

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760702

研究課題名(和文) LHD周辺領域のグローバルシミュレーションによる不純物輸送機構の解明

研究課題名(英文) Global simulation analysis of impurity transport in LHD peripheral regions

## 研究代表者

河村 学思 (Kawamura, Gakushi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：70509520

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：核融合科学研究所にある大型ヘリカル装置(LHD)プラズマにおける、周辺領域の不純物輸送の解析実現のため、EMC3-EIRENEコードを用いたモデル開発を行った。ダイバータ部の形状変更(開から閉)によって、リサイクリング(水素イオンと水素ガスの循環)が増加すること、それとともにダイバータ部でプラズマ密度と炭素不純物密度がともに増加することがわかった。ただし、高密度プラズマ条件では不純物スクリーニング(プラズマの流れによる吐き出し)が優位になり、開/閉で不純物量の違いが小さいことがわかった。

研究成果の概要(英文)：A transport model with EMC3-EIRENE code was developed to realize impurity transport analysis on the peripheral regions of Large Helical Device of NIFS. Simulation analysis was carried out and showed the following results. Modification of the divertor configurations, from the open to the closed ones, increases hydrogen recycling between neutral molecules and ions and hence, increases plasma density and impurity density in the divertor regions. Impurity screening due to plasma flow, however, is dominant in the case of high density plasma, and the difference of the amount of impurity ions in the plasma between the open and the closed divertor configurations is relatively small.

研究分野：核融合プラズマシミュレーション

キーワード：核融合プラズマ 周辺プラズマ 輸送 リサイクリング 不純物 LHD

## 1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマの閉じ込め研究の進展につれて、核燃焼を伴う核融合炉の設計を見通した研究が活発化している。その中でも、高温高密度のコア(炉心)プラズマを支え、装置壁との緩衝領域としての役割を持つ周辺プラズマ(図1参照)を理解し、その知見を最適な運転へとつなげることが重要視されてきている。周辺プラズマは多種のイオン、多種の輸送機構、多種の時間空間スケールなど、複数の物理要素が相互に影響しあう系であるため、各要素コードの結合が必要不可欠であり、装置形状やプラズマ配位への依存が大きいために装置形式ごとの専門性が求められる。核融合科学研究所のLHDにおいては、これまでの周辺プラズマのシミュレーション研究は個別のプラズマ領域に対しては行われているものの、それらを広範囲に結合するには至っていない。

このような状況に対応するため、LHD周辺プラズマの統合的なコード開発が必要とされている。将来的には、コアプラズマの統合コードに対し、周辺プラズマの情報を境界条件として提供し、また逆に情報を受け取ることのできる周辺コードの開発が強く望まれている。また、これは実験結果の物理的理解や予測を与える道具としても極めて有用である。

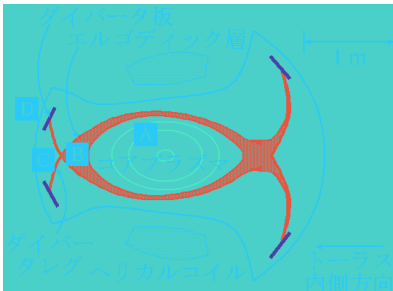


図1: LHDのポロイダル断面。コア(A)、周辺領域(BとC)、壁(D)。

## 2. 研究の目的

本研究は、コアと連携可能なLHD周辺プラズマモデルの構築を見据え、そのために必要不可欠なグローバルな周辺プラズマシミュレーションコードの研究開発を中心課題に据えている。ここでいうモデルとは、基礎となる物理的過程に基づき、装置やプラズマの形状、そして加熱等の外部入力パラメータに対してプラズマ分布および境界条件を相互矛盾無く与えるものを指す。核融合反応を担う高温高密度のコアプラズマはそれを取り巻く周辺プラズマと密接に結合しており、その相互作用をシミュレーション研究を通して理解し、モデル化へと進めていくことが周辺プラズマに課せられた重要な研究課題の一つである。

