

国際評価委員会報告要約

広島大学放射光科学研究センター 2018年3月8-9日

広島放射光科学研究センターの国際外部評価委員会(The International Review Committee : IRC)は、HiSOR における研究活動を評価するため、2018年3月8、9日に、広島大学において評価委員会を開いた。委員会に先立ち、HiSOR 側から多くの参考資料が配布され、委員会中においても適宜補足の説明がなされた。評価委員からの質疑に対するHiSOR 側からの回答は大変参考になった。円滑な進行に努めてくれたセンター長に敬意を表するとともに、委員滞在中、親切にもてなして頂いたことに感謝したい。

国際評価は、第22回広島放射光国際シンポジウムという形で実施された。このことにより、IRC は、HiSOR スタッフによる多くの優れた講演を聞くことができ、ポスターセッションでは、若手研究者と交流するとともに、質の高い最新の研究成果を包括的に見渡せる機会にもなった。

シンポジウムの開会の挨拶で、広島大学の山本副学長は、同大学の研究と教育にHiSOR が重要な役割を果たしていることを強調した。IRC は、HiSOR の発展のために、大学本部が尽力していることに感銘を受けた。島田センター長は、過去5年間におけるHiSOR での大変優れた研究活動を総括した。それらの多くの研究成果は論文にまとめられ、かなりの割合が、査読を経て、物理、化学、生物関連の著名な学術誌に掲載されている。HiSOR は「共同利用・共同研究」拠点として高い地位を確立しており、HiSOR スタッフは学外利用者が提案した共同研究にも密接に関与している。IRC はこういったHiSOR の成功に敬意を表し、このような「共同利用・共同研究」のあり方を続けていくことを強く期待する。世界的に著名なグループとの共同研究は全体の約25%にのぼっており、HiSOR の重要な特徴のひとつとなっている。IRC は、HiSOR が研究活動を一層広げることで、世界を牽引する研究グループが注目するような、優れた施設に位置づけられていると考えている。少数のスタッフと運営経費を考えれば、HiSOR は、光源加速器、ビームライン、観測装置の継続的な維持と高度化に、非常に良く取り組んでいるといえよう。

島田センター長は、以下の5つの重点研究分野を強調した。

- 高分解能光電子分光による電子構造の研究
- スピン分解光電子分光によるスピン構造の研究
- 軟X線磁気円二色性分光による表面ナノ構造の研究
- 真空紫外円二色性分光による生体物質の研究
- 光源加速器および挿入光源の研究

高分解能光電子分光による電子構造の研究

光電子分光は HiSOR における主要分野になっており、Eike Schwier 博士が現状と将来の展望について概要を説明した。

偏光依存角度分解光電子分光(ARPES) - 入射光の偏光に依存する双極子選択則を積極的に活用した実験手法は、プニクタイド系高温超伝導体やトポロジカル物質のような、多バンドをもつ系の研究に有力である。この手法は現在 HiSOR で BL-1 と BL-9A, B に導入され、広く利用されている。2つは、偏光を切り替えるのに異なる方法を用いており、BL-1 では ARPES 装置を回転させることにより、BL-9A, B は可変偏光の APPLE-II アンジュレータを利用することで、それを行っている。偏光効果を確実に利用できるよう、「正確な」実験配置に注意が払われている。HiSOR ビームラインにおけるこの手法は、オフラインでの μ -ARPES 装置にも取り入れられており、レーザー光源の偏光は波長板により切り替えられている。多バンド系に対する偏光依存実験の威力は、多くの先駆的な研究により確かめられており、IRC は、HiSOR がこういった装置を開発したことを評価する。

空間分解能の向上 - IRC は、試料上での放射光のスポットサイズの微小化に取り組んでいることを高く評価している。現状ではスポットサイズは数 100 μm であり、これが HiSOR からの放射光を用いる際、観測装置の性能を制限する主な障害になっているように思う。特に、多くの興味ある系は、数 10 μm かそれ以下の微小なドメインからなっている。全てのオプションを慎重に検討した結果、BL-1 では真空紫外(VUV)領域での楕円形をしたキャピラリーミラー(Sigray Inc.)を利用して、スポットサイズを 75x30 μm^2 まで小さくするアイデアを前にすすめている。この方法の実際上の最大のメリットは、適度な予算(10 万ユーロ程度)で実行可能であることだろう。スポットサイズの微小化は、空間分解能だけでなく、ARPES 装置の角度分解能も向上させる。IRC は、この方向での装置の高度化を継続していくことを強くすすめる。

