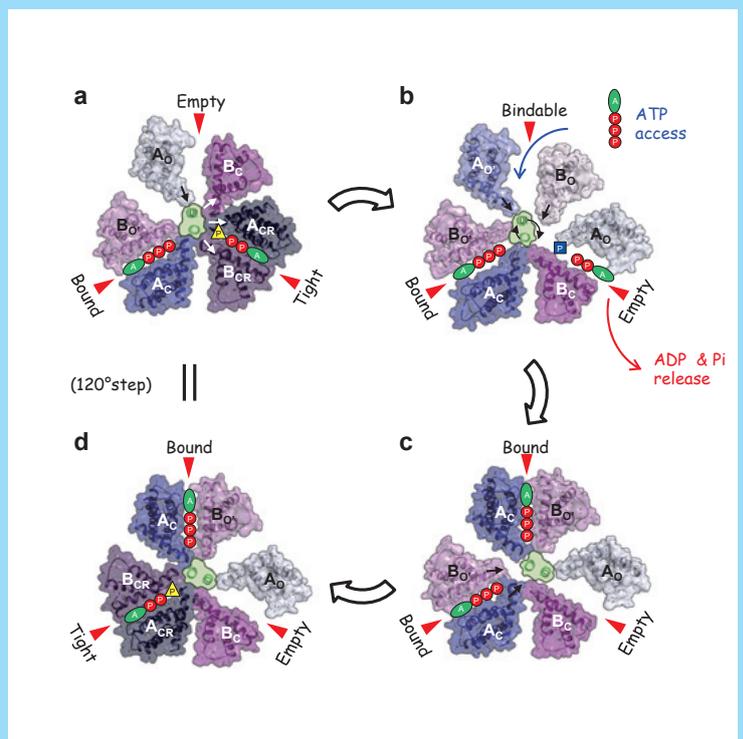
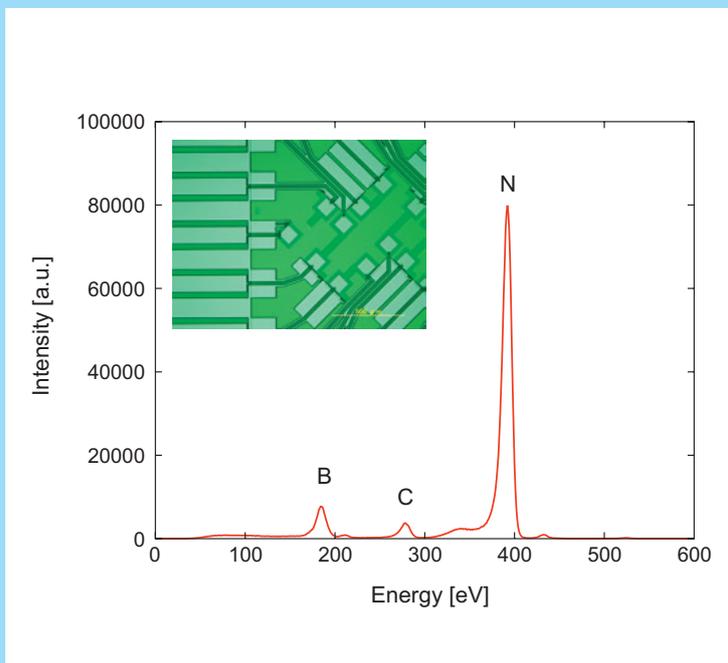
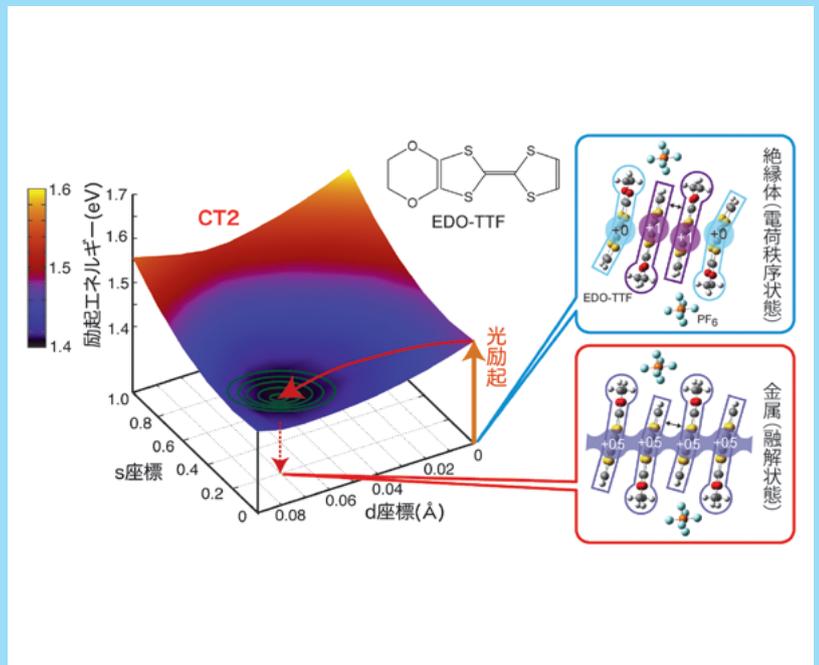
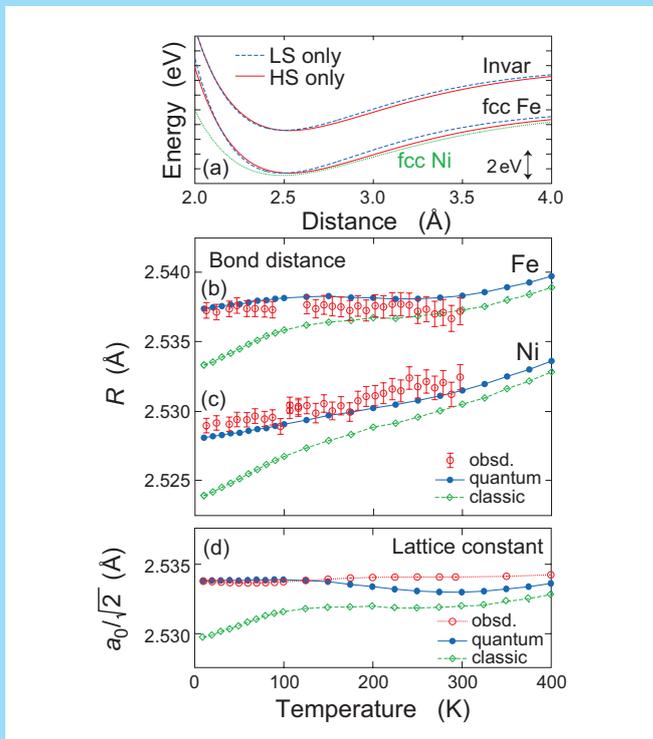


- Invar合金の非熱膨張特性の起源解明
- 超伝導検出器で可能になる微量軽元素の蛍光収量X線吸収分光
- 擬1次元分子性結晶(EDO-TTF)₂PF₆における光誘起相転移の理論的解明
- X線結晶構造解析から明らかになる腸球菌Na⁺輸送性V-ATPaseの回転メカニズム



目次

施設だより	村上 洋一	1
現 状		
入射器の現状	古川 和朗	2
光源の現状	小林 幸則	4
放射光科学第一、第二研究系の現状	熊井 玲児	5
ERL計画推進室報告	河田 洋	6
最近の研究から		
Invar合金の非熱膨張特性の起源解明		
横山利彦・江口敬太郎		8
Origins of Negligible Thermal Expansion in Invar Alloys		
超伝導検出器で可能になる微量軽元素の蛍光収量X線吸収分光		
志岐成友・浮辺雅宏・松林信行・小池正記・北島義典・大久保雅隆		13
X-ray Absorption Spectroscopy using Superconducting Tunnel Junction Detector for Trace Light Elements		
擬1次元分子性結晶(EDO-TTF) ₂ PF ₆ における光誘起相転移の理論的解明		
岩野薫・下位幸弘		18
Theory for Photoinduced Phase Transition in Quasi-One-Dimensional Molecular Solid (EDO-TTF) ₂ PF ₆		
X線結晶構造解析から明らかになる腸球菌Na ⁺ 輸送性V-ATPaseの回転メカニズム		
西條慎也・山登一郎・村田武士		23
X-ray crystallography unraveled the rotation mechanism of Na ⁺ translocating V-ATPase		
プレスリリース		28
安価で高性能なハードディスクドライブ(HDD)記録媒体の実現可能性		
～白金フリー酸化物垂直磁気記録材料の薄膜化に世界初成功～		
物構研におけるマルチプローブ利用研究のすすめ		
～放射光、低速陽電子、中性子、ミュオンを使って新しい世界を見てみよう～		
研究成果1 Muon D1: ミュオン物質生命科学実験装置を利用して		
ミュオンスピン緩和法で得られる実空間情報～鉄系超伝導体CaFe _{1-x} Co _x AsFの例～		
竹下聡史・門野良典・平石雅俊・宮崎正範・幸田章宏・松石聡・細野秀雄		29
研究成果2 Muon D2: ミュオン基礎科学実験装置を利用して		
負ミュオンを用いた非破壊元素分析		
二宮和彦・久保謙哉・長友傑・河村成肇・ストラッサー・パトリック・下村浩一郎・三宅康博・		
髭本亘・春日井好巳・坂元真一・小林義男・石田勝彦・鈴木栄男・篠原厚・齋藤努		34
研究会等の開催・参加報告		
REXS2013に参加して	岡本 淳	40
LPBMS2013開催報告	山崎 裕一	41
LPBMS2013に参加して	高橋由香利	42
第16回XAFS討論会報告	宇尾 基弘	43
XAFS討論会参加報告	江口敬太郎	44
PF研究会「極短周期アンジュレータと新しい高性能光源加速器の開発」開催報告	山本 樹・熊谷 教孝	45
AOFRR2013報告	足立 伸一	46
ユーザーとスタッフの広場		
イギリスRAL滞在記: 中性子散乱実験	千葉 文野	48
ドイツ電子シンクロトロン(DESY), PETRA III 拡張計画, 高圧プレスビームライン	西山 宣正	49
防災・防火訓練が実施されました	丹羽 尉博・山田 悠介	51
PFトピックス一覧(8月～10月)		51
PF-UAだより		
ゆーざーぐるーぷ紹介シリーズ 核共鳴散乱ユーザーグループ紹介	小林 寿夫	52
ゆーざーぐるーぷ紹介シリーズ 低速陽電子ユーザーグループ紹介	長嶋 泰之	54
人 事		
人事異動・新人紹介		55
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 教員公募について(依頼)		56
お知らせ		
「物構研サイエンスフェスタ2013 第5回MLFシンポジウム/第31回PFシンポジウム」開催のお知らせ	阿部 仁・下村浩一郎	65
物構研特別シンポジウム「物質・生命科学における大学共同利用～物構研のあり方を問う～」開催のお知らせ	山田 和芳	65
PF研究会「第2回先進的観測技術研究会-時間分解計測の最前線-」開催のご案内	足立 純一	66
平成26年度前期フォトン・ファクトリー研究会の募集	村上 洋一	66
大学院生奨励課題(T型課題)の新設について	村上 洋一	67
予定一覧		67
運転スケジュール		68
掲示板		
物構研談話会		69
第53回物質構造科学研究所運営会議議事次第		69
内部スタッフ・大学院生優先ビームタイム採択課題一覧(2013年度前期)		70
施設留保ビームタイム採択課題一覧(2013年度前期)		71
編集委員会だより		72
巻末情報		73

(表紙説明)【左上】インバー合金における局所熱膨張のFe, Niサイト依存性と低温での量子効果(最近の研究から「Invar合金の非熱膨張特性の起源解明」より)
【左下】超伝導検出器で測定した窒化ホウ素の蛍光X線スペクトルと検出器の顕微鏡写真。(最近の研究から「超伝導検出器で可能になる微量軽元素の蛍光収量X線吸収分光」より)
【右上】(EDO-TTF)₂PF₆における第2電荷移動励起帯(CT2)励起後の予想される構造変化。絶縁体(電荷秩序状態)から金属相に向けての変化が起きると解釈される。(最近の研究から「擬1次元分子性結晶(EDO-TTF)₂PF₆における光誘起相転移の理論的解明」より)
【右下】腸球菌Na⁺輸送性V-ATPaseの回転機構モデル(最近の研究から「X線結晶構造解析から明らかになる腸球菌Na⁺輸送性V-ATPaseの回転メカニズム」より)

落ち葉が舞うころとなりました。秋は教育・研究のかき入れ時ですので、何時にも増して忙しい日々をお過ごしのことと存じます。さて、11月初旬に締め切りました2014年度前期課題の申請では、例年通り約200件の申込みを頂きました。昨今の光熱水量費の値上げにより十分な運転時間が確保できないため、ビームタイム配分率がかなり低下しており、皆様にはご不自由をお掛けしています。ビームタイムの十分な確保を目指して、来年度の予算要求を行っているところですが、一方で、これらの課題実験が効率よく快適に行える環境も整えていきたいと考えています。

大学共同利用について

PFユーザーの皆様は、KEKが大学共同利用機関法人であることをご存じでしょうか。高エネルギー物理学研究所(KEK)は、国内初の大学共同利用機関として1971年に発足しました。2004年には、高エネルギー加速器研究機構(KEK)として、国立大学と共に「国立大学法人法」のもとに法人化されました。その目的は、加速器科学の総合的発展の拠点として研究を推進し、国内外の関連分野の研究者に対して研究の場を提供することです。大学を中心とする研究者コミュニティのための共同利用施設として、個々の大学では維持が難しい大きな装置・設備を保有し、これを研究者が有効に利用することによって、先端的研究成果を挙げることを推進するとともに、当該分野での研究ネットワークの中心となることが求められています。また、このような先端的研究を通じて、教育(人材育成)を行うことも大学共同利用機関に期待されています。

KEKには我々が属する物質構造科学研究所の他に、素粒子原子核研究所がありますが、そこでの大学共同利用は上記の定義がよく当てはまると思います。ある特定のコミュニティの研究者が、先端的研究と人材育成をKEKスタッフと共同で行っています。PF設立当初は、これと同様の状況であったことが想像できます。ユーザーがPFスタッフと一緒に、ビームラインや実験装置の建設・維持に携わっていました。その後、放射光実験技術・手法の開発が進み、手軽に測定・解析が可能になると、放射光を研究開発のための1つの分析ツールとして利用するユーザーの数が増えてきました。PFが参画している光ビームプラットフォーム事業や創薬等支援技術基盤プラットフォーム事業では、産業界を含む利用者を対象としており、イノベーションに繋がる研究開発が目的となっています。また、「施設利用」では、企業等が研究・研修・講習等のために有料で成果非公開の利用を行うことができます。これに加えて、今年度より国家プロジェクトなどの課題解決型研究を推進するために、「優先利用」として有料ですが優先的に放射光をご利用頂いています。このようにPFでは、従来の大学共同利用に加えて、より幅広いユーザー層に放射光利用の機会を提供し、本施設を最大限に利用して成果を

挙げて頂いています。本来の大学共同利用機関のミッションを保持しつつ、ユーザーに様々な利用形態を提供することで、広い範囲のユーザーの要求に応えようとしています。

このような研究動向の変化の中で、物質科学・生命科学を推進する上で大型施設の運営はどうあるべきかという大きな問題意識から、物構研のあり方を問うシンポジウムが、12月17日(火)にKEKで開催される予定です。ご興味がありましたら是非ご参加頂き、議論に加わって頂けようようお願い致します。詳しくはお知らせの欄をご覧ください。

国際協力研究(インドビームラインのユーザーミーティング)

去る10月7日、8日にインドのコルカタにあるSaha Institute of Nuclear Physics(SINP)で、PFインドビームラインBL-18Bの第1回ユーザーミーティングが開催されました。野村理事・熊井主幹と一緒に、このミーティングに参加してきました。事の始まりは、2007年に行われた日本学術振興会の日印科学評議会での提言でした。その後、2009年にKEKとDST(The Department of Science and Technology of India)の間でMOU(the Memorandum of Understanding)が結ばれ、これに基づきインドビームラインの建設が開始されました。ビームラインは順調に立ち上がり、低温/高温/高圧下での粉末X線回折実験や固体表面・界面、液体表面・液/液界面からの散乱実験を行える回折計が整備されました。既に多くのインドからのユーザーが利用実験を行っており、来年度からは一般ユーザーも共同利用実験が行えるようになりました。共同利用実験では、インドのビームライン・サイエンティストがユーザー実験の補助をしてくれます。

ユーザーミーティング当日、SINPのゲートには、ミーティングの開催を知らせる立派な垂れ幕が掛かり、広い講演ホールの席も多くのユーザーで埋まっていました。質の高い講演が多かったように記憶していますが、中にはまだ実験を行っていないというような講演も複数ありました。今後、ますます利用が広がっていくように感じました。ユーザーミーティングの後、インドビームライン運営委員会が開催され、今後の活動などに関して意見交換がされました。興味深かったのは、運営会議の直前にマスコミ関係者が呼ばれ、質疑応答を行っていたことでした。地元のテレビ局も取材にきており、SINPの所長でもありインドビームラインの責任者のSanyal教授がそつなく対応していました。

インドではINDUS-Iという放射光加速器が1999年から運転されており、2005年にはINDUS-IIが完成しています。その一方で、安定に運転しているPFのビームラインで、日印間の国際協力の基にインド人放射光ユーザーを多数育てたいとのことでした。インド側の並々ならぬ熱意が感じられた2日間でした。PFとしましてもこれに応えるべく様々な協力をを行い、日印間の架け橋となるような事業にしていきたいと考えています。

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川 和朗

概要

2013年度の夏前の運転を7月1日に無事終了した後、9月までの夏の停止期間に震災復旧や SuperKEKB に向けた建設が行われ、PF、PF-AR を含めた同時入射のための制御やタイミング機構の改造も行われた。これらの作業を SuperKEKB に向けた改造の一つの試金石と捉え、作業計画の維持に最大の注意を払った結果、秋からの試験運転は9月24日に予定通り開始することができた。試験運転と並行して10月15日の週より、PF・PF-AR 入射も開始している。

SuperKEKB に向けた建設

今年の夏季停止期間中には、主に入射器の前半部分において、旧陽電子生成装置の廃止と大電流向け新規開発装置の建設開始、本格的な低エミッタンス・大電流 RF 電子銃の設置など、大幅に建設・開発が進められた。

まず、大電流陽電子生成装置に関しては、ユニット #21 に設置されていた KEKB 時の陽電子生成装置を撤去し、約 40 m 上流のユニット #15 に新しい装置の設置を開始した。この位置は、3.5 GeV から 4.0 GeV に上がる陽電子エネルギーと、ダンピング・リング経由の入射、及び陽電子生成量の間の最適化から選ばれている。多数の加速管、集束ソレノイド、集束四重極電磁石などの装置や、それに伴う電源配線や冷却水配管の撤去、移設、新設などが、慎重に計画された予定表に従って行われた。もちろん予定通りに進む部分と進まない部分があったため、週末や時間外にも職員や委託会社の方々に協力いただく場面が多数あり、二年後まで続く改造作業の課題となっている。

作業としては、ユニット #14 から #23 までの 80 m 区間の、架台を含めた加速器装置が撤去され、再構築が行われた。架台の設置、暫定アライメント、加速器装置の設置、微細アライメント、という手順で各ユニットの設置が進められ、またその間、何度も図面等との突き合わせを行い、慎重な作業が行われた(図 1, 2)。今回設置した中ではユニット #16 が新設の大口径 S-バンド加速管(LAS)や重量の大きな集束ソレノイドを含み、導波管や冷却水配管も複雑なため、最も慎重な手続きを踏んだが、幸いにして大きな障害なく RF コンディショニング試験を始めることができた。陽電子生成に最も重要なフラックス・コンセントレータなどを含み、構成が複雑となるユニット #15 の新設は 11 月に予定しており、現在は電子ビームのための真空ダクトのみを設置している。今回の作業が予定を守りながら進められたことは、今後の自信となると思われる。と同時にさらに余裕を持った作業計画が必要なことでもわかった。



図 1 撤去された陽電子生成部と、重量のある新規陽電子生成部(ユニット #16)の架台脚。



図 2 陽電子生成部(ユニット #16)の LAS 加速管と集束ソレノイド電磁石の設置作業と、設置後。

今回、設置された電磁石は再利用されたものも多いが、大口径集束四重極電磁石など新規製作したものも多く、それらの磁場測定作業には PF の軌道グループ、特に原田氏に大変お世話になった。入射器の機器や人員だけでは作業は難しく、この場を借りて感謝を表わしたい。

また、ユニット #28 のうしろの第 2 スイッチヤード

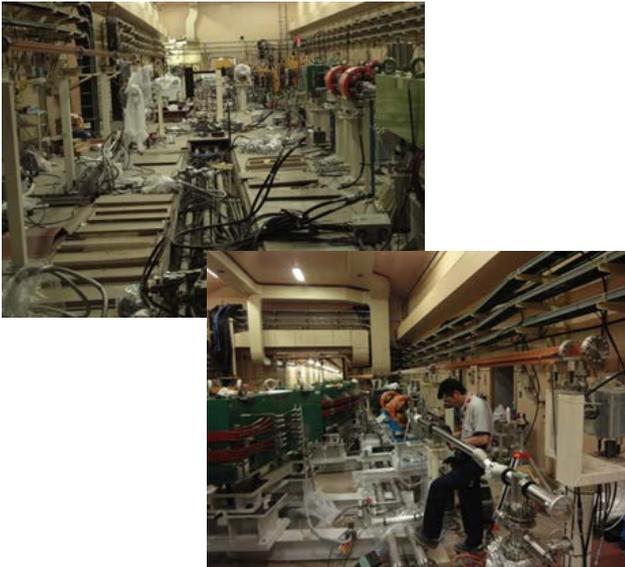


図3 ECS部の撤去、移動・再設置とPF向けビームラインの再構築。

(SY2)においては、ダンピング・リング接続のためのビームラインの構築、第3スイッチヤード(SY3)においては、ビーム・エネルギー圧縮装置(ECS)の設置が進められた(図3)。これらの複雑な作業を待って、入射器全体のアライメントも再度行われた。低エミッタンスの電子ビームを600 mに亘って導くためには、軌道補正によるウェイク場の補償と共に、その補償が線形に収まるよう、0.1 mm精度のアライメントが必要とされ、今後の繰り返しアライメントが必要と考えられている。

これらの新規装置を運用するためには、大幅な電源電力と冷却水の増強が必要となるが、昨年度から施設部門に協力いただいて建物の増築を含めた計画を進めており、来年夏の利用開始を予定している。そのため今期は最大出力を得ることはできないが、小電流でのビーム試験を10月から予定している。

A1部に建設中のRF電子銃については、Ybファイバー・レーザー発振器、ファイバー・増幅器、及びディスク・レーザーを組み合わせた多段の大電力レーザーの安定化を進めながら、新しく採用する擬似進行波型空洞(QTWSC)の設置を進めた。QTWSCはこれまで利用してきたDAW型空洞に比べ、さらに加速電界や収束力に優れ、空間電荷効果の影響が大きい大電流加速においては有利となる(図4)。さらに電子銃の直後には診断ラインも新設される。

幸いにして、新しい空洞のRFコンディショニングは順調に進み、初期の調整でDAW空洞と同程度の電流を確認した。さらに大電流加速に向けた調整を進めている。

この他にも、建設に対応した施設の改造、電磁石や電源の増設、冷却水や電源配線の改修、ビームワイヤスキャナ・ビーム位置モニタ・ストリークカメラなどビーム測定装置の増設移設、マイクロ波発生装置の小型化と移設、さまざまな制御装置の更新、などが行われた。特に長年使用されて増築を重ねたタイミング・システムの再構成を行い、全

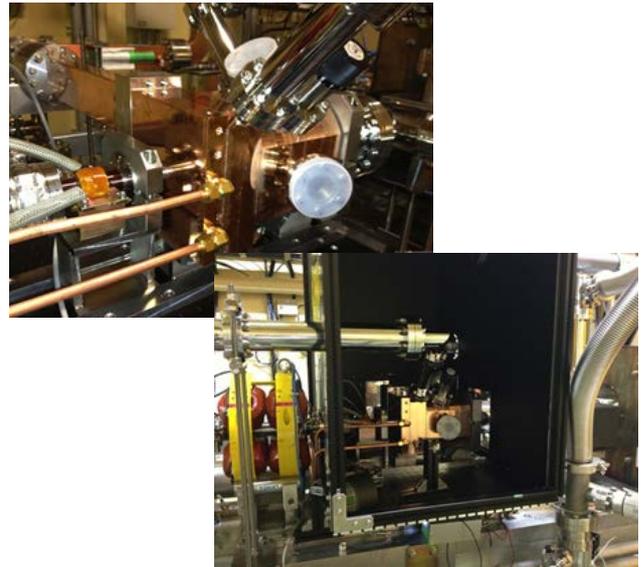


図4 導波管が接続されたQTWSC空洞とそのレーザー保護箱。

体として柔軟性と信頼性を高めるような改造を行った。機器の改造に伴って、安全系の対応も行われ、より信頼性を高めるべく動作論理の見直しも行った。さらに運転中に漏水を起こした加速管の交換を含め、通常の保守作業も行っている。

PF・PF-AR入射と小電流試験運転

10月からの運転においては、これまで同様、入射器後半部分では仮電子銃(GU_31)を使用してPF・PF-AR入射運転を継続しながら、前半部分でRF電子銃(GR_A1)を用いてSuperKEKBに向けた小電流試験運転を始めている。RFコンディショニングやタイミング調整など、予定した作業の後、幸いにして大きな問題なく立ち上げることができた。タイミング系の更新によって、20年以上前のTRISTAN時代から使用されていたPF-AR向け回路なども撤去されたので、全体として信頼性が向上したと考えている。今後11月には陽電子生成部の追加建設作業を行い、さらに12月から3月まで小電流の電子・陽電子コンディショニングを行う予定を考えている。

夏の停止期間中の作業

PFリングでは、4台の高周波加速空洞を使用しているが、それぞれの空洞は独立のクライストロンから高周波電力が供給されている。そのクライストロンを空洞からの反射高周波電力から保護するために、サーキュレータが設置されている(図1)。サーキュレータの仕様は、表1に示すとおりである。大震災以降、4台のサーキュレータが次々に冷却水漏れ、あるいは電波漏れを起こすようになった。メンテナンス時や毎日の巡視点検などで、それらを発見すると直ちに応急処置を施すか、もしくは予備のサーキュレータと交換して運転を継続してきた。同時に、4台すべて新規交換を目指して製作を行ってきた。この夏の停止期間によりやく4台すべてを新品に交換する作業を行うことができた。4台すべての性能確認も停止期間中に終了し、10月15日からの運転再開への準備は整った。



図1 冷却水漏れを起こしたサーキュレータを交換しているところ(上図)と新規製作のサーキュレータに交換完了したところ(下図)。

表1: PFリングのサーキュレータの仕様

周波数	500 ± 1.5 MHz
入力高周波電力	200 kW (CW)
反射高周波電力	100 kW (CW)
入力 VSWR	1.35 以下

光源リングの運転状況

PFリングは、10月15日9時に秋の運転を再開した。入射ビームは11時前にリングに蓄積しはじめ、入射調整、軌道調整、バンチごとフィードバック調整を行いながら、徐々に電流値を上げ、17時過ぎ450 mAに達した。その後真空光焼きだしを開始した。翌日から、新短周期アンジュレータ#15(SGU#15)の最小ギャップ値と軌道の確定を行い、その後ビームラインへの光導入、挿入光源のフリーチューニングをほぼ予定通りこなし、10月21日9時にユーザ運転再開となった。夏の停止期間中に、SGU#15設置等で真空作業を行ったため再開時のビーム寿命の回復が心配されたが、立ち上げ期間中に真空焼き出しが順調に進み、450 mAで約20時間のビーム寿命となった。

PF-ARは、10月18日9時に再開した。PF-ARは停止期間中に大きな真空作業が無かったものの、15台のリング4極電磁石電源の更新を行っていたため、3 GeVから6.5 GeVへの加速がスムーズに行くかどうか懸念材料であった。立ち上げ初日には、いつものように入射路をビームが通らず苦労したが、軌道調整、エネルギー調整を入念に行いようやく22時過ぎに20 mAリングに蓄積するようになった。翌日からは、ユーザ運転再開へ向けて55 mAの蓄積、6.5 GeVまでの加速を成功させるべく調整に費やし、加速中にビームをロスするという不安定要素は残るものの、10月22日9時にユーザ運転に漕ぎ着けることができた。図2にPFリングおよびPF-ARの立ち上げからユーザ運転再開にいたる蓄積電流値の推移を示す。

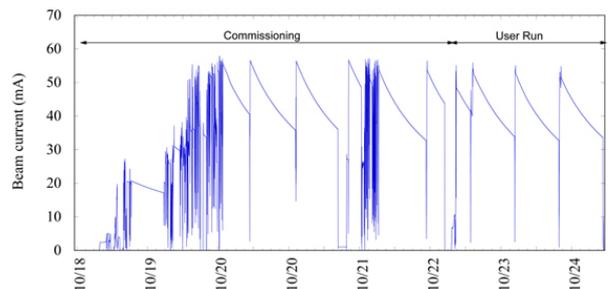
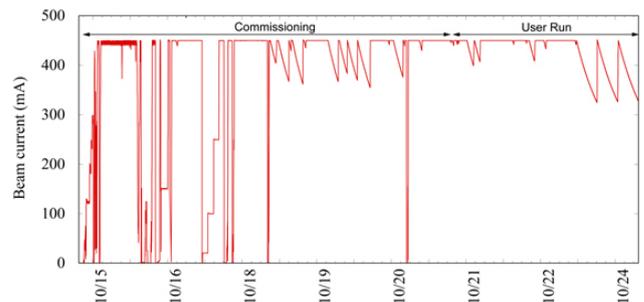


図2 PFリング(上図)とPF-AR(下図)の蓄積電流値の推移。

PF-AR 直接入射路トンネル建設進捗状況

PF-AR 直接入射路トンネル建設工事は順調に進んでいる。今年は台風による影響で雨の日が多いものの、9月初旬から掘削が開始され、概ねスケジュール通り経過している。10月中旬からはトンネルの躯体築造が始まる予定である。直接入射路に設置される新規電磁石、電磁石電源、真空チャンバー等の調達も概ね順調に進んでいる。



図3 PF-AR 南実験棟前（左図）とD7 電源棟前（右図）の掘削が行われている。

放射光科学第一、第二研究系の現状

放射光科学第一研究系研究主幹 熊井 玲児

運転、共同利用関連

PF, PF-AR ともに、6月28日朝の運転終了後、夏期シャットダウン期間に様々な作業が行われました。放射線変更申請も無事に終了し、放射線安全を確保するためのシャッター点検、インターロック総合動作試験を経て、PFは10月21日、PF-ARは10月22日から共同利用実験を開始し、12月20日の朝までPF, PF-ARともにユーザー運転を続ける予定です。2014年1月以降の運転予定は、電力使用量と電気料金の推移を見た上で10月中旬に決定されました。昨年度と同様に予算の削減と電気料金の高騰により、ユーザー運転の時間は例年よりも短めになっておりますが、ユーザーの皆様のご理解と、運転時間の確保のためにPFを利用した成果の発信などによるアピールをお願いいたします。

今年の夏のシャットダウン期間中には、BL-2, BL-6C, BL-10C, BL-13, BL-15, BL-20Bと多くの箇所でのビームラインの建設、改造などが行われました。特にBL-2, BL-15の二本では大がかりな工事が行われました。これらのビームラインの概要については何度かお伝えしている通りですが、BL-2, BL-15ともに建設は順調に進み、秋期運転の前に各種検査を受けたのち、コミッショニングを開始する予定です。どちらのビームラインも夏のシャットダウン前に更地になっていたところに新しい光学系が設置され、さらにBL-15では新しい大型の実験ハッチが構築され、ホール内の景色がだいぶ変わったことに気づくのではないのでしょうか。BL-2ではこの秋からは既存のアンジュレータを用いてSX領域の光を使った光学系、測定装置の調整を行ったのち、2014年にはVUV領域の新しいアンジュレータを設置して、VUV・SX領域の広い波長範囲をカバーするビームラインとして稼働する予定です。一方、その他のビームラインでは、主にハッチの改造や光学系コンポーネントの変更などが行われました。

また、PF-ARでは、直接入射路の建設のためにトンネル工事が行われています。これに伴ってPFへのアクセス道路とKEKB周回道路が交互に通行止めになっております。共同利用実験が始まり多くのユーザーの方が通行する

時期ですが、シャットダウン期間だけで工事を行うことが難しく、ご不便をおかけしますが、ご協力をお願いいたします。なお、通行止めの状況はPFホームページで公開しておりますのでご確認ください。

安全関連

前号のPFニュースでもお知らせしましたが、KEKでは東海キャンパスのJ-PARCハドロン実験施設事故を受けて、つくばキャンパスでも安全への取り組みの強化見直しが行われています。KEK全体の安全への取り組みの概要は機構のホームページに掲載されておりますが、機構長のもとに安全・環境・衛生管理推進室を新たに設置し、安全管理全般の方針、目標設定、安全活動計画の立案、実施を行う体制を作り、安全管理体制の強化を行いました。また、安全活動の実施のために、安全・環境・衛生管理実施室が、これまでの安全委員会に加えて設置されました。これらの体制のもとに、計画(Plan)-実施(Do)-評価(Check)-改善(Act)のPDCAサイクルを構築し、外部監査委員の助言を仰ぎながら安全管理体制の確立を目指します。PFにおける安全への取り組みに関してですが、ご存知のようにPFのグループ体制には「先端技術・基盤技術・安全グループ」があり、このグループを中心にして、共同利用実験をはじめとする日々の安全の確保に努めております。この夏には、春の運転期間中に実施した運転当番の見回りにおいて、安全の確保のために改善が必要と指摘があった事項についてスタッフによる対処が行われました。共同利用実験が始まり、今後も運転当番の巡回時などに安全に関する指摘等が行われる可能性があります。共同利用実験では、自身の安全だけでなく、同時に実験を行う多くのユーザー全員の安全確保が必要となります。運転当番あるいはビームライン担当者を通じての指示があった際にはご協力をお願いいたします。また、既にメール等を通じてユーザーの皆様へご案内しておりますが、毎年度視聴をお願いしている「放射光利用実験を安全に行うために」の講習ビデオに加え、放射線科学センターの指示により、放射線安全に関するビデオをご覧ください。これまでより

もやや視聴時間が長くなりますが、ご協力をお願いいたします。また、先述のKEKにおける新たな安全管理体制のもとで、今年度のアクションプランの一つとして、事故・災害及びそれ未満の事象、体験、ハザードを洗い出す、ハインリッヒ調査をはじめています。事故や災害などの重大な事例に加え、いわゆるヒヤリ・ハットに相当する事象や、事故を誘発する可能性のある状況（ハザード）などを、階層（ハインリッヒ階層）にわけた整理を行い、その背景要因を分析し安全管理計画に反映させることを目的としています。また、同時に法令・規定の遵守（コンプライアンス）の調査として、放射線安全だけでなく、PFで行われる共同利用実験に係わる全ての安全（電気、機械、高圧ガス、化学、遺伝子組み換えなど）の安全管理体制の再確認を行っています。これまでもユーザーの皆様へは化学薬品持ち込み届け等、各種手続きを行っていただいておりますが、今後もご協力をお願いいたします。また、11月1日には例年同様、ユーザーの皆様にも参加していただく防災・防火訓練が行われました。PF、PF-ARではシャッターを閉じ、ビームを止め、ユーザー実験を一時中断してご参加をいただきました。ご不便をおかけ致しましたが、ご協力をいただきありがとうございます。

人事関連

昨年度3月に定年退職され、今年度よりシニアフェローとして引き続きPFの運営に協力していただいた、伊藤健二氏が8月末に、また構造生物ビームラインで活躍されていたLeonard Chavas氏が10月6日付けで退職されました。伊藤氏はフランスの放射光施設であるSOLEIL、Chavas氏はドイツ DESY の自由電子レーザー施設であるEuroFELと、それぞれヨーロッパへ活動の地を移されました。お二人の新天地でのご活躍を期待しております。博士研究員の米村博樹氏は9月末で任期満了となり退職されました。また、長らくPFの主幹秘書として働いていただいた森史子さんも9月末で退職されました。スタッフはもとより、ユーザーの方もお世話になった方が多いのではないのでしょうか。

新しくPFに2人の方が着任されました。10月1日付けで新たに木村正雄氏が新日鐵住金より教授として着任されました。物質化学グループのグループリーダーとしてはもちろんのこと、これまでの企業での研究の経歴を活かして産業利用の観点などからPFの運営に協力いただけることを期待しています。また、11月1日付けで特任助教として中嶋享氏が着任しました。PFでは柳下教授と協力して、軟X線を用いた光電子の運動量画像測定法の開発を推進する予定です。

ERL 計画推進室報告

ERL 計画推進室長 河田 洋

cERL の建設状況

4月から6月末までに行ってきたcERLの入射部の試験運転は無事に終了し、7月からいよいよ周回部の建設作業が開始されました。ERL 開発棟は約100 m × 50 m のKEKで最も古い実験室ですが、空調設備はなく、夏場の作業は必ずしも快適ではありません。しかし、加速器室（シールド内部）は空調されており、その中で周回部の電磁石設置に向けたベースプレートの設置、マグネット架台の設置、電磁石の設置までが9月8日の一般公開までに終了し（図1）、一般公開後には、精密アライメントを経て9月末に作業を終了しています。

10月に入り、真空ダクトの設置作業や、放射線変更申請に伴う加速器のビームラインに沿ったシールドの設置等の作業が精力的に行われています。真空ダクトを設置するために、4極電磁石は二つ割にし、そこに真空ダクトを順番に設置しているところです。図2は測量をしながら真空ダクトを設置している様子で、南側の直線部のダクト設置は10月10日現在でほぼ終了しています。そして、真空ダクトの設置と並行して、モニター等の設置、ケーブル配線作業、そして放射線シールド、インターロック作業を行い11月中旬には自主検査を含めて周回部建設作業を完了するスケジュールで進めています。何とか、今年中（2013年中）に、周回部の電子ビーム運転を開始すべく、関係者



図1 一般公開前の周回部の様子。ベースプレートの設置、マグネット架台の設置、電磁石の設置まで、無事終了した。



図2 (上) 測量をしながら真空ダクトを設置している様子。(下) 設置が完了した南側の直線部。

は一丸となって現場の建設作業を進めています。1月の放射光学会ではその立ち上げ状況を報告できればと思っています。

ERL 計画の対内外の活動

先に述べましたが、9月8日に KEK の一般公開が行われました。毎年9月の上旬の日曜日に行っていますが、ERL プロジェクトの公開は今まで研究本館等の会議室でパネルを中心に行ってきました。しかし、今年は cERL の建設が進んでいることから、ERL 開発棟を一般公開対象に組み入れることを行い、ERL の原理を説明するパネルと動画説明 (図3)、コントロール室、冷凍設備、RF 源、電子銃のレーザーシステム、そして加速器シールド内の高輝度電子銃、超伝導空洞、そして建設中の周回部 (図4) という見学コースを整えて、加速器第七系のメンバーを中心に説明に当たりました。また、cERL の入室扉上方に ERL プロジェクトのロゴマークを掲載し (図5)、広く一般の方にもニックネーム (PEARL) と共に ERL 計画を知ってもらおう事を行った次第です。当日はあいにくの雨模様でしたが、約1000人の一般の方々が ERL 開発棟にきてくださって、賑やかな一日となりました。またこれを機会に ERL プロジェクト (PAERL) のパンフレットを改訂しました。ご興味のある方はこちらの URL からダウンロードして頂ければ幸いです (<http://imss.kek.jp/library/pamphlet/PEARL2013.pdf>)。



図3 一般公開での様子。ERL の原理についての小林主幹の説明を聞く見学者。



図4 一般公開での様子。建設中の周回部も見学コースに入り、多くの見学者が訪れた。



図5 cERL の入室扉上方に ERL プロジェクトのロゴマーク。

9月9日からロシアの BINP (ノボシビルスク) で ERL2013 の国際ワークショップが開催されました。我々のプロジェクトからは、cERL の入射部の運転コミッションを中心にして、高輝度電子銃、大強度レーザーシステム、超伝導空洞開発、RF 源の開発の中心メンバーが参加し、世界の ERL 開発メンバーと議論をしてきました。それらの会議報告を ERL 検討会で順次、関係の方々にしていただきますので、ご興味のある方は是非ご覧下さい (<http://pfwww.kek.jp/ERLOffice/> の ERL 検討会・関係資料を参照下さい)。

Invar 合金の非熱膨張特性の起源解明

横山利彦^{1,2}, 江口敬太郎²

¹分子科学研究所, ²総合研究大学院大学

Origins of Negligible Thermal Expansion in Invar Alloys

Toshihiko YOKOYAMA^{1,2}, Keitaro EGUCHI²

¹Institute for Molecular Science, ²The Graduate University of Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

極低温から室温以上までの広い温度範囲で熱膨張がほとんどない Invar 合金 fcc Fe₆₆Ni₃₄ と熱膨張が異方的で Invar/逆 Invar 特性を示す正方晶系 Mn₈₈Ni₁₂ martensite 合金の局所構造・局所熱膨張を、温度依存広域 X 線吸収微細構造 (EXAFS) 法と経路積分有効古典ポテンシャル法に基づいた理論シミュレーションにより検討した。Fe₆₆Ni₃₄ Invar 合金では、Fe 周囲の熱膨張は極低温から室温まで確かにほとんどなく、Ni 周囲では金属 Ni より小さいものの有意な熱膨張が観測された。この合金の室温付近の非熱膨張は、Fe の電子状態が温度に応じて高スピンと低スピン配置をとるという従来モデルでは記述できたが、低温での非熱膨張は振動の量子効果であることが示された。正方晶系マルテンサイト Mn₈₈Ni₁₂ 合金では、短い *a* 軸は熱膨張が通常より大きく (逆 Invar 効果)、長い *c* 軸では熱膨張がほとんどない (Invar 効果) といった異方的熱膨張を示した。これは Mn 原子が温度に応じて *c* 軸方向に長い非球形低スピン配置と球形高スピン配置の両方の配置をとることに由来することがわかった。いずれの合金でも、Fe, Ni あるいは Mn, Ni の 2 種類の元素まわりの局所構造・局所熱膨張は決して同一ではなく、X線回折で与えられる晶系や格子定数はあくまで平均のもので、各原子の局所構造を反映していないことに留意すべきである。

1. はじめに

1897 年、スイスの Guillaum [1] は、室温付近で熱膨張のほとんどない FeNi 合金 (Fe 65.4%, Ni 34.6%) を発見した。この Invar 合金が登場した後も非熱膨張材料の開発は進み、今日に至るまで Invar 合金あるいはその類似合金からなる非熱膨張材料は、半導体加工、精密鋳型、顕微鏡、望遠鏡等さまざまな精密機器に対して極めて広く日常的に用いられている。Guillaum は、Invar 合金の発見と熱膨張の精密測定法の開発の功績から、1920 年ノーベル物理学賞 (Einstein の前年) を受賞した。この奇妙な Invar 効果の起源について、1963 年、Weiss [2] は簡単な 2 準位モデルを提唱した。この Weiss モデルは、Fe 原子が原子半径の大きい安定な高スピン (HS) 状態と原子半径が小さく不安定な低スピン (LS) 状態の両方をとり得るというものである。低温では安定な HS 状態にあるが、温度上昇に伴って LS 密度が増え、平均原子間距離は短縮する。そして、この負の熱膨張がちょうど非調和振動に由来する本来の熱膨張と相殺されるのである。このモデルは Invar 合金の非熱膨張起源の本質をおおよそ捉えたものとして認知されているが、実際の系はもっとはるかに複雑な磁気構造を呈することが指摘され、現在まで、固体物性物理のひとつの long-standing problem として知られている。たとえば最近の第一原理量子計算 [3] では、Fe, Ni とともに原子ごとに

異なる磁気モーメントを示し、またその向きも非平行であることが提唱されており、真の理解にはまだまだ至っていない [4]。

本研究では、電子状態から視点を変えて、局所構造・局所熱膨張と極低温熱膨張に焦点を当てた検討を行った。本来の熱膨張は非調和熱振動に由来するものなので、低温では振動の量子効果 (零点振動) が重要と予想される。しかし Invar 効果に対する低温での量子効果に言及した論文は報告されていない。また、Fe の電子状態変化に伴って Fe 周囲の第 1 配位原子間距離の短縮は予想できるが、Ni 周囲の第 1 配位の熱膨張がどうなるかは直感的にはわからない。さらには、熱膨張が非調和振動に由来するものであれば、熱膨張のないこの系において逆に非調和振動がどのようであるか興味があった。これらの観点から、EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure, 広域 X 線吸収微細構造) によって Fe, Ni 周囲の局所熱膨張や非調和性を検討し、また、経路積分有効古典ポテンシャル (Path-Integral Effective Classical Potential, PIECP) 法 [5] に基づいた Monte Carlo (MC) 計算を行い、量子効果、局所熱膨張、非調和性などの問題を検討した [6]。

一方、少し違った Invar 特性を示すと思われる Mn₈₈Ni₁₂ 合金も検討した。この合金の粉末 X 線回折を測定したところ、正方晶系で *c* 軸に熱膨張がほとんどなく (Invar 効果),

a 軸は普通より大きな熱膨張（逆 Invar 効果）を示すことがわかった。また、この合金は、過去の研究 [7] から、高温では立方晶にマルテンサイト変態し形状記憶性をもつことが知られている点でも興味深い。さらに、この合金は $\text{Fe}_{66}\text{Ni}_{34}$ Invar 合金とは違って磁気構造が単純である。すなわち、(001) 面内で強磁性的、(001) 面間で反強磁性的磁気相互作用を呈する反強磁性体で、磁気モーメントは平行・反平行であり、Mn の磁気モーメントの大きさは同じとされている。スピナルブのような磁気抵抗素子の反強磁性基板としても有効な材料であり、 $\text{Fe}_{66}\text{Ni}_{34}$ Invar 合金のような磁気的な曖昧さが生じないことも話をわかりやすくする利点となる。本研究では、この合金で Invar/逆 Invar 効果が同時に生じる理由を解明し、また、無秩序合金における平均格子構造と局所構造の相違を検討するなどの目的で、X線回折・EXAFS・PI-ECP 計算による研究を行った [8]。

2. 実験・データ解析・理論計算

EXAFS 測定は、Photon Factory BL-9C において $\text{Fe}_{66}\text{Ni}_{34}$ 合金箔 (8 μm) の Fe, Ni-K 吸収端、ならびに、 $\text{Mn}_{88}\text{Ni}_{12}$ 合金箔 (12.5 μm) の Mn, Ni-K 吸収端を、10 K 程度の極低温から室温までの温度範囲で透過法により測定した。FeNi 合金の測定の際は、試料温度を試料近傍に設置した校正済 Si ダイオードと Cu 箔の EXAFS 温度依存性を併せて見積もったが、BL-9C の温度制御器の表示温度は 3 K 以内で一致していた。EXAFS の解析は主として第 1 配位圏について行い、3 次のキュムラント展開式 [9] を用いて非調和性を考慮した。FeNi 合金では、原子間距離の絶対値は FEFF8 理論標準 [10] で求め、相対値は最低温データを基準とした。MnNi 合金では、距離の絶対値・相対値とも FEFF8 理論標準 [10] を用いた。なお、第 1 配位圏にはいずれの金属原子も存在する（たとえば FeNi 合金において、吸収原子を Fe とした場合、Fe 周囲に Fe, Ni 両方が存在する）が、Fe, Ni, Mn と原子番号が近く、EXAFS では散乱原子として区別できないものとした。EXAFS であるから、吸収原子は当然 2 種の原子の区別が可能であるが、散乱原子については吸収原子と両金属原子の平均距離が求められることになる。

$\text{Mn}_{88}\text{Ni}_{12}$ 合金の格子定数は、分子研・機器センターの極低温粉末 X 線回折装置（リガク）を用いて実験的に決定した。用いた X 線は Cu $K\alpha$ 線であり、検出 X 線は、Mn $K\alpha$ 蛍光 X 線を除くため graphite 結晶で分光した。主に 311, 113 反射を用いて面心正方格子定数 a, c を得た。なお、Bravais 格子では体心正方格子であるが、面心立方格子への変態を想定しているため、便宜上、面心正方格子として格子定数を与えた。

FeNi, MnNi 合金の PIECP MC 計算は、それぞれ fcc, fct モデル構造（合計 500 原子）を、原子配置の異なる 11 種を無作為に作成のうえ MC 計算し、結果を後で平均して物理量を算出した。原子ポテンシャルは、金属に対してよく用いられる経験的な Embedded Atom Method (EAM) [11] を用いた。詳細は原著 [6, 8] を参照されたい。

3. 結果と考察

3.1. $\text{Fe}_{66}\text{Ni}_{34}$ Invar 合金

まず、 $\text{Fe}_{66}\text{Ni}_{34}$ Invar 合金の結果を述べる。Fig. 1(a) は PIECP 計算で用いた Fe HS, LS 原子間ポテンシャルのいずれか一方を使って $\text{Fe}_{66}\text{Ni}_{34}$ Invar 合金と仮想的 fcc Fe の平均ポテンシャルを計算した結果である。両系とも第 1 配位原子間距離として HS では 2.530 Å, LS では 2.491 Å 程度に極小値を有し、Invar 合金では HS が 25.0 meV 安定、fcc Fe では逆に LS が 8 meV ほど安定になっている。したがって、Invar 合金では温度上昇に伴う原子間距離の短縮（非調和振動による熱膨張との相殺、Invar 効果）が期待でき、fcc Fe では温度上昇に伴って原子間距離が通常非調和振動由来の熱膨張よりも大きく伸びる（Anti-Invar 効果）ことが予想できる。

Fig. 1(b-d) には、本研究の EXAFS から決定された第 1 配位原子間距離と文献値 [12] から得た格子定数に関して、量子 PIECP MC と古典 MC 計算の結果を示した。まず、Fig. 1(b,c) から、Fe 周囲の第 1 配位はほとんど熱膨張がないのに対し、Ni 周囲の第 1 配位は熱膨張がはっきりと観測されていることがわかる。ただし、Ni 周囲も金属 fcc Ni

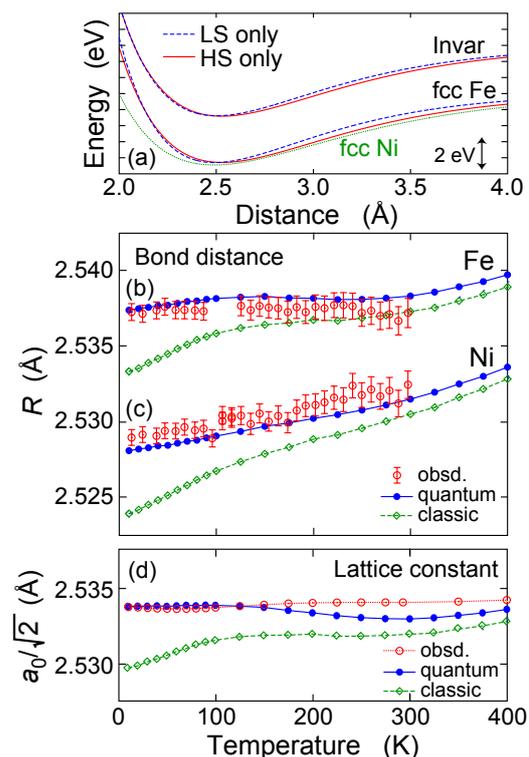


Figure 1

(a) Binding energies of Invar $\text{Fe}_{66}\text{Ni}_{34}$ (top lines), fcc Fe (bottom lines), and fcc Ni (bottom, green dotted line) as a function of the first nearest-neighbor distance at a temperature of 0 K. For Fe, two types of the potentials for the HS (red solid line) and LS (blue dashed line) states are depicted. (b,c) The first nearest-neighbor bond distance around Fe (b) and Ni (c) given by the experimental EXAFS data (red open circle with an error bar), PIECP (blue circles and solid line, quantum) and the classical MC (green diamond and dashed line, classic) methods. (d) Equilibrium first nearest-neighbor distance ($a_0/\sqrt{2}$) given by the experimental literature data (red circle and dotted line) [12], and the PIECP and classical MC simulations.

