

串木野-冠岳化石熱水系における石英・方解石脈の放射化分析

森下祐一* 佐々木祐二** 木村 幹***

Morishita, Y., Sasaki, Y. and Kimura, K. (1991) Neutron activation analyses of quartz-calcite veins in the Kushikino-Kammuridake fossil hydrothermal system. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 42 (3), p. 149-166, 4 fig., 4 tab.

Abstract: The Kushikino deposits, located in southern Kyushu of Japan, occur as fissure-filling epithermal veins in Neogene andesitic volcanic rocks. The veins consist of gold- and silver-bearing quartz and calcite with minor amounts of adularia, sericite and sulfides. In the area to the east of the Kushikino mine, there occurs E-W trending silicified zone with dimensions of 1 by 3 km at around Mt. Kammuridake. The zone is considered as the center of the hydrothermal system which was responsible for the mineralizations in the Kushikino-Kammuridake area.

Twenty-two elements including gold, silver, arsenic, antimony and six rare earth elements in quartz-calcite veins from nine drill holes in the Kushikino-Kammuridake area were determined by neutron activation analysis. Several gold values of quartz-calcite veins exceed 10 ppb in the Kushikino mining area, though the gold enrichment in veins is poor in the Kammuridake area. Ag/Au ratios in the Kushikino area are mostly 6 to 9 which are in good agreement with those in the Kushikino ore deposits, whereas Ag/Au ratios in the Kammuridake area are mostly over 100. No enrichments of gold are found in monomineralic vein samples of quartz or calcite. Chondrite-normalized REE patterns for quartz-calcite veins have positive Eu anomalies. These patterns imply that the vein-forming hydrothermal fluid was under reducing condition.

要 旨

串木野金銀鉱床地域を含む串木野-冠岳地域で得られた 9 本の試錐コアを切る石英・方解石脈の中性子放射化分析を行い, 金, 銀, ヒ素, アンチモン, 6 種の希土類元素を含む 22 種の元素の定量値を得た。串木野鉱床地域では金の濃度が 10 ppb 以上のものが多く, Ag/Au 比は 6-9 程度で串木野鉱床内の値とおおむね一致しているが, 冠岳周辺地域では金の濃集は見られず, Ag/Au 比は 100 を越えている。また, 一般に石英, 方解石が共存する試料に金の濃集が認められる。希土類元素の定量値をコンドライトの値で規格化したパターンには Eu の正の異常が認められ, このことは熱水溶液が還元的であった事を示唆している。

1. はじめに

熱水性鉱脈鉱床の成因を明らかにするためには, 鉱床本体の調査だけでなく, 鉱床をもたらした熱水系全体を視野に入れた研究も必要と考えられる。串木野鉱床(鹿児島県)は約 400 万年前に生成した浅熱水性鉱脈型金銀鉱床である。地質及び鉱床, 特に鉱脈構造については詳細に調査されている(例えば, 松任谷, 1967; 若林ほか, 1973; 祐下・植村, 1976)。その後の調査, 特に石英脈及び珪化岩中の流体包有物研究により, 串木野鉱床を生成した熱水系は鉱床東方の冠岳周辺地域に及ぶことが明らかになった(通商産業省資源エネルギー庁, 1981)。変質鉱物組合せや流体包有物の均質化温度に基づく研究によると, 冠岳地域は大規模な化石地熱地帯の中心で,

* 鉱物資源部

** 青山学院大学理工学部 (現日本原子力研究所東海研究所化学部)

*** 青山学院大学理工学部

Keywords: neutron activation analysis, gold, rare earth element, quartz vein, calcite vein, hydrothermal system, Kushikino, Kammuridake, Kyushu, Neogene

串木野鉱床はその西方に位置することが指摘された(橋詰・井沢, 1981)。このことは安定同位体手法を用いた研究によって裏付けられており(森下・松久, 1986)、串木野鉱床の鉱化熱水系を解明するためには研究対象地域を串木野-冠岳地域に拡張する必要が生じた。串木野-冠岳地域における変質鉱物の分布や岩石中の化学成分の濃度・移動については通商産業省資源エネルギー庁(1986)が膨大なデータに基づいて議論している。全岩分析値は、岩石-熱水系における最終的な元素の分布を知るには好都合だが、鉱化熱水溶液の化学を直接反映しているとは限らない。熱水系における溶液の物理化学的性質を知るためには、熱水溶液から直接沈澱、生成した石英・方解石脈の分析をすることが有用である。

串木野鉱床の金・銀の分布は坑内において詳細に調べられているが、その周辺地域に分布する細脈の化学分析値はほとんど報告されていない。本研究では、串木野-冠岳地域における試錐コア中の石英・方解石脈の化学分析を行い、熱水系内での元素の分布、熱水溶液の不均質性を明らかにする。鉱床周辺地域に分布する細脈中の金濃度は、鉱床内のそれと比べて相当低いことが予想されるため、検出限界の低い分析方法が必要である。また、主成分元素と微量元素(特に希土類元素)の分析を同時に行うため、分析方法は中性子放射化分析法を用いた。この方法で得られた分析値を使って、石英・方解石脈中の金と他元素との相関、元素間の相関、及び鉱物組成と元素濃度の関係について考察する。

本稿は、工業技術院特別研究「深部鉱物資源のポテンシャル評価に関する研究」の成果の一部である。

2. 分析試料

分析試料は、金属鉱業事業団が通商産業省資源エネルギー庁の委託を受けて北薩・串木野地域広域調査の一環として実施した試錐調査により得られたコアから採取した石英・方解石脈である。分析対象とした9本の試錐位置(第1図)と簡単な記載(通商産業省資源エネルギー庁, 1979, 1981, 1982, 1984)は次の通りである。分析した脈試料の特徴も併せて記す。

53 MAHT-2号(深度: 603.30 m, 方位: 175° M.N., -50°)は串木野鉱床荒川鍾群の西方に位置し、135.25 m 以浅では北薩中期火山岩類を、それ以深では北薩古期安山岩類を貫く。北薩中期火山岩類は、ほとんど熱水変質作用を受けていない。一方、串木野鉱床の胚胎母岩である北薩古期安山岩類は、緑泥石化、緑レン石化、炭酸塩化など、いわゆるプロピライト変質をしている。粘土化破砕帯は多いが、石英・方解石脈の発達は乏しい。

分析した試料は、フィルム状方解石細脈とパッチ状クリストバル石の2試料である。

54 MAHT-3号(深度: 504.60 m, 方位: 0° M.N., -50°)は串木野鉱脈群の南端に位置し、北薩古期安山岩類を貫く。湯河原沸石と濁沸石を含む試料があるが、多くの試料は石英・方解石脈である。

54 MAHT-4号(深度: 501.00 m, 方位: 306° M.N., -20°)は54 MAHT-3号と同位置から方位を変えて掘削したもので、北薩古期安山岩類を貫く。分析した2試料共、2-3 mm 幅の方解石細脈である。

55 MAHT-3号(深度: 350.95 m, 方位: 335° M.N., -40°)は串木野鍾群と荒川鍾群の間に位置し、荒川2号鍾上盤分岐脈(北薩古期安山岩類中)を貫く。濁沸石、石英、方解石を含むパッチ状試料の他は石英・方解石脈である。

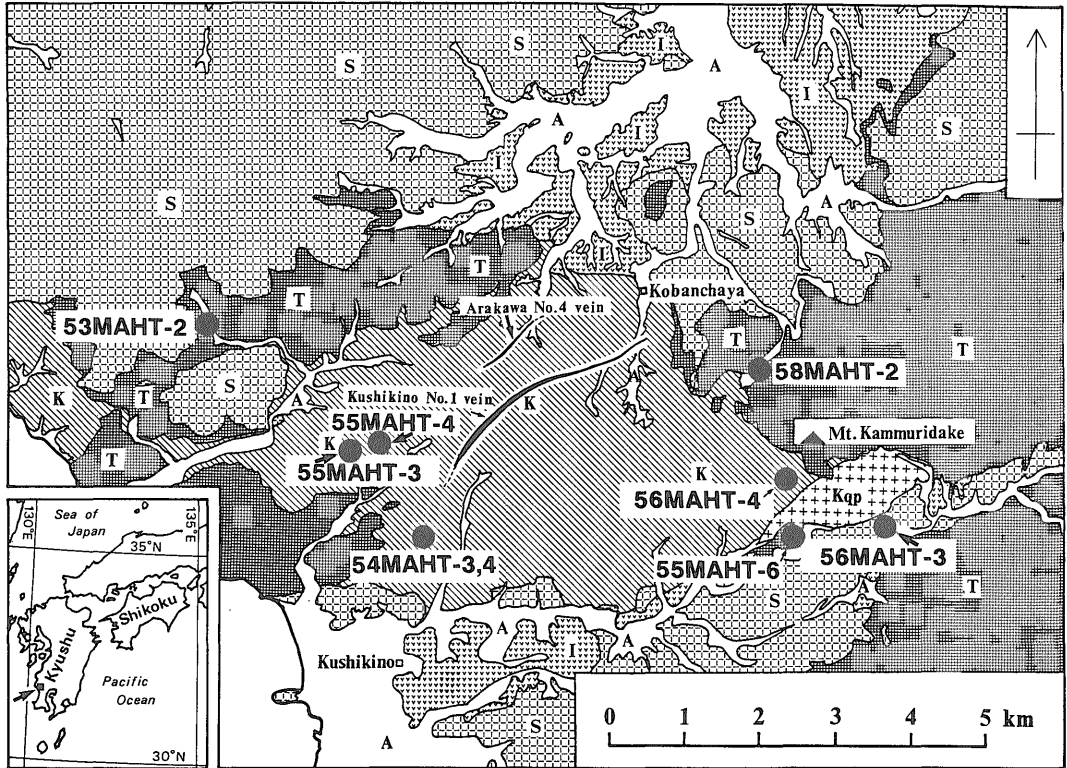
55 MAHT-4号(深度: 331.65 m, 方位: 335° M.N., -40°)は55 MAHT-3号の東北東約400 mに位置し、同試錐と平行に北薩古期安山岩類を貫く。脈状、鉱染状の石英・方解石試料であり、アデュラリアを含むものが2試料ある。

