

九州大学

低温センターだより

No. 4



2010年3月

目次

	ページ
●巻頭言	(1)
九州大学 低温センター長	船木 和夫
●研究ノート	
①金属ナノ構造における純スピン流とその応用	(2)
九州大学 稲盛フロンティア研究センター 次世代エレクトロニクス材料研究部門	木村 崇
②TaバリアMgB ₂ 線材を用いた小コイルの熱的安定性	(8)
九州大学 電気電子システム工学専攻	田中 和英、中尾 彰浩、浦竹 勇希寛
九州大学 超伝導システム科学研究センター	柁川 一弘、船木 和夫
産業技術総合研究所	岡田 道哉
③重い電子系CePtSi ₂ における圧力誘起超伝導の探索	(15)
九州大学大学院 理学研究院 物理学部門 (現：新潟大学)	中野 智仁
●技術ノート	
希釈冷凍 (Ⅲ)	(24)
九州大学大学院 理学研究院 物理学部門	矢山 英樹
●サロン	
低温センターが設置されるまで	
九州大学大学院 理学研究院 物理学部門 (現：久留米工業大学)	(32)
巨海玄道	
●低温センターから	
伊都地区における寒剤状況遠隔監視システムの構築	(41)
九州大学 超伝導システム科学研究センター	松尾 政晃
九州大学 低温センター	佐藤 誠樹
平成21年度保安教育実施報告	(47)
平成21年寒剤供給状況	(48)
お知らせ	(50)
低温センターを利用した論文 (2009)	(51)
低温センター運営委員	(64)

低温センターは、安全、安定かつ安価な寒剤供給、低温を用いた教育研究の支援、利用者の安全教育に責任を持って取り組むことを目的として平成18年4月に発足して以来、ほぼ4年が経過しております。寒剤を利用した教育研究の今後の展開や伊都キャンパスへの移転に際して寒剤供給や安全な利用等のさらなる支援・充実を図るものです。伊都キャンパスでは、液体ヘリウムについては、液化冷凍機と各棟間に敷設された回収配管系の増設等により供給体制の整備が進んでおります。また、液体窒素につきましても、大型貯槽による集中管理とデリバリ体制が整いつつあります。さらに、今後の移転計画に沿いまして、箱崎キャンパスと伊都キャンパスにおける寒剤供給体制の効率的な組み直しについて検討を重ねていきたいと思っております。また、寒剤に関連します全学的な安全教育につきましても、学内に新たに発足しています安全衛生推進室（高圧ガス等安全管理部門）の支援を得ながら、これまで以上に充実したものにしていく所存です。

寒剤供給や安全教育体制は現在移行期にあります。学内の寒剤を利用されます皆様方からのご意見を伺いながら進めさせていただきたく思います。どうぞよろしくお願いいたします。

低温センター長 船木和夫



低温センター伊都地区センター（CE60）／超伝導システム科学研究センター（CE50）

1 はじめに











まず最初に、九州大学歴が浅い筆者の簡単な紹介から述べさせて頂きたい。筆者は、2002年3月に、大阪大学基礎工学研究科を修了し、その後、理化学研究所、東京大学物性研究所を経て、2009年1月より、本学の稲盛フロンティア研究センター・次世代エレクトロニクス材料研究部門に着任した。稲盛フロンティア研究センター（以下、稲盛センター）は、本学の創立百周年記念事業の一環として、財団法人稲盛財団様及び京セラ株式会社様より多大の御支援を頂き、2009年10月に伊都キャンパスに創設されたものである。というわけで、筆者の本学での実験歴は、まだ、数ヶ月であり、現在、実験設備の立ち上げを急ピッチで行っている。また、つい先日、稲盛センター内のヘリウム回収ラインが利用可能になった。このヘリウム回収設備については、当初、設置が予定されていなかったが、事務関係者の方々、及び低温センター関係の方々のご尽力により、設置して頂けることになり、大変感謝している。これから、いよいよ九州大学での実験活動を活発化させる必要があるが、現時点、まだ、外に公表できる実験結果を持ち合わせていないので、今回は、これまで筆者が行ってきた実験について、簡単に紹介させて頂く。

2 スピン流

従来の半導体ベースのエレクトロニクスデバイスにおいては、電子の持つ電荷に着目し、電荷の流れ、及び蓄積に相当する電流、電圧を制御することで素子動作を実現している。一方で、電子には、↑スピンと↓スピンというスピン自由度も存在する。通常、非磁性金属や半導体の場合、表1の最上段に示すように、伝導に寄与する↑スピンの電子数と↓スピンの電子数が同じであるため、スピンの伝導への影響を考慮する必要は無いが、強磁性金属などのように、伝導電子がスピン偏極している系においては、電流を流すと同時に、スピン角運動量の流れが発生し、電気抵抗などにスピンの影響が現れる（表1第2段参照）。ここで、スピン角運動量の流れに対応する“↑スピンによる電流と⊗スピンによる電流の差”をスピン流と呼んでいる。

このスピン流は、これまで電荷ベースのエレクトロニクスデバイスに、スピンの不揮発性機能を付加した高性能電子デバイスの実現を可能にする。そのようなスピン流デバイスは、半導体デバイスの集積化限界を打破する次世代電子デバイスの最有力候補として、スピントロニクスという分野の名のもとに、近年、盛んに研究されている。通常、スピン流は、表1の2、3段目に示すように、電流と共存し、スピン偏極電流という形で存在するが、強磁性体-非磁性体の複合構造を用いることで、表1最下段に示す電流を流さないスピン流である純スピン流を創出することも可能である。このような純スピン流は、電流によるジュール損失を伴わず、低消費電力なスピン機能デバイスを実現する上で極めて有力であるとともに、スピン流が引き起こす新しい物理現象を探索するツールとして注目されている。

表 1: 様々な電流とスピン流

	電流	スピン流
非偏極電流 		0
スピン偏極電流 		
完全偏極電流 		
純スピン流 	0	

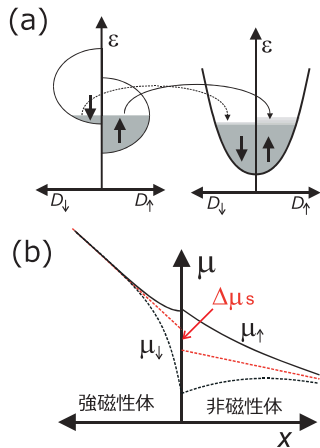


図 1: (a) 電気的スピン注入と (b) スピン蓄積時の電気化学ポテンシャルの模式図

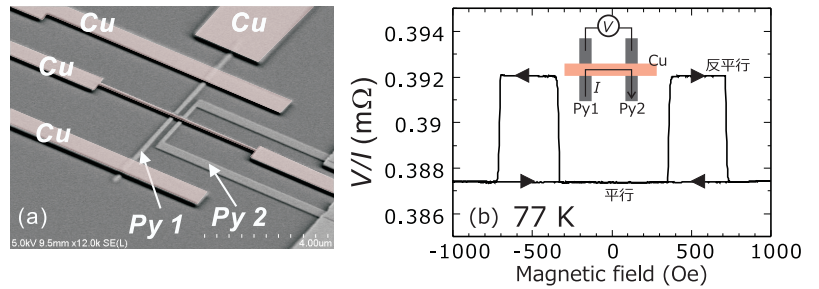


図 2: (a) 作製した Py/Cu 面内スピンバルブ素子の SEM 写真と (b) 局所スピンバルブ測定端子配置図と 77 K で観測されたスピン蓄積電圧の磁場依存性

3 電気的スピン注入とスピン検出

透明な (接合抵抗がゼロの) 界面を有する強磁性/非磁性接合において, 強磁性体から非磁性体に電子を注入すると, 電流に加えてスピン流が注入され, 図 1 (a) のように, 接合近傍の \uparrow スピン電子と \downarrow スピン電子の間に不均衡が生じ, 非平衡磁化 (スピン蓄積) が発生する. [1] この様子をスピン依存の電気化学ポテンシャル μ_{\uparrow} , μ_{\downarrow} を用いて模式的に示したものを 図 1(b) に示す. スピン蓄積は, スピン緩和のため, 接合界面からの距離と共に減衰し, ある距離で消失する. このスピン蓄積が消失する距離をスピン拡散長と呼んでいる. また, この接合の電気抵抗を測ると, 従来の各層の直列抵抗に加えて, スピン注入によって界面に生じる境界抵抗が重畳される. これは, 図 1(b) に示すように, 各層の電気抵抗率に比例して発生するオーミックな直線的電位勾配が, スピン蓄積のため界面で不連続になることによって生じる.

このようなスピン蓄積によって誘起される境界抵抗を検出するには, 通常, 強磁性/非磁性/強磁性層からなる二重接合構造を用いる. このような系では, 両端の強磁性層が平行なときは, 非磁性体中のスピン蓄積が小さくなり, 小さな境界抵抗しか誘起されないが, 反平行のときは, スピン蓄積が大きくなり, 大きな境界抵抗が誘起される. このスピン蓄積による抵抗変化を観測するために, 図 2(a) のような, 二本の強磁性細線とそれを接続している非磁性細線からなる面内スピンバルブ素子を作製した. ここで, 二本の強磁性細線は, 線幅 100 nm, 厚さ 30 nm のパーマロイ (Py) で, 両磁性細線の中心間隔は 200 nm, 非磁性細線は, 線幅 100 nm, 厚さ 100 nm の Cu である. 一方の Py 細線 (Py2) の端部は, 大きな pad に接続されているため保磁力が小さくなり, もう一方の Py 細線 (Py1) と保磁力が異なる. したがって, 二つの Py 細線の平行, 反平行状態を外部磁場で制御することができる. この素子において, 図 2 (b) の挿入図に示すように, Py1 から Cu を通して Py2 に電流を流し, Py1-Py2 間に発生する電圧を測定する. この電圧を, 磁性細線の線方向に平行な外部磁場を印加しながら液体窒素温度 (77 K) で測定した結果を 図 2(b) に示す. ここで, 縦軸は, 測定電圧を電流で除した抵抗値を示している. 外部磁場が両磁性細線の保磁力に比べて十分大きいとき, 二つの磁性細線の磁化は平行となり, スピン蓄積が小さくなるため測定電圧が小さくなる. その後, 磁場をゼロにして, 磁場方向を反転させると, 約 -200 Oe 付近で, Pad 付き磁性細線が磁化反転し, 両細線の磁化が反平行になる. このとき, 前述のように, スピン蓄積が大きくなり, 発生電圧が大きくなる. 更に, 逆方向の磁場を大きくしていくと, もう一方の磁性細線も磁化反転し, 再び平行状態になり, 発生電圧が小さくなる. このように, スピン蓄積による電圧変化を明瞭に観測できる. このことは, Cu のスピン拡散長が, Py 細線間隔 (200 nm) に比べ十分長いことを示している.[2]

上記の方法でも、スピン蓄積に起因する電圧変化が観測可能であるが、測定電圧には、非磁性層 (Cu) の電気抵抗に起因するオーミックな電圧降下が重畳されてしまう。そこで、より高感度にスピン蓄積に起因する電気信号を観測するために、非局所スピンバルブ測定と呼ばれる手法が提案された[3]。同様の面内スピンバルブ素子において、図 3(a) 上図の矢印に示すように電流を流す。この場合、

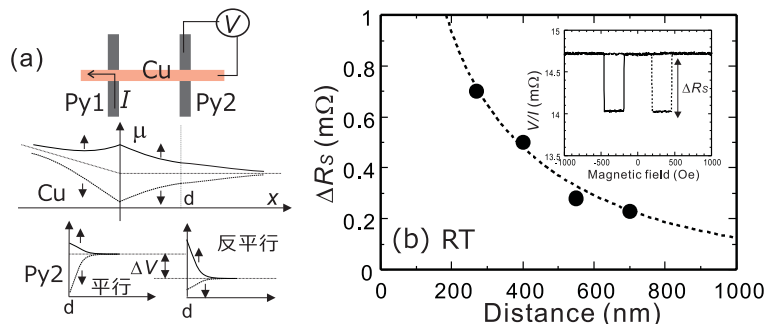


図 3: (a) 非局所スピン注入測定法とそれによって誘起される強磁性、非磁性体中の電気化学ポテンシャルの空間分布 (b) スピン蓄積信号の距離依存性. 挿入図は、間隔 200 nm 時の非局所スピン蓄積信号の磁場依存性

電流が流れている左側の Cu 細線内にスピン蓄積が誘起されるのは前述の通りだが、電気化学ポテンシャルの連続性から、電流の流れていない右側の Cu 細線内にも、スピン蓄積が誘起され、前述の表 1 最下段に示す純スピン流が創出される。このときの Cu 細線内の電気化学ポテンシャルの模式図を 図 3(a) に示す。ここで、電流が流れていない右側の Cu に、もう一つの強磁性電極を Py 2 が接触している場合、電気化学ポテンシャルの連続性から、Py 2 の電気化学ポテンシャルにもスピン蓄積が生じる。Py 中の電気化学ポテンシャルの平衡位置は、多数スピンの方が伝導率が大きいため、電気化学ポテンシャルの緩和に偏りが生じ、Py 2 の磁化が、Py 1 の磁化と平行な場合は中間よりも上に、反平行の場合は中間よりも下にくる。ここで、平行、反平行に対応した右側 Cu 端子と Py 2 端子の電位差を測定することにより、Cu のスピン蓄積を測定することができる。この場合、電圧端子間には、電流が流れていないため、前述したような非磁性層の電気抵抗や強磁性電極からの磁気抵抗等の擬似的な抵抗変化は重畳せず、純粋なスピン蓄積による電圧変化が検出可能となる。

図 3(b) の挿入図に、図 2(a) の試料を用いて行なった室温での非局所スピンバルブ測定の実験結果を示す。図を見て分かるように、平行、反平行に対応した明瞭なスピン蓄積信号が室温で観測されるのが確認できる。このような非局所測定を、二本の強磁性細線の間隔を変えて繰り返すことで、Cu 細線内のスピン蓄積の空間分布、すなわち、Cu のスピン拡散長を見積もることができる。実験から、Cu のスピン拡散長が室温で 500 nm と、非常に長いことが分かった。[4]

4 スピン吸収 [5]

前述の非局所スピンバルブ測定では、スピン注入により生じた非磁性体中のスピン蓄積を調べるために、検出用の強磁性細線を電圧端子として接続していた。しかし、この方法はよく考えてみると、以下に記述するような問題がある。図 4(a) の電気化学ポテンシャルの分布において、検出用の強磁性電圧端子がある場合と無い場合を比較する。強磁性電圧端子が無い場合、スピン注入が生じている非磁性/強磁性接合からみて、非磁性細線の右側も左側も同じようにスピン拡散するため、スピン流とスピン蓄積電圧の空間分布は左右対称となる。一方、右側に強磁性細線が存在する場合、強磁性体中のスピン緩和が非磁性体に比べて圧倒的に速いため、右側に流れこんだスピン流は、非磁性体を経由して、強磁性体内に吸収される。このことは、右側のスピン緩和が左側のスピン緩和より早い場合、注入された殆どすべてのスピン流は、右側に流れることを意味している。大きなスピン流が流れることは、スピン蓄積電圧の減衰を引き起こすため、非局所スピンバルブ測定では、スピン蓄積電圧を減衰させながら検出していることになる。

このような強磁性端子によるスピン流の吸収効果（スピンシンク効果）を、より直接的に観測するために、スピン注入端子とスピン検出端子の間に付加的な中間強磁性細線を挿入し、中間細線の有無による非局所スピン蓄積信号の変化を調べた。試料は、図 4(a) の挿入図に示すような、間隔約 200 nm で配置された線幅約 100 nm の 3 本の Py 細線とそれらと交差する Cu 細線からなる。図のように、左端の Py 細線を電流端子に、右端の Py 細線を電圧端子に選んだ場合の非局所スピンバルブ測定を行い、注入端子と検出端子の間に、Py 細線を接続した場合の非局所スピン蓄積信号を測定した。また、比較のために、中央の付加的な Py 細線が無い場合 (図 4(b) 挿入図) の測定も行なった。図 4(a) 及び 図 4(b) は、それぞれ、中間 Py 細線がある場合と、無い場合の非局所スピン蓄積信号の測定結果である。中間 Py 細線が無い場合は、 $0.24\text{m}\Omega$ の明瞭なスピン信号が観測されているにもかかわらず、Py 細線が存在する場合は、 $0.04\text{m}\Omega$ と僅かなスピン信号しか観測されない。これは、スピン緩和が強い中間 Py 細線にスピン流が吸収され、非磁性層のスピン蓄積が抑制されたことを示している。このスピン流の吸収（スピンシンク）現象は、細線のスピン抵抗の大きさに依存するため、スピン抵抗が小さい物質を接続した場合、強磁性、非磁性に関わらず同様の現象がおきる。

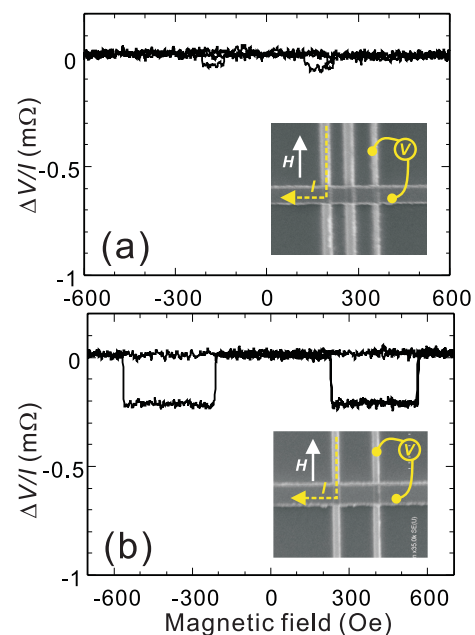


図 4: (a) Py 中間細線有り (b) 中間細線無しの場合の非局所スピン蓄積信号の室温での測定結果。

5 スピン吸収による純スピン流注入磁化反転 [6]

強磁性体にスピン流を注入すると、伝導電子スピンと局在電子スピンの間に働く **s-d** 交換相互作用のために、スピントルクと呼ばれるトルクが作用する。[7] ここで、磁性体に注入するスピン流の強度を増やしていくと、伝導電子のスピンの方向に磁化が配向する。この現象は、スピン注入磁化反転として知られており、従来の電流誘導磁場による磁化反転手法と比較して低消費電力で、漏れ磁場等の問題を解決できるため、次世代スピントロニクス実現において極めて重要な要素技術として知られている。通常、スピン注入磁化反転は、積層構造に、膜面垂直方向に電流を流して、電流が重畳したスピン流を磁性体に注入することで成されているが、この場合、電流の成分は、単にジュール発熱を引き起こすだけで、スピントルクとして何ら寄与しない。一方で、これまで説明してきた純スピン流を磁性体に注入すれば、電流が存在しないため、極めて効率的で無駄の少ない磁化反転が実現できる。

これまでの実験から、スピン吸収効果により、磁性体を接続するだけで、純スピン流を効率的

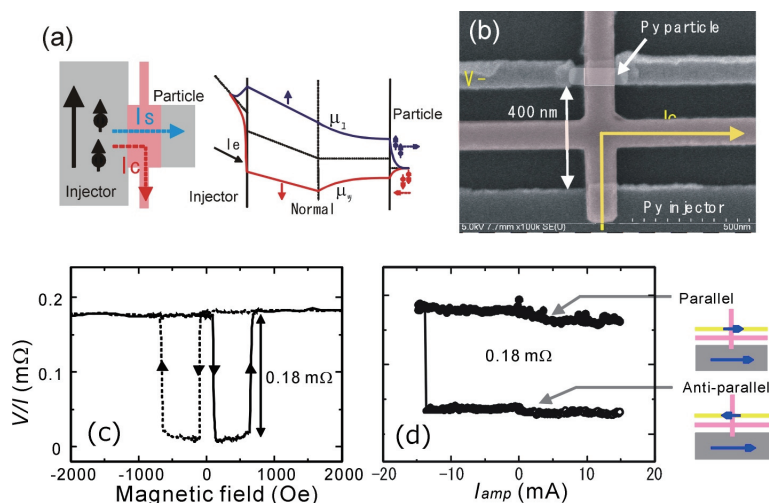


図 5: (a) 純スピン流注入による磁化反転の概念図。 (b) 作製した試料の SEM 像。 (c) 非局所スピン信号と (d) 非局所スピン信号の注入電流依存性

に取り出せることが分かっている。そこで、電流を伴わない純スピンの流による磁化反転を実現するため、図 5(a) および 5(b) に示すような磁性微粒子を含むスピバルブ素子を作製し、非局所手法を用いて磁性微粒子に純スピン流を注入し、磁化反転を実現する実験を行った。ここで、磁性微粒子は、幅 50 nm、長さ 180 nm、厚さ 6 nm の Py で、Cu 細線の下に位置している。

図 5 (c) に示すように、非局所スピバルブ測定において、0.18mΩの明瞭なスピン信号が観測されており、純スピン流が、Py 微粒子に注入されているのが確認できる。次に、純スピン流による磁化反転の実験を行った。最初に、外部磁場を制御することで、Py 注入端子と Py 微粒子の磁化を反平行にし、スピン注入を行った。図 5(d) は、非局所スピバルブ信号の注入電流依存性である。電流が正の場合、+15mA の電流まで電流を増加させても、非局所スピン信号に変化は現れなかったが、電流を負方向に増加させた場合、-13 mA で、大きな非局所スピン信号に大きな変化が現れた。この大きさは 0.18mΩであり、図 5(c) におけるスピン信号の大きさと一致している。また、この状態から磁場掃印を行い非局所スピン信号の磁場依存性を調べた結果、Py 微粒子が Py パッドに平行に配列しているのが確認された。したがって、-13 mA で観測された変化は、Py 微粒子の磁化反転に対応している。また、図 5(a) に示すように、負の電流注入は、注入端子の磁化と平行のスピンの流が、Py 微粒子に注入されることに対応しているため、Py 微粒子を平行にするようにスピントルクが作用する。したがって、前述のスピントルクモデルと定性的に一致しており、純スピン流注入によるスピントルクによって、Py 微粒子の磁化が反転したことを示している。

6 スピン吸収によるスピホール効果の電氣的検出 [8]

運動する電子は、スピン軌道相互作用が存在すると、↑スピンと ↓スピンが互いに逆方向に散乱され、図 6(a) に示すように、電流に対して垂直方向に純スピン流が発生する。また、また逆に、膜面垂直に偏極しているスピン流を同一試料に流すと、同様のスピン軌道相互作用により、今度は、スピン流の持つスピンの方向とスピン流の流れに垂直方向に、電流が発生する (図 6(b))。これらの現象は、それぞれ、スピホール効果、逆スピホール効果として知られており、強磁性体を用いない新しいスピン流の制御法として注目されている。[9] スピホール効果の起源は、スピン軌道相互作用であり、大きなスピホール効果を観測するためには、スピン軌道相互作用の強い物質を用いるのが有効である。しかし、そのような物質中では、スピン拡散長が短くなり、スピン流やスピン蓄積が直ぐに消失してしまうため、検出が困難である。そこで、我々は、前述のスピン吸収効果を用いることで、スピン軌道相互作用の強い物質中での効率的なスピホール効果の検出法を開発した。

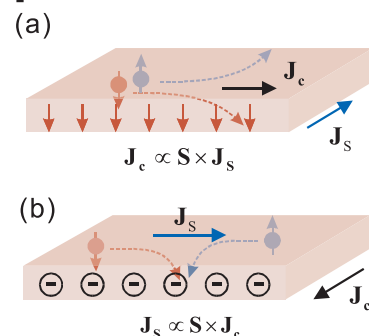


図 6: (a) スピホール効果 (b) 逆スピホール効果の概念図

前節のスピン吸収効果によるスピン流の流れをもう少し詳しく見てみる。Pt などスピン緩和の速い物質を、スピン蓄積している Cu 細線に接続した際、スピン流は接合面から垂直に流れ込んだ後、Pt 内で直ちに減衰し消失する。この場合、スピン流の流れる方向としては、Cu 細線内のように線に沿ってではなく、むしろ Cu/Pt 接合面に対して垂直に流れるのが適切である。(図 7(b) 参照) ここで、Pt 細線に吸収されるスピン流のスピンの方向が Cu の線方向を向いている場合、逆スピホール効果によって Pt 細線内に線方向の電流が誘起されることになる。この現象を観測するために、図 7(a) に示すような Py, Cu, Pt からなる面内構造素子を作製した。ここで Pt 細線は、厚さ 4 nm であり、スピン拡散長よりも短くなるように設計した。

図 7(c) の挿入図に示すように電流を流して、スピン吸収効果によって Pt 細線に垂直にスピン流を注入する。ここで、スピン流のスピン方向は、外部磁場により、Py の磁化を配向させることで制御することができる。したがって、磁場を水平方向に印加することで、Pt 細線の線方向に沿って電流を発生させることができ、定常状態における Pt 細線両端の電位差を測定することで、逆スピンホール効果により発生する電荷蓄積電圧を検出することができる。図 7(c) は、室温と 10 K における逆スピンホール効果の測定結果である。

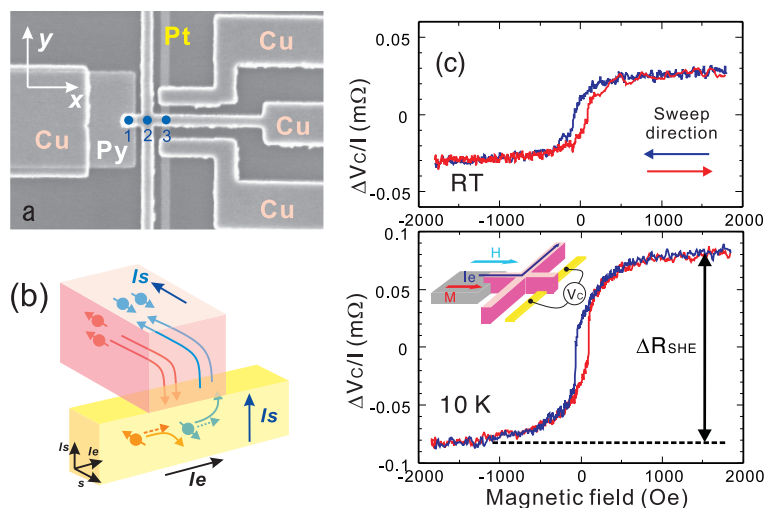


図 7: (a) スピンホール効果の観測実験のために作製された試料の SEM 像. (b) Pt 中の逆スピンホール効果の発現メカニズムの概念図. (c) 室温、及び 10 K における逆スピンホール電圧の磁場依存性.

