

日本の加速器を用いた原子核・素粒子実験におけるトリスタン 加速器の位置づけ*

菊谷英司

高エネルギー加速器研究機構 史料室

1 トリスタン加速器とは

トリスタン加速器とそれに設置された素粒子実験用測定器は、1986年高エネルギー物理学研究所で完成した大規模実験施設である。その目的は電子と陽電子が高エネルギーで衝突した際におこる素粒子反応を研究することであった。それまでも日本には加速器による原子核・素粒子の実験施設はあったが、ビーム衝突型の装置 (colliding machine) は日本初のものである。1986年10月に完成し1996年5月まで約10年間稼働し、三つの大型測定装置と一つの小型測定装置を用いた実験が遂行された。運転初期の約1年間、同種の加速器としては世界最高のエネルギーをもつ加速器であった。

2 日本における加速器を使った物理学実験の歴史

1945年8月の第二次大戦終了の時点で、日本には4基のサイクロトロンがあった。即ち、理化学研究所 (理研) の2基 (26インチ、60インチ)、大阪帝大と京都帝大^{*1}の各1基 (ともに26インチ) である。理研の26インチサイクロトロンは、この型の加速器の発明者である E. Lawrence が研究活動を行っていたアメリカ以外では最初のものであった。これ以外にもバンデグラーフ型加速器などの加速器がこれらの三拠点をはじめとして、国内に複数存在していた。この事実は、加速器の研究分野にお

いて、1940年代前半まで日本が決して西欧に遅れをとっていたわけではなかったことを表している。

しかし、日本が降伏した数ヶ月後の1945年11月末、連合国軍最高司令官総司令部 (General Headquarters : GHQ) の指令により、米軍がこれら4基のサイクロトロンとそれに附属する機器などが破壊、廃棄してしまった。のみならず、こうした実験機材と共に研究ノートなども押収されてしまい、加速器及びそれを使った研究も禁止されてしまった。このことにより、日本のこの分野の研究は大きな打撃を受けることになった。

その約5年後、サンフランシスコ講和条約に署名がされる数ヶ月前の1951年5月、E. Lawrence が来日し、日本でのこの分野の研究を再開してもよいのではないかと発言をした。これを期に日本での加速器を使った研究が再開されることになり、まず、上述のサイクロトロンが破壊されてしまった三拠点、理研、京大、阪大で26インチのサイクロトロンが再建された。また、しばらくおいて (1955年) 「東京大学原子核研究所」 (東京の田無町、現在の西東京市) が開設され、60インチのサイクロトロンが建設されることになった。

3 さらに高いエネルギーの加速器にむけて

3.1 アメリカなどでの動向

日本がやっと原子核研究所で上記のサイクロトロンを建設している頃、アメリカを中心とした地域では桁違いに高いエネルギーの加速器の建設が始まっていた。これは「シンクロトロン」と呼ばれる型の

* この報告は日本物理学会 2013 年秋期大会 (2013 年 9 月、徳島大学) の「物理学史、物理教育」のセッションで口頭発表したものを文章化したものである。

*1 京都帝大のものは完成間近ではあるが、未完成であった。

加速器で、その動作原理は戦後すぐ提案されていたが、1950年代に入りそれが実機として建設され始めていた。サイクロトロンの場合、粒子を加速するとそれに応じてその円軌道の半径が大きくなってゆく。このことは、高いエネルギーを得ようとすればするほど広い領域に磁場をつくらなければならないことを意味する。このことから実用的な観点からはサイクロトロンで得られるエネルギーに限界があることは見えていた。これに対してシンクロトロンでは粒子のエネルギーの上昇に同期して磁場の強さも増すように作られており、結果として軌道の半径は一定となる。このことがサイクロトロンより遙かに高いエネルギーに到達することを可能にした。実際、1950年代にはギガ電子ボルト級の高いエネルギーの陽子シンクロトロンがアメリカなどで建設されていた。サイクロトロンで得られるエネルギーが（その当時）数十メガ電子ボルトであったことを考えれば極めて高いエネルギーと言える。

