

第9章

高エネルギー物理学の社会史

平田 光司 葉山高等研究センター

1. はじめに

今回のレクチャー¹は高エネルギー加速器科学研究機構（KEK）で開催されていることもあり、高エネルギー物理学について講義する。KEKではさまざまな研究が行われているが、中心は高エネルギー物理学であり、日本におけるその中核的研究機関である。講義では高エネルギー物理学の中身を含む歴史をみる。

これによって、現代科学のおかれている状況の一端を理解してもらい、自分の専門分野と比較してもらいたい。

素粒子物理学の目的は物質の極限の存在形態を探ることであるが、高エネルギー物理学はその一部であり、加速器を利用して高速の粒子を作り、それが起こす高エネルギー反応を観測するものである。（これに対して宇宙線を利用する分野は「超高エネルギー」と呼ばれることがある。）KEKには様々な加速器があるが、今回見学するKEKB加速器は世界最強の加速器（高エネルギー反応を起こさせる能力が最大）であり、周長は約3Kmである [1]。小林、益川のノーベル賞受賞にも貢献した世界的にも超一流のものだ。エネルギー的に最高の加速器はヨーロッパのセルン（CERN）に建設され運転の始まったLHC（Large Hadron Collider）で、その周長は約30Kmである。高エネルギー物理学には大きな予算が必要となり、しかし産業に利用できる知識をもた

1 2009年7月に高エネルギー加速器研究機構で開催された総研大レクチャー「科学における社会リテラシー」における講義録である。実際の講義ではカバーできなかった部分、講義のあと付け加えた説明もふくめてある。

らすものでもなく、そのような科学活動がなぜ存在し得るのか疑問を持つかもしれない。そのような問いに答えるには、その学問の歴史を知ること、それを通じて社会との関係を知ることが重要である。

講義のタイトルにも使われている社会史という言葉は、文献 [2] の前書きによると、科学史で使われる場合には科学の歴史を世界史的な背景に留意しつつ、その社会的なありようの面から記述するものである。同書は20世紀以降の日本の科学技術を、その社会的背景から描いたものだ。世界的な科学の社会史については文献 [3] などがある。また、原子力については文献[4]がある。科学は社会の中にありつつも、社会からは一定の自立性を持ち、社会と相互に規定しあっている。これは例えば芸術も同様である。科学を社会との相互作用において記述するのが科学の社会史である。

高エネルギー物理学の社会史にとって重要なトピックスはたくさんあるが、この講義では、その主なものを、しかもかいつまんで紹介する。さらに興味ある人は参考文献を参照してほしい。

2. 巨大科学の起源—サイクロトロンから原爆へ

KEKの見学で明らかと思うが、加速器や実験のための測定器は物として巨大であるだけでなく、ハイテク装置の固まりであり、複雑な構造をしている。これらの装置を用いて実験を行い、科学知識を生産するわけだが、関わる研究者も多い。Bファクトリーの場合、測定器 (Belle) は200人 (フルタイム換算)、加速器 (KEKB) は100人ほどの研究者が関わっている。論文の著者も通常200人程度である。巨大科学には以下の特徴がある [5]。

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。

このような体制の始まりはアメリカにおけるサイクロトロンの開発と発展にみることができる[6, 7]。アメリカの科学が世界の一流となったのは1930年代と言われている[3]。サイクロトロンの発明と発展はその代表的な例である。サイクロトロンは核物理研究のために1930年代に開発されたが、1940年代には原爆開発で重要な役割を演じることとなり、巨大「科学」としてのマンハッタン計画および戦後の高エネルギー物理学の原型モデルともなった。

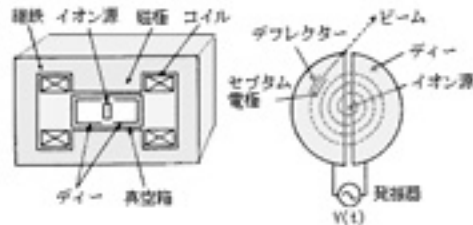
2.1 サイクロトロン

カリフォルニア大学Radiation Laboratoryのローレンスは1931年、サイクロトロンを発明、核物理の発展に大きな貢献をした。

最初のサイクロトロン（直径11インチ）は80KeVの陽子を加速することができた。翌年には500KeVの陽子を用いた人工核変換に成功する。初期のサイクロトロンはエネルギー的にはそれ以前の静電加速器や、ウラン塩などから放出される自然放射能にも及ばなかったが、加速できる粒子の量が多い、エネルギーなどが調節できる、という利点から核物理の画期的な装置となった。

おおきな磁石によって磁場を作り、荷電粒子がその中で円軌道を描くことを利用し、粒子を何回も加速できるようにしたところがよかった。高電圧発生にこだわらず、むしろ電圧は低くても交流の電場で何度も加速し、最終的には大きなエネルギーに達するものである。

【図1】サイクロトロン。KEK「キッズサイエンティスト」より。



サイクロトロンの開発には大きな資金が必要であったが、それを可能にしたのは核物理学における必然性だけでなく、当時のアメリカにおける社会状況もあった。また、建設のためには資金だけではなく、アメリカの産業技術の発展も不可欠であった。

1. 学術的基盤

サイクロトロンの発明には、核物理を進める上での必然性があった。

1920年代には量子力学の「完成」と並行して原子物理の理解も基本的には終了し、多くの科学者の興味は原子核に向けられていた。原子核の研究にはウラン塩から自然に放出されるアルファ粒子が用いられていたが、使用できるアルファ粒子の量には限りがあり、定量的な研究のためには安定して多くの粒子(アルファ粒子や水素イオン=陽子)を、いろいろなエネルギーで供給できる装置が必要であった。サイクロトロンの発明は、このような核物理の必要性に応えるものであった。

サイクロトロンの発明とほぼ同時期に起きた中性子の発見(1932)は、サイクロトロンの価値を大きく高めた。中性子の発見によって原子核の基本構造が明らかになるとともに原子核の力学的性質を表現する現象論的理論(液的模型)がうまれた。ウラン塩から自然に放出されるアルファ粒子は正の電荷を持っているため、やはり正電荷を持つ原子核に近づくことが難しかった。中性子は電氣的に中性なので、原子核に容易にとびこむことが可能であり、フェルミなどが中性子を用いて核物理の研究をするようになった。フェルミは放射性物質の自然崩壊で得られるアルファ粒子をベリリウムBeにあて、そこから発生する中性子を用いたが、より安定に大量の中性子を得られる実験装置が望まれた。サイクロトロンはまさにこれであった。

サイクロトロンで重水素(通常の水素に中性子がくっついたもの)を加速しBeにあてると中性子ビームが得られる。中性子製造マシンとしてのサイクロトロンは核物理に必須な装置となり、アメリカの各大学に急速に広まり、日本、ヨーロッパでも作られた[6]。

2. 産業技術基盤

ある意味でサイクロトロンは、当時大きく発展中であった各種の産業技術を組み合わせたものであった [7]。

ローレンスが利用できた技術的インフラとしては

- 高電圧技術：20世紀初頭の高電圧輸送の必要から高電圧の技術が開発されていた
- マイクロ波工学：ラジオ放送のために開発が進んでいた高出力の、巨大なラジオ波（RF）発生器を利用できた。
- 磁石：水力発電のために巨大な磁石が開発されていた。

などがある。

アメリカでは20世紀初頭に、おおくの巨大企業が誕生し、企業内研究所のいくつかは基礎研究を行うようになった（産業の科学化）。顕著な例としては次の様な企業があった [3]。

●General Electric

1900年に研究所設立。アカデミックな研究者を招聘。タングステン電球、ガス封入電球、などの成果をもらたした。

●Du Pont

1927年に基礎研究部門を設立（多くの反対があった）。高分子の基礎研究にとりくみ、それを実際に構成してみせるという構成的研究からナイロンの発明に至った。1935年に工業化に着手し230人の科学者、技術者を動員し、1938年に発売、日本の生糸産業に壊滅的な打撃を与えた。基礎研究指向で成功し、巨大科学のひな形となったとも言われる [9]。

●Bell Telephone研究所

AT&Tを母体として1925年に設立され、純粋科学の面で多くの成果をあげた。（シェーンによる論文捏造事件のあと閉鎖された。）

巨大装置の実現には、それを支える産業技術が存在することが不可欠の条件である。

3. 人的基盤

巨大科学は多くの研究者を必要とするが、人材の確保が必須の条件となる。これには人材の供給源としての研究者集団（核物理のグループ）および教育システム（大学院）が存在する必要がある。

1880-1890年ころのアメリカでは、大学院教育はもっぱらドイツ留学によって行われていた。国内では大学、大学院の拡充が進み、ドイツから帰国した博士が就職した。彼らは大学院を整備し、1900年代になって大企業が科学研究を行うようになると、その人材を供給できた。アメリカの大学はこのような企業との連携によって発展し、大学院教育も自前で行うようになった [3]。サイクロトロンの開発はアメリカ人によるものであり、アメリカの科学の自立を象徴するものともなった。

4. 財政基盤＋イデオロギー基盤

巨大科学の遂行には予算が必要であり、多くの場合、公的資金の支出を必要とする。このためには、税金を投入するための理由づけが必要であり、それが説得力のあるものでなければならない。

興味深いことに、サイクロトロンの建設と発展は（1929年10月24日にニューヨーク証券取引所で株価が大暴落したことをきっかけに起きた）世界大恐慌の中で起きた。

サイクロトロンは建設と運営のために巨額の資金を必要としたが、予算の22%は連邦予算、40%は州、38%はフィランソロピーによる（Rockefeller財団など）。サイクロトロンがガン治療に有効である可能性から国家が予算をつけ [7]、ローレンス自身も0.5MeV以上のX線医療、中性子医療を宣伝、ガン治療に寄付を集めた。Rockefeller財団は 1913年に設立され、人件費を含む研究資金を提供することで、アメリカの（後にはヨーロッパも含む）科学研究体制の確立を促した。この活動が後にNSFの制度の下敷きとなった [11]。

