

## 特集 (日本の加速器の歴史)

## INS-ES から KEK-PS の誕生 (II)

木村 嘉孝\*

Looking-Back on the Development of High Energy Accelerators in Japan  
—From the INS-ES Construction to the Birth of KEK-PS (II)—

Yoshitaka KIMURA\*

## 1. はじめに

東京大学原子核研究所の電子シンクロトロン (INS-ES) が完成したのは 1961 年であり, 高エネルギー物理学研究所の設立ならびに陽子シンクロトロン (KEK-PS) の建設が始まるのが 1971 年である. 本稿では, この間の素粒子研究計画の展開について, 加速器に関係したところを中心にまとめてみた.

この十年間については, 関係した人それぞれの立場により「殆どが無益な体制論議に費やされたしまった」から「まだまだ発展途上にあった日本の経済状況のなかで, ともかくも大型加速器の建設に道が開けたことでよしとすべし」まで様々な評価がありうるであろう. いろいろな問題が, いろいろな場所で, いろいろな具合に議論されたという印象で, なかなか筋道を立てて整理することは難しい. かなり乱暴に分けると, 「どのような加速器が適切か?」, 「加速器を建設し, それを共同利用に供する研究所の設置形態と体制・組織は?」, 「素粒子, 原子核, 宇宙線をはじめいろいろな分野の研究計画のバランスや相互関係は?」あたりが, 大きなテーマになっていたように思う.

以下では, 先ず経緯について概略を述べ, 続いて KEK-PS とそこに至るまでに建設の候補にあがった加速器について紹介する. なお, 参考にした資料・報告のうち代表的なものをあげておく<sup>1)</sup>.

## 2. 経緯

1958-1963: 大型の高エネルギー加速器計画について具体的な検討が始まるきっかけとなったのは, 1958 年 5 月, 日本学術会議の原子核特別委員会 (核特委) における菊池東京大学原子核研究所長の提案

「INS-ES の次の段階としての日本の高エネルギー核物理研究計画」であったとされる. これ以降, 核特委では将来計画が重要な議題としてとりあげられることとなり, 高エネルギー関係の研究者を中心に具体的な計画の立案作業が進められた.

次節に示すように, 幾つかの可能性が比較検討された結果, 1960 年頃に 12 GeV 大強度陽子シンクロトロン (平均ビーム電流  $0.1 \mu\text{A}$  以上) の案がまとまり, その建設に向けて, 1962 年の 5 月には学術会議会長から政府に「原子核研究将来計画の実現について」という勧告が出された. この計画には素粒子研究のための新研究所 (素粒子研究所, 略して素研と呼ばれることになる) の設立 (総額約 320 億円) が含まれており, それは高エネルギー研究部 (12 GeV 陽子シンクロトロンとそれによる実験研究), 超高エネルギー研究部 (宇宙線研究), 開発研究部 (素粒子の基礎研究と装置開発) で構成するというような内容であった.

これを受けて文部省では, 大学学術局長の諮問機関である研究所協議会で新研究所に関する検討が始まり, 1963 年 7 月に, 1964 年度から着手すべき事項として, 宇宙線観測の充実, 低エネルギー核物理研究のための原子核研究所関西支所の設置 (後の大阪大学核物理研究センター) とともに, 大型加速器の基礎研究の実施ならびに大型研究施設と関連した新しい国立共同利用研究所の体制についての報告がまとめられた.

1964-1967: この報告に対応するように, 1964 年には東大核研に巨大加速器の基礎研究のための予算として 1 億円が計上された. これ以後 KEK-PS 誕生まで素研関連の予算が毎年計上されることになるが, それを KEK-PS の建設予算と共に表 1 にまとめておく. この予算を受けて, 核特委のもとに素研準備調査委員

\* 高エネルギー加速器研究機構 KEK  
(E-mail: yoshitaka.kimura@kek.jp)

表1 大型陽子加速器の開発ならびに建設予算の推移

開発・準備期間(億円)		建設期間(億円)	
1964	1.0	1970	2.4
1965	2.5	1971	14.0
1966	3.0	1972	33.3
1967	5.0	1973	24.5
1968	2.5	1974	23.1
1969	1.8		

会(SJC)が組織され、準備調査の作業が始まった(委員長:朝永, 加速器責任者:熊谷, 測定器責任者:三浦)。しかし実際の作業は、同時に東大核研に設置された素研準備室で行われ、そこが加速器や測定器をはじめとする様々な開発研究を受け持った。このやり方は、フォーマルには予算も定員も東大核研に執行責任がありながら、実際の運営には核特委の下部組織であるSJCが当たるといふ、いささか変則的なものであった。

この素研準備室での作業のなかで、加速器に関する検討が精力的に行われ、4節で説明するように、1964年から1965年にかけて、12 GeV大強度陽子シンクロトロン計画は、40 GeV陽子シンクロトロン計画(総額約270億円)へと変更された。また1965年8月にはSJCの改組があった(委員長:早川, 加速器責任者:諏訪, 測定器責任者:三浦)。

