

平成22年 6月 9日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2009

課題番号：17072004

研究課題名（和文） 非破壊 100 テスラ領域の精密物性研究

研究課題名（英文） Precise Measurements in the Non-destructive 100 Tesla region for Solid State Physics

研究代表者

金道 浩一 (KINDO KOICHI)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：20205058

研究成果の概要（和文）：非破壊 100T 領域でのスピン科学を展開するために、マグネットの開発を行った。新たなマグネットにより研究が進展したテーマは、「強磁場 ESR および NMR」、「SPring-8 における放射光 X 線を用いた実験」と「J-PARC におけるパルス中性子源を用いた実験」である。また、非破壊 100T 発生および超ロングパルス磁場発生のためのモデルコイルのテスト実験に成功し、実用型のマグネットの製作が始まっている。

研究成果の概要（英文）：This study has been made to carry out Spin Science in the non-destructive 100 T fields. For the purpose, we have developed some new magnets and technologies for precise control of measuring conditions. Magnets made for both high-field ESR and NMR, X-ray diffraction measurement at SPring-8 and neutron experiments at J-PARC have been developed and established. Model coils for the non-destructive 100 T field and very long pulse field were examined and practical magnets have been produced.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	36,800,000	0	36,800,000
2006年度	28,500,000	0	28,500,000
2007年度	22,000,000	0	22,000,000
2008年度	19,300,000	0	19,300,000
2009年度	9,100,000	0	9,100,000
総計	115,700,000	0	115,700,000

研究分野：強磁場物性

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：強磁場、磁性、マグネット、放射光、パルス中性子、マクロ測定、微量測定

1. 研究開始当初の背景

(1)研究開始当初は、パルス強磁場を用いた精密物性研究は50T程度に限られていた。100Tに至る強磁場下における精密物性測定は強

磁場研究者の夢であり、世界中の研究者が目指す目標でもあった。また、日本の物性研究では優れた新物質開発能力により様々な物質が合成され、新現象の観測に必要な強磁場

として 100T が望まれていた。

(2)一方、世界における当該研究の競争は激化しており、ロスアラモス（米）、ドレスデン（独）やツールーズ（仏）には巨大な強磁場施設を設立して一極集中的に研究を進めていた。

2. 研究の目的

(1)本研究の目的は、これまでに開発されたマグネット技術を一般化し、100T 領域の精密物性研究を実施する事である。

(2)また、精密物性測定のための磁場発生領域を拡大するために新しくマグネットを開発し、100T の発生を目指す。

(3)さらに、様々な物性測定手法にパルス強磁場を導入するために新規デザインのマグネット開発を行い、研究領域の拡大を目指す。

3. 研究の方法

(1)これまでに開発されたマグネットを東大と阪大の強磁場施設に設置し、既設電源を用いて 100T 領域の精密物性研究を推進する。

(2)100T の発生を目指したマグネット開発には東大の強磁場施設で二台のコンデンサ電源を用い、並列放電による二段パルス方式での実現を狙う。

(3)強磁場を用いた研究領域の拡大には、本特定領域研究内の他班との連携により研究を進める。

4. 研究成果

(1)放射光 X 線を用いた回折実験を強磁場下で行うためにマグネット開発を行った。SPring-8 における実験のためのマグネットは、X 線の回折角が十分に取れるようにスプリットペア型の開発から始めた。当初は 250kJ のコンデンサ電源を使用し、磁場発生時間は 5 ミリ秒程度であったものの 40T の磁場が発生出来、いくつかの回折実験に成功した。ここで原理的に大きな問題はなかったため、さらなる精密測定を目指し、マグネットのロングパルス化を進めた。まず電源を 500kJ に増強し、そのエネルギーに見合ったコイルの多層化を行うことで、パルス幅を 25 ミリ秒にまで延ばすことに成功した。パルス幅が約 5 倍になったため信号の検出効率も約 5 倍になり、精密測定には大きく寄与している。このマグネットは安定して 40T を発生する事が出来るため、現段階で標準型として使用されており、今後も重大な成果をあげ続けると期待できる。この測定システムは世界に先駆けて完成し、現在も最高の性能を誇る物

