

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540367

研究課題名（和文）

Ce-T-Al（T=遷移金属）系の純良単結晶育成と冷凍機による物性測定

研究課題名（英文）

Single crystal growth of Ce-T-Al (T=transition metals) and development of physical property measurements by GM cryocooler

研究代表者

西岡 孝（NISHIOKA TAKASHI）

高知大学・教育研究部自然科学系・教授

研究者番号：10218117

研究成果の概要（和文）：Ce 化合物の磁性は、近藤効果と RKKY 相互作用の競合を記述するドニャック・モデルで理解できると考えられてきた。CeRu₂Al₁₀ は近藤効果が支配的な非磁性基底状態に位置するにも関わらず、27K という高い温度で相転移を起こす。我々は純良単結晶および関連物質の多重極限環境下の微視的および巨視的測定から、この相転移はドニャック・モデルでは記述できない新しい相転移であることを提案した。

研究成果の概要（英文）：Magnetic properties of Ce intermetallic compounds have been considered to be understood by Doniach model which describes the competition between Kondo and RKKY interaction. In spite of CeRu₂Al₁₀ is located in the non-magnetic ground state regime in which Kondo effect is dominant, a phase transition appears at a temperature as high as 27 K. From the macroscopic and microscopic measurements under multiple extreme condition using high quality single crystals of CeRu₂Al₁₀ and the related compounds, we have proposed that this phase transition cannot be described by Doniach model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：重い電子系，近藤半導体，価数揺動，希土類化合物，フラックス法，機械式極低温冷凍機

1. 研究開始当初の背景

Ce 化合物の磁性は Kondo 効果と RKKY 相互作用の競合を記述する Doniach model でほぼ理解できると考えられてきた。この model

によると、Ce 化合物の磁性は主に伝導電子と 4f 電子の交換相互作用 J_{cf} の大きさに従って、3つの領域に分類することができる。すなわち、① J_{cf} が小さい局在磁性領域、② J_{cf} が

大きい遍歴磁性（価数揺動）領域，③ ①と②の境界に位置する重い電子系領域である。重い電子系領域は量子臨界点近傍に位置し，その領域では非BCS超伝導や非フェルミ液体など電子相関が主体となる多彩な物理が出現し，研究はその領域に集中していた。実験的な観点から見ると，重い電子系超伝導は純良試料において1 K以下の極低温，数万気圧の超高压下で出現するのが通常であるので，そのような実験環境を実現し，重い電子系領域の異常な振る舞いを明らかにすることにCe化合物の研究は集中していた。しかしながら，重い電子系の研究も30年以上経過し，新物質探索も実験技術も飽和状態にあり，ゆきつまりの感があった。それは研究課題を見ると明らかであり，何か一つ面白い物質が見つかることに群がるということがわかる。重い電子系のこのころの研究はスクッテルダイト化合物一色であった。

このようなCe化合物の閉塞感を打開するには別の観点からの研究が必要である。そのためには小回りの利く地方大学の特性を生かすことが重要である。ところが，重い電子系の研究には上述したように，極低温，超高压環境という地方大学には非常に厳しい実験環境が必要とされ，実際地方大学のみで重い電子系の研究を行っている研究グループはなかった。我々のグループは研究代表者の西岡が高知大学に着任した2004年度から重い電子系の研究体制，すなわち純良単結晶の育成を行い，多重極限環境（極低温・超高压・強磁場）下で巨視的・微視的測定を行う研究基盤の構築に取り組んだ。微視的測定である核磁気共鳴以外の設備は高知大学には存在しなかった。これらの取り組みは大学に評価され，主に学長裁量経費の補助を受けて，2009年度初頭の時点ではほぼ研究環境の構築には成功していた。中でも大きなことは市販の冷凍機に若干の手を加えることで1 K以下を実現できる冷凍技術を発明したことである。これは今では高知大学方式冷凍機として広く知られている。また，試料作成においても低融点金属，特にAlやGaを用いたフラックス法による純良単結晶育成法の開発を進め，世界最高純度の単結晶を育成する技術の開発に成功した。これらの努力により，高知大学のみで重い電子系を研究する体制を人材，環境ともにほぼ整えることができた。

2. 研究の目的

1. の冒頭で述べたように，Ce化合物の研究は量子臨界点近傍に集中している。逆にいうとそれ以外の領域はあまり研究が精力的に行われていない。特に③の価数揺動領域では結晶構造は知られているものの物性が未知の物質が数多く存在する。我々はこの領域において，特にAlフラックス法を活用して

