

高エネルギー物理学将来計画検討小委員会

最終答申

1997年5月19日

委員

萩原薫 (KEK) 井上研三 (九州大学) 川越清以 (神戸大学) 金信弘 (筑波大学)
駒宮幸男 (東京大学、委員長) 久野良孝 (KEK) 蔵重久弥 (京都大学)
松井隆幸 (KEK) 鈴木厚人 (東北大学) 鈴木史郎 (名古屋大学) 峠暢一 (KEK)
徳宿克夫 (KEK) 柳田勉 (東京大学) 山中卓 (大阪大学) 山内正則 (KEK)
山崎良成 (KEK) 吉岡正和 (KEK、幹事)

序文

我が国の高エネルギー物理学は TRISTAN 建設によって新たな局面を迎えた。即ち一挙にエネルギーフロンティアに躍り出ることにより、日本の加速器技術は著しく向上し世界のトップと肩を並べるに至った。又、国外にフロンティアとしての研究拠点を求めていた時代は終わり、国内でも国際的に評価される最先端の研究がなされるまでに日本の研究者は力をつけた。TRISTAN は新粒子の発見には恵まれなかったものの、グルオンの自己結合の検出、光子の深部構造理解の飛躍的進展、電磁気力が短距離で強くなることの検証等、世界的に評価される数多くの研究成果が発表された。

ここで高エネルギー物理学とは加速器を用いた素粒子物理学の実験的研究のことである。戦後の復興期から最近にいたるまで、高エネルギー物理学を含めた我が国の基礎科学研究は欧米に依存していた部分が多かったことは否めない。しかしながら現在我が国は基礎科学についても国際的に十分に貢献し得る技術力、産業基盤並びに経済力等を有するに至った。長期的展望に立った国際貢献を果たすためには、国外の研究機関における国際協力を推し進めるだけでなく、国内において世界的規模の研究設備を充実させ、最先端の科学技術をきりひらき、人類の新たな文化の創造に資することが必要である。

現在、高エネルギー物理は「標準理論」とよばれる一つのパラダイムがほぼ完成したが、質量の起源などの様に根源的な疑問は未だ解決されていない。これらの疑問に解答を与え、新たな地平を切り開くのは近い将来の実験的発見によると我々は確信する。この状況の下、ヨーロッパ諸国の科学者は次期ハドロンコライダー LHC の建設を決めた。しかし標準理論を越えた物理の方向を確実に決定するためには e^+e^- リニアコライダーによる実験が不可欠である。従って我が国の高エネルギー物理学の次の基幹計画は、我が国がホスト国となり e^+e^- リニアコライダーを建設することであり、これは国益にもかなった国際貢献の一つであるという学界内でのコンセンサスを形成するに至ったのである。

KEKB 計画の発足、米国の SSC 計画の中止などの大きな情勢の変化に伴い、高エネルギー委員会は最近の世界の学界の情勢を分析し、今後 10 年間に俯瞰して日本の高エネルギー物理学（素粒子実験物理学）の進むべき方向を検討するために、1994 年に第二次将来計画検討小委員会の発足を決定した。本小委員会は 1994 年 8 月に活動を始め、将来計画、特に e^+e^- リニアコライダーの物理と技術を検討した。この間、LEP/SLC での超精密測定により標準理論を越える物理の示唆が与えられ、TEVATRON ではトップクォークが発見されるなどの学問上の新しい展開があり、 e^+e^- リニアコライダーに対する期待が更に強まった。この様な状況の下、本小委員会は約 1 年の活動の後、1995 年 7 月に特に緊急性の高い e^+e^- リニアコライダーの早期建設に関する中間答申を高エネルギー委員会に対して提出した。その後もリニアコライダー及びそれ以外の高エネルギー物理学将来計画の検討を行い、議論を重ね、本答申を提出するに至った。

目次

序文	ii
答申	1
要約	2
1 基礎科学の重要性	6
2 素粒子物理学の現状とエネルギーフロンティアの課題	7
2.1 素粒子物理学の現状と展望	7
2.2 エネルギーフロンティアの課題	8
2.3 e^+e^- リニアコライダの早期建設の必要性	10
2.4 リニアコライダ第一期及び第二期計画	12
3 世界の高エネルギー物理学の動向と日本の将来計画	13
3.1 欧米に於ける高エネルギー物理の歴史	13
3.2 諸外国の高エネルギー物理の現状分析	13
3.3 我が国の高エネルギー物理学の歴史	14
4 基幹計画	16
4.1 リニアコライダ 加速器	16
4.1.1 リニアコライダの原理	16
4.1.2 第一の課題：大電力高周波	16
4.1.3 第二の課題：衝突	17
4.1.4 第三の課題：パラメーターの最適化	17
4.1.5 第四の課題：信頼性とコスト	17
4.1.6 課題にどう迫るか	17
4.2 リニアコライダ加速器の基本構成と開発研究	18
4.2.1 電子、陽電子源	19
4.2.2 ダンピングリング、ATF	19
4.2.3 バンチコンプレッサ	19
4.2.4 主線型加速器	19
4.2.5 最終収束系	20

4.2.6	その他	21
4.3	リニアコライダー開発・建設の体制	21
5	その他の計画	24
5.1	概観	24
5.2	国内計画	25
5.2.1	KEKB 計画	25
5.2.2	長基線ニュートリノ振動実験	27
5.2.3	大型ハドロン施設 (JHF)	27
5.2.4	非加速器物理学	28
5.3	国際協力	29
5.3.1	LHC 計画	29
5.3.2	SLC/SLD 実験	29
5.3.3	LEP	30
5.3.4	TEVATRON	30
5.3.5	DESY HERA	30
5.3.6	固定標的実験	31
5.3.7	タウ・チャーム・ファクトリー	31
6	人材育成と組織	32
6.1	概観	32
6.2	高エネルギー加速器研究機構と大学の役割	32
6.3	基幹計画のための人材確保の多様性の追求	33
6.4	国際研究所に相応しい環境の整備	34
7	他分野との関連	34
7.1	概観	34
7.2	科学の一分野としての高エネルギー物理学と他分野との関連	35
7.3	他の加速器科学分野との関連	36
7.4	加速器科学分野と他分野との関連	38

答申

我々は我が国の高エネルギー物理学の将来計画として以下の提言をなす。

- (1) e^+e^- リニアコライダーを日本における高エネルギー物理学研究の次期基幹計画とする。
 - 第一期計画のエネルギーは重心系エネルギー 250 ~ 500GeV とし、LHC と同時期の実験遂行を目指して 2000 年代初頭に建設開始するよう努力する。第一期計画後は、第二期計画として重心系エネルギー $\gtrsim 1\text{TeV}$ への増強を行なう。
 - e^+e^- リニアコライダーを国際的に開かれた計画として位置づけ、そのホスト国として我が国が主導的役割を果たす。
 - 基幹計画推進のための体制を作り、またその国際化を積極的に進める。
- (2) 現在建設中の KEKB 計画を予定通り遂行することは重要である。また、その他の国内・国外における加速器・非加速器実験の諸計画も、広範な学問基盤の形成のために推進する。
- (3) 基幹計画及びその他の諸計画を推進するため、人材育成を図る。

要約

近い将来行なわれる実験によって高エネルギー物理学が新たな方向性を見出し、大きく発展すると考えるべき十分な根拠がある。現在の素粒子物理の「標準理論」は、ゲージ対称性という原理が基礎になっている。この対称性の下では、全ての基本粒子は質量を持たないのが自然である。「標準理論」の最も重要な未検証部分である「基本粒子に質量を与えるメカニズム」即ちゲージ対称性を破る機構の実験的解明こそ、標準理論を越えて新たなパラダイムへ向かう方向性を見出すものである。

これはヒッグス粒子と呼ばれる質量を与える機構に関与する粒子を発見し、この性質を解明することによって可能となる。「標準理論」を越える理論として現在最も有望な「超対称性大統一理論」は、150GeV以下の質量をもつヒッグス粒子が少なくとも一つ存在することを予言している。この軽いヒッグス粒子の存否の決定とその性質の解明こそ、現在の高エネルギー物理学に課せられた最重要かつ緊急の課題である。

この軽いヒッグス粒子の存否を確実に決定し、かつ、発見した暁にはさらにその性質の詳細を解明できるのが、 e^+e^- リニアコライダーを用いた実験である。それ故にここ10年以上世界中で e^+e^- リニアコライダーの研究開発が活発に行われてきた。我が国もトリスタンの建設により世界の最先端に肩を並べるまでになった加速器技術を基礎にして、 e^+e^- リニアコライダーの研究開発を他国との競争と協力により積極的に行い、大きな成果を挙げてきた。そしていよいよ、現実的な設計にとりかかろうとしている。

一般にLHCの様な陽子-陽子コライダーは非常に大きな質量の新粒子まで生成できる。しかし、新粒子の信号に対する雑音レベルが一般に高いので、大量に生成され、かつ著しい特性信号をもたらす新粒子しか発見できないと考えられる。これに対して e^+e^- リニアコライダーにおける実験では新粒子の信号と雑音とが一般に同じレベルで、かつ素過程が単純なので予言も正確である。従って新粒子が e^+e^- コライダーのエネルギー範囲にあれば、その発見は容易であり、かつその粒子の性質の解明も可能である。

e^+e^- リニアコライダーが素粒子物理の進展にとって最も有効な貢献をするのは、ヨーロッパの陽子-陽子コライダーLHCによる実験とほぼ同時期に、重心系のエネルギーが250～500 GeVでの実験を開始する場合である。リニアコライダー実験によって、軽いヒッグスポソンの有無を模型の詳細によらずに確定することが、LHC実験の新しい物理発見能力を飛躍的に高めるということが期待されるからである。本小委員会は、1995年にこの e^+e^- リニアコライダー(LC1)の早期実現を小委員会の中間答申として提言した。これは最近の加速器研究開発の飛躍的発展を鑑みると実現可能であると考えられるからである。更に第二期計画(LC2)として、約1TeV又はそれ以上の重心系エネルギーへの増強がLC1完成後に図られるべきであるということを提言した。LC2ではLC1の成果をふまえ、カラーを持たない超対称性粒子の発見やその特性の測定、重いヒッグスポソンの探索などを行なう。又、たとえ軽いヒッグス粒子が存在しない場合もLHCでの WW 散乱の研究と共に、 W^+W^- 対生成や $t\bar{t}$ 生成などの精密実験等により質量の起源解明の糸口を見出し得るであろう。この e^+e^- リニアコライダー計画を我が国の高エネルギー物理学の近い将来の基幹計画と位置づけ、その早期実現のため、我が国がホスト国として名乗りを挙げることが、我々高エネルギー物理研究者のコンセンサスであるとして、このことを本小委員会は中間答申において明確に提言した。

リニアコライダーは国際的な批評に耐えうる技術設計により建設されるべきであり、そのための開かれた開発、建設体制づくりは必須である。基幹計画である e^+e^- リニアコライダーの円滑な推進にあたっては、高エネルギー物理のコミュニティーが総体としてプロジェクトに取り組むことが重要であり、コミュニティーの意見をプロジェクトに十分に反映させる必要がある。そのためには、大学及び KEK のリニアコライダーを推進する指導者からなる委員会を発足させ、ここでコミュニティーの意見を汲み取り、また、情勢の分析を行って様々な可能性を探り大きな方針をうちたてるべきである。その方針を尊重し、KEK はこのプロジェクトを責任を持って遂行するために「LC 推進室」を設置し、これが加速器の開発研究、建設、実験の準備を統括して推進する中心となるようにすべきである。

ヨーロッパで LHC、アジア・太平洋地域で e^+e^- リニアコライダーにより研究を推進することによって、お互いに刺激しあい、かつ協力しあうということが出来れば、素粒子物理学の発展は世界的に加速される。 e^+e^- リニアコライダー建設は、我が国がホスト国として主体的に計画を遂行すると同時に、全世界、特に現在著しく発展しつつあるアジア・太平洋地域の諸国と協力して行うべきである。又、 e^+e^- リニアコライダーにおける実験は、国際的にオープンに行うべきである。リニアコライダー計画はこのように我が国の基礎科学における国際貢献事業の一つとして位置づけるべきであり、1995 年の国会において超党派で成立した科学技術基本法の内容にも合致するプロジェクトである。我が国が将来の高齢化・高福祉社会においても活力ある経済、文化活動を行っていくためには、次世代の担い手たちを鼓舞するプロジェクトが必要であり、科学技術、特に基礎科学に今こそ投資すべきである。

欧米先進諸国へのキャッチアップの時代が終わり、国際的な貢献が期待されている今日、我が国が 21 世紀に果たす役割は、未踏の基礎科学に取り組み、国際的協調と分担の中で人類が共有する新たな知的財産の創出を担っていくことである。このためにも、人類共有の財産である学問的、文化的成果の期待されるプロジェクトを積極的に遂行すべきである。 e^+e^- リニアコライダープロジェクトはこの様な大きな展望の下に位置付けられるものである。

これまでの高エネルギー物理学はエネルギーフロンティアにおける加速器実験を中心に進展してきた。我が国の基幹計画である e^+e^- リニアコライダーはこの基本路線にある。しかしながら学問の進展は予測もされなかった所から生ずる場合もあることは、今日までの歴史が証明している。従ってエネルギーフロンティアの基幹計画を優先させつつも、これと相補的な多種多様な実験計画は、広範な学問基盤の形成のためにも重要である。特に低エネルギー大強度 e^+e^- コライダー、KEKB 計画は実験開始後 10 年以上にわたって重要な結果を出し続けることが期待されている。これを予定通りに遂行し、素粒子物理に於ける基本的問題の一つである CP 非保存の機構の解明の手掛かりをつかむことは重要である。

その他の国内計画としては、我が国が主体的に計画し多くの成果が期待されるスーパーカミオカンデを筆頭とする様々な非加速器実験があり、核子崩壊、ニュートリノ振動、暗黒物質の探索等の研究を行うことで素粒子物理、宇宙物理双方にとって新たな突破口が得られると期待されている。

又、本来原子核分野のプロジェクトである「大型ハドロン施設 (JHF)」においても、大強度の $K, \pi, \text{中性子}$ 等の二次粒子ビームを利用して「標準理論」を越える物理の手がかりとなる稀崩壊現象やニュートリノ振動などの素粒子物理の多彩な実験が期待されている。

一方、国外の研究所において我が国は国際協力実験に参加し、様々な成果を挙げた。コライダーを用いた実験では、米国の TEVATRON 実験でのトップクォークの発見に貢献した。又、SLC では偏極電子ビームを用いた実験に参加している。ヨーロッパでは CERN の LEP 実験で Z ボソン、 W ボソンの研究から「標準理論」の詳細検証を行い、DESY の HERA 実験では電子と陽子の衝突によって陽子の構造の研究を行ってきた。

コライダー以外では CERN でのニュートリノ振動の実験を遂行し、Fermilab、BNL 等では K 中間子を用いた CP 非保存稀崩壊等の実験を行っている。これらの国際協力実験への参加は物理の第一級研究成果を挙げるに留まらず、国際的な環境で協力して研究を進めていける国際感覚を持った人材の育成と、将来の大掛かりな国際協力を進めていく上での人と人との繋がりや経験をj得るのにも重要である。

基幹計画である e^+e^- リニアコライダー計画とともに重要な CERN の LHC 計画には、実験のみならず加速器建設に対しても我が国は大きな貢献をしている。LHC 計画は 2005 年に実験開始の予定であり、CERN の加盟国であるヨーロッパ諸国が中心となり、他の地域の非加盟国が実験に参加する際には加速器への財政的貢献を求めるという新しい方式をとっている。これに対して、HERA はドイツがホスト国となり、加速器建設の不足分を諸外国に貢献してもらおうという方式をとっている。これらの国際協力形態は、我が国がホストとなって e^+e^- リニアコライダーを建設する際の参考となる。我が国が世界の研究者を受入れるのに相応しい環境の整備を進めることが極めて重要であり、学ぶべき点が多い。

いかにプロジェクトが大きくなっても研究の推進力は個々の研究者、技術者の創造性であり、熱意にあることには変わらない。それらを引き出すことのできる組織が必要であり、かつ科学的に正当な国際的な評価を受け汲み上げる組織を作ってプロジェクトが遂行されなければならない。基幹プロジェクトである e^+e^- リニアコライダー建設などの大きな事業を遂行するためには、若い世代の研究者層育成が必要であり、中央研究所 (KEK) と大学との効果的な協力体制を検討すべきであり、大学活性化小委員会の活動を支持し、広い視野に立った議論を期待するものである。特に、中央研究所への予算、人員の集中は一見効率的である反面、大学グループの主体性と責任分担に基づいた中央研究所との長期的協力という点を考えると実態に即さない面もある。大学への予算の割り当てと運用の形態を改善し大学の基幹設備の充実をはかり学界全体の底力をつけるべきである。

