

高密度点火シナリオを実現するために必要となる粒子供給特性

Pellet fueling requirements to allow high density self-burning scenario on a helical-type fusion reactor

坂本隆一, 山田弘司, 宮澤順一

SAKAMOTO Ryuichi, YAMADA Hiroshi, MIYAZAWA Junichi

核融合科学研究所

National Institute for Fusion Science

LHD 実験で得られた熱・粒子輸送を外挿することによって、ヘリカル型核融合炉における自己燃焼プラズマの運転領域を探索し、その定常維持に必要な粒子供給特性を推定した。既存のペレット入射技術を考慮した粒子供給シナリオでは、ペレット速度が不十分のためペレット侵入長が浅く、平坦な密度分布が予測されるが、 $T_e(0) = 15 \text{ keV}$, $n_e(0) = 2.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ における自己燃焼プラズマの保持が可能であることが示された。一方で、密度分布の尖塔化度 ($n_e(0)/\langle n_e \rangle$) が高いほど、運転領域は低温・高密度側にシフトし、尖塔化度が2の場合は $T_e(0) = 11 \text{ keV}$, $n_e(0) = 3.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ での運転が可能となる。加えて、平坦密度分布に比べて30%少ない核融合出力で自己燃焼プラズマを安定に維持できる様になる。尖塔化密度分布を得るためには中心粒子供給が必須となるが、10 km/s を超える高速ペレット入射による直接中心粒子供給が必要となり、ペレット入射技術の大幅な進展が高密度点火シナリオ実現の鍵となる。

本解析では、LHD 実験で観測されている gyro-Bohm 型の輸送特性が炉条件まで維持されると仮定し、LHD の輸送特性を炉心プラズマの運転シナリオへ外挿している。炉条件における衝突周波数 ($\nu_b^* = 0.3$ 程度) は、LHD 実験における中密度放電 $T_e(0) = 2.5 \text{ keV}$, $n_e(0) = 3 - 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ に対応する運転領域であり、衝突周波数の観点からは、LHD プラズマからの外挿は妥当であると考えられる。アルファ加熱とプラズマの損失の間の熱バランスのみを考慮した POPCON 解析によって運転領域全体の把握を行なうとともに、プラズマ分布の時間変化も考慮して、ペレット粒子供給に対する自己燃焼プラズマ挙動の数値シミュレーションを行った。粒子供給分布としては、ペレット溶発コードを組み込むことによって現実的な粒子供給深さを与えた他に、任意の粒子供給深さを仮定することによって、粒子供給深さが自己燃焼プラズマ特性に及ぼす影響を広範囲に調べた。

ペレット入射による粒子供給法では、ペレットの

溶発過程 (ペレット侵入長) に加えて、溶発プラズマモイドの均質化過程 (ドリフト輸送) が粒子供給特性を支配する。プラズマ温度が高くなると、深いペレット侵入長が期待できなくなることから、溶発プラズマモイドのドリフト輸送による実効粒子供給特性の最適化が重要な課題となり、既存のトカマク装置では高磁場側からのペレット入射の優位性が示されている。しかしながら、大サイズ/高温となる核融合炉心プラズマを想定すると、浅いペレット侵入長を溶発プラズマモイドのドリフト輸送が十分に補って、コア部への粒子供給が可能であるか否かは自明ではない。とりわけヘリカル装置においては、磁場構造の3次元性に起因して、溶発プラズマモイドのドリフト輸送による実効粒子供給効率改善が期待できないことが示唆されており、本解析では、溶発プラズマモイドのドリフト輸送が粒子供給特性改善に及ぼす影響を無視した。

より現実的な検討を行うために、アルファ粒子損失や不純物蓄積による制動放射パワー損失、ヘリウム灰による燃料希釈等が自己燃焼プラズマに及ぼす影響を考慮に入れた計算も行った。これらの非理想的な影響によって、運転領域は高密度側にシフトし、自己燃焼プラズマを維持するために必要な最低核融合出力は増加する傾向を示す。特に、ヘリウム灰の発生は核融合出力と表裏一体であり、回避することができない本質的な課題である。ヘリウム灰は燃焼領域で発生するために、その除去特性はプラズマの閉じ込め特性と相反するが、コア部への直接粒子供給が可能ならば、コアプラズマの燃料純度維持とコア部から周辺部への粒子束増加に伴う移送が期待できることから、燃料希釈を十分に抑制できる可能性がある。

その他、ペレット粒子供給に伴う擾乱が引き起こす核融合出力変動やグローバルな粒子循環量 (トリチウムインベントリ) の観点から、核融合炉において必要となる粒子供給特性を議論するとともに、自己燃焼プラズマの運転シナリオについても言及する。