1 解説 米国における核融合研究の現状, (Ⅳ)

Present Status of Fusion Researches in USA, (Ⅳ)

Ⅵ. プリンストン大学プラズマ物理研究所における現状

吉川 庄一*, 岡林 典男*

*Current Status of Fusion Research at Plasma Physics Laboratory
of Princeton University*

By Shōichi YOSHIKAWA and Michio OKABAYASHI

1958年第2回ジュネーブ会議で「核融合」が公開されてから25年になろうとしている。この間プリンストン大学プラズマ物理研究所は、トロイダル系核融合装置研究の中心的役割を果たしてきた。1982年12月より始まった大型トカマクTFTRの実験も、初期データとして閉じ込め時間200msという最高記録を出し、トロイダル装置は炉の科学的実証実験($Q=1$)へと一歩近づいたようにみえる。

もちろんトロイダル系による核融合炉実現には、技術開発が重要である一方、理論、新しい装置ごとに出てくる実験データの解釈、アイデアの開発がなされねばならない。

確信がもてる商業炉の概念が確立するまで、これらの研究課題でバランスを取ることが長い眼でみて重要であることは明らかである。詳細は個々の文献にゆずることにして、本稿ではプリンストン大学における現時点での課題および対処を中心にまとめ、それが我々の最終目標である商業炉達成へ、いかなる態度で、いかにして研究課題のバランスを図るのか、考える手助けになれば幸いである。

I. ま え が き

プリンストン大学プラズマ物理研究所(PPPL)は、核融合炉の実現に必要な基礎を充実するために1950年代より実験および理論の開発を行なってきた。ステラレータ-内部導体式-トカマクと、次々にプラズマ閉じ込め実験/理論の最先端を推し進め、プラズマ加熱の方でもイオンサイクロトロン加熱、高速中性粒子入射加熱、低域ハイブリッド加熱を成功させた。イオン温度7 keVを達成し、「火の鳥(fire-bird)」と賞賛された

のもごく数年前のことである。最近では低域ハイブリッドによる電流励起でも最高記録3sに達している。日に進歩していく高度技術、大型計算機の駆使、新しいアイデアの開発および吸収と、バランスのとれた活動が行われ、測定技術の開発、データ処理等、世界で数少ない基礎物理かつ核融合物理をカバーする研究所になっている。次に、現在の活動状況を説明してみよう。

II. 実験装置

1. PDX (Poloidal Divertor Experiment)

この装置は1972年に、将来の核融合炉で不純物が炉の性能を低下させることを懸念して、プラズマ外部より侵入してくる不純物原子をプラズマ外縁部でイオン化して、ダイバータ部に流し出すことを目的としてつくられた装置である⁽¹⁾。8 MWの高速中性粒子入射装置がつけ加えられて、high β の実験もできる装置となった⁽²⁾。ダイバータの実験(第1図)を1983年6月初旬で終り、現在bean形トカマクの装置へ改造中である⁽³⁾。次に最近の結果をまとめてみる。

(1) high β /low q 実験

核融合炉を経済的に作るには、与えられた磁場で閉じ込められているプラズマのエネルギーを上げることが望ましく、プラズマ β (閉じ込められたプラズマ圧力を必要な磁場圧力で規格化したもの)を7~10%にすることが商業炉を作る際の目安になっている。PDXでは約3%の β に達したが⁽⁴⁾、プラズマ β が高くなるとともにプラズマに一種のプラズマMHD不安定性が

* 米国プリンストン大学プラズマ物理研究所(Plasma Phys. Lab., Princeton Univ., USA)
(1983年 9月20日 受理)

z 方向に 4 cm 上げた single divertor 磁場配位
第 1 図 PDX の divertor 配位の 1 例

起こり、入射された粒子(45 keV)が放出され、加熱効率が低下する現象が見つかった(fish-bone 不安定性)⁽⁵⁾。この現象は第 2 図(b)に示すように磁場振動測定ループに burst がほぼ定間隔で現われ、スコープでトレースをみていると魚骨のように並んでいるところからこの名がついた。この burst と同時に高速中性粒子が多量に放出され、入射エネルギー(45 keV)以上の高エネルギー(55~70 keV)の粒子も含まれている(第 2 図(d))。

