



解説

モンテカルロコード DEGAS を用いた 中性粒子輸送シミュレーションの技法

—ガンマ10への適用—

中嶋 洋輔

(筑波大学プラズマ研究センター)

Technique of Neutral Transport Simulation Using the DEGAS Monte-Carlo Code
— Application to GAMMA 10 —

NAKASHIMA Yousuke

Plasma Research Center, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8577, Japan

(Received 25 June 2004)

Techniques for the neutral transport simulation using a Monte-Carlo code are briefly reviewed by explaining the examples of the simulation with the DEGAS Monte-Carlo code. Tandem mirror plasma produced in GAMMA 10 is employed as a target plasma for the simulation. An axisymmetric simulation using the ver.35 code is applied for the central-region and a three-dimensional simulation in non-axisymmetric anchor region is performed with the ver.63 code. In this review brief introduction of both versions, newly introduced processes and mesh models designed for axisymmetric and non-axisymmetric structures in the GAMMA 10 are described.

Keywords:

DEGAS, neutral transport, Monte-Carlo simulation, particle source, H α line-emission, wall recycling, atomic and molecular processes, GAMMA 10, tandem mirror

1. はじめに

磁気閉じ込め装置において、粒子・エネルギー収支を解明し、プラズマ閉じ込め性能を向上する上で、中性粒子の挙動は重要な研究課題である。また、プラズマ中およびその周辺の中性粒子密度は、リサイクリングや粒子源の強度を評価する上で、測定すべき不可欠のプラズマパラメータである。

プラズマを生成するには真空容器にまずガスを入射し、それが充満した頃を見計らって、電磁誘導あるいはマイクロ波の入射により電離を起こし、それを初期プラズマとして、ガスパフや中性粒子ビーム入射 (NBI) や高周波波動 (RF) 等の加熱パワーを用いて高温プラズマに立ち上げてゆく。また、外部からプラズマ銃で初期プラズマを入射し、それにガスパフと加熱パワーを用いてビルドアップさせる方法もある。いずれにせよ、プラズマ生成時の初期から、高温プラズマ達成時に至るまでプラズマ中およびその周辺には少なからぬ中性粒子が存在しており、プラズマとの相互作用により、我々に複雑な現象を提供してくれる。プラズマ中の中性粒子は、高温プラズマイオンの荷電交換反応によるエネルギー損失のターゲットであることから、過剰な中性粒子はエネルギー損失の元凶となりうる。その反面、中性粒子はプラズマ密度上昇を促進させるための電離

author's e-mail: nakashma@prc.tsukuba.ac.jp

の元 (粒子源) を担うものでもあり、適切な中性粒子の供給 (Fueling) は効率的な高温プラズマ生成にとって必須の手法である。

近年、ダイバータ部におけるダイバータ板への熱負荷を評価する上で、ダイバータプラズマの輸送過程を調べるためには、同領域における中性粒子輸送の解明は、重要な研究課題となっている。また、トラス系プラズマ装置において近年話題となっているプロブと呼ばれる磁力線に垂直な輸送現象やHモード閉じ込め時に形成される周辺ペダスタル構造と中性粒子の浸透の関係が重要視されている。一方、プラズマ閉じ込め磁場の磁力線に沿った中性粒子輸送は、ダイバータ配位や、タンデムミラー等に代表される開放端系プラズマ閉じ込め装置の特徴として、プラズマパラメータが大きく変化している場合が多いため、それらについての十分な理解が必要とされる。このように普遍的な研究テーマである中性粒子の挙動解析を目的として、様々な方式のプラズマ閉じ込め研究において、中性粒子挙動を調べる実験的あるいは理論的手法が開発されてきた。

中性粒子の挙動を実験的に調べる手法として、水素プラズマの場合励起された水素原子の主量子数 $n = 3$ から 2 へ遷移する輻射線 (H α 線) の発光を計測することが一般的なものとして確立されている [1, 2]。その際、H α 線輻射強度

と中性粒子密度とを結びつける分光モデルが必要とされ、通常我々が取り扱うプラズマパラメータ領域では、衝突輻射モデルが採用されている[3-5]。後述するように、プラズマ中からの $H\alpha$ 線輻射の計測は、古くからトカマクプラズマで行われており[6-9]、今ではリサイクリングや Fueling 量を推し量る指標としても広く利用されている。

一方、中性粒子挙動を理論的なアプローチで解明することは、上述の実験的手法より以前から行われており、中性粒子に関するボルツマン輸送方程式を解くことを目的として、スラブ近似や円筒近似に基づいて、1次元の数値解析が行われてきた[10,11]。しかしながら、任意の複雑な形状について解くことは非常に困難であり、しかも様々な原子・分子過程を取り入れた計算や壁との相互作用を考慮することは、実際上不可能であることから、モンテカルロ法を用いた中性粒子輸送シミュレーションが、近年のコンピュータ性能の向上とともに、非常に有効な手段として浮かび上がってきた。モンテカルロ法による中性粒子輸送解析では、後述するように数千個から数十万個のテスト粒子をメッシュ状に区切ったシミュレーション空間（真空容器およびプラズマ領域）中に放出し、乱数に従ってプラズマを構成している粒子との相互作用を模擬しつつ、テスト粒子の軌道を追跡してゆき、各セルにおけるテスト粒子のウェイトをスコアリングすることにより、セル内の中性粒子の密度や温度を評価する。

本解説では、モンテカルロ法を用いた中性粒子輸送シミュレーション解析の技法について、DEGAS モンテカルロコードをガンマ10タンデムミラープラズマへ適用した例をあげて述べる。上記プラズマを適用対象とした理由は、筆者が筑波大学プラズマ研究センターにおいてガンマ10プラズマの研究に従事していることが主たる理由ではあるが、後述するようにタンデムミラープラズマには軸対称モデリングが適したセントラル部と非軸対称部である極小磁場部の両方を備えており、両部においてシミュレーションと比較すべき計測データが比較的豊富にそろっていることも理由の一つである。一方、モンテカルロコード自身の説明については、紙面のスペースから困難であることから、本稿では触れず、これに関するいくつかの文献にゆだねる[12,13]。またダイバータプラズマ、周辺プラズマ等のシミュレーションに関しては、畑山氏の執筆された2001年本誌解説を始め、最近本誌の小特集での詳細な記事[14,15]があり、シミュレーション応用例としてのプラズマ輸送解析に関する記事[16]が竹永氏によって書かれているので、これらについては当該文献を参照されたい。

引き続き第2節では、現行のDEGASに至るまでの中性粒子輸送モンテカルロコードの歴史的発展について紹介し、入力データを始めとするシミュレーション研究に必要な資源について概説する。第3節では、軸対称モデルとしてのガンマ10セントラル部への適用結果について述べ、第4節ではその延長である3次元モンテカルロシミュレーションの適用に関し、ガンマ10非軸対称極小磁場部において行われた解析結果について議論する。第5節では、まとめと今後の課題・展望について触れる。

2. 中性粒子輸送モンテカルロコード「DEGAS」

2.1 中性粒子輸送モンテカルロコードの歴史的発展

モンテカルロコードによる中性粒子輸送シミュレーション研究としては、1970年代後半にHughesとPostらによって開発されたAURORAコードを用いたものが、初期の頃の代表的なものの一つにあげられる[17]。AURORAコードは、円柱近似に基づいたプラズマ内の中性粒子の輸送をモンテカルロ法によって模擬するコードであり、軸対称に作成したセル内における中性水素原子の密度や温度を計算することができる。計算コードでは、系外から入射されたテスト中性粒子は、Path Length Estimatorと呼ばれるアルゴリズムに従って、荷電交換、衝突電離、壁との相互作用等の過程を経て、その軌跡が追跡され、最終的に各セルに存在したテスト粒子のウェイトの総和として密度が求められる。その他、スプリッティングゾーンやロシアンルーレット法などのテクニックが導入され、当時としては少ないテスト粒子数(<1,000個)で比較的統計精度の良い計算結果を出していた。計算結果は、様々なプラズマ中のイオン温度の測定手法である荷電交換中性粒子分析における、エネルギースペクトルの解析等に用いられた。

1980年代に入って、ダイバータ領域での中性粒子輸送をシミュレートできるコードが数多く開発されるようになった[12,13,18,19]。その中で、DEGASはHeifetzらによって開発されたコード[12,13]で、現在も至る所のプラズマ閉じ込め装置における中性粒子の計算やダイバータ設計のために用いられている。上述のAURORAコードでは、中性水素原子を入射して、その軌跡を追跡することによって密度分布を計算しているのに対し、DEGASコードでは、中性水素分子を入射し、水素分子がプラズマ内で解離反応により原子を生成し、それら分子と原子の両方を追跡している。また、DEGASコードでは、粒子追跡のアルゴリズムにpseudo-collision[13,20]の手法を用いており、前出のAURORAコードに比べて、テスト粒子の追跡において計算速度等に優れ、真空中での中性粒子を追跡できるといった特長を持っていた。このことは、ダイバータ領域における排気ダクトの設計等で中性粒子輸送のシミュレーションを行うのに好都合である。また、本コードでは水素原子・分子に関する様々な原子分子過程を考慮できるようになっている。これによって、入射粒子を水素分子として計算を行うことができるので、より現実的な状況下でのシミュレーションが可能となる。文献[12]では、INTORのダイバータの設計例を取り上げて、D, T, Heの排気効率やダイバータ内でのionization rateの空間分布、ダイバータ板上の熱負荷や損耗率等の計算結果の例が示されている。

