

奥会津地熱地域・中新統滝沢川層にみられる変質 — 貯留槽母岩の地熱変質とその地化学的特徴 —

関 陽児¹

Yoji SEKI (2001) Hydrothermal alteration of the Miocene Takizawagawa Formation in the Okuaizu geothermal area, Japan -Alteration mineralogy and geochemistry of the reservoir bedrock-. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 52 (11/12), p. 493-571, 111 figs., 5 tables, 8 appendix-tables.

Abstract: Alteration mineralogy and whole rock geochemistry of the Miocene Takizawagawa Formation distributed around the Okuaizu geothermal system were studied using bulk XRD techniques, bulk chemical analysis using XRF, NAA and ICP, and thin sections observation. This study aims to reveal the hydrothermal alteration zoning and to estimate gains and losses of major and minor elements in bedrocks around the reservoir depth of the Okuaizu geothermal system during the modern geothermal activity.

The Takizawagawa Formation, which is composed of Miocene rhyolitic to dacitic lavas and pyroclastic sediments, generally has undergone regional diagenetic alteration and overprinting local hydrothermal alteration both formed in Tertiary. In the Okuaizu geothermal system, the modern hydrothermal alteration overprints the Tertiary diagenetic and hydrothermal alteration.

Regional diagenetic and overprinting local hydrothermal alteration is mostly characterized by illite and chlorite (illite-chlorite (IC) zone).

In the reservoir depth of the modern geothermal system, following four alteration zones are recognized based on the distribution of clays, carbonates and sulfates.

- 1) Illite-chlorite+ (IC+) zone
- 2) Illite (I) zone
- 3) Kaolinite (K) zone
- 4) Mixed-layered clay mineral (ML) zone

1) Illite-chlorite+ (IC+) zone is widely distributed in the deeper zone (1000 - 2000 m depth) with high temperature (200-350°C), and is characterized by illite, chlorite, carbonate minerals (mostly dolomite and siderite with lesser amount of magnesite and rhodochrosite) and anhydrite.

2) Illite (I) zone is sporadically distributed around upper portion (300 - 1000 m depth) of reservoir fracture, and is characterized by illite, carbonate minerals (dolomite and siderite with sporadic rhodochrosite).

3) Kaolinite (K) zone is distributed around shallower extension (shallower than 1000 m) of the reservoir fracture. It forms irregular shape, and is characterized by kaolinite and abundant carbonate minerals (mainly dolomite and siderite).

4) Mixed-layered clay mineral (ML) zone is limitedly distributed adjacent to the kaolinite zone, and is characterized by illite- smectite mixed layered mineral.

On the assumption that Al_2O_3 is immobile during the modern geothermal activity, average bedrock chemistry of the Takizawagawa Formation outside and inside the geothermal system were compared. Gains and losses of chemical components in each alteration zone were calculated, with the result that gains of Ca, S, As, Cu and loss of Cs for the all alteration zones inside the system, in addition to gains of Mn, Au, Ag and loss of Na for the illite zone were recognized.

Judging from the result obtained in this study on hydrothermal alteration, combined with the published geological, hydrological and geochemical data, the following genetical model is proposed for each alteration zone in the modern geothermal system.

1) Illite-chlorite+ (IC+) zone is formed during large-scale infiltration of the deeper high temperature geothermal fluid with higher CO_2 content.

2) Illite (I) zone is formed by local infiltration of relatively shallower geothermal fluid with boiling.

3) Kaolinite (K) zone is formed by relatively low pH shallower underground water generated by CO_2 injection, which is brought by boiling of the deeper geothermal reservoir.

4) Mixed-layered clay mineral (ML) zone is formed as a peripheral phase of the Kaolinite zone.

¹ 深部地質環境研究センター (Research Center for Deep Geological Environments, GSJ)

Key words: Okuaizu geothermal system, Takizawagawa Formation, Hydrothermal alteration, Geochemistry

要 旨

奥会津地熱地域に分布する下部中新統滝沢川層を主な対象として、貯留槽深度における、現在の地熱活動による母岩の変質を記載するとともに、変質に伴う化学成分の移動傾向を明らかにし、変質帯の成因を考察した。

滝沢川層は地熱系の貯留槽深度(地表下1000~2000m)および地熱系外西方の地表に広く分布し、流紋岩~デイサイトの溶岩および同質火山砕屑岩からなる。

地熱系外の滝沢川層は、イライト、緑泥石を特徴鉱物とし基質の脱ハリ、粘土鉱物化、方解石化、黄鉄鉱化を伴う広域的な続成変質を受けている。

地層温度約100°C以上の領域を現在の地熱系の温度影響範囲内(「地熱系内」)とみなすと、そこに分布する滝沢川層には、中新世の広域続成変質に現世の地熱変質が重複した結果、四つの変質帯、すなわちイライト・緑泥石+帯、イライト帯、カオリナイト帯、混合層粘土鉱物帯が形成されている。

イライト・緑泥石+帯はイライト、緑泥石、硬石膏により特徴づけられ、石英、斜長石、黄鉄鉱を伴う。貯留層深度の上方(深度300-1000m)ではしばしば多量の苦灰石、菱鉄鉱を、一部でマグネサイト、菱マンガン鉱、閃亜鉛鉱を伴う。基質の粘土鉱物化、硬石膏化、炭酸塩鉱物化、黄鉄鉱化が普通に見られる。貯留槽深度(深度1000-2000m)とその上方に広範囲に分布する。

イライト帯はイライトにより特徴づけられ、石英、苦灰石、菱鉄鉱を伴う。イライト・スメクタイト混合層鉱物、カリ長石、斜長石、菱マンガン鉱、黄鉄鉱を伴うことがある。高温部では硬石膏を伴う。基質および斜長石の粘土鉱物化、炭酸塩鉱物化、硬石膏化が進んでいる。貯留槽深度より浅所の貯留槽裂罅延長部の近傍の一部に局所的に分布する。

カオリナイト帯はカオリナイト、菱鉄鉱、苦灰石により特徴づけられ、石英、斜長石を伴う。イライト・スメクタイト混合層鉱物、マグネサイト、硬石膏、黄鉄鉱を伴うことが多い。イライト、カリ長石、スメクタイトを伴うこともある。基質および斜長石の粘土鉱物化、炭酸塩鉱物化が進んでいる。貯留槽深度より浅所(深度1000m以浅)に、大局的には裂罅に規制されながらも水平方向にも発達した不規則な形態で分布する。

混合層粘土鉱物帯はイライト・スメクタイト混合層鉱物または緑泥石・スメクタイト混合層鉱物により特徴づけられ、石英、斜長石を伴う。緑泥石、苦灰石、菱鉄鉱を伴うことが多い。基質および斜長石の粘土鉱物化、炭酸塩鉱物化が進んでいる。滝沢川層中に現れる混合層粘土鉱物帯は、カオリナイト帯と相接して局所的に分布する。

地熱系外の滝沢川層を基準として、Alによる規格化を行い、地熱系内の各変質帯における化学成分の移動度

を算出した。その結果、地熱系内の全ての変質帯で化学成分の移動が認められた。すなわち、Ca, S, As, Cuの付加とCsの除去が全ての変質帯で認められるとともに、Naの除去とMn, Au, Agの付加がイライト帯で、またFe, Mn, Mgの付加がカオリナイト帯でそれぞれ認められた。

変質帯と地熱系の地質・温度・水理構造や流体の化学性状などを合わせて考察すると、系内にみられる多様な変質帯は、それぞれが系内に分化した物理化学条件やその変化に対応して形成されたと考えられる。すなわち、イライト・緑泥石+帯はCO₂ガスに富む高塩濃度の地熱流体が貯留槽中を移動しつつ周辺母岩中に浸透することにより、イライト帯は相対的に透水性の高い岩石中を地熱流体が沸騰しつつ浸透することにより、カオリナイト帯は貯留槽深度周辺における気液分離で生じたCO₂ガスが浅層の地下水に吹き込むことで生じた低温の炭酸酸性水と母岩との反応により、混合層粘土鉱物帯はカオリナイト帯が形成された場の最も外側で低温の浅層地下水により、それぞれ形成された。

1. はじめに

奥会津地熱系は福島県河沼郡柳津町西山地域に位置し(第1図)、電気出力65000kWの柳津西山地熱発電所を擁する国内有数の活動的地熱系である(新田・他, 1995)。

奥会津地熱系およびその周辺地域の地層は、時代と生成環境を異にする様々なタイプの変質を重複して被っている。例えば、地熱系最上部に分布する更新統砂子原層では、現在と一連の地熱活動により湖成堆積物が変質を被り、Ca沸石、雲母粘土鉱物やカオリナイトなどの変質鉱物が生成し、6帯の変質帯が識別されている(関2000)。また、地熱系周辺地域に広く分布する中新統を主とする第三系は、中新世の広域的な続成変質およびそれに重複する黒鉄鉱化作用に関連した局所的な熱水変質を受けている(歌田・石川, 1973; 早川・他, 1977)。さらに、地熱系の貯留槽深度に分布する中新統を主とする地層では、それらより古い時代の変質と現在の地熱活動による変質とが重複している(関・安達, 1997)。

本研究では、地熱系の貯留槽深度近辺において、現在の地熱活動により形成された変質とそれに伴う化学成分の移動傾向を明らかにすることを目的とした。そのために、貯留槽深度周辺と系外西方の地表に広く分布する中新統滝沢川層に注目し、現世地熱系の熱的影響範囲の内外における変質鉱物組成および全岩化学組成を比較した。以下では、奥会津地熱系の中心から約3km以内に相当する、深度1000mにおける地層温度が約100°C以上の領域を、現世地熱系の熱的影響範囲内とみなし「地熱系内」と呼び、その外側を「地熱系外」とよぶこととする。変質岩の解析手法としては、変質鉱物の同定は粉末X線回折法に

より、変質岩の組織の記載は光学顕微鏡により、全岩の主成分・微量成分の化学分析は蛍光 X 線分析 (XRF)・中性子放射化分析 (NAA)・誘導結合プラズマ発光分析法 (ICP) 等により行った。

2. 地熱系および地質の概要

奥会津地熱系の位置する会津盆地南西方の山地には、先第三系の堆積岩類および花崗岩類を基盤として、前期-中期中新世の海成、一部非海成碎屑岩類と火山岩類 (鈴木・吉田, 1956; 北村・他, 1968; 通産省, 1970; 鈴木・他, 1986), および後期中新世-鮮新世のカルデラ火山環境下で形成された堆積岩・火山岩 (山元, 1992) が分布する。

奥会津地熱地域の層序は、下位より、下部中新統大桧沢層、下部中新統滝沢川層、中部中新統荻野層、中部中新統漆窪層、上部中新統入山沢層、更新統砂子原層からなる (小室, 1978; NEDO, 1985; 新田・他, 1987; 水垣, 1993; 関・安達, 1997; 第 2, 3 図)。

大桧沢層は砂岩と安山岩からなり、基盤の先第三系とは不整合または断層関係と考えられている。滝沢川層は流紋岩ないしデイサイトとそれらの火山碎屑岩からなり、大桧沢層に整合に重なる。荻野層は流紋岩質火山碎屑岩を主とし泥岩を伴い、滝沢川層に整合に重なる。下部の泥岩は厚層をなし、宮下泥岩部層と呼ばれる。漆窪層は流紋岩質火山碎屑岩・砂岩・泥岩などからなり、荻野層に整合に重なる。入山沢層はデイサイト質火山碎屑岩を主とし岩屑なだれ堆積物を伴い、下位層に不整合に重なる。砂子原層は流紋岩・同質火山碎屑岩・砂岩・泥岩などからなり、分布の縁辺に不淘汰角礫岩を伴い、下位層に不整合に重なる。

本研究の主たる対象である滝沢川層は、流紋岩および一部デイサイトの溶岩とそれらの火山碎屑岩からなる。模式地 (大沼郡金山町滝沢上流) の滝沢川層は、流紋岩およびデイサイトの溶岩、緑色凝灰角レキ岩、火山レキ凝灰岩、軽石質凝灰岩などからなる (鈴木・他, 1986)。地熱地域の地下では、流紋岩質火山碎屑岩を主とし少量の流紋岩溶岩を挟む (関・安達, 1997)。地熱地域の西側の地表においても流紋岩質火山碎屑岩と流紋岩溶岩からなるが、調査範囲内では流紋岩がより広く分布する。

地熱流体は、主として滝沢川層と大桧沢層中に発達するふたつの急傾斜開放裂隙群、すなわち血の池沢および猿倉沢フラクチャーゾーン中に貯留される (新田・他, 1987; Seki, 1991; 第 4, 5 図)。主たる貯留槽の賦存深度の上方、地表下 500 m 前後に難透水帯が水平方向に連続して分布し、深部の地熱流体を効果的にシールする (関・安達, 1997)。地熱流体の一部は、その難透水帯を通り抜けて浅所の地下水と混合したのち地表に達し、西山温泉、荒湯、神の湯などの温泉として湧出する (新田ほか,

1987; 関, 2000)。貯留槽中の地熱流体の実測最高温度は 340°C 以上 (新田・他, 1995)、全溶存成分濃度は約 2wt%, CO₂ 濃度は約 1wt%, H₂S 濃度は約 200mg/kg であり (Seki, 1990)、高温・高塩濃度・高ガス濃度の特徴をもつ (関, 1996)。貯留槽深度の熱水性鉱物脈には閃亜鉛鉱や方鉛鉱などの金属硫化物が含まれ (今井・他, 1988)、また地熱流体からは金銀を含む硫化物スケールが生じるなど (新田・他, 1991)、金銀・重金属の鉱化ポテンシャルをもつことも特徴である。地熱水からはトリチウムが検出されることから、地熱流体中には相当量の天水が含まれると考えられる一方、N₂, Ar, He ガス組成は島弧の火山ガス (Giggenbach, 1992) に類似することから、地熱系へ火山ガスが注入されている可能性が高い (関, 1996)。

3. 熱水変質岩の解析手法

3.1 X 線回折による鉱物同定

変質鉱物同定のため、岩石試料約 400 個の X 線回折を行った。うち約 300 個は地熱系周辺の約 100km² の範囲の地表露頭から採取した岩石試料であり、約 100 個は地熱系とその近傍の代表的な坑井から採取したコアおよびカッティングス試料である。露頭試料の採取地点を第 6 図に、坑井の坑口位置を第 4, 7 図にそれぞれ示す。

変質鉱物の同定は、メノウ乳鉢で磨砕した全岩粉末をスライドガラスに塗りつけた半定方位試料により行った。代表的な試料については鏡下観察および水ヒにより得た粘土画分の定方位試料の X 線回折を行った。変質鉱物同定に際しての粉末 X 線回折は、理学製ロータフレックス RAD- γ A を用い、測定条件は Cu-K α , 出力 40kV-100mA, スリット系 1°-1°-0.3mm、走査速度 8°/分、時定数 0.1 秒とした。緑泥石の鉄含有量推定およびイライト/スメクタイト混合層鉱物の混合層構造の推定に際しての粉末 X 線回折の測定条件は、Cu-K α , Ni フィルター, 出力 40kV-100mA, スリット系 1/2°-1/2°-0.3mm, 走査速度 2°/分, 時定数 1 秒とした。緑泥石鉱物とスメクタイトはエチレングリコール処理 (定方位試料に EG10% 溶液を添加) により、緑泥石鉱物とカオリン鉱物は塩酸処理 (1N-HCl 中に 60°C-2 時間) により識別した。雲母粘土鉱物については、10 Å 反射の低角方向へのピークシフト量が 0.2° 以上認められたものをイライト/スメクタイト混合層鉱物とみなした。炭酸塩鉱物の同定は、主として 104 反射に基づいて行い、固溶体と考えられる鉱物は主たる成分を端成分とする鉱物名で記載した (例えば Mg 成分を若干含むと考えられる Ca-Mg 炭酸塩鉱物は「方解石」とした)。

3.2 変質岩の化学分析

地熱系内外の代表的な岩石試料合計約 130 個について、

全岩の主成分および微量成分を分析した。このうち約90個は代表的な坑井(N57-OA1, N57-OA2, N57-OA4, 84N-2t, 84N-4r, 84N-18t)から採取したコア・カッティングス試料, 約40個は地熱系周辺の地表露頭から採取した代表的な地表岩石試料である。コアと露頭岩石試料については, 熱水性鉱物脈が認められた場合それを除去した上で分析したが, カッティングス試料については熱水性鉱物脈の混入有無の確認や除去等の処理は行っていない。孔井の位置を第4, 7図に, 地表試料の採取位置を第8図にそれぞれ示す。分析はActivation Laboratories Ltd.社(カナダ)において実施した。分析法と検出限界を第1表に示す。

4. 変質帯の累帯構造と化学成分の移動傾向

4.1 変質鉱物の分布と産状

奥会津地熱系とその周辺の地表および坑井から得られた岩石試料から同定された変質鉱物とそれらの分布, 産状を以下に述べる。砂子原層については, 関(2000)による。地表における主な変質鉱物分布を第9図に, 代表的な坑井における変質鉱物の産出状況を第10図に, 地熱系を切るAA', BB'断面(第5図)における主要な変質鉱物の分布範囲を第11図に, 代表的な変質岩の写真を第12, 13図にそれぞれ示す。

地熱系最上部の砂子原層では, 現在と一連の地熱活動のみにより生成された変質鉱物が産出する。関与した流体の化学性状や温度の違いを反映し, Ca沸石, 雲母粘土鉱物やカリ長石などの中性変質鉱物, カオリナイトや明礬石などの酸性変質鉱物が認められる。

地熱流体の貯留槽深度である地下1000-2000mに分布する滝沢川層を主とする中新統の地層では, 地熱系外と共通して認められるイライト, 緑泥石に加え, 硬石膏, 苦灰石, 菱鉄鉱などの現世地熱活動により生成した硫酸塩・炭酸塩鉱物が多産する。また, 硬石膏, 炭酸塩鉱物, 閃亜鉛鉱, アラバナイトなどからなる熱水性鉱物脈も数多く認められる。

上記二つに挟まれた深度300-1000mの範囲では, 貯留槽深度の母岩にみられる変質鉱物に加え, カオリナイトが広範囲に認められる。

奥会津地熱地域における産出鉱物の分布と産状を以下に述べる。

1) シリカ鉱物

石英: ほとんど全ての岩石に初生鉱物として含まれる。地熱系とその周辺の砂子原層では, 広範囲で火山ガラスの脱玻璃による石英の生成が認められる。地熱系内では地熱流体からの直接沈殿を示す付加型の石英が普通に認められる。

クリストバライト: 砂子原層中の流紋岩中に初生鉱物として産するほか, 同層の流紋岩質凝灰岩中では火山ガ

ラスを交代したクリストバライトを産する。

2) 長石類

斜長石: 量の多寡はあるものの初生鉱物として全ての地層にはほぼ普遍的に認められる。地熱系内では, 斜長石はイライト, 炭酸塩鉱物, 曹長石などにより様々な程度に交代される(第13図)。黄鉄鉱やイライトの増加に伴い斜長石が消滅することもある(例えばOA4の深度300-700m)。地熱系外でも, 局所的に一部ないし全部がイライトや方解石により交代される。

カリ長石: 地熱系最上部の砂子原層では, 固結度が低く透水性の高い湖成堆積物中において, 空隙への直接沈殿あるいは火山ガラスを交代して普通に産する。滝沢川層, 荻野層, 漆窪層で普通に産する。

曹長石: 貯留層近傍の一部では, 斜長石が曹長石化する。

3) 雲母粘土鉱物

雲母粘土鉱物として, スメクタイト, イライト-スメクタイト混合層鉱物, イライト, 初生の白雲母が認められる。

砂子原層の流紋岩, 流紋岩質凝灰岩およびそれらの二次堆積物には, 初生の白雲母が含まれる。初生白雲母は粗大なフレークの単独粒子であることが多く, 微細結晶が集合する熱水性イライトとは鏡下で容易に識別できる。

熱水性イライトは滝沢川層中にはほぼ普遍的に, また荻野層の多くに認められるほか, 地熱系の地層温度100~150°C以上の高温領域に普通に認められる。母岩の基質や斜長石を交代して産出する。

地熱系内では深度の増加にしたがい, スメクタイトからイライト-スメクタイト混合層鉱物を経てイライトが卓越する傾向が認められる。また, イライト-スメクタイト混合層鉱物は, カオリナイトの出現領域の縁辺部に産する例が多い。

地表では, スメクタイトは荻野層, 漆窪層, 入山沢層, 砂子原層で普通に, イライト-スメクタイト混合層鉱物は滝沢川層, 荻野層, 入山沢層の一部に産する。

4) 緑泥石および緑泥石-スメクタイト混合層鉱物

緑泥石は滝沢川層中にはほぼ普遍的に, また荻野層の一部に認められるほか, 地熱系の地層温度100~150°C以上の高温領域に普通に認められる。火山砕屑岩の軽石や基質を交代し, しばしば大量に生成している(第13図)。14 Å - 7 Å - 4.7 ÅのX線底面強度反射比(Oinuma *et al.*, 1972)は, I(7 Å) = 50%前後のものが多い。そのI(7 Å)からは, 比較的大きなMg/Fe比が予想される。

緑泥石-スメクタイト混合層鉱物は, 入山沢層の一部や地熱系の地層温度100°C前後の領域に, 散点的に現れる。

5) カオリナイト

カオリナイト: 地表の砂子原層では, 老沢沿いに局所的に分布するほか, 温泉湧出箇所の近傍に少量産出する。温泉湧出箇所では, 石英, スメクタイト, イライトのほかカリ長石と共存することもあり, 中性変質への重複が

示唆される。入山沢層中にもまれに現れる。地熱系の地下では、貯留槽深度の上方にあたる深度300-1000mの範囲で、しばしば多量の菱鉄鉱と苦灰石を伴い産する。大局的には貯留槽裂罅の上方延長部を中心としその周囲の水平方向に延長して産する。カオリナイトの出現に伴って緑泥石が減少ないし消滅することが多い（例えば、1tの深度700-850m, 2tの深度200-400m, 4rの深度500m前後など）。

ハロイサイト：地表の砂子原層の一部にみられる。

6) 沸石鉱物

モルデン沸石・斜プチロル沸石：地表では荻野層、漆窪層、入山沢層上部、地表地熱微候範囲周辺の砂子原層などで普通に、しばしば多量に産する。地熱地域の地下では、地層温度50～80℃以下の浅所で普通に認められる。

濁沸石・輝沸石：地熱系の浅所や入山沢層中にまれに認められる。

ワイラサイト：地熱系内では、貯留槽深度の熱水性鉱物脈中に稀に産するが、母岩中には産しない。地表では、入山沢層にごく稀に産出する。

7) 炭酸塩鉱物

菱鉄鉱・苦灰石：地熱系地下の幅広い深度範囲に、普通にしばしば大量に産する。基質や斜長石を交代するほか、空隙に直接沈殿することも多い。菱鉄鉱と苦灰石の分布の下限から数100m上方に、カオリナイトの分布の下限が調和的に認められる。地表では、苦灰石は地熱系外の入山沢層で普通に、滝沢川層、荻野層の一部に産する。

菱マンガン鉱：貯留槽深度の一部で見られる。母岩の基質や斜長石を交代するほか、単独であるいは硬石膏とともに細脈として産することも多い（第13図）。多量のイライトとともに産出することがある。

菱苦土石：貯留槽深度より数100m上方に、カオリナイトとともに比較的広範囲にわたり選択的に多量に産する。

方解石：地熱系外の地表の滝沢川層、荻野層、入山沢層などで母岩の基質や斜長石を交代して普通に見られる。地熱系内では炭酸塩鉱物の中では相対的に少なく、一部の坑井で部分的に少量認められるのみである。

クトノホライト：地熱系内の貯留層深度に限り、しばしば認められる。

8) 硫酸塩鉱物

硬石膏：地熱系内の地層温度が100～150℃以上の貯留槽周辺の広い範囲でほぼ普遍的に、しばしば多量に産する。母岩の基質や斜長石を交代するほか、裂罅を充填したり、開放裂罅表面に単独であるいは石英や硫化鉱物とともに自形結晶をなして直接沈殿する（第13図）。

石膏：地熱地域上部の地層温度100℃以下の領域に少量見られることがあるほか、貯留槽深度付近にも多量の硬石膏に伴って少量認められることがある。

明礬石：地熱流体貯留裂罅の地表延長部に相当する砂子原層のごく限られた範囲で、火山ガラスを交代して多

量に産出する。

鉄明礬石：地表の温泉湧出地域周辺の砂子原層中に、黄鉄鉱の風化生成物として産する。

9) 硫化鉱物

黄鉄鉱：宮下泥岩部層では比較的多量の、滝沢川層や入山沢層、砂子原層や荻野層の一部では少量の鉱染状黄鉄鉱が認められる。正六面体自形結晶をなすことが多い。地熱流体貯留槽の近傍では、ほぼ普遍的に産出する。

閃亜鉛鉱・方鉛鉱・アラバンダイト：貯留層近傍では、母岩中に少量の閃亜鉛鉱が産出することがある。貯留槽深度では、自形ないし半自形結晶からなる石英-硬石膏とともに黄鉄鉱・閃亜鉛鉱・方鉛鉱・アラバンダイトを含む細脈がしばしば見られる。

雄黄：地表の砂子原層の温泉湧出箇所近傍に限って産出する。未固結の砂質堆積物中の空隙に直接沈殿する。

硫黄：砂子原層地表部の老沢沿いの地形的高所に限って、フィルム状でないし粗粒堆積物の粒間を充填して産出する。

10) その他

緑簾石：地熱系深部の地層温度300℃以上の領域に稀に少量産する（例えば、22Tの深度2200-2300m）。

4.2 変質帯の区分と分布

本地域の変質は、前述した変質鉱物の組合せに基づいて、弱変質帯、スメクタイト・沸石帯、混合層粘土鉱物帯、イライト・緑泥石帯、イライト・緑泥石+帯、イライト帯、カオリナイト帯、明ばん石帯の8つの変質帯に区分できる。このうち、明礬石帯は地熱系最上部の砂子原層に、弱変質帯とスメクタイト・沸石帯は主として砂子原層に、混合層粘土鉱物帯とカオリナイト帯は砂子原層とその下位の地層に、イライト・緑泥石帯は主として地熱系外の滝沢川層に、イライト・緑泥石+帯は地熱流体の貯留槽深度の滝沢川層を中心に分布する。

これらの変質帯の区分は、単一の変質作用で生じたものか、時代や生成環境の異なる変質作用が重複した結果によるものかにかかわらず、現在観察される変質鉱物の組合せに基づいて行った。変質帯区分の指標には、ほぼ全ての変質岩に含まれている粘土鉱物ないし沸石鉱物を主に用いた。それぞれの変質帯の鉱物組合せを第14図に、地表における変質帯分布を第15図に、坑井データに基づく鉛直断面における変質帯分布を第16図にそれぞれ示す。

なお、以下に述べる変質帯のうち、弱変質帯、スメクタイト・沸石帯および明礬石帯は、関（2000）にしたがった。

1) 弱変質（LA）帯：未変質火山ガラスが多量に残存し脱ハリの程度が弱いことを特徴とする。少量のスメクタイト、モルデン沸石、斜プチロル沸石を含むことがある。地熱系中心から1～2km以上離れた地表ないし浅所の砂子原層および藤峠層中に分布する。本帯の凝灰

岩や凝灰質碎屑岩の多くは未固結ないし固結不完全、脆弱で間隙に富み、青灰～明灰色を呈する。

2) スメクタイト・沸石 (SZ) 帯: スメクタイト、モルデン沸石または斜プチロル沸石により特徴づけられ、クリストバライト、方解石、黄鉄鉱を伴うことがある。本地域内では弱変質帯に次いで弱い変質帯である。石英、斜長石またはカリ長石も見られるが、いずれも初生である。地熱活動地域近傍の砂子原層、入山沢層の一部、地熱系外の漆窪層と荻野層の大部分が本帯に属する。本帯の凝灰岩や凝灰質碎屑岩には固結不完全、脆弱で間隙に富むものから、比較的堅硬、緻密なものまである。青灰～灰白色を呈するものが多いが、スメクタイトを多量に含む変質岩は、緑、青、ピンクなど色調の変化に富む。

3) 混合層粘土鉱物 (ML) 帯: イライト・スメクタイト混合層粘土鉱物または緑泥石・スメクタイト混合層粘土鉱物により特徴づけられ、石英、斜長石を伴う。緑泥石、クリストバライト、カリ長石、モルデン沸石、斜プチロル沸石、方解石、苦灰石、菱鉄鉱、黄鉄鉱を伴うことがある。基質の脱ハリ、粘土鉱物化、カリ長石化、黄鉄鉱化が普通に見られる。地熱活動地域近傍の砂子原層、入山沢層、滝沢川層、漆窪層、荻野層などの一部が本帯に属する。滝沢川層中に本帯が現れる場合、苦灰石や菱鉄鉱を伴ってカオリナイト帯と相接して局所的に分布することが多い (例えば、1t の深度 1000-1500m, 18t の深度 900-1100m など)。比較的堅硬、緻密で、青灰～明灰色を呈する。

4) イライト・緑泥石 (IC) 帯: イライトと緑泥石により特徴づけられ、石英、斜長石を伴う。方解石、苦灰石、カリ長石、黄鉄鉱を伴うこともある。基質の脱ハリ、粘土鉱物化、方解石化、黄鉄鉱化が普通に見られる。入山沢層の過半、地熱系外の滝沢川層の大部分が本帯に属する。堅硬、緻密で、青灰～淡緑灰色を呈する (第 12 図)。地熱系外における本帯の一部は、局所的に比較的強いイライト化、黄鉄鉱化を受けている。

5) イライト・緑泥石+ (IC+) 帯: イライト、緑泥石と硬石膏により特徴づけられ、石英、斜長石、黄鉄鉱を伴う。カリ長石を伴うこともある。地層温度が 300°C 以上の高温部ではまれに少量の緑簾石を伴うことがある。地熱系内の貯留層深度より浅所 (深度 300-1000m) ではしばしば多量の苦灰石、菱鉄鉱を、一部でマグネサイト、菱マンガン鉱、閃亜鉛鉱を伴う。基質は粘土鉱物化、硬石膏化、炭酸塩鉱物化、黄鉄鉱化され、斜長石の一部ないし全てが粘土鉱物や炭酸塩鉱物により交代される。地熱系内の地層温度約 150°C 以上の領域に分布する漆窪層と荻野層の一部、および滝沢川層と大桧沢層の大部分が本帯に属する。堅硬、緻密で、青緑灰～緑白色を呈する (第 12 図)。

6) イライト (I) 帯: イライトにより特徴づけられ、石英、苦灰石、菱鉄鉱を伴う。イライト・スメクタイト

混合層粘土鉱物、緑泥石・スメクタイト混合層粘土鉱物、カリ長石、カオリナイト、菱マンガン鉱、黄鉄鉱、斜長石を伴うことがある。基質および斜長石の粘土鉱物化、炭酸塩鉱物化が進んでいる。地熱系内の地層温度約 150°C 以上の高温部では硬石膏を伴う。地熱系外の滝沢川層中にも三坂山など局地的に分布することがある。地熱系内では、貯留槽上方の貯留層裂罅延長部の近傍に局所的に分布し、坑井掘削時の大量逸水区間と一致することが多い (例えば、OA4 の深度 300-700m)。堅硬、緻密で、灰白～白色を呈する (第 12 図)。

7) カオリナイト (K) 帯: カオリナイト、菱鉄鉱、苦灰石により特徴づけられ、石英、斜長石を伴う。イライト・スメクタイト混合層粘土鉱物、硬石膏、黄鉄鉱を伴うことが多い。イライト、カリ長石、スメクタイトを伴うこともある。基質および斜長石の粘土鉱物化、炭酸塩鉱物化が進んでいる。地熱系内の貯留槽深度より浅所 (深度 1000m 以浅) の滝沢川層や荻野層の一部などに、大局的には貯留槽裂罅の上方延長部を中心に水平方向へも発達した不規則な形態で分布する。水平方向への連続性は深度 500m 付近で最もよい。その一部は地表に達し、主として老沢断層沿いに狭長に露出する。地表の本帯では、炭酸塩鉱物はほとんど認められない。地表の本帯は軟質で含水率が高く、灰白色を呈する。地下では比較的堅硬、緻密で灰白色を呈する (第 12 図)。

8) 明ばん石 (A) 帯: 多量の明ばん石により特徴づけられ、石英、クリストバライト、斜長石を伴う。スメクタイトを伴うことがある。地熱系上部地表の滝谷川沿いの砂子原層中に局地的に分布する。坑井試料中では確認されていない。変質の進行度が高く、脆弱、粗しょうで白色を呈する。

4.3 化学分析結果の概要

分析を行った中新統地層群の多くは流紋岩ないしデイサイト質の溶岩、火山碎屑岩を主体とする地層であり、全岩化学組成はそのような岩相上の特徴を反映している。地層別の平均化学組成をみると、滝沢川層、荻野層、漆窪層、入山沢層のいずれも、流紋岩～デイサイトに相当する主成分組成を示す。地層別の REE 平均値のコンドライト規格化パターンには、地層間での明瞭な違いは認められない。

全試料の主成分および微量成分の分析結果を巻末資料に、主な変質指標成分の地表での濃度分布を第 17 図に、主な変質指標値の地表での分布を第 18 図に、坑井における元素濃度分布を第 19 図に、坑井における主な変質指標値の分布を第 20 図に、地層別の各成分の平均、標準偏差等の統計諸量を第 2 表に、地層別の REE の平均値のコンドライト規格化パターンを第 21 図にそれぞれ示す。

坑井ごとに化学分析結果をみると、地熱系の中心からやや離れた N57-OA1 と N57-OA2 では地熱系外と共通

した結果が、地熱系の中心付近に位置する N57-OA4, 84-2t, 84-4r, 87-18t では地熱系を特徴づける分析結果が得られた。以下に、坑井ごとに、分析結果の概要を述べる。

(1) N57-OA1

本坑井は湯八木沢の北方、標高 320m 地点より、垂直に深度 1005m まで掘削された。坑口は砂子原カルデラの北方外側に位置する。地表から坑底に向かい、荻野層、宮下泥岩部層、滝沢川層を貫く（関・安達, 1997）。地熱系の中心から約 3km 北に隔たっており、坑底で得られた温度は約 135°C である（NEDO, 1985）。滝沢川層の変質帯は地熱系外に広くみられるイライト-緑泥石帯ではなく、混合層粘土鉱物帯に属する。ほとんどの深度で、多くの成分が地熱系外と同様の濃度を示すが、深度 400m と 590m では Ba が、深度 502m では Ag, Cu, Pb, As が例外的に高濃度を示す。地熱系の中心からの距離、裂罅系の分布状況などから考えると現在の地熱流体が影響している可能性は低いので、この重金属類の高濃度異常は第三紀の鉱化作用に関連する可能性が高い。

(2) N57-OA2

本坑井は小野川原の標高 475m 地点より、垂直に深度 1004.5m まで掘削された。坑口は砂子原カルデラ内の西縁部、小野川原断層直近に位置する。地表から坑底に向かい、砂子原層、荻野層、宮下泥岩部層、滝沢川層を貫く（関・安達, 1997）。地熱系の中心から約 3km 西北西に隔たっており、坑底で得られた最高温度は約 103°C である（NEDO, 1985）。滝沢川層の変質帯は地熱系外と同じイライト・緑泥石帯である。ほとんどの深度で、多くの成分が地熱系外と同様の濃度を示すが、深度 618m では Ba が、深度 918m では Fe, S, Cu, Ag, As が例外的に高濃度を示す。

(3) N57-OA4

本坑井は黒沢の東、標高 350m 地点より、垂直に深度 1305.3m まで掘削された。坑口は砂子原カルデラ内、血の池沢断層と滝谷川断層の交会部直近に位置する。地表から坑底に向かい、砂子原層、宮下泥岩部層、滝沢川層を貫く（関・安達, 1997）。地熱系の中心付近に位置し、深度 1282m で得られた最高温度は 266°C である（NEDO, 1985）。主成分では、Fe, Mn, Ca, Mg, S などの炭酸塩鉱物・硫化鉱物・硫酸塩鉱物を構成する元素の増加や、斜長石のイライト化により移動する Na の減少などが認められる。微量成分では、Sr, Rb など熱水変質に伴い移動しやすい元素の増減、Au, As などの浅熱水性元素、Pb, Zn などの重金属元素の増加などが認められる。深度 300-650m の間の Na₂O 濃度 <0.1% の領域は、イライト帯の分布深度とほぼ一致する。また、深度 550-650m の間の Au, As, Pb, Zn の高濃度異常域は、坑井掘削時の大量逸水区間とほぼ一致する。

(4) 84N-2t

本坑井は黒沢の東、標高 422m 地点より、垂直に深度 1305.3m まで掘削された。坑口は砂子原カルデラ内、血の池沢断層と猿倉沢断層の間に位置する。地表から坑底に向かい、砂子原層、滝沢川層を貫く（関・安達, 1997）。地熱系の中心付近に位置し、坑底で得られた最高温度は 311°C である（新田・他, 1995）。主成分では、Fe, Mn, Ca, Mg などの炭酸塩鉱物・硫化鉱物・硫酸塩鉱物を構成する元素の増加や、斜長石のイライト化により移動する Na の減少などが認められる。微量成分では、Sr, Rb など熱水変質に伴い移動しやすい元素の増減、Pb, Zn などの重金属元素の増加が認められる。

(5) 84N-4r

本坑井は黒沢の東、標高 422m 地点より、傾斜掘りにより深度 712.2m まで掘削された。坑口直下では垂直、坑底付近では方位 214° に約 70° 傾斜する。坑口は砂子原カルデラ内、血の池沢断層と猿倉沢断層の間に位置する。地表から坑底に向かい、砂子原層、滝沢川層を貫く（関・安達, 1997）。地熱系の中心付近に位置し、坑底で得られた最高温度は 165°C である（新田・他, 1995）。Fe, Ca, Mg, S などの炭酸塩鉱物・硫化鉱物・硫酸塩鉱物を構成する元素の増加や、斜長石のイライト化により移動する Na の減少などが認められる。

(6) 87N-18t

本坑井は五疊敷南東方、標高 413m 地点より、傾斜掘りにより深度 1654.9m まで掘削された。坑口直下では垂直、坑底付近では方位 220° に約 70° 傾斜する。坑口は砂子原カルデラ内、老沢断層の北側に位置する。地表から坑底に向かい、砂子原層、宮下泥岩部層、滝沢川層を貫く（関・安達, 1997）。地熱系の中心から約 1km 北東に隔たっており、坑底で得られた最高温度は約 217°C である（新田・他, 1995）。Fe, Ca, Mg などの炭酸塩鉱物・硫化鉱物・硫酸塩鉱物を構成する元素の増加、斜長石のイライト化により移動する Na の減少や Pb, Zn などの重金属元素の増加などが認められる。

4.4 地熱系外の滝沢川層

地熱系外の滝沢川層は、第三紀の海底火山活動の影響下で広域続成変質を受けるとともに、地熱系の西方約 20km の横田・大塩鉱床などに代表される黒鉱化作用に関連した熱水変質を重複して受けることにより、一部では珪化、炭酸塩化、沸石化などの熱水変質が重複している。地熱系外の地表に露出する滝沢川層の主体を占めるイライト・緑泥石帯は広域続成変質のみを受けた部分にはほぼ相当し、三坂山など一部で局所的に認められるイライト帯や混合層粘土鉱物帯は広域続成変質に熱水変質が重複した部分と考えられる。

Na₂O と K₂O の合計と SiO₂ との関係を示す TAS ダイアグラム（LeBas *et al.*, 1986）上では、地熱系外の滝沢川層の 80% 以上が流紋岩の領域に、残りはデイサイト

の領域にプロットされる(第22図)。一方、ある程度の熱水変質の影響を受けていても原岩の岩石種を指示するとされる TiO_2/Zr 比(例えば Finlow-Bates and Stumpf, 1981; Petersen, 1983 など)をみると、地熱系外試料の大部分は流紋岩ないしデイサイトの値を示すが、一部に安山岩～玄武岩の値を示すものもある(第23図)。

アルカリ「セリサイト化指数」($S.I. = K_2O/(Na_2O + K_2O)$)ダイアグラム(Hughes, 1972)上では、地熱系外の滝沢川層の中では“igneous”にプロットされるものは約1/3であり、残りは“hydrothermal”の領域にプロットされる(第24図)。“hydrothermal”領域にプロットされるもののうち、特に「セリサイト化指数」が高い試料は、広域続成変質に熱水変質が重複したと考えられる試料であるが、広域続成変質のみを受けていると考えられる試料の多くも、“hydrothermal”の領域にプロットされる。

地熱系外の地表露頭から採取した滝沢川層の全岩化学分析結果の変異係数(=標準偏差/平均)を見ると、 SiO_2 , Al_2O_3 が0.2以下と比較的小さく、 MnO , CaO , S , Sb , Cu , Pb , Zn などが1以上と比較的大きい(第3表)。変異係数が大きな成分はいずれも熱水変質や黒鉱タイプの鉱化作用に伴って移動する成分である。これは、地熱系外の滝沢川層の一部では、類似した化学組成をもっていた原岩が様々な程度に熱水変質を受けることにより化学組成が多様化したことを示唆する。また、 Pb や Zn の最高値は500ppm近くに達するが、それらの微弱な重金属鉱化作用を受けた試料の大部分は、「セリサイト化指数」の高い試料と共通する。