ここで、縦軸は、Pt 細線の両端に発生した電圧を入力電流で除したのに対応している。図に示すように、Py の磁化方向の反転に伴う、電圧の極性が反転する現象が明瞭に観測されており、Pt 細線に注入されたスピン流が逆スピンホール効果により、電流に変換されたことが確認できる。

7 おわりに

強磁性金属と非磁性金属からなる複合ナノ構造において、非局所スピン注入法により、電気を運ばずスピンのみを運ぶ電子の流れである純スピン流が生成可能であることを述べた。さらに、純スピン流が、スピン吸収効果により効率的に取り出されることについて述べ、スピン吸収効果を用いた純スピン流による磁化反転やスピンホール効果の検出実験について紹介した。純スピン流は、スピンデバイスを低消費電力で動作させるための手法として期待されているが、現段階では、純スピン流の生成効率が、極めて低いため、応用的発展のためには、純スピン流生成効率の飛躍的向上が必要不可欠である。そのためには、材料探索、素子構造の最適化、デバイスの高品質化が重要課題である。

本稿で紹介した実験は、東大物性研の大谷教授との共同研究に基づいており、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] M. Johnson : Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 2142
- [2] T. Kimura et al.: Appl. Phys. Lett. 85, (2004) 3501
- [3] F. J. Jedema, A. T. Filip and B. J. van Wees : Nature (London) 410(2001) 345
- [4] T. Kimura, J. Hamrle and Y. Otani : Phys. Rev. B 72 (2005) 014461
- [5] T. Kimura et al.: Appl. Phys. Lett. 85 (2004) 3795
- [6] T. Kimura, J. Hamrle and Y. Otani : Phys. Rev. Lett. 72 (2006)
- [7] J. C. Slonczewski : J. Magn. Magn. Mater. 159 (1996) L1
- [8] T. Kimura et al.: Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 156601
- [9] J. E. Hirsch : Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 1834

Ta バリア MgB₂ 線材を用いた小コイルの熱的安定性

Thermal stability in of small coil using Ta barrier MgB₂ wire

電気電子システム工学専攻
超伝導システム科学研究センター
産業技術総合研究所

田中和英、中尾彰浩、浦竹勇希寛
柁川一弘、船木和夫
岡田道哉

Department of Electrical and Electronic Systems Engineering

Kazuhide TANAKA, Akihiro NAKAO, Yukihiro URATAKE

Research Institute of Superconductor Science and Systems

Kazuhiro KAJIKAWA, Kazuo FUNAKI

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Michiyo OKADA

Abstract—We have fabricated a small test coil with an AlN former by employing Cu-Ni sheathed Ta barrier MgB₂ multifilamentary wire made in a wind-and-react process. An overcurrent was applied to the coil conduction-cooled in an initial temperature range between 10K and 30K to investigate its thermal stability by measuring temperature distribution in the winding and the terminal voltage after the application of overcurrent. The experimental results show that permissive temperature rise without thermal runaway decreases with the initial temperature, while total heat generation for the thermal runaway has a maximum at an initial temperature around 14K. We also numerically calculated the responses of the test coil to the overcurrent by simulating the electrical and thermal process with a finite element method and *V-I* characteristics of the coil. The comparisons with the experimental results show that the electrical and thermal responses are rather well reproduced by the numerical model.

注) 本報告は、低温工学への原著論文 (印刷中) を再編成したものである。

1. はじめに

2001年に発見された二ホウ化マグネシウム (以下, MgB₂ と略す) は, 金属系超伝導材料としては非常に高い 39 K の臨界温度 (以下, T_c と略す) を有する¹⁾. この T_c は, 現在超伝導材料として主に用いられている NbTi ($T_c=9.8$ K) や Nb₃Sn ($T_c=18$ K) と比較して, 20 K 以上も高い. このため, 液体ヘリウムあるいは冷凍機冷却で使った場合に温度マージンを大きくできるので, クエンチ (温度上昇による超伝導から常伝導への転移) が生じにくいマグネット用材料として期待されている. このため, 発見以来, 多くの研究機関で長尺線材化や臨界電流密度 (以下, J_c と略す) の向上を目指した研究が行われてきた²⁻⁴⁾. 現在では, 1 km を超す線材や, MRI マグネットの試作が行われ画像の撮影にも成功している⁵⁻⁶⁾. さらには, 永久電流モードでの長時間運転も可能なレベルになっており⁷⁾, MgB₂ 超伝導体の更なる特性向上により, 産

業用, 医療用, 運輸用, 電力用などの様々な分野での応用の拡大が期待される。

これまで我々の研究グループでは, その熱的特性評価の第一歩として, 液体ヘリウム浸漬冷却中における MgB_2 線材の常伝導部の伝播速度を測定し, 印加磁場や通電する電流値に対する最小伝播電流値 (常伝導部の伝播が起こらないための通電電流の上限値) や常伝導部の伝播速度などの熱的特性を測定し, これらの特性と冷却条件との関係を定量的に評価してきた⁸⁾. 本研究では, 伝導冷却 MgB_2 コイルの応用を念頭におき, Cu-Ni シース Ta バリア多芯線材を用いて作製した試験用小コイルを, 幅広い温度領域で過電流通電し, コイルの熱的応答の実験結果と数値解析結果から, MgB_2 コイルの熱的安定性に対する基礎的データを得ることを目指した。

2. 実験方法

2.1 試料

本研究では, ex-situ 法に比べて, 不純物添加や粉末微細化などの効果により, 将来的に超伝導特性の改善が見込める in-situ 法に着目し, 5 芯の MgB_2 多芯線材を作製した. Mg 粉末とアモルファス B 粉末を 1:2 の組成比に秤量した後, アルゴン (Ar) 雰囲気中でボールミル混合した. 粉末を充填する金属管(バリア材)には, Mg や B との反応による I_c 劣化が小さい純 Ta 管を用いた. また, Ta の外側には Cu-10%Ni 管(以下, Cu-Ni と略す)を被せた. さらに, 熱的安定性やクエンチ時の発熱低減のため, 中央部に Cu を配置した. Fig. 1(a) に伸線加工後の単芯線材の横断面を示す. その後, 得られた単芯線材を 6 等分の長さになるように切断し, これを Cu-Ni 合金管に組み込んだ. ガンドリル方式により作成した Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 /6 芯線の横断面を Fig. 1(b), その仕様を Table 1 に示す. 得られた線材の MgB_2 超伝導コア比は 9.5%である. ツイストピッチは 50 mm である.

作製した Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 /6 芯線を用いてソレノイドコイルを作製した. 本研究では, 巻線してから熱処理を施す Wind-and-React 法を適用した. 熱処理条件は, Ar 気流中で, 600°C, 1時間とした. 巻線した線材の長さは 58m で, コイルのターン数は 400 である. コイル定数は 0.0082 T/A である. なお, 線材表面の絶縁は, 耐熱性ガラスを編組被覆するものとした. 本コイルは伝導冷却を行うことから, ポビンは熱伝導が良好な窒化アルミ製(以下, AlN と略す)とした. 形状は, 内径 35 mm (ボア径 25 mm), 外径 98 mm, 高さ 48 mm である.

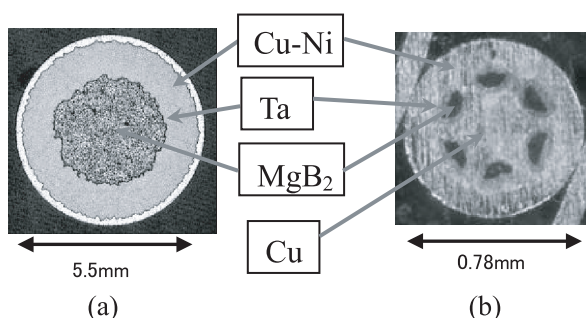


Fig. 1 Cross sectional view of the MgB_2 mono-core wire and 6-filament wire.

Table 1 Specifications of the MgB_2 6-filament wire

	Cu-10%Ni-sheathed wire
Barrier	Ta
Wire dia.	0.78 mm
Structure	MgB_2 / Cu / Ta /Cu-Ni 0.095/0.06/0.10/0.745
Twist pitch	50 mm
Number of filament	6
Filament size	0.10 mm

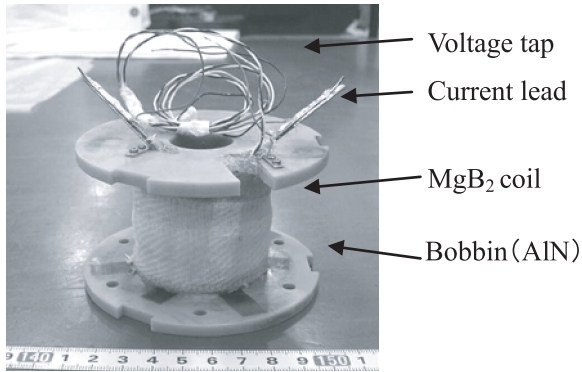


Fig. 2 A photograph of the MgB₂ test coil.

Table 2 Specifications of the MgB₂ test

Wire	Length	58 m
Coil	Inner dia.	35 mm
	Outer dia.	51 mm
	Height	48 mm
	Turn	40×10
	Inductance	3.66 mH
	Coil const.	0.0082 T/A
Insulator	T-glass	
Resin	Epoxy (in vacuum)	

コイル最内層部では、最大で 2.2%の曲げ歪が加わっているが、事前確認において本線材は曲げ歪が 3%以内であれば、巻線後に熱処理を行うことで線材性能は低下しないことを明らかにしており、今回の曲げ歪は許容値である。

通電試験を行うにあたり、コイルに温度センサなどの計測線を取り付けるため、ボビンの中央部と下部に貫通孔を設けた。コイル内部に配置される線材の層間、ターン間、線材とボビン間には、 10^{-1} Pa 以下の真空度で熱伝導性が良好なエポキシ樹脂で含浸を行った。Fig. 2 にエポキシ含浸後のコイルの外観を示す。また、Table 2 にコイルの仕様を示す。

2.2 測定方法

MgB₂ コイルの臨界電流 I_c は、直流四端子法を用いて測定した。その際、温度調整可能な内挿クライオスタット内のコールドヘッドに MgB₂ コイルを装着し、コールドヘッドの温度範囲 5~30 K で特性評価した。冷媒はヘリウムガスである。温度制御は、冷却ガス流量と、試料上部に取り付けたヒータ電流を調整することで行った。

Fig. 3 に使用したクライオスタット概略図とコイルへの温度センサ取付け位置を示す。コイル温度は、ボビン中央部、ボビン下部、巻線部下端（それぞれ、 T_{ic} , T_{ic} , T_{ob} と記す）に設置したセルノックス温度センサで測定した。コイル上フランジとコールドヘッドはグリースを介して面接触させ、ボビンを介した伝導冷却した。

3. 過電流通電実験

作製したコイルについて、5~30 K の温度範囲でコイル I_c を測定した。その結果を Fig. 4 に示す。ここで、横軸は T_{ic} の実測値である。コイル I_c

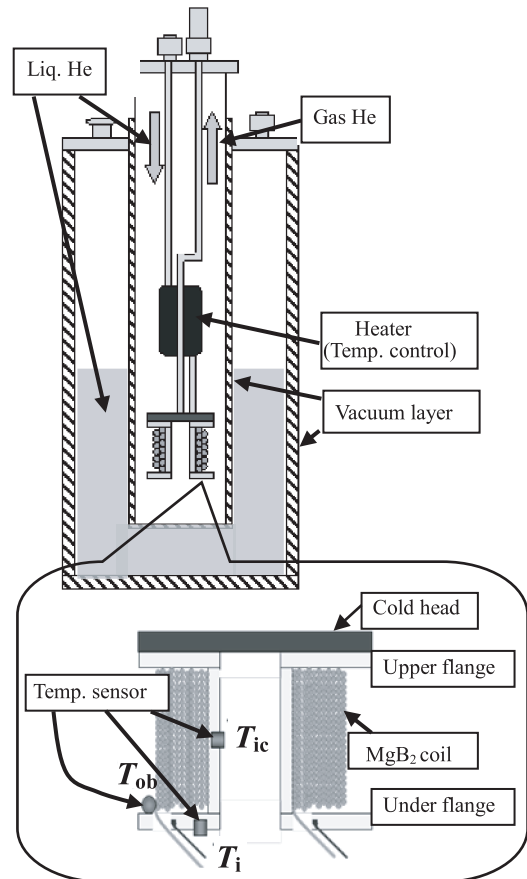


Fig. 3 Cross-section of present cryostat and the MgB₂ coil.

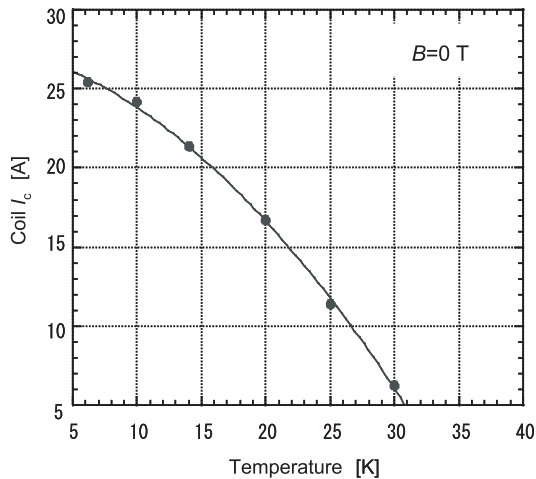


Fig. 4 Temperature dependence of I_c evaluated from the coil V - I characteristics.

は、巻線全長 58 m に対して、端子間電圧が 5.8 mV に達した時の通電電流値とした。

コイルの通電電流は、1.04 A/s の変化率で掃引してある所定値でホールドし、その後急速遮断した。コイル I_c の温度依存性で得られた結果をもとに、通電電流のホールド値を I_c レベルから始めて、 I_c の 10% 刻みで増加させた。以上のような通電パターンを、熱暴走が観測されるまで電流のホールド値を増加させながら繰り返し通電した。Fig. 5(a)~(c)に初期設定温度 14 K のときの測定結果を示す。各通電において、上から順にコイル両端電圧、 T_{ic} 、 T_{ob} 、 T_{ib} の時間変化を示す。電流掃引時には、両端電圧に誘導電圧

が重畳されている。3 箇所温度の初期値が若干異なっているのは、直前の測定からの時間経過が十分ではなく、温度の均一化が不十分なためである。ここでは、初期温度からの温度上昇分に着目した。 I_c を通電した場合 ($I = 1.0I_c$) には、若干の温度上昇分がほぼ均一であることから、AIN 製ボビンによる冷却が有効であるといえる。このときのコイル巻線部全体の発熱は、コイル端子電圧と通電電流の積として求めると 0.15 W である。一方、 $I = 1.4 I_c$ 通電時の場合には、ほぼ $\Delta T_{ic} = \Delta T_{ib}$ となっていることから、ボビン内筒部自体の温度上昇は認められるものの、ボビンを介した冷却はまだ有効に働いているといえる。300 秒間の通電ではクエンチには至らないことから、熱的な安定性も維持できていると判断した。ボビンの上フランジに熱接触させている冷却ヘッド部の温度は通電前の温度レベルを維持する制御を行っているため、この温度上昇分は主に冷却ヘッド部とボビンとの温度差になっているものと推

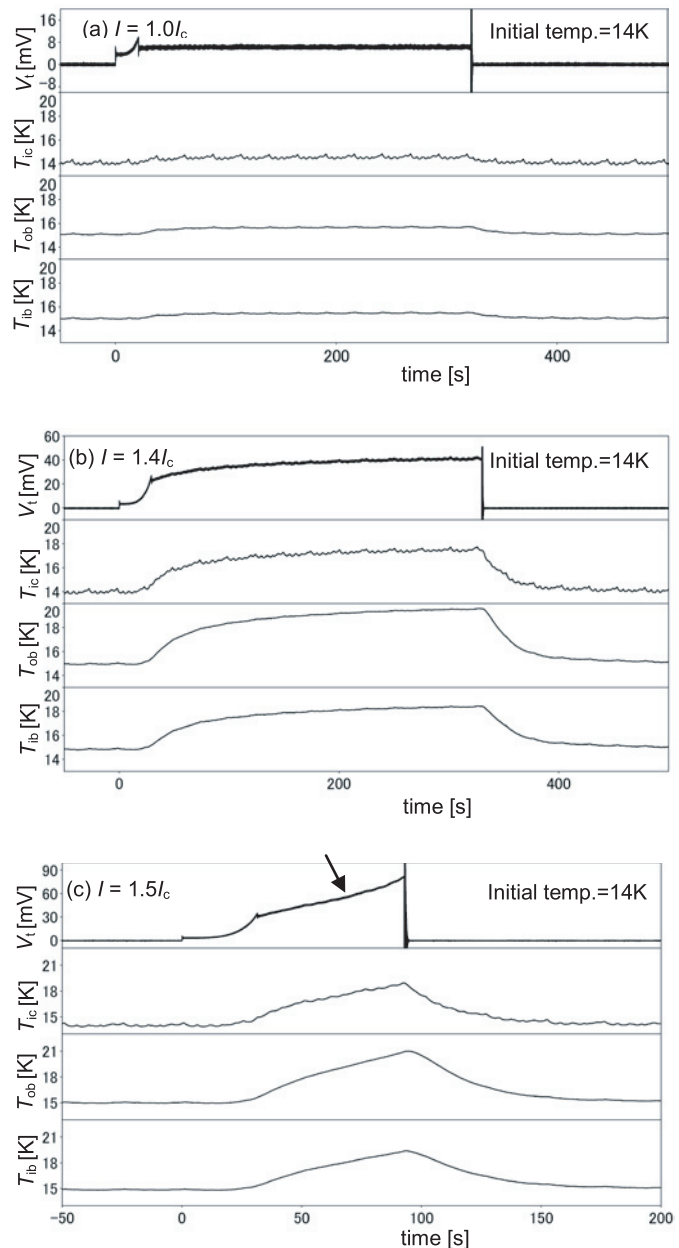


Fig. 5 Responses of terminal voltage and sensor temperatures to overcurrent. (a) $1.0 I_c$, (b) $1.4 I_c$, (c) $1.5 I_c$.

察される. また, T_{ic} , T_{ib} の上昇分と比べて T_{ob} の上昇分が多少大きく, 通電電流値を大きくする毎に温度差も大きくなった. これは T_{ob} が冷却ヘッド部から最も離れており, 冷却が効きにくくなっていることによるものと考えられる.

これに対し, $1.5I_c$ 通電時には, Fig. 5(c) の電圧の応答に矢印で示す変曲点が観察されたことから, 熱暴走と判断できる. このときのコイル全体での発熱は 1.95 W に達した. しかしながら, コイル両端電圧や温度変化は比較的緩やかであるため, コイル保護の観点からは十分に対策可能なレベルであると考えられる.

次に, 過電流通電において, 温度上昇が顕著であった T_{ob} の上昇分の漸近値について, その過電流設定値への依存性を全ての初期設定温度についてまとめたものを Fig. 6 に示す. 測定は初期設定温度 10~30 K の範囲で実施した. 図中の縦線は, 各初期設定温度において, 熱暴走を観測した過電流レベルを表している. 初期設定温度が低いほど, 熱暴走に至るまでの温度上昇に余裕があることがわかる. これは初期設定温度が低いほど, T_c に至るまでの余裕度(温度マージン)が大きいことによるものであろう.

Fig. 7 に熱暴走開始時のコイル発熱の初期温度依存性を示す. この発熱が熱暴走を抑制できる発熱量の上限とすると, その限界レベルが 12~14 K の範囲内で極大値を持つことがわかる. この要因として, 温度マージンの初期温度依存性だけでなく, ボビンも含めたコイル全体の各種材料における伝熱効率の影響も考えられる. その場合には, 熱的に安定な動作特性を持つコイルの冷却構造を設計するに当り, 伝熱材料の熱伝導率の温度依存性までを考慮した解析が必要になる. 今後は, これらのことにも着目し, コイル化における熱設計データベースを蓄積することが課題である.

4. 考察

コイル全体に分布する熱的擾乱について実験と数値解析の両面から評価し, コイルの熱特性をモデル化することを試みた. ここでは, 過電流通電試験時に得られたコイルの平均的な V - I 特性からコイル巻線部の全発熱を求め, これがコイル巻線部で一様に分布するとする第1ステップの近似により, 発熱に対するコイルの熱的応答について解析を行った.

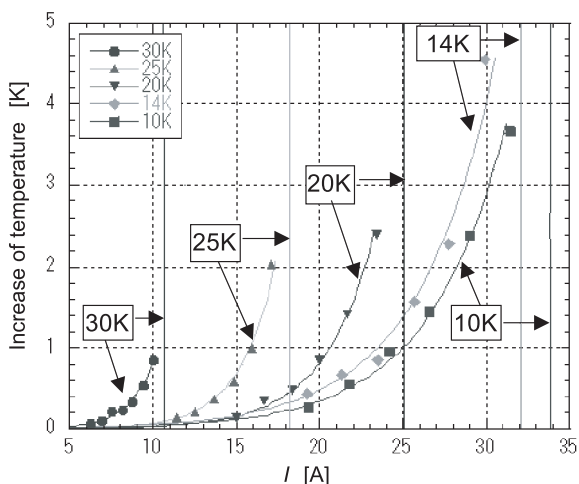


Fig. 6 Temperature rise in T_{ob} after 300s application of overcurrent.

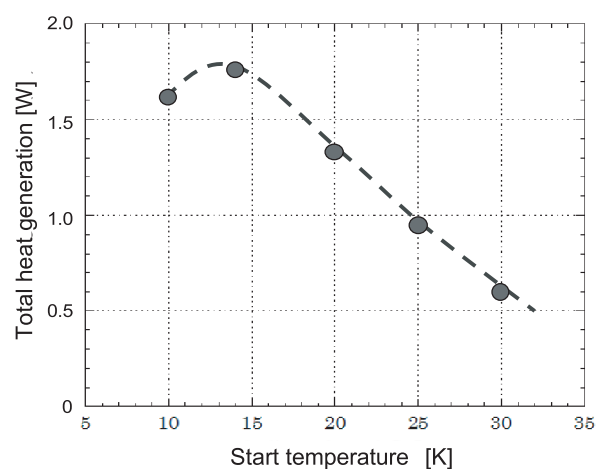


Fig. 7 Start temperature dependence of total heat generation for thermal runaway.

