

KEK ロードマップ 2013

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構（KEK）では 2007 年 12 月に KEK ロードマップ（5 年計画）を策定し、2010 年 4 月の補足とともに研究推進の指針としてきた。2012 年 4 月以降、機構の研究推進会議で次期 KEK ロードマップの策定を進め、このたび「KEK ロードマップ 2013」をとりまとめた。

加速器を用いた科学研究は、素粒子・原子核物理による究極の物質像の探究とそれに基礎を置いた宇宙の起源の解明から、物質科学や生命科学の推進、医療やエネルギー問題などへの応用まで広い分野にわたっている。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いる。そのために KEK は最先端の加速器を開発・建設・運転し、我が国の加速器科学の中核施設として、また世界の加速器研究の拠点としての役割を果たしてきた。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、世界の基礎科学研究を先導する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、素粒子原子核研究所および物質構造科学研究所を通じて、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。そして、2012 年 8 月に中間まとめを本機構内外の研究者コミュニティに公開し、意見を求めた。本ロードマップは、寄せられた意見を参考に、研究推進会議でさらに検討を続けてまとめたものである。フォトンサイエンス（放射光科学）に関しては、その後さらに検討を行い、2016 年 6 月に大幅な改訂を行った。

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 2014 年から 5 年間の研究戦略を記述する。

・ J-PARC

ニュートリノ実験施設では、T2K 実験の測定精度を向上させるとともに、次世代長基線ニュートリノ振動実験に向けた具体的な研究計画を立案し、そのための準備研究を推進する。

ハドロン実験施設では、現行および新 1 次陽子ビームラインによる実験を着実に進め

るとともに、ハドロン実験施設の拡張を目指す。

中性子実験施設では、パルス中性子実験装置の所期の性能を達成し、さらなる開発・建設・高度化により物質・生命科学の飛躍的發展を目指す。

ミュオン実験施設では、ビームラインを整備し、独創的な μ SR実験による物質・生命科学、幅広い応用研究、および基礎物理学研究を進展させる。

加速器の高度化に関しては、早期に設計強度を達成するとともに、将来の J-PARC 加速器のさらなる高度化に向けて、設計強度を大幅に超えるビームの大強度化などの加速器次期計画を策定する。

- **SuperKEKB/Belle II**

加速器・測定器を完成させ、早期にルミノシティ設計値を達成し、新物理の探索を進める。

- **LHC/ATLAS**

ATLAS 実験を引き続き遂行するとともに、加速器・測定器のアップグレード部の建設を国際協力で積極的に推進する。

- **ILC**

日本がホストする ILC 計画を推進するために国際準備組織を立ち上げ、装置、施設・設備、研究所組織の詳細設計などに取り組み、国際協力の枠組みによる建設着手を目指す。

- **フォトンサイエンス (放射光科学)**

PF および PF-AR の安定な運転を継続し、放射光科学を推進するとともに、3GeV クラスの蓄積リング型高輝度光源施設の具体的計画を早急に策定し、関係機関と連携しながら、早期の実現を図る。

- **加速器・測定器技術の新展開**

KEK の持つ加速器・測定器の技術・専門的知見を活かし、関連する研究分野との連携、産業利用・医療応用などを通じての社会還元、ならびに加速器・測定器技術の飛躍的な発展のための萌芽的研究を進める。

前述のように、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に対して、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・財政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。特に長期プロジェクトに関しては、節目ごとの達成目標を明らかにし、適切に進展状況を評価しながら強力に研究を推進していく。

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

これまでに粒子加速器を用いた研究などによって、物質を構成する原子核や素粒子の様々な性質が明らかにされ、根本的な自然法則の解明や宇宙のごく初期の理解までも視野に入れるに至った。最近、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）において、長年の懸案であったヒッグス粒子と考えられる粒子が発見された。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の解明を進めることが最も重要な課題である。近年の宇宙論的観測によって明らかになった暗黒物質や暗黒エネルギーの存在も新しい物理法則の必要性を強く示唆しており、エネルギーフロンティア実験によってその一端が解き明かされることが期待されている。

一方、CP非保存など、エネルギーフロンティアの加速器では解明しきれない粒子の性質を明らかにし、新しい物理法則の全容解明に貢献するのがフレーバー物理である。新しい物理に起因する世代構造やCP非保存がこれまで見えていないことから、新しい物理は世代間の遷移やCP非保存を抑制する仕組みをもつものと考えられる。今後、より高い精度での研究によってその仕組みを解明することが期待される。また、ニュートリノの研究においては、非加速器実験および加速器による長基線実験によってニュートリノ振動現象が明らかにされ、最近、J-PARCなどの加速器や原子炉による研究で初めて混合角 θ_{13} の測定が行われた。その結果はレプトンにおけるCP非対称性の測定に道を拓くものであり、CP非対称性測定のための次期実験計画の策定が世界的に進んでいる。

原子核物理学の重要課題は、多様なクォーク多体系に対し、量子色力学（QCD）に基づいた理解を得ることである。宇宙ではビッグバン後にまず高温のクォーク・グルーオンプラズマが生じ、宇宙膨張による冷却に伴ってハドロンが、続いて原子核が生成され、さらに超新星爆発時に重い原子核が生成される、といった過程を経て物質宇宙が構成されたと考えられている。しかし、それぞれの物質の性質や相互変化のメカニズムはこれまでのところ一部を除いて理解されておらず、その解明が期待される。

