

大型装置純粋科学試験

平田光司

はじめに

高エネルギー物理学は物質の根源形態（素粒子）を加速器という人工的手段で研究する物理学の一分野である[1]。加速器で電子、陽子などを高エネルギーに加速し、物質と衝突させて高エネルギー素粒子反応を起こさせ、そこで生成される素粒子現象を特別に設計された装置（測定器）で観測するのが基本的方法論である。研究対象も原子核からその構成要素である陽子、中性子の内部構造に進み、現在では基本的構成要素であるクォークとレプトンがヒッグス粒子との非線形相互作用で質量を獲得（ヒッグス＝アンダーソン機構）したゲージ場によって相互作用しているとする、単純で壮大な自然像（標準理論）がほぼ確立している。これによって、電磁相互作用と弱い相互作用が一つの力の異なる現れであることが理解され（ワインバーグ＝サラム理論）、また、同様の枠組み（ゲージ理論）で強い相互作用も理解された。弱い相互作用の理論は、実験事実の説明に関しては十分実証され、信頼できるものになっていたにも関わらず、理論の内的無矛盾性に問題があった（くりこみ不能問題）。標準理論によってはじめて素粒子現象を論理的矛盾なしに理解することができる。標準理論から導かれる現象はすべて実験で確認され、唯一、実証されていないのがヒッグス粒子と呼ばれる粒子の存在である¹。

アメリカにおける高エネルギー物理学の中心的計画であったSSC(Superconducting Super Collider、超伝導超大型衝突型加速器)[2]はこのヒッグス粒子を発見する（もしヒッグス粒子が存在しなければ、これにかわる現象を発見する）ためのもので、建設も進み、既に20億ドルが支出されていたにもかかわらず、1993年10月に議会で中止が決定された。これは大きな衝撃であった。これをきっかけに、研究者の間にも高エネルギー物理学が置かれている状況を見直す動きもあらわれた

1 ニュートリノに質量があっても、標準理論とは矛盾しないので、この言明は現在でも正しい。

[3]。

高エネルギー物理学は 20 世紀初頭における加速器の発明と、それを用いた人工的核変換の成功に端を発するが、主に第 2 次大戦後に巨大科学として急劇に発展した。リヴィングストン曲線[4]で如実に示されるように、最先端の加速器によって到達できる素粒子反応の最高エネルギーは、加速器の巨大化、大規模な資金の注入、加速器技術の進歩などによって、時間の指数関数として増大してきた（ほぼ 6 年で 10 倍の伸び率である）。ところが、SSC 中止によって、これまで指数関数的に発展してきた高エネルギー物理学に停滞のきざしが見え始めた（つまりリヴィングストン曲線が飽和状態に近付いたように見える）。この現象は冷戦体制のもと、国防と結びついた形で発展を保證されてきた高エネルギー物理学が、その終結によって国家的支持を失ったためであるなどと説明されている[5]。このような困難な状況によって、高エネルギー物理学の持つ学問としての内的構造が見易くなってきたように思われる。

本論文は、高エネルギー物理学における研究者、研究機関が置かれている環境を論じ、高エネルギー物理学および類似の学問分野の将来の発展に資することを目的とする。次章において高エネルギー物理学を典型とする大型装置純粋科学を定義する。3 章では大型装置純粋科学の 3 要素、巨大科学、装置科学、純粋科学のそれぞれについて考察する。4 章ではこれら 3 要素の相互作用で起きる現象を分析する。5 章では高エネルギー物理学が、学問分野として持つ内的問題およびそれが社会の中に置かれていることによる問題について考察し、将来の可能性について提言を行う。

1. 高エネルギー物理学

加速器も粒子測定器もきわめて大型の装置である。例えば、高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構、以後 KEK）で 1981 年から 1996 年まで行われた TRISTAN 計画[6]では、加速器と測定器が新たに建設され、実験が 86 年から 95 年まで行われた。総予算は約 2500 億円で、これは当時、日本の科学計画としては突出した規模であった。建設に参加した研究者は、加速器に 100 人、4 つの測定器に合計 200 人程度である[7]。これらの建設にあたっては、研究者の組織化が行われ、大規模な分業体制がとられた。この計画はほとんどトップ

クォークの発見のみを目指したものである。

高エネルギー物理学は典型的な（巨額の資金と大量の組織化された研究者集団で特徴づけられる）「巨大科学」と言えるが、宇宙開発や原子力研究と比べると、その目的が実用的価値にない点に特徴がある。素粒子物理学の目標は物質の究極の存在形態を明らかにすることで、何かの役にたつことは意図されていない。つまり「純粋科学」である。あるエネルギー以下では決して見ることができない高エネルギー現象が存在するため、世界最高のエネルギーを出せる加速器は新現象を独占的に発見でき、それよりエネルギーの劣る加速器は2級とならざるを得ない[8]。つまり、世界で最もすぐれた装置を持つことが基本的に重要である。このため加速器開発が研究の死命を制する。これを「装置科学」と呼ぼう。以上をまとめると次のようになるだろう：

巨大科学 巨額の資金と大量の人材を投入する他、研究者間に管理体制・ヒエラルキーが存在する。

純粋科学 プロジェクトの目的が、少なくとも公式的には、純粋に科学的興味のみである。つまり、科学のための科学である。

装置科学 実験装置（加速器と測定器）の開発が本質的に重要で、そのための専門家集団を持っている。

これら3つの特徴が互いに関係して独特な構造を作り出す。高エネルギー物理学は原子力開発と同列には論じられないし、大学研究室規模の基礎研究とも区別しなければならない。高エネルギー物理学のような科学のありかたが現代科学の特徴的な一面を代表しており、また歴史的必然性をもって生まれてきたものであるならば、高エネルギー物理学に現れる諸問題は今後より大規模に起きるであろう科学をめぐる問題の先触れであり、むしろ科学論[9]が関るべき中心的なテーマの一つと考えなければならない。高エネルギー物理学、および類似のスタイルを持った科学研究体制を特徴づけるために、大型装置純粋科学という名称を提唱したい。大型装置純粋科学の定義は、「巨大科学」、かつ「装置科学」、かつ「純粋科学」、ということである[10]。

2. 大型装置純粋科学の概念

まず、大型装置純粋科学の3つの条件を高エネルギー物理学における実例を用

いて個別に論じる。

2.1. 科学主義

科学主義とは、科学はそれ自体として意味があり、価値があるとする考え方である。これを科学主義と呼ぼう。これには「学問の自由」の必要性和「研究命令」としての業績競争も意味されている[12]。科学主義科学は純粋科学とも呼ばれる。科学主義の反対は実利主義である。「実利」とはといっても、経済的利益だけを指すのではなく、エイズ治療法の開発、環境保護など、福祉的なものも入るし、兵器の開発なども実利追究型といえる。ある目的を達成するための研究で任務遂行型といっても良い。原爆開発（マンハッタン計画）、宇宙開発や原子力研究、企業における開発研究などが実利主義の典型であろう。実利主義科学はその目的によって正当化され、達成度によって評価される。

科学主義と実利主義の違いは、研究の目的、看板、にある。研究運営の仕方や研究態度にあるのではない。この分類は各研究者、研究グループ、研究機関、研究分野など、どれにでも適用できるが、本稿では「高エネルギー物理学」のような研究分野、「KEK」のようなそれを担う研究機関を主として考える時に科学主義と呼び、研究者個人の研究態度に関しては「態度としての科学（実利）主義」と（誤解のおそれのある場合には）、いちいちことわることにする。また態度としての科学主義を特にアカデミズムと呼ぶ²。原理解明に向かう基礎研究と原理を利用する応用研究という分類は研究の方向性に関するものであろう。純粋科学は基礎研究で実利型科学は応用研究、というわけではない。今日では、実利主義的な基礎研究も大規模に行われている。看板としての科学主義、実利主義、態度としての科学主義（アカデミズム）、実利主義、方向としての基礎、応用、についてはすべての組み合わせが可能であり、実際に行われている。ここでは看板としての科学主義についてまず論じる。

高エネルギー物理学は典型的な純粋科学であって、その目標である物質の根源形態が発見されたところで、人類の福祉はもとより新兵器の開発にさえ貢献しないだろう。原子核レベルまでの知識には実用的応用の可能性も考えられるが、クォークレベルの知識には実際的な応用は考えにくい[13]。もちろん何らかの副次的効

2 この態度としてのアカデミズムを特徴づけるにはマートンのノルム（普遍主義、公有性、利害の超越、系統的懷疑主義）で十分であろう[67]。

果[14]をもたらすことはありえるが、それが目的ではない³。

実利主義研究なら、当初の目標が達成できれば成功であり、研究成果が研究投資にみあうか否かの判断も可能である。一方、純粋科学の成果は何か新しいことの発見 (something new-ism [15]) であり、その価値は学問集団の中でのみ評価される。科学主義においては真理追求の名のもとに「無制限」な研究の自由があり (あるべきであり、と表現されることがある)、専門分野における新しい知識を得ることだけが要求される。そこで得られた知識が投入された予算に見合うかどうかを判断するための基準は無い[16]。唯一の価値基準は「何か新しいこと」であり、「何か新しいこと」を出し続けることが研究者 (集団) としての存在意義となる[17]。このため、「出版か死か」といわれる果てしない業績競争が起きる。科学主義における研究者の制御不能な競争と、研究以外の一切を考慮に入れない研究活動が生みだす問題については、多くの指摘がある (ブレーキのない車[15]、フォン＝ノイマン問題[18])。大型純粋科学ではこれが大規模におきる可能性がある。

