

## 話 題

## 私の加速器遍歴 (II)

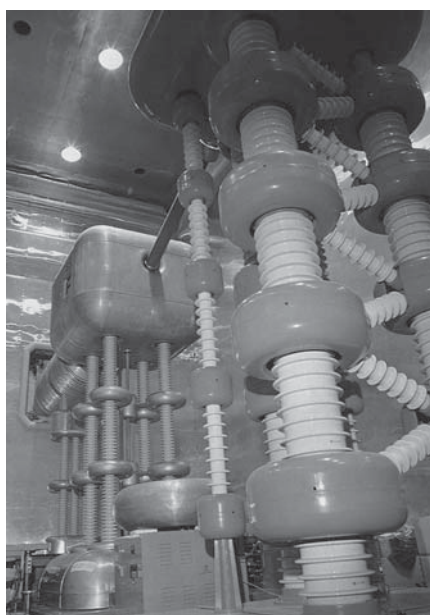
菊池 健

Wandering Accelerator throughout My Life (II)

Ken KIKUCHI

陽子シンクロトロン建設 {1}  
—前段加速器と線形加速器—

陽子シンクロトロン建設場所は将来計画も考慮して、敷地のほぼ中央に決めた。前段加速器室の建設は、文部省の一般会計で昭和45年(1970)に始まった。前段加速器には75万ボルトのコッククロフト・ワルトンが使われたが、これは核研の準備室で建設したものを移設した。地下5.5mの床面に据え付けられたコッククロフト・ワルトンの上部には陽子イオン源が置かれ、陽子イオン(後、水素マイナスイオン源に改修)はそこから直径1.5mのセラミック製加速管を通して加速され、リニアックへ入射される。このセラミック製加速管はリニアック側の壁に片持ち式で取り付けられた。重量約1トンのセラミック製加速管を片



前段加速器 (コッククロフト・ワルトン型)

持ちで支えられるか、疑問視されたが客員教授の平田賢先生(東大工学部)の知恵を借りて十分頑丈な装置が完成した。前段加速器室の内面は放電を防ぐため全面アルミニウム板が貼付けられていた。イオン源自身が高電圧であるので、そのコントロールは壁穴からの光で行われた。コッククロフト・ワルトンは最高100万ボルトを発生したが、通常75万ボルトで運転されている。前段加速器は昭和49年(1974)7月23日、陽子ビームを750 keV(強度100 mA)に加速することに成功した。

建設中には来訪者が絶えなかった。昭和47年7月19日、皇太子殿下(現天皇)が中曽根科技庁長官を伴って視察された。昭和48年2月には奥野文部大臣が来訪。朝永振一郎先生は昭和48年11月30日、湯川秀樹先生は昭和49年2月22日来所され、漸く動き出した日本の高エネルギーを激励された。私は昭和48年秋、松澤美作管理部長を伴って、世界の高エネルギー研究所—ラザ



前段加速器の付近を視察される皇太子殿下とご説明をする西川哲治氏。

フォード, CERN, ブルックヘブン, フェルミ研, アルゴン研, SLAC 一を訪問したが, 帰国後, 部長は報告会で「この高エネルギー研が 10 年前に出来ていたらなあ……」と感想を述べた。

エネルギー 20 MeV の線形加速器(リニアック)の加速空洞, 加速管は鉄の表面に厚さ 1 mm 程度の銅を電解法でメッキしたもので, 前例のないものであった。これまでのリニアックは鉄の表面に銅板を貼りつけて製作したもので, 鉄と銅では膨張係数が異なり, 温度変化などで周波数が微妙に変化するなど欠点があった。この欠点を克服するために, 準備室時代に西川氏が牧田三菱重工(名古屋)社長に会って要請し, 東大との共同研究の成果としてメッキ法が開発された。こうして製作された精密な空洞, 加速管は現場で組み上げられ, 建設は順調に進行した。包装を解かれ, 内面がまるで鏡面のようにピカピカ光る空洞の姿は圧巻であった。前段加速器の成功に続いて, 昭和 49 年(1974) 8 月 1 日, 線形加速器は陽子を 20 MeV (強度 4 mA) の加速に成功した。その後, 改良の結果, 昭和 50 年 7 月 24 日, 前段加速器ビーム 270 mA, リニアック・ビーム 95 mA を達成した。線形加速器は将来に備えて十分のスペースを取っていたので, 後に加速空洞は延長され, エネルギーも 40 MeV に増強された。

