

## 1. 全体概要

1 極端紫外光研究施設 UVSOR は 1983 年の初点から数え、2023 年に 40 周年を迎えた。今後の 30～50 年間の次世代への更なる展開を見据えて、大型設備である放射光源施設による共同利用・共同研究と学術推進の歩みを継続する必要がある、ここにコンセプトデザインレポートとしてまとめる。本構想の基本デザインについては、2018 年より重ねてきた議論を基に、2023 年の日本学術会議の未来の学術振興構想グランドビジョン「量子ビームを用いた極限世界の解明」に統括されたビジョン「複雑・不均一系の分子ダイナミクスに挑む量子光科学研究拠点の構築」、並びに文部科学省へ提出したロードマップ 2023 の設備計画「自律型機能の解明に向けたテラレーメイド光科学研究拠点」の申請書で議論されてきた内容にもとづく。

1900 年代から続く量子力学の発展に伴う光計測の進化の歴史は、結晶系の原子レベルでの精密な考察を目指し、今世紀のナノテクノロジーに表現されるように、多くの技術革新と共に進んできた。今やナノテクノロジーに表現されるように、我々の生活に欠かせない技術となっている。その後、人類の好奇心は留まることを知らず、より複雑で不均一な標的をいかにして理解し制御するかに移りつつある。1993 年、Ilya Prigogine の著書「複雑性の探究」により、「複雑系」という言葉が流行語になった。この複雑系は、エネルギーや物質の出入りによって新しい構造や機能が生まれ、物理法則から予測が難しい「散逸構造」と呼ばれる一般的な現象を指しており、生命活動にも強く関連する学際領域である。時を経て 30 年後の今、人類の好奇心は留まることを知らず、より複雑で不均一な標的をいかにして理解し制御するかに移りつつある。コンピューター計算能力の向上と観測技術の発展がその要因であり、時代の要請は「複雑なものをありのまま観測する」である。第一次ブームの流行語と似てはいるものの、その後 30 年経過した今は当時のような曖昧な概念ではない。

生物学分野は、複雑系事例の宝庫である。SPring-8 をはじめとした高エネルギー大型放射光施設の発展により、複雑なタンパク質の構造解析が進み生物学をはじめとして多くの知見を与え続けている。しかし、例えば生物学の大いなる謎である「物質がなぜ情報を持つか」を理解するためには、これまでの緻密な構造解析法だけでは全く不十分であり、全く新しい機能解析法の開拓による複雑系ダイナミクスに関わる学理構築が求められている。そのために科学目標に沿って、現在持ちうる技術を駆使して光計測を挑戦的かつ革新的に発展させることに加え、光科学との分野融合による新たな学術分野の構築を強力にサポートする組織体制の構築という、光源や実験設備インフラストラクチャーのハードとワンルーフ研究教育支援環境のソフトの両側面による推進が不可欠である。複雑系の代表的な機能である「自律性」は、ゆらぎ・動的平衡物理として生命科学の多くの分野で発現するだけでなく、次世代量子マテリアル開発においてもその機能を理解するうえで重要視される学際的な共通項といえよう。

そこで次期 UVSOR 計画では、生命科学の重要課題であるロバスト(堅牢さ)と柔らかさが基礎となる自己修復能や環境応答性、エネルギー変換機能等をモデル標的とし、先端技術を駆使した挑戦的な光科学による量子計測によって困難な各研究課題を克服し、**10 年後の国際トレンドを主導できる中核研究拠点を目指す**。現在、生物学研究の主流は、時間・空間の各階層の構造学的な知見と、それらの相関情報を理論シミュレーションなどで繋げたマクロな機能の推察による展開である。この戦

略で得られる知見には限界があり多くの研究者が自律性機能の「真の姿」の理解を求めており、複雑系・不均一系の機能の因果律の理解に向けた抜本的な戦術転換が求められる。極めて挑戦的な目標であり、実現に向けては各分野の専門家が結束し大きな目標に向かって取り組む仕組みづくりが重要である。物理・物理化学と生物学や生命科学の連携はまさに超異分野融合とでも言うべきもので、協働作業のための人と技術の循環システムを新センター「**極限光オートノミー探究センター**」が担い、光科学を通じた自律性機能の翻訳によって為される、新学際領域「**フォトオートノミー科学**」の開拓を世界に先駆けて実現する。生命の理の深淵に踏み込むのはもちろんだが、生命は自然そのものが私たちに示している応用科学と言えよう。新奇物性の解明や物質開発にも、生き物たちから得た知見は役立つはずであり、生命科学の自律性を課題として開発される技術は、その他の物質系の計測技術として還元され新たな循環系を創出する。新センターが強力に超異分野融合を牽引し、生体模倣によって未来の材料開発に新たな価値観を生み出したい。

