

KEK ロードマップ (5 カ年計画)

＜Super-KEKB に関する記述を本文の後に補足 1 として付記する＞ (2010-04-30)

1 概要

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) ではまもなく J-PARC が完成し、大強度陽子ビームを利用した新しい時代の素粒子・原子核の研究、および中性子・ミュオンによる物質生命科学の研究が始まろうとしている。また、KEKB の積分ルミノシティはまもなく当面の目標 ($1ab^{-1}$) を達成しようとしている。海外では今後の素粒子物理の方向性を大きく左右する LHC の稼働が目前に迫り、一方では国際協力で進めている ILC の開発も工業化を視野に入れた新たな段階に入ろうとしている。放射光を利用した研究分野では、全世界的にその中心が第二世代光源から第三世代光源を用いたものに移行しつつあり、さらに次世代の光源の建設計画も検討されている。

このような大きな転換期を迎えるにあたり、今後の KEK における研究計画を策定することは我が国の加速器科学にとって緊急の課題である。この目的で KEK では 2010 年代の研究を展望しつつ、今後 5 年間 (2009-2013 年) の具体的なロードマップを策定するためのタスクフォース (メンバーをこの文書の最後に記載) を立ち上げ、検討を進めてきた。

このロードマップ策定にあたっては、次の点が考慮された；

- 将来にわたって継続して世界トップレベルの研究成果をあげ続けられる計画であること。このために各研究分野の研究動向を踏まえて、時期を逸することなく国際競争力のある加速器施設の充実を図ることが必要である。
- 大学共同利用機関として国内コミュニティのニーズに応え、コミュニティから提案されている将来計画案の実現を目指すこと。そのために高エネルギー物理学研究者会議の提言 [素粒子物理学の展望] (2006 年 10 月) 及び放射光学会・先端的リング型光源計画特別委員会 (2005 年度) における答申などを関係分野

動向の指針とした。

これらの観点を踏まえて検討の結果、タスクフォースは当面の KEK の最優先課題である J-PARC の計画通りの完成・運転、および放射光施設の運転の継続を前提とし、また、エネルギーフロンティアの物理が最重要であるとする高エネルギー物理学コミュニティの方針も踏まえて、以下の5項目を柱とするロードマップを策定した。個々の計画については第3章で詳述する。

- I. J-PARC の運転に加えて、主リング (MR) の改造により陽子ビームの強度増強を図る。
- II. KEKB 加速器の増強により 10 倍以上のルミノシティを実現し、測定器 (Belle) にも改良を施したうえで B ファクトリー実験をさらに推進する。
- III. 以下に述べる ERL の完成までは、広範な分野をカバーするユーザーコミュニティの需要に応えるため、現在稼働中の PF/PF-AR を維持・改良して運転を継続する。
- IV. CERN で稼働開始が予定されている LHC における研究を推進する。
- V. 次の項目に関して先端加速器および測定器の技術開発を推進する。
 - V-1 次世代放射光源である ERL の実現のためにコンパクト ERL を建設し、ERL の要素技術を確認する。またコンパクト ERL をテラヘルツ光源として用いた物質・生命研究を推進する。
 - V-2 ILC 加速器に関連した技術開発を推進する。特に超伝導加速システム技術の確立・工業化と超低エミッタンスビームの制御技術の確立を目指す。
 - V-3 最先端の研究に不可欠な先端的測定技術の革新・開発を推進する。

このロードマップに沿って研究を展開し、施設の充実を図ることによって、KEK は 2010 年代においても世界トップレベルの加速器科学研究所として、多彩な成果を出し続けることができる。

本ロードマップは、今後 5 年間の実行計画を示したものであり、その後の方針は、研究成果の評価、関連学問分野の進展、財政状況などによって、当然適切に見直されるものである。従って高エネルギー物理学の分野で、例えば ILC 計画などの将来計画に大きな進展があれば、関連研究体制を速やかにそれにむけて移行させることも想定される。日本原子力研究開発機構 (JAEA) との共同事業であり、現在順調に建設の進む J-PARC の完成とそこにおける多様な研究の開始は KEK の当面の最重要課題である

が、ここにおいても、関係コミュニティと協議の上、その研究成果を踏まえて、このロードマップに必要な改定が加えられるべきである。

2 素粒子物理学、原子核物理学、物質生命科学の展望

序： 加速器科学の展望

17 世紀に発明された顕微鏡や望遠鏡は生命と宇宙の神秘を解明する上で、大きな革命をもたらした。さらに、20 世紀に入ると、レントゲン写真、電子顕微鏡、高エネルギー加速器、放射光、中性子ビーム、ミュオンビームといった量子ビームの生成・利用技術が飛躍的に進み、新たな学問領域が創成された。さらにこれらの産業利用も急速に展開することとなった。

20 世紀後半には、高エネルギー加速器が著しく進歩し、次々と新しい素粒子や新しい法則が発見されて、それらの研究成果は素粒子の「標準模型」という形に結実した。物質・生命科学においては、放射光によって従来の顕微鏡では見ることの出来なかったタンパク質や新材料の構造が明らかにされ、物質構造や生命現象の理解が飛躍的に進展した。放射光という大強度・高品質光源は、産業の発展にとっても不可欠な研究手段となり、陽子や重粒子ビームはがん治療に活躍している。最新鋭の加速器技術、測定器技術によって牽引されてきた加速器科学は、今後もその研究領域をさらに拡大し、人類の自然の理解に大きく貢献するのみならず、我々の暮らしを大きく変貌させ、豊かなものにしていくであろう。

