

講座「プラズマ生成」

座談会「人類とプラズマ／プラズマ生成について」

ー講座「プラズマ生成」の開講にあたってー

藤 田 順 治

(核融合科学研究所)

(1992年11月7日受理)

(Received November 7, 1992)

編集委員会では、この1月号から6回シリーズで、プラズマ生成に関する講座を連載することとした。また、7月号では、「実用装置におけるプラズマ生成」と題する小特集を組むことになっている。更に、これらの内容をまとめて、プラズマ生成に関する単行本を出版することも計画されている。今月の第1回では講座開講に当たって座談会を開き、来月からの講座の内容の紹介を兼ねて、プラズマと我々人類との関わり及びプラズマの生成について、講師の先生方に自由に放談して頂いた。これはそのときの記録の要旨である。

座談会出席者：「プラズマ生成」編集委員会

藤田順治、板谷良平、坂本雄一、佐藤徳芳、佐藤照幸、学会事務局（司会）

M：皆様お忙しい中をお集まり頂きまして有り難うございます。

今日は、この1月号から6ヵ月の予定で連載されます講座「プラズマ生成」の幕開けといたしまして、いったいどのような内容の講座になるのか、また、講座が終わった段階で単行本としても出版される予定と伺ってますので、その予告編としてのお話を皆様からお聞きしたいと思います。

学会では折りにふれて、学生の方や、これからプラズマに関連した仕事を始めようという方々に、一人でも多く会員になって頂こうと努力しています。

学会の主催で毎年開催しているプラズマ生成・制御に関する「専門講習会」に参加された方々のアンケートの中にも、もっと分かりやすく、とい

うご意見もありました。そういう方々に、興味をもって読んで頂けるような講座になることを望んでおります。

では今日は、私が先生方に質問をさせて頂いて、先ずは“プラズマ”について、そしてこの“プラズマ生成”に関する講座の概要を、専門的知識を持たない私にも理解できるように説明して頂きたいと思います。

さて、早速第一の質問なのですが、確か宇宙の90%以上はプラズマの状態にあるのだと教えて頂いたことがあります。その“プラズマ”とか、“プラズマ状態”という意味から教えて頂きたいのです。

この地球も、私たちも、そして身のまわりのもの、みんな大宇宙のはしくれだと思うのですが、

ちっともプラズマのように感じられません。地球上では、プラズマは存在しがたく、生成することが難しいのですか？

「あの中にプラズマができていますのですよ」と教えられたネオンサインは、スイッチを切るとすぐ消えますし、稲妻やスパークにしても、あっという間に消えてしまう。この辺の事情を分かりやすく教えて下さいませんか。

T：始めから難問だな。一笑いー

Mさん、平家物語の出だしを御存知でしょう？

M：え？「祇園精舎の鐘の声……………」ですか？

T：ええ、その続きの生者必滅、会者定離……です。生成されたプラズマは必ず消滅する。電離して別れた電子とイオンはいずれ再結合して、もとの分子に戻る。奢るプラズマ久しからず。

M：あら、プラズマって文学的なんですか？

T：文学的どころか、哲学的でもあるんですよ。

M：え？

T：ギリシャ哲学では、万物はすべて地と水と気と火からなると言われているでしょ。地は固体、水は液体、気は文字通り気体、そして火はプラズマなんですよ。物質は温度を上げると、固体から液体、気体と変わりますね。更に温度を上げるとみんなプラズマになってしまう。“プラズマ状態”が物質の第4態と呼ばれる所以です。

M：それでは、温度を上げていくとみんなプラズマになってしまうのですか？

T：そのとおり。ただ、よほど温度が高くないとこの辺りのものはプラズマにはなりません。太陽の中心では1,500万度のプラズマです。

M：昔のギリシャの人々は既にプラズマのことを予見していたのですか？

T：それは分からない。一笑いー

R：いま、プラズマは文学的だ、哲学的だという話が出ましたね。実はプラズマという言葉自体、うんと神秘的なのですよ。

M：そういえばプラズマにあたる言葉は日本語にはありませんね。中国語では等離子体と言うそうですが、電子とイオンと同じ数に分かれているという意味で、なんとなく分かった気になります。

