

## 加速器で探る素粒子・宇宙・物質・生命

J-PARCセンター長 教授 永宮 正治



### はじめに

ご紹介いただきました永宮でございます。  
本日は、この講演会にお越しいただき、ありがとうございます。私は、現在J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) という加速器施設の建設に携わっています。このプロジェクトは、日本で一番大きな加速器プロジェクトです。本日の題名に掲げた素粒子・宇宙・物質・生命に関して、加速器はどのようなチャレンジをしているかについて、今日はお話したいと思います。特にJ-PARCにおいていかなる研究がなされようとしているかを中心にお話ししますが、時間の許す限り他の加速器についても触れたいと思います。

### 粒子と波

まず粒子と波について考えたいと思います。こういう例をとってみましょう。暗い井戸の中に水があるかどうか調べる実験を試みます。波の性質を持つ光を使って観測する方法があります。懐中電灯を照らして、中に水があるかどうか調べるという方法です。しかし、別の方法もあります。井戸の上から石を放り込み、跳ね返ってくる水を観測する方法です。この場合は、中に水があるというだけでなく、それがきれいな水であるかとか、あるいは飲める水であるかどうかといった、水の成分までも測定できます。このように、石ころのような粒子を使うか、懐中電灯の光といった波を使うかによって、井戸水の見える側面が異

なってきます。

現代物理学では、粒子は波であり、波は粒子であるという、やや込み入った事情が知られています。そのため、近代的な物理学実験では両側面を利用できるという、複雑ですが好都合な事情も存在します。この点について、まずご説明しておきたいと思います。

図1のように二つのスリットを用意して、光のような波を入射させます。波の波長を二つのスリット間隔程度に調整しておきますと、右のスクリーンに波の干渉縞が見えます。この現象は、学校で実験されたり習われた方が多数おられると思います。

次に、同じ二つのスリットに粒子を入射させます。皆さん電子という粒子はお聞きになった事があると思いますが、電子を左から入射しますと、粒子の強度分布は図1の右上のように、2カ所で多く観測されるのではないかと想像されます。しかし、実際の測定した結果は図1の下のような結果になります。たしかに、一つ一つの電子は粒のように観測されます。しかし、その強度分布はちょうど左上の波の干渉縞のようなパターンを示すのです。

このことは粒子は波であり、波は粒子であるということを示しており、20世紀の物理学の基礎的な概念になっています。もちろん、波長がスリットの幅に非常に近い場合にのみこのような現象が起こるわけで、波長が非常に短いと古典的な描像に近づいてきます。

皆さんは中性子という粒子を聞かれたこと

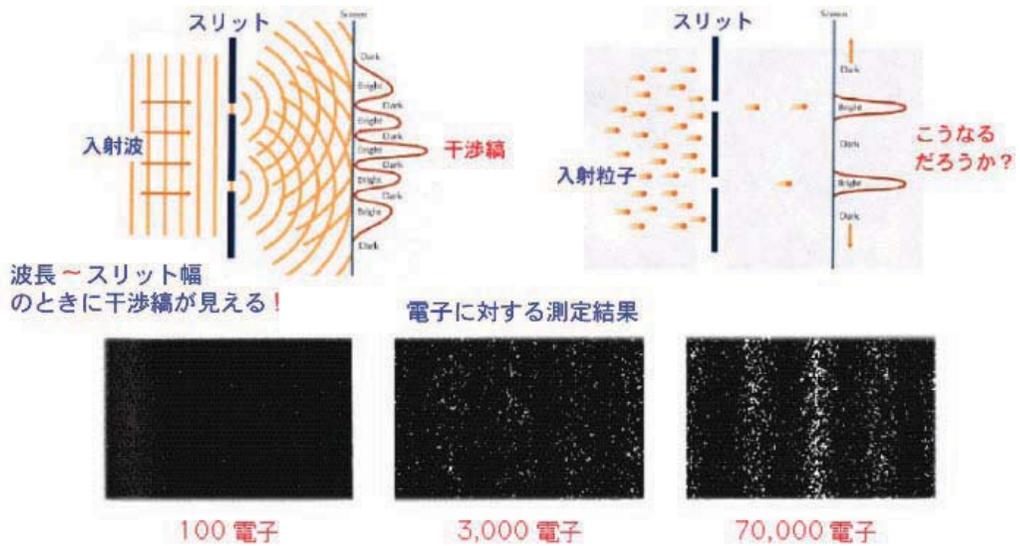


図1 つぶつぶの電子が作り出す干渉縞

があるかと思います。これは、J-PARCの今日の話でも何回か出てまいります、中性子は波であるというのはご存じでない方もおられると思います。中性子に対する実験結果をみても、二つのスリットを通過する粒子が、あたかも干渉縞のようなパターン、回折パターンが観測されることがよく知られています。

今日の話には、ニュートリノという粒子も出てまいります。ニュートリノという粒子は、スーパーカミオカンデという、水をいっぱいためた装置で観測されます。ちょっと難しい話になりますが、その測定の方法をご紹介します。ニュートリノは電氣的に中性な粒子ですが、それを原子核に当てると、電荷のあるミュー粒子というのが出てきます。これを、水の中で観測しますと、チェレンコフ光という光が出てくることが知られています。スーパーカミオカンデでは、チェレンコフ光を観測するのに約5万トンの水を溜め、1万本余りの光電増倍管を用意いたします。

そこで測定データを見ますと、確かに図2に示すようなリングが見えます。チェレンコフ光特有のリングが鮮やかに観測され、これを用いるとニュートリノがどの方向から飛んできたかも測定できます。一方、このデータ

をよく見てみますと、光もつぶつぶの粒子のようにふるまっていることがわかります。光電増倍管で観測されたチェレンコフ光は、一つ一つが粒のようになっています。このように、光が粒子であるというのは、1905年にアインシュタインがすでに言い始めたことで、アインシュタインは相対性理論で有名ですが、実はつぶつぶの光であると言い始めたということでノーベル賞を受賞しました。このように、波は粒子で粒子は波であるということが、ほんやりとでもお分かりになったのではないかと思います。

それでは、粒子と波はどう結びつくかということを中心に考えたいと思います。ルイ・ドブロイという人が、波の性質である「波長」と粒子の性質である「運動量」は反比例の関係で結びつくということを言いました。これは彼の博士論文ですが、パリの大学の先生はこの博士論文はよく理解できないということで、論文の審査をアインシュタインにお願いしました。アインシュタインはこれを眺めて、数学的に美しい論文であるので合格にしろということになって論文になったという話が残っています。その直後にアメリカで、先ほど図1で述べたような「電子が波



