

磁気圏型閉じ込め装置 RT-1 における 平衡の実験的推定と安定の理論的解析

東大新領域

林裕之, 矢野善久

序論 高速流を持つプラズマにおいては自己組織化により 1 を越えるような超高 β 平衡の実現が指摘されており [1, 2], 我々の研究室では磁気圏型プラズマ実験装置 RingTrap-1 (RT-1) を開発し, 高 β なプラズマ閉じ込めの実験研究を行っている. RT-1 では半径 1m の真空容器の中心部にある高温超伝導コイル(電流中心半径 0.25m, 250kAt)を, 装置上部に設置された常伝導吊上げコイル(30kAt)により磁気浮上させ, セパトリックスをもった磁気圏型の磁場配位によりプラズマを閉じ込めている(図 1). 純ダイポール磁場配位の状態でのプラズマ生成も可能だが, 磁気浮上させることでコイルの支持構造物がプラズマ閉じ込めの障害になることを防ぎ, またセパトリックスを装置内部に残すことでプラズマと装置壁との間の相互作用を防ぐこともできる.

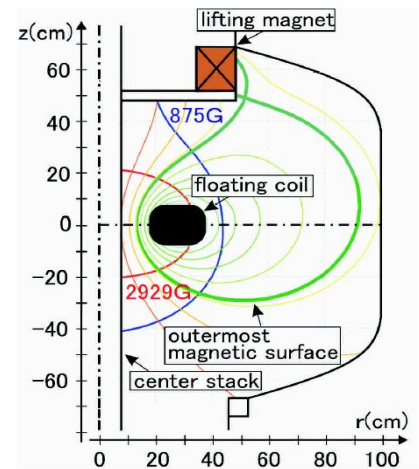


図 1 RT-1 装置のポロイダル断面

平衡の実験的推定 RT-1 装置は 2006 年に実験を開始し磁気浮上に
関する技術開発研究や ECH 加熱装置やプラズマ計測装置の整備などの実験を重ね RT-1 プラズマの高速流を駆動しない実験における基礎的なプラズマパラメータが分かってきた. 特に低水素ガス圧(数 mPa)領域における高エネルギー電子モードにおいて反磁性量が 3[mWb](=最大 β 値 40%程度に相当)を超える高 β 平衡が 1 秒以上に渡り安定に生成されており, 軟 X 線の計測では反磁性計測と矛盾しない 10keV 程度の温度を持つ高エネルギーの電子が 10^{16} m^{-3} 程度存在することが確認されている(圧力のほとんどを電子の高エネルギー成分が持つ).

反磁性ループや軟 X 線計測によるプラズマ圧計測は面積や視線によるマクロな積分であるためにミクロな圧力構造を正確に測ることは困難であり, 実験的な精度のある β 値の推定や下に述べられる圧力分布に大きく関係する不安定性の議論を行うには誤差が大きい. そこで内部の圧力分布(≡プラズマの磁場分布)を実験的に計測するためにホール効果素子を用いた磁気プローブを開発してプラズマによる磁場分布の測定を赤道面上で行った. 実験は測定誤差程度以上の磁場変化を計測したい要求と高温プラズマからプローブを保護したい要求を共に満たす条件($\beta \sim 1\%$)で行われた点やプローブによるプラズマへの外乱という議論の余地は残されるが, プラズマの圧力分布はかなり高磁場側にピーキングしているという結果が得られた. また封入する水素ガス圧を上げていった場合圧力分布が低磁場側にシフトしていくという傾向が得られ, これらは違う位置に取り付けられた複数の反磁性ループの信号比から推定される結果・傾向と矛盾しない.

安定の理論的解析 磁気圏型プラズマでは, その磁場配位の性質から圧力駆動による不安定性が起こる可能性があるが, RT-1 においてこのような高 β 平衡が実現されるのは, 安定化効果の一つとして磁気圏型磁場配位における圧縮性効果が不安定性を抑えているためと考えられている. そこで, 実験で実現されるこのような高 β 平衡の安定性をより正確に調べるため, 圧力駆動不安定性に対する固有値解析を RT-1 の有限 β なプラズマ平衡に対して行った. これにより, プラズマの反磁性効果による磁場配位の変化やセパトリックスの存在を考慮した解析を行うことができ, これまでの研究では不明であった圧縮性の安定化効果に対する①磁力線平行方向のプラズマ運動の影響, ②吊上げコイルによる磁場配位変化の影響, ③有限 β な平衡による磁場配位変化の影響についても調べることができた. まず, RT-1 平衡に即した精度の高い解析を行うことで, 従来から言われている圧力駆動不安定性に対する理論的な安定条件式 $p'/p + \gamma U'/U < 0$ ($p(\psi)$: 圧力, $U(\psi)$: 磁束管比体積)と解析結果が一致し, 本研究における数値解析が理論的にも正しく評価され, 圧縮性の安定化要因は磁束管の比体積変化にあることが示された. また, 吊上げコイルにより磁場配位が変化することで, 磁束管比体積が増大し, さらに圧縮性の安定化効果が強まることが明らかになった. そして高 β 平衡時には, エッジ領域における磁束管比体積の減少により圧縮性による安定化効果が弱まることで不安定性が生じることも示され, RT-1 における安定限界の物理的要因が解明された.

参考文献

- [1] A. Hasegawa, Comments Plasma Phys. Controlled Fusion 1, 147 (1987).
- [2] S. M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett. 81, 4863 (1998).