

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18206074
 研究課題名（和文） 環境共生型シリサイド熱電半導体のサブラティス・エンジニアリング
 研究課題名（英文） Sublattice Engineering of Environmentally Friendly Thermoelectric Silicide Semiconductors
 研究代表者
 乾 晴行（INUI HARUYUKI）
 京都大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：30213135

研究成果の概要：Re, Ru のシリサイドに注目して、これらシリサイドのシリコン副格子（サブラティス）の配列の多様性に基づいた特異な微細組織を制御して、その特性改善および新たな物質探索、特性向上の指導原理の確立を目指した。「金属副格子を一定に保つことによって電気伝導を低減することなく、Si 副格子のナノ・スケール変調から生じる相界面により熱伝導を低減する」サブラティス・エンジニアリングがこれらの目的に有用であることを明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	22,500,000	6,750,000	29,250,000
2007 年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2008 年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
年度			
年度			
総計	38,600,000	11,580,000	50,180,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：熱電変換材料，無次元性能指数，ゼーベック係数，電気伝導度，熱伝導度，微細組織，ラットリング，透過電子顕微鏡法

1. 研究開始当初の背景

地球環境問題でのエネルギー有効利用やエレクトロニクス産業の高機能化（局所精密冷却）の観点から熱電発電・冷却に対する期待が高まり、熱電材料に再び注目が集まっている。熱電材料の特性は、ゼーベック係数、電気伝導度、熱伝導度を α , σ , κ , とすると、性能指数 $Z = \alpha^2 \sigma / \kappa$ あるいはこれに温度 T を乗じた無次元性能指数 ZT で表される。この値が大きいほど熱電変換効率が高く、 $ZT=1$

が実用化の目安とされている。多種多様の材料が熱電材料として可能性を試されており、環境共生型シリサイド半導体と呼ばれる一連の材料もその1つである。Fe や Mn のシリサイドは集中的に研究がなされた代表例であるが、実用化には更なる特性の改善が必要と考えられている。そのような中、我々は独自に Re, Ru のシリサイドに注目して熱電特性を調べ、これらシリサイドがある特異な微細組織を呈する場合に良好な熱電特性を示すことを

見出した。この特異な微細組織はシリサイドを形成する副格子（サブラティス）の配列の多様性に基づいたもので、「金属副格子を一定に保つことによって電気伝導を低減することなく、Si 副格子のナノ・スケール変調から生じる相界面により熱伝導を低減する」サブラティス・エンジニアリングの可能性を示唆するもので、Re, Ru のシリサイドを例に取り上げ、その特性改善および新たな物質探索、特性向上の指導原理の確立を目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(1) この特異な微細組織の詳細、形成要因ならびにそれに伴う特性発現機構を明らかにし、その知見から、(2) サブラティス・エンジニアリングにより Ru, Re シリサイドの熱電特性の更なる改善を目指すとともに、(3) サブラティス・エンジニアリングなる概念が熱電変換の物質探索、特性改善の新たな指導原理となり得るか検証することである。

3. 研究の方法

Re, Ru いずれのシリサイドの場合も、Si 副格子の変調は添加元素の含有量による M(金属)/Si 原子比の変化により起こるため、1 金属原子あたりの価電子数 (VEC) 14 を基本組成として 3 元化合物の固溶範囲の拡張が起こると考えられ、光学式浮遊帯域溶融法により単結晶および多結晶試料の作製を行った。添加元素には、Re シリサイドでは Mo, Cr, Ru などの遷移金属に加え Al, P を、Ru シリサイドでは Re, Mn を選定した。作製した結晶試料について、相構成、添加元素の固溶度、微細組織を EDS 元素分析を併用しながら走査電子顕微鏡、透過電子顕微鏡法を用いて行った。熱電物性（熱伝導、電気伝導度、ゼーベック係数、ホール係数）は室温（必要に応じて液体ヘリウム温度）から 800 の広い温度範囲で行った。