KEKにおける素粒子・原子核研究

ヒッグス粒子や今後LHCで発見が期待される新しい物理法則の解明を進めるために、重心系エネルギー500GeV程度の電子・陽電子リニアコライダーの実現が世界的に強く望まれている。日本の研究者はこの研究開発においてすでに重要な役割を果たしているが、今後、国際リニアコライダー（ILC）の実現を図るための活動を一層強化することが特に必要であり、KEKはこのための国内拠点としての役割を担うことが期待されている。またこれと並行してLHC実験への参加を続け、ヒッグス粒子の性質解明や新しい粒子の直接探索を推進する。

KEKではBファクトリー（KEKB）およびKEKと日本原子力研究開発機構（JAEA）との共同プロジェクトであるJ-PARCにおいてフレーバー物理を推進してきた。KEKBで

の Belle 実験では加速器の世界最高ルミノシティ達成を背景に様々な成果を挙げ、現在そのルミノシティをさらに 40 倍に高めるための改造が行われている。2014 年度の運転再開後、Belle II 実験は B 中間子や τ 粒子などの崩壊現象を詳細に測定する。J-PARC においては、 K^0 稀崩壊実験、 μ 粒子電子転換現象の探索や異常磁気能率の測定など、大強度陽子ビームを用いた様々なフレーバー物理の研究計画が準備されている。TRIUMF や J-PARC で企画されている中性子の電気双極子測定実験もこの範疇の実験である。これらはいずれもエネルギーフロンティアの実験では探索できないユニークな現象を発見しようとするもので、大きなインパクトをもつ研究成果が期待される計画である。

T2K 実験は、J-PARC 主リング (MR) ビームの大強度化によるニュートリノ混合角の測定精度の向上を図り、CP 非対称性を引き起こす複素偏角の測定を目指す。またこれと並行して、質量階層性の決定や CP 非保存の直接的探索などに向けた今後のニュートリノ研究の戦略の検討が必要である。ニュートリノ研究においては、加速器による研究に加えて原子炉からのニュートリノを用いた研究計画も実施されており、世界的に激しい競争がある。これを踏まえて国内の研究を強力に推進しなければならない。

J-PARC ハドロン施設における主要な研究テーマである原子核・ハドロン物理の研究では、ハドロン構造・核子間相互作用・高密度核物質の物性などを QCD に基づいて統一的に理解し、宇宙においてクォークからハドロンや原子核といった物質の基本形態がどのように作られてきたのかを理解することがその大きな目標の一つである。そのためには多角的な実験を並行して進めることが重要である。なお、元素合成過程の解明を目指した不安定核に関する研究 (KISS) は理化学研究所と協力しつつ推進する。

KEK は、加速器実験で培った技術を活かすことによって、加速器を用いない実験・観測においても重要な役割を果たしてきた。今後も素粒子・原子核物理学および関連研究分野の進展を踏まえて、KEK の使命である加速器を用いた研究に加えて、それ以外の実験・観測にも積極的に関与する可能性について検討を進める。

これら実験的研究に加えて、関連する理論的研究を並行して推進することは重要である。実験の多くは理論的モデルを検証することを目的とし、一方、理論は実験で得られた知見を元に自然界を記述するモデルを構築する。超弦理論のように実験で到達可能なエネルギーを遙かに超えるスケールを対象とする理論においても、宇宙の進化にその痕跡を探る可能性が議論されている。また、実験データの解釈には理論的計算を必要とすることが多く、J-PARC など KEK が進める実験計画において最大限の成果を引き出すには、実験と理論のより直接的な協力が不可欠になる。こうした理論的研究は、素粒子・原子核物理全体にわたる広い視野で、かつ世界的規模で行われており、自らその一端を担いつつ日本の研究拠点のひとつとしての役割を果たすことは KEK の研究活動として重要である。

理論的研究のうち、大規模なスーパーコンピュータを用いる計算素粒子原子核物理は、相応の計算資源を必要とするため、大学共同利用機関である KEK が主要な役割を果たしてきた。最も大規模な計算となる格子 QCD の分野では、現実の QCD を再現する計算が実現

しつつある。SuperKEKB/Belle II のデータ解析において必要になる形状因子の精密計算やバリオン間力の第一原理計算などの結果は、実験で得られるデータを補完する重要な役割を果たすことが期待される。KEK は、計算素粒子原子核物理をさらに発展させて実験的研究とのコヒーレントな進展を図る。

2. 2 物質・生命科学分野

物質・生命科学の展望

物質が示す機能性と多様性の起源をできるだけ単純な原理や概念で理解し、新しい物質観の創成や物質・材料の創出にも貢献するのが物質・生命科学のミッションである。特に近年、グリーンマテリアルなど、持続可能な社会に資する機能が求められており、基礎原理や概念の創出と共に、これらを「役立つ機能性」という出口にいかにつなげるかが物質・生命科学に問われている。すなわち、物質・生命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「役立つ機能性」を持つ物質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となっている。