経済恐慌の対策として、ルーズベルト大統領によってニューディール政策と呼ばれる公共投資を中心とする経済政策がとられた。それま

での市場主義的な政策から転換し、国家が大規模な経済政策を行い、労働者の雇用を生み出すものである。有名なTVA(テネシー川流域開発)などの大規模な土木工事が行われた。サイクロトロンへの支出も、このような大規模事業の一環でもあった。

また、大恐慌をきっかけに世界経済のブロック化が進み、自国で資源、産業、技術をまかなえることが重要であり、技術力を高めて国際経済で有利な位置を占める必要性が明らかとなってきた。このために科学技術への投資が国家的な必要性から推進された。日本でも同様に、大不況の中で大きな科学投資が行われ、理研のサイクロトロンが建設され、理学部中心の帝国大学が創設される（阪大など）[2]。経済不況が巨大科学の追い風となることは、いろいろな実例がある。

5. サイクロトロン研究の影響

ローレンスの研究室はサイクロトロンを利用した各種の研究をすすめる、さらに大きなサイクロトロンの建設計画にもとりかかり、多くの研究者を供給、アメリカ全土にサイクロトロンがひろまった。サイクロトロンが巨大になるに従い、研究所の運営も「組織された研究」を行うようになった。その原型は巨大企業が提供したものと言える。サイクロトロンは巨大企業の組織を科学研究に持ち込むことになった。

11インチという最初のサイクロトロンでさえ、そのための磁石は重さ85tであり、マイクロ派発生装置やビームの取り出し、ビームと物質の相互作用の設定、その観測など、様々な要素からなる。このような装置を作り、運転する必要性から専門的な加速器研究者が生まれた(cyclotroners [7])。このような装置に関わる研究者の組織は前にあげた巨大科学の特徴を示している。ここで育成された専門家がアメリカ各地の大学、研究所にちらばって、そこでサイクロトロンを作った。

サイクロトロンは1939年からは核分裂反応に関わる各種のデータ、核物質の製造などに活躍し、マンハッタン計画の中核を担うことになった。また、このことによって核物理は巨大な資源を利用できるよ

うになり、戦後の大発展につながる。

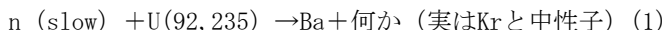
2.2 Manhattan 計画

原爆開発のマンハッタン計画は、総額20億ドル²の大プロジェクトであり、サイクロトロンによって巨大化しつつあった核物理と、これも巨大化しつつあった大企業が軍隊のもとで結合し、科学技術複合体となったものである。

1. 核分裂連鎖反応の発見

1938年、中性子をウランに照射する実験で、オットー・ハーン (O. Hahn) とシュトラスマン (F. Strassmann) が生成物中にBaを発見、リーゼ・マイトナーと彼女の甥オットー＝ロベルト・フリッシュにより核分裂の可能性が示された。ボーアの液滴模型と相対論で理解したものである。マイトナーはオーストリア国籍のユダヤ人女性科学者で、スウェーデンに亡命していた。

この反応は以下のようなことであった。



Baの陽子数は56である³。原子核が分裂することはすでに知られていたが、このようにほぼまっ二つに分裂することはまったく予想外のことであった。1939年、このニュースは一举にアメリカ中に伝わり、ほぼ即座に新型爆弾の可能性が理解された。反応(1)で、新たに生成された中性子の数が2個以上であれば、それが新たな反応を引き起こし連鎖反応(chain reaction)となる。全米のサイクロトロンを持つ大学で追実験がおこなわれ、これは確信にいたる。(1940年には全米で

2 通貨の換算は難しいが、オーダーをあたってみる。

http://www.mofa.go.jp/mofaj/area/usa/keizai/eco_tusho/us_2007.htmlによると、1941年のアメリカの財政支出は13,618million = 136.18億ドル。この15%である。2007年の財政支出は277000millionドルだから、1941年の20億ドルは2007年換算で4068億ドル、ほぼ40兆6800億円となる。

3 なお「U(92, 235)」などの表記は「元素記号(陽子数、質量数=陽子数+中性子数)」を意味する。簡略してU(235)などとも表記する。

23のサイクロトロンがあった [7])。4月までには論文も出版され、世界的に知識が伝わった。9月にはドイツがポーランドに侵入し第2次世界大戦が始まった。

アメリカは参戦しないことを国民に宣言していたが、密かに核分裂を利用する爆弾の計画を進めていった。1940年にバークレーのマクミラン、アーベルソン、シーボーグ等は超ウラン元素Pu(94, 239)の生成に成功した⁴。この元素がU(92, 235)と同様に連鎖分裂反応することは液滴模型からほぼ明らかであった。

2. 原爆製造のシナリオ

1941年にはV. ブッシュが科学研究開発局長となり、大統領が原爆の本格的開発を決定。12月には日米英開戦となる。この時期には核兵器の可能性としてはU(235)を用いる方法、Pu(239)を用いる方法の2つがあった。

天然ウランではU(235)は0.7%しかなく、ほとんどはU(238)である。原爆を作るにはU(235)の濃度を90%まで高める必要があった（ウラン濃縮）。しかし、U(235)とU(238)は化学的性質は全く同じであり、大量にウランを濃縮するのは非常に難しい。わずかな質量の違いによって、多孔質膜を通過する速度が異なることを利用して分離が行われた（ガス拡散法）が、大規模施設を必要とした。最終的に濃度を高めるためには一様な磁場中でU(235)とU(238)の軌道がわずかに異なることを利用した（電磁分離法）。後者の方法は質量分析器に用いられているもので、ローレンスの提案による。磁石にはサイクロトロンのために開発されていた巨大磁石が利用された。磁石の巨大さだけでなく、技術的にもサイクロトロンに近いものである（空間電荷効果の存在など）。

一方、Puを生産するためにはフェルミやシラードによって考案され

4 サイクロトロンからの重水素を天然ウランにあててNp(93, 239)を生成。これがベータ崩壊してPu(94, 239)に。1941年にはシーボーグ、マクミランによりPu分離。

た原子炉が有力と考えられた。減速材に黒鉛を用いた原子炉(黒鉛炉)では天然ウランを「燃焼」させることが可能である⁵。天然ウランの中のU(235)が核分裂し、そこから生じる中性子がU(238)に衝突することで、U(238)をPu(239)に変えることが可能である。原子炉を燃やしたあと、その灰から化学的にPuを集める(再処理)ことはそう難しくはない。すなわち、原子炉はU(235)を分裂させることでそれとほぼ同量のPu(239)を得る装置である。シカゴ大学で最初の原子炉CP-1(シカゴパイル)が作られ、1941年12月には初めて連鎖反応を実現した。これによってPu生産の方法が確立した。

ウラン濃縮法も原子炉も、未経験の技術であり(先端技術)、ほんとうに思うように働くかどうかはやってみなければわからないことであつた。マンハッタン計画はこの両者を並行して進めた。原爆製造の大きな流れは以下になる。

ウラン鉱山→精錬→ $\left\{ \begin{array}{l} \text{濃縮} \rightarrow \text{濃縮ウラン} \rightarrow \text{Los Alamos} \rightarrow \text{広島型} \\ \text{原子炉} \rightarrow \text{再処理} \rightarrow \text{Pu} \rightarrow \text{Los Alamos} \rightarrow \text{長崎型} \end{array} \right.$

Los Alamos研究所は濃縮ウランとプルトニウムを爆弾に加工することが任務だった。

原爆製造のシナリオは、未知の要素をたくさんかかえていた。予算がどれだけ必要かの見積もりもできなかったと思われる。

■ウランの確保

コンゴ(ベルギー領)には世界最大のウラン鉱山があつた。ベルギーはドイツに降伏したが、イギリスに亡命した自由ベルギー政府がコンゴを支配しており、そこからウランを輸入できた。また、1941年、インディアン局によってナバホ族居留地のモニュメント・バレー(ユタ州南部、アリゾナ州北部)にウラン鉱山が発見され、その翌年から1945年の間に、1万1000トンものウラン鉱石が採掘された。ナバ

5 念のため。原子炉でウランを「燃焼」させるという言い方がよく用いられるが、酸素と結合するという通常の燃焼とは異なる

ホ族の鉱夫やその家族は、これ以降、深刻な健康被害に苦しめられるようになる [12]。

■ウラン濃縮

オークリッジに総床面積20万平方メートルの工場を建設。

■原子炉

プルトニウムの大量生産はDuPontが請け負った。CP-1ではPuの必要量を供給できないとして、大型の原子炉を作った。プルトニウム生産炉とプルトニウム抽出工場が、ワシントン州北部のハンフォードに建設された。3つの原子炉（パイル）、4基の化学プラントがあった。ハンフォードが選ばれたのは安全性の考慮からであった（人口密集地から遠い）。

■爆弾の開発

台形の段丘（メサ）の頂上、プエブロ居留地のすぐ外側にあり、聖地であった [12] ロスアラモスに研究所が作られ、理論物理学者のオッペンハイマーを所長とし、多くの科学者、技術者を集めた。ふもとの町からは道路が一本しかなく、秘密研究所には絶好の場所であった。

■Puの人体実験

マンハッタン計画には初期の段階から保健部門が設立され放射性物質の人体への影響を研究した。1945年からは人体実験 [13, 15] が行われた。

3. Los Alamosと爆縮法

1943年にはニューメキシコにロスアラモス研究所が設立され、原爆の開発研究を開始した。

ウラン爆弾もプルトニウム爆弾も、臨界量をほぼ2つに分離しておいて火薬の爆発によって両者を結合させ、一挙に臨界量を超えることによって爆発させることができると思われていた（砲撃法）。しかし、砲撃法の開発と並んで、爆縮（Implosion）法も検討された。

爆縮法は、球の中心付近に核物質をおき、表面の火薬を一斉に爆発

させ、それによって生じる内向き球面衝撃波によって核物質を急速に圧縮し臨界密度を超えさせるものである。この方法は技術的には難しいが、砲弾のスピードと比較しても急激かつ強力な圧縮を実現できる(かもしれない)ことで、独自の魅力を持つものであった。ロスアラモスでは当初からネッダーマイヤーが中心となって爆縮法の検討も行われていた。