55 MAHT-6号(深度: 502.70 m, 方位: 347° M.N., -75°)は冠岳(西岳)の南方約1 km、串木野ダムの北側に位置し、81.00 m 以深で北薩古期安山岩類を貫く。136.7 m 試料は、晶洞を微量の絹雲母を伴った方解石が埋める。この他の11試料は方解石を主体とした細脈で、石英、アデュラリア、ワイラキイトを含む試料もある。

56 MAHT-3号(深度: 715.20 m, 方位: 330° M.N., -30°)は冠岳の南東約1.5 kmの地点に位置し、9本の試錐のうち東端にあたる。134.70 m 以浅は北薩中期火山岩類であるため熱水変質は微弱であり、石英・方解石脈は見出せない。134.70 m 以深は北薩古期安山岩類で、顕著な熱水変質作用を受けており、石英・方解石脈を伴う。鉱染状の脈が多く、晶洞や珪化母岩が部分的に見られる。石英または方解石のみから成るものが4試料、両者が共存するものが2試料ある。後者の2試料も石英、方解石が互いに偏在しており、両鉱物が同時に晶出したとは考えられない。

56 MAHT-4号(深度: 601.30 m, 方位: 320° M.N., -45°)は冠岳の南南西に位置し、北薩古期安山岩類を貫く。鉱染状方解石の空隙を後期晶出の石英が埋める試料やフィルム状方解石細脈試料を分析した。

58 MAHT-2号(深度: 701.68 m, 方位: 330° M.N., -60°)は冠岳の北西、北薩中期火山岩類分布域に位置し、冠岳地域の4本の試錐の北端にあたる。124.24 m



第1図 串木野-冠岳地域の概略地質図に示した試錐位置 (通商産業省資源エネルギー庁, 1979, 1981, 1982, 1984, 1985 による)。K: 北薩古期安山岩類, Kqp: 石英閃緑斑岩, T: 北薩中期火山岩類, S: 北薩新期火山岩類 (川内溶結凝灰岩及び川内玄武岩を含む), I: 始良火砕岩 (シラス), A: 沖積層。

Fig. 1 Generalized geologic map of the Kushikino-Kammuridake area. Locations of the drill holes are shown (after MITI, 1979, 1981, 1982, 1984, 1985).

K: Hokusatsu Older andesites, Kqp: Quartz diorite porphyry, T: Hokusatsu Middle-stage volcanics, S: Hokusatsu Younger volcanics (including the Sendai welded tuff and the Sendai basalt), I: Aira pyroclastic rocks (so-called "Shirasu"), A: Alluvium.

以深では北薩古期安山岩類を貫く。深度 300 m から孔底まで方解石細脈が普遍的に分布するが、裂カ系の発達が悪い。石英、方解石が共存するものが1試料あるが、粒径の大きな石英の間を方解石が埋める組織を示し、両者は異なるステージで晶出したと考えられる。

9本の試錐のうち、53 MAHT-2号-55 MAHT-4号の5本は串木野地域の鉱脈群の周辺に位置する。これに対し、55 MAHT-6号-58 MAHT-2号の4本は冠岳地域に分布する珪化岩脈の下部を貫いている。珪化岩脈は下部では石英・方解石脈に移化しているが、一般に裂カの発達が悪く、鉱染部や珪化部が多く見られる。串木野地域では石英・方解石脈が普遍的に分布する。冠岳地域でも石英、方解石の組合せを持つ試料は多いが、その多くは両者が互いに偏在しており、晶出ステージが異なる

可能性が高い。

串木野-冠岳化石熱水系の拡がり、北薩古期安山岩類の分布とはほぼ一致している (第1図)。北薩古期安山岩類は全体がプロピライト化しており、その上部は現在までに数百 m 削はくされたと考えられることから、現在の地表付近に見られる石英・方解石脈の生成温度に高いものがあっても矛盾しない。脈からは濁沸石、湯河原沸石、ワイラカイトの Ca 沸石が検出され、いずれも中性-アルカリ性の熱水から晶出したものと考えられる。

3. 実験法

試料はめのう乳鉢で粉末化し、X線粉末法で鉱物の同定を行った。この粉末試料を約 50 mg 正確に秤取し、ポリエチレン袋に2重封入した。標準試料は各元素の標

第1表 試錐コア中の脈試料の化学分析値と鉱物組成

Table 1 Chemical compositions and mineral assemblages of vein samples from the drill holes.

Drill hole, depth	53MAHT-2, 513.3 m	53MAHT-2, 516.8 m	54MAHT-3, 37.5 m	54MAHT-3, 64.6 m	54MAHT-3, 65.9 m	54MAHT-3, 130.6 m	54MAHT-3, 132.6 m
Mineral assemblage (determined by XRD)							
Quartz	—	Trace	Major	Major	Trace	Trace	Trace
Calcite	Major	—	Trace	—	Major	Major	Major
Other minerals		Cristobalite(Major) Montmorillonite (Trace)		Yugawaralite (Minor)			
Major elements (%)							
Ca	27 ± 3	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.3 ± 0.3	35 ± 2	34 ± 2	39 ± 2
Mn	0.65 ± 0.07	—	—	—	0.37 ± 0.09	0.20 ± 0.05	0.22 ± 0.08
Al	1.2 ± 0.3	2.0 ± 0.6	0.4 ± 0.1	2.0 ± 0.6	0.6 ± 0.2	0.13 ± 0.05	0.5 ± 0.2
K	0.05 ± 0.03	0.08 ± 0.03	0.033 ± 0.002	1.1 ± 0.2	0.2 ± 0.02	0.010 ± 0.004	0.11 ± 0.04
Fe	1.0 ± 0.1	2.2 ± 0.7	0.23 ± 0.02	0.16 ± 0.01	0.4 ± 0.2	0.18 ± 0.02	0.18 ± 0.01
Mg	—	—	—	—	0.5 ± 0.2	—	0.26 ± 0.09
Minor elements (ppm)							
Au	0.041 ± 0.009	0.017 ± 0.006	0.0066 ± 0.0007	0.740 ± 0.070	0.004 ± 0.002	0.011 ± 0.002	0.003 ± 0.001
Ag	—	—	—	5 ± 1	—	0.1 ± 0.05	—
As	9 ± 1	44 ± 9	5.7 ± 0.7	5.5 ± 0.8	1.5 ± 0.1	3 ± 1	0.38 ± 0.01
Sb	—	0.9 ± 0.2	29 ± 5	7 ± 1	0.2 ± 0.06	4.5 ± 0.5	0.13 ± 0.04
Cr	3.1 ± 0.8	3 ± 3	400 ± 30	30 ± 10	6.7 ± 0.7	21 ± 4	3 ± 2
Se	—	—	—	0.8 ± 0.3	—	0.4 ± 0.2	—
V	30 ± 5	140 ± 30	11 ± 3	11 ± 5	16 ± 4	1.9 ± 0.6	—
Cs	4 ± 2	19 ± 8	2.2 ± 0.2	3.3 ± 0.6	2 ± 1	0.33 ± 0.08	0.6 ± 0.2
W	—	—	4.4 ± 0.3	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.2	—	0.30 ± 0.01
Sc	11 ± 1	15 ± 6	1.2 ± 0.2	1.3 ± 0.2	5 ± 2	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.01
La	28 ± 9	0.51 ± 0.05	2.3 ± 0.2	1.3 ± 0.3	97 ± 9	1.5 ± 0.2	2.8 ± 0.6
Ce	100 ± 20	7 ± 2	4.1 ± 0.4	3.0 ± 0.3	200 ± 20	1.2 ± 0.4	4.1 ± 0.2
Sm	5.6 ± 0.6	0.25 ± 0.01	0.56 ± 0.08	0.68 ± 0.04	14 ± 1	0.21 ± 0.06	0.34 ± 0.02
Eu	1.5 ± 0.2	0.08 ± 0.02	0.25 ± 0.03	0.18 ± 0.03	9 ± 1	0.09 ± 0.02	0.32 ± 0.03
Tb	0.95 ± 0.05	0.06 ± 0.02	—	0.03 ± 0.02	1.9 ± 0.5	—	0.06 ± 0.02
Yb	4 ± 1	0.8 ± 0.3	—	0.08 ± 0.05	2.4 ± 0.8	—	0.13 ± 0.03