数値解析は、熱伝導方程式に重みつき残差法、特に Galerkin 法を適用し、導かれた方程式を有限要素法により解いて実施した。解析モデルについて、今回用いたコイルは軸対称性を持つので計算を簡略化するために 2 次元軸対称モデルを用いた。モデルは巻棒である AIN 部と巻線部とに分かれており、巻線部は MgB_2 線材と含浸材であるエポキシ樹脂が含まれている。冷却条件として、コイル上フランジ部と冷却ヘッド部との境界面の温度を一定（初期設定温度）としている。また、過電流による発熱は、過電流通電試験時に得られたコイルの V - I 特性を n 値モデルで近似することにより評価した。このうち、コイルの I_c については Fig. 4 に示した測定結果の近似曲線を、得られた n 値については Fig. 8 に破線で示した試行関数を用いた⁹⁾。

過電流通電試験時と同様に、初期設定温度を 10 K から 30 K まで 5 K 刻みに設定し、数値解析を行った。Fig. 9 及び Fig. 10 に初期設定温度を 14 K、 $I=1.5I_c$ とした際のコイル両端電圧、及び各温度センサ部の温度推移の数値解析の結果を示す。解析の際に採用した各部の熱特性値等は文献 9 を参照願いたい。Fig. 9 と実験結果(Fig. 5(d))を比較すると、電流掃引時($0 \leq \text{time} \leq 33$)には多少ずれが生じているが、一定電流通電時は実験結果と概ね一致した。また、同様に、Fig.10 と実験結果とを比較すると、各温度センサ部ともに多少の温度差や温度上昇の速さに違いはあるものの、実験結果と概ね一致している。

次に、数値解析から得られた熱暴走電流 I_{tr} と実験結果との比較を Fig. 11 に示す。ここで、 I_{tr} は、試験時と同様に、過電流通電後 300 秒以内に両端電圧の経時変化曲線に変曲点が生じた通電電流値とした。初期設定温度が 10 K 及び 14 K においては多少外れてはいるが、実験時に熱暴走前と熱暴走と判断した電流値との範囲内で熱暴走となるような解析結果が得られた。また、温度が上昇しコイル I_c が低下するのにはほぼ比例して、 I_{tr} も低下していることがわかる。

以上のことから、今回作成した解析コードは概ね妥当であり、実験結果を近似的に再現できていると言える。今後、数値解析結果の信頼性を向上させるため、コイル巻線と同等の線材の短尺試料の E - J 特性を測定し、これに基づいたコイル内のより具体的な発熱分布を考慮した解析を行っていく必要がある。

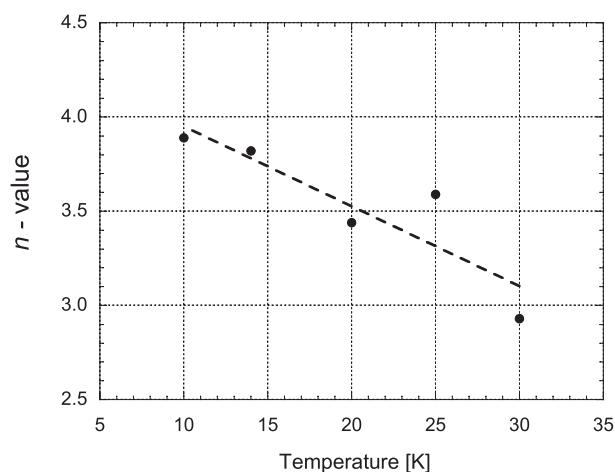


Fig. 8 Temperature dependence of n -value evaluated from the coil V - I characteristics

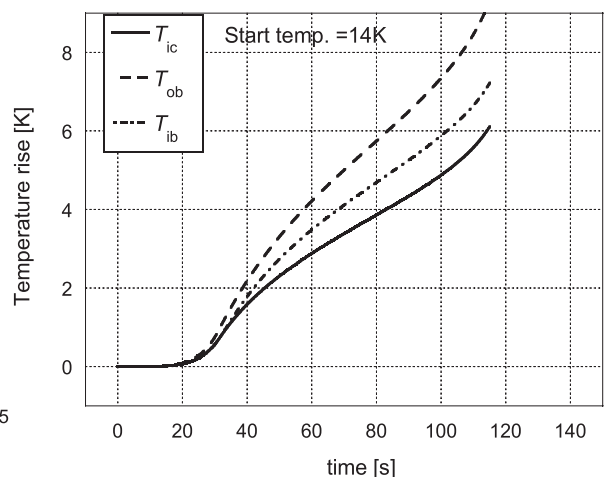


Fig. 9 Numerical results of sensor temperature. ($T=14\text{K}$, $I=1.5I_c$)

最後に、本研究を進めるにあたり、実験結果に関しご討論いただいた物質・材料研究機構の熊倉浩明博士に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) J. Nagamatsu, et al.: "Superconductivity at 39K in magnesium diboride," Nature **410** (2001) 63-64
- 2) K. Tanaka, et al.: "Fabrication and transport properties of MgB₂ wire and coil," Physica C **382** (2002) 203-206
- 3) H. Yamada, et al.: "Effect of aromatic hydrocarbon addition on in situ powder-in-tube processed MgB₂ tapes," Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) 175-177
- 4) S. X. Dou, et al.: "Transport critical current density in Fe-sheathed nano-SiC doped MgB₂ wires," IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 3199-3202
- 5) M. Tomsic, et al.: "Development of magnesium diboride (MgB₂) wires and magnets using in situ strand fabrication method," Physica **C456** (2007) 203-208.
- 6) V. Braccini, et al.: "Development of ex situ processed MgB₂ wires and their applications to magnets," Physica **C456** (2007) 209-213.
- 7) M. Takahashi, et al.: "Relaxation of trapped magnetic field in a 100m long class MgB₂ solenoid coil in persistent current mode operation," Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) 373-375
- 8) K. Funaki, et al.: "Quantitative Analysis of Normal Zone Propagation in MgB₂ Superconducting Wires," TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn) **43** (2008) 423-429.
- 9) A. Nakao, et al.: Reserch Reports on Information Science and Electrical Engineering of Kyushu University, to be submitted.

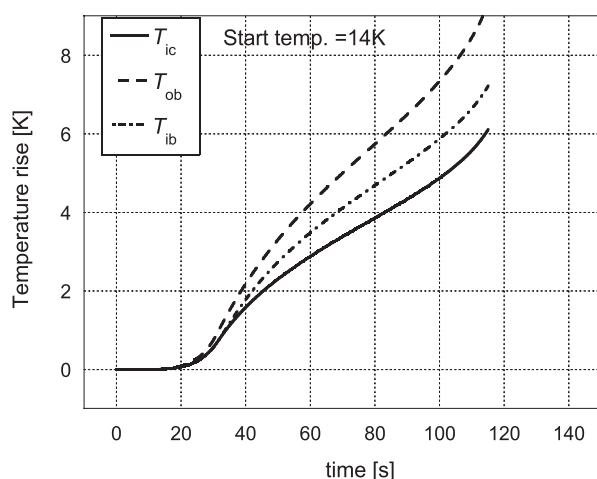


Fig. 10 Numerical results of sensor temperature.
($T=14\text{K}$, $I=1.5I_c$)

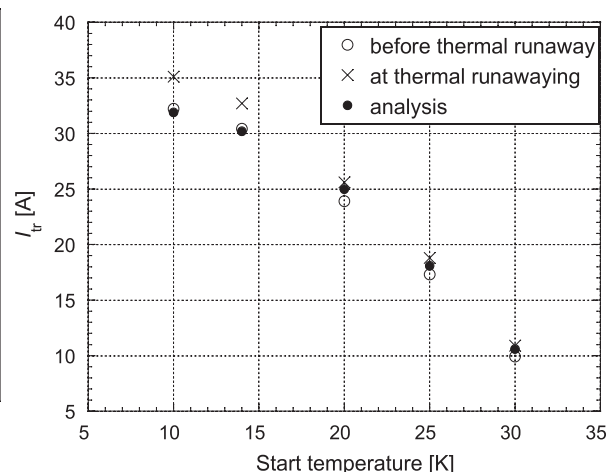


Fig. 11 Comparing between experimental and analytic result of thermal runaway current.

重い電子系 CePtSi_2 における圧力誘起超伝導の探索

九州大学大学院 理学研究院 物理学部門 (現：新潟大学工学部)

中野智仁

1. はじめに

なぜ超伝導を採るのであろうか。その答えの一つは室温超伝導の実現にあるだろう。化石燃料の枯渇などのエネルギー問題や地球温暖化現象が深刻化する近年、エネルギーの有効利用が必要であることは言うまでもない。太陽光を利用した光電変換材料、廃熱を有効利用できる熱電変換材料、二酸化炭素を排出しない燃料電池、フロン等のガスを使用しない磁気冷凍等既に実用化されているものから実用化寸前のものまで様々である。電気抵抗ゼロと言った特徴を持つ“超伝導”も送電時等のエネルギーロスをゼロに近づける等、画期的な省エネ効果を実現する材料である。しかしながら超伝導をよく説明する BCS 理論から予測される超伝導転移温度 T_c は最高でも数 10 K であり、室温(300 K)にはほど遠い。上記の観点で着目すべきは 100 K 以上の比較的高い T_c を示す高温超伝導体で報告されている非 BCS 超伝導であろう。著者は 2007 年 11 月～2009 年 8 月まで九州大学理学部に在籍していた。本稿では在籍当時、著者らが発見した重い電子系 CePtSi_2 における圧力超伝導の発見について、実験の苦労話を交えながら時系列に沿って紹介する。詳しい結果と考察は既に公表されている[1-3]等を参考にされたい。

2. 研究の背景

高温超伝導等に代表される遷移金属酸化物や重い電子系等 f 電子を持った希土類化合物に代表される電子相関が強い系(強相関電子系)では電子間の相互作用が物質の性質に大きな影響を与える。これらではスピン、軌道、電子、格子等の相互作用が圧力、磁場、置換等の外場によって調整され量子相転移が誘起される事が知られている。量子相転移点近傍では“非 BCS 超伝導”や非フェルミ液体等の興味深く着目すべき現象が観測されることがあり、精力的な研究が国内外で行われている。 f 電子を 1 つ持った Ce 化合物では磁気秩序を安定化させる RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) 相互作用と逆に遮蔽する近藤効果が競合しバラエティ豊かな性質を示すことが多い。これらは $4f$ と伝導電子の混成の変化

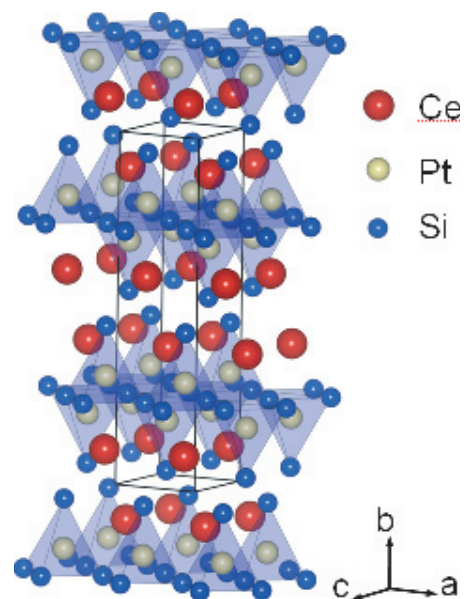


図 1: CePtSi_2 の結晶構造

によって調整されることとなる。2 K 以下で反強磁性を示す CePtSi₂ は圧力によって混成が調整され新しい量子相を示す候補の一つであったと言える。

CePtSi₂ は斜方晶 CeNiGe₂ 型、*b* 軸方向への層状構造を持つ(*a* = 4.288, *b* = 16.718, *c* = 4.238 Å)(図 1)。電子比熱係数は *T_N* 以上の常磁性領域で 600 mJ/molK² を示す重い電子系物質群の一つである[4]。特徴的な近藤温度 *T_K* は比熱、電気抵抗、磁化測定から 3 K 程度と見積もられている[5]。比熱の飛び、電気抵抗の折れ曲がりと関連付けられる反強磁性秩序は 2 K 以下で観測される[1-5]。同程度の *T_K* と *T_N* はこの系で近藤効果と RKKY 相互作用がよく拮抗していることを示す。圧力下による研究は巨海らによってなされていた[6-8]。*T_N* は圧力増加にともなって減少し、外挿線からおよそ 1 GPa 程度で反強磁性は消失することが予想された。代わりに 2 K 以上ではあるが、電気抵抗の log *T* 的な温度依存性に代表される非フェルミ液体的な振る舞いが観測されていた。また加賀山らや宮川らによって ³He 冷凍機を用いて 0.3 K 程度までの測定はなされていたようであったが、超伝導を見つけるには至っていなかった。そこで本研究ではより温度を下げることができる ³He-⁴He 希釈冷凍機を用いて高精度な実験を行うことによって CePtSi₂ の圧力誘起超伝導を探索し、その起源の解明に貢献することを目的に始まった。

3. 実験方法

CePtSi₂ 多結晶試料はアーク溶解によって作成された。溶解後、均一化のため 1100°C、真空中で 3 週間熱処理がなされた。試料は放電加工機で 0.5 × 1 × 1 mm³ の大きさに整形した。電気抵抗測定には LR700 レジスタンスブリッジを用いた交流 4 端子法によって行った。希釈冷凍機を用いることによって 50 mK から室温までの測定を行った。圧力発生には NiCrAl-CuBe ハイブリッド-ピストンシリンダー圧力セルを採用した。精度の高い圧力生成には定荷重型の圧力セルを用いるべきであるが、荷重を印加するための室温から直結するプローブが必要になるため希釈冷凍機での測定には不向きである。本実験ではクランプ型を用いた。圧力媒体にはダフニオイル 7373 を用いた。磁場印加は 20 T 級超伝導磁石を用いて 0.7 T まで印加した。交流磁化測定は相互インダクタンス法で行った。1 KHz、0.02 Oe の交流磁場を用い、ロックインアンプによって検出した。圧力生成は電気

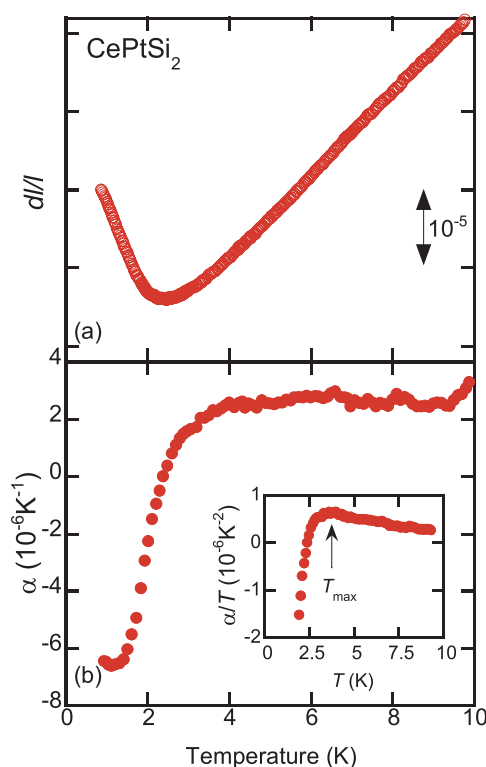


図 2: CePtSi₂ の熱膨張 dl/l (a) と熱膨張係数 α (b) [2].

抵抗測定と同様のセッティングで行った。常圧での熱膨張測定はキャパシタンス法を用い、 ^3He クライオスタットを用いて行った。

4. 実験結果と考察

4.1. 熱膨張 $d\ell/l$

図 2(a)に CePtSi_2 熱膨張 $d\ell/l$ の温度依存性を示す。10 K 以下で $d\ell/l$ は 3 K 付近まで温度に対して線形的に減少する。反強磁性転移にともなって 2.5 K 以下で $d\ell/l$ は上昇に転じる。2.5 K 付近の極小前後の線形外挿線の交点を T_N と定義し、 $T_N = 2.1$ K が見積もられた。この値は比熱や後述する電気抵抗から見積もられた値よりも僅かに大きい。 $d\ell/l$ の温度微分から見積もった熱膨張係数 $\alpha (= \frac{1}{l} \frac{d\ell}{dT})$ を図 2(b)に示す。10 K で $2 \times 10^{-6}(\text{K}^{-1})$ であった α は 4 K 程度まではほぼ一定値を示す。それ以下では急激な減少を示し、2.4 K 以下では負の値を示す。1.2 K 以下では $-6.5 \times 10^{-6}(\text{K}^{-1})$ を示した。同様の振る舞いは反強磁性転移を示す CePd_2Si_2 [9], CeCu_6 [10], Ce_2RhIn_8 [11]等の Ce 系重い電子系化合物でも見られる。通常の金属では熱膨張係数は以下の(1)式に従うことが知られている。

$$\frac{\alpha(T)}{T} = A + BT^2 \quad (1).$$

ここで A と B は物質固有の定数である。また、第一項は電子および磁気的な寄与、第二項は格子の寄与を示す。図 2(b)の挿入図に示される $\alpha(T)/T$ は 10 K 以下で温度降下にもなって上昇を示す。グリューナイズンの関係によれば、グリューナイズン定数の温度依存を無視すれば $\alpha(T)$ は比熱 C に比例することから、 $\alpha(T)/T$ の増加は C/T の増加、すなわち電子比熱係数 γ の増加を示唆する。実際 Geibel らによって報告されている C/T も T_N まで増加し本結果と一致する[4]。図 2(b)の挿入図に示されるとおり $\alpha(T)/T$ は 3.6 K で極大を示す。これは T_N よりもむしろ T_K に近い。同程度の T_N と T_K が T_N (および T_K) 近傍の振る舞いを曖昧にさせ、正確な T_N の見積もりを困難にしているのであろう。そう考えると熱膨張から見積もった T_N が他より若干高いのも理解できる。

さて、本稿のタイトルは圧力誘起超伝導の探索である。非 BCS 超伝導や非フェルミ液体等の興味深い現象は量子臨界点(QCP)近傍で現れやすいことは先に述べたとおりであり、実験的アプローチとしては量子臨界点を探すことになる。 T_N の 1/10 程度の超伝導転移温度 T_c を想定すると ^3He 冷凍機では十分とは言えず、液体ヘリウムを大量に消費する希釈冷凍機を用いた実験が必要である。ヘリウムも有限な資源であり、液化するために大量の電力を消費する以上、QCP が出現する圧力を検討しておく必要である。以下に示されるように熱力学的考察から QCP を見積もった。 CePtSi_2 の反強磁性転移は 2 次の相転移であるので、エーレンフェストの関係式を基にして dT_N/dP は以下の式で記述される。

$$\frac{dT_N}{dP} = \frac{T_N \Delta \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)}{\Delta C_p}. \quad (2)$$

ここで、 T_N (~ 2 K)での ΔC_P は定圧比熱の飛びでGeibelらによって測定された 1.2 J/molKを用い[4]、 V は体積、 $\Delta(\partial V/\partial T)$ は T_N 前後の V の温度微分の差である。残念ながら本測定は多結晶試料によるため、正確な $\partial V/\partial T$ を見積もることはできない。ここでは格子定数 a, b, c が均一に温度依存するものとして計算した($dV/V_{\text{poly}} = da/a = db/b = dc/c$ とする)。これらの条件から dT_N/dP は -2 K/GPaと見積もられた。つまり $T_N = 0$ となるQCPが 1 GPa近傍にあることが示唆された。この圧力であれば 3 GPa程度まで加圧可能であるオーソドックスなハイブリッド型ピストンシリンダーでの測定が可能である。また 1 GPa近傍を細かく測定するという指針ができたことになる。これらをもとに圧力下の実験を行った。

4.2. 圧力下電気抵抗と交流磁化

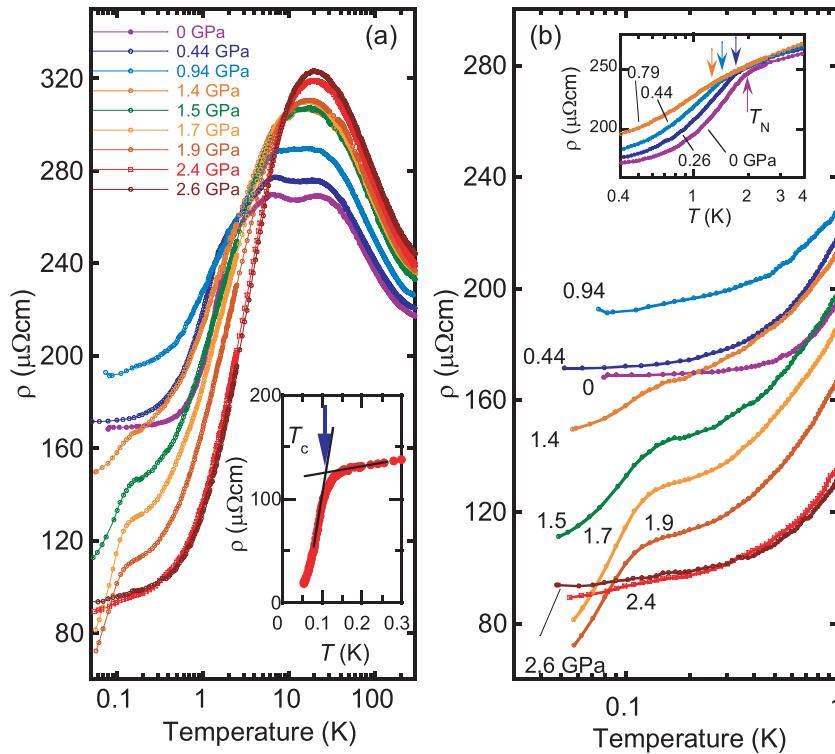


図 3: (a)CePtSi₂ の圧力下電気抵抗の温度依存性. 挿入図: 1.7GPa, 10 μ A での T_c 近傍の詳細. (b)低温領域の拡大. 挿入図: 0.79 GPa までの T_N 近傍の詳細。[1]

図 3(a)は圧力下における CePtSi₂ の電気抵抗 ρ の温度依存性である。実際にはより多くの圧力点での測定を行ったが、一部を抜粋した。ちなみに測定には途中学会等による中断があったが延べ1ヶ月を要し、その間20回程度希釈冷凍機を酷使することとなった。使ったヘリウムの量は計り知れない。印加電流は温度降下とともに段階的に減少させ、最低

温近傍では $100 \mu\text{A}$ 程度である。常圧の ρ は室温から温度降下にもなって増大し、 23 K (T_2) と 7 K ($=T_1$) 付近に二つの極大を示す。これらは結晶場と近藤効果の相互作用をともなった Ce 系の重い電子系の特徴的振る舞いである。 7 K 以下で ρ は減少し、反強磁性転移によってさらなる減少を 2 K 付近で示す。この様子は図 3(b) の挿入図に示されている。 2 K 付近の変曲点の前後の線形外挿線の交点から $T_N = 1.8 \text{ K}$ を見積もった。 T_N 以下で ρ はフェルミ液体的な $\rho \sim T^2$ を示した。これらの結果は先行研究と一致する[4-8]。常圧での結果が確かめられ、いよいよ圧力を印加することとなった。圧力下の ρ の全体像は図 3(a) に示される。全般的に圧力によって ρ は劇的な変化を示した。もっとも興味のある低温領域に着目する。図 3(b) 挿入図に示されるように T_N は圧力によって減少する。 T_N での異常を追うことによって 0.79 GPa までは反強磁性転移が存在することが確認できた。 0.79 GPa までの T_N の圧力依存性は -1 K/GPa と見積もられ、熱膨張から見積もられた値と同程度であり、先の見積もりが有効であったと言えるだろう。 0.94 GPa では最低温 ($\sim 50 \text{ mK}$) まで異常は観測されなかった。また低温領域の ρ は圧力増加にもなって増大した。これは残留抵抗 ρ_0 の増大を示す。 1.4 GPa では ρ は減少し、QCP 近傍で ρ_0 が極大を示す傾向があることから反強磁性は消失し QCP を迎えたことを示すと考えられる。 $P_c = 1.4 \text{ GPa}$ で突然 ρ は 0.15 K 付近で新たに急激な減少を示した。この異常は 1.7 GPa まで圧力増加にもなって発達し 2.1 GPa まで観測された。この異常は超伝導転移を推測させ、著者はそれまでにいたる実験の疲れが吹き飛んだことを記憶している。この異常は 1.7 GPa 付近でもっとも明確になった。この異常が超伝導に起因することを確かめるため、 1.7 GPa で ρ の電流依存性を調べた。図 3(a) の挿入図は $10 \mu\text{A}$ での結果である。 $\rho(10 \mu\text{A})$ は $\rho(100 \mu\text{A})$ に比べて明らかに鋭く減少した。また 50 mK ではゼロに接近した。この様な ρ の電流依存性は超伝導の典型的な特徴

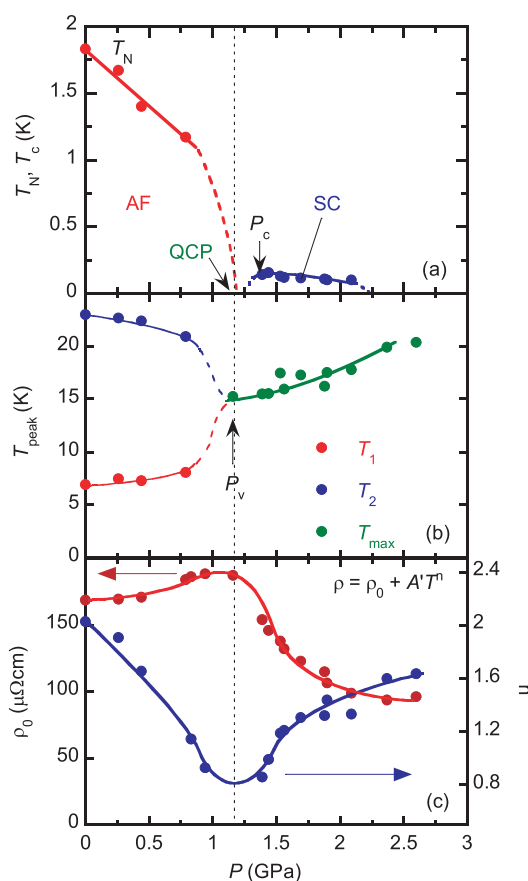


図 4: (a) 圧力下の CePtSi_2 相図。点線は T_N の予想される依存性を示す。(b) T_1 , T_2 および T_{max} の圧力依存性。(c) ρ_0 および n の圧力依存性。[1]

