

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889068

研究課題名(和文)L-H遷移の第一原理シミュレーション手法の構築

研究課題名(英文)Development of a first-principal simulation code of L-H transition

研究代表者

瀬戸 春樹 (SETO, HARUKI)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所・博士研究員

研究者番号：90733692

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：乱流輸送モデルのL-H遷移・Hモード放電時の予測精度向上によるL-H遷移の定量的検証手法の確立を目的として、三次元MHD/乱流フレームワークBOUT++を用いてプラズマ乱流を記述する簡約化MHD方程式にイオン種の径方向の力の釣り合いから径方向電場を決定する機構を取り入れたL-H遷移の第一原理コードの開発を行った。コード内部におけるn=0モードの取扱いに起因すると予想される数値的不安定性からL-H遷移の再現には至らなかったが、(1)周辺径電場シアの形成、(2)周辺乱流輸送レベルの低減、(3)周辺圧力勾配の急峻化、のL-H再現に必要な機構が確認出来た。

研究成果の概要(英文)：Development of a first-principal simulation code of L-H transition was carried out based on a three-dimensional MHD/turbulent simulation framework BOUT++ for the quantitative prediction of L-H transition through the improvement of turbulent transport model in L-H transition and H-mode discharge. Although L-H transition itself was not reproduce due to a numerical instability expected to arise from an inconsistent treatment of n=0 mode, a set of key mechanisms required for L-H transition, (1) the generation of the edge radial electric field shear, (2) the reduction of the edge turbulence level, (3) the enhancement of the energy deposition at the edge region, was observed.

研究分野：核融合学

キーワード：L-H遷移 簡約化MHDモデル シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

プラズマ境界近傍の周縁領域に輸送障壁 (ETB) が形成され、炉心の閉じ込め性能が改善する H モード (高閉じ込めモード) 放電は ITER や原型炉の標準運転モードであり、L モード (低閉じ込めモード) から H モードへの遷移 (L-H 遷移) の物理機構の解明による炉心性能予測の高度化は、ITER や原型炉の性能予測における重要課題の 1 つである。

そのため、周縁領域を対象とした L-H 遷移シミュレーションが 1.5 次元コア輸送コードと 2 次元周辺輸送コードを結合させた統合輸送コードを用いて行われており、L-H 遷移による炉心の閉じ込め性能向上の定性的な評価に成功している [M. Yagi+ CPP2012]。この枠組みでは炉心の閉じ込め性能に大きな影響を与えるペダスタル頂点の圧力等の定量的な評価には至っておらず、L-H 遷移の定量的理解には乱流輸送モデルの L-H 遷移・H モード放電時における予測精度の高度化が課題である。これまでの L-H 遷移の理論研究としては径電場とプラズマ回転シアが周辺乱流を抑制して L-H 遷移が起こるモデルが複数提案されているが、実験を定量的に説明出来るモデルの確立には至っていない。そのため、従来の L-H 遷移モデルと実験の直接比較による定性的検証に加えて、より第一原理的な手法による L-H 遷移モデルの定量的検証手法の構築が重要な課題となっている。

3 次元周縁磁気流体力学 (MHD) / 乱流コード BOUT++ [B. D. Dudson+ CPC2009] はダイバータ配位をはじめとした任意の軸対称磁場配位と任意の物理モデルを実空間 3 次元の初期値問題として解析可能なプラズマ流体シミュレーションフレームワークである。BOUT++ コードは H モード時の周縁領域の急峻な圧力勾配による不安定性により駆動される熱・粒子の間欠的・周期的な放出現象 (ELMs) の解析を主目的に開発が行われているが、周辺プラズマ乱流を記述する簡約化 MHD 方程式にイオン種の小半径方向の力の釣り合いから径方向電場を決定する機構を組み込むことにより、L-H 遷移過程のより第一原理的なシミュレーション手法の構築が可能であると見込まれる。