図2 スーパーカミオカンデとニュートリノの観測。  
光もつぶつぶの粒子であることがよく分かる。

である」という実験結果が出されました。

それによってこの博士論文がノーベル賞になったわけですが、この意味は、粒子のエネルギーが高いほど実は運動量が大きくなり、波長が短くなるということにあります。先ほどのスリットのデータを見ますと、エネルギーが高いほど、スリットの幅が狭い間隔まで見えてくる。すなわち、エネルギーが高いほど、マイクロなものが見えるということになります。

### 加速器

このようなことから、マイクロな世界を見る道具として、波長を短くしてよりマイクロなものを観測する手段として、加速器が登場いたしました。加速器はマイクロなものを見る装置として非常に強力なものであり、以下にご紹

介しておきたいと思います。

ご承知のように、原子の内部を眺めると、原子は中心に原子核がありその周りを電子が回っています。そのうち、一番単純な原子は、陽子の周りを電子が回っているという水素原子です。それを温めると、プラスとマイナスが引き離されまして、イオンのガスができます。プラズマという状態です。そこに図3のように負の電圧をかけますと、真ん中にある陽子が加速されていきます。

このように加速された粒子はエネルギーを持ちますが、1ボルトかけたときのエネルギーを1電子ボルトと呼びます。1エレクトロンボルトとも言います。先ほど申しましたように、エネルギーが高くなるほどマイクロなものが見えてきますが、10キロボルトぐらいかけますと、波長が原子のサイズぐらいになります。ということで、原子を見るには、この程度加速した粒子を見ればよく見えるということになります。さらに、メガというのは100万ですが、100メガボルト、すなわち1億ボルトぐらいかけると原子核がよく見えます。1 GeVというのはさらに大きくて10億ボルトぐらいですが、そうすると原子核中の中性子や陽子が見えてきます。さらに100ギガエレクトロンボルトぐらいに上げると、素粒子の世界が見え始めるわけです。

実は、図3は加速器の原理を示したもので、単一の電極でかけられる電圧は限られています。そのため、実際の加速器では、多くの工

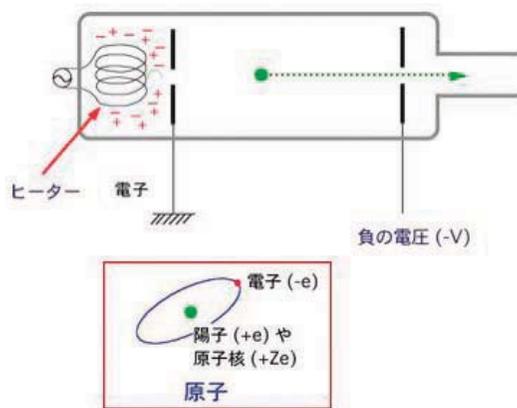


図3 加速器の原理

夫が施されています。今日のお話では典型的な二つの工夫についてお話ししたいと思います。

一つは、図4に示したりニアックと呼ばれる線形加速器で、たくさんの電極を直線上に並べるものです。まず単一電極で1MVの電圧をかけます。この電圧は、ほぼ単一電極における上限値と考えられています。この場合、一番目の電極でマイナスの電圧をかけ、粒子が電極に着いたら電極の電圧を反転し、次の先の電極を用意してそこでマイナスをかけます。そうしますと、2倍のエネルギーまで加速できます。さらに、3段目を用意して同様の工夫を施しますと、今度は3倍のエネルギーにまで加速できます。たとえば1,000段加速しますと、1,000MeV、すなわち1ギガ電子ボルトまで加速できるわけです。

一方、単一の電極だけを見てみると、マイナス、プラス、マイナスと交流の電場をかけることで済みます。すなわち、交流の電場をかけることにより、全体としては電極の数に印加ボルトをかけたエネルギーにまで加速できる。これが、リニアックという加速器です。J-PARCでもリニアックを入射器として用いております。

一方、リニアックの欠点は、エネルギーを上げると加速器が長くなっていくという点が上げられます。長くなるとお金もかかります。

そこで、単一電極を何度も使う工夫はないだろうかと人々は考えました。

ご承知のように、電荷を帯びた粒子が磁場の中を走りますと、フレミングの左手の法則により、粒子は曲げられます。そこで、図5のように電極を用意して、まず加速します。まず先ほどの10分の1、100キロボルトぐらしかけて加速するとします。そこに磁石をたくさん並べ、一つ一つではちょっぴりと曲げて、全体としては1周まわって戻ってくるように磁石を配置します。戻ってきたときに、そこで再度加速しますと、一つの電極を何回も使うことができるわけです。

もう少しミクロに見ますと、エネルギーが上がると磁場で曲げられにくくなります。したがって、磁場の強さをエネルギーとともにシンクロナイズして増やしていくことにより、同じ軌道を回すことが出来ます。このように、磁石の強度をエネルギーを共にシンクロナイズさせるので、シンクロトロンと言われております。シンクロトロンを使いますと、たとえば100キロボルトかけて10万回ぐらいいると、10ギガエレクトロンボルトまで加速できるということになります。J-PARCでもこういう原理の加速器も使っており、50GeVシンクロトロンでは、リングの中を数十万回回すということで現在調整中です。

加速器には、大ざっぱに言って三つの方向

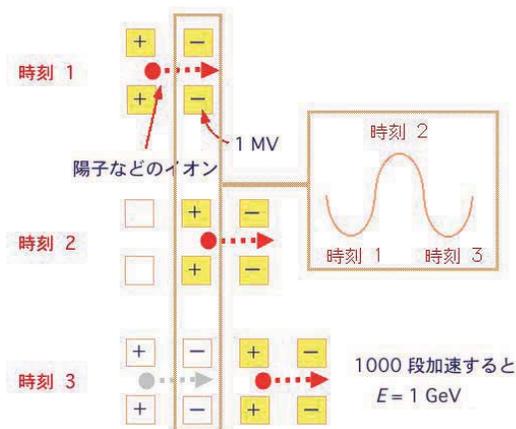


図4 リニアック（線形加速器）の原理と実際のリニアック。



図5 シンクロトロン の原理と実際のシンクロトロン。

があります。第一の方向は、エネルギーを増やして、よりマイクロなものを見ようとする方向です。新しい粒子の発見も期待できます。しかし、エネルギーを大きくしますと、加速器自身が大きくなってきますから、21世紀は世界規模で作るべしと言うことになりつつあります。最近話題になっているLHCや、近々国際協力でつくろうとしているILCという加速器は、このエネルギーを上げようとする方向に属する加速器です。