である。

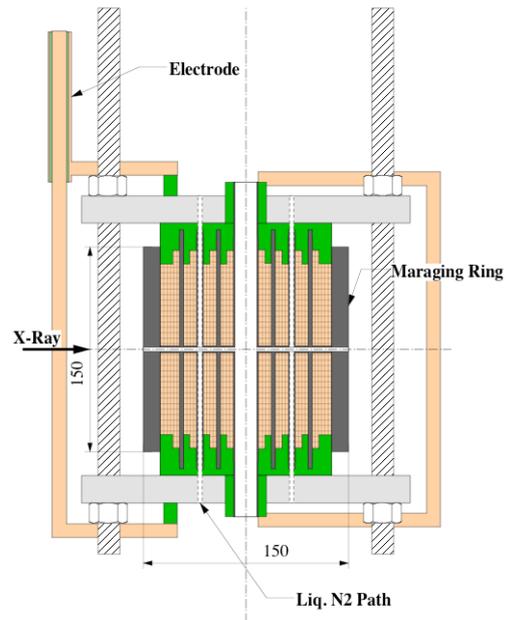


図 1 X 線回折実験用スプリットペア型パルスマグネットの断面図

(2) SPring-8 での回折実験の次のステップとして XMCD 実験に用いるためのマグネットの開発を開始した。このマグネットはソレノイド型が使用可能なため磁場発生には有利であるが、マグネットを設置するクライオスタット内のスペースと投入可能なエネルギーに制約があるため、如何に効率の良いコイルを作るかがポイントである。現状では、60T までの実験に実績のある型式をベースとしたマグネットをプロトタイプとして作り、予備実験に成功している。また、このソレノイド型マグネットは「J-PARC におけるパルス中性子源を用いた実験」に用いるためにも設置されており、今後の成果が期待できる。

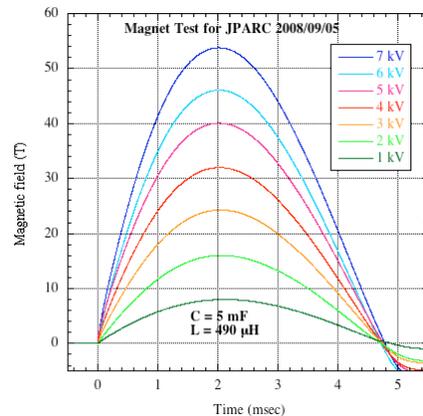


図 2 XMCD および J-PARC 用に開発したマグネットの磁場波形

(3) ESR および NMR を行うためのマグネット開発を行った。ESR を 70T まで測定可能にするためマグネットの安定化を目指した R&D を実施し、答えが得られた。それは内部補強した 10 層コイルであり、70T の磁場が 100 ショット程度発生可能である事が分かった。また NMR のプローブはある程度の大きさのマグネット内径を必要とし、測定はロングパルスが必要とすることから、内径 22mm の 17 層コイルを開発することにより、約 50T までの測定が可能となった。しかしながら、測定にはパルス幅が長いほど都合が良いため、本研究テーマで培われた技術を東大において進行中の超ロングパルス磁場計画に取り入れる事により、究極の強磁場 NMR の研究開発を目指す。

