解 説

素粒子研究所大加速器の建設計画

熊 谷 寛 夫*

(昭和41年7月1日 受理)

On the Large Proton Synchrotron Project for Expected Research Institute
for Particle Physics.

Hiroo KUMAGAI

(Institute for Nuclear Study, Tanashi, Kitatama, Tokyo)

(Received July 1, 1966)

1. はしがき

素粒子に関する実験研究は、はじめ宇宙線によって行なわれて来たが、1948年に大型加速器を用いて π^- 中間子を発生することに成功してからは、加速器を用いる素粒子物理学の実験研究は非常な勢いで発達してきた。現在、我国で、素粒子物理学に使用することのできる加速器は原子核研究所の13億電子ボルトの電子シンクロトロンだけである。これだけでは甚だ不充分であるために、世界水準の実験を行なうことのできる大型陽子シンクロトロン建設の計画がある。この陽子シンクロトロンは、そのエネルギーは 40GeV (400億電子ボルト) とされ、形式はふつうの強収斂型である。この計画はいまだ政府によって認められていない。しかし、そのための基礎研究の予算が、昭和39年度以来原子核研究所に出ていて、本年はその3年目に入る。

2. いきさつ

原子核研究所の創設は1955年であるが、その計画は1953年から行なわれていた。米国で加速器によって人工的に π^- 中間子を発生してから5年のあとであるから、中間子を発生できるような加速器を作るべきであるとの声があった。つまり素粒子物理学の実験研究を、はじめから原子核研究所において行なうのがよいというのである。しかし、サイクロトロンによる原子核物理学の研究によって、研究実績をあげる必要が認められて、まず可変エネルギーサイクロトロンを建設することになった。このサイクロトロンはその性能においても、それによる

研究成果においても成功を収めたのであるが、やはり素粒子物理学の実験研究の必要性がますます感ぜられるようになった。そのために、サイクロトロンの完成を待たないで、電子シンクロトロンの建設計画が出発した次第であった。

1957年にサイクロトロンが完成したあと、1960年頃から、電子シンクロトロンの次に作るべき加速器は何であるべきかという討論がはじまっている。世界の加速器におくれて作られるので、何かの特長を強く持つべきだとされた。そのための一つの案は陽子強度を大きくするために、20サイクルという大きいくりかえしを持ち、エネルギーが 12GeV の陽子シンクロトロンである。もう一つはエネルギーが 10 GeV の線型陽子加速器であって、陽子の入射、とり出しの心配が不必要な点に注目されたのである。討論の結果、陽子シンクロトロンの方が製作に容易であるとされて、この型のものを建設する案を立てた結果、学術会議は1962年にその建設を政府に勧告した。このときに原子核、宇宙線の計画も一所に勧告されている。

この勧告に対して政府は、1964年に1億円の予算を原子核研究所につけた。このときに政府は陽子シンクロトロンの建設を認めたのではないということを明らかにするために「基礎研究」とし、「準備研究」としなかった。1965年には2.5億円、1966年には3億円の予算が出ている。

この基礎研究に対して、朝永振一郎博士を所長予定者とし、筆者が加速器部門の責任者、三浦功氏が測定器部門の責任者となり、研究を開始した。その結果、陽子シンクロトロンとしては、くりかえしがふつうのもので、

* 東京大学原子核研究所 (東京都北多摩郡田無町)

陽子のエネルギーが大きいものの方が建設も更に容易であり、素粒子物理学の研究の上で有利であることが分り、そのために全国の研究者の討論を起した。約1年間の討論が行なわれたあと、前の設計を変更して、エネルギー 40 GeV、くりかえしを2秒に1回のものとした。この決定は1965年の夏である。なお1966年4月以後は加速器部門の責任者は諏訪繁樹氏となっている。