2.2. 装置科学

自然科学における実験の重要性は誰もが認めるところである。物理学における重要な発見はたいいてい新装置の発明、開発と結び付いている (もちろん、既存の装置を巧妙に組み合わせて使うことも新装置の開発である)。この意味では、自然科学は常に装置依存的である。高エネルギー物理学における科学装置は、しかし、「重要」以上のものである。

装置科学の概念を定義するために、まずその反対概念を説明する。植物採集に類する基礎データの集積は自然科学にとっての基本的作業である。天文学のある部分では、様々な天体の観測データを集積、解析することによって研究を進めていく。こういう科学分野を「情報集積科学」と呼んでもいいだろう。たとえば宇宙の大規模構造である void の発見[19]には、望遠鏡としてはとくに最先端のものが必要とはされなかった。むしろ天体の分布についての大規模な情報収集とたくさんな情報整理がこの発見をもたらした。これが情報集積科学の典型であろう。いっぽう、当時最新鋭のパロマー天文台の望遠鏡で遠方の星を観測し赤方偏移を発見したのは装置科学の典型であろう。TRISTAN でトップクォークは発見できなかった、LEP [20] でもなかった、そしてフェルミ加速器研究所 (FNAL) で発

3 4.1. でも論じているが、副産物で純粋科学を擁護することはできない。

見されたのは加速器のエネルギーが高かったからである。エネルギーの高い現象はエネルギーの低い現象を含んでおり、よりエネルギーの高い加速器が完成した時点でエネルギーの低い加速器は（ほとんど）無意味になる。高エネルギー物理学の現在の局面では世界最新鋭の装置でしか新しいことは研究できない。情報集積科学に対して、世界記録型とでもいうべきものである。装置の優劣が研究成果に直接むすびついているのは、軍事と似ている。兵器が劣っていては勝負にならない[21]。

このように、装置の優劣が決定的に重要な科学を装置科学と呼ぶ。装置科学では装置の開発が研究活動の根幹となる。一方、情報集積科学においては、装置の開発は研究とは切りはなされ得る。高エネルギー物理学における最新鋭装置とは、最高到達エネルギーの高い加速器である。もっとも、エネルギーは低くても、ある特定の興味ある現象を徹底的に精密測定する研究もある。これにはその現象を見やすいように特別に設計された、エネルギーとは別の意味で[22]圧倒的に優秀な加速器が必要である。現在 KEK とスタンフォード線形加速器センター（SLAC）で完成し、競争している B ファクトリー[23]はこのタイプである。これも、最新鋭加速器の一つの方向といって良い。

電子加速器から放出されるシンクロトロン放射光を用いる物性研究は情報集積科学といえる。これは巨大科学で、高エネルギー物理学と似ているようだが大きな違いがある。そこでは、加速器は（電気、ガス、建物と並ぶ）研究の環境にすぎず、加速器の役割は少なくとも現在のところ、高エネルギー物理学におけるものとは大きく異なっている。光の質（ブライトネス、コヒーレンスなど[24]）を向上させることで物性研究の新局面をひらかなければ、研究者（集団）としての存亡にかかわるということは現在のところないようである。大型科学装置の位置づけは装置科学と情報集積科学では全く異なる。前者では装置は学問上の目的を持っているが、後者ではその装置を使う利用者が学問上の目的を与える。後者の装置は、このため、施設（facility）と呼ぶほうが適当であろう。施設型の装置は、潜在的利用者が多いので支持されやすい。またそれ自体の目的が無いので成果があがらなくても利用者の責任と考えられ、批判されることも少ない。

施設型装置の計画にあたっては、より多くの潜在的利用者を確保して計画を受け入れやすくすることが得策で、そのために多機能型の装置になりやすい。装置の設計思想も最大公約数的になって、特徴の無いものになり、大量の論文を生産

できる反面、画期的成果は出にくいものになるだろう。施設型装置の建設、運転に携わる研究者はサービス業化しやすく、装置の性能を向上させようとする動機は持ちにくい（むしろ施設の利用者からは、しばしば、「よけいなことをするな」という意見が出るようだ[25]）。アメリカ、ヨーロッパ、カナダ、ロシア、日本が共同で建設する予定の宇宙ステーション計画は目標が多様化してしまい、典型的な施設型プロジェクトになりそうである[26]。装置としての宇宙ステーションを最適化しようにも、どの方向に最適化すれば良いのか指針が無いのでは、改良への意欲は湧かないであろう。

新装置の開発によって情報集積を圧倒的に速くすることができ、それが決定的な差になる場合には、情報集積科学は装置科学に転化するだろう。装置科学か情報集積科学かは、学問の性質とその歴史的局面による。現在の高エネルギー物理学は完全に装置科学であるが、ハドロンが次々と発見された1950～60年代には複数の加速器が活躍しており、高エネルギー物理学は主として情報集積科学であった。そこで発見された数多くのハドロンが群論によって整理され、統一的に理解されたことによって、標準理論への準備が整ったのである。

2.3. 巨大科学

原子力、宇宙開発などが巨大科学の典型である。巨大科学という時には、予算、人員の規模だけではなく、研究が高度に組織化されていることも意味するものとする。すなわち組織化科学でもある。初の巨大科学であり、その典型となったマンハッタン計画に見られたように、あるはっきりした（科学主義的または実利主義的）目的のために、さまざまな分野の研究者を集め、組織することによって、目標の達成を目指すものである[27]。

巨大科学では、

1. 個々の研究者には研究テーマが与えられており、その問題を解決することが業務となる。
2. 仕事の評価も、いかに学問に貢献したか以上に、いかにプロジェクトに貢献したか、が重要視される。
3. 直接研究にたずさわらず、研究者を統括、監督する研究者がいる。

極端に言えば、研究者は軍隊における兵士のように組織され、現場指揮官、作戦本部の参謀、物資調達にあたる主計部など、直接戦闘（研究）にたずさわらない

官僚的部分も必要となる。

研究者はたいていアカデミックな精神構造を持つが、科学者の自発的研究に基礎を置くアカデミズムは巨大組織研究と両立しない、という意見は説得力がある。たしかにプロジェクトの成功に貢献することと、自分の学問的興味を追究し、論文を書いて学会に貢献する（同時に学者としての経歴を得る）こととは「矛盾」することが多い。この「矛盾」が最もよく現われるのは業績評価においてである。たとえば、高エネルギー物理学研究所（当時）の職員組合が行った職員の意識アンケート調査でも[28]、人事に関する不満は多く

- Physical Review (最も権威があると思われるアメリカ物理学会の専門誌：著者註)に幾つも論文を出している人が助手で、論文を一つも出していない教授もいるなど実力本位になっていない（加速器研究者）。
- 計算だけでは（計算は理論的な仕事で論文も書きやすい、と思われる：著者註）、加速器やその他の設備はできないのであるから、ハードウェアに携わっている人も昇格が遅れることのないような配慮が望まれる（加速器研究者と思われる：著者註）。

という正反対の意見があり、そのどちらにも一理ある、ということが起きる。しかし、これを「矛盾」と感じるのはあやまりであろう。研究者の業務がはっきり定義されている組織研究においても、科学者の自発的研究に基礎を置くアカデミズムが重要となる。プロジェクトを遂行する局面での態度としての科学主義と実利主義は、アカデミック指向かプロジェクト指向か、と言い換えることができる。実際の研究組織はこれに関して3つの階層から成ると言える。つまり、

アカデミック指向： 仕事の質は高く世界的な業績をあげている。しかし、「必要以上に」趣味的に研究する。慎重すぎるように見えるが、プロジェクトがパイオニア的になればなるほど不可欠になる。指導部に批判的で、現行のデザインを批判する。「プロジェクト指向の研究者は軽薄で見てられない」と思う。こういう研究者ばかりではプロジェクトが予定通り進まない。

プロジェクト指向： オリジナルな業績という点では落ちるが、外国をふくめて業界の情勢を良く知っており、プロジェクトに必要な基礎計算も適当な文献を見つけてきて、てっとり早くもっともらしい答えをだす。「アカデミック指向の研究者は好き勝手なことを言うだけであてにならない」と思う。プロジェクトの推進に有用だが、こういう研究者ばかりでは、特にパイオニア的

プロジェクトの場合には危険であろう。立派な報告書はできるが装置はうまく働かない。良質の部分は指導部（官僚）向きであろう。

無関心派: この他にかなりの無関心層があるだろう。

ある先端的プロジェクトが成功するためには、アカデミック指向の研究者もプロジェクト指向の研究者も必要である。また無関心派の研究者にもうまく仕事をさせなければならない。指導部の役割の一つはこの点の調整にある。

「科学は、あらゆる制約から自由であるとき、もっとも発展する」（バグウォッシュ宣言）とすれば、研究テーマが「上から」与えられる組織研究型は非能率的な方法で、伝統的な大学における研究体制のように、各自が興味ある研究を勝手に行うのが科学の発展に最も適していることになろう。これは一理あるようだが、実際はあやまりである。科学の発展にとって、真の桎梏は、研究方法、考え方などを制約する権威主義、タブー、研究範囲を限定する専門意識、研究の質を問わずに結論だけを急がせるスケジュールなどであって、任務遂行型の研究とアカデミズムは矛盾しない。研究目標達成のために解決すべき問題を発見することにこそアカデミズムの本領がある。たとえば、マンハッタン計画における次の描写[29]は、そのことをよく表わしている。

