

## 特集 (日本の加速器の歴史)

## INS-ES から KEK-PS の誕生 (I)

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 (I)

Yoshitaka KIMURA\*

## 1. はじめに

日本の高エネルギー加速器計画を、素粒子実験のための主要施設に限って年代順にあげると、INS-ES (1961), KEK-PS (1976), TRISTAN (1986), KEKB (1999), J-PARC (2007)ということになる<sup>\*1</sup>。括弧内は完成又は完成予定年である。今回、本誌編集担当からの依頼は、「日本の加速器の歴史」特集の一環として、このうちの初期の頃について書くようにとのことである。筆者は、KEK-PS以降はこれらの計画に建設グループ或いはマネージメントの立場で深く関わった。しかしそれより前は、専ら加速器を利用して物理実験を行う側に居たので、加速器計画そのものについての知識は甚だ限られたものである。従って内容には誤りや見落としが避けられないと思う。お気づきの方には是非ご指摘をお願いしたい。

そこで、まずはINS-ES計画から始めることにな

るわけであるが、日本の高エネルギー加速器<sup>\*2</sup>ということでは、その前に、1953年の東大強収斂電子シンクロトロン計画についてふれておかなければならない<sup>\*3</sup>。同時期には東北大学でも高エネルギー加速器に関する研究・開発が進められていた。歴史的な重要性では、こちらの方についても記録を整理し、残しておくことが望まれる。なお、これら一連の高エネルギー加速器計画を回顧・紹介した文献としては、西川による「素粒子実験と加速器—戦後の日本を中心に」がある(日本物理学会誌・日本物理学会50周年記念特集企画)<sup>1)</sup>。

## 2. 東大強収斂電子シンクロトロン計画

第二次大戦後、日本で逸早く高エネルギー加速器の研究に取り組んでいたのは、東京大学理学部物理学教室の宮本研究室である。そこでは高エネルギー物理学のための加速器を目標に、新しい加速方法の研究が精力的に進められていた。丁度その頃(1952)米国から、E. D. Courant達が提案した強集束の原理に関する情報が伝わり、是非この原理を実証するための装置を同グループで建設しようということになったようである<sup>\*4</sup>。そこで、それまでのシンクロトロンをはじめ

\*1 加速器の日本語名称 (所属機関)

INS-ES: 電子シンクロトロン (東京大学原子核研究所)

KEK-PS: 陽子シンクロトロン (高エネルギー物理学研究所)

TRISTAN: 電子・陽電子衝突ビーム加速器・トリスタン (高エネルギー物理学研究所)

KEKB: 非対称エネルギー電子・陽電子衝突ビーム加速器・Bファクトリー (高エネルギー物理学研究所)

J-PARC: 大強度陽子加速器 (高エネルギー加速器研究機構・日本原子力研究所)

\*2 加速器分類上の高エネルギー加速器の範囲は、加速器による素粒子研究が始まる1950年頃はパイ中間子を生成できるエネルギーの装置、また近年はビームエネルギーが凡そ1 GeV程度以上のものになっているようである。

\*3 最近では、“focusing”に「集束」を充てているが、以前は「収斂」であった。「東大強収斂電子シンクロトロン」は固有名詞として扱うので、そのままとした。

\*4 強集束の原理が実機で最初に証明されたのは、1954年のCornell大学の実験で、300 MeVの弱集束電子シンクロトロンに電磁石磁極を強集束の条件になるよう変更して行われた。Cornell大学に続いて建設された強集束電子シンクロトロンのうち比較的早かったものとしては、1959年完成のBonn大学の500 MeVの装置などがあげられる。

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

とする加速器に関する研究の蓄積をベースに、計画の立案と提案が短時日のうちに行われた。これが東大強収電子シンクロトン計画であり、その設計・建設は、早くも翌1953年に文部省の機関研究費によりスタートしている。建設費は2千万円であった(1953-57)。なお本計画の詳細については、同研究室から総合報告が出ている(1961)<sup>2)</sup>。

表1はシンクロトンの主要パラメーター(設計値)である。また、本計画を知る加速器研究者は、現在ではごく少数と思われるので、設備の配置、リング構成、同写真、主電磁石断面を図1-1~4に示しておく(総合報告から転載)。これらの資料を見てまず気付くのは、設計エネルギーがパイ中間子光発生(1)の閾値の上