純良単結晶育成を行い，興味ある物性を開発することを第一の目的とした。第二の目的は高知大学方式冷凍機を用いた物性測定システムの開発である。冷却技術を開発したもののあらゆる物性測定を冷凍機で行うところまでは至っていない。このために高知大学方式冷凍機の性能を向上させ物性測定に適用することを目的とした。しかし，研究費申請の前後にCeRu₂Al₁₀という奇妙な相転移を示す物質を発見し，この機構の解明が研究費交付期間の主要な目的となった。

3. 研究の方法

研究の方法は，①試料作成，②常圧の基礎物性，③高压の巨視的物性，④常圧の核磁気共鳴，⑤他大学との共同研究，⑥冷凍機開発からなる。具体的には以下のように行った。

① 試料作成

単結晶育成はAl自己フラックス法によって行った。目的とする試料をアーク炉で作成し，これに適量のAlを加えてタンマン管に入れたものを石英管に真空封入し，電気炉で徐冷し，フラックス剤を遠心分離機で除去した。

② 常圧の基礎物性

冷凍機を用いた電気抵抗，磁化率測定に加えて，学内の共同利用施設海洋コアセンターに設置してある量子干渉磁化測定装置(MPMS)で磁化測定を行った。熱伝導，熱起電力，熱伝導の測定は研究協力者の広島大学の世良研究室で，比熱測定は東京大学上床研究室で行った。

③ 高压の巨視的物性

ピストンシリンダーで発生できる2 GPaまでの電気抵抗測定は高知大学で行い，それ以上の圧力は東大物性研究所上床研究室との共同研究で行った。

④ 常圧の核磁気共鳴

高知大学で松村が開発してきた核磁気共鳴システムにより，主に核四重極共鳴(NQR)の測定を行った。核磁気共鳴(NMR)に関しては，原研先端研，広島大との共同研究で行った。

⑤ 他大学との共同研究

超音波速度，ミュオンスピン回転，中性子回折，精密X線回折，光電子分光などの実験を共同研究として行った。

⑥ GM冷凍機を用いて，温度振動の低減，1 Kの永続運転，光学実験の開発に取り組み，物性測定システムの基礎を築いた。

4. 研究成果

Ce化合物の磁性は1. の冒頭で述べたようにRKKY相互作用と近藤効果の競合で生じる。Ceが希薄な化合物においてはCe間の距離が遠くなりRKKY相互作用は抑制される。したがって， J_{cf} の大きさが小さい場合

は低温で磁気転移が起こり、 J_{cf} が大きい場合は価数揺動状態となり、特別に異常なことは起こらないと考えられる。ところが、 $CeRu_2Al_{10}$ が $T_0 \sim 27$ K において相転移を起こすことが 2008 年に Strydom による多結晶の実験で報告された。我々は、 $CeRu_2Al_{10}$ の単結晶を初めて育成し、その常圧および高压下でのマクロ測定を行い、 T_0 が加圧に伴い緩やかに上昇して 2 GPa 程度で極大値を取った後、4 GPa 付近で 20 K 付近から突然消失し (図 1 参照)、近藤半導体へと変化し、さらに圧力を加えると重い電子系金属へと変化することを明らかにした。さらに、常圧の電気抵抗、磁化率、比熱の測定からこの相転移は磁気転移ではなくて電荷が主要因であり、その候補の一つとして CDW 転移を提案した。この提案は直後に行われた NQR 測定により支持され、スピンの自由度を磁気転移でない相転移により凍結するという奇妙な相転移として注目され、活発な研究が高知大学を中心として展開された。しかしその後、 μ SR や中性子回折で反強磁性秩序が T_0 で観測され、磁気転移であることは確実となった。また、当初の NQR の結果も同じ磁気構造で理解できるということが明らかになった。しかし、②以下で述べるように、 T_0 における相転移は Ce 化合物における通常の磁気転移とは大いに異なるものであることが明らかになった。

