

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2007～2010

課題番号：19253005

研究課題名(和文) 重希土類元素およびインジウムの濃集機構と資源ポテンシャル評価の研究

研究課題名(英文) Study on concentration mechanism and resource potential of heavy rare earth elements and indium

研究代表者

渡辺 寧 (WATANABE YASUSHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門・主任研究員

研究者番号：90358383

研究成果の概要(和文):世界各地の重希土類およびインジウム鉱床の調査を実施し、ベトナム、タイ等東南アジア地域で重希土類に富む花崗岩風化殻を発見するとともに、日本、中国、ベトナム、ペルー、ボリビアでのインジウムの資源量の見積もりを行った。これらの結果、中国以外の地域でも重希土類およびインジウムの資源ポテンシャルが存在することが判明し、また鉱床成因のための必要条件が考察された。

研究成果の概要(英文):The worldwide field surveys on heavy rare earth and indium deposits led to the discovery of the weathered crust enriched in heavy rare earths in Vietnam, Thailand, etc., and indium resource estimation in Japan, China, Vietnam, Peru and Bolivia. These results indicate that significant heavy rare earth and indium potential present in the countries outside China. The study also shows the conditions that form these ore mineralization.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2008年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2009年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2010年度	3,000,000	900,000	3,900,000
総計	29,700,000	8,910,000	38,610,000

研究分野：数物系科学A

科研費の分科・細目：岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：重希土類，インジウム，資源，濃集機構

1. 研究開始当初の背景

日本の先端産業の原料として不可欠なレアメタルの需要は年々増加しており、現在ほぼすべての金属元素の価格が上昇している。本提案で取り上げる重希土類元素(ジスプロシウムやテルビウム)は、ハイブリッド車のモーターに使用される希土類磁石の添加物として用いられている。インジウムは液晶画面の透明電極に用いられており、日本は世界全体の約60%のインジウムを消費している。これらの元素はハイブリッド車や薄型テレビの普及とともに、今後ますます需要が増大

することが確実であり、2001年以降、インジウムの価格は約8倍、重希土類のジスプロシウムは約9倍にもなっている。今後の重希土類やインジウムの需要の伸びを考慮すると、これらの元素を供給するためには、中国のみでなく、全世界でこれらの元素に富む鉱床を開発する必要がある。いずれの元素も日本が世界生産量の多くを消費しており、資源確保のための資源量評価や鉱床の探査・開発指針を提示するのは、日本の先端産業維持のため必要不可欠な研究課題であり、資源消費国としての責務である。

これらの元素の寿命(世界埋蔵量/年間生産量)は、希土類元素が 883 年、インジウムが 6 年と見積もられている。この見積もりによると、希土類は豊富に存在するが、希土類資源全体の中で重希土類の占める割合はわずか 4.5%であり、そのほとんどすべてが中国南部の花崗岩風化殻から生産されている。中国は希土類を戦略物質と位置づけ、自国の磁石産業発展のために、ライバルである日本への供給を制限している。一方、資源の枯渇が迫るインジウムは、亜鉛鉱石中の副産物として回収されているが、インジウムの含有量調査を行っていない鉱山も多く、世界の亜鉛生産国の中には、インジウムを全く、またはほとんど生産していない国が多い。

私たちの研究グループは、資源の安定供給に資するために、重希土類およびインジウムの濃集機構に関する予察的研究を実施してきた。その結果、重希土類の供給源としては、花崗岩の風化殻に希土類が濃集する風化残留型鉱床と熱水変質を受けた過アルカリ岩が最も重要であるという結論を得た。風化残留型鉱床の形成には、1) 重希土類に富む花崗岩の存在、および 2) 花崗岩風化による希土類の移動・風化殻への濃縮が必要となる。本邦の花崗岩類の研究から、希土類—特に重希土類—に富む花崗岩は、結晶分化の進んだチタン鉄鉱系列花崗岩体頂部に形成されることが判明している。風化殻の粘土鉱物組成と希土類元素濃集度の検討からは、ハロサイトの卓越する風化殻では希土類元素の 2~5 倍の濃縮が生じることを示している。一方、一部の過アルカリ岩には高濃度の重希土類が含有されるが、特に変質部分では極めて濃度が高いことが判明している。

