

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25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2008 ～ 2012

課題番号：20224015

研究課題名（和文）

価数不安定性をもつアクチノイド化合物に特有の新奇量子状態の研究

研究課題名（英文）

Investigation of novel quantum states in actinide-based compounds with unstable valence

研究代表者

佐藤 憲昭 (SATO NORIAKI)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：30170773

研究成果の概要（和文）：本研究課題の最大の目的は、国際規制物資であるウランなどのアクチノイド元素^{*1}を含む化合物の物性研究を行うための拠点を東北大学金属材料研究所アルファ放射体実験室に形成することである。この目的のために、単結晶育成^{*2}のためのテトラアーク炉、および育成された試料の基礎物性を評価するための分析装置を金研アルファ放射体実験室に設置・導入した。その結果、“超伝導を示す磁石”^{*3}における超伝導発現機構の解明に成功を収めた。さらに、アクチノイド元素だけでなく希土類元素^{*4}を含む物質にも研究を展開し、準結晶^{*5}を含む新分野の開拓に貢献した。

[*1] ウランなどは国際規制物資として管理され、その取り扱いには厳しい制限が付されている。金研アルファ放射体実験室は、このような国際規制物資を取り扱うことが許可された施設である。また、そこには、アクチノイド元素（周期表で最下段に位置する元素の集合で、トリウム、ウラン、ネプツニウムなどから成る）を安全にハンドルのための多くの装置と経験が蓄積されている。

[*2] 目に見える大きさのスケールまで原子が規則正しく配列した結晶を単結晶と呼ぶ。

[*3] 従来の物理学では、磁石と超伝導は犬猿の仲であり、磁石は超伝導にはならないと考えられてきた。しかしアクチノイド化合物の中には、磁石でありながら超伝導を示すものがある。磁石が何故超伝導を示すかという問題は、物理学上の重要な課題の1つとなっている。

[*4] 周期表でアクチノイドの上段に位置する元素の集合で、アクチノイドと類似の性質を示す。

[*5] 周期性を持たず、結晶では許されない回転対称性を持つ物質を準結晶と呼ぶ。

研究成果の概要（英文）：The main purpose of this project is to establish a base institute for the study on the actinide physics. For this purpose, we constructed a tetra-arc furnace at Laboratory of alpha-Ray Emitters, Institute for Materials Research, Tohoku University, for the single crystal growth of uranium-based materials, and set up commercial equipments for the measurements of the physical properties of grown single crystals as well. Furthermore, we opened a new avenue of research on novel phenomena that will be related to valence instability in both 4f and 5f electron systems including quasicrystals.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	67,100,000	20,130,000	87,230,000
2009年度	33,900,000	10,170,000	44,070,000
2010年度	16,300,000	4,890,000	21,190,000
2011年度	16,300,000	4,890,000	21,190,000
2012年度	16,300,000	4,890,000	21,190,000
総計	149,900,000	44,970,000	194,870,000

研究分野：強相関物理学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：アクチノイド、重い電子系、磁性、超伝導

1. 研究開始当初の背景

ウランをはじめアクチノイド元素を含む物質は磁性や超伝導に関し興味ある性質を示す。例えば図1に示すように、強磁性磁気秩序状態（磁石）と超伝導は外部磁場に対し全く逆の応答を示すにも関わらず（強磁性体は磁力線を内部に引きこむのに対し、超伝導体は磁力線を外部に排除する）、両者の共存を示す物質（例えば UCoGe）が存在する。このような“従来の物理学の常識を覆す物質”の研究を行いたいと考える研究者は国内にも数多く存在する。一方、UCoGe などに含まれるウランは国際規制物資であり、且つ放射性である。従って、磁性超伝導の研究を行うためには、国際規制物資の試料育成を行える国内施設が必要である。

我が国においては、1980年代以降、アクチノイド化合物の単結晶育成のためのトリアーク炉などが東北大金研アルファ放射体実験施設に整備されてきたが、これらは20年を過ぎて老朽化が著しかった。また、育成された試料の基礎物性を評価する装置がアルファ放射体実験施設には完備されていなかった。我が国の先達によって築き上げられてきたアクチノイド研究を持続的に発展させ、また欧米の研究グループとの研究競争に打ち勝っていくために、アクチノイド科学の研究拠点を整備し、上記問題点を解決することが急務となっていた。