新しい加速器計画の策定、それに伴う素研準備室での開発研究の進展を受けて、1966年から1967年にかけては、素研設立の機運が大いに高まった。実際1967年には、それまでの巨大加速器の基礎研究に、建設準備研究のための予算が加わり総額5億円が計上された。また、1961年頃から高エネルギーの研究者を中心に始まっていた素研の建設用地の調査も、建設準備予算がついたことで急速に進んだ。当初は全国で80箇所程上がっていた候補地が最終的には筑波と黒磯の2箇所に絞られ、さらにこれらの詳細な検討結果として、SJCは、筑波・大穂町の敷地を素研建設の第一候補地に決定した。主な選定理由は、土地入手の可能性、交通の便、文化的環境整備の見通し、などであった。

1968:多くの研究者の期待にもかかわらず、この年も素研計画はスタートできなかった。これから高エネルギー物理学研究所の発足に至るまでの3年間は状況が次々と目まぐるしく変化し、その度ごとに一喜一憂したことが思い出される。素研計画が暗礁に乗り上げた理由としては、新研究所の体制・組織に関する研

究者間の意見の不一致などもあったが、結局は、いよいよというところで政府としても、当時の財政状況では300億円近い計画について他分野の研究者の理解を得ることが難しいという判断になったのであろう。

ところが1968年の11月、学術審議会第12回総会において素研計画の4分の1縮小案が突如として浮上し、これで新しい素研計画案がつくられるのであれば、総会はそれを承認するという事になった\*1。そこで同審議会は、急遽、専門小委員会を設け\*2、そこに新しい計画案の作成を付託した。そしてこの小委員会が1ヶ月程でまとめたのが、縮小する場合の具体案としての「8 GeV程度の陽子シンクロトロン、建設費約80億円(5ヵ年)」という構想である。このような数字が早々と出てきたところをみると、一部では内々に縮小案の可能性が検討されていたのかも知れない\*3。

なお、第12回総会には、学術審議会のもとの学術研究体制特別委員会(主査名から小谷委員会と呼ばれた)から、素研の体制について、文部省直轄の国立研究所とするという最終案が報告されている。

1969:この年はまさしく混乱の一年であった。文部省サイドでは前年の学術審議会の結論をもとに縮小案による素研設立に向けての検討が着々と進む一方、研究者グループは、体制も含めて、そもそもこのような

\*1 本総会の議事要旨の骨子メモから関連部分をあげておく。

「全体の予算規模を4分の1の75億円に縮小し、それなりに独自の意義を持つものとして5年程度で完成する。これの完成後については、世界における大加速器の技術、方式の進展状況、わが国における学術振興策の全体的見通し等を勘案する必要があるので、クエスチョンマークとしておくが、将来の発展の可能性のあるものとしておく、という案が提示され、こうした案を一案として早急に専門的検討を行い、練り直した案がまとまり、それを総会で承認するときは、昭和45年度から加速器の建設に着手し素粒子研究所を設立する方針を決める。なおこの場合昭和44年度の予算には、この新しい計画のための準備調査費的なものが必要になる」

\*2 専門小委員会のメンバーは次の各氏であった。

主査:伏見康治, 専門委員:菊池正士, 熊谷寛夫, 諏訪繁樹, 武田暁, 西川哲治, 早川幸男, 三浦功, 三宅静雄

\*3 伝えられるところでは、この総会で縮小案を提案したのは伏見康治氏ということになっている。高エネルギー物理学研究所の創設十周年記念に発行された「十年の歩み」の中で同氏は、この縮小案について、「勿論単なる思い付きではなく、事前に高エネルギー関係の方々との話し合いの中で一つの可能性として考えていたものである」と述べておられる。

案を受け入れるべきかどうか、最後まですっきりとはまとまらなかった。この間、4月の核特委委員の総辞職、9月の暫定委員による暫定核特委の発足など紛糾を極めた結果、12月には新しい核特委がスタートしたが、議論は収束せず、結論は年を越すことになってしまった。

これとは対照的に学術審議会の方は、8月の第15回総会で、素研を早急に発足させるために「学術振興に関する当面の基本的な施策について」を文部大臣に答申し、1970年度の準備予算を含め総額約80億円の大規模加速器計画に実質的なGOサインを出したのである。

1970：研究者サイドの議論に結論が出たのは3月～4月にかけてであった。最も紛糾していたのは、宇宙線グループによる超高エネルギー研究を素研の中でどのように位置付けるかであったが、最後には宇宙線研究は素研から分離し、別の研究所として独立することを目指すということで決着した（後に東大宇宙線研究所として実現した）。

このようなことが行われている一方で、1970年の4月には、一般会計に素粒子研究の施設整備等に必要経費（素研創設準備調査、加速器のモデル試作、実験室等一部施設の建設等）が計上され、素研準備室のメンバーを中心に実質的には加速器の建設が始まった（実際、新研究所設立直前の1970年度末には、前段加速器室、加速器実験室、加速器準備室、変電室などが完成していた）。また8月には宇宙線の分離とも関連して、新研究所の名称を、それまでの「素粒子研究所」ではなく「高エネルギー物理学研究所」とすることが決まった。

このようにして高エネルギー物理学研究所は文部省直轄の国立大学共同利用研究所として1971年4月に設立の運びとなったのである。初代は諏訪所長、西川加速器研究系主幹、安見物理研究系主幹、三浦共通研究系主幹、松澤管理部長という陣容であった。

