

## 話 題

## 真空チェンバー/アラルダイトから SUS ベローズへ

吉田 勝英\*

## Historical Review of the Vacuum Chamber Technology for INS-ES

Katsuhide YOSHIDA\*

ここでいう真空チェンバーとは、旧東大原子核研究所電子シンクロトロン<sup>1</sup>の真空路を意味する。このような題で記事を書くように本誌の安東編集委員長から依頼された時は、そんな話で読者の興味を引けるだろうか？ というのが私の第一感だった。引き続いての安東氏の説明では、氏の大学院生の頃、核研の ES (旧東大原子核研究所 1.3 GeV 電子シンクロトロン) を用いる実験に行くと、真空系の故障で待たされることがよくあったものだ、そんな状態が如何に改善されたかを書け、ということだった。思案している内に編集部から送られてきた案内では本誌の「話題」欄の記事を、ということだった。話題といえば最新のトピックスという感じなのでますます困惑したが、本誌のバックナンバーを紐解くと、あらゆるカテゴリーの記事が見受けられる。それでようやく書く気になった次第である。筆者も大学院生の頃は ES 初期のユーザーであり、安東委員長と思いを同じくするところがある。それが後に ES マシングループの一員となり主客転倒したので、マシンの側から先人の苦闘と成功の後をたどってみたい。核研 ES はすでに 1999 年にシャットダウンしているが、これからの加速器のための何らかの教訓を汲み取ることができるであろうか？

## 1. 核研電子シンクロトロン (INS-ES) の特徴

### 1.1 日本における最初の高エネルギー加速器

INS-ES の歴史的 position については木村嘉孝氏により本誌第 1 巻第 3 号に詳述されている。そこに述べられているように、INS-ES は当時本命であった陽子シンクロトロンを建設するための練習台と位置付けられていたようだが、完成後は高エネルギー物理学の研究に活用された。練習台と言っても決して設計製作

に手を抜いたものではなく、むしろ最近限られた経費とマンパワーの中で作られる加速器施設よりよほど完成度の高いものであったと思う。而して INS-ES は日本において高エネルギー加速器学を確立する礎となっただけでなく、高エネルギー物理学を創始する舞台ともなった。高エネルギー物理研究者からの高性能ビームに対する熱望が加速器の性能向上を促し、故富家雄氏をして「加速器は育てるもの」と言わしめた。シャットダウン直前には、わずか 15 MeV の入射器で最大 150 mA に及ぶ GeV 周回ビームを毎秒 21.5 回加速していた。この事実が、本誌第 2 巻第 3 号で紹介されている NTT 800 MeV 放射光源の入射器に 15 MeV リニアックをあてる設計の基礎となっている。GeV 級蓄積リングの入射器として、放射減衰がないにもかかわらず、わずか 15 MeV のリニアックをもってする可能性を示したのである。

### 1.2 強収束機能結合型加速器

INS-ES は 1956 年に建設開始、1961 年に完成している。強収束の原理が認識されるようになったのは、1952 年のことというから、そのわずか 4 年後に、しかも日本初の GeV 加速器の建設にその原理を採用した先人達の進取の精神に感服する。これが現代の高エネルギーシンクロトロンが殆どそうであるような機能分離型の加速器であればそれほど驚くことはない。なぜならば、チューンは加速器の完成後に調整可能である、文字通り tunable であるからである。ところが当時は機能結合型の時代であり、偏向電磁石の  $n$  値によってチューン即ち動作点が決まり、一旦作ったものの調整は不可能である。従って電磁石の磁場分布は設計製作の段階で極めて慎重に制御しなければならない。加えて現在のように電磁石磁場がコンピューターで精度よく計算できる時代ではなかった。そこで電磁

\* 九州シンクロトロン光研究センター  
(E-mail: yoshida@saga-ls.jp)

石の磁極先端部“Pole Tip”は着脱式とし（木村嘉孝氏記事の図参照）、膨大な数のモデルを用意して Rotation Coil で磁場測定し、設計通りの  $n$  値を出した形跡が筆者が着任した時にも残されていたモデル Pole Tip の山から俵ばれた。

木村氏は先に引用した記事で、INS-ES の入射用線形加速器の開発で創造的な仕事がなされたことを強調しておられるが、そのことも含め、日本における初代の高エネルギー加速器研究者の集団が進取の精神に満ちたものであったことが、後に続く加速器研究者にとって幸運であったと認識すべきだろう。

