



高密度のプラズマ——細さが髪の毛の1/10 —— 石井研究室～電気・電子工学科 ——

プラズマの研究は、歴史的に言えば、核融合が提案された1945年以後から活発に始められた。それまで原水爆にのみ使用されていた核エネルギーを、平和利用することが検討されるようになったのである。当時から高密度のプラズマは、電極間の重水素ガス中に、パルス大電力を流せば簡単に生成できると考えられていた。これは、Zピンチ方式と呼ばれるプラズマ発生法である。

実際には、プラズマを制御し長時間にわたって保持するのは難しかった。またZピンチはプラズマの不安定性など問題が多く、核融合への研究はあきらめられていた。しかし最近では新たな応用として、X線源やX線レーザに利用するために研究されている。これらの応用を実用化するためには、電気エネルギーを瞬間的に放出して大きなパワーを得る、パルスパワー工学—高速パルス大電力技術—が必要である。パルスパワー技術の研究は日本の大学ではあまり行われておらず、長岡技術大、熊本大、大阪大など数カ所しかない。

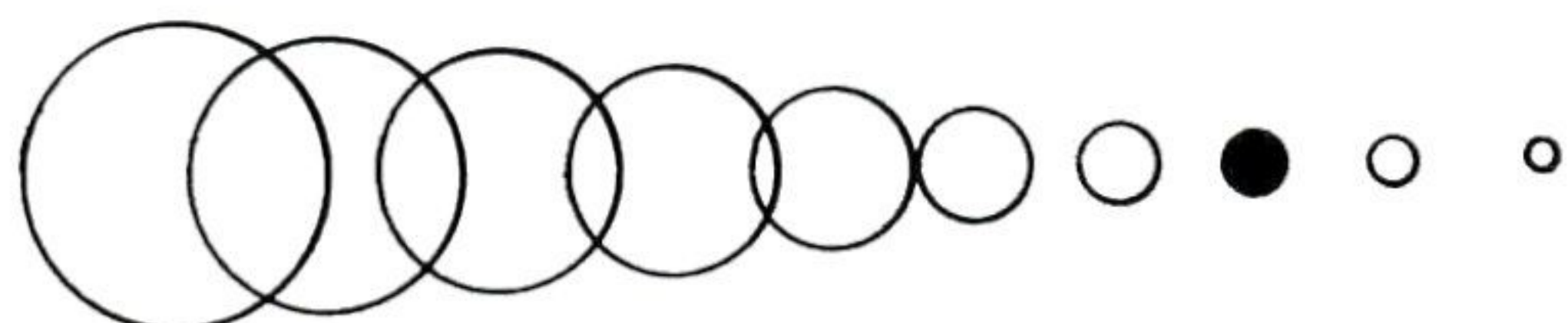


石井 彰三 教授



“ヒット”と“ホームラン”の研究

石井教授は卒業研究の研究室を決めるときに、友人から「これからはプラズマが面白い」という話を聞き、プラズマの研究を始めた。プラズマは気体がイオンと電子に電離し、電氣的に中性な電気伝導体である。宇宙の99%近くはプラズマの状態といわれているが、地上でプラズマを作るのは面倒であり、大きなエネルギーが必要である。プラズマは地上では一種不自然な物質の状態となっている。このため教授は、物理をきちんと理解しそれをうまく利用すべきであると考えている。



教授は、電力エネルギー分野における10年15年先まで考えた夢のある研究を行うために、野球の“ヒット”と“ホームラン”のように研究を分けて考えている。まず“ヒット”として、短期間でもまとまった結論が出せるような研究で手堅い成果をあげながら、かつ“ホームラン”として、成功したら画期的といわれるような研究も行うのである。どれがホームランになるかは、研究の進展と他分野との関係で決まることになる。

まず“ヒット”をねらう研究の一つとして、高エネルギー密度プラズマがある。普通ではプラズマの作製には、気体を用いることが考えられている。しかし気体からではなく、固体から作られたプラズマは瞬間的にしか発生できないが、エネル

ギー密度を高くすることができる。このプラズマから、軟X線という波長が短く様々なスペクトルをもつ電磁波を取り出すことができる。

次に、パルスパワー工学——高速パルス大電力技術——の研究がある。これは、電気エネルギーを極めて短い時間内に解放したらどうなるか、という疑問から始められた。例えば、同じ乾電池を使っても、懐中電灯では長時間光るがあまり明るくない。しかしストロボのように瞬間的に発光させると、何10kwという眩しい程の明るさになる。すなわち、同じエネルギーでも瞬時に放出することによって、瞬間的に大きなパワーを得ることが

