(社)未踏科学技術協会　超伝導科学技術研究会

CODEN:FSNEFR

2010-10-15

FSST NEWS

Forum of Superconductivity
Science and Technology News

No. 127

発　行
(社)未踏科学技術協会
平成 22 年 10 月 15 日発行
〒105-0003
東京都港区西新橋 1-5-10
新橋アマノビル 6 階
Tel ： 03-3503-4681
Fax ： 03-3597-0535
Email： fsst@sntt.or.jp

＜トピックス 1＞

鉄系超伝導体 $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$ にみる非フェルミ液体的輸送現象と超伝導ギャップ構造

Non-Fermi liquid transport properties and superconducting gap structure as seen in $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$ iron-pnictide superconductor

京都大学低温物質科学研究センター
笠原成
Research Center for Low Temperatures and Materials Sciences, Kyoto University
S. Kasahara

1. はじめに

鉄ニクタイド*Ln*FeAs(O,F)を中心とした新たな高温超伝導物質群の発見は、物理学・化学・工学の枠組みを超えた大きな反響を世界中に及ぼした[1]。鉄系超伝導体における高い転移温度(T_c)での電子対形成について発現機構を理解し、又、より高温での超伝導の可能性を探る上でも、物理的に起きている事象を明らかにすることが不可欠である。その際、非常に重要となるのが

①超伝導周辺での異常な常伝導状態の理解

②超伝導ギャップ関数の決定

であろう。このような鉄系超伝導の物理を理解する為には、様々な類縁構造を舞台に起こるこの系の超伝導の中から明快なモデル物質となるものを見出し、且つ、物理の本質を侵すことのない純良な単結晶を舞台とした議論が不可避となる。この観点から$AEFe_2As_2$ (AE = Ba, Sr, Ca) を母物質とした“122”系鉄ニクタイドは単結晶試料を得やすく、鉄系超伝導を理解する為の重要な系として活発に研究がなされている。図1は$BaFe_2As_2$を母物質とした代表的な元素置換効果の概略図である。BaサイトをKで置換することによりホールが、FeサイトをCo等へ置換することにより電子がキャリアとしてドープされ、これに伴って構造相転移と反強磁性的SDW転移が抑制され超伝導が出現する[2,3]。この他、この系では母物質への圧力印加によっても超伝導が誘起されることが知られており[4]、更に、元素置換においてもAsサイトを等原子価のPで置き換えることで化学的圧力が系に導入され超伝導が出現する[5]。又、Fe面内をRuで置換した場合にも超伝導が出現することが知られている[6]。

筆者らはこのうち$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$に着目し、常伝導状態での輸送現象や、超伝導ギャップ構造に関する実験を行なってきた[7-16]。等原子価の元素置換でSDW相から超伝導相まで基底状態を変化可能なこの系は、xの値によらず補償金属条件が成り立ち、鉄系超伝導体の輸送現象などを議論する上で重要なモデル物質となる。T_cが最も高い最適置換試料では、鉄系超伝導体の中でも極めて急峻な超伝導転移を示し、更に、超伝導を誘起する為には元素置換が必要な鉄砒素系超伝導体の中にあって、広い置換囲で磁気量子振動（dHvA振動）が観測される程の純良さを示す。従って、この系は鉄ニクタイドの超伝導を議論する上で極めて好適な系であると言える。本稿では等原子価元素置換系である$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$について、非フェルミ液体的輸送現象と量子臨界点的な振る舞い、そして超伝導ギャップ構造に焦点を当て、この系が鉄系超伝導体を物理的に理解する上での重要なモデル物質であることを紹介したい。

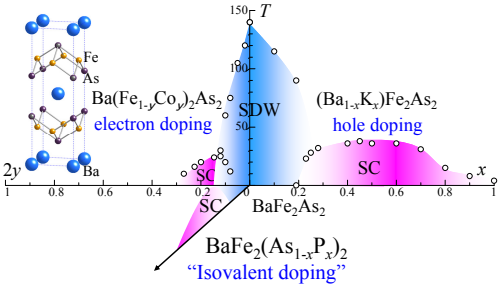

図1. $BaFe_2As_2$系の元素置換相図

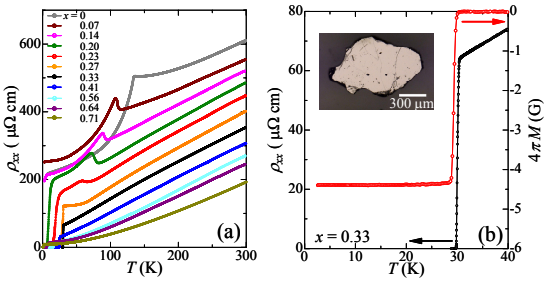

図2. (a)$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$単結晶の$\rho_{xx}(T)$曲線。 (b)x=0.33でのT_c近傍の$\rho_{xx}(T)$及び$M(T)$曲線[7]

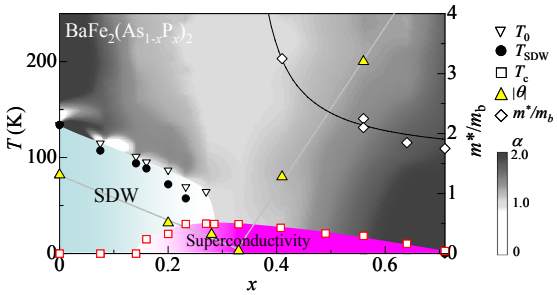

図 3. BaFe2(AS1-xPx)2 の T-x 相図

2. 非フェルミ液体的輸送現象と量子臨界点的振舞い

2.1 非フェルミ液体的輸送現象

この系での異常な輸送現象について述べる前に、まずは相図について触れておきたい。図 2(a) は$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$の各組成試料における面内電気抵抗率の温度依存性$\rho_{xx}(T)$である。x = 0の$BaFe_2As_2$ではT_0 = T_{SDW} = 137 K において構造/磁気の同時転移に伴う異常が見られる。AsサイトのP元素への置換により、この構造/磁気相転移は低温側に抑制され、それぞれT_0における$\rho_{xx}(T)$の増大と、T_{SDW}におけるピーク構造という形で現れる。同様の振る舞いは電子ドープ型の$Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$においても報告されているが、構造/磁気相転移より低温でも$\rho_{xx}(T)$が減少していく点は多少異なる[17- 19]。x ~ 0.2程度において超伝導によるゼロ抵抗が観測されx > 0.3で構造/磁気相転移が見られずT_c ≤ T_c^{max} ≈ 31 Kの超伝導転移を示す。図2(b)は超伝導転移近傍における$\rho_{xx}(T)$と、dc磁化の温度依存性$M(T)$である。超伝導転移は極めて急峻であり、数多くの鉄系超伝導体の中でも最良のものにあたる。より高濃度のP置換によってT_cは徐々に低下し、x ~ 0.71程度において超伝導相が消失する。このT-x相図を図3に示した。0.14 ≤ x ≤ 0.71の広い置換範囲で超伝導相が存在する。

さて、ここで注目をしたいのが構造/磁気相転移の抑制された非磁性常伝導状態における$\rho_{xx}(T)$の変化である。T_cが最大値を示す最適置換近傍、即ち、構造/磁気相転移消失の直近では、$\rho_{xx}(T)$が温度の一乗に比例する異常な振る舞い(ρ_{xx} ~ T)が観測される[図4(a)]。電気抵抗率の温度変化を

$$\rho_{xx}(T) = \rho_0 + AT^{\alpha} \qquad (1)$$

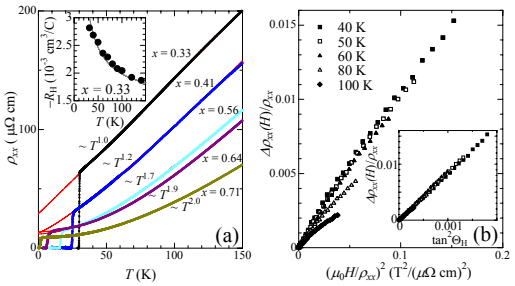

図4. (a)$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$単結晶の非磁性領域(x > 0.3) における$\rho_{xx}(T)$曲線。挿入図は最適置換試料での$R_H(T)$。(b)最適置換試料での$\Delta\rho_{xx}(H)/\rho_{xx}$.[7]

と表すとα = 1.0であり、これはランダウのフェルミ液体論において電子–電子散乱によって導かれるα = 2.0から大きく逸脱している。xが大きくなり、T_cが低くなると、αの値は2.0へと次第に近づき、フェルミ液体的な振る舞いへと移行する。図3のT-x相図上に、ベキαの変化をイメージプロットとして表した。x = 0.33の最適置換近傍を中心にα = 1.0 → 2.0への変化が低温からV字状に広がっている。尚、最適置換近傍の試料においてT > 150 Kの高温域でρ_{xx} ~ Tから僅かにずれ始める上凸の振る舞いが現れるが、これはキャリアの散乱極限（Ioffery-Regel極限）に近づいているためとみることができる。一般に金属は高温で電気抵抗が散乱によって飽和し、このとき$k_F l_{mfp}$ ~ 1に当たる（k_Fはフェルミ波数, l_{mfp}はキャリアの平均自由行程）。第0近似として単純な二次元のフェルミ面を考慮すると、この系の5つのフェルミ面による伝導度はσ = 5 × $(e^2/h)\, k_F l_{mfp}$ と見積もられ、ρ ~ 350 μΩcmで$k_F l_{mfp}$ ~ 1となると考えられる[20]。

上述のように$\rho_{xx}(T)$は最適置換近傍で従来のフェルミ液体的輸送現象から逸脱した振る舞いを示す。では、それ以外の輸送係数はどうであろうか。第二の輸送現象の異常として、ρ_{xx} ~ Tが観測される組成域ではホール係数R_Hが低温に向けて、$|R_H(T)|$ = $C_1/T+C_2$で近似されるような増大を示すことが挙げられる[図4(a) 挿入図]。このような$\rho_{xx}(T)$, $R_H(T)$の振る舞いは他の鉄系超伝導体でも報告されているが[17-19, 21]、xの値によらず補償金属条件が成り立つ$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$では、この絶対値はバンド計算から見積られるキャリア濃度で期待されるものよりも数倍大きく、通常の多バンドの効果では説明は困難である[7]。更に、鉄系超伝導体の異常な常伝導状態を特徴付ける第三の輸送現象として磁気抵抗率$\Delta\rho_{xx}(H)/\rho_{xx}$が挙げられる。従来のフェルミ液体では、磁気抵抗$\Delta\rho_{xx}(H)/\rho_{xx}$ ≡ $[\rho_{xx}(H) - \rho_{xx}(H{=}0)]/\rho_{xx}$はキャリアの軌道の彎曲効果によって生じ、サイクロトロン周波数ω_cと散乱時間τを用いて$\Delta\rho_{xx}(H)/\rho_{xx}$ = $F(\omega_c\tau)$ = $F(\mu_0 H/\rho_{xx})$でスケーリングされるコーラー則が成り立つ。これを用いてx = 0.33の最適置換試料における磁気抵抗をプロットしたものが図4(b)である。各温度での

$\Delta\rho_{xx}(H)/\rho_{xx}$はスケールされず、明らかにコーラー則が破れている。実は、このような非フェルミ液体的輸送現象を示す強相関電子系では、磁気抵抗はホール角$\Theta_H[\equiv \tan^{-1}(\rho_{xy}/\rho_{xx})]$を用いてスケールされ、$\Delta\rho_{xx}(H)/\rho_{xx} \propto \tan^2\Theta_H$ の形の修正コーラー則が成り立つことが知られている[22, 23]。図4(b)挿入図にホール角に対するプロットを示した。コーラー則に対してはスケールされない$\Delta\rho_{xx}(H)/\rho_{xx}$が同一線上に乗り、この系において、修正コーラー則が成り立つのが確認される。

ここまで示した$\rho_{xx}(T)$、$R_H(T)$、及び$\Delta\rho_{xx}(H)/\rho_{xx}$の全ての輸送現象でのフェルミ液体から逸脱した振る舞いは、銅酸化物や準二次元重い電子系化合物など、いわゆる反強磁性近傍にある強相関電子系において共通に観測されている現象である[24, 25]。これが鉄系超伝導体においも観測されることは極めて興味深い。又、圧力下にある$CaFe_2As_2$や化学的圧力の導入された系である$CaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$においては、collapsed tetragonal (cT)相という結晶対称性は同じでありながら格子がc軸方向に潰れた構造に低温で相転移を示し、このcT相では超伝導が起こらず、上記の全ての輸送現象測定で通常のフェルミ液体的状態が実現していることが明らかになっている[26]。このことからも鉄系超伝導と非フェルミ液体的輸送現象をもたらすような非従来型の散乱機構の間には、強い相関が存在していることが明らかである。重い電子系や銅酸化物高温超伝導体では、このような非フェルミ液体的輸送現象の起源として、準粒子が特定の波数の反強磁性揺らぎによって強く散乱されることにより、バックフローという緩和時間近似における電流項への補正が生じ、これによって多くが説明可能であるとの議論がなされている[22,25]。これらの系と同じく反強磁性近傍に位置する鉄系超伝導体において、このような効果がどう取り入れられるか、今後の研究が待たれる。

2.2 dHvA振動と量子臨界点的振る舞い

価数操作によるキャリアドープを伴わずに基底状態が変化可能な$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$では、結晶構造の変化と、これに伴うフェルミ面のトポロジーの変化が重要な役割を果たしていると考えられる。図5(a)-(b)はエンド物質である$BaFe_2As_2$及び$BaFe_2P_2$について、LDAバンド計算により得られたフェルミ面の図である。両エンドはどちらも2枚の電子面を持つが、$BaFe_2As_2$は二次元的な3枚のホール面を持ち、一方$BaFe_2P_2$はホール面が2枚でうち1枚が強い三次元性を持つ点が異なる。スピン揺らぎ機構の立場にたって単純な解釈をするならば、P置換に伴い図5(c)-(e)のようにホール面に三次元性が現れ、ネスティング条件が悪化することでSDW相転移が抑制され超伝導が誘起されると考えることができる。

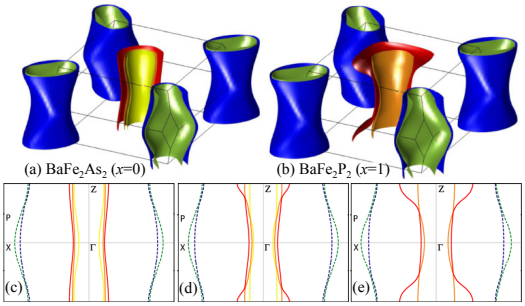

図5. (a)$BaFe_2As_2$, (b)$BaFe_2AP_2$のフェルミ面と(c) x= 0, (d)x = 0.3, (e)x = 1.0の(110)方向の断面図[7, 8]

さて、バンド計算から予測される電子状態に対し、実際の系がどのようになっているかを実験的に明らかにし、その差異を調べることで電子の多体効果に関する重要な情報を得ることが出来る。このようなフェルミ面の情報を得る手段の一つに量子振動の観測がある。筆者らは$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$についてマイクロカンチレバーを用いた高磁場磁気トルク測定を行い、x = 0.41～1という実に広い置換範囲($T_c < 0.8T_c^{Max}$)において、ドハース・ファン・アルフェン(dHvA) 振動を観測することに成功した[8]。

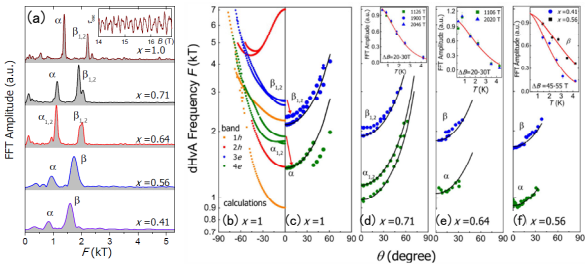

図6. (a)磁気トルクのフーリエスペクトル。(b)$BaFe_2P_2$のバンド計算から予測されるdHvA周波数、及び(c)-(f)x = 1.0 - 0.41で観測されたdHvA周波数の磁場方向依存性[8]。