KEK における物質・生命研究

KEK 物質構造科学研究所（物構研）は、大学共同利用機関として、広範な物質・生命研究分野における先端性の高い共同利用研究と、これらを将来にわたって支える人材育成を最大のミッションとする。

物構研は、複数の異なる量子ビーム（放射光・中性子・ミュオン・低速陽電子）をひとつの研究所内で利用できる世界的にも希有な研究機関である。ユーザーの自由な発想に基づく広範な分野の研究を支え、そのさらなる活性化を図るために、個々の量子ビームの整備と、それを利用する先端的研究を物構研が主体となって推進する。特に、物構研の構造物性研究センターおよび構造生物学研究センターを中心として、量子ビームの複合的かつ協奏的利用の戦略を立てる。また、物構研の計測システム開発室は、機構の先端加速器推進部・測定器開発室と強く連携して計測技術開発を行い、それぞれの量子ビームの高度化を推進する。

今後 5 年程度、量子ビームの複合的かつ協奏的利用の先端性を高め、研究分野の拡大を図るために、共通の課題「物質中の水素とスピン」を設定する。これにより、物質中の水素とスピンに対するそれぞれの量子ビームの感度と精度を向上させ、その理解を深める。

水素はほとんどの有機物質や生体物質に含まれ、それらの特徴的機能と直結する。また無機物質においても、エネルギー貯蔵や、その量子性が誘起する新奇な物性が注目されて

いる。さらにスピン状態は磁性全般のみならず、生体物質の機能性にも深く関与する。

「物質中の水素とスピン」は、水素やスピンとの相互作用が弱い放射光にはチャレンジングな課題であるが、今後重要な研究対象の一つになると予想される。そのため「水素とスピン」とその先にあるサイエンスを見据えて、3GeVクラスの蓄積リング型高輝度光源施設の計画を推進する。中性子は水素とスピンには高い感受性を持つが、精密研究には水素の核スピンの乱雑さによる非干渉性散乱のバックグラウンドや反跳効果など、いくつかの未解決な問題の解決が必要である。また磁気散乱と核散乱を厳密に区別するためには偏極中性子のスピン偏極度解析が必要であるが、広いエネルギー領域で偏極度解析を行う技術が存在しない。ミュオンは物質中の局所スピン状態を高感度で感知し、またミュオン自身が水素の軽い同位体として振る舞うことから、捕獲やドーピングされた水素の電子状態に関する情報など、物質・生命の機能に直結する他の手段では困難なユニークな情報が得られることが期待されている。物質に入射された陽電子は、対消滅した位置での電荷密度の情報を与える。そのため、水素が誘起する格子膨張や原子空孔などの局所構造変化および水素が選択的に捕獲される構造空孔を研究できる。今後、陽電子の固体表面感性を利用して水素やスピンの情報がどのように得られるか新しい挑戦となる。

構造物性研究センターおよび構造生物学研究センターがイニシアティブをとって、これら「物質中の水素とスピン」に関連するボトムアップ中心の基礎研究を推進する。また量子ビーム技術ならびに計測手法や解析手法の開発を「物質中の水素とスピン」の研究を念頭において推進する。一方、両センターは出口を見据えたトップダウン研究も中心となって推進する。今後5～10年程度の具体的プロジェクトとして、構造物性研究センターでは特に電子材料・磁石材料を中心とした「元素戦略研究プロジェクト」、また構造生物学研究センターでは「解く構造から使う構造へ」を中心課題とし、「創薬等支援技術基盤プラットフォーム」などに、異なる量子ビームを複合的・協奏的に活用して取り組む。

KEK 物質・生命科学における複合量子ビームプラットフォーム

KEK 物構研は、今後10年程度を目処に、複合量子ビームプラットフォームの国際拠点の形成を目指す。さらに複合量子ビームプラットフォームを基盤として大学との連携を強化し、物質・生命科学の推進と人材育成を促進する。そのために物構研の各量子ビーム実験施設は以下のような長期展望に立つ。

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、静的な構造および電子状態だけでなく、その時間発展を決定できるようになってきた。KEKは、世界最先端の放射光科学を開拓するとともに、放射光を利用した幅広い学術領域の研究を支え続ける。そのために、関係機関と連携して、3GeVクラスの新しい蓄積リング型高輝度光源施設を早急に建設し、運用を開始する。この光源から得られる、真空紫外・軟X線から硬X線にわたる高輝度・高コヒーレンス放射光を利用する

ことにより、ナノメートルの空間分解能とミリ電子ボルトの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ようになる。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ようになる。特に、不均質な系で必然的に生じる、異なる相や物質の間の界面において、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。

中性子は物質中の原子核の配列やスピン構造および電子状態を研究するプローブである。放射光と比較して、輝度と強度は落ちるが、高い透過性を持つ。KEK 中性子実験施設は今後 10 年程度でスピン制御技術を開発し、世界最小となるミクロンサイズの高輝度中性子ビームの生成を目指す。磁場勾配を利用したビームの高輝度化は、同時にスピン偏極を引き起こすので、世界最高輝度の偏極中性子ビームが得られる。これにより、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、放射光など、他の量子ビームからの情報との定量的比較が可能となる。さらにスポレーション中性子の特性を極限まで利用した世界最高エネルギー10eV の中性子非弾性散乱実験を実現し、ブリルアン散乱などによる高速ダイナミックスの研究を目指す。これらの技術開発により、界面近傍ダイナミックス、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・生命科学をスタートする。