現代のシンクロトロンのはじめが機能分離型であると述べたが、筆者は INS-ES が発揮した高い性能を思うにつけ、目的によっては機能結合型の復活があってよいと感じている。なぜならば、収束用の 4 極電磁石を配する必要がない分、リングの周長は小さくなり、当然電源も簡単になる。1.3 GeV の INS-ES は長さ 3.14 m の強収束機能結合型の電磁石 8 台を 1.2 m の直線部で結ぶもので周長は 35 m であった。現代では磁性体の進歩もあって、もっと小型にできるだろう。医療用粒子線加速器の小型化が追求される時勢だが、その目的のシンクロトロンには機能結合型が適すのではなかろうか。

### 1.3 共振励磁方式の高繰返しシンクロトロン

INS-ES の電磁石は、そのコイルの持つインダクタンスと外部に配置したコンデンサーのキャパシタンスで構成される共振回路を交流発電機で励振し、その共振電流で励磁する方式だった。共振周波数は 21.5 Hz であり、これをトリガーパルスとして入射器やパルスマグネットなどが動作した。従って加速ビームは 21.5 Hz でユーザーに供給された。当時 INS-ES と覇を競ったボン大学電子シンクロトロンは、この周波数が 50 Hz である。固体素子の電源で励磁される最近のシンクロトロンの繰返しが 1 Hz 以下であるのに比べると、まさに Rapid Cycling である。1 パースあたりあたりの加速粒子数が両者で同じとすれば、INS-ES のような Rapid Cycling シンクロトロンは、Slow Cycling のシンクロトロンの 2 桁上の出力を持つことになる。

前項で機能結合型のシンクロトロンを医療用に適用する可能性に触れたが、その励磁方式を共振励磁とすれば出力強度を大幅に上げることができる。放射線治療にそれ程の強度は不要かもしれないが、PET 用アイソトープの製造が可能となれば別に PET 専用のサイクロトロンを持つ必要がなくなるだろう。

## 2. INS-ES の真空チェンバー： SUS 溶接ベローズ以前

これまで本題と関係のないことを述べたかに思われるかもしれないが、実は INS-ES の真空チェンバー（電磁石磁極間の真空箱）は前記の INS-ES の特徴と無関係ではない。因みにこの真空チェンバーはドーナツと称されていた。ベータトロンの真空チェンバーがまさにお菓子のドーナツの形をしているところからきているという。

さてこのドーナツだが、INS-ES が Rapid Cycling であることから強い交流磁場にさらされるので、蓄積リングのようにアルミや銅を素材として使うことはできない。もし真空チェンバーが導電性であると、交流磁場による電磁誘導電流によってチェンバーが熱を帯びるのみならず、渦電流が誘起する磁場によって電子軌道がゆがめられる可能性がある。そういうことから、INS-ES では最初、陶器の真空チェンバーが採用された。当時のレポートでは Ceramic となっているが私の理解では Porcelain である。今は J-PARC の 3 GeV Rapid Cycling シンクロトロンに立派なセラミック製真空チェンバーが採用される時代であるが、INS-ES のものはまさに陶器であった。しかも INS-ES の磁極ギャップは強収束のために中心軌道上でわずか 54 mm であり、軌道の内側外側ともに  $n$  値のために更に狭くなっている。長さは機能結合型のために 3.14 m と長い。4 m という曲率半径もある。これを一体の陶器でカバーすることは不可能なので、長さが約 50 cm のモジュールを連結して用いていた。私はその使用状態を目にした訳ではないが、後に陶器のモジュールが倉庫にころがっているのを目にした。

核研のアニュアルレポートを紐解くと、1963 年頃、即ち INS-ES が稼動し始めて 2 年後頃、陶器製モジュールを繋ぐガスケットの放射線損傷がしばしば真空不良を招くので、ドーナツを部分的にガラスファイバーで補強したエポキシ樹脂（アラルダイト）製のものに置き換え始めた（図 1）、との記述が現れる。

真空度が  $1.5 \times 10^{-5}$  torr 即ち  $2 \times 10^{-3}$  Pa. に落ちるとビーム強度に影響するという測定結果も報告されている。“コンフラットフランジ”で固められた現代の加速器からは考えられないような低い真空度ではあった。

