特集 —— 高温超伝導体の新潮流——鉄系新超伝導体 --

鉄系新高温超伝導体の電気抵抗と 帯磁率の圧力効果

Pressure Effect on Electrical Resistivity and Magnetic Susceptibility of Newly Discovered Iron-based High T_c Superconductors

高橋 博樹* 岡田 宏成

Hiroki TAKAHASHI* Hironari OKADA

Electrical resistivity and magnetic susceptibility measurements under high pressure were performed on ironbased superconductor LaFePO and LaFeAsO_{1-x} F_x system. A steep increase in superconducting transition temperature (T_c) was observed for LaFePO and LaFeAsO_{1-x} F_x . Pressure-induced superconductivity was confirmed in undoped LaFeAsO and SrFe₂As₂ by electrical resistivity measurements under high pressure. X-ray diffraction measurements were also performed under high pressure up to 10 GPa for LaFePO, LaNiAsO and LaFeAsO_{1-x} F_x system, where the anisotropic decreases of the lattice constants were observed with applying pressure. Recent advance in the high pressure reserches for iron-based high T_c superconductors are also presented. [*electrical resistivity, magnetic susceptibility, piston-cylinder, cubic anvil, diamond anvil cell, superconductivity,*

[erectrical resistivity, magnetic susceptionity, piston-cylinder, cubic anvit, diamond anvit cen, superconduct x-ray diffraction, iron-based superconductor]

1. はじめに

鉄系新高温超伝導体は 2008 年 2 月に東京工業大 学の細野グループが LaFeAsO_{1-x}F_x で $T_c = 26 \text{ K}$ の超 伝導を発見したことをきっかけに[1],世界中の注 目が集まり、固体物理学の分野では1986年の銅酸 化物超伝導体発見当時を思わせる異様な熱気に包ま れている。我々のグループでは、1986年の銅酸化 物超伝導体発見当初よりこれまで, 高圧力技術を用 いた各種物性測定を行うことにより、高温超伝導の 研究に大きくかかわってきた[2]。電気抵抗をはじ め,帯磁率,ホール係数,磁気抵抗,X線回折, 中性子線回折などの物性測定を,より高い圧力で, より精密に測定を行うため、装置開発も含め、研究 を進めてきた。銅酸化物では母物質に対する元素置 換効果によりキャリアがドープされ超伝導が発現す る。1つの物質に対して、ドープ量と超伝導転移温 度 T_cの関係から,アンダードープ,最適ドープ, オーバードープと呼ばれ,最適ドープで*T*。は最大 値をとる。また、銅酸化物超伝導体の結晶構造は層 状構造であり、圧力に対し結晶は面内よりも面間方 向に大きく圧縮される性質を示すことから、圧力下 では電荷分布が変化し, 伝導面に対しキャリアドー プと同様の効果をもたらすと考えられている。実際, アンダードープの状態に圧力を加えると電気伝導の 主役である Cu-O 面にキャリアがドープされ T_cは 上昇する。一方,最適ドープ,オーバードープの状 態に対しては、T_cが圧力に対して減少することが 観測されている。高圧下のホール係数測定からは、 キャリア濃度が高圧下で増加することが確認されて おり、元素置換によるキャリアドープと圧力効果の 関連性について指摘されてきた[2]。また,理論的 に超伝導が予測されていたスピンラダー酸化物 Sr_{14-x}Ca_xCu₂₄O₄₁は,元素置換による超伝導化が難 しく、圧力により伝導面(ラダー面)の電荷濃度を 変化させることにより、銅酸化物では唯一、圧力下 でのみ超伝導が発現している[3]。このように圧力 は物質の電子状態を大きく変化させるパラメータで

〒156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40 日本大学文理学部 物理学科 College of Humanities and Sciences, Nihon University, 3-25-40 Sakurajosui, Setagaya-ku, Tokyo 156-8550

