

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540336

研究課題名(和文)量子ビームの相補利用による非調和振動がもたらす新奇物性の解明

研究課題名(英文)Complementary use of quantum beams to explore novel physical properties induced by anharmonicity

研究代表者

金子 耕士(Kaneko, Koji)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号：30370381

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：非調和熱振動は、新奇物性発現の新たな鍵として高い注目を集めていた。本研究では、放射光X線と中性子を相補的に用いることで、非調和振動について静的・動的構造及び他の自由度との相関を調べた。その結果、充填スクッテルダイト、 β -パイロクロア超伝導体、 $(\text{Ca}, \text{Sr})_3\text{T}_4\text{Sn}_{13}$ などの籠状化合物において非調和熱振動の精緻な描像の解明を通じ、超伝導や重い電子状態、量子臨界現象等との関連を明らかにした。CeAl₂では、非調和フォノンと結晶場の動的結合状態について、両者の詳細な構造を決定し、理論構築や新奇な動的結合モードの探索に資する重要なデータが得られた。

研究成果の概要(英文)：Anharmonic oscillation and its coupling to other degrees of freedom can give rise to emergent phenomena in matters. In this study, we employed a complementary use of synchrotron x-ray and neutron scattering to explore anharmonicity and its effects on physical properties. We revealed importance of anharmonicity in unconventional physical properties, such as superconductivity, heavy-fermion state and quantum criticality in cage compounds, filled skutterudites PrT₄Sb₁₂, beta-pyrochlore AOs₂O₆ and stannide superconductors $(\text{Ca}, \text{Sr})_3\text{T}_4\text{Sn}_{13}$ through a detailed investigation of static and dynamical responses. Detailed insights into both phonon and crystal field excitations in vibronic compounds CeAl₂ can contribute to establish theoretical model and look for nuclear-magnetic interference effects.

研究分野：固体物性

キーワード：ラットリング フォノン 中性子散乱 X線非弾性散乱 物性実験 国際研究者交流(フランス) 国際研究者交流(アメリカ)

1. 研究開始当初の背景

非調和熱振動は、特異な物性発現の鍵として高い注目を集めていた。この実現には、非調和振動を示すゲストイオンが緩い束縛状態にあることが必要だと考えられ、その代表的な舞台として籠状構造が着目された。籠状構造では、等方的な電場による結晶場の縮退や、高い配位数による強い混成など、構造に起因した特徴的な物性が現れることから、ゲストが磁性イオンの場合、非調和振動は、格子、電荷、磁性を伴って振動することとなる。即ち、各々の自由度を動的に結びつける新たな要素とも捉えることが可能である。従って、ラットリングについて理解する上では、振動状態の詳細に加え、各種動的応答の解明が不可欠である。

非調和振動の重要性が認識される一方で、非調和性を有効に観測する手法は確立していなかった。その中で、中性子散乱は、原子核で散乱されることに起因し、熱振動や詳細な原子核位置を検出可能なことから、非調和性の研究の有効手段となる。一方 X 線では、近年の放射光技術の発展により、微小試料で高効率の非弾性散乱が可能になったことから、フォノン分光を通じて非調和性の検出が可能となってきた。

2. 研究の目的

物性を支配する新たな要素として、ラットリングと呼ばれる巨大非調和振動に着目し、中性子及び放射光 X 線を相補的に用いることで非調和振動の可視化やフォノン分光を通じてラットリングの普遍的概念や発現条件を調べることを目的とした。さらに非調和振動に伴う格子・電荷・スピンの動的応答及び各々の結合について、フォノンや結晶場励起との相関、局所格子歪み等新奇な応答の探索を目指した。上記、非調和性振動の静的・動的側面の理解を通じて、物性発現機構の解明を目指した。具体的には、(1) 充填スクッテルダイト $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$ (2) β -パイロクロア超伝導体 AOs_2O_6 (3) 非磁性超伝導体 $\text{A}_3\text{T}_4\text{X}_{13}$ (4) 重い電子系 $\text{YbT}_2\text{Zn}_{20}$ (5) その他特異な結晶構造を持つ化合物に焦点を当て、研究を行った。

