低温プラズマと工学(I)

—何が制御でき、できないか—

藤 田 順 治*

(昭和59年12月13日 受理)

Low Temperature Plasmas and Engineering (I)

—What can be controlled and what not?—

Junji FUJITA

(Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Nagoya 464)

(Received December 13, 1984)

1. はじめに

核融合を目指して高温プラズマの研究を続けている身にとって、副題として提示された“何が制御でき・できないか”という問いかけはまさに冷汗の出る言葉である。何故かといえば、“制御された核融合研究 (controlled thermonuclear fusion research)”に携わりながらも、高温プラズマを制御することがいかに難しいことであるかを身に沁みて感じているからである。プラズマを生きものにたとえた人がある。プラズマはそのままでは存在し続けることができず、常にエネルギーを補給してその構成粒子である電子やイオンを生成し続けてやらなくてはならないためであろうが、我々実験をしようとしているものの言うことを一向に聞かないところも、プラズマは或る種の生きものにそっくりである。

核融合の場合には、最終的には核融合反応を起こさせ、経済的にひき合うだけの核融合エネルギーを取り出すことが目標であるから、そのためには、よく言われているようにプラズマの温度 T を1億度以上に、そして単位体積中のイオンの個数、つまりプラズマの密度 n と、エネルギーがその系に保持される時定数、即ちエネルギー閉じ込め時間と呼ばれている量 τ との積、 $n\tau$ を $10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ 以上に保ち得る条件を達成することが当面の課題である。従ってプラズマを制御しようというときには、

いかにしてこの条件を満たすプラズマを生成するかという目標にすべてが集約されることになる。その点、低温プラズマと工学との関係を論じるとなるといささか様子が変わってくる。低温プラズマの工学上の使い途は千差万別であろうし、そのために必要とされるプラズマも決して一色ではあるまい。しかしそれでは話が進まないの、ここでは、核融合研究における高温プラズマの制御についての経験をもとに、低温プラズマを制御するとはどういう意味を持ち、どうすれば制御できるかについて考察してみることにする。

2. 高温プラズマと低温プラズマ

前にも述べたように、核融合を起こさせようと思うと、プラズマの温度を1億度にも高めなくてはならない。しかし、このような高温に耐え得る容器はこの世には存在しない。そこで、磁場の働きを利用してプラズマの熱が容器の内壁に直接伝わらないようにしている。つまり、電子やイオンのように電荷を持った粒子は磁力線を横切っては動き難いことを利用して熱絶縁に使おうという算段である。これはまさに磁場を用いてプラズマを制御しようということに外ならない。しかし一方では、磁場の中でのプラズマの振舞はそう簡単ではなく、磁場中プラズマの関与するもろもろの複雑な現象やプラズマのあまのじゃく振りは、すべてこの磁場とプラズマの相互作用に起因していると言っても過言ではない。プラズマを磁場を用いて閉じ込めようとする、プラズマは磁

* 名古屋大学プラズマ研究所 (名古屋市千種区)

力線の網をすり抜けて逃げ出そうとする。磁場中のプラズマにはいろいろな波動が生じたりそれを伝播させる性質がある。このことが、プラズマの粒子やエネルギーが磁場を横切って予想以上に速く伝わってしまう原因であるとも言われている。磁場中のプラズマの振舞いは、物理的には未だまだ解明されていないことが多い。そうは言っても、磁場中でプラズマが運動すれば磁場は変化するし、磁場を変えることによってプラズマを動かすこともできる。プラズマの形状や運動をピックアップコイルを用いて磁場変化の形で検出したり、その信号に応じて外部磁場を変化させてプラズマ位置をフィードバックコントロールするという手法は、今やトカマク装置では常識となっている。