^{*} Electronic address: hiroki@chs.nihon-u.ac.jp

あり、常圧で最も高い T_c (134 K) を持つ Hg 系銅酸化物 HgBa₂Ca₂Cu₃O₈ では約 30 GPa 加圧することによりさらに高い 164 K まで T_c が増加することが報告されている[4]。

2006年、東京工業大学の細野グループにより、 鉄をベースとした LaFePO で超伝導を示すことが 報告された[5]。T_cは5~7Kと,さほど高くない が、銅酸化物と同様に層状の結晶構造をとることか ら, 圧力下での異方的圧縮により, 電子状態が大き く変化し、T。が上昇するのではないかということ が期待され、細野グループと共同で高圧実験をス タートした。高圧実験の結果,T。が大きく上昇す ることが観測され、再現性の確認やデータの精密化 を進めていたところ,2008年2月に,細野グルー プは同じ結晶構造を持つ LaFeAsO_{1-x} F_x が $T_c = 26$ K の超伝導を示すことを発表した[1]。それまでの経 緯から,我々のグループではいち早く LaFeAsO_{1-x} F_x の圧力効果の測定を開始し、高圧下で T_c が1気 圧の 26 K から銅酸化物を除いて最高の 43 K まで上 昇することを発見した[6]。その後,異なる結晶構 造を持つ鉄系超伝導体がいくつか発見され、結晶構 造と組成比とから1111型,122型,11型,111型 と分類されている。LaFeAsO_{1-r}F_r および LaFePO は1111型である。いずれもアニオンが4面体的に 配位した鉄またはニッケルの正方格子が基本になっ て超伝導が発現している。本稿では我々の研究を中 心に、最初に発見された1111型、続いて発見され た122型を中心に実験結果を紹介する。

1111 型超伝導体の圧力効果

2.1 LaFeAsO_{1-x} F_x

LaFeAsO_{1-x}F_x は c 軸方向に (La³⁺O²⁻)⁺ 層 と (FeAs)⁻ 層が交互に積層した層状構造をとり,元 素置換された (La³⁺O²⁻)⁺ 層から (FeAs)⁻ 層に電 子が移動し超伝導を示す。層状構造を示し,電子構 造も 2 次元的であることや,伝導面に他の層から電 荷が供給 (ドープ) されることなど,銅酸化物超伝 導体との類似点は多いが,鉄の電子状態やノンドー プ (母物質)の非超伝導体の磁性などを考慮すると 本質的な相違点が多く,全く新しい電子状態が実現 している可能があり,物質についての「新概念」の 誕生および「材料」としての有効性の見地から大き な注目が集まっている。LaFeAsO_{1-x}F_xの T_c は, F ドープに応じて,非超伝導 (x = 0), $T_c = 23$ K の



Fig. 1. Electrical resistivity of $LaFeAsO_{0.89}F_{0.11}$ for each pressure. (ref.6)

「アンダードープ」(x = 0.05), $T_c = 26 \text{ K}$ の「最適 ドープ」 (x=0.11), $T_{c}=19 \text{ K} O [オーバードープ]$ (x=0.14) といったように、台形型の変化を示す[1]。 Fig. 1 に「最適ドープ」(*x*=0.11)のダイヤモンド アンビルセル(DAC)を用いた電気抵抗の温度変 化を各圧力に対して示す[6]。試料は細野グループ により焼結法で合成された多結晶[1,6]であり、高 圧下の電気抵抗測定は3GPa以下は多層型 NiCrAl 製シリンダー, 31 GPa までは DAC を用いた。ク ランプ式ピストンシリンダー装置には圧力媒体とし てフロリナート(FC70: FC77=1:1の混合液)を 用い, 直流4端子法で電気抵抗測定を行った。一方, ダイヤモンドアンビルセルには先端径 ¢0.5 mm の ダイヤモンドアンビルを用い、レニウム板をガスケ ット, NaCl を圧力媒体とし、白金箔を4端子とし て直流電気抵抗測定を行った。電気的絶縁には BN パウダーを用いた。T_cは Fig. 1 に矢印で示すよう に,超伝導転移温度直上と直下にフィッティングさ せて引いた直線の交点をオンセット T_cとして定義 した。T_cは圧力に対し非常に大きく上昇し、4GPa で43Kという銅酸化物超伝導体を除き、その時点 での最高温度まで上昇することを確認した。T.の 増加率の最大値は約8K/GPaであり、銅酸化物超 伝導体の T_cの圧力効果が 1~2 K/GPa であること を考えると、非常に大きく、また銅酸化物超伝導体 での最適ドープの状態に圧力を加えた場合に T_cが 減少するという性質とは異なる傾向を示しているこ とから、圧力効果のメカニズムについて銅酸化物超 伝導体との相違が示唆される。低圧部分のT。の急 上昇については、高圧下の帯磁率の測定結果でも dT_c/dP がほぼ等しい値を示すことを確認した。高



