

新緑の眩しい季節になりました。PFの再誕生から5年目となりましたが、その大半の期間において甚大な影響をもたらしたCOVID-19も終息に向かい、いよいよPFの本来の活動が可能になるものと期待しています。

5年前の『施設だより』(2019年5月号)でも述べていますが、PFの施設運営においては「連携」が大切です。2023年度第1期の運転については、光熱費の抑制のため、関係各所と連携して、例年と比べて2週間ほど前倒しとなるスケジュールを組みました。ゴールデンウィーク前からの運転となったことで、スタッフはもちろん、利用者や委託業務従事者の皆さんへの影響も大きかったかと思えます。この場を借りて、関係する全ての皆さんの協力に感謝を申し上げます。

日本学術会議が募集した「学術の中長期研究戦略」には、KEK-PIP2022を踏まえ、マルチビームをキーワードとして含む量子ビーム科学のビジョンと新放射光源施設を中心とした施設計画がKEK機構長から提案されました。機構長から新放射光源施設が提案されたことは大きな意味を持ちますが、実現のためには、文科省の「学術大型計画の基本構想ロードマップ」に掲載されることが重要です。その選考ですが、学術会議が採択したプロジェクトを対象に募集が行われてきた従来の方式ではなく、学術会議による採択を前提としない新規の方式に変更されるとのことです。詳細については不明ですが(注:原稿執筆後、文科省のWebに募集開始の案内が掲載されました)、国内の他の放射光施設の整備計画やKEKの他の分野の大型計画との調整も必要ですので、早期に好機が訪れた場合にも逃さないように準備を進める考えです。

具体的には、新放射光源施設の有力な候補であるハイブリッドリングを構成する超伝導ライナックと蓄積リングのうち、開発要素が少なく単独での運用が可能な蓄積リング部を先行して整備するための検討を開始しました。昨年度、UVSOR、HiSOR、PF-UAと連携して開催したPF研究会「開発研究多機能ビームラインの建設と利用」では、高性能な蓄積リングで展開される2ビーム利用サイエンスの提案が多数ありました。また、PFおよびPF-ARの2リングを並行して運用することは、予算、機材、人員などのリソースを分散させることになり、非効率な状態でもあります。このような背景からも、蓄積リング部の先行整備は合理的であると考えています。

フォトンファクトリー計画推進委員会(2023年1月30日)およびKEK国際諮問委員会(2023年2月22日)では、ハイブリッドリングの蓄積リング部について、Energy Switchable Storage Ringを提案しました。国際的にも国内的にも、小型、中型、大型の施設が分担して、10 eV~100 keVを中心とした放射光利用が推進されています。国内に、蓄積電子エネルギー(以下、電子エネルギー)が

0.5 GeV~1.5 GeVの複数施設、3.0 GeVのNanoTerasu、8.0 GeVのSPring-8があることも考慮して、2.5 GeVと5.0 GeVの切り替え(運転時間2.5 GeV:5.0 GeV=3:1)、周長750mを蓄積リング部の仕様策定に向けた検討の出発点として設定しました。この出発点は、高い基本性能、高い自由度・拡張性、広い分野・手法への対応、現実的な建設と運転のコストなどの観点から、以下の近似的な関係に基づいて設定されています。

- 放射光エネルギーは、電子エネルギーの2乗に比例する。
- 放射光輝度は、電子エネルギーの4乗に反比例し、周長の6乗に比例する。
- ビームライン数は、周長に比例する。
- 建設費は、周長に比例する。電力消費は、周長を固定するならば、電子エネルギーの2乗に比例する。周長を電子エネルギーに応じて伸長することで、比例するぐらいまで抑制できる。

この提案では、施設としての放射光のエネルギー範囲が広がるだけでなく、単一のビームラインでもエネルギー範囲を広げることが可能です。現在、将来計画の一環として建設を進めている開発研究多機能ビームラインでは、エネルギーは未定ですが、軟X線と硬X線の2ビーム利用が可能になります。また、先行して建設を進めている広波長域軟X線ビームラインでは、50 eV~5 keVの利用が可能になります。これらのビームラインは偏向電磁石を光源としていますが、Energy Switchable Storage Ringのビームラインでは、2台のアンジュレーターを光源として、例えば、12.5 eV~50 keV(12.5 eV~12.5 keV@2.5 GeV, 50 eV~50 keV@5.0 GeV)の高輝度放射光の利用が可能になります。

