講座

輸送解析から見た高エネルギー粒子計測手法

Energetic Particle Diagnostics for Transport Analysis

(Received 3 September 2004)

はじめに

今月より3ヶ月間、「輸送解析から見た高エネルギー粒子計測手法」と題した「講座」を連載する。核融合研究で取り扱う高温プラズマの振る舞いについては、これまで多くの特集・講座などが設けられてきたが、高エネルギー粒子の振る舞いに関したものは、あまり見受けられなかった。そこで、今回、このようなタイトルを冠した講座を行うことを企画した。この講座は、「高エネルギー粒子(イオン)の計測法とそれからわかる物理量を高エネルギー粒子輸送特性の解析に関連した形でわかりやすくまとめる。」ことを目的としている。高温プラズマにおける高エネルギー粒子研究は、核融合燃焼プラズマ(以後、「燃焼プラズマ」という。)におけるアルファ粒子の挙動の理解と予測を究極の目標としているため、燃焼プラズマについて別の視点で考えを深める機会となれば幸いである。

高エネルギー粒子研究の目的

核融合研究で対象とする高温プラズマ中の粒子には、等方的でその速度分布がマクスウェル分布によって表される集団(バルクプラズマ)と、核融合反応やプラズマ加熱によって生成された高エネルギー粒子(バルクプラズマの温度よりもかなり高いエネルギーを持つ粒子。エネルギー範囲は明確に決められているわけではないが、イオン温度の5倍以上を目安としている場合がある。)の集団がある。バルクプラズマの閉じ込めや不安定性の研究が、燃焼プラズマにおいても重要であることは言うまでもなく、燃焼プラズマの理解をめざして研究が行われている。また、高エネルギー粒子の振る舞いに関する研究についても、以下で述べる核融合炉におけるアルファ粒子の重要性から、トカマク、ヘリカルを問わず精力的に進められている。

核融合炉では、

- ① 低温の重水素(D)・三重水素(T)の混合プラズマを、中性粒子ビームや高周波などを利用して加熱し、高温のプラズマを生成する、
- ② 高温のプラズマにおいて重水素と三重水素が核融合反応を起こし、高エネルギーのアルファ粒子と中性子を生成する、
- ③ 生成された高エネルギーのアルファ粒子が、プラズ

マの電子やイオンとの衝突によって減速する際に、電子やイオンにそのエネルギーを移行し(実際には、アルファ粒子のエネルギーの大部分は、まず、電子に移行する)、高温のプラズマを維持する、

といったように、アルファ粒子のエネルギーによる核融合反応の持続が必要になる。つまり、高温プラズマを維持するためには、高エネルギーのアルファ粒子を十分長くプラズマの中に閉じ込めておくことが不可欠である。そのため、高エネルギー粒子の研究は、燃焼プラズマにおいて必要なアルファ粒子の閉じ込めを確保するための重要な研究課題と位置づけられる。

ここで、少し具体的に高エネルギー粒子研究の目的について考えてみる。高エネルギー粒子研究は上記の①から③のすべての過程に関する研究を行っており、物理的な見地でみると、その目的は、

- a) 高エネルギー粒子の閉じ込めは古典的か?
- b) 高エネルギー粒子からバルクプラズマへのエネルギーの移行はどうか?
- c) バルクイオンの様に揺動や不安定性によって引き起こされる輸送は存在するのか? もしあれば、それはどの程度か?
- d) 集団的な効果による不安定性の励起は? 高エネルギー粒子の損失は?

ということを明らかにし、これらが既知の理論から予測される結果と異なる場合は、その振る舞いを探ることにある。さらに、高エネルギー粒子の閉じ込めが劣化するようなことがあれば、それを改善する手法を探索することも研究として重要である。そして、この講座では取り上げないが、物理的に得られた知見を元にして、工学的には、

- e) 高エネルギー粒子の損失によって炉壁等が損傷されることがないか?