4. 研究成果

(1) Re シリサイド

Re シリサイドはこれまでの ReSi_2 組成の C11_b 構造をもつという報告とは大きく異なり、Si 副格子に 12.5% もの大量の空孔を含む空孔規則相で、その結晶構造は単斜晶系の空間群 Cm に属すると決定した。2 元系では無次元性能指数は [001] 方向で特に優れ、800 K で $\text{ZT}=0.75$ を示す。Re との価電子数の多寡によ

り空孔濃度を増減させることができ、その結果、インコメンシュレート相が形成される。このインコメンシュレート相では Re 副格子は保たれたまま Si 副格子の空孔密度と配列が変化しており、合金元素量増加に伴いインコメンシュレート構造は、シアー構造からアダプティブ構造へと変化する。この変化がおきる合金組成は合金元素に依存し、Mo, W, Al などでは少ない添加量でこの変化がおこるものの、Ru, Fe, Cr, Nb などでは固溶限ぎりぎりまでシアー構造が安定となる。熱電特性は概して、シアー構造を取る場合に低く、アダプティブ構造を取る場合に高い。たとえば、2% 程度の合金添加でアダプティブ構造が形成される Mo 添加の場合、[001] 方向で得られた無次元性能指数は 800 K で $\text{ZT}=0.85$ (n 型) であり、2 元系 Re シリサイドをはるかに凌駕する。添加量としては、シアー構造からアダプティブ構造へ変化するぎりぎりの組成で最も性能が良く、それ以上の添加ではかえって特性を悪くする。シアー構造を取りアダプティブ構造が形成されない Ru, Fe, Cr, Nb などの添加では特性の改善は見られなかった。これに対し、Si を Al で置換すると、結晶全体としては大きな微細構造の変化はないものの、双晶境界に局所的に、アダプティブ構造が散在して形成され、[010] 方向の無次元性能指数は 400 K で $\text{ZT}=1$ (p 型) に迫る高い性能を示した。

(2) Ru シリサイド

Ru シリサイド (Ru_2Si_3) に Re や Mn を添加すると、2 元系では高温でしか安定でないチムニラダー構造が低温でも安定に現れ、 $\text{Ru}_2\text{Si}_3\text{-ReSi}_{1.75}$ 擬 2 元系で広い固溶域を形成する。この擬 2 元系固溶域では金属(M)/シリコン(Si)原子比は合金元素添加量とともに順次減少するが、金属原子の副格子を一定に保ったまま Si 副格子の大きさを次々変える一連のチムニラダー化合物が形成される。しかも、1 つの合金組成で 1 種のチムニラダー化合物だけを観察することは稀で、合金組成によっては、主相に加えて粒界近傍に一連のチムニラダー化合物からなる遷移領域が形成される。この遷移領域には、数種のことなる組成を持つチムニラダー化合物が、数 μm 幅にわたって形成される。Re 添加材ではこのような遷移領域は粒界近傍に限定されるが、Mn 添加材では試料全面に渡るほど広い領域で遷移領域が形成される。Si/(Ru+合金元素)-合金元素プロットにより p-n 伝導の制御が出来る

ことが明らかとなった。Re 添加に比べ Mn 添加材ではより広い組成範囲で n 型伝導を示し、p-n 伝導の遷移がかなり高 Mn 添加量でしか実現しない。これは、Re 添加に比べ Mn 添加では金属副格子の体積膨張が小さいためである。Mn 添加材では、Ru と Mn の原子量が大きく異なるため、かなり広い組成範囲の一連のチムニーラダー相が 1 つの試料に密に形成される。金属副格子の結晶方位は一定に保たれた中で Si 副格子の周期が変化するため、電気伝導は阻害されず、熱伝導のみ低下する熱電材料として理想的な界面が多数形成される。単結晶上の試料を作成し、熱電特性を測定すると Ru を Mn で 90% 置換した材料で、無次元性能指数(ZT)が 880 K で 0.76 と非常に大きな値を示した。これは、ナノ組織制御により熱電特性を飛躍的に向上させることができることを示唆している。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計 33 件)