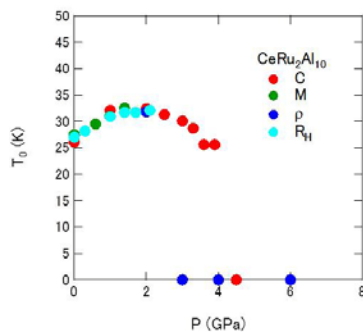


図 1. 比熱、磁化、電気抵抗、ホール係数から求めた $CeRu_2Al_{10}$ の相転移温度 T_0 の圧力依存性。

① $CeRu_2Al_{10}$ の Ce サイト置換効果

図 2 に Ce サイトを他の希土類元素 Gd, Y, La で置換した系の相図を示す。Gd は磁性元素であるのに対して La, Y は非磁性元素である。また、イオン半径は Gd と Y はほぼ同じで Ce より小さいのに対して、La のイオン半径は Ce より若干大きい。Gd Ru_2Al_{10} は 16.5 K で通常の局在反強磁性秩序を示す。(Ce, Gd) Ru_2Al_{10} の相図を見てすぐわかることは、 $CeRu_2Al_{10}$ の相転移と Gd Ru_2Al_{10} の相転移は独立にふるまっているということである。

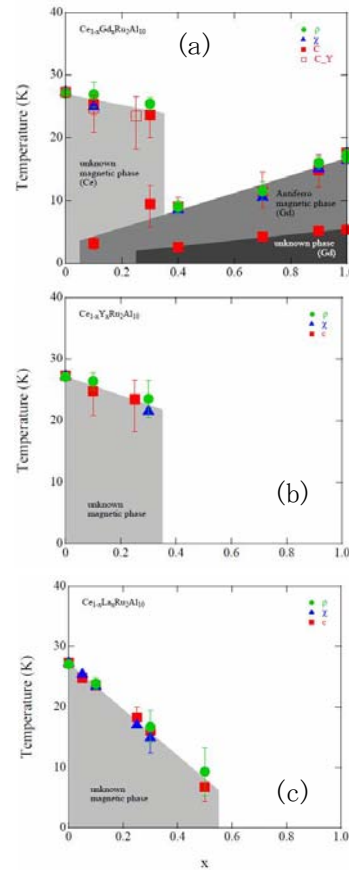


図 2. (Ce, R) Ru_2Al_{10} の T_0 の x 依存性。(a) R=Gd, (b) R=Y, (c) R=La。 T_0 は比熱、電気抵抗、磁化率により求められた。

しかも、 T_0 は Gd の大きなモーメントの影響をほとんど受けずに 30 % 程度の置換で突然消失している。この相図を (Ce, Y) Ru_2Al_{10} の相図と比較してみると大変よく似ている。Gd と Y の共通点は Ce よりイオン半径が小さいことであり、これは①で述べた圧力を加えることに相当する。これらの実験から T_0 での相転移には磁性はあまり関係なく格子体積が重要であるということが示唆される。このことは、(Ce, La) Ru_2Al_{10} の相図からも支持される。La で置換した場合 Y と同じ非磁性であるにもかかわらず、 T_0 は単調に減少していく。これは、格子体積が T_0 の相転移に重要であるということを示している。これらの実験は、 $CeRu_2Al_{10}$ が価数揺動領域にあり、その相転移の主要因が磁気転移ではなく格子体積に関係したものであることを明確に示す。格子体積はすなわち価数であり、価数不安定領域における新しい相転移であることが強く示唆される。このような性質をもった相転移は Ce 化合物で今までに見出されたことはない。

② CeRu₂Al₁₀のRu サイト置換

Ru サイトを別の d 元素で置換することは、体積効果に加えて電子数を変化させる効果がある。我々は電子数が同じ Fe、電子数が多い Rh、Co と電子数が小さい Mn 置換を行いそれらの物性を調べた。Rh 以外は Ru よりもイオン半径が小さい。

図3に示すように、電子数が同じでイオン半径が小さな Fe 置換の場合は、転移点は最初徐々に上がっていくが 50%程度で最大値を取り、70 %程度で突然消失する。また、比熱測定から見積もられた転移に伴うエントロピーは徐々に小さくなる。これらの結果は CeRu₂Al₁₀ の高圧実験で得られた結果とほぼ同様であり、Fe 置換系は高圧実験の代わりとして利用することができる。RKKY型の磁気転移の場合、転移温度はスピンの大きさに平方に比例するので、スピンの縮むと磁気転移点は下がってくるはずである。ところが CeRu₂Al₁₀ の場合はむしろ逆である。これは上述の Ce 置換の研究でも示唆されたように格子体積が重要であることを示唆している。格子体積は近藤効果やRKKY相互作用の源である伝導電子と f 電子の交換相互作用 J_{cf} を増加させる働きがある。 J_{cf} が大きければ Ce の 4f 電子はもはや安定ではなくなり、磁気転移は通常消失する。しかし CeRu₂Al₁₀ の場合はむしろ、 J_{cf} が相転移を誘発しているようにも思える。