「ロスアラモスに着いた時、私が驚嘆をもって見出したのは、はっきりと定まった実地的な計画について仕事している技術者ではなく、抽象的な推論を討論している数学者のグループを思わせる環境であった」

マンハッタン計画はいろいろな意味で成功した大型装置（実利）科学であるが、そこでは任務遂行型の研究とアカデミズムがうまく調和していたと思われる。

伝統的アカデミズムの典型である素粒子理論においても、「研究者個人」の特殊な問題意識を各人がかってに追究しているわけではない。すべての研究者にとってかなり共通した問題意識があり、その問題意識に促されて研究が行われるのであって、学問の世界に「研究者個人」は存在しないと言っても良い。主流とはかけはなれた研究を行っている研究者も、実はそのテーマが重要であるのに他の人は気がついていない、と思っているのである。この意味で、アカデミズムの研究も任務遂行型であるともいえる。任務遂行型研究とアカデミズムは一見対立するようだが、実は相補的關係にあり、さらに、結局は同じものの両面にすぎないことも多い。

3. 大型装置純粋科学の構造

ここでは大型装置純粋科学の3つの特徴的要素、科学主義研究、巨大組織研究、装置科学が互いにどう関係しあうかを論ずる。

3.1. 大型装置純粋科学における科学装置

装置のよしあしが勝敗を決する装置科学で科学主義における競争原理が働けば、装置の開発研究が最重要課題となるのは必然的なことであろう。アカデミズムの世界では、「出版か死か」とよくいわれるが、装置科学の世界では良い装置を持たなければ出版もできない。高エネルギー物理学では「建設か死か」となろう。

装置科学である高エネルギー物理学では、新鋭装置を次々に投入する。この装置の維持、運転自体にも多額の資金を要するため、「新鋭装置」はもはや新鋭でなくなった時点で廃棄されることが起きる。この「寿命」は、10年程度かそれ以下である。たとえばトリスタンの主加速器はその「使命」を終えBファクトリーに転換された。2線級の加速器にも資料集積用加速器としての利用価値がある場合もあり、装置の維持費が莫大でないかぎり、その加速器を徹底的に利用しつくすことも普通に行われている（例えばKEKの陽子シンクロトロン）。しかし、それが研究所の看板になることはない。このように、装置純粋科学は装置を短期間に消費することになる。これは軍拡競争と軍事技術の関係と似ている。冷戦時代には、ソ連が米国より優秀な兵器を持てば、米国は従来の装備を捨ててより優秀な新兵器に移行しなければならなかった。こうして、開発された兵器はほとんど使われることなく廃棄される。この類推で兵器産業にあたるのが加速器研究者集団である。

プロジェクトの目的は科学主義的なものでも、なかの研究体制は実利主義的になりえる。高エネルギー物理学全体という枠の中で加速器研究を考えると、加速器研究者集団は、高エネルギー物理学全体に対して優秀な加速器を建設する責任を負っているので、その研究活動は実利的研究に見える。つまり

国家：原子力研究 = 高エネルギー集団：加速器集団

という平行関係がある。純粋科学研究か実利的研究かの違いは研究の現場を見ても区別がつかない。この区別は、外部社会との関係、つまり、(スポンサーとして

の) 国家、国民との関係にある。加速器集団が高エネルギー集団のなかでかけられる看板は実利主義的なものであるが、高エネルギー集団全体としては国家、国民に対して科学主義の看板をかけるわけである。

この構造は「いれこ」となって幾重にも重なっている。高エネルギー集団内の実利的研究集団である加速器集団の中でも、科学主義的研究(自発的、自己目的の加速器研究)が存在し[30]、それが重要な役割を果たしている。モード論[32]を高エネルギー物理学にあてはめる時、この「いれこ」構造のためにうまくいかない。高エネルギー集団全体としては国家に対してモード1であるが、加速器集団は集団としての一体性があるとはいえ、様々な異なる分野の専門的研究者が分野横断的、合目的的に集まっているので、高エネルギー集団に対してモード2的である様に見える。

装置科学では、装置の開発が基本的に重要である。しかし、装置の開発を、研究目標から逆規定された受注的研究と考えてはあやまりである。装置の開発はかならずしも、というより、通常、受注・請負的なものではない。加速器技術、加速器理論の自発的な発展があり、これによって、素粒子研究の新局面が開かれることも多い。加速器の研究者が新アイデアを出して、従来の加速器では考えられなかった種類の高エネルギー実験が可能となる場合である(SppSと確率冷却など[34])。このため装置科学においては、目的(素粒子現象の解明)と手段(加速器)の関係は相互依存性である。装置科学を定義したとき、「そのための専門家集団を持っている」とつけた理由はここにある

この専門家集団は、各分野の専門家を分野横断的に「集めた」ものではなく、時間をかけて専門的に養成された集団である。加速器では粒子の運動を研究するビーム力学などの理論的分野とともに、「高周波空洞」「電磁石」、「真空」、「制御」、「放射線管理」などの工学的分野の専門家も必要である。しかし、これらの各専門分野の担当者も、ビーム力学はもとより加速器全体についての知識を必要とする。加速器はいわば複雑系であって、個々の要素の単なる集積ではなく、全体がシステムとして関係しあっているからである。個々の要素がすでに非線形性をともなうが、それがビームを通じて関係しあう。ビームの従う自然法則(相対論的運動方程式)も非線形であって、系のふるまいを完全に把握することはできない。加速器研究者の養成はビーム力学から始めて加速器の各要素についての多少の経験を経て始めて自立した研究者となるものであり、ここには研究者から研究者へと

伝承的に伝えられる暗黙知も含まれる。これらの知識を論文、報告書を読むことだけで得ることは不可能であろう⁴。

SSCは周長約87kmのトンネルに強力な超伝導電磁石を並べ、20テラ電子ボルトの陽子ビームを2つ作り、衝突させる計画であった。ここでは超伝導電磁石の開発が中心的課題であったが、電磁石の満たすべき性能はビーム力学によって研究される。SSCの建設がほぼ確定した1984年からCentral Design Group(CDG)によってこのビーム力学の研究が行われた。ここで問題となるのは加速粒子の長時間にわたる安定性である。この電磁石のデザインはまた、実際に(安価かつ大量に)製作し得るものでなければならず、加速器デザインと電磁石の試作が平行して進められる。ビームの安定性のみを重視すれば磁石に無理が生じ、製作不能か、またはとてつもなく高価なものになる。また、磁石の作り安さのみを重視すれば加速器の性能は不確かなものになる。ビーム力学の専門家も電磁石製作の専門家も互いに全体的な見通しをもって共同作業を行わなければならない。時には相手の土俵に踏み込んで議論することもあり、また検討が進む中でこれまでの主張を白紙にもどすこともある。それができるのは、研究者全体が同一の、専門的に養成された集団に属するからである。SSCでは、あとで述べる事情から、こういう共同作業が形式的にしか行われなかったようだが、普通は、経験を積んだ研究者の「同志的連帯」でこの作業が進められる。

この共同作業で最も不確かなのが粒子運動の安定性である。先端的加速器の設計段階では、過去の実例もあまり参考にならず、数値シミュレーションに頼らざるを得ない。与えられた力の中での古典的粒子運動の長時間安定性は、天体力学との関連においてポアンカレによって研究が始められたものである。近年、この系のカオスの性質が注目されているが、「粒子運動の長時間安定性を有限の手続きで保証する必要十分条件は存在しない」ことが知られている[35]。いかに複雑でもなんらかの解析の評価が可能であれば、大型計算機を用いて信頼性のある評価もできるだろうが、現実には数値シミュレーションによって「十分な」安定性のあるデザインを決定しなければならない。しかし、シミュレーションは常に何らかの近似をとまなうので、その近似が本当に正しいかどうかは、加速器を建設するまで分からない。また、電磁石などの製作誤差、並べた時の相互の位置関

4 職人、芸術家、宗教者の養成でも似たようなことがある。禅宗における悟りが通信教育で可能とは思われない。科学が単なる知識の集積であれば、それも可能であろうけれど。

系の誤差なども、実際に作って見なければよくわからない。シミュレーションでは、たとえば、上記の位置関係の誤差など、あらかじめ知ることができない誤差を乱数を用いて仮に作り、その影響を調べる。この乱数が異なれば予想される加速器の性能も異なる。あらゆる乱数について共通に得られる最低の性能がデザインで保証できる性能と見なされる。これらの不確定要素をいかに十分取り入れるかは、どういう誤差がどの程度あるかを含めて、最終的にはシミュレーションをする物理学者の判断による。

ここに加速器建設においてアカデミズムが重要となる理由がある。もし、すべてが理解されているのであれば、加速器建設もマニュアル化された仕事となり、単に「手抜きをするな」というような、一般職業倫理のみが問題となるであろう[36]。しかし、すべてを把握することはできなくても、できうる限り良く理解する必要がある。また、どこまでは理解され、どこから先は理解されていないか、を常に問題とすることも必要である。この消極的効用としては不注意による失敗が避けられることがある。より積極的な効用は、計画の問題点を未然に回避し、性能向上を可能とすることであろう。また、これまで未解決だった問題を解明し、理解された領域を拓げる契機となることもあるだろう。反対に、この局面で、研究者のアカデミズムが試されることにもなる。