KEK においては、J-PARC の前身にあたる 12GeV 陽子シンクロトロンが平成 17 年度末にその運転を停止するまで、ハドロン実験、ニュートリノ振動実験、中性子やミュオンビームによる物質構造の研究など様々な成果を上げてきた。また、KEKB の前身であるトリスタンは超伝導加速空洞を世界で初めて大規模に実用化することによって、当時としては世界最高の衝突エネルギーを実現した。現在では素粒子研究用の衝突型加速器 (KEKB)、放射光リング (PF/PF-AR)、多様な 2 次ビームを創り出す大強度陽子加速器 (J-PARC、建設中) を有し、素粒子・原子核物理学から物質・生命科学までを展開することのできる世界でもユニークな「総合加速器科学研究所」である。今後とも引き続き、世界最高性能の加速器を開発・建設し、世界中の加速器科学の研究者に最先端の研究の場を提供していくことは KEK の責務である。KEK は、これまでに数々の先端加速器を開発・建設・運転してきた実績を有しており、関連コミュニティは、

KEK が幅広い研究分野にわたる加速器科学の国際研究拠点として更に発展することを熱望している。本ロードマップは、この目標を達成するための5ヶ年計画を策定するものである。

2-1 素粒子物理学の展望

人類は、粒子加速器を用いた研究などによって物質を構成する素粒子の様々な性質を明らかにし、重力を含む自然の基礎法則の解明、ひいては宇宙の成り立ちの理解までも視野に入れつつある。近年では時間・空間の概念の変革をせまる新しい物理法則、概念が提案され、素粒子の理解が新しい段階に入ろうとしている。このような研究の展開において、TeV（テラ電子ボルト：1兆電子ボルト）のエネルギースケールの研究は新しい時代の幕開けに本質的であると考えられており、手が届きつつあるこの研究に大きな期待が寄せられている。ここにおける新しい物理法則の発見によって、力の統一、ニュートリノの質量の起源、宇宙のバリオン数生成、暗黒物質の正体など、今日の素粒子・宇宙物理学における大問題の解明に大きな進展があると期待されている。

新現象の発見を含む新しいエネルギー領域の研究に先鞭をつけるべく CERN（欧州原子核研究機構）で建設されているのが LHC（Large Hadron Collider:大型ハドロンコライダー）である。これからの素粒子物理学においては、この LHC をはじめとする最高エネルギー実験：エネルギーフロンティア実験によって新粒子や新現象を直接測定し、そこに横たわる基本法則を解明することが最も重要である。特に、長年の懸案であったヒッグス粒子の直接生成と精密測定によっ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は今後の素粒子の研究にとって本質的である。KEK を含む日本の研究者は LHC 加速器の超伝導収束電磁石の開発・建設及び ATLAS 実験を通して LHC に積極的に参加し、新しい時代の幕開けに大きな役割を果たすための努力を続けている。

また、LHC で発見が期待されるヒッグス粒子や超対称性粒子の性質の詳細な理解、さらには、新しい物理法則の解明を進めるためには、1 TeV 程度までのエネルギーをカバーする電子・陽電子リニアコライダーの実現が不可欠であることが世界的な共通認識になっている。このために世界規模の加速器開発を目的とした GDE (Global Design Effort: リニアコライダーの国際設計チーム) が組織され、国際リニアコライダー (ILC: International Linear Collider) の実現に向けての国際協力が続けられ

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、この活動は今後一層推進されることが必要である。

一方、新しい物理法則にとって、その基本的対称性や新しく発見される粒子の混合現象などは、きわめて重要な側面であるが、エネルギーフロンティアの加速器だけでは解明しきれない。これらの理解を進め、新しい物理法則の全容解明を行うのに大きな役割を果たすのがフレーバー物理と呼ばれるレプトンやクォークの研究である。日本はこれまでBファクトリー(KEKB)やニュートリノ実験によってこの分野において中心的な役割を果たしてきた。現在、KEKBは世界最高のルミノシティ(ルミノシティ：衝突型加速器の性能を表す重要なパラメータのひとつ、粒子の衝突頻度はルミノシティに比例)を誇っている。Belle実験は、これにより初めて可能になる極めて精度の高い解析によって、B中間子におけるCP対称性の破れを発見したほか、標準理論の重要な構成要素である小林・益川理論を証明するなど、標準理論の確立に大きな役割を果たしてきた。

新しい物理法則がTeVのエネルギースケールに存在すれば、B中間子、D中間子、 τ レプトンなどの崩壊現象に影響を与え、標準理論の予言からはずれた現象が現れると考えられる。これまでのBelle実験では様々なB中間子崩壊モードにおけるCPの破れや稀崩壊過程を発見してきたが、その測定精度は、新しい物理法則の効果を探るためにはまだ十分ではない。現在のKEKBのルミノシティを10倍以上にすることによって、B中間子、D中間子、 τ レプトンのフレーバー物理は精密測定領域に入る。そこでは、多くの精密に決定された測定量を組み合わせることによって新しい物理の影響が見える可能性が格段に向上し、さらには様々な物理モデルを区別することも可能になる。したがってこのような高度化したBファクトリーにおける詳細測定は新しい物理法則におけるCP非保存や新粒子の混合という基本的な問題を調べる絶好の機会となる。もしLHCで新しい物理が見つからなかった場合でも、KEKBでは高次効果の影響を精密に測定することによって、現在、構想されているエネルギーフロンティア実験では到達できない高いエネルギー領域の物理現象を発見する数少ない可能性を提供する。

スーパーカミオカンデによるニュートリノの有限質量の発見や、引き続いて行われたKamLANDやK2K実験などによって、これまで謎に包まれていたニュートリノの世界が次第に明らかになってきた。この研究はエネルギーフロンティアとは異なる側面、すなわち世代とその間の関係という、古くて未解明の物理の解明に重要な役割を果た

