

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400372

研究課題名(和文) コドーピングによる高臨界温度鉄系超伝導体の創成と超伝導増強因子の解明

研究課題名(英文) Development of high-T_c iron-based superconductors using co-doping and study on the mechanism of the increase in T_c induced by this method

研究代表者

工藤 一貴 (Kudo, Kazutaka)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：40361175

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：鉄系超伝導体に1つの化学種をドーピングして生じる最高のT_cは、1111型で55 K、122型で38 Kである。一方、122型CaFe₂As₂に2つの化学種をコドーピングすると、T_c = 45 Kの超伝導が発現する。本研究では、この化合物において、As-As結合の形成と切断の揺らぎが超伝導を誘起する可能性を指摘した。さらに、鉄系112型CaFeAs₂にLaとSbをコドーピングすると、1111型に次いで高いT_c = 47 Kの超伝導が発現することを発見した。この結果は、コドーピングが鉄系超伝導体の物質開発に有効であることを示している。

研究成果の概要(英文)：In iron-based arsenides, systematic studies on chemical doping have led to the highest superconducting transition temperature T_c of 55 K in SmFeAsO_{1-x}F_x among 1111-type compounds and 38 K in Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ among 122-type compounds. It seems that there is no room left for enhancement of T_c in terms of chemical doping. Here, in this research project, we studied the mechanism of the increase in T_c up to 45 K in La and P co-doped 122-type CaFe₂As₂. Our result revealed that the superconducting phase is far from the antiferromagnetic phase in the co-doped CaFe₂As₂, and also suggested that the fluctuation between forming and breaking As₂ dimers could be responsible for the emergence of superconductivity. Moreover, we found that co-doping also enhances T_c in the 112-type Ca_{1-x}R_xFeAs₂. The additional doping of Sb increases the T_c of Ca_{1-x}La_xFeAs₂ from 35 to 47 K. These results suggested that the co-doping sheds light on a novel route to develop iron-based superconductors with higher T_c.

研究分野：数物系科学

キーワード：高温超伝導

1. 研究開始当初の背景

本研究の発端となったのは、122型 CaFe_2As_2 に La と P をコドープ (同時にドープ) すると $T_c = 45 \text{ K}$ の超伝導が発現するという私たちの報告 [K. Kudo *et al.*, *Sci. Rep.* **3**, 1478 (2013).] である。鉄ヒ素系化合物は化学ドープへの許容性が高い。鉄ヒ素層およびスペーサー層の各サイトに多様な化学種をドープすることができ、その結果、超伝導が発現する。上述の報告以前に、網羅的かつ系統的な化学ドープが行われており、最高の臨界温度 T_c は、1111型で 55 K ($\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$)、122型で 38 K ($\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$) に達していた。一見すると、化学ドープにはもはや工夫の余地が無いように思えた。したがって、鉄系超伝導体において物質開発の可能性を広げるためには、上述のコドープによる超伝導増強の機構を解明することが重要と考えられた。また、その手法の普遍性を確認するために、他の鉄系に適用することも不可欠と思われた。

2. 研究の目的

本研究では、鉄系 122 型 CaFe_2As_2 において、2つの化学種をコドープすることによって生じる超伝導増強因子を抽出することを目的とする。さらに、コドープの手法を他の鉄系に適用し、その効果が普遍的であることを確認することも、本研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 試料の合成と評価

① 単結晶育成

セルフフラックス法あるいは熔融凝固法により単結晶を育成した。アルゴンガスを満たしたグローブボックス内で原料を秤量し、アルミナ坩堝に入れ、石英ガラス管に真空封入した。そのガラス封管を $1000^\circ\text{C} - 1100^\circ\text{C}$ で加熱、除冷し、単結晶試料を育成した。

② 相の同定

実験室系の X 線装置で粉末 X 線回折を行い、相の同定を行った。

③ 化学組成分析

エネルギー分散型 X 線分析装置を用い、試料の化学組成を決定した。

(2) 物性評価

① 反強磁性転移温度 T_N 、超伝導転移温度 T_c 、超伝導体積分率の決定

磁化を MPMS (Quantum Design) で、電気抵抗率を PPMS (Quantum Design) で測定した。それらの温度依存性から T_N と T_c を決定し、磁化の値から超伝導体積分率を求めた。

