

機関番号：12301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760687

研究課題名（和文）核融合プラズマコアへの粒子供給を目指した加速CTの中性化過程

研究課題名（英文）Neutralization process of an accelerated compact torus plasma for deep fuelling into a fusion plasma

## 研究代表者

高橋 俊樹 (TAKAHASHI TOSHIKI)

群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10302457

研究成果の概要（和文）：核融合プラズマコアへの粒子供給を目的とした加速コンパクトトーラス（CT）プラズマの中性化過程をモンテカルロシミュレーションで再現し、中性化効率を求めた。1 mの中性化セルを浸透するCTプラズマがほぼ100%中性化するためには、0.5 mTorr以上の封入ガス圧が必要であることがわかった。中性化とともに電子温度は低下するが、再結合による中性化促進は期待できない。中性化過程の電磁場時間発展を解析する必要性から並列計算機を構築した。

研究成果の概要（英文）：New fuelling method using an accelerated compact torus (CT) plasma technique is proposed. Neutralization efficiency of a CT plasma in neutralizer filled with neutral gas is computed by a Monte-Carlo calculation. It is found that higher than 0.5-mTorr gas pressure is needed to generate a complete neutral flow within a 1-m length neutralizer. The electron temperature of the accelerated CT plasma reduces by ionization and excitation collisions between plasma electrons and neutral gas particles. Reduction of the electron temperature, however, never contributes to enhance the neutralization efficiency because of the low recombination rate.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：核融合プラズマ理工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：核融合，粒子供給，コンパクトトーラス，モンテカルロシミュレーション，ハイブリッドシミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

ITERの建設が進められる中、核融合燃焼プラズマに対する技術課題は早期に克服され

なくてはならない。技術課題の一つに、核融合プラズマコアへの粒子供給法の開発がある。粒子供給法として現在主流となっている

のは、超音速ガスジェットやペレット入射である。これらは通常のカパフ方式に比べ、中性粒子が周辺で電離することなくプラズマ内部にまで到達できることが優位点である。しかしながら、核融合プラズマのように 10 keV 程度の電子温度では、超音速ガスジェットやペレット入射でさえもプラズマ中心部への燃料供給が困難になり、これに代わる燃料供給手段が必要となる。

磁化同軸プラズマガンで生成されたスフェロマクを加速したカマクやヘリカルなどの大型プラズマへ入射する、いわゆる“CT 入射”による粒子供給は、上記の手段とは全く別の斬新な方法である。ただし、CT 入射による粒子供給技術をさらに発展させるためには、大型装置の漏洩磁場による CT の減速を防ぎ、長距離移送を実現可能とする方策が必要となる。超伝導材によるシールドが提案されているが、今後の研究開発を必要とする。

CT の高速入射を活かしつつ、磁場の影響による問題を回避するためには、加速 CT の再中性化が有効である。中性粒子の高速フローは漏洩磁場の影響を受けない。また、超音速ガスジェットとペレット入射速度がともに約 1 km/s、であるのに対して、プラズマジェットの速度は 100 km/s と 2 桁も大きく、核融合プラズマでさえもコア領域への供給が可能となる。

## 2. 研究の目的

加速 CT 中性化による高速中性粒子フロー入射は、新たな粒子供給法として魅力的である。ITER 級装置への応用に向け、新手法の実現可能性を十分に検討する必要がある。しかしながら、加速 CT の中性化過程に関する理論・シミュレーション研究はこれまでになく、参考にできる知見は皆無である。本提案を実現化するためには、実験と理論・シミュレーション研究の連携は重要である。特に、加速 CT 中性化過程を詳細に分析し、実現化に向けて克服すべき課題を探求することは、理論・シミュレーション研究の果たすべき役割であると考えられる。

