

小特集 連結階層モデルによって見えてきたプラズマシミュレーションの新たな局面

2. プラズマにおける連結階層シミュレーション

2.5 磁気核融合プラズマにおける多階層統合シミュレーション研究の展望

福山 淳

京都大学大学院工学研究科

(原稿受付: 2009年8月13日)

磁気閉じ込め核燃焼プラズマの実現をめざして国際熱核融合実験炉 (ITER) の建設が始まり, その性能予測, 制御手法開発, 運転シナリオ最適化に向けて, プラズマ全体の時間発展を全放電時間にわたって記述する統合シミュレーションの開発が急務となっている. このようなシミュレーションは時間スケールと空間スケールが非常に幅広い様々な物理現象を含んでおり, それらの現象が密度, 温度, 運動量等の空間分布や電磁場を通して密接に結合しているため, 個々の現象を記述する様々なレベルの物理モデルを組み合わせた, 多要素結合型の多階層統合シミュレーションを必要とする. この章では, 磁気核融合プラズマにおける統合シミュレーションにおける階層性について説明し, 多数の物理モデルを組み合わせた統合コードの代表的な構成を示す. そして, 統合コードにおける物理モデル間のデータ交換を系統的に実現するためのフレームワークについて説明し, それらが実装された統合コードによる具体的なシミュレーション例を示す. さらに, プラズマの時間発展を記述する基礎となる輸送モデリングの高度化に向けた試みを紹介し, 最後にまとめる.

Keywords:

integrated simulation, magnetic fusion, burning plasma

2.5.1 はじめに

磁気閉じ込め核燃焼プラズマの実現をめざして国際熱核融合実験炉 (ITER) の建設が始まり, その性能予測, 制御手法開発, 運転シナリオ最適化に向けて, プラズマ全体の時間発展を全放電時間にわたって記述する統合シミュレーションの開発が急務となっている. ITER 機構では, 参加各極と協力して ITER 統合モデリング解析コード群を構築するために, 統合モデリング専門家グループ (IMEG: Integrated Modelling Expert Group) を発足させ, 2009年6月から活動を始めている. 国内では, 2002年から核燃焼プラズマ統合コード構想 (BPSI: Burning Plasma Simulation Initiative) [1] が, 磁気閉じ込めプラズマの統合コード開発をめざして, 大学・核融合科学研究所 (NIFS)・日本原子力研究開発機構 (JAEA) の研究協力を進めている.

磁気核融合プラズマにおける統合モデリングの主な目的は, (1)核燃焼プラズマの性能を予測することによって, 装置設計, 研究計画の策定, 運転シナリオの検討に寄与すること, (2)プラズマの振る舞いを自己無撞着に記述し, 実験結果と比較することによって, 物理モデルを検証し, 物理機構を解明すること, (3)計測データから輸送係数, 加熱・損失パワー等の直接には測定できない物理量を定量的に評価し, 物理現象の理解を促進することである.

磁気閉じ込めプラズマの振る舞いは, 時間・空間スケールが大きく異なる様々な現象を含むとともに, 空間領域や運転領域によって支配的な現象が変化するため, 単一の物

理モデルによって記述することは事実上不可能である. そのため, 時間・空間スケールの限られた領域を記述する要素コードを多数組み合わせる多要素結合型, 言い換えると物理モデルの階層性を利用して, 単一階層モデルに階層間の相互作用を取り入れて全体を記述する多階層統合型シミュレーションが必要となる.

この節では, まず核燃焼プラズマの階層性について説明し, 具体的な多階層連結コードの構成, 階層連結のためのフレームワーク, 核燃焼シミュレーション例を説明するとともに, 今後の開発課題である輸送モデリングの高度化について述べる.

2.5.2 統合シミュレーションの階層性

磁気核融合プラズマのシミュレーションは時間スケールと空間スケールが非常に幅広い様々な物理現象を含んでおり, それらの現象が密度, 温度, 運動量等の空間分布や電磁場を通して密接に結合しているため, 個々の現象を記述する様々なレベルの物理モデルを組み合わせた自己無撞着な解析を必要とする. 主な現象の時間・空間スケールを図1に示す. 加熱や電流駆動に利用される波動の周波数は 10 MHz から 200 GHz であるが, 放電の継続時間は 1000 s を越える. 電子のサイクロトロン半径は 10 μm のオーダーであるのに対して, プラズマのサイズは数 m となる.