すものとして世界的にも高く注目されている。J-PARCにおいては、T2K 実験準備が進み、高強度ニュートリノビームを約 300km 離れたスーパーカミオカンデに打ち込み、フレーバーの転換である ν_μ から ν_e の出現過程を世界で初めて捉えること、およびこの測定からこれまで上限値しか与えられていない未測定の混合角 θ_{13} の測定がなされることに期待が集まっている。さらには、 ν_μ から ν_e の出現過程の研究はレプトンにおける CP 対称性の破れの探索の道を開くものである。ニュートリノの分野には、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提案されており、世界的に激しい競争が起こりつつある。従って、国内の研究を強力に推進することは今後特に重要である。

J-PARC においては、ニュートリノ以外にも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提案されている。現在検討されているのは K^0 稀崩壊実験、T 対称性の破れの探索、 μ 粒子から電子への転換の探索などであるが、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、発見されれば新しい物理の流れを作り出すようなインパクトをもつ研究計画である。中性子などの電気双極モーメントの測定なども含めて、J-PARC の特質を生かした研究として推進されることが期待される。

以上に述べたように、日本の高エネルギー物理学の研究活動は実に多彩であり、世界的な激しい競争の中で新しい物理法則の発見、全容解明において主導的な役割を果たそうとするものである。このロードマップは高エネルギー物理学研究者会議における協議の結果を実現し、多彩な成果を挙げ続けるために策定されたものである。

2-2 原子核物理学の展望

今日の原子核物理学のフロンティアは、強い相互作用による量子多体系の極限状態の研究である。例えば、クォーク・グルーオンの高温・高密度における振る舞い、ストレンジネスを持つ核子系の振る舞い、中性子を過剰に含む系の振る舞いなどがそれにあたる。これらは、ビッグバン以来の宇宙の進化にも密接な関係を持つ。この量子多体系の理解には、エネルギースケールの違いなどにより、量子色力学 (QCD) に基づくクォークとグルーオンを基本粒子とした理解と、ハドロンを基本粒子とした理解がある。すなわち、原子核は、そのおかれたエネルギーなどの環境により全く違う様相を示す。このため、広い対象に対する網羅的な研究と集中的に掘り下げる研究の両方が必要になり、世界の様々な実験施設を用いて実験と理論研究が幅広く行われている。中でも、世界トップレベルのビーム強度を擁する J-PARC では、幅広いユニークな研

究が展開されると期待されている。

高純度の K 中間子ビームにより創り出されるストレンジネス核の研究は、特に J-PARC 運転の初期段階から可能な実験として採択されており、多彩なデータを提供することが確実である。そうしたデータからハイペロン・核子の相互作用、ハイペロン・ハイペロンの相互作用がさらに高精度で測定されることが期待される。理論的には、量子色力学に基づく数値シミュレーションにより、核力の性質やハイペロンの相互作用を理解することが可能となってきた。また、K 中間子を埋め込むことで、より強く結合した高い核子密度状態が実現される可能性が示され、そうした高密度が実現されていると考えられる中性子星の形成についても理解の進展が期待できる。

原子核内では、カイラル対称性の部分的回復により、ハドロンの質量が真空中よりも小さくなると理論的に予想されている。原子核内でのハドロンの質量の測定も J-PARC での興味ある研究テーマの一つである。

陽子のスピンを理解するには、陽子中のクォークのスピンのみでなく、グルーオンのスピンや軌道角運動量の寄与、さらにストレンジ・クォークの寄与も考慮する必要がある。J-PARC で偏極ビーム加速が実現すれば、この課題の解決に大きく貢献するものと期待される。また、ニュートリノと核子散乱の研究もこの課題を理解に手がかりを与える可能性がある。

近年、伝統的な描像では理解できないハドロンの状態が次々と発見され、ハドロンスペクトロスコーピーは新しい展開を迎えている。J-PARC では、これまでに知られているメソンやバリオンとは異なるクォーク・グルーオンの結合状態の探索についても大きな進展が期待される。

このように、原子核を構成する物質の形成を理解する上で要となる強い相互作用を中心とする研究は、世界トップレベルのビーム強度の実現を目指す J-PARC で大きく展開することが期待されている。J-PARC を最大限に利用し、これらの多彩な研究を展開していくには、現在建設が進んでいる実験施設を超える施設が必須である。一方で、J-PARC は JAEA との共同プロジェクトであり、また今後の展開を展望したグランドデザインの策定が進行中であるので、このロードマップには含めないが、J-PARC を最大限に利用して物理成果を生み出すことは KEK にとって重要である。

2-3 物質・生命科学の展望

現代の物質・生命科学は、人類共通の知的財産として重要であるばかりではなく、日常生活を豊かにする基礎から応用にわたる研究として認識され、多くの研究者の活動によって強力に展開されている。基礎から産業化までと研究領域は極めて広汎であるが、要約すると、「ミクロ領域での分子構造、分子配列や電子構造がどのようにマクロな世界の物性を支配するかを明らかにすること」であると言える。

これらの研究のために、KEKでは加速器をベースとした放射光・中性子・ミュオン・低速陽電子というそれぞれに特徴ある量子ビームを駆使し、物性科学・化学・材料科学・環境科学・生物学・惑星科学・医学・薬学などの研究領域において、4,000人を超えるユーザーに支えられて基礎から応用にわたる研究を幅広く展開してきた。例えば、高温超伝導体や巨大磁気抵抗を示す物質等については、放射光、中性子、ミュオンを用いて、電荷秩序・軌道秩序・フェルミ面を含む電子状態の研究、磁気状態の研究、電子-格子相互作用の研究が推進され、物質の性質の発現機構が論じられている。また、磁気記録材料、燃料電池、触媒や環境試料、タンパク質等において構造・電子状態から機能発現機構を解明する研究も活発に進められている。