この高速中性粒子の流出が少なからぬことは D-D 反応(主にビーム粒子とプラズマ粒子の反応)で出る中性子量が burst ごとに 20~30% 減少することでもわかる。Burst を詳細にみるときれいな振動をしており、特に onset の近いところでは成長率も遅く exponential に増大し、プラズマ条件の変化とともに飽和し、次第に減少していく(第 3 図)。

この burst 強度および β 値のトロイダル磁場、プラズマ電流、加熱入力依存性が調べられ、プラズマ β と加熱入力の関係をまとめたものを第 4 図に示す。 βq にして約 5×10^{-2} 以上を得ることはなかなか難しい。ちなみに、DIII(楕円率 $b/a=2$)の $\beta=4.5\%$, $q \leq 2$ も $\beta q / \sqrt{b/a}$ でプロットしてみると、ほぼ PDX のデータに近い値となる⁽⁶⁾。

プラズマ MHD 不安定性との比較が、大型計算機を使って実験条件を綿密に考慮に入れてなされた。その

この例では fish-bone がかなり強度に発展した状況の様子である。

(a) ダイバータの H_α , (b) ミルノフ信号, (c) 中性子の増減, (d) 流出した高速中性粒子量, バーストごとに中性子量が減少し、高速粒子が増大することに注目。

第 2 図 fish-bone 不安定性が起こった際の種々のパラメータの振舞い

第3図 fish-bone が起こり出す臨界条件での磁場振動の増大

まとめが第5図に示してある。これによると fish-bone が $n=1$ インターナル・キンクの onset のあたりより起こり出し、ビームの数を増加しても β はゆるやかに上昇するが、バルーニング β limit ($n=\infty$) を超えるには至らない。インターナル・キンクにしてもバルーニング mode にしても、プラズマ圧力を上げて初めて出てくる不安定性である。この onset 条件以外に、成長率を理論と比較しても実験誤差の内で一一致する¹⁰⁾。もちろん注意しなければならないのは、一つの理論で矛盾な

第4図 種々の条件でのデータをまとめて出来た普遍関係

Q_{SH} は安全係数 q のプラズマ端での値
 $n=1W$ は $n=1$ インターナル・キンク onset
 $n=\infty$ はバルーニング onset
 $n=3W$ は $n=3$ インターナル・キンク onset

第5図 β と q との関係

く説明できたとしても、それが本当の原因であるかはわからない。不安定性を除去して初めて原因がわかる訳で、プラズマ圧力の増大に対して強い bean 形の非円形トカマクに PDX を改造中である (PBX)。詳しくは後で述べる。

(2) H-mode (high energy confinement mode)

最近になって、トカマクの物理はトロイダル磁場、プラズマ電流値、加熱入力等の特性パラメータを規定しただけでは、一義的にプラズマの状態、特に閉じ込め時間を記述できないことがわかってきた。これは西独ガルヒンにある ASDEX ダイバータ装置¹¹⁾から明らかになってきたことで、中性粒子入射中に、ある条件の

もとで瞬間的に閉じ込め時間が2倍以上よくなり、一種の層転位のような状況を示した。PDXのon-line computerの測定装置を使って詳細に調べた結果によると、ある物理条件がそろると、往々にしてsawtooth(鋸歯型) oscillationの直後であるが、プラズマ端部の電子温度が上昇し(20→400 eV)、それと同時にプラズマ粒子の流出が一時中断し、プラズマ密度が外側に近いところから上昇して遂には平坦な分布になる。第6図に、56 point トムソン散乱で測定された電子密度、電子温度の時間変化を示す。この測定は1ショットで56個所のデータを取り、異なる時刻でのデータを平均してつなげたものである。この例では中性粒子入射は300 msから600 msであり、層転移は430 msで起こっている。プラズマ端部が39 cmであるから、最終状態では密度および電子温度勾配が $2 \times 10^{13}/\text{cm}$ 、200 eV/cmという大きな値に達している。

