

レーザーを用いたプラズマ計測



研究ノート

岡田 成文*

1. はじめに

これまで磁場閉じ込め核融合の研究はトカマク方式と、この欠点の解決を目的としたいくつかのトカマク代替方式について行なわれてきた。筆者はこのうち後者の中の反転磁場配位 (Field Reversed Configuration : FRC) プラズマについてレーザーを用いた計測を行なってきた。レーザーを用いた計測に限っても既に広大な分野となっているが、そのうち干渉測定と回折測定について述べる。このように話を限定する一方で、いささか大仰であり、又核融合研究全体を見渡せるような仕事をしているわけでもないが核融合について述べることから始める。

2. 核融合の長所

現在、エネルギー源としては石炭、石油の燃焼に大きな部分を頼っており、これらの枯渇が心配されている。特に石油については燃料としてより化学原料としての価値が増々重視されるようになるだろう。これに加え、炭酸ガスによる地球温暖化、硫黄・窒素酸化物による化学汚染が問題になっている。ウランなどの核分裂による原子力に関しては核反応の暴走による核汚染の可能性が潜在する。一方核融合に関しては、現在最も実現に近い燃焼方式は重水素と、放射性は持つが半減期が12年とウランに比しずっと短い三重水素を磁場を用いて高温に保ち核融合反応 (D-T 反応) を起こさせ、そのエネルギーを取り出す方式である。この方式では放射性燃料を炉内に大量に蓄わえ、暴走しないように制御を行なっている核分裂方式と異なって、

燃料を補給し、微妙な制御を行なわなければ燃焼を持続させることができず、核反応の暴走は起こらない。核融合炉ではD-T反応で発生した中性子により構造材が放射化するが、炉の閉鎖時での放射能は単位出力当りでは分裂炉より小さく、又10-100年で急激に減少すると見積られている¹⁾。

3. 核融合の問題点

核分裂炉との比較の上で核融合炉について既述の利点が挙げられているが、40年近い研究の歴史で実際にD-T反応を起こすプラズマを用いての研究はこれから行なわれるという段階に在る。

そもそもプラズマは荷電粒子—電子とイオンとから成り、磁場や電場の作用を受けるので、これらを用いて制御できる可能性がある。実際磁場閉じ込め方式核融合では、磁場の圧力を用いてプラズマを一定の領域に閉じ込め、プラズマ中の電流による磁場でプラズマを安定に保持している。中性粒子のみから成る気体では、分子間距離程度に近づくことによって初めて粒子間相互作用 (衝突) が生じるが、プラズマ中では荷電粒子が集合したり、運動したりすることによって電場や磁場が生じ、遠方にまで力を及ぼし、これに多数、複数種の粒子が反応するので、様々な波動が生じるし、粒子・エネルギーが局在した熱平衡から離れた状態にあるので、種々の不安定・乱れ・自己組織化といった現象も生ずる。このような複雑な系では、温度や密度といったパラメーターの広い範囲にわたってその振舞を単純な法則で予測することができず、我々が簡単に手にできるパラメーターからかけ離れたパラメーター領域に在る核融合達成までには多くのステップを踏んで少しずつ進んで行

* 岡田 成文 (Shigefumi OKADA), 大阪大学工学部超高温理工学研究施設, 助教授, 理学博士, プラズマ物理

く必要がある。このような理由で、核融合の研究に於て、プラズマ性能の向上のため、これまで長い時間がかかってきた。更に次の様な理由で大きな資金も必要とされる。核融合反応を持続させ、外から注入したエネルギー以上のエネルギーを得るためには、たとえばプラズマを10テスラ程度の強い磁場を用いて、1秒間程度閉じ込め、密度・温度をそれぞれ 10^{20} 個/ m^3 及び2億度程度に保たねばならない。このような状態を保つためには、磁場を横切つての粒子・エネルギー損失を考慮して現在トーラス（ドーナツ）型の主半径6m、副半径2mのトカマク装置が検討されている²⁾。装置が大きくなるに伴ない、プラズマ閉じ込め磁場発生用に大電力が必要とされ、又プラズマからの熱放射、中性子、プラズマ粒子照射に耐え得る材料も開発されねばならない。D-T反応による中性子から燃料の三重水素を生成するブリーダーも必要とされる。これらをトーラス形状に組み上げると装置構造は極めて複雑なものになってしまう。

4. 反転磁場配位 (FRC) プラズマ

トカマク装置の複雑さを解消するために、装置自体は円筒形にし、この中にトーラス状のプラズマを生成するのがFRC方式である。この方式ではトーラス状のプラズマを取り囲むトーラス状の真空容器を用いていないので、プラズマを円筒の軸に沿って移動させられるという特色があり、又、閉じ込め磁場の利用効率が高く、中性子発生が少ない燃焼方式の可能性も研究されている。しかし現時点では、研究が最も進ん