基礎科学の成果の多くは、その時代の経済活動や生活への直接的応用が考えられなくても、後の時代における技術革命をもたらすことは歴史が証明している。更に、基礎科学から生まれた技術は即座に工業技術の発展を促すこともある。高エネルギー物理の波及効果としては加速器技術の応用の数々が挙げられる。放射光を利用した物質構造の解析や半導体集積回路の生産等産業への応用、中性子を利用した生体高分子等の構造解析、医療への加速器の応用等枚挙に暇がないほどである。夢の光源として期待されている自由電子レーザーの実現にとって最も有望な候補は、輝度の高いリニアコライダーの電子源そのものであり、いくつかのリニアコライダーの試験機で自由電子レーザー計画が実現されようとしているのも、その例である。又、高エネルギー実験からの要請によって牽引されてきた技術として、大容量高速コンピュータ、高速電子回路、高精度の工作技術等が挙げられる。

高エネルギー物理学を含めた基礎科学の本質は、真理の探求であり、人類の知的好奇心に基づく文化の創造活動である。かつて質量の起源や宇宙の創成などは、科学上の問になり得るかについてさえ疑問視されていた。1970年代から80年代にかけての「標準理論」の確立により、われわれは素粒子の相互作用をほぼ完全に記述できるようになり、素粒子の質量の起源こそが自然の次の階層を明らかにする鍵であることがわかった。質量の起源はLHCや e^+e^- リニアコライダーによって実験的に解明されるであろう。又、素粒子物理学の発展によって高エネルギー状態での素粒子反応が理解されていき、高エネルギー状態にあった創成期の宇宙で何が起こっていたかが推測可能となり、ビッグバン宇宙論の展開と相俟って今日の宇宙論の発展がもたらされた。質量の起源の解明、物質と反物質の非対称性の理解、宇宙の暗黒物質となる素粒子の発見等、期待される素粒子物理学の発展が我々の自然と宇宙の更なる理解に及ぼす影響は計り知れない。このように高エネルギー物理学は活気ある学問として21世紀にもさらに大きな発展が期待され、新たな進展が期待される他の学問分野とともに強力に推進されるべきである。

1 基礎科学の重要性

人類が自然との調和のなかでより一層の発展を維持するためには、自然を深く理解し、科学的な自然観をもつことが必要不可欠な条件である。本来、真理の探求は自己開発能力に優れた人類の能動的・知的好奇心に基づく文化の創造活動であり、その蓄積としての知的財産は、それ自体価値を有し、人類に豊かさや更なる発展性を与えるものである。そして基礎科学は、人々の物の考え方、広い意味での思想にも影響を及ぼすものであり、基礎科学による宇宙観、物質観、生命観などは、哲学や思想、さらに文学や芸術にまで大きな影響を与える。

また基礎科学は、技術を仲介とする生産によって社会と強いつながりを持つものである。1997年は電子が発見されてちょうど百年目にあたる。電子の発見があつてはじめて電子計算機や電子顕微鏡の発明が可能になり、量子力学や相対性理論が構築されたことによって、現代の高度の電子技術、機械技術、材料技術の発展がもたらされたことなど、実例は枚挙に暇がない。

このように基礎科学の発展は、後の時代における技術革命をもたらし、産業の飛躍的な発展という形で人類社会に貢献してきた。自然、および物質の根底を極めようとする、一見何の役に立ちそうもない真理の探求が、社会に密接に関係する技術革新の起源になることは、歴史的な事実ではあるが、人類が自然に関する知識を有効に活用することによってその生活を豊かにしてきたことを考えると、むしろ必然的な因果関係にあるといえるのではないであろうか。この意味で、人類が基礎科学を推進して来た歴史は正当なもので、またこの姿勢は、今後より明確な形で我々人類社会に位置づけられるべきものである。

基礎科学の振興は、即座に工業技術の発展を促す要素も持っている。特に、基礎科学の実験的研究は、その時代の最新の技術に支えられているとともに、現状を越える高度な技術を要請するのが常である。高エネルギー物理学の発展とともに、大量の実験データを瞬時に処理することが要求され、電子計算機の性能が急速に向上したことは顕著な例である。このように、基礎科学と工学は相乗効果によって飛躍的に発展する関係にあり、両者が一体となって推進されることが必要不可欠である。

今日、物質の根源とその間に存在する基本法則の解明を目的とする研究は、高エネルギー物理学によって引き継がれ、自然科学における最も根源的な問いに挑む学問として、基礎科学の先導的役割を果たしてきた。そして現在、高エネルギー物理学は物質の究極像、物質の質量の起源、自然界に存在する力の統一像を明らかにしようとしている。

さらに、高エネルギー物理学の近年の進展とビッグバン宇宙論の確立によって、高エネルギー物理学と宇宙物理学とが密接な関係にあることが分かってきた。宇宙創成の謎、物質宇宙の進化、宇宙終焉の謎を解く鍵は、高エネルギー物理学の今後の展開に依存していると言っても過言ではない。このように高エネルギー物理学は、自然と物質の基本的法則の究明のみならず、宇宙における物質の誕生、進化、終焉をも解明する使命を背負っているという点で、まさに根源的な問いに挑む基礎科学である。真理の探求が人類の新たな文化を創造するという点で、そして、それが人類の存在に直接関わっている宇宙の起源におよぶという段階を迎え、高エネルギー物理学を従来にも増して積極的に推進することは、価値あるものである。

高エネルギー物理学の発展は、その実験的手段である加速器科学の発展なしには望むことができない。そして、研究の対象がより極微の世界に及ぶにつれて、これを探索するための加速器は益々高度化、大型化してきている。こうした大型化への傾向は、その他の基礎科学分野にも現れ始めており、高度・大型基礎科学への対応という点で高エネルギー物理学は、先導的役割を担って

いる。このように、学術研究の高度化、大型化が進行するなかで、科学的、組織的に創造性豊かな研究活動を展開しえるさらに大きな研究集団を組織し、成果を挙げて行くことが今後の課題であり、積極的に巨大科学に取り組んでいくことが必要である。

国際的な貢献が期待されている今日、我が国が 21 世紀に果たす役割は、未踏の基礎科学領域に積極的に取り組み、国際的な協調・分担のなかで人類が共有する新たな知的財産の創出を担っていくことである。また、我が国が真の科学技術立国を目指すためには、独創的かつ長期的展望を持った新技術の開発能力を持たなければならないことは明白であるが、この開発能力は、基礎科学の蓄積を基礎として初めて育成されるものであって、この点からも基礎科学の更なる重視が求められる。

2 素粒子物理学の現状とエネルギーフロンティアの課題

2.1 素粒子物理学の現状と展望

自然の極微の姿の解明を目指して進展してきた素粒子物理学は、標準理論がほぼ確立した現在、大きな転換の時代に至っていると見える。近年の米国立フェルミ研究所 TEVATRON におけるトップクォークの発見により、物質を構成する基本構成子として 3 世代 6 種類のクォークおよびレプトンが全て出揃い、それらの間の力を媒介する粒子である光子、グルオン、 W ボソン、 Z ボソンといったゲージ粒子の相互作用の実験的分析も、標準理論が与える予言を着実に検証して来ている。局所ゲージ対称性の原理に基づく場の量子論によって記述されたこの標準理論の成功は、ゲージ原理を自然の基本的な力学を支配する原理として揺るぎないものにした。それは、標準理論を越えてさらに極微の世界の解明を目指す理論的研究において、確固とした指導原理を与え、強、電磁および弱相互作用全ての統一を試みる大統一理論、テクニカラーモデル等強結合ゲージ理論に基づいた素粒子模型、超対称性理論に基づいた模型、さらには重力まで含めて全ての力の統一を模索する超重力理論や超弦理論等々、素粒子の究極の統一理論に向けての我々の理論的模索を導いてきた。

高エネルギー物理学に現在課されている課題は、標準理論のさらなる検証及びその全貌の解明とともに、その背後に潜む極微の世界の、さらに深いレベルでの自然の本質的理解に向けて、我々の自然観を築き上げていくことにあると言える。特に焦眉の課題は、素粒子の質量の起源、つまり電磁相互作用と弱い相互作用とを統一する電弱ゲージ対称性の破れの機構を解明することである。標準理論は多大な成果を挙げてきたが、しかしそれらはほとんどゲージ原理によって完全に規定されるゲージ粒子の関与する相互作用の領域に限られており、電弱ゲージ対称性の破れや素粒子の質量の起源に関わって理論の中で不可欠な役割を担うヒッグスボソンの関与する相互作用についての我々の知識は、ヒッグスボソンが未だ発見されていないため、実験的には全く空白状態にある。このヒッグスボソンを発見しその特性を調べるとともに、ヒッグスボソンの起源を明らかにすることは、標準理論の全貌を明らかにするという意義にとどまらず、標準理論の基づくゲージ原理を越えて極微の世界を支配する、まだ認識されていない「かくれた原理」の探究にとって極めて重要な意義をもつ。

標準理論をより深く理解しようとする理論的試みを通して、現在ヒッグスボソンの素性に関して、大まかに 2 通りのシナリオが予測されている。

その一つは、テクニカラーモデルに代表される考え方で、電弱ゲージ対称性の自発的破れは新たな強結合ゲージ理論の力学の帰結として実現される。ヒッグスボソンはこの力学を通して構成さ

れた複合系であり、更に数 TeV から 10TeV のエネルギー領域においてこの新しい強結合力学の帰結として種々の新粒子を含んだ多彩な世界が展開される。このシナリオに基づいてクォークやレプトンの質量の生成をも解明する完成された理論は未だ構築されていないが、ゲージ対称性をダイナミカルに破るという新たな力学的構造を含む素粒子理論の可能性は真剣に検討され続けなければならない。

近年とみに期待が高まって来たもう一つのシナリオは、ヒッグスボソンに関わる諸々の問題を超対称性理論の中で理解していくものである。この理論によると、全ての粒子はスピンの異なるパートナー、超対称性粒子を伴って自然界に存在しており、それらの相互作用も超対称性によって強く規定される。超対称性は、我々が住む 4 次元時空の持つ対称性を理論的に矛盾なく拡張しうる極めて根源的な対称性であり、超重力理論や超弦理論等、重力まで含めた素粒子の統一理論のこれまでの研究の蓄積を通して、究極の力学が如何なるものであろうとも、超対称性は自然界を支配する新たな原理として基本的役割を担っているであろうと期待される。

標準理論を超対称性に基づいて拡張した超対称標準理論は、標準理論の粒子群の超対称性パートナーとして、数 100GeV から 1TeV 領域に多数の新粒子群の存在を预言するが、それに加え、特筆すべき理論の帰結として、ヒッグスボソンの質量が 150GeV 程度以下であることを预言する。これまでいろいろな角度からこの理論の現象論的妥当性が検討され、標準理論の次のレベルの理論の最も有望な候補として徐々にその基盤を固めてきている。特に、最近のゲージ結合定数に関する精密実験により、強、電磁、弱の三つの相互作用が超対称性のもとで 10^{16} GeV 程度のエネルギースケールで大統一される超対称大統一理論の可能性が強く示唆されており、重力をも含めた究極の統一理論への鍵と期待される超対称性の発見は、今や高エネルギー物理学が果たすべき最も重要な課題である。

2.2 エネルギーフロンティアの課題

上に述べた様に我々の自然に対する理解を確実に前進させるためには標準理論のゲージ対称性を自発的に破る機構、つまり質量の起源を明らかにすることが必要である。現在実施中又は準備中の多くの加速器・非加速器による高精度素粒子実験で期待される成果が、ゲージ原理を越えて極微の世界を支配する「かくれた原理」の探求に繋がるためには先ず、素粒子の質量を産み出す機構が明らかにされなければならない。例えば、B ファクトリーではクォークの質量行列に現れる物質と反物質の非対称性を探ることにより宇宙の物質の起源の謎に迫ることが期待されるが、そこで得られる多くの知見からより深いレベルの自然の理解に至るためにはクォークの質量行列を作る機構を明らかにする必要がある。同様のことは、ニュートリノの質量、レプトンの質量行列等を探る神岡等の非加速器地下実験の成果や、宇宙の質量の主演であると目される暗黒物質の正体に関する宇宙観測の成果についても言える。ゲージ対称性を破る機構、素粒子の質量の起源を明らかにすることは、我々を自然の究極の理解へと導く鍵なのである。

ゲージ対称性を自発的に破り、W ボソンや Z ボソン等のゲージボソンに質量を与える機構は一般的にヒッグス機構と呼ばれ、その必然的な帰結として一つ以上の電氣的に中性でスピンのゼロの粒子(ヒッグスボソン)が存在することを预言する。質量の起源を明らかにすることは即ち、ヒッグスボソン(群)を発見し、その特性を調べ、その起源を解き明かすことである。これがエネルギーフロンティア実験に課せられた最も重要な課題である。

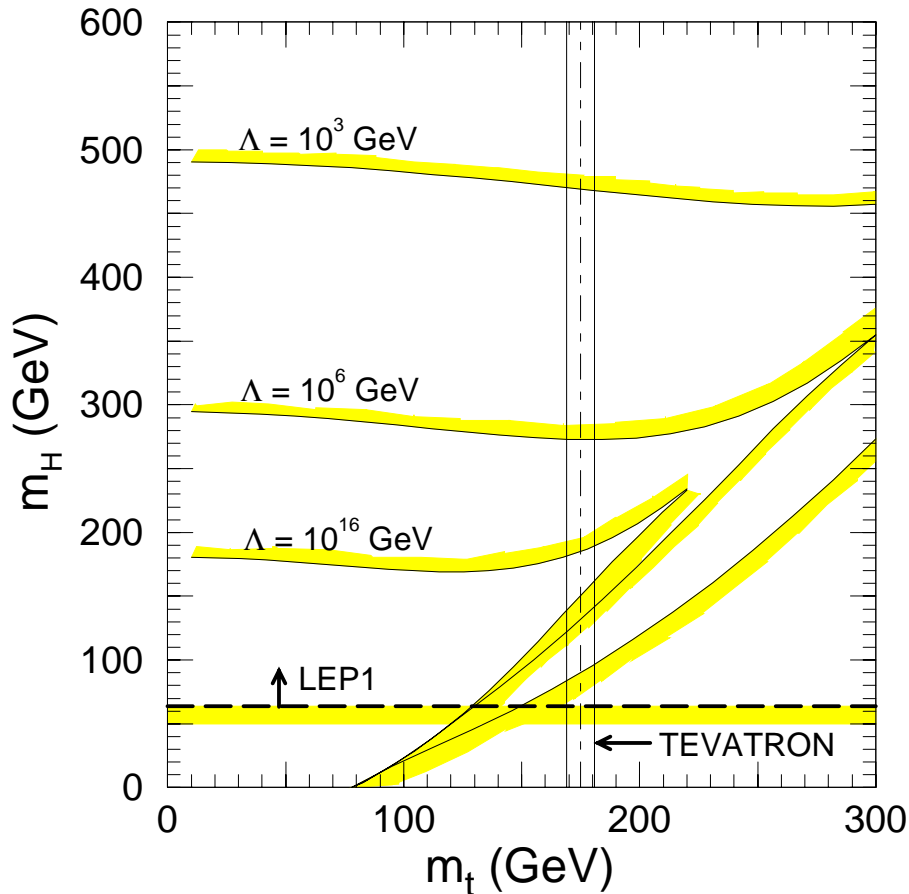


図1：単一のヒッグスボソンが W 、 Z ボソンとトップクォークを含む全ての素粒子の質量を与える「最小模型」において、理論的に許されるヒッグスボソンの質量 (m_H) の範囲をトップクォークの質量 (m_t) の関数として示す。 Λ はこの模型を越える新しい物理が現れるスケール。LEP1 実験による m_H の下限と TEVATRON 実験で測定された m_t の領域も示した。

ヒッグスボソンの探索は、従って現在のエネルギーフロンティア実験に於ても精力的に続けられており、欧州原子核研究機構 CERN の e^+e^- コライダー LEP ではその質量が 65 GeV 以上であることが確認され、現在その第二期の実験 LEP2 により、質量が 90 GeV 程度までのヒッグスボソンを検出するための努力が継続されている。米国フェルミ研究所 Fermilab の $p\bar{p}$ コライダー TEVATRON に於ても近い将来のアップグレードにより質量が 120 GeV 程度までのヒッグスボソンを検出する可能性が検討されている。このヒッグスボソン探索領域を一気に拡大するのが CERN の大型 pp コライダー LHC 計画である。2006 年頃の実験開始を目指すこの計画により、標準理論特に単一のヒッグスボソンだけが存在する「最小模型」に於ては、許される全ての質量領域のヒッグスボソンを検出することが期待されている。