インジウムについては、豊羽鉱山の亜鉛鉱石の研究から、インジウム鉱床生成には、1) インジウムを含有する閃亜鉛鉱を多量に沈殿させるに足る硫黄が熱水系に含まれること、2) インジウムが選択的に沈殿する還元条件が実現されることが必要であるが判明した。

重希土類元素もインジウムも火山弧に通常見られる酸化型花崗岩(磁鉄鉱系列花崗岩)には伴われず、過アルカリ岩や還元型(チタン鉄鉱系列)花崗岩に伴われる。その結果として、中国を始めアジア大陸地域へのこれらの元素の偏在が生じている。

2. 研究の目的

本プロジェクトでは、上記の研究成果をさらに発展させ、重希土類およびインジウムの濃集過程の研究と、これらの元素の資源ポテンシャル評価を海外で実施し、今後の鉱床探査・開発に資する鉱床探査指針と、資源の安定供給のための方策の提案を目指すと同時に、重希土類元素やインジウムに富む還元型

花崗岩がなぜアジア大陸や南米の内陸部に形成されたのかその成因解明を目指す。

本研究プロジェクトの目標は、以下の通り。

- 1) 重希土類およびインジウムに関して、元素の濃集過程の解明を行う。
- 2) 調査対象国でのこれらの元素の資源ポテンシャル評価を実施する。
- 3) これらの鉱床を胚胎する還元型花崗岩、過アルカリ岩の成因の研究に基づき、これらの鉱床が形成されるテクトニックセッティングを解明する。

これらの結果は、今後のこれらの資源の探査・開発時の探鉱指針として活用されるとともに、資源量評価結果は、資源の安定供給のための基礎資料となる。

3. 研究の方法

重希土類に関しては、花崗岩の風化残留型鉱床と過アルカリ岩鉱床について元素の濃集過程の研究を行う。風化残留型鉱床は現在中国華南地域でのみ稼行されているが、予察的調査結果によると、タイにも重希土類に富む花崗岩と風化殻が存在する。華南地域と同様の地質・気候条件である東南アジア地域を調査地域として、花崗岩の鉱物・岩石化学的研究と風化殻の鉱物・地球化学的研究を行い、重希土類元素の濃集度、移動過程の解明し、風化残留型鉱床の鉱床形成モデルを提案するとともに還元型花崗岩の鉱物学的、年代学的、地球化学的検討を行い、その成因を明らかにする。

4 年の限られたプロジェクト期間では、全世界の様々な鉱床タイプや鉱床・鉱微地を調査することは不可能で、最大限の結果が得られるように、これまでの研究結果を踏まえ、研究対象地域や対象鉱床種を以下のように絞る。最初の 3 年を海外での調査期間にあて、平行して岩石・鉱物・化学分析を国内で実施し、最終年度は資源量評価や鉱床成因モデルの構築と成果発表・成果の普及に努める。

重希土類に富む過アルカリ岩については、資源量の点では重要であるにもかかわらず、過去に採掘された例はない。その存在がエジプトやモーリタニア、カナダで報告されているが、詳しい研究は行われていない。どのような条件で母岩の花崗岩が形成され、そこに希土類が濃集し、それが熱水変質によりどのように再移動・濃集したかを鉱物、岩石化学、流体包有物による研究をもとに明らかにする。この鉱床成因の研究と平行して、風化殻や熱水変質花崗岩の化学分析を広範に行い、それぞれの資源ポテンシャルの評価を同時に行う。

インジウムに関しては、日本で得られた沈殿条件や鉱床成因モデルがインジウム生産国やインジウムのポテンシャルを持つ国でも適用できるかを検証する。調査対象地域は、

亜鉛の資源ポテンシャルを持ち、還元的な火成岩が分布する中国～モンゴル地域と南米（ペルー、アルゼンチン）とし、これらの地域でインジウム資源評価を行い、世界のインジウム埋蔵量を改定する。