さらに今後は、物質・生命の機能そのものを直接的に解明するためのダイナミクス研究への展開、また、界面やナノ構造における局所領域の機能を直接解明する研究が重要になる。このためには、物質構造科学研究所の放射光・中性子・ミュオン・低速陽電子を用いた設備の絶え間ない改善が必須である。同時に、時期を逸さない飛躍を常に念頭に置くことが肝要である。

放射光に関しては、前述の将来像に向けて、より広範で新しい物質・生命科学研究を担うために、機能の発現過程を直接測定する超短パルスおよび局所構造を特定するための超高輝度を有する新しい放射光源が不可欠である。KEKでは「先端的リング型光源」として5GeVクラスのエネルギー回収型ライナック（Energy Recovery Linac、ERL）を提案している。その実現により、サブミクロンサイズのタンパク質結晶の構造解析、コヒーレント回折顕微鏡による細胞中のタンパク質機能解明など、生命科学の分野で新たな情報を引き出すことが期待される。物質科学においては機能性素子、高速スイッチング素子という産業界からの期待も含めて、超短パルス光を用いた「スピンドイナミクス、光誘起相転移現象」等の解明、ナノビームを用いた量子ドット、ナノ細線等の局所電子状態の解明といった機能性物質の解明が可能となる。また基礎科学分野においては、たとえば惑星内部のように超高圧・超高温という極端環境下に

おける研究の発展が期待される。なお、日本放射光学会の「先端的リング型光源計画特別委員会」（2005 年度）において、ERL が先端的リング型光源として最有力の候補であるとの結論を得ている。

中性子、ミュオンに関しては、現在建設が進められている J-PARC により、旧 KEK-PS の数 100 倍の大強度ビームが実現する。中性子ビームを用いた実験研究では、世界最高の運動量・エネルギー分解能をもつ実験装置を用いて、物質のバルク及び局所領域構造、磁気状態、フォノン状態を観測し、物質機能の発現機構解明に新展開をもたらす。例えば、超伝導物質、マルチフェロイック物質やフラーレン化合物等の機能発現に伴う原子・分子構造変化並びにダイナミクス変化が、この飛躍により明瞭に解明できる。また、ハイブリッド材料、超分子、医薬、階層構造をもつ物質、界面、水素吸蔵物質等の興味深い物質群の機能解明に大きな貢献が期待される。

ミュオンビームを用いた実験研究では、世界最大のパルス強度をもつ表面・崩壊ミュオン実験装置を用いて、磁性や超伝導、半導体等における局所的電子状態を探る研究が大きく進展する。例えば、超伝導物質開発の鍵のひとつである超伝導電流の渦系の内部構造を明確に捕らえることが期待されている。また、負ミュオンを用いたミュオニック原子、ミュオニック分子の化学反応、ミュオン触媒核融合等の研究が進展する。さらに、物質科学のみならずエネルギー問題の解決に向けた新提案を提示することもこの研究により可能となる。

このような研究を J-PARC の性能を十分に発揮して行うためには、中性子やミュオンの先鋭的な実験装置を早期に整備することがきわめて重要である。現有の放射光施設と併せて J-PARC を本格利用することにより、放射光、中性子、ミュオンの量子ビームを使った研究のシナジー効果が顕著に現れてくることは明らかで、物質・生命分野での大きな研究発展が期待される。

3 ロードマップで策定された研究計画

3-1 J-PARC の運転および MR の陽子ビーム増強計画

J-PARC の運転を予定通り開始・継続することの重要性はあらためて述べるまでもないが、ここでの素粒子・原子核実験にとって、MR のビーム強度の増強は、研究の進展に不可欠であり、あらゆる方法でこれを追求すべきである。特に、現在未知であり、3

世代間の混合が起こっていることを表すニュートリノ混合角 θ_{13} を世界に先駆け発見する。これは宇宙創成の謎を解く鍵のひとつであると考えられているレプトン過程における CP 非対称性の探索の道を開くものであり、ニュートリノビーム強度が重要な鍵を握る。また、ハドロン実験においても、K 中間子などの 2 次ビームの強度増強と安定な供給は研究成果達成には欠くことができない。

現在建設・整備されている J-PARC 加速器施設・設備の大きな変更無しに実現できる性能改善として、J-PARC-MR のビーム加速周期の変更等が考えられる。具体的には、加速器からの陽子ビーム強度を、現在想定されている (LINAC の 400MeV 回復前の) 0.36MW から 1.7MW 程度まで増強し、それによってニュートリノビーム、ハドロンビームの性能向上を行う。

陽子ビームの大強度化は、主リングの高周波システムと電磁石電源の増強により実現する。ニュートリノビームラインの各装置(ビーム窓、標的、ホーン)は、強度増強後のパワー1.7MW 程度までは現在建設中の機器のまま対応が可能である。一方、ハドロンビームラインの各装置も同様にビーム強度増強に対応が可能である。