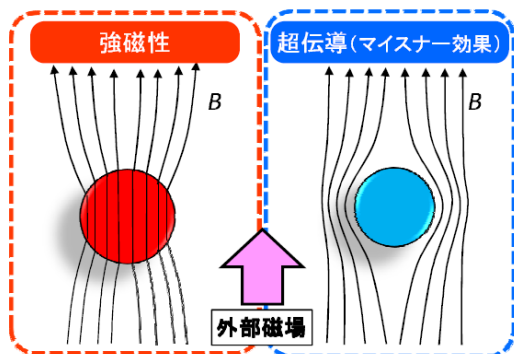


図1：強磁性と超伝導の外部磁場応答

2. 研究の目的

上記の背景から分かるように、まず第1の目的は、金研アルファ放射体実験室のトリアーク炉の更新（より高性能の炉の設計と設置）と試料評価装置の導入である。これらを用いて育成・評価された高品質の単結晶試料に対し、多種多様な測定を行うことにより、磁性超伝導体 UCoGe における超伝導発現機構の解明や、URu₂Si₂ における「隠れた秩序

相」(図2の相図を参照)の解明を図ることが第2の目的である。また、(アクチノイドの放射性を考えると容易ではないが)新物質の開発を行うことも目的の1つとなっている。さらに、アクチノイド化合物と同様の価数不安定性を示す希土類元素化合物で懸案となっている諸問題(例えばイッテルビウム元素を含む化合物における奇妙な“量子臨界”の問題)の解明を図ることも重要な目的である。

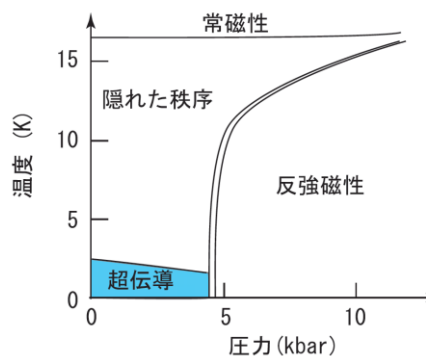


図2：URu₂Si₂の温度対圧力相図

3. 研究の方法

新しく導入されたテトラアーク炉を用い、良質の単結晶育成を行う。次に、アルファ放射体実験室に設置されているX線回折装置や放電加工機を用い、単結晶の方位決定後、種々の測定のために最適な形状・大きさに試料を切断・成形する。それを本研究課題により導入された試料評価装置(PPMS)を用い、(超伝導や磁気秩序の)転移温度の高さや鋭さ、残留抵抗の大きさなどを測定する。その結果、研究に必要な質が得られたと確認された場合は、極低温や高圧実験、あるいは中性子散乱実験や核磁気共鳴実験のために、研究者(代表者や分担者あるいは連携研究者)が属する機関や共同利用機関に移送する。(勿論、国際規制物資の移送にあたっては、法律に従ってこれを行う必要がある。)もし仮に、単結晶の質が十分でないと判断された場合は、アルファ放射体実験室に設置されているSEMなどの分析装置を援用し、何処に問題があるかをはっきりさせたい。育成条件を変えて、再度、単結晶の育成を行う。十分な質の単結晶が得られるまで、これを繰り返す。高品質の試料を送付された研究者は、それぞれ独自の手法(例えば研究代表者の属する名大においては、極低温・高圧下における磁化率や比熱の測定など)を用いて実験を進める。

4. 研究成果

(1) **アクチノイド研究拠点の形成**：アクチノイド化合物用単結晶育成炉（GES社製テトラアーク炉：図3上参照）を設計し、東北大金研アルファ放射体実験施設に設置した。単結晶育成の様子を図3下左に、育成された単結晶の写真を図3下右に示す。また、単結晶試料の物性評価（質のチェック）を行うための装置（カンタムデザイン社のPPMS装置）およびX線Laue写真用のIPカメラおよびリーダーシステム（トライ・エスイー社製）を導入した。



図3：テトラアーク炉の写真（上）、引き上げ法による単結晶の育成（下左）、育成されたUCoGe単結晶の写真（下右）

(2) **強磁性超伝導体UCoGeの良質単結晶育成と超伝導発現機構の解明**：導入したテトラアーク炉を用いて、UCoGeの良質単結晶を育成した。この単結晶を用い種々の実験を行うことにより（共同研究を含む）、以下を明らかにした。① 通常の超伝導体とは異なり、UCoGeにおいては下部臨界磁場（従ってマイスナー領域）が存在しない（図4参照）。これは、これまで実験的には証明されたことのない「自発ボルテックス状態（自己誘導ボルテックス状態）」の存在を示すものと期待される。即ち、UCoGeは自発ボルテックス状態が実現している最初の例である可能性が高い。これをより直接的に証明することが今後の課題として残されている。なおこの成果は、超伝導に関する国際会議で招待講演として報告された。