Fig. 2. Superconducting phase diagram for LaFeAsO_{1-x} F_x .

圧下の帯磁率測定は、Cu-Be 製ピストンシリン ダーセルを用い, SQUID (カンタムデザイン社 MPMS) マグネトメーターを用いて測定を行った。 「アンダードープ」(x = 0.05),「オーバードープ」 (x=0.14) についても同様に高圧下で電気抵抗測定 を行い, 求めた T_cを Fig. 2 に示した[6,7]。両者と も「最適ドープ」と同様に圧力に対し T_cは上昇し, 最大値を経てゆっくりと減少するという結果であっ た。「アンダードープ」(x=0.05)の T_c は酸化物超 伝導体の場合と同様に圧力に対し上昇するという現 象がみられた。「最適ドープ」x=0.11の最大値と 同程度まで Tc が上昇することが期待されたが,高 圧下のT_cの最大値は29K程度であり、かなり低く 抑えられている。一方,「オーバードープ」(*x*= 0.14)のT_cは高圧下でx=0.11の最大値と同じ43 Kまで大きく上昇しており、これは銅酸化物超伝導 体のオーバードープと正反対の圧力効果であり、ま た T_cの増加率は最も大きく, 圧力効果について銅 酸化物超伝導体との相違が顕著である。

アンドープ(x=0.0)は非超伝導で,150 K 付近 に急な電気抵抗減少を伴う構造相転移と磁気転移が 報告されている。Fig. 3 に電気抵抗の温度変化を各 圧力に対し示す[8]。電気抵抗の温度微分がピーク を示す温度 T_0 が1気圧で145 K であり,NMR 測 定から報告されている磁気転移温度の142 K にほぼ 等しいことから, T_0 を磁気転移温度に対応してい ると考えた。この転移に伴う電気抵抗の急激な減少 は,圧力増加に従ってなだらかになり, T_0 は圧力 で大きく抑制される。さらに,この転移とは別に 1.5 GPa 以上の圧力で,低温部で抵抗の急激な減少 を伴う相転移が観測されている。この転移は圧力増 加と共に顕著となり,12 GPa ではゼロ抵抗を示す。 この転移温度以下で磁場印加による電気抵抗の増加,



Fig. 3. Electrical resistivity of undoped LaFeAsO for each pressure.

電流増加による電気抵抗の増加,交流帯磁率測定に よる反磁性がそれぞれ観測されていることから,超 伝導転移であると判断した。1111 型物質で最初に 見つかった圧力誘起超伝導である。Fig. 2 に示すよ うに x=0 の T_c も他の物質と同様に圧力で上昇し, 最大値を経てさらに圧力で減少するが, T_c の最大 値は最も低く約 21 K であった。x=0 の T_c の最大 値が低い温度に抑えられているのは,圧力で誘起さ れた超伝導相が磁性相 (SDW 相) とオーバーラッ プしているためかもしれない。そう考えると,「ア ンダードープ」の物質で T_c の最大値が x=0.11 や x=0.14 より低く抑えられているのは,磁性相に近 接していることがその理由の一つかもしれない。