トロイダルプラズマの統合シミュレーションにおいては, 密度, 回転速度, 温度, 電流密度等の空間分布の時間

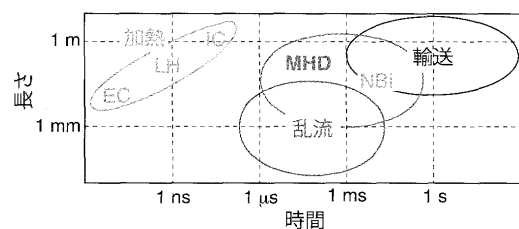


図1 磁気核融合プラズマにおける物理現象の特性時間と特性長。

発展は、粒子、運動量、エネルギー、磁束の閉じ込め時間を特性時間とする輸送過程によって支配されている。プラズマ壁相互作用等を除いて、多くの現象の特性時間は輸送過程に比べてはるかに短いの、プラズマの長時間の振る舞いは輸送現象がほぼ支配的である。

プラズマの平衡や安定性を支配する磁気流体 (MHD) 現象の特性時間は、典型的にはアルヴェン波がプラズマを横切るポロイダルアルヴェン時間である。MHD 平衡によって決定されるプラズマ形状は、プラズマの圧力分布や電流分布の変化に直ちに追従するとともに、輸送係数にも影響を与えるため、平衡と輸送過程とは非常に強く結びついている。一方、鋸歯状振動、周縁局在モード (ELM), 抵抗性壁モード (RWM) 等の MHD モードの成長は非常に早い、その線形安定性は、固定されたプラズマ空間分布に対して計算される。もし MHD モードが不安定になれば、非線形現象によってプラズマ空間分布が変形するが、非線形 MHD 方程式の計算は非常に大規模になる。そのため、あらかじめ定められた分布変形を適用したり、一定期間輸送係数を増加させるモデル化が、現在は用いられている。将来的には、非線形 MHD シミュレーションと直接結合することが期待される。

プラズマ中の輸送現象は、衝突輸送、乱流輸送、輻射輸送に分けることができるが、エネルギー閉じ込めを支配するのは乱流輸送である。微視的不安定性の成長と非線形乱流飽和の特性時間は、典型的には圧力勾配による反磁性ドリフト周波数、磁場勾配による捕捉周波数やプリセッション周波数等の逆数であり、輸送の特性時間に比べて通常短い。したがって、乱流輸送係数は通常固定されたプラズマ分布に対して計算される。しかしながら、MHD 過程の特性時間は乱流の特性時間と同程度となることもあり、その場合は両者を取り入れた自己無撞着な解析が必要となる。また、過渡的な輸送現象の記述では、時間スケールの分離が困難となり、やはり自己無撞着な解析が必要となる場合がある。

加熱や電流駆動は、通常 2 つの物理過程に分けることができる。波の伝播と共鳴粒子による吸収の特性時間は群速度によって決定され、輸送過程に比べてはるかに短い。中性粒子ビームの入射による高エネルギーイオンの生成もまた非常に短い時間スケールを持ち、いずれも固定したプラズマ分布に対して計算することができる。それに対して、加速された共鳴粒子や高エネルギービームイオンの衝突緩和は輸送過程と同程度の長い特性時間を持つ。したがって、衝突緩和現象は輸送シミュレーションにおいては、注

意深く取り扱う必要がある。

周辺プラズマでは、磁力線が閉じておらず、ダイバータ等につながっている。さらに、電離、再結合、線輻射等の原子分子過程に加えて、壁との相互作用も輸送現象に関与する。このため、コアプラズマとは異なるさまざまな現象が輸送の特性時間で現れ、それらを統合的に取り扱う必要がある。

2.5.3 統合シミュレーションコードの構成

磁気核融合プラズマの統合シミュレーションの代表的な構成を図 2 に示す。プラズマの形状を定める平衡、密度・温度等の時間発展を記述する炉心プラズマ輸送、プラズマの巨視的な安定性、外部からの入力である粒子源・加熱源・運動量源、炉心プラズマの境界条件を与える周辺プラズマ輸送等の解析が組み合わせられて統合シミュレーションコードを構成している。将来的には、計測装置を模擬する計測モデルや制御アルゴリズムを具体化する制御モデル等を加えて、核燃焼プラズマの運転制御をシミュレーションすることが目標である。