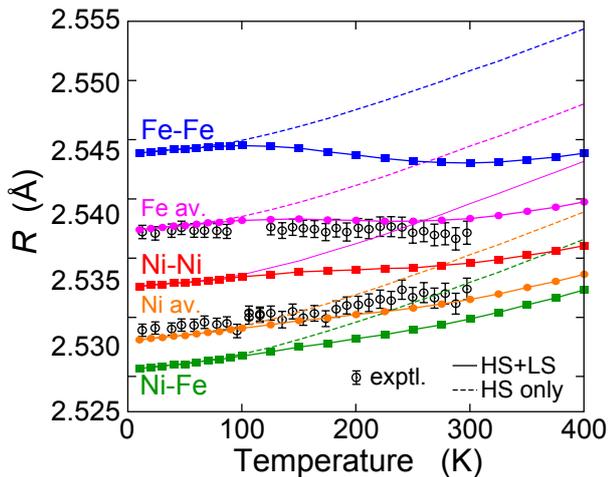


Figure 2
 Simulated bond distances of Fe-Fe (blue square and solid line), Ni-Ni (red square and solid line), and Ni-Fe (green square and solid line) pairs, together with the average ones around Fe (pink circle and solid line) and Ni (orange circle and solid line). The experimental data for the average one around Fe and Ni are also shown. The dashed lines are the PIECP results by using only the HS state in Fe.

の値に比べるとその熱膨張はかなり小さくなっている。PIECP 計算の結果は、原子間距離・格子定数とも実験値とよく一致している。一方、古典的計算では、低温(<100 K)での一致が悪く、低温ではむしろ正常な熱膨張を呈してしまっている。量子論と古典論では全く同じ原子間ポテンシャルを用いており、この差異は量子揺らぎの有無に起因する。すなわち、Invar 合金において低温で熱膨張がないことは振動の量子効果であると結論できる。

Fig. 2 には PIECP MC 計算による第 1 配位 Fe-Fe, Ni-Fe, Ni-Ni の原子間距離の温度変化を示した。HS 状態のみの計算値 (破線) は正常な熱膨張を示す仮想的な計算と考えてよい。Fe-Fe 配位は熱膨張がほとんどなく、HS 状態のみの計算値とのずれも一番大きい。しかし、Ni-Ni, Ni-Fe 配位でも、熱膨張は HS 状態のみの計算値に比べてかなり小さく、電子状態が単一の Ni も Fe の状態変化の影響で熱膨張が顕著に抑制されていることがわかった。Fig. 1(c) の EXAFS の結果で、Ni 周囲第 1 配位の熱膨張が Ni 金属より小さかったこととよく対応している。また、PIECP 計算の結果から、Ni-Fe の熱膨張より Ni-Ni 配位の熱膨張が強く抑制されているといえ、Fe の電子状態変化の影響が直接的な Ni-Fe 配位に比べて間接的である Ni-Ni 配位に強く及んでいるという結果は興味深い。これは、Ni が多く配位する Fe は HS 状態を取りやすく、かつ、Ni-Ni ポテンシャルが Ni-Fe より柔らかく格子定数に追随しやすいことが原因である。

Fig. 1(b,c) から明らかのように、Fe と Ni では周囲原子との原子間距離が異なっている。結晶構造は fcc であるから、本来 Fe と Ni の幾何構造は熱膨張も含めて一致すべきかもしれないが、実際には異なることがはっきりと示された。すなわち、X線回折で与えられる格子定数や晶系はあくまで平均のものであり、無秩序合金における局所構造は

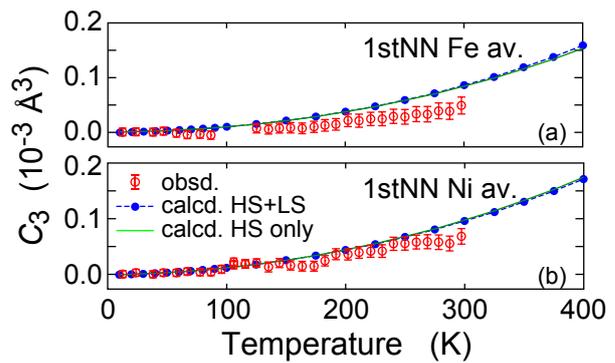


Figure 3
 Mean cubic relative displacement C_3 given by the experimental EXAFS (red open circle with an error bar) and by the PIECP simulations using the two-state (blue circle and dashed line) and the HS-only (green solid line) models for the average first nearest-neighbor bonds around Fe (a) and Ni (b).

X線回折から決定できるものではないといえる。Fig. 3 に第 1 配位の動径分布の非対称性 $C_3 = \langle (r-R)^3 \rangle$ (R は平均原子間距離) について、EXAFS 実験値および PIECP MC 計算値を示した。熱膨張がなくとも第 1 配位の分布の非対称性 (= 非調和性) は Ni 周囲のみならず Fe 周囲もきちんと存在し、単純な熱膨張と C_3 の 1 対 1 の関係はないことがわかった。

3.2. $Mn_{88}Ni_{12}$ Martensite 合金

続いて $Mn_{88}Ni_{12}$ マルテンサイト合金の結果を述べる。Fig. 4 に EXAFS による第 1 配位原子間距離の温度変化を示した。この系は正方晶であるため Mn, Ni の EXAFS と第 1 配位が 2 種類の原子間距離から構成されると仮定して 2-shell で解析した。その結果、Mn 周囲は確かに長短 2 種類の結合 Mn(*l*), Mn(*s*) が観測できたが、Ni 周囲は長短の差がほとんどなく面心立方格子的な挙動を示した。また、原子間距離も Mn, Ni で 0.03 Å 程度の差があった。FeNi 合金と同様に、X線回折で与えられる平均的な正方晶構造は局所的には保たれていないことが明らかとなった。

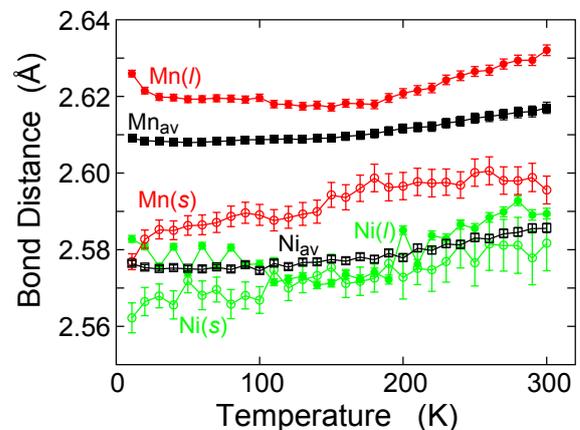


Figure 4
 Experimental bond distances in $Mn_{88}Ni_{12}$ determined by the Mn and Ni K-edge EXAFS. *l*, *s*, and *av* denote the longer and shorter bonds and the average, respectively.

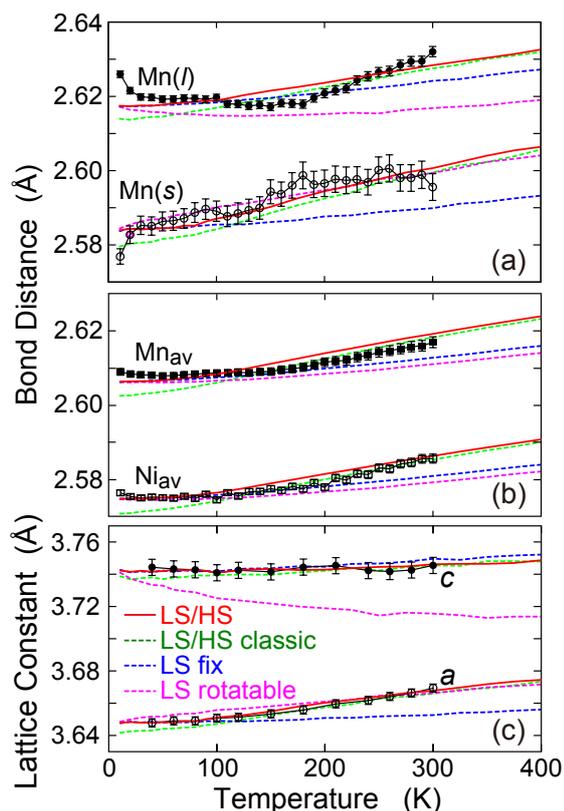


Figure 5
 Simulated bond distances for (a) Mn(l) and Mn(s) and (b) Mn_{av} and Ni_{av}, and (c) fct lattice constants a and c, together with the experimental EXAFS and XRD data with error bars. Four kinds of simulated results are depicted: the quantum LS-HS model (red solid line), the classic LS-HS model (green dashed), the tetragonal-axis fixed LS model (blue dashed), and the tetragonal-axis rotatable model (purple dashed).

MnNi 合金では、Mn 原子が正方歪を示すことから、Mn LS 原子形状を回転楕円体型と仮定し、次の (i)~(iv) の 4 つの構造モデルに基づくシミュレーションを行った。そのモデルとは、(i) Mn LS 原子が低温では *c* 軸方向に長軸を揃え、温度上昇とともに向きが無秩序になるモデル (LS rotatable model), (ii) Mn LS 原子が温度に依らず *c* 軸方向に長軸を揃えたモデル (LS fixed model), (iii) Mn が回転楕円体型 (LS) と球形 (HS) の 2 種類の状態をとり、楕円体の長軸は *c* 軸方向に向きを揃えているモデル (LS/HS model), (iv) (iii) の古典論モデル (LS/HS classic model) である。Fig. 5(c) には、粉末 X 線回折による格子定数の温度変化の実験結果を計算結果とともに示した。実験的には、長い *c* 軸は熱膨張がほとんどなく、短い *a* 軸は熱膨張が大きいことがわかった。LS rotatable model では *c* 軸が負の熱膨張を示し、LS fixed model では *a* 軸の熱膨張がほとんどなく、いずれも実験事実を再現しなかった。これに対して、LS/HS モデルでは、格子定数だけでなく、Fig. 5(a,b) の原子間距離を含めてよい一致を示した。LS/HS classic モデルでもおおむね良好な結果であるが、FeNi 合金の際と同じく、低温では大きな熱膨張を呈しており実験結果と合致しない結果である。結局、量子論的な LS/HS モデルが最も妥当といえる。この LS/HS モデルでは、Mn 原子が、低温で楕円体の長

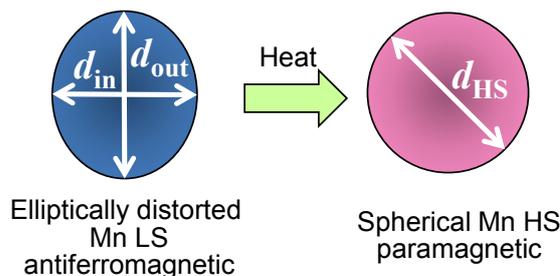


Figure 6
 LS/HS model for Mn electronic structure in the Mn₈₈Ni₁₂ alloy. At low temperature, elliptically distorted Mn LS state with $d_{in}=2.57 \text{ \AA}$ and $d_{out}=2.64 \text{ \AA}$ is dominant. With a temperature rise, the population of the Mn HS state with $d_{HS}=2.62 \text{ \AA}$ increases. This model successfully explains the experimental temperature dependence of the bond distances and the lattice constants.

軸は *c* 軸方向に向きを揃えているが、温度上昇に伴い HS の割合が増え *a*, *c* 軸の距離の差は小さくなっている。さらに、HS での球の直径 (2.62 Å) が、LS での短軸 (2.57 Å) よりかなり大きく、長軸 (2.64 Å) よりわずかに短いという状況が実現している [Fig. 6 参照]。一方、Ni は温度によって電子状態は変化せず球形の 1 種となる。以上から、長い *c* 軸方向では熱膨張のない Invar 効果、短い *a* 軸方向では熱膨張が大きい逆 Invar 効果が生じたと言える。なお、Mn 原子が LS から HS に変化することは、3d 電子数の変化に由来する。Mn₈₈Ni₁₂ 合金では、Mn は LS が安定であるが、温度上昇で HS 濃度が高まり、その結果として熱膨張に異常な現象が観測されたと言える。

4. まとめ

Invar 合金 Fe₆₆Ni₃₄ と協奏的 Invar/ 逆 Invar 効果を示す Mn₈₈Ni₁₂ マルテンサイト合金の局所構造・局所熱膨張を温度依存 EXAFS 法と量子論を組み込んだ PI-ECP 法に基づく理論シミュレーションにより検討し、Invar 効果の発現機構などを考察した。Fe₆₆Ni₃₄ Invar 合金では、Fe 周囲の熱膨張は極低温から室温まで確かにほとんどなく、一方、Ni 周囲では金属 Ni より小さいものの有意な熱膨張が観測された。この合金の室温付近の非熱膨張は、Fe の電子状態が温度に応じて HS と LS 配置をとるという従来モデルでほぼ記述できたが、低温での非熱膨張はむしろ振動の量子効果であると結論できた。正方晶系 Mn₈₈Ni₁₂ 合金では、短い *a* 軸の熱膨張は通常より大きく (逆 Invar 効果)、長い *c* 軸の熱膨張はほとんどない (Invar 効果) という異方的熱膨張を示した。これは Mn 原子が温度に応じて *c* 軸方向に長い回転楕円体形状の LS 配置と球形 HS 配置の両方の配置をとることで説明できた。いずれの合金でも、Fe, Ni あるいは Mn, Ni の 2 種類の元素周囲の局所構造や局所熱膨張は決して同一ではなく、X 線回折で与えられる fcc や fct 構造はあくまで平均のもので、局所的には各原子の構造を反映していない点に留意すべきであるとわかった。このことは磁気構造を量子力学的計算で検討するなどの今後の研究にも重要な指針であるといえる。

謝辞

EXAFS の測定は PF-PAC No. 2010G551, 2012G008 に基づいて行いました。また、プレスリリースや KEK ならびに物構研公式 HP でも成果を紹介いただきました。XAFS ステーション担当, KEK 物構研広報担当の皆様には感謝いたします。また、研究の一部において、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究 (A) (No. 22241029) を活用しました。

引用文献

- [1] C. E. Guillaume, C. R. Hebd. Seances Acad. Sci. **125**, 235 (1897).
- [2] R. J. Weiss, Proc. R. Soc. Lond. A **82**, 281 (1963).
- [3] M. van Schilfgaarde, I. A. Abrikosov, and B. Johansson, Nature (London) **400**, 46 (1999).
- [4] E. F. Wasserman, Ferromagnetic Materials, eds. K. H. J. Bushow and E. P. Wohlfarth (Elsevier Science Publishers B.V., New York, 1990), Vol. 5, p. 237.
- [5] A. Cuccoli, R. Giachetti, V. Tognetti, R. Vaia, and P. Verrucchi, J. Phys.: Condens. Matter **7** (1995) 7891; T. Fujikawa, T. Miyana, and T. Suzuki, J. Phys. Soc. Jpn. **66**, 2897 (1997); T. Yokoyama, Phys. Rev. B **57**, 3423 (1998); T. Yokoyama, J. Synchrotron Radiat. **8**, 87 (2001).
- [6] T. Yokoyama and K. Eguchi, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 065901; T. Yokoyama, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **10**, 486-492 (2012); T. Yokoyama and K. Eguchi, Photon Factory Activity Report Part A: Highlights and Facility Report 2011 (2012) p.32-33; <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/20110915170000/>
- [7] T. J. Hicks, A. R. Pepper, and J. H. Smith, J. Phys. C **1**, 1683 (1968); H. Uchishiba, J. Phys. Soc. Jpn. **31**, 436 (1971); N. Honda, Y. Tanji, and Y. Nakagawa, J. Phys. Soc. Jpn. **41**, 1931 (1976).
- [8] T. Yokoyama and K. Eguchi, Phys. Rev. Lett. **110**, 075901 (2013); T. Yokoyama and K. Eguchi, Photon Factory Activity Report Part A: Highlights and Facility Report 2012 (2013) in press; <http://imss.kek.jp/news/2013/topics/0207invar/index.html>.
- [9] G. Bunker, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **207**, 437 (1983).
- [10] A. L. Ankudinov, B. Ravel, J. J. Rehr, and S. D. Conradson, Phys. Rev. B **58**, 7565 (1998).
- [11] M. S. Daw and M. I. Baskes, Phys. Rev. B **29**, 6443 (1984); S. M. Foiles, Phys. Rev. B **32**, 3409 (1985).
- [12] Thermodynamical Properties of Matter, eds Y. S. Touloukian, R. K. Kirby, R. E. Taylor and T. Y. R. Lee (Plenum, New York, 1975), Vol. 12, p. 848.

(原稿受付日: 2013 年 9 月 11 日)

著者紹介

横山利彦 Toshihiko YOKOYAMA



自然科学研究機構分子科学研究所 教授
〒444-8585
愛知県岡崎市明大寺町字西郷中 38
TEL: 0564-55-7345
FAX: 0564-55-7337
E-mail: yokoyama@ims.ac.jp

略歴: 1987 年東京大学大学院理学系研究科中退, 同年広島大学理学部助手。1993 年東京大学大学院理学研究科助手。講師, 助教授を経て, 2002 年岡崎国立共同研究機構分子科学研究所教授。理学博士。
最近の研究: 放射光やレーザーで見た表面薄膜磁性。

江口敬太郎 Keitaro EGUCHI



総合研究大学院大学物理科学研究科
5 年一貫制博士課程
〒444-8585
愛知県岡崎市明大寺町字西郷中 38
TEL: 0564-55-7341
FAX: 0564-55-7337
E-mail: keguchi@ims.ac.jp

略歴: 2009 年熊本大学理学部卒, 同年総研大物理科学研究科構造分子科学専攻入学。
最近の研究: 表面における金属錯体の新規合成と電子状態の解明。

超伝導検出器で可能になる微量軽元素の蛍光収量X線吸収分光

志岐成友¹, 浮辺雅宏¹, 松林信行¹, 小池正記¹, 北島義典², 大久保雅隆¹

¹産業技術総合研究所, ²高エネルギー加速器研究機構

X-ray Absorption Spectroscopy using Superconducting Tunnel Junction Detector for Trace Light Elements

Shigetomo SHIKI¹, Masahiro UKIBE¹, Nobuyuki MATSUBAYASHI¹, Masaki KOIKE¹,
Yoshinori KITAJIMA², Masataka OHKUBO¹

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ²High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

多くの材料で機能発現に不可欠な微量軽元素（ドーパント）の状態分析への適用を目的として、超伝導トンネル接合アレイ検出器を用いた蛍光収量法によるX線吸収分光（XAFS）装置を開発し、波長分散分光より高い感度と、半導体検出器より高いエネルギー分解能を同時に実現した。SiC中の微量窒素ドーパントのXAFS測定を行い、軽元素ドーパントのXAFS分析に本装置が有効であることを示した。本装置はナノテクノロジープラットフォーム事業の登録装置として、KEK PFにてユーザーに公開されている。

1. はじめに

2 keV以下の軟X線領域の蛍光収量法によるX線吸収端微細構造（XAFS）の測定は、化合物半導体や太陽電池、磁性体、触媒など、軽元素を含む材料の研究開発に必要とされている。軟X線は透過力が弱く透過法による測定が困難であるために、電子収量法や蛍光収量法が用いられてきた。その中でもバルクの分析では蛍光収量法が重要で、特に分析対象が微量成分である場合は、エネルギー分解能が高く、高感度のX線分光器が必要である。しかしながら、従来型のX線分光検出器である半導体検出器と回折格子分光器は、それぞれエネルギー分解能、検出感度において微量成分の分析を行うには十分な性能ではなかった。そこで我々は、高分解能かつ高感度で、また放射光での計測に適した高計数率を併せ持つ非平衡超伝導検出器として超伝導トンネル接合（STJ）検出器に着目した[1-2]。STJ検出器のエネルギー分解能は軟X線領域では10-20 eVであり[3]、回折格子分光器には劣るが、半導体検出器の分解能を遥かに上回る。また、STJ検出器の有感面積は、半導体検出器には及ばないものの、100素子アレイを用いると面積は1 mm²に達し、回折格子分光器より高感度になる。このようにSTJ検出器は半導体検出器と回折格子分光器の中間的な性能を持つため、これを用いれば高感度かつ高分解能の測定を実現できる。実際、9素子からなるSTJアレイ検出器を用いた予備的なZnOのN吸収端スペクトル測定によりドーピングされた窒素が分子状であることが明らかにされ、STJ検出器の有効性が確認されている[4]。

このような背景の元、2006年度より100素子STJアレイ

検出器を備えたX線吸収分光装置の開発に着手した。従来行われたSTJ-X線検出器の研究は、最高の分解能を実現することや素子の特性を明らかにすることを目的とした単一素子に対するものがほとんどであった。この開発では、100素子アレイを構成する各STJ素子が、安定的に高い分解能を実現し、実用的な分析装置として動作することが必要であった。そのため新たなノウハウの蓄積が必要となり、1 nm厚の絶縁層をもつ接合素子の歩留まり、トンネル障壁の均一性、疑似信号の除去、アレイ用読出回路、ソフトウェアなど様々な開発を行った[5-13]。本稿では装置の構成、性能、および、利用例を紹介する。

2. 装置

2-1. 装置構成

装置の構成を図1に示す。単色化された放射光を真空中の試料に照射し、90°方向に配置された超伝導検出器を用いて蛍光X線を分光する。試料用真空槽は到達圧力がおよそ10⁻⁷ Paである。試料用真空槽にはロードロックチャンバーがあり、短時間で試料交換ができる。検出器の冷却は機械式冷凍機を備えた³He冷凍機により行われ、到達温度は320 mKである。この冷凍機は液体ヘリウムや液体窒素といった寒剤を用いず、自動で冷却することができ、極低温実験の経験が無いユーザーでも操作可能である。STJ検出器はクライオスタットから60 cmほど伸ばしたスナウトの先端に取り付けられ、クライオスタット全体をリニアステージで動かすことにより、試料用真空槽への出し入れができる。試料と検出器の距離は最短で約20 mmである。

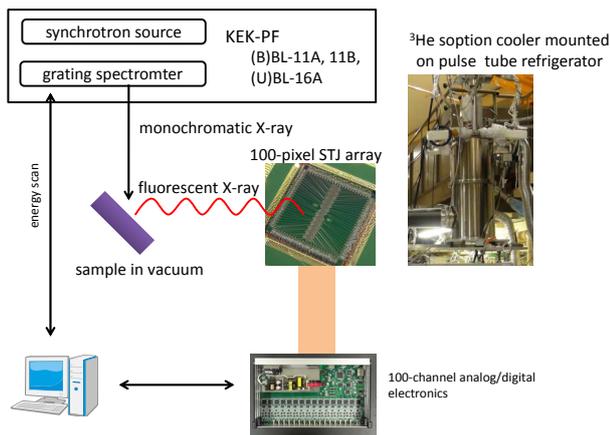


Figure 1 Setup of fluorescent yield X-ray absorption spectroscopy apparatus using 100-pixel STJ detector array.

個々の STJ 検出器の信号は、電荷有感型増幅器を用いて増幅されたのち、200 MHz flush analog to digital converter (FADC) と field programmable gate array (FPGA) を用いた波高分析器によりパルス波高スペクトルに変換される。波形整形関数は台形である。吸収端スペクトル測定の際には、本装置からビームラインの分光器を制御し、一定時間積分して、全チャンネルの波高スペクトルを保存する。入射エネルギーごとに波高スペクトルを計測したのち、任意のエネルギー窓のイベント数を積算し、入射光強度で規格化して蛍光収量吸収端スペクトルを得る。入射光強度はメッシュやミラーの電流を V-F コンバータでパルスに変換し、パルス数より求める。分光器の制御は STARS を介して行われるので、利用者の要望に応じて複数のビームラインに対応することができる。現在使用できるビームラインは BL-11A, BL-11B, BL-16A で、70 - 5000 eV の範囲が測定できる。

2-2. STJ アレイ検出器

使用した STJ 検出器の構造を Fig. 2 に示す。この構造は軟 X 線に最適化されており、上部電極ニオブを厚く、下部電極ニオブを薄く積層することで、主な吸収体である上部電極の検出効率を増やし、下部電極ニオブに X 線が吸収された際に発生する疑似信号を抑制している。また接合周囲の絶縁膜 (SiO_2) が上部電極にかかる割合を減らし、低エネルギー側の擬信号を抑制している [10]。このような構造の検出器が 100 素子、一つのチップの上に配置されている。

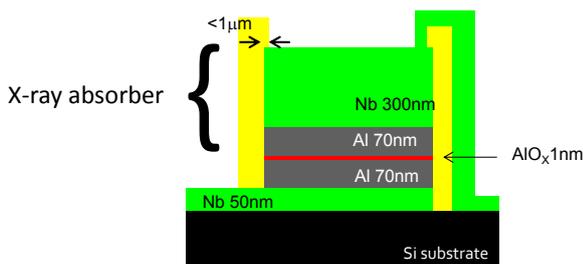


Figure 2 Schematic cross section of STJ detector designed for soft X-ray spectroscopy.

100 個の STJ 素子の電流電圧特性はほとんど同じで、超伝導エネルギーギャップ (2Δ) の 1/2 に相当するバイアス電圧 (Δ/e) において、およそ 1 nA と極めて小さいリーク電流を実現している。100 素子中 90 素子以上を X 線検出器として利用でき [10]、エネルギー分解能のバラツキも 0.6 eV と小さい [11]。

軟 X 線に対する検出効率は検出器の吸収効率と X 線フィルターの透過率の積で表わされる。量子効率として上部ニオブ電極の吸収率を Fig. 3 (a) に示す。740 eV 以下で 90% 以上の検出効率が得られる [12]。試料と検出器の間には、赤外線の入射を抑制し検出器を低温に保つために 3 つの X 線フィルターが設置されている。各フィルターは、厚さ 100 nm のパリレン-N にアルミニウムを 25 nm 蒸着した自立膜で、開口率 86% のメッシュでサポートされている。この X 線フィルターは 30 K, 3 K, 0.3 K にひとつずつ設置され、3 つのフィルターを通した透過率は Fig. 3 (b) に示すとおりである。検出系の感度は X 線フィルターの透過率と検出器の検出効率で表される (Fig. 3 (c))。軟 X 線全域で高い効率が得られる。また、数 μm の穴を密に配置して、透過率の光子エネルギー依存性がないフィルターも低エネルギー領域で有望である [14]。

検出分光器としての効率は、試料から放射される蛍光 X 線のうち検出できる割合で記述される。検出器と試料の間の距離がおよそ 20 mm、検出器面積が 1 mm^2 、感度が 30% 程度なので、効率はおよそ 10^{-4} である。この効率の値は通常の半導体検出器と比べると高くないが、回折格子分光器 [15] より 2 桁以上高く、微量軽元素の検出が可能となる。分光性能は単色光に対する全吸収ピークの半値全幅 (FWHM) により記述される。N-K 線に対するエネルギー分解能は全素子の信号を積算したスペクトル上で 12 eV FWHM である (Fig. 4) [16]。この分解能は軟 X 線用のシリコンドリフト検出器の分解能 [17] と比べて十分高い。入射エネルギーに対する応答の直線性は 1 keV 以下の範囲ではリニアである [13]。

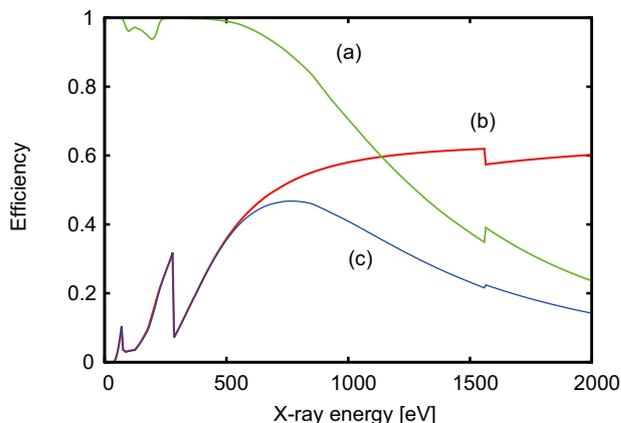


Figure 3 Spectral sensitivity of an STJ detector and X-ray filters. Detection efficiency of STJ top electrode (a), Transmittance of X-ray filter made of 100nm parylene-N and 25nm aluminum (b), and total sensitivity of STJ spectrometer (c).

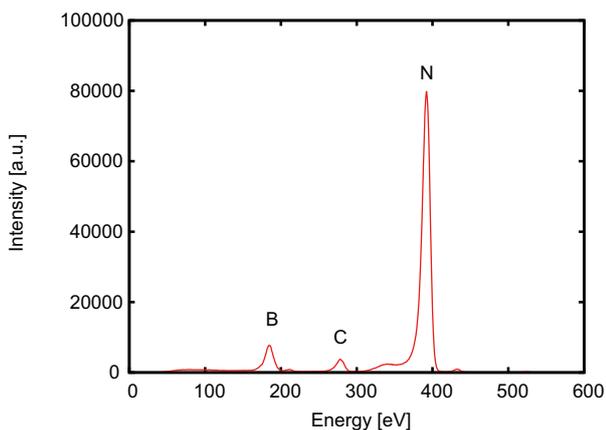


Figure 4 Averaged fluorescent X-ray spectrum over all STJ pixels for BN powder at X-ray of 430 eV.

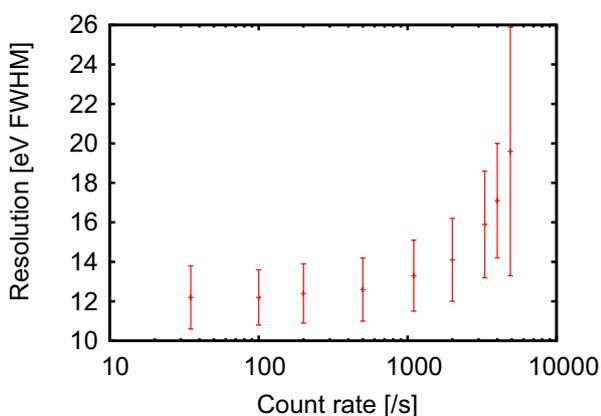


Figure 5 Energy resolution of STJ detector array as a function of count rate.

微量成分の検出には、エネルギー分解能とともに、高い計数率が要求される。X線光子に対するパルス電流出力の緩和時間はおよそ $2 \mu\text{s}$ であり、計数率とエネルギー分解能を両立するため波形整形時間は $4 \sim 10 \mu\text{s}$ としている。波形整形時間 $8 \mu\text{s}$ の時のカウントレートとエネルギー分解能分布の対応を Fig. 5. に示す [16]。エネルギー分解能 20 eV を許容すると最大計数率は 5 kcps で、 100 素子アレイ全体では 500 kcps まで利用できる。分解能が劣化する原因は台形波整形後の波形のアンダーシュートなので、波形整形の時定数や読出回路の変更により改善できる可能性がある。

3. 利用例

本装置を用いて、これまでに、化合物半導体、太陽電池、絶縁体材料 (BN, アルミナナノ粒子)、磁性体の XMCD などが測定されている。特に高分解能と高感度を生かした例として、SiC に微量の窒素をドーピングした試料の測定例について以下に述べる [18]。

SiC はワイドギャップ半導体で、モビリティーが高いために、パワーエレクトロニクス材料として実用化が進んでいる。SiC に窒素をドーピングすると n 型半導体となる。ドーピングには基板加熱した状態でイオンを注入する高温

イオン注入法が用いられ、注入後に活性化のため $1400 \sim 1800^\circ\text{C}$ でアニールされる。アニール後の活性化率は高濃度ドーピング時 ($10^{19}\text{-}10^{20}\text{cm}^{-3}$) に低く、SiC デバイスの省電力化を阻んでいる。活性化率が低い原因として窒素が Si サイトを占めている可能性が示唆されているが明確な証拠は見つかっていない [19]。微量ドーパントの結合状態を決定するには部分蛍光収量法による吸収端スペクトルの測定が有効であるが、従来のシリコンドリフト検出器を用いた場合、主成分の炭素とドーパントの窒素の蛍光 X 線を分離できないために、窒素吸収端スペクトルの測定が困難であった。そこで高い分解能が得られる STJ 検出器を用いて吸収端スペクトル測定を試みた。

STJ 検出器を用いて測定した SiC:N の蛍光 X 線スペクトルを Fig. 6. に示す。窒素と炭素の特性 X 線が完全に分離されていることがわかる。吸収端近傍では散乱光と蛍光 X 線を区別できないため、 350 eV から 500 eV の範囲にエネルギー窓をかけて吸収端スペクトルを求めた (Fig. 7)。吸収端スペクトル上のピークのエネルギーを、FEFF を用いて求めたピークと比較すると、C サイト置換であると考えられる。

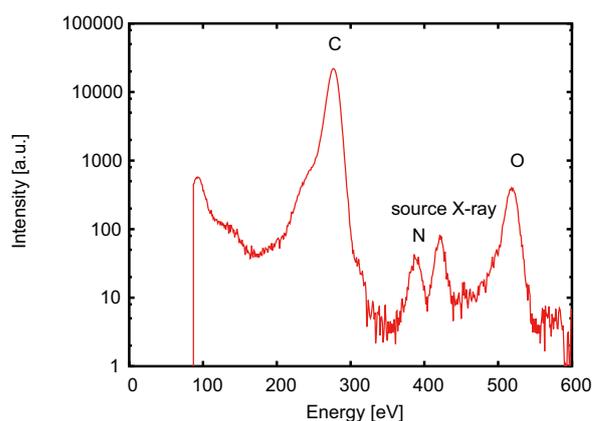


Figure 6 Fluorescent X-ray spectrum of SiC:N (300 ppm).

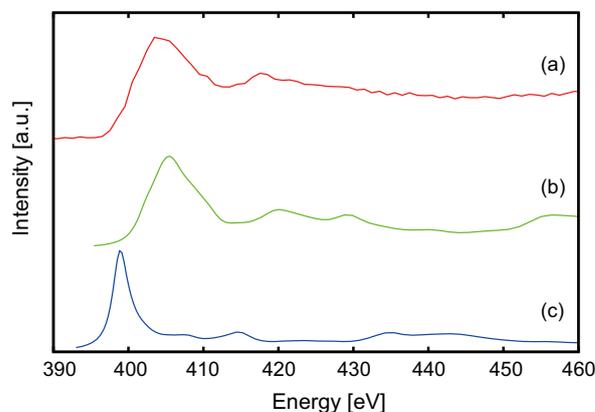


Figure 7 Partial fluorescence yield N-edge spectrum of SiC:N (300 ppm) (a). Ab initio multiple scattering calculations for N K-edge absorption edge of N replaced to each site of C sites (b) and Si sites (c) in SiC(4H).

4. まとめ

バルク中の微量軽元素の XAFS スペクトル測定を実現するため、100 素子 STJ 検出器アレイを備えた軟 X 線領域を対象とした超伝導蛍光収量 X 線吸収微細構造分析装置を開発した。100 素子 STJ アレイ検出器を用いることで、エネルギー分解能 12 eV FWHM@392 eV、計数率は 500 kcps を実現した。この装置を用いて 300 ppm の窒素を含む SiC の窒素吸収端スペクトル計測に成功し結合状態を評価できた。また、本装置は軽元素の K 線のみならず、遷移金属の L 線の分光にも有効である。本装置は PF の複数のビームラインで利用でき、ナノテクノロジープラットフォーム事業微細構造解析プラットフォームの登録装置としてユーザーに公開されている [20]。

謝辞

本研究は筆者が所属するグループの各位の様々な協力のもとで実施された。ビームラインの制御に関しては、永谷康子氏、雨宮健太先生に便宜を図っていただいた。KEK-PF 共同利用実験課題番号は、2007G678, 2009G686, 2011G678 である。本研究の一部は、文部科学省原子力試験研究費とナノテクノロジープラットフォーム事業の支援により実施された。

参考文献

- [1] B. Sadoulet, AIP Conf. Ser. **1185**, 785 (2009)
- [2] M. Ohkubo, AIP Conf. Ser. **1185**, 381 (2009)
- [3] J. B. le Grand, C. A. Mears, L. J. Hiller, M. Frank, S. E. Labov, H. Netel, D. Chow, S. Friedrich, M. A. Lindeman, A. T. Barfknecht, Appl. Phys. Lett. **73**, 1295 (1998)
- [4] P. Fons, H. Tampo, A. V. Kolobov, M. Ohkubo, S. Niki, J. Tominaga, R. Carboni, F. Boscherini, S. Friedrich, Phys. Rev. Lett. **96**, 045504 (2006)
- [5] Y.E. Chen, M. Ukibe, A. Kushino, M. Ohkubo, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **559**, 536 (2006)
- [6] Y. Chen, M. Ukibe, A. Kurokawa, T. Fujimoto, M. Ohkubo, Physica C **468**, 2004 (2008)
- [7] M. Ukibe, Y. Chen, Y. Shimizugawa, Y. Kobayashi, A. Kurokawa, M. Ohkubo, J. Low Temp. Phys. **151**, 316 (2008)
- [8] S. Shiki, N. Zen, M. Ukibe, M. Ohkubo, AIP Conf. Ser. **1185**, 409 (2009)
- [9] M. Ukibe, A. Kurokawa, M. Ohkubo, IEEE Trans. Appl. Supercond. **19**, 140 (2009)
- [10] M. Ukibe, S. Shiki, Y. Kitajima, M. Ohkubo, X-Ray Spectrometry **40**, 297 (2011)
- [11] S. Shiki, M. Ukibe, N. Matsubayashi, N. Zen, M. Koike, Y. Kitajima, M. Ohkubo, J. Low Temp. Phys, submitted
- [12] M. Ukibe, S. Shiki, Y. Kitajima, M. Ohkubo, Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 010115(2012)
- [13] S. Shiki, M. Ukibe, Y. Kitajima, M. Ohkubo, J. Low Temp. Phys. **167**, 748 (2012)
- [14] S. Shiki, M. Ukibe, R. Maeda, M. Ohkubo, Y. Sato, S. Tomita, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **595**, 391 (2008)
- [15] J. Nordgren, G. Bray, S. Cramm, R. Nyholm, J. E. Rubensson, N. Wassdahl, Rev. Sci. Instrum. **60**, 1690 (1989)
- [16] S. Shiki, N. Zen, N. Matsubayashi, M. Koike, M. Ukibe, Y. Kitajima, S. Nagamachi, M. Ohkubo, Progress in Supercond. **14**, 99 (2012)
- [17] D.M. Schlosser, P. Lechner, G. Lutz, A. Niculae, H. Soltau, L. Strüder, R. Eckhardt, K. Hermenau, G. Schaller, F. Schopper, O. Jaritschin, A. Liebel, A. Simsek, C. Fiorini, A. Longoni, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **624**, 270 (2010)
- [18] M. Ohkubo, S. Shiki, M. Ukibe, N. Matsubayashi, Y. Kitajima, S. Nagamachi, Scientific Reports **2**, 831 (2012)
- [19] T. Kimoto, Phys. Stat. Sol. A **162**, 263 (1997).
- [20] <http://unit.aist.go.jp/riif/openi/nanotech/index.html>
(原稿受付日：2013 年 9 月 26 日)

著者紹介

志岐成友 Shigetomo SHIKI



産業技術総合研究所 主任研究員
〒305-8568 茨城県つくば市梅園
TEL: 029-861-3414
FAX: 029-861-5881
e-mail: s-shiki@aist.go.jp

略歴：2013 年 年産産業技術総合研究所

主任研究員。

博士（工学）。

最近の研究：極低温実装技術

趣味：自転車旅行、紅茶

浮辺雅宏 Masahiro UKIBE



産業技術総合研究所 主任研究員
〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1
TEL: 029-861-5668
FAX: 029-861-5881
e-mail: ukibe-m@aist.go.jp

略歴：2007 年産産業技術総合研究所計測

フロンティア研究部門 主任研究員。博士（工学）。

最近の研究：超電導デバイスを用いた計測機器の開発。

趣味：サッカー鑑賞。読書（SF）。

松林信行 Nobuyuki MATSUBAYASHI



産業技術総合研究所 研究主幹
〒305-8568 茨城県つくば市梅園
TEL: 029-861-9373
FAX: 029-861-5881
e-mail: n-matsubayashi@aist.go.jp

略歴：1986 年大阪大学理学研究科博士

課程終了，1986年通商産業省工業技術院化学技術研究所
(現 独立行政法人 産業技術総合研究所)
博士(理学)。
最近の研究：X線吸収分光解析
趣味：スクエアダンス

小池正記 Masaki KOIKE



産業技術総合研究所 研究グループ長
〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1
TEL: 029-861-5671
FAX: 029-861-5881
e-mail: m-koike@aist.go.jp
略歴：2004年産業技術総合研究所計測

フロンティア研究部門。工学博士。
最近の研究：放射線利用・分光計測
趣味：日帰り温泉めぐり。

北島義典 Yoshinori KITAJIMA

物質構造科学研究所 放射光科学研究施設 講師
〒305-0801 茨城県つくば市大穂
TEL: 029-864-5645
FAX: 029-864-2801

e-mail: yoshinori.kitajima@kek.jp

略歴：1988年東京大学大学院理学系研究科博士課程中退，
高エネルギー物理学研究所助手，2012年高エネルギー加
速器研究機構物質構造科学研究所講師。
最近の研究：放射光軟X線分光法(光学系・計測系)およ
び放射光軟X線を利用した固体や表面の構造及び電子状態
の研究。

大久保雅隆 Masataka OHKUBO



産業技術総合研究所
〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1
TEL: 029-861-5685
e-mail: m.ohkubo@aist.go.jp
略歴：2011年 産業技術総合研究所計
測フロンティア研究部門 部門長。博士

(工学)。
最近の研究：超伝導検出器の分析機器への応用。
趣味：テニス。MTB。

擬1次元分子性結晶 (EDO-TTF)₂PF₆ における光誘起相転移の理論的解明

岩野薫¹, 下位幸弘²

¹高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所, ²産業技術総合研究所ナノシステム研究部門

Theory for Photoinduced Phase Transition in Quasi-One-Dimensional Molecular Solid (EDO-TTF)₂PF₆

Kaoru IWANO¹, Yukihiro SHIMO²

¹Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
²Nanosystem Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract

光によって物質の相をマクロスコピックに変化させる「光誘起相転移」が近年注目を集めている。そのような現象を理論的に明らかにすることがこれまで試みられてきたが、いずれもいわゆるモデル計算に基づいており、物質の特性や複雑さの取り扱いにおいて信頼性が十分でなかった。これに対して筆者等は「第一原理的固体光物性」というアプローチを近年提唱しており、今回具体例として擬1次元分子性結晶 (EDO-TTF)₂PF₆ における低温相電荷秩序状態からの光融解という現象を特に初期過程に注目して扱ったので、それをまとめて報告するとともに放射光による今後の研究への期待を述べる。

1. はじめに

1-1. 光誘起相転移とは

最近、「光誘起相転移」という言葉を比較的頻繁に耳にするようになった。その研究の始まりの頃から携わっている筆者には嬉しい限りだが、一方で近年のめざましい実験的研究の発展を目の当たりにすると理論側の新しい手法や概念の開拓の必要性を痛感する。概念的な事についてはまた機会がある時に述べたいが、本稿では特に手法的な事に絞って最近の筆者等の成果を中心に説明したい。

まず、具体的な話に入る前に、あまり馴染みのない方のために「光誘起相転移とは何か？」について答える必要があるだろう。実のところ、研究者によって少しずつ意味合いが違うが、おそらく共通するところは「光照射によって物質の状態がマクロスコピックに変化する」という事である。もちろん、それは「溶けた」とか「壊れた」という意味ではなく、相として意味のある別の状態に変化した、という事を念頭に置いている。一方、それはいわゆる色素分子系におけるフォトクロミズム (photochromism) とも異なる。なぜなら、後者においては個々の分子が光励起によってほぼ独立に構造変化をし、色が変わったからであり、たとえ全体の色が変わったように見えてもそれは個々の変化の蓄積に過ぎないからである (つまり、そこには「相」と呼べるものがない)。対照的に光誘起相転移においては極限的には1光子の吸収でもそれを元に空間的に大きなサイズの変化が起きることが可能であり、それは基底状態とは異なる「隠された」相に向かって電子や原子配置が一気に変化する事を意味するし、もっと突き詰めて言えば、原子同士、電子同士、さらには原子と電子が互いに強く相互

作用し合い、いわばドミノ倒し的な現象が起きていることを意味する。

1-2. (EDO-TTF)₂PF₆

少し抽象的になりすぎたので、本稿の具体的な研究対象、擬1次元分子性結晶 (EDO-TTF)₂PF₆ に話題を移そう。この物質は、ethylenedioxy-tetrathiafulvalene (EDO-TTF) 分子が1次元的に積み重なった構造をとり、対イオン (PF₆⁻) から EDO-TTF あたり平均で 0.5 個のホール (正孔) が電荷移動する。この系は Fig. 1 右に示すように2つの相を持ち、右上が絶縁 (電荷秩序) 状態である低温相、右下が金属状態である高温相である [1]。電荷秩序状態とは電子の電荷自由度が秩序化して配列したものであり、金属酸化物でも見られる状態である。ただし、後者においては原子単位で

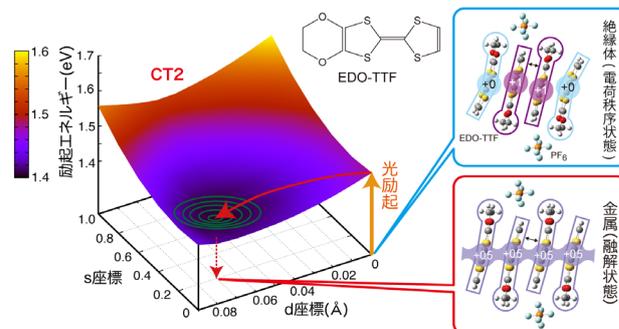


Figure 1 Two thermal equilibrium phases of (EDO-TTF)₂PF₆ (left) and the relaxation path predicted to occur after the photoexcitation to CT2 (right).