本研究では、加速 CT が中性化セル内を通過する際のプラズマ粒子と中性粒子間の相互作用をモデル化し、中性化過程をモンテカルロシミュレーションコードで再現する。これによって、例えば中性化に必要な入射速度や中性化セル封入ガス圧、および中性化セル長などを定量的に評価できる。したがって、実験装置設計の指針を明確にもできる。また、中性化に伴う CT プラズマの電磁的振る舞いも注目される。閉じ込め磁場の減衰や、荷電交換反応後の室温イオンと CT 内電子との相対速度に由来する電場の生成など、シミュレーションにより明らかにすべき現象がいくつも存在する。

## 3. 研究の方法

### (1) 軸方向 NBI との等価性を利用したモンテカルロシミュレーション

加速 CT の中性化効率を計算するために、軸方向 NBI との等価性を利用する。つまり、加速 CT と中性化セル内中性粒子との相対的な運動状態は、静止した CT イオンと軸方向から入射された中性粒子ビームとの相対運動と等しいということである。図 1 にその概念図を示す。

静止した CT の平衡分布は、Grad-Shafranov 方程式を解いて求める。CT のイオンは、中性粒子との荷電交換反応によって中性化する。反応確率と一様乱数との大小関係から反応を再現する。中性化に伴い変化するイオンや中性粒子密度は、PIC 法によって集計する。電離衝突や励起衝突についても、モンテカルロ法で再現し、プラズマ内電子のエネルギーを PIC 法で集計して温度低下についても議論できる。

CT は生成時に温度が高く、中性粒子フローに変換後、熱拡散がおこる。とくに、径方向への拡散は、中性粒子が移送管に吸着されることになるので好ましくない。本研究では、中性粒子フローの拡散についても、解析を行った。また、中性粒子とイオンの弾性衝突の影響についても調べた。

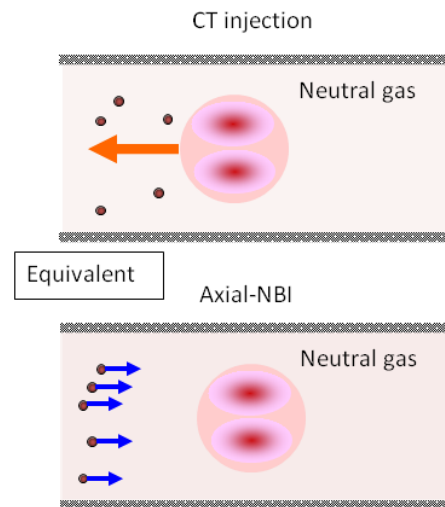


図 1 : 軸方向 NBI モデル

### (2) 加速 CT ならびにその中性化過程のハイブリッドシミュレーション

(1) で述べたモンテカルロシミュレーションは、CT の中性化効率を評価するために行われるものであり、中性化に伴う磁場や電場の構造変化については明らかにできない。そこで、CT 中性化過程を再現することを目指し、イオンを粒子、電子を流体とモデル化するハ

イブリッドシミュレーションコードを構築した。イオンは初期速度に応じた重みを Maxwell 分布により与えられる。計算粒子数は 1,000 万粒子を超えることになり、研究効率を高めるため、並列計算機を自作することにした。図 2 に、並列計算機の写真を示す。