1990年代において、それまでメインフレーム(Cray Computer等)において稼働させていたDEGASコードは、時代のニーズに合わせてUNIXマシンへ移植されることになり、バージョンアップがStotlerらによって進められていった。第4節で紹介する3次元シミュレーションは、この段階のDEGAS ver.63[21]を用いて行っている。Stotlerらは、現在DEGAS 2コード[22]を新たに開発し、さらに多様な原子分子過程および中性粒子同士の衝突等の物理モデルを

考慮したシミュレーションを可能にしている。上記物理モデルは、昨今のダイバータモデリングに適していることから、プラズマの粒子、熱輸送を解くB2やUEDGE等のコードと結合されダイバータコードとしても使用されている。

2.2 シミュレーション解析に必要なリソース

以上概説した DEGAS コードを実際に利用するには、以下のような方法が考えられる。最も「廉価」に利用するには、核融合科学研究所計算機センターの汎用計算機システム SX-5 に移植されている ver.35 を用いるのがもっとも早い。この場合には、上記研究所との共同研究の申請を行った上で、公開されている本コード*1 を各自の端末 (PC) からログインしてコードを稼働させ、計算結果を FTP 転送して利用する形態をとる。ただしこのバージョンでは、スラブモデルを始め、円筒軸対称モデルやトロイダル対称性を仮定したものしか対応しないので、複雑な体系には向かない。一方、手元に比較的高速の計算機資源がある場合、ver.63 を導入する*2 ことによって、3次元体系に対応するシミュレーションが可能になる。この場合には、Alpha マシンと Compaq Fortran の組み合わせが、実用上問題のない性能を出す。また、Intel チップベースの PC Linux システム + Intel Fortran も、廉価版の構成モデルとして適切である。予算に糸目をつけないのであれば、Alpha チップベースのマルチ CPU ワークステーションが現時点では最も高性能を発揮すると思われる。この他の DEGAS のバージョンとして、1980年代に旧プラズマ研究所において、川村先

生のグループによって導入され、最近大阪府立大学の松浦氏により、同計算センター SX-5 上で整備された ver.45*3 や、前述の DEGAS 拡張版であり、PC 上で利用可能な DEGAS2*4 が存在する。参考までに、国内の大学、研究所等で使用されている各種 DEGAS のバージョンおよび動作環境の一覧を Table 1 に示す。

2.3 解析対象とシミュレーション体系の適合性

続いて、解析しようとする対象のプラズマおよび壁等の構成要素の幾何学的形状がどのシミュレーション体系に適合しているかを見定める必要がある。たとえばダイバータ板近傍における局所的な中性粒子挙動をシミュレートする場合には、1次元のスラブモデル体系で十分な解析が可能な場合もある。また、軸対称性の非常に高い装置のプラズマ (ダイバータ模擬装置など) では、殆どの場合軸対称性を仮定した円筒モデルが適当である。単純なトーラス形状の装置を内部に設置した様々な装置までモデル化しない場合には、トロイダル一様性を仮定した2次元のモデルが比較的簡単に解析が可能である。上記のモデルでは、ver.35 を用いた2次元体系の計算で事足りるが、それらに比べて複雑な形状、例えばヘリカル装置や非軸対称形状を持つ極小磁場配位の体系をモデリングする際や、単純な形状でも内容物が複雑な形で存在している場合には、ver.63 を用いた3次元体系での解析が必須となる。

2.4 DEGAS 計算に必要な入力パラメータ

DEGAS では、比較的小規模の ver.35 を用いる場合で

Table 1 List of operating environments of DEGAS simulation carried out in some institutes of Japan.

Institute	DEGAS / version	Computer	Memory	Operating system	Compiler	Key person
NIFS	DEGAS / ver.63	VT-Alpha 600S / 700S (Alpha21264A, 600MHz / 700MHz)	768MB / 1GB	Linux	Compaq Fortran for Linux Alpha	M. Shoji
JAERI	DEGAS / ver.35 modified by JAERI	VPP5000	512GB	UXP/V	Fortran77/VPP	H. Takenaga
	DEGAS2	IBM RS/6000 SP	4GB	AIX4.3.3	XL Fortranv8.1 for AIX	
	DEGAS2	Xeon 3GHz	2GB	Linux	Fujitsu Fortran / PGI Fortran	
	DEGAS2	Compaq Alpha (667MHz, 2cpu)	1GB	True64 UNIX	Compaq Digital fortran90	
IAE, Kyoto Univ.	DEGAS / ver.63	Compaq Alpha (667MHz, 4cpu)	4GB	Digital Unix V4.0F	Compaq Digital fortran90	S. Kobayashi
Osaka Pref. Univ.	DEGAS / ver.45	NIFS SX-5				H. Matsuura
	DEGAS / ver.63	PC(Pentium700MHz / 2.2GHz)	128MB / 1GB	Linux	Fujitsu Fortran / Intel Fortran	
	DEGAS2	PC(Pentium700MHz)	128MB	Linux	Fujitsu Fortran	
PRC, Univ. Tsukuba	DEGAS / ver.35 modified by PRC. Univ. Tsukuba	NIFS SX-5				Y. Nakashima
	DEGAS / ver.63	VT-Alpha 533 / 6 HR (Alpha21164, 533MHz / 21264B, 800MHz)	512MB / 2GB	Linux	Compaq Fortran for Linux Alpha	

- * 1 核融合科学研究所・計算機センターの汎用計算機システムにログインして、/usr/nifsc/appl/gdegasu ディレクトリの実行ファイルを使用するか、ソースコードを/usr/nifsc/src/gdegasu ディレクトリからダウンロードした後、コンパイルして使用する (計算機利用共同研究を予め申請してアカウントを貰っておく必要がある)。
- * 2 プリンストンプラズマ物理研究所 FTP サイト (ftp.pppl.gov) の/pub/degas ディレクトリから tar ファイルをダウンロードできる。
- * 3 核融合科学研究所・計算機センターの汎用計算機システム内の/usr/nifsc/appl/degas45ディレクトリにある。
- * 4 プリンストンプラズマ物理研究所のホームページ (http://w3.pppl.gov/degas2/) からソースコード、マニュアルがダウンロードできる。

も、60種類を超える入力パラメータを設定する必要がある。このうち代表的でシミュレーション実行上注意すべきもの、後述するシミュレーション結果の際に重要となるパラメータについて簡単に説明を行う。

(1) テスト粒子数

文字通りシミュレーション空間内に入射して、その軌跡を追う粒子の個数であり、通常数千個から3次元空間の比較的大規模なシミュレーションの場合数十万個に及ぶ。また、この粒子数を15個程度以下にすると各テスト粒子の軌道を出力する機能があるので、粒子が正常にメッシュ空間内を飛行しているかどうかを確認する上で重要となる。

(2) 粒子種

通常水素しか使用していないが、重水素、三重水素も対象となっている。

(3) テスト粒子の入射エネルギー・角度分布

ガスパフやリサイクリング等による中性粒子の入射の際のエネルギーを定義する。通常は室温に相当するエネルギーを入れる。また、入射粒子として中性水素原子と中性水素分子を選択することが出来る。入射角度分布については、通常コサイン分布の頻度で、入射粒子の角度を与えるようになっている。

(4) 壁

DEGAS上で定義できる壁の種類として、通常の壁、ミラー壁、出口の3種類の他に粒子源を与える中性化プレートがある。通常の壁では、テスト粒子は壁材料に応じた反射係数データベース[23]に基づいて反射および新たな粒子の脱離を生じる。ミラー壁では、テスト粒子は鏡面反射を行うので、上下や左右対称の体系では、中心にミラー壁を定義することによって、メッシュ空間を半分節約することができる。中性化プレートは、ガスパフやリサイクリング領域の壁に定義することによって、テスト粒子の供給源として用いる。複数の中性化プレートが存在する場合には、各プレートから放出されるテスト粒子の重みを別のパラメータによって個別に指定できる。出口は、真空排気のダクトなど粒子が再び戻らないと考えられる箇所定義する。

(5) プラズマパラメータ

DEGASでは、シミュレーション空間に定義されたセル全てに、以下のプラズマパラメータを入力する必要がある。電子密度は、中性粒子の平均自由行程を左右する最も感度の高いパラメータである。電子温度は、原子分子過程の反応率に強く影響を及ぼすため、これも重要なパラメータとなる。特に周辺部の水素分子の密度が高い領域では、電子温度の値が分子の解離に影響を及ぼす可能性があるため、注意が必要である。イオン温度は、中性粒子が荷電交換反応によって新しいエネルギーの中性粒子となる際のキーパラメータである。したがって、比較的高密度プラズマにおいて、プラズマ中の中性粒子の平均自由行程がプラズマ半径に比べて短くなる状況下では、イオンと中性粒子間のエネルギーの交換が頻繁になり、両者の温度差は小さくなる。

