

高エネルギー物理学将来計画
次期計画検討小委員会報告

(1986年3月)

目次

1. 提言	2
2. 高エネルギー物理学の価値	3
3. 高エネルギー物理学の展望	
3.1 歴史的展望	7
3.2 将来への指針	7
3.3 エネルギーフロンティアを実現する加速器	9
4. 我が国の進むべき方向	
4.1 望ましい研究環境	12
4.2 "幹"の計画: エネルギーフロンティア	14
4.3 "枝"の計画	16
4.4 日本の高エネルギー物理学界におけるマンパワー	17
5. 電子リニアコライダー: 第一次開発計画	19
6. 小委検討経過	21
添付資料1: トリスタン phase II の位置付け (中間報告抜粋)	22
添付資料2: 次期計画検討小委の任務とメンバー構成	25

1. 提言

物質の究極を探る高エネルギー物理学は、加速器の発展と共に、遂に 10^{-16} cmのミクロのレベルに到達し、物質の究極粒子をクォークとレプトンとし、力の根源をゲージ粒子とする新しい物質像、標準理論を確立した。この標準模型自身は、現象論的記述を完全には払拭できないものの、現存する全ての実験事実を説明しており、その適用限界を未開の領域に求めろという新たな問題を提起している。この局面を打開し、新しい物理への突破口を開く糸口はエネルギーフロンティアに在るというのが我等の信念である。トリスタンによってエネルギーフロンティアに到達し、世界の第一線に立つことになった今、我々は引き続きエネルギーフロンティアを求めて行かなければならない。トリスタン後の我が国高エネルギー物理学の将来計画として、我等が一致した意見は次の通りである。

現トリスタン計画達成後、重心系エネルギー数百GeV~数十TeV領域のエネルギーフロンティアでの研究を、最重要課題として推進する。そのために、

1. TeV領域の電子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。

上記エネルギーフロンティア実現のためには、引き続き創造的な研究活動を維持し、すぐれた若手研究者の育成をはかる基礎作りが欠かせない。そのためにエネルギーフロンティアの効率良い早期実現に支障をきたさない配慮のもとに、物理の発展に応じて、現有設備の充実、拡充を計る。さらに、非加速器素粒子実験を、加速器を使用しない分野として、独自に推進し、多様な物理研究の可能性を追求する。なお、海外協力実験や加速器の国際協力は今後共大いに奨励すべきである。当面の推進課題として、

- ◎ a. 現トリスタン計画達成後に、主リングのエネルギーを増加する。さらに、低エネルギー・大強度コライダー等への将来の改良を目指した努力をする。
- b. 現12GeV陽子加速器を改良して強度増を計る。

◎非加速器素粒子実験計画を推進する。

目標達成に至る道は長く、実現には辛抱強い努力が必要である。他分野に対する影響も無視できないであろう。以下、第2章で高エネルギー物理学を推進する意義を改めて問い直す。第3章では高エネルギー物理学の一般的動向を述べ、エネルギーフロンティアを目指す理由を述べる。第4章で我が国の進むべき方向についてのシナリオを描く。上記の提言はこの背景の中でのステップと見なされるべきである。第5章は、電子リニアコライダーのR&Dのための具体的な実行計画である。最後に第6章で、これまでの検討経過を述べる。

2. 高エネルギー物理学の価値

我々を取り巻く物質は何でできているか、また、それらを支配する法則は何であるか？ 有史以来、人類が問い掛けてきたこの素朴な質問に対し、我々はようやく自信を持って答えられると感じ始めている。10年程前であったならこのような自信のある態度はとれなかったであろう。最近の10年間の高エネルギー物理学の急展開により我々の物質観は大きく変化した。我々は今日、物質の根源的構成要素はクォークとレプトンであり、それらを互いに結び付ける力の根源がゲージ粒子であることを理解した。現在の広大な宇宙の構造や物質の反物質に対する過剰が、ビッグバン初期の素粒子的現象の遺産であることも明らかにされつつある。この理解の過程で果たした加速器及びその背景に有る科学技術の役割は、どんなに強調しても強調しすぎることはないであろう。過去40年間の高エネルギー物理学の発展は、加速器の発展と密接に結び付いている。より緻密な構造を求める科学者の努力は加速器の大型化を促し、研究目的を遂行するには高額の費用と最新の技術の駆使、新しい運営形態の研究組織が必要となるにいたった。それに伴う困難は我々の予期以上であったし今後も益々そうであろう。これと平行して、何故高エネルギー物理学かという問い掛けが、科学者のみならず社会一般に起こって来るのは、けだし当然のことであろう。我々は、その問いに対しいささかなりとも答える努力をしてみたいと思う。

知的好奇心 高エネルギー物理学または素粒子物理学は物質の究極構造を明らかにしようとする学問の一分野で、原子論的観点及び手法をミクロの世界へと進めていく努力の場であり、人間の知的探求の最先端の場であると嘗える。高エネルギー物理学者、また広く科学者を駆り立てるものは、人間の心に内在するやむにやまれぬ衝動であり、幼な子の「何故空は青いの？ 何故月は落ちて来ないの？」といった素朴な疑問に答えようとする努力と同じものである。古くより人間が抱いてきた限りない好奇心は宇宙観、物質観として人間の持つ世界像さらには人間の思想文化を作り上げてきた。人間がこうした知的探求努力を、なかならず高エネルギー物理学の追求するテーマを如何に高く評価するかは、高エネルギー物理学の歴史が数々のノーベル賞受賞によって彩られていることでもわかる。科学は本来文学芸術と同列に論ぜられるべき文化活動である。その結果として技術や思想にも重要な変動をもたらす原動力となってきたこともまた事実である。しかし、人間の生活を豊かにする科学の恩恵はむしろ結果であって、科学その物の本来の価値は結果だけによって決められるべきものではない、というのが我々の信念である。このことは特に基礎科学の役割を考えれば明らかになるであろう。

基礎科学 高エネルギー物理学は、その時代での最も基本的なレベルでの物質の構造と、そこに働く基本法則を明らかにすることを目的とするが故に、基礎科学の中でも中心的な役割を果たしてきた。此処で発見された法則を応用して、自然現象を説明しようとする時、一つの新しい学問が打ち立てられる。原子物理学、原子核物理学は名前こそ違ったが、かつては高エネルギー物理学の場であった。その過程での努力が、量子物理学という全く新しい学問哲学体系を創始した。こうした基礎学問の周辺に対する影響はかなり顕著である。最近の例を挙げれば、

中高エネルギー原子核物理学が大きな目標とするクォーク・グルーオンプラズマは、QCD（量子色力学）の直接産物であるし、原子核物理のハイパー核への興味は高エネルギー物理学で発見された“奇妙粒子”を原子核に注入して新産面を開こうとする試みである。より周辺の分野への浸透は緩やかなものであるが、及ぼす影響はかなりドラマチックとなる。シュレーディンガー方程式を出発点とする物性物理学の守備範囲は広く、その応用は今日のハイテク産業に直接つながる。高エネルギー物理学で打ち立てられた場の量子論は、物性物理学でも不可欠の道具となっているし、最近の例では、くりこみ群の相転移論への応用が耳に新しい。近代の化学、生物学は量子力学無くしては考えられない。

基礎科学で発見された原理が直接の利益を産み出すには、30年前後の歳月が必要であろう。今日の原子力エネルギーは、ある原子核反応の前夜でほんの僅かな質量欠損が生じるといふ事実の応用である。国家の繁栄は直接には経済活動に負う所が大きい。しかし、長期的に活力が持続できるかどうかは技術開発力にかかっている。そのため、他国の輸入技術に頼っていた我が国のこれ迄の態度が反省され、ようやくのことに基礎科学技術の振興が叫ばれはじめている。基礎を重視し技術開発を進めることは、10年後の我が国の進路を左右するであろう。基礎科学はさらに根源的なものであり、国家30年の計を建てる時最も重要なものである。30年先に役立つ知識は、それが実用化される迄には、広く人間社会に行き渡り、人類共通の資産として共有されているであろう。我々の動機が仮に地域社会の利益であるにしても、結果は広く人間社会に行き渡る。従って、高エネルギー物理学のような高価な基礎科学を推進することができる国々は、広く人間社会への影響を考慮しつつ努力する必要がある。