各解析で記述される物理現象の中には、解析モデルが既に確立されているもの (白地) もあれば、非線形 MHD 現象や乱流輸送現象等のように大規模シミュレーションを必要とするもの (灰色地) もある。後者を統合シミュレーションに取り入れるためには、計算速度等の制約から、大規模シミュレーションの結果を基に、合理的かつ堅牢で精度の高い簡約モデルを構築する必要がある。

また、各解析においても、記述レベルの異なるモデルが複数存在する場合がある。例えばコアプラズマ輸送においては、従来の拡散型輸送方程式による拡散型輸送モデル、運動方程式を含む多流体方程式による動的輸送モデル、運動量分布関数を用いる運動論的輸送モデル等があり、順により詳細な記述が可能になる一方、計算規模が増大する。巨視的な安定性解析においても、MHD モデル、二流体モデ

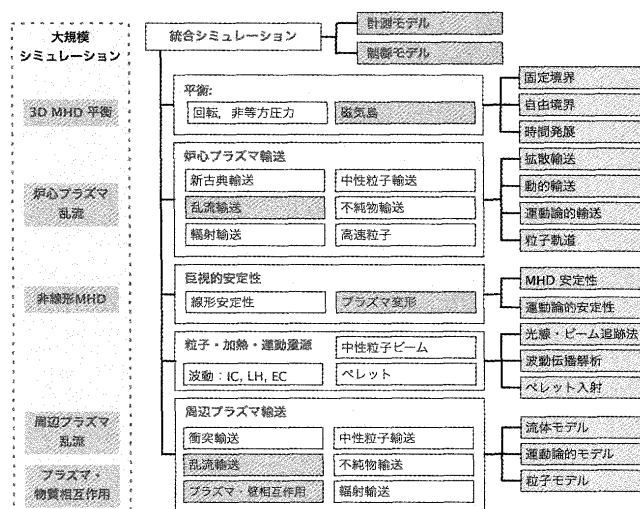


図2 磁気核融合プラズマ統合シミュレーションの構成。統合シミュレーションの中の灰色地の項目は、左側の大規模シミュレーションの結果を取り入れた物理モデルを意味する。

ル、運動論的モデル等のレベルが存在する。これらの記述レベルの異なるモデルは、必要に応じて選択することになり、相互の比較・検証も可能でなければならない。

2.5.4 統合シミュレーションコードのフレームワーク

このように多数の解析モデルから構成される統合シミュレーションを実現するためには、各解析モデルを記述する要素コードが互いにデータを交換し、階層間の相互作用を取り入れて実行されることが必要である。BPSI では、統合コードを実現するためのフレームワークとして、データ交換インターフェース (BPSD) を開発し、実行制御インターフェース (BPSX) の検討を進めている。BPSD は、交換するデータの内容と形式を定めた標準データセット (SDS) と、実際にデータを交換するプログラムインターフェース (API) から構成され、最小限の単純な API で必要十分な SDS を機能させることをめざしている。

標準データセット SDS は、現在のところ、FORTRAN の派生型 (C の構造型に対応) によって記述されており、プラズマ平衡、プラズマ流体、プラズマ運動論、輸送係数、粒子源、加熱源、波動ビーム、波動分布等のデータセットが定義されている。各データセットは、図 3 に示すように、基本的には、時刻、データ記述、データ数、データ格子、データ本体からなる。個々のデータは、実空間（あるいは位相空間）における格子点上の物理量が派生型として記述されており、例えばプラズマ流体データは、各粒子種の密度、温度、磁力線に平行な方向の速度等から構成される。データ記述はデータの名称、簡略名称、単位を含み、データ数は例えば径方向の格子点数、データ格子は格子点の径方向位置、データ本体は派生型データの配列である。このデータ構成は、領域分割による並列化の際にデータの局所性を保つように設計されている。

プログラムインターフェース API は、現在のところ、データの書き込み (bpsd_set_data)、データの読み出し (bpsd_get_data)、ファイルへの書き出し (bpsd_save)、ファイルからの読み込み (bpsd_load) が定義されている。今後、データを時系列的に処理するためのインターフェースを拡張する必要がある。

実行制御については、一体型実行、個別実行、ワークフロー型ミドルウェアによる実行等様々な形態が考えられ、並列処理における負荷分散も考慮に入れて、検討が進められている。現在の実行形態は輸送コードである TASK/TR から他の要素コードを定期的に起動する方式でシミュレーションが行われているが、将来的には代表的な物理量の時間変化に合わせて、必要なコードを起動する方式を採用する必要がある。