滝沢川層は、奥会津地熱系の内外を対象として試料の直接観察や分析ができる唯一の地層である。ただし、滝沢川層は現世地熱変質を受ける以前に第三紀の広域続成変質を受け、さらに黒鉱鉱化作用に関連した熱水変質も重複して受けているため、その鉱物組成や化学組成にある程度の多様性があると予想される。したがって、地熱系の内外での化学成分の挙動を考察する場合は、現世地熱変質を受ける以前の滝沢川層の化学組成の不均質性について検討する必要がある。

地熱系外の滝沢川層について、変質や岩相の違いに基づいて、熱水変質の重複の有無、および溶岩か火山砕屑岩かの岩相による区分を行い、それぞれの平均値を系外全体の平均値と比較した(第25図)。その結果、 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 など大部分の成分については、岩相や変質タイプの違いにかかわらずその平均値は、系外全体の平均値の $\pm 50\%$ 以内で一致した。反対に、グループ間での違いが大きい成分としては、熱水変質の有無で比較した場合、 Na_2O , S , Sr , Pb が $\pm 50 \sim 120\%$ の範囲で、岩相で比較した場合、 As , Sb , Pb , Zn が $\pm 50 \sim 80\%$ の範囲で、それぞれ系外全体の平均値から隔たりを示す。平均値から比較的大きな隔たりを示すこれらの成分は、

岩相別比較の場合も含め、熱水変質や重金属鉱化作用に伴って移動する元素群であり、地熱系外の滝沢川層の一部が広域続成変質だけでなく熱水変質も受けていることを示す。後述する化学成分の収支の見積りの際には、ここで述べた地熱系外の滝沢川層の岩石中の地化学的不均質性を考慮した。

4.5 地熱系内外における変質岩の化学組成の比較

地熱系外で17試料、系内で76試料の合計93試料の滝沢川層の変質岩について、全岩化学分析を実施した。地熱系外の試料は全て地表露頭より、系内の試料は全て坑井より採取された。地熱系内滝沢川層の各成分の平均、標準偏差等を第4表に、地熱系内外の主成分、微量元素、REEの平均値の比較を第26図にそれぞれ示す。地熱系の内外での滝沢川層の化学組成を比べると、 MnO , CaO , S , Au , As , Cu などの地熱系内における顕著な濃度増加に代表される、多くの成分の濃度変化が認められる。

地熱系外に比べ系内の試料は SiO_2 が低いものも多く、TASダイアグラムや TiO_2/Zr 比ダイアグラム上では安山岩ないし玄武岩質安山岩の領域にまで及ぶ(第22, 23図)。 SiO_2 が低い地熱系内試料の化学的特徴は、ハーカーダイアグラム上によく現れる。 SiO_2 の低下に伴って増加する傾向をもつ成分は、 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , LOI などであり、中でも LOI と SiO_2 とがもっとも明瞭な負相関を示す(第27図)。その LOI は Fe_2O_3 , MgO , CaO , S などと正相関を示す(第28図)。一方、地熱系内には強熱減量により分解される Ca , Fe , Mg の炭酸塩鉱物や Ca の硫酸塩鉱物が変質鉱物として多産する。これらのことから、 SiO_2 が低い地熱系内試料は、原岩の SiO_2 が低かったと考えるよりも、地熱変質による炭酸塩・硫酸塩鉱物の生成に伴う密度増加による相対的な SiO_2 濃度の低下の結果である可能性が高い。

地熱系内外の滝沢川層の全岩化学組成平均値を比べると(第3表)、主成分では、地熱系内において S が著しく高く、次いで CaO , MnO , MgO , LOI も系内で高い一方、 SiO_2 , Na_2O は系内でやや低い(第26図(a))。微量元素では As が地熱系内で著しく高く、 Cu , Au , Ba , Sr , Zn も系内で高い一方、 Cs と V は、逆に系内で低くなっている。(第26図(b))。レアアースについては、地熱系内外の平均値の間にほとんど差は認められない(第26図(c))。

アルカリ「セリサイト化指数」ダイアグラムをみると、 $S.I.$ の範囲が火成岩から変質岩までの広範囲に分散する点は系内外ともに共通しているが、地熱系内試料については特に $S.I. = 1$ の近傍に集中が認められ、地熱変質により強く「セリサイト化」した試料が多いと言える(第24図)。

熱水変質作用を受けても原岩の値を保持する傾向が強

いと考えられている TiO_2/Zr 比は、地熱系内外ともに 0.03-0.15 の範囲の中にある。 TiO_2/Zr 比は、セリサイト化指数が 0.6 付近を境に異なる傾向を示す。すなわち、セリサイト化指数 < 0.6 では TiO_2/Zr 比は 0.02-0.10 の範囲にあるが、セリサイト化指数 > 0.6 では 0.03-0.15 へと範囲が拡大する (第 29 図)。

コンドライト規格化した REE パターン全体の勾配を示す La/Yb 比は、地熱系の内外ともに 2-10 の範囲の中にあり、セリサイト化指数との間に特に関係は認められない (第 29 図)。

4.6 地熱系内の変質帯間での化学組成の比較

地熱系内の滝沢川層の変質帯ごとの各成分の平均、標準偏差等を第 4 表に、変質帯ごとの主成分、微量成分、REE の平均値の比較を第 30 図にそれぞれ示す。地熱系内の滝沢川層では、イライト帯に見られる浅熱水性元素群が示す濃度増加と Na_2O 、 Sr の濃度減少、カオリナイト帯に見られる微量元素や HREE の濃度減少など、それぞれの変質帯を特徴づける化学組成上の傾向が認められる。

地熱系内の滝沢川層の変質帯ごとの主成分濃度 (第 30 図 (a)) をみると、イライト・緑泥石+帯は、相対的に高い CaO 、 P_2O_5 により特徴づけられる。イライト帯は、相対的に高い MnO 、 K_2O と S および相対的に低い MgO と Na_2O により特徴づけられる。カオリナイト帯は、相対的に高い LOI および相対的に低い CaO 、 K_2O 、 TiO_2 と S により特徴づけられる。

変質帯ごとの微量元素濃度 (第 30 図 (b)) をみると、イライト・緑泥石+帯は、相対的に高い Sr 、 Sc 、 Zn 、 Ni 、 Cr と V および相対的に低い As と Sb により特徴づけられる。イライト帯は、相対的に高い Ba 、 Rb 、 Cs 、 Au 、 Ag 、 As 、 Sb 、 Cu と Pb および相対的に低い Sr と Zn により特徴づけられる。イライト帯において Au 、 As 、 Sb などの浅熱水性元素群の高濃度化が認められる試料の大部分は、高い「セリサイト化指数」を示す (第 31 図)。カオリナイト帯は、相対的に低い Cs 、 Au と Cu により特徴づけられる。

変質帯ごとの REE 濃度 (第 30 図 (c)) をみると、イライト・緑泥石+帯、イライト帯、カオリナイト帯の順に REE 濃度が減少し、かつ HREE でその傾向がより大きくなる。

4.7 “immobile” 元素の挙動

熱水変質の過程で移動しにくいとされている Al 、 P 、 Ti 、 Zr 、 Y 、 Ce など (例えば、Floyd and Winchester, 1978; Finlow-Bates and Stumpfl, 1981; Petersen, 1983 など) について、地熱系内外の滝沢川層におけるそれら相互の相関を検討した。その結果、 Al_2O_3 、 Zr 、 Hf の三者の間の相関が最も強く、地熱変質の過程にお

いてそれらの元素の移動の度合いが相対的に小さかったことが示唆される。

地熱系内外における原岩中のそれぞれの “immobile” 元素の平均濃度が同じで、地熱変質の過程でそれらが移動しないとす。他の成分の移動に伴って地熱系内における “immobile” 元素の相対濃度は変化するものの、地熱系内外全体としては “immobile” 元素群中の任意の 2 成分間には正相関がみられるはずである。しかし実際には、地熱系内外における “immobile” 元素相互の相関の強さには大きなばらつきが認められる。その理由としては、以下の可能性が挙げられる。ひとつは、地熱系の内外あるいはそのいずれかの原岩中の “immobile” 元素の濃度範囲が大きい、すなわち原岩中のばらつきが大きい場合である。その場合、任意の 2 成分間のプロットは大きな広がりをもつことになり、正相関は強くは現れない。もうひとつは、地熱変質の過程で “immobile” 元素が移動する場合 (例えば、MacGeehan and MacLean, 1980; Taylor *et al.*, 1981) である。移動の結果として、地熱系内における “immobile” 元素の濃度が増加ないし減少すれば、やはり任意の 2 成分間のプロットは大きく広がるために相関の度合いは弱くなる。さらに、これら二つが複合する可能性もある。

地熱系内外の滝沢川層を対象として、代表的な “immobile” 元素である Al 、 Ti 、 P 、 Zr 、 Hf 、 Y 、 Sc 、 Ce 相互の相関係数を見ると、 Zr - Hf の相関 (+0.88) が最も強い。次いで Al_2O_3 - Hf (+0.78)、 Al_2O_3 - Zr (+0.71)、 Hf - Ce (+0.66)、 Zr - Y (+0.64)、 Zr - Ce (+0.61) の正相関が比較的強く、地熱変質の過程において Al_2O_3 、 Zr 、 Hf などの移動の度合いが比較的小さかったことが示唆される。 Al_2O_3 、 TiO_2 、 P_2O_5 の主成分相互の相関係数はいずれも +0.5 以下であり明瞭な相関が認められないことは (第 5 表)、前述とあわせて考えると、 Al_2O_3 に比べて TiO_2 や P_2O_5 が移動しやすいことを示唆する。 Al_2O_3 と P_2O_5 、 TiO_2 、 Zr との関係プロットを第 32 図に示す。

“immobile” 元素の地熱系内外における変動係数 (= 標準偏差 / 平均) をみると、 Al_2O_3 が最も小さく (0.18-0.25)、 Ce (0.29-0.31)、 Hf (0.21-0.32)、 Zr (0.30-0.32) などがそれに次いで小さい。変動係数が最大の成分は P_2O_5 (0.51-1.67) であり、 TiO_2 (0.42-0.60) がそれに続く。相対的に強い正相関が認められた Al_2O_3 、 Hf 、 Zr 、 Ce などの変動係数はいずれも小さい方に属する。

代表的な “immobile” 元素として Al_2O_3 、 TiO_2 、 Zr および Hf について、地熱系内の滝沢川層の各変質帯における平均値を、地熱系外の滝沢川層の平均値で基準化した数値を第 33 図に示す。各成分の特徴をみると、いずれの成分もイライト・緑泥石+帯、イライト帯、カオリナイト帯の順に平均濃度が低下する点で同じ傾向を示す。すなわち、どの成分で規格化しても、イライト・緑泥石

+帯, イライト帯, カオリナイト帯の順に変質帯の平均密度が上昇する傾向を示す。濃度低下の度合いは Al_2O_3 , Zr, Hf がほぼ同程度であるのに対し, TiO_2 はそれよりも大きな低下傾向を示す。また, 地熱系外の平均値と比較すると, Al_2O_3 と Hf がほぼ同じ範囲の値を示すのに対し, TiO_2 の示す範囲はそれよりも大きく, Zr は全体により大きな方向にずれている。

4.8 地熱変質に伴う化学成分の移動傾向

系外のイライト・緑泥石帯を基準として, Al_2O_3 により規格化し, 全ての化学成分について移動傾向を検討した。その結果, 地熱系内の全ての変質帯で化学成分の移動が認められた。系内の全ての変質帯で共通して付加されている成分が CaO, S, As, Cu, 共通して除去されている成分が Cs である。さらにイライト帯では Na_2O の除去および MnO, Au, Ag の付加が, またカオリナイト帯では Fe_2O_3 , MnO, MgO の付加が認められた。

熱水変質の過程において Al_2O_3 が移動しないと仮定して, いずれも Al_2O_3 で規格化した地熱系外の滝沢川層の平均値と地熱系内の各変質帯の平均値を比較し, 各成分の移動度を算出した (第34図)。4.4 で述べたとおり, 地熱系外の滝沢川層, すなわち地熱変質を受ける以前の原岩は, 第三紀の熱水変質の有無, 岩相の違いなどにより, 系外全体の平均値から隔たりを生じる。その隔たりはほとんどの成分で50%以内であるが, Na_2O , S, Sr, Ag, Sb, Cu, Pb, Zn では +/-50~120%とやや大きい。

そこで, Al_2O_3 による規格化計算によって得られた地熱系内外の変質帯の平均値の差が, 系外の原岩中のグループ間にみられる差を超えた場合に, 地熱系内において化学成分の移動があったとみなすことにして, 各変質帯における化学成分の移動傾向を検討した。その結果は以下のとおりまとめられる。

主成分については, イライト・緑泥石+帯は, MnO, MgO, CaO, S の付加で特徴づけられる。イライト帯は, MnO, CaO, S の付加および Na_2O の除去で特徴づけられる。カオリナイト帯は, Fe_2O_3 , MnO, MgO, CaO, S の付加で特徴づけられる (第34図 (a))。

微量成分については, イライト・緑泥石+帯は, Sr, As, Cu, Zn の付加および Cs, Sb の除去で特徴づけられる。イライト帯は, Ba, Au, Ag, As, Cu の付加および Cs, V の除去で特徴づけられる。カオリナイト帯は, As, Cu の付加および Cs, Cr と V の除去で特徴づけられる (第34図 (b))。

5. 変質帯の成因

5.1 変質帯成因の概要

地熱系の地下にみられる各変質帯の変質鉱物組成, 化学成分の収支, 変質帯の分布様式, 変質岩の組織などを

総合すると, 各変質帯の成因は以下のように考えられる。イライト・緑泥石+帯は CO_2 ガスに富む高塩濃度の地熱流体が貯留槽中を移動しつつ流紋岩質の火山碎屑岩からなる周辺母岩中に浸透することにより, イライト帯は相対的に透水性の高い岩石中を地熱流体が沸騰しつつ浸透することにより, カオリナイト帯は貯留槽深度周辺における気液分離で生じた CO_2 ガスが浅層の地下水に吹き込むことで生じた低温の炭酸酸性水と母岩との反応により, 混合層粘土鉱物帯はカオリナイト帯が形成された場の最も外側で低温の地下水により, それぞれ形成された。

なお, ここで対象とする地層は, 滝沢川層を主とし, 大檜沢層, 荻野層, 漆窪層などを含む貯留槽深度周辺に分布する新第三系全体である。地熱系最上部の更新統砂子原層中の変質の成因については, 関 (2000) に述べられている。

5.2 イライト・緑泥石+帯

貯留槽深度周辺の滝沢川層や大檜沢層の地層温度は $200 \sim 350^\circ C$ に達しており (第5図), イライト・緑泥石+帯はその領域の大部分を占めている。一般に, 地熱系に出現する多くの変質鉱物の中に, Ca を含む一群のアルミノケイ酸塩鉱物が知られている。例えば, $150 \sim 200^\circ C$ の地熱系では濁沸石, $200^\circ C$ を超えると緑簾石やワイラカイト, $300^\circ C$ を超えるとブドウ石やアクチノ閃石などである (Henley and Ellis, 1983; Bird *et al.*, 1984)。

これに対して, 奥会津地熱系の高塩領域では, 濁沸石, ワイラカイトや緑簾石の産出はごくまれで, ブドウ石やアクチノ閃石の産出報告はない。その最大の理由は, 地熱流体の化学性状にあると考えられる。すなわち, 奥会津地熱系の地熱流体は約1wt%に達する高い CO_2 を含んでいるため (関, 1996), Ca の大部分は炭酸と結合して種々の炭酸塩鉱物を生成し, Ca アルミノケイ酸塩鉱物を生成しなかったと考えられる。このような CO_2 含有量の多寡と Ca アルミノケイ酸塩鉱物の有無との関係は, ニュージーランドの Wairakei (Steiner, 1968) や Broadlands (Browne and Ellis, 1970) 地熱系での観察事実などと類似する。高温領域において特徴的な Ca アルミノケイ酸塩鉱物が生成されない結果, イライト, 緑泥石, 炭酸塩鉱物, 硬石膏からなる変質鉱物組合せとなり, 粘土鉱物および沸石鉱物を指標とした場合, 地熱系外の滝沢川層との違いが見られなくなる。以上に述べたことは, 逆にまた, 現在貯留槽深度周辺に存在する変質鉱物が生成した際に関与した地熱流体が, 現在の地熱流体と同様に CO_2 に富む流体であったことを示唆する。

イライト・緑泥石+帯を特徴づける変質鉱物として Ca, Mg, Fe, Mn の炭酸塩鉱物と Ca 硫酸塩 (硬石膏) があるが, それらの構成化学成分の多くは系外のイライト・緑泥石帯に比べ富化されている成分である (第34図)。また, イライト・緑泥石+帯の分布は, 地熱流体の貯留

裂罅近傍だけでなく地層温度 200-350°C の高温領域の大部分を占めている。

これらの特徴から判断すると、イライト・緑泥石+帯は、CO₂ ガスに富む高塩濃度の地熱流体（関，1996）が、急傾斜の開放裂罅群からなる貯留槽中を移動しつつ流紋岩質の火山砕屑岩からなる周辺母岩中に浸透することにより生成したと考えられる。

5.3 イライト帯

イライト帯の分布は、比較的浅所の地熱流体貯留裂罅の近傍の一部に限られる。例えば、N57-OA4 坑井でイライト帯が出現する深度 550-650m 間は孔井掘削時の大量逸水箇所であり、同坑井の浅所の地熱流体のフィードポイントになっている。

イライト帯の特徴は、多くの場合、熱水変質が基質だけでなく斜長石にも強く及んでいることであり、斜長石がイライトや炭酸塩鉱物で完全に交代されている例も多い。これは、岩石中を通過した地熱流体の量が多く、反応がより完全に進んだことを示唆する。コアで岩相が確認できるイライト帯の母岩は、自破碎溶岩や火山角礫岩など透水性が高い岩石であることが多いことも、この示唆を支持する。また、イライト帯で認められる Mn の付加も、イライト帯への熱水相の関与を示している。

イライト帯の生成には局所的な沸騰現象が関与している可能性が高い。母岩の透水性が相対的に高ければ、そこで減圧が生じ沸騰と温度低下が起きる可能性が高い。また、イライト帯の中には、沸騰が沈澱の重要な必要条件である Au (Hedenquist *et al.*, 1996) の異常濃集を伴うことがある。例えば、N57-OA4 坑井におけるイライト帯の出現範囲では、母岩中の Au 濃度が 20～60ppb であり、バックグラウンドの 1～5ppb に対して 10 倍以上の高濃度異常を示している（巻末資料）。このように極端な母岩中の Au の高濃度異常が認められるのは、他の坑井も含めてこの箇所だけである。

温度低下に関しては、水-岩石反応の数値実験結果とも整合する。地熱系内に分布するイライト・緑泥石+帯やカオリナイト帯に比べ、イライト帯は高い K₂O 濃度と低い Na₂O, MgO 濃度を特徴としている（第 30 図）。水卓越条件下で、流紋岩溶結凝灰岩と熱水を温度低下させつつ反応させた数値実験（Takeno, 1989）によれば、得られた変質岩には石英と白雲母が生成し、その組成は原岩に比べて SiO₂, K₂O が増加し、Na₂O, MgO, CaO が減少した。この結果は、奥会津地熱系におけるイライト帯でみられる鉱物・化学組成上の傾向と一致する。

以上をまとめると、イライト帯は相対的に透水性の高い岩石中を、地熱流体が沸騰しつつ浸透することにより形成されたものと考えられる。

5.4 カオリナイト帯

地熱系内にみられる変質帯の多くが、地温構造ないし層序と調和した分布を示す中で、カオリナイト帯はそのいずれとも不調和な分布形態を示す。大局的には、老沢、猿倉沢、血の池沢などの地熱流体を貯留する開放裂罅群に規制されつつも、深度 500m 付近を中心に水平方向へ分布が展開するなど、全体としてはイライト・緑泥石+帯や、スメクタイト・沸石帯などの他の変質帯を断ち切る分布形態を示す。このような分布形態は、カオリナイト帯の形成が、他の変質帯の形成後に、それらにオーバープリントしたことを示唆する。

カオリナイト帯を構成する鉱物の特徴の一つは、雲母粘土鉱物としてイライト・スメクタイト混合層鉱物が含まれることである。カオリナイト帯の分布範囲の下半は滝沢川層中にあり、そこではカオリナイト帯の大部分はイライト・緑泥石+帯と接している（例えば、1t, 4r など）。イライト・緑泥石+帯の雲母粘土鉱物はイライトであるから、イライト・スメクタイト混合層鉱物を含むカオリナイト帯は、変質鉱物の一般的な生成温度（Henley and Ellis, 1983）を適用すれば、その周囲のイライト・緑泥石+帯よりも低温で生成したことになる。現在の地熱系では、貯留槽深度からその上方にかけての範囲で、温度構造の逆転はないので（関・安達，1997）、カオリナイト帯が示す温度の逆転傾向を現在の温度構造の中で生成されたものとして説明することは困難である。

一方、カオリナイト帯の鉱物組合せのもうひとつの特徴は、炭酸塩鉱物にある。大部分のカオリナイト帯は、多量の苦灰石および菱鉄鉱または菱苦土石を伴っている（例えば、1t, 4r, 22T など）。さらに、それらの炭酸塩鉱物はカオリナイト帯の分布域内に出現するだけでなく、カオリナイト帯の下方に接するイライト・緑泥石+帯中にも現れる（第 10 図 (b)）。すなわち、カオリナイトの分布範囲は、苦灰石や菱鉄鉱などの炭酸塩鉱物の分布範囲の上部を占めていることになる。炭酸塩鉱物の生成には、CO₂ に富む地熱流体が関与したと考えられる。また、カオリナイトは炭酸酸性の流体により生成される（Hedenquist, 1990）。これらと、前述した温度の逆転構造を合わせて考えると、カオリナイトは、貯留槽深度周辺における気液分離で生じた CO₂ ガスが炭酸塩鉱物を形成しつつ地層内を上昇し、上方に存在した低温の地下水に吹き込むことで生じた炭酸酸性水と母岩との反応により生成されたと解釈できる。

5.5 混合層粘土鉱物帯

地熱系地下における混合層粘土鉱物帯は、しばしばカオリナイト帯と相接して現れる。混合層粘土鉱物帯は、イライト・緑泥石帯ないしイライト・緑泥石+帯が CO₂ ガスと低温の地下水が関与した地熱変質を受けてカオリナイト帯へと変化する場の最も外側で、低温の地下水により形成された可能性が高い。

6. ま と め

奥会津地熱系の貯留層深度周辺および系外西方の地表に分布する下部中新統滝沢川層を中心に、母岩の変質を記載するとともに化学成分の移動傾向を調べ、変質帯の成因を考察した。その結果は以下にまとめられる。

1) 地熱系内外の母岩の変質は、ほぼ普遍的に含まれる粘土鉱物ないし沸石鉱物に基づいて、弱変質帯、スメクタイト・沸石帯、混合層粘土鉱物帯、イライト・緑泥石帯、イライト・緑泥石+帯、イライト帯、カオリナイト帯、明ばん石帯の8つの変質帯に区分できる。

2) 地熱系外の滝沢川層の大部分は、第三紀の広域続成変質の産物であるイライト・緑泥石帯の変質を受けている。イライト・緑泥石帯はイライトと緑泥石により特徴づけられ、石英、斜長石を伴い、方解石、苦灰石、カリ長石、黄鉄鉱を伴うこともある。

3) 地熱系内の滝沢川層には、広域続成変質と現在の地熱変質とが重複し、四つの変質帯、すなわちイライト・緑泥石+帯、イライト帯、カオリナイト帯、混合層粘土鉱物帯が識別できる。イライト・緑泥石+帯はイライト、緑泥石、硬石膏により特徴づけられ、石英、斜長石、黄鉄鉱、苦灰石、菱鉄鉱を伴う。貯留層深度の概ね200°C以上の高温領域に広範囲に分布する。イライト帯はイライトにより特徴づけられ、石英、苦灰石、菱鉄鉱を伴う。地熱系内の貯留層裂隙浅所近傍の一部に局所的に分布する。カオリナイト帯はカオリナイト、菱鉄鉱、苦灰石により特徴づけられ、石英、斜長石、イライト・スメクタイト混合層鉱物を伴う。地熱系内の貯留層裂隙浅所の滝沢川層、荻野層および地表の砂子原層の一部などに不規則に分布する。混合層粘土鉱物帯はイライト・スメクタイト混合層鉱物または緑泥石・スメクタイト混合層鉱物により特徴づけられ、石英、斜長石を伴う。カオリナイト帯と相接して局所的に分布することが多い。

4) 滝沢川層の岩相は、地熱系の内外ともに流紋岩～デイサイト質の溶岩ないし火山砕屑岩であり共通している。地熱系内の全岩化学組成は系外に比べ主成分、微量元素とともに幅広い変化を示す一方、地熱系の内外でREEパターンに違いは認められない。地熱系内の全岩化学組成の多様性は、現世地熱活動によりもたらされたと考えられる。

5) 地熱系外の滝沢川層を基準として、Alで規格化して地熱系内外の化学成分の収支を検討した結果、地熱系内の全ての変質帯で化学成分の移動が認められた。すなわち、全ての変質帯で共通して付加される成分がCa, S, As, Cu, 共通して除去されている成分がCsである。加えて、イライト帯ではNaの除去およびMn, Au, Agの富化が、またカオリナイト帯ではFe, Mn, Mgの付加が認められた。

6) イライト・緑泥石+帯はCO₂ガスに富む高塩濃度の地熱流体が貯留槽中を移動しつつ周辺母岩中に浸透することにより、イライト帯は相対的に透水性の高い岩石中を地熱流体が沸騰しつつ浸透することにより、カオリナイト帯は貯留槽深度周辺における気液分離で生じたCO₂ガスが浅層の地下水に吹き込むことで生じた低温の炭酸酸性水と母岩との反応により、混合層粘土鉱物帯はカオリナイト帯が形成された場の最も外側で低温の地下水により、それぞれ形成されたと考えられる。

謝辞 安達正敏, 井上啓二, 横本誠一の各氏をはじめとする奥会津地熱株式会社および三井金属鉱業株式会社の関係各位には調査に際して種々の便宜を計って頂いた。奥会津地熱株式会社には未公表資料の使用を許可して頂いた。また、青木正博 博士からは多くの御教示を頂いた。田中ひとみさんには図表の作成を手伝って頂いた。以上の方々に深く感謝申し上げます。

文 献

- Bird, D. K., Schiffman, P., Elders, W. A., Williams, A. E. and McDowell, S. D (1984) Calc-silicate mineralization in active geothermal systems. *Econ. Geol.*, **79**, 671-695
- Browne, P. R. L. and Ellis, A. J. (1970) The Ohaki-Broadlands hydrothermal area, New Zealand: Mineralogy and related geochemistry. *American Jour. Sci.*, **269**, 97-131
- Finlow-Bates, T. and Stumpfl, E. F. (1981) The behaviour of so-called immobile elements in hydrothermally altered rocks associated with volcanogenic submarine-exhalative ore deposits. *Mineral. Deposita*, **16**, 319-328
- Floyd, P. A. and Winchester, J. A. (1978) Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements. *Chem. Geol.*, **21**, 291-306
- Giggenbach, W. F. (1992) Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth and Planet. Sci. Letters*, **113**, 495-510
- 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, **27**, 367-378.
- Hedenquist J. W. (1990) The geochemical structure of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand. *Geothermics*, **19**, 151-185

- Hedenquist, J. W., Izawa, E., Arribas, A. and White, N.C. (1996) Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. *Res. Geol. Spec. Pub.* no.1
- Henley, R. W. and Ellis, A. J. (1983) Geothermal systems ancient and modern: A geochemical review. *Earth-Sci. Rev.*, **19**, 1-50
- 平林武雄 (1966) 横田鉾山の内部構造, とくに本山鉾床について. *鉾山地質*, **16**, 106-115
- Hughes, C. J. (1972) Spilites, keratophyres and igneous spectrum. *Geol. Mag.*, **109**, 513-527
- 今井秀喜, 安達正敏, 高橋幹男, 山口光男, 家城康二 (1988) 福島県奥会津地熱試錐井における地熱流体より沈澱した硫化鉍物ならびにその浅成金鉍脈との関連. *鉾山地質*, **38**, 291-301.
- 北村 信, 菅原祐輔, 鈴木養身, 藤井敬三, 伊藤修, 高橋清治 (1968) 福島県地質調査報告, 宮下地域の地質. 福島県. 21 p.
- 小室裕明 (1978) 会津柳津地方における後期中新世陥没盆地の形成について. *地球科学*, **32**, 68-83.
- LeBas, M. J., LeMaitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Jour. Petrology*, **27**, 745-750
- MacGeehan, P. T. and MacLean, W. H. (1980) An Archean Sub-seafloor geothermal system, 'calc-alkali' trends, and massive sulphide genesis. *Nature*, **286**, 767-771
- 水垣桂子 (1993) 砂子原カルデラの構造と火山活動史. *地質学雑誌*, **99**, 721-737.
- Myers, R. E. and McLean, W. H. (1983) The geology of the New Inso copper deposit, Noranda District, Quebec. *Canadian Jour. Earth Sci.*, **20**, 1291-1304
- N E D O (新エネルギー総合開発機構) (1985) 地熱開発促進調査報告書. no.8, 奥会津地域, 811 p.
- 新田富也, 寿賀祥五, 塚越重明, 安達正敏 (1987) 福島県奥会津地域の地熱資源について. *地熱*, **24**, 340-370.
- 新田富也, 安達正敏, 高橋幹男, 井上啓二, 阿部泰行 (1991) 福島県奥会津 87 N -15 T 坑井地熱流体からの重金属鉍物の沈澱について. *鉾山地質*, **41**, 231-242.
- 新田富也, 塚越重明, 安達正敏, 瀬尾邦夫 (1995) 福島県, 奥会津地熱地帯の探査と開発. *資源地質*, **45**, 201-212
- Oinuma, K., Shimada, S. and Sudo, T. (1972) Triangular diagrams for surveying chemical compositions of chlorites. *Jour. Toyo Univ., Gener. Educ. (Nat. Sci.)*, **15**, 1-33.
- Pertersen, M. D. (1983) The use of the "immobile" elements Zr and Ti in lithochemical exploration for massive sulphide deposits in the Precambrian Pecos Greenstone Belt of northern New Mexico. *Jour. Geochem. Exploration*, **19**, 615-617
- Seki, Y. (1990) Gas concentration in aquifer fluid prior to boiling in the Oku-aizu geothermal system, Fukushima, Japan. *Geochem. Jour.*, **24**, 105-121.
- Seki, Y. (1991) The physical and chemical structure of the Oku-aizu geothermal system, Japan. *Geochem. Jour.*, **25**, 245-265.
- 関 陽児 (1996) 奥会津地熱系の地熱流体の地球化学的特徴. *地質調査所月報*, **47**, 273-289.
- 関 陽児 (2000) 奥会津地熱地域・更新統砂子原層にみられる変質—現在の地熱活動による湖成堆積物の変質—. *地質調査所月報*, **51**, 329-367
- 関 陽児, 安達正敏 (1997) 奥会津地熱地域の層序と熱水変質—坑井データに基づく検討—. *地質調査所月報*, **48**, 365-412
- Steiner, A. (1968) Clay minerals in hydrothermally altered rocks at Wairakei, New Zealand. *Clays and clay minerals*, **16**, 193-213
- 鈴木敬治, 島津光夫, 島田 朗, 真鍋健一 (1986) 北村信編“新生代東北本州弧地質資料集”第3巻, 島弧横断ルート no.28 (柏崎—守門岳—只見—会津若松—郡山), 宝文堂.
- 鈴木敬治, 吉田 義 (1956) 会津盆地西南縁地域の第三系・第四系について. *地質学雑誌*, **62**, 161-176
- Takeno, N. (1989) The effect of temperature gradient on the interaction between geothermal water and rock -An approach by numerical simulation-. *Min. Geol.*, **39**, 295-304
- Taylor, R. P., Strong, D. F. and Fryer, B. J. (1981) Volatile control of contrasting trace element distributions in peralkaline granitic and volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **77**, 267-271
- 通商産業省 (1970) 昭和44年度広域調査報告書, 西会津地域.
- 歌田 実, 石川 翼 (1973) 西会津黒鉍鉍床地域に見られる変質帯, とくに方沸石帯とその探鉍への応用. *鉾山地質*, **23**, 213-226.

山元孝広 (1992) 会津地域の後期中新世 - 更新世カ
ルデラ火山群. 地質学雑誌, **98**, 21-38

(受付: 2001年8月28日; 受理: 2001年12月20日)

第1表 分析法および検出限界
Table 1 Analytical methods and detection limits

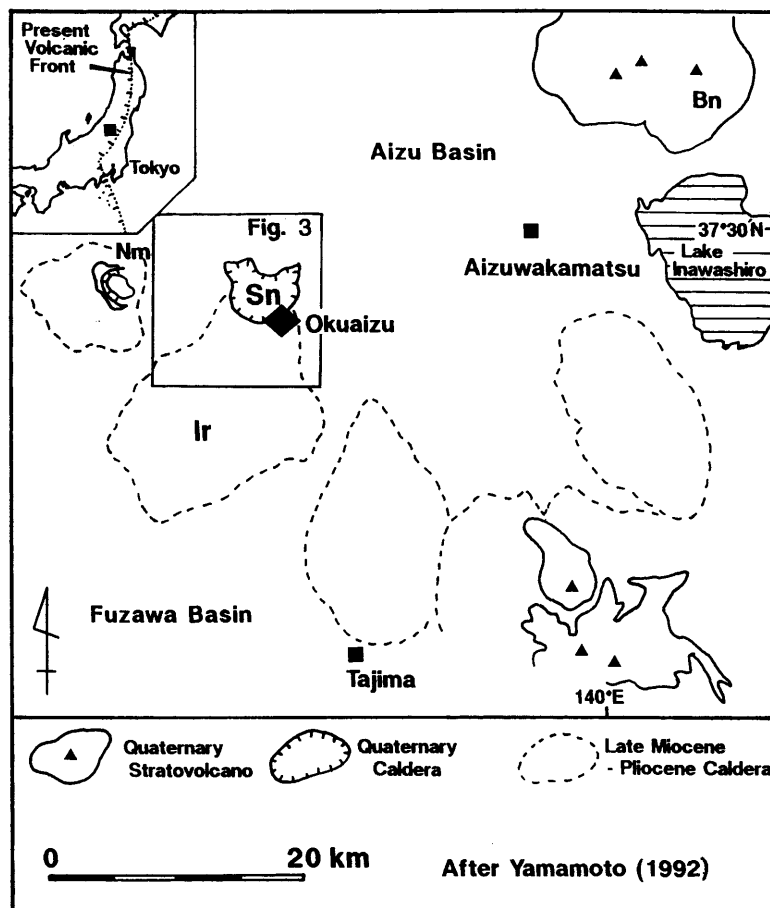
成分	分析法	検出限界	成分	分析法	検出限界	成分	分析法	検出限界	
SiO ₂	XRF	0.010%	As	INAA	0.5 ppm	Ag	ICP	0.5 ppm	
Al ₂ O ₃		0.010%	Au		2 ppb	Cd		0.5 ppm	
Fe ₂ O ₃		0.010%	Ba		50 ppm	Cu		1 ppm	
MnO		0.010%	Co		1 ppm	Mo		2 ppm	
MgO		0.010%	Cs		1 ppm	Ni		1 ppm	
CaO		0.010%	Cr		5 ppm	Pb		5 ppm	
Na ₂ O		0.010%	Hf		1 ppm	Zn		1 ppm	
K ₂ O		0.010%	Hg		1 ppm	V		2 ppm	
TiO ₂		0.005%	Rb		15 ppm	La		INAA	0.1 ppm
P ₂ O ₅		0.010%	Sb		0.1 ppm	Ce			0.2 ppm
LOI		0.010%	Sc		0.1 ppm	Nd			0.1 ppm
S	Infrared	0.010%	Se	3 ppm	Sm	0.1 ppm			
			Sr	1 ppm	Eu	0.05 ppm			
			Ta	0.5 ppm	Tb	0.1 ppm			
			Th	0.2 ppm	Yb	0.1 ppm			
			Y	2 ppm	Lu	0.04 ppm			

第4表 地熱系内の滝沢川層の変質帯ごとの各成分の統計数量
Table 4 Mean net composition of each alteration zone of the Takizawagawa Formation
(inside the Okuizu geothermal system)

Table with 12 columns: Component (e.g., SiO2, Al2O3, Fe2O3, MnO, MgO, CaO, Na2O, K2O, TiO2, P2O5, LOI, S, ppm, Ba, Rb, Sr, Y, Zr, Cs, Hf, Sc, Au (ppb), Ag, As, Sb, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, V, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu), and 10 sub-columns for each alteration zone (Min., Max., Mean, S.D., S.D./M., N.).

第5表 滝沢川層における“immobile”元素間の相関係数
 Table 5 Correlation matrix for “immobile elements” of the Takizawagawa Formation

	TiO ₂	P ₂ O ₅	Zr	Hf	Y	Sc	Ce
Al ₂ O ₃	0.4684	0.0906	0.7106	0.7785	0.4679	0.4911	0.5377
TiO ₂		0.4434	0.3333	0.2424	0.4179	0.4179	0.4179
P ₂ O ₅			-0.0311	-0.0882	0.3992	0.3831	0.3992
Zr				0.8806	0.6356	0.3437	0.6121
Hf					0.5460	0.3055	0.6566
Y						0.4832	0.4008
Sc							0.0275

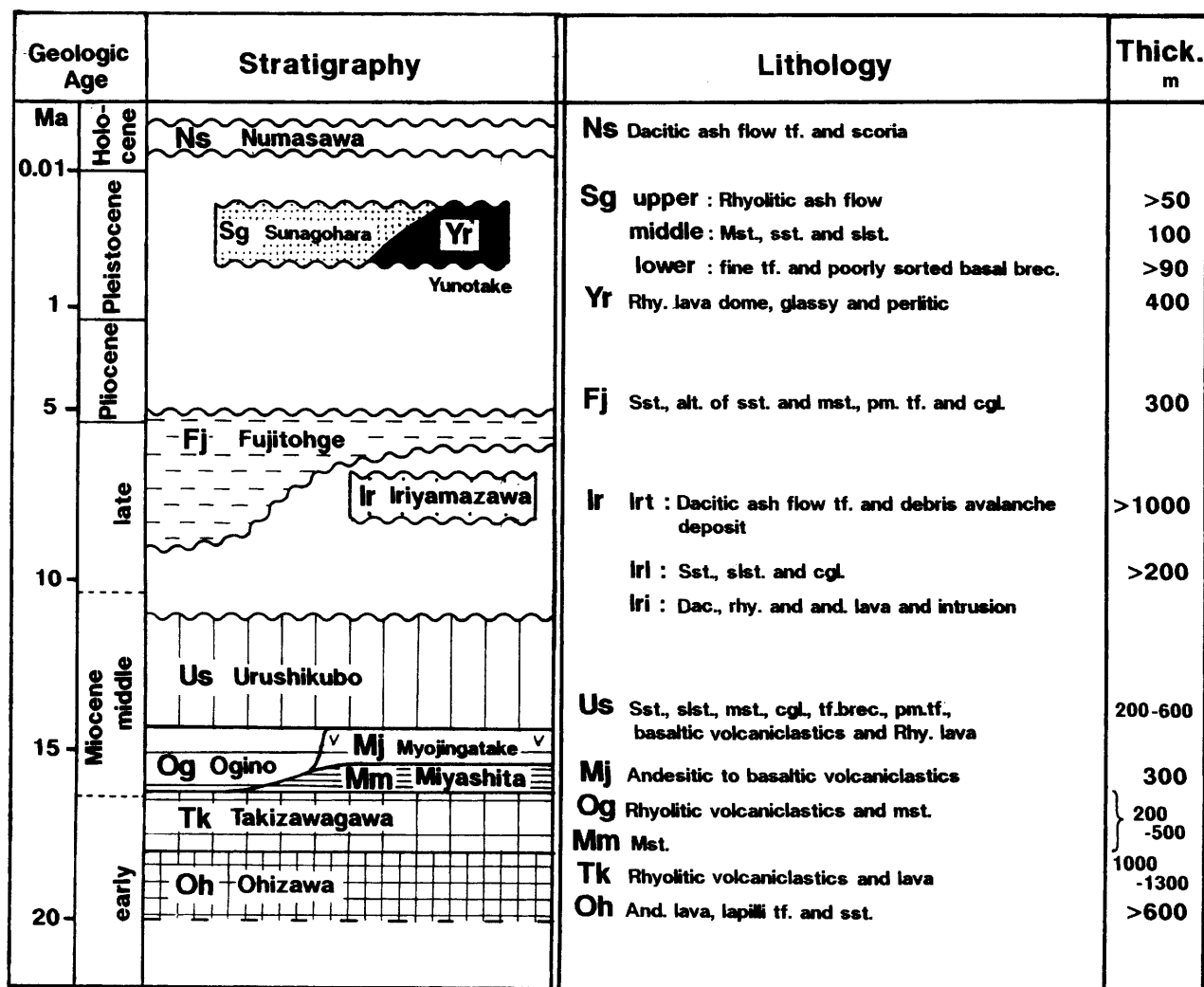


第1図 調査地域位置.

Nm : 沼沢火山, Sn : 砂子原カルデラ, Ir : 入山沢カルデラ,
 Bn : 磐梯火山.

Fig. 1 Location Map.

Nm : Numazawa volcano, Sn : Sunagohara caldera,
 Ir : Iriyamazawa caldera and Bn : Bandai volcano.