波及効果 波及効果の第一は学問的なものであり、基礎科学としての役割は既に述べた。

波及効果の第二は、教育的文化的なものである。高エネルギー物理学を目指す若い人は、その過程で世界観に対する深い洞察を養い、専門技術を身につける。高エネルギー物理学は、放射線技術から低温、高圧、真空技術、エレクトロニクス、計算機等におよぶ広い手段を一つの研究目的に向けて駆使する。高エネルギー物理学を飽く迄も追求する人々の他に、専門技術を活かして企業に入る者もあれば、加速器の需要に応じて他分野へ進出する者も多い。注目すべき一つの事実は、高エネルギー物理学は大型の共同作業であることで、個人の発想と独自性を強調する学問の形態としては、今のところ、いささか特殊な部類に属する。トリスタン実験では100人余りの研究者がチームを組んでいる。当然のことながら、ここには喜びと悲しみ、そして協調と闘争という人間社会のドラマが、縮小された形で実現する。こうした共同作業を経験した人間は、システムという概念を自然に身に付け、決して象牙の塔に閉じこもることはない。高度な専門技術と柔軟な考えを身に付けて、広く社会で指導的な役割を演じられる人材が養成され、後世への生きた文化遺産として残る。

波及効果の第三は、技術的なものである。高エネルギー物理学はその学問の性格により、常に、限界を越えた観測技術を要求されることが多い。新技術開発は高エネルギー物理学という学問に内在する要素として組み込まれている。実際、最近の博士論文の相当部分が、物理研究内容のみならず、それを達成する為の技術

開発とその成果に費やされるようになっていく。こうした技術は、直ちに他分野へ波及して行く。放射線測定技術、大量のデータの高速処理の必要性による信号処理やCAMACエレクトロニクス仕様、泡箱の写真解析技術の産み出した図形認識などなど、医学、生物学を始め他分野で広く応用されている例は枚挙に暇がない。

波及効果の第四は、企業に対するものである。企業サイドから見た場合、リスクが大きくて単独では乗り出せないような大型の技術開発を行う機会が与えられる。トリスタンは、大型超伝導電磁石の製作を始めとして、大小百余社の腕を競う場となっている。

我が国の学術研究における企業との連携は、学術研究体制内における技術者層の欠如がもたらした必然の結果であるが、利点も幾つかある。その第一は省力である。我が国高エネルギー物理学における人件費の割合は、欧米に比べ著しく低い。

総額が少ないにも拘わらず、設備に向けられる有効投資が大きい。第二は加速器の巨大化に伴い、建設を企業に頼らざるを得ないという状況が、世界的な傾向として出て来たことである。この点において、企業との連携に長い経験を持つ我が国の役割が大いに期待されている。気が付いて見れば我々は独自の近代的な研究開発方式を創始していたのである。高エネルギー物理学の発展は、企業から見ても文化の発展に尽くす共通の場が与えられるという大きな意義を持っている。

加速器科学 最近、加速器は様々の用途に供せられるようになってきた。低エネルギー加速器は、今や研究者の手を離れて商品化され、医学利用、非破壊検査、超精密印刷など、本来の用途とは関係ないところで広く使用されている。高エネルギー加速器もまた、その産み出す粒子ビームの性質を応用して、いろいろな学問分野での重要な研究手段と成りつつある。高エネルギー物理学研究所のブースター利用では粒子線医療や中性子、ミューオンを使った物性研究や材料工学で大きな成果を挙げつつある。線型電子加速器からのビームを蓄積して生成するシンクロトロン放射光の利用は、フォトンファクトリーとして広く物性関係者、関連企業に恩恵をもたらす、そのユーザー数は今や高エネルギーを凌駕する。また、高エネルギー陽子加速器を改造して、最先端の原子核実験に利用する計画も有り、高エネルギー加速器の用途は多様である。より高く、より強くという高エネルギー物理の飽くなき要請は、常に新鮮なる加速器技術をもたらすと同時に、その利用は今後共広がって行くであろう。高エネルギー物理学は加速器科学の最先端を走ると共に牽引車の役割を果たしているのである。

国際協力と我が国の果たすべき役割 高エネルギー物理学は加速器の巨大化に伴い、一国では賅えないような規模に達した。共通の学問目的を遂行するためには世界的なレベルで研究活動の集中化と地域による分業化を促進する気運が高まっている。今日、大型の高エネルギー実験で国際協力でないものは少ない。我が国でも日米協力を始め、東大のOPAL実験等、海外での協力実験には古い歴史がある。最近では、トリスタン・AMYグループに見られるように、国内での国際協力も定着しつつある。この様な双方向の国際協力は全ての分野で広がっている。高エネルギーでは、その巨大さの故に、個人的な友好をはるかに越えた、集団のレベルでの共同作業が必然となるが、国益に結び付かない純学問活動であるが故に成功の確率は非常に高い。高エネルギーでの成功が契機となって、共同作

業が科学を越えたさまざまなレベルに広がり、ヨーロッパで果たしたCERNのバイオニアとしての役割が高く評価されている。人間社会の相互理解へ先鞭をつける一番槍として高エネルギー物理学は最も適切なものである。これを認識する時、また我が国のアジアの一員としての立地条件を考慮する時、先進諸国との協力のみならず、広くアジア・西太平洋諸国の国際協力活動の中心となるべきであろう。

高エネルギー物理学は疑いも無く高価な事業である。にもかかわらず中国を始め高エネルギーに未経験な国も国家的事業として取り組もうとしている。これは波及効果もさることながら、まさに一国の工業力、学術文化の成熟度を忠実に反映するバロメーターだからである。多くの途上国にとっては高嶺の花である時、先進国の一員として、また西太平洋・アジア地域における唯一の実績を持つ国として、高エネルギー物理学を推進し、広く人類の共有すべき文化を創り出すことは我が国の役割であろう。

結び 高エネルギー物理学を推進する本来の動機は、人間の知的好奇心である。いろいろ効用を並べ立てはしたが、研究プロジェクトを認める際に考慮する判断材料としては副次的な意味しか持たないであろう。ファラデーは電磁誘導の法則を発見した時、それが何の役に立つかと聞かれて、生まれたての赤ん坊が何の役にたちますかと聞き返したという。母親の満足が子を愛する充実感の中に有るように、知的好奇心が満足されるとき味わう充実感こそ、そしてそれを人類と共有することこそ、高エネルギー物理学及び広く基礎科学の最も大きな見返りではなからうか？若い優秀な人材を惹き付けるのは、しばしば役に立つ技術ではなくして、反物質とか宇宙のビッグバンのような課題である。若い人材を惹き付ける要因が存在する限り、高エネルギー物理学は活力有る分野であり続けるであろう。高エネルギー物理の発展は、知的好奇心を持つ我々の同胞がどれだけ我々と夢を共有してくれるかにかかっている。人間の知的なものに対する強いあこがれは、計画が合理的であり、十分検討され尽くしたものである限り、そして知的好奇心を満たすという見返りが十分である限りは、基礎科学を進める偉大な力となり得ると我々は信じる。

3. 高エネルギー物理学の展望

3.1 歴史的展望

第二次大戦後に出現した高エネルギー加速器は、素粒子やその相互作用を探索する不可欠の手段となり、今日まで重要な役割を演じてきた。1947年に最初の人工 π 中間子を生成したシンクロサイクロトロンエネルギーは300 MeVであったが、加速器物理学や関連技術の発達により、約7年に10倍の割合で上昇を続けてきた。今日ではシンクロトロンエネルギーは1000 GeVに到達しようとしており、さらに1960年代から実用の域に入った衝突型加速器(コライダー)によって、飛躍的に高いエネルギー領域の研究が可能になった。かつて原子が物質の究極像と考えられていた時代には、我々の探索できるミクロ領域は、 10^{-8} cm位の大きさであったが、今日ではクォークレベルの 10^{-16} cm領域に足を踏み入れつつある。

1950年代から1970年代の初めにかけて建設された数GeVから数10GeVのシンクロトロンやコライダーは、強い相互作用や弱い相互作用に関連する数々のデータを提供し、以後の理論的発展に重要な貢献を与え、QCD理論や電弱相互作用の理論を生む端緒となったが、1970年代から1980年代前半における実験は、逆に理論的予想を検証することに主力が注がれた。今日では全ての相互作用はゲージ粒子によって媒介され、物質の基本的要素はレプトンとクォークであるとされ、過去40年来の諸問題に、全て決着がついたように見える。現時点で、理論主導の時代は未だ続いている。幾つかの実験で示唆された異常現象は、1985年の京都国際会議ですっかり払拭され、標準理論の基盤はゆるぎないように見える。実際、ゲージ統一理論に対する信仰は非常に強く、大統一理論のように、エネルギースケールで一挙に 10^{14} GeVまで飛躍した議論が展開され、さらに理論家は重力を含めた超大統一理論(カルツァ・クライン理論、超重力理論、超弦理論等)にまで挑戦している。今や理論は実験から離れて一人歩きし始めた観がある。こうした時代において、高エネルギー物理学は如何に突破口を切り開く道があるのだろうか?