### 3. 12 GeV 大強度陽子シンクロトロン計画

上に述べたように大型の陽子加速器計画は、1958年頃から核特委を中心に検討が始まっている。それは1960～61年頃に、12 GeVの大強度陽子シンクロトロンということで一応の結論に達した。検討の詳しい記録は見当たらないが、他にはラジアル型のFFAGや陽子リニアック等が候補として組上にあがったようである。いずれも大強度の加速器である。完成後の施設でどのような物理の研究ができるかに加え、既存の加速器をエネルギーと強度で2次元プロットしたグ

ラフで、技術と予算のレベルを勘案しつつも、どこかの方向でこのプロットの最前線に出るべきだという議論があったことも大強度へ向かう大きな要因となった。直接の関係はないが、40年後のJ-PARCでも、計画の説明に同様のグラフを使っている。

陽子リニアック計画については熊谷等による報告があり<sup>2)</sup>、第1期に2 GeV、30  $\mu$ Aのリニアックを120億円で建設し、第2期にそれを10 GeVに拡張、更に第3期では10+10 GeVのp-p コライダーに進むという内容である。このクラスでは、LANLの800 MeV陽子リニアックが建設されたのが1968～72年であり、1960年当時、2 GeVのリニアックでは技術的なリスクが大き過ぎるという判断になってもやむを得なかったであろう。

一方、将来計画として推進することとなった12 GeV大強度陽子シンクロトロンについては、北垣による1961年の高エネルギー加速器国際会議での報告などによって概要を知ることが出来る<sup>2,3)</sup>。提案された加速器の主要パラメータを表2に示す。まず設計ビーム強度の平均電流2  $\mu$ Aは相当に高い目標である。当時完成から2年程のBNL-AGSとCERN-CPSの平均電流はまだ0.02～0.03  $\mu$ A程度であった。こういう状況から、核特委でまとめられた際には目標電流は0.1  $\mu$ A以上という書きぶりになっている。因みに現在のKEK-PSの平均電流は約0.7  $\mu$ Aである。ま

表2 12 GeV 大強度陽子シンクロトロンの主要パラメータ

シンクロトロン・リング (コンバインド・ファンクション型)	
最高ビームエネルギー	12 GeV
繰り返し	16 Hz
ビーム電流 (平均)	2 $\mu$ A
平均軌道半径	66.11 m
電磁石配列	FOFODODO×32 セル
n 値	142
ベータトロン・チューン	6.2
最高磁場 (中心軌道)	1.1 T
入射磁場 (中心軌道)	0.0265 T
RF 加速周波数	7.26～23.11 MHz
ハーモニック数	32
RF 加速電圧 (ピーク)	1.03 MV
入射リニアック (ドリフトチューブ型)	
ビームエネルギー	50 MeV
ビーム電流 (ピーク)	10 mA
ビームパルス幅	35 $\mu$ sec

た加速器仕様のなかでは、高周波加速電圧が、16 Hz という早い繰り返しのために際立った数値となっている。ピーク電圧で約 1 MV である。同じく BNL-AGS や CERN-CPS では高々 100~200 kV であったので、当時としては相当な技術的困難を予想させたと思われる。なおこの時期のリングの設計には、まだ長直線部という考え方は導入されていない。また将来は 12 GeV リングの後に、平均半径 1 km の 250~300 GeV シンクロトロン（フェルミ研究所のメインリングや CERN の SPS と同じ規模）を建設することが接続計画として提案されている。

#### 4. 40 GeV 陽子シンクロトロン計画

1964 年に東大核研に素研準備室が設置され、専任スタッフによる精力的な開発研究が始まった。そのなかで加速器の機種についても再検討が行われた。それまでの 12 GeV 大強度陽子シンクロトロンに加え、20~40 GeV の遅い繰り返しのシンクロトロンや、60 GeV のカスケード方式のシンクロトロン等が比較されたようである。その結果、技術開発の要素が多い、残留放射能や放射線遮蔽の問題など放射線関連でも未知の部分が多い、磁場のフラット・トップが短くカウンター実験に不便を来すなどの理由で、早い繰り返し、平均電流数  $\mu\text{A}$  の 12 GeV 計画は退けられることとなり、40 GeV で遅い繰り返しの陽子シンクロトロンが、改めて推進計画案として採用されることとなった。この頃になると、早く実験に取り掛かって欧米（AGS や CPS では実験が盛況を極めていた）と肩を並べたいという意識が強く、機種選定に当たっても、開発要素が少なく、確実に早く建設でき、実験のやり易い装置ということに重点が置かれた。40 GeV のシンクロトロンは、33 GeV の AGS と比較しエネルギーの違いは大きくないが、入射器のエネルギーを上げてビーム強度を大きくする、長直線部を導入してビームの取り出しを容易にする、などによって実験上は遥かに利用度の高いものにすることができるといった判断であった。

この 40 GeV 陽子シンクロトロン計画は、結局のところ 1968 年に頓挫するわけであるが、それまでの約 4 年間にはかなりの予算とマンパワーが開発研究に投入された。この、実を結ぶことがなかった準備研究については、外部にとかくの批判もあったようである。しかしこの間に、まさに高エネルギー加速器に関する基盤技術や設計手法がほぼ確立されたわけで、KEK-PS の成功はその延長線上にあるといってもよいであろう。