図6(a)はフーリエ変換された磁気トルクの振動スペクトルである。dHvA周波数Fは、オンサーガーの関係式$F = (\hbar/2\pi e)A_k$によってフェルミ面の極値断面積A_kを与える。又、dHvA振動の振幅からは、リフシッツ-コセビッチの式により準粒子の有効質量が算出される[27]。実験では2つのdHvA周波数が観測された。その磁場方向依存性は、疑二次元フェルミ面に対して期待される$F \sim 1/\cos\theta$ (θはc軸から磁場印加角度)に乗り、バンド計算から予測される2つの電子面を観測しているとアサインされる。しかしながら、バンド計算では電子面の極値断面積が、xにほぼ依存しないと予測されるのに対し、実験結果は大きく異なり、x が小さくなると共に極値断面積が連続的に減少している。同時に、実験から求められる準粒子の有効質量にもバンド計算との大きな差異が見られる。各xの試料について有効質量を見積もると、バンド計算から見積もられる質量m_bと観測された有効質量m^*の比はx = 1において$m^*/m_b \sim 2$であったものが、xの減少とともに連続的に大きくなり、x = 0.41では$m^*/m_b \sim 4$となる(図3)。

このようなフェルミ面の縮小と有効質量の増大は、単純なLDA計算と大きく異なっており、高いT_cをもつような鉄系超伝導体では、電子系に対する多体効果が重要であることを示唆している。尚、dHvA振動から導かれる電子状態と同じ描像が、最適置換試料に対する角度分解光電子分光測定からも得られている[14]。このような有効質量の増大は、非フェルミ液体的輸送現象を示す準二次元重い電子系の反強磁性量子臨界点近傍においても観測されている[28]。

最後に、反強磁性揺らぎの大きさについてであるが、核磁気共鳴(NMR)測定により、核スピン-格子緩和率$1/T_1$を通じて動的帯磁率の低エネルギー成分に関する情報を得ることができる。特に、$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$の場合、組成による状態密度の変化が殆どなく、$1/T_1T$から反強磁性揺らぎの大きさについての明快な議論が可能となる。実験では$1/T_1T$が高温で組成によらずほぼ一定値を示し、最適置換近傍では低温に向かって大きな上昇を示す。これに対してxが大きくなりT_cが低くなると$1/T_1T$の上昇が抑えられる結果が得られている(図7)。この結果を$1/T_1T = a + b(T+\theta)^{-1}$でフィットすることにより、磁気揺らぎの大きさを特徴付ける温度(ワイス温度)θが求められ、最適置換近傍で$\theta \approx 0$となることが示される(図3)。これは$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$に磁気量子臨界点($\theta \rightarrow 0$)が存在することにコンシステントである[9]。

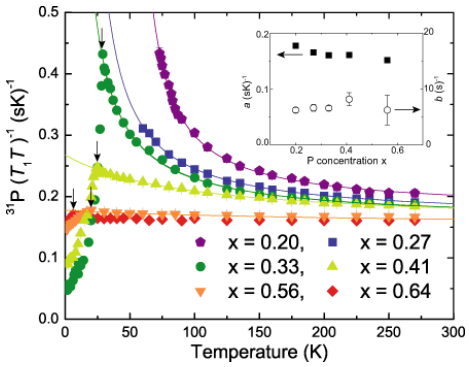

図7. $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$各組成試料での^{31}P-$1/T_1T$の温度変化[9]

以上のように、この系では構造/磁気相転移消失の直近で非フェルミ液体的な輸送現象や、有効質量の増大とフェルミ面の縮小、反強磁性揺らぎの増大、ワイス温度の量子臨界点的な振る舞いなどが現れる。超伝導はそこで最高T_cを示し、反強磁性揺らぎと超伝導の間には強い相関関係が見られる。これらは超伝導の電子対形成がスピン揺らぎによるとする機構と矛盾しない。但し、鉄系超伝導の別の理論モデルとして、軌道揺らぎに基づく電子対形成機構が提案されているが、最近、軌道揺らぎによっても非フェルミ液体的輸送現象が現れるとの指摘がなされている[29–32]。鉄系超伝導体の電子対形成機構を理解するには、今後、超伝導相周辺での軌道ゆらぎの存在を実験的に明らかにし、それがどう超伝導と相関しているかを明確にすることが一つの鍵となるだろう。

3. 超伝導ギャップ構造

鉄系超伝導体の発現機構を理解する為には、超伝導秩序関数のエネルギーギャップ構造を決定することが極めて重要となる。従来型のBCS超伝導体の場合、ギャップが等方的に開くのに対し、多体効果が重要となり、異方的な引力相互作用により電子対形成が起きるような非従来型の超伝導では、ギャップ関数がフェルミ面上で符号反転を起こし、ギャップがゼロになるノード(節)構造を持つ場合が起こり得るからである。銅酸化物のように単一のフェルミ面で記述される場合、ギャップの符号反転が存在すると必ずフェルミ面上にノードが現れ、これによって低温で準粒子励起が起きる。一方、鉄系超伝導体ではホール面と電子面からなる複数のフェルミ面が存在し、シンプルなスピン揺らぎに基づく理論では、これらのフェルミ面をつなぐネスティングベクトル$\boldsymbol{Q} = (\pi/a,\ 0)$の反強磁性揺らぎを媒介として、$s_{\pm}$状態と呼ばれるホール面で正、電子面で負といった符号反転が存在しながらフェルミ面上にノードのない非従来型超伝導が初期より提案されている[33,34]。1111系や$(Ba_{1-x}K_x)Fe_2As_2$などの鉄砒素系単結晶を用いた大部分の実験では、ノードレスな超伝導状態が実現していることが示されており[35-40]、これは$s_{\pm}$波によるものと矛盾しない。一方で、弱いshearフォノンが軌道揺らぎの臨界的な増大をもたらし、この軌道揺らぎが符号反転のないs_{++}波超伝導を実現しているのではないかとの指摘もなされている[29-32]。この場合にも基本的にはギャップ構造はフルギャップとなる。

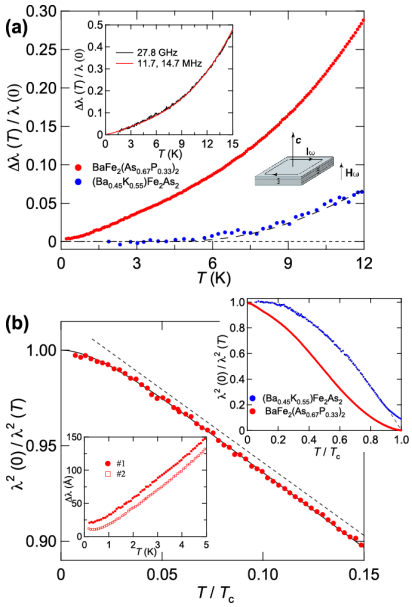

図8. $BaFe_2(A_{0.67}P_{0.33})_2$の(a)$\Delta\lambda(T)/\lambda(0)$、及び(b)$\lambda^2(0)/\lambda^2(T)$ [10]

それでは、$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$の場合はどうか。筆者らは、ギャップ関数におけるノードの有無を調る強力な手段として、特に、準粒子の低エネルギー励起に敏感な磁場侵入長と熱伝導率の精密測定を基軸とした実験を行なっている[10]。図8(a) に最適置換単結晶試料 (x ~ 0.33、T_c ~ 30 K) についての規格化された面内磁場侵入長の温度依存性$\Delta\lambda(T)/\lambda(0)$を示した。$BaFe_2(As_{0.67}P_{0.33})_2$においては低温から強い温度依存性がみられ、温度の一乗に比例した磁場侵入長の変化($\Delta\lambda(T) \propto T$)を示している。これは$(Ba_{0.45}K_{0.55})Fe_2As_2$においてノードレスなギャップ構造を反映して$\Delta\lambda(T)/\lambda(0)$が低温で殆ど温度依存性を示さないのと対照的である[38]。同様に超伝導電子密度$\lambda^2(0)/\lambda^2(T)$においても$(Ba_{0.45}K_{0.55})Fe_2As_2$と$BaFe_2(As_{0.67}P_{0.33})_2$で明らかな違いが見て取れ、後者では低温から大きな温度変化を示す[図8(b)]。このような磁場侵入長、及び超伝導電子密度の振る舞いは、低エネルギーの準粒子励起が存在することを意味し、フェルミ面上において超伝導ギャップにラインノードが存在することを強く示唆している。尚、$T/T_c < 0.03$という極めて低い温度域においては、超伝導電子密度が温度の一乗に比例する振る舞いから僅かにずれるが、これは不純物による影響と解釈できる。ダーティーリミットにあるラインノード型の超伝導では $\Delta\lambda(T) \sim T^2$が観測され、クリーンリミットとのクロスオーバーは$\Delta\lambda(T) \propto T^2/(T+T^*)$の式で表される。ここで$T^*$は不純物の寄与による系のディスオーダーを温度で表すパラメータである。この式を用いて実験結果をフィットすると、$T^* = 1.3$ Kと見積もられる。これはクリーンリミットにある$YBa_2Cu_3O_y$と同程度であり[41]、$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$ が純良でクリーンリミットにあるラインノード超伝導体であることがわかる。

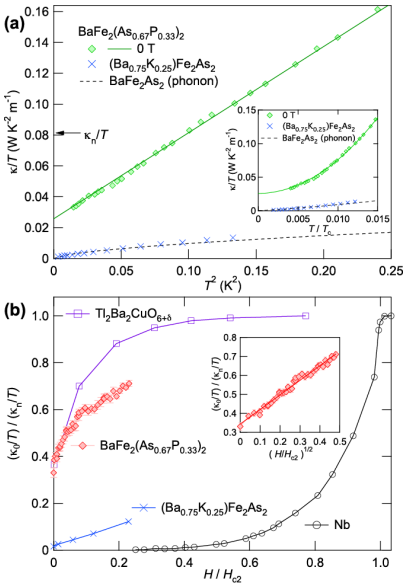

図9. $BaFe_2(As_{0.67}P_{0.33})_2$の(a)$\kappa/T$の温度依存性、及び(a)($\kappa_0/T$)/ ($\kappa_n/T$)の磁場依存性[10]。

更に、熱伝導度κもやはり $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$ におけるラインノードの存在を示している。まずゼロ磁場での温度依存性κ/T であるが、ホールドープ型の$(Ba_{0.75}K_{0.25})Fe_2As_2$では$\kappa/T$は母物質$BaFe_2As_2$におけるフォノンの寄与$\kappa_{ph}/T$とほぼ同程度であり、$T \ll T_c$において準粒子励起が殆どないフルギャップの超伝導とコンシステントである[39]。対照的に $BaFe_2(As_{0.67}P_{0.33})_2$ では、残留電気抵抗率の値ほぼ同じであるにも関らず、κ/Tが$(Ba_{0.75}K_{0.25})Fe_2As_2$のものよりも大きく増大している。低温での温度依存性は$\kappa/T = aT^2 + b$ で非常に良くフィットされ b ~ 25 mW/K^2 の有限の残留熱伝導率を示す。ギャップに符号反転によるラインノードが存在する場合、不純物によるバンド幅をγ_0として、$k_BT < \gamma_0$での準粒子の熱伝導度は

$$\kappa/T = \kappa_0/T(1 + O[T^2/\gamma_0^2]) \qquad (2)$$

で表される[42]。ここで$\kappa_0/T \approx \pi\hbar k_B^2/3e^2\mu_0\lambda(0)^2\Delta_0$,($\Delta_0$はギャップの最大値 (~$1.7k_BT_c$))によって残留熱伝導度を大まかに計算すると$\kappa_0/T$ ~ 22 mW/K^{2}m となり、実験値とほぼ一致する値が得られる。上式のT^2項は準粒子の熱励起による温度変化であるが、$BaFe_2(As_{0.67}P_{0.33})_2$においては$\kappa_{ph}/T$よりも一桁大きな寄与を$\kappa/T$ に与えていることになり、符号反転を伴ったラインノードの存在と一致する。

最後にラインノードが存在を示すもう一つの実験結果としてκ_0/T の磁場依存性について議論したい。$BaFe_2(As_{0.67}P_{0.33})_2$ ではκ_0/T が低磁場から大きく増大する。その値はウィーデマン-フランツ則により見積もられる常伝導熱伝導率κ_n/T ~ 81 mW/K^2 に対し、0.2H_{c2} 程度の磁場で 70%にまで上る。これはラインノードを持つ銅酸化物 $Tl_2Ba_2CuO_{6+\delta}$での振る舞いと非常に類似しており[43]、フルギャップ構造をもつNbなどの従来型超伝導体や、$(Ba_{0.75}K_{0.25})Fe_2As_2$ とは明らかに異なる[39,44]。フルギャップ超伝導体においては、磁場印加により発生する渦糸中の準粒子は局在し、低磁場では熱を運ぶことができない。これに対してノードを持つ超伝導体の場合、渦糸の外においても非局在の準粒子が存在し、これが低磁場での熱伝導を支配する。ラインノードが存在し電子のエネルギー状態密度が $N(E) \propto |E|$ のように線形な変化を持つ場合、準粒子に対するドップラーシフトにより $N(H) \propto H^{1/2}$ となることが知られているが、これは図 9(b)挿入図に示したκ_0/T の $H^{1/2}$ 依存性と良く一致する[45]。

以上に示したように、$BaFe_2(As_{0.67}P_{0.33})_2$では(i)$T$リニアな磁場侵入長 (ii)ゼロ磁場中での大きな残留熱伝導度 κ_0/T (iii) $\kappa/T \propto T^2$ (iv) $\kappa_0/T \propto H^{1/2}$ がみられ、何れもフェルミ面上においてギャップの符号反転が存在するラインノードの存在を強く示している。又、紙面の都合上、

紹介を割愛させていただいたが、(vi)超伝導状態における^{31}P-NMR測定においても$1/T_1 \sim T$のコリンハ則が観測されておりに、やはり残留状態密度の存在を示唆する[11]。これらの結果は、鉄系化合物における超伝導が非従来型であることを直接示す証拠であると同時に、$(Ba_{1-x}K_x)Fe_2As_2$と$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$では同じ母物質を出発点としながらも、ノーダルとノードレスの2種類の超伝導ギャップ構造が実現しているという、既存の超伝導体にはない新しい側面を明らかにしている。ちなみにT_cの低いLaFePOやKFe_2As_2でも磁場侵入長や熱伝導度の実験からギャップにノードが存在することが明らかになっている[46-50]。LaFePOの場合、理論的には二次元鉄平面からのニクトゲン高さが低くなるとギャップにノードが生じることがスピン揺らぎ機構により指摘されており、これはこの物質の低T_cでラインノードという描像とコンシステントである[51]。$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$でもニクトゲンの高さがP置換により低くなるが、比較的高いT_cを持ちながら、ラインノードが存在しえるかが問題であろう。高いT_cを持ちながらノードが存在し得る機構として、$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$のような三次元性の強いホール面を持つ場合に、水平方向にラインノードが入ることも提案されている[52,53]。又、軌道揺らぎ機構を考えたモデルでも、スピン揺らぎが強い純良な系の場合、両者の拮抗によってノードが生じる得ることが提案されている[29,31,32]。鉄系超伝導体でギャップ構造のノーダルとノードレスを分けるのは何か。筆者らは、$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$で実験的に観測されたラインノードがフェルミ面のどこに存在するかを明らかにすることが、多岐に渡る鉄ニクタイドにおいて普遍的に超伝導をもたらしている発現機構を解明する重要な手がかりの一つになると考えている。

4. まとめ

本稿では鉄系超伝導体$BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$を例にして、非フェルミ液体的輸送現象と量子臨界点的な振る舞い、そして超伝導ギャップ構造について焦点を当てた紹介をした。鉄系超伝導体では銅酸化物や重い電子系と共通した様々な常伝導相の異常がみられる一方、超伝導ギャップは既存の超伝導体にはない多様性をもっている。本研究が鉄系超伝導の電子対形成機構解明のための一助となれば幸いである。

本研究は、寺嶋孝仁、松田祐司、芝内孝禎、橋本顕一郎、山下穣、宍戸寛明、池田浩章、中井祐介、石田憲二（京都大学）、A. Carrrington (Bristrol Univ.), A. Coldea (Oxford Univ.), 吉田鉄平、 藤森淳、下志万貴博、辛殖（東京大学）の各氏、及び各研究室の大学院生との共同研究に基づくものです。又、前野悦輝、矢持秀起、陰山洋（京都大学）の各先生方には実験面での多くのサポートを賜っております。紺谷浩（名大）、黒木和彦（電通大）の両先生には貴重なご議論を多々して頂きました。ここに感謝いたします。

参考文献

[1] K. Ishida, Y. Nakai, and H. Hosono: J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 062001.
[2] M. Rotter, M. Tegel, and D. Johrendt: Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 107006.
[3] A.S. Sefat, R. Jin, M.A. McGuire, B.C. Sales, D.J. Singh, and D. Mandrus: Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 117004.
[4] P.L. Alireza, Y.T. Chris Ko, J. Gillett, C.M. Petrone, J.M. Cole, G.G. Lonzarich and S.E. Sebastian: J. Phys.: Condens. Matter **21** (2009) 012208.
[5] S. Jiang, H. Xing, G. Xuan, C. Wang, Z. Ren, C. Feng, J. Dai, Z. Xu, and G. Cao: J. Phys.: Condens. Matter **21** (2009) 382203.
[6] S. Sharma, A. Bharathi, S. Chandra, V.R. Reddy, S. Paulraj, A.T. Satya, V.S. Sastry, A. Gupta, and C.S. Sundar: Phys. Rev. B **81** (2010) 174512.
[7] S. Kasahara, T. Shibauchi, K. Hashimoto, K. Ikada, S. Tonegawa, H. Ikeda, H. Takeya, K. Hirata, T. Terashima, and Y. Matsuda: Phys. Rev. B **81** (2010) 184519.
[8] H. Shishido, A. F. Bangura, A. I. Coldea, S. Tonegawa, K. Hashimoto, S. Kasahara, P. M. C. Rourke, H. Ikeda, T. Terashima, R. Settai, Y. Onuki, D. Vignolles, C. Proust, B. Vignolle, A. McCollam, Y. Matsuda, T. Shibauchi, and A. Carrington: Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 057008.
[9] Y. Nakai, T. Iye, S. Kitagawa, K. Ishida, H. Ikeda, S. Kasahara, H. Shishido, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima: Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 107003.
[10] K. Hashimoto, M. Yamashita, S. Kasahara, Y. Senshu, N. Nakata, S. Tonegawa, K. Ikada, A. Serafin, A. Carrington, T. Terashima, H. Ikeda, T. Shibauchi, and Y. Matsuda: Phys. Rev. B **81** (2010) 220501(R).
[11] Y. Nakai, T. Iye, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima: Phys. Rev. B **81** (2010) 020503(R).
[12] J. S. Kim, P. J. Hirschfeld, G. R. Stewart, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, and Y. Matsuda: Phys. Rev. B **81** (2010) 214507.
[13] C.J. van der Beek, M. Konczykowski, S. Kasahara, T. Terashima, R. Okazaki, T. Shibauchi, and Y. Matsuda: arXiv:1005.2129.
[14] T. Yoshida, I. Nishi, S. Ideta, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, H. Ikeda, and R. Arita: arXiv:1008.2080.