3.2 将来への指針

以上の疑問に答える道は幾つかあるように思える。第一は、現在の標準理論の枠内に入らない異常現象を発見することによって、新しい物理の展開を計ることである。CERNのUA1実験で幾つかの兆候はあったが、それも全て消滅し、現在試みることができるのは、これまでの加速器を越えた新エネルギー領域に挑戦することである。過去において、新エネルギー領域に乗り出した多くの加速器が、当初には予想もしなかった新現象で活躍することはしばしば有り、歴史が証明する最も有効な道は“エネルギーフロンティア”である。

考え方は同じであるが方法として逆のやり方は、既存のエネルギー領域でビーム強度を上げ、K中間子崩壊や、cクォーク、bクォークを含む新粒子反応での稀現象(香りの変わる中性カレント、スカラー中性粒子探求や、CP, CPT等の基本的対称性の徹底的追求等)を見つけることである。後者のうち、K中間子に注目すると、大強度陽子加速器(Kメソンファクトリー)が有用である。c-, b-クォークに注目するときは、大強度・低エネルギー電子コライダー(c, bメソ

ンファクトリー)が有用となる。第二の方法は、現在の標準理論の中で実験的に証明されていない所、もしくは理論的に不満足なところを追求して、糸口を見つけようと試みる。第一の方法と同じく、エネルギーフロンティアを目指すところは同じであるが、より確かな目標を与える。現在の標準理論で最も不満な所は、いわゆるヒッグス機構—質量の起源に関する取り扱い—に有る。ヒッグスは素粒子なのか、複合粒子なのか、あるいは種々の力学的効果(多くの人は、この効果はエネルギースケールで ~ 1 TeV付近に有ると信じている)の集約的表現なのか誰も知らない。ヒッグス粒子探求は、現代高エネルギー物理学の緊急課題であり、新しい加速器建設提案には必ず最重要課題として掲げられるものである。丁度、1958年頃V-A理論が確定してから後、W粒子が演じた役割に共通する歴史的重要性がある。

もう一つのガイドラインは超対称性である。これは大統一理論におけるいわゆるハイラーキー問題の解決策として提案されたものである。また重力を含む超大統一理論の構成には不可欠の対称性でもある。もし超対称性があれば超対称粒子(SUSY粒子)の存在が予言され、標準理論と矛盾をきたさないためには数百GeVの質量を持つとされる。つまり理論を指針とした場合は、同じエネルギーフロンティアでも、 ~ 1 TeVの質量スケールを扱える所が目安となる。

この他、クォーク・レプトンの複合粒子模型や、様々なエキゾチックな理論的提言がある。いずれも、確固としたエネルギー領域は不明であるにしても、とにかく高いエネルギー領域にその兆候が現れる可能性があることでは共通しており、これもエネルギーフロンティア物理となる。

第三の方法は、ドラマチックに成功を収めた統一ゲージ理論の手法をナイーブに推し進め、大統一理論に向かうことである。大統一理論は、重力を除く強・電・弱の三つの力を統一するのみならず、宇宙初期の状態を解明する強力な手段を提供し、宇宙には何故物質ばかりで反物質が無いかな等の重要な問いに答える事ができる。

大統一理論は陽子崩壊を予言し、また宇宙の初期に大量のモノポール(磁気単極子)が生成されたことを予言する。これらの検出は加速器に依らずに、物質の究極像を解明できるので、非加速器素粒子物理として、今日大いに脚光を浴びている分野である。

第四のケースは、標準理論を越える所ではなく、むしろ標準理論から出発して新天地を開こうとするものである。我々はハドロンがクォークの集合体であることを知った。QCD(量子色力学)は、ハドロンの質量単位や漸近自由を始めとするクォーク関連現象を、全て定性的には説明することができる。QCDは奥行きが深くヴァラエティに富むが、基本的にはSU(3)群に基づく非可換ゲージ理論によって記述されると信じられている。換言すれば、全てのハドロン現象はQCDの応用問題を解くことに帰着する。こうした意味で1960年代から1970年初頭にかけて、高エネルギー物理学の主流であったハドロンスペクトロスコピーは、もはや素粒子物理としての意味合いを持たなく、QCD物性という新しい名前を与えられるべきであろう。このQCD物性は、丁度、かつての素粒子物理の最先端であった原子物理学、原子核物理学が分化したように、新しい学問として花開くことも考えられる。この分野ではハドロンスペクトロスコピー精密実験と、スーパーコンピュータを駆使して現象を再現する計算機物理が主たる手段となるであろう。大強度陽子加速器のもう一つの用途であり、独自に奨励されるべき分野で

はあるが、物質の究極構造を追求するという高エネルギー物理学の本来の使命からすれば副次的な役割となろう。

同じハドロン物理を目指すものであっても、 c 、 b -クォークを含む物理現象は比較的历史が浅く、十分スペクトロスコーピーが調査されているとは言えない。さらに、これらの重いクォークは世代間にまたがる遷移を起こし、 CP の破れや、電弱統一理論を越える現象への糸口となる可能性を含み、素粒子物理の研究対象としての価値は高い。

以上の議論を総括すると、今後の高エネルギー物理学を目指す上での重要度はおのずと明らかとなる。エネルギーフロンティアこそ高エネルギー物理学の王道である。新しいエネルギー領域を目指す新加速器建設が、最も現代物理の要求に答え、実りある成果が期待できる。上の議論で、目安となるエネルギースケールは ~ 1 TeVと指摘したが、勿論これは緻密な議論によるものではなく、数百GeVであったとしてもその妥当性は変わらない。

3.3 エネルギーフロンティアを実現する加速器 ハドロンコライダー

ハドロンコライダーの利点は高エネルギー達成が比較的容易なことである。現在米国で計画中のSSCコライダーでは、最高の \sqrt{s} (重心系での全エネルギー)が40 TeVにもなり、ルミノシティは $10^{32}-10^{33}/\text{cm}^2/\text{sec}$ を目標としている。新しい事実、新しい物理の発見成果は、探索する未知のエネルギー領域が大きければ大きいほど沢山期待できる。ただし、ハドロンはクォーク及びグルーオンの集合体であり、クォークの持つ実効エネルギーはハドロンの持つエネルギーの $1/5\sim 1/10$ となる。40 TeVで生成し得る質量が何処まで行くかは、クォークのハドロン内での運動量分布やモデルにも依るが、実効的に見て $1\sim 2$ TeV、最高5 TeV迄と考えられる。また、ハドロンはグルーオンを含むので、ハドロンコライダーは、クォークコライダーと共にグルーオンコライダーとしての役割が大きい。グルーオンは強相互作用の担い手であるので、強相互作用の延長上に新相互作用があるとなれば、ハドロンコライダーの役割はユニークなものとなる。 $\bar{p}p$ コライダーは、反クォークを含むので消滅反応は起こし易いが、内に含むグルーオン量は同じであるので、物理現象について言えば $\bar{p}p$ と pp で大きな差がある訳では無い。両者の得失は加速器を建設するうえでの技術的、予算的困難さによって決まるであろう。ハドロンコライダーは、高いルミノシティ、大きな断面積によって高い計数率が期待できる。一方QCDバックグラウンドが大きく、稀現象を選別するには苦勞するであろう。SSCでは事象率が ~ 100 MHz、一事象あたりの軌跡数が150以上で非常に大きく、高速トリガーやデータ取得装置が必要であり、またビーム付近の放射能が高く、放射能に強い検出物質の選定など、測定器のR&Dが要求される。

電子コライダー 電子の持つビームエネルギーが、そのまま全部実効エネルギーとして使える利点がある。例えば2 TeVの電子コライダーは20 TeVのハドロンコライダーに相当するといえる。電子コライダーの強みは強い相互作用や複合粒子のバックグラウンドが無く非常にクリーンなことである。一方、電子コライ