かくして 1964 年にドーナツはアラルダイト製のものに置き換えられた。1 本が、3.14 m の電磁石 1 台に対応する長さのもので、帯電を防ぐため内面には

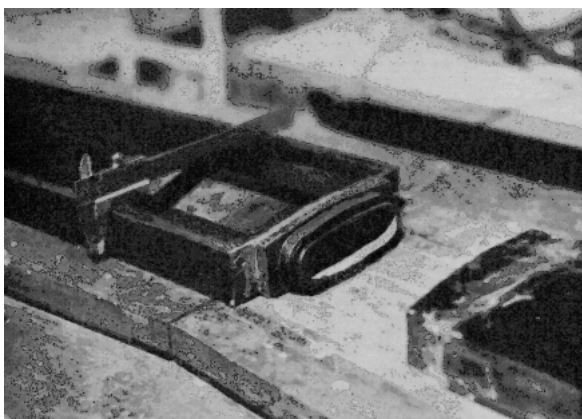


図1 アルダイトのドーナツ (INS Annual Report 1963 より)

dotite paint という導電性の塗料が塗られた。アルダイトにも各種あるが、耐放射線性の良いものを選び、専任の臨時職員によって所内で製作された。

これで真空の問題は解決したかというところと全くそうではなく、相変わらずドーナツのトラブルは続いた。INS Annual Report によると ES の故障率はこの頃 10% に近い数%台を占めていたが、殆どの年度で真空系トラブルが最たる原因となっている。1966 年度には全故障原因の内、実に 53% を真空系の故障が占めている。筆者も当時 ES のユーザーであったが、マシントラブルが起こると深夜、日曜祭日を問わずマシンスタッフに電話して来てもらったものである。電話先は、当時核研の近くにお住まいであった山口省太郎教授（故人）、山川達也助教授（後に KEK 教授、東北大教授）、佐藤勇助手（後に KEK 教授、日大教授）であった。山口教授は、そんな時に備えて夜寝る時は枕元に電話を置く、と語っておられた。当時ユーザーのマシントイムへの渴望はそれ程強く、マシンスタッフもそれに快く？ 応えてくださった。故山口教授は、「世に、理論屋は王様、実験屋は貴族、加速器屋は奴隷というやからがいる」と語りながら加速器屋の誇り高く、「教授の言うことにはまずノーと言え」などと有名なせりふを語るなど、意気軒昂たる先生であった。

真空トラブルの原因は、やはりドーナツモジュールを直線部の真空箱に接続するガスケットの放射線損傷や、時には電子軌道上へドーナツ内面の導電性塗料が垂れ下って、ビームが回らない原因の追究に長時間を要したということもあった。現代でも類似のトラブルがあり得ることをご承知の読者もあろう。昔、外国の話ではあるが、弱収束で真空路が広いマシンで

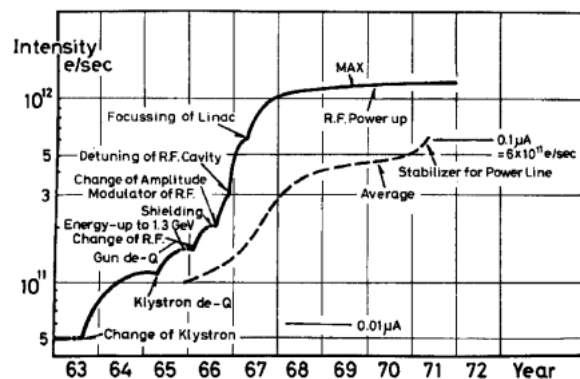


図2 INS-ES のビーム強度の増進 (INS Annual Report 1970 より)

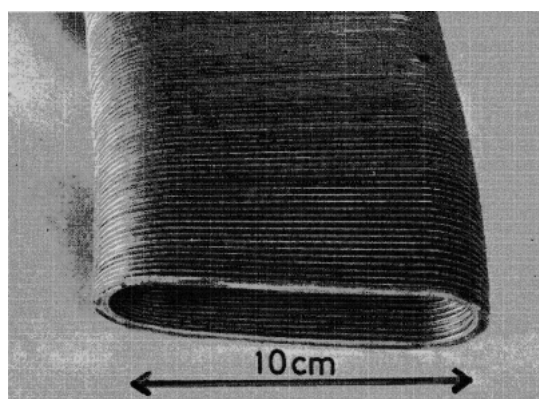


図3 ステンレス溶接ベローズ試作品 (INS Annual Report 1970 より)