図 2：構築した PC 4 台による並列計算機

#### 4. 研究成果

##### (1) モンテカルロシミュレーションによる研究成果

加速 CT の中性化と軸方向 NBI との等価性を用いて、CT の中性化効率を計算した。中性化効率は、(中性化したイオン数) / (初期の CT 内イオン数) として定義する。中性化効率は、中性化セルへ CT が浸透するにつれて上昇する。CT の浸透長に対する中性化効率の変化を示したのが図 3 である。CT の入射速度は 50 km/s であり、CT 中心部の温度は 20 eV、また中心イオン密度は  $1.0 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  である。封入ガス圧によって中性化効率は変化する。ここでは、中性化セルの封入ガス圧を 0.01 から 5.0 mTorr まで変化させた結果を示す。図 3 から 0.5 mTorr 以上の封入ガス圧の場合、1 m 浸透した時点での中性化効率がほぼ 100% になることがわかった。中性化セルが 1 m 以上になると、核融合炉設計において大きな制約となりうる。したがって、封入ガス圧を 0.5 mTorr より高くし、よりコンパクトな中性化装置を開発する必要があることがわかった。図 4 に中性化効率の入射速度依存性を示す。この図においてガス圧は 0.1 mTorr に固定してあり、1 m 浸透時の中性化効率を示してある。50 km/s の時には 32% 程度の効率であるが、300 km/s まで速くすると 29% 程度にまでわずかながら低下する。入射速度に対して減少関数となっているのは、荷電交換

反応断面積が入射エネルギーとともに減少するためである。入射速度増大による中性化効率低下はわずか数%程度であるので、入射速度増大による優位性、例えばプラズマコアへの粒子供給、などを検討した方が良さそうである。

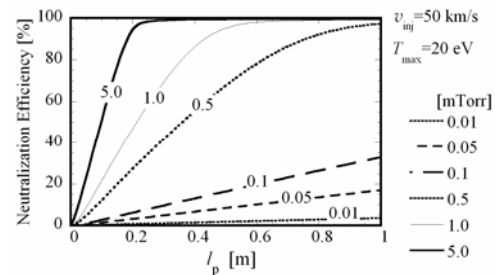


図 3：CT の中性化セル内浸透長と中性化効率の関係

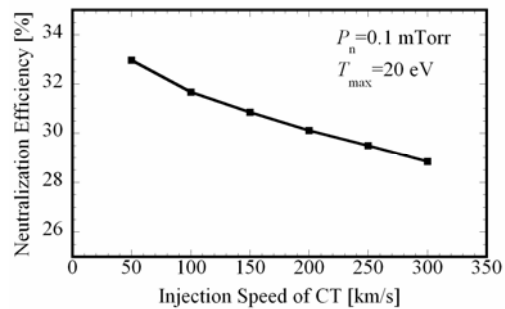


図 4：中性化効率と入射速度の関係

図 3 と図 4 においては、中性粒子とイオン間の荷電交換反応のみを考慮し、CT イオンの中性化効率を調べた。ここでは CT 内の電子と中性粒子との電離反応や励起反応については考慮していなかったが、これらの反応によって CT 内電子の運動エネルギーは束縛電子の励起や電離に消費され失われる。したがって、CT 内の電子温度は低下する。図 5 に体積平均電子温度が中性化セルを浸透するにつれて減少する様子を示す。図 5 において CT 中心の電子温度は 20 eV ごとに 100 eV まで考慮した。封入ガス圧は 10 mTorr、入射速度は 50 km/s である。中心電子温度が 100 eV の場合、初期の体積平均温度は 60 eV 程度であるが、1m 浸透することによって 10 eV 程度減少していることがわかる。しかし、温度低下は比較的緩やかであることも図から見て取れる。

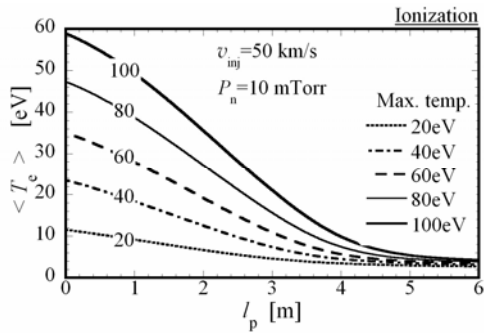


図5：浸透長と体積平均電子温度の関係

温度低下に伴い、再結合反応が促進し中性化効率がさらに向上することが期待できる。しかしながら、入射速度が 100 km/s の時、1 m 走行するのに  $10^{-5}$  秒要するのに対して、再結合反応率から見積もられる再結合時間は  $10^{-2}$  秒であり、加速 CT の中性化過程で再結合反応は無視できることがわかる。

