

SSC — 大型装置科学論の話題から

総合研究大学院大学教育研究交流センター

平田 光司

アメリカにおける高エネルギー物理学の主要プロジェクトであった SSC (Superconducting Super Collider—超伝導超大型衝突型加速器) 計画は、建設が始まり、すでに20億ドルが支出されていたにもかかわらず、1993年11月、議会の決定によって中止された。SSCの歴史をもとに、現代における大型基礎科学についての論点を探る。

はじめに

高エネルギー物理学とは、物質の根源的な存在形態(素粒子)を実験的に研究する分野である。加速器で電子、陽子などを高エネルギーに加速し、衝突させて高エネルギー素粒子反応を起こさせ、それを特別に設計された測定器で観測する。加速器も測定器も巨大なハイテク設備とでも呼ぶべきもので、その建設には多くの研究者による長年の研究、作業が必要とされる。費用も莫大なものであり、例えばトックォークの発見を主な目的とし、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)で1981年から1996年まで行われたTRISTAN計画の総費用は約2500億円と見積もられる(建設費は700億円)。SSCは周長約87キロメートルの地下トンネル内に強力な超伝導磁石を並べ、20TeV(テラ電子ボルト)の2つの陽子ビームを作り、それらを衝突させる計画であった。

高エネルギー物理学は原子力、宇宙開発などと並ぶ巨大科学であるが、その目的が知的好奇心の探究(のみ)である点が異なる。このような「役に立たない」科学が、かつて、国家によって(国威発揚などのために)強力に支持、推進されて来たが、もはや時代が変わった、という見方は非常に多く、SSCもこういう文脈で象徴的な実例として語られることが多い。しかし、SSCの歴史には、科学と社会、科学と国家の関係の変化というような外在的な問題点と並んで、巨大科学に特徴的な内在的問題とも言える側面もある。本稿では、計画の中止という劇的事件のかげに隠されて、ふつうあまり議論されていないこの「内在的」問題を論じたい。

SSCの歴史

SSCの最初の具体的アイデアは1982年に提案された。これはアメリカで研究の進んでいた超伝導磁石を用いて、世界的に最も性能の高い加速器を建設するというもので、素粒子の統一理論の要であるヒッグス粒子が発見できるという期待がもたれた。たちまちアメリカ高エネルギー学界に支持され、1984年にはCentral Design Group(CDG)の発足がエネルギー省によって認可された。CDGは加速器の概念設計を行い、1986年に概念設計報告書(CDR)が提出された。建設費の見積もりは、53億ドルとされた。1987年にレーガン大統領によって計画が認可され、1989年にはテキサスにSSC研究所が設立された。建設予定地が決定してから、SSC研究所では加速器計画の再検討を行い、結論は1990年に膨大な報告書として発表された(Site-Specific Conceptual Design, SSCD)。CDRにおけるデザインとの大きな相違点は

- 入射エネルギーを1TeVから2TeVにあげ、
- 加速器の内径(口径)を4cmから5cmにあげた

ことである。このため、SSCの総予算は当初の53億ドルから83億ドルへと大きく上昇した。

連邦議会では、この予算膨張分は国際協力などによってまかなうことを要求し、日本へも協力要請が行われた。しかし国際協力が思うように進まず、また研究所の運営にも問題が指摘されるなど、計画中止を求める声が高まり1993年の中止決定にいたる。

表1 SSCの歴史

| | |
|------|--|
| 1982 | 6月アメリカ物理学会夏期研修会でSSC構想発表 |
| 1983 | 7月エネルギー省(DOE)高エネルギー物理諮問委員会でSSCの検討開始が承認される |
| 1984 | 夏Central Design Group(CDG)がBerkeleyに設立 |
| 1985 | 10月下院公聴会でSSCについて議論。SSCに対する反対強まる。 |
| 1986 | 3月Conceptual Design Report(CDR)発表。総費用53億ドルの見積もり |
| 1987 | 1月レーガン大統領によってSSCが承認される。候補地を募る |
| 1989 | 1月SSC研究所が発足。テキサスに建設することが決定 |
| 1990 | 7月SSC Site-Specific Conceptual Design発表。総費用83億ドルに。 |
| 1991 | 1月SSC建設開始 |
| 1992 | 6月下院でSSCの中止が決議されるが上院では継続となり、上下両院協議会で継続が決定 |
| 1993 | 1月クリントン大統領就任。SSC支持を表明 6月下院でSSCの中止が決議される。SSCの運営方針が問題とされる 9月上院は継続を決定 10月上下両院協議会で継続が決定するが、下院は拒否。SSC中止が事実上決定される |

