

# 1. 加速器科学の過去—黎明期—

## 1.1 コッククロフト=ウォルトン型加速器とサイクロトロン

1932年、イギリスでJ. コッククロフトとA. ウォルトンが、現在彼らの名を冠して呼ばれているタイプの加速器を建設し、それを使って、史上初めて加速器を使って原子核の変換反応を起こすことに成功しました(図1)。この型の加速器は直流高電圧で加速するため静電型加速器とも呼ばれ、類似の加速器としてはR. バンデグラーフがバンデグラーフ型と呼ばれるものを発明しています。

静電型の加速器では、高い電圧をつくるのがそのまま高いエネルギーの粒子を得ることを意味します。しかし、高電圧には放電の発生という問題があり、静電型加速器では20MV程度以上の高い加速エネルギーを得ることができません。この問題を克服するには、放電限界以下の適切な電圧を用いて何度も繰り返し加速し、結果として高いエネルギーを得る必要があります。そのためには、電磁気学の基本法則のため、直流ではなく交流の電源が必要になります。繰り返し加速を行う一つの方法は、加速される粒子を一つの(あるいは少ない数の)加速装置を多数回通過させる、というものです\*。その場合には、加速される粒子の軌道を曲げて加速装置の入り口にもどす必要があります。アメリカのE. ローレンスによって発明された「サイクロトロン」はその方式の加速器で、軌道を曲げるために大きな電磁石が使われます。この原理の加速器が初めて加速に成功したのは1931年のことです。



図1 KEKで作られたコッククロフト=ウォルトン型静電型加速器

## 1.2 日本での黎明期

日本における加速器の研究、あるいはそれを用いた原子核、素粒子物理学の研究は、おおむね

1. 理化学研究所(理研): 仁科芳雄(図1)によって牽引されたグループ
2. 大阪帝国大学: 菊池正士(図2)を中心とするグループ
3. 京都帝国大学: 台北帝国大学から京都帝大に移った荒勝文策(図3)が中心となったグループ



図1 仁科芳雄 図2 菊池正士 図3 荒勝文策

の三つの源流に遡れると考えられます。

荒勝文策(1890-1973)は、1934年、台北帝国大学でコッククロフト=ウォルトンの実験の再現に成功し、菊池正士(1902-1974)もすぐその後に同様の実験に成功しています。サイクロトロンについては、理化学研究所(理研)の仁科芳雄(1890-1951)が早くから開発を進め、アメリカ以外で最初に建設されたサイクロトロンとして、1937年に26インチのサイクロトロンを完成させ(図4)、その後60インチのサイクロトロンを建設しました。また、第二次世界大戦の敗戦までに、大阪帝国大学に26インチ、そして京都帝国大学にも完成間近の26インチサイクロトロンがありました。

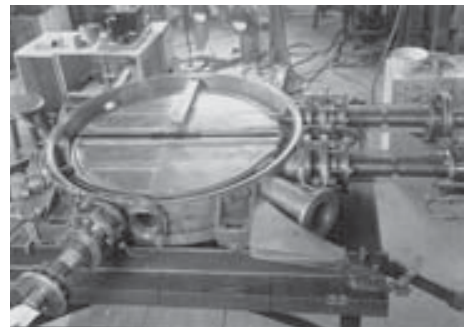


図4 理研で作られた1号サイクロトロン

## 1.3 敗戦による挫折

第二次世界大戦後の1945年の11月末、日本を占領統治した連合国最高司令官総司令部(GHQ)は理研、大阪帝国大学、京都帝国大学の3拠点にあったサイクロトロン4基を破壊・廃棄し、日本における加速器を用いた実験物理の研究を禁止しました(図1)。その結果、日本の加速器、及びそれを使った実験は欧米に比較して大きな遅れをとることになりました。



図1 東京湾に沈められた理研のサイクロトロン(LIFE誌)