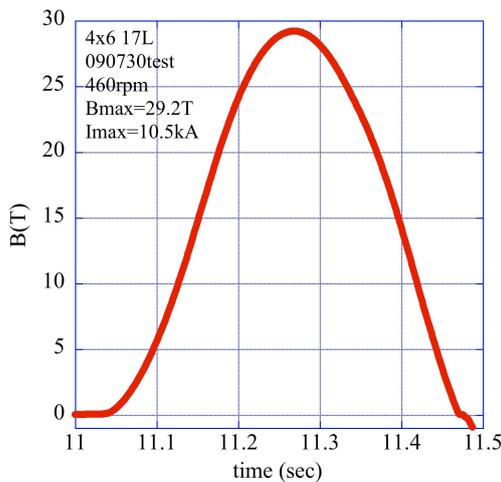


図 3 強磁場 NMR を実施する予定のロングパルス磁場波形

(4) マルチパルス法による 100T の発生に向けた開発の第一段階として、2 段パルス法による 85T 程度の磁場発生に成功した。この実験から得られた最も重要な成果は、外コイルの発生した約 75T の磁場下で内コイルは 10T もの磁場を発生する事が出来た点であり、この事から 4 段のパルスを組み合わせる事により 100T の発生が現実のものになると考えられる。4 段のパルス方式を実現するためにはコンデンサ電源の整備が必要となるため時間がかかっていたが、ようやく電源の整備が完了したため近日中にモデルコイルによる磁場テストを実施する予定である。また、上述した NMR 実験を実施するための超ロングパルスマグネットの電源となるフライホイール付き直流発電機の整備も完了しており、パルス幅が 1 秒程度の超ロングパルス磁場の発生に成功している。ロングパルス磁場は本研究テーマが目指す精密物性測定には相性が良く、従来のパルス磁場で実施している輸送現象測定などの格段の精密化が図れるだけでなく、NMR や比熱測定といった従来のパルス磁場で

は困難であった測定が可能となるため、物性研究に新たな展開をもたらす物と期待している。こちらは当面の目標発生磁場は 55T を目指しているが、上述のマルチパルス法の外コイル用電源としてこれを用いることにより、より高い磁場での測定にも対応可能とする予定である。

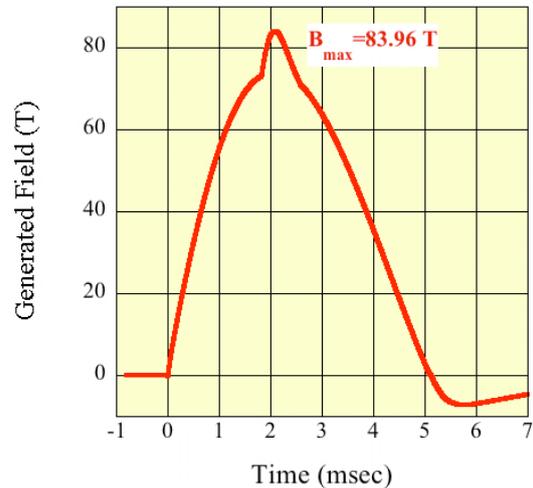


図 4 二段パルス方式による磁場波形

(5) 磁気媒介超伝導体 CeIn_3 における強磁場電子状態の解明に成功した。 CeIn_3 のフェルミ面は、ブリルアンゾーンの 15% 程度を占めるだけの d ブランチと呼ばれる球状フェルミ面が主たるものである。この d ブランチは球状だが、有効質量が異方的なため特異なフェルミ面である。一方、 CeIn_3 の参照物質である LaIn_3 では、ブリルアンゾーンの約 40% を占める a ブランチと呼ばれるフェルミ面が主たるものであり、 CeIn_3 のフェルミ面は LaIn_3 のものと非常に異なっている。 CeIn_3 の反強磁性体秩序による磁気周期性を取り入れたバンドの折りたたみを考慮しても、 CeIn_3 と LaIn_3 のフェルミ面が全く異なる理由が約 15 年間解らなかつた。このフェルミ面の決定的違いは、 CeIn_3 の超伝導が出現する原因と密接に関連しており、(1) SDW 理論をもとにしたフェルミ面形成の解釈の妥当性、(2) 磁気相図の決定、(3) 磁気相図とフェルミ面の変化を対応させることの 3 点が、本研究期間中に可能となって解明された。特に、4f 電子のキャラクターを強く負う小さなフェルミ面 (ブリルアンゾーンの数%) の発見と、その磁場変化を捉えたことが、磁気媒介超伝導発現への 4f 電子の寄与を強く示唆する結論を得ることにつながった。