周辺領域のプラズマ・不純物・中性ガス等の輸送をとく計算コードとして、

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (ドイツ・グライフスヴァルト)のDr. Fengによって開発されているEMC3-EIRENEコード[Y. Feng et al., Contrib. Plasma Phys. 44 (2004) 57]がある。このコードはLHDへすでに導入されて研究に使用されているが、図1中のBに相当する領域のみを解いており、壁との間に存在するダイバータレグ領域Cが含まれていなかった。このために、水素のリサイクリング(中性ガスとプラズマとの間の粒子循環)および不純物ソースを正しく計算できないという制限があった。そこで、本研究の中心的開発課題として、計算に用いる空間グリッド(図1中のBとCをあわせた領域)の作成が第一の目標である。そして、コア周辺領域にダイバータを含めたプラズマの輸送シミュレーションを実現させ、輸送解析を行うことが第二の目標である。これらの目標を達成した上で、ダイバータ形状やリサイクリングに関する解析を行い、LHD周辺プラズマの理解を進めることが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

本研究の基盤コードとなるのはEMC3-EIRENEコードである。これは3次元のプラズマ流体輸送コード(EMC3)と中性粒子輸送コード(EIRENE)を結合したものである。PWI(プラズマ壁相互作用)、不純物輸送、グローバルなリサイクリングなどを正しく取り入れるため、まず計算領域の拡張を行う。そして、これを用いた周辺プラズマの輸送シミュレーション研究を行う。開発と解析について以下に述べる。

### (1) EMC3-EIRENEコードで使用する計算メッシュのダイバータ領域への拡張

周辺プラズマ全領域を覆う計算グリッドの構築を行う。グリッドは実装置形状と実磁場配位を反映する必要があり、プラズマ領域では磁力線追跡コードKMAG、および真空領域は幾何形状に即したグリッド半自動生成ツールの開発を行う。LHD全体をエルゴディック領域、ダイバータレグ領域、その他の真空領域に分割して生成し、EMC3-EIRENE上で相互に結合して用いる。

### (2) 開構造・閉構造ダイバータにおける水素リサイクリング解析

LHDのヘリカルダイバータのうち、トロイダル内側が閉ダイバータ構造に改修されている。これをコードにも導入し、計測されている中性ガスの圧縮効果の再現と測定との比較を行い、コードの検証と物理的過程の解析を行う。そして、ダイバータ部で顕著になると考えられる、水素リサイクリングの機構を中性粒子の輸送とイオン化によるプラズマとの

相互作用を中心に解析し、パフ板のプラズマへの影響を明らかにする。

### (3) ポンプを含めたグローバルな粒子バランス解析

LHD に設置されている真空ポンプ、特にドーム構造下部のポンプがプラズマに与える影響を解析する。これはダイバータの閉構造化の一つの目的であるため、実験に対して重要な示唆を与えるシミュレーションである。粒子のグローバルな輸送バランスを解析可能とするコードの改修を行う。また、不純物（ダイバータ板から発生する炭素）の輸送解析を行う。

## 4. 研究成果

前項であげた三つの点に則した成果に加えて、関連する研究活動と展望について述べる。

### (1) レグ領域を含めたメッシュ開発

LHD 磁場が持っている対称性を利用し、トロイダル方向 18°分について計算メッシュの開発を行った。エルゴディック領域、ダイバータレグ領域、真空領域に領域分割し、それぞれについて半自動的なメッシュ生成プログラムを開発し、各々の領域を適切な境界条件で結合した。技術的詳細については割愛するが、図 2 で示すメッシュを作成した。トロイダル方向に 0.25°刻みで各ポロイダル断面のメッシュを作成した。ただし、最も外側の境界は実際の装置とは異なり、単純な円形を用い、その内部に真空容器形状（図中の黒実線）を重ねる方法を取った。作成が技術的に容易にすることと、形状の変更に対して柔軟に対応できることが理由である。磁気軸位置  $R_{ax}=3.6\text{m}$  の真空磁場を元にして作成したが、他の磁気軸位置に対するメッシュ作成も可能である。このメッシュを用いて EMC3-EIRENE の試験を行い、以前のレグのない場合と矛盾しない結果を得た。図 3 に電子温度分布を真空容器の三次元形状とともに示す。図中では 3 枚のポロイダル断面のみを示しているが、実際には 0.25°刻みで多数の分布情報を保持している。