これと同時期に J-PARC 第 2 中性子ターゲットステーションの建設開始が検討されている。これにより、新規デバイスを用いた実験手法の成熟を加速させ、さらに新規手法の開拓による循環的發展を実現させるとともに、物質・生命科学における基礎から産業応用まで幅広い分野における中性子の先端的利用と汎用的利用を展開させる。

ミュオンスピン回転・緩和・共鳴法 (μ SR) では物質の局所情報を得ることが出来るため、物質の空間構造やその揺らぎを波数・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な手法であり高い相補性を持つ。次の四半世紀にミュオンを用いた物質科学の目標は、大強度パルスという特性を活かしつつ、 μ SR という手法をさらに洗練・高度化し、従来見えなかったものを見えるようにすることである。そのため、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利用者の拡大を進める。今後 10 年程度で、最先端のビーム技術である超低速ミュオンビームと μ SR の組み合わせにより、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（～数ナノメートル）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ためのユニークな微視的評価手法を確立させる。さらに、通常低速ビーム利用による μ SR においても、J-PARC の大強度を活かし、従来に比べ格段に高感度・高精度の測定が可能になる。そのため、ミュオンによる基礎物性研究に加えて、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。また、ミュオン関連物理量の精密測定実験により、基礎物理学における大きな進展を目指す。

低速陽電子による研究では、KEKの加速器施設を有効活用して世界最高クラスの低速陽電子ビームを生成し、陽電子回折による表面構造解析法を確立する。ここでも、表面電子のエネルギー状態を、放射光やその他の手法との組合せで明らかにしていく。さらに、スピン偏極低速陽電子ビーム生成の新たな方式を開拓する。これらの研究開発により、低速陽電子を物質・生命科学に幅広い立場から利用する新しいユーザーの開拓とユーザーコミュニティの拡大を図る。

2. 3 KEKにおける加速器・基盤技術の展開

KEKは物質の根源探究のために、各時代の最先端技術を用いた粒子加速器をプローブとして、科学の世界を切り拓いてきた。それぞれの科学研究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、今後も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、次世代基礎科学研究のプローブとして高性能・高安定な加速器と運用基盤を提供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応用し、実験目的に適合した量子ビームを作り、実験成果の創出に貢献する。また、世界各地で生まれる新しい発想と技術にも常に注目し、積極的に取り込みつつ発展させ、社会に還元する。

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、最近の設計は BEPC-II(Beijing)や NSRRR(Hsinchu)で実用に供されている。ILCに向けては機構内で超伝導加速空洞の量産化技術の開発と実証を行っている。電鍍方式による高周波空洞も独自の技術として各国に普及した。J-PARCや KEKB でそれぞれ実証された金属磁性体空洞やクラブ空洞は LHCなどで応用されようとしている。また、KEKB ARES 空洞、J-PARC ACS 空洞、PF および Accelerator Test Facility (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。今後も ILC などの次世代加速器に向けた開発を発展強化する。さらに、ますます高度化する大電力高周波の発生・伝達・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集合体や μ 粒子 $g-2$ 実験、 μ 粒子電子転換探索実験 (COMET) の超伝導電磁石の 3次元高精度磁場設計を、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て最先端の実験成果を目指す。KEK が主導してきた LHC や J-PARC ニュートリノビームラインの超伝導電磁石の技術をさらに発展させて LHC アップグレードにも貢献する。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パルス電磁石と電源が開発され、いずれも極限性能に近づいているが、一方で長期の実用運転に耐える工夫にも満ちている。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・耐放射線性能を含めた総合的なシステムを構築すると共に、省電力性能の向上にも取り組む。

J-PARC・SuperKEKB・ILC などあらゆる計画の成否を決める重大な要素になりつつあ

るビーム源については、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一層努力する。大強度のビームが通過することにより、加速器の真空システムは、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ある。KEK ではすでに KEKB 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、世界の各種加速器での新手法・新技術の発展はめざましく、それらに絶えず着目し批判的に摂取発展を心がける。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・発展性の確保を担っている。今後も加速器制御機構関連の技術開発を各加速器の保護システム構築の実績と組み合わせながら一層の発展に努め、測定器など周辺への応用拡大も追求する。

上記のような最先端要素技術を将来の加速器に向けて確立するために、ATF や超伝導加速加速器試験施設 (STF) を発展させ、国際協力にも活用する。

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付け、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。これには長期の不断の努力を要することが多いが、この手法においても世界に先んじて、一層の強化を図る。

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、空気や水の放射化対策など、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る。

情報処理システムの基盤となる設備、大型計算機システム、スーパーコンピューターシステムを運用・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。

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、次世代の高磁場・高耐放射線材料の開発など、加速器用先進超伝導技術の発展に取り組む。また、超伝導加速空洞を機構内で製造できる設備で空洞の量産化技術の開発と実証を行う。さらに、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、超精密加工技術の高度化を図る。