第1表 (つづき)
Table 1 (continued)

Drill hole, depth	54MAHT-3, 133.8 m	54MAHT-3, 140.1 m	54MAHT-3, 147.2 m	54MAHT-3, 455.6 m	54MAHT-3, 457.2 m	54MAHT-4, 176.0 m	54MAHT-4, 307.5 m
Mineral assemblage (determined by XRD)							
Quartz	Minor	—	Trace	—	Minor	—	—
Calcite	Major	Major	Major	Major	Major	Major	Major
Other minerals				Laumontite (Major)		Montmorillonite (Minor)	
Major elements (%)							
Ca	19 ± 3	31 ± 2	40 ± 2	14 ± 3	36 ± 2	33 ± 2	36 ± 2
Mn	0.1 ± 0.02	0.20 ± 0.04	0.14 ± 0.04	—	0.10 ± 0.03	0.4 ± 0.1	0.3 ± 0.1
Al	0.4 ± 0.1	2.0 ± 0.5	0.2 ± 0.05	4 ± 1	0.19 ± 0.03	0.8 ± 0.2	0.20 ± 0.05
K	0.04 ± 0.01	0.5 ± 0.2	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.02	0.01 ± 0.003	Trace	0.04 ± 0.02
Fe	0.17 ± 0.01	0.28 ± 0.03	0.13 ± 0.02	0.12 ± 0.03	0.16 ± 0.02	0.20 ± 0.03	0.34 ± 0.08
Mg	—	0.6 ± 0.1	—	—	—	—	—
Minor elements (ppm)							
Au	0.040 ± 0.030	0.0020 ± 0.0002	0.0020 ± 0.0006	0.002 ± 0.002	0.070 ± 0.030	0.003 ± 0.002	0.002 ± 0.002
Ag	0.3 ± 0.2	—	—	—	0.08 ± 0.04	—	—
As	8 ± 2	0.2 ± 0.04	0.47 ± 0.09	—	6 ± 2	—	0.4 ± 0.1
Sb	6.9 ± 0.1	—	—	0.6 ± 0.2	1.4 ± 0.3	—	0.05 ± 0.03
Cr	10 ± 5	3.1 ± 0.8	68 ± 6	7.4 ± 0.5	7.7 ± 0.4	9 ± 4	28 ± 7
Se	0.5 ± 0.1	—	—	—	0.4 ± 0.2	—	—
V	8.4 ± 3	28 ± 6	1.5 ± 0.5	—	5 ± 2	26 ± 8	4 ± 1
Cs	1.1 ± 0.3	6 ± 2	0.87 ± 0.08	15 ± 3	0.27 ± 0.05	0.25 ± 0.05	0.9 ± 0.3
W	0.26 ± 0.2	—	0.42 ± 0.09	—	—	3.1 ± 0.3	0.7 ± 0.3
Sc	0.15 ± 0.02	2.6 ± 0.2	0.42 ± 0.05	0.50 ± 0.02	0.23 ± 0.03	0.98 ± 0.03	2.1 ± 0.9
La	0.91 ± 0.05	41 ± 6	13 ± 2	2.1 ± 0.5	4.9 ± 0.7	11 ± 2	30 ± 3
Ce	0.7 ± 0.4	57 ± 6	19 ± 2	2.8 ± 0.4	6.6 ± 0.7	15 ± 2	70 ± 10
Sm	0.07 ± 0.04	5.1 ± 0.6	1.1 ± 0.2	0.24 ± 0.02	0.63 ± 0.05	2.3 ± 0.3	5.7 ± 0.8
Eu	0.05 ± 0.01	4.7 ± 0.3	0.37 ± 0.04	0.25 ± 0.02	0.28 ± 0.04	1.4 ± 0.2	3.2 ± 0.4
Tb	—	0.6 ± 0.2	—	—	0.02 ± 0.01	0.41 ± 0.08	0.9 ± 0.1
Yb	—	1.1 ± 0.2	—	—	0.3 ± 0.2	0.7 ± 0.2	1.3 ± 0.2

串木野-冠岳化石熱水系における石英・方解石脈の放射化分析 (森下 ほか)

第1表 (つづき)
Table 1 (continued)

Drill hole, depth	55MAHT-3, 168.4 m	55MAHT-3, 177.0 m	55MAHT-3, 178.1 m	55MAHT-3, 261.8 m	55MAHT-3, 265.1 m	55MAHT-3, 265.3 m	55MAHT-4, 197.7 m
Mineral assemblage (determined by XRD)							
Quartz	Minor	—	Major	Minor	Major	Major	—
Calcite	Minor	Major	Minor	Major	—	—	Major
Other minerals	Laumontite (Major)		Montmorillonite (Minor) Pyrite (Minor)				
Major elements (%)							
Ca	11 ± 2	38 ± 2	8 ± 2	34 ± 2	0.4 ± 0.3	—	40 ± 2
Mn	—	0.12 ± 0.03	0.07 ± 0.03	0.10 ± 0.03	—	—	1.0 ± 0.2
Al	6 ± 1	0.3 ± 0.1	0.5 ± 0.2	—	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.08	—
K	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.025 ± 0.005	0.018 ± 0.002	0.02 ± 0.005	0.03 ± 0.01	Trace
Fe	0.07 ± 0.01	0.12 ± 0.03	0.19 ± 0.03	0.03 ± 0.01	0.1 ± 0.05	0.37 ± 0.08	0.28 ± 0.07
Mg	—	—	—	—	—	—	0.24 ± 0.09
Minor elements (ppm)							
Au	0.02 ± 0.01	0.005 ± 0.003	0.04 ± 0.02	0.002 ± 0.001	—	0.008 ± 0.001	0.006 ± 0.004
Ag	—	—	0.26 ± 0.04	—	—	—	—
As	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.2	2.1 ± 0.3	0.21 ± 0.06	1.5 ± 0.4	1.0 ± 1.0	0.3 ± 0.1
Sb	0.6 ± 0.2	—	8 ± 2	1.6 ± 0.6	6 ± 2	29 ± 5	—
Cr	20 ± 10	20 ± 3	240 ± 40	37 ± 8	220 ± 50	600 ± 100	11 ± 2
Se	—	—	—	—	—	—	—
V	—	—	9 ± 3	—	—	2.3 ± 0.8	—
Cs	9.4 ± 0.2	1.4 ± 0.4	1.0 ± 0.3	0.39 ± 0.08	1.4 ± 0.5	3.0 ± 0.6	0.17 ± 0.07
W	—	0.2 ± 0.1	—	—	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.2	0.27 ± 0.08
Sc	0.14 ± 0.06	0.13 ± 0.04	0.05 ± 0.03	0.15 ± 0.04	0.03 ± 0.02	0.07 ± 0.02	0.07 ± 0.03
La	0.40 ± 0.09	3.1 ± 0.7	1.3 ± 0.2	10 ± 2	0.12 ± 0.04	0.17 ± 0.05	0.7 ± 0.4
Ce	0.7 ± 0.2	4.4 ± 0.9	1.6 ± 0.4	13 ± 4	—	—	0.4 ± 0.2
Sm	0.036 ± 0.004	0.37 ± 0.05	0.14 ± 0.02	0.9 ± 0.4	0.01 ± 0.005	0.015 ± 0.005	0.05 ± 0.05
Eu	0.02 ± 0.01	0.29 ± 0.03	0.14 ± 0.02	0.46 ± 0.06	0.016 ± 0.001	—	0.06 ± 0.02
Tb	—	0.03 ± 0.02	—	—	—	—	—
Yb	—	—	—	—	—	—	—

第1表 (つづき)
Table 1 (continued)

