

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では2007年以来、KEKロードマップを策定し、研究推進の指針としている。最新のロードマップは、2013年5月に策定し、2019年4月に小改訂の後公表した「KEKロードマップ2013 アップデート」である。今回、2022年度から始まる第四期中期目標・中期計画期間を見据えてロードマップを見直し、策定することとし、このたび「KEKロードマップ2021」を取りまとめた。

加速器を用いた科学研究は、基礎科学から応用分野まで広範囲に及び、近年その重要性が増している。KEKは大学共同利用機関法人として、素粒子物理・原子核物理・物質科学・生命科学という基礎科学分野の研究を推進しており、大学を中心とした学術界のみならず、産業界まで広く国内外の研究者に研究の場を提供している。そのためにKEKは最先端の加速器を開発・建設・運転し、加速器研究の国際拠点としての役割を果たしてきた。さらに加速器技術の産業・医療応用に向けての研究開発にも力を入れてきた。このロードマップは、このようなKEKの役割をさらに発展させ、加速器科学の世界的な拠点として研究成果をあげることを目指してまとめたものである。

ロードマップ策定に際しては、機構を構成する4つの研究所、研究施設、つまり素粒子原子核研究所、物質構造科学研究所、加速器研究施設、共通基盤研究施設を通じて、素粒子・原子核・放射光・中性子・ミュオンなどの各関連研究者コミュニティの将来計画の検討に基づく意見を取り入れた。策定作業は2019年12月に機構の研究推進会議で開始した。2020年7月に機構内外の研究者の参加のもと、KEKロードマップオープンシンポジウムを開催した。これらの議論をもとに、2020年9月の研究推進会議で「中間まとめ」を作成、公表して、研究者コミュニティからの意見を募った。寄せられた意見を参考に、さらに研究推進会議で検討し、「KEKロードマップ2021」を取りまとめた。

本ロードマップは、第2章で、KEKに関連する研究分野の長期的な展望と、その中でKEKが果たすべき役割について記述する。それは、素粒子・原子核分野の研究、物質・生命科学分野の研究、加速器・基盤技術の展開、測定器開発、および国際協力・人材育成・社会還元の拠点としてのKEKの役割についてである。第3章では、次に概要を示す6項目について、2022年度から2027年度の第四期中期目標・中期計画期間に相当する時期の研究戦略を記述する。

・J-PARC

ニュートリノ実験施設、ハドロン実験施設、物質・生命科学実験施設の全てでビーム強度の設

計値達成を確実にするとともに、ビーム時間の確保と施設の高度化を適切なバランスで進める。高度化では、Hyper-K のためのビーム増強、ミューオン $g-2/EDM$ 実験、ハドロン実験施設の拡張、そして COMET 実験の phase-II を着実に進行。また、物質・生命科学実験施設の将来計画である第二標的ステーションについて、開発および研究計画を具体化する。

・SuperKEKB/Belle II

SuperKEKB/Belle II は、性能改善を行いつつ運転を継続し、新物理現象の探索などを進める。2031 年頃までに $50ab^{-1}$ のデータを蓄積することを目標に、2026 年頃までに加速器・測定器を改造し、以後の大幅な性能向上を可能にする。

・LHC/ATLAS

ATLAS 実験を引き続き遂行するとともに、LHC の高輝度化に向けた加速器・測定器のアップグレードを国際協力で積極的に推進する。

・ILC

KEK をホストとして 2020 年 8 月に設立された国際推進チームのもとで、国際的な準備組織となる ILC Pre-Lab の設立に向けた制度設計を行なうとともに、加速器、物理・測定器の研究開発などに取り組む。早期に Pre-Lab の運用を開始し、ILC Pre-Lab のもとで、国際コミュニティと共に ILC 計画を牽引する。

・フォトンファクトリー

学術先端基盤施設として、引き続き、稼働中の 2 光源による物質と生命の探究を進めるとともに、短期計画として、高度化により向上する光源性能を活用したオンリーワン・ナンバーワンのビームライン群と R&D 専用ビームラインを整備し、最先端の利用研究と開発研究を展開する。また、長期計画の具体化に向けて、自由度を格段に向上させた新光源施設の概念設計と関連技術の R&D を進める。

・その他の重要なプロジェクトの推進

KEK では、上記の 5 つの大きなプロジェクト以外に、

(1) 新たに設立された応用超伝導加速器センターのもとで、電力効率よく大強度のビームを加速できる超伝導高周波加速器をはじめとして KEK がこれまで培ってきた加速器技術の産業・医療等への応用展開を進める。

(2) 低速陽電子実験施設で、世界を先導して陽電子回折法の開発と利用拡大を進め、機能性表面材料の開発研究のニーズに応えていく。

(3) 和光原子核科学センターで、独自の短寿命原子核実験施設を運用し、宇宙の元素合成過程の研究を進め、新技術による次世代施設を実現し、ウランの起源の解明を目指す。

(4) 他機関・他分野と連携して、中性子電気双極子モーメント探索実験 (TUCAN)、CMB の偏光度の精密観測 (LiteBIRD)、大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) プロジェクトを推進する。

このロードマップは、関連研究コミュニティからの意見を基に、今後 KEK で取り組んでいくべき研究の大きな方針を示すためにまとめたものである。このロードマップに述べられている研究を、そ

の時機を逸することなく進めるためには、関連する研究分野の進展と技術開発の状況を踏まえ、人的・資金的資源の確保を含めた着実な実施計画を立てて実現していくことが必要である。ロードマップ 2013 に基づき 2016 年 6 月にはロードマップにあげられた研究計画を具体的に進めるための実施計画「KEK Project Implementation Plan(KEK-PIP)」を策定した。今回 KEK ロードマップが新たになることで、今後その研究戦略を実現するための適切な実施計画を策定していく必要がある。

KEK ロードマップに位置付けるべき計画は、関連研究者コミュニティとともに、発案から技術開発、設計、実施まで長いプロセスを着実に進めていくことが必要である。KEK は将来のための新しい提案の検討を推奨する。また、今回のロードマップの対象期間中に、このロードマップにあげられたプロジェクトを含めて、特に大きなインパクトを持つ進展がある場合は、このロードマップ自体をアップデートすることも必要となる。

2. 各分野の長期展望と KEK の役割

2.1 素粒子・原子核分野

素粒子・原子核研究の展望

自然界の物質を構成する原子核や素粒子の性質を理解することは、基礎科学の中心的な課題の一つである。19 世紀末に放射線が発見されて以来、原子核と素粒子に対する理解は加速度的に進んだが、その最大の要因は加速器の発明と発展に求められる。

加速器実験によって次々に発見された新粒子や精密化された測定により、素粒子のいわゆる「標準模型」が確立し、多くの素粒子現象について精密な予言が可能になった。一方、この間のさまざまな発見は新たな謎を生むことになった。その存在が確実視されている暗黒物質は素粒子標準模型に明らかに欠けている要素であり、今後の実験・観測での発見が期待される。また、宇宙に反粒子が見当たらず粒子だけが残った理由や、素粒子の世代構造の謎、宇宙の加速膨張の謎、さらには宇宙開闢の謎など、数多くの問題が残されている。これらの問題の探求は、時空の構造を含む素粒子の究極の法則の解明につながると考えられており、物質と宇宙の全体像の理解を目指す物理学のグランドチャレンジと言える。

素粒子物理学の次のブレークスルーがどこからもたらされるのか、現時点で確たることを言うのは難しい。だからこそ多様なアプローチが重要で、素粒子標準模型を超える現象の探索は、未踏の高エネルギーでの加速器実験と、低エネルギーでの超精密実験を軸に進んでいる。

2012 年、KEK も参加する欧州合同原子核研究機関(CERN)に建設された大型ハドロンコライダー(LHC)実験により、長年の懸案であったヒッグス粒子が発見された。今後の素粒子物理学においては、この発見に引き続いて電弱ゲージ対称性の破れのメカニズムを理解し、その背後にある新しい物理法則を解明することが最も重要な課題である。LHC において高統計のデータを活用し、引き続きヒッグス粒子の性質の測定を進める。さらにより精密な検証には電子陽電子衝突に

よる実験が不可欠であるため、国際リニアコライダー(ILC)計画の実現が待望されている。これらのエネルギーフロンティアの実験において、標準模型を超える物理の端緒を開くため、さらなる未知の新粒子の探索を続けることになる。

素粒子標準模型のほころびを探る試みを多角的に進め、あらゆる世代の素粒子の精密測定や、宇宙観測から得られる結果を総合的に組み合わせることで、標準模型を超える理論の構築が進むことになるであろう。B 中間子やタウレプトンの崩壊の精密測定は SuperKEKB/Belle II 実験で、K 中間子の稀崩壊やミュオンの性質の精密測定は J-PARC で、ニュートリノの世代間振動の測定は J-PARC とスーパーカミオカンデの共同でと、KEK の施設はこれらの研究推進の世界的な拠点としての役割を担っている。KEK が全ての世代のクォーク・レプトンを用いた測定や探索を網羅的に行っているのは、世界の他の研究機関には無い強みである。また、中性子の電気双極子モーメント(EDM)探索や宇宙背景放射(CMB)の偏極の観測など、KEK が他機関と緊密に連携して、国際協力のもと開拓している分野もある。