こうした加速器の到達エネルギーの上昇の状況を視覚化したものが「Livingston 図」と呼ばれるグラフである（図 1 参照）。このグラフは E. Lawrence がサイクロトロンを開発していた当時、その指導で実際に手ずから建設作業を行っていた M.S. Livingston（当時大学院生）が、後年その著書 [1] の中で使ったのでこのように通称されているものである。

この図で横軸は年代、縦軸は各時代の各種の加速器の最高エネルギーである。最高エネルギーは、対数目盛りで書かれたこのグラフの中で、ほぼ直線的に伸びている。これを見ると 6 年でエネルギーが約 10 倍になっていることが見て取れる。つまり、技術革新による加速器のエネルギーの上昇は指数関数的であったのである。

3.2 日本の動向

1955 年の原子核研究所の開設当時、日本でもこの陽子シンクロトロンを建設しようという意見もあったが、原子核研究所初代所長の菊池正士は慎重に計画を遂行する立場からサイクロトロンの建設を決心した。しかし、高エネルギー加速器の「本命」であるシンクロトロンの建設を日本の研究者があき

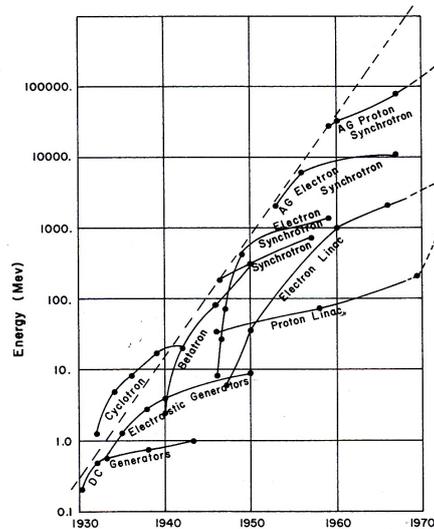


FIG. 34. Energies achieved by accelerators from 1932 to 1968. The linear envelope of the individual curves shows an average tenfold increase in energy every 6 years.

図 1 Livingston 図。原書 [1] からの転載であり、キャプションもそのまま掲載する。いつかの種類の加速器が同じグラフに書かれているが、そのうち最高エネルギーのものがほぼ直線状に伸びている。

らめたわけではない。第一歩として陽子シンクロトロンほど技術的な難易度が高くない電子シンクロトロンを原子核研究所内に建設した。1960 年代前半のことである。この加速器のエネルギーは世界最先端には程遠いものであったが、湯川秀樹がその存在を予言したパイ中間子を人工的に作ることであり、実際にそれに成功した。

さて、その次の目標はやはり陽子のシンクロトロンの建設であった。これを実現するため、原子核研究所内に「素粒子研究所準備室」が設置され、将来大型（と言ってもアメリカではなく日本の常識で「大型」）の陽子シンクロトロンを建設するための準備的開発研究が進められた。

この研究の成果と研究者や文部省の努力の結集の結果、新しい土地筑波に設立されたのが「高エネルギー物理学研究所」*2、(略称 KEK) である。将来

*2 組織改変があり現在は「高エネルギー加速器研究機構」となっている。

の拡張を踏まえ、原子核研究所の数十倍の面積の研究施設も確保された。1971年の研究所創設とともに10ギガ電子ボルトクラスの陽子シンクロトロン³の建設が始まり、1976年に完成した。日本の加速器研究者の念願であった陽子シンクロトロン（通称 KEK PS）が完成したのである。

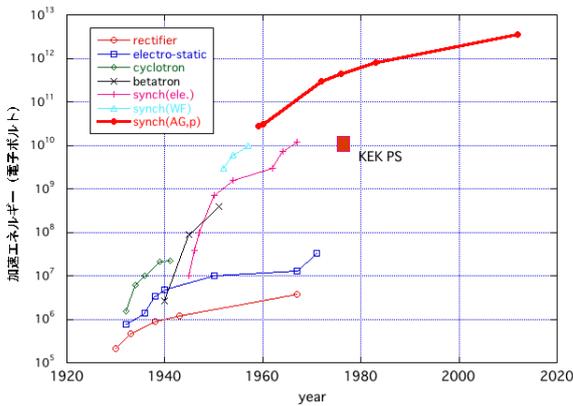


図2 加速器建設の世界的流れの中での KEK PS の位置。赤の太い線で結んだプロットが陽子シンクロトロンのエネルギーの遷移を表している。KEK PS はその時代の趨勢に比べ 1.5 桁程度低いエネルギーである。