図1にこの「最小模型」、単一のヒッグスボソンが W ボソン、 Z ボソンとともに全てのクォーク・レプトンの質量を担う模型に於て許されるヒッグスボソンとトップクォークの質量領域を、新しい物理が現れるエネルギースケール (Λ) に応じ示す。トップクォークの質量は TEVATRON 実験により 175 ± 6 GeV であることが分かっているので (縦長の領域)、ヒッグスボソンの質量には上限と下限とがあることが分かる。例えばもし「最小模型」を越えた新しい物理が $\Lambda \sim 1$ TeV 以下のスケールに無ければ、ヒッグスボソンの質量は約 500 GeV 以下でなければならない。もしヒッ

グスボソンがこれより重く、約 700GeV 以上であると、その質量が新しい物理のスケールを越え、ヒッグスボソンは基本粒子としてではなく、新しい強い相互作用による複合系としてとらえなければならない。一方電、弱、強の三ゲージ相互作用の大統一が期待される $\Lambda \sim 10^{16}$ GeV 程度まで新しい物理が存在しなければ、ヒッグスボソンは 130GeV から 190GeV 程度の質量を持たなければならない。この「最小模型」を仮定すると、LHC 実験では許される全ての質量領域でヒッグスボソンを発見することが期待される。

2.3 e^+e^- リニアコライダーの早期建設の必要性

前節では、単一のヒッグスボソンが全ての素粒子の質量の起源に係わる「最小模型」に基づいてヒッグスボソン探索のシナリオを整理した。最新の素粒子理論の成果はしかし、この「最小模型」の仮説がもっともらしくないことを強く示唆している。例えば、テクニカラー模型等新しい強い相互作用がゲージ対称性を破る模型では、ヒッグスボソンが明瞭な素粒子としては検出されない可能性があり、一方超対称性に基づく模型に於てはヒッグスボソンは最小でも 4 つ以上のスカラー（スピゼロ）粒子を仲間とする。これらのより魅力的な模型に於ては一般にヒッグスボソンの検出がより困難であり、LHC 実験でさえその検出を果たせない可能性が否定できない。

特に、1980 年代の理論的発展と 1990 年代初頭の精密実験とにより、ヒッグスボソンの起源として、超対称性によって拡張された標準理論が最も有力な候補と目される様になった。この理論ではゲージ対称性の自発的な破れの機構が超対称性の破れと係わって自然に理解され、神岡等の地下実験で陽子崩壊が見られないこととともに電、弱、強三ゲージ結合定数の大統一の予言が精密実験の結果と定量的に一致したのである。図 2 に LEP1 実験等による最も精密な三ゲージ結合定数の測定値をもとに、それらがより高いエネルギースケールで変化する様を、標準理論とその超対称性版の場合について示した。超対称性理論で期待される 1TeV 程度以下の質量を持つ多くの超対称粒子の効果により三ゲージ結合が $\Lambda \sim 10^{16}$ GeV 程度のエネルギースケールで統一されることが読み取れる。この高い大統一エネルギースケールのため、陽子の寿命は充分長くなり、その崩壊がスーパー神岡実験等で観測しうるかどうかは大統一模型の詳細に依存する。一方、超対称性粒子が無い場合（破線）は、この三ゲージ結合力の大統一は実現されない。

超対称性により拡張された標準理論の最も重要な帰結の一つは、上記の三ゲージ結合の大統一を損なわない一般的な模型において質量 150GeV 以下のヒッグスボソンが必ず一つは存在することである。このヒッグスボソンは、最小超対称性模型の場合等、LHC で検出可能な場合もあるが、検出不能である可能性も大きい。最近の理論計算とシミュレーションによれば、重心系エネルギー 250 ~ 500 GeV の e^+e^- リニアコライダーにより、超対称性大統一理論が予言するヒッグスボソンを確実に発見し、且つその量子数と Z ボソンとの結合の強さを測定することができる。この意味で、リニアコライダーは現代素粒子論の最も大胆で且つ魅力的な仮説である超対称性が我々の世界に係わっているか否かを確定する加速器である。もし 150GeV 以下のヒッグスボソンが存在しなければ、超対称性がどんなに理論的に魅力あるものであろうとも、それはこの世界の質量の生成に直接係わるものでないことが明かとなり、我々は質量の起源として新たな強い相互作用を含む、全く異なった機構を見出さなければならない。一方、もし期待される質量領域にヒッグスボソンが発見されれば、我々は直ちに超対称性粒子の探索、重力をも含む超対称性模型の検証へと研究の方針を定めることができる。リニアコライダーは、素粒子物理学の進むべき方向を決定するのである。

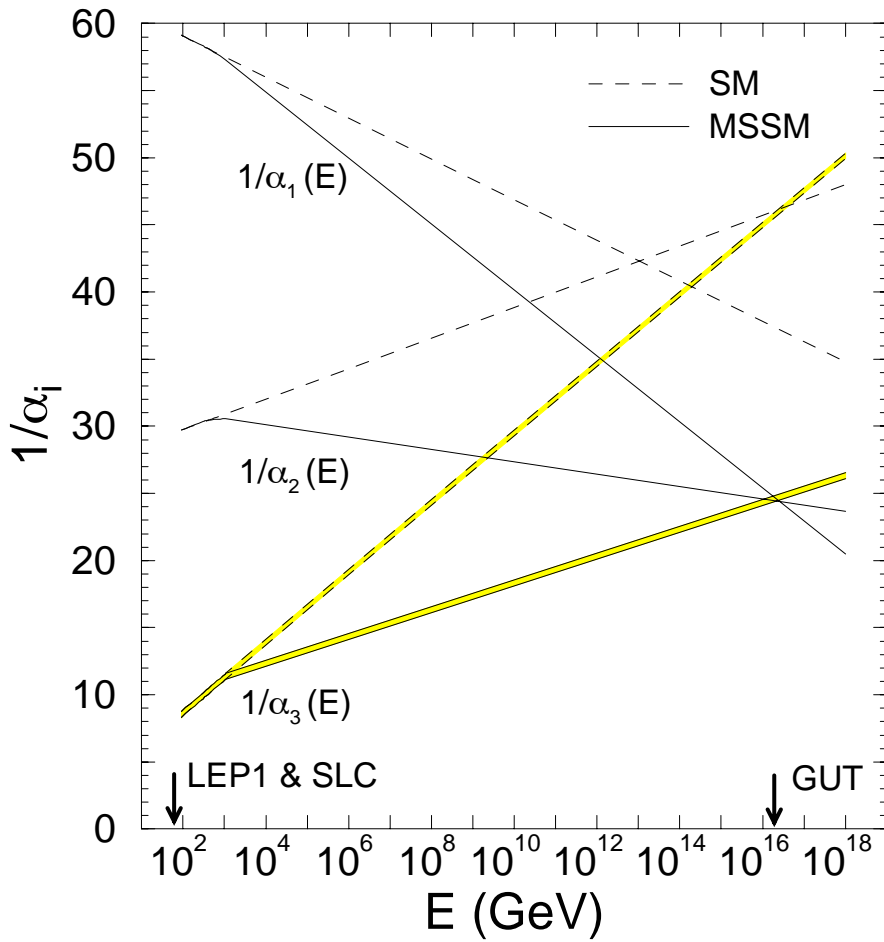


図2：100GeVのエネルギー領域で精密に測定された三つのゲージ結合定数 α_1 、 α_2 、 α_3 が、より高いエネルギーで変化する様子。標準理論の粒子だけが存在する場合（破線）は、三結合定数は統一されない。超対称性によって拡張された標準理論（実線）では、1TeV程度以下の質量を持つ多くの超対称性粒子の効果により、三ゲージ相互作用の大統一が 10^{16} GeV程度のエネルギーで実現される。

LHCは超対称性粒子の発見の可能性を含め膨大な発見能力を秘めた加速器であるが、ヒッグスボソンの質量が約150GeV以下の場合には、模型に依らずにはその存否を決定することができない。実際、超対称性大統一理論が预言する150GeV以下のヒッグスボソンは、その特性がLHCでの検出にとって好ましい場合でさえ、その発見には大変困難な作業が要請される。カラーを持つ超対称性粒子が重くそのシグナルが明瞭でない場合には、実験開始後も長い年月ヒッグスボソンについても超対称性粒子についても決定的な証拠が得られない可能性が大きい。もし同時期にリニアコライダー実験の成果が得られるならば、LHCの持つ膨大な潜在的発見能力を引き出すことができる。150GeV以下にはいかなるヒッグスボソンも存在しないことが同時期のリニアコライダー実験によって確定すれば、LHCはより高いルミノシティー運転によりWボソンやZボソンの新しい強い相互作用の検出に全力を傾けることができる。一方150GeV以下にヒッグスボソンが確認された場合には、LHCはその運転目標を超対称性粒子の検出に定めることができる。ここで想起すべきことは、過去ハドロン衝突で新しい粒子が発見されたのは、J/ Ψ 、 Υ 、W、Zボソンとトップクォークを含め、それらの粒子の崩壊生成粒子、電子、ニュートリノ、b-クォーク、Wボソン等の電荷や質量が知られていた場合に限ることである。LHCで生成されるカラーを持つ超

対称性粒子、グルイノやスカラー・クォークはその崩壊により一般にカラーを持たない超対称性粒子、ゲージノやスカラー・レプトンを生成するが、これらの崩壊生成粒子の質量や特性は特定の模型に依らない限り定まらない。従って、LHCにおける超対称性粒子の探索には新しい種類の困難が予想される。リニアコライダーがこれらカラーを持たない超対称性粒子を発見しその質量を決定すればLHCのグルイノやスカラー・クォークの発見能力は飛躍的に向上し、その質量を正確に測定することも可能となる。実際、LHC実験で予想されるグルイノやスカラー・クォーク生成の数多くのシグナルが超対称性の破れに関する特定の既存の模型の予言に一致するような場合を除き、LHCが単独で「超対称性の発見」を確立することは容易でないと思われる。更に超対称性粒子の質量スペクトラムが重力をも含む究極の素粒子模型の探索の鍵であると考えられるため、超対称性の発見とそれに続く究極の統一理論の探索の双方において、リニアコライダーとLHCとの同時実験の意義は計り知れない。

2.4 リニアコライダー第一期及び第二期計画

上に述べた様に、リニアコライダーが素粒子物理学の進展に最も有効な貢献をするのは、重心系のエネルギーが250～500 GeVでの実験をLHC実験と同時期に開始する場合である。これは最近の加速器技術開発の飛躍的發展を鑑みると実現可能だと考えられる。従って我々はリニアコライダー第一期計画(LC1)として、250～500 GeVでの実験をLHC実験と同時期に実現させることを提言する。LC1の目標は150 GeV以下のヒッグスボソンの存否を決定することにより、現在最も有力な超対称性大統一理論の帰趨を決し、素粒子物理の方向を定めることである。更に W^+W^- 生成とトップクォーク対生成の精密実験により、これらの粒子の質量の起源に関し模型に依らない情報を得ることができる。これらの情報は比較的軽い超対称性粒子がLC1で発見される可能性を含め、LHC実験の物理発見能力を飛躍的に高めることが期待される。上記の目標を達成するために、LC1は積分ルミノシティとして一年間に約 10fb^{-1} 以上を実現しなければならない。

ヒッグスボソンの発見に留まらず、その起源を明らかにするためには、ヒッグスボソンの仲間のスカラー粒子や超対称性粒子、或いは複合粒子としてのヒッグスボソンを作る新しい強い相互作用の効果を検出しなければならない。そのためには重心系のエネルギーとして約1 TeV程度が必要と考えられ、第二期計画(LC2)としてリニアコライダーの増強が図られなければならない。1 TeV領域のLC2実験によりカラーを持たない超対称性粒子の発見能力が飛躍的に向上し、カラーを持つ超対称性粒子に関するLHCの探索能力と拮抗する。又、1 TeV程度のエネルギーに於ける W^+W^- 生成に関する精密実験は、LHCにおいても困難が予想されるWボソンの強い相互作用検出実験と相補的な情報をもたらす。更に現在はその起源を説明する理論的模型が知られていないものの、原理的には存在しうる質量が約700 GeV以下の基本粒子としてのヒッグスボソンの特性を決定しその起源を明らかにすることもLC2の課題である。LC2の積分ルミノシティの目標としては、一年に数 10fb^{-1} 程度が要求される。

リニアコライダー計画は、その第一期計画において素粒子物理の方向を決定し、第二期計画において標準理論を越える新しい物理の描像をより明らかにすることを目標とし、その全過程においてLHC実験との有効な協調、競争関係を目指さなければならない。トリスタン以来培ってきた我が国の加速器建設、素粒子実験の能力と、国際協力によって最近の飛躍的發展を実現したリニアコライダー建設の基礎研究を土台として、国際協力によりこのリニアコライダー計画を実現させることが我が国の高エネルギー物理学研究者が採るべき最重要且つ火急の課題である。この計画を支える様々な理論的根拠を辿ると、その実現が基礎科学の分野に於ける最も実り多い国際貢献となり得ることが確信される。

3 世界の高エネルギー物理学の動向と日本の将来計画

3.1 欧米に於ける高エネルギー物理の歴史

アメリカ合衆国は第二次世界大戦前から次々に加速器を建設し、それらによって多くの発見を行い、学界をリードしてきた。戦後多くのヨーロッパや日本の高エネルギー物理研究者たちはアメリカに移り、フェルミ国立加速器研究所 Fermilab、ブルックヘヴン国立研究所 BNL、スタンフォード線型加速器センター SLAC などの研究所で研究活動を行っていた。一方ヨーロッパは 1953 年に CERN を設立し、西ヨーロッパ地域内での国際協力を行うと同時に、アメリカなどからも研究者を受け入れてきた。又、ドイツは独自にドイツ電子シンクロトロン研究所 DESY を設立し、CERN での国際協力と同時に DESY に於ても国際協力実験を行って多くの成果を上げてきた。

1970 年代中ごろからアメリカとヨーロッパは健全な競争状態となり、時期を前後して同じ様なタイプの加速器が両地域に於て次々と建設されて行った。SPEAR (SLAC,1972) /DORIS (DESY,1973)、PETRA (DESY,1978) /PEP (SLAC,1980)、 $Spp\bar{S}$ (CERN,1981) /TEVATRON (Fermilab,1987)、SLC (SLAC,1989) /LEP (CERN,1989) などがこの例にあたる。最後に挙げた SLC/LEP の電子・陽電子実験に於いては、SLAC の SLC 加速器での実験が先行したが、欧州 CERN での LEP 実験がこれに直ちに追いつき、 Z ボソンサンプルの統計精度において速やかに凌駕するに至った。日本からはまず LEP に、次いで偏極電子ビームを備えた SLC にも実験グループが加わり、電子・陽電子衝突の先端エネルギー実験の推進に積極的に関与してきたという歴史がある。

1980 年代初頭から PETRA でのグルーオンの直接発見、CERN での W 及び Z ボソンの発見など、ヨーロッパの組織的な研究による成果が生まれた。そして CERN は LEP のトンネルの中に LHC を建設する計画を立てた。これに対しアメリカは他の追従を許さない巨大な SSC 計画を国家プロジェクトとして立ち上げた。SSC 計画は周長 87km の円形トンネルにビームエネルギーが 20TeV の pp コライダーを建設するというもので、一度は議会で承認され建設が始まったもののプロジェクト継続のための予算について 1993 年議会の賛成が得られず中止となった。

一方旧ソ連は Dubna、Novosibirsk 等に加速器を建設し、東欧諸国と一緒にあって独自に加速器を建設し、またそれと同時に CERN などとも協力関係を結んでいた。しかしソ連邦解体以降は大きく状況は変化している。

3.2 諸外国の高エネルギー物理の現状分析

現時点に於て、北米、ヨーロッパの将来計画を分析すると以下の通りである。

アメリカ合衆国は SSC の中止以降、(1) LHC への参加(加速器の建設を含めて)、(2) TEVATRON の増強 (Main Injector)、(3) SLAC の B-factory (PEP2) が近い将来計画としてある。(2)、(3) は承認されているものである。LHC への参加は、国内に SSC がなくなった以上自然な成り行きで、CERN との間の予算交渉が現在行なわれている。SSC の場合と同様、一度プロジェクトが承認されても、議会の反対で覆される例もあるので、国際協力の場合、計画遂行の保障をいかにして取っていくかが重要である。これは今後の計画でアメリカと協力する際に考慮すべき点である。上記の既存の計画に対して SLAC を中心として NLC (Next Linear Collider) 計画がある。SLAC は線型加速器の中心的研究所として Two-Mile Linac の建設や、世界初のリニアコライダー SLC の建設及び次世代リニアコライダー R&D など、今迄多くの成果を上げてきた。しかし歴史的に、八