新放射光源施設については、KEKロードマップ2021において、PFの稼働から50年となる2030年代前半までに建設するとしています。放射光科学の黎明期に建設されたPFが50年であるならば、放射光科学が飛躍的な発展を遂げた後に建設される新放射光源施設は100年(あるいはそれ以上)を目指すべきではないでしょうか。そのためには、多様な学術研究の展開に必要な先端性を保ち続けられるよう、将来の拡張を見据えた計画でなければなりません。したがって、放射線遮蔽も含めた建物が極めて重要になります。現在、放射線科学センターや施設部施設企画課とも連携して検討を進めています。

最後に、加速器第六研究系の研究主幹の交代について報告したいと思います。小林幸則前主幹が定年により退任し、帯名崇新主幹が着任しました。小林さんとは、実験施設長と研究主幹として、緊密に連携しながら同じ目的に向かって施設運営を行ってきました。Energy Switchable Storage Ringも、小林さんとの議論から着想して、共同で提案したものです。引き続き、小林さんから助言をもらいながら、帯名さんと緊密に連携して施設運営にあたります。

昨年、日本学術会議から「未来の学術振興構想」の策定に向けた「学術の中長期研究戦略」の公募がありました。物構研における直近の最大の課題は学術のための将来放射光源計画ですが、研究所全体の学術振興構想はフォトンサイエンスを包含する量子ビーム科学が基本になっています。そのため、物構研の中長期研究戦略としては「量子ビーム施設統合マルチプローブ学術研究基盤」を提案することにしました。以下で簡単に説明します。

自然界に存在する生命体や無機物、人間によって人工的に生み出された機能性材料や文化財など、広い意味の“物質”には総合知としての情報が蓄積されています。これらの情報を統合的に引き出すことで“物質”の様々な機能の起源が解明できれば、より高性能な機能や新たな機能を生み出すことができるようになると考えられます。このように純粋な理想系から実在の複雑系や不均一系に拡大している現代の物質科学は、各実験手法に適した状態にするため物質を破壊して取り出した試料を要素還元的にそれぞれ分析・解析する時代から、可視光下の我々の目には直接見えない物質内部をいろいろな“新たな目”を駆使して“あるがままに見る”時代に突入していると言えます。この新たな時代を支えるのはX線、中性子、ミュオンのような非破壊で物質内部に侵入できる量子ビームの統合的利用であり、統合型量子ビーム科学というものが「未来の学術振興構想」のひとつになると考えられます。

物構研では、放射光、中性子、ミュオン、陽電子の4つの大型加速器施設にクライオ電子顕微鏡設備も加えた学術研究基盤を整備し、国内外の研究者による共同利用研究・開発研究を進めています。統合型量子ビーム科学の動向に世界で唯一、単独で対応できるのが物構研の特徴になっています。物質の3次元構造決定には放射光硬X線（水素など軽元素に鈍感）と中性子（水素にも敏感）が主に利用されています。低速陽電子は表面近傍の3次元構造決定に利用されます。一方、電子構造決定には放射光軟X線とミュオンが主に利用されます。このように3次元構造と電子構造の相関関係を統合的に明らかにするには異なる量子ビームをハイブリッド利用（装置的に可能であれば同時利用）する必要があることは自明です。また、X線以上に透過性の高い中性子、ミュオンは厚い物質でも観測可能です。軽元素と重元素からなる機能性材料である各種電池や触媒の動作中の機能変化のあるがままの理解には統合マルチビーム・マルチプローブ構造解析（電子構造・機能の解析を含む）が重要です。また、細胞などの厚みのある多層構造のあるがままの理解には電子顕微鏡と同じ原理でありながら透過性の高いミュオン顕微鏡やトモグラフィーのハイブリッド利用が必須となります。文化財など厚さ方向に構造が大きく違ってくる観測対象についても構成成分に応じた量子ビームのハイブリッド利用が必須です。このように統合型量子ビーム科学により、物質から引き出せる情報量が豊富に

なるとともに、それらの多次元相関構造が統合的に解明できるようになると考えられます。“新たな目”を駆使して“あるがままに見る”時代が実現すれば、観測対象とする物質群の拡大も進み、新たな物質観を生み出すことにもつながります。