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」をもたらす技術と言えるが、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」とも言えるものであり、素粒子・原子核の微細世界の探究から、放射光・中性子・ミュオンによる物質や生命の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、以下のような計測器関連技術に機構横断的に取り組んできた。

- ・ 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、暗黒物質探索に活用可能な高精細／超高速／高機能ピクセルセンサー
- ・ 素粒子・原子核実験、ミュオン実験など多様な実験装置で活用される高感度光センサー
- ・ ニュートリノ検出、陽子崩壊・暗黒物質探索そして医療・産業用にも期待される高機能ガンマ線検出で威力を発揮する希ガス液体 Time Projection Chamber (TPC)
- ・ 次世代の中性子実験、素粒子・原子核実験に有効な Micro Pattern Gas Detector (MPGD) による大面積イメージング装置
- ・ 超高感度測定で CMB や宇宙ニュートリノ崩壊、暗黒物質探索などの超高感度量子検出、テラヘルツイメージングなどを可能とする超伝導素子
- ・ 先端的測定器システムに必須となる、メカトロニクス、マイクロエレクトロニクス、低温などの基盤技術

これら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・システムとしてすでに国際的に高い評価を得ており、今後も将来の実験動向を見据えつつ、プログラムをタイムリーに編成しながら組織的に一層推進していく。

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、社会からも大きく期待されており、今後の KEK の研究活動における使命のひとつともなってきた。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 においてもそれに向けて一層の戦略的な展開と国際連携が必要である。

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る。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果たす。

また、加速器プロジェクトの大型化や応用面の広がりやを考慮すると、加速器科学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、人材育成の拠点となる。加速器科学に関連したスクールの実施や、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てることができる。KEKは基礎科学研究から応用への架け橋としての役割を積極的に果たすことで、社会還元に取り組む。

3. 5 5年研究戦略（2014-2018）

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複合研究施設である。KEKの研究は、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展開され、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。本ロードマップ期間においては、以下のように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目指す。すなわち、素粒子・原子核分野では、LHCやILCのような高エネルギーフロンティアを補完する大強度フロンティアをSuperKEKBと共に牽引する。物質・生命科学においては、中性子およびミュオンビームのビーム強度・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。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、さらに将来のアップグレードを検討する。

ニュートリノ実験施設

KEKにおける今後5年程度のニュートリノ研究は、T2K実験の遂行を柱とし、次世代ニュートリノ実験の実現に向けた具体的な研究計画を立案し、そのための準備研究を推進する。

T2K実験はミューニュートリノから電子ニュートリノへの変化（電子ニュートリノ出現）を世界に先駆けて発見するという大きな成果を上げた。今後は、MRの設計強度の早期達成を背景に測定精度の向上を目指す。目標とする標的照射陽子数（POT） $\sim 8 \times 10^{21}$ を早期に実現し、電子ニュートリノ出現確率の精密測定（ $< 10\%$ ）及び、ミューニュートリノ消失の精密測定による $\sin^2 2\theta_{23}$ （ $\sim 1\%$ ）、 Δm_{23} （ $\sim 3\%$ ）の高精度決定を目指す（括弧内は目標精度）。こうして得られるデータは、原子炉ニュートリノ実験や大気ニュートリノ観測などの結果と併せた解析により、物質優勢宇宙の謎に迫るニュートリノセクターのCP非保存や質量階層性について、重要な制限を与える可能性がある。

CP非対称性および階層性に決着を付けることを目的とした次世代長基線ニュートリノ振動実験では、スーパーカミオカンデを遥かに凌ぐ超大型高感度検出器と、1メガワット級の大強度ビームの長期安定供給が必須である。検出器は同時に核子崩壊の探索や宇宙ニュートリノの観測などにおいても重要な役割を果たすものであり、その案として超大型水チェレンコフ検出器ハイパーカミオカンデと液体アルゴン飛跡検出器の開発が進められてき

たが、現時点で技術的に最も成熟度が高いと考えられるのがハイパーカミオカンデである。KEK は東京大学宇宙線研究所などと協力して次世代長基線実験の具体化、特に実験成否の鍵を握る 1 メガワット級大強度ビームの実現を図る。またこの実験の測定感度を飛躍的に高めるためには設計強度を大幅に超えるさらなるビームの大強度化が必要となる可能性が高いため、加速器のアップグレードとニュートリノビームラインの性能向上のための研究開発を並行して進める。また将来有望な高性能ニュートリノ検出器の可能性として、液体アルゴン飛跡検出器の性能実証のための開発も継続する。

ハドロン実験施設

ハドロン実験施設においては、ストレンジネス核物理やハドロン物理などの強い相互作用に関する研究ならびにK中間子の稀崩壊の探索に代表されるフレーバー物理の研究を推進してきた。本ロードマップ期間内の優先課題は、これらの実験の成果を継続的に挙げつつ、新1次陽子ビームラインを建設し、核物質中の中間子質量の変化をはじめとする原子核・ハドロン物理実験及び μ 粒子電子転換現象の探索実験などを着実に進めることである。なお新1次陽子ビームラインの建設は、大阪大学核物理研究センターなどと連携して実施する。

