

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23244075

研究課題名(和文) 磁気相と共存・競合関係にある強相関電子系超伝導体の研究

研究課題名(英文) Studies on strongly correlated electron superconductors coexisting and/or competing with magnetism

研究代表者

石田 憲二 (ISHIDA, Kenji)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90243196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、特に強磁性超伝導体UCoGeにおいて、磁気秩序と超伝導の関係、磁気ゆらぎが超伝導に果たす役割を核磁気共鳴(NMR)/核四重極共鳴(NQR)の測定から調べた。その結果、超伝導と磁気秩序が微視的に共存していることを明らかにした。またUCoGeでは超伝導上部臨界磁場(Hc2)が異常な振舞いを示すことが知られていた。我々はこの物質の持つ磁気励起を核スピン格子緩和率(1/T1)から調べ、異常なHc2の振舞いはこの超伝導体を持つc軸方向の強磁性縦ゆらぎの磁場依存性と強く関係していることを明らかにし、強磁性ゆらぎが超伝導の起源であることを主張した。

研究成果の概要(英文)：We have studied the relationship between superconductivity and magnetism on strongly correlated electron superconductors located near magnetic phase with nuclear magnetic resonance (NMR)/ nuclear quadrupole resonance (NQR). In this research project, we have focused on ferromagnetic superconductor UCoGe and iron-based superconductor BaFe<sub>2</sub>(As<sub>1-x</sub>Px)<sub>2</sub> and investigated the coexistence of superconductivity and magnetic ordering and the role of the magnetic fluctuations for the occurrence of superconductivity from the microscopic point of view.

We obtained following results on UCoGe: 1) Superconductivity and magnetism coexist microscopically in UCoGe. 2) From the nuclear spin-lattice relaxation rate 1/T<sub>1</sub> measurements in three directions and under various magnetic fields, Ising ferromagnetic fluctuations in UCoGe play an important role in superconductivity, which presumably pairing glue for superconductivity. 3) Thus, the pairing symmetry of UCoGe would be spin triplet.

研究分野：数物系科学

キーワード：超伝導 強磁性超伝導 磁気共鳴 鉄系超伝導 強磁性ゆらぎ 超伝導発現機構

## 1. 研究開始当初の背景

2000年に強磁性体  $\text{UGe}_2$  が加圧下で超伝導を示すことが発見され超伝導研究者を驚かせた。その後  $\text{URhGe}$  や  $\text{UCoGe}$  など常圧で超伝導を示す強磁性体が発見され、強磁性と超伝導の関係も調べやすくなった。

また、2008年には鉄系超伝導体が発見され、鉄系超伝導もまた磁気相の近傍で超伝導が出現することが明らかになった。今世紀になっても興味深い強相関電子系超伝導体の発見が続いていたが、これら超伝導体では従来の電子-格子相互作用で超伝導が起こっているとは考えにくく、新しい超伝導発現機構の存在が考えられた。

## 2. 研究の目的

新しく発見された強磁性超伝導体や鉄系超伝導体において、磁気相と超伝導の関係や磁気ゆらぎが超伝導に与える影響を明らかにすることは超伝導の発現機構を考える上で不可欠である。また新たな超伝導発現機構を明らかにすることは室温超伝導など超伝導の新たな可能性を拓くことにつながる。

## 3. 研究の方法

良質な単結晶を用いた微視的測定である核磁気共鳴(NMR)/核四重極共鳴(NQR)実験より磁気秩序の秩序変数に関する内部磁場の様子を調べ、超伝導転移温度との関係を調べる。また磁気励起を詳細に調べることのできる核スピン格子緩和率( $1/T_1$ )の方向依存性、磁場依存性を調べ、各軸方向の磁気励起や磁場による磁気励起の抑制を知る。また磁気励起と超伝導の関係を調べ、磁気励起が超伝導に果たす役割について考察する。

## 4. 研究成果

強磁性超伝導体  $\text{UCoGe}$ 、鉄系超伝導体  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  に対して以下の成果が得られた。

[強磁性超伝導体  $\text{UCoGe}$ ]