第二は、エネルギーはそれほど上げなくても強度を上げようという方向です。これは大強度化といいますが、加速する粒子の数を増やすということです。日本にあるフロンティア加速器、あるいは21世紀の主たる潮流は、ほとんどこの大強度化に集中されています。たとえば、電子ビームの大強度化で得られるものはBファクトリーがあります。これは高エネルギー加速器研究機構で動いている加速器です。あるいは、お聞きになったかどうか知りませんが、西播磨にあるSPring-8という加速器があります。電子ビームを加速して大強度化し、それから出てくる放射光を使うというものであります。また、陽子ビームの大強度化は、J-PARCでわれわれがつくろう

としているもので、中性子、K中間子、ミュオン、ニュートリノといった粒子ビームを用います。さらに、原子核ビームを加速して大強度化するのがRIビームファクトリーで、理化学研究所によって最近稼働を始めました。このように、日本の多くの最新加速器は、この大強度化をめざしています。

第三の方向は、特殊な目的として加速器を応用研究に使うものです。日本で最も盛んなのは、医療用の加速器です。特に、HIMACは強力ながん治療の目的で使われています。さらに、小型医療用加速器は多くの場所で使われています。

加速器は、ほぼこの三つの方向で進んでいますが、加速器が基礎科学で非常に注目される理由は、ノーベル賞の数だけ見ても、20世紀には加速器から14件のノーベル賞が出ていることから伺い知ることが出来ます。21世紀にも1件出ています。最近の傾向は、上に述べた「大強度化」からたくさんノーベル賞が出てきているということです。

この節を終る前に、日本の加速器にはどういったものがあるかをご紹介します。まず、素粒子や宇宙を見る研究としては、大強度化の例として挙げた高エネルギー

加速器研究機構のBファクトリー、大阪大学にあるサイクロトロン、理研にあるRIビームファクトリー、それからJ-PARCにある50GeVのシンクロトロンにおけるK中間子ビームやニュートリノビームが代表的なものです。

物質や生命を研究するものとしては、西播磨にあるSPring-8と呼ばれる大型放射光施設、その原型となった高エネルギー加速器研究機構の放射光施設があります。あるいは、加速器ではありませんが中性子を出す研究用原子炉があり、さらに、J-PARCの3 GeVシンクロトロンでは、中性子やミュオンビームを用いて物質科学や生命科学の研究を行う加速器として注目されています。

最後に医療用は、先ほど言いました放医研のHIMACは有名なものですが、それ以外に植物の改良に使われる加速器、等も稼働中です。

#### J-PARCとは？

加速器の大ざっぱなお話はこの辺にしまして、次にJ-PARCとは何かということについてお話しておきたいと思います。J-PARCというのは、大強度の陽子を加速する装置で、東海村に建設中であります。日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構の共同事業として進められている事業ですが、建設は今年度で終了いたします。予算としては

1,500億円ぐらいの規模のものです。

図6に示しましたように、入射器としてリニアックがあります。先ほどの線形加速器です。リニアックでは、陽子ビームを光の速度の60%ぐらいまで加速します。これを入射器として使い、3 GeVシンクロトロンで30億ボルトまで加速します。ここでは、陽子ビームは光速の97%ぐらいまでになります。そのビームを物質・生命科学実験施設というところに導き、ここで中性子、あるいはミュオンをビームとして引き出し、物質・生命科学を行います。

さらに、5%ぐらいのビームを50GeVシンクロトロンに導き、500億ボルトまで加速します。ここでは、陽子ビームは光速の99.98%にまで加速されますが、そのビームの一部をハドロン実験室というところに導いて、Kaonファクトリーとも言われていますが、中間子ビームをつくりだします。さらに、別の箇所からビームを西の方向に曲げ、ニュートリノビームをつくり、神岡で検出するという壮大な企画もされています。また、さらに将来は、核変換の実験施設もつくろうということになっています。今日は、お越しいただいた玄関のところに、この装置の模型やパンフレットを置いてありますので、興味のある方はお帰りの際にもお持ち帰りいただければと思います。

このJ-PARC計画は何を目指すかということ

ですが、陽子を光速近くまで加速して原子核と衝突させます。そうすると、原子核というのは実は陽子や中性子からできていますが、これをちょうどハンマーで叩き割ったような反応が起こります。これを、図7に示しましたように核破碎と言いますが、そうしますと、中に含まれている中性子が沢山出てきます。あるいは、中にほとんどなかった中間子が出てきます。この中で、 $\pi$ 中間子はミュオンとニュ



図6 J-PARCの全体図

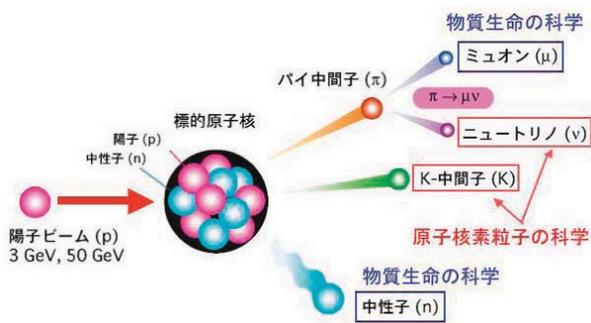


図7 J-PARC研究の特徴

ニュートリノに崩壊することが知られています。

われわれが学生時代や若い頃は、こういった中間子や中性子がいかに放出されるかを研究するだけでも研究テーマになりました。しかし、現在はこういうものがどう放出されるかというメカニズムは良く知られています。逆に、よく分かっている放出粒子ビームとして用いることにより、新たな研究が出来るのではないか。そういう点に着目したのがJ-PARC計画です。

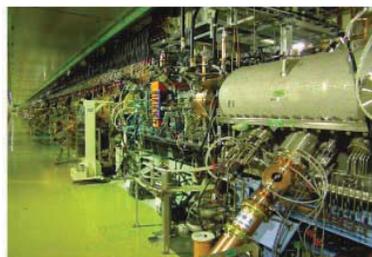
具体的に、ビームの強度を算定しますと、

中性子やミュオン、あるいはK中間子等、粒子によってビーム強度は異なりますが、1秒間に100万から1億個ぐらいの粒子がJ-PARCの実験室で得られます。神岡の検出器を通過するニュートリノの量も同程度あります。

こういった粒子をビームとして使うためには、そもそも入射する陽子ビームの強度が非常に高くないと使い物になりません。というわけで世界最大強度陽子ビーム加

速が必要になってきます。大強度の陽子加速器が必要になるのは、こういった理由からです。

現在建設はどうなっているかと申しますと、図8に示しましたように、リニアックでは平成19年1月にビームを出しています。さらに、3段ロケットみたいなものの2段目に相当する3 GeVシンクロトロンにおいても平成19年10月にビームが出ています。強度も順調に上がり、9月18日(昨日)には、210キロワットという、世界最高レベルに近づいています。