(6) パルス強磁場下における高速偏光顕微鏡観察システムを開発した。偏光顕微鏡は双晶構造を検出する際に有効な道具である。強磁場下で偏光顕微鏡観察を行う事で、ある種の磁場誘起構造相転移による結晶の対称性の変

化を直接的に検出する事が可能になる。本研究で開発したシステムでは、35T まで発生可能な小型パルスマグネットの中心におかれた試料を偏光顕微鏡で観察し、パルス磁場下の瞬間的な画像の変化を高速度カメラで撮影する。磁場のパルス幅約5 ミリ秒に対して、通常は5,000 から10,000 フレーム/秒の速さで撮影を行う。高速度カメラは12 ビットの垂直分解能を持っているため得られた画像を定量的に評価する事も可能である。この装置を用いて層状マンガン酸化物 $\text{La}_{1/2}\text{Sr}_{3/2}\text{MnO}_4$ の磁場中偏光顕微鏡観察を行ったところ、電荷軌道秩序の磁場融解現象を明瞭に検出する事に成功した。

(7) YbB_{12} はギャップの大きさが200 K という近藤半導体の代表例である。このギャップ形成機構を、Lu置換という新たな置換量パラメータを導入し、 $\text{Yb}_{1-x}\text{Lu}_x\text{B}_{12}$ でのギャップの微細な構造変化とその磁場応答を、磁化、磁気抵抗、ホール効果の測定を通じて調べ、ギャップ形成の起源を明らかにした。(公募)

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 205 件)

(1) 学術雑誌

- ①. Magnetic and Fermi Surface Properties of CePd_5Al_2 and PrPd_5Al_2 , Y. Nakano, F. Honda, T. Takeuchi, K. Sugiyama, M. Hagiwara, K. Kindo, E. Yamamoto, Y. Haga, R. Settai, H. Yamagami, Y. Onuki, J. Phys. Soc. Jpn., 79 (2010) 024702(9), 査読有り
- ②. Field Induced Spin-State Transition in LaCoO_3 , K. Sato, A. Matsuo, K. Kindo, Y. Kobayashi, K. Asai, J. Phys. Soc. Jpn., 78 (2009) 093702(4), 査読有り
- ③. High-field magnetization of $\text{SrMn}_3\text{P}_4\text{O}_{14}$ exhibiting a quantum-mechanical magnetization plateau and classical magnetic long-range order, M. Hase, T. Yang, R. H. Cong, J. H. Lin, A. Matsuo, K. Kindo, K. Ozawa, H. Kitazawa, Phys. Rev. B, 80 (2009) 054402(5), 査読有り
- ④. Evidence of spin singlet ground state in the frustrated antiferromagnetic ring Cr_8Ni , Y. Furukawa, K. Kikuchi, K. Kumagai, Y. Ajiro, Y. Narumi, M. Iwaki, K. Kindo, A. Bianchi, S. Carretta, P. Santini, F. Borsa, G. A. Timco, R. E. P. Winpenny, Phys. Rev. B, 79 (2009) 134416(7), 査読有り
- ⑤. Field Induced Lattice Deformation in the Quantum Antiferromagnet $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$, Y. Narumi, N. Terada, Y. Tanaka, M. Iwaki, K. Katsumata, K. Kindo, H. Kageyama, Y. Ueda, H. Toyokawa, T. Ishikawa, H. Kitamura, J. Phys. Soc. Jpn., 78 (2009) 043702(4), 査読有り
- ⑥. Observation of Half-Integer Quantum Hall Effect in Single-Layer Graphene Using Pulse Magnet, S. Masubuchi, K. Suga, M. Ono, K. Kindo, S. Takeyama, T. Machida, J. Phys. Soc. Jpn., 77 (2008) 113707(4), 査読有り
- ⑦. Topological effects on the magnetic properties of closed and open ring-shaped Cr-based antiferromagnetic nanomagnets, Y. Furukawa, K. Kiuchi, K. Kumagai, Y. Ajiro, Y. Narumi, M. Iwaki, K. Kindo, A. Bianchi, S. Carretta, G. A. Timco, R. E. P. Winpenny, Phys. Rev. B, 78 (2008) 092402(4), 査読有り
- ⑧. Multistep magnetization plateaus in the Shastry-Sutherland system TbB_4 , S. Yoshii, T. Yamamoto, M. Hagiwara, S. Michimura, A. Shigekawa, F. Iga, T. Takabatake, K. Kindo, Phys. Rev. Lett., 101 (2008) 087202(4), 査読有り
- ⑨. Magnetic-field-induced quantum oscillation in $\text{h-Mo}_4\text{O}_{11}$, K. Suga, A. Ohnishi, M. Koyano, M. Sasaki, K. Kindo, J. Phys. Soc. Jpn., 77 (2008) 074605(6), 査読有り
- ⑩. Novel ordering of an $S=1/2$ quasi-1D Ising-like antiferromagnet in magnetic field, S. Kimura, T. Takeuchi, K. Okunishi, M. Hagiwara, Z. He, K. Kindo, T. Taniyama, M. Itoh, Phys. Rev. Lett., 100 (2008) 057202, 査読有り
- ⑪. Field-induced order-disorder transition in antiferromagnetic $\text{BaCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$ driven by a softening of spinon excitation, S. Kimura, H. Yashiro, K. Okunishi, M. Hagiwara, Z. He, K. Kindo, T. Taniyama, M. Itoh, Phys. Rev. Lett., 99 (2007) 087602, 査読有り
- ⑫. Correlation between crystal structure and magnetism in the frustrated antiferromagnet CuFeO_2 under high magnetic fields, N. Terada, Y. Narumi, Y. Sawai, K. Katsumata, U. Staub, Y. Tanaka, A. Kikkawa, T. Fukui, K. Kindo, T. Yamamoto, R. Kanmuri, M. Hagiwara, H. Toyokawa, T. Ishikawa, H. Kitamura, Phys. Rev. B, 75 (2007)