ダーは多大のルミノシティを必要とする。断面積が $1/S$ で下がることを考慮すると、エネルギー($\sqrt{s}/2$)が300-500 GeVで 5×10^{32} 、1 TeV以上で 10^{33} は必要となる。現在LEPが建設中であるが、これは周囲が27 kmあり、リング加速器としてはこれ以上大きくするのは実際的でない。LEP-IIのエネルギー(100+100) GeVより高いエネルギーでは、シンクロトン放射損失を考えると、リング加速器では建設費がエネルギーの二乗に比例して増加するので効率的でない。従って、TeV領域では、線型衝突型加速器(リニアコライダー)が今の処唯一の解と考えられる。問題は、現時点ではルミノシティの高いリニアコライダーの技術は未だ確立されていないことである。現在の技術では、線型加速器の1メートルあたり得られる加速エネルギーは、最高20 MeV程度である。1 TeVの線型加速器では50 kmもの長さになる。そこで、100 MeV/m以上の加速電界を実現するためのRF源や、RF加速構造の開発をする必要がある。このほかサブミクロンのビーム精度の実現を含めたビームダイナミックスの問題も有る。そこで、準備研究期間を設けて、RF源やRF加速構造、ビーム収束法等の開発を行うと同時に施設、設備の面からの検討を進める必要がある。我々や諸外国が考えているシナリオは、(300+300) GeV位から始めて最終的には(1+1) TeVを目標とするものである。現在最初のリニアコライダーSLCがSLACで建設中であり、SLCがうまく稼働することが次へのステップの最低必要条件であろう。SLCがうまく稼働しても、TeV領域のリニアコライダー建設にはビーム・ビーム効果等なかなか単純な外挿ではいかない技術的困難がいろいろ指摘されている。

e pコライダー e pコライダーの新粒子、新現象発見器としての役割は、クリーンさを特徴とする電子コライダーと、到達可能なエネルギーもしくはルミノシティに勝るppコライダーの中間に位置する。その他の現象では、Large P_r現象、ジェット現象を含め、ある程度 e^+e^- 、ppコライダーと同じ物理現象を追求できるが、e pコライダーの基本的役割は、 e^+e^- 、ppコライダーでは得られない独自の所に求めなければならない。これは、深非弾性散乱によるクォークの内部構造追求や、中性カレント現象等のtチャネルでの標準理論のテストに有る。現在、既にHERA((30+800) GeV)が建設中であり、CERNではLEPとSPSを使用して、(50+270) GeVのe pコライダーを実現させる計画がある。エネルギーフロンティアを狙うとすればこれを越えるエネルギーを必要とする。

以上の議論から、エネルギーフロンティアの選択は、広い物理を考える加速器としては、 e^+e^- もしくはppとなる。建設の容易さはさておき、両者の得失は昔から議論の別れるところである。ハドロンコライダーでは、測定器がどれだけビーム強度に耐えるか、あるいは何処までバックグラウンドを抑えこめるかが大きな要素となる。一方、電子コライダーでは、加速器が何処までルミノシティを挙げられるかが岐路となる。それぞれ別の要因が実験を制約するし、対象となる物理現象もそれぞれの特徴を持つので、両者の役割は相補的と考えるべきであろう。

同じ現象を扱う時、歴史を振り返るとハドロンが発見手段としての役割を果たし、電子加速器が精密測定に重要な役割をはたした例が幾つか見つかる。「 γ/μ 」は、陽子加速器と電子コライダーで同時に、 Υ (ウブシロン)は、陽子加速器で最初に発見されたが、精密なスペクトロスコーピーや崩壊モードの測定は電子コライダー

の独壇場であった。S p p S コライダーで Z^0 、 W^\pm が発見され、さらにトップクォークの存在も示唆されているが、包括的な精密測定はトリスタンやLEPで行われるであろう。これらの歴史的事実は、電子コライダーが加速器の性能で、発見器としての機能に劣るということの意味しない。ハドロン加速器の方が歴史が古く、研究され尽くした器械であり、時期的に常に先行したという事実の反映であろう。現在～1 TeV スケールの物理を目標とした場合、ハドロンコライダーは、現在の技術またはその延長で建設可能と予測されるのに対し、電子リニアコライダーは相当期間のR&Dを必要とする事実によって、再び歴史が繰り返されようとしている。我々としては電子コライダーが後追いになっても、大きな成果を挙げ、その演じた役割の重要性がいささかも減ることが無かったことに注目したい。

4. 我が国の進むべき方向

第3章における物理的考察により結論付けられる最も重要なことは、我々は常にエネルギーフロンティアを目指さなければならないということである。ここでは、エネルギーフロンティアの物理を、如何に実現しかつ維持していくかという原則に基づいたシナリオをえがく。

4.1 望ましい研究環境

これまで高エネルギー物理学は、物質の究極構造を探るという exciting な学問として、しかも最先端の技術を総合的に駆使する分野として、優秀な人材を惹き付けると共に急速に発展してきた。我が国も、トリスタン完成の暁はエネルギーフロンティアに突入し、世界的レベルの本格的研究が始まる。今後共この状況を維持する為にはエネルギーフロンティアという目標は不可欠である。しかし、目標を掲げるだけではなく、我が国が独創的な成果を挙げ続け、若手研究者を惹き付け、育てる為の環境作りも同時に進めて行かなければならない。こうした環境作りにも最も大切な要因は連続性であろう。

高エネルギー物理学に特徴的なこととして、巨大で高額な研究設備とそれに伴うタイムサイクルの長さがある。この事実が、時間的および空間的に好ましくない不連続性を引き起こし勝ちである。時間的不連続性とは、加速器要員の必要性が加速器建設時に集中し、物理の成果がその直後に続くものの、その後空白期を迎えることである。空間的不連続性とは研究設備が一箇所に集中し、そこから距離に比例した研究環境の劣化が起こることである。こうした環境を克服し、独創的研究活動を維持する為には、連続性と共に次の要因を考慮することが大切である。

(1) 物理の連続性と相補性

加速器の巨大化に伴い、世界的に見ても重複を避け、分業して相補的な加速器を建設する傾向が強まっている。この場合、国内で柱となる加速器のみでは研究者の要求する物理の多様性を満たすことができない。必要に応じて何処の加速器でも使う事ができるという環境作りが大切である。国際協力を奨励し、海外実験を促進することはどの分野でも重要であるが、特に高エネルギー物理学では欠かせない。もう一つは、新しい実験物理を狙った加速器の改良や、非加速器素粒子物理等に依って、国内での物理研究に多様性を持たせることである。

(2) 加速器および加速器技術の連続性

将来のエネルギーフロンティアを目指した加速器のR&Dを充実させることが加速器の連続性に繋がる。具体的には、第5章で述べるようなリニアコライダーのR&Dを推進するとともに、その次の21世紀を目指した新加速器原理のR&Dをも同時に進めていかなければならない。より地道な努力としては、トリスタン建設終了後の空白を避ける為の、既存設備の充実、改良が必要である。このことは高エネルギー物理の連続性にも繋がる。加速器技術にも世界的分業による地域特色性があり、こうした技術を広く吸収するためには、加速器の国際技術協力もまた重要である。ICFAガイドラインによる国際協力や、日米科学技術協力協定によ

る国際協力を、今後とも、充実発展させていくことが大切である。

(3) 大学の充実と若手研究者育成

高エネルギー物理学は巨大科学の先兵として、従来の大学にベースを置く基礎科学には今まで無かった、新しい研究運営体制を必要とするようになっていく。大量の人員設備を能率良く機能させるための研究所と、自由な発想と自主独立を尊び、次代を担う若手研究者の育成の場である大学との緊密な連携と、両者の健全な発展は共に不可欠である。広く国内各地から若手研究者を育成するためには、遠隔地の大学でも十分独自性を持った研究が行える環境作りが欠かせない。現状では、予算と人が中央研究所に集中している。このことが大学に与える影響は、同じ巨大設備を共同利用する場合でも、現れ方は様々である。例えば、同じ高エネルギー研でも、多様なテーマが可能でかつグループ毎の独立性が強いフォトンファクトリーと、一つの測定器を、研究所が中心となり大学が協力して建設するトリスタンとでは大いに違う。高エネルギー物理学では、予算の集中化が、大学グループにとって、独自性を持った研究を難しくしている。ちなみに米国では、実験費をDOEが大学に分け与え、それを研究所に来て使うという形で、中央研究所と大学のバランスをとっている。こうしたことは、行政レベルも含む総合的な取り組みが必要であるが、長期的に考えた場合、分野の活力は若い人材の養成にかかっている。真剣に考えておく必要がある。短期的に見て我々にできることは、教育効果をj考えて大学が独自性を発揮できる研究施設、環境作りである。