② 結晶構造解析

放射光 (SPring-8, BL02B2) あるいは実験室系の X 線回折装置を使用し、試料の結晶構造解析を行った。温度を変えながら結晶構造を精密化し、構造パラメータの温度依存性を求めた。

4. 研究成果

(1) 主な結果

① 122 型 CaFe_2As_2 において La と P のコドープによって生じる超伝導増強因子

一般に、鉄系の超伝導相は反強磁性秩序相に隣接する。そのため鉄系では、磁気揺らぎに由来する超伝導発現機構が盛んに議論されてきた。そこで本研究では、まず、「La と P のコドープにより系が反強磁性相に近づき、高い T_c の超伝導が発現する」という仮説を立てた。そして、そのことを実証するために、組成を系統的に変えた $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_2(\text{As}_{1-y}\text{P}_y)_2$ 単結晶試料を育成し、磁化と電気抵抗を測定して、 T_N と T_c の x, y 依存性を調べた。その結果、仮説に反して、超伝導相が反強磁性相に隣接しないことがわかった [工藤一貴, 野原実, *工業材料* **62**, 20 (2014).]. この結果は、磁性以外にも、超伝導発現を媒介する機構が鉄系に存在することを示唆する。

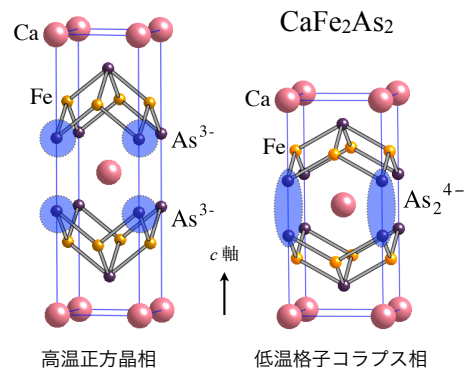


図 1. CaFe_2As_2 の結晶構造.

予備的ではあるが、そのヒントが結晶構造解析から得られた。122 型特有の構造相転移である格子コラプス転移の揺らぎが重要な役割を果たしている可能性がある。温度を変えながら粉末 X 線回折を行った結果、 $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_2(\text{As}_{1-y}\text{P}_y)_2$ の構造が、低温において高温正方晶 (図 1) から低温格子コラプス相 (低温正方晶) (図 1) へクロスオーバー的に変化することを見出した。一般に、122 型で見られる格子コラプス転移は一次転移であり、転移と共に超伝導が消失することが知られている。これは、格子コラプス転移に伴って c 軸長が 10% 程度減少し、フェルミ面が 3 次元的になるためと考えられている。一方、本研究では、そのような相にクロスオーバー的に移行すると、逆に高い T_c の超伝導が発現することを明らかにした。この結果は、高温正方晶と格子コラプス相の間の構造揺らぎが、この化合物の超伝導発現に重要な役割を果たしていることを示唆する。さらに、格子コラプス転移の駆動力が FeAs 面間の As^{3-} による $(\text{As}_2)^{4-}$ 分子の形成であることを考慮すると、この系の構造揺らぎは自然に価数揺らぎを

導く。そのような高エネルギーの揺らぎが、高い T_c の超伝導を媒介する可能性は十分にあると考えられる。この「価数揺らぎを伴う $(As_2)^{4-}$ 分子の形成と切断の揺らぎが高温超伝導を導く」という仮説は、私たちの次の科研費採択課題に引き継がれ、現在、実証するための実験が進められている。磁気揺らぎ以外の超伝導機構に軌道揺らぎに基づくものがある。その機構との関連性も今後明らかにしたいと考えている。

② 112 型 $CaFeAs_2$ において希土類元素と Sb のコードープによって生じる超伝導の増強
鉄系 122 型を対象として開始した本研究を、もう一つの鉄系である 112 型に発展させることができた。鉄系 112 型 $Ca_{1-x}RE_xFeAs_2$ (RE = 希土類元素) は、鉄系超伝導体の新しい型である [雑誌論文⑬]。単斜晶の結晶構造を持ち、FeAs 層と As ジグザグ鎖層の交互積層からなる。超伝導転移温度 T_c は、RE = La のとき 35 K [雑誌論文⑭]、RE = Pr [雑誌論文⑩]、Nd [雑誌論文⑩]、Sm, Eu, Gd のとき 10-15 K である。RE = Ce のときは超伝導を示さない [雑誌論文⑩]。