予算増大のメカニズム

1986年のCDRから1990年のSSCDの間に何が起ったのか？

加速器では各種磁石による磁場によって荷電粒子を制御する。速度を持つ荷電粒子が磁力線の中を通過するとローレンツ力と呼ばれる力が働くことは良く知られている。加速器では安定軌道のまわりに(バネの力のような)線形の修復力を作り出してビームを制御する。この修復力によって、ビーム粒子は安定軌道のまわりで微小振動しながら、リングをまわるわけである。さて、ビーム粒子は少しずつエネルギーが異なる。これらの粒子を同じように収束させるために、非線形な力も必要である。一方、非線形の力があると、安定軌道のまわりでの粒子の振動が、ある振幅を越えると急激に増大することになる。この振幅を「力学口径」と呼ぶ。力学口径を越える粒子は、予測不能な運動をして、ビームを囲っている真空パイプにあたって失われてしまう。「力学口径」はビーム力学のキーワードの一つで、「その内側の点は常に内側にとどまる」という領域の外縁のことだが、そういう領域が有限の大きさで存在するという証明、また存在するための必要条件は知られていない。このため、力学口径を予測するには、シミュレーションによって、長時間粒子を追跡する以外方法がない。

粒子の運動が予測不能になるのは、カオスと呼ばれる現象による。粒子の運動は古典力学によって完全に記述される。古典力学は完全に決定的な系であって、ある時刻における粒子の位置と運動量が与えられれば、その後の運動は一意的に決まっている。しかし、そこにランダムで予測不能な運動が生じる。決定的な系であることと、粒子の運動が予測不能であることは矛盾しない。例えば、コンピューターでは決定論的なアルゴリズムによって乱数を発生させる。カオスが起きるのは、加速器が物理的な乱数発生器になっているようなものである。

磁石が完璧なものであっても、力学口径は有限な値をとる。製作誤差を計算に入れると、一般に力学口径は小さくなる。十分な力学口径が無いとリングへの入射が不可能になる(入射してもすぐにロスする)。入射できたとしても、ビームの寿命が短くなって、ビームとしては役に立たない。有限の手続きで、力学口径を求めるアルゴリズムはありそうも無い。しかし、粒子の長時間安定性は

例えば磁石の製作精度に対する要求に直接関係しており、「加速器物理の根本問題」の一つである。

SSCでは大量の超伝導磁石を製作しなければならず、個々の磁石の製作誤差を個別に測定するのは費用がかかりすぎるので、全体としての統計的誤差だけを押さえる方針であった。このため、想定できる誤差のパターンをいくつも計算器上で作り（乱数を発生させ、それによって擬似的な誤差のパターンを作る）、長時間シミュレーションによって、最悪の場合の力学口径を決めることがCDGにおける最も重要な作業であった。力学口径にある程度の大きさがないと、加速器にビームを入射することができない。大規模なシミュレーションが行われた結果、入射エネルギー1TeV、磁石の内径4cmというデザインが決定され1986年の報告書、CDRが書かれたのである。

