解説

臨界プラズマ試験装置 JT-60 の現状と将来

(日本原子力研究所) 岸 本 浩・JT-60 チーム

JT-60 は、1987 年 9 月に臨界プラズマ条件の目標領域に到達後、下側ダイバータコイルの設置やベレット入射装置の新設等を行い、高性能化実験を開始した。1988～89 年の高性能化実験では、主として下側に X 点を持つダイバータ配位での閉じ込め性能の改善、ベレット入射による密度分布制御、低域混成波を用いた電流駆動等の研究を中心に進めて、いくつかの新しい結果を得た。

JT-60 では、これらの実験と並行して、真空容器やボロイダル磁場コイルを全面的に取り替え、プラズマ電流を 2 倍強に増大させる大電流化改造の準備に取りかかっており、この改造が完了する 1991 年からは、新たな段階の高性能化実験を開始する予定である。この高性能化計画の実施により、自己点火の実現に向けて必要な炉心プラズマ開発の主要な部分の研究を推進することができる。

I. はじめに

現在世界のトカマク型装置による核融合研究は、いわゆる 4 大型トカマク装置—JT-60(日)、TFTR(米)、JET(EC)、T-15(ソ)—を先頭とし、プラズマ性能の向上を目指してたゆみない努力を続けている。努力の焦点は、高温プラズマの閉じ込めとその定常維持の実現にあるといえよう。

JT-60 では、第 1 図に示すように、1988 年から高性能化計画の段階に入り、閉じ込め性能の向上と変圧器の原理に依らないプラズマ電流の発生(非誘導電流駆動)による定常化の研究を中心課題として実験を進めている。JT-60 の高性能化計画は 3 つの段階に分かれ、第 1 の段階では、真空容器下部にコイルを追加して、第 2 図に示すように、従来のリミタ配位や外側ダイバータ配位に加えて、新たに下側ダイバータ配位の実験ができるように改造し、さらにベレット入射装置や高効率の高周波(RF)電流駆動装置を導入して、ダイバータ機能の最適化、ベレットを用いた高密度化、高効率の非誘導電流駆動の実験等を進めている。この段階での JT-60 装置の主要諸元は第 1 表に示す通りであり、性能値によっては当初予定を上回るものもある。

高性能化実験(1)の終る 1989 年 11 月からは、1 年余り装置の運転を停止し、真空容器およびボロイダル磁場コイルを全面的に更新する大電流化改造を実施する。同時に、これまで水素を用いて実験を行ってきたのに対して、新たに重水素も使用するため、それに必要な施設の整備を行う。このような大電流化改造と重水素の導入によって、1991 年より行う高性能化実験(2)で

は、大電流プラズマによるプラズマ性能の向上をはかり、あわせて核融合炉心プラズマの形状を模擬してその制御技術を確認する研究を進める。高性能化実験の最後の段階では、核融合炉心に近いパラメータの領域、特に高い密度領域でプラズマ性能を維持しつつ非誘導方式で電流を駆動する技術を開発し、トカマク型核融合炉の長時間運転あるいは定常運転の技術的見通しを得る計画である。

第 1 表 JT-60 の主要諸元

諸 元	計 画 値	到 達 値
プラズマ電流		
リミタ (MA)	2.7	3.2
外側ダイバータ (MA)	2.1	2.7
下側ダイバータ (MA)	2.2	2.2
トロイダル磁場 (T)	4.5	4.8
(R=3m)		
加熱入力(トラス)		
NBI 75 kV	20 MW	24 MW
LHRF 1.7~2.2 GHz	15 MW	11 MW
ICRF 110~130 MHz	5 MW	3.1 MW
第 1 壁材料	TiC/Mo	TiC/Mo
(1987 年 3 月まで)		
黒鉛(1987 年 6 月から)		
ベレット	1.9 km/s	2.3 km/s
	4 mm ϕ ×4 mm ^L	4 mm ϕ ×4 mm ^L

本稿では、JT-60 の高性能化実験(1)で得られた新しい研究成果を紹介しながら、あわせて今後の計画につ

Status and Future Program of JT-60: Hiroshi KISHIMOTO・JT-60 Team (JAERI).