K. Kishida, A. Ishida, T. Koyama, S. Harada, N.L. Okamoto, K. Tanaka and H. Inui, Thermoelectric Properties of Ternary and Al Substituted $Ru_{1-x}Re_xSi_y$ Chimney-Ladder Compounds, *Acta Materialia*, 査読有, Vol. 57 (2009), 2010-2019.

S. Harada, K. Tanaka, K. Kishida, N.L. Okamoto and H. Inui, Change in the Thermoelectric Properties with the Variation in the Defect Structure of $ReSi_{1.75}$, MRS Symposium Proceedings on Advanced Intermetallic-Based Alloys for Extreme Environment and Energy Applications, 査読有, Vol. 1128 (2009), U01.07.1 - U01.07.6.

N.L. Okamoto, T. Nakano, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Mechanical and Thermal Properties of Single Crystals of Some Thermoelectric Clathrate Compounds, MRS Symposium Proceedings on Advanced Intermetallic-Based Alloys for Extreme Environment and Energy Applications, 査読有, Vol. 1128 (2009), U01.11.1 - U01.11.6.

T. Koyama, N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Crystal Structure and Thermoelectric Properties of Mn-Substituted Ru_2Si_3 with the Chimney-Ladder Structure, MRS Symposium Proceedings on Advanced Intermetallic-Based Alloys for Extreme Environment and Energy Applications, 査読有, Vol. 1128 (2009), U05.01.1 - U05.01.6.

N.L. Okamoto, T. Koyama, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Crystal Structures and

Thermoelectric Properties of Chimney-Ladder Compounds in the Ru_2Si_3 - Mn_4Si_7 Pseudobinary System, *Acta Materialia*, 査読有, (2009), in press

N.L. Okamoto, T. Nakano, K. Tanaka and H. Inui, Mechanical and Thermal Properties of Single Crystals of the Type-I Clathrate Compounds $Ba_8Ga_{16}Ge_{30}$ and $Sr_8Ga_{16}Ge_{30}$, *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 104 (2008), 013529.

K. Tanaka, J.-H. Kim, K. Kishida and H. Inui, Variation in the Einstein Temperature of Guest Atoms in Ba-Ge-X Type-III Clathrate Compounds, MRS Symposium Proceedings on Thermoelectric Power Generation, 査読有, Vol. 1044 (2008), 223-228.

J.-H. Kim, N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Crystal structure and Thermoelectric Properties of Type-III Clathrate Compounds in the Ba-In-Ge System, *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 102 (2007), 094506.

T. Koyama, A. Ishida, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Crystal Structure Variation of Ru_2Si_3 upon Alloying with Mn, *Advanced Materials Research*, 査読有, Vol. 26-28 (2007), 229-232.

S. Harada, K. Tanaka, K. Kishida and H. Inui, Crystal Structure and Thermoelectric Properties of $ReSi_{1.75}$ Based Alloys, *Advanced Materials Research*, 査読有, Vol. 26-28 (2007), 197-200.

K. Kishida, A. Ishida, K. Tanaka and H. Inui, Thermoelectric Properties of Ru_2Si_3 -based Chimney-Ladder Phases, *Materials Science Forum*, 査読有, Vol. 561-565 (2007), 463-466.

H. Inui, K. Tanaka, K. Kishida and S. Harada, Defect Generation in Some Transition-metal Silicides in Accommodating the Deviation from the Stoichiometric Compositions, *Materials Science Forum*, 査読有, Vol. 561-565 (2007), 443-446.

J.-H. Kim, N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Thermoelectric Properties and Crystal Structure of Type-III Clathrate Compounds in the Ba-Al-Ge System, *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 102 (2007), No.3, 034510.