強磁性超伝導体  $\text{UCoGe}$  については、強磁性は試料の全領域で見られ、その後内部磁場を受けているサイトが超伝導を示すことから、超伝導と強磁性はミクロに共存していることを明らかにした。さらに  $\text{UCoGe}$  は強磁性状態では  $c$  軸方向にのみ小さな強磁性モーメントが見られる一軸異方性を持つことが知られていたが、各軸方向の  $1/T_1$  を調べることにより、磁気ゆらぎも  $c$  軸方向にイジング的な強磁性ゆらぎが支配的であることを明らかにした。(図1参照)

この特徴的な強磁性ゆらぎと超伝導との関係を超伝導上部臨界磁場と強磁性ゆらぎの磁場依存性より調べた。その結果、超伝導は  $c$  軸方向の強磁性ゆらぎが大きな磁場領域でのみ見られることを明らかにした。(図2参照)

さらに  $\text{UCoGe}$  では超伝導上部臨界磁場 ( $H_{c2}$ ) が図3に示すような大きな軸依存性、特異な磁場依存性を持つことが知られている。特に  $b$  軸に磁場を印加した場合  $H_{c2}$  は増大す

る。我々は  $a$  軸、 $b$  軸に磁場を印加し強磁性転移温度 ( $T_{\text{Curie}}$ ) がどのように変化するかを調べた。その結果、図4に示すように  $a$  軸方向に磁場を加えても  $T_{\text{Curie}}$  は変化しないが  $b$  軸に加えると  $T_{\text{Curie}}$  は減少し、低温での強磁性ゆらぎは増大することを示した。したがって  $T_{\text{Curie}}$  が磁場で抑制されることにより誘起された強磁性ゆらぎが超伝導と関係しているのではないかと考え、 $a$ 、 $b$  軸方向の磁場に対する強磁性転移温度の差 ( $\Delta T_{\text{Curie}} \equiv T_{\text{Curie}}(H^a) - T_{\text{Curie}}(H^b)$ ) と超伝導転移温度  $T_{\text{Sc}}$  の差 ( $\Delta T_{\text{Sc}} \equiv T_{\text{Sc}}(H^b) - T_{\text{Sc}}(H^a)$ ) を、それぞれ  $T_{\text{Curie}}(H^a)$  と  $T_{\text{Sc}}(H^a)$  で規格化した値を磁場に対してプロットした。図5に見るように両者の間に強い相関が見られる。

これらの結果を考え合わせ、強磁性超伝導体  $\text{UCoGe}$  では異方的な強磁性ゆらぎを媒介とし超伝導が実現していることを主張した。また超伝導の引力となっている強磁性ゆらぎを磁場で tuning することができる極めて特殊な超伝導体であることも主張した。これは反強磁性ゆらぎを媒介とする超伝導体と大きく異なる点である。

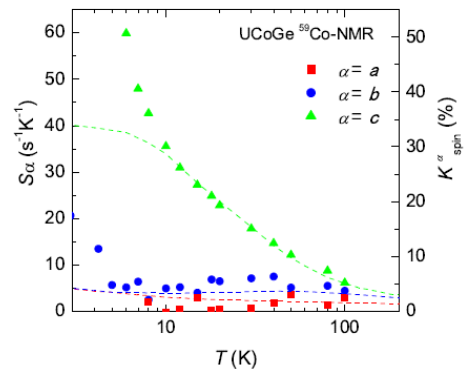


図1:  $a$ 軸方向の磁気ゆらぎ  $S_\alpha$  とナイトシフト(点線)の温度依存性。ナイトシフトと磁気ゆらぎが同じ振舞いをすることから磁気ゆらぎは強磁性的である。(T. Hattori *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, 073708(2014))