[15] S. K. Goh, Y. Nakai, K. Ishida, L. E. Klintberg, Y. Ihara, S.Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima: arXiv:1006.5830.
[16] L. E. Klintberg, S. K. Goh, S. Kasahara, Y. Nakai, K. Ishida, M. Sutherland, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima: arXiv:1009.2716.
[17] X.F. Wang, T. Wu, G. Wu, R.H. Liu, H. Chen, Y.L. Xie, and X.H. Chen: New J. Phys. **11** (2009) 045003.
[18] L. Fang, H. Luo, P. Cheng, Z. Wang, Y. Jia, G. Mu, B. Shen, I. I. Mazin, L. Shan, C. Ren, and H.-H. Wen: Phys. Rev. B **80** (2009) 140508(R).
[19] F. Rullier-Albenque, D. Colson, A. Forget, and H. Alloul: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 057001.
[20] S. Onari and H. Kontani: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 177001.
[21] N. Doiron-Leyraud, P. Auban-Senzier, S. Rene de Cotret, C. Bourbonnais, D. Jerome, K. Bechgaard, and L. Taillefer: Phys. Rev. B **80** (2009) 214531.
[22] H. Kontani, K. Kanki, and K. Ueda: Phys. Rev. B **59** (1999) 14723; H. Kontani: Rep. Prog. Phys. **71** (2008) 026501.
[23] C. M. Varma and E. Abrahams: Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 4652; **88**, (2002) 139903(E).
[24] See, for example, N. P. Ong: in Physical Properties of High Temperature Superconductors II, edited by D. M. Ginsberg: Singapore, 1992).
[25] Y. Nakajima, H. Shishido, H. Nakai, T. Shibauchi, K. Behnia, K. Izawa, M. Hedo, Y. Uwatoko, T. Matsumoto, R. Settai, Y. Onuki, H. Kontani, and Y. Matsuda: J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 024703.
[26] S. Kasahara: (unpublished).
[27] See, for example, D. Schoenberg: Magnetic Oscillations in Metals (Cambridge University Press, London, 1984).
[28] H. Shishido, R. Settai, H. Harima, and Y. Onuki: J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 1103.
[29] H. Kontani and S. Onari: Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 157001.
[30] Y. Yanagi, Y. Yamakawa, Y. Ōno: Phys. Rev. B **81** (2010) 054518.
[31] T. Saito, S. Onari, and H. Kontani: arXiv:1008.1765.
[32] S. Onari and H. Kontani: arXiv:1009.3882.
[33] I. I. Mazin, D. J. Singh, M. D. Johannes, and M. H. Du: Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 057003.
[34] K. Kuroki, S. Onari, R. Arita, H. Usui, Y. Tanaka, H. Kontani, and H. Aoki: Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 087004.
[35] K. Hashimoto, T. Shibauchi, T. Kato, K. Ikada, R. Okazaki, H. Shishido, M. Ishikado, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, S. Shamoto, and Y. Matsuda: Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 017002.
[36] L. Malone, J.D. Fletcher, A. Serafin, A. Carrington, N. D. Zhigadlo, Z. Bukowski, S. Katrych, and J. Karpinski: Phys. Rev. B **79** (2009) 140501(R).
[37] H. Ding, P. Richard, K. Nakayama, K. Sugawara, T. Arakane, Y. Sekiba, A. Takayama, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, Z. Wang, X. Dai, Z. Fang, G. F. Chen, J. L. Luo, and N. L. Wang: EPL **83** (2008) 47001.
[38] K. Hashimoto, T. Shibauchi, S. Kasahara, K. Ikada, S. Tonegawa, T. Kato, R. Okazaki, C. J. van der Beek, M. Konczykowski, H. Takeya, K. Hirata, T. Terashima, and Y. Matsuda: Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 207001.
[39] X. Luo, M. Tanatar, J. Reid, H. Shakeripour, N. Doironleyraud, N. Ni, S. Budko, P. Canfield, H. Luo, Z. Wang, H. Wen, R. Prozorov, and L. Taillefer: Phys. Rev. B **80** (2009) 140503(R).
[40] M. Yashima, H. Nishimura, H. Mukuda, Y. Kitaoka, K. Miyazawa, P. Shirage, K. Kiho, H. Kito, H. Eisaki, and A. Iyo: J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 103702.
[41] R. Prozorov and R. W. Gianneta: Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) R41.
[42] M. J. Graf, S.-K. Yip, J. A. Sauls, and D. Rainer, Phys. Rev. B **53**, 15147 (1996).
[43] C. Proust, E. Boaknin, R. W. Hill, L. Taillefer, and A. P. Mackenzie: Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 147003.
[44] J. Lowell and J. B. Sousa: J. Low Temp. Phys. **3** (1970) 65.
[45] G. E. Volovik: JETP Lett. **58** (1993) 469.
[46] J. D. Fletcher, A. Serafin, L. Malone, J. G. Analytis, J. H. Chu, A. S. Erickson, I. R. Fisher, and A. Carrington: Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 147001.
[47] C. Hicks, T. Lippman, M. Huber, J. Analytis, J. Chu, A. Erickson, I. Fisher, and K. Moler: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 127003.
[48] M. Yamashita, N. Nakata, Y. Senshu, S. Tonegawa, K. Ikada, K. Hashimoto, H. Sugawara, T. Shibauchi, and Y. Matsuda: Phys. Rev. B **80** (2009) 220509(R).
[49] J. K. Dong, S. Y. Zhou, T. Y. Guan, H. Zhang, Y. F. Dai, X. Qiu, X. F. Wang, Y. He, X. H. Chen, and S. Y. Li: Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 087005.
[50] K. Hashimoto, A. Serafin, S. Tonegawa, R. Katsumata, R. Okazaki, T. Saito, H. Fukazawa, Y. Kohori, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, H. Ikeda, Y. Matsuda, A. Carrington, and T. Shibauchi: Phys. Rev. B **82** (2010) 014526.
[51] K. Kuroki, H. Usui, S. Onari, R. Arita, and H. Aoki: Phys. Rev. B **79** (2009) 224511.
[52] K. Kuroki: (unpublished).
[53] S. Graser, A. F. Kemper, T. A. Maier, H.-P. Cheng, P. J. Hirschfeld, and D. J. Scalapino: Phys. Rev. B **81** (2010) 214503

＜トピックス 2＞

冷却システムと励磁電源が分離可能な RE 系モバイルマグネット

Mobile magnet using RE wire with detachable cooling system and power supply

鉄道総合技術研究所
長嶋賢、小方正文、水野克俊、荒井有気、
長谷川均、笹川卓
Railway Technical Research Institute
K. Nagashima, M. Ogata, K. Mizuno, Y. Arai,
H. Hasegawa and T. Sasakawa

1. はじめに

RE系線材（RE-Ba-Cu-O材料を使用した高温超電導テープ線材、REは希土類元素）の浮上式鉄道用高温超電導磁石への適用について検討している[1,2]。高温超電導線材の導入で期待できる具体的な効果は、磁石運転温度の向上に伴う、車載冷凍システム重量の低減や省エネルギー化である。また、コイルの運転温度を例えば50 Kまで向上すると、コイルそのものの熱容量も4.2 Kで運転する場合に比べて1,000倍程度まで飛躍的に向上するため、ある程度の時間であれば、車載冷凍機を搭載しなくても磁石が運用できる可能性がでてきた。

そこで今回は、RE系線材で製作した小型のレーストラック型コイルを、冷凍機無しの断熱容器に納め、持ち運びの可能な「モバイルマグネット」を開発したので紹介する。

開発に当たっては、コイル温度50 Kで最大1 Tの磁場が発生できること、冷凍システムと励磁電源を分離しても磁石単体で8時間以上磁場発生が可能なこと、を目標とした。

2. 高温超電導線材評価装置

RE系線材を用いた超電導コイルの設計のためには、磁場、磁場角度、温度をパラメータとして、線材の臨界電流値を詳細に把握することが必要である。線材メーカは77 K自己磁場中での臨界電流値のデータは製品とともに提供してくれるものの、それより低温のデータあるいは磁場中におけるデータを入手することは困難である。

そこで鉄道総研では、浮上式鉄道用超電導磁石の検討のために必要な、表1に掲げるような環境下での臨界電流値、あるいはn値の評価に必要な装置を開発した[3]。図1に装置の写真を、図2に装置の模式図を示す。この装置を用いれば、長さ10 cm程度の市販線材を加工せずにそのままの姿で性能評価が可能である。

最近ではRE系線材で気になる磁場角度依存性も低温状態で試料の向きを任意に変更できるようになり、線材の評価が迅速にできるようになってきた。線材の開発は現在、人口ピンを導入するなど、磁場中特性を向上する開発が盛んだが、この装置により、常に線材性能の現状を把握しつつ高温超電導磁石開発を進めることができるようになった。

この試験装置を用いて、現在市販されている全てのRE系線材の特性を調べた。性能、価格、入手性等から今回の磁石製作に用いる線材を決定し、その線材の性能に基づいて超電導コイルの設計を行った。

表1　高温超電導線材評価試験装置の主要性能

電流（I）	0 ～ 1000 A
磁場（B）	0 ～ 5.5 T（超電導コイル使用）
磁場角度（θ）	0 ～ 100°（無段階）
温度（T）	10 K ～（冷凍機伝導冷却）

図1　高温超電導線材評価試験装置

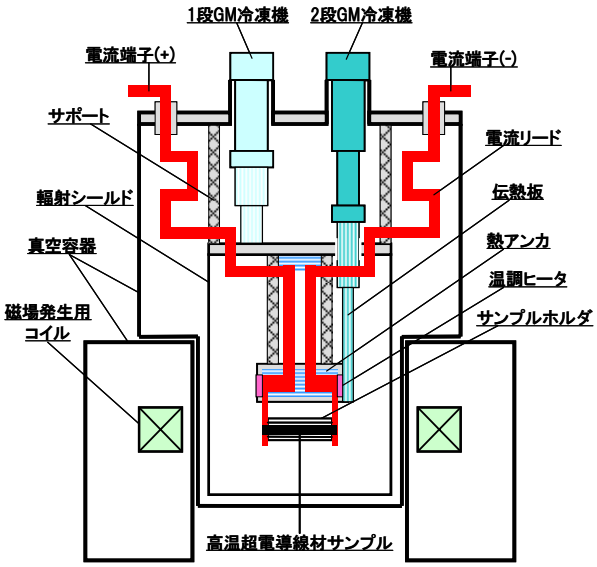

図2　高温超電導線材評価試験装置（模式図）

3. モバイルマグネット

3.1　コイル性能

超電導コイルの設計を行った結果、表2の様にモバイルマグネットの諸元を決定した。この諸元に基づいて製作した、線材長100 mのレーストラック型シングルパンケーキコイルを図3に示す。設計では、本コイルを4つ積層して86 A通電すると、最大磁場 1 T が発生できることになる。

完成した積層コイルに通電した結果、臨界電流値は予測値より若干低下したものの、50 Kで113 Aであり、定格電流より大きな値となった[4]。実際に臨界電流値を流しながらコイル表面付近で測定した発生磁場の温度異存性を示したデータが図4である。これによって当初掲げた目標の一つである「コイル温度50 Kで最大1 Tの磁場が発生できること」は満たしたことが確認された。しかし、n値は7前後の値をとっており、線材単体でのn値（20前後）からは大幅に劣化していた。この性能低下の原因はコイル製作時の熱処理や樹脂含浸に伴う低温での熱ひずみなどが考えられる。

3.2　保冷性能

上記の積層コイルを内蔵した、モバイルマグネットを図5に示す。磁石の冷却システムは磁石内部に引き通した冷却用配管（配管の出入口は図5の左上に見える。）に外部から低温ヘリウムガスを供給する方式とし、コイルを20 K以下まで初期冷却した後、ガス供給管を切り離す構造とした。また、クライオスタット内の低温部に設置した機械式スイッチ（常温の操作ハンドルは図5の右下に見える。）を用いて閉ループ電流回路を構成することにより、励磁電源分離後の磁場発生を可能とした。後は保冷時間の確認が残るが、これについては、高温超電導コイルの周囲に配置した金属の熱容量を利用することと、断熱容器内部に設置した活性炭で容器内の真空度を確保するなどの工夫を施した。その結果、図6に示すように、コイル温度50 K以下を9時間保持できる保冷能力があることを確認した。当初掲げた目標の二つ目である、「冷凍システムと励磁電源を分離しても磁石単体で8時間以上磁場発生が可能なこと」も達成することができた。

これにより、電源線やガス配管等が一切つながら無い状態で、クライオスタット単体で磁場発生が可能な「モバイルマグネット」が実現した。

表2　モバイルマグネットの主要仕様

線材	YBCO (MOCVD) / Hastelloy
線材幅／厚さ	4.1 mm / 0.1 mm
臨界電流（77K,s.f.）	112 A
パンケーキコイル形状	レーストラック型 （4 シングルパンケーキを積層）
曲線部外径／内径	150 mm / 100 mm
直線部長さ	150 mm
巻数	562 turns
全線材長	400 m
自己インダクタンス	97 mH
定格電流	86 A
磁石構造	コイル+コイルケース＋輻射シールド +積層断熱材（MLI）＋外槽
初期冷却方式	低温ガスヘリウムによる強制冷却
初期冷却温度	< 20 K
励磁回路	機械式スイッチを用いた閉回路
磁石寸法	W:600 mm, T:400 mm, D:200 mm
磁石質量	52 kg