この層転位により confinement time はよくなるのであるが、やはり不安定になり fish-bone が現われ、 β に達する以前に、プラズマ周辺で burst が起こる。この急激な変化が H_α に顕著に現われるので、 H_α -spike と呼んでいる。第2図での H_α は fish-bone が強くなった後の振舞いであるが、少し低い β だと弱い fish-bone の周期の間に、 H_α -spike が現われる。この H_α -spike の現象をX線でみると、プラズマ周辺から約 $\frac{1}{2}$ の半径のところまで広がっていて、 β の増加は H_α -spike が強くなると弱まってくる。この現象は密度、電子温度勾配がプラズマ端で大きくなったために起こるのか、プラズマのやや内部に起因するのかよくわかっていない。

中性粒子入射は0.3 sより始まり0.6 sまで続いている。
層転位は0.43 sに起こっている。

第6図 H-mode が起こった際の(a)電子温度、(b)電子密度の時間変化

この例では層転位が470 msで起こっている。

第7図 プラズマ密度、 β 、閉じ込め時間の時間変化

第7図に、層転位が起こる前後のプラズマ密度、閉じ込め時間、 β の変化を示してある。

2. PLT (Princeton Large Torus)

高速中性粒子入射により、イオン温度を5~7 keVに加熱することに成功した後、PLTの実験中心課題は高周波加熱と電流励起へと変わっていった。

(1) 低域ハイブリッド波による電流励起

低域ハイブリッド進行波の位相と電子の動きを同期させることにより電流励起のできることを、がわかってきたのはごく最近のことである⁽⁸⁾。大型装置では初めてPLTで実用性が実証された⁽⁹⁾。使用された周波数は800 MHzで、最初にプラズマ電流をOH電流により励起した後RFをかける。第8図に示すように、プラズマ電流はOH電流が遮断された後でも維持されている。

第8図 低域ハイブリッド波により
プラズマ電流を励起した例

電流の励起効率は1 kA/1 kW (プラズマ密度が $6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 800 MHz 使用)であり、密度が高くなると反比例して減少する。ここに示された例では、プラズマ電流(170 kA)が3 s以上保たれ、平衡磁場電源限界で放電が終了している。

(2) イオンサイクロトロン(ICF)加熱

ICF加熱方式に、①minority heatingによるものと、②第2高周波共鳴加熱によるものがある。minority speciesの加熱では、まずプラズマ中に混合された5%程度の ^3He またはHを加熱してプラズマの主成分たるDを衝突過程により加熱しようというものである。第2高周波共鳴加熱では、第2高周波共鳴によりまず高エネルギーの粒子群をつくり、それが原子同士の衝突過程によりプラズマ全体を加熱しようというものである。この方式ではプラズマ粒子のエネルギー分布がnon-Maxwellianになるので、平均値をもって温度を

定義して他の加熱方式と比較している。第9図に、第2高周波加熱によりイオン温度を上げた場合の例を示す。1個のアンテナより注入できる入力に目下のところ限界があるので、入力を上げるためにはアンテナの個数を増やしてやらねばならない。平均エネルギーをプロットしているためでもあるが、加熱効率は中性粒子入射と比べてやや高い。

第9図 第2高周波加熱により
イオン温度を上げた例

3. TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor)

D-T反応による核融合エネルギー出力を加熱入力以上に取り出して($Q>1$)、トカマク方式核融合炉の可能性を実証することを目的としたのがTFTR装置である(写真1)。

	小半径 a (m)	大半径 R (m)	I_0 (MA)	P (MW)	プラズ マ形
PLT	0.4	1.3	0.5	3(NB) 3(RF)	円形
PDX/PBX	0.4	1.4	0.5	7(NB)	非円形
TFTR	0.85	2.5	2.5	33(NB)	円形

表に示すように、PLT/PDXよりも約2倍大きく2.5 MAのプラズマ電流を目標としている。現在(1983年7月)28 kGで1 MAのプラズマ電流を得ておりエネルギー閉じ込め時間は0.2 sに達し(電子密度は $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)、他の装置とサイズ依存性を比較してみると、単純な $\tau_E \propto a^2$ よりはずっと良い性能になっている。