3. 陽子のエネルギーを大きくするのは何のためか

大型加速器には陽子を加速するものと、電子を加速するものがある、それぞれの特長を持っている。ここでは陽子の場合についてだけ考えよう。加速器ではまず陽子のエネルギーが最も大きい問題である。陽子のエネルギーが大きくなれば、その物質波としての波長が短くなることを利用することもあるが、ふつうは陽子が陽子または原子核に衝突して二次粒子として作り出された新しい素粒子を利用することが多い。表1はガンマ線または陽子を使って素粒子を作り出す例を示している。たとえば $p+p \rightarrow p+p+p+\bar{p}$ では新しく $p+\bar{p}$ ($\bar{p}$ は反陽子)の一对が見れるので、そのためのエネルギーを $E=mc^2$ の関係で MeV であらわすと 1880 MeV となる。実験室でこれだけのエネルギーを用意すると反陽子が作れるかというところ、そうはいかない。重心系で1880 MeV必要である。それで実験室では5640 MeVが必要である。米国のペバトロンはこの点を考慮して $6.2 \text{ GeV} = 6200 \text{ MeV}$ として、反陽子を作った。 π^+ , K^+ などを作る場合にも同じようなことがある。

反陽子を作るためには 5640 MeV以上、 π^- 中間子を作るためには 290 MeV以上の陽子のエネルギーが必要である。これでとにかく作れるが、作られた素粒子のエネルギーは小さい。生れてくる二次粒子として、相当のエネルギーを持つものを期待するならば、さらに陽子のエネルギーを大きくする必要がある。表2はこの間の事情を示すものである。表は一次陽子をベリリウムに衝突させて、 π^- , K^- , $\bar{p}$ を作る時に、一次粒子の入射する方向に出る二次粒子の強度を相対的にあらわしたものである、一次陽子のエネルギーを 40, 30, 20 GeVと変化し、二次粒子の運動量 20, 12, 6 GeV/cのものについて注目している。二次粒子の運動量が 6 GeV/c ならば、一次陽子のエネルギーが小さくなくても、その強度はあまり変らない。しかし、12 GeV/cではその減少は大きく、20 GeV/cではもっと激しく減少する。

二次素粒子を使って、素粒子の実験を行なうことが多いので、その運動量にもいろいろのものが必要である。

表1 素粒子を作るために必要なエネルギー

素粒子を作る反応	新しく生れる質量 (MeV)	実験室で必要なエネルギー (MeV)
$\gamma \rightarrow e^- + e^+$	1	1
$\gamma + p \rightarrow n + \pi^+$	140	150
$p + p \rightarrow p + n + \pi^+$	140	290
$p + p \rightarrow p + d^0 + K^+$	670	1580
$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$	1880	5640

表2 一次陽子のエネルギーが高いと運動量の大きい二次粒子がたくさんできる。

		相 対 強 度		
		二次粒子運動量 GeV/c*		
(p+Be)で作る	一次陽子のエネルギー (GeV)	6	12	20
二次粒子 π^-	40	1.4	0.7	0.04
	30	1.0	0.25	0.0008
	20	0.5	0.03	0
二次粒子 K^-	40	9	5	0.1
	30	5	1.5	0.002
	20	2	0.08	0
二次粒子 $\bar{p}$	40	3	2	0.3
	30	1.5	0.3	0.003
	20	0.2	0.003	0

* 高エネルギーで使う運動量の単位。速さが光の速さに近いとこの数値は GeV の数値に一致する。

このために一次陽子のエネルギーは大切であることが表2からわかる。これからわかるように 40 GeVの方がより有利であり、20 GeVでは問題にならないことがある。かつて考えられた陽子シンクロトロンエネルギー12 GeVを変更した理由はここにもある。

3.1 世界の大型陽子シンクロトロン

1948年に人工的に π^- 中間子を作った加速器はパークレーの 750 MeVのシンクロサイクロトロンであるが、この前後から、陽子シンクロトロンは世界の各地で計画されていた。表3はこれらの計画を示している。最も早く完成したのは米国のブルックヘブン国立研究所のコスモトロンであり、エネルギーは 3 GeV で K-中間子の研究に活躍した。現代世界最大級の陽子シンクロトロンとして活躍しているのは米国のブルックヘブン研究所の33 GeVのものと欧州連合(セルン)の28 GeVのものである。この二つとも強収斂型といつて、陽子軌道に対する集束作用を、磁石の特殊な磁極形状によって強化した設計である。この設計のために比較的少ない予算によって高いエネルギーまで加速できるようになったものである。