研究推進に不可欠なハードウェアとして、主体となるインフラストラクチャーはリング型放射光源とそれを利用した実験設備であるが、小型レーザー光源による実験ステーションや生命科学研究で必須な各種分析機器群を集中配備し、複雑系の必要設備群を岡崎キャンパス内に拠点集約する。放射光源としては、最適化された次世代の省エネ・高輝度小型リング放射光施設を敷地内に新たに建設する計画である。技術的にまだ十分に利用されていない波長帯の光や、新たに開発される超広帯域光の多元的複合利用によって新たな分子の表情を獲得し、自律性の光計測による新しい基盤学理を構築できる。また、放射光大国である我が国において、低エネルギー帯をカバーする小型施設は中型・大型施設では実施困難な研究課題を担うことができるため、学術性、国際競争や産業利用における相補的役割も持つ。40年の歴史をもち、3世代に渡り進化し続けてきた UVSORの強みである新規量子光ビームの開発や易損傷物質であるソフトマテリアルへの計測発展の成功事例をもとに、蓄積された知的資産を発展的に継承し、複雑系に挑戦的に展開することが有効である。具体的には、光の複合利用(マルチモーダル、マルチビーム、ビームアシストなど)により時空間階層を分離結合するクロススケール計測、あるいは階層横断的なトランススケール計測をはじめとした新規手法を開拓し、ゆらぎ現象の可視化により因果律をひもとくことで自律性機能のメカニズムの量子論的な理解を目指す。時間と空間の複合的現象である自律型機能の可視化には既存の諸手法では困難で、新規手法開拓が欠かせない。高輝度小型放射光と、小型レーザー光、自由電子レーザー光などの先端光源を最適化技術により安定的に供給し、テラヘルツ光、赤外線から真空紫外線、軟 X 線、ガンマ線にわたる超広帯域な光の複合利用による未踏の量子計測技術を開拓しつつ、多彩な光計測設備や各種分析器設備を自在に活用できる共同利用環境が構築される。また、我が国が主導してきた放射光・レーザー光による計測技術を軸とした学術発展の歩みを効果的に継承し次世代へ伝承する目的も無視できない。以上から、化学分野強化の基盤を担ってきた分子科学研究所 UVSOR 施設の計測科学ノウハウの継承資産と、自然科学研究機構の有する生命分子科学系の計測・分析技術と研究基盤を効果的・発展的にワンルーフで一元集約した新センターを発足し、国際的にユニークな「**分野の要望に応じてテーラーメイドに光を提供する**」光科学研究拠点を構築する。

一方、こうした手法や装置の開発能力をもつ若手研究者の育成は待ったなしの時期に来ている。学術系施設で培われてきた技術・人材資産は計画実現の重要基盤であり、マスタープラン 2020 で

進めている学術系放射光3施設間ネットワークを軸に、希少な技術情報や人材育成機会を国内共有し、コミュニティの連携を持続的に強化する。挑戦的な超異分野融合には、共同利用支援システムの運営体制の発展も不可欠で、効果的な研究活動を促進するために、生命科学で不可欠な専用試料調製準備室、汎用計測実験環境、倫理審査管理体制などを整える必要がある。集約された研究設備環境と研究機会を共有できる環境を最大限に生かすために、新センターでは「光道場」と名付ける育成プログラムの枠組みを設計する。光計測の階層トップでプログラムを牽引するオペレーターは学術界のマイスター「匠」である。このように大学共同利用機関が技術開発や人材育成の中心となり、超異分野連携を通じて困難な課題を打破するための大型設備の運営を行うことができる。