3. 研究の方法

研究手段として、主に中性子及び放射光 X 線散乱を計画した。この内中性子については、単結晶回折実験により秩序変数を調べることに加え、構造解析にマキシマムエントロピー法を用いることで、原子核密度分布をモデルフリーで実空間で可視化し、非調和性や安定位置を調べることにした。また中性子三軸分光器において非弾性散乱実験を行い、フォノンや臨界揺らぎなどのダイナミクスを調べることに加え、この内フォノンについては、異なる特性を持つ放射光 X 線非弾性散乱実験を相補的に実施し、全体像の解明を計画していた。

この内、中性子散乱については、研究代表者が所属する日本原子力研究開発機構の研

究用原子炉 JRR-3 に設置されている装置群の利用を計画していたが、研究期間中に研究炉が稼働せず、実施出来なかった。そのため、実験は主として海外の原子炉施設を利用するとともに、パルス中性子源 J-PARC MLF の装置建設に参加し、国内での実験環境の整備を進めた。

4. 研究成果

(1) 充填スクッテルダイトにおける重い電子状態とラットリング

ラットリングの重要性が認識された先駆けである充填スクッテルダイトの中で、共に超伝導体である $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ と $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$ では、近い超伝導転移温度を持ちながら、前者が非従来型の重い伝系超伝導体であるのに対し、後者は従来型の超伝導体と対照的である。両者は近い格子定数を持ちながら、物性を担う Pr イオンの熱振動には本質的な違いが見られることを代表者は見出し、非調和性と電子状態との関連が考えられていた。

本研究では、Os と Ru の混晶系を作製し、フォノン測定を通して非調和性と物性との関連を調べた。フォノンの分散関係及びその温度依存性を様々な組成について測定から、 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ に Ru を置換していくことで、Pr イオンの非調和モードに対応する低エネルギー励起が高エネルギー側に徐々にシフトしていく振る舞いを明らかにした。さらに温度による低エネルギー励起のソフトニングも置換と強い相関をもつことを見出した。この結果から、非調和性が遷移金属に強い影響を及ぼしていること、さらには物性とも関連していることを明らかにした。

(2) β -パイロクロア化合物 AOs_2O_6 におけるラットリングと超伝導

β -パイロクロア超伝導体 AOs_2O_6 ($A=\text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$) では、 Os_2O_6 が形成する大きな籠の中に A イオンが内包される構造をとる。籠とイオン半径の差異の大きさに対応し、A イオンの熱振動因子は Cs, Rb, K の順に大きくなり、それに対応して超伝導転移温度も高くなることや、超伝導を担うフォノンエネルギーの大きさなどから、ラットリング振動が超伝導を担っていることが示唆された。さらに、振動が一番大きい KO_2O_6 では強結合超伝導が実現していることに加え、超伝導相内にラットリング転移と呼ばれる一次転移が現れるが、その詳細は明らかではなかった。単結晶育成や取り扱いに困難があるため、多くの疑問が残されていた。

本研究課題では、単結晶中性子回折実験に MEM 解析を適用することで、A イオンが示すラットリング振動の解明を目指した。小型単結晶での強度不足を補うため、世界最高の中性子束を誇るフランスのラウエ・ランジュバン研究所の D9 回折計において、Cs と K を対象に実験を行った。 CsOs_2O_6 について、十分な回折強度データの取得に成功し、Cs の大きな

原子変位パラメーターを確認した。超伝導転移温度直上のデータのMEM解析から、Csの熱振動には籠の対称性を反映した異方性が存在し、空隙に対応した111方向の中で隣接Csイオンを避ける方向に伸びた振動をしていることを見出した。さらにこの異方的な熱振動が超伝導転移以下で抑制されていることを見出した。以上の結果から、超伝導転移温度直上では、Csイオン間には斥力が働き、それを反映した3次の非調和ポテンシャルが影響していることを明らかにした。さらに超伝導転移以下で異方性が抑制されることから、この非調和ポテンシャルが超伝導と同程度のエネルギースケールを持ち、超伝導に重要な役割を演じていることを見出した。