BPSD を利用して開発が進められている統合シミュレーションコード TASK (京都大学)[2] および TASK3D (NIFS, 京都大学)[3] の構成を、図 4 に示す。TASK は主にトカマクを対象とし、平衡・輸送・加熱・電流駆動の解析モジュールを含んでいる。TASK3D はヘリカル系プラズマおよび非軸対称効果を含めたトカマクを対象とし、径電

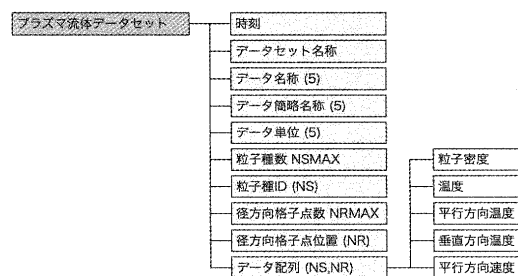


図 3 BPSI データ交換インターフェース (BPSD) の標準データセットの一例。プラズマ流体データセット (plasmaf)。

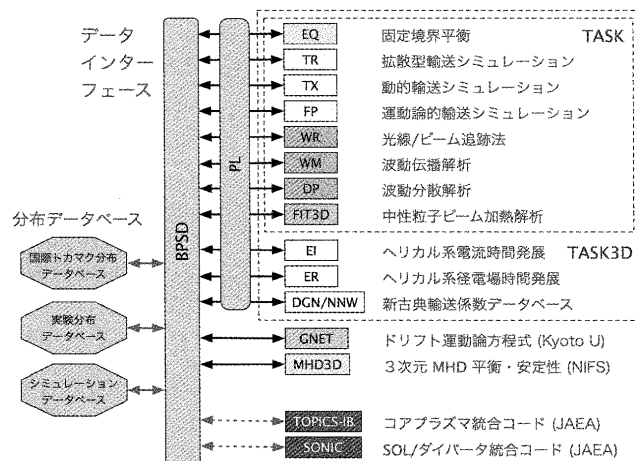


図 4 統合シミュレーションコードの構成。BPSD は BPSI データ交換インターフェースを、PL は BPSD 利用のためのユーティリティ群を、それぞれ意味する。

場および新古典輸送を解析するモジュール等を TASK に追加し、3次元の平衡・安定性を扱う MHD3D コードと組み合わせ、解析を行う。将来的には、BPSD を介して、原子力機構が開発を進めているコアプラズマ統合コード TOPICS-IB および SOL/ダイバータ統合コード SONIC との連携を進める予定である。

乱流輸送モデルをはじめとする物理モデルの検証には、実験データとの系統的な比較が重要な役割を果たす。ITER 物理 R&D および国際トカマク物理活動 (ITPA) の活動により国際トカマク分布データベース[6]が構築され、トカマクプラズマにおける各種物理量の空間分布とその時間発展データが蓄積されている。TASK および TASK3D コードは、国際トカマク分布データベースを利用した乱流輸送モデルの検証が可能であり、JT-60U や LHD の実験データベースを利用した研究も進められている。

2.5.5 統合コードによる ITER プラズマシミュレーション

統合コードを用いた ITER プラズマの時間発展シミュレーションは、現在日米欧をはじめとする ITER 参加極で開発が進められている。ここでは、TASK コードを用いた ITER プラズマの計算例を示す。

図 5 は、プラズマ電流 15MA の誘導運転シナリオにおける電流立ち上げ解析例を示す。乱流輸送モデルとしては、電流拡散性バーニングモード (CDBM) モデルを用いて

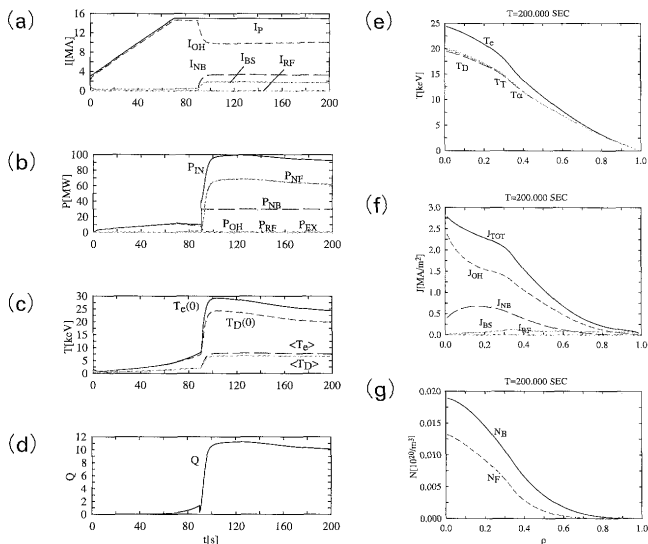


図5 TASKコードによるITER誘導運転モード計算例。(a)トロイダル電流、(b)加熱パワー、(c)中心温度、(d)エネルギー増倍率、の時間発展、(e)温度、(f)トロイダル電流密度、(g)高エネルギーイオン密度の径方向分布。