CDG では、大規模なシミュレーションによって加速器の基本設計を行い、その成果は 1986 年に膨大なレポートとして発表された[37]。純物理学的にこのレポートを見ると、しかし、十分な検討がなされたとは言い難い面がある。CDG では、他の研究所で作られたシミュレーションコードをすべて入手し、新米（多くはポストドク）の加速器物理学者にそれぞれを割り当てて計算させたと言う。SSC のような大型計画であれば、当然、シミュレーションプログラムを新たに作成するはずである。プログラムにどういう物理的効果がどのように取り入れられているか、完全に把握できていなければ、計算結果を信用することはできないからである。このような作業によって 1986 年の報告書が書かれた。その報告書は一面苦渋に満ちたものでもあった。主リングへの入射エネルギーを 1 テラ電子ボルト、超伝導磁石の開口部の直径を 4cm で十分としているが、同時に「入射エネルギーはより高く、開口部はより広くしたほうが、安全ではあるが、それは予算的に実現不能である」という記述があり、SSC の建設予算を低く算定し、計画が認められやすくするために、多少無理な数値を出していることが伺える。実際、計画が

認められてからあらためて加速器デザインを行った結果[38], 入射エネルギーは2テラ電子ボルト、超伝導磁石の開口部の直径は5cmとなった。これによってSSC計画の総予算が大きく増大し、計画中止の原因の一つとなる。CDGにおける加速器物理学者のアカデミズムについては不十分だった感がある⁵。

装置研究者(集団)のエートスは、要求されていようがいまいが、より強力で安定した装置を開発し、それを用いて初めて可能となる実験を実現させることである。このような研究者の自律性は、時には暴走して、誰も使いようがない装置を作る可能性があるように見えるが、実際にはそういうことは起こらない。装置研究の自律性は「合目的的自律性」とでも呼ぶべきもので、加速器研究者はどういう加速器が望まれているかを良く理解しており、その方向に研究の自律性を向ける(べきである)⁶。高エネルギー加速器の研究者には高エネルギー実験、素粒子論の出身者が多く、加速器に転向したのも分野としての近親性もあるが、高エネルギー物理学の進歩に貢献したい、というナイーブな理由もあるだろう。加速器研究者に高エネルギー実験、素粒子論の出身が多いことは、加速器研究の質を高める上で非常に重要であると思われる。それは、以下のようなことであろう[39]。

「一般に、技術者にとって自らが関わっている技術の全体的ヴィジョンを把握することは、その技術にまつわる倫理的・社会的コンテクストの理解のためにはもちろん、当該技術を成功裏に開発するためにもきわめて重要である。「全体的ヴィジョン」は「心眼」とも言い換えられる。科学的工学の教育を受けただけの技術者(その多くは大学工学部の出身者である)は、この「心眼」をもたない傾向性が強い」

3.2. 大型装置純粋科学としての高エネルギー物理学

さて、装置の開発が重要だとしても、それが巨大化に向かうのは必然的な過程か? 加速器の大型化(高価化)は避けられないものか? 加速器のエネルギーを上

5 文献[59, 60]参照。

6 専門家は各自の専門が活かされることを望みし、専門家を即席に養成することはできない。創造的な専門家集団を持つためには、あるていどの余裕(当面必要ない専門家もいれておき、彼等にも仕事があるようにしておくなど)も必要である。原子核物理学の中井浩二氏は初期の原子力研究所について次のような批判を行っている[58]。

当時、研究所の理事であったある先生が建てられた構想は呆れたものでした。研究室というのは人材のプールだと言うのです。研究所としてはガス冷却炉なりなんなりプロジェクトを建てる。そうすると研究部のプールから、あいつをつれて来い、こいつにやらせようということが出来る。そういう発想を聞いて、私はこんな世界に居られないと思いました。一人一人の研究者がやっていたことを活かして研究所の事業を組み立てるという余裕が持てなかったのだと思います。

これは装置の開発を目標から逆規定された受注的研究と考えた誤りであろう。

げるためには、より強力な磁石、加速装置が必要で、また、それに対応する測定器も反応のエネルギーが上がれば大きなものが必要となる。このため装置は大型化する。これはしかし一面では、加速器、測定器の革新が行われず、同じ原理の上で量的拡大をはかってきたからでもある[40]。つまり、大艦巨砲主義時代の戦艦大和のような方向に進み続けているとも言える。より強力な戦艦を作るためには、国家予算の増大と、それなりの技術的進歩も必要だった。高エネルギー加速器にとって重要なのはビームのエネルギーとルミノシティが高いことであって、それは必ずしも大型化を意味しないはずだが、現実にはそうなっている。

革新的装置の開発によって、加速器の小型化（低額化）を計るために、ある加速器研究者集団が当面の開発競争から身をひき、かかる装置の開発を目指すことも論理的可能性としてはありえるだろう。しかしこれが事実上不可能なのは次に述べるような事情のせいである。3.1. で述べたように、加速器研究者集団は即席には形成できず、集団としての蓄積が重要である。当面の科学主義競争に勝利するには、この蓄積を生かすようなプロジェクトを経動員体制ですすめるのが最も有利であることは明らかである。つまり、既存の原理の枠内で量的拡大に向かうのが最も効率が良い。このため、これまでの蓄積を御破算にして革新的な開発研究に向かうことは、多大な投資を要し、開発期間中は高エネルギー物理学の成果を出すことはあきらめざるを得ず、そうすると実験家集団が壊滅することになり、支持されるものではない。例えばまだ萌芽の段階にあるが、将来の強力で小型の加速器に発展し得るプラズマ加速[41]などは、大きな基幹研究所では研究しづらいもので、実際、ほとんど研究されていない。基幹研究所は常に「次期」計画に全力を注ぐのが使命である。

同じ理由から、新鋭加速器はセンターとしての研究所に建設されるのが普通である。新たにセンターとなる研究所を作るとはまず無い。センターとしての研究所には細かいノウハウが蓄積されており、利用可能な設備も豊富で、開発研究に適した管理体制もある程度確立しているからである。プロジェクトの準備段階において、現在建設中または稼働中の計画の予算、人員などを機能的、弾力的に運用できることもメリットとなる。SSCは例外的に新しい研究所を作った。もし、これまでの蓄積が豊富なフェルミ研究所に建設されていたなら、深刻な問題のかなりの部分は起きなかったであろう[42]。

新しい加速器の計画をたてるときには、現在稼働中、建設中、計画中の加速器

に関する世界情勢を見て、完成時に世界最強となるものを考える。物理学上の関心から逆規定されてプロジェクトが決まることはあまり無い。例えば、TRISTAN計画では、トップクォークが見つかるかどうか、はっきりした見通しはなかったが、KEKの敷地の制限から許される最高エネルギーをねらった、とするほうが考えやすい。SSC計画の場合も、初期の段階において、まず、当時の技術と使えるであろう予算規模からして最高エネルギー、最高ルミノシティの加速器が提案され、それを使ってヒッグス粒子の研究ができる（さらに、それが最低のエネルギーである）という論理は、あとから考えられたように見える（その「証拠」に最高エネルギーとルミノシティの値は初期の計画から最終設計まで変わっていない）。SSCの予算見積もりが膨張したとき、予算節約のためにエネルギーを下げることもできたはずだが、今度は逆にその論理が足枷となった。加速器プロジェクトの計画書を見ると、まず物理学上の目標が説明されるのが普通である。これは、道具（加速器）には目的（発見すべき対象）がある、という常識的な考えに沿ったもので、必ずしも予算を獲得しやすくするための詭弁ではない。

新しい加速器の規模が大きくなるに従い、いくつかの研究所における研究が少数のセンターに統合されていく過程があった。この統合が起きた1960年代以後、高エネルギー物理学における競争が国家間の競争の感を呈するようになっている。大きな構造としてかつてはソ連、アメリカ、ヨーロッパが競争していた。日本の次期計画、リニアコライダー[43]が実現すれば、将来はアメリカ、ヨーロッパ、日本の3極構造となるだろう。巨大科学は予算規模から言って国家による強力な支持がなければ実行不可能である。加速器研究者を含む高エネルギー物理学の研究者集団を持っているのは、いわゆる大国に限られる。大国の予算規模を以てしても高エネルギー物理学への支出は、無視できない額になっている。高エネルギー物理学の場合、他の研究分野から自分のところの予算を圧迫する、という批判、不満が常に存在する。これはどこの国でも同じことで、SSCの場合には反SSCの大合唱が起こった（アメリカ[3]はもちろん、日本[44]でも）。高エネルギー物理学集団が国際的な科学主義競争に勝つためには、まず、国家内での分野間競争に勝たなければならない。そこでは、高エネルギー物理学の国際的支援がある（たとえばICFA[45]の声明など）。国際的な科学主義競争においては、愛国主義的な精神的支援がある。SSCにおいても、アメリカの愛国心に訴える論調が数多く見られた。国家科学としての高エネルギー物理学のあり方は、国家の変質、退潮と