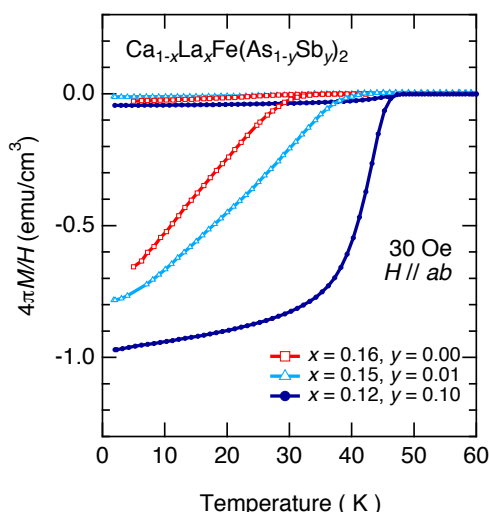


図 2. $Ca_{1-x}La_xFe(As_{1-y}Sb_y)_2$ における磁化の温度依存性.

私たちは、112 型 $Ca_{1-x}RE_xFeAs_2$ (RE = La, Ce, Pr, Nd) に Sb をコードープすると、超伝導が著しく増強されることを明らかにした [雑誌論文⑩⑭]。 $Ca_{1-x}La_xFeAs_2$ に Sb をコードープすると、 T_c が 47 K まで上昇した (図 2)。この T_c は、鉄系 1111 型に次いで 2 番目に高い値である。Sb コードープの効果は、RE = Ce, Pr, Nd の場合にも現れ、Sb をコードープした $Ca_{1-x}RE_xFeAs_2$ (RE = Ce, Pr, Nd) は $T_c = 43$ K を示した (図 3)。112 型では、 a 軸方向の As-Fe-As 結合角が最適値とほぼ一致する。一方で、 b 軸方向の結合角が最適値よりも小さい。単結晶構造解析の結果から、Sb をドーブ

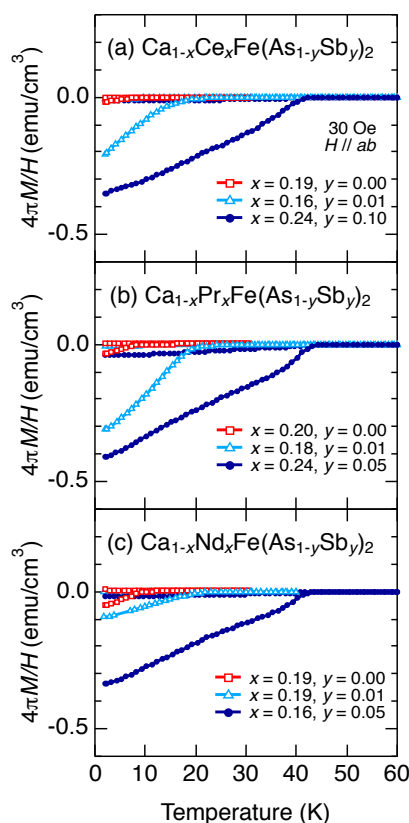


図 3. $Ca_{1-x}RE_xFe(As_{1-y}Sb_y)_2$ (RE = Ce, Pr, Nd) における磁化の温度依存性.

すると b 軸長が伸び、 b 軸方向の結合角が最適値に近づくことがわかった [雑誌論文⑩]。 b 軸長を a 軸長と同程度の長さまで伸ばすことができれば、112 型超伝導体の T_c は 50 K を越えるかもしれない。

(2) 国内外における位置づけとインパクト

本研究では、鉄系超伝導体の母物質 122 型 $CaFe_2As_2$ と 112 型 $CaFeAs_2$ に 2 つの化学種をコードープし、それぞれにおいて、 $T_c = 45$ K と 47 K の高温超伝導発現を観測した。この結果は、鉄系において既に工夫し尽くされたと考えられていた化学ドーピングの選択肢を広げ、結果として鉄系における物質開発の幅を広げた。この成果のインパクトは、Nature Japan 注目の論文 (Sci. Rep., Nature Publishing Group) への選出、「次代を拓くー工業材料キーワード 32 (工業材料, 日刊工業新聞社) への選出、JPSJ Highly Cited Article (The Physical Society of Japan) への 3 年連続選出 (2013 年, 2014 年, 2015 年)、日本物理学会若手奨励賞受賞などの形で、国内外から第三者的に評価されている。