秩序化するのに対し、分子性結晶では分子単位で秩序化する。すなわち、ホールは各分子に一樣に分布するのではなく、右上のように1次元方向に4量体を形成した4個のEDO-TTF分子に0個、1個、1個、0個、というようにホールが局在している。これにより、系は絶縁体になるとともに、分子の価数に応じて各分子内に分子変形が生じている。なお、このようなタイプの電荷配置(0110型)はかなり特異であり、電荷間の斥力相互作用により(0101)型になるのが通常である。特徴的な4量体構造と相まってこの系の基底状態はそれ自体このように興味深い。一方、右下に示される高温相ではこのような4量体構造は解消しており、また電子状態もすべてのEDO-TTF分子が平均価数(+0.5価)を取り金属状態に相応しい状況になっている。

このような系において光励起の結果どのような変化が起きるかを最初に発見したのはChollet等であった[2]。彼らの結果によると低温相に光を照射すると比較的短い時間(100ピコ秒程度)内に可視光学スペクトルに大きな変化が現れ、それは変化の形状の吟味(低温相と高温相のスペクトルの比較)から金属状態への光誘起相転移と解釈された。この解釈はその後同じグループによって少し修正を受け、直接金属状態へ転移というよりはもっと時間の早い段階で(光励起後0.1ピコ秒程度)で別の電荷秩序状態((0101)型)を経由していることが示唆されたが[3]、いずれにしても元々の電荷秩序状態が大域的に融解して新しい状態が出来る事には間違いない。我々はこのような変化の起きる原動力に興味があり、それを探るべく理論計算を行いFig. 1左図のような結果を得たので、それについて以下順々にお話ししたい。

2. 「自己無撞着環境場」

まずこのような固体中の光励起緩和の問題を扱う場合は一定の信頼性がある光励起状態の計算手法が必要なことは容易に想像出来ると思う。まずその点については、我々はバンド計算でよく知られた密度汎関数理論(DFT)に時間依存性を持たせるよう拡張した時間依存密度汎関数法(TD-DFT)[4]を用いる。この手法は本当の意味での実時間発展も扱うことが出来、近い将来の光誘起相転移への応用も期待されるが、今回はむしろ励起状態計算という目的で用いる。ひょっとしたら「時間依存と励起状態とどういう関係?」と疑問を持たれる方もおられるかも知れないが、理論的には励起状態というのは電子系の1種の「振動」であり、その基準振動が個々の状態に相当する。ただし、そのような記述(広い意味でのRPA計算)にも一定の限界があり、例えばいわゆる強相関電子系に直接は適用出来ない。しかしながら、光励起状態として最も基礎的な励起子状態などを扱うことが出来、有用性が高い。また、そもそもモデル計算とは異なりDFT法は第一原理計算に基づいているので、基底・光励起状態両方の原子配置依存性などを詳しく調べられるという利点は複雑な分子内および分子間構造を有する分子性結晶に特に有効と考える。

次に、取り扱う系の形態の問題がある。対象が固体なの

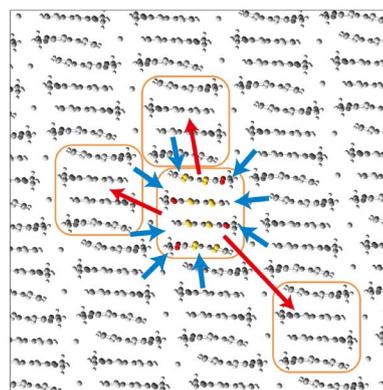


Figure 2 Schematic picture showing the system cluster and its self-consistent environment. The blue arrows means that the environment works as a potential source for the cluster and the red arrows means that the valencies of the cluster are "copied" to the environment to fulfill the self-consistency.

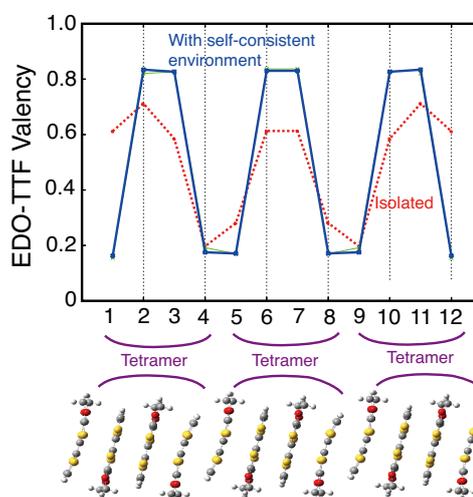


Figure 3 Patterns of the molecular valencies. The blue (red) one corresponds to that calculated with (without) the environment. K. Iwano and Y. Shimoi, "Large electric-potential bias in an EDO-TTF tetramer as a major mechanism of charge ordering observed in its PF₆ salt: A density functional theory study", *Physical Review B* 77, 075120 (2008). Copyright 2008 by the American Physical Society.

で理想的には並進対称性がある周期的境界条件が好ましいが、その場合通常だとユニットセルを計算のセルとして計算すれば済む。しかしながら、今回のような構造変化を扱う場合はその変化までも周期的に並べいわゆる「スーパーセル」を作る必要がある。そのようなやり方は将来的には視野に入ってくると期待されるが現状では計算機パワーの問題で難しい。そこで、有限個の分子の集まりであるクラスターを用いて計算することを考えた。その場合問題となるのは、真空中に剥き出しのクラスターでは固体の中の環境と随分異なり結果として採用出来ないということである。そこでFig. 2にあるように、例えば中央4量体の計算をする際に周りをアニオン(PF₆)も含めた点電荷で囲み、擬似的に固体環境をシミュレートすることを考えた。ここで、基底状態の場合、周りも自分(4量体)と同じであるので、各点電荷の価数は中央4量体を量子力学的に計算して求め

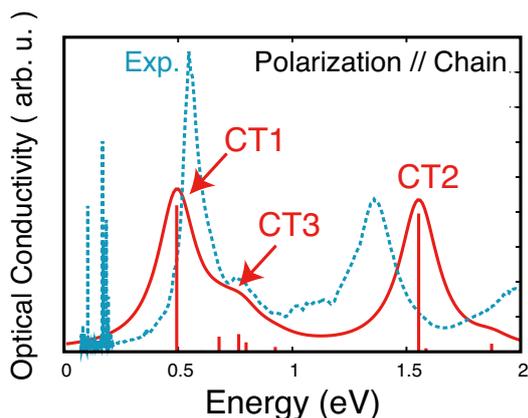


Figure 4 Calculated spectrum (red solid curve) and the experimentally observed spectrum (blue dotted curve). K. Iwano and Y. Shimoi, "Large electric-potential bias in an EDO-TTF tetramer as a major mechanism of charge ordering observed in its PF₆ salt: A density functional theory study", *Physical Review B* 77, 075120 (2008). Copyright 2008 by the American Physical Society.

たものと一致させる。このような自己無撞着性は繰り返し法によって価数にして5桁程度の高い精度で実現されており、このようなアプローチを「自己無撞着環境場」と名付けている [5]。

Fig. 3に4量体3個（計12分子）の系に対してそのような手法で求めた分子価数分布を青線で示す。なお、ここで原子配置はX線構造解析で求められたものを使った。自己無撞着場を用いない孤立系の場合（赤線）と対照的にクラスターの端での乱れや全体的な不規則性が無くなり、予想される(0110)型価数分布が再現されている。特に定量的にも hole-rich および hole-poor なサイトでの価数は、それぞれ約 +0.8, +0.2 と計算され、最大エントロピー法を用いたX線回折実験の結果とも良く一致し、全体的に本手法の有効性を示している。なお、このような電荷秩序を与えるメカニズムは幾つか複合しているものの、最も支配的な要因は4量体内に発生した静電ポテンシャル、言い換えれば、長距離クーロン相互作用であると考えられる。

以上は基底状態における求められた電子状態の信頼性を示しているが、光励起状態も十分信頼出来るものでないといけない。一般的にはそれを細かく確認するというのは難しいが、我々は「可視および近赤外領域の光学伝導度スペクトル形状が十分特徴を捉えて再現出来ているかどうか？」を overall な判断基準にしている。Fig. 4に Fig. 3でも用いた4量体3個の系に対して計算された光学伝導度スペクトル（赤線）を測定結果（青線）とともに示す [5]。もちろん細かい違いはあるが全体的に特徴を捉えていると考えている。特に CT1 ~ CT3 と名付けられた3つの主要な電荷移動 (CT) 吸収帯が再現されており、この事は大変重要であると思われる。なお、測定結果には 1 eV 程度の所に微弱な吸収帯があるように見えるが、類似物質の (EDO-TTF)₂AsF₆ においてはこの部分は確認出来ない [6]、これはクラマースクロニッヒ変換を行う際のノイズの可能性があると思われる。

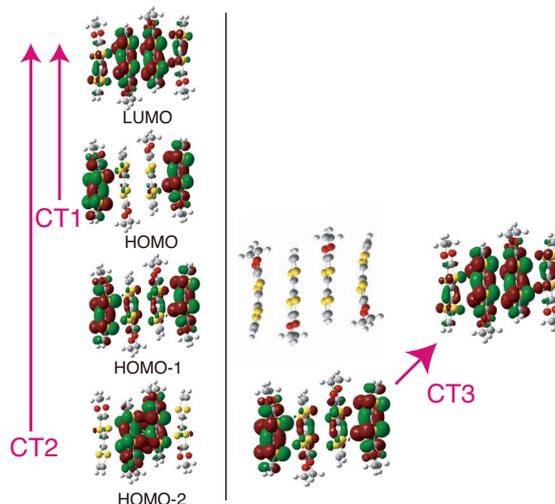


Figure 5 Three principal optical transitions. The CT1 and CT2 occur within the tetramer, while the CT3 is an inter-tetramer transition.

一方、スペクトル幅については、まず、計算においては均一幅を仮定しており、その理由で測定結果に見られるピークごとに幅の違いを再現出来ないのは当然である。むしろ興味深いのは、この幅の違い、特に「CT1のシャープな形状とCT2の幅広い形状の違いが何を物語っているか？」である。我々はこの事はこれらの励起状態の本性と直接関係していると考えている。すなわち、Fig. 5に示されるようにCT1は4量体の外側2分子から内側2分子への遷移であるのに対し、CT2は内側2分子間結合軌道から反結合軌道への遷移である。従って、CT1の方が相対的に空間的に広がった性質を持っており、それが motional narrowing の機構を通してスペクトルの先鋭化につながっている解釈される。

本節の最後のコメントとして、以上はすべて低温相構造についてであったが、高温相構造についても同様の手法による計算を行い、その場合はモデル計算の援用のもと基本的には高温相の性質の再現に成功している [7]。

3. 光誘起緩和の計算結果

ここまでの研究で本手法を用いて基底・励起状態が十分信頼性を持って記述出来ることが分かったが、しかし、光励起緩和を扱うためにはそれだけではまだ十分とは言えない。実際、第2章で触れたクラスターに対して基底状態において構造最適化を行うとクラスターは壊れてしまう。これの主たる原因は、例えば周りの点電荷がマイナスに帯電している場合、クラスター内の水素原子（プラスの価数になっていることが多い）がそこに吸引されてしまうなどの振る舞いである。我々は光励起されて初めて生じる不安定性を議論したいのであるからこのままでは実用にならない。これを防ぐにはクラスター周りの環境のうち、とくにクラスターに近い部分にいわゆるレナードジョーンズポテンシャルを原子単位で加えれば良く、実際そのようにしたところ、後述のように多少のズレはあるものの、ほぼX線

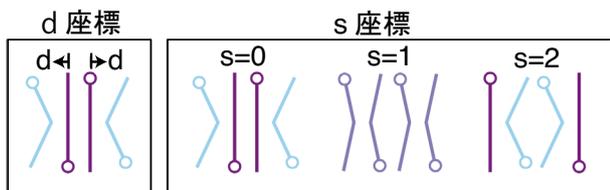


Figure 6 Schematic picture of the two assumed deformation modes, s and d.

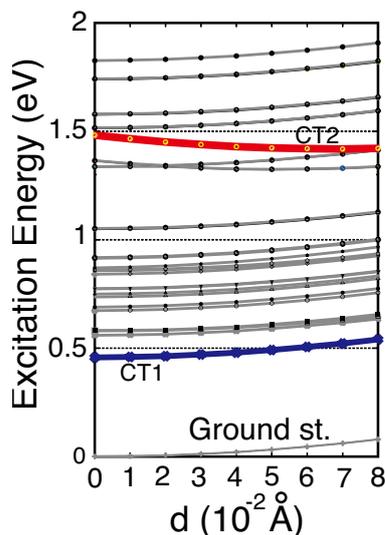


Figure 7 Adiabatic potential curves as functions of the coordinate d. K. Iwano and Y. Shimoi, "Revealing the Photorelaxation Mechanism in a Molecular Solid Using Density-Functional Theory", Physical Review Letter 110, 116401 (2013). Copyright 2013 by the American Physical Society.

構造解析で決定された構造を維持出来ることが分かった [8]。

また、より詳しくクラスターの安定性を調べるために振動計算も行った。詳細は省くが特に C=C 伸縮振動について赤外およびラマン分光を通して詳細な解析が行われているので [6], それらと比較をしたところかなり良い一致が得られた [8]。なお、クラスターあるいは結晶中では、たとえ分子内振動であっても分子間の相互作用（電子の分子間ホッピングなど）を通じてその振動数は変調を受ける。孤立分子の振動解析は広く行われているが、分子集団としての解析は限られている。その意味でも今回の成果は意義があると考えている。

さて、以上で準備はほぼ整ったので、いよいよ励起緩和について話を進める。まず、計算の仕方としては、引き続き 4 量体 3 個の系 (+ 自己無撞着環境) を用い、その中央の 4 量体のみに対して構造変化を許した。特におおその様子を把握するために、Fig. 6 の概略図に示されるような 2 つの変形モードを仮定した。まず 1 つは分子の価数変化に伴う形状変化 (bending= 折れ曲がり) を表す「s 座標」であり、s=0, s=1 がそれぞれ低温相、高温相の構造に相当する (s=2 は s=0 とは逆位相の低温相に対応する)。ちなみに高温相構造では弱い 2 量体化が存在し、詳しい説明は省くがその程度も電子相間効果との関係から重要であ

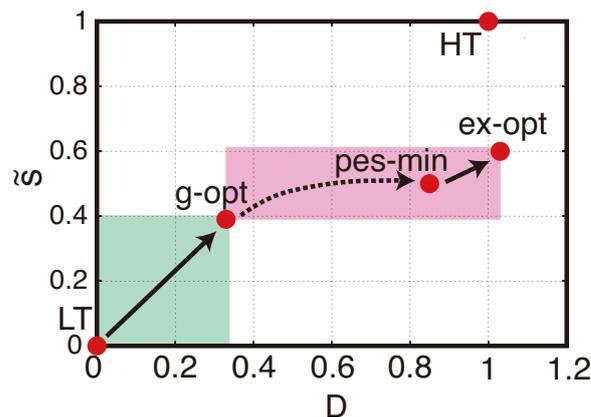


Figure 8 Trajectories found in this work. The abbreviations, LT, g-opt, pes-min, ex-opt, and HT mean the configurations of the low-temperature phase, the state optimized at the ground state, the state at the potential minimum of Fig. 1, the state optimized at the CT2 excited state, and the high-temperature phase, respectively. K. Iwano and Y. Shimoi, "Revealing the Photorelaxation Mechanism in a Molecular Solid Using Density-Functional Theory", Physical Review Letter 110, 116401 (2013). Copyright 2013 by the American Physical Society.

る。もう一方のモードは、4 量体内の内側 2 分子の間の距離が伸びるモードであり、それを「d 座標」と呼ぶことにする。

まず、s 座標を 0 に固定し、d 座標についてのみその影響を見よう。Fig. 7 に約 2 eV までの励起エネルギーの状態に対していわゆる断熱ポテンシャル曲線を描いた [8]。すると、一見して分かるように CT2 状態に対してのみ不安定性が生じ左下がりになり、それ以外の状態は安定のままである。このような CT2 における不安定性は実は理解は容易で、既に説明したように本質的にこの励起は結合軌道から反結合軌道への遷移になるので 2 原子分子の例のように距離が増えるとエネルギーは下がる。次にこの CT2 だけ取り出して s 座標も含めてポテンシャル面を描いたのが冒頭の Fig. 1 の左側の図であり、光励起直後の状態 (s=d=0) から赤矢印で示されるような緩和が起きると解釈される。今回の計算は扱っている計算サイズが限られているので、このような緩和状態は文字通り金属的なドメインが形成されているわけではないが、しかし、低温相に特有の 4 量体構造が融解しかけているという意味でこれはいわば光誘起相転移の前駆現象 (precursor) と言うべき状態である。

以上のようなポテンシャル面解析は扱っている自由度が限られているので、我々は励起状態に対して制限を付けずに構造最適化の計算も試みた。特に CT2 に対する構造最適化の結果を基底状態における構造最適化などの結果も含めてまとめたのが Fig. 8 である [8]。そこでは横軸、縦軸は前述の s, d 座標と意味は似ているが、s, d 座標はパラメータであるのに対し、ここではクラスター内の規格化された実測値を表している。まず、g-opt は低温相 (LT) から出発して得られた基底状態における最適構造に対応する。従って、薄緑色の部分は理想的には全く無い方が良いので今回のクラスターの設定における技術的限界を意味する。

一方、ピンクの部分(励起状態における構造緩和)に対応し、点線がポテンシャル面解析から予想されるトラジェクトリー、実線が構造最適化の結果を意味し、これらの終点は比較的近くに位置する。特に重要と考えられるのは、後者の終端(ex-opt)と高温相構造(HT)との位置関係で、D座標(4量体内側2分子間の平均距離に相当)については両者ほぼ一致するが、 δ (分子の折れ曲がり角度から計算)については0.6程度と必ずしも一致しない。この結果から我々は本系の光誘起相転移の主要なモード(反応座標)がD座標であると解釈する。このような解釈は他の計算結果、例えば、EDO-TTF分子の形状を変化させても分子価数がほとんど変わらない事とも符合し、分子内変形のモードはいわば原因と言うより結果と思われる。

4. 残された問題と今後の展望

最後に残された問題を整理してそれを含めた上で今後の展望を述べたい。まず、現段階では冒頭で触れた(0101)型電荷秩序はまだ計算では再現出来ていない。これについては今回考慮しなかったアニオンの変位が重要なのではないかと考えており、それを計算に取り込むべく検討中である。

また、上記の議論ではCT1励起からの緩和についてあらわに述べなかった。今回の計算ではFig. 7に示されるようにCT1についてはd座標での緩和は確認できず、それはs座標を考慮しても変わらないことも確認済みである。さらに励起状態における構造最適化によっても有意な緩和は確認できなかった。このことは一見不思議で、Fig. 5に示されるようにCT1は分子価数を変化させるのでその意味でいわゆるHolsteinモデル的な電子格子相互作用(例えば、分子内のbendingや伸縮など)を通して励起子の自己束縛的な緩和が起きそうである。このことに関してはまずbendingは電子状態にあまり効いていない事は既に述べた。また振動数解析の結果から分子の伸縮振動に関してはその電子格子相互作用の結合定数の絶対値が大体見積もれ、それによるとやはり緩和がほとんど起きない程度に小さいことが判明した。しかしながら、一方実験事実としてはCT1からでも光誘起相転移することが分かっている[9]。従って、現在の理論にはまだ欠けている要因があることが考えられる。それについては少なくとも二つの可能性を考えており、まず一つは前述のアニオンの変位であり、またもう一つは空間的にもっと広範囲にわたる原子変位のもたらす4量体内のポテンシャル変化である。これらの問題についても喫緊の課題として現在検討中である。

今後の展望として以下のように考えている。まず理論的には、今回用いた手法はその他の系、分子性結晶のみならず、他の様々な系、例えば、金属酸化物や金属錯体などに適用可能であり、今後も様々な系の光誘起相転移に適用していきたい。実験的には今回のような速い時間領域で光誘起相転移を構造変化の観点から放射光によって捉えた例はまだ少なく、その意味で理論と実験が密接に連携した今後の研究の進展に強く期待する次第である。

謝辞

本研究を行うにあたり、結晶構造データは田崎涼子博士、光学伝導度スペクトルは石川忠彦博士にご提供を頂きました。さらに、これらお二方に加え、星野学博士、恩田健准教授、腰原伸也教授にも幅広く有益なご教示を頂きました。また、分子性結晶の振動数解析については山本薫准教授、薬師久弥教授に有益な実験的情報を頂きました。本研究は基盤研究(C)(No. 21540334)によって行われ、かつ、基盤研究(C)(No. 25400334)によっても現在も遂行中です。

引用文献

- [1] A. Ota, H. Yamochi, and G. Saito, *J. Mater. Chem.* **12**, 2600 (2002).
 - [2] M. Chollet, L. Guerin, N. Uchida, S. Fukaya, H. Shimoda, T. Ishikawa, H. Yamochi, G. Saito, R. Tazaki, S. Adachi, and S. Koshihara, *Science* **307**, 86 (2005).
 - [3] K. Onda, S. Ogihara, K. Yonemitsu, N. Maeshima, T. Ishikawa, Y. Okimoto, X. Shao, Y. Nakano, H. Yamochi, G. Saito, S. Koshihara, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 067403 (2008).
 - [4] R. E. Stratmann, G. E. Scuseria, M. J. Frisch, *J. Chem. Phys.* **109**, 8218 (1998).
 - [5] K. Iwano and Y. Shimoi, *Phys. Rev. B* **77**, 075120 (2008).
 - [6] O. Drozdova, K. Yakushi, K. Yamamoto, A. Ota, H. Yamochi, G. Saito, H. Tashiro, and D. B. Tanner, *Phys. Rev. B* **70**, 075107 (2004).
 - [7] K. Iwano and Y. Shimoi, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 103705 (2010).
 - [8] K. Iwano and Y. Shimoi, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 116401 (2013).
 - [9] S. Ogihara, K. Onda, M. Shimizu, T. Ishikawa, Y. Okimoto, X. F. Shao, Y. Nakano, H. Yamochi, G. Saito, and K. Koshihara, *J. Phys.: Conf. Ser.* **148**, 012008 (2009).
- (原稿受付日: 2013年10月1日)

著者紹介

岩野薫 Kaoru IWANO



物質構造科学研究所 研究機関講師
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
TEL: 029-864-5593 FAX: 029-864-5623
e-mail: kaoru.iwano@kek.jp

最近の研究: 光誘起相転移理論。強磁性材料現象論。

趣味: 世界の美味しいもの探し。

下位幸弘 Yukihiko SHIMOI



産業技術総合研究所ナノシステム研究部門
上級主任研究員
〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1
TEL: 029-861-5376 FAX: 029-861-5547
e-mail: y.shimoi@aist.go.jp

最近の研究: 有機物質を中心とした物性理論, 計算科学的研究。

X線結晶構造解析から明らかになる腸球菌 Na⁺ 輸送性 V-ATPase の回転メカニズム

西條慎也¹, 山登一郎², 村田武士^{3,4}

¹ 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所, ² 東京理科大学基礎工学部,

³ 千葉大学大学院理学研究科, ⁴ JST, PRESTO

X-ray crystallography unraveled the rotation mechanism of Na⁺ translocating V-ATPase

Shinya SAIJO¹, Ichiro YAMATO², Takeshi MURATA^{3,4}

¹ Institute of Materials Structure Science, KEK,

² Department of Biological Science and Technology, Tokyo University of Science,

³ Graduate School of Science, Chiba University, ⁴ JST, PRESTO

Abstract

V₁-ATPase は ATP の加水分解のエネルギーを利用して、中心軸である DF 複合体がヘテロ六量体からなる A₃B₃ 複合体の内部で回転する分子モーターである。本研究では、ATP アナログ結合型および非結合型の A₃B₃ 複合体の構造から、ATP の結合により起こる構造変化を明らかにし、さらに、ATP アナログ結合型および非結合型の V₁-ATPase (A₃B₃DF 複合体) の構造から、DF 複合体の結合により起こる A₃B₃ 複合体の構造変化を明らかにし、ATP が分解される部位を推定した。これらの構造が示す非対称性から、V₁-ATPase の回転機構のモデルを提案した。

1. はじめに

細胞の内外のイオン環境を適切に維持することは生物の生存に必須である。イオン環境の恒常性を維持するためには、細胞の生体膜に存在するイオン輸送性タンパク質、その中でもイオン輸送性 ATPase が重要な役割を果たしている。イオン輸送性 ATPase は、細胞におけるエネルギー通貨である ATP (アデノシン三リン酸) の加水分解のエネルギーを利用してイオンを輸送するタンパク質であり、細胞膜に存在する P-ATPase、ミトコンドリア内膜、葉緑体のチラコイド膜に存在する F-ATPase、主に真核細胞のオルガネラに存在する V-ATPase (Vacuolar ATPase, 液胞型 ATPase) が知られている。F-ATPase はプロトンの濃度勾配と膜電位を用いて ATP 合成をおこなう ATP 合成酵素である。一方、V-ATPase はこのエネルギーを利用して、真核生物において酸性オルガネラ膜にてプロトンを送り込み内部の pH を酸性に保っている。V-ATPase は細胞膜にも存在し、細胞間マトリックスの pH を酸性化することで骨吸収やがんの悪化・転移にも関与している [1]。そのため、ヒト V-ATPase は骨粗鬆症やがんなどの多くの疾病にかかわる創薬ターゲットとしても注目されている。

V-ATPase と F-ATPase の構造には類似点が多く、共通の祖先を持つと考えられている。ATP 分解 (合成) 活性を持つ親水性の V₁ 部分あるいは F₁ 部分と、イオンポンプである膜内在性の V₀ 部分あるいは F₀ 部分とが、中心軸と周辺固定子により繋がった共通構造をもつ。触媒機能をもつ V₁-ATPase および F₁-ATPase は回転分子モーターであることが知られている。F₁-ATPase については、X線結晶構

造解析 [2] や 1 分子観察 [3] など数多くの研究がなされてきた。一方、V₁-ATPase に関しては、ATP 合成酵素として機能する高度好熱菌 *Thermus thermophilus* 由来の V-ATPase を用いて研究は先導されてきた。A₃B₃ 複合体の結晶構造 [4] (分解能 2.8 Å) や、V₁-ATPase (A₃B₃DF 複合体) の結晶構造 [5] (分解能 4.5 ~ 4.8 Å), 1 分子観察 [6] から、F₁-ATPase との違いが明らかになってきたが、V₁-ATPase の詳細な回転機構の理解に必要な高分解能での結晶構造の解明が待たれていた。

筆者らは、腸球菌 (*Enterococcus hirae*) から発見された V-ATPase の類縁酵素について、分子生物学的、生化学的、構造生物学的な研究を展開し、この酵素が Na⁺ 輸送性

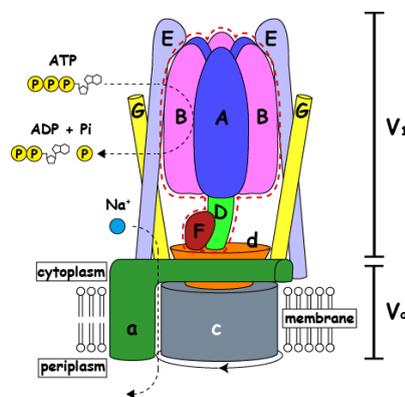


Figure 1 Schematic model of *E. hirae* V-ATPase. V₁-ATPase is indicated with the dotted line (red).

V-ATPaseであることを明らかにした (Fig. 1) [7]。本研究では、V-ATPaseの回転機構の解明を目的として、V₁-ATPaseを構成するサブユニット (A, B, DF) について、発現系、精製系、再構成系を構築し、得られた複合体のX線結晶構造解析 [8] を行った。

2. V₁-ATPaseの発現と結晶の改善

1995年以降、筆者らは腸球菌からV₁-ATPase (A₃B₃DF複合体) を大量発現、精製することに成功し、V₁-ATPaseのX線結晶構造解析を目的として結晶化を進めてきた。結晶は短期間で得ることができたが、試料に中心軸であるDF複合体が解離したタンパク質が混在していたため、放射光を利用して6 Å程度と回折能は低く、結晶構造解析を行うことは不可能であった。次に、大腸菌発現系を用いてAサブユニットおよびBサブユニットをそれぞれ個別に発現、精製をおこない、A₃B₃複合体を再構成することに成功したが [9]、結晶化スクリーニングに必要な大量調

製を行うことが困難であった。最終的に大腸菌無細胞タンパク質合成系を用いて共発現させることでA₃B₃複合体の大量調製に成功し、この高純度のタンパク質試料を用いることにより良質の結晶を得ることができた。同様に、大腸菌無細胞タンパク質合成系を用いた共発現によってDF複合体の大量調製をおこない、DF複合体単独での結晶構造解析にも成功した [10]。これらの高純度のA₃B₃複合体とDF複合体からのV₁-ATPase (A₃B₃DF複合体) の再構成条件を表面プラズモン共鳴法を用いて検討した。その結果、安定に精製できる条件 (酸性、Mg²⁺の添加) を見出すことに成功し、この標品を用いることでV₁-ATPaseについても良質の結晶を得ることができた。

3. A₃B₃複合体の構造

ATPやADPなどのヌクレオチドの非存在下で得られたヌクレオチド非結合型A₃B₃複合体の結晶構造を分解能2.8 Åで決定した (PDB ID: 3VR2, Fig. 2a)。触媒サブユ

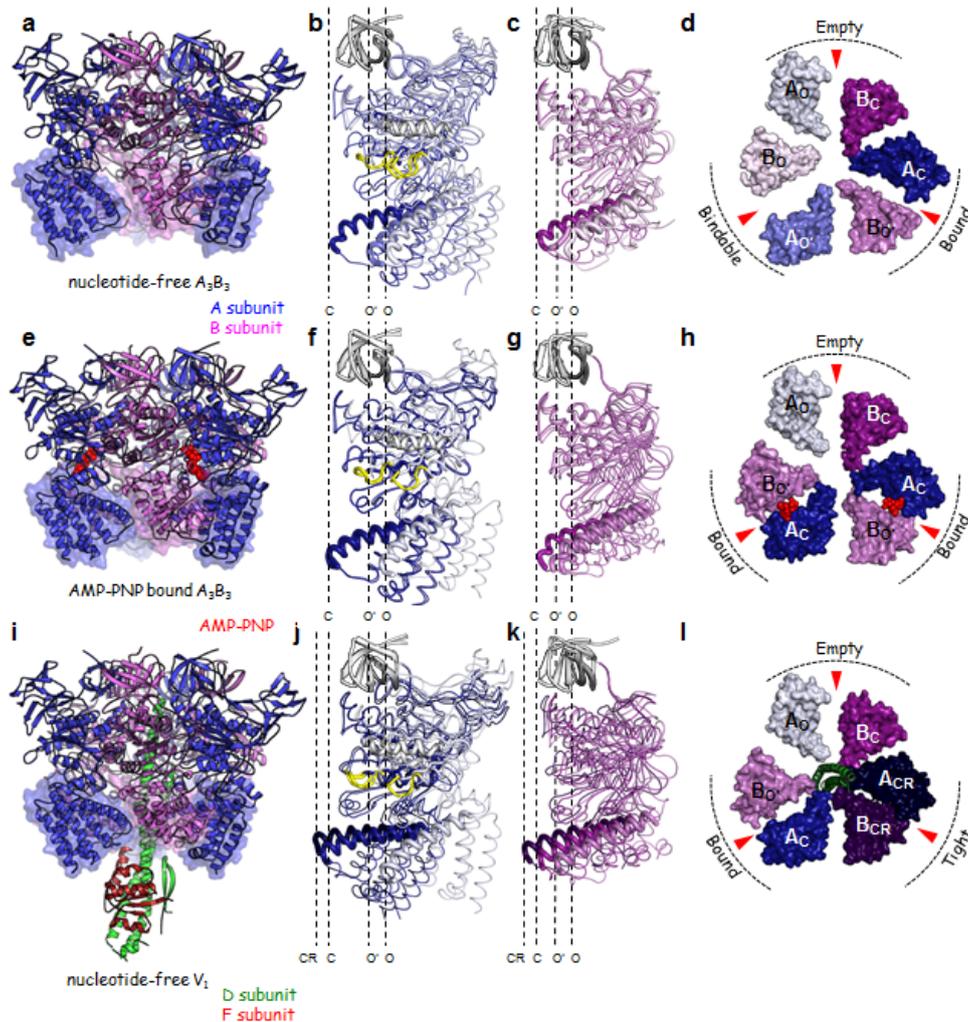


Figure 2 Structure of the A₃B₃ and A₃B₃DF complexes.

a, Side view of the nucleotide-free A₃B₃ structure. **b**, **c**, Superimposed structures at the N-terminal β-barrel (white) of the three structures of A (**b**) and B (**c**) in the nucleotide-free A₃B₃. Open (O and O') and closed (C) conformations of A and B are shown in light and darker colors, respectively. **d**, Top view of the C-terminal domain (shown in a as transparent surface) of the nucleotide-free A₃B₃ from the N-terminal β-barrel side. The triangles indicate the nucleotide-binding sites. **e**–**h**, Structures of the AMP-PNP-bound A₃B₃, and **i**–**l**, Structures of the nucleotide-free A₃B₃DF complex, viewed and colored as in **a**–**d**.

ニットである A サブユニットと非触媒サブユニットである B サブユニットがそれぞれ 3 つ、互い違いに配置したヘテロ六量体リングから構成されていた。どちらのサブユニットも N 末端側にある β バレル、中間にある α/β ドメイン、C 末端側にあるヘリカルドメインから構成されているが、ヘテロ六量体リングの同一の 3 つのサブユニット構造に違いがあることが明らかになった。ヘテロ六量体リングのなかで固定されている N 末端側の β バレルについてそれぞれを重ね合わせたところ、A サブユニットのうち 1 つは A_3B_3 複合体のリングの中心にむかいシフトしている closed 構造 (A_C) をとり、残り 2 つの A サブユニットは互いによく似た open 構造 (A_O および $A_{O'}$) をとっていた。同様に、B サブユニットも 1 つは closed 構造 (B_C) を、2 つは open 構造 (B_O および $B_{O'}$) をとっており、 A_3B_3 複合体は非対称な構造であった。3 箇所あるヌクレオチド結合部位は A_OB_C ペア、 $A_{O'}B_O$ ペア、 $A_CB_{O'}$ ペアのあいだに位置し、A サブユニットの P ループ、A サブユニットのアーム領域の N 末端側に存在する Glu261 および Arg262、B サブユニットの Arg フィンガーとよばれる領域にある Arg350 から構成されているが、ヌクレオチドと結合していないにもかかわらず、これら 3 つのヌクレオチド結合部位も異なるコンホメーションをとっていた。

次に、ATP とどのように結合するかを明らかにするため、ATP アナログである AMP-PNP の存在下で結晶化させたヌクレオチド結合型 A_3B_3 複合体の構造を分解能 3.4 Å で決定した (PDB ID: 3VR3, Fig. 2b)。3 箇所のヌクレオチド結合部位のうち 2 箇所に AMP-PNP が結合していた。AMP-PNP と結合していない AB ペアはヌクレオチド非結合型 A_3B_3 複合体の A_OB_C ペアにもっとも類似したコンホメーションをとっており、AMP-PNP に対する親和性が低いと考えられたため、この A_OB_C ペアを empty 型と名づけた。また、AMP-PNP と結合していた 2 つの AB ペアの構造は互いによく似ており、また、ヌクレオチド非結合型 A_3B_3 複合体の $A_CB_{O'}$ ペアとも、AMP-PNP と相互作用していた側鎖の構造のほかはよく似ていた。この $A_CB_{O'}$ ペアはヌクレオチドを結合している状態の構造であると考えられたので bound 型と名づけた。ヌクレオチド非結合型 A_3B_3 複合体の $A_{O'}B_O$ ペアは、ATP の存在下ではこれと結合し bound 型に構造変化すると考えられた。そこで、この $A_{O'}B_O$ ペアはヌクレオチドと結合できるという意味で bindable 型と名づけた。それでは、この bindable 型はどのようにして ATP を認識、結合し bound 型へと構造を変化させるのだろうか？ ATP の γ リン酸と相互作用する Arg262 と Arg350 との距離は、bindable 型と bound 型とで類似していた。一方、empty 型では Arg262 と Arg350 との距離が近づいており、この距離の違いがヌクレオチドに対する親和性の違いを生んでいる可能性が示唆された。

このように、 A_3B_3 複合体は ATP と結合できない型 (empty 型)、ATP と結合することができる型 (bindable 型)、ATP と結合している型 (bound 型) の 3 つの異なる AB ペアから構成されていることが明らかになった。ATP の存在下で

は bindable 型と bound 型に ATP が結合し 2 つの bound 型ができるが、もともとあった bound 型において ATP が分解されると、bound 型は empty 型に、empty 型は bindable 型に変化して A_3B_3 複合体ははじめの構造にもどると考えられた。つまり、もとの A_3B_3 複合体の構造から 120 度回転させた構造にずれていくことになる。以上の考察から、 V_1 -ATPase が ATP のエネルギーを使って一方向に回転するしくみを、 A_3B_3 複合体の非対称構造から理解することができた。

4. V_1 -ATPase 複合体の構造

ヌクレオチド非結合型の V_1 -ATPase (A_3B_3DF 複合体) の結晶構造を分解能 2.2 Å で決定した (PDB ID: 3VR4, Fig. 2c)。 A_3B_3 複合体と同様に、非対称な六量体を形成する A サブユニットと B サブユニットの中心の空洞部分に、中心軸である D サブユニットと F サブユニットが挿入された構造をとっていた。D サブユニットは DF 複合体のみの結晶構造 [10] よりもまっすぐな構造で、六量体の内部に挿入されているコイルドコイル構造の α ヘリックスは A_3B_3 複合体の内部にある多くの残基と相互作用していた。 V_1 -ATPase のもつ ATPase 活性を促進させるのに重要な D サブユニットの短い β ヘアピンと F サブユニットの C 末端領域は、B サブユニットの C 末端ドメインと相互作用していた。

ヌクレオチド非結合型の A_3B_3 複合体と V_1 -ATPase (A_3B_3DF 複合体) の立体構造を比較することにより、DF 複合体との相互作用によりひき起こされる構造変化を理解することができた。ヌクレオチド非結合型 A_3B_3DF 複合体には、1 つの empty 型 (A_OB_C ペア) と 1 つの bound 型 ($A_CB_{O'}$ ペア) が存在していた。しかしながら、empty 型どうしの位置を基準とした場合、ヌクレオチド非結合型 A_3B_3 複合体の bindable 型は A_3B_3DF 複合体ではヌクレオチドがなくても bound 型に変化していた。この構造変化はヌクレオチド結合型 A_3B_3 複合体において AMP-PNP との結合により起こった変化と非常によく似ていた。残りの AB ペアは A_3B_3 複合体には存在しない、よりコンパクトなコンホメーションに変化していた。このコンホメーションを closer 構造 (A_{CR} および B_{CR})、この $A_{CR}B_{CR}$ ペアを tight 型と名づけた。ヌクレオチド非結合型 A_3B_3 複合体の bound 型が DF 複合体との相互作用により tight 型へと変化したものと考えられた。

tight 型のヌクレオチド結合部位では B_{CR} の Arg フィンガー (Arg350) がアーム領域の Arg262 に接近していた。この Arg350 の構造変化がヌクレオチドとの結合にどのような影響をあたえているかを知るため、ATP アナログである AMP-PNP と結合したヌクレオチド結合型の V_1 -ATPase (A_3B_3DF 複合体) の構造を分解能 2.7 Å で決定した (PDB ID: 3VR6)。AMP-PNP は bound 型と tight 型の 2 箇所に結合し、empty 型には結合しなかった。ヌクレオチド結合型 A_3B_3 複合体での結果と同様に、empty 型ではヌクレオチドに対する親和性が低いものと考えられた。AMP-PNP の

γ リン酸と Mg^{2+} はヌクレオチド結合型 A_3B_3 複合体と同様に、A サブユニットの Lys238, Thr239, Arg262 と B サブユニットの Arg フィンガー (Arg350) と相互作用していた。ヌクレオチド結合型 V_1 -ATPase の tight 型および bound 型のヌクレオチド結合部位を比較したところ、tight 型において Arg フィンガー (Arg) が γ リン酸に対し 1.6 Å 近づき、 γ リン酸それ自体も Glu261 に対し 0.7 Å 移動していた。Glu261 は出芽酵母の V_1 -ATPase においては ATPase 活性に必須で [11]、 F_1 -ATPase においても γ リン酸の酸素原子と水を介し相互作用している [12]。以上の結果から、DF 複合体との相互作用により起こる Arg フィンガーの動きが ATP 加水分解のきっかけとなることが示唆され、今回、得られたヌクレオチド結合型 V_1 -ATPase の結晶構造は ATP 加水分解待ちの中間状態をとらえているものと考えられた。

5. 回転機構のモデル

本研究で得られた結晶構造をもとに、 V_1 -ATPase の回転機構のモデルを提案する (Fig. 3)。ヌクレオチド結合型 V_1 -ATPase では bound 型と tight 型の 2 箇所に ATP が結合している。tight 型に結合した ATP は Arg フィンガーが γ リン酸に近づいた分解待ちの状態であり、この ATP が加水分解することにより反応はスタートする。ATP が加水分解されると A_3B_3 複合体には定常状態であるヌクレオチド非結合型の構造にもどるような構造変化が促進されると考えられる。つまり、tight 型は empty 型へと構造変化し、ヌクレオチドに対する親和性が低下した結果、ADP とリン酸の遊離が起こる。一方、empty 型は ATP との結合の可能な bindable 型へと構造変化を起こし、 A_3B_3 複合体はヌクレオチド非結合型の状態になる方向へと進む。しかしながら、tight 型と DF 複合体は強く結合しているため、 A_3B_3 複合体の構造変化は抑制されると考えられ、実際には、これらの中間状態に変化すると予想している。つき

に、bindable 型あるいは中間状態の AB ペアと ATP とが結合することにより A_3B_3 複合体はヌクレオチド結合型の構造に変化し、2つの bound 型に ATP が結合し、これにより DF 複合体は回転する。最後に、もともとあった bound 型が DF 複合体との相互作用により tight 型へと構造変化し、Arg フィンガーが γ リン酸に近づいて、はじめの構造から 120 度ずれた構造になる。

6. おわりに

本研究では、腸球菌に由来する V-ATPase について、ヌクレオチド非結合型およびヌクレオチド結合型の A_3B_3 複合体および V_1 -ATPase (A_3B_3 DF 複合体) の結晶構造を明らかにした。

ヌクレオチド非結合型 A_3B_3 複合体の構造自体が非対称性を持ち、その非対称性が回転の方向性を決定していることや、DF 複合体との結合により tight 型への構造変化が引き起こされ ATP 加水分解のトリガーとなることなどが示唆され、 V_1 -ATPase の新しい回転機構のモデルを提案することができた。腸球菌 V-ATPase の知見をもとに、反応中間体の結晶構造解析や分子動力学シミュレーション、1 分子観察などの関連構造解析を進めている。また、創薬ターゲットであるヒト V-ATPase に関する研究も進行中である。

謝辞

本稿で紹介した研究における X 線回折強度データの収集は、高エネルギー加速器研究機構・フォトンファクトリーの BL-1A, NE3A, NW12A および SPring-8 の BL41XU を用いて行われました。また、文部科学省・日本学術振興会科学研究費補助金、ターゲットタンパク研究プログラム、ならびに JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ「ライフサイエンスの革新を目指した構造生命科学と先端的基盤技術」の支援を受けて実施されたものです。ここに謝意を表します。

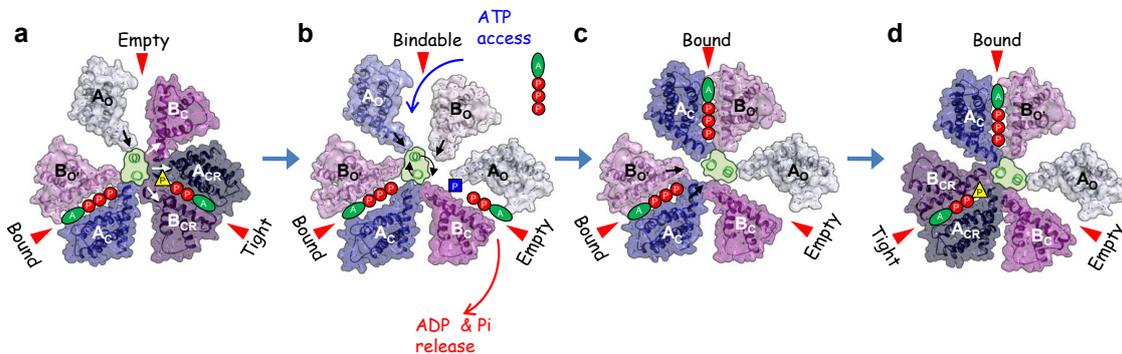


Figure 3 Rotation model of V_1 -ATPase.

Top view of the C-terminal domain viewed as in Fig. 2d, h and i. ATP with triangle “P” in a and d represents an ATP molecule that is committed to hydrolysis. The rectangle “P” in b represents a phosphate molecule after ATP hydrolysis. a, The AMP-PNP-bound V_1 : Two ATPs are bound in the “Bound” and “Tight” forms at first. The reaction is triggered by the ATP hydrolysis in the “Tight” form. b, The nucleotide-free A_3B_3 : By the conversion to ADP and phosphate, the conformation of the A_3B_3 part in V_1 -ATPase may return to nucleotide-free A_3B_3 (ground structure of A_3B_3 complex) in a cooperative manner. The “Tight” form changes to the “Empty” form with the release of ADP and phosphate and the “Empty” form changes to the “Bindable” form. c, The AMP-PNP-bound A_3B_3 : By new ATP binding to the “Bindable” form, the conformation changes to A_3B_3 , which has two “Bound” forms with two ATP, and then the DF rotates. d, The “Bound” form from the beginning changes to the next “Tight” form, induced by DF binding and the V_1 -ATPase returns to the initial state with 120° rotation.