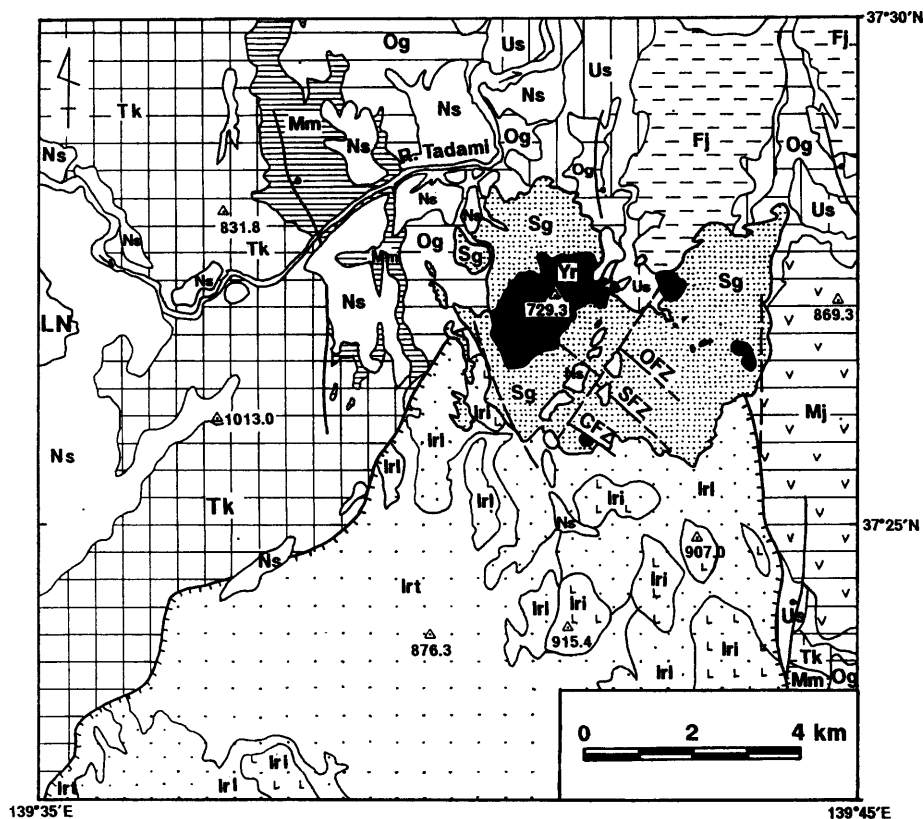


第2図 層序 (NEDO (1985), 鈴木・他 (1986), 山元 (1992), 水垣 (1993) より編図)。

Oh : 大檜沢層, Tk : 滝沢川層, Mm : 宮下泥岩部層, Og : 荻野層, Mj : 明神ヶ岳安山岩, Us : 漆窪層, Ir : 入山沢層, Fj : 藤峠層, Sg : 砂子原層, Yr : 湯ノ岳流紋岩, Ns : 沼沢火砕流堆積物。

Fig. 2 Stratigraphy of the Okuaizu area (compiled from NEDO (1985), Suzuki *et al.* (1986), Yamamoto (1992) and Mizugaki (1993)).

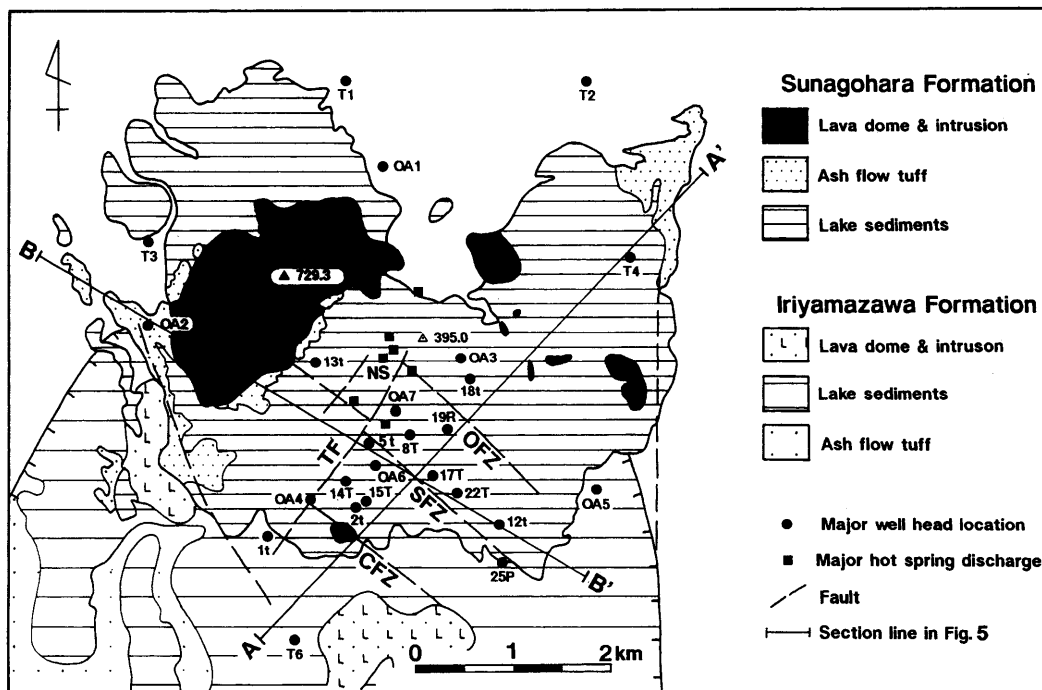
Oh : O-hizawa Formation, Tk : Takizawagawa Formation, Mm : Miyashita mudstone member, Og : Ogino Formation, Mj : Myojingatake Andesite, Us : Urushikubo Formation, Ir : Iriyamazawa Formation, Fj : Fujitohge Formation, Sg : Sunagohara Formation, Yr : Yunotake Rhyolite, and Ns Numazawa pyroclastic flow deposit.



第3図 広域地質 (NEDO (1985), 山元 (1992), 水垣 (1993) より編図)。

C. F. Z. : 血の池沢破砕帯, S. F. Z. : 猿倉沢破砕帯, O. F. Z. : 老沢破砕帯, その他の記号は第2図と同じ。
 Fig. 3 Regional geology (compiled from NEDO (1985), Yamamoto (1992) and Mizugaki (1993)).

C. F. Z. : Chinoikezawa fracture zone, S. F. Z. : Sarukurazawa fracture zone, O. F. Z. : Oisawa fracture zone, the other abbreviations are the same as in Fig. 2.

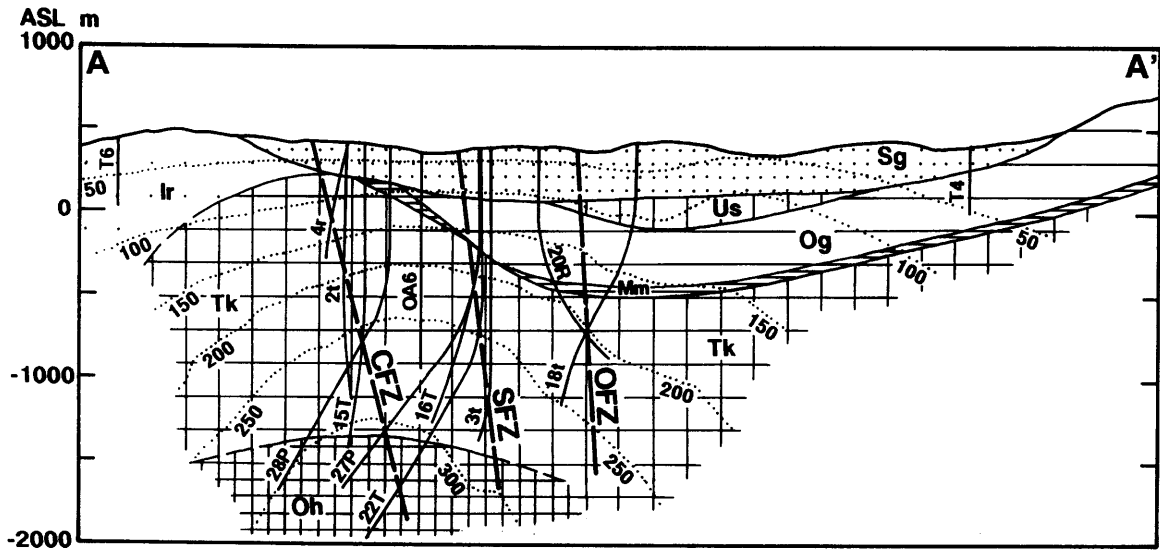


第4図 地熱系周辺の地表地質および主要坑井位置。

T.F. : 滝谷川断層, その他の記号は第2, 3図と同じ。A-A', B-B' は第5, 15図に示す断面線。

Fig. 4 Geological map adjacent to the Okuazu geothermal system with major drill hole locations.

T. F. : Takiyagawa fault, the other abbreviations are the same as in Fig. 3. A-A' and B-B' are section lines shown in Figs. 5 and 15.



第5図 地熱系周辺の地質断面。

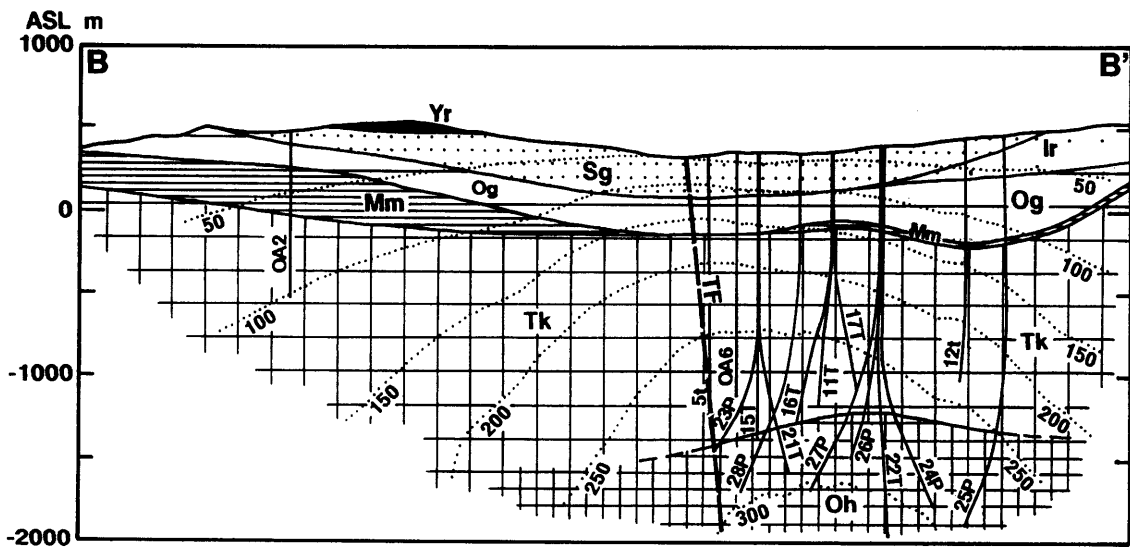
点線と数字は温度検層結果に基づく地下等温線，細実線は地熱坑井．その他の記号は第2，3図と同じ．

(a) A-A' 断面

Fig. 5 Geologic cross section of the Okuaizu geothermal system.

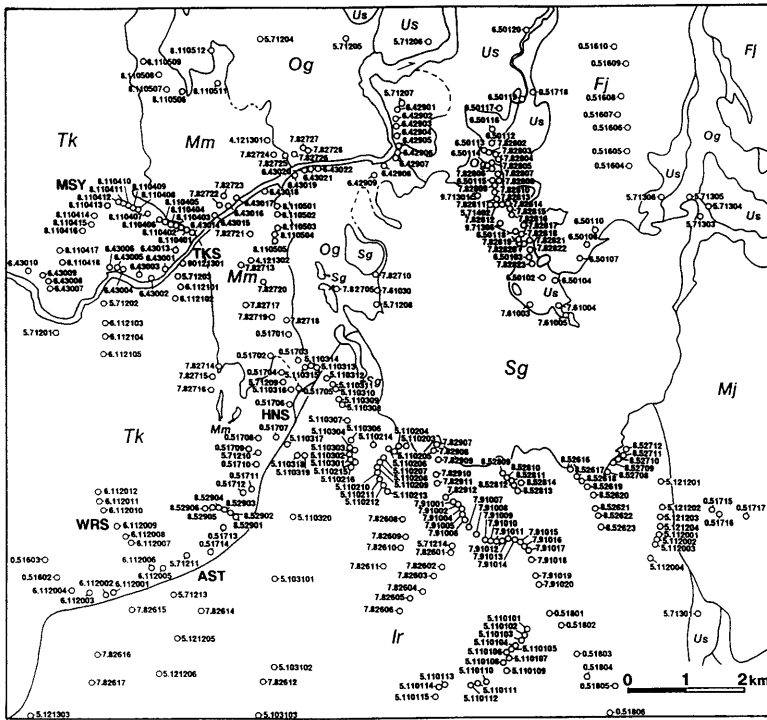
Dotted lines are isotherm based on logging data, the other abbreviations are the same as in Figs. 2 and 3.

(a) Section A-A'



第5図 (b) B-B' 断面

Fig. 5 (b) Section B-B'



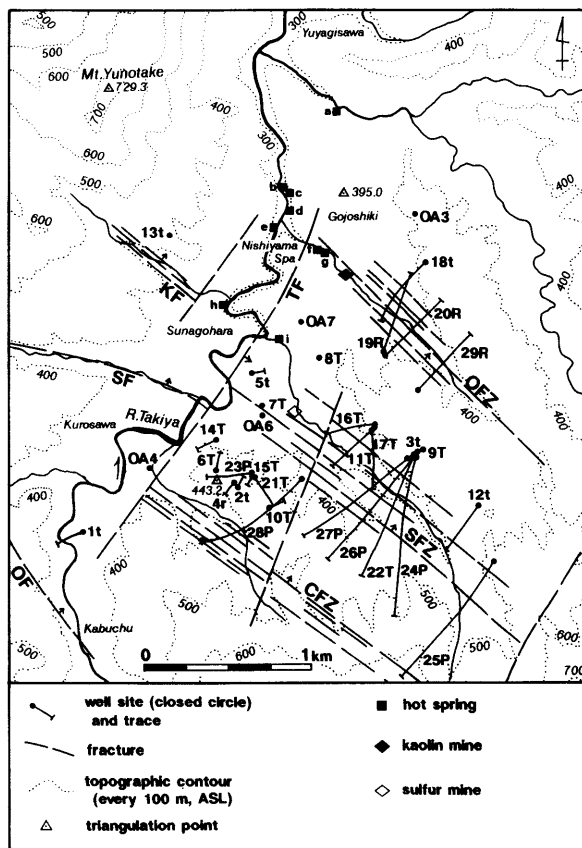
第6図 変質鉱物同定用試料の採取地点。

MSY : 三坂山, TKS : 高清水, HNS : 本村, AST : 浅岐, WRS : 割沢. その他の記号は第2図と同じ。

Fig. 6 Sampling locations for mineral identification by XRD.

MSY : Misakayama, TKS : Takazhimizu, HNS : Honson, AST : Asamata, WRS : Warusawa.

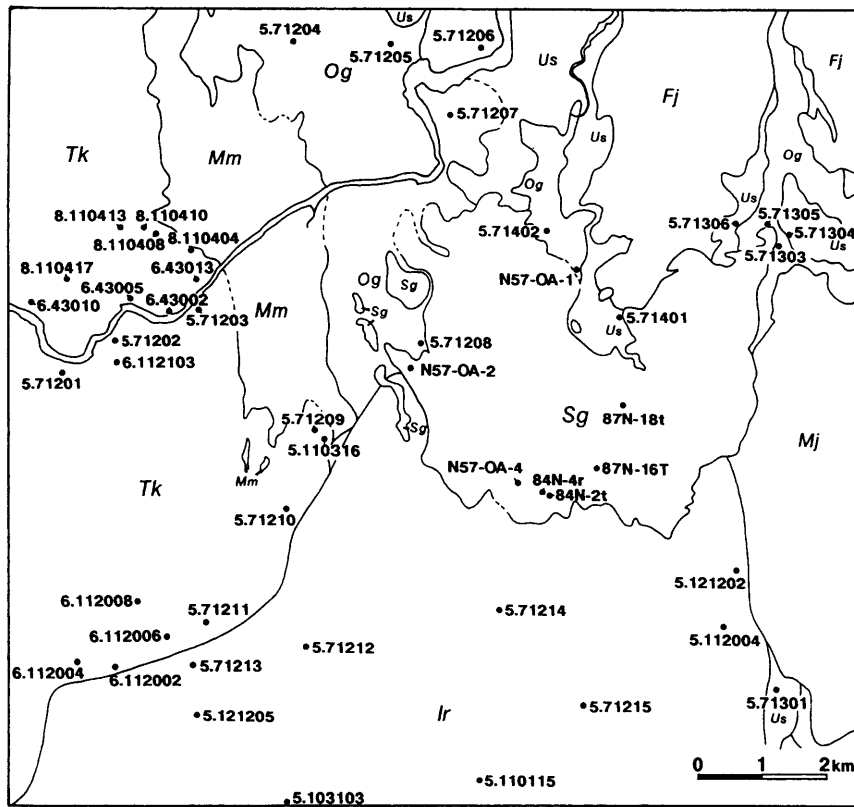
The other abbreviations are the same as in Fig. 2.



第7図 坑井位置および地表地熱徴候。

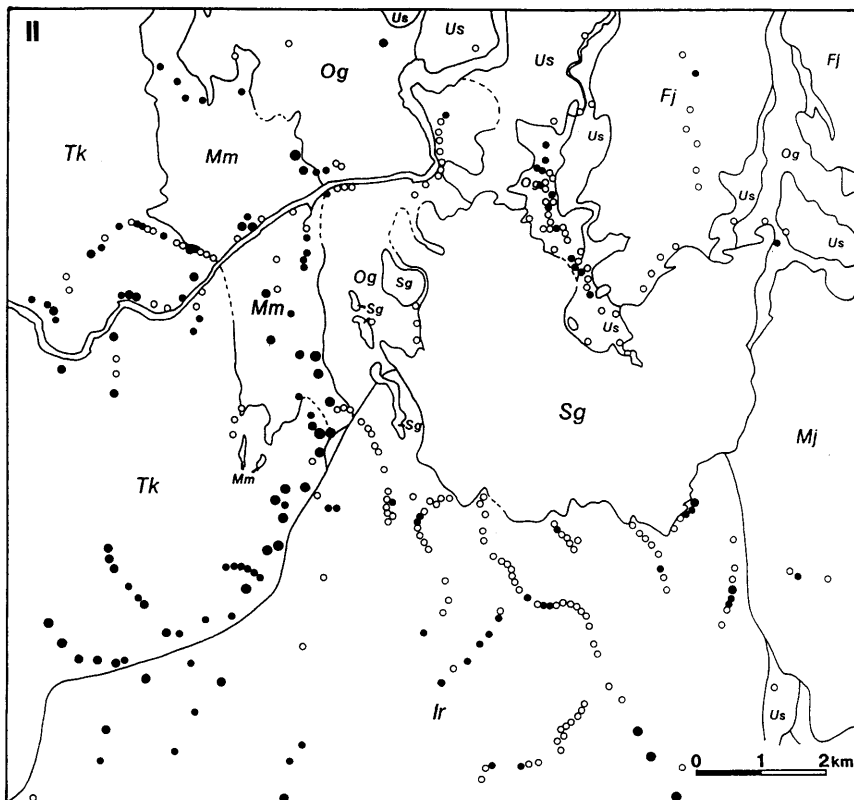
Fig. 7 Well head locations with traces and surface expression of geothermal activity.

奥会津地熱地域・中新統滝沢川層にみられる変質（関）



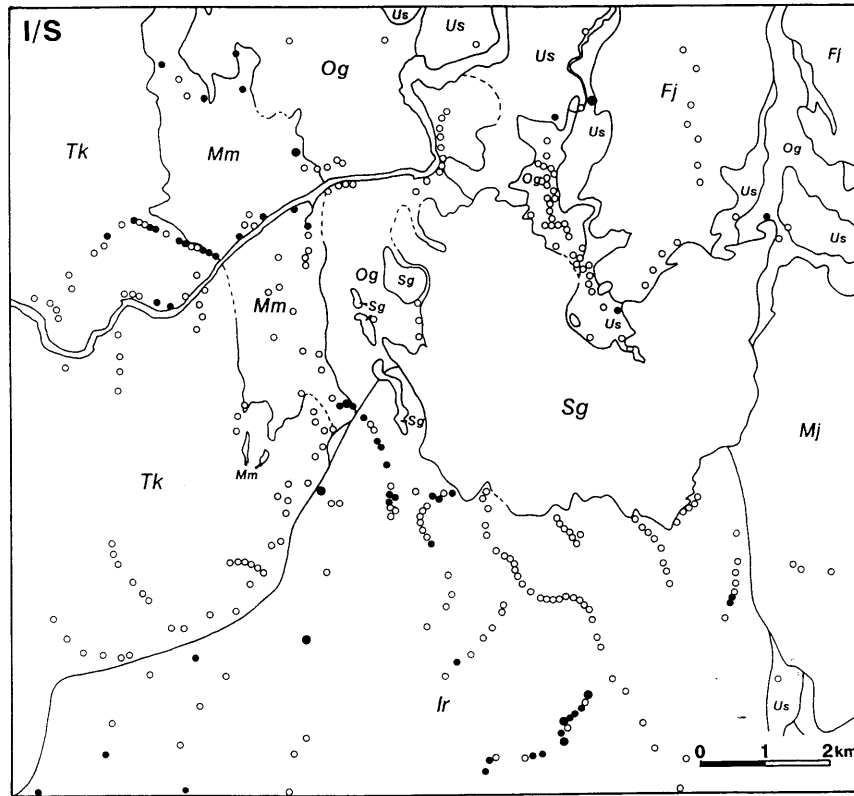
第8図 化学分析試料の採取地点。記号は第2図と同じ。

Fig. 8 Sampling locations for whole-rock chemical analysis. Abbreviations are the same as in Fig.

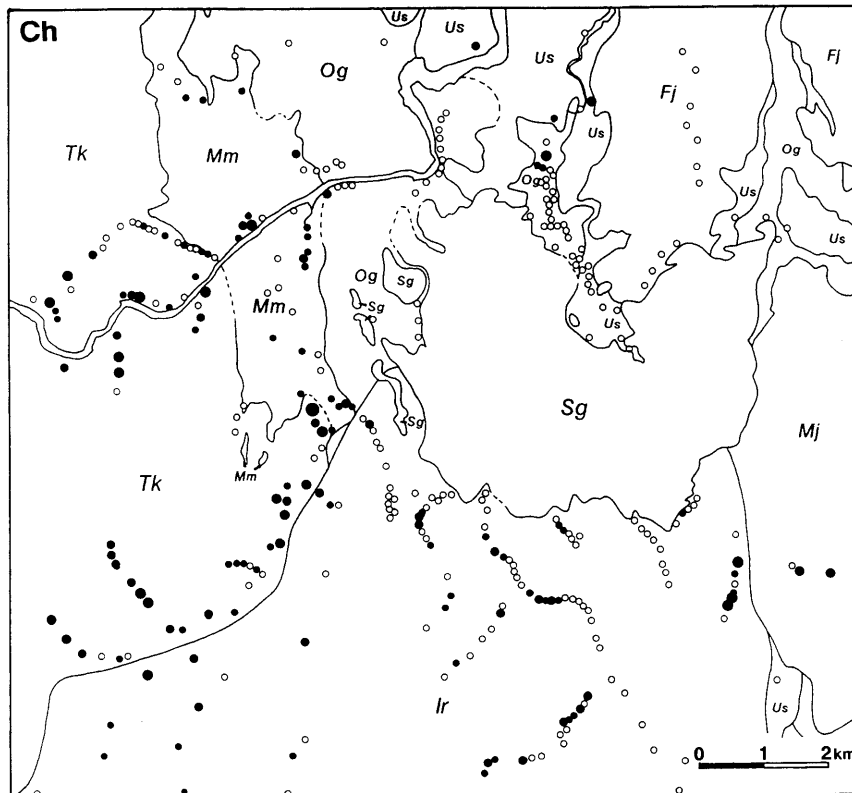


第9図 地表の変質鉱物分布。
○：検出されず，●：微量，
●：中量，●：多量。
(a) イライト

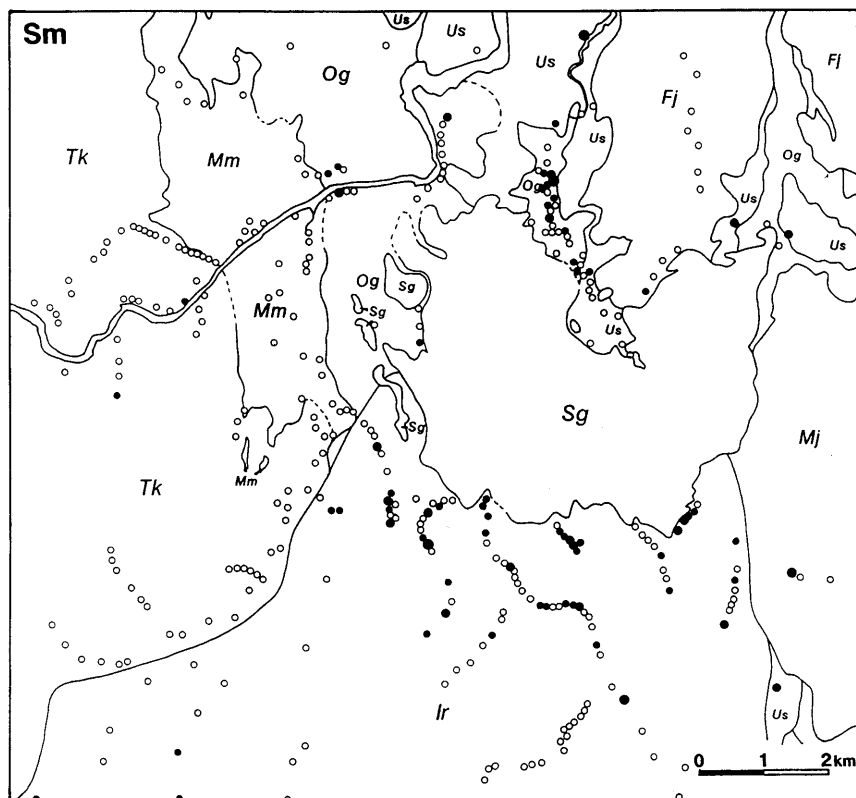
Fig. 9 Surface distribution of alteration minerals.
○：not detected, ●：small amount,
●：moderate amount, ●：large amount.
(a) illite



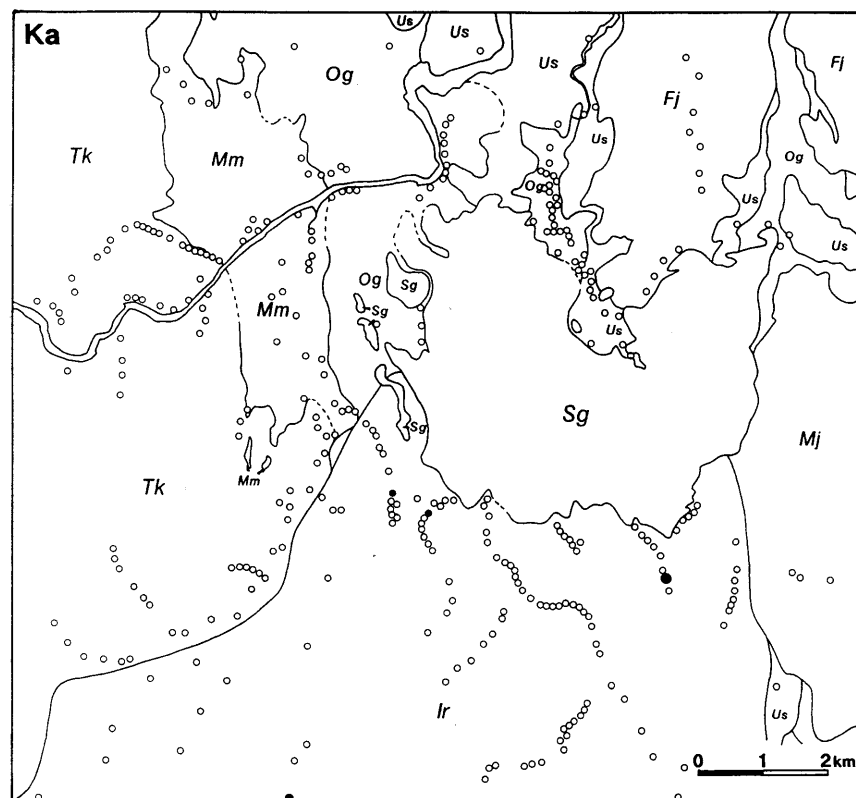
第9図 (b) イライト・スメクタイト混合層鉱物
Fig. 9 (b) illite-smectite inter-layered mineral



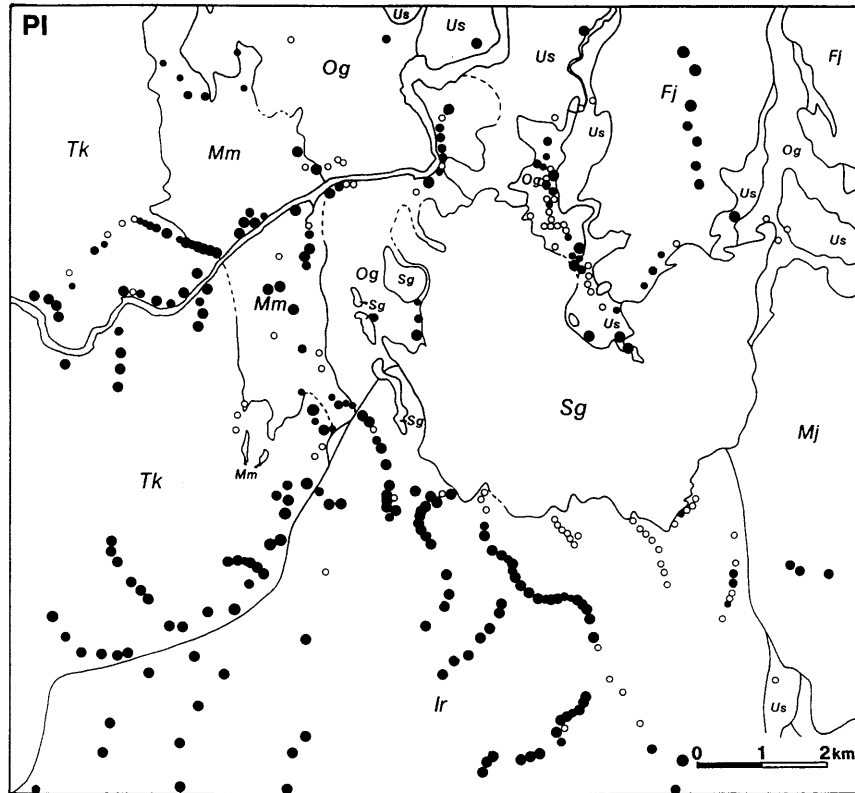
第9図 (c) 緑泥石
Fig. 9 (c) chlorite



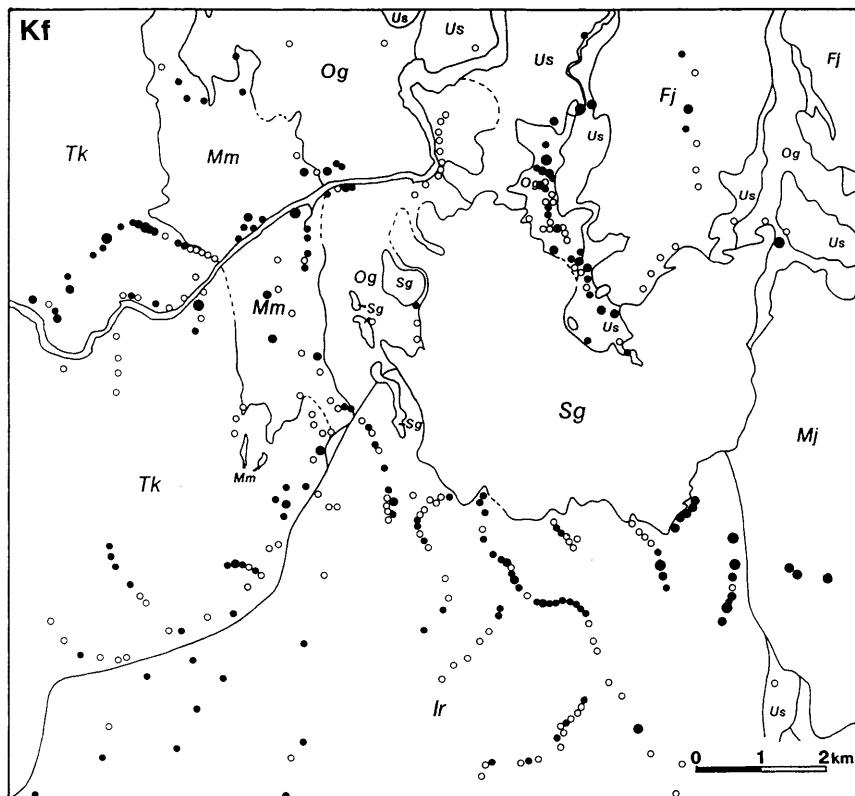
第9図 (d) スメクタイト
Fig. 9 (d) smectite



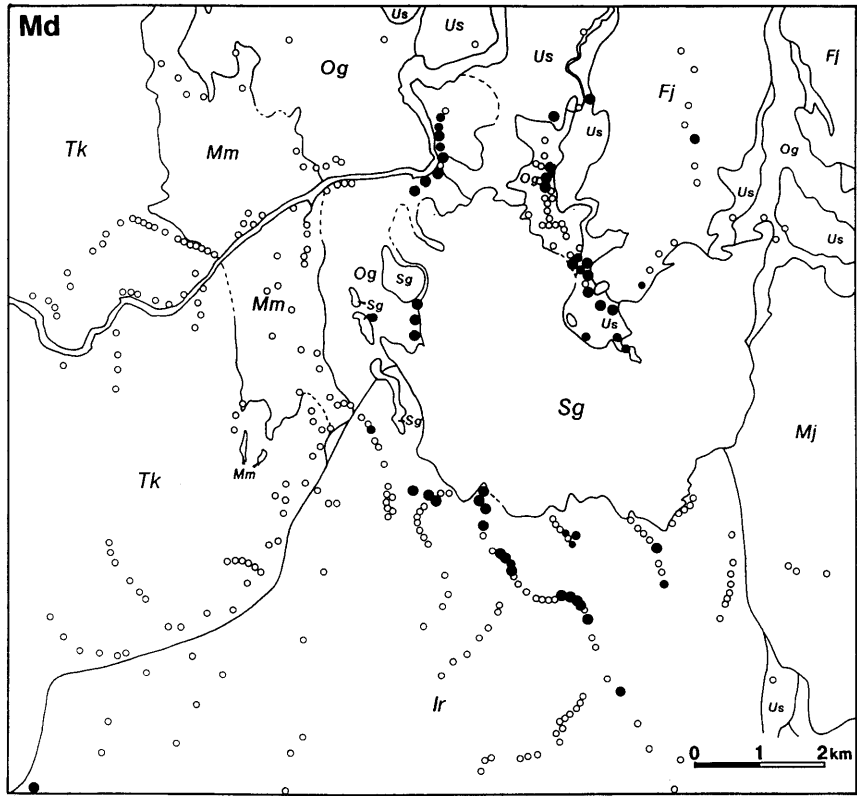
第9図 (e) カオリナイト
Fig. 9 (e) kaolinite



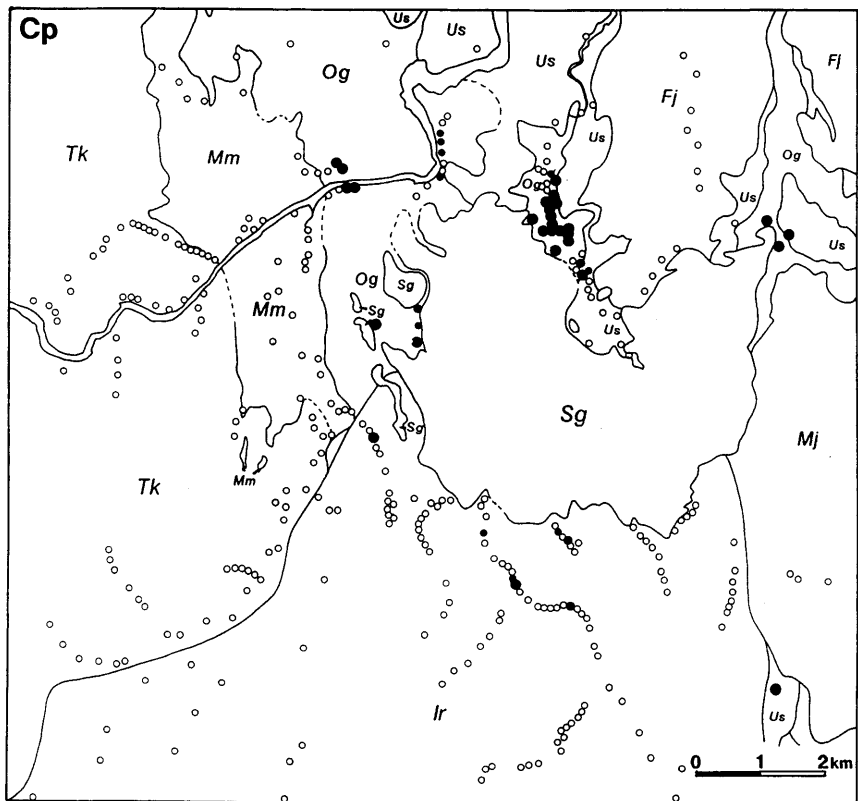
第9図 (f) 斜長石
Fig. 9 (f) plagioclase



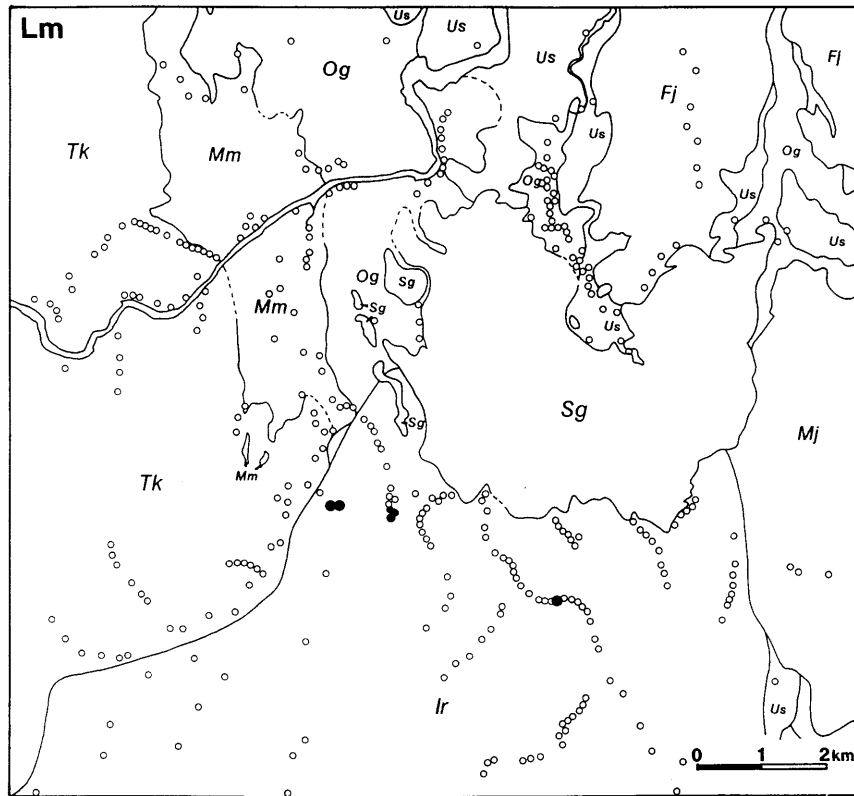
第9図 (g) カリ長石
Fig. 9 (g) K-feldspar



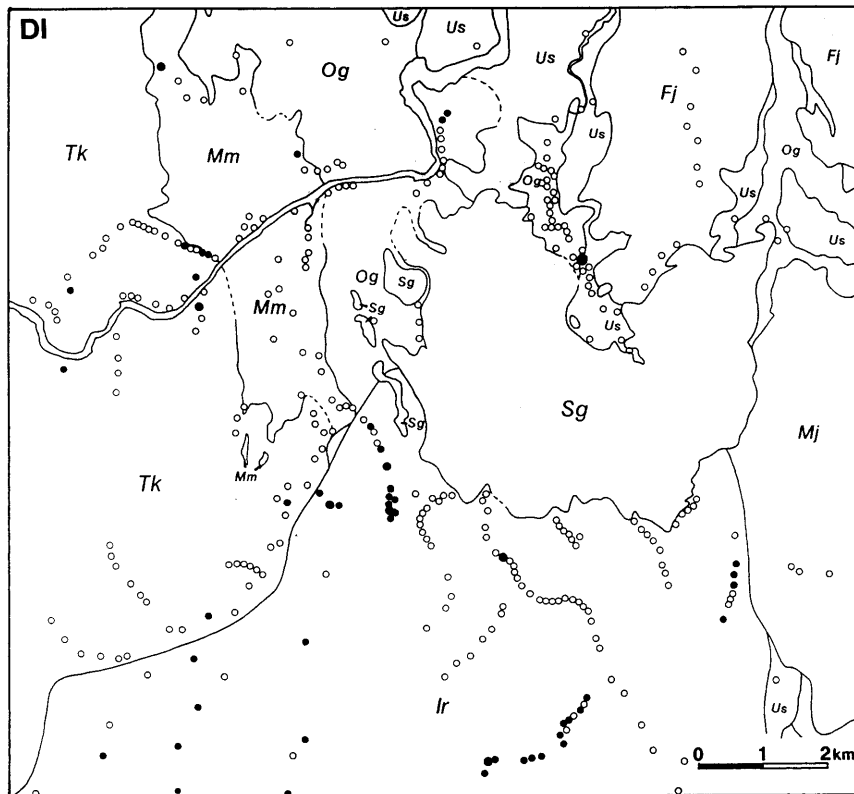
第9図 (h) モルデン沸石
Fig. 9 (h) Mordenite



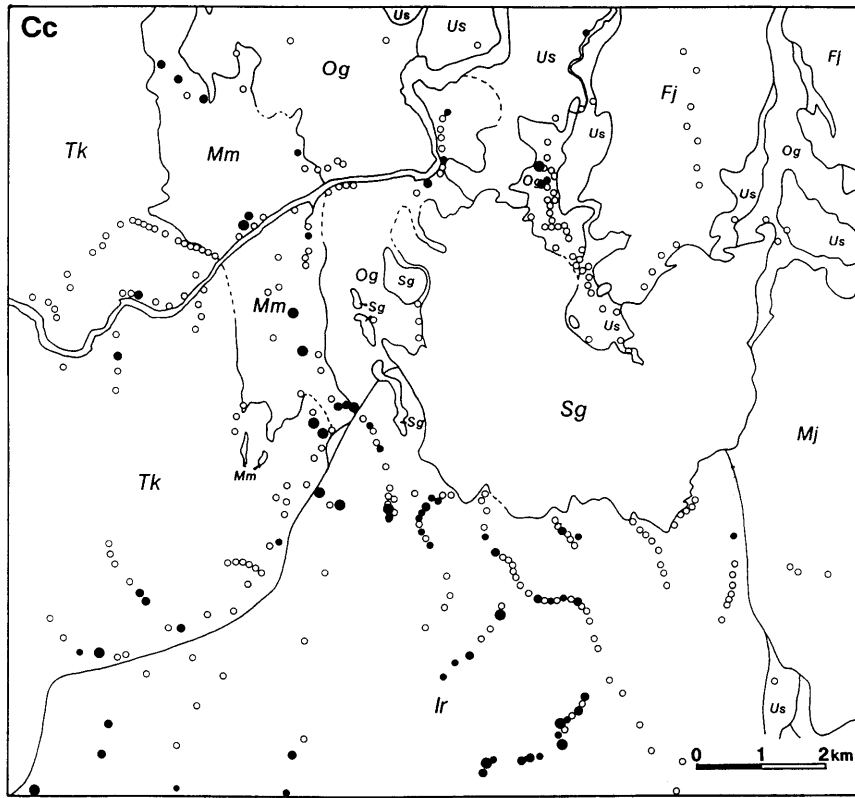
第9図 (i) 斜プチロル沸石
Fig. 9 (i) clinoptilolite