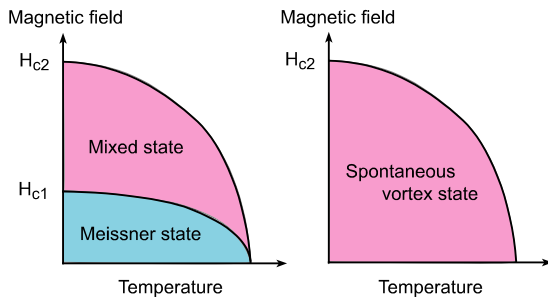


図4：UCoGeで期待される温度対磁場相図（右）と通常第2種超伝導の相図（左）

② 強磁性と超伝導は、マクロ且つマイクロに共存する。同様の結果は UGe_2 でも指摘されたことがあったが、本研究成果ほどまでに明確に示されてはいなかった。UCoGeのマイクロな共存に関する成果は、J. Phys. Soc. Jpn. 誌の editor's choice に選ばれ、また新聞（H22年3月5日付）でも報道された。③ 大きな1軸異方性を持つスピン揺らぎが存在する。またそのスピン揺らぎは所謂SCR理論で記述され、それを特徴付ける特性温度が評価された（後述の図6を参照）。④ 上記のIsing的縦磁気揺らぎ（量子揺らぎ）が超伝導ペア引力を担っていることを明らかにした（図5参照）。スピン揺らぎによる対形成は、液体ヘリウム3の超流動発現機構としてよく知られているが、超伝導で確認されたのは初めてである。この成果は、Phys. Rev. Lett. 誌の注目論文に選ばれた。これにより、「強磁性超伝導の発現機構」の問題に決着がつけられた。

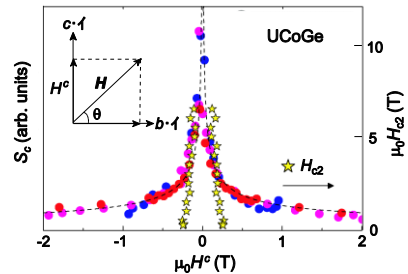


図5：角度分解核磁気共鳴実験の結果

(3) **URu₂Si₂における隠れた秩序相**（図2参照）の対称性の解明：① SPring-8及びKEK-PFの放射光X線回折実験を行い、隠れた秩序に伴う結晶対称性の低下が無いことを高い精度で示した。また、原子変位パラメータ、Si原子座標といった内部変数に変化がみられないことも示した。② 一方、マクロ及びマイクロプローブを用いた詳細な実験を行い、隠れた秩序相において、回転対称性が破れている可能性を指摘した。これは、理論モデルに対し制限を与えるものであると同時に、これまでに予想されていなかった質的に新しい情報でもある。上記①の実験結果と矛盾するものであるか否かを明らかにすることが今後の課題である。③ 極めて純度の高い試料を育成し、隠れた秩序相でのみ電気抵抗に非フェルミ流体挙動が存在すること、及びその係数の大きさが超伝導転移温度と比例関係にあることを見いだした。④ 超強磁場中での超音波音速測定を行い、重い電子状態の形成と x^2-y^2 型の格子不安定性とが密接に関係していることを示した。⑤ 共鳴X線散乱および1軸応力下中性子散乱実験を実施し、少なくとも期待される秩序波数には、反強多極子の秩序が存在しないことを示した。⑥ 弱い反強磁性が結晶中の残留歪みによって誘起されていることを明らかにした。

(4) ウラン系化合物の良質結晶育成と物性研究：上記典型物質以外のウラン系化合物に対し、以下の成果を上げた。① UCoGeと同様に強磁性と超伝導の共存を示すUGe₂において、温度-磁場-圧力空間における磁気相図を完成し、3重臨界点の位置を同定した。② 重い電子系超伝導体として古くから知られるUBe₁₃において、異方的超伝導状態における熱平衡磁化を初めて測定し、混合相内に顕著な常磁性効果の存在することを明らかにした。③ UPd₃に対し角度分解光電子分光実験を行い、バンド構造を明らかにした。④ UPt₃に対し角度分解比熱および熱伝導実験を行い、超伝導パラメータの対称性を決定した。⑤ UPd₂Si₂, U₂PdSi₃, UPt₂Si₂, UCu₂Si₂, UCuPO, U₂Zn₁₇等の化合物の合成と単結晶育成を行い、その磁性および超伝導性を明らかにした。例えば、UPd₂Si₂の非整合反強磁性の圧力効果を調べ、温度-磁場-圧力相図を作成するとともに、5f電子系特有と思われる遍歴・局在双対性の振る舞いを観測した。