リニアック (長さ330m) : 平成19年1月24日にビーム。



3 GeVシンクロトロン (周長350m) : 平成19年10月31日にビーム。平成20年2月末にはパルスあたり5 kW (2.5 Hzでは130 kW相当)。同年9月18日には210 kW 出射。



5.0 GeVシンクロトロン (周長1600m) : 平成20年5月22日に3 GeVビーム周回、RF捕獲、出射に成功。



超伝導電磁石

図8 各種加速器の建設状況



図9 J-PARCの現在の建設状況

210キロワットと申しましても、これがどれだけすごいものかお分かりにならないと思います。実は、これまで日本最高記録を達成した高エネルギー加速器研究機構のブースターシンクロトロンのビームパワーが3キロワットでした。したがって、それに比べて70倍の強度が出ているということに相当します。さらに、実は、この値は最終ゴールではありません、われわれはこの5倍ぐらいまで増強しようとしているわけです。

最後に、第3段目の50GeVシンクロトロンでも、5月末にほぼビームの周回に成功し、現在加速テストを行っているところです。

こういう風に、プロジェクトは順調に進んでいます。プロジェクトを進めていくには、工程表と言うものが非常に重要です。われわれのプロジェクトは2001年度、平成13年度に建設を開始し、今年が建設の8年目になっています。この工程表をつくったのは3年ぐらい前ですが、その時点から、この工程表を変えずに作業を進めています。リニアックや3 GeVではビームが出て、50GeVでもビームが出つつあるということです。したがって、3

GeVを使う中性子やミュオンのユーザーには、今年12月から利用を開始していただくということになっており、現在そのための準備を進めているところです。

実験施設は、図9に示しましたように、リニアックがあり、3 GeVシンクロトロンがあって、その後ろに50GeVシンクロトロンがありますが、3 GeVシンクロトロンからビームを導いて物質・生命科学実験施設にビームが導かれています。さらに、50GeVからはハドロン実験施設にビームを導く。これは今年度のプロジェクトで、来年度早々、平成21年4月に神岡のほうに向けてニュートリノビームを出射することになっております。

#### 素粒子や宇宙の実験

それでは、次に、どのような素粒子や原子核の実験がなされるかについてお話したいと思います。まず、物質は原子からできているというのはご存じだと思いますが、その原子の中を眺めてみると原子核が真ん中に存在し、原子核は陽子や中性子からできています。それをさらに顕微鏡で眺めてみますと、陽子



図10 三世代を持つクォークとレプトン

や中性子はさらに素なる粒子、クォークからできていることが知られています。

このクォークは何種類あるかに関して、1980年代から1990年代、素粒子物理学の注目はこの点に注がれましたが、現在、図10に示しましたように、第3世代までで終わりではないかと言われています。すなわち、素粒子の世界は、クォークが3世代、さらに、電子とかニュートリノを含むレプトンで3世代あるというのが、現在の素粒子描像です。

素粒子に関していくつかの疑問がありますが、現在一番皆さんが関心を持ち、私自身も非常に興味を持っていることは、質量という問題です。質量に関する三つの謎をここに書きました。まず第一の疑問は、なぜ質量という物理量が生じるのかという点です。質量の概念を作り出す起源を探ろうと言うもので、ヒッグスという先生が質量をつくる場を定義しました。そうしますと、それに付随して粒子が出てくるということです。ヒッグス粒子を探索するというのがCERNのLHCの最大の目標です。質量をつくる神様みたいなものです。

次の第二の疑問は、もともと質量がゼロであると信じられている粒子がいくつかありますが、果たしてゼロなのかという疑問です。たとえば電磁場を媒介する光子、フォトンで

す。アインシュタインが見つけた光の粒子は質量がゼロです。また、ニュートリノも謎の粒子と言われていましたが、質量はゼロと仮定して、標準模型という素粒子の模型がつけられています。はたして、ニュートリノには質量がないのでしょうか？ 特に、ニュートリノに関しては、質量があるのではないだろうか、疑問を出されるようになりました。

さらに、第三の疑問は、先ほどクォークが集まって陽子や中性子ができると言いましたが、実は地球上の物質の質量の99.8%は陽子

や中性子が担っていますが、クォークが複合体をつくる時になぜ陽子や中性子の質量ができるのかが、大きな疑問です。軽いクォークが3つ集まると、急速に重たい陽子や中性子が出来ることも知られており、疑問は増すばかりです。

J-PARCはこの第二の疑問と第三の疑問の二つにチャレンジしようという、大きな夢を持って邁進しております。第一の疑問に関しては、CERNのLHCが答えることになるでしょう。

### ニュートリノ実験

そこで、第二の疑問のニュートリノの質量に関してですが、高エネルギー加速器研究機構の前の機構長で最近お亡くなりになった戸塚先生という方が、地球の上から飛んでくるニュートリノと裏側から飛んでくるニュートリノを観測しました。そうすると、裏側から飛んでくるニュートリノより上側から飛んでくるニュートリノの数が多いうことを発見されました。ニュートリノが地球の裏側から表側にやってくる間になくなってしまいう現象を、ニュートリノ振動といいます。実は、ニュートリノ振動が起こるのは、ニュートリノに質量があるときに限られています。そういうわけで、ニュートリノには質量があると

- 素粒子の標準模型ではニュートリノの質量をゼロと仮定している
  - しかし、ニュートリノに質量！
  - ← ニュートリノ振動

地球の上方から飛んでくるニュートリノの数の方が地球の裏側からのニュートリノより数が多い。この観測からニュートリノ振動が発見された。



戸塚 洋二氏  
(前KEK機構長)



図11 T2K (Tokai to Kamioka) 実験

いうことを言われました。

もしそうならば、加速器で人工的に作ることでできるニュートリノを使って実験できないだろうか、というアイデアが生まれました。その検証実験のごく初期的な実験は、KEK-PSを用いてすでにスタートしました。J-PARCでは、この本格的な実験を行おうとするものです。まず、加速器を用いてミュオンニュートリノという粒子をつくります。そのミュオンニュートリノが別のニュートリノに変わる、ニュートリノ振動を見つけようとする試みです。図11に示すT2K (Tokai to Kamioka) 実験です。

ちょっと専門的になりますが、この実験では、第1と第3のニュートリノの混合角を世界で初めて測定します。ミュオンニュートリノが振動を起こしますと、主にタウニュートリノに変質しますが、一部分、電子ニュートリノにも変化します。前者のみならず、後者を測定しようという試みです。これは非常にユニークな実験であるということで、当初は100名ぐらいでチームをつくっていましたが、