試料周りの環境整備 - 機能的でユーザーフレンドリーな、試料周りの環境整備は、分光研究にとっては欠かせない部分である。これに関し、最近の HiSOR の特長的な点として、(1) 高精度の 6 軸マニピュレータを備えていること、(2) 試料温度が 12 K (BL-1)、7 K (BL-9A)まで冷却可能なこと、(3) 2000 K 以上での高温アニールが可能であること、(4) ARPES 測定中に、試料表面にアルカリ金属を蒸着できること、が挙げられる。IRC は、こういった試料周りの機能的な環境整備に継続的に取り組んで来たことを高く評価する。

オフラインでの ARPES 装置 - IRC は、レーザー光源や UV 光源を用いたオフラインでの ARPES 装置の開発を全面的に支持したい。これにより、試料準備に関する念入りな予備実験が可能となり、放射光を用いたビームタイムを最大限に有効活用することができる。また、 μ -ARPES 装置の利用により、HiSOR の放射光を用いた実験に相補的な結果を、高い空間、エネルギー、角度分解能で得ることができる。

分子系および有機系における研究 - 結晶表面における分子吸着系は、単分子磁石など、新しい機能性

の発現のため、最近関心が高まっている。また、ペロブスカイトを含む有機系は、例えば、太陽エネルギーの変換の分野で、最近有望視されている。こういった系に対する ARPES 実験では、入射光強度が系にダメージを与えてしまうことが障害となってきた。HiSOR のような低エネルギーで大きなスポットサイズであれば、このようなダメージを最小限におさえることができ、分子系、有機系の ARPES 研究が可能となっている。IRC の意見では、この分野は、HiSOR で大きく期待できる研究分野のひとつである。

スピン分解光電子分光によるスピン構造の研究

VLEED 型スピン検出器は、通常のコトロン型のスピン検出器と比べて 100 倍の効率を持っている。エネルギー、偏光可変な放射光を用いることで、HiSOR は、世界のスピン分解 ARPES 分野において、トップレベルの装置を用いて研究成果を上げている、最もアクティブな研究センターのひとつである。奥田太一博士は、HiSOR におけるこの分野の現状について報告した。

VLEED 型スピン検出器を備えたスピン分解 ARPES 装置は $\Delta E \leq 10 \text{ meV}$ のエネルギー分解能と 0.4° の角度分解能を達成しており、3 次元スピンベクトル解析も行えるようになっている。これらの性能は、世界のスピン分解 ARPES 装置の中でも最も優れており、これにより、トポロジカル絶縁体やワイル半金属などのように、高いエネルギー分解能と角度分解能を必要とする、精密スピン分解測定が可能となっている。実際、トポロジカル物質や新規な量子物質のスピン分裂した電子状態の直接観測において、高度にオリジナルな結果を出し、画期的な成果を上げていることに、IRC は祝意を表す。

多様な試料を育成している研究施設との共同研究により、新しいトレンドの研究分野にタイムリーに対応することが可能になる。先に述べたように、「共同利用・共同研究」の形態は HiSOR における強みであり、スタッフの十分な支援により、外部ユーザーが、質の高いデータを効率的に得られるようになっている。

世界的な研究施設であることと優れたスタッフの支援の相乗効果により、ユーザー数、とりわけ海外からのユーザー数が急速に増えてきており、現在申請課題の半数が国際共同研究によるものである。急速に発展している競争の激しい研究分野において、HiSOR が世界をリードしている現状を維持し、いっそうの発展を遂げるには、ビームタイムの不足が深刻な問題になってくると、IRC は危惧している。