M.W. Oh, J.J. Gu, H. Inui, M.H. Oh, D.M. Wee, Evaluation of Anisotropic Thermoelectric Power of $ReSi_{1.75}$, *Physica*, 査読有, Vol. B389 (2007), No. 2, 367-371.

N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Effect of In-Additions on the Thermoelectric Properties of the Type-I Clathrate Compound $Ba_8Ga_{16}Ge_{30}$, *Journal of Applied*

Physics, 査読有, Vol. 101 (2007), No. 11, 113525.

H. Inui, K. Tanaka and K. Kishida, Defect Control and Defect Engineering of Transition-Metal Silicides, MRS Symposium Proceedings on Advanced Intermetallic-Based Alloys, 査読有, Vol. 980 (2007), 0980-II04-01.

J-H. Kim, N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Thermoelectric Properties of Ba-Ge Based Type-III Clathrate Compounds, MRS Symposium Proceedings on Advanced Intermetallic-Based Alloys, 査読有, Vol. 980 (2007), 0980-II04-05.

A. Ishida, N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Crystal Structures and Thermoelectric Properties of $Ru_{1-x}Re_xSi_y$ Chimney-Ladder Compounds, MRS Symposium Proceedings on Advanced Intermetallic-Based Alloys, 査読有, Vol. 980 (2007), 0980-II05-37.

S. Harada, K. Tanaka, K. Kishida and H. Inui, Control of the Si Vacancy Concentration and Arrangement in $ReSi_{1.75}$ by Al and P Additions, MRS Symposium Proceedings on Advanced Intermetallic-Based Alloys, 査読有, Vol. 980 (2007), 0980-II05-40.

岡本範彦, 金正煥, 田中克志, 乾 晴行, Ba-Ga-Ge系クラスレート化合物における内包原子サイトの分裂挙動と格子熱伝導率, 日本金属学会報, 査読有, Vol. 46 巻 (2007), 487-491.

²¹ N.L. Okamoto, J-H. Kim, K. Tanaka and H. Inui, Splitting of Guest Atom Sites and Lattice Thermal Conductivity of Type-I and -III Clathrate Compounds in the Ba-Ga-Ge System, Acta Materialia, 査読有, Vol. 54 (2006), 5519-5528.

²² N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Crystal Structure and Thermoelectric Properties of Type-I Clathrate Compounds in the Ba-Ga-Ge System, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 100 (2006), 073504.

²³ B.A. Simkin, A. Ishida, N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka, and H. Inui, Formation of a Series of Chimney-Ladder Compounds in the Ru-Re-Si System, Acta Materialia, 査読有, Vol. 54 (2006), 2857-2865.

²⁴ J-H. Kim, N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, High Thermoelectric Performance of Type-III Clathrate Compounds in the Ba-Ge-Ga System, Acta Materialia, Vol. 54 (2006), No. 8, 2057-2062.

²⁵ N.L. Okamoto, M-W. Oh, T. Nishii, K. Tanaka and H. Inui, Crystal Structure and Thermoelectric Properties of the Type-I Clathrate Compound

Ba_8Ge_{43} with an Ordered Arrangement of Ge Vacancies, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 99 (2006), .033513.

²⁶ N.L. Okamoto, K. Tanaka and H. Inui, Crystal Structure Refinement of a Type-I Clathrate Compound Ba_8Ge_{43} with an Ordered Arrangement of Germanium Vacancies, Acta Materialia, 査読有, Vol. 54 (2006), 173-178.

²⁷ H. Inui, Re Silicide as a New Class of Thermoelectric Material, MRS Symposium Proceedings on Materials and Technologies for Direct Thermal-to-Electric Energy Conversion, 査読有, Vol. 886 (2006), 219-229.