表 3 40 GeV 陽子シンクロトロンの主要パラメーター

シンクロトロン・リング (コンバインド・ファンクション型)	
最高ビームエネルギー	42 GeV
繰り返し	0.5 Hz
ビーム電流 (平均)	0.1 $\mu\text{A}$
平均軌道半径	201.76 m
長直線部 (コリズ型)	10.99 m $\times$ 8
セル数	32 セル I, 32 セル II
電磁石配列 (セル)	FOFODO
n 値	406
ベータトロン・チューン	10.25
最高磁場 (中心軌道)	1.2 T
入射磁場 (中心軌道)	0.0139 T
RF 加速周波数	4.00~8.51 MHz
ハーモニック数	36
RF 加速電圧 (ピーク)	420 kV
入射リニアック (ドリフトチューブ型)	
ビームエネルギー	125 MeV
ビーム電流 (ピーク)	100 mA
ビームパルス幅	100 $\mu\text{sec}$

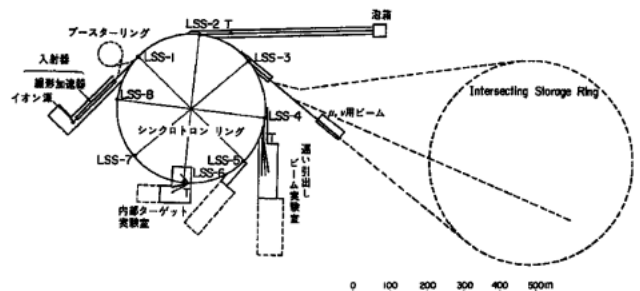


図 1 40 GeV 陽子シンクロトロンの配置

この 40 GeV 加速器のデザインも、開発期間中に詳細ではいろいろ変わっているが、ほぼ最終案に近いものの主要パラメーターを表 3 にまとめておく<sup>4)</sup>。また加速器の配置案を図 1 に示す。図 2 はスーパーピリオド内の磁石配列、図 3 は AG 集束型モデル電磁石の写真である。このデザインで特徴的なのは、8 箇所約 11 m の長直線部が挿入されていることである。現在では軌道設計用の計算機コードが開発され、いろいろなタイプのインサクションを工夫できるが、この時はマッチングが容易であるという理由でコリズ・ストレイト・セクションが採用された。また主要な加速器システムのいくつかについて、異なる方式の間の比較検討が行われた。即ち、リングの電磁石システムについて、コンバインド・ファンクション方式とセパレーテ

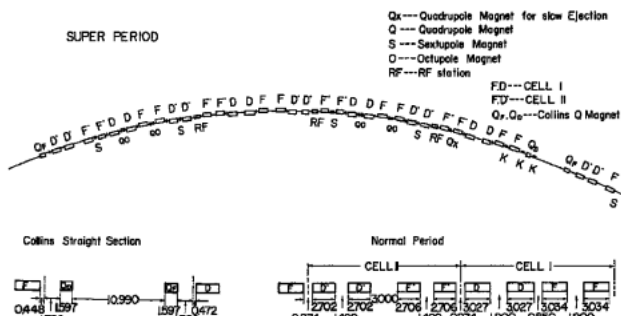


図2 40 GeV 陽子シンクロトロン・スーパーピリオドの磁石配列

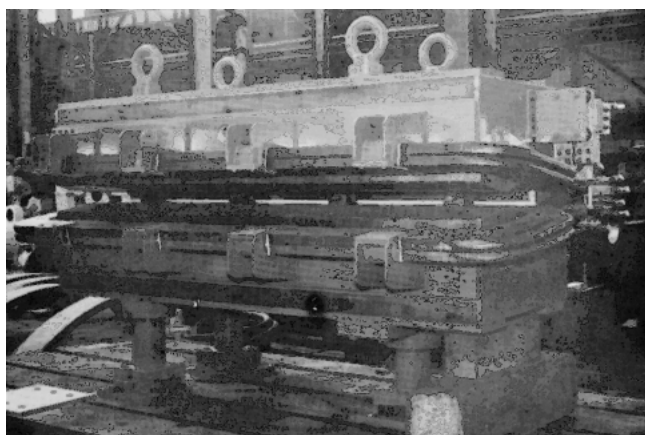


図3 40 GeV 陽子シンクロトロンのAG集束型モデル電磁石

ッド・ファンクション方式、電磁石電源について、回転機による発電方式と送電線からの直接取り込み・整流方式、入射システムについて、リニアックからの直接入射方式と間にブースターを挿むカスケード方式などである。結論としては、コスト、マンパワー、それまでの技術開発の流れなどの観点からと思われるが、いずれもより保守的な前者の方のシステムを採用することとしている。興味深いのは、その後2年ほどでスタートしたKEK-PSでは、これらすべてが後者の方式になったことである。

なお、この間に開発された加速器技術で、KEK-PSにそのまま受け継がれたもののなかには、電磁石用の磁気特性に優れた方向性鋼板、RF加速空洞に用いる周波数変調のための高透磁率・低損失フェライトとその冷却法、光沢メッキ法で製作された加速タンクなどドリフトチューブ型リニアックの諸要素、デュオプラズマトロン型イオン源、750 kV コッククロフト型高電圧発生装置などがある。