以上掲げた各種入力パラメータの他にもメッシュを作成

する段階で様々なパラメータ設定を必要とするが、本解説の範囲を逸脱するので省略する。これらのデータを入力ファイルとして作成し、シミュレーション実行時に読み込ませる。シミュレーション終了時に、DEGASは出力ファイルを生成し、その中から、中性水素原子、分子の密度・温度等の必要な情報を抽出し、視覚化して実験データとの比較検討を行う。

3. タンデムミラーへの適用

3.1 ガンマ10装置とH α 線計測

第1節において述べたように、中性粒子輸送の解明は重要な研究課題となっており、開放端系においてもプラズマ内部の中性粒子密度は、粒子バランス解析や高 β プラズマ生成のために、重要な計測対象となっている[24-27]。特にタンデムミラーにおける水素リサイクリングの制御、サーマルバリア等の閉じ込め電位の維持および、密度制御のための適切な粒子補給の観点からも、その解明が求められている。本節において、DEGASコードのタンデムミラープラズマへの適用結果を示す前に、簡単にガンマ10タンデムミラー装置における中性粒子挙動に関する計測システムを紹介しておきたい。

ガンマ10では、中性粒子の挙動を調べるためにセントラル部においてH α 線輻射の計測が行われ、その径方向プロファイルから中性粒子密度が求められてきた[28]。また、軸方向にもH α 線検出器が設置されており、磁力線に沿った方向の挙動を観測している[29]。これらの計測結果から、プラズマ維持のために入射される水素ガスがガスパフ近傍に偏在することが明らかになっている。

ガンマ10は全長約27mの実効的軸対称化されたタンデムミラーであり、軸対称のプラズマ主要閉じ込め領域であるセントラル部、極小磁場部であるアンカー部、軸方向閉じ込めを行うプラグ・バリア部から成っている[30-33]。セントラル部の長さは6mで、ミッドプレーンの磁場強度は通常0.41 Teslaで実験される。セントラルの両端には、ミラースロート部を介してアンカー部が接続される。初期プラズマはプラズマ銃によって両端部から入射され、ガスパフとICRF波動によって、プラズマの密度制御・加熱が行

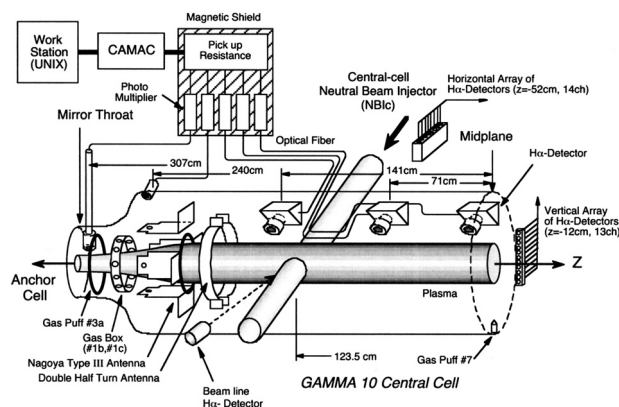


Fig. 1 Schematic view of GAMMA 10 central-cell and heating systems and diagnostics for this study.

われる。

Fig. 1はガンマ10セントラル部の真空容器, H α 線計測器, 加熱系とガス導入系の概略図を示す。セントラル部のイオンは, セントラルセル両端部にあるダブル-halfターンアンテナで励起されたイオンサイクロトロン共鳴によって加熱される。ガンマ10セントラル部には7個のガスパフが設置されており, 水素ガスは通常荷電交換損失を免れるように両端より入射される。軸方向検出器は, セントラル部ミッドプレーン近傍 ($z = -1$ cm, -71 cm, -141 cm) の3点とミラースロート部 ($z = -307$ cm) に新しく設置されていて, 各々はプラズマ中心を向いている。検出器は干渉フィルタと光ファイバーおよび光電子増倍管で構成され, 検出された信号はCAMACシステムに転送され, 最終的にワークステーションで処理される。ガンマ10では, セントラル部においてICRF波動を用いたプラズマイオン加熱を行い, ECRHにより軸方向閉じ込め電位を発生し, プラズマ閉じ込め実験を行っている。この場合, セントラル部イオン温度が電子温度に比べて極端に高く (T_e : 数十 eV ~ 100 eV に対して, T_i : 数 keV ~ 10 keV.), イオンから衝突緩和過程を介して電子にエネルギーが供給される状態とな

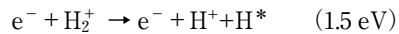
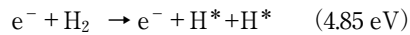
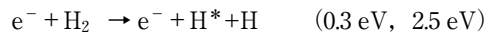
り, このような運転モードを高イオンモードと呼んでいる [34]。

Fig. 2は典型的な高イオンモードにおける, プラズマパラメータと H α 線放射強度の時間変化を示す。この実験モードでは, 2種類のガスパフが使用される。一つは初期プラズマのスタートアップ用として, 短パルスで濃いガスをガスボックス (GasBox) を用いて入射している。もう一方のガスパフは, ミラースロート部に設置されており, プラズマを維持する目的で, ICRF パルスに合わせて比較的長時間入射される。Fig. 2(c)は, 今回新設した H α 線検出器アレイの信号と既設の GasBox 近傍およびスロート部の H α 線信号の時間変化を示す。GasBox 部の信号は通電初期に強いピークを示していることがわかる。これは, 立ち上げ初期の GP #1b からのガス導入の影響を示している。一方, プラズマが定常維持されている時間帯では, スロート部の発光強度が極めて高い。これはスロート近傍の中性粒子密度分布が高く, GP #3a よりスロート部に入射されているガスが, その近傍に局在化していることを示唆している。定常状態時のスロート部における H α 線放射輝度は, セントラルミッドプレーン部の20倍以上に達している。以上のことから, ミラースロート部へのガスパフはミラープラズマのビルドアップにとって効果的であることが確認された。

3.2 DEGASによるガンマ10セントラル部の軸対称モデリング

3.2.1 低密度プラズマへの対応(分子の解離・励起過程の導入) [35]

前述したように, DEGAS コードとは, 任意の形状をしたプラズマをメッシュ状に刻んだセルで近似することにより, プラズマ中の中性粒子の密度・温度分布をモンテカルロ法に基づいて求めるコードである。DEGASには, 水素原子・分子にかかわる種々の過程が考慮されている [13] が, 水素分子の解離過程において, 以下に示す解離反応の際に励起にかかわる反応過程が考慮されていなかった (括弧内の数値は解離時に持つ水素原子のエネルギーを表す)。



ガンマ10のプラズマでは, 通常のトカマクプラズマ装置に比べ, 電子密度が1桁程度低く, プラズマ周辺部の中性水素分子密度が高いので, シミュレーションの過程に水素分子の解離・励起の効果を入れるように, ガンマ10に適用するに先だって ver.35 および, 後述する ver.63 の両コードに改良を施している。DEGAS コードに以上のような改良を加える際, 励起状態にある中性水素原子が次の原子分子過程を引き起こす前に基底状態に戻るといった仮定を与えている。主量子数 n が2ないし3の状態に励起した中性水素原子は, その遷移確率から考えて各々 2 ns ないし 18 ns 程度の時定数で基底状態に戻る。上記の解離励起過程によって生成される中性水素原子の平均エネルギーは 0.3 から 4.85 eV であるので, 励起した中性水素原子が基底状態に戻るまでに, プラズマ中を $1.6 \sim 40 \times 10^{-3}$ cm 進むと考え

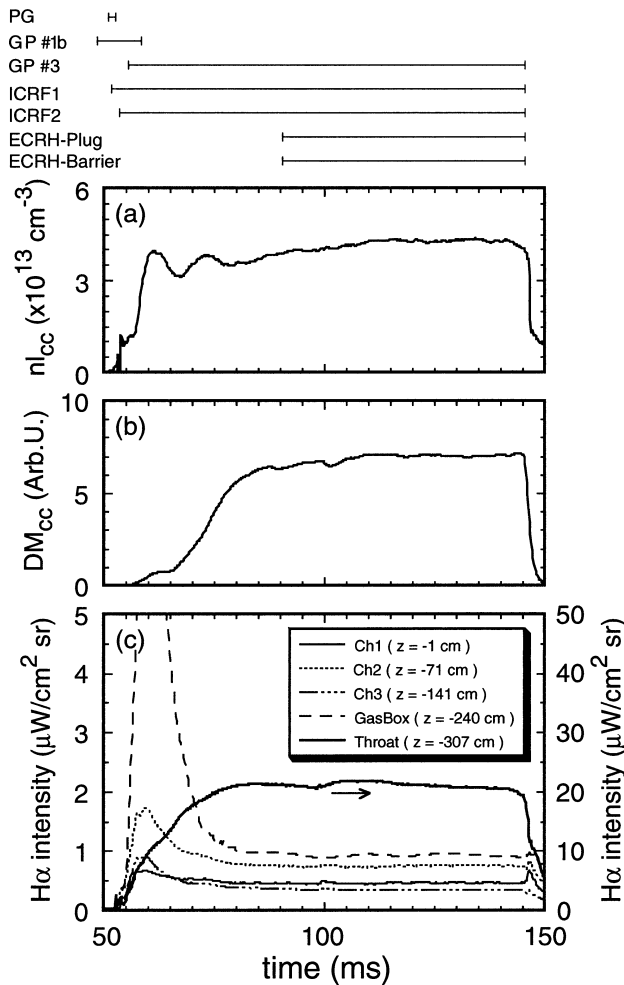


Fig. 2 Time behavior of plasma parameters obtained in typical hot-ion-mode plasma of GAMMA 10. (a) Line density of electron, (b) diamagnetism, (c) H α line intensity of various positions.

