高エネルギー粒子挙動に関する研究課題

Research Plan on the Energetic Particle Physics

村上定義¹, 磯部光孝², 小川国大², 富田英生³, 長壁正樹², 齋藤泰之¹, 本間雅之¹, 前田渉吾¹, 山口裕之¹, LHD 実験グループ² S. Murakami¹, M. Isobe², K. Ogawa², H. Tomita³, M. Osakabe², Y. Saito¹, M. Homma¹, S. Maeta¹, H. Yamaguchi¹, LHD exp group²

> ¹京大・工,²核融合研,³名大工 ¹Kyoto Univ., ²NIFS,³Nagoya Univ.

将来の核融合炉においては,DT 核融合反応により α 粒子 (3.5MeV) が発生し,この高エネルギー α 粒子に よる加熱が高温プラズマを維持することになる.このため,核融合炉においては,高エネルギー粒子の効率的 な閉じ込めが必要不可欠である.一方,核融合反応が進み高エネルギー α 粒子の圧力が上昇すると,アルフ ヴェン固有 (AE) モードなど MHD 波動と α 粒子が相互作用し,不安定化し成長した MHD 波動が α 粒子の損 失を増加させる可能性がある.このため高エネルギー粒子と MHD 波動の相互作用を検証することが将来の 核融合炉を考える上で重要な課題の一つとなっている.さらに,ヘリカル系では,3次元磁場配位により,磁 場配位に軸対称性がなく,粒子軌道が複雑となることから,磁場配位最適化の高エネルギー粒子閉じ込めへの 影響や,乱流などのミクロな電磁揺動による軌道変化の閉じ込めへの影響などの検証が必要となっている.

LHD では、高エネルギー粒子に関する様々な計測機器が設置され [1], NBI 加熱による高エネルギービーム イオンが駆動する AE モードなどの MHD 波動による高エネルギー粒子の拡散等の研究が行われて来ている [2]. また、磁場配位最適化の高エネルギー粒子閉じ込めへの影響について様々な検証実験が行われて来てい る [3]. 結果として、高エネルギー粒子が不安定化する MHD 波動により、高エネルギー粒子の損失が増加す ることが示された.また、高エネルギー粒子閉じ込めが理論で予想される分布と定性的に一致することが示 された.しかしながら、これらの高エネルギー粒子に関する計測結果は、主に高エネルギー粒子が中性粒子と 荷電交換することにより得られた間接的な情報である.このため中性粒子が多く存在する周辺領域を中心と した高エネルギー粒子を観測していることになっている.したがって、本来重要なプラズマ中心付近の高エネ ルギー粒子の情報が得られていないことが課題となっている.

LHD において開始される重水素プラズマに重水素 NBI ビームを入射する重水素実験においては、重水素 ビームと熱重水素粒子との D-D 核融合反応により

$$D + D \rightarrow n(2.45 \text{MeV}) + {}^{3}\text{He}(0.82 \text{MeV})$$
 (1)

$$\rightarrow p(3.02 \text{MeV}) + T(1.01 \text{MeV}) \tag{2}$$

2.45MeVの中性子が発生する反応と1.01MeVの三重水素 (T)が発生する反応がほぼ同じ確率で起こる.この 中性子を計測することにより,重水素ビームの分布を直接的に得ることができる.さらに同確率で発生した高 エネルギー三重水素は熱重水素粒子と核融合反応し,

$$\Gamma + D \rightarrow n(14.1 MeV) + \alpha(3.5 MeV)$$
 (3)

14.1MeV の中性子を発生させる. この反応は約 150keV に反応のピークがあり,約 1MeV で発生した三重水 素はエネルギー減衰した後に核融合反応することになる. このため 14.1MeV の中性子を計測することにより, 三重水素のエネルギー減衰過程での閉じ込め性能を検証することができる. これはトリトン燃焼実験として, JT-60U などで実験研究が行われている [4]. したがって,重水素プラズマにおいて核融合反応により発生す る中性子 (2.45MeV および 14.1MeV) を計測することにより,これまで観測することができなかったプラズマ 中心における高エネルギー粒子の情報を直接観測することができる. LHD 重水素実験においては、2.45MeV および 14.1MeV の中性子を計測するための準備が進められている [5]. 中性子の総量を計測するため、²³⁵U 核分裂計数管および ³He 比例計数管が設置され、中性子総量を高い 時間分解能で計測することができる. この高い時間分解能を用いることにより、中性子の時間発展を解析する ことができ、様々な高エネルギー粒子に関する物理現象の時間的変化を解明することができるようになる. ま た、D-T 核融合による 14.1MeV の中性子を検出するためシンチレーションファイバー束検出器が設置され、 トリトンの径方向分布を得ることができる. これにより、トリトンの時間変化だけでなく、空間的な分布の変 化を解明することができる. これらの計測を用いることにより LHD 重水素実験では、高エネルギー粒子閉じ 込めに関して以下の様な検証が可能となる.

- MHD 波動との相互作用の NBI ビームイオン閉じ込めへの影響(2.45MeV 中性子発生量の古典論シミュ レーション予想量との比較)
- 磁場配位最適化と NBI ビームイオン閉じ込めの検証(2.45MeV 中性子発生量の比較)
- MHD 波動との相互作用のトリトン (1MeV) 閉じ込めへの影響(14.1MeV 中性子発生量の古典論シミュレーション予想量との比較)
- 磁場配位最適化とトリトン (1MeV) 閉じ込めの検証(14.1MeV 中性子発生量の比較)

一方,これら実験結果を検証するためには,数値シミュレーションによる高エネルギー粒子の古典的な閉じ 込め予想が必要となる.われわれはこれまで,統合シミュレーションコード TASK3D と5 次元位相空間ドリ フト運動論解析コード GNET を用いることにより,LHD 重水素実験における中性子発生量の予測を高精度 に行って来ている.最近の成果としては,ビーム・熱粒子間のみで無く,ビーム粒子間に発生する D-D 核融 合反応の評価が可能となった.また,時間発展版の GNET-TD において核融合反応を評価できる様コードの 改良を進めている.Fig.1-(left)は,D-D 核融合反応による 2.45MeV の中性子発生量の径方向分布を示してい る.2.45MeV 中性子発生量がプラズマ密度に大きく依存しないことが分かる.一方,D-T 核融合反応による 14.1MeV 中性子発生量は密度に大きく依存することが分かる(Fig.1-(center)).これは,D-D 核融合で発生 するトリトン (1MeV) のエネルギーが高いため損失率が大きくなり,より減衰時間の短い高密度プラズマの 方が反応率が高くなるためである.また,同様に損失率が磁場配位に大きく依存するため [6],内寄せ磁場配 位の反応率が高いことが示されている(Fig.1-(right)).



Fig. 1: Radial profiles of neutron production rate by the D-D fusion reaction (left), by the D-T fusion reaction (center and right) in the three different densities and different magnetic configurations.

- [1] M. Isobe, et al., Fusion Sci. Technol. 58 (2010) 426.
- [2] M. Osakabe, et al., Fusion Sci. Technol. 58 (2010) 131.
- [3] S. Murakami, et al. Fusion Sci. Technol. 46 (2004) 241.
- [4] T. Nishitani et al., Plasma Phys. Control. Fusion 38 (1996) 355.
- [5] M. Isobe et al., Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 10D310
- [6] S. Murakami, et al., Nuclear Fusion 42 (2002) L19.