東太平洋海膨(8°N-14°N)における 熱水活動の資源ポテンシャルについて*

村山 信行¹ 松浦 由孝¹ 岡本 信行²

Resource Potential of Hydrothermal Activity on the East Pacific Rise (8°N-14°N)

by Nobuyuki MURAYAMA¹, Yutaka MATSUURA¹ and Nobuyuki OKAMOTO²

1. Exploration Dept., Deep Ocean Resources Development Co., Ltd., Segawa Bldg. 8, Kanda-Surugadai 2 Chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101
2. Industrial Science and Technology Fronteir Program, Agency of Industrial Science and Technology, Ministry of International Trade and Industry

Investigation of hydrothermal ore deposits on the East Pacific Rise (EPR) and on its off-axis volcanoes was carried out from 1985 to 1994 by the R/V Hakurei-maru No. 2. More than one and a-half hundred hydrothermal activity sites were observed in the axial rift and on the off-axis volcanoes along the courses of the investigation. The hydrothermal sites were clustered between 12°47'N and 12°51'N, and between 11°20'N and 11°36'N. Though some percentages of the sites were concentrated on the top of ridge and in the spreading center of the rift, the off-axis volcanoes are considered as the most important area in the EPR from the view point of resource potential.

KEY WORDS: Hydrothermal Activity, East Pacific Rise, Off-axis Volcanoes, Hydrothermal Ore Deposits, Resource Potential

1. はじめに

1979年に、21°Nの東太平洋海膨(EPR: East Pacific Rise)の海底拡大軸上において、塊状硫化鉱および生物群集を伴う活発な熱水域がアメリカ合衆国とフランスのグループにより発見された(Francheteau et al., 1979; Spiess et al., 1980; Hekinian et al., 1980)。

我が国の経済は諸外国からの膨大な量の鉱物の輸入を必要としている。熱水活動によって生成された塊状硫化鉱物は、将来の鉱物資源確保という観点から非常に重要である。こうした観点に鑑み、我が国における海底熱水鉱床の資源ポテンシャル調査が、深海資源開発株式会社(DORD)によって、金属鉱業事業団(MMAJ)所有の鉱物資源探査専用船「第2白嶺丸」を使用して、EPRにおいて1985年から開始された。なお、本調査は、通商産業省(MITI)資源エネルギー庁/金属鉱業事業団から委託を受けて、DORDが実施したものである。

本調査は、東太平洋海膨8°N-14°N間のEPR中軸谷およびオフアキシス海山(off-axis volcano)において、1985年から1994年まで北から南にかけてブロック単位に順次実施した。ブロック単位による地形、磁気、そしてサイドスキャンソナー

(SSS)調査といった系統立てた物理探査が海水調査に引き続き行われた。この結果に基づき、海底観察をするための、いくつかの有望サイトを抽出した。海底観察は、海底色異常、生物群集および水温異常といった鉱徴の捕捉に有効な手段であるTVシステム(FDC)によって行われた。FDCで確認された鉱徴に対して、油圧グラブサンプラー(FPG)、グラビティコアラ(GC)、大口径グラビティコアラ(LC)およびチェーンバケットドレッジ(CB)を使用して、サンプル採取に努めた。なお、本報文において、鉱徴とは、FDC調査によって観察された生物群集域、海底面の変色域、また、CTDによる水温異常域。鉱化帯とは、鉱徴のうち実際にサンプリングで硫化物、熱水性沈殿物、変質物が採取された地点およびその周辺。鉱床とは、鉱化帯の集中域。また鉱徴集中域とは鉱徴が連続して観察された範囲と定義する。

ここでは、EPRにおける熱水活動の一般的な地質学的特徴は簡潔に述べ、主に資源ポテンシャルといった観点からオフアキシス海山の重要性について論議する。なお、本報文は1995年11月にISOPE-Ocean Mining Symposiumで発表した内容を基に総説としてまとめたものである。

2. 過去の研究経緯

EPR 8°N-14°N間では、過去に多くの注目すべき調査が行われた。12°50'N付近における熱水硫化物に関する初期のレポートは、Hekinian et al. (1983a) および Francheteau and Ballard (1983) によって提供された。また、潜航調査結果については、Ballard et al. (1984) によって報告された。さらに、

* 1996年10月2日受付 10月26日受理

1. 深海資源開発(株)資源調査部

2. 通商産業省工業技術院産業科学技術研究開発室

[著者連絡先] FAX 03-3294-4876 (深海資源開発(株)資源調査部)

キーワード: 熱水活動, 東太平洋海膨, オフアキシス海山, 熱水鉱床, 資源ポテンシャル

Table 1 Summary of main previous investigations in the area (1979~1995).