## 陽子シンクロトロンの建設 {2}

### —ブースター—

KEK シンクロトロンはカスケード方式を採用したので, ブースター・シンクロトロンの成否は陽子シンクロトロンの成功の鍵を握っていた。この方式を最初に実践したのは米国フェルミ研究所であり, KEK シンクロトロンが 2 番目であった。ブースター責任者佐々木氏は核研電子シンクロトロンの経験を生かし, 同じコンバイン・タイプの磁石 8 基を使用, 平均半径 6 m, 設計エネルギーは 500 MeV とした。

電子シンクロトロンとの大きな違いは高周波加速装置であった。線形加速器からの 20 MeV 陽子ビームの速度  $\beta$  ( $v/c$ ) は 22% 程度であるが, 500 MeV では 76% に達する。したがって高周波周波数は 3 倍以上に変化することになる。責任者近藤氏は東北金属など企業の協力を得て高周波加速装置に必要なフェライトを開発した。

ブースター, 主リングの電磁石には, 独特の方向性鉄板が使用された。これは炭素の含有量の少ない鋼板で, 溶鉱炉から取り出して板状に圧延する際, 引っ張り方向の透磁率が普通の鋼板に比べ数倍大きくなるというものである。理論的には, 昔, 茅誠司先生が予言されたとも聞いているが, これを実用化して磁石を製作した。ただ, 普通の鋼板に比べ強度が劣ることも知られていた。ブースターの電磁石は川崎製鉄(現 JFE スチール)製の厚さ 0.5 mm の方向性鉄板を使用して, 富士電機が製作した。

当時の運転モードではリニアックは時間幅 10 ~ 20 マイクロ秒の陽子ビームパルスブースターに入射する。これは空間的には長さ数百メートルのビームになるので, 直径 12 m のブースター・リングに入射すると 10 周以上蓄積出来る計算になる(マルチターン入射)。それを加速して主リングに入射するが, ブースターの繰り返しは毎秒 20 回で, そのうち 9 パルスが全周 9 倍の主リングに入射され, 加速される。残りのビームを中性子, 医学など他分野に利用することになる。主リングのビーム強度を上げるためには, マルチターン入射を効率良く行うことが必須であった。運転の初期には最初の 3 ターン程度はビームがうまく入射出来るが, その後は徐々に入射効率が悪くなり, 苦勞した。規模は違うが, 同じ問題をフェルミ研でも抱えていた。

1974 年(昭和 49 年)に入って, ブースター磁石の励磁テストが始まった。磁場を上げていくと, 熱のため磁石の両端がわずかに変形することが分かった。方向性鉄板が普通の鋼板より柔らかいという欠点による現象であった。この磁石は漏洩磁場の影響を最小にするため, 特殊な形状に加工されていた。幸い, 変形は小さく補強材で防ぐことが可能であった。ビームを入射しての運転テストは 1974 年 12 月に開始され, ビーム強度(パルス当たり 90 億個)は低かったが, 12 月 4 日, 475 MeV まで加速出来た。1 週間後, 12 日, 500 MeV (パルス当たり 400 億個)までの加速に成功した。年末, ブースター完成を祝って霞が関東海大学校友会館でささやかなパーティを開催した。その後, 昭和 50 年 5 月 ~ 7 月, ビーム強度はパルスあたり 0.2 兆個, ブースターからの取り出し効率 95% 以上を達成した。