は猫を走らせて障害物がないかを確認めたという伝説がある。

さて以上のようなドーナツのトラブルは、その出来が悪かったせいかということ、そうとは言えない。要因は、INS-ES の性能が飛躍的に向上し、放射線量が桁違いに増大したことにある。

1965 年には当初 750 MeV であったエネルギーが、共振回路に DC バイアスを加えることで 1.3 GeV に増強された。ビーム強度も当初  $5 \times 10^{10}$  e/秒であったものが、様々な改良の結果「育てられて」1667 年頃には  $10^{12}$  e/秒を超えるようになっていた (図 2)。したがって放射線量が 2 桁以上増大し、ドーナツの放射線損傷を促進したのである。

1970 年の INS Annual Report では、ES の性能が著しく改善されたことを誇ると共に、副作用としてエポキシドーナツの劣化が激しいことを嘆いている。エポキシドーナツはここ数年、“leading trouble maker”であり、週 1 回以上の頻度でトラブルを起こす、とある。安東編集委員長が京都から ES のマシン

タイムでやってきたものの、しばしば真空トラブルで待たされたのはこの頃であろうか。ドーナツのみならず、入射器その他の機器が10年間の運転で劣化したので、「特別補修費」(当時そう呼ばれた)を政府に要求することにしたと報じている。そして、ステンレス溶接ベローズによるドーナツの試作品(図3)の記事が続く。

### 3. メタルドーナツ：ステンレス溶接ベローズ

「特別補修費」は1972年度から認められることになるが、それ以前にメタルドーナツの試作品が登場したのは、当時「素研準備調査費」という柱が立っていて、そこから研究費を工面してもらったからだと聞く。そして最初の「特別補修」の対象は無論ドーナツであった。1971年にKEKが発足し、ESスタッフの多くがKEKへ移った後のことであり、故山口省太郎教授、故富家雄教授の指導のもと、気鋭の辻川浩技官(後に東大助手、現株式会社デューン取締役社長)がこの仕事を仕切った。

この仕事の内容はドーナツのメタル化に留まらなかった。その時点まで用いられていたオイル拡散ポンプをスパッタイオンポンプに取り替えることを含んでいた。因みにINS-ESのオイル拡散真空ポンプは高エネルギー加速器学の祖とも言うべき故熊谷寛夫氏によって発明されたカスケード型のもので、拡散ポンプと回転ポンプの間に別の小さな拡散ポンプを仕込んだものだった。それでもオイル拡散ポンプからの逆拡散オイルでINS-ESの真空系は汚染されていたので、すべての真空チェンバーの内面がサンドブラスターによって削りとられた。これを「Dry Vacuum化」と呼んでいた。

さてベローズとはいえ、メタルドーナツを採用す

るとなると、まず交流磁場による渦電流の効果を検討しなくてはならない。もとよりステンレス溶接ベローズは次のようなメリットが予見されていた。①放射線損傷がない。②ステンレスでしかも山谷構造なので電気伝導度が小さく、渦電流が小さい。③渦電流による発熱があってもラジエーター機能がある。④フレキシブルだから強収束機能結合型のプラスnマイナスn構造の磁極間を端からくぐらせることができる。等厚さ0.12mmのステンレスを用い、山の高さ(谷の深さ)6mm、ピッチ2.5mmとすると、 $4.5 \times 10^5$  gauss/秒の磁場変化に対して渦電流による磁場は1.5 gauss, n値の変化は3%と(佐藤勇氏により?)推計された<sup>1)</sup>。

### 4. ステンレス溶接ベローズの性能

筆者が核研へ転任したのはこの頃のことであり、これまでのストーリーはユーザーとして見聞したこと、ないし文献や伝聞によるものである。以下は現場での実体験による。

このようにして8本のステンレス溶接ベローズが8回対称のINS-ESのドーナツとして導入され、真空ポンプもイオンポンプに置き換えて真空系の改造が完了した。図4に磁極間に設置されたドーナツの断面を示す。