Drill hole, depth	55MAHT-4, 241.6 m	55MAHT-4, 257.5 m	55MAHT-4, 282.4 m	55MAHT-4, 314.0 m	55MAHT-4, 315.3 m	55MAHT-6, 136.7 m	55MAHT-6, 145.2 m
Mineral assemblage (determined by XRD)							
Quartz	Minor	Minor	Minor	Minor	Trace	—	—
Calcite	Major	Major	Major	Major	Major	Major	Major
Other minerals		Adularia (Trace)		Adularia (Minor)		Sericite (Trace)	
Major elements (%)							
Ca	30 ± 5	34 ± 2	36 ± 2	23 ± 2	40 ± 2	32 ± 8	39 ± 2
Mn	0.1 ± 0.02	0.2 ± 0.04	0.25 ± 0.05	0.06 ± 0.03	0.10 ± 0.04	0.18 ± 0.03	0.21 ± 0.04
Al	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.1	2.0 ± 0.4	0.1 ± 0.03	2 ± 0.6	0.4 ± 0.1
K	0.35 ± 0.07	0.4 ± 0.2	0.16 ± 0.09	3.2 ± 0.1	0.09 ± 0.03	0.55 ± 0.05	0.12 ± 0.01
Fe	—	0.14 ± 0.04	0.3 ± 0.1	0.15 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.39 ± 0.04	0.14 ± 0.02
Mg	—	—	—	3.0 ± 0.6	0.10 ± 0.04	—	—
Minor elements (ppm)							
Au	0.110 ± 0.010	0.300 ± 0.200	0.021 ± 0.002	0.006 ± 0.001	0.004 ± 0.002	0.0024 ± 0.0008	0.003 ± 0.001
Ag	0.35 ± 0.03	0.4 ± 0.2	0.13 ± 0.06	—	—	—	—
As	2.4 ± 0.3	0.6 ± 0.2	12 ± 3	0.9 ± 0.3	0.82 ± 0.2	0.5 ± 0.2	—
Sb	2.5 ± 0.7	2.0 ± 0.4	1.5 ± 0.4	3.7 ± 0.7	—	—	—
Cr	140 ± 30	19 ± 4	130 ± 60	120 ± 10	—	1.5 ± 0.5	31 ± 3
Se	0.6 ± 0.2	0.3 ± 0.2	0.35 ± 0.08	0.2 ± 0.04	—	—	—
V	—	3 ± 1	—	5 ± 2	1.1 ± 0.3	8 ± 2	4 ± 1
Cs	0.8 ± 0.2	1.0 ± 0.4	3.0 ± 1.0	2.6 ± 0.3	0.25 ± 0.05	3.6 ± 0.7	1.5 ± 0.3
W	1.1 ± 0.7	0.5 ± 0.08	1.3 ± 0.2	1.0 ± 0.2	0.48 ± 0.06	—	—
Sc	—	0.19 ± 0.08	0.6 ± 0.3	0.54 ± 0.02	0.24 ± 0.05	1.0 ± 0.2	1.1 ± 0.2
La	1.0 ± 0.3	1.0 ± 0.4	1.8 ± 0.4	4.7 ± 0.8	7.9 ± 0.3	33 ± 6	25 ± 2
Ce	—	0.7 ± 0.3	3.0 ± 0.4	5.8 ± 0.2	10 ± 2	52 ± 6	39 ± 5
Sm	0.10 ± 0.01	0.07 ± 0.02	0.23 ± 0.04	0.33 ± 0.02	0.45 ± 0.05	6.9 ± 0.6	4 ± 2
Eu	—	0.059 ± 0.005	0.14 ± 0.04	0.35 ± 0.05	0.41 ± 0.06	3.3 ± 0.5	3.3 ± 0.3
Tb	—	—	0.04 ± 0.02	—	—	1.5 ± 0.5	0.8 ± 0.2
Yb	—	—	—	—	—	1.1 ± 0.5	0.7 ± 0.2

第1表 (つづき)
Table 1 (continued)

Drill hole, depth	55MAHT-6, 145.4 m	55MAHT-6, 151.9 m	55MAHT-6, 182.1 m	55MAHT-6, 255.8 m	55MAHT-6, 332.2 m	55MAHT-6, 356.3 m	55MAHT-6, 377.7 m
Mineral assemblage (determined by XRD)							
Quartz	—	—	—	Minor	Minor	—	Minor
Calcite	Major	Major	Major	Major	Major	Major	Major
Other minerals					Wairakite (Major)		
Major elements (%)							
Ca	33 ± 2	36 ± 2	39 ± 2	33 ± 2	9.8 ± 0.3	40 ± 2	37 ± 2
Mn	0.3 ± 0.1	0.21 ± 0.06	0.3 ± 0.1	0.28 ± 0.08	—	0.13 ± 0.03	0.33 ± 0.09
Al	0.6 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.3 ± 0.1	0.6 ± 0.2	5 ± 1	—	0.8 ± 0.2
K	0.13 ± 0.08	0.2 ± 0.1	0.02 ± 0.02	0.09 ± 0.04	0.22 ± 0.05	Trace	0.20 ± 0.02
Fe	0.20 ± 0.01	0.060 ± 0.005	0.19 ± 0.02	0.24 ± 0.01	0.28 ± 0.02	0.075 ± 0.008	0.80 ± 0.08
Mg	—	—	—	—	—	—	—
Minor elements (ppm)							
Au	0.003 ± 0.002	—	0.0015 ± 0.0005	0.0019 ± 0.0008	0.006 ± 0.002	0.0016 ± 0.0007	0.003 ± 0.002
Ag	—	—	—	—	—	—	—
As	0.3 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.5 ± 0.3	1.6 ± 0.4	1.9 ± 0.3	0.10 ± 0.05	0.8 ± 0.5
Sb	0.15 ± 0.05	—	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.10 ± 0.05	0.26 ± 0.08
Cr	2.7 ± 0.6	4.1 ± 0.8	4 ± 1	6 ± 1	19 ± 6	2 ± 1	14 ± 9
Se	—	—	—	—	—	—	—
V	1.8 ± 0.5	3 ± 1	2 ± 1	4 ± 1	—	—	—
Cs	1.6 ± 0.4	0.9 ± 0.2	0.17 ± 0.03	0.7 ± 0.2	610 ± 30	0.14 ± 0.02	1.0 ± 0.2
W	—	—	—	—	—	0.16 ± 0.05	—
Sc	0.81 ± 0.07	0.10 ± 0.02	1.3 ± 0.2	1.6 ± 0.2	1.7 ± 0.3	0.13 ± 0.02	1.9 ± 0.2
La	15 ± 3	0.9 ± 0.6	36 ± 3	52 ± 7	3.4 ± 0.1	3.5 ± 0.6	39 ± 9
Ce	26 ± 4	0.6 ± 0.2	56 ± 6	100 ± 20	7 ± 2	4.8 ± 0.6	71 ± 7
Sm	2.6 ± 0.4	0.15 ± 0.05	9 ± 1	12 ± 2	0.72 ± 0.09	0.8 ± 0.2	8.6 ± 0.7
Eu	2.6 ± 0.4	0.04 ± 0.01	6.1 ± 0.5	4.8 ± 0.3	0.31 ± 0.09	0.96 ± 0.02	3.7 ± 0.6
Tb	0.3 ± 0.2	—	1.8 ± 0.2	1.7 ± 0.9	—	0.11 ± 0.04	1.2 ± 0.2
Yb	0.6 ± 0.2	—	2.3 ± 0.3	2.8 ± 0.6	—	0.12 ± 0.04	2.0 ± 0.3

第1表 (つづき)
Table 1 (continued)

Drill hole, depth	55MAHT-6, 406.2 m	55MAHT-6, 436.3 m	55MAHT-6, 443.3 m	56MAHT-3, 186.6 m	56MAHT-3, 190.3 m	56MAHT-3, 195.9 m	56MAHT-3, 202.3 m
Mineral assemblage (determined by XRD)							
Quartz	—	Minor	Minor	Major	Major	Major	Minor
Calcite	Major	Major	Major	—	—	—	Major
Other minerals		Adularia (Minor)					
Major elements (%)							
Ca	39 ± 2	35 ± 2	36 ± 2	—	—	—	30 ± 2
Mn	0.14 ± 0.04	0.21 ± 0.04	0.32 ± 0.09	—	—	—	0.2 ± 0.05
Al	0.4 ± 0.1	0.8 ± 0.2	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.5 ± 0.2	0.3 ± 0.1	0.6 ± 0.2
K	0.16 ± 0.02	0.84 ± 0.03	0.14 ± 0.02	0.02 ± 0.01	0.16 ± 0.03	0.02 ± 0.01	0.11 ± 0.02
Fe	0.12 ± 0.01	0.16 ± 0.02 [†]	0.24 ± 0.01	0.5 ± 0.1	0.34 ± 0.04	0.27 ± 0.01	0.19 ± 0.05
Mg	0.32 ± 0.08	—	—	—	—	—	0.5 ± 0.2
Minor elements (ppm)							
Au	0.002 ± 0.0006	0.002 ± 0.001	0.002 ± 0.002	0.004 ± 0.002	0.012 ± 0.002	0.0021 ± 0.0007	0.003 ± 0.002
Ag	—	—	—	—	3.0 ± 0.6	—	—
As	0.13 ± 0.03	0.32 ± 0.04	2.2 ± 0.8	1.2 ± 0.3	1.4 ± 0.6	1.2 ± 0.2	0.3 ± 0.1
Sb	0.21 ± 0.05	0.06 ± 0.04	0.12 ± 0.06	6 ± 2	12 ± 2	11 ± 4	0.4 ± 0.2
Cr	2.1 ± 0.5	3 ± 1	3.8 ± 0.3	1000 ± 200	700 ± 100	560 ± 30	110 ± 20
Se	—	—	—	—	—	—	—
V	5 ± 1	—	7 ± 2	3 ± 1	—	1.2 ± 0.3	40 ± 10
Cs	0.4 ± 0.1	0.37 ± 0.02	0.7 ± 0.2	0.7 ± 0.2	1.1 ± 0.2	0.8 ± 0.1	1.9 ± 0.7
W	—	—	0.17 ± 0.03	2.5 ± 0.4	1.0 ± 0.2	1.0 ± 0.2	0.6 ± 0.3
Sc	1.3 ± 0.1	0.57 ± 0.04	3.5 ± 0.2	0.48 ± 0.03	3.0 ± 0.3	0.05 ± 0.01	4 ± 2
La	8.3 ± 0.6	4.4 ± 0.8	9.7 ± 0.4	0.08 ± 0.02	0.29 ± 0.04	0.05 ± 0.02	2.8 ± 0.4
Ce	9.8 ± 0.4	6.5 ± 0.3	15 ± 2	—	—	—	6 ± 2
Sm	1.0 ± 0.1	0.59 ± 0.04	1.7 ± 0.2	0.02 ± 0.01	0.058 ± 0.006	—	1.4 ± 0.2
Eu	0.9 ± 0.2	0.16 ± 0.03	0.57 ± 0.06	—	0.022 ± 0.002	—	0.57 ± 0.03
Tb	0.15 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.3 ± 0.2	—	—	—	0.28 ± 0.03
Yb	0.25 ± 0.03	0.08 ± 0.04	0.5 ± 0.2	—	—	—	0.7 ± 0.2

