

『がんの新しい放射線治療—重粒子線臨床試行—』

放医研公開講座を終えて

わが国の「がん克服10カ年戦略」の一環として、医療用としては世界

で初めての重粒子線がん治療装置（HIMAC）が1993年に放医研に建設さ

れ、1994年から重粒子線のひとつである炭素イオンを用いたがん治療の

臨床試験（臨床試行）が行われている。炭素イオンは、従来使われてい

る治療用放射線に比べてがんを治療する上で幾つかの長所をもつもので

ある。



佐々木所長の開会挨拶



真剣に聞きいる聴衆

この臨床試験は、全国の多くの専門家の方々からな

る試験計画、倫理

審査、試験実施、成果評価などの委員会のコントロールのもとに行われ

ているが、開始してから4年あまりを経て予期されたような成果を出し

つつある。この成果は、半年ごとに上記委員会の審議を受け、その後プ

レス発表されてきた。また、内外の研究会などでもその都度報告されて

きた。

これらの現状をより多くの方々に知って頂くために、原子力の日

なんで、10月25日（日）に放医研公開講座『がんの新しい放射線治療－

重粒子線臨床試行－』が開かれた。

プログラムは3部から構成された。

第1部では放医研の担当者から、（1）物理学的側面からの重粒子線

（とくに炭素イオン）の解説、（2）炭素イオンのがん組織への作用、

（3）炭素イオンによるがん治療臨床試験の目的、組織、経緯、現状、

（4）頭頸部、肺、肝臓を例にとってこれまでに分かった具体的なこと

がら、などが報告された。

第2部では、重粒子線治療に期待することと題して、がん治療で高名

なお二方、磯野可一千葉大学長（外科の立場から）と森田皓三愛知県が

んセンター病院長（放射線治療の立場から）から忌憚のないご意見を戴

いた。

第3部の特別講演では、国立がんセンター名誉院長・市川平三郎先生

が、正しく扱えば放射線はいかに有用なものであるかを見事な話術で説

かれ、聴衆を魅了された。

今回の公開講座のお知らせは、一般住民、報道関係、医師会、病院、

大学、関係省庁など多くの方々にお配りしたが、当日は100余名のご出席

を頂いた。ここに誌面をかりてお礼申し上げる。

現在、放医研のがん治療臨床試験は、殆どの臓器で第 I/II 相試験

(安全性を確認し、且つ治療効果を検討する) という初期の段階であ

る。今後いくつかの臓器について、がんに対する治療効果を本格的にみ

るための第 II 相試験を実施していく予定であるが、その結果に基づいて

実用化を目指したいと考えている。これからも、より正確なデータを積

み重ねるために、慎重にこの臨床試験を進めていくつもりである。皆様

のご理解とご支援を賜りたい。

(重粒子治療センタ

ー長 村田 啓)