これまで、非破壊観測法、顕微イメージング法などの新たな実験手法や人材育成（施設系人材と利用者人材）は、量子ビーム別に分かれて発展してきました。しかし、物質の3次元構造と電子構造・機能の多次元相関構造を明らかにするためには、量子ビームの物質との相互作用の違いを相補的に利用し、多次元に相関している情報から物質を統合的に見る必要があります。このような統合型量子ビーム科学が扱う物理現象は、量子ビームの種類によらず、共通の回折・散乱、吸収・反射、それらの二次過程であることから、相互作用パラメータが違うだけでデータ解析を統合することも容易であり、データ科学との相性も優れたものになっています。日本学術会議には、量子ビームの種類に依存しない統合的な手法開発・人材育成をさらに進めるための「量子ビーム施設統合マルチプローブ学術研究基盤（施設計画）」の構築・強化を「学術の中長期研究戦略」として提案しました。

「学術の中長期研究戦略」では今後10年で実現すべき具体的な計画を示す必要がありましたので、KEKでの国際評価を経て絞り込まれた実施計画 KEK PIP2022 をもとにまとめることにしました。まず、共同利用開始後40年を越えたフォトンサイエンスの中核施設として、波長特性・ビームサイズ特性・パルス特性等が異なるマルチビームの同時利用が可能な新放射光施設計画を含めました。顕微鏡への展開では、X線や電子より遅れていた、透過性の高いミュオンや中性子においても近年ビーム収束技術が進んできましたので、その進歩を見据え、細胞などの非破壊・オペランド観測を可能とする、電子顕微鏡のミュオン版の開発計画を含めることにしました。そのほか、放射光との併用実験の需要が高いが測定が律速となっている低速陽電子のビーム強度を2桁向上させる計画と、生命科学や材料科学で需要の高いトランススケールイメージング実現のための研究環境の整備計画を含めました。

以上のように、統合型量子ビーム科学に向けて物構研がやるべきことは山積していますが、着実に前に進めていきたいと考えていますし、国内外の関連施設との連携も重要と考えています。幸い令和5年度概算要求において、統合型量子ビーム科学の推進により新たな研究領域を切り拓いていくための新組織「新領域開拓室」が認められ、今年度から教員人件費と事業費の一部を確保することができました。今後、拡充要求を行い、量子ビーム施設連携部門、AI・DX開発部門、イメージング・顕微開発部門、非破壊分析開発部門の4部門体制の新組織を整備していくことになります。皆様のご理解とご協力をよろしくお願い申し上げます。

放射光実験施設長としての二期目も残り半年となりました。『施設だより』については、PFの再組織化の準備を進めていた5年前の2018年11月号から隔号で担当しており、今回は11回目になります。読み返してみると、色々なことが思い出され、お世話になった方々への感謝の気持ちが湧き上がります。

2019年11月号(の『施設だより』,以下同様)では、「フォトンファクトリー新体制発足記念講演会～PF REBORN 2019～」の報告をしています。この講演会では、次期計画として推進しているPhoton Factory Hybrid Light Source (PF-HLS)に繋がるPFの将来の方向性が議論されました。その際の想定では、新放射光源施設の10年後の実現を目指すとしており、約半分の年月が経過したことになります。2023年5月号でも述べましたが、実現のためには、文科省の「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想(ロードマップ)」に掲載されることが重要です。今年度、ロードマップ2023策定のための計画の募集があり、KEK機構長から「研究分野を深化・融合・創成する放射光マルチビーム実験施設」が提案されました。その際、新放射光源施設の呼称についてハイブリッドリングからPF-HLSに変更しています。日本学術会議の「学術の中長期研究戦略」に続いて、文科省のロードマップにKEK機構長から提案が行われたという実績は、採否に関わらず、次期計画の実現に向けた大きな一歩と考えています。