### 2. 研究の目的

乱流輸送モデルの L-H 遷移時の予測精度向上による L-H 遷移の定量的検証手法の確立を目的として、L-H 遷移の統合輸送シミュレーションに用いられた電流拡散バルーニングモード (CDBM) 乱流輸送モデルの基礎方程式である電流拡散を取り入れた電磁プラズマ乱流を記述する 3 場 (渦度、圧力、磁気ポテンシャル) の簡約化 MHD 方程式に、新古典輸送理論に基づく力の釣り合いから径電場シアを駆動する機構を導入した L-H 遷移の第一原理モデルの構築と BOUT++ コードによる L-H 遷移の第一原理コードの開発を行う。

### 3. 研究の方法

BOUT++ コードは空間離散化、時間前進手法といった MHD コードに共通した機能を提供するシステムモジュール群と個別の物理モデルを記述した物理モジュールから構成されており、システムモジュール群に接続する物理モジュールを開発することによって任意の物理モデルを解析可能である (図 1)。そこで、本課題では L-H 遷移の第一原理コードを BOUT++ フレームワークで動作する物理モジュールとして開発する。コード開発全体の方針としては、BOUT++ コードの開発行程を次の 4 工程に分けてコードとモデルの妥当性の検証を行うことで、問題点を明確化する。

(1) 3 場の電磁抵抗性バルーニングモード (RBM) 不安定性の物理モデルを記述する物理モジュールを開発し、single-n (単一のトロイダルモードが発展) の線形計算で得られる線形成長率と電磁 RBM 不安定性の線形成長率の局所的な理論式 [B. A. Carreras+ PRL1983] との比較を通してコードの妥当性を検証する。

(2) 3 場の電磁 RBM 不安定性の物理モデルを用いて multi-n (複数のトロイダルモードが同時に発展) の線形計算を行い、トロイダルモード間のモード分離の妥当性を検証する。

(3) 3 場の電磁 RBM 不安定性の物理モデルを用いて multi-n の非線形計算を行い、系の非線形飽和が得られることを確認する。

(4) 新古典輸送理論に基づく力の釣り合いから径電場シアを駆動する機構を導入した電磁プラズマ乱流系の L-H 遷移コードの開発を行う。

ここで、行程 (4) に関しては、静電抵抗性プラズマ乱流を記述する熱源駆動型の 2 場 (渦度、圧力) の簡約化 MHD 方程式の渦度方程式に新古典平行粘性によるダンプ項として新古典ポロイダル回転のある径方向の力の釣り合いを導入した L-H 遷移モデル [L. Chone+ PoP2014, G. Y. Park+ PoP2015] が本課題着手後に報告されたため、当初の予定を変更してこれらの静電プラズマ乱流系の L-H 遷移モデルの詳細を調査し、電磁プラズマ乱流系の L-H 遷移モデルへの拡張手法を検討した。

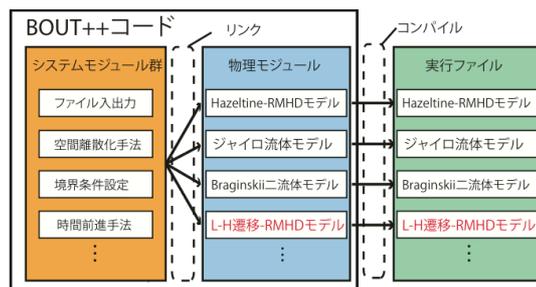


図 1: BOUT++ コードの概念図

#### 4. 研究成果

(1) 線形電磁 RBM モデルの single-n 計算によるコードの妥当性の検証

電磁 RBM 不安定性では線形成長率は抵抗率の  $1/3$  乗、固有関数の磁力線方向の特性長は抵抗率の  $-1/3$  乗、ポロイダル共鳴構造の特性長は抵抗率の  $1/3$  乗に比例する。

図2はトロイダルモード数  $n=30$  の電磁 RBM 不安定性の線形成長率(上)、静電ポテンシャルの固有関数の空間構造(中)、ポロイダル共鳴構造(下)の抵抗率依存性を single-n の線形計算で評価した結果である。低抵抗率側では線形成長率は  $1/3$  乗則に精度良く一致するが、高抵抗率側においては成長率の抵抗率依存性が弱くなる。一方で、固有関数とポロイダル共鳴の空間構造は高抵抗率領域においてもバルーニング構造を示しており、径方向・磁力線方向の特性長の抵抗率依存性も局所的理論と定性的に一致している。