(1989 年 4 月 10 日 受理)

西歴	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
JT-60 高性能化計画	臨界プラズマ 実験	高性能化実験(1)			高性能化実験(2)		高性能化実験(3)	
重水素計画	下側コイル 等		大電流化改造		高密度電流駆動装置			
			施設整備					
装置改良	下側コイル設置 ペレット装置新設		真空容器, ポロイダル 磁場コイル等 改造		高密度電流駆動装置取付			
研究の内容	高性能化実験(1) <u>炉心性能の確認</u> ・ダイバータの最適化 ・ペレットによる高密度化 ・高効率電流駆動				高性能化実験(2) <u>炉心制御技術の確立</u> ・大電流プラズマによる 閉じ込め向上 ・非円形ダイバータ制御		高性能化実験(3) <u>定常化技術の開発</u> ・高密度電流駆動 ・長パルス化	

第1図 JT-60 高性能化計画

第2図(a)~(c) JT-60における磁場配位

いて述べる。なお、JT-60の高性能化計画に至る以前の研究の成果については、文献⁽¹⁾⁻⁽³⁾に詳しい。

Ⅱ. 最近の実験結果

1. 下側ダイバータによるプラズマ閉じ込め

プラズマの閉じ込め性能を向上させることは、核融合研究の一番大きな課題である。特に、トカマク装置においては、ジュール加熱に加えて第2段の加熱を行なった時に、Lモードと呼ばれる閉じ込めの悪い状態と、Hモードと呼ばれる閉じ込めの良い状態が出現す

ることが広く知られるようになってきた。閉じ込めの良いHモードでは、エネルギーあるいは熱の閉じ込めの向上と同時に粒子の閉じ込めも良くなるため、不純物イオンがプラズマ中に蓄積する傾向があり、すべてに理想的なプラズマ状態というわけでもない。

JT-60ではこれまで、第2図に示すリミタ配位および外側ダイバータ配位のそれぞれについて、Lモードの状態ならびにHモードの状態のいずれも実現してきた。しかし、これまでのところ、Hモードにおいても閉じ込めの改善はLモードの10~20%止まりであっ

た⁽⁴⁾。第2図の下側ダイバータは、閉じ込め改善により有利な特性を持つと考えられ、高性能化実験(1)ではこの磁場の形状による研究を主として進めてきた。その結果、従来のLモードやHモードとは異なる新しい閉じ込めの状態を実現した⁽⁵⁾。この状態はIDC(Improved Divertor Confinement)モードと称しているが、Hモードに類似の性質とHモードとは異なる性質の両面を持っている。

第3図は、JT-60の下側ダイバータ配位におけるHモードの発生の様子を示す。20 MWという高入力の中性粒子入射(NBI)加熱を行い、約0.7 sの間Lモードの状態が続いた後Hモードへの遷移が起きる。Hモードでは、プラズマ蓄積エネルギー W の増加(エネルギー閉じ込めの向上)、平均電子密度 $\bar{n}_e$ の上昇(粒子閉じ込めの向上)、ダイバータ板近傍の水素スペクトル線強度 H_α^{DIV} の低減(燃料粒子の循環率の低下)等が生じる。主プラズマからの放射損失 P_{rad}^{MAIN} も増大する。

第3図 下側ダイバータ配位におけるHモード放電

このような状態がさらに長く継続すれば、エネルギー閉じ込めはLモードの2倍近くにまで向上する。しかし、水素プラズマにおいては、第3図のように0.2~0.3 sの静かなHモードの状態が続いた後、ダイバータ近傍の水素スペクトル線強度が激しくスパイク状に変動し、プラズマエネルギーや密度の上昇が極端にゆるやかになる。この激しいスパイク振動はプラズマ境

界部に生じる不安定現象によるものであり、ELM(Edge Localized Mode)と呼ばれている。これと同様に、水素プラズマではHモードが実現しても、必ずしも大幅な閉じ込めの改善に至らない場合があり⁽⁶⁾、引き続き研究を続ける必要がある。