PF REBORN 2019では、PFの使命についても議論されました。大学共同利用機関法人KEKを構成する物質構造科学研究所(大学共同利用機関)が運営する学術施設として、PFは「①開発研究を通じて世界を先導する新技術と若手人材を供給する。②先端基盤施設として物質と生命に関わる多様な利用研究を推進する。」を使命として掲げています。放射光科学を取り巻く時代の変遷に合わせて、主に共用施設との役割分担を意識して策定したのですが、PF-HLS計画の推進にあたっては、放射光学術基盤ネットワークを構成するUVSORやHiSORとの役割分担を明確化していくことも重要になります。両施設とは開発研究多機能ビームライン(BL-11A,-11B)の建設を共同事業として進めているところですが、役割分担の議論を通して、より包括的な連携体制を構築できるのではないかと考えています。

PF-HLS計画を推進する中で肝に銘じていることは、新放射光源施設の実現は手段であって目的ではないということです。研究分野の深化・融合・創成による物質・生命科学の推進が計画の目的です。新放射光源施設は、スタッフとユーザーの能力を最大限に引き出し、持続的に優れた研究成果を創出しながら、技術開発と人材育成を担うことを可能にする研究インフラであり、その実現は目的の達成のための手段です。人員や予算に限りがある中で成果を最大化して、特に長期的な観点から貢献できるよう、必要に応

じてUVSORやHiSORとの役割分担に伴う光源性能の最適化を行うなど、計画のブラッシュアップを継続していきます。

放射光のあらゆる性能を統合的に活用することを謳うPF-HLS計画ですので、新しい挑戦も数多くあります。2023年5月号などでも紹介したBL-12A広波長域軟X線ビームラインとBL-11A,-11B開発研究多機能ビームライン(前述の通り、学術基盤ネットワークの共同事業)で、それぞれ、広波長域利用と2ビーム利用の技術実証と利用研究に取り組みます。前者は2023年度内の完成、後者は2025年度の夏期停止期間中の完成を目指しています。2019年11月号では、PFとして推進するプロジェクトについて説明していますが、2021年度からは、そうしたプロジェクトをPF-S型課題として実施しています。広波長域利用と2ビーム利用に関するプロジェクトは、まさにPF-S型課題の趣旨に沿っており、具体的な準備を始めています。なお、開発研究多機能ビームラインについては、施設内にワーキンググループを設置して運用制度の検討を開始しています。放射光共同利用実験の一般課題(G型課題)として実施するのは困難と考えており、ユーザーの皆さんの意見を伺う機会も設けながら、1年程度の期間で運用制度の検討を進めます。そうした運用制度の検討もPF-HLS計画に反映させたいと考えています。

現時点でのPF-HLS計画の概要は、パンフレット(https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/library/PF-HLS_202309_v1.pdf)でご確認いただけます。また、ウェブサイト(<https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/>)も随時に更新して参ります。現在、施設内でConceptual Design Report ver. 1を準備しており、今後、半年に1回ぐらいのペースでバージョンアップしていく予定です。ユーザーの皆さんにも、遠くない将来に協力をお願いすることになると思いますので、よろしく願いいたします。

PF REBORN 2019の際に発足したPF同窓会の講演会が、11月4日にKEKつくばキャンパスで初めて現地開催されました。見学会も開催され、20年以上ぶりに実験ホールに入域した元スタッフの方々からは「(1980年代の黎明期に)自分が導入した装置と先端的なビームライン」が共存していることに感激したとのコメントもいただきました。2009年にノーベル化学賞を受賞されたアダ・ヨナット博士(KEK特別栄誉教授)の来訪もありました。ヨナット博士からは、PF-HLS計画のパンフレットの表紙に、Good Luck! Many Great Results, Ada Yonath 27.9.23との直筆メッセージをいただきました。長期間の試行錯誤を経てリボソームの構造を解明されたと伺っていますが、優れた研究成果を創出することこそが大切と改めて説かれた気がしました。この先、色々なことがあるかと思いますが、PF-HLSの実現に向けて、一喜一憂せずに取り組んで参ります。

毎年1回、2月のPFニュースに掲載される「物構研つくばキャンパスだより」では、「物構研」でも「PF」でもなく「物構研つくばキャンパス」というくくりで何を書くか、毎年頭を悩ませています。さて、物構研を含めKEKには様々な出版物があり、その多くは秋から冬にかけて公開されます。KEKとしては、KEK要覧、KEK Annual Reportなどがありますし、物構研およびその中の施設や組織としては、物構研要覧、Photon Factory年報、Photon Factory Highlights、CIQuS（量子ビーム連携研究センター）年報などがあります。いずれもWebで公開されており、この1年間を中心に最近の活動が凝縮されていますので、ぜひご覧ください。