日本人実験者は当初からあまり増えていませんが、どんどん外国人が増えて、現在350人の外国人が参加しております。

この実験ではどういった装置を使うのかについて、若干説明しておきます。50GeVとシンクロトロンからビームを曲げ、まず図12の右付近に導きます。そこで $\pi$ 中間子をつくります。次に、ディケイボリュームというところで、 $\pi$ 中間子が崩壊してニュートリノが生成されます。さらに、 $\pi$ 中間子を神岡方向に向けて絞る装置を置きます。これはホーンと呼ばれる装置です。最終的には、ニュートリノがこの場所で生成されたということを確認する敷地内検出器でニュートリノの生成を確認してから、神岡方向に出射されます。

ニュートリノはどの程度作られるのかを考えますと、J-PARCでは1秒間に1,000兆個のニュートリノが敷地内で生成されます。すごい数です。その後、ニュートリノは1,000分の1秒間で神岡に着きますが、いくら絞っても限界があり、1秒間に全個数の0.03%の約3,000万個ぐらいしか神岡検出器を通過しま

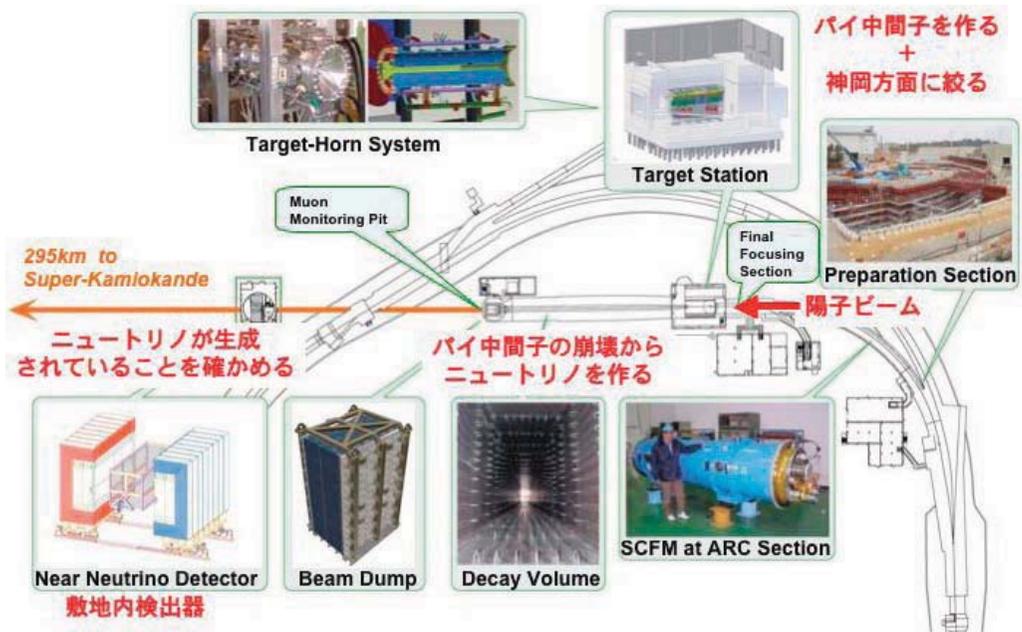


図12 T2K実験で用いられる種々の装置群

せん。しかし、1日経過しますと数兆個のニュートリノが神岡のスーパーカミオカンデ検出器を通り抜けるわけです。通過したもののほとんどは神岡でも検出されず、検出されるニュートリノ数は高々10個ぐらいです。非常に難しい実験であります。

宇宙の空間を眺めると、宇宙で一辺2メートルの立方体をつくりますと、宇宙ではその箱の中に平均1個の陽子と電子が入っています。しかし、ニュートリノは何と30億個も入っているのです。宇宙はニュートリノで満ち満ちているわけです。したがって、ごく微量の質量でも正確に量って、宇宙の質量を正しく計測するという事は非常に重要なことでもあります。

アジアの地図を広げると、ニュートリノを神岡に飛ばすと、神岡ですら広がってぼわっとしてくるわけですが、ぼわっとしたものが西に飛んで、1,000キロぐらいで次に韓国にぶつかります。J-PARCができると、韓国でも自然にニュートリノが飛んでくるわけですので、T2KK (Tokai to Kamioka, Korea)

という実験も現在検討が始まっています。

### ハドロン実験

次に第三の課題として、陽子や中性子の質量という話をしたいと思います。先ほど陽子や中性子は三つのクォークからできていると言いましたが、陽子はuudという三つのクォークからできており、中性子はuddという三つのクォークからできております。両者の質量は、陽子で938MeVで中性子では940MeVなので、

$$2m_u + m_d = 938\text{MeV}$$

$$m_u + 2m_d = 849\text{MeV}$$

を解きますと、 $m_u = 312\text{MeV}$ で $m_d = 314\text{MeV}$ という値になります。われわれの学生時代はこれが正しい値ではないかということを知ったことがあります。

一方、 $\pi$ 中間子というのはud-barで構成されています。d-barというのはdの反粒子ですが、質量はdと同じです。したがって、ud-barの質量は $m_u + m_d = 626\text{MeV}$ になります。しかし、実際の中間子の質量は140 MeVし

かありません。さらに、その後 $m_u$ クォークとか $m_d$ クォークの質量を量る実験をしたら、実は $u$ クォークは2 MeV、 $d$ クォークは5 MeVしかないということがわかってきました。そうすると、これを足してもとうてい陽子や中性子の質量は生み出されないわけです。何か別のメカニズムがあって、クォーク同士がくっつき合ったときに質量ができるのではないかと考えられます。なぜ軽いクォークが集まって重い質量になるか。これは、英語ではmass without massというパズルとして数年前から皆さんがかなり真剣に考えている課題です。

宇宙論的に見るとどういうことかと申しますと、ご承知のように150億年前にビッグバンができたという仮説がありますが、宇宙ができて約0.1ミリ秒後に、バラバラのクォークや反クォークが結合し、陽子や中間子ができたと考えられています。この瞬間にクォークの閉じ込めが起こり、大きな質量が発生したのではないかと考えられています。すなわち、クォークの閉じ込めの現象とクォーク複合体が質量を生むことは、関連しているのではないかと考えられます。

南部陽一郎先生という有名な先生がおられますが、この先生がかなり昔に、クォークを結びつける力になるグルーオンという餌のような粒子の存在を提唱されました。その餌の粒子がカイラル対称性を破る。そのため、餌の粒子が質量の発生の原因ではないかということを言われました（追記：南部先生は、その後ノーベル賞を受賞されましたが、そのノーベル賞の受賞対象が、ここでいうカイラル対称性の破れに関する研究でした）。