この二つの加速器の素粒子物理学における働きぶりを見て、多くの素粒子の研究者はさらに高エネルギーの加速器を要望するようになっている。現にソ連では表3に示したように 70GeV のものを建設中である。我日本では40GeVのものを作ろうとし、またフランスでも 約40 GeV のものを希望しているという。また一方アメリカでは 200GeV のものの計画があり、学者と政府の間の討論が続いている。

4. 陽子シンクロトロンとは

陽子シンクロトロンでは図1のように円形の軌道を陽子がまわりながら加速されるもので、円運動を行なわせるために電磁石の磁場を使う。陽子は線型陽子加速器によって50MeV又は100MeV に加速されてから、インフレクターによって円軌道に打ち込まれる。陽子は加速されるにしたがって曲りにくくなるが、それにつれて電磁石の磁場が強くなって、陽子は同じ軌道をまわるように調節される。この間に陽子の速さの変化につれて加速電波の周波数も変調される。これらのものがシンクロナイズして変化するのでシンクロトロンとよぶのである。磁場が大きくなる間は加速が行なわれ、そのあと磁場は減少してもとに戻る。このくりかえしも一定の周期でくりかえされる。

陽子の軌道は中心軌道にぴたりと乗ることはない。これからずれると、磁場の集束作用によって中心軌道に戻るようになされ、結局図のように中心軌道のまわりに振動する。これをベータートロン振動という。強収斂型シンクロトロンではこのベータートロン振動の幅を大変に小

図1 陽子の軌道

さくしている。

4.1 素粒子研究所に予定される陽子シンクロトロンの設計の概要

最大エネルギー	40 GeV
期待される陽子の強度	0.1 μ A
最大磁場	12.4キロガウス
軌道半径	100m
平均軌道半径(直線部が入るため)	186m
1まわりに入るベータートロン振動の数	9.75
長い直線部の数と長さ	6 個, 11m
電磁石の数と全重量	264 個, 4200トン
磁極の中心間隙と幅	8.5cm, 33cm
くりかえし	2 秒に 1回
入射用線型陽子加速器のエネルギー	100MeV
電波加速空洞の周波数	2.55~6.17MC

表3 世界の大型陽子シンクロトロン

国	場所	名称	エネルギー GeV	平均陽子強度 μ A	くりかえし周波数	完成年度
米	ブルックヘブン プリンストン バークレー アルゴンヌ ブルックヘブン	コスモトロン ペパトロン	3	0.043	$\frac{1}{8}$	1952
			3	0.3	19	1963
			6.2	0.1	$\frac{1}{6}$	1954
			12.5	(~ 0.4)	$\frac{1}{4}$	1963
			33	0.03	$\frac{1}{8}$	1960
ソ連	モスクワ ドブナ セルプコフ	シンクロファソトロン	6	0.0015	$\frac{1}{6}$	1961
			10	0.0007	$\frac{1}{12}$	1957
			70	~ 0.05	$\frac{1}{10}$	建設中
英	バーミンガム ハーウェル	ニムロッド	1	0.0001	$\frac{1}{10}$	1953
			7	~ 0.08	$\frac{1}{2}$	1963
仏	サックレー	サトゥルネ	3	0.0043	$\frac{1}{8}$	1958
欧州連合	ジュネーブ		28	0.027	$\frac{1}{8}$	1959

電波加速空洞の電圧	24kV
電波加速空洞の数	16個

4.2 設計の特長

この陽子シンクロトロンは、ブルックヘブンやセルソンのものに比べてエネルギーが大きい外に、長い直線部を持っていることが特長である。直線部とは電磁石と電磁石の間で、磁場がなくて、陽子が直線に走る所である。これを6カ所だけ特に長くするのである。これをおくと、陽子の入射、加速のあとでのとり出し、また π 、 K^- p などの二次粒子を利用するときには便利である。ただし、長い直線部を持ったものは世界にまだないので、設計には細心の注意を要する。

