

アト秒レーザー科学研究施設

① 計画の概要

【背景と必要性】近年の超短パルスレーザー技術の進歩は目覚ましく、100 アト秒を切る時間幅を持つ超短パルスの発生が可能となった。このような非常に短い時間分解能を持つ究極のプロブによって、物質中の電子の動きを捉えることが可能となりつつあり、化学と生物学、物理学、医学との学際領域の研究分野において、アト秒パルスは将来必須の道具になると考えられる。欧州ではアト秒レーザーに特化した光源施設 ELI-ALPS の運用が開始され、我が国においてもアト秒レーザー研究施設建設に対する機運は高まっている。そこで本申請では、幅広いアト秒レーザー光の共同利用を目的としたアト秒レーザー科学研究施設の設置を提案する。

【施設内容】アト秒レーザー科学研究施設では、様々な利用用途に対応した4種類のアト秒レーザービームラインを整備する。その際、各ビームラインは、既存の光源装置なども活用して運用を行う。軟 X 線領域のアト秒レーザー光と同時に、テラヘルツ光から極端紫外光まで幅広い波長範囲の高輝度短パルス光を供給し、アト秒時間分解能での時間分解分光を可能とする。次世代ビームラインでは、既存の加速器技術と電子ビームからアト秒光パルスを発生させる技術を融合して、次世代の高輝度アト秒光源技術の開発を行う。2018 年度に採択された文部科学省 Q-LEAP 先端レーザーイノベーション拠点「次世代アト秒レーザー光源と先端計測技術の開発」部門との連携のもと、国内の研究開発協力体制を確立し、各ビームラインに導入されるレーザー装置の仕様は常に最先端のレベルを維持する。

【運営組織】本施設は東京大学が中心となり、東京大学、理化学研究所、高エネルギー加速器科学研究機構 (KEK)、自然科学研究機構分子科学研究所、慶應義塾大学、電気通信大学が計画の主体として参画、全国の協力研究者の協力のもとに設置・運営される。

② 学術的な意義

本計画で展開していくアト秒科学は物質内や界面での電子運動を実時間で観測・制御する研究分野であり、全ての物質変換の根源を解明する学問である。関連する研究分野は、物質・生命科学、電子工学、創薬・医療と多岐に渡り、最先端のアト秒レーザー光源が各先端分野の第一線研究者にいち早く提供されることが望まれている。

【化学反応追跡・制御・イメージング】分子に対するアト秒時間分解計測から分子内の電子波束発展や多電子系における電子間の相互作用のメカニズムが解明される。高度に制御された電子波束によって誘起される化学反応をアト秒時間分解分子イメージング法で実時間追跡することによって、究極の化学反応追跡・制御技術が確立される。

【物質材料開発・超高速エレクトロニクス技術開発】分子性固体における電子雲の非局在化過程や界面における電子移動の初期過程が解明され、有機デバイスや高機能触媒、太陽電池などを開発する新たな設計指針が得られる。また、金属ナノ構造体中のプラズモン増強電場の時間発展が明らかになり、ナノサイズの超高速電子デバイスが実現される。さらに、アト秒精度の光波合成技術を確立することにより、ペタヘルツオーダーの整形電場による超高速エレクトロニクス技術の発展が期待される。

【生物学・創薬・医療への応用】軟 X 線領域のアト秒パルスを顕微測定や回折法の光源として用いることによって、生体イメージングを、“高い空間分解能”、かつ、“テーブルトップ装置”で行い、創薬・医療分野への応用が可能となる。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

世界初のアト秒パルス発生から 18 年が経過し、アト秒パルスを用いた応用研究が進み、電子運動の追跡・制御・イメージングによる物質・生命科学の新展開が期待されている。必須となるアト秒パルスの高強度化において、東京大学、理化学研究所のもつアト秒レーザー技術と、理化学研究所、KEK の加速器技術を組み合わせた次世代アト秒光源技術は世界をリードしている。このような光源は、数十フェムト秒のパルスを発生できる FERMI (イタリア) のみであり、次世代アト秒パルスを安定に発生し、利用研究者に供与できる施設は現時点で存在しない。一方、アト秒パルスの応用研究を、より広い学術分野に適応できる研究施設の建設が待ち望まれていた。欧州では ELI-ALPS 計画によって、極めて先端的な高輝度アト秒光源の大型施設が運用され始めたが、その応用領域は比較的限られた分野に留まっている。本計画では、世界最高水準のアト秒レーザー光を多くの利用研究者のために安定的に供給する光源施設を提案する。この施設が中核となり、国際的な規模でアト秒レーザー科学を発展させる。

④ 実施機関と実施体制

本施設は東京大学が中心となり、東京大学、KEK、理化学研究所、自然科学研究機構分子科学研究所、慶應義塾大学、電気通



図1 アト秒レーザー科学の波及効果

信大学が主体となって計画を推進し、アト秒レーザー科学コンソーシアムに参加する全国の協力研究者によって構成される運営委員会（施設整備委員会・利用推進委員会・解析支援委員会）によって運営される。中心機関である東京大学と主体となる機関との間で、本計画の推進と設置場所についての合意が得られている。それぞれの委員会の役割は以下の通りである。

施設整備委員会は、東京大学、理化学研究所、KEK の研究者の協力のもと設置され、4本のアト秒ビームラインを整備するとともに、整備したビームラインの維持管理を担当する。さらに、次世代高輝度アト秒光源の開発を行う。