R：そう。それはそのとおりです。

ところでプラズマという言葉は何に由来していると、あるいはどんな言葉に関係があると思いますか？。

M：先生、ずるいですよ。今日は私が先生方に質問をすることになっているんですから。

R：まあ、そう固いことを仰らずに、何か連想することを言ってみて下さい。

M：そうですね、一番近い言葉は“プラスティック”。

R：いい線を行ってますよ。

ギリシャ語で“πλάσμα”は、粘土細工のように何かを形造る、あるいは造られたもの、という意味で、中世では、神の造りたまひしもの、の意味に使われていたようです。医学の世界では、原形質や血液中の血漿もプラズマと呼ばれています。^{注1)} 我々の扱うプラズマにこの「造られたもの」としてのプラズマの名を与えたのは、1920年代のラングミュア先生です。^{注2)} 彼は放電管の研究をしていて、ガラス管の中に妖しく輝く放電プラズマを見て、まさに神秘的なものを感じ取ったのではないのでしょうか。あるいは、放電プラズマの形状とかプラズマ振動の様子がまるで原形質みたいだなと思ったのかも知れません。

M：神秘的といえば、エンデヴァーに乗った宇宙飛行士の毛利衛さんが、宇宙から見た南極のオー

注1) 核融合研究13 (1964) 7月号 p. 67「放談室」掲載の“坂本賢三氏から伏見康治先生への手紙”参照。

注2) Irving Langmuir, *Proc. Nat. Acad. Sci.* **14**, 627 (1928). “Oscillations in Ionized Gases” に次の表現がある。

We shall use the name *plasma* to describe this region containing balanced charges of ions and electrons. (p. 628)

また, Lewi Tonks and Irving Langmuir, *Physical Review* **33**, 195 (1929). “Oscillations in Ionized Gases” の footnote (p. 196) には次のように記述されている。

The word “plasma” will be used to designate that portion of an arc-type discharge in which the densities of ions and electrons are high but substantially equal. It embraces the whole space not occupied by “sheath.”

ロラの美しさに感動していらっしゃいましたね。
これもプラズマの一種なのでしょう？

T：そうです。これは太陽風で運ばれてきたエネルギーの高い粒子が、地磁気で北極や南極に吸い寄せられ、高層の大気を刺激して発光しているのです。

M：これも自然界のプラズマですね。そうすると、地球上でプラズマを作ろうと思うと、ラングミュア先生のようにガラス管で放電させる方法しかないのですか？

T：確かに一番手っとり早く作る方法と言えますね。

M：その放電管のお話しをもう少しして頂けませんか？ネオンサインや蛍光灯の中にプラズマができていう話はよく聞くのですが、ネオンサインなんかは神秘的というより、世俗的な感じがしますが。一笑いー

R：私が就職してから最初のプラズマとのお付き合いは実は蛍光灯なんです。蛍光灯はご存じのようにガラス管でできてますね。中にはアルゴンガスと水銀が封入してあって、両端には電極があります。管壁には蛍光物質が塗布してあって、中の様子は見えませんが、ここにデモンストレーション用の放電管の写真がありますので、中でいったい何が起こるのかお話ししましょう。

まず、ガラス管の中が大気圧のままですと、よほど高い電圧をかけないと放電は起こりません。しかし、ポンプでガラス管の中を排気していきますと、ちょうど雷のミニチュアのような放電が起こります。(写真1参照)。写真では動きが分かりませんが、実際にはちっとも安定してなくて、絶えず放電の道筋が変わっています。ところが、もっと排気して管内の圧力が数百分の一気圧くらいになりますと、前より低い電圧で放電が起こり、しかも管内が一様に光り出します。更に管内の圧力を下げていくと、写真2のように色も変わりますし、管軸に沿って一様ではなくなり、電極の近くに明るい場所、色が変わった場所などが見られるようになります。

M：気圧を下げるだけで、こんなにいろいろな光かり方をするのですか。不思議ですね。

R：もっと圧力を下げて、一万分の一気圧くらいにすると、放電を起こすのにかえって高い電圧が必要になり、放電の光も淡くなって管壁が緑色の蛍光を発するようになります。

こうしてガラス管を真空に引いて、別のガスを入れますと、ガスの種類に応じて、お馴染みのネオンの色とか、トカマクなどで使われている水素放電ではこのような藤色とも赤紫ともつかぬ色になったり、それから、ストライエーションと呼んでいますが、このような縞模様が現れることもあります。写真3は、ガスレーザーの放電の様子を写したのですが、上の写真は純粋なヘリウムの放電で、下の写真はレーザー発振をさせるために、メタンと窒素の混合ガスを流量にして13%程度混ぜたときの写真です。同じガス圧、同じ放電電流で、このようにすっかり違った光りかたをします。上の写真のように一様に見える放電も、高速度写真で見ると縞模様が連続的に移動している場合もあります。