引用文献

- [1] M. Forgac, Nat. Rev. Mol. Cell Biol., **8**, 917 (2007).
- [2] J. P. Abrahams, A. G. Leslie, R. Lutter, and J. E. Walker, Nature, **370**, 621 (1994).
- [3] H. Noji, R. Yasuda, M. Yoshida, K. Kinosita. Nature **386**, 299 (1997).
- [4] M. J. Maher, S. Akimoto, M. Iwata, K. Nagata, Y. Hori, M. Yoshida, S. Yokoyama, S. Iwata, and K. Yokoyama, EMBO J., **28**, 3771 (2009).
- [5] N. Numoto, Y. Hasegawa, K. Takeda, and K. Miki, EMBO Rep., **10**, 1228 (2009).
- [6] H. Imamura, M. Takeda, S. Funamoto, K. Shimabukuro, M. Yoshida, and K. Yokoyama, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **102**, 17929 (2005).
- [7] S. Arai, S. Saijo, K. Suzuki, K. Mizutani, Y. Kakinuma, Y. Ishizuka-Katsura, N. Ohsawa, T. Terada, M. Shirouzu, S. Yokoyama, S. Iwata, I. Yamato, and T. Murata, Nature, **493**, 703 (2013).
- [8] T. Murata, K. Igarashi, Y. Kakinuma, and I. Yamato, J. Biol. Chem., **275**, 13415 (2000).
- [9] S. Arai, I. Yamato, A. Shiokawa, S. Saijo, Y. Kakinuma, Y. Ishizuka-Katsura, M. Toyama, T. Terada, M. Shirouzu, S. Yokoyama, S. Iwata, and T. Murata, Biochem. Biophys. Res. Commun., **390**, 698 (2009).
- [10] S. Saijo, S. Arai, K. M. M. Hossain, I. Yamato, K. Suzuki, Y. Kakinuma, Y. Ishizuka-Katsura, N. Ohsawa, T. Terada, M. Shirouzu, S. Yokoyama, S. Iwata, and T. Murata, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **108**, 19955 (2011).
- [11] Q. Liu, X. H. Leng, P.R. Newman, E. Vasilyeva, P. M. Kane, and M. Forgac, J. Biol. Chem., **272**, 11750 (1997).
- [12] M. W. Bowler, M. G. Montgomery, A. G. W. Leslie, and J. E. Walker, J. Biol. Chem., **282**, 14238 (2007).

(原稿受付日：2013年10月17日)

著者紹介

西條慎也 Shinya SAIJO



物質構造科学研究所 構造生物学研究センター 研究員

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

TEL: 029-864-6105

FAX: 029-864-6105

e-mail: shinya.saijo@kek.jp

略歴：2005年東京工業大学生命理工学研究科博士後期課程修了，理化学研究所リサーチアソシエイト，高輝度光科学研究センター協力研究員，東京理科大学基礎工学部助教を経て2013年より現職。博士（理学）。

最近の研究：タンパク質の放射光X線小角散乱。

山登一郎 Ichiro YAMATO



東京理科大学基礎工学部 教授

〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1

TEL: 03-5876-1717 ex.1902

FAX: 03-5876-1639

e-mail: iyamato@rs.noda.tus.ac.jp

略歴：1977年東京大学大学院薬学系研究科博士課程修了，東京大学理学部助手，スイス・バーゼル大学バイオセンター研究員，東京理科大学基礎工学部助教を経て1995年より現職。薬学博士。
最近の研究：生体エネルギー論，インシリコ生物学。

村田武士 Takeshi MURATA



千葉大学大学院理学研究科 准教授

〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

TEL: 043-290-2794

FAX: 043-290-2794

e-mail: t.murata@faculty.chiba-u.jp

略歴：2000年東京理科大学大学院基礎工学研究科博士課程修了，英国・MRC博士研究員，理化学研究所基礎科学特別研究員，京都大学医学部助教を経て2009年より現職，工学博士。

最近の研究：膜タンパク質の構造機能解析。

安価で高性能なハードディスクドライブ (HDD) 記録媒体の実現可能性～白金フリー酸化物垂直磁気記録材料の薄膜化に世界初成功～

平成 25 年 10 月 15 日

国立大学法人 筑波大学
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
国立大学法人 北海道大学

【本成果のポイント】

1. これまで薄膜化が困難とされていた磁性材料のコバルトフェライトを、量産化可能な手法で高品位な薄膜にする技術を、世界で初めて開発。
2. この薄膜は、強い磁気異方性を持つ垂直磁化膜であることが判明。
3. 垂直磁気記録方式の HDD の記録媒体として現在広く使われている、白金等の貴金属を含む磁性材料の代替可能性を開く。

【概要】

国立大学法人筑波大学（以下「筑波大学」という）数理物質系 新聞智彦助教（現東北大学）、柳原英人准教授、喜多英治教授らのグループは、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（以下「KEK」という）物質構造科学研究所・構造物性研究センター 中尾裕則准教授、国立大学法人北海道大学大学院（以下「北海道大学」という）理学研究院 小池和幸教授らとともに、量産に適した成膜手法であるスパッタリング法を用いて、良質なコバルトフェライト単結晶薄膜を作製することに世界で初めて成功しました。この薄膜について磁気特性および結晶構造の評価を行ったところ、白金等の貴金属を含む磁性材料に匹敵する強い垂直磁気異方性を有することを見出しました。今日、広く使われている HDD の記録媒体には、高記録密度化（大容量化）を実現するため、強い垂直磁気異方性を有する磁性材料として、希少で高価な白金を含む磁性金属合金が用いられています。今回開発したコバルトフェライト薄膜により、貴金属を用いない、高性能な垂直磁気記録方式の HDD の記録媒体を実現できる可能性が示されました。

コバルトフェライトは、比較的入手の容易な元素で構成された酸化物です。この格子をひずませることで、強い垂直磁気異方性が発現することは、従来から現象論的に予想されており、各国の研究グループが良質な薄膜を成膜する方法を検討してきましたが、物性や構造の制御が難しく、実際に強い垂直磁気異方性を実現できた報告はありませんでした。本研究ではコバルトフェライトの成膜方法に関して検討を行い最適化した結果、 14.7 Merg/cm^3 もの大きさ

の垂直磁気異方性の発現を初めて確認しました。この異方性の大きさは、次世代垂直磁気記録材料として利用するのに十分です。

本研究成果は、米国物理学協会が発行する 10 月 14 日付の *アプライドフィジックスレター* 誌にオンライン掲載される予定です。

※なお本成果は、文部科学省の元素戦略プロジェクトによる委託業務として、筑波大学が実施した「複合界面制御による白金族元素フリー機能性磁性材料の開発（研究代表者：喜多英治（筑波大学））」によるものです。

物構研におけるマルチプローブ利用研究のすすめ

～放射光，低速陽電子，中性子，ミュオンを使って新しい世界を見てみよう～

Vol. 30 No.4 から始まった「物構研におけるマルチプローブ利用研究のすすめ」。放射光と他の量子ビームとの違いや，各ビームラインの紹介，利用の手引きをご紹介した第1回目から一歩進み，Vol. 31 No.1 からは各ビームラインを使用して得られた研究成果について，2つのビームラインごとにご紹介しています。具体的な研究プランを描く際に参考になれば幸いです。

研究成果 1 Muon D1: ミュオン物質生命科学実験装置を利用して

ミュオンスピン緩和法で得られる実空間情報～鉄系超伝導体 $\text{CaFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{AsF}$ の例～

竹下聡史¹，門野良典²，平石雅俊²，宮崎正範²，幸田章宏²，松石聡³，細野秀雄^{3,4}

¹ 理化学研究所 放射光科学総合研究センター，² 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

³ 東京工業大学 応用セラミック研究所，⁴ 東京工業大学 元素戦略研究センター

Real Space Information Obtained by Muon Spin Relaxation ~ Example of Iron Based Superconductor $\text{CaFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{AsF}$ ~

Soshi TAKESHITA¹, Ryosuke KADONO², Masatoshi HIRAISHI²,
Masanori MIYAZAKI², Akihiro KODA², Satoshi MATSUISHI³, Hideo HOSONO^{3,4}

¹RIKEN SPring-8 Center, ²Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization,

³Frontiers Research Center, Tokyo Institute of Technology,

⁴Materials Research Center for Element Strategy, Tokyo Institute of Technology

Abstract

実空間情報を得ることが得意であるミュオンスピン緩和 (μSR) 法を，鉄砒素系超伝導体の例を交えてご紹介します。 LaFeAsF に Co をドーピングすることによりキャリアドーピング量をシステムティックに変化させた系において， μSR により特徴的な超伝導の状態を発見しました。また，この超伝導は島状に分布するモデルで説明できることを示しました。

1. はじめに

ミュオンスピン緩和 (μSR) 法は，試料内に打ち込まれたミュオンのサイトにおける (実空間上の) 局所内部磁場をプローブする手法であり，核磁気共鳴や核共鳴散乱に近い実験手法と言えます。さらにこれらの共鳴型の実験手法に比して特徴的なことは，プローブであるミュオンは必ず崩壊し信号を出すため，ミュオンが止まった環境 (すなわち試料) によらず，原理的に検出効率を 100% にすることができます。このメリットを利用することにより，たとえ相共存・相分離した試料であっても，それぞれの体積分率に加えて，各相での局所内部磁場の測定が可能となります。ここでは，このミュオンの特徴を活かした例として， Co ドーピング系鉄砒素系超伝導にみられる大変興味深い超伝導の存在状態についてご紹介したいと思います。

2. 鉄系超伝導

鉄系の高温超伝導が 2008 年に発見されて以来 [1] 活発な研究が進められ，圧力印加や希土類の置換により，超伝導臨界温度 T_c の 50 K 台までの上昇が同年内に達成され [2, 3]，大変注目を浴びたことは記憶に新しいことかと思えます。この鉄系超伝導体の一つである $\text{LaFeAs}(\text{O},\text{F})$ は，

FeAs 層と LaO 層が交互に積層した層状構造をとっており，超伝導は Fe が担っている点が特徴的です (Fig. 1)。母物質は室温で金属的性質を示し，130 K 近傍において構造転移，金属絶縁体転移に加え，磁気転移を示します。この系に対して F ドーピングを行うと，ドーピング量 5% 付近において転移温度の急峻な低下がみられます。さらにドーピング量を増加させていくと超伝導が現れます。その転移温度は 20 K 程度であり， F ドーピング量に大きくは依存しません [1]。

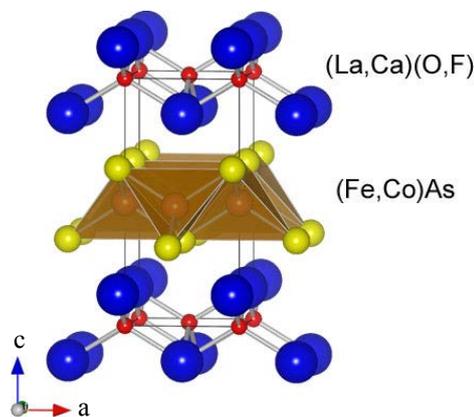


Figure 1 Structure of $\text{LaFeAs}(\text{O},\text{F})$, $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Co})\text{AsF}$.

3. 鉄砒素系超伝導 LaFeAs(O,F) の μ SR

我々の研究グループでは、この鉄砒素系超伝導体において、超伝導ギャップの対称性及び超伝導と磁性の相関について調べるために μ SR 実験を進めておりました [4, 5, 6]。その結果、超伝導ギャップの対称性は、単純な BCS のシングルギャップモデルでは説明できず、マルチギャップ的であることを明らかにしました [5, 6]。

また、本研究で注目している超伝導と磁性についても、超伝導転移温度以下において互いに相関がみられるという興味深い結果を得ていました [4]。Fig. 2 に LaFeAs(O_{1-x}F_x), $x = 0.06$ (多結晶体) における零磁場、縦磁場、及び横磁場 μ SR のタイムスペクトルを示します。超伝導転移温度以上である 30 K の零磁場スペクトルはガウス型の緩和を示していますが、転移温度以下に下げる (2 K) と、ガウス型 (解析より分率は約 75%) に加え指数関数型の緩和を示す成分 (解析より分率は約 15%) が現れます。この低温でガウス型緩和を示す 75% の成分は 5 mT の縦磁場を印加することで容易に内部磁場からデカップルされているため、核スピンの内部磁場を感じている、すなわち常磁性成分であることがわかります。一方で、残り 15% の成分は、弱い縦磁場ではデカップルされないことから、電子スピンの作り出した内部磁場を感じている、すなわち磁性成分であることがわかります。これより、 T_c 以下においては常磁性成分と磁性成分が共存していることが明らかとなりました。さらに横磁場スペクトル (図には横磁場スペクトルの横緩和項、すなわち包絡線を示しています) をみると、零磁場でガウス型の緩和を示していた成分は、磁束格子状態の形成に伴い緩和率が大きくなっており、超伝導を示す相であったことがわかります。この緩和率の増大は、超伝導転移温度以下で発達することが下の解析からわかります。

横磁場スペクトルの解析結果について示します (Fig. 3)。横磁場スペクトルの解析は、超伝導相 (G_S) と磁性相 (G_M) の 2 成分を仮定し次の式で行いました。

$$G_x(t) = \exp\left(-\frac{1}{2}\delta_N^2 t^2\right) [w_1 G_S(t) + (w_2 + w_3) G_M(t)]$$

$$G_S(t) = \exp(-\delta_S^2 t^2) \cos(2\pi f_S t + \varphi)$$

$$G_M(t) = \exp(-\Lambda_m t) \cos(2\pi f_m t + \varphi).$$

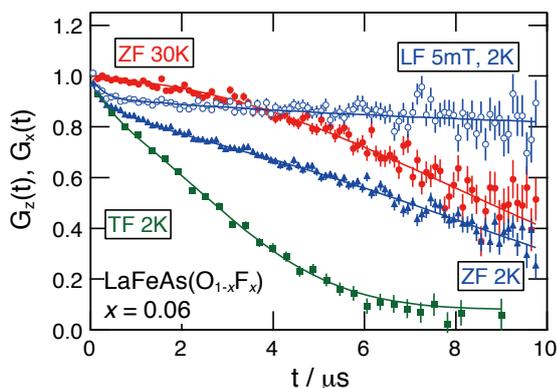


Figure 2 μ SR time spectra of LaFeAs(O_{0.94}F_{0.06}).

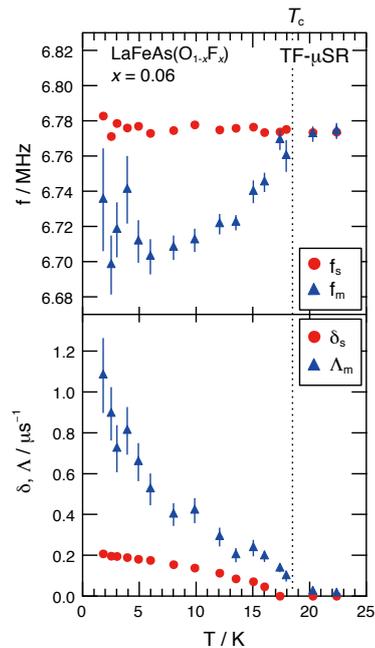


Figure 3 Temperature dependence of obtained parameters.

解析結果には磁性相と超伝導相の成分をともに示しました。なおこの解析において、磁性相と超伝導相の体積分率は零磁場の解析結果とコンシステントです。緩和率の温度依存性を見ると、超伝導相の緩和率 δ_S および磁性相の緩和率 Λ_m ともに $T_c \sim 18$ K 以下で増大していることがわかります。この結果から、超伝導相と磁性相のあいだに何らかの相関があることが示唆されます。

4. Co ドープ系 Ca(Fe,Co)AsF の μ SR

LaFeAs(O,F) において超伝導相と磁性相が相共存しており、かつ互いに相関がありそうであることが示唆されました。これが、ドープ領域全般にわたってユニバーサルなものであるのかどうかを調べるために、Ca(Fe,Co)AsF 系において Co 組成を振った試料 (多結晶体) にて μ SR 実験を行いました [5, 7]。Ca(Fe,Co)AsF 系では Fe²⁺ のサイトが Co³⁺ で置換されるため形式的には電子ドープが行われます。すなわち Co ドープ量 x を振ることにより、キャリア量をコントロールすることができます。

Fig. 4 に典型的な 2 組成の μ SR タイムスペクトルを示します。Fig. 4(a) の試料は組成が $x = 0.075$ であり、超伝導を示しますが、その組成は磁性を示す組成と超伝導を示す組成のほぼ境界領域に位置します。この $x = 0.075$ の組成においても、先に示した Fig. 2 のスペクトルと定性的によく似ており、磁性相と超伝導相が共存している事がわかります。解析より、磁性相の体積分率は約 80% と見積もられています。Fig. 4(b) の試料は $x = 0.150$ であり、ドープ量がさらに進んだ組成になっています。Fig. 4(a) 同様に、タイムスペクトルから磁性相と超伝導相の共存している様子が読み取れますが、解析から磁性相の体積分率は約 30% であり、 $x = 0.075$ の組成よりも減少しています。

次に、組成 x を振ったシリーズにおいて、零・縦磁場の

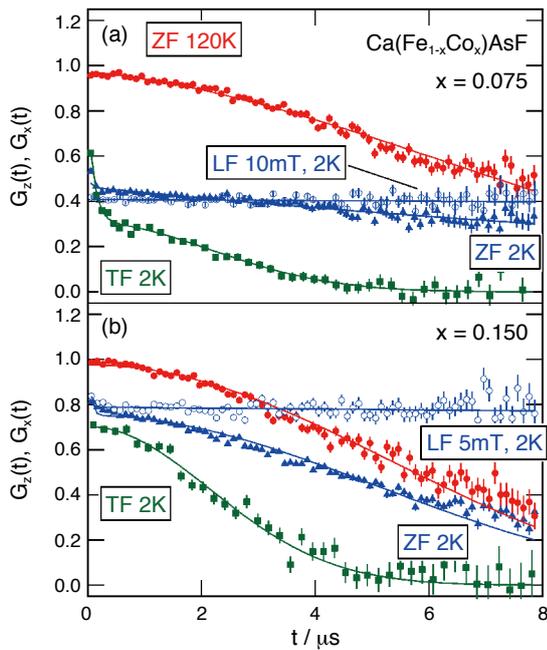


Figure 4 μSR time spectra of Ca(Fe,Co)AsF.

タイムスペクトルについて、次の式で解析を行いました。

$$G_z(t) = [w_1 + w_2 G_m(t)] G_{KT}(\delta_N; t)$$

$$G_m(t) = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \exp(-\Lambda_m t) \cos(2\pi\nu t + \phi).$$

また、横磁場のタイムスペクトルについては、次の式で解析を行いました。

$$G_x(t) = [w_1 e^{-\delta_s^2 t^2} \cos(2\pi f_s t + \phi) + w_2 G_m(t)] e^{-\frac{1}{2} \delta_N^2 t^2}.$$

Fig. 5 に解析結果を示します。組成 $x = 0.075$ 及び 0.150 における超伝導相の超伝導電子密度 $\sigma_s = \sqrt{2} \delta_s$ の温度依存性 (Fig. 5(a)) を見ると、どちらも BCS モデルでは説明ができないことが明確です。また、 0 K に外挿した値は、それぞれ $0.44 \mu\text{s}^{-1}$, $0.45 \mu\text{s}^{-1}$ であり、ほとんど x に依存していないことがわかります。このことから、Ca(Fe,Co)AsF の超伝導電子密度はキャリアドーパ量にほとんど依存しないと考えられます。一般的にはキャリア量が増加すると、(キャリアが超伝導に寄与している場合) 超伝導電子密度も変化すると考えるのが自然ですが、Ca(Fe,Co)AsF の場合は少し特殊なことを考えないと説明が難しいようです。一体、ドーパされたキャリアはどこへ行ってしまったのでしょうか。

そこで、先ほど Fig. 4 のタイムスペクトルを説明した際に触れていた、「超伝導相と磁性相の共存」に着目してみます。磁性相の体積分率がドーパ量 x に依存していることから、零磁場スペクトルから求めた常磁性相と磁性相の体積分率を解析により求めました。この常磁性を示す相は、Fig. 4 でも見て取れますように、横磁場実験から超伝導相であることが確認されています。結果を Fig. 6 に示します。磁性相の体積分率の x 依存性をみますと、ドーパ量の増加とともに $x = 0.05$ 付近より体積分率がほぼ直線的に減少し

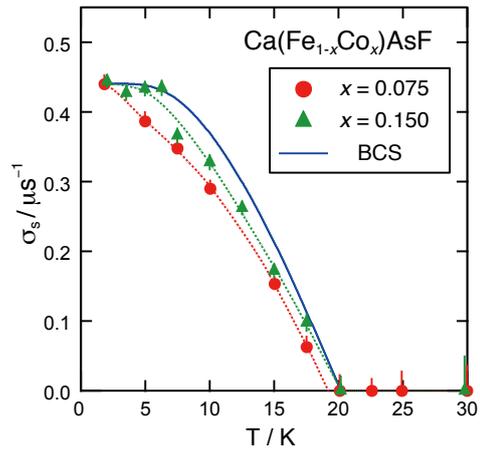


Figure 5 Temperature dependence of superfluid density in Ca(Fe,Co)AsF.

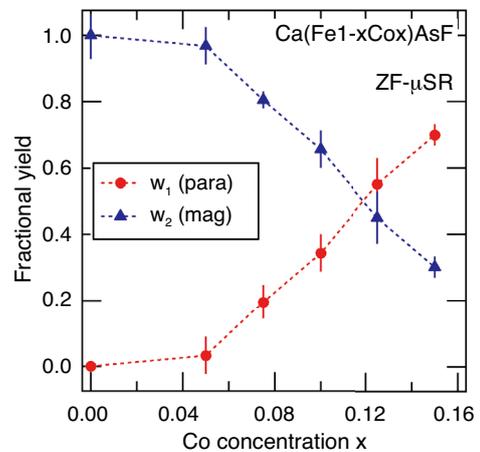


Figure 6 Fractional yield of paramagnetic and magnetic phase.

ていることがわかります。対して、常磁性相の分率は全く逆の傾向を示しています。これらの結果から、Co ドープにより注入されたキャリアは、超伝導電子密度には寄与せず、超伝導相の体積分率を増加させることに寄与していると考えられます。

では、一体どのような状態が実現しているのでしょうか。これを説明する一つのモデルが島状超伝導モデルです。一定の超伝導電子密度を有する小さな超伝導の島が磁性相の中にポツポツと存在している状態です (Fig. 7)。この超伝導の島は、ドーパされた Co 原子の周りに生じているのではないかと考えています。そうすると、Co ドープ量が増加するに従って磁性相の体積分率は減少し、対して超伝導相の体積分率が増加することが説明できます。また、島の超伝導電子密度は一定なため、Co をドーパしても超伝導電子密度がほぼ不変である事も説明できます。

さて、このようなモデルを考えたときに、最もつまらないケースが考えられます。それは、Co が試料内に均質にドーパされず局所的な領域に集まってしまい、Co リッチなクラスターを作ってしまうケースです。しかしこのクラスターモデルは、実験的には、電気伝導性や格子定数が

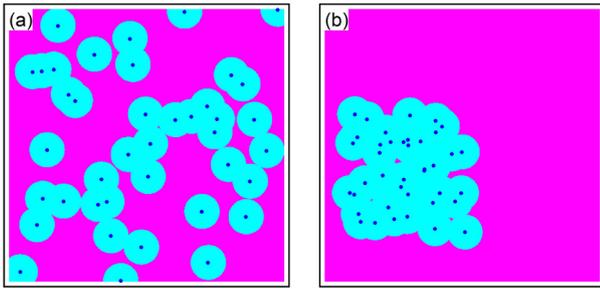


Figure 7 (a) Insular model and (b) Cluster model.

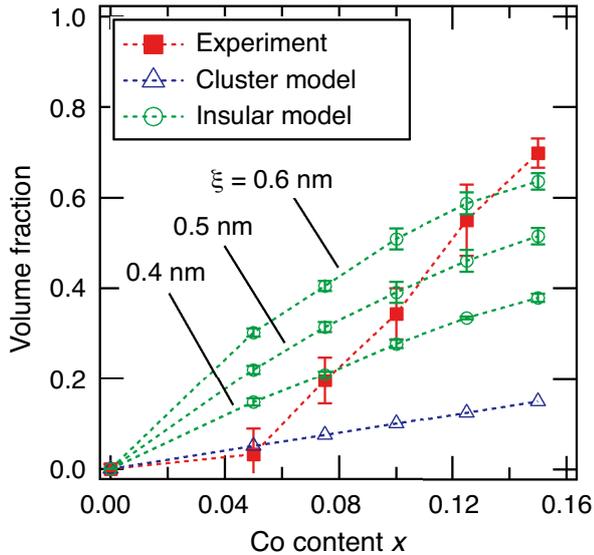


Figure 8 Simulation result of superconducting volume fraction.

Co ドープ量の増加とともに一様に変化していることから、その可能性は低く、また次に示しますシミュレーションの結果から、実験結果を説明できないことが示されます。

上記クラスターモデルの検証を行うために、体積分率のシミュレーションを行いました。シミュレーションは、鉄系超伝導体が層状構造を形成していることから2次元系であるとし、超伝導の島を半径の円形であると仮定し、Co で置換されたサイトをランダムに発生させ、その濃度をドープ量 x で規定しました。結果を Fig. 8 に示します。図中の、四角形、三角形、及び丸形のシンボルは、それぞれ超伝導相の体積分率の実験データ、クラスターモデルのシミュレーション結果、及びいくつかの島状モデルのシミュレーション結果です。結果から明らかなように、クラスターモデルでは、20% 以上の超伝導相体積分率を再現することができません。これは、Co 原子が密に存在し、互いの超伝導の島が重なり合ってしまうため、超伝導の体積分率を稼げないことを意味しています。実際に実験で使用した、数～10 数% 程度の Co ドープ量では、実験結果の数 10% といった大きな体積分率を実現することが不可能であることを示します。一方で島状モデルの場合、島の半径にもよりますが、その半径が 0.4～0.6 nm であれば、実験結果の比較的大きな超伝導相体積分率を再現すること

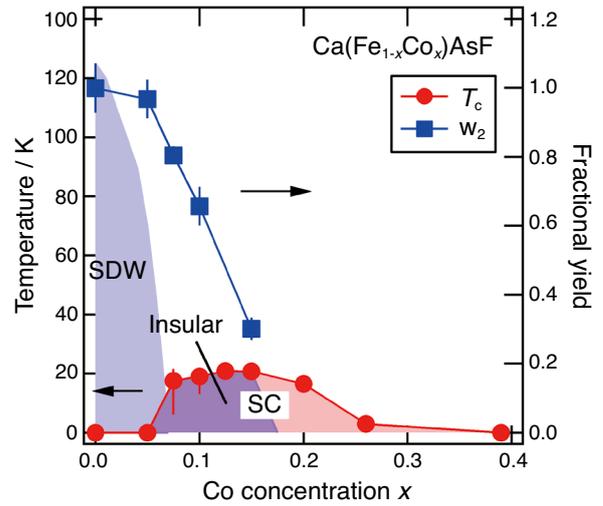


Figure 9 Phase diagram in Ca(Fe,Co)AsF Superconductor.

ができます。

以上の結果から、Ca(Fe,Co)AsF の超伝導は、試料内に均質に存在しているわけではなく、磁性相と超伝導相に相分離した状態であることが、 μ SR 実験を通して明らかとなりました。さらにこの超伝導は磁性相の中に島状に点在していること、Co ドープは超流体密度の増減にはほとんど寄与せず、島の数を増やしていく効果があるという、大変興味深い状態であることが示唆されました。

最後に Fig. 9 に Ca(Fe,Co)AsF 系の μ SR からみられた相図を示して、本解説のまとめに代えさせていただきたいと思えます。

5. あとがき

現在、J-PARC MUSE では超低速ミュオンビームラインの建設が行われております。超低速ビームラインが運用されまると、これまで μ SR 実験では困難であった微量試料や薄膜での実験も可能となり、実験対象となる試料の幅が大きく広がることとなります。試料の制約からこれまで実験をためらっていた方にも、これを機にぜひミュオン実験に挑戦していただけることを願っております。また本稿により、少しでも多くの方がミュオンへの興味を頂いていただけることができましたなら、大変にうれしく思います。

本稿でご紹介した研究は、J-PARC D1 ビームライン (2008A0005)、TRIUMF M15 ビームライン (M1154, M1174) において得られた μ SR データをもとにしています。また、J-PARC MUSE、及び TRIUMF の各施設スタッフに多大なるご尽力をいただきましたこと、加えて KEK ミュオン共同利用実験プログラム (海外施設利用) によりご支援いただきましたこと、ここに深く感謝いたします。

引用文献

- [1] Y. Kamihara *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **130**, 3296 (2008).
- [2] H. Takahashi *et al.*, Nature **453**, 376 (2008).
- [3] X.H. Chen *et al.*, Nature **453**, 761 (2008).
- [4] S. Takeshita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 103703 (2008).

- [5] S. Takeshita *et al.*, New J. of Phys. **11**, 035006 (2009).
[6] M. Hiraishi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 023710 (2009).
[7] S. Takeshita *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 027002 (2009).

著者紹介

竹下聡史 Soshi TAKESHITA

理化学研究所 放射光科学総合研究センター 特別研究員

〒 679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

TEL: 0791-58-2942

FAX: 0791-58-2717

e-mail: soshi@spring8.or.jp

略歴：2006年東京理科大学大学院理工学研究科博士課程修了，2006年高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 ミュオン科学研究系 博士研究員。2009年より現職。博士（理学）。

最近の研究：サブミクロン集光X線を用いた走査型顕微回折法の開発，及び強相関係材料のドメイン観察。

趣味：楽器（ホルン）を磨くこと。

負ミュオンを用いた非破壊元素分析

二宮和彦¹, 久保謙哉², 長友傑³, 河村成肇³, ストラッサー・パトリック³, 下村浩一郎³, 三宅康博³, 髭本亘⁴, 春日井好巳⁴, 坂元眞一⁴, 小林義男⁵, 石田勝彦⁶, 鈴木栄男⁷, 篠原厚¹, 齋藤努⁸

¹大阪大学, ²国際基督教大学, ³高エネルギー加速器研究機構, ⁴日本原子力研究開発機構, ⁵電気通信大学, ⁶理化学研究所, ⁷芝浦工業大学, ⁸国立歴史民俗博物館

Non-destructive Elemental Analysis Using Negative Muon

Kazuhiko NINOMIYA¹, Kenya KUBO², Takashi NAGATOMO³, Naritoshi KAWAMURA³, Patrick STRASSER³, Koichiro SHIMOMURA³, Yasuhiro MIYAKE³, Wataru HIGEMOTO⁴, Yoshimi KASUGAI⁴, Shinichi SAKAMOTO⁴, Yoshio KOBAYASHI⁵, Katsuhiko ISHIDA⁶, Takao SUZUKI⁷, Atsushi SHINOHARA¹, Tsutomu SAITO⁸

¹Graduate School of Science, Osaka University, ²Division of Natural Sciences, International Christian University

³High Energy Accelerator Research Organization (KEK), ⁴Japan Atomic Energy Agency,

⁵The University of Electro-Communications, ⁶RIKEN, ⁷Shibaura Institute of Technology,

⁸National Museum of Japanese History

Abstract

筆者らはこれまで負の電荷をもったミュオンを用いて、ミュオン特性X線測定による元素分析手法の開発を行ってきた。この研究は既にシャットダウンした KEK-MSL での実験, dreamX project (damageless and regioselective elemental analysis with muonic X-rays) から継続して行っているものである [1]。ここ数年 J-PARC の大強度の負ミュオンビームを用いることで、本分析手法の開発において急速な研究進展があった。本分析手法の特徴を、最新の成果とともに本稿で紹介したい。

1. 負ミュオンによる元素分析の原理

現在、物質の元素を定量分析するに当たって、すでに多くの手法が開発されている。例えば多元素同時分析が可能で比較的安価な、しかも高精度の分析手法として、ICP-MS (誘導結合プラズマ質量分析) が普及しているが、測定試料を溶液とする、つまり破壊する必要がある。非破壊分析としては PIXE (粒子励起 X 線分析) や XPS (X 線光電子分光) が知られている。しかしこれらの手法は電子由来の低エネルギーの特性 X 線を測定するため、軽元素の定量が難しく、分析対象が物質の表面に限られている。NAA (中性子放射化分析) や PGA (即発ガンマ線分析) は非破壊分析法として力を発揮している。この手法では中性子捕獲断面積の大きさから一部の元素に対しては高い検出感度を示すが、逆に検出に向かない元素もある。また、分析対象によってはそれが利点であることもあるものの、分析位置の選択性に乏しい。我々は多元素同時でかつ、あらゆる元素に対して感度があり、大きな試料に対して内部も位置選択的に元素分析する方法として、負ミュオンによる元素分析手法の開発を行っている。

負ミュオンは電子の 200 倍の質量を持ち、同じ電荷を持っている素粒子である。負ミュオンを物質中に入射すると、散乱過程により減速され、物質中にある原子に捕らわれて、電子の代わりに負ミュオンがひとつミュオン原子軌道を周回しているミュオン原子が形成される。捕獲された負ミュオンは当初高い励起状態に存在するので、負ミュオンはミ

ュオン 1s 軌道に向かって次々に脱励起を繰り返し、その過程で特性 X 線 (ミュオン特性 X 線) を放出する。負ミュオンの質量は電子の 200 倍であるので、ミュオン特性 X 線のエネルギーは近似的には電子由来の特性 X 線のエネルギーの 200 倍であり、非常に高エネルギーの光子である。

物質に負ミュオンを照射し、ミュオン原子をつくり、放出されるミュオン特性 X 線を測定するのが負ミュオンによる元素分析手法の原理となる。負ミュオンによる元素分析の試みの歴史は古く、正負のミュオンが加速器で大量に作られるようになった 1980 年代には、タイルやガラス製品に対して負ミュオンを照射し、ミュオン特性 X 線を測定したといういくつかの報告例もある [1-3]。しかしながら、おそらくはビーム強度や測定上の問題などから、詳細な研究開発は行われなかった。

本分析手法の特徴を挙げると以下のようなになる。

1. 特性 X 線による元素決定
2. 感度が元素にほとんど依らない多元素同時分析
3. X 線強度の違いによる定量分析
4. バルクな試料の非破壊内部分析
5. 分析位置選択性

本手法は物質中の透過力の強い高エネルギーのミュオン特性 X 線を利用すること、また電荷をもった負ミュオンを用いることで、物質への入射エネルギーを変化させてミュオンの停止位置 (深さ) を選択できるところに大きな特徴がある。ミュオン特性 X 線エネルギーの同位体シフトを用い

た同位体分析や、ミュオン特性X線構造の詳細な測定による、化学状態の決定ができる可能性など、本手法はこの他にもユニークな特性を持ち合わせている。なおミュオン特性X線構造と化学状態関係についての研究も、我々は並行して進めているので興味のある方は以前の記事を参照いただきたい [5]。本稿では上記の5つの特徴に焦点を当て、多元素負同時定量分析として青銅の考古学資料を用いた実験を、位置選択分析について小判を使った実験を紹介したい。

2. 青銅製品の多元素同時定量分析

我々は本手法の定量分析法としてのフィジビリティチェックのために、まずは青銅の考古学資料に対する元素分析を行った。分析対象としては古代中国の青銅貨幣（半両：紀元前3世紀、秦代）、および青銅鏡（星雲鏡：紀元前1世紀、前漢時代）を選択した（Fig. 1）。

青銅貨幣を用いた分析は、J-PARC ミュオン施設 MUSE において 2009A0055 実験として行った [6]。実験セットアップの概要を Fig. 2 に示している。本実験では試料を空气中に設置してミュオン照射し、放出されるミュオン特性X線をゲルマニウム半導体検出器で測定した。負ミュオンの入射エネルギーは 30 MeV/c に調整した。これはビームライン窓や空気層を考慮すると試料の表面から 260 μm の深さに負ミュオンが停止することに相当する。青銅貨幣に一次陽子ビームの強度 20 kW の条件で、16 時間負ミュオンの照射をして得られたミュオン特性X線スペクトルを Fig. 3 に示す。本実験では青銅貨幣と同様に、Cu, Sn, Pb の金属板への負ミュオン照射実験も行った。Fig. 3 に示してい

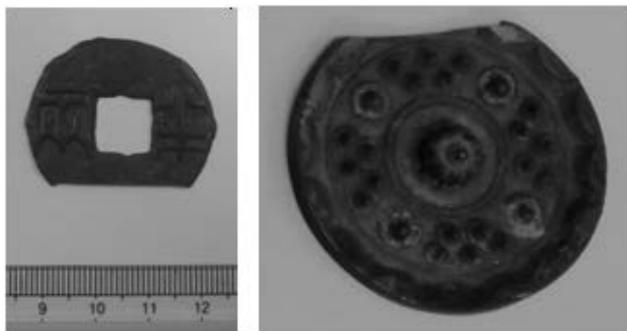


Figure 1 Muon irradiation samples: bronze coin, the Ban Liang coin (left) and bronze mirror, Seiun-kyo (right).

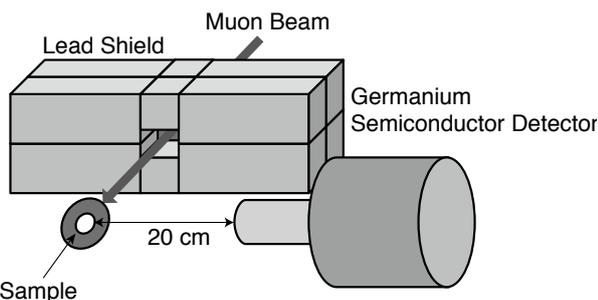


Figure 2 Schematic view of the experimental setup for muon irradiation of the bronze coin.

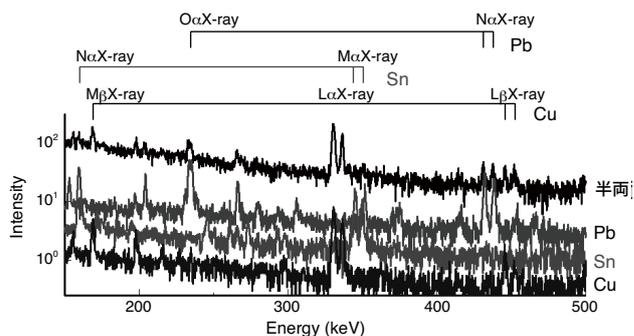


Figure 3 Muonic X-ray spectrum for the bronze coin.

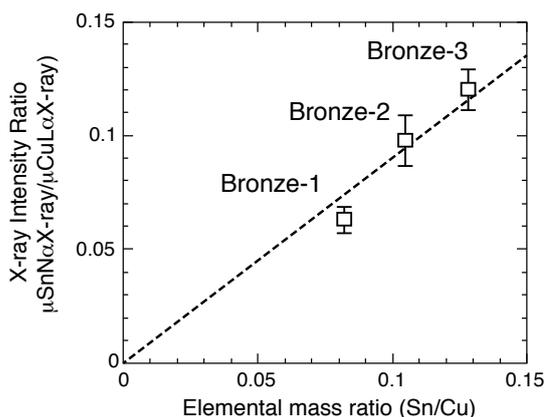


Figure 4 Relation between X-ray intensity and elemental composition for Cu-Sn alloy.

るように、青銅貨幣を試料にして得られたミュオン特性X線スペクトルのピークは、Cu, Sn, Pb の金属試料に対する負ミュオンの照射を行ったときに得られたピークに帰属することができた。このことは本研究で使用した青銅貨幣が、Cu, Sn, Pb の3種の金属の合金であることを示している。本研究では定量分析を行うために、成分が既知の青銅についても負ミュオンの照射を行った。Cu と Sn に注目したときの、青銅試料の元素成分比と得られたミュオン特性X線の強度比の関係を図 4 に示す。元素成分比と X 線強度比は直線関係があり、標準試料を測定して検量線を作ることによって定量分析が可能であることが示された。また、得られた検量線の傾きが 1 に近いということもわかり、これは X 線の強度比がほとんどそのまま元素の成分比に対応するという事となるので、本手法は元素によってほとんど感度の変らない分析法であるということもいえる。青銅貨幣のスペクトルを解析し、検量線を基に青銅貨幣の元素成分比を求めたところ、Cu : 69.8 \pm 2.6%, Sn : 10.0 \pm 1.7%, Pb : 20.3 \pm 2.2% (以下すべて重量%での分析値) が得られた。

次に Pb の含有率が 5% 程度と比較的少ないことが知られている青銅鏡に対して同様に元素分析を行い、本手法の検出限界についてのデータ取得を行った。本実験は理研 RAL ミュオン施設 port-4 において、R-1017 実験 (J-PARC 課題 2011A0017 の振替) として行った。負ミュオンの入

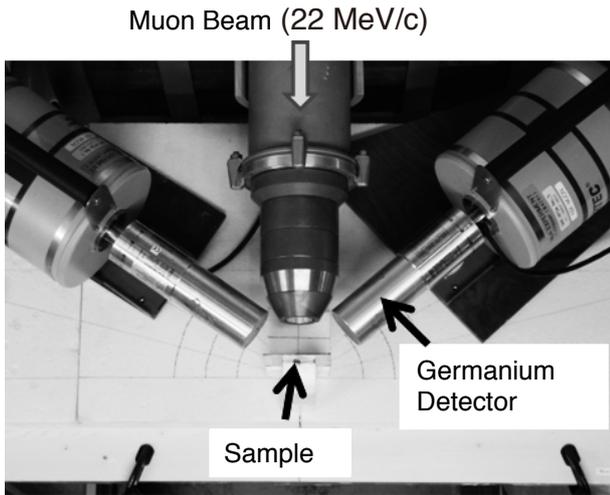


Figure 5 Picture of experimental setup for R-1017 experiment; bronze mirror experiment.

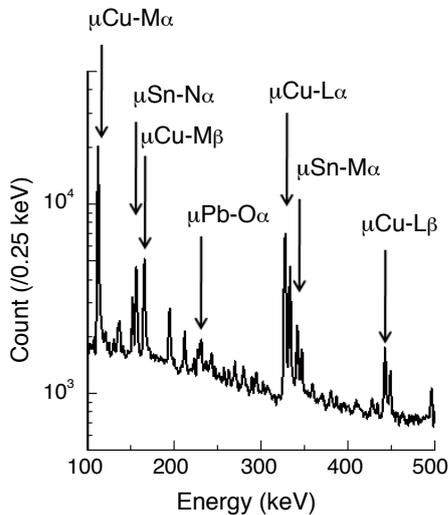


Figure 6 Muonic X-ray spectrum for the bronze mirror.

射エネルギーは 22 MeV/c を選択した。これは Cu 金属中で 80 μm の飛程に相当する。実験の様子を Fig. 5 に、実際に得られたミュオン特性 X 線スペクトルを Fig. 6 に示す。青銅貨幣の実験と同様に、本研究でも試料を空气中に置いて行った。星雲鏡試料から得られたスペクトルのピークも、すべて Cu, Sn, Pb 由来であることがわかり、青銅標準試料の検量線から元素成分を求めたところ、Cu: $73.0 \pm 2.1\%$, Sn: $22.3 \pm 1.9\%$, Pb: $4.7 \pm 0.5\%$ が得られた。これは既に分析されている値と良い一致を示した。

本実験では青銅鏡 28 時間の負ミュオン照射で、最も統計の良い Pb 由来の X 線として、 O_α X 線 (負ミュオンが主量子数 6 から 5 に遷移) が 1940 ± 170 count 得られた。定量可能な検出限界を 3σ の条件とすると、本手法による今回の実験条件での Pb の検出限界はおおよそ 1% となる。検出器の遮蔽を設置することによる S/N の向上や、多数の検出器を準備し検出効率を上げることにより、本手法の検出限界は今後改善していくと考えている。

3. 天保小判の深さ選択元素分析

負ミュオンにより、位置分解能のある非破壊分析が可能であることを実証するために、Fig. 7 に示す天保小判 (19 世紀) への負ミュオン照射実験を行った。天保小判は全体での Au の含有率が 57% 程度であることが分かっているが、「色揚げ」と呼ばれる製造上の技術により、表面付近では金の含有率が 90% 以上と非常に高い層となっており、表面から数マイクロメートルで、全体の Au の含有率となる 57% に低下することが知られている [7]。本実験では入射する負ミュオンの運動量を変化させて、X 線の強度の違いから深さ方向の Au 含有率変化の測定を行った。

小判の元素成分の変化を検出するためには、負ミュオンを試料表面数マイクロメートルで停止するような非常に低エネルギーの負ミュオンを取り出す必要がある。そこで実験に先立ち J-PARC で 30 MeV/c 以下の低エネルギーの負ミュオンが実際に取り出せるかのビームコミッションング



Figure 7 Picture of the Tempo-koban, (left: 5 JPY coin).

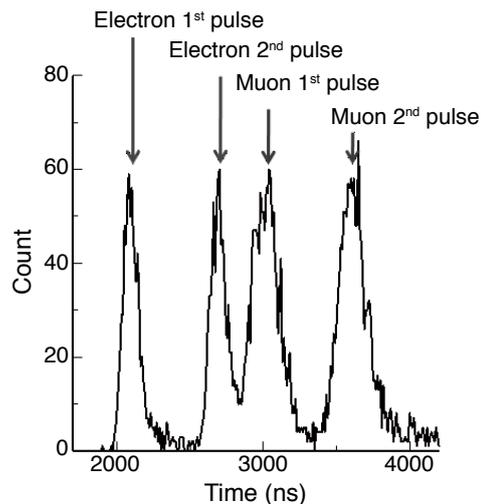


Figure 8 TOF spectrum of HPGe detector for negative muon irradiation experiment tuned with 6.4 MeV/c. Time deviation between the events originated from electrons (noise signal) and these from muons was about 950 ns. This time difference is consistent with the expected values that 6.4 MeV/c negative muons were transported in beam line in J-PARC/MUSE.

を行った。詳細は割愛するが、実際に 6.4 MeV/c (運動エネルギー換算で 200 keV) の低エネルギーの負ミュオンが輸送できることを確認し、また輸送の最適条件を調べたのちに実験を行った (Fig. 8)。

天保小判を試料としたときの実験の様子を Fig. 9 に示す。本実験では低エネルギーの負ミュオンビームを使うために、試料チャンバーとビームラインを窓なしで接続したセットアップで照射を行った。負ミュオンの入射運動量は 6.4~15.2 MeV/c を選択した。これは負ミュオンの Au 中での飛程として 2~20 μm に相当する運動量である。Fig. 10 に実験で得られたミュオン特性 X 線スペクトルの一例を示す。Ag 由来のミュオン特性 M_{α} X 線 (305 keV) の強度でスペクトルの規格化を行ったところ、ミュオンの入射運動量の違いによって Au 由来のミュオン特性 N_{α} X 線 (400 keV) の強度に明確な違いがみられた。負ミュオンの入射運動量での Au 中での飛程と、 $\mu\text{Ag}-M_{\alpha}$ X 線と $\mu\text{Au}-N_{\alpha}$ X 線の X 線強度比の関係を調べたところ Fig. 11 が得られた。Au の X 線強度は、負ミュオンの停止位置が浅い場合は高いが、ある深さまで入れると X 線の強度比がほとんど変わらなくなることがわかった。このことは、本研究で

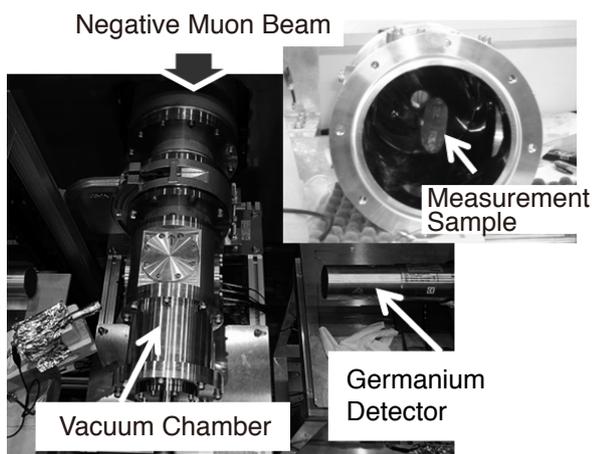


Figure 9 Picture of muon irradiation experiment for the Tempo-koban.