砲撃法による原爆製造の技術的問題がほぼ解決した 1943年夏には、数学者として名高いノイマンがロスアラモスを訪れ、爆縮法について研究した。これを契機に、あくまで第2の方法としてではあったが、より多くの研究者が爆縮法の検討にあてられることとなった。この時期に第2の方法でしかなかった爆縮法に対して、大きな投資がなされた理由を科学史家のホジソンは次のように推測している [16]。(1) 砲撃法と比べて、必要な核物質が少なくてよく、また純度も低くてもよいことがノイマンによって示された(これはPuの生産が予定通りに進まない状況では大きなメリットだった)、(2) 砲撃法に予想されなかった困難が生じるかもしれないので、バックアップも用意されていた方がよい、(3) 球面衝撃波の生成は流体力学における最先端の研究課題に関わることで、方法としてエレガントであり、理論物理学者の興味を引くものであった。とくに、ベーテやテラーなどの指導的理論家が強く興味を示した⁶。

さらに、以下の理由もつけ加えられるだろう。(4) 1942年末には、Pu (239) が α 粒子を自然放出し、これが不純物として含まれる軽元素にあたって大量の中性子バックグラウンドを作ることをシーボーグが確かめており、オッペンハイマーはそれを知っていたため、砲撃法

6 ファインマンの経験談 [17] は、成功する任務遂行型研究に必要な要素を考える上で重要な示唆を与えている。研究にたずさわるすべての人がその目標を認識し、自分の担当部分の位置づけを知り、必要とあらば上からの指示に対案をだせる環境であったことが伺える。ロスアラモスでは自由な発想と探究心にもとづく研究をある程度許容していた。ホジソンも主張するように、これは任務遂行型の研究が成功する必要条件であろう。その任務が「やってみなければわからない」先端的なものであるほど、研究者に自発性を発揮させ、さまざまな可能性を広く追求し、多様なアプローチを可能にしておかなければならない。任務に直結する研究のみを許容し、自由な探究心による研究を排除するならば、結局、当の任務の達成にも成功しないのではないだろうか。

の利用には一抹の不安をもっていた [18]。これらの中性子は砲撃法によるPuのスピードよりも速く、2つのPuの固まりが合体するまでに、早期に部分的な核反応を起こしてしまう。この早期爆発がおこれば、反応はゆっくりしたものになって爆発にはならない。不純物である軽元素を除去すればよいのだが、困難も予想されていた。また(5)テラーが熱心に追求していた核融合爆弾（水爆）では、爆縮法による高密度の達成が必要となることが予想されていた。つまり、将来への投資として意味があったことも理由として大きいのではないかと思われる。（当面の目標には不要であっても、その先に必要となるかもしれない問題を早くから検討しておくことも、成功する研究所の秘訣である。）

さて、1944年の夏になって、原子炉の生成物中にはPu(239)の他にPu(240)も不純物として大量に含まれていることが判明した。Pu(240)は寿命が短く、大量に中性子を発生する。これも早期爆発を起こす。軽元素で心配していたことがPu(240)によって起きることになった。U(235)とU(238)の分離が難しかったのと同じ理由で、Pu(239)とPu(240)の分離はさらに難しい。砲撃法によるPu爆弾という方式はここに完全に潰れ、そこでマンハッタン計画を救ったのが爆縮法であった。研究所の大改組が行われ、ほとんどすべての研究者が爆縮法の研究に動員された。

爆縮法にはまだ解決すべき諸問題があった。とくに、1944年に訪問したテイラーが指摘した乱流の発生による球対称性の破れは、それまでの検討をすべて見直す必要性を示していた。爆縮法に必要な複雑な計算のために、若いファインマンがリーダーとなってIBMのカード式計算機を巧妙に使い、膨大な計算をおどろくほど短期間に遂行した。またノイマンは爆縮法に必要な計算のため、ハーバードで開発されIBMが作成した「マークI」を利用しつつ、さらにプログラム内蔵計算機の開発にとりくみ、戦後になってからは水爆の開発を目的にコンピュータの性能の向上を目指した [19]。（以上の記述は文献 [14] を再利用している。）

2.3 Manhattan 計画の「成果」

砲撃法によるウラン爆弾は、確実に爆発することが予想されたが、爆縮法によるプルトニウム爆弾はあまりにも先端技術であったので、本当に爆発するかどうかは実験してみないとわからなかった。このため 1945年7月16日にロスアラモス南方のアラモゴードで実験が行われ (TRINITY実験)、成功した。

アメリカ軍はウラン爆弾を8月6日に広島へ、プルトニウム爆弾を8月9日に長崎に投下した。

原子爆弾の成功は戦後のアメリカに大きな影響をもたらした。

戦争終結以前に、すでに大統領は V. Bushに戦後の科学政策について諮問しており、これに答えた Bushの「科学、終わりなきフロンティア」が戦後のアメリカ科学政策の基本となった。これは基礎科学が進歩すれば応用科学の進歩を促し、それが国民に利益をもたらすので、国家は基礎科学に投資する必要がある、というもので、図式的には

基礎科学→応用化学→社会

と書ける。関係が直線的なので、リニアモデルと呼ばれる。これは同様に

科学→工学→産業

とも書けるだろう。この発想の原型は原爆開発にあった。つまり

核物理→原爆開発→戦争勝利

というわけである。リニアモデルに依拠して、戦後のアメリカでは基礎科学 (核物理、素粒子物理、天文、宇宙、核融合、原子力など) に大きな投資がなされた。物理学の重視から、大学の工学部でも基礎工学として物理学を中心とする教育が行われるようになった。(そのため、工学部が応用物理のようになって、「もの作り」の基本がおろそかになったことが指摘されている [20].)

原子爆弾の成功で、戦後のアメリカはソ連 (ソビエト連邦) に対して圧倒的に優位な立場にたった。その後ソ連も原爆を完成、アメリカは水爆の開発に取り組み、ソ連もそれに続く、という核武装のエスカ

レーションが起こる。そこでも「基礎科学」が重要であった。リニアモデルで「基礎科学」と呼ばれたものの多くは国防と密接に関係があるものである。単純に考えても核物理、原子力は原爆に、天文、宇宙はスパイ衛星やミサイル技術に、核融合は水爆と関係している。一見、地上の現実とは無縁の一般相対性理論の研究においても、超新星爆発とブラックホールの形成などの計算は原爆・水爆で使われる爆縮法の基礎計算と非常に似ており、実際に天体核物理の研究者が水爆の開発、改良に協力している。これらを吉岡は「冷戦型科学」と呼んでいる[22]。

特に核物理は核兵器の基礎を与えるものであるもので、戦後のアメリカでは重視された。そのなかから高エネルギー物理学が生まれていく。

3. 高エネルギー物理学

戦後、原子力エネルギーの管理は軍隊ではなく、文民の委員会である原子力委員会（AEC）が行うこととなった。これにはオッペンハイマーの努力が大きかったようだ[18]。（彼は水爆の開発にも反対した。）AECは原子力（核）兵器の開発、特に水爆の開発、動力源としての原子力の開発（原子力潜水艦ノーチラス号の開発から軽水炉の完成）、核物理の推進を行った。1973年のオイルショック後再編され、1977年10月1日にDOE（エネルギー省）が発足した。核エネルギーの安全を管轄する委員会が独立して別にできた他はほとんど AECを引き継いでいる。

AEC、DOEの管轄は核兵器、原子力、核物理である。その原型はマンハッタン計画にあった。

AECの管轄のもとにあることで、核物理は特権的な地位を得た。さっそく核物理の研究所、ブルックヘブン国立研究所（BNL）が設立され、バークレイとともに核物理研究の中心となった。そこで新たな素粒子が続々と発見され、高エネルギー物理学が成立した。その後もフェルミ研究所の巨大加速器などで、世界の高エネルギー物理学をリードするようになった。

戦時研究から多くの物理学者が復帰し、多くは兵器の研究からは遠ざかったものの、ローレンス、テラー、ベーテなどその後も核兵器の開発に熱心にとりくんだ物理学者も多い。また、直接は核兵器の開発にたずさわらなかった物理学者もJASON委員会〔23〕などで、アメリカの国防に助言するなど高エネルギー物理学とアメリカの国防とは密接なつながりを持っていた。

当初は予算の心配はせずに、思うように研究が進められたが、これはアメリカがソ連に対抗するために核物理を重視したせいである。(基礎科学への投資が本格的、全面的になったのは1957年のスプートニクショックの後であった〔39〕というが、高エネルギー物理学への投資はそれ以前からであった。)しかし、その後(1)高エネルギー物理はあまりにも進歩したため、もはや現実的な力からはかけ離れた、(2)アメリカがソ連を圧倒したことが明らかになった、(3)基礎科学に投資しなかった日本で産業技術が進歩し、アメリカのテレビや自動車の市場を制覇するなど、リニアモデルが疑問視されりようになった、などの理由から、高エネルギー物理に対する国家支援も減り、新興勢力である CERNや日本に主導権をゆずるようになる。

20世紀後半における高エネルギー物理学の発展の要因は以下のよう
にまとめられるだろう。

●政治的基盤

リニアモデルのもとに、高エネルギー物理学を推進する政策的基盤があった。このことは財政的安定をもたらした。また東西冷戦の中で、国防と直接的では無いが、しかし密接に結びついていた。

●人的基盤

マンハッタン計画に参加し、巨大科学の運営に習熟した物理学者が多数いた。また一流となったアメリカの物理学は、外国からの留学生を含む多くの研究者を育成することができた。

●技術的基盤

シンクロトロンが発明されギガ電子ボルトの加速が可能となっ

た。これには戦時中、レーダーの開発によって進歩したマイクロ波技術も貢献した。

●学術的基盤

新粒子が続々と発見され、素粒子物理学が発足した。

3.1 シンクロトロンと高エネルギー物理学の成立（～1970）

高エネルギー物理学の急激な発展はシンクロトロンによる。

磁場の強さをエネルギーに比例して増大することによって巨大磁石を不要とした近代的なシンクロトロンのアイデアが1945年に発表されるや、急速に実用化が進み、1949年にはカリフォルニア大学で電子シンクロトロンが完成した。急速な発展の背景には、マイクロ波などの戦時中に発達した技術が利用できたことも大きい、「最も重要なのは、国民の間で科学者に対する信望が増大し、そのおかげで科学者たちは政府から急速に、しかも十分な財政上の支援を受けられるようになったことである」と当事者の一人が書いている。また、同様の新型加速器が続々と作られたが、そのほとんどが米国海軍の研究資金の援助を受けていたことも報告されている [24]。

