

文部科学省 高エネルギー加速器研究機構 一般公開講座
講演タイトル：『加速器：高エネルギーへのたゆまざる挑戦』
講演日 2002年9月1日
講演：高田 耕治氏（高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設教授）

司会：高柳 雄一 広報室長

高エネルギー加速器研究機構では宇宙、物質から生命まで非常に幅広い基礎研究を行っています。その中でもこれから講演していただく加速器は、どの分野においても非常に重要な仕事をする装置として大活躍しています。その加速器がどういうものなのか、どういうふうに考えればいいのか、あるいはこの講演の後、日ごろ近づけない大きな加速器を見学できますので、そのときにどういうことに気をつければいいのかに注意して、今から始まる高田先生のお話をお聞きいただければと思います。
高田耕治先生お願いします。

高田 耕治教授（高エネルギー加速器研究機構）

ただいま紹介していただきました高田と申します。丁度30年前の今日である1972年9月1日に高エネルギー加速器研究機構に着任して以来、ずっと加速器の研究をしてきました。加速器はたいへん大きな装置で、いろいろな部分からなっていますので、誰も一人で全部をカバーするわけにはいきません。そのなかで私がやってきたことといえば、非常に強い電波で、電子や陽子などの電気をもつ微粒子、荷電粒子のビームを加速して高エネルギーまでもっていく、そういった仕事を特に専門としてきました。今日はこれを中心にお話したいと思います。

まず、なぜ加速器なのかをお話したいと思います。

私達の身の回りには、ほとんど分子でできています。分子を細かく見ていきますと原子に分解されることはよく知られています。その原子を更に細かく見ますと、原子核とその周りを回る電子からできています。その原子核の中味をもっと深く探っていくと、陽子や中性子、中間子といったいろいろなもの - 素粒子と云われています - から構成されています。更にその先はというと、クォークなど、今日の物理学でもっとも基本的な素粒子と考えられている細かな粒子で構成されていることが分かっています。どこまでも物質の奥、言い換えると根源をどこまでも探っていきたいというのが物理学者の持っている大きな夢です。物質の奥底まで突き抜けて調べるためには鋭い道具が必要となりますが、そのためにそれ自身極微の素粒子を使うほかはありません。そこで電子や陽子という素粒子を高速に加速する装置として加速器が発明され、大きく発展してきてきました。今では加速器は私たちにとって、私達が大きな謎である、物質の根源、宇宙の成り立ち、あるいは生命現象に関わる分子やたんぱく質の姿を探るために欠かせない道具となっています。これは20世紀になって初

めて生まれてきた非常に強力な実験装置です。

お話を進めるまえに、どんなに小さな粒子の世界を相手にしているか、水の分子を例えに取ってみましょう。よく知られているように水の分子は H_2O 、すなわち水素原子2個と酸素原子1個から出来ています。全体で4オングストロームほどの寸法です。ここでオングストロームというのは1センチの1億分の1という大変小さな長さの単位です。酸素や水素の原子の大きさは水分子の数分の1です。さらに酸素の原子核や水素の原子核である陽子となると、分子の10万分の1という極微の物差しで測らなければなりません。陽子の中を“泳いでいる”クォーク族になるともっと、もっと小さいということです。今日の話では数式は一切出さないうもりですが、非常に大きな数字や小さな数字を使いますので、驚かないでいただければと思います。

さて本題に戻りましょう。ご存知の方も多いと思いますが、自然界には4種類の力が有ります。その中で、我々人間が日常生活で親しみを持ち、影響を受けているのは二つで、まずは電気、磁石、電波などの「電磁気力」、もう一つは物の上げ下ろしの時に感じる「重力」です。この頃は原子力、核融合などに関する話題もしばしば出てきますが、これらは三つ目の「強い力」に関するものです。この力は原子核の内部で支配的ですが、外部では極めて小さいものです。今日の公開ではニュートリノに関する施設も見学個所になっています。ニュートリノは天体の成り立ちに関係する重要な素粒子です。非常に高エネルギーの現象で目立ってきます。しかし普通は検知することが大変むづかしいので、「弱い力」と呼ばれます。これらが四つの力です。

加速器はこの中の電磁気力、とくに高電圧を利用して、電気を帯びた陽子や電子などの素粒子を非常に高いエネルギーへ加速します。そして、今ある物質世界が、重力は別として、強い力、弱い力、電磁気力の三つの力で相互作用しあう素粒子の群れによってどのように出来上がってきたか、その根本原理を探ろうとするのです。

高電圧で陽子や電子などを加速する仕組みは自然界にもいくつかあります。最も目立つのは稲妻です。これは積乱雲が成長しながら電気を帯びることによる現象です。電気の量が雲と雲、あるいは雲の部分で違えば高電圧が発生します。大気中の分子のうちにはわずかですが電気を帯びたもの（イオン）、それに自由な電子が存在します。それらがこの高電圧で加速され、大気中の他の分子に衝突して光るわけですが、それが大規模な放電になったものが稲妻です。うんと小規模なものでは、冬の夜、自動車にキーを近づけると火花が出ることがよくありますが、これも原理は同じです。湿度が低いと、自動車と人間と電気の帯びる量が異なっただけになることがあって、電圧が発生し、小さい“加速器”ができるのです。このような自然現象はきまぐれですから、実験装置としては使えません。