まだ光を知らない、光を使いこなせていないコミュニティがあり、多くの研究者と学生が存在する。こうした人々への研究支援や教育活動は自動的に、我が国の先端研究を担う人材問題の解決策へ誘うだろう。国内コミュニティの活性化はもちろんであるが、将来的にアジア近隣諸国、あるいはアフリカ諸国に新たな人材供給源を開拓し、国際連携を通じた新たな課題解決に取り組むことが可能となり、ひいては多くの国際社会課題の解決に向けた次世代の産業応用基盤創発に資することもできる。UVSOR-IV をベースにする小型放射光源による医療・創薬・食・環境・エネルギー課題等の研究推進のためのインフラ整備事例は、建設コストや運営観点から、こうした国々の良いロールモデルとなる

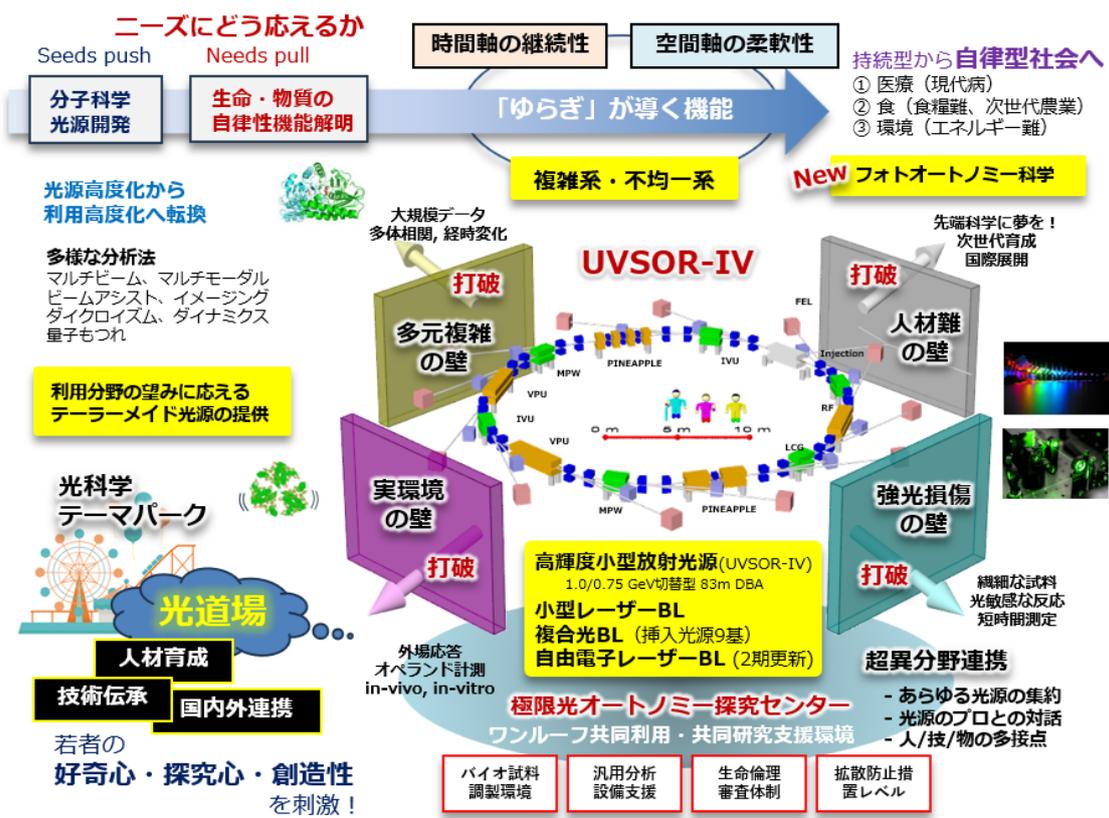


図 1-1: 多彩な光源をワンルーフ集約し、テーラーメイドな高度支援環境の構築で困難な計測対象を克服し、総合性で各壁を打破し、新たな学際領域を新センターが切り開く