低温プラズマでは幸い磁場の力を借りなくても固体壁の容器内に生成することができる。内壁の前面にシースが形成されて、これが熱絶縁の役目を果たしてくれるからである。このことは、磁場の存在に起因する不安定性とか、エネルギーや粒子の異常輸送とは無縁であることを意味するが、一方ではそれだけ制御の観点からの自由度が減ったことにもなる。もうひとつの大きな違いは、低温プラズマでは電子やイオンの衝突する相手が中性分子または原子である点である。放電プラズマのようにプラズマの生成を電子衝突による電離に頼っている場合には、電子温度が低いために電離度も低く、分子や原子の割合が多いからである。高温プラズマでは完全電離に近く、電子が衝突する相手はイオンと考えてよい。この違いはプラズマの電気伝導度の大きな差として現われる。低温の場合には相手の気体の種類によって決まる移動度と電子密度とに比例するが、高温の場合には相手のイオン電荷数と電子温度のみでほとんど決まり、その値は非常に大きい。高温・低温という文学的な分け方でなく、プラズマ中で荷電粒子間の衝突現象が支配的となっているか、気体分子との衝突で物事が決まっているかで区別した方が、プラズマをより明確に理解する助けとなるであろう。

3. 何を制御するか

プラズマを制御し得た、あるいはし得ない、というとき、プラズマの持っているさまざまな性質あるいは特徴的な量のうち、一体何を制御しようとしているのかははっきりしていなくては意味を持たない。プラズマと工学との関係を論じるのであるから、必ず工学的な目的がある筈である。その目的にかなったプラズマを望みの形態で生成することができ、しかも、いつもどこでもそれが再現されることが、制御されたという真の意味であろう。個々の場合にたまたま望みのプラズマが生成できたとい

うだけでなく、別の条件の場合にやはり望みのプラズマを生成できるためには、普遍性がなくてはなるまい。そこで、まずプラズマの性質はどういう基本的な物理量で記述されるかを考えてみよう。これらの基礎量を望みの値に持って行くことができれば、これは立派にプラズマを制御したことになる。

4. プラズマの基礎量とその制御

4.1 プラズマの構成イオン種

プラズマは電子とイオンの集合体である。低温プラズマであれば中性の原子や分子も多く含まれる。核融合の場合には重水素や三重水素が興味の対象であるが、その前段階としてプラズマの性質をよく理解しておこうと普通の水素を用いている。それに招かれざる客として器壁からたたき出された酸素や、スパッタリングの結果として器壁材の鉄や炭素などが混ってくる。これらの不純物は大きな放射損失や不安定性の原因となるので、その制御は核融合研究の大きな課題である。ダイバータと呼ばれる不純物除去装置や、壁の構造、器壁の放電洗浄法などに多くのアイデアが出され、活発に研究が進められている。

工学上の目的からは、どういう種類のイオンを必要とするかによって、例えば放電に用いるガスを選ぶことになる。金属イオンが欲しい場合には、それを電極として放電させたり、金属蒸気の形で放電させるか、他の放電し易い気体によって放電を維持させておいて、その中に金属蒸気を混入させてイオン化する手法もよく用いられる。

低温プラズマならではの利用法の中に、イオンではなく、電離していない中性の原子や分子を利用するものがある。ネオンサインや分光用放電光源などに見られるように、電子衝突による原子の励起に伴う特定のスペクトル線の発光を利用する場合とか、或る種の気体放電レーザーなどがそれに当たる。混合ガスの放電やシード放電は最近とみに実用化されてきているようであるが、適当な種類の原子、分子、イオンを含んだプラズマを生成するため微妙な制御が必要となる¹⁾。日常生活に最も身近な蛍光灯は混合ガス放電の典型的な例で、電子衝突で生じた準安定状態のアルゴン原子が、水銀原子と衝突してそれを電離するというペニング効果を最大限に利用したものである。従って蛍光灯の温度を変化させて水銀の蒸気圧を変えてやると、その放電特性は大きく変わる。蛍光灯のように放電をさせ易くするため混合ガスを用いるのではなく、電子付着能の大きなガスを混ぜてアーク放電の消弧特性をよくした例もある²⁾。さらに極端な場合として、プラズマの電気伝導性だけに着目して、あるいは大

電流の電子源としてのプラズマに着目して、イオンの種類は本質的でなく電子のみが主役というプラズマの使い方もある³⁾。

4.2 プラズマの密度

プラズマの構成要素である電子あるいはイオンの密度、即ち単位体積中の個数はプラズマの最も重要な基礎量である。プラズマに電磁波が入射したとき誘電体としての性質を示すが、その誘電率は電子密度 n_e の関数として表わされる。次節で述べる電子温度 T_e とともに、プラズマのさまざまな性質を記述するパラメータとして必ず顔を出す物理量である。低温プラズマではイオンはほぼ1価に電離したものとすればよく、プラズマは準中性であるという性質から、イオン密度 n_i はほぼ n_e に等しいと考えてよい。但し負イオンが存在するときにはこの限りではない。