issued year	author(s)	magazine	vol.	No.	page	outline	paper title
1979	Francheteau, J., Juteau, T., et al.	Nature	281		209-211	Lava dome. Basaltic pillars, structure of 21°N	Basaltic pillars in collapsed lava-pools on the deep ocean-floor. East Pacific Rise Near 13°N: Geology of New Hydrothermal Fields.
1983	Hekinian, R., Fevrier, M., et al.	Science	219		1,321-1,324	12°38'N-12°52'N.	The East Pacific Rise near 21°N, 13°N and 20°S: inferences for along-strike variability of axial processes of the Mid-Ocean Ridge.
1983	Francheteau, J., Ballard, R. D.,	E. P. S. L.	64		93-116	MOR, spreading rate, near 21°N, near 13°N, near 20°S, lithosphere	Geological setting of hydrothermal activity at 12°50'N on the East Pacific Rise: a submersible study.
1984	Ballard, R. D., Hekinian, R., et al.	E. P. S. L.	69		176-186	12°38'N-12°54'N, hydrothermal activity,	The Evolution of Craters and Calderas on Young Seamounts: Insights from Sea MARC I and Sea BEAM Sonar Surveys of a small Seamount Group near The Axis of The East Pacific Rise at 10°N.
1984	Fornari, D. J., Ryan, W. B. F.,	Jour. Geop. Res.	89	B13	11,069-11,083	Lamont Seamounts, near 10°N, craters and calderas.	East Pacific Rise From Siqueiros to Orozco Fracture Zones: Along-Strike Continuity of Axial Neo volcanic Zone and Evolution of Overlapping Spreading Centers
1984	Fox, P. J.,	Jour. Geop. Res.	89	B7	6049-6069	8°20'N-18°30'N, OSC, spreading rate	The spacing of rift axis highs: dependence upon diapiric processes in the underlying asthenosphere?
1985	Crane, K.,	E. P. S. L.	72		405-414	Lamont seamounts, EPR, spreading rate of MOR, coincide with Rayleigh-Taylor model.	Volcanism and Metallogenesis of Axial and Off-Axial Structures on the East Pacific Rise near 13°N.
1985	Hekinian, R., Fouquet, Y.,	Echo. Geol.	80	2	221-249	Fe-Mn oxides, basaltic rocks, volcanism, metallogenesis, mineralogy, geochemistry, formation of sulfide deposits,	Detailed geological mapping by submersible of the East Pacific Rise axial graben near 13°N.
1986	Gente, P., Auzende, J. M., et al.	E. P. S. L.	78		224-236	12°38'N-12°54'N, morphostructural map.	A new view of the mid-ocean ridge from the behaviour of ridge-axis discontinuities
1988	Macdonald, K. C., Fox, P. J., et al.	NATURE	335		217-225	three-dimensional mapping of mid-ocean ridge.	Geochemical and structural studies of the Lamont seamounts: seamounts as indicators of mantle processes.
1988	Fornari, D. J., Perfit, M. R., et al.	E. P. S. L.	89		63-83	survey of Lamont seamounts by the Alvin, spidergram, chemical analysis, isotope.	Small-scale heterogeneities in depleted mantle sources: near-ridge seamount lava geochemistry and implications for mid-ocean-ridge magmatic processes.
1988	Fornari, D. J., et al.,	NATURE	331		511-513	Lamont seamounts, chemical analysis, isotope.	Location of sulfide deposits, chemical analysis, X-ray detection, classification of type of sulfides, axial rift and seamounts, around 13°N.
1988	Fouquet, Y., Auclair, G., et al.,	M. Geol.	84		145-178	cross section of axial rift, OSC, Magma Chamber, 8°20'N to 13°N.	The axial summit graben and cross-sectional shape of the East Pacific Rise as indicators of axial magma chambers and recent volcanic eruptions.
1988	Macdonald, K. C., Fox, P. J.,	E. P. S. L.	88		119-131	hydrothermal processes and products, 30 S to 25°N, chemical analysis, mound and chimney model.	Hydrothermal processes and products on the Galapagos Rift and East Pacific Rise.
1989	Haymon, R. M.,	Est. Pfc. Ocn and Hwi.	N		125-144	segmentation, 8°00'N to 18°00'N, cross section of axial rift, SeaMARC II survey, OSC.	The East Pacific Rise and its Flanks 8-18°N: History of Segmentation, Propagation and Spreading Direction Based on SeaMARC II and Sea Beam Studies.
1989	Hekinian, R., Thompson, G., et al.,	Jour. Geop. Res.	94	B12	17,437-17,463	segmentation, 8°00'N to 18°00'N, cross section of axial rift, SeaMARC II survey, OSC.	Volcanic eruption of the mid-ocean ridge along the East Pacific Rise crest at 9°45'-52°N: Direct submersible observations of seafloor phenomena associated with an eruption event in April, 1991.
1992	Macdonald, K., Fox, P. J., et al.,	M. Geop. Res.	14		299-344	9°45'N to 52°N, young lava, axial rift, active volcano.	Chemical and Physical Diversity of Hydrothermal Plumes Along the East Pacific Rise, 8°45'N to 11°50'N.
1993	Haymon, R. M., et al.,	E. P. S. L.	119		85-101	survey, chemical and physical diversity, 8°40'N to 12°00'N.	Dependence of ridge-axis morphology on magma supply and spreading rate.
1993	Lupton, J. E., Baker, E. T., et al.,	Geop. Res. Lett.	20	24	2,913-2,916	ridge-axis morphology, spreading rate versus depth.	Variation on Cross-Sectional Area of the Axial Ridge Along the East Pacific Rise: Evidence for the Magmatic Budget of a Fast Spreading Center.
1993	Morgan, J. P., Chen, Y. J.,	NATURE	364		706-708	4°N to 18°N, 4°S to 24°S, cross section of axial rift, OSC, chemical analysis, magam chamber.	The Renavigation of Sea Beam Bathymetric Data Between 9°N and 10°N on the East Pacific Rise.
1993	Scheirer, D. S., Macdonald, K.,	Jour. Geop. Res.	98	B5	7,871-7,885	9°N to 10°N, Sea Beam bathymetry, renavigation, gridded map.	Hydrothermal plumes along the East Pacific Rise, 8°40' to 11°50'N: Plume distribution and relationship to the apparent magmatic budget.
1993	Wilcock, W. S. D., Toomey, D. R.,	M. Geop. Res.	15		1-12	8°40'N to 11°50'N, hydrothermal plumes, active vent, OSC, water analysis.	Vent and nonvent faunas of Cleft segment, Juan de Fuca Ridge, and their relations to lava age
1994	Baker, E. T.,	E. P. S. L.	128		1-17	mapping by the SeaMARC I	Polymetallic sulfides on the off-axis volcanoes around the East Pacific Rise, 11°30'N latitude.
1994	Milligan, B. N., Tunnicliffe, V.,	Jour. Geop. Res.	99	B3	4,777-4,786	Seamounts, DORD, MMAI, R/V Hakurei-maru No.2.	Near-axis seamounts on the flanks of the East Pacific Rise, 8°N to 17°N.
1994	Kuriyama, T., Matsumoto, K., et al.,	Res. Geol.	44	(3)	187-199	SeaBeam and Sea MARIKII bathymetry, 8°N to 17°N, Seamounts, Where Do Seamounts Grow and From.	
1995	Scheirer, D. S., Macdonald, K.,	Jour. Geop. Res.	100	B2	2,239-2,259		