ドロンコライダーでの実験研究に従事してきた研究者の相対比は高く、LHC を凌ぐ高エネルギーのハドロンコライダーやミュオンコライダー計画を唱える研究者もいる。

ヨーロッパは現時点では将来計画を LHC に収束させている。従ってこの他の計画は制約を受けている。これは現在行なわれている LEP2 に対しても当てはまる。LEP2 の年間稼働時間が厳しく定められており、たとえ LHC が遅れても数年間 LEP2 を延長することはよほどの発見やその兆候が見られない限り困難であろう。LHC 以外の計画としてはヨーロッパでも DESY を中心としてリニアコライダー（超伝導リニアックを用いる TESLA 及び S-band 常伝導リニアックを用いる SBLC）が計画されている。TESLA の R&D はアメリカなどとも協力して行なわれている。DESY では TESLA の早期実現のため原子核、放射光などの研究者もプロジェクトを共同して推進するため自由電子レーザー（FEL）などの研究も同時に行なっている。これは我が国がリニアコライダーに対して考えている方向と同じである。しかしながら、ヨーロッパの将来計画の中心が LHC にある以上、ドイツは LHC に協力し、CERN に巨額の投資をしつつリニアコライダー計画を進めて行かねばならない。一方 CERN も CLIC という双ビーム方式のリニアコライダーの開発計画を持っており、R&D も活発に行われてきた。しかし LHC 優先のためあくまでも LHC の次の計画として位置付けられている。従って CERN の立場としては日本など外国に CLIC を下回るエネルギーのリニアコライダーが建設される可能性があってもそれに協力こそすれ、反対はしないと考えられる。しかしあくまでも 1TeV を越えるエネルギー領域のリニアコライダー建設は自分たちでやりたいと考えている。このようにヨーロッパ、北米ともにリニアコライダーの重要性は十分に認識している。

日本以外のアジア諸国では中国に於て 1992 年に重心系エネルギーが 3GeV 領域の e^+e^- コライダーが建設稼働し成果を上げている。1995 年には ACFA (Asian Committee for Future Accelerator) が日本、中国、韓国、台湾、インド、タイなどを中心に設立され、アジアに於ける加速器関連分野の組織的な協力を推進している。ここにおいてもリニアコライダーについての検討がなされ、ACFA はリニアコライダーをアジア太平洋地域のプロジェクトとして捉えると共に、日本がこの為の国際的機関の設立に主導的役割を果たす事を期待している。

3.3 我が国の高エネルギー物理学の歴史

日本は戦後、原子核、素粒子の研究を復興するために、多くの困難を乗り越えて東京大学原子核研究所に 1.3GeV 電子シンクロトロンを建設した。この加速器は、本格的な高エネルギー加速器建設のための試験器としての意味をも持つものであったが、同時にその後の我が国の高エネルギー物理の分野を支える人材の育成の場ともなった。一方第一線の物理研究の場として 1960 年代まで多くの研究者がアメリカへ渡り、また 1970 年代以降には、ヨーロッパとも国際協力を行うようになった。このように国外での研究活動が重要な役割を果たしてきた。しかし国内でも本格的な研究機関を持つべきとの機運が盛り上がり、1971 年 4 月に KEK (高エネルギー物理学研究所) が設立され、陽子シンクロトロン、放射光施設そして 1986 年秋には e^+e^- コライダー TRISTAN が稼働し、一挙にエネルギーフロンティアに躍り出たのである。TRISTAN 建設の意義は極めて大きく、国外に研究拠点を求めていた時代が終わり、国内でも国際的に評価される研究が行えるまでに日本が力をつけてきたのである。とりわけ TRISTAN 建設によって日本の加速器技術は著しく向上し、世界のトップレベルと肩を並べるに至ったことの意義は大きい。この様に我が国は特に e^+e^- コライダーでは世界的成果を挙げて来ている。そして 1994 年より基幹計画であった TRISTAN の延長として高ルミノシティの e^+e^- コライダー B-factory、KEKB の建設に着手しており、1998 年完成を目指している。粒子・反粒子、空間反転非対称性に関する研究に躍進を起こす様な成果

が期待されている。

既に第2章で述べたように素粒子物理学に於ける最も緊急で重要な課題である電弱対称性の破れの機構の解明、即ち素粒子の質量の起源の解明のために巨大ハドロンコライダーであるLHCとSSCが計画されたと言って過言ではない。しかしながら超対称性理論等で期待される軽いヒッグスボソンの発見には e^+e^- リニアコライダーの方が有利だと考えられる。従って1980年代半ばよりリニアコライダーのR&Dが世界中で行なわれるようになった。我が国も米、独、仏、ソ、CERNなどとともにその先頭を切ってR&Dを行ってきた。「リニアコライダーが日本に於ける次期基幹計画である」というコンセンサスが学界内に定着するに至った歴史は次の通りである。

1984年に第一次将来計画検討小委員会（長島順清委員長）が発足した。ここで2年間の検討の末1986年に標準理論を越えた新しい物理の突破口を開く鍵はエネルギーフロンティアにおける実験にあるとして、(1) TeV領域の e^+e^- リニアコライダーの国内建設を目指した加速器のR&Dに直ちに着手する、(2) SSCにおける国際協力実験を推進する、の二点を最重要課題として推進すべきという基本方針を打ち出した。

この報告を受け、リニアコライダーの研究開発、第一期5カ年計画が遂行され、1993年1月にはそのまとめが発表されている。この間、LEPなどでの精密データの解析、理論的な研究等により、超対称性などの理論で軽いヒッグスボソンの発見などに有利な重心系エネルギー300～500 GeVの e^+e^- リニアコライダーの早期建設が極めて重要であるとの認識が深まり、全国の研究者の活発な議論と詳細な検討を受け、リニアコライダーにおける物理及び加速器のその時点での可能な設計の検討結果がJLC-1（KEK Report 92-16、JLC: Japan Linear Collider）にまとめられた。高エネルギー委員会は重心系エネルギー300～500 GeVのリニアコライダー建設の緊急性に鑑み、1993年4月に第二期3カ年計画の提案を行った。ここでは、1993～1995年を第二期開発計画期間と定め、主要装置のプロトタイプの開発、製作とパラメーターの最適化を行い、JLCの概念設計を目指すということであった。特にJLCのミニチュア版とも言えるATF（Accelerator Test Facility）の完成を中心に据え、またATFと相補的な、外国の開発研究にも協力するとともに日本でのR&Dへの外国の参加も求めた。

序文でも述べたように高エネルギー委員会は1994年に本小委員会を発足させた。本小委員会は1995年7月に特に緊急性の高い e^+e^- リニアコライダーの早期建設に対する中間答申を提出し、学界内のコンセンサスをより強固なものとした。第一次小委員会の答申にある、「新しい物理への突破口を開く鍵はエネルギーフロンティアにおける実験にある」という基本姿勢は今日でも何ら揺るぎないものである。物理的な要請と技術的可能性両面からのリニアコライダー早期建設の機運の高まり、SSCの中止という二つの変化が、第一次答申から本答申への発展の背景となっている。

1995年秋に科学技術基本法が超党派の議員立法で制定された。このことの意義は非常に大きい。この立法の趣旨にも述べられているが、我が国は長期的視野に立って基礎科学への投資を主体的に行っていくべきである。このとき単に国外の研究機関に投資するだけでは国内の空洞化が生じ、経済力の割に研究基盤が薄いという状況に陥る。又、かつて基礎研究はほとんど欧米に依存していたという歴史的事実も踏まえ、基本法がうたっているように我が国における基礎科学の研究費を倍増させるべきである。そうして我が国が、来るべき高齢化社会においても、活力ある経済活動を行っていくための科学技術の基礎をしっかりと身に付け、発展させるだけの基盤を緊急に作らねばならない。このための投資はいかに財政事情が苦しくても、将来のために必要なものとして位置付けるべきである。高エネルギー物理に対する投資もこれら基礎科学への投資の一環として、長期的な見通しのもとに位置づけられるべきであり、とりわけ近い将来大きな学問的な発展が期待される分野として、また、多くの波及効果を生み経済活動を活性化させる先端的分野とし

て捉えられるべきと考える。他の先端的分野とともにその中核の一つとして今後の発展を考えて行くべきであり、学界、政界、産業界にこの考え方を広く浸透すべき時期であると考え。とりわけリニアコライダーは海外の研究者が参加を希望することが必至の学問上本質的に重要なプロジェクトであり、日本がホスト国として真の国際貢献を行う場としての意義は大きい。

この様に e^+e^- リニアコライダーの学問的重要性と我が国の加速器技術の高さ、それを実現し得る産業基盤の充実、我が国の学界におけるコンセンサス、我が国を取り巻く諸外国の学界の動向等のいずれを取っても、我が国が中心となって e^+e^- リニアコライダーを建設することの必然性が導かれる。

4 基幹計画

4.1 リニアコライダー 加速器

4.1.1 リニアコライダーの原理

これまでの電子・陽電子衝突型加速器は、主に貯蔵リング方式により建設されてきた。リング中で電子・陽電子は、長さ数ミリ、さしわたし数百ミクロンの粒子群（バンチ）の形に収束され、偏向電磁石で進行方向を曲げ制御されながら光速で周回する。このとき電子・陽電子は、シンクロトロン放射光を前方に放出してエネルギーを損失するので、これを補うため、リングの一部に高周波空洞を設置する。空洞を繰り返し通過するバンチの周回頻度は非常に大きいので、少数で低加速電場の空洞によっても、数十 GeV までのビームエネルギーにおいてはビームを維持/貯蔵することができる。しかし、シンクロトロン放射による単位時間当りのエネルギー損失は、ビームエネルギーの 4 乗に比例し、軌道曲率半径の 2 乗に反比例するので、加速空洞に供給する全電力を一定に保ちエネルギーを上げるためには、軌道曲率半径をビームエネルギーの二乗に比例して大きくしなければならない。加速器を構成する各種機器の数はほぼ加速器の全長に比例するので、建設費は目標エネルギーのほぼ 2 乗に比例して増大することになる。現在 CERN で活躍中の LEP2（重心系エネルギー最大 200 GeV）のエネルギーまではこの貯蔵リング方式により数々の輝かしい成果を挙げている。しかし、周長 27km の LEP2 を大きく越えるエネルギーを、さらにリングサイズを大きくして実現することは現実的でない。そこで考案されたのが、シンクロトロン放射エネルギー損失のない線型加速器を使用するリニアコライダーである。これは対向する二台の線型加速器で電子と陽電子を別々に加速して中央で衝突させるもので、この方式では加速器全長は、目標エネルギーのほぼ 1 乗に比例する。以下にリニアコライダーの特徴並びにそれを実現するために解決すべき課題をまとめる。

4.1.2 第一の課題：大電力高周波

リニアコライダーでは、一回の線型加速器の周期で、電子・陽電子の生成から数百 GeV のエネルギーにまで一気にビームを加速しなければならない。そのため貯蔵リングより、はるかに数多くの加速装置が必要となる。実際、重心系エネルギー 0.5~1 TeV を実現するためには、~50 MeV/m 程度の高加速電場を使っても 20~30 km の線型加速器を建設する必要がある。この線型加速器は数千台もの多数の高周波源や加速空洞から構成される。リニアコライダー設計の第一の課題は、このように多数でしかも高加速電場の加速空洞とそれを駆動する大電力高周波源とを、如何に電力効率よく、高い信頼度で実現し運転するか、ということである。

4.1.3 第二の課題：衝突

リニアコライダの衝突繰り返し周波数は、線型加速器の加速パルス繰り返しで決まるが、電力の上限や大電力高周波源設計上の問題から、毎秒高々数百回に限られる。これは典型的な貯蔵リングの場合の1/1000程度以下である。これに対して、電子・陽電子衝突における素粒子反応の代表的な反応断面積は重心系エネルギーの2乗に反比例するので、重心系エネルギー500 GeVのリニアコライダでは、低い衝突繰り返し頻度でTRISTAN等の百倍近いルミノシティを達成しなければならないことになる。ルミノシティを上げるために粒子数を貯蔵リングの場合より上げることは空洞に蓄積できる電磁エネルギーの限界などから不可能であり、リニアコライダでは衝突点のビームサイズを通常の貯蔵リングでのその1/1000程度のナノメートルの桁まで強力に絞り込むことで、ルミノシティを上げなければならない。リニアコライダ設計の第二の課題は、加速途中のエミッタンス保存を図り、このような小さいビームサイズを如何に実現し、衝突を如何に長期間安定に維持できるようにするかである。

4.1.4 第三の課題：パラメータの最適化

ナノメートル・サイズの二つのバンチが衝突すると、目的とする電子・陽電子素粒子反応の他に、強く絞り込まれた互いのバンチが作る強力な電磁場のために、放射光(Beamstrahlung)が発生し、また低エネルギーの電子・陽電子対が多数生成される。これらは皆、物理実験上のノイズとなる。これらの発生数は、バンチ当り粒子数に比例し、バンチ横方向サイズに反比例する。研究上意味のある実験を行なうためには、対粒子数をある程度以下に押さえなければならない。リニアコライダ設計上、バンチあたり粒子数と衝突点でのビームサイズの関係に一定の境界条件ができる。実際には、この二つのパラメータは、線型加速器の運転条件、ビームエミッタンス等、リニアコライダの運転設定では多数のパラメータにも関係がある。このように、多数のパラメータが相互に関係しており、その最適化がリニアコライダ設計上の第三の課題である。

4.1.5 第四の課題：信頼性とコスト

物理実験の効率的な遂行のためには年間の積分ルミノシティを上げることが重要である。そのために加速器の最大ルミノシティを向上させ、これを安定に保たねばならない。従って加速器の工学設計は、ビーム加速、ビームの絞り込み、及びパラメータ設定という上記三つの課題に加えて、信頼性、稼働率、保守、維持のことも考慮して行う必要がある。これらのことはリニアコライダにおいては特に重要である。即ち、各機器が長期にわたり安定に働くことが必須であり、十分に余裕をもった設計をしなければならない。同時に、機器の性能を保ちながら如何に製造コストを下げるかということも重要な課題である。実際リニアコライダの建設段階では、膨大な量にのぼる各機器の製造はメーカーに委ねることになる。メーカーにとって現実的に採用できる製造工程の合理化、信頼性の確認された民生技術の導入を含めた工学設計も重要である。これがリニアコライダ設計上の第四の課題である。

4.1.6 課題にどう迫るか

リニアコライダの開発は1980年代末のICFA(International Committee for Future Accelerator)研究会を機に世界各地で開始された。当初は各種加速技術の検討も含め様々な模索がなされたが、1988年にSLACで行なわれた第1回国際リニアコライダワークショップのころより、次

世代リニアコライダの方式についての整理が始められた。一方、リニアコライダ実機第一号として SLAC の SLC (重心系エネルギー $\sim 92\text{GeV}$) が 1996 年からの立ち上げを経て 1989 年から物理実験を開始している。リニアコライダの基本的構成は、その個々の性能は別として、SLC の中に見出すことができ、そこで蓄積された運転経験は次世代のリニアコライダの基礎となるものである。SLC は敷地の制限から衝突させる電子と陽電子を同一の線型加速器で加速している。二つの対向する線型加速器で電子と陽電子を別々に加速して衝突させる形式としては、次世代のリニアコライダが初めてのものになる。次世代リニアコライダは日、米、欧、露の各地域で様々な方式のものが検討、提案されてきた。これらの中では先ず、主加速器を超電導、常電導の何れにするかの選択肢がある。常電導の場合、高周波周波数やバンチ構造により、さらに種々の選択肢がある。また二台の加速器を並列し、一方で高周波電力を生成、増幅し、他方に供給する双ビーム方式も提案されている。各国グループでは、それぞれの立場から上記の四つの課題を解決するための、各種ハードウェアの現実的可能性の検討を行い、幅広い範囲にわたる設計パラメータの最適化努力を友好的競争のもとに進めてきた。そして 1990 年代に入ると KEK、SLAC、CERN、DESY、Protovino 研究所等でそれぞれリニアコライダのシステムとして、JLC (日本)、NLC (SLAC)、CLIC (CERN)、TESLA (DESY を中心とした国際協力)、SBLC (DESY)、VLEPP (Protovino) 等が提案された。またそれらの開発のため ATF (JLC)、NLCTA (NLC)、CTF (CLIC)、TTF (TESLA) 等の試験加速器の建設も始まった。1990 年代前半には SLC のルミノシティが向上し、偏極電子ビームも実用になった。1994 年に SLAC における国際協力の FFTB 実験で 60nm のビームスポットサイズの実現とその測定に成功した。1995 年以降は ATF 等、試験加速器の成果が次々と出始めた。ATF におけるマルチバンチビーム生成、加速とその測定技術の開発、NLC にむけた SLAC での X-band クライストロンの着実な成果、CLIC における高周波電子銃の成功、高電界超電導空洞の着実な成果など枚挙に暇がない。このようにして上に挙げた四つの課題は、徐々に解明され、今日では概念設計から工学設計へと向かおうとしている。