(4) 技術者集団の充実

良好な研究環境作りが欠かせない切実な問題としては、技術者集団の充実がある。従来の我が国の学術研究体制のなかでは、研究目的のための器具・設備の設計製作は、本来研究者の仕事の一部とみなされる。これを助けるものとして技官の存在があるが、技官には技術者としての位置付けは無く、補助者として考えられて数も少なかった。今日でもこの伝統は受け継がれ、我が国の主要な研究所を眺めても、技術者層が大きく欠落している。技術が日進月歩の時代において、新しい技術に対応していくことは、研究水準を維持するための必須条件であり、技術者集団の充実が望まれる。また、かつては研究者の手作りであった実験器具も大型化し、今や法律規制の対象外ではあり得ない。しかるべきサポートグループなしに、放射線・高圧ガス・可燃性物質規制等の法律に対処し、責任ある保安体制を敷くことは、非常に困難であり、研究者に犠牲を強いることになる。仕事の一部は外注して企業に肩代わりさせることができるにしても、こうした技術者・サポートグループの不備は、研究設備が巨大化した今日、大きな歪みを産み出しており、真剣に対処しなければならない問題である。

連続性を維持しつつ、教育的文化的効果を最大限に発揮するには、国内に確固とした基盤を築くことが重要である。このため、長期目標としては国内でエネルギーフロンティアを実現すること、短期的には時宜に叶った既存加速器の改良充実、非加速器実験を含めた種々の大型測定器の建設が肝要である。海外での国際協力も、強固な国内基盤無しには、結局は不毛のものとなることは万人の認めるところである。測定器のR&Dがホームベースで行えることが如何に重要か、また

確固としたホームベースでの実績を持つという背景が、如何に国際協力で発言力を増大させるかは、日米協力の経験の教えるところである。

以上の観点より、我々の将来計画案は二面の考察より成る。一つは向こう10年間で、素粒子物理と加速器技術進展を見通した上での長期目標であり、最優先度を与えられるべき“幹”ともいべき計画である。当然のことながら、幹の計画はエネルギーフロンティアを目指すことになる。第二は、エネルギーフロンティア実現の為の基礎を築くと共に、研究の連続性を維持する為のいわば“枝”の短期計画である。枝の計画は、エネルギーフロンティア計画と矛盾しない範囲で、可能な限りの多様性を維持しつつ、物理学の展開に対応して、適宜採り上げられるべき性格のものである。我々は、以下に現時点での高エネルギー物理学の展開に叶い、かつ我が国の実情に見合った幾つかの推進課題を採り上げる。個々のプロジェクトの具体的実現には、責任ある機関によって実施計画が提案されることが必要である。さらに時宜に叶った物理のメリット、当事者能力の評価等フィジビリティについて、しかるべき諮問機関の審議を経ることもあろう。当委員会としては、このカテゴリーのプロジェクトについては、2~3年毎に見直しを計る必要があると考える。

なお、従来トリスタン PHASE IIとして、現トリスタンに接続すべきであったepコライダー建設計画は、3.3章で述べたように既にHERAやCERNの接続計画に凌駕され、時代の発展にそぐわなくなったと考えられる(添付資料1)。勿論、トリスタン主リングに電子以外の粒子を注入して新しい加速器として再生を計ることは、将来の可能性として残されている。しかし、そうした計画は物理の発展によって必要性が持ち上がった時点で再検討されるべきものであり、以下の考察には入っていない。

4.2 “幹”の計画： エネルギーフロンティア

科学技術の進展は日進月歩である。さらに加速器をめぐる国際情勢もまた非常に流動的である。我々としては、常に世界の情勢をにらみつつ、状況の変化ににんじた柔軟な対処をしていく必要があるということを強調した上で、以下に、現時点での加速器技術及び既に提案されている加速器計画に基づいた将来の見通しを立てる。

現時点で我々の一致した意見は、国内にベースを置くエネルギーフロンティアの加速器としては、TeVクラスの電子リニアコライダー(JLC、JAPAN LINEAR COLLIDER)を目指すべしということである。

理由の第一は、同じエネルギースケールでは、ハドロンコライダーよりクリーンな物理実験成果が期待できることである。第二は、加速器グループにとってトリスタン後の大きな目標となることである。第三は世界的レベルでの相補性である。

このため世界における潮流を眺めて見よう。下の表に、向こう10年間に物理実験が実現できると期待される、建設中もしくは計画中の加速器プロジェクトを掲げる。

エネルギーフロンティア（世界の建設中もしくは計画中の加速器）

	名称	エネルギー	稼働予定年
e ⁺ e ⁻ コライダー	トリスタン	30+30 GeV	1986
	SLC	50+50 GeV	1986
	LEP I	50+50 GeV	1989
	LEP II	100+100 GeV	1993
e p コライダー	HERA	30+800 GeV	1990
p(p̄)p コライダー	TEVATRON	1+1 TeV	1986
	UNK	3+3 TeV	?
	SSC	20+20 TeV	1994?

ハドロンコライダーでは、既にSSCが ~1 TeV 領域の物理を目指している。このSSC計画は、米国の総力を挙げたもので、現代加速器技術のほぼ限界に迄挑戦したものである。予算、土地のスケールを見ても、SSCを超えるハドロンコライダーの建設を考えることは現実的でない。電子リニアコライダーを目指した場合、物理の実現はSSCよりは相当期間遅れる可能性があるが、その場合でも電子コライダーの価値が減じることは無いというのが、我々の信念であり、また歴史の教えるところでもある。しかし、JLC建設には少なくとも10~15年は要すると考えられるので、早急に加速器のR&Dを進めることにする。R&Dは第5章に示す国内の開発計画を中心に行い、国際的な研究協力をも最大限に活用して、加速器技術の迅速な確立を計らねばならない。

国内長期目標が定まったところで、我が国で向こう10年間、エネルギーフロンティアにおける物理をどう実現するかを考えてみよう。向こう5年間位は、トリスタンが第一線の意義ある成果を出すであろう。その後、エネルギー変更、強度増強などや、e⁻、b-メソンファクトリーとしての可能性も含め、さらに新しい物理の成果を出し続けることは可能としても、エネルギーフロンティアとしての役割は終えているであろう。従って連続性を重視し、後半期にもエネルギーフロンティアでの物理を目指すのであれば、海外に求める以外に道は無い。上記の表のどの加速器を選ぶかは、個々の研究者により意見が別れるところであろう。既に筑波大を中心とするグループは、TEVATRONのCDF実験に参加し、東大グループは、LEPでのOPAL計画を進めている。さらに、将来のリニアコライダーを目指してSLCに参加すべきであるという意見があるし、HERAをやりたいという人もある。我々は研究者の独自性を尊重し、個々のグループが推進する国際協力実験は、今後共奨励するものである。しかしながら、我が国高エネルギー物理学コミュニティをグローバルに捉えた場合、我々は二つの理由で、SSCにおける国際協力実験を積極的に推進すべきものとする。第一はこれが向こう10年間に TeV 領域のエネルギーフロンティアを実現する可能性のある唯一の計画だからであり、第二はトリスタンとJLCとの連続性を考える上で、最も整合性が有るからである。以上の考えに立つ時、我が国の高エネルギー物理学の主要成果は長期的に見た場合、トリスタン、SSC、JLCによって、この順番で生産されるであろう。

4.3 "枝"の計画

素粒子追求のフロンティアは、常に高エネルギー指向によって形づくられ、基本的な問題の殆どは、高エネルギー現象を起こさせてみることににより、明確な形で解決されてきた。ここでは、先に述べたエネルギーフロンティア中心計画を前提とした上で、なおかつ研究手段の多様性を可能にする環境作りについて提言する。考慮する多様性は、現計画の充実、発展という最も効率的な方法で、かつ"幹"の計画と矛盾しない範囲で実現すべき規模のものであり、低エネルギー・大強度加速器実験、小規模国際協力、及び非加速器素粒子実験に大別される。いずれも、素粒子物理上の意義という基本的要請を満たす。