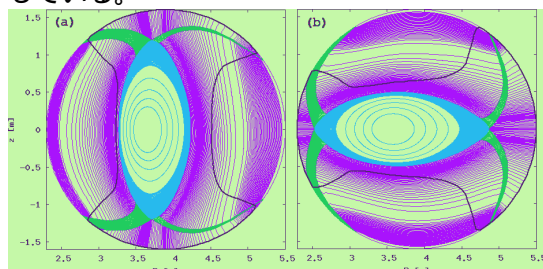


図 2: 作成したポロイダルメッシュ。(a) トロイダル角度 0°と(b) トロイダル角度 18°の断面。赤がエルゴディック領域、紫がダイバータレグ領域、水色が真空領域、

黒実線が真空容器。

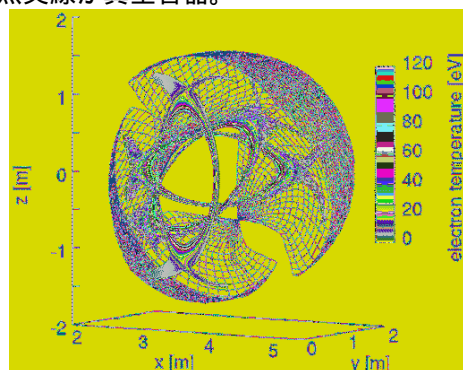


図 3: トロイダル角度 0°、9°、18°のポロイダル断面の電子温度分布および真空容器（黒実線）。

### (2) 開構造・閉構造ダイバータにおける水素リサイクリング解析

平成 24 年度～25 年度にかけて作成した計算メッシュにより、開/閉両方のダイバータ形状でシミュレーションを行えるようになった。実験による計測との比較のため、一定加熱パワーの放電立ち上げを模擬した電子密度スキャンを行ったところ、図 4 に示す中性ガス圧の依存性を得た。閉構造のドーム下部（図 5 参照）における中性ガス圧力は開構造時と比較して 10～20 倍となり、これは計測で得られた比率とよく一致する。また、電子密度に対する中性ガス圧の変化についても、開/閉の両構造に対してよく一致するスケーリングを得た。これらの結果は水素のリサイクリングを直接反映したものであり、グローバルな装置形状やプラズマおよび中性ガス輸送に強く依存するため、EMC3-EIRENE 計算が正しくグローバル輸送とプラズマ・中性ガス相互作用を記述していることを示していると考えられる。また、計測では明確な違いは得られていないが、他の場所（たとえば外側ダイバータ版付近）のガス圧も有意に上昇する結果を得（図 5 参照）これはリサイクリングが装置全体で上昇した結果である。

ダイバータ形状変化がプラズマ分布へ与えた影響としては、閉構造化された部分に局所的に見られる電子密度の増加と電子温度の低下がある。ダイバータ板で水素イオンが表面再結合することで中性ガスとなるが、開から閉への形状変更によって、よりプラズマに戻りやすくなり、それらがプラズマソースの増加を引き起こし、プラズマ密度の上昇と温度の低下を引き起こされた。この変化は実験では明確には計測されておらず、今後の実験に対する示唆となると考えている。

これらの成果について、末尾につけた国際会議 で発表し、論文 にまとめた。

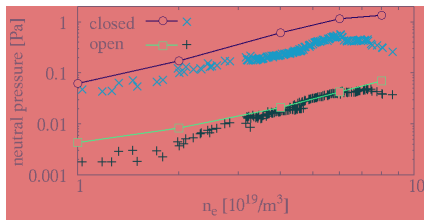


図 4: ドーム下部における水素ガス圧の比較。  $n_e$  は最外殻磁気面における電子密度。赤: 開構造、青: 閉構造。点: 計測、実線: EMC3-EIRENE 計算結果。

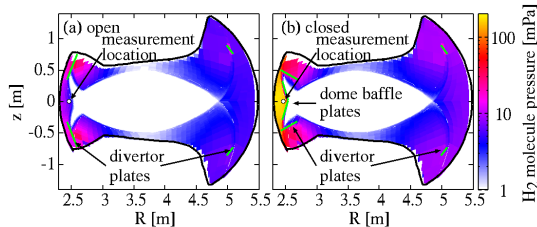


図 5: トロイダル角  $18^\circ$ におけるポロイダル断面の水素ガス圧分布。(a) 開構造、(b) 閉構造。

### (3) ポンプを含めたグローバルな粒子バランス解析

LHD ダイバータの閉構造化のねらいは、水素ガスの排気を行って装置内の燃料ガスの量をコントロールすることであり、周辺密度の低減とコア密度の上昇を実現させるために必要と考えられている。水素ガス排気の影響評価を行った。