海底地形と分布については、Choukroune et al. (1985) および Gente et al. (1986) によって行われた。この海域における過去の研究経緯を Table 1 にまとめた。

一方、オフアクシス海山においても多くの研究が行われた (Fouquet et al., 1988; Fournari et al., 1988 a, b; Haymon, 1989)。しかし、資源ポテンシャルについては、わずかな論文で論議されたに過ぎない (Hekinian and Fouquet, 1985; Hekinian et al., 1989)。

3. 地質学的背景

3・1 概要

本調査範囲は、西に太平洋プレート (Pacific Plate)、東にココスプレート (Cocos Plate) が位置する EPR 中軸部の 65,000 km² である。この中軸谷は 4~5 km の幅、水深 2,500~2,800 m である。この地域の地形的概要を Fig. 1 に示し、その中でリフト軸を実線で示した。海嶺セグメント (segment) の大部分を含むこの地域は、オロズコ断裂帯 (Orozco Fracture Zone: OFZ)、クリッパートン断裂帯 (Clipperton Fracture Zone: CFZ) そしてシケイロス断裂帯 (Siqueiros Fracture Zone: SFZ) の中に位置している。

この地域の地質学的背景は、Macdonalds et al. (1984; 1988; 1992) によって詳細に述べられている。こうした研究および一部

本調査で得られた知見を踏まえて、以下に海嶺セグメントの概要を記す。

3・2 SFZ－CFZ間の海嶺セグメント

このセグメントは、220 km の長さで、南に SFZ、北に CFZ の間に位置している。このセグメントの中央部付近の 9°03'N には重複拡大軸 (Overlapping Spreading Center: OSC) が位置している。ここでは、2つの海嶺が約 25 km にわたって重複している。また、重複拡大軸海盆 (Overlapping Spreading Center Basin: OSCB) がこの2つの海嶺間に位置している。その海盆の基底水深は 3,100 m である。

海嶺の頂部水深は、2,500~2,800 m であり、9°50'N 付近には地形的高まりが位置し、その頂部水深は 2,500 m である。この海嶺の幅は、OSC の北方では狭くなり (平均 6.7 km)、南方では広くなる (平均 11.6 km) 傾向がある。海嶺断面の特徴については、Macdonald et al. (1984) および Macdonald and Fox (1988) によって詳細に検討されている。

ラモント海山 (Lamont Seamounts) 列は、9°55'N 付近の中軸谷の西側に位置する。海山列の頂部水深は、1,600~1,800 m である。この海山列についての詳細な記述は、Fournari et al. (1984; 1988 a) によって一連の研究がなされている。CFZ の中央部には、2つの平行した凹地 (depression) を持った東西方向の地形的高まりが認められる。