海産魚のクローン作出

クローン作出の方法には2通りある。その一つがある有名なドリーが

産まれた「核移植法」である。この方法については新聞や報道でご周知

のことと思われるのでここでは説明しない。魚のクローンはもう一つの

方法、「単為発生法」で作出され、2世代にわたる染色体操作が必要で

ある。

魚類の正常な受精では、卵 ($2n$) と精子 (n) が受精し ($3n$)、成熟分

裂の途中で極体 (n) が放出されて受精卵は $2n$ となり、 $2n$ の正常個体が産

まれてくる。単為発生法では受精前に精子の遺伝子を破壊しておく。こ

の精子で受精させると、精子の侵入がトリガーとなり、卵 ($2n$) は通常

の場合と同様、成熟分裂を開始して極体 (n) を放出しようとする。極体

を放出してしまえば卵核は半数体 (n) となり、胚体形成は進むものの孵

化まで至ることはない。そこで極体放出を阻止する必要がある、その方

法として受精卵に約600気圧の圧力を加える。これにより卵核は $2n$ を維持

することができ、こうして作出された世代は雌の遺伝子情報のみを受け

継いだ全雌性群となる。これを雌性発生法と言う。第二段階ではこの雌

性発生で得られた雌から採卵し、再度雌性発生を繰り返す。得られた雌

性群は、互いに等しい遺伝子情報を持つこととなる。魚の性は水温やホ

ルモン投与によって比較的容易に転換する。そこでこの第二世代につい

て偽雄を作る。この雌雄を親魚とすると次世代は親と遺伝的に全く同質

のクローンとなる。

雌性発生法は、もともとは二十世紀初頭に行われたカエル精子に対す

る放射線影響を調べる実験の産物である。それが Hertwig effectである。

Hertwig effectとは、X線またはγ線を照射した精子と正常な卵を受精させ

た場合、胚の生存率は精子への照射線量の増加とともに低下するが、線

量がある一定量を超えると今度は逆に生存率が上昇するという現象であ

る。このカエルは半数体 (n) で生存できなかったが、その後Rostand

(1936) によって低温処理法で2nの幼生が得られることがわかり、雌性

発生法の骨格が完成した。

魚類においては1960年頃、コイとドジョウで実験が行われたのが最初

で、これまで報告された適線量は魚種によって異なるが、およそ 10^2 ~

10^3 Gyである。ところが1970年代に入って、Hertwig effectが紫外線でも得

られることがわかり、このとてつもなく高い放射線量で行っていた精子

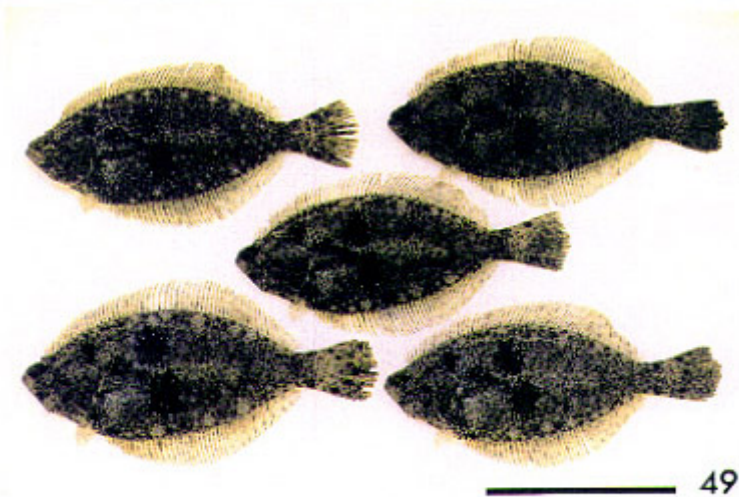
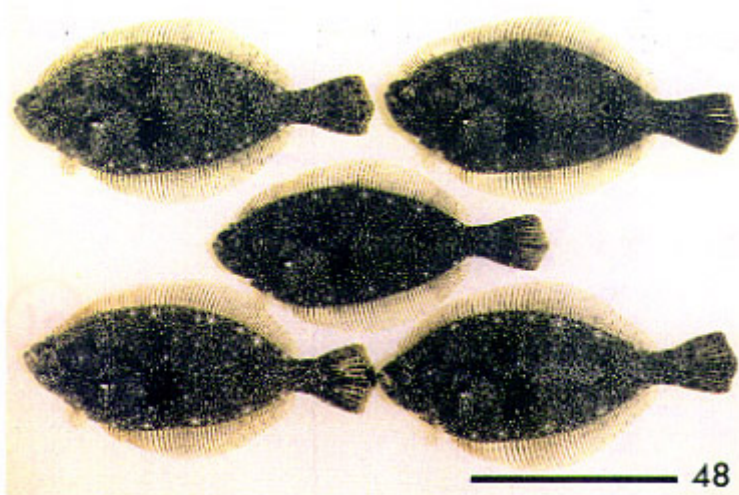
遺伝子の破壊は、15Wの殺菌灯を数分間照射することでまかなわれるよ

うになった。なぜ紫外線で十分なのか、その辺はいまだに明らかにされ

てはないが、紫外線になって取り扱いが簡便になったことから、研究

施設の制約がなくなったため、多くの機関で染色体操作実験が盛んに行

われるようになった。



異なる系統のクローンヒラメ
(鳥取県水産試験場 山本栄一氏 提供)