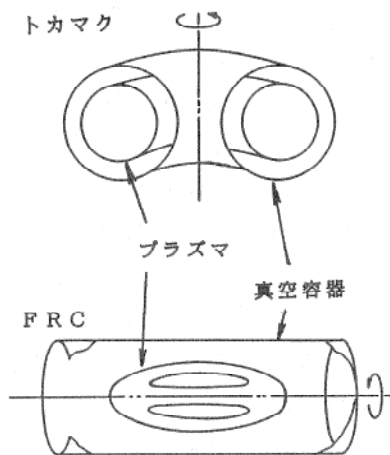


図1 トカマクとFRCの概念図

だトカマク装置に比し、プラズマ温度や粒子・エネルギー閉じ込め時間等のプラズマ性能が著しく劣っていること、核融合領域のプラズマパラメーターに対し、不安定性に問題が有ると考えられている等、未解決の点を抱えている。

5. FRCプラズマのレーザーを用いた計測

プラズマからの粒子・エネルギー損失にはプラズマ中の波動が重要な役割を演じており、様々な波動がどのような輸送係数（拡散係数D、電気抵抗率 η 、熱伝導率 χ 、…）を生ずるか理論的予測もされている。FRCプラズマは B_p （ポロイダル磁場、トーラスの小円周方向の磁場）のみから成り B_t （トロイダル磁場、大円周方向の磁場）を持たないこと、及び温度がプラズマ内ではほぼ一様であることから粒子損失率、磁場減衰率と密度分布 $n(r)$ の測定値から拡散係数の空間プロファイル $D(r)$ を算出することができ、理論から予測された $D(r)$ と比較できる。 $n(r)$ はたとえば干渉計による線積分密度プロファイル $\int n dl(r)$ から求められるが、この方法では $\int n dl(r)$ の誤差が $n(r)$ に増幅されて現われるので精密な測定ができる干渉計が必要とされる。最も単純な干渉計ではプラズマ中を通過したことによって位相が変化したレーザー光とプラズマを通過していないレーザー光とを干渉させ、その干渉光強度の変化から位相の変化を検出する。干渉計の精度を上げるためには屈折率の光波長依存性を利用して、長波長光を用い、位相変化を大きくすれば良いが、位相と同時に光の屈折による光強度変化も増大してしまうので、次のようなヘテロダイン方式を用いて

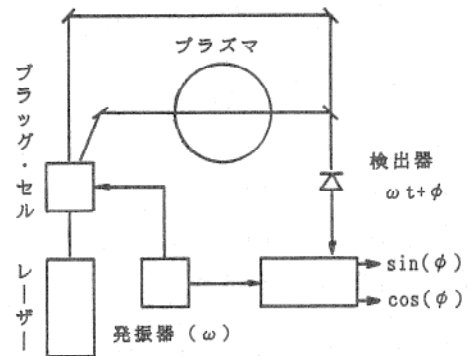


図2 ヘテロダイン方式干渉計の概念図

位相変化のみを取り出すことができる。レーザー光を音響光学素子（ブラッグセル）を用いて2つのビームに分割するとともに一方に $\omega = 60\text{MHz}$ の位相変調を与える。このビームがプラズマ中を通過すると更にプラズマによる位相変化が加わる。このビームと位相変調されていないビームとを干渉させると60MHzにプラズマによる変化が加わった干渉信号が得られるので、これから位相変化分を取り出せば良い³⁾。このような測定の結果 $D(r)$ は理論から予測されるものと全く異なっており⁴⁾、研究の次段階として、プラズマ中にどのような波動が生じているかの直接測定をフラウンホーファー回折法を用いて行ないつつある。この方法は次のような原理を用いている。プラズマ中に波動が存在し、これによってプラズマ密度が空間的に変調を受けていれば、光の屈折率の変化分はプラズマ密度に比例するので、これも同様の空間変調を受ける。この波面に平行に入射したレーザー光は

規則的な屈折率のパターンにより回折される。この回折角はパターンの間隔により決まり、パターンの変化の速さで回折光も変化するから、回折光の測定からプラズマ中の波動の波長と周波数を知ることができる。

以上、レーザーを用いたFRCプラズマにおける輸送現象の研究をきっかけとして核融合研究について概観した。

参 考 文 献

- 1) 狐崎晶雄：燃料協会誌68（1989），975 原子力工業35（1989），10など
- 2) 苦米地頭：プラズマ・核融合学会誌65（1991），32
- 3) 湊恒明，武内清，岡田成文，大井正一，伊藤博：電気学会論文誌A，105（1985）135
- 4) S. Okada, Y. Kiso, S. Goto, T. Ishimura : Physics of Fluids, B1（1989）2422