加速器は、決まった目的に合うように加速するものでなければなりません。加速器研究の歴史は、いかに加速の仕方を精密にコントロールしながら高エネルギーの極限を目指してきたかに尽きます。しかしその副産物として、日常生

活でも身近なものが2、3あります。テレビのブラウン管や医者を使うレントゲン装置などです。これらも含め、加速器に分類される装置には大きく分けて四つの大事なポイントがあります。すなわち、

1．速度や方向の良く揃った電子や陽子などを沢山発生させる部分を備えていること。電子や陽子のビームを有効に利用するからには当然事でしょう。何事もはじめが肝心ということです。

2．高電圧で一気に加速する仕組みを備えていること。とくに高エネルギーのビームを得るためには是非必要です。ぐずぐずしているとビームが無くなってしまいます。鉄は熱いうちに打てということです。

3．ビームの加速が終わるまでは、その道筋はとても良い真空中に保たれていること。空気などの分子が残っていると、電子や陽子はそれらと衝突したとき方向が変わります。その頻度が大きいと加速途中で電子や陽子の数が大きく減ってしまいます。

4．ビームの走る道筋が正確に決まっていること。加速される粒子がばらばらな軌道をとると、加速器の寸法がとても大きなものになります。高エネルギー加速器は実際上建設不可能です。また、加速途中で加速器の壁に当たって失われる粒子の数も無視できません。そして何よりも加速し終わったビームが細く、方向の揃ったものでないと利用価値が激減します。

例えばテレビのブラウン管を例に見てみましょう。その後ろの細いところ、テレビの箱で後に突き出ている部分が電子ビームを作る部分です。カソードと云われますが、フィラメントが赤くついて高温になっています。そうすることによって電子が沢山発生するわけです。カソードから電子はすぐに高電圧のかかった電極を通過します。電圧は2万ボルトぐらいです。テレビの後ろ蓋を開けると“高電圧危険”と表示してあるのはそのためです。ブラウン管はガラスで出来ていますが、作る途中で大変高温にし、中の空気などを徹底的に追い出してからガラス球を封じます。こうしてブラウン管の内部は大変良い真空中になっています。そして、正確なビーム軌道ですが、鮮明な画像が作れるように、電気や磁気のレンズが組込まれています。前面のガラスの裏側に塗られた蛍光体に電子ビームが当たって発光するわけです。ある決まった時間と場所に、ある決まった強さのビームが出来ただけ小さい焦点を結ぶことが、ブラウン管の値打ちを左右します。

さて、高エネルギー加速器は、イギリスの Cockcroft とウォルトンが完成させたものがその始まりです。彼らは1932年に陽子のビームを40万ボルトくらいまで加速して、リチウム原子核を壊し、2個のヘリウム原子核が発生することを確認しました。これが人工的に原子核が壊れた最初の例です。これにより現在の原子核物理学が飛躍的に発展しました。

どうやって40万ボルトもの高電圧を作ったかが今日の話の中心に関わってきます。その電気回路は直流電池を何段も直列につないで電圧を上げるというのと同じ原理の簡単なものです。違うところは電池のかわりに交流を直流に変える整流器を（ラジオや電話機を動かすためにコンセントにさし込む四角い形の

ものも整流器です)使いました。そして1段で10万ボルト出るものを4段使ったわけですが、そのつなぎ方に一寸した工夫があって、今でもコッククロフト・ウォルトンの整流回路と呼ばれています。彼らはその後120万ボルトまで出る装置を作っています。

ここでコッククロフトが実験をしている写真をお見せします。広い部屋いっぱい装置を積み上げ、100万ボルト前後の高電圧をかけているところです。実験者は電波、放射能などから保護する箱の中に入って装置を運転しています。

もう一つ例を見せます。これは高エネルギー加速器研究機構の装置です。これは75万ボルトの電圧を作っています。

これらの写真から、100万ボルト前後の高電圧をつくるには大きな部屋いっぱいの装置を組み上げ、放電などに細心の注意を払いながら運転しなければならないことが分かります。このように直流装置を積み上げる方式で100万ボルト以上の電圧を作るのは大変なことになります。

そこで、どうやってこれを解決するかが次のお話になります。整流回路や電池のようにプラスとマイナスが反転しない直流装置をどこまでも積んでいくわけにはいかないとすると、プラスとマイナスが反転する交流で、それも1秒あたりにたくさん繰り返してプラスとマイナスが入れ替わる高周波を使おうという考えが発展してきました。プラスになった瞬間を使おうというものです。プラスの瞬間毎にビームもやって来るような条件が満たされれば、1回毎の加速電圧は小さくても、ビームを何回も繰り返して通過させて、いくらでも高いエネルギーまで加速できます。家庭の交流は毎秒50サイクルで、1秒間に50回プラスとマイナスに反転します。しかしそれではビームを加速するには遅すぎて、実際は1秒間に100万回から100億回も速く反転する電波(高周波といわれます)を使います。