3-2 Bファクトリーの高度化

現在、KEKB は世界最高のルミノシティを誇っている。これまでの 8 年間に及ぶ研究において、B 中間子が $J/\psi K_S$ に崩壊する際の CP 非対称性などはすでに精密科学の領域に達しており、小林・益川模型を証明することに成功した。この B ファクトリーをさらに高度化し、ルミノシティを大幅に改善させることによって、B 中間子のほかの崩壊や D 中間子振動、 τ の崩壊などにおいても測定の精密化が可能となる。現在までに B 中間子が ϕK_S に壊れる際の CP 非保存など、新しい物理の関与を示唆する結果がいくつか得られているが、これに明確な結論を得るためには 10 ab^{-1} 以上の積分ルミノシティに基づく詳細な解析を行うことがその唯一の方法である。また、Belle 実験では 4 つのクォークからなると考えられる新しい種類の共鳴状態が発見されているが、 10 ab^{-1} のデータの蓄積によってこのような多クォーク状態の解明も可能となる。このロードマップに述べる計画はこれらの目的で 10 ab^{-1} のデータ蓄積を目標として加速器・測定器の高度化を図るものであるが、それが達成された時点で、LHC の研究結果や ILC など他の研究計画の進捗状況などを勘案して再度検討を行い、さらなる高度化を進める可能性を残した改造計画とする。

このために、本ロードマップが範囲とする 5 年間において、最初の 3 年間は運転を

休止し、加速器、測定器の基本的部分の改造を行う。さらにその後の2年間で運転・実験を行いながら高周波加速システムなどの増強を行い、この期間で 2×10^{35} ($/\text{cm}^2/\text{秒}$) を越えるルミノシティの達成を目指す。また、前述の 10 ab^{-1} のデータを収集するためにこの5年間の範囲を越えて、さらに数年間にわたってRFを増強しながら運転を続けることが必要である。

最初の3年間の運転休止期間に行う改造は以下の5点である。

- ビームパイプの交換
- 衝突点の改良
- 地上部RF設備の更新
- クラブ交差の改善
- Belle 測定器の改良

また、3年後に運転を開始した後には以下の3点において増強を図りつつ運転を行う。

- ダンピングリングの設置
- RF 加速システムの増強
- 冷却設備の増強

以下にこれらの概要について述べる。ルミノシティの増強のためにビーム電流を増加させることが必要であるが、そのためにビームパイプを、大強度シンクロトロン光と高次モード放射に耐え、かつ、電子雲の発生も抑制する新設計のものと交換する。あわせてビームパイプに付属する超高真空排気装置やビーム位置検出器などの周辺装置も同時に更新する。この交換による直接的なルミノシティ増加は1.5倍程度であるが、この改造は短バンチ化とその後の電流増加を可能にする前提条件として必要である。

さらに、衝突点付近のビーム光学系を改造することによって、より強いビーム収束を実現し、約2倍のルミノシティ増加を達成する。また、上に述べたように電流増加のための高周波加速装置は運転を開始した後に漸次増強するが、それを可能にするために地上設備の再配置と最小限の大電流対応加速ユニットの設置は休止期間に行う。

ルミノシティ増大のもう一つの鍵は、「クラブ交差」という、衝突点でのビーム交差角を維持しながら実質的な正面衝突を実現する方法である。クラブ交差は現在の

KEKBで試験が行なわれており、改造のための運転休止までに、現在のルミノシティの1.5-2倍の増加が見込まれている。改造後は衝突条件の改善によりさらに2倍のルミノシティ増加を目指す。

3年間の運転休止期間に以上の改造を行った後に、KEKBの運転を再開する。加速器の運転と並行して、大電流化を図るためにダンピングリングの設置による入射器の改良、高周波加速システムの増強、大電流に伴う発熱に対する冷却設備の強化、受電設備や空調装置等の更新などを漸次行い、更なるルミノシティの増加を図る。これらによって本ロードマップの期間において 2×10^{35} (/cm²/秒)を越えるルミノシティの達成が可能となり、さらに数年間程度運転を継続することによって目標とする 10 ab^{-1} のデータ蓄積が可能になる。

ルミノシティを増強したKEKBで実験を行うためには、B中間子などの崩壊を測定する測定器システムに関しても様々な改良が必要である。最も重要なのは、かつてない大電流と超高ルミノシティがもたらす高計数環境で安定に動作し、かつ高い性能を発揮できることである。加えて超高ルミノシティによってもたらされる超稀少現象を見逃さないために、優れた粒子識別能力と、ニュートリノの発生も見逃さない完全な崩壊事象の再構成能力が求められる。また、超高ルミノシティがもたらす、莫大なデータを処理するためのデータ収集・解析能力も重要な鍵である。これらの要求を満たすために現在のBelle測定器を改造するにあたって以下の技術が鍵となる。

- 測定要素の細密化：細密ピクセル検出器の採用などによる空間次元の細分化と、高速サンプリング回路による時間次元における高密度化を同時に実現する。
- ピコ秒の精度で光子を捕らえる新世代光センサーを用いて、高精度チェレンコフ型粒子識別装置を実現する。
- 超高速ネットワークをバックボーンとしたデータ収集装置と大容量データ処理システムを実現する。

このような測定器を建設するためにはいくつかの項目において研究開発が必要である。今後は世界中から研究者を募って新しい国際共同研究チームを組織する予定であり、現段階でこのチームには20ヶ国程度から600人以上の研究者が参加することが見込まれている。

3-3 PF/PF-ARの運転継続とアップグレード

現在稼働中の放射光施設、PF および PF-AR では、現在 3,000 名を超えるユーザーが広汎な研究分野で研究を展開している。5 GeV クラスの ERL が稼働するまでは、これらのコミュニティの要求に応え、放射光科学をリードしていくことが共同利用機関の使命である。直線部増強などで向上した加速器の性能をフルに生かすべく、今後もビームラインや実験装置の増強等のアップグレードを行い、基盤施設としての競争力を保つ。