利用推進委員会は、様々な専門分野の利用者からのニーズに応じた光源設備についての提言を行う。さらに、各種測定装置の整備を担当する。本委員会は、20 を超える大学・研究機関・企業からの最先端の研究を行なっている研究者で構成される。

解析支援委員会は、東北大学、東京大学、筑波大学、理化学研究所、量子科学技術研究開発機構に所属する研究者によって構成され、主に理論的な研究支援を行う。大規模計算機施設と協力して、実験成果を迅速に解析し、新たな理論的解釈や理論モデルを提言する事によって、アト秒科学分野における実験研究と理論研究の協調的な発展を目指す。

⑤ 所要経費

所要経費のうち、物品費については、中核施設整備費と計測装置整備費の2つに分けられる。加えて、施設を運営するための人件費や維持管理費が必要である。以下の総額として、96 億円を所要経費として要求する。

【中核施設整備費（79 億円）】整備する装置群とその内訳は、基幹レーザー施設と施設建屋（16 億円）、冷却水循環装置（2 億円）、電気・機械系設備（7 億円）、アト秒パルス発生用設備アップグレード整備費（5 億円）、高輝度アト秒パルス発生用設備（2 億円）、高速電子発生装置（5 億円）、電子加速装置と電源装置（23 億円）、挿入光源装置（8 億円）、電子バンチ圧縮器と電磁石（6 億円）、ビームライン（5 億円）である。

【計測装置整備費（9 億円）】計測装置を整備するための費用として、9 億円を計上する。整備する装置群とその内訳は、建屋（3 億円）、軟 X 線光電子分光装置（2 億円）、軟 X 線顕微鏡装置（2 億円）、軟 X 線分光装置（2 億円）である。

【人件費・維持管理費（8 億円）】施設を運営するための人件費や維持管理費として、8 億円を計上する。内訳は、人件費〔5 名×10 年〕（4 億円）、維持管理費（4 億円）である。

⑥ 年次計画

本計画では以下の4つの期間に分けて、計画を推進する。

【1～2年次】基幹レーザー施設と実験施設の整備を行う。具体的には、本施設の基幹レーザー施設、ならびに実験施設等を収納する建屋の建設、基幹レーザーである超高強度フェムト秒レーザーシステム導入、ならびにアト秒パルス発生用設備の整備を行う。発生したアト秒パルス診断を行う計測機器として光電子・光イオン同時画像観測装置の導入を行う。

【3～4年次】先に整備したアト秒ビームライン、計測機器の共同利用を開始するとともに、高輝度アト秒ビームラインの開発を行う。また、アト秒電子ダイナミクス計測のためのパルス電子線回折装置とアト秒時間スケールの超高速構造変化追跡のためのパルス電子線イメージング装置の開発、ならびに共同利用を開始する。また、データ解析部門の整備を行い、アト秒時間スケールで変化する電子構造の解析手法を開発する。

【5～6年次】先に開発した高輝度アト秒ビームラインの共同利用を開始するとともに、軟 X 線領域のアト秒パルス光電子分光装置を開発し、幅広いユーザーに対して光源、ならびに計測装置群を提供する。

【7～10年次】加速器技術に基づいたビームラインの建設、およびユーザーへの共同利用を行う。具体的には、軟 X 線自由電子レーザービームラインとして、高強度パルスを必要とするユーザーへ提供する。

【期間終了後】引き続き共同利用施設として運営することによって、アト秒科学とその応用研究の発展に寄与するとともに、若手人材育成と次世代基盤技術開発の中心施設として運用を継続する。

⑦ 社会的価値

近年の科学・技術は、物質中や界面での電子運動によって誘起される様々な素過程・反応性・物性を利用して発展しており、電子の動きを直接捉えることが出来るアト秒レーザーによる実験が実現されれば、人類の物質観・自然観を格段に広げるものと期待される。また、本提案によって実現される世界最先端の超短パルスレーザー技術を基礎としたアト秒レーザー科学研究施設は、軟 X 線からテラヘルツ波までの先進的な光源を提供するものであり、基礎科学研究のみならず、環境材料、ライフ、バイオ・医療などの幅広い分野のイノベーション創出を支援すると期待される。特に、アト秒レーザー科学分野は、物理学・化学・生物学・医学を包含した学際領域であり、光触媒や太陽電池などの光機能材料の物性研究と電子・デバイス、新しい材料開発や、医療診断技術を含む生体観察技術の開発を通じて、日本発の新しい計測技術開発や医療工学に資すると考えられる。そして、SDGs (7a、8、2、9、5、17、6) の達成と Society 5.0 の実現にハード、ソフト両面から貢献する。

⑧ 本計画に関する連絡先

山内 薫（東京大学・大学院理学系研究科）

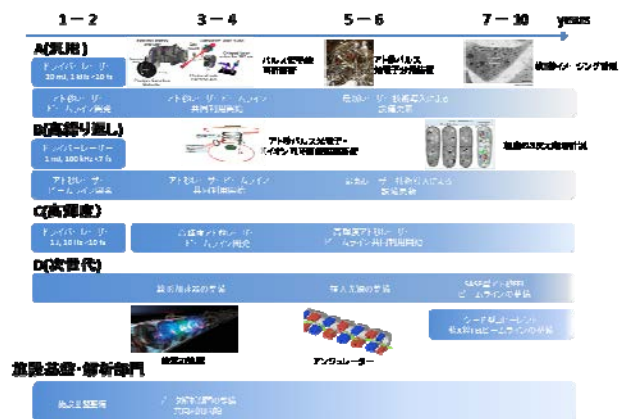


図2 施設整備のロードマップ