M：確かに神秘的な感じはしますね。でも先程のお話しでは、よほど温度が高くないとプラズマにはならないということでしたよね。蛍光灯なんて、手で触ってもちっとも熱くないじゃないですか。

N：ちょうど良いところで話に乗って下さいましたね。

確かに蛍光灯は熱くありません。しかし、電極間に高電圧がかかっているところが味噌なのです。“君の瞳は一万ボルト”という唄がありましたが、美女がウインクしても睨んでも放電は起きません。しかし、電極間に高電圧がかかっていると、中に存在している電子が加速されて中性粒子に衝突し、新たな電子ができ、できた電子がまた加速されて更に多くなり、鼠算的に電子が増えてプラズマができます。電子は高温ですが、ガスの量に比べてまだずっと少ないので、管壁は高温になりません。

M：でも最初の電子は？

T：なかなか鋭いですね。実は地球上には宇宙線が間断無く降り注いでいて、大気中で1秒間に1立方センチメートルあたり10個程度の割合で電子が生成されています。この電子は短時間のうちに

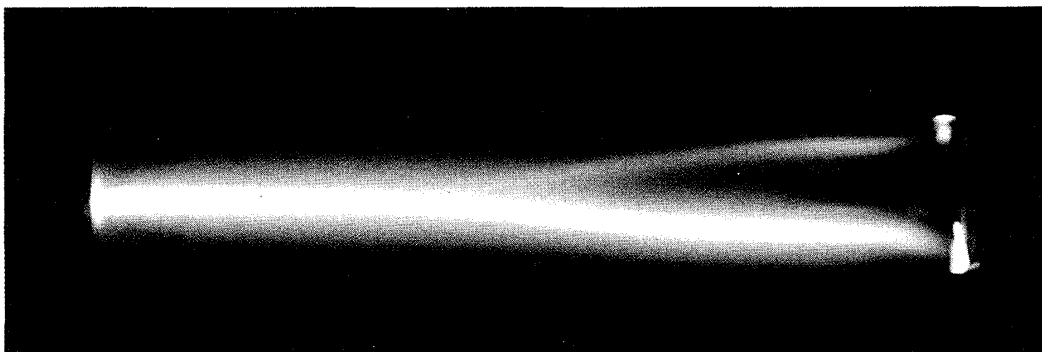


写真1. ガス圧約50Torrの空気の放電プラズマ（放電管は直径30mm, 電極は直径20mm, 間隔120mm）

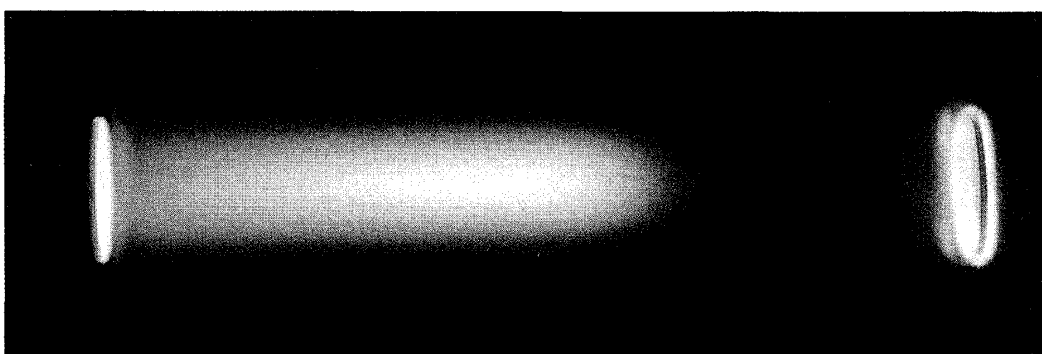


写真2. ガス圧約2Torrの空気の放電プラズマ（放電管は写真1と同じ）

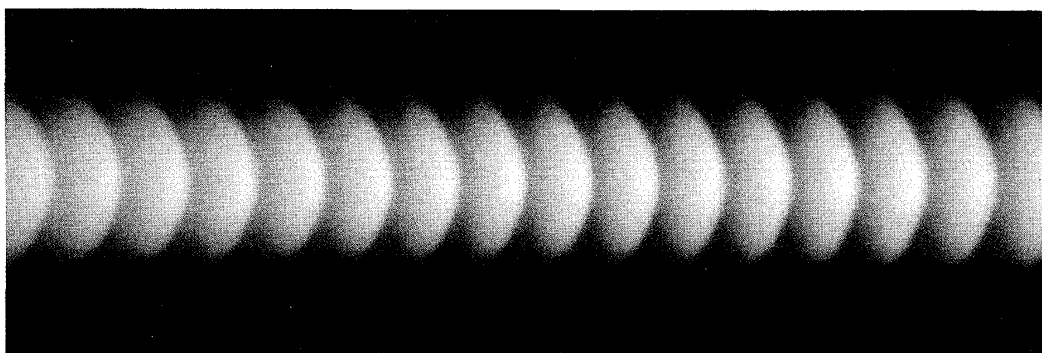
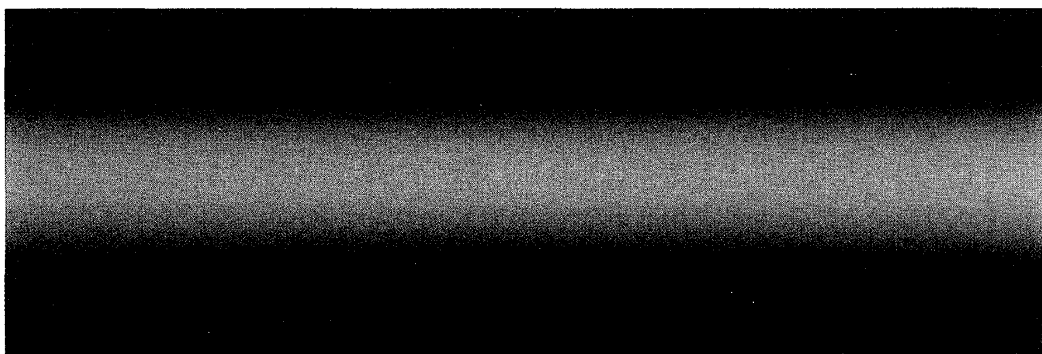


写真3. ガスレーザー放電管で生成されたプラズマ
（上：ヘリウム, ガス圧2Torr, 放電電圧2kV,
放電電流1A, 下：ヘリウム+メタン+窒素,
ガス圧2Torr, 放電電圧3.6kV, 放電電流1A）