3-4 LHC 実験の推進

LHC 加速器は、CERN 加盟国(欧州 20 ヶ国)と日本、米国、カナダ、ロシアなどの非加盟国による国際協力により建設が進められている。LHC では2つのエネルギーフロンティア実験装置の建設が進められているが、日本グループそのうちのアトラス実験グループにその創設期より参加している。アトラス実験装置は重量 7000 トンの巨大な装置で、35 ヶ国約 1600 名の研究者が参加している。その中で日本グループは KEK・東京大・神戸大など 15 機関から約 60 名の研究者が参加し、装置の建設や解析準備を行ってきた。KEK は実験装置建設に重要な役割を果たし、主にミュオントリガー装置、シリコン検出器、超伝導ソレノイド装置の建設、および物理解析準備を行ってきた。建設に 13 年を要したが、LHC 加速器が完成する 2008 年夏から物理実験が開始される予定である。今後 KEK は大学共同利用機関として参加機関の中心としての機能を果たしつつ、日本グループが建設した装置の維持運転、および物理解析で主導的役割を進める。

3-5 先端加速器、および測定器技術の開発

3-5-1 ERL の開発計画

次期の放射光源は、物質機能の直接測定を可能とする超短パルス性および局所構造を特定するための超高輝度性を有し、かつ広範な物質・生命科学の研究を担うなど、研究の多様性に対応できる必要がある。この特徴を兼ね備えている設備として 5 GeV クラスの ERL が次期放射光光源として有望な候補である。ただし、このような ERL は未だ世界には存在せず、定常的に安定な放射光を多くのユーザーに提供するためには、今後 ERL における電子ビーム力学的研究、および加速器の要素技術開発が必要である。これらの技術的課題を克服するために、第 1 段階として 60MeV 程度のビームエネルギーをもつコンパクト ERL を建設することが適当である。

このコンパクト ERL で得られる放射光は高輝度・短パルス性(0.1 ピコ秒)・高繰り返し性(1.3GHz)を兼ね備えている。この光源から発生される THz 領域の放射光は

従来の光源と比較して7~8桁ほど高い強度を持つコヒーレント放射光(CSR)であり、格子振動や分子振動、伝導キャリアのプラズマ振動数、相互作用の強い系の準粒子など、物質科学の根本に関わる素励起の研究に重要な役割を果たす。さらに、この THz 光源は単なるプローブ光源としてだけでなく、その大強度、短パルス性から励起光源としても期待されている。

また、コンパクト ERL は超伝導加速空洞を用いることから、通常の常伝導加速空洞で問題となる発熱が極めて少なく、電子バンチを高い繰り返し頻度で加速することが可能である。その結果、レーザー逆コンプトン散乱を利用した微小光源によるX線イメージング装置、および超高速現象を描画するフェムト秒X線パルス光源としての期待が高まっている。特に、X線イメージング装置に関して、従来大型放射光施設でのみ可能であった詳細なX線屈折画像診断がコンパクトなシステムでも実行できるようになるという波及効果を有している。

具体的な計画として、この5年間(2009年から2013年)で、加速器の要素技術開発を進め、東カウタホールを再利用してコンパクト ERL (60MeV, 10mA 以上) を建設する。要素技術としては、超伝導空洞入力カプラー、電子銃、ドライブレザー、ビーム精密制御などがあげられる。コンパクト ERL 建設に基づいて、5 GeV クラス ERL 建設のための R&D を本格的に開始し、2013 年頃から実機の建設を目指す。この計画は、JAEA、東大物性研、SPring-8、分子研、産総研、広大などを含む all Japan の計画として推進している。さらに、Cornell 大、Argonne-APS などとの国際協力のもとに推進する。

3-5-2 ILC の開発計画

ILC の開発は、世界的合意に基づいて組織された国際開発チームである GDE を中心に進められている。KEK はその主要な研究機関のひとつとして国内大学の活動もとりまとめつつ GDE の活動に参加し、ILC の研究開発を推進している。2007 年夏に ILC の基本設計書(Reference Design Report: RDR)が完成し、GDE の活動は工学設計と技術の工業化(産業界への技術移転)の段階に入った。2010 年を目途に工学設計書(Engineering Design Report: EDR)を完成させる予定である。技術的観点から最も早い建設開始は 2012 年頃と考えられるが、その場合でも主要コンポーネントの製造開始はその数年後になることから、本 5 カ年計画は ILC のための工業技術確立の時期と一致する。この期間の研究開発は、以下の 3 項目が柱となる；

A) 現在も進行中の研究開発の継続

- B) 工学設計
- C) 技術の工業化

A) は超伝導加速空洞の加速勾配の達成、減衰リングにおけるビーム不安定性など、まだ設計仕様を満たしていない課題の解決を目指すものである。

B) は RDR の概念設計から出発して、工業設計を行うものである。

C) は、現在主に研究所レベルで行われているコンポーネント製造技術を企業に移転し、かつ大量生産に向けた製作方法を確立することであり、アジア・北米・ヨーロッパの 3 地域で推進するものである。

ILC に必要な新しい技術は

- ・ 超伝導加速に関連した技術
- ・ ビームの精密制御に関連した技術

に大別できる。KEK では、前者は STF (Superconducting RF Test Facility:超伝導 RF 試験施設)、後者は ATF/ATF2 (Accelerator Test Facility:加速器試験施設) を利用して開発を進める。

ATF は活動開始からすでに 10 年以上を経てその成果が国際的に認められているが、今後、低エミッタンスのためのチューニング技術の確立、Fast Ion Instability などのビーム不安定性の研究、取出しキッカーの開発、レーザーワイヤーなどの診断機器の開発等の研究開発項目を残している。さらに ATF 取出しラインを延長し、ILC の最終収束系 (Beam Delivery System, BDS) の雛形として ATF2 の建設を進めており、2008 年秋には運転を開始する。この運転は ILC の BDS 建設開始まで継続して、ILC の設計改善に資する。