第9図 (j) 濁沸石
Fig. 9 (j) laumontite

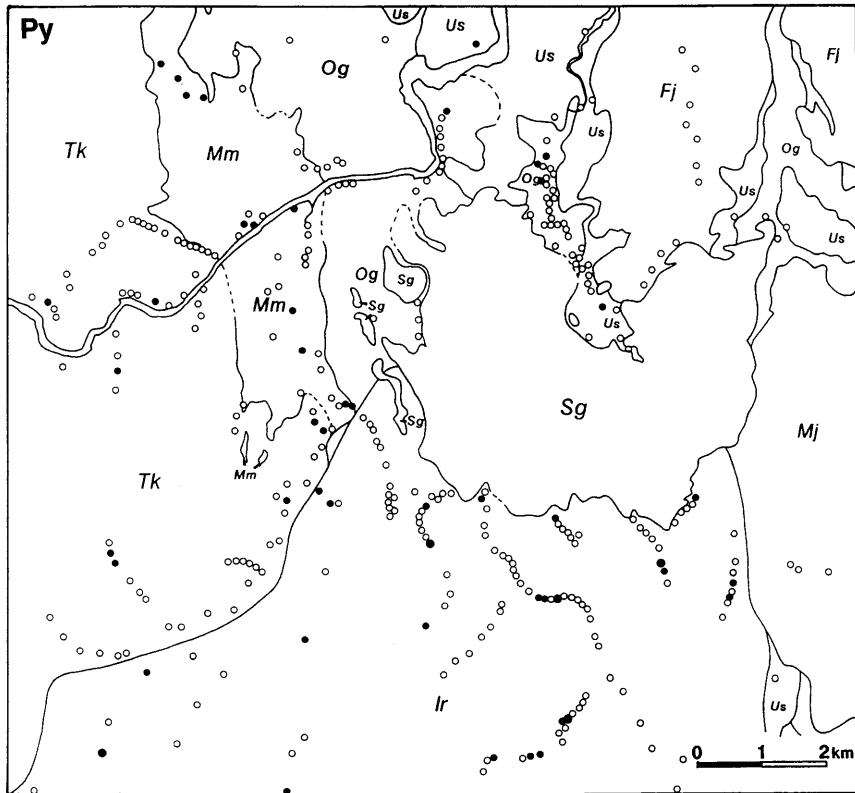


第9図 (k) 苦灰石
Fig. 9 (k) dolomite



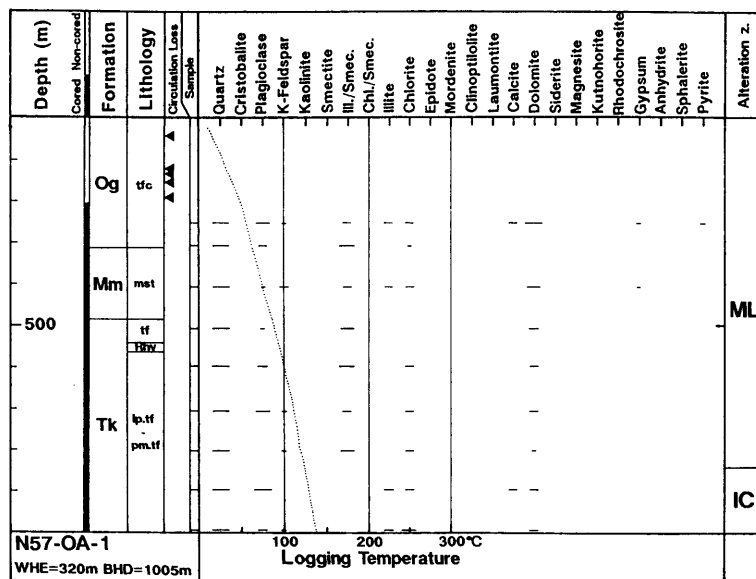
第9図 (l) 方解石

Fig. 9 (l) calcite



第9図 (m) 黄鉄鉱

Fig. 9 (m) pyrite



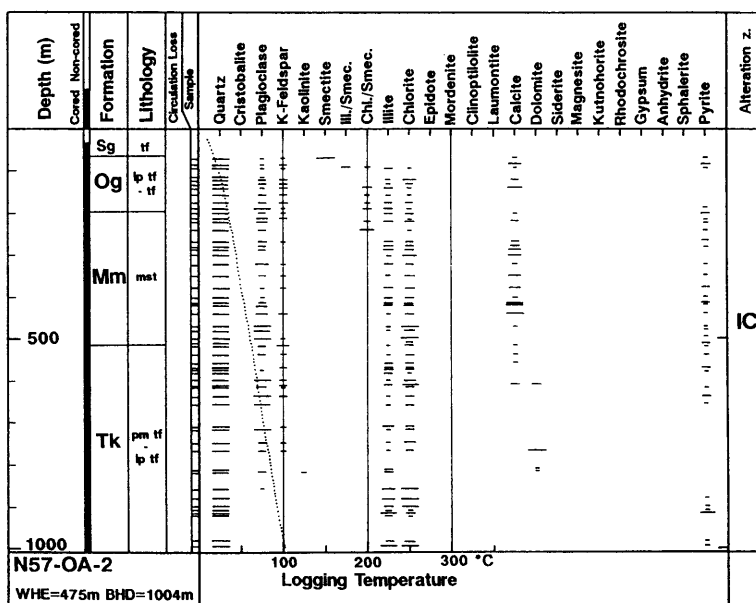
第10図 代表的な坑井の変質鉱物分布。

tf : 凝灰岩, lp.tf : 火山レキ凝灰岩, pm.tf : 軽石凝灰岩, tf.br : 凝灰角レキ岩, vol.br : 火山角レキ岩, tfc : (カッティングス試料における) 凝灰質岩, Rhy : 流紋岩, Dac : 石英安山岩, And : 安山岩, sst : 砂岩・シルト岩, mst : 泥岩, cgl : レキ岩, brec : 角礫岩. その他の記号は第2図と同じ. 温度データは Seki (1991), 岩相は関・安達 (1997) による.

(a) N57-OA1

Fig. 10 Distribution of alteration minerals in representative wells. tf : tuff, lp.tf : lapilli tuff, pm.tf : pumice tuff, tf. br : tuff breccia, vol.br : volcanic breccia, tfc : tuffaceous rock (for cuttings), Rhy : rhyolite, Dac : dacite, And : andesite, sst : sandstone or siltstone, mst : mudstone, cgl : conglomerate, brec : breccia. The other abbreviations are the same as in Fig. 2. Temperature and lithology data are from Seki (1991) and Seki and Adachi (1997), respectively.

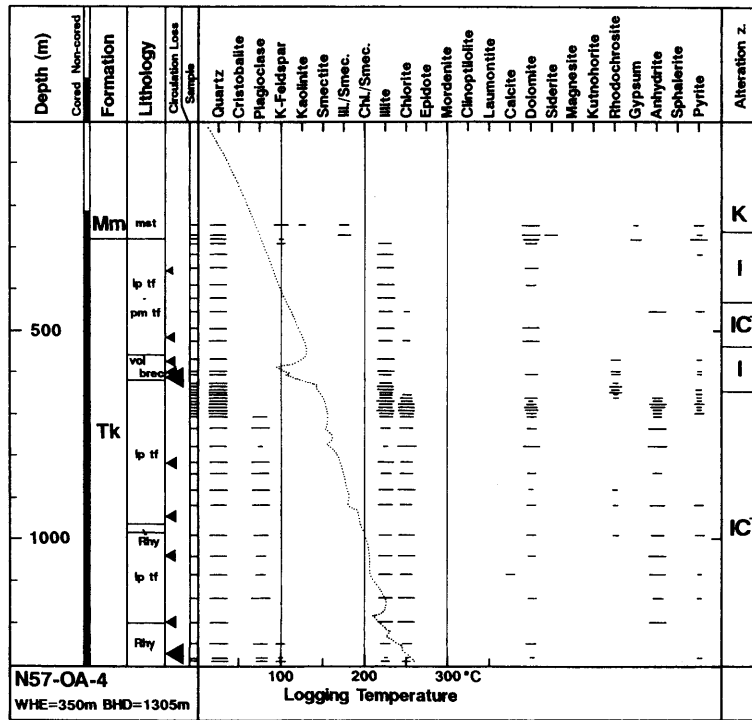
(a) N57-OA1



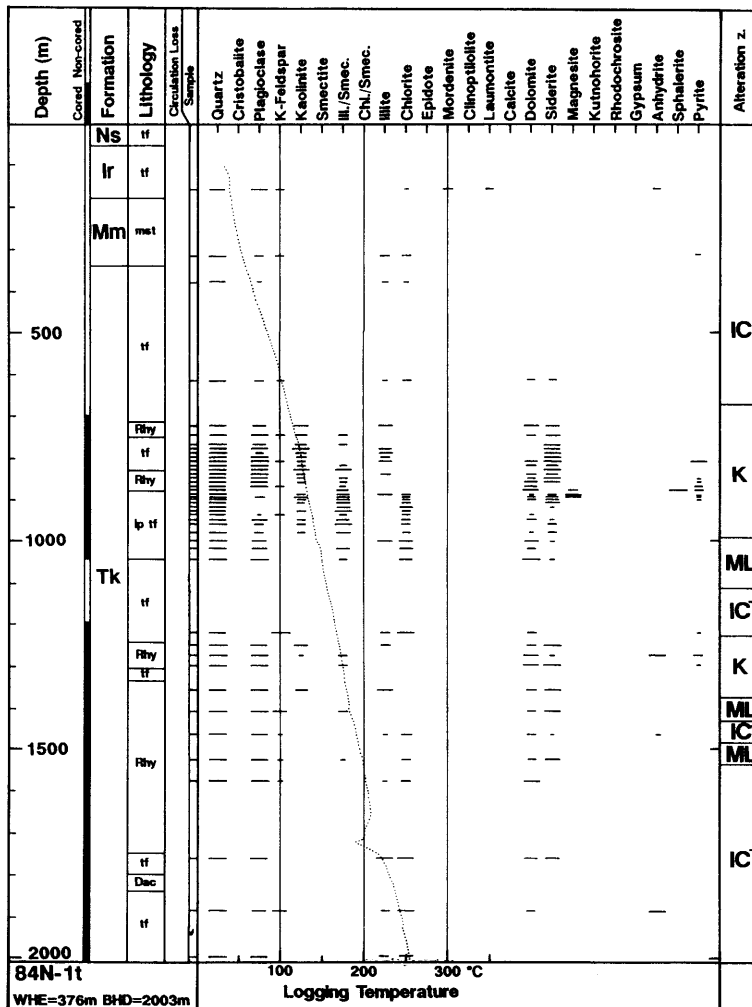
第10図 (b) N57-OA2

Fig. 10 (b) N57-OA2

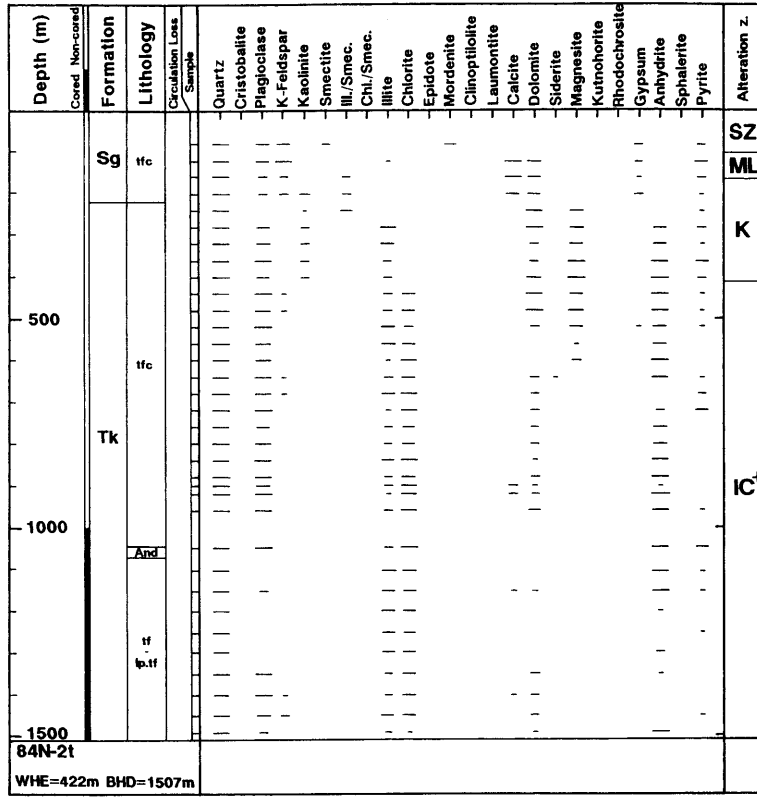
奥会津地熱地域・中新統滝沢川層にみられる変質（関）



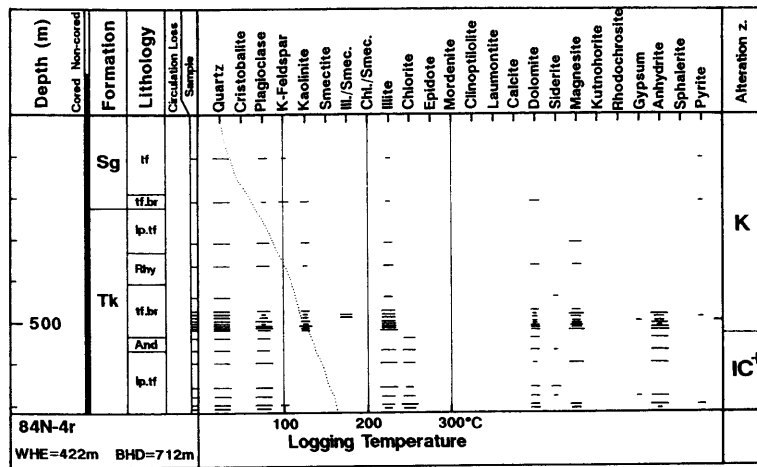
第10図 (c) N57-OA4
Fig. 10 (c) N57-OA4



第10図 (d) 84N-1t
Fig. 10 (d) 84N-1t

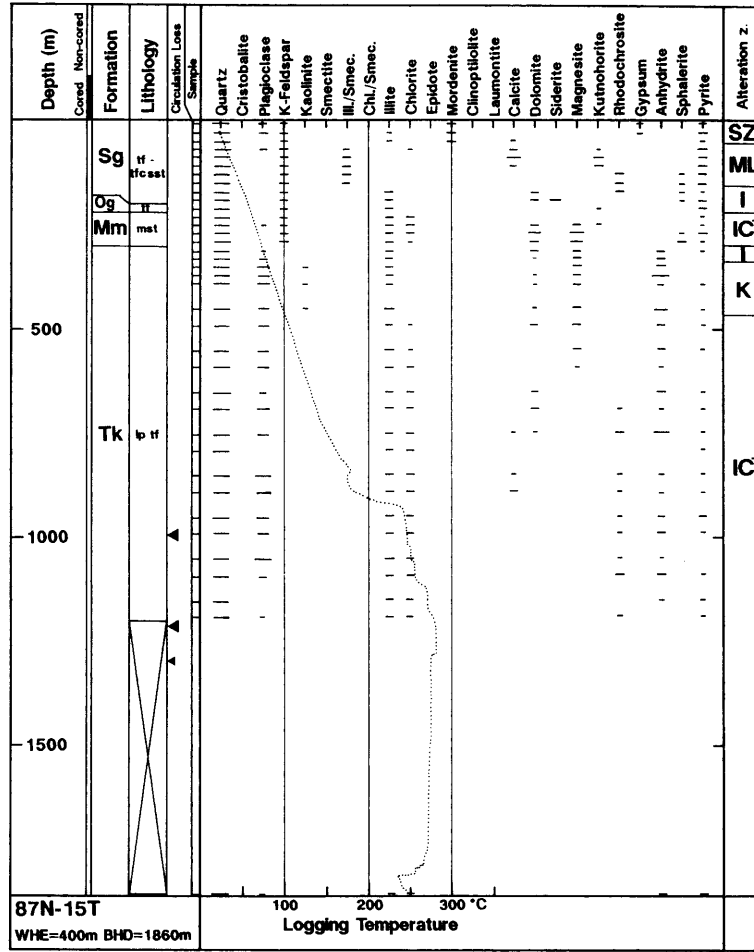


第10図 (e) 84N-2t
Fig. 10 (e) 84N-2t

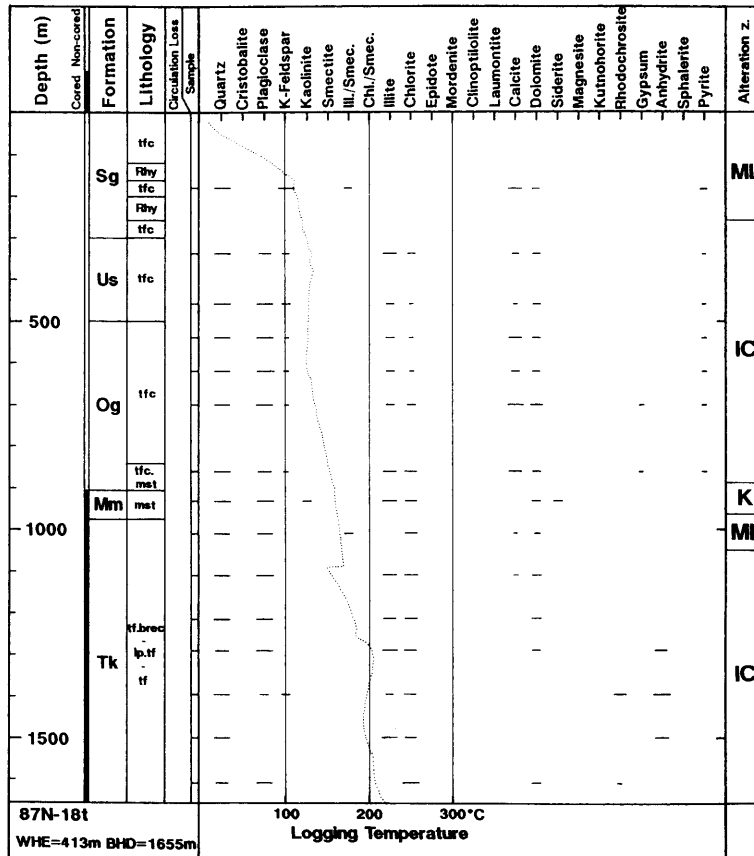


第10図 (f) 84N-4r
Fig. 10 (f) 84N-4r

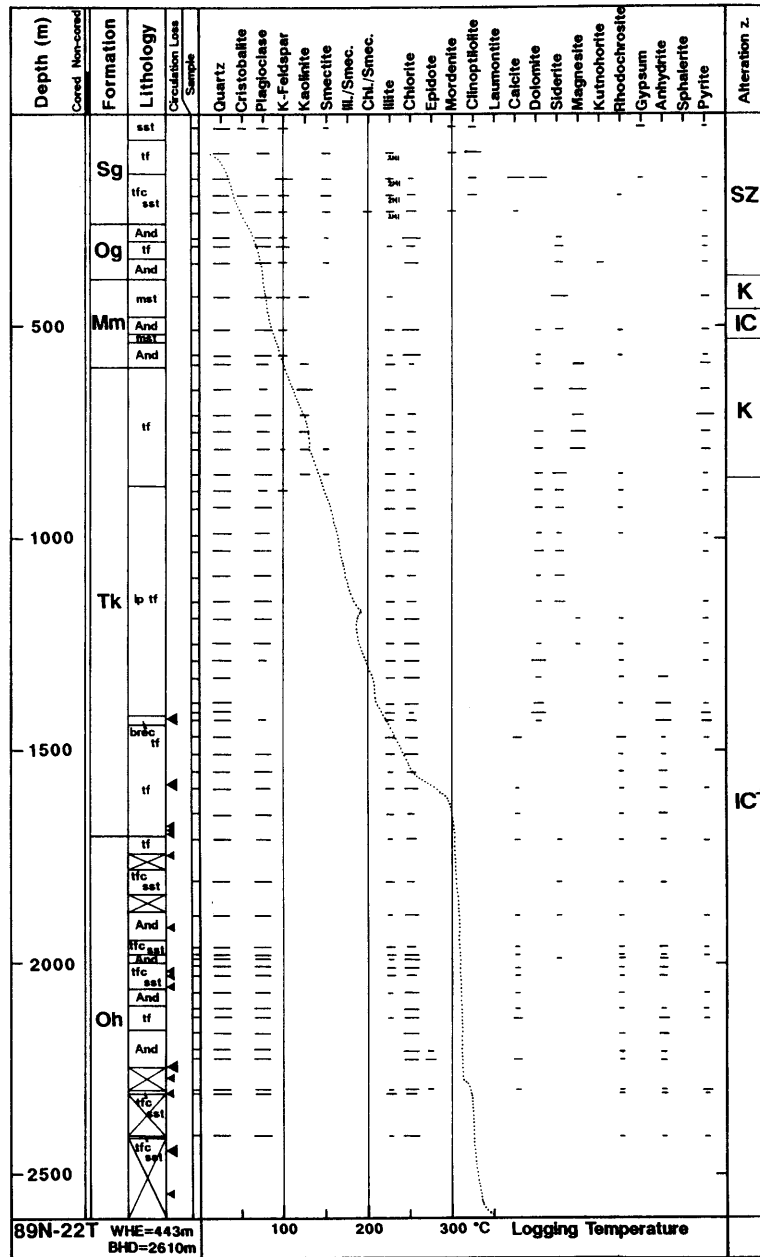
奥会津地熱地域・中新統滝沢川層にみられる変質 (関)



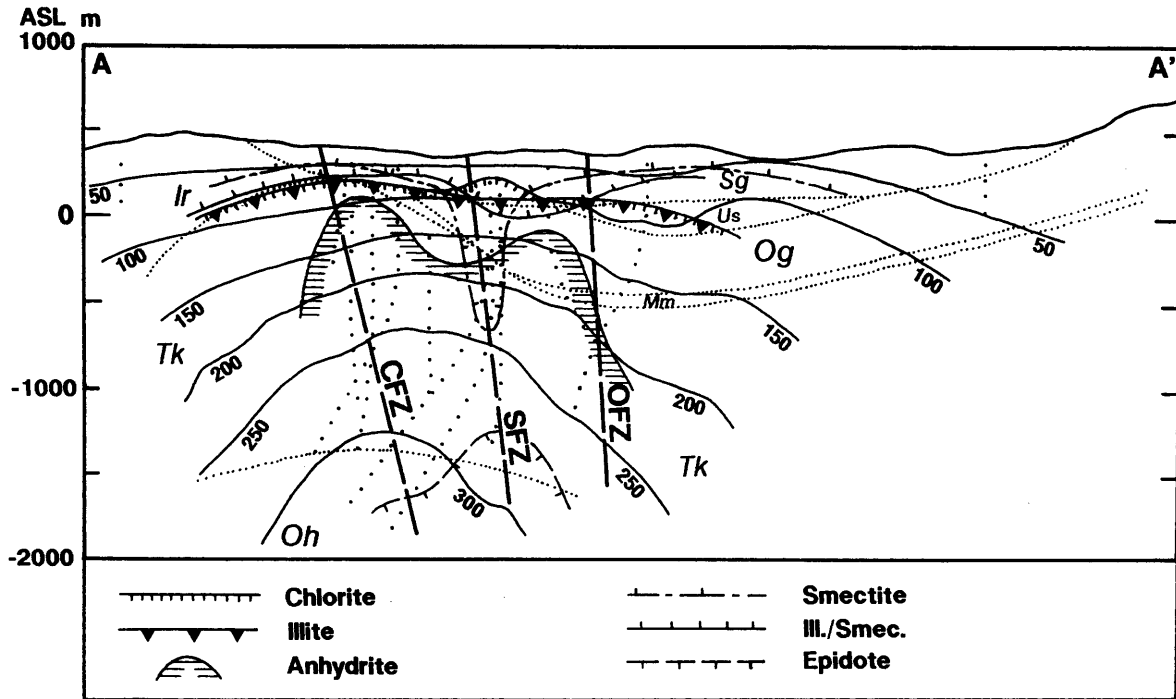
第10図 (g) 87N-15T
Fig. 10 (g) 87N-15T



第10図 (h) 87N-18t
Fig. 10 (h) 87N-18t

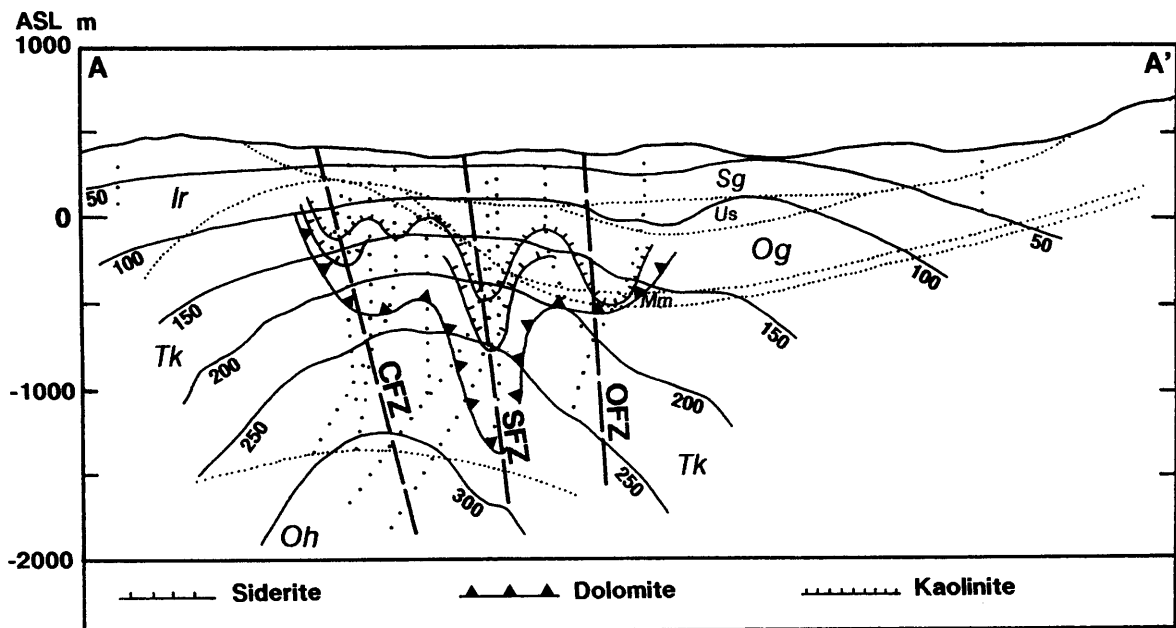


第10图 (i) 89N-22T
Fig. 10 (i) 89N-22T

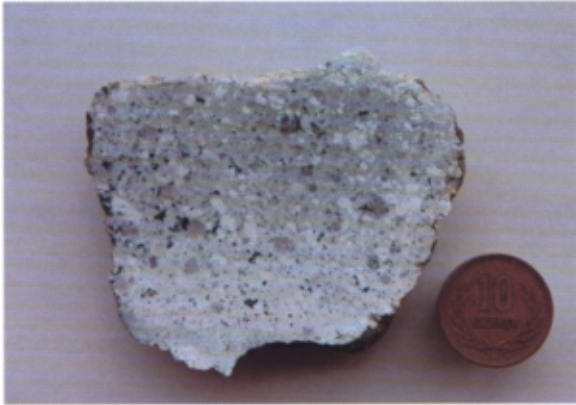


第11図 変質鉱物分布断面。
記号は第2, 5図と同じ。
(a) 粘土鉱物および硬石膏

Fig. 11 Distribution of alteration minerals along the section A-A' and B-B'.
Abbreviations are the same as in Fig. 2 and 5.
(a) Clay minerals and anhydrite



第11図 (b) 炭酸塩鉱物およびカオリナイト
Fig. 11 (b) Carbonate minerals and kaolinite



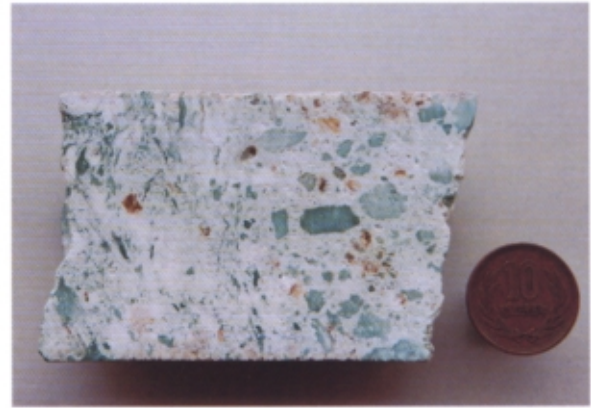
第12図 (a) 資料番号：95071209, 採取地：三島町本村.
地熱系外のイライト・緑泥石帯の流紋岩.
Fig. 12 (a) Regionally altered rhyolite from illite chlorite zone, Honson, Mishima town (#95071209).



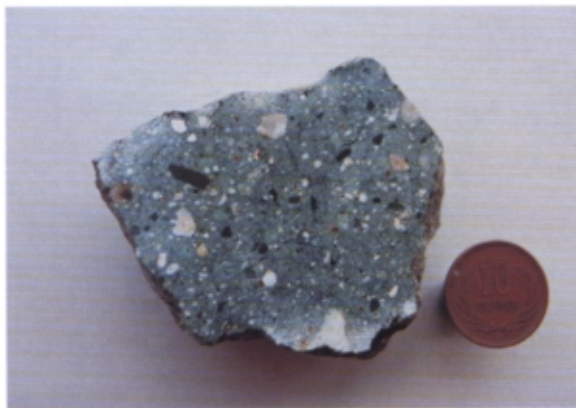
第12図 (d) 試料番号：OA1-998, 採取地：坑井N57-OA-1, 深度998.0m. 地熱系内(地層温度約130°C)のイライト・緑泥石帯の流紋岩質火山礫凝灰岩.
Fig. 12 (d) Altered rhyolitic lapilli tuff from illite chlorite zone in present geothermal system (130°C logged), GL -998.0m in well N57-OA1.



第12図 (b) 試料番号：95071211, 採取地：三島町浅岐.
地熱系外のイライト・緑泥石帯の流紋岩質火山礫凝灰岩.
同質岩片を多数含み, 細粒部は強く緑泥石化する.
Fig. 12 (b) Regionally altered rhyolitic lapilli tuff from illite chlorite zone, Asamata, Mishima town (#95071211).



第12図 (e) 試料番号：OA4-847, 採取地：坑井N57-OA-4, 深度847.7m. 地熱系内(地層温度約170°C)のイライト・緑泥石+帯の流紋岩質火山礫凝灰岩.
Fig. 12 (e) Altered rhyolitic lapilli tuff from illite chlorite+ zone in present geothermal system (170°C logged), GL -847.7m in well N57-OA4.



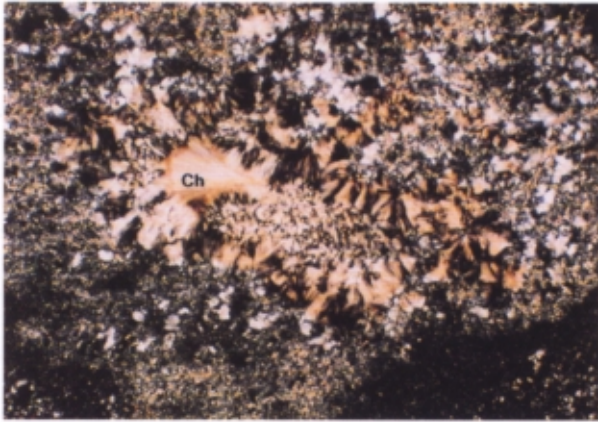
第12図 (c) 試料番号：96112006, 採取地：三島町割沢.
地熱系外のイライト・緑泥石帯の流紋岩質火山礫凝灰岩.
同質礫のほかに暗灰色泥岩片を含む.
Fig. 12 (c) Regionally altered rhyolitic lapilli tuff from illite chlorite zone, Warusawa, Mishima town (#96112006).



第12図 (f) 試料番号：4r-650, 採取地：坑井84N-4r, 深度650.0m. 地熱系内(地層温度約150°C)のイライト・緑泥石+帯の流紋岩質軽石凝灰岩.
Fig. 12 (f) Altered rhyolitic pumice tuff from illite chlorite+ zone in present geothermal system (150°C logged), GL -650.0m in well 84N-4r.

第12図 代表的な滝沢川層の写真.

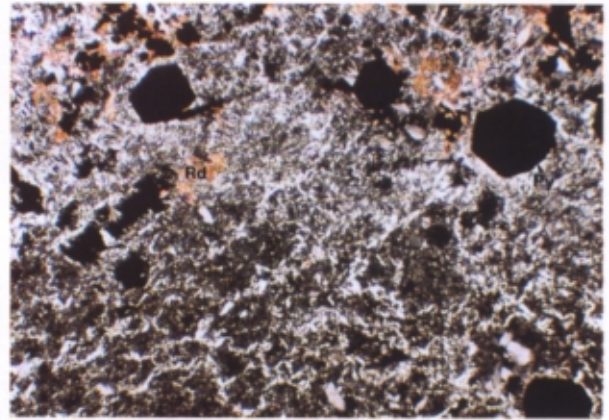
Fig. 12 Slab photographs of typical altered bedrocks of the Takizawa-gawa Formation.



第13図 (a) 試料番号：90121302, 採取地：三島町高清水。
イライト・緑泥石変質を受けた流紋岩質細粒凝灰岩。
Ch：緑泥石。長辺の長さは約2mm。

Fig. 13 (a) Regionally altered rhyolitic fine tuff from illite-chlorite zone, Takashimizu, Mishima town (#90121302).

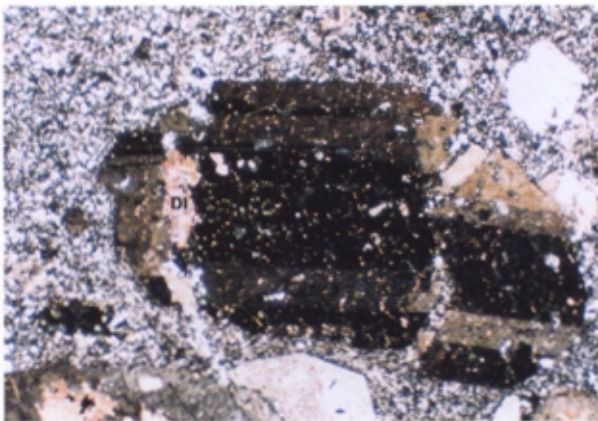
Ch : Chlorite. 2 mm width. Crossed polar.



第13図 (c) 試料番号：OA4-635, 採取地：坑井N57-OA-4, 深度635.0m。イライト変質を受けた流紋岩質火山礫凝灰岩。

Rd：菱マンガン鉱, Py：黄鉄鉱。長辺の長さは約2mm。

Fig. 13 (c) Altered rhyolitic lapilli tuff from illite zone in present geothermal system (140°C logged), GL-635.0 m in well N57-OA4. Rd : rhodochrosite and Py : pyrite. 2 mm width. Crossed polar.

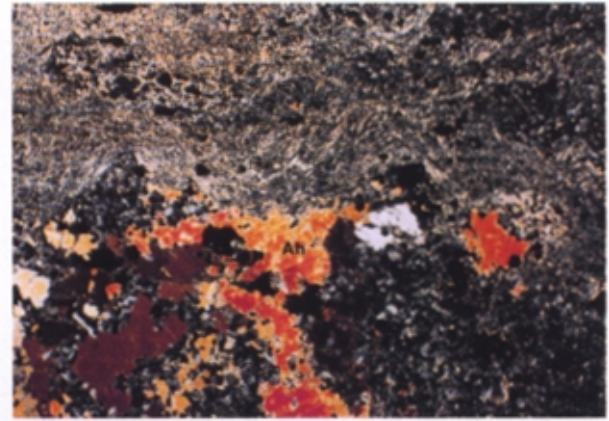


第13図 (b) 試料番号：90121302, 採取地：三島町高清水。イライト・緑泥石変質を受けた流紋岩。基質では広範囲にイライト、緑泥石による置換が、斜長石の一部では炭酸塩鉱物（苦灰石）の生成が認められる。

Dl：苦灰石。長辺の長さは約2mm。

Fig. 13 (b) Regionally altered rhyolite from illite-chlorite zone, Takashimizu, Mishima town (#90121302).

Dl : Dolomite. 2 mm width. Crossed polar.



第13図 (d) 試料番号：2t-1106, 採取地：坑井84N-2t, 深度1106.0m。イライト・緑泥石+変質を受けた流紋岩質凝灰岩。

Ah：硬石膏。長辺の長さは約2mm。

Fig. 13 (d) Altered rhyolitic tuff from illite-chlorite+ zone in present geothermal system, GL-1106.0m in well 84N-2t.

Ah : Anhydrite. 2 mm width. Crossed polar.

第13図 代表的な変質岩の顕微鏡写真。

Fig. 13 Photomicrographs of typical altered bedrocks.