しかし、状況は「まだまだ」であった。アメリカでは200ギガ電子ボルトの陽子シンクロトロンが KEK PS とほぼ同時に完成し、エネルギーの格差は歴然としたものであった。その様子は図2をみれば一目瞭然である。この図から、こうした積み重ねの上に完成した陽子シンクロトロンも同種の加速器の世界的趨勢に比べて1.5桁ほど低いエネルギーのものであることが読み取ることが読み取られる。

4 TRISTAN 計画へ

この劣勢を挽回しようとの動機に計画されたのが TRISTAN 加速器の建設（TRISTAN 計画）である。後に KEK の二代目所長になる西川哲治は、まだ陽子加速器建設中の1973年に、「TRISTAN 計画」を日米の研究集会で発表した [2]。この計画は「衝突型加速器」を用いるものであるが、これはアメ

リカなどに比較して狭い土地であっても物理学の成果が得やすいと判断されたためであった。当初案では陽子と電子の衝突実験を基本的な考え方としていたが、1981年に文部省に建設が認められた時点では電子・陽電子衝突の加速器へと計画変更された。図3は KEK 敷地内における TRISTAN 加速器の配置を示す。一周3km強の円形加速器は、大凡1km×2kmの長方形の敷地いっぱいになられ、リング上に4棟の実験室が作られている。

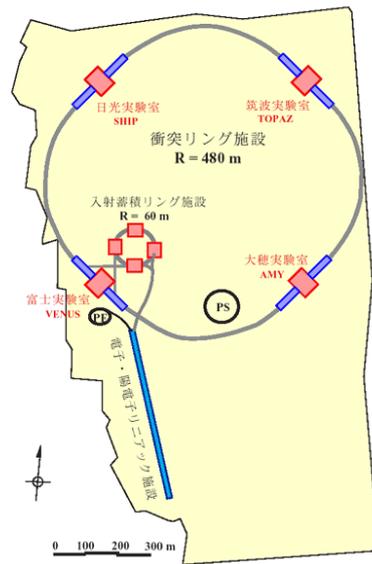


図3 KEK 敷地内の TRISTAN 加速器の配置。敷地いっぱい大きな加速器を配置している。加速器の型としては「円形加速器」であるが、直線を円弧で結んだような形をしている。このような形にすることによりできる直線部にできるだけ多くの加速装置を並べ、少しでも高いエネルギーを得るためである。

この加速器が世界的な動きの中でどのような位置を占めるのかを表すのが図4である。このグラフで赤い点は加速器のエネルギー^{*3}を表し、青い点は加速器の周長を表す。

この図から読み取れるように電子・陽電子衝突型の加速器だけを取り上げれば、この TRISTAN 加

^{*3} より詳しくは「重心系エネルギー」と言い、粒子衝突の際の実質的なエネルギーである。

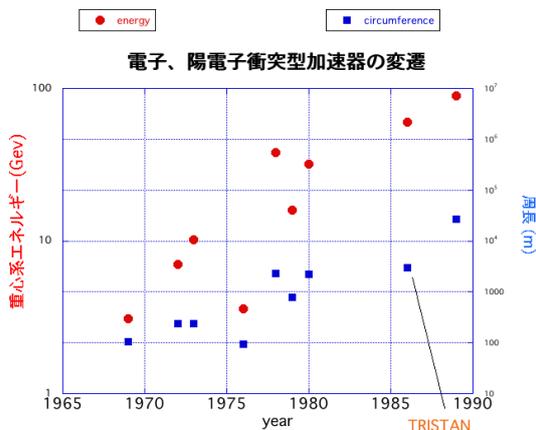


図4 電子・陽電子衝突型加速器のエネルギーと大きさの推移。赤丸のプロットが重心系エネルギーを表し、青の四角いプロットがリング一周の長さを表す。重心系エネルギーはこの TRISTAN 加速器完成時点で世界最高であった。