しかし、その233ページには「入射エネルギーは主として磁石の精度に対する要求から決まる。磁石の非線形成分の補正システムが簡単化できるには、入射エネルギーを2~3TeVにしなければならないが、この場合、入射システムの費用が禁止的に高くなり、まじめに考えるまでもない」という「苦渋に満ちた」表現が記されている。入射エネルギーを高くすれば、粒子は磁石の製作誤差に鈍感になるので、製作誤差の許容度が上がり、磁石の設計を容易にする。しかし、CDRでは、入射エネルギーを下げ、その分、磁石システムの誤差にたいする許容度を酷しいものにする（いいかえれば磁石製作に楽天的な）決定をしたものである。これはつまり、磁石とその補正システムにデザイン上の問題を「しわよせ」し、総費用の見積もりを低く抑えたということである。SSCの建設を国家に認めてもらうために、ぎりぎりの設計をしたものと推測される。当時から磁石の専門家の間には、磁石の内径4cmで、制作誤差の許容値におさまるものを、一つだけ丁寧に作るならともかく大量生産をするのは技術的に難しいのではないか、という思いがあったようだ。専門家のそのような思いはCDRに反映されなかった。

SSCの建設が決定してから、様々な研究所の協力によって、磁石の試作が行われたが、デザインどおりの磁石を作成するのは難しいことがいよいよはっきりしてきた。これを実現する方向で更に努力するか、デザインを変えるかの判断には難しいものがあった。そのころ、磁石の開発と平行してCDGとは別のグループによってシミュレーションが行われ、1TeV-4cmでは十分な力学開口が得られないとする結果が発表された。しかし、このシミュレーションの論文を読んでも、方法などに関する記述、CDGの結論への批判などが書かれていず、結果だけが述べられているにすぎない。専門的に説得力のある論文とはいえない。2つのシミュレーションの結果が異なれば、その理由や、どちらが正しいかについて、物理学的な検討が行われるべきだが、そういうことも無かった。1TeV-4cmでは何となく危ない、という気分が研究所の大勢を占めるなか、新たなシミュレーションが「理論的支柱」となってSSC計画諮問委員会では2TeV-5cmを推奨することとなったと思われる。誰かが言い出すのを待って雪崩的にデザインを変更する方向に動いた、というのが真相ではないだろうか。費用はかかるがより確実な方向へと修正が行われたわけだ。

CDRでは、(1) 力学口径を推定するシミュレーションはどの程度信頼できるか、(2) 磁石システムの製作誤差に対する推定はどの程度信頼できるか、という二つの点に対する判断のバランスから、1TeV-4cmを採用した。両方とも学問的な証明は不可能で、ある程度の経験と直感によって、「独断的」に決めるしか無いものであろう。これを学問的に判断しようと思えば、実際に作ってみるしか無いのである。大型装置のデザインでは、第1原理からすべてを計算するシミュレーションコードというのは、無いといってよいだろう。複雑な系では、系のパラメータが大きく変わると新しい物理が重要になることがあり、従来は十分に現象を記述したコードでも、新しいパラメータにも適用できるかどうかは自明ではない。また、部品の製作誤差、実際の装置における相互の位置関係の誤差なども、実際に作って見なければよくわからない。ためしに何台も作るわけにはいかない。一発勝負である。これらの不確定要素をいかに十分取り入れるか、さまざまな付加要素をいかに評価するかは、リスク管理の問題とも言えるが、最終的にはデザインをする物理学者の判断による。これは結局は研究者の確信、または「思い込み」であろう。つまり、研究者の学問的には証明され得ない判断に依存しているのである。

ここに先端的大型装置建設において物理学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、装置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。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。加速器の建設は長らく工学的な問題とされ、「物理学者の仕事では無い」と見るような風潮があった。最近の新鋭加速器の建設は、物理学上の問題を物理学的に解決していくことによってしかできないものであることは近年認識されつつあり、ビーム物理研究会が結成され、ビームの性質を物理学の問題として研究する風潮が生まれている。日本物理学会にも新領域として「ビームの物理」が創設されたのは、よろこばしいことである。

物理学的にはわずかで定量的な差といえども、予算や計画の進め方という点では大きな違いになる場合、ある種の政治的判断が入り込む余地ができるのであろう。先鋭的装置のデザインにはそのような不定性がある。あるデザインが正しいかどうかは、結局は作ってみなければ解らないものであり、装置の建設自体も開発実験の一環であることを研究者も社会も認識すべきであろう。シミュレーションを含め先鋭的装置のデザインにはそのような不定性がある。