原子核は、それを構成する核子自身がハドロンと呼ばれるクォークとグルーオンの束縛状態の一つである。ハドロンの構造やその複雑な多体系である原子核の性質を強い力の基礎理論である量子色力学(QCD)にもとづいて理解し、宇宙初期のクォークグルーオンプラズマから重い元素の生成に至る物質の進化の全体像を明らかにすることが、原子核ハドロン物理学の大きな目標である。

ハドロンや原子核の性質はその分光や遷移を通じて調べるのが一般的だが、QCD にもとづく理解を深める上では、原子核中に異物(ストレンジクォークやチャームクォークなど)を挿入した状態の研究が有効である。J-PARC が提供する高エネルギー陽子ビームや K 中間子ビームなどは、ストレンジネスを含むハイパー核や K 中間子原子、原子核中の中間子の研究を通じて、原子核ハドロン構造のより深い理解をもたらす。

近年の宇宙観測の進展により多くの中性子星が観測され、その質量などの情報が得られている。中性子星合体が放出する重力波や電磁波が測定されるようになり、高密度核物質の性質を理解する必要性が高まっている。高密度核物質を理解するには、系がストレンジネスを含む場合の“一般化された核力”の性質を知る必要があり、それはハイパー核の研究によって得られる。また、キセノン・金・ウランなどの重い元素は、宇宙での爆発的事象における速い中性子捕獲過程によって生成されたと考えられており、それに関与している短寿命原子核の特性を加速器実験で明らかにする重要性もますます高まっている。天体物理と原子核物理はこのように密接に関わりながら進展しており、加速器実験からの情報が重要な役割を果たす。

素粒子原子核実験の精密化、高統計化が進むにつれて、測定技術と解析の高度化がますます求められるようになってきている。個々の検出器の測定精度の向上はもちろん、データ量の爆発的な増大は、データ処理と解析の高速化も要求する。機械学習の手法を用いた実験データ解析は、高エネルギー実験では標準的な手法になっており、その技術開発にも先導的な役割を果たしうる。また、実験結果の精密化は対応する理論計算の精密化を要求する。例えば、SuperKEKB/Belle II 実験で得られたデータは、QCD の効果を理論的に評価して初めて標準模型を超える現象の探索

に意味をもつ。J-PARC のハイパー核実験で得られたスペクトルなどの情報は、QCD の理論計算と比較することでより基本的な核力の情報に焼き直すことができる。スーパーコンピュータを用いた理論計算による、実験精度に見合った理論精度の達成が視野に入っている。

KEK における素粒子・原子核研究

KEK は国内研究者コミュニティの意見を取り入れながら、世界的な研究の動向にも注意を払い、多くのプロジェクトを遂行し、国際的な素粒子・原子核研究の一大拠点となっている。エネルギーフロンティア研究においては、ヒッグス粒子や新しい物理法則の解明を進めるために、LHC 実験を続けつつ、ILC の実現を図る活動を継続する。KEK は ILC の準備を遂行する国際拠点としての役割を担っており、その活動を一層強化していく。一方で、KEK が有する大強度フロンティア加速器である SuperKEKB や J-PARC を利用した特色ある研究計画を立案し実行していく。数々の重要な実験を進める KEK は、物質と宇宙の全体像の探求において鍵を握る研究拠点であり、リソースを十分に得て、これらの計画をタイムリーに実現し豊かな研究成果を出し続けて、魅力的な研究機関であり続けることを常に目指していく。

短期的な最重要課題は、現実的なリソースを考慮し、その配分に注意を払いながら、既に稼働中の実験の長期安定運転を実現し、研究成果を上げていくことである。すなわち、Belle II 実験における目標積分ルミノシティの達成とそれによるクォーク・タウレプトンフレーバー物理の推進、J-PARC 大強度陽子ビームを用いた T2K 実験におけるニュートリノ CP 非保存現象の解明とハドロン実験施設における K 中間子フレーバー物理の展開、ならびにストレンジクォークを含む原子核物理の推進、そして μ 粒子電子転換現象を探索する COMET Phase I 実験の実現において、十分なビームタイムを確保して物理研究成果を創出し、これらの分野で世界を牽引する事である。ここでは、国内外からの研究者らが望む研究環境の整備と将来の研究の発展を念頭にいった開発研究をバランスよく推し進めることも重要である。他機関との緊密な研究協力に基づいて現在進めているプロジェクトについても、機関連携による相乗効果を生かして成果の創出を図る。さらには、既に次期計画として建設が進行中の Hyper-K、HL-LHC プロジェクトにおいては、建設終了後に直ちに研究成果を創出するフェーズへと移行できるように研究準備を進める。

次章で詳述する、KEK の現有施設を拡張するプロジェクト、すなわち、ミューオン $g-2$ /EDM 実験、J-PARC ハドロンホール拡張と新規 2 次ビームラインの建設、COMET Phase-II、KISS-II については、これまで長期にわたって具体的な検討を進めてきた。段階的な実現を含むそれぞれの計画内部のタイムラインの精密化を継続しながら、相互関係も考慮して優先順位を検討し、早期に施設の実現を目指す。さらに、適切な規模での計算機資源への投資を行いながら、計算素粒子原子核物理の分野でも特徴ある研究を推進してコミュニティを牽引し、実験的研究とのコヒーレントな進展を図る。

多角的に新しい素粒子・原子核物理を探究する上で、様々な新しい実験に取り組むことの重要性が増している。KEK の持つ加速器施設を最大限に利用する新しい実験のアイデアを常に国内外のコミュニティから吸い上げるとともに、これまでの研究の発展や、培った技術を応用して、既存

の加速器の利用にとらわれない新しい展開もバランスを取りながら検討していくことが重要である。理論センターを中心に行われている理論研究は、素粒子現象論からハドロン原子核理論、宇宙物理学、超弦理論まで、物質と宇宙の根源を理解するための新たな可能性の探究として重要である。理論センターは、KEK の様々な実験プロジェクトにおける実験と理論との連携強化を先導するとともに、素粒子原子核物理および周辺分野を俯瞰した上でのアイデアの創出、実験との連携による実現可能性の検討、さらに素粒子原子核分野を超えた将来の展開を検討する上で中心的な役割を果たす。

今回の KEK ロードマップの策定に先駆けて、素粒子原子核研究所(素核研)は国内のコミュニティから広く委員を集めた研究計画委員会を招集して将来の研究の拡がりに関して広範な議論を依頼した。上記のような現在 KEK が主体となっているプロジェクト以外にも、多くのプロジェクトへの KEK の関与・サポートの期待が寄せられ、KEK がコミュニティにとって単なる利用施設以上の役割を担っていることが示された。KEK は既に、国内では大学連携プログラム、海外での研究では日米・日仏等で日本のコミュニティの活動をサポートしているが、さらに進化した形態でコミュニティと一体となった研究推進を模索する必要がある。

2.2 物質・生命科学分野

物質・生命科学研究は、多種多様な物質群を対象とし、その多様性の理解から機能性発現の基礎原理や概念の創出、さらには持続可能社会実現に向けて役に立つ新機能物質の創成へとつながっていく。物質の機能性には、電子・原子・分子の凝集性や相互作用あるいは階層性が大きく関与しており、機能性発現機構の解明には、構造の長さスケールと揺らぎの時間スケールが大きく異なる物質群を構造解析や分光法などで研究できる量子ビームの利用が近年必須となってきた。特に物質・生命科学の多様性や多面性の理解には様々な量子ビームの複合的かつ協奏的利用が重要である。

KEK 物質・生命科学における量子ビーム研究

KEK の大きな柱である放射光は、物質の構造および電子状態を精密に決定することができるため、物理学・化学・材料科学・生命科学・地球惑星科学など幅広い学術領域において不可欠のツールとなっている。最近では、静的な構造・電子状態だけでなく、その時間発展が決定できる。また、真空紫外・軟 X 線から硬 X 線にわたる高輝度光や軟 X 線領域の高コヒーレンス光を駆使することにより、ナノメートル領域の高い空間分解能や meV 領域の高いエネルギー分解能で局所構造および電子状態を決定できる。これにより、機能性材料においてしばしば重要な役割を果たす、ナノ領域で不均一な系において、その機能発現機構を解明することができる。特に、不均質な系で必然的に生じる、異なる相やその界面において、そこに特有の構造と電子状態を解明することは、機能の起源を探る上で大きなブレークスルーとなる。

中性子は、原子核や電子スピンと相互作用することから、軽元素の位置や磁気構造の詳細決

定、原子・分子や分子集団の運動状態の解明などに用いられる。とりわけ同位元素置換や偏極スピン解析を利用することにより、多成分系の交差相関解析に力を発揮する。集光ミラーや磁場勾配デバイスを用いたビームの高輝度化と偏極中性子利用技術の開発によって、表面近傍からバルクまで、研究目的に応じて自由に観測領域を選択できるようになり、放射光などの他の量子ビームによる情報との定量的比較やマルチプローブ解析が可能となる。このような高分解能、測定強度、試料環境等の KEK が有する中性子実験装置の特徴を生かして、界面近傍ダイナミクス、マイクロ空間材料構造解析、電荷励起観測などの中性子による次世代の物質・生命科学研究を展開する。