電子数が異なる置換には大きな体積効果は見られない。むしろ電子ドーピング (Rh, Co 置換) かホールドーピング (Mn 置換) によって大きな差異が認められる。体積効果が見られないのは対応する化合物が存在しないために置換量に限界があり、十分な体積変化が得られないためであると考えられる。電子ドーピングの場合は近藤温度は減少し、相転移の振る舞いは通常反強磁性転移で期待される振る舞いとなる。 μ SR や中性子回折の実験からも、Ce のモーメントが大幅に増加していることが示唆され、通常 RKKY型磁気転移に変化したものと思われる。一方 Mn 置換では近藤温度は急激に増加し、磁気転移は速やかに消失する。また、両置換とも電気抵抗に 10 K 程度で見えていた小さな半導体ギャップの起因と考えられるこぶがわずかな置換で消失する。これは、この相転移が半導体と密接な関係があることを示唆する。

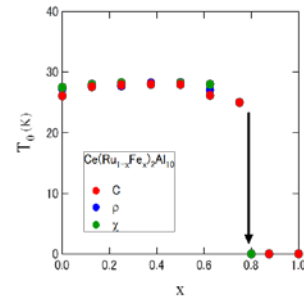


図3. 比熱, 磁化, 電気抵抗から求められた Ce(Ru_{1-x}Fe_x)₂Al₁₀ の T₀ の圧力依存性。

③ CeFe₂Al₁₀のFe サイト置換

CeRu₂Al₁₀ に圧力を加えると、4 GPa 程度で相転移は消失し、近藤半導体へと変化する、CeFe₂Al₁₀ は 4 GPa 程度の振る舞いとほぼ同じである。しかし、半導体的振る舞いが突然現れたわけではなく、CeRu₂Al₁₀ は近藤半導体でありながら相転移を示し、その相転移が消えた状態が CeFe₂Al₁₀ であると考えられる。CeRu₂Al₁₀ の半導体ギャップの存在は、マクロ測定、NQR、光反射などの実験で観測されているからである。従って、CeRu₂Al₁₀ の相転移を理解するにはその背景と考えられる CeFe₂Al₁₀ の性質を知ることが重要である。実験は Co 置換のみ行なった。CeCo₂Al₁₀ という物質がないために、置換できる最大量は約 17 %であった。この置換により、上で述べた電子ドーピングと同様に近藤温度は急激に減少した。また、わずかな置換で 10 K 程度の小さなギャップは消失した。これは、CeFe₂Al₁₀ の近藤半導体的振る舞いはこの電子数が重要であることを意味している。CeRu₂Al₁₀ において電子数を変化させると転移の様子が大きく変わったことと合わせて考えると、CeRu₂Al₁₀ の相転移は近藤半導体を舞台として起こっているということがわかる。なお、CeFe₂Al₁₀ の La 置換で相転移が出現することを期待したがそれは実現しなかった。

④ 高知大学方式GM冷凍機の性能向上

我々は 2007 年に小型 4 K GM 冷凍機を用いて 1 K 以下を実現する方法を発明した。これは、現時点でも世界最小でかつ簡便な方法である。この冷凍機の性能をさらに向上させるために三つの観点から開発を行なった。一つ目は冷凍機の温度振動の低減である。厚手の銅の容器に 100 気圧程度のヘリウムガスを室温で充填したヘリウムポットを冷凍機の冷却部分に取り付けると、4 K 付近で温度振

動は 300 mK から 10 mK 以下に低減できる。二つ目は連続運転の試みである。1 Kポットに新たに注入口を設けたいくつかの試作品を作り、現時点で 1.8 K 程度を維持することができるようになったが、さらに低い温度を目指した試みを行なっている。三つ目は光の実験への対応である。今までの実験は外部からの光を遮断したものであった。ところが、物性実験でも光をいれた実験が重要であり、またテラヘルツ産業においては不可欠の技術である。そこで今までの経験をもとに装置の最適化を図ることにより 1 K 以下の維持時間を従来の 2 倍以上に向上させることができた。その状態でテラヘルツ光を入れたところ、約 30 時間 1 K 以下を維持しており、これは実用に十分耐えられる性能である。これらの開発に加えて、熱伝導度、熱起電力の測定システムの設計を行った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (49 件)