このようなJT-60のHモードに対して、新たに見出されたIDCモードは、その発生条件にいくつかの類似点がある。すなわち、両者ともにLモードからその状態に移行するための加熱入力の下限値があり、密度についても同様の制限領域が存在する。磁場の勾配 $\vec{\nabla}B$ によって引き起こされるイオンのドリフト運動の方向がX点に向かう場合はLモードからの移行が容易であり、逆の場合は移行しにくい点も両者に共通の性質である。磁場の影響については、Hモードが強磁場中で起りにくくなるのに対し、IDCモードはむしろ強磁場中で起りやすい。

IDCモードの発生後のプラズマの振舞いには、Hモードとは異なるいくつかの特徴が見られる。第4図に示すように、IDCモードではプラズマ蓄積エネルギーや電子密度の上昇はゆるやかである。IDCに移行する前のLモードに比して、エネルギー閉じ込め時間の改善は20%程度である。しかし、主プラズマからの放射損失はHモードの場合とは違って減少し、不純物の蓄積は見られない。逆にダイバータ板近傍のプラズマからの放射損失はIDCモードへの移行とともに急増し、第5図に示すパワー分配のなかで、プラズマに注入される加熱入力の約半分をこの放射損失で除去する。このようなダイバータ部分での放射損失による熱除去

第4図 下側ダイバータ配位におけるIDCモード放電

第5図 下側ダイバータ配位での
パワーの流れ

は、ダイバータ板の熱負荷をHモードの場合の半分にまで軽減し、ダイバータ板の大幅な寿命の延長が計られるようになった。IDCモードの発生がなく、ダイバータ板の熱負荷条件が苛酷であった外側ダイバータ配位とは対照的な結果である。

このIDCモードについては、なお多くの究明すべき点があるが、その発生原因をさぐる手がかりとして、炭素と酸素の不純物の振舞いの違いが注目されている。すなわち、第4図において、プラズマ中の炭素不純物がIDCモードに移行後も漸増傾向を示すのに対して、酸素不純物は大幅に減少し、これが全体として主プラズマからの放射損失の減少につながると考えられる。

Hモードは、閉じ込め特性の大幅な改善をもたらし得る反面、不純物の蓄積という不利な面を伴う。IDCモードは不純物の蓄積をもたらさず、かつダイバータ

板の熱負荷の大幅な軽減を可能にするが、閉じ込め性能の向上はHモードほどに著しくない。核融合炉心の研究の目標は、この両者の望ましい特性を兼ね備えた閉じ込め状態の実現であり、そのための努力が今後も続けられるであろう。

2. ベレット入射実験

通常トカマクプラズマに燃料を供給するためには、プラズマ表面に低温のガスを吹き付けて電離する方法がとられる。この方法では燃料供給が表面から行われるので、プラズマの密度分布は平坦化しやすい。これに対して、燃料を氷の粒(アイスベレット)にして高速でプラズマ中に打込み、プラズマ中心部で蒸発・電離させるとプラズマ中心部に強く集中した密度分布が形成される。このような燃料供給の方法の違いに起因する密度分布の差は、プラズマ閉じ込め特性にどのように影響するであろうか。

第6図は、JT-60に取り付けられたベレット入射装置の構成を示す。燃料の水素ガスは、液体He温度で冷却されて固体水素ベレットとなる。水素ベレットは高圧のガス噴出によって加速され、プラズマ中に入射される。ベレットのサイズと速度は第1表または第6図に示すように、直径と長さが共に3mmと4mmの円柱状のものがそれぞれ2個ずつ入射可能であり、最大入射速度は2.3 km/sである。ベレット入射したプラズマの加熱にはNBIを用いる。

第6図 ベレット入射装置

- ベレットの大きさと数
直径3.0ミリ、長さ3.0ミリ 2個
直径4.0ミリ、長さ4.0ミリ 2個
- ベレットの速さ
秒速2.3 km

ベレットをプラズマ中心にまでうまく導くためには、ベレット入射前のプラズマの条件、特に電子密度と電子温度の最適化が必要である。ベレットのサイズと速度に応じた最適のプラズマでない場合、ベレットがプラズマ中心に至る手前で蒸発してしまったり、あるいは逆に、充分蒸発しないままプラズマ中心部を通り過ぎてしまったりする。また、ちょうどプラズマ中心部で蒸発し、中心に集中した密度分布が形成されても、その後の加熱条件によっては良好な閉じ込めが実現しない。