この電子密度の値は、例えば電子衝突電離による電子の生成の割合と、空間での再結合や器壁への拡散による損失の割合とのバランスでもって決まる。従って密度を制御しようと思えば、電離の割合か損失の割合か、どちらかを変えてやればよいことになる。しかし、放電管の大きさやガスの種類・圧力が決まっているときに損失の割合を変えることは困難で、通常は放電電流を増減させて生成の割合を変え、密度を制御している。高温プラズマではほとんど完全電離なので、ガスの密度も変えてやらねば密度の制御はできない。トカマクでは、最初、最も安定に放電のつき易い低目のガス圧で放電を開始させ、放電が成長した後、高速のガスパルプで中性ガスを注入し高密度のプラズマを生成している。ピエゾパルプを用いれば印加電圧に応じてガス流量を制御できるので、マイクロ波干渉計などを用いてプラズマ密度をモニターし、それが一定値となるよう流量を調節するフィードバックコントロールによって定密度放電を実現している。

4.3 電子温度

電子温度も前述の電子密度に劣らぬプラズマの重要な基礎量である。原子や分子の励起あるいは電離の起こり方は電子温度によって大きく変わる。再結合の割合もまた電子温度の関数である。プラズマに接する物体表面に形成されるシースの厚さやシース電位も電子温度によって決まる。

ここでいとも無難作に“電子温度”という言葉を用いてしまったが、“温度”の意味を少し考えてみよう。本来、温度という概念が成立つためには、その系は完全な熱平衡状態になっている必要がある。しかし、我々が地球上に作り得るプラズマでは、放射まで含めた熱平衡は成立っていない。それでは温度という言葉は意味を持た

ないと思われるかも知れないが、粒子の運動に着目してみると、それぞれ熱運動をしており、その速度分布はある温度 T で記述されるマックスウェル分布をしていることが多い。そこで、この熱運動の大きさの目安として温度を定義しておく、集団としての粒子の振舞を記述するときに便利である。ここでもその意味で温度という言葉を用いることとする。

現実のプラズマでは必ずエネルギーの流れがある。例えば気体放電の陽光柱を考えてみると、電子は軸方向の電場で加速されエネルギーを得る。しかし電子同志の数回の衝突によって、電子は電子なりの一つのマックスウェル速度分布になる。しかし、電子とイオン、あるいは原子・分子との衝突によるエネルギー緩和時間は大きな質量比のため長く、なかなか電子とイオン、原子・分子とは同じ温度にはならない。その結果、電子は数万度という高い値を保ちながらも、イオンや原子、分子は室温とあまり変らぬ値に止まる。このことから電子とイオンあるいは原子・分子が別の温度を持つということも理解されるであろう。それに加えて、放電管の内壁の前面にはイオンシースが形成され、それによって大半の電子はプラズマ側へ追い返される。このことも蛍光灯に触れても熱く感じない理由のひとつである。

プラズマの密度が生成と消滅のバランスで決まるのと同様に、プラズマの温度も加熱入力とエネルギー損失のバランスで決まる。従って原理的には加熱入力を増すとプラズマの温度は上がる筈であるが、いつもそうとは限らないのがプラズマの難しさである。再び気体放電の陽光柱を考えてみる。加熱入力を増そうと高い電圧をかけても、実際には放電電流が増加するだけで陽光柱にかかっている電場の強さは変わらない。電場が一定でも電流密度が上があれば入力は増加したことになるが、電子密度がほぼ電流に比例して増加しているため、電子1個あたりに分配される入力は変わらないことになる。それではエネルギー損失の方を減らしたら温度は上がるであろうか。陽光柱では粒子の損失は半径方向の両極性拡散と呼ばれる過程によって起こっている。放電管の内径を太くして拡散による粒子損失を減らしてやると、それによってエネルギー損失も減るものと考えられる。しかし、粒子の損失が減ったため、定常状態を保つのに必要な電離の割合は少なくて済むことになり、低い軸方向の電場で定常状態が実現される。即ち電子温度は前よりも低くなるという一見パラドックスめいたことが起こるのである。気体のガス圧を増やすことは管径を太くすることと等価であり、陽光柱での電子温度は気体の種類と、ガス圧 p と管径 R とで決まり、 pR の減少関数で表わされる。陽光柱の場合のように加熱と電離が絡み合っているときには複