表4 KEK-PS 計画の建設スケジュール、人員、予算

71-07-05

建設年次計画		46年度	47年度	48年度	49年度	50年度	51年度	52年度	53年度
0. 全体管理									29.07 入設
1. 前射加速	設計製作 → 製作 → 設置								6
2. リニアック空洞	製作 → 搬送								6
3. 40 GeV 高周波	設計製作 → 搬送								9
4. プラズマ電磁石	設計 → 製作 → 設置調整								6
5. 主リニアック電磁石	設計 → 製作 → 搬送調整								6
6. 主リニアック電源	設計 → 製作 → 調整								4
7. 高周波	設計製作 → 搬送調整								6
8. 真空	設計製作 → 搬送調整								5
9. 制御	設計製作 → 搬送調整								6
10. ビームパイプ	設計 → 設計製作 → 調整								5

建設予算 (概略)

入射器	10億円	主リニアック電磁石	10億円
ブースター	900	主リニアック電源	1,120
電磁石電源	560	高周波	190
真空		真空	160
制御		制御	200
		ビームパイプ	223

### 5. KEK-PS 計画

1968 年末に素研計画は、学術審議会の議論によって、計画規模を4分の1に縮小せざるを得なくなった。これをうけて、1969~1970 年には素研準備室を中心に、8~10 GeV での新しい加速器計画の検討が精力的に進められ、ようやく KEK-PS 計画の策定に至った。1971 年 4 月の高エネルギー物理学研究所発足後、7 月 5 日に、最初の加速器研究系の打ち合わせ(加速器部会と呼んでいた)が開かれているが、表4は、その際の西川主幹による計画説明の中で配られた資料のコピーである。建設スケジュールとともに、スタッフの予定数や各パートの建設予算が示されている。

KEK-PS は現在も稼働中であり、その詳細は既によく知られている。ここでは参考のために建設時の主要パラメータを表5にまとめておく<sup>5)</sup>。公式のビームエネルギーは 8 GeV としているが、当初から最高磁場には余裕を持たせ、電源の増強で容易に 12 GeV に到達できる設計になっていた。最終の加速器設計案をまとめたのは、西川主幹を中心とする建設グループであるが、このような内容に落ち着く迄には、いろいろな部分でクリティカルな選択を行った。大小取り混ぜて、筆者の記憶に残っているものをいくつか拾ってみる。

一番大きな選択は、500 MeV ブースターを挿むカ

表 5 KEK-PS の主要パラメーター

主リング (セパレーテッド・ファンクション型)	
最高ビームエネルギー	8(12) GeV
繰り返し	0.5 Hz
ビーム強度	$2 \times 10^{12}$ ( $8 \times 10^{12}$ ) ppp
平均軌道半径	54 m
スーパーピリオド数	4
セル数	20 ノーマルセル, 8 長直線部セル
電磁石配列 (セル)	FODO
ベータトロン・チューン	7.25
最高磁場	1.26(1.75) T
入射磁場	0.148 T
RF 加速周波数	6.03~7.92 MHz
ハーモニック数	9
RF 加速電圧 (ピーク)	60(120) kV
ブースター (コンバインド・ファンクション型)	
最高ビームエネルギー	500 MeV
繰り返し	20 Hz
ビーム強度	$6 \times 10^{11}$ ( $2 \times 10^{12}$ ) ppp
平均軌道半径	6 m
電磁石配列	FDDFO × 8 セル
n 値	12.09
ベータトロン・チューン	2.25
最高磁場 (中心軌道)	1.09 T
入射磁場 (中心軌道)	0.197 T
RF 加速周波数	1.62~6.03 MHz
ハーモニック数	1
RF 加速電圧 (ピーク)	16(30) kV
入射リニアック (ドリフトチューブ型)	
ビームエネルギー	20(40) MeV
ビーム電流 (ピーク)	100(20) mA ( $H^-$ に変更後 18 mA)
ビームパルス幅	20(5) $\mu$ sec ( $H^-$ に変更後 40 $\mu$ sec)
前段加速器	750 kV コッククロフト-ワルトン型

(括弧内は後に達成された数値)

スケード方式の採用であろう。この議論については 1971 年に詳しい報告が出ている<sup>6)</sup>。リニアックからの直接入射方式などと比較した結果は図 4 のようであった。A のケースを選択したわけであるが、欧米の加速器のように主リング・マグネットの口径を大きくしておいて (B' のケース)、後にブースターを加える方が最終的なビーム強度は大きくできる。しかしその場合には、今日まで様々の重要な成果を生み出し、また J-PARC 建設の原動力の一つともなった、ブースター利用施設の実現は難しかったであろう。いずれにしても、このエネルギー規模の加速器でカスケード方式を採ったことは、当時としては大英断であった。