巨大科学における研究体制

2TeV-5cmが確定したあと、SSCのための基礎研究では超伝導磁石製作がキーポイントであり、そのためには、他の研究所にいた経験豊富な人材を活用することが成功の鍵であったが、それは実現しなかった。所長には高名な高エネルギー物理学者を据えたものの、加速器計画の総括運営、計画運営、磁石部門の責任者などの重要な管理職ポストは軍、軍需産業の経営陣出身の「官僚」によって占められた。彼らは修士号、博士号も持ち、技術的なことに携わってきたとは言え、加速器の経験は無く、例えばミサイルの製造を担当し軍需産業との交渉によって仕事をしてきたような人達であった。

普通、加速器の研究所では建設も含め開発研究の重要なポストは研究者が担当している。加速器の重要な構成要素は（SSCの場合は特に超伝導磁石）、まず研究者が研究所の技術者と協力しつつ設計、試作し、量産モデルにまで仕上げた後、企業に発注するのがあたりまえの方法である。発注してからも、研究者が企業と連絡をとりつつ細かい点を調整しなければならない。仕様書を書いて入札すれば、あとは企業の責任、というわけにはいかない。しかし、SSC研究所の場合は、磁石の開発、設計を含め、製作全般を巨大軍事産業であった General Dynamics (GD) 社に発注した。実は量産モデルの作成がフェルミ研究所（アメリカ最大の高エネルギー物理学研究所で超伝導技術を開発し成功させてきたパイオニアである）で行われていたが、GD社の責任を明確にするという理由により、フェルミ研究所での設計は参考とするに止め、GD社が独自に開発することが求められた。磁石システム研究部では各社の実績をもとにして発注する会社を検討したが、その検討の頭ごしに、GD社が決定されたと言われている。

このような開発方式は高エネルギー物理学の世界では考えられないことであったが、軍事産業、エネルギー産業などではむしろ普通の方法であったようだ。軍・産業界出身の官僚にしてみれば、信頼できる企業が全責任を負ってまると請け負うほうが、安心できたのであろう。自分達の責任を回避しようという心理も働いたかもしれない。

自らもSSCに参加した物理学者である D. Ritson はSSCの中止後、次のようなことを書いている。「SSCのような大計画は軍か産業界の経営の経験をもった者を中心に推進しなければならないだろうと政府は考え、物理学者の役割はデザインだけに限定された。指導体制は複雑になり、官僚的運営によってSSCの科学者と対立した。物理学者の軽視は明らかとなり多くの経験者がSSCを離れた。経験ある物理学者を採用する必要はあったが、うまくいかなかった。(中略) ふうの研究所の標準

からするとSSCの研究スタッフは経験が浅く、指導部が多すぎた。この雰囲気では、プロジェクトが予算内で計画通りに進んでいることを示すことがSSC指導部にとって重要視され、デザインの改良によってコストを削減することは難しくなった。」

研究者の学問的態度、アカデミズムなしに最新鋭装置の開発はありえない。アカデミズムには、興味のかま、好きなことを研究するという「好奇心主導」という面のほかに、すでに確定したデザインを批判し、改良を提案するような批判的精神も含まれている。更に言えば、与えられた任務そのものを見直し、別の方法を提案する、という面もあろう。任務遂行型の研究はアカデミズムと矛盾するのではなく、任務の中に問題点を見だし、解決するところにアカデミズムの本領があると言えるのではないだろうか。逆にいえば、それこそが研究者の任務であろう。そのような研究者をいかに育成し活用するかが、大型プロジェクト成功の鍵となる。これには時間も費用もかかる。先端装置の開発には、目的に応じて専門家を集め、予算をつけなければよい、というのは大きな誤りで、このような発想には、たとえば初期の原子力研究所についての原子核物理学者の中井浩二氏（東京理科大学教授）による次のような批判があてはまるだろう：