- ① H. Kato, R. Kobayashi, T. Takesaka, T. Nishioka, M. Matsumura, K. Kaneko, N. Metoki, Magnetic Structure Determination of CeT_2Al_{10} (T=Ru and Os): Single Crystal Neutron Diffraction Studies, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 80, No. 7, 2011, pp. 073701-1-4.
- ② M. Matsumura, H. Tanida, D. Tanaka, H. Kato, T. Nishioka, M. Sera, Reconciliation between NQR Spectrum and Long-Range Magnetic Order in $CeRu_2Al_{10}$, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 80, No. 8, 2011, pp. 085001-1-2.
- ③ H. Kato, T. Takesaka, R. Kobayashi, T. Nishioka, M. Matsumura, Y. Tokunaga, S. Kambe, A NQR study of $CeOs_2Al_{10}$, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 査読有, Vol. 273, No. 1, 2011, pp. 012037-1-4.
- ④ R. Kobayashi, Y. Kawamura, T. Nishioka, H. Kato, M. Matsumura, K. Kodama, H. Tanida, Y. Uwatoko, Magnetic phase diagram of $Ce_{1-x}Gd_xRu_2Al_{10}$ single crystals, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 80, SA, 2011, pp. 044-1-4.
- ⑤ Y. Kawamura, Y. Ogane, T. Nishioka, H. Kato, M. Matsumura, D. Tanaka, H. Tanida, Y. Uwatoko, Hall coefficient for $CeRu_2Al_{10}$ under pressure, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 80, SA, 2011, pp. 046-1-4.
- ⑥ Y. Kawamura, Y. Ogane, T. Nishioka, H. Kato, M. Matsumura, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, Magnetic and transport properties of CeT_2Al_{10} (T = Fe, Ru, Os) under pressure, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 査読有, Vol. 273, No. 1, 2011, pp. 012038-1-4.
- ⑦ T. Nishioka, D. Hirai, Y. Kawamura, H. Kato, M. Matsumura, H. Tanida, M. Sera, Y. Uwatoko, Magnetic properties of $Ce(Ru_{1-x}Fe_x)_2Al_{10}$, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 査読有, Vol. 273, No. 1, 2011, pp. 012046-1-4.
- ⑧ 西岡孝, GM 冷凍機の改造による絶対温度 1 K 以下の超低温の開発, 査読無, 56 巻, 2010, 16-21
- ⑨ Y. Kawamura, S. Edamoto, T. Takesaka, T. Nishioka, H. Kato, M. Matsumura, Y. Tokunaga, S. Kambe, H. Yasuoka, ^{27}Al -NQR/NMR Study of Kondo Semiconductor $CeFe_2Al_{10}$, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 79, No. 10, 2010, pp. 103701-1-4.
- ⑩ T. Takesaka, T. Sumida, K. Oe, R. Kobayashi, T. Nishioka, H. Kato, M. Matsumura, K. Kodama, Semiconducting behavior in $CeFe_2Al_{10}$ and $CeRu_2Al_{10}$ single crystals, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 査読有, Vol. 200, No. 1, 2010, pp. 012201-1-4.
- ⑪ M. Matsumura, Y. Kawamura, S. Edamoto, T. Takesaka, H. Kato, T. Nishioka, Y. Tokunaga, S. Kambe, H. Yasuoka, Novel Phase Transition in $CeRu_2Al_{10}$ Probed by ^{27}Al -NQR/NMR -No Evidence of Magnetic Ordering-, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 78, No. 12, 2009, pp. 123713-1-4.
- ⑫ T. Nishioka, Y. Kawamura, T. Takesaka, R. Kobayashi, H. Kato, M. Matsumura, K. Kodama, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, Novel phase transition and the pressure effect in $YbFe_2Al_{10}$ -type CeT_2Al_{10} (T = Fe, Ru, Os), *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 78, No. 12, 2009, pp. 123705-1-4.

[学会発表] (計 139 件)

- ① 西岡孝, 大金優太, 平井大士, 加藤治一, 松村政博, 川村幸裕, 山本裕二, 小玉一人, $CeFe_2Al_{10}$ の置換効果, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学
- ② T. Oota, K. Okidono, T. Sumida, T. Nishioka, H. Kato, M. Matsumura, O. Sasaki, Suppression of temperature oscillation of GM cryocooler, LT26, 2011/8/15, Beijing (China)
- ③ Y. Ogane, Y. Kawamura, T. Nishioka, H. Kato, M. Matsumura, Y. Yamamoto, K. Kodama, Equal volume dilution effect of $CeRu_2Al_{10}$, LT26, 2011/8/13, Beijing