LaFeAsO_{1-x}F_xの T_c の大きな圧力効果から,Fe-As の原子間距離を縮めると T_c が高くなるというこ とが予想され,このことは物質開発の重要な指針と なる。実際に,Laよりイオン半径の小さなSmを 用いたSmFeAsO_{1-x}F_x[9]や,同様にイオン半径の 小さなNdを用い,Oに欠損を与えて電子ドープを 行ったNdFeAsO_{1-x}F₁[10]では50Kを越える超伝導 が報告され,多くの研究者に衝撃を与えた。我々の グループでは T_c が52KのSmFeAsO_{0.9}F_{0.1}につい て,高圧下で電気抵抗測定を行い T_c の圧力効果を 調べたところ, T_c は1.5GPaまでの圧力で 6K/GPaの割合で大きく減少する傾向が見られた。 この結果はSmFeAsO_{1-x}F_x[11]やNdFeAsO_{1-x}[12] に対して他のグループによって報告されているもの

このファイルの頒布は著者およびその所属機関に限って許諾されています。



Fig. 4. Superconducting phase diagram for LaFePO.

と定性的に一致しており、これら 50 K を超える T_c をもつ物質の電子状態は、LaFeAsO_{1-x}F_xの $T_c(P)$ の最大値を超えた圧力の状態に対応しているのかもしれない。これらの結果から、1111 型物質では、現在得られている最高の超伝導転移温度 56 K が上限であるように思われる。

2.2 LaFePO

LaFeAsO と同じ結晶構造を持つ LaFePO は T_c が 4~7Kの超伝導体であり、構造相転移、磁気転 移は報告されていない[5,13]。圧力は 1.5 GPa 以下 はピストンシリンダー装置で、それ以上の圧力は DAC を用いて電気抵抗測定を行った。LaFeAsO_{1-x} F_x と同じ方法で決定した T_c の圧力依存性を Fig. 4 に示す[14]。 T_c は約 4.0 K/GPa の割合で増加し、 0.8 GPa で最大値 8.8 K をとり、さらに高い圧力で は減少している。 T_c の圧力効果は LaFeAsO_{1-x}F_xの 場合と傾向は同じであるが、LaFePO での低圧側で の T_c の上昇が高圧側の T_c の減少に比べ非常に急激 である。このことについて詳しく調べるために、現 在、Fドープした LaFePO について高圧下で電気 抵抗測定を行っている。

LaFePO と LaFeAsO_{1-x} F_x の結晶構造の圧力効果 について、KEK-PF, BL-18C で X 線回折実験を行 った[7,14]。DAC を用い圧力媒体はメタノール: エタノール=4:1 である。体積および a 軸, c 軸の 圧縮曲線を求め、Table 1 にこれらの圧縮率をまと めた。これらの値は代表的な銅酸化物超伝導体 YBa₂Cu₃O_{7-y}[15]や HgBa₂CaCu₂O_{6+δ}[16]と同程 度の大きさである。また、c 軸は a 軸に比べ圧力に 対し約 2 倍ほど圧縮されやすいことから、電荷分布 が圧力で大きく変化していることを示唆している。 また、LaFeAsO の単位格子 (0.142 nm³) は F をドー



Fig. 5. Superconducting phase diagram for LaNiXO (X = P, As).

Table 1. Linear compressibilities, compressibility and bulk modulus for $LaFeAsO_{1-x}F_x$, LaFePO and LaNiPO.