STF1 は、ILC で計画されている L-band 超伝導加速装置のプロトタイプを製作し、超伝導加速技術の経験を積むことを目的としている。2 台のクライオスタットに総数 8 台の空洞を格納し、運転を行う。現在組立・試験が進行中で、2008 年度までに完了する。

引続き、STF2 では ILC の設計に近い構造をもつ 1 加速ユニット (空洞 8 ないし 9 台を格納するクライオスタット 3 台、それを駆動する 10MW クライストロン、試験に必要な電子ビーム源を含む) を製作して日本の技術力を高め、全体の設計の整合性を確認する。本 5 カ年計画の初期に建設する。

これらに並行して高加速勾配空洞の開発も進める。ILC の設計では、予備試験段階で 35MV/m 以上、クライオスタット内に設置後の平均加速勾配 31.5MV/m、とされている。本 5 カ年計画の初期の段階で、20 台以上の多数の空洞を製作し、同じ表面処理方法による高い歩留りを保証する技術を確立する。

STF2 に続き STF3 を建設する。STF3 の目的は、企業に対して加速器コンポーネント生産の技術移転を行い、企業による製造技術・工程を確立・実証することにある。超伝導空洞など鍵となるコンポーネントの製造には実機の大量生産方式に近い製造設備を用いる。ILC の本建設開始までには 3 加速ユニットの製造が必要と考えられているが、本 5 カ年計画の後半に ILC の 1 加速ユニットを製造する。このために建屋延長工事および空洞の生産設備の建設を本 5 カ年計画前半に行なう。

3-5-3 先端測定器の開発

新発想の加速器技術や検出器技術は、次世代科学研究の基盤の一つである。それらの革新は、しばしば素粒子・原子核物理学に代表される基礎科学の進展に突破口を与える。たとえば、半導体測定器の開発によって粒子の精密位置測定が可能となり、特に重いクォークの物理に画期的な進展がもたらされ、また、大口径光電子増倍管の開発によってスーパーカミオカンデ実験が可能になったことは特筆すべきである。

今後期待される検出器技術としては、暗黒物質の検出、ダブルベータ崩壊探索、陽子崩壊探索などにおいて、反応に関与する粒子のすべての軌跡を 3 次元的に構成し、その時間情報をサブナノ秒の精度で記録（合わせて 4 次元の再構成）、事象の完全再構成ができる測定器システムの実現が考えられる。これを可能にするのは、液体キセノンなどのシンチレーション発光する媒体を利用して、その発光の時間・空間情報を、高度なエレクトロニクス（ASIC）とソフトウェアによって、現象をトモグラフィーのように多元的に処理する統合システムである。又、次世代ニュートリノ振動実験で鍵を握る、測定精度、サイズ双方においてスーパーカミオカンデを超えるような水チェレンコフ測定器または液体アルゴンを用いた大型測定器などに展開していく可能性がある。

上記検出装置実現のためには、次のような要素技術の開発が必要である。3 次元測定システムを構築するタイムプロジェクションチェンバー（TPC）と MPGD（マイクロパターンガス検出器）技術とピクセル技術、シンチレーション光を優れた時間精

度・エネルギー分解能で計測する光検出器技術、液体キセノンや液体アルゴンを安定に扱うための低温技術、多チャンネルのエレクトロニクスを高速に処理するASIC、事象の四次元再構成を高速で処理するソフトウェア、測定品質を保ちつつ測定器の大型化を実現するための基礎技術開発などがそれである。

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、測定器の要素技術は、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、放射光によるイメージングや次世代電子顕微鏡への展開、中性子を使った基礎物理学から物質・生命科学への新しい展開も、これら要素技術の開発と相まって初めて可能となることを忘れてはならない。

4 まとめ

高エネルギー加速器研究機構(KEK)は、大学等の研究機関の研究者と密接な協力の下、12 GeV 陽子シンクロトロン、8 GeV 電子・陽電子ライナック、2.5 GeV(PF)と 6.5 GeV(PF-AR)の放射光電子シンクロトロン、32 GeV 電子・陽電子コライダー(トリスタン)、3.5 GeV + 8 GeV 非対称エネルギー衝突型リング(KEKB・Bファクトリー)、試験加速器(ATF)と数々の加速器を成功裏に建設・運転し、30年の間に加速器技術と各種のビームを使った研究分野において、世界で確固たる地位を占めるにいたった。さらに現在では、J-PARC 加速器施設の建設に取り組んでいる。また、加速器科学の国際化が進む今、KEK が国際共同研究においても大きな活躍をすることに期待が寄せられている。

ロードマップで提案している上記の5カ年計画(J-PARCの運転およびMRビーム増強、KEKB改造、PF/PF-ARの運転継続とアップグレード、LHC計画への参加、ERL、ILCの研究開発、および測定器開発)は、これまでのKEK及び我が国の加速器科学の歴史を引き継ぎ、さらに新たな飛躍を目指して、立案されたものである。すなわち、J-PARCの性能を強化することはニュートリノ研究など世界最先端の研究に競争力を与えるものであり、Bファクトリーの高度化によってTeV領域の新しい物理法則における粒子混合やCP非対称性といった宇宙や物質の根源に関わる問題について大きな展開が期待され、コンパクトERLによって物質や生命科学の研究手段に新たな一歩が記される。またILCの研究開発は次世代の加速器技術を現実のものとする大きな飛躍をもたらすものである。またここに提案されている新しい測定装置の開発は加速器技術と両輪をなす測定器の側面から広範囲の科学に飛躍をもたらす技術を切り拓こうとする