また電磁石の電源に SCR (シリコン制御整流器) を利用して、電磁石の電流波形を比較的に自由に变化することも特長である。

また入射器のエネルギーを 100 MeV とするのも世界ではじめてである。このために入射が確実となり、最後まで加速される陽子の数も増す。

4.3 電磁石と電源

周囲に 264個ならべられる電磁石は図2のようなものである。電磁石は陽子を円形にまげる役目と、集束の役目の二つを行なう。そのために磁極は図3のような形をしている。真空ドーナツは短辺 8.5cm、長辺約 17cm の楕円形の切口を持ち、この外に磁極があるが、図のように磁極は平行でなく傾きを持っている。陽子をまげるためだけならば傾きを持つ必要はないが、集束作用を大きくするために傾いているもので、その傾きが大きく、また次の磁石に移ると点線で示したように逆方向の傾きになる。このような設計が強性勾配型といわれるもので、交互に傾きが変わるので **alternate gradient** 方式ともいう。この設計のために、図1のベータートロン振動の振幅が小さくなり、ドーナツと電磁石が小さくすむようになった。ブルックヘブンやセルソンのものがこの設計であり、原子核研究所の電子シンクロトロンもこれである。

円軌道の半径は 100m であるが、磁石の間に長短の直線部があるので、円と稍異なる軌道となり、それと近似的に円とみるとその平均半径は 186m となる。直径 400m に近い円で、ドーナツの切口は厚さ 8cm、幅 17cm の程度である。この中を 10万回以上も陽子がうまきまわるには電磁石の性能と据付の精度が高い必要がある。電磁石の性能の精度は大体 0.1% をねらい、据付の精度は 0.2 mm 前後が必要である。この据付は、電磁石のトンネルの中に据付けられたポストを基準にして、三角測量の技術を最高に利用して行なわれる。

磁界は最高 12.4キログaussまで变化する。そのあり

図2 主電磁石

図3 磁極と真空ドーナツ

図4 磁場の時間変化

さまを図4に示した。磁場の立上りは直線に立上らないで、はじめゆるやかに立上るようにする。これは、真空ドーナツを金属で作るために、渦電流による磁場の乱れを少なくするためと、最初の加速をやりやすくするためである。磁場の立上りをこのように変化するために励磁するための交流電圧を変化し、SCRの位相制御を行なう。

電磁石の励磁は交流発電機と SCR による。発電機の交流と整流して、プラスの電圧がコイルにかかるよう

図 5 コイルの電流，電圧波形

図 6 入射用線型陽子加速器

にして励磁し、磁場が減少するときには、マイナスの電圧がかかるようにする。このありさまを図 5 に示した。このようにすると電磁極間の空間に貯えられた磁気エネルギーが無駄にならないで発電機に返却される。このために、発電機の回転数は小さくなったり、大きくなったりする。この変化を少くするために多くの場合に発電機に大きいはずみ車をつけている。しかし、はずみ車でなく、発電機の回転子自身の慣性率を大きくする設計がよくはないかといわれている。

もともと、コイルの抵抗による電力損も大きい。しかし、上の方式によって磁気エネルギーを棄てない方式によって相当の節約となる。

電磁石の性能については鉄の材質の問題が大切である。陽子を入射するときには磁場は 135 ガウスであり、この精度を 0.1% にする必要がある。抗磁力（ヒステレシス）による残留磁場が 20 ガウス程度になり、これを制御することはむづかしいので、なるべく抗磁力の小さい鉄を使用する必要がある。また加速の終りには強い磁界が欲しいので、磁束密度の大きい所で透磁率の大きい

ものが必要である、

やむを得ない磁場の不整を補う目的で、周囲にいくつかの 4 極または 6 極の電磁石が配置される。

4.4 入射用線型陽子加速器

円形軌道に入射する陽子のエネルギーはなるべく大きい方がよい。その理由の一つは、入射時の磁界がなるべく大きくないと、前述のように残留磁場に邪魔されて精度が悪いからである。もう一つの理由は、なるべく高いエネルギーで入射すると、次に述べる電波加速空洞の周波数変調の幅が小さくなるからである。素研に予定されるものでは 100MeV に加速して入射する。