	LaFeA $x = 0.05$	$sO_{1-x}F_x$ x=0.11	LaFePO	LaNiPO
$\kappa_{a} (10^{-3} \mathrm{GPa^{-1}})$	3.52	3.98	2.74	3.1
$\kappa_{\rm c} (10^{-3} {\rm GPa^{-1}})$	7.42	7.25	4.95	4.8
$\kappa (10^{-3} \mathrm{GPa^{-1}})$	14.4	15.1	10.4	11.0
B ₀ (GPa)	70	66	96	91
B'_0	7.1	7.0	3.5	5.2

プすることによりドープ量に比例して減少するが, 5%のドープを行ったときの体積の減少は,圧力下 では0.3 GPaでの体積の減少に対応している。

2.3 LaNiXO (X=P, As)

1111 型の構造を持つ物質では Fe のみならず Ni をベースとした LaNiPO, LaNiAsO で超伝導がそ れぞれ T_c =2.68 K, T_c =2.34 K で報告されている [17]。Fig. 5 に多結晶試料についてピストンシリン ダー装置で電気抵抗測定を行って求めた T_c の圧力 効果を示す[18]。圧力に対し T_c はそれぞれ約 1 K/ GPa の割合で増加し, LaNiPO は 1.67 GPa で最大 値をとり, LaNiAsO は 0.75 GPa で最大値をとると いう結果が得られている。LaFeAsO_{1-x}F_x と同じ方 法で行った LaNiPO の高圧 X 線回折実験の結果を Table 1 に示す。

122 型超伝導体の圧力効果

122 型は 1111 型と同様にアニオンが 4 面体的に 配位した鉄またはニッケルの正方格子を基本とした ThCr₂Si₂型の層状構造をもつ物質であり, BaNi₂P₂ において $T_c = 約3 K$ の超伝導が報告された[19]。



Fig. 6. Superconducting phase diagram for SrFe₂As₂.

その後, BaFe₂As₂ に K をドープ (ホールドープ) することで T_c=38Kの高温超伝導が報告された [20]。アンドープの AFe₂As₂ (A = Ca, Ba, Sr) は 1111 型の LaFeAsO と同様に低温で構造相転移,磁 気転移を示し、元素置換でこれらの転移が抑制され 超伝導が発現する。また、高圧下では1111型と同 様に、構造相転移、磁気転移が抑制され、超伝導が 出現する。CaFe₂As₂は高圧下で tetragonal 相から 体積減少を伴って "collapsed tetragonal" 相に転移 し,転移した後に 0.5 GPa で T_c = 13 K の圧力誘起 超伝導を示すことが報告された[21,22]。BaFe₂As₂, SrFe₂As₂では高圧下の帯磁率測定から圧力誘起超 伝導相が見つかり[23], それぞれ 3.3 GPa, 3.0 GPa でT.の最高値 29 K, 27 K を示す。我々のグループ は高圧下の電気抵抗測定を行い, SrFe₂As₂ で最初 にゼロ抵抗を報告した[24]。電気抵抗の温度変化に は LaFeAsO と同じように, 200 K 付近に温度微分 がピークを示す温度 To が観察された。また 1.5 GPa 以上の圧力では、急激な抵抗減少が温度 T*で 観測された。低温での抵抗減少は、圧力とともに顕 著となり、8 GPa では 10 K でゼロ抵抗となった。 電流増加によって,抵抗増加が観測されていること から, T*を超伝導転移温度と考えている。Fig. 6 に T*と T₀の圧力効果を示す。定性的には LaFeAsO と同じ傾向を示している。SrFe₂As₂では Sr を K で置換することで超伝導が発現するが、元 素置換により体積は増加するので、単純に元素置換 と圧力効果を比較することはできない。一方, Kの ドープ量を変化させた物質系で,系統的にT_cの圧 力効果を測定することで、1111とは異なり、アン ダードープでは圧力に対し T_cが上昇,オーバー ドープでは Tc が減少するという結果が報告され,

圧力効果について銅酸化物超伝導体との類似性も指 摘されている[25]。最近 CaFe₂As₂に対し, ヘリウ ムガス圧力を用いた静水圧性が高い圧力の場合には, 圧力誘起超伝導が観測されないと報告されている [26]。超伝導は内部ストレインにより誘起されると いうことが主張されているが, CaFe₂As₂では"collapsed tetragonal"相で超伝導が観測されるという 事情もあることから,構造,磁性,超伝導の相関に ついて今後詳しく調べる必要があると思われる。

