

広島大学放射光科学研究センター 国際評価委員会報告 2012年3月1日～2日

委員

Ingolf Lindau教授 (委員長)

スタンフォード大学 (米国)

Evgueni V. Chulkov教授

バスク大学(UPV/EHU)材料物理学部 (UPVはバスク大学(Universidad del Pais Vasco)の略語、EHUはバスク語(Euskal Herriko Unibertsitatea)の略語)、ドノステ
ィア国際物理センター (スペイン)

Jürg Osterwalder教授

チューリッヒ大学物理学研究所 (スイス)

Friedrich Reinert教授

ユリウスマクシミリアン大学ヴュルツブルク物理学研究所 (ドイツ)

Giorgio Rossi教授

モデナレッジョエミリア大学物理学部、ELETTRA APE ビームライン (イタリア)

Qiao Shan教授

復旦大学先端材料研究所 (中国)

Bonnie Ann Wallace教授

ロンドン大学バークベックカレッジ構造および分子生物学研究所 (英国)

Johannes Bahrtdt博士

ベルリンヘルムホルツ材料エネルギー研究センター (ドイツ)

オブザーバー

太田俊明教授

立命館大学 (日本)

国際評価委員会報告要約

国際評価委員会（IRC: International Review Committee）は、HiSORにおける研究活動を評価するために、2012年3月1日～2日、広島大学において会合を開いた。HiSOR側からは、委員会に先立って多くの参考資料がIRCに配布され、また委員会中においても補足の説明がなされた。委員会からの質疑に対するHiSOR側からの回答はとても参考になり、これが委員会の円滑な進行に寄与したものと評価している。これに加え、委員滞在中、手厚くもてなして頂いたことに感謝したい。

国際評価は、第16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、HiSORで得られている質の高い最新の研究成果を包括的に見渡し、若手研究者と交流する機会にもなった。

シンポジウムの開会の挨拶で、広島大学の浅原学長は、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が成功をおさめるために、大学本部が尽力しているのにたいへん感銘を受けた。最近の特筆すべきことは、固体の電子構造および生体物質の構造に関する2つの若手研究者のポストを措置したことである。IRCは大学本部による今回の措置を高く評価しており、HiSORにおける2つの重要分野での優れた研究に大きく貢献するであろう。谷口センター長は、HiSORのたいへん印象深い活動について総括を行い、最も注目すべき研究成果のいくつかについて報告した。

評価の焦点は、電子構造解析、スピン構造解析、ナノ物質解析、生体物質円二色性の4つの研究分野に、加速器および挿入光源に関する研究開発を加えた5つのカテゴリにおける研究の質に置かれている。詳しい評価結果は、以下に続く報告書に記載されている。本要約では、IRCはこれらすべての領域における研究の質について最高の評価を与えたことを述べるだけで十分であろう。研究は、首尾一貫して世界レベルのものであり、その多くが世界最先端のものである。このことは、例えば、2010年および2011年には、11編および5編の論文がNature, Science, Physical Review Letters等の最も著名な学術誌に掲載されていること、また、総数50および41編といった概して多くの論文が査読付き学術誌に掲載されていることによって示されている。

HiSORは、外部ユーザーが提案した共同研究にスタッフが直接関わることで、非常にうまく「共同利用」を行っており、これが施設運営の重要なコンセプトとなっている。IRCは、HiSORが「共同利用」で成功をおさめていることを評価す

るとともに、この「共同利用」のあり方を継続していくことを強く推めたい。

IRC は、全体的に HiSOR が、ビームラインとエンドステーションの継続的な高度化と保守に非常に力をいれて取り組んでいると感じている。このような取り組みは、HiSOR における研究活動の大きな成功の鍵となってきたものであり、IRC は、これらの支援、人員、予算が将来にわたって維持されることが最も重要であると考えている。

本報告書には、HiSOR が供している高性能な実験装置が、世界の最先端にあることを示す多くの例が掲載されている。たとえば、稼働中のスピン角度分解光電子分光(ARPES)装置は、世界でも全部で約 10 台程度しかないが、その中でも HiSOR は、急速に進展しているスピントロニクス分野における研究で絶好の立場を占めている。IRC は、直交した2つの VLEED 型スピン検出器を用いた3次元スピン分解 ARPES を強く支持しており、その実現を待ち望んでいる。重要分野であるナノ物質研究において、HiSOR は、とりわけ、軟 X 線磁気円二色性(XMCD)実験と走査型トンネル顕微鏡 (STM) 観察を *in situ* で実施できるシステムの構築に取り組んでいる。これらの実験手法は、互いに相補的で、ナノ物質の解析に大きく貢献する。また、IRC は、紫外線 (UV) 円二色性ビームラインの BL-12 への移設計画を全面的に支持している。この移設により、フォトンフラックスが大幅に増強され、提案されている CD 装置のアップグレードとあわせれば、CD 研究の可能性が広がっていくであろう。長期的に見て、IRC は、競争力のある研究を将来にわたって実施するために、現行の機器を最先端のものに更新することを推めたい。

現行の蓄積リングは、わずか3人の加速器グループにより、優れた安定性と信頼性を備えている。IRC は、彼らを祝福するとともに、極めて高く評価したい。

IRC は、挿入光源 (APPLE II アンジュレータ) やビームライン (環境ノイズや熱ドリフトに対する安定性) のアップグレードに深い感銘を受けた。これらは円滑なユーザー実験を行うのに不可欠である。IRC は、準周期型 APPLE II アンジュレータに関する開発研究や、いわゆるリーフアンジュレータとよばれる新型アンジュレータの設計検討を全面的に支持している。

IRC は、現行のレーストラック型蓄積リング(エミッタンス 400 nmrاد) から、エミッタンスのより小さな(約 20 nmrاد)新しい蓄積リングへの、大変魅力的な更新計画について紹介された。IRC の意見としては、このような開発は極めて重要な科学的意義をもっており、実際、HiSOR が今後7~10年間にわたって世界レベルの研究を維持し続けていくために必要である。常に増加し続ける先端物質に対する電子構造、スピン構造、ナノ構造の解析には、より高輝度の放射光、すなわち、電子ビームの低エミッタンス化が必要である。IRC は、現施設の隣の敷地に納まるような、新しい光源に関する活発的な研究開発を強く支持しており、委員会に提示された、この前途有望な計画を、喫緊にすすめるべきであると考えている。

HiSOR の研究スタッフおよび技術スタッフの知識レベルと貢献度は、IRC に大変強い印象を与えた。これらのスタッフにより、高度に成功を収めている研究を継続し、最先端の装置を新しく開発し、新しい光源の計画を推進するのに、HiSOR は絶好の立場を築いている。

IRC には、HiSOR が広島大学からの最高の期待を満たしていることは、明らかであった。HiSOR と国内外の機関の研究者との共同研究は、優れた成功をもたらしてきた。例えば、過去 4 年間にわたり、BL-1 と BL-9A における研究課題の 25～35% は海外研究者によるものである。更に、HiSOR は社会への情報発信・貢献といった点でも高い評価を受けている。

以上まとめると、IRC は、HiSOR における研究内容の質および関連事項を詳細に評価する機会を与えられた。その結果、HiSOR は、世界レベルの優れた研究成果をあげており、極めて見事に運営されている施設であると結論して間違いはない。

2012 年 3 月 31 日、スタンフォードにて

Ingolf Lindau (委員長)
(IRC を代表して)

はじめに

広島大学放射光科学研究センター HiSOR は、1996 年に広島大学に共同利用施設として設置された。HiSOR の目的は、放射光科学分野における物質科学研究と人材育成を推進することである。HiSOR は、文部科学省 (MEXT) によって、2010 年 4 月から 6 年間、共同利用・共同研究拠点として認定された。この認定において、HiSOR の中期計画は次の研究を重点分野として規定している。

- 超高分解能光電子分光による固体物理の主要課題の研究
- 高分解能・スピン分解光電子分光による磁性および非磁性物質のスピン構造に関する研究
- ナノ科学の研究に最適化された最先端設備を用いたナノ物質に関する研究
- HiSOR で開発された装置を用いた生体分子の構造解析に関する研究
- 高輝度小型光源の研究開発