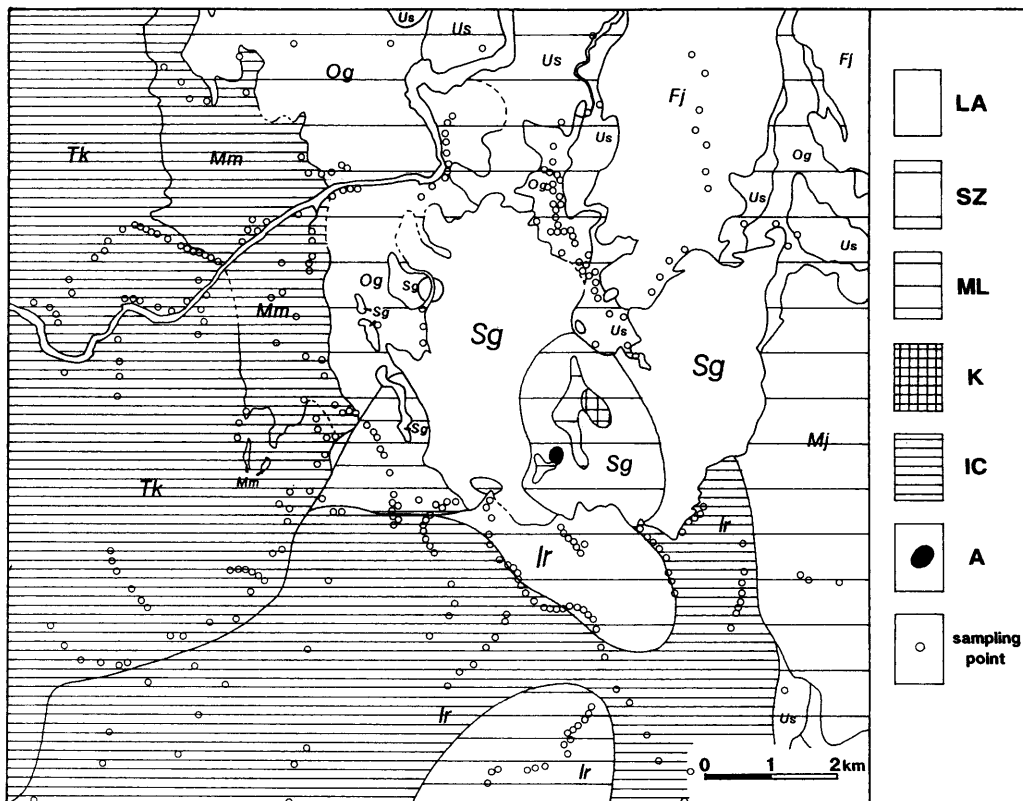
Hydrothermal mineral	Alteration zone							
	LA	SZ	ML	IC	IC+	I	K	A
Quartz								
Cristobalite	----	----					----	----
Plagioclase								
K-feldspar								
Kaolinite								
Alunite								
Smectite	----							----
Chl./Smec.								
Illite/Smec.								
Illite								
Chlorite								
Mordenite	----							
Clinoptilolite	----							
Laumontite								
Wairakite								
Epidote								
Sulfur								
Orpiment								
Sphalerite								
Pyrite								
Anhydrite								
Gypsum								
Calcite								
Dolomite								
Siderite								
Magnesite								
Rhodocrosite								
Ankerite								
Kutnahorite								

第14図 変質鉱物組合せ.

LA : 弱変質帯, SZ : スメクタイト・沸石帯,
ML : 混合層粘土鉱物帯, IC : イライト・緑泥石帯,
IC+ : イライト・緑泥石+帯, I : イライト帯, K : カオリナイト帯, A : 明礬石帯.

Fig. 14 Mineral assemblages for alteration zones.

LA : least-altered zone, SZ : smectite-zeolite zone,
ML : mixed-layered clay mineral zone, IC : illite-chlorite zone, IC+ : illite-chlorite+ zone, I : illite zone, K : kaolinite zone, A : alunite zone.

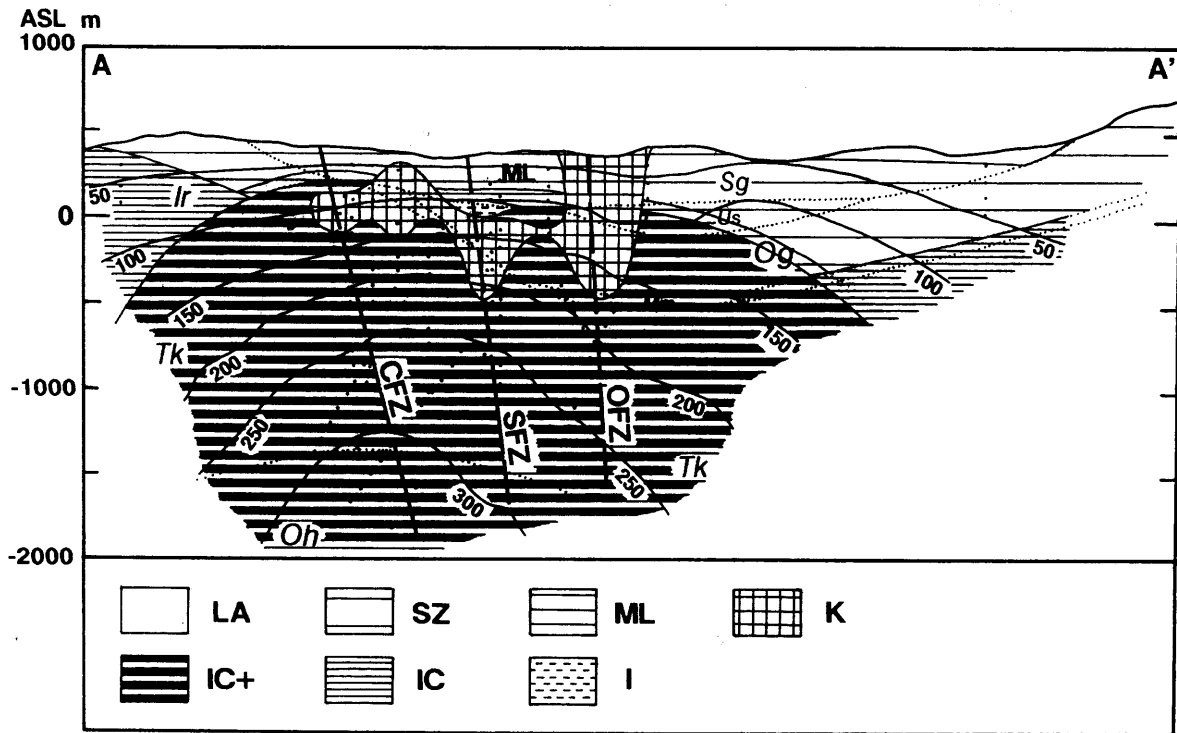


第15図 地表変質帯分布.

記号は第2, 14図と同じ.

Fig. 15 Distribution of alteration zones on surface.

Abbreviations are the same as in Figs. 2 and 14



第16図 変質帯分布断面.

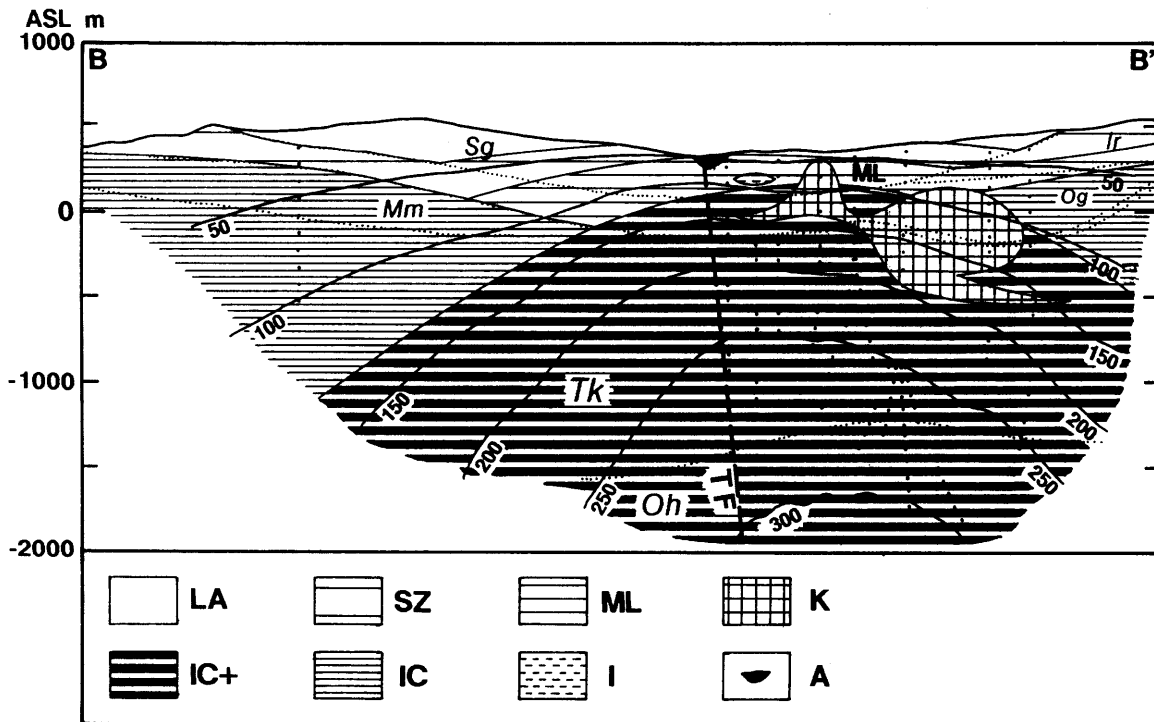
断面線は第5図と同じ。記号は第2, 3, 5, 14図と同じ。

(a) A-A'断面

Fig.16 Distribution of alteration zones in cross-sections.

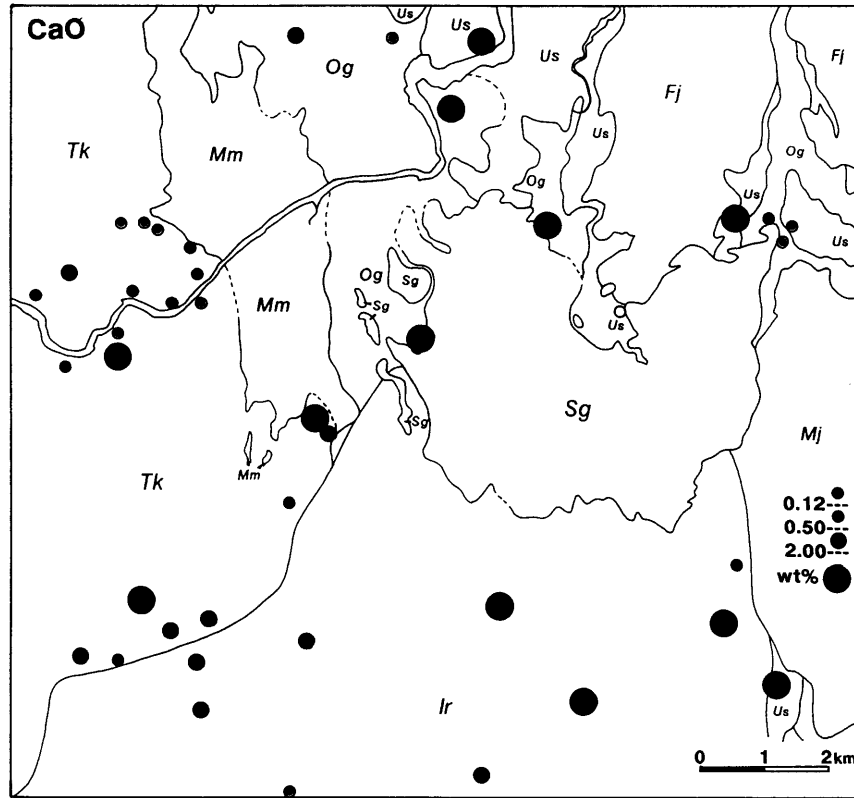
Abbreviations are the same as in Figs. 2, 3, 5 and 14.

(a) Section A-A'



第16図 (b) B-B'断面

Fig.16 (b) Section B-B'

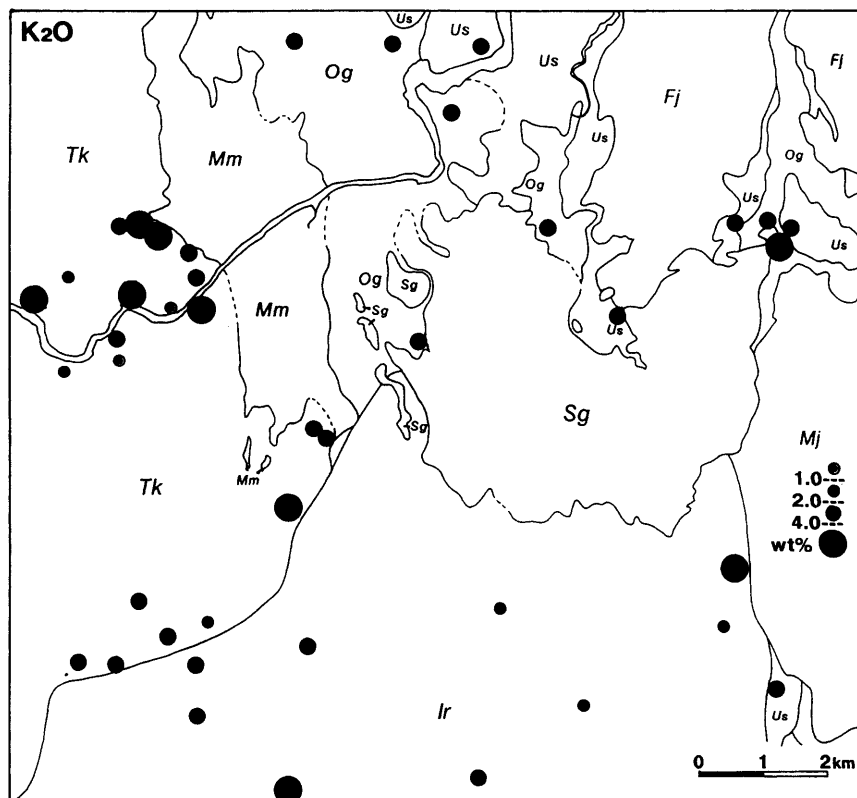


第17図 主な変質指標成分の地表における濃度分布. 記号は第2図と同じ.

(a) CaO

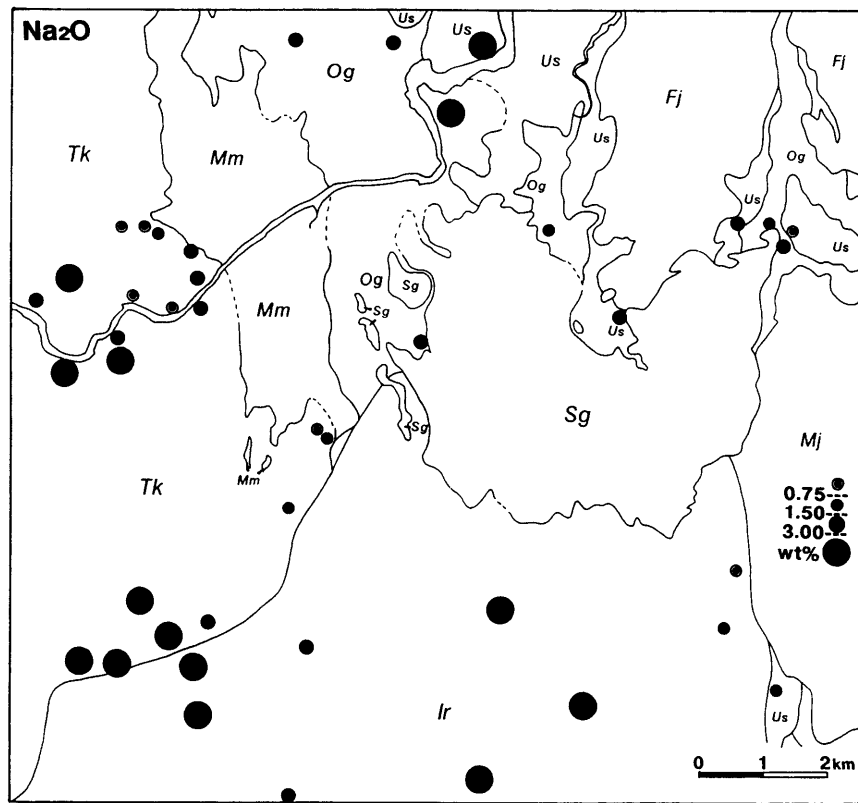
Fig. 17 Concentration distribution of key components. Abbreviations are the same as in Fig. 2.

(a) CaO

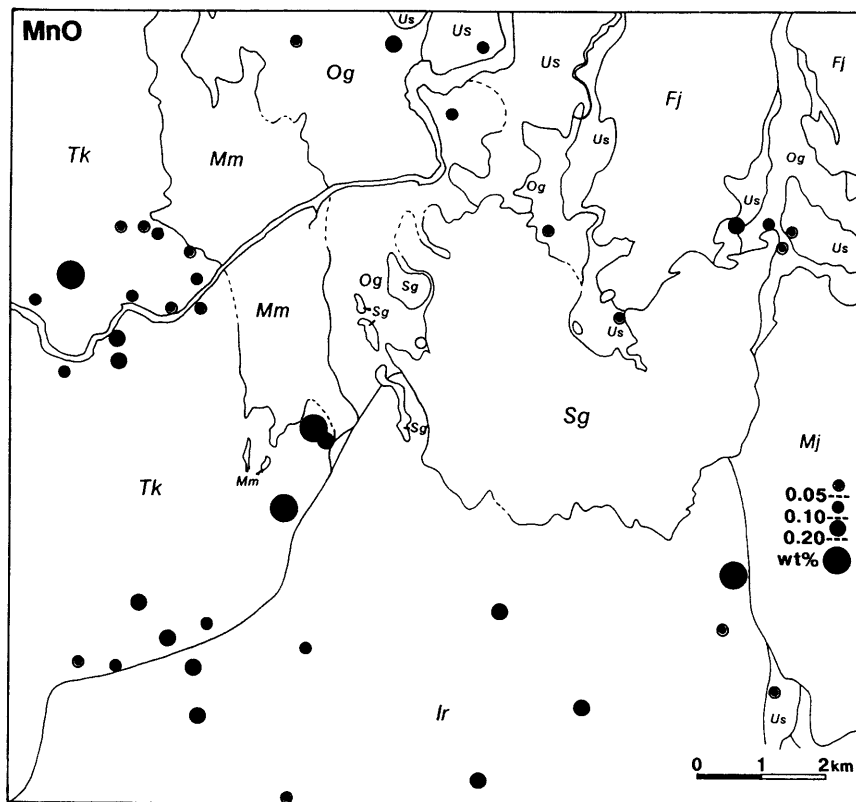


第17図 (b) K₂O

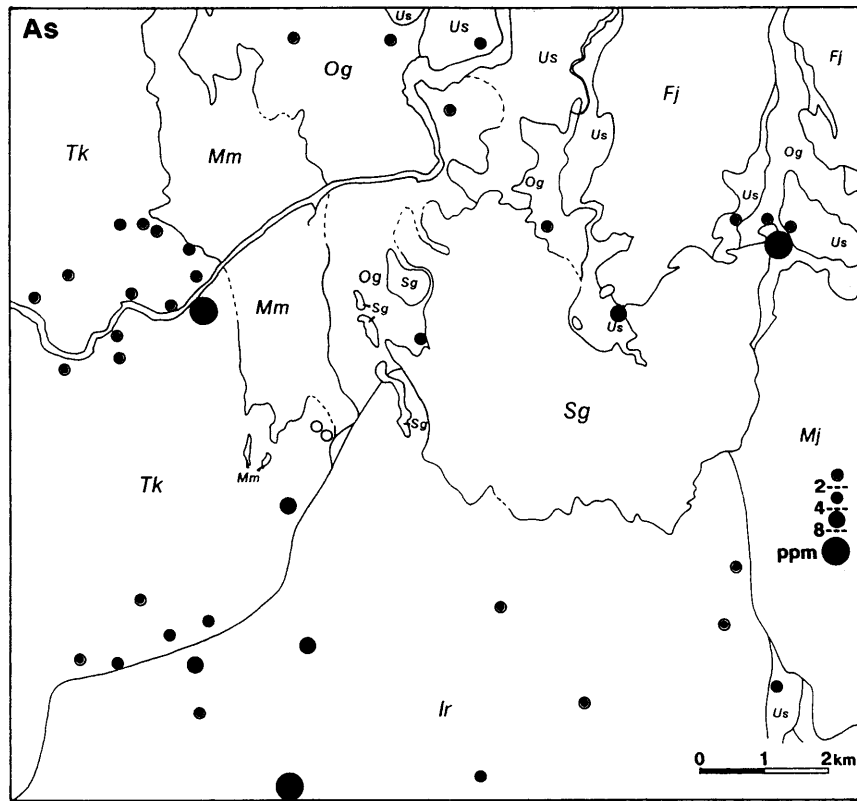
Fig. 17 (b) K₂O



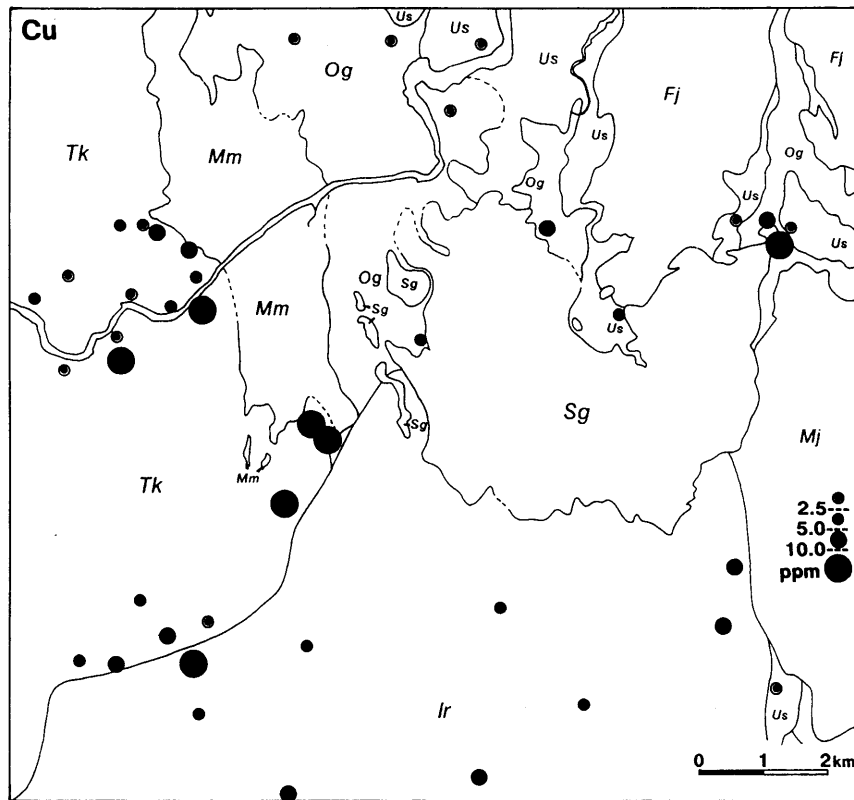
第17図 (c) Na_2O
Fig. 17 (c) Na_2O



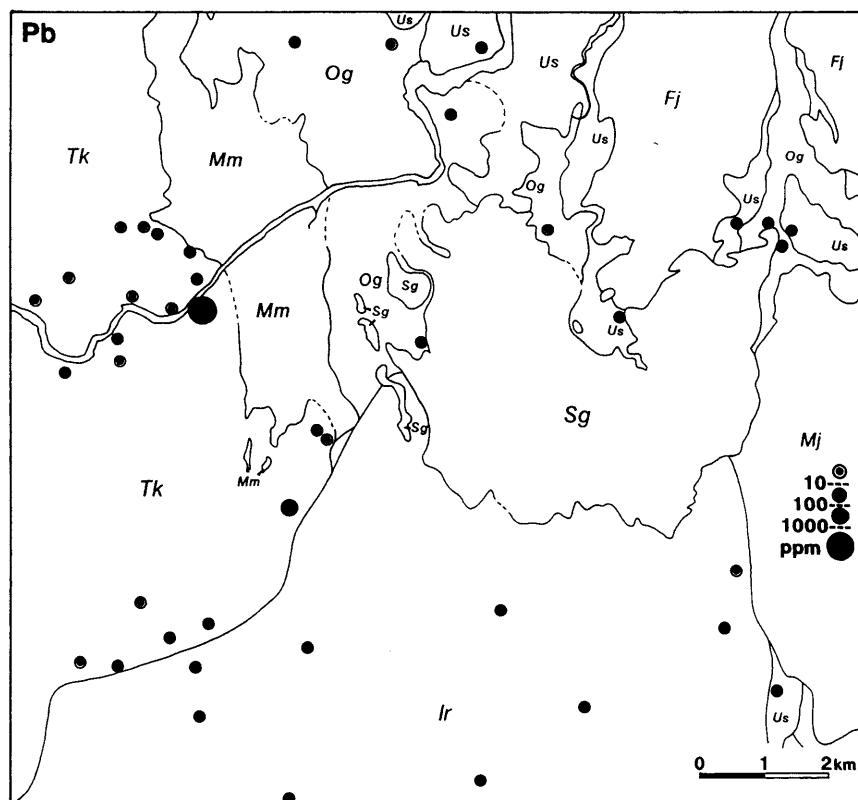
第17図 (d) MnO
Fig. 17 (d) MnO



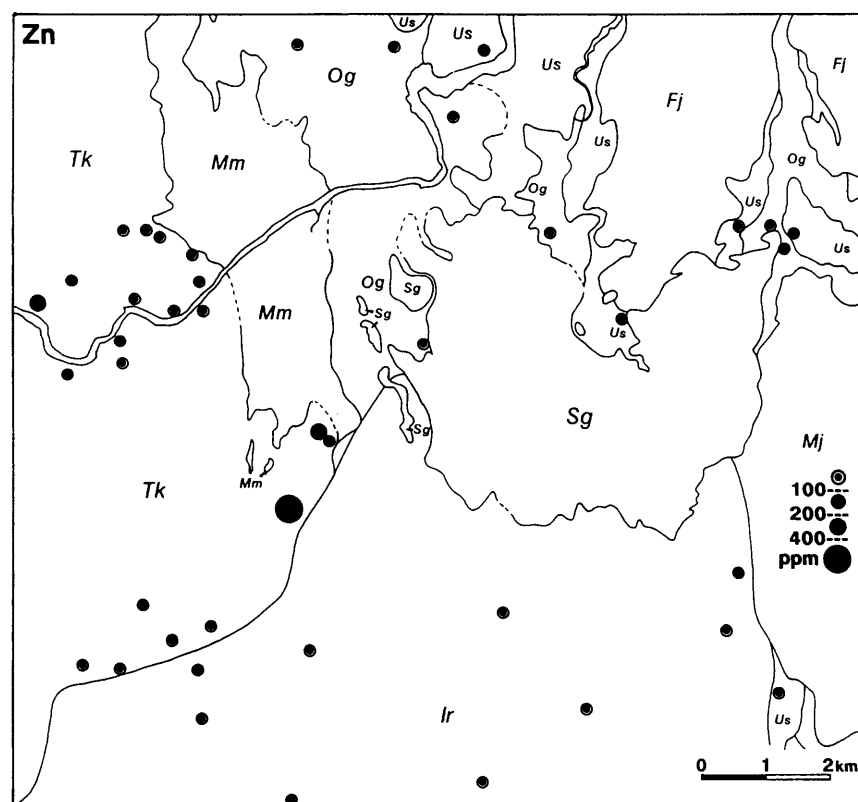
第17図 (e) As
Fig. 17 (e) As



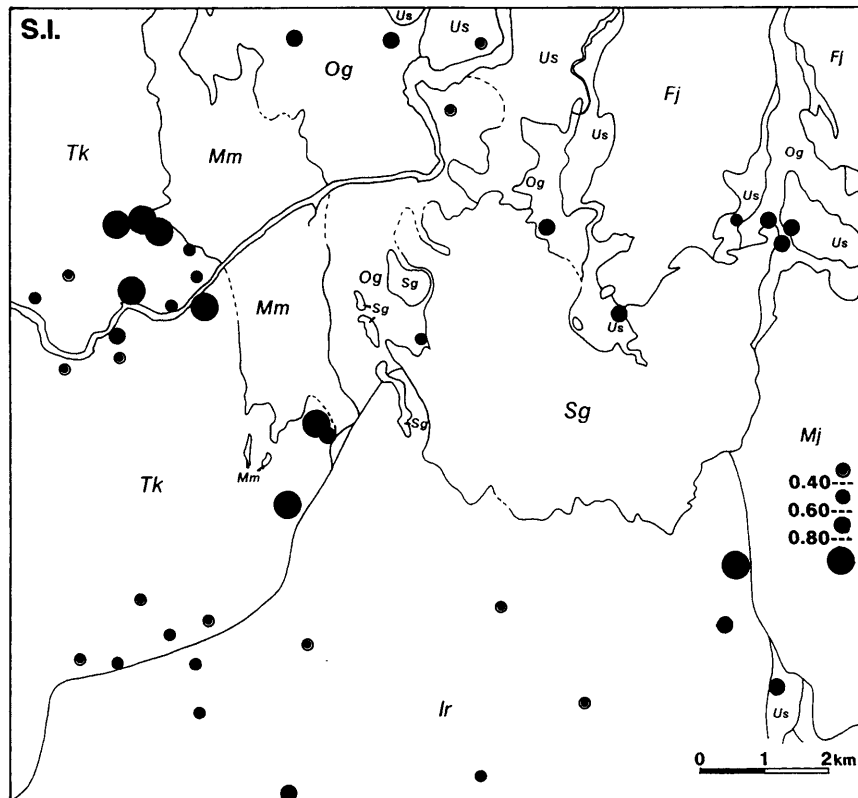
第17図 (f) Cu
Fig. 17 (f) Cu



第17図 (g) Pb
Fig. 17 (g) Pb



第17図 (h) Zn
Fig. 17 (h) Zn

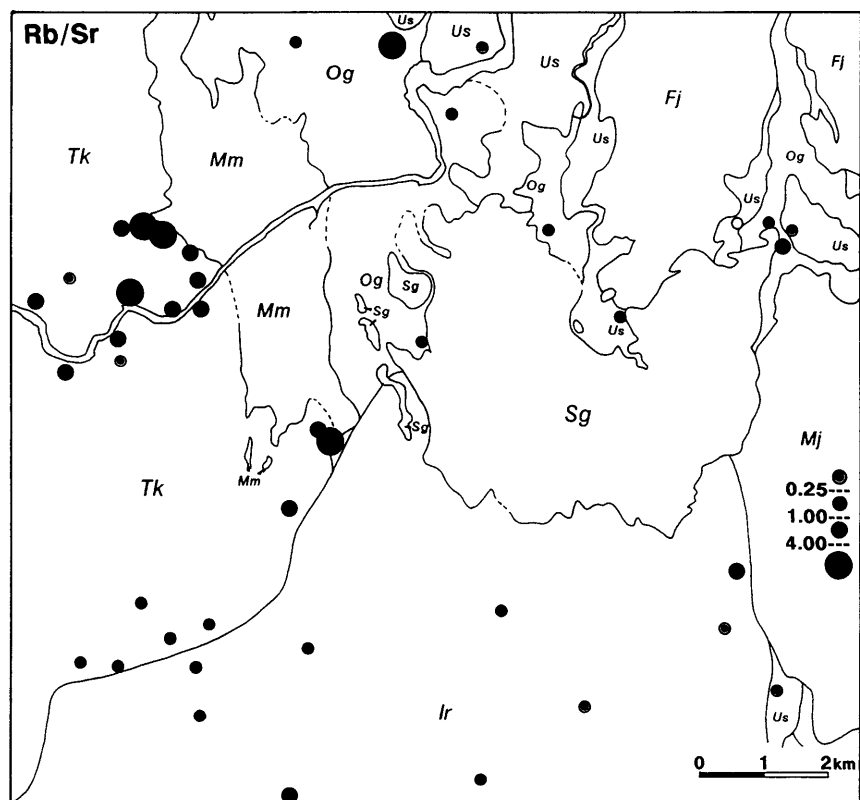


第18図 主な変質指標値の地表における分布.

(a) セリサイト化指数 (S. I.)

Fig. 18 Surface distribution of major alteration indices.

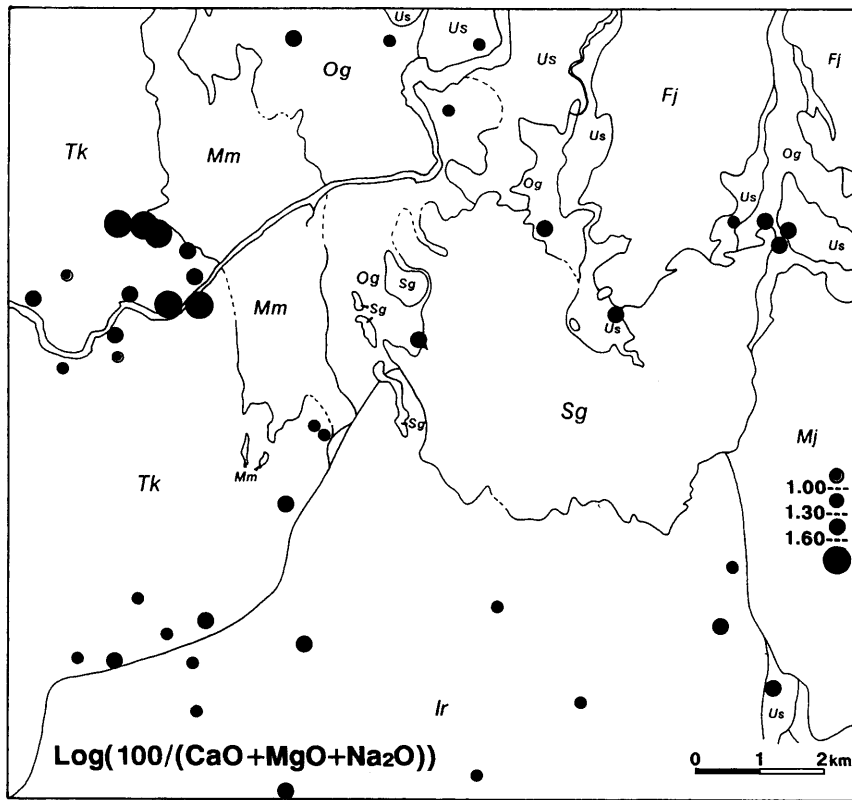
(a) Rb/Sr



第18図 (b) Rb/Sr

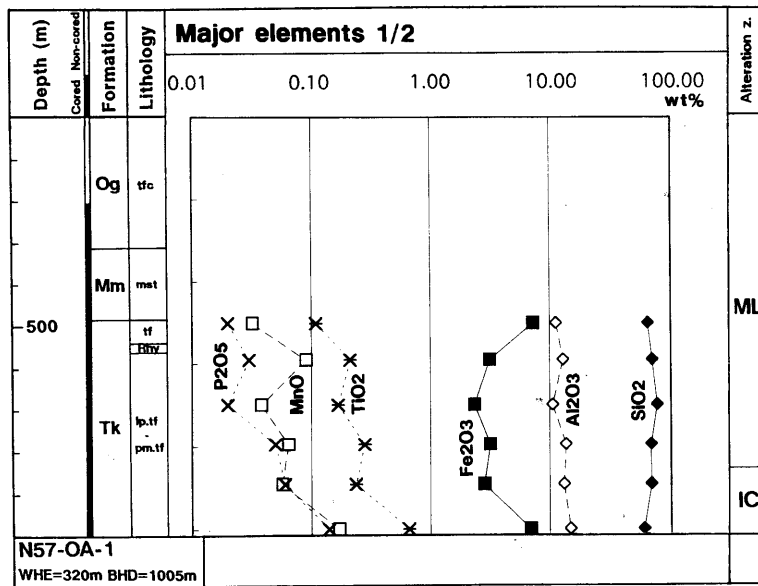
Fig. 18 (b) Rb/Sr

奥会津地熱地域・中新統滝沢川層にみられる変質（関）



第18図 (c) $\text{Log}(100/(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}))$

Fig. 18 (c) $\text{Log}(100/(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}))$

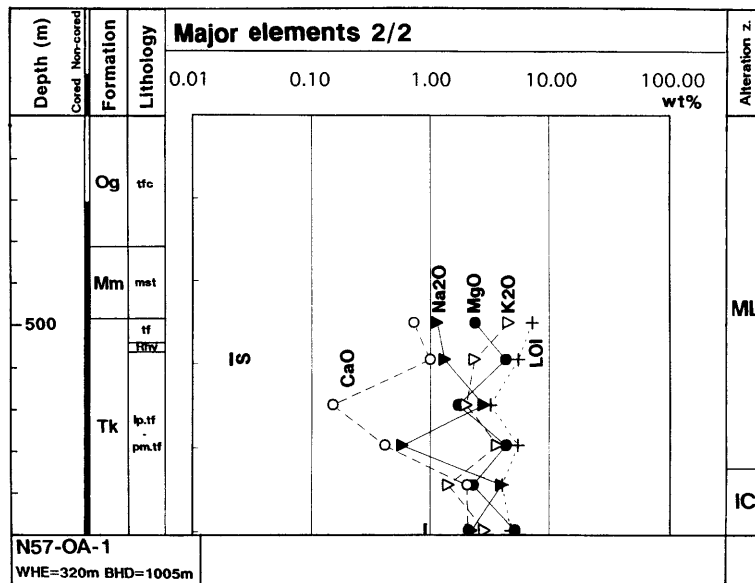


第19図 坑井における元素濃度分布.

(a) N57-OA-1, 主成分 (1)

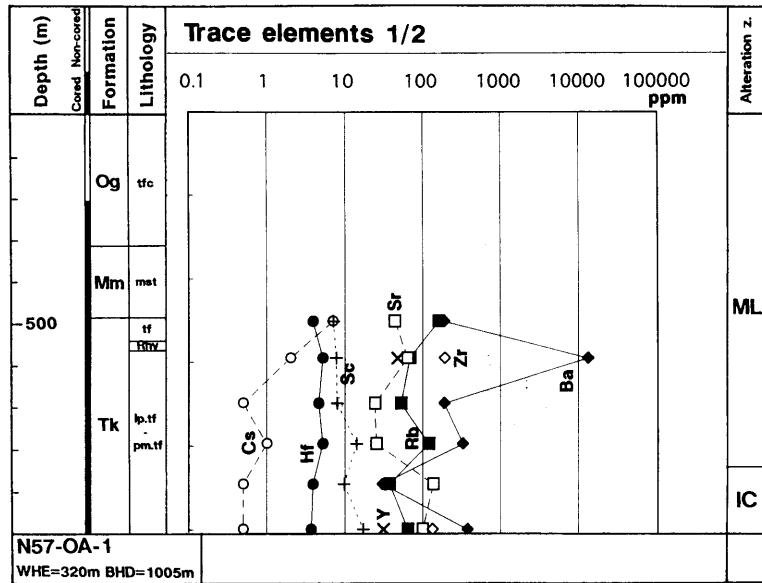
Fig. 19 Concentration distribution of chemical components for each well.