具体的な研究方法は、1) 現地地質鉱床調査・試料採取と2) 日本国内での鉱物・岩石・鉱石等の化学分析の2つに大別される。各地域で採取した試料は日本でそれぞれの研究分野の担当者に分配し、各種の分析を実施する。得られた分析結果は、毎年実施する日本での研究打ち合わせ会議で報告し、それらをもとにテクニクス・メタロジェニーの解明と広域資源ポテンシャル評価を行う。

4. 研究成果

本研究による主要な研究成果は以下のとおりまとめられる。

風化残留型の重希土類鉱床については、現在世界で唯一希土類を生産している中国南部地域の鉱床の鉱床母岩の特徴や鉱石の産状、希土類品位等を調査した。その結果イオン吸着鉱の母岩となる花崗岩には、軽希土類に富むものと重希土類に富むものが混在しており、希土類品位は0.1%未満とかなり低いことが明らかになった。また花崗岩中の希土類含有鉱物はモナザイトではなく二次的に生じた炭酸塩鉱物であることが判明した。このような花崗岩は中央海嶺の沈みこむテクニクセッティングのもとで形成されたことが考察された。鉱石中のイオン吸着性の希土類量は高く、希土類の抽出が極めて用意であることも希土類抽出実験から判明した。これらの結果からイオン吸着型鉱床の成因には、1) 希土類（特に重希土類）に富む花崗岩の存在、2) 花崗岩の風化を促進する湿潤気候、3) 難溶性希土類鉱物の分解を促す熱水変質作用が必要条件であることが結論された。この成果をもとに中国南部と同様のテクニクセッティングにある東南アジア（ベトナム、タイ、マレーシア、ラオス、インドネシア）地域の広域的な地質調査を実施し、ベトナムでは鉱化有望地域を発見した。

アルカリ岩に伴う重希土類鉱床は、エジプト、カナダ、南アフリカ共和国、モンゴルで調査を実施した。調査の結果、マグマ性の鉱床と熱水性の鉱床に区分されることが判明し、マグマ性の鉱床では、過アルカリ岩の集積岩に重希土類含有鉱物が濃集するものと、分別結晶作用により最末期に重希土類鉱物が濃集する2つのタイプが存在することが明らかになった。希土類含有鉱物は岩体により異なるが、Nb-Ta 鉱物やZr 鉱物に随伴することが判明した。これらの鉱物からはこれまでほとんど希土類が生産されてこなかったが、抽出試験の結果希土類を回収することは可能であることが判明した。

インジウムのポテンシャルについては、日本、ベトナム、ポリビア、アルゼンチン、ロシア、北欧、モンゴル等の銅・鉛・亜鉛鉱床を調査し、日本、ベトナム、南米の鉱床に特にポテンシャルがあることが判明した。これらの鉱床は、還元型花崗岩に関連しており、鉱化地域には広く堆積岩が分布することが判明している。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計128件）