(3) 今後の展望

鉄系 122 型、112 型に続く第 3 の系に、コードープの手法を適用する。122 型において到達した超伝導増強機構の仮説を実証する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 48 件)

- ① J. F. Landaeta, S. V. Taylor, I. Bonalde, C. Rojas, Y. Nishikubo, K. Kudo, and M. Nohara, High-resolution magnetic penetration depth and inhomogeneities in locally noncentrosymmetric SrPtAs, *Phys. Rev. B* 93, 064504 (5 pages) (2016). 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.93.064504
- ② A. Park, A. Mine, T. Yamada, F. Ohtake, H. Akiyama, Y. Sun, S. Pyon, T. Tamegai, Y. Kitahama, T. Mizukami, K. Kudo, M. Nohara, and H. Kitamura, Enhancement of critical current density in a $\text{Ca}_{0.85}\text{La}_{0.15}\text{Fe}(\text{As}_{0.92}\text{Sb}_{0.08})_2$ superconductor with $T_c = 47$ K through 3 MeV proton irradiation, *Supercond. Sci. Technol.* 29, 055006 (6 pages) (2016). 査読有 DOI: 10.1088/0953-2048/29/5/055006
- ③ S. Kawasaki, T. Mabuchi, S. Maeda, T. Adachi, T. Mizukami, K. Kudo, M. Nohara, and G.-q. Zheng, *Phys. Rev. B* 92, 180508(R) (5 pages) (2015). 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.92.180508
- ④ K. Kudo, K. Fujimura, S. Onari, H. Ota, and M. Nohara, Superconductivity in MgPtSi: An orthorhombic variant of MgB_2 , *Phys. Rev. B* 91, 174514 (5 pages) (2015). 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.91.174514
- ⑤ M. Sunagawa, R. Yoshida, T. Ishiga, K. Tsubota, T. Jabuchi, J. Sonoyama, S. Kakiya, D. Mitsuoka, K. Kudo, M. Nohara, K. Ono, H. Kumigashira, T. Oguchi, T. Wakita, Y. Muraoka, and T. Yokoya, Comparative ARPES Study on Iron-Platinum-Arsenide Superconductor $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ ($x = 0.25$ and 0.42), *J. Phys. Soc. Jpn.* 84, 055001 (2 pages) (2015). 査読有 DOI:10.7566/JPSJ.84.055001
- ⑥ S. Kawasaki, Y. Tani, T. Mabuchi, K. Kudo, Y. Nishikubo, D. Mitsuoka, M. Nohara, and G.-q. Zheng, Coexistence of multiple charge-density waves and superconductivity in SrPt₂As₂ revealed by ⁷⁵As-NMR/NQR and ¹⁹⁵Pt-NMR, *Phys. Rev. B* 91, 060510 (5 pages) (2015). 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.91.060510
- ⑦ S. Kitagawa, S. Araki, T. C. Kobayashi, H. Ishii, K. Fujimura, D. Mitsuoka, K. Kudo, and M. Nohara, Simultaneous suppression of superconductivity and structural phase transition under pressure in $\text{Ca}_{10}(\text{Ir}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Ir}_x\text{As}_2)_5$, *Phys. Rev. B* 90, 224513 (5 pages) (2014). 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.90.224513
- ⑧ N. Katayama, K. Sugawara, Y. Sugiyama, T. Higuchi, K. Kudo, D. Mitsuoka, T. Mizokawa, M. Nohara, and H. Sawa, Synchrotron X-ray Diffraction Study of Structural Phase Transition in $\text{Ca}_{10}(\text{Ir}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Ir}_x\text{As}_2)_5$, *J. Phys. Soc. Jpn.* 83, 113707 (5 pages) (2014). 査読有 DOI:10.7566/JPSJ.83.113707
- ⑨ E. Paris, B. Joseph, A. Iadecola, C. Marini, K. Kudo, D. Mitsuoka, M. Nohara, T. Mizokawa, and N. L. Saini, Determination of temperature-dependent atomic displacements in the $\text{Ca}_{10}\text{Ir}_4\text{As}_8(\text{Fe}_2\text{As}_2)_5$ superconductor with a metallic spacer layer, *Phys. Rev. B* 90, 094508 (6 pages) (2014). 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.90.094508
- ⑩ K. Kudo, Y. Kitahama, K. Fujimura, T. Mizukami, H. Ota, and M. Nohara, Superconducting Transition Temperatures of up to 47 K from Simultaneous Rare-Earth Element and Antimony Doping of 112-Type CaFeAs_2 , *J. Phys. Soc. Jpn.* 83, 093705 (4 pages) (2014). 査読有 DOI:10.7566/JPSJ.83.093705
- ⑪ K. Sawada, D. Ootsuki, K. Kudo, D. Mitsuoka, M. Nohara, T. Noda, K. Horiba, M. Kobayashi, K. Ono, H. Kumigashira, N. L. Saini, and T. Mizokawa, Coexistence of Bloch electrons and glassy electrons in $\text{Ca}_{10}(\text{Ir}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Ir}_x\text{As}_2)_5$ revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. B* 89, 220508(R) (4 pages) (2014). 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.89.220508
- ⑫ K. Matano, K. Arima, S. Maeda, Y. Nishikubo, K. Kudo, M. Nohara, and G.-q. Zheng, Spin-singlet superconductivity with a full gap in locally noncentrosymmetric SrPtAs, *Phys. Rev. B* 89, 140504(R) (4 pages) (2014). 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.89.140504
- ⑬ M. Sunagawa, T. Ishiga, K. Tsubota, T. Jabuchi, J. Sonoyama, K. Iba, K. Kudo, M. Nohara, K. Ono, H. Kumigashira, T. Matsushita, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Wakita, Y. Muraoka, and T. Yokoya, Characteristic two-dimensional Fermi surface topology of high- T_c iron-based superconductors, *Sci. Rep.* 4, 4381 (6 pages) (2014). 査読有 DOI:10.1038/srep04381
- ⑭ K. Kudo, T. Mizukami, Y. Kitahama, D. Mitsuoka, K. Iba, K. Fujimura, N. Nishimoto, Y. Hiraoka, and M. Nohara, Enhanced Superconductivity up to 43 K by P/Sb Doping of $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{FeAs}_2$, *J. Phys. Soc. Jpn.* 83, 025001 (2 pages) (2014). 査読有 DOI:10.7566/JPSJ.83.025001
- ⑮ N. Katayama, K. Kudo, S. Onari, T. Mizukami, K. Sugawara, Y. Sugiyama, Y. Kitahama, K. Iba, K. Fujimura, N. Nishimoto, M. Nohara, and H. Sawa,