入射までの加速は線型陽子加速器で行なう。図 6 はその説明図である。図の左の部分は予備加速部であり、右にアルバレ型加速部としてある部分がエネルギーの大部分を与える加速空洞である、この部分での加速のためには電波を使い、その周波数はたとえば 200MC ($\lambda=1.5\text{m}$) である。この波長のものは直径約 1m の円筒の中に TM010 型の共振といって図の円筒の長さの方向に直線的に向う電場を持つ共振を起すことができる。この中に陽子とび込むと、ある周期には加速されても、次の周期には減速されてしまう。そこで、円筒の中に図のようにドリフト管を入れて、加速されるときは陽子がドリフト管の間にいるようにし、電場が逆方向になるときは陽子はドリフト管の中に入って電場から遮蔽されるように工夫してやる。この原理をつかうことを米国のアルバレが考えたので、これをアルバレ型加速器とよんでいる。陽子はだんだん速くなるので、ドリフト管もそれに合わせて長くしていく。したがってドリフト管の長さが次々ときめられると、陽子の速さも決定し、この加速器ではエネルギーも決ってしまう。また陽子の速さを予定通りに増加してやるために電場の強さも一定になる。実際の設計では、このような加速空洞が 5 個作られ、順次加速されて 100MeV になるようにする。

この加速空洞は勿論真空ポンプで排気する。セルンの場合には水銀拡散ポンプと液体空気トラップによって排気し、ブルックヘブンはイオンゲッターポンプによっている。いずれもドリフト管の間の真空放電に苦しむらしい。ことに、加速の初期には陽子の速さも小さく、ドリフト管の間隔が小さいので、放電が起りやすいという。ドリフト管の中には陽子の集束のために 4 極電磁石が作り込まれる。

陽子はまずイオン源で作られ、予備加速器で 750 KV に加速される。予備加速器は直流でぶつうコッククロフト型のものが使われている。予備加速器を出た陽子は図 6 のようにバンチャーを通る。バンチャーは、右に続く

アルバレ型加速部と同じ周波数の電波によって励振されるごく短い円筒で、ここで到達時間によって加速または減速をされて、ある距離を走ったあとパンチングといって、陽子がかたまりになる。かくしてアルバレ型加速部で加速が行なわれる位相に陽子をたくさん揃えようというのである。

陽子は加速されながら図1に示したようなベータートロン振動を行なうが、はじめにイオン源から出るイオン束の太さが小さく、その角度の揃い方がよい程、具合がよい。そのあとでベータートロン振動が少なくなるからである。太さと角度の揃い方をあらわす数量をエミッタンスとっている。世界のどこの大型陽子加速器でも、イオン源の改良には大きい努力を払っている。

4.5 電波加速部

陽子は円軌道をまわりながら加速される。加速は電波によって行なわれる。約20万回軌道をまわるから、40GeVまで加速するには一まわりあたりにおよそ200kVずつ加速すればよい、しかし実際には加速電圧の尖頭値は200kVの2倍400kVとする。これは、尖頭値で加速することがむずかしいばかりでなく、位相約30°で、尖頭値の半分で加速していると、説明する余裕がないが、位相安定といって、陽子と加速電波の位相調整によって具合のよいことがあるからである。

実際の加速空洞は図7のような構造になる。後にのべる必要があって、空洞は二つに分れ、一つに12kVの電圧を出し二つで24kVになる。図7のような空洞を16個用意し、軌道の周囲に設置する。加速の電波は周波数変調を行なう必要がある。それは陽子の速さに変化するからである。100 MeVの入射時には $\beta = v/c = 0.43$ であるから $\beta=1$ までに2.3の幅の周波数変調が必要である。

加速電波の周波数は陽子が軌道を一周する周波数にする必要はなくその整数倍でよい。我々の設計では24倍にする。これによると、全周に陽子は24個の群になってまわるのである。このときには全周の24分の1だけはなれた所に加速空洞をおき、空洞は同位相で励振すれば、陽子群は次々と加速される。

空洞の周波数変調は、空洞の中のフェライトによる。フェライトに磁場を加え、これによってその透磁率を変化して周波数を2.55から6.17 MCの間に変調する。この変調は陽子の速さの変化に同期して、つまり、電磁石の磁場の強さに同期して自動的に行なわれる。

フェライトに磁場を加えるためには図のようにバイアス電流を流す。この電流は2000Aにおよぶ。このバイアス電流を流すために、図7のように2個の空洞を組み合わせた形になる。そうしないとバイアス回路に高周波電圧