- ① Sanematsu, K. and Ishihara, S., $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the Da Lien granite related to the Nui Phao W mineralization in northern Vietnam, *Resource Geology*, 査読有, 61 巻, 2011, 印刷中
- ② Sanematsu, K., Moriyama, T., Sotouky, L., Watanabe, Y., Mobility of rare earth elements in basalt-derived laterite at the Bolaven Plateau, Southern Laos, *Resource Geology*, 査読有, 61 巻, 2011, 140-158
- ③ Ishihara, S., Murakami, H., Marquez-Zavalia, M. F., Inferred indium resources of the Bolivian tin-polymetallic deposits, *Resource Geology*, 査読有, 61 巻, 2011, 174-191
- ④ Moriyama, T., Miyawaki, R., Yokoyama, K., Matsubara, S., Hirano, H., Murakami, H. and Watanabe, Y., Wakefieldite-(Nd), a new neodymium vanadate mineral in the Arase stratiform ferromanganese deposit, Kochi Prefecture, Japan, *Resource Geology*, 査読有, 61 巻, 2011, 101-110
- ⑤ Sanematsu, K., Murakami, H., Duangurigna, S., Vilayhack, S., Duncan, R. A. and Watanabe, Y., $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of granitoids from the Truong Son fold belt and Kontum massif in Laos, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 106 巻, 査読有, 2011, 13-25
- ⑥ Ishihara, S., Tuan Anh Tran, Watanabe, Y. and Trong-Hoa Tran, Chemical characteristics of lead-zinc ores from North Vietnam, with a special attention to the In contents, *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 査読有, 61 巻, 2010, 307-327
- ⑦ Aboelkhair, H., Ninomiya, Y., Watanabe, Y. and Sato, I., Processing and interpretation of ASTER TIR data for mapping of rare-metal-enriched albite granitoids in the Central Eastern Desert

- of Egypt, *Journal of African Earth Sciences*, 査読有, 58 巻, 2010, 141-151
- ⑧ Hoshino, M., Kimata, M., Shimizu, M., Nishida, N., Akasaka, T., Crystal chemistry of zircon from granitic rocks, Japan: genetic implications of HREE, U and Th enrichment, *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie- Abhandlungen*, 査読有, 187 巻, 2010, 167-188
- ⑨ Hoshino, M., Kimata, M., Shimizu, M., Nishida, N., Chesner, C. A., Akasaka, T., Crystal chemistry of volcanic allanites indicative of naturally induced oxidation-dehydrogenation, *Mineralogy and Petrology*, 査読有, 99 巻, 2010, 133-141
- ⑩ Hoshino, M., Kimata, M., Nishida, N., Shimizu, M., Dissakisite-(Ce) chemical composition: some implications for its origins, *Physics and Chemistry of Minerals*, 査読有, 37 巻, 2010, 255-263
- ⑪ 山田亮一・吉田武義・掛川 武・奈良郁子・小川泰正、東北地方北部の金属鉱床に随伴する高インジウム鉱石の形成条件、*資源地質*、査読有、60 巻、2010、153-164
- ⑫ 山田亮一・吉田武義、東北地方北部の金属鉱床に随伴するレアメタルの分布特性、*資源地質*、査読有、60 巻、2010、143-152
- ⑬ 渡辺 寧、レアメタルテキスト: (1) 希土類、*資源地質*、査読無、60 巻、2010、103-122
- ⑭ Imai, A., Ikuno, T., Sanematsu, K., Sueoka, T., Ishida, S., Watanabe, K., Sitha, K., Setijadji, L. D. and Boosayasak, J., Rare Earth Elements in Weathered Crusts of Granitic Rocks in Southeast Asian Tin Belt (Northern Thailand, Southern Thailand (Ranong-Takua Pa-Phuket) and Bangka Island, Indonesia, *Proceedings of the 2nd Regional Conference Interdisciplinary Research on Natural Resources and Materials Engineering*, 査読無, 2009, 45-52
- ⑮ Sanematsu, K., Murakami, H., Watanabe, Y., Sixomxuen Duangsurigna and Siphandone Vilayhack, *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 査読有, 2009, 527-558
- ⑯ 石原舜三・村上浩康、華南のインジウム資源の地質的背景、特に大鉱床の成因について、*資源地質*、査読無、58 巻、2008、139-150
- ⑰ Ishihara, S., Hua, R., Hoshino, M., Murakami, H., REE abundance and REE minerals in granitic rocks in the Nanling range, Jiangxi province, southern China, and generation of the REE-rich weathered crust deposit, *Resource Geology*, 査読有, 58 巻, 2008, 355-372
- ⑱ 石原舜三・浦辺徹郎, Vo Tien Dung、ベトナム北部の亜鉛鉱床のインジウム含有量—予察調査、*資源地質*、査読有、58 巻、2008、23-28
- ⑲ Moriyama, T., Panigrahi, M. K., Pandit, D., Watanabe, Y., Rare earth element enrichment in Late Archean manganese deposits from the Iron Ore Group, east India, *Resource Geology*, 査読有, 58 巻, 2008, 402-413
- ⑳ Murakami, H., Ishihara, S., REE mineralization of weathered crust and clay sediment on granitic rocks in the Sanyo belt, SW Japan and the southern Jiangxi province, China, *Resource Geology*, 査読有, 58 巻, 2008, 373-401
- [学会発表] (計 144 件)
- ① Watanabe, Y., Japan's search for alternative rare earths supplies, 6th International Rare Earths Conference, 2010 年 11 月 11 日, 香港(中国)
- ② Mentani, T., Ohmura, T., Watanabe, Y., Urabe, T., So-called "ion-adsorption type" REE Deposits Found in weathered Crust of ilmenite-series granite in northern Vietnam, 2010 GSA Annual Meeting, 2010 年 11 月 1 日, デンバー (米国)
- ③ Kon, Y., Murakami, H., Hirata, T., Takagi, T., Watanabe, Y., Rapid quantitative analyses of REE and trace elements in 1:10 XRF Glassbead using LA-ICPMS, 2010 GSA Annual Meeting, 2010 年 11 月 1 日, デンバー (米国)
- ④ Sanematsu, K., Kon, Y., Hirano, H., Watanabe, Y., Mineralogy and geochemistry of the Mushgai Khudag REE deposit, Mongolia, 2010 GSA Annual Meeting, 2010 年 11 月 1 日, デンバー (米国)
- ⑤ Watanabe, Y. and Hitzman, M., Critical metals for the new energy future, 2010 GSA Annual Meeting, 2010 年 11 月 1 日, デンバー (米国)
- ⑥ Murakami, H. and Ishihara, S., Indium resources and metallogeny in Japan, China and Bolivia, 2010 GSA Annual Meeting, 2010 年 11 月 1 日, デンバー (米国)
- ⑦ Hoshino, M., Watanabe, Y., Murakami, H. and Kon, Y., Formation process of zircon associated with REE fluorocarbonate and