### 陽子シンクロトロンの建設 {3} —主リング—

主リングは偏向電磁石と四極電磁石の機能分離型構造 (FODO) で、平均半径 54 m、ブースターの 9 倍に設計されている。つまり、ブースターからの 500 MeV 陽子パルス 9 個が主リングに入射され、最高エネルギーまで加速されることになる。

主リング電磁石は新日鉄製厚さ 1 mm の方向性鉄板を使用し、ラミネートして製作された。本格的製作は 1973 年から日立工場で開始された。鉄板は連続的に打ち抜いても数ヶ月を要するので、その間の温度変化を避けるため、工場内に天幕を張って恒温室をつくり、その中で打ち抜き作業が実施された。更に、溶解ロットごとに透磁率が異なるので、打ち抜かれた鉄板をシャッフルして磁石を組み上げた。

主リング磁石の据え付けは、0.01 mm の精度が要求される。昔は、円形リングに対角線状トンネルを作って測量したが、その後、トンネルの円周に沿って一定長さのワイヤーを基準に三角測量を繰り返して磁石の位置を決める方法が採用されている。KEK 主リングの場合は一周の測量で、出発点の 0.5 mm 以内に返ってくる精度であった。

主リングの建設はほぼ予定通り進捗し、1975 年 (昭和 50 年)、4 月 5 日、ブースターからのビーム取り出しに成功、同時に主リングの通電テストも開始した。10 月、中央コントロール室制御盤、主リング真空系、高周波加速装置が完成し、11 月に入ってブースターから長いビーム輸送系 (途中に主リングとブースター利用施設へビームを振り分ける装置がある) を経て主リングへの本格的入射テストが始まった。最初の 1 周には多少苦勞したが、11 月 21 日、第 1 回の入射テストに成功した。引き続き運転の努力の結果、12 月 19 日夕刻、4.2 GeV まで (遷移エネルギーの直前) の加速に成功した。その時、諏訪所長は久寿米木氏宅の物理系忘年会に出席していたが、電話を受け忘年会を中座した物理の連中とコントロール室に駆けつけた。

1976 年正月早々、前段加速器からリニアックへビームを輸送するラインの四極電磁石 7 基が焼損した。原因は電源の切り忘れであった。磁石系は即刻、メーカーの住友重機新居浜工場 (ここは

戦時中、中学生だった私が勤労働員で働いていた) へ送られ、担当の福本、石丸両氏も出張、メーカー側関係者は日夜作業し、通常なら 2 ヶ月を要すると言われた修理を 1 週間で終了した。

1976 年 2 月 16 日、主リングでの加速テストを再開したが、位相遷移エネルギーを超えるのは容易ではなかった。これは、簡単に言えば加速器が加重器に替わる点で、加速される粒子群が加速サイン波の前面から瞬間的に後面に移動するエネルギーである。この移動の瞬間、粒子群の軌道が不安定になる。近藤氏をヘッドとする RF グループの懸命の努力に拘わらず顕著な進展が見られなかったので、西川主幹は急遽、亀井、高田氏ら高周波を得意とするメンバーを投入、タスクフォースを編成し、事態の解決に当たらせた。運転責任者小島氏も高周波の専門家であったので、関係者一丸となって RF 改善に努力した。原因はいろいろあったが、一つには陽子の軌道測定センサーの位置が RF 装置に近く、RF のノイズを拾っていて正常に機能しなかったようだ。

かくして 3 月 4 日、主リングエネルギーは目標値 8 GeV に到達した。ビーム強度はパルス当たり約 2 兆個であった。私は、西川主幹からビーム加速成功を祝うためのワインとワイン・グラスを預かっていたが、遂に栓を抜く日がやってきた。3 月 17 日、ブースタービームの 9 パルス入射に成功した。この時、ビーム強度はブースターではパルス当たり 4000 億個、主リングでは 800 億個であった。更に 3 月 19 日、主リングは 10.4 GeV の加速に成功した。強度は 40 億個であった。その後、方向性鉄板が効能を発揮し、12 月 22 日、エネルギーは 11.8 GeV に達し、翌年 2 月 23 日には強度もパルス当たり 0.52 兆個に達成した。