1950年代には、強収束原理に基づくギガ電子ボルト級の加速器（高エネルギー加速器）が完成されるようになり、新しい素粒子が続々と発見されることになった。物理学の最前線は、原子核の構造を研究する原子核物理学から、原子核を構成する粒子の性質を研究する素粒子物理学へと移り、巨大な加速器がおもな実験装置となっていく。素粒子の実験的研究には宇宙線も重要なデータを与え続けるが、それと区別するために加速器を用いる素粒子研究には「高エネルギー物理学」という呼び方が生まれた。（宇宙線は超高エネルギー、原子核は低エネルギーという呼び方もされる。）

1952年にはBNLで初の陽子シンクロトロン、コスモトロン（3GeV）が完成。陽子をターゲットにぶつけて反応生成物を観測するなかから次のような大発見がもたらされた。

● π 粒子と陽子の散乱の観測から陽子と中性子の間、各種パイ粒

子 π^+ , π^0 , π^- の間には対称性があることが判り、荷電対称性 (Iso-Spin対称性) が発見された。陽子pと中性子nは、実は同じ粒子の異なった状態とみなされる。つまり、

$$p = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad n = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

と表され、これらを入れ替える変換⁷のもとで、物理系は不変である。これが遠因となって、素粒子の内部対称性の理論が進展する。

- 新粒子 Λ 、K など「奇妙な」粒子が発見された。これらは沢山つくられる (物質との相互作用が強いことを意味する) 反面、寿命が長い (相互作用が弱い) という点で奇妙であった。これを解釈するため、「奇妙さ (Strangeness)」、S という量子数が導入された。

S は強い相互作用では保存するが、弱い相互作用では保存しない。

1954年にはバークレイにBevatron (6GeV) が完成し、反陽子の生成に成功した。アメリカの各大学がシンクロトロン⁸の建設をすすめるなか、1964年にはR. Walkerのパネルによって、「将来の高エネルギー加速器は地域的な研究施設ではなくむしろ国全体のものとして考えるべきだ」という決定がなされ、その後高エネルギー加速器は国家プロジェクトとして建設されることになる。その第1号として中西部、シカゴ郊外に国立加速器研究所 (NAL、後にフェルミ国立加速器研究所 FNAL) が建設される。その初代所長となるR. Wilsonは、その建設をめぐる連邦議会の証言で、「その研究所はどのように国防に貢献するか?」と問われ「アメリカを防衛するに値する国家とするのに貢献する」と語った。その時点の高エネルギー物理学は、もはや兵器の生産に寄与するようなレベルではなく、物質の根源形態をさぐるものになっていた。「文化としての」高エネルギー物理学を宣言したものであろう。NALは周長 6 kmの巨大加速器 (陽子、500GeV) を建設し (1971

7 SU (2)

年)、圧倒的な能力を発揮することになる。

一方、1966年にはマイクロ波研究のセンターであったスタンフォードに研究所 (Stanford Linear Accelerator Center、SLAC) が作られ2マイル加速器 (電子、20GeV) が作られる。これは陽子の深部非弾性散乱の実験 (電子を陽子に衝突させ、その内部構造をさぐる) によって、陽子に内部構造があることを示した。

1960年代の素粒子物理は多くの新粒子を発見し、その解釈をめぐる活発な研究が展開された。主要な潮流としては次のものがあげられる。

■クォークモデル

1954年、坂田昌一は坂田モデルを提唱した。すべてのハドロン (強い相互作用をする粒子) は (p, n, Λ) からできているというものである。1959年には大貫、小川、池田、山口によって、 (p, n, Λ) の相互の入れ替えによってハドロンの世界は不変であるという説が提唱され、当時すでにおびただしい数になっていた新粒子がこの対称性に依拠して分類されるようになる。1962年には、その発展型としてゲルマンによるクォークモデルが提唱される。これは坂田モデルの (p, n, Λ) が実際の素粒子だったのに対して、仮想的な粒子 (u, d, s) を導入したもので、それらは電荷が陽子の $1/3$ 、 $2/3$ などというものである。SLACでの精密実験によって、陽子は点状のもの (parton) からできていることが明らかになり、クォークを実体と思う研究者も出てきた。

■S行列の理論

坂田モデルやクォークモデルは仮想的な実体を考えるのに対し、物理学は実際に観測される量同士の関係を記述するべきである、という立場からS行列の理論が発達した。S行列とは実験前の状態 ϕ^- と実験後の状態 ϕ^+ を結びつける行列であり、 $\phi^+ = S\phi^-$ と書かれる。S行列の立場からは坂田やゲルマンは観測されないものを実体と想定する観念論である。S行列理論の一派として興味深いのは靴ひも理論である。これは、「すべての素粒子は、他の素粒子から成る」

とするもので (p, n, Λ) を特別視する坂田モデルに対して素粒子民主主義などと言われた。

■ゲージモデル

Iso-Spin対称性を思想的起源とする。陽子と中性子が同じ粒子の異なる状態であるとすれば、その中間的な状態も連続的に存在するはずだ、つまり陽子と中性子が混じり合った

$$\cos \theta \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \sin \theta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

という状態もゆるされるはずだ、という発想にもとづく。混じり具合は実体とは関係なく、それを観測する人間の解釈によるので、空間の各点で任意にとれるはずである ($\theta = \theta(x)$)。この任意性が実体化したのが光子などのベクトル粒子である、とするものでゲージ原理とも呼ばれる。戦前から研究され大発展していた量子電気力学(ファインマン、シュウィンガー、朝永、など)もゲージ原理に基づく解釈される。南部先生による自発的対称性の破れをゲージ原理に持ち込むと質量のあるベクトル粒子が得られることが判り(ヒッグスメカニズム)、ゲージ原理とクォークモデルにもとづく素粒子の一般理論(ワインバーグ=サラムモデル)が提唱された(1967)。これは電磁相互作用と弱い相互作用を統一的に理解するものであり、しかも1971年には「繰り込み可能」であることが証明された。しかし、そこで必要とされる中性カレントが実験では見つからなかった。

3.2 コライダーと高エネルギー物理学の発展(～1990)

60年代には緒潮流がたがいに混じり合ってカオス状態になっていた。小林(誠)先生は、このころを「なんでもありの時代」と言っている[1]。しかし70年代にはゲージモデルによる標準理論が確立した。その後は標準理論の確立のための粒子発見に高エネルギー実験が集中する。このための主要な手段がコライダーであった。最後に残った未

知のHiggs粒子を求めてSSC計画が始まったが中止にいたる。

1973年にはヨーロッパのCERNで中性カレントが⁷ 発見される。この時期、小林、益川先生はクォークの世代数が3以上、すなわち

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}, \dots$$

であれば、ワインバーグ＝サラムモデルの枠内で CP対称性（粒子－反粒子の間の対称性）の破れが可能であることを示した。しかし、当時に出版された教科書〔25〕でも「クォークはハドロンの分類に便利な仮想的な粒子という傾向が強い」と書かれているように、クォークは便利ではあるが実体のない概念と思われていた。ワトソン・クリックよりはるか以前の「遺伝子」の概念と似ていたと言える。

1974年にはSLACとBNLで同時に新粒子、 J/ψ 、が発見され、これが新クォーク c とその反粒子 \bar{c} の束縛状態であるとししか解釈できないことが明らかになってクォークの存在が確立した（ほとんどの研究者がその存在を認めた）。この発見は11月革命と呼ばれる。1976年にはFNALで b -クォークが発見された。

1973年にはクォーク間に働く力の場合（グルオン）の理論も登場し、これもゲージ原理に基づくものであるが、クォークには r 、 g 、 b の3色があり、これらがミックスしてできる白色（色の無い状態）のみが物理的に観測できるとする。グルオンの力はクォーク間の距離が短いときは弱く、遠くなると無限に強くなるので、クォークが単体で見つからない理由も理解された。

電弱相互作用のワインバーグ＝サラムモデルと強い相互作用のグルオン理論によって、素粒子の性質はすべてほとんどが理解された。これが素粒子の標準理論である。標準理論の「登場人物」は以下のよう

にまとめられる

	世代	1	2	3	電荷	色
粒子：	Quark	u	c	t	2/3	r, g, b
	Quark	d	s	b	-1/3	r, g, b
	Lepton	e	μ	τ	-1	0
	Neutrino	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	
ゲージ粒子：	電・弱相互作用	W^+, W^-, Z^0, γ				
	強い相互作用	g_i (i=1, ⋯, 8) (グルオン)				
Higgs粒子：	h					

J/ψ 粒子を発見したSLACの加速器は電子陽電子衝突型加速器（コライダー）であった。それまでの加速器では加速した粒子を標的に衝突させていたが、この方式では粒子のエネルギーの多くが反応生成物の運動エネルギーに費やされてしまい、新粒子生成のために使われるエネルギーは少ない。コライダーは粒子と反粒子（電子・陽電子または陽子・反陽子）を同じエネルギーで正面衝突させるもので、粒子のエネルギーのすべてが新現象の生成に使われる。コライダーの成功によって、その後の高エネルギー加速器は、ほとんどすべてがコライダー型となる。

1979年には超伝導磁石の利用によってNALの加速器を1TeVにまであげるTEVATRONが完成し、アメリカの高エネルギー物理学はさらなる発展を目指すことになる。まずTEVATRONを陽子・反陽子コライダーに転換(1983)した。しかし、その直接のターゲットであった W^\pm, Z^0 粒子は、後進であったCERNで発見された。それ以前から、徐々にアメリカ政府による高エネルギー物理学の支持は弱まりはじめており、アメリカは遅れをとりはじめた。

3.3 CERN

CERNは Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire、つまり1952年に結成されたヨーロッパ核物理委員会の仏文名の略称がもとの意味である。研究所が発足してからはEuropean Organization for Nuclear Researchが正式名称となったが、CERNが相変わらず用いられ