いる[7]。超伝導ボロイダルコイルに加わるループ電圧の制約から、70秒かけてプラズマ電流を15 MAまで増加させ、90秒から30 MWの中性粒子ビーム加熱を加え、エネルギー増倍率 $Q=10$ が得られているが、定常状態には維持できていない。図は、トロイダル電流、加熱パワー、中心温度、エネルギー増倍率の時間発展と最終時刻における温度、トロイダル電流密度、高速エネルギーイオン密度の径方向分布を示す。図6は、電子サイクロトロン波の光線追跡法による伝播解析、イオンサイクロトロン波少数イオン加熱における波動電界と吸収パワー密度のポロイダル断面分布を示す。ここでは、重水素フェーズにおける水素を少数イオンとする計算例を示している。図7は、運動量分布関数の局所的な解析例を示す。電子には電子サイクロトロン波と低域混成波による電流駆動、重水素には中性粒子ビーム加熱、三重水素にはイオンサイクロトロン第2高調波加熱、ヘリウムにはアルファ粒子加熱を加えたときの計算例を示す。この計算例では、分布関数の変形を強調するために、実際よりも大きな加熱パワーを加えている。

2.5.6 今後の発展：輸送モデリングの高度化

磁気核融合プラズマの統合シミュレーションにおいては、プラズマの時間発展を記述する輸送モデリングが、取り扱う物理現象の範囲を規定する重要な役割を果たす。これまでの輸送モデリングでは、長い間、密度、温度、磁束に対する1次元拡散型輸送方程式が用いられてきた。一方、大規模な乱流輸送シミュレーションにおいては、サイクロトロン運動に関してのみ平均された5次元位相空間での分布関数によりプラズマの振る舞いを記述するジャイロ運動論等が用いられ、それらが記述する物理現象には大きなレベル差がある。それらのレベル差を埋めるため、これまでの拡散型輸送モデリングでは記述できなかった物理現象を取り入れた、より高度な輸送モデリングが必要となっ

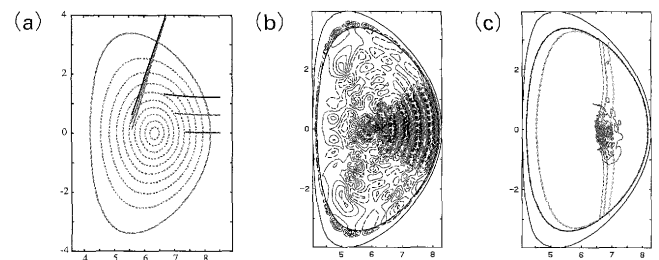


図6 TASKコードによるITERプラズマ中の波動伝播解析例。(a)電子サイクロトロン波の伝播、(b)イオンサイクロトロン波D+H少数イオン加熱における波動電界(ポロイダル成分)、(c)少数イオンの加熱パワー密度。

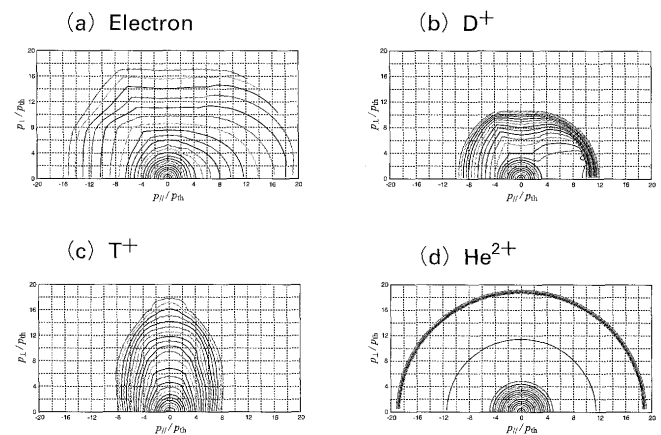


図7 TASKコードによる運動量分布関数解析例。(a)電子：電子サイクロトロン波と低域混成波による電流駆動、(b)重水素：中性粒子ビーム加熱、(c)三重水素：イオンサイクロトロン2倍高調波加熱、(d)ヘリウム：アルファ粒子加熱。