写真 1 1 MA に達した TFTR

1986年には $Q=1$ を超え, 1986~90年に RF 加熱をつけ加え, 1990年に $Q>2$ に達することを計画している。ただし, 放射線防護壁の限界から $Q=2$ の実験は約 100 パルス程度である。しかしながら, この実験が達成されれば, 核融合炉の基本的可能性が実証される訳で, 商業炉へ向けての技術開発ならびに炉自体の性能を上げる研究, およびミラーを含めて他の方式との商業ベースから見た比較, 等が真剣になされることになると思われる。

4. S-1 スフェロマク

現在の大部分のトロイダル装置は, トロイダル磁場コイルを対称軸付近に持ち, プラズマ電流とトロイダル磁場コイルとはトポロジカルに切り離すことができない。この構造上の複雑さのために, 炉の放射線防護壁, 装置保守等も一層複雑なものとなる。そこで提案されたのは, プラズマ形成過程の最終段階においてトロイダルコイルのない状況にしてやることである。しかしプラズマ自体, トロイダル磁場が必要なため, プラズマ形成の初期段階にトロイダル磁場コイルが必要

である。そこで考えられたのはトロイダル磁場とポロイダル磁場をつくるコイルを作り, まずそのコイルのまわりにプラズマを作り, 徐々にプラズマ形成領域から切り離して, 閉じ込め領域に移動する方式である(第10図)。

提案された段階においては実験結果も少なく, このような磁場配位を作り得るものか, はたして安定なものか不明であったが, prot-S1 により第11図に示すように, 形成および MHD 的には安定であることが実証された⁽¹¹⁾。商業炉の見地からみると, 非常に魅力的であるので, 今後もっと違った方式ならびにプラズマ配位形成後の加熱, 電流維持等の研究がなされると思われる。

現在の S-1 装置(第12図)は1983年2月に完成し, かつ現在プラズマ電流が 300 kA, 電流持続時間が 1 ms に達している。もっとも興味ある点はスフェロマクでは磁場 shear がプラズマ安定性の主な要因になっており, トカマクの min B 系とは異なっていることで, プラズマ閉じ込め時間がどの程度になるか判明すれば,

QUASISTATIC FORMATION USING INDUCTION

コアの周辺にまずプラズマを作り、対称軸の方向へ移動させてプラズマ環を形成する。

第10図 スフェロマク的方式

この種の装置の将来性が明らかになると思われる。

Ⅲ. 最近の理論から

1. bean 形トカマク

高速中性粒子入射で high β のプラズマが得られる

第11図 S-1 スフェロマクの装置

ようになったが、円形で3%, 楕円形で4.5%どまりで、核融合炉を経済的に魅力のあるものにするには、さらに β を高くすることが望ましい。現在のところ、プラズマ圧力増大により生じたバルーニング不安定性の β limit に達したという積極的な実験結果はないが、これらの実験値はほぼ理論的限界値の近くにある。また前述のように、高速粒子の流出原因である fish-bone 不安定性も、プラズマ圧力が上がったことによるインターナル・キンク不安定性によると解釈すれば矛盾なく説明できる。そこでなんとか、プラズマ圧力増大に対して強い磁気配位がないかということになる。bean 形トカマクはすでに10年も前からD形プラズマの極限として注目され、最近の数値計算技術の発展とともに、より定量的に議論できるようになった。

(1) バルーニング β 限界とくぼみ量との関係

bean 形トカマクの幾何学的特徴を表わすのに、くぼみ量($d/2a$)をとる(第13図)。徐々にくぼみ量を強くしていくと、第14図(a)に示すように β の上限がゆるやかに上昇し⁽¹²⁾、ある値を超えると($d/2a \approx 0.3$)、 β の限界がなくなり、いわゆる第2安定領域に入ることがわかってきた。もちろんこの関係は、プラズマ圧力分布、電流分布、安全係数 $q(\psi)$ に依存し、特にアスペクト比(R/a)が小さく、プラズマ周辺での安全係数 q_{edge} が低い場合には、安定領域が狭くなる。