ている。Centre Européen pour la Recherche Nucléaireという気持ちである。

CERNの創設は1954年。戦争で荒廃したヨーロッパで科学を通じて平和に貢献できる（かもしれない）という理想のもとに、戦勝国、敗戦国が集まって作った。この動きは軍隊と無関係であった [26]。本部は永世中立国のスイス、多くの国際機関があるジュネーブにおかれた。CERN自体も国際機関であり、上級の職員、研究者は国際公務員の資格、外交官特権を持つ（税金を払わなくて良い、駐車違反しても罰金をはらわなくて良い、など）。その予算はヨーロッパ各国がそのGNPに比例して拠出するしくみになっている。つまり、予算的にも非常に安定している。このような結構な仕組みができたのは、戦後の平和回復期、復興期に創設されたことが大きな理由となっている。

高エネルギー物理学の面では、当初は先行していたアメリカの後塵を拝していたが、1973年には中性カレントの発見で功績をあげ、1979年にSPS加速器を陽子反陽子コライダー SP \bar{P} Sに転換し、標準理論のかなめであったW, Z₀中間子を発見（1981）したころから主導的な地位を得た。アメリカがエネルギーを増やすことを先行させたのに対し、CERNはコライダーの開発を先行させたことが、勝負の分かれ目となった。

1991年には世界最高エネルギーのLEP（Large Electron Positron Collidesr）を完成させ、アメリカのSSC中止後にはそれに代わる加速器 LHC計画を推進、アメリカ、日本などからの資金も獲得して、真に国際的な研究機関となった。2009年にはLHCが稼働した。

3.4 ICFA

1960年代の終わりには、アメリカ、ヨーロッパ、ソ連は、よりエネルギーの高い加速器の建設で競争していたが、いずれ、単独で建設できる規模を超えるであろうという予測のもとに、国際協力によって加速器を建設しようという動きが強力になってきた。そこで1975年に結成されたのがICFA（International Committee for Future

Accelerators、将来の加速器のための国際委員会）である。そこでは高エネルギー物理学による協力を通じて国際平和に貢献できる、という理想主義も働いていた。

様々なアイデアが検討されたが、その一つであった超伝導磁石を用いる大型加速器を、アメリカが単独で、国内プロジェクトSSC (Superconducting Super Collider, 超伝導超大型衝突型加速器) として進めることになった。

4. SSC

SSC計画の始まりから終わりまでの状況はアメリカにおける高エネルギー物理学の盛衰を象徴的に示している [27]。

4.1 SSC 計画

1980年代の初頭、アメリカの高エネルギー物理学にはCERNに立ち後れたという思いがあり、FNALで実用化に成功しつつある超伝導磁石を用いて巨大な加速器を作り、標準理論に必要な素粒子でありながらまだ発見されていないヒッグス粒子を発見しようという構想がたてられた。この構想が1982年にアメリカ物理学会夏期研修会で発表されるや、圧倒的な支持を得る。

ビームのエネルギーは20TeVとされた。このエネルギーが必要かどうか、はっきりした理論的うらづけは無かったが、アメリカが作れる最大の加速器として、予算的な面からの上限が20TeVと思われたと考えられる。後になってCERNが発表した同様の加速器LHCは最大エネルギーを7TeVとしており、これへの対抗から20TeVが必要であるという理屈が固まっていた。

この時代は共和党から当選したレーガン大統領（在職は1981-1989）の時代であり、1983年に発表された戦略防衛構想 (Strategic Defense Initiative, SDI) 通称スターウォーズ計画 (光線/粒子線兵器) などで、カーター大統領の時代に沈静化していた東西冷戦が再び緊張

していた。高エネルギー物理学界もSDIに協力しつつ、自分たちの計画も進められると判断していたと思われる。

1984年にはパークレイにCentral Design Group (CDR) が設置され、SSCの概念設計が始まった。この作業は2年間続き、1986年にConceptual Design Report (CDR) が出版される。磁石の内径（開口部）4 cm、入射エネルギーは1TeVとされた。「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」とあるように [28]、アメリカが支出できそうな予算を考慮したことが明らかである。総予算は53億ドルとされた。

1987年にはブッシュ大統領がSSCを認可し、議会でも予算を承認した。1988年から建設候補地さがしが始まる。この時点でCERNはLHC計画を発表した。LHCはビームエネルギーを7TeVとし、それでもHiggs粒子を発見できる能力はSSCより大きいと主張した。SSC側としては20TeVにこだわることになり、退路をたたれた形となった。1989年には多くの立候補地のなかからテキサスに決定、SSC研究所（SSCL）が設立された。テキサスはレーガン大統領、続くブッシュ大統領の地盤であり、彼らの意向に沿ったのではないかという疑いもあったようだ。アメリカの陽子加速器に関する基盤的研究所はBNLとFNALであり、そこから遠く離れた南部に加速器を建設することは不利であったが、一方で、北部に偏重している高エネルギー物理学の基盤を南部に建設するのは意味のあることとも言えた。

SSCLでは研究者を大量に雇用しつつより具体的な設計をすすめ、1990年にはSite-Specific Conceptual Design (SSCD) を完成した [29]。ここでは磁石の内径を5 cmとし、また、入射エネルギーを1TeVから2TeVにした。このため予算は大きく83億ドルに膨らんだ。

この計画は政府によって認められたが、連邦予算は5億ドルしかふやさず、足りない分は自前で調達することが要求された。このうち、10億ドルはテキサス州が負担することを申し出た。残りの15億ドルは海外に依拠することになり、この時点で余儀ない状況からSSCが「国際プロジェクト」になる。ヨーロッパはLHCを計画として持っている

競争者であり、協力が想定される主なターゲットは日本であった。日本では賛否の議論が激しく行われたが、結果が出る前にSSCが中止された。

1991年にはSSCの建設が開始され、地下200mのトンネル掘削が開始された。トンネルが20%ほど完成された1992年には、しかし、下院でSSCの中止決議が行われた。その背景には1991年1月17日に始まった湾岸戦争とそれに付随するアメリカの景気後退があったと思われる。このときは上院がSSC継続を支持し、下院でもそれを認めたためにことなきを得た。アメリカ経済が下降するなか、1993年にクリントン大統領が就任すると、経済最優先の政策をとった。大統領はSSCを支持していたが、同時期に改選された議会では財政立て直しを公約として当選した議員が多く、下院でふたたびSSC中止が決議された。上院では継続が承認され、両院議員総会でも継続の結論が出たが、この結論は下院によって拒否され、SSCの中止が決まった。その秋にはクリントン大統領によってSLACのBファクトリー計画が認可されたが、それはSSC中止の代償の感があった。

SSCに雇用されていた物理学者は解雇された。名声のあるシニアな研究者は各地の大学、研究所に職を得ることができたがポストドクなどの若手はきびしい状況に直面した。テキサスに家を買って、家族ともども引っ越してきた人たちは、家を売ろうとしてもSSC中止による不動産価格の下落によって多額のローンを抱えることになる。一説によると、この機会に高エネルギー物理を離れた若手物理学者が金融工学に入り込んだことで、金融工学の隆盛をもたらした。

1994年12月にはSSCの中止を待っていたかのように、CERNでLHC建設が決定された。

4.2 SSC 中止の諸要因

SSCの中止には、さまざまな要因があった。それらは複合的に関連している。

1. 財政危機

レーガン政権下では高金利政策からドル高が進行し輸入が増大して貿易赤字となる。また国防予算を増大したため支出が拡大した。このため、財政赤字、貿易赤字の双子の赤字と言われる事態に陥った。1992年には財政赤字が最悪となり予算の縮小が必要であった。（クリントン政権は重化学工業からIT・金融に重点を移し2000年には財政黒字）。このための格好のターゲットとしてSSCが標的になった。NASAなども同様に廃止のターゲットになったが、NASAの関連研究所、企業は多くの州にちらばっており、NASAの縮小は影響が大きかった。それにくらべてSSCはテキサスだけの問題であり、政治的に切りやすかった。

2. 冷戦の終了（湾岸戦争）

1991年12月25日のソ連崩壊（ゴルバチョフ書記長辞任）にともなって、ポスト冷戦時代が始まる。ほぼ同時にSSC計画が中止される（1993）。これは冷戦的科学の衰退の典型として語られることが多い。その側面は否定できないが、国防費の削減はるか以前から行われており、高エネルギー物理だけでなく宇宙科学（NASA）の予算も同様に減っていた。SSCは予算縮小にともなう軍・軍需産業の受け皿の役割も果たしていたものであり、この観点からは、冷戦終結によって、SSCが中止されるのはむしろ逆である。

むしろ、同じく1991年に行われた湾岸戦争で、通常兵器の重要性が再認識され、そうなると軍需産業としては科学計画などにかかわるより、本業にもどるほうが良い、という面があったのではないかと筆者は疑っている。（超伝導磁石の生産ラインを作っても、SSC以降の需要は見込めない、ペイしない。SSCはもうからない、というのが産業界の見方であり、計画を中止して補償金をもらったほうが得だった）。冷戦末期で落ち目だった軍・軍需産業と密接にかかわらざるを得ない状況で、SSC計画は、軍・軍需産業が凋落するにせよ復活するにせよ、その事情にひきまわされる結果となったものではないか。

ポスト冷戦期には、経済の国際化にともない、科学も市場経済の中

に置かれる傾向が強くなる。しかも、国民国家の枠を超えて超国家的、国際的な市場が形成された。国家が科学に直接投資するのではなく、産業が投資して利益に結びつける傾向が強くなりつつある。特にバイオ産業、IT産業にこの傾向が見られる。一方、短期的には産業的利益にむすびつかない基礎科学や人文科学で、大学の講座が減るなどの影響がアメリカでは出ている。ここに至ってリニアモデルは完全に過去のものとなったが、すでにSSCの計画段階でもSSC建設に反対する論調にはリニアモデルを疑問視するものが現れていた。