てきている。

乱流輸送においては、プラズマ中の径電場や回転速度の空間的なシアが輸送係数に大きな影響を与えることが明らかになってきている。また高速イオンの生成や損失に伴う径方向電流がトルクを生み出し、プラズマ回転に寄与することから、回転や径電場を正確に取り扱うことが必要である。これらを自己無撞着に取り扱うため、各粒子種の運動方程式やガウスの法則を直接解く動的輸送モデリングが開発され[8]、高速イオンの生成・損失に伴うプラズマ回転の生成[9]や圧力勾配の急峻化に伴う輸送障壁形成等の解析が進められている。

波動や中性粒子ビーム、さらにはアルファ粒子による加熱・電流駆動においては、運動量分布関数のマクスウェル分布からのずれが大きくなり、波動やビームの吸収、核融合反応率、アルヴェン固有モードの励起、各種計測等に大きな影響を与える。従来は運動量分布関数に対するフォッカー・プラנק方程式を各粒子種毎に解き、衝突緩和による吸収パワー密度を拡散型輸送方程式に源項として与える手法が用いられてきた。しかしながら、粒子種間の衝突緩和や空間拡散のエネルギー依存性を取り入れ、運動量分布関数を正確に評価するためには、空間拡散を含めた3次元フォッカー・プラנק方程式(径方向1次元、運動量空間2次元)を用いて輸送現象を記述することが必要になりつつ

ある。このため、軌道平均された運動量分布関数の時間発展を取り扱う運動論的輸送モデリングの開発が進められている。

さらに、現在の輸送モデリングにおいては入れ子状になった磁気面が仮定されているが、新古典ティアリングモード (NTM) の励起や外部からの共鳴磁場揺動 (RMP) の印可に伴って、磁気島が形成され、磁気面の部分的崩壊が生じる。これらの現象はヘリカル系プラズマの周辺部においては常に発生しているが、これまでの輸送モデリングにはほとんど取り入れられていなかった。これらの現象を取り入れた定量的な解析をするためには、非軸対称効果を取り入れた新たな輸送モデリングが必要とされている。

2.5.7 まとめ

磁気核融合プラズマの総合的な解析には、時間スケールの異なる様々な現象を記述する多数の物理モデルを連携させて自己無撞着に時間発展を記述する、多要素結合型の多階層統合シミュレーションが必要である。ITER や核融合炉における核燃焼プラズマの予測に向けて、統合モデリングコードの組織的な開発が先進各国で進められている。信頼できる核燃焼プラズマ統合シミュレーションを実現するためには、統合コードの体系的な開発、実験との系統的な比較による物理モデルの検証、非線形物理機構の解明に向

けた大規模シミュレーションとの連携等が不可欠である。

統合コードにおいてプラズマの時間発展を記述する輸送モデリングについては、従来の拡散方程式による流体記述を拡張するいくつかの試みが進められている。これらの新しい輸送モデリングの比較・検証も今後の重要な課題の一つであろう。統合コードのフレームワークについても、さらに必要な機能を追加する共に、負荷分散を考慮に入れた実行制御を実現することも今後の課題である。

参考文献

- [1] 福山 淳, 矢木雅敏: プラズマ・核融合学会誌 **81**, 747 (2005).
- [2] A. Fukuyama *et al.*, *Proc. of 20th IAEA Fusion Energy Conf.* (Villamoura, Portugal, 2004) IAEA-CSP-25/CD/TH/P2-3.
- [3] M. Sato *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **3**, S1063 (2008).
- [4] N. Hayashi *et al.*, *Nucl. Fusion* **47**, 682 (2007).
- [5] K. Shimizu *et al.*, *Nucl. Fusion* **49**, 065028 (2009).
- [6] C. M. Roach *et al.*, *Nucl. Fusion* **48**, 125001 (2008).
- [7] A. Fukuyama *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **37** 611 (1995).
- [8] M. Honda and A. Fukuyama, *J. Comput. Phys.* **227** 2808 (2008).
- [9] M. Honda *et al.*, *Nucl. Fusion* **48**, 085003 (2008).