第2安定領域が存在することは数年前より指摘され

トロイダル磁場, ポロイダル磁場がプラズマ中に捕捉されていることがわかる。

第 12 図 prot-S1 装置における磁場分布測定

ていたことではあるが, この bean 形変形が初めて具体的に第 2 領域に入る方式を示した。この計算では波数が ∞ の局所化した限界を考えているので, 実際上はイオンの Larmor radius 効果のため安定領域は増加すると思われる(第 14 図(b))。この安定化の機能は, 変形による min B を深くすることと, 電流分布が外側に押し出されたことにより出来た high local shear による。

(2) インターナル・キンクの安定化

インターナル・キンクは磁気面中心近くの $q < 1$ 領域で r_p と磁場曲率 k が同方向になることから起こる非

局所的な MHD 不安定性である。第 15 図に示すように, 少しのくぼみ($d/2a=0.1$)をつけるだけで, 安全係数 q_0 にかかわらずインターナル・キンクは安定化できることがわかってきた⁽¹⁴⁾。

(3) bean 形装置

これだけ望ましい条件を持っているのであるが, 最大の欠点は axi-symmetric mode に対して不安定であることである。これは楕円形プラズマが上下方向に対して不安定なのと同じく, この場合はプラズマ全体が内側へ回転するような運動を示す(第 16 図)。これを安

第13図 bean 形トカマク配位と変形の定義

くぼみ量が 0.3 を超えると β の限界がなくなり、第 2 安定領域に入ることができる。

第14図(a) バルーン β 限界とくぼみ量 ($d/2a$) との関係

この例は $q_{edge} = 2.9$ の場合に ion diamagnetic drift の項を入れて計算したものである。

第14図(b) β limit の計算にギネテック効果を入れた際の様子

くぼみ量が 0.1 に達すると q_0 (磁気面軸での安全係数) にかかわらず安定になる。 $[q(0)]$ は不安定領域の $q(0)$ の幅を表わしている。

第15図 インターナル・キンクの安定領域とくぼみ量との関係

定化するには、導体壁でプラズマ周辺を囲んで MHD 的には安定化を図り、かつ導体壁の抵抗ロスにより起こるプラズマ変形には低周波低電圧電源で押し戻してやらねばならない。これは楕円形に関しては PDX, DIII⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾ で実証されているので、原理的には可能であると思われる。目下 PDX を bean 形に改造中である(第 17 図)。この実験では現在の 7 MW 中性粒子入射装置を使ってプラズマ電流 600 kA, $\beta \approx 7 \sim 10\%$ を得ることを目標としている。

2. ヘリアック-ステラレータ

東北大の長尾名誉教授が長らく研究されていた立体磁気軸ステラレータが、高 β プラズマの可能性が認められてきて注目されるようになった。PPPL で考案された方式は通常の数本のヘリカルコイルでプラズマを閉じ込めるのではなく、1本の軸対称なコイルがあり、そのまわりにプラズマおよび他の閉じ込めコイルがヘリカル状に置かれているものである。この配位は 1965 年ごろ提案された後⁽¹⁶⁾、最近になって計算技術の発達とともに詳細な議論ができるようになった⁽¹⁷⁾。2, 3 の計算例を第 18 図に示してある。この 2 つの磁気面はトロイダル方向で 0° と $180^\circ/N$ の様子を重ね合わせたもので、軸対称コイルは中心に(コイルの面積効果を入れるため 2 本に分けてある)、他のヘリカル

壁が離れすぎると(c)に示されたような移動を起こす。プラズマ端と壁の距離はプラズマ短半径のほぼ1/2程度が安定性を得るための最少距離である。

第 16 図 導体壁によりプラズマの axis-symmetric mode を安定化させる条件

第17図 PDX のダイバータコイルを移動してできる bean 形トカマク(目下改造中)

コイルは1.3 m離れたところに置かれている。この磁気井戸の深さは20%程度に達し、1960年代のインターナル・リングの磁気井戸とはほぼ等しいか、または深い。これによりかなりのプラズマ安定性が得られるものと思われる。

3. μ -meson および核スピン を利用する核融合反応

D, T を入れた容器を μ 中間子のビームにさらすと μ を触媒として核融合反応が起こる。これは PPPL での仕事ではないが、将来トリチウム生成に役立つかもしれないので、ここに述べておく。 μ 中間子は触媒として D または T と結合することによって、 μ と D または T との原子が出来る。ところが μ の質量は大きいので核の近くまでいき、その原子の大きさは普通の水素原子に比べてずっと小さくなる。そのような原子がもう1つの核(DまたはT)に接近するのは容易であってその時に核反応を起こす。結果的には μ 中間子を触媒