スピン揺らぎを特徴付ける特性温度と超伝導転移温度の関係性をプロットしたものが図6である。従来の概念に従えば、赤い実線で示されたような相関が存在する。実際、UPd₂Al₃などのスピン1重項超伝導体だけでなく、スピン3重項超伝導体であるUNi₂Al₃を含め、多くの超伝導体がこの直線上にのる。これに対し、青い丸で囲まれた強磁性超伝導体(UCoGe, UGe₂, URhGe)は、この相関から大きく外れている。この結果は、磁性と超伝導の相関(強磁性秩序が超伝導を抑制)に関して新たな問題を提起している。

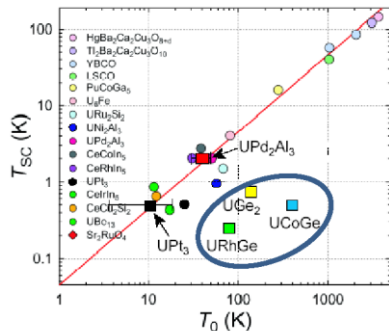


図6：超伝導転移温度とスピン揺らぎの相関

(5) 超ウラン化合物の合成と物性の研究：① AnPd₅Al₂を合成し、その磁性と超伝導特性を明らかにした。② 放射性物質測定用密封小型比熱測定装置を開発し、新規超伝導体NpPd₅Al₂の電子状態を調べた。その結果、上部臨界磁場において電子比熱係数が極めて大きなどびを示すことを見出した。③ NpPd₅Al₂と同じ結晶構造を持つPuPd₅Al₂の探索を行うとともに、原料Pu酸化物から金属間化合物を調整する方法として、遷移金属による結合還元法が適用可能であることを見いだした。④ 強磁性転移

を示すスクッテルダイト化合物NpFe₄P₁₂の⁵⁷Feメスbauer分光実験を行い、Feサイトの電場勾配と内部磁場の寄与を明らかにした。⑤ (Pu, Am)₂O₃酸化物とPdの粉末を水素還元雰囲気中で処理する結合還元法により作製した合金が高分解能のAmメスbauer線源として有望であることを実証した。

(6) 固体塩電池の開発：錯体化学的研究により、以下の成果を得た。① ウラン(III)の反応性の高い出発物質UCl₃(thf) 1.5を、塩化ウラン(VI)のHCl水溶液の水銀陰極電解と真空乾燥を組み合わせる方法を開発した。② ジベンゾイルメタン等を有するウラン(V)の錯体の単離、およびテトラメチルマロンアミド等を有するウラン(III)錯体の単離を行った。このうち、ジベンゾイルメタンのウラン(V)錯体と、テトラメチルマロンアミドのウラン(III)錯体については、単結晶を単離した。③ バナジウム電池のプロトタイプとして1.5V-1Ahタイプおよび1.5V-2.4Ahタイプを作成し、アクチノイド(ウランあるいはネプツニウム)の固体塩電池が可能であることを示した。これは、アクチノイド固体塩電池の可能性を示すだけでなく、アクチノイドの電極反応、5f電子物性の観点からも重要な成果である。

(7) 非アクチノイド物質の合成と物性研究：

① UCoGeのスピン揺らぎはSCR理論で記述される。その揺らぎがアクチノイドに固有であるか否かを調べるため、典型的SCRモデル物質である遍歴電子強磁性体ZrZn₂に対し高圧・極低温下における磁化率の精密測定を行った。その結果、従来知られていなかった奇妙な相が高圧下で出現することを見出した。その起因の解明は今後の課題である。② NpFe₄P₁₂と同じように強磁性転移を示すスクッテルダイト化合物EuFe₄As₁₂に対し⁵⁷Feメスbauer分光実験を行い、Feサイトの電場勾配と内部磁場を測定し、Eu²⁺とEu³⁺の混合原子価状態が実現していることを示した。③ NpPd₅Al₂と同じように上部臨界磁場で一次転移を生じる超伝導体CeCoIn₅に対し、常磁性効果を明らかにした。④ 反強磁性秩序と超伝導の共存を示すCeRhIn₅の高圧下中性子回折実験を行い、秩序ベクトルが圧力の増大に対し急激に変化することを見出した。⑤ 価数揺動の典型物質であるSmSに対し、高圧・低温下における磁気的・熱的性質および輸送現象を調べ、温度対圧力相図を完成させた。また、“真の束縛状態”から“仮想的な束縛状態”への転移が圧力によって誘起されることを示した。