であろう。このように、UVSOR 次期計画は新たな放射光施設建設を軸にするものであるが、単なるいち組織の設備の高度化・高性能化を目指した施設計画では無く、新たな分野融合型の挑戦的な研究計画と捉えていただきたい。時代背景の生物学利用・複雑系計測に牽引されるニーズプル型の視点と、これまでの UVSOR の強みである光源開発力・分子科学やマテリアル科学の実績によるシーズプッシュ型が4輪駆動でドライブすることで初めて困難な科学目標を達成することができると確信する。化学分野強化の基盤を担ってきた UVSOR の装置開発の伝統と、光計測科学の技術と利用ノウハウの資産継承は我々の強みである。また、岡崎三機関の有する生命分子科学系の計測・分析基盤技術を効果的・発展的にワンルーフで一元集約できる地の利は極めて重要な因子である。次期計画の実施体制としては、大学共同利用機関の拠点機能を生かしつつ、光のヘビーユーザーを抱える連携機関を拠点ハブとして、ライトユーザーあるいはビギナーの利用障壁を排除し、一致団結の総合力で未来へ向かって共同利用・共同研究を強力に推進する。

### ・分野融合ニーズプル型の施設

- 1) **分野融合型研究が必要とする大型設備開発**: バイオイメージングのニーズの高まり
- 2) **研究ニーズ視点による光のテーラーメイド利用**: 緊急性の高い複雑系/不均一系の科学  
大型施設の担う「百貨店」要素と相補的な「専門店」要素
- 3) **ゼロをイチにするトライ&エラーの学術研究**: 小型施設の自由度と機動力は、大型施設ミッションの多様性機能とは相補的
- 4) **技術伝承と人材育成のためのワンルーフ研究環境**: ケミカルマシンに次ぐ分子科学研究所の第二弾拠点構築計画

### ・研究拠点構築へ向けて

- 1) **未踏の手法開拓で先端的な光計測を国際主導**: 光源のマルチ利用に挑戦し、光とバイオ専門家の協働による超異分野融合を目指す(トライ&エラーの研究環境パッケージが前提)、光科学以外の周辺研究環境の総合性が不可欠(試料作製・分析・解析・コーディネーション)
- 2) **地域性と研究資産(人と装置)による課題突破**: バイオ分野と放射光分野のオールジャパン体制と、UVSOR の歴史的資産である真空紫外線・軟 X 線を光プローブとした分光・顕微・回折諸手法による有機・無機ハイブリッド系の構造・電子物性計測ノウハウの蓄積を活用
- 3) **光源ファシリティの新しいあり方を具現化するセンター**: 進化し続けるファシリティとして、時代毎にミッション定義し学術創発する仕組みを完成。ユーザー要望に即したテーラーメイドな光を提供(光の利用高度化、最適化、戦略特化型)。光源施設と複合設備のワンルーフ環境により課題克服(放射光とレーザー光の共生融合)。放射光利用実験で築かれた共同利用・共同研究スタイルの拡張(レーザー設備の共用化でコミュニティ拡大)。
- 4) **長波長帯域の光源の希少性と成熟期にある技術開発**: 高輝度化の光源性能追及の時代から、データ出力に注視する時代へ、データの量と質、効率性と安定性(目的特化のスピード感で新分野開拓へ)。国際的に希少となる波長域の技術開発の持続性を担う。

## ・生物学を軸に国際トレンド創発へ

- 1) **バイオイメーjing手法の世界的な開発競争**: 微視構造や集合体構造の情報だけの研究は10年程度で行き詰まる懸念
- 15 2) **刻々と変化する生物の新しい表情の獲得・現象発見が不可欠**: 機能生物学の発展が今後の研究ターゲット. 生命の理解には各階層の構造学だけでは困難で階層横断計測へ. 使われていない波長帯の光があり、見ることができていない現象や対象がある
- 3) **新たな手法開拓に向けたニーズとシーズの分野融合が必須**: この数年で装置開発と試料調製の技術が進み、計測実現性が高まって国際的にブレイクしうる時期. 国際的に稀有な研究環境を構築し困難課題を打破する.
- 4) **自律性機能の解明を足掛かりに次世代の生物学の起点へ**: 複雑系や不均一系の重要機能のひとつである自律型生命機能のメカニズム解明とその制御を目指し、岡崎地区がハブ拠点となりオールジャパン体制で新たな学際領域「フォトオートノミー科学」を分野創発
- 5) **バイオ系に発した光科学の逆循環サイクル**: 現象の宝庫である生物系で開拓される手法をその他の分野へ技術フィードバックする新たな潮流を創出.