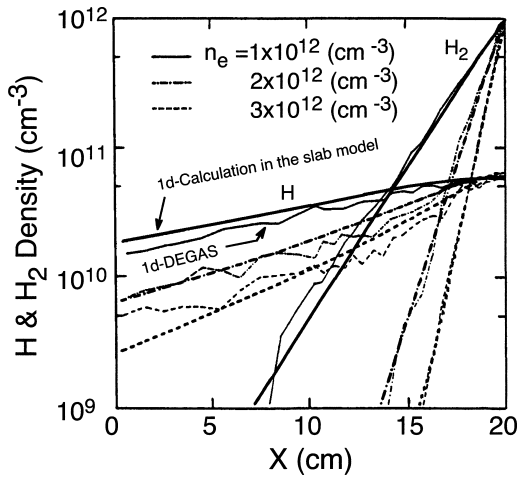


Fig. 3 Comparison of calculated results in neutral density between 1-dimensional rate equation code and 1-dimensional DEGAS simulation.

られる[36]. 通常のガンマ10のプラズマパラメータから考えて、プラズマ中の中性水素原子の平均自由行程は $1 \sim 4 \times 10^2$ cm 程度となる。以上の条件下では励起した中性水素原子が励起状態のまま、次の原子分子過程を引き起こすことなく、速やかに基底状態にもどるという仮定が十分に成立することがわかる。上記の仮定により、モンテカルロコード内で励起水素原子の粒子の追跡を行う必要がなくなり、コードの改良が容易になる。

引き続き、改良に伴う計算の妥当性を調べるために、DEGASによる計算とは別に、単純化したモデルにおいて中性粒子密度の数値計算を行い、正常に作動していることを確認した。Fig. 3はスラブ近似の1次元Rate Equation Codeを用いた数値計算結果と、この計算に対応させるために1次元化したDEGASの計算結果を比較したものである。スラブ状の一樣プラズマを仮定し、外部から水素分子を侵入させた場合のプラズマに入る深さ方向(X方向)の水素原子分子の密度分布を示している。ここでは3種類のプラズマ電子密度について計算を行っている。太線で表されているのがRate Equation Codeから求めた結果であり、折れ線様の細線がDEGASの計算結果である。両者は概ね良く一致しており、水素分子の解離励起過程を導入したアルゴリズムが正常であることが確認された。

Fig. 4は、ガンマ10に適用した際のメッシュモデルを示す。本シミュレーションでは、ガンマ10のセントラル部を対象としているので、プラズマおよび真空容器は円筒形を仮定しており、軸対称のメッシュモデルを作成している。また、軸方向には一樣性を仮定して、両端部は鏡面としている。一方、ガンマ10の真空容器には、カーボニゼーション等の表面コーティングは施されていないので、真空容器の側面は鉄であるとして、粒子源を側面全体に設定し、Eckstein, Verbeekらの反射係数に基づいた水素原子の反射効果を考慮している[22]。

3.2.2 シミュレーション結果と実測値との比較

プラズマ電子密度に対する特性を調べるために行ったシミュレーション結果をFig. 5に示す。Fig. 5(a)は比較的low

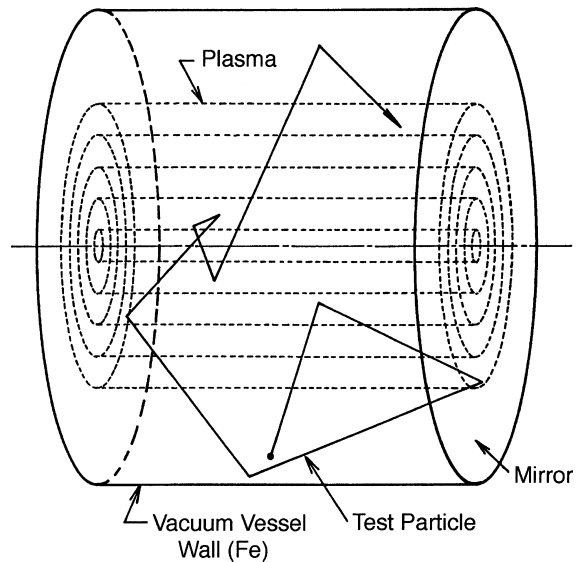


Fig. 4 Mesh model of the central-cell used in the axisymmetric DEGAS simulation.

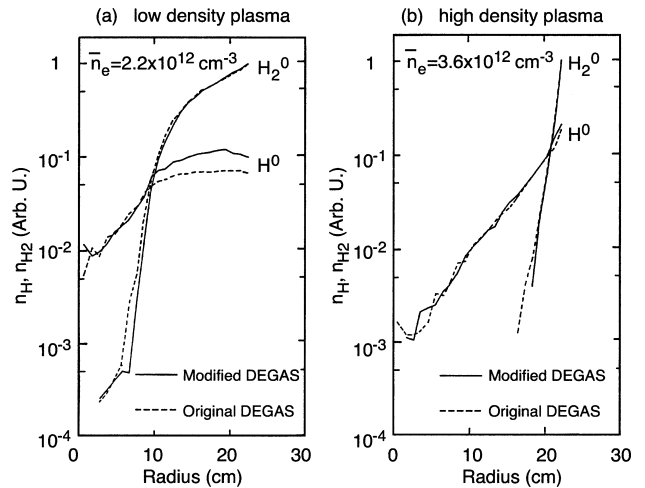


Fig. 5 Results of the axisymmetric DEGAS simulation. (a) Low density case, (b) high density case.

密度の場合(線平均電子密度 $\sim 2.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)の水素原子と分子密度の半径方向分布を表わしており、Fig. 5(b)は高密度の場合(同 $3.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)の計算結果を示している。図中の破線は水素の解離励起過程を考慮していない従来のDEGAS計算結果で、実線は改良を施したものに对应している。両者は、プラズマ境界部での水素分子密度で規格化している。図から低密度の計算結果での水素原子密度に差異が現れていることがわかる。

Fig. 6は、プラズマ中心部における水素原子密度 $n_H(0)$ とプラズマ境界での値 $n_H(a)$ の比を、プラズマ電子密度に対してプロットしたものである。図中の●印は従来のDEGASシミュレーション結果であり、□印は改良後のものである。両者は共に電子密度の上昇に伴い、 $n_H(0)/n_H(a)$ の値は減少しており、密度上昇によって外部からの中性粒子の侵入が抑制されていることが示されている。しかしながら、低密度領域では両者に差が生じており、 10^{13} cm^{-3}

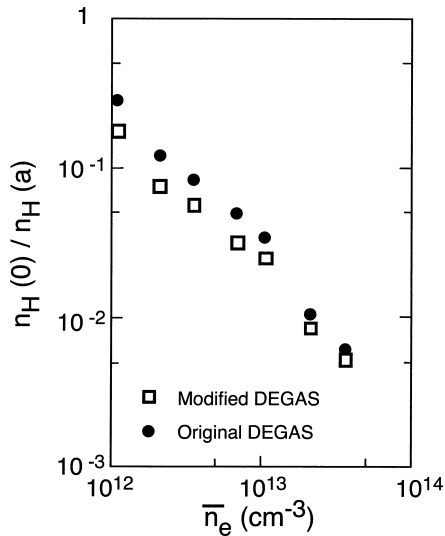


Fig. 6 Neutral density ratio $n_H(0)/n_H(a)$ as a function of the electron density.

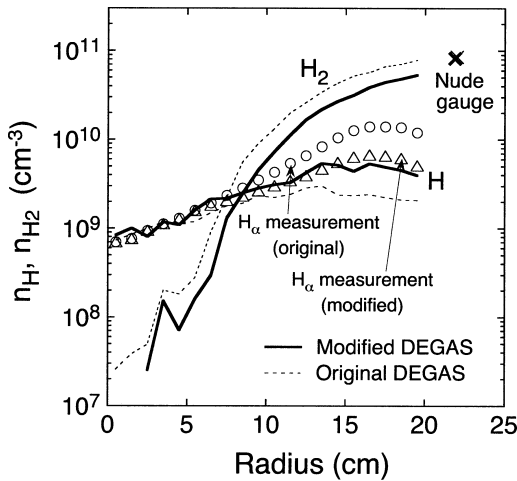


Fig. 7 Comparison between the simulation results and the experimental result.