(8) 新物質開発：UT₂Al₂₀ (T: 遷移金属) やURhIn₅などの新物質を発見し、それらの磁性等を明らかにした。

(9) Au-Al-Yb系準結晶における新奇量子臨界現象の発見：準結晶は、上記(8)まで記してきた結晶とは質的に異なり、周期性（従って単位格子）を持たない。また、結晶では許されない対称性（例えば5回対称性）とフラクタル性を持つ（図7左参照）。Au-Al-Yb系準結晶を合成し、極低温における物性計測を行った結果、4f電子が価数揺動状態にあり、奇妙な量子臨界性を示すことを見出した（図7右）。面白いことに、この量子臨界性は、ある種の重い電子系（即ち結晶）と共通していることから、価数揺らぎによって誘起されているようにも見える。この類似性から、互いに無関係であると思われてきた結晶と準結晶との間に接点が存在する可能性を指摘した。さらに本研究が、準結晶特有の臨界状態（理論的には指摘されてきたが実験的には未だ証明されていない）の実証となっている可能性を指摘した。このように、本研究成果は、準結晶研究に新しい流れを引き起こすものと期待されているだけでなく、量子臨界性に関する物理を深く追求していく上で重要な指針を与えるものとしても期待されている。なお、この成果は、新聞でも報道された。

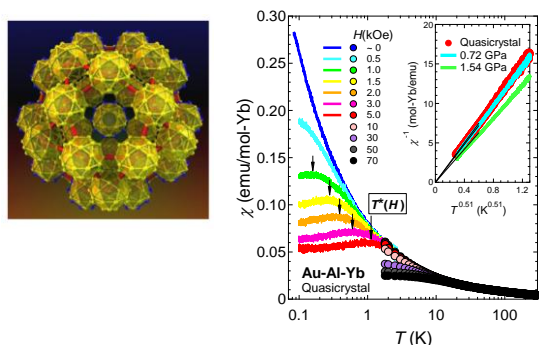


図7：準結晶の構造（左）と低温物性（右）

(10) 装置開発：① URu₂Si₂の高圧下精密磁化測定を行うために約3 GPaまでSQUID及びファラデー法磁力計で使用可能な高圧セルを開発した。② 放射性物質測定用密封小型比熱測定装置を開発した。

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 151 件）

1. T. Yanagisawa 他9名 (4番目), “ Γ_3 -Type Lattice Instability and the Hidden Order of URu₂Si₂ by Precise dc Magnetization Measurements”, J. Phys. Soc. Jpn. 82 (2013) 013601-1-5. 査読あり
2. I. Kawasaki, S. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, A. Yasui, Y. Saitoh, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Onuki, “Band

Structure and Fermi Surface of UPd₃ Studied by Soft x-Ray Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy”, Phys. Rev. B 87 (2013) 075142-1-6. 査読あり

3. K. Deguchi, S. Matsukawa, N.K. Sato, T. Hattori, K. Ishida, H. Takakura and T. Ishimasa, “Quantum critical state in a magnetic quasicrystal”, Nature Materials 11 (2012) 1013-1016. 査読あり
4. T. Hattori, Y. Ihara, Y. Nakai, K. Ishida, Y. Tada, S. Fujimoto, N. Kawakami, E. Osaki, K. Deguchi, N. K. Sato, and T. Satoh, “Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in UCoGe”, Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 66403-1-4. 査読あり
5. Y. Shimizu, Y. Haga, Y. Ikeda, T. Yanagisawa, and H. Amitsuka, “Observation of an Unusual Magnetic Anomaly in the Superconducting Mixed State of Heavy-Fermion Compound UBe₁₃ by Precise dc Magnetization Measurements”, Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 217001-1-5. 査読あり
6. S. Tonegawa 他11名 (6番目), “Cyclotron Resonance in the Hidden-Order Phase of URu₂Si₂”, Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 36401-1-4. 査読あり
7. R. Yoshida 他9名 (3番目), “Observation of two fine structures related to the hidden order in the spectral functions of URu₂Si₂”, Phys. Rev. B 85 (2012) 241102. 査読あり
8. N. Kabeya, H. Maekawa, K. Deguchi, N. Kimura, H. Aoki, and N. K. Sato, “Non-Fermi Liquid State Bounded by a Possible Electronic Topological Transition in ZrZn₂”, J. Phys. Soc. Jpn. 81 (2012) 07370-1-4. 査読あり
9. 山村朝雄, “ウラン電池からバナジウム固体塩電池 (VSSB) へ”, 放射化学ニュース 24 (2012) 61-66. 査読なし
10. K. Imura, S. Kanematsu, K. Matsubayashi, H. S. Suzuki, K. Deguchi, N. K. Sato, “Discontinuous Transition from a Real Bound State to Virtual Bound State in a Mixed-Valence State of SmS” J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 113704-1-4. 査読あり
11. R. Okazaki, T. Shibauchi, H. J. Shi, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Onuki, H. Ikeda and Y. Matsuda, “Rotational Symmetry Breaking in the Hidden-Order Phase of URu₂Si₂”, Science **331** (2011) 439-442. 査読あり
12. K. Karube T. Hattori, Y. Ihara, Y. Nakai, K. Ishida, N. Tamura, K. Deguchi, N.K. Sato, H. Harima, “⁵⁹Co-Nuclear Quadrupole Resonance and Nuclear Magnetic Resonance