染色体操作によるクローン魚は1980年にゼブラフィッシュやメダカと

いった実験用魚で最初に作出された。1990年代になってコイ、アユ、数

種のサケ科魚類など、淡水産の水産重要種でも作出例が報告された。海

産魚では1991年にはじめて鳥取県水産試験場の山本によりヒラメでクロ

ーン系が得られた。マウスでは近親交配を何十世代も繰り返して作り出

された純系を維持管理し、これらを生理実験に使うことが当然のことと

なっている。魚でもゼブラフィッシュやメダカなど、すでに確立された

実験魚が有効に利用されている。これに対して海産魚では魚体の大きさ

や海水の便などに伴う高コストと種苗生産技術や継続飼育技術の難しさ

が障壁として存在している。しかし、海産魚は食用としての商品価値が

高く、また海洋汚染のバイオマーカーとしての役割も大きい。有用種の

生産や海洋汚染監視技術開発という面からばかりではなく基礎研究の観

点からも、クローン化技術を付加させた海産魚ジーンバンクの創設が望

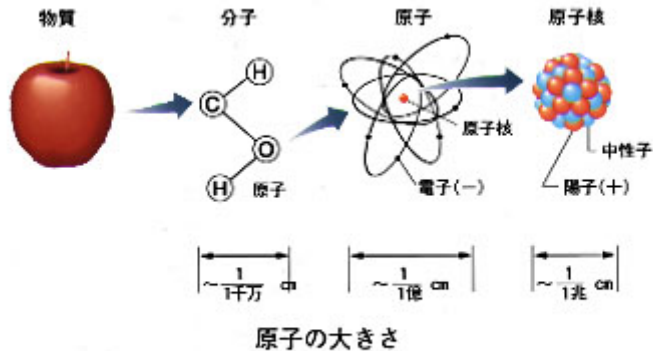
まれる。

(那珂湊放射生態学研究センター第3研究室 宮崎多恵子)