(China)

- ④小林理気, 西岡孝, 加藤治一, 松村政博, 谷田博司, 世良正文, 松林和幸, 上床美也, CeRu₂Al₁₀の置換効果, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 25 日, 大阪府立大学
- ⑤H. Kato, T. Takesaka, T. Nishioka, M. Matsumura, Y. Tokunaga, S. Kambe, An Al-NQR/NMR study of CeOs₂Al₁₀, 2010/7/1, SCES2010, Santa Fe (USA)
- ⑥T. Nishioka, D. Hirai, Y. Kawamura, H. Kato, M. Matsumura, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, Magnetic Properties of Ce(Ru_{1-x}Fe_x)₂Al₁₀, 2010/6/29, SCES2010, Santa Fe (USA)
- ⑦大金優太, 川村幸裕, 竹坂智明, 西岡孝, 加藤治一, 松村政博, 松林和幸, 上床美也, CeT₂Al₁₀ (T=Fe, Ru, Os) の圧力下の電気抵抗, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 23 日, 岡山大学
- ⑧沖殿佳祐, 角田泰啓, 西岡孝, 加藤治一, 松村政博, 高知大学方式 ³He GM 冷凍機の性能向上, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学
- ⑨竹坂智明, 川村幸裕, 大江健太, 小林理気, 西岡孝, 加藤治一, 松村政博, 小玉一人, 新しい混成ギャップ半導体 CeOs₂Al₁₀ 単結晶の磁性, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 25 日, 熊本大学
- ⑩K. Oe, Y. Kawamura, T. Nishioka, H. Kato, M. Matsumura, K. Kodama, Magnetic properties of CeT_xGa_{4-x} (T=Cu, Ag) single crystals, 2009/7/27, ICM2009, Karlsruhe (Germany)
- ⑪T. Takesaka, T. Sumida, K. Oe, R. Kobayashi, T. Nishioka, H. Kato, M. Matsumura, K. Kodama, Semiconducting behavior in CeFe₂Al₁₀ and CeRu₂Al₁₀ single crystals, ICM2009, 2009/7/27, Karlsruhe (Germany)

[その他]

- ①西岡孝, RKC 高知大学ラジオ公開講座, 「多重極限環境における物理」2010 年 2 月 28 日,

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西岡 孝 (NISHIOKA TAKASHI)
高知大学・教育研究部自然科学系・教授
研究者番号: 10218117

(2) 研究分担者

松村 政博 (MATSUMURA MASAHIRO)
高知大学・教育研究部自然科学系・教授
研究者番号: 20127400
加藤 治一 (KATO HARUKAZU)

高知大学・教育研究部自然科学系・准教授
研究者番号: 60363272

(3) 連携研究者

世良 正文 (SERA MASAFUMI)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授
研究者番号: 40196978
谷田 博司 (TANIDA HIROSHI)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・助教
研究者番号: 00452615
鈴木 孝至 (SUZUKI TAKASHI)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授
研究者番号: 00192617
上床 美也 (UWATOKO YOSHIYA)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号: 40213524
松林 和幸 (MATSUBAYASHI KAZUYUKI)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号: 10451890
金道 浩一 (KINDO KOICHI)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号: 20205058
近藤 晃弘 (KONDO AKIHIRO)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号: 00572819
安岡 弘志 (YASUOKA HIROSHI)
東京大学・名誉教授
日本原子力研究開発機構・研究員
研究者番号: 50026027
神戸 振作 (KAMBE SHINSAKU)
日本原子力研究開発機構・主任研究員
研究者番号: 40224886
徳永 陽 (TOKUNAGA YO)
日本原子力研究開発機構・研究員
研究者番号: 00354902
目時 直人 (METOKI NAOTO)
日本原子力研究開発機構・主任研究員
研究者番号: 40343909
金子 耕士 (KANeko KOJI)
日本原子力研究開発機構・主任研究員
研究者番号: 30370381
小玉 一人 (KODAMA KAZUTO)
高知大学・教育研究部自然科学系・教授
研究者番号: 00153560
山本 裕二 (YAMAMOTO YUJIO)
高知大学・教育研究部自然科学系・助教
研究者番号: 00452699

(4) 研究協力者

石井 勲 (ISHII ISAO)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・
博士研究員
小林 理気 (KOBAYASHI RIKI)
日本原子力研究開発機構・博士研究員
川村 幸裕 (KAWAMURA YUKIHIRO)
室蘭工業大学・大学院工学研究科・
博士研究員