## 2. 加速器科学の過去—戦後—

### 2.1 東京大学原子核研究所の開設まで

1951年5月、サイクロトロンを発明者であり、その功績でノーベル物理学賞を受賞したE.ローレンスが来日し、日本での研究再開を支持する発言をしました。これにより、日本における加速器およびそれを使った原子核研究などが再開されました。そして、理研、大阪大学、京都大学の3拠点に26インチのサイクロトロンが1基ずつ再建されました(図1)。



図1 理研再建サイクロトロンのイオン加速箱(実物)

しかし、世界に目を向けると、サイクロトロンより高いエネルギーが得られる「シンクロトロン」の原理が終戦後間もなく考案されていました。サイクロトロンでは、加速によるエネルギーの上昇に伴い、粒子は渦巻き状に段々半径が大きくなっていく軌道を描きます。これに対して、シンクロトロンではエネルギー上昇に同期させて磁場を上げていくため、軌道の半径は一定です(この「同期」が「シンクロトロン」の語源)。日本がやっとサイクロトロンを再建しているとき、世界ではこれは既に小型加速器の部類になっており、アメリカでは大型の陽子シンクロトロンがつくられ、サイクロトロンの数百倍ものエネルギーが得られる加速器が完成していました。

そこで日本は上記の3拠点に加えて、新しく東京大学原子核研究所を設立し、大阪大学から菊池正士を初代所長として招きました。日本では「原子核」という言葉には抵抗があり、この研究所の設立については地元の反対もありましたが、後にノーベル物理学賞を受賞することになる朝永振一郎も住民に対して熱心に説得にあたりました(図2および図3)。



図2 陽子加速器トンネル建設現場を視察する朝永振一郎

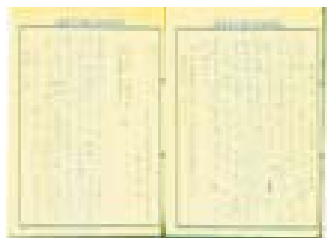


図3 田無町長に宛てた朝永振一郎の手紙

原子核研究所は東京大学の中に附置研究所として組織されましたが、東京大学にとどまらず全国のこの分野の研究者が集まる「共同利用研究所」として開設されました。このタイプの研究所としては先に京都大学の「基礎物理学研究所」があり、当時の文部省によって共同利用型の組織の設置に関する制度ができていました。また同じ頃、東北大学でも加速器建設の動きがあり、電子線形加速器が作られ、現在も使われています。

## 2. 加速器科学の過去—戦後—

### 2.2 東京大学原子核研究所

1955年、東京大学原子核研究所では三力所の再建サイクロトロンより一回り大きい60インチサイクロトロンが建設されました(図1)。原子核研究所の加速器の建設の際も、サイクロトロンではなくエネルギーをより高くできるシンクロトロンを建設しようという意見もありましたが、菊池の意見によりまずサイクロトロンの建設になったと伝えられています。もちろん、日本の研究者もエネルギーが低いサイクロトロンで満足したわけではなく、原子核研究所の中に「素粒子研究所準備室」を設置し、将来の大規模な研究所建設の構想の検討が始まっていきました。



図1 FMサイクロトロン模型(模型)

そうした中、同じシンクロトロンであっても陽子シンクロトロンに比較して技術的に取りかかりやすい電子シンクロトロンを建設しようという計画がもちあがり、電子を最終的に1.3GeVまで加速できる加速器が建設されました(図2)。このエネルギーは湯川秀樹(図3)がその存在を予言した $\pi$ 中間子を実際に人工的に作るのに十分な大きさであり、その完成は戦後の忍従の時代の記憶がぬぐえない研究者にとっては大きな励みになりました。



図2 1.3GeV電子シンクロトロン



図3 湯川秀樹

この頃から、日本の加速器を使った物理研究者の集団は「原子核研究者」と「高エネルギー研究者」のグループに次第に分岐していきます。電子シンクロトロンの実験で博士の学位論文を書いた研究者が着々と増え、その次の「素粒子研究所」(後に正式名は高エネルギー物理学研究所となる)における加速器及び測定器建設における若手職員が育っていくこととなります。