以下では差が顕著になる傾向が見られる。

典型的な高イオンモードプラズマ ($n_e(0) \sim 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $T_i(0) \sim 5 \text{ keV}$) において、 $H\alpha$ 線の空間分布計測から求められた中性粒子密度とシミュレーション結果とを Fig.7 で比較している。計算に用いたプラズマパラメータ (n_e , T_e , T_i) は実際に測定された値を用いている。シミュレーション結果は、従来の DEGAS と改良されたものの両方を示している。実測値を表す図中の○印は、 $H\alpha$ 線の発光がすべて中性原子のみによるとした場合の中性原子密度のプロファイルを表し、△印は水素分子の解離励起時の発光の寄与を差し引いて求めた水素原子密度を示している。従来の DEGAS (破線) では、周辺部で $H\alpha$ 線計測から求められる水素原子密度と差が認められるが、改良したシミュレーション結果 (実線) は、水素分子の解離励起を考慮した実測値と極めてよく一致している。また、図中の×印は、セントラル部真空容器に設置されている高速電離真空計で測定された圧力を密度に換算した値を示しており、周辺部

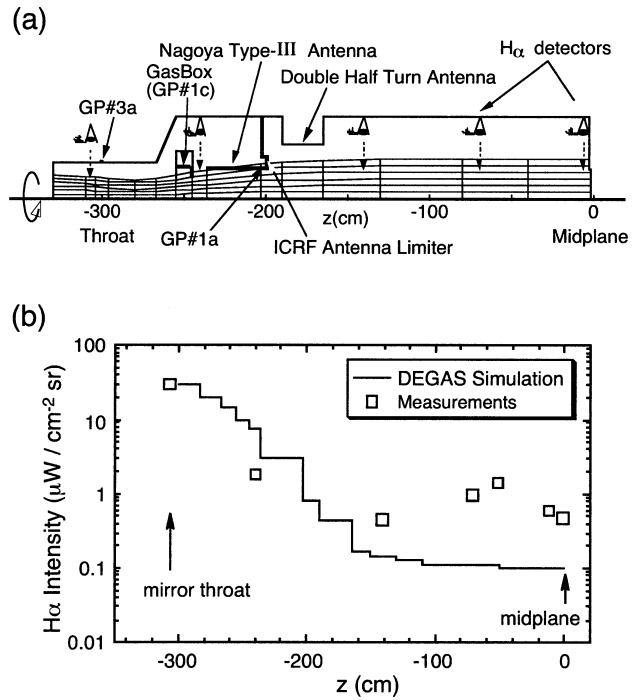


Fig. 8 (a) 2-dimensional mesh model of the DEGAS simulation in the central-cell, (b) Comparison between the calculated results of $H\alpha$ emission with DEGAS simulation and measured results.

の水素分子密度の値に対しても、大きな矛盾のないことがわかる。これらの結果は、低プラズマ密度領域では水素分子の影響が特にプラズマ周辺領域で重要になることを示している。

3.2.3 軸対称円筒モデルの導入とリサイクリングの効果

実験的に観測されたガスパフ近傍に中性粒子が局在化する結果を検討するために、DEGAS の磁力線方向への拡張を行った。磁力線方向に沿って計算できるように、新しく作成したメッシュモデルを Fig.8(a) に示す。計算で使用したメッシュは、セントラル部真空容器の片側が、真空容器およびアンテナ等の内容物を含め、軸対称を仮定して作成されている。この計算では、ガスはミラースロット部から注入している。Fig.8(b) には、 $H\alpha$ 線放射強度に換算したシミュレーション結果と実測値との比較を示す。DEGAS の結果は、スロット部の実測値で規格化している。シミュレーション結果から、 $H\alpha$ 放射強度はガスを導入しているスロット部に局在化しており、ミッドプレーン近傍で殆ど一定となっている。これらはスロット部からミッドプレーン方向へは、2本のアンテナやガスボックス等中性粒子の輸送を妨げるものが多いため、このような減衰が生じていると考えられ、定性的に実測結果と一致している。しかしながら、ミッドプレーン付近では計算値が実測値に比べて1桁程度低くなっており、明らかに不一致が認められる。

上記の不一致の原因の一つとして、セントラル部中央付近で起こっている水素リサイクリングが考えられる。ガンマ10セントラル部のミッドプレーンには、イオン加熱のためのイオンサイクロトロン共鳴領域が存在しており、通常の高イオンモードのプラズマではイオン温度が数keVまで

加熱されている。この高温イオンが荷電交換によって生じる高エネルギー中性粒子の引き起こすリサイクリングの影響が無視できない。今までのガンマ10におけるリサイクリングの研究では、セントラル部のリサイクリング係数（壁に入射した荷電交換中性粒子数に対する壁から放出される粒子数の割合）が1以上であることがわかっている[35, 37, 38]。一方、DEGASコードでは、通常リサイクリング係数を1とした計算が行われる。そこで、今回リサイクリング係数を1以外としたシミュレーションを試みた。DEGASに1以上のリサイクリングの過程を導入するに当たって、取りあえず粒子追跡のアルゴリズム中で、壁に入射した粒子の反射過程を無視して水素分子の脱離過程のみを抽出し、その脱離粒子のウェイトを増やすことにより、擬似的に1以上のリサイクリング係数を与えたシミュレーションを行った[39]。

Fig. 9は、脱離粒子に与えたりサイクリング係数 α を1.0から2.5まで変化させた場合の軸方向に沿った各部の水素原子密度の半径方向プロファイルを示す。ガスパフ近傍であるスロート部 ($z = -307$ cm, Fig. 9(a)) では α の変化に対して密度分布に大きな違いが認められない。しかし、GasBox付近 ($z = -240$ cm, Fig. 9(b)) では、 α の値が増加するに従って、径方向分布の形状は変化せずに、その絶対値が上昇していることがわかる。ミッドプレーン近傍では、さらにその傾向が強くなっている。この結果から、擬似的にリサイクリング量を増加させた場合、径方向分布に与える影響に比べて、軸方向に大きく影響を与えることが示唆される。

Fig. 10に、計算結果に基づいてH α 線の放射強度に換算した軸方向分布および参考として実測値も併せてプロットしている。この計算では、壁における入射粒子の反射の過程はEckstein, Verbeekの反射係数[22]を用い、反射を起こさずに脱離した粒子のみにリサイクリング係数を与えて計算を行っている。 α の値が大きくなるにつれて、H α 線の放射強度の軸方向に沿った減衰の程度が抑制され、結果としてミッドプレーン付近の放射強度が高くなっている。また、図中の太い実線は、リサイクリングの原因と考えられる高イオンの存在領域を考慮して、 α に軸方向分布を与えて計算したもので、実測値を良く再現できていることがわかる。

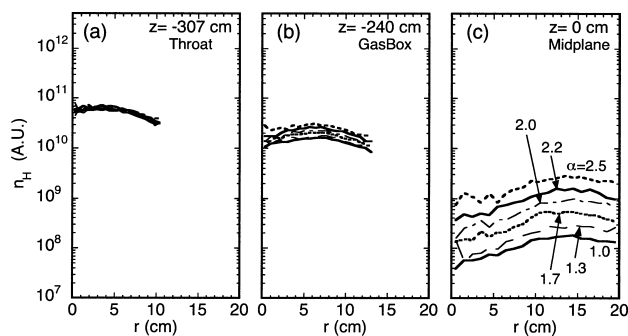


Fig. 9 Radial profile of atomic hydrogen density calculated by the DEGAS code in the cases with enhanced reflection factor.

以上の結果から、軸方向の中性粒子輸送には、リサイクリングによる壁からの粒子供給が大きな影響を及ぼしていることがわかる。実際プラズマでは、軸方向にイオン温度が分布を持っているため、リサイクリングについてもミッドプレーンとスロート部で、その程度に差があると考えられる。したがって、今後はリサイクリング係数の軸方向分布を考慮に入れたシミュレーションが必要である。

3.3 粒子源の検討

上で述べたように、セントラル部ミッドプレーンのH α 線強度を実測値と合わせるためには、ミッドプレーン周辺に強いリサイクリングに起因する粒子源を考慮する必要があった。セントラル部ミッドプレーンには内径36 cmのリミタが設置されており、プラズマの最外殻は、この口径で決定されている。一方、高イオンモードプラズマの径方向分布は、必ずしもこのリミタに対応してはならず、通常もっとピーキングした分布を呈している。したがってリミタは、トカマクのリミタやダイバータ板のように荷電粒子が衝突し中性ガスを発生するような粒子源とは考えにくい。ガンマ10では、セントラル部におけるプラズマと壁との相互作用は、荷電交換中性粒子が真空容器内壁を衝撃し、その結果脱離ガスが発生してリサイクリングの源となると考えられている。ここでは、通常粒子源とは考えられていないリミタも含めて、リサイクリングに起因する粒子源であると仮定した場合の計算を試みた[40]。

Fig. 11に、セントラル部ミッドプレーン付近の真空容器壁および、リミタ側面上に粒子源を設定した場合のシミュレーション結果を実測値とともに示す。ここでは、通常のミラースロート部ガスパフに対応する粒子源に加えて、ミッドプレーン近傍 ($z \geq -100$ cm) とリミタ側面の2ヶ所に粒子源を設定し、各々の粒子源のウェイトをいくつか変更することによって、実測値を再現するような組み合わせを探した。図からわかるようにスロート部の粒子源に対して25%のリミタ上の粒子源を与えることで、実測値を概ね再現できることがわかった。

このことから、真空容器内壁に一様なりサイクリングによる粒子源を与えても、リミタ部周辺に局在化した粒子源

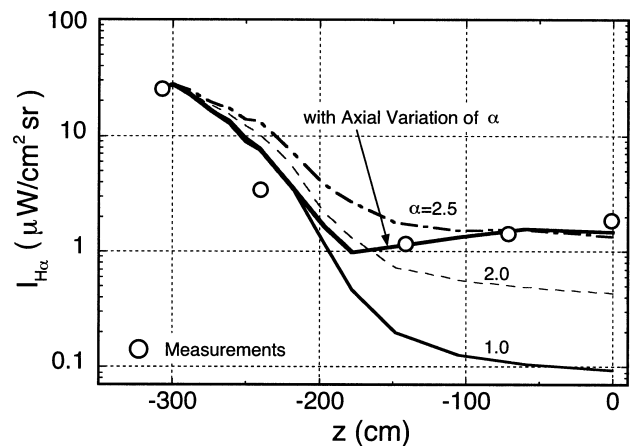


Fig. 10 Axial profile of H α intensity calculated with DEGAS compared with the measured results.