高周波を使った加速には二つの方式があります。まず一つはまっすぐビームを走らせて、その道筋に高周波のかかった加速電極をたくさん並べる方式。これを「リニアック」(線型加速器)といいます。この施設でも研究されています。もう一つは粒子を加速させる加速電極は一つか二つと少数ですが、ビーム自身を丸い軌道で、何回も何回もぐるぐる回しながら高エネルギーまで加速する方式。これは初めサイクロトロンといいましたが、だんだん進化して現在のシンクロトロンと呼ばれるものになりました。今から7、80年前は強力な高周波電波を発生させる技術はそれほど発達していませんでした。そこでアメリカのローレンスは小さな高周波電圧でも動かせるサイクロトロンを実用化しました。

<映像：半月状の金属電極が少し隙間をおいて左右に並び円形になっている写真。ビームはこの平たい円形の弁当箱のなかでらせん軌道を走るが、左右の隙間を通るときに電波を感じて加速される。弁当箱自体は磁石のN極とS極の間におかれる。その磁場の力でビームはらせん軌道を描く。>

最初にできたサイクロトロンは手の平に乗るような小さなものでした。それでも120万ボルトに相当するエネルギーまで陽子ビームを加速しました（電圧を表すボルトという単位は厳密にいうとエネルギーの単位ではないのですが、煩しさを避けるために無視します）。円形弁当箱の中心に陽子ビームを発生させる部分があります。そこで発生した陽子は二つの半月形弁当箱の隙間（加速間隙という）にかかっている高周波電圧を受けて走り出します。磁場があるので小さな円軌道をとります。半周すると加速間隙に再度到着し、加速されます。そして少し大きな半径の円軌道を走り、半周するとまた加速され、軌道半径が大きくなる、ということを繰り返してゆくわけです。軌道を上から見るとらせん状になります。軌道が磁石の一番外側まできた最高エネルギーの陽子ビームを取出して実験に使います。サイクロトロンは高電圧放電を気にしなくてもよいので、磁石を大きくすることによって、ビームエネルギーがどんどん上がってゆきました。例えば、同じローレンスのグループはN極とS極の直径が1.5mという大きな電磁石を持つサイクロトロンで2千万ボルトの加速エネルギーを達成しました。しかしこの方式でさらに高エネルギーにしようとするのは、鉄の重量や寸法から見て製作が殆ど不可能です。

そこで考えられたのが現在高エネルギー加速器研究機構にあるようなシンクロトロンという加速器です。サイクロトロンではビームの軌道半径がエネルギーとともに増加してゆきますが、シンクロトロンでは軌道半径をエネルギーによらずほぼ一定にします。これには磁石の強さをビームエネルギーに比例して大きくすればよいのです。こうしてサイクロトロンのようにらせん軌道をべったり覆う巨大な磁石は不要になり、一定半径のビーム軌道にそってドーナツ状に磁石を並べることになります。ですから磁石の総体積、総重量は大幅に小さくなりました。

シンクロトロンのシンクロは同期するという意味ですが、同じ軌道上を低エネルギーから高エネルギーまでビームと同期を取りながら加速する原理から来ています。1945年に米国とソ連で独立に発見されたこの原理は、加速器の高エネルギー化に極めて重要なものです。

しかしこれでもひとつひとつの磁石はかなり大きなものです。例をお見せします。

ロシアの古い形のシンクロトロンです。磁石はドーナツ状に置かれています。しかし各磁石の幅はバスが2台交差できるほどです。しかしこれではサイクロトロンの場合と同様に鉄の総重量からくる限界につき当たります。このように大きな磁石が必要なのは、ビームの太さが無視できないからです。ビームを構成する沢山の粒子はエネルギーや進行方向がある程度ばらついていて、したがって軌道半径も粒子ごとに異なってくるわけです。従って、ビームの太さを可能なかぎり小さくする工夫が必要です。

これは特別な磁石を軌道にそって置くことで解決しました。平均の軌道からの外れが大きいほど強い復元力（収束力）をもつ磁石を配置したのです。凸レ

レンズと凹レンズを交互に並べてゆくと、光ビームを遠くまで同じ太さで送れるのと同じ原理です。これを強収束方式といいます。シンクロトロン加速の原理と同じように重要な原理です。これは1950年前後に米国で発見されました。強収束方式のシンクロトロンでは、ビームを円軌道にする磁石と収束を受持つ磁石が軌道にそって交互にならぶこととなります。

ビームが細くなったことにより、使用する磁石の量が大幅に減少し、そのぶん大きな加速器が作れるようになりました。KEKにあるKEKBリングのライドをお見せします。これは1周3キロあります。2種類の磁石がずっと先の方まで並んでいるのがわかります。外国の例を一つお見せします。シカゴにあるシンクロトロンで1周6キロにもなります。これで驚かないで下さい。これよりも、もっと大きな4倍くらい長いものがスイスにあります。アルプスの山の地下を走っているのですが、1周26キロです。