MEXT は、HiSOR の中間評価を 2013 年に計画している。評価には、研究の質およびアウトプット、組織の効率性、国内外研究者との共同研究および国際交流、学部および大学院学生の教育、社会への情報発信・貢献が含まれている。

これに関連して、国際評価委員会 (IRC) は、HiSOR の研究活動を評価する役割を任されている。本報告書は、上記の 5 つの研究分野に関する評価結果である。

IRC は、2012 年 3 月 1 日～2 日に実施された評価委員会に先立ち、HiSOR 側から多くの参考資料が配布された。評価は、第 16 回広島放射光国際シンポジウムという形で実施された。IRC にとって、HiSOR の研究活動に関する知見が得られる良い機会だった。開会の挨拶で、広島大学の浅原学長は、同大学の研究と教育において HiSOR が重要な役割を果たしていることを強調した。谷口センター長は、施設の現在の活動と将来の計画に関する見通しを明確に述べた。HiSOR の 5 人のスタッフ、島田博士、佐々木博士、松尾博士、奥田博士、沢田博士は、主要分野の研究における優れた報告を行なった。ポスターセッションでは、53 件の報告があり、若手研究者が入念に準備されたポスターで成果を発表した。IRC は、熱心で聡明な学生・大学院生やポスドク研究者と対話する機会が与えられたことを心から感謝している。

3 月 2 日に行われた評価委員会において、HiSOR の担当スタッフは、委員からのあらゆる質問に対して丁寧に回答し、論点を明確にするための要望にも応じた。IRC は、評価委員会を有益で誠実なものにするために、担当スタッフの行った相当な努力に心から感謝している。

研究分野

1-1. 電子構造解析 (BL-1、BL-9A)

現状

広島大学放射光科学研究センター (HiSOR) の放射光源の2つの直線部に設置されたリニアアンジュレータビームライン BL-1 およびヘリカルアンジュレータビームライン BL-9A は、真空紫外線 (VUV) から軟 X 線領域 (SX、 $h\nu < 300$ eV) の高輝度放射光を用いた高分解能光電子分光 (PES) による固体電子構造の精密解析のために設計されており、世界最先端の共同利用・共同研究を実施することを目的としている。HiSOR は、2009 年にビームライン専属スタッフの増員を図り、2011 年からは、各2名のスタッフを両ステーションに配置している。HiSOR のスタッフは、ビームラインとエンドステーションの改善とアップグレードに継続的に取り組んでおり、共同利用・共同研究に最適な環境を提供している。これら2つのビームラインは、2010年に日本学術振興会 (JSPS) による「先端学術研究人材養成事業」のもとで複数のプロジェクトの中心となった。これは、国際共同研究の件数を増やし、学術交流を拡大するための絶え間ない取り組みの一部である。HiSOR におけるすべての共同研究には、原則として担当スタッフが参加するため、外部からの研究者が初めてセンターで実験を行う場合でも、初日から効率よく実験データを取得することが可能である。

2つのアンジュレータビームラインとも、最新の高分解能角度分解光電子分光 (ARPES) アナライザ (VG Scienta 社 : R4000) および高精度低温多軸ゴニオメータが設置され、高エネルギー分解能 (BL-1 : $\Delta E = 5$ meV、BL-9A : $\Delta E = 0.7$ meV) と低温 (5-8K) での詳細なバンド構造測定と効率的なフェルミ面のマッピングが可能である。スタッフは、ゴニオメータを制御する自動データ収集プログラムの開発を含む、現行のハードウェアおよびソフトウェアを継続的にアップグレードしている。ARPES 分析槽には、真空の質を高め、超高真空 (UHV、 2.0×10^{-9} Pa) における ARPES 実験を可能にするために、標準的な排気系に加え、非蒸発型ゲッター (NEG) ポンプが設置されている。さらに付属の準備槽には、再現性良く *in situ* の単結晶表面の準備と表面の評価が行なえるように、アニーリングシステム、オージェ電子分析器、低エネルギー電子回折 (LEED) システム、イオン銃などの各種の試料準備ツールが設置されている。

2008年には、新しい回転式高分解能 ARPES システムが BL-1 に構築され、高分解能アナライザを放射光軸と試料の周りに回転できるようになった。この機能により、直線偏光の方向の変化に加え、実験配置を独立に変更することが可能になる。このシステムは、2009年から共同利用・共同研究で使用されている。2010年には、上記の準備装置に加え、金属蒸着源と反射高速電子線回折 (RHEED) システムが試料準備槽に設置され、エピタキシャル金属薄膜の成長と *in situ* でのモニタリングが可能になっている。

BL-9A では、既存の五軸ゴニオメータが 2008 年に六軸ゴニオメータにアップグレードされた。回転軸が増え、可動範囲が広がったことにより、フェルミ面近傍の微細電子構造の研究における幅広い要求に対処できるようになった。同年、光強度とエネルギー分解能を安定化させるため、回折格子の温度制御システムが導入され、入出射スリットに水冷システムが導入された。2009 年には、Xe プラズマ放電管 ($h\nu = 8.4 \text{ eV}$) が設置され、夜間など、放射光を利用できない場合でも、低エネルギーかつ高分解能の PES 実験を実施できるようになった。

評価

BL-1 は、VUV および SX 領域 ($h\nu \sim 20\text{-}300 \text{ eV}$) における直線偏光アンジュレータ光による高分解能 ARPES 測定を特徴としている。一方、BL-9A は、低エネルギー VUV 領域 ($h\nu \sim 5\text{-}30 \text{ eV}$) における左右円偏光による高分解能 ARPES 測定が特徴である。東京大学、理化学研究所、日本原子力研究開発機構、産業技術総合研究所、コロラド大学 (米)、ネブラスカ大学リンカン校 (米)、アイオワ州立大 (米)、中国科学院物理研究所 (中)、復旦大学 (中)、延世大学 (韓)、ヴェルツブルク大学 (独)、ローマ大学 (伊)、ソレイユ放射光施設 (仏) など、日本および海外の有力な研究者が、共同利用・共同研究でこれらのビームラインを訪問した。このことは BL-1、BL-9A の高い国際競争力を示すものと評価できる。

BL-1 および BL-9A における共同利用・共同研究の成果は、国内外で非常に高い評価を受けており、日本物理学会、日本放射光学会、米国物理学会、真空紫外線・X 線物理学国際会議 (VUVX2010、全発表件数 465 の内、HiSOR は 36 を占めた) などで、多くの基調講演、招待講演、シンポジウム講演が依頼されている。

BL-1 は、新システムの主要機能である偏光配置制御によって実施可能な共同利用・共同研究を受け入れている。入射光の直線偏光の活用は、電子状態の対称性の決定、フェルミ面や電子バンドの選択的分離観測に有効である。新システムの導入により、トポロジカル絶縁体、鉄系超伝導体、ルテニウム超伝導体などのマルチバンドシステムにおける電子構造に関する多くの研究成果が、*Phys. Rev. Lett.*、*Phys. Rev. B* に掲載されている。

BL-9A では、高精度六軸ゴニオメータを新たに導入し、低エネルギー領域の超高分解能 ARPES 実験における試料方位をさらに精度よく制御できるようになった。銅酸化物高温超伝導体における超伝導ギャップの精密評価、準粒子バンドの微細変化、有機分子の軌道分布、酸素同位体効果の研究を筆頭に、様々な強相関物質の電子構造に関する研究成果が、*Nature*、*Science*、*Phys. Rev. Lett.*、*Phys. Rev. B* に掲載されている。BL-1 および BL-9A において、共同利用・共同研究の課題数の増加、また、それらの研究成果の水準の向上は、HiSOR のスタッフが、実験ステーションを世界的に競争力のある高い水準まで向上および改善していること、スタッフがこれらの研究が優れた研究成果をあげるように継続的に関与していることを示すものである。この成功は、限られた利用可能なビームタイムの中で、