できるのである。この分野に関しては、パルスパワー電源用の半導体や、超伝導体を用いたスイッチの開発が行われている。これは、普通のon-offスイッチとは異なり、レーザー・X線などを使って抵抗値を制御するという新しい考えのものであり、我々が抱えているスイッチのイメージとは大いに異なっている。

“ホームラン”が出そうな研究としては、非線形伝送線路を用いて非常に立ち上がりの速い高電圧のパルスを作り、伝送する技術の開発がある。

それでは、これらの研究内容についてもう少し詳しく述べてみることにする。



プラズマ物理の玉手箱——Zピンチ

プラズマからは、可視光以外に紫外線やX線が出る。非常に波長の短い軟X線を取り出すためには、プラズマを高温で高密度の状態にすることが重要である。パルス大電流を放電管軸方向に流してプラズマを生成すると、電流と磁場によるローレンツ力が内向きに働くことによってプラズマが自らを締め付けて圧縮し(図1)、さらに高密度になっていく。この現象をピンチ現象と呼ぶ。ピンチには締め付けるという意味がある。このように軸方向の電流によって高密度プラズマを作り出す方法が、Zピンチ方式である。Zピンチ方式によるプラズマは、全ての現象が直径5mm、長さ数cmの中で、しかも1~2 μ s以内に起こっており、未知の面白い事がまだまだたくさん隠されているので“プラズマ物理の玉手箱”とも言える。またこの方式では装置がコンパクトであり、プラズマの発生原理も簡単であるので、様々な応用に取り入れられていく可能性がある。