串木野-冠岳化石熱水系における石英・方解石脈の放射線分析 (森下 ほか)

第1表 (つづき)
Table 1 (continued)

Drill hole, depth	56MAHT-3, 472.6 m	56MAHT-3, 510.0 m	56MAHT-4, 243.1 m	56MAHT-4, 245.4 m	56MAHT-4, 299.1 m	56MAHT-4, 511.4 m	56MAHT-4, 581.9 m
Mineral assemblage (determined by XRD)							
Quartz	Trace	—	Major	Minor	Trace	Trace	Trace
Calcite	Major	Major	Trace	Major	Major	Major	Major
Other minerals				Adularia (Trace) Pyrite(Trace)			Adularis (Trace)
Major elements (%)							
Ca	31 ± 2	31 ± 2	0.7 ± 0.2	27 ± 7	34 ± 2	39 ± 2	40 ± 6
Mn	0.8 ± 0.3	0.4 ± 0.2	—	0.36 ± 0.09	0.6 ± 0.1	0.2 ± 0.05	0.13 ± 0.04
Al	0.10 ± 0.03	1.0 ± 0.3	0.3 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.7 ± 0.2	0.1 ± 0.03	1.2 ± 0.4
K	0.08 ± 0.02	0.3 ± 0.2	0.015 ± 0.006	0.12 ± 0.01	0.20 ± 0.09	0.03 ± 0.02	1.1 ± 0.2
Fe	0.54 ± 0.08	1.0 ± 0.4	0.26 ± 0.03	0.17 ± 0.01	0.30 ± 0.07	0.28 ± 0.07	0.28 ± 0.04
Mg	—	0.6 ± 0.2	—	—	0.9 ± 0.2	0.2 ± 0.05	—
Minor elements (ppm)							
Au	0.0031 ± 0.0007	0.009 ± 0.002	0.002 ± 0.001	0.0011 ± 0.0005	0.003 ± 0.002	0.0042 ± 0.0008	0.0014 ± 0.0007
Ag	—	—	0.2 ± 0.2	—	—	—	—
As	1.1 ± 0.3	13 ± 3	1.1 ± 0.2	0.7 ± 0.2	0.4 ± 0.2	3.0 ± 0.6	2.0 ± 0.3
Sb	0.25 ± 0.07	—	9 ± 1	0.9 ± 0.2	—	0.28 ± 0.08	0.3 ± 0.1
Cr	110 ± 10	120 ± 20	600 ± 100	200 ± 50	54 ± 2	21 ± 8	50 ± 10
Se	—	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.4	—	—	—	—
V	4 ± 1	22 ± 5	—	—	—	4 ± 1	14 ± 3
Cs	1.2 ± 0.4	9 ± 2	0.91 ± 0.04	0.23 ± 0.06	3 ± 1	0.12 ± 0.06	1.5 ± 0.4
W	6.4 ± 0.9	—	1.0 ± 0.1	0.3 ± 0.2	—	—	—
Sc	1.3 ± 0.1	4 ± 2	0.067 ± 0.007	0.70 ± 0.02	2.5 ± 0.9	1.3 ± 0.2	3.5 ± 0.8
La	12 ± 2	29 ± 6	0.36 ± 0.04	2.6 ± 0.3	5.6 ± 0.6	50 ± 10	37 ± 1
Ce	24 ± 4	57 ± 4	—	3.7 ± 0.7	8 ± 2	90 ± 20	61 ± 7
Sm	5.7 ± 0.8	11 ± 3	0.13 ± 0.02	0.38 ± 0.03	1.2 ± 0.3	10 ± 2	5.9 ± 0.4
Eu	3.2 ± 0.2	4.1 ± 0.4	0.11 ± 0.04	0.46 ± 0.04	1.7 ± 0.3	4.6 ± 0.6	2.1 ± 0.4
Tb	1.1 ± 0.2	1.9 ± 0.2	—	—	—	1.6 ± 0.4	1.2 ± 0.3
Yb	1.7 ± 0.2	4.8 ± 0.3	—	—	—	2.7 ± 0.7	1.9 ± 0.4

第1表 (つづき)
Table 1 (continued)

Drill hole, depth	58MAHT-2, 302.5 m	58MAHT-2, 324.4 m	58MAHT-2, 365.4 m	58MAHT-2, 420.9 m	58MAHT-2, 422.5 m
Mineral assemblage (determined by XRD)					
Quartz	—	—	—	Major	—
Calcite	Major	Major	Major	Major	Major
Other minerals		Sericite (Trace)			
Major elements (%)					
Ca	35 ± 2	28 ± 5	40 ± 2	16 ± 2	31 ± 2
Mn	0.7 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.10 ± 0.03	0.42 ± 0.08
Al	—	0.8 ± 0.2	0.2 ± 0.04	0.5 ± 0.1	0.6 ± 0.2
K	0.016 ± 0.003	0.44 ± 0.08	0.054 ± 0.004	0.05 ± 0.03	0.07 ± 0.04
Fe	0.25 ± 0.03	0.23 ± 0.04	0.18 ± 0.02	0.14 ± 0.03	0.17 ± 0.02
Mg	—	—	—	—	—
Minor elements (ppm)					
Au	—	0.0034 ± 0.0006	0.0023 ± 0.0007	0.001 ± 0.0003	0.0035 ± 0.0008
Ag	—	—	—	—	—
As	1.2 ± 0.2	0.3 ± 0.2	0.9 ± 0.1	0.37 ± 0.08	—
Sb	—	—	—	1.3 ± 0.7	—
Cr	1.8 ± 0.3	2 ± 1	2.3 ± 0.4	25 ± 5	2.3 ± 0.7
Se	—	—	—	—	—
V	—	9 ± 3	5 ± 1	—	2.0 ± 0.5
Cs	0.21 ± 0.05	2.0 ± 0.4	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.2	0.6 ± 0.2
W	—	—	—	0.1 ± 0.1	—
Sc	1.4 ± 0.3	4.7 ± 0.5	1.9 ± 0.2	0.2 ± 0.1	0.25 ± 0.03
La	15 ± 6	68 ± 5	19 ± 3	2.1 ± 0.3	5.9 ± 0.9
Ce	32 ± 4	100 ± 10	22 ± 3	2.3 ± 0.9	6.0 ± 0.3
Sm	3.4 ± 0.8	11 ± 2	2.8 ± 0.4	0.20 ± 0.04	0.8 ± 0.1
Eu	11 ± 2	6.6 ± 0.8	3.0 ± 0.4	0.23 ± 0.03	0.55 ± 0.02
Tb	1.3 ± 0.3	1.7 ± 0.8	0.37 ± 0.04	—	0.021 ± 0.003
Yb	0.66 ± 0.03	1.9 ± 0.2	0.5 ± 0.1	—	0.07 ± 0.02

準溶液を調製し、1 cm 四方に切った濾紙に固着し、ポリエチレン袋に2重封入した。中性子照射は日本原子力研究所 JRR-4、T パイプ及び気送管で行った。石英・方解石脈試料は化学的に分離、濃縮せずに中性子照射し、照射試料から放出される γ 線スペクトルを測定する非破壊放射化分析法により分析することができる。この方法では化学分離が不要なため分離時の収率について考慮する必要がなく、確認した元素すべての同時定量が可能である。 γ 線の測定は青山学院大学理工学部において Ortec 社製 Ge (Li) 半導体検出器を用いて行い、計数装置は Nuclear Data 社製 ND 65 型多重波高分析器を使用した(佐々木, 1987)。

4. 分析結果

非破壊中性子放射化分析の結果、金、銀、ヒ素、アン

チモン、6種の希土類元素を含む22種の元素について定量値が得られた。第1表、第2表は9本の試錐コアから得た各試料の分析値(佐々木, 1987)である。試料の鉱物組成は X 線粉末法による定性値を示した。

第2表 塩酸処理試料の Au, Ag 分析値
Table 2 Gold and silver contents of the samples which were treated with hydrochloric acid.

Sample	Au (ppm)	Ag (ppm)
55MAHT-4, 302.5m	0.013 ± 0.008	—
55MAHT-4, 304.5m	0.008 ± 0.004	0.11 ± 0.04
55MAHT-4, 309.5m	0.005 ± 0.004	—
56MAHT-3, 156.4m	0.030 ± 0.010	2.5 ± 0.9
56MAHT-3, 247.0m	0.0022 ± 0.0003	0.4 ± 0.2
56MAHT-4, 277.0m	0.006 ± 0.002	—

第3表 金と他元素との相関関係。Au ≥ 10 ppb の試料と Au < 10 ppb の試料の平均化学組成 (53MAHT-2号コアの試料を除く)

Table 3 Comparison of the average chemical composition of the samples containing more than 10 ppb gold with that of the samples containing less than 10 ppb gold (excluding the samples from the 53MAHT-2 drill hole).