これらの結果は高抵抗率側に磁場の大域構造に起源を持つ  $1/3$  乗則とは異なるブランチが存在する可能性を示唆している。そのため、ポロイダル方向を実空間で解く初期値コードでは、乱流の抵抗率相似性を仮定して現実より大きな抵抗率を用いて計算格子解像度を節約する場合は、解が  $1/3$  乗則のブランチ上に存在しているか注意する必要がある。

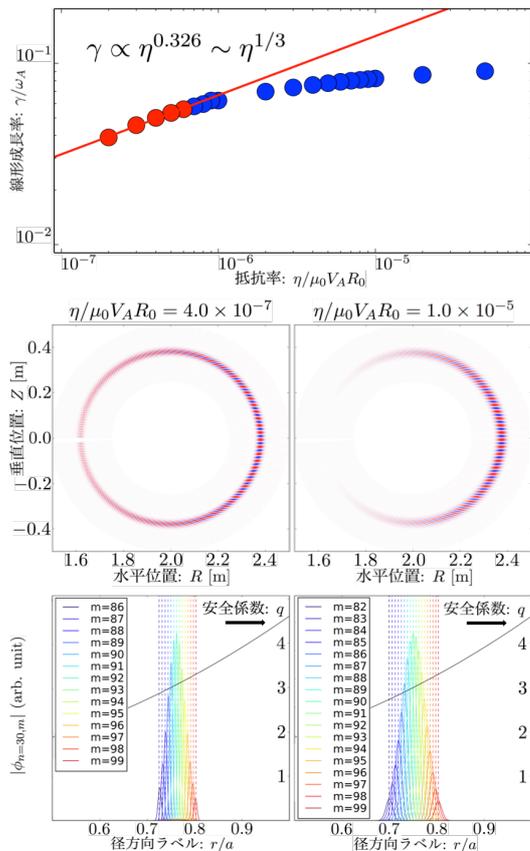


図2: 線形電磁 RBM モデルの single-n 計算 ( $n=30$ )。上段: 線形成長率の抵抗率依存性、中段: 静電ポテンシャルのポロイダル断面図、下段: 静電ポテンシャルのポロイダル共鳴。ここで、中・下段は左図が抵抗率  $=4.0 \times 10^{-7}$ 、右図が抵抗率  $=1.0 \times 10^{-5}$  の結果を表す。

(2) 線形電磁 RBM モデルの multi-n 計算によるコードの妥当性の検証

完全に線形化された multi-n シミュレーションではトロイダルモード間の結合が存在しないため、各モードの成長率と固有関数の空間構造は保存される。BOUT++コードでは SOL/ダイバータ領域の衝撃波を伴う乱流を取り扱うために、3次精度の WENO 法が対流微分処理に用いられている。

各モードをスペクトル分解してモードの固有関数を解析するツールを開発して、対流微分項を3次精度 WENO 法と4次精度中心差分法で処理した2種類の線形 multi-n シミュレーションを行い、線形成長率と固有関数の比較検討を行った。その結果、3次精度 WENO 法では風上方向の選択に起因する数値的非線形性がモード間の非物理的な結合を誘起することにより低成長率のモードの固有関数がバルーニング構造からインターチェンジ構造へと遷移していることが明らかとなった(図3)。

対流微分項は最外殻磁気面内の共鳴モードの三波結合を記述することが本質であるため、周辺乱流を正確に取り扱うためには最外殻磁気面の内側では対流微分を中心差分法に代表される線形差分手法で計算し、SOL/ダイバータ領域ではショック波に強い WENO 法で計算する等のコードの改良が必要である。