Studies on YCoGe-Comparison between YCoGe and UCoGe”, J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 64711. 査読あり

13. Y. Ihara 他7名 (7番目), “Anisotropic magnetic fluctuations in the ferromagnetic superconductor UCoGe studied by direction-dependent ^{59}Co NMR measurements”, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 206403-1-4. 査読あり

14. K. Deguchi, E. Osaki, S. Ban, N. Tamura, Y. Simura, T. Sakakibara, I. Satoh and N. K. Sato, “Absence of Meissner State and Robust Ferromagnetism in the Superconducting State of UCoGe: Possible Evidence of Spontaneous Vortex State”, J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 083708-1-4. 査読あり

15. T. Ohta 他7名 (7番目), “Microscopic Coexistence of Ferromagnetism and Superconductivity in Single-Crystal UCoGe”, J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 023707-1-4. 査読あり

〔学会発表〕 (計 405 件)

〔図書〕 (計 2 件)

1. “磁性と超伝導の物理－重い電子系の理解のために” 佐藤憲昭・三宅和正、全390ページ、名古屋大学出版会 (2013年)

2. “宇宙史を物理学で読み解く－素粒子から物質・生命まで－” 佐藤憲昭 (分担執筆) p.174-184, 福井康雄 監修、飯島徹・杉山直・平島大・伊藤繁 編、名古屋大学出版会 (2010年)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 8 件)

名称：バナジウムレドックス電池及びその運転方法

発明者：山村朝雄, 坂本清志, 吉田茂樹

権利者：ブラザー工業 (株)

種類：特許

番号：2013-073613

出願年月日：2013年03月29日

国内外の別：国内

名称：固体活物質を含むバナジウム電池

発明者：山村朝雄

権利者：東北大学

種類：特許

番号：2012-038057号

出願年月日：2012年02月23日

国内外の別：国内

名称：電池及びその方法

発明者：山村朝雄, 佐藤伊佐務

権利者：東北大学

種類：特許

番号：2012-007125号

出願年月日：2012年01月17日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ：<http://mlbp.phys.nagoya-u.ac.jp/>
新聞掲載

1. 準結晶に関する記事

朝日新聞および中日新聞、2012年10月8日

2. UCoGeに関する記事

中日新聞、2012年2月7日 他2紙

3. UCoGeに関する記事

科学新聞、2010年3月5日.

4. URu₂Si₂に関する記事

日刊工業新聞、平成23年1月28日 他3紙

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 憲昭 (SATO NORIAKI)

研究者番号：30170773

(2) 研究分担者

網塚 浩 (AMITSUKA HIROSHI)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：40212576

山村 朝雄 (YAMAMURA TOMOO)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：20281983

芳賀 芳範 (HAGA YOSHINORI)

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：90354901

四竈 樹男 (SHIKAMA TATSUO)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：30196365

(3) 連携研究者

阿曾 尚文 (ASO NAOFUMI)

琉球大学・理学部・准教授

研究者番号：40313118

神戸 振作 (KANBE SHINSAKU)

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：40224886

本間 佳哉 (HONMA YOSHIYA)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：00260448

藤森 伸一 (FUJIMORI SHINICHI)

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・主任研究員

研究者番号：70343936

山上 浩志 (YAMAGAMI HIROSHI)

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：20239867