第7図は、プラズマ条件を変化させてベレットの侵入深さを制御し、ベレット蒸発後10MWのNBI加熱によって得られたプラズマ蓄積エネルギーを示す。ベレットがプラズマの中心部に充分進入した場合、軟X線強度が中心部に著しく集中して、ここに高密度のプラズマが形成されたことを示し、同時に加熱時のプラズマエネルギーの増加が顕著である。ガス供給の方式に比べるとエネルギー閉じ込めは、プラズマ電流が

2.1 MA の場合、1.4 倍の改善が得られている。また、プラズマ電流の増加と共にプラズマエネルギーも目立って増大している。なお、ベレット入射によって密度の中心値は平均値の5倍程度にまで高まり、最大の平均密度は $1.8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ である。

ベレット入射に伴う閉じ込め性能の向上は、何によるものであろうか。これまでの実験結果から、プラズマ中心部の安定係数 $q=1$ の面(トロイダル磁場とプラズマ電流のつくるポロイダル磁場の磁束量が等しくなる面に相当する)の内側に注入された粒子とエネルギーが効率良く閉じ込められるためと考えられる。電流の増加と共に閉じ込め性能が向上するのも、電流が大きくなると $q=1$ の面が拡大することによると解釈できる。それでは、 $q=1$ の面内に際限なく大きなプラズマエネルギーを蓄えることが可能であろうか。それにはやはり限界があり、1つは $q=1$ の面内部のプラズマを外に吐出させるノコギリ歯振動の発生による制限であり、今一つはプラズマ圧力勾配の制限による⁷⁾。

第7図 ベレット入射による密度分布制御と閉じ込め特性の向上

3. 非誘導電流駆動

JT-60は強力な2GHz帯の低域混成波(LH波)装置を有し、これまでに2MAの大電流を極めて高い効率で駆動し、パルス運転の宿命を負うとされるトカマクプラズマの定常運転の実現に向けて大きく前進してきた⁸⁾。高性能化実験(1)においては、電磁波を放射するランチャーの構造に工夫を重ね、より高いプラズマ電流の駆動効率の実現を目指した。従来のランチャーは8列4段の位相制御導波管束であったが、新たに導入した多段結合型は、第8図に示すように、従来の1導波管を3列結合モジュールに分割し、合計24列4段の導波管束として、放射される電磁波のスペクトル特性を

第8図 多段結合型低域混成波ランチャー

鋭くしかつ方向性を大幅に高めたものである。隣接導波管の位相差に応じたトロイダル磁場方向の屈折率 $N_{//}$ は1~3.4の間で可変である。

導波管の位相差, すなわち $N_{//}$ を変化させた時の電流駆動効率 η_{cd} (=平均電子密度×プラズマ主半径×駆動電流/RF入力)を第9図(a)に示す。 $N_{//}=1.3$ 近傍で高い駆動効率を示し, それ以上の $N_{//}$ の条件では駆動効率は減少する。この特性は, 理論的予測ともよく一致している。LH波によるプラズマ電流の駆動機構は, 方向性を持ってプラズマ中を伝わる電磁波がプラズマ電子の一部を共鳴加速することにより電流を誘起する

もので, 加速電子の発生するX線を観測することがこの機構の裏付けとなる。第9図(b)は, $N_{//}$ の変化に応じたX線強度をRF入力で規格化した量を示す。駆動効率と同様に $N_{//}=1.3$ 近傍で強いピークを持つ特性を示し, まさに高エネルギーの電子流が発生してプラズマ電流を引き起こしていることが示されている。