この餌の効果の計算は難しく、その後、こういう計算は通常の方法ではできないと考えられ、長らく放置されていました。図13の記事は、若干古い新聞からの抜粋ですが、去年の4月ごろの朝日新聞です。物質に重さがある理由がついに検証されたということです。数式的にはなかなか解けないものが、スーパーコンピューターという大型計算機を駆使して、やっと計算の糸口が見ついたという話題です。もちろん、完全に解けたわけではなくて、今はまだまだ研究中のテーマです。

したがって、実験的にはほとんど何も検証されていません。最近、 $\pi$ 中間子や $K$ 中間子を原子核の中に埋め込むことにより、実験的



クォーク同士が結合する時には「餌」のようなグルーオンが介在し、このグルーオンが質量発生の原因となる。

クォークを結びつける餌が、カイラル対称性と称される対称性を破り、そのために質量が生じることを提唱



南部陽一郎氏  
(シカゴ大教授)

■ 最近は大規模計算機を駆使して質量を計算

(朝日新聞、H19.4.25. 朝刊)

図13 陽子や中性子に質量が出来る原因

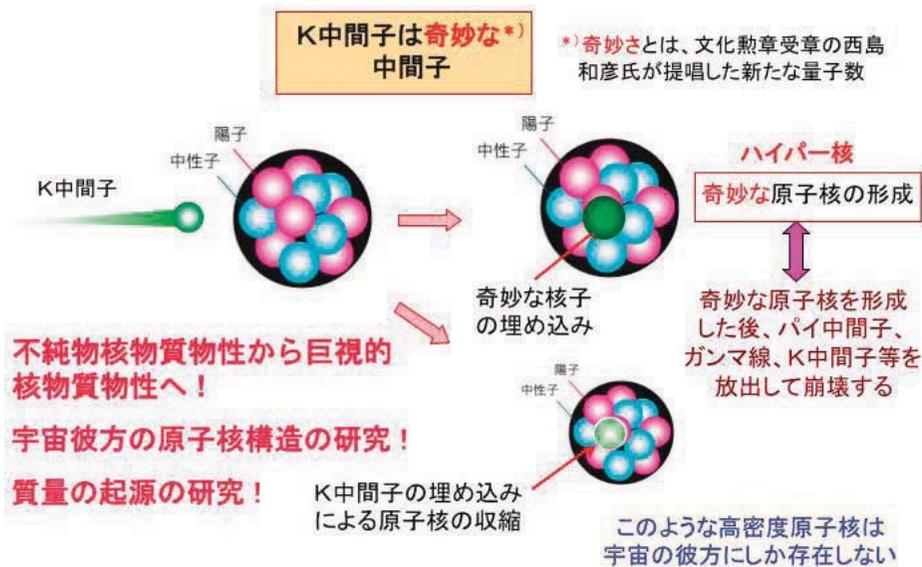


図14 ハドロン実験ホールでの実験計画

な研究が急速に進み始めました。原子核という高密度物質の中にこれらの中間子をいれ込むことにより、真空中と異なった条件下で質量の変化を観測できるからです。さらに、K中間子を埋め込みますと、原子核全体を収縮させるのではないかという理論的予測があります。より専門的な言葉で申しますと、図13のカイラル対称性の破れが、中間子を入れ込む物質の密度により大きく変化するのです。こういった実験的な研究を進めようとしています。J-PARCではこのような実験研究が一つの主要な研究テーマとなっています。

また、原子核の密度が、K中間子を埋め込むことにより高くなれば、地上には存在しない原子核の研究も加速されます。実は、地球上の原子核の密度は一定とされており、ある一定密度以上には変化しないと考えられておりました。それが、K中間子の注入により、より密度の高いものが出来ると、まったく新しい世界が開けます。宇宙の果てまでいくと、中性子星といった密度の高い星の存在が知られています。K中間子ビームを用いると、このような新たな星の構造を調べることも可能になるかもしれません。図14に示したよ

うに、夢はどんどん広がります。

ともかく、原子核中に中間子を放り込むことにより、その性質の変化を見ようというのが、これらの実験の共通した課題です。

#### 物質や生命科学の実験

J-PARCでは、3 GeV陽子ビームを実験施設に導くことにより、ミュオンや中性子のビームを発生させることができ、物質科学や生命科学の実験も可能になります。特に、中性子ビームとはどういうものかにスポットを当てて、ご紹介したいと思います。

結晶を用意しますと、結晶には結晶面というのが存在します。中性子を結晶に照射しますと、中性子は冒頭に申しましたように波のような性質を持ちますから、走行距離の差がちょうど波長と同じ、あるいは波長の整数倍になった場合は、波を強め合うということが知られています。フラッグ反射と呼ばれる現象で、結晶解析の基になる現象です。波長が一定ですと、角度を変えると走行距離を変えることができますから、ある特定の角度に反射されやすいという現象が起こります。

実験のデータを眺めますと、まず図15を

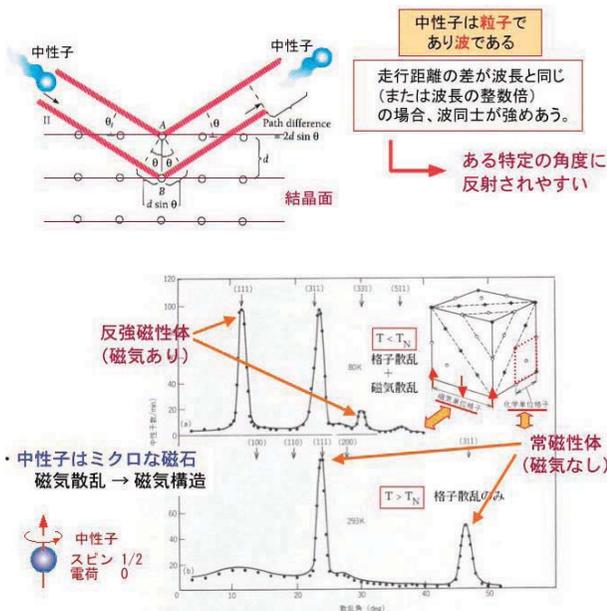


図15 中性子の散乱(回折)と実際の実験データ

見ていただければ、 $23^\circ$ 位のところで強く散乱され、その次は $46^\circ$ ぐらい散乱されるという風に、波の1倍、2倍、3倍というところで強い散乱が起こります。このように、非常にきれいなブラッグ散乱というのが出ます。この間隔は、結晶のユニットセルといわれ、このような測定によって結晶構造を決めることが出来るわけです。

温度を下げていきますと、実はこれ以外の別のピークが出てきます。中性子は電荷はゼロですが、スピンというのを持っていて、磁気を持っています。中性子はミクロの磁石と言われてます。したがって、磁気的に規則正しく並んで構造があると、その性質が見えるというわけです。このデータでは、 $11^\circ$ ぐらいのところ