ミュオンでは、波数・エネルギー空間からアプローチする放射光や中性子とは対極的かつ相補的な手法であるスピン回転・緩和・共鳴法(μ SR)によって、物質の空間構造やその揺らぎを研究することができる。世界最高の大強度ミュオンビーム、特にエネルギー可変の超低速ビームが利用可能な環境を整備するとともに、時間分解能の飛躍的向上、過渡現象観測の実用化等、 μ SRの高度化を進めることが重要である。高度化された μ SRにより、物質科学の大きなフロンティアのひとつである表面近傍や界面を舞台にした様々な興味ある現象の起源を原子スケールで解明する。また、ミュオンによる基礎物性研究に加えて、ミュオン X 線による非破壊元素分析、産業応用を目指した材料研究、さらにはソフトマター・生命関連物質のプローブとして幅広い応用への展開を図る。

低速陽電子では、回折法による表面敏感かつ精密な解析によって物質表面数層に絞った原子配列を決定することができる。これまでルチル型 $\text{TiO}_2(110)(1 \times 2)$ 表面原子配列に対して 30 年来続いた議論の決着をはじめとし、単結晶表面上の 1 次元原子鎖、2 次元分子層の構造の確定に次々と成功し、最近では超伝導の発現する SiC 上 Ca 挿入 2 層グラフェンの原子配列が従来信じられてきたものと全く異なることを初めて明らかにしている。このような物質系の表面構造解析は先進触媒や新奇電子デバイス開発の観点から重要である。今後、陽電子回折法を用いて、表面構造と特性・機能の関係を明らかにする研究を強化する。また、陽電子と電子からなるエキゾチックな原子であるポジトロニウムの飛行時間測定による表面電子状態の研究も進める。

KEK 物質・生命科学におけるマルチ量子ビームプローブ研究

物質構造科学研究所(物構研)では、放射光・中性子・ミュオン・低速陽電子の 4 種類の異なる量子ビームを有する世界的にも他に類を見ないユニークな研究所としての利点を活かすために、2003 年に構造生物学研究センター、2009 年に構造物性研究センターを設置した。2020 年には、構造物性研究センターを発展的に改組して、マルチプローブ研究を物質構造科学全体に拡大するために量子ビーム連携研究センターを創設した。このように、物質構造科学は、4 つの量子ビームの吸収・透過、散乱・反射、回折等の観測手法によって表面構造、内部構造、不均一構造を調べて物質の構造と機能を解明することを中心課題とし、主に表面科学、固体物理学、材料科学、構造生物学の 4 つの主要研究分野をカバーすることに加え、量子ビームの異分野への拡大を図る。

(1)量子ビーム連携研究の推進

量子ビーム連携研究センターでは、「発掘型共同利用」制度を構築することで、所外研究者からの各プローブへの利用申請をただ待つのではなく、マルチプローブ利用に精通したスタッフが共同利用研究者とともに研究内容を検討して、マルチプローブ利用へと誘導し、試料の調製から実験、解析まで一貫して指導・助言・支援を行う。また、「テーマ設定型共同研究」制度を構築することで、物構研のスタッフが中心となって、①表面科学、②固体物理学、③材料科学に関してイノベーションに貢献できる量子ビーム連携研究課題を5年間程度で解決すべきグランドチャレンジとして設定し、産学官連携・国際連携によって課題を解決する。これらの取り組みを進めるにあたり、ポストコロナ時代の研究様式に対応すべく実験装置の自動化・遠隔化を進め、マルチプローブ利用の初心者でも確実かつ迅速にデータが得られるよう、プローブ間で試料環境制御システム等を統一するとともに、異なる量子ビームによって得られる大量のデータを統合的に解析するためにAI・機械学習を含むデータ駆動科学や高速計算技術を利用した解析手法の高度化・効率化を進める。

① 表面科学

超スマート社会や持続可能社会の実現のための高速・低消費電力情報通信デバイス、低環境負荷触媒材料、新規超伝導材料などの材料開発には、固体最表面や原子層状物質の原子配列や表面磁性の情報が不可欠であり、材料を調製しながら、その場で表面敏感な量子ビーム手法を使って測定する必要がある。このような試料作製と特性評価が直結している表面科学分野において、特徴ある量子ビーム連携研究課題を設定して、課題を解決する。

② 固体物理学

異種の物性の組合せから新たな物性が発現するなど、要素還元型解析では理解できない創発型の物性研究が固体物理学の新たな流れになっている。機能性材料研究における純粋な系から不純物等を含む不均一な系への展開とも相関しており、基礎研究、応用研究の両面から、量子ビームを駆使した研究が不可欠となっている。メゾスコピック構造物性、交差相関物性、スピン相関物性、水素誘起物性などの物理の理解を深めるとともに、スピントロニクスデバイス、高保持力磁石、低エネルギー損失モーター、高速光スイッチなどの開発研究にもつながる量子ビーム連携研究課題を設定して、課題を解決する。

③ 材料科学

近年、持続可能な社会、低炭素社会、グリーンイノベーション、エコマテリアル、プリンタブルエレクトロニクスなどを強く意識した材料開発が加速している。表面科学の動向とも連動するが、材料開発の現場と量子ビームを駆使したマルチプローブ材料評価の距離が近く、緊密な産学連携をベースに量子ビームによる評価技術の開発も不可欠になっている。例えば、高機能有機エレクト

トロンクス材料、高性能蓄電池、高性能熱電材料についてはその場マルチスケール観測技術、高亀裂耐性構造材料については顕微観測技術が必要である。このような高度な測定手法の開発を含めた量子ビーム連携研究課題を設定して、課題を解決する。

(2) 構造生物学研究の推進

構造生物学研究センターでは、①相関構造解析、②トランススケール構造解析、③各解析技術の高度な自動化（ハードウェアとソフトウェアの両面）のグランドチャレンジに取り組むとともに、研究対象を生体高分子から細胞内の事象にまで拡大することで、次世代の生物学においても重要な役割を果たす。

① 相関構造解析

結晶構造解析の確立によって、細胞内の複雑かつ精緻な生命維持の素過程を原子のレベルで解明されている。今世紀に入ってから、結晶構造から溶液構造への転換、単一状態解析から複数状態解析への転換、極低温の構造状態から常温への構造状態への転換などの解明のため、結晶構造解析法のみならず溶液散乱法、クライオ電子顕微鏡法などの複数の手法を組み合わせ、一つの分子を多面的に解析していく相関構造解析法が広く用いられるようになった。さらに、分子のダイナミクスを理解するための手法として、XFEL、中性子散乱などの量子ビーム技術に加え、ラマンスペクトルやNMRなどの分光学的手法、そして計算科学との共同作業が必要で、そのためには組織を超えて連携を発展させていく必要がある。このような多面的な立体構造研究は、低分子性のタンパク質阻害剤などの合理的設計技術の基盤となる。

② トランススケール構造解析

従来の構造生物学では、細胞の構成要素を分子や生体高分子のレベルまで分解して解析する研究が主流であった。現在は逆に、分子や生体高分子のネットワーク、さらには細胞までの様々なスケールの構造を極めて高い分解能で解析し、細胞の構造・機能と結びつけていく流れが生まれている。細胞レベルの構造に関しては、細胞内を近原子分解能で解明することのできるクライオ電子顕微鏡の利用（クライオ電子線トモグラフィー）が必須である。さらに、従来の構造生物学の枠を超えた幅広い研究体制の構築も必要である。トランススケール構造解析によって、細胞内の遺伝情報の発現や、タンパク質、代謝物などの量と種類を網羅的に解析可能としたオミックス解析と連携してお互いの長所を活かすことで、細胞の生きている状態の理解に迫る。

(3) 異分野融合研究の推進

文理融合として「負ミュオンによる考古学資料・文化財の非破壊元素分析研究」、新分野融合として放射光、中性子、ミュオンが関わる「地球/惑星/環境物質のマルチスケール状態解析:過去の履歴解明」、素粒子原子核分野の基礎物理との連携として「冷中性子干渉計による feV サイエンスの開拓研究」、ミュオン触媒核融合に向けた「エキゾチック原子・分子の基礎と応用」、「ボースア

インシュタイン凝縮実現のためのポジトロニウムレーザー冷却研究」などのグランドチャレンジに取り組む。

2.3 KEKにおける加速器・基盤技術の展開

KEKは加速器科学の国際的拠点として、各時代の最先端技術を採り入れた粒子加速器を用いて基礎科学とそれに関連する応用分野を切り拓いてきた。これからも、様々なプロジェクトで培われた加速器・基盤技術の設計・開発・建設・運転・性能向上の実績に基づき、学術はもとより幅広い応用を含む国内外のあらゆる用途の加速器とその利用に関する研究開発を牽引していく。さらなる探究のためには、より高性能で高安定かつ高効率の加速器とその運用基盤を実現することが重要である。このために以下に述べる多様な最先端技術を活用し、実験目的に適合した加速器・基盤技術の高度化を推進しながら、実験成果の創出に貢献する。