であるが、本結果においてはむしろ接触抵抗等の有限の抵抗による自己発熱が原因である可能性が高い。しかしながら、ほとんどゼロの抵抗によって著者とその共同研究者らは圧力誘起超伝導であることを確信(?)した。 ρ の急激な減少が始まる温度前後の線形外挿線の交点を T_c と定義し 1.7 GPa で $T_c = 0.14$ K を見積もった。 T_c および T_N の圧力依存性を図 4(a) に示す。

1.7 GPa ではさらに磁場中での測定を行った。図 5 に 0.7 T までの磁場中の ρ を示した。磁場は電流と平行方向印加されている。 ρ は T_c 以上では磁場によって変化を示さないが T_c 以下では ρ の急激な減少が抑制され、0.7 T では消失した。これは CePtSi₂ の超伝導の証拠の一つである。 T_c の磁場依存性は図 4 挿入図(a)に示されるが、上部臨界磁場 B_{c2} は 1.7 GPa ではおよそ 0.7 T、 B_{c2}/T_c は 5(T/K) と見積もられた。この値は BCS 理論から予測されるパウリリミットよりもはるかに大きく、CePtSi₂ の超伝導が BCS 理論の枠を超えた非 BCS 超伝導であることが期待できる。

CePtSi₂ の超伝導の証拠は揃ってきたが未だ完全ではなかった。実はこの時点で論文を書き上げ投稿したがレフリーも同様の判断であった。そこで当時計画していた交流磁化測定を緊急で行うことにした。マイスナー効果を確認することによって超伝導の確かな証拠を得る目的である。しかしながら希釈冷凍機での測定、それも最低温付近での測定はヒーティング問題等により容易ではなかった。それでも最適条件を根気強く探すことによって測定が可能になった。図 4 挿入図(b)に CePtSi₂ の 1.8 GPa での交流磁化 M_{ac} を示す。 M_{ac} は T_c 付近で減少を示し、マイスナー効果が確認された。これは超伝導の直接的な証拠であり、さらに体積分率は 30% と見積もられ、

CePtSi₂ の超伝導がバルクの現象であることが確認された。この時点で確かに CePtSi₂ が圧力誘起超伝導体であることが確認された。図 4 挿入図(b) T_c の磁場依存性は電気抵抗から見積もられたものとおおよそ一致する。

さて、高温領域の結果についても少し言及したい。常圧の ρ は先述のとおり T_1 および T_2 で極大を示した。これらは図 4(b)に示されるように 1.15 GPa 付近でマージしその後は T_{max} と圧力増加にともなって増大する。このような振る舞いは CeCu₂Si₂[12], CeCu₂Ge₂[13] や CeAl₂[14] でも報告されている。このマージする圧力を P_v と定義する。通常、圧力で伝導に寄与する d 電子と磁気的な f 電子の混成の

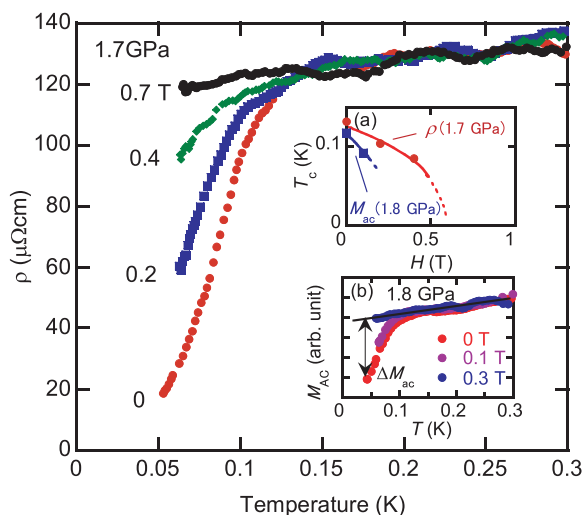


図 5: 1.7 GPa での CePtSi₂ の磁場中電気抵抗。挿入図: 電気抵抗および交流磁化率から見積もられた T_c の磁場依存性。(b) 1.8 GPa での交流磁化率。[1]

増大によってする近藤効果は増大し、 T_{\max} の増大は近藤温度の増大を示す。 T_1, T_2, T_{\max} の圧力依存性は図 4(c)に示される。

4.3. 反強磁性の構造

QCP 近傍の電気抵抗は

$$\rho_m = \rho_0 + A'T^n \quad (3)$$

でよく表される。ここで A' は定数、 n は指数定数とある。フェルミ液体であるとき n は 2 に近づくと、量子臨界点近傍ではその磁氣的揺らぎによって n は 2 から外れ、三次元的強磁性、三次元的反強磁性および二次元的反強磁性ではそれぞれ 5/3, 3/2 および 1 を示す [16,17]。図 4(c)に示されるように n は常圧で 2 に近いが圧力増加にともなって減少し QCP 近傍では 1 に近い。これは CePtSi₂ の反強磁性が二次元的であることを推測させる。図 1 に示されるとおり、CePtSi₂ は層状構造をとることからも矛盾はない。また ρ_0, n ともに 1.2 GPa 付近で極値を示し、そこに QCP があることを示す。1.2 GPa 以上で n は増大し再びフェルミ液体的な 2 に近づいた。Magnetic Interaction Model では磁気秩序温度(この場合は T_N)は量子揺らぎによって $|P-P_c|^x$ で抑制される [17, 18]。ここで x は二次元反強磁性では 2/3、三次元反強磁性では 1 を示す。図 4(a)に示されるとおり 0.79 GPa までの T_N は圧力により線形的に減少していることから x は 1 と見積もられ、CePtSi₂ の反強磁性がやはり二次元的であることが示された。一方 0.79 GPa 以上で T_N は突如として消失し反強磁性量子揺らぎとは異なったなんらかの揺らぎ、おそらく後述する価数揺らぎの存在が示唆される。

4.4. 圧力誘起超伝導の起源

これまで記述したとおり CePtSi₂ の圧力誘起超伝導は著者らによって発見された。最後にこの超伝導の起源について考察する。重い電子系における超伝導は現在ではさほど珍しくはなく圧力下も含めると 20 種類以上が報告されている。その中で三宅らは CeRh₂Si₂ や CeIn₃ 等で観測された反強磁性スピン揺らぎ媒介(タイプ I)とするものと CeCu₂Si₂ や CeCu₂Ge₂ で観測された価数の揺らぎを媒介とするもの(タイプ II)に分類した [19]。多くの重い電子系超伝導はタイプ I であるが、一方でタイプ II の報告例は少なく、その出現圧力領域が大きい(T_c の最大値を示す圧力は CeCu₂Si₂ では 5 GPa 近傍、CeCu₂Ge₂ では 17 GPa 近傍)。この場合、ピストンシリンダーでの実験が難しいため、各種の圧力下測定が困難である。CePtSi₂ の圧力誘起超伝導はどちらのタイプであろうか。現在のところ後者である可能性が高い。CePtSi₂ における超伝導とタイプ II 超伝導は酷似している。両者とも T_c のピークは反強磁性消失圧力付近よりも高压であり、さらに比較的広い圧力範囲で存在する。また電気抵抗の T_1, T_2 がマージする圧力と T_c の最大値を示す圧力が一致することも同様である。Jaccard らは圧力によって結晶場分裂と近藤温度が同程度になり Ce が中間価数状態になり始めるとき T_1 と T_2 がマージすることを示した [13]。比較的低い圧力で出現する CePtSi₂ の超伝導はまだ報告例の少ないタイプ II 超伝導の実験的アプローチからの起源解明に有力な物

質となるであろう。しかしながら現状の試料は残留抵抗比が小さい等、純良な試料とは言えない。また、同じ結晶構造を持つ CeRhGe_2 でも圧力誘起超伝導が報告されており[20]、他の元素置換系も含めた純良試料作成が今後の課題である。

5. まとめ

本研究では重い電子系 CePtSi_2 の熱膨張および圧力下電気抵抗、交流磁化測定を行い、圧力によって反強磁性転移は消失し 1.4 GPa で超伝導を示すことを発見した。また、この超伝導は価数揺らぎに起因する超伝導であることを示唆した。今後は純良試料の作成と価数を観測する実験が必要であり現在進行中である。

謝辞

本研究は九州大学(現久留米工大)の巨海玄道教授、金沢大学の大橋政司准教授、大阪大学竹内徹也助教、東京大学物性研究所の上床美也准教授、松林和幸助教との共同研究として行われました。また希釈冷凍機では琉球大学の辺土正人准教授、広島大学才賀裕太博士に協力をいただきました。交流磁化測定では九州大学河江達也准教授に助言をいただきました。ここに謝意を表明いたします。また本研究では直接関わりませんでしたが、このセンターだよりを執筆する機会を与えてくださった九州大学和田裕文低温センター長、および、九州大学在籍時の低温実験の際にお世話になった上田雄也氏、上田廣孝氏に感謝いたします。

References

- [1] T. Nakano, M. Ohashi, G. Oomi, K. Matsubayashi, and Y. Uwatoko, Phys. Rev. B 79, 172507 (2009).
- [2] T. Nakano, G. Oomi, and T. Takeuchi, J. Phys.: Conf. Ser. 150, 042139 (2009).
- [3] T. Nakano, M. Ohashi, G. Oomi, K. Matsubayashi, and Y. Uwatoko, J. Supercond. Nov. Magn. In press.
- [4] C. Geibel, C. Kammerer, B. Seidel, C. D. Bredl, A. Grauel, and F. Steglich, J. Magn. Magn. Mater. 108, 207 (1992).
- [5] W. H. Lee, K. S. Kwan, P. Klavins, and R. N. Shelton, Phys. Rev. B 42, 6542 (1990).
- [6] G. Oomi, T. Kagayama, Y. Uwatoko, H. Takahashi, and N. Mori, J. Alloys Compd. 207, 278 (1994).
- [7] G. Oomi, T. Kagayama, Y. Uwatoko, H. Takahashi, and N. Mori, J. Alloys Compd. 207, 278 (1994).]
- [8] G. Oomi *et al.*, JJAP Series 11, 165 (1998).
- [9] N. H. van Dijk, B. Fåk, T. Charvolin, P. Lejay, and J. M. Mignot, Phys. Rev. B 61, 8922 (2000).
- [10] H. Tsujii, E. Tanaka, Y. Ode, T. Katoh, T. Mamiya, S. Araki, R. Settai, and Y. Onuki, Phys.

Rev. Lett. 84, 5407 (2000).

[11] A. Malinowski, M. F. Hundley, N. O. Moreno, P. G. Pagliuso, J. L. Sarrao, and J. D. Thompson, Phys. Rev. B 68, 184419 (2003).

[12] A. T. Holmes, D. Jaccard, and K. Miyake, Phys. Rev. B 69, 024508 (2004).

[13] D. Jaccard, and A. T. Holmes, Physica B 359, 333 (2005).

[14] H. Miyagawa, G. Oomi, M. Ohashi, I. Satoh, T. Komatsubara, M. Hedo, and Y. Uwatoko, Phys. Rev. B 78 (2008).

[15] T. Moriya in *Spin Fluctuations in Itinerant Electron Magnetism* (Springer, Berlin, 1985).

[16] T. Moriya and T. Takimoto. J. Phys. Soc. Jpn. **64**, 960–969 (1995).

[17] N. D. Mathur, F. M. Grosche, S. R. Julian, I. R. Walker, D. M. Freye, R. K. W. Haselwimmer, and G. G. Lonzarich, Nature 394, 39 (1998)

[18] A. J. Millis, Phys. Rev. B 48, 7183 (1993).

[19] 三宅和正, 固体物理43, No.4,171 (2008).

[20] 本多史憲, 村中大志, 吉内伸吾, 広瀬雄介, 撰待力生, 大貫惇睦, 日本物理学会第64回年次大会28pTD-8

本稿は希釈冷凍についての紹介であるが、分量が多いので分割して掲載する予定である。全体の構成は、次のとおりである。

- (Ⅰ) 1. 希釈冷凍の物理的原理 [九州大学低温センターだより No.2 (2008年3月)に既掲載]
- (Ⅱ) 2. 混合器 3. スティル [九州大学低温センターだより No.3 (2009年3月)に既掲載]
- (Ⅲ) 4. 熱交換器 5. 1Kポット [本号に掲載]
- (Ⅳ) 6. 希釈冷凍機の種類 [次号に掲載予定]

4. 熱交換器

希薄溶液と濃厚溶液が流れながら熱交換するための、低温熱交換器は希釈冷凍機の主要な部品の中の一つである。希釈冷凍機では2つの種類の熱交換器が用いられる。1つは熱交換器の長さ方向に沿って壁の温度が連続的に変化するものであり、もう1つは壁の温度が一定のステップ交換器である。最も簡単なものは、熱伝導度の小さい2つの肉薄パイプの細い方を太い方に挿入したチューブインチューブ型である。良好に動作したキュプロニッケル製のチューブインチューブ型熱交換器の特性値を、表6に示す。この種の熱交換器は、簡便であること、十分低温が得られること(約25 mK)、体積が小さいため定常運転までの時間が短いこと等の長を有している。この熱交換器の内側のパイプのホットエンドにその内径と同じくらいの線を挿入して、フローインピーダンスを付加することは有益である。この副インピーダンスは、 ^3He が蒸発(気化)して好ましくない状況が発生するのを抑えるのに有効である。

表 6 チューブインチューブ型熱交換器のパラメータ [1]

内側のチューブの外径と肉厚 (mm)	外側のチューブの外径と肉厚 (mm)	長さ (m)	\dot{n}_3 (mol/s)	T_m (mK)
0.40 × 0.08	1.19 × 0.08	1	1.4×10^{-5}	26
0.40 × 0.08	1.19 × 0.08	1	0.9×10^{-5}	23
0.40 × 0.08	1.19 × 0.08	1.5	0.9×10^{-5}	22

熱交換の面積を増加するためには、内側のパイプの径を太くするのが望ましいが、溶液の流速が減少するため濃厚溶液の相分離が発生する可能性がある。それは、超流動ブロックを形成し、動作が不安定になる[1]。このため、内側のパイプの外径は0.4~0.7 mmに設定されている。また外側のパイプの外径は、粘性発熱を減少するためには径を太くするほうがよいが、そうすると希薄溶液の対流による不安定性が生じるため、両者の妥協によるところで決まる。この不安定性は、熱交換器の下部より上部の方が溶液密度が大きいため

本稿は、ウクライナ科学アカデミー低温物理工学研究所編、矢山英樹、I.B.ベルクトフ訳「超低温の実験技術」九州大学出版会、2000年、からの抜粋である。

重力によって生じるものである。

熱交換器を設計するときに考慮しなければならない幾つかの重要なファクターがある。主なものは、カピッツァ（Kapitza）抵抗である。

$$R_K = \Delta T / \Delta \dot{Q} \quad (14)$$

ここで、 ΔT は液体と固体の間の温度差であり、 $\Delta \dot{Q}$ は界面の単位面積を通過して流れる熱量を表わす。カピッツァ抵抗は、データの再現性が悪く、表面の質と処理状態に依存する。しかし、多くの場合、低温で温度依存性 $R_K \sim T^{-3}$ を示すことが多くの研究から判っている。

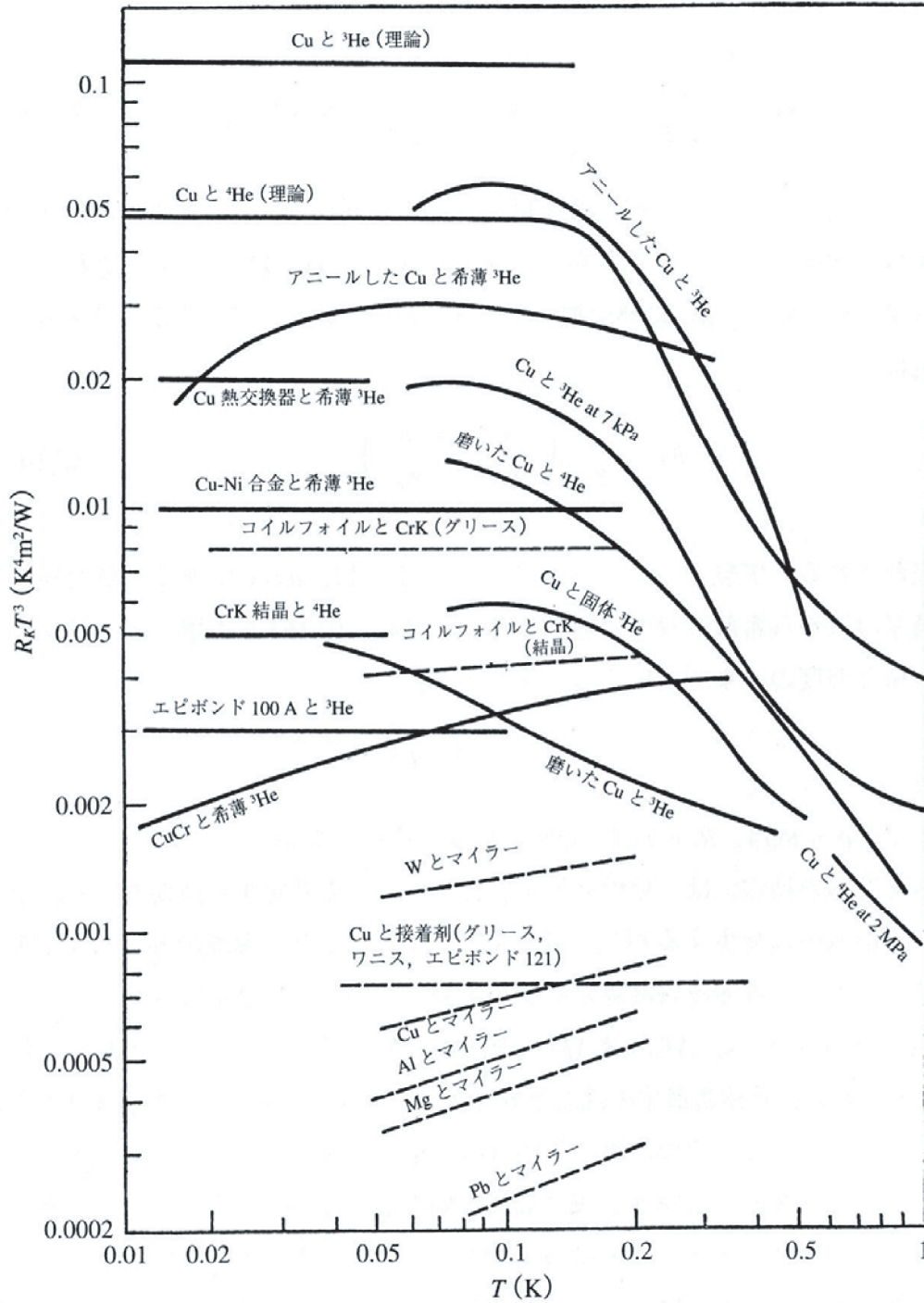


図 11 ^3He と固体の間のカピッツァ抵抗 [20]

したがって $\Delta T \ll T$ の場合、固体と濃厚相および固体と希薄相間のカピッツァ抵抗は、それぞれ次のように表わされる。

$$R_{KC} = \frac{a}{A_C T^3} \quad \text{および} \quad R_{KD} = \frac{b}{A_D T^3} \quad (\text{K}^4 \text{m}^2 \text{W}) . \quad (15)$$

ここで、 A_C と A_D はそれぞれ濃厚相と希薄相の熱交換器の面積である。 a と b の値は実験的に決まる。これらの実験データを、図 11 に示す。これらのカピッツァ抵抗 R_{KC} と R_{KD} は熱交換器の計算においては直列につながっており、全抵抗は

$$R_K = \frac{1}{T^3} \cdot \left(\frac{a}{A_C} + \frac{b}{A_D} \right) \quad (16)$$

で表わされる。実験データ[2]から分かるように、 $a \cong b$ である。熱交換器中の濃厚溶液から希薄溶液への熱流は、式(14)~(16)を考慮して、熱交換器の面積と温度の 4 乗に比例する。すなわち、

$$\dot{Q} = \alpha (T_C^4 - T_D^4) .$$

ここで、 $\alpha = R_0 / 4$ 、 $R_0 = R_K \bar{T}^3$ であり温度に依存しない。

熱交換器の動作には、粘性発熱が影響することを考慮する必要がある。その場合、溶液中に発生するパワーは式(5)で表わされ、温度上昇は式(7)で計算される。粘性発熱の計算に必要な実験データを、表 4 に示す。

理論的[3]には、 $\Delta T_D \cong 8 \Delta T_C$ である。すなわちこれは、同じ形状で流れが同じであれば、希薄溶液中の温度上昇は濃厚溶液中のそれに比べて、8 倍大きいことを示している。そのため、条件 $\Delta T_D = \Delta T_C$ を達成するためには、インピーダンスを $\Delta Z_C = 8 \Delta Z_D$ とするか、または式(6)から分かるように、希薄溶液のパイプの外径を濃厚溶液のパイプの 1.7 倍大きくしなければならない。

粘性発熱を考慮すれば、パイプの径を増加する方が良いが、その場合、溶液の熱容量も同様に増加する。そのため、粘性発熱を小さく抑え、熱容量を増やさないような最適なパイプ径が存在する。すなわち、

$$\dot{Q} = \frac{128l}{\pi d^4} \eta \dot{V}^2 + \frac{\pi d^2}{4l} \kappa \Delta T = \frac{\alpha}{d^4} + \beta d^2 .$$

ここで、 κ は溶液の熱伝導係数である。パイプの径の最適値は、 $d_{opt} = (2 \alpha / \beta)^{1/6}$ と計算される[4]。

熱交換器の厳密な解析のためには、2 つの連立方程式を定義する必要がある[5]。それは熱伝導、粘性発熱、カピッツァ抵抗、およびエンタルピー変化を含んでいる。一般に、その方程式は解析的には解けない。しかし、簡単化することにより、実際的な目的に必要な方程式を得ることが可能である。粘性発熱と熱伝導が小さいと仮定し、カピッツァ抵抗が $R_K \sim T^{-3}$ で表わされるとすれば、次のパラメータ間の関係を記述する簡単な方程式を立てることが可能である。すなわち、混合器の温度を T_m (K)、熱交換器の面積を A (m^2)、循環速度を \dot{n}_3 (mol/s)、混合器への熱流入を \dot{Q}_m (W) とすれば[4,6]、

$$T_m^2 = 6.4 R_{Km} \frac{\dot{n}_3}{A} + 1.22 \times 10^{-2} \frac{\dot{Q}_m}{\dot{n}_3} . \quad (17)$$

ここで、 $R_{Km} = 2 R_K T^3$ $\text{m}^2 \text{K}^4 / \text{W}$ であり、温度に依存しない。式(17)は、循環速度と熱流入が分かっているならば、必要な温度を得るための熱交換器の面積を計算するのに有用である。

$A \rightarrow \infty$ であれば、式(17)は(4)式に帰着される。そして、 A が非常に小さいときには、式(17)の第2項は無視できる。希釈冷凍機においては、 $\dot{Q}_m \sim 10^{-7} \sim 10^{-8}$ Wである。式(17)で計算されるデータは、連続カウンターフロー型熱交換器の実験データとよく一致する。

(17)から分かるように、希釈冷凍機の冷凍パワー \dot{Q}_m （定常運転状態では、熱流入に等しい）は、循環速度の単調関数ではない。

$$\dot{Q} = 82\dot{n}_3 T^2 - \frac{5.25 \times 10^2}{A} R_{Km} \dot{n}_3^2 . \quad (18)$$

このとき、最適循環速度は条件 $\partial \dot{Q} / \partial \dot{n}_3 = 0$ から見出される。すなわち、

$$(\dot{n}_3)_{\text{opt}} = \frac{T^2 A}{12.8 R_{Km}} . \quad (19)$$

これは与えられた温度での最大冷却パワーに相当する。最大冷却パワーは、(19)式を(18)式に代入することによって分かるように、温度の4乗に比例する。

$$\dot{Q}_{\text{max}} = 3.2 \frac{T^4 A}{R_{Km}} . \quad (20)$$

式(20)は、カピツァ抵抗が T^{-3} に比例するとして得られた。温度が高くなると、条件式(19)は満足されず、 $(\dot{n}_3)_{\text{opt}}$ は最大循環速度を超える、 $\dot{Q} \sim T^2$ 。