に設定されていること、配置図には制動輻射による $\gamma$ 線を使う実験室が見られることである。これらから、本計画の目的はあくまでも加速器技術の開発としているものの、完成後には日本最初のパイ中間子発生実験も可能であったことが窺える。

建設開始から4年後の1957年に装置が一通り完成し、ビーム入射と加速の試験が始まった。電子銃からのビームを6 MeVまでベータトロン加速し、その後シンクロトンに切り替え加速するという大変複雑な入射システムであったが、ほぼ順調に30 MeVまでの加速に成功している(最高エネルギーはこの時点での主電磁石電源の容量で制限された)。本格的な加速実験は、170 MeV対応の電磁石電源が完成した1959年以降である。結論から先に述べると、この実験・研究は1960年代の中頃まで続けられたが、入射から加速途中にかけてのビームロス(2)を完全には克服できず、最高到達エネルギーは140 MeVあたりであったようである。原因は、加速中にビームのベータトロン振動数が大きく変化し、幾つかの致命的なベータトロン共鳴を横切ることになったためである。これは基本的には主電磁石システムの問題であり、設計上、強集束原理の有用性を最大限に示そうとして、集束のための磁場勾配(n値)を大きくとり過ぎていたのも一因と考えられる。実際、磁極間隙が狭くなる場所での飽和効果(3)がかなり大きくなる等、磁場分布の不斉要因の影響を完全には補正しきれなかったようである。これは、計算機を使って磁石やビーム軌道の設計が正確に行える(4)現在では考えられないことかも知れない。

表1 東大強収電子シンクロトンの主要パラメーター(設計値)

最大エネルギー	170 MeV
平均軌道半径	930 mm
軌道曲率半径	780 mm
n 値 ( $n_D = -n_F$ )	9.75
電磁石配置	FODO×7 ユニット
最大磁場(中心軌道上)	0.7 T
繰り返し	1 Hz (170 MeV), 10 Hz (60 MeV)
入射(電子銃)	60 kV
ベータトロン加速	6 MeV まで (300 V/ターン)
高周波加速	155 MHz
ビーム強度	$10^8$ 電子/パルス