(1) 非加速器素粒子実験

多くは伝統的な原子核、宇宙線実験手法により、加速器を使わず個々の大学、研究機関が独自に推進できる。各人の独創性を活かし易く、物理の価値はエネルギーフロンティアに劣らず、周辺分野との協調も可能である。そのような意味で"幹"に対する"枝"としての特徴が最も活かせる分野であり、大いに奨励すべきであろう。非加速器素粒子実験の中で、分野全体で考えるべき大型プロジェクトとしては、スーパー神岡実験(SUPER-KAMIOKANDE)がある。これは現行の神岡実験の有効体積を25倍にした32000トンの水チェレンコフカウンターを建設して、陽子崩壊についての究極実験を目指すと共に、モノポールや天体ニュートリノ観測も行おうというものであり、積極的に推進すべきである。

(2) 低エネルギー・大強度電子コライダー(C.B.τ-ファクトリー)

エネルギーフロンティアでは新粒子探索実験が主となる。これにとって替わることはできなくても、密接に関連した研究は、中間子崩壊実験の精密実験によって可能である。特にbクォークは、必ず世代にまたがって崩壊するという点では、sクォークと同じ立場にあるが、直接に関係する世代数が多く、しかも第4世代クォークの間接的影響も受けやすいため、物理上の窓口がずっと広い。CPの破れという疑問に対しても、B中間子崩壊でどの程度に現れるかが新たな窓口となり得る。また、未開の質量スケールでの新相互作用を探るには、結果の解釈は模型に依存するという不定性が残るにせよ、稀崩壊の研究が有用である。B中間子を対象とするこのような研究は、非常に高いルミノシティのe⁺e⁻衝突によって可能となる。第3世代に属するτレプトンの稀崩壊も同様に有望な研究対象であり、また同様な加速器を必要とする。具体的には、現状よりも約100倍のルミノシティを持つ3~10 GeVビームのストレージリングである。現トリスタン加速器の改造により可能であるが、現在は、"幹"であるトリスタンの本来の計画が進行中であるため、当面は、加速器面での現有設備を利用しての高ルミノシティの開発が主となる。これは、e⁻ビームについては問題ないが、e⁺ビームについては、新しいシステムを開発しなければならない。現在考えられているのは、e⁺を2.5 GeVのe⁻ linac beamで生成し、約200~400 MeVにlinacで加速した後2.5~3 GeVの50Hzブースターで加速し、入射蓄積リングに移す方法である。一方測定

器についても、低いエネルギーまでの e, μ, γ 検出能力を飛躍的に上げるなどの開発を検討することが望ましい。

(3) 大強度陽子加速器 (Kメソンファクトリー)

日本では 12GeV PS が KEK で稼働中であるが、世界的にクォーク・レプトン時代に突入して既に久しく、数 GeV ハドロン衝突や、スペクトロスコーピーを中心としたハドロン物理への実験的興味は散発的になってきた。むしろ、K中間子の稀崩壊探索や、精密実験が PS での古くて新しいテーマとして復活している。それは、電弱相互作用理論の予言能力が高く、新しい相互作用が無い場合の崩壊率を十分に計算できるようになったためである。sクォーク崩壊はこれからの物理への感度では、bクォークなどより低い、PS という環境で到達し得る精密さは、これを十分に補う可能性がある。

歴史の深い K中間子崩壊の研究を進展させるためには、ビーム強度の増大と測定技術の両面での飛躍が必要である。しかし、まだ物理に由来する基本的な制約、高い計数率への対応、加速器や実験室設備の許容度などの点に困難があり、高強度一本槍は得策ではなかろう。時間的、経済的、技術的ファクターも考慮すると、現在の KEK-PS を可能な範囲で改良するのが最も現実的な道である。PS においては原子核実験の比重が増しているが、幸いにしてビーム粒子種や強度について共通の要求があり、原子核分野と協力し合って改善していくのが望ましい。

(4) 小規模国際協力実験

高エネルギーにおける国際協力実験の重要性については、既に述べた通りである。日本でも 70 年代初期から、大学チームによる国際協力が、ヨーロッパで成功を収めて発展し、また 70 年代末にスタートした日米科学技術協力事業によって全国に波及した。そこでの個々の協力実験の規模や内容は、参加チームの事情に合った多様なものであり、またその成果も多様である。その背景には、先にも述べたように実験施設の巨大化、集中化が進み、高エネルギー実験分野全体が第一線の研究に携わる態勢を保ち難いという世界に共通した問題がある。従って、長期計画による強固な地盤作りを柱とした上でも、今後も研究機関を単位とした小規模な国際協力実験が必要であろう。この場合、協力規模は小さくても、各時点でのフロンティアを目指すべきであり、特に、参加チームが独自性を発揮して第一線の研究に寄与することは、単なる多様化以上の深い意義をもつ。このような協力実験の経験は、国内でのフロンティア計画への極めて有用なフィードバックとなる。さらに、研究テーマ、研究手段の一本化による弊害を克服する有効な道でもあろう。

4.4 日本の高エネルギー物理学界におけるマンパワー

トリスタンにおける物理生産と SSC への準備、SSC での物理生産と JLC への準備が時間的に重なり合うので、予算及び人的資源の適切な配分を考慮する必要がある。マンパワー考察にあたって参考となるべき数字を表に掲げておく。

日本の高エネルギー物理学界におけるマンパワー () 内は外国人研究者数

同好会選挙権行使者数	438人	(1985年12月現在)
同上 KEK職員数	203人	
内訳 物理研究系所属	75人	
加速器その他	128人	
同上 核研職員数	32人	
トリスタン実験登録者(学生を含む)	253(37)人	(1985年12月現在)
内訳 VENUS	108人	
TOPAZ	79人	
AMY	66(37)人	
日米協力実験参加者	125人	(1984年実績)
延べ滞在月数	425人月	
同上 専従者(CDF, 東北大)	~30人	

現在日本の高エネルギーグループを大別すると次の四つに分類される。

- (1) トリスタン、陽子シンクロトロンなど、国内の加速器で実験するグループ ~230人
- (2) 米国の加速器、LEP等外国の加速器で実験するグループ ~150人
- (3) KEK、東大核研などの加速器グループ ~140人
- (4) 加速器を用いない素粒子実験のグループ

(各グループの人数は概算で重複が存在する)

上記のグループに属する研究者数の変動、あるいはグループ間の移動はあっても、今後10年間の研究活動はこれらの流れに沿って進められると予想される。

まず加速器グループのマンパワーであるが、トリスタン終了後は、相当部分 JLC の R&D に割く必要がある。SSC などの他の建設協力を行う余地は残っていないが、現在の SSC 方式は、加速器グループに馴染み難いであろう。高エネルギー研を取り巻く諸般の事情を考慮すると、個人参加や R&D での協力はあり得ても、加速器グループとして、大挙して建設協力を行う可能性は小さいと考えられる。

SSC で物理実験を行うのに必要なマンパワーは、実験の規模にもよるので、これからの具体的実施計画を待たなければ、きちんとした評価はできない。中間報告ではモデルとして、SSC の一つのインターセクションで、大型検出器を主体性を持って分担することが検討された。このモデルによれば、常駐者 ~30 名程度を中心に、総参加者数 100 名程度を想定する。多少の増減はあるにせよ、これは、VENUS、または TOPAZ グループの規模に相当する。上記の表によれば、これは現在の日米協力実験で、5~6 グループに分散している人員を一つに纏めた程度であり、過去の経験からすれば大きな矛盾は起こらないであろう。

5. 電子リニアコライダー： 第一次開発計画

リング蓄積型電子コライダーは、LEP以上のエネルギーではシンクロトロン放射のため非現実的な規模になる。リニアコライダーは、この困難を避けるため提案されたもので、基本的には e^+ と e^- の線型加速器を対向させ、それぞれのビームを衝突させ合う。しかし、この場合ビーム衝突は一回きりであるため、1 TeVの実験に必要なルミノシティ $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ 程度を得るためには、強力なビームパンチを、衝突点で $1 \mu\text{m}$ 以下のサイズに絞る必要がある。一方、パンチをこのように小さくすると、その中の電荷密度は非常に大きくなり、パンチ同士が衝突する際、互いに強い電磁気力を及ぼし合う結果、種々の厄介な問題が生じる。現在、このようなリニアコライダーの問題については、世界的にも積極的な研究が進められているが、現時点では、ビームダイナミクスの理解と加速器技術の両面で、数百 GeV 以上の装置を直ちに建設できる段階には至っていないと判断される。そこで我々としては、まず、次に示す内容の“リニアコライダー 第一次5ヶ年計画”を1986年度からスタートさせるよう提案する。