- niobium minerals at the Nechalacho REE deposit in the Thor Lake syenite, Canada, 2010 GSA Annual Meeting, 2010年11月1日, デンバー (米国)
- ⑧ Watanabe, Y., A Japanese perspective for the stable supply of rare earths, Minor Metals & Rare Earths 2010, 2010年10月19日, アモイ (中国)
- ⑨ 星野 美保子、渡辺 寧、村上 浩康、トアレイク Nechalacho REE 鉱床における REE フッ化炭酸塩鉱物と Nb 鉱物を伴うジルコンの形成過程、日本鉱物科学会、2010年9月25日、島根大学 (島根県)
- ⑩ Watanabe, Y., Rare earth usage in Japan: Future requirements, sourcing challenges and the Japanese perspective, 21st Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and their Applications, 2010年8月30日, ブレッド(スロベニア)
- ⑪ Hoshino, M., Kimata, M., Shimizu, M., Nishida, N., Akasaka, T., Crystal chemistry of volcanic allanites indicative of naturally induced oxidation-dehydrogenation, 20th General Meeting of the International Mineralogical Association, 2010年8月25日, Budapest (Hungary)
- ⑫ Shimizu, M., Cook, N. J., Shimizu, M. and Sundblad, K. L., Indium Mineralization in Magmatic-Hydrothermal System, 20th General Meeting of the International Mineralogical Association, 2010年8月23日, Budapest (Hungary)
- ⑬ Hoshino, M., Kimata, M., Shimizu, M., Nishida, N., Akasaka, T., Crystal chemistry of zircon from granitic rocks, Japan: genetic implications of HREE, U and Th enrichment, 20th General Meeting of the International Mineralogical Association, 2010年8月22-24日, Budapest (Hungary)
- ⑭ Ikuno, T., Imai, A., Yonezu, K., Sanematsu, K., Setijadji, L., Sitha, K., Dimara, A., Pistha-Arnord, V., Nakapadungrat, S., REE sequential extraction and geochemical behavior in hydrothermally-altered and weathered granitic rocks in southern Thailand and Bangka island (Indonesia), 資源地質学会, 2010年6月25日, 東京大学 (東京都)
- ⑮ Mentani, T., Watanabe, Y., Urabe, T., Enrichment and modes of occurrence of rare earth elements in weathered granites in northern Vietnam, 資源地質学会, 2010年6月24日, 東京大学 (東京都)
- ⑯ 星野 美保子、実松 健造、渡辺 寧、重希土類元素を含有したジルコンの鉱物学的研究、日本希土類学会、2010年5月28日、北九州国際会議場(福岡県)
- ⑰ 村上 浩康、佐藤比奈子、石山大三、昆 慶明、石原 舜三、豪州・ノーランズボア 鉱床産鉱石と燐灰石の REE 組成、日本地球惑星科学連合大会、2010年5月23日、幕張コンベンションセンター (千葉県)
- ⑱ Watanabe, Y., High-tech metals and the needs of society, 7th Fennoscandian Exploration and Mining, 2009年12月3日, ロバニエミ(フィンランド)
- ⑲ Watanabe, Y., Rare earth elements: a new scope of mining for saving energy and environment, The 33rd International Geological Congress, 2008年8月12日, オスロ(ノルウェー)
- ⑳ 渡辺 寧、希土類資源の現状と重希土類元素の新たな供給源の探索、日本希土類学会第25回希土類討論会、2008年5月29日、タワーホール船堀(東京)