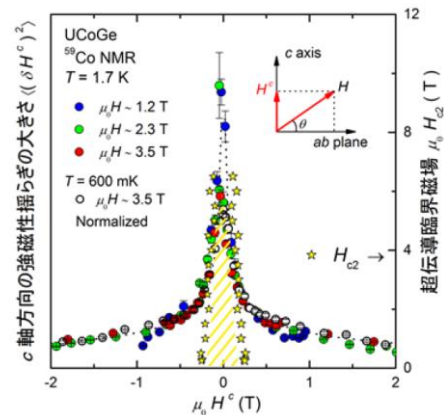


図2: 磁気ゆらぎと超伝導臨界磁場の  $H^c$  依存性。星印で囲まれた斜線領域で超伝導が見られることより、強磁性ゆらぎと超伝導の正の相関がわかる。(T. Hattori *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 066403(2012))

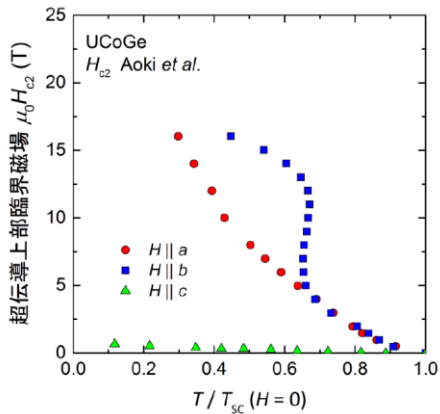


図 3 : UCoGe における上部臨界磁場。b 軸方向に印加した場合、超伝導が増大する振舞いが見られる。(D. Aoki *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 113709 (2009))

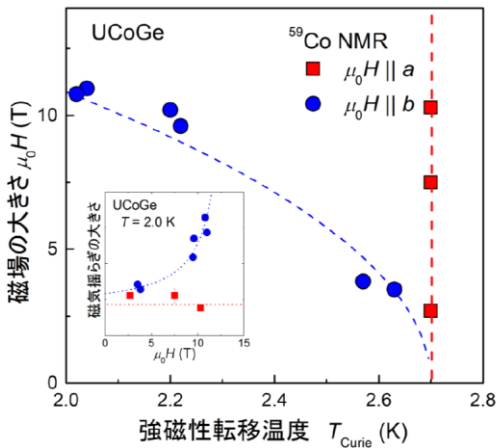


図 4: 強磁性転移温度の  $T_{\text{Curie}}$  の磁場依存性。挿入図は  $T = 2 \text{ K}$  における磁気ゆらぎの磁場依存性。(T. Hattori *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, 073708(2014))

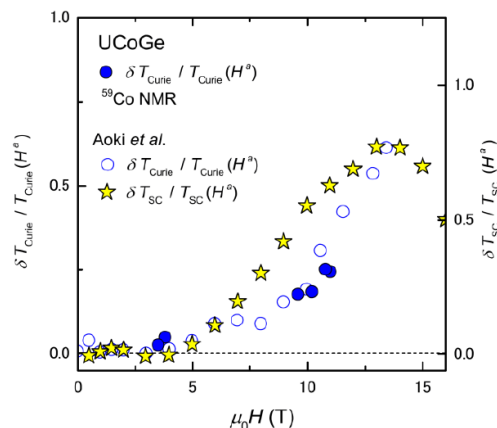


図 5 : a, b 軸方向の磁場に対する強磁性転移温度の差 ( $\delta T_{\text{Curie}} \equiv T_{\text{Curie}}(H^a) - T_{\text{Curie}}(H^b)$ ) と超伝導転移温度  $T_{\text{sc}}$  の差 ( $\delta T_{\text{sc}} \equiv T_{\text{sc}}(H^b) - T_{\text{sc}}(H^a)$ ) を、それぞれ  $T_{\text{Curie}}(H^a)$  と  $T_{\text{sc}}(H^a)$  で規格化した値を磁場に対してプロットした図。両者に強い相関があることがわかる。(T. Hattori *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, 073708(2014))

### [鉄系超伝導体 BaFe<sub>2</sub>(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>)<sub>2</sub>]

鉄系超伝導体の中でも BaFe<sub>2</sub>(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>)<sub>2</sub> は、良質な単結晶が得られること、As と P は同価数であるため置換によるキャリアの変化がないことなどの理由から超伝導と磁性の関係や超伝導の発現機構を研究するには最も適した系の一つといえる。これまでの研究より、反強磁性ゆらぎから見積もられる磁気転移温度がゼロとなる濃度(反強磁性量子臨界点)で超伝導転移温度が最大となることを報告した。