こうして大きな加速器が作れる素地が整ってきました。そこで本題の、どのように高周波で高い電圧を作って加速をするかという話に移りましょう。高周波の高い電圧を本格的に作るには空洞というものを使います。空洞の壁は金属ですが内部は文字通り空っぽです。形を適当にえらんで電波が共鳴すれば、内部に電波のエネルギーが沢山貯まるようになります。楽器での音波の共鳴とまったく同じ原理です。電波では一見難しいようですが、うまく共鳴すると、電波がひとりでにその中に入っていつてくれます。日常の生活でも毎日電波の空洞が使われています。電子レンジの食べ物を温めるところです。これは金属の板で出来た箱ですね。外で発生した電波が効率よくこの空洞に入るように工夫されています。そうして貯まった電波のエネルギーで食べ物が温まるのです。

さて原理は同じでも加速器の空洞では大変難しい問題をいくつも解決しなければなりません。なによりも高電圧を発生しなければなりませんから、放電の原因となる尖った輪郭のものは絶対に使えません。また入力する電波エネルギーには限りがありますから、効率良く電圧が出る構造が必要です。加速する電圧の方向もビームと正確に揃っていないと、ビームの進行方向がばらつき、長時間、安定に加速できなくなります。その他、いろいろ問題がありますが、常にその時々での最先端の技術を使って挑戦してゆくのは非常に面白い問題です。事実、半世紀以上にわたっていろいろな人がいろいろな研究、発明をしてきました。

しかし殆ど全ての加速空洞はここでお見せするような短い円筒を基本形として発展しました。英語ではピルボックス(pillbox：丸薬箱)といい、ピルボックス空洞が専門用語ですが、日本語でならさしずめ茶筒というところでしょうか。円筒両端の蓋となる二つの円板の間に電圧が発生し、そのプラス、マイナスが電波の周波数で入替ります。ビームは二つの円板の中心を結ぶ線、すなわち円筒の中心軸にそって進むこととなります。

実際の加速器ではこのようなピルボックス空洞を所どころにばらばらに置いて使ったり、沢山のピルボックス空洞をまとめて長い円筒状のものにして使っ

たりします。空洞の基本条件のひとつは、電波のエネルギーが壁でできるだけ消費されないようにすることです。ピルボックス空洞では電圧が出ている二つの円板を結ぶ円筒部分に電流が行き来します。そうして電熱器（ヒーター）と同じ原理で熱となって電波エネルギーが消費され、ビーム加速に使われる割合が減ります。したがって通常は空洞は出来るだけ純度の高い、抵抗の小さい銅で作ります。あるいは、超伝導という原理的に抵抗の無い金属、例えばニオブという金属を極低温に冷やして使います。

もうひとつの基本的で大事な条件は、空洞をいかに上手に電波の周波数に共鳴させるかということです。普通、0.01%周波数がずれると実用になりません。共鳴する周波数と空洞の寸法はほぼ反比例しますので、非常に正確な寸法で空洞をつくる必要があります。それには二つの大事な工程があります。ひとつは共鳴の様子を計算機で精密にシミュレーションすることです。もうひとつは、シミュレーションに従って超精密加工することです。今日はこの超精密加工について少し詳しくお話をしたいと思います。

<映像：ビームが通る小さい円孔のあいたピルボックス空洞が多数つながった構造。>

これは先ほどのピルボックス空洞を多数一列に並べた形のもので、このタイプはリニアックの加速空洞にもっぱら使われます。たとえばKEKでは、Bファクトリーの入射器やATFの入射器等のリニアックで使われています（入射器とは主加速器にビームを入れるためのものです）。このように多数の空洞がつながったものと、ひとつひとつの円筒が非常に正確に作られていることが必要です。先ほど申しましたように高純度の銅を使って加工するわけですが、純度の高い銅ほど柔らかくなり、精密加工が難しくなります。今日は工作センターでそのような機械加工の最先端の技術がご覧になれると思います。

ではどういうふうに作っているか、具体的に見てゆきましょう。形のサンプルはいろいろありますが、直径5センチ位の空洞の例をあげてみます。その断面は基本的にはカップ状ですが、その輪郭はいたるところ曲線です。その曲線形は計算機シミュレーションで割り出されたものです。その曲線形を、どこをとっても1ミクロン - 1ミリの千分の1 - 以下のずれで再現するように加工するわけです。普通、辞書の紙の厚さが40ミクロンぐらいですから、その厚みの40分の1くらいの精度で仕上げないといけないわけです。こうして初めて望む通りに電波が共鳴するようになるのです。

このような曲線の輪郭をもつカップを、高純度銅の塊から旋盤で削り出すのですが、主な機具はどこの機械工場にもある旋盤という機械です。旋盤は陶器を作る時のろくろが横になったようなもので、粘土のかわりに金属の塊をぐるぐる回します。ろくろでは柔らかい粘土を手や竹のへらで整形してゆくのですが、旋盤ではバイトという非常に堅い刃で金属を削ってゆきます。上に述べた1ミクロンというような精度で削るには先ず刃物を選びます。現在、ダイヤモンド

ンド結晶の刃先が一番良いとされています。次のポイントは、金属の塊をぐるぐる回す回転軸がぶれたり、ずれたりしないことです。そのために回転軸の軸受けは非常に堅牢でかつ滑らかに回るように設計されます。また、加工時間とともに旋盤の温度が上がってゆくわけですが、その熱膨張によって刃先の位置がずれることに注意しなければなりません。そのために軸受けの潤滑油の温度管理などに細心の注意を払っています。このようにいろんな工夫を入れて沢山のカップ状加速空洞ユニットを高精度で削りだすわけです。