- 224411, 査読有り
- ⑬. Metamagnetic transition to poor conductor in BaVS_3 , Y. Narumi, K. Suga, K. Kindo, T. Yamasaki, M. Shiga, H. Nakamura, J. Phys. Soc. Jpn., 76 (2007) 013706, 査読有り
- ⑭. Observation of higher-harmonic helical spin-resonance modes in the chromium spinel CdCr_2O_4 , S. Kimura, M. Hagiwara, H. Ueda, Y. Narumi, K. Kindo, H. Yashiro, T. Kashiwagi, H. Takagi, Phys. Rev. Lett., 97 (2006) 257202, 査読有り

[学会発表] (計 413 件)

(1)国際会議招待講演

- ①. High-field Multi-frequency ESR Studies on Quantum and Geometrically Frustrated Spin Systems, M. Hagiwara, S. Kimura, H. Yamaguchi, T. Kashiwagi, K. Kindo, Electron Magnetic Resonance of Strongly Correlated Spin Systems (EMRSCS2009), 11.8-11.9 (2009) Kobe, Japan
- ②. Development of Multi-Extreme High Frequency ESR Measurement System and Its Application, H. Ohta, E. Ohmichi, S. Okubo, T. Sakurai, M. Fujisawa, 51st Rocky Mountain Conference on Analytical Chemistry, 7.19-7.23 (2009) Colorado, USA
- ③. Hidden Order and Field-Induced Quantum Criticality in URu_2Si_2 - Rh-Substitution Effects, H. Amitsuka, APCTP Winter Workshop on Strongly Correlated Electron Systems, 2.5-2.11 (2007) Pohang, Korea
- ④. New Pulsed Magnets for 100T, Long-Pulse and Diffraction Measurements, K. Kindo, Yamada Conference LX on Research in High Magnetic Fields (RHMF 2006), 8.16-8.19 (2006) Sendai, Japan