ともに変質するものであろう。

これまで、高エネルギー物理学におけるプロジェクトと研究機関（例えばKEK）を特に区別しなかった。しかし、この区別は重要である。一つの研究機関では複数のプロジェクトが同時に走っているのが普通である。最低でも2つはある。一つは建設段階、いま一つは準備段階である。ある大きなプロジェクトが始まった時点で、その次のプロジェクトの構想が始まっていなければならない。構想開始から、プロジェクト開始（予算がつく）までにはそうとうの時間的な開きがある。書類上では予算がついてから検討がはじまるはずだが、予算を要求する時点で、「通れば実現できる」という見通しがなければならない。実は国家センターとしての研究所レベルでもっとも重要視されるのは高エネルギー集団の国家レベルでの連続性である。研究者集団が存在し続けるためには定常的に業績をあげる必要があり、そのために新装置（加速器）が必要になる。また、新たな研究者を獲得しつづける必要もあり、このためには博士論文のテーマが常に用意されていなければならない。そのためには新装置が必要になる。若い研究者のポストもなければならない。彼等のポストを確保するには、中堅研究者の適正な昇格を保証し、ポストを開けなければならない。そのためには新装置をともなう新計画が必要になる。このため、高エネルギー物理学業界は構造的に新装置（加速器）を常に必要とする[46]。

この自己増殖的サイクルは戦後高エネルギー物理学が世界的に拡大を続けてきたことによって可能となったものである。このサイクルを止めることは簡単では無い。こういうサイクル構造は業界の拡大局面でのみうまく働くもので、経済的バブルの構造と似ていなくもない。SSCの中止が明らかに示していることは、しかし、もはや拡大局面ではない、ということである。

3.3. 大型装置科学における研究者のアカデミズム

SSCにおいては、予算規模が大きかったため、運営行政の専門家（ただし高エネルギー物理学については何の経験もない軍需企業や軍隊の出身者）が政府機関によって多数派遣され、官僚的運営を行った。研究者の役割が予定通りに計画を進行させる「単純任務遂行」に限定され、例えばデザインの見直しによって経費を節約するようなアイデアが生かされず、計画中止の一因ともなった[42]。巨大科学においては「小科学」におけるものと異なる運営が必要であることは明らか

であるが、それが研究者のアカデミズム（問題を発見し根本的に解決しようとする姿勢）を排除することによって遂行されるならば、研究の質を維持することは不可能となろう。

巨大科学において、このような矛盾が起きやすい。SSCの場合には予算規模の大きさから、計画の遂行が常に（後になるに従い特に）エネルギー省と議会によって監視され、計画が予定どおり、予算内で進行していることを明らかにしておく必要があった。このため、研究者から設計についての異論が出ることは運営面では歓迎されなかったようだ。研究者の側から考えれば、設計の問題点を常に発見しようとし、何か見つければそれを解決し、また設計段階では気が付かなかった改良案があれば、設計変更を提案するのが、むしろ研究者としての義務でもある。予算案を決定する議会から見れば、このような変更は初期の設計が完全でなかったことを意味し、計画全体にたいする不信感の原因となる。このような運営のもと、2.3.で議論した「アカデミック指向」の研究者は排除され、「プロジェクト指向」の研究者が大多数を占める事態となったようだ⁷。

SSCですべてが官僚的運営のもとに計画どおりに、研究者のアカデミズムを排除しつつ進んでいけば完成はしたかもしれないが、予期せぬトラブルが頻発する加速器になっていたと推察される。これは「放射能漏れ」のように人に危害をおよぼすことは無いにしても、結果的には計画全体にとって大きな損失となったであろう。

大型装置科学が成功するには、研究者のアカデミズムを保証し、同時に研究活動を組織化しなければならない。計画の規模が大きくなれば、これはより難しくなるだろう。これを研究者の資質の問題とせず、組織的に保証する組織論が必要である。これは今後真剣に検討されるべき重要問題であると考ええる。巨大科学における組織化を、奴隸的研究者が与えられた課題をいよいよこなすもの、というように考えてはならない。逆に、巨大科学における研究の確実性、独創性のためには、アカデミズムをいかに保証するかが、重要となろう⁸。組織科学のありかたを軍隊組織にたとえたが、それは徴兵性に基礎を置く帝国主義軍隊ではだめで、義勇兵に基礎を置く（理想化された）中国赤軍のようなものでなければならないだろう⁹。

7 この点、SSCの組織図を含め、文献[61]を見よ

8 JCO臨界事故に見られる、原子力開発体制におけるアカデミズム不在の問題は文献[63, 64]で詳しく議論した。

9 そこでは、ザイマン[68]があらゆる研究機関が充分配慮すべき点としてあげている次の項目が有益な指針となる

高エネルギー物理学は大型装置純粋科学の典型であるが、現代天文学のかなりの部分も大型装置純粋科学である。重力波検出のための大型レーザー干渉計装置、光学望遠鏡、電波望遠鏡、ニュートリノ観測装置、空気シャワー観測装置など、使われる装置は大型化している。

4. 社会の中の大型装置純粋科学

4.1. 大型装置純粋科学の反社会性

大型装置純粋科学は純粋科学が肥大化したものである。純粋科学者は、国家、国民、市民の生活原理とは異なる原理によって動かされている。純粋科学は科学のための科学であり、科学はそれ自身価値があるという考え方であるが、それが国家、国民、市民の生活原理と矛盾する場合どうするかについては回答を持っていないので、結局は科学至上主義である。科学至上主義とは「科学のためには手段を問わない」ということである。社会の中に、独自の価値観、行動原理を持つ集団があれば、反社会的になる可能性は常にある。宗教、芸術においても同様である。SSCにおいても、SSCを擁護するために、例えば「SSCの成果によってAIDS治療法開発に有益な手段が得られる」といった、無節操ともいえる発言もあった。このようになりふりかまわず予算を獲得することも、純粋科学の理念からして当然のことである。とにかく研究が進めば良いのであって、そのために何をしようと科学主義の立場から批判されることは無い。

広重徹が紹介した深刻とも冗談ともとれる逸話がある[47]。科学史家小倉金之助の論文「革命時代における科学技術学校」(1948)と「戦時下における科学技術学校」(1944)を比較して

前者の民主革命うんぬんという書きだしは、もとの形では、大東亜戦争に勝ち抜くために、科学技術の躍進を必須としているうんぬんとなっており、また各処で、はじめ「戦時下の」とあったところが、「民主革命下の」と改めてあるというふうな訂正が加えられてはいるが、それ以外の内容はまったく同

だろう：

- 個人が指導力と創造性を発揮するための社会空間
- アイデアが成熟にまで達するのを待つことができる時間的余裕
- 議論と批判に対して開かれていること
- 新しいものに対する暖かい包容力
- 特化された専門性への尊敬。

じである。(中略)歴史的・社会的条件を捨象した科学の進歩とか科学技術教育の革新とかの一般的基準は、どんな時代、どんな社会にも—その時代、その社会がそれぞれに科学を必要とするかぎり—通用しうる性格をもつことを、事実として認めないわけにはいかないであろう。

と論じている。純粹科学を擁護するためにさまざまな「実用的」効用が主張された。たとえば、「お国のため」、「近代化に役立つ」、「民主化に役立つ」、「将来応用される」等々。しかし、結果的にこれらの主張の多くは、科学者のやりたいようにさせておけば学問が進歩する、それはいいことだ、という自分勝手な理屈であると思われる。これも科学至上主義の現れである。今日「科学と社会」というコンテキストで、大型装置純粹科学はその予算規模の大きさと社会への実利的還元の少なさから、批判されやすい[48]。実用的効用に依拠すれば予算は獲得しやすいだろう。しかし、たとえば核融合科学も典型的装置科学であるが、実利的目標を掲げたために、費用対成果の比較を余技なくされ、今や、学会全体が苦境にたたされているようだ¹⁰。純粹科学を実用的効用で擁護することは、安易であるが、本質的な擁護になっていないことが多い。(では、何が本質的擁護か? 擁護するべきか? などは、稿を改めて論ずるべきテーマである)。

また、文学者唐木順三[49]は「科学的真理の無限追究の自由を背後に維持しながら、その真理が技術的に実現、応用、乃至悪用されることについて制限を加ふべしと言」う二元論を批判した。特に湯川秀樹に対して、『『絶対悪』を云々した以後でも、己れの中の数式、形、その変化の仕方が、実験室内で一々実証されてゆくときの『喜悦』といってよいものをいくどか、むしろたびたび書いてゐた』、「この『絶対悪』と物理学の進歩、未発見な未発明のことがらを見出す折の喜悦とは、どこで、どうつながりうるだろうか。湯川の場合、つながってゐない。」と厳しく批判している。

この批判は正当である。物理学者である限り(他の科学でもそうだろうが)、この研究の「喜悦」を知っているはずである。物理学者はすべて物理学至上主義であるとも言える。この点では宗教、芸術などと同じである。科学至上主義は、しかし、科学発展の原動力でもある。

さらに科学にとってトラブルなのは、原爆のような「悪魔の知」への挑戦で

10 最近の ITER 建設誘致の動向を見ていると、かならずしも「苦境にたたされている」とも言えないようにも見えるが、もれ伝わってくる学会内部の状況は、深刻な路線論争が起きていることを想像させる。核融合研究者の「反省」としては文献[66]が率直な意見を提供している。

あっても、科学者という人種は嬉々として熱中してそれを達成するということである。そしてまた戦後の歴史が証明しているようにこの同じ能力と情熱が科学のフロントを拡大させている[13]。

湯川がつなぎ得なかった「絶対悪」と「喜悦」の間をつなぐ道を見い出さなければならない。

4.2. 大型装置純粋科学と「社会」

今日「科学と社会」というテーマで多くの研究がなされている。人間のスケールを越えた科学の進歩に社会がどう対処するか、というのが基本的な問題意識であろう。これは科学から社会を守ることである。ここで科学者の説明責任 (accountability) が問われるのは当然なことだ。一方、ここでは「社会から科学を守る」とでも言うべき立場を主張したい。