式(17)による見積もりでは、混合器の温度 $T_m = 25$ mKで循環速度 $\dot{n}_3 = 10^{-5}$ mol/sの場合、熱交換器の面積は $A = 12$ cm²が必要である（ \dot{Q}_m の値は無視し、キュプロニッケルの場合 $R_{Km} = 1.2 \times 10^{-2}$ m² K⁴/Wである[4]）。表6に示される熱交換器のパラメータは、これらの条件を満足している。

この簡単な熱交換器の短所は、混合器へ流れていく³Heに対して大きな抵抗をもっているため、大きな循環速度を得ることができないことである。加えて、循環速度が $\dot{n}_3 = 10^{-4}$ mol/sで温度 $T_m = 25$ mKを得るためには、式(17)から分かるように、熱交換表面積250 cm²が必要である。この短所はスパイラルインチューブの構造をもつ熱交換器で克服できる[4]。内側のパイプを長さ数メートル、直径1.5~2 mmの細いチューブで作ったスパイラルで置き換える。この細いチューブは直径2~2.5 mmの棒に巻きつけて作る。巻きつけることによってチューブがつぶれて径が小さくなった長さ1.5~2 mのスパイラルを、ステンレスパイプの中に挿入する。このパイプを引っ張って絞る、スパイラルがステンレスパイプ中にきっちり収まるようにする。外側のパイプは直径4~5 mmになり、熱交換器の中には直径2 mmの穴が形成される。これは、チューブインチューブタイプの熱交換器と比べてより大きな熱交換が可能であるので、高い循環速度を得ることができる。このスパイラルインチューブは今日では非常に一般的に用いられている。

温度2~3 mKが、銀のパウダーを含む連続熱交換器を用いた希釈冷凍機で実現されている[4,6]。粒径700 nmの銀粉を焼結すると、表面積は1.8 m²/gになる。この焼結体と液体ヘリウムの間のカピツァ抵抗の測定から、 $R_K \sim T^{-2}$ であることが分かった。式(17)は次のように変更される。

$$T_m = 2.7 R_{Km} \frac{\dot{n}_3}{\sigma} + 0.11 \sqrt{\dot{Q} / \dot{n}_3} . \quad (21)$$

ここで、 $R_{Km} = 27.8$ m² K³/Wである。最適循環速度は絶対温度に比例し、最大冷却パワー

は絶対温度の3乗に比例する。

式(21)から分かるように、循環速度 $\dot{n}_3 = 2 \times 10^{-4} \text{ mol/s}$ で熱流入 $\dot{Q}_m = 3 \times 10^{-8} \text{ W}$ のときに温度 2 mK を得るには熱交換表面積 $A = 235 \text{ m}^2$ が必要である。この表面積は質量 129 g、幅 25 mm のストライプ状の銀の焼結体によって得られた[4]。厚さ 0.1 mm のキュプロニッケルの薄板を、基板として用い、焼結の前に金と銀でメッキする。焼結銀の厚さは 1 mm であり、全長は 104 cm である。この熱交換器は 5 つの部分に分けられる。最初の 2 つは長さ 13 cm で次の 3 つは 26 cm である。粘性発熱を減少するために四角い断面をもつチャンネルを、希薄相側と濃厚相側の両方に用いる。5 つの部分それぞれに最適なサイズのチャンネルを形成する。それらはそれぞれ濃厚相側では、1.6, 2.8, 3.4, 4.2, 5 mm、希薄相側では、4.0, 6.8, 8.3, 10.2, 12.2 mm である。希薄相側の熱交換器を出た直後の温度は、測定値でそれぞれ 6.5, 4.0, 2.7, 2.2, 2.0 mK であった。

したがって、熱交換器に沿っての温度勾配は混合器に近いほど小さく、最終段では 0.2 mK である。これは、この連続熱交換器の特性が、構成や技術的な面でより簡単なステップ交換器の特性に近いことを意味している。

チューブインチューブやスパイラルインチューブなどの連続カウンターフロー型の熱交換器は、20 mK 以下の温度を得るために、通常、分離型（またはステップ型とも呼ばれる）の熱交換器とつながれる。ステップ交換器の数は、重要である。熱交換器を出た直後の希薄相と濃厚相の温度が等しくなるような理想的な熱交換器の解析は可能である。混合器の直前に置かれた一番下のステップ交換器の場合、次のように書ける。

$$\dot{Q}_i + \dot{n}_3 [H_3(x_C, T_{i-1}) - H_3(x_C, T_i)] = \dot{n}_3 [H_3(x_D, T_i) - H_3(x_D, T_m)] \quad (22)$$

ここで、 \dot{Q}_i は熱交換器への熱流入であり、 T_{i-1} はステップ交換機から出て行く濃厚相の温度であり、エンタルピーの値は図 3 に示されている。もし、混合器の温度 T_m が与えられれば、式(3)によって T_i を求めることができ、それから T_{i-1} も求めることができる。熱流入が全くないと仮定した計算では、3 つのステップ交換器の条件を $T_i = 28 \text{ mK}$, $T_{i-1} = 66 \text{ mK}$, $T_{i-2} = 179 \text{ mK}$, $T_{i-3} = 730 \text{ mK} = T_s$ とした場合、混合器の最低温度が 10 mK となる。しかし、実際には多くの熱流入があり、熱交換器の表面積も限られているため、状況は厳しい。

熱交換器の解析のためには、2 つの連立方程式を解かなければならない[5]。

$$a_j \left[\kappa_j \frac{d^2 T_j}{dx^2} + \frac{d\kappa_j}{dT_j} \left(\frac{dT_j}{dx} \right)^2 \right] - \frac{dA}{dx} \int_{T_b}^{T_j} \frac{dT}{R_K} + \eta \dot{V}^2 \frac{dZ}{dx} = n_3 C_j \frac{dT_j}{dx} \quad (23)$$

ここで、 $j = C$ および $j = D$ である。濃厚相の方程式は、式(23)において j を C で置き換えることによって得られ、希薄相の方程式は、 j を D で置き換えることによって得られる。ここで、 a_j は溶液が流れるところの断面積であり、 κ_j は溶液の熱伝導度、 C_j は溶液のモル比熱、 Z はインピーダンス、 x は流れに沿って測った長さ、 T_b は熱交換器の温度であり一定であると仮定する。この解は、繰返し法による数値計算で求められる[5]。式(23)の左辺は、第 1 項が熱伝導を表わし、第 2 項がカピッツァ抵抗の影響を表わし、第 3 項が粘性発熱の影響をあらわす。一方右辺は、エンタルピー変化を表わす。これらの方程式は、解析的には解けないが、境界条件を与えて数値的に解くことができ、濃厚相と希薄相の溶液の温度分布が求まる。

熱交換器に関する計算は、簡単な物理的モデルに基づいて行われている[1, 5, 7, 8, 9, 10,

11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. 焼結型ステップ交換機の構造を、図 12 に示す。この熱交換器は、ステンレス製の上下の蓋と洋銀製の隔壁でできている。金属粉末は隔壁の両側に焼結されている。焼結の際に放射方向に粉末が縮むのを避けるために、最初に薄い層の焼結体を作り、その後、残りの粉末を成形してプレスし焼結するという方法が用いられている。蓋の部分は、濃厚相と希薄相の溶液の通り道となるチャンネルをもち、厚さ 0.3 mm の板をコールドプレスすることによって作られている。粉末を焼結した隔壁と 2 枚の蓋はアーク溶接を用いて接合されている。焼結体の温度はあまり上がらないようにされているため、溶接後も熱交換器は微粒子の状態を保持しており広い表面積を確保している。

文献[19]中の解析によると、熱交換器の全表面積が同じであれば、小さな熱交換器を多数直列に接続して用いるほうが、大きな熱交換器を少数直列に接続して用いるより効果的であることが分かっている。

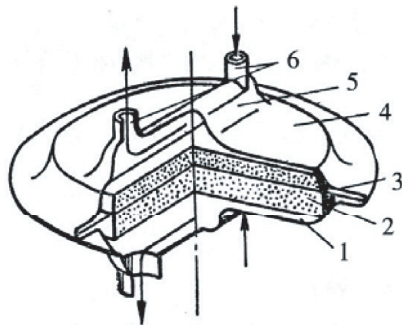


図 12 ステップ熱交換器の模式図 [8]
1 は下の蓋, 2 は焼結体, 3 は隔壁, 4 は上の蓋, 5 はチャンネル, 6 は溶液の出入口.

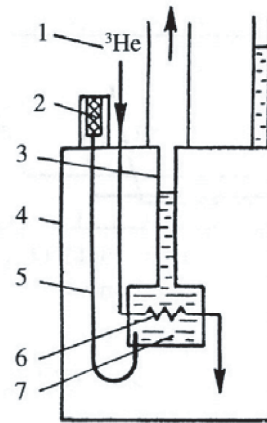


図 13 1K ポットの模式図 [19]
1 は外部ヘリウム槽 (4.2 K), 2 はフィルター, 3 はポンピングライン, 4 は真空容器, 5 はインピーダンス, 6 は ^3He 凝縮器, 7 は 1K ポット.

5. 1 K ポット

1K ポットの主な目的は、戻っていく ^3He を凝縮（液化）することである。その他に、低温部につながるリード線やパイプ類の熱アンカーとして用いられる。この 1K ポットは L. E. De Long, O. G. Symko, and J. S. Wheatley [19]らによって最初に提案された。1K ポットは、時間の制約を受けずに長時間希釈冷凍機を運転できるため、現在では広く用いられている。

1K ポットの模式図を図 13 に示す。1K ポットには、フィルター、パイプ、インピーダンスを通して ^4He が導入される。1K ポットとインピーダンスは、真空チェンバーの中に設けられていて、外部のヘリウム槽とは断熱されている。液体ヘリウムはメカニカルポンプまたは拡散ポンプによって減圧され、温度が 1.1 ~ 1.4 K に下がる。1K ポットの熱負荷は、戻っていく ^3He の凝縮熱である。

1K ポットの内部の液面位置は、熱流入とポンピング速度の比によって決まる。熱流入がある臨界値に達するまでは、1K ポットは定常状態で動作する。もし熱負荷が増加（減

少)して熱力学的状態が変化したときには、それを補償するように 1K ポット内の液面が減少(増加)し、温度は実質的にほとんど変化しない。1K ポットの熱力学的振舞いを、図 14 に示す。1K ポットには、それ以上の熱が供給されると定常動作が壊れて急激な温度の上昇が生じる臨界熱負荷が存在することが分かる。1K ポットの臨界冷却パワー \dot{Q}_{cr} はインピーダンスの値に依存する。インピーダンスの値が増加すれば、冷却パワーは減少し、1K ポットの温度は幾分減少する。1K ポットの動作を決定するパラメータの値を表 7 に示す。

1K ポットに関する計算は、インピーダンス Z の値の決定に帰着される。すなわち、ポンピング速度 \dot{V} が与えられれば、1K ポットの圧力つまり温度を決めるインピーダンスの値が決まるからである。圧力 P とポンピング速度 \dot{V} とヘリウムの消費速度 \dot{n} の関係は次の実験式によって与えられる。

$$P = 25 \left(\frac{\dot{n}}{10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}} \right) \left(\frac{0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}{\dot{V}} \right) \quad (24)$$

この式から、 \dot{n} と \dot{V} を求めることができ、式(13)を用いてインピーダンス Z を計算できる。

1K ポットの冷却パワーは \dot{n} と蒸発熱の積で与えられる。すなわち、インピーダンスの値が増大すると冷却パワーは減少するが、低温が得られる。なぜなら、パイプ中のヘリウムの液面が低くなるからである。

1K ポットの種類は、多数存在する。それらの多くは、スパイラルチューブあるいは焼結体を用いた ^3He 凝縮器と熱交換する容器である場合が多いが、 ^4He をポンピングするチューブと ^3He リターンチューブを渦巻き状にして半田付けしたコールドプレートの形をしたものもある。

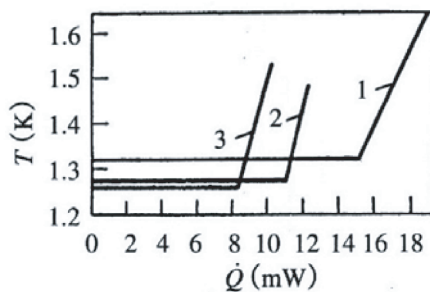


図 14 インピーダンスの値をパラメータとして表わした、1K ポット温度の熱負荷依存性 [19]
1: $Z = 6.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, 2: $1.26 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 3: $2.00 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$.

表 7 インピーダンスが異なる 1K ポットの動作特性 [19]

$Z (\text{cm}^{-3})$	2.0×10^{12}	1.26×10^{12}	6.7×10^{11}
1K ポットの熱平衡温度 (K)	1.26	1.27	1.33
^4He 消費速度 (mol/s)	1.85×10^{-4}	2.4×10^{-4}	3.3×10^{-4}
臨界冷却パワー (mW)	8.2	10.7	15
1K ポットの充填時間 (min)	9	5	2.2

参考文献

- [1] Wheatley J.C., Rapp R.E., Johnson R.T., Principles and methods of dilution refrigeration II, J. Low Temp. Phys. 1971, Vol. 4, No. 1, pp. 1-39.
[2] Зиновьева К.Н. Теплообмен между твердым телом и жидким гелием ниже 1 К, ЖЭТФ

- (Soviet Physics JETP), 1971, Vol. 60, No. 6, pp. 2248-2251.
- [3] Wheatley J.C., Vilches O. E., Abel W.R., Principles and methods of dilution refrigeration I, Physics, 1968, Vol. 4, No. 1, pp. 1-64.
- [4] Frossati G., Obtaining ultralow temperatures by dilution of ^3He into ^4He , J. Phys. (France), Colloq. C6. 1978, Vol. 39, suppl. 8, pp. 1578-1589.
- [5] Siegwarth L.D., Radebaugh R., Analysis of heat exchangers for dilution refrigerators, Rev. Sci. Instr. 1971, Vol. 42, No. 8, pp. 1111-1119.
- [6] Frossati G., Godrin H., Hebral G. *et al.*, Conventional cycle dilution refrigeration down to 20 mK, Phys. Ultralow Temp.: Proc. Int. Symp. Hakone, 1977, pp. 205-224.
- [7] Боровик-Романов, Буньков Ю.М., Дмитриев В.В. и др., Криостат ядерного размагничивания и криостат растворения ^3He в ^4He большой холодопроизводительности, ПТЭ (Instruments and Experimental Techniques USSR), 1985, No. 3, pp. 185-192.
- [8] Гончаров В.А., Григорьев В.Н., Лукашов В.Н. и др., Мощный рефрижератор растворения ^3He в ^4He , Харьков, 1985, 10. с., (Препринт / АН УССР, ФТИИТ; No. 10-85).
- [9] Есельсон Б.Н., Рудаковский Э.Я., Чаговец В.К. и др., Простой криостат растворения непрерывного действия для получения температур до 15 мК, Расчет и исследования криогенных систем, Киев: Наук.думка, 1981. pp. 18-22.
- [10] Неганов Б.С., Новый метод получения сверхнизких температур, Вестн. АН СССР, 1968, No. 12, pp. 49-58.
- [11] Alvesalo T., Anufriev Yu., Buch Lund P., *et al.*, A cryogenic system for studying the properties of ^3He between 1 and 15 mK, Cryogenics 1974, Vol. 14, No. 7, pp. 384-390.
- [12] Ehenholm G.J., Gylling R.G., A dilution refrigerator with large cooling power, Cryogenics 1971, Vol. 11, No. 1, pp. 39-46.
- [13] Ehenholm G.J., Soini J.K., A compact dilution refrigerator, Proc. 14th Int. Conf. Low Temp. Phys. (LT14. 1975), Amsterdam-Oxford-New York, 1975, Vol. 4. pp. 21-24.
- [14] Mueller R.M., Buchal C., Oversluizen T., *et al.*, Superconductivity aluminum heat switch and plated press-contacts for use at ultralow temperatures, Rev. Sci. Instr. 1978, Vol. 49, No. 4. pp. 515-518.
- [15] Niinikoski T.O., Construction of sintered copper heat exchangers, Cryogenics, 1971, Vol. 11, No. 3, pp. 232-233.
- [16] Oda Y., Fujii G., Nagano H., Practical design of a heat exchanger for dilution refrigeration, *ibid.*, 1978, Vol. 18, No. 2, pp. 73-78.
- [17] Rosenbaum R.L., Breuer A., Practical model for the design of step heat exchangers, Rev. Sci. Instr. 1982, Vol. 53, No. 6, pp. 897-904.
- [18] Raudebeau P., Varoquaux E., Copper foil heat exchangers for dilution refrigerators, Cryogenics, 1970, Vol. 10, No. 3, pp. 255-256.
- [19] De Long L.E., Symko O.G., Wheatley J.C., Continuously operating ^4He evaporation refrigerator, Rev. Sci. Instr., 1971, Vol. 42, No. 1, pp. 147-150.
- [20] Lounasmaa O.V., Experimental Principles and Methods Below 1K, Academic Press, London and New York, 1974.

低温センターが設置されるまで
巨海 玄道
(九州大学名誉教授、現：久留米工業大学)

私は平成21年10月末日を持って本学を早期退職した。その理由はこれまでいくつかの大学で多くの先輩達の退職前の姿に接し、それに対して回りの毀誉褒貶をつぶさに見てきたからである。そこには多くのバラエティがあった。最後まで教室会議に出て鋭い意見を言う人、数年前から定年モードになり（いやその前からかも知れないが）悠々自適の毎日を積み重ねるもの、自分の部下をなんとかしてでも昇格させ、院政を敷きたいと孤軍奮闘するもの、定年後も当然のごとく研究室に出てきて研究を続け、回りの輿論を買うもの、定年前にさっさと異動していくもの・・・そこはまさに人生の終末期の縮図と言われるものであった。どれもが違法なことではなくその人の判断に任されるものであった。この1年近く、「自分はどのタイプになるのか」を考えることはある意味で期待とスリルを感じるものであった。いま教員は上から下までとにかく多忙である。朝から晩までてんてこ舞いの生活を続けている。私も例外でなく帰るのは夜10時を過ぎる事もたびたびあった。地下鉄の駅へ着くとよく憔悴しきった顔見知りの教員に出会うことも多かった。聞いてみると研究より講義の準備、雑用で遅くなったという。皆一緒なのだと思感した。彼が持っていたのど飴を2人でなめながら、地下鉄の中で死後の世界についての話に花が咲いた。良い研究の創出には多くの無駄な時間と労力が必要で、その中からきら星のように出て来るものである。研究室にいと四六時中、人が尋ねてくる状態で研究のブレイクスルーなど起こるはずはない。私は定年前の数ヶ月の間そのような組織の中において、アクティビティを阻害するようなことはやってはならないと思った。幸いその様な私を拾ってくれるところがあったため、大変感謝すると共に、早めに赴任することにした。

やれやれ安心、このまま静かに九大を退散しようと思っていた矢先に、副低温センター長から何か書けという命令が下った。なんでこの濡れ落ち葉に！・・・と思いつつも引き受けることにした。しかし安請け合いのしっぺ返しはすぐやってきた。内心低温センター設置の歴史を箇条書きにしてお茶を濁そうと思っていたのだが昨年（平成21年）の3月私は居室があった六本松の部屋を箱崎へ移るため引き払った。その際もういらないと思って低温センターに関する資料はほとんど全てを廃棄してしまった。これに気づいたのは引き受けてから暫く立ってからであった。一瞬天を仰いでしまったがもう廃棄され灰燼に帰した資料は戻ってこない。仕方なくボケかかった頭でいろんな事を思い出しつつこの記事を書く羽目となった。従って以下に書いていることはある意味小生の薄れかかった記憶の中で蓄積されているものであり、正確な日時や関係者等についても記憶も曖昧であるのでそう言うことがあったかと言う程度の「老人の戯言」として読み流してもらいたい。私の勝手な視点から、現在の低温センターができるまでを概観したいと思う。

(1) 「極低温科学センター」から「物性科学研究センター」構想へ

九州地区の物性研究の拠点をめざし、また低温物性の振興を計るため、九大理学部の低温室を研究部門を備えた省令施設「極低温科学センター」への格上げを計画したのは当時の室長の網代先生であった。それはちょうど全国的な「物性研究拠点整備計画」(後述)が学術会議から対外報告として出された平成8年前後のことであったと思う。しかし私が着任した平成12年頃の全国的な趨勢を見ると低温関連でのセンター化は大変難しい状況にあった。しかし当時熊本大学で「衝撃・極限環境研究センター」の設置が人員の純増も含めて認められていたため、特色ある施設ならば認可されるのではないかと考えた。センターの設置には準備委員会が無ければならない。当時の矢田副学長の助言により、平成12年8月に事務局に極低温科学センターの委員会のメンバーが集まり、この概算要求をそのまま引き継ぐことにしてメンバーに若干の変更をして新しく「物性科学研究センター」設置準備委員会を立ち上げた。この委員会の期限は平成14年3月までであった。

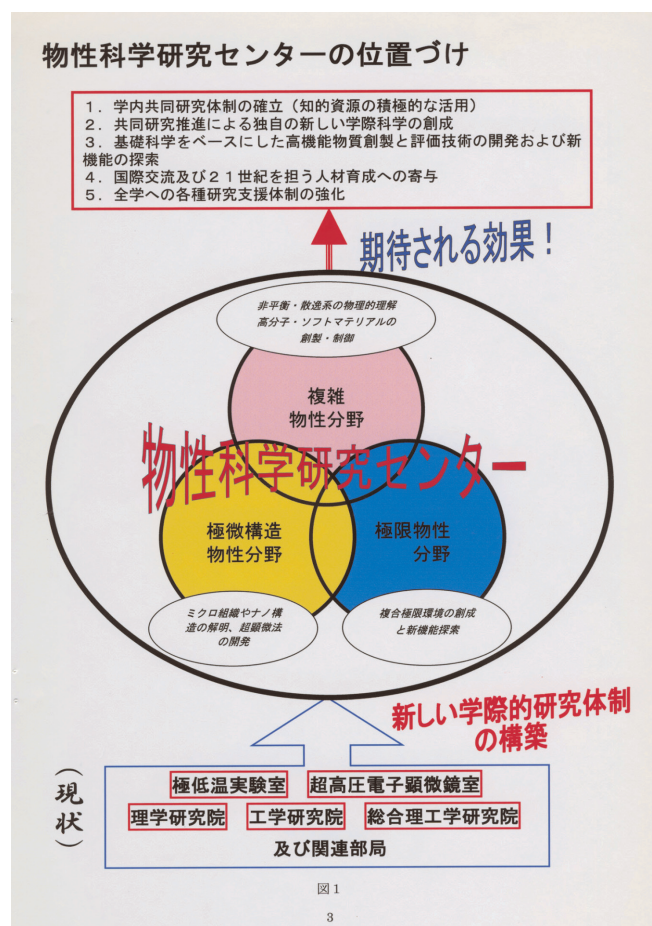


図1 物性科学センターの概念図

早速文部相用の書類作成に取りかかり、この概算要求は理学部極低温室と超高压電子

顕微鏡室を原資として関連する工学部や理学部の教員が協力するという形で出発することになり図1のような概念のもと申請に踏み切ることとなった。表1には当時の大胆な定員増の要求（教授、助教授、助手、それぞれ1ポストずつ）と総額8億円余の予算を含めて平成14年度の概算要求として申請書類を作った。文部科学省への第1回説明は平成13年2月14日のことであった。

表1 九州大学物性科学研究センター組織編成（案）

	教（一）			行（一）		計
	教授	助教授	助手	事務官	技官	
複雑物性分野	<3>	<3>	<1> 1			
極限物性分野	<3> 1	<3>	<2>		△2 2	
極微構造物性分野	<3>	<3> 1	<3>		△2 2	
客員分野*	I種 3 III種 3					
計	<9> 1+*6	<9> 1	<6> 1		△4 4	

（注1）< >書きは学内の各研究院の教官がそれぞれ担当（重担）する。△は振替を意味する。
（注2）その他は純増として（教授1、助教授1、助手1）要求する。
（注3）機関研究員（ポストドク）として各分野ごとに2名ずつ、合計6名のポストを要求する予定である。

表1. 物性科学センターの人員構成

この要求はかなりのところまで行ったが諸般の事情で実現までには至らなかった。その後大学の独立行政法人化が始まりこのような小さなセンターは各大学の責任において設置するか否かを決めることとなった。また設置準備委員会の期限が14年一杯であり、そのことも考慮して新しく構想を練ることとなり、次の未踏領域物質科学研究センターが新しく概算要求の俎上に載ることとなった。

（2） 「物性科学研究センター」から「未踏領域物質科学研究センター」へ

上で書いたように平成14年度から新しい概算要求として「未踏領域物質科学研究センター」を提出し平成14年3月に紆余曲折の末、企画専門委員会においてセンターの設置準備委員会が認められた。しかしこの時既に独立行政法人化は既成の事実となっており、その大きな波はセンター構想にも容赦なく襲ってきた。何とか打開しようとして主計課に