開発の対象は、以下の6項目とし、前半2年は各対象について、モデル実験などを中心に、5年間で達成すべき目標に見通しをつける事が主眼である。後半3年は前半の成果をもとに、より集中的に予算とマンパワーを配し、実機の開発に取り組む。なお開発期間中には、ビームエネルギー 0.3~0.5 TeV のプロトタイプ加速器の詳細設計を行い、その feasibility の評価をするなど次期の実験計画を立てる。本開発計画の規模としては、予算的には前半2年で5億円、後半3年で20億円程度、マンパワーは20~25人が必要になるであろう。

(1) Beam Dynamics

研究テーマは大きく分けて次の三つになる。

- damping ring, linac, final focus などを含むシステムの設計
- beam-beam disruption, beamstrahlung などビーム衝突の際の問題
- linac 加速中のビーム安定性問題

(2) 常伝導加速管

目標を 100 MV/m 以上の実用加速電界が得られる加速構造におく。実験としては、まずテスト用加速管に大電力が供給できる Sバンド (2586 MHz) の RF 発生装置を製作する。これを用い、候補となる幾つかの構造について、RFパラメータの最適化や高電界での性能評価を行う。より高い C (6 GHz)、X (9 GHz)、Ka (30 GHz)、などの周波数バンドに属する加速管に対しては、RF的には、Sバンドの研究結果を参考にすることとし、実験は機械的問題の解決に重点をおく。

(3) 超伝導加速管

最近の研究から、超伝導加速管をパルス動作させる場合、長期の運転経費を考慮すると加速周波数を低く選べるなど、SC linac の方が有利な可能性も出て来た。しかし、そのためには加速電界を少なくとも 30 MV/m 程度にしなければならない。理論的には、電界強度の限界は 50~80 MV/m と予測されており、電界を上げる

ための表面処理技術と、コストを下げるための空洞成型法の開発が中心となる。

(4) 大電力高周波源

最適の加速周波数を限定できるに至っていない現状では、いくつかの種類の高周波源の開発を進めておく必要がある。代表的なものとして次の三つが考えられ、ピーク出力 500~1000 MW を目標に開発を進める。

a. Lasertron

既に数年前から Sバンドでの開発が進められており、その発展として、前半2年で約 50 MW、後半3年では約 500 MW の出力を持つ実機の製作を目指す。

b. Klystron および Gyroklystron

クライストロンは原理的にはよくわかっており、最も信頼できる RF 源である。しかし現在のところは日米協力により SLAC で最近開発に成功した 150 MW のものが最大である。ここでは、クライストロンの出力限界について研究を進める。

一方周波数の高くなる場合を考え、発信管としては大きな出力が得られているジャイロトロンについても、増幅管としてクライストロンのような安定な動作をさせることができるかどうか調べる。

c. FEL 増幅器

Xバンド以上の周波数を選ぶ場合には FEL (自由電子レーザー) を利用する増幅器が有力になる。現在 Kバンドで 100~150 MW の出力が得られている。ここではまず、FEL をドライブするための大電流電子ビーム装置の製作から始め、2~3 m の FEL ユニットにより、1 GW/m 程度の高周波出力を目指す。

(5) Final focus

数百 GeV 以上のリニアコライダーでは必要なルミノシティを得るため、衝突点でビームを $1 \mu\text{m}$ 以下の大きさに絞らなければならない。これまで四極磁石を用いる通常の low beta 構造に加え、レーザーとか、intense beam による収束などの新方法も提案されているが、いずれも実用には多くの問題がある。ここでは、種々の final focus system の設計計算を行うとともに、高磁界超伝導四極磁石などのハードウェアモデルを製作する。

(6) Alignment 及び防震構造

final focus や linac 加速中のビーム安定性の問題と関連し、各装置の fine alignment とその防震対策が必要となる。要求される精度は現在の加速器の数 $10 \mu\text{m}$ を約 2 桁上回る $0.1 \mu\text{m}$ のオーダーである。これについては地盤の常時微動の問題なども取り入れ、総合的に static および dynamic な alignment の方法を開発しなければならない。

6. 検討経過

高エネルギー物理学次期計画検討小委は、1984年4月16日、第97回高エネルギー委員会に於て組織された(添付資料1)。趣旨は、我が国に於ける高エネルギー物理学研究を、今後どのように進めるべきかを検討する為であり、委員の構成はその物理を実際に荷うことになる中堅・若手研究者を中心とした5大学、3研究所の代表15名よりなる。第1回の小委員会にて、委員長に長島(阪大)、幹事に岩田(KEK)を選出した。又、海外計画と密接に接触し、各種情報のチャンネルとなるコンタクトパーソンとして、加速器は木村(KEK)、測定器は近藤(KEK)が高エネルギー委員会より指名されている。

1984年7月より1985年8月の間における、8回の会議と1回の研究会によるまとめは、既に中間報告として提出された。

中間報告では、高エネルギー物理学を取り巻く世界情勢を観察し、その中で日本が果たした役割を分析した。そして、多様な選択肢の中から、今後我々の採るべき道について、おおよその方向付けを行った。この時点において、現トリスタン e^+e^- コライダーの接続計画として位置付けられていた、トリスタン PHASE II、 $e p$ コライダーは、もはや時代と物理の展開にそぐわないことが認識され、トリスタン PHASE II をこれ以上推進しないことを決定した。(添付資料1参照)

この中間報告は、親委員会の第100回高エネルギー委員会(1985年9月17日)で承認され、広く我が国高エネルギーコミュニティに配布された。この報告は、その後の4回(1985年9月25日東大、1985年12月18日核研、1986年1月21日KEK、2月21日KEK)の討議と、一般高エネルギー物理学研究者からの意見に基づいてまとめられたものである。

添付資料1: トリスタン phase II の位置付け
(次期計画検討小委員会中間報告からの抜粋)

A2. 日本の高エネルギー物理学の現状

トリスタン:

トリスタン計画は、1973年、現高エネルギー研所長西川氏により、その原型が提案されて以来、幾多の変遷を経て $e-p$ コライダーの建設をせよと云う第一次案が1977年にまとめられた。そこでは、電子のエネルギーを17 GeV とし、phase I では常伝導電磁石を用い、陽子のエネルギーを50 GeV とする。phase II で超伝導電磁石を用いて陽子のエネルギーを180 GeV 迄上げると云うものであった。その後、更に検討を重ねて「phase I では、(30+30) GeV の $e+e^-$ コライダーを建設し、phase II で超伝導電磁石を用いて陽子を350 GeV 迄加速して、 $e-p$ コライダーとする」とすることで、1979年高エネルギー物理学界のコンセンサスが得られたものである。

この1973~1979年という時期は、丁度、物質の究極構成要素としてのクォークの存在が認識され始め、ワインバーグ・サラム理論や QCD のいわゆる標準理論が固まりつつあった時代と一致する。1973年には11月革命と呼ばれるチャームの発見、1974年には中性カレントの発見が有り、大変革が始まっていた。しかし、1970年代初期には、未だ、様々の現象が混沌として在り、全く整理は付いていなかった。異種粒子の反応($e p$ 、 πp 、 $k p$ 、 $\bar{p} p$ 、 $p p$ 等)は独立の現象と見なされ、多様な反応を追跡できる固定標的実験が優勢な時代であり、FNALの200 GeV 陽子加速器がようやく稼動し始めた頃であった。固定標的加速器でFNALのエネルギーを超えることは難しく、エネルギーフロンティアを求める為にはコライダーが有効であるとの認識は有ったものの、多様性を追究することに大きな意義があった時代であった。 e^+e^- コライダーでは、SPEAR (3+3) GeV、及び DORIS (3.6 + 3.6)、後に (5.5 + 5.5) GeV が既に活躍しており、PEP (18+18) GeV、PETRA (21+21) GeV も立案されていた。 $\bar{p} p$ コライダーでは、ISR (28+28) GeV、1971年稼動)があり、FNALの Doubler (1 TeVへの増強)計画が検討され始めていた。このような状況では、 $e p$ コライダーがエネルギーフロンティアを狙える唯一のチャンスであったし、又、 $e e$ もしくは $p p$ と違った独立の現象が求められると云う意味も有った。