次は、旋盤で苦心して加工したこれら単体の空洞を並べ、つなぎ合わせて細長い（ふつう数10cmから2m位）円柱形の一体の加速管にします。すべての空洞の中心が厳密に一直線上にあるように注意して並べ、全体を軽く締めつけます。そして高温の炉に入れて、一体に接合するわけです。その場合、すべてのつなぎ目が完全に真空漏れがないことは当然の条件です。また、一つ一つのつなぎ目が高周波の電流の障害にならないようにきちんと付けなければなりません。そういったことに注意して空洞を一体の加速管にします。

ここで高温炉を使った接合技術について少し詳しくお話します。加速器のみならず電子レンジ、レーダーなどのための大電力高周波はすべて特殊な真空管 - 電子管といいますが - を使って発生させます。電子管は加速空洞と同じような高純度銅を主体に、タングステン、モリブデン、ニッケル、あるいは電子ビームを発生する特殊金属（カソード）、などを複雑に組合せて出来上がっています。上の加速管と同じように高真空と極小の電流損失という二つの条件を満たすために、各部品はしっかりと精度良く接合されなければなりません。金属間の接合として、銅線などを半田（錫と鉛の合金）づけするのは日常的ですが、しかし半田は強度がないこと、融点が高いことなどで電子管製作には向いていません。電子管に使われるのは、半田付けと区別して鑢付けという技術で、金、銀、銅、あるいはそれらの合金を使います。鑢材を金鑢、銀鑢、銅鑢などと呼び、様々な融点（摂氏700度ぐらいから1000度強まで）のものが用意されています。それぞれを接合したい金属の種類、接合順序にあわせて使い分けます。高真空あるいは水素ガスを入れた高温炉で高精度接合加工を行うには、真空工学、金属工学、機械工学の粋を総合する技術が要求されます。そういう意味で、電子管工業は一国の工業技術水準をはかるバロメータと言えるものです。

現代では電子管のかなりは半導体にとって代わられましたが、半導体工学は電子工学を土台に発展してきたものです。幸いにも日本は電子管、半導体それぞれ半世紀以上にわたり欧米にひけを取らない技術を蓄積してきました。これが日本におけるいろいろな加速器の成功につながっています。

さて、高温炉はふつう金属の容器で出来ているので、接合過程を直接観察できません。しかし私が昔、実験室でガラス容器の中でやった写真を持っていますので、今日はそれをお見せしたいと思います。

<映像：

1. 綺麗に削った単体銅の空洞に、直径0.5mmほどの銀鑑線を埋め込んでいます。
2. そしてこれを注意深く積み重ねていきます。
3. 積み上がった銅空洞の円柱を直径20センチほどのガラス管のなかに置きます。
4. ガラス管の中ほどには銅のコイルが巻かれている、その部分の銅空洞は赤く光っている。>

銅の空洞が赤色に光るのは、銅のコイルから電波が出て中を温めるからです。この原理は家庭用の電磁調理器と同じです。調理器自身は全く熱くないけれども、調理器に埋込んだコイルから出る電波をお鍋が吸収して熱くなり、調理ができるのです。それと同じ理屈でコイルは熱くないのですが、中の金属の温度が上がるような仕組みです。さて赤色の具合を見ながら温度を判断するのですが、900度になると絵具では出せない、きれいな赤色で輝き、一度見るとなかなか忘れることのできない色合いです。

接合技術については更に細部にわたるようで恐縮ですが、高エネルギー加速器研究機構で開発、完成された新しい方法を補足します。これは高純度銅の部品どうしの接合に使われるものですが、鏤材を一切用いない方法です。凹凸がなく、非常にきれいに仕上げられた銅部品の面どうしを軽く押しつけて炉で900度まで上げます。そうすると表面にある銅原子が互いに相手の部品の表面に入り込み、一体構造になるのです。これは拡散接合と呼ばれ、米国でも採用されています。鏤材という「異物」を使わないので、加工前後の寸法の狂いも小さく、組成も100%銅であることを保証できます。このようなほぼ理想的といえる接合は、高エネルギー加速器研究機構の工作センターで完成した精密加工技術があっただけで可能になったのです。現在、高エネルギー加速器研究機構で作っている加速管のうち、直径の小さいものは専らこの拡散接合法によるものです。

次に、空洞の中に注入する非常に強力な電波をどういうふうに発生させるかのお話しに移りたいと思います。そのように強力な電波を発生させるには、半導体ではほとんど無理で、先ほど申しましたように電子管というものを使います。その代表的なものにマグネトロンとクライストロンと呼ばれるものがあります。