Superconductivity in $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{FeAs}_2$: A Novel 112-Type Iron Pnictide with Arsenic Zigzag Bonds, *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, 123702 (4 pages) (2013). 査読有 DOI:10.7566/JPSJ.82.123702

- ⑯ K. Kudo, D. Mitsuoka, M. Takasuga, Y. Sugiyama, K. Sugawara, N. Katayama, H. Sawa, H. S. Kubo, K. Takamori, M. Ichioka, T. Fujii, T. Mizokawa, and M. Nohara, Superconductivity in $\text{Ca}_{10}(\text{Ir}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_2\text{As}_2)_5$ with Square-Planar Coordination of Iridium, *Sci. Rep.* 3, 3101 (5 pages) (2013). 査読有 DOI:10.1038/srep03101
- ⑰ K. Kudo, S. Nakano, T. Mizukami, T. Takabatake, and M. Nohara, Enhancing high-temperature thermoelectric properties of PtAs_2 by Rh doping, *Appl. Phys. Lett.* 103, 092107 (3 pages) (2013). 査読有 DOI:10.1063/1.4819953
- ⑱ K. Kudo, M. Kobayashi, S. Pyon, and M. Nohara, Suppression of structural phase transition in IrTe_2 by isovalent Rh doping, *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, 085001 (2 pages) (2013). 査読有 DOI:10.7566/JPSJ.82.085001
- ⑲ K. Tsubota, T. Wakita, H. Nagao, C. Hiramatsu, T. Ishiga, M. Sunagawa, K. Ono, H. Kumigashira, M. Danura, K. Kudo, M. Nohara, Y. Muraoka, and T. Yokoya, Collapsed tetragonal phase transition of $\text{Ca}(\text{Fe}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{As}_2$ studied by photoemission spectroscopy, *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, 073705 (5 pages) (2013). 査読有 DOI:10.7566/JPSJ.82.073705
- ⑳ K. Kudo, H. Ishii, M. Takasuga, K. Iba, S. Nakano, J. Kim, A. Fujiwara, and M. Nohara, Superconductivity induced by breaking Te_2 dimers of AuTe_2 , *Journal of the Physical Society of Japan* 82, 063704 (4 pages) (2013). 査読有 DOI:10.7566/JPSJ.82.063704