さらに原子核・ハドロン物理やフレーバー物理に関わる重要な研究を多角的かつ並行して進めるために、それまでの成果を踏まえて、ハドロン実験施設の拡張およびこれまでの施設にはない性能を持つビームラインの増設を目指す。実験施設拡張に関しては、理化学研究所など、他機関と連携して実施することを模索する。これらの計画を実現することで、ハドロン実験施設は、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。

これらと並行して、遅い取り出しを用いる実験のフロンティアを目指して、加速器の増強を検討する。ビーム強度の増強と安定性の向上、さらに大強度の遅い取り出し利用時間の拡大を目指して、ストレッチャーリングの建設などの検討を進める。また、国際情勢を見ながら重イオン加速などの新しい可能性についても検討を進める。

物質生命科学実験施設（中性子実験施設）

世界最高のピーク強度を持つ J-PARC パルス中性子を用いた物質・生命科学研究の飛躍的発展を目指す。KEK が現在有する装置群は、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。特に、界面近傍の構造とダイナミクス、強相関電子系のダイナミクス、エネルギー変換物質科学、水素誘起物性、中性子基礎物理学などの研究を主体的に展開する。

「物質中の水素とスピン」の研究を推進するため、KEK および他大学・他機関の技術力を結集して、分解能・測定強度・試料環境の極限に加えて、スピン感度の極限を目指す基

盤技術開発を進める。並行して、偏極中性子の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度解析分光器、および中性子スピンの歳差運動の観測により精密な準弾性散乱を測定する中性子スピンエコー分光器などの装置を建設し、本格稼働させる。

物質生命科学研究施設（ミュオン実験施設 MUSE）

現在進行中の超低速ミュオン利用（Uライン）に加え、複数の分岐を持つSラインを整備することで特殊装置専用ビームラインによる高度な μ SR実験を実現し、今後5年間に「物質中の水素とスピン」を中心とした物質・材料などの研究を格段に進展させる。また、負ミュオン利用特性X線分析による考古学から生命科学までの幅広い応用研究を推進する。これらの研究を通じて利用者コミュニティの拡大と研究フロンティアの拡大を図る。こうした展開により、J-PARC MUSE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、ミュオン科学の国際的拠点となる。

さらに、Hライン基幹部の整備により、同じく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。

加速器の高度化

J-PARCにおいて、3GeVシンクロトロン（RCS）およびMRのビーム強度の増強は、今後5年間における最優先課題のひとつである。RCSおよびMRにおいて設計強度を実現するには、入射器であるリニアックの増強は必須であり、ビームエネルギーの181MeVから400MeVへの増強、ピーク電流の30mAから50mAへの増強を2013年度に実施する。その後は可能な限り早期に1メガワット（設計強度）のビームをRCSから物質生命科学研究施設へ供給する。一方、MRにおける今後5年の目標は、T2K実験には速い取り出しにより750キロワット（設計強度）、ハドロン実験施設には遅い取り出しにより100キロワット以上のビームを供給することである。この目標を達成するために、高繰り返しと高い安定性を持つ電磁石電源を実現する。並行して、ニュートリノ実験施設および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を遂行するために、J-PARC加速器のさらなる高度化を検討する。ニュートリノ実験については設計強度を大きく上回るビームの実現を目指し、ハドロン実験施設についてはビーム強度の増強はもとより利用時間の大幅な拡大も視野に入れて、加速器の次期計画を策定する。

3. 2 SuperKEKB/Belle II

SuperKEKBはKEKBのピークルミノシティを40倍にアップグレードし、Belle実験の約50倍のデータ（50 ab⁻¹）を蓄積する。これにより、標準理論を越える物理によるCP非保存など、B中間子、D中間子および τ 粒子の崩壊において量子効果による高いエネルギースケ

ールの新しい物理に起因する現象の発見が期待される。また、4個以上のクォークで作られる新粒子状態の解明が可能となる。

加速器は、これまでにない高いルミノシティを達成するため、衝突点における垂直ビームサイズを約50 nmに絞り込む「ナノビーム方式」に基づいて全面的に改造する（KEKBは約1 μ m）。さらに蓄積電流も2倍にするなど、最先端の加速器技術を駆使した挑戦的なアップグレードである。測定器も、電磁石内部の検出器およびデータ収集システムを全面的に高性能のものに取り換える。

2010年度より加速器および測定器の改造が始まり、ほぼ順調に進んでいる。2014年度末に加速器の運転を開始し、2016年度より物理データ収集を開始する予定である。運転開始後は、大電流および低エミッタンス極小衝突点ベータ関数による衝突実験性能を極限まで追求して4~5年でピークルミノシティ設計値を達成し、2022年頃に、目標データ量の達成を目指す。その過程において発生するであろうビーム物理上の新たな課題への取り組みと解決が加速器科学の発展を促す。Belle II実験は約20ヶ国にわたる約70の大学・機関からの400人を超える研究者からなる国際協力実験である。KEKは日本の大学の共同利用および世界中の研究者の拠点として重要な役割を果たしていく。