計算領域内の水素(分子+原子+イオン)の総量は時間的に一定であるので、排気と同量の供給を模擬するコード拡張を行った。具体的には、閉ダイバータのドーム構造下部のクライオポンプを模擬する粒子吸収条件を設定し、次の2種類の粒子供給方法を仮定した。一つは、ガスパフを模擬するためにダイバータ板のリサイクリングによる中性ガス供給を増加させる場合で、もう一つは、ペレット入射や中性ビーム入射等による炉心粒子供給を模擬するために炉心境界からの水素イオンの径方向輸送を増加させる場合である。

図 6 に計算結果を示す。ガスパフを模擬した場合には、ポンプ設置位置周囲を除き、プラズマ密度・温度、および中性ガス密度に大きな違いが見られなかった(図 5(b)と図 6(a)の比較)一方、炉心供給を模擬した場合、ダイバータ領域のプラズマ密度の減少、中性ガス密度の全体的な減少が顕著に見られた。この変化は、開から閉構造への変更時に意図していた変化である。グローバルな粒子バランスがプラズマ分布に対して非常に重要であることを示している。実験ではこれと直接比較可能な違いは計測されていないが、ガス排気装置の増強が平成 27 年度に計画されており、実験とシミュレーションの双方向の研究が可能になると期待される。

また、炭素不純物の輸送解析も行った。図 7 に不純物量の比較を示す。閉構造化によって、リサイクリングが増加し、それにしただがって水素イオンフラックスも増加するため、不純物量の増加が見られた。最外殻磁気面(LCFS)の電子密度のスキャンを行ったところ、低密度条件では開/閉の違いが大きい、不純物スクリーニングと呼ばれるプラズマフローによる不純物の押し流し(図 8 参照)が発生する高密度条件では違いが小さいことが示された。

これらの成果について、末尾につけた国際会議で発表を行った。また、2015年9月に行われる Plasma Edge Theory 国際会議で本研究に関連する招待講演が決定している。

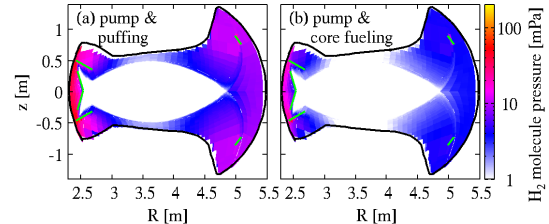


図 6: ポロイダル断面の水素ガス圧分布。(a) 排気&ガスパフ、(b) 排気&コア粒子供給。

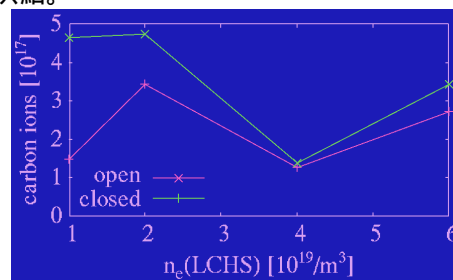


図 7: プラズマ内部の炭素不純物総量。赤: 開構造、青: 閉構造。

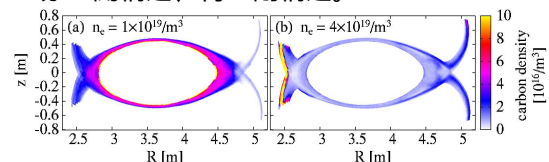


図 8: 炭素不純物イオン(全電荷合計)の空間分布。(a) 低密度条件、(b) 高密度条件。高密度条件ではスクリーニングによって不純物がコア側に蓄積しない。

### (4) 他の研究への波及と今後の展望

本研究でメッシュ作成および改修を行った EMC3-EIRENE コードは LHD 周辺プラズマ分布を解く唯一のコードであり、得られる密度・温度・フロー等の分布は他のシミュレーション研究にも利用可能である。

本研究期間に、Dr. Pigarov (UCSD・アメリカ)で開発されたダスト粒子輸送コード DUSTT に関して庄司博士(NIFS・日本)と共同研究を開始した。背景プラズマ分布として計算結果の提供を行い、その成果は国際会議および論文[ ]に発表された。