高周波技術では、TRISTAN計画において世界に先駆けて実用化された超伝導加速空洞技術が、今や世界中で利用されており、KEKBおよびSuperKEKBの超伝導加速空洞が中国科学院高能物理研究所(IHEP)のBEPC-IIや台湾国立放射光研究センター(NSRRRC)のTPSでも実用に供されている。ILCの技術開発においては、超伝導加速空洞として最大級の加速勾配を持つ空洞を製作し、それを用いて安定なビーム加速に成功するなど、内外の超伝導加速空洞の研究を牽引する成果を上げている。J-PARCで開発された金属磁性体空洞は、CERNIにおいてHL-LHCに向けたPSB(PSブースター)の増強やPSの縦方向ダンパー、反陽子の減速に採用され、KEKBで実証されたクラブ空洞はLHCなどで応用されようとしている。また、KEKBおよびSuperKEKBのARES空洞、J-PARCのACS空洞、PFおよび先端加速器試験施設(ATF)の減衰空洞など、目的に合わせた独自技術による加速空洞がKEKの加速器計画の成果を飛躍的に高めることに貢献してきた実績もある。これらの成果を踏まえ、今後も次世代加速器に向けた開発を発展させる。また、ILCや産業応用に向けては超伝導加速空洞の性能向上に関する研究開発を強化する。さらに、ますます高度化する大電力高周波の発生・伝送・制御の要求に応えるために、今後とも半導体化やデジタル化により高精度化・高効率化を追求する。

電磁石技術においては、SuperKEKB衝突点超伝導電磁石群の3次元磁場設計をナノメートルレベルの3次元ビーム運動解析と組み合わせる最先端の実験成果を目指す。また、 μ 粒子異常磁気能率・電気双極子能率精密測定($g-2$ /EDM実験)のための超伝導電磁石の開発を進め早期の実験実現を目指すとともに、3次元高精度磁場設計および測定技術の高度化を図る。 μ 粒子電子転換探索実験(COMET)の建設を完了し、MLF第二ターゲットなど将来の大強度加速器応用のための高耐放射線超伝導電磁石技術へと発展させる。LHCアップグレードのためのビーム分離用超伝導電磁石の開発を推進するとともに、それを発展させ将来のハドロンコライダー用高磁場超伝導電磁石技術開発に貢献する。また、J-PARC、電子陽電子入射器、SuperKEKB、PF/PF-AR、ATFなどではそれぞれの目的に応じた電磁石電源やパルス電磁石とその電源が開発され、その多くが極限性能に近い状況で運用されており、加えてそれらには長期の実用運転に耐えるよ

うに様々な工夫も施されている。最近の例をあげると、J-PARC・MRのビーム強度増強のために開発されている大容量コンデンサーバンクを用いた高繰り返し電源、PF及びPF-ARのビーム入射用パルス多極電磁石システム、エネルギーの異なる4リングへの同時トップアップ入射を可能にしたパルス電磁石電源などがある。またSuperKEKBにおいて改めて注目されたように、大規模加速器施設における精密測量とアライメントに関してもKEKは優れた実績を持つ。今後も高度な電磁石の設計に併せて、高精度電源・高精度アライメント・高耐放射線性能を含む総合的なシステムの強化に関わる開発研究を進めると共に、省電力性能の向上にも引き続き取り組む。

J-PARC、SuperKEKB、ILCなどあらゆる計画のビーム性能を決める重大な要素の一つであるビーム源(電子・陽電子・陽子・負水素等)については、独自に技術開発を進めるとともに国内外・他分野も含めた協力を強化していく。また、レーザーなど関連技術の開発についても積極的に推進する。

加速器の真空システムは、大強度のビームが通過することにより、電磁場・発熱・放電・ビームロス・電子雲などの過酷な環境下にさらされている。KEKではすでにKEKBおよびSuperKEKBでの各種大電流対応真空部品群やJ-PARCでの大規模セラミックビームパイプなど、独自のコンポーネントを設計・開発・運用しており、今後も表面物理や材料科学の理解を進め、極高・超高真空の達成に取り組んで行く。

ビーム診断の高精度化・高速化・多様化についても十分な実績を積み重ねてきたが、この分野の新技术・新技術の発展はめざましく、それらに絶えず着目し必要に応じて適切に取り入れながら最先端の診断技術を開拓する。KEKはこのような診断技術とEPICSによる加速器制御の統一により、汎用性・発展性において世界をリードしている。今後も機械学習を含む加速器制御関連の技術開発の発展に努め、測定器など周辺への応用拡大も追求する。

冷凍機システムについては飽和超流動ヘリウムを用いた2K冷凍機の実用化などの実績を踏まえつつ、今後も開発研究を継続する。ビーム輸送系、人的・機器保護システム、大強度ビームに対応したビームコリメータ及びビーム標的・ビームダンプなどについてもさらなる高性能化を追求する。

加速器理論・ビーム力学解析においてもKEKは多くの重要な貢献をしてきた。今後も加速器設計手法やコードの開発・普及に一層の努力を継続する。最先端の加速器では、ビーム診断や制御技術を加速器設計や理論に有機的に結びつけ、新しいアイデアを迅速に試みることによって極限性能を引き出す仕組みが必要となる。現在、J-PARCやSuperKEKBをはじめとするKEKの加速器群で達成している世界最高レベルのビーム性能は、シミュレーションと系統的なビームスタディの両面から追求した結果として、実現されたものである。これらの加速器のビーム性能の向上には長期の不断の努力を要することが多いが、その手法においても世界に先んじて、一層の強化を図る。

従来の加速器の性能を、将来飛躍的に向上させる可能性がある常伝導高周波技術による高電界加速や超伝導高周波技術による大電流高電界加速、レーザー・プラズマなどを利用した新しい加速技術、大強度ミューオンの加速、ビーム利用の萌芽的な研究についても、長期的な展望の

下に着実に推進する。

放射線防護については、加速器の運転に伴って発生する放射線・放射能の測定技術、シミュレーション技術を進め、混合放射線場測定、空気や水、加速器構造体の放射化対策などの研究開発を進め、将来加速器の安全システム設計に展開させる。また、環境保全のための分析に加え、加速器運転に伴う冷却水、加速器装置の製造・開発行程において発生する試料の化学分析を進め、その高度化を図る。

情報処理システムの基盤となるネットワーク、大型計算機システム、スーパーコンピュータシステムの運用・利用に関する研究に加えて、Belle II実験をホストする機関として、世界各地のGRIDセンターに大規模実験のデータ・計算資源を分散させてデータ解析を行うための技術開発・運用を行う。また高度化を続ける情報セキュリティの脅威に備えつつ新しい時代の要求に応えるため、技術動向を注視しつつ機構の情報セキュリティ維持、向上に資する技術支援を進める。

極低温・超伝導技術を応用した加速器機器・物理実験へ貢献し、大量の液化ヘリウムを供給するとともに、次世代の超伝導電磁石技術の開発など、加速器用先進超伝導・極低温技術の発展に取り組む。

機械工学の高い技術を用いた実験機器や装置の設計・製作を行い、加工、設計、計測、ロボット、メカトロニクス、材料等の機械工学分野における技術の高度化を図る。特にそれらの技術を応用してKEKにおけるユーザー実験の自動化・遠隔化に貢献する。また、超伝導加速空洞の量産化技術の開発と実証を空洞製造技術開発施設(CFF)で行う。

また、これからもAIや量子情報などを含む新しい発想や技術にも常に注目し、加速器・基盤技術に積極的に取り込みつつ発展させ、社会に還元する。

2.4 KEK における測定器開発

加速器技術はいわばサイエンスの世界に新しい「光」をもたらす技術であり、検出器・測定器技術はこの様々な新しい「光」に対する鋭敏な「眼」である。この「眼」は、素粒子・原子核の微細世界の探究から、放射光・中性子・ミュオンによる分子イメージングまで、KEKのミッションである多様な基礎科学に共通する欠くことのできない基盤である。

KEKはその先鋭化に取り組むため、測定器開発室を設け、様々な計測器関連技術開発を機構横断的に進めてきた。特に、過去数年間は、放射光や宇宙からのX線、素粒子の崩壊点測定、加速器モニター、暗黒物質探索等に応用可能な超高精細/超高速/高機能ピクセルセンサーの開発を重点的に行った。この開発研究から生まれた数多くの成果は、日本/KEK発の先端技術・システムとして国際的に高い評価を得ており、基礎科学のみならず産業界を巻き込んだ応用展開に発展している。

今後も引き続き計測関連技術を発展させるべく、2019年に測定器開発プラットフォームを立ち上げた。これにより、素粒子原子核、天文、物性物理、工学、医療などの幅広い分野の研究者交流を促進し、新たな研究テーマの創出を図る。測定器開発において粒子ビームを使った試験は不

可欠であり、そのためのテストビームラインの運用はコミュニティが、大型加速器を有するKEKに期待する重要な役割である。フォトンファクトリーの協力のもと、2020年にPF-ARに建設を開始した電子テストビームラインは2022年から運用を開始する。将来的には、J-PARCにハドロンテストビームラインの建設も目指す。これらのテストビームラインや大型設備などを活用することで、KEKは測定器開発拠点としても、国内外、特に近隣のアジア諸国も含めた国際的な連携を推進する。また、Open-Itの枠組みによる計測技術の維持・改善・アーカイブ化も着実に進展しており、今後も技術継承という重要な役割を果たしていく。