マグネトロンのマグはマグネット（磁石）のマグです。磁石によって、初めの方でお話しましたサイクロトロンと同じ原理で、電子ビームがマグネトロンの容器の中をぐるぐる回っています。クライストロンは細長い電子管で、電子のビームはまっすぐ走ります。電波を発生する原理はどちらも同じです。カソードからは方向や速度の揃った電子ビームが発射されます。しかし途中でムラが生じると、それがだんだん増大します。ムラのある電子ビームが電子管に仕込まれた空洞を通過すると、共鳴を起こして電波を発生するのです。電子の運動エネルギーが電波のエネルギーに転換されるのです。ですから、出来るだ

け高電圧、大電流の電子ビームを作れば、そのぶん強力な電波が発生することになります。中電力の電波には小型にできるマグネトロンが使われますが、加速器に使うような超大電力発生には大型ですが単純な直線状のクライストロンが採用されます。

マグネトロンは電子レンジに使われており、現代の日常生活には欠かすことができない電子管です。電子レンジの中を開けることはめったに有りませんので、ご覧になったことはないと思いますが、このようなマグネトロン<映像>が使われています。

12センチくらいの波長の電波で400ワットから500ワットを出し、食べ物を温めます。

ところでマグネトロンについては日本には先駆的な業績が有ります。最初にマグネトロンで本格的な電波発生に世界で初めて成功したのは、東北大学の岡部金治郎先生でした。この方が、約70年前にマグネトロンから強力な電波が出る構造を発見されました。これが今、世界的に日常生活の役に立っているのです。しかしこれは実験していた学生が奇妙なデータを持ってきたことに端を発しています。先生は学生の実験の間違いであろうと考えました。しかし念のためご自身で追試したところ、データは正しかったというエピソードがあります。日本は電子管の分野で高度な技術を誇っていますが、その発端にこのようなマグネトロン発明があったことを忘れるわけにはゆきません。

それでは加速器に使われる電子管であるクライストロンについてお話しします。クライストロンでは電子ビームは真っ直ぐ走ります。ただし道路で車が混んでいる所と空いている所ができるように、全体がスムーズに動いているわけではありません。途中で「空洞」という、道路でいえば信号にあたる障害物が有ります。信号が無ければ一定速度で走るのですが、これがあるために電子ビームにムラができます。そのムラの周期がちょうど空洞と共鳴し合うと、ビームの走るエネルギーが電波に変わるわけす。これがクライストロンの原理です。マグネトロンと同じく、やはり6、70年前に世界的に競って研究され、特にドイツやアメリカでは力が入れられていました。しかし最も有名なのはカリフォルニアのバリアン兄弟が発明したクライストロンです。彼らは本格的にこれを実用化しました。クライストロンという名称も彼らによるものです。クライストロンの最初のクライスはギリシャ語です。沖から次第に大きくなりながら打寄せてきた波が岸辺で崩れる様を表現する単語です。一様な電子ビームにだんだんムラムラができ、波頭が最後の空洞で崩れて電波のエネルギーに変わるというまさにその様子を表現しています。

クライストロンが特に多く使われるのは上に述べたりニアックという直線的に長い加速器です。本格的な高エネルギー加速器としてのリニアックは1952年にスタンフォード大学で完成したものが最初です。それまでクライストロンが使われていたのは航空機監視用レーダーの電波源としてで、電波出力も大きくはありませんでした。スタンフォード大学のリニアック構想は1940年代後半に始まりましたが、同時にクライストロンの大電力化にも手がつけられました。

そこで再びバリアン兄弟の努力が実を結び、電波出力レベルが何桁も上がって加速器に使えるものに成長したわけです。

現在、総延長3.2キロ（2マイル）という世界最大のリニアックがスタンフォード大学キャンパスに隣接した研究所（スタンフォード・リニアック・センター、略してSLAC）にあり、40年間高エネルギー物理実験に使われています。高エネルギー加速器研究機構はこのSLACと永年にわたって協力研究を行ってきました。そのなかで、次世代の高エネルギー加速器に関する研究は重要な課題ですが、これについてはこの講演の最後のところで触れたいと思います。

ここまでは丸い加速器、すなわちシンクロトロン、と直線加速器、すなわちリニアックについてそれぞれお話してきました。高エネルギー加速器としてはシンクロトロン（特に衝突型の円形コライダーと呼ばれるもの）が多く建設されてきたことをご紹介しました。しかし、電子の加速器でより高いエネルギーを目指そうとしたとき、障害となるものが一つあります。これはシンクロトロン放射光というもので、高エネルギーを目指すときに立ちはだかる難しい問題です。高エネルギーの電子は曲線軌道を走ると、非常に鋭いエックス線を出します。これがせっかく加速した電子のエネルギーを大量に持ち去ってしまいます。ですから円軌道をとる電子のシンクロトロンは現在限界にきています。より高エネルギーを目指そうとするならば直線型のリニアック以外にありません。次世代の高エネルギー加速器として研究されているリニアコライダーは、電子リニアックと陽電子リニアックを同じ直線上に対向して置き、それぞれからのビームを中点でぶつける方式の加速器です。