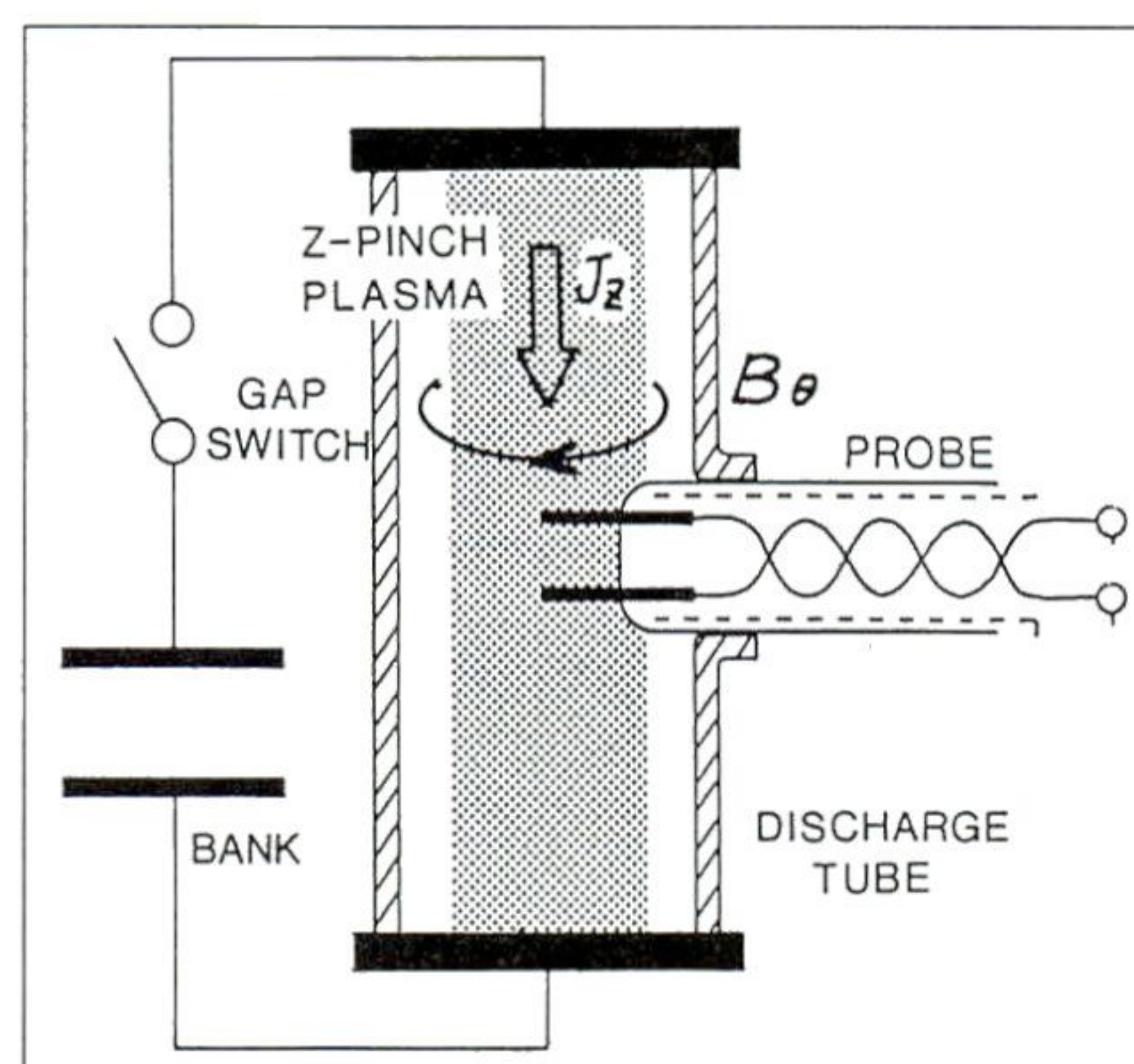


図1

Zピンチで固体からプラズマを発生させる利点は、固体密度に近い高密度プラズマを簡単に作れることである。この方法を使うと、理論的には周期律表にある大部分の原子をプラズマにすることができる。しかしプラズマができた後、固体の一部分または全体は消失してしまう。プラズマは真空中に作られるため、補給の方法が問題である。