次の大きな選択は、主リングの電磁石システムをセ

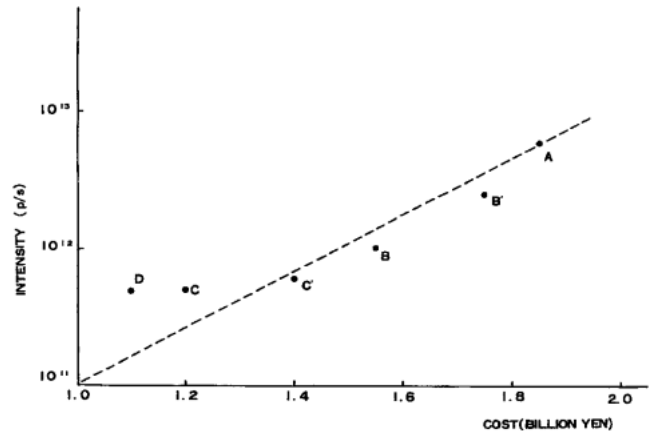


図 4 KEK-PS のいろいろな入射方式案の比較 (A : 20 MeV リニアック + 500 MeV ブースター, B, B' : 50 MeV リニアック, C, C' : 2 MeV, 4 MeV バンデグラーフ + 500 MeV ブースター, D : 20 MeV リニアック, 但し主リング偏向磁石の磁極間隙は 5.6 cm, B' のみ 8 cm)

パレーテッド・ファンクション方式にしたことである。今であれば特別に取り上げるほどのことではないが、それまで何年にもわたり素研準備室でコンバインド・ファンクション方式の電磁石を開発してきた経緯と、それまでこの方式で稼動するシンクロトロンが世界に存在しなかったことなどを考えると、これも英断といつてよいであろう<sup>4)</sup>。

既に施設の建設に入っていたにもかかわらず土壇場で変更を行ったのは主リングのラティス構成である。最終的な形は図 5 の通りであるが、当初の設計では長直線部が、 $Q_F$  の後と、すぐ次の  $Q_D$  の後の B を夫々取り去ってつくる構造であった (図 2 のように 40 GeV 計画でも  $Q_D$  の後ろに長直線部が配置されている)。ところが 1972 年の 2~3 月にかけて L. C. Teng が KEK にやってきて、薄いレンズ近似ではあったが、殆ど手計算で主リングラティスの設計をやり直した<sup>7)</sup>。そのなかで、全体としてはパラメーターに大きな変化はなかったものの、長直線部は図 5 のように  $Q_F$  と次の  $Q_F$  (ベータトロン振動の位相でほぼ  $90^\circ$  離れている) の後の B を抜いてつくりなさいということになった。これはキッカーとセプタム磁石を夫々  $Q_F$

<sup>4)</sup> セパレーテッド・ファンクションの原理は、1953 年に北垣氏によって提案されたものであるが、磁場変化の大きい偏向磁石と集束磁石を、高精度でトラックさせる必要があるシンクロトロンでは実現していなかった。KEK-PS より少し前、1969 年に建設の始まったフェルミ研究所 (当時は NAL) の 500 GeV メインリングに始めて採用された。

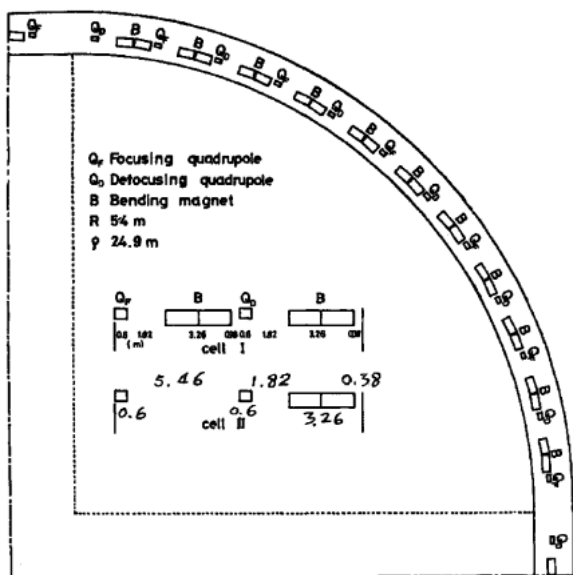


図5 KEK-PS スーパーピリオドの磁石配列

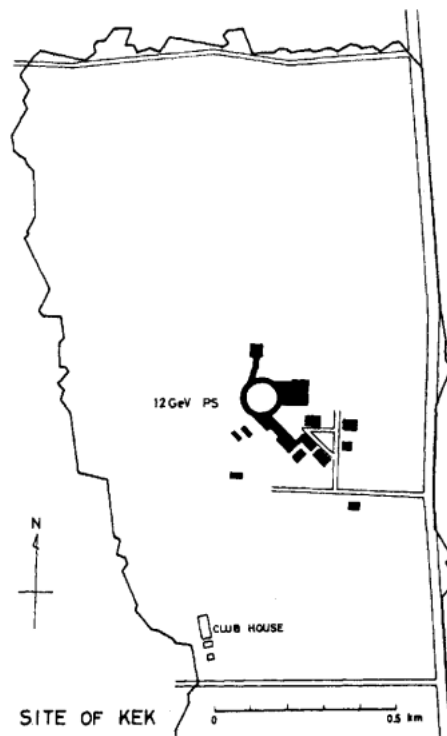


図6 高エネルギー物理学研究所の敷地と KEK-PS 施設の配置

の後に配置してビーム取り出しを楽にしようという考えである。既にトンネルが旧設計で建設にかかっていたので、新しいデザインのリング形状とトンネルの形が少しばかりずれることになった。