ここでシンクロトロン放射光について簡単にお話したいと思います。今申しましたように、シンクロトロン放射光は高エネルギー加速には困りものです。しかし、実はある意味では福の神なのです。なぜならば、非常に強力なエックス線の線源になるので、物質の構造を調べる上で強力な手段になるからです。シンクロトロン放射光の原理は、放送局のアンテナから電波が出るのと全く同じです。違うところは、電波を出す点が、放送局のアンテナではわれわれ同様に地面に固定されていますが、加速器の軌道の上を走っている電子では、光速に近い速さで走っているということです。ですから強力なドップラー効果 - 宣伝カーが自分に向かって走ってくると音が高くなるのと同じ - で電波の振動数が非常に高くなる、いいかえれば波長の極めて短い光になります。可視光線より波長の短い光を紫外線、さらに短いものをエックス線といますが、電子のエネルギーが上がるとエックス線成分が非常に強くなります。強力なエックス線は物質の分子レベルでの構造を解析するのになくってはならないものです。そのために、シンクロトロン放射光を目的とした電子シンクロトロンが世界中に沢山作られ、物質科学の発展に非常に役立っています。

いよいよ最後に、これからの究極の高エネルギー加速器と考えられているリニアコライダーについてお話したいと思います。先に述べましたように、高エネルギーの電子リニアックと陽電子リニアックが対向した長い加速器です。陽電子は電子と全く同じ粒子ですが、ただ電気の符号が、電子は負であるのに対

し正であるところが違っています。中点で電子と陽電子が衝突すると様々な高エネルギー素粒子を作りますが、円形コライダーのエネルギー領域では不可能であった新しい素粒子の発見が期待されています。

加速器の設計についてはいくつかの案がありますが、規模としては、全長約30キロメートルのものが考えられています。先ほどのスタンフォード（SLAC）のリニアックが2マイル、3.2キロメートルですから、その約10倍です。このように長大な加速器の建設は高エネルギー加速器を研究している者の大きな夢ですが、どの国の研究所でも単独での開発は不可能です。緊密な国際協力無しには実現できないというのが共通の理解となっています。とくに高エネルギー加速器研究機構とSLACとは10数年にわたって共同研究を続けてきました。例えば、高エネルギー加速器研究機構で非常に性能のいい加速管を作り、それをSLACへ送って、どれくらい高い加速電圧を出せるか盛んに実験をしています。SLACでは高エネルギー加速器研究機構で作られた加速管を並べ、先ほどのクライストロンという真空管（電子管）で発生させた強力な電波を加速管へ入れてテストをします。この実験において、現在何が一番問題になっているか最後にお話したいと思います。

<映像：加速管の内部を内視鏡で撮った映像：5円硬貨のように中央に穴のあいた丸く平たいドーナツ状の像。>

加速管の中に電波を押しこめると、高電圧が引起す放電による内表面の損傷です。加速管の製作のところでお話し、また今映像でお見せしたように、加速管はカップ状の単位空洞がつながった構造ですが、そのカップの中央は5円硬貨のようにビームが通る小さい穴が明いています。その小さい穴の周辺にとくに高電圧が立ちます。したがって一番放電が起こりやすい場所です。放電は一種の小さい雷が落ちるのと同じと思ってください。雷が落ちると、落ちた点の銅表面を急激に加熱し、蒸発させます。結果としてあばたができます。何度も雷が落ちるとあばたがどんどんどんどん成長します。あばたが多数できるということは、精密に加工した空洞の寸法が狂ってくることを意味します。したがって電波への共鳴が起きない事態となります。また精密に加工した表面が荒れることは、高電圧による放電がますます起きやすくなるという悪循環におちいります。

<映像：上の内視鏡写真の拡大図。スポンジのように細かい穴が無数にあいている。>

上の内視鏡写真をもう少し拡大します。10ミクロンで見ると、雷が落ちて溶けてグチャグチャのあばた構造になっていることが見えます。ひとつひとつのあばたの直径はほぼ10ミクロンです。いままでの多数の加速管での実験を整理すると、あばたの成長はある電圧の大きさを越えたとき急に激しくなることが分かってきました。その値をビーム加速電圧に換算しますと、リニアコライダ

一のための設計値（1メートルあたりで70メガボルト、つまり7千万ボルト）に1、2割足りなかったのが去年までの状況でした。高エネルギー加速器研究機構とSLACはこの状況を打開するために全力をあげています。日本では、例えば埼玉大学の高電圧研究室などにも協力をお願いしています。その結果、解決の目途がついてきました。しかしこの1、2年の最大の課題であることには間違いありません。

大分細かいお話になってきましたし、時間もきましたのでこの辺で終わりにします。ただ、いかにして高電圧を作り出すか、いかにしてリニアコライダーという長大な加速管で10の12乗ボルトという高エネルギーのビームを作り出すか、物質の奥底に潜む極微のクォーク粒子、あるいはそれ以下のレベルにあるさらに極微な物質構造探索ための加速器の実現を目指し、高エネルギー加速器研究機構の多くのスタッフが情熱をかけて研究していることをお分かりいただければ幸いです。