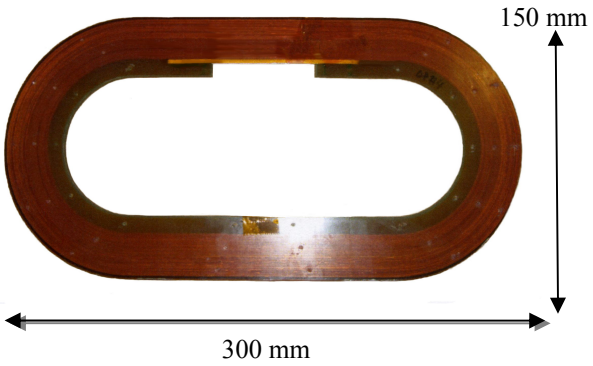

図3　レーストラック型シングルパンケーキコイル

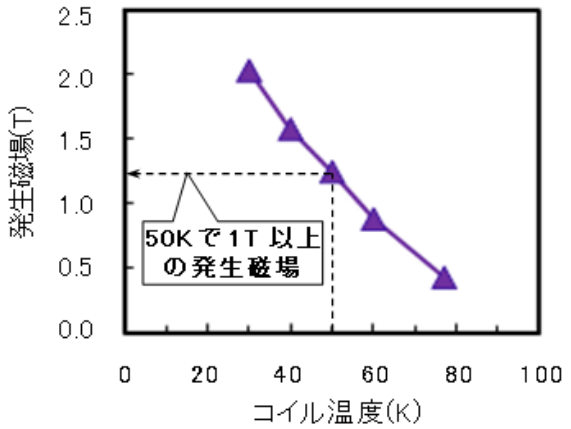

図4　積層コイルの磁場性能

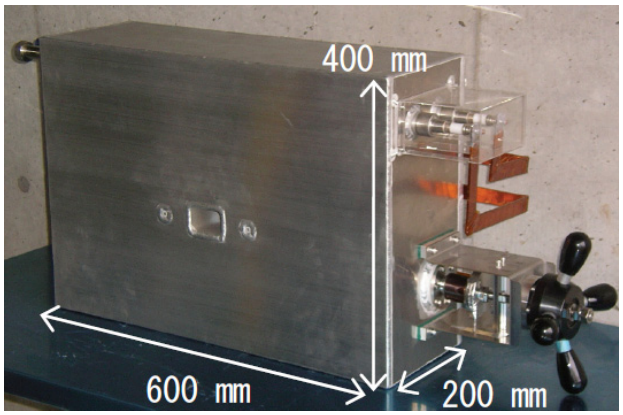

図5　モバイルマグネット

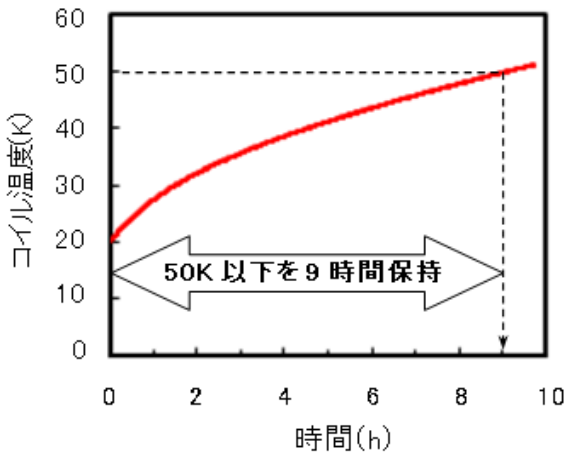

図6　モバイルマグネットの保冷性能

4. まとめと今後の進め方

今回、当初の目標を達成し、冷却システムと励磁電源が分離可能なRE系モバイルマグネットを開発した。

コイル温度が20 Kから50 Kに至るまでの保冷時間は10時間弱であった。主な熱侵入源は電流リードであり、超電導電流リードを用いれば大幅な保冷時間の延長が可能である。また、実機サイズのコイルの場合ではスケール効果により保冷時間は24時間に達すると考えられ、浮上式鉄道への応用も十分に考えられる値である。

一方、保冷特性が良好なため、磁場を10時間近く発生し続けることができるものの、実際には機械式スイッチ接続部の電気抵抗が大きくなるという問題があった。コイルの発生磁場は10時間で初期の27%程度まで減衰した。この電気抵抗の原因は超電導線材のはんだ付け抵抗や熱処理等による線材の局所的な劣化が原因ではないかと考えられる。この他にコイル本体には前述した*n*値低下の問題がある。磁場減衰を低減するには閉ループ内の接続抵抗低減とコイル性能向上が今後の課題である。

しかし、既に、コイルの*n*値低下に対する方策や、接続抵抗を低減する方策の報告がなされつつある。この課題が解決されれば、実機ではコイルの自己インダクタンスも飛躍的に大きくなるため、磁場減衰が大幅に抑制できる可能性もある。数Tの強力な磁場を、冷凍システム無しに長時間発生できる超電導磁石が将来応用に供される可能性は大きいと考えている。

今後は、ここで得られた知見を元にRE 系線材による5 T級の超電導磁石開発を進めていく計画である。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

[1] M. Ogata, Y. Miyazaki, H. Hasegawa, T. Sasakawa, and K. Nagashima, :J. of Phys. Conference Series., **234** 032042(2010).

[2] 小方, 宮崎, 荒井, 長谷川, 笹川, 長嶋:鉄道総研報告, 第 **24** 巻 第 1 号 (2010) 5-10. http://www.rtri.or.jp/infoce/rtrirep_J.html

[3] 小方, 長嶋, 宮崎, 岩松, 柳瀬, 山下:鉄道総研報告, 第 **22** 巻 第 11 号 (2008) 23-28.

[4] 小方, 水野, 荒井, 長谷川, 笹川, 長嶋: 第 82 回低温工学・超電導学会 3C-a01 (2010) p.196.

〈トピックス 3〉

スラッシュ窒素冷却システムの開発

Development of slush nitrogen cooling system

㈱前川製作所
仲村　直子
MAYEKAWA MFG.CO.,LTD
N. Nakamura

1. はじめに

前川製作所では、高温超電導（以下、HTS）アプリケーション向けの冷媒として、スラッシュ窒素（以下、SN2）の実用化に向けた研究を行っている。これまでに流動および熱特性に関する基礎的な研究を行っており、近年では独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構のプロジェクトである「イットリウム系超電導電力機器技術開発」において、HTSケーブル向けのSN2冷却システムの開発を実施している。

本稿では、SN2の特性、HTSアプリケーション向けの冷媒としてのメリットなどについて解説し、現在実施しているHTSケーブル向けSN2冷却システムの開発状況についての紹介を行う。

2. スラッシュ窒素（SN2）

SN2は、微細な固体窒素粒子と液体窒素（以下、LN2）が混合した固液二相流体である。図1のように、流体は固体粒子による光の乱反射により白濁している。窒素の相図において、SN2は三重点および固体と液体の二相が共存する融解曲線上に存在するため、流体の温度は固液の比率にかかわらず窒素の固化温度の63 K近傍となる。

SN2の生成方法には、FREEZE THAW法[1]、エジェクタノズル法[2]、オーガ法[3]などがあるが、いずれの方法も窒素の温度、圧力を制御して固体窒素を生成する。後述の4.3節において、当社で開発したオーガ法による生成装置および固体粒子の生成方法を簡単に説明する。

当社では、HTSアプリケーションをターゲットにしてSN2冷却システムの開発を行っているが、他分野においてはデンプン分子の骨格構造を観測するための凍結試料作製装置に用いた研究もあり[4]、SN2を用いることによる安定した急速冷凍の利点を生かした応用も考えられる。

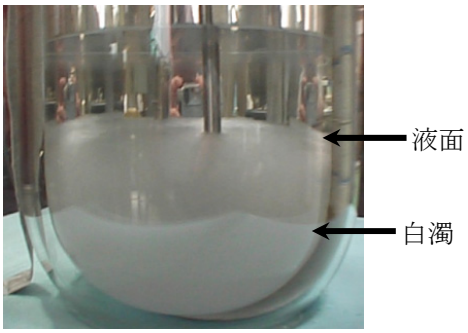

図1　ガラスデュワー内のスラッシュ窒素

3. HTS に対する SN2 冷媒のメリット

HTSケーブルなどの電力応用機器は、LN2を用いて冷却する場合が多く見受けられる。さらに、気泡による電気絶縁特性劣化や冷媒循環の不安定性などを抑制するため沸騰を避ける場合には、サブクール状態のLN2が使用される。

HTS電力応用機器の冷媒として、サブクールLN2の代わりにSN2を用いると、固体が存在する間は液体窒素の最低温度約63 Kに保持され、全ての固体が融解した後にはサブクールLN2として顕熱を利用した冷却が可能となる。例えば、窒素の融解潜熱25.7 kJ/kgは、絶対圧力0.2 MPaにおける液体窒素の温度64 K (Enthalpy -148.89 kJ/kg※) から76 K (Enthalpy -124.71 kJ/kg※) までの顕熱 24.2 kJ/kg にほぼ相当するため、LN2温度を飽和温度まで上昇させる場合には、融解潜熱と同等量の顕熱を冷熱として用いることが出来る。

これまでに、SN2冷媒を用いたHTS線材の評価試験が実施されており、SN2の冷却効果によるHTS線材の特性向上が確認されている[5]。

また、冷熱を固体の状態で保存することが可能となるため、いわゆる氷蓄熱のような考え方を用いて蓄熱システムを構築することも可能と考えられる。

なお、近年SN2の絶縁耐力はLN2と同等以上であるとの結果が得られており[6]、SN2はHTS電力応用機器向けの冷媒として有用な冷媒であることが再確認された。

※ Refprop ver.7.0 より算出

4. HTSケーブルのSN2冷却システム

4. 1 HTSケーブルの冷却システム

HTSケーブルの冷却システムにおいては、ポンプでLN2を送り出して冷凍機などで冷却し、サブクール状態を維持しながらHTSケーブルを冷却する循環冷却システムが用いられている[7]。この循環冷却システムにおいては、LN2の圧力、温度を融解曲線と飽和曲線の間に存在するサブクール状態を維持しながら温度などを制

御している。

HTSケーブルシステムに対しては、LN2温度を可能な限り低下させることにより、HTSの通電特性の向上、冷却ステーション間隔の延長などの利点がある。しかし、冷凍機などにより温度を低下させ過ぎると、冷凍機の熱交換器部などにおいて冷媒温度が融解温度以下となり、固化してLN2の循環を妨げる可能性もあるため、現状のシステムでは最低運転温度に余裕が必要となる。

4．2 SN2冷却システム

SN2は、窒素の固化温度である63 K近傍で冷媒温度を維持することが可能であり、HTS ケーブルシステムを従来のサブクールLN2より低い温度で冷却することが出来る。3章で記載したとおり、固体窒素粒子の融解潜熱により、冷媒の温度をより長い時間約63 Kに保持すること、サブクールLN2の顕熱が利用出来ることなどの理由により、冷却ステーション間隔の延長が可能となる。

温度制御の観点からも、仮にHTSケーブル入口温度を約63 Kに固定した場合、HTSケーブルを長尺にした際にも簡潔な制御が可能となる。また、1箇所のSN2冷却ステーションから複数回線のHTSケーブルシステムへ、温度的に安定した冷媒供給が比較的簡単に行えるなどの利点があると考える。

本研究では、上記のようなSN2冷却システムのメリットを確認するため、主に融解潜熱によるスラッシュ窒素の冷却効果の評価を目的として実験装置の設計および試験を実施することとした。

4．3 スラッシュ窒素生成装置

本研究では連続的にスラッシュ窒素を生成する方法としてスラッシュ水素生成にも利用されているオーガ法[8]を用いた。オーガ法では、融解温度以下の冷却面でLN2を固化させ、掻き取り刃などを用いて固体窒素を掻き取り、固体粒子を生成する。本生成方法を用いて、冷却面での熱流束と掻き取り速度などを調整し、固体窒素粒子の生成量やサイズなどを制御する。

開発したSN2生成装置の構造を図2に示す。本装置は、LN2およびSN2を貯槽するLN2容器、断熱真空槽、固体窒素を生成するためのGM冷凍機、生成した固体窒素を掻き取る刃、刃を回転させるためのモータ、生成した固体窒素粒子を観測するための観察窓などから構成される。

図3にSN2生成装置の掻き取り刃の回転数と固体窒素粒子の生成量の関係を示す。本結果から、生成能力は掻き取り刃の回転数9 rpmにおいて約5 g/sであることが分かった。また、回転数を増加させると固体窒素粒子の生成量が低下傾向にある。この理由として、回転軸の芯ブレなどにより冷却面上の固体窒素が十分に掻き取れていないことや、容器内のLN2が全体的に攪拌されてしまい、冷凍機の冷凍能力が固体窒素の生成のみならずLN2の温度を下げる働きに使われてしまっている可能性が考えられる。

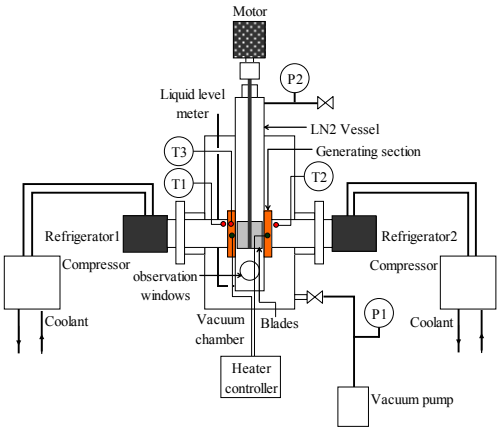

図2 SN2生成装置

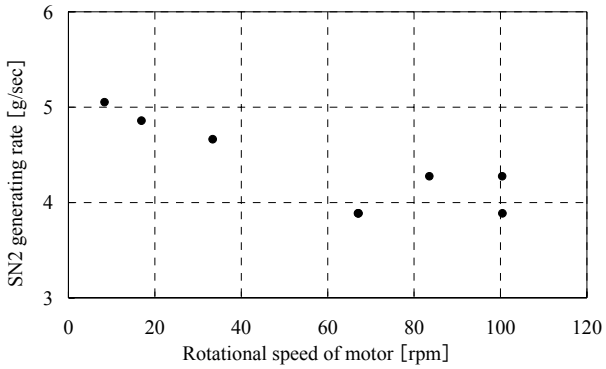

図3 掻き取り刃の回転数とSN2生成量の関係

固液二相流体の粘性係数の観点から、固体粒子のサイズや均一性はSN2の流動および熱的特性に影響を与える。実用化を考えると、サイズ1 mm以下の均一な固体窒素粒子を生成することがSN2の冷却システムを構築する上でも重要と考える。本研究では、固体窒素粒子のサイズや均一性を確認するため、高速度カメラを利用して、生成された固体窒素粒子を撮影し、粒子のサイズを測定した。撮影された固体窒素粒子の様子を図4に示す。掻き取り刃の回転数17 rpmの場合での固体窒素粒子径のヒストグラムを図5、回転数100 rpmでの結果を図6にそれぞれ示す。粒子径は、撮影した粒子の投影面積から、平均直径を算出した。測定した粒子の個数は約260個であった。なお、画像解像度の限界により40 μm以下の粒子については測定していない。

当社がこれまでに真空法にて生成した固体窒素粒子サイズは1～2 mm程度、エジェクタノズル法では180 μm

程度であった[2]。今回生成した粒子径の分布は、40 μm から60 μmの間でピークを示しており、これまでトライした方法と比較すると、小さいサイズの粒子を生成することが出来た。なお、掻き取り部のクリアランス等の問題によって1 mm以上の粒子が生成される場合もあるため、装置改良の余地があることも分かった。

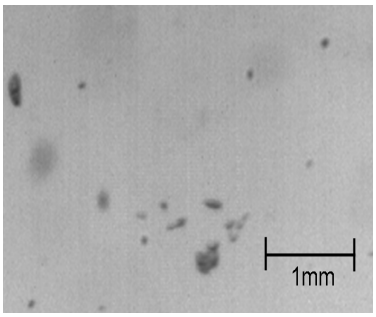

図4　固体窒素粒子

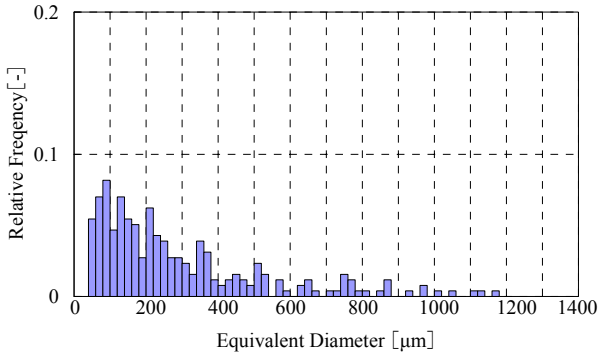

図5　回転数17 rpmでのヒストグラム

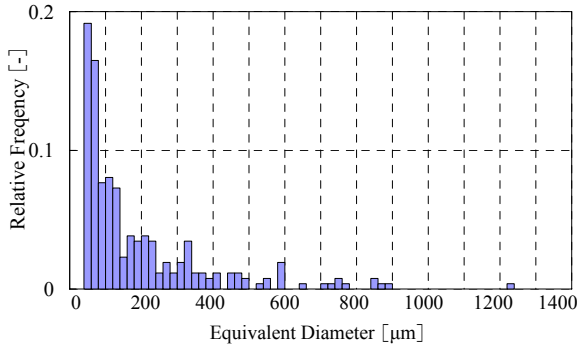

図6　回転数100 rpmでのヒストグラム

4. 4 スラッシュ窒素冷却評価試験

4.2節に記したとおり、SN2をHTSケーブルシステムの冷媒に用いた場合、図7に示すような冷媒の運転温度上のメリットがあると考えられる。そこで、SN2の冷却特性を評価するため、図8に示す評価試験装置を製作した。本試験装置は、LN2タンク、SN2生成装置、HTSケーブルを模擬したトランスファチューブで構成される。模擬トランスファチューブは、1 m毎にヒータを取り付け、さらに配管内には、0.5または1 mの間隔で温度計を設置し、SN2およびLN2の冷媒温度を直接測定した。