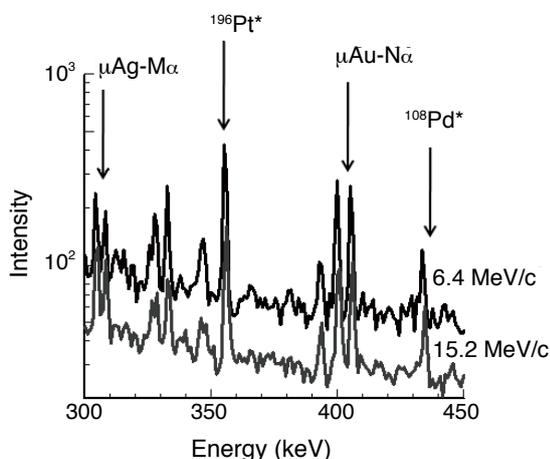


Figure 10 Muonic X-ray spectra for the Tempo-koban with the different incident momentum. Gamma-rays originated from muon capture in the nucleus were also observed (see text).

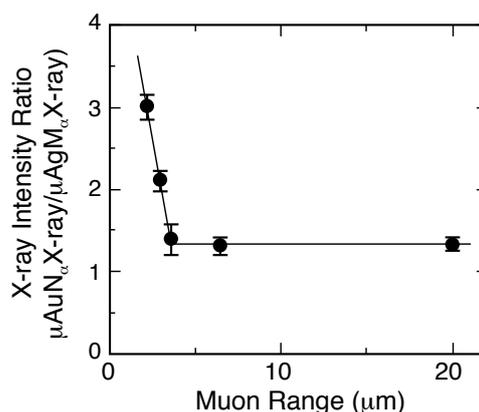


Figure 11 Relation between muonic X-ray intensity ratio (Au/Ag) and muon stopping position. Note that the Tempo-koban was placed at 45 degree from beam direction.

Table 1 Elemental depth-profiling of the Tempo-koban determined from muonic X-ray intensity.

Muon momentum (MeV/c)	Muon range in Au (μm)	Au: wt. %
6.4	2.2	74.4 \pm 4.8
7.5	3.0	67.0 \pm 4.7
8.0	3.6	57.4 \pm 8.1
10.2	6.5	55.9 \pm 5.1
15.2	20	56.3 \pm 3.9

使用した天保小判が、表面数マイクロメートルに Au の含有率の高い層があり、Au の含有率が深さとともに連続的に減少し、ある一定の深さになると Au と Ag の比率が一定となる層があるということを示唆している。またこの実験に先立ち、35 MeV/c の条件 (飛程換算で 300 μm) の条件で実験を行ったところ、Au と Ag 由来の X 線の強度比は 8.0 MeV/c 以上での値と一致した [8]。

定量的な元素分析を行うために、青銅での実験と同じように Au と Ag からなる成分既知の標準合金試料 (Au 含有率 80%, 60%, 50%) に負ミュオン照射を行い、検量線を作成した。それぞれの運動量の負ミュオン停止位置での Au の含有率を求めたところ、Table 1 に示す結果が得られた。これらの Au の含有率の変化は、すでに別の方法で調べられている、色揚げされた小判の元素成分の深度分布の結果に整合した [7]。

4. ガンマ線測定による元素分析

天保小判による元素分析実験を進めていくうちに、負ミュオンが原子核に吸収された後に放出されるガンマ線による元素分析の可能性が最近明らかとなったので、それについても紹介したい。

負ミュオンは原子に捕獲されミュオン原子を形成後、ミュオン 1s 軌道へと到達する。その負ミュオンは最終的には寿命 (2.2 μs) に従い崩壊するか、原子核への吸収反応を起こす。特に原子番号が大きくなると ($Z > 30$), 捕獲された負ミュオンのほとんどは原子核に吸収される。この

反応は原子核の電子捕獲壊変と同じであり、原子核の陽子が一つ中性子へと変換され、Z-1 原子が形成される [9]。このとき負ミュオンの質量分のエネルギーが原子核に与えられるので、高い励起状態にある原子核が形成される。励起エネルギーのほとんどは主に中性子として放出されるが(確率は低い放出されないこともある)、一部は原子核へと残り低励起の原子核を形成し、その脱励起に伴いガンマ線が放出される。原子番号の大きな元素だと、負ミュオンの原子核への吸収寿命は 100 ns 以下であり [10]、原子核の励起準位のほとんどは寿命がとても短いので、ゲルマニウム検出器の時間分解能からすると、ガンマ線放出はミュオン特性X線の放出と同時に起こることになる。つまりミュオン特性X線測定と同様に、ビームに同期した成分を取り出すことでガンマ線スペクトルの取得ができる。ガンマ線の強度は負ミュオンの原子への捕獲数に対応するので、同様にその強度を調べることで定量的な元素分析ができると期待される。この手法のコンセプトは入射粒子と反応こそ異なるが、PGA と同じである。

実際に天保小判を試料とした場合、Fig. 10 に示したように負ミュオンが Ag に捕獲されることで生成する Pd 同位体、Au に捕獲されることで生成する Pt の同位体の励起核からのガンマ線が観測されている。このうち $^{108}\text{Pd}^*$ の 434 keV のガンマ線、 $^{196}\text{Pt}^*$ の 356 keV に注目して、これまでと同じようにガンマ線の強度比と負ミュオン入射運動量の関係を調べると、Fig. 12 が得られた。標準合金試料からミュオン特性X線による分析と同様に、ガンマ線強度

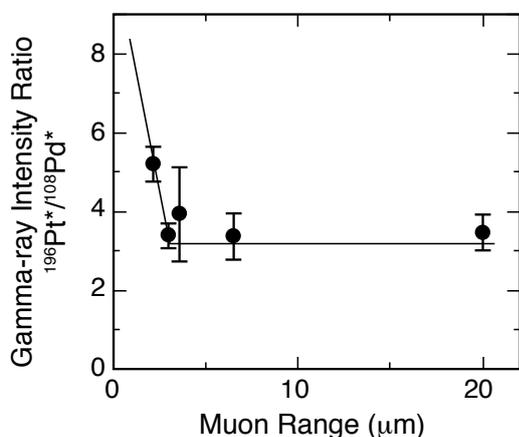


Figure 12 Relation between gamma-ray intensity ratio and muon stopping position.

Table 2 Elemental depth-profiling of the Tempo-koban determined from gamma-ray intensity

Muon momentum (MeV/c)	Muon range in Au (μm)	Au: wt. %
6.4	2.2	76.5 ± 6.5
7.5	3.0	68.0 ± 6.1
8.0	3.6	60 ± 14
10.2	6.5	68 ± 12
15.2	20	68.4 ± 8.6

で検量線を作ることで、Table 2 に示す分析値が得られた。本手法での分析値は、 $^{108}\text{Pd}^*$ のガンマ線強度が低いために、誤差が大きなものとなっているがミュオン特性X線からの結果を再現した。

ガンマ線測定による分析は、ミュオン特性X線による分析と同時に進行することができる。そしてX線による分析との違いとして、ガンマ線の放出には元素(原子核)による感度の違いがあることが挙げられる。生成した励起核のガンマ線強度を比較することで、試料の同位体比についての知見がX線分析によるものより高精度で得られる可能性があり、今後の展開が期待できる。

5. 負ミュオンによる分析手法の展開

以上のように、負ミュオンによる元素分析法は非破壊で物質内部を、位置選択的に定量できる手法であることが確認できた。現状我々が測定に用いている検出器の数は限られており、試料から出るX線検出の立体効率は1%にも満たない。多数のゲルマニウム検出器を設置した、例えばゲルマニウムボールなどの測定システムを整備することができれば、測定効率や検出限界が1桁以上向上することが期待でき、本手法による分析にブレイクスルーをもたらすと考えている。

負ミュオンによる元素分析法は青銅製品の分析実験のように試料を空気中において実験することができる。つまり試料を真空中におく必要がないので、その大きさや、形状の制限をほとんど受けない。またコリメーターによる照射位置の選択と、運動量調整による負ミュオン停止深さを変えることによって、三次元の非破壊元素分析が可能である。負ミュオンの元素への捕獲確率があらゆる元素でほとんど同じであるということから、物質中の微量な元素の分析には向かないと考えられるが、逆に一定以上の組成の物は間違いなく検出することができるというのも特徴である。負ミュオンによる元素分析は位置の選択性があるので、容器の外から試料の位置に選択的に負ミュオンを停止させて分析するというのも可能である。たとえば生体等の分解できないもの、もしくは分解しては意味の無くなるものや、空気等による何らかの変性を受けてしまうものや、小惑星からのリターンサンプルなどを地上で一度も開封することなく分析することも可能であると期待される。

今後はビームのコリメートにより平面方向の位置選択性がどの程度出のかといった測定手法としての開発に加え、短時間で精度の良いデータを出すための測定環境の整備を進めていきたいと考えている。

6. おわりに

本稿で紹介した研究内容は J-PARC ミュオン施設において実験課題 2009A0055, 2010A0056, 2010B0031, 2011A0017 (理研 RAL 課題 R-1017) および 2011B0035 実験として行われたものである。高強度で質の高い負ミュオンビーム生成に関わった J-PARC, RIKEN-RAL のすべてのスタッフに感謝したい。

引用文献

- [1] M. K. Kubo *et al.*, J. Radioanal. Nucl. Chem., **278**, 777 (2008).
- [2] E. Köhler *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., **187**, 563(1981).
- [3] H. Daniel *et al.*, Z. Anal. Chem., **321**, 65 (1985).
- [4] H. Daniel, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., **B3**, 65 (1984).
- [5] 二宮和彦, めそん, 2010 年秋号, No.32, p52 (2010).
- [6] K. Ninomiya *et al.*, Bull. Chem. Soc. Jpn., **85**, 228 (2012).
- [7] 上田道男, 日本銀行金融研究所「金融研究」第 12 巻, 第 2 号, p103 (平成 5 年)
- [8] K. Ninomiya *et al.*, J. Phys. Conf. Ser., **225**, 012040 (2010).
- [9] D. F. Measday, Phys. Rep., **354**, 243 (2001).
- [10] T. Suzuki *et al.*, Phys. Lett., **95B**, 202 (1980).

著者紹介

二宮和彦 Kazuhiko NINOMIYA

大阪大学 助教

〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町

TEL: 06-6850-5416

FAX: 06-6850-6999

e-mail: ninokazu@chem.sci.osaka-u.ac.jp

略歴：2007 年大阪大学大学院理学研究科博士課程終了，
2008 年大阪大学大学院理学研究科附属原子核実験施設
特任研究員，2009 年独立行政法人日本原子力研究開発機
構 先端基礎研究センター 博士研究員。2012 年より現職。
博士（理学）。

最近の研究：放射性核種の環境動態。ミュオン原子形成に
関する基礎研究。単色中性子による核反応。

趣味：料理。将棋。

久保謙哉 Kenya KUBO

国際基督教大学 教授

〒 181-8585 東京都三鷹市大沢

TEL: 0422-33-3454

FAX: 0422-33-1449

e-mail: kkubo@icu.ac.jp

略歴：1989 年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。
2009 年から現職。理学博士。

最近の研究：ミュオンの化学。不安定核ビームを利用した
メスバウアー分光。

趣味：速歩。

REXS2013 に参加して

構造物性研究センター 岡本 淳

Workshop on Resonant Elastic X-ray Scattering in Condensed Matter (REXS) 2013 は 2013 年 7 月 15 日から 19 日にかけて、Diamond Light Source の主催で、イギリスのオックスフォード大学で開催されました。急速な進歩を遂げる共鳴非弾性 X 線散乱との分別ということで、共鳴 X 線“弾性”散乱を用いた物性研究に関するこの会議は不定期に行われており、前回は 2011 年にフランスで開催されました。研究会会場のオックスフォードは古くからの史跡と大学が混在した町で、少し歩けば教会や一般開放した博物館にぶつかりました。中世文化と現代科学が渾沌としながらも違和感なく存在しているのが印象に残りました。

初日は、Diamond Light Source の見学ツアーが行われました。オックスフォードからバスで 40 分ほどのどかな田園地帯を揺られた先にある Rutherford-Appleton 研究所にある放射光施設で、ツアーの前に共鳴 X 線散乱の院生や研究者向け講義を兼ねた Student day が開催されていました。私は参加しませんが基礎原理・装置光源説明や計算ソフトを使った解析の講習と共鳴 X 線散乱研究に必要な一通りの講習がされていたようです。Diamond 見学では、硬 X 線ビームライン I16 と軟 X 線ビームライン I10 を訪れ、4 軸回折計や軟 X 線用超高真空回折計 RASOR についての説明を受けました。

研究会会場は Medical Education Center の 1 フロアを貸し切って行われました。ホール 1 つとポスター会場を兼ねたロビー 1 つとこじんまりとしていましたが、75 名の参加人員にはちょうど良い密度だったのではないかと思います。最初に Y. Joly 氏が Introduction として共鳴 X 線散乱を用いた物性研究の歴史の紹介を行いました。Y. Joly 氏は理論計算を用いた共鳴 X 線散乱の解析をしていることもあっ

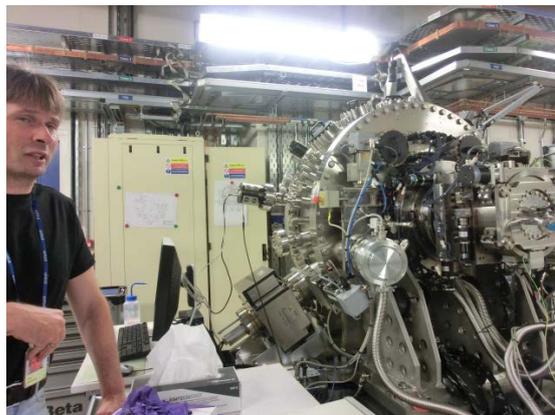


図 2 Diamond Light Source で見学した、大きなドラム型チェンバーが特徴的な軟 X 線用回折計 RASOR。左は担当者の P. Steadman 氏。

て、偏光依存性やアジムス角依存性を用いた磁気や軌道秩序構造の解析を高く評価しており、CuO の軌道カレントといった最近の研究についても理論によるスペクトル再現を行っていました。近年各地の放射光施設で成果が出つつある時間分解 REXS については、Max Planck 研究所の M. Forest 氏が BESSY の FEL や LCLS で行った Ni 酸化物ヘテロ構造の電荷不均化転移による金属絶縁体転移とスピン秩序研究を紹介しました。Ni と Nd サイトの反強磁性磁気秩序がレーザー照射で溶ける速度の違いを、ピコ秒の時間分解で示していました。

日本からは、理研の玉作賢治さんが非線形光学過程を利用することで硬 X 線を入射して VUV 領域の散乱光を利用したイメージング研究を紹介されました。NiO で M2,3 端の散乱光で Å オーダーの分解能を得ているということで興味深い内容でした。残念ながら、軟 X 線領域での分解は難しいとのことでした。研究対象としてマルチフェロイクスを挙げた講演が多かったのですが、阪大の木村剛さんが



図 1 宿泊所の Keble College。Oxford 大学は多くの College からなっています。



図 3 2 日目のエクスカージョン「テムズ川の川下り」で水門を抜けているところ。手前の 3 人は玉作賢治さん（理研）、木村剛さん（阪大）、田中良和さん（理研）。



図4 3日目のバンケット会場 Exeter College の広間。

ヘキサフェライトでのらせんスピンドメイン構造の空間分布を円偏光共鳴磁気散乱をスキャンすることで示した研究を紹介されました。

会の運営でよかったと感じた点が、ポスター講演の方法と昼休みが2時間取られていたことです。ポスターは全部で12枚と少なかったのですが、会期中はずっと展示されており、毎日4名が数分間の説明を行う plenary talk の時間が設けられていました。昼食はロビーで配られ、食後は共同研究者間での打ち合わせやポスター講演について講演者を捕まえては議論している様子が見られました。

次回は2016年にPETRA IIIのあるドイツのハンブルグで開催されます。ERLや時間分解を利用したPFでのX線散乱研究が報告されることを期待します。

LPBMS2013 開催報告

放射光科学第二研究系 山崎裕一

2013年8月28日から31日まで、つくば国際会議場にて国際会議 LPBMS2013 ("Light and Particle Beams in Materials Science") を開催しました。LPBMSは、放射光、中性子、ミュオン、低速陽電子などの量子ビームの利用を軸に、最先端の物質科学の研究成果を議論する会議です。本会議の前身は、1994年から開催されてきた放射光を用いた物質科学の国際会議 SRMS (Synchrotron Radiation



図1 LPBMS2013の集合写真

表1: LPBMS2013の講演における利用したプローブの割合

プローブ	発表件数 (%)
放射光	47 %
FEL	14 %
中性子	17 %
放射光と中性子の相補利用	15 %
ミュオン	5 %

in Materials Science) で、前回は2010年にイギリスで行われました。今回、KEK物質構造科学研究所が主催することを機に、放射光に限らず量子ビーム全般をカバーする会議に拡張され、初めてつくばで開催されました。

初日には、物質・生命科学実験施設 (MLF) の実験装置などを見学する J-PARC (大強度陽子加速器施設) ツアーが催されました。夕方から行われたウェルカムパーティーでは、本会議の組織委員長である村上洋一 PF 施設長による開会の挨拶に続き、国際諮問委員長である Aberystwyth 大学の Greaves 教授より、ご挨拶を頂きました。

本会議はプレナリーセッションと、オーラルの平行セッション、およびポスターセッションからなっており、29日の朝から31日の昼までの2日半に渡って行われました。セッションは磁性物質、低次元性物質、グリーンマテリアル、強相関電子系物質、触媒、ソフトマター、無秩序系物質、測定手法、複合物質などの多岐にわたり、分野横断的な議論が行われました。プレナリーセッションでは世界の第一線で活躍されている著名な研究者9名をお呼びして、量子ビームを用いた最新の研究結果を紹介して頂きました。オーラルセッションでは、3会場に別れて32名の招待講演者を含む、総勢52名の方の口頭講演がありました。会場が手狭になるほどのセッションもあり、盛況な議論が行われていました。ポスターセッションでは121件の講演があり、ポスター番号の偶奇で講演時間を分け、それぞれ2回ずつ計4回の講演が行われました。また、30日の夜には、懇親会をつくばの山水亭において開催しました。懐石料理とともに、鏡割りや和太鼓の演奏など、国外の参加者には日本文化に触れていただく絶好の機会になったと思います。



図2 ポスターセッションの様子。

LPBMS2013 に参加して

放射光科学第二研究系 高橋由香利

2013年8月28日(水)から31日(土)の4日間、茨城県つくば市のつくば国際会議場にてLight and Particle Beams in Materials Science(LPBMMS)2013が開催されました。LPBMSは、1994年からSynchrotron Radiation in Materials Science(SRMS)として開催されていた会議の後進で、今回より、放射光に加え中性子、ミュオンといった量子ビーム全般を使った物質材料科学研究に関する講演が扱われ、拡張されてから初めての開催でした。講演は強相関電子系、超伝導体、触媒、バイオマテリアル、ソフトマター、新しいプローブ技術など多岐にわたる研究内容でした。会議期間中は天候に恵まれ、つくばは真夏日続きでしたので、参加記念品の扇子が大変役に立ちました。

オープニング後は、東大の十倉先生の講演から始まりました。強相関酸化物における電場や磁場による金属-絶縁体転移の制御に関する研究やスピンサイクロイド、スピンの渦を描いて並ぶskyrmionに関する研究は、強相関電子系の研究に携わる身としては興味深い話でした。以降、どの発表者も熱心に講演されていて、時間を多少超過して議論する様子が見受けられました。すべての講演内容を理解することは難しく、聞き取れない部分も多々ありましたが、量子ビームを用いた最先端の研究分野に触れることができ、とても勉強になりました。一日目の講演の合間に集合写真の撮影がありました。カメラマンとはガラス越しで距離があったため、シャッターを切る合図も何も聞こえないシーンと静まり返った中での撮影となりました。さらに、二日目に同じ状況でもう一度撮影し直すというハプニングもありましたが、いい思い出となりました。

昼食は5種類のお弁当(和風、洋風、中華)が用意されており、各自好きなものを選びました。加えて、一日目はバナナ、二日目はリングとオレンジが用意されていました。お弁当が盛り沢山な内容だったため、デザートのお菓子を食べる余裕がなかったのが残念でしたが、参加者と会話しながら楽しい時間を過ごせました。



図1 講演中の十倉先生。



図2 バンケットでの様子。日本酒を片手に楽しそうな参加者。

一日目と二日目の午後には、口頭発表に加えてポスターセッションがありました。ポスター番号が偶数と奇数でコアタイムが分かれており、発表は60分間×2回ありました。夜の時間帯ではビールやジュース、軽食が用意されていました。幸いにも、会場までの交通手段はバスでしたので、ビールを飲みながらリラックスした雰囲気の中で、発表・議論することができました。残念ながら筆者のところにはあまり人が聞きに来てくれなかったのですが、ポスター会場をウロウロしていると、筆者らの研究内容と似ている軟X線を用いた吸収スペクトル測定を発表しているポスターを見つけ、詳しく話を聞くことができました。DNAにX線を照射し、どの結合部位が切れているのかを吸収スペクトルで調べる研究で、窒素や酸素のK吸収端のエネルギー領域で測定されていました。このエネルギー領域での実験に筆者らは苦戦していたので、これは非常に興味深い発表であり、軟X線・有機物質を扱う研究を行っている競合相手として筆者らも負けていられないとモチベーションが上がる気がしました。他にも、電界効果トランジスタを作製して、電気抵抗を測定しながら同時に格子変化を追い、VO₂ filmの金属-絶縁体転移のメカニズムを研究している発表がありました。これは、測定方法を工夫していて面白かったです。議論をしていると時間はあっという間に過ぎるので、終了のベルが鳴っていてもなかなか終わることができませんでした。活発な議論を通して他の研究者から刺激を受け、有意義な時間を過ごすことができましたと思います。

今回初めてLPBMS2013に参加して、幅広い講演内容に知識がついていけませんでした。物構研が構築しようとしているマルチプローブという観点においては、非常に参考になる会議だったのではないかと思います。同時に、英語を理解して聞き取れるようにもう少し耳を鍛えなくてはならないと自分自身の課題も改めて自覚させられました。最後に、会議全体を通して軽食としてパン、ドーナツ、シュークリームが用意されるなど、食べ物が豊富で、美味しかったことが印象に残っています。しっかり食べて、しっかり学ぶことができ、参加して良かったと思います。

第16回 XAFS 討論会報告

東京医科歯科大学医歯学総合研究科 宇尾 基弘

第16回 XAFS 討論会は2013年9月5日(木)から7日(土)の3日間、東京大学理学部において日本 XAFS 研究会の主催、東京大学理学部スペクトル化学研究センターの共催により開催されました。この討論会は1998年に第1回が東京大学理学部にて、今回と同じくスペクトル化学研究センターとの共催にて行われてから、年1回、北は札幌から南は福岡まで各地で開催されており、16年目で日本を一周して来たことになります。

今回は招待講演が5件、一般講演の口頭発表が30件、ポスター発表が32件、ナイトセッション3件の計70件の講演があり、133名の参加者を得て盛会のうちに終了することができました。

招待講演者として、新日鐵住金の木村正雄先生、あいちシンクロトン光センターの竹田美和先生、首都大学東京の宍戸哲也先生、東京大学生産技術研究所の増野敦信先生、ドイツ Helmholtz Zentrum Berlin の Elizabeta Holub-Krappe 先生をお招きいたしました。当初は国内の4名の招待講演者をお願いしておりましたが、千葉大学 藤川先生のお世話により XAFS 討論会の直前に来日予定であった Holub-Krappe 先生にもご講演いただけることとなり、5名という異例の多さとなりました。招待講演の内容も理論、施設、触媒、材料、産業利用とバランスに富み、今日の XAFS の多方面への展開を示唆するものとなりました。

初日には木村先生に「実材料/実プロセスにおける XAFS 研究のインパクト ～触媒 (nm-scale) から製鉄 (m-scale) まで～」と題して、製鉄・製鋼プロセスのような大規模プロセス中の反応解析から、腐食や触媒などの nm レベルの微小過程まで、幅広いスケールでの XAFS の産業利用について多くの実例を交えて解説をいただきました。Holub-Krappe 先生からは "Bayes-Turchin approach to EXAFS Data Analysis" として EXAFS のデータ処理についてのご講演を戴きました。ご講演後には前 IXAS 会長の大柳先生から、Holub-Krappe 先生が2003～2009年まで IXAS の Executive Committee Member を務められたことを感謝してトロフィー贈呈が行われました。夕刻にはナイトセッション



図1 会場(理学部化学本館 講堂)の様子。



図2 ポスター会場の様子。

ンが行われ、施設報告に引き続いて、「顕微 XAFS の現状と将来を考える」と題して PF, SPring-8 の顕微 XAFS ビームラインの状況と展望を阿部先生、寺田先生から説明があり、ユーザーサイドからのお話として、保倉先生から顕微 XRF, XAFS の応用例と施設への要望が示され、活発な討論が行われました。

2日目の招待講演では、宍戸先生より「触媒調製時ならびに反応中における活性種の挙動の解明を目指した XAFS 測定」として、液相中や担体上での金属ナノ粒子の形成過程やその触媒としての反応過程解析における、in situ 時間分解 XAFS の有用性についてご講演をいただき、竹田先生からは「あいちシンクロトン光施設とその利用事例」と題して、着工から供用開始まで1年強という驚異的な短期間での立ち上げを成し遂げた同センターの設立に関わることご苦労や産官学の強力な連携による研究推進の現状についてのご講演をいただきました。夕刻にはポスターセッションが行われ、化学本館講堂前のホワイエにて、熱のこもった討論が行われました。

2日目までの口頭発表のうち、7件を学生奨励賞審査対象とし、審査委員会(委員長:宮永崇史先生(弘前大))による厳正な審査が行われ、「フォスファチジルコリン(PC)のAu表面における吸着反応に関する研究」を発表された塚田千恵さん(名大)、「多重散乱理論による軽元素 K-edge XANES スペクトル解析」を発表された高橋慧さん(千葉大)に授与されることとなりました。表彰式は懇親会の席で行われ、朝倉会長より賞状と副賞が授与されました。

懇親会は二日目の夜に東京大学山上会館にて行われ、75名という多数のご参加をいただきました。朝倉会長のご挨拶と、竹田先生の乾杯のご発声で、和やかな懇談が始まりました。

3日目には増野先生に「XAFS による非晶質相と準安定結晶相の局所構造解析」と題して、浮遊融解法を用いて作成した TiO₂ ベースガラスという新たな組成のガラスの作製と、XAFS を用いた構造解析という材料科学への応用についてご講演をいただきました。3日目は SPring-8 シンポジウムと日程が重なっていたことから、参加者が減ることが危惧されたのですが、最後まで活気にあふれた議論が続きました。

来年の第17回 XAFS 討論会は徳島大学の山本孝先生を
実行委員長として開催されることがアナウンスされまし
た。最初に記しましたように、第16回で XAFS 討論会の
スタートの地に戻り、これから第二ラウンドに向けてのス
タートとなります。XAFS に関する研究が更に深く、広く
発展し、討論会がますます活発になることが何より祈念さ
れます。

今回の討論会には9社の関連企業様から広告費を頂戴し
ました。この場をお借りして厚く御礼を申し上げます。本
討論会が無事に終わりましたのは東大・医科歯科大の実行
委員の皆様や、お手伝いをいただいた学生さん、プログラ
ム委員の皆様、日本 XAFS 研究会幹事の皆様のお力によ
るところ大であり、何よりご多忙の中をご講演、ご参加下
さった皆様のご支援によるものです。最後になりましたが
心より御礼を申し上げます。

XAFS 討論会参加報告

総合研究大学院大学 物理科学研究科 江口敬太郎

東京大学・本郷キャンパスにおいて第16回 XAFS 討論
会が9月5日から3日間の日程で開催された。今回の開催
場所である東京大学は第1回目の開催以来15年ぶり2度
目の開催であった。筆者にとっては、東京大学を訪れるの
は今回が初めてであり、どのような場所なのか（立地や学
内の広さ、建物の古さ、学生のにぎやかさなど）というこ
とを密かな楽しみとして参加した。

地方出身の筆者にとって東京は迷路のようなもので
あり、案の定上野駅到着後すぐに迷った。地図を片手に路地
を行ったり来たり繰り返しながら、なんとかホテルにたど
り着き、荷物を預けて東京大学へと向かった。会場に到着
したのは、受付開始の少し前だったと思うが、会場にはす
でに同じ研究室の中野裕仁さんの姿があり、慣れない環境
にいるという緊張が少し和らいだ。その後、討論会が始ま
るまでは、芝生のサッカーグラウンドがあることに驚いたり、
そのグラウンドの下にトレーニング用のジムがあること
を岡林潤先生よりお聞きしたりして歓談を楽しんだ。

討論会が幕を開けた。様々な現象のメカニズムを明らか
にする研究や医療分野・ナノテクノロジー分野・エネルギー
分野への応用研究、実材料の研究開発、環境問題を解決
へと導く研究など XAFS を用いた素晴らしい発表が行わ
れた。実は、講演では内容だけでなく発表技術まで勉強す
ることができる。生き生きとした表情かつ滑らかな口調、
ジェスチャーやアクセントを交えてお話しされており、身
につけたいテクニックは山ほどある。そして、1日目を終
了した。

食事を済ませて帰宅した後、発表スライドの修正や発表
練習に取り掛かった。しかし、発表時間12分で終わる気
配がしない。今回が3度目の発表であるが、全く慣れるこ
とはなく、どうしようか迷った末、少しずつ話す内容を削



図1 中野裕仁さんによるポスター発表。

ることにした。発表練習は十分ではないが、睡魔に耐えき
れず寝ることにした。

2日目は朝6時に起床し、天気予報を確認しながら朝食
を食べ、発表練習に取り掛かった。前向きに攻めの姿勢で
臨もうとするが、憂うつ感が払拭されず、時間だけが刻々
と過ぎて行った。

私の発表は午前の部の最後であった。怒られるかもしれ
ないが、私に順番が回ってくるまで、スライドに目を通し
たり、原稿に目を通したり、落ち着くことができず、他の
発表者のご講演にあまり集中することができなかった。来
年こそは余裕を持って発表できるように早い段階から準備
をしようと思う。演台に立った後のことはよく覚えていな
いが、もう少しスムーズな発表を行ったり、言い間違いを
減らしたり十分でないところが多々あるように感じたた
め、今後改善していきたい。

午後からは招待講演・一般講演およびポスターセッシ
ョンが行われた。ポスターセッションでは、同じ研究室の中
野さんがポスター発表を行っていた（図1）。素晴らしい
ポスター発表であった。だが、XAFS 討論会の特徴のひと
つは、他の学会に比べて学生に対して比較的口頭発表を行
えるチャンスを与えて頂けることであると思うため、発表
を行うときはぜひとも積極的に口頭発表を希望してほしい
と思った。

この日の夜は懇親会に参加し、美味しい料理と美味しい
お酒、それから色々な人との交流を楽しんだ。あっという
間の2時間であった。

最終日も朝から大勢の人が集まり、興味深い講演と活発
な議論が行われ、すべての日程が終了した。

今回の参加では、XAFS が幅広い分野において利用され
ていることを再確認した。さらに、講演を拝聴したり、発
表を行ったりするだけでなく、様々な研究者との交流は大
変貴重な時間であった。休憩時間やフリーな時間を利用し

て、藤川高志先生や藤川研究室のみなさん、岡林先生には理論計算に関してご教授・議論して頂き、XAFS および自身の研究に対する考えを深めることができた実感している。また、XAFS のみならず卒業や就職活動、学校生活、さらには恋愛についてまで、若手の研究者や学生の方々に相談に乗って頂いたり、アドバイスをさせて頂いたり、楽しいひとときを過ごしたことも印象的な思い出である。同じ悩みを抱えている学生も多く、それらを共有することで不安を払しょくしたり、学生奨励賞を競い合うライバルとなったり、将来の XAFS の在り方を描いたり学生ならではの楽しみ方というものもあるのではないかと感じた。そのため、今後も多くの学生が参加することを期待している。

最後になるが、帰りの新幹線の中では、自身の発表について反省するとともに、今回の東京開催は私自身へ「初心に戻りなさい」というメッセージであったのかなと思った。今日からまた、次回の徳島開催に向けて日々研究に励みたいと思う。

PF 研究会「極短周期アンジュレータと新しい高性能光源加速器の開発」開催報告

放射光科学第一研究系 山本 樹
高輝度光科学研究センター 熊谷 孝孝

2013 年 9 月 18-19 日の日程で、KEK 研究本館小林ホールにおいて標記研究会を開催した。

極短周期アンジュレータとして、現在の通常型アンジュレータよりも一桁程度短周期のアンジュレータが実現できた場合には、光源加速器施設の大幅なコンパクト化が可能になる。さらにこのコンパクト化が加速器自体の性能向上をもたらすことも期待できる。しかし、周期長が通常アンジュレータの 1/10 になるということは、アンジュレータが動作する磁石間ギャップも 1/10 程度に狭めなければならないことを意味し、このことから極短周期アンジュレータを通常の光源加速器に単純に応用することには幾つかの困難が生じることが予想される。

本研究会の目的は、上記の困難を乗り越えて極短周期アンジュレータを利用する高性能光源加速器の開発を行うために、現状の問題点を克服する解決策を検討することである。このために、現在国内の第一線で活躍する光源加速器研究者に参加を呼びかけた結果、53 名の登録参加者を得ることができ、2 日間に亘る活発な議論を行うことができた。

極短周期アンジュレータは、KEK-PF において開発が進められている。現状の到達点と展望に関する報告 (KEK 山本) の後 (以下略敬称)、線形加速器関連 (KEK 中村)、KEK 宮島、RIKEN SPring 8 Center/JASRI 原、RIKEN SPring 8 Center 田中、広大 栗木)、レーザー加速器関連 (JAEA 関西研 神門)、および蓄積リング型加速器関連 (JASRI 高雄、JASRI 早乙女、JASRI 大熊、分子研 加藤、



図1 会場の様子。

東北大 濱) の成果に関する研究報告と議論が行われた。併せて、極短周期アンジュレータ光源を利用する科学研究の可能性についての検討 (KEK 足立伸一、KEK 足立純一) を行った後、まとめ (JASRI 熊谷) の議論が行われた。個々の報告の詳細については近く公表される予定の会議録を参照して頂きたい。

極短周期アンジュレータの実用化に向け、その構造的課題、加速器導入時の電子ビームへの影響とアンジュレータ磁石の減磁の問題、極短周期アンジュレータの狭い波長可変範囲の利用実験における問題等、今後解決すべきことは多く存在する。これらの解決のために、磁性材料開発を含めた光源・加速器・利用実験各分野の密接な連携の重要性を再認識し、若手人材の育成を含めた今後の展望を確認して研究会を閉幕した。

また、初日の会議終了後にはつくば駅周辺某所において懇親の会を設けることができた。当初 2 時間の予定であったにも拘わらず参加者の熱気に満ちた議論は止まず、宴は深夜に及んだことを申し添えます。

開催趣旨

現在 KEK-PF では、PF2.5GeV リングにおける真空封止型短周期アンジュレータ開発の成功に基づき、さらに高いエネルギーのアンジュレータ放射を、より低次のアンジュレータ放射において短いアンジュレータ周期長を用いて実現するために、極短周期アンジュレータの開発が進められている。極短周期アンジュレータを用いた光源開発においては、極めて短い (数 mm) 周期長の故に本質的に狭小なギャップ (1 mm 程度) を必要とするアンジュレータを許容する加速器が要求される。

リング型光源加速器においてアンジュレータを収容可能な非常に開口の狭い直線部を実現することは容易ではないと考えられる一方で、極短周期アンジュレータを光源とする場合、アンジュレータ直線部の全長総和を非常に短くできることが、新しい光源加速器の検討に大きな自由度を与えるものと期待される。

提案者達は上記の観点から、本研究会において極短周期アンジュレータの可能性を展望するとともに、このような

光源加速器の実現性について検討を行い、新しい放射光源加速器の将来像を模索したいと考える。検討対象には、現在国内で最高の電子ビーム性能を実現している SPring-8、さらに高いビーム性能実現を目指して計画立案中の ERL 光源加速器、東北光源計画加速器、および SPring-8II 等を含め、最終的には極短周期アンジュレータに特化した光源加速器設計にむすびつきたいと考える。

さらに、現在はまだ我々の視野に入っていない新奇なアイデアについても議論が及べば幸いである。

提案代表者：

山本 樹 (KEK-PF 放射光研究施設・教授)
熊谷 教孝 (高輝度光科学研究センター・専務理事)

プログラム

9月18日(水)

14:00-14:10 「挨拶」 村上洋一 (KEK)

座長：山本 樹 (KEK)

14:10-14:40 「極短周期アンジュレータの開発と今後の展望」 山本 樹 (KEK)

14:40-15:10 「ERL 将来光源計画と cERL 周回部進捗状況」 中村 典雄 (KEK)

15:10-15:40 「cERL 入射部立ち上げと電子銃および空洞開発の現状」 宮島 司 (KEK)

15:40-16:00 コーヒーブレイク

座長：渡部貴宏 (JASRI)

16:00-16:30 「SACLA 線形加速器の性能と課題」 原 徹 (RIKEN SPring-8 Center /JASRI)

16:30-17:00 「挿入光源の次世代化に向けた新しいコンセプト」 田中 隆次 (RIKEN SPring-8 Center)

17:00-17:30 「レーザー電子加速の現状と小型放射光源への応用の可能性について」 神門 正城 (JAEA 関西研)

18:30- 懇親会



図2 コーヒーブレイクでの様子。

9月19日(木)

座長：足立伸一 (KEK)

9:30-10:00 「アンジュレータ極狭ギャップのビームダイナミクスへの影響」 高雄 勝 (JASRI)

10:00-10:30 「1 回対称リングの安定性」 早乙女光一 (JASRI)

10:30-11:00 「SPring-8 加速器診断 BL での極短周期アンジュレータの性能試験」 大熊 春夫 (JASRI)

11:00-11:30 「位相空間回転によるマイクロバンチ構造の生成」 栗木 雅夫 (広島大)

11:30-13:00 昼食

座長：渡部貴宏 (JASRI)

13:00-13:30 「小型放射光リングにおける極短周期アンジュレータ」 加藤 政博 (分子研)

13:30-14:00 「東北放射光計画 - 低エミッタンス 3 GeV 光源リングの概要 -」 濱 広幸 (東北大)

14:00-14:30 「極短周期アンジュレータ光源による利用研究 1」 足立 伸一 (KEK)

14:30-15:00 「極短周期アンジュレータ光源による利用研究 2」 足立 純一 (KEK)

15:00-15:30 「まとめ」 熊谷 教孝 (JASRI)

AOFSRR2013 報告

放射光科学第二研究系 足立伸一

2013年9月21日から24日までの4日間に亘り、姫路市内のイーグレ姫路およびSPring-8サイトにおいて、放射光科学アジアオセアニアフォーラム (Asia-Oceania Forum for Synchrotron Radiation Research, AOFSRR2013) が開催された。このフォーラムは、アジア・オセアニア地区の放射光科学における連携をテーマとした催しである。2006年につくばで開催された第1回を皮切りに、ほぼ毎年各国持ち回り (新竹 (台湾, 2007年), メルボルン (オーストラリア, 2008年), 上海 (中国, 2009年), ポハン (韓国, 2010年), バンコク (タイ, 2012年)) で開催されており、今回は第7回となる。ちなみに2011年のAOFSRRはバンコク市内の大洪水のため開催直前にキャンセルされ、翌年に開催された。

9月21日のウェルカムパーティーに続いて、9月22日、23日に主要なセッションが開催され、24日にはSACLAへのサイトツアーが行われた。

22日のオープニングでは、地元兵庫県出身で元文部科学大臣の渡海紀三朗衆議院議員が挨拶し、衆議院科学技術・イノベーション推進特別委員会での議論などについて紹介した。続く施設建設等に関するセッションでは、まず理化学研究所播磨研究所長、放射光科学総合研究センター長の石川哲也氏が Global Trends of DLSR and XFEL という題目で、最近の回折限界光蓄積リング (DLSR) と X線自由電子レーザー (XFEL) の世界的な動向を取り上げて紹介し

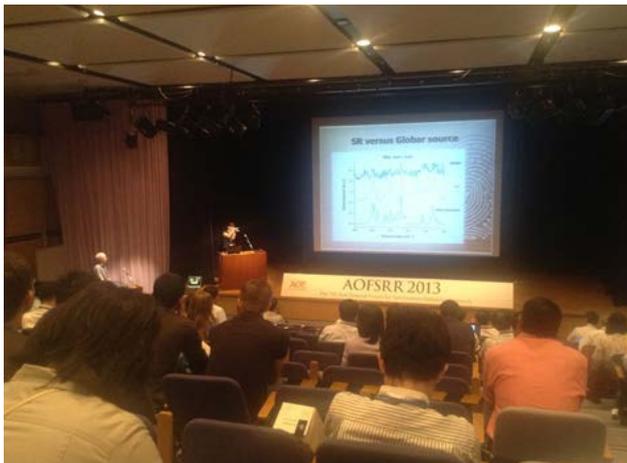


図1 講演の様子。

た。続いて、台湾・国家同步輻射研究中心（NSRRC）の Shin-Lin Chang 氏が、現在建設中の Taiwan Photon Source (TPS) の現状を紹介し、加速器性能とビームライン建

設計画について詳しく説明した。Pohang Accelerator Lab (PAL) の In Soo Ko 氏は、PAL-XFEL プロジェクトの進捗状況について紹介した。現在、建屋の土木工事が進んでおり、また主要なコンポーネントの設計も進んでいるが、建設予算配分の不足により全体計画が遅れ気味とのことだった。上海放射光施設の Hongjie Xu 氏は中国で進行中の放射光プロジェクトについて紹介し、タイ放射光研究所の Sarawut Sujitjorn 氏は ASEAN 諸国が共同運営する新しい放射光施設の枠組みについて紹介した。その後、アジア・オセアニア地区における放射光科学のトピックスを取り上げた2日間のセッションが開催され、PFからは、雨宮健太教授が Real-time observation of surface chemical reaction at millisecond resolution by means of soft X-ray dispersive XAFS というタイトルで、また山本樹教授が Development of Very Short Period Undulators というタイトルで講演を行い、最新の研究成果について報告した。最終日には参加者のうちの10数名が SACLA の見学会に参加したようである。

次回第8回は、台湾で開催される予定である。



図2 全体集合写真。

イギリス RAL 滞在記: 中性子散乱実験

慶應義塾大学理工学部 千葉文野

2013年9月28日から10月9日まで、中性子散乱実験のため英国の Rutherford Appleton Laboratory (RAL) に滞在しました。図1は、共同研究者の川北さんと服部さん(共に J-PARC) と RAL の入口で撮った写真です。私は、ここしばらく放射光を用いた実験を主としていたので、実験責任者としての中性子散乱実験は大変久しぶりでした。

初めて宿舎の Ridgeway House に泊まりましたが、施設の目の前なので、深夜や早朝に歩いて実験ホールに行くのに便利でした。宿舎には、機能的で広い仕事のスペースがあり、机には6個の電源を備えていて、パソコンや携帯電話等の充電に重宝しました。机を照らす照明が3個あるのが格好良いと感じました。朝食付き、一泊税込58ポンドで、宿舎としては高価に感じられるのと、洗濯機が2台しかないのは少し不便な点です。トイレとシャワーのある部屋はやけに広いのに、シャワーブースは半畳程度とやけに狭いのもバランスが変でした。しかし、欠点を上回る良い点が沢山ありました。ベッドが広くて大変寝やすく快適で、部屋は KEK の宿舎よりも広く感じられ、ベッド横に絵が飾ってあり、部屋の照明は間接照明、フロントの天井には光ファイバーを使った飾りの照明と、全体的に遊び心があります。部屋や公共の場所の装飾に遊び心が感じられることは、RAL 全体について言えることで、RAL に入ってからすぐの受付にあるソファやその配置も美しく、それをそこに置いた人がさぞかし楽しかったらうと思える遊び心あるデザインで、こういう感覚は日本の施設にはあまり見られないように思います。使えれば良い、という以上の、研究生生活を楽しむマインド、また、無難さを求めすぎず、ある程度デザイナーの主張を受け入れるような心の広さは、個人的にはとても好きなところですが、そもそもイギリスでは、



図1 RAL 入口の前にて。左から千葉、共同研究者の服部高典さん、川北至信さん。



図2 サンプルからセルに交換するところ。サンプル部のニオブ円筒は先方の担当者が溶接で作って下さったもの。ニオブ筒に触れている2本の線が熱電対。

オリジナリティが高く評価され、人種の多様さからか、少し変な人でも、受け入れる性質があり、日本にいるときのように空気を読む必要がないのが楽である反面、自己責任の文化がありますから、日本と比べると、生活していく日々にはサバイバルするという感覚があるように思います。

RAL は公共の交通手段によるアクセスが不便な場所にあるので、空港からのタクシーが無料で手配できることに長年(少なくとも私が初めて行った2000年には)なっていました。車で1時間程度ですから、これは本当にありがたいサービスでしたが、この11月からタクシー制度が廃止になったのは実に残念なことです。イギリスではオートマ車のレンタル代金が高価ですし、空港から RAL まで行くのが、今後は大変だなおもいます。

実験環境の整備や提供は以前から素晴らしいと感じている部分です。いつもビームライン上に乗せる高温炉を使わせていただくのですが、1000°C まで到達できるものを無料で利用できるばかりか、サンプル(およびセル)だけ準備して、その形状を伝えておけば、それに合わせた保持器具をニオブフォイルのスポット溶接によって予備も含めて何本か準備しておいてくださり、炉へのサンプルのセットでは高価なガドリニウムフォイルも提供いただけて、至れり尽くせりです。難点は、先方が大丈夫と言っていたサイズのセルを準備して行っても、必ずしも大丈夫でないことがあり、前日に部品を作り直して下さるので、一応なんとかなるのですが、最初からメールで詳細までチェックして下さるほうがドタバタせず安心できるという点と、セッティングを先方の担当者がやって下さってしまうので、熱電対の接触の確認や、セッティングのやり直しをお願いを、気を使ってしまい言い出しにくいことです。今回は共同研究者の服部さんが、熱電対の接触状態を見て、ちゃんと

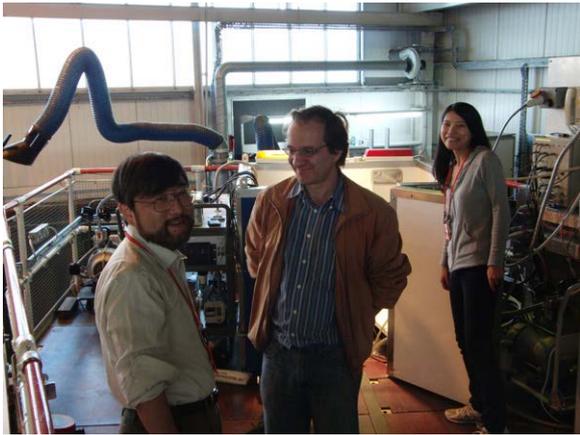


図3 装置 OSIRIS の前にて。左から川北さん、装置担当者の Franz Demmel さん、千葉。その奥の扉の向こう側の下部に装置が沈めてありビームは足元の床よりも下を通る設計。服部さんが撮影。