3・3 CFZ から北側のリッジセグメント

このセグメントは、約 400 km の長さを有し、CFZ から調査海域北端の 14°N までの海域である。このセグメントは、11°45'N 付近にある OSC によって、2 つの小海域に区分される。この OSC は、約 14 km の長さを有し、海嶺の幅は 8 km であり、間に基底水深 3,180 m の OSCB を伴っている。

このセグメントの南部海域には、海嶺と平行な多数のリニアメントが、10°20'N–11°00'N にかけての海嶺の両側で認められる。CFZ の近くでは、海嶺水深は深くなり、また幅は狭くなる。地形の高まりは、11°00'N および 11°30'N に見られる。

一方、北部海域では、海嶺の名残であるような構造が、11°45'N OSC の西側海嶺の北西方向に見られる。この西側海嶺

Fig. 2 Magnetization distribution map from three-dimensional inversion solution of gridded bathymetric and magnetic data (between 8°20'N and 12°N)

3・5 拡大速度

Fig. 2 に示す磁化強度分布図から算定した CFZ の北側におけるココスプレートおよび太平洋プレートの拡大速度は、それぞれ 55 mm/年および 60 mm/年である。これらの数値は、Crane (1985) および Morgan and Chen (1993) によって得られた数値と類似する。

また、CFZ の南側においては、太平洋プレートの拡大速度は 51 mm/年である。しかし、ココスプレートについては、磁気年代を割り出せるだけの境界が見出せなかったことと、ラモント海山列等の海山における磁気異常の影響により、拡大速度の算定は困難であった。

4. 調査海域における地質および地球化学

4・1 岩石の性状

玄武岩質溶岩が EPR のすべての中軸谷に分布する。玄武岩質溶岩は、枕状溶岩、シート状溶岩およびロベイト状溶岩に区分される。ロベイト状溶岩は、中軸部で最も多く観察される。また、しばしば直径 0.5 m から数 m の陥没ピットを形成し、直径数 10 m の溶岩池を形成している。海底観察結果の例を Fig. 3 に示す。直径 0.5 m から 3 m 程度の枕状溶岩が中軸谷の中で観察される。

鉍微および鉍化帯は、主にロベイト状溶岩分布域で観察され、しばしばシート状溶岩分布域でも観察される。オフアクシス海山では枕状溶岩が卓越し、ロベイト状溶岩はほとんど観察されない。

4・2 玄武岩質岩石の地球化学

EPR の海嶺中軸から採取された玄武岩質岩石は、通常、細粒ガラス質であり、カンラン石、斜長石、輝石の斑晶を伴う。また、テクスチャーは、インターサータル、バリオリティック、インター

Fig. 3 Distribution of ore indications between 12°44'N and 12°52'N in the axial rift on the EPR. Numbers show ore indication No. The FDC observations was carried out in the 1986, 1988 and 1989 surveys.

グラニューラー、ポーフィリティックである。特徴的な分布として非常に新鮮な玄武岩の分布が 10°N から南にかけて中軸谷に沿って観察された。これは Haymon et al. (1993) によって報告されたものと同一のものであると考えられる。中軸谷から採取された玄武岩の地化学データの例を Table 2 に示す。

4・3 堆積物の性状

海嶺中軸およびオフアクシス海山において LC で採取した堆積

Table 2 Results of chemical analysis for basalts from axial rift.

Latitude	08°N		09°N			11°N		12°N						13°N	
Sample No.	94DFPG 02	94DFPG 04	93DCB02 02	93DFPG 01	93DFPG 02	89DCB 08	89DCB 12	86123CB 02-2	86130CB 02	87DCB 04	87DCB 29	88DCB 08	88DCB 10	85132DB 01	86132CB 01
SiO2 (%)	49.62	54.25	48.61	48.20	48.97	49.60	49.29	50.33	49.94	50.03	49.71	48.75	49.68	50.60	49.95
TiO2 (%)	1.18	2.06	1.27	1.32	1.63	1.96	1.87	1.70	1.85	1.37	1.42	1.26	1.37	1.88	1.69
Al2O3 (%)	16.93	12.86	14.67	14.65	13.61	14.98	15.82	14.36	14.53	14.77	14.51	15.24	15.44	13.03	14.56
Fe2O3 (%)	1.33	1.20	2.48	1.53	8.09	2.52	2.23	0.67	0.60	1.50	1.59	1.11	1.83	3.80	1.16
FeO (%)	7.44	11.94	8.19	9.23	4.72	8.28	7.66	8.81	9.79	7.80	8.24	7.85	7.74	7.45	9.28
MnO (%)	0.25	0.32	0.19	0.24	0.26	0.19	0.17	0.19	0.19	0.18	0.18	0.16	0.17	0.25	0.19
MgO (%)	7.47	3.14	8.27	8.07	7.45	7.61	7.82	7.34	6.52	8.40	8.24	8.36	8.32	6.73	7.05
CaO (%)	11.72	6.91	11.73	11.62	11.27	11.64	11.48	11.70	11.42	11.89	11.74	11.87	12.20	10.64	11.57
BaO (%)	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01			0.003	0.002	0.005	0.002	<0.01	<0.01		0.003
Na2O (%)	2.82	4.22	2.41	2.46	2.62	3.11	3.05	2.90	2.84	2.71	2.62	2.72	2.74	2.91	2.71
K2O (%)	0.11	0.73	0.04	0.04	0.08	0.24	0.39	0.20	0.17	0.23	0.16	0.09	0.10	0.23	0.14
P2O5 (%)	0.61	0.65	0.14	0.13	0.17	0.33	0.37	0.20	0.20	0.19	0.18	0.18	0.19	0.18	0.24
LOI (%)	0.61	0.30	0.83	0.68	0.40	<0.01	<0.01	0.98	1.09	0.19	0.29	<0.01	0.02	<0.01	1.04
Total (%)	100.07	98.59	98.81	98.16	99.24	100.46	100.15	99.38	99.14	99.22	98.87	97.57	99.81	97.67	99.53