雑であるが、トカマクのような閉じ込め装置では、確かに加熱入力を上げればそれに応じてプラズマの温度も上がっている。しかしメガワットという大電力の高周波加熱を行うと、それによってプラズマの閉じ込め性能が劣化したり、アンテナや壁から不純物が入り込んで思ったほど温度が上がらないということも起こり、頭を悩ませている。

電場によるプラズマの加熱や電子サイクロトロン共鳴加熱の場合には、まず電子が加熱され、それからイオンや中性原子・分子にエネルギーが移って行くが、イオンの温度を選択的に変化させたいということも起こる。そのときにはイオンサイクロトロン加熱⁴⁾という手法があるが、低温プラズマでは加熱効率が悪く、難しいものと思われる。

放電開始時のように、電子密度はそれ程高くなくて、しかも高い電場がかかっているときには、電子の速度分布関数はマックスウェル分布から大きくずれる可能性がある。電場で加速された電子は、電子同志の衝突よりも気体分子との衝突によって速度分布の形が決まるので、もし分子との衝突断面積がエネルギー依存性を持っていればそれを反映した分布関数⁹⁾の形となる。放電が成長した後であっても、放電管内に比較的強い電場が存在するときには Druyvestein 分布をとる。このように分布関数の形がマックスウェル分布からずれているときには、温度を基礎的な物理量として考える訳には行かず、平均エネルギーで記述することになる。一方、マックスウェル分布からの僅かなずれが、いろいろな物理現象を大きく支配していることが多い。プラズマを制御する立場からは重要な情報ではあるが、それを量的に表わすことは難しく、厳密に言えば分布関数の形全体を測定する必要がある。高温プラズマの場合、電場で加速された電子はイオンとの衝突によってブレーキがかけられるが、その衝突断面積はエネルギーが高くなるほど小さくなる。つまり、加速されてスピードが高くなればなるほど衝突し難くなるのであるから、トカマクのようにドーナツに沿ってエンドレスに電場がかかっているときには瞬時にして数 MeV にまで加速されてしまう。これを逃走電子と呼んでおり、これが最終的にリミターと呼ばれる放電管の保護板や管壁そのものに当たると大きな損傷を与えることになる。従ってトカマクでは逃走電子の制御は大きな課題である。

プラズマ中の電流も、分布関数による表現によれば、その方向への分布関数のずれとして捉えることができる。しかしマックスウェル分布のまま、ある方向への平均速度の重畳した形であるか、分布の形そのものがずれているのかによって、積分値としての電流は同じであっ

ても、それに伴ってひき起こされる物理現象は同じとは限らない。

プラズマに電場をかけたり、ビームを入射したりしてマックスウェル分布からずれた速度分布を電子に持たせることはできるが、任意の形の分布関数を持つ電子の集団を作り出すことはほとんど不可能である。にも拘らずここで分布関数について詳しく述べた理由は、プラズマを制御しようとしたとき、その現象を把握する上で分布関数の形を知ることが大きな助けとなるからである。低温プラズマでは、原子や分子の励起あるいは電離には、電子のエネルギー分布関数のうち、励起電圧や電離電圧以上のエネルギーのもの、即ち分布関数のテールのごく少量の部分が寄与しているので、ちょっとした分布関数のずれが大きく響いてくる。

4.4 プラズマの形状・形態・空間分布

本来、工学的見地からは、必要とされるプラズマの大きさ、形状、そして時間的な形態がまず最初に議論されるべき事柄であろう。低温プラズマの場合、プラズマの形状はプラズマ容器の形で決まると考えてよい。但し、磁場の存在する場合、単に電子が磁場に沿って運動し易いということから、その電子によって電離されて生成されるプラズマも磁力線の形に沿ったものとなる。時間的な形態とは、定常なプラズマを生成しなくてはならないのか、パルス的でもよいのか、あるいはパルス的でなくてはならないのか、用途によって決まる話である。プラズマの外形、形状としてはほぼ方円の器に従うと考えてよいかも知れないが、その内部構造はいつも一様とは限らず、むしろ常に空間分布を持つものと考えた方がよい。そしてこの空間分布こそ実用上は大きな問題であり、これを制御することが大変難しいのである。ここで何の空間分布なのか、何を一様にしたいのか、それが重要な話であり、前述の電子密度の分布を議論するか、温度の一様性が重要なのか、要請に応じて考えなくてはなるまい。そのような理由から、密度や温度の話の後にもってきたのである。