ものである。これらの計画を総合的に推進することにより KEK は今後とも加速器科学の世界の拠点として中心的役割を果たし続けることが可能となる。

タスクフォースメンバー

池田 進	生出 勝宣	春日 俊夫	神谷 幸秀	河田 洋
斉藤 直人	佐藤 康太郎	清水 裕彦	下村 理	高崎 史彦
西川 公一郎	野崎 光昭	野村 昌治	幅 淳二	平山 英夫
山内 正則	横谷 馨			

補足 1 : (2010. 04. 30改訂)

ロードマップ本文中「3-2 Bファクトリーの高度化」においては、大電流・クラブ交差方式によるKEKB高度化が記述されているが、高度化については、その後も引き続き、更なる建設費・運転経費の削減が追求されてきた。また、素粒子物理学からのルミノシティに対する要求は一層高まっており、この間の加速器研究上の進展を踏まえて、高度化の方式を変更した。以下にKEKロードマップの一部として新たに提案する「ナノビーム方式」によるSuper-KEKBについて述べる。

KEKBは、世界最高ルミノシティを誇るBファクトリーであり、ピーク・ルミノシティ $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、および積分ルミノシティ 1 ab^{-1} を達成した。これまでに蓄積されたデータによって、Belle実験は、小林・益川理論の証明に成功するとともに、標準理論を超えた新しい物理の関与を示唆する実験結果をも得ている。現在、素粒子物理学においては、「新たな物理法則」の発見・解明が喫緊の課題と考えられており、それには、現KEKBをSuper-KEKBとして高度化し、ルミノシティを大幅に上げることによって詳細な実験を行うことが、最短・最善の方法である。

このために、KEKBの運転を休止し、「ナノビーム方式」に基づいた全面的改造を施して、現在の40倍に当たるピーク・ルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目指す。具体的には、衝突点における垂直方向ビームサイズを50-60 nmに絞り込み(現KEKBは約1 μm)、同時に蓄積電流を現在の約2倍に増加することによって、目標値を実現する計画である。改造に必要な運転休止期間は最短で3年間であり、運転再開後、6年程度で50 ab^{-1} を蓄積することを目標とする。

Super-KEKBのための主要な改造項目は以下のとおりである。

- ・ 衝突点と筑波直線部の改造
- ・ 曲線部およびウィグラー部のビーム光学系改良
- ・ 両リングのエネルギーの変更
- ・ 両リングのビームパイプの交換
- ・ 高周波加速システムの増強と再配置
- ・ 陽電子ダンピングリング設置、陽電子源増強、RF電子銃新設を含む入射器増強
- ・ ビーム診断・制御システムの高速度と高精度化
- ・ 冷却設備の増強

ルミノシティを上げるには、(1)衝突点における垂直方向ベータ関数（焦点深度にも対応）を小さく絞る、(2)ビーム電流を増加させる、(3)ビーム・ビーム・パラメタを大きくする、という三つの方法がある。ナノビーム方式では、衝突点垂直方向ベータ関数を約 $300\ \mu\text{m}$ に絞り込むことによって現在の20倍、電流増加によって2倍、合わせて40倍のルミノシティ増を目指している。ビーム・ビーム・パラメタについては、現KEKBですでに達成されている値を想定する。

衝突点垂直方向ベータ関数を絞り込むため、超伝導四極磁石および永久四極磁石による新たなビーム最終収束系を構築する。衝突点において、大きな水平交差角度を導入し、ビーム交差領域の進行方向の長さを短くすることによって、「砂時計効果」を回避して、垂直ベータ関数を約 $300\ \mu\text{m}$ まで絞ることが可能になる(注)。またできる限り広い力学口径を確保するため、局所的色収差補正セクションを両リングに設置する。

衝突点で極小のビームサイズを実現するには、衝突点ベータ関数を絞るだけでなく、水平エミッタンスも現在の $1/5 - 1/10$ に下げる必要がある。このため、両リングの曲線部、および陽電子リングウィグラー部のビーム光学系を大幅に改造する。また、両リングのエネルギーを $8\ \text{GeV}/3.5\ \text{GeV}$ から、より低エミッタンスに適した $7\ \text{GeV}/4\ \text{GeV}$ に変更する。

ビーム電流倍増に対応して、両リングのビームパイプを大強度シンクロトロン光と高次モード放射に耐え、かつ、電子雲発生を抑制できる新設計のものと交換する。また高周波加速システムを增強し、加速空洞を改造・再配置する。合わせて、ビーム位置検出器、バンチフィールドバックシステム、ビームプロファイルモニター等、ビーム診断・制御システムも高速化・高精度化を図る。また、大電流に伴う発熱に対応して冷却設備も強化する。

低エミッタンスRF電子銃新設、陽電子源增強、 $1\ \text{GeV}$ 陽電子ダンピングリング設置、入射器およびビーム輸送路の增強により、入射ビームの高品質化と大強度化を図り、衝突リングへの入射効率を向上させ、必要な入射ビームを供給する。

(注)

ルミノシティは衝突点における垂直方向ベータ関数の値に反比例する。衝突点における垂直方向ベータ関数は、ビーム交差領域の進行方向の長さがその下限である（「砂

時計効果」)。つまり、ベータ関数は衝突点から進行方向に離れると急激に増大するため、進行方向の長さ以下にベータ関数を絞っても、ルミノシティ向上には繋がらない。Super-KEKBにおいては、現KEKBより水平交差角度が大きく(83 mrad)、水平方向ビームサイズが小さい(約 $10\ \mu\text{m}$: 現KEKBの約1/10)設計になっており、その場合ビーム交差領域の進行方向の長さは約 $300\ \mu\text{m}$ となる。従って、 $300\ \mu\text{m}$ 程度まで垂直ベータ関数を絞ることができる。