4.2 リニアコライダ加速器の基本構成と開発研究

我が国では 3 章でふれた様に 1986 年の第一次将来計画検討章委員会の答申を受けて本格的にリニアコライダ開発研究を開始した。その結果は高エネルギー委員会に提出された報告に詳しい。それによると、我が国では主線型加速器として、パルス運転するクライストロンからの高周波電力を時間的に圧縮してピーク電力を高め、常電導加速管に供給し、そこで多数の電子・陽電子群 (マルチバンチビーム) を加速する方式を採っている。この方針の下にビームダイナミクスやパラメータの検討などの理論的研究と、試験装置建設も含めたハードウェアの開発が並行して実施されている。ここではリニアコライダ加速器のビーム源から衝突点にいたる概観をこの選択及び開発研究の指針に則して記述することにする (概観図参照)。リニアコライダ加速器は、マルチバンチ大電流ビームを生成する電子、陽電子源、ビームを低エミッタンスにするためのダンピング・リング、超短バンチビームを実現するためのバンチ・コンプレッサー、低エミッタンスを保持しながら、効率よく加速する主加速管、高効率大電力高周波源、ナノメータ・サイズのビームを衝突させるための収束衝突系、以上のシステムを安定にかつ効率的に運転、調整するための測定系などから構成される。

4.2.1 電子、陽電子源

電子は通常は熱陰極電子銃で生成するが、超対称性大統一理論を系統的に研究するためには、偏極電子ビームを提供することも不可欠である。このため歪ガリウムヒ素超格子フォトカソードと円偏光レーザーを組み合わせた電子源が最も有力である。

陽電子は自然界にそのままでは存在しないので、その生成のためには、タングステン等の重金属標的に数 GeV ないし十 GeV 程度のエネルギーの電子ビームを当て、そこで発生する電磁シャワーの中から陽電子を選び出す。この場合、陽電子生成効率を向上させるために強力な収束系やアクセプタンスの改善等様々な工夫を行う必要がある。金属標的が入射電子ビームによる発熱にどこまで耐えるかの基礎データは、SLC の経験から知られている。しかし、大ビーム電流環境下の放射安全対策、金属標的の保守の便の向上など、開発要素は多く、今後とも開発研究を強力に進めていく必要がある。

4.2.2 ダンピングリング、ATF

電子、陽電子源で生成したビームを数 GeV にまで加速した後、ダンピングリングとよぶ小型の貯蔵リングに入射し、数十ミリ秒の間、シンクロトロン放射をさせることによって低エミッタンス化する。ここで電磁石等の機器の設置精度、真空チェンバーや加速空洞などの電気的設計において、低エミッタンスを達成するために細心の注意を払う必要がある。またビーム入射、取り出し装置やフィードバック技術も重要なものとなる。このとき、リングのビーム光学上の特性からエミッタンスの下限が決められてしまう可能性があり、早くからその限界を見極めて、全体設計に反映させる必要がある。このような観点から、ATF 計画がつけられたのである。これは、一ダンピングリングのみでなく、可能な限り実際のリニアコライダーのパラメーターに近い条件を作りだす必要性から、入射器を始めとしてその関連機器も含めた総合化技術という観点からも重要な開発計画である。このように、ATF はリニアコライダーに必要な加速器装置の雛形であるとも言える。

4.2.3 バンチコンプレッサ

ダンピングリングで提供される低エミッタンスビームのバンチ長は数 mm であり、そのままでは衝突点での約 0.1mm 程度の収束焦点深度に比べて長過ぎる。また、主線型加速器で加速中にエミッタンスを保持するためにもバンチ長を短くし、加速高周波により粒子を均一に加速する必要があるが、やはり数 mm のバンチ長は長過ぎる。このため、バンチ長を圧縮するビーム光学系と加速装置から成る特別のビームラインを用意することになる。このバンチコンプレッサの方式には複数ありうるが、いずれも全長数百メートルにもおよぶ長大なものである。リニアコライダー実機建設の前に、バンチコンプレッサにまつわる諸問題とその解決策をどのように実験的に検証するか、またダンピングリング・バンチコンプレッサ・主加速器の接続をどのようにビームを使い、或いはビームを使わずにプロトタイプ試験をすべきかについての検討が進められる必要がある。

4.2.4 主線型加速器

主線型加速器は、加速器全体の規模から見て最も大きな部分となる。全長が 20 ~ 30km のトンネル内に、高周波源、高周波電力圧縮装置及び加速管などから構成される単位長がほぼ 10m 程度

のユニットを数千台ならべ、これらを 50 ~ 150 Hz の繰り返しで運転する。高周波源のピーク出力は 50MW あるいはそれ以上になり、さらにパルス圧縮した後は数 100MW 級になる。これを加速管に供給したときの電界強度は ~ 50MV/m 程度となる。ここでマルチバンチビームをエミッタンスを損なわないよう加速するため、従来の電子線形加速器では例を見ない、ビーム不安定性を起ささないような新しいタイプの加速管の開発や、その高精度設置及びビーム制御技術が要求されることになった。また既述したように、数千台という多数のユニットの信頼性、稼働率、寿命、コスト等を考慮し、実用的な設計を行うことも重要である。

現在、日本は主加速器開発の中心として高周波周波数が X-band のリニアックの開発に取り組んでいる。またそのバックアップ技術として C-band リニアックの開発にも着手している。X-band リニアックの開発は、SLAC や Protovino 研究所との密接な協力のもとに進めている。SLAC では 1996 年にピーク電力 75 MW、パルス時間幅 1.1 マイクロ秒の出力を、繰り返し 60 Hz で取り出すことに成功しており、また省エネルギーのため永久磁石でビームを収束させることにも成功した。これは FFTB 実験の結果とともにリニアコライダー開発における大きなマイルストーンである。リニアコライダー実機では、このようなクライストロンを少なくとも 5000 本以上設置し、安定に運転することが必要である。大量生産の方策、信頼度の向上は今後の最重要課題の一つである。クライストロンに電力を供給する変調電源は、部品点数が多く、加速器の信頼性やコストを決める重要な要素であるが、その開発は今後の課題である。C-band リニアックの、ハードウェアも含めた開発は緒に就いたところであるが、バックアップ技術として信頼性やコスト等に関し、見通しをつけることが急がれる。またエネルギー拡張可能性の検討も重要である。

クライストロンから得られた出力を時間的に圧縮または分配して実効的にピーク電力を高め、加速管に供給する方式については目下複数の方法が研究されている。今後の低電力試験や大電力試験の結果と、システムとしての安定性・信頼度などを調査のうえで総合的な判断をする必要があろう。

加速管の方式については、様々なタイプのものが開発されている。総じて個々の加速セルの工作精度は、現在の工業水準で達成出来るし、多数の加速セルをつなぎ合わせて加速管を組み立てる方策も研究が進んでいる。このような要素技術の開発に加えて今後の課題は、実験的研究の更なる推進、高精度の加速管の大量生産、コスト低減、及び加速器トンネル内への設置・実装技術の開発が挙げられる。

なお日本は L-band 超伝導空洞の開発も行っており、ここでは TRISTAN における抜きんでた超伝導空洞の実績を踏まえて 40 MV/m の高電界を安定に達成するための空洞製造、処理技術を確立しつつある。

4.2.5 最終収束系

主線型加速器により、エミッタンスを損なうことなく、高エネルギーにまで加速した電子・陽電子ビームを、最終収束系でナノメートル台のサイズにまで強く収束し、衝突点で衝突させる。このとき、強い収束に伴う諸問題に対する対処、衝突の精密制御及び測定技術の開発は、高いルミノシティを達成、維持するために不可欠である。また、実験に対するバックグラウンドを軽減するためのコリメータや衝突点近傍のマスクの設計も、従来のリング加速器と異なったものになる。衝突点におけるビーム収束と制御については、SLAC での FFTB 実験が 1992 年から行われている。これは国際協力に基づく実験計画であり、日本チームも参加し、ビーム光学設計や収束磁石、ビーム測定器で特に重要な成果を挙げた。その結果、これまでにリニアコライダーに必要な最終

収束系のビーム光学的設計は基本的に実現可能であり、またリニアコライダの衝突点で現出するナノメートル・スケールのビーム断面大きさも測定可能な技術はほぼ確立している。

4.2.6 その他

このほか、リニアコライダで必要とされる加速器コントロール系とビーム診断システムの連携、自動化フィードバックによるビーム制御などの基本概念設計については、SLCでの運転開発経験の蓄積を活かせるところが大きい。しかしながら、リニアコライダで必要とされるビーム制御技術水準はSLCでのそれを大きく上回るものが多く、リニアコライダに特化した具体的な検討と開発が急がれるべきであることは論をまたない。

4.3 リニアコライダ開発・建設の体制

第一次将来計画検討小委員会では、エネルギーフロンティアでの研究を最重要課題とし、そのための国内計画としてリニアコライダの開発計画と、そして国際協力を前提としたSSCへの参加を提起した。その後の経緯から本小委員会は、今後のリニアコライダを日本がホスト国として中心的役割を担いながら国際協力により建設し、物理実験は世界の研究者と我々との共同利用を基本とした開かれた形態を進めることを提言した。我が国の高エネルギー物理学の分野はこれまで欧米諸国から多くを学んで今日の発展を成し遂げたのであるが、このようにしてリニアコライダを建設し、そこでの研究機会を世界の研究者に提供することによって、将来の日本の各方面における国際貢献のひとつとなすべきであると本小委員会は考える。

リニアコライダ研究開発において、過去の種々の国際協力はよく機能してきた。今後リニアコライダ早期建設のためにはそうした努力を更に進め、より幅広く内外の英知を結集する必要がある。加速器各部分の技術方式の決定やパラメータの詳細にわたる選定は、担当研究所を中心とする開発陣の技術的、実証的な判断に基づき、科学的に行われるべきである。そしてリニアコライダは国際的な批評に耐えうる技術設計により建設されるべきであり、そのための開かれた開発・建設体制づくりは必須のことである。また、こうした作業を行うに当り、我が国はリニアコライダ建設のホスト国となり、重大な責任と任務を自らに課すべきときであるということ、本小委員会は真剣に認識する。ホスト国となることは、我が国に初めて大規模な基礎科学の国際センターをつくることであり、これは今世代から次世代に伝える長期的拠点となり得るものである。このことは高エネルギー物理学のみならず、我が国の加速器科学及び関連諸分野の水準を高く保ち、国内外への貢献に資するものとなるであろう。そしてこのことは自然に、我が国の高エネルギー物理・加速器関係者がホスト国たるに相応しい一層の研鑽を積む必要性を浮き立たせる。また同時に、これを通して我が国の巨大科学のあり方の一つの雛形を形成していく極めて良い機会となるものである。

我が国内外の諸企業との協力体制の構築も、積極的に進める必要がある。企業において先ず期待されるのは、企業の持つ高度な要素技術とこれまでに蓄積されてきた加速器に関する知見を結合させ、リニアコライダにおける各種ハードウェアの信頼性の向上や大量生産に反映させることである。ここで要求される技術の多くは従来の加速器では例を見なかった水準のものであるため、個別部品の量産以前に、研究所・大学と企業の両者が技術的課題とその解決策を深く検討し、それをチームとして良く共有する必要がある。多くの場合、開発途中もしくは初期から、研究所・大学と企業の研究者、技術者達が共同で研究開発を進めることが望ましい。本小委員会は、このような形態の共同研究開発を推進するために、KEKおよび高エネルギー物理学界の指導者が配慮

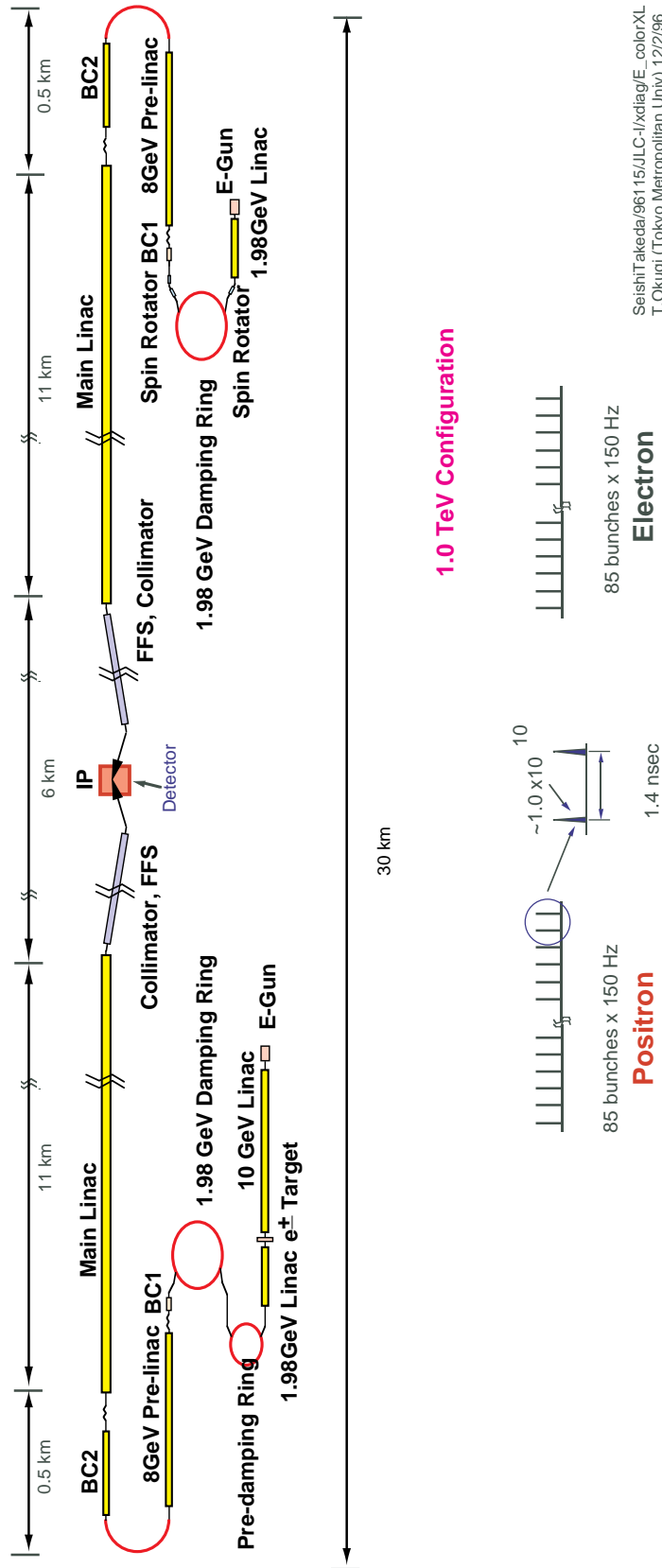
を怠らないことを勧告する。

日本を含む各国間の技術協力の在り方を見極めるためには、まずリニアコライダーを開発・建設するのに必要な技術的作業の全貌を明確にし、それを関係者の共通認識としなければならない。また、関係各国が寄与・利用できる施設・設備・人材の実態を率直な対話を通して明らかにし、それら資源をリニアコライダー早期実現のために、いかに活用していくかを探り、また新たな設備建設と人材育成に必要な方策を総合的・積極的に検討する必要がある。従来、リニアコライダー開発のため、各国研究所の諸試験設備や KEK の ATF 等が共同開発に利用されてきており、今後も活用されると思われる。R&D の進捗に伴い、これらに加えて、リニアコライダー実機の建設に先立ち、今後新たにどのような試験設備に拠る実験研究が必要かについての系統的検討を急ぐ必要がある。またリニアコライダー加速器用トンネル設備等の検討、用地評価作業なども、更に行っていく必要がある。

基幹プロジェクトである e^+e^- リニアコライダーの円滑な推進にあたっては、高エネルギー物理のコミュニティ総体がプロジェクトを支援することが重要であり、コミュニティの意見をプロジェクトに十分に反映させる必要がある。そのためには、大学及び KEK のリニアコライダーを推進する指導者からなる委員会を発足させ、ここでコミュニティの意見を汲み取り、大きな方針を議論すべきである。その方針を尊重し、KEK はこのプロジェクトを実際に責任を持って遂行するために、「LC 推進室」を設置し、これが加速器の R&D、建設、実験の準備を統括して推進する中心となるようにすべきである。プロジェクトを進めて行く際の方針やその決定に至る議論の情報公開が担当者とコミュニティに対してオープンに行われ、意志の疎通が良くはかられるための努力が極めて重要であり、推進室と上記委員会はよく協力してこれに努めるべきである。又、プロジェクトの進行状況を繰り返しチェックするための国際評価委員会が必要であることは言うまでもない。これら計画推進の諸組織はプロジェクトの国際化の度合に伴って国際化していく必要がある。