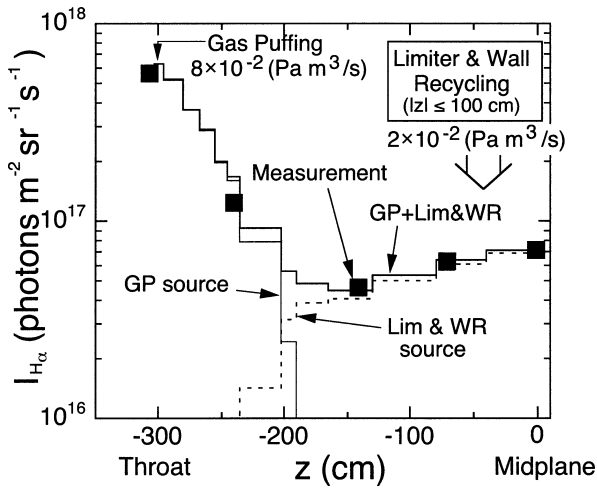


Fig. 11 Simulation results with the particle source on the limiter compared with the measurements.

を与えても実験を説明できるため、現状ではどちらがより現実的な粒子源を反映しているかを決定できない。リミタからの粒子源の比率をリミタへの粒子束強度測定など、独立した計測結果から導き出すことができれば、この疑問を解明するための重要な判断材料となると考えられる。

4. 非軸対称プラズマへの適用

4.1 DEGAS ver. 63による3次元モンテカルロ計算(ガンマ10非軸対称アンカー部への適用)

前節では、DEGAS ver.35を用いた1次元無限円柱と軸対称円筒モデルにおける中性粒子輸送シミュレーションの結果を紹介した。本節では、UNIX版DEGAS ver.63による3次元計算の結果[41, 42]について述べる。

Fig. 12に、ガンマ10非軸対称極小磁場アンカー部におけるメッシュモデルを示す。図に示すように、本モデルでは上下対称性を導入しており、メッシュセルはプラズマの半径方向に11個、周方向には8個に分割されている。また磁力線に沿ったz軸方向には41個の領域に分割している。今回行ったシミュレーションでは、NBIは用いていないため、粒子源としてミラースロート部のガスパフに加えて、アンカー部外側変換部に設置されているプラズマ中に挿入されている可動リミタ(MLO)を模擬した粒子源を与えている。

ver.63を用いるシミュレーションでもver.35と同じプラズマの情報(n_e , T_e , T_i)が必要とされるが、実験で得られているアンカー部でのプラズマパラメータは非常に限られており、計算に用いる3次元化されたデータを得るためには、幾つかの仮定を導入する必要がある。電子密度の空間分布については、以下に示すような典型的な2種類のモデルを採用した。

シミュレーションに用いられたプラズマ電子密度の(y-z平面)空間分布をFig. 13に示す。一つは、Fig. 13(a)のように、セントラル部からアンカー部へ向かって流出するプラズマを仮定して、粒子束が保存するような条件で磁力線方向に変化する磁場強度を考慮した密度をモデリングした。もう一方は、磁場変換部の小さいミラー磁場に捕捉

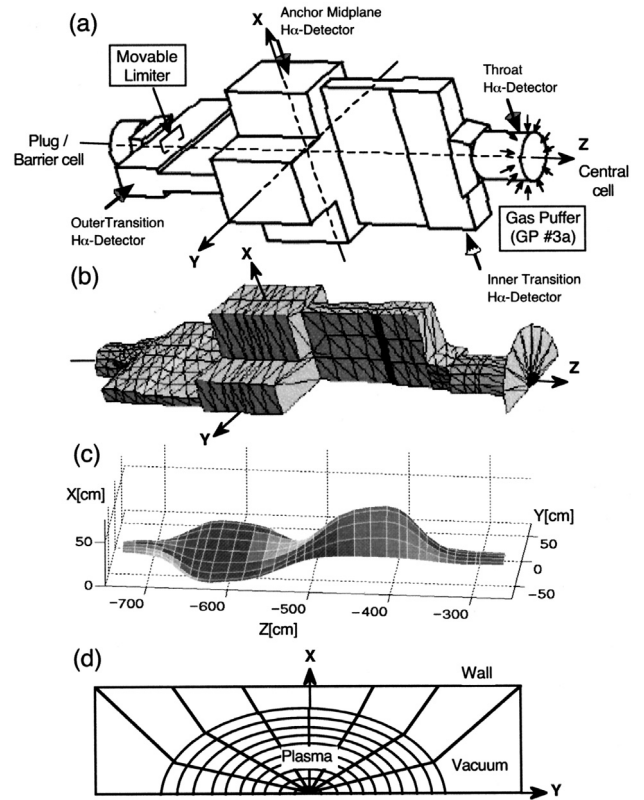


Fig. 12 Mesh model of 3-d DEGAS simulation in the GAMMA 10 anchor-cell. (a) Vacuum vessel wall, (b) the wall surface, (c) the plasma surface, (d) cross-section view of the mesh.

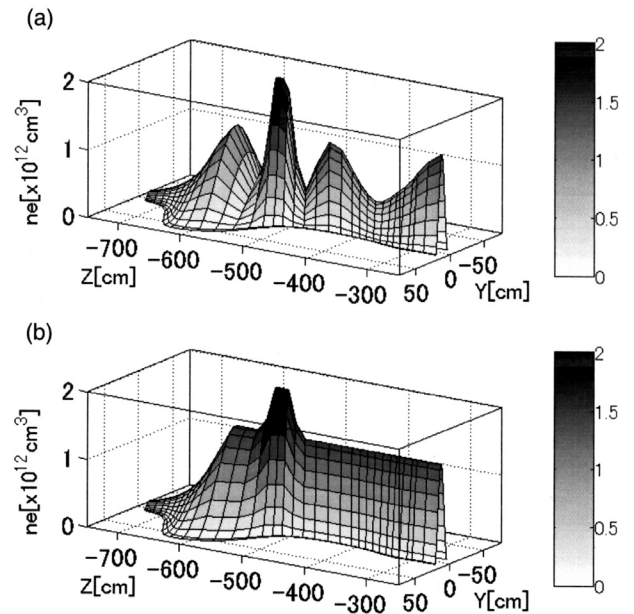


Fig. 13 Spatial profile of electron density used in 3-d DEGAS simulation. (a) Flux conservation model, (b) uniform density model.

された粒子の効果を考慮して、軸上密度がアンカー中央部付近まで一定の分布をFig. 13(b)のように仮定した。いずれも、アンカーミッドプレーン部のICRF加熱による粒子捕捉の効果を考慮し、セントラル部密度分布に基づいた、ミラースロート、アンカーミッドプレーンのプラズマ中心

コードの線密度を考慮して、磁力管の形状に対応させて密度分布を決定している。

4.2 シミュレーション結果

Fig. 14は、ミラースロート部のガスパフおよびアンカー部外側変換部に設置された可動リミタを粒子源として両方から粒子を放出したシミュレーション結果を示す。計算された結果は、ミラースロート部とアンカー外側変換部において測定されたH α 線計測結果に一致するように規格化されている。Fig. 14(a)に示すように、水素分子密度の径方向分布は周辺部に対して数十分の1から2桁減衰し、軸方向へはアンカーミッドプレーンへ向けてさらに大きく減衰する。中性粒子の浸透はプラズマの厚みが薄くなった周辺領域で起こっている。このことは、ガスパフから注入されたガスはアンカー内側変換部を経て大きく減衰し、一部のみにアンカーミッドプレーンへ到達していることを示している。分子密度とは対照的に、Fig. 14(b)に示す水素原子密度はプラズマのコア領域に集中している傾向を持つ。また、水素原子はプラズマ断面が扁平になった内側・外側変換部においてほぼ均質な密度分布を呈している。この機構は詳細には明らかになっていないが、フランクコンドン中性粒子のプラズマ厚みに比して長い平均自由行程がこのような中性粒子密度分布の形成に重要な役割を果たしていると考えられる。