●シリーズ：放射線とつきあうために…… 2



放射線の種類



全ての物質は、原子が集まってできている

放射性物質の崩壊に伴う放射線

—α線、β線、γ線—

全ての物質は、原子が集まってできています。原子の中心には原子核

があり、その周りに負の電荷を持った電子が回転しています。原子核

は、主に正の電荷を持った陽子と、電荷を持たない中性子の塊でできて

います。そして、この原子核に含まれる陽子の数によって原子の種類が

決まります。これは、化学的に分離できる最小単位でもあって、元素と

呼ばれています。ところが同じ元素、すなわち陽子の数が同じでも中性

子の数が異なる場合があります。これらを同位元素（アイソトープ）と

呼んでいます。

世の中に存在する多くの元素は安定ですが、中には原子核に含まれる

陽子と中性子の結合状態が不安定な元素があつて、自ら放射線を出し

て、より安定な他の元素になろうとします。このような元素を放射性同

位元素（ラジオアイソトープまたはRI）と呼んでいます。このRIが放出

する放射線には、主に3つの種類があります。α線とβ線とγ線です。

α線は、原子核の中の陽子2個と中性子2個が塊になって放出される

ヘリウム原子核と同じもので、正の2価の電荷を持っています。

β線は、原子核の中の中性子1個が陽子に変化し、高速の電子（β⁻

線）を放出します。ところが、同じ元素でも、陽子の数が中性子の数よ

り多い元素の場合は、陽子1個が中性子に変化し、正の電荷を持った電

子（β⁺線）を放出することもあります。これを陽電子またはポジトロ

ンと呼んでいます。この陽電子は、負の電荷を持った電子と結合しやす

く、一緒になると消えて無くなってしまいますが、その時、電子の質量

に等しいエネルギーの2個のγ線を互いに反対方向に放出します。電子

の質量は軽くα粒子の約7千分の1です。

γ線は、原子核が励起されたとき放出され、その原子核は安定な基底

状態に戻ります。このγ線は、電磁波の一種で波長が非常に短く、質量

もないのですが、粒子の流れとしての性質もあることから、光子とも呼

ばれています。この光子は、物質の原子と衝突して、その周りを回って

いる電子と相互作用を起こし、その電子を原子から切り離したり（電

離）、電子を一つ外側のエネルギーの高い軌道に上げて、原子を励起し

て、次の瞬間原子自らの力で原子特有のX線を出し、電子を元のエネル

ギーの位置に戻したりします。このように放射線には物質を電離した

り、励起したりする特徴があります。

放射線発生装置で作られる放射線

レントゲン博士が発見したX線は、最初に放射線発生装置で作り出さ

れた放射線だといえます。X線発生装置によるX線写真やX線CTは、胸

部検診や胃がんの検査のように病気の検診や骨折など負傷の程度を知る

ための診断に使われ、電子加速器（ライナックやマイクロトロン等）で

発生させた電子線やX線は、がん治療のために使われています。

サイクロトロンやシンクロトロン等の大型加速器で加速した陽子やイ

オン等の荷電粒子群も、陽子線、重イオン線としてがん治療に使われ、

さらに、それらの粒子をターゲットにぶっつけて2次的に発生させた粒

子群、中性子線や負パイ中間子線もがん治療に使われています。また、

原子炉の実験孔を使って利用される γ 線や中性子線もあります。原子炉

から取り出した熱中性子や熱外中性子は、ホウ素中性子捕捉療法（BNCT

）としてがん治療にも利用されています。

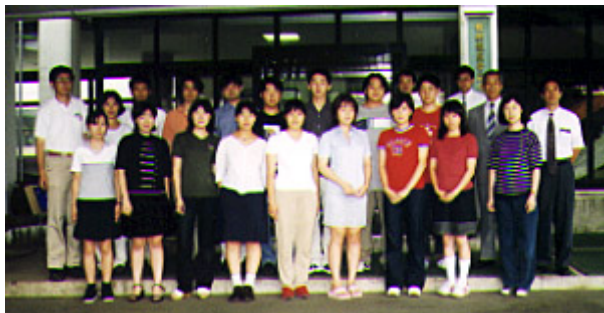
（特別研究

官 河内 清光）

— サイエンスキャンプ'98に参加して —

3日間の実体験による感想

放医研『サイエンスキャンプ'98』は、去る8月19日～21日の日程で開かれたが、参加した高校生(男子4名・女子8名)は3日間の実体験を通して<放射線とその医学利用>をどのように感じたのだろうか。10月号に続いて紹介します。(五十音順)



“私の将来に大きな影響を与えた3日間”



私がサイエンスキャンプで一番得たと思うことは、研究者への憧れと、自分が将来目指したいと思える職業が研究者だとわかったことです。

私は小学生の時から医者になりたく、中学生の頃には、外科医になりたいという志望が固まりつつありました。5年以上も、臨床医になりたいと思っていました。しかし、3日間のサイエンスキャンプで、研究医への強い志望が心の中にできました。5年以上もの思いが、たった3日でくつがえされるのも、今一つ信用し難いことですが、私は少なくとも、サイエンスキャンプの3日間は、私に大きな影響を与えたと思っています。

サイエンスキャンプの中の一体何に強く影響を受けたかという点、選択に困りますが、おそらく、3日目のマウスの解剖や、遺伝子の実験等が挙げられると思います。一概に、そのことだけだとは言えませんが、強く印象には残っています。他には、初めて研究者の方々を目にしたこともあると思います。

サイエンスキャンプそのものについては、1日目の実験が一番わかりやすく、2、3

日目の理解をより手助けるものとなりました。講師の方々の人数も多かったので、質問がしやすかったことも理解の大きな手助けとなっていました。2日目の施設見学等では、もっと多くの施設を見学したかったです。なぜなら、私は宇宙医学に興味があるので、そちらの方の施設を見学したかったためです。

サイエンスキャンプは、私はとても気に入った企画なので、もっと多くの高校生（特に1、2年生）にも門戸を広げるべきだと思います。これからも、興味分野の宇宙医学はもちろん、医学系、放射線治療系での情報があれば、色々知りたいので、様々な企画を期待しています。

（埼玉県立浦和第一女子高等学校3年 中川 織絵）



“友を得た喜びを受験への励みに”

放射線医学総合研究所での3日間の実験、講義、施設見学を終えて僕が知識不足にもかかわらず、親切かつ丁寧に教えて下さった先生方には感謝の気持ちでいっぱいです。

また3日間での実習、講義にも非常にためになりました。2日目の病院見学では実際に使用している医療器具を見せてもらったり、MRIを体験したりと他ではできないことばかりで、放射線については氷山の一角しか知らない僕にとっては何事も新鮮に写りました。