Electron-Positron Linear Collider *JLC*

500 GeV JLC-I → 1.5 TeV JLC



Seishi Takeda/96115/JLC-1/xdiag/E_colorXL
T. Okugi (Tokyo Metropolitan Univ) 12/2/96
Updated for MCPAC97 by N. Toge 1/22/97

図 3 : e^+e^- リニアコライダー概観図

5 その他の計画

5.1 概観

これまで高エネルギー物理学は、エネルギーフロンティアを目指した加速器実験を中心として進展してきた。これは、素粒子物理学が自然の極微の姿の解明を目的とする学問分野であり、エネルギーのより高い状態での反応を測定することは、より小さなスケールの構造を調べるために一番直接的な手段であったからである。そして、大型加速器による実験的研究は電磁・弱統一理論が予言する諸現象の検証に成功し、標準理論の確立に多大なる貢献をしてきた。一方、現在の理論的研究においては、強、電磁および弱相互作用を統一する大統一理論や超対称性理論に基づいた超対称大統一理論、さらには重力まで含めて全ての力の統一を模索する超重力理論や超弦理論の構築へと進んでいる。標準理論が確立したことによって、このような新しい理論の現象論的帰結が、様々な実験・観測環境に応じて詳細に予測可能となり、その結果、素粒子物理学の研究手法、手段が多岐多様性に富むようになってきた。このような素粒子研究の多様化を考慮し、我々は、個々の研究グループの独自性を尊重し、基幹計画以外の実験計画を奨励し推進することも重要であると考えらる。

研究計画の多様化の一例としてエネルギーフロンティアをとってみても、国内ではトリスタン実験、国際協力実験として LEP や SLC などにおける電子・陽電子衝突実験による Z^0 での物理、TEVATRON における陽子・反陽子衝突実験によるトップクォークの発見、HERA での ep 衝突実験など多種にわたる実験がなされている。日本の実験グループは、これらの様々な種類の加速器のなかから目的にあった計画を選び、すばらしい研究成果を挙げてきた。特に、大学の研究チームは日米科学協力事業その他によって、外国での大型国際協力実験に積極的に参加し、以前にも増して目覚ましい研究実績を挙げるようになったことは注目に値する。そして、TeV エネルギー領域を目指す大型陽子・陽子衝突実験計画である LHC に対しても、日本グループは積極的に参加協力している。

さらに、エネルギーフロンティアと相補的に、低エネルギー大強度電子・陽電子衝突加速器 (KEKB 計画) や大強度陽子加速器 (JHF 計画) など強度フロンティアでの実験計画が国内計画として着実に推進されている。これらは、精密実験を通して CP 非保存などの基本的対称性の問題を研究したり、稀崩壊探索により高いエネルギースケールでの振る舞いを間接的に探ろうとする計画である。また、陽子崩壊やニュートリノ実験などの非加速器素粒子実験では、日本は世界を凌駕するトップクラスの業績を挙げている。以上のように、日本の高エネルギー物理学研究者は国際的にも評価される実績を挙げてきており、これからも多様化に対応した幅広い研究活動を支える環境を整えていくべきである。

このような素粒子物理学研究の多様化は、研究成果の充実だけでなく、長期的展望を見据えることのできる足腰のしっかりした研究者集団を育成するという観点からも重要である。近年、高エネルギー物理学実験の将来計画案は大規模になり、その実現までに長い期間を要するようになった。このような時代において、若い優秀な人材を絶え間無く育成していくためには、基幹計画以外の実験計画も推進し、特に大学において研究活動の継続と活性化を図ることが重要であると考えらる。国内外での大小様々な実験計画によって、幅広い経験と知識を身に付けた多くの若い人材を着実に育てていくことが、日本の高エネルギー物理学の繁栄にとって必要である。

つまり、多様化した計画を推進することにより、国内の人材育成を促進し、また研究に奥行きと多様性を与えることが、長い目での基幹計画の成功に結び付くことになる。したがって、基幹

計画の優先度を明確にしつつ、これらの基幹計画以外の計画を着実に推進していくべきであると考える。

これら基幹計画以外の計画は、国内計画と国際協力実験に大別することができる。現在進行している研究計画の進展として位置づけられるものや LHC 計画のようにエネルギーフロンティア計画まで多彩であり、その規模にしても KEKB や JHF のように大型国内計画から、大学単位で行う国際協力まで幅広い。さらに、以下にリストした以外の萌芽的着想に基づく新しい計画が考えられた時はそれを受け入れる柔軟性も必要となろう。以下に、国内計画と国際協力実験に分けて、それぞれの計画に対してその研究目的、現状および将来の展望をまとめてみる。

5.2 国内計画

国内計画としては、1986 年の第一次将来計画検討小委員会での“枝”の計画として挙げられていた三つの柱が成長を遂げ、国内計画の中核をなしている。第一の柱とされた低エネルギー大強度電子コライダーは、トリスタン計画の成功を基盤にした大強度電子・陽電子コライダー KEKB 計画として現在進行形で進んでおり、CP 対称性の破れの起源を調べる実験として KEK や国内外グループを中心に準備が進められている。第二の柱である大強度陽子加速器は、12GeV 陽子加速器の発展としての 50GeV、 $10\mu\text{A}$ の大強度陽子加速器 JHF 計画として検討されている。第三の柱である非加速器素粒子実験としてはすでに実験を開始しているスーパーカミオカンデを筆頭に様々な実験が計画されている。また全く新しいタイプの素粒子実験として、KEK の 12GeV 陽子加速器を用いてニュートリノビームを作り、それを約 250km 離れた上記のスーパーカミオカンデに照射するロングベースライン(長基線)ニュートリノ振動実験が、1998 年度始動を目指して準備されている。これらの諸計画は、全てエネルギーフロンティアの基幹計画と相補的であり、その将来の展望は現計画の延長上に存在している。以下に、個々の計画が目指す物理とその展望を俯瞰する。

5.2.1 KEKB 計画

CP 対称性の破れは物質宇宙の起源とも関連した素粒子物理学における重要な問題のひとつであるが、実験的には 1964 年に $K^0\bar{K}^0$ 中間子システムにおいて発見されて以来、新たな証拠は他にみつかっていない。1972 年小林と益川は、ゲージ原理による弱い相互作用と電磁気力の統一模型に於いて CP 対称性が破れる可能性を検討し、次の結論を得た。即ち、観測された CP 非保存現象は、クォークが 6 種類以上あるか、又は数個のスカラーボソン等の新粒子とその相互作用を必要とするのである。この第一の可能性は何一つ新しい相互作用を要求しないので大変魅力的であったが、 u, d, s の 3 種類のクォークしか知られていなかった当時としては衝撃的な予言であった。その後の高エネルギー物理学の進展はしかし、1974 年に c (チャーム)、1976 年に b (ボトム) そして 1994 年には t (トップ) を発見するに至り、小林-益川模型は一躍 CP 非保存の標準模型と考えられる様になった。しかしながら、小林-益川原論文で明らかにされた様に、CP 非保存の起源には幾通りかの可能性がありこれらを明確に区別できる実験が強く望まれてきた。特に小林-益川模型は、中性 K 中間子系では 1000 分の 1 の程度にすぎない CP 非保存効果が中性 B 中間子系では 10 分の 1 程度になりうることを予言するのでその実験的検証が強く期待されている。

KEKB はこのような背景のもとに、 B 中間子の崩壊過程を詳しく調べることによって CP 対称性の破れに関する理解を飛躍的に深めることを目的とする電子・陽電子衝突実験である。KEKB では、エネルギーの異なる電子と陽電子を高いルミノシティで衝突させ B 中間子を生成する方

式を採用しており、中性 K 中間子系以外で初の CP 非保存の発見を目指すだけでなく、小林-益川行列要素の複素偏角の測定が可能であり、CP 対称性の破れの起源が小林-益川論文の二つの可能性のどれであるかに関して明快な結論を得ることができるものと期待されるものである。

現在、1998 年の実験開始に向けて、1994 年度から旧トリスタン MR トンネルを利用して加速器建設が開始されている。KEKB 加速器は衝突エネルギー $8 \times 3.5 \text{ GeV}$ 、設計ルミノシティーが $10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ であり、高周波空洞技術を始めとしたトリスタンで培われた加速器技術をさらに発展させた技術が随処に使われた設計がなされた。また、KEK には蓄積リング (AR) や、光源リングなどの稼動中の中型電子加速器があり、ここで試験を積み重ねながら KEBB を建設して行けることは、大きな利点となっている。

KEKB では衝突点は一箇所であり、ここでの実験として BELLE 実験が採択されている。この測定器はシリコンストリップ測定器、ドリフトチェンバー、CsI カロリメーターなどからなるスペクトロメーターで、特にエネルギーの低い粒子に対する測定精度を良くするような工夫がなされている。この測定器の詳細設計はすでに完成し、建設が順調に進行中である。

KEKB と同様に B 中間子の CP 非保存を調べようとする計画は世界中の各研究機関で実施されている。SLAC では KEBB と同様、非対称型電子・陽電子衝突型加速器 (PEP-II) の建設が進んでおり、KEKB とほぼ同時期に実験が開始される予定である。また、Fermilab では TEVATRON 実験で発生する B 中間子を用いた実験が、DESY では HERA の陽子ビームを固定標的に当てて B 中間子を作る HERA-B 計画が、CERN では LHC で発生する B 中間子を使って同様の測定をしようとする LHC-B 計画が検討されている。

KEKB 実験によってどのような物理が明らかになっていくかは、様々なシミュレーションによって検討がなされており、以下のようなシナリオが考えられている。まず、小林-益川模型によれば、実験開始後 1~2 年後 (積分ルミノシティーで 20 ないし 60 fb^{-1})、 $B \rightarrow J/\Psi K_S$ という崩壊モードで CP の破れが観測されると期待される。もし発見されれば、それは K 中間子系以外で初めての CP 非保存現象の発見であるばかりでなく、1972 年に 6 クォークの予言を導いた機構、即ち 6 クォークの混合による CP 非保存の機構が検証されることになる。もしこの期間に CP 非保存が発見されなければ、その結果は K における CP 非保存が小林-益川模型の範囲で説明されないことを強く示唆する。

第 2 段階として、KEKB 加速器の最高ルミノシティーが設計値 $10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ に到達し、約 200 fb^{-1} の積分ルミノシティーを蓄積した時点で、ユニタリティー三角形の全ての辺、角度の測定が可能となり、小林-益川行列の V_{ts} を除く全ての行列要素をそれらの複素偏角を含めて決定することができる。このことによってユニタリティー三角形自身の無矛盾性、 K 、 D 中間子の崩壊との比較など、小林-益川行列を含む全ての過程のテストが可能となる。この後、さらにその測定精度を上げ、これらに一つでも矛盾が発見されれば、これは標準理論の範囲を越える物理の手掛かりとなろう。さらに KEBB のエネルギーを 5% 上げることで、 B_s の崩壊における CP 非保存の発見、崩壊モードの研究等が可能となろう。

いずれの場合でも、KEKB は実験開始後十年以上に亘って重要な結果を出し続けることが期待されており、我が国の高エネルギー物理学の発展のためには、KEKB 計画の推進は欠かせないものとなっている。

5.2.2 長基線ニュートリノ振動実験

標準理論ではゼロ質量とされるニュートリノが微小な質量を持ち、その結果 3 種類のレプトンが量子力学的混合を起こす可能性は、小林-益川行列によるクォーク混合と対比される素粒子物理学の重要な問題のひとつである。近年、太陽ニュートリノの観測数が標準理論の予想に比べて有意に少ないことが神岡鉱山の実験（カミオカンデ）等で発見され、これがニュートリノ振動によるものである可能性が高い事が指摘されている。更に、カミオカンデ等では大気ニュートリノ中のミューニュートリノと電子ニュートリノの比に於いても異常が認められ、これは大気圏上層部での宇宙線衝突により生成されたミューニュートリノが地下実験室に達するまでに他のニュートリノに転化することを示唆している。

観測された大気ニュートリノの異常がニュートリノ振動に依るものであれば、地球上の実験でそれを検証する可能性が生まれる。KEK とスーパーカミオカンデを結ぶ長基線ニュートリノ振動実験はこの様な背景のもとに計画され、世界に先駆けて実験準備が進められている。これは KEK の 12GeV 陽子加速器で生成されたミューニュートリノビームを約 250km 離れた神岡鉱山で 1996 年に稼働を開始した世界最大の水チェレンコフ計測装置スーパーカミオカンデで測定することにより、期待されるニュートリノ振動を検証し、さらにニュートリノ質量差の同定を目指すものである。

この実験では、ミューニュートリノが電子ニュートリノに転化する場合にはスーパーカミオカンデに於いて電子ニュートリノが検出され、それ以外の粒子に転化する場合にはミューニュートリノ数の減少が観測される。タウニュートリノへの転化を直接検出する為には、より高エネルギーのニュートリノビームが必要で、次節に述べる JHF 計画の 50GeV 陽子加速器を用いた増強が計画されている。

5.2.3 大型ハドロン施設（JHF）

大型ハドロン施設（JHF）は、50GeV・10 μ A の主リング（50GeV-PS）と 3GeV・200 μ A のブースターリングからなる高強度陽子加速器複合体を建設する将来計画である。これは、原子核分野の研究者集団を中心に推進されている計画であるが、高エネルギー物理学、中性子や中間子を使った物質科学などの幅広い分野の研究にも利用出来る学際的加速器計画である。

JHF 計画の 50GeV 陽子シンクロトロンは、アメリカ合衆国の Brookhaven 国立研究所（BNL）の AGS 加速器のエネルギーおよびビーム強度を上回り、このエネルギー領域で世界最大の強度を持つことになり、ここでの高エネルギー物理学実験は現存の KEK 陽子シンクロトロン加速器（KEK-PS）で行われている素粒子物理学実験の発展として捉えることができる。

JHF 計画での素粒子物理学は、エネルギーフロンティアとは違い、大強度の陽子ビームを使った強度フロンティアを追及する物理である。特に、 $K \rightarrow \pi l \bar{\nu}$ などの K 中間子稀崩壊を精密に測定することにより、標準理論を研究し小林-益川クォーク混合行列要素を決定したり、標準理論では禁止されている崩壊モードを探索することによって標準理論を超える新しい物理を探索することなどを主眼とする。また、標準理論枠外の新しい CP 対称性の破れの探索や時間反転不変性の破れの探索など、 K 中間子による基本的対称性の研究を通して、新しい物理の手がかりを調べることも重要な課題である。

前節の長基線ニュートリノ振動実験を、JHF の 50GeV 陽子シンクロトロンを用いて増強することも重要である。これによって更に高精度、高統計の測定が可能になるだけでなく、高いエネルギー

ギーのニュートリノビームを用いることにより、振動の結果として終状態に生成されるタウレプトンを直接測定する実験が可能となる。さらに振動がみえた場合には、クォーク混合の場合の小林-益川機構に対応する、レプトン混合の CP 非保存を探索するという展望もある。長基線ニュートリノ振動実験は依然として謎に包まれているニュートリノの特性を知る手がかりとなるものとして大いに期待されている。

また、陽子ビームから生成した大強度ミュー粒子ビームを使って、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ や $\mu^- \rightarrow e^-\gamma$ 変換などのレプトンフレーバー数を破る過程を、従来に無い高い感度で探索する実験が可能となる。超対称性大統一理論など標準理論の拡張モデルは、レプトンフレーバー数を破る過程に対して、現在の上限値のないし二桁以下の値を予言しており、これは実験的に到達できる範囲内である。このため、このミュー粒子の稀過程は陽子崩壊とともに超対称性大統一理論を検証する最重要実験として幅広く注目されており、積極的に推進する必要がある。

固定標的実験のできるハドロン加速器が、世界的に見て少なくなってきたことを考えると、JHF は世界に開かれた研究施設として世界各国から注目を集めることが期待される。また、これまで国際協力実験の一環として米国や欧州での固定標的実験に参加してきた我が国からの実験グループが、日本を基盤として研究活動ができる機会を得ることになる。これからは日本が国際研究協力のリーダーシップをとり、JHF でおこなわれる国際協力実験を推進する必要があると思われる。

5.2.4 非加速器物理学

近年の素粒子物理学の展開は、電弱統一理論の成功を基礎にして、強い力を含めた三力を統一する大統一理論、更に第4の力である重力をもふくめた理論の構築へと進んでおり、これらの統一理論の実験的検証が、素粒子物理学の進展に不可欠となってきた。非加速器物理学は、自然界で起こっている現象の中から、大統一理論が予言する陽子崩壊現象や有限質量のニュートリノが引き起こす現象、磁気単極子の検出を研究主目的の一つにしている。これらの大部分は、加速器物理学で実施することが難しい研究課題である。このため、非加速器物理学は素粒子物理学研究において、加速器物理学と相補的な関係にあり、両研究を同時に推進することは相乗効果を生んで、素粒子物理学の発展に大いに貢献するものと期待される。