Fig. 4 Distribution of ore indications between 9°55'N and 9°26'N in the axial rift on the EPR. Numbers show ore indication No. The observations were carried out in the 1994 survey.

物は、石灰質生物殻、珪質生物殻および火山ガラスを含む石灰質軟泥、石灰質粘土、褐色粘土および有孔虫砂に区分される。海嶺中央部では岩石露頭が卓越し、少量の堆積物が中軸谷の中の溶岩クラック中で見られる。堆積物の量は、中軸谷から遠ざかるにつれ次第に増加する傾向にある。

オフアキス海山の堆積物は、海嶺中軸に比べて厚く、その表面にリップルマークや生痕が観察された。87D-D1 海山においては、コア長 2.9 m の堆積物柱状試料を採取し、その堆積物中に含まれる有孔虫微化石から、コア最深部の地質年代を 4.8 Ma と算定した。このことから堆積速度は 0.6 mm/1000年と考えられる。

Table 3 Results of chemical analysis of samples from axial rift (trace level).

Sample No.	Axial rift									
	85124DB 04-A	85124DB 04-B	85124DB 04-D	86124CB 11-A	86125CB 01	87DCB 07	87DCB 10	87DCB 10	87DCB 23	87DCB 24
Au (ppm)	<2	<2	<2	10	10	9	7	8	<1	10
Ag (ppm)	134	46	47	198	174	172	116	152	13	168
Cu (%)	6.25	2.69	0.68	0.17	0.49	0.48	2.46	0.60	24.11	0.59
Pb (%)	0.01	0.03	0.03	0.19	0.13	0.10	0.06	0.08	0.01	0.09
Zn (%)	1.14	0.46	6.31	36.63	24.52	39.29	26.14	36.96	1.43	49.39
S (%)	47.69	47.59	39.41	30.10	27.85	36.52	33.18	30.61	38.20	33.15
Fe (%)	41.52	43.35	31.95	14.45	23.80	18.53	21.29	15.59	34.62	12.01
SiO ₂ (%)				10.99	10.26	4.10	12.07	10.67	1.83	3.43
Ni (ppm)	1050	300	100	<10	<10	5	6	13	3	5
Co (ppm)	360	2430	590	63	85	140	17	18	12	50
Mn (ppm)	40	50	190	224	826	120	270	410	44	110
Cd (ppm)	40	20	80	712	945	1140	610	1280	53	1380
Mo (ppm)	210	60	50	15	57	49	32	74	25	28
Se (ppm)	<10	<10	<10	<10	<10	<5	<5	<5	<5	<5
As (ppm)	230	150	110	320	349	110	6	44	<5	23
Sb (ppm)	<20	<20	<20	<20	<20	<5	<5	<5	<5	<5
BaSO ₄ (ppm)	20	30	70							
Ba (ppm)				<100	600	<100	200	200	<100	<100
Ca (ppm)				700	1500	200	2700	4400	200	200
Ge (ppm)				159	157	122	88	103	12	102
Ga (ppm)				26	44	<50	<50	<50	<50	<50
In (ppm)				<10	<10	12	16	19	8	15

Fig. 5 Location map of the mineralized zone on 87D-D1 Seamount and geological route map using a deep camera and video system (FDC) (Kuriyama et al., 1994).

5. 鉱床および鉱微の分布および産状

5・1 概要

FDC 調査によって、海嶺中軸で 138 サイト、オフアクシス海山で 26 サイトで鉱微が観察された。このうち、サンプリングにより、硫化物または熱水性沈殿物が、それぞれ 138 サイトのうち

28 サイトで、26 サイトのうち 25 サイトで採取された。

5・2 海嶺中軸

海嶺中軸における 138 サイトの鉱微の分布は、12°N から 14°N 間では 61 サイト、10°N から 12°N 間では 25 サイト、9°N から 10°N 間では 20 サイト、そして 8°20'N から 9°N 間では 32 サイトである。特に、12°47'N から 12°51'N 間および 11°20'N から

Table 4 The characteristics of the mineralized zones on the off-axis colcanoes.