広重徹[50]はまさに高エネルギー物理学を例にとって

しかし、この巨大化そして技術化については、科学の本来の、内在的な要請のみによるものとは必ずしもいえないことに注意しなければならない。こんにちの研究体制（資金と組織の両方を含めた）が、学問的必然性とは独立に、研究の大規模化を誘導する傾向をもっているように思われる。

と論ずる。これまで筆者の論じてきたのは、「学問の必然性による研究の大規模化」の側面であった。一方、広重の指摘はまったく正しいと言わざるを得ない。学問の必然性のみによって、研究が大規模化できるはずはなく、そこに社会的要請も無ければならない。社会的要請には国家威信、国防、産業界への波及効果などの「上からの」要請もあれば、オリンピックにあらわれるような素朴なナショナリズム、科学へのあこがれなどに依拠する「下からの」要請もあろう。ここで広重が問題にしているのは「上からの」要請であって、科学の前線配置が支配権力の意向に沿った形に誘導、決定されており、これに対して「現代科学の構造変革」が必要であると論ずる。広重は更に「科学の前線配置は、科学の内的必然性といったようなもので決まるのではなく、社会的に規定されるものである」と、より強く言い切っているが、決して「社会的規定のみ」によって発展の方向が決まる、とは言っていないと思われる。これは当然のことで、政府、産業界がいくら望もうと、学問が必然性のない発展をできるはずは無いし、できないものはできないのである。高エネルギー物理学に関しては、「学問の必然性」と「上からの要請」が

うまくかみあったことによって戦後の爆発的な拡大が可能となったものである。

この「上からの要請」をうまくとりこむために、「現在巨大科学でなく、また元来巨大科学化しなければならたない必然性もない分野までもが、みずからを巨大科学に擬する努力にかりたてられる。」「日本において、あらゆる科学分野がわれもわれもと将来計画なるものをデッチあげ、共同利用研究所の設立を要求してひしめいている」(広重同書)という状況もたしかに有るように感じられる。政府、産業界主導の科学プロジェクトが巨額の予算をつかったあげく、さしたる成果をあげたようにも見えないうちにうやむやに終了するのは一二の例にとどまらないのではないだろうか。これは「内的必然性」が無いのに「社会的要請」によって巨大(予算)化が起きるからであろう。

アメリカの科学政策において、科学が「競合する基礎科学の諸分野に、広い範囲に存在する科学的基礎資料から市場の要求に対する科学の成果の詳細な応用に至るまでのすべての決定が、ますます企業、銀行、軍部のリーダーから成る層の手に集中してきている。それは他の部門(たとえば大学)の助けによっている。」ことは明らかと思われる[51]。SSC計画発足時にも、SDI(戦略的防衛構想)を初め数々の大規模科学計画が政府、軍の主導で進められていた。SSCもかかる科学政策の一環として認識されていたものである。科学を国家政策、企業戦略の一環に位置付け、それをコントロールする傾向は徐々に強まっていると思われる。国家政策、企業戦略によるコントロールは研究費の重点的配分として、また企業研究所への取込みとして現れる[52]。アメリカにおいては、物質科学のような比較的小規模だが産業とより密接に関連する研究分野からこれが始まり、今日では物質科学のかんりの部分が軍・企業の研究所、軍・企業から研究費をもらう大学研究所などで行われている。この傾向がさらに高エネルギー物理学にまで及んだのがSSCではなかったらうか?

高エネルギー物理学は、大枠としてはアメリカの科学政策によって強く支えられていた。しかし、一方、研究所の運営、科学者の研究活動についてはむしろ古典的自由を享受していた。大枠としての予算を政府が支出する、その意図はどうあれ、予算の執行にあたっては高エネルギー物理学としての「内的必然性」によって方針が決められ、進歩、発展してきた。SSCの歴史を見ると、軍、産業界による高エネルギー物理学の取込みとも見えることが多い。SSCの研究者はアカデミズムでそれに対抗し、軍、産業界が撤退したとも言える[53]。産業界にとっては、

— SSC が当初計画どおり完成し、予期せぬ不備、故障によって次々と磁石を交換、改良、さらには全面交換、となったほうが、利益となったであろう。そのような事態となっても、SSC が世界最強の加速器であるかぎり、純粋科学の装置として、費用対効用の議論に直面することはない。軍需産業の次期計画としてはかっこうの題材であったであろう。これらはまったくの推測であり、また、事態の一面にしかすぎない。しかも、証明できるようなものではないが、仮説として述べた。

4.3. 高エネルギー物理学の将来

大型装置純粋科学は、何らかの応用を意図するものではない。高エネルギー物理学の研究で得られる知識には何の実利的有用性もない。

実は、しかし、高エネルギー物理学に限って言えば、きわめて有用な副産物を作り出してきたし、作り出しつつある。加速器技術である。高エネルギー加速器はいわば最先端の加速器であり、そこで得られた知識、経験は他のより実用的な加速器に応用されている。今日、加速器は、シンクトロン光、中性子ビームを用いた物性研究を始め、医療、産業に広く用いられていて、21 世紀は加速器の時代とも言われている。これらの実用的加速器の創出にあたって高エネルギー加速器研究が主導的な役割を果たしたことは否定しえない。高エネルギー物理学における競争に促されて、「採算」を度外視した加速器開発が行われ、それが、情報集積科学の諸分野での研究環境を作り出し、更に民生用の加速器をも作り出してきた。施設型加速器からの自発的イノベーションはほとんど現れていないと言っていいだろう。この構造は軍事研究に酷似している。軍事研究においては、国防という抽象的目的のために、採算を度外視した巨額の研究投資が行われる。目的があいまいなので、採算がとれているとも、とれていないとも言える。その結果として、軍事技術が民生技術に応用される。実用的加速器の観点からみた高エネルギー加速器の役割は、自動車工業における F1 レースとよく似ている[54]。加速器の進歩のために高エネルギー物理学がある、という見方もありえよう。高エネルギー物理学への指向性なしでは、先端的加速器開発への動機は生じにくい。

大型装置純粋科学では、科学主義、科学至上主義のもと、科学競争に勝つことのみが行動原理となる。科学至上主義に忠実であろうとすれば「敗退するまで突き進む」しかない。SSC では、ついに科学至上主義が敗退したとも言えよう。高エネルギー物理学は SSC の経験から、何を汲み取るべきであろうか？ 高エネルギー

物理学を今後も維持する、ということを目標として考えれば、かなり明確な方針がありえると思われる。

「全世界の協力で大きな加速器を一つ作ろう」という意見は説得力があり、ICFAの目的でもあったが、かって実現しなかった。まず、アメリカが国内プロジェクトとしてSSCを計画した時点でこの「理想」は崩れた。SSCは計画の途中で予算不足から日本をはじめ各国の支出を求める国際化路線に転じたが[55]、そのような形での協力は日本の高エネルギー物理学の発展にはつながらないこともあって、国内的な支持を得ることはできなかった[44]。ヨーロッパがSSCに対抗するために計画したLHC計画[56]が、SSC中止の影響からなりゆきで、かえって国際プロジェクトとなった。リニアコライダー計画も国際プロジェクトとしてLHCと相補的な役割を演じるであろう。その後のさらに高エネルギーの加速器については、現実的な見通しは立っていないと言ってよいであろう。加速器の巨大化を進めるならば、その費用だけからも、ほとんど実現不能と考えられる。この方向では国際協力による加速器を世界に一つ建設すること、つまり、ICFAの理念が唯一の可能性であろう。ほんとうに、最先端加速器が世界に一つしかないとなると、しかし、これまで競争によって発展してきた高エネルギー物理学は異なる様相を示すことになるだろう。このような加速器は施設化しやすく、学問としての魅力を保ち続けられるかどうか、疑問である。

加速器の大型化とは異なるシナリオが必要ではないだろうか。

ほぼ唯一の可能性は、高エネルギー実験集団に当面犠牲をしいるものである。高エネルギー物理学は何ら実用的価値とは結びつかないのだから、急速な発展をする必要はない。新しい（より効率の良い）加速原理の開発にもっと集中することもできる。これが現実的に難しい理由は3.2.で説明した。高エネルギー実験集団が壊滅するからである。さらに、科学主義の立場からして世界的な業績競争に負けることが問題となる。しかし、高エネルギー物理学のように、世界的にも小数の基幹研究機関が競争している分野では、一時的に世界的な競争抑制策をとること（核拡散防止条約、軍縮条約のようなとりきめ）が可能であろう。たとえばICFA（将来の加速器のための国際委員会）のガイドラインとしてそのような協定を結べないことはない。

当面の加速器建設から解放された加速器研究者集団は、さまざまな加速原理の開発に専念し、そこで世界的な科学主義競争を展開する。学問の一分野として、

基幹研究機関だけでなく大学、企業の研究者もアカデミズムの観点から、また実用主義の観点から参加できる。これによって、応用的加速器の技術革新も進むので加速器の民生的応用も進む。ここで加速器研究が自然探究の一環であるという態度が重要であって、加速器の開発研究というより粒子ビームの性質を探究するという「ビーム物理」の観点が力を持つであろう[31]。加速器開発にそれが有用なだけではなく、学問における競争原理が成立し、研究が自発的に発展する要因ともなろう¹¹。