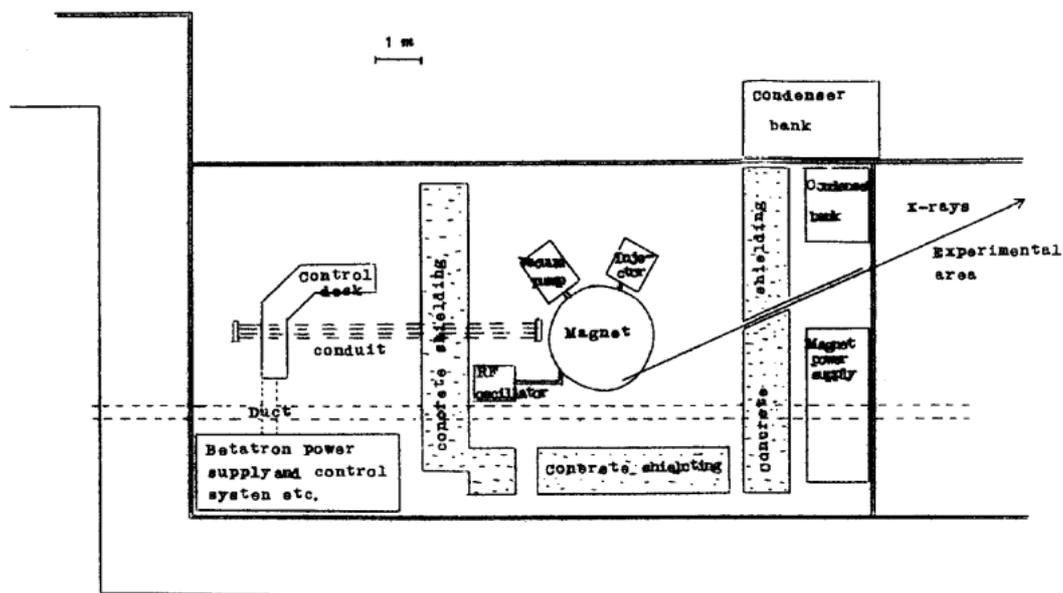


図1-1 東大強収電子シンクロトンの設備配置

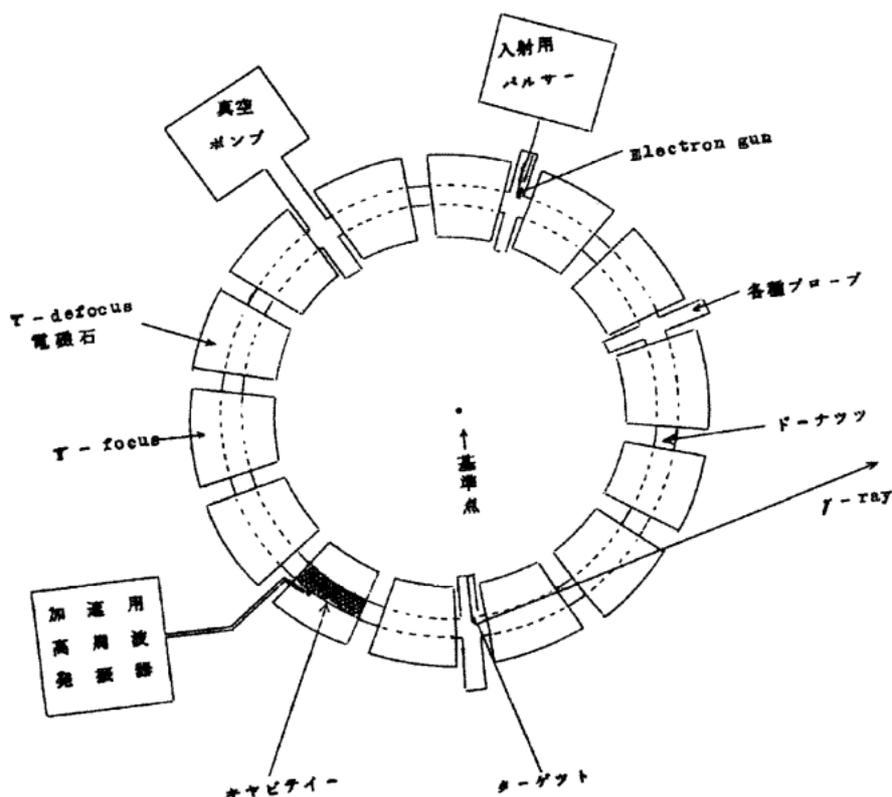


図1-2 東大強収斂電子シンクロトロンリング構成

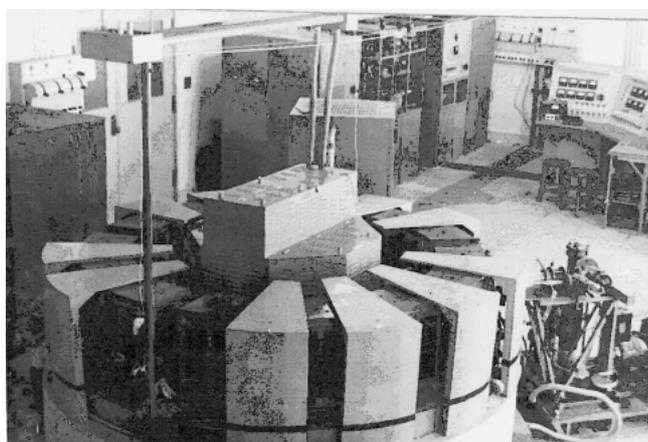


図1-3 東大強収斂電子シンクロトロン電磁石配列

一方加速器研究という観点では、強集束シンクロトロン装置の要素技術が一通り開発されたことや、ベータトロン振動など加速器内のビームの振る舞いを観測する様々な手法が確立されたことなどを、この計画の先駆的な成果としてあげることができる。また、グループの一員であった大河によるFFAGの原理の発見も、この装置の設計研究から生まれた大きな成果である。人材的にもこのグループは、後にINS-ESで