高効率・高精度でデータが取得できるように取り組んできた結果であることは言うまでもない。

2つの ARPES アンジュレータビームラインの汎用性は、様々な試料準備が可能である点においても明らかであり、ユーザーは、実験装置を変更することなく、単結晶試料、バルクおよび表面のナノ構造システム（例えば、層状酸化物ヘテロ構造や自己組織化有機薄膜）の準備と評価をすることができる。HiSOR は、試料表面準備の柔軟性、エンドステーションにおける電子エネルギー分析器の高い信頼性、そして優れた技術支援により、高分解能測定において全世界の放射光施設の中でも際立った競争力を持っている。

今後のあり方

HiSOR は、2009 年に共同利用・共同研究拠点として認可された、VUV から SX 域の放射光を利用する全国共同利用施設である。現在、国内外の著名研究者との共同研究を積極的に進めている。共同利用・共同研究をさらに促進するためには、蓄積リングの運転時間やユーザータイムの延長、およびそれに対応したマンパワーの強化が望まれる。

BL-1 および BL-9A は国際的競争力のあるステーションであり、ビームタイムの不足は、特に現在の運転時間の制約のもとでは、避けられない問題となりつつある。加えて放射光を利用できないときでも相補的な高分解能光電子分光実験が実施できるように、BL-1 において高調波を発生するレーザーまたは Xe 放電管のような実験室光源を実験装置に整備することが望ましい。しかし、これらの実験室光源の汎用性は、放射光には遠く及ばず、HiSOR における利用可能な実験手法のうちの1つとしてのみ見るべきである。特に外部ユーザーにとっては、ビームタイムの延長と利用可能な高分解能の実験室光源の整備が、科学的魅力を大幅に引き上げるであろう。

BL-1 のエンドステーションのアップグレードにより、偏光と実験配置の制御による高分解能 ARPES の実行が可能になった。共同利用・共同研究をさらに推進するためには、ビームラインを準周期アンジュレータにアップグレードして、高次光の寄与を減らすことが重要な改善点であろう。これは、低エネルギー域におけるフェルミ準位近傍の高分解能 ARPES にとって有用である。もう一つの重要なアップグレードは、分解能と強度を同時に向上するために必要な、回折格子と水冷入射スリットに関するものである。また、試料位置におけるビームのスポットサイズを縮小するために再集束ミラーの改良も推めたい。

BL-9A における APPLE-II 型の可変偏光アンジュレータへのアップグレードは、すでに計画済みである。BL-1 における成功に見られるように、今回のアップグレードは、低エネルギー放射光の偏光方向の制御により応用範囲が飛躍的に広がるため、国際的競争力が向上するであろう。さらなる改善には、モノクロメータにおける熱負荷の軽減も含まれる。新しいアンジュレータへの変更は、光学素子へ

の熱負荷の増加が伴うためである。測定位置では光強度が安定していることが基本である。これは、光学素子の熱負荷による、時間に対するエネルギードリフトと強度変動を無くさなければならないこと意味する。

将来の新しい低エミッタンス放射光源の実現に関連する研究として、例えば高調波を発生するレーザー光源を併用するような研究を行なう必要がある。同時に既存の光源の最も効率的な利用を保証するために、ビームラインとエンドステーションの絶え間ない改善も当然続けなければならない。

1-2. スピン構造解析 (BL-9B、Spin-ARPES)

現状

HiSOR では、スピんに分離した電子構造を直接観測できるスピン・角度分解光電子分光(スピン分解 ARPES)装置の開発・改良に取り組んでいる。特にトポロジカル絶縁体が発見されたことにより、そのスピン偏極した表面状態の測定のため、装置の需要は高まってきている。Mott 型スピン検出器を備えたスピン分解 ARPES 装置が最近 (VLEED 型スピン検出器を備えたものに) アップグレードされた。施設内での研究および多くの共同利用・共同研究を通じて、本装置は国内だけでなく国外からの利用も増えてきている。これと同時に、低速電子線回折 (VLEED) を利用した高効率スピン検出器を備えた新しいスピン分解 ARPES 装置が、ヘリカルアンジュレータビームライン BL-9B のエンドステーションとして、2010 年から開発中である。

これら 2 つのスピン分解 ARPES 装置が、共同利用・共同研究拠点における非常に優れた特長になっている。これらの装置には市販品がなく、HiSOR において開発およびアップグレードがすすめられてきたため、その運用には高度な専門知識が必要とされる。HiSOR では、これらのシステムに関する最先端技術とノウハウに精通し、スピン構造解析で優れた学術業績を有する専任スタッフを配置している。このように、HiSOR はスピン分解 ARPES 装置の調整、整備、改良を通して、高いパフォーマンスを維持し続けている。

Mott 型スピン分解 ARPES 装置では、高輝度 He 放電管を使用して、優れた成果を挙げてきた。それを顕著に示す例として、半導体表面に吸着した単層の Pb 薄膜やバルク半導体 BiTeI の Rashba 型スピン分裂の直接観測があげられる。これらの成果は、それぞれ Nature Communications および Nature Materials に掲載され、表面科学および物性物理学の分野で大きな注目を集めた。

HiSOR では、Mott 型スピン検出器の 100 倍以上の効率を持つ VLEED 型スピン検出器と高分解能 ARPES アナライザー (VG Scienta R4000) を組み合わせた、新しいスピン分解 ARPES 装置を設計・開発した。この先駆的開発により、はるかに高効率で、かつ従来にない高エネルギーおよび高角度分解能で、スピン分解

ARPES 測定が行えるようになった。このシステムは、高精度低温五軸ゴニオメータも備えており、これにより、フェルミ面の正確な測定ができる。高輝度 He 放電管を用いたテスト測定の結果、スピン分解測定モードで $\Delta\theta < \pm 0.19$ の角度分解能と $\Delta E \leq 10 \text{ meV}$ のエネルギー分解能が実現されていることが分かった。第 16 回広島放射光国際シンポジウムにおいて、このシステムで得られた、Bi(111)表面状態における特異なスピン構造に関する最初の成果が報告され、別のグループにより報告されていた、いくつかの矛盾が解決した。

この新しいシステムは、可変偏光アンジュレータビームライン BL-9 のブランチャライン BL-9B に設置され、入射光の左右円偏光、ならびに水平垂直直線偏光を活用したスピン分解 ARPES 実験に向けて更なる整備が進行中である。ビームラインは、ドラゴン型斜入射分光器を用いており、16-300eV のエネルギー領域の放射光が利用できる。これらの先端的な機能に加え、16-40eV の放射光を利用したスピン分解 ARPES では、 $\Delta E = 15 \text{ meV}$ 以下の高エネルギー分解能が期待されている。

Mott 型および VLEED 型の各スピン分解 ARPES 装置の試料準備槽には、高温アニリング装置、オージェ電子分光装置、低エネルギー電子回折 (LEED) 装置、反射高速電子線回折 (RHEED) 装置、イオン銃が備えられており、3 つ以上の蒸着源ポートが用意されている。これらの設備により、2,000°C 以上の高温アニールが必要とされるタングステンを含む単結晶金属試料、半導体、ナノ物質など、様々な清浄単結晶表面の準備とその評価が可能になっている。

評価

現在、スピン分解 ARPES 実験が実施可能な場所は、世界的にみても限られている。このような状況の中で、2 つのスピン分解 ARPES 装置がパフォーマンスを維持しつつ安定的に稼働していることの重要性を強調しておきたい。Mott 型検出器を備えた装置は既に確立されており、高い信頼性で動作する。これを運用しながら、一方において、将来有望でより大きな成功が期待される、新しい検出原理に基づく新スピン分解 ARPES 装置の開発を平行してすすめていくのは、賞賛されるやり方である。

VLEED 型スピン分解 ARPES 装置は、従来のスピン検出器と比較して、100 倍以上のスピン検出感度をもつことが確認されており、エネルギー分解能 $\Delta E \leq 10 \text{ meV}$ 、角度分解能 $\Delta\theta \leq 0.5^\circ$ での測定も可能になっている。これらの分解能は、世界中のスピン分解 ARPES では、最高の値である。現在、トポロジカル絶縁体に代表されるような、高エネルギー分解能と同時に高角度分解能を必要とする物質あるいは表面に対する、正確なスピン分解測定が実施可能となっている。

Mott 型スピン分解 ARPES 装置は、Tl/Si(111)や Pb/Ge(111)など重元素が吸着した半導体表面や、Bi(111)や BiTeI などのバルク結晶のように、Rashba 型スピン分裂を示す電子バンドの直接測定において、オリジナリティーの高い成果を生み出