(a) N57-OA-1, Major elements (1)

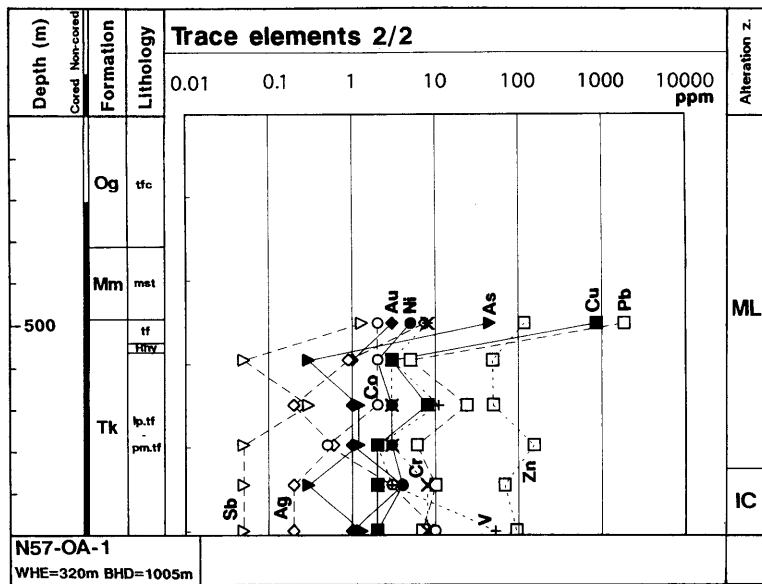


第19図 (b) N57-OA-1, 主成分 (2)

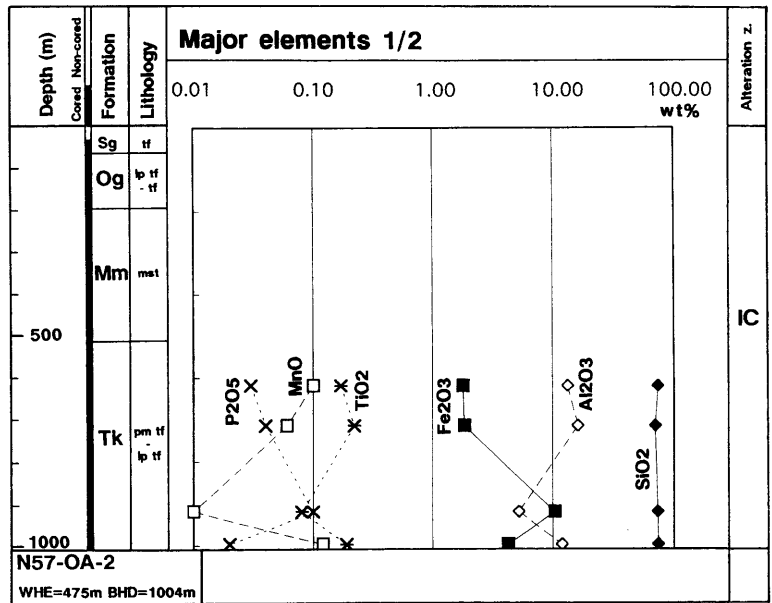
Fig. 19 (b) N57-OA-1, Major elements (2)



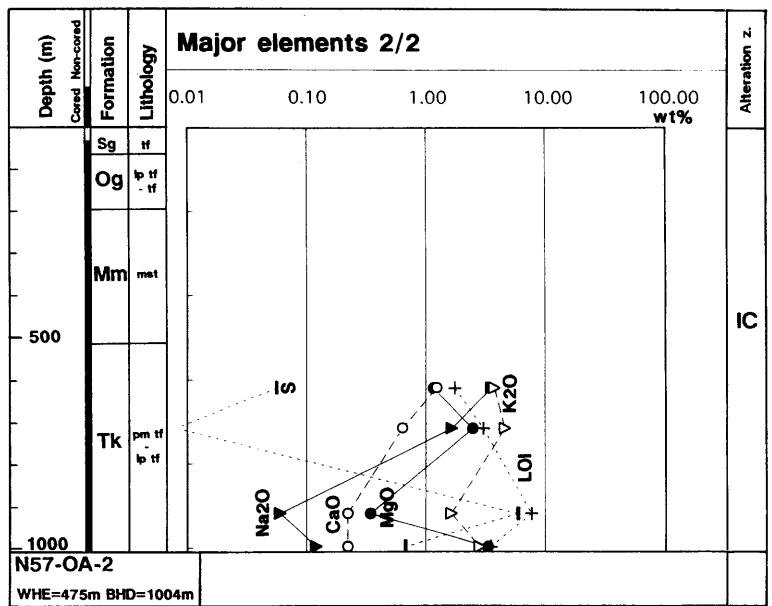
第19図 (c) N57-OA-1, 微量元素 (1)
 Fig. 19 (c) N57-OA-1, Trace elements (1)



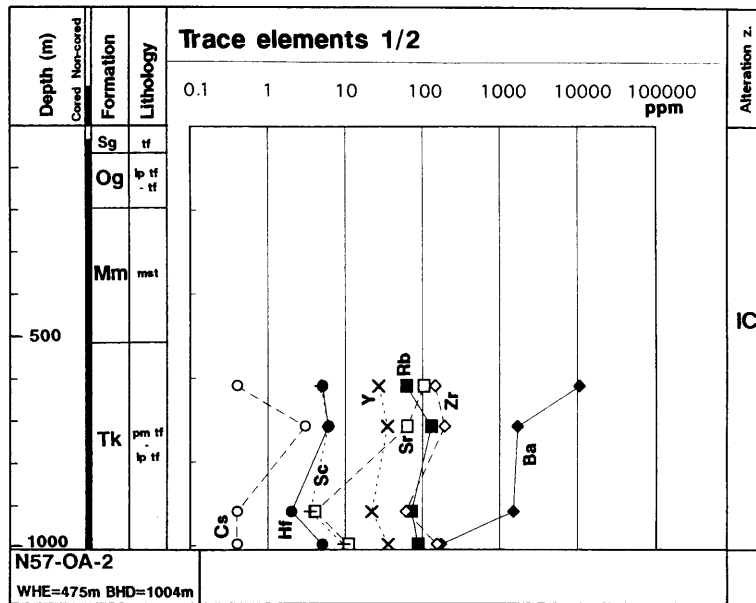
第19図 (d) N57-OA-1, 微量元素 (2)
 Fig. 19 (d) N57-OA-1, Trace elements (2)



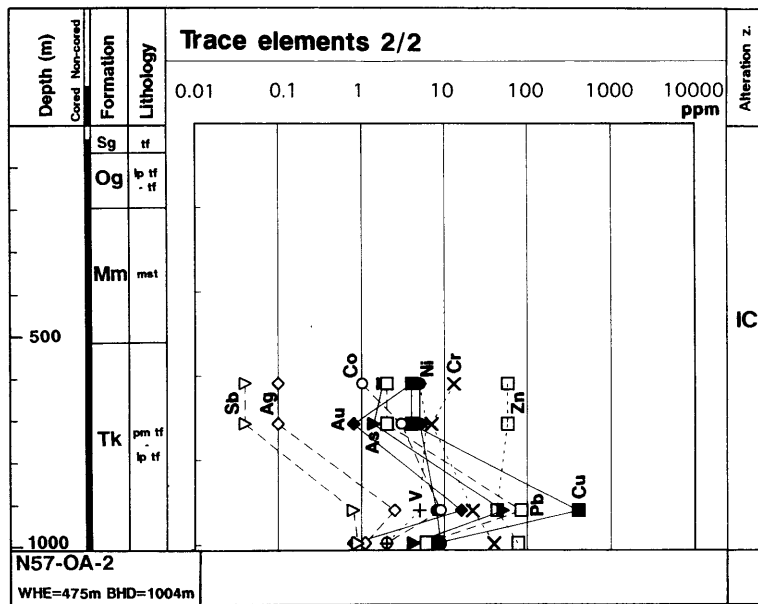
第19図 (e) N57-OA-2, 主成分 (1)
Fig. 19 (e) N57-OA-2, Major elements (1)



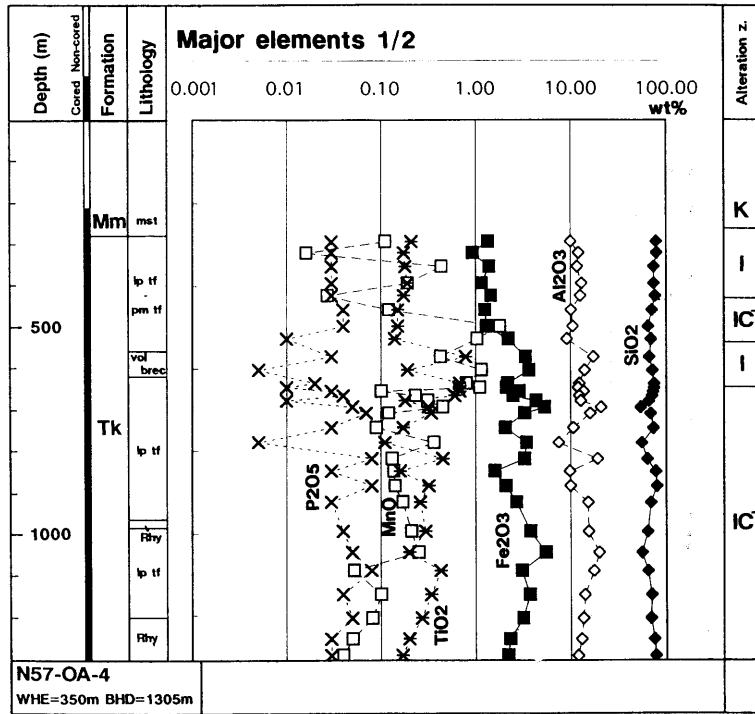
第19図 (f) N57-OA-2, 主成分 (2)
Fig. 19 (f) N57-OA-2, Major elements (2)



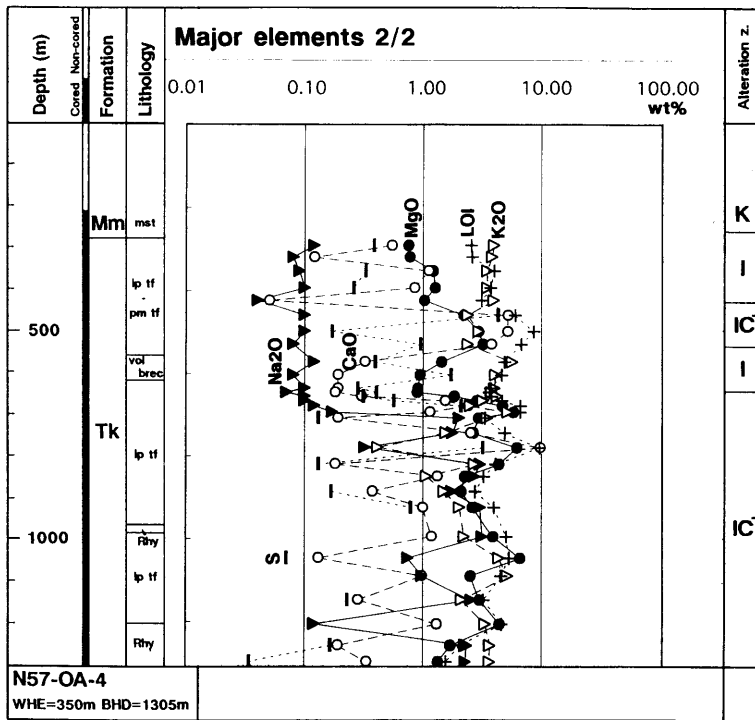
第19図 (g) N57-OA-2, 微量成分 (1)
 Fig. 19 (g) N57-OA-2, Trace elements (1)



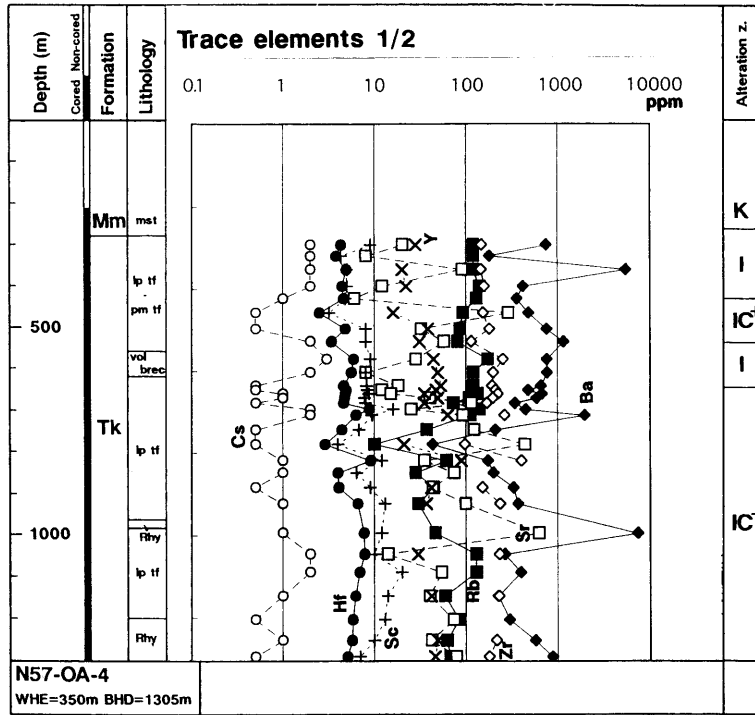
第19図 (h) N57-OA-2, 微量成分 (2)
 Fig. 19 (h) N57-OA-2, Trace elements (2)



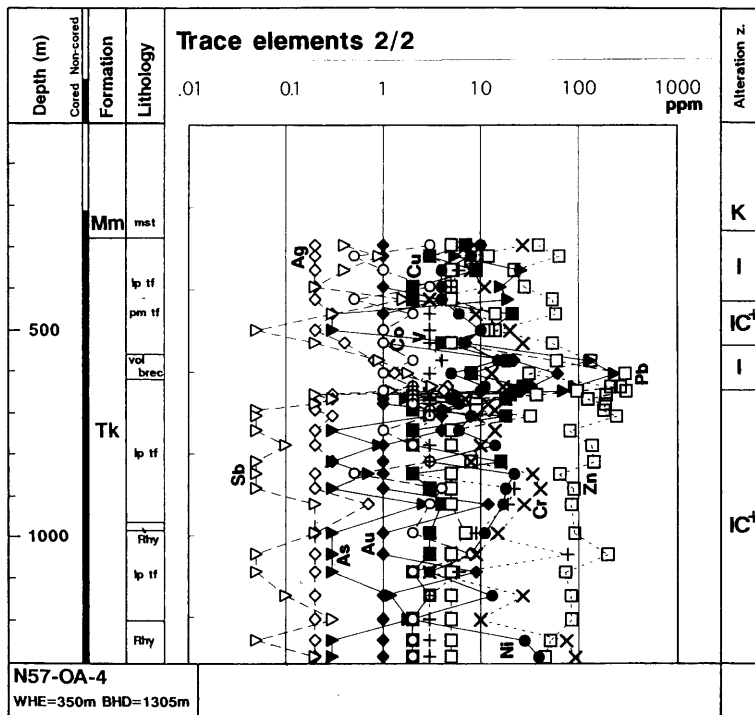
第19図 (i) N57-OA-4, 主成分 (1)
Fig. 19 (i) N57-OA-4, Major elements (1)



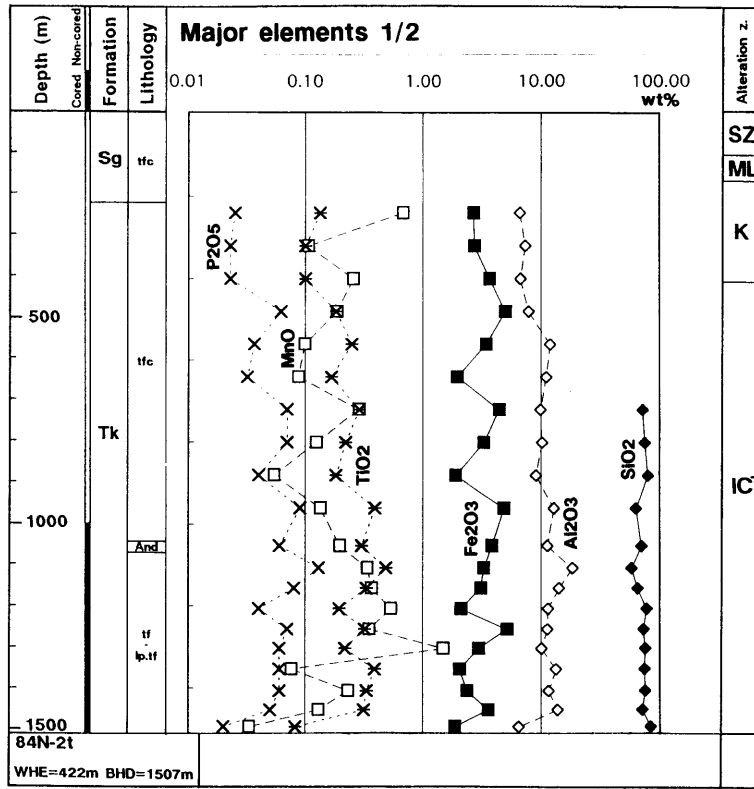
第19図 (j) N57-OA-4, 主成分 (2)
Fig. 19 (j) N57-OA-4, Major elements (2)



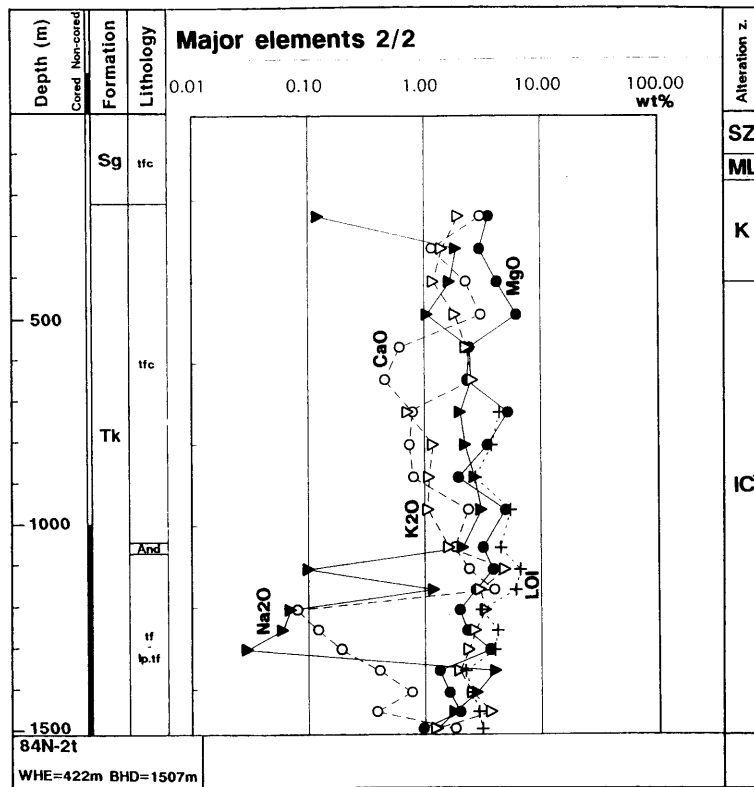
第19図 (k) N57-OA-4, 微量成分 (1)
 Fig. 19 (k) N57-OA-4, Trace elements (1)



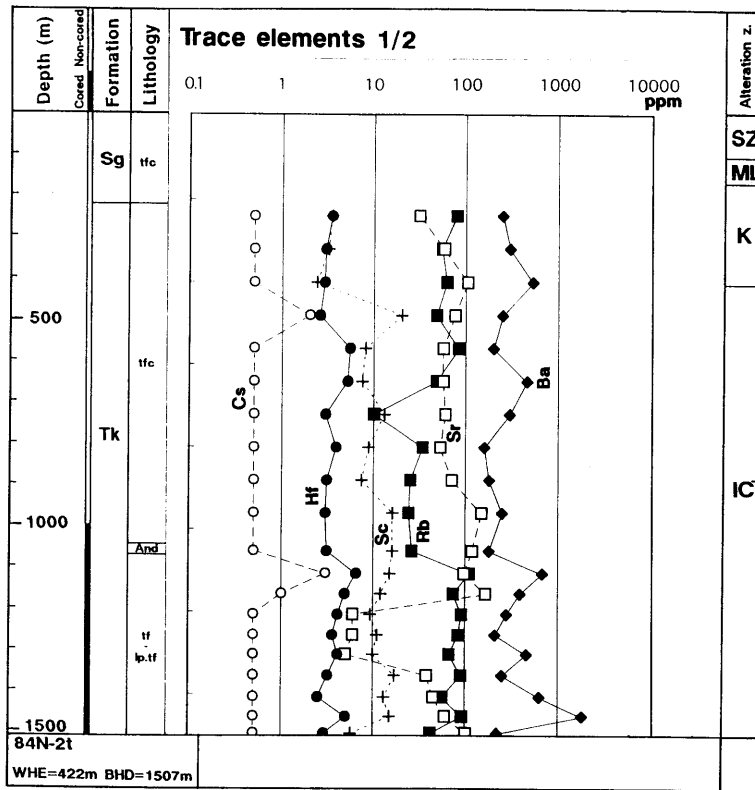
第19図 (l) N57-OA-4, 微量成分 (2), Au は ppb.
 Fig. 19 (l) N57-OA-4, Trace elements (2), Au in ppb.



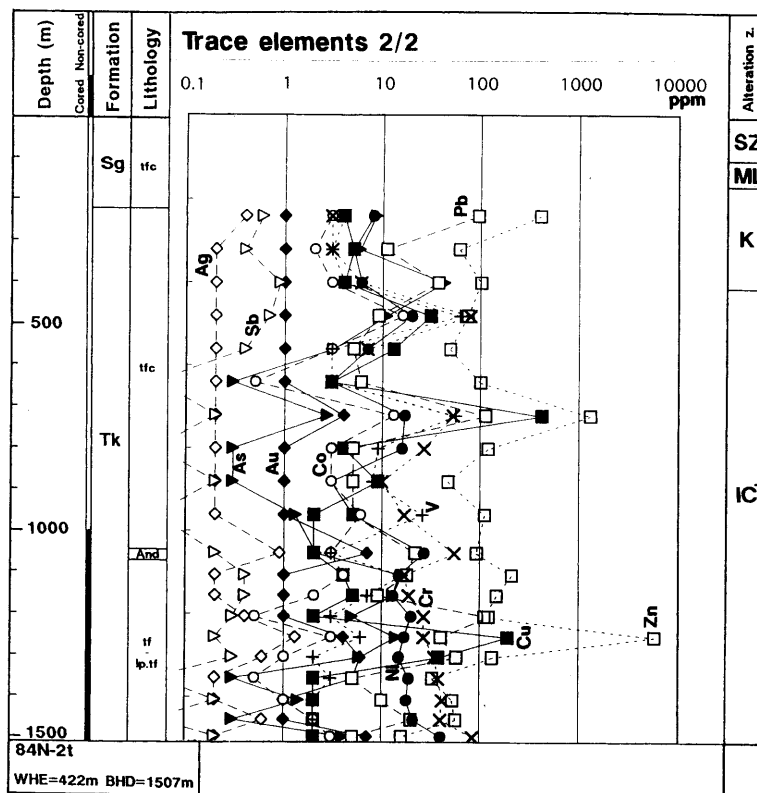
第19図 (m) 84N-2t, 主成分 (1)
 Fig. 19 (m) 84N-2t, Major elements (1)



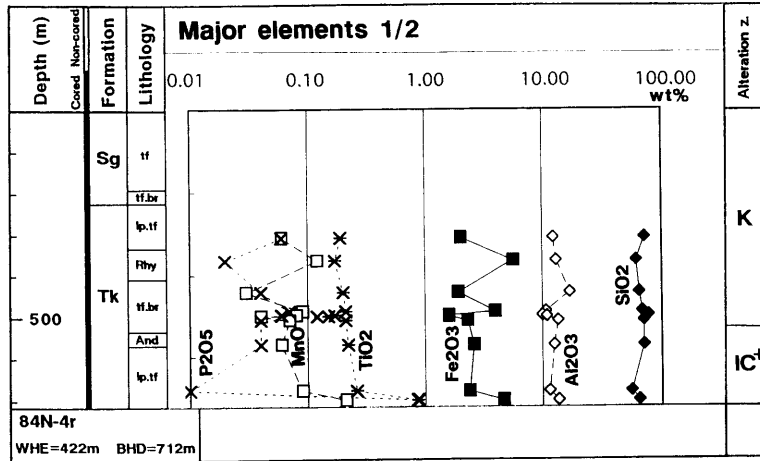
第19図 (n) 84N-2t, 主成分 (2)
 Fig. 19 (n) 84N-2t, Major elements (2)



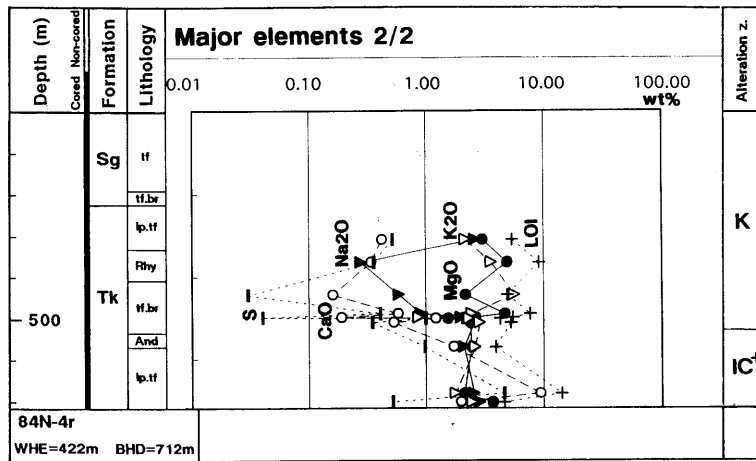
第19図 (o) 84N-2t, 微量成分 (1)
 Fig. 19 (o) 84N-2t, Trace elements (1)



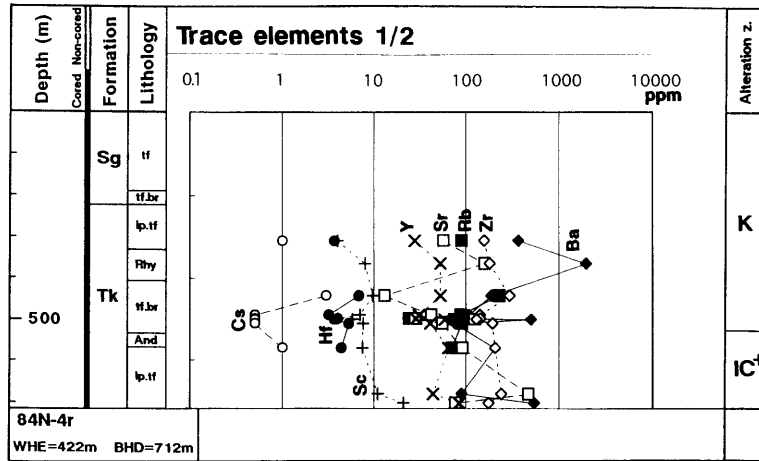
第19図 (p) 84N-2t, 微量成分 (2)
 Fig. 19 (p) 84N-2t, Trace elements (2)



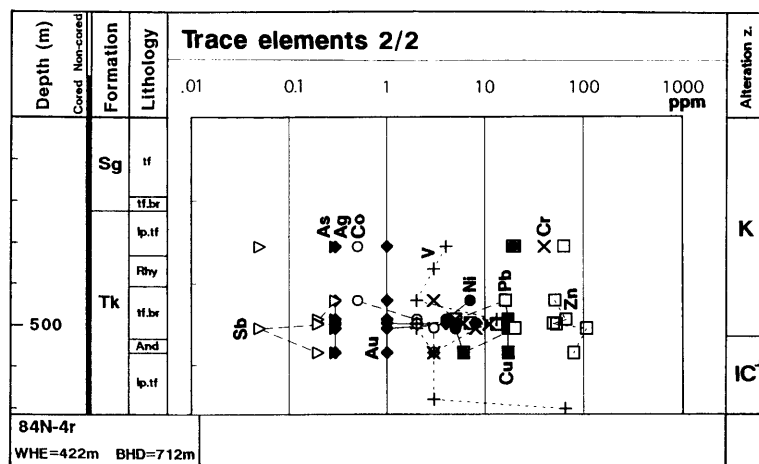
第19図 (q) 84N-4r, 主成分 (1)
 Fig. 19 (q) 84N-4r, Major elements (1)



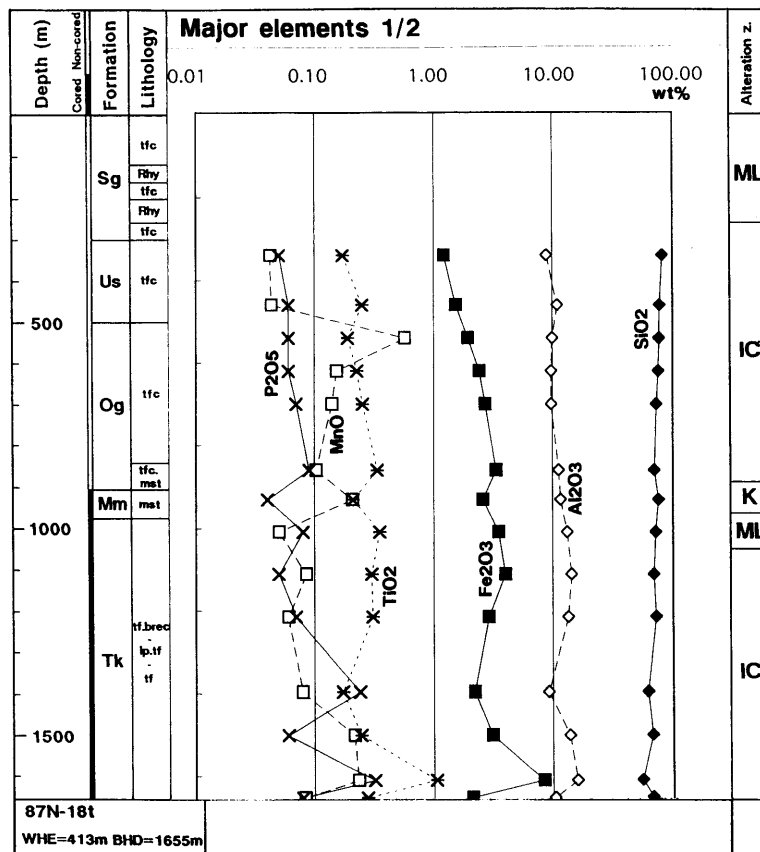
第19図 (r) 84N-4r, 主成分 (2)
 Fig. 19 (r) 84N-4r, Major elements (2)



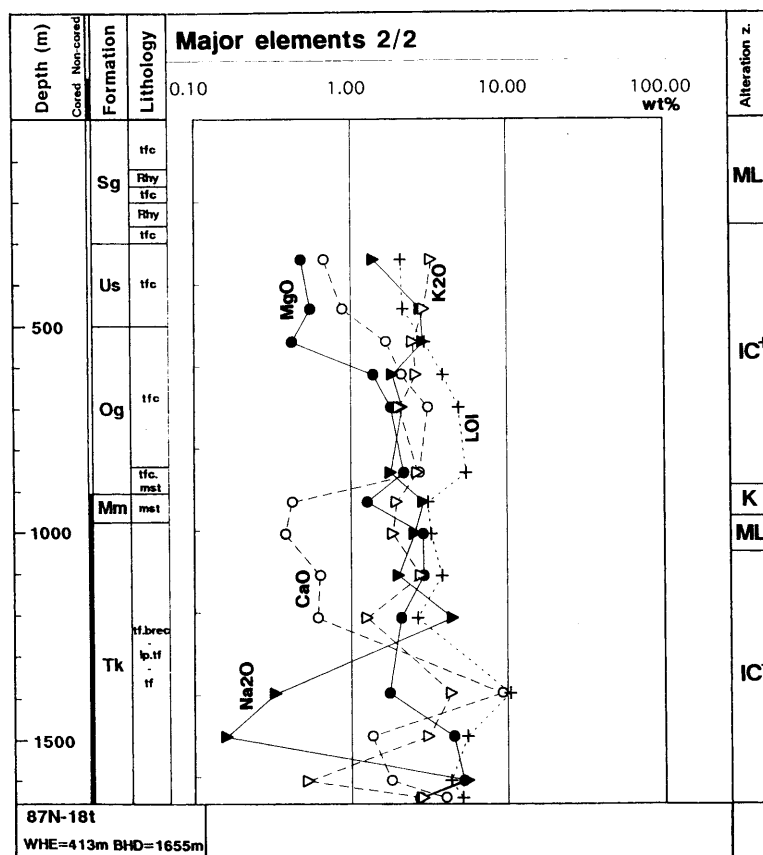
第19図 (s) 84N-4r, 微量元素 (1)
Fig. 19 (s) 84N-4r, Trace elements (1)



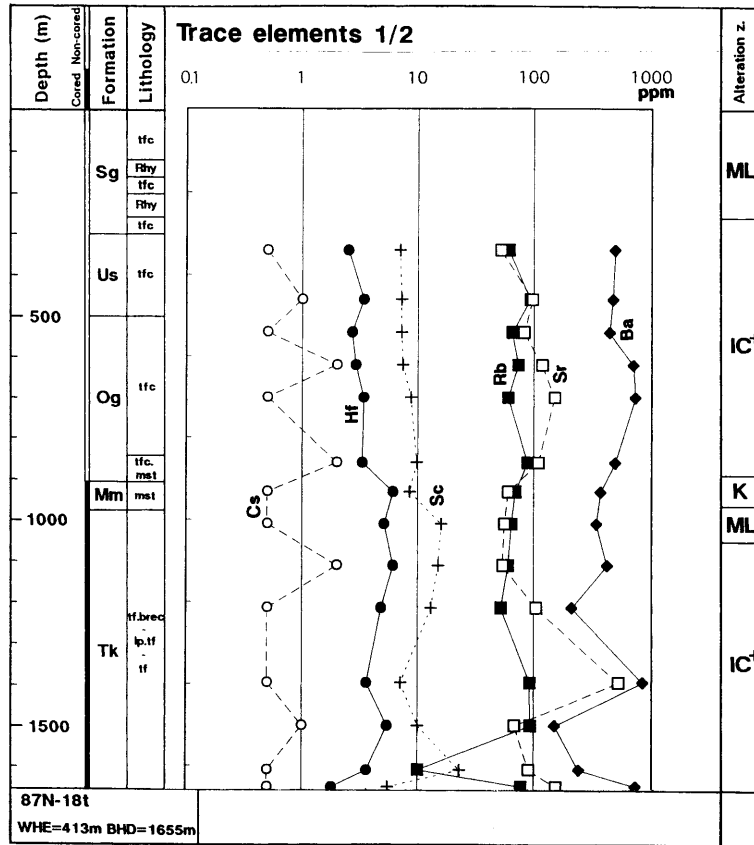
第19図 (t) 84N-4r, 微量元素 (2)
Fig. 19 (t) 84N-4r, Trace elements (2)



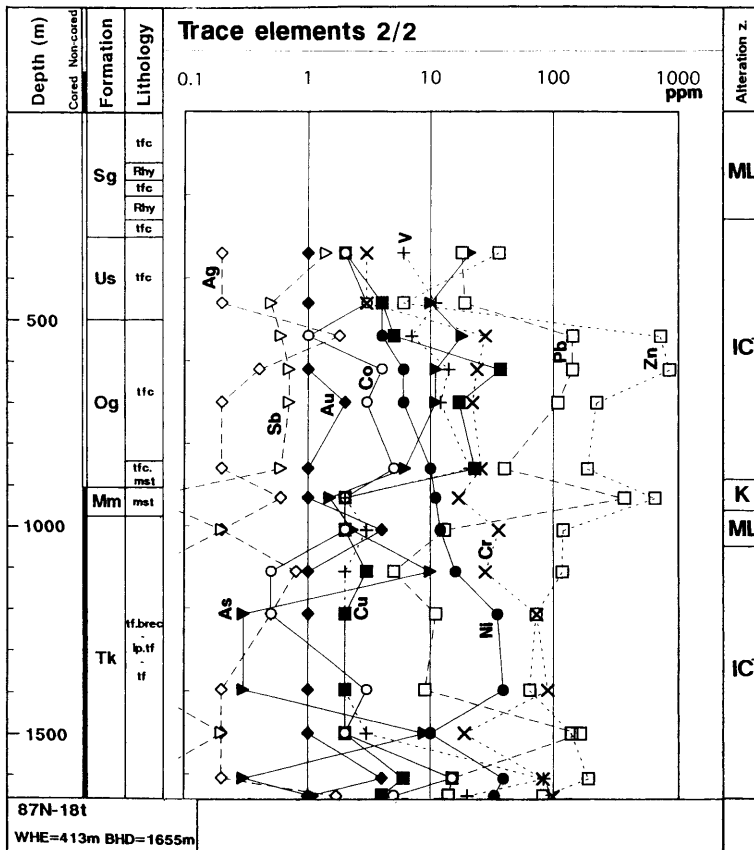
第19图 (u) 87N-18t, 主成分 (1)
Fig. 19 (u) 87N-18t, Major elements (1)



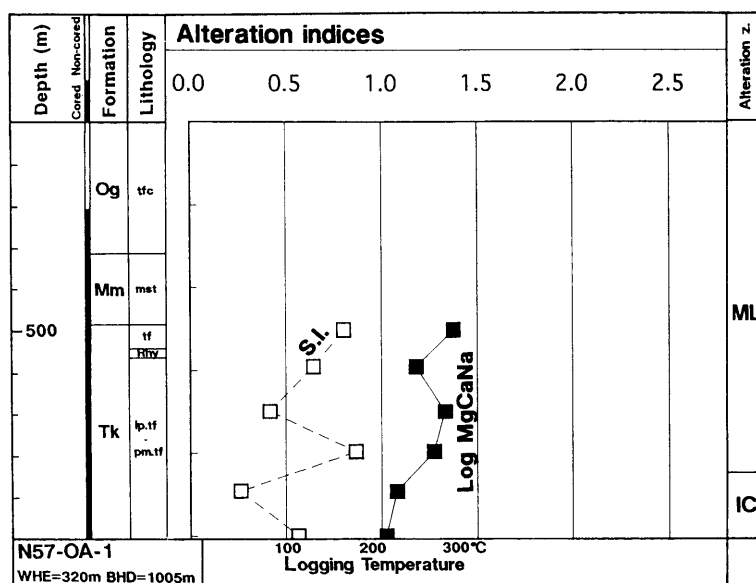
第19图 (v) 87N-18t, 主成分 (2)
Fig. 19 (v) 87N-18t, Major elements (2)



第19図 (w) 87N-18t, 微量元素 (1)
Fig. 19 (w) 87N-18t, Trace elements (1)



第19図 (x) 87N-18t, 微量元素 (2), Au は ppb.
Fig. 19 (x) 87N-18t, Trace elements (2), Au in ppb.

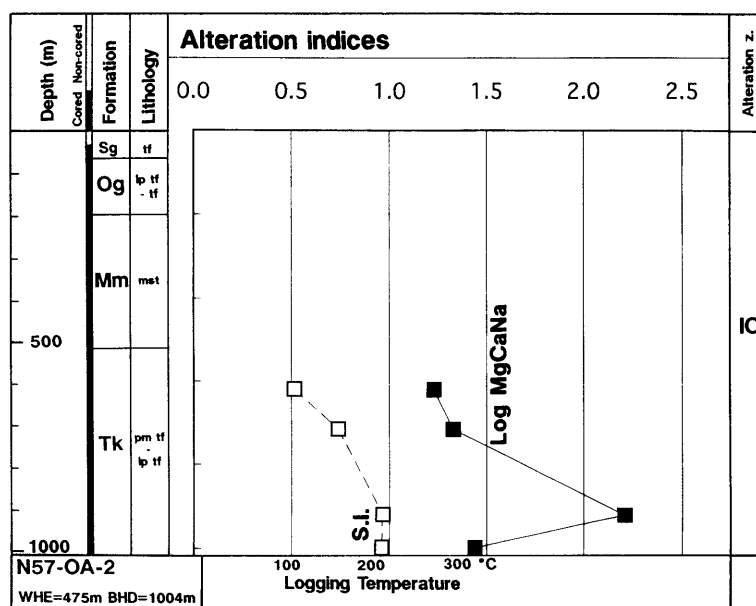


第20図 主な変質指標値の坑井における分布. S.I.は「セリサイト化指数」, Log MgCaNaは $\text{Log}(100/(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}))$.

(a) N57-OA-1

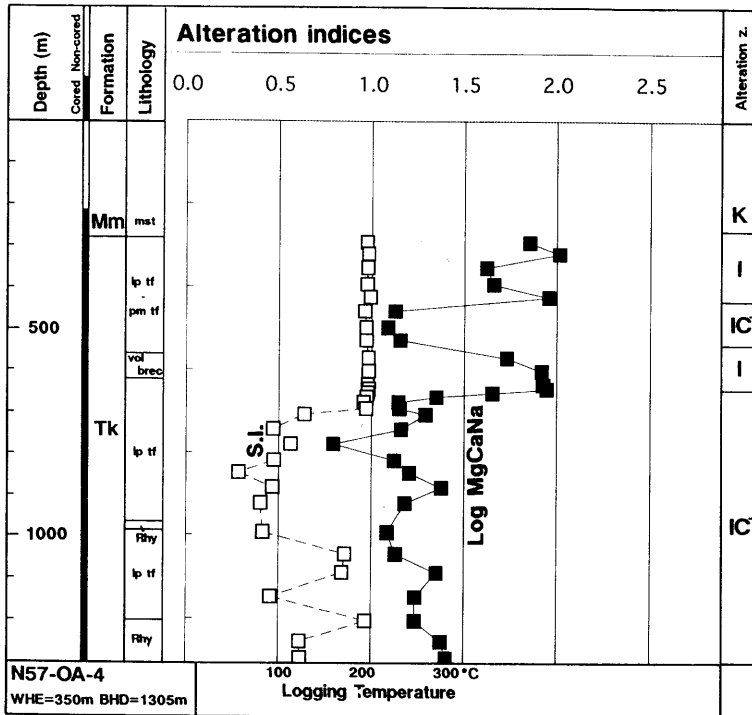
Fig. 20 Distribution of alteration indices for each well. S.I.:Sericitized index and Log MgCaNa : $\text{Log}(100/(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}))$.