本試験装置を用いて、質量流量約0.07 kg/s、ヒータパワー合計約100 W（各約25 W）の条件におけるトランスファチューブ内の冷媒温度の測定結果の一例を図9に示す。

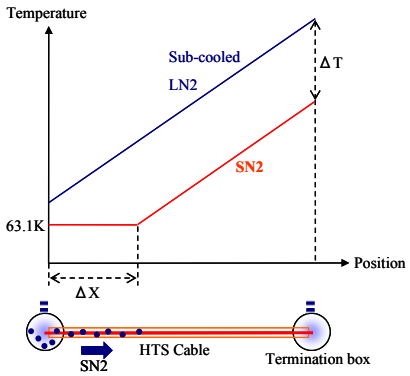

図7　HTSケーブルシステムにおける冷媒温度

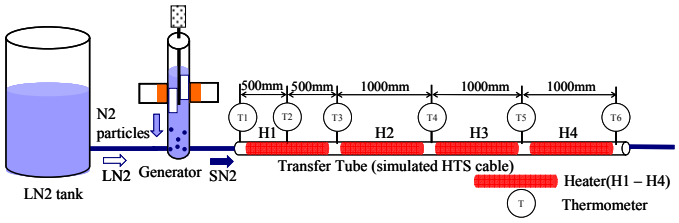

図8　冷却特性評価装置

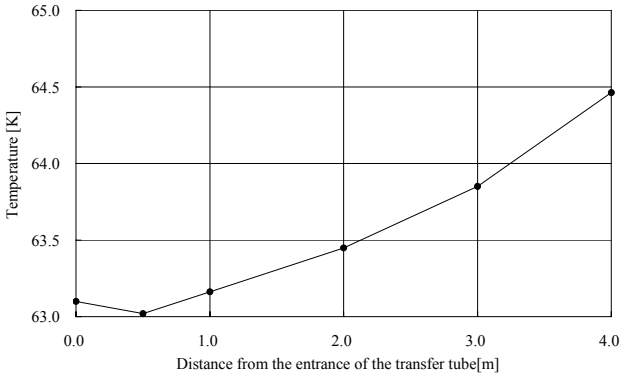

図9　トランスファチューブの温度分布

本測定の結果、トランスファチューブに約 63 K の冷媒（SN2 と想定）を送出することに成功した。さらに、トランスファチューブへの冷媒の送液中に、SN2 生成装置内に固体窒素粒子が停滞している様子を観察窓から確認しており、生成した固体窒素粒子を十分にトランスファチューブに移送させるための改良が必要であることも分かった。そこで、現在 SN2 生成装置内での LN2 と固体

窒素粒子の混合方法を検討するため、LN2の流れや対流の影響などについて流体解析を用いた研究を実施している。

5. まとめ

SN2の特徴やHTSアプリケーション用冷媒としてのメリットについて解説し、さらに現在実施しているHTSケーブル向けSN2冷却システムの開発内容について紹介を行った。

開発したSN2生成装置の固体窒素粒子の生成能力は、掻き取り刃の回転数9 rpmにおいて約5 g/sであった。さらに、生成した粒子径のヒストグラムは回転数100 rpmにおいて40から60 μmの間でピークを示すことが分かった。

SN2冷却特性評価試験においては、HTSケーブルを模擬したトランスファチューブ入口での冷媒温度は約63 Kであり、本試験装置においてSN2を生成、送液出来ることが分かった。

参考文献

[1] 松尾, 池内, 町田, 安田: 低温工学, **39** 巻 10 号 (2004), 475-482.

[2] 池内, 柳, 町田, 服部, 安田: 低温工学･超電導学会講演概要集, **68** (2003), 159.

[3] 仲村, 大野, 池内, 矢口, 町田: 低温工学･超電導学会講演概要集, **80** (2009), 64.

[4] 小池, 松田, 新田: 日本作物學會紀事, **73** 別号 1 (2004), 188-189.

[5] 瓜生, 百足, 佐藤, WANG, 植田, 石山, 淵野, 古瀬, 池内, 大野: 電気学会全国大会講演論文集, **2009** 巻 5 号 (2009), 210.

[6] 淵野, 古瀬, 名取, 池内, 大野, 石山, 植田: 電気学会全国大会講演論文集, **2009** 巻 5 号 (2009), 209.

[7] H. Yumura, T. Masuda, M. Watanabe, H. Takigawa, Y. Ashibe, H. Ito, M. Hirose, K. Yatsuka, K. Sato and R. Hata: SEI TECHNICAL REVIEW, No.**64** (2007).

[8] D. E. Daney, V. D. Arp and R. O. Voth: Advances in Cryogenic Engineering, vol **35** (1990), 1767-1776.

＜会議報告 1＞

ICEC23-ICMC 2010 国際会議報告
Report on ICEC23-ICMC 2010

物質・材料研究機構
熊倉浩明
National Institute for Materials Science
H. Kumakura

表記の国際会議が7月19日から23日にわたって、ポーランド、Wroclaw 市の Wroclaw University of Technologyで開催された。この会議はInternational Cryogenic Engineering Conference (ICEC) とInternational Cryogenic Materials Conference (ICMC) と合同で隔年に開催されているもので、Cryogenic Engineering Conference (CEC)-ICMCが米国で開かれない年に開かれる。Wroclawは、ワルシャワから南西に約300 kmに位置する人口約60万の都市で、第二次大戦終了まではドイツの一部であった。歴史的に古い町で教会が非常に多く、日本人にとっては中々興味をそそられる街である。会場となったWroclaw University of Technologyはポーランドでは古い大学で、今年で創立100年を迎えるとのことである。

今回の会議への出席者数は300人強で、論文発表数は全部で345件あった。その約3/4がICECでの発表で、1/4がICMCでの発表であった。国別の出席者数では、日本からの53人が第2位のポーランドの44人を抜いて最も多く、以下10位までを記すと、ドイツ34人、中国34人、米国23人、スイス22人、フランス20人、韓国14人、英国11人、ロシア10人、となる。日本からの出席者が多いのは他の国際会議と同様であるが、中国からの参加者の多いのが注目される。今回に限らず、最近の国際会議では中国からの参加者が増えているのが特徴で、発表する論文のレベルも上がってきているようである。

以下に日本以外からの発表で、筆者が興味を持ったいくつかの発表について、簡単に報告したい。

イタリア、University of Genova の M. Putti は、“Application Relevant Properties of Pnictide Superconductors”と題して、応用の観点から鉄系超伝導体の特徴について述べた。層状構造を有し異方性を示すなど、鉄系超伝導体は高温酸化物超伝導体（HTS）に似ているが、高温酸化物の基となる母物質が絶縁体なのに対して鉄系超伝導体の母物質は金属であるとし、異方性は1111系がγ ～9と大きいのに対して122系では約2と小さく、11系では更に小さくて約1であると述べた。これに伴って抵抗法による超伝導転移曲線は、1111系ではHTSと同様に磁界が高くなるに従って転移幅がブロードになるが、122系では磁界によってほとんどブロードにならず、通常の金属系超伝導体に近いとしている。また多結晶122系バルクでは、磁界が印加された場合ジョセフソンカップリングによる粒間J_cの急激な低下が認められるが、122系については、粒のミスアラインメントによる粒間J_cの低下の度合いはHTSよりも小さいとし、さらにJ_c//abとJ_c//cは同じレベルであろうと述べた。T_cやH_{c2}が高く、また熱揺らぎが小さいことなどから、応用上は122系が最も有効であろうとしている。

ウクライナ、Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences の T.Prikhna は“High-pressure synthesized MgB_2-based materials with high critical current density and upper critical field”と題して高圧合成したMgB_2バルクについて発表した。バルク材はHot Isostatic Pressing (HIP)、ホットプレス、それにプラズマ焼結法で作製している。これらの方法でかなり高いMgB_2の充填率を得ており、HIP処理したバルクでは空隙率が10数%であるとしている。作製したバルク材はX線回折ではほぼMgB_2単層に近いが、TEMやSEM観察からはかなり多くのMg-B-O析出物が分散しているのが認められるとしている。また酸素を多く含むバルクの方がむしろ高い超伝導特性を示す傾向にあると述べた。また、Ti、Ta、Zr、SiCなどの不純物添加が酸化物の分散状態に影響を与え、その結果超伝導特性にも影響を与えている可能性が高いとしている。このようにして20 K、自己磁界中で1.0 – 1.8×10^6 A/cm^2のJ_cが得られ、また20Kでの不可逆磁界H_{irr}は13 Tに達すると述べた。

ポーランド、Institute of High Pressure Physics のT. Cetnerは、MgB_2線材のHIP処理の効果について発表した。線材は米国のHypertech Research Inc. から供給を受けたCTEF法による単芯ならびに多芯線材で、これに1.4 GPa、600 - 850°CでHIP処理を行っている。生成したMgB_2の粒径は、通常熱処理とほとんど変化がないが、密度が大幅に上昇し、特に高磁界中で高いJ_cが得られるとしている。最高のJ_cとして4.2 K、14 Tの磁界中で3×10^4 A/cm^2以上の値が得られ、HIP法は実用的にも有望な方法であると述べた。

中国科学院電工研究所のL. Xiao は、“Recent Progress of Superconducting Wires and Power Technology in China” と題して発表した。超伝導線材としては、YBCO、MgB_2、それに鉄系超伝導体の三つについて研究を進めている。YBCOについては、RABiTS法を適用して基板上にバッファ層を形成し、PLD法によってReel to Reel法で長尺のテープを試作しようとしている。MgB_2ではPIT法による単芯テープにナノカーボンや炭素化合物添加でJ_cの向上をはかっている。特に、

$C_9H_{11}NO$添加はJ_cならびにH_{c2}の改善に効果的であるとし、800°Cで熱処理をした場合は4.2 K、10 T の磁界中で3.7×10^4 A/cm^{2}のJ_c が得られ、これは炭素化合物を添加したMgB_2線材としては最高の値であるとしている。鉄系も PIT 法で線材化を試みている。122 系($Sr_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$) において銀シースを用い、さらに銀を添加することで特性が改善されると述べた。4.2 K、ゼロ磁界ではJ_c = 3,750 A/cm^2 (I_c = 37.5 A) が得られ、これは鉄系超伝導線材としては最高の値であるとしている。また、応用についても触れ、HTS パワーケーブルの他に限流器やモータ、SMESなども開発中であると述べた。全ての研究開発において中国政府の強力なバックアップがあるようである。

同じ電工研究所のS. Daiは“The design of a 380 m/10 kA HTS DC power cable”と題して発表した。中国では主に国の西側で発電を行い、東側で消費をするので電力輸送が長距離にわたる。そこで直流の超伝導送電が有利であるとして開発を進めている。ビスマス系線材を用いたパワーケーブルで2010年の後半には運転試験を行う予定であると述べた。

なお、次回のICEC24-ICMC 2012は、平成23年5月14－18日、福岡市の福岡国際会議場で九州大学の舟木和夫教授を議長として開催される予定である。

＜会議報告 2＞

応用超伝導会議(ASC2010)会議報告
(1) エレクトロニクスセッション

Report on electronics sessions of Applied Superconductivity Conference 2010 (ASC2010)

名古屋大学
赤池 宏之
Nagoya University
H. Akaike

応用超伝導会議2010（ASC2010）が、8月1日から6日までの日程で、米国ワシントンD.C.のOmni Shoreham Hotelにて開催された。この会議は、超伝導応用に関する世界最大の会議であり、隔年で米国にて開催される。エレクトロニクスセッションのことは後ほど述べるとして、最初に、全般的なことで、印象に残ったことをいくつか挙げておく。まず、日が長いためか、セッションが夜遅くまで続いた点である。実際、イベントのない月曜と水曜は、ポスターセッションが午後9時半あるいは10時まで続いた。これまで何回かASCには出席しているが、今回のように遅くまで会議が続くのは珍しく、新鮮に感じた。次に、木曜夜のバンケットである。これは、なかなかよい企画だった。会場ホテル内での着席式であったが、多くのテーブルには “Mentors & students” と札が置かれており、学生たちが分野を超えて一流の研究者たちと食事をする機会を得ることができるようになっていた。ただ、BGMが若干大きかったため、テーブルの向かい側の方の声がほとんど聞こえないという状況であったが、学生たちにとってはよい経験を得ることができたと思う。もう1点は、エレクトロニクス分野のBoard Memberに名古屋大学の藤巻教授が選ばれたことである。これで、現メンバーの田辺氏（国際超電導産業技術研究センター）を含めASC Board Members の中にエレクトロニクスに関係する日本人は2人となった。エレクトロニクス分野における日本の研究開発の重要性が益々高まってきていることを意味していると思われる。

さて、エレクトロニクス分野の発表に目を向けてみると、超伝導転移端センサ（TES）に関するセッションが多い。応用としては、宇宙の起源を探る宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の観測や、高エネルギー粒子線検出である。多素子化から信号処理回路まで、精力的な開発が進んでいる。SQUIDに関する発表は、低磁場NMR/MRI関連が中心となっている。量子ビット関連では、8つの量子ビットを集積化したプロセッサの試作や、磁束量子ビットにおいて10 μsecを超えるエネルギー緩和時間を達成したという講演が注目を浴びた。また、スペシャルセッションとして、マイクロウェーブSQUIDやパラメトリック増幅器関連の講演があった。これらは主として、量子ビットの読み出しなどに用いられる。

一方、デジタル回路のセッションは3つあったが、そのほとんどの発表が日本（横国大及び名大が中心）からであり、そこに米国Hypres社などの発表が加わった形となった。発表内容としては、単一磁束量子（SFQ）回路設計及び動作実証が中心となっている。日本からの発表は、現在進行中のJST-CRESTプロジェクトであるRDP（再構成可能なプロセッサ）関連及び昨年度終了した科研費特定領域研究の成果が中心であった。

デジタル関連のトピックスとしては、デジタルシステムの低消費電力化・省エネ化を目的として、今回新たに “Power efficient digital logic” のセッションが設けられたことである。ICT技術等の発達・普及や高性能コンピューティング（HPC）に対する更なる高性能化の追求により、今後益々エネルギー消費量が増大することが社会的問題となっている。SFQ回路は半導体回路に比べて3桁以上低消費電力であるが、このような社会的背景を受け、さらに省電力化を目指すことが世界的な流れである。実際、米国では省電力ゲートを用いたHPC応用について

のプロジェクトが一昨年から始まっている。また日本でも、今年6月から科研費の支援を得て、省電力ゲートの検討が横国大を中心として始まっている。ここで発表に目を向けると、まず、Hypres社のMukhanov氏から、省電力化技術の必要性と概要、及び、独自開発の省電力SFQ技術について招待講演があった。従来のSFQ回路の消費電力は、主として回路駆動用電流がバイアス抵抗を流れることにより発生する静的消費電力である。そこで、この静的消費電力をゼロにする技術が鍵となる。これまでにも大きなインダクタンスをバイアス抵抗に直列に付加することによりその抵抗値を小さくし、省電力化を図る技術（L-Rロードと呼ばれる）が開発されている。しかし、彼らの技術はL-Rロードのバイアス抵抗をジョセフソン接合に置き換えるというものである。これにより、従来のSFQ回路の性能をほぼ保った状態で、静的消費電力をゼロにすることができると同時に、従来のSFQセルライブラリの資産をそのまま活かすことができるとのことである。実際、この新しい方式（ERSFQ）を用いたトグルフリップフロップ（T-FF）を20段接続した回路（20 bitカウンタ）を67 GHzまで動作させることに成功している。一方、米国Northrop Grumann社のHerr氏からは、RQL（Reciprocal Quantum Logic）と呼ばれる高周波電流を利用した省電力ゲートの招待講演があった。このゲートは、バイアス線を流れるAC電流により超伝導トランスを介して駆動され、バイアス抵抗が使われていないため、静的消費電力はゼロである。RQLゲート自体の提案は、前回のASC（ASC2008）にて同氏から発表があったが、今回はそれを用いた桁上げ先見加算器の設計についてである。大規模回路設計法・構築法やCADツール開発などが進んでおり、主要ゲートやシフトレジスタなどの動作が確認されている。その他、別の試みとして、静的消費電力ではなく、接合がスイッチすることにより発生する動的消費電力に着目し、その低減の試みが横国大吉川教授から発表された。これら低消費電力化技術、あるいは省電力ゲートは、先に述べたように、今後デジタル関連で重要な位置を占めることになると考えられる。今回のセッションでは、6件中4件が米国からであり、日本からの発表は1件のみであった。これからの日本の各研究機関の頑張りに期待したい。