してきた。これらの成果は、Nature Materials、Nature Communications、Physical Review Letters などの著名な学術誌に掲載された。

これら2つのスピン分解 ARPES 実験の特徴を十分に生かすためには、汎用性の高い試料準備槽が必要である。2つのシステムの試料準備槽では、装置のセットアップを変更することなく、層状物質を含むバルク単結晶、単結晶金属、ナノ物質の清浄表面の準備と評価が可能である。これらの特徴により、さまざまな試料を効率良く準備でき、この急速に進展する分野における新しい動向に迅速に対応できるようになっている。たとえば、高温アニーリング装置は、試料を 2,000°C 以上に加熱することができ、用途の多いタングステンや他の金属表面の清浄化が可能である。タングステンの清浄表面は、金属超薄膜を作成する基板としてしばしば用いられている。

スピン分解 ARPES 装置を用いた共同利用・共同研究には、常に HiSOR の担当スタッフが参加している。これにより、初めて実験を行う場合であっても、ユーザーは初日から効率的に質の高いデータを取得できるようになっている。装置の独自性と複雑性から判断して、これ以外の運用方法は考えられないであろう。

VLEED 型スピン分解 ARPES 装置は、現在、BL-9B のエンドステーションに設置されている。夜間には放射光利用はできないので、それに対応するために、高輝度 He 放電管が備えられている。このことは、試料の準備とその評価、またある場合には、高分解能スピン分解 ARPES 測定の点で、施設利用の効率化に確実に貢献している。将来的には、放射光の夜間利用が望まれる。

今後のあり方

近年、スピントロニクスおよびトポロジカル絶縁体の研究が盛んに行われるようになり、スピン分解 ARPES 測定への期待が高まってきている。世界で稼働しているスピン分解 ARPES 装置は数が限られているため、2台の装置をともに供することで HiSOR はそのニーズに応え、この研究分野において際立った役割を果たすことができるであろう。高輝度放射光源を利用したスピン分解 ARPES 測定に対する需要は極めて高い。トポロジカル絶縁体におけるスピン偏極した表面状態は、しばしばバルクバンドの近くに存在するため、高エネルギー分解能かつ高角度分解能と、励起光エネルギーの可変性が不可欠である。将来的には、ビームライン BL-9B のアップグレードと、真空紫外域中心の放射光を用いた環境で、VLEED 型スピン分解 ARPES 装置を運用することが期待される。現在のところ、装置は、主に高輝度 He 放電管を光源として用いられているが、個々の試料に対して最適な励起エネルギーと偏光を利用することで、スピン電子構造の正確な測定が可能になるはずである。高分解能スピン分解 ARPES 装置の特性を最大限に活用するためには、放射光の利用が不可欠である。現在、VG Scienta や SPECS などのメーカーが機器を市販しているが、VLEED 型スピン検出器の新たな開発は、HiSOR がこの分野において最先端の施設であり続ける事を意味している。

一方、高輝度 He 放電管を光源とする Mott 型スピン分解 ARPES 装置は、励起

光のビームサイズが大きいので、達成可能なエネルギーおよび角度分解能には限界があり、また小さな試料にはあまり適さない。ミラーを設置して、試料位置におけるビームサイズを縮小することは、装置の競争力を維持するのに、大きな効果があると考えられる。ミラーの利用は、簡単で比較的安価な方法であり、最優先で取り組むべき事項である。

既存の2台のスピン分解 ARPES 装置では、いずれにおいても、3つの直交成分の内、2つのスピン成分しか測定できない。3次元スピン偏極ベクトルが測定できれば、トポロジカル絶縁体の従来とは異なるスピン構造、スピンに依存した電気伝導、およびスピンゆらぎの研究にとって必要不可欠な情報を得る事ができる。現在、2つの VLEED 型スピン検出器を直交配置した3次元スピン偏極計の設置が進められている。これは、高効率の VLEED 型スピン検出器を用いて3次元スピン偏極ベクトルを決定する、世界初の試みである。IRC は、この開発を待ち望んでおり、これにより、間違いなく HiSOR がスピン分解 ARPES の分野において世界最先端の施設であり続け、共同利用・共同研究の需要がさらに高まっていくであろう。

HiSOR のスタッフは、スピン分解 ARPES 装置の設計とその運用に長期にわたる豊富な経験を有しており、本施設は、「マルチチャンネルスピン検出器」-すでにある程度アイデアが提出されている-を開発するのに絶好の立場にある。これは、世界で最も独創的なスピン分解 ARPES 装置の1つが更に発展し、3次元スピン検出が実現可能になるだけでなく、エネルギーおよび角度分解能が飛躍的に向上し、超高速の時間分解測定へ道を開く可能性も有している事を示すものである。

HiSOR が、将来さらに発展するために、世界最先端のスピン分解 ARPES 実験装置と実験環境を整備し、放射光の夜間利用を可能にすることで、ユーザーにビームタイムを安定的に供していくことが強く望まれる。

1-3. ナノ物質解析 (BL-14、LT-STM)

現状

ビームライン BL-14 は、ナノ構造物質の磁気特性に関する実験を実施するためのビームラインである。清浄表面の準備、in situ における試料蒸着および走査型トンネル顕微鏡 (STM) によるモフォロジー解析を行うための設備を備えた超高真空槽一式が、ビームラインに接続されている。これにより、十分評価された試料に対して、磁場を印加しながら円偏光放射光を照射することで、軟 X 線磁気円二色性 (XMCD) 実験を行うことができる。

薄膜成長に関しては、リアルタイムでの RHEED 振動測定を利用して、単原子層レベルでの制御が可能となっている。また、サブモノレイヤーの精度で膜厚を制御した、ウェッジ形状膜の作製も可能な段階にまで達している。XMCD 装置の

試料周りには、可変磁場が印加できる電磁石と、(磁場反転のための)スライド式の永久磁石が備えられている。また、試料温度のモニターと制御も可能である。

XMCD 測定では、スペクトルの温度依存性だけでなく、磁気ヒステリシスループの測定データも取得できる。このような実験環境は、単原子層薄膜の巨視的および微視的磁気特性を同時に調べるのに非常に適している。

これらの装置は、BL-14 グループの目標である、STM と XMCD を組み合わせた *in situ* 実験の実現を目的に、アップグレードされてきた。最初の成果は、Pd 単結晶基板の表面に Co および Pd 単原子層を積層した垂直磁気異方性を示す Pd/Co/Pd(001)系について得られた。表面上に形成された磁気クラスタのようなナノ構造体の構造と磁気特性に関する研究課題が、現在進行中である。HiSOR では、BL14 以外でも STM を活用した研究が実際に幅広く行なわれている。他の STM 装置は、ビームラインに直接接続されているわけではないが、表面構造や局所的な電子状態密度の詳細な研究に活用されている。それらは相補的で質の高い研究課題となっており、例えば、Si(111)表面に規則的に配列した Al ナノクラスタの電子構造や、SiC(0001)上のステップエッジにおけるグラフェンの初期成長、アームチェアとジグザグエッジを有するグラフェン層の成長に関する研究が挙げられる。この研究成果は、グラフェンエッジに形成されるスピン偏極電子の測定の可能性に道を開くことを期待させる。最近のもう一つの研究成果は、トポロジカル絶縁体 Bi₂Se₃における Dirac 表面状態とバルク価電子帯の間の散乱チャンネルの存在を明らかにしたもので、将来、より理想的なトポロジカル絶縁体を作製するための材料設計に指針を与えるものである。