Belle II実験では、電子・陽電子衝突によるクリーンな環境のおかげで、幅広い新物理の探索が可能である。 $B \rightarrow l \nu$ 、 $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ 、 $B \rightarrow K^{(*)} \nu \nu$ などの測定は、電子・陽電子コライダーのBファクトリーのみで測定可能であり、荷電ヒッグスや新しい物理に感度があるため重点的に追究する。LHCでの新物理の探索やLHCbでB崩壊などの測定から得られる相補的な結果とともに、新物理の理解に重要な役割を果たす。数 ab^{-1} のデータ蓄積以降、新しい重要な結果が逐次得られると期待され、今後の進展が見込まれる格子QCD計算などの情報も最大限に組み合わせ、新物理発見の先陣を切ることを目指す。

3. 3 LHC/ATLAS

質量126 GeV付近にヒッグスと考えられる粒子を発見したLHCでは、今後衝突エネルギーを設計値まで上げて実験を進め、この粒子の性質の測定と、さらに高いエネルギー領域に標準理論を超える現象を探索することが極めて重要な課題である。2014年までの加速器補修の後、2015年からの数年間で新粒子探索を進めていく。KEKは、国内の大学とともに国際共同実験ATLAS実験を遂行し、これらの研究を推進する。

今後10年以上にわたってエネルギーフロンティアの研究を進める場がLHC以外にはないこと、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徐々に高いエネルギー領域の探査が可能になることを考慮すると、2020年代を通してLHCでの実験を継続すべくルミノシティ増強を行っていくことが、今後の高エネルギー物理学を進める上で重要な戦略である。このためには2020年代前半に加速器と測定器のアップグレードが必要になり、現行のLHCでの実験遂行と並行して、2015年頃からアップグレード部の建設に着手する。KEKは、これまでのLHC加速器建設とアトラス実験での実績をもとに、アップグレード部

のための研究開発を進め、国際協力で建設を積極的に推進する。加速器ではCERNと協議の上、衝突点近傍の超伝導磁石などの開発・製作を進める。測定器では高輝度に対応できる飛跡検出器やミュオントリガーなどの開発・建設に主導的役割を果たす。

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におけるヒッグスと考えられる新粒子の発見および今後期待される発見に基づき、重心系500GeV程度のエネルギー領域において、それらの新粒子・新現象についてレプトンコライダーの特長を活かした明解かつ精密な測定を行う。これにより、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。日本はILCの加速器および測定器の研究開発において既に重要な役割を果たしており、今後ILCの実現を図るための活動を一層強化することが求められる。KEKは、ILC国際共同設計チーム（ILC-GDE）との連携によって、ILC実現にむけた超伝導加速空洞および加速器関連技術開発を着実に推進するとともに、2012年には、必要な技術・予算・人員・建設期間を含む設計検討結果を、ILC技術設計書として完成させ、LHCでの新粒子発見に基づいた適切なエネルギー領域での加速器建設に向けた具体的な準備を進めている。LHC実験との相乗効果による物理成果を最大限に引き出すべく2020年代中のILC稼働を目標とする。KEKが中心となって、日本がホストするILC計画推進のための国際準備組織を立ち上げ、装置、施設・設備、研究所組織の詳細設計などに取り組み、本ロードマップ期間内（2014年からの5年間）の国際協力の枠組みによる建設着手を目指す。

3. 5 フォトンサイエンス（放射光科学）

KEKは、日本における放射光利用の中核的拠点として、放射光ユーザーコミュニティからの要望に応じていく。そのために、先端性と汎用性の両面を備えた3GeVクラスの蓄積リング型高輝度光源施設を建設・運営し、放射光科学の画期的進展を実現する。これにより、将来にわたって、世界の放射光科学の発展における先導的な役割を果たす。

PFおよびPF-ARでは、3GeVクラスの蓄積リング型高輝度光源施設が稼働するまで、日本の放射光利用の中核施設として役割を果たすべく、安定なユーザー運転を継続する。大学や他研究機関との強い連携に基づく先端的な共同研究を強く推進し、物質・生命科学研究における必須のツールである放射光を利用した広範囲の研究領域を支え続ける。特に、直線部増強計画において整備した挿入光源ビームラインでは、強相関固体物性研究、表面・界面物性研究、表面化学反応研究、ソフトマテリアル・機能性高分子材料研究、蛋白質構造解析による構造生物学研究などを強力に推進する。一方、PF-ARは、KEKBのアップグレードに合わせて設置した直接入射路を活用して、フルエネルギー入射による電子ビームの低エミッタンス化と6.5GeVのトップアップ運転によるビーム強度の安定化を実現する。

輝度向上と平均電流向上の相乗効果により、ビーム強度として 5 倍程度の増強が見込まれる。これにより、これまで実施が困難だった微小結晶試料の高圧 X 線回折測定や希薄試料の時間分解 X 線測定などの先端的な物質研究を行う。

KEK は、コンパクト-エネルギー回収型リニアック (c-ERL) を建設・運転することにより、将来の放射光源としての ERL の R&D に取り組み、ERL の実現可能性を探ってきた。しかし最近の加速器技術の進歩で、3GeV クラスの蓄積リング型高輝度光源により、ERL で期待されていた放射光科学への貢献の多くは、早期に実現が可能となることが分かってきた。そこで KEK は、将来の放射光源としての ERL 計画の検討を中止し、蓄積リング型高輝度光源の早期実現を目指すことを決定した。