酸素分子に付着して酸素分子の負イオンを作り、正イオンと結合して中性粒子にもどってしまいます。それでも、この負イオンは1立方センチメートルあたり1000個程度存在しています。そしてこの負イオンから離脱する電子が、最初の電子としてプラズマ生成に活躍するわけです。

M：へーっ、そんなにたくさんの電子ができているのですか。

T：びっくりしなくてもいいですよ。なにしろ空気の分子の個数は、大気圧でほぼ $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ですから、 10^{16} 分の1にしか過ぎません。ですからこれをプラズマと呼ぶには薄過ぎて、プラズマらしい性質は現れません。

もしも、電子が発生するところに高電圧がかかっていると、先程のお話のように、電子はすぐに加速され、中性粒子と衝突してそれを電離し、プラズマを作ることになります。先程の写真にあるような放電管の中にこうして生成されたプラズマの密度は、 10^{10}cm^{-3} 程度ですから、プラズマとしての性質を表すようになります。

M：先程のお話で、気圧を下げて行くと放電しやすくなるということでしたね。

そうすると、成層圏のように空気が薄くなると、放電も起こりやすいのですか？

T：事実そうなんです。蛍光灯のところでもお話があったように、気体の圧力を下げていくと電圧がそんなに高くなくても放電が始まり、容易にプラズマをつくるようになります。

N：ここではプラズマ生成の話なので、みんないかにして望みのプラズマを作るか苦労しているのですが、世の中には、どうすればプラズマを作らないようにできるか、言い換えれば、どうやって絶縁破壊を防ぐかということをテーマに頑張っている人も多いですよ。スイッチを切った後のスパークを素早く消してしまおうという研究もされています。