4. おわりに

鉄系超伝導の研究は競争が激しく、新物質が見つ かると, 置換効果や物性測定が直ちに行われ, 結果 がインターネットのアーカイブに貼られるという状 況が続いている。1986年の銅酸化物超伝導体の発 見後も同じような雰囲気はあったが、今回はイン ターネットの利用とあいまって、情報の伝達速度が 速く、また、世界中で情報を共有できる状況にある。 鉄系超伝導体の研究では圧力でTcが大きく上昇す ることから, 高圧実験への注目度は大きく, 世界中 のグループが電気抵抗,帯磁率,X線回折,中性 子線回折,NMR, µSR などの測定を高圧下で行い, 次々と新しいデータを報告している。本稿では触れ ることができなかったが、11型[27]や111型[28] の鉄系超伝導体の高圧実験も行われており、興味深 い結果が報告されている。本稿の執筆時点ではまだ, 超伝導メカニズムに関しては結論が出ておらず,T。 の最高値は56Kである。しかしながら、今後、圧 力により大きく物性が変化し、より高い T。を持つ お伝導体が現れることを期待すると同時に、 超伝導 メカニズム解明への情報をはじめ、新物質での圧力 誘起超伝導、新物質合成の指針となるような成果が 圧力実験により数多く出てくることを期待したい。

謝 辞

本研究は神原陽一博士,松石聡助教,平野正浩教 授,細野秀雄教授をはじめとする東京工業大学の細 野グループとの共同研究である。本論を執筆するに 際し,日本大学大学院総合基礎科学研究科の井川一 美,有井一伸,高橋由起の各氏には修士論文の研究 テーマとして重要な成果を出していただきました。 東京大学物性研究所の松林和幸助教,上床美也准教 授にはキュービックアンビルプレスの測定について, 物質・材料研究機構の中野智志博士,高エネルギー 加速器研究機構の亀卦川卓美助教には放射光を利用 した高圧 X 線回折実験についてご助力をいただき ました。ここに深く謝意を表します。また,本研究 の一部は科学技術振興機構 JST, TRIP の補助のも と進められました。

参考文献

- [1] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, H. Hosono: J. Am. Chem. Soc., **130**, 3296 (2008).
- [2] H. Takahashi, N. Mori: *in Studies of High Temperature Superconductors*, ed. A. Narlikar (Nova Science, New York, 1996), Vol. 16, pp. 1–63.
- [3] M. Uehara, T. Nagata, J. Akimitsu, H. Takahashi, N. Mori, K. Kinoshita: J. Phys. Soc. Jpn., 65, 2764 (1996).
- [4] L. Gao, Y.Y. Xue, F. Chen, Q. Xiong, R.L. Meng, D. Ramierz, C.W. Chu, J.H. Eggert, H.K. Mao: Phys. Rev. B, **50**, 4260 (1994).
- [5] Y. Kamihara, H. Hiramatsu, M. Hirano, R. Kawamura, H. Yanagi, T. Kamiya, H. Hosono: J. Am. Chem. Soc., 128, 10012 (2006).
- [6] H. Takahashi, K. Igawa, K. Arii, Y. Kamihara, M. Hirano, H. Hosono: Nature, 453, 376 (2008).
- [7] H. Takahashi, K. Igawa, Y. Takahashi, K. Arii,
 H. Okada, Y. Kamihara, M. Hirano, H. Hosono,
 K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, S. Nakano, T.
 Kikegawa: J. Phys. Soc. Jpn., 77, Supplement C, 78 (2008).
- [8] H. Okada, K. Igawa, H. Takahashi, Y. Kamihara, M. Hirano, H. Hosono, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko: J. Phys. Soc. Jpn., 77, 113712 (2008).
- [9] Z.A. Ren, J. Yang, W. Yi, X.L. Shen, Z.C. Li, G.C. Che, X.L. Dong, L.L. Sun, F. Zhou, Z.X. Zhou: Chin. Phys. Lett., 25, 2215 (2008).
- [10] H. Kito, H. Eisaki, A. Iyo: J. Phys. Soc. Jpn., 77, 063707 (2008).
- [11] B. Lorentz, K. Sasmal, R.P. Chaudhury, X.H. Chen, R.H. Liu, T. Wu, C.W. Chu: Phys. Rev. B, **78**, 012505 (2008).
- [12] N. Takeshita, A. Iyo, H. Eisaki, H. Kito, T. Ito: J. Phys. Soc. Jpn., 77, 075003 (2008).
- [13] Y. Kamihara, M. Hirano, H. Yanagi, T. Kamiya, Y. Saitoh, E. Ikenaga, K. Kobayashi, H. Hosono: Phys. Rev. B, 77, 214515 (2008).
- [14] K. Igawa, H. Okada, K. Arii, H. Takahashi, Y.