「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。」

この理事の先生の誤りは、装置開発研究の自律的性格、また、装置開発研究の体系性を知らなかったことにある。新鋭装置の開発とは、また、ひいては学問の進歩とは、人と資金がアカデミズムと調和し、ゆっくりうまく醸成すれば達成できるかも知れないものではないだろうか。人を集め、資金を投入すれば何でも開発できるわけではない。SSCにおける加速器研究は、経験豊富な加速器研究者を十分集められず、少数の専門家も官僚的運営のため思うように仕事ができなかったので、事実上、加速器のしろうとである指導部が、分野横断的に各種の専門家を集め、短時間で計画を遂行しようとした、というようなものとなった。

計画の規模が大きくなると、官僚的管理も必要とされるだろう。しかし、SSCではこのような運営体制が研究者のアカデミズムと矛盾し、最悪の結果となった。SSCにおいては、現行のデザインの批判はCDRの不備を示すものと受け取られ、また、改良の提案は計画遂行の足を引っ張るものと見られ、管理者側からは研究者不信の種となるものだったろう。研究者のアカデミズムを抑制するこのような運営は（膨大で立派な報告書は作れるだろうが）、無駄の多い、非生産的な研究所をつくるだろう。高エネルギー物理学に限らずすべての大型プロジェクトにおいて、アカデミズムと矛盾せず、アカデミズムを生かすような計画の運営方法を見出すことは、今後、真剣な検討がなされるべき課題である。高エネルギー物理学の中心的な研究機関では、アカデミズムと運営体制とが全く問題が無いというわけではないにしろ、ある程度折り合いをつけることに成功していると言える。

アカデミズムと矛盾せず、アカデミズムを生かすようなプロジェクトの運営方法は、今後、真剣な検討がなされるべき課題であろう。同時に、アカデミズムを生かしつつ、大型科学プロジェクトを指導できるような人材の育成も、大きな課題である。そのような指導者は、プロジェクトの目的、技術的問題点に加えて、その社会的位置づけをも理解し、適切な指導ができる科学者であるだろう。社会についての知識、「社会リテラシー」は将来の研究者にとって欠くことのできない教養となるだろう。

基礎科学をめぐる論争

88年にアメリカで行われた3000人以上の科学者を対象とする世論調査ではSSCを支持したのはわずか2%であったという。科学者による支持が弱いことは中止決定と直接の関係はないかも知れないが、中止決定をもたらしたものを反映しているだろう。ここで、アメリカ物理学学会誌（Physics Today）の記事と投書（レター欄）によって物理学界内部のSSCをめぐる議論の中で目に付いたものを取り

あげて見たい。

CDG が設立され、将来計画として SSC の確実性がかなり高まった 85 年ころから論争が始まる。Physics Today の 85 年 3 月号にグラシヨウ（素粒子理論）とレーダーマン（高エネルギー実験、当時フェルミ研究所所長）連名による SSC の解説記事が載った。SSC 建設の目的、計画の妥当性を物理学学会の会員に示し、理解をおおぐためのものであったと思われる。とくに、「ヒッグス粒子の発見は基礎科学の重要なステップであり、自然の法則への理解を増進させる。高エネルギー物理学と宇宙論においては基礎法則が部分的にしかわかっていない」と延べ、予想される波及効果、コストなどについても論じている。

この記事に対して「巨大科学への投資」と題する論争が Physics Today 誌上で繰り広げられた。論争の皮切りは、ロイ（ペンシルベニア州立大学物質科学研究所初代所長、米国科学アカデミー会員）によるほぼ全面的な否定である。論争は数回くり返されたが、結局ロイの論点は次のようにまとめられる：

『SSCは純粋知識のための巨大計画で、その成果は高エネルギー物理学の専門家にしか興味のないものである。隣接諸分野への科学的インパクトはない。また計画の副産物が産業に役立つような波及効果も期待できない。SSCの予算を例えば物質科学などに投資すれば、産業の育成に寄与し、アメリカの経済的競争力を高め、ひいては国民の福祉を増進する効果があるだろう。SSCのように社会的価値の認められない計画に公的資金を使うべきではない。SSCの唯一の価値は音楽、文学などと同様の文化的価値にあり、むしろ（個人、会社、愛好者団体などの）私的資金に依拠するようすべきだ。』