本研究期間では磁気相と超伝導相の境界に位置する試料において加圧下の <sup>31</sup>P-NMR より磁性と超伝導が微視的に共存していることを示した。(図 6 参照)

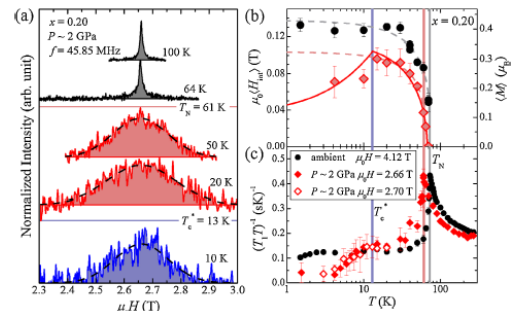


図 6 : 磁気相と超伝導の境界にある BaFe<sub>2</sub>(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>)<sub>2</sub> の <sup>31</sup>P-NMR の結果。T<sub>N</sub> 以下内部磁場発生のため共鳴線は増大するが、T<sub>c</sub> 以下超伝導ギャップ形成のため(T/T<sub>c</sub>)-1 の減少が見られた。この結果は両者の微視的な共存を示唆する。(T. Iye *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **81**, 033701(2012))

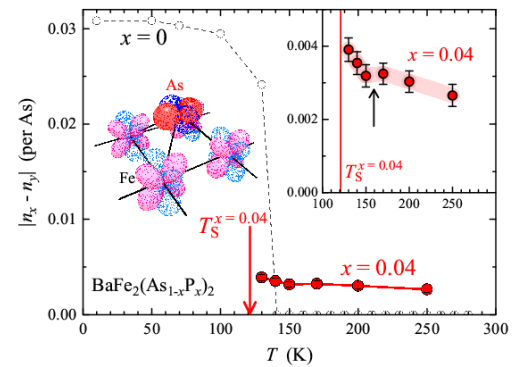


図 7 : As サイトの電場勾配の異方性から求めた  $4p_x$ ,  $4p_y$  軌道の電子占有数の差  $|n_x - n_y|$  の温度依存性。点線は BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> ( $x = 0$ )。右上挿入図は  $x = 0.04$  のデータの拡大図。左下図は Fe と As サイトの電子軌道の概念図 (T. Iye *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **84**, 043705(2015))

また磁気相にある P4%の単結晶試料に対し面内の異方性を <sup>75</sup>As 核の核磁気共鳴(NMR)実験よりマイクロな観点から調べた。その結果、構造転移以上の正方晶の温度域において <sup>75</sup>As-NMR の共鳴線が低温で見られる斜方晶軸に沿って二回対称性を示すことを見

出した。この2回対称性の原因は核位置での電場勾配に由来し、電場勾配の2回対称性から求めた  $4p_x$ 、 $4p_y$  軌道の電子占有数の差  $|n_x - n_y|$  を図7に示す。室温で見られた僅かな占有数の差は、低温になると大きくなり160 Kあたりから顕著になる。この160 Kは磁気トルクや光電子分光の測定から二回対称性や擬ギャップ、Feの軌道秩序が報告されている温度とほぼ一致しており、巨視的測定だけではなく微視的測定からも正方晶温度域で二回対称が現われていることを明らかにした。

## 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25件) (全て査読あり)

① **“Ferromagnetic critical behavior in  $U(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}$  ( $0 \leq x \leq 0.02$ ) studied by  $^{59}\text{Co}$  nuclear quadrupole resonance measurements”**

K. Karube, T. Hattori, K. Ishida, and N. Kimura  
*Phys. Rev. B* **91**, 075131 1-6 (2015)

発表年月: 2015年2月26日

DOI: 10.1103/PhysRevB.91.075131

② **“Origin of the Tetragonal-to-Orthorhombic Phase Transition in FeSe: A Combined Thermodynamic and NMR Study of Nematicity”**