接触していないのではとご指摘くださり、大変ありがたかったと同時に、やはりそこは、言うべきことは言わねばならないなど、勉強になりました。図2は、装置担当者がサンプル交換をして下さっているところの写真です。図3は、サンプルの測定が終わり良いデータが取れて、あとは空セルを取るばかりとなって笑顔で装置 OSIRIS の前で真空が引けるのを待っているところです。今回は久しぶりの中性子散乱でしたが、皆さんが全力で知恵を貸して下さり、本当に勉強になった上に、良いデータが取れて素晴らしい滞在でした。早朝にランニングをしてみると、朝焼けを背景に芝生に霧が落ち、幻想的な風景で大変美しかったです。

今回の反省点は、お土産にらくがんを持参してしまったことで、日本人にはおいしく感じられても、イギリス人には単なる固い砂糖の塊にしか思えなかったであろうと思われます。以前に某東京銘菓を持参したときも、水分がないのねえといった反応で、良さを分かってもらえなかった気がします。美味しい洋菓子を持参した方が無難だとやっと気づきました。今後は気を付けたいと思います。

ドイツ電子シンクロトロン (DESY), PETRA III 拡張計画, 高圧プレスビームライン

ドイツ電子シンクロトロン, フォトンサイエンス
西山宣正

私は、2012年4月からドイツ電子シンクロトロン(DESY)に勤務し、ドイツの第3世代放射光施設である PETRA III の拡張計画の中で建設される大容量高圧発生装置 (Large Volume Press, LVP) を使用したビームラインの manager としてビームラインの設計、および LVP を使った研究に従事しています。この記事では、私が知る範囲ですが DESY, PETRA III, PETRA III 拡張計画、さらには、私が

担当するビームライン計画の紹介をさせていただきます。

DESY は北ドイツ、エルベ川沿いのドイツ第2の都市、ハンブルグにあります。ヨーロッパの主要都市から直接アクセスできるハンブルグ空港から DESY まではタクシーで20分程度、近郊電車で乗り換えなし45分程度で行くことができます。DESY のキャンパスは、ハンブルグ中心部から10 km ほどのところにあり、近郊電車で20分程度の距離です。第3世代放射光施設をもつ研究所としては、大都市からのアクセスがとてもいいと言えます。

DESY は、ヘルムホルツ協会の研究施設のひとつです。DESY の運営資金の90%以上は連邦政府予算によって賄われているので、ほとんど国立研究所だという印象を受けています。私が所属する DESY フォトンサイエンスは光を使ったサイエンスを推進する部門で、現在稼働している主要な研究施設は、PETRA III と自由電子レーザー、FLASH です。PETRA III は、2009年から稼働を開始した世界でもっとも高輝度な放射光施設のひとつです。現状の PETRA III は、リング全周の8分の1だけを覆う弧状の実験ホール(図1)に14本のビームラインが稼働しています。フォトンファクトリーのような円形に近い形、Spring-8 のようなリング状ではないため、世界の放射光実験ホールの中でも特殊な形をしています。FLASH は、2005年から世界で初めて本格的に稼働し始めた UV、軟X線領域の自由電子レーザーです。現在、5つの実験ステーションが稼働しています。

現在、DESY フォトンサイエンスでは、複数の研究施設の拡張計画が同時進行しています。私が関与しているのが、放射光施設 PETRA III の拡張計画です。DESY では第3世代の PETRA III と、第2世代の DORIS-III が同時に稼働していましたが、DORIS-III は2012年10月に閉鎖され、現在は PETRA III のみが稼働しています。PETRA III 拡張計画 (PETRA III extension project) では、DORIS-III の実験ステーションの一部および、複数の新しい枠組みのビームライン (主に国際協力によって建設されるビームライン) を、新しく建設する2つの実験ホール (Hall North, Hall East) に設置します (図2)。リングの長い直線部を利用し、そ



図1 DESY フォトンサイエンスの実験施設 (DESY ホームページより)。

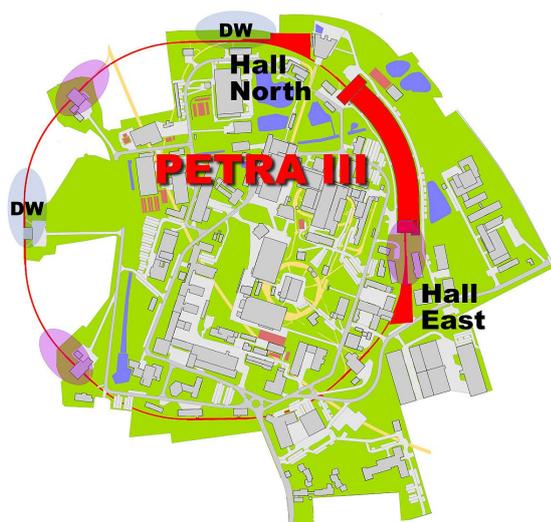


図2 PETRA III 拡張計画 (DESY ホームページより)。

ここに挿入光源を設置し、それに隣接する弧状の部分にビームラインを設置します。Hall North の直線部には、現状の PETRA III を低エミッタンス化するためにダンピングウィグラーが設置されています。この PETRA III 拡張計画では、このダンピングウィグラーから生み出されるともパワフルな高エネルギー X 線も実験に使用します。PETRA III 拡張計画の実験ホール建設は、2014 年 2 月から開始される予定です。2015 年の始めから、いくつかのビームラインでコミショニングが開始される予定です。

FLASH の拡張計画、FLASH II の建設は既に 2011 年に開始されています。FLASH II では、6 本のビームライン建設が計画されています。自由電子レーザーに関しては、DESY 単独の計画ではありませんが、ヨーロッパ 12 カ国による共同プロジェクトとして、DESY 敷地内から出射される全長 3.4 km の European XFEL (X-ray Free Electron Laser) の建設が 2009 年から開始されています。10 の実験ステーションのための地下実験ホールが建設され、2015 年からコミショニングが開始される予定です。これらの光を利用した実験施設と強くリンクする研究施設として、NanoLab が建設されます。NanoLab では、電子顕微鏡を利用したナノキャラクタリゼーション、薄膜やナノ物質の合成設備が設置される予定です。DESY 研究者はもちろん、放射光や自由電子レーザーのユーザーもマシンタイムの直後に試料の評価をするため、あるいは NanoLab で合成した試料をすぐに PETRA III、FLASH の実験に使用することが可能になります。この施設の開始も、2015-2016 年に予定されています。以上のように、DESY フォトンサイエンスは大きく変化しつつあり、数年後には拡張された第 3 世代放射光施設 PETRA III、UV から軟 X 線の自由電子レーザー FLASH および FLASH II、硬 X 線までカバーする European XFEL、さらには試料評価のための NanoLab と複数の施設がひとつのキャンパス内で連携する研究拠点になります。DESY はドイツの研究施設ですが、この過程

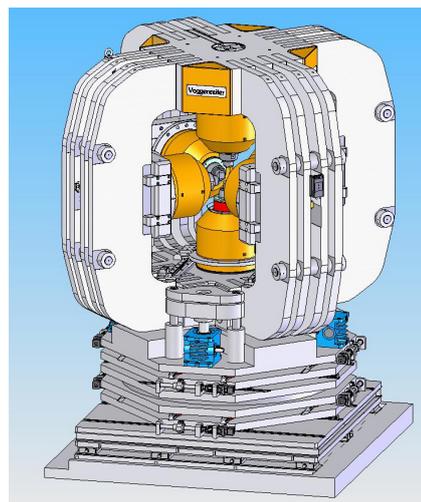


図3 PETRA III 拡張計画の LVP ビームラインに導入予定の装置の概念図。

で大きく国際化しているように感じます。

最後に簡単に、PETRA III 拡張計画における大容量高圧発生装置、LVP を使用したビームラインを紹介させていただきます。このビームラインの目的は、実験的に作り出した高圧状態をその場で X 線により観察することです。ちなみに、LVP とシンクロトロンを組み合わせたのは日本発の実験手法で、PF-AR に設置されている MAX-80 が世界初の放射光施設に設置された LVP です。PETRA III 拡張計画では、6 つの油圧ピストンを備えた装置を導入予定です (図 3)。ステージも合わせると高さ 3 m、重さ 30 トンにもなる大型装置です。この装置も、岡山大学地球物質科学研究センターで開発されたもので、現在、日本で 2 台 (岡山大学、JPARC)、ドイツで 2 台 (バイロイト大学) が稼働しています。この装置の特徴は、立方体の加圧空間を 6 方向から独立に加圧することにより等方性の高い加圧ができること、あるいは、ある封圧下で差応力を発生させ、高圧下における物質の変形や破壊を起こすことができる点です。この装置を、先に述べたダンピングウィグラーを光源とするビームラインに導入します。高圧下におかれた試料はその周りを圧力容器などによって囲まれているため、試料の様子をその場観察するためには高輝度の硬 X 線が必要となり、ダンピングウィグラーはこのビームラインの光源としては適しています。

日米欧の放射光施設、10 ビームラインほどで LVP を利用した研究が行われています。そのほとんどで、何らかの形で日本人が関与し、ビームラインが立ち上げられ研究が進められてきました。私にドイツで研究をする機会が巡ってきたのも、日本の高圧科学の先輩方の長年に渡るご努力があればこそと思っています。その歴史を汚さぬようにしたいという思いで仕事に取り組んで行きたいと考えています。

防災・防火訓練が実施されました

放射光科学第二研究系 丹羽尉博・山田悠介

KEK では防災・防火訓練を毎年 1 回行っていますが、2013 年度の訓練を 11 月 1 日（金）午後 1 時 30 分より行いました。KEK では、震度 4 以上の緊急地震速報が茨城県南部に発令されると自動的に構内に非常放送が行われます。PF、PF-AR では緊急地震速報の非常放送があった場合には地震に備えチャンネルクローズし、実際の地震の震度が 4 以上だった場合にはビームダンプすることになっています。

今回の訓練では、震度 5 強の地震により建物に被害が出たため運転当番が避難を指示するという想定で訓練を行い、ユーザーの方々にも実験を中断して参加して頂きました。非常放送から地震到達までの間に身の安全を確保し、地震がおさまった後に職員の誘導により指定の避難場所に避難して頂き安否の確認を行いました。PF では自衛消防隊の避難誘導班員により PF 実験ホール内に逃げ遅れている人がいないか捜索を行いました。避難誘導班員は負傷者役 1 名を無事発見し、トランシーバーにて応援を求め、担架により負傷者役を搬出することができました。

訓練終了後にアンケートを行い、37 名のユーザーの皆様から有意義なご意見を頂きました。昨年までに実施された防災訓練でのアンケートによると、30~40% の方が避難場所を知らない状況でした。このため、避難場所の周知徹底の努力をした結果、今回の訓練では約 85% のユーザーの方が避難場所を知っているとご回答頂きました。一方で、「放送があまり聞こえなかった」「放送がうるさすぎて不明瞭だった」という放送設備に関するご意見も頂きました。今回の訓練でも例年に倣い MBS を一時強制的に閉じました。ユーザーの皆様には測定が中断となるご迷惑をお掛けしましたが、「このような訓練を実施することをどう思うか」との問いには 95% の方が「ユーザー参加でやるべきだ」とご回答されています。このような、ユーザーの皆様の非常に高い防災意識があって初めて PF のような共同利用施設では安全な研究活動が行えると思います。今後とも引き続き PF での防災、安全活動にご協力頂きますようよろしくお願い致します。

繰り返しになりますが、防災は単に避難するだけでなく、実験装置をきちんと固定する、高温になる装置の取り扱いに注意する、電気配線に注意する等、普段からの防災意識が重要です。PF での実験中に危ないと



図 1 安否確認を行うユーザーの皆様。

感じたら、些細なことでも運転当番にご連絡頂くかビームタイム利用記録に記載して頂ければ幸いです。

最後になりましたが、約 80 名のユーザーの方々にご貴重なビームタイムを割いて訓練に参加して頂きましたこと、この紙面をお借りして御礼申し上げます。

PF トピックス一覧 (8 月～ 10 月)

KEK では 2002 年より「トピックス」、「ハイライト」、「プレスリリース」と題して最新の研究成果やプレスリリースなどを紹介していますが、PF のホームページ (<http://pfwww.kek.jp/indexj.html>) でも、それらの中から、または PF 独自に記事を作成して掲載しています。各トピックスの詳細は「これまでのトピックス」(<http://pfwww.kek.jp/topics/index.html>) をご覧下さい。

2013 年 8 月～ 10 月に紹介された PF トピックス一覧

- 8.01 【連載科学マンガ】カソクキッズ セカンドシーズン第 10 話「ミクロな世界を見る！ 2～タンパク質を作るリポゾーム～」が公開されました。
- 8.02 今年の KEK 一般公開は 9/8（日）に開催します。
- 8.20 Photon Factory News Vol. 31 No. 2 AUG 2013 がウェブに掲載されました。
- 9.02 【連載科学マンガ】カソクキッズ セカンドシーズン第 11 話「炭素と分子と高分子～」が公開されました。
- 9.06 量子ビームによる物質科学を推進、LPBMS2013 開催
- 9.11 「イノベーションフォーラム in つくば 2013」の開催に協力
- 9.13 【KEK つくばキャンパスで一般公開 2013 を開催
- 9.18 高校生等実習受入事業 この夏、岩手県立盛岡第一高等学校 他 8 機関が参加
- 9.18 第 7 回 サマーチャレンジ開催される
- 9.20 高性能光源開発のための研究会を開催
- 10.01 【連載科学マンガ】カソクキッズ セカンドシーズン第 12 話「宇宙をみる～前編～」が公開されました。
- 10.03 ウィンターサイエンスキャンプ in KEK 「加速器って何だ？ 素粒子から身近な物質までを探る」
- 10.04 11/16（土）に東京国際フォーラムで大学共同利用機関シンポジウム 2013 『万物は流転する 因果と時間』が開催されます。
- 10.10 「サイエンスの美」展を東京・銀座で 10/18（金）まで開催しています。
- 10.15 安価で高性能なハードディスクドライブ（HDD）記録媒体の実現可能性～白金フリー酸化物垂直磁気記録材料の薄膜化に世界初成功～
- 10.16 清泉女学院の生徒 2 名、KEK で職場体験
- 10.28 11/15（金）に東京大学柏キャンパスで『第 1 回大型研究施設と大学院教育の連携シンポジウム』が開催されます。

ユーザーぐるーぷ紹介シリーズ 核共鳴散乱ユーザーグループの紹介

兵庫県立大学大学院 小林 寿夫

1. はじめに

PF-AR の放射光専用化を機会として、放射光核共鳴散乱法を用いて研究を協力して行ってきた関係者が集まってユーザーグループが発足致しました。放射光を用いた無反跳核共鳴励起（メスバウアー効果）の提案がなされたのは 1971 年です。しかし、実際に放射光による核共鳴ブラッグ散乱が明確に観測されたのは、その 13 年後の 1984 年です。放射光を用いた研究分野の中でも、この実験手法自体は比較的新しいものと言えます。また、核共鳴散乱の測定には 5 keV 程度以上の大強度高エネルギー X 線が必要とされるために、国内の放射光施設においては PF-AR と SPring-8 以外の施設では研究が行われていません。そのため放射光核共鳴散乱を用いた研究自体は、現在でもポピュラーなものとは言えないかもしれません。しかし、放射性同位体線源を用いて無反跳核共鳴吸収を利用するメスバウアー分光法は、 ^{57}Fe 原子核のメスバウアー効果測定が比較的容易なため、鉄化合物・合金研究のための実験手法として物理、化学や地球科学の分野で大きく発展してきました。一方、メスバウアー効果が観測されている元素は 40 を超えています。しかし、鉄を含まない化合物・合金研究へのメスバウアー分光法の展開は限定されています。その大きな理由は、それぞれのメスバウアー元素に対して適当な放射性同位体線源を用意しなくてはならないことにあります。しかし、大強度放射光施設の利用が可能となった現在、今までの放射性同位体線源を用いるメスバウアー分光法では測定困難な元素（核種）や、実現不可能であった測定手法（核共鳴弾性・非弾性散乱など）も可能となるなど、多くの可能性を秘めた研究分野です。

ここで、現在主として行われている時間領域での放射光核共鳴散乱測定手法では、シングルバンチもしくはセペラルバンチ運転が必要とされます。これは、核共鳴条件下においても原子核による X 線散乱強度は電子によるそれに比較して数桁以上小さいため、核共鳴散乱では放射光の短パルス性と X 線散乱過程での固有時間スケールの違いを利用することで原子核による散乱成分のみを測定しているためです。PF-AR は、常にバンチ間隔 1.2 μs のモードで運転が行われているため、 ^{57}Fe (寿命: $\tau_0=141\text{ ns}$) や ^{119}Sn ($\tau_0=25.6\text{ ns}$) といった励起状態の寿命の長い原子核を用いた電子状態の研究（核共鳴前方散乱法）に適した施設となっています。

本ユーザーグループの責任者は、瀬戸誠先生（京大）から 2007 年に私に引き継がれています。国内には PF-AR と

SPring-8 以外に測定可能な施設が存在しないため、本ユーザーグループのメンバーのほとんどが、SPring-8 の核共鳴散乱研究会のメンバーと重複しています。そのため、ユーザーグループの活動としては、合同で年 1 回の研究会を行っています。このユーザーグループのメンバーによって主として行われている研究は、核共鳴散乱過程の基礎的研究、核共鳴散乱測定のための要素技術研究及びこの手法を直接利用した凝縮系や地球惑星科学の研究など幅広い分野に渡っています。また、電子遷移による核励起という原子核物理の研究も行われています。

2. どのビームラインを使って研究を行っているのか

前述しましたように、現在国内で放射光核共鳴散乱実験が行える施設としては実質的に PF-AR と SPring-8 だけです。PF-AR では、1990 年に世界に先駆けて核共鳴散乱専用 X 線アンジュレータ・ビームライン AR-NE3 を建設し、多くの先端的な研究成果を生み出してきました。しかし、2008 年 3 月をもって、AR-NE3 専用ビームラインとしての利用は終了となりました。その後、2009 年からは新 AR-NE1A で核共鳴散乱法が利用できるようになっています。このステーションでは、これまでの凝縮系の研究だけでなく地球惑星科学的研究のための実験環境が整備されてきています。一方、核共鳴散乱への応用を想定した、高エネルギー X 線検出用高速シンチレーション検出器と、Si-APD リニアアレイ検出器の開発研究は BL-14A で行われています。

3. どのような測定環境が整いつつあるのか

現在の AR-NE1A ステーションでは、KB ミラーを用いたビーム集光により AR-NE3 でも行われていた超伝導マグネットと加圧装置であるダイヤモンド・アンビル・セル (DAC) を組み合わせた (図 1) 低温・高圧力・強磁場という多重極限環境下での ^{57}Fe 核共鳴前方散乱測定が可能となってきています。Si-APD 検出器の最適化などにより

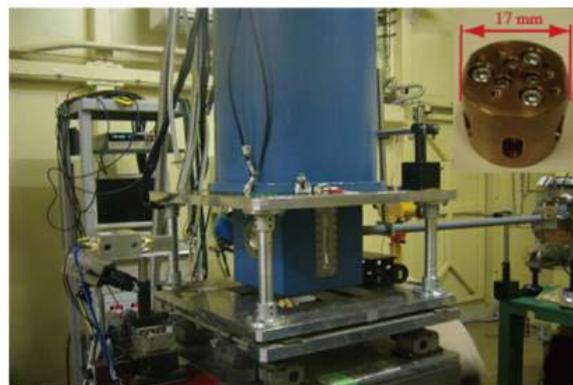


図 1 超伝導マグネットとミニチア DAC。

核共鳴前方散乱時間スペクトル測定の高効率化も行われています。さらに、BL-13Aでのレーザー加熱ダイヤモンド・アンビル・セル(LHDAC)を用いた高温・高圧力下X線回折と核共鳴前方散乱法との統合も目指しています。X線回折実験用に設置されたLHDACの回折実験用架台上で合成された試料に対し、大きな架台移動や変更作業を行わずに同一試料に対する ^{57}Fe 核共鳴前方散乱時間スペクトルの測定を可能にする改造を行ってきました。X線回折実験用の大型架台を電動化し、X線光学系も回折実験用のモノクロ・メータと核共鳴散乱実験用の高分解能モノクロ・メータを両実験モードでの最適値へと電動で再現することは原理的には可能です。現在、高温・高圧力下でのX線回折パターンと ^{57}Fe 核共鳴前方散乱時間スペクトルの連続測定を可能とするべく環境整備を行っています。

4. どのような研究が繰り広げられているのか

集光した入射X線を用いることが可能な、AR-NE1Aステーションにおける核共鳴散乱法を用いた凝縮系研究でのキーワードは極限状態です。高圧力や強磁場などの環境変数を変えることによる極限環境下と、固体の表面や界面などの次元性の低下による極限状態での元素選択した電子状態の研究を行っています。

例えば、正方晶 AFe_2As_2 ($\text{A}=\text{Sr}, \text{Ba}, \text{Eu}$) 化合物は、最近発見された FeAs 系高温超伝導体の母物質の一つです。常圧力下では約200 K以下で斜方晶への構造変態をとめない反強磁性状態へと転移します。この相転移は圧力で抑制され磁気秩序が不安定になる(磁気量子相転移)近傍で超伝導状態が低温で出現します。周期性の乱れを導入することなく混成・バンド幅を制御し化合物の基底状態を変化させることが可能な圧力は、超伝導機構を研究する上において最も重要な変数の一つです。さらに、この超伝導状態の出現には Fe の3d電子が直接関与していることから、AR-NE1Aステーションで実現されている多重極限環境が国内外で最も適した実験環境です。現在、単結晶試料を用いた多重極限環境下での ^{57}Fe 核共鳴前方散乱の測定結果から、超伝導状態と磁気秩序状態の共存など興味ある現象が観測されています。

固体の表面や界面では、対称性の低下や界面での異種原子との相互作用にとめない、しばしば固体中心とは異なる物性が発現します。そのひとつの興味ある例が、表面・界面での磁気キャンピングです。表面・界面での磁気キャンピングとは、膜内部では面内が磁化容易軸であるのに対し、表面・界面においては面直磁化を示す現象です。鉄を中心にした金属・金属酸化物の表面・界面での磁気構造を明らかにすることを目的とした研究も進められています。現在、AR-NE1Aにおける核共鳴散乱測定法を用いて、 $\text{Si}(111)$ 上の鉄薄膜について実験を行い、表面磁気キャンピングを観測することに成功しています。

これらの実験は、PF-ARの特徴であるバンチ間隔1.2 μs のモードによる運転と核共鳴励起確率の入射X線偏光依存性を利用した成果です。すなわち、AR-NE1AではKBミ

ラーによる集光ビームを利用できることで、極限状態での測定では第三世代放射光施設に匹敵する感度での実験が行われています。

マンツルの代表鉱物中の鉄の価数変化や磁気構造またスピン状態変化が地球規模のダイナミックな現象に関連していることが示唆されています。これまでの地球惑星科学における高圧力下でのその場観察手段の主流となっているX線回折実験からは、極僅かな構造変化を読み取ることが困難なため、局所プローブである ^{57}Fe 核共鳴前方散乱が高圧力下での有用な実験手法として着目されています。特に、LHDACを用いた高温高圧力環境下で合成された試料に対しても、様々なその場観察実験を総合して試料を評価することが望まれています。現在でも、PFでは高圧力下での合成試料を複数のステーションに利用申請を行って、X線回折実験、分光実験、マイクロイメージング等のデータを取得することは不可能ではありませんが、大変効率が悪い状況です。そこでAR-NE1Aでは、回折実験用に設置されたLHDACの回折実験用架台上で合成された試料に対し、大きな架台移動や変更作業を行わずに同一試料に対する核共鳴前方散乱測定を可能にする改造が行われ、1時間以内に二つの実験モードを切り替える整備が進んでいます。今後、高温高圧力環境下でのX線回折と ^{57}Fe 核共鳴前方散乱の複合測定が実現し、マンツル鉱物中の鉄の価数変化と地球規模のダイナミックな現象との相関の解明が期待されています。

4. PFへの要望

十数から数十 keVの高輝度高エネルギーX線を高分解能モノクロ・メータで数 eVまで単色化して入射X線として用いる核共鳴散乱においては、SPring-8でのTopUp運転の実現により高分解能モノクロ・メータの安定性の向上という大きな恩恵を受けています。その結果、測定の高効率化などが実現されてきました。現在、KEKつくばキャンパスでは、PF-AR直接入射トンネルを建設するための工事が始まっています。その結果、PF-ARでもTopUp運転が可能になると伺っていますが、いつごろ実現されるのでしょうか。できる限り早期でのTopUp運転実現を要望いたします。

< PFからの回答 >

PF-ARのTop-Up運転の有効利用をご計画いただきありがとうございます。現在KEKキャンパス内で進行中のPF-AR直接入射トンネル工事は、PF、PF-ARおよびSuperKEKBへの多リング同時入射を実現するための工事ですが、その結果、PF-ARのTop-Up運転が可能となる予定です。現在の予定では、平成28年4月頃からのTop-Up運転開始を目指しています。

ユーザーぐるーぷ紹介シリーズ 低速陽電子ユーザーグループ紹介

東京理科大学 長嶋泰之

電子の反粒子である陽電子は、古くから金属結晶のフェルミ面の観測や金属や半導体中の空孔型格子欠陥の検出に用いられ、多くの研究成果をもたらしてきました。真空中や気体中、あるいは絶縁体中におけるポジトロニウム（電子と陽電子の水素原子様束縛状態）の研究も行われ、量子電気力学の検証から原子・分子、固体物理に至るまで、様々な研究が展開されています。

陽電子消滅の研究では通常、 β^+ 崩壊する放射性同位元素から放出される陽電子が用いられます。このような放射性同位元素は多数存在しますが、陽電子消滅の実験で利用されるのは ^{22}Na です。 ^{22}Na から放出される陽電子の放出エネルギーは、 β^+ 崩壊の特徴を反映して0から546 keVまで広がっています。均一な物質内部の性質を調べる場合にはこのままでも利用可能ですが、固体表面を調べたり、あるいは、原子・分子との相互作用を調べるには不向きです。このため、焼鈍して格子欠陥を除去したタングステンに陽電子を入射して減速し、表面から3 eV程度のエネルギーで放出させて加速し単色ビームとして利用する技術が、1970年代から開発されてきました。こうして得られる陽電子ビームは、低速陽電子ビームと呼ばれます。

KEKの低速陽電子実験施設には、この減速技術を利用した低速陽電子ビーム発生装置が設置されています。ただし、 ^{22}Na 線源から放出される陽電子ではなく、ライナックで加速した電子をタンタルに入射し、その制動放射の対生成によって得られる陽電子を用いています。このようにして得られる低速陽電子ビームは、次のような長所を持っています。

- (i) 強度が ^{22}Na を用いる低速陽電子ビームと比べて数桁高いこと。KEK低速陽電子実験施設のビームは、ミュンヘン工科大学の原子炉を用いて得られる高強度低速陽電子ビームに次いで、世界第二位の強度を有しています（ミュンヘン工科大学の低速陽電子ビームの実質的な強度は公表値よりも低いという噂があり、それが正しければ、KEKのビーム強度は世界一、ということになります）。
- (ii) ライナックの特性を反映してパルス状であること。
- (iii) 電源を切れば陽電子が発生しなくなるため、安全であること。
- (iv) ^{22}Na 線源の供給体制を気にせずに実験が可能であること。これは我々陽電子のユーザーにとって大変重要なことです。現在、 ^{22}Na を供給している施設は南アフリカにある加速器施設1箇所のみです。今後安定して供給が行われるかどうか、定かではなく、その供給体制は、陽電子消滅の研究に携わる研究者にとって大きな不安要素です。KEKの低速陽電子実験施設が存続する限り、そのような不安を全く考えることなく、安心して陽電子消滅の研究に携わることができます。

低速陽電子UGが現在行っている研究は下記の通りです。

(1) 陽電子線回折

陽電子を表面にすれすれの角度で入射すると、電子と異なって表面で全反射されるため、表面第1層の情報が得られます。この手法は反射高速陽電子回折法（reflection high-energy positron diffraction, 略してRHEPD）と呼ばれて来ましたが、低速陽電子実験施設の高輝度高強度ビームを用いることにより、全反射を生かした一段と質の高いデータが得られるようになり、全反射高速陽電子回折（total reflection high-energy positron diffraction, 略してTRHEPD）という新しい呼び名が提唱されています。入射角度を調整すれば、再表面から2層目、3層目と奥に向かって構造を確定することが可能です。最近、この方法を用いて、他の手法では決定できなかったGe(001)表面上の(4x2)Ptナノワイヤ表面の構造を決定することに成功しました。TiO₂(110)-(1x2)表面やAg(111)表面上のシリセンの構造も結果が出ています（それぞれ、投稿準備中、および投稿中）。

(2) ポジトロニウム負イオン光脱離実験

陽電子1個と電子2個から成る3体の束縛状態であるポジトロニウム負イオンの性質を調べます。たとえば高強度レーザー光を照射して電子1個を剥ぎ取って、ポジトロニウムが形成される過程を調べています。これが可能なのは、低速陽電子施設のビームがパルス状で、パルスレーザーを同期させることが可能だからです。2011年には、ポジトロニウム負イオンの光脱離を初めて実現することに成功しました（<http://legacy.kek.jp/ja/news/highlights/2011/Positronium.html>）。ポジトロニウム負イオンの光脱離では共鳴が起こることが理論的に予測されており、現在、その検証実験を行っています。また2012年には、ポジトロニウム負イオンを電場で加速してから光脱離させることによって、エネルギー可変ポジトロニウムビームを作ることにも成功しました（<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20120620140000/>）。現在、このポジトロニウムビームを使った応用研究を目指しています。ポジトロニウムビームを固体表面にすれすれの角度で入射してTRHEPDと同様な回折像を撮ることも可能になるかもしれません。

(3) ポジトロニウム飛行時間測定

低速陽電子ビームを固体に入射すると、しばしばポジトロニウムが放出されます。この現象を調べて固体表面を調べる研究が展開されています。

低速陽電子UGでは、同じメンバーが低速陽電子UAのメンバーにもなって共同利用の研究体制を作っています。この施設のスタッフは兵頭俊夫さん、和田健さんのお二人です。この体制になってから、施設が整備され、活発に共同利用できるようになりました。この施設がスタッフや資金の面でさらに充実することを望みます。

今後はこの施設を利用して、さらなる研究を展開し、世界に発信していきたいと考えています。

人事異動・新人紹介

	発令年月日	氏 名	現 職	旧 職
(辞職)	H25.9.30	伊藤 健二	Universita Pierre e Marie Curie	加速器科学支援センター シニアフェロー
	H25.9.30	米村 博樹		物構研 放射光科学第一研究系 博士研究員
	H25.10.6	CHAVAS, Leonard	Free Electron Lasers of Europe	物構研 放射光科学第二研究系 助教
	H25.10.31	脇坂 祐輝	名古屋大学	先端研究基盤共用・プラットフォーム 形成事業 研究員
(採用)	H25.10.1	須田山貴亮	先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業 研究員	物構研 放射光科学第二研究系 博士研究員

- | |
|---|
| 1. 着任日 2. 現在の所属・職種 3. 前所属・職種
4. 専門分野 5. 着任に当っての抱負 6. モットー
7. 趣味 |
|---|

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設教員公募について(依頼)

本機構では、下記のとおり教員を公募いたします。

記

公募番号 加速器13-4

1. 公募職種及び人員

助教 若干名 (任期なし)

本機構の教員の職名は、教授、准教授、講師、研究機関講師、及び助教であるが、機構の性格から、大学における講座制とは異なる運営が行われる。また、本機構の教員の定年は63歳である。

2. 研究(職務)内容

加速器研究施設では、J-PARC 陽子加速器、SuperKEKB コライダー、フォトンファクトリー加速器(PF と PF-AR)、及び電子陽電子入射リニアックの設計・建設・運転・性能向上に関連する加速器の研究を行うとともに、次世代光源、リニアコライダーなどの将来計画に向けた加速器技術開発、加速器理論等の加速器に関する広範な研究を進めている。

採用後は、加速器研究施設が進めているいずれかのプロジェクトに属して、加速器の運転、維持、開発研究を行う。

3. 公募締切

平成25年12月25日(水)必着

※ 応募者は複数の公募に応募可能である。応募に際しては希望優先順位を明示する事。

4. 着任時期

平成26年 4月1日以降、できるだけ早い時期

5. 選考方法

原則として面接選考とする。

面接予定日: 決まり次第機構 Web サイトに掲示します。

6. 提出書類

(1) 履 歴 書----- KEK指定様式

※KEK指定様式以外の履歴書を使用する場合は、通常の履歴事項の後に必ず応募する公募番号(2件以上応募の場合はその順位)、電子メールアドレス及び、可能な着任時期を明記すること。

(2) 研 究 歴

(3) 発 表 論 文 リ ス ト----- 和文と英文は別葉とすること。

(4) 着 任 後 の 抱 負

(5) 論 文 別 刷----- 主要なもの、5編以内

(6) 本人に関する推薦書または参考意見書(宛名は加速器研究施設 施設長 生出 勝宣とすること)

※研究歴・抱負の記述においては、必ずしも加速器を専門としない人事委員も含まれることから、特殊な略号の未定義な使用は控えること。

※上記の書類は、すべてA4判横書きとし、それぞれ別葉として各葉に氏名を記入すること。

(可能であれば、(1)から(4)までの提出書類をPDFファイルに変換のうえCD-RもしくはUSBメモリに保存し、提出書類とともに送付願います。)

※推薦書・参考意見書は電子メールでも結構です。(jinji1@ml.post.kek.jp)

※2件以上応募の場合であって内容が同じ場合の提出書類は一部が良いが、内容が異なる場合は提出書類を別々に用意すること(推薦書等も同様とする)。

※原則として、提出書類(CD-R、USBメモリ含む)は返却いたしませんので、あらかじめご了承ください。

※ 応募の際は必ず加速器研究施設長 生出 勝宣 に連絡し、研究内容等について問い合わせること。

7. 書類送付

送付先 〒305-0801

茨城県つくば市大穂1-1

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

総務部人事労務課人事第一係

封筒の表に「教員公募関係」「公募番号」を朱書きし、郵送(書留)または持参すること。

8. 問い合わせ先

(1) 研究内容等について

加速器研究施設 施設長 生出 勝宣 TEL: 029-864-5314 (ダイヤルイン) e-mail: katsunobu.oido@kek.jp

(2) 提出書類について

総務部人事労務課人事第一係 TEL: 029-864-5118 (ダイヤルイン) e-mail: jinji1@ml.post.kek.jp

9. その他

本機構は、男女共同参画を推進しており、女性研究者の積極的な応募を歓迎します。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設教員公募について(依頼)

本機構では、下記のとおり教員を公募いたします。

記

公募番号 加速器13-5

1. 公募職種及び人員

特別助教 若干名 (任期:平成 30 年 3 月 31 日まで)

本機構の教員の職名は、教授、准教授、講師、研究機関講師、及び助教であるが、機構の性格から、大学における講座制とは異なる運営が行われる。

2. 研究(職務)内容

加速器研究施設に属し、以下のいずれかのプロジェクト:

- ・J-PARC 陽子加速器
- ・SuperKEKB コライダー(リングおよび電子陽電子リニアック)
- ・放射光源加速器(PF/PF-AR/cEPL)

において、建設・運転維持・性能向上に従事するとともに、関連する加速器の将来計画に向けた開発研究を進める。

3. 公募締切

平成25年12月25日(水)必着

※ 応募者は複数の公募に応募可能である。応募に際しては希望優先順位を明示する事。

4. 着任時期

平成26年 4月1日以降、できるだけ早い時期

5. 選考方法

原則として面接選考とする。

面接予定日:決まり次第機構 Web サイトに掲示します。

6. 提出書類

(1)履 歴 書----- KEK指定様式

※KEK指定様式以外の履歴書を使用する場合は、通常の履歴事項の後に必ず応募する公募番号(2件以上応募の場合はその順位)、電子メールアドレス及び、可能な着任時期を明記すること。

(2)研 究 歴

(3)発 表 論 文 リ ス ト----- 和文と英文は別葉とすること。

(4)着 任 後 の 抱 負

(5)論 文 別 刷----- 主要なもの、5編以内

(6)本人に関する推薦書または参考意見書(宛名は加速器研究施設 施設長 生出 勝宣とすること)

※研究歴・抱負の記述においては、必ずしも加速器を専門としない人事委員も含まれることから、特殊な略号の未定義な使用は控えること。

※上記の書類は、すべてA4判横書きとし、それぞれ別葉として各葉に氏名を記入すること。

(可能であれば、(1)から(5)までの提出書類をPDFファイルに変換のうえCD-RもしくはUSBメモリに保存し、提出書類とともに送付願います。)

※推薦書・参考意見書は電子メールでも結構です。jinj1@ml.post.kek.jp

※2件以上応募の場合であって内容が同じ場合の提出書類は一部が良いが、内容が異なる場合は提出書類を別々に用意すること(推薦書等も同様とする)。

※原則として、提出書類(CD-R、USBメモリ含む)は返却いたしませんので、あらかじめご了承ください。

※ 応募の際は必ず加速器研究施設長 生出 勝宣 に連絡し、研究内容等について問い合わせること。

7. 書類送付

送付先 〒305-0801

茨城県つくば市大徳1-1

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

総務部人事労務課人事第一係

封筒の表に「教員公募関係」「公募番号」を朱書きし、郵送(書留)または持参すること。

8. 問い合わせ先

(1)研究内容等について

加速器研究施設 施設長 生出 勝宣 TEL: 029-864-5314 (ダイヤルイン) e-mail:katsunobu.oide@kek.jp

(2)提出書類について

総務部人事労務課人事第一係 TEL: 029-864-5118 (ダイヤルイン) e-mail:jinj1@ml.post.kek.jp

9. その他

本機構は、男女共同参画を推進しており、女性研究者の積極的な応募を歓迎します。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設教員公募について (依頼)

本機構では、下記のとおり特定有期雇用教員として、博士研究員を公募いたします。

記

公募番号 加速器13-7

1. 公募職種及び人員

博士研究員 若干名 (任期は単年度契約で2年)

博士研究員とは「専攻分野について高度な研究能力を持つ若手研究者で、一定期間にわたり共同研究プロジェクト推進のために雇用される」者である。

2. 研究 (職務) 内容

加速器研究施設では、J-PARC 陽子加速器、SuperKEKB コライダー、フォトンファクトリー加速器 (PF と PF-AR)、及び電子陽電子入射リニアックの設計・建設・運転・性能向上に関連する加速器の研究を行うとともに、次世代光源、リニアコライダーなどの将来計画に向けた加速器技術開発、加速器理論等の加速器に関する広範な研究を進めている。

採用後は、加速器研究施設が進めているいずれかのプロジェクトに属して、加速器の開発研究を行う意欲的な若手研究者を求めている。

3. 応募資格

応募締切時点で博士の学位を有する者、または着任までに学位取得が確実な者。これまでの研究分野は問わない。

4. 公募締切

平成25年12月25日 (水) (必着)

*応募者は複数の公募に応募可能である。応募に際しては希望優先順位を明示する事。

5. 着任時期

平成26年 4月1日以降、できるだけ早い時期

6. 給与

基準年俸額 3,960,000円 (事業年度の途中で採用された場合は、採用時期に見合った額) および、通勤手当

7. 選考方法

原則として面接選考とする。

面接予定日：決まり次第機構 Web サイトに掲示します。

8. 提出書類

(1) 履 歴 書——KEK指定様式

※KEK指定様式以外の履歴書を使用する場合は、通常の履歴事項の後に必ず応募する公募番号(2件以上応募の場合はその順位)、電子メールアドレス及び、可能な着任時期を明記すること。

(2) 研 究 歴

(3) 発表論文リスト和文と英文は別葉とすること。

(4) 着任後の抱負

(5) 論 文 別 刷——主要なもの、5編以内

(6) 本人に関する推薦書または参考意見書(宛名は加速器研究施設 施設長 生田 勝宣とすること)

※研究歴・抱負の記述においては、必ずしも加速器を専門としない人事委員も含まれることから、特殊な略号の未定義な使用は控えること。

※上記の書類は、すべてA4判横書きとし、それぞれ別葉として各葉に氏名を記入すること。

(可能であれば、(1)から(4)までの提出書類をPDFファイルに変換のうえCD-RもしくはUSBメモリに保存し、提出書類とともに送付願います。)

※推薦書・参考意見書は電子メールでも結構です。(jinji1@ml.post.kek.jp)

※2件以上応募の場合であって内容が同じ場合の提出書類は一部で良いが、内容が異なる場合は提出書類を別々に用意すること(推薦書等も同様とする)。

※原則として、提出書類(CD-R、USBメモリ含む)は返却いたしませんので、あらかじめご了承ください。

※応募の際は必ず加速器研究施設長 生田 勝宣 に連絡し、研究内容等について問い合わせること。

9. 書類送付

送付先 〒305-0801

茨城県つくば市大徳1-1

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

総務部人事労務課人事第一係

封筒の表に「教員公募関係」「公募番号」を朱書きし、郵送(書留)または持参すること。

10. 問い合わせ先

(1) 研究内容等について

加速器研究施設 施設長 生田 勝宣 TEL 029-864-5314 (ダイヤル) katsunobu.oide@kek.jp

(2) 提出書類について

総務部人事労務課人事第一係 TEL 029-864-5118 (ダイヤル) jinji1@ml.post.kek.jp

11. その他

本機構は、男女共同参画を推進しており、女性研究者の積極的な応募を歓迎します。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設教員公募について (依頼)

本機構では、下記のとおり教員を公募いたします。

記

公募番号 物構研13-13

1. 公募職種及び人員

助教 1名 (任期なし)

本機構の教員の職名は、教授、准教授、講師、研究機関講師及び助教であるが、機構の性格から、大学における講座制とは異なる運営が行われる。また、本機構の教員の定年は63歳である。

2. 研究(職務)内容

大学共同利用機関である物質構造科学研究所(IMSS)では、放射光、中性子、ミュオン、低速陽電子を幅広くかつ横断的に利用した物質・生命科学研究を推進している。本候補者は、同研究所放射光科学研究施設(PF)の生命科学グループに属し、主に X 線回折・散乱実験を用いた構造生物学研究の推進と、関連するビームラインおよび実験装置の性能向上および維持管理に努め、大学共同利用研究の支援を行う。さらに、本候補者は構造生物学研究センターに所属し、生体高分子の X 線回折法に関する技術開発等において先端的な研究を推進する。

3. 応募資格

博士の学位を有すること

4. 公募締切

平成25年12月13日(金)必着

5. 必着着任時期

採用決定後できるだけ早い時期

6. 選考方法

原則として面接とする。ただし、第一段階の審査として書類選考を行うことがある。
面接予定日:平成26年1月中旬(決定次第機構 Web サイトに掲示します。)

7. 提出書類

(1)履 歴 書 ----- KEK指定様式

KEK指定様式以外の履歴書を使用する場合は、通常の履歴事項の後に必ず応募する公募番号(2件以上応募の場合はその順位)、電子メールアドレス及び、可能な着任時期を明記すること。

(2)研 究 歴

(3)発表論文リスト ----- 和文と英文は別葉とし、共著の論文については、共著者名をすべて記入すること。
また、提出する論文別刷の番号には○印を付すこと。

(4)着任後の抱負(公募内容全般に対するものであること)

(5)論 文 別 刷 ----- 主要なもの、5編以内

(6)その他参考資料(外部資金獲得状況、国際会議招待講演、受賞歴等)

(7)本人に関する推薦書または参考意見書(宛名は物質構造科学研究所長 山田和芳 とすること)

※上記の書類は、すべてA4判横書きとし、それぞれ別葉として各葉に氏名を記入すること。

(可能であれば、(1)から(4)までの提出書類をPDFファイルに変換のうえCD-RもしくはUSBメモリに保存し、提出書類とともに送付願います。)

※推薦書・参考意見書は電子メールでも結構です。(jinji1@ml.post.kek.jp)

※2件以上応募の場合であって内容が同じ場合の提出書類は一部が良いが、内容が異なる場合は提出書類を別々に用意すること(推薦書等も同様とする)。

※原則として、提出書類(CD-R、USBメモリ含む)は返却いたしませんので、あらかじめご了承ください。

8. 書類送付

送付先 〒305-0801

茨城県つくば市大穂1-1

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

総務部人事労務課人事第一係

封筒の表に「教員公募関係」「公募番号」を朱書きし、郵送(書留)または持参すること。

9. 問い合わせ先

(1)研究内容等について

研究主幹 千田 俊哉(放射光科学第二研究系) TEL: 029-879-6178 (ダイヤルイン) e-mail: toshiya.senda@kek.jp

(2)提出書類について

総務部人事労務課人事第一係 TEL: 029-864-5118 (ダイヤルイン) e-mail: jinji1@ml.post.kek.jp

10. その他

本機構は、男女共同参画を推進しており、女性研究者の積極的な応募を歓迎します。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所教員公募について(依頼)

本機構では、下記のとおり教員を公募いたします。

記

公募番号 物構研13-15

1. 公募職種及び人員

特任助教 1名 (任期 単年度更新、最長4年)

本機構の教員の職名は、教授、准教授、講師、研究機関講師及び助教であるが、機構の性格から、大学における講座制とは異なる運営が行われる。

2. 研究(職務)内容

大学共同利用機関である物質構造科学研究所(IMSS)では、放射光、中性子、ミュオン、低速陽電子を幅広くかつ横断的に利用した物質・生命科学研究を推進している。本候補者は、同研究所構造物性研究センターに所属し、主に硬軟 X 線を用いた回折・散乱実験を用いて元素戦略プロジェクト(電子材料領域)における構造物性研究に従事する。

3. 応募資格

博士の学位を有すること

4. 公募締切

平成25年12月13日(金)必着

5. 必着着任時期

平成26年4月1日

6. 選考方法

原則として面接とする。ただし、第一段階の審査として書類選考を行うことがある。
面接予定日:平成26年1月中旬(決定次第機構 Web サイトに掲載します。)

7. 提出書類

(1)履 歴 書 ----- KEK指定様式

KEK指定様式以外の履歴書を使用する場合は、通常の履歴事項の後に必ず応募する公募番号(2件以上応募の場合はその順位)、電子メールアドレス及び、可能な着任時期を明記すること。

(2)研 究 歴

(3)発 表 論 文 リ ス ト ----- 和文と英文は別葉とし、共著の論文については、共著者名をすべて記入すること。

また、提出する論文別刷の番号には○印を付すこと。

(4)着 任 後 の 抱 負 (公募内容全般に対するものであること)

(5)論 文 別 刷 ----- 主要なもの、5編以内

(6)その他参考資料 (外部資金獲得状況、国際会議招待講演、受賞歴等)

(7)本人に関する推薦書または参考意見書(宛名は物質構造科学研究所長 山田和芳 とすること)

※上記の書類は、すべてA4判横書きとし、それぞれ別葉として各葉に氏名を記入すること。

(可能であれば、(1)から(4)までの提出書類をPDFファイルに変換のうえCD-RもしくはUSBメモリに保存し、提出書類とともに送付願います。)

※推薦書・参考意見書は電子メールでも結構です。(jinji1@ml.post.kek.jp)

※2件以上応募の場合であって内容が同じ場合の提出書類は一部で良いが、内容が異なる場合は提出書類を別々に用意すること(推薦書等も同様とする)。

※原則として、提出書類(CD-R、USBメモリ含む)は返却いたしませんので、あらかじめご了承ください。

8. 書類送付

送付先 〒305-0801

茨城県つくば市大穂1-1

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

総務部人事労務課人事第一係

封筒の表に「教員公募関係」「公募番号」を朱書きし、郵送(書留)または持参すること。

9. 問い合わせ先

(1)研究内容等について

研究主幹 熊井 玲児(放射光科学第一研究系) TEL: 029-879-6024 (ダイヤルイン) e-mail: reiji.kumai@kek.jp

(2)提出書類について

総務部人事労務課人事第一係 TEL: 029-864-5118 (ダイヤルイン) e-mail: jinji1@ml.post.kek.jp

10. その他

本機構は、男女共同参画を推進しており、女性研究者の積極的な応募を歓迎します。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所教員公募について(依頼)