司会：高柳先生

加速器の歴史から始まって、今どこへ向かっているかというところまでお話を頂いたのですが、ご質問は有りますか。

聴衆

高真空に保たなければならない加速管の内部でのアウトガス（ガス放出）の問題はどうなりますか。

高田先生

清浄な表面に加工することが必要条件です。お話の中で綺麗な加速管を作ると申しましたが、これにはいろいろな方法が有ります。まず電解研磨（電気メッキの逆で、汚れた金属表面を極く薄く溶かし去る）とか化学研磨（強い酸で金属表面を極く薄く溶かし去る）とかいう方法です。それから加速管を作るときには数回高温炉に入れることもお話ししました。高温に上げる過程で表面についた汚れが蒸発し、清浄な表面が得られます。旋盤で削ったままの加速空洞ですと表面にどうしても油などの汚れが残っていますので、丹念にそれらを取除くのです。それでも銅の原子と原子の間には炭素、酸素、水、硫黄、その他いろいろな原子、分子が不純物として入りこんでいて、ガス放出の原因となります。それでこのように何種類もの脱ガス処理を行うのです。これが不十分ですと高真空にならないだけでなく、最後にお話した放電の引金にもなります。まだ「これだ」「これがベストな処理方法だ」というものは見つかっていません。「だいたいこの辺だな」という感触は有ります。SLACでの加速管試験では1回のテストでに何ヶ月もかかります。そういう意味で非常に気の長い仕事です。

司会（高柳先生）他に質問は有りますか。

聴衆

最後の話で、10の12乗ボルトの加速とのことですが、実際は陽電子と普通の

電子をぶつけると2倍のスピードになるのですか。

高田先生

電子も陽電子も100万ボルト(10の6乗ボルト)も加速すると殆ど光速になります。アインシュタインの相対性原理によればどんな粒子も光速度を越えられません。したがって2倍になるのはスピードではなくエネルギーなのです。電子、陽電子それぞれ5掛ける10の11乗ボルトまで加速します。ぶつけると全体のエネルギーは2倍になって10掛ける10の11乗ボルト、言い替えると10の12乗ボルトになるのです。

リニアコライダーでもBファクトリーでも、みんな衝突型になっています。それぞれのエネルギーを足した全体がエネルギー量です。そのエネルギーでどのような素粒子ができるかが決まります。そういうふうにご理解下さい。

聴衆

最後の方の放電の問題は、電子を加速するときも陽電子を加速するときも共通に起こるのですか。

高田先生

はいそうです。空洞がたくさん並んだ加速管と呼ばれるところにたくさん強い電波を閉じ込めて、その強い電場で陽電子や電子を加速します。電子も陽電子も同じですが、電荷は片方がマイナスで片方がプラスです。ですから、電子を電波の山の頂上で加速するとすれば、陽電子は電波の谷底で全く同じ加速ができます。頂上か谷底かを除けば加速管の仕組みは何も変わりません。

聴衆 陽電子を作る方法を教えてください。

高田先生

陽電子を作る方法は、KEKBファクトリーの入射器やSLACで長く使われてきた標準的なものを考えています。高エネルギーの電子ビームを重金属に当てるといろいろな粒子ができます。その過程でガンマ線というエックス線よりもはるかに高エネルギーの光が発生します。ガンマ線が重金属の中を進むうちに電子とその反粒子である陽電子の対ができます。この電子、陽電子はやはり高エネルギーですから、それぞれが再度ガンマ線をつくります。そして電子、陽電子の対がまたできるというように、電子、陽電子がねずみ算的にふえます。そのうちの陽電子をより分け、集めて使うというのが方法の原理です。

聴衆 発生した陽電子の方向はどのようにコントロールするのですか。

高田先生

それがとても問題です。重金属の標的に打込む電子ビームは高エネルギーですから、発生する電子、陽電子は大体において同方向に走ります。しかしそれでも標的の下流にある加速管にとっては散らばりすぎです。そこで非常に強い磁石(コイル)を使って絞ります。下流にある加速器では高電圧で素早く陽電子を高エネルギーまで加速しなければなりません。さもないと、せっかく強磁場で絞り込んだ陽電子ビームがまた発散してしまうからです。どちらにしても標

的直下のコイルや加速管は常に強烈な放射線にさらされています。その条件下で強い収束磁場や高加速電圧を発生するのが難しいのです。

聴衆 リニアコライダーは長さが30キロですが、50キロだと更にいいのですか。

高田先生

いろいろな評価のポイントがあるのでそうとは言いきれませんが、一口に言えば長い方がいいです。ただし、そんな土地がどこに得られるかという大きな問題があります。それから長さに比例してビームエネルギーを上げようとするれば、運転するための電力も増加します。それをどうやって押さえるかが問題です。今の技術レベルでは30キロくらいだと電力にして100メガワットから200メガワットくらい必要ですが、50キロになると2倍近くになりますので、どうやって電力を調達するかとか、電気代をどうするかなどいろいろな問題があります。一方、ビームエネルギーは変えないとすれば、長いほうが電力が小さいし、単位長さ当りの加速電圧も減ります。ただ、細いビームをまっすぐ走らせるためには、沢山の加速管を直線上に高精度で並べてゆかなければなりません。30キロから50キロになると、この並べ方の精度は非常に厳しいものになります。

リニアコライダーの設計パラメーターは絶えず更新され、よりよい加速器システムへの改善努力が続けられています。しかし、長さについては30キロメートル辺りが様々な面において、最善の数値のようです。

司会（高柳先生） ありがとうございます。