3日目の生物実習ではマウスのDNA解析の実習を行い、そこで行われたマウスやラットの解剖の時、解剖を見るのは初めての経験だったので最初は感心して見ていたのですが、ふと気付くと先程まで箱の中を走り回っていたマウスがいなくなっていたのにはさすがに複雑な気持ちになりました。

とにもかくにもこの3日間は充実していたわけですが、でも僕が最も嬉しかったのは同じ夢を持った友達に出会えたことです。高校には同じ夢を持っている人がいないため研究所で出会え、診療放射線技師について話し合えたことが僕にとって、とてもプラスになりました。このことで、僕はこの人達と共にこれからの受験勉強を乗りきってい

たいとも思ったし、受験では同じ夢を持つ何万人のライバルの1人なので負けてはいけないとも思いました。今もこの友達とは時折電話で話し合い、とてもよい刺激を受けています。

研究所での3日間で吸収した事もあり、学んだこともあったので大変失礼だとは思いますが、来年の研究生のために一言言わせてもらいたいと思います。それは研究生の人数を1人でも2人でもいいので参加できる研究生の人数を増やしてもらいたいと思います。このようなすばらしい体験ができるのに12人では、少なすぎると感じました。1人でも多くの人にこの研究所で学んでいてもらいたいと思いました。最後に3日間教えて下さった先生方、本当にありがとうございました。

(私立名城大学附属高等学校3年 野田 則仁)

“放射線が医療の夢であることを実感”



今年の夏、私は今までにない貴重な体験をすることができました。

なぜなら、興味ある「放射線」について、自分の知識を大きく変えることができたからです。

重粒子線によるがん治療は、特に私の心を動かしました。もともとサイエンスキャンプに参加したのも、医療に興味があったからです。がんという病気は早期発見できた人しか治らないと思っていました。が、4年位前にできた重粒子線がん治療装置は、従来のがん治療では治せなかった局所進行がんまで治療できることでした。最も新しい治療をこの目で見ることができたのが、何よりの喜びでした。実際に、MRI検査を受けさせてもらえて、患者さんの気持ちが少しわかったような気もしました。

次にマウスの解剖見学は、見ても平気か多少心配でした。私が見学したマウスは白血病により死亡したのが、解剖により分かりました。担当の方が、マウスの腹の方を切り終えた瞬間、血が異常にかたまっていた臓器が目映りました。思わず目をそむけたり

もしたけれど、ひとつひとつ丁寧に説明して頂くうちに正常な臓器との違いも分かるようになってきました。実験動物により病気の治療法が生まれ、未来の私達を救うかも知れないと思うと、この場で学んだことを決して無駄にはしてはいけないと思いました。

「放射線」について学んだ中には、2年生であるせいか、難しいことも少なくありませんでした。しかし、今後の私次第でこの3日間が、より有意義なものになるのだと思います。私には、将来医学に携わり、多くの人を救うという夢があります。「放射線」が医療の夢であることを実際に確認できたこの夏に感謝し、何としても夢を叶えるべく、今後も私自身を変えていくよう努力し続けます。

(私立秀明英光高等学校 2年 橋本 洋記)



“支え合う大切さを痛感したキャンプ”

このキャンプを通して、重粒子線、ガンマ線のメリットやデメリット、マウスの解剖、放射線治療の実態など、いろいろなことを学ぶことができた。初めてのことばかりが多かったが、

どれも、とても印象的で充実した日々であった。多くの地域の人たちとも友達になれ、お互いに情報交換もして、切磋琢磨できる存在であった。

そして、私が一番気づかせられたことがあった。それは、いろいろな人たちがいるから成り立っていけるということだった。私は医者になりたいと思っている。病院で見えていても、一番医者がなんでもできる存在という風を感じていた。でも、医者がいるだけでは成り立っていない。機械を作る人がいて、放射線技師がいて、それを研究する人がいて、協力して、支え合っはじめて成り立っていけるものだというのを。

このサイエンスキャンプに参加をさせてもらえなかったら、一生分からなかったことかもしれない。いい体験をさせてもらって、そして、自分を考えることができ本当にこのキャンプに参加して、プラスになることばかりだった。

来年も再来年もずっと続けて行ってほしいと思う。

(徳島県立池田高等学校 3年 藤川 悦子)



“高校生活 3年間のうちで一番の体験”