T：放電管に高電圧をパルス的にかけてプラズマを作ろうとして、大音響とともに絶縁破壊が起こり、放電管の中にプラズマができないで、外側に立派な大気圧のプラズマができてしまったという失敗談はよくあります。一笑いー

M：成層圏の話に関連して、もっと地球から離れて行くと、プラズマがうんと重要になるんでしょうか。

N：そうです。先程も話題になりましたが、多くの星、星間空間は、密度の違いはあってもプラズマなのです。人間が地上から遠く離れて活動するときの環境は、まさにプラズマ空間です。今後、ますますこのプラズマ環境が重要になってきます。プラズマを利用するプラズマロケットで、プラズマ空間である宇宙旅行を！ということが近々できるかもしれません。また、太陽を始め、多くの星の中は高温プラズマですが、そこで高温イオン同志が融合する核融合反応が起こっており、エネルギーの源となっているのです。

J：プラズマ研究の重要な応用に核融合研究がある訳ですが、これは核反応のまさに平和利用であり、制御された核融合反応を地上で実現し、限られた資源に依存している現在のエネルギー源に代わり、よりクリーンなエネルギーを長期にわたって賄おうとするものです。核融合を使えば、いま世界的な大問題となっている地球の温暖化をも防ぐ可能性のあるエネルギー源が開発できるのですよ。

M：プラズマの研究は、エネルギー問題と地球環境問題と、両方の調和を目指す重要な研究なのですね。

Y：プラズマと核融合との関連については今のお話しのとおりですが、プラズマがどれほど人間生活に深く関連しているかご存知ですか？

M：最初に出てきた放電管のお話は確かに日常生活に密着していますね。もう私たちは蛍光灯無しの生活は想像できません。それ以外にどのようなところでプラズマが使われているのですか？

Y：プラズマの利用は二つのカテゴリーに分類できます。その一つは、①低温プラズマの利用です。低温プラズマと言う意味は、それが触れている固体壁が融けたり、蒸発したりするような熱的損傷を与えないということです。古くからある利用では、照明用の蛍光灯やナトリウムランプ、また、医療用の水銀灯などがありますが、最近輝かしい活躍をしている分野として、半導体工業における

超微細加工としてのドライエッチングや、薄膜堆積、鉄・ガラス・プラスチックなどの表面改質のような、プラズマのもつ化学作用の固体表面の加工や処理への利用を挙げることができます。

N：最近、プラズマを使って黒板くらいの大きさの太陽電池が作られるようになりましたね。

Y：そうです。それからもう一つは、②高温プラズマの利用です。ここで高温と言うのは、できたプラズマにもっとエネルギーをつぎ込み、プラズマの温度を高めた状態のことです。①とは反対に、固体の溶解や蒸発が容易に起こると言う意味で、電子、イオン、中性原子（分子）が大体等温であると言えます。つまり、ほぼ熱平衡にあるわけで、高密度でもある訳です。このため、溶接、溶断、溶解、溶射、蒸発などに広く利用されているだけでなく、通常の化学反応では容易に得られないダイヤモンド薄膜などの高度材料や、有望な未来をもっている超微粒子の生成などにも積極的に使われつつあります。

R：Mさん、どこかのコマーシャルに“ゆりかごから墓場まで”，というのがありましたね。プラズマも墓場まで関係あるのですよ。もっとも墓石をプラズマで加工しようという話ではなくて、いま社会的な大問題となっている産業や生活の廃棄物の処理にプラズマが活躍する話です。例えば、生ごみを燃やすことや、燃えにくいものを完全燃焼させた上で、灰まで融かして、ガラス状にして建材として利用することなどが試みられているのですよ。また、今話題のフロンガスの分解や、ディーゼルエンジンの排気ガスの清浄化なども、かなり進んだところまで来ていますよ。放射性廃棄物の処理については、放電を用いて、その体積を減らす研究が進んでいます。なにしろ1年にドラム缶何万本も出てくるものが、その何分の一かで済めば、その後の貯蔵や処理もずっと楽になります。