²⁸ N.L. Okamoto, K. Tanaka and H. Inui, Splitting of Guest Atom Sites and Lattice Thermal Conductivity in Ba-Ga-Ge Clathrate Compounds, MRS Symposium Proceedings on Materials and Technologies for Direct Thermal-to-Electric Energy Conversion, 査読有, Vol. 886 (2006), 407-412.

²⁹ J-H. Kim, N.L. Okamoto, K. Tanaka and H. Inui, Effect of Ga-Doping on the Thermoelectric Properties of Ba-Ge Type-III Clathrate Compounds, MRS Symposium Proceedings on Materials and Technologies for Direct Thermal-to-Electric Energy Conversion, 査読有, Vol. 886 (2006), 425-430.

³⁰ B.A. Simkin, J-J. Gu, M-W. Oh, Y. Hayashi and H. Inui, Electrical Properties and Phase Changes in Ru_2Si_3 and Re_4Si_7 , Proceedings of International Conference on Solid-Solid Phase Transformations in Materials, 査読有, (PTM'05), (2006), 1073-1088.

³¹ 田中克志, 岸田恭輔, 乾 晴行, 熱電金属間化合物 - ナノスケール欠陥制御と特性改善, 金属, 査読有, Vol. 76 (2006), 49-54.

³² 田中克志, 岸田恭輔, 乾 晴行, 表紙を語る: 原子空孔の規則配列を操作する方法を探る, 金属, 査読有, Vol. 76 (2006), 3.

³³ 原田俊太, 寺田英司, 田中克志, 岸田恭輔, 乾 晴行, $ReSiAl$ の構造解析における原子サイト分析, 日本金属学会報, 査読有, Vol. 45 巻 (2006), 870.

〔学会発表〕(計 34 件)

北本雄祐, 岡本範彦, 田中克志, 乾 晴行, 二相組織を有するクラスレート化合物の熱伝導挙動, 日本金属学会 2009 年春期 (第 144 回) 大会, 2009 年 3 月 27 日, 東京工業大学.

原田俊太, 田中克志, 乾 晴行, 不定比酸化チタンの面欠陥導入に伴う熱伝導率の低減, 日本金属学会 2009 年春期 (第 144 回) 大会, 2009 年 3 月 27 日, 東京工業大学.

S. Harada, K. Tanaka, K. Kishida, N.L.

Okamoto and H. Inui, Change in the Thermoelectric Properties with the Variation in the Defect Structure of $\text{ReSi}_{1.75}$, MRS 2008 Fall Meeting on Advanced Intermetallic Alloys II –Designing For Extreme Environments and Energy Efficiency, 2008年12月1日, Boston (U. S. A.) .

N.L. Okamoto, T. Nakano, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Mechanical and Thermal Properties of Single Crystals of Some Thermoelectric Clathrate Compounds, MRS 2008 Fall Meeting on Advanced Intermetallic Alloys II –Designing For Extreme Environments and Energy Efficiency, 2008年12月1日, Boston (U. S. A.) .

T. Koyama, N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Crystal Structure and Thermoelectric Properties of Mn-Substituted Ru_2Si_3 with the Chimney-Ladder Structure, MRS 2008 Fall Meeting on Advanced Intermetallic Alloys II –Designing For Extreme Environments and Energy Efficiency, 2008年12月1日, Boston (U. S. A.) .

岡本範彦, 中野貴博, 岸田恭輔, 田中克志, 乾 晴行, クラスレート化合物単結晶の熱および機械的特性, 日本金属学会 2008年秋期(第143回)大会, 2008年9月23日, 熊本大学黒髪キャンパス .

小山達也, 原田俊太, 岡本範彦, 岸田恭輔, 田中克志, 乾 晴行, Ru_2Si_3 基チムニラダー相の分布と熱伝導率の相関, 日本金属学会 2008年秋期(第143回)大会, 2008年9月23日, 熊本大学黒髪キャンパス .