なお、次回のASCは、2012年10月にオレゴン州ポートランドで開催される予定である。

(2) ASC2010 会議報告（RE 系線材）

Report on Applied Superconductivity Conference 2010 (Coated Conductors)

昭和電線ケーブルシステム株式会社
小泉　勉
SWCC Showa Cable Systems Co., Ltd.
T. Koizumi

1966 年より開催されてきたASC は、今回で23回目を数えるようになった。今年は8月1日から6日までの6日間、Washington, D.C.の動物園近くにある Omni Shoreham Hotel で開催された。本会議においても、RE 系線材の製法については、気相法とMOD 法に大別され、各々長尺化、低コスト化に加え、磁場中応用に向けた報告が精力的に行われた。本会議において、印象に残った発表について以下に記す。

ヒューストン大学の Selvamanickam らは、MgO / IBAD テープ上に MOCVD 法によりにYBCO層を成膜した線材の長尺化を行い、キロメートル級線材の作製が高い歩留りで可能になったことを報告した。また、長尺化に加え、高 I_c 化やピンニングセンターの導入等にも着手し、長尺化を進めていると報告し、安定化銀層のメッキ化等による、線材の低コスト化についても報告した。

ICMAB の Obradors らは、TFA-MOD 法線材作製プロセス中の、仮焼時の雰囲気の効果について報告し、窒素雰囲気で仮焼を行った場合、本焼後、膜中の空隙が減少するとした。更に、仮焼膜中の F 低減を狙い、Ba を TFA から F-free 原料に変更した原料を用いることを試み、YBCO 層厚700 nm において、2～3 MA/cm^2 (@77 K、Self field) が得られたことを報告した。

ISTEC-SRL の Yoshizumi らは、TFA-MOD 線材の、Y を一部 Gd に置換し、$BaZrO_3$ をランダムピンとして導入した線材について、磁場中での I_c 向上を試みた。原料溶液に Zr 塩を添加したところ、～ 30 nm の $BaZrO_3$ ナノ粒子を導入、分散させることに成功したと報告した。また、YGdBCO に対して1 wt% の$BaZrO_3$を添加した線材で、I_c = 35 A/cm-幅 (@77K、3 T) が得られたとのことであった。さらに、3 wt%の$BaZrO_3$ を添加した線材では、更なる磁場中特性の向上が認められたと報告した。

LANL の Matias らは、線材の低コスト化の検討を行っており、現在主流であるのハステロイなどの Ni 基合金ではなく、安価なステンレス等に入れ替えることにより、Ni 基合金と比較して 3～5 倍のコストダウンになることを報告した。また、超電導層の作製には、共蒸着法を用いることで、製造速度が高速化し、低コストプロセスが実現可能であることを示唆した。

ORNL の Paranthaman らは、これまで電解研磨を施したハステロイ基板上に PVD 法でバリア層 (Al_2O_3) を成膜していたが、コストダウンを目的に、電解研磨を施さないハステロイ基板上に MOD 法を用いてバリア層を成膜することを試みた。1～4回塗布を行い、塗布回数が増す毎に表面の凹凸が改善されることが判り、溶液塗布速度を増すことによっても凹凸が改善されることも判ったとのことであった。その基板を用い、それ以降の成膜に PVD法を用いて線材を作製したところ、J_c = 3.04 MA/cm^2 が得られたと報告した。

ORNL の Goyal らは、透過型電子顕微鏡を用いて YBCO と $BaMO_3$ (M = Zr, Sn, Ce) との界面観察を詳細に行った。その結果、BMO_3 の成長は YBCO の格子との不整合性に関係があることを示唆した。

九州工業大学の松本らは、人工ピンの形状が J_c 印加磁場角度依存性に及ぼす影響ついて報告した。PLD 法に用いるターゲットを交換する方法により、$BaZrO_3$ や $BaSnO_3$ ナノロッドの長さを変えた試料を作成し、J_c 印加磁場角度依存性について調査を行った。その結果、ナノロッドの長さの減少に伴い、ピンニング挙動が、一次元的なものから、ナノ粒子を導入した試料に見られるような、三次元的なものに変わっていくことを示唆した。

九州大学の木須らは Gd 系線材の超電導特性について報告した。近年、Gd 系線材の I_c は向上しつつあり、超電導層厚 2 μm で I_c > 200 A/cm-幅 、5 μm で I_c > 1,000 A/cm-幅 が得られているとし、ゼーベック顕微鏡による評価から、超電導組織の均一性の向上が、I_c 向上に寄与していると報告した。

ISTEC-SRL の Lee らは、PLD 法を用いたGd 系線材の高速製造に向けた検討を行い、製造速度 30 m/h で平均 I_c = 320 A/cm-幅、100 m/h で平均 I_c = 200 A/cm-幅 の線材作製が可能になったことを報告した。

LANL の Miura らは、TFA-MOD 線材について c 軸方向の転位や$BaZrO_3$ ナノ粒子のピンニングセンター導入のメカニズムについて、PLD 線材と比較し、粒径 25 nm 程度の $BaZrO_3$ ナノ粒子の分散等により、@ 77 K、1 T (B // c) での J_c が 3 倍以上に向上することを示唆した。さらに、65 T までの高磁場測定を行い、B_{irr} を評価した。

CSIC の Palau らは、ピンニングセンターを導入した TFA-MOD 線材の $BaZrO_3$、Y_2O_3 等のナノ粒子の分散について透過型電子顕微鏡観察を行った。BZO ナノ粒子周辺のY123層は、転位と圧縮応力歪みが生じていることが観察され、格子歪みの大きさが J_c 及び J_c - B 特性に寄与していると報告した。

ANL の Chen らは、TFA-MOD 線材におけるYBCO 相の成長機構について、YBCO 層厚1.2 μm の試料を用いて、中間層界面付近から表層まで、ラマン分光法を用いて YBCO層の成長過程を観察した。YBCO 線材の熱処理過程を段階に分け、各々の過程において試料を急冷し、YBCO の結晶が中間層との界面から表層に向かって成長していくことを解明した。また、塗布回数 1 回および 2 回の試料を比較し、塗布回数 1 回の試料においては I_c = 389 A/cm-幅 2 回においては I_c = 288 A/cm-幅 が得られ、高 I_c 化には塗布回数を 1 回で行う必要があるとした。その原因として、2 回塗布の場合、層間界面に CuO が析出し YBCO の結晶成長が不均一になり、特性を低下させることを示唆した。

本会議においては、長尺化や特性向上に加え、磁場中応用やコスト低減等についても多く報告され、実用化を鑑みた研究開発へとステップアップしていた。高温超電導の実用化に期待が持てるものであった。

(3) ASC2010 会議報告（金属系線材）

Report on the Applied Superconductivity Conference 2010 (metallic conductor)

物質・材料研究機構
伴野　信哉
National Institute for Materials Science
N. Banno

ASC 2010は米首都ワシントンにおいて8月1日から6日まで開催された。金属系超伝導材料に関して言えば Nb_3Sn、Nb_3Al等のA15型化合物材料に加え、MgB_2、鉄系超伝導を加えると筆者が数えただけで128件あり、金属系超伝導材料関係の会議としては最大規模といえる。内訳はNb_3Sn関係40件、Nb_3Al 7件、NbTi 3件、MgB_2 45件、鉄系超伝導（ニクタイド）33件である。ニクタイドについては発表件数が急激に増え、日本や中国、イギリスやメキシコ、アメリカ、イタリア、ドイツ、台湾から発表があった。

今回NISTのJ. EkinがIEEEの超伝導材料部門の表彰を受けたことで、A15型線材の機械的特性の特別セッションが設けられた。Nb_3Sn関係の発表では、約半数が機械的特性や関連する組織観察の内容となっている。それはITER用導体の開発の中でしばしば指摘されているように、複雑な撚りに起因する局所曲げひずみによる導体性能の劣化が問題視されているためである。こうした問題はここ数年言われ続けており、根本的な打開策はまだないように見受けられる。機械的特性は線材開発上の極めて重要な要素であり、J. Ekinの功績が称えられたのもそうした重要性が評価されてのことだろう。

その他Nb_3Sn関係で筆者が気になった点は、日本企

業からの発表が一件もなかったということである。日本以外のメーカーでは、OST、Hyper Tech、SuperMagnetics、Supercon INC.が発表していた。開催場所が遠いアメリカということも関係しているのだとは思うが、積極的に情報交換する機会をもつ必要性があるのではないだろうか。これだけ機械的特性が世界で話題とされている中で、参加せずに距離を置き続けてしまったらいつか情報量の点で大きな差を付けられてしまう懸念がしてならない。会議報告をしても詳細な情報までは伝えられないので、自分の目で確かめていく姿勢は必要に思う。

Nb_3Al関係ではジュネーブ大学のC. Senatoreから比熱測定の結果が発表されたほか、同大B. Seeberから横圧縮応力の結果が報告されたが、多くはNIMSからの発表である。今後もしNb_3Al線材をどうしても使用せざるを得なくなり、世界でも一社しか生産できないという状況を打破するためには、現実的な解としては急熱急冷処理以外の前駆体線材の生産までは各メーカーで行い、最後の処理だけを一社に任せるという選択肢はあるだろう。そういう意味でもCERNやITERとも近いジュネーブ大学や、加速器関係でKEK・NIMSとコンタクトのあるFermi Lab.などの外国機関がNb_3Al線材で少しでもつながりを持ち続けていくことは非常に良いことだと思う。

MgB_2に関しては大きな進展は見られないものの、現象解明や特性改善方法の探索が進み、着々と進歩しているように感じている。NbTiに代わる低コスト材料としても期待されており、Columbus（伊）をはじめBruker、Hyper Techなどが着々と商業化を進めている印象がある。

鉄系超伝導に関しては最初の発見から次々と同系列の超伝導体が発見され、非常に展開が多岐に広がっている。現在までの臨界温度の最高値は約56 K。ただ線材開発に関して言えば発表は3，4件見受けられただけで特性もほとんど優位なものは示されていない。もっぱら超伝導発現に関連したエネルギー状態や結晶構造に注意が向けられているようである。以下いくつか個別に紹介する。

(a) Nb_3Sn

特に興味深かった発表は、J. Ekinと同じくNISTで活躍しているN. CheggourからのTiおよびTa添加の機械的特性への影響に関するものである。まず従来のTa添加RRP線材の不可逆ひずみ $\varepsilon_{irr,0}$（ピークを示す印加ひずみからの値）がわずか0.04%であるという問題点を指摘した。一方Ti添加RRPの $\varepsilon_{irr,0}$は0.2～0.25%であり、Ti添加は $\varepsilon_{irr,0}$の向上に効果があると報告した。OSTもこの結果を受けてTi添加へ開発をシフトしているようである。

一方OSUのM. D. SumptionやHyper TechのM. J. Tomisicらが進めているTubularタイプ線材の場合には、Ta添加線材でもTi添加線材でも $\varepsilon_{irr,0}$は0.25%程度の値を示している。N. Cheggourによれば、Nb+Taのバリア厚が効いているとの見解である。

P. J. Lee (FSU) からはSULTANでの試験後のITER TFMC用導体の縦断面において、広範囲のクラック解析を行った結果を報告し、線材が曲がった個所でクラックが観察されやすい傾向があることを報告した。

ラザフォード導体では最近コンパクション時の線材の変形に伴うバリアの損傷が問題となっているが、FermiのE. Barziから有限要素法解析を利用して損傷に至る変形の限界を探ろうとする興味深い発表もあった。

OSTのRRP線材はITERや加速器用導体の受注で大変活況である。新規に50人の職員を雇用し、新しい工場を建て、ITER TF用に60 kgのビレットを今後2(+)年で1000ビレット生産する体制を整えているということである(J. Parrell (OST))。

材料学的に興味深かったのは、Supercon INC.のC. V. RenaudからのNb-47Ti合金を使ったTi添加内部拡散法線材の発表で、TiのNbへの拡散は遅く、Nb_3Sn相領域がNb-47Ti相に達して急激にTiの拡散速度が上がることを詳細に調べた。その他C. Senatore (Univ. Geneva)の比熱測定、CERNのI. PongのSn濃度と粗大粒に関する発表も興味深かった。

(b) Nb_3Al

Nb_3Alに関してはEBSD分析による組織観察やリスタック法線材の長尺化・急熱急冷処理の定電圧モードへの試み、Taマトリクス前駆体線材の加工性、KEKからラザフォード導体の試作、ジュネーブ大から横圧縮応力下でのJ_c特性に関する報告があった。

(c) MgB_2

ジュネーブ大学のR. FlükigerはCold High Pressure Densification (CHPD) と呼ばれる方法でJ_c向上に成功したと発表した。熱処理前に4方向から数GPaの圧力を加え、粒間のコネクティビティーを改善する。長尺化へも対応可能である。メーカーではColumbus、Bruker、Hyper Techからの発表があり、Hyper Techは増産のために新しい場所へ移ったそうである。またCASのX. Zhangから$C_9H_{11}NO$を添加したMgB_2線材の発表があり、carbohydrate添加線材の中で最も高いJ_c = 3.7 × 10^4A/cm^2@10Tの値を示した。

(d) ニクタイド

線材化に関する発表で気になったのはCASのY. Maによるもので、SrKFeAsコアの中でAg添加がコネクティビティーの改善に役立っているとの話であった。3,750 A/cm^2@0 TのJ_c を示す。

(4) ASC2010会議報告 (Large Scale)

Report on the ASC2010 (Large Scale)

日本原子力研究開発機構
辺見　努
Japan Atomic Energy Agency
T. Hemmi

2010年8月1日から6日までの日程で、米国のワシントンDCにおいて、ASC2010が開催された。この会議は2年ごとに米国で開催され、超伝導応用に関する最も大きな国際会議となっている。参加者は合計で約1700人となっており、毎回、増加傾向にある。

Large Scaleの発表件数は約540件（欧州26%、米国23%、日本20%、韓国18%、中国11%）で、約半数がアジアからの発表である。発表内容の内訳としては、HTSが約370件、LTSが約160件であった。機器別に見てみると、HTSは電力機器等を中心に、磁気浮上（64件）、限流器（56件）、電力ケーブル（49件）の発表が目立ち、LTSは大型科学プロジェクトである加速器（75件）及び核融合（37件）が中心となっている。10年前のASC2000と比較すると、Large Scaleの発表件数は当時の約300件から大きく増加しており、HTSだけでなくLTSの発表件数も増加している。特に増加に寄与しているのは、韓国と中国からのHTSに関する発表である。また、ASC2000では発電機やSMESの電力機器にLTSを適用する研究が存在したが、現在はほぼ無くなってきている。

ASC2010のLarge Scale全体の印象としては、HTSを応用した電力機器が実系統への連係を含めた実規模レベルでの開発が着実に進められ、実用化の段階に近づいていることが実感されると同時に、競合技術と比較して魅力ある機器とするために正念場の時期にあると感じられた。一方、LTSはNb_3SnやNb_3Alを用いた高磁場応用を目指した研究開発が中心であり、欧州及び米国ではHTSとほぼ同等の発表件数を維持している。これはLHCのアップグレード計画及びITER計画を背景として研究開発が行われていることによる。そのなかで、高磁場化による電磁力に起因する歪の影響に関する発表が多く、活発な議論が行われていたのが印象的であった。

以下に核融合に関連する発表のいくつかについて紹介する。

M. Jewell（ITER機構）からの報告では、ITERのトロイダル磁場（TF）コイル用導体を製作する6極（中国、欧州、日本、韓国、米国、ロシア）により、すでに約100トンのNb_3Sn素線が製作され、ブロンズ法及び内部拡散法のNb_3Sn素線を用いた性能検証試験は6極全てがITERの要求性能を満足するものであったと報告された。TFコイルの運転に要求される1000回の繰り返し通電による分流開始温度T_{cs}の低下はこれまでに報告されているものと同様に観測されている（2LB-05）。