Fig. 15は、シミュレーション結果から導出されたH α 線強度と実験から得られた結果を比較している。図から、両者共に実測値を良く反映しているが、アンカーミッドプレーンでは、Fig. 13(a)に示した密度モデルが、実測値をより正確に反映しているところがある。このように、ミラースロート部ガスパフと外側変換部可動リミタからの粒子源を仮定することによって、H α 線強度の測定値の軸方向分布を上手く再現することができた。以上のことから、水素リサイクリングはアンカー部非軸対称部において中性粒子の挙動に重要な役割を果たしていることが明らかになっ

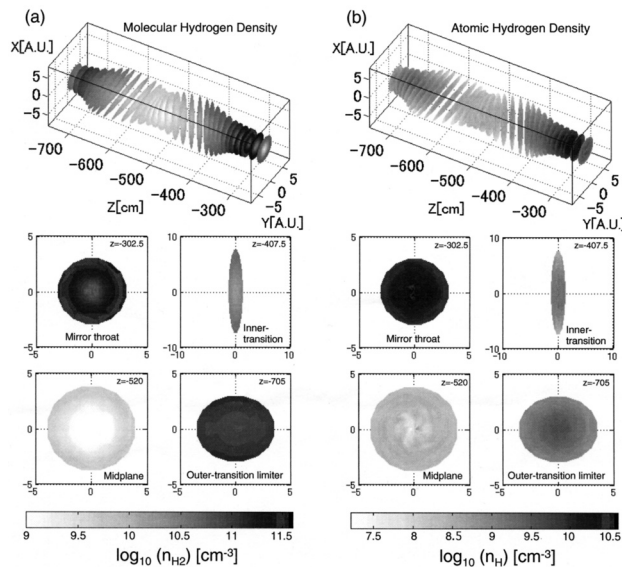


Fig. 14 Simulation results obtained from 3-d simulation in the anchor-cell.

た。

4.3 3次元モンテカルロ計算上の留意点

以上、3次元中性粒子輸送シミュレーションの計算結果を実験との比較と粒子源の場所とその強度の観点で述べてきたが、これ以外に3次元シミュレーションを行う上で留意すべき技法をいくつかあげておきたい。

真空容器内には、第1壁の他に様々な内容物が存在している。たとえばトロイダル装置であれば、RF加熱用のアンテナやポロイダルリミタ、あるいはポンプリミタ等トロイダル方向の一様性を乱すいくつかの機器が設置されている。直線型のタンデムミラー装置においても、ガンマ10セントラル部にはICRF加熱用アンテナや前述のリミタ、ガスを局在化させるためのガスボックスなどが設置されている。これらの大部分はプラズマに近接して設置されている場合が多いことから、中性粒子輸送に影響を及ぼすことが懸念される。したがってこれらをできる限り現実に忠実にシミュレーション空間内に再現するためには、第1壁以外に第2、第3の壁を定義する必要がある。DEGAS ver.63では、適用開始以来、この第2壁の定義に成功していなかった。そのために、ガンマ10セントラル部におけるver.63コードによるモデリングができていなかったが、最近コードに改良を加えることにより第1壁内に複数の独立した壁を定義、正常にシミュレーションコードを稼働させることに成功した[42]。Fig. 16にガンマ10セントラル部の真空容器と第2壁として定義した機器のメッシュモデルを示す。このモデルを用いて、テスト粒子を第1壁内部に発射し、第2壁表面での粒子の反射を確認した。

また、この他の技法として、トロイダル装置においてトロイダル方向に周期性のある構造を持った装置に適用可能な特殊な壁を定義することが可能である。たとえばヘリカル装置などでは、真空容器やプラズマ断面形状が、ヘリカルコイルのピッチに対応した周期性をもっていることがわかっている。このような体系では、ヘリカルコイルの1ピッチ分のシミュレーション空間を作製し、その中でテスト粒子を発射しその軌跡を追跡することができればトーラス1周分を作製せずにシミュレーションが可能となる。こ

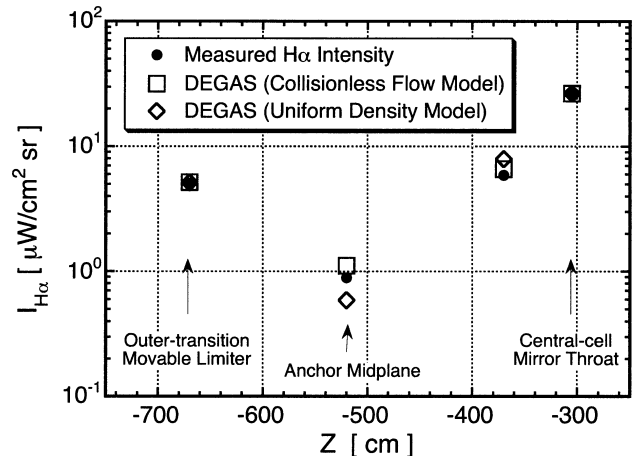


Fig. 15 Comparison between the measured H α intensity and simulated one in the anchor-cell.

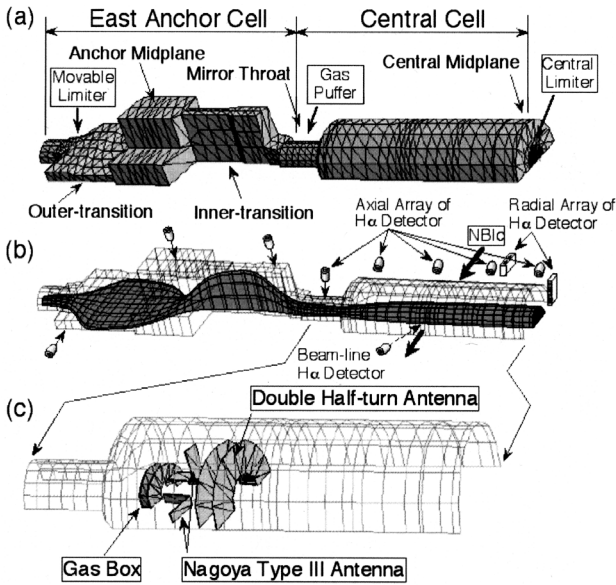


Fig. 16 A new mesh model of 3-d DEGAS simulation in the central-cell in which the 2nd wall is defined.

の時、一方の壁から発射されたテスト粒子が、1ピッチ分トロイダル方向に進んで、もう一方の壁に衝突した際、単純に反射させるのではなく、衝突時におけるテスト粒子の速度ベクトルを維持したまま元のトロイダル位置に戻して飛行を続けさせる必要がある。Fig. 17に、上記手法を取り入れたヘリカル装置LHDの3次元シミュレーションのメッシュモデル[43]を示す。また、ヘリオトロンJ装置ではトロイダル一周のモデリングに成功しており、作成されたメッシュモデルをFig. 18に示す[44]。この他にも、3次元化されることによって、粒子源をさらに複雑に現実的な形状に定義することが可能になり、ガスパフイメージング(GPI)実験[45,46]時のシミュレーション解析[47]やNBI時のビームライン近傍の中性粒子挙動などの詳細解析が可能となる。

5. まとめと今後の課題

モンテカルロコードを用いた中性粒子輸送解析は、今日コンピュータの高性能化に伴って、より精密に現実的・定量的解析が可能な段階に来ている。特に3次元モンテカルロ計算は、ここ1~2年で急速な進歩を遂げ、国内においても、前節で述べたような完全3次元化された体系での中性粒子輸送シミュレーションが開始されている[41-43]。しかしながら、シミュレーション空間がより現実的で詳細になればなるほど、制作するメッシュの整合性・一貫性の検証が困難になってくる。3次元のメッシュの制作には、メッシュ作製ソフトウェアが必須となり、その結果出来上がったメッシュがシミュレーション空間を隙間なく埋め尽くし、プラズマセルと矛盾なく整合しているかを調べるためには多大な時間と労力を必要とする。

さらに、得られた結果をどのように視覚化することも重要な検討課題である。3次元空間内に分布した情報は、当然のことながらそれ自体で4次元のデータ空間を占める。これを2次元の紙面上に適切に情報を展開・表現するために

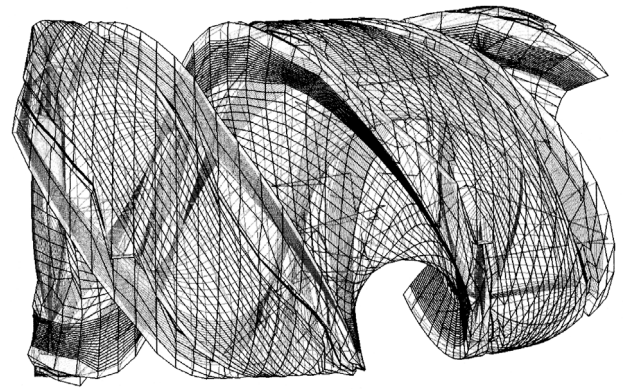


Fig. 17 Mesh model of LHD for 3-d DEGAS simulation [41]. Thin lines in the vacuum vessel wall represent the tracks of test particles.