主リングの偏向電磁石を C 型にするか H 型にするかも問題になった。磁場性能の面では H 型の方が有利であるが、サジッタを小さくし口径を節約するために、2 台のコアを、角度を付けて並べ、コイルを 2 台まとめて巻くという構造や、真空ダクトの作業が容易である、などの理由で C 型になった。

主リングの電磁石電源では、大電力半導体素子の進歩や、後々のメンテナンス作業の差、当時建設中のフェルミ研究所の加速器で既に採用されていたことなどから、それまでの回転機による発電方式ではなく、送電線からの直接取り込み・整流方式が採用された。もっとも完成後暫くは、本電源の影響による AC ラインの揺れや混入雑音に悩まされることにもなった。

ビームパラメータで多少議論があったのは 500 MeV ブースターのベータatron・チューン ( $\nu$  値) である。当初は 1.75 に選ばれていたが、それではトランジション・エネルギーが取り出しエネルギーに近過ぎ、ブースター・パンチと主リングの RF バケットのシンクロナイゼーションが難しくなるという理由で、2.25 に変更された。1.75 に選ばれた理由の一つは、偏極陽子ビームの加速を考えると、陽子の異常磁気回転比が 1.7928 であるので、 $\nu_V$  をこれ以下しておけば、強いイントリニック・レゾナンスが避けられるということであった。後日、このリングで偏極陽子

ビームの加速に成功しているが、建設当時は誰も考えていなかった断熱通過による完全なスピン・フリップという方法でレゾナンスによる減偏極を回避した。

既に述べたように KEK-PS は、実質的には 1970 年から施設の建設が始まった。図 6 は研究所の敷地に KEK-PS 施設を入れたものである。広いスペースの何処に本施設を置くかは、後にどのような大型施設がつけられるかに関連して結構難しい問題であったと思うが、実際は、周囲への放射線の影響なども考え、単純にほぼ中心辺りが選ばれただけのようなのである。

加速器の建設は順調に進み、1974 年 8 月に 20 MeV リニアック、12 月に 500 MeV ブースターでビーム加速試験に成功した。それから丁度 1 年後の 1975 年 12 月には主リングが完成、ビーム入射試験に入った。ビームの入射と加速には殆ど時間が掛からなかったが、トランジション・エネルギーを越えて加速することには相当梃子摺った。結局 8 GeV までの加速試験は年明けの 3 月までずれ込んだ。もっとも、どこかに重大な問題があったというわけではない。主リング RF 加速システムの低レベル系は、ビーム・フィードバックで働く仕掛けになっており、当初はビームも弱く、またビームモニターを含む回路系も雑音に対して十分強くはなかったので、フィードバック系の

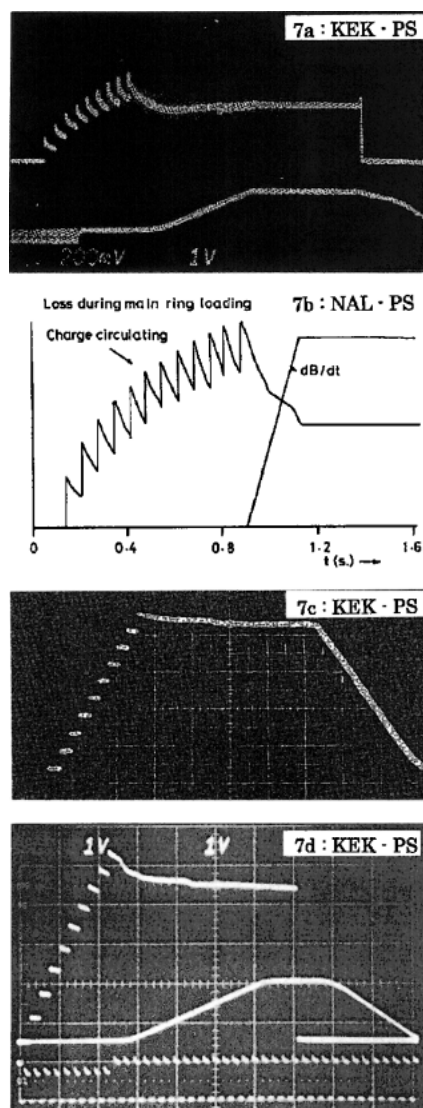


図7 KEK-PS 主リングへのビーム入射と加速 (a: 完成当初, b: フェルミ研究所主リングの完成当初, c: ブースターのビーム強度を絞った場合, d: KEK-PS で最高強度  $8 \times 10^{12}$  ppp を記録)

ゲイン調整が非常に微妙になっていただけである。運転を続けて行くうちに、ビームも少しずつ強くなり、また回路系も整備された結果、かなりのビームロスに伴いながらも、トランジションを通過できるようになった。システムの制御にビーム信号を直接利用するような装置は、当初はできるだけシンプルな構成にしておくのが良いということである。