長い円柱状の高周波放電や直流放電の陽光柱などで、電離の割合はその場所での電子密度に比例し、損失は両極性拡散で決まるとして、そのバランスの式を立てて解くと、電子密度の分布はベッセル関数で表わされ、中心部で高く、管壁近くでゼロに近づく分布となる。一方、損失が空間での再結合で支配されているとすると、密度分布の一様性は保たれるであろう。磁場のない場合には、電子温度は比較的一様性のよい分布をする。

低温プラズマの場合でも、電子を空間的に局在させたり、電子の寿命を延ばして電離効率を上げる目的で磁場を用いることがある。この場合、磁場に対して直角方向

の不均一性はいつまでも磁力線に沿って尾を引くので、カusp磁場、マルチポール磁場、容器内面に永久磁石を多数埋め込んだ形の表面多極磁場などを用いて、中心部分での磁場をゼロとして均一性をよくする工夫がなされている⁶⁾。イオンソースとしてのプラズマの場合には、引出し電極部分の磁場をいかに低い値に抑えることができるか、あるいは望みの形の磁場を実現できるかが鍵となる。低温プラズマであっても、やはり磁場配位の制御は重要のようである。

空間分布が重要となる物理量のひとつにプラズマ電位がある。空間電位とも呼ばれるが、このプラズマ電位はプラズマの形状、放電電極の配位、放電の形態によって決まってしまう、ほとんど制御の余地はない。しかし、プラズマを制御する立場からは、ぜひとも知っておかねばならぬ物理量である。

5. おわりに

以上、高温プラズマを対象として研究を続けている立場から、低温プラズマの制御について思いつくまを述べてきた。その結果、簡単に制御できると思っている、制御し得るパラメータは意外と限られていることに気付く。そしてまた、制御しようと思うなら、そのパラメータがどういうメカニズムによって決まっているか、物理的な考察が不可欠であることも、いくつかの例題から理解されるであろう。物理機構を解明するためには、まず、起こっている現象を的確に把握しなくてはならない。そのための第一歩は、あらゆる計測手段を駆使して、制御したいパラメータと、それ以外の基本的な物理

量との関係を見出すことに始まる。次に、外部条件を変えたり、パラメータを変化させたときの反応を知ったり、要するに経験則を求めることがこれに続く。同じような条件下で望みのパラメータを再現するためにはそれで充分かも知れないが、別の条件にまで外挿しようとするとき、あるいは極限的なパラメータを実現したいときなどには、その制御すべきパラメータの関与する物理現象を十分に把握しなくてはならないであろう。精密且正確な測定に基づくプラズマの物理的的確な理解によって、工学上必要とされるプラズマがより広範囲に、より望みの形に近く制御されるようになることを祈るものである。

なお、必ずしもプラズマを専門となさらない大多数の読者のことを考え、制御に関するごく限られた例についてしか触れなかったことと、なるべく直観的に説明しようとしたため、物理的に厳密さを欠く記述に終った部分があることをお詫びする。

〔文 献〕

- 1) 安田幸夫：応用物理，**50**(1981)638.
- 2) 電気学会編：放電ハンドブック（オーム社，1974）.
- 3) 浦本上進：真空，**20**(1977)170
真空，**26**(1983)15.
- 4) 杉原 亮，金子 修：応用物理，**49**(1980)1162.
- 5) L. B. Loeb: *Fundamental Processes of Electrical Discharge in Gases*, (John Wiley & Sons, Inc., 1939) 177, 奥田孝美：気体プラズマ現象（コロナ社，初版，1964，第4版，1975）37.
- 6) 奥田孝美：プラズマ工学（コロナ社，1975）125.