# 3. 加速器科学の 現在

KEK創設から最先端の  
加速器施設に至る道

## 3.1 KEK創設まで

電子シンクロトロンが完成したとはいえ、やはり高エネルギー物理学での本命は「陽子シンクロトロン」と考えられていました。素粒子研究所準備室での基礎研究活動の末、1971年に設立されたのが「高エネルギー物理学研究所」(KEK)です。文部省を始めとする多数の関係者の議論と努力の結果、KEKは、原子核研究所や基礎物理学研究所とは異なり、特定の大学に設置する研究所ではない設置形態(大学共同利用機関)をとることになりました。現在までにこの大学共同利用機関という形態をモデルにしていくつもの研究所が設立され、あるいは別の形態から改組されました。

高エネルギー物理学研究所の設立5年後の1976年に、12GeVのエネルギーを持つ陽子シンクロトロンが完成しました(図1)。



図1 KEKに作られた12GeV陽子シンクロトロンのメインリング

しかしこの頃、アメリカではまたしてもこれを遙かに凌ぐ200GeVの陽子シンクロトロンが、フェルミ国立加速器研究所において完成していました。この歴然とした差をなんとか縮めるべく、KEK設立の立役者の一人で、二代目所長でもあった西川哲治は、1973年に「トリスタン計画」の概要を発表し、より高いエネルギーの加速器をつくることを国内外に宣言しました。まだ陽子シンクロトロンが完成しておらず、研究上の成果も出ていない時点で、当時建設中のものの何倍も資金のかかる計画を発表したのです。このトリスタン計画では、アメリカに比較して国土が狭い日本で、固定標的型加速器ではなく、衝突型加速器を作ることによって互角に闘おうという意図が盛り込まれました。

完成当時から世界水準に比較して低いエネルギーの加速器であった12GeV陽子シンクロトロンは、それでも少しずつ成果を挙げ、ビーム強度も少しずつ上昇していきました。そしてトリスタンの建設と並行して、素粒子物理学だけでなく原子核物理学の比較的高エネルギーの反応の実験に使われるようにもなりました。この加速器の学問上の最大の功績は、運転停止の直前数年間におけるニュートリノの実験(K2K実験)を実現したことでした。ニュートリノは質量が無い素粒子としてその存在が理論的に提唱されたものです。ところが20世紀も終わろうとする頃、自然界から注がれるニュートリノを使った観測が東京大学宇宙線研究所のスーパーカミオカンデで行われ、わずかながら質量があることがわかってきていました。この観測を、12 GeV陽子シンクロトロンで作られた人工ニュートリノを用いて実証・確認したのです。一方、12 GeV陽子シンクロトロンの上流には「中段ロケット」のような役割を演ずる「ブースターリング」が設置されていました。これから取り出された500MeVの陽子ビームは、世界初のパルス状中性子、及びミュオン発生に用いられ、物質科学に新たな研究手法をもたらすと同時に、陽子線を用いたガン治療への道を拓きました。

12GeV陽子シンクロトロンは、多くの大学院生に実験参加と教育の機会を提供しました。これも大きな功績です。そこで育った大学院生たちは、その多くが博士の学位を取得し、その後のトリスタン加速器建設の若手の担い手となっていきました。

# 3. 加速器科学の 現在

KEK創設から最先端の  
加速器施設に至る道

## 3.2 トリスタンからKEKB (ケックビー) へ

1980年代の中頃、トリスタン加速器とそこで実験を行う測定器が完成しました(図1)。同種の加速器の中では一時的ではありますが「世界最高」のエネルギーを保持し、戦後の遅れを取り戻すという目的を果たしたことになります。トリスタンでは電子・陽電子の消滅反応を使い、電弱相互作用の研究、クォークやグルーオンの生成やハドロジェットの研究が精力的に行われましたが、残念ながら計画の看板であった「トップクォーク」の発見には至りませんでした(トップクォークについては、後になって、トリスタンで生成できるよりは遙かに大きい質量をもつことがわかっています)。

トリスタン計画では、加速器建設や測定装置の開発にあたってKEK、関係した大学、企業の間で多くの経験が積み、技術が国内に蓄積していきました。日本の物理学実験の歴史の中では最も大きなプロジェクトであり、参加する人員も大いに増強され、その後日本が世界におけるこの分野の中で大きな位置を占めるための組織づくりに貢献した、という面も忘れてはならないことです。