中性化セル内の中性粒子と加速 CT のイオンとの弾性衝突は、中性粒子を拡散させ CT 中性化に悪影響を及ぼす可能性がある。弾性衝突の有無による中性化効率の変化を図6に示す。わずかに CT 中性化を遅らす効果はあるが、ほぼ無視できることがわかった。

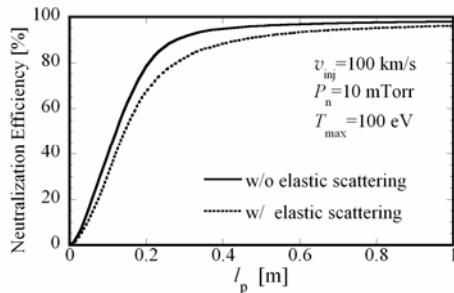


図6：弾性衝突の有無による中性化効率の変化

CTは生成時に数 10 eV の温度を持つ。したがって、中性粒子フローは比較的高い熱エネルギーを有することになる。径方向熱拡散によって移送管壁に高エネルギー中性粒子が衝突すると、吸着が起こり、またフローの持つ運動量ならびにエネルギーが低減する可能性もある。本研究では、中性化したイオンの径方向の損失について解析を行った。その結果を図7と図8に示す。

図7の縦軸は、中性フローの生成効率である。生成効率は移送管に衝撃した中性粒子を軌道損失したものとして取り扱い、したがって、中性化セル内を進行するにつれて熱拡散により効率が低下していることがわかる。し

かし、中心温度 100 eV の比較的高いプラズマ温度を設定しても、1 m 浸透時には熱拡散を考慮しない場合に比べて約 20% 低下で抑えられていることもわかる。

図8は移送管壁へ衝突した中性粒子の入射角依存性である。壁への入射角によって反射や吸着の割合が変化することは実験やスパッタリングのシミュレーションからわかっていることである。本研究の成果とプラズマ壁相互作用の研究を連携させることによりさらなる研究の進展が期待できる。

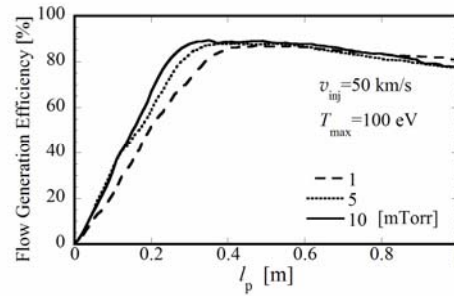


図7：浸透長とフローの径方向損失を考慮した生成効率の関係

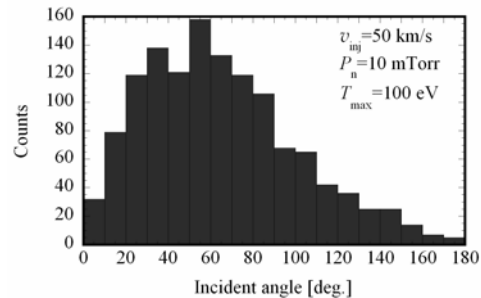


図8：入射角分布

## (2) ハイブリッドシミュレーションによる研究成果

中性化は CT の入射方向先端部分から起こる。閉じた磁力線構造を持つ CT において、磁気面内の一部が中性化されると、影響は磁気面全体に広がるだろう。また、荷電交換反応によって生成したイオンと加速 CT の電子は大きな相対速度を有するため、これによって大きな軸方向電場が形成されることも考えられる。本研究では、これらを明らかにするため磁場反転配位 (FRC) を再現する目的で開発されたハイブリッドコードを改良し、CT のハイブリッドコードを開発した。16 ノードの並列計算機を構築し、予備的なシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、まだプラズマイオンの中性化について