また、EMC3-EIRENE コードの利用として、名古屋大学のダイバータプラズマ模擬を目的とした NAGDIS-II 直線装置のプラズマモデリングへの応用を同大学の野教授のグループと開始し、2015 年 9 月に開かれる Plasma Edge Theory 国際会議での同グループの発表が決定している。

以上の共同研究以外にも検討を開始した共同研究もあり、今後も複数のグループと密接に議論を続ける予定である。本研究により、周辺プラズマ輸送解析を担うコードとして、日本における開発研究の基盤を整備できたと考えている。

#### < 引用文献 >

M. Shoji et al, “Studies of dust transport in long pulse plasma discharges in the large helical device” Nuclear Fusion, in press.

M. Shoji et al, “Analysis of the three-dimensional trajectories of dusts observed with a stereoscopic fast framing camera in the Large Helical Device” J. Nuclear Mater., in press.

M. Shoji et al., Plasma Fusion Research 9 (2014) 3403132

#### 5 . 主な発表論文等

##### [ 雑誌論文 ] ( 計 2 件 )

G. Kawamura, F. Feng, M. Kobayashi, M. Shoji, T. Morisaki, S. Masuzaki, Y. Tomita, “First EMC3-EIRENE Simulations with Divertor Legs of LHD in Realistic Device Geometry” Contrib. Plasma Phys. 54 (2014) 437-441 ( 査読有 )  
DOI: 10.1002/ctpp.201410027

G. Kawamura, Y. Tomita, A. Kirschner, “Kinetic effects of inclined magnetic field on physical sputtering by impurity ions” J. Nucl. Mater. 438 (2013) S909-S912 ( 査読有 )  
DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.197

##### [ 学会発表 ] ( 計 7 件 )

河村学思、小林政弘、庄司主、森崎友宏、増崎貴、Y. Feng, “開 / 閉 LHD ダイバータ配位における周辺プラズマ輸送シミュレーション解析”, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市), 2014/11/18, 8PB-065 (ポスター発表)

G. Kawamura, Y. Feng, M. Kobayashi, M. Shoji, T. Morisaki, and S. Masuzaki, “Transport simulation analysis of peripheral plasma with the open and the closed LHD divertor” IAEA-FEC2014, サンクトペテルブルク (ロシア), 2014/10/16, TH/P6-39 (ポスター発表)

G. Kawamura, Y. Feng, M. Kobayashi, M. Shoji, T. Morisaki, S. Masuzaki, “Three-Dimensional Transport Analysis of Peripheral Plasma in the Closed Divertor Configuration of LHD” 第 30 回プラズマ・核融合学会

年会, 東京工業大学 (東京都目黒区), 2013/12/5, 05pA03 (口頭発表)

G. Kawamura, M. Kobayashi, Y. Tomita, S. Masuzaki, T. Morisaki, Y. Feng, “First EMC3-EIRENE simulations with divertor legs of LHD in realistic device geometry” 14th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, クラクフ (ポーランド), 2013/9/23, P1-3 (ポスター発表)

G. Kawamura, Y. Feng, M. Kobayashi, M. Shoji, T. Morisaki, S. Masuzaki, “EMC3-EIRENE simulation of impurity transport in closed-divertor configuration of LHD” 23rd International Toki Conference, セラトピア土岐 (岐阜県土岐市), 2013/11/20, P1-45 (ポスター発表)

G. Kawamura, Y. Tomita, A. Kirschner, “Kinetic effects of inclined magnetic field on physical sputtering by impurity ions” the 20th International Conference on Plasma Surface Interactions, アーヘン (ドイツ), 2012/5/22, P2-067 (ポスター発表)

G. Kawamura, Y. Tomita, A. Kirschner, “スパッタリングおよび二次電子放出に対する斜め磁場の運動論的効果” 第 29 回プラズマ・核融合学会年会, クローバープラザ (福岡県春日市), 2012/11/28, 28D42P (ポスター発表)

#### 6 . 研究組織

##### (1) 研究代表者

河村 学思 (KAWAMURA Gakushi)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号 : 70509520

##### (2) 研究分担者

##### (3) 連携研究者