

高密度無電流環状プラズマにおける周辺部閉磁気面領域の低温化による水素体積再結合の促進と回転運動する輻射帯の発生について

Hydrogen volume recombination and a rotating radiation belt observed in the peripheral region of high-density toroidal plasmas

宮沢 順一 [1]

Junichi Miyazawa[1]

[1] 核融合研

[1] NIFS

地上で制御された熱核融合反応を定常的に発生し、そのエネルギーを利用することを最終目的として、高温・高密度プラズマの磁場による閉じ込め実験を行っている。核融合プラズマの維持に必要とされる装置サイズは、現在実験を行っている大型ヘリカル装置 (LHD) の数倍になると予測している。そのように大きなプラズマでは、核融合反応を持続するための、いわゆる自己点火条件における核融合出力は、粒子の分だけでも数百 MW に上る。磁場閉じ込め方式では、プラズマからの熱及び粒子は、磁力線によってダイバーターと呼ばれる領域に設置されたプラズマ対向材料 (炭素やタングステンなどが用いられる) に導かれ、処理されるのが一般的である。LHD のカーボン・ダイバーター・タイルは、平米当たり 10MW 程度以下の熱負荷ならば問題なく機能しているが、これを越えるとカーボンの噴出しが観測されるようになる。核融合出力が装置サイズの 3 乗に比例して増加するのに対し、ダイバーター・タイルの受熱面積は装置サイズの 2 乗でしか増加しない。例えば、装置サイズが LHD の 3 倍で、粒子出力が 600MW の核融合炉を想定すると、ダイバーター熱負荷は定常状態で平米当たり 30MW を超えると予想される。熱負荷には分布があることを考慮すると、最も厳しい位置では更に数倍の定常熱負荷となるが、そのように高い熱負荷に耐えるプラズマ対向材料は、現在のところ無い。ダイバーターの熱負荷を如何にして軽減するかという問題は、核融合炉実現のための最重要課題の一つである。

ダイバーター熱負荷軽減のためには、ダイバーター・プラズマを非接触化すること (デタッチメントと呼ばれる) が有効である。デタッチメントは周辺部プラズマを高密度化し、その熱エネルギーを輻射あるいは再結合といった損失過程によって失わせることで実現される。LHD における水素プラズマ実験では、ガス入射などによってプラズマ密度を増加していくと、プラズマ周辺部の電子密度が加熱入力に依存する閾値に達した時点で、高温プラズマ境界が通常 (アタッチ) 時のプラズマ閉じ込め領域である最外殻磁気面の内側にシュリンクし、デタッチメントに至る。デタッチ状態が、ガス入射などといった外部制御無しに自己保持される場合がある。この現象は、「最外殻磁気面の下層で自己調整されるプラズマ境界」の英文表記の頭文字から、「サーパンス・モード」と名付けた (サーパンスには蛇座の意もある)。サーパンス・モードではダイバーターに流れ込むイオンの熱流束が、アタッチ時に比べて 10% 程度にまで減少する (但し、密度で規格化して比較)。従って、上記で想定したような核融合炉でも最大定常熱負荷を平米当たり 10MW 以下とすることが可能である。デタッチメントによってダイバーター熱負荷がゼロになるわけではないが、核融合反応により生成されたヘリウム灰を排気しなくてはならないという観点からは、デタッチ時にもダイバーターへの粒子束が存在することは、むしろ望ましい。

デタッチ時、あるいはサーパンス・モード時には水素のパルマー系列が観測され、例えば H_{α}/H_{β} や H_{γ}/H_{δ} といった信号強度比が増大する。このことは、デタッチプラズマで水素の体積再結合が発生していることを示唆する。これらの場合、高温プラズマ境界から最外殻磁気面までの閉じた磁気面で構成される領域に、低温かつ高密度の水素プラズマが存在している。水素の体積再結合はこの領域において発生していると考えている。特にサーパンス・モードでは、トロイダル及びポロイダルに回転するヘリカル形状の輻射帯が観測される。任意のトロイダル断面で輻射分布の時間変化を観測すると、回転ヘリカル輻射帯は蛇状の波形として現われることから、これをサーパント (大蛇の意) と呼んでいる。 H_{α}/H_{β} などの信号強度比は、サーパントの通過に同期して増大する。このことは、サーパントの内部で水素の体積再結合が促進されていることを示唆する。サーパントの発生と維持に関する物理機構や、その回転を駆動する機構については現在検討が進められている段階であるが、次に示す幾つかの実験事実が明らかになっている。即ち、サーパントは磁力線に沿って伸びているが、トロイダルには 1 周以下の長さである、サーパントは最外殻磁気面と高温プラズマ境界の間の領域で回転している、その回転速度は加熱入力と正相関にある、トロイダル磁場の方向を反転すると回転方向も反転する、LHD における主力加熱装置はトロイダル接線方向に入射される高エネルギーの水素ビーム加熱であるが、サーパンスの回転方向はビームの運動量注入方向に依らない。