近年、次世代電子顕微鏡、あるいはX線や中性子を利用した高機能可視化装置、ならびに粒子線などによる先端医療や各種医療・診断装置の高度化など、基礎科学向け開発研究における成果の多様な活用が、社会から大きく期待されている。そのような応用研究は、今後のKEKの活動における重要な使命の一つである。世界の主要な加速器・実験研究機関においても、こうした開発研究の多彩化・多目的化とスピノフへの取り組みの重視は共通の流れとなっており、KEKにおいても戦略的に同様の展開を図る。

2.5 国際協力、人材育成、社会還元の拠点としての KEK

大型加速器プロジェクトの巨大化・長期化・必要な技術の先鋭化に伴い、加速器科学の分野では、加速器の研究開発・設計・建設における国際協力がますます重要になってきている。このために KEK は、加速器科学研究の国際的な中核拠点としての役割を担っていく。

また、加速器プロジェクトの大型化や応用面の広がりに伴い、加速器科学諸分野を支える人材の育成は急務である。KEK は最先端加速器を持つ研究施設として、当該分野の人材育成の拠点としての役割を果たす。総合研究大学院大学などにおける大学院教育にも積極的に取り組む。

KEK では、国際協力の推進、国内外の人材育成のために、様々な取り組みを実施している。40年以上にわたる高エネルギー物理学分野の日米協力事業、フランスやカナダの研究所との協力事業、アジア地区の大学・研究機関との合同ワークショップ開催、加速器研究開発における多国籍協力の枠組み、様々な国際スクールの開催や支援、海外の研究機関との協力による加速器科学分野における男女共同参画推進事業、国内外の学部学生、大学院生、若手研究者・技術者向けの講習や実習等を大学研究者と連携しながら進めている。また、つくば地区の研究機関との連携等を活かしつつ、物質科学や生命科学分野の大学院生と若手研究者のスキルアップを支援している。これらの取り組みは、新しい共同研究を開拓し、若手人材を育成するために重要であり、積極的に推進する。

KEK は国際共同実験などにより海外からの多くのユーザーを受け入れており、日本の大学共同利用のみならず、世界中の研究者のための研究拠点として重要な役割を果たすことが求められている。今後 KEK の国際化がさらに進むであろうことに鑑み、海外からの研究者の意見を聴きながら必要な整備を進める。

KEK の主な目的は基礎科学研究の推進であるが、そのために培われた技術や知識はより広い

応用分野の研究にも役立つことができる。KEK は産学連携研究、産学コンソーシアムなどによる産業界と連携・協力、地域の大学・研究機関との組織的連携を進め、基礎科学研究から応用への架け橋としての役割を果たし、応用のための技術開発に取り組むことにより、研究成果の社会還元に努める。

これらの取り組みを進めるにあたっては、URA などの専門的人材を登用し、他の大学共同利用機関法人や総合研究大学院大学との連携を活用する。また、大学との組織的な連携により、大学の機能強化にも寄与できるように努める。

新型コロナウイルスを経験して、世界は一変しつつある。科学技術における国際協力、国際連携がますます重要になる一方、今までのような様式の国際交流はそのままでは、成り立たない。KEK は、デジタル技術とオンサイトにおける研究の実施を組み合わせ、新しい研究様式を開拓、実践することにより、ウィズコロナ、ポストコロナの国際協力のあり方を示していく。

以上のような取り組みにより、KEK は、「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」(SDGs)へ貢献する。

3. 2022 年度から 2027 年度までの研究戦略

3.1 J-PARC

J-PARC は大強度陽子ビームを基盤として、物質の起源および構造から生命の成り立ちまで、広い研究分野をカバーする多目的研究施設である。その位置付けは、今後より一層重要性を増すと考えられる。J-PARC は KEK と日本原子力研究開発機構(JAEA)の共同プロジェクトとして実施している。KEK は J-PARC の全ての実験施設(ニュートリノ実験施設、ハドロン実験施設、物質・生命科学実験施設)でその研究を展開し、それらは加速器科学・超伝導技術・放射線科学・計算科学などの基盤技術に支えられている。放射化に耐える要素技術など KEK と JAEA の専門性を合わせた研究も進行している。本ロードマップ期間では、従来に引き続き、大強度陽子ビームの特長を活かした、インパクトのある研究成果の創出をコミュニティと共に目指す。すなわち、素粒子・原子核分野では、SuperKEKB と共に素粒子の世代構造を網羅的に精査し、合わせて強い相互作用の理解を深めることで、宇宙における物質の起源を追求する。物質・生命科学においては、中性子およびミュオンを用いた実験のビーム強度・分解能・試料環境を極限まで追求し、放射光や低速陽電子実験施設とともに、複合量子ビームプラットフォームの一翼を担う。通常の共同利用に加え、大学や企業が東海に設置している分室や MLF に設置しているビームラインの共同運営なども活用することで、産業界を含む内外のコミュニティとの連携を強め成果を最大化する。加速器は、これらの研究を支えるべく、後述する設計性能を早急に実現し、さらなるアップグレードを推進する。

ニュートリノ実験施設

KEK は、T2K 実験の高度化とハイパーカミオカンデ実験の建設を推進して「レプトンの CP 対称性の破れ」の発見とその大きさの測定を目指す。

T2K 実験はニュートリノ振動による電子ニュートリノ出現を世界に先駆けて発見し、さらに電子ニュートリノ出現と反電子ニュートリノ出現の違いから「レプトンの CP 対称性の破れ」の兆候をとらえるという大きな成果を上げてきた。J-PARC MR は 2021 年の高繰り返し化により、当初設計強度 750 kW の達成と、さらなるビーム強度向上が期待されている。それにあわせて T2K 実験は前置検出器を大規模改造する。KEK は、今後もビームパワーを増強させながらニュートリノビームによるデータを蓄積し、前置検出器の改良とそれを用いた測定による系統誤差の改善とともに、CP 対称性の破れの探索を推進する。

東京大学宇宙線研究所と KEK を主体として 2020 年に建設を開始したハイパーカミオカンデ実験では、宇宙ニュートリノの観測や核子崩壊の探索とともに J-PARC ニュートリノビームによる長基線ニュートリノ振動実験が主目的の一つであり、2027 年の実験開始をめざしている。KEK は、おもに大強度ニュートリノビームの実現と、前置検出器の高度化を担う。

大強度ニュートリノビームでの実験を実現するために、実験施設の段階的な増強と T2K 実験への安定的なビーム供給の実績を積み重ね、ハイパーカミオカンデ実験の開始するまでに 1.3MW のニュートリノビーム生成をめざす。前置検出器の高度化として、現行前置検出器のアップグレードおよび、新規の水チェレンコフ検出器の建設を行う。生成されたニュートリノビームフラックスの決定精度改善のための陽子—原子核反応によるハドロン生成量の測定実験も進める。

上記を実現するための要素技術は米国のフェルミ国立加速器研究所(FNAL)や CERN などの陽子加速器施設と共通項目が多い。これらについては、今後も国際協力を進める。

また、J-PARC のニュートリノビームを活用し、長基線ニュートリノ実験の精度向上のためのニュートリノ—原子核反応測定実験やそのための検出器開発が行われている。ステライルニュートリノ探索実験などの進展も期待される。KEK は、国内外の大学・研究所と協力して、長期的な視野にたち、マルチメガワット級のニュートリノビームなど革新的なビームや、液体アルゴン飛跡検出器など高性能ニュートリノ検出器の基礎開発を推進する。

ハドロン実験施設

ハドロン実験施設は、最大 51 kW のビーム強度で実験を行い、KLビームラインでの中性 K 中間子の稀崩壊実験(KOTO)はすでに世界最高感度に到達している。ストレンジクォークを含むハドロン多体系の研究では、K1.8 と K1.8BR のビームラインにおいて、ストレンジクォークを 2 つ含む ($S=-2$)ハイパー核の開拓、K⁻中間子と 2 つの陽子の束縛状態の発見、 Σ ハイペロンの散乱実験の成功などによりハドロン間相互作用の理解が深まった。MR 加速器の増強と 95kW 対応の二次粒子生成標的の運転により、2022 年から数年間で、 $S=-2$ のハイパー核の高統計かつ系統的な分光研究の実施、KOTO 実験で世界記録を更新することが視野に入っている。また、新たな標的を開発導入することにより、100 kW を超えるビーム強度で実験をより効率的に進める。2020 年に運用を開始した新しい 1 次陽子ビームライン(B ライン)でも、核物質中の中間子質量スペクトル

の変化を調べる研究が進行中である。2023年には新しい陽子ビームライン(Cライン)にて、 μ 粒子電子転換現象を探索する COMET 実験の第一段階を開始する。

現行施設での研究成果を元に、更なる研究の飛躍的な発展を期するため、複数の標的と新たなビームラインを新設するハドロン実験施設の拡張計画を推進する。特に、中性子星内部の高密度核物質で重要となるバリオンの多体間力を解明するには、 $S=-1$ の Λ ハイパー核準位を数十 keV (これまでの 10 倍以上)の精度で測定することが必要であり、運動量の分散整合を利用した大強度高分解能の π 中間子ビームラインを新設することでこれを実現する。また新しい小角度取り出しの中性 K 中間子ビームラインを設置することで KOTO 実験の感度をさらに二桁あげて標準理論の分岐比 3×10^{-11} との差を捉える。実験ホールを拡張し複数の標的を設置することで、ビームラインの数を増やし、現行のビームラインでの実験とともに高精度で多彩な研究を展開できる。