(2)国際会議一般講演

- ①. Multi-step Magnetization Process and Long-range Magnetic Interaction in $\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x\text{B}_4$, F. Iga, K. Murakami, S. Michimura, T. Takabatake, K. Takeda, K. Suga, K. Kindo, 9th International Conference on Research in High Magnetic Fields (RHMF 2009), 7.22-7.25 (2009) Dresden, Germany
- ②. High Frequency ESR Measurements on the Spin Crossover Complex $[\text{MnIII}(\text{taa})]$, S. Kimura, M. Hagiwara, Y. Narumi, M. Nakano, K. Kindo, International

Conference on Magnetism 2009, 7.26-7.31 (2009) Karlsruhe, Germany

- ③. High Frequency High Field ESR Measurement System using a Pulsed Magnetic Field up to 55T, H. Ohta, S. Okubo, E. Ohmichi, T. Sakurai, M. Fujisawa, M. Tomoo, K. Kindo, Y. Uwatoko, 6th International Conference on Physical Phenomena in High Magnetic Fields (PPHMF-VI), 8.1-8.6 (2008) Tallinn, Estonia
- ④. X-Ray Diffraction Studies in Pulsed High Magnetic Fields, Y. Narumi, K. Kindo, K. Katsumata, M. Kawauchi, Ch. Broennimann, U. Staub, H. Toyokawa, Y. Tanaka, K. Kikkawa, T. Yamamoto, M. Hagiwara, T. Ishikawa, H. Kitamura, Yamada Conference LX on Research in High Magnetic Fields, 8.16-8.19 (2006) Sendai, Japan

(3)国内会議招待講演

- ①. 強磁場中性回折装置の開発とフラストレーション磁性体への応用、鳴海康雄、野尻浩之、大山研司、保井基良、吉居俊輔、岡田郷子、中島健次、前川藤夫、及川健一、原田正英、金道浩一、満田節生、木村剛、第1回MLFシンポジウム 3.29-31 (2010) いばらき量子ビーム研究センター、東海村
- ②. 反強磁性リングクラスター化合物の強磁場磁化過程とトポロジー効果、鳴海康雄、古川裕次、熊谷健一、網代芳民、金道浩一、A. Lascialfari, F. Borsa, G. A. Timco, R. E. P. Winpenny、第3回東北大学 G-COE 研究会「金属錯体の固体物性科学最前線」 12.18-12.20 (2009) 東北大学、仙台市
- ③. ペロフスカイト型マルチフェロイック酸化物における強磁場誘起相転移、徳永将史、第48回電子スピンスイエンソ学会年会 (SEST 2009) 11.10-11.12 (2009) 神戸大学 百年記念館六甲ホール、瀧川学術交流会館、神戸市
- ④. MEMS と物理：精密計測のフロンティア、大道英二、京都大学低温物質科学研究センター・第6回講演会 3.5 (2007) 京都大学、京都市

(4)国内学会発表

- ①. 鳴海康雄、 BaVS_3 の強磁場 X 線回折、日本物理学会、2010年3月22日、岡山大学
- ②. 吉澤正人、パルス磁場を用いた TbB_4 の弾性定数測定、日本物理学会、2010年3月22日、岡山大学
- ③. 長谷正司、量子磁化プラトーとフェリ磁