また、素粒子物理学は、宇宙創成、宇宙の進化、宇宙終焉を支配する基本的概念に密接に関わっている。宇宙創成期、宇宙元素合成期、銀河形成期から現在の宇宙で起こった素粒子反応現象の検出は、宇宙像の究明の鍵を握っている。地球や太陽、活動する天体からやってくる素粒子の検出、宇宙初期から現在までに生成され、宇宙を浮遊している素粒子の検出は、非加速器物理学のもう一つの重要な研究課題である。これらの宇宙における新しい素粒子現象の発見は、宇宙物理学と素粒子物理学に変革をもたらすことが予想され、注目される研究分野になってきている。

我が国における非加速器物理学の研究は、世界の先頭に立っている。特に、陽子崩壊の検出、太陽ニュートリノの検出、大気ニュートリノの検出等を主目的としたスーパーカミオカンデ実験、大阪大学の2重ベータ崩壊実験や宇宙暗黒物質粒子の探索実験、東京大学の宇宙反物質探索実験や宇宙暗黒物質粒子の探索実験、京都大学のアクシオン探索実験は、世界的な成果を挙げており、今後も推進しなければならない。

上述のように、自然界や宇宙は素粒子物理学の一大実験室である。素粒子物理学と宇宙物理学を新しい側面から研究する非加速器物理学には、まだ多くの未踏の研究領域が広がっており、これらの領域を開拓する独創的な研究を積極的に推進することは重要である。東北大学が計画している、大容量液体シンチレータを用いる超微弱素粒子反応計測実験や、重点領域研究チームによ

る超冷中性子を用いる種々の実験などは、今後、期待される研究である。

素粒子物理学の発展のためには、エネルギー・フロンティアを目指す加速器物理学の推進が最重要研究課題であるが、一方小規模で、かつ独創的な非加速器物理学研究を並行して促進することは、素粒子物理学研究の発展のみならず、研究者の育成、実験技術の向上など、総合的研究力を高めるのためにも重要であり、その必然性は益々増大してきている。

5.3 国際協力

国際協力実験の意義としては、第一義的には一国ではできないような大型研究計画や国内では行われていないユニークな実験などに貢献して物理の第一級の研究成果を挙げることができる。同時に人材の育成という面においても様々な波及効果を期待することができる。たとえば、比較的小規模の実験においても大学院生や助手など若い人々にそうした海外で実験を行う機会を与えることにより、国際的な環境で協力して研究を進めていける国際感覚を持った人材に育てることができるという重要な面がある。更に、様々な海外の研究者グループと協力することにより、異なった実験の手法、技術を互いに学び、分かち合うことができ、同じ実験や加速器で苦労して得た人と人とのつながりと経験は、将来の大掛かりな国際協力を進めていく上で非常に貴重なものとなる。

以下に、我が国の高エネルギー物理学研究者の参加している国際協力実験について、その現状を説明し将来の展望を検討する。

5.3.1 LHC 計画

LHC(Large Hadron Collider)とは、重心系エネルギー 14TeV で陽子・陽子を衝突させる CERN の次期加速器計画であり、LEP2 終了後 LEP トンネル内に建設が予定されている。LHC は陽子・陽子衝突実験を 2005 年に開始し、ルミノシティは最終的に $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に到達する予定である。日本からは KEK および大学の研究者が陽子・陽子衝突実験 ATLAS に参加するとともに、加速器建設にも協力することが決定している。

第 2 章で論じたように、LHC の最大の目的はヒッグス粒子の発見であり、標準理論だけでなく、超対称性理論の予言するヒッグス粒子についても、広い質量範囲にわたっての発見が可能である。また、カラーを持った超対称性粒子や複合模型が予言する新現象など、標準理論を超える未知の現象をエネルギーフロンティアで探索する。さらに新粒子の探索だけでなく、トップクォークの精密測定や B 中間子を用いた CP の破れの測定など、豊富な物理成果が期待されている。また LHC は、CP の破れの測定に焦点を合わせた実験 (LHC-B) や、鉛などの重イオンを衝突させる実験など、様々なオプションが計画されている。

5.3.2 SLC/SLD 実験

SLC は、電子、陽電子を 50GeV まで加速しアークによって振り分けて衝突させる世界初のリニアコライダーで、1989 年から実験を開始している。SLD 測定器には、日米科学協力事業の一環として、名古屋大学、東北大学等が参加している。1992 年からは偏極電子の加速に成功し、Z ボソンの生成断面積について電子偏極非対称度を測定することによって、電弱相互作用のワインバーグ角を LEP データに比する高精度で得ている。SLD グループでは、最終収束系を改造したうえで実験を継続し、約 300 万もの偏極 Z ボソン生成事象を観測する計画が検討されている。これら

SLC/SLD での経験は将来のリニアコライダー計画において、加速器の開発及び物理への指針と
いった点において重要な役割を果たすと期待されている。

5.3.3 LEP

欧州原子核研究機構 (CERN) は世界最大かつ最高エネルギーの電子・陽電子衝突型加速器 LEP
(Large Electron-Positron collider) を建設し、1989 年から実験を開始した。4 つある測定器のひ
とつである OPAL 実験には、東京大学を中心とする日本グループが、測定器の設計段階から参加
し中心的役割を果たしている。

LEP はまず、重心系エネルギーを Z ボソンの質量近辺において実験を行ない (LEP1)、クォー
クレプトン世代数の決定の他標準理論の精密検証を行うとともに、ヒッグス粒子や超対称性粒子等
の新粒子、新現象の探索を行なってきた。第二段階としてビームエネルギーを増強し、1996 年に
 W 粒子の対生成が可能な重心系エネルギー (172 GeV) に到達した (LEP2)。今後もエネルギー
を増強して実験を行い、 W 粒子の対生成を用いての電弱相互作用の精密検証が行なわれる。また、
 Z ボソンの質量程度までのヒッグス粒子は発見可能であり、超対称性粒子発見の期待も大きい。

LEP はその実験開始以来、常にエネルギーフロンティアで活躍してきており、LEP が目指す物
理は、重心系エネルギーは小さいものの、次世代のエネルギーフロンティアであるリニアコライ
ダーの物理と方向を同じくするものであり、LEP2 で得られる物理成果はリニアコライダー計画に
も極めて重要な情報を与えるものと期待される。

5.3.4 TEVATRON

TEVATRON は、米国フェルミ国立加速器研究所に建設された現在世界最高エネルギー (重心
系エネルギー 1.8 TeV) の陽子・反陽子衝突型加速器で、1987 年より物理実験を開始した。エネ
ルギーフロンティアのハドロンコライダーの特徴は、電子・陽電子衝突型加速器が到達できないエ
ネルギー領域での未知の新現象が発見可能なところにある。TEVATRON での 2 つのコライダー
実験のうち、CDF 実験には、日米科学協力事業の一つとして筑波大学等が準備段階より参加して
おり、1996 年 2 月迄に積算ルミノシティー 0.11 fb^{-1} のデータを収集し、その成果として 1994 年
にはトップクォーク生成の証拠を見つけた。

1999 年からは、現在建設中の主リング入射器の完成によって年間 2 fb^{-1} のデータを収集でき
るようになり、トップクォーク及び W ボソン質量の高精度測定や、 B 粒子を用いた小林・益川行列の
パラメータの精密測定が予定されている。また将来計画としては、2004 年頃に建設予定のリサイ
クラー・リングを反陽子の貯蔵リングに用いて、ルミノシティーを増強する TeV33 計画も検討され
ており、120 GeV 以下の質量範囲でのヒッグス粒子の発見が可能になると期待されている。

5.3.5 DESY HERA

ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) では、世界に唯一の電子・陽子衝突型加速器 (HERA)
が建設され、1992 年より実験が始まっている。衝突実験には二つの国際共同実験グループが組織
され、日本からは東京大学原子核研究所、東京都立大学等が ZEUS グループに参加している。

高エネルギー電子・陽子散乱実験は、電子をプローブとして陽子内部に存在するクォークを探
らうとする、いわば巨大な電子顕微鏡である。衝突の重心系エネルギーは約 300 GeV で、同様な

静止標的実験より 10 倍以上高くなっている。1995 年までに得られたデータによって、陽子内部のクォーク及びグルーオンの分布に関して高精度の測定が行なわれた。この結果は、標準理論の中核となる量子色力学 (QCD) のよいテストとなる。

1998 年以降は偏極電子ビームでの散乱実験も可能となる予定であり、また 2000 年にはより高輝度の加速器へと性能強化が行なわれる。これにより、右巻き W ボソンや右巻きニュートリノの探索など、様々な電弱相互作用の精密検証が可能になると期待されている。

上記の衝突実験に加えて、HERA では偏極電子ビームと静止原子核標的との散乱を研究する実験 (HERMES) も 1995 年より並行して行なわれており、日本からは東京工業大学が参加している。また、陽子ビームと静止原子核標的を用いて、 B 中間子を生成させその性質を調べる実験 (HERAB) も承認され測定器建設が進行している。

5.3.6 固定標的実験

国際協力として海外で行われている固定標的実験としては、Fermilab 国立加速器研究所 (Fermilab) で行われている KTeV 実験や、Brookhaven 国立研究所 (BNL) で行われている E787 など、 K 中間子崩壊の精密測定から弱い相互作用を研究する実験がある。KTeV 実験には大阪大学が参加し、直接的な CP の破れのパラメーター、 $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$ の測定 (E832) および稀崩壊モード $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$, $K_L \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$ などの探索実験 (E799) を行っている。BNL E787 には KEK と阪大が参加し、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 探索を行っている。

2000 年頃からは Fermilab の主リング入射器 (Main Injector) や BNL の AGS を用いた K 中間子崩壊の実験が考えられている。近い将来の K 中間子崩壊の主眼の一つは $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を用いた、直接的な CP の破れの発見および小林-益川行列の η の測定になる。この実験は B-factory の実験とほぼ同時期に行われ、CP の破れの起源を探る上で B 崩壊の実験と相補的な役割を果たすと期待されている。

また、CERN SPS (Super Proton Synchrotron) においては、ニュートリノ振動 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 直接検証を目的とした二つのニュートリノ実験が進行中であり、名古屋大学を中心とする日本のグループは CHORUS 実験に参加し、測定器の重要部分となるエマルジョン標的を担当しており、その実験結果が待たれている。名古屋大のグループはまた、エマルジョンを用いて Fermilab で ν_τ を探索する実験 (E872) も行っている。

次世代のニュートリノ実験としては、CERN や Fermilab においてロングベースラインのニュートリノ振動実験が計画されており、21 世紀初頭の実験開始を目指している。これらのロングベースライン実験によって、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ のニュートリノ振動をこれまでカバーできなかった広いパラメータ領域で検出することが可能になり、ニュートリノの本質に迫ることができよう。

その他、SPS からの陽子やミュオンビームを用いた核子のスピン構造の研究、グーボール等のハドロンスペクトロスコピーの研究を合併して新たに提案された COMPASS 実験にも日本から参加している。

5.3.7 タウ・チャーム・ファクトリー

中国科学院高能物理研究所 (IHEP) では、BTCF (Beijing Tau Charm Factory) の建設を進めている。これは電子・陽電子の 2 リング衝突型加速器で、ビームエネルギーは 1.5~3 GeV、目

標ルミノシティは $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。BTCF では、スカラー・グルーボールや D 中間子の粒子反粒子混合及びタウ粒子崩壊における CP 非保存の研究を目的としている。KEK は BTCF 加速器や測定器開発への協力を表明しており、また ACFA(Asian Committee for Future Accelerator) もその R&D の推進を支持している。この計画はアジア地域における我が国以外の唯一の高エネルギー加速器計画であり、今後日中協力の重要な柱の一つとなりえるものである。

6 人材育成と組織

6.1 概観

高エネルギー物理学は多くの先端的科学技術を総動員して成り立つ分野である。広範な興味を喚起し、幅の広い人材を結集して、加速器・非加速器実験による素粒子物理研究及び加速器そのものの研究の発展を図るべきである。

高エネルギー物理学は、長期展望に立った巨大プロジェクトを基幹とする分野である。基幹計画が期待される成果を挙げるには、プロジェクトの方向性が明確に示され、コミュニティー全体の力量が十分に発揮されることと、そこで第一線を担う研究者の意欲と創造性が生かされるように組織化された研究体制が必要である。また、このような計画を遂行するためには若い世代の研究者層の育成と充実が重要である。

いかにプロジェクトが巨大になっても、研究の推進力は個々の研究者の創造性と熱意にあることには変わりはなく、いかにこれらを引き出し得るかが組織としてプロジェクトを推進する上で鍵になる。組織のリーダー達はプロジェクト全体の方向性を絶えず明示していくと同時に、研究者が独創的なアイデアと新しい芽を育て得る環境と、それが科学的に正当な評価を受けて汲み上げられる体制を強化すべきである。

次期基幹計画である e^+e^- リニアコライダーはアジア・太平洋地域の計画として建設し、広く国際的に開く計画である。組織、人材育成について開発研究及び建設段階から、それに相応しい国際協力を図る環境整備を行うべきである。

6.2 高エネルギー加速器研究機構と大学の役割

1996 年の高エネルギー委員会は大学と共同利用研究所の有るべき関係を議論し、大学の活性化を図るため、大学活性化小委員会を設立した。この努力は重要であり、本小委員会もこれを支持し、高エネルギーコミュニティーの発展を担う次世代のために、広い視野に立った議論を期待するものである。

これまでの日本の高エネルギー実験の多くは、大学が中央研究機関施設の共同利用や共同建設、また共同実験を行うという形態で実施されてきた。これら大学と研究所の協力関係によって、研究プロジェクトが発展し、次世代を担う研究者の育成もその中で行われてきた。有能な研究者の教育は、第一線の研究活動が行われるところで初めて可能である。このような意味で、トリスタンの果たした役割は大きい。即ち高エネルギーコミュニティーに質・量ともに飛躍をもたらし、これまで高エネルギー講座を持たなかった大学にもトリスタン共同実験への参加が広がりをみた。これは B ファクトリー計画においてさらに発展させ、リニアコライダーへと継続させて行くべきものである。

大学の高エネルギー物理研究者は、大学院生を含み、10名程度以上の規模のグループが過半であるが、半数近くはスタッフ1-2名の小グループに分散しており、大型共同研究の面では必ずしも容易ではない状況にある。反面、それだけ学生との接点を多く持ち、若い世代に対して影響力を与え得る立場にある。これらの様々な条件にある大学の研究者の力を基幹プロジェクト推進のために汲み上げられるように、大学-大学、大学-KEK間の連携した研究・教育の協力体制を追求することが必要である。

基幹プロジェクトを推進する大学グループは、基幹プロジェクトをKEKと共同で推進しながら、次世代の研究者を育成し、かつ萌芽的な研究にもチャレンジする独自の使命を持っており、柔軟で自由な発想に基づく長期的視野に立った加速器、測定器の開発研究を促進して行かねばならない。大学がそのような次世代の物理を拓く実験手法の開発能力を持ち、かつKEKとの共同研究がより効果的となるために、大学の基幹設備の充実を図るべきである。

予算の効率的執行の方針により、これまでKEKの設備を使用するプロジェクトへの予算・人員はKEKへ集中してきた。これは一見効率的である反面、各グループが主体性と責任を持って力量を十分発揮し、長期的な展望を持って共同建設を進めて行くべき実態に即さない面もある。長期にわたる基幹研究プロジェクトを成功させる為には、大学と中央研究所との共同研究をより強力なものにし、双方の総力を挙げて取り組む体制を構築しなければならない。特に、参加各大学の責任を明確にし、それに応じて大学への予算の割り当てを行なうことは重要である。これにより大学の研究者は、自らの責任に於いて基幹設備の充実と研究活力の強化を図ることが可能となり、独自の長期的展望を持って基幹プロジェクトに参加し、且つ将来の為の萌芽的研究に取り組むことができる。

6.3 基幹計画のための人材確保の多様性の追求

リニアコライダーは先端技術を結集して実現するものである。本来の高エネルギー物理学分野の技術はもとより、材料や製造などに関わる、多岐にわたる先端分野の技術を総合的に用いる必要がある。従って、幅広い研究者の興味を引くものであって、人材の育成、実験組織の形成は現在の高エネルギーコミュニティの枠をさらに充実させながら、かつより広く行うべきである。加速器科学分野の進展により、我々の周辺には、放射光や中性子を利用した物質科学、種々の粒子線を用いた医学利用、あるいは将来のエネルギー問題に関する課題に取り組むなどの多様な加速器ユーザーが存在する。それらの分野で加速器、あるいは高エネルギー実験に興味を持つ有能な若手研究者と積極的に交流を深める努力が必要である。