IRC は、レーザーを光源としたスピン分解 ARPES 装置や、マルチチャンネルの VLEED 型スピン検出器の開発計画を、大いに支持している。

軟 X 線磁気円二色性分光による表面ナノ構造の研究

沢田正博博士は、BL-14 における X 線磁気円二色性分光(XMCD)装置について報告を行った。この装置は、磁気ナノ構造の研究にフォーカスした試料合成槽を備え、in situ での放射光解析に特化されている。合成槽と解析槽が一体となっていることは、物質科学において大切な研究姿勢である。HiSOR は、磁気ナノ構造、とりわけ、人工的に制御された系の磁気状態の研究において、大きな成功をおさめてきた。IRC は XMCD 装置の基本的な建設が完了していることを評価する。いくつかの興味深い研究成果が得られており、その中のいくつかは、外部のユーザーグループとの共同研究である。

IRC は、後に出てくる「今後の展望」で挙げられているいくつかの高度化計画に全面的に賛成し

ている。例えば、試料温度の領域を広げること、より強磁場が得られるようにマグネットシステムを高度化することであり、サイエンティフィックな観点からすれば、十分納得いくものである。現状の液体窒素温度までの冷却システムでは、低いキュリー温度をもつ強磁性体や、表面における小さな磁気クラスターの研究が出来ない。磁氣的に硬い系の研究や、磁化困難軸に沿った測定を可能とするために、IRC は、超伝導マグネット、あるいは、強磁場の生成できる電磁石を整備していくことをすすめる。また、試料位置での磁場測定装置を設置することも提案しておきたい。これにより、マグネットの磁心からくる残留磁化に関連した問題(特に保持力の低い試料で問題となる)を除外できることになる。別の改善事項としては、絶縁体の測定にも対応できるよう、感度の高い蛍光検出器を備えることがあげられる。

装置は高度に自動化されており、ことことは、ユーザーが効率的に装置を操作していくうえで大変重要である。IRC は、z 軸(磁場)方向にも実験配置がセットできるよう、自動化を更新することをすすめておく。既存の STM 装置は、in situ での試料評価が可能な点で非常に重要であり、多くの場合において、貴重な情報を与える。IRC は、HiSOR の将来計画において、試料評価のツールとして、構造解析のための電子線回折、表面解析のためのイオン散乱分光装置や SEM を新たに導入することをすすめたい。試料準備は重要な側面をもっているため、既存のツールに加え、蒸着中の試料基板の温度をモニターできるようにすることも提案しておく。これにより、蒸着薄膜の構造の質向上や、膜厚測定の精度向上が期待される。

これまでの研究は、超高真空下での試料にフォーカスされてきたが、全ての研究が超高真空を必要とするわけではない。HiSOR には、超高真空下にあるビームラインに、窒化シリコン膜を介して接続した、低真空あるいは大気圧下での試料槽の整備を検討してもらいたい。こういった環境下では、フォトンイン・フォトンアウトの実験が要求されるが、この手法により、よく規定された多層膜を含む、新しいクラスの磁性物質への研究の拡大につながっていく。また、誘電率テンソルが調べられる反射率測定装置の整備も、前向きに考えてもらいたい。

真空紫外円二色性分光による生体物質の研究

松尾光一博士が具体的に説明したように、BL-12 は十分機能しているビームラインであり、生物物理と構造生物学が主に関係する研究分野である。BL-12 では、吸収分光に加え、円二色性(CD)および線二色性(LD)分光が実施でき、光源の運転中は連続稼働が可能である。BL-12 での VUV-CD 分光装置は、水溶液に対しては VUV 領域から 170 nm まで、膜に対しては VUV 領域から 140 nm までの範囲で、CD スペクトルの計測が可能である。低ノイズで、測定試料の消費が少なく(μl オーダー)、高速でデータが取得できるので、これまでの通常の CD 装置では難しかった構造の情報が得られる。タンパク質同士の相互作用、タンパク質とヌクレオチドの間の相互作用、タンパク質と脂質の間の相互作用に加え、膜タンパク質、糖類、ヌクレオチド、変性タンパク質の構造解析に適用できる。この分光測定の別の有用な応用分野としては、主成分分析、分子動力学、バイオインフォマティクスが挙げられる(査読付き論文数や引用数によって裏付けられている)。最近、松尾光一博士のグループに泉雄大博士が加わり、より効率的なユーザー支援や、ビームライン検討の可能性の余地が増えた。IRC は現状の成果と VUV-CD の活用に感銘を受けた。物理を中心とした 24 件の学生によるポスター発表の中で、BL-12 で研究を行った学生からは 5 件のポスター発表があり、そのうちの 2 件がポスター賞を授与さ