また、COMET 実験では、その第一段階で 10^{-14} を超える実験感度(現在の上限値の 100 倍以上)に到達し、並行して測定器と μ 粒子捕獲システムの増強を推進し、最終目標である 10^{-16} を超える実験感度の早期実現を目指す。

ハドロン実験施設はこれらにより、世界をリードする原子核・ハドロン・素粒子研究の拠点施設として、世界の研究者からの期待に応えることができる。実験施設の将来の可能性、例えば重イオンビームによる実験、についても、世界的な研究の動向を見ながら検討する。

物質・生命科学実験施設

KEK は JAEA と緊密に協力し、特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律の登録機関や茨城県などの関連機関とも協力して、世界最高のピーク強度を持つ J-PARC パルス中性子・ミュオンを用いた物質・生命科学研究の飛躍的な発展と産業利用の一層の推進を目指す。試料環境や解析ソフトウェアなどの基盤的技術開発により実験装置の更なる高度化を図るとともに、MLF の多様な実験装置群を活用した幅広い研究を推進する。これにより、産業界も含めたユーザーの視点に立った利用制度の充実や合理的な安全管理体制を確立し、研究成果の最大化を図る。

これらの研究を通じて利用者コミュニティの拡充と研究フロンティアの拡大を図るとともに、放射光・低速陽電子とのより強固な連携も進める。こうした展開により、中性子・ミュオン科学は物構研の複合量子ビームプラットフォームの一翼を担い、国際的研究拠点となる。これらの活動と研究成果の創出を将来に渡って担う人材の育成に、コミュニティとも協力しながら、注力する。

中性子科学においては、世界最高の J-PARC パルス中性子を用いた物質・生命科学研究の飛躍的な発展を目指す。KEK が現在有する中性子実験装置は、分解能・測定強度・試料環境の極限を追求したものである。検出器などの整備により、装置の所期性能を達成し、特殊試料環境整備などで、さらなる高度化を図る。さらに JAEA と協力し、物質・生命科学実験施設の多様な中性子装置群を活用した幅広い研究を促進する。

物質・生命科学におけるグランドチャレンジ研究の推進のため、KEK および他大学・他機関の技術力を結集して、基盤技術開発による中性子実験装置の高度化を図る。例えば精密な金属加工技術の応用による回転楕円体型中性子ミラーや磁場勾配を利用した集光デバイスの開発によ

り、高輝度かつ微小なビームを生成する。これにより表面・界面近傍における動的構造の測定や、高性能蓄電池などの新奇材料や局所構造の測定が可能になる。またパルス中性子と偏極中性子の特徴を生かした中性子非弾性散乱により多様な励起状態の精密測定を行い、交差相関物性の起源の解明に貢献する。そのため、スピン偏極度解析により磁気構造とそのダイナミクスを詳細に決定する偏極中性子解析システムの建設において、まずは早期に 40meV までの偏極中性子による非弾性散乱実験のユーザー利用を実現するとともに、100 meV までのエネルギーの中性子のための偏極・検極デバイスの開発を進める。一方、偏極中性子を利用してエネルギー変化を精密測定する中性子スピンエコー分光器においては、最大フーリエ時間を 0.1 マイクロ秒まで拡張することにより、多成分ソフトマターの機能発現要因の解明を目指す。これらに加えて、冷中性子干渉計による feV サイエンス等の中性子基礎物理研究を進める。

ミュオン科学においては、崩壊ミュオンライン(Dライン)、低速ミュオンライン(Sライン S1 エリア)での共同利用実験が順調に進行しており、超低速ミュオンライン(Uライン)ではナノメータ μ SR、透過型ミュオン顕微鏡の開発が進められている。これらの装置群を用いて、超低速ミュオンや μ SR法を用いてグランドチャレンジ研究を進める。さらに、負ミュオン特性 X 線分析による材料科学、あるいは考古学から文化財科学までの幅広い異分野融合型応用研究を推進する。

また、基礎物理・透過型顕微鏡用 H ライン基幹部の整備により、J-PARC の大強度を活かしたミュオニウム原子精密分光実験、 μ 粒子異常磁気能率/電気双極子能率($g-2$ /EDM)の精密実験に代表される基礎物理学研究を進展させる。更に長期的にはミュオンを物質波として利用した透過型ミュオン顕微鏡を実用化し、グランドチャレンジ研究を強力に推進する。

将来計画として、MLF 第二ターゲットステーション等の検討を中性子科学会および中間子科学会とともに進めており、中性子輝度 10 倍、ミュオン強度 50~100 倍を実現するための開発計画とこれらの線源を用いた研究計画を具体化する。

加速器の高度化

現在、J-PARC 加速器(リニアック、3 GeV シンクロトロン(RCS)、主リングシンクロトロン(MR))は 3 つの実験施設それぞれに世界最大級の大強度ビームを供給している。今後も安定なビーム運転を継続しながら、ビーム強度をさらに増強していくことが加速器として最も優先される課題である。

すでに RCS から物質・生命科学実験施設に設計強度 1 MW のビームを供給する試験運転に成功しており、今後は大強度ビームに対応する中性子生成標的を開発・整備することにより、1 MW ビームでの本格的利用運転の早期開始を目指す。さらに、将来、物質・生命科学実験施設の第 2 ターゲットステーションが稼働する場合に必要となる 1.5 MW の実現を目指して、リニアック及び RCS でのビームスタディや要素技術の開発研究を推進する。

一方、MR における本ロードマップ期間の目標は、速い取り出し(FX)により T2K 実験に設計強度 750 kW を超えるビームを供給するとともに、2027 年に予定されているハイパーカミオカンデを用いた長基線ニュートリノ振動実験の開始にむけて 1.3 MW のビーム運転を確立することであり、

さらに、遅い取り出し(SX)によりハドロン実験施設に 100 kW の安定なビームを供給することである。これらを達成するために、高繰り返しを可能とし高い安定性を持つ新たな主電磁石電源の導入、2 倍高調波空洞の増設を含む高周波加速システムの増強、入出射機器の増強等を実施する。また、SX において 100 kW を超えるビーム強度を実現するために、すでに達成している世界最高の取り出し効率 99.5 %をさらに上回る高効率のビーム取り出しを目指してビームスタディと開発研究を推進する。

また、それらと並行して、ニュートリノ実験やハドロン実験施設における素粒子・原子核実験の将来計画として、J-PARC 加速器の大規模な増強やあらたな加速器施設の建設計画を検討する。ニュートリノ実験に関しては、マルチメガワット級のビームを目指して、MR の入射エネルギーを 8 GeV に上げるために RCS の下流に新設するブースターシンクロトロンや、つくばキャンパスでの展開も視野に入れた超伝導リニアックを基本とする大強度プロトンドライバーの設計と開発研究を進める。ハドロン実験施設の素粒子・原子核実験に関しては、ビーム強度増強のための開発研究に加えて、利用時間の大幅な拡大を可能とする超伝導ストレッチャーリングの検討を進める。

3. 2 SuperKEKB/Belle II

KEKスーパーBファクトリー計画を推進し、SuperKEKB加速器の性能を改善しながらBelle II測定器でデータを取得する本格物理運転を継続する。国際共同実験Belle IIIは、B中間子、D中間子、 τ レプトンの崩壊過程を精密測定することで、CP対称性の破れや荷電レプトンフレーバーの破れなどに現れる高いエネルギースケールの新物理現象の発見を目指す。現在見られるレプトン普遍性の破れのアノマリをはじめとし、数々の新現象の有無を明らかにすることにより、高エネルギースケールを支配する新物理法則を決定するための重要な情報を与える。また、低いエネルギースケールにおける暗黒物質の探索や、ハドロン形成機構についての研究も進め、素粒子物理学・ハドロン物理学・宇宙物理学とその境界領域における学術の進展へとつなげてゆく。

入射器改造による安定性の向上とエミッタンス保存、衝突点領域の開口拡大、測定器の耐放射線性と性能の向上、RFシステムの増強などを行うことで、電流を増強し、かつ衝突点ベータ関数をさらに小さくすることが可能となる。これらの改造を2026年頃までに行い、その後の大幅なルミノシティ改善へと導く。2020年に到達した $2.40 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の世界最高ルミノシティをさらに数十倍更新し、かつ年間8か月の運転期間を確保することで、2031年頃までに 50ab^{-1} を蓄積、世界に先んじて新現象を探索する。一方で、崩壊の終状態にニュートリノなどの測定器にかからない粒子を複数含むモードの解析や包括的測定など、独自性の高い研究が大きな強みになる。

50ab^{-1} までのデータに確実な新物理の証拠が観測された場合には、その詳細を明らかにするために、さらなるルミノシティ向上と運転の継続が求められる。そうでない場合にも、偏極電子を用いた実験を行うなど、将来に向けた提案がなされており、物理的重要性を確認しつつ、技術的実現可能性を検討するためのR&Dを継続する。