加速器のエネルギーは世界の第一線の上ののっている。また、同種の加速器の中での大きさでも同じことが言える。このことは、日本の加速器関連研究者が戦後になって目標としてきた「世界的レベル」の加速器の建設を、少なくとも数値的には達成したことを表している。また、比較上狭い土地になるべくエネルギーの高い加速器を実現するため、超伝導電磁石を用いた加速器を建設しようという方針が TRISTAN 計画の初期からのもくろみであった。このこと自身は実現しなかったが、超伝導技術は着実に蓄積され、この技術を使って加速空洞を TRISTAN 加速器で大規模に用い、この方向性でも一応の成功を見たことになる。

一方、物理学上の成果の観点に目を点ずると、この計画を進めるにあたって第一目標として掲げていた「トップクォークの発見」を行うことはできず、*4。比較的地味な物理学上の成果しか得られなかったことは否めない事実である。ただし、たとえ地味な結果であってもそれを研究する研究者にその活動の場を与え、若い研究者が育っていったことは

*4 後になってトップクォークは TRISTAN 加速器のエネルギー範囲より高いところで発見された。

記憶に留めなくてはならない。

さて、TRISTAN 加速器の物理学以外の観点からの評価を試みでみよう。日本の民間企業の技術水準はこの年代にはかなり上がり、加速器のような特殊な製品を製造するにあたっては技術力はそれに耐えられるものであった。それまでも諸外国の高エネルギー物理学の研究所に比べ、KEK は企業との協力は多かったが、TRISTAN の建設は国立の研究所と企業との協力をより大規模に行うことが行われた。

一方、この加速器の開発、建設、さらにそれを使った実験などの遂行のために高エネルギー物理学研究所はかなりの人員増強を文部省に要請し、実際それはかなり実現した。図5は KEK の人員数の推移を示している。1980 年代に急速に「教官数」が増えていることがわかる。このことは、その後現在にいたる高エネルギー物理学の歴史の中で日本の保有する人員が世界で占める影響力を得るために布石となった。

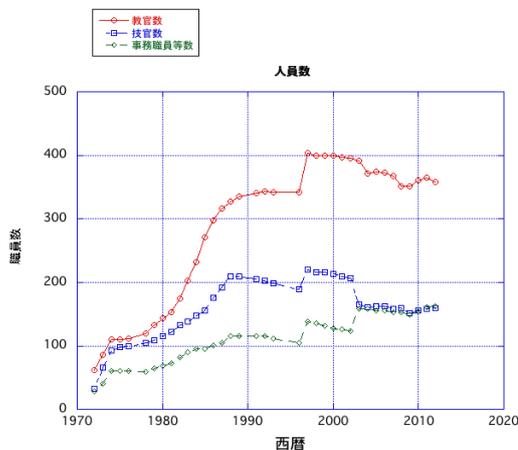


図5 KEK のスタッフの数の推移 [3]。1980 年代に飛躍的に「教官」、つまり研究者を中心としてスタッフの人数が増えている。1997 年の急増は、原子核研究所などとの合併によるもので、定員増加ではない。

5 まとめ

戦前、戦中において日本の加速器およびそれを使った研究の世界的地位は決して低いものではな

かった。ところが敗戦を経てこの分野の研究が禁止され、また加速器も破壊され、研究活動は厳しい状況に置かれた。その後日本が独立し、この分野の研究も再開された。TRISTAN 加速器は数値的な観点に立てば、電子・陽電子衝突型加速器の分野で「世界一」のエネルギー（1年ほどであったが）を実現した加速器であった。この意味で戦後のこの分野の研究者が「加速エネルギーで世界水準に追いつく」という目標を一応果たしたことになると言える。また、この建設のために増員された研究者の数は、その後の日本のこの分野の世界に占める位置の向上に重要な役割を果たすことになった。

参考文献

- [1] M. S. Livingston, *Particle Accelerators : A Brief History*, Harvard University Press, 1969.
- [2] T. Nishikawa, “KEK FUTURE PROJECT”, Proceedings of US-Japan Seminar on Accelerator Science, Tokyo and Tsukuba, 1973.
- [3] KEK Annual Report (各年) に掲載の資料より作成。