トリスタン加速器での技術や経験の蓄積の上に建設されたのが、小林-益川理論の実証を主目的とする加速器、「KEKB(ケックビー)」です(図2~3)。



図1 トリスタン加速器システム



図2 KEKB加速器



図3 KEKB内に設置されたBelle検出器

この加速器が作り出すエネルギーは、トリスタン加速器が作り出すエネルギーより低いものですが、ビームの量(蓄積している電荷の量)は極めて多く、実験で得られる素粒子反応の数において世界一をめざし、それを実現しました。これは、後にノーベル賞を獲得する重要な理論を検証することに特化したためです。図4は、ここ30年の電子・陽電子衝突型加速器の衝突性能の推移を示します。横軸は年代、縦軸は衝突性能の目安になるビーム衝突頻度で、対数目盛りという記法で書かれており、約30年でこの性能が1000倍になり、KEKBは2010年時点でなお世界トップの座にあったことがわかります。

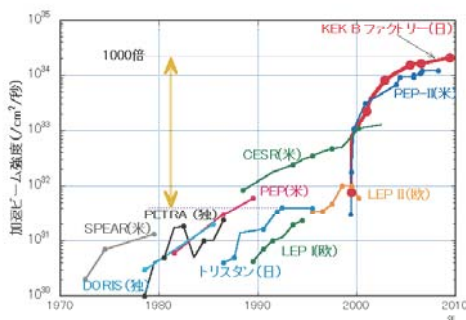


図4 電子・陽電子衝突型加速器の衝突頻度の推移

# 3. 加速器科学の 現在

KEK創設から最先端の  
加速器施設に至る道

## 3.3 大強度陽子加速器施設J-PARC

12GeV 陽子シンクロトロンは、21 世紀に入って数年後に共同利用実験を終了し、わずかな部分を残して運転を停止しました。この陽子加速器で行われていた実験を引き継ぎ、さらに大規模な施設として建設されたのが、大強度陽子加速器施設、「J-PARC」です（図1～3）。J-PARC は、KEK と日本原子力研究開発機構（計画当初は日本原子力研究所）が共同で運営するため、東海村に建設した施設です。12GeV 陽子シンクロトロンにより、世界的な成果を出したニュートリノ実験はJ-PARC にも引き継がれ（T2K 実験）、現在この分野で世界をリードする実験結果を発表しています。

J-PARC ではさらに素粒子物理学以外の分野の実験も行っています。先に触れたブースターリングからのパルス状陽子ビームによる中性子・ミュオン粒子発生技術はJ-PARC で大きく開花し、ビーム強度を格段に増したこれら粒子線を利用する施設がJ-PARC に展開しています。この施設は「物質生命科学実験施設」と呼ばれ、研究分野も拡大しています。



図1 リニアック(エネルギー 400 MeV)  
※現在 181 MeV で運転中



図2 RCSと呼ばれるシンクロトロン  
(エネルギー 3 GeV)



図3 MRと呼ばれるシンクロトロン  
(エネルギー 50 GeV) ※現在 30 GeV で運転中

# 3. 加速器科学の 現在

KEK創設から最先端の  
加速器施設に至る道

## 3.4 放射光の加速器

高いエネルギーの電子が磁場のなか円軌道を描いて運動すると「放射光」と呼ばれる広い波長範囲（赤外線からX線領域）の光が発せられます。これは加速器という「道具」の推進母体であった原子核・素粒子研究者集団にとってはエネルギー損失の原因になる厄介者でしたが、物質科学の研究者にとっては非常に「うれしい光」でした。東京大学原子核研究所の1.3GeVの電子シンクロトロンでも、そこから得られる放射光が物質科学研究者に使われていました。

1970年代、この放射光を出すことを主任務とする加速器が欲しい、という機運が物質科学の研究者の中で盛り上がりました。その結果、東京大学物性研究所の研究施設として、数百MeVのリングが1.3GeV電子シンクロトロンの近くに建設されました。これは、世界で初めて作られた放射光実験専用の加速器です。