高エネルギー物理学の実験家は一時的に「失業」するかもしれない。しかし、彼等もより高エネルギーの素粒子実験を望むならビーム物理の基礎研究に参加すべきである。科学主義の「教義」によれば、科学の進歩のためには、何でもするべきであって、当面実験ができないからといってこの戦列を離れる研究者は、純粹科学である高エネルギー物理学の「背教者」である。科学至上主義とは、つまるところ、研究対象を自己限定しない、必要なものが手に入らなければ自分で作る、科学のために研究者がいるのでその逆ではないから必要なら殉教もいとわない、というようなある種の宗教的態度であって、このような献身性のみが科学至上主義の反社会性を浄化できる可能性があるのではないだろうか。

5. おわりに：大型装置純粹科学の科学論に向けて

大型装置純粹科学では科学主義による競争原理が装置開発競争の形をとり、やはり競争原理から装置の大型化をもたらす。大型装置純粹科学の遂行においては装置研究者のアカデミズムに依拠するとともに、アカデミズムを排除するという二律背反に陥る傾向がある。現在では、大型装置純粹科学は国家科学にならざるを得ず、政治性を帯びる。

大型装置純粹科学は好むと好まざるに関わらず、そこに存在する社会現象である。そこに現われる現象を無視して現代科学論は展開できないであろう。巨大科学に関する研究は多い。純粹科学に関する研究も多い。しかし、巨大科学では、原子力、宇宙開発などが主要なモデルとなり、純粹科学では古典的な大学アカデミズムがモデルとなる。このような一次元的な発想では現代の科学情況はとらえられない。まとめとして、大型装置純粹科学が科学論の概念として重要と思われる

11 この線にそった高エネルギー物理学関係者への提言は文献[65]にある。

る理由を列記しておこう。

- 「科学のための科学」の究極の存在形態である。このため、「科学のための科学」の特徴が顕在化する。
- 伝統的な科学者の行動様式（アカデミズム）が巨大科学の中に置かれることによって、自明でない様相を呈する。
- 科学における装置の役割について、新たな視点を提供する。

科学と科学者のありかたを考える上で、高エネルギー物理学の例、およびその抽象概念である大型装置純粋科学の概念は有用であると考ええる。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、総合研究大学院大学グループ研究「新分野の開拓」小グループ「大型装置科学の科学論」研究会における議論、コメント、批判が大変参考になった。研究会メンバーに深く感謝する。本稿執筆時のメンバーは以下の通りである。綾部広則、佐々木力、佐藤文隆、澤田芳郎、高岩義信、松岡勝、横山輝雄、Jonathan Lewis、和気正芳、および筆者。

* 「年報科学・技術・社会」8巻（1999）51頁（科学・技術と社会の会発行、ISBN4-87492-145-0）の論文に脚注として説明を加えたものである。

参考文献

- [1] 本稿で用いられる高エネルギー物理学、加速器、測定器の知識については、たとえば、レーダーマン・シュラム（平田光司、清水韶光訳）『クォークから宇宙へ』（東京化学同人、1993年）で十分である。
- [2] SSCに関する一般的な解説には、森茂樹『究極の加速器 SSC と 21 世紀物理学』、講談社（1992）がある。
- [3] 平田光司、高岩義信「SSC — 巨大実験の科学」岩波講座『科学／技術と人間第2巻（1999）。
- [4] リヴィングストン（山口嘉夫、山田作衛訳）『加速器の歴史』（みすず書房）。リヴィングストン曲線とは加速器の最高エネルギー E を時間の関数として表したもので、文献[1]も参照。陽子加速器、電子加速器、衝突型加速器な

どの個々のケースで適当な標準化が行われる。SSC までは時間 (t) の指数関数 $E = E_0 \exp t/a$ で非常に良く近似できる。ここで E_0 、 a はある定数である。

- [5] D. J. Kevles, *the Physicists - the history of scientific community in modern America, with a new preface by the author*, Harvard University Press, (1995) 序文。
- [6] 高エネルギー物理学研究所『トリスタン計画報告書』(1996)。
- [7] 加速器研究者はすべて KEK の職員であるが、測定器建設には日本各地および外国の大学、研究所から研究者、学生が参加しており、実数の把握はむずかしい。KEK が毎年発行する Annual Report によると TRISTAN 計画関連の予算は次のようになっている。1982 年度から 96 年度までの総計で、加速器・測定器の建設費（設備費）466 億円、加速器・測定器の運転および実験経費 805 億円である。この他 582 億円が電気・水道に支出されているが、これは項目として KEK 全体の電気・水道代である。電気代に関しては、この内すくなくとも 3/4 は TRISTAN の電気代と思われる。この他、加速器のためのトンネル、測定器のための建物などの建設費は会計上別になっている。1980 年発行の「高エネルギー物理学研究所加速器拡充計画—トリスタン I の設計研究」では設備費 400 億円、建設費 329 億円となっているが、設備費総額は前記のものとほぼ一致するので、建設費もだいたい上記程度と推察できる。これに研究者・技術者の人件費をざっと年間一人 1000 万円、300 人 \times 15 年とすると総額推定で 2487 億円となる。
- [8] 例えば、TRISTAN 加速器は、目標であったトップクォークは発見できなかったものの、完成時から 1989 年に CERN（ヨーロッパ原子核物理学研究機構）で新加速器 LEP が運転を開始するまで、世界最強の電子・陽電子加速器として新データを生産し続けた。LEP 以後は大量のデータを蓄積する精密実験で有用な情報を集積した後、閉鎖された。
- [9] 科学論とは、科学史、科学社会学、科学政治学、科学哲学などをふくむ、科学についての考察全体を指すものとする。
- [10] 高エネルギー物理学をふくむ巨大科学を論じたものとして、文献[11]がある。高エネルギー物理学、現代天文学などを巨大科学の例としててぎわよく紹介したのち、「開放系モデルの提唱」が行われ、原子力、宇宙開発へと

論を進めている。しかし、高エネルギー物理学、現代天文学は、現代の科学分野において最も典型的な純粹装置科学で、これを例として実利的装置科学である原子力、宇宙開発などを論じることは無理であり、それぞれに固有の問題が見えなくなってしまう怖れがある。実利的研究では、「費用対成果」が議論しうるが、純粹研究では「成果」がはっきりしない¹²。

- [11] 吉岡齊『科学革命の政治学』中公新書（1987）。
- [12] 佐々木力『学問論』東京大学出版会（1997）。
- [13] 佐藤文隆『科学と幸福』岩波書店（1995）。
- [14] 高エネルギー物理学の最大の副産物は加速器の進歩であろう。これについては後述する。
- [15] 村上陽一郎『科学者とは何か』新潮選書（1994）。
- [16] 高エネルギー物理学の学問分野としての「効率」を、論文出版について考えれば、非常に効率が悪い。トリスタン計画による博士論文は94編である[6]。建設費700億円だけ考えても、1編につき7億円強である¹³。他の判定基準をもってしても高エネルギー物理学の「効率」は非常に悪いだろう。しかし効率について議論することも、科学主義の観点からは許容できないであろう。
- [17] 当然のことながら、「何か新しいこと」と言っても、新しければ良いというわけではない。何が価値のある研究であるか、について、専門家集団の間にはかなり強固な共通理解がある。少なくとも物理学の枠内では、各専門家集団における価値基準は外部からはわかりにくい、一方、適当な解説によって、理解し得るものである。
- [18] 佐々木力『科学論入門』岩波新書（1996）。
- [19] 宇宙における銀河、銀河団の分布の観測から、これらが紐状の構造を形成

12 第2次世界大戦を境に、アカデミズム科学が産業化科学になった、とする。高エネルギー物理学も筆者の定義に従えば産業化科学と言って良いと思われるが、そこでは原子力、軍事研究などがモデルとなっている。要するに、本書では、巨大科学と小型科学という2分法によって、純粹科学と実利主義科学を区別せずに議論している。

専門分野というシステムの「生存と成長」こそが科学研究の目標であり、高エネルギー物理学において、大型加速器を次々とアップ・トゥ・デイトしていくことがこの現われである、という指摘は鋭いが、なぜ、そういう活動が国家によって支持されているか、もっとも肝心なところがよく議論されていない。著者はモデル化に固執するあまり、個々の研究活動に対する「暖かい視点」を失い、科学者を研究ロボットとしてしかとらえていないのではないかと、もちろん、モデル化をするためには「暖かい視点」は不要である。しかし、何のためのモデル化であるか？モデルのためのモデルなら不要である。

13 日本のX線天文衛星「あすか」では、博士論文1編につき1億円程度だった[57]。著者の井上氏は「かけた経費に十分見合う成果」と書いている。しかし、十分か不十分か判定する基準は存在しないのではないだろうか？筆者も、物理学者の直感としては、十分な成果と思うが、例えば生命系の研究者、人文系の研究者が、さらに一般市民がどう思うか、興味あるところである。

し、何もない空間 (void) を取り囲んでいることがわかった。これは標準理論の延長としての大統一理論に基づく初期宇宙論を支持する事実として注目されている。文献[1] 参照。