A. E. Böhrer, T. Arai, F. Hardy, T. Hattori, T. Iye, T. Wolf, H. v. Löhneysen, K. Ishida, and C. Meingast

*Phys. Rev. Lett.* **114**, 027001 1-5 (2015)

発表年月: 2015年1月15日

DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.027001

③ **“Spin-Triplet Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in  $\text{UCoGe}$  Probed by  $^{59}\text{Co}$  NMR Measurement”**

T. Hattori, Y. Ihara, K. Karube, D. Sugimoto, K. Ishida, K. Deguchi, N. K. Sato, T. Yamamura

*J. Phys. Soc. Jpn* **83**, 061012 1-8 (2014) 発

表年月: 2014年5月9日

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.061012>

④ **“Anisotropic Uniaxial Pressure Response in  $\text{UCoAl}$  Studied by Nuclear Magnetic Resonance Measurement”**

K. Karube, S. Kitagawa, T. Hattori, K. Ishida, N. Kimura, and T. Komatsubara

*J. Phys. Soc. Jpn* **83**, 084706 1-5 (2014)

発表年月: 2014年7月10日

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.084706>

⑤ **“Relationship between Ferromagnetic Criticality and the Enhancement of Superconductivity Induced by Transverse Magnetic Fields in  $\text{UCoGe}$ ”**

T. Hattori, K. Karube, K. Ishida, K. Deguchi, N. K. Sato, T. Yamamura

*J. Phys. Soc. Jpn* **83** (2014) 073708 1-5

発表年月: 2014年6月27日

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.073708>

⑥ **“Relationship between Superconductivity and Antiferromagnetism in  $\text{LaFe}(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)\text{O}$  Revealed by  $^{31}\text{P}$ -NMR”**

S. Kitagawa, T. Iye, Y. Nakai, K. Ishida, Cao Wang, Guang-Han Cao, and Zhu-An Xu

*J. Phys. Soc. Jpn* **83** (2014) 023707 1-5

発表年月: 2014年1月31日

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.023707>

⑦ **“Spin-Triplet Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in  $\text{UCoGe}$ : Theoretical Aspect”**

Y. Tada, S. Fujimoto, N. Kawakami, T. Hattori, Y. Ihara, K. Ishida, K. Deguchi, N. K. Sato, I. Satoh

*J. Phys. Conf. Ser.* **449** (2013) 012029 1-12.

doi:10.1088/1742-6596/449/1/012029

⑧ **“Spin susceptibility in the superconducting state of the ferromagnetic superconductor  $\text{UCoGe}$ ”**

T. Hattori, K. Karube, Y. Ihara, K. Ishida, K. Deguchi, N. K. Sato

*Physical Review B* **88** (2013) 085127 1-5

発表年月: 2013年8月30日

DOI: 10.1103/PhysRevB.88.085127

⑨ **“Spin-Density-Wave-Type Ordering of  $\text{LaCoGe}$  Revealed by  $^{59}\text{Co}$  and  $^{139}\text{La}$ -Nuclear Magnetic Resonance Measurements”**

K. Karube, T. Hattori, K. Ishida, N. Tamura, K. Deguchi, and N. K. Sato

*J. Phys. Soc. Jpn* **82** (2013) 083712 1-4

発表年月: 2013年7月24日

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.083712>

⑩ **“Normal-state spin dynamics in the iron-pnictide superconductors  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  and  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  probed with NMR measurements”**

Y. Nakai, T. Iye, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, H. Ikeda, and T. Terashima

*Physical Review B* **87** (2013) 174507 1-10

発表年月: 2013年5月10日

DOI: 10.1103/PhysRevB.87.174507

⑪ **“Ferromagnetic Quantum Critical Point Induced by Tuning the Magnetic Dimensionality of the Heavy-Fermion Iron Oxypnictides  $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{PO}$ ”**

S. Kitagawa, K. Ishida, T. Nakamura, M. Matoba, and Y. Kamihara

*J. Phys. Soc. Jpn* **82** (2013) 033704

発表年月: 2013年2月14日

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.033704>

⑫ “s-wave superconductivity in superconducting BaTi<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>O revealed by <sup>121/123</sup>Sb-NMR/nuclear quadrupole resonance measurements”