Seamount	85D-C	85D-D (*2)	87D-C	87D-D1	87D-O
(Outline of seamount)					
Location of summit	12°49.5' N 103°53.0' W	12°42.7' N 103°51.9' W	11°30.0' N 103°52.5' W	11°32.0' N 103°33.5' W	10°01.0' N 104°11.0' W
Distance from the axial rift (km)	6.5	5.9	7.4	29.6	16.6
Age (1,000 years) (*2)	12	10	13	50	30
Topography	Circle-ellipse	Circle-ellipse	ellipse	Circle	Circle-ellipse
Depth of summit (m)	2,625	2,465	2,240	2,090	2,320
Diameter (km)	7	4.4	10 x 19	7.4	5.5
(Characteristics of mineralized zone)					
Location (*3)	N slope	S slope	N slope	N slope	W slope NE slope
Kinds and size (m)	oxides? 150 x 900	oxides sulfides 900 x 800	oxides sulfides 1,200 x 600	oxides sulfides 400 x 750	oxides sulfides 500 x 250 750 x 250
Occurrences	Mounds Chimneys	Mounds	Mounds Chimneys	Mounds	Mounds Chimneys
Distance from summit (m, Horizontal)	950	400	800	600	300 to 600
Distance from summit (m, Vertical)	25 to 60	70	80	30 to 50	20 to 60
Water temperature anomaly (°C)	0.01 to 0.69	0.01	0.01 to 0.04	0.02	0.70
Biological communities	<i>Calypptogena magnifica</i> Tube warm	no	<i>Serpulid polychaetes</i> <i>Munidopsis</i> sp. <i>Bathograes thermydron</i>	<i>Munidopsis</i> sp.	<i>Munidopsis</i> sp.

(*1) Age of seamount was assumed by the spreading rate.

(*2) Fouquet et al., (1988).

(*3) N : Northern, S : Southern, W : Western, NE : Northeastern.

Table 5 Results of chemical analysis of samples from off-axis volcanoes.

Sampling Points	87D-O Smt.			87D-C Smt.		87D-D1 Smt.		
Sample	94DFPG	94DFPG	94DFPG	91DCB	91DCB	90DCB	91DFPG	92DFPG
No.	07-G	08-C	09-C	08A-1	08A-2	09-10	07A	02B
Au (ppm)	0.23	1.35		0.475	0.649	0.141	4.925	
Ag (ppm)	160	210		177	132	4	1771	
Cu (%)	0.01	0.06	40.46	0.61	0.18	8.44	4.38	25.45
Pb (%)	0.08	0.17	0.02	0.07	0.09	0.01	0.12	<0.01
Zn (%)	8.78	12.30	1.70	29.98	9.87	0.04	0.29	0.05
S (%)	6.72	25.87	31.24	34.76	43.43	23.58	29.03	0.11
Fe (%)	2.68	21.11	21.72	18.81	34.23	20.15	24.93	29.71
SiO2 (%)	78.84	35.00		10.27	6.74	44.36	36.75	4.32
Ni (ppm)	5	5		35	40	9	36	<100
Co (ppm)	54	190		18	3	504	8	<100
Mn (ppm)	21	150		256	326	42	285	<100
Cd (ppm)	120	440		1102	283	5	6	
Mo (ppm)	17	38		68	118	80	37	
Se (ppm)	<1	<1		2	<1	85	5	
As (ppm)	42	78		183	157	67	922	
Sb (ppm)				50	32	2	73	
Ba (ppm)				200	200	100	300	
Ca (ppm)	200	400	300	300	200	800	300	
Ge (ppm)	18	62		66	33	2	5	
Ga (ppm)	5	95		105	35	2	9	
In (ppm)	<1	<1		<1	<1	<1	<1	
Hg (ppb)	8560	55900		215750	79396	1409	53350	

ら 11°36' N 間で認められた 2 つの鉱床または鉱徴集中域は、Table 1 に示した過去の研究によって発見されていたものと同一の場所を観測したものと判断される。

9°43' N から 9°52' N 間における海嶺中軸では、非常に新鮮な玄武岩ゾーンが 1993 年 6 月に観察されたが (Fig. 4), 鉱徴としては黄色沈殿物がわずかに溶岩クラック中に見られたに過ぎなかつ

た。これは、最近の報告にある溶岩流の場所と同じ位置であった (Haymon et al., 1993; Lupton et al., 1993)。

熱水鉱床の一般的な構造は、主にチムニー、マウンドおよび沈殿物から構成される (Haymon and Kastner, 1981)。観察されたマウンドの最大のものは、直径約 40 m であった。鉱徴の N-S 方向の広がり、サイト単位で数 m から 50 m であるが、特に

Fig. 6 Geological logs of large gravity corers (LC) in 87D-D1 Seamount (Kuriyama et al., 1994).