[学会発表] (計93件)

- ① 工藤一貴, P ドープ CrAs におけるヘリカル磁性の抑制と量子臨界現象, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 日~22 日, 東北学院大学(宮城県・仙台市).
- ② 工藤一貴, 鉄系および関連物質における新規超伝導体の開発, 2015 年日本化学会中国四国支部大会, 若手セッション「エキゾチックな超伝導体の新展開」15SA02, 2015 年 11 月 14 日~15 日, 岡山大学津島キャンパス(岡山県・岡山市).
- ③ 工藤一貴, Au ドープ PdTe_2 における電子状態密度の発散的増大による強結合超伝導, 科研費新学術領域研究「J-Physics: 多極子伝導系の物理」キックオフミーティング, 2015 年 9 月 14 日~15 日, 神戸大学統合研究拠点コンベンションホール(兵庫県・神

戸市).

- ④ K. Kudo, Drastic enhancement of superconducting transition temperature in 112-type $\text{Ca}_{1-x}\text{RE}_x\text{FeAs}_2$ (RE = La, Ce, Pr, Nd) induced by negative chemical pressure, 20th International Conference on Magnetism, 2015 年 7 月 5 日~10 日, Barcelona (Spain).
- ⑤ 工藤一貴, 112 型 $\text{Ca}_{1-x}\text{RE}_x\text{FeAs}_2$ の超伝導と化学置換効果, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日~24 日, 早稲田大学(東京都・新宿区)
- ⑥ K. Kudo, Superconductivity in $\text{Ca}_{10}(\text{Ir}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_2\text{As}_2)_5$ with a metallic spacer layer, Ushimado International Workshop on Physics and Chemistry of Novel Superconductors and Related Materials, 2014 年 11 月 8 日~10 日, Okayama (Japan).
- ⑦ K. Kudo, Superconductivity at 47 K in 112-type CaFeAs_2 with simultaneous rare-earth element and antimony doping, Ushimado International Workshop on Physics and Chemistry of Novel Superconductors and Related Materials, 2014 年 11 月 8 日~10 日, Okayama (Japan).
- ⑧ 工藤一貴, Sb ドープ 112 型 $\text{Ca}_{1-x}\text{RE}_x\text{FeAs}_2$ の超伝導—負の化学圧力印加による $T_c = 47$ K のバルク超伝導発見—, 京都大学基礎物理学研究所研究会「多自由度電子状態と電子相関が生み出す新奇超伝導の物理」, 2014 年 10 月 21 日~22 日, 京都大学(京都府・京都市).
- ⑨ K. Kudo, Transition from interfacial to bulk superconductivity in rare-earth doped CaFe_2As_2 , The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2014), 2014 年 7 月 7 日~11 日, Grenoble (France).
- ⑩ K. Kudo, Square-Planar Coordination of Iridium (II): Metallic Spacer Layers of Superconducting $\text{Ca}_{10}(\text{Ir}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_2\text{As}_2)_2$, 2014 MRS Spring Meeting, 2014 年 4 月 21 日~2014 年 4 月 25 日, San Francisco (USA).
- ⑪ 工藤一貴, 平面四配位 Ir_4As_8 層を持つ鉄系超伝導体 $\text{Ca}_{10}(\text{Ir}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_2\text{As}_2)_5$ の発見, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日~30 日, 東海大学(神奈川県・平塚市).
- ⑫ 工藤一貴, 鉄系および関連物質における新超伝導体の開発, 日本物理学会第 69 回年次大会 第 8 回 (2014 年) 日本物理学会若手奨励賞(領域 8) 受賞記念講演, 2014 年 3 月 27 日~30 日, 東海大学(神奈川県・平塚市).
- ⑬ 工藤一貴, 鉄系超伝導体の新物質開発, CROSSroads of Users and J-PARC 第 9 回「超伝導、磁性とフラストレーション」,

2013年12月3日～5日, KEK 東海 (茨城県・東海村) .