評価

HiSOR BL-14 では、円偏光放射光を用いた元素選択的な磁気測定が可能だけでなく、超薄膜成長とモフォロジー観察による評価も行えるような最先端の実験設備が整えられており、これらを利用した物質科学に関する実験が実施できるようになっている。これまで強調してきたように、蒸着中の RHEED 振動の同時観察による薄膜成長の制御、オージェ電子分光(AES)による表面化学組成分析、低エネルギー電子回折(LEED)による表面の長距離的な対称性とドメインサイズの解析、STM による表面物質の微細構造の解析が、特徴としてあげられる。現在のセットアップはウェッジ形状膜の成長に適したものになっており、簡単に「一次元試料ライブラリ」を *in situ* で準備することができる。放射光の集光状態は中程度だが、膜厚感度の高い XMCD 測定が同時に可能である。XMCD を行うにあたって、光源の円偏光度を定量的に評価することは非常に重要である。また、応用技術の開発者に定量的な情報を提供するには、現象論的な分析だけではなく、定量的で意味のある結果を得なければならない。そのためには、ナノ物質系とその高精度分析のための信頼性の高い計測手法を開発する必要がある。このような考えのもと、BL14 では、再現性の高い薄膜成長手法の試みと開発が行われ、Fe、Co、Ni を含む薄膜系の磁性分析が行われてきた。BL14 の実験設備はこのような

取り組みの結果として整備されてきたものである。STMを用いた、極めて局所的なモフォロジーと原子構造に関する評価により、様々な膜厚領域が特徴づけられ、XMCDデータの説得力のある解釈が可能になる。HiSORにおける、表面ナノ構造の総合的な研究手法は、基礎研究と応用研究を統合し、実用性のある物質開発の可能性を高めるうえで適切なものである。HiSORでは、表面ナノ構造における電子状態の総合的理解のために、STM-局所的な電子状態密度が調べられる-と放射光を相補的なプローブ手段として用いている。これは放射光施設においてSTMがどのように活用されうるかという興味深い例となっている。

現在BL14は、幅広いユーザーコミュニティが関心をもつようないくつかの重要な特徴をもっており、3d磁性化合物に特化した物質科学ビームラインの方向性を示す良い手本となっている。

今後のあり方

今後の課題の多くは、放射光源の高度化、すなわち、新しいリングにおけるAPPLE アンジュレータビームラインの設置その他のアップグレードにかかっている。BL-14のグループは、大変優れた研究手法を用いて、試料作製の制御と詳細な解析を行っている。これらをさらに発展させるためには、まずin situ条件下において、より複雑な試料ライブラリを作製可能にすることを考えてほしい。試料の同時蒸着や、ウェッジを交差させて膜厚制御を行えば、2次元、あるいはより多次元の試料ライブラリの作製が可能になる。これにより、無機/有機界面を有するハイブリッド表面ナノ構造や、2元系あるいは3元系試料を作製できることになる。この手法が確立されれば、試料マニピュレータの自動制御により試料表面全体をスキャンすることで、多くの系に対するデータの同時取得も可能になり、スループットが高まるであろう。また、Kerr効果ベクトル測定装置を既存システムに追加すれば-これは簡単にできる-、XMCDと全く同一の磁場・温度条件におけるKerr測定が同じチェンバー内で可能になる。Kerr効果の同時測定は、XMCD測定と相補的な、バルク敏感で元素非選択な情報を与える。XMCD測定槽(だけ)ではなく、実験準備槽にKerr効果測定装置を設置すれば、XMCD測定「前」の試料特性評価ツールとして活用することができる。また、XMCD装置の試料周りの部分を修正することで、(化学・電気化学反応や電圧制御反応を追跡する)「in-operandoモード」での実験手法の開発も可能であろう。このような研究方法の利点を十分生かすには、放射光の試料位置でのビームサイズを最適化するとともに、同時に安定性、強度の面においても、最適な条件を見出していかなければならない。

超高真空走査型電子顕微鏡(SEM)は、実験装置として大いに有用である。XMCD実験では、放射光が照射される領域全体にわたって平均化された結果が得られる。STMでは、その領域における試料の均一性を時間効率よく観測できるが、SEMは、特にX線蛍光分析と組み合わせた場合、間違いなくSTMの結果を補完するものとなる。

放射光を集光する(一部)代わりになる手法に、表面イメージングがある。これは、スループットを高める手法のひとつになるかもしれない。マイクロ構造やナノ構造の貴重な「局所」情報を得るため、光電子顕微鏡(PEEM)型アナライザや、放射光励起された光電子を検出する走査型プローブの利用も考えられる。

「局所的な」磁場印加を可能にすると同時に、試料位置での有効磁場の特性を完全に評価する方法も検討すべきである。

FEL の出現により、極短パルスが利用可能になっていること、また、中程度の時間分解をもつ放射光パルスを利用することにより、ポンププローブ実験が、多くの放射光源において一般的になりつつある。特に HiSOR において光源の大幅なアップグレードや新しい光源の建設が予定されているのならば、このような状況も考慮にいれておいたほうがよい。

HiSOR のような施設では、それほど困難無く、放射光 XMCD を「含めた」物質科学の最先端設備の開発が可能で、それが他の施設にとっても参考になるであろう。また、試料の育成評価から放射光実験までの一連の研究手法は、ナノ物質の専門家であっても、まだ放射光実験を専門としていないようなユーザーの数を増やし、HiSOR の設備を更にインパクトのあるものにするであろう。

IRC としては、放射光実験や磁気測定結果の解釈にあたり、ユーザーが、試料の特性を十分評価するのに時間がかけられることが重要であると考えている。これは、ユーザーが良好な条件で試料準備に取り組めるようにするために、ビームラインの操作やデータ取得における手間を減らすことで、短時間のうちに達成可能である。すべての実験情報と計測結果を有意義に取り扱うためには、メタデータを含むデータ構造の管理に関する取り組みも必要であろう。

1-4. 生体物質円二色性 (BL-15)

現状

生命科学のための実験ステーションであるビームライン BL15 には、真空紫外線円二色性 (VUVCD) 分光装置が設置されており、水溶液中の生体分子 (蛋白質、糖類、核酸) の構造解析に利用されている。VUVCD は、様々な溶媒/環境条件下にある多彩な種類の生体試料を対象にすることができ、X 線結晶学や核磁気共鳴 (NMR) などの高分解能技術では対応が困難な生体物質の構造解析に有力な手法である。

2000 年、HiSOR は、世界で初めて、VUVCD ビームラインの開発に成功した放射光施設の一つとなった。測定および解析技術を継続的に高度化し、国内外の研究者との共同研究を推進することにより、VUVCD による生体分子の構造解析で重要な役割を果たしてきた。その後、多数の VUVCD 専用ビームラインが世界各国で開発され、現在では Aarhus Storage Ring (ISA) (デンマーク)、Beijing

Synchrotron Radiation Facility (BSRF) (中)、National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) (台湾)、Berlin Electron Storage Ring Company for Synchrotron Radiation (BESSY2) (独)、Diamond Light Source (英)、Ångströmquelle Karlsruhe (ANKA) (独)、Synchrotron SOLEIL (仏) において稼働中である。

HiSOR の VUVCD 装置は、左右円偏光を 50kHz で切り替える光学システムと、2 つの光電子増倍管とロックインアンプからなる検出システムから構成されている。これら 2 つのシステムが光サーボ制御システムで連結されており、これにより CD 信号を高精度で検出することができる。温度可変システムを備えているため、 -30°C から 80°C までの温度範囲で生体分子の CD スペクトルが測定できる。

VUVCD 実験では、S/N 比の高い、効率的な測定が必要とされる。最近、高感度検出器 (2009 年度) と高反射率回折格子 (2010 年度) が導入されたことにより、測定効率が約 2 倍になった。現在 HiSOR は、VUVCD 測定に最適な Wadsworth 型垂直入射分光器 (BL-12) の建設を進めている。これにより、 10^{12} photons/sec のフラックスの放射光が利用できる見込みである。これは、世界にある他の VUVCD ビームラインのフラックスと同等であり、より高い精度と効率で VUVCD 測定が可能になる。

HiSOR は、2010 年に共同利用・共同研究拠点として認可された。VUVCD 装置に関して採択された共同利用・共同研究課題数は、2009 年は国内外あわせて 9 件、2010 年には 1.5 倍以上の 14 件にまで増えた。昨年度 (2010 年度)、VUVCD ビームラインは、52 週のうち共同利用・共同研究のために約 30 週、実験システムの調整と改良のために約 10 週利用された。国内で利用している研究機関は、産業技術総合研究所、理化学研究所、東京大学、自然科学研究機構、大阪大学である。また産業界からは、キッセイ薬品工業が利用している。海外からは、英国、フランス、ハンガリー、ロシア、中国、台湾などが参加している。ユーザーには、X 線結晶構造解析、NMR、低温電子顕微鏡といった別の分野で構造生物学を研究する専門家も含まれている。