重要な役割を果たすことになる小林、冨家等の高エネルギー加速器研究者を輩出した。このように東大強収斂電子シンクロトロン計画は、残念ながら当初の目標を完全には達成できなかったものの、なお日本の高エネルギー加速器研究に多くのものを残したといっよいであろう。

### 3. INS-ES 計画

日本で最初の高エネルギー加速器となる東京大学原子核研究所(INS)の1.3 GeV電子シンクロトロンは、1956年6月に建設が始まり、1961年12月に当初の設計エネルギー750 MeVまでのビーム加速に成功した。建設費は2億5千万円(1956-59)であった。INSの創立が1955年の7月であり、その後わずか1年で建設に取り掛かれたということは、相当早い時期から加速器計画の内容自体は固まっていたものと思われる。しかしどのような経過でこの計画がつけられ、また関連分野の研究者の承認を得るに至ったかについては、筆者は正確な知識を持ち合わせていない。手元にある資料によると<sup>3)</sup>、かなり早い時期に日本における高エネルギー加速器の建設についてふれたものとしては、1953年5月の、日本学術会議会長から内閣総理大臣にあてた「原子核研究所設置勧告書及び設立趣

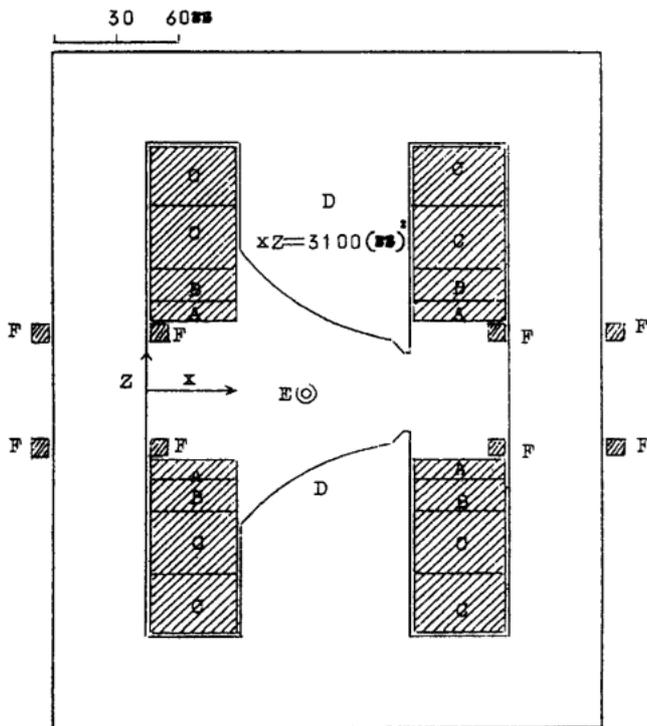


図 1-4 東大強収斂電子シンクロトロンの主電磁石断面 (A: 直流バイアスコイル, B, C: コイル, D: ヨークと磁極, E: 中心軌道, F: ベータatron加速コイル)

意書」があげられる。このなかの「具体的構想」の部分には、「現在の加速装置で達しうる最高エネルギーは  $10^9$  eV 程度であるが、我国で直ちにこの程度の加速装置の建設にかかることは経費があまりにかさみ、現在の経済状態より見てかなり問題である。技術的にも多少の冒険である。まづ  $10^7$  eV 程度のシンクロサイクロトロンを作り、その範囲の原子核物理学の基礎を充分に作る」と書かれている。これには註が付けられており、このシンクロサイクロトロンの必要性が述べられた後に、「他方  $10^9$  eV 程度の加速装置についての準備的研究を開始し、なるべく近い将来にそれが実現できるように努力する」という記述があり、更にその後には、上記の  $10^9$  eV 程度の加速器建設の経済的問題を繰り返しながらも、「而して最近提案された Livingston の方法はこの点に関して我々に光明を与えるものがある。また最近の Linear accelerator の発展も非常に注目値する。従って将来の研究如何によっては我国においても  $10^9$  eV 程度の加速装置を作り得る可能性もあろう」と付け加えられている。この設立趣意書の原案作成が、原子核特別委員会と物理学研究連絡委員会・小委員会の中での専門的討議による、とされているところなどから判断すると、当時の関連分