高エネルギー物理学研究所が設置され、陽子シンクロトロンの稼働も始まった数年後の1980年代初頭、さらにエネルギーの高い放射光実験用の専用加速器を建設し、より波長の短いX線が得られるようにしたい、との要望が持ち上がり、KEK敷地内に建設されたのが「フォトンファクトリー」と名付けられた放射光専用電子貯蔵リングです（図1）。上に説明したように放射光用のリングは物性研究所に存在しましたが、GeV級のエネルギーを持つリングは日本では初めてであり、またこのころから世界中でこの種の電子加速器が作られることになりました。



図1 フォトンファクトリー

KEK以外でこの種の加速器として世界をリードしているのが、理研と高輝度光科学研究センターが兵庫県で運転・運営する大型放射光施設、「SPring-8」です（図2）。8GeVのエネルギーを誇り、非常に「細い」放射光ビームをつくる加速器として知られています。また同研究所内には「自由電子レーザー」の仕組みを使った加速器「SACLA」が2011年度末から共用運転を開始し、この分野で最先端の業績をあげています。



図2 SPring-8とSACLA

放射光は現在、生物、化学、物理など幅広い分野の研究を推進するのに必要不可欠な装置の一つになっています。さらに基礎学術研究のみならず、医療分野から材料分野にわたる産業界においても幅広く利用されており、将来的にもその利用が高まることが予想されます。

なお、当初フォトンファクトリーにビームを供給するために建設された電子線形加速器はトリスタン加速器（のちにKEKB加速器）に電子・陽電子ビームを供給する入射加速器としても使われることになりました（図3）。この電子線形加速器は世界で二番目のエネルギーを誇り、KEKB加速器やふたつの放射光加速器にビームを供給するマルチタスク加速器となっています。



図3 電子線形加速器

# 4. 加速器科学の未来

## 将来の加速器に向けて

目覚ましい成果をあげたKEKBの実績を土台に、現在KEKではこれをさらに40倍の性能をもつ「SuperKEKB」に高度化する工事を行っています(図1)。SuperKEKBは、現在の素粒子物理学の標準理論によって予言される物理現象を詳しく調べ、標準理論では説明できない新しい現象を探求することを目的にしています。

加速器を使った今後の素粒子物理学実験はさらに大規模であることが要求され、その課題を克服するため、世界の研究者が一致協力しようというコンセンサスが形成されつつあります。日本は、アメリカ、ヨーロッパと並ぶ三拠点のひとつとされており、KEKにおいては「先端加速器試験施設」(図2)、「超伝導加速器試験施設」を建設し、将来の加速器技術の開発研究にも取り組んでいます。

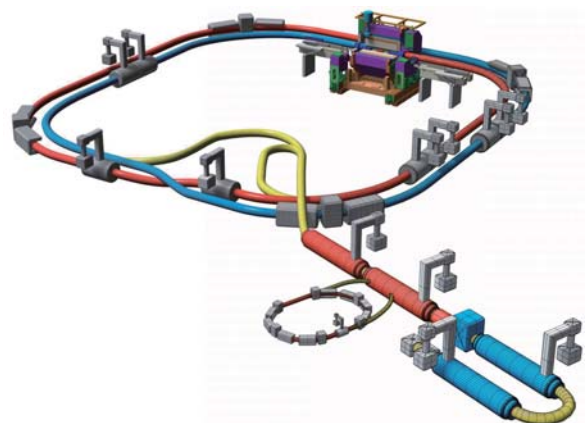


図1 SuperKEKB加速器の模式図

また、将来の放射光源候補であるエネルギー回収型線形加速器(Energy Recovery Linac = ERL)を実証する実験施設として、KEKにおいて「コンパクトERL」を立ち上げている最中です(図3)。さらに、国内の物質科学研究者の間では、3GeV程度のビームエネルギーをもつ高輝度光源リングが必要であるとの要望が高まっており、関係者間で検討が始まっています。



図2 先端加速器試験施設



図3 コンパクトERL