3. 運営（組織）の問題

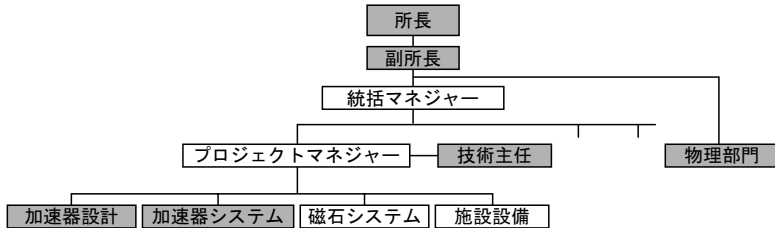
SSCの組織は従来の研究所から見ると異様であった。所長（高エネルギー）、副所長（加速器）は物理学者であったが、彼等が直接コントロールできたのは物理研究の部門のみであり、磁石の開発・製造など実質的な部門の総括マネージャー（general manager）はDOE長官が直接選んだ元海軍軍人（原子力発電所などの建設会社首脳部の経歴も持つ）だった。その下にいる計画運営責任者（project manager）は加速器の経験のある科学者だったが、副責任者は元陸軍将軍で、こちらが実質的な責任者であったようだ。計画運営責任者を補佐する技術主任はフェルミ研究所から来た加速器物理学の専門家だったが開発計画をめぐる対立が生じていた。この下にある実働部隊では、最も重要な磁石システムの責任者もDOE長官が選んだ元海軍軍人であった。磁石の発注先は研究者にはかることなく、上層部がかつてに軍事産業を選んだと言われている。施設・設備の責任者も元海軍軍人である。

このような組織になった理由として（1）予算が巨額であり、物理学者だけでは運営できないのではないかという思いをDOEが持っていた、ということの他に（2）国防予算が縮小する中、軍、軍需産業の受け皿としてSSCが期待されていた、ということがあるだろう。

物理学者が活動できたのは物理部門（理論と実験）を除けば加速器設計、加速器システムのみであったが、そこでは仕事の範囲があらかじめ区切られており、現行のデザインを見直すような研究は推奨され

なかった。現行デザインの批判は計画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るような状況で、科学者が探究心を発揮することはできなかった。

【図2】SSCの組織図（影つきの部署は物理学者）



SSCLにおけるCDG設計の見直しは、科学研究にもとづく「下からの」提案というより、軍事研究の流儀を踏襲する指導部の指示によるところが大きかったと思われる。軍事研究は国防という絶対的な価値をたてて行うもので、ある程度費用を度外視することが許される。CDG設計は、予算を認めてもらうために、費用を節約して、技術的にはぎりぎりの線を出したものであるが、建設が決まった以上、ぎりぎりの線で作って失敗することは避けなければならない、設計を保守的なものに改変した。あとから必要な予算が増えることは、軍事技術ではよくあることのようにである。

所長もSSCの運営が官僚主導であり、自分の方針が実行できないことから相当な不満を持っていたことが伺える。「物理の成績がCだった連中が研究所を動かしている」というようなスタッフに対する批判を公にするなど、研究所の運営がうまく行っていないことが外部にも明瞭となり、SSCの中止に影響を与えたと思われる。

4. 設計の問題

CDGの設計によって認可されたSSCは、新研究所SSCLで設計をやりなおし、予算の増大を招いた。

CDGは物理学者によって運営されており、科学的な議論によって設計がなされた。このグループは、しかし、SSCLには引き継がれなかった。CDGにはアメリカ各地の加速器研究者が協力していたが、多くの研究者は「僻地」であるテキサスに移らなかった。テキサスに移った研究者も窓際状態となり、また研究所の運営が気に入らず上司（官僚）と衝突してSSCLを去った研究者も多かった。SSCLでは新たに研究者を雇用したが、平均的なレベルは下がったように見える。

CDGの設計では小さな磁石を想定した。磁石が小さければ、その冷却装置の費用も低く抑えられる。また入射エネルギーも低く設定した。これによって入射器の費用が節約できる。この設計の正当性は2つの仮定によって成り立っている。

■磁石の精度

小さい磁石になるほど、費用は小さくなるが製作精度を維持するのは難しい。実験室で一つ作るだけなら、そうとうに精度の良いものを作れるだろうが、SSCの磁石は工場に専用のラインを作って大量生産するものである。磁石の専門家の中でも、内径4 cmは難しいのではないかと、という予想があった。しかし、これを不可能だと証明することはできない。

■bore tube corrector

CDGでは、磁石の精度が足りない分を補正するためのアイデアを持っていた。磁石中心付近でビームの通る空間と磁石のスペースを分離するボアチューブというパイプがある。これに接するように置かれた分散型の補正用電磁石によって超伝導磁石の誤差を補正するものであった。CDGのデザインにとっては必要不可欠な要素であった。このアイデアは、しかし、SSCLでは採用されなかった。実績がないことから信用されなかった以上に、新デザイングループとしては予算が増やせるならリスクのある新アイデアに頼って失敗することは避けたかったのであろう。

旧CDG側では、このアイデアを死守すべきであったかもしれないが、学問的議論もないまま、あらたな設計に移行するのを阻止できなかった

た。

SSCにおける設計の問題はCDGからSSCLへの移行を含め、かなり運営の問題に帰着されるだろう。

KEKでの筆者の経験から考えて、SSCの設計に関しては以下の問題点が指摘できる。

- CDGにおける検討のレベル。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。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もある。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效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。
- CDGが寄せ集め集団であったこと。CDGにはアメリカの各地から一流の研究者が出向していた。SSCが認可される前であったので、CDGはLBLに間借りする形で運営されていたが、同じ研究所に所属する運命共同体とは違っていた。その設計も、本当に自分たちが作る、という迫力に欠けており、研究論文を書くような調子で設計報告を書いていたのではないか。このため、SSCが認可されたあとは、ほとんどの研究者はもといいた研究所、大学に戻ってしまい、設計に責任を感じていたとは思えない。
- SSCLでは運営形態が異なり、官僚的統制のもとにおかれたとは言え、CDGのメンバーが自分たちの設計が変更されることに対して抵抗したようには見えない。CDGの設計はSSCを認めてもらうための単なる作文であり、認可後には予算を増やして再設計を行うことが暗黙の了解となっていたのではないか。実際、SSCLにおける新デザインの際、磁石の大きさと入射エネルギー以外にも、多く

の要素が安全、保守的な方向に改変されたと言われている。

- SSCLにおける設計。SSCLで新たに雇われた物理学者達にとって、CDGの設計は予算を低くするために無理な設計をしていると感じられたとしても無理は無い。「CDGが行った無責任な設計の責任をとらされるのはいやだ」と考えれば、予算は増えてもより安全な設計に変更することに異存は無かったであろう。それが全体の雰囲気としても受容されるのであれば、なおさらである。

設計は科学的に行われることとは言え、予算の制限など、科学的とは言えない要素も大きい。これはトランスサイエンスの典型例でもある[30, 31, 32]。SSCの設計に関しては、「科学的とは言えない要素」として、予算以外にも運営の方針、科学者集団の対立などの要素が入っていたと言える。

5. 国際的孤立と設計の硬直化

CERNはSSCの認可とほぼ同じタイミングでLHC計画を発表した。エネルギーは低いものの(7TeV)、Higgs粒子を見つけるには、むしろSSC(20TeV)より優れている、という主張がなされた。CERNはSSCに対抗するLHC計画を発表することで、SSCへの非協力を宣言し、同時にSSCの退路を断ったことになる。SSC側では当初の計画を見直して、エネルギーを低くし、より現実的(建設費のかからない)設計に変更するという選択肢もあったはずだ。到達エネルギーの目標値をさげること、で、予算の増大は避けられる。現在から見ると、それが最善の方策であったと思われる。エネルギーができるだけ高いほうが良いことは確かだが、20TeVでなければならない、という明確な物理的理由があったわけでは無かった。

この選択がなされなかったのは、20TeV以下では意味が無いという当初の主張へのこだわりとともに、建設費が多少増えても認められるだろうという指導部の見通しの甘さがあったことも大きな理由であろう。その背景にあるのは国家による手厚い支持に慣れていた物理学者の傲慢さである。

SSCはICFAが国際協力で建設することを検討していた超伝導技術を用いた巨大加速器を、アメリカの国家プロジェクトとしたものであり、ICFAの他のメンバーからは批判されるものであった。SSCは予算不足から急遽、国際計画を名乗ることになったが、デザインも済み、建設が始まってからでは、国際計画は名ばかりであり、協力はほとんど得られなかった。日本ではこれに呼応する動きもあったが、高エネルギー研究者集団内部にも、すでにデザインもかたまり建設が進行中の計画に参加しても共同研究の実質が無い、日本はBファクトリーやリニアコライダーを将来計画として持っており、それらへの影響が大きいなどの理由で、協力には消極的であった。また高エネルギー以外の分野からも学会会議を中心として、日本がSSCに拠出すれば、日本の科学予算が減ることになる可能性に対して危惧があり、慎重な対応を求めめる意見が優勢であった。外交的な観点から外務省が、産業育成の観点から通産省（当時）が積極的だったが（繊維から鉄鋼、テレビ、工作機械、自動車、半導体などと推移した貿易摩擦の解消への考慮から拠出に動いていた）、文部省（当時）は消極的だった。政策レベルで調整がなされつつあるあいだにSSC自体が中止となった。

6. 他分野（物理学界内部）からの批判

85年ころから論争が始まる。Physics Today（アメリカ物理学会誌）の85年3月号にグラショウ（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会の会員に示し、理解をあらためるものである。「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、ロイによるほぼ全面的な否定である。結局ロイの

論点は次のようにまとめられるだろう。

1. SSCは純粹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と初期宇宙論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。
2. 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。
3. 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。米国科学予算の配分は社会的目標の無い純粹科学偏重で、社会的要請に答える分野への予算が少なすぎる。
4. SSCのように社会的価値の認められない計画に、たとえばマイノリティーの失業対策、酸性雨対策などにも使える公的資金を使うべきではない。
5. 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にすべきだ。（実際、音楽家は演奏会の収入によって、文学者は作品の印税によって芸術活動を維持している。国家に83億ドルの支出を要求したりしない。）

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と断言している。

その他の読者からもロイへの反論が出された：「純粹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、ロイにあつさり反論されるだけで論争が深まることはなかった。ロイの主張の中心は、好奇心を追究するアカデミックな学問への公的投資が正当化されるのは（科学の他の分野へのインパクトを通じた場合も含めて）社会への還元が期待されるからだ、ということである。