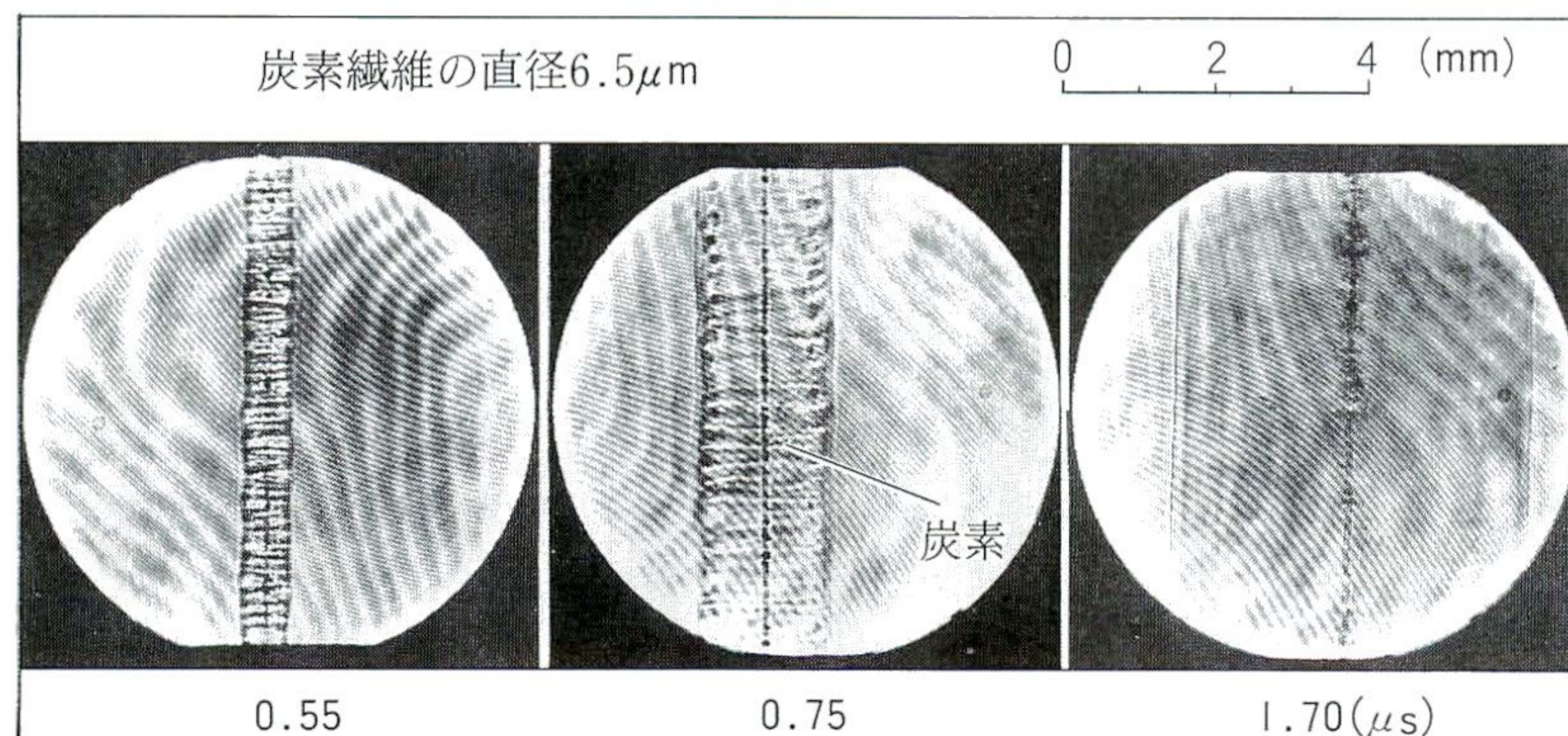


写真1
大気中での
炭素繊維放電

具体的なプラズマ発生法としては、(1)直径 $7\mu\text{m}$ の炭素繊維のプラズマ化、(2)円筒状の金属薄膜によるプラズマ圧縮、(3)金属蒸気噴出型Zピンチの3種類が研究されている。

(1)の方法では、炭素繊維自身がプラズマになる(写真1)。固体であるために最初から高密度状態であり、ピンチ現象によってその高密度の状態を維持できる。また(3)の方法は、金属蒸気をスプレー状に真空中の電極間に吹き出し、ここに大電流を流してプラズマ化するものである(図2)。取扱いがすべて真空中で行えるため、繰り返しが容易である。

このように、大強度軟X線源、X線レーザーへの応用に適した様々なZピンチの方式が研究されている。しかし、それでもまだZピンチプラズマの特徴の一部分を活用しているに過ぎず、今後さらなる応用が期待されている。