評価

VUVCD 装置では、様々な種類の生体分子および生体物質の CD スペクトルを測定することができる。建設から 10 年以上経っているが、測定効率を向上させるために、高度化が行われてきた。前回の国際外部評価の後、回折格子の更新、新たな検出器の設置 (測定できる波長範囲が拡張された)、ソフトウェアの改訂、検出器の電圧モニター、これまでの真空中での測定に加えて窒素雰囲気下での測定、試料槽の改良、試料準備に必要な機器の設置など、多くの重要な高度化が行われてきた。VUVCD 装置を最先端装置として維持するためには、今後も引き続いて高度化を絶えずすすめる必要がある。BL-12 への移設計画が実現すれば、フラックスが増加することで、測定の精度と効率が向上し、高度化が大いにすすむであろう。また、線二色性測定や配向 CD 実験 (繊維、膜、フィルム、エマルジョンなど、測定対象が広がるので特に有益である) を含む、他の手法を導入していく

ことも効果的である。その他では、新しいソフトウェアの導入、駆動モーターの設置、窓材・ミラーの交換によるフラックスの改善などが、システムの高度化としてあげられるだろう。

VUVCDグループは、アミノ酸、糖類、蛋白質、その他生体分子の構造解析に関する論文を国際的な学術誌へ発表しており、それを含めて着実な成果を上げている。また、VUVCDと最先端の計算技術とを組み合わせ、蛋白質の新しい構造解析法を開発してきた。この解析法は、蛋白質の構造や機能の解明のために、他の施設でも使われるようになり得るであろう。しかしこれが普及するためには、ソフトウェアを簡単な方法で（すなわち、専用計算Webサーバーまたは少なくともダウンロード可能なソフトウェアパッケージ配布によって）広く利用者に開放する必要がある。また、HiSORのグループは、VUVCDを利用した糖類研究において世界最先端にある。たとえば、公的な共有データバンクを通じるなどして、上に述べたような仕方でもデータが他の施設の研究者にも公開されれば、他の施設から蛋白質のVUVCDスペクトルが論文として発表される際に、広く引用されるようになるであろう。

BL-15で進められている研究は、VUVCDコミュニティで認められつつある。過去5年間に、理研シンポジウム（2009年・和光）、第2回放射光円二色性国際ワークショップ（2009年・北京）、田中豊一記念シンポジウム（2010年・京都）、日本化学会（2010年・東京）、日本物理学会（2010年・兵庫）、国際CD・バイオインフォマティクス会議（2010年・ロンドン）など、国内外の17の学会で、招待講演を依頼された。また、*Biosci. Biotech. Biochem.* (2009)に掲載された多糖類に関する研究論文は、日本農芸化学会BBB論文賞に選ばれた。さらに*Biochemistry* (2009)に掲載された蛋白質-生体膜相互作用のメカニズムと蛋白質による薬物輸送機構の解明を試みた論文は、*科学新聞 (The Science News)* と *日経産業新聞 (Nikkei Business Daily)* で紹介された。これらの成果は、VUVCDグループが、国際的に高く評価されていることを示している。今後は、生物科学に重点を置いたプレゼンテーションや論文発表を行うことで、VUVCDビームラインが、国内外の生命科学コミュニティ（CD、CD装置の専門家ではなく）にとって有益であることを、広く示していくことを提案する。

VUVCDグループの研究が優れていることは、また、2006～07年度の科学研究費（C）、2006年度の若手研究者補助金（B）、2008～10年度の科学研究費（C）、2010～11年度の研究活動スタート支援、2011～14年度の若手研究者補助金（A）に採択されていることなど、外部資金の獲得に成功していることから裏付けられている。

VUVCDビームラインにおける共同利用・共同研究として採択された課題数は、過去数年で飛躍的に増えており、外部ユーザーによる研究論文の数も順調に伸びている。また、海外ユーザーの増加も、HiSORにおけるVUVCD装置が、国際交流の場として機能していることを示している。上記の高度化を通じたCD測定の効

率化によって、共同利用・共同研究課題数がさらに増えることが期待される。ビームラインの仕様、実験手法の紹介と応用例、他のビームラインを含め、HiSORの技術開発が掲載されている論文にアクセスできるような、専用Webサイト（日本語・英語）を設けるなどして、新しい外部ユーザーに対する支援の更なる充実を推めたい。また、従来のCD分光法のユーザーを対象とした国内（あるいは国際）学会／ワークショップを開催することで、放射光利用の価値を高め、外部ユーザーの数が飛躍的に伸びるであろう。

松尾光一博士は、過去数年間にわたり、非常勤スタッフの身分でビームラインの開発と利用を担当してきたが、この度、常勤のスタッフとして、ビームライン担当者の役職に就いた。今回の第16回広島国際シンポジウムと国際評価委員会で説明された事項の中では、このことが主要かつ非常に重要な進展であった。松尾博士が着任したことにより、HiSORにおけるVUVCD研究は、本質的に安定で将来性のあるものになった。後日、松尾博士にアシスタントがつけば、増加した外部ユーザーによる実験への対応だけでなく、先に述べたユーザー支援や装置の高度化もより可能になるであろう。

今後のあり方

HiSORにおけるVUVCD研究は、(英国、フランス、ドイツ、デンマーク、米国、中国、台湾、日本の主要メンバーからなる) VUVCD研究者のコミュニティおよび共同利用・共同研究者（ユーザー）の間で高く評価されている。

一方、国外におけるVUVCD装置の技術は年々向上しており、より高精度の測定システムが確立されてきている。このためHiSORにおけるVUVCD装置の現在における国際的な地位を維持し続けるためには、既存の装置を常に改善していくだけではなく、固体および繊維試料の構造解析に必要な高速温度スキャン、線二色性および配向CD実験など、各種の新しい測定オプションの導入を続けることが不可欠である。また、VUVCD装置が最初に開発されてから10年以上経過している。BL-12への移設に続いて、最新の光学および検出システムを備えた次世代のVUVCD装置の建設が強く望まれる。

VUVCDビームラインは、HiSORと生命科学コミュニティの両者にとって貴重な資源である。これは、HiSORにおいて生物学／生体物質研究専用の唯一のビームラインであり、「共同利用・共同研究拠点」の重要な要素である。このビームラインは、生体分子の構造解析に関連したCD分光学の有用性を飛躍的に拡大してきた。構造生物学における基礎研究に留まらず、耐熱酵素、薬の開発など、産業界が関心を抱く分野での研究等、幅広い応用研究が大いに期待されている。既存のビームラインの更なる改良と新しい次世代ビームラインの開発計画は、HiSORでの生命科学の重要な役割を堅持し、この分野での国際的な発展に貢献するものと期待される。

1-5. 光源加速器と挿入光源

現状

広島大学放射光科学研究センター (HiSOR) の光源加速器システムは、150 MeV の入射用マイクロtron加速器、ビーム輸送ライン、レーストラック型蓄積リングから構成される。このリングの周長は 22m、偏向半径は 0.87m で、常伝導の 2.7 T 偏向電磁石を使用している。蓄積電子ビームのエネルギーは 700MeV で、2 つの 180°偏向電磁石から発生した、臨界光子エネルギー 873eV の放射光を、14 箇所のビームポートから取り出すことができる。AURORA-2 レーストラック型デザインをオリジナルとしており、2 つのアンジュレータを挿入するスペースを確保するため、180°偏向電磁石間の直線部が長くなるように、住友重機械工業 (SHI) によって修正された。これらの直線部に挿入されているアンジュレータの一方は、26~300eV の直線偏光した放射光を発生するリニアアンジュレータ(長さ 2.4m、周期 57mm)である。もう一方の直線部に挿入されていたアンジュレータは、上下それぞれ 3 列の磁石列の位相を変えることにより、ヘリカルモードで 4-40 eV の左右円偏光、リニアモードで 3-300 eV の直線偏光を発生するマルチモードアンジュレータ(長さ 1.8m、周期 100mm)である。このマルチモードアンジュレータは、2011 年 7 月末にリングから取り外され、ごく最近、APPLE II 型アンジュレータに置き換えられた。