[図書] (計12件)

- ① 渡辺 寧、他、ニュートンプレス、レアメタルレアアース、2011、144
- ② 渡辺 寧、他、株式会社 情報機構、ガラスの加工技術と製品応用、2008、21-26
- ③ 渡辺 寧、他、株式会社エヌ・ディー・エス、希土類の材料技術ハンドブック、2008、591-611
- ④ 渡辺 寧・守山 武・村上浩康、他、工業調査会、レアメタル、2007、50-90

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 寧 (WATANABE YASUSHI)
独立行政法人産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門・主任研究員
研究者番号：90358383

(2) 研究分担者

村上 浩康 (MURAKAMI HIROYASU)
独立行政法人産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門・主任研究員
研究者番号：40371083

松枝 大治 (MATUEDA HIROHARU)
北海道大学・総合博物館・教授
研究者番号：20108921

吉田 武義 (YOSHIDA TAKEYOSHI)
東北大学・理学研究科・教授
研究者番号：80004505

水田 敏夫 (MIZUTA TOSHIO)
秋田大学・工学資源学部・教授
研究者番号：80094051

石山 大三 (ISHIYAMA DAIZO)

秋田大学・工学資源学部・教授
研究者番号：30193361
清水 正明 (SHIMIZU MASA AKI)
富山大学・総合理工学部・教授
研究者番号：50162714
木村 純一 (KIMURA JYUNICHI)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
変動研究センター・研究グループリーダー
研究者番号：3024170
渡邊 公一郎 (WATANABE KOICHIRO)
九州大学・工学研究科・教授
研究者番号：10182916
今井 亮 (IMAI AKIRA)
秋田大学・工学資源学部・教授
研究者番号：90223304
浦辺 徹郎 (URABE TETSURO)
東京大学・理学研究科・教授
研究者番号：50107687
鹿園 直建 (SHIKAZONO NAOTATSU)
慶応大学・理工学部・教授
研究者番号：10011751
林 謙一郎 (HAYASHI KENICHIRO)
筑波大学・大学院・生命環境科学研究科・
教授
研究者番号：40124614
実松 健造 (SANEMATSU KENZO)
独立行政法人産業技術総合研究所・地圏資
源環境研究部門・研究員
研究者番号：40462840
星野 美保子 (HOSHINO MIHOKO)
独立行政法人産業技術総合研究所・地圏資
源環境研究部門・研究員
研究者番号：10549885