	Average composition of Au ≥ 10 ppb samples (n = 10)	Average composition of Au < 10 ppb samples (n = 42)	Average composition of all the samples (n = 52)	Crustal average*
Ca	21 %	28 %	27 %	4.15 %
Mn	0.10%	0.25%	0.22%	0.095%
Al	1.1 %	0.73%	0.80%	8.23 %
K	0.23%	0.23%	0.23%	2.09 %
Fe	0.17%	0.25%	0.24%	5.63 %
Mg	0 %	0.17%	0.14%	2.33 %
Au	136 ppb	3.03ppb	28.7 ppb	4 ppb
Ag	0.96ppm	0.00ppm	0.19ppm	0.07 ppm
As	4.1 ppm	1.2 ppm	1.7 ppm	1.8 ppm
Sb	4.6 ppm	2.4 ppm	2.8 ppm	0.2 ppm
Cr	130 ppm	110 ppm	110 ppm	100 ppm
Se	0.34ppm	0.02ppm	0.08ppm	0.05 ppm
V	3.8 ppm	5.6 ppm	5.2 ppm	135 ppm
Cs	2.1 ppm	(1.7 ppm)** 16 ppm	(1.8 ppm)** 14 ppm	3 ppm
W	0.45ppm	0.59ppm	0.56ppm	1.5 ppm
Sc	0.58ppm	1.3 ppm	1.2 ppm	22 ppm
La	1.4 ppm	17 ppm	14 ppm	30 ppm
Ce	1.8 ppm	29 ppm	24 ppm	60 ppm
Sm	0.22ppm	3.2 ppm	2.6 ppm	6.0 ppm
Eu	0.10ppm	2.1 ppm	1.7 ppm	1.2 ppm
Tb	0.01ppm	0.51ppm	0.41ppm	0.9 ppm
Yb	0.04ppm	0.74ppm	0.60ppm	3.0 ppm

* : Abundance of chemical elements in the continental crust (Taylor, 1964).

** : excluding the value of 55MAHT-6, 332.2 m sample.

Au の分析値は串木野地域で 0 (検出限界以下を意味する。以下同じ)-740 ppb, 冠岳地域では 0-12 ppb の範囲にある。As の分析値は串木野地域で 0-44 ppm, 冠岳地域で 0-13 ppm であり, Sb は同様に 0-29 ppm 及び 0-12 ppm である。主成分値は Al が 0-6% 及び 0-5%, Ca が 0-40% 及び 0-40%, Fe が 0-2.2% 及び 0.06-1.0%, K が Trace-3.2% 及び Trace-1.1%, Mg が 0-3.0% 及び 0-0.9%, Mn が 0-1.0% 及び 0-0.7% (以上いずれも串木野地域の値, 冠岳地域の値の順である) の範囲にある。

X 線粉末回折法による定性的な鉱物組成と主成分値の対応はおおむね整合的であると言える。ただし X 線による検出限界はあまり低くないため, 微量の粘土鉱物やアデュラリア等の影響で Al 等が検出された場合でも X 線粉末回折法では検出できない場合がある。また, 鉱物中の元素を他の元素が一部置換して理想化学式からずれる場合や, 結晶性の良くない鉱物が若干量混入した場合にも両者の不一致が起こり得ると考えられる。

全分析値の平均値 (後に述べる理由により, 53 MAHT-2 号コアの値を除外する) を地殻平均値と比較すると, Au, Ag, Sb, Ca, Mn の鉱床関連元素が石英・方解石脈中に濃集していることがわかる (第 3 表)。この他, Cs (14 ppm) の値も高いが, 55 MAHT-6 号, 332.2 m の試料が 610 ppm と極めて高い値を示すためである。55 MAHT-6 号のコアで 332.2 m の試料を除いた 11 試料の平均は 1.0 ppm であり, 他のすべてのコアを含めても 332.2 m の試料の次に高い値は 35 ppm で, 332.2 m の試料が異常に高い値を持つことがわかる。332.2 m の試料は方解石, 石英の他に相当量 (40% 程度) のワイラカイトを含んでおり, Cs はこの中に取込まれているものと考えられる。Cs を持つ鉱物であるポルサイトの化学組成はワイラカイトの Ca を Cs で置換えたものと類似しているが, X 線回折パターンが異なる。ただし, X 線粉末回折チャートからはポルサイトの存在は確認されていない。ワイラカイトを含有する試料は 1 つだけであり, この 332.2 m の試料を除いた Cs の平均濃度は 2.8 ppm となる。

5. 串木野-冠岳地域における金の分布

串木野鉱床地域の試錐コアでは金の濃度が 10 ppb 以上のものが多く, 中には数百 ppb の濃集が認められるものがある。これは, 串木野鉱床の派生脈を切る試錐コアがあるためと考えられる。一方, 冠岳周辺地域ではほとんどの試料で数 ppb 以下であり, 深部においても金濃度は増加しない。森下・松久 (1981) は, 坑内におい

て石英・方解石の平衡組合せが確認された地点が金の富鉱部に対応している事を指摘したが, 試錐コアにおいても石英または方解石を欠く試料で金が 10 ppb 以上検出されたものはそれぞれ 1 つずつしかない。この他, クリストバル石+石英+モンモリロナイト及び石英+湯河原沸石の鉱物組合せで金を 10 ppb 以上含むものがそれぞれ 1 試料ずつある。このうち, クリストバル石とモンモリロナイトを含む試料 (53 MAHT-2 号, 516.8 m) は, 比較的低温で生成した可能性がある。54 MAHT-3 号, 64.6 m で検出された湯河原沸石の生成環境は明らかにされていないが, 宮城県鬼首地熱地帯で誰錐コアより採取された湯河原沸石 (Seki and Okumura, 1968) は濁沸石と共存しており, 高温を指示しているとは言えない。これら 2 試料は石英・方解石脈の発達のない地点で生成しており, 大量の熱水が関与した鉱脈と比較して, 熱水と母岩との局所的な反応に規制され易い環境であったと考えられる。

Ag/Au 比に関しては, 検出限界以下の銀濃度を持つ試料が多かったため, Au, Ag 両方の定量値が得られた試料は塩酸処理試料の分析値 (第 2 表) を含めて 13 個に留まった。第 2 表は, 石英の酸素同位体比を測定する目的で塩酸処理により方解石を除去した試料の Au, Ag 分析値を示したものである。これらのうち, 串木野鉱床地域の試錐コアでは Ag/Au 比は 6-9 程度であり, 串木野鉱床内の値とおおむね一致している。一方, 冠岳周辺地域では Ag/Au 比は 100 を越えている。

6. 元素間の相関関係

金と他元素との相関関係は必ずしも明瞭ではないが, Au \geq 10 ppb の試料と Au<10 ppb の試料に分け, それぞれのグループについて各元素濃度の平均値を計算して示した (第 3 表)。表から, Ag や As は Au と正の相関があると言える。Au と Se にも正の相関が認められるが, 個々の値を見るとむしろ Ag と Se の相関関係の方が強いと思われる。Ag と Se はナウマン鉱として産するものと推定される。Au と Ag, Ag と Se の正の相関から Au と Se の相関関係が生じたものと考えられる。また, Sb も Au と弱い相関関係があるようである。一方, 金と希土類元素は負の相関があり, カルシウムとも弱い負の相関があるように見える。希土類元素は方解石の中に取込まれているものと見られ, 方解石の量 (Ca 濃度) と希土類元素の濃度は正の相関がある。Mn は Ca の特に多い試料でのみ検出され, Ca と正の相関がある。これは, 方解石の Ca サイトを約 1% Mn が置き換えているためであると考えられる。

7. 希土類元素

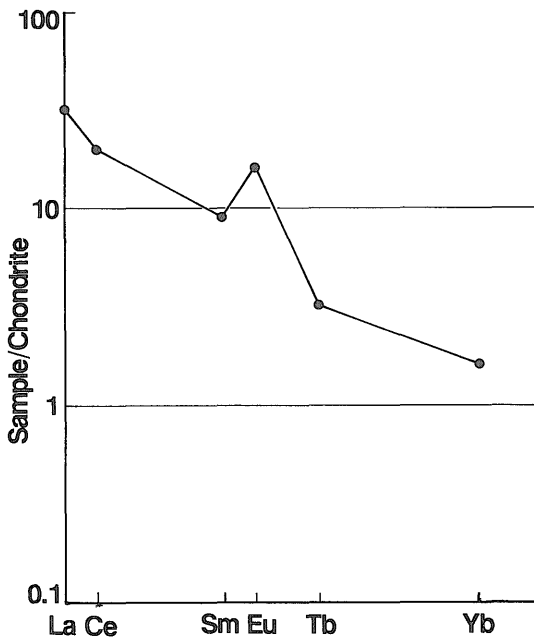
本研究では La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb の6つの希土類元素の定量値が得られた。定量された全試料の平均値を Leedey コンドライトの値 (Masuda *et al.*, 1973; Masuda, 1975) で規格化したパターン (Masuda-Coryell プロット) を第2図に示す。曲線は左(軽希土)上がりで, Eu の正の異常が認められる。個々の試料の定量値からおおむね同じパターンが得られる。この Eu の異常は, 通常の+3価のもの他に+2価の Eu が存在するために生ずると考えられる。Kerrich and Fryer (1979) は Fe の+2価と+3価の比と Eu の値から, Dome 鉱山産石英脈の示す Eu の正の異常は熱水溶液の還元性を示す, と結論付けた。串木野-冠岳熱水系においても, 熱水溶液中の Eu の大部分が還元的な環境下で+2価として存在し, 方解石の Ca を置換するなどして正の異常が生じたものと考えられる。