野の研究者の間では、強集束の原理によれば、GeV 級の加速器でもそれまでの弱集束型からの予測よりは遙かに小額の経費で建設できそうであり、この際早急に GeV 級の強集束シンクロトロンを実現すべしという考えが大勢を占めていたと思われる。また、この註書きの最後にわざわざリニアックの可能性についてもふれられているのは、研究者の中に、リニアック建設を強く主張したグループも存在したことを示している。

GeV 級のシンクロトロンの場合、早く欧米の研究計画と肩を並べるためには陽子シンクロトロンが望ましいという点では異論がなかったと思われる。しかし結局最終的には 1 GeV 程度の電子シンクロトロンから取り掛かることでまとまった。この選択の要因としては、主に、獲得可能な建設予算の規模（数億円程度？）と、加速器技術上の難度に対する配慮があげられる。特に加速器については、論文が発表されて数年、かつ BNL や CERN など欧米でもまだ建設途中であった強集束シンクロトロンについて、なお未知の問題発生を危惧する研究者も少なくなく、技術的により易しい方を選ぶということになったのであろう。実際十何年か後、KEK-PS の建設時に遭遇した様々な問題のことを考えると、たとえ予算的に可能であったとしても、欧米の加速器研究施設との交流が殆どなかった当時、陽子シンクロトロンに取り組んでいたら大苦戦は免れなかったと思われる。世界的な事例からも、高エネルギー加速器のような大きなプロジェクトでは、一度失敗するとそれを取り返して次のステップに進むことは非常に難しく、そういう点でも INS-ES の選択は日本の高エネルギー物理学にとって大変大きな意味を持っていたといえる。

上記のように、INS-ES 計画が持ち上がった時、東大強収斂電子シンクロトロンは既に建設中であった。研究組織（大学の研究室と共同利用研究所）や予算規模の違いはあるものの、同じ形式の装置を建設対象にしていたわけであるから、両計画は互いに何らかの影響を及ぼしあったと想像されるが、当時の詳しい状況についてはよく分からない。加速器技術上、東大計画が先端性を重視した多少際どいパラメーター設定になっていたのに対し、INS-ES の設計では、入射器としての強力なりニアックの導入等、何よりも高エネルギー物理学実験のための確実に働く装置ということに重点が置かれていたことは間違いない。しかし、INS-ES の建設中に東大ではシンクロトロンの試験運転が始まり、なかなか設計通りの性能が出せないという状況の中で、INS-ES についても、とにかく全ては加速器がきちんと動くかどうかを見てからという雰囲気

が方々にあったように思われる。INS-ES での高エネルギー物理学実験に向けた取り組みが、加速器の完成間近になってからと相当に遅れたのは、こういう事情も影響していたのではなかろうか。

INS-ES の主要パラメーターを表 2 に示す。当時 0.3~1 GeV あたりの電子シンクロトロンは世界で既に 10 台余が稼動していたが、強集束型の電子シンクロトロンに限ると、INS-ES は、Cornell 大学、Bonn 大学、Stockholm 王立研究所のものと並んで最初期のグループに属する。図 2-1~5 は建物と装置配置（加速器完成時）、シンクロトロン・リング全景、入射リニアック（建設中）、中央制御室、主電磁石断面である（INS Annual Report より転載）<sup>4)</sup>。当時加速器の放射線シールドとしては、図 2-1、2 に見られるようにリングの周りにコンクリートシールドが積まれていた。しかし後にビーム強度が上がると周辺地域の放射線レベルが許容値を超えるようになり、リングの天井部分や建物の外側にもシールドが追加された。当初のビーム強度予測がかなり低目に設定されていたとはいえ、当時放射線安全のための研究体制の整備はなお不十分で、安全対策も後手に回ることが多かったように思う。