HiSORリングは、順調に運転されており、1996年以來ユーザーに安定した光子ビームを提供してきた。運転時間は年間 2,000 時間を超え、ユーザー運転時間は年間約 1,600 時間である。マシンは、1 日 11 時間(2 回の入射を含む)で毎週 4 日間運転されている。月曜日は、保守運転日となっている。朝のマシン起動は 30 分しかかからない。安定なビームを提供するために、光源グループは、ビーム寿命の改善(RF Cavity 固有の HOM を利用したバンチ伸長)、入射時(150MeV)およびランプアップ時(150MeV→700MeV)のビーム不安定性への対応(RF シェイクによる不安定性の抑制)、機器の動作モニタリングの強化、制御機器の分散化による制御トラブル被害の最小化(局所化)などを行っている。

ビーム不安定性は小型光源あるいは低エネルギー入射に起因するものであり、それに対応する技術開発も小型故の空間的制約や速い周回周波数に対応したものでなければならぬ。また、バンチ伸長等に関しても、基本となるビーム寿命が大型放射光源に比べると短いため、安易に大型放射光源で用いられるような手法(phase modulation 等)を用いることは出来ない。小型放射光源の安定化のためには独自の研究、技術開発の積み重ねが必要不可欠であり、モニタリングを含む制御系についても随時、先端技術を取り入れるような対応を行っている(手元の英文と比較して表現内容が豊富になっています)。また、次世代小型高輝度光源 HiSOR-II の設計研究および加速器要素技術の開発研究も行っている。

挿入光源については、2011 年 7 月 31 日に、マルチモードアンジュレータが、新しく建設した 78mm 周期の準周期 APPLE-II 型可変偏光アンジュレータに置き換えられた。

このアンジュレータは、光子エネルギー範囲 5～50eV の左右円偏光した放射光を発生できる。水平および垂直の直線偏光モードでは、それぞれ 3.1eV と 6.5eV の放射を最小ギャップ (23mm) で生成する。また、対角磁石列 (たとえば上部右と下部左の列) 間の反平行移動を導入することにより、傾斜直線偏光も生成可能である。

この新しいアンジュレータにより、利用可能な光子エネルギー範囲のフラックスが以前のアンジュレータの 2 倍以上に増加した。また、磁石列に準周期構造を採用したことにより、モノクロメータを通過した後の放射光の単色性が水平線形モードで大幅に向上した。過去 6 年間の HiSOR-II (周長 40m) の設計検討の結果、達成可能な最小エミッタンスは現在 14nm-rad まで小さくなっている。HiSOR-II のラティスは、ルンド (スウェーデン) にある MAX-lab の MAX-III ラティスに基づいて設計された。小さなリングでこのような低エミッタンスを達成するには、偏向磁石が、集束力を生成するための複合機能を持っている必要がある。蓄積ビーム寿命は短い (3 時間未満) ため、3Hz のトップオフ運転が計画されている。

2010 年には、光源リングだけではなく、各種のシンクロトロン加速器および蓄積リングにも利用可能なまったく新しいラティス構造を独自に見出した。従来の蓄積リングでは、電子ビーム軌道がリングを 1 周しただけで閉じていた。これに対して、新しいラティス構造では、ビーム軌道はリング内を複数回回ってから閉じる。次世代の小型光源リングにこの新しい概念を適用することにより、蓄積電子ビームの閉じた軌道長をリング周長の 3 倍以上にすることができる。また、11 個の偏向磁石を装備した直径 15m のリングは、11 個の長い直線部 (3.6m) と短い直線部 (1.8m) を持っており、挿入光源やその他必要な加速器コンポーネントを収容できる。

新しいラティスの設計検討に加え、各種アンジュレータの設計検討も進行中である。

評価

15 年を超える運転を通じて、HiSOR 放射光施設は、光電子分光研究、生体物質の CD (円二色性) 研究、ナノ物質の研究のための、並外れた条件を提供する知名度の高い研究施設に成長した。この施設は、海外の多くの研究者を引き付けている。2 つのアンジュレータビームラインから発生する高フラックスの放射光は、高分解能角度分解光電子分光 (ARPES) に使用されている。ビームラインの 1 つでは、通常の光電子分光測定に加えて、スピン分解測定 (SARPES) も可能である。光源のエミッタンスは 400nmrad と非常に大きいですが、これらのビームラインから得られるデータは、世界で高い競争力を持っている。これには、複数の理由がある。

- i) 加速器グループにはわずか 3 名のスタッフしかいないにもかかわらず、光源は高い信頼性で動作しており、非常に高い評価を受けている。
- ii) ビームラインの保守は良好で、各種細部を改善するために絶え間なく取り組みが行われている (例えば、ごく最近、振動を軽減するために BL-9A

の回折格子チェンバーとスリット部が石でできた架台の上に取り付けられ、熱ドリフトを小さくするために断熱された)。

- iii) 実験用チェンバー (ARPES、SARPES) は HiSOR が所有し、HiSOR のスタッフによって良好に管理されている。スタッフが実験に関与することにより、常に最高のパフォーマンスが保証されている。岡山大学の設備を除き、すべてのビームラインは、HiSOR のビームライン科学者および学生によって運用することが HiSOR の一般の方針である。これらの人々は、20~30%程度の研究活動に参加しており、実験環境の高い質基準と継続的な発展が保証されている。
- iv) 最も大きな特徴は、*in situ* の試料準備と、同じ環境で行なわれる測定前の試料評価の高度な組み合わせである。通常、このようなアプローチは、他の研究所では行われていない。
- v) 試料位置におけるかなり大きなビームサイズは、安定性の改善に役立っている。試料のビームスポットから発生する光電子の一部しか電子分析器を通過しないので、電子ビーム軌道の小さな変化や、ビームラインを構成している機器のドリフトは、ほとんど影響を及ぼさない。

APPLEアンジュレータの設置により、ビームラインBL-9AおよびBL-9Bのパフォーマンスは大幅に向上した。APPLEアンジュレータによって生成された偏光の角度や状態が、光学素子により変化することを考慮すべきである。円偏光した光は、試料に導かれるまでに大きく変化するかもしれない。これは、主にアンジュレータをユニバーサルモードで運転することにより補償できる。実験で使用される簡単な偏光検出器(例えば、完全ストークスベクトルを測定できないRabinovich検出器)は、どちらかという、クロスチェックに有効であろう。

新しい APPLE アンジュレータは準周期型である。高次光による汚染は、水平直線偏光モードで大幅に減少する。垂直直線偏光モードでは、3 次高調波の抑制が不十分で、3 次高調波は複数のピークに分裂し、利用可能な光子フラックスが減少する。これは、APPLE 型磁石構造に固有の問題である。現在、垂直直線偏光モードにおけるパフォーマンスを向上するために、別の準周期スキームが考察されている。(HiSOR の準周期 APPLE アンジュレータは、架台ごとレールの上に設置されているため)アンジュレータをこのレールシステム上で真空チェンバーから後退させ、一部の磁石を再配置することにより、準周期構造を数時間以内に容易に転換できる。

アンジュレータ直線部には、真空槽の上下にあるビーム軸方向に整列した電流ストリップの束を装備してある。これは、垂直および傾斜モードのオペレーションで最も強くなる 2 次キックを補償するためである。BESSY II における経験は、特に低電子エネルギーマシンにおける電流ストリップの価値を証明している。

高輝度のアンジュレータ放射とは別に、2.7 T 常伝導偏向電磁石からの放射が利用に供されている。強い磁場の結果、高い臨界エネルギーが得られ、2 つの二結晶分光器を備えたビームラインでは、数 keV 領域の光子が利用可能である。ま