日本がこの加速器の建設を開始した時、ある機会に集まった 4 名の外国人著名学者のうち 3 名が予定通り完成出来ないと言い、1 名だけが予定通り完成すると言ったと伝えられている。日本の研究者は公約を実現した。これは日本が高エネルギー物理実験の分野で、漸く世界の一員になった画期的な日であった。思えば、学術会議の勧告 (1962) から 14 年、苦難と歓喜が交錯する道であった。1976 年 (昭和 51 年) 4 月、完成したばかりの中実験室 (管理棟の北側にあったが、トリスタン建設の際、研究本館南に移設) で、陽子シ



陽子加速器の加速成功を祝ったパーティー。左手前の横顔が筆者。



研究所設立と陽子加速器完成記念を兼ねた式典。挨拶する諏訪繁樹所長。

シンクロトロン完成式典が挙行された。研究者に加えて、高エネルギー研設立に協力して頂いた文部省関係、企業関係者も招待したが、祝賀会などに必要な経費は企業などからの寄付で賅った。

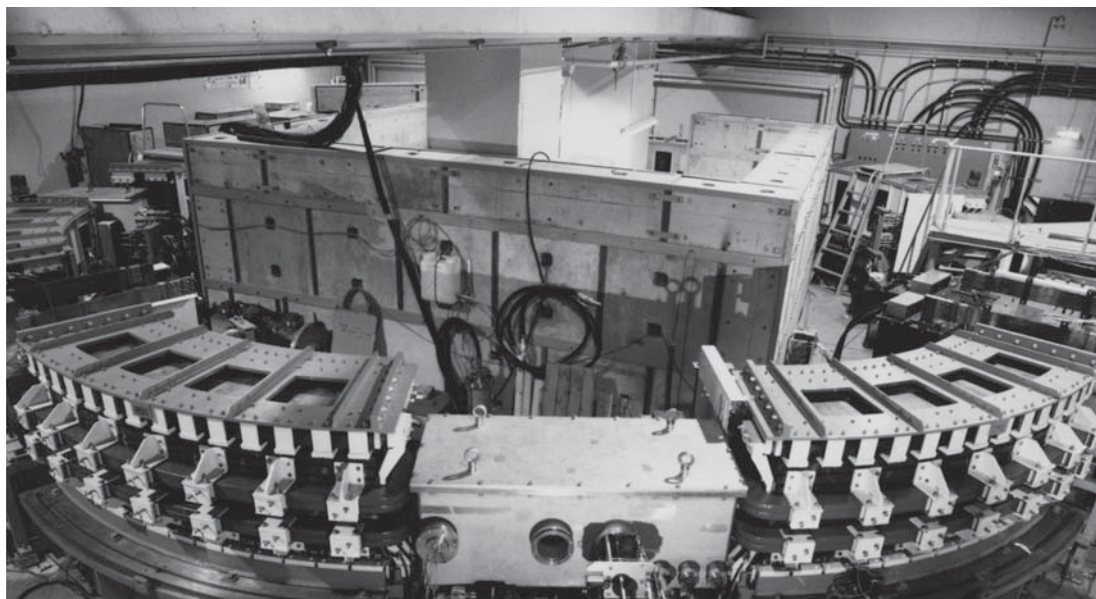
### ブースター利用施設

#### — KENS, BOOM. 医学利用施設 —

KEK シンクロトロンでは、ブースターの 500 MeV ビームを利用する研究を推進することは折り込み済みであった。研究として名乗りを上げたのは中性子を利用する物性研究、パイ中間子やミュオン粒子を利用する研究、医学利用の研究であった。これらを纏めたブースター利用施設は