続いて最も注目を集める KOs_2O_6 について、単結晶中性子回折実験を行った。 KOs_2O_6 は湿度に敏感であるため、不活性ガス下の試料環境を整備し、実験に成功した。 $CsOs_2O_6$ と同様にマキシマムエントロピー法を用いた解析を行い、Kイオンの強い非調和熱振動の可視化に成功した。Kイオンの核密度分布についても、 $\langle 111 \rangle$ 方向の中で隣接Kイオンが存在しない方向に広がった異方性を有しており、Csイオンと同様に3次の非調和ポテンシャルの強い影響が見られることを見出した。超伝導転移温度やさらにラットリング転移温度前後でも測定を進め、構造解析に成功したが、Csで見られたような顕著な温度変化はKイオンでは見られなかった。新たな超格子反射の出現も実験精度の範囲で観測されず、これまでに示唆された同型転移を支持する結果が得られた。

本研究では、これまで粉末回折実験等では不明であったAイオンのラットリング振動の詳細な可視化に成功し、非調和性と超伝導との関連について理解を深めることが出来た。

(3) 3-4-13系超伝導体におけるソフトフォノンによる非磁性起源の量子臨界現象

非従来型超伝導をはじめとする新奇な物性は、2次転移が消失する量子臨界点近傍で多く実現する。2次転移の秩序変数は、磁性が一般的であるが、スクッテルダイト類似化合物 $A_3T_4Sn_{13}$ ($A=Ca, Sr, La\cdots$, $T=$ 遷移金属)では、Snのソフトフォノンに起因した構造相転移による非磁性起源の量子臨界性が指摘された。そこで該当する相転移の起源について、単結晶X線及び中性子散乱実験により徹底的に調べた。

母物質である $Sr_3Ir_4Sn_{13}$ の相転移について、中性子散乱実験において超格子反射の観測に成功し、秩序波数 $q=(1/2\ 1/2\ 0)$ で記述される構造相転移であることを明らかにした。超格子反射強度において温度履歴がないことに加え、秩序波数付近で転移温度に向けて高温側から発達する臨界散乱の存在を検出し、この相転移が2次の構造相転移であることを見出した。さらに中性子及び放射光X線の非弾性散乱実験で、室温で4 meV付近に低

エネルギーフォノンが存在し、相転移点に向けてソフト化していく傾向を見出した。これらの静的・動的応答は、対象とする相転移が2次の構造相転移であることと一致し、構造由来の量子臨界性というシナリオを支持することを明らかにした。

IrをRhで置換した $Sr_3Rh_4Sn_{13}$ に対し、さらにSrをCaで置換して量子臨界点に近接していくにつれて、超格子反射強度が著しく抑制されるとともに、秩序変数の臨界指数も合わせて変化していることを見出した。この結果は、揺らぎが量子臨界点に向けて系統的に変化していることを示唆しており、臨界点近傍でのダイナミクス of 解明に繋がる重要な足がかりが得られた。

(4) $YbCo_2Zn_{20}$ における重い電子状態と磁場誘起秩序

立方晶 AT_2X_{20} ($A=$ 希土類, アクチノイド, $T=$ 遷移金属, $X=Zn, Al$)は、Aイオンが多配位の籠に内包された構造を有することに加え、Xイオンの一部でラットリング振動の重要性も示唆されている。特徴的な構造を反映して超伝導や四極子転移など多彩な物性が実現する。本研究では重い電子系化合物 $YbCo_2Zn_{20}$ に着目し、その電子状態を調べた。

中性子非弾性散乱実験から、Ybイオンの3 meV以下の小さな分裂幅の結晶場を持ち、基底状態における重い電子状態は二重項基底が担っていることを見出した。さらにこの重い電子状態は、磁場により急激に抑制されることを確認した。また $\langle 111 \rangle$ 方向に磁場を印加した際にのみ現れる磁場誘起秩序状態について、単結晶中性子回折実験により調べた結果、 $q=(1/2\ 1/2\ 1/2)$ で記述される秩序構造を持つことを明らかにした。さらに誘起磁気モーメントの解析から、秩序変数の対称性を決定し、バルク測定から示唆された O_2^0 型の反強四極子秩序であることを決定した。圧力では反強磁性秩序が現れることと対照的で、磁場と圧力により異なる臨界現象を示すことを示唆する重要な結果が得られた。その起源をめぐって、構造の外場依存性の違いによる影響も考えられ、新たな機構をめぐる重要な知見が得られた。