原田俊太, 田中克志, 岸田恭輔, 岡本範彦, 乾 晴行, 空孔規則配列相を有する $\text{ReSi}_{1.75}$ 基シリサイドの熱電特性, 日本金属学会 2008年秋期(第143回)大会, 2008年9月23日, 熊本大学黒髪キャンパス .

乾 晴行, 耐熱構造材料, 熱電材料, 電池材料, JST 第4期科学技術基本計画ワークショップ, 2008年7月25日, 科学技術振興機構別館 .

田中克志, 原田俊太, 乾 晴行, 遷移金属シリサイドのナノ構造制御と熱電変換特性, 日本学術振興会アモルファス・ナノ材料第147委員会第101回研究会 2008年6月4日, 弘済会館 .

田中克志, 原田俊太, 金 正煥, 岸田恭輔, 乾 晴行, Ba-Ge基クラスレート化合物における原子の熱振動と熱伝導, 日本金属学会 2008年春期(第142回)大会, 2008年3月26日, 武蔵工業大学大学 .

小山達也, 原田俊太, 岸田恭輔, 田中克志, 乾 晴行, $\text{Ru}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Si}_y$ チムニラダー相の結晶構造と熱電特性, 日本金属学会 2008年春

期(第142回)大会, 2008年3月26日, 武蔵工業大学大学 .

原田俊太, 田中克志, 岸田恭輔, 乾 晴行, $\text{ReSi}_{1.75}$ 基シリサイドの空孔規則配列の変化に伴う熱電特性の変化, 日本金属学会 2008年春期(第142回)大会, 2008年3月26日, 武蔵工業大学大学 .

H. Inui, K. Tanaka, K. Kishida and S. Harada, Defect Generation in Some Transition-Metal Silicides in Accommodating the Deviation from the Stoichiometric Compositions, The Sixth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, 2007年11月5日, Jeju Island (Korea) .

K. Kishida, A. Ishida, K. Tanaka and H. Inui, Thermoelectric Properties of Ru_2Si_3 -Based Chimney-Ladder Phases, The Sixth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, 2007年11月5日, Jeju Island (Korea) .

S. Harada, K. Tanaka, K. Kishida and H. Inui, Crystal Structure and Thermoelectric Properties of $\text{ReSi}_{1.75}$ -Based Alloys, The Sixth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, 2007年11月5日, Jeju Island (Korea) .

T. Koyama, A. Ishida, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Crystal Structure Variation of Ru_2Si_3 Upon Alloying with Mn, The Sixth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, 2007年11月5日, Jeju Island (Korea) .

小山達也, 原田俊太, 石田 央, 岸田恭輔, 田中克志, 乾 晴行, Ru_2Si_3 基チムニラダー相の構造変化と熱電特性, 日本金属学会 2007年秋期(第141回)大会, 2007年9月19日, 岐阜大学 .

原田俊太, 田中克志, 岸田恭輔, 乾 晴行, $\text{ReSi}_{1.75}$ 結晶中の欠陥構造が及ぼす熱電特性への影響, 日本金属学会 2007年秋期(第141回)大会, 2007年9月19日, 岐阜大学 .

金 正煥, 田中克志, 岸田恭輔, 乾 晴行, Ba-Ge基クラスレート化合物における原子変位パラメータと熱伝導, 日本金属学会 2007年秋期(第141回)大会, 2007年9月19日, 岐阜大学 .

21 H. Inui, K. Kishida, A. Ishida, S. Harada, Defect Generation in Some Transition-Metal Silicides to Accommodate the Deviation from the Stoichiometric Compositions, European Congress on Advanced Materials and Processes, 2007年9月10日, Nurnberg (Germany) .

22 小山達也, 石田 央, 岸田恭輔, 田中克志, 乾 晴行, Mn置換による Ru_2Si_3 相の結晶構造

変化, 日本金属学会 2007 年春期 (第 140 回) 大会, 2007 年 3 月 27 日, 千葉工業大学津田沼キャンパス.