Kamihara, M. Hirano, H. Hosono, S. Nakano, T. Kikegawa: to be published in J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 025001 (2009).

- [15] J.D. Jorgensen, P. Shiyou, P. Lightfoot, D.G. Hinks, B.W. Veal, B. Dabrowski, A.P. Paulikas, R. Kleb, I.D. Brown: Physica C, 171, 93 (1990).
- [16] B.A. Hunter, J.D. Jorgensen, J.L. Wagner, P.G. Radaelli, D.G. Hinks, H. Shaked, R.L. Hitterman, R.B. Von Dreele: Physica C, 221, 1 (1994).
- [17] T. Watanabe, H. Yanagi, T. Kamiya, Y. Kamihara, H. Hiramatsu, M. Hirano, H. Hosono: Inorg. Chem., **46**, 7719 (2007).
- [18] H. Okada, Y. Takahashi, K. Igawa, K. Arii, H. Takahashi, T. Watanabe, H. Yanagi, Y. Kamihara, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono, S. Nakano, T. Kikegawa: J. Phys. Soc. Jpn., 77, Supplement C, 119 (2008).
- [19] T. Mine, H. Yanagi, T. Kamiya, Y.Kamihara, M. Hirano, H. Hosono: Solid State Commun., 147, 111 (2008).
- [20] M. Rotter, M. Tegel, D. Johrendt: Phys. Rev. Lett., **101**, 107006 (2008).
- [21] T. Park, E. Park, H. Lee, T. Klimczuk, E.D. Bauer, F. Rpnning, J.D. Thompson: J. Phys.: Condens. Matter, **20**, 322204 (2008).
- [22] M.S. Torikachvili, S.L. Bud'ko, N. Ni, P.C. Canfield: Phys. Rev. Lett., **101**, 057006 (2008).
- [23] P.L. Alireza, Y.T.C. Ko, J. Gillett, C.M. Petrone, J.M. Cole, G.G. Lonzarich, S.E. Sebastian: J. Phys.: Condens. Matter, **21**, 012208 (2009).
- [24] K. Igawa, H. Okada, H. Takahashi, S. Matsuishi, Y. Kamihara, M. Hirano, H. Hosono, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko: J. Phys. Soc. Jpn., **78**, 025001 (2009).
- [25] M. Gooch, B. Lv, B. Lorenz, A.M. Guloy, C.W. Chu: Phys. Rev. B, 78, 180508 (2008).
- [26] W. Yu, A.A. Aczel, T.J. Williams, S.L. Bud'ko, N. Ni, P.C. Canfield, G.M. Luke: Phys. Rev. B, **79**, 020511 (2009).
- [27] Y. Mizuguchi, F. Tomioka, S. Tsuda, T. Yamaguchi, Y. Takano: Appl. Phys. Lett., 93, 152505 (2008).
- [28] M. Gooch, B. Lv, J.H. Tapp, Z. Tang, B. Lorenz, A.M. Guloy, P.C. Chu: Europhys. Lett., 85, 27005 (2009).

[2009年1月21日受付,2009年2月23日受理] © 2009日本高圧力学会