ところで, より詳細な実験によれば, $N_{//}=1.3$ 近傍の条件で駆動されるプラズマ電流はプラズマ中心部に主として発生し, ノコギリ波振動の抑制に有効に作用している。また, $N_{//}$ が1.3より大きくなるにつれて駆動電流はプラズマ周辺部にまで広がり, 電流分布の平坦化をうながす⁷⁾。

第9図 多段結合型ランチャーを用いた電流駆動における効率(a)とX線発生(b)の磁場方向屈折率との関係

多段結合型ランチャーは強い指向性と鋭いスペクトルを有するので, 従来型ランチャーよりも高い電流駆動効率が期待できる。実験的にこれを示したのが第10図である。駆動効率は経験則として平均電子温度とともに高まり, 下側ダイバータ配位で得られたJT-60従来型ランチャーによるデータも, これまでの中小型装置の実験結果の延長線上におおむね位置していた。多段結合型ランチャーの駆動効率は従来型に比して1.5倍程度改良され, 最大 $3.4(\times 10^{19} \text{ m}^{-2} \cdot \text{A/W})$ に達している。ITER等の核融合次期計画に要求される駆動効率は5程度とされているが, JT-60の結果はこの目標の至近位置にあり, 電子温度を高めることによって近いうちにこのレベルに到達しうるものと考えられる。

RFによる電流駆動とは別に, 最近JT-60の下側ダイバータ配位の実験において, 圧力勾配に起因するブートストラップ電流の存在を示唆する実験データの解析が進められた⁹⁾。JT-60では, NBIの垂直入射方式を採用しているためビーム駆動電流の誘起が小さく, ブートストラップ電流を観測しやすい条件を備えてい

る。データの解析は, プラズマの電気抵抗率をスピッツァの2体衝突モデルで評価した場合, 新古典理論に基づきブートストラップ電流を考慮しない場合, ならびにブートストラップ電流を考慮し, 入射ビーム成分の寄与まで含めた場合のそれぞれについて算出し, この抵抗値からプラズマの1周電圧を求めて実測値と比較した。その結果は第11図に示す通りである。

スピッツァ抵抗に基づく1周電圧の評価値は実測値より小さく, ブートストラップ電流を考慮しない新古典理論によるものは実測値より大きい傾向にあり, 結局ビーム成分の寄与まで含めてブートストラップ電流を考慮した新古典理論が最も実測値によく一致する。これは, 間接的ではあるが, ブートストラップ電流の存在を示唆するものである。プラズマの各種の輸送現象が明らかに新古典理論とは異なる異常性を示すにもかかわらず, プラズマ抵抗がこのように新古典理論の枠内で把握できるのは興味深い事実とみるべきであろう。

第 10 図 電流駆動効率と電子温度の関係

第 11 図 プラズマ 1 周電圧の理論値と実測値の比較

Ⅱ. 今後の計画

第 1 図に示されている通り、JT-60 の高性能化実験 (1) は 1989 年後半に終了し、高性能化実験 (2) のための大電流化改造の工事に入る。改造後の JT-60 (JT-60U と称す) の縦断面および主要性能は、第 12 図に示す通りである。プラズマ電流およびプラズマ体積は現在の JT-60 の下側ダイバータ配位の 2～3 倍になり、プラズマ性能の大幅な向上が期待できる。ただし、トロイダル磁場コイルは従来のものをそのまま利用して大電流プラズマを得ようとしているため、例えば、 $I_p = 6 \text{ MA}$ の

ダイバータ放電ではプラズマ表面の安定係数が $q = 2.2$ になることや、プラズマ表面でのトロイダル磁場の不均一性 (リップル率) が従来の 0.4% から 2～3% に増加するなどの問題点もあわせ持っている。

高性能化実験 (2) においては、これまでの水素に加えて重水素の使用も計画している。これによって、先に述べた H モードの性質を高め、より詳しく調べることができるであろう。また、第 2 表にまとめて示すように、重水素の導入によって NBI の効率が上がり、ビーム入力がこれまでの 20 MW から 40 MW にまで増大し、さらに低域混成波電波駆動の密度領域も水素プラズマ