第 18 図 ヘリアック磁気配位の計算例

にして核融合反応が起こることになる。 μ 中間子の半減期は短い、核融合反応の起こる方が速い。残念なことに $D+T \rightarrow He+n$ の He が μ と結合して分子を作ってしまうことで、 He を除去する方法が開発されることが先決である。他に PPPL から提案されたもので、 D と T のスピンをそろえてやると核融合反応が 50% 増えることを利用しようとする方法もある。50% はあまり大きくないようであるが、炉を作った際に 50% 出力が増えることは重要なことである。目下、プラズマ中でスピンのどれくらい整ったままであるか等の理論的研究がなされている。

IV. あとがき

核融合研究が昔のように研究室の片隅で行われていた時代は過ぎてしまった。我々が好むと好まざるとにかかわらず、世界のエネルギー事情が核融合研究を左右する。1972 年のエネルギー危機が大型装置 (TFTR, JT-60, JET) の建設決定に大きな影響を及ぼしたことは記憶に新しいことである。核融合研究が経済的な商業炉を実現させるという最終目標から、とすると逸脱して、すでにある装置型式が適していると考えがちである。また、すでに存在する装置の存続の方が大切になる傾向も出てきたりする。もちろん核融合の研究が、そのような状態にあるといっているのではない。

PPPL の歴史を振り返ってみると、ステラレータ → スフェレータ → U.S. で最初のトカマク ST → 最高のイオン温度 PLT → ダイバータ PDX → スフェロマク → 2 成分高温イオン TFTR → bean 形トカマク → ヘリアック → ? と、とにかくユニークなことをやることに心がけてきた。決して最終階段が現状からの小さな第 1 次近似解にあるとは思ってはいなかったと思われる。

TFTR の実験開始とともに次の装置の設計が始まりつつある。これまでに増してのいろいろな制限の中で、いかにしてユニークで最終目標に近い装置を設計するかが重大な課題である。

PPPL の歩みを振り返ると、いつの段階でも優れた理論家がいる、いろいろなアイデアを公平に判断するのに貢献してきたように思われる。優れた大きな視野で議論できる理論家を育てることは、長い眼で見たとき、核融合研究のような長期的開発には非常に重要なことであろう。

—参考文献—

- (1) OWENS, D.K., et al.: *Nucl. Mater.*, **93**, **94**, 213 (1980).
- (2) FONCK, R.J., et al.: *ibid.*, **111**, **112**, 343 (1982).
- (3) JOHNSON, D., et al.: *Proc. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Vol. 1, A-1 (1983), IAEA.
- (4) BOL, K., et al.: *PPPL-2032*, (1983).
- (5) MCGUIRE, K., et al.: *Phys. Rev. Lett.*, **50**, 891 (1983).
- (6) NAGAMI, M., et al.: 文献(3), A-2.
- (7) WAGNER, F., et al.: 同上, A-3.
- (8) YAMAMOTO, T., et al.: *Phys. Rev. Lett.*, **45**, 716 (1980).
- (9) BERNABEI, C., et al.: 文献(3), C-5.
- (10) HWANG, D., et al.: 同上, I-1.
- (11) YAMADA, M., et al.: *Phys. Rev. Lett.*, **46**, 188 (1981).
- (12) CHANCE, M., et al.: *Proc. 1983 Sherwood Theory Mtg. Arlington, Virginia, Mar. 21~23, 1983*, **2**, C, 4.
- (13) MANICKAM, J., et al.: 同上, Vol. 2, C, S.
- (14) YOKOMIZO, H., et al.: *"Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research"*, R-1 (1982), IAEA.
- (15) TAKAHASHI, H., et al.: *Nucl. Fusion*, **22**, 1597 (1982).
- (16) FURTH, H.P., et al.: *"Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research"*, Vol. I, p. 103 (1966), IAEA.
- (17) YOSHIKAWA, S.: *Nucl. Fusion*, **23**, 667 (1983).