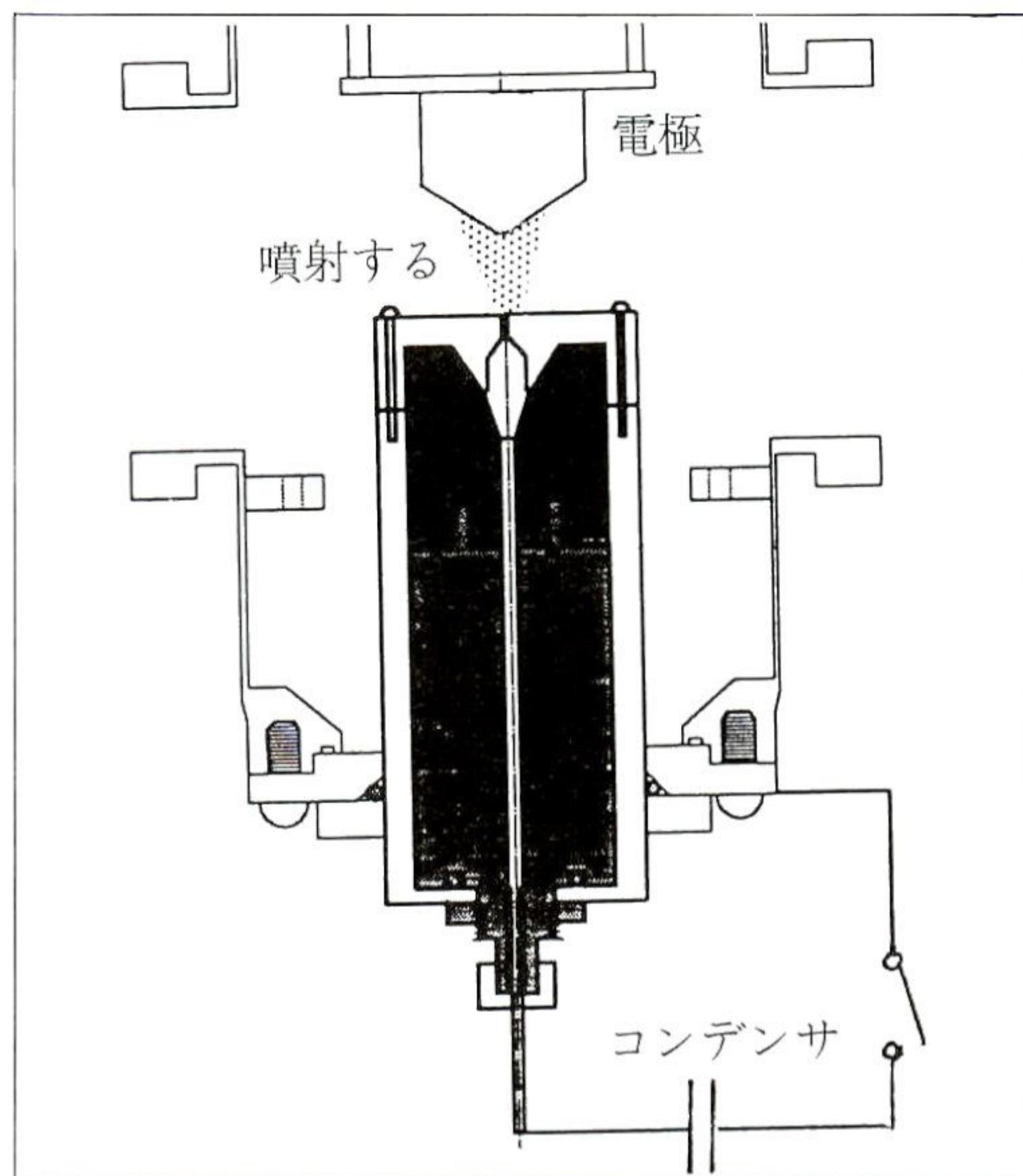


図2 キャピラリー放電型Zピンチの放電容器系



高電圧でエネルギーの大きいパルス？

この研究は、パルス幅が $0.01\mu\text{s}$ で電圧100万V程度の、大電力パルスを発生できる電源を実用することが目的である。

放電やプラズマの応用で、エネルギーを無駄にせず効率的に行うためには、高速で高電圧のパルスの利用が最も適している。こういった主張からこの研究が始まった。目的を達成するためには瞬間的に高い電圧が立ち上がり、急激に電圧が下げられる高速高電圧パルス電源（パルスパワー電源）が必要なのである。

パルスパワー電源を作るためには、パルス発生のための高電圧、大電流を制御できるスイッチが必要となった。そこで今研究されている半導体スイッチは、バルク状の半導体に電子ビームやX線を照射することで、電子と正孔を生成して電流のon動作をさせるものである(図3)。これは、電流の立ち上がりが速い、瞬時に電流を遮断できるなどの特徴があり、パルスパワー電源のスイッチとして大いに期待されている。

さらに、高速のパルスを作るために電源から出力された電圧パルスを、伝送する間に急峻化させる研究がある。これには、電圧により静電容量が変化する、非線形特性のあるコンデンサを含んだ非線形伝送線路を用いる。これは、非線形波動で