本機構では、下記のとおり教員を公募いたします。

記

公募番号 物構研13-16

1. 公募職種及び人員

特任助教 1名 (任期 単年度更新 最長平成28年3月末まで。但しその後、当該プロジェクト終了まで更新の可能性あり)

本機構の教員の職名は、教授、准教授、講師、研究機関講師及び助教であるが、機構の性格から、大学における講座制とは異なる運営が行われる。

2. 研究(職務)内容

大学共同利用機関である物質構造科学研究所(IMSS)では、放射光、中性子、ミュオン、低速陽電子を幅広くかつ横断的に利用した物質・生命科学を推進している。本候補者は、同研究所構造物性研究センターに所属し、放射光と中性子を総合的に利用してナノ複相組織制御磁石の研究開発を展開する。

3. 応募資格

博士の学位を有すること

4. 公募締切

平成25年12月13日(金)必着

5. 必着着任時期

平成26年4月1日

6. 選考方法

原則として面接とする。ただし、第一段階の審査として書類選考を行うことがある。

面接予定日:平成26年1月中旬(決定次第機構 Web サイトに掲示します。)

7. 提出書類

(1) 履 歴 書 ----- KEK指定様式

KEK指定様式以外の履歴書を使用する場合は、通常の履歴事項の後に必ず応募する公募番号(2件以上応募の場合はその順位)、電子メールアドレス及び、可能な着任時期を明記すること。

(2) 研 究 歴

(3) 発 表 論 文 リ ス ト ----- 和文と英文は別葉とし、共著の論文については、共著者名をすべて記入すること。

また、提出する論文別刷の番号には○印を付すこと。

(4) 着 任 後 の 抱 負 (公募内容全般に対するものであること)

(5) 論 文 別 刷 ----- 主要なもの、5編以内

(6) その他参考資料 (外部資金獲得状況、国際会議招待講演、受賞歴等)

(7) 本人に関する推薦書または参考意見書(宛名は物質構造科学研究所長 山田和芳 とすること)

※上記の書類は、すべてA4判横書きとし、それぞれ別葉として各葉に氏名を記入すること。

(可能であれば、(1)から(4)までの提出書類をPDFファイルに変換のうえCD-RもしくはUSBメモリに保存し、提出書類とともに送付願います。)

※推薦書・参考意見書は電子メールでも結構です。(jinji1@ml.post.kek.jp)

※2件以上応募の場合であって内容が同じ場合の提出書類は一部で良いが、内容が異なる場合は提出書類を別々に用意すること(推薦書等も同様とする)。

※原則として、提出書類(CD-R、USBメモリ含む)は返却いたしませんので、あらかじめご了承ください。

8. 書類送付

送付先 〒305-0801

茨城県つくば市大穂1-1

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

総務部人事労務課人事第一係

封筒の表に「教員公募関係」「公募番号」を朱書きし、郵送(書留)または持参すること。

9. 問い合わせ先

(1) 研究内容等について

研究主幹 熊井 玲児(放射光科学第一研究系) TEL: 029-879-6024 (ダイヤルイン) e-mail: reiji.kumai@kek.jp

(2) 提出書類について

総務部人事労務課人事第一係 TEL: 029-864-5118 (ダイヤルイン) e-mail: jinji1@ml.post.kek.jp

10. その他

本機構は、男女共同参画を推進しており、女性研究者の積極的な応募を歓迎します。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所教員公募について(依頼)

本機構では、下記のとおり教員を公募いたします。

記

公募番号 物構研13-17

1. 公募職種及び人員

特任准教授または特任助教 1名 (任期 単年度更新、最長4年)

本機構の教員の職名は、教授、准教授、講師、研究機関講師及び助教であるが、機構の性格から、大学における講座制とは異なる運営が行われる。

2. 研究(職務)内容

大学共同利用機関である物質構造科学研究所では、放射光、中性子、ミュオン、低速陽電子を利用した物質・生命科学研究を推進している。本候補者は、同研究所放射光科学研究施設(PF)に所属し、文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」の下で、放射光とパルスレーザーの連携による光誘起物質構造ダイナミクスの精密計測のための実験・装置開発に従事する。

3. 応募資格

博士の学位を有すること

4. 公募締切

平成25年12月13日(金)必着

5. 必着着任時期

平成26年4月1日

6. 選考方法

原則として面接とする。ただし、第一段階の審査として書類選考を行うことがある。

面接予定日:平成26年1月中旬(決定次第機構 Web サイトに掲示します。)

7. 提出書類

(1)履 歴 書 ----- KEK指定様式

KEK指定様式以外の履歴書を使用する場合は、通常の履歴事項の後に必ず応募する公募番号(2件以上応募の場合はその順位)、電子メールアドレス及び、可能な着任時期を明記すること。

(2)研 究 歴

(3)発 表 論 文 リ ス ト ----- 和文と英文は別葉とし、共著の論文については、共著者名をすべて記入すること。

また、提出する論文別刷の番号には○印を付すこと。

(4)着 任 後 の 抱 負 (公募内容全般に対するものであること)

(5)論 文 別 刷 ----- 主要なもの、5編以内

(6)その他参考資料 (外部資金獲得状況、国際会議招待講演、受賞歴等)

(7)本人に関する推薦書または参考意見書(宛名は物質構造科学研究所長 山田和芳 とすること)

※上記の書類は、すべてA4判横書きとし、それぞれ別葉として各葉に氏名を記入すること。

(可能であれば、(1)から(4)までの提出書類をPDFファイルに変換のうえCD-RもしくはUSBメモリに保存し、提出書類とともに送付願います。)

※推薦書・参考意見書は電子メールでも結構です。(jinji1@ml.post.kek.jp)

※2件以上応募の場合であって内容が同じ場合の提出書類は一部で良いが、内容が異なる場合は提出書類を別々に用意すること(推薦書等も同様とする)。

※原則として、提出書類(CD-R、USBメモリ含む)は返却いたしませんので、あらかじめご了承ください。

8. 書類送付

送付先 〒305-0801

茨城県つくば市大穂1-1

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

総務部人事労務課人事第一係

封筒の表に「教員公募関係」「公募番号」を朱書きし、郵送(書留)または持参すること。

9. 問い合わせ先

(1)研究内容等について

研究主幹 足立 伸一(放射光科学第二研究系) TEL: 029-879-6022(ダイヤルイン) e-mail: shinichi.adachi@kek.jp

(2)提出書類について

総務部人事労務課人事第一係 TEL: 029-864-5118(ダイヤルイン) e-mail: jinji1@ml.post.kek.jp

10. その他

本機構は、男女共同参画を推進しており、女性研究者の積極的な応募を歓迎します。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所教員公募について(依頼)

本機構では、下記のとおり教員を公募いたします。

記

公募番号 物構研13-18

1. 公募職種及び人員

特別助教 若干名 (任期 最長4年)

本機構の教員の職名は、教授、准教授、講師、研究機関講師及び助教であるが、機構の性格から、大学における講座制とは異なる運営が行われる。

2. 研究(職務)内容

大学共同利用機関である物質構造科学研究所では、放射光、中性子、ミュオン、低速陽電子を利用した物質・生命科学研究を推進している。本候補者は、同研究所放射光科学研究施設(PF)に所属し、ロボティクスによる計測自動化、もしくは、放射光測定に関連する基盤技術開発に従事するとともに、ビームラインおよび実験装置の性能向上および維持管理に努め、大学共同利用研究の支援を行う。

3. 応募資格

博士の学位を有すること

4. 公募締切

平成25年12月13日(金)必着

5. 必着着任時期

平成26年4月1日以降、できるだけ早い時期

6. 選考方法

原則として面接とする。ただし、第一段階の審査として書類選考を行うことがある。

面接予定日:平成26年1月中旬(決定次第機構 Web サイトに掲示します。)

7. 提出書類

(1)履 歴 書 ----- KEK指定様式

KEK指定様式以外の履歴書を使用する場合は、通常の履歴事項の後に必ず応募する公募番号(2件以上応募の場合はその順位)、電子メールアドレス及び、可能な着任時期を明記すること。

(2)研 究 歴

(3)発表論文リスト ----- 和文と英文は別葉とし、共著の論文については、共著者名をすべて記入すること。

また、提出する論文別刷の番号には○印を付すこと。

(4)着任後の抱負(公募内容全般に対するものであること)

(5)論 文 別 刷 ----- 主要なもの、5編以内

(6)その他参考資料(外部資金獲得状況、国際会議招待講演、受賞歴等)

(7)本人に関する推薦書または参考意見書(宛名は物質構造科学研究所長 山田和芳 とすること)

※上記の書類は、すべてA4判横書きとし、それぞれ別葉として各葉に氏名を記入すること。

(可能であれば、(1)から(4)までの提出書類をPDFファイルに変換のうえCD-RもしくはUSBメモリに保存し、提出書類とともに送付願います。)

※推薦書・参考意見書は電子メールでも結構です。(jinji1@ml.post.kek.jp)

※2件以上応募の場合であって内容が同じ場合の提出書類は一部で良いが、内容が異なる場合は提出書類を別々に用意すること(推薦書等も同様とする)。

※原則として、提出書類(CD-R、USBメモリ含む)は返却いたしませんので、あらかじめご了承ください。

8. 書類送付

送付先 〒305-0801

茨城県つくば市大穂1-1

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

総務部人事労務課人事第一係

封筒の表に「教員公募関係」「公募番号」を朱書きし、郵送(書留)または持参すること。

9. 問い合わせ先

(1)研究内容等について

研究主幹 足立 伸一(放射光科学第二研究系) TEL: 029-879-6022 (ダイヤルイン) e-mail: shinichi.adachi@kek.jp

(2)提出書類について

総務部人事労務課人事第一係 TEL: 029-864-5118 (ダイヤルイン) e-mail: jinji1@ml.post.kek.jp

10. その他

本機構は、男女共同参画を推進しており、女性研究者の積極的な応募を歓迎します。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所教員公募について(依頼)

本機構では、下記のとおり教員を公募いたします。

記

公募番号 物構研13-19

1. 公募職種及び人員

博士研究員(常勤) 若干名(任期 単年度更新、最長3年)

2. 研究(職務)内容

大学共同利用機関である物質構造科学研究所では、放射光、中性子、ミュオン、低速陽電子を幅広くかつ横断的に利用した物質・生命科学を推進している。本候補者は、同研究所放射光科学研究施設に所属して、以下のいずれかの分野の研究に従事する。

- 1) タンパク質など生体高分子の精製・結晶化・構造解析に関する研究
- 2) 超高速光電子回折法の開発に向けた理論的研究
- 3) 放射光を用いた光電子分光による機能性材料の表面・界面の研究
- 4) 超高速時間分解XAFS 実験環境の構築と研究(理論計算含む)
- 5) 放射光軟・硬 X 線および物構研で利用できるプローブを相補的に用いた構造物性研究
- 6) 二次元 X 線検出器システムの開発およびその応用研究

3. 応募資格

博士の学位取得者。あるいは、着任時に博士取得見込みの者。

4. 公募締切

平成25年12月13日(金) 必着

5. 着任予定時期

平成26年4月1日

6. 選考方法

原則として面接選考とする。ただし、第一段階の審査として書類選考を行うことがある。

面接予定日:平成26年1月中旬(決定次第機構 Web サイトに掲示します。)

7. 給与

基準年俸額 3,960,000円(事業年度の途中で採用された場合は、採用時期に見合った額)及び、通勤手当

8. 提出書類

(1) 履歴書 ----- KEK指定様式

KEK指定様式以外の履歴書を使用する場合は、通常の履歴事項の後に必ず応募する公募号(2件以上応募の場合はその順位)、希望研究内容(複数ある場合は希望順位を明確に記すること)電子メールアドレス及び、可能な着任時期を明記すると。

(2) 研究歴

(3) 発表論文リスト ----- 和文と英文は別葉とし、共著の論文については、共著者名をすべて記入すること。

また、提出する論文別刷の番号には○印を付すこと。

(4) 着任後の抱負(公募内容全般に対するものであること)

(5) 論文別刷 ----- 主要なもの、5編以内

(6) その他参考資料(外部資金獲得状況、国際会議招待講演、受賞歴等)

(7) 本人に関する推薦書または参考意見書(宛名は物質構造科学研究所長 山田和芳 とすること)

※上記の書類は、すべてA4判横書きとし、それぞれ別葉として各葉に氏名を記入すること。

(可能であれば、(1)から(4)までの提出書類をPDFファイルに変換のうえCD-RもしくはUSBメモリに保存し、提出書類とともに送付願います。)

※推薦書・参考意見書は電子メールでも結構です。(jinji1@ml.post.kek.jp)

※2件以上応募の場合であって内容が同じ場合の提出書類は一部で良いが、内容が異なる場合は提出書類を別々に用意すること(推薦書等も同様とする)。

※原則として、提出書類(CD-R、USBメモリ含む)は返却いたしませんので、あらかじめご了承ください。

9. 書類送付

送付先 〒305-0801

茨城県つくば市大穂1-1

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

総務部人事労務課人事第一係

封筒の表に「教員公募関係」「公募番号」を朱書きし、郵送(書留)または持参すること。

10. 問い合わせ先

(1) 研究内容等について

研究主幹 足立 伸一(放射光科学第二研究系) TEL: 029-879-6022 (ダイヤル) e-mail: shinichi.adachi@kek.jp

(2) 提出書類について

総務部人事労務課人事第一係

TEL: 029-864-5118 (ダイヤル) e-mail: jinji1@ml.post.kek.jp

11. その他

本機構は、男女共同参画を推進しており、女性研究者の積極的な応募を歓迎します。

「物構研サイエンスフェスタ 2013 第5回 MLF シンポジウム / 第31回 PF シンポジウム」開催のお知らせ

物構研サイエンスフェスタ実行委員長 阿部 仁
下村浩一郎

「物構研サイエンスフェスタ 2013 第5回 MLF シンポジウム / 第31回 PF シンポジウム」を2014年3月18日(火)-19日(水)の日程で開催します。会場はつくば国際会議場(エポカルつくば)です。このシンポジウムは、施設側スタッフ、ユーザーの皆様が一堂に会することのできる機会ですので、是非ご参加下さいませようお願い申し上げます。

例年通り、前日の3月17日(月)の夕方にユーザーグループミーティングを開催できるように会議室を確保する予定です。実行委員会が立ち上がり、プログラム等の検討を進めています。詳細が決まり次第ホームページやPFニュース等で皆様にお知らせ致します。

今年度はMLF シンポジウムと合同開催となり、新しい交流も多く生まれ、ポスターセッションや懇親会等も含めてより盛大なシンポジウムとなりそうです。皆様のご発表、ご参加をお待ちしております。

物構研特別シンポジウム「物質・生命科学における大学共同利用～物構研のあり方を問う～」開催のお知らせ

物質構造科学研究所長 山田和芳

KEK 物構研では、標記シンポジウムを開催する予定です。多くの皆様のご参加をお待ちしています。

開催趣意：

1971年、国内初の大学共同利用機関として高エネルギー物理学研究所(KEK)が発足してから40年以上が経過しました。この間大学共同利用は、大型加速器のみならず大望遠鏡や核融合実験装置など、一大学では導入・維持することが難しい大規模研究設備を整備し、大学等の研究者に広く利用を公開することで学術研究の発展・振興に資することを目的とした日本独自の制度として発展し、現在に至っています。また、大学共同利用機関は研究者コミュニティそのものを存立の基盤とし、機構長・所長の選考や教員人事等も含めた施設運営についても大学を中心とした研究者コミュニティが主体的に関与し、相互に協力しながら建設や運営・維持管理、さらには高度化をも進めつつ、成果創出を行ってきました。

一方、1994年には大学のみならず、産業界も含んだ先

端大型研究施設の幅広い共用を促進するため「特定放射光施設の共用の促進に関する法律」(いわゆる共用促進法)がSPRING-8の放射光施設に適用され、2009年からは「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律」となり、適用範囲が中性子施設(J-PARC)や高速電子計算機施設(京)にも広げられました。これにより物質・生命科学の分野では素粒子・原子核分野とは違い、「大学共同利用」と「共用促進利用」と言う2つの異なる制度による運営と利用の並立という新たな状況が生まれています。これら2つの制度は本来異なる目的のために作られたものであるにも関わらず、一般公募と審査による課題選定のプロセスはほぼ同じであることなどから、一般ユーザーにとっての利用に関する違いは見えません。

物質構造科学研究所(物構研)はKEKの研究所として、大学共同利用を推進するというミッションのもと、つくばキャンパスでは放射光科学研究施設(Photon Factory、低速陽電子を含む)を単独で運営する一方で、東海キャンパスではJAEAと共同でJ-PARCの物質・生命実験施設(MLF)を運営しています。そのためMLFの中性子利用では大学共同利用と共用促進利用が共存しており、利用者も時には混乱する場合があります。一方Photon Factoryは主に大学共同利用を行っているものの、有料での施設利用により産業利用をも積極的に行っていることから、共用促進施設と比較される立場にあります。

本来大型施設には、その運用制度に関わらず、幅広い研究者に利用の機会を提供し、施設として最大限の成果を創出するという使命があります。従って我々は、物質科学・生命科学を推進する上で大型施設の運営はどうあるべきなのか、一般利用だけでなく国家プロジェクト等の重点的な利用をどのように推進すべきなのか、等について良く考える必要があります。その上、施設における機器開発や装置の維持管理を行う人材を長期的視点に立ってどのように育成するのかなど、様々な視点も含めて「大学共同利用」と「共用促進利用」の2つの異なる制度の原点に立ち戻って考える必要があると考えます。2004年に物構研が発足してから10年が経とうとしている現在、これらについて改めて考え直す機は熟している、と言えるのではないのでしょうか。

以上のような問題意識から、今回のシンポジウムでは有識者の方をお招きして、大学共同利用の将来と物構研のあり方、とりわけ物質科学と生命科学の分野における大型施設のあり方について、大所高所に立った議論を行います。その中で10年後、20年後を見通した物構研のあるべき姿を明確にすることが重要だと思われまます。このシンポジウムは可能な限り継続させて議論を深めたいと考えていますが、今回はそのためのスタートラインとしたいと考えておりますので、どうか活発なご議論をよろしく御願いたします。

日時：2013年12月17日（火）

場所：KEK つくばキャンパス 小林ホール

プログラム：

- 10:20 開会挨拶：山田和芳（KEK 物構研）
- 10:30 来賓挨拶
- 10:45 KEKにおける大学共同利用：
野村昌治（KEK 理事）
- 11:10 フォトンファクトリーの現状と課題：
村上洋一（KEK 物構研）
- 11:40 J-PARC/MLFの現状と課題：
瀬戸秀紀（KEK 物構研）
- 12:10- 昼食
- 13:30 KEKと物構研：福山秀敏（東京理科大）
- 14:00 放射光における共用促進法と大学共同利用：
熊谷教孝（JASRI）
- 14:30 特定中性子線施設（J-PARC/MLF）における
利用促進プログラム：藤井保彦（CROSS 東海）
- 15:00 ユーザーのための物構研：
水木純一郎（関西学院大）
- 15:30 物性研の立場から：瀧川仁（東京大学）
- 16:00 パネルディスカッション
パネリスト：野村、村上、福山、瀧川、熊谷、水木

PF 研究会「第2回先進的観測技術研究会 —時間分解計測の最前線—」開催のご案内

放射光科学第一研究系 足立 純一

近年の観測技術の進展は目覚ましいものがあり、今まで不可能と思われてきたことが当たり前ようになってきている。一方、先端的技术であるがゆえ、他の研究分野から見えにくくなっている点も否めない。そのため、近未来の観測技術の発展には、広く先進的観測技術の現状を知るとともに、その上で議論することが必須といえる。また、現在の観測技術の相補利用によるブレークスルーも期待される場所である。そこで、他分野における先進的な観測技術を紹介していただき、分野横断的に議論ができる研究会を定期的に開催していくことを計画している（第1回は「局所構造解析、イメージングの最前線」と題して2012年12月26日に行われた）。

第2回は、時間分解計測およびその基礎となる技術に焦点を当て、先進的観測技術の第一線で研究されている若手研究者を集め、先進的観測技術の現状と今後の展望を議論したい。すでに超高速ダイナミクス研究が活発に行われているレーザー光を用いた研究、そして、電子線を用いた高速ダイナミクス研究、cERLでの実現を目指している極短パルス THz 光による実験と関連が深い研究などについての講演を予定している。開催時期については2014年2月21日（金）の第三期運転終了後を予定しているが、確定していない状況である。講演者の先生・開催時期が確定し

だい PF Web サイトに掲載するので、是非、ご参加いただき、将来的に展開される放射光実験についてご議論いただきたい。

平成26年度前期 フォトン・ファクトリー研究会の募集

放射光科学研究施設 村上 洋一

物質構造科学研究所放射光科学研究施設（フォトン・ファクトリー）では放射光科学の研究推進のため、研究会の提案を全国の研究者から公募しています。この研究会は放射光科学及びその関連分野の研究の中から、重要な特定のテーマについて1～2日間、高エネルギー加速器研究機構のキャンパスで集中的に討議するものです。年間6件程度の研究会の開催を予定しております。

つきましては研究会を下記のとおり募集致しますので応募下さいませようお願いします。

記

1. 開催期間 平成26年4月～平成26年9月
2. 応募締切日 平成25年12月20日（金）
〔年2回（前期と後期）募集しています〕
3. 応募書類記載事項（A4判、様式任意）
 - (1) 研究会題名（英訳を添える）
 - (2) 提案内容（400字程度の説明）
 - (3) 提案代表者氏名、所属及び職名（所内、所外を問わない）
 - (4) 世話人氏名（所内の者に限る）
 - (5) 開催を希望する時期
 - (6) 参加予定者数及び参加が予定されている主な研究者の氏名、所属及び職名
4. 応募書類送付先（データをメールに添付して送付）
放射光科学研究施設 主幹秘書室 石川 銀
Email: gin.ishikawa@kek.jp TEL: 029-864-5196

なお、旅費、宿泊費等については実施前に詳細な打ち合わせのうえ、支給が可能な範囲で準備します（1件当たり上限50万円程度）。開催日程については、採択後にPAC委員長と相談して下さい。また、研究会の報告書をKEK Proceedingsとして出版していただきます。

大学院生奨励課題 (T型課題) の新設について

放射光科学研究施設長 村上 洋一

大学院生奨励課題 (T型課題) の新設につきましては、これまでユーザーコミュニティ (PF-UA) との議論を重ねて参りましたが、放射光課題審査委員会および物質構造科学研究所運営会議での承認を経て、実際の運用を開始することになりましたのでお知らせいたします。この課題は、PF を高度に活用した優れた研究を主体的に推進する大学院生を、大学と PF が共同して指導、支援を行い、放射光科学の将来を担う人材の育成を行うことを目的としています。T型課題に採択された大学院生には、特別共同利用研究員 (*) として、KEK にほぼ常駐して研究を進めていただきます。

大学教員の皆様におかれましては、是非、この T型課題に学生が主体的に応募するように周知していただきますようお願い申し上げます。また、申請にあたっては、課題の趣旨を十分に機能できるようにするため、PF 側と綿密な事前打ち合わせが必要となっております。T型課題申請におきましては、できるだけ早めに PF 側との相談を開始していただきますようお願い申し上げます。

大学院生奨励課題 (T型課題) の骨子

- ◆ PF を高度に活用した研究を主体的に推進しようとする大学院生の研究を推進するための申請課題である。

- ◆ 基本的に G 型課題と同様の基準で審査を行う。ただし、申請者が主体的に申請していることを採択の前提とし、評定者 (3 名) によるヒアリングを行う。
- ◆ 本課題へ採択された課題の申請者とその内容は、Web および物構研サイエンスフェスタ等を通じて広報する。
- ◆ 毎年、物構研サイエンスフェスタでポスター発表を行い、PF-PAC で評価して、研究推進のための必要な助言を行う。
- ◆ 採択課題を推進するため、大学側教員と PF 側受け入れ担当教員により共同の指導・支援を行う。申請の事前に PF 側受け入れ担当教員と研究に関する十分な打ち合わせを行い、採択された場合は、特別共同利用研究員に申請することとする (総合研究大学院大学生が採択された場合には、特別共同利用研究員に申請する必要はない)。また、実験準備や教員との打ち合わせのための旅費を施設内規定により支給し、課題の推進を支援する。
- ◆ 課題の有効期間は最長 3 年とする。「終了届」を提出することにより、期限以前に課題を終了することが出来ることとする。また、再申請も可能とする。

(*) 特別共同利用研究員

<http://www.kek.jp/ja/Education/Graduate/Acceptance/>

予 定 一 覧

2013 年

11 月 28 日	第 2 回タンパク質結晶構造解析初心者向け合同講習会開催
12 月 17 日	物構研特別シンポジウム「物質・生命科学における大学共同利用～物構研のあり方を問う～」
12 月 20 日	PF 平成 25 年度第二期ユーザー運転終了
12 月 20 日	PF-AR 平成 25 年度第二期ユーザー運転終了
12 月 20 日	平成 26 年度前期フォトン・ファクトリー研究会公募締切
12 月 27 日	KEK 一斉休業

2014 年

1 月 11 日～13 日	第 27 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム (広島国際会議場)
1 月 16 日～17 日	技術職員シンポジウム (小林ホール)
1 月 16 日	PF 平成 25 年度第三期ユーザー運転開始
1 月 17 日	PF-AR 平成 25 年度第三期ユーザー運転開始
2 月 21 日	PF, PF-AR 平成 25 年度第三期ユーザー運転終了
3 月 18 日～19 日	物構研サイエンスフェスタ 2013 (つくば国際会議場)

※最新情報は <http://pfwww.kek.jp/spice/getschtxt> をご覧下さい。

運転スケジュール(Dec. 2013～Mar. 2014)

E : ユーザー実験 B : ボーナスタイム
M : マシスタディ T : 立ち上げ
MA : メンテナンス HB : ハイブリッド運転

12月	PF	PF-AR	1月	PF	PF-AR	2月	PF	PF-AR	3月	PF	PF-AR
1(日)			1(水)			1(土)			1(土)		
2(月)	E	E	2(木)			2(日)			2(日)		
3(火)			3(金)			3(月)	E	E	3(月)		
4(水)	B	B	4(土)			4(火)			4(火)		
5(木)	M	M	5(日)			5(水)	B	B	5(水)		
6(金)			6(月)			6(木)	M	M	6(木)		
7(土)			7(火)	STOP	STOP	7(金)			7(金)		
8(日)	E	E	8(水)			8(土)			8(土)		
9(月)			9(木)			9(日)	E	E	9(日)		
10(火)			10(金)			10(月)			10(月)		
11(水)	B	B	11(土)			11(火)			11(火)		
12(木)	M		12(日)			12(水)	B	B	12(水)		
13(金)			13(月)			13(木)		B	13(木)		
14(土)			14(火)			14(金)			14(金)		
15(日)	E	E	15(水)	T/M		15(土)			15(土)	STOP	STOP
16(月)			16(木)		T/M	16(日)	E	E	16(日)		
17(火)			17(金)			17(月)			17(月)		
18(水)	B	B	18(土)			18(火)			18(火)		
19(木)	E	E	19(日)	E	E	19(水)	B	B	19(水)		
20(金)			20(月)			20(木)	E	E	20(木)		
21(土)			21(火)			21(金)			21(金)		
22(日)			22(水)	B	B	22(土)			22(土)		
23(月)			23(木)			23(日)			23(日)		
24(火)			24(金)			24(月)	STOP	STOP	24(月)		
25(水)			25(土)			25(火)			25(火)		
26(木)	STOP	STOP	26(日)	E	E	26(水)			26(水)		
27(金)			27(月)			27(木)			27(木)		
28(土)			28(火)			28(金)			28(金)		
29(日)			29(水)	B	B				29(土)		
30(月)			30(木)	M	M				30(日)		
31(火)			31(金)	E	E				31(月)		

・スケジュールは変更されることがありますので、最新情報はPFホームページ(<http://pfwww.kek.jp/indexj.html>)の「PFの運転状況／長期スケジュール」(<http://pfwww.kek.jp/unten/titlej.html>)をご覧ください。

物構研談話会

日時：9/3 (火) 10:00～

題名：XXXL Solutions for specialty applications Or how to meet your high efficiency Gamma & X-ray detection requirements

講師：Dr. Marie-Odile LAMPERT (キャンベラフランス工場工場長)

日時：11/15 (火) 16:00～

題名：多成分磁気構造を持つオリビン型マンガン酸化物 Mn_2GeO_4 におけるマルチフェロイック特性

講師：本田 孝志氏 (大阪大学大学院 基礎工学研究科)

日時：11/28 (木) 10:00～

題名：In-situ XAS, RIXS and TXM experiments

講師：Prof. Dr. Frank de Groot (Synchrotron and Theoretical Spectroscopy Debye Institute of Nanomaterials Science Utrecht University)

⑤ 物構研サイエンスフェスタについて

⑥ マルチプローブ課題導入について

⑦ 次期所長選考について

2. その他

① 5年度放射光共同利用実験課題の審査結果 (U型) について

② 平成25年度後期放射光共同利用実験課題の審査結果について (条件解除)

③ 平成26年度概算要求について

④ J-PARC センター及び東海キャンパスの運営体制について

⑤ 覚書等の締結について (資料配付のみ)

【3】研究活動報告 (資料配布のみ)

1. 物質構造科学研究所報告

2. 素粒子原子核研究所報告

3. 加速器研究施設報告

4. 共通基盤研究施設報告

第53回物質構造科学研究所運営会議議事次第

日時：平成25年10月23日 (水) 13:00～

場所：高エネルギー加速器研究機構 管理棟大会議室

【1】審議事項

① 特定有期雇用職員の雇用について (物構研)

② 教員人事 物構研 13-7 特別助教 1名

③ 教員人事 物構研 13-8 特任助教 1名

④ 教員人事 物構研 13-12 学術フェロー 1名

⑤ 教員公募 構造生物 助教 1名

⑥ 教員公募 講師 1名

⑦ 教員公募 電子材料 特任助教 1名

⑧ 教員公募 磁性材料 特任助教 1名

⑨ 教員公募 光量子連携融合

特任准教授または特任助教 1名

⑩ 教員公募 特別助教 若干名

⑪ 教員公募 博士研究員 若干名

⑫ 教員公募 ミュオン 特別助教 若干名

【2】報告事項

1. 所長報告

① 人事異動について

② 研究員選考結果

③ 陽電子評価委員会・将来検討委員会設置について・委員案

④ 大学共同利用シンポジウムについて

内部スタッフ・大学院生優先ビームタイム採択課題一覧（2013年度前期）

課題番号	申請者	所属	課題名	希望ステーション	希望ビームタイム	実施ビームタイム
2013PF-01	阿部 仁	PF	ホウレンソウの塩茹でにおける食塩の効果の検証の模擬実験	9A, 12C	60時間	60時間
2013PF-02	井上 圭介	総研大	放射光X線による Si-APD および高速型シンチレーション検出器の特性評価	14A	2日間	48時間
2013PF-03	手塚 泰久	弘前大学	BL13 における軟X線発光実験	13	6日間	0時間
2013PF-04	手塚 泰久	弘前大学	BL16 における軟X線発光実験	16	6日間	
2013PF-05	足立 純一	PF	軟X線パルスセクターの運転安定性試験	20A	3日間	72時間
2013PF-06	呉 彦霖	総研大	Laue 結晶における Borrmann fan 形成と位相画像の空間分解能に関する研究	14C	6日間	168時間
2013PF-07	高橋 博樹	日本大学	新たな低温高压装置の立ち上げおよび比較試験	18C	1週間	120時間
2013PF-08	藤崎布美佳	総研大	XAFS 測定による NaAlH ₄ の局所構造の検討	11A		24時間

物構研職員および物構研に籍を置く大学院生は、次に掲げる項目の実験を行うために、下記手続きを経て優先的にビームタイムを使用できる。

- (1) 新しい実験手法のテスト（装置開発など）
- (2) 試料のテスト（興味深い試料の予備実験など）
- (3) 大学院生の研究指導
- (4) 新しい研究の予備実験

<補足>

- 予備的段階が終了して、本格的に研究を行う場合は物構研職員等も PAC に課題申請する。ポスドク、総研大生についても可能な限り速やかに、受入教員またはポスドク本人が共同利用課題申請を行うこと。
- 1ステーションあたり、優先ビームタイムの配分は年間運転時間の20%程度までとする。

施設留保ビームタイム採択課題一覧 (2013 年度前期)

課題番号	申請者	所属	カテゴリー	課題名	希望 ステーション	希望 ビームタイム	実施 ビームタイム
2013R-1	割鞘 雅一	アステラス 製薬	g	放射光を利用した顧みられない熱帯病治療薬創出のためのタンパク質構造解析研究	5A		63.5 時間
2013R-2	松垣 直宏	KEK-PF	b	創薬等 PF 事業におけるビームライン技術開発	1A, 5A, 17A, NW12A, NE3A		1047.5 時間
2013R-3	清水 伸隆	KEK-PF	g	創薬等支援技術基盤プラットフォームにおける溶液散乱スクリーニング	10C,6A		96 時間
2013R-4	神戸 高志	岡山大学	g	アンモニア溶媒を用いて合成した AFe_2Se_2 (A=Ba, Cs, K) 超伝導体の結晶構造	8B	48 時間	48 時間
2013R-5 (2013G231)	Wang Yanli	Institute of Biophysics	c	Structural studies of Stim1-Orai1 complex	1A	29 時間	37.5 時間
2013R-6	矢嶋 俊介	東京農業大学	g	ヒドラジン分解酵素の立体構造解析	NW12A	14 時間	22.5 時間
2013R-7	清水 伸隆	KEK-PF	e	第 1 回タンパク質 X 線溶液散乱講習会におけるテスト測定	10C	24 時間	24 時間
2013R-8	山本 洋平	筑波大学	e	ポリフッ化ピリリデンやオリゴペプチドの集積構造の解明	8B	24 時間	24 時間
2013R-9 (2013G194)	五十嵐圭日子	東京大学	c	真菌由来セルラーゼ PcCel45A の高分解能 X 線結晶構造解析	1A	6 時間	22.5 時間
2013R-10 (2012G569)	胡桃坂仁志	早稲田大学	c	クロマチンダイナミクスと DNA 損傷修復に関わる複合体の構造解析	1A	14.5 時間	23 時間
2013R-11	鈴木 守	大阪大学	g	リボヌクレアーゼの抗腫瘍細胞等生理活性の解明と応用	17A	8.5 時間	23 時間
2013R-12	松垣 直宏	KEK-PF	e	創薬等 PF 事業における初心者向け講習会	1A, 5A, 17A, NW12A, NE3A		22.5 時間
2013R-13	平山 朋子	同志社大学	b	X 線回折法による二円筒試験機内潤滑油膜の構造解析	NE-7A	96 時間	96 時間
2013R-14	東 善郎	上智大学	b	新規設置 Scienta R4000 光電子アナライザーの立ち上げと調整	20A	48 時間	48 時間

- a) マシン, ビームラインの故障等に対するビームタイムの補填。
- b) ビームライン・実験装置の性能向上をスピーディにする。
- c) 早期に成果を創出するために, やり残した実験を実施する。
- d) U 型課題の受付をし, 重要な研究の計画から成果公表までの時間を短縮する。「既配分課題を排除する程の重要性」ではなくても緊急かつ重要な U 型研究課題を実施する。U 型申請, 審査は従来通り行うが, 留保枠, 未配分 BT 内で実施すべきものはレフェリーの意見を参考に PF-PAC 委員長が判断する。
- e) 講習会, 実習等や有望な新規ユーザーを開拓する。※ 利用経験者による新しい研究提案は U 型課題として処理する。
- f) 教育用ビームタイムの時間確保。
- g) 施設, ビームラインの運営に対する柔軟性を増し, 一層の成果拡大に対して工夫する自由度を作る。外国の放射光施設職員等の来所時にテスト実験を行う等運用上の柔軟性を確保する。

「PF ニュース」からのお知らせ

平成 24 年度からの PF-UA の発足に伴い、PF ニュースはウェブが主体となりましたが、引き続きご愛読を賜り感謝致します。今後も新しい企画記事の連載など誌面の充実につとめ、PF ニュースをより魅力あるものにしていきます。昨年リニューアルした PF ニュースウェブページには、冊子版では白黒となっている図等もオリジナルのカラーのものを掲載しています。ウェブ版もお楽しみ頂ければと思います。

ウェブ掲載時にはメールでお知らせするシステムも運用しています。希望される方は、どうぞご登録下さい。PF ニュースウェブページにフォームを掲載しています（※ KEK の共同利用者支援システムでユーザー登録をされた皆様には、PF メルマガが配信され、そちらにも PF News 発行のお知らせが載りますので、その方はお知らせメールの登録は必要ありません）。

PF ニュース編集委員一同

投稿のお願い

【最近の研究から】

PF で行われた実験，研究の成果をお寄せ下さい。

【建設・改造ビームラインを使って】

特にビームラインの改良点，他のビームラインとの比較，要望等を是非お聞かせ下さい。

【ユーザーとスタッフの広場】

PF での実験の成果等が認められ受賞された方，海外放射光施設に滞在，訪問された方，国際会議等に参加された方，修士論文等，どうぞご投稿下さい。また PF に対するご意見等がありましたら是非ご投書下さい。

詳細は事務局または PF ニュース HP をご覧下さい。

宛 先

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所 放射光科学研究施設内
PF ニュース編集委員会事務局
TEL：029-864-5196 FAX：029-864-3202
E-mail：pf-news@pfqst.kek.jp
URL：http://pfwww.kek.jp/publications/pfnews/

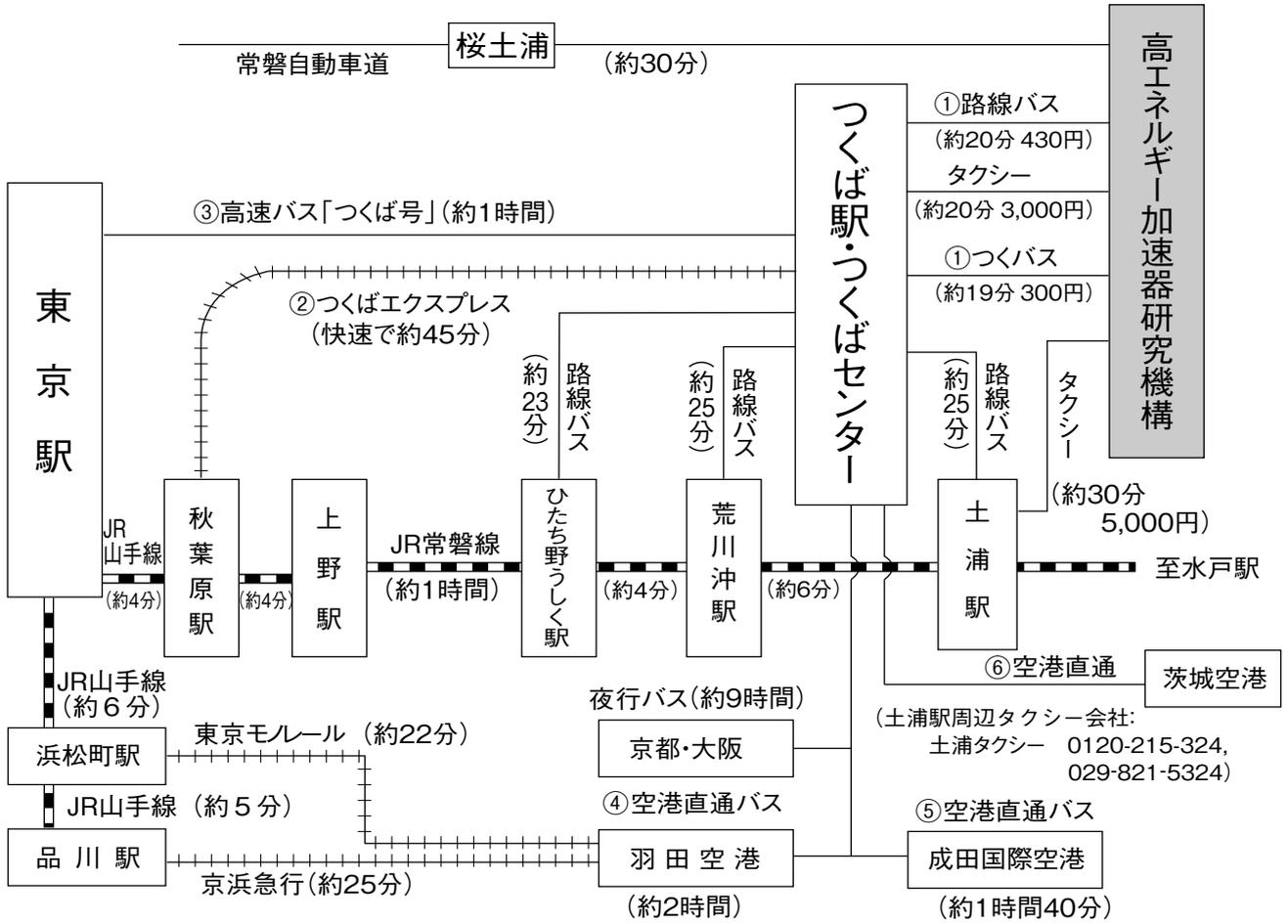
編集後記

私にとって、雑誌の編集委員を初めて務めさせていただいたのが、この PF ニュースでした。もう少しで任期が終わってしまいましたが、編集委員会のあたたかい雰囲気といえますか、少しでも読者の皆様の役に立つようにという姿勢は勉強になりました。恥ずかしながら自分の研究のことしか考えていなかった私ですが、今後はコミュニティーの役に立っていききたいという視点が持てるようになりました。私にとっては KEK では KENS にお世話になったのが先で修士の学生の頃からです。PF はポストク時代、その後、助教になって PF-AR のユーザーになりました。20 代の頃は毎年自分の誕生日を KEK での実験中にひそかに迎えて、結局丸一日実験していて、誰にも祝ってもらえないという悲しい学生時代を過ごしました。海外の施設に行きますと、グループのリーダーの先生は、学生などグループメンバーの誕生日だけは忘れないように気を付けていて、必ずお祝いのメッセージを送っているのが印象的でした。出張実験の夕食の際にでも、誕生日おめでとうなどと言ってもらえたら、当時の私ならやる気 100 倍です。そんな暖かい心遣いのできるようなリーダーに、将来はなりたいたいなと思います。(A.C.)