日参し、文部科学省の研究機関課に交渉に行ったが厚い壁を感じた。この中においてもせめて低温室でも生き残らないかと画策した。この時の概念図が図2である。

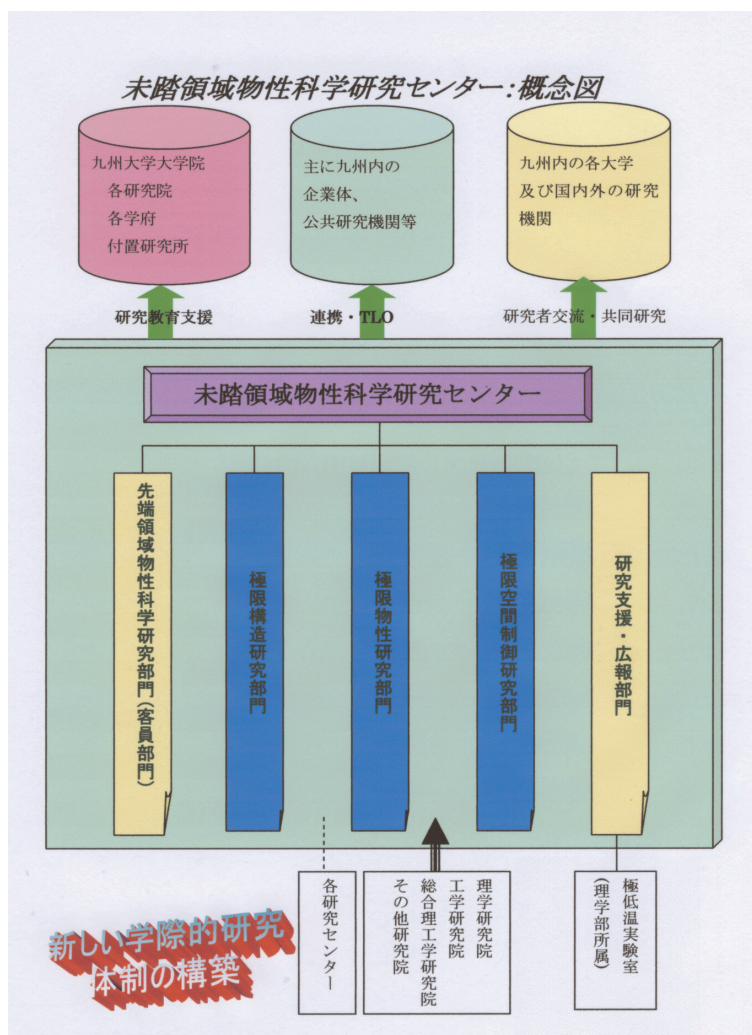


図2. 未踏領域物質科学研究センター概算要求の概念図。ここで低温室は「研究支援・広報部門」として位置付けられている。

結局この構想は学内センターを目指すということになり、再度学内用に書類を揃えることとなったが図1で示されたような人員増もなく、予算措置もないという状態でセンターを作ることを疑問視する意見も出てきた。さらに独法化ばかりでなく、学内においてもいろいろと変化が起きてきた。平成13年11月に新しく梶山総長が誕生し、リサーチコア構想が持ち上がった。今後センター設置や予算請求についてこのコアをベースにするということだった。そこで我々も急いでコアの一つとして「極限環境科学リサーチコア」を立ちあげ、その様な動きに追随することとなった。従って14年度後半から設置準備委員会とリサーチコアを基に活動することとなり、以前から続けていた「極限環境科学セミナー」を「リサーチコア研究会又はセミナー」と読み替えて継続させるなど、今後はいまま

で省令施設としての要求から学内センターとしての申請へ変える手続きを取らざるを得なかった。従って学内センターの実現には企画専門委員会に「検討ワーキンググループ」の設置を了承してもらわなければいけなかった。ここでは学内のいろいろな力学が働くことになり、設置準備委員会はこれまでの対外的な文部省交渉とは又違った対応をすることが要求された。私たちの必死の活動にも関わらず、平成16年5月に大略以下のような答申が企画専門委員長から出され、このセンター構想は時期尚早と判断され、設置準備委員会も解散することとなった。

未踏領域物性科学研究センター設置計画について

(平成16年5月17日)

同センターが目指す極限環境下での新材料・新機能物質の創成とその物性に関する研究と・・・(中略)・・・、極限構造研究部門を初めとする研究部門についてはリサーチコアや関連する研究所等との連携を計り、研究を推進していくなど別途の方策を検討する必要がある。しかしながら研究支援・広報部門(極低温実験室)については理学研究院、工学研究院、・・・等における計画との統合を図り、全学的な寒剤供給体制を構築することが望ましい。(中略)ただし、寒剤供給体制の整備の観点から、学内共同教育研究施設の機能別再編により研究支援センターとして整備していくことを検討する。

(3) 急展開・・・再び「低温センター」設置へ

以上のような経過から未踏領域物質科学研究センター構想は消滅することとなった。この答申で大事なことは最後の2行で極低温部門に限り、学内共同教育研究施設のセンターとして整備していくことを提言されている事である。従って私たちはこの答申が出てほとんど休む間もなく当時は理学部の1施設としての存在でしかなかった極低温室を全学の新しい「低温センター」へ格上げし、さらにヘリウム液化機の更新へ向けて「九州大学移転に伴う極低温寒剤供給のための特別設備」として17年度概算要求を申請することとなった。液化機の更新は数億円の予算を必要とするため何回も学内のヒヤリングを突破しなければならなかった。図3のようなポンチ絵を作って当時の低温室長達と関係の人たちに説明をした。

この過程において当時の大森理学部事務長の身を粉にしたがんばりが大きな推進力となった。申請書類の書き方など私たちはほとんど無力だったが大森事務長や当時の経理関

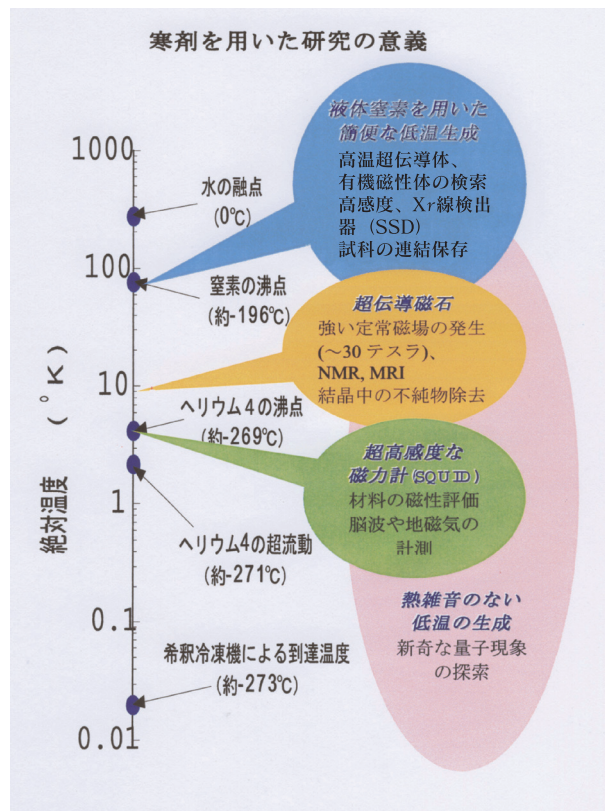


図3 低温センターの概算要求に使った概念図 (ポンチ絵)

連の人たちの書く説得力のある文章には思わず唖らされたものであった。結局私は思うのだが概算要求などにおいては教員個人の力もさることながら事務サイドのサポートはそれをはるかに超えるぐらいの力を持つものであると思う。いろんな大学の概算要求を聞くとそこに必ず責任教員を支える縁の下の力持ちとしてそれなりの優秀な事務サイドの人がいるものである。いま思い出しても大森さん(勿論彼を取り巻いた事務官の方々にも)には頭が下がり、感謝の念に絶えない。九大の低温関係者は彼に足を向けて寝ることがあってはいけないと思う。大型予算や施設、大学改組などは人のロマンをくすぐるものであるがそこには旗を振る人、それを支える人、そしてなんとと言ってもその過程でどんな人と出会うかにかかっているような気がする。ともあれ平成18年4月からセンターも発足し、新しい液化機の予算も通った。決定を受けた日に私はいつものように近くの陸軍墓地を通り帰路に就いたが大きな墓石の前でしばし佇み、これまでの数年を振り返ってみた。このような気分になるのは実は2回目であった。前任の大学で概算要求が通り、文部省から連絡を受けたその日、一人で白川の畔を散策した。12年に本学へ赴任し5年余の歳月がたっていた。ある意味で不満の残る結果でもあったが、その日は又私が研究・教育へと帰っていく日でもあった。平成19年11月26日に伊都キャンパスにおいて低温センターの開所記念式典が行われた。九大の低温関係のコミュニテイも新しい時代に入ったのである。

(4) 極低温室での成果の例：金属人工格子 Fe/Cr の圧力効果

最後に私も研究者の端くれとして寒剤の恩恵を受けたので代表的な仕事として金属人工格子 Fe/Cr の巨大磁気抵抗(Giant Magnetoresistance, GMR と略)が高圧下でさらに大きくなることを突き止めたので紹介したい。人工格子は磁気抵抗効果がこれまでの材料と違って異常に大きく、磁気センサーや大容量のメモリー(MRAM)としての応用が見込まれることから近年活発な研究が続けられている。この磁気抵抗を大きくすることそしてその機構の解明をすることが我々に課された大きな課題である。Fe/Cr はその様な素子として最初に発見された。その後のインパクトは大変大きく、数年前発見者の Fert と Grünberg はノーベル賞を授与された。私たちは東北大や京都大と協力して高圧下で磁気抵抗を測定しそれが大きくなるかと言うことを 1990 年頃から探索しはじめた。しかし実際やってみると高圧下で GMR の大きさは多くの人工格子に対して小さくなり、連戦連敗を繰り返し、特性の向上は無いとほとんどあきらめかけていた。そう言ったとき京都大から送られてきた試料に何かこれまでと違った振る舞いが見られた。東北大でもう一度いい試料を作ってもらい、修士の学生に測定をしてもらったがやはり同じ結果が出てきたので一同がっかりした。もうこれまでと思い、試料の整理をして修士論文を書いて終わりとすることにしたがその修士の学生が何かこだわりがあったのか2月に修士論文を終えて、3月になってから私に黙って実験を繰り返していた。

夜更けに帰り支度をしていた私の部屋にその学生が息せき切って電話をしてきた。「先生、高圧下で GMR が増えました」私は一瞬あつけにとられたがこれまでもこの手の話で何回もいやな目に遭ってきたので「明日もう一度圧力を上げて試してくれ」と指示をして帰った。翌日又同じ電話がありどうも高圧下で GMR が増加するのは間違いないようであった。彼は私に電話してから夜を徹して実験をしたようであった。彼が卒業してから実験を繰り返すこと約半年、間違いなく図4の用に GMR は高圧下で増加していた。学会で発表しても研究会で発表しても皆大変な興味を示し、学者冥利に尽きた。

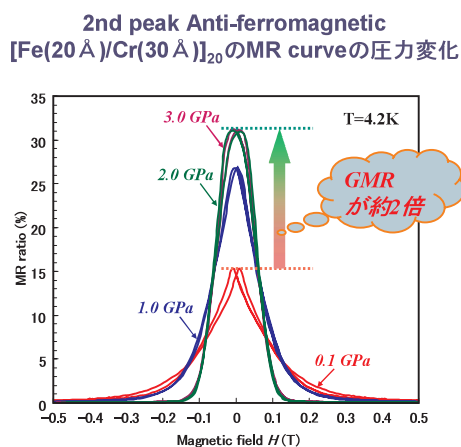


図4 高圧下で巨大化する Fe/Cr の磁気抵抗

結局この仕事はアメリカで発行されている著名な物理学会誌 Physical Review Letters, 98, 207202(2007) に採録され、平成18年度の末永氏の学位論文へつながることとなった。この仕事を始めてここまで実に15年の歳月がたった。

私はこの他グラニュー物質においても高圧下でトンネル効果による磁気抵抗が大きくなる現象を見いだした[1]。この実験をやったのは博士課程の女子学生であった。高圧下におけるナノスケール磁性体の輸送現象の測定は国内外に例がなかったため各方面から注目された。ついであるが九大を含めて私は多くの女子学生を指導したが能力的にも体力的にも男女に差は本来ないというのが実感である。要は本人がどこまで意識して仕事をするかではないかと思う。

終わりに

思い返せばいろんな大学の物性研究者達とそのよりどころとして多様なその大学特有の概算要求は平成8年度に出され、その後具体化に向けた策定がなされた「物性研究拠点整備計画」であった。具体案が出たのは平成12年5月のことであった[2]。この案を作るためその年の初めに全国から各大学の主要メンバー達が高エネルギー物理学研究所に集まり、討論が夕方5時から始まり終わったのが翌朝5時であった。その時の熱気に満ちた議論はいい思い出として私の心の中に残っている。学術会議の下部組織である第17期物理学研究連絡委員会（所謂「物研連」）物性物理専門委員会が主導した討論会であった。専門委員会の代表者達は文部省へ交渉に行ったり、対外報告を出したりしてこの計画の積極的なPRを行った。そこには素粒子・原子核などのグループが次々に大型プロジェクトを成功させているものの物性関係の施設整備は全くそれに追いついてないという危機感があったからだと思われる。私もその時の物研連のメンバーの一人として微力ながら具体化案の作成に参加した。その後各大学の物性関連の概算要求はこの案に従って為され大体において程度の差こそあれ、順次実現されることとなった。

センター化が実現された大学を見るとそこには必ず「外から見える人」がいるといった共通の特徴がある。実際その様な人と会って話を聞くことも多かったがその様な人に共通しているのは「私を捨て、公を取る」といった態度が見られると言うことである。この言葉は江戸末期、薩長連合軍が江戸総攻撃を前に勝海舟が西郷隆盛を説得しそれを思いとどまらせた際の殺し文句である。そこには概算要求にせよ大型予算の獲得にせよ単なる自己満足ではやっていけないと言うことであろう。施設や改組などある日突然出来ると言うことはない。大学や学部の将来計画、学問分野の動向、等が大きな推進力となる。そしてそれを推し進める強力な人とそれをサポートする体制が整っていなければ認可までは到達しない。つまり施設の新設には準備だけでも数年から10年近くかかると言うことである。そうなると思えばそれを担う人は40代の方が望ましいこととなる。このような人は自分の分野の研究・教育もやり、なおかつこのような概算要求もやることになりまさにスーパーマンのようなパワーが必要となる。つまりその人の属する研究グループはその人をサポー

トする体制を構築しなければならないこととなる。このような体制が整って初めていろんな事が可能となる。10年ほど前、その様な目で九大の極低温室を見た場合、残念なことに歴史がなかった。アクティビティレポートさえ存在しなかった。当時の低温室長は急遽それを作り将来計画に資することとなった。当時の文部省は要は実績がどれほどあるかを見るのが常であった。交渉の席上で1メートルを越える資料を積まないと言われればと説得力が無いとまことしやかに言われた。まあそんなことはなかろうと思うが九大の場合その手の実績はなく1メートルどころかノギスで計らないと認識し得ないと言ったところであった。

しかし平成16年から始まった大学の独立行政法人化により、拠点計画はほとんど機能しなくなった。現在新しく結成された学術会議で再度の拠点計画が策定されていると聞く。「新しい文化は辺境地域から出る」という事は人類の歴史が教えるところである[3]。九州を辺境というのは言い過ぎであるが霞ヶ関から見るとまんざら当たってないわけではない。今後新しい枠組みの中で全国の物性研究においてこの九州から新しい芽が出てそれが全国に波及して行くことを心から祈り、この記事を終えることにしたい。

参考文献

[1] S.Kaji et.al., Phys.Rev.B,68(2003)054429.

[2] “物性研究拠点整備計画の具体化に向けて”（日本学術会議、物理学研究連絡委員会、物性物理専門委員会、平成12年5月29日）

[3] 増田四郎、「大学でいかに学ぶか」（講談社）

伊都地区における寒剤状況遠隔監視システムの構築

超伝導システム科学研究センター
低温センター

松尾 政晃
佐藤 誠樹

E-Mail : matsuo@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

九州大学伊都キャンパスでは、低温センター伊都地区センター（以下、伊都地区センター）により低温を利用する教育研究者に対し寒剤（液体ヘリウム・液体窒素）の安定・安価な供給が行われている。特に、液体ヘリウムの使用に対しては、各種低温実験で使用された蒸発ヘリウムガスをキャンパス内に張り巡らされたヘリウムガス回収配管を通じ回収し、そのヘリウムガスは精製を経て再液化され、再度液体ヘリウムとしてユーザへ供給される、いわゆるヘリウムのクローズドサイクル利用 (Fig.1) が行われている。

平成 19 年 4 月に伊都地区センターに導入されたヘリウム製造設備は、

- | | |
|------------------|---------------------------------------|
| (1) ヘリウム液化・冷凍機： | 精製されたヘリウムガスを使用し
液化や冷凍を行う装置 |
| (2) 液体ヘリウム貯槽： | 液化されたヘリウムを貯める容器 |
| (3) 液体窒素貯槽： | 液化や精製ならびに学内低温教育研究者に供給する
液体窒素を貯める容器 |
| (4) 高圧外部精製器： | 回収されたヘリウムガスを精製する装置 |
| (5) 回収・精製用高圧圧縮機： | 回収・精製でカードルや精製器にヘリウムガスを
圧送する装置 |
| (6) ガスバック： | ヘリウムガスを一時的に貯めておく風船 |
| (7) カードル： | 回収・精製されたヘリウムガスを貯めておく
高圧の蓄圧器 |

等で構成されており、また、各装置の液量・圧力等の各種情報は、伊都地区センター建屋内の管理室に設置された液化・冷凍機制御用パーソナルコンピュータ（以下、液化用パソコン）(Fig.3) に取り込まれ表示されている。

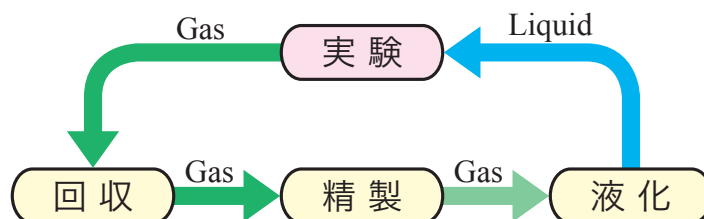


Fig.1 ヘリウムのクローズドサイクル利用

2. 目的

学内における液体ヘリウム供給価格は、ランニングコスト(消費電力、設備の維持費、ヘリウムガスの損失等)を考慮し522円/ℓ(2010年1月現在)となっているが、回収されるヘリウムガスの純度や回収率の低下によって、精製運転の負担増加やヘリウムガスの補充が必要となるため、この供給価格は回収ヘリウムガスの純度と回収率に大きく依存する。

伊都地区センターでは、回収ヘリウムガスの純度と回収率の向上を目指しており、その第一段階として、ユーザ各人が回収ヘリウムガス純度、ヘリウム液量等の現状をリアルタイムで確認できる寒剤状況遠隔監視システムの構築を行った。

3. 遠隔監視システムの構築方法

Fig.2に今回構築したシステムのネットワーク構成図を示す。システムの構築にあたり、下記の事柄を基本的な条件とした。

- (1) 液化用パソコンへの書き込み量増大による負担は最小限にすること。
- (2) 液化・冷凍機制御用プログラム(以下、液化用プログラム)に悪影響を与えないこと。
- (3) 液化用パソコンは不正侵入防止のため外部ネットワークと接続しないこと。
- (4) 遠隔監視用サーバのセキュリティは強固にすること。
- (5) 情報の更新が頻繁に行われるため記憶装置は機械的では無いものにする。
- (6) メンテナンスは極力行わなくて良いものとする。
- (7) 回収ヘリウムガス純度、ヘリウム液量等の現在状況は簡単に確認出来ること。

また、上記の基本的条件を満足できる方法として、下記の方法を選択した。

- (1) 外部の記憶装置に情報を書き込むことにより液化用パソコンへの負担を小さくした。
- (2) 液化用プログラムに悪影響を与えないようにするため、別のプログラムで現状の情報取得を行うことにした。
- (3) サーバを立ち上げ、情報公開はサーバで行うことにより、液化用パソコンと外部ネットワークの分離を行った。

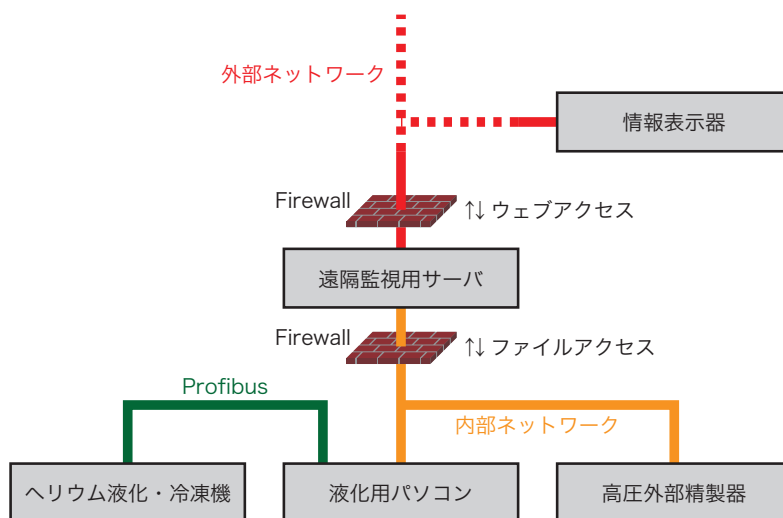


Fig.2 ネットワーク構成図

- (4) Firewallによるポート制限や最低限のネットワークサービスに限定することにより遠隔監視用サーバのセキュリティ対策を行った。
- (5) 頻繁に書き込みが行われるため遠隔監視用サーバの記憶装置はソリッドステートドライブ (Solid State Drive; SSD) を選択し、機械的でないものにした。
- (6) 遠隔監視用サーバにおけるメンテナンスの手間を極力省くため、無停電電源装置 (Uninterruptible Power Supply; UPS) を設置し、停電時においても自動的に起動・停止を行うようにした。
- (7) 情報公開はウェブで行い、ユーザが簡単に確認できるようにした。

4. 遠隔監視システムの構築

(1) プログラム

新規に構築する遠隔監視システムでは情報の更新を頻繁に行う必要があるため、液化用プログラム変更による方法を用いた場合、同プログラムの情報処理量が増大する恐れがある。そこで、この問題点を克服できる方法として、外部プログラムを用いて遠隔監視用サーバの情報を更新する方法を選択し、さらに、液化用プログラムに影響を与えずに現状の回収ヘリウムガス純度、ヘリウム液量等の各種情報をリアルタイムで得ることができる方法として、液化用パソコンの画面 (Fig.4, Fig.5) をキャプチャする方法を採用した。

具体的なプログラムの作成方法は以下のとおりである。まず、低温センター内に設置された液化用パソコンのOSはWindows XPであり、自身の使用経験と作成の容易さの面などから外部プログラムとしてVisual Basicによるプログラム作成を選択した。

このVisual Basicのプログラムを遠隔監視用プログラムに用いることにより、液化用パソコン画面の決められた場所をキャプチャし、頻繁な情報更新に対して、液化用プログラムの処理量を増大させることなく、遠隔監視用サーバに画像ファイル (JPEG形式) として保存することができる。

(2) 遠隔監視用サーバ

遠隔監視用サーバ (Table1) のOSにはフリーのUNIX (FreeBSD) を選択し、ファイルサーバにはSamba、ウェブサーバにはApacheを使用した。なお、ウェブによる情報公開 (Fig.6) は、IPアドレスによる制限 (学内に限定するため) とパスワードによる制限 (学外からアクセス可能にするため) により情報公開の制限を行った。

ネットワークセキュリティとしては、内部ネットワークから外部ネットワークへの通信は全て出来ないようにし、外部ネットワークからの通信は遠隔監視用サーバへのウェブアクセスのみ許可した。(Fig.2)

機械的な安全性としては、UPSによる電源管理、SSDによる書き込み負荷の低減により、遠隔監視用サーバの安全性を確保した。

なお、遠隔監視用サーバは、超伝導システム科学研究センターに設置されている液体ヘリウム貯槽付近に設置し、情報を随時表示することにより寒剤の汲み出しやヘリウムガス回収に対する現状確認ができる情報表示器としても使用している。

Table1 遠隔監視用サーバの仕様

ハードウェア	
マザーボード：	GIGABYTE GA-E7AUM-DS2H
CPU：	intel Celeron Dual-Core E1400 (2GHz)
メモリ：	2GB
SSD：	Transcend TS64GSSD25S-M (64GB)
ディスプレイ：	iiyama E1702S-2 (17inch)
UPS：	APC BE500JP (500VA, 300W)
ソフトウェア	
OS：	FreeBSD 6.4-RELEASE
ファイルサーバ用ソフトウェア：	Samba 3.0.34
ウェブサーバ用ソフトウェア：	Apache 2.0.63
UPS コントロールソフトウェア：	Apcupsd 3.14.5