一方, 安山岩等に含まれる斜長石の REE パターンは, 一般に Eu の正の異常を示す(例えば, Schnetzler and Philpotts, 1970; Nagasawa and Schnetzler, 1971)。その原因となる Eu^{2+}/Eu^{3+} 比が斜長石で高くなり, その値が環元的な環境でより大きくなることは, 分配実験で示されている (Drake, 1975)。仮に鉱床胚

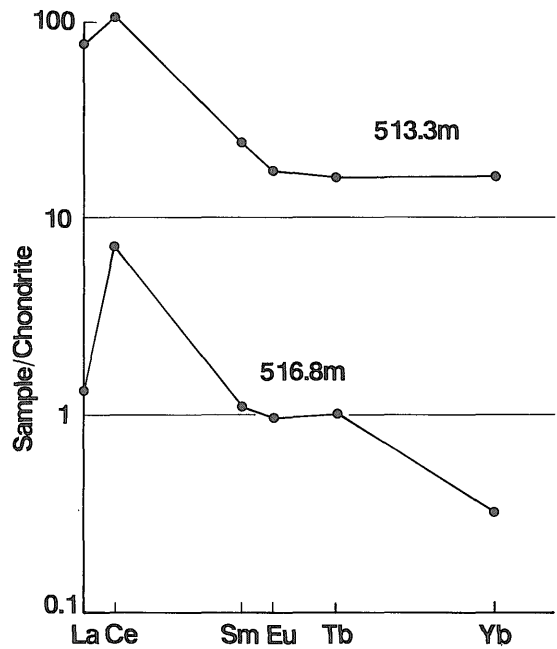
胎母岩中の斜長石が熱水溶液と反応して Eu に富む REE が熱水に付加されると, 生成する石英・方解石脈は Eu の正の異常を示すことになる。しかし, 串木野-冠岳地域において, 鉱化に前駆する母岩のプロピライト化に伴って斜長石と溶液の反応が起きたとすると, このプロセスによる鉱化熱水溶液への寄与は無視できる。

53 MAHT-2号のコア(試料数は2個)では, REE パターンがその他のものとは異なっている(第3図)。ここでは Eu の異常は見られず, かわりに Ce の正の異常が認められる。このことは, これらの試料を晶出させた熱水溶液が酸化的であったことを示唆する。このコアでは石英脈はほとんど見られず, 今回分析した2試料も方解石細脈とクリストバル石の卓越する試料である。いずれの試料においても Sc (11及び15 ppm) と V (30及び140 ppm) の濃度が高く, 他のコア全体の平均値 (Sc: 1.2 ppm, V: 5.1 ppm) と比べて明らかに異なっている。

本コア周辺における母岩の変質は, スメクタイト変質を主体とする弱変質であり, 他のコアで見られるプロピライト変質は認められない(巖谷, 私信)。この53 MAHT-2号誰維は串木野鉱脈群の西方約2kmに位置し, 串木野-冠岳熱水系の端にあたると考えられる。こ



第2図 全試料の平均希土類元素パターン
Fig. 2 Average REE pattern for all the vein samples.



第3図 53 MAHT-2号コアの希土類元素パターン
Fig. 3 REE patterns for the vein samples from the 53 MAHT-2 drill hole.

のような場所では鉱化熱水の寄与は相対的に小さく、他の溶液（溶存酸素に富む浅所地下水等）の混入により、熱水は比較的酸化環境にあったものと考えられる。以上の理由により、53 MAHT-2号コアの試料は串木野-冠岳熱水系における性質を示していないと考え、この化学分析値を除外して考察することとした。

8. 考 察

石英・方解石脈の鉱物組成と微量成分元素の相関関係を論じるには分析値が少ないが、全分析値（酸処理した試料及び53 MAHT-2号コアの試料を除く）を石英、方解石の量比で分類したそれぞれの平均値を第4表に示す。この表は石英、方解石以外の鉱物の有無は分類の基準にしていないので、例えば石英、方解石共存試料のグループにはアデュラリア等が共存するものとししないもの

とを含んでいる。石英または方解石を欠く試料の金濃度は低いと述べたが、第4表の方解石を含まない試料のグループで金の濃度が高い。これは、湯河原沸石を伴う石英脈試料（54 MAHT-3, 64.6 m）に高濃度の金が検出され、平均値に大きく寄与しているためである。第4表の金のデータを全試料個別にプロットした第4図は、この試料（図中の×印）の特異性を示している。そこで、この試料の値を除外すると、方解石を欠く試料の金濃度は平均5 ppbとなり、石英または方解石を欠く試料中には金は平均5 ppb以下しか含まれていない、と言える。一方、石英・方解石共存試料には金の濃集が見られるものが多い（第4図、第4表）。

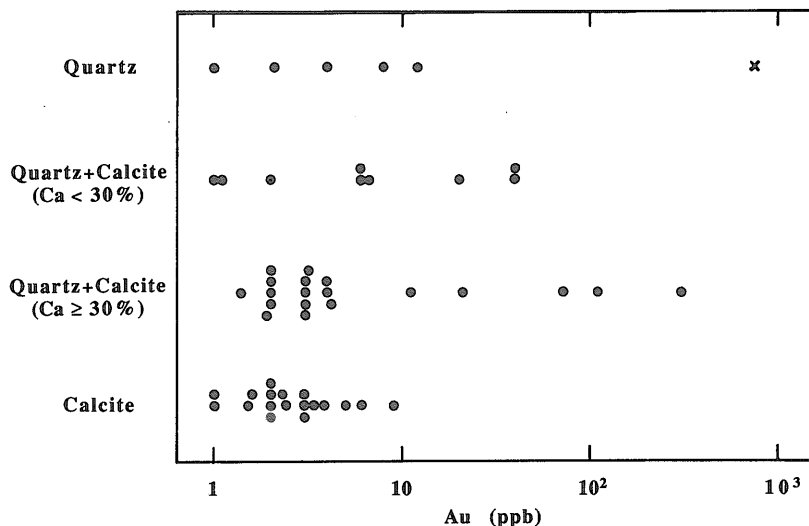
森下・松久（1981）は、串木野鉱脈の石英と方解石が共存する試料について、両者が密に共存する試料と、互いに偏在する試料とに分けて両鉱物の酸素同位体比を測

第4表 石英・方解石組合せごとの平均化学組成（53MAHT-2号コアの試料を除く）
Table 4 Average chemical compositions of several kinds of quartz-calcite assemblages (excluding the samples from the 53MAHT-2 drill hole).

	Quartz (n=6)	Quartz+ Calcite(Ca<30%) (n=9)	Quartz+ Calcite(Ca≥30%) (n=19)	Calcite (n=18)
Ca	0.28%	13 %	35 %	34. %
Mn	0 %	0.08%	0.26%	0.32%
Al	0.62%	1.72%	0.41%	0.78%
K	0.23%	0.41%	0.22%	0.15%
Fe	0.48%	0.18%	0.24%	0.24%
Mg	0 %	0.33%	0.13%	0.10%
Au	(5.2 ppb)* 128 ppb	13.6 ppb	29.0 ppb	2.9 ppb
Ag	1.3 ppm	0.08ppm	0.06ppm	0 ppm
As	2.0 ppm	2.3 ppm	2.1 ppm	1.0 ppm
Sb	12 ppm	6.6 ppm	0.83ppm	0.07ppm
Cr	520 ppm	180 ppm	42 ppm	14 ppm
Se	0.13ppm	0.12ppm	0.11ppm	0.02ppm
V	2.9 ppm	3.7 ppm	5.3 ppm	6.7 ppm
Cs	1.7 ppm	(2.5 ppm)** 70 ppm	1.1 ppm	2.5 ppm
W	1.0 ppm	0.78ppm	0.61ppm	0.25ppm
Sc	0.82ppm	0.53ppm	1.4 ppm	1.4 ppm
La	0.34ppm	2.0 ppm	19 ppm	19 ppm
Ce	0.50ppm	2.9 ppm	34 ppm	31 ppm
Sm	0.13ppm	0.29ppm	3.4 ppm	3.7 ppm
Eu	0.04ppm	0.21ppm	1.7 ppm	2.9 ppm
Tb	0.01ppm	0 ppm	0.50ppm	0.66ppm
Yb	0.01ppm	0 ppm	0.80ppm	0.89ppm

* : excluding the value of 54MAHT-3, 64.6 m sample.

