

## 海外ビームライン研究紹介：Diamond Light Source と ARPES ビームライン I05 の現状

岩澤英明 (Diamond Light Source)

### 1) Diamond Light Source (DLS)

DLS は英国が有する唯一の放射光施設である。オックスフォード南部、英国らしい広大な牧草風景に囲まれた Harwell キャンパス内にある。同キャンパス内には、Rutherford Appleton Laboratory の中性子散乱施設 (ISIS) やレーザー施設 (CLF) などが併設され、英国の一大研究拠点と言える。ロンドン・ヒースロー空港からは、車で 1 時間程度であるが、公共交通機関 (電車・バス) を利用した場合には 2 時間程度と、交通の便は多少悪い。

第 3 世代・中型高輝度放射光施設である DLS は、電子ビームエネルギー・3 GeV、リング電流値・300 mA、エミッタンス・2.7 nm.rad であり、トップアップ運転が行われている (将来的には、設計値 500 mA での運転も計画されている)。2018 年に建設・開発期間 (Phase III) が終了し、全 33 本のビームラインが稼働予定 (内 27 本が稼働中) である。新しいビームラインとしては、例えば、15 m の分光器を備えた高分解能・非弾性 X 線散乱 (RIXS) ビームライン (I21) が建設中である。

施設の規模と比べると、約 550 人と数多くのスタッフ (事務系職員を含む) が勤務している。各ビームラインでは、サイエンティスト 2-3 名、博士研究員・大学院生 2-3 名、専属テクニシャン 1 名の人員が基本構成となり、さらに、ビームライン素子、真空装置、ソフトウェアなどの専門グループから、担当者が割り振られ、サポートが加わる。日本と海外の放射光施設の一番の違いは「マンパワー」にあるように感じられる。また、個人的に驚いたのは、アンジュレータなどの挿入光源や、下記で述べる試料マニピュレータ、ARPES 装置全体の回転機器といった大掛かりな物まで、内部エンジニアが製作できる技術を有していることである。さらに、計測・研究機器の製作に関わる図面等の資料・ノウハウが、施設側に蓄積・管理されるシステムが整備されている。この事は、研究活動の継続性・人材の流動性を生むことにも繋がっているように思う。

DLS の短・中期的な将来計画としては、リングの更新 (Diamond-II) と X 線自由電子レーザー (XFEL) の建設が挙げられている。現時点で断定的なことは言えないが、予算の見通しも含めて、Diamond-II の更新計画は順調に推移しているという話である。本年中には、Diamond-II に関するワークショップが開催される予定である。

### 2) ビームライン I05

ビームライン I05 には、APPLE-II 型の準周期アンジュレータが設置されている。可変偏光 (直線：水平・垂直、円：左・右)、高輝度 ( $> 10^{12}$  photons/sec) の真空紫外光・軟 X 線 (励起光エネルギー：20-250 eV) が利用できる。エネルギー分解能は、20,000 程度 (20-60 eV) である。実験ステーションは、高エネルギー分解能用の「HR-ARPES」と高空間分解能用の「Nano-ARPES」の 2 つのブランチに分かれている。ビームライン・HR-ARPES 装置の詳細は、解説記事等を参照して頂きたい [1-2]。

## 2-1) HR-ARPES

光電子分析器はシエンタ社の R4000 を使用し、Felix Baumberger 教授（ジュネーブ大）と共同開発した 6 軸試料マニピュレータが搭載されている。試料マニピュレータは、回転自由度（チルト回転±30 度、面内回転±120 度）と冷却能力（5 K）を両立し、位置安定性も高い（バックラッシュが小さく、極低温から室温まで位置変動が非常に小さい）。スポットサイズは、 $50 \mu\text{m}^2$  程度に絞れており、20-100 eV 範囲では、数 meV の高エネルギー分解能で実験できる。各種ビームラインコンポーネントの制御、試料位置・角度の制御、温度制御、ARPES 測定は、DLS の開発ソフトウェア「GDA」で一括して行うことが出来る。そのため、測定値（フォトダイオードの電流値、CCD カメラや光電子分析器のイメージ・強度など）を、どのパラメータに対してもマップすることが可能である。ARPES 測定で言えば、フェルミ面マッピングや励起光エネルギー依存性の測定を、短時間かつ自動で行うことが出来る。さらに、装置全体のハンドリング（試料搬送など）も、一人で容易に実施可能な設計となっている。このように、ARPES 装置に関わる要素が余すところなく高い水準で整備され、どの励起エネルギー・偏光、試料角度・温度においても、高品質かつ効率的な ARPES 測定が可能なのが、本ビームラインのハイスループットに繋がっていると考えられる [3]。