(5) $CeAl_2$ におけるパイロニック状態

立方晶ラーベス型化合物 $CeAl_2$ は、強い電子-格子作用により、Ceイオンの結晶場がフォノンと強く結合することでさらなる分裂を示す特殊な束縛状態を形成することが知られている。本研究では、この特徴的な束縛状態に関し、放射光X線及び偏極中性子散乱を相補的に駆使し、詳細の解明を目指した。

放射光非弾性X線散乱実験から、フォノン分散及びその温度変化の詳細を明らかにし、パイロニック状態の形成に伴い、フォノンについても結晶場と同様に分裂が徐々に生じていることを初めて明らかにした。さらに偏極中性子非弾性散乱を用いて、磁気成分の

みの励起スペクトルの詳細を明らかにし、結晶場分裂は高温から存在し、フォノンとは異なる温度依存性をもつことを示した。この結果は、以前提唱された理論モデルと一致しており、フォノンの分裂は、結晶場の基底状態の占有率と相関していると考えられる。また詳細な温度・波数依存性のデータは、今後の理論モデル構築に加え、未だ観測例のない核-磁気干渉効果の探査に役立つ貴重な結果が得られた。

(5) 単結晶中性子回折計の建設

前述の通り、当初主たる研究場所と想定していた研究用原子炉 JRR-3 は、震災後、研究期間内に再稼働しなかったため、中性子散乱実験について再検討が必要となった。海外施設を最大限に活用して研究を遂行したが、マシンタイムは限界があった。そこで特殊な結晶構造に起因した物性についてもテーマを拡げ、微小な原子変位が絡むマルチフェロイクスや非従来型超伝導体の電子状態について研究を進めたことに加え、国内での実験環境を実現するために、立ち上げ時期にある J-PARC での装置建設に参加した。この中で、単結晶中性子構造解析装置の建設に加わり、研究発展の鍵を握る、微小単結晶に対応した低温・極限環境機器の整備を進めた。当初計画していた 1 mm^3 以下の結晶について、低温での解析を実現した。当装置では、微小単結晶に加え、より高波数までの測定が可能となった。これにより、熱振動についてもより高分解能の描増を得ることが可能となり、今後の研究につながる重要な進展が得られた。

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 10 件)