S. Kitagawa, K. Ishida, K. Nakano, T. Yajima, and H. Kageyama  
*Physical Review B* **87** (2013) 060510 (R)  
発表年月: 2013年2月28日  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.060510>

⑬ “Ferromagnetic Quantum Critical Point in Heavy-Fermion Iron Oxypnictides Ce(Ru<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)PO”

S. Kitagawa, K. Ishida, T. Nakamura, M. Matoba, and Y. Kamihara  
*Physical Review Letter* **109** (2012) 227004  
発表年月: 2012年11月27日  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.227004>

⑭ “Quantum critical state in a magnetic quasicrystal”

K. Deguchi, S. Matsukawa, N. K. Sato, T. Hattori, K. Ishida, H. Takakura, T. Ishimasa  
*Nature Materials* **11** (2012) 1013-1016  
発表年月: 2012年10月7日  
doi:10.1038/nmat3432

⑮ “Universality and critical behavior at the critical endpoint in the itinerant-electron metamagnetic UCoAl”

K. Karube, T. Hattori, S. Kitagawa, K. Ishida, N. Kimura, and T. Komatsubara  
*Physical Review B* **86** (2012) 024428  
発表年月: 2012年7月23日  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.024428>

⑯ “Gradual suppression of antiferromagnetism in BaFe(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>)<sub>2</sub>: Zero-temperature evidence for a quantum critical point”

T. Iye, Y. Nakai, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima  
*Physical Review B* **85** (2012) 18405  
発表年月: 2012年5月4日  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.85.184505>

⑰ “Enhanced anisotropic spin fluctuations below tetragonal-to-orthorhombic transition in LaFeAs(O<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>) probed by <sup>75</sup>As and <sup>139</sup>La NMR”

Y. Nakai, S. Kitagawa, T. Iye, K. Ishida, Y. Kamihara, M. Hirano, and H. Hosono  
*Physical Review B* **85** (2012) 134408  
発表年月: 2012年4月4日  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.85.134408>

⑱ “Microscopic Evidence of Direct Coupling between Magnetic and

Superconducting Order Parameters in BaFe<sub>2</sub>(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>)<sub>2</sub>”

T. Iye, Y. Nakai, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 033701  
発表年月: 2012年2月10日  
<http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.033701>

⑲ “Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in UCoGe”

T. Hattori, Y. Ihara, Y. Nakai, K. Ishida, Y. Tada, S. Fujimoto, N. Kawakami, E. Osaki, K. Deguchi, N. K. Sato, and I. Satoh  
*Physical Review Letter* **108** (2012) 066403  
発表年月: 2012年2月6日  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.066403>

⑳ “Evaluation of Spin-Triplet Superconductivity in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>”

Y. Maeno, S. Kittaka, T. Nomura, S. Yonezawa, and K. Ishida  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 011009  
発表年月: 2011年12月26日  
<http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.011009>

㉑ “Metamagnetic Behavior and Kondo Breakdown in Heavy-Fermion CeFePO”

S. Kitagawa, H. Ikeda, Y. Nakai, T. Hattori, K. Ishida, Y. Kamihara, M. Hirano, and H. Hosono  
*Physical Review Letter* **107** (2011) 277002  
発表年月: 2011年12月30日  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.277002>

㉒ “NMR studies on iron-pnictide superconductors: LaFeAs(O<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>) and BaFe<sub>2</sub>(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>)<sub>2</sub>”

K. Ishida, Y. Nakai, S. Kitagawa and T. Iye  
*Comptes Rendus Physique* **12** (2011) 515-531  
発表年月: 2011年5月25日  
doi:10.1016/j.crhy.2011.04.004

㉓ “<sup>59</sup>Co-NMR/nuclear quadrupole resonance (NQR) Studies on Ferromagnetic Superconductor UCoGe”

T. Hattori, Y. Ihara, K. Ishida, Y. Nakai, E. Osaki, K. Deguchi, N. K. Sato, and I. Satoh  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) SA007  
発表年月: 2011年6月11日  
<http://dx.doi.org/10.1143/JPSJS.80SA.SA007>