ということを明らかにすることも研究の目的になっており、実際にこのような側面から研究が進められている。

高エネルギー粒子の閉じ込めと輸送

この講座は「輸送解析から見た」高エネルギー粒子計測手法について解説することが目的であり、高エネルギー粒子の閉じ込めや輸送自身を解説することを目的とするもの

OSAKABE Masaki, National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292, Japan

KUSAMA Yoshinori, Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki 311-0193, Japan

e-mail: osa@nifs.ac.jp

e-mail:kusamay@naka.jaeri.go.jp

ではない(高エネルギー粒子の閉じ込めや輸送については、文献[1-3]に良くまとめられているので参照していただきたい)。しかし、この講座の連載を通して共通の基盤となる高エネルギー粒子の閉じ込めや輸送に関連する基礎的な事柄をここで簡単にまとめておきたい。

- ・速度空間での損失領域(ロスコーン)の存在
- ・クーロン散乱による減速とピッチ角散乱(速度空間での拡散)およびそれらの時定数(衝突時間)
- ・輸送に関わるステップ長としてのラーモア半径($\rho_L = mv_{\text{perp}}/eB$)、ポロイダルラーモア半径($\rho_\theta = mv_{\text{perp}}/eB_\theta$)
- ・粒子のピッチ角、位置による軌道の差異(通過粒子、捕捉粒子)、磁気面からのずれ(トカマクでは $\sim \rho_\theta$)、および軌道を代表する時定数(回転時間、バウンス時間)
- ・トロイダル磁場リップル／ヘリカルリップルによる輸送の増大
- ・中性粒子との荷電交換反応による損失(大型装置ではプラズマの周辺部)

これらは主に古典的／新古典的な損失過程に関わるものであるが、高周波(RF)加熱によるピッチ角散乱や電磁流体力学的(MHD)不安定性などの揺動に起因する輸送も存在する。例えば、アルファ粒子の集団現象の一つであるアルヴェン固有モードの励起により、アルファ粒子の輸送を増大させ、その結果アルファ粒子による加熱の劣化や第一壁／真空容器壁の損傷を引き起こす可能性が指摘されている[4]。このような輸送は、非古典的な輸送として注目され、これまで、理論と実験の両面からそのモードの発生条件や物理機構、高エネルギー粒子の損失などについて調べられてきている。このような不安定性は、単に高エネルギー粒子の輸送を変化させる要因としてのみ注目されているわけではない。MHD不安定性によって引き起こされた高エネルギー粒子損失によって、バルクプラズマの閉じ込めが改善されたという報告[5,6]や、アルヴェン固有モードを介して高エネルギー粒子のエネルギーがバルクイオンに伝達されるといった報告[7]がある。また、閉じ込め改善モードでは、プラズマ内での電場の形成が観測されており、高エネルギー粒子の閉じ込めや輸送にも影響を及ぼす可能性があり、精度の高い解析には考慮する必要がある。これら未解決の課題の解明のため、今後ますます研究の進展が期待されている。

高エネルギー粒子実験の手法と解析

それでは、どのようにして高エネルギー粒子実験を行うのであろうか？各章で具体的な実験方法が述べられるが、高エネルギー粒子実験の一般的な手法をまとめておく。

高エネルギー粒子研究の目標は、燃焼プラズマ中のアルファ粒子の振る舞いの理解と予測と述べた。実際にDTプラズマを生成して、その中で発生するアルファ粒子の振る舞いを調べるのが直接的で良いが、放射性同位元素である三重水素を使用するのは容易ではない。そこで、アルファ粒子の代替粒子として、中性粒子ビーム入射(NBI)や高周波(RF)加熱によって生成した高エネルギー粒子を利用する。NBIを用いた場合には、その入射方向や捕捉され