- ① Y. W. Cheung, J. Z. Zhang, J. Y. Zhu, W. C. Yu, Y. J. Hu, D. G. Wang, Y. Otomo, K. Iwasa, K. Kaneko, M. Imai, H. Kanagawa, K. Yoshimura, and S. K. Goh: “Second-order Structural Transition in Superconductor $\text{La}_3\text{Co}_4\text{Sn}_{13}$ ”, *Phys. Rev. B*, in press (5 pages), 査読有
- ② T. Ohhara, R. Kiyonagi, K. Oikawa, K. Kaneko, T. Kawasaki, I. Tamura, A. Nakao, T. Hanashima, K. Munakata, T. Moyoshi, T. Kuroda, H. Kimura, T. Sakakura, C.-H. Lee, M. Takahashi, K. Ohshima, T. Kiyotani, Y. Noda, and M. Arai: “SENJU: a new time-of-flight single-crystal neutron diffractometer at J-PARC”, *J. Appl. Crystallogr.* 49, 120-127 (2016), 査読有, DOI: 10.1107/S1600576715022943
- ③ K. Kaneko, S. Raymond, E. Ressouche, G. Lapertot, T. Takeuchi, Y. Hirose, F. Honda, and Y. Onuki: “Field-induced order in heavy-fermion compound $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ ”, *JPS Conf. Proc.* 3, 011061 1-5 (2014), 査読有, DOI: 10.7566/JPSCP.3.011061
- ④ S. Tsutsui, K. Kaneko, R. Miyazaki, R. Higashinaka, Y. Aoki, R. Kobayashi, S. Wakimoto, A. Q. R. Baron, H. Sugawara, and H. Sato: “Anharmonic Pr Guest Modes in $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ Investigated by Inelastic X-ray Scattering” *JPS Conf. Proc.* 3, 011060 1-5, (2014), 査読有, DOI: 10.7566/JPSCP.3.011060
- ⑤ K. Kaneko, O. Stockert, B. Fåk, S. Raymond, M. Skoulatos, T. Takeuchi and Y. Onuki : Magnetic-field enhanced aniferromagnetism in the noncentrosymmetric heavy-fermion superconductor CePt_3Si ”, *Phys. Rev. B* 89, 241105 (2014), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.89.241105
- ⑥ H. Mitamura, R. Watanuki, K. Kaneko, N. Onozaki, Y. Amou, S. Kittaka, R. Kobayashi, Y. Shimura, I. Yamamoto, K. Suzuki, S. Chi, and T. Sakakibara: “Spin-Chirality-Driven Ferroelectricity on a Perfect Triangular Lattice Antiferromagnet”, *Phys. Rev. Lett.* 113, 147202 1-5 (2014), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.147202
- ⑦ R. Kobayashi, K. Kaneko, K. Saito, J. Mignot, G. André, J. Robert, S. Wakimoto, M. Matsuda, S. Chi, Y. Haga, and T. D. Matsuda:” Influence of Electron Doping on Magnetic Order in $\text{CeRu}_2\text{Al}_{10}$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 83, 104707 1-5 (2014), 査読有, DOI: 10.7566/JPSJ.83.104707
- ⑧ K. Kaneko, S. Yoshiuchi, T. Takeuchi, F. Honda, R. Settai, and Y. Onuki: “Effect of magnetic field in heavy-fermion compound $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ ”, *J. Phys. Conf. Ser.* 391, 012026 1-4 (2012), 査読有, DOI: 10.1088/1742-6596/391/1/012026
- ⑨ S. Raymond, K. Kaneko, A. Hiess, P. Steffens, and G. Lapertot: “Evidence for Three Fluctuation Channels in the Spin Resonance of the Unconventional Superconductor CeCoIn_5 ”. *Phys. Rev. Lett.* 109, 237210 1-5 (2012), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.237210