これでINS-ESの真空系のトラブルは解消したかという点、必ずしもそうとは言えなかった。まず、真空系を一新したことにより初期の脱ガスがあった。現代の加速器のイオンポンプ電流は通常おそらく $\mu\text{A}$ の領域であろうが、INS-ESでは数十mAも流れ、メーターが振り切れるのでバイパス回路を付けたりして凌ぐ有様だった。それが落ち着いてくると、メタルドーナツを直線部の真空箱へつなぎ込むガスケットまわりの放射線損傷が激しくなった。メタルドーナツは

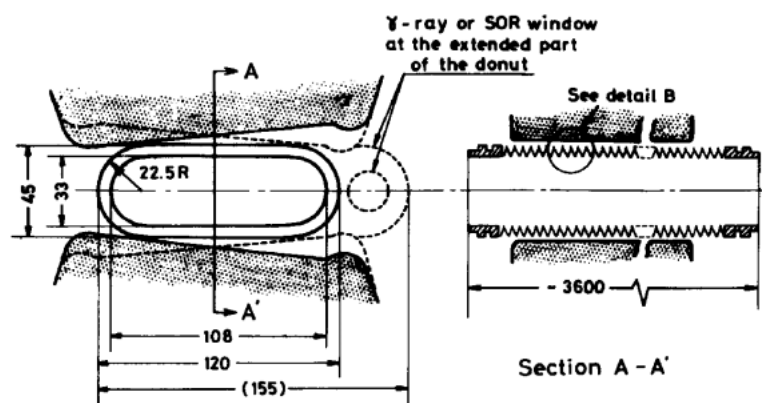


図4 ステンレス溶接ベローズ設置断面図 (INS Annual Report 1973 より)

強い交流磁場のもとに置かれるので、その両端がアースに落ちていると、あたかも One Turn Coil の如くに大きな電流がドーナツを流れる。これをさえぎるには、ドーナツモジュールのどちらか一端を絶縁する必要がある。そこでガスケットにはゴムを使い、フランジを締め付けるためのボルト孔には絶縁体のカラーを用いる必要があった。これらが放射線損傷を受けて真空漏れを起こすのである。その応急措置に“VACSEAL”をかけるものだから、ドーナツの端はいつも汚くよごれていた。

次に、腐食にも放射線損傷にも強いものと認識していたステンレスベローズが意外にも錆びて真空漏れを起こすのである。使っていた材質は、厚さ 0.12 mm の SUS27、後に SUS304 と呼ばれるようになったステンレスである。折しも、原子炉の冷却水系に用いられている SUS304 のパイプが「応力腐食割れ」を起こすことが認識されるようになっていた。溶接時の熱ひずみによる残留応力がある部分に、ある種の環境要素、例えば塩素が加わると SUS304 といえども腐食するというのである。対策として材質を SUS316L (L は Low Carbon の意) または“インコネル”に変更することが検討されていた。塩素といえば、加速器の中には多数のビニール被覆の電線が張りめぐらされており、古い加速器ではえてしてビニールテープが多用される。これらが放射線の作用で分解して塩素を出すと推定された。

こうして一部に真空漏れを起こしたドーナツモジュールも、高価なものだから取り替えるわけにもいかず、修理して使う方針がとられた。ところが、これらは放射化しているので工場へ修理に出すことができない。そこで、工場の工作機械を INS-ES の放射線管理区域内へ搬入し、技術者に出張してもらって修理を行ったものである。しかしイオンポンプ電源のメーターのバイパス回路は依然として必要であり、イオンポンプ本体も年に 1 度、再生処理が必要であった。このような事態の結果、9 年を経た初代ステンレス溶接ベローズの更新が必要となった。

## 5. ステンレス溶接ベローズの更新

初代ステンレス溶接ベローズの問題点は二つであった。一つは端部の電氣的絶縁のために使っていた材質が放射線に弱いということである。第 2 に材質として SUS304 は不適だということである。2 代目メタルドーナツの製作では、これらの問題を解決する必要があった。また財政的な課題の解決には当時 KEK 所長であった西川哲治先生にお力添えいただいた。