23 原田俊太, 岸田恭輔, 田中克志, 乾 晴行, 遷移金属を添加した $\text{ReSi}_{1.75}$ における結晶構造と熱電特性, 日本金属学会 2007 年春期 (第 140 回) 大会, 2007 年 3 月 27 日, 千葉工業大学津田沼キャンパス.

24 金 正煥, 田中克志, 岡本範彦, 乾 晴行, Type - クラスレート化合物の結晶構造と熱電特性, 日本金属学会 2007 年春期 (第 140 回) 大会, 2007 年 3 月 27 日, 千葉工業大学津田沼キャンパス.

25 H. Inui, Defect Control and Defect Engineering of Transition-metal Silicides, MRS 2006 Fall Meeting on Advanced Intermetallic Alloys, 2006 年 11 月 29 日, Boston (U. S. A.).

26 J. H. Kim, N. L. Okamoto, K. Tanaka and H. Inui, Thermoelectric Properties of Ba-Ge based type- Clathrate Compounds, MRS 2006 Fall Meeting on Advanced Intermetallic Alloys, 2006 年 11 月 29 日, Boston (U. S. A.).

27 A. Ishida, N. L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Crystal Structures and Thermoelectric Properties of $\text{Ru}_{1-x}\text{Re}_x\text{Si}_y$ Chimney-Ladder Compounds, MRS 2006 Fall Meeting on Advanced Intermetallic Alloys, 2006 年 11 月 29 日, Boston (U. S. A.).

28 S. Harada, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Control of the Si Vacancy Concentration and Arrangement in $\text{ReSi}_{1.75}$ by Al and P Additions, MRS 2006 Fall Meeting on Advanced Intermetallic Alloys, 2006 年 11 月 29 日, Boston (U. S. A.).

29 原田俊太, 岸田恭輔, 田中克志, 乾 晴行, Re を Mo で置換した $\text{ReSi}_{1.75}$ における結晶構造の変化, 日本金属学会 2006 年秋期 (第 139 回) 大会, 2006 年 9 月 16 日, 新潟大学五十嵐キャンパス.

30 金 正煥, 田中克志, 乾 晴行, Type - クラスレート化合物の熱電特性, 日本金属学会 2006 年秋期 (第 139 回) 大会, 2006 年 9 月 16 日, 新潟大学五十嵐キャンパス.

31 石田 央, 岡本範彦, 岸田恭輔, 田中克志, 乾 晴行, $(\text{Ru, Re})\text{Si}_y$ チムニーラダー相の熱電特性に及ぼす Al 添加効果, 日本金属学会 2006 年秋期 (第 139 回) 大会, 2006 年 9 月 16 日, 新潟大学五十嵐キャンパス.

32 J-H. Kim, K. Tanaka and H. Inui, Thermoelectric Properties of Ba-Ge Type-III Clathrate Compounds, 2006 GIST/KAIST/Kyoto University/Tohoku University Joint Symposium on Materials Science and Engineering for the 21st Century, 2006 年 7 月 20 日, Naruko.

33 S. Harada, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Variation in Crystal Structure of Some Ternary $\text{ReSi}_{1.75}$ Based Alloys, 2006 GIST/KAIST/Kyoto University/Tohoku University Joint Symposium on Materials Science and Engineering for the 21st Century, 2006 年 7 月 20 日, Naruko.

34 乾 晴行, 遷移金属シリサイドの電子線結晶学, 日本顕微鏡学会関西支部 平成 18 年度特別講演会, 2006 年 7 月 15 日, 京都大学化学研究所.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

乾 晴行 (INUI HARUYUKI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 30213135

(2) 研究分担者

岸田 恭輔 (KISHIDA KYOSUKE)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 20354178
田中 克志 (TANAKA KATSUSHI)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30236575
岡本 範彦 (OKAMOTO NORIHIKO)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60505692

(3) 連携研究者

なし