入射リニアックの建設は順調に進み、1961 年 2 月には早々と 6.5 MeV、50 mA のビーム加速に成功した。一方リングの方は、制御系の整備などで多少遅

れ、同年 11 月からビーム・コミッショニングに入っている。たまたま筆者はこの作業をごく間近で見ることになったが、相当に梃子摺ったという印象が残って

表 2 INS-ES 主要パラメーター

基本性能	
最大エネルギー	750 MeV (1.3 GeV)
周長	3478 cm
繰り返し	21.5 Hz
ビーム強度	10 <sup>11</sup> 電子/秒 (2.3×10 <sup>12</sup> 電子/秒)
電磁石	
軌道曲率半径	400 cm
n 値 (n <sub>D</sub> = -n <sub>F</sub> )	14.8
電磁石配置	DFDO×8 ユニット
最大磁場 (中心軌道上)	0.625 T (1.08 T)
高周波加速	
加速周波数 (h=16)	138.15 MHz
加速電圧	20 kV (75 kV)
入射リニアック	
エネルギー	6 MeV (15 MeV)
ピーク電流	100 mA (150 mA)
パルス幅	1.4 マイクロ秒
マイクロ波周波数	2758 MHz
マイクロ波出力	3 MW (7 MW)

(括弧内は後年の増強計画によって達成された数値)