当初は、ブースターから主リングへのビーム・トランスファーにおいて、ブースターのビーム・バンチを主リングの RF バケットにうまくシンクロサイズさせることができるかどうかを心配していた。結果的には、このプロセス自体は何とかなったが、ブースターからの 9 バンチを主リングで積み上げ、加速する途

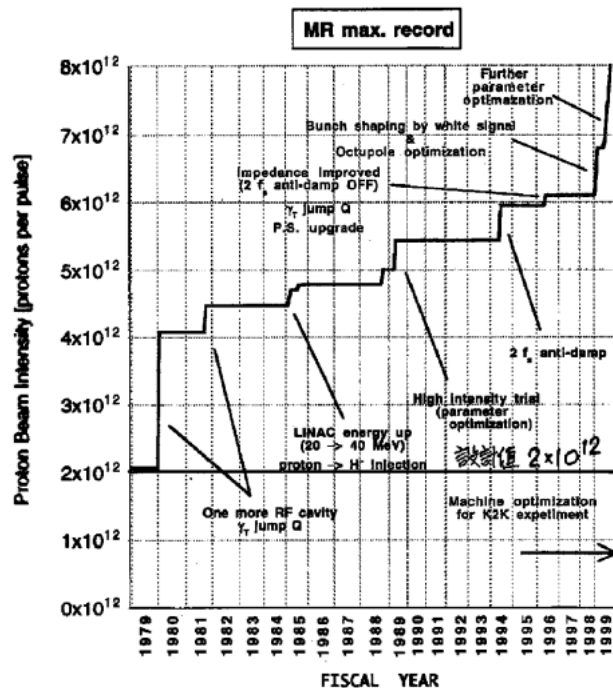


図8 KEK-PS におけるビーム強度改善記録

中ではいろいろなメカニズムでビームが失われた (図 7a)。興味深かったのは、同じカスケード方式のフェルミ研究所の加速器も、当初は同様な問題で困っていたことである (図 7b)。KEK-PS では、この問題は今なお完全には解決されていない (図 7d)。ブースターのビーム強度を絞ると主リングでのビームロスはかなり小さくなるので (図 7c)、両リングでのインテンシティー効果を十分には制御できていないということであろう。

図 8 は主リングで、ビーム強度が当初目標値の  $2 \times 10^{12}$  ppp を達成した後、その約 4 倍に到達するまでのプロセスを示したものである。KEK-PS の性能改善が、いかに長い時間と様々な努力によって進められてきたかが良く分かり、加速器は成長する実験装置であるということが如実に示されている。

## 6. おわりに

紙数の関係からも本特集では、KEK-PS のコミッションの様子や、また長い年月をかけてビーム性能の改善がどのように行われたかについて、詳しく述べることはできなかった。本年 (2005 年) の末にはこの加速器は完全にシャットダウンされることになっている。この機会に KEK-PS に関する記録を整理し、報告書の形にして後に残しておくことが望まれる。



KEK-PS を契機に高エネルギー物理学研究所が、大型研究施設を有する最初の文部省直轄・大学共同利用機関として設立されたわけであるが、本加速器は、ビッグサイエンスとしての基礎研究施設、またそれを活用する制度としての共同利用研究ということでは、まさに先兵の役割を十分に果たしたといえてよい。また教訓とすべきは、完成後約 25 年近くにもなろうかという時期に、K2K 長基線ニュートリノ実験が行われ、世界の注目を集めるマシンになったことである。このような大型装置では、いつ何時とんでもなく面白い研究が出てこないとも限らない。これは効率最優先の短期的評価制度に対する警鐘といえるであろう。

最後に、今や高エネルギー加速器による研究の非常に重要な部分が、宇宙物理と深く関わってきていることは多くの研究者の認めるところである。そこで、1960 年代の素研計画のそもそもの議論に立ち返って、嘗ては袂を分かつことになってしまった宇宙線の研究と、加速器による素粒子研究を融合することの可能性、具体的には東大宇宙線研究所と高エネルギー加速器研究機構、について今一度考えてみる必要が出てきているように思う。

## 参考文献

- 1) 「高エネルギー物理学研究所，創設の経緯等に関する資料—昭和 56 年 7 月」（高エネルギー加速器研究機構・史料室）  
日本物理学会誌，**21**, p. 11, 1966 「素粒子研究所の建設計画」  
日本物理学会誌，**22**, p. 641, 1967 「素研計画特集号」  
日本物理学会誌，**27**, p. 249, 1972 「特集—高エネルギー物理学研究所発足にあたって」
- 2) 加速器を中心とした高エネルギー物理学総合研究班—Design Study Group 報告  
Part II Proton Linac 1960–9–20  
Part III 12 BeV 大強度プロトンシンクロトロンと接続将来計画 1960–9–20
- 3) T. Kitagaki: Proceedings of the International Conference on High Energy Accelerators 1961, 65
- 4) 素粒子研究所準備研究総合報告（昭和 39 年～昭和 43 年）—40 GeV 陽子シンクロトロン—  
昭和 44 年 8 月 東京大学原子核研究所・素粒子研究所準備室
- 5) T. Nishikawa: Proceedings of IXth International Conference on High Energy Accelerators 1974, 23  
T. Suzuki: KEK-74-4
- 6) T. Kamei et al.: KEK-REPORT-1 (1971)