** : excluding the value of 55MAHT-6, 332.2 m sample.



第4図 石英・方解石組合せごとの金の分析値 (53 MAHT-2号コアの試料を除く)。×印は 54 MAHT-3, 64.6 m の試料を示す。

Fig. 4 Au content of several kinds of quartz-calcite assemblages (excluding the samples from the 53 MAHT-2 drill hole). ×: 54 MAHT-3, 64.6 m sample.

定した。この結果、顕微鏡で両鉱物の密雑(比較的両鉱物の粒径が小さく、両者が混在している)が確認された試料では、両鉱物が平衡(同時)に晶出したことが同体的に明らかになった。一方、両鉱物が互いに偏在する試料では、異なるステージでそれぞれが晶出したことが確認された。本研究では、冠岳地域の石英・方解石共存試料のうち、両鉱物が同時に晶出したとは考えられない試料が数個あることを先に記載した。これらの試料(いずれも低い金濃度を持つ)も第4図と第4表では石英・方解石共存試料に分類してあるが、これらを除外すれば石英・方解石の鉱物組合せによる金の濃度対比は一層際立つものと考えられる。

主成分元素では、CaとMnが方解石の量にほぼ比例しているが、AlやKは石英、方解石の量比とは無関係に、アデュラリアや沸石等の有無に左右される。

微量成分元素では、希土類元素(La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb)は方解石の多い試料に濃集しており、Vにも同様の傾向が認められる。一方、Cr, Sb, Wは石英の多い試料で高濃度である。Ag, SeはAuと正の相関があることを述べたが、総体的には石英の認められる試料に濃集している。AsはAuと正の相関があるが、鉱物組合せによる値の相違は認められない。CsはQuartz + Calcite (Ca < 30%)の値が突出しているが、55 MAHT-6号, 332.2 m試料の影響によるものである。

この試料の値を除外すると平均値は2.5 ppmとなり、他の鉱物組合せの平均値と同様の値となる。

9. おわりに

石英・方解石脈の化学組成、特に希土類元素やその他の微量元素の濃度を1つの熱水系について調べることにより、鉱物と元素の分布やそれぞれの間の関係の一端が明らかになった。しかし、金の起源については依然として不明である。菱刈鉱床を始めとして四万十帯の堆積岩類を基盤とする金鉱床が九州南部に多いため、Ishihara, Sakamaki *et al.* (1986)は四万十帯堆積岩類の金含有量を調べた。この結果、北薩地域では基盤岩の金含有量は低く、高温熱水が岩石中の金を抽出して熱水中の金濃度を高めることは難しいと考えた。また、菱刈鉱床では黄鉄鉱の硫黄同位体比が0‰(CDT)前後であり、硫黄のマグマ起源を暗示しているとした(Ishihara, Sakamaki *et al.*, 1986)。串野野鉱床では、酸素・炭素同位体研究により鉱化熱水溶液の大部分が天水起源であると考えられているが、少量のマグマ水が混入していた可能性はある(Matsuhisa *et al.*, 1985)。串野野鉱床地域における鉱脈系のシミュレーション実験(Morishita and Kodama, 1986)によると、鉱脈裂け系が冠岳地域でのマグマの上昇によって生じた可能性が指摘されており、その仮定に立てば熱水系の熱源をその潜在

岩体に求めることができる。石原ほか (1985) と Ishihara, Kimura *et al.* (1986) は日本の深成岩類の金含有量を放射化分析により測定し、磁鉄鉱系深成岩類の方がチタン鉄鉱系のものより金存在量が多いことを示した。これによると、磁鉄鉱系マグマから放出された金に富むマグマ水の一部が串木野鉱床の鉱化熱水系に混入した可能性が考えられるが、熱水-岩石間での元素の移動が否定されたわけではない。

この問題の解決の糸口を見つけるためには従来から多く行われている胚胎母岩の分析だけでなく、鉱床周辺深部における基盤岩の化学分析値が数多く明らかになる必要がある。今後、より深部の試料が得られるようになれば、熱水系の性質だけでなく溶存元素の起源についても議論できる環境が整うものと期待される。

謝 辞 本研究を始めるに当たり、地質調査所佐藤壮郎氏は著者らの共同研究を許可し、支援された。また、青山学院大学理工学部平尾良光氏 (現在: 東京国立文化財研究所)、斎藤裕子氏にお世話になった。

本研究に用いた試料は金属鉱業事業団の許可により著者ら及び地質調査所富樫幸雄氏が採取したものである。現地調査に際しては、三井串木野鉱山(株)の方々にお世話になった。中性子照射は、日本原子力研究所東海研究所における東京大学原子力研究総合センターの共同利用研究の援助を受けた。地質調査所青木正博氏には原稿を読んで有益な助言を頂いた。以上の方々に感謝致します。

文 献

- Drake, M.J. (1975) The oxidation state of europium as an indicator of oxygen fugacity. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 39, p. 55-64.
- 橋詰 満・井沢英二 (1981) 串木野鉱床東部・冠岳地区の珪化岩について (演旨). 三鉱学会昭和 56 年度秋期連合学術講演会要旨集, p. 84.
- 石原舜三・木村 幹・大田浩二・佐藤壮郎 (1985) 日本の花崗岩類の金含有量—予報. 鉱山地質, vol. 35, p. 295-298.
- Ishihara, S., Kimura, K., Takahashi, H., Saito, Y. and Hirao, Y. (1986) Gold abundance of Japanese plutonic rocks: A preliminary result. *Mining Geol.*, vol. 36, p. 407-410.
- Ishihara, S., Sakamaki, Y., Sasaki, A., Teraoka, Y. and Terashima, S. (1986) Role of the basement in the genesis of the Hishikari gold-quartz vein deposit, southern Kyushu, Japan. *Mining Geol.*, vol. 36, p. 495-509.
- Kerrich, R. and Fryer, B.J. (1979) Archaean precious-metal hydrothermal systems, Dome Mine, Abitibi Greenstone Belt. II. REE and oxygen isotope relations. *Canadian Jour. Earth Sci.*, vol. 16, p. 440-458.
- Masuda, A. (1975) Abundance of monoisotopic REE, consistent with the Leedeey chondrite values. *Geochem. Jour.*, vol. 9, p. 183-184.
- , A., Nakamura, N. and Tanaka, T. (1973) Fine structures of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 37, p. 239-248.
- Matsuhisa, Y., Morishita, Y. and Sato, T. (1985) Oxygen and carbon isotope variations in gold-bearing hydrothermal veins in the Kushikino mining area, southern Kyushu, Japan. *Econ. Geol.*, vol. 80, p. 283-293.
- 松任谷滋 (1967) 串木野鉱山の鉱脈構造について. 鉱山地質, vol. 17, p. 139-150.
- Morishita, Y. and Kodama, K. (1986) Simulation analysis of the gold-quartz vein systems in the Kushikino mine area, southern Kyushu, Japan. *Mining Geol.*, vol. 36, p. 475-485.
- 森下祐一・松久幸敬 (1981) 串木野鉱脈における酸素及び炭素同位体分別 (演旨). 三鉱学会昭和 56 年度秋期連合学術講演会要旨集, p. 85.
- ・——— (1986) 串木野金鉱床地域の鉱化熱水系—安定同位体による研究— (演旨). 地調月報, vol. 37, p. 155-156.
- Nagasawa, H. and Schnetzler, C.C. (1971) Partitioning of rare earth, alkali and alkaline earth elements between

- phenocrysts and acidic igneous magma. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 35, p. 953-968.
- 通商産業省資源エネルギー庁(1979) 昭和53年度
広域調査報告書(北薩・串木野地域). 92
p.
- (1981) 昭和55年度広域調査報告書(北
薩・串木野地域). 79 p.
- (1982) 昭和56年度広域調査報告書(北
薩・串木野地域). 81 p.
- (1984) 昭和58年度広域調査報告書(北
薩・串木野地域). 69 p.
- (1985) 昭和59年度広域調査報告書(南
薩地域). 180 p.
- (1986) 昭和60年度広域調査報告書
(構造解析総合調査). 641 p.
- 佐々木祐二(1987) 放射化分析による串木野地
区の金の挙動の研究. 青山学院大学修士
論文, 93 p.
- Schnetzler, C.C. and Philpotts, J.A. (1970)
Partition coefficients of rare-earth
elements between igneous matrix
material and rock-forming mineral
phenocrysts-II. *Geochim. Cosmo-
chim. Acta*, vol. 34, p. 331-340.
- Seki, Y. and Okumura, K. (1968) Yugawara-
lite from Onikobe active geothermal
area, northeast Japan. *J. Jap. Ass.
Mineral. Petrology Econ. Geol.*, vol.
60, p. 27-33.
- 祐下 実・植村一統(1976) 三井串木野, 荒川鍾
の探査. 鉱山地質, vol. 26, p. 165-177.
- Taylor, S.R. (1964) Abundance of chemical
elements in the continental crust: a
new table. *Geochim. Cosmochim.
Acta*, vol. 28, p. 1273-1285.
- 若林健介・祐下 実・植村一統(1973) 串木野鉱
山の探鉱について. 鉱山地質, vol. 23,
p. 179-190.

(受付: 1991年1月8日; 受理: 1991年2月20日)