1978 年発足し、ブースターの責任者佐々木氏が初代施設長となった。中性子利用の専任教授として渡辺昇氏が着任、東北大石川義和教授らと協力して建設に当たった。 $\pi$  中間子・ $\mu$  粒子施設は東大山崎敏光グループが建設した。この両施設は 25 億円をかけ、1978 年～1979 年度に亘って建設された。この施設が早くスタートすることが出来た一因は、石川氏が当時の大蔵省主計官篠澤氏(後、次官)と極めて親しい友人であったことによる。

500 MeV 陽子ビームはブースターから主リングへ輸送される途中で、主リングへ入射するビームとブースター利用施設へのビームに振り分けられる。ブースターの加速繰り返しは毎秒 20 回であり、そのうち 9 パルスが主リングへ入射される。主リングの 1 サイクルは入射に約 0.5 秒、加速に約 0.7 秒、実験を行うフラット・トップ 0.5 秒、磁場を下げてもとに戻る時間が約 0.4 秒、全体で約 2 秒を繰り返し、その間にブースターからの 40 パルスの陽子群のうち 30 パルスが利用施設へ送られる計算になる。主リングへのビーム・ラインから振り分けられた陽子パルスは約 50 m 下流で 3 方向に分けられる。上流から見て右方向が  $\pi$ 、 $\mu$  研究施設、左が医学利用研究で、まっすぐ正面に進むと中性子発生用ターゲットに当たる。ターゲットは最初タングステンなど重金属が使われて



500 MeV ブースターシンクロトロン

いたが、後にウランが使用されるようになった。ウランは核燃料物質規制の対象になっていて許可を取る手続きは厄介だった。また、ウランターゲット製作はウランを閉じ込める技術が確立しているアルゴン研究所に依頼せざるを得なかった。ターゲットに当たるビームはパルスであるから、発生する中性子もパルス中性子である。これまで中性子源は原子炉からの中性子で連続ビームであったが、KEKの中性子源は世界最初のパルス中性子源となった。名付けてKENS (KEK - Neutron - Source) ということになった。その後、ラザフォード研などで強力なパルス中性子源が出来たが、KENSはこの分野で先駆的役割を果たした。

$\pi$ 中間子・ $\mu$ 粒子施設は東大山崎、永嶺氏らによって建設された。これまでも $\mu$ 粒子を利用する研究はカナダ、スイスなど所謂ジャイアント・サイクロで行われていたが、それらは連続ビームを使っていた。果たしてパルスビームで実験が出来るかと疑う声もあった。しかし、山崎氏は、パルスビームが起こす現象の時間経過を、次のパルスまでの静かな時間を利用して観測することで、新天地を開拓した。この施設はブースターと

ミュオンの頭文字をとってBOOMと名付けられ、東大の施設となった。ブースター利用施設の完成を記念して、1980年9月13日、東大久保亮五教授の記念講演が行われた。東大グループは、その後、カナダのTRIUMFにおいても同様な研究を続けた。TRIUMFの超伝導ミュオン・チャンネルは東大グループが建設したが、1988年12月8日、完成式典が実験室で行われ、参列者、職員が実験室を取り巻く2階廊下まで所狭しと立っていた。Vogt所長に続いて、高エネルギー研兼日本代表として私が祝辞を述べ、ミュオン物理に着目した山崎グループの先見性を賞賛した。式典に先立って、上村東大教授がミュオン物理の将来について記念講演した。

医学利用の研究は筑波大学医学部によって進められた。すでに諸外国で加速器を利用したがんの治療例はあったが、この施設は本格的な専用施設として世界初と言ってよい。1980年10月、筑波大学粒子線医科学センターとなったが、現在、がん治療は筑波大シンクロトロンで実施され、同大病院の一部となっている。

(次号へ続く)

#### お詫びと訂正

「加速器」第10巻第1号に掲載された「私の加速器遍歴(I)」に年号の誤りがありました。お詫びとともに訂正いたします。

4 ページ右段 下から4行目  
誤) 昭和31年1月から 正) 昭和33年1月から