格子間隔にすれば2倍のところが見えるわけです。2倍のところが見えるということは、磁気構造は結晶構造と異なっていることを示唆しており、実は、反強磁性体という磁気構造が図15のように交互に上と下と変化している構造がきれいに見えるという次第です。すなわち、中性子散乱は物質の磁気の研究に非常に有力であることが知られており、今後も物質の磁性研究においては重要な役割を果たすと考えられております。

さらに、中性子線は、SPring-8等で得られるエクス線と異なり、非常に面白い性質があります。エクス線は電子に当たってはね返るという性質があります。したがって、電子の数が多いものはよく見えますが、少ないものはよく見えません。一方、中性子線は、原子核に当たって反射しますので、どんな原子でも同じように見えるという性質があります。逆に言うと、エクス線で見たときには鉛とかニッケルという重い原子、すなわち、原子番号の大きなものはよく見えますが、水素などの軽い元素は中性子の方がよく見え

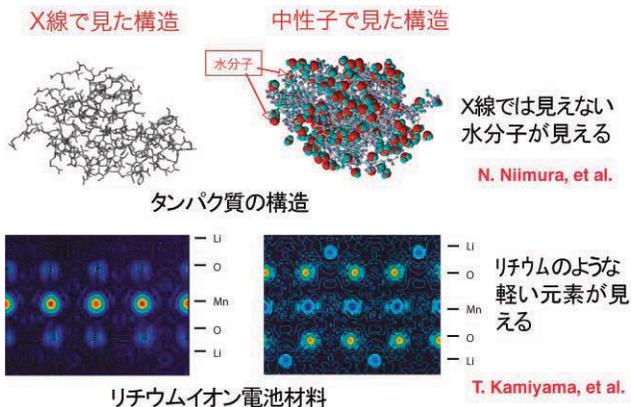


図16 X線で観測した写真と中性子線で観測した写真

ることになります。

皆さんエックス線で肺の写真なんかを撮られますが、骨の構造はよく見えるわけですが、逆に中性子線で写真を撮ると水しか見えません。そのため、中性子線では、まったく異なった側面が見えるわけです。たとえば、図16に示しますように、タンパク質などの構造を調べるときには、エックス線で見ると骨格構造が非常にきれいに見えますが、中性子線で見ると周りにくっつけている水の分子がよく見えます。あるいは、携帯電話などで用いられるリチウム電池を眺めますと、エックス線で見た場合はマンガンのような重い原子はよく見えますが、リチウムのような軽い原子は中性子でよく見えるということになります。

そういうことで、中性子による水素研究というのがにわかにな注目されてきました。たとえば、自動車における水素燃料は、将来のエネルギー源として非常に注目されているものですが、水素吸蔵合金をいかに作り出すかが生命線です。あるいは鉄鋼産業で、鉄鋼の中に水素が入りますと鉄が非常に弱くなります。水素が入っているのをいかにトラップしてしまうかという研究も進んでいます。

あるいは、創薬の研究ですが、創薬というのはダメージを受けたDNAをいかに薬が修復するかが鍵となります。修復して蓋をして

しまうのが薬なわけですが、特に介在するのは水分子だと言われています。水素です。したがって、水素の構造を中性子を用いて調べることは重要になります。ということで、製薬会社が非常に興味を持っています。

また、植物のイメージング。図17に書きました例は、カーネーションの例ですが、中性子を当てると水のところしか見えません。そういうことで、水の部分の研究ということでいろんな応用が考えられて、産業利用が中性子の一つの大きな特徴になっています。

すなわち、学問的な研究は8割ぐらいにして、2割ぐらいは産業利用をしようということでわれわれは準備を整えつつあります。

### 加速器の医学利用

ここで話題を変えて、加速器の医学利用について触れておきます。もっか、放射線医学研究所（放医研）というところで重粒子線、重イオンのビームがガンの治療に使われています。こういった話題に関してです。

皮膚の中に重イオン（重粒子線）を当てますと、あるところで非常に大きな損傷を起こします（図18）。要するに、重イオンを照射しますと、奥でだけ焼き切れるわけです。奥の方にガンがあると、その局部だけ焼き切ることが可能になります。これは、ガンマ線治療と決定的に異なる点で、

そのため、重イオン治療が脚光を浴びてきました。最近の日本では、この治療法が急速に伸びてきています。

余談になりますが、サイクロトロンを初めて作り、発明したのは図19に示したローレンスという方です。1930年代にサイクロトロンを初めてつくったときには、アイソトープを人工的につくるといったのが当時の一番大きな研究課題でした。それまでは自然にある放射性物質しかなかった

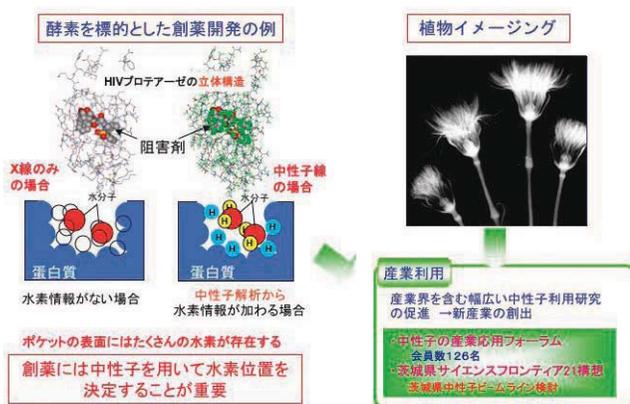


図17 水素分子を眺める特長を生かした中性子による創薬研究や植物の研究

のを、人工的に放射性物質をつくらうという試みです。一方、ローレンス自身は、このアイソトープ生成以外に加速器を役に立てることができないかを考え、弟さんのジョン・ローレンスという、イエール大学で内科の先生をしておられた人と相談しました。そうしましたら、弟さんは医学に使うということを提案され、ジョン・ローレンス自らがバークレーに移ってこられました。私は1970年代にバークレーにいましたが、その頃、この弟さんの方は、バークレーの医学部長をされていました。

そこで始まったのが、放射線医学という分野です。ジョン・ローレンスは中性子のビームを用いた中性子線による治療を手がけました。ただ、中性子はその当時あまり効かなくて、陽子とか重イオンの方がいいのではないかとこの動きが出ました。このため、1950年代にすでにバークレーで1台だけ治療用加速器が登場しました。ウィルソンという方が、バークレーでの陽子線による治療用加速器を提案したためです。この方は、後にフェルミ国立研究所の所長になる人ですが、1950年代にすでにバークレーで、陽子加速器でガンを治療しようというのが始まっていたのは驚きです。私がいまいた70年代には、すでに重イオンによる治療がスタートしておりました。放医研で重イオン照射がスタートしたのは90年代ですが、日本ではその後急速に加速器を用いた治療が増え、世界の先頭を切るまでになっております。