これが集中する場所では途中の不連続域を含めれば、鉍徴の最大広がりは約 1,000 m にものぼる。

海嶺中軸から採取された硫化物の化学分析結果は、最大で Cu が 24.11 %, Zn が 49.39 %, Au が 10 ppm, Ag が 199 ppm であった (Table 3)。

5・3 オファクシス海山

オファクシス海山で確認された大部分の鉍徴は、Fig. 5 に示すような硫化物の採集により大部分が鉍床であることが判明した。87D-D1 海山における詳細調査結果の例を示す。

85D-C, 87D-C, 87D-O そして 87D-D1 海山で確認された鉍化帯は、いずれも頂部から 1 km 以内にあり、また比高差も 100 m 以内である (Table 4, 85D-D 海山のデータは、Fouquet et al., 1988 を参考とした)。頂部付近は、多くのリニアメントが発達し、熱水活動のエネルギーの放出場所であったと推定できる。また、観察結果から期待され得る鉍化帯の海面上での大きさも Table に掲げた。この大きさは、一般に海嶺中軸のものより大きい。

加えて、87D-D1 海山では、LC サンプリングによって、堆積物下から硫化物サンプルを採取している (Fig. 5 および Fig. 6)。この結果から、オファクシス海山における鉍床は、堆積物に覆われていることが推定できる。

オファクシス海山から採取した硫化物の構成物は、中軸部と類似している。その結果は、最大で Cu が 40.46 %, Zn が 29.98 %, Au が 4.9 ppm, Ag が 1,771 ppm であった (Table 5)。

6. 討 論

資源ポテンシャルという観点からは、鉍床の品位および大きさが、2つの重要なファクターとなる。硫化物の金属構成は、サンプルデータから得られたものである。Hekinian and Fouquet (1985) による報告では、鉍床が 1 m の厚さを有し、3 g/cm³ の密度であると仮定し、オファクシス海山の鉍量を海底面に露出した鉍床面積に基づいて算定している。

本調査で実施したオファクシス海山でも、調査結果に基づいて、Table 4 のように同じ見積もりが可能である。計算された資源ポテンシャルは、おのおのの海山で 40 万 t から 210 万 t である。この数値と比較して、中軸部では、1 鉍床当たり 15 万 t が最大である (Hekinian et al., 1980 ; 1989)。

なお、本報文中で述べたオファクシス海山で堆積物下に確認された潜頭鉍床は、上記計算には入れていない。このため、オファクシス海山ではさらに資源ポテンシャルが増大する可能性を秘めていると判断される。

7. 結 論

EPR における熱水活動は、科学調査の対象というだけでなく、鉍物資源ポテンシャルを秘めている点で非常に興味のあるもので

ある。本報文では、資源ポテンシャルという観点で地質学的特徴および分布をまとめてみた。

中軸部におけるいくつかの鉱化帯は、断続的に最大約 1 km の長さにわたっている。一方、海山における 4 つの鉱化帯は、1 km × 数 100 m の幅を持っている。

オフアクシス海山は、FDC 調査で確認された鉱徴の大部分は鉱床として位置付けられること、鉱化帯の規模も中軸部と比較して大きいこと、さらに潜頭鉱床の存在も示唆されることなどから、中軸部より資源ポテンシャルが高い可能性を秘めている。現時点でもかなりの量の鉱量が見込めるが、正確な鉱量については、これらの鉱床の厚さを把握してから改めて算出する必要がある。

謝辞 本報文は、1985 年から 1994 年までの 10 年間に実施した EPR における調査結果を要約したものである。各年度の調査には、佐原弘輔、日下浩、伊達二郎、栗山隆、川崎潔が洋上調査の責任者として乗船したことを記す。調査に際しては、第 2 白嶺丸の船長、乗組員の方々による絶大なるご協力があった。