歪に敏感な脆性材料であるNb_3Sn素線を用いたケーブル・イン・コンジット導体（CICC）では、自身の電磁力により導体を構成する素線が変形し、性能に影響を及ぼすことがITERの工学設計活動における中心ソレノイド（CS）モデルコイルを始めとした大型コイルで確認され、ASC2010でも実用上重要な研究テーマとして多くの発表が行われた。繰り返し通電によるT_{cs}の低下もこれに関連した課題である。

A. Nijhuis（Twente大）は、CICC内のNb_3Sn素線間の接触状態を模擬した状態での超伝導性能の評価結果等、これまで行われた一連の研究がレビューされた。歪で評価すると、内部拡散法の素線がブロンズ法の素線よりも大きく影響を受けるが、力で整理すると逆にブロンズ法の素線の方がより大きな影響を受けることが示された。これは、実用上、非常に興味深い知見である(2LB-01)。M. Breschi（Bologna大）は、ITER TFコイル用導体の性能試験結果から求めたT_{cs}とNb_3Sn素線の臨界電流の歪特性から求めた実効歪とn値の関係が直線に近似できることを報告した。実効歪は素線性能の違いを規格化した導体の性能低下化度を示す指標であり、n値の低下は素線内フィラメント間転流によるものと考えられる。この二つに相関があることから、CICCを構成する素線内でフィラメントの破壊が起こり、導体のT_{cs}が低下しているではないかと推定していた (2LP2B-06)。これに関連する研究として、P. J. Lee（フロリダ州立大）はTFモデルコイル用導体の試験サンプルから取り出したNb_3Sn素線について断面観察を行った結果、曲げが生じている素線においてフィラメントの破壊が観測されることを報告した。電磁力による圧力の大小による違いは明確ではなかったとされ、破壊メカニズムを考える上で興味深い結果となっていた（2MP1F-10）。

P. Bruzzone (CRPP) は、これらのNb_3Sn素線の歪に関連する話題はすでに25年前の大型コイル計画（LCT）で報告されていることであり、新しい問題ではないと指摘し、CICCが核融合炉用導体として最適な選択肢なのか問題提起した（3LA-01）。この発表に対して、活発な議論が行われ、J. Minervini (MIT) から、冷媒との接触面積を大きくすることが可能なCICCは核発熱を除去できる唯一の選択肢であるとのコメントがあり、今後の核融合炉用大型導体の方向性について示唆を与える議論であった。

CICCの性能低下に関するメカニズムの解明及びその最適化を目指した研究として、CICC内のNb_3Sn素線を忠実に模擬した力学モデルを立てて、素線1本1本の

状態を数値計算により明らかにする研究がA. Torre (CEA, 3LA-03), D. P. Boso (Padova大、2LP2A-07) 及びJ. Qin (Twente大、3LA-04) から報告された。従来は、Nb_3Sn素線単体の試験結果や解析結果からCICC内の素線の状態を推定する研究が行われたてきたが、今後はCICC全体を模擬する数値解析によるアプローチも発展していくという印象をもった。また、CICC内の素線のNb_3Snフィラメントの歪状態を直接明らかにする試みについて、T. Hemmi (JAEA) よりJ-PARCの高強度パルス中性子を用いたITER TFコイル用導体の歪測定結果が報告され、CICC内部のNb_3Sn超伝導体の歪を非破壊で測定できることが示された。これまで、導体構造の複雑さから歪を評価することが困難であったことから、新たな歪測定手法として期待される（2LP2A-04）。

ITERの建設に伴ってNb_3Sn素線の大量生産技術の確立、素線及び導体の機械特性に関する多くの研究は核融合応用だけでなく、ラザフォードケーブルとCICCの導体構成の違いはあるものの、加速器の高性能化に対しても同じであり、実際に同様の多く研究が両者でなされている。また、ITER機構とCERNの共同研究も盛んに行われていることから、これが相乗効果となり、核融合原型炉へ向けた更なる高性能化の道筋となることが期待される。

＜会議報告 3＞

IUMRS-ICEM 2010 会議報告

Report on the International Union of Materials Research Societies International Conference on Electronic Materials 2010 (IUMRS-ICEM 2010)

物質・材料研究機構
中根　茂行
National Institute for Materials Science
T. Nakane

2010年度のIUMRS-ICEM（正式名称はInternational Union of Materials Research Societies, International Conference on Electronic Materials）が8月22ー27日の期間に韓国で開催された。開催場所はKINTEX (Korea International Exhibition Center) という大きなイベント会場で、ソウル市中心部からバスや地下鉄で1時間強離れた大化 (Daehwa) という町にある。手頃な設備と広さの会議室が十分にあるだけでなく、飲食施設等もあり、本会規模の学会であれば、十分な施設であったと思う。

IUMRS-ICEMは、多岐に渡る分野の研究関係者が参加する中規模の国際会議で、プログラムは、ワイドギャップ半導体、ナノマテリアル、太陽電池、電子デバイス、燃料電池、有機EL、プラズマ応用技術、機能性酸化物、超伝導などの各セッションに分類されている。著者が参加したのは、このうちの超伝導セッションで、発表は全て8/24にまとめられていた。会場は211号室を一日借り切った状態で行われた。発表者・聴講者は総勢30名程度だったのではないかと思われる。

参加者は韓国人、日本人、中国人が多く、全体の印象としては、若い参加者が多く見受けられた。

本稿では、全ての発表について詳細に解説するのではなく、超伝導に関する発表のうち、著者の独断と偏見で選んだ主要と思われる研究（発表者の敬称は省略する）について紹介する。

トップバッターはWollongong大（オーストラリア）のXiao-Lin Wangで、ニクタイド化合物に関するこれまでの研究成果と、MgB_2線材に関する近況報告がなされた。発表は全体的にピンニングエネルギーや独自に定義したH_{c2}/H_{irr}という値について議論する磁気特性に関するもので、ニクタイド化合物の中でも (Ba,K) Fe_2As_2 は、磁気特性が等方的で低温ではFlux Jumpが見られるなど、他のニクタイド化合物とは異なる振る舞いがあることに言及しており、その原因として、この物質に存在する格子歪み（BaとKのサイズの違いに基づく）の影響や熱伝導性や熱容量などが他のニクタイド化合物とは異なっている旨を指摘した。また、MgB_2の発表では、$SiCl_4$を添加するとSiC以上の高J_cが得られるという報告があった。炭水化物以外で有力な添加物が発見されたことは興味深い。

物質・材料機構（日本）の熊倉浩明、松本明善は、それぞれの視点で高圧焼成したin-situ線材の諸特性についての報告をした。高密度化は今後のMgB_2線材の特性を議論する上で重要なパラメータであり、この発表で得られた知見は参考になるだろう。添加物を入れない試料のJ_c (4.2 K, 10 T) は、高圧処理することで3,200 A/cm^{2}から8,500 A/cm^{2}に、添加物を入れた試料の場合、33,000 A/cm^{2}から45,000 A/cm^{2}に向上するらしい。気なるのは、同じように高密度化を図っても添加物の有無でJ_cの向上率が異なる点である。先の$SiCl_4$の添加効果でも議論されたが、MgB_2線材のJ_cを決定するパラメータとして、粒成長は思っている以上に配慮すべき点なのかもしれない。

Wollongong大のJung-Ho Kimは、MgB_2線材のJ_cに対する添加効果について報告した。融点が低く酸素を含まないPyrene、プラズマ焼成したボロンをカーボンでコーティングしたものなどを出発原料に使用したことについて述べていたが、リンゴ酸を添加した線材のJ_cが

Nb-Tiの特性を越えていることに感心した。

Max-Planck研究所（ドイツ）のErnst Helmut Brandtは、ボルテックスの理論研究について歴史から現代の状況まで話した。予定時間を大幅に上回る45分間の講義だったが、理論に疎い著者としては、前半のノーベル賞がらみの話が一番印象に残った。

物質・材料機構の中根茂行は、金属交換反応を活用することで、100°C未満の低温でMgB_2を合成できることを報告した。この方法は、化学的な合成ルートの足掛かりとなるだけでなく、低温合成である点や出発原料に化合物を使用できる点、できあがった粉体試料を溶媒内に保存することで表面劣化を避けられる点など、多くの利点もある。現状では還流法よりも高圧容器を使用するソルボサーマル法の方が有効な手段である。一見、高圧なので大量合成には向かないと思われがちだが、流通装置を使用する水熱合成法の粉体製造などを考えれば、現時点でも大量合成は見込める。課題は不純物の除去などであるが、適切な出発原料、還元剤の選択も含めた作製条件全般に対する最適化が今後の鍵となるだろう。それから、最後にコメントしたことだが、MgB_2試料内の不純物に関する議論では、XRDによる検出が主流だが、^{11}Bに対するNMR測定も有効である旨も紹介しておきたい。この方法では検出が困難なMgB_2試料内の微量な未焼成ボロン粉末の有無や量の変化を議論することができる。こうした評価技術の導入も、データを多角的な視点で議論する必要性が高まっている今後の線材研究では重要となるだろう。

最後にポスター発表についてもコメントしておきたいところではあるが、当日は取り下げられたのか見当たらないものも多く、関連する研究報告を探すのが大変だった。著者が個人的に興味を持っていた研究報告も見当たらなかったのが残念だった。

以上がIUMRS-ICEM 2010で報告された超伝導に関する主な研究発表である。全体的には、もう少し活気が欲しい印象だった。“新しさ！”を皆でもっと追求すべき時期……といった印象だった。

＜会議報告 4＞

2010 年秋季第 71 回応用物理学会学術講演会報告

Report on the Japan Society of Applied Physics 71st Fall Meeting

鹿児島大学
土井　俊哉
Kagoshima University
T. Doi

2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会が、9月14日～17日、長崎大学文教キャンパスにて開催された。応用物理学会学術講演会は非常に大きな学会であり、セッション数106、発表件数は4,000件を越えるものであった。全体は18の分科会に分れており、超伝導は単独で1つの分科会を形成、「11.1 基礎物性」、「11.2 薄膜, 厚膜, テープ作製プロセスおよび結晶成長」、「11.3 臨界電流, 超伝導パワー応用」、「11.4 アナログ応用および関連技術」、「11.5 接合, 回路作製プロセスおよびデジタル応用」の5つのセッションに分かれている。今回、それぞれのセッションでの発表件数は、32、30、18、25、16の合計121件であった。

以下、筆者が参加した、「11.1 基礎物性」、「11.2 薄膜, 厚膜, テープ作製プロセスおよび結晶成長」、「11.3 臨界電流, 超伝導パワー応用」の3つのセッションでの講演について紹介する。

「11.1 基礎物性」のセッションは14日午後と15日午後の2回に分けてポスターセッションにて行われ、内訳は鉄系超伝導体に関する発表が14件、新物質関連7件、Bi2212の固有ジョセフソン接合の利用6件、ジョセフソン接合2件、その他2件であった。鉄系超伝導体の研究は引き続き活発であり、着実に進展していることが実感できた。また、新物質の探索的研究も継続的に行われていることは我が国の超伝導研究の基礎体力の高さを感じさせてくれる。東北大の川上らは、超高圧法で合成したLi-Pd系水素化物試料中にT_c = 5 Kの超伝導物質層が存在することを報告した。また、東海大の川島氏はグラファイトにアルカンを接触させるとグラファイト表面でプロトンによる常温超伝導が起きると主張した。電気的測定および磁気的測定結果に基づき室温以上の温度で電気抵抗 0とマイスナー効果が確認できたとのことであった。提示されていた測定データだけでは、筆者が常温超伝導の出現を確信できるまでには至らなかったが、今後の研究の進展が大いに注目される発表であった。

最近、メサ型Bi2212固有ジョセフソン接合からのテラ

ヘルツ波放射が注目を集めており、本学会でも6件の関連する発表があった。テラヘルツ波は光と電波の境界に位置する周波数領域の電磁波であり、セキュリティ、環境、通信、エレクトロニクス分野などでの応用気運が盛り上がってきている。テラヘルツ波を発生できる素子は超伝導に限らないが、競合技術との競争に勝ち抜いて、超伝導素子の新たな市場を獲得することを期待したい。また、NTTの赤碕らはLED素子の電極にMgB_2を用いた研究結果を報告した。超伝導薄膜を電極に使用することで発光効率が高まるとのことである。

「11.2 薄膜, 厚膜, テープ作製プロセスおよび結晶成長」のセッションではY(RE) 系線材に関して14件、鉄系超電導薄膜5件、銅酸化物薄膜4系、微細加工プロセス3件、MgB_2線材3件、Bi系薄膜1件、NbTiN薄膜1件の発表があった。

Y系線材の長尺プロセスは低温工学の守備範囲となりつつあり、応用物理学会には低コスト化を目指した新しい製法技術に関する発表が集まるようになっている。名大グループはNd:YAGレーザーを用いたPLD法により短尺IBAD-Y系線材の作製し、エキシマレーザーを用いた場合に遜色のない特性が得られることを示した。また東芝からはTFA-MOD法によるYBCO反応生成過程に関する詳細な研究結果が示され、7 MA/cm^2（77 K、自己磁場中）と極めて高品質のYBCO膜が得られることが報告された。静岡大のグループからはフッ素フリーMOD法によるREBCO薄膜作製に関して3件の報告があった。ナノロッドやナノ粒子を導入したYBCO薄膜に関する系統的な研究結果が九工大、九大から報告され、生成機構やピン止め機構が解明されつつある。鹿児島大からは配向Cuとステンレス貼合せテープ上にバッファ層を介して1 μm厚のYBCO層を形成し、J_c = 2.1 MA/cm^2、1 cm幅当りのI_c = 210 Aが得られているとの報告があり、IBADよりも低コストが期待できる配向金属テープの実用化が視野に入ったことが確認された。

鉄系超電導薄膜に関しては5件の発表があり、良質な薄膜の作製条件が確立されつつある。今後1～2年で様々な物性評価が行われ、鉄系超電導体の未来が決することになると思われる。MgB_2線材に関しては拡散法を用いた19芯線の結果が報告された。また、Alテープ上にEB蒸着法で作製した短尺コート線材の結果が報告され、4.2 K、10 Tの磁場中でも1.5 MA/cm^{2}と非常に高いJ_cが維持されることが報告された。その他にも、(Sr,RE)CuO_2、Pr_2CuO_4、Bi2223、NbTiN薄膜に関してレベルの高い発表が行われた。

「11.3 臨界電流, 超伝導パワー応用」のセッションではY(RE) 系線材の特性に関して7件、ピン止め点を導入したREBCO薄膜特性評価 5件、鉄系薄膜の特性 1件、200 m級超電導直流送電実証実験装置 1件、その他 4件18の発表があった。九大グループからRE系線材の組織・欠陥とテープ内J_c分布の詳細な研究結果が報告された。また九大、九工大、熊大、高知工大からJ_c-B特性、J_cの磁場印加角度依存性、ピン止め点との関係などについて詳しい測定データが報告され、非常に活発な議論が行われた。SRLからはRE線材の層間密着性に関する検討結果が報告され、CeO_2/REBCO界面もしくはREBCO内部で剥離が生じることが示された。また東大の下山氏はREBCO膜にナノロッドを導入した際に生じるJ_c低下は歪効果によるものではなく、元素置換による超電導相の劣化である可能性を指摘した。その他REBCOバルクやREBCO厚膜、Bi系線材評価についての興味深い発表があった。

長期的に発表件数が漸減していることが心配されるものの、今回の講演会場はほぼいつも満席状態で時々立ち見が出る盛会であった。

＜会議報告 5＞

日本物理学会 2010 年秋季大会報告

Report on the 2010 autumn meeting of the Physical Society of Japan

産業技術総合研究所
伊豫 彰
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
A. Iyo

大阪府立大学中百舌鳥キャンパスにおいて、2010年9月23～26日の日程で開催された日本物理学会2010年秋季大会の超伝導関連の報告を行う。物理学会では、研究対象ごとに13の領域があり、超伝導に関する発表は複数の領域で行われている。ここでは、領域8（強相関系）における鉄系超伝導関連の報告を行う。超伝導関連のセッションは、4日間終日組まれており、ポスターセッションも含めて約350件の超伝導関連の発表が行われた。鉄系超伝導に関する発表が最も多く、約150件もあった。鉄ヒ素系高温超伝導体が発見されてから、約2年半経過した。現在では、ペロブスカイト関連構造を含む物質も次々に発見され、10種類以上の結晶構造の鉄系超伝導体が知られるようになった。当初は、多結晶試料でさえ合成が困難であったが、現在では良質な単結晶も育成されるようになり、多くの研究グループで精密な測定が行われるようになってきた。