1969年のSLAC・MITに始まる一連の深非弾性散乱実験は、核子の構造を明らかにし、クォークが実在の基本構成要素であることを証明した。また、初期の強い相互作用理論の幾つかの候補の中から、正しくQCDを選ぶのに非常に有効であった。 $e p$ コライダーはこの延長線上に在り、物質のより微細な内部構造を追求すると云う独自で且つ本質的な役割を持つ。このような訳で、当初 $e p$ コライダーを考えたのには十分な理由があった。

1970年代の終り頃迄には、 $e+e^-$ コライダーの重要性が著しく増大して

いた。11月革命に始まり、チャーム及びボトムクォークスペクトロスコピー、グルーオンジェットの確認等、 $e+e-$ コライダーが標準理論確立に果たした役割は大きく、且つ、扱える現象の多様性、解釈の明瞭さで他の加速器を大きく引き離れた。この電子コライダーの優位は当分続く予想された。更に、この頃には、標準理論が可なり確立し、陽子は一個の素粒子と云うよりはクォーク（以下 q と略す）の集合体と見なされるようになった。この場合、 $e+e-$ 、 $e+p$ 、 pp 加速器は独立の現象を追求する手段と云うよりは、同じ物理現象を実現する為の異なる実験方法と見なされる。陽子の中のクォークは、平均として陽子の1/6の運動量を持つので、 $e+p$ 、 pp コライダーを、それぞれ eq 、 qq コライダーと見なす時の有効エネルギーは、大ざっぱに言って1/6に減ると見て良い。この事実により、 $e+p$ コライダーの魅力は大いに減じる一方、高エネルギーを実現する為の超伝導化技術には、未だ慎重な対応が必要であった。更に、現存の高エネルギー研の敷地の範囲内で、電子のエネルギーを30 GeV迄加速できる目途が付き、 $e+e-$ コライダーでエネルギーフロンティアを目指すことが可能となった。こうして、 $e+e-$ コライダーを phase I とし、phase II で $e+p$ コライダーを目指す最終のトリスタン計画案が1979年にまとまったのである。

現在建設中のトリスタンは、順調に進めば昭和61年度中には実験開始が予定されている。ビームエネルギーは、最初20 GeVあたりからスタートし、62年度には設計値である30 GeVに到達するであろう。これまで4つの実験、VENUS、TOPAZ、AMY、SHIPが採択されており、最初のビームに間に合わせるべく測定器建設が進められている。SPSにおける最近の実験を土台にして、高エネルギー加速器による実験は新しい時代に突入しつつある。その中で、電子・陽電子コライダーの果たす役割は非常に重要視されているが、LEPやSLCは50 GeV周辺の領域、トリスタンは30 GeV領域を調べる加速器として活躍するであろう。これらの領域の物理としては、トップクォークや次の世代のクォークやレプトンの物理、ヒッグス粒子やテクニカラー粒子、超対称性粒子群(SUSY粒子)などの発見、電弱相互作用の研究や Z^0 の物理、クォーク間の相互作用やジェットの解明、レプトンの内部構造の検証など、多くの魅力あるテーマが山積している。これらのテーマのうち、 Z^0 の物理や新しい重いクォークの発見などについては、LEPやSLCが活躍するであろうが、それ以外のテーマについては、トリスタンへの期待は極めて大きい。トップクォークに関しては、CERNのU1グループは、その質量を30-50 GeVと予測しているので、現時点でトリスタンの研究領域に入るかどうかかわからないが、トリスタンとしては超伝導高周波空洞の導入等によって、そのビームエネルギーを40 GeV程度まで増強することが望ましいと考えられる。またこれまでに見つかった J/ψ 粒子や Υ 粒子の分光学的研究が今日まで精力的に続けられているように、トリスタンの実験も今後10年以上にわたり活発に行われるであろう。

なお、当初トリスタン Phase II 計画としていた $e+p$ コライダーについては、

次に述べる理由やHERA計画(30+800) GeV、 $e+p$ が既にスタートし建設が進んでいることを考慮すると、建設の意義は著しく小さくなったと言える。

即ち、最近の高エネルギー物理学の発展は $e+p$ コライダーを、はっきりと eq コライダーとして位置付けるものとした。この場合、トリスタン phase II の実効エネルギー \sqrt{S} は80 GeVであり、現在建設が進行中のLEPもしくはSLC(50+50 GeV $e+e-$ 、 $\sqrt{S}=100$ GeV)に劣る。一步進んで、 $e+p$ 全体のエネルギーで考える場合、 $\sqrt{S}=200$ GeVとなる。既に稼働しているCERNのSPSPは、 $\sqrt{S}=540$ GeVであり、 qq コライダーと考えると、 $\sqrt{S}=90$ GeVとなる。SPSPは、 W^\pm 、 Z^0 を発見すると云う大きな成果を挙げたが、新粒子や標準理論を越える新現象はこれ迄の所見つかっていない。ルミノシティが上がった場合、SPSPで新現象の見つかる確率は皆無では無く、この時は、トリスタン phase II は第二世代加速器として精密実験を目指さなければならない。しかし、第二世代の精密実験と云う役割では、LEP II ($\sqrt{S}=300$ GeV)には及ばないであろう。多重クォーク体としての陽子の存在によりバックグラウンドが大きいからである。 $e+p$ コライダーの新粒子、新現象発見器としての役割は、クリーンさで $e+e-$ に劣り、到達可能なエネルギーもしくはルミノシティで pp コライダーに劣るといいうささか中途半端な所に在る。その他の現象では、Large P ν 現象、ジェット現象等を含め、或程度は $e+e-$ 、 pp コライダーと同じ物理現象を追究できるが、 $e+p$ コライダーの基本的役割は、 $e+e-$ 、 pp コライダーでは得られない独自の所に求めなければならない。これは、前にも述べたように、深非弾性散乱に依ってクォークの内部構造を求める所に在る。この時、何処迄内部に入り込めるかの目安の遷移運動量 Q は、トリスタン phase II で大体100 GeV(距離にして 10^{-16} cm)である。ところで、何らかの意味で内部構造存在の目安を与えるカットオフは、既に電子やミューオンの異常磁気能率($g-2$)測定や、PETRA等の最近の実験で、1 TeVに近い値になっている。従って、クォークの内部構造が見つかる可能性は極めて小さい。

以上よりトリスタンは e^+e^- 衝突リングとして、今後、超伝導空洞の活用によるエネルギーの増強など、総合的な加速器の性能向上をはかり、LEPやSLCに対抗できる物理の成果を出すことに全力を尽くすのが望ましいと考えられる。

添付資料 2. 次期計画検討小委員会の任務とメンバー構成
(高エネルギー委員長藤井忠男氏の手紙)

1984年6月21日

*****殿

拝啓

先日開催されました第97回高エネルギー委員会におきまして、我が国における高エネルギー物理学の実験研究を今後どのように進めるべきかを検討する為に、中堅・若手を中心とした高エネルギー次期検討委員会を発足させることを決めました。

つきましては貴兄にその委員を委嘱することになりましたので、よろしくお願い申し上げます。

尚、この小委員会の任務、構成は下記の通りであります。

1) 委員会の任務

検討小委員会は高エネルギー次期計画を検討し、1986年3月までに計画案を高エネルギー委員会に答申する。高エネルギー次期計画としては、次期加速器、国際協力、非加速器実験などを含む。

2) 委員会の構成(15)名

岩田正義(KEK)、折戸周治(東大理)、大島隆義(東大核研)、
近藤敬比古*(KEK)、笹尾 登(京大理)、鈴木史郎(名大理)、
長島順清(阪大理)、森 茂樹(筑波大物工)、荒船次郎(東大宇宙線研)
清水顔光(KEK)、木村嘉孝*(KEK)、佐藤 勇(KEK)、
佐藤康太郎(KEK)、光延信二(KEK)、吉岡正和(東大核研)

(*は海外に於ける諸計画に関するコンタクトマンの役割を兼ねる)

この検討小委員会の最初の会合を可及的速やかに召集し、委員長、幹事を互選することから始めて戴きたいと思っておりますので、その日時及び場所について同封の葉書のアンケートの答えを7月6日(金)までにお送りください。

敬具

高エネルギー委員長
藤 井 忠 男