- ⑭ K. Kudo, Superconductivity at 45 K in La and P co-doped CaFe_2As_2 , International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2013 (NS²2013), 2013年11月21日～22日, Tokyo (Japan).
- ⑮ K. Kudo, Emergence of superconductivity at 45 K by La and P co-doping of CaFe_2As_2 , 26th International Symposium on Superconductivity (ISS2013), 2013年11月18日～20日, Tokyo (Japan).
- ⑯ 工藤一貴, La と P をコドープした CaFe_2As_2 における臨界温度 45 K の超伝導, 京都大学基礎物理学研究所研究会「鉄系高温超伝導の物理～スピンと軌道の協奏～」, 2013年10月8日～9日, 京都大学 (京都市) .
- ⑰ K. Kudo, Superconductivity at 45 K induced by La and P co-doping of CaFe_2As_2 , The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013), 2013年8月5日～2013年8月9日, Tokyo (Japan).
- ⑱ K. Kudo, Emergence of superconductivity at 45 K induced by La and P co-doping of CaFe_2As_2 , ICC-IMR International Workshop “Superconductivity research advanced by new materials and spectroscopies”, 2013年7月23日～2013年7月25日, Sendai (Japan).
- ⑲ 工藤一貴, 分子状ダイマーの形成・切断による超伝導体開発, 応用物理学会超伝導分科会第47回研究会「高温超伝導体の鉱脈を探せ!」, 2013年7月5日, 公益財団法人 国際超伝導産業技術研究センター (ISTEC) (東京都・江東区) .

[産業財産権]

- 出願状況 (計2件)
- ① 名称: IRON-CONTAINING SUPERCONDUCTIVE SUBSTANCE, AND METHOD FOR PRODUCING SAME
発明者: 澤博、片山尚幸、細野秀雄、野原実、工藤一貴
権利者: 国立大学法人 岡山大学、名古屋大学、東京工業大学
種類: 特許
番号: PCT/JP2014/072770
出願年月日: 2014年8月29日
国内外の別: 国外
 - ② 名称: 鉄系超伝導物質及びその製造方法
発明者: 澤博、片山尚幸、細野秀雄、野原実、工藤一貴
権利者: 国立大学法人 岡山大学、名古屋大学、東京工業大学
種類: 特許
番号: 特願 2013-199997
出願年月日: 2013年9月26日
国内外の別: 国内

[その他]

- 報道 (計10件)
- ① 2014年5月6日, Advances in Engineering (Canada), Enhancing high-temperature thermoelectric properties of PtAs_2 by Rh doping
 - ② 2014年1月14日, マイナビニュース, 岡山大学、新開発の鉄系超伝導物質が“次代を拓く-工業材料”に選出
 - ③ 2013年11月29日, 科学新聞, レアアース含有量を低減 名古屋大 岡山大 新しい高温超伝導体開発
 - ④ 2013年11月18日, 日経産業新聞, 臨界温度零下228度へ 鉄系超伝導材料 岡山大が開発
 - ⑤ 2013年11月15日, マイナビニュース, 名大など、レアアースの含有量を減らした新しい高温超伝導体を開発 名古屋大学 (名大)は11月14日、岡山大学と共同で、新しい鉄系超伝導体を開発したと発表した。
 - ⑥ 2013年10月4日, 電気新聞, 発電電力量5割増の熱電変換材料-岡山大研究グループ
 - ⑦ 2013年9月26日, マイナビニュース, 岡山大学、熱エネルギーを電気エネルギーに変換可能な白金化合物を開発
 - ⑧ 2013年5月13日, Nature Japan 注目の論文 (Scientific Reports, Nature Publishing Group), Emergence of superconductivity at 45 K by lanthanum and phosphorus co-doping of CaFe_2As_2
 - ⑨ 2013年4月22日, 山陽新聞, レアアース含有量大幅減 安価な超伝導物質 岡山大大学院が開発
 - ⑩ 2013年4月5日, 科学新聞, 鉄系超伝導基本物質 転移温度で世界記録

○ホームページ (計5件)

- ① http://www.okayama-u.ac.jp/tp/news/news_id5680.html
- ② http://www.okayama-u.ac.jp/tp/news/news_id3444.html
- ③ http://www.okayama-u.ac.jp/tp/news/news_id3106.html
- ④ http://www.okayama-u.ac.jp/tp/release/release_id110.html
- ⑤ http://www.okayama-u.ac.jp/tp/release/release_id96.html

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
工藤一貴 (KUDO KAZUTAKA)
岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 40361175