る位置により、通過粒子／捕捉粒子の違いが生ずる。イオンサイクロトロン加熱(ICH)では、高周波の共鳴領域でピッチ角が90度近傍になる捕捉粒子を生成する。ICHでは、DT反応で発生するアルファ粒子のエネルギーに匹敵するMeVクラスの高エネルギー粒子が生成される可能性があり、エネルギーの面では“アルファ粒子を模擬”するには適している。取り扱いが比較的容易な重水素を用いて、DD核融合反応で発生する高エネルギーの核融合反応生成粒子も利用できる。核融合反応生成粒子は等方的に発生するので、燃焼プラズマにおけるアルファ粒子の模擬には適している。しかし、それらの粒子はエネルギーが大きいためにラーモア半径やポロイダルラーモア半径が大きく、中型、小型の装置では閉じ込めが悪く、高エネルギー粒子研究に利用するのは困難である。

ここで、実際に実験を行うにあたって考えておくべき点をいくつか挙げる。前節で高エネルギー粒子の閉じ込めと輸送に関わる高エネルギー粒子の軌道について触れたが、粒子の軌道によって現象の現れ方が異なる。そのため、調べようとする物理現象によって、その現象が現れやすい軌道を持った高エネルギー粒子を選択・利用することが重要である。例えば、トロイダル磁場リップルによる輸送の増大は、捕捉粒子にのみ起こる。そのため、NBIを利用する場合には、捕捉粒子を作りやすい垂直入射を利用するのが直接的である。

古典／新古典輸送に関わる要因と前節で挙げた非古典的な効果との切り分けが重要である。例えば、古典／新古典輸送を調べようとする場合、各種の揺動の発生を抑え、極力“静かなプラズマ”を作ることが必要となる。そのため、計測の信号強度を多少犠牲にしてもNBI加熱パワーを制限することが必要になったりする。また、電場の効果を考慮しなくて良いように、高閉じ込めモード(Hモード)などへ遷移するのを避ける必要がある場合もある。バルクプラズマの拡散を調べる際には、摂動としてガスパフや加熱入力を短時間行い、その時間応答から輸送を調べる手法が用いられている。高エネルギー粒子研究でもこれと同様の手法が利用され、“静かなプラズマ”に高エネルギー粒子を短時間加える方法で拡散係数や閉じ込めの評価がなされている。

磁場や装置サイズが異なる装置間の比較や燃焼プラズマへの外挿性について考えてみたい。バルクプラズマの研究では、良く規格化ラーモア半径($\rho^* = \rho_L/a$)や規格化衝突周波数($\nu^* = \nu_e/\tau_b$)が用いられる。これは流体の風洞実験と同じ原理であり、バルクプラズマを支配するプラズマの挙動は、プラズマ基礎方程式を満足するとして、無次元量で記述することができるという考えによる。高エネルギー粒子研究でも同様に、燃焼プラズマへの外挿性を考えるためには、規格化ラーモア半径を同じにしたり、あるいは変えながら個々の現象を調べていくことが重要である。

次章以降で述べられる実験結果は、上記の点を十分考慮して行われたものであると考えている。

計測については次節で述べるが、実験データの解析について簡単に触れておきたい。バルクプラズマと同様に高エ

エネルギー粒子の挙動も多くの要因に影響されるので、プラズマの配位、温度・密度分布などのパラメータを考慮しながら、前節で示した多くの要因を同時に取り扱える計算コードを解析に利用することが多い。代表的なものとして、荷電粒子のクーロン衝突を取り扱うフォッカー・プランク方程式を数値的に解く手法がある。この手法の利点は速度分布関数が数値的に求まるところにあり、中性子発生量の評価などにも有効である。しかし、この手法では、高エネルギー粒子の挙動で重要な軌道の効果を取り入れることはできない。そのため、軌道を追跡しながらモンテカルロ法でクーロン衝突を取り入れ、高エネルギー粒子の挙動を調べるコードが開発され、利用されるようになった。しかしながら、このような高度な解析コードを用いないと高エネルギー粒子の研究ができないというわけではない。理論的に厳密な式を近似（モデル化）して簡単な式を導出し、むしろ、近似式が当てはめられるように実験を工夫することも行っている。解析を念頭におきながら実験を進めることが重要であろう。最後に、高エネルギー粒子研究の進展には解析コードの開発や高度化が重要であり、理論やシミュレーション研究に携わる研究者の尽力によるところが大きかったことを付け加えねばならない。