大学や研究所における技術者研究協力者集団の数は元々諸外国に比べると多くなく、それどころか定員削減によりさらに減少傾向にある。これに歯止めをかけ、また給与体系を魅力あるものに改善するためにコミュニティ全体が世論や所轄官庁の理解を得るための努力をしていく必要がある。

我が国では、加速器、測定器の開発、建設に関しては、多くの企業の技術者、研究者と協力しながら進めるといった独特の方策をとっている。これは多くの技術者を持つ企業と力を合わせて一緒にやっていくなかで、相互に加速器科学や先端的技術に関する力量を高め、機能的に人材を確保するといった効果があり、今後もさらに発展させるべきものである。その際、人の移動に伴って、ノウハウが散逸せずに蓄積できるような、共同研究の進展が重要である。また、それら企業の技術者、研究者に対して、大学やKEKが大学院生、研究生、あるいは客員研究者として受け入れ、あるいは招聘するための受け皿を整備するべきである。CERNもLHC建設においては、企業と

共同で R&D を行い、企業の力を活用して超電導電磁石等の製造を行うといった方式を探ろうとしている。規模が一定程度以上のプロジェクトにおいてはこのような方式が幅広い人材の確保、大規模生産システム、大量の部品の品質管理などの面から有利であり、推奨されるべきものである。

6.4 国際研究所に相応しい環境の整備

国際的研究所（研究機構）においては人事や委員会の構成員などに、国籍、民族による区別があってはならない。

我が国がリニアコライダーのホスト国として効果的に機能するためには世界の研究者を受け入れるのに相応しい環境の整備を進めることが極めて重要である。とりわけ研究者とその家族の住居、医療、子弟の教育、言語教育、配偶者の職場などの整備を行うと同時に、文化的な生活を送ることができる様に配慮すべきである。又、研究者間のみならず、関係当局、関係自治体等も異なる文化を認め、外国から来た研究機関の研究者や学生が我が国で生活して行く上での様々な問題に対して柔軟な姿勢で対応することを要望する。このためには中央研究機関は海外からの研究者とその家族のために、専門職員を配備すべきである。

国際的な研究所として、国内及び国際的に共同研究を活力を持って推進するためには、人事交流が重要であり、その活性化を図るべきである。特に国際的人事交流は我が国ではまだ部分的なものでしかなく、その促進は真に国際的研究機関になるために必須のことであり、不断の努力が必要である。また、研究の国際化を積極的に推し進めるために、国内外からの短期・長期滞在の研究者が KEK を研究拠点として研究を推進できるような基盤の整備が急務である。

7 他分野との関連

7.1 概観

科学とは何かということに関しては、自然科学、人文科学も含め、哲学的、宗教的、イデオロギー的論議等、いろいろな観点から論じられてきたが、それが人間の知識の体系化という側面を持つことについては、異論のないところであろう。科学の進歩にともない、各分野がますます精緻化し、専門化していく一方で、それらを統合し、より体系化された統一的観点から自然を理解しようとすることは、科学自身の本性から考えても当然の営みである。また、一つの分野の発展が、その分野の知的財産の蓄積にとどまらず、他分野の研究手段の革命をもたらしたり、考え方の転換を促してきた例は非常に多い。さらに、いくつもの分野にまたがった学際的アプローチが、新たな観点を導入し、新しい分野を切り開き、科学をより豊かなものにしてきた例は枚挙に暇がない。このように、応用分野をも含めて、科学の多くの分野が互いに刺激しあいながら、均衡のとれた形で発展していくことが、もっとも望ましい形である。

このような観点からも、高エネルギー物理学という分野は、他の分野の発展の成果を直接的にも間接的にもいち早く吸収しながら、一方では新しい学際分野の創設を促すとともに、他分野の発展に寄与し、今後もますますその期待が高まっているといえよう。ここでは、広く科学全体から見たときの高エネルギー物理学の位置づけを行う。

7.2 科学の一分野としての高エネルギー物理学と他分野との関連

体系化された知識の集大成という科学の一側面に注目するとき、自然科学の諸分野には各々二つの側面がある。一つは各分野が対象とする物象により規定される側面で、各々の分野に固有のものであり、もう一つは、個別科学の方法や法則をその具体的対象物に依らずより抽象的、普遍的な妥当性を持ち得る原理として捉えようとする見方で、この側面を通して学際的な研究交流が可能となる。素粒子物理学（高エネルギー物理学）もその例外ではない。

第一の側面に注目するならば、素粒子物理学は物質の究極の構成要素としての素粒子とその間に働く基本法則を明らかにすることを課題とする自然科学の一分野である。LHC やリニアコライダーによる高エネルギー実験は、素粒子の質量の起源を解明することにより、何故特定の素粒子が存在するのか、また、それを可能とする時空（時間と空間）の構造はどういうものであるべきかというより本質的な課題に取り組む確かな手がかりをもたらずと期待されている。実際、現在最も有力な新しい物理の候補と目される超対称性理論は、我々の時空が4次元（時間1次元と空間3次元）ではなく、実はスピンの異なる素粒子に対応するような余分の次元を持つことを示唆している。更に重力をも含めた全ての素粒子とその相互作用の統一理論と目される超弦理論に於いては、宇宙創生の機構の究明と共に、何故我々の時空が4次元であるのかが研究の主要な課題になると考えられている。このように素粒子物理学の研究対象は、我々の自然に対する最も素朴な疑問に関わるものなので、その研究成果は我々の自然観、宇宙観に深い影響を与えてきたし、今後も与え続けるであろう。一方素粒子物理学が対象とするエネルギー、時間、空間的距離のスケールが他の自然科学分野の対象と較べて極端に異なる為、そこで見出された新しい法則が直接他分野の知識体系に影響を及ぼすとは考えにくい。その唯一の例外と捉えることができるのが、1章でも述べた素粒子と宇宙の関係であって、これはビッグバン宇宙論による宇宙創生が、素粒子物理学が対象とする超高エネルギー現象だと考えられるからである。この意味でいまや宇宙物理学と素粒子物理学が融合して、一つの科学分野になりつつあるような様相を呈している。この極微の世界と極大の世界の融合という事実は、素粒子物理学と宇宙物理学が今、我々の自然観の革新に多大な影響を与える基礎となっている。

素粒子物理学のもう一つの側面は、素粒子の世界で見出される科学法則が、より抽象化された形で、自然科学の他の分野にも適用され、又逆に、マクロな世界で発見された法則が素粒子の相互作用を支配する法則として再発見される等、その研究が他の自然科学諸分野の研究と共に発展する関係にあることを意味する。またそれは、従来分類法に基づく科学分野には収まらないいわば分野横断的な学際的なアプローチに、素粒子物理学者も積極的に参加していく基盤となる側面である。このような学際的な発展の例は枚挙に暇がない。良く知られた例としては、電気工学で発達していた理論形式が量子力学的世界に応用される場合や、超伝導理論でよく知られた概念が、素粒子の質量の起源の解明に本質的な役割を果たすと考えられていること等が挙げられる。また最近脚光を浴びつつある複雑系の科学や、カオス、カタストロフ、非線型といったキーワードで語られる科学の横断面は、宇宙や時空の創生といった最も根源的な問いに対峙した時、素粒子物理学の一断面でもありうるのである。

このような例は数限りなく存在するが、もっとずっと抽象的には、時代背景など芸術をも含むような全状況が、科学に新しい概念の導入を促すということもありうるであろう。一方、現代が科学技術の時代といわれるのは、コンピューターを始めとした技術の発展が、大きく時代そのものを動かしていく原動力の一つとなっているからだけではない。DNAを始めとする遺伝学の研究や脳の研究を含む最近の生物学など、物理学のみでなく、いろいろな科学の分野の研究で得られた知見が、時代精神そのものに大きな影響を与えているからである。1章、2章で詳述したような質

量の起源や宇宙の創成に関することは、従来は、それが科学上の問いたりうるかについてすら、疑問視されていたものである。質量の起源の解明を始めとした素粒子物理学の大きな転換が、今リニアコライダーによって切り開かれようとしている。質量という物質にとって根源的な概念に変革を与えるということは、人類の物質観、宇宙観、自然観、さらには科学観そのものにすら大きな変革を迫ることである。このような転換が特に予想される今だからこそ、リニアコライダーを中心とした素粒子物理学を強く推進する必要がある。

7.3 他の加速器科学分野との関連

現在高エネルギー物理学と呼ばれている分野は、歴史的にはその時代時代に物質の根源または物質の最小単位としての基本粒子、それを支配している自然法則に関する研究と定義することができ、その意味で、素粒子物理学という名前と呼ばれてきた。20世紀初頭には物質の最小単位は原子であり、さらに水素原子の原子核すなわち陽子となり、現在は陽子の構成要素であるクォークが素粒子と考えられている（クォークの構成要素についても議論されている）。原子の中心の非常に小さい空間に全部の陽電荷が凝集しているという原子モデルの検証から始まって、20世紀の素粒子の研究は、より高エネルギーの粒子を物質に衝突させて、その反応を研究するということが研究手段の中心としてきた。特に、原子核の構成要素としての素粒子の研究は、より高エネルギーの加速器を使うにしたがって、より質量の大きい素粒子が発見されることから、高エネルギー（原子核）物理学という名称を持つに至った。この名称は、高エネルギーで発現される原子核の性質の研究という意味ではあるが、より実際的には高エネルギー加速器を使用する実験物理学という側面を持っている。このように、伝統的な意味での素粒子物理学が、高エネルギー加速器を使った実験を主たる研究手段としてきた一方で、低エネルギー加速器を使って低エネルギーで発現される原子核のいわば物性を研究するという分野が、低エネルギー原子核物理学と呼ばれ、一つの研究分野として発展するに至っている。高エネルギー物理学がますます高エネルギーへとその研究の対象を移していくにしたがって、現在では、この中間の中高エネルギー原子核物理学という分野も生まれている。

初期の加速器の発明がその当時の素粒子物理学の研究を目的としていたという歴史的経緯から、高エネルギー物理学が長く加速器技術発展の牽引車であったことは当然の帰結である。現在でも、高エネルギー物理学が、より高エネルギーの加速器を要請することから、より高度の加速器技術を必要とし、この牽引車としての役割はますます増加している。その一方で、高エネルギー物理学とともに発展してきた加速器が、上記の広い意味での原子核の研究にとどまらず、多くの分野で、画期的な研究手段を提供するに至り、その分野の研究に特化した加速器技術の発展も見られるようになってきた。その結果として、高エネルギー物理学以外の目的のための加速器技術の発展が、高エネルギー加速器に応用されるという例も増えている。このようにして、加速器技術が高エネルギー物理学のみでなく広汎な科学・工学分野にわたって重要な研究手段を提供するとともに、産業への応用も広がるに至り、加速器科学という大きな総合科学的学際分野が誕生した。

すでに産業化された加速器の応用としては、医学利用、産業利用等を目的とした放射線アイソトープの生産がある。また、癌治療を目指した、陽子、重イオン加速器は、現在、実験的段階からより日常的な治療手段の段階に移りつつある。物質の処理技術として一次ビームを使うという意味での加速器の産業界への応用も、ますます増加すると考えられる。

高エネルギー物理学を目的とする加速器の研究開発およびその建設・運転が、直接的に他の加速器科学分野の発展を促してきた例としては、放射光科学がある。放射光は、その輝度を始めと

した優れた特性のため、高エネルギー電子・陽電子リングの登場とともに、直ちに他の科学・工学分野から注目を浴び、その有用性が実証されるに至った。その結果、次々と放射光専用リングが建設され、現在は第3世代、第4世代と言われるリングが建設・運転されている。広汎な科学分野にとってすでに日常的な研究手段として認知される一方で、半導体の生産等、産業への応用への期待も高まっている。放射光の輝度（ある指定された特性を満たす光の強さで放射光の特性の指標）の向上は、ビームの特性の向上を要請するが、これこそ現在でもBファクトリーやリニアコライダの減衰リング（ダンピングリング）等で求められている特性そのものである。このように、放射光専用リングの発展は、高エネルギー物理学用加速器と手を携えてきた。

さらに、夢の光源として期待されている自由電子レーザーの実現にとって最も有望な電子ビーム源の候補は、輝度の高いリニアコライダーそのものであり、いくつかのリニアコライダーの試験機でコヒーレンスの良いX線自由電子レーザー計画が実現されようとしている。

一方、高エネルギー陽子加速器も、パルス状中性子源として注目され、KEKは500MeVブースターからの陽子ビームを使用したKENSを世界に先駆けて建設した歴史を持っている。その有用性が認識された結果、英国ではその100倍にも達する強度を持つISISが、米国ではLANSCEが建設され、放射光同様広汎な科学分野で重要な研究手段となっている。特に、中性子が水素に敏感なことから、生命体等複雑な生体高分子の構造解析には放射光以上に強力な武器として発展してきた。また、中性子が水素原子核とほぼ同じ質量を持つことから、質量のない光では探査できない物質の諸相を実現することが可能であり、物質のダイナミズムの研究にとっては最も期待されている研究手段となっている。大強度高エネルギー陽子加速器はさらに、質量の重い電子・陽電子ともいべきミュー粒子をも大量に作り出すことができ、パルス状中性子源同様、その特徴を生かした物質の研究手段として脚光を浴びつつある。このような状況から、JHF計画を始めとして、ヨーロッパではESS計画、米国ではORNS計画等、第3世代の中性子源、ミュー粒子源が次々と実現されようとしている。しかし、このような大強度高エネルギー陽子加速器の建設には、大電力高周波加速装置の開発、ビーム損失の削減、ビーム不安定性の回避等、最も高度な加速器技術の集大成が必要であり、それはまさに高エネルギー物理学用加速器で発展してきた加速器技術の延長線上にある。

特に、KEKでは、12GeV陽子シンクロトロン（上記500MeVブースターを含む）放射光用加速器PF、さらにはトリスタンを建設・運転し、現在はKEKB、ATFが建設中であり、近い将来JHFの建設が予定されている。これらは、それぞれの加速器の開発、研究、建設、運転が次の加速器の発展を促してきた歴史そのものであり、高エネルギー物理学用加速器の発展なくして、加速器科学の発展がありえないことを実証してきたといえる。逆に近年は、高エネルギー物理学用以外の加速器のために開発された技術が、高エネルギー物理学用加速器に応用される例も増え始めている。

また、21世紀のエネルギー・環境問題を考えるとき、環境汚染が極めて少ないという意味でクリーンで、かつ限りなく安全なエネルギー源が必要であることは言うまでもない。原子力発電に伴う放射性廃棄物処理、さらには新しいコンセプトによる原子力発電にとって、高エネルギー超大強度陽子加速器は近年特に期待されているところであって、日本原子力研究所で計画が検討されている中性子科学研究計画においてその中心的役割を果たすはずである。その実現のためには、トリスタんで初めて実用化された超伝導加速システムは不可欠の要素であり、さらにはKEKB、ATF、JHFで開発されてきた、大電流用大電力高周波加速器システムを始めとして、一方では加速器理論も含む総合科学としての力量が必要とされている。また、夢のエネルギー源として各国が競って開発している核融合炉にとっても、その開発のためには炉材料研究に使用される超大電

流重陽子源は不可欠の要素であって、各国が共同で建設することが計画されている（IFMIF）。

このような歴史的経緯に鑑みると、加速器科学の一分野という観点からの高エネルギー物理学の発展は、21世紀を切り開く技術の先導役として不可欠のものであるといわねばならない。

7.4 加速器科学分野と他分野との関連

上述したように、加速器科学が総合科学であることから、当然他の高度技術との関連が深いこととは言うまでもない。現在の日本における高エネルギー物理学を含む加速器科学の隆盛は、経済力によることは勿論、その高度な技術力によるところは測りしれない。逆に、高性能加速器の研究開発・建設・運転は、先端高度技術の発展を促してもきた。本来、高エネルギー物理学用加速器は、現在得ることのできる先端高度技術を駆使して、到達可能な性能を極限まで使いきることによって設計・建設されるものであって、それこそエネルギー最前線（energy frontier）と呼ばれる。したがって、その開発研究・建設・運転には、先端高度技術の最前線上で一步でも抜け出ようとする努力が日々積み重ねられており、その成果は当然、先端高度技術をさらに推し進めるものである。たとえば、高周波加速空洞建設に必要とされる超高精密機械加工・超電導技術・表面処理技術等を始めとし、高精度計算機ネットワーク、高速回路、高速測定技術など、産業技術の推進に役立った例は数えきれない。

（完）