平成 25 年度 PF ニュース編集委員

委員長	岡林 潤	東京大学スペクトル化学研究センター			
副委員長	阿部 仁	物質構造科学研究所			
委員	足立 純一	物質構造科学研究所	安達 成彦	物質構造科学研究所	
	宇佐美徳子	物質構造科学研究所	小野 寛太	物質構造科学研究所	
	帯名 崇	加速器研究施設	杉山 弘	物質構造科学研究所	
	田中 万也	広島大学サステナブル・ ディベロップメント実践研究センター	千葉 文野	慶應義塾大学理工学部	
	辻 淳一	(株)東レリサーチセンター	長江 雅倫	理化学研究所基幹研究所	
	原田 雅史	奈良女子大学生生活環境学部	深谷 有喜	日本原子力研究開発機構	
	山崎 裕一	物質構造科学研究所	山本 勝宏	名古屋工業大学大学院工学研究科	
事務局	高橋 良美	物質構造科学研究所			

KEK アクセスマップ・バス時刻表



高エネルギー加速器研究機構

(KEK周辺タクシー会社：大曾根タクシー 0120-000-302, 029-864-0301) (確認日：2013. 10. 20)

① つくばセンター ↔ KEK (2013年3月15日改正)

関東鉄道バス 所要時間 約20分 運賃 430円 (KEK—土浦駅間の料金は760円) つくばセンター乗り場5番
 18系統：土浦駅東口→つくばセンター→KEK→つくばテクノパーク大穂 C8系統：つくばセンター→KEK→つくばテクノパーク大穂
 71系統：つくばセンター→(西大通り)→KEK→下妻駅 (筑波大学は経由しません)
 つくバス 所要時間 約20分 運賃 300円 つくばセンター乗り場3番
 HB/HA (北部シャトル)：つくばセンター→KEK→筑波山口 (筑波大学には停まりません)

下り (×は土曜・休日運休、○は土曜・休日運転)

系統	つくばセンター	KEK	系統	つくばセンター	KEK	系統	つくばセンター	KEK	系統	つくばセンター	KEK
HB	6:55	7:13	HB	10:25	10:43	HB	14:25	14:43	C8	× 18:30	× 18:45
C8	× 7:22	× 7:37	71	× 10:30	× 10:49	HB	14:55	15:13	HB	18:55	19:13
HB	7:30	7:48	C8	10:55	11:10	71	15:00	15:19	71	× 19:05	× 19:24
C8	× 7:50	× 8:05	HB	10:55	11:13	HB	15:25	15:43	HB	19:25	19:43
HB	7:55	8:13	71	11:00	11:19	HB	15:55	16:13	71	○ 19:30	○ 19:49
18	8:10	8:32	HB	11:25	11:43	C8	16:25	16:40	71	× 19:45	× 20:04
HB	8:30	8:48	HB	11:55	12:13	HB	16:25	16:43	HB	19:55	20:13
71	8:45	9:04	71	12:00	12:19	71	16:35	16:54	C8	× 20:05	× 20:20
HB	8:55	9:13	HB	12:25	12:43	HB	16:55	17:13	HB	20:25	20:43
71	9:07	9:26	HB	12:55	13:13	C8	× 17:00	× 17:15	HB	20:55	21:13
HB	9:20	9:38	C8	○ 13:20	○ 13:35	HB	17:25	17:43	HB	21:25	21:43
C8	○ 9:35	○ 9:50	HB	13:25	13:43	71	17:30	17:49	HB	21:55	22:13
71	× 9:55	× 10:14	HB	13:55	14:13	C8	17:55	18:10	HB	22:20	22:38
C8A	× 10:00	× 10:15	C8	× 14:00	× 14:15	HB	17:55	18:13			
HB	10:00	10:18	71	14:00	14:19	HB	18:25	18:43			

18系統の土浦駅東口→つくばセンターは20分間です。

上り (×は土曜・休日運休、○は土曜・休日運転)

系統	KEK	つくばセンター	系統	KEK	つくばセンター	系統	KEK	つくばセンター	系統	KEK	つくばセンター
HA	6:20	6:43	71	10:18	10:40	71	14:28	14:50	HA	18:15	18:38
71	×6:28	×6:50	C8	○10:25	○10:45	HA	14:45	15:08	71	○18:28	○18:50
HA	6:50	7:13	HA	10:45	11:08	C8	×14:50	×15:10	18	○18:45	○19:05
HA	7:15	7:38	C8	×10:55	×11:19	HA	15:15	15:38	HA	18:45	19:08
71	7:28	7:50	HA	11:15	11:38	71	15:28	15:50	C8	×18:45	×19:15
HA	7:45	8:08	71	11:28	11:50	HA	15:45	16:08	HA	19:15	19:38
HA	8:10	8:33	HA	11:45	12:08	HA	16:10	16:33	71	×19:18	×19:40
71	8:28	8:50	C8	11:50	12:10	HA	16:35	16:58	C8	×19:30	×19:50
HA	8:45	9:08	HA	12:15	12:38	71	16:58	17:20	HA	19:45	20:08
C8	×8:50	×9:14	HA	12:45	13:08	HA	17:10	17:33	HA	20:10	20:33
C8	○9:05	○9:25	HA	13:15	13:38	C8	○17:20	○17:40	HA	20:35	20:58
HA	9:20	9:43	71	13:23	13:45	C8	×17:20	×17:45	18	×20:50	×21:10
C8	×9:25	×9:49	HA	13:45	14:08	HA	17:40	18:03	HA	21:10	21:33
HA	9:45	10:08	HA	14:15	14:38	C8	×17:50	×18:15	HA	21:40	22:03
HA	10:15	10:38	C8	○14:20	○14:40	71	×17:58	×18:20			

18系統のつくばセンター→土浦駅東口は22分間です。

②つくばエクスプレス

(2012年10月15日改定)

所要時間 つくば駅-秋葉原駅(快速)約45分 [1,150円]

普通回数券(11枚綴り), 昼間回数券(12枚綴り), 土・休日回数券(14枚綴り)あり

詳細はホームページ <http://www.mir.co.jp/> をご参照下さい。

平日・下り					
秋葉原発	つくば着	秋葉原発	つくば着	秋葉原発	つくば着
*5:30	6:27	10:15	11:08	○20:00	20:46
*5:45	6:43	○10:30	11:15	20:10	21:03
○6:05	6:50	10:45	11:38	20:20	21:13
6:18	7:11	(10時~16時まで同じ)		○20:30	21:16
6:30	7:23	○17:00	17:45	20:40	21:33
6:46	7:38	17:10	18:03	20:50	21:43
○7:00	7:45	17:20	18:13	○21:00	21:46
7:12	8:05	○17:30	18:16	21:12	22:05
7:24	8:19	17:40	18:33	21:23	22:16
○7:37	8:22	17:50	18:43	21:36	22:29
7:46	8:40	△18:00	18:49	21:48	22:41
8:02	8:57	18:10	19:03	○22:01	22:47
○8:11	8:59	18:20	19:13	22:15	23:07
8:18	9:14	△18:30	19:19	22:30	23:23
○8:30	9:17	18:40	19:33	22:45	23:38
8:41	9:37	18:50	19:43	○23:00	23:45
8:56	9:50	△19:00	19:49	23:15	0:08
○9:09	9:54	19:10	20:03	*23:30	0:28
9:17	10:10	19:20	20:13	*23:45	0:43
○9:30	10:16	△19:30	20:19		
9:45	10:38	19:40	20:33		
○10:00	10:45	19:50	20:43		

平日・上り							
つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着
5:07	5:59	○9:24	10:10	○17:18	18:03	21:26	22:19
○5:28	6:13	9:31	10:25	17:20	18:13	21:41	22:34
5:32	6:24	○9:55	10:40	17:32	18:25	21:57	22:50
5:51	6:43	10:00	10:53	○17:49	18:34	22:13	23:06
6:12	7:05	○10:25	11:10	17:51	18:44	*22:27	23:25
6:32	7:26	10:30	11:23	18:01	18:54	22:40	23:33
6:40	7:33	○10:55	11:40	○18:20	19:06	22:56	23:49
△6:52	7:43	11:00	11:53	18:23	19:15	*23:14	0:11
6:56	7:51	○11:25	12:10	18:32	19:25		
7:04	7:59	11:30	12:23	○18:50	19:36		
7:11	8:07	○11:55	12:40	18:53	19:46		
△7:24	8:16	12:00	12:53	19:02	19:54		
7:27	8:23	○12:25	13:10	○19:20	20:06		
7:35	8:30	12:30	13:23	19:23	20:16		
7:43	8:38	○12:55	13:40	○19:50	20:36		
△7:53	8:46	(12時~15時まで同じ)		19:53	20:46		
7:57	8:52	16:00	16:53	○20:18	21:03		
8:12	9:05	○16:27	17:12	20:24	21:17		
△8:25	9:14	16:31	17:24	20:38	21:31		
8:31	9:24	16:42	17:35	20:51	21:44		
8:47	9:40	16:52	17:45	○21:08	21:53		
9:01	9:54	17:01	17:54	21:11	22:03		

土曜/休日・下り					
秋葉原発	つくば着	秋葉原発	つくば着	秋葉原発	つくば着
*5:30	6:27	9:45	10:38	○20:00	20:45
*5:45	6:42	○10:00	10:45	20:15	21:09
○6:05	6:50	10:15	11:08	○20:30	21:15
6:18	7:11	○10:30	11:15	20:45	21:39
6:31	7:24	10:45	11:38	○21:00	21:45
6:43	7:35	(10時~16時まで同じ)		21:11	22:04
○7:00	7:45	○17:00	17:45	21:24	22:17
7:12	8:05	17:15	18:09	21:36	22:29
○7:24	8:09	○17:30	18:15	21:48	22:41
7:35	8:27	17:45	18:39	○22:03	22:48
7:48	8:41	○18:00	18:45	22:15	23:08
○8:00	8:45	18:15	19:09	22:30	23:23
8:20	9:12	○18:30	19:15	22:45	23:38
○8:30	9:15	18:45	19:39	○23:00	23:45
8:50	9:42	○19:00	19:45	23:15	0:08
○9:00	9:45	19:15	20:09	*23:30	0:28
9:19	10:12	○19:30	20:15	*23:45	0:43
○9:30	10:15	19:45	20:39		

土曜/休日・上り							
つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着	つくば発	秋葉原着
5:07	5:59	○7:58	8:43	10:29	11:22	21:00	21:53
○5:28	6:13	8:02	8:54	○10:55	11:40	○21:28	22:13
5:32	6:24	○8:28	9:13	11:02	11:54	21:40	22:33
5:51	6:43	8:32	9:25	○11:25	12:10	21:56	22:49
6:13	7:06	8:47	9:39	11:30	12:23	22:15	23:08
6:33	7:26	○9:10	9:55	○11:55	12:40	*22:27	23:25
○6:57	7:42	9:17	10:10	12:00	12:53	22:40	23:33
7:01	7:53	9:31	10:24	○12:25	13:10	22:56	23:49
○7:28	8:13	○9:54	10:39	12:30	13:23	*23:14	0:11
7:31	8:23	10:01	10:54	○12:55	13:40		
7:41	8:34	○10:25	11:10	(12時~20時まで同じ)			

○:快速

△:通勤快速(研究学園駅にも停まります。)

無印:区間快速 *:普通

③ 高速バス

高速バス発車時刻表 [つくば号]

(2011年6月1日改正)

運賃 東京駅←→つくばセンター (←→筑波大学) : 1150円 (3枚綴り回数券3100円, 上り専用3枚綴りで1900円)
 @ミッドナイトつくば号 東京駅→筑波大学: 2000円 (回数券は使用不可)
 所要時間 東京→つくば65分~70分 つくば→上野90分 (平日) つくば→東京110分 (平日)
 つくば→東京80分 (日祝日)

○ 6:50U	○ × 9:30U	○ × 14:30U	○ × 18:40U	× 21:30U
× 7:00U	○ × 10:00U	○ × 15:00U	○ × 19:00U	○ 21:40U
○ 7:20	○ × 10:30U	○ × 15:30U	○ 19:20U	○ × 22:00U
× 7:30U	○ × 11:00U	○ × 16:00U	× 19:30U	○ 22:20U
○ 7:40	○ × 11:30U	○ × 16:30U	○ 19:40	× 22:30U
○ × 8:00U	○ × 12:00U	○ × 17:00U	○ × 20:00U	○ 22:40U
○ 8:20U	○ × 12:30U	○ × 17:20U	○ × 20:20U	○ × 23:00U
× 8:30U	○ × 13:00U	○ × 17:40U	○ × 20:40U	○ 23:50U@
○ 8:40U	○ × 13:30U	○ × 18:00U	○ × 21:00U	× 24:00U@
○ × 9:00U	○ × 14:00U	○ × 18:20U	○ 21:20U	○ 24:10U@
			○ × 24:30U@	

○ 5:00U	× 8:40U	○ × 11:30U	○ 16:20U	○ 19:20U
○ × 5:30U	○ × 9:00U	○ × 12:00U	× 16:30U	× 19:30U
○ × 6:00U	○ 9:20	○ × 12:30U	○ 16:40	○ 19:40U
○ × 6:30U	× 9:20U	○ × 13:00U	○ × 17:00U	○ × 20:00U
○ × 7:00U	○ 9:40	○ × 13:30U	○ 17:20U	○ 20:20U
× 7:20U	× 9:40U	○ × 14:00U	× 17:30U	× 20:30U
○ 7:30U	○ × 10:00U	○ × 14:30U	○ 17:40U	○ 20:40U
× 7:40U	○ × 10:20U	○ × 15:00U	○ × 18:00U	○ × 21:00U
○ × 8:00U	○ 10:40	○ 15:20U	○ 18:20U	○ 21:20
× 8:20U	× 10:40U	× 15:30U	× 18:30U	× 21:30U
○ 8:30U	○ × 11:00U	○ 15:40U	○ 18:40U	○ 21:40U
		○ × 16:00U	○ × 19:00U	○ × 22:00U

※○: 平日 ×: 土日休 @ミッドナイトつくば号。

上りは, 平日・土曜のみ都営浅草駅, 上野駅経由

※つくば市内のバス停 (上下便とも) 筑波大学, 大学会館, 筑波大学病院, つくばセンター, 竹園二丁目, 千現一丁目, 並木一丁目, 並木二丁目, 並木大橋, 下広岡

※ミッドナイトつくば号の乗車券は乗車日の1カ月前から発売。

●発売窓口: 学園サービスセンター (8:30~19:00) 東京営業センター (東京駅乗車場側/6:00~発車まで)

新宿営業センター (新宿駅南口JRバス新宿営業センター内/6:00~23:00)

●電話予約: JRバス関東03-3844-0489 (10:00~18:00) ●ネット予約: 決済 <http://www.kousokubus.net/> (高速バスネット)

④⑤⑥ 空港直通バス

(つくばセンターバス乗り場: 8番)

羽田空港←→つくばセンター

所要時間: 約2時間 (但し, 渋滞すると3時間以上かかることもあります。) 運賃: 1,800円 (2013年10月1日改定)

国際線ターミナル	第2ターミナル	第1ターミナル	つくばセンター
9:15	9:25	9:30	11:15
11:15	11:25	11:30	13:15
14:45	14:55	15:00	16:45
16:05	16:15	16:20	18:05
17:45	17:55	18:00	19:45
19:20	19:30	19:35	21:00
20:45	20:55	21:00	22:15
22:05	22:15	22:20	23:35

つくばセンター	第2ターミナル	第1ターミナル	国際線ターミナル
4:40	6:17	6:22	6:29
6:00	7:47	7:52	7:59
8:00	9:57	10:02	10:09
9:30	11:27	11:32	11:39
12:30	14:07	14:12	14:19
14:30	16:07	16:12	16:19
17:30	19:07	19:12	19:19
18:35	20:02	20:07	20:14

※ 平日日祝日とも上記時刻表

※ 羽田空港乗り場: 1階到着ロビーバス乗り場13番, 国際線ターミナル6番

※ 上下便, つくば市内でのバス停: 竹園二丁目, 千現一丁目, 並木一丁目, 並木二丁目, 並木大橋

※ 問い合わせ: 029-836-1145 (関東鉄道) / 03-3765-0301 (京浜急行)

成田空港←→つくばセンター (土浦駅東口行) (AIRPORT LINER NATT'S)

(2013年11月18日改定)

所要時間: 約1時間40分 運賃: 2,540円

乗車券購入方法(成田空港行): 予約制。1カ月前から予約受付。乗車券は3日前までに購入。KEKの売店でも購入可。

予約センター電話: 029-822-5345 (月~土: 8:30~19:00)

つくばセンター方面土浦駅東口行: 成田空港1F京成カウンターにて当日販売

第2ターミナル	第1ターミナル	つくばセンター
7:40	7:45	9:20
9:05	9:10	10:45
10:35	10:40	12:15
12:50	12:55	14:30
14:30	14:35	16:10
16:15	16:20	17:55
17:20	17:25	19:00
18:45	18:50	20:25
20:10	20:15	21:50

つくばセンター	第2ターミナル	第1ターミナル
5:50	7:30	7:35
7:00	8:40	8:45
8:50	10:25	10:30
10:40	12:15	12:20
12:20	13:55	14:00
13:35	15:10	15:15
14:35	16:10	16:15
15:50	17:25	17:30
17:35	19:10	19:15

※ 平日日祝日とも上記時刻表

茨城空港←→つくばセンター

(2013年3月31日改定)

所要時間: 約1時間 運賃: 1,000円

問い合わせ 029-836-1145 (関東鉄道)

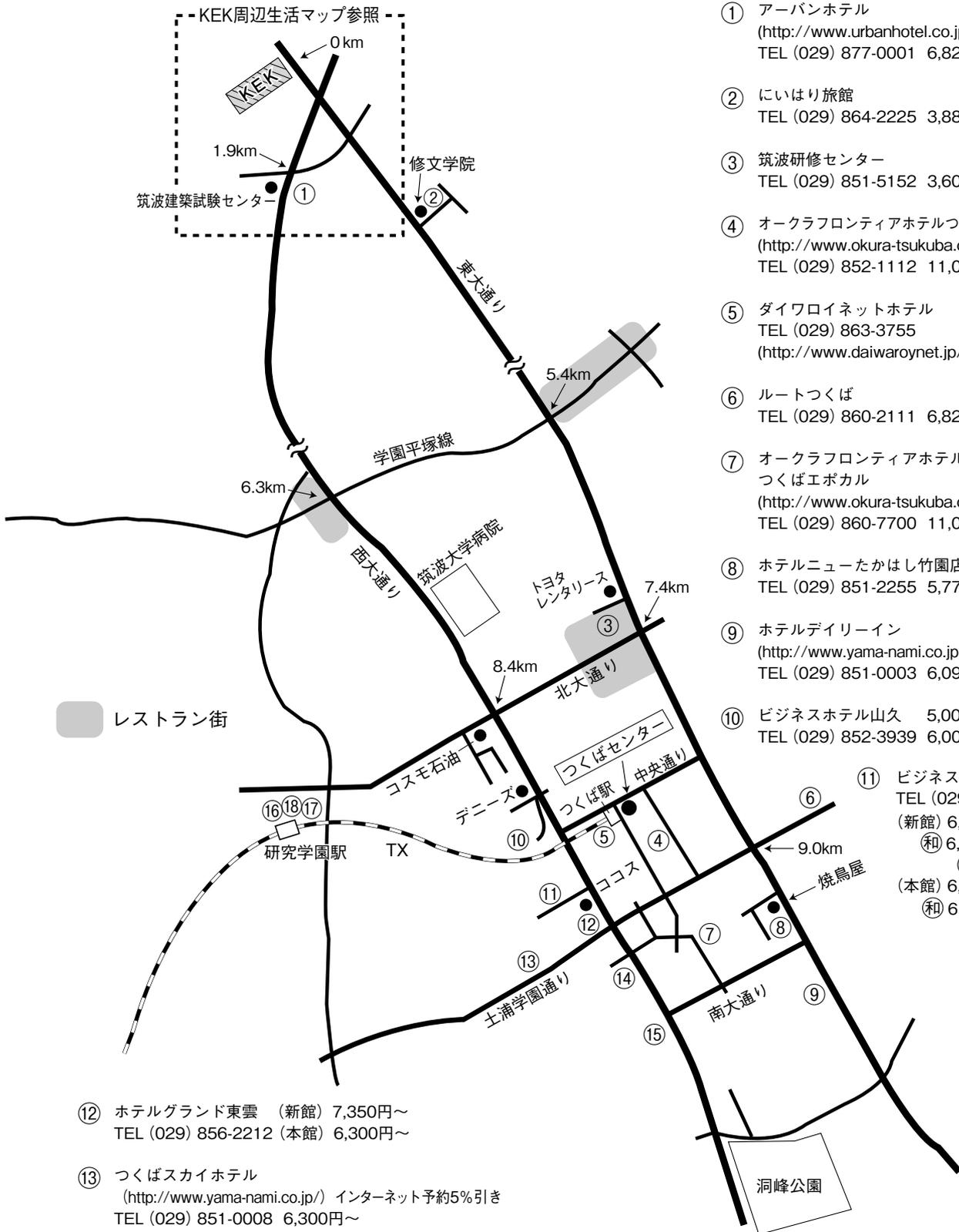
11:20	12:20
18:00	19:00

9:00	10:00
15:30	16:30

※航空便の運行状況によって, 運休/時刻変更の場合があります。

つくば市内宿泊施設

(確認日:2013. 10. 20) ※料金は参考値です。



- ① アーバンホテル
(<http://www.urbanhotel.co.jp/uhotel.html>)
TEL (029) 877-0001 6,825円～
- ② にいはり旅館
TEL (029) 864-2225 3,885円～
- ③ 筑波研修センター
TEL (029) 851-5152 3,600円～
- ④ オークラフロンティアホテルつくば
(<http://www.okura-tsukuba.co.jp/>)
TEL (029) 852-1112 11,088円～
- ⑤ ダイワロイネットホテル
TEL (029) 863-3755
(<http://www.daiwaroynet.jp/tsukuba/>)
- ⑥ ルートつくば
TEL (029) 860-2111 6,825円～ (朝食付)
- ⑦ オークラフロンティアホテル
つくばエポカル
(<http://www.okura-tsukuba.co.jp/>)
TEL (029) 860-7700 11,088円～
- ⑧ ホテルニューたかはし竹園店
TEL (029) 851-2255 5,775円～
- ⑨ ホテルデイリーイン
(<http://www.yama-nami.co.jp/>)インターネット予約5%引き
TEL (029) 851-0003 6,090円
- ⑩ ビジネスホテル山久 5,000円～(2食付・1室2人)
TEL (029) 852-3939 6,000円～(2食付・1室1人)
- ⑪ ビジネスホテル松島
TEL (029) 856-1191
(新館) 6,500円～
(和) 6,800円 (3人～)
(風呂・2食付)
(本館) 6,000円～
(和) 6,300円(3人～)(2食付)

- ⑫ ホテルグランド東雲 (新館) 7,350円～
TEL (029) 856-2212 (本館) 6,300円～
- ⑬ つくばスカイホテル
(<http://www.yama-nami.co.jp/>) インターネット予約5%引き
TEL (029) 851-0008 6,300円～
- ⑭ 学園桜井ホテル
(<http://www.gakuen-hotel.co.jp/>)
TEL (029) 851-3011 6,878円～
- ⑮ ビジネス旅館二の宮
TEL (029) 852-5811 5,000円～
(二人部屋のみ 2食付)

- ⑯ ホテルベストランド
(<http://www.hotel-bestland.co.jp/>)
TEL (029) 863-1515
- ⑰ 東横イン
(<http://www.toyoko-inn.com/hotel/00228/>)
TEL (029) 863-1045
- ⑱ ホテルマークワン
(<http://www.mark-1.jp/>)
TEL (029) 875-7272

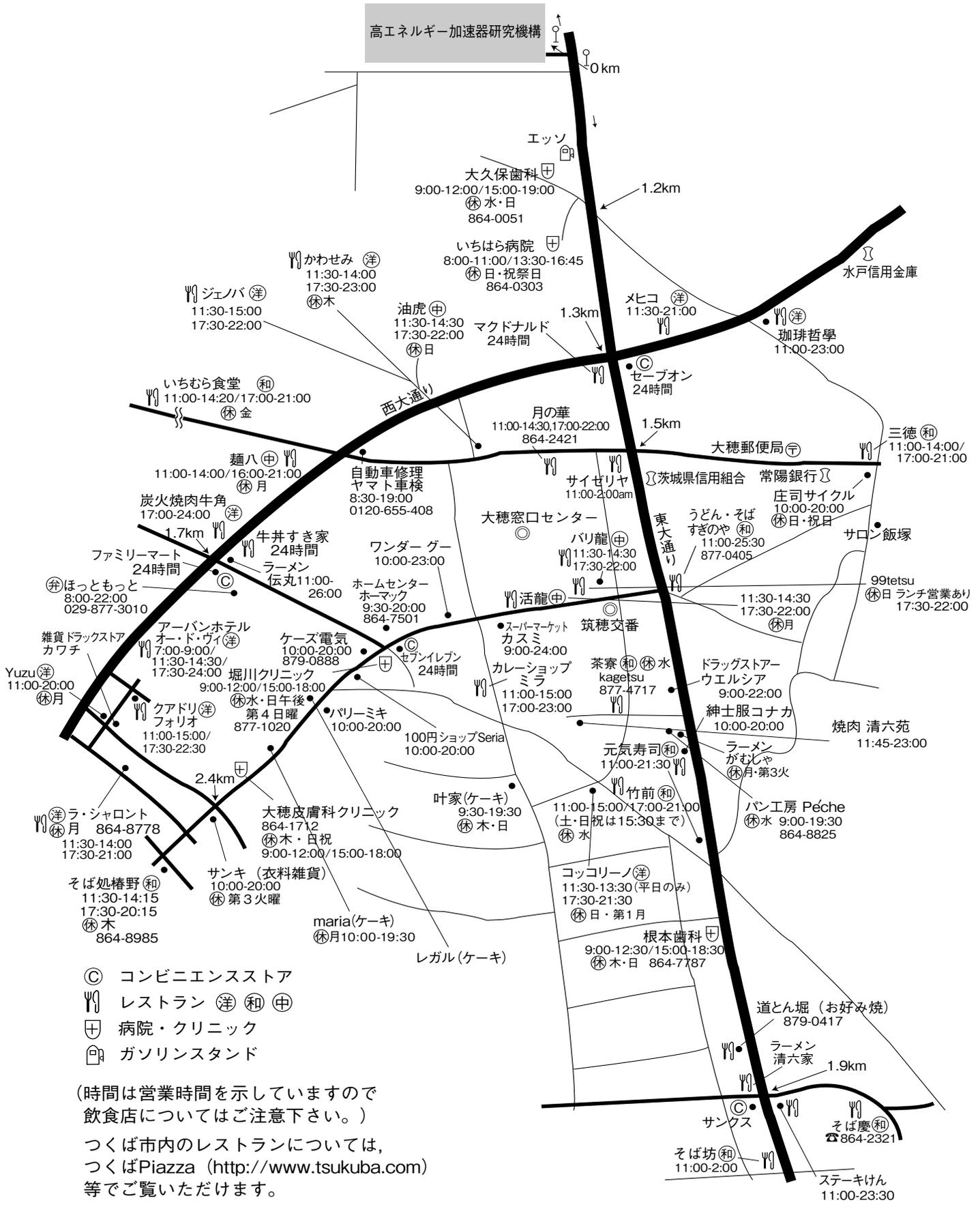
KEK 周辺生活マップ

(確認日: 2013. 10. 20)

放射光科学研究施設研究棟, 実験準備棟より正面入口までは約 800 m

KEK

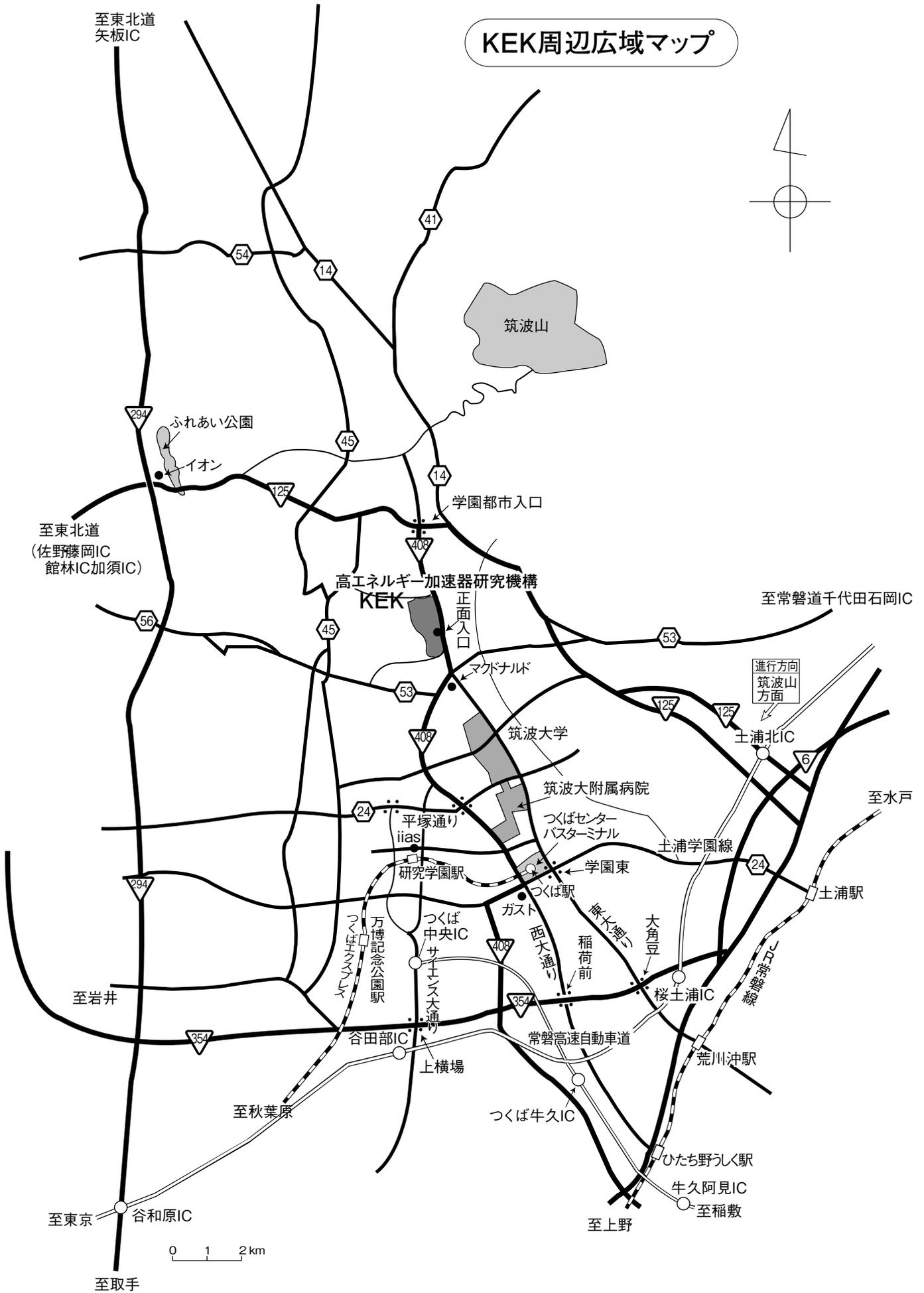
高エネルギー加速器研究機構



- ◎ コンビニエンスストア
- ☎ レストラン (洋) (和) (中)
- ⊕ 病院・クリニック
- 🛢️ ガソリンスタンド

(時間は営業時間を示していますので
飲食店についてはご注意ください。)
つくば市内のレストランについては、
つくばPiazza (<http://www.tsukuba.com>)
等でご覧いただけます。

KEK周辺広域マップ



KEK内福利厚生施設

ユーザーの方は、これらの施設を原則として、機構の職員と同様に利用することができます。各施設の場所は後出の「高エネルギー加速器研究機構平面図」をご参照下さい。

●共同利用宿泊者施設（ドミトリー）

（管理人室 TEL/FAX:029-864-5574 PHS:2929）

シングルバス・トイレ付き 2,000円

シングルバス・トイレなし 1,500円

- ドミトリーは夜の22時から朝の8時までは施錠されます。また、この時間帯は管理人が不在ですので、22時以降にドミトリーに到着される方はインフォメーションセンター（029-864-5572, PHS:3398）でドミトリーの部屋の鍵を受け取って下さい。
- 支払いはユーザーズオフィスにて、現金の他、クレジットカード、デビットカードが利用可能です。また宿泊が週末等になり、ユーザーズオフィスで支払えない場合は銀行振込、管理人による現金での領収も可能です。

●図書室（研究本館1階 内線3029）

開室時間：月～金 9:00～17:00

閉室日：土、日、祝、年末年始、夏季一斉休業日
機構発行のIDカードがあれば開室時間以外でも入館可能。詳しくは下記URLをご覧ください。

(<http://www-lib.kek.jp/riyou/index.html>)

●健康相談室（医務室）（内線 5600）

勤務時間中に発生した傷病に対して、応急処置を行うことができます。健康相談も行っていますので、希望者は事前に申し込んでください。

場 所 先端計測実験棟

開室時間 8:30～17:00（月曜日～金曜日）

●食 堂（内線 2986）

営 業 月～金 ただし祝日及び年末年始は休業

昼食 11:30～13:30 夕食 17:30～19:00

●レストラン（内線 2987）

営 業 月～金 ただし祝日及び年末年始は休業

昼食 12:00～14:00（ラストオーダー13:40）

●喫茶店「風来夢（プライム）」（内線 3910）

営 業 日：毎日（年末年始、夏季休業日を除く）

営業時間：7時30分～21時00分（土・休は8:00～）

（朝食）7時30分～9時30分

（昼食）11時30分～13時30分

（夕食）17時30分～21時00分

上記以外は喫茶での営業

（※清掃作業のため10時～11時は入店出来ません。）

●売 店（内線3907）

弁当、パン、食料品、菓子類、日用品、タバコ、お酒、雑誌、切手等、素粒子グッズの販売、クリーニング、DPE、宅配便の取次ぎ。

営 業 月～金 9:00～19:00

●宅配便情報

① PF に宅配便で荷物を送る場合には、下記宛先情報を宅配便伝票に必ず記載する。

【PF への荷物の宛先】 PF 事務室気付 BL-○○○（ステーション名）+受取者名

【PF-AR への荷物の宛先】 PF 事務室気付 PF-AR 共同研究棟 N○○○（ステーション名）+受取者名
以下の情報を shipping@pfqst.kek.jp 宛てに送る。

1. 発送者氏名, 2. 所属, 3. KEK 内での連絡先（携帯電話等）, 4. 発送日, 5. 運送業者, 6. PF への到着予定日時, 7. 荷物の個数, 8. ステーション名およびビームタイム

② PF-AR 地区宅配便荷物置場の移動について

2010年9月24日より、宅配便荷物置場が従来使用してきたPF-AR南コンテナハウスから、PF-AR共同研究棟に移動しました。PF棟入口は平日8:30～18:00以外は自動施錠されますが、ユーザーカードによる解錠は可能です。

●自転車貸出方法（受付 [監視員室] 内線3800）

- ・貸出は実験ホール入口の監視員室で行う。
- ・貸出は一往復とし、最長でも半日とする。
- ・使用後は所定の自転車スタンドへ戻し、鍵は監視員室へ速やかに戻す。

（PF-ARでも自転車を10台用意していますので利用したい方はビームライン担当者または運転当番 [PHS 4209] に連絡して下さい。）

ユーザーズオフィスでも自転車の貸出を行っています。

●常陽銀行ATM

取扱時間：9:00～18:00（平日） 9:00～17:00（土）

日・祝日の取扱いはありません。常陽銀行以外の金融機関もカードのみの残高照会、引出しが可能です。

●郵便ポスト（計算機棟正面玄関前）

収集時間：10:30（平日・土曜）、10:00（休日）

●ユーザーズオフィスについては、<http://usersoffice.kek.jp/>をご覧ください。

Tel : 029-879-6135, 6136 Fax : 029-879-6137

Email : usersoffice@mail.kek.jp

ビームライン担当一覧表 (2013. 11. 1)

ビームライン ステーション	光源 形態	光源 ステーション/実験装置名 (●共同利用, ○建設/立ち上げ中, ◇所外, ☆教育用BL, ★UG運営ST)	BL担当者 担当者	担当者 (所外)
BL-1		U	松垣	
BL-1A	●	タンパク質結晶構造解析ステーション	松垣	
BL-2		U	雨宮	
BL-2A	○	固体表面・界面光電子分光実験ステーション(仮)	雨宮	
BL-2B	○	機能性材料解析ステーション (仮)	雨宮	
BL-3		U (A) / B M (B, C)	中尾	
BL-3A	●	六軸X線回折計/二軸磁場中X線回折実験ステーション	中尾	
BL-3B	☆●	VUV 24m球面回折格子分光器 (SGM)	柳下	加藤 (弘前大)
BL-3C	●	X線光学素子評価/白色磁気回折ステーション	平野	
BL-4		B M	中尾	
BL-4A	●	蛍光X線分析/マイクロビーム分析	飯田	
BL-4B2	●★	多連装粉末X線回折装置	中尾	井田 (名工大)
BL-4C	●	六軸X線回折計用実験ステーション	山崎	
BL-5		M P W	松垣	
BL-5A	●	タンパク質結晶構造解析ステーション	松垣	
BL-6		B M	五十嵐	
BL-6A	●	X線小角散乱ステーション	五十嵐	
BL-6C	●★	X線回折/散乱実験ステーション	河田	佐々木 (東工大)
BL-7		B M	雨宮 (岡林: 東大)	
BL-7A	◇●	軟X線分光 (XAFS, XPS) ステーション (東大・スペクトル)	雨宮	岡林 (東大)
BL-7C	●	汎用X線ステーション	杉山	
BL-8		B M	熊井	
BL-8A	●	多目的極限条件下ワンセンベルグカメラ	熊井	
BL-8B	●	多目的極限条件下ワンセンベルグカメラ	熊井	
BL-9		B M	阿部	
BL-9A	●	XAFS実験ステーション	阿部	
BL-9C	●	XAFS実験ステーション	阿部	
BL-10		B M	五十嵐	
BL-10A	●★	垂直型四軸X線回折装置	山崎	吉朝 (熊本大)
BL-10C	●	溶液用小角散乱実験ステーション(酵素回折計)	清水	
BL-11		B M	北島	
BL-11A	●	軟X線斜入射回折格子分光器	北島	
BL-11B	●	軟X線2結晶分光ステーション	北島	
BL-11D	●	軟X線光学素子評価装置用ステーション	間瀬	
BL-12		B M	仁谷	
BL-12C	●	XAFS実験ステーション	仁谷	
BL-13		U	間瀬	
BL-13A/B	●	表面化学研究用真空紫外軟X線分光ステーション	間瀬	
BL-14		V W	岸本	
BL-14A	●	単結晶構造解析・検出器開発ステーション	岸本	
BL-14B	●	精密X線回折実験ステーション	平野	
BL-14C	●	X線イメージングおよび汎用X線実験ステーション	兵藤	
BL-15		U	五十嵐	
BL-15A1	○	セミマイクロビーム XAFS 実験ステーション	仁谷	
BL-15A2	○	高輝度X線小角散乱実験ステーション	清水	

BL-16		U	雨宮
BL-16A	●	可変偏光軟X線分光ステーション	雨宮
BL-17		U	山田
BL-17A	●	タンパク質結晶構造解析ステーション	山田
BL-18		B M	柳下 (矢治 : 東大物性研)
BL-18A	◇●	表面・界面光電子分光実験ステーション	柳下 矢治 (東大物性研)
BL-18B(インド・DST)	◇○	Multipurpose Monochromatic Hard X-ray Station	熊井 VELAGA, Srihari (DST)
BL-18C	●★	超高压下粉末X線回折計	亀卦川 中野 (物材機構)
BL-19 (東大・物性研)		U	柳下 (矢治 : 東大物性研)
BL-19A	◇●	スピン偏極光電子分光実験ステーション	柳下 矢治 (東大物性研)
BL-20		B M	足立 (純)
BL-20A	☆●	3 m直入射型分光器	足立 (純) 河内 (東工大)
BL-20B	○	白色・単色X線トポグラフィ/X線回折実験ステーション	杉山
BL-27		B M	宇佐美
BL-27A	●	放射性試料用軟X線実験ステーション	宇佐美
BL-27B	●	放射性試料用X線実験ステーション	宇佐美
BL-28		H U	小野
BL-28A/B	●	可変偏光VUV・SX不等間隔平面回折格子分光器 高分解能角度分解光電子分光実験ステーション	小野
PF-AR			
AR-NE1		E M P W	亀卦川
AR-NE1A	●	レーザー加熱超高压実験ステーション	亀卦川
AR-NE3		U	山田
AR-NE3A	●	タンパク質結晶構造解析ステーション	山田
AR-NE5		B M	亀卦川
AR-NE5C	●	高温高压実験ステーション / MAX80	亀卦川
AR-NE7		B M	兵藤
AR-NE7A	●	X線イメージングおよび高温高压実験ステーション	兵藤
AR-NW2		U	阿部
AR-NW2A	●	時分割XAFS及び時分割X線回折実験ステーション	阿部
AR-NW10		B M	仁谷
AR-NW10A	●	XAFS実験ステーション	仁谷
AR-NW12		U	山田
AR-NW12A	●	タンパク質結晶構造解析ステーション	山田
AR-NW14		U	野澤
AR-NW14A	●	時間分解X線回折実験ステーション	野澤
低速陽電子			
SPF-A3	○	全反射陽電子回折装置	兵頭
SPF-B1	●	低速陽電子ビーム汎用ステーション	兵頭
SPF-B2	●	ポジトロニウム飛行時間測定装置	兵頭

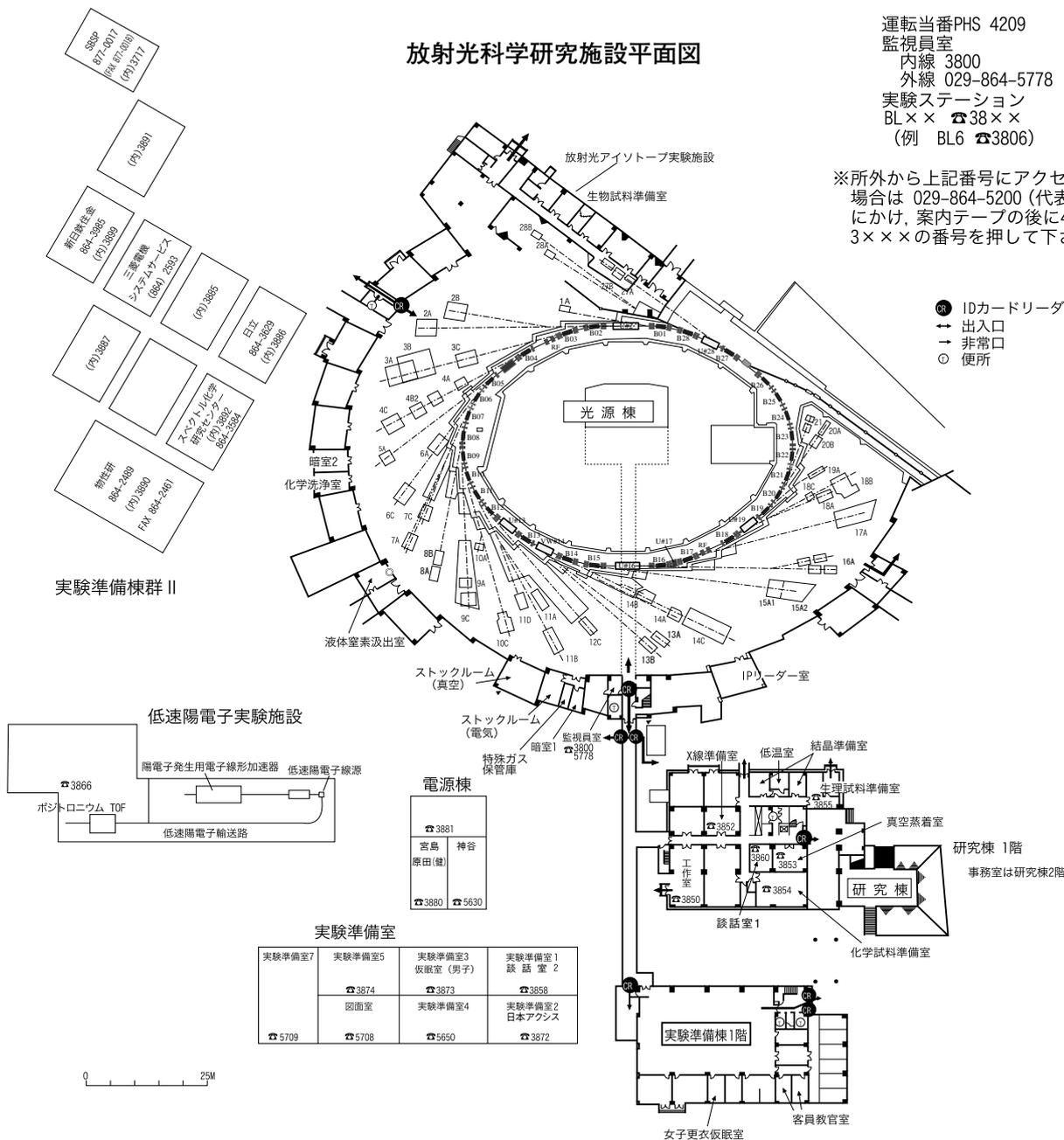
【所外ビームライン】 BL-7A 東大RCS 岡林 jun@chem.s.u-tokyo.ac.jp
BL-18A, 19A 物性研 矢治 029-864-2489 yaji@issp.u-tokyo.ac.jp
BL-18B インド・DST VELAGA, Srihari 029-879-6237 [2628] vsrihari_kjgm@yahoo.co.in

放射光科学研究施設平面図

運転当番PHS 4209
 監視員室
 内線 3800
 外線 029-864-5778
 実験ステーション
 BL×× ☎38××
 (例 BL6 ☎3806)

※所外から上記番号にアクセスする
 場合は 029-864-5200 (代表番号)
 についで、案内テープの後に4×××、
 3×××の番号を押して下さい。

- IDカードリーダー
- 出入口
- 非常口
- 便所



実験準備室

実験準備室7 ☎5709	実験準備室5 ☎5708	実験準備室3 仮眠室 (男子) ☎3873	実験準備室1 談話室 2 ☎3858
	図面室 ☎5650	実験準備室4 ☎5650	実験準備室2 日本アクセス ☎3872

PF-AR平面図

PF-AR共同研究棟

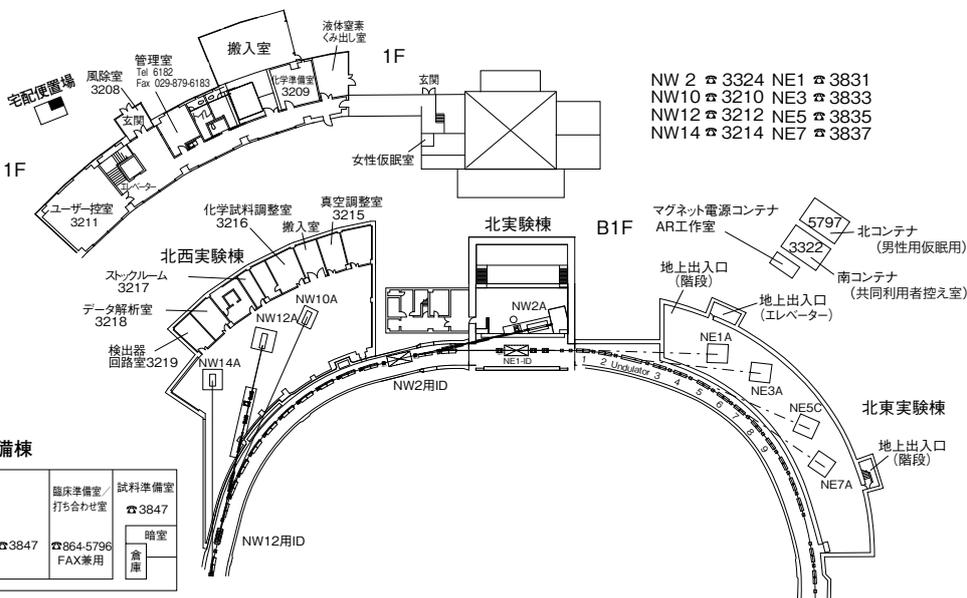
富田, 星野
6185.6186
Fax 6187

PF-ARコンテナ

北コンテナ	南コンテナ
男子仮眠室/ 物品倉庫 ☎5797	ユーザー控室/ 打ち合わせ室 ☎3322

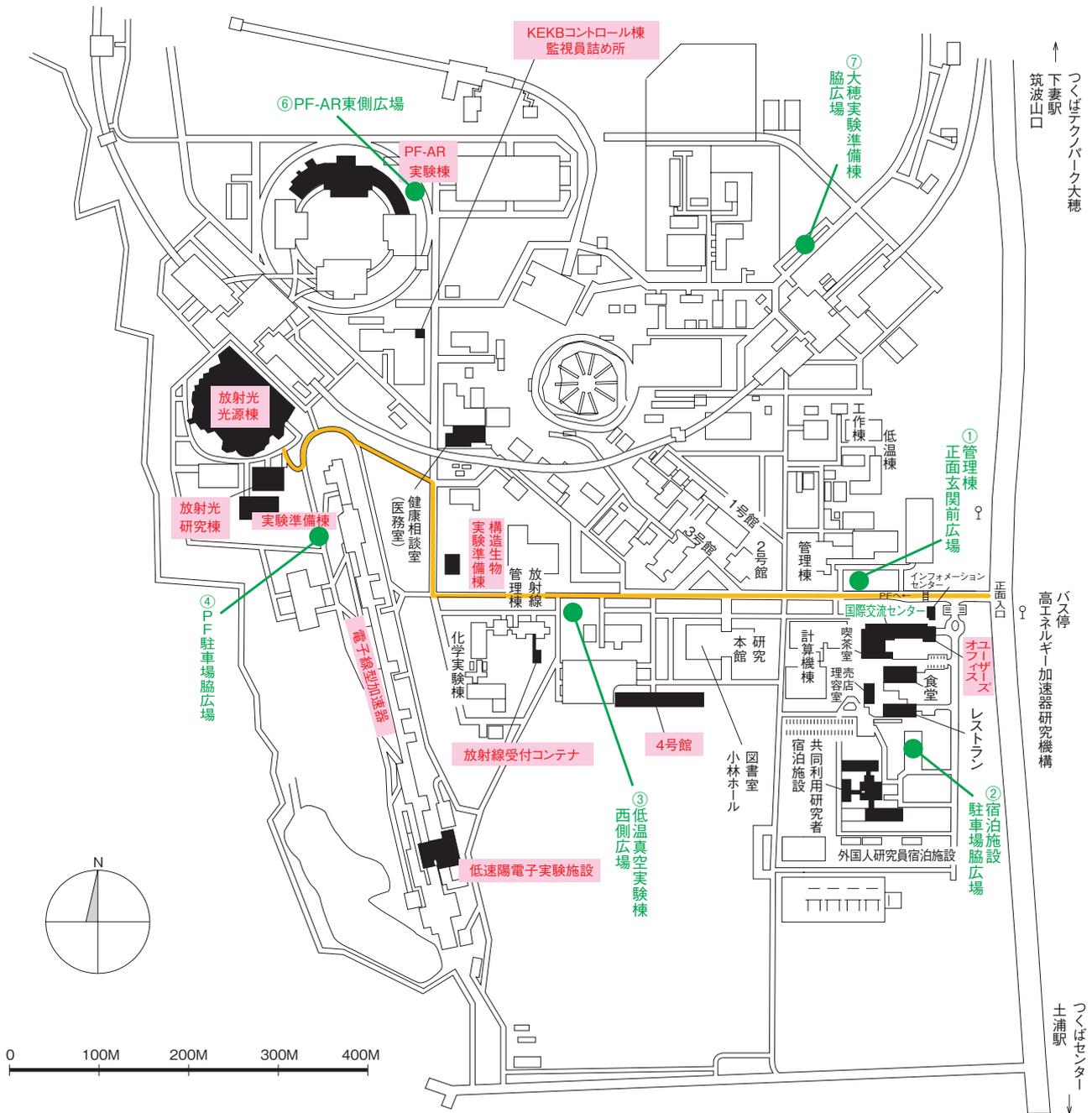
PF-AR実験準備棟

真空装置調整室 ☎3846	結晶加工室 ☎3846	臨床準備室/ 打ち合わせ室 ☎3847	試料準備室 ☎3847
	光学素子評価室 ☎3846	☎864-5796 FAX専用	暗室 倉庫



高エネルギー加速器研究機構平面図

(物質構造科学研究所 放射光科学研究施設関係分)



— 歩行者・自転車用ルート(工事のため通行できない場合がありますので、ご注意下さい。)

● 緊急時避難場所 Emergency Assembly Area

非常の際は、運転当番 4209 インフォメーションセンター 3399