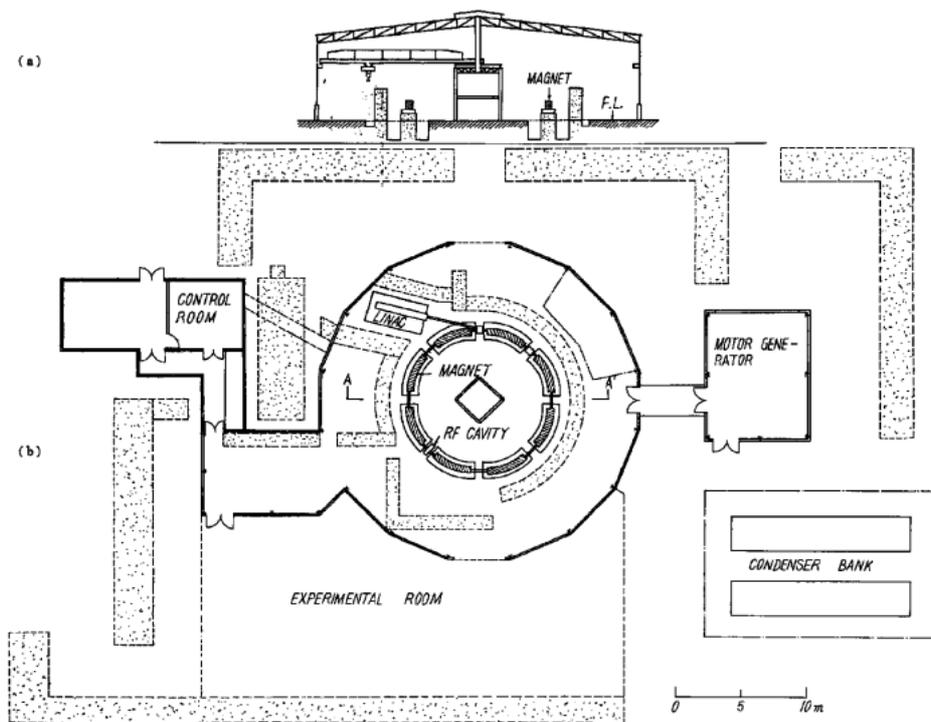


図 2-1 INS-ES の建物と設備配置

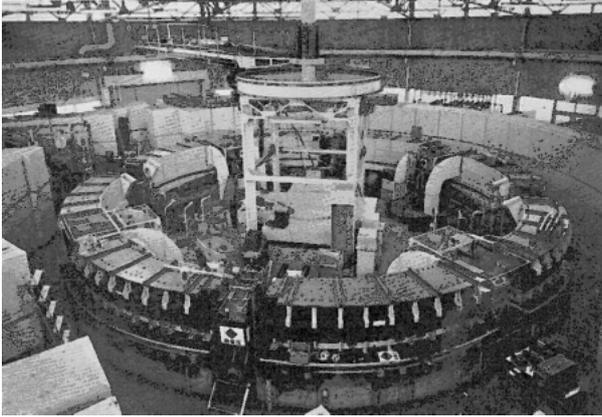


図 2-2 INS-ES のリング全景

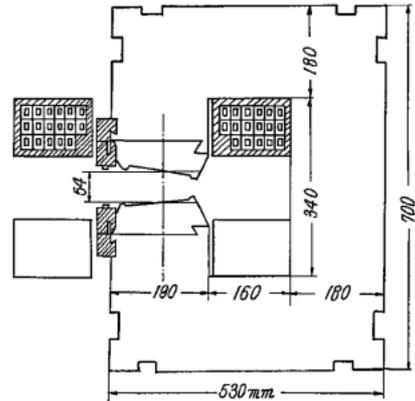


図 2-5 INS-ES の主電磁石断面

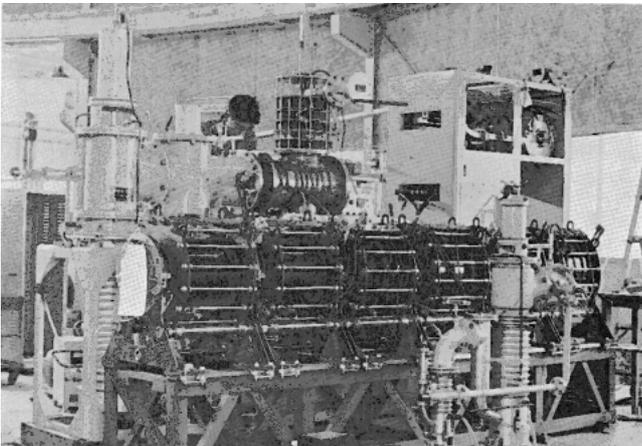


図 2-3 INS-ES の入射リニアック

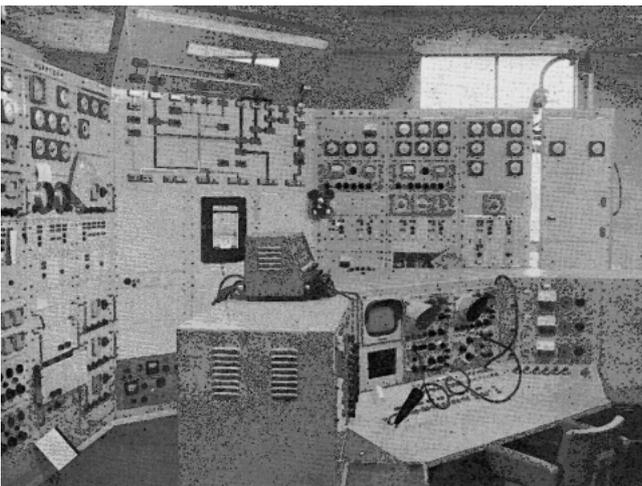


図 2-4 INS-ES の中央制御室

いる<sup>\*5</sup>。入射ビームを1ターンさせるところまでは割合早く辿り着けたと思うが、それから先がなかなか進まなかった。結局ビームの入射・加速に成功するまで

にはさらに約1ヶ月を要した。後から考えると、入射磁場が54 Gaussとかなり低く、CODが予想以上に大きただけであり、ステアリングコイルを使って軌道補正をすればよかったわけである。しかし実際には、ビームが回らない原因としていろいろと難しい理由を考える人が次々と現れ、それらを一つ一つ検証するために相当の時間が費やされた。またビーム位置モニタが整備されていなかったため、ステアリングの調整が、ビームロスを見ながらあらゆる組み合わせを試すようなことになり、なかなか正しい設定に行き着けなかった。加えて、当初は正弦波励磁される主電磁石のバイアス直流電源が用意できず、ビームを磁場が最も急速に時間変化するあたりで入射しなければならなかったが、これも入射の調整を難しくした要因になっていたと思われる。

1961年11月にビーム入射試験に入り、ようやく100ターン近くまで続くビームロスが観測されたのは12月14日であった。翌15日には更に700 MeVまでの加速に成功し、大騒ぎとなった。ただこの100ターン成功で、1ヶ月近くに及ぶ悪戦苦闘の中、一部に出かけていた加速器自身に何か大きな問題があるのではないかという疑念が払拭され、一気に展望が開けたように思う。図3-1~2に100ターンした時の制御室の喜びの表情と、翌日700 MeVまでの加速に成功した直後の乾杯の様子を示す<sup>\*6</sup>。その後加速器は順調