- ⑩ S. Kambe, H. Sakai, Y. Tokunaga, and K. Kaneko: “Correlation between the superconducting pairing symmetry and magnetic anisotropy in f -electron unconventional superconductors”, J. Phys. Conf. Ser. 344, 012003 1-8 (2012), 査読有
DOI: 10.1088/1742-6596/344/1/012003
- [学会発表] (計 15 件)
- ① 筒井智嗣, 金子耕土, A. Q. R. Baron, 海老原孝雄: “CeAl₂の X 線非弾性散乱”, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19-22 日, 東北学院大学(宮城県仙台市).
- ② K. Kaneko: “Sample environment at JRR-3”, 1st Workshop for ANSTO/J-PARC MOU collaboration, 2016 年 3 月 2-3 日, 日本原子力研究開発機構原子力化学研究所(茨城県那珂郡東海村), 招待講演.
- ③ 金子耕土: “偏極中性子が拓く強相関 f 電子物性”, 東北大学金属材料研究所ワークショップ-中性子プラットフォームによる物質材料科学の進展-, 2015 年 11 月 12-13 日, 東北大学(宮城県仙台市), 招待講演.
- ④ 金子耕土, 松田雅昌, 筒井智嗣, S. K. Goh, 松元卓也, 今井正樹, 吉村一良: “籠状構造をもつ超伝導体 Sr₃Ir₄Sn₁₃ における相転移”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 16~19 日.
- ⑤ 末國晃一郎, 田中博己, 李哲虎, 中村充孝, 河村聖子, 菊池龍弥, 金子耕土, 長谷川巧, 西堀英治, 笠井秀隆, 小坂康文, 高島敏郎: “硫化銅鈦物 Cu₁₂M₄S₁₃ (M = Sb, As) のソフトフォノンモードと構造相転移”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 16~19 日.
- ⑥ K. Kaneko: “Upgrade of triple-axis spectrometers at JRR-3 -complementary to J-PARC instruments-”, MANTA: A next generation cold triple axis spectrometer for HFIR, 2015 年 5 月 18-19 日, Oak Ridge National Laboratory (USA), 招待講演.
- ⑦ 金子耕土: “中性子散乱で見る重い電子系超伝導体の磁気応答”, Workshop CROSSroads of Users and J-PARC 強相関電子系の物理, 2014 年 12 月 2-3 日, いばらき量子ビームセンター(茨城県那珂郡東海村), 招待講演.
- ⑧ K. Kaneko, T. Ohhara, R. Kiyonagi, T. Kawasaki, K. Oikawa, I. Tamura, Y. Yamauchi, T. Hanashima, T. Moyoshi, A. Nakao, K. Munakata, T. Kuroda, Y. Noda, Y. Shimojo, M. Ohkawara, D. Kawana, R. Sugiura, and T. Asami: “Current status of extreme environment single crystal neutron diffractometer SENJU, and latest news from JRR-3”, 8th International Workshop on Sample Environment at Neutron Scattering Facilities, 2014 年 10 月 12-16 日, Oxfordshire (United Kingdom), 招待講演.
- ⑨ 金子耕土, S. Raymond, E. Ressouche, 椎名亮輔, 竹内徹也, 広瀬雄介, 本田史憲, 大貫惇睦, G. Laperot: “重い電子系化合物 YbCo₂Zn₂₀ で実現する新奇な磁場誘起磁気秩序”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学(神奈川県).
- ⑩ K. Kaneko: “Upgrade plan of three-axis spectrometers in JRR-3: complementary with inelastic instruments in J-PARC”, multi-TAS or TOF? JCNS workshop satellite, 2013 年 10 月 10-11 日, Munich (Germany), 招待講演.
- ⑪ 筒井智嗣, 金子耕土, 小林理気, 脇本秀一, A. Q. R. Baron, 宮崎亮一, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行: “Pr(Os_{1-x}Ru_x)₄Sb₁₂ における Pr 原子の非調和振動”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 25-28 日, 徳島大学(徳島県).
- ⑫ S. Tsutsui, K. Kaneko, R. Miyazaki, R. Higashinaka, Y. Aoki, R. Kobayashi, S. Wakimoto, A. Q. R. Baron, H. Sugawara, H. Sato: “Relationships between Anharmonic Pr Guest Modes and Electronic States in Pr(Os_{1-x}Ru_x)₄Sb₁₂”, The international Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013), 2013 年 8 月 5-9 日, 東京大学(東京都).
- ⑬ K. Kaneko: “Magnetic field-induced order and spin dynamics in heavy-fermion compound YbCo₂Zn₂₀”, 4th REIMEI International Workshop, 2013 年 7 月 31-8 月 2 日, いばらき量子ビームセンター(茨城県那珂郡東海村), 招待講演.
- ⑭ 金子耕土: “SENJU における試料環境の現状と f 電子物性の研究”, Workshop CROSSroads of Users and J-PARC J-PARC の単結晶回折計による構造物性研究, 2013 年 2 月 4-5 日, いばらき量子ビームセンター(茨城県那珂郡東海村), 招待講演.
- ⑮ 金子耕土, S. Raymond, A. Hiess, P.

Steffens, G. Lapertot: “重い電子系超伝導体 CeCoIn₅ におけるカイラリティをもつスピンレゾナンス”, 日本中性子科学会第12回年会, 2012年12月11-12日, 京都大学 (京都府), 招待講演.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金子 耕士 (KANEKO Koji)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹
研究者番号: 30370381

(2) 連携研究者

脇本 秀一 (WAKIMOTO Shuichi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究主幹
研究者番号: 40399415

筒井 智嗣 (TSUTSUI Satoshi)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・主幹研究員
研究者番号: 70360823