第12図 JT-60 Uの断面と主要性能

の場合の1.5倍程度高密度側に拡張できる見通しである。多段結合型ランチャーの有用性がこれまでの実験で実証されたため、高性能化実験(2)ではこの型のランチャーをさらに積極的に利用し、プラズマ電流5 MAレベルの高周波電流駆動を高効率で実現することも可能であろう。

1993年以降に計画している高性能化実験(3)では、高密度電流駆動装置を新に導入し、トカマクプラズマの定常化に向けて一層強力な研究の展開を期している。高密度電流駆動装置の方式については現在検討中であるが、高密度領域での電流駆動特性に優れているだけでなく、高密度プラズマの効果的な加熱、特にプラズマ中心部に集中的に強力な加熱パワーを注入する性能もあわせ持つ方式として、500 keV級の負イオンNBIの導入が有力である。負イオンNBIと低域混成波の併用により、ITERの検討のなかでも考えられている加熱と電流駆動の両方の機能を満たす運転シナリオがJT-60Uで試みられることになる。

高エネルギーの重水素ビームは ^3He のプラズマと融合反応し、相当量の α 粒子を発生することが可能であるので、負イオンNBIの導入は重水素と三重水素の反応を用いずに α 粒子物理の研究に着手できる利点がある。

第2表 JT-60の今後の計画

閉じ込め性能向上(高性能化実験(2); 1991~)

1. 大電流化改造

$I_p=6$ MA(ダイバータ), 7 MA(リミタ)

$b/a=1.5\sim 1.6$ m/1 m

2. 重水素ビーム→重水素プラズマ

$P_{NB}=49$ MW, $E_B=120$ keV

3. RF加熱増強

$P_{LB}=24$ MW 発振出力, ランチャー改良

$P_{IC}=10$ MW 発振出力, アンテナ改良

高効率・高密度電流駆動(高性能化実験(3); 1993~)

1. 高効率電流駆動用ランチャー(1989~)

2. 高密度電流駆動(1993~)

負イオンNBI/EC

ある。また、RFあるいはNBIの電流駆動の高効率化を目指す場合、第10図のデータにも示されるように、電子温度の向上が重要であるので、電子を選択的に加熱できる電子サイクロトロン共鳴(EC)加熱が有効であろうと考えられる。

以上より、高性能化実験(2)以降におけるJT-60 Uの主要な研究課題は以下のようにまとめられる。

- (1) 閉じ込めの改善(パラメータの向上)と閉じ込め物理の研究(異常輸送過程の研究、スケール則の確立等)
- (2) トカマク定常化の研究(電流駆動、粒子制御、第1壁熱除去、ディスラプション緩和等)
- (3) 核融合反応生成粒子の挙動の研究(D-D反応による高エネルギー粒子の挙動、D- ^3He 反応による α 粒子物理等)

JT-60 Uにおいて、これらの研究を進めることにより、自己点火の実現を目指す核融合次期計画に向けて、最も重要な炉心プラズマ開発を主導する役割を担うことになるであろう。

—参考文献—

- (1) YOSHIKAWA, M.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **26**(1), 197 (1989).
- (2) 原研臨界プラズマ研究部, JT-60試験部: 原子力誌, **28**(1), 41 (1986).
- (3) 同上: 同上, **29**(6), 480 (1987).
- (4) 宮直之・JT-60チーム: 核融合研究, **60**(2), 138 (1988).
- (5) TSUJII, S., et al.: *Proc. Plasma Phys. and Controlled Nuclear Fusion Research*, IAEA, Vienna, 1988, IAEA-CN-50/A-V-1 (To be published).
- (6) SCHISSEL, D.P., et al.: *Nucl. Fusion*, **29**(2), 185 (1988).
- (7) JT-60 Team (by NAGAMI, M.): 16th European Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Venice, 1989.
- (8) JT-60 Team (by IMAI, T.): 11th IAEA Conf. on Plasma Phys. & Contr. Nucl. Fusion Research (Proc. 11th Int. Conf. Kyoto, 1986), Vol. 1, 563 (1987).
- (9) KIKUCHI, M., et al.: 文献(5), IAEA-CN-50/I-II-4.