この立場は、リニアモデルを完全に否定したものだ。

7. 高エネルギー物理学者の傲慢

「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」ということは、他の分野では基礎法則は判っていてその原理に依拠した計算方法だけが問題である、という意味でもある。これはすべての現象は、その下位レベルの法則によって説明されるという還元主義の言明でもある。生物学は分子化学によって究極的には説明され、化学は物質科学の応用であり、物質科学は原子構造に還元され、それは原子核、素粒子に還元される。現在知られているもっとも基本的な物理を研究するのが高エネルギー物理学である、とするものである。

これに対して物質科学から、猛烈な反発があった。どのようなレベルであれ、その下位の物理から完全に説明されるわけではなく、各レベルには固有の法則がある、とするものである。その理由は物理現象の複雑性にある。現象が複雑になると、下位の法則からは説明不能となる。統計力学によって熱力学が完全に説明されるわけではなく、分子化学によって生物が説明されるのでは無い、という主張である。これから複雑な系には独自の法則性が生まれるとする見方がうまれ、複雑系の科学が発展した。複雑系の科学のリーダーのひとりであったアンダーソンは超伝導で業績をあげたノーベル賞受賞者であったが、議会でSSCに反対する答弁を行っている。

還元主義の立場では、最も下位の現象を研究する高エネルギー物理学のみが科学の真のフロントであり、他の科学はその応用であるという研究のヒエラルキーが成立する。高エネルギー物理学はその意味で特別な研究分野であることを主張することが多かった。この傲慢性が他の分野からは嫌われた。ロイの批判の第1はこの点に対するものだ。

高エネルギー物理学の傲慢性は、マンハッタン計画を成功させ、国防の最前線を担っているという自負にもよっている。DOEはそれを制度的に保証してきた。しかし、現実の高エネルギーの世界は、あまりにも日常世界から離れたレベルになった。クォークの存在が確立したとして、それで何がかわるか。遠い将来に何らかの応用があるかもし

れない、という漠然とした期待感だけで83億ドルの支出を正当化することはできなかった。

SSCの中止が議会で議論されはじめるや、ノーベル賞受賞者を始めとする有名な研究者が次々にSSCの継続を求めて発言した。しかし、他分野からSSCを応援する発言は無く、高エネルギー物理学者の傲慢性が浮き彫りにされただけに終わったと思われる。

5. 終わりに

5.1 日本の高エネルギー物理学

アメリカを中心に高エネルギー物理学の歴史を見てきたが、日本についてかんたんな解説をしておく。

1. 戦前から戦後期

日本はアメリカとほぼ同時期にサイクロトロンを完成させ（理研、1937年）、戦前にはアメリカに次ぐサイクロトロン大国であった。研究費も他分野に比べて優遇されていた [34]。1930年代に核物理が優遇された理由はアメリカと同じことで、国際競争を生き抜くために科学技術の独立と優越が必要であるとみなされたからだ。同じ理由で、多くの理学部が新設される（1930年北海道帝大、33年大阪帝大、42年名古屋帝大、など）。戦中には研究動員をよびかけ、とくに原爆開発に協力することで、研究費も豊富であった。研究者組織としては素粒子論グループがすでにあり、実験核物理もネットワークを形成していた。

戦後の混乱期にも、これらのネットワークは保持され、占領の終了後にはすみやかに研究体制を構築することができた。学会会議には核物理特別委員会（核特委）が設置され、核物理は特別な位置を占めた。核物理コミュニティーは核特委を中心に、学会会議に大きな影響力を持ち、戦後の科学体制を作っていた。核特委のメンバーは核物理学界の実力者であり、また核物理コミュニティーの主流派であった。

1952年には核特委の主要メンバーが日本における原子力委員会の設置を提案した。核特委をアメリカのAECと同等の強い権限を持つものにするのが意図されていたと広重 [38] は論じている。学術会議で方針がまとまらない間に1954年には中曽根議員らによって原子力予算が提出され、原子力についての発言権を失った。とは言え、原子力3原則（自主、民主、公開）の確立で核特委の存在感を示した。さらに1953年には原子核研究所の開設が学術会議から勧告され、1955年には東京大学原子核研究所（核研）が設立された。この住民への説明の過程で核研では原子力の研究はしないことが明言された [33] が、続く1956年には京大に原子炉（関西原子炉）を作って原子力の研究を行う発議がなされる。研究用原子炉設置準備委員会の初代委員長は湯川秀樹であった。原子核研究者は核研（田無）でも関西でも住民の説得にあたる。住民側では研究所の安全性は当然として、日本が再軍備したら原子力の研究が核兵器の開発と結びつくという可能性に大きな不安があった。このため、田無には研究所と市の連絡会議が設置され、関西原子炉では地方自治体（大阪府）が原子炉の運営にかかわれる仕組みが作られた。

核研は東大附置の共同利用研究所として共同利用を通じて核物理の中心となり、また日本最初のシンクロトロン（ES）の建設に成功して日本の高エネルギー物理学発祥の地となった。原子力については1956年に設立された科学技術庁と原子力研究所（原研）が中心となった。その後原子力の研究は1956年の原子力長期計画に基づきPu増殖の路線に沿って進む。原研を中心とし高速増殖炉の開発に進むが、1号機の常陽の設計を最後に主力は動力炉燃料開発事業団（動燃）に移る。並行して商業炉としては通産省主導で軽水炉が広まる。軽水炉の廃棄物を再処理してPuを取り出し、増殖炉で燃やすことによってさらに Puを増やせば、ウラン資源の少ない日本でもほぼ無尽蔵のエネルギー源を得られることになる。この中で京大原子炉を含むアカデミックな研究と科学技術庁系の開発的な計画、および通商産業省系の実用路線は、それぞれほぼ無関係に進む状況になってしまった [4]。

さて、1958年には、核特委を中心に、原子核の総合的な将来計画の検討が進められる。1959年には核特委のもとに原子核将来計画小委員会が設置され、総額320億円の「物理研究総合研究機構」構想という壮大な計画が出された。素粒子、原子核、宇宙線の研究所と各大学における原子核研究部門を包含するものである。その運営は全国研究者の代表からなる科学政策委員会の諮問に基づく、とされた。この運営体制が重要なポイントである。政府が直接コントロールすることは排除し、研究者の総意（学術会議）による運営が必要であった。政府への不信感、軍事に加担する可能性の排除、が基調となっている。それを避けるために研究者の「自治」が必要とされた。将来計画は単に研究所の新設だけでなく、核物理全般にわたる研究体制を提案したものだ。その中心は「民主主義」であった。

戦後日本における科学状況の特徴のひとつは「民主主義」の重視であった。戦前の軍国主義、非合理主義のもとで科学は発達できず、科学力によってアメリカに負けた。戦後も政府と資本家は産業の育成にのみ熱心で科学をおろそかにしている。また再軍備をねらっていて油断できない。科学の進歩のためには民主化が必要であり、科学を民衆（人民）のコントロールにおかなければならない。一方、科学の合理性は民主化を助けるので資本家は科学の振興を望まない。基礎科学の進歩は人民の勝利である。

というようなものである。

核特委はこのような科学観のもとに、「原子核の研究は研究者が主導権をとって政府からは独立して人民の支持のもとに研究を行う。政府は予算を出す口は出さない」というような図式を目指した。この運動は核特委を中心に進行した。このような科学観に対して、科学史家の広重は認識の誤りを幾度も警告している [34, 35, 36]。

将来計画の中心である素粒子研究所の方針をめぐる研究者側が混乱している間に、政府は学術審議会を設置し、将来計画は学術審議会で討議されることになる。学術審議会は素粒子研究所の予算を1/4に縮小することを求め、高エネルギー研究者がそれを受け入れること

によって、高エネルギー物理学研究所（KEK）が1971年に創設された。これによって、将来計画は分断され、核物理の「人民管理」の構想はつぶれた。科学界はこの分断支配を受け入れることで規模の拡大には成功したとも言える。実際、研究施設の面では将来計画のほぼすべてについて、要求していたものは何らかの形で確保された。ただ、それらの運営形態は核特委の構想とは大きく違っていた。

2. ポスト戦後期

1970年代が日本の歴史の大きな転換期であったことは多くの研究者が指摘している [40, 41]。高エネルギー物理学も大きく変わる。

上記の経緯のもとに高エネルギー物理学研究所（KEK）が1971年に創設された。日本における巨大科学の始まりと言える。文部省直轄の研究所ではあったが、全国大学共同利用機関として全国の研究者の意見が研究所の運営に実質的に反映できるシステムを作ったことで、将来計画の理念の一部は保たれた。

核物理将来計画のてんまつからして、学術会議が分野間の利害を調整するガバナンスに欠けることも明らかになり、学術会議の衰退（政策への反映能力の低下）を招いた。文部省の学術行政は学術審議会という政府機関によって行われる体制が確立した。

KEKでは12GeVの陽子シンクロトロン（KEK-PS）を建設し1976年にはこれが完成、共同利用実験がはじまる。はやくも 1973年にはPSの次期計画TRISTAN計画が構想される [42]。TRISTANについては実質的に学術会議に図ること無く、学術審議会がこれについて検討し、1981年には計画が承認された。TRISTANは電子陽電子コライダーで、完成時に世界最高エネルギーとなるものであり、1986年に完成した。総予算は700億円であるが、これには人件費などは入っていない。当初はこのような国際級のプロジェクトを日本ができるのかという危惧もあったが、加速器も測定器も設計通りに動いた。しかし、プロジェクトの目標であったtクォークの発見はできないままCERNに完成されたLEPが動きだした（1990）。

このためTRISTANは失敗である、という評価がさけられず、ポスト TRIS-TANについての議論は1980年代の終わりから始まり、混迷した。主な主張としては(1)すでに検討が進んでいたリニアコライダーを建設する、(2) SSC計画に合流する、(3) Bファクトリーを作る、などがあった。(1)と(2)についてはすでに研究グループができており賛同する研究者も多かった。しかし、(1)は実現可能性が未知であり、(2)はアメリカの計画に乗ることで日本の研究基盤が崩壊する可能性、および大学の研究者にとっては国内に実験設備が欲しいという要求もあって反対も多かった。結局、主流とは言えなかった(3)が次期計画となり、これによってSSCへの資金提供を断る口実もできた[43]。Bファクトリー計画は SLACとの競争に勝ち抜き、世界最高性能のコライダーとして高い評価を得た[1]。Bファクトリーと並行して、それまで核物理のために提供されていたKEK-PSを改造し、ニュートリノ研究に用いる計画(T2K)も進められ、ニュートリノに質量があることを発見したことも大きな貢献であった。