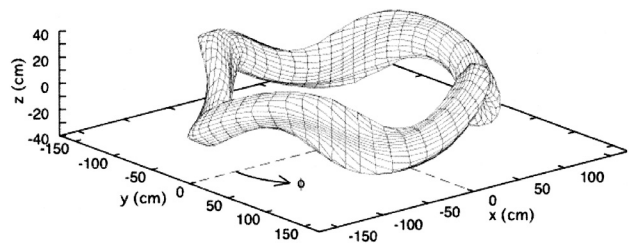


Fig. 18 Mesh model of the Heliotron-J device for 3-d DEGAS simulation [42].

は、様々な工夫が必要であり、それらのニーズに適切に対応する視覚化ソフトウェアをどのように選択するかは、効率的なシミュレーション研究を進める上で重要である。現状のソフトウェアでは、限られた予算、時間内にそれらを習得するには、敷居の高いものも多く、一度使い始めるとなかなかそのソフトを手放せなくなることも多いので、些細なことではあるが、初期の選択が非常に重要となる。

一方、このような詳細な3次元シミュレーションでは、コンピュータの高性能化が進んでいるとはいえ、まだ多大な計算時間を費やしているのが現状である。特にダイバータコードと結合させたモデリング計算など100時間を超える計算時間が要求される。また、それに伴って計算のデータベースである原子分子過程および、中性粒子と壁との相互作用データの完備が急務の課題となっている。特に、ダイバータ領域における、非接触プラズマ状態を含めたダイバータプラズマの理解を進める上で、この領域における特有の素過程のデータベースの充実が必要であろう。

以上、簡単なまとめといくつかの課題を述べてきたが、今後コンピュータの性能の向上とシミュレーションの基礎となる素過程データベース、それらを支えるソフトウェア群の充実により、この分野の進展とその重要性が増すものと期待される。

謝辞

DEGASを用いた中性粒子輸送の研究の開始に当たりコードの利用許可と導入について尽力いただいた元プリンストン物理学研究所のD.E. Post博士および、同研究所のD.

P. Stotler 博士に感謝致します。また、当時 DEGAS ver.35 が CRAY コンピュータ用にコーディングされていたものを、国産コンピュータ (FACOM) への移植に尽力された当時京都大学ヘリオトロン核融合研究センターの大引得弘教授および、ガンマ10へ適用する際にもご助力いただいた現大阪府立大学の松浦寛人助手、そして筑波大の院生時代からガンマ10における初期バージョンの軸対称化モデルの計算を手がけ、核融合科学研究所に移られてからも3次元モンテカルロ計算において多大なるご協力をいただいている庄司 主助手に深く感謝致します。そして同じく院生時代に DEGAS を用いてガンマ10における中性粒子輸送研究に携わった京都大学の小林進二助手をはじめ、卒業生の深澤崇浩氏、現大学院生の東園雄太君に多大な協力をいただきました。ここに感謝いたします。最後に本原稿をまとめるにあたり数多くの助言をいただきました筑波大学プラズマ研究センター立松芳典講師に大変感謝致します。

参考文献

- [1] S.A. Cohen, *Physics of Plasma-Wall Interactions in Controlled Fusion*, Eds. D.E. Post and R. Behrisch (Plenum Press, New York 1986) p.773.
- [2] D.H. McNeal, *J. Nucl. Mater.* **162-164**, 476 (1989).
- [3] L.C. Johnson and E. Hinnov, *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.* **13**, 333 (1973).
- [4] プラズマ・核融合学会編：プラズマ診断の基礎 (名古屋大学出版会, 1990).
- [5] M. Goto, I. Murakami and T. Fujimoto, *J. Plasma Fusion Res.* **79-80** (2003-2004) *in Japanese*.
- [6] E.I. Kuznetsov and N.D. Vinogradova, *Sov. Phys. JETP Lett.* **8**, 34 (1968).
- [7] N.D. Vinogradova and K.A. Razumova, *JETP Lett.* **19**, 156 (1974).
- [8] E.S. Marmor *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **76&77**, 59 (1978).
- [9] G.M. McCracken *et al.*, *Nucl. Fusion* **18**, 35 (1978).
- [10] O.V. Konstantinov and V.I. Perel, *Sov. J. Plasma Phys.* **5**, 1403 (1961).
- [11] C. Mercier and F. Werkoff, *Proc. 6th Int. Conf. Berchtesgaden 1976 IAEA CN-35/B8-1, Vol.2*, 29 (1977).
- [12] D.B. Heifetz *et al.*, *J. Comp. Phys.* **46**, 309 (1982).
- [13] D.B. Heifetz, *Physics of Plasma-Wall Interactions in Controlled Fusion*, Eds. D.E. Post and R. Behrisch (Plenum Press, New York 1986) p.695.
- [14] A. Hatakeyama, *J. Plasma Fusion Res.* **77**, 420 (2001) *in Japanese*.
- [15] A. Hatakeyama, *J. Plasma Fusion Res.* **80**, 205 (2004) *in Japanese*.
- [16] H. Takenaga, *J. Plasma Fusion Res.* **79**, 790 (2003) *in Japanese*.
- [17] M.H. Hughes and D.E. Post, *J. Comp. Phys.* **28**, 43 (1987).
- [18] E. Cupini *et al.*, NET Report, EUR XII - 324/9 (1983).
- [19] D. Reiter *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **128&129**, 458 (1984).
- [20] A.S. Kukushkin, V.I. Pistunovich and S.V. Utvinski, IAEA-CN-35/B4, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA, Vienna, Austria (1977).
- [21] D.P. Stotler *et al.*, *Phys. Plasmas* **3**, 4084 (1996).
- [22] D.P. Stotler *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* **40**, 221 (2000).
- [23] W. Eckstein and H. Verbeek, Max Planck Institute für Plasmaphysik, IPP-9/32 (1979).
- [24] S.L. Allen, D.L. Correll, D.N. Hill *et al.*, *Nucl. Fusion* **27**, 2139 (1987).
- [25] R.A. Breun, D.A. Brouchous, J. R. Conrad *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.* **A5**, 265 (1987).
- [26] R.S. Post, K. Brau *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **145-147**, 81 (1987).
- [27] Y. Nakashima, N. Yamaguchi, K. Yatsu *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **220-222**, 580 (1995).
- [28] N. Yamaguchi, S. Adachi, T. Cho *et al.*, *Proc. 15th Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Heating* (Dubrovnik, 1988) **Vol.12B** part II p.593.
- [29] Y. Nakashima *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **241-243**, 1011 (1997).
- [30] M. Inutake *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 939 (1985).
- [31] T. Tamano *et al.*, *Proc. 15th Int. Conf. on Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Research*, Seville, 1994 (IAEA, Vienna, 1995) **Vol. 2**, p.399.
- [32] K. Yatsu *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **74**, 844 (1998).
- [33] K. Yatsu *et al.*, *Nucl. Fusion* **43** No.5, 358 (2003).
- [34] T. Tamano, *Trans. Fusion Technol.* **27**, 111 (1995).
- [35] Y. Nakashima, K. Yatsu, K. Tsuchiya *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **196-198**, 493 (1992).
- [36] R.K. Janev, W.D. Langer, K. Evans, Jr. and D.E. Post, Jr., *Elementary Processes in Hydrogen-Helium Plasmas* (Springer, Berlin, 1987).
- [37] K. Yatsu, Y. Nakashima *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **176&177**, 404 (1990).
- [38] K. Tsuchiya, Y. Nakashima *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, 3689 (1995).
- [39] S. Kobayashi, Y. Nakashima *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **266-269**, 566 (1999).
- [40] S. Kobayashi, Y. Nakashima *et al.*, *J. Plasma Fusion Res. SERIES 3*, 303 (2000).
- [41] Y. Nakashima *et al.*, *to be published in J. Plasma Fusion Res. SERIES 6* (2004).
- [42] Y. Nakashima *et al.*, *submitted to J. Nucl. Mater.*
- [43] M. Shoji *et al.*, *to be published in J. Plasma Fusion Res. SERIES 6* (2004).
- [44] S. Kobayashi *et al.*, *Proc. 31th EPS Conf. Plasma Phys.* (London, 2004) P5-097.
- [45] S.J. Zweben *et al.*, *Phys. Plasmas* **9**, 1981 (2002).
- [46] J.L. Terry *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **290-293**, 757 (2001).
- [47] D.P. Stotler *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **313-316**, 1066 (2003).



なかしま ようすけ
中嶋 洋輔

和歌山県出身、京都大学大学院工学研究科博士課程を終了後、筑波大学プラズマ研究センターに勤務。1984年工学博士、2000年助教授、現在に至る。主な研究分野は、タンデムミラーにおける中性粒子ビームを用

いたプラズマ加熱・電位形成の物理、中性粒子計測と輸送解析、プラズマ・壁相互作用と多岐にわたる。趣味も音楽（楽器演奏）からスキー・テニスと多岐にわたる。最近ほ息子とサッカーに夢中。