- 性秩序が共存する $\text{SrMn}_3\text{P}_4\text{O}_{14}$ の高磁場磁化測定、日本物理学会、2009年9月26日、熊本大学
- ④. 中村哲也、パルス強磁場下での軟 X 線 MCD 測定技術の開発、日本物理学会、2009年9月27日、熊本大学
 - ⑤. 松尾晶、フライホイール付き大型直流発電機を使った強磁場発生、日本物理学会、2009年9月28日、熊本大学
 - ⑥. 岡田郷子、J-PARC における強磁場中性子回折実験、日本物理学会、2009年9月28日、熊本大学
 - ⑦. 片倉稲子、パルス強磁場下における高速偏光イメージングシステムの開発とその応用、日本物理学会、2009年9月28日、熊本大学
 - ⑧. 武田健一、パルス強磁場下における $\text{Yb}_{1-x}\text{Lu}_x\text{B}_{12}$ のホール抵抗、日本物理学会、2009年9月28日、熊本大学
 - ⑨. 木村尚次郎、擬一次元 Ising 型反強磁性体 $\text{BaCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$ の強磁場中放射光 X 線回折、日本物理学会、2009年3月27日、立教大学
 - ⑩. 佐藤桂輔、 LaCoO_3 における強磁場誘起スピン転移、日本物理学会、2009年3月27日、立教大学
 - ⑪. 菅健一、ホール効果に見る近藤半導体 YbB_{12} の磁場誘起半導体-金属転移、日本物理学会、2008年9月20日、岩手大学
 - ⑫. 鳴海康雄、 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ の強磁場磁性と格子変形、日本物理学会、2008年9月20日、岩手大学
 - ⑬. 木村尚次郎、60 テスラパルスマグネットを用いたテラヘルツ ESR、日本物理学会、2008年9月21日、岩手大学
 - ⑭. 友尾水樹、55T 級パルスマグネットを用いた強磁場 ESR 測定装置の開発、日本物理学会、2006年9月25日、千葉大学
 - ⑮. 福井智哉、X 線回折実験用ロングパルスマグネットの開発、日本物理学会、2006年9月25日、千葉大学

[解説] (計2件)

- ①. 非破壊型パルスマグネットの開発、金道浩一、固体物理 **44** (2009)pp905-911, アグネ技術センター
- ②. マイクロカンチレバーを用いた高周波電子スピン共鳴法の開発、大道英二他4名、固体物理 **44** (2009)pp453-462, アグネ技術センター

[その他]

- (1) ホームページ等
<http://spin100.imr.tohoku.ac.jp/>
- (2) 受賞など
- ①. テラヘルツ ESR に向けたカンチレバー

- ESR 測定法の開発、大道英二、第5回日本赤外線学会奨励賞、2009.6.5
- ②. マイクロカンチレバーを用いた微小磁気トルク測定法の開発と物性研究への応用、第3回日本物理学会若手奨励賞、2009.3.30
 - ③. カンチレバーによる磁気トルクの測定法の開発、第3回分子性導体チャレンジャー賞、2008.1.9
 - ④. J. Phys. Soc. Jpn. Papers of Editor's choice, Universal Scaling in the Dynamical Conductivity of Heavy Fermion Ce and Yb Compounds by T. Ebihara 他11名、J. Phys. Soc. Jpn., **76** (2007) 023703, 1-5
- (3) 新聞報道など
- ①. 「希土類化合物に新知見」、科学新聞、2007.2.3
 - ②. 「結晶中の原子位置 磁場で段階的に変化 理研など観測に成功」、日刊工業新聞、2006.11.10

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金道 浩一 (KINDO KOICHI)
 東京大学・物性研究所・教授
 研究者番号: 20205058

(2) 研究分担者

長田 俊人 (OSADA TOSHIHITO)
 東京大学・物性研究所・准教授
 研究者番号: 00192526

徳永 将史 (TOKUNAGA MASASHI)
 東京大学・物性研究所・准教授
 研究者番号: 50300885

大道 英二 (OHMICHII EIJI)
 神戸大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号: 00323634

網塚 浩 (AMITSUKA HIROSHI)
 北海道大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号: 40212576

海老原 孝雄 (EBIHARA TAKAO)
 静岡大学・理学部・准教授
 研究者番号: 20273162

北澤 英明 (KITAZAWA HIDEAKI)
 独立行政法人物質・材料研究機構・量子ビームセンター・グループリーダー
 研究者番号: 00195257

杉山 清寛 (SUGIYAMA KIYOHIRO)
 大阪大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号: 00187676

(3) 連携研究者

なし