た、電子ビーム軌道面から上下に外れたダイポール放射は XMCD 研究にも使用される。

現在 14 本の偏向電磁石ビームラインが盛んに使用されており、アンジュレータビームラインは将来的に課題数が過剰になると思われる。ビームタイムを延長することで恩恵を受ける実験は複数ある。ビームタイムの延長は、いわゆる「夜明スペシャル」を実施することにより、新しいスタッフを雇うことなく実現できる。既存の安全規則の中で、最後の入射は深夜直前に実行可能で、一晩中監視することなく、マシンを運転できる。HiSOR マシンの高い信頼性、ならびに 350mA で 7 時間、200mA で 10 時間というビーム寿命により、長時間にわたり優れたパフォーマンスが保証される。

ユーザーの実験に安定した光子ビームを提供する目的で、光源リングのパフォーマンスを維持および改善するために、少数のスタッフによる継続的努力がなされることが非常に重要である。また、蓄積ビーム電流の増加と各種のビーム不安定性の解消は、高く評価される。これらの取り組みは、放射光ユーザーの研究活動の発展に寄与してきた。

新しく設置された準周期可変偏光アンジュレータによる光子フラックスの増加と可変偏光（ヘリカル、楕円、傾斜直線偏光）の提供によって、高分解能の ARPES 及び SARPES 実験による固体物理研究の革新的進歩が期待されることは、注目に値する。

HiSOR の 400nmrad という大きなエミッタンスは、レーストラック型小型加速器構造では（これ以上）小さくできない。新しい蓄積リングである HiSOR II では、エミッタンスを 20 分の 1 以下に小さくできる。多くの実験が、試料におけるスポットサイズの縮小として現れる輝度向上の恩恵を受けるだろう。特に ARPES 及び SARPES 実験が、試料ビームスポットと光電子分析器による光電子アクセプタンスのマッチング性向上による恩恵を受ける。また、HiSOR では、磁区の顕微分析、スペクトル顕微分光法、イメージングなどの新しい実験が可能になると思われる。小型光源リングのためのラティス設計という独自のアイデアが、HiSOR のユーザーコミュニティから評価されることに疑いの余地はない。

新しい光源の設計検討が数年前から行なわれている。HiSOR II の設計には、4 つの長い直線部 (3.4m) と 4 つの短い直線部 (2.0m) を持つ MAX-III ラティスが採用されている。傾斜ダイポール磁石（四極成分および六極成分を含む）と追加の四極磁石が、同じ鉄ヨーク内に組み合わされている。このような解決法の有効性は、MAX III で証明されている。小型であることに加え、設置と位置合わせが容易である。傾斜ダイポール磁石と四極磁石の磁場クロストークは、数値評価されており、無視できることがわかっている。DBA ラティスのエミッタンスは、35nmrad が予測されている。（一方、）分散のない直線部を作るという拘束条件を回避するという今日では妥当でかつリスクのない仮定条件を採用することにより、17nmrad という小さなエミッタンスを達成することが出来る。この場合、ビーム寿命は 3 時間を下回る。

2年前、HiSOR II+と呼ばれる新しいラティスデザインが、SasakiとMiyamotoによって提唱された。この新型ラティスでは電子軌道は射影したトーラス結び目の幾何形状に従って、数回の周回後に閉じる。既存のHiSOR IIと同じ外周長を仮定して、軌道が3サイクル後に閉じる11回対称ラティスが選ばれている。多周回レイアウトは、直線部の数(11本の長い直線部(3.6m)と11本の短い直線部(1.8m))の観点で柔軟性がはるかに高い。ビーム入射部とRF加速空洞は、短い直線部に配置可能で、ダンピングウィングラまたは他の加速器コンポーネントも短い直線部に配置でき、11本の長い直線部は、すべて挿入光源に開放できる。この設計では、HiSOR IIと比較して、より多くの、より長い直線部を設けることができる。また、加速器診断のために大きなスペースが用意できるので、非常に有用である。通常、このスペースは、今日の第3世代マシンではかなり制限されている。新しい設計のもう一つの利点として、単バンチ運転ではバンチ間隔が広がるので、時間分解分光に適していることがあげられる。

HiSOR IIラティスの概念は、完成度が高く、基準設計として利用できる。HiSOR II+の新しい設計概念に基づいて、研究開発を進めることを強く推奨する。これには、i) 交差する軌道を許容する、かなり複雑な複合機能偏向磁石の詳細磁石設計、ii) これら特有の磁石の真の3次元特性を内蔵した広範囲なトラッキングおよびダイナミックアパチャーのシミュレーション、iii) トップアップスキーム、その他が含まれる。

HiSOR IIの設計は、このリングの各加速器コンポーネントが従来型のもので、製造上の課題はないため、直ちに建設できると思われる。しかし、建設計画を短期間で具体化するには、他の施設の加速器専門家との協力が不可欠である。HiSOR II+の設計は、より高度で、詳細な検討が必要である。新しい低エミッタンスマシンでは、加速器とビームラインのコンポーネントに安定した条件が必要である。安定した運転のための前提条件の一つとして、トップアップ入射がある。これは、多くの第3世代光源で標準の運転モードになっており、トップアップのためのフルエネルギーブースターを最初から装備する必要がある。14nmrad (HiSOR II) または17nmrad (HiSOR II+) というエミッタンスは、短いビーム寿命によって達成され、トップアップ入射は、人工的エミッタンスブローアップを避け、ユーザーのニーズに従った妥当な寿命を達成するための手段に過ぎないことを述べておく。また、熱ドリフトを最小限に抑えるために、24時間運転を考えるべきである。

過去に Sasaki が、様々な新しいアンジュレータの概念を提案し、それらは世界中で実用化されている(APPLE アンジュレータ、準周期アンジュレータ)。放射光装置に関する十分な知識は、HiSOR の更なる発展と HiSOR II(+)の戦略的計画にとって非常に有用である。HiSOR II(+)の設計検討の中で、新しいアンジュレータ概念が評価される。たとえば、いわゆるリーフアンジュレータが提案されている。この装置は、軸上の高次高調波を強力に削減したモードを持っている。この特徴を考慮すると、よく知られている Figure-8 アンジュレータをパフォーマンスで凌ぐ。さらに、磁石列を移動することにより、円偏光モードや、高次高調波が必要な場合それらを持つ直線偏光モードなどの他の運転モードを確立できる。

今後のあり方

現在の HiSOR リングは、周長 22m のレーストラック型リングなので、より大きなビーム電流やさらに長いビーム寿命、低エミッタンス／高輝度、その他のこれ以上の改善は非常に難しい。また、施設の老朽化に対して、現行マシンのパフォーマンスを維持するには、保守にかかる費用の大幅な上昇が容易に想像できる。これらの状況を考慮すると、新しい最先端の小型高輝度光源を設計および建設することが強く推奨される。エミッタンスは 1 桁以上減少し、アンジュレータを設置するための直線部の数は約 8～10 になるはずである。

新しい低エミッタンスマシンは、環境ノイズや熱ドリフトにより敏感で、加速器とビームラインのコンポーネントが受動的または能動的に安定化された場合にのみ、ユーザーは究極のパフォーマンスを利用できる。たとえば、高度なビーム診断、高速のビーム軌道フィードバック、トップアップ運転は、他の光源と競っていく上で不可欠である。

広島大学には、加速器の問題に関する深い知識をもつ人材が存在するが、求められるすべての分野をカバーするには人員を追加する必要がある。国内外の他の加速器グループとの密接な協力も不可欠である。多くの高度に開発されたシステムは、人的資源を節約するために、既存の光源から受け入れることができる。迅速かつスムーズな立ち上げのためには、ビームラインとエンドステーションの共同開発に関するユーザーとの協力が重要である。

HiSOR は、加速器グループの 3 人と、ビームラインおよびエンドステーションを担当する 10 人のみで運転されている。これが可能なのは、マシンが SHI からターンキーレディ装置として引き渡されたからである。保守と修理は、引き続き SHI が行なう。加速器グループの技術職員 1 人が、これらの活動を統率している。人材が限られていることから、HiSOR II(+)についても同様の仕方が強く推奨される。マシン全体を建設および設置することができるメーカーは、世界にいくつかある。新しいリングの保守とサービスはほとんど外部委託できても、新しいより多機能のマシンの信頼できる運転のためには、組織内での技術支援が不可欠である。このマシンは、より長い年間あたりのビーム時間と 24 時間サービスを提供するために、別のビーム時間スケジュールを採用すべきである。