## 2-2) Nano-ARPES

高空間分解能の電子状態のプロープとしては、試料走査型の光電子顕微分光（SPEM）と試料投影型の光電子顕微鏡（PEEM）が挙げられる。Nano-ARPES は「角度分解」の SPEM であり、微小集光した入射光に対して、試料を走査する事で、局所領域の電子状態を観察出来る。ただし、SPEM で主に行われてきた化学分析（ESCA）だけではなく、通常の ARPES で観察される微細な電子状態（バンド分散、フェルミ面、超伝導ギャップなど）が観察可能な点が大きな利点である。

図 1 上段に、DLS における Nano-ARPES 装置を示す。光電子分析器はシエンタ社の DA30 を利用しており、また、入射光・集光系・試料を固定したまま、分析器を自身を回転出来る。これにより「分析器のディフレクタ」もしくは「分析器の回転」を用いることで、入射光と試料の関係（測定点）を変えずに、フェルミ面などの ARPES 測定が行える。集光はゾーンプレートにより行い、ナイフエッジにより評価したスポットサイズは  $\sim 700 \text{ nm}$  となっている。励起光エネルギーは 60–200 eV で可変であり、どの偏光も利用できる。試料温度は 20 K 程度までの冷却が可能で、試料の極角・面内角の 2 軸がモータ制御出来る。これらの測定自由度の高さ（可変エネルギー・偏光・温度）は、本装置の大きな特徴と言える。

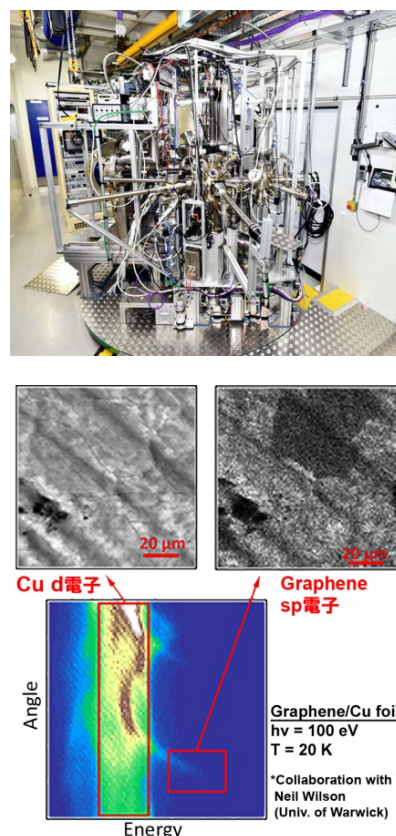


図 1 Nano-ARPES 装置：  
上) 全体像、下) 測定例

図1下段は、Cu箔上のGraphene試料におけるNano-ARPES測定例であり、Cuのd電子とGrapheneのsp電子の元素マッピングを示している。Nano-ARPESでは、エネルギー・角度方向で強度積分することで、方位に関する情報を反映した元素マッピングになっている。このような空間マッピング・バンド分散の測定は、100 meV、50 meV程度のエネルギー分解能で、今のところ行っている。今後、ビームライン・集光系・分析器の最適化などにより、10-20 meVのエネルギー分解能は達成できると考えている。

世界的に見ると、Nano-ARPES装置は、Elettra・SOLEILで既に稼動中であり、ALSではコミッション期間中である。DLSでは、2013年頃からプロジェクトが始動し、2016年4月からユーザーの共同利用を開始している。また、上海放射光施設(SSRF)では、2017年末稼動に向けて、Nano-ARPES装置の建設が予定されている。このような先端的な実験手法の開発には、第3世代中型放射光源が必要不可欠であり、日本国内における軟X線領域の高輝度放射光源の必要性を改めて感じる。一方で、世界の第3世代の放射光源において、更新計画が進められている現状を考えると、日本において高輝度放射光源を新規に建設し・運用するに留まらず、その更新計画も早期に検討する必要があると感じられる。今後、日本国内の限られたリソース(資金・人材)をどのように運用すれば、10年・20年といったスパンで、国際競争力を継続的に維持・発展できるかなど、日本・放射光コミュニティ全体としてのビジョン・マネージメントが一層重要となってくるのではないかと思う。

## 謝辞

DLS, I05のMoritz Hoesch, Timur Kim, Pavel Dudin, B21の井上勝晶氏、ならびに関係者の方々に感謝申し上げたい。

[1] M. Hoesch *et al.*, 放射光, Vol. 29, No. 5, pp. 253-262 (2016).

[2] M. Hoesch *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 88, 013106 (2017).

[3] <http://www.diamond.ac.uk/I05>, see Publications.