世界で唯一稼働する電子・陽電子コライダーのBファクトリーとして、Belle II実験への注目は高

まっており、26の国と地域から1000名を超える研究者が集まる国際共同実験に成長した。これは日本がホストする国際共同プロジェクトとしては最大規模であり、KEKは日本の大学共同利用のみならず、世界中の研究者のための研究拠点としての機能を果たす。

3.3 LHC/ATLAS

LHCの最重要課題は、標準模型を超える新物理現象を発見することである。そのためには、虚心坦懐に多様なアイデアに基づき新物理を探ることが重要で、LHC実験では、重心系エネルギー13TeVという世界最高エネルギーを利用して、TeV領域の新物理現象をくまなく探索している。同時に、ヒッグス粒子やトップクォークなどの重粒子を生成できる特徴を活かして、既知の素粒子の性質の精密測定からも新物理の兆候を探っている。

2022年から2024年までは、第3期運転を行い収集データ量を倍増させて、新物理探索のフロンティアをさらに前進させる。KEKは、実験現場であるCERNに研究者を長期滞在させ、国際共同実験ATLAS実験を遂行する。国内グループにおける役割分担に基づき、測定器の保守運用についてはKEKが、コンピューティングについては東京大学素粒子物理国際研究センターが中心となり、国内研究者の取りまとめ役を果たしつつ、収集データの質・量の向上および物理成果の創出に主導的役割を果たす。

陽子・陽子衝突実験では積分ルミノシティの増加とともに、より高いエネルギー領域の探査が可能になることから、ルミノシティ増強により新物理のエネルギースケールを探ることが今後の高エネルギー物理学の進む方向を定める上で重要である。このため、CERNでは、毎秒10億回程度であるLHCの陽子・陽子衝突頻度を1桁上げる高輝度化(HL-LHC)計画の準備が、欧州だけでなく米中なども巻き込んだ世界中の国際協力で進められている。HL-LHCでは 4000fb^{-1} 程度の陽子・陽子衝突事象により、新物理の探索限界を劇的に拡大させる。たとえば、ヒッグス粒子測定においては、結合定数の測定精度は数倍向上し、自己結合の検証も視野に入る。日本は、CERN加盟国以外で初めてLHCへの参画を決め、現在のような世界中の国際協力という枠組みを構築する礎となり、LHC加速器建設とATLAS実験での多岐にわたる活躍で、ヒッグス粒子発見などの物理成果の創出に大きく貢献してきた。KEKは、これまでの実績をもとに、HL-LHCに向けたアップグレードにおいても、国内研究者と共に計画成功のために欠くことのできない一翼を担う。

第3期運転終了直後から加速器と測定器双方の刷新作業を行い、2020年代後半に高輝度化されたLHCが再稼働する。HL-LHCでは、生成される粒子数が飛躍的に増大し、たとえば、検出器の最内層は $1 \times 10^{16}\text{cm}^{-2} \cdot 1\text{MeVn}_{\text{eq}}$ を超える放射線に曝されるため、最新技術を用いる測定器開発を進めてきた。過去10年近くを技術開発に費やし、技術的な課題を克服しつつあるので、今後は開発に目処をつけ、実機製造と建設に向けた準備期間へと移行していく。

加速器では、衝突点近傍に設置する様々な電磁石を刷新し高輝度化を実現する。KEKはこれまで常伝導で実現していたビーム分離用電磁石を超伝導磁石に置き換える。飛跡検出器とミュオントリガーでは、現行測定器に比べて10倍程度の微細化・高速化・放射線耐性強化を達成させ

るための技術開発を完了させた後、実機の製造と建設を行う。KEKは、国内拠点としてこれらの活動を主導する。

3.4 ILC

高エネルギー物理学はハドロンコライダーとレプトンコライダーを両輪として飛躍的な発展を遂げてきた。ILC は、LHC におけるヒッグス粒子の発見に基づき、重心系エネルギー250GeV のヒッグスファクトリーとして立ち上げる。レプトンコライダーの特長を活かし、ヒッグス粒子の明解かつ精密な測定、LHC では発見が困難なタイプの新粒子の高感度探索を行う。そこでの成果や LHC で期待される今後の発見に応じ、見つかった新粒子・新現象をさらに詳細に調べるためのエネルギー拡張性も有する。これらにより、電弱ゲージ対称性の破れのメカニズムの理解を深め、背後にある新しい物理法則の解明を進めて、素粒子物理学を新たな段階へと飛躍させる。

ILC 加速器の基幹技術は、ナノメートルサイズのビーム制御技術と超伝導加速技術である。KEK では、ATF にて目標ビームサイズをほぼ達成し、さらなる信頼性および安定性の追求によるナノメートルサイズビーム収束技術の研究開発を進めている。超伝導リニアック試験施設(STF)、CFF においては、超伝導加速器開発及び高性能空洞の製造技術開発を進めており、さらに、日米協力や日欧協力等により超伝導加速器の低価格化を含めた研究開発が進行中である。これら基幹技術の研究開発を着実に継続していくとともに、陽電子源やビームダンプなど ILC 加速器要素技術の研究開発や加速器施設の全体設計を進める。また、日本の研究者は、ILC での物理の検討や測定器開発においても重要な役割を果たしてきているが、その国内拠点としての KEK の機能をより強化することが求められる。

ILC は、世界の素粒子物理及び加速器研究者の国際協力による実現を目指している。その研究開発および設計は、2005 年以来、国際将来加速器委員会(ICFA)の下に設置された国際設計チームにより続けられており、2013 年に技術設計報告書が出版されている。2012 年には日本の高エネルギー物理学者コミュニティが ILC を日本がホストすることを提案した。2017 年 7 月には、高エネルギー物理学研究者会議は、LHC RunII のこれまでの結果を踏まえ、あらためて、ILC を重心系 250GeV のヒッグスファクトリーとして早期に建設することを提案し、この提案は ICFA により支持された。現在では、電子・陽電子ヒッグスファクトリーが次期コライダーの最優先計画であることが世界的共通認識となっている。

2020 年 2 月の ICFA 提言に基づき、2020 年 8 月に国際推進チーム(IDT)が KEK をホストとして設立された。IDT では、ILC の時宜を得た実現を目指し、2019 年 10 月の KEK 国際ワーキンググループの報告書をもとにして国際的な準備組織となる ILC Pre-Lab の設立に向けた制度設計を行なう。また、これまでの国際協力体制を継承して加速器、物理・測定器の研究開発、工学設計のための連携を進める。国際的な合意に基づき早期に Pre-Lab の運用を開始し 4 年程度をかけ ILC 建設開始に必要な準備を完了する。その後、政府間合意により設立される ILC 研究所のもとでの建設に 10 年程度を想定しており、順調に進めば 2030 年代中頃に ILC を稼働できる。こ

のために、KEK は、国際コミュニティと共に ILC 計画を牽引する。

3.5 フォトンファクトリー

フォトンファクトリー(PF)は、X線域におよぶ広範なエネルギーの放射光の利用を可能にする国内初の専用施設として誕生し、放射光科学の黎明期を先導するとともに、40年の長期にわたり優れた研究成果を創出し続けてきた。この間、国内外に放射光施設が続々と建設され、光源の高性能化や利用の汎用化が進むなど、PFを取り巻く情勢は大きく変化した。こうした現状に鑑み、PFは、大規模学術放射光施設としての使命に立ち返り、現在を第二黎明期と捉え、放射光科学に変革をもたらし、次の成功に導くことを目指す。

PFの使命は、(1)開発研究を通じて世界の放射光科学を先導する新技術と若手人材を輩出すること、および、(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ことである。使命の遂行には、光源、ビームライン、および、その運用の「自由度」が高いことが重要である。この自由度の意味するところは、ある性能に特化した光源ではなく目的に応じた放射光を発生することのできる柔軟性の高い光源、それを活用できるビームライン群、そして、研究者のアイデアの試行と実現を促進する施設運営であり、自由度の高い施設へのコミュニティからの期待は大きい。PFは、現在でも自由度の高い施設であり、多様な研究が可能であるが、将来計画では、この点を更に強化する。

使命の遂行に適した体制とするため、PFの組織改編を2019年4月1日付で実施した。新体制により、稼働中の2光源の特長を活かした放射光科学を推進するとともに、短期の将来計画を実現することで、それらの特長を更に先鋭化する。また、KEKとして長期の将来計画を推進するための体制を構築して、関連施設・コミュニティとの連携を強化することで、PFの稼働から50年となる2030年代前半までに、自由度を格段に向上させた将来光源施設を建設する。

光源加速器

PFリングの高度化を3年計画で実施する。平均輝度やピーク輝度などの基本性能の向上とともに、運転パラメータの自由度の向上とビーム安定性の向上を両立させることで、より多様な利用研究を可能にする。更に、世界唯一の垂直ウイグラーの性能を向上させる。

長期計画の具体化に向けて、Hybridリングを始めとした自由度を格段に向上させることのできる光源の概念設計を進める。Hybridリングは、超伝導入射器からの超高性能の電子バンチ(シングルパスモード)と第3世代性能の蓄積電子バンチ(ストレージモード)を共存させることのできる可変光源の提案である。また、関連した加速器技術のR&Dを進める。

実験施設

光源加速器の高度化により向上する性能と自由度を最大限に活用して、オンリーワン・ナンバードワンのビームライン群による最先端の利用研究を展開する。短期計画として、開発研究専用ビ