あるソリトン*と深く関係している。電力、エネルギー分野に利用する研究はまだ始まったばかりであり、パルスパワー電源への応用はまだ未解決な点が多い。

*ソリトン…形が変わらず減衰しない波で、孤立波といわれる。主な例に津波があり、光通信でも利用され始めている。

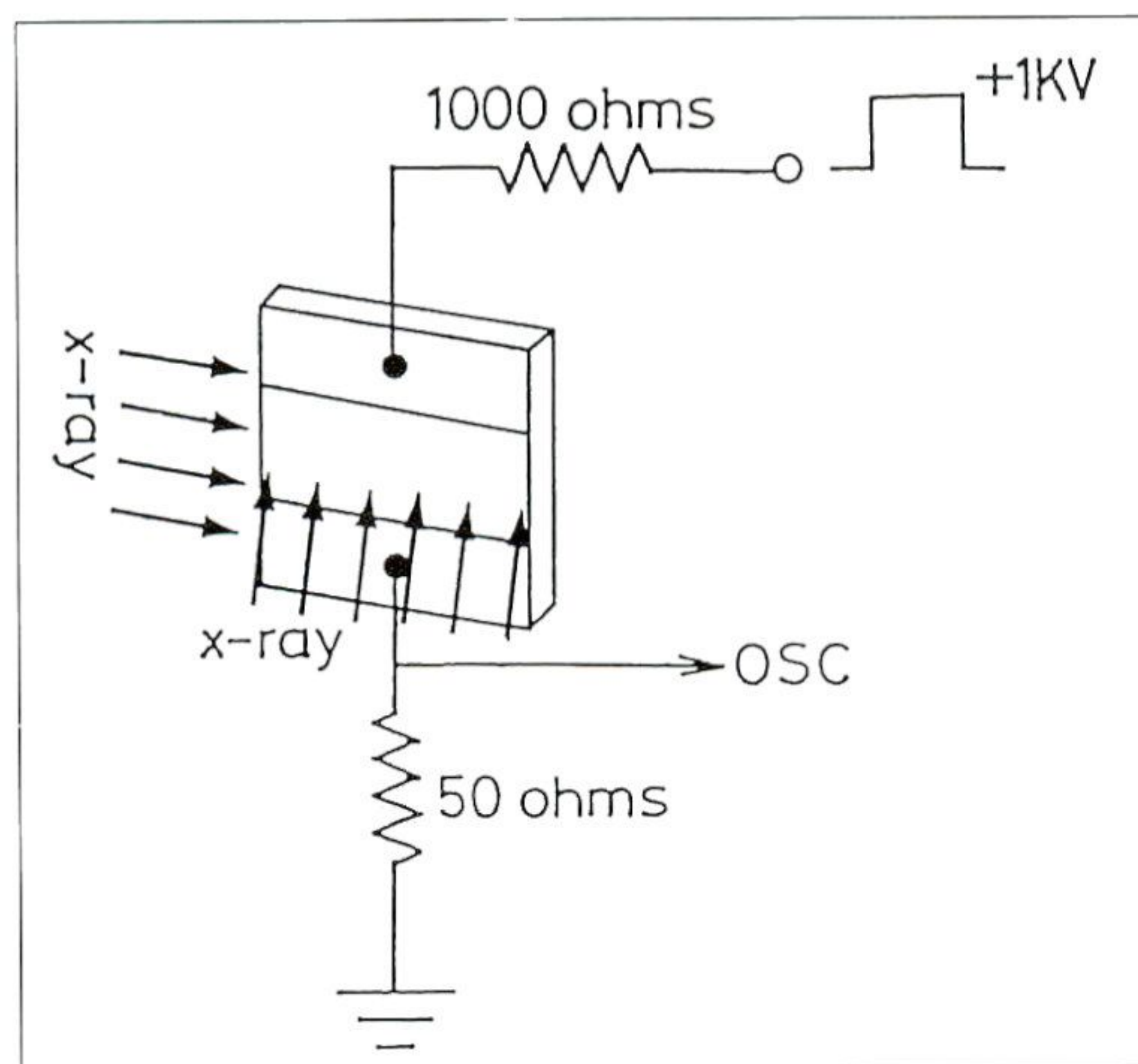


図3 半導体スイッチ

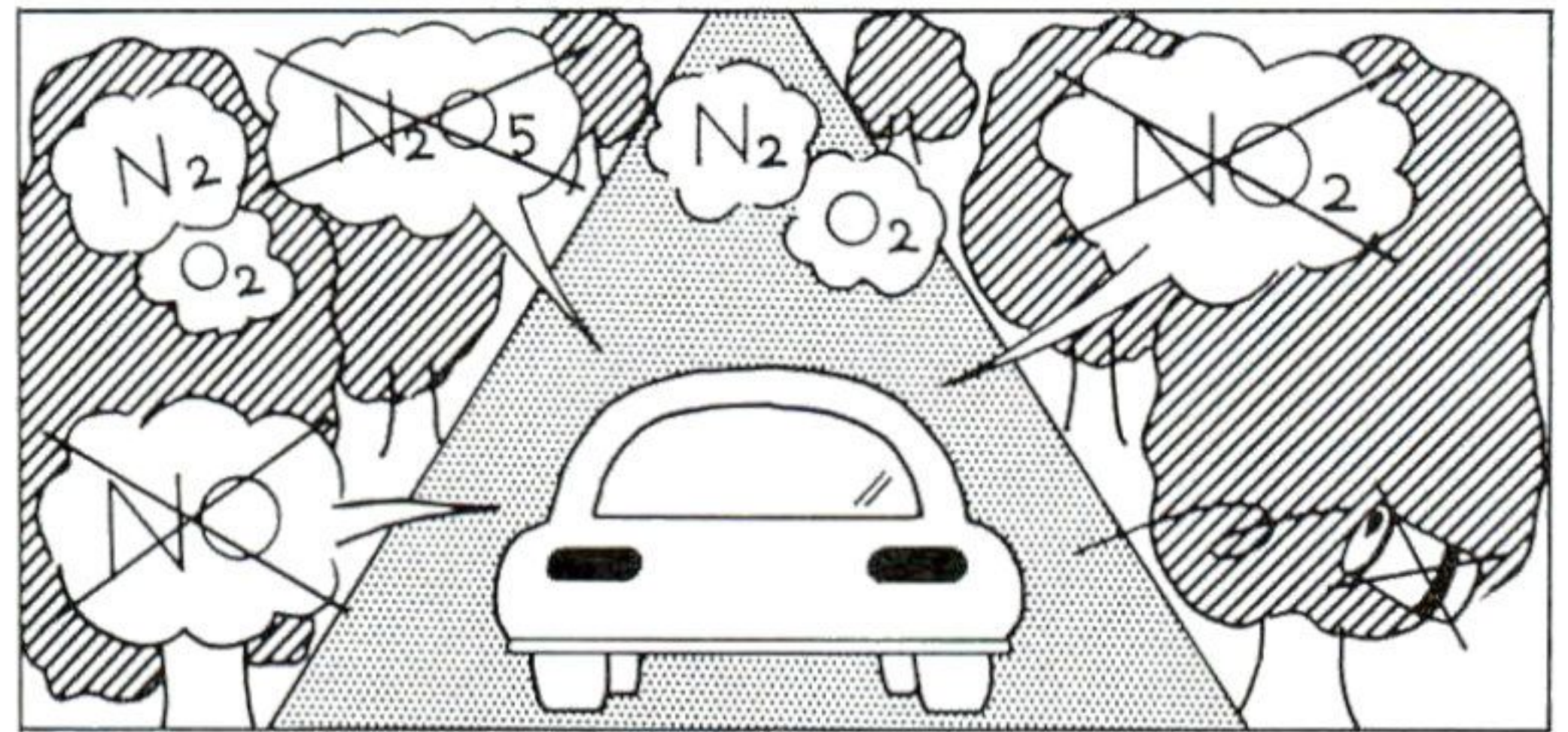


パルスパワー技術で空気をきれいに

教授は自宅が川崎にあったために、子供の頃から「空気が汚い」と感じていた。研究者となった今、何かできるに違いないと、環境問題について真剣に考え始めた。大気汚染の原因として問題となっている窒素酸化物の分解に、パルスパワー技術が使えるのではないかと考えた。

パルス大電力ならば、連続してではなく間欠的にしかエネルギーが使われないので、エネルギー消費は小さくてすむ。また、電圧の立ち上がり速度が速ければ気体中でも電子の加速が効率よく行われるので、放電・プラズマへの新しい応用の道が開かれてくる。窒素酸化物の分解装置も小さいエネルギーで実現することができる。装置の小型

化が容易なので、各々の自動車に乗せることができ、排気ガス中に含まれる窒素酸化物を分解した形で排出することが可能となる。そうすれば、少しは空気がきれいになるかも知れないと教授は言う。しかし電極が汚れてくるため、寿命が短いという問題点がある。