図7 電波加速部

図8 陽子シンクロトロン制御概念図

ができて困るからである。

4.6 真空系

入射用線型陽子加速器の真空についてはすでに述べた。つぎに円形軌道の真空について述べよう。加速器では良い真空が必要であるが、イオンのエネルギーが大きくなると、真空度に対する要求はゆるくなる。それはイオンが残留気体分子に衝突しても、方向の変化が少く、前方に集中するようになり、加速器の集束作用がこれをもとに戻す作用があるからである。セルンの陽子シンクロトロンでは、真空度は 1×10^{-5} torr 以下になれば良いとしている。我々の設計では入射器のエネルギーがセルンの50 MeVにくらべて、100 MeVであるから、 1×10^{-5} torr でもセルンより余裕があることになる。セルンでは冷水で冷されたバッフルつきの油拡散ポンプ

を用い、ブルックヘブンはイオンゲッターポンプを用いている。セルンの報告で、図7の加速間隙の近くの絶縁物が油で汚れたことが報告されほかに、真空系に問題があったことは聞かない。真空ドーナツは細いから、たくさんの真空ポンプが電磁石と電磁石の間の直線部に配置される。

真空ドーナツは厚さ2mmくらいのステンレスで作ってよい。磁場のくりかえしが小さく、ことに入射時の磁場の時間変化を図4のように小さくするので渦電流の影響が少なくて上記の材料を使える。このためにドーナツの製作は大変に容易になった。前の設計のように1秒に20回もくりかえすものでは、ドーナツに絶縁物を用いる必要があり、製作は面倒であった。

4.7 制御系

制御系としては二つの役目がある。その一つは、入射器、電磁石、電波加速部の運転系と、その安全運転のためのインターロック系である。これは複雑で規模の大きいものになる。この系は核研の電子シンクロトロンでもすでにハンダ付などによる結点が数十万個所におよぶことを考えると、大型陽子シンクロトロンではどのような規模のものになるか想像できる。

制御系のもう一つの仕事は、このシンクロトロンが2

秒に1回加速をくりかえすために、自動的に指令を出すことである。図8にその要領を示した。まず電磁石は図4のような波形をくりかえす。つぎにA点の磁場検出によってまず入射器に指令を出してこれを動作させ、そのあとは電波加速部の周波数を制御する。さらに磁場が強くなるとビームとり出し装置をはたらかせる。

つぎにBのビーム位置検出は加速電波の位相を制御してビームの位置を正しい位置に保つ。Cのビームバンチ検出では、これによって電波加速の周波数の自動制御を行なう。

幸いに素粒子研究所が出発すれば、上記の陽子シンクロトロンは5年乃至6年間の工程で完成される。これと同時に、液体水素泡箱などの測定器も整備され、その予算は約290億円とされている。勿論国産技術で建設される。

5. むすび

日本で、このような大型陽子シンクロトロンの建設を少くとも物理学者が決心していることは、すでに世界の物理学者に知れわたり、注目されている。最近フランスで約40GeVの陽子シンクロトロンの計画がほぼ決定したのも、日本の決意の影響があるのかも知れないとされている。我々の計画が政府によって一日も早く承認されることを願うものである。

新製品紹介

ULVAC BABY

日本真空技術(株)では ULVAC BABY と云う「真空排気」および「コンプレッサ」両用の小型軽量ポンプを開発し、販売を開始した。

この ULVAC BABY の仕様は、次の通り

重量 7kg : 大きさ 25cm×13.5cm×50cm H

真空ポンプとして使用時到達圧力 10 torr以下

コンプレッサとして使用時圧力 0.5kg/cm²G

排気速度 15l/min; 冷却水 不要、

100V 単相 65W (電灯線使用可能)

1回の給油により100時間以上の使用可能

用途としては

1. 化学・物理・医学・薬学・農学等の研究室における蒸留・濾過・送風・噴霧用
2. 写真製版・印刷・複写等の真空チャックの排気用
3. ビン詰・カン詰製造時の密封工程中における真空排気

4. 冷蔵庫・冷凍機の冷媒ガス・チャージの時、配管内の排気用(とくに現地工事用)
 5. 小型電子部品・機械部品組立時の真空ピンセットの排気系
 6. スプレー・ガン用コンプレッサ
 7. アスピレータの代用
- その他、応用範囲は極めて広い。

国内販売価格は1般用 27,500円/1台