ームラインの整備、医学イメージングビームラインの高度化など、5 本程度のビームラインの整備と高度化を進める。

開発研究専用ビームラインは、放射光関連技術の開発研究を推進することで、日本および世界の放射光施設の持続的な発展を可能にする。また、研究者が新たに開発する装置のフィージビリティテストのための国内唯一のビームラインとしても機能し、新しい研究分野の創出に貢献する。前出の垂直ウイグラーを利用した広視野・高分解能 X 線干渉計は、現在でも世界最高の密度分解能(密度差検出限界)を誇るが、ビームライン側も更に高性能化することで、造影剤なしで毛細血管までを可視化できる医学イメージングビームラインとして整備する。この他、10 倍以上の可変倍率をもつ X 線顕微イメージングやコヒーレント軟 X 線による時間分解回折イメージングなどのビームラインの整備を進める。また、素粒子原子核分野が中心となって進めている検出器開発テストビームラインの整備に全面的に協力する。

長期計画については、Hybrid リングのシングルパスモード利用によるフェムト秒域でのダイナミクス研究やシングルパスとストレージの 2 モード同時利用による放射光科学の新展開について検討するとともに、短期計画で整備を予定している開発研究専用ビームラインを利用して R&D を進める。

3. 6 その他の重要なプロジェクトの推進

3. 6. 1 加速器技術の医療・産業利用

これまで KEK が培ってきた加速器技術を産業・医療等へ応用展開するために、2019 年に応用超伝導加速器センター(CASA)が設立された。KEK は、トリスタン加速器の時代にいち早く超伝導高周波(SRF)技術を利用したビーム加速を実現し、ILC などの SRF 加速器の研究開発拠点となっている。電力効率よく大強度のビームを加速できる SRF 加速器は、医療、情報通信、インフラストラクチャー、エネルギー、環境の各分野で世界的な応用が進められている。KEK においても、これまで、核医学検査薬剤(Mo99)の生成やアスファルト改質による長寿命化、次世代半導体露光用 EUV-FEL 等の応用研究が進められており、超伝導加速器の応用研究を行う大電流超伝導高周波試験加速器である cERL、超伝導空洞開発設備を有する産学連携施設(COI 棟)を活用して今後もこれらの実用化に向けた研究開発を推進する。超伝導薄膜を利用した低損失加速空洞は小型冷凍機による加速器運転を可能とし、加速器小型化へのブレークスルーとなる。加速器のニーズに合わせて、加速空洞をはじめとする加速器要素開発を進める。

CASA では常伝導加速器を含めた幅広い加速器応用を目指しており、線形加速器を使ったホウ素中性子捕捉療法(BNCT)の性能向上にむけた研究開発や誘導加速シンクロトロン(デジタル加速器)等の先進加速器応用を進める。

産学連携により加速器応用を進めるために応用超伝導加速器コンソーシアムを設立している。このコンソーシアムを中核として新たな産業・医療利用のニーズを開拓し、KEK がもつ加速器技術

を展開させることにより社会に貢献する。

3. 6. 2 低速陽電子実験施設 (SPF)

低速陽電子実験施設 (SPF) では、世界で唯一稼働中の陽電子回折 (Total-reflection high-energy positron diffraction (TRHEPD)および Low-energy positron diffraction (LEPD))の装置開発と共同利用実験を行っている。陽電子回折は、他のどの手法よりも表面敏感かつ精密な解析によって物質表面数層に絞った原子配列を決定することができる理想的な表面構造解析手法であり、世界的に関心が高まっている。例えば、最近、ドイツの研究用原子炉からの中性子/γ線による低速陽電子ビーム施設 Neutron induced positron source munich (NEPOMUC) において、物構研 SPF の協力によって、TRHEPD の導入が進んでいる。

SPF は、2010 年のビーム強度増強とその後の革新的な装置開発によって桁違いの性能向上を実現したが、より短時間の測定や測定対象の拡大などのために、さらなるビーム強度・輝度の向上が望まれている。これは、今後も SPF が世界を先導しながら、機能性表面材料の開発研究の幅広いニーズに応えていくための必須条件である。ビーム強度増大のために陽電子源に照射する一次電子ビーム電力増大の諸方策に取り組むと共に、低速陽電子ビーム輸送技術の改良によるさらなる高輝度化を実現する。

さらに桁違いのビーム強度増大を見据えた次世代陽電子源の開発研究にも取り組み、世界最高強度の低速陽電子ビームを用いた物質研究の世界拠点となることを目指す。

3. 6. 3 KISS

KEK は理化学研究所との協力の下、理研敷地内に和光原子核科学センターを設置し、独自の実験施設 KISS を運用して、世界の類似施設で提供できない低エネルギー中性子過剰原子核ビームを共同利用実験に提供している。KISS の特徴は多核子移行反応とレーザー共鳴イオン化を用いた独特の装置にあり、これまで宇宙における元素合成過程の研究に寄与してきた。飛躍的な高感度・高効率を有する次世代の装置 KISS-II を目指して開発してきた多重反射型飛行時間測定式質量分光器 MRTOF と高周波を用いたガスセル装置を活かすことで、世界に先駆けたウランの起源の解明や、ニホニウムに次ぐ新元素の正確な同定を目指す。

3. 6. 4 他機関・他分野との連携

KEK では、他機関・他分野と連携・協力して、下記の 3 つのプロジェクトを推進する。

TUCAN

KEK では核破碎中性子源と超流動ヘリウムコンバータを組み合わせた超冷中性子 (Ultra-Cold Neutron: UCN) 源を開発し UCN 生成に成功した。この技術を活かして中性子 EDM 探索を行う国

際共同実験グループ(TUCAN)を組織した。TUCAN ではカナダの TRIUMF 研究所の陽子ビームラインに新方式の UCN 源を建設し既存の 100 倍以上の UCN 密度を実現し、3 年間のデータ取得により現在の感度を 1 桁上回る 10^{-27} ecm 領域での探索を行う。実験開始は 2023 年を予定しており KEK は基幹要素である大型ヘリウム冷凍機の開発を担当している。

LiteBIRD

LiteBIRD 衛星は、KEK 素核研 CMB グループを中心に提案され、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が戦略的中型宇宙科学ミッション 2 号機に選定した計画であり、2020 年代後半の打上げを予定している。CMB の偏光度を全天に渡り精密観測し、代表的インフレーション宇宙モデルを検証することを主目的とし、人類の宇宙像を左右するミッションである。その観測は超弦理論などの量子重力理論を検証する道も拓き、さらに宇宙論、素粒子論、天文学にわたる成果を生む。KEK では加速器実験技術のスピノフとして CMB 偏光観測に挑み、チリ・アタカマ高地に設置した望遠鏡により、世界で初めて CMB 偏光の情報だけから重力レンズ効果を検出する等の成功を収めた。極低温マイクロ波測定技術を始めとする CMB 観測に特化した KEK の技術が、LiteBIRD プロジェクトの成功に必要とされている。

KAGRA

大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)は、KEK が東大宇宙線研、国立天文台とともに推進するプロジェクトであり、岐阜県飛騨市神岡町に 2010 年から建設が始まり、2020 年より観測を開始した。主たる科学目標は、米国の LIGO やヨーロッパの Virgo と構成する国際重力波観測網でコンパクト天体合体や超新星爆発などの観測を行い、重力波天文学・物理学を発展させることである。KEK では加速器の真空・低温・制御・測量といった先端技術と大型施設建設・運用のノウハウ、理論研究などで重要な役割を果たしてきた。KAGRA は今後も観測とアップグレードを 3 年程度の周期で繰り返し、継続的に進化を続ける予定であり、KEK では上記分野を通して重力波天文学の発展に貢献する予定である。

4. まとめ

「KEK ロードマップ 2021」は、2022 年度から 6 年間を見通した KEK の研究の大きな指針とすべく策定した。推進すべき項目としては、実施中のプロジェクト、つまり J-PARC、SuperKEKB/Belle II、LHC/ATLAS、フォトンファクトリーと、それらの将来展開、および国際プロジェクトとしての ILC 実現に向けた取り組みをあげた。また、その他の重要な中規模のプロジェクトとして、加速器技術の医療・産業利用、低速陽電子実験施設、および和光原子核科学センターを進める KISS があり、さらには他機関、他分野と連携・協力による TUCAN、LiteBIRD、KAGRA をあげた。

これらの研究を国内外の研究施設と連携しつつ計画的に進めることにより、KEK は加速器科学関連分野で世界を先導する研究拠点としての役割を果たすことができ、学術及び社会に大きな貢

献をする。

高エネルギー加速器研究機構研究推進会議委員

足立伸一、雨宮健太、伊藤晋一、後田裕、内丸幸喜、宇野彰二、岡田安弘(議長)、荻津透、神谷幸秀、小杉信博、小関忠、小林隆、小林幸則、小松原健、五味田將、齊藤直人、佐々木慎一、澤田真也、下村浩一郎、瀬戸秀紀、千田俊哉、高橋真木子、徳宿克夫、飛山真理、橋本省二、花垣和則、幅淳二、船守展正、真鍋篤、道園真一郎、三原智、山口誠哉、和田道治