(3) 情報表示器

超伝導システム科学研究センターでは、既に遠隔監視用サーバによる情報の表示が行われているが、伊都地区センターに設置されている液体ヘリウム貯槽付近では情報表示器がないため液体ヘリウムの汲み出し時に不便である。このため、操作が簡単でメンテナンス不要・セキュリティ的に安全なものを伊都地区センター内にも設置することにした。今回は、情報表示器 (Table2) に市販の ASUSTeK 社製 EeeBox を使用し、OS として ExpressGate を使用することにした。これらの利点としては、OS を USB メモリから起動が可能、数秒で起動が可能、HDD を必要としないため機械的な故障の心配がない、通信は無線 LAN を使用できるためセキュリティの確保が可能、画面は普通のディスプレイを利用できるため使用用途に合わせて大きさを選択できる等があげられる。すなわち、ウェブによる情報表示しか利用しない今回の目的に合致しており、電源と無線 LAN の電波が確保できる場所であれば、どこにでも設置が可能である。

Table2 情報表示器の仕様

ハードウェア	
本体：	ASUSTeK EeeBox B202-B
CPU：	intel Atom N270 (1.6GHz)
メモリ：	1GB
ディスプレイ：	iiyama PLE2209HDS-B1 (22inch)
ソフトウェア	
OS：	Express Gate



Fig.3
液化用パソコン

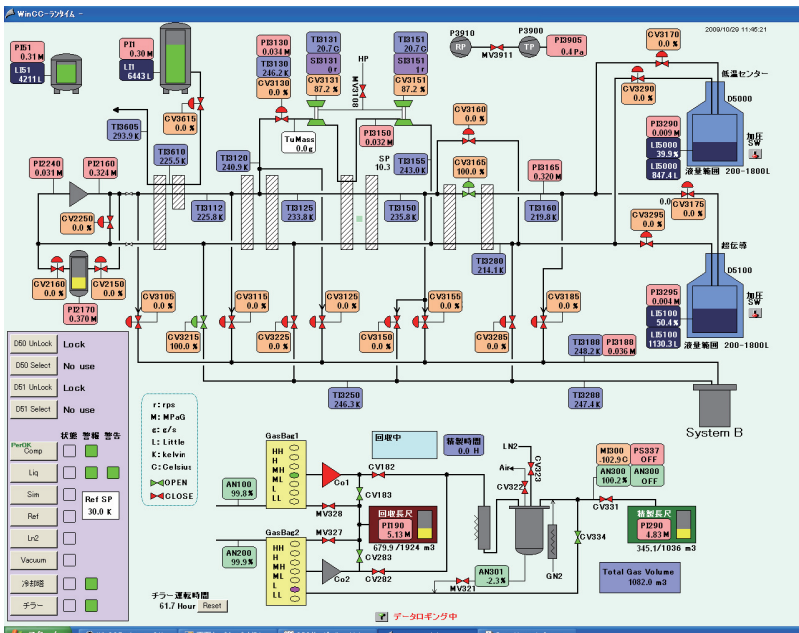


Fig.4
液化用パソコンの画面(左)



Fig.5
液化用パソコンの画面(右)



Fig.6 ウェブ表示の画面例

5. まとめ

現在、本寒剤状況遠隔監視システムが稼働を初めて約1年となるが不正侵入、故障等の問題もなく稼働している。また、停電時にも自動的に停止し、復旧後自動的に起動することも確認されているなど、遠隔監視用サーバはメンテナンスフリーの状態での稼働中である。このように、今回新たに構築した寒剤状況遠隔監視システムは情報公開の方法として非常に優れていると考えている。

今後は、このシステムをうまくユーザが利用し、回収ヘリウムガスの純度や回収率がなお一層向上してくれることを望みます。最後はユーザ次第ですが...

平成 21 年度 保安教育実施報告

九州大学低温センター長
船木 和夫

九州大学低温センターでは寒剤利用者のための全学保安教育を、伊都地区においては伊都地区センター・LCSセンター（業者）、箱崎地区・馬出地区・筑紫地区においては箱崎地区センターが主導の下、下記の要領で行いました。本年度も多数の参加者を得ることができ、寒剤を用いた実験を安全に行うための知識と技術を深めていただくことができたと思っております。今後ともご協力を賜りますよう、よろしく願いいたします。

保安教育は、寒剤を安全に利用していただくために行なっておりますので、低温センターの寒剤ユーザーの皆様は必ず受講していただきますようお願いいたします。

最後になりましたが各地区において講義室の準備等、ご支援をしていただいた皆さまに御礼を申し上げます。

記

- 伊都地区
 - ①平成 21 年 2 月 20 日（月）（20 年度）西講義棟 1 番講義室
講師 LCSセンター技術スタッフ 受講者：15名
 - ②平成 21 年 6 月 16 日（火）西講義棟 1 番講義室
講師 LCSセンター技術スタッフ 受講者：82名
 - ③平成 22 年 1 月 25 日（月）西講義棟 1 番講義室
講師 LCSセンター技術スタッフ 受講者：113名

- 箱崎地区
 - ①平成 21 年 5 月 14 日（木）九州大学国際ホール（主として理学部対象）
講師：上田 雄也（箱崎地区センター職員） 受講者：236名
 - ②平成 21 年 6 月 23 日（火）九州大学国際ホール（主として農学部対象）
講師：上田 雄也（箱崎地区センター職員） 受講者：226名

- 馬出地区
 - 平成 21 年 5 月 27 日（水）総合研究棟 IT ルーム
講師：上田 雄也（箱崎地区センター職員） 受講者：84名

- 筑紫地区
 - 平成 21 年 5 月 20 日（水）総合研究棟 3 階 303 号室
講師：上田 雄也（箱崎地区センター職員） 受講者：69名

平成21年 寒剤供給量 (伊都地区センター)

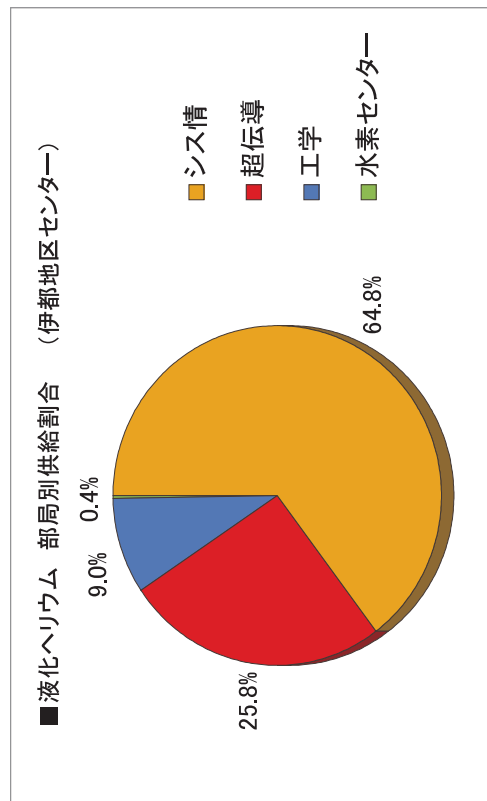
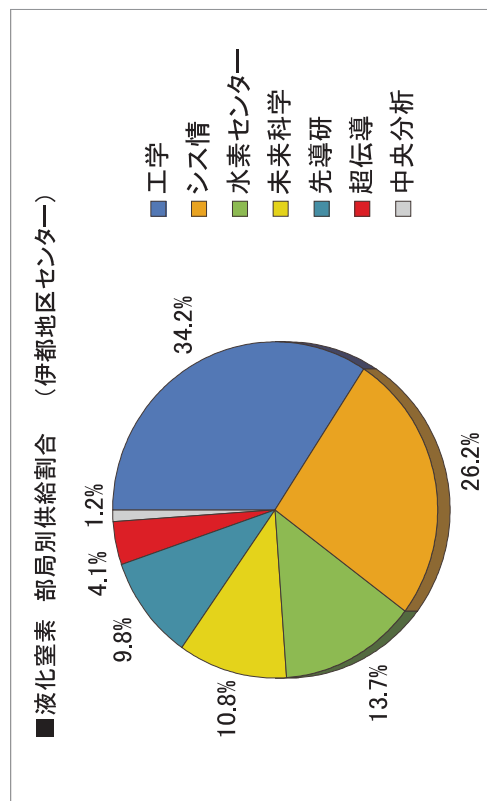
単位:リットル

■液化窒素

部局	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
工学研究院(工学部舎)	2,978.0	2,597.0	1,384.0	1,836.0	2,839.5	3,576.0	2,549.5	2,087.0	2,815.0	3,468.5	3,526.0	2,964.0	32620.5
システム情報科学研究院	3,164.0	2,402.5	903.5	560.0	2,222.5	2,094.5	2,553.0	1,836.0	1,847.0	2,180.5	2,473.5	2,736.5	24973.5
水素利用技術研究センター	316.0	450.5	675.5	1,065.5	715.0	1,276.5	1,303.0	1,093.5	1,426.5	1,646.0	1,459.5	1,612.5	13040.0
未来科学創造センター	1,378.5	883.5	765.0	833.5	879.0	1,025.5	1,184.0	1,109.0	459.0	587.5	569.5	652.5	10326.5
先端物質科学研究所	765.5	652.0	367.5	341.0	603.5	1,022.0	835.0	543.0	693.5	1,343.5	1,262.0	923.0	9351.5
超伝導システム科学研究センター	128.0	318.0	0.0	218.0	0.0	629.0	426.0	570.0	328.0	654.0	266.0	384.0	3921.0
中央分析センター	107.5	98.0	79.5	99.5	71.5	141.5	96.0	70.0	109.5	109.5	120.5	89.5	1192.5
合計	8837.5	7401.5	4175.0	4953.5	7331.0	9765.0	8946.5	7308.5	7678.5	9989.5	9677.0	9362.0	95425.5

■液化ヘリウム

部局	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
システム情報科学研究院	3,788.0	850.0	0.0	0.0	1,050.0	1,630.0	1,570.0	1,602.0	1,409.0	1,803.0	1,689.0	2,687.0	18078.0
超伝導システム科学研究センター	1,390.0	680.0	50.0	210.0	290.0	1,140.0	2,160.0	200.0	720.0	180.0	60.0	120.0	7200.0
工学研究院	265.0	60.0	115.0	210.0	340.0	160.0	225.0	160.0	60.0	427.0	260.0	240.0	2522.0
水素利用技術研究センター	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
合計	5443.0	1590.0	165.0	520.0	1680.0	2930.0	3955.0	1962.0	2189.0	2410.0	2009.0	3047.0	27900.0



平成21年 寒剤供給量 (箱崎地区センター)

単位:リットル

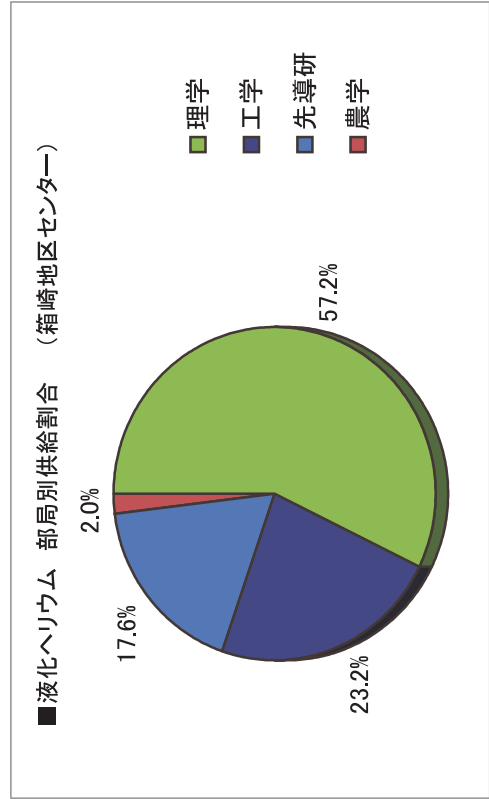
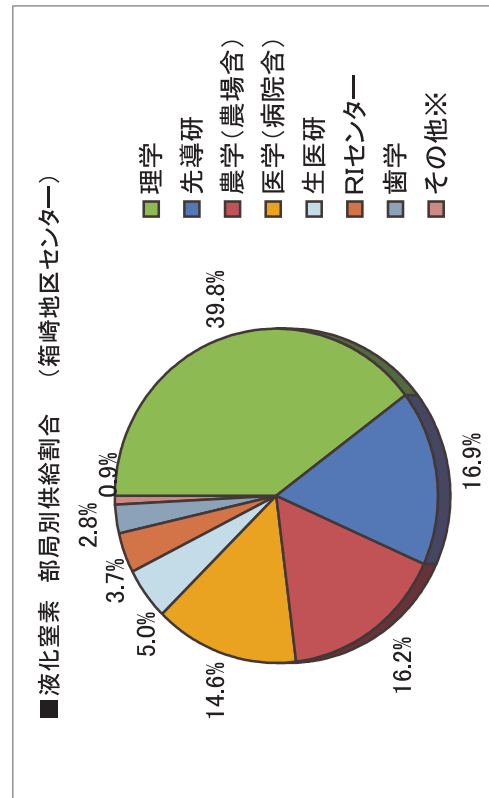
■液化窒素

部局	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
理学研究院	4994.0	4320.0	3488.0	4275.0	4850.0	4712.0	4134.0	3655.0	3963.0	4601.0	4203.0	5382.0	52577.0
先導物質科学研究所	1846.0	1656.0	1896.0	1743.0	1682.0	2241.0	1868.0	1814.0	1711.0	2037.0	2024.0	1816.0	22334.0
農学研究院(農場含)	1600.0	1223.0	1505.0	1742.0	1749.0	2048.0	1855.0	1856.0	1854.0	2057.0	1887.0	2024.0	21400.0
医学研究院(病院含)	1703.0	1515.0	1670.0	1515.0	1720.0	1655.0	1520.0	1685.0	1565.0	1608.0	1665.0	1505.0	19326.0
生体防御医学研究所	490.0	440.0	410.0	790.0	540.0	420.0	660.0	540.0	540.0	540.0	420.0	750.0	6540.0
アイソトープ総合センター	390.0	340.0	340.0	330.0	340.0	513.0	509.0	450.0	470.0	469.0	360.0	400.0	4911.0
歯学研究院	330.0	270.0	324.0	310.0	270.0	335.0	335.0	360.0	225.0	340.0	250.0	290.0	3639.0
その他※	100.0	75.0	170.0	10.0	100.0	102.0	125.0	70.0	104.0	100.0	205.0	90.0	1251.0
合計	11453.0	9839.0	9803.0	10715.0	11251.0	12026.0	11006.0	10430.0	10432.0	11752.0	11014.0	12257.0	131978.0

※その他は、工学研究院・システム情報学研究院・総合理工学研究院・総合工学研究院・総合文化研究院・バイオアークキテクチャーセンター・システム生命科学府の合計

■液化ヘリウム

部局	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
理学研究院	612.0	492.0	59.0	332.0	283.0	597.0	112.0	327.0	800.0	150.0	791.0	1037.0	5592.0
工学研究院	0.0	210.0	235.0	102.4	83.6	345.0	233.0	200.0	153.2	274.6	280.0	147.0	2263.8
先導物質科学研究所	166.0	57.0	262.0	136.0	105.0	175.0	145.0	149.0	115.0	157.0	168.0	88.0	1723.0
農学研究院	0.0	0.0	62.5	0.0	0.0	0.0	68.0	0.0	0.0	0.0	0.0	65.0	195.5
合計	778.0	759.0	618.5	570.4	471.6	1117.0	558.0	676.0	1068.2	581.6	1239.0	1337.0	9774.3



お知らせ

1 投稿のお知らせ

低温センターだより編集部では、「低温センターだより」への投稿あるいは記事を希望される執筆者（自薦・他薦）を歓迎しております。

研究に関するものに限らず、一般的に役立つような実験技術、情報等もお寄せください。

1) 研究ノート

最近の研究に関する報告、話題の紹介、新しい試みなど。

2) 技術ノート

技術面からの話題の紹介、知っておいたら役に立ちそうな事柄等。

3) その他

編集部よりの報告・紹介等。

投稿、推薦したい場合は、以下の内容をご連絡下さい。

- 題目
- 執筆者
- 所属
- 連絡先
- E-mail Address
- アブストラクト

みなさまからの気軽な連絡をお待ちしております。

2 低温センターからの学内 LAN 利用について

パーソナル・コンピューター（もしくはワークステーション）を学内 LAN に接続して利用することを希望される方、今後、学内 LAN の利用を検討しようとお考えの方は、LAN 管理者（下記）までご連絡下さい。

■ 箱崎地区センター／伊都地区センター

連絡先 大学院理学研究院 助教 浅野貴行

092-642-4342（内線 箱崎 4342）asano@phys.kyushu-u.ac.jp

低温センターを利用した論文 (2009)

理学研究院 物理学部門

●和田研究室

- 1 XMCD spectroscopy on valence fluctuating and heavy fermion compounds in very high magnetic fields up to 40 T
Y. H. Matsuda, J. L. Her, T. Inami, K. Ohwada, Z. W. Ouyang, K. Okada, H. Nojiri, A. Mitsuda, H. Wada, K. Yoshimura, H. Amitsuka, N. Kawamura, M. Suzuki, A. Kotani
Journal of Physics: Conference Series, **190**, 012019 (2009)
- 2 Zero-resistance superconducting phase in BaFe₂As₂ under high pressure
Fumihiro Ishikawa, Naoya Eguchi, Michihiro Kodama, Koji Fujimaki, Mari Einaga, Ayako Ohmura, Atsuko Nakayama, Akihiro Mitsuda, and Yuh Yamada
Phys. Rev. B, **79**, 172506 (2009)
- 3 Pressure effect on valence fluctuation and magnetic ordering in YbPd
A. Mitsuda, K. Yamada, M. Sugishima and H. Wada
Physica B, **404**, 3002 (2009)
- 4 X-Ray Magnetic Circular Dichroism of a Valence Fluctuating State in Eu at High Magnetic Fields
Y. H. Matsuda, Z.W. Ouyang, H. Nojiri, T. Inami, K. Ohwada, M. Suzuki, N. Kawamura, A. Mitsuda, H. Wada
Phys. Rev. Lett., **103**, 046402 (2009)
- 5 Pressure dependence of magnetic entropy change and magnetic transition in MnAs_{1-x}Sb_x
H. Wada, S. Matsuo, A. Mitsuda
Phys. Rev. B, **79**, 092407 (2009)
- 6 EuPtP の二段価数転移に対する圧力・磁場・原子置換効果
大学院理学府基礎粒子系科学専攻
大隈俊哉(2008年度)
- 7 La(Fe_xSi_{1-x})₁₃の磁気熱量特性に対する圧力効果及び元素置換効果
大学院理学府基礎粒子系科学専攻
貞松康史(2008年度)
- 8 価数揺動系YbPdの相転移の圧力依存性と電荷秩序の可能性
大学院理学府凝縮系科学専攻
杉島正樹(2008年度)
- 9 CuMoO₄の磁氣的性質とクロミズム制御

- 大学院理学府基礎粒子系科学専攻
西村泰三(2008年度)
- 10 反強磁性ボンド交替鎖AgCuPO₄の構造と磁性
理学部物理学科
中村直彦(2008年度)
- 巨海研究室
- 11 Anisotropic Lattice Compression and Possible Valence Transition in KondoCompound
CeAu₂Si₂
Mio Ohmura, Kumiko Sakai, Tomohito Nakano, Hidenori Miyagawa, Gendo Oomi,
Isamu Sato, Takemi Komatsubara, Haruyoshi Aoki, Yuji Matsumoto and Yoshiya
Uwatoko
J. Magn. Soc. Jpn., 33, 31-34 (2009).
- 12 Hall effect in CeAl₂ under high pressure
Hidenori Miyagawa, Masashi Ohashi, Tomohito Nakano, Gendo Oomi, Isamu Satoh
and Takemi Komatsubara
J. Phys.: Conf. Ser. 150, 042127 (2009).
- 13 The negative magnetoresistance of Fe/Tb magnetic multilayer
Masashi Ohashi, Gendo Oomi, Katsuyoshi Takano, Hiroshi Sakurai, Fumitake Itoh,
Eiji Ohmichi and Toshihito Osada
J. Phys.: Conf. Ser. 150, 042149 (2009)
- 14 The enhanced negative magnetoresistance of Fe/Tb multilayer at multiextreme conditions
M. Ohashi, G. Oomi, E. Ohmichi, T. Osada, K. Takano, H. Sakurai, and F. Itoh
J Appl. Phys. 104, 073901 (2009).
- 15 Effect of pressure and magnetic field on the electrical resistivity of TbB₆
T. Sakai, G. Oomi and S. Kunii
J. Phys.: Conf. Ser. 176, 012035 (2009).
- 16 Effect of pressure on the anomalous magnetoresistance and antiferromagnetism of single
crystal GdB₄
G. Oomi, M. Ohashi and B. Cho
J. Phys. Conf. Ser., 176, 012038 (2009).
- 17 Effect of pressure on the heavy-electronic states in Ce_{1-x}R_xAl₂(R:La, Er)
九州大学大学院理学府 基礎粒子系科学専攻 極限電子物性
宮川英典 (2008 度)
- 18 高濃度近藤系 CeAu₂Si₂ の高圧下における磁性と伝導
九州大学大学院理学府 極限電子物性
酒井久美子(2008 年度)

- 19 Fe/Cr 人工格子の巨大磁気抵抗にたいする圧力及びイオン照射効果
九州大学大学院理学府 極限電子物性
弥生達彦 (2008 年度)

●篠崎研究室

- 20 Annealing effect on the superconductivity of In_2O_3 -ZnO thin films,
B. Shinozaki, N. Kokubo, K.Makise S. Takada, T. Yamaguti, S.Ogura, K. Yamada, K. Yano,
and H. Nakamura ,
Physica C 469 956-959 (2009).
- 21 Thickness dependence of superconductivity for In/Mo thin films,
K.Makise, T. Nakamura and B. Shinozaki,
Physica C 469 1005-1008 (2009).
- 22 Mode Locking features of driven vortex matter in an amorphous detected by rf impedance
technique,
N.Kokubo and B.Shinozaki
Physica C 469 1099-1101 (2009)
- 23 Superconductivity in In_2O_3 -ZnO crystalline films,
B.Shinozaki, N.Kokubo, S.Takada, K.Yamada, K.Makise, K.Yano, K.Inoue, and
H.Nakamura ,
J.Phys. Conference Seri. 150, 052237 (4pp) (2009)
- 24 Electrical transport properties of amorphous Zn-doped In_2O_3 films in a wide region of carrier
density,
B.Shinozaki, K.Makise, M.Funaki, K.Yano, K.Inoue and H.Nakamura,
J.Phys. Conference Seri. 150, 022076 (4pp) (2009)
- 25 Thickness tuned two-dimensional superconductor-insulator transitions for amorphous
ultrathin films,
K.Makise, K.Mithuishi, K.Furuya, A.Hirakawa, H.Nakanishi, T.Kawaguti and B.Shinozaki
J.Phys. Conference Seri. 150, 052148 (4pp) (2009)
- 26 Magnetic field induced superconducting-insulator transition for ultra-thin Bi films on the
different underlaers,
K.Makise, T. Kawaguti and B.Shinozaki
J.Phys. Conference Seri. 150, 052149 (4pp) (2009)
- 27 Field dependent orientation of driven vortex lattice in amorphous MoGe films,
N.Kokubo, B.Shinozaki and P.H.Kes
J.Phys. Conference Seri. 150, 052116 (4pp)(2009)
- 28 History dependent vortex configurations in superconducting disks of amorphous MoGe
N.Kokubo, S.Okayasu, A.Kanda and B.Shinozaki

- J.Phys. Conference Seri. 150, 022044 (4pp). (2009)
- 29 The Hall effect measurement in the high resistance In_2O_3 -ZnO polycrystalline films,
K.Yamada, T.Yamaguti, N.Kokubo, B.Shinozaki, K.Yano, H.Nakamura,
Transactions of Materials Research Society of Japan 34[4]. 755-757 (2009)
- 30 Carbon fiber の電気輸送特性
理学府物理学専攻修士課程
小倉俊助
- 31 $\text{In}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{Mo}$ 膜における電気輸送特性
理学府物理学専攻修士課程
小早川優介
- 32 $(\text{In}_2\text{O}_3)_{1-x}(\text{ZnO})_x$ 膜の熱処理効果と超伝導特性
理学府物理学専攻修士課程
山口高史