<sup>\*5</sup> 当時筆者は東大物理学教室・西川研究室の大学院学生であり、INS-ESを使ったパイ中間子光発生の実験のためにシンチレーションカウンタの製作をしていた。たまたまそのシンチレーションカウンタがビームロス・モニタとしてシンクロトロンでのビーム試験に利用されることとなり、夜は殆ど毎日原子核研究所に出掛けていた。

<sup>\*6</sup> 奥野英城氏提供



図 3-1 INS-ES のコミッションングで初めて入射後 100 ターンまでのビームが観測された直後の制御室 (熊谷, 佐々木, 馬場, 山口, 山川の各氏と筆者)



図 3-2 INS-ES のコミッションングで初めて 700 MeV までのビーム加速に成功した後の乾杯 (右から 亀井, 石井, 山田, 堀越, 村田, 佐々木, 田中, 山口, 山川, 馬場の各氏)

に立ち上がり, 短時日のうちにビームエネルギーと強度の当初目標 (表 2) を達成, ほぼ 1 年後の 1963 年からは共同利用実験に供された。

なお INS-ES は, 1961 年末の完成から 1999 年 6 月にシャットダウンされるまでに幾つかの大きな改良・増強を施され, その性能を飛躍的に伸ばした。主なものとしては, 1966 年の主電磁石電源への直流バイアス電源の組み込みと RF の増強によるビームエネルギーの 750 MeV から 1.3 GeV への拡張, 1968 年の 3 次共鳴を利用した電子ビームの遅い取り出し, 1974 年の入射リニアックの更新 (6 MeV から 15 MeV へ) とそれによる ES ビーム強度の大幅増加などがあげられる。

この INS-ES 計画が, 日本における高エネルギー加速器と高エネルギー物理学の研究を推進する基盤かつ原動力となったのは改めて述べるまでもないことである。特に加速器については, ES 建設に加わった研究者の多くが, 後の KEK-PS の建設においても中心的な役割を担い, また電磁石, RF, 真空など, 加速器技術の面でも ES での経験が, PS 成功のためには不可欠であった。ここでは特に, ES の入射リニアックについて注目しておきたい。日本にはそれまでも民間会社等で電子リニアックの製作経験はあったようであるが, Stanford 大学などよその装置を参考にしたものが多かったのではなかろうか。それらに対し, 西川, 田中等に代表される入射リニアックの建設グループは, 加速管を始めとする装置の主要素をビームダイナミクスに基づいて独自に設計し, また建設にあたっては, 電鋳法による加速管の製作など装置の高性能化に向けた新しい手法を開発した。本文冒頭に示したように, その後日本には新しい高エネルギー加速器が相次いで建設された。それらの入射器には高性能の電子又は陽子のリニアックが用いられているが, その建設を担当したのは, いずれもこの ES リニアックのメンバーを中心に, つくられ, また広がって行った研究グループである。加速器の世界でよく使われる “No accelerator is better than its injector.” という言葉に従えば, 今日, 日本の高エネルギー加速器が世界で高い評価を勝ち得るに至った歴史の中では, INS-ES 入射リニアックの建設は大変重要なステップであったということができよう。

なお, INS-ES で是非ふれておかなければならないことは, そこでの放射光研究である。パラサイト利用ではあったが, それは高エネルギー物理学の共同利用実験とほぼ同時期に始まっている。また後には (1974), 300 MeV の放射光専用リングも付設された。このように INS-ES 施設は日本における放射光研究の原点といてよいが, それについては, 例えば「放射光源加速器の歴史」のような別の特集を組み, そこで詳しく取り上げていただきたい。

## 参考文献

- 1) 日本物理学会誌, 51, p. 11 1996.
- 2) 「東京大学強収斂電子シンクロトロン」  
東京大学理学部物理学教室・宮本研究室, 1961 年 3 月 1 日.
- 3) 「核研二十年史 1955-1975」東京大学原子核研究所.
- 4) Annual Report 1955-1960, Annual Report 1960-1962  
Institute for Nuclear Studies, University of Tokyo