3GeV クラスの蓄積リング型高輝度光源施設では、ナノメートルの空間分解能とミリ電子ボルトのエネルギー分解能を実現することにより、現状では研究が困難な不均一な物質系における構造・電子状態、さらには揺らぎを含めたダイナミクス・化学反応や細胞制御機構の解明などを目指した、新しい研究が可能になる。これらの研究を含む放射光科学を推進するために、大学や他放射光施設との連携を柱とし、コンソーシアムを創るなど、密接な共同研究を行う。このような共同研究の中で、人事交流を積極的に行いながら、手法開発や人材育成を行うことにより、最先端放射光科学を創出するとともに、放射光を利用した幅広い学術領域の研究を支え続ける。

これらの状況を鑑み、KEK は 2016 年度から蓄積リング型高輝度光源の詳細設計を開始し、早期の実現を図る。その先の長期計画に関しては、改めて検討する。

3. 6 加速器・測定器技術の新展開

KEK では主要プロジェクトと並行して、例えば、宇宙背景輻射の偏極観測や重力波観測のような、KEK 発のアイデアや技術を活かした研究を進めている。このような加速器科学に密接に関連する分野の研究は、科学的意義や KEK の特色を考慮した上で、関連するコミュニティおよび研究機関と連携して進める。

KEK で培われた加速器・測定器の技術・専門的知見を基礎として、産業利用・医療などを視野に入れて、加速器硼素中性子捕捉療法や、誘導加速シンクロトロン (デジタル加速器)、超伝導を利用した電子顕微鏡の開発、などを推進して社会へ還元する。特に医療分野では、診断・治療に有効な加速器・検出器・シミュレーションなどの技術開発を関連機関と協力しながら推進する。

従来の加速器・測定器の性能を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レーザー・プラズマなどを利用した新しい加速技術、ナノサイズビームやレーザーを使った量子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。

4. まとめ

KEKはこれまで、12GeV陽子シンクロトロン・放射光施設・TRISTAN・KEKB・J-PARCなどの加速器施設の建設・運転を通して、我が国の加速器科学の中核としての役割を果たしてきた。KEKBではB中間子におけるCP対称性の破れの研究により、小林・益川理論の実験的検証につなげるという世界的な成果を挙げる事ができた。

今後5年間も、現行計画の進展によって多くの成果が期待できる。日本原子力研究開発機構との共同プロジェクトであるJ-PARCを設計性能に到達させ、そこでの素粒子・原子核・物質・生命科学研究を進める。物質構造科学研究所では、高度化した複数の量子ビームを協奏的に利用できる複合量子ビームプラットフォームの国際拠点の形成を目指す。KEKBをさらに高度化したSuperKEKBの運転を開始し、新しい素粒子物理法則の証拠を探る。エネルギーフロンティアでは引き続き国際協力によるLHC実験を遂行する。フォトンサイエンス分野では、PFおよびPF-ARの安定な運転を続け、放射光科学の推進を継続するとともに、迅速に蓄積リング型高輝度光源施設の具体的計画を策定し、関係機関と連携しながら、早期の実現を図る。これらにより、日本全体の放射光科学の発展に対して先導的な役割を果たし続ける。

一方でこの5年間は、より長期の研究計画の準備のための重要な期間である。エネルギーフロンティアの分野では、LHCの実験が継続する2020年代中のリニアコライダの運転開始を目指し、加速器の技術開発と最終設計だけでなく、運営組織などについても具体的な提案を策定する必要がある。KEKが中心となって、日本がホストするILC計画推進のための国際準備組織を立ち上げ、詳細設計などに取り組み、本ロードマップ期間内（2014年からの5年間）に国際協力の枠組みによって建設に着手することを目指す。J-PARCでは、今後の大型ニュートリノ実験や、多彩な素粒子・原子核・物質・生命科学研究を進めるに、ユーザーの使える積分ビーム強度をさらに拡大していく必要があり、加速器増強や実験施設拡張の具体的計画を検討していく。

また、これら主要な研究プロジェクトとともに、KEKの持つ最先端技術を活かして、新しい加速器技術の開発、他分野との連携、医療などの応用研究への協力を推進する。

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。

高エネルギー加速器研究機構研究推進会議委員

(平成25年5月24日)

生出勝宣、大友季哉、岡田安弘（議長）、門野良典、河田洋、小関忠、小林隆、齊藤直人、堺井義秀、篠原新一、住吉孝行、清家孝行、千田俊哉（平成25年1月より）、田中万博、峠暢一、徳宿克夫、野崎光昭、野村昌治、橋本省二、幅淳二、伴秀一、古川和朗、村上洋一、山内正則、山田和芳、山本明、若槻壮市（平成24年12月まで）

(一部改訂 平成28年6月30日)

赤井和憲、足立伸一、磯暁、大友季哉、岡田安弘（議長）、荻津透、門野良典、金子敏明、神谷幸秀、河田洋、小関忠、小林茂、小林隆、小林幸則、小松原健、齊藤直人、堺井義秀、佐々木慎一、瀬戸秀紀、千田俊哉、竹内大二、田中万博、徳宿克夫、野村昌治、幅淳二、花垣和則、道園真一郎、三原智、三宅康博、宮武宇也、村上洋一、山口誠哉、山田和芳