ストーリーのある研究、明るい研究室

〈研究に必要なのは〉

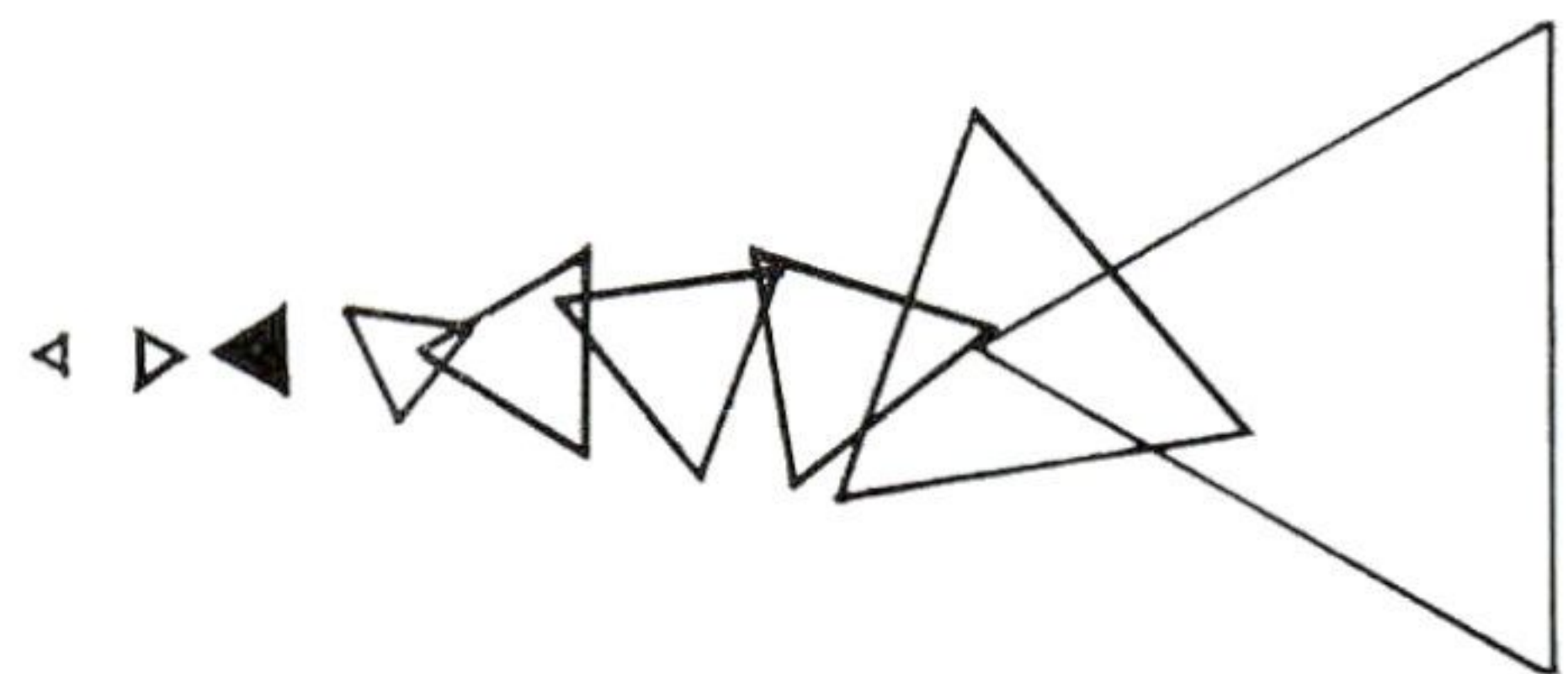
研究者は、極限に挑戦してみるのがオーソドックスなやり方だという。教授の研究も、「短い時間に大きなエネルギーを注ぎ込んだらどうなるだろうか」という素朴な疑問を調べてみたいという所から始まった。また非線形伝送線路のように、プラズマとは全く関係ない畑違いのところからアイデアをもらおうと、面白いことが突如出てくるともいう。



石井彰三（教授）

人生においても研究室においても必要なのは、どれだけ面白いストーリーを作れるか、ということだと教授は言う。面白いストーリーとは、テレビドラマで長時間見ても飽きないシナリオのようなものである。研究に関していえば、ある実験の結果を、何に应用できるのか、应用できたら何に役立てることができるのかまで考えることが必要である。実験結果と計算機シミュレーションの結果を比較し、ただ満足するだけではあまりにも面白くない。

最近では、自分の研究していることはよく判っているが、他のことについては何も知らないという人が多い。研究は、一人でできる範囲は限られているのだから、他人が何を行っているのか、常に情報を取り入れ、利用できるものがあったら自分の研究にどんどん取り入れていくべきであると、石井教授は語った。



〈研究室の実験では〉

実験室では普通の人が扱わない20～100kV程度の電圧、kA単位の電流を取り扱うので、結構壮絶である。

実験するには、電圧が高い、プラズマを作るには真空が必要などの色々な条件があり、かなり準備に時間が必要となる。研究室の人の分担、協力なしにはとても一人ではできない。そのため各グループに分かれ、グループ別に計画を立てて実験を行っている。

〈院生の方に〉

この研究室に入ろうと思ったのは、二つの大きな理由があったからだという。一つは大きな装置を扱えるから。もう一つは、電磁気・半導体は授業でやるがこのプラズマは授業ではやらない範囲であるため、わからない点で興味深かったから。ただ、大きな装置を使うにはお金がかかる。そのため、実際に企業の人と組んで実験をすることもあるらしい。大学内とは違った見方で参考になるという。

実験はメンバーが集まり次第始めるので、悪く言えば時間にルーズ、よく言えば自主制に基づいてフレキシブルに動いているという。先生あるいは助手の方がいる昼間に高電圧の実験をやり、その他の時間には各自で勉強する。

ここの研究室は十数名の所帯であるが、皆でスキーに行ったり、飲みに行ったり、サークルのように和気あいあいとしている。何といても、他のところに比べてとても明るいのが長所であるといわれる。



鈴木浩光（助手）



保科好一（博士3年）



お忙しい中、快く取材に応じて下さった石井教授をはじめ鈴木助手、研究室の方々に、深く感謝致します。また、石井研究室の一層のご発展とご活躍をお祈りするとともに、“ホームラン”がでる日を心からお待ちしております。

（池田）