鉄系超伝導体研究における現在の関心事は、超伝

導機構の解明とより高い超伝導転移温度 (T_c) を持つ物質の開発であろう。機構解明のためには、超伝導ギャップの構造を明らかにすることが鍵となっている。当初、フェルミ面の全方向に超伝導ギャップが開いているが、複数あるフェルミ面間で超伝導ギャップの符号が反転した符号反転S波 (S±) と呼ばれる超伝導ペア対称性が有力であると理論的に指摘されてきたが、T_cの不純物効果がS±で期待されるほど大きくないといった主張や、KFe_2As_2や$BaFe_2(As,P)_2$では超伝導ギャップにノードの存在を強く示唆する実験結果が報告されるなど、混沌とした状況にある。鉄系に高いT_cをもたらす引力相互作用についても、それをスピン揺らぎに求める理論と軌道揺らぎに求める理論がある。様々な実験結果や理論に基づき、講演の質疑応答で白熱した議論がかわされることもあり、鉄系の超伝導機構解明に向けた取り組みは、最も面白い局面にある。以下に、聴講した幾つかのセッションについて報告を行う。

超伝導ギャップを直接観測できる角度分解光電子分光法は、銅酸化物系の解明でも大きな役割を果たしてきたが、鉄系でも物性解明に大きな貢献が期待される。光電子分光のセッションにおいて、約10件の口頭発表が行われた。対象となる物質は、$BaFe_2As_2$や$CaFe_2As_2$など、いわゆる122系関連物質だけでなく、NaFeAs（111系）やFe(Se,Te)（11系）にまで広がっている。(Ba,K)Fe_2As_2では、フルギャップとなることが光電子分光により既に明らかになっている。従来のようなk_x-k_y平面のみならず、3次元的なフェルミ面の構造が測定されるようになっており、今後は物質依存性などの詳細が明らかになることを期待したい。

鉄系超伝導体のT_cは、鉄ヒ素四面体の結晶構造（As-Fe-As結合角やAsの鉄面からの距離）に極めて敏感であることが、実験と理論の双方から示されている。T_cと結晶構造の相関を明らかにすることは、機構解明に向けた有力な手がかりになることから圧力効果は有望な実験手段となっている。東大物性研他の松林らは、NaFeAs純良単結晶において、約5 GPaで34 Kの超伝導が実現することや、超伝導が122系に比べて広い圧力範囲で保たれることを示した。産総研他の竹下らは、*Ln*FeAsO 系 (*Ln*-1111) において、様々な*Ln*（ランタノイド）で行ったT_cの圧力効果から、As-Fe-As結合角の他にFe-As結合長を加えた相図を提案した。神戸大院理他の田尾らは、ペロブスカイト層の厚みの異なる一連の物質のT_cの圧力効果に違いが有ることを見いだした。東工大応セラ研の片桐らは、Fe(Se,Te) の単結晶を用いた一軸性圧力効果（*c*軸方向）を行った。ところが、予想とは反対の圧力効果を示したことから、11系は他の系とは高T_cのための最適な構造が異なるのではという提案をした。圧力下での結晶構造の変化が明らかになれば、よりT_cと結晶構造の相関について理解が進みそうである。

超伝導ギャップ構造は、当初フルギャップが有望視されてきたが、物質によって異なっているようである。幾つかの講演でノードの存在を示唆する結果が発表された。京大院理他の勝股らは、P置換量の異なる$BaFe_2(As,P)_2$単結晶 (T_c = 30 ~ 13 K) の磁場侵入長の測定から、この系において広いP置換領域において、ラインノードの存在があることを示した。また、原子力機構他の石角らは、ノードがあるとされる多結晶$BaFe_2(As,P)_2$の中性子非弾性散乱を行った結果、La-1111系などフルギャップのS±であるとされる超伝導体と同じような特徴を持っていることを示した。実験を説明する理論的可能性としては垂直方向のノードの可能性を指摘した。今後は、様々な実験手法によりギャップ構造を多角的に検証することが必要である。

新鉄系超伝導物質については、岡山大学の垣谷らより、Ca-Fe-Pt-As系における興味深い報告がなされた。鉄欠陥の導入により超伝導を誘起しようという方針のもと、$Ca(Fe_{1-x}Pt_x)_{2-\delta}As_2$ (δ = 0.4 ~0.6) という組成で合成された試料において、T_c = 38 Kが電気抵抗率および帯磁率によって確認された。*a*軸および*c*軸方向に長周期構造 (a = 8.814 Å, c = 20.6 Å) が見られるとのことで、これをきっかけに物質探索の幅が広がる可能性を秘めており、結晶構造の決定など今後の進展に期待したい。産総研他のShirageらは、高圧合成によってEr-1111系超伝導体 (T_c = 44 K) を初めて合成した。これにより、*Ln*FeAsO系のT_cは、*Ln* = Sm付近を中心にドーム型の依存性となることを明確に示した。この他にも、東大新領域他の平井らは、RuX (X = As, P) のRuサイトをRhに60%置換することで、T_c = 3.7 K の超伝導体を得た。まだ、遷移元素化合物は多くの可能性を秘めていることを示している。

以上、鉄系超伝導体を中心に報告を行った。超伝導メカニズムや超伝導ペア対称性に関しては、まだ論争中であるものの、良質単結晶や物性を制御された試料において、精密な研究が進展しており、近い将来、鉄系超伝導体の理解が急速に進むのではないかという印象を受けた。また、鉄系関連物質だけでなく、様々な見地から新しい超伝導体を探索する試みも継続されており、今後どのような物質が出てくるか楽しみである。この報告では触れていないが、銅酸化物高温超伝導体も精力的に研究されており、将来、鉄系および銅酸化物系の類似点や相違点などが明らかになり、より高いT_cを持った物質の設計に繋がることを期待したい。

応用物理学会（超伝導分科会 第 42 回研究会）　未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会
第 76 回ワークショップ

『省エネ・低炭素社会を目指す取り組みと超伝導』

地球温暖化の原因物質とされる温室効果ガスの排出を抑えるためには、世界が一丸となって低炭素社会の実現を目指すことが求められています。しかし、現在の豊かさを維持しつつ、自然との共生を実現する低炭素社会を実現するためには、省エネルギー・低炭素エネルギーを推進する社会システムの改革が必要になります。そこで、今回は、低炭素社会を目指す社会インフラ技術の先導的な取り組みについて紹介して頂くとともに、この分野への応用が期待される最新の超伝導応用技術・材料開発技術について紹介して頂き、低炭素社会に貢献する新たな取り組みについて議論することを目的に本研究会を企画しました。エネルギー分野・環境分野に関わる研究者・技術者はもとより、低炭素社会の実現を目指す技術に関心のあるすべての方々のご参加をお待ちしております。

■主催： 応用物理学会 超伝導分科会、未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会
協賛： 低温工学協会

■日時： 2010 年 12 月 15 日（水） 13:00～17:00

■場所： 埼玉大学　東京ステーションカレッジ　A1-A3教室
（〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1-7-12 JR サピアタワー9F ）
会場地図：https://www.bispot.jp/sapia/access/pdf/jrkaraannai.pdf
https://www.bispot.jp/sapia/access/pdf/syuhenmap.pdf

■定員： 100 名（定員になり次第締め切り）

プログラム	
13:00-13:10	**研究会開会の挨拶・趣旨説明**　下山 淳一 （東京大学）
13:10-13:45	**省エネ・低炭素社会に向けた次世代グリッド（TIPS）開発の取り組み**　小林 広武 （（財）電力中央研究所）
13:45-14:20	**省エネ・低炭素社会に向けた鉄道インフラの取り組み**　奥井 明伸（（財）鉄道総合技術研究所）
14:20-14:55	**低炭素社会に向けたエコテクノロジーの取り組み**　小林 英樹 （（株）東芝）
14:55-15:10	休憩
15:10-15:45	**電力応用に向けた超伝導材料開発の現状**　和泉 輝郎 （（財）国際超電導産業技術研究センター）
15:45-16:20	**変電システムと超伝導応用機器**　岩熊 成卓 （九州大学）
16:20-16:55	**次世代電力系統における超伝導送電システムの開発**　向山 晋一 （古河電工（株））
16:55-17:00	**閉会のあいさつ**

参加費：

・応物超伝導分科会員	2,000 円（資料代込）
・応用物理学会員、協賛団体会員	3,000 円（資料代込）
・一般	4,000 円（資料代込）
・未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会会員	無料（+別途資料代 2,000 円）
・学生	1,000 円（+別途資料代 2,000 円）

申し込み方法： 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会の HP にて **必ず参加事前登録** をお願いします。
http://www.sntt.or.jp/~fsst/　※セキュリティの関係上、当日のご参加は出来ません。

問合せ先： 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会事務局 TEL:03-3503-4681e-mail: fsst@sntt.or.jp

～ 第 15 回超伝導科学技術賞　候補者公募要領 ～

超伝導科学技術賞は、最初の高温超伝導体が発見された年から 10 年目に当たる平成８年度に、超伝導科学技術研究会によって創設されました。第 1 回の授賞式は平成 9 年 4 月に超伝導シンポジウムの会場で行われ、内外の大きな注目を浴びました。以来毎年シンポジウムの場において、超伝導科学技術の研究に関して卓越した業績を残された方々を顕彰してまいりました。本年も以下の要領で候補者の公募を行います。

趣旨：

エネルギー、バイオ、情報、交通等、広範な分野においてキーテクノロジーとしての役割を果たすと期待されている超伝導は、基礎物性、材料、応用等に関係する総合的な科学技術を形成しています。超伝導科学技術研究会はこれらの諸分野間の円滑な連携を図り、研究の振興に資するよう努めて参りました。本賞はこうした取り組みの一環であり、超伝導に関係する分野で卓越した研究成果をあげてこられた方々を顕彰しようとするものです。我が国では、超伝導の基礎から応用までの各方面で若手研究者を含む多くの研究者が国際的にも注目される活躍をしています。しかし、超伝導は境界領域の学問であるがゆえに既存の大きな学協会組織をもたず、学会賞　協会賞に相当するものが存在していませんでした。こうした状況に鑑み、本賞は、超伝導分野で日々たゆまぬ努力を続けている研究者の方々を励まし、その一層の発展の一助となることを目的として創設されました。

顕彰の対象者：

1. 基礎研究において世界的なインパクトを与えた者
2. 応用開発において、マイルストーンとなる高度な技術進展に寄与した者
3. 研究開発あるいは国内国際交流において、斯界分野の振興に大きな役割を果たした者

※ 賞の数は年間数件程度を原則とします。発展途上の若手研究者も賞の対象とします。また、完全には確立していない研究成果や、実用化の域に達していない技術であっても、将来の発展性が期待できればポジティブに評価します。

賞の対象となる具体的な分野：

1. 超伝導新物質開拓に関するもの
2. 超伝導基礎理論に関するもの
3. 超伝導基礎実験に関するもの
4. 超伝導材料（線材、バルク、薄膜、導体など）の高性能化に関するもの
5. 超伝導プロセス技術に関するもの
6. 超伝導の測定、評価、標準化に関するもの
7. 超伝導機器、デバイス、システム等、超伝導の用途開発に関するもの
8. データベースに関するもの
9. 超伝導研究推進に産業界、学会、官界、報道界などから貢献したもの（功労賞に相当するものを含む）

※ 各分野それぞれ１件とするものではなく、また、すべての分野に賞を設定するというものでもありません。

賞設定の目的：

1. 強いインパクトのある研究に対する評価
2. 活発な若手への応援
3. 長年の功労者に対する感謝の表明
4. 企業の関連グループに対する精神的支援
5. この分野の関係者の努力に対する精神的支援

授賞時期：

授賞式は、超伝導科学技術研究会主催のシンポジウムの時に行います。

授賞の伝達：

受賞者には事前に連絡するほか、企業及び国公立研究所の場合には、授賞決定通知を社長、機関長宛てに伝達します。
また、授賞理由等は(社)未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会の機関誌に掲載します。

募集・応募の方式：

自薦他薦を問いません。超伝導科学技術研究会に属する団体（担当者）、個人会員に推薦を依頼するほか、公募します。推薦依頼及び推薦提出先は審査委員会委員長とします。また、選考委員会内でも推薦可能とします。推薦理由の記述は比較的簡単なものとし、応募を容易にします。また、必要な場合には追加資料の提供を求めることができるものとします。対象者の国籍は問いませんが、日本国内での研究活動を賞の主たる対象とします。

超伝導科学技術賞候補者推薦書はホームページよりダウンロードできます。

推薦書の提出先：

社団法人未踏科学技術協会　超伝導科学技術研究会　賞審査委員会委員長宛
（〒105-0003　東京都港区西新橋 1-5-10　新橋アマノビル 6 階） Tel:03-3503-4681,　Fax:03-3597-0535
E-mail: fsst@sntt.or.jp　　URL: http://www.sntt.or.jp/~fsst/

推薦の締切：　　第 15 回超伝導科学技術賞推薦締切：平成 22 年 12 月 6 日（月）

研 究 会 の 動 き

〔平成 22 年 (2010 年) 7 月 1 日～平成 22 年 (2010 年) 9 月 30 日

幹事会
平成 22 年度第 3 回
日時：平成 22 年 9 月 7 日(火)15:00～17:00
場所：NIMS 東京事務所　会議室
出席者：　幹事 8 名　事務局 1 名

議事：
(1) 第 75 回ワークショップ開催報告
(2) 第 76 回ワークショップについて
(3) 第 77 回ワークショップについて
(4) 第 15 回超伝導科学技術賞について
(5) 第 15 回日米先進超伝導ワークショップについて

国内超伝導関連会議

Conferences related to Superconductivity (Domestic)

会　議　名	日　付	開催場所	主催及び問合せ先
秋季低温工学･超電導学会	H22.12.1～12.3	かごしま県民交流センター （鹿児島県鹿児島市）	低温工学協会

国際会議及び国外の主要な会議

Conferences related to Superconductivity (International/Abroad)

会　議　名	日　付	開催場所	主催及び問合せ先
ISS2010: 23rd International Symposium on Superconductivity	2010.11.1～11.3	つくば国際会議場 （つくば）	http://www.istec.or.jp/ISS/

超伝導科学技術研究会　編集委員会　委員

松本　明善	㈱ 物質･材料研究機構 超伝導材料センター 主任研究員	小泉　勉	昭和電線ケーブルシステム ㈱ 技術開発センター 超電導技術開発室　主査
荒井　有気	㈶ 鉄道総合技術研究所 低温システム研究室 研究員	日高　睦夫	㈱ 国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所　低温デバイス開発室 室長
伊豫　彰	㈱ 産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 超伝導材料グループ　グループ長	木村　茂行	㈳ 未踏科学技術協会 理事長
		大貫留美子	㈳ 未踏科学技術協会

＜FSST NEWS No.127 目次＞

＜トピックス 1＞
鉄系超伝導体 $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$ にみる非フェルミ液体的輸送現象と超伝導ギャップ構造
京都大学　笠原 成……1

＜トピックス 2＞
冷却システムと励磁電源が分離可能な RE 系モバイルマグネット
鉄道総合技術研究所　長嶋 賢……8

＜トピックス 3＞
スラッシュ窒素冷却システムの開発
前川製作所　仲村直子……11

＜会議報告 1＞
ICEC23-ICMC 2010 国際会議報告　物質・材料研究機構　熊倉浩明……15

＜会議報告 2＞
応用超伝導会議（ASC2010）会議報告
(1) エレクトロニクスセッション
名古屋大学　赤池宏之……16
(2) RE 系線材
昭和電線ケーブルシステム　小泉 勉……17
(3) 金属系線材
物質・材料研究機構　伴野信哉……18
(4) Large Scale
日本原子力研究開発機構　辺見 努……20

＜会議報告 3＞
IUMRS－ICEM2010 会議
物質・材料研究機構　中根茂行……21

＜会議報告 4＞
2010 年秋季第 71 回応用物理学会学術講演会報告
鹿児島大学　土井俊哉……22

＜会議報告 5＞
日本物理学会 2010 年秋季大会報告
産業技術総合研究所　伊豫 彰……23

○超伝導科学技術研究会第 76 回ワークショップ
／応用物理学会超伝導分科会第 42 回研究会……25
○第 15 回超伝導科学技術賞候補者公募……26
○研究会の動き……27
○国内超伝導関連会議／国際会議及び国外の主要な会議……27