加速器を用いた研究としては、素粒子原子核のようなごく基礎的な研究、物質生命科学のように基礎と応用を含めた研究、さらに、ガン治療のようにまったくの応用研究と三つの領域があると思います。この第三番目の応用も重要かと思ひ、J-PARCという話題とはやや離れますが、ここに挿入させていただきました。

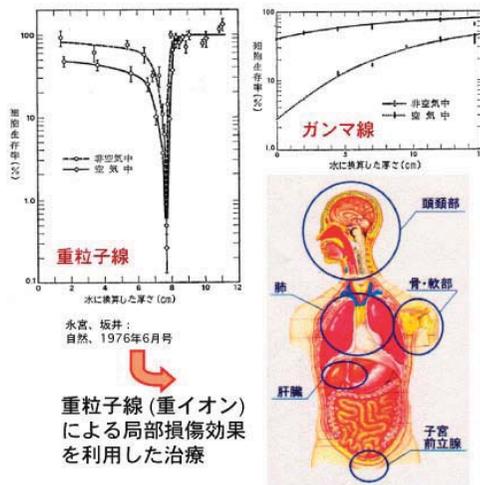


図18 重イオン (重粒子線) 治療の原理



Ernest O. Lawrence (1901-1958)  
サイクロトロン発明者  
1928年: Yale から Berkeley へ  
1930年代: 本格的なサイクロトロン建設  
1939年: ノーベル賞



John H. Lawrence (1903-1991)  
1936年: Yale 大学医学部内科から Berkeley へ  
放射線医学のバイオニア  
(中性子線による治療、さまざまなアイソトープ  
や放射線を用いた治療)  
1937年:  $^{32}\text{P}$ ( $t_{1/2}=14.3$ 日)を用いた骨髄における  
赤血球増加症の抑制治療を始める。  
1983年: E.Ferimi 賞 (放射線医学のバイオニア)

図19 サイクロトロン発明者のローレンスと放射線医学のバイオニアのローレンス

### 再びJ-PARCに戻って

最後に、再びJ-PARCということで、残りの時間を利用してJ-PARCはどのようなものであるかということ、建設状況の映画を見ながらお話ししたいと思います。

J-PARCは、私どもが建設を始めてから8年目になります。1段目のリニアック、2段目の3 GeVシンクロトロン、3段目の50 GeVシンクロトロンの3つの加

速器から成り立っております。(中略) リニアックの建屋は、全体で330メートルあります。これは東京駅の丸の内駅舎とほぼ同じ長さです。東京タワーも330メートルですから、それを横にしたようなものです。2階にはクライストロンが並んでいます。このクライストロンは東芝でつくりました。J-PARCのために新しく開発したもので、現在世界のいろいろな研究所がこの新しいクライストロンを使うようになってきています。(中略)

その後ろに、2つのシンクロトロンがあります。(中略) これは3 GeVのシンクロトロンですが、現在200キロワットという非常に大パワーのビームが加速されている現場です。それを3段目の加速器50GeVのシンクロトロンに導きますが、50GeVトンネルは一周約1.6キロという長いものです。ここでは、レーザーによるアラインメントをして、0.1ミリメートルの精度でセットします。日本のメーカーの技術はなかなか優れたもので、このような調整も可能なのです。

実験室の映画は、一つだけお見せします。ここにお見せするのは、中性子を発生させる装置の外側に使う、直径10メートルの鉄の遮蔽体です。こういう大型建造物は、建屋を建てる前に入れ込まなければなりません。この中心部に多量の陽子ビームがやってきますが、熱くなるので水銀で冷やします。(中略) このように作った中性子源も、いよいよできあがり、12月から実験することになっています。

これは余談ですが、こういう大工事を行いますと、いろいろなハプニングが起こります。まず、近隣の方を集めて植林をしました。約9,000本の苗を植えたら、現在、立派な森が出来上がりました。あるいは、オオタカが出てきたときに、野鳥の会にいろいろお世話になりました。そこで、小鳥の水飲み場をつくりました。感謝状もいただきました。また、遺跡が出て参りました。鹿島灘の北の端っこの塩田遺跡ですが、そういうことで調査に1年半ほどかかってしまいました。

J-PARCは、知識の最先端としての原子核

や素粒子の謎、特に、物質の根源である質量の問題等を研究することを一つの目標として進んでいます。また一方、物質・生命科学、特に、材料の研究や生命科学である創薬という産業利用も視野に入れた、技術の最先端をもめざしています。すなわち、多目的施設として進もうとしており、その意味でも、現在脚光を浴びております。

さらに、建設を始めたころはそれほど意識していませんでしたが、世界のいろいろな施設との競争も始まりました。図20に示しましたように、中性子分野では、SNSというアメリカの中性子源ですが、J-PARCから1年ほど先行して建設し、既にできあがっております。さらに、ISISとも競っており、J-PARCがこれからISISを抜き、SNSを抜いていくのではないかと思います。

ニュートリノ分野では、フェルミ国立研究所とかCERNでニュートリノの実験がいま行われつつあります。これは第1世代の実験で、われわれは第2世代の実験をやりますので、日本がリーダーシップを取っていけるのではないかと考えています。

ハドロンに関しては、Kファクトリーが世界で一つあり、これはOECDが推奨した線に沿っています。それ以外の大きな計画としてはGSIもありますが、ここでは反陽子物理学を行うことにしています。

このように、中性子分野、ニュートリノ、ハドロン物理、の3つにおいて、世界のセンターをめざしております。建設は終了しつつあって、世界最高級の陽子加速器施設ができあがりつつあります。しかし、国際的に一流の研究拠点にするためには、これから必死の努力が必要ではないかと思います。というのは、日本人は外国で研究することには、よく慣れていますが、外国人をうまく呼びよせて、日本の中で外国人に合わせたような研究所のインフラストラクチャーをつくり出すというのは、まだまだ遅れたところがたくさんあるからです。ということで、国際的な拠点の形成はわれわれの次の大きな課題だと思っています



図20 国際センターとしてのJ-PARC

る次第です。

最後に、まとめますと、J-PARCは多目的な施設としてスタートしました。特に、中性子やミュオンのビームを用いた物質・生命科学の研究、ハドロンやニュートリノビームを用いた素粒子や原子核の研究がハイライトです。また、国際社会や産業界への積極的な開放は、これからの大きな課題だと思っています。ということで、いよいよJ-PARCが始動しますので、今後ぜひご期待いただきたいとともに、ぜひ現地に見学にお越しいただければと思います。8月に一般公開しましたが、2,600名ぐらいの方が来られました。来年も行う予定ですので、ぜひお越しいただければと思います。

ご静聴ありがとうございました。