考慮されていない。しかしながら、先に示したモンテカルロシミュレーションとカップリングすることで中性化過程をモデル化することは可能であり、現在研究を進めているところである。

図9はCTイオン密度分布の時間発展を示している。徐々に周辺の密度増加が起こり、ホローな密度分布が形成されることがわかる。これらの結果は、米国メリーランド大学のスフェロマック実験の結果をよく再現している。クーロン衝突によるピッチ角散乱を導入することで、密度の局所の上昇は抑えられるようになると考えられる。

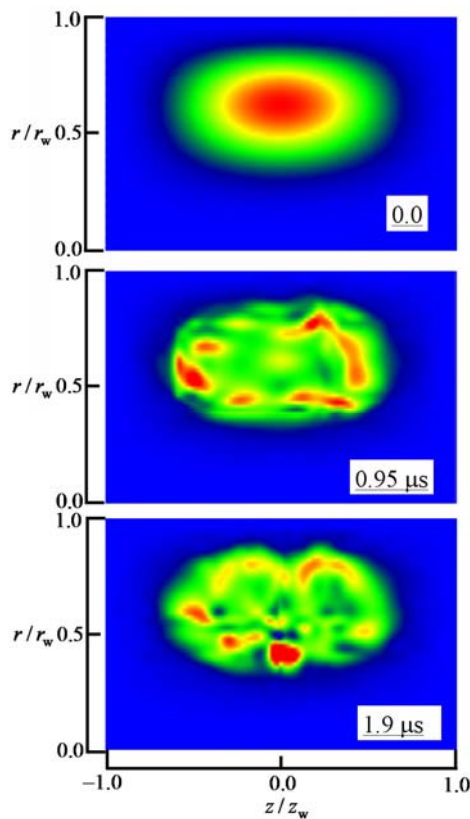


図9：CTイオン密度の時間発展

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① S. Fujii, T. Ohshima, T. Takahashi, N. Fukumoto, and M. Nagata, Monte Carlo Simulation on a Neutralization Process of an Accelerated Compact Torus Plasma, IEEE Trans. Plasma Sci. 38, pp. 1473-1477 (2010), 査読有.

[学会発表] (計5件)

- ① 福本直之, 宮澤順一, 後藤基志, 高橋俊樹, 菊池祐介, 永田正義, 浅井朋彦, 政宗貞男, 山田弘司, SPICA装置を用いた高速CTプラズマの中性粒子フロー化とその定量的評価, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 2010年12月30日, 北海道大学学術交流会館(札幌).
- ② N. Fukumoto, J. Miyazawa, T. Takahashi, M. Nagata, M. Goto, T. Asai, S. Masamune, Y. Kikuchi, H. Yamada, Development of a neutral particle flow fueling system by using a compact torus plasma injector for LHD, 23<sup>rd</sup> IAEA Fusion Energy Conference, October 12, 2010 (Daejeon, Korea).
- ③ 福本直之, 宮澤順一, 菊池祐介, 永田正義, 高橋俊樹, 浅井朋彦, 高橋努, 政宗貞男, 三瓶明希夫, 井通暁, 入江克, SPICA装置のCT生成加速部電源一段化と高速中性粒子フロー生成への応用, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009年12月4日, 京都市国際交流会館(京都).
- ④ T. Ohshima, T. Takahashi, N. Fukumoto, and M. Nagata, Effects of the recombination reaction on a neutralization process of an accelerated compact torus plasma, The 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association and the Asia-Pacific Plasma Theory Conference, Oct. 27, 2009 (Aomori, Japan).
- ⑤ S. Fujii, T. Ohshima, T. Takahashi, N. Fukumoto, and M. Nagata, Monte-Carlo simulation on a neutralization process of an accelerated compact torus plasma, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009, Oct. 6, 2009 (Lisbon, Portugal).

[その他]

ホームページ等

<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~eed1/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 俊樹 (TAKAHASHI TOSHIKI)  
群馬大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：10302457