今回はそれらの中から、KEKとして出版している「環境報告」（2023年度版は<https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2023/09/ER2023.pdf>）に注目したいと思います。一口に環境と言っても色々ありますが、昨今、地球温暖化、カーボンニュートラルといった話題を聞かない日はないといつていくくらいですし、それらと密接に関連するエネルギー問題には、大きな関心が寄せられています。ご承知の通りKEKは、大型加速器をベースに大学共同利用を行っており、その運転には大きなエネルギーを必要とします。もちろん、その結果としてたくさんの研究成果が得られ、皆様の教育・研究活動、ひいては人類の発展に大きく貢献しているのですが、実際にどのくらいのエネルギーを消費しているのか、その環境負荷はどのくらいなのかを把握し、研究アクティビティを維持・向上しつつ、環境負荷を低減する方策を考えることは重要な課題です。以下、「環境報告」に掲載されているデータを紹介します。

2022年度のKEK全体でのエネルギー投入量は2,464 TJ（テラジュール）でした。Jという単位自体は、我々研究者にとってなじみのあるものですが、この数字を見ても全く実感がわかないと思います。エネルギー投入量の99%以上は電力が占めており、2022年度の電力使用量は253,531 MWhでした（うち、つくばキャンパス分は202,295 MWhで、一般家庭の約67,000世帯分に相当するとのことです）。なお、2022年7月からSuperKEKBが改修のために運転を停止していたため、つくばキャンパスにおける2022年度の電力使用量は2021年度と比べて約40%減少しています。この数字をカーボンニュートラルの観点からみると、2022年度のエネルギー由来のCO₂排出量は83,701 t-CO₂となり、これも電力使用量によるものが99%以上を占めます。この値は、2005年度の273,960 t-CO₂と比べて約69%の減少となっており、SuperKEKBの運転停止を差し引いても、この20年程度の間大きく減少していることがわかります。実はその大きな要因の一つは、電力使用量とCO₂排出量の関係、すなわちCO₂換算係数にあります。つくば地区におけるCO₂換算係数は、2005年度の0.555 t-CO₂/MWhから、2022年度の0.296 CO₂/MWh

へと大きく減少しています。まさにここが、PFをはじめとする物構研の量子ビーム施設を利用して行われている研究が貢献する部分になります。もちろん、KEKでは加速器の消費電力を削減するための設備整備や技術開発を進めていますが、量子ビーム利用を含めた材料研究等によって、CO₂換算係数の減少や、電力を利用する機器のエネルギー効率の向上に貢献できれば、その波及効果は非常に大きなものになります。ただし、カーボンニュートラルは、材料開発や技術革新だけで実現できるものではなく、社会・経済などを含めた総合的な取り組みが必要です。KEKでは、「カーボンニュートラル時代に向けたKEKの役割について」をテーマに、機構コロキウムをシリーズとして開催しており、その第一弾として昨年12月20日に、人間文化研究機構総合地球環境学研究所の谷口真人副所長にお話をいただきました。これを手始めとして、今後一層、カーボンニュートラルのための取り組みを強化していきたいと考えています。

また、「環境報告」には、これも昨今大きな問題になっている、ヘリウムに関するデータも示されています。KEKでは液体ヘリウムを必要とする機器（主に超伝導関連）が多く利用されていますが、物構研では特に、試料の冷却に用いられることが多いと思います。ご承知の通りKEKにはヘリウム液化設備が整備されており、使用したヘリウムを回収して再液化することでヘリウムの消費を抑制していますが、2022年度につくばキャンパスにおけるヘリウム回収率が低下し、90%を少し下回ってしまいました。この主な原因は、PFの回収液化設備の老朽化とのことで、現在KEKとして改修を進めていますが、ユーザーの皆様にも改めて、高純度を保ったヘリウム回収へのご協力をお願いいたします。

以上、相変わらず「物構研つくばキャンパスだより」にふさわしい内容かどうか自信はありませんが、話題提供として紹介させていただきました。今後とも、環境に関する諸々の課題にこれまで以上に留意しつつ、皆様とともに教育・研究を進めていければ幸いです。