高エネルギー粒子計測とこの講座の概要

高エネルギー粒子研究では、高エネルギー粒子が「実際のプラズマの中でどのように振舞うのか」、また、それらが「教科書や論文で論じられている理屈」と合うのかを検証するには、何らかの方法で高エネルギー粒子を計測する必要がある。ここで、現在用いられている代表的な三つの計測手法について触れる。

高エネルギー粒子がDまたはTの場合には、DD/DT反応で発生する中性子を測定することにより、高エネルギー粒子の情報を得ることができる。これには、全中性子発生率測定、中性子発生分布測定、中性子エネルギースペクトル測定が利用されている。また第1章で紹介するアルファノックオン効果のように、高エネルギー粒子がバルクのDまたはTの速度分布関数に影響を与えるような場合にも中性子計測は有効である。

磁場に閉じ込められた高エネルギーイオンの閉じ込めの情報はそのエネルギー分布に直接現われるので、荷電交換反応を利用した中性粒子計測は、高エネルギーイオン物理研究に幅広く用いられている。しかし、JT-60等の大型トカマクではプラズマの小半径が大きいというのに密度も高く、プラズマ中心部の情報が得にくい。そのため、中性粒子

ビーム入射と組み合わせた能動的な測定の工夫がなされている。この講座では述べないが、ITERの燃焼プラズマでのアルファ粒子測定に向け、協同トムソン散乱法等の開発が進められている。

第一壁へ損失する高エネルギー粒子による第一壁の温度上昇から損失する高エネルギー粒子のパワーやその分布を評価することによって、高エネルギー粒子の閉じ込めを定量的に評価することが可能である。また、磁場から逃れた高エネルギー粒子を第一壁近傍に設置したプローブ等によって計測することによっても高エネルギー粒子の情報を得ることができる。

最後に、この講座の構成であるが、以下のように高エネルギー粒子計測の代表的な三つの計測手法に着目して解説する。

はじめに（本章）

第1章 高エネルギー粒子輸送解析のための中性子計測（10月号掲載）

第2章 高エネルギー粒子輸送解析のための中性粒子計測（11月号）

第3章 高エネルギー粒子輸送解析のための損失粒子計測（12月号）

個々の章では、計測のポイントとなる事柄や実験手法、データの解析や解釈の仕方などを主に説明する予定である。

（核融合科学研究所 長壁正樹，
日本原子力研究所 草間義紀）

参考文献

- [1] K. Tobita and A. Fukuyama, J. Plasma Fusion Res. **76**, 138 (2000).
- [2] S. Murakami, J. Plasma Fusion Res. **80**, 725 (2004).
- [3] W.W. Heidbrink and G.J. Sadler, Nucl. Fusion, **34**, 535 (1994).
- [4] K. Toi *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **75**, 517 (1999).
- [5] S. Guenter *et al.*, *Proceedings of 28th EPS on Controlled Fusion and Plasma Physics* (Funchal, 2001), P1-006.
- [6] K. Toi *et al.*, Nucl. Fusion **44**, 217 (2004).
- [7] D.A. Gates *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 205003 (2001).

下記論文も、高エネルギー粒子の古典／新古典的閉じ込めを理解する上で大変参考になる文献である。

- [8] 谷 啓二，他：核融合研究 **66**, 35 (1991).
- [9] K. Tobita *et al.*, Nucl. Fusion **34**, 1097 (1994).
- [10] 中島徳嘉，他：核融合研究 **66**, 631 (1991).