(a) N57-OA-1

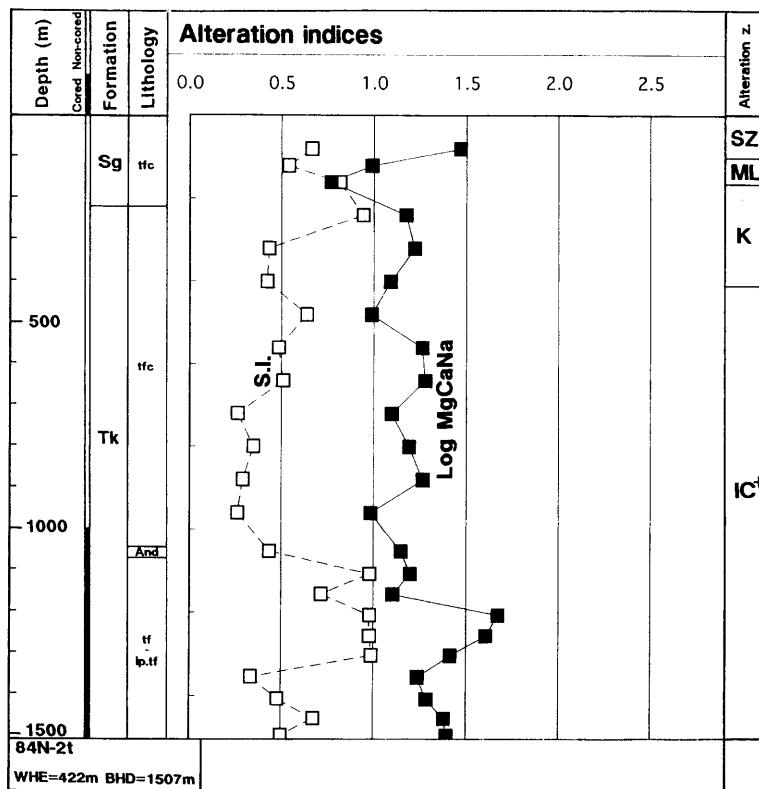


第20図 (b) N57-OA-2

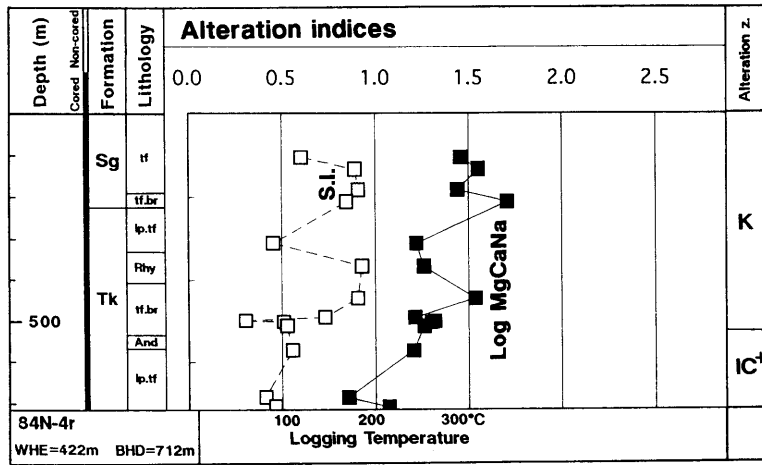
Fig. 20 (b) N57-OA-2



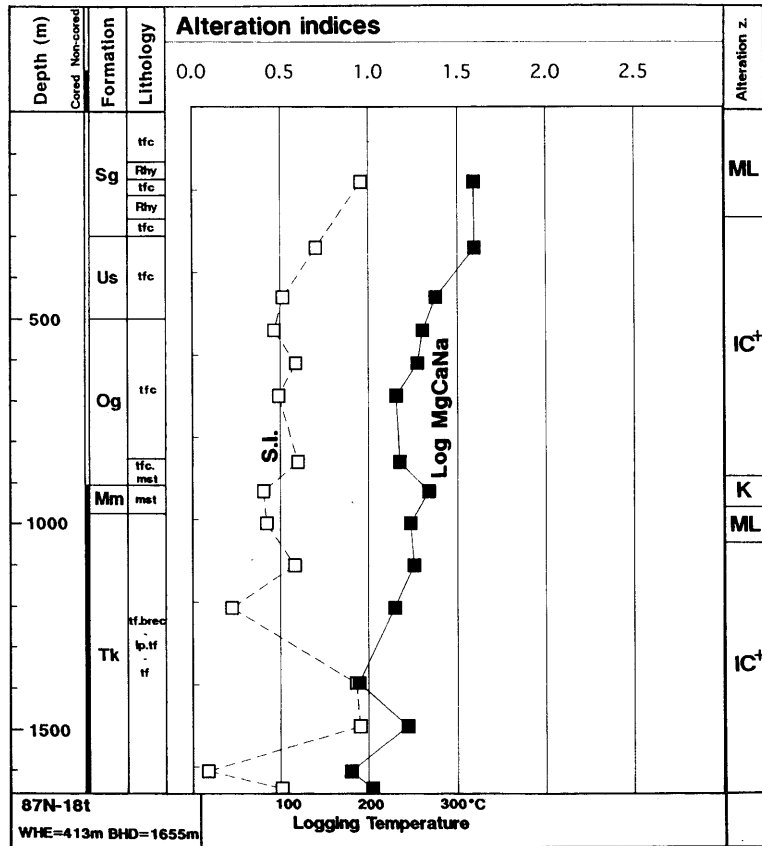
第20図 (c) N57-OA-4
Fig. 20 (c) N57-OA-4



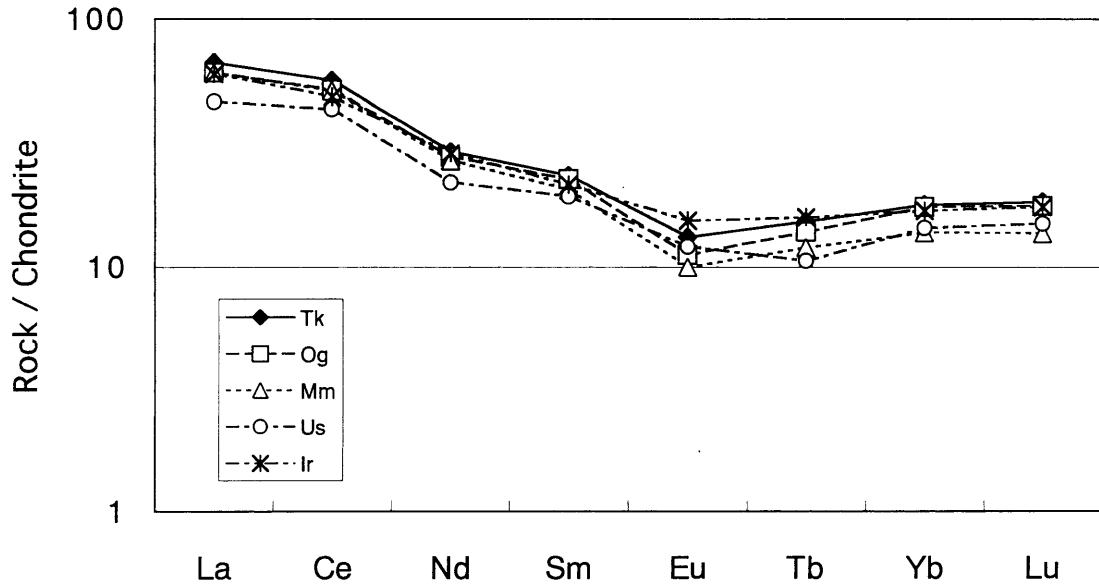
第20図 (d) 84N-2t
Fig. 20 (d) 84N-2t



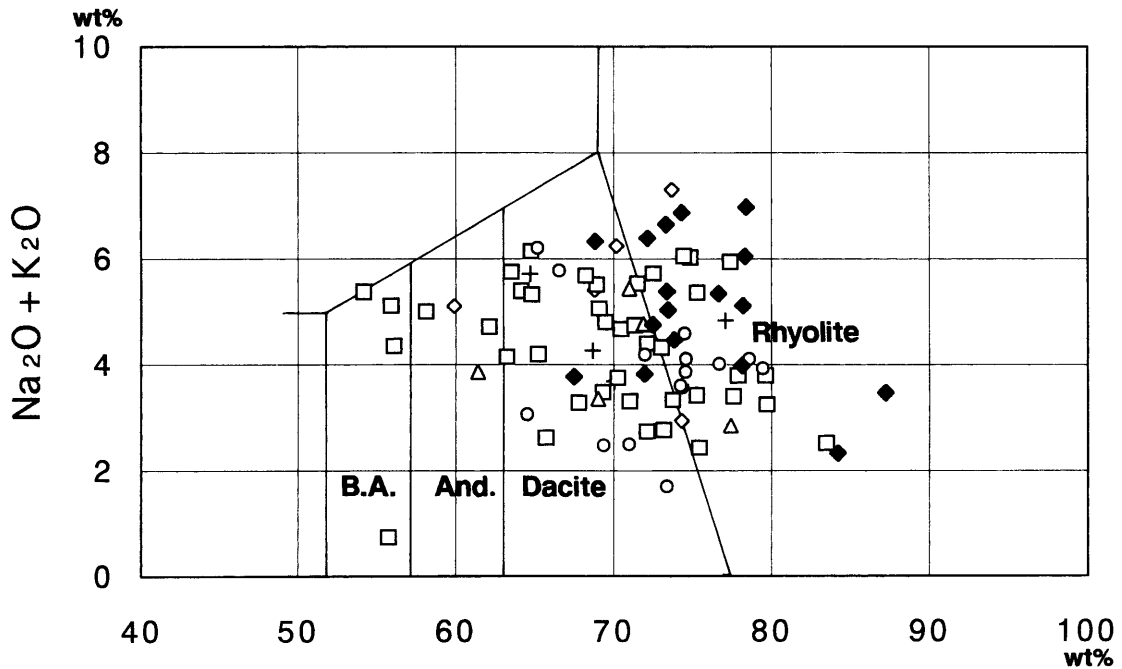
第20図 (e) 84N-4r
Fig. 20 (e) 84N-4r



第20図 (f) 87N-18t
Fig. 20 (f) 87N-18t



第 21 図 地層別の REE 平均値のコンドライト規格化パターン。
 Fig. 21 Average REE patterns for each formation.

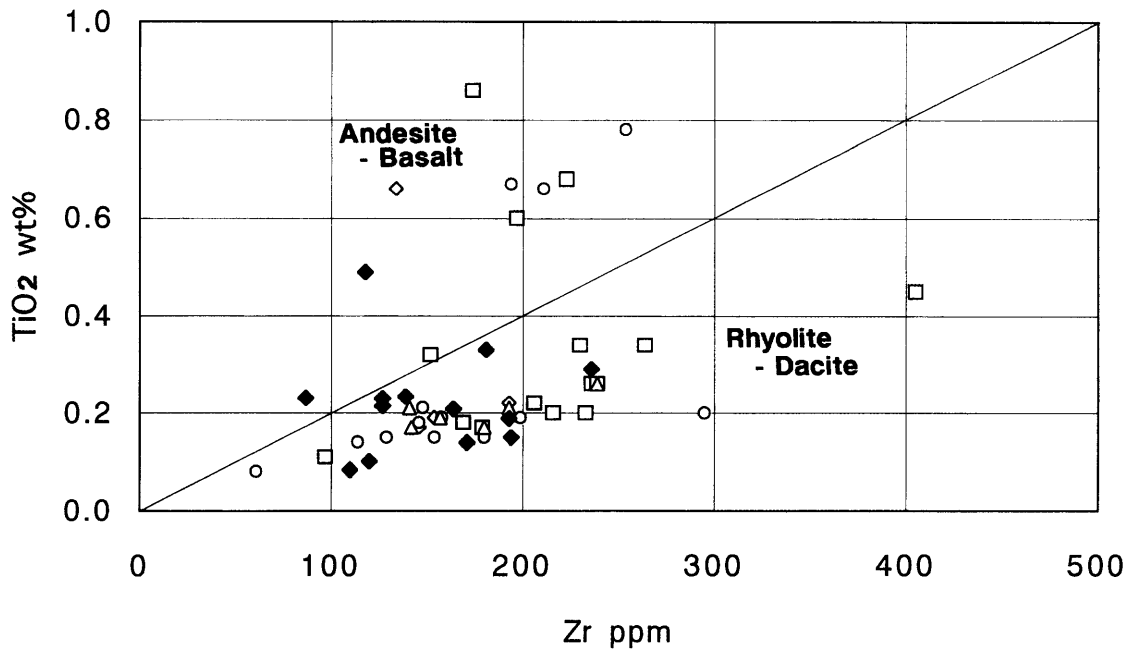


第 22 図 滝沢川層の TAS ダイアグラム・プロット (LeBas *et al.*, 1986).

◆：地熱系外，+：地熱系内 ML 帯，◇：地熱系内 IC 帯，□：地熱系内 IC+ 帯，○：地熱系内 I 帯，△：地熱系内 K 帯。

Fig. 22 Total alkalis-silica (TAS) diagram for each alteration zone in the Takizawagawa Formation.

◆：outside geothermal system，+：ML zone in geothermal system，◇：IC zone in geothermal system，□：IC+ zone in geothermal system，○：I zone in geothermal system，△：K zone in geothermal system.

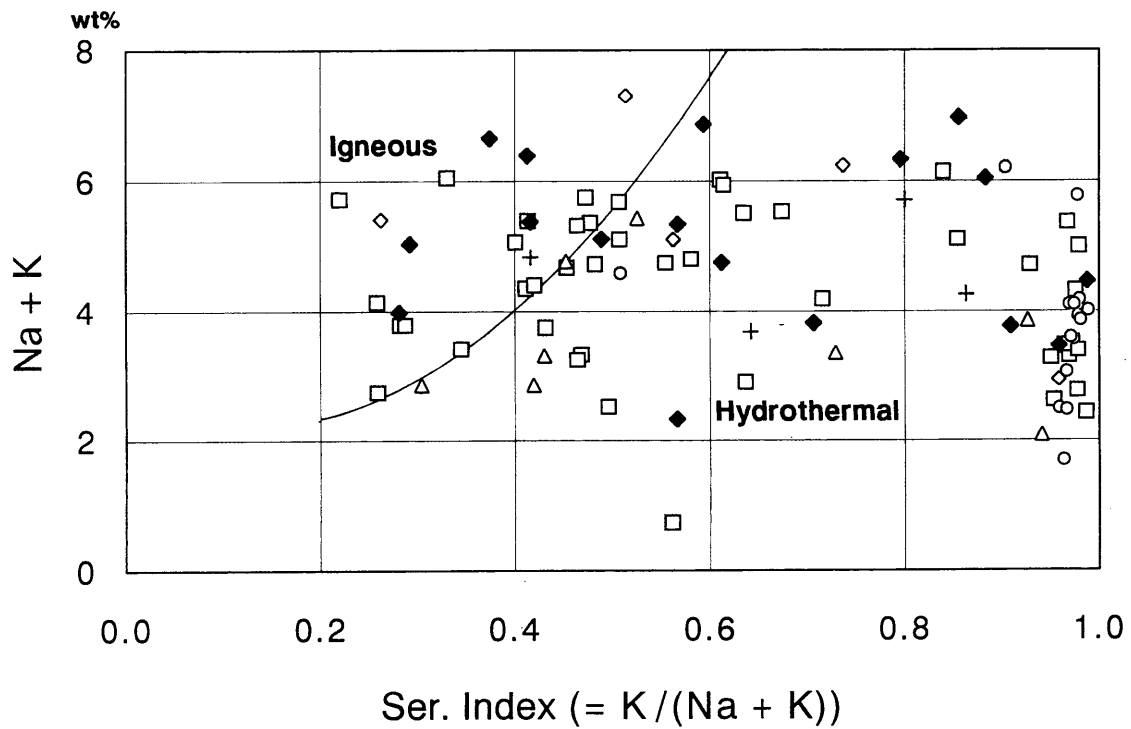


第23図 滝沢川層の Zr と TiO₂ との関係。

境界線は Petersen (1983) および Elliott-Meadows and Appleyard (1991) による。記号は第22図と同じ。

Fig. 23 Zr - TiO₂ plots for the Takizawagawa formation.

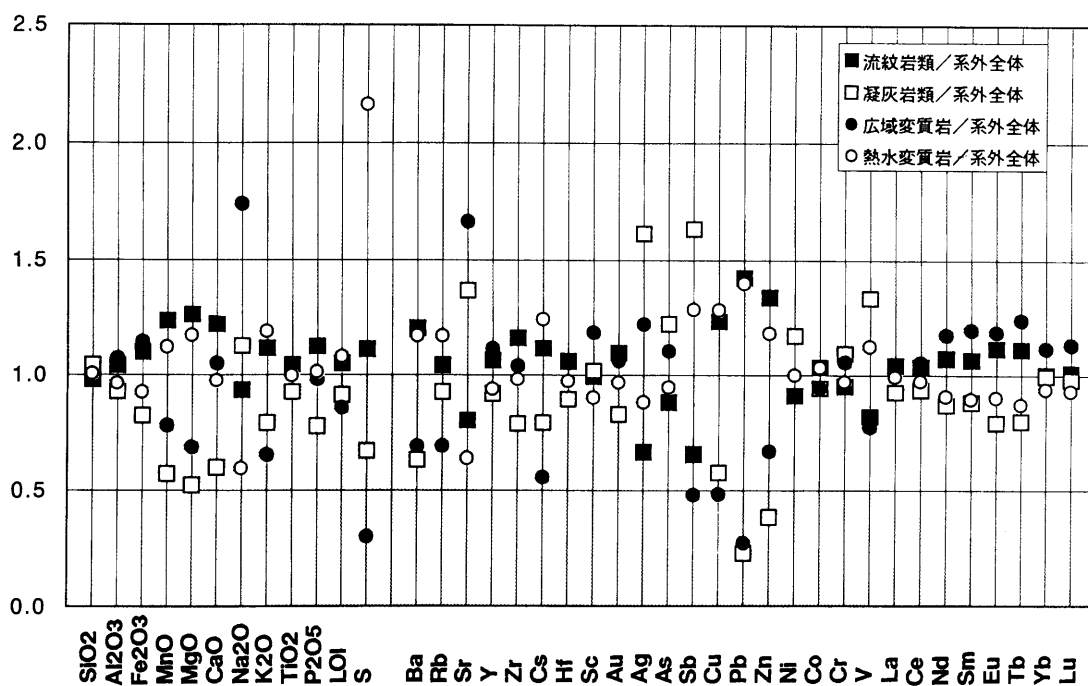
Boundary from Petersen (1983) and Elliott-Meadows and Appleyard (1991). Abbreviations are the same as in Fig. 22.



第24図 滝沢川層のアルカリ - 「セリサイト化指数」(Hughes, 1972) ダイアグラム (Myers and McLean, 1972) ・プロット。

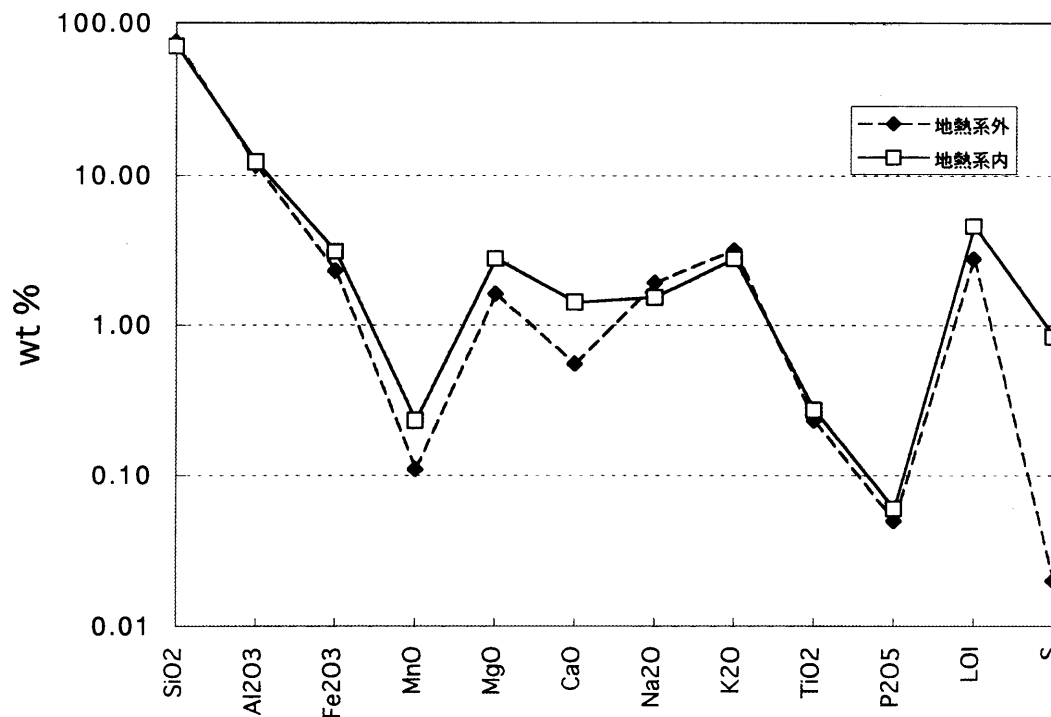
記号は第22図と同じ。

Fig. 24 Alkali - Sericitized Index (S. I.; Hughes, 1972) plots for the Takizawagawa Formation. Abbreviations are the same as in Fig. 22.



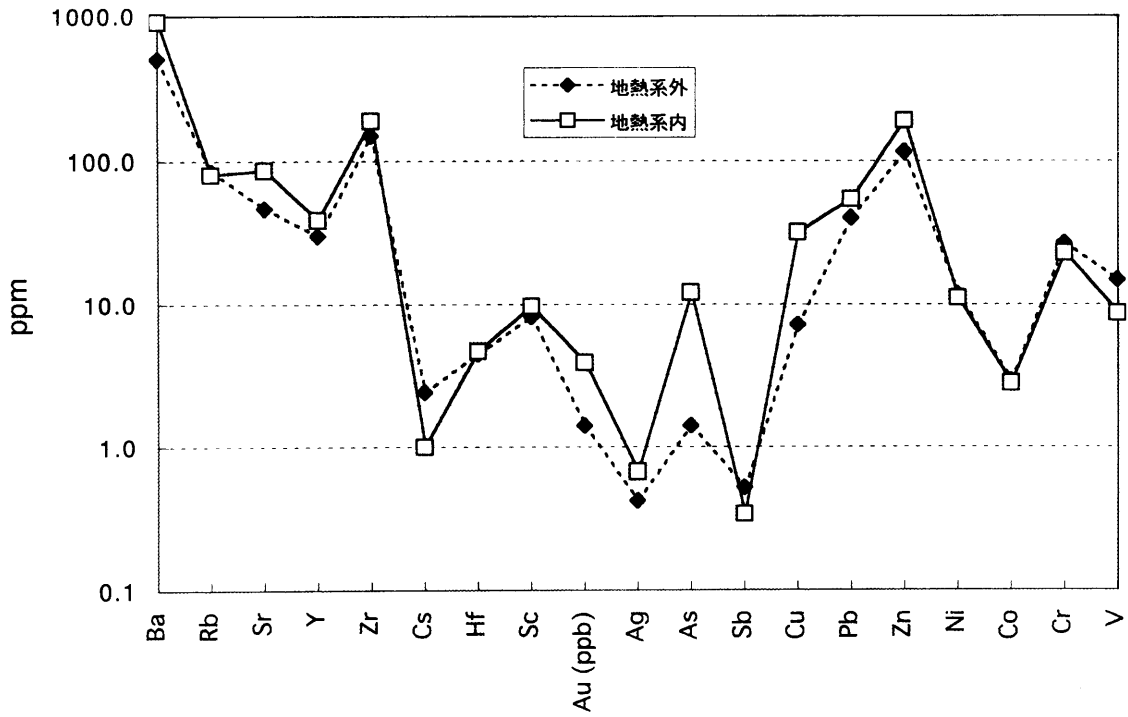
第25図 地熱系外の滝沢川層における岩相別・変質型別にみた成分濃度。■：流紋岩，□：凝灰岩，●：広域変質岩，○：熱水変質岩。数値は地熱系外全体の平均値とそれぞれの岩相・変質型の平均値との比。

Fig. 25 Average concentration for each lithology and alteration type in the Takizawagawa Formation outside the Okuizu geothermal system. ■ : rhyolite, □ : tuff, ● : regionally altered rocks, ○ : hydrothermally altered rocks. Values are normalized by mean of whole sample.

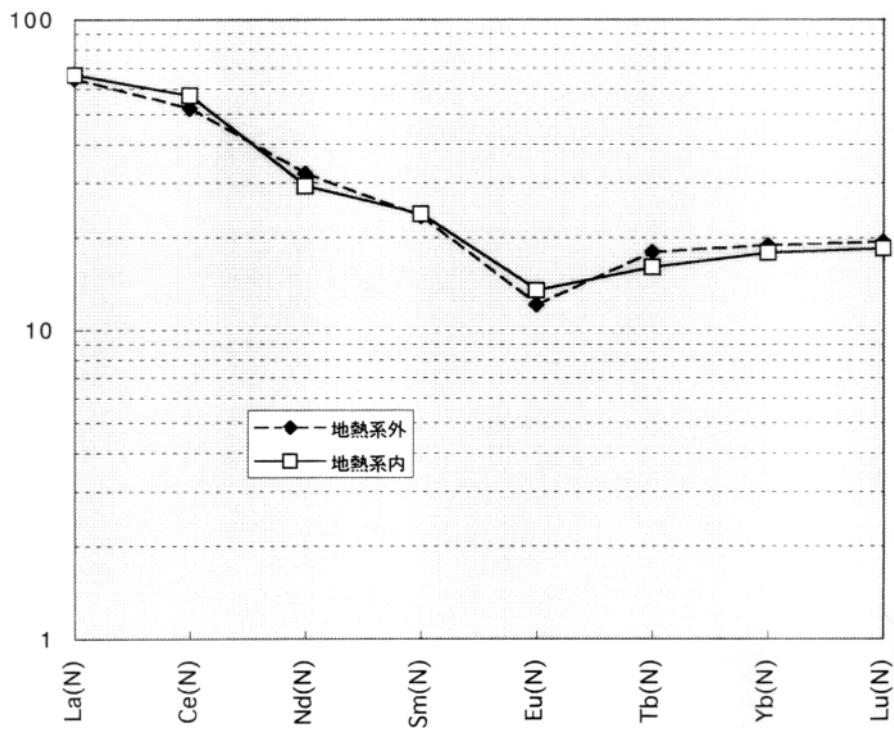


第26図 滝沢川層の地熱系内外での化学成分比較。
◆：地熱系外，□：地熱系内。
(a) 主成分

Fig. 26 Comparison on whole rock chemistry of the Takizawagawa Formation between outside and inside the Okuizu geothermal system.
◆ : outside, □ : inside.
(a) major elements

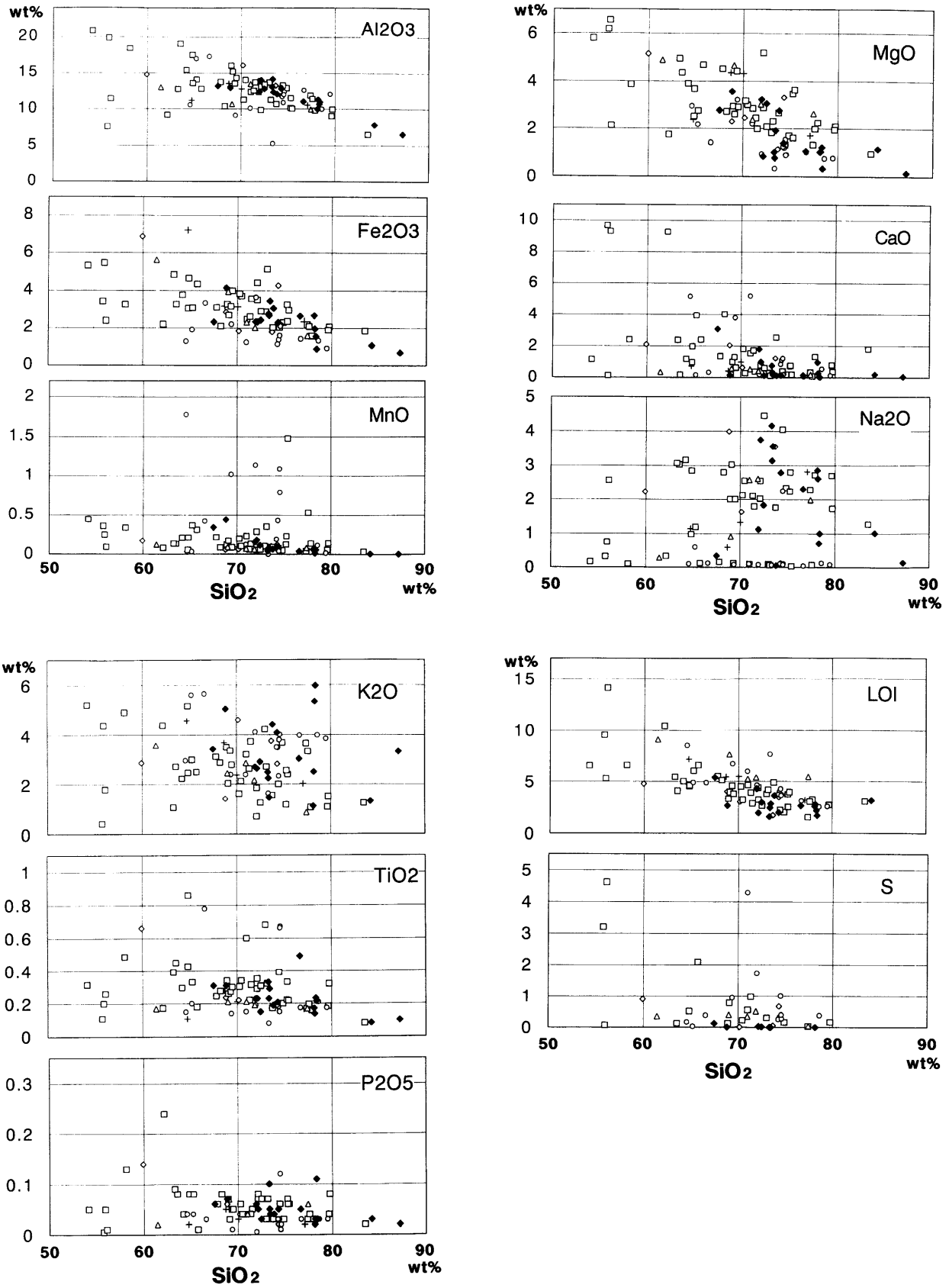


第26図 (b) 微量元素
Fig. 26 (b) trace elements



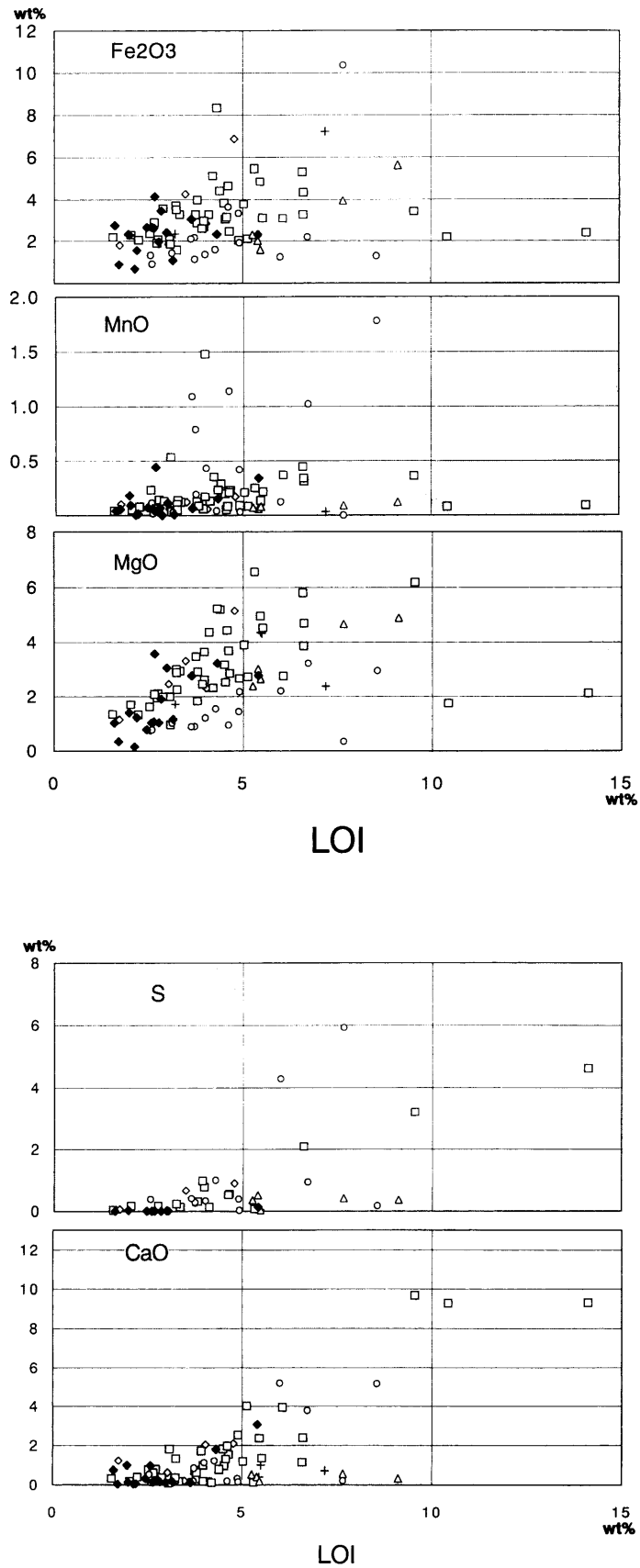
第26図 (c) レアアース
Fig. 26 (c) REE.

奥会津地熱地域・中新統滝沢川層にみられる変質（関）

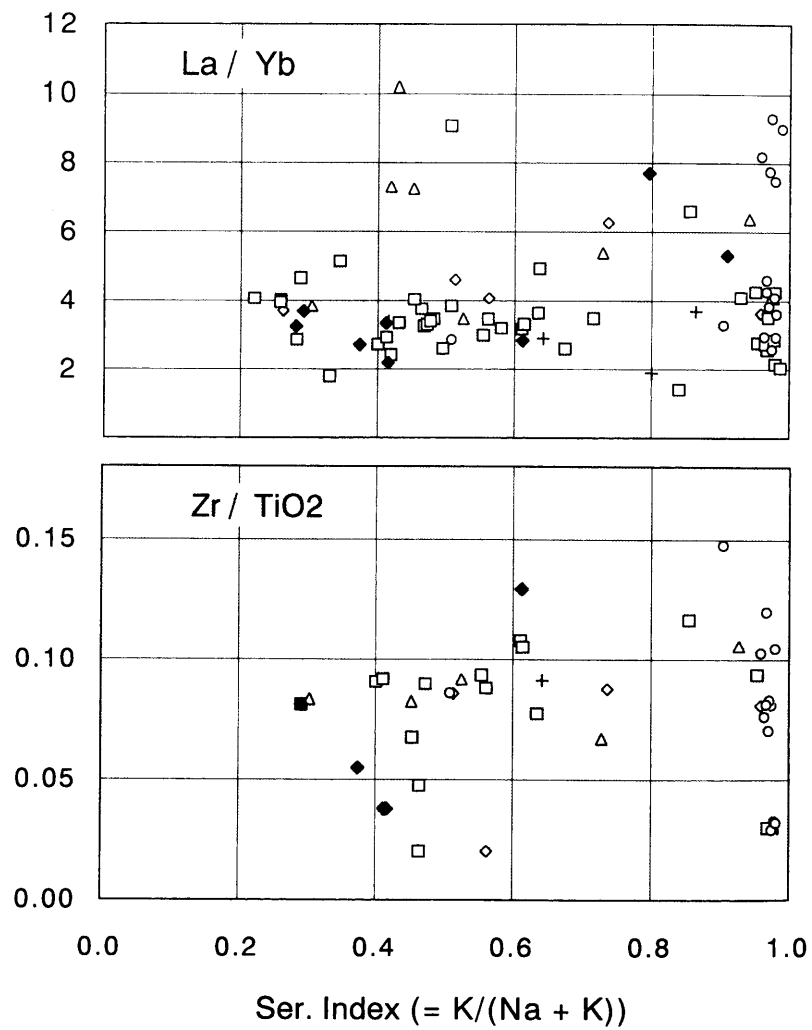


第27図 滝沢川層のハーカーダイアグラム・プロット。
記号は第22図と同じ。

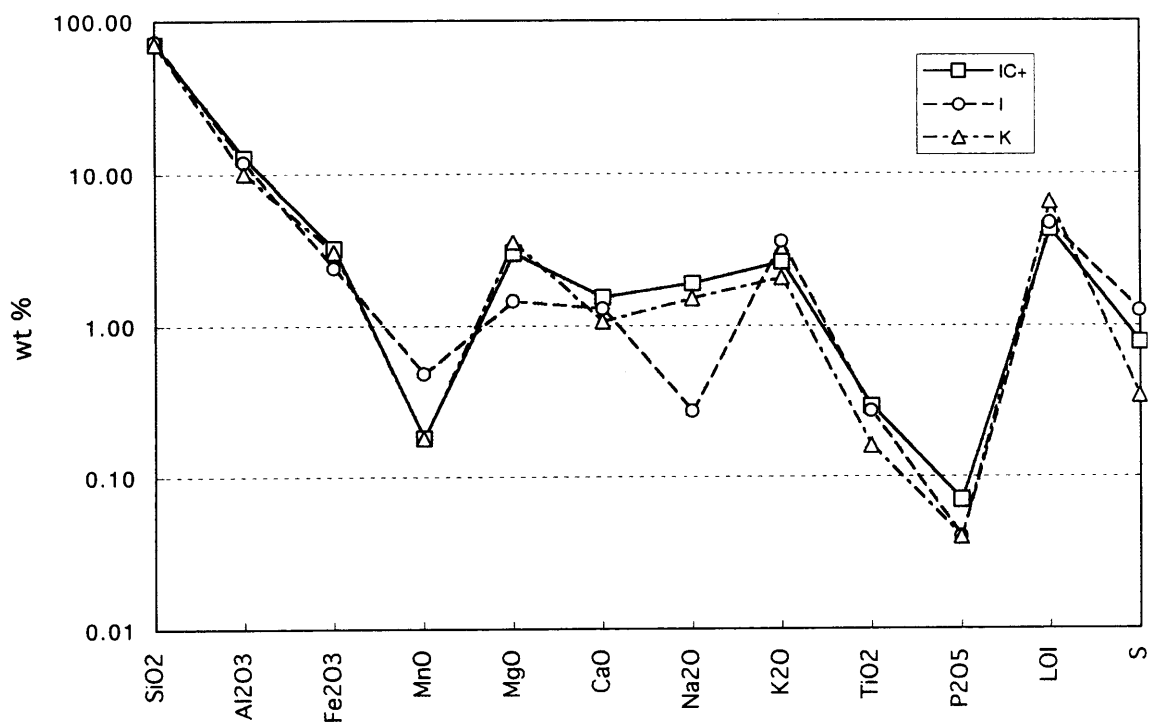
Fig. 27 Harker plots for the Takizawagawa Formation.
Abbreviations are the same as in Fig. 22.



第28図 滝沢川層のLOIとFe₂O₃, MnO, MgO, S, CaOとの関係。記号は第22図と同じ。
 Fig. 28 Plots of LOI versus Fe₂O₃, MnO, MgO, S and CaO in the Takizawagawa Formation.
 Abbreviations are the same as in Fig. 22.



第29図 滝沢川層の「セリサイト化指数」(Hughes, 1972) と La/Yb, Zr/TiO₂との関係. 記号は第22図と同じ.
 Fig. 29 Plots of Sericitization Index (Hughes, 1972) versus La/Yb and Zr/TiO₂ for the Takizawagawa Formation.
 Abbreviations are the same as in Fig. 22.



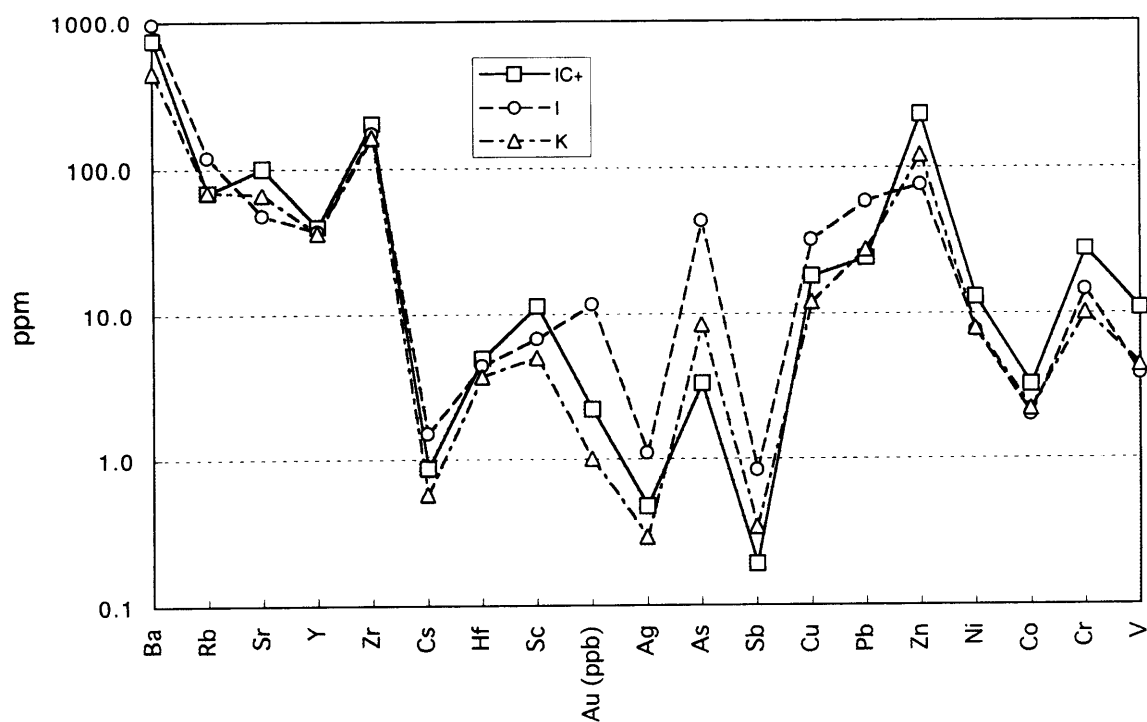
第30図 地熱系内の滝沢川層の変質帯別に応じた化学成分比較。

□ : IC帯, ○ : I帯, △ : K帯。

(a) 主成分

Fig. 30 Whole rock chemistry of each alteration zone in the Takizawagawa Formation distributed in the Okuaizu geothermal system.

(a) major elements.