この批判に対してレーダーマンは正面から答えなかった。まともに反論することによって、相手の土俵にのぼることを避けたのだろうか？ロイは何度もレーダーマンを攻撃しているが、レーダーマンは最初の冷笑的反論を最後にロイを無視しつづけた。様々な物理学学会会員からもロイへの反論が出されたが、例えば「純粋科学は人間の本性からくるもので、政府がコントロールするべきものではない」、「真理探究の波及効果は予測不能であり、SSCからすばらしい技術的進歩も生まれ得る」、などのナイーブで感情的な意見が多く、ロイにあっさり反論されるだけで論争が深まることはなかった。

確かにSSCで検証しようとしたヒッグス粒子の存在が直接にインパクトを与えるのは初期宇宙論のような限られた分野だけで、高エネルギー物理学に最も近いと思われる原子核物理学にさえ直接的な影響はほとんどないであろう。そこで必要な弱い相互作用については、すでに確立している現象論的標準理論で十分であるとも言える。しかし、現象論的標準理論は、しかし、理論としての首尾一貫性は無い。原子核における弱い相互作用の計算にヒッグス粒子を使う必要は無いかもしれないが、これは原子核物理に理論としての首尾一貫性が無くてもかまわない、ということでは無い。ふだんは現象論的標準理論を使っても、いざという時にはヒッグス粒子が必要になる、ということを知らないと、変な近似にもとづく精密な計算をして、うまく行っても、ヒッグス粒子の必要性を再発見することになる。これは物理学が個々のデータの集積では無く、大系的知識である、ということのあらわれである。原子核物理学にとって、ヒッグス粒子があっても無くてもかまわない、ということはある得ない。更に、ロイの立場は、ロイの専門である物質科学をも批判しうるものであろう。ロイの主張を発展させれば、社会への還元がより期待できる分野にだけ（または、より多くの）公的投資を配分するべきである、となる。物質科学にも基礎科学としての分野があり、産業に直接役立つようなものが多い。物質科学から、直接産業に役立つところだけを残して、あとは潰してしまえばよさそうなものだが、そうすると物質科学が単なるデータの集積になってしまい、かえって、役に立たない科学の典型となるだろう。

SSCに対するロイの批判は、結局、「この分野よりはあの分野のほうが役に立つ」という、学問分野に対する適切な予算配分についての問題といえるだろう。ハイリスク・ハイリターン of 学術行政の中で、いかにリスクを最小にして研究資源を分配するか、逆に許容できるリスクの枠内でいかに

リターンを最大にするか。このような判断のできる人材、つまり信頼できる科学政策立案者、オピニオンリーダーの集団は、日本では皆無に近いといわざるを得ない。そのような人材の育成も緊急に必要とされているだろう。

さらに、「社会の役に立つ」ことをどうとらえるかは、基礎科学だけでは無く、学問全体にとって向けられた大きな問である。これを短絡的に「産業にすぐ役立つ」とするのが、日本での最近の傾向である。それに対して有効で説得力のある対案を出すことができるかどうか、問われているといえるだろう。解なし、という事態も覚悟しつつ、この問題を根底的に考えていかなければならぬだろう。

おわりに 共同研究「科学と社会」

本稿は総研大グループ研究「新分野の開拓」の一部として行われた「大型装置科学論」における研究をベースに、共同研究「科学と社会」での議論を加えて発展させたものである。また稲盛財団による支援も受けたので、ここに感謝の意をあらわしたい。

文献（本稿は以下の文献で発表したもののまとめである）

- (1) 平田光司「加速器とビームの物理」岩波講座「物理の世界」2002
- (2) 平田光司「「大型科学」論とSTSの課題」科学技術社会論研究、第1号、68(2002)
- (3) 平田光司、「ビーム物理の社会的責任」、原子核研究、46巻、No.1, p.1-4, (2001)
- (4) 平田光司「JCO臨界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」七つ森書館、277-281 (2000)
- (5) 平田光司「大型装置純粋科学試論」年報科学技術社会、第7巻 (1999)
- (6) 平田光司「SSCと大型装置科学の現在」岩波「科学」1999年3月号 (1999)
- (7) 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巻所収 (1999)