はじめの問題に対しては、ベローズの端部近くにセラミック材を挟むことにした。セラミックにまずコバールを焼付け、コバールとステンレスベローズを溶接する手法がとられた。こうして、ガスケットの部分で絶縁をとる必要はなくなった。そして好都合なことにその頃“ヘリコフレックス”と称するメタルガスケットが出回るようになった。これは鉄製のスプリングをリング状にしてリングを純アルミで被覆したものであり、ゴム O-リング用ガスケット溝に適合する。ドーナツ用ガスケット溝に合う形のを特注で作ることにより、絶縁体の放射線損傷の問題は解決した。

第 2 のステンレスの材質については、SUS316L を採用することとした。SUS316L は機械的強度が SUS304 より劣るので、厚さを 0.12 mm から 0.15 mm に増すこととした。INS-ES と同様 Rapid Cycling シンクロトロンである KEK のブースターシンクロトロンでは“インコネル”の採用が検討されているという情報もあったが、“インコネル”は高価な上、硬くて INS-ES の狭い磁極ギャップには適合しそよになかった。それで材質は SUS316L となった。このようにして INS-ES 真空系のトラブルは最終的に解決を見た。

しかしある時、思わぬ大故障に見舞われた。先に述べたように、INS-ES のリング電磁石は n 値をつけた磁極先端部が着脱式で、ベークライトの強固なブロックを用いてヨークに固定されていた(木村氏記事の図を参照)。そのブロックのひとつ、長さ 5 cm 程度が放射線損傷のために壊れ、固定されていた Pole Tip が解き放たれたのである。これでドーナツは鉄のハンマーにより 21.5 Hz で叩き潰された。この事故が深夜、ユーザーに運転をゆだねている時に起こった。当然警報ベルが鳴り「真空系重故障」が表示された。そして入射用線形加速器を含み、すべての高電圧、高周波等が自動停止した。そこで、ユーザーが「警報停止」ボタンを押し、続いて「リセット」ボタンを押すと「真空系重故障」の表示は消えた。これは故障原因が解消したことを意味する。なぜそうなったかという点、当時 INS-ES では、真空系の故障を検知するためのセンサーとしてペニング真空計を使っていた。これは大気になっても素子を流れる電流はゼロであり、極めて良好な真空度との区別がつかない。それで真空度に異常なしの状態になったのである。そこでユーザーは OFF となっていた線形加速器の電子銃ヒーターのスイッチを投入し、ヒーター電圧を所定値まで上げた。大気中で電子銃のヒーターを点火したのであ

る。これにより、カソード物質が蒸発、下流の線形加速器の加速管内面を白っぽい皮膜で覆う程に汚染した。一応真空を復帰させて加速管にマイクロ波を投入してみると、案の定、低いレベルでも殆んど連続放電を起こす状態であった。この時は、INS-ES の運命もこれまでかと思わせた。しかし諦める前にやることはやってみようの精神で、放電の状態をペンレコーダーで記録し、良く観察すると、ところどころで放電が休止し、その頻度が次第に増加している。つまりエージング効果が見えたのである。これを3日3晩だったかそれ以上だったか継続した結果、ついに何とかハイパワーを加速管に投入できるまでに回復した。このような手法をとった判断材料の一つとして、電鍍法で作った KEK-PF リニアック加速管が初期立ち上げ時に予想以上の放電を起こしたがエージングの結果治まったという話を耳にしていたことがある。加速器の世界では、理論的考察とともに経験も大事だということである。磁極先端は、今なら計算機で精度良く磁場分布が得られる時代であり、着脱式にする必要はなからう。

さて上に述べた入射用線形加速器は、1973年に更

新されたものである。「特別補修」の第2年度(1973年度)は入射用線形加速器の更新であった。それまで設計エネルギー6 MeVの線形加速器で実際には約9 MeVの電子を加速していたが、新しい線形加速器は15 MeVと設計され、所定の性能を出してINS-ESの一層の性能向上に寄与した。この更新計画は田中治郎教授(後にKEK教授)の指導のもと、佐藤勇助手(その後KEK教授)、片山武司助手(後に東大教授)、新井重昭助手(後にKEK教授)らによって推進されたものだが、途中で筆者が加わった。旧線形加速器は取り外してみると、加速構造の内部は付着した拡散ポンプ油が高電界の作用で炭化し、表面を黒く覆っていた。この旧線形加速器は、木村氏が述べておられるように、歴史的に貴重なものということで、核研の閉所まで、ES棟玄関の一隅に展示されていた。今どうなっていることだろう。

#### 参考文献

- 1) Annual Report, Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, 1972