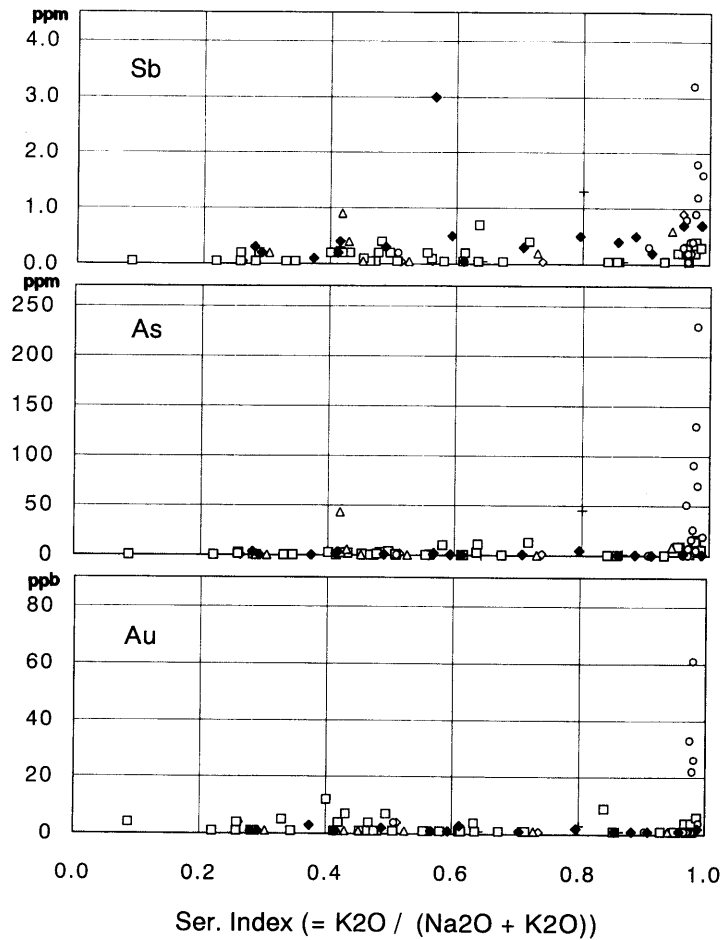


第30図 (b) 微量元素

Fig. 30 (b) trace elements.

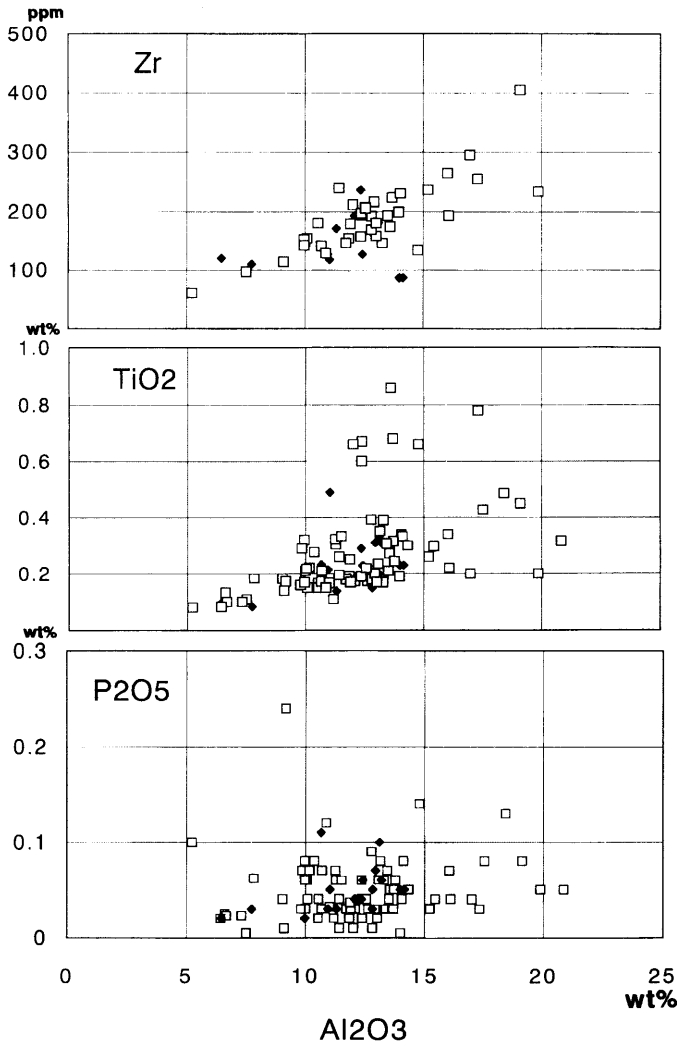


第30図 (c) レアアース
Fig. 30 (c) REE.

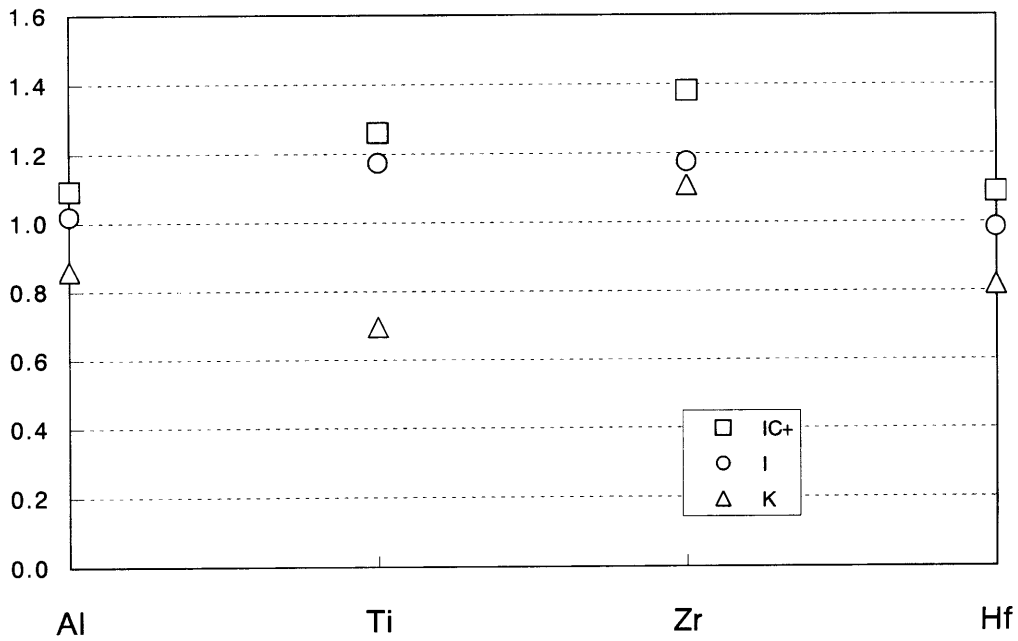


第31図 滝沢川層の「セリサイト化指数」(Hughes, 1972) と Sb, As, Au との関係。記号は第22図と同じ。

Fig. 31 Plots of Sericization Index (Hughes, 1972) versus Sb, As and Au in the Takizawagawa Formation. Abbreviations are the same as in Fig. 22.

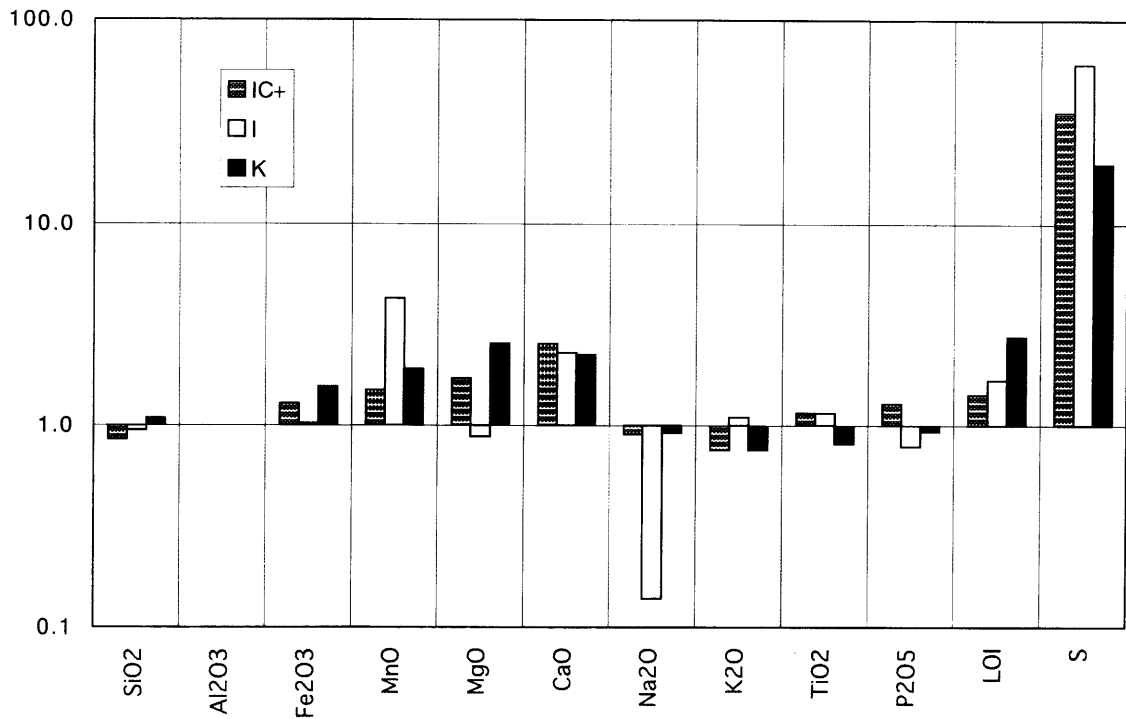


第32図 滝沢川層の Al_2O_3 と Zr, TiO_2 , P_2O_5 との関係。
記号は第22図と同じ。
Fig. 32 Plots of Al_2O_3 versus Zr, TiO_2 and P_2O_5 in the Takizawagawa Formation.
Abbreviations are the same as in Fig. 22.



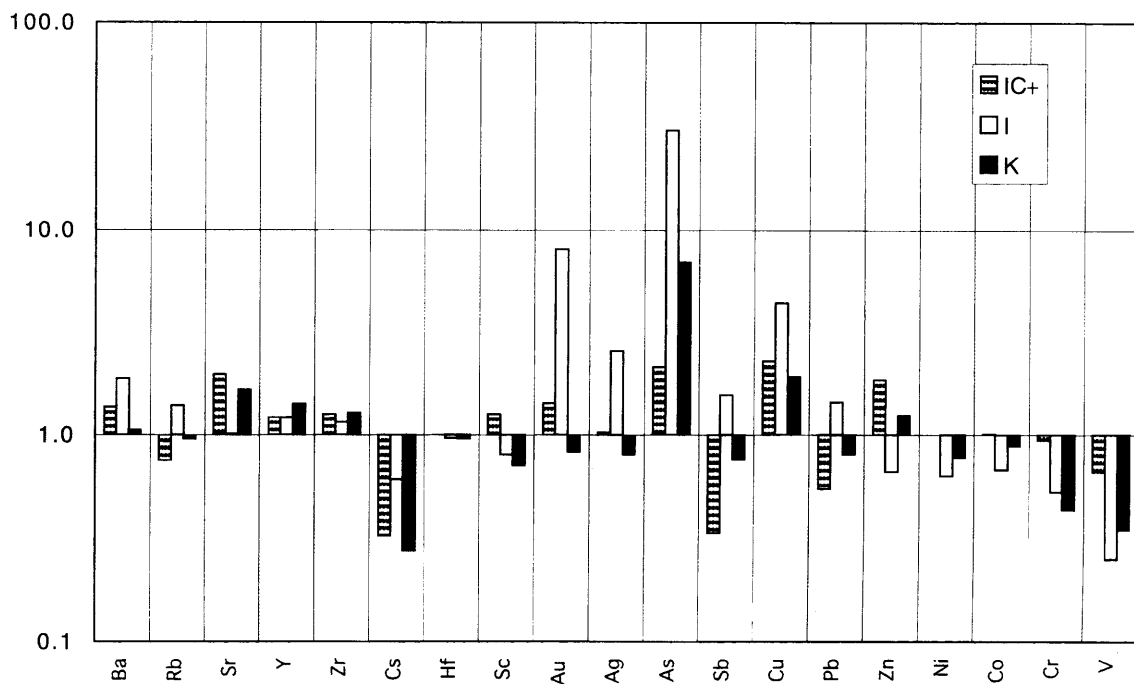
第33図 Al_2O_3 , TiO_2 , Zr, Hf についての、地熱系外の滝沢川層の平均値で標準化した地熱系内各変質帯の平均値。
記号は第32図と同じ。

Fig. 33 Al_2O_3 , TiO_2 and Zr values for each alteration zone in the Takizawagawa Formation normalized by average of outside-geothermal system. Abbreviations are the same as in Fig. 32.



第34図 Al_2O_3 の移動度をゼロと仮定した場合における、地熱系外の滝沢川層を基準とした地熱系内各変質帯の成分移動度。
(a) 主成分

Fig. 34 Gains and losses in the Takizawagawa Formation in the Okuaizu geothermal system, under the assumption that Al_2O_3 is immobile.
(a) major elements



第34図 (b) 微量元素

Fig. 34 (b) trace elements

巻末資料 変質岩の化学分析結果
Appendix.....Result of whole rock chemical analysis for hydrothermally altered rocks.

Sample No.	95071201	95071202	95071203	95071204	95071205	95071206	95071207	95071208	95071209	95071210	95071211	95071212A	95071212B	95071213	95071214	95071215	95071301	95071302	95071303	
Loc./Well	Ankurasawa	Sakainosawa	Atrasawa	Ohshida	Nishikata	Aso	Hinohara	Onogawara	Honson	Ohya S.S.	Asama S.S.	Iriyamazawa	Iriyamazawa	Koyanosawa	Kabucho S.	Maeda	Sawanaka	Takanori	Ginzar-Toge	
Depth (m)																				
Rock / Cut.	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Formation	Tk	Tk	Tk	Og	Og	Us	Og	Og	Tk	Rh	Rh	Rh	Rh	Ir	Ir	Ir	Us	Tk?	Tk?	Og?
Rock type	Rhy	Rhy	Dac	if	if	tfc.sst	Dec	lp.tf	Rhy	IC	IC	IC	IC	if	if	if	sst	ML	ML	if
Alter. type	IC	IC	IC	IC	IC	Cr.Py	SZ	SZ	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC	ML	SZ	ML	ML	SZ
Alter. miner.	Q,Il,Ch,Dl	Q,Il,Ch	Q,Kf,Dl	Q,Il,Ch	Q,Il,Ch	Cr.Py	Q,Tr,Cr,Dl	Q,Ch,Md	Q,Il,Ch,Cc	Q,Kf,Ch	Q,Il,Ch	Q,Il,Ch	Q,Il,Ch	Q,Ch,Il	Q,Ch,Ac,Cc	Q,Kf,Us	Cr,Sm,Cp,Hi	Q,Il,S,Ch	Q,Il,S,Ch	Q,Ch,Kf,Cc
Prim. miner.	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	g,Hb	Q,Pl	Pl	Sm,Il,Py	Q,Pl	Py	Il,Di,Py	Cc,Di	Cc,Py	Cc,Py	Kf,Di	Di,Kf,Il	Ch,Cc,Di		Di,Kf	Di,Kf	U,S,Sm
Temp. (C)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Description																				
SiO2	73.47	72.50	10.62	13.50	14.42	13.79	13.34	68.72	67.52	68.85	78.17	71.60	13.85	72.11	70.44	68.03	12.08	12.56	12.56	10.94
Al2O3	12.36	12.83	3.13	1.14	3.72	3.27	2.36	12.23	13.21	12.96	9.99	13.85	13.29	13.29	13.70	16.32	2.23	1.47	1.47	1.89
Fe2O3	3.44	2.41	0.00	0.04	0.10	0.05	0.06	1.24	2.31	4.14	2.66	2.63	3.59	2.53	3.07	3.24	0.02	0.03	0.03	0.01
MnO	0.08	0.11	0.03	0.20	4.15	0.30	0.42	0.58	2.77	3.57	0.06	0.09	0.11	0.14	0.11	0.10	0.02	0.02	0.02	0.01
MgO	1.91	3.05	0.06	1.60	0.10	2.18	2.04	2.38	3.08	0.15	0.96	1.00	0.77	1.43	2.55	2.61	1.29	0.65	0.65	0.40
CaO	0.17	0.13	0.06	1.60	0.10	1.13	1.04	1.92	3.08	0.15	0.96	1.00	0.77	1.43	2.55	2.61	1.29	0.65	0.65	0.99
Na2O	3.56	1.84	1.80	2.61	1.71	4.10	4.05	1.92	1.29	2.86	1.89	1.89	3.37	3.37	3.96	3.86	0.89	3.71	3.71	1.65
K2O	1.47	2.91	7.51	3.90	2.75	2.02	2.48	2.11	3.43	5.04	1.12	2.48	2.48	2.48	1.12	1.33	2.36	3.05	3.05	4.36
TiO2	0.29	0.15	0.17	0.20	0.37	0.48	0.50	0.15	0.31	0.31	0.17	0.36	0.17	0.35	0.41	0.60	0.28	0.08	0.08	0.08
P2O5	0.04	0.03	0.18	0.01	0.08	0.05	0.11	0.02	0.06	0.07	0.02	0.06	0.07	0.06	0.08	0.10	0.04	0.01	0.01	0.02
LOI	2.84	2.99						9.34	5.41	2.67	2.59	3.81	99.63	98.92	99.62	99.35	22.09	21.63	21.63	20.34
total	99.63	96.95	23.50	23.20	27.39	26.25	25.37	98.71	98.78	99.49	99.63	98.54	25.69	98.92	99.62	99.35	22.09	21.63	21.63	20.34
S	0.00	0.02						0.02	0.13	0.01	0.00	0.12	0.44	0.00	0.00	0.01				
Ba	370	507	1900	530	260	490	350	653	290	1100	180	630	150	470	330	400	680	170	170	470
Rb	58	65	120	110	77	29	73	68	120	85	35	67	10	61	48	39	59	61	61	90
Sr	36	22	72	137	12	240	181	198	43	41	53	106	138	167	147	229	326	49	49	73
Y	40	62						41												
Zr	236	194						80												
Cs	1	3	1	3	2	1	1	4	5	2	2	5	4	6	7	2	2	2	1	5
Hf	7	5	4	4	3	5	4	3	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	5	4
Sc	10	8	7	5	16	14	14	7	9	7	8	10	14	8	12	16	8	8	11	10
Au (ppb)	1	3	1	4	6	4	5	1	1	2	2	3	4	1	1	2	2	1	1	1
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
As	0	0	12	0	0	2	0	2	0	5	3	4	0	5	0	1	2	0	0	29
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Sn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Cu	2	2	20	2	2	2	2	4	25	27	2	3	7	21	4	3	3	2	2	10
Pb	23	17	1700	15	9	18	17	19	20	477	15	15	12	70	17	10	13	25	25	12
Zn	158	122	16	33	78	60	59	67	237	477	143	80	78	143	68	63	44	56	56	130
Ni	4	6	9	2	8	3	7	4	6	8	13	3	9	7	2	2	2	4	4	4
Co	2	2	1	1	6	2	2	2	2	7	2	3	4	2	5	4	4	3	3	1
Cr	19	14	22	3	7	9	7	12	9	19	26	8	20	14	8	7	3	3	3	3
V	7	3	6	6	44	2	6	11	33	20	3	30	28	25	37	40	12	2	2	2
La	25.10	26.50	17.60	22.10	12.40	18.60	20.20	19.40	19.70	19.40	17.80	18.70	15.80	19.90	14.00	14.00	17.10	27.60	27.60	22.60
Ce	50.00	63.00	41.00	41.00	28.00	39.00	42.00	47.00	32.00	36.00	41.00	42.00	41.00	46.00	34.00	31.00	39.00	64.00	64.00	51.00
Nd	18.00	31.00	11.00	15.00	14.00	17.00	18.00	18.00	18.00	16.00	19.00	17.00	16.00	15.00	15.00	14.00	17.00	26.00	26.00	19.00
Sm	5.40	6.90	2.60	3.60	3.50	4.00	4.80	4.90	3.90	3.00	4.70	4.70	5.00	4.50	4.00	3.70	4.10	6.70	6.70	5.70
Eu	1.00	0.90	0.10	0.70	1.20	1.40	1.40	1.00	1.00	0.50	0.90	1.00	1.30	0.90	1.00	1.40	0.80	1.20	1.20	1.00
Tb	0.90	1.40	0.50	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.80	0.30	0.90	0.90	0.80	0.80	0.80	0.80	0.60	1.40	1.40	1.30
Yb	4.60	6.30	2.10	2.80	3.30	2.60	3.10	4.90	2.50	1.70	3.70	3.90	3.90	3.70	3.30	3.40	2.00	4.50	4.50	5.70
Lu	0.75	0.99	0.34	0.46	0.51	0.44	0.50	0.77	0.42	0.30	0.57	0.59	0.58	0.59	0.55	0.54	0.34	0.71	0.71	0.83

奥会津地熱地域・中新統滝沢川層にみられる変質（関）

(cont.)

Sample No.	95071304	95071305	95071306	95071401	95071402	95103103	95110115	95121202	95121205	95121301	96043002	96043005	96043010	96043013	96112002	96112004	96112006
Loc./Well	Ginzaan-Toge		Ohmine	Yuyugisawa		Iriyamazawa	Ishibaniyama	Yotsuya	Yotsuya	Koyanosawa	Tengu-iwa	Tengu-iwa	Hayato	Takashimizu	Kinomatazaw.	Kinomatazaw.	Wanusa
Depth (m)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Rock / Cont.	Us	Og	Us	Us	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Formation	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf
Rock type	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ
Alter. type	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct
Alter. mincr.	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us	Cr,Cs,Us
Prim. mincr.	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Temp. (°C)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Description																	
SiO2	9.85	9.85	14.38	12.53	75.80	73.47	71.97	73.23	68.97	74.13	75.06	84.23	73.85	74.32	78.23	73.39	73.33
Al2O3	1.04	1.53	4.69	1.57	13.61	13.33	12.43	10.86	13.10	14.09	13.90	7.76	12.09	12.84	11.32	14.16	13.12
Fe2O3	0.02	0.06	0.16	0.02	0.02	0.11	0.15	0.02	0.35	0.11	0.08	1.09	3.05	2.29	1.96	2.66	2.75
MnO	0.70	0.95	1.01	1.03	0.73	0.23	0.50	0.83	4.75	0.56	0.43	1.16	0.06	0.09	0.07	0.07	0.04
MgO	1.65	1.55	4.09	1.44	0.11	1.97	1.80	2.30	0.17	1.88	1.30	0.19	2.76	1.40	1.04	0.78	1.02
Na2O	0.55	1.05	2.54	1.66	2.27	3.57	1.12	1.01	0.37	3.63	3.71	1.01	0.05	2.79	2.61	3.14	4.16
K2O	2.11	3.92	2.36	3.19	4.01	2.44	2.70	1.98	5.78	2.40	2.89	1.32	4.41	4.08	2.50	2.24	2.49
TiO2	0.05	0.07	0.78	0.20	0.35	0.26	0.23	0.25	0.35	0.32	0.26	0.08	0.19	0.21	0.14	0.23	0.33
P2O5	0.01	0.01	0.19	0.02	0.02	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.03	0.04	0.05	0.03	0.05	0.10
LOI	15.99	18.96	30.21	21.66	99.75	100.39	100.32	100.40	100.56	100.86	101.01	100.04	100.27	100.21	100.95	99.51	99.70
total	2400	2400	360	530	1289	633	315	705	1219	568	638	121	592	704	217	355	390
S	97	70	84	69	110	55	110	61	120	75	69	38	110	83	95	61	29
Ba	713	84	305	89	82	142	19	275	54	173	162	31	11	44	28	118	92
Rb	16	3	4	2	135	129	6	130	128	134	140	110	193	164	171	87	181
Str	4	4	3	4	5	4	4	5	4	2	2	2	6	2	2	3	0
Y	6	10	19	11	6	8	8	10	14	10	7	3	8	5	6	3	5
Zr	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	2	1	3
Cs	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
Hf	2	2	0	1	2	2	1	0	1	0	2	1	1	1	1	3	0
Sc	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	1	1	0	0	0
Au (ppb)	2	6	3	4	7	5	24	5	5	4	4	4	2	3	1	5	4
Ag	28	31	12	28	23	17	1	16	6	13	9	9	0	3	3	11	7
Sb	183	92	87	106	76	76	108	65	107	53	51	29	87	239	67	72	66
Cu	2	4	2	2	4	4	2	5	5	7	4	9	3	30	2	11	27
Zn	1	1	4	1	3	3	4	3	5	3	1	2	2	3	0	5	3
Ni	3	3	6	8	6	6	11	6	9	18	10	23	12	73	7	26	60
Co	2	2	20	10	19	19	21	14	19	17	13	0	0	7	6	22	7
V	9.90	26.40	16.80	15.80	21.90	21.40	31.30	17.30	19.90	20.00	19.60	28.10	10.60	24.00	25.70	13.60	17.70
La	29.00	57.00	40.00	40.00	47.00	42.00	58.00	37.00	41.00	42.00	34.00	48.00	35.00	50.00	53.00	36.00	34.00
Ce	3.00	26.00	13.00	20.00	18.00	19.00	19.00	17.00	21.00	20.00	16.00	13.00	10.00	18.00	22.00	14.00	18.00
Nd	2.40	6.30	4.20	5.00	4.50	4.50	4.20	3.90	4.40	4.40	3.90	2.50	3.20	4.80	4.90	3.20	4.70
Sm	0.90	1.30	1.40	0.60	1.30	1.10	0.90	0.90	1.20	1.30	1.10	0.20	0.90	1.00	0.60	0.60	1.30
Eu	0.30	0.90	0.30	0.30	0.80	0.70	0.70	0.70	0.90	0.60	0.70	0.20	0.20	0.90	0.20	0.70	0.90
Tb	2.50	2.00	2.50	4.30	3.30	3.70	2.30	3.40	3.70	3.80	3.40	3.10	5.50	3.80	2.90	4.20	4.40
Yb	0.40	0.30	0.39	0.70	0.56	0.59	0.32	0.53	0.60	0.59	0.52	0.46	0.80	0.58	0.44	0.63	0.68
Lu																	

奥合津地熱地域・中新統滝沢川層にみられる変質(関)

(cont.)

Sample No.	OA2-714	OA2-918	OA2-996	OA4-246	OA4-352	OA4-392	OA4-422	OA4-457	OA4-497	OA4-528	OA4-571	OA4-602	OA4-635	OA4-645	OA4-654	OA4-664
Loc./Well	N57-OA-2	N57-OA-2	N57-OA-2	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4
Depth (m)	714.0	918.0	996.0	246.4	352.1	392.5	422.9	457.5	497.3	528.0	571.0	602.6	635.0	645.2	654.5	664.8
Rock / Cut.	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Formation	TK	TK	TK	Mm	TK	TK	TK	TK	TK	TK	TK	TK	TK	TK	TK	TK
Rock type	pm.tif	lp.tif	lp.tif	mst	pm.tif	pm.tif	pm.tif	pm.tif	Rhy	Rhy	lp.tif	lp.tif	lp.tif	lp.tif	tf	lp.tif
Aller. type	IC	IC	IC	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	IC+	IC+
Alter. miner.	Q,Il,Kf	Q,Il,Py	Q,Il,Ch,Py	Q,Il,Sq,Py	Q,Il,Kf	Q,Il,Kf	Q,Il	Q,Il,Ab,Ch,Py	Q,Il,Kf	Q,Il,Ab,Ch	Q,Il,Rd	Q,Il,Rd,Py	Q,Il	Q,Il,Rd	Q,Il,Ch,Py	Q,Il,Ch,Ab,Py
Prim. miner.	Q,Pl	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q
Temp. (°C)	80	90	100	90	120	120	130	140	150	150	160	160	170	170	170	170
Description	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO2	70.19	73.39	74.33	62.62	74.40	74.27	76.73	70.99	64.58	69.40	66.60	72.00	74.62	74.57	73.03	71.04
Al2O3	16.09	5.23	11.85	13.01	11.72	13.02	12.63	10.09	10.55	9.11	17.31	13.98	12.39	12.02	13.70	12.38
Fe2O3	0.06	0.00	0.12	0.22	0.43	0.19	0.03	0.12	1.29	2.19	3.33	3.63	2.16	2.10	2.87	2.46
MnO	2.46	0.34	3.31	2.90	0.75	1.21	1.26	2.20	2.94	3.21	1.43	1.14	0.90	1.09	0.10	0.23
MgO	0.63	0.22	0.22	3.82	0.12	1.11	0.04	5.20	5.17	3.78	0.32	0.19	0.19	0.89	1.83	2.85
Na2O	1.64	0.06	0.12	0.29	0.09	0.10	0.04	0.10	0.10	0.08	0.12	0.08	0.10	0.07	0.10	0.10
K2O	4.60	1.63	2.82	5.29	3.84	3.50	3.97	2.39	2.96	5.65	4.10	4.00	4.00	3.79	4.22	3.21
TiO2	0.22	0.08	0.19	0.16	0.18	0.19	0.17	0.15	0.15	0.14	0.78	0.19	0.67	0.66	0.68	0.60
P2O5	0.04	0.10	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.04
LOI	3.04	7.67	3.49	8.13	4.01	3.74	3.13	6.00	8.56	6.73	4.89	4.62	3.73	3.64	3.80	4.65
total	100.81	99.07	100.73	98.06	98.03	98.28	99.23	98.52	98.12	98.06	100.88	100.88	99.57	99.02	100.66	99.10
S	0.01	5.92	0.67	1.21	0.33	0.26	0.39	4.29	0.17	0.94	0.39	1.72	0.28	0.40	0.31	0.56
Ba	1696	1489	174	1268	5455	419	360	482	759	1155	764	769	662	479	676	592
Rb	130	88	11	65	120	140	130	92	85	80	172	120	120	118	134	108
Sr	63	4	11	36	90	22	6	289	32	57	18	8	18	12	15	40
Y	35	22	36	28	20	22	4	16	38	31	44	49	53	47	35	49
Zr	193	61	154	161	146	158	154	180	180	114	254	199	194	211	223	197
Cs	3	0	2	2	2	2	1	1	1	2	3	3	1	1	1	1
Hf	6	2	5	5	4	4	5	3	5	3	6	6	5	5	5	5
Sc	6	4	10	13	5	5	5	3	8	8	9	8	8	8	9	8
Au (ppb)	1	16	1	4	1	1	4	1	1	1	22	61	33	26	1	1
Ag	0	3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	5	4	0	0
As	1	51	4	12	26	16	19	0	0	7	130	230	91	70	6	2
Sb	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	1	2	3	1	0	0
Cu	4	405	8	6	9	2	2	21	12	4	19	8	27	22	20	18
Pb	2	84	6	20	5	5	5	14	12	5	59	293	264	96	37	7
Zn	58	43	77	73	22	28	54	58	14	54	132	31	211	301	189	123
Ni	5	8	9	8	4	4	4	6	10	7	15	5	11	10	2	5
Co	3	9	2	2	1	3	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2
Cr	7	22	40	11	8	11	3	9	20	27	17	13	17	22	3	7
V	6	5	2	13	6	5	4	3	3	3	4	3	2	2	2	3
La	32.50	9.60	22.60	23.50	30.30	27.60	28.00	17.00	22.50	19.60	24.90	22.20	17.60	23.00	23.00	20.80
Ce	64.00	21.00	49.00	54.00	62.00	57.00	60.00	38.00	49.00	43.00	57.00	51.00	45.00	54.00	53.00	44.00
Nd	24.00	11.00	25.00	21.00	22.00	19.00	18.00	13.00	18.00	19.00	21.00	17.00	16.00	16.00	18.00	12.00
Sm	4.80	3.10	5.10	5.50	4.00	4.00	3.80	2.30	4.90	4.40	5.20	5.40	4.30	4.80	4.40	4.60
Eu	0.90	2.60	1.00	0.90	0.60	0.60	0.60	0.40	0.90	0.80	1.00	0.90	1.10	1.00	0.60	1.00
Tb	0.20	0.20	1.00	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.80	0.80	0.30	1.20	1.10	0.30	0.30	1.00
Yb	3.50	2.20	4.00	4.10	2.20	2.40	2.10	1.40	3.30	3.10	4.10	5.10	4.60	4.30	3.80	4.00
Lu	0.55	0.35	0.70	0.64	0.38	0.36	0.39	0.29	0.52	0.55	0.66	0.78	0.80	0.71	0.64	0.63

(cont.)

Sample No.	OA4-677	OA4-692	OA4-707	OA4-742	OA4-778	OA4-818	OA4-847	OA4-883	OA4-922	OA4-993	OA4-1044	OA4-1088	OA4-1146	OA4-1204	OA4-1254	OA4-1294	21-240	21-240	21-320
Loc./Well	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	N57-OA-4	84N-21	84N-21	84N-21
Depth (m)	677.2	692.5	707.1	742.5	778.6	818.2	847.7	883.7	922.4	993.1	1044.8	1088.9	1146.8	1204.4	1254.9	1294.8	240.0	240.0	320.0
Rock / Cut.	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	C	C
Formation	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk
Rock type	pm.f	lp.f	lp.f	pm.f	pm.f	pm.f	lp.f	lp.f	lp.f	lp.f	lp.f	lp.f	pm.f	pm.f	Rhy	Rhy	tfc.sst	tf	tf
Alter. type	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	ML	ML	K
Alter. miner.	Q,Pl,Ch,Ab	Q,Pl,Ch,Ab	Q,Pl,Ch	Q,Pl,Ch	Q,Ch,An,Ab	Q,Pl,Ch	Q,Pl,Ch	Q,Pl,Ch	Q,Pl,Ch	Q,Pl,Ch	Q,Pl,Ch	Q,Pl,Ch,Ab	Q,Pl,Ch	Q,Pl,Ch	Q,Pl,Ch,Ab	Q,K,Pl,Ch,Di	O,Pl,Di,Sd	O,Pl,Di,Sd	O,Pl,Di,Sd
Prim. miner.	Al,Py	Ab,Red,Py	Di	Rd	Il	Q,Pl	Ab	Red,Di	Di,Py	Ab,Red	Kl	Q,Pl	Di	Q	Q,Pl	Q,Pl	Ka,Py	Ka,Py	Ka,Di,Py
Temp. (°C)	170	180	180	190	190	200	210	210	220	230	240	250	260	260	270	270	90	90	100
Description																			
SiO2	65.76	54.18	68.95	73.77	55.77	65.54	77.91	79.75	69.11	64.19	55.93	64.81	70.48	69.34	74.88	77.42			
Al2O3	12.82	20.84	16.04	10.68	7.52	19.10	9.80	9.96	15.22	15.44	19.87	17.52	14.05	13.55	12.94	11.91	6.21	6.61	7.33
Fe2O3	4.34	5.32	3.27	3.42	3.42	3.27	1.58	2.07	2.68	3.77	3.77	2.18	3.70	3.15	2.29	2.18	5.68	2.67	2.72
MnO	0.31	0.45	0.12	0.09	0.56	0.13	0.14	0.14	0.17	0.21	0.25	0.05	0.10	0.08	0.05	0.04	2.42	0.68	0.11
MgO	4.69	5.80	2.94	2.66	6.18	4.36	2.25	2.10	2.61	3.90	6.56	2.52	3.00	4.42	1.70	1.34	1.69	3.57	2.99
CaO	2.39	1.14	0.19	2.53	9.68	0.18	1.32	0.37	0.99	1.18	0.13	0.97	0.28	1.30	0.19	0.33	14.84	3.01	1.15
Na2O	0.12	0.17	2.01	1.77	0.32	3.03	2.72	1.74	3.03	3.16	0.74	0.98	2.55	0.12	2.34	2.29	0.53	0.12	1.89
K2O	2.50	5.20	3.50	0.17	0.11	2.72	1.07	1.51	2.03	0.30	4.37	5.16	2.12	3.36	3.68	3.65	2.32	1.97	1.43
TiO2	0.18	0.32	0.34	0.07	0.11	0.45	0.16	0.32	0.26	0.30	0.20	0.43	0.34	0.27	0.20	0.17	0.07	0.13	0.10
P2O5	0.01	0.05	0.07	0.03	0.01	0.08	0.03	0.08	0.03	0.04	0.05	0.08	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02
LOI	6.62	6.59	3.34	4.90	9.55	4.11	3.26	3.26	3.98	5.03	5.31	4.54	3.24	4.58	2.04	1.56			
total	99.74	100.05	100.77	100.19	93.33	100.97	100.24	100.80	100.11	99.45	98.88	100.11	99.90	100.22	100.34	100.92	33.79	18.78	17.73
S	2.09		0.13		3.20	0.13		0.17	0.78		0.07		0.23		0.16	0.03			
Ba	343	450	1961	210	43	174	200	332	372	7400	267	400	400	300	574	876	440	250	300
Rb	72	140	111	37	10	61	28	44	30	46	130	130	59	84	62	67	62	79	55
Sr	114	25	92	122	440	35	74	43	99	625	14	54	40	73	42	78	83	31	58
Y	35		63		21	89		42	37		30		42		49	46			
Zr	169		264		97	405		152	236		233		230		216	179			
Cr	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	1	1
Cs	5	9	6	4	3	9	4	4	7	8	8	7	6	6	6	5	2	4	3
Hf	8	16	9	7	4	12	6	9	13	12	10	20	14	13	10	7	9	4	3
Sc	1	4	4	4	1	1	1	1	12	1	1	9	1	1	1	1	3	1	1
Au (ppb)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
As	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cu	2	2	18	2	2	16	2	3	4	3	3	2	2	2	2	2	14	4	5
Pb	9	9	32	5	5	8	5	5	5	7	5	5	5	5	5	5	180	95	11
Zn	186	179	240	81	136	142	64	89	84	91	196	73	83	84	51	45	272	406	61
Ni	6	4	8	6	14	3	22	18	17	11	8	3	13	2	28	39	2	8	5
Co	2	3	3	1	2	3	1	4	3	2	8	2	3	2	2	2	1	3	2
Ct	12	14	9	14	10	8	34	41	28	15	9	3	27	10	75	92	3	3	3
V	3	3	4	2	3	3	2	22	19	9	77	6	3	3	3	3	4	4	3
La	15.20	30.10	27.50	19.30	11.80	37.20	19.10	20.60	18.60	26.90	43.00	9.00	28.70	25.20	22.60	21.60	25.80	24.60	27.20
Ce	3.60	72.00	61.00	47.00	29.00	84.00	46.00	48.00	44.00	61.00	93.00	22.00	71.00	59.00	49.00	52.00	70.00	52.00	52.00
Nd	1.50	24.00	20.00	18.00	11.00	26.00	18.00	20.00	18.00	23.00	33.00	12.00	27.00	25.00	20.00	20.00	31.00	13.00	16.00
Sm	4.00	7.90	6.10	5.00	3.20	8.60	5.60	5.00	4.10	7.10	7.00	3.10	6.90	7.00	5.80	5.60	12.00	4.00	6.00
Eu	0.80	1.70	1.40	1.00	0.60	1.70	1.20	0.90	0.90	1.30	0.70	0.40	1.20	1.60	1.10	1.00	1.60	0.60	0.60
Tb	0.90	1.70	1.10	1.00	0.60	1.50	1.40	1.10	1.10	1.50	0.30	0.30	1.10	1.60	0.30	1.20	1.60	0.70	0.70
Yb	3.70	7.90	5.10	4.00	2.30	7.60	4.50	3.70	4.60	6.20	4.40	4.30	4.80	6.20	4.80	4.40	12.90	2.60	1.80
Lu	0.63	1.19	0.83	0.64	0.35	1.22	0.67	0.57	0.74	1.05	0.77	0.75	0.77	0.93	0.78	0.67	1.87	0.38	0.36

奥会津地熱地域・中新統滝沢川層にみられる変質 (関)

(cont.)

Sample No. Loc./Well	18t-1396		18t-1501		18t-1610		18t-1652	
	87N-18t	18t-1501	87N-18t	18t-1501	87N-18t	18t-1610	87N-18t	18t-1652
Depth (m)	1396.0	1501.0	1610.0	1652.0				
Rock / Cut.	R	R	R	R	R	R	R	R
Formation	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk	Tk
Rock type	lp-ff	ff	lp-ff	lp-ff	lp-ff	lp-ff	lp-ff	lp-ff
Alter. type	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+	IC+
Alter. miner.	Q,Ch,Ab,Ed	Q,Il,Ch,Ab	Q,Ch,Di,Rd	Q,Ch,Ab,Kf	Q,Ch,Ab,Kf	Q,Ch,Ab,Kf	Q,Ch,Ab,Kf	Q,Ch,Ab,Kf
Prim. miner.	K,Pl	Q	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl
Temp. (C)	200	200	210	210	210	210	210	210
Description								
SiO2	62.16	67.82	55.82	68.26				
Al2O3	9.17	13.77	15.96	10.37				
Fe2O3	2.19	3.10	8.34	2.10				
MnO	0.08	0.22	0.23	0.08				
MgO	1.75	4.52	5.22	2.72				
CaO	9.28	1.35	1.79	4.01				
Na2O	0.33	0.16	5.57	2.80				
K2O	4.38	3.12	0.53	2.88				
TiO2	0.17	0.25	1.05	0.28				
P2O5	0.24	0.06	0.32	0.08				
LOI	10.43	5.53	4.32	5.13				
total	100.18	99.89	99.16	96.71				
S								
Ba	840	150	240	730				
Rb	92	93	10	77				
Sr	522	68	90	153				
Y								
Zr								
Cs	1	1	1	1				
Hf	4	5	4	2				
Sc	7	10	23	6				
Au (ppb)	1	1	4	1				
Ag	0	0	0	2				
As	0	9	0	1				
Sb	0	0	0	0				
Cu	2	2	6	4				
Pb	9	163	15	14				
Zn	64	139	189	82				
Ni	39	10	39	33				
Co	3	2	15	5				
Cr	90	19	82	99				
V	2	3	83	20				
La	16.40	23.40	16.00	12.10				
Ce	38.00	55.00	38.00	22.00				
Nd	17.00	24.00	20.00	11.00				
Sm	4.20	5.40	5.20	2.10				
Eu	0.80	1.00	1.30	0.60				
Tb	0.90	1.00	0.30	0.30				
Yb	2.70	3.70	3.50	0.90				
Lu	0.45	0.59	0.51	0.14				