㉔ “<sup>59</sup>Co-Nuclear Quadrupole Resonance and Nuclear magnetic Resonance Studies on YCoGe -- Comparison between YCoGe and UCoGe --”

K. Karube, T. Hattori, Y. Ihara, Y. Nakai, K.

Ishida, N. Tamura, K. Deguchi, N. K. Sato, and H. Harima  
*J. Phys. Soc. Jpn.* 80 (2011) 064711  
発表年月: 2011年 6月 10日  
<http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.064711>

②⑤ “Nonmagnetic pair-breaking effect in  $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Zn}_x)\text{AsO}_{0.85}$  studied by  $^{75}\text{As}$  and  $^{139}\text{La}$  NMR and NQR”  
S. Kitagawa, Y. Nakai, T. Iye, K. Ishida, Y. F. Guo, Y. G. Shi, K. Yamaura, and E. Takayama-Muromachi  
*Physical Review B* **83** (2011) R180501  
発表年月: 2011年 5月 6日  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.180501>

[学会発表] (計 75 件) (内招待講演 18 件)  
石田憲二の主な招待講演

① “NMR Investigation on Iron-based Superconductors”, International Workshop “Itinerant Magnetism and Superconductivity” Dresden, June 23-25, 2014

② “Quantum Critical Behaviors in Ferromagnetic Heavy Fermion Compound  $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{PO}$ ”, APS Meeting, Mar. 6<sup>th</sup> 2014, Denver USA

③ “Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in  $\text{UCoGe}$ ”, Korean Physical Society Fall Meeting, 31 Oct. 2013, Changwon CECO, Korea.

④ “Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in  $\text{UCoGe}$ ”, The international conference on Strongly Correlated Electron Systems, 9<sup>th</sup> Aug., 2013, The University of Tokyo, Japan.

⑤ “Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in  $\text{UCoGe}$ ”, Materials & Mechanisms of Superconductivity Conference 2012 (M2S 2012) 3rd Aug., 2012, Washington DC, USA.

⑥ “NMR investigation on iron-based superconductors Interplay between magnetism and superconductivity”, International Workshop “Iron-Based Superconductors” March 21-23, 2012, Munich, Germany.

⑦ “Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in  $\text{UCoGe}$ ”, International Conference on Heavy Electrons and Novel Quantum Phases ICHN, 5th July, 2012, Gyeongju, South Korea.

[図書] (計 4 件)

① 「ウラン系強磁性超伝導体における強磁性ゆらぎが誘起するスピン三重項超伝導」  
石田憲二, 服部泰佑, 佐藤憲昭, 出口和彦, 多田靖啓, 藤本聡  
*固体物理* Vol.50, No.3 (2015) 23-32

② “Review of NMR Studies on Iron-Based Superconductors”

K. Ishida, and Y. Nakai  
*Iron-Based Superconductors: Materials, Properties and Mechanism*  
Edited by N. L. Wang, H. Hosono, and P. Dai,  
Pan Stanford Publishing Pte.Ltd. 275-355  
発表年月: 2013年 2月 14日

③ “Unconventional Superconductivity Realized Near Magnetism and Hydrus Compound  $\text{Na}_x(\text{H}_3\text{O})_2\text{CoO}_2\cdot y\text{H}_2\text{O}$ ”

Y. Ihara, and K. Ishida  
“SUPERCONDUCTIVITY –THEORY AND APPLICATIONS” edit by Adir Moyses Luiz  
Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia 発表年月: 2011年 6月

④ 「磁石にくっつく超伝導体  
—強磁性と超伝導の微視的な共存—」  
石田憲二, 佐藤憲昭  
パリティ Vol.26 No.4 (2011) 49-54

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

「磁石でもありながら超伝導にもなる物質の超伝導発現の新しい仕組みを解明」  
[http://www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news\\_data/h/h1/news6/2011/120207\\_1.htm](http://www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news_data/h/h1/news6/2011/120207_1.htm)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 憲二 (ISHIDA, Kenji)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 90243196