私は放射線技師になりたいという目標があったので、このサイエンスキャンプに参加させて頂きました。

この3日間は普段では出来ない貴重な経験をし、本当に充実した日々を送りました。マウスの解剖、がん細胞のDNA、重粒子線がん治療装置を見せて頂いた時は本当に感動しました。また講義を受けた後、α線、β線、ガンマ線の違いなど、今まで解らなかったことが理解できました。

私は将来がん治療に貢献したいと思っているので、重粒子線がん治療装置にとっても興味がありました。それを見せて頂いた時、とてつもない大きさ、また多葉コリメータの機能に驚かされました。腫瘍患部の断面に合わせることが出来るなんですよ。世界に2台しかないというこの装置を、もっと多くの病院で使い、多くの患者さんを治してほしいです。

このキャンプに参加させて頂き、高校生活3年間のうちで一番良い経験が出来ました。そして参加する前より放射線技師になりたいという思いが一層強まりました。本当に参加させて頂いて、ありがとうございました。

(私立羽衣学園高等学校 3年 村田 むつみ)

“すべてが新鮮で感動の連続でした”



私は、本当に感激した。放射線医学総合研究所での出来事は、すべて真新しく、新鮮に感じられ、感動の連続だった。

将来、私は三つ口や乳がんの後の形を整えたりする形成外科医になろうと思っている。つい最近のことだが、今の放射線治療では、乳がんの治療を最小限にすませ、できるだけ余分なも

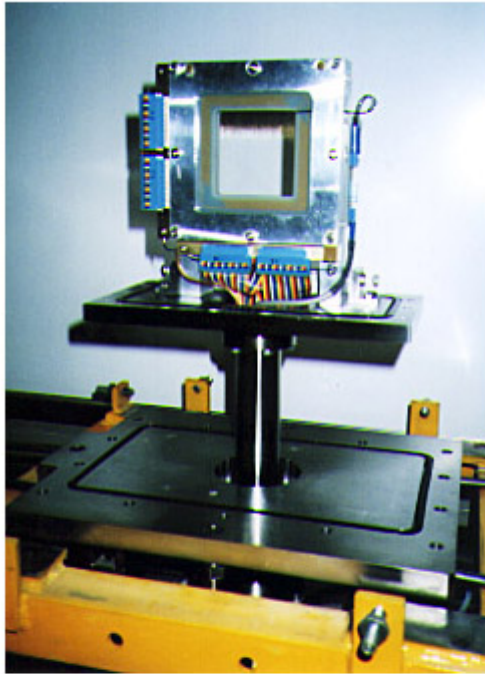
のを取らないでいいということを知り、私は放射線に興味を持ち始めた。それからα線やγ線などの害について調べ、携帯電話で脳腫瘍になったり、送電線の近辺に住んでいる人に白血病の人が多いなどということを知った。なぜ治療につかわれる放射線が人に害をおよぼすのかが不思議だった。

そんな私の放射線に対する疑問を解消してくれたのは、このサイエンスキャンプだった。α線やγ線のちがいについての詳細な実験や講義、そして、重粒子線についての知識をたっぷり吸収できた。

現代、原子力発電所での事故そして核実験と騒がれている世の中だけれども、もっと私たちが放射線、放射能について、よく知り、逸早く、世界の平和が訪れたらいいと思う。

(私立横浜雙葉高等学校 2年 山口 朋子)