M：プラズマはそういうところでまで活躍しているのですか。一日も早く実現して欲しいですね。

プラズマが日常生活に深く関わっていることはよく分かりました。しかし、これまでのお話の中に出てくるプラズマは、やはり放電を使って生

成しているのですか？

R：今まで随分いろいろなプラズマの話が出てきましたね。プラズマの使い道は千差万別ですから、それぞれ用途に応じて、目的に合ったプラズマ生成に努めなくてはなりません。放電を用いてプラズマを作るだけでなく、表面電離という現象を使ったり、光を用いてプラズマを生成したり、電子とイオンを別々に作って合成プラズマを生成することもできます。今までのプラズマは、光りを出すとか、大電流をオン・オフするスイッチとか、比較的単純な目的に使われてきましたが、プラズマプロセスでは使う相手が無数にあるので、それぞれに適したプラズマをどのようにして作るか、また、常にプロセスの結果を最良でかつ安定に維持するにはどうすれば良いかなど、産業界にとって重要な課題がたくさん存在しています。

Y：同じ放電を使う場合でも、先程の直流放電と違って、高周波やマイクロ波を使った放電もよく利用されています。適当な圧力のガスを詰めた放電管を電子レンジに入れてスイッチを入れますと、放電が起きます。私も昔、マイクロ波放電でプラズマを作る研究をしていましたが、真空容器の外部から導波管でマイクロ波を送り込むと、真空窓がマイクロ波を吸収して発熱し、クラックが入ってしまい、大変苦勞しました。プラズマ生成には本当にノウハウがつきものですね。

J：プラズマの使い道は千差万別ですし、作り方も用途に応じてさまざまですが、生成されたプラズマの特性は、その成分、密度、温度、大きさでほぼ統一的に表すことができるのです。問題はこれらのプラズマパラメータとでも言うべき物理量が非常に広範囲にわたっていることです。プラズマの温度も、低温で良い場合から、核融合のように数億度まで、プラズマの密度も薄くて良い場合から、レーザーなどを用いた慣性核融合のように、液体の密度の数百倍も必要な場合まで、そしてプラズマの大きさも、宇宙空間をシミュレートするためのスペースチェンバーのように、人間が中に入って作業することのできるほどの大きさから、慣性核融合のように、1 mm以下のものまで、本当に千差万別です。それでも、プラズマを生成する

基本原理は共通していて、いくつかの手法に分類することができます。

今回の講座は、広範囲の分野でのプラズマの使われ方と、千差万別のプラズマの作り方とを網羅したものですから、非常に面白いものになると思いますよ。今日の予告編に従って、講座「プラズマ生成」は来月から次のような構成で始まります。

第2回：平成5年2月号（執筆予定者）

1. プラズマ生成総論

1.1 自然界のプラズマ（大沢幸治）

1.2 プラズマ生成の基礎（佐藤照幸）

第3回：平成5年3月号

2. 基礎的プラズマ生成（佐藤徳芳，真瀬 寛）

2.1 熱生成プラズマ

表面電離プラズマ

2.2 直流放電

第4回：平成5年4月号

2.3 誘導放電（トカマク， θ ピンチ等）

（嶋田隆一）

2.4 高周波・マイクロ波放電

（有電極，無電極）

（板谷良平，八坂保能）

第5回：平成5年5月号

2.5 ECRプラズマ（ホイッスラー波）

（河合良信）

第6回：平成5年6月号

2.6 ビームによるプラズマ生成（原 民夫）

2.7 光・レーザーによるプラズマ生成

（山中龍彦）

3. まとめ

（藤田順治他）

ここまでは、いわゆる講座として、ある程度原理の話とか、多少教科書的になるかも知れませんが、この後、実用装置でどのようにプラズマ生成が行われているか、現場の方々にも役立ち、一般の読者の興味もそそる内容のものを、解説：小特集の形でまとめることにしました。

小特集：平成5年7月号

－実用装置におけるプラズマ生成－

1. イオン源プラズマ（石川順三）

2. プロセス用プラズマ

非平衡プラズマ

（板谷良平）

平衡プラズマ

（吉田豊信）

3. 光源用プラズマ

（岡本幸雄）

プラズマディスプレイ

照明

レーザー

4. ピンチプラズマ

（横山昌弘）

プラズマフォーカス，中性子源

真空スパーク

5. プラズマエンジン

（栗本恭一）

6. 産業廃棄物処理用プラズマ

（板谷良平）

7. 核融合装置プラズマ生成

磁場閉じ込め

（玉野輝男）

慣性閉じ込め

（山中龍彦）

M：なかなか盛り沢山な内容のようですね。是非とも分かり易い講座にして下さるよう期待しております。

本日は有り難うございました。