- [20] CERN(欧州原子核物理学研究機構) で 1989 年に完成した電子・陽電子衝突型加速器。
- [21] 高エネルギー物理のデータは、最新鋭の加速器（世界にただ一つ）でしか得られないので、実験科学の基本である追試可能性に疑問がある、という観察もある[15]。たしかに、追試のために、一線級の加速器を用いることは考えにくいし、追試のためだけに古い加速器を温存することはまずありえない。しかし、加速器の性能が世界のどこかで向上しているかぎり、これが深刻な問題になることは無い。もし、古いデータにあやまりがあれば、いずれ発見される。高エネルギー物理学は、単に現象を発見しては記録する資料収集科学ではなく（単に資料を収集するだけの科学など無い）、すべてのデータが無矛盾的に結び付いている体系的知識である。高エネルギー実験では、おびただしい素粒子現象のなかから、新発見として意味のある現象を選び出す必要がある。この時、すでに知られている現象は雑音の評価に利用される。この雑音は以前には高エネルギー物理学の最先端のテーマであった素粒子および素粒子現象から成る。雑音の評価が、過去のデータを用いて予想していたものと異なれば当然前提となるデータの信頼性が問題となる。この時、追試するのに適当な加速器が稼働していない、ということ是在りえるが、遅かれはやかれ、何らかの装置を用いて、このデータの再検討が行われる。
- [22] 単位時間あたりの高エネルギー反応が起きる回数が多いことである。これを表すために、ルミノシティという指標がある。
- [23] 高エネルギー物理学研究所、*KEKB B-Factory Design Report*, KEK Report 95-7 (1995)。
- [24] ブライトネスは、放出された放射光におけるフォトンの（位相空間における）密度に相当する量で西播磨に建設された SPring8 などの新世代加速器はこのブライトネスが大きいことに特徴がある。またコヒーレンスは得られた光の干渉性のことで、レーザー光はコヒーレンスが高い。
- [25] 例えば、濱広幸、“Beam Dynamics Activity on the UVSOR Storage Ring”,

- ICFA Beam Dynamics Newsletter vol.15, p.27 (1997).
- [26] 松岡勝、「大型装置科学の科学論」研究会におけるコメント (1998)。
 - [27] 戦後のアメリカにおける高エネルギー物理学はマンハッタン計画に参加した核物理学者が中心となり、その研究方法を受け継いで、よりミクロの物理現象の解明に進んだものである。
 - [28] 組合ニュース (高エネルギー物理学研究所労働組合) no.1064(1995年1月20日) および、それに続く各号。
 - [29] S. ユーラム他、『フォン・ノイマン』、佐々木[18]より (ただし、引用の意図は必ずしも同じでない)。
 - [30] 科学主義的加速器研究[31]は現に存在しているが、それを看板として掲げることができるかどうかは状況による。科学主義的加速器研究は、副産物の有用性をもって存在を正当化することも多く (アカデミックな研究により加速器の性能が向上するなど)、19世紀における純粋科学発祥時と似たような状況にある。
 - [31] 安東愛之輔、井上信、片山武司、平田光司、「ビームの物理」、日本物理学会誌 52 巻 2 号 (1997)。
 - [32] M. ギボンズ編著 (小林信一監訳)『現代社会と知の創造』丸善ライブラリー (1997) および文献[33]の解説。
 - [33] 現代思想 26 巻 6 号 (1996 年 5 月号) 特集「科学者とは誰か」、青土社 (1996)。
 - [34] 加速器技術者であるファン＝デア＝メールによって、当時の技術レベルでビームの冷却が可能なが示され、これに注目した実験家 (ルビア) が、この技術を用いて CERN の SPS を改良し (SppS)、W ボソンの発見を成功させた。両名はこの業績によって 1985 年にノーベル物理学賞を受賞した。高エネルギー物理学の観点からすると、すでに、多くの証拠から W および Z ボソンの質量がほぼ確定しており、そこにあるものを行ってひろった、という印象がある。
 - [35] 簡単な解説は平田光司「加速器における古典力学」『数理科学』第 33 巻 (1995) p.54。
 - [36] そもそもどんな作業であれ、完全にマニュアル化できるものかどうか疑問だが、ここでは常識的に考えておく。
 - [37] SSC Central Design Group, "Conceptual Design of the Superconducting Super Collider", SSC-SR-2020, March 1986.

- [38] “*Site-Specific Conceptual Design*”, SSCL-SR-1056, 1990; “*Site-Specific Conceptual Design of the Superconducting Super Collider Executive Summary*”, SSCL-SR-1055, 1990.
- [39] E.S. ファーガソン『技術屋の心眼』、佐々木[18]より（ただし、引用の意図は必ずしも同じでない）。
- [40] 現在の高エネルギー加速器が、現実的なものになったのは、加速器技術・理論の進歩があったからで、単なる量的拡大とは言えない。加速器の性能が上がるにもかかわらず、小規模な巨大化で済んでいるのはこのためである。しかし、一方、シンクロトロン以後、根本的、原理的な変革はなかった。
- [41] たとえば小方厚「プラズマ航跡場による電子ビームの加速と収束」プラズマ・核融合学会誌 70 巻、1 号、6 ページ（1994）。
- [42] D. Ritson, *Demise of the Texas Supercollider*, Nature 366, 607 (1993).
- [43] JLC Group, *JLC-I*, KEK Report 92-16 (1992).
- [44] 綾部広則「国際共同研究体制下における科学者集団の構造」、年報 科学・技術・社会 第 5 巻（1996）p.21。
- [45] International Committee for Future Accelerators（将来の加速器のための国際委員会）。国際純粋応用物理学連合の下部機関。アメリカ、ヨーロッパ、ロシア、日本、中国などの高エネルギー物理学基盤研究機関の所長、高エネルギー物理学研究者集団の代表などが委員である。その小委員会のひとつである「ビーム力学小委員会」（ホームページは、<http://www-acc-theory.kek.jp/ICFA/icfa.html>）が発行している「ICFA Beam Dynamics Newsletter」は、加速器物理学の現状を知るための資料として有用であろう。
- [46] この点、文献[11]の分析が優れている。
- [47] 広重徹『科学と歴史』みすず書房（1965）。
- [48] SSC およびその推進者であるレーダーマンを激しく批判したロイの基本的立場が、この論理である。ロイに対する批判についても文献[3]を見よ。
- [49] 唐木順三『科学者の社会的責任』についての覚書、筑摩書房。
- [50] 広重徹「問い直される科学の意味」自然 1969 年 2 月号（近代科学再考、朝日新聞社、所収）。
- [51] D. デイクソン（里深文彦監訳）『戦後アメリカと科学政策-科学超大国の政治構造』同文館（1988）、日本語版への序文。
- [52] この状況では研究資金を得るための申請書が非常に重要であり、「応募せよ、さもなければ死ぬことになるぞ」というのは単なる冗談ではなくなってく

る。申請書に対して研究資金が提供されれば、それは請負研究的なものになり、成果に対する説明責任が生ずる。これは先に述べた市民、国民としての社会にたいする説明責任とは異なるものであり、説明責任についての議論では、この点を混同してはならない。

- [53] SSC の研究者は、当初計画の不備を正し、改良案を提出し続けた。SSC の予算見積りが増大した理由の一つはこの点にある。産業界が撤退するにあたって、それまでの投資（磁石の生産ラインなど）に対する補償金を国家から受け取った。そのためには SSC の中止が必要であった。
- [54] 佐藤文隆、「大型装置科学の科学論」研究会におけるコメント（1997）。
- [55] 澤田芳郎「科学技術と企業-国家関係— SSC 計画を事例として」、年報 科学・技術・社会 第1巻（1992）p.33。
- [56] CERN で建設計画が進められている SSC と同じタイプの大型加速器。エネルギーは SSC より低いがルミノシティは大きいとされている。LHC 計画は SSC 建設が決定された時点でほぼ同時に CERN の将来計画として発表された。実際に建設が決定したのは SSC 中止後である。

追加文献

- [57] 井上一、日本物理学会誌 第56巻（2001）p.903.
- [58] 中井浩二／澤田芳郎（聞き手）、文献[33]。
- [59] 平田光司、「SSC とカオス」、総合研究大学院大学グループ研究「新分野の開拓」論文集「新分野'99」（2000）
- [60] 平田光司、「ミュレーションと科学—SSC の事例から」、総合研究大学院大学共同研究「科学と社会」論文集「科学と社会 2000」（2001）p.43.
- [61] 平田光司「SSC と大型装置科学の現在」岩波「科学」Vol.69, 164（1999）.
- [62] 平田光司「ビーム物理の社会的責任」、原子核研究 46 巻、no.1, 1（2001）.
- [63] 平田光司「JCO 臨界事故とビーム物理」、総合研究大学院大学グループ研究「新分野の開拓」論文集「新分野'99」（2000）
- [64] 平田光司「JCO 事故とその対応に見る原子力開発体制の問題点」、JCO 臨界事故総合評価会議「JCO 臨界事故と日本の原子力行政」277 頁（2000）七つ森書館。
- [65] 平田光司「ビームの物理」KEK ニュース 1999 年 2 月（高エネルギー加速器研究機構）。これは以下の URL でも見ることができる。

<http://koryu.soken.ac.jp/home/staff/teacher/hirata/beamphys.html>

- [66] 井口春和「エネルギー開発における認識論的展開」総合研究大学院大学共同研究「科学と社会」論文集「科学と社会 2000」（2001）p.59.
- [67] 横山輝雄「マートンの『科学のノルム』」、化学 vol.52、No.3（1997）。
- [68] ジョン・ザイマン（村上陽一郎他訳）『縛られたプロメテウス』、シュプリンガー・フェアラーク東京（1995）。