ワイヤーグリッドモニタ ＜HIMACのビームモニタ2＞



多線比例計数管型のワイヤーグリッドモニタを示します。写真で薄く金色に光っている部分は、縦方向に張られた直径 $20\mu\text{m}$ の陽極ワイヤーです。

イオンビームの輸送・加速調整にとってその形状や位置を知ることは

基本的で重要なことです。この目的のために、HIMACにはワイヤーグリ

ッドモニタと呼ばれるビーム形状測定用のモニタが多数用意されていま

す。ワイヤーグリッドモニタは縦及び横方向に張られた多数のワイヤー

から成る有感面を有しており、イオンビームはこれらの面に垂直方向に

入射し、ビームの経路上のワイヤーに電荷を誘起します。各ワイヤーに

誘起された電荷または電流を読み出すことで、ビームの電荷の空間分布

を測定することができます。これをビームの形状と定義しています。以下

下ではイオンビームを単にビームと称します。

入射器とシンクロトロンリングに至るビーム輸送ラインには12台のワイヤ

ヤーグリッドモニタが設置されており、いずれも直径0.1mmのタングス

テンワイヤーが張られています。ワイヤーと衝突する6MeV/uのビーム

は、その大部分がワイヤー中で停止するため、それぞれのワイヤーでビ

ームの電荷を直接読み取ることで、ビームの空間分布を知ることができ

ます。この時の各ワイヤーからの出力電流の典型的な値は数 μ A程度で

す。この値は電流測定上は望ましいのですが、細いワイヤーにとっては

過酷な値と言えます。つまりワイヤーの発熱が無視できなくなり、ビ

ーム電流が大き過ぎる場合は、ワイヤーが焼き切れることがあるからで

す。事実過去にワイヤーの焼損が発生しており、ワイヤーの一層の改良

を検討中です。シンクロトロンリング内部にも2台のワイヤーグリッド

モニタがあり、それぞれビームをリングに入射した時のビーム周回の様

子を監視するために用いられます。測定の原理は入射器と同様ですが、

シンクロトロンに入射されるビームの量は、入射器の場合に比べて少な

いため、ワイヤーの焼損の心配はありません。

これらのワイヤーグリッドモニタで注意すべき点
は、いずれも真空中

に設置されることです。設置場所付近の真空度を悪化
させないために

は、ワイヤーグリッド本体からの放出ガスを減らす必
要があります。こ

のためにワイヤーグリッド本体はセラミックで製作さ
れています。特に

シンクロトロンリング内は超高真空 ($\sim 1 \times 10^{-8}$ Pa)
のため、本体全体が

200℃の真空ベーキングの可能なものになっていま
す。

シンクロトロンリングから取り出された高エネルギー
のビームは治療

室や実験室に輸送されます。ビームは治療用には数
 10^8 個/秒の強度が要

求されますが、物理などの実験では、場合によっては
数千個/秒または

それ以下の強度が要求されます。このように広い範囲
の強度のビームを

様々な部屋に輸送するために、総計42台の多線比例計
数管型のワイヤー

グリッドモニタが設置されています。このワイヤーグ
リッドモニタで

は、陽極面を構成する直径20 μ mのワイヤーと対面す
る陰極面はガス中に

入れられています。入射した高速の荷電粒子によりガ
ス中に生成された

イオンや電子は、それぞれ陰極面かまたは陽極ワイヤ
ーに導かれます。

特に軽い電子は、陽極ワイヤーの極近傍に形成される
大きな勾配の電場

により加速され、更にガスを電離します。この電離で生じた電子は更に

電離を誘起し、最終的にはねずみ算式にたくさんの電子を生成すること

になります。これを電子雪崩と言います。結果として、最初に生じた電

荷量に比べて桁違いに多くの電荷量が得られます。最初と最後の電荷量

の比を増幅率と言いますが、これは陽極陰極間の電位差や用いるガスの

種類によって大きく影響を受けます。電子親和性の大きい成分、例えば

酸素を持つガスでは大きな増幅率は得られません。ここではアルゴン

80%と二酸化炭素20%の混合ガスを用いており、その結果印加電圧

-2700Vで約8000倍の増幅率を得ています。そのお陰で、例えば炭素ビー

ムであれば、粒子数が毎秒数百個の低強度のビームの形状でも、はつき

りと測定できます。写真はこのワイヤーグリッドモニタの本体を示して

います。ビームの陰極での多重散乱を減らすために、陰極面もワイヤー

で構成しています。

(医用重粒子物理・工学研究

部 取越 正己)

◆お知らせ◆

第26回放医研環境セミナー

放射性核種の環境動態と線量評価モデル

■主催：放射線医学総合研究所

■日時：平成10年12月10日（木）・11日（金）

■場所：放射線医学総合研究所 講堂

■プログラム：

I. 線量評価モデルと移行パラメータ／特別講演／
線量評価モデル

II. 長半減期核種の環境挙動と公衆被ばく／特別
講演／

沿岸海域環境保全情報の整備／水路部におけ
る漂流予測の現状

■参加費：無料

■問合せ先：企画室 統計係 TEL 043-251-2111（内
線233）