1980年代には高エネルギー物理学だけでなく、宇宙線のカミオカンデ、天文学ではスバル望遠鏡、核融合では大型ヘリカル装置など国際級の装置を日本が作り始めた。これに応じて、大学の附置研であった多くの共同利用研究所が KEKと同様の全国大学共同利用研究機関となり、1989年創立の総研大の基盤となった。日本の経済は1960年代、70年代の高度成長を経てバブル経済に向かう時期であった。

2000年以降、日本の高エネルギー物理学は世界最高と言って良いレベルに達した。しかし、これからの進展については楽観できない。核物理と高エネルギー物理のために KEKと原研によって建設されたJPARCは難しい加速器であり、思うように成果が出なければその先の計画は難しいだろう。また、日本経済の状態もこれまでとは違い、低成長安定路線をとらざるを得なくなりつつあるため、基礎物理への大きな投資は難しくなるかもしれない。ただし、商品の生産についてはアジア各国の生産力、技術力が向上しているので、日本としてもさらに知識集約的な産業構造に転換していく必要があり、基礎科学への期

待は高まっている面もある。

5.2 科学者は科学を「統治」できるか？

SSCの中止後、FNAL所長であったレーダーマンは、反省と提案を公にしたが、中で「科学の緒分野間での適正な予算配分についての合意を目指し、巨大プロジェクトの他分野への影響などを冷静に分析するための意見交換の場を作る」必要性を指摘している。NSFやNIHには多くの科学者がスタッフとして配置され、科学行政に携わっている。DOEにも同じような側面はある。しかし、これらはあくまで行政側の組織であって、科学者の組織では無い。科学のことを一番良く理解しているはずの科学者が科学行政を行えば良い、という意見は昔からあるが、実現したことは無い。

学術会議も科学者による学術行政を目指したが、結局は分野の代表者による勢力争いの場となり、意見をまとめきれず、すべての分野の将来計画を承認するようなことになった。核物理将来計画の漂流にもそのことは現れている。日本では大型の研究費を獲得するには科学者の代表による審議では無く、文部省、文科省、政府機関との個別交渉によって行われている。

しかし、本当に「科学のことを一番良く理解しているはずの科学者が科学行政を行えば良い」のか。科学予算の確保に邁進するだけではないか、という疑いもある。国防のことを一番良く理解しているのは軍人だから、国防政策は軍人にまかせるのが良い、という議論と似ている。科学予算を国家予算全体のなかで適切に配置し、科学と社会の調和ある発展をはかるためには、科学を理解しつつ、しかしそれを相対的に見ることのできる知的グループを育成する必要があるだろう。

5.3 高エネルギー物理学と社会

アメリカにおいては高エネルギー物理学は終焉の時を迎えているように見える。LHCでもKEKBでも多くのアメリカ人研究者が活躍しているが、かつての勢いは無い。また具体的な将来計画も無い。

高エネルギー物理学はアメリカの国防政策の一環として繁栄した。国防が国家の最重要課題であった時代は終わろうとしているかもしれない。米本〔44〕は、今や、国防にかわって環境政策が国家の国際戦略として重要となりつつあることを指摘している。国家が科学を推進する時代は終わり、科学研究の推進母体はグローバル化した産業にかわろうとしていることもある。その実例はバイオ産業などで典型的に見られる。

アメリカの高エネルギー物理学は国防との関連の中で始まり、国家科学として発展し、いまや衰えつつある。この観点からすると、ヨーロッパと日本は違うように見える。CERNはいまや全世界的な支持のもとにLHC計画を進めている。日本もKEKBなどの世界的な成果を得た。ヨーロッパや日本における高エネルギー物理学の進展は、すくなくとも表面に現れる限りにおいて国防や軍隊とは無関係であった。そこではヨーロッパの伝統と文化、また憲法9条を持つ日本の姿勢が大きな役割をはたしている。しかし、今後どのような展開が期待できるかは疑問である。ヨーロッパも日本も経済は基本的には停滞しており、世界的な経済再編の潮流の中で、産業とは直接かかわらず巨額の資金を要する高エネルギー物理学も何らかの変化を被ると考えざるを得ない。

「国際競争を生き抜くために科学技術の独立と進歩が必要」という認識は戦前にもあり、戦後も維持され、近年では「科学技術創造立国」政策として科学技術への優先的な投資が現在まで続いてきた。科学への投資は無条件に善とされてきたのだ。戦後科学運動の旗手でもあった数学史家小倉金之助について、広重徹は文献〔35〕所収の「科学者と歴史」の中で「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」と改めであるというふうな訂正が加えられているが、

それ以外の内容はまったく同じである。（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。

たしかに1970年代までは「自然を征服せよ、科学は自動的に善」という時代であったと言える。しかし現代では「自然に従え。科学は悪ももたらす」となっている。科学のすばらしさ、だけでなく恐ろしさ、莫大な費用についても人々に伝え、社会の合意のもとに持続可能な科学を築いていくことが、これからの科学者の課題であろう。

【参考文献】

- [1] 総研大ジャーナル2号特集「世界最強の加速器KEKBの挑戦」
www-kek.kek.jp/Publication/Sokendai/Sokendai.pdf
- [2] 広重徹、「科学の社会史（上下）」岩波現代文庫（2002）。もともと「科学の社会史—近代日本の科学体制」（中央公論社自然選書）（1973）として刊行されたもの。
- [3] 古川安「科学の社会史—ルネサンスから20世紀まで」南窓社（1989）
- [4] 吉岡斉「原子力の社会史」朝日選書
- [5] 平田光司「大型装置純粋科学試論」、年報「科学・技術・社会」vol. 8, P. 51（1999）
- [6] 日野川静枝「サイクロトロンから原爆へ—核時代の起源を探る」續文堂出版（2009）
- [7] R.Seidel, "The origin of the Lawrence Berkeley Laboratory", in文献 [8]
- [8] P. Galison and B. Hevly Eds, "Big Science -The Growth of Large-Scale Research-", Stanford University Press, Stanford（1992）
- [9] D.A. Hounshell, "Du Pont and the management of Large-Scale Re-search and Development, in文献 [8]
- [10] 村松秀「論文捏造」中公新書ラクレ（2006）

- [11] 出口正之「フィランソロピーと科学」、平田光司編著「科学における社会リテラシー 2」総合研究大学院大学 (2004) p. 259-273。
- [12] 鎌田遵「ネイティブ・アメリカン—先住民社会の現在」岩波新書 (2009)
- [13] アイリーンウェルサム (著), 渡辺正 (訳)「プルトニウムファイル上、下」翔泳社
- [14] 平田光司「プルトニウムをめぐる研究史—社会との関係を中心に」岩波「科学」2010年2月号 (2010)
- [15] アルバカーキー・トリビューン (編)、広瀬隆 (訳)「プルトニウム人体実験」小学館 (1994)
- [16] L. Hoddson, "Mission Change in the Large Laboratory: The Los Alamos Implosion Program, 1943-1945", in 文献 [8]
- [17] R. P. ファインマン (著), 大貫昌子「ご冗談でしょう、ファインマンさん上、下」岩波現代文庫
- [18] 藤永茂「ロバート・オッペンハイマー—愚者としての科学者」朝日新聞社 1996
- [19] 佐々木力「二十世紀数学思想」みすず書房 (2001)
- [20] E. S. ファーガソン (藤原良樹、砂田久吉、訳)「技術屋の心眼」平凡社 (1995)
- [21] 佐藤文隆「科学と幸福」岩波書店 (1995)
- [22] 中山茂、吉岡斉編集「科学革命の現在史」(2002)
- [23] 池内了「科学者心得帳」みすず書房 (2007)
- [24] M. S. 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 (1972)
- [25] 山本祐靖「高エネルギー物理学」、培風館 (新物理学シリーズ14) (1973)
- [26] D. Pestre and J. Kriege, "Some Thoughts on the Early History of CERN", in 文献 [8]
- [27] 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)
- [28] SSC Central Design Group, "Conceptual Design of the Superconducting Super Collider", SSC-SR-2020, March 1986.
- [29] "Site-Specific Conceptual Design", SSCL-SR-1056, 1990; "Site-Specific Conceptual Design of the Superconducting Super Collider Executive Summary", SSCL-SR-1055, 1990.
- [30] A.M. Weinberg, "Science and Trans-Science", Minerva, vol.10, no.2 (1972)

- [31] 平田光司「トランスサイエンスとコミュニケーション」科学におけるコミュニケーション2007
- [32] 小林傳司「トランス・サイエンスの時代」NTT出版（2007）
- [33] 高岩義信「巨大科学が受容される条件を探る」岩波科学 vol. 75, no. 9 (2005)
- [34] 広重徹、「日本における核物理学の発展」
- [35] 広重徹『科学と歴史』みすず書房（1965）。
- [36] 広重徹「問い直される科学の意味」自然1969年2月号（文献 [37] 所収）
- [37] 広重徹「近代科学再考」朝日新聞社（1979）
- [38] 広重徹「巨大科学と物理学の未来」日本物理学会誌 27巻4号 307-313 (1972)
- [39] 中山茂「科学技術の国際競争力ーアメリカと日本 相克の半世紀」朝日選書 793（2006）
- [40] 安田常雄『『研究博物館』と現代展示』総研大ジャーナル 14号 pp18-21（2008）
- [41] 吉見俊哉「ポスト戦後社会」岩波新書シリーズ日本現代史 9（2009）
- [42] 文部省高エネルギー物理学研究所「10年の歩み」（1981）
- [43] 「菅原寛孝氏インタビュー」（2003）インタビューア：高岩義信、編集：高岩義信、平田光司
- [44] 米本昌平「地球環境問題とは何か」岩波新書（1994）