本稿発表に当たり、通商産業省資源エネルギー庁海洋開発室、金属鉱業事業団の各位に種々ご指導・ご助言を頂いた。ここに記して深く感謝申し上げます。

文 献

- Ballard, R. D., Hekinian, R. and Francheteau, J. (1984) : Earth and Planetary Science Letters, Vol. 69, p. 176–186
- Baker, E. T. (1994) : Earth and Planetary Science Letters, Vol. 128, p. 1–17
- Choukroune, P., Francheteau, J. and Hekinian, R. (1985) : Bull. Soc. geol., France, (8), t. I, n° 1, p. 145–148
- Crane, K. (1985) : Earth and Planetary Science Letters, Vol. 72, p. 405–414
- Fornari, D. J., Ryan, W. B. F. and Fox, P. J. (1984) : Journal of Geophysical Research, Vol. 89, No. B13, p. 11,069–11,084
- Fornari, D. J., Perfit, M. R., Allan, J. F., Batiza, R., Haymon, R., Barone, A., Ryan, W. B. F., Smith, T., Simkin, T. and Luckman, M. A. (1988 a) : Earth and Planetary Science Letters, Vol. 89, p. 63–83
- Fornari, D. J., Perfit, M. R., Allan, J. F. and Batiza, R. (1988) : Nature, Vol. 331, p. 511–513
- Fouquet, Y., Auclair, G. (1988) : Mar. Geol., Vol. 84, p. 145–178
- Fox, P. J. (1984) : Journal of Geophysical Research, Vol. 89, No. B7, p. 6,049–11,083
- Francheteau, J., Juteau, T. and Rangan, C. (1979) : Nature, Vol. 281, p. 209–211
- Francheteau, J. and Ballard, R. D. (1983) : Earth and Planetary Science Letters, Vol. 64, p. 93–116
- Gente, P., Auzende, J. M., Renard, V., Fouquet, Y. and Bideau, D. (1986) : Earth and Planetary Science Letters, Vol. 78, p. 224–236
- Haymon, R. M. and Kastner, M. (1981) : Earth and Planetary Science Letters, Vol. 53, p. 363–381
- Haymon, R. M. (1989) : Est. Pfc. Oce. and Hawaii, Vol. N, p. 125–144
- Haymon, R. M., Fornari, D. J., Von Damm, K. L., Lilley, M. D., Perfit, M. R., Edmond, J. M., Shanks, III, W. C., Lutz, R. A., Grebmeier, J. M., Carbotte, S., Wright, D., McLaughlin, E., Smith, M., Beedle, N. and Olson, E. (1993) : Earth and Planetary Science Letters, Vol. 119, p. 85–101
- Hekinian, R., Fevrier, M., Bishoff, J. L., Picot, P. and Shanks, W. C. (1980) : Science, Vol. 207, p. 1,433–1,444
- Hekinian, R., Fevrier, M., Avedik, F., Cambon, P., Charlou, J. L., Needham, H. D., Raillard, L., Boulegue, J., Merlivat, L., Moinet, A., Mangani, S. and Lange, L. (1983 a) : Science, Vol. 219, p. 1,321–1,324
- Hekinian, R., Francheteau, J., Renard, V., Ballard, R. D., Choukroune, P., Cheminee, J.-L., Albareda, F., Minster, J.-F., Chariou, J.-L., Marty, J.-C. and Boulegues, J. (1983 b) : Mar. Geol. Res., Vol. 6, p. 1–14
- Hekinian, R. and Fouquet, Y. (1985) : Economic Geology, Vol. 80, No. 2, p. 221–240
- Hekinian, R., Thompson, G., Daniel, B. (1989) : Journal of Geophysical Research, Vol. 94, No. B12, p. 17,437–17,463
- Kuriyama, T., Matumoto, K. and Huijoka, Y. (1994) : Res. Geol., Vol. 44, No. (3), p. 187–199
- Lupton, J. E., Baker, E. T., Mottl, M. J., Sansone, F. J., Wheat, C. G., Resing, J. A., Massoth, G. J., Measures, C. I. and Feely, R. A. (1993) : Geophysical Research Letters, Vol. 20, No. 24, p. 2,913–2,916
- Macdonald, K., Sempere, J.-C. and Fox, P. J. (1984) : Journal of Geophysical Research, Vol. 89, No. B7, p. 6,049–6,069
- Macdonald, K. C., Fox, P. J., Perram, L. J., Eisen, M. F., Haymon, R. M., Miller, S. P., Carbotte, S. M., Cormier, M.-H. and Shor, A. N. (1988) : Nature, Vol. 335, p. 217–225
- Macdonald, K. C. and Fox, P. J. (1988) : Earth and Planetary Science Letters, Vol. 88, p. 119–131
- Macdonald, K. C., Fox, P. J., Miller, S., Carbotte, S., Edwards, M. H., Eisen, M., Fornari, D. J., Perram, L., Pockalny, R., Scheirer, D., Tighe, S., Weiland, C. and Wilson, D. (1992) : Marine Geophysical Researches, Vol. 14, p. 299–344
- Milligan, B. N. and Tunncliffe, V. (1994) : Journal of Geophysical Research, Vol. 99, No. B3, p. 4,774–4,786
- Morgan, J. P. and Chen, Y. J. (1993) : Nature, Vol. 364, p. 706–708
- Scheirer, D. S. and Macdonald, K. (1993) : Journal of Geophysical Research, Vol. 98, No. B5, p. 7,871–7,885
- Scheirer, D. S. and Macdonald, K. (1995) : Journal of Geophysical Research, Vol. 100, No. B2, p. 2,239–2,259
- Spiess, F. N., Macdonald, K. C., Arwater, T., Ballard, R., Carranza, A., Cordoba, D., Cox, C., Diaz-Garcia, V., Francheteau, J., Guerrero, J., Hawkins, J., Haymon, R., Hessler, R., Juteau, T., Kastner, M., Larson, R., Luyendyk, B., Macdougall, D., Miller, S., Normark, W., Orcutt, J. and Rangin, C. (1980) : Science, Vol. 207, p. 1,421–1,433
- Wilcock, W. S. D. and Toomey, D. R. (1993) : Marine Geophysical Researches, Vol. 15, p. 1–12