れた。

評価委員会中も、外部ユーザーが測定を行っていた。フランク・ヴィーン博士は、自身でビームラインを評価し、IRC に対し、標準試料に対する測定結果に矛盾がないこと、ヨーロッパの放射光施設と BL-12 で得られた測定結果の整合性を保障した。

マイクロ流路フロー、ストップフローを設置し、有機系キラル分子の薄膜作成のための蒸着装置、微小集光のためのシュワルツシルト光学系、時間分解装置の開発を進めることは、今後の方向性としては確実な事項であり、ユーザーや学生の関心をいっそう高めることになるであろう。現在のセットアップの改良として、一点だけ提案できるとすれば、それは、CD スペクトル、吸収スペクトルの温度可変下での測定の自動化である。これにより、例えば、熱分析と組み合わせた、熱安定性の解析や熱力学的な研究が可能になる。

別の開発研究としては、VUV-CD イメージングのための CCD カメラの設置が検討されている他、長期的には、左右円偏光した光渦を生成するアンジュレータの設計、開発研究があげられている。IRC は、新しい HiSOR 光源に道を拓くためにも、こういった新しい開発研究を強く支持する。

過去 10 年において、重要な高度化がなされており、BL-12 での手法により、構造生物学、糖鎖生物学、より一般的には、キラル分子の研究において、非常に多くの成果が得られるようになってきた。このような研究は、分子の大きさや複雑で変わりやすい構造のため、他の実験手法では困難である。

光源加速器および挿入光源の研究

川瀬啓悟博士は HiSOR 光源を紹介した後、数少ない光源加速器のスタッフにより行われている、HiSOR 光源における開発研究について報告を行った。IRC は、現状でのスタッフ数(計 3 名)で、最小限のことは達成されていることを指摘しておきたい。そうはいつても、スタッフは関連する加速器会議で発表しているように、いくつかの興味深い開発研究を行っている。

ひとつは、HiSOR の将来計画で用いられることになる、新しい低エミッタンスのラティスに関する研究である。これには、いわゆる「トーラス・ノット」の他に、MAX-3 や ASTRID2 を参考にしたラティス設計が含まれている。将来の HiSOR 光源の詳細設計につなげるためには、このようなラティスの開発研究をさらに進めていくしかなく、それは、今後の加速器建設にとっても必要とされるとともに、基礎となっていくであろう。また、新光源におけるパラメータリストの作成や、多様な加速器の仕様にも、つながると期待される。

現在の HiSOR の光源スタッフが推進しているもうひとつの研究は、準周期 APPLE-II 型や、Knot-APPLE 型のように、軌道角運動量をもつ光を生成する、新しいアンジュレータ光源の研究である。こういった研究は、将来の HiSOR 光源における挿入光源とも関わってくるだろう。

KEK や UVSOR のような加速器施設との共同研究について説明があったが、IRC は、共同研究をいっそう強化し、今後も継続していくことを強くすすめる。HiSOR の将来計画の立案において重要になってくるであろう。

全般に関する意見と提言:

現状においては、マンパワーの制限から、HiSOR の稼働時間は、平日 2 回入射に限られている。ユーザーコミュニティからは、ビームタイム拡大の要望が、徐々に高まってきている。IRC としては、

そのような要望に対しては、安全面とマンパワーを勘案しながら、可能な範囲での検討をすすめておきたい。

IRC は、現在の HiSOR 光源を、「回折限界」に近い低エミッタンスのラティスでおきかえることを強く提案しておく。例えば、低エネルギー域での HiSOR の姉妹施設で、更新に成功した ASTRID を参考にすることが考えられる。新光源では、いくつかの挿入光源(4 台以上)をもち、トップアップ入射、終日運転で、現在より数桁小さなビームが供給できるようになるとよい。HiSOR で展開されている研究活動は、現状においても非常に優れているが、光源が新設されれば、現在の研究活動が質・量ともに充実し、2030 年代にむけて大いに発展していくことと期待される。

2018 年 3 月 30 日、スタンフォードにて



Ingolf Lindau

IRC 委員長