理学研究院 化学部門

●香月研究室

- 33 Asymmetric Lewis Acid Catalyst of Aluminum(salalen) Complexes: Fridel-Crafts Reaction of Indole
巢山 慶太郎、松本 和弘、香月 勲
Heterocycles, 77 (2), 817-824 (2009)
- 34 Efficient Construction of α -Spirocyclopropyl Lactones: Iridium-Salen Catalyzed Asymmetric Cyclopropanation
一瀬 麻沙美、末松 英浩、香月 勲
Angew. Chem. Int. Ed. 48 (17), 3121-3123 (2009)
- 35 Iron-Catalyzed Asymmetric Aerobic Oxidation: Oxidative Coupling of 2-Naphthols
江上 寛通、香月 勲
J. Am. Chem. Soc. 131 (17), 6082-6083 (2009)
- 36 $\text{Ru}(\text{PPh}_3)(\text{OH})$ -salen Complex: a Designer Catalyst for Chemoselective Aerobic Oxidation of Primary Alcohols
溝口 大昂、内田 竜也、石田 浩一、香月 勲
Tetrahedron Lett. 50 (26), 3432-3435 (2009)
- 37 Highly Enantioselective Epoxidation of *cis*-Alkenylsilanes
松本 和弘、久保 卓也、香月 勲
Chem. Eur. J. 15 (27), 6573-6575 (2009)
- 38 Construction of a New Type of Chiral Bidentate NHC Ligands: Copper-Catalyzed

- Asymmetric Conjugate Alkylation
内田 竜也、香月 勲
Tetrahedron Lett. 50 (33), 4741-4743 (2009)
- 39 Highly Enantioselective Epoxidation of Styrenes Catalyzed by Proline-Derived C₁-Symmetric Titanium(Salan) Complexes
松本 和弘、小熊 卓也、香月 勲
Angew. Chem. Int. Ed. 48 (40), 7432-7435 (2009)
- 40 Iridium(III) Catalyzed Diastereo- and Enantioselective C-H Bond Functionalization
末松 英浩、香月 勲
J. Am. Chem. Soc. 131 (40), 14218-14219 (2009)
- 41 Study on Titanium-Catalyzed Asymmetric Epoxidation with Aqueous Hydrogen Peroxide as the Oxidant
理学研究院、化学部門、生物・有機系講座
松本 和弘
- 42 Studies on Use of Hydrogen Peroxide for Green Asymmetric Oxidation
理学研究院、分子科学専攻、博士後期課程
江上 寛通
- 桑野研究室
- 43 Nickel-Catalyzed Formation of a Carbon–Nitrogen Bond at the β Position of Saturated Ketones
Satoshi Ueno, Ryosuke Shimizu, and Ryoichi Kuwano
Angew. Chem. Int. Ed., **48**, 4543–4545 (2009).
- 44 [4+2] Cycloaddition of *o*-Xylylenes with Imines Using Palladium Catalyst
Satoshi Ueno, Masakazu Ohtsubo, and Ryoichi Kuwano
J. Am. Chem. Soc., **131**, 12904–12905 (2009)
- 45 Rhodium-Catalyzed Cross-Coupling of Organoboron Compounds with Vinyl Acetate
Jung-Yi Yu and Ryoichi Kuwano
Angew. Chem. Int. Ed., **48**, 7217–7220 (2009).
- 46 Catalytic Asymmetric Hydrogenation of Benzene ring in Quinolines (キノリンのベンゼン環選択的な触媒的不斉水素化)
大学院理学府修士課程分子科学専攻
平佐田一樹 (2008年度)
- 47 Catalytic Asymmetric Hydrogenation of Naphthalenes (ナフタレンの触媒的不斉水素化)
大学院理学府修士課程分子科学専攻
森岡竜一 (2008年度)

- 48 ニッケル触媒による酸化的アミノ化反応を利用したアルコールの γ 位アミノ化法
理学部化学科
臼井和実 (2008年度)
- 49 ニッケル触媒を用いたケトン類の β 位における分子内酸化的アミノ化反応
理学部化学科
清水亮佑 (2008年度)
- 50 パラジウム触媒を用いたベンジルエステル類の分子内芳香族求核置換反応
理学部化学科
小宮貞一 (2008年度)

●北川研究室

- 51 Size-Controlled Stabilisation of the Superionic Phase to Room Temperature in
Polymer-Coated AgI Nanoparticles
R. Makiura, T. Yonemura, T. Yamada, M. Yamauchi, R. Ikeda, H. Kitagawa, K. Kato,
M. Takata
Nature Materials, 8, 476-480 (2009).
- 52 A Protection and Deprotection Approach for the Introduction of Functional Group
to Metal-Organic Frameworks
T. Yamada, H. Kitagawa
J. Am. Chem. Soc., 131, 6312-6313 (2009).
- 53 High Proton Conductivity of One-Dimensional Ferrous Oxalate Dihydrate
T. Yamada, M. Sadakiyo, H. Kitagawa
J. Am. Chem. Soc., 131, 3144-3145 (2009).
- 54 Rational Designs for Highly Proton-Conductive Metal-Organic Frameworks
M. Sadakiyo, T. Yamada, H. Kitagawa
J. Am. Chem. Soc., 131, 9906-9907 (2009).
- 55 Oxalate-Bridged Bimetallic Complexes $\{\text{NH}(\text{prol})_3\}[\text{M}(\text{ox})_3]$ ($\text{M} = \text{MnII}, \text{FeII}, \text{CoII}$;
 $\text{NH}(\text{prol})_3^+ = \text{Tri}(3\text{-hydroxypropyl})\text{ammonium}$) Exhibiting Coexistent Ferromagnetism
and Proton Conduction
H. Okawa, A. Shigematsu, M. Sadakiyo, T. Miyakawa, M. Ohba, H. Kitagawa
J. Am. Chem. Soc., 131, 13516-13522 (2009).
- 56 Atomic-Level Pd-Au Alloying and Controllable Hydrogen-Absorption Properties in
Size-Controlled Nanoparticles Synthesized by Hydrogen Reduction Method
H. Kobayashi, M. Yamauchi, R. Ikeda, H. Kitagawa
Chem. Commun., 4806-4808 (2009).
- 57 A New Type of Iodosulfite Ion Formulated as I_2SO_2 -

- I. Nagasawa, H. Amita, H. Kitagawa
Chem. Commun., 204-205 (2009).
- 58 Hydrogen Storage Mediated by Pd and Pt Nanoparticles
M. Yamauchi, H. Kobayashi, H. Kitagawa
ChemPhysChem, 10, 2566-2576 (2009), (Invited Review).
- 59 Pressure-induced Consecutive Phase Transitions of a Metallic MMX-Chain Complex,
Pt₂(dtp)₄I (dtp : C₂H₅CS₂-)
K. Otsubo, A. Kobayashi, M. Hedo, Y. Uwatoko, H. Kitagawa
Chem. Asian J., 4, 1673-1676 (2009).
- 60 Design and Characterization of a Polarized Coordination Polymer of a Zinc(II)
Biphenyldicarboxylate Bearing a Sulfone Group
K. Kanaizuka, S. Iwakiri, T. Yamada, H. Kitagawa
Chem. Lett., in press.
- 61 Crystal Structure and Proton Conductivity of a One-dimensional Coordination Polymer,
Mn(DHBQ)·2H₂O
S. Morikawa, T. Yamada, H. Kitagawa
Chem. Lett., 38, 654-655 (2009).
- 62 Structures and Proton Conductivity of One-Dimensional MDHBQ · nH₂O (M = Mg, Mn, Co,
Ni, Zn, H₂DHBQ = 2,5-dihydroxybenzoquinone) Promoted by a Connected Hydrogen Bond
Networks with Absorbed Water
T. Yamada, S. Morikawa, H. Kitagawa
Bull. Chem. Soc. Jpn., in press.
- 63 129I Mössbauer Spectroscopic Study on a Metallic MMX Chain System
A. Kobayashi, S. Kitao, M. Seto, R. Ikeda, H. Kitagawa
Inorg. Chem., 48, 8044-8049 (2009).
- 64 Propagation of the Ballistic Nuclear Wavepacket on an Adiabatic Potential Surface of a
One-Dimensional Br-Bridged Pd-Complex without a Self-Trapped Exciton State
Y. Takahashi, H. Kitagawa, T. Suemoto
Phys. Rev. B, 79, 153103 (2009).
- 65 Electroconductive Porous Coordination Polymer Cu[Cu(pdt)₂] Composed of Donor and
Acceptor Building Units
T. Takaishi, M. Hosoda, T. Kajiwara, H. Miyasaka, M. Yamashita, Y. Nakanishi, Y. Kitagawa,
K. Yamaguchi, A. Kobayashi, H. Kitagawa
Inorg. Chem., 48, 9048-9050 (2009).
- 66 Origins of Improvement of Hole Injection by MoO₃ Layers on a Polymeric Semiconductor
Poly(dioctylfluorene-alt-benzothiadiazole)

- Y. Nakayama, K. Morii, Y. Suzuki, H. Machida, S. Kera, N. Ueno, H. Kitagawa, Y. Noguchi,
H. Ishii
Advanced Functional Materials, in press.
- 67 Recent Findings on Metal Nanoparticles as New-Type Hydrogen-Storage Material
H. Kobayashi, M. Yamauchi, H. Kitagawa, M. Takata
Spring-8 Research Frontiers 2008, 68-69 (2009).
- 68 無限錯体による電子・プロトン移動
北川 宏
超分子金属錯体 三共出版, 265-279 (2009).
- 69 サブナノ格子物質中における水素が誘起する新機能 (解説論文)
亀川厚則, 中東 潤, 山口 明, 藤田麻哉, 山内美穂, 北川 宏, 岡田益男
日本金属学会誌, 73, 141-150 (2009).
- 70 ナノ粒子のサイズ制御で室温超イオン伝導を実現
牧浦理恵、北川 宏
セラミック, 44, 印刷中
- 71 金属ナノ粒子の水素吸蔵
小林浩和, 山内美穂, 北川 宏
- 72 ナノ空間材料の創製と応用展開 フロンティア出版,
配位高分子におけるプロトン伝導性
山田鉄兵, 北川 宏
配位空間の化学—最新技術と応用—、シーエムシー出版,
- 73 Systematic Studies on Hydrogen-Storage Properties of Pd_xM_{1-x} Bimetallic Nanoparticles (M
= Ir, Pt, Au)
理学府化学科
小林浩和 (2008 年度)
- 74 Ru 及び PdRu 固溶体型合金ナノ粒子の水素吸蔵特性についての研究
理学府化学科
小坪正信 (2008 年度)
- 75 ビスピラジンジチオラート金属錯体を基盤としたプロトン・電子連動システムの開
発
理学府化学科
高橋佑季 (2008 年度)
- 76 水素結合ネットワークを導入したシュウ酸架橋配位高分子の合成とプロトン伝導性
に関する研究
理学府化学科
貞清正彰 (2008 年度)

- 77 電極表面における金属錯体フレームワークの逐次合成
理学部化学科
原 岳史 (2008 年度)
- 78 hcp 構造を有する Ni ナノ粒子とナノファイバーの合成と性質
理学部化学科
細井 浩平 (2008 年度)
- 79 ポルフィリン誘導体を用いた固体表面での配位高分子膜の作製と評価
理学部化学科
本山 宗一郎 (2008 年度)
- 80 金属酸化物で挟まれた三重項発光有機 EL 素子の特性評価
理学部化学科
山崎 周平 (2008 年度)

●徳永研究室

- 81 Kinetic Resolution of P-Chirogenic Compounds by Pd-catalyzed Alcoholysis of Vinyl Ethers.
Hisashi Itoh, Eiji Yamamoto, Shigeyuki Masaoka, Ken Sakai, Makoto Tokunaga
Adv. Synth. Catal., 351, 1796-1800 (2009).
- 82 Hydroformylation of Olefins by Au/Co₃O₄ Catalysts.
Xiaohao Liu, Baoshan Hu, Kaoru Fujimoto, Masatake Haruta, Makoto Tokunaga
Appl. Catal. B, 92, 411-421 (2009).
- 83 One-Pot Synthesis of Indoles and Aniline Derivatives from Nitroarenes under Hydrogenation Condition with Supported Gold Nanoparticles.
Yoshihiro Yamane, Xiaohao Liu, Akiyuki Hamasaki, Tamao Ishida, Masatake Haruta, Takushi Yokoyama, Makoto Tokunaga
Org. Lett., 11, 5162-5165 (2009).
- 84 Enhancement of Reaction Efficiency by Functionalized Alcohols on Gold(I) Catalyzed Intermolecular Hydroalkoxylation of Unactivated Olefins.
Toshifumi Hirai, Akiyuki Hamasaki, Aki Nakamura, Makoto Tokunaga
Org. Lett., 11, 5510-5513 (2009).
- 85 均一系触媒によるアルケニル基質の加水分解反応および加アルコール分解反応
徳永 信、濱崎昭行
月刊「ファインケミカル」, 38, 15-23 (2009).
- 86 金属酸化物担持金ナノ粒子を利用した有機合成反応
濱崎昭行、山根義弘、原口慎吾、劉 小浩、徳永 信
九州大学中央分析センター報告, 27, 1-6 (2009).

- 87 加アルコール分解および加水分解による軸不斉化合物の速度論的光学分割
理学府修士課程凝縮系科学専攻（化学コース）
佐久間 毅 (2008 年度)
- 88 Au または Pd 錯体触媒を用いる酸素求核剤の炭素-炭素二重結合への付加反応の研究：
ビニル交換反応及びブタジエンモノオキサイドへの 1,4-付加反応
理学府修士課程凝縮系科学専攻（化学コース）
中村 安希 (2008 年度)
- 89 Ru/Pd 触媒によるアリルエステルの不可逆型加水分解反応
理学府修士課程凝縮系科学専攻（化学コース）
中村 麻美 (2008 年度)

工学研究院 エネルギー量子工学部門

●河江研究室

- 90 Magnetic Phase Diagram of DMACuCl_3
Yuji Inagaki, Osamu Wada, Koichiro Ienaga, Hiroki Morodomi, Tatsuya Kawae, Y asuo
Yoshida, Takayuki Asano, Yuji Furukawa and Yoshitami Ajiro
Journal of Physics: Conference Series , **150**, 42067 (2009) .
- 91 Development of Pressure Cell for Specific Heat Measurement at Low Temperature and High
Magnetic Field
T. Kawae, K. Yaita, Y. Yoshida, Y. Inagaki, M. Ohashi, G. Oomi, K. Matsubayashi, T.
Matsumoto and Y. Uwatoko
Review of Scientific Instruments, Vol. **80**, 025102 (2009).
- 92 Drastic anion substitution effect in deformed pyrochlore lattice $\text{Co}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_{1-x}\text{Br}_x$
Masato Hagihala, X.G. Zheng and Tatsuya Kawae
Physica B **404**, 671–673 (2009).
- 93 Spin-glass state in the mixed system $(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ on deformed pyrochlore lattice
M. Fujihala a, M. Hagihala a, X.G. Zheng a,b,_, T. Kawae
Physica B **404**, 674–676 (2009).
- 94 Exotic antiferromagnetic transition in deformed pyrochlore lattice $\text{Ni}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ of
atacamite-structure
X.G. Zheng, M. Hagihala, K. Nishiyama and T. Kawae
Physica B **404**, 677–679 (2009).
- 95 Magnetic transitions in botallackite-structure $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Br}$ and $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{I}$
X.G. Zheng, T. Yamashita, M. Hagihala, M. Fujihala, T. Kawae
Physica B **404**, 680–682 (2009).
- 96 Magnetic Field versus Temperature Phase Diagram of the Spin-1/2 Alternating-Bond Chain

Compound F5PNN

Y. Yoshida, T. Kawae, Y. Hosokoshi, K. Inoue, N. Maeshima, K. Okunishi, K. Okamoto and T. Sakai ,

Journal of the Physical Society of Japan, Vol. **78**, 074716 (2009).

- 97 Volume shrinkage dependence of ferromagnetic moment in lanthanide ferromagnets gadolinium, terbium, dysprosium, and holmium
M. Mito, K. Matsumoto, Y. Komorida, H. Deguchi, S. Takagi, T. Tajiri, T. Iwamoto, T. Kawae, M. Tokita and K. Takeda
Journal of Physics and Chemistry of Solids, **70**, 1290-1296 (2009).
- 98 幾何学的フラストレーションを持つハイゼンベルグ磁性体 $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ の低温物性に関する研究
工学研究院 エネルギー量子工学専攻
諸富 大樹 (2009 年度)
- 99 Ag-Pd-Cu 合金を用いた多重極限実験用圧力セルの開発
工学研究院 エネルギー量子工学専攻
八板 克仁 (2009 年度)

先導物質化学研究所

●三島研究室

- 100 Enols of 2-nitro- and related 2-substituted malonamides,
Ahmad Basheer, Masaaki Mishima, Zvi Rappoport,
J. Phys. Org. Chem. Published online, Sep.9, 2009.
- 101 Revision of the Gas-Phase Acidity Scale below 300 kcal·mol⁻¹,
Ivo Leito, Elin Raamat, Agnes Kütt, Jaan Saame, Karin Kipper, Ilmar A. Koppel,
Ivar Koppel, Min Zhang, Masaaki Mishima, Lev M. Yagupolskii, Romute Yu. Garlyauskayte,
Andrey A. Filatov,”
J. Phys. Chem. A, 113 (29), 8421–8424, 2009.
- 102 Gas-Phase Basicities of Acetophenones toward Lanthanum Cation [La(OMe)₂]⁺,
Soe Than, Md. Mizanur Rahman Badal, Shuhei Itoh, Masaaki Mishima,
J. Phys. Org. Chem., accepted July 21, 2009.
- 103 Structural Effect on the Stability of Acetophenone-B(OMe)₂ Complexes in the Gas Phase.
The Nature of the Bond between Boron Cation and Neutral Molecules,
Shuhei Itoh, Md. Mizanur Rahman Badal, Masaaki Mishima,
J. Phys. Chem. A, 113(37), 10075-10080. 2009.
- 104 Gas-Phase Acidities of Acetophenone Oximes. Substituent Effect and Solvent Effects,

Md. Mizanur Rahman Badal, Masaaki Mishima,
Bull. Chem. Soc. Jpn., (No. 1) 58-65, 2010.

- 105** Highly Effective Vinylogous Mukaiyama-Michael Reaction Catalyzed by Silyl Methide Species Generated from 1,1,3,3-Tetrakis (trifluoromethanesulfonyl)propane,
Takahashi, Arata; Yanai, Hikaru; Zhang, Min; Takaaki, Sonoda; Mishima, Masaaki; Taguchi, Takeo,
J. Org. Chem., accepted, January 09, 2010.
- 106** Binding Energies of Metal Ions with Neutral Molecules in the Gas Phase
(気相における金属イオンと中性分子の結合エネルギー) 2009年3月
理学府博士後期課程凝縮系科学専攻
ソータン(Soe Than)

超伝導システム科学研究センター

- 107** Characteristic Tests of a 1600W-class Refrigeration System at 10K to 70K
T. Kawae, S. Sato, M. Matsuo, K. Funaki, M. Kinoshita, T. Fushimi and N. Uwe
Proc. of 22nd Int. Cryogenic Engineering Conf. / Int. Cryogenic Materials Conf.
2008 (ICEC22-ICMC2008), pp. 51-56 (2009)
- 108** Observation of Current Distribution in High- T_c Superconducting Tape Using Scanning Hall-Probe Microscope
M. Inoue, K. Abiru, Y. Honda, T. Kiss, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, K. Nakao and Y. Shiohara
IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 2847-2850 (2009)
- 109** The Use of Low Temperature Scanning Microscope for Estimating In-Plane Thermal Diffusivity in YBCO Thin Film
A. Matsekh, T. Kiss, M. Inoue, M. Yoshizumi, Y. Sutoh, T. Izumi and T. Shiohara
IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 2867-2871 (2009)
- 110** Development of Low-AC-Loss Bi-2223 Superconducting Multifilamentary Wires
K. Funaki, Y. Sasasige, H. Yanagida, S. Yamasaki, M. Iwakuma, N. Ayai, T. Ishida, Y. Fukumoto and H. Kamijo
IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 3053-3056 (2009)
- 111** 液体水素液位センサ用 MgB_2 線材の最適化の指針
戸町恭平, 柁川一弘, 松尾政晃, 佐藤誠樹, 田中和英, 船木和夫, 熊倉浩明,
岡田道哉, 中道憲治, 木原勇一, 神谷卓伸, 青木五男
低温工学, Vol. 44, No. 8, pp. 366-372 (2009)
- 112** Critical current property in YBCO coated conductor fabricated by improved TFA-MOD

process

M. Inoue, T. Kiss, K. Motoyama, S. Awaji, K. Watanabe, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi and Y. Shiohara

Physica C, Vol. 469, Nos. 15-20, pp. 1443-1445 (2009)

システム情報科学研究所 情報エレクトロニクス部門

●宮尾研究室

113 Electrical injection and detection of spin-polarized electrons in silicon through an Fe₃Si/Si Schottky tunnel barrier,

Y. Ando, K. Hamaya, K. Kasahara, Y. Kishi, K. Ueda, K. Sawano, T. Sadoh and M. Miyao, Appl. Phys. Lett. 94, 182105 (2009).

114 Spin-Related Current Suppression in a Semiconductor-Quantum-Dot Spin-Diode Structure, K. Hamaya, M. Kitabatake, K. Shibata, M. Jung, S. Ishida, T. Taniyama, K. Hirakawa, Y. Arakawa, and T. Machida,

Phys. Rev. Lett. 102, 236806 (2009).

115 Ferromagnetism and Electronic structures of Nonstoichiometric Heusler-Alloy Fe_{3-x}MnxSi Epilayers Grown on Ge(111),

K. Hamaya, H. Itoh, O. Nakatsuka, K. Ueda, K. Yamamoto, M. Itakura, T. Taniyama, T. Ono, and M. Miyao,

Phys. Rev. Lett. 102, 137204 (2009).

116 Magnetic properties of epitaxially grown Fe₃Si/Ge(111) layers with atomically flat heterointerfaces,

Y. Ando, K. Hamaya, K. Kasahara, K. Ueda, Y. Nozaki, T. Sadoh, Y. Maeda, K. Matsuyama, and M. Miyao,

J. Appl. Phys. 105, 07B102 (2009).

低温センター運営委員

(2010年3月現在)

低温センター長	大学院システム情報科学研究院	教授	船木 和夫
副低温センター長	大学院理学研究院	教授	和田 裕文
伊都地区センター長			(低温センター長の兼任)
箱崎地区センター長			(副低温センター長の兼任)
複担教員	大学院理学研究院	准教授	光田 暁弘
複担教員	大学院工学研究院	准教授	河江 達也
	大学院理学研究院	教授	北川 宏
	大学院工学研究院	教授	石原 達己
	大学院システム情報科学研究院	教授	木須 隆暢
	大学院農学研究院	教授	黒田 健一
	先導物質科学研究所	教授	佐藤 治
	大学院歯学研究院	准教授	小林 家吉
	工学部等事務部	事務部長	東島 利昭
	理学部等事務部	事務長	根本 正明

九州大学 低温センターだより

No. 4 (2010年3月)

編集委員会：船木和夫、和田裕文、柁川一弘

河江達也、光田暁弘、上田雄也

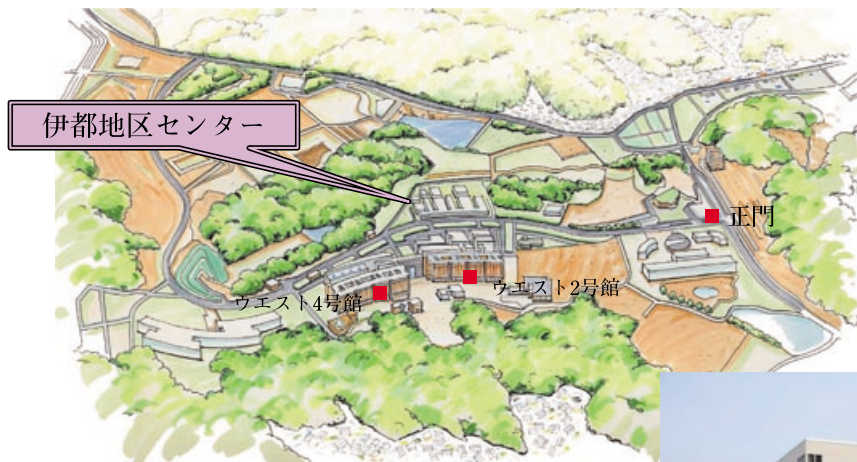
発行者：九州大学低温センター

Tel/Fax 0928023940 (伊都地区)

Tel/Fax 0926422701 (箱崎地区)

印刷：(株)サガプリンティング

伊都キャンパス



低温センター伊都地区センター
〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744
TEL (FAX) 092-802-3940
http://www.ltc.kyushu-u.ac.jp/ito_top.html



箱崎キャンパス



低温センター箱崎地区センター
〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1
TEL (FAX) 092-642-2701
http://www.ltc.kyushu-u.ac.jp/hakozaki_top.html