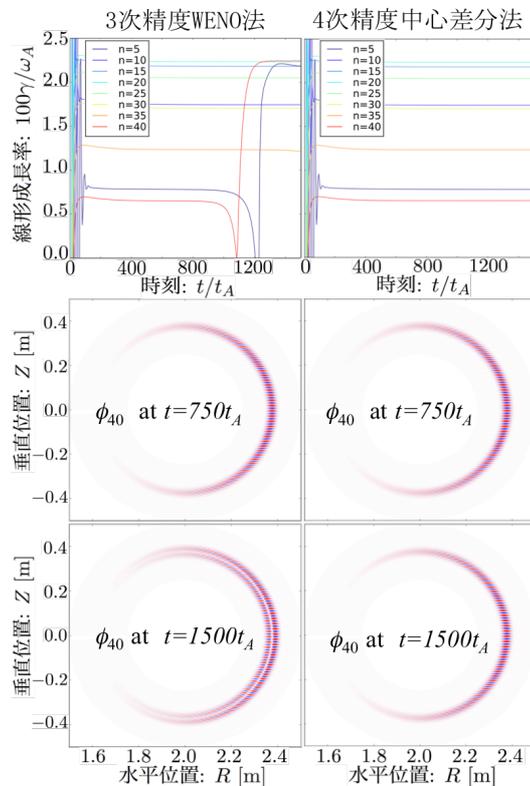


図3: 線形電磁 RBM モデルによる multi-n 計算における対流微分手法の比較(左図:3次精度 WENO 法、右図:4次精度中心差分法)。上段: 各モードの成長率の時間発展、中段: 固有関数のポロイダル断面 ( $t=750t_A$ )、下段: 固有関数ポロイダル断面 ( $t=1500t_A$ )

(3) 非線形電磁 RBM モデルの multi-n 計算によるコードの妥当性の検証

非線形電磁 RBM モデルの multi-n 計算を行ったところ、静電ポテンシャルの n=0 成分の磁力線方向に強い数値振動が発生して、計算の収束を得ることが出来なかった (図 4)。BOUT++コードのシステムモジュール群内部の実装を調査した結果、渦度から静電ポテンシャルを計算する際に用いるラプラス逆変換関数における n=0 モードの取扱いに問題がある可能性が高いことが分かった。BOUT++コードではフルート型の MHD 不安定性を高精度かつ低計算資源で解析を行うために磁力線に沿った座標系で微分演算子を定義している [X. Q. Xu+ CCP2008]。加えて、磁力線に垂直な方向の勾配を評価する際にはフルート近似 (高 n パルレーンクモードに対しては有効) を用いて磁力線方向の微分を無視することにより、磁力線に垂直な 2 方向の問題へと簡略化を行っている。しかしながら、渦度方程式の n=0 成分では磁場の曲率項から生じるポロイダル結合を無視できないため、簡約化の妥当性は保証されない。観測された振動は渦度から静電ポテンシャルを評価する際にこれらの構造を正確に表現出来ないことに起因すると推測される。システム内部の調査に想定以上の時間を要したことから数値振動の原因の断定に必要な磁力線方向の微分の寄与を導入したラプラス逆変換関数の開発にアルゴリズムの大幅な変更が必要と見込まれたことから、本課題期間中の数値振動の解消には至らなかった。今後は磁力線方向の微分を取り入れたラプラス逆変換関数の開発を継続して行うとともに、平衡磁場作成コードや境界条件設定の再検証を行い、数値振動の原因の断定と multi-n 計算における非線形飽和を早期に実現させる。

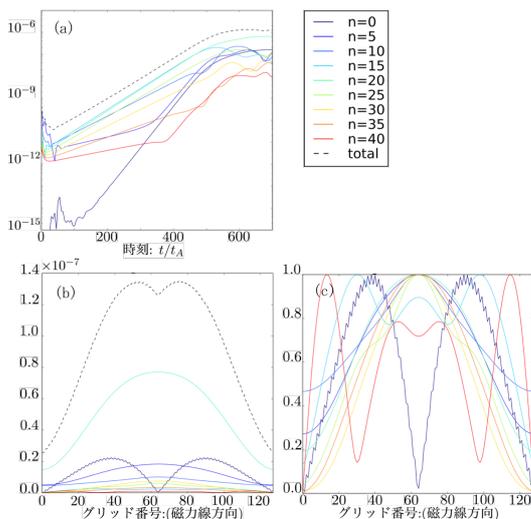


図 4 : 非線形電磁 RBM モデルの計算例  
 a: 各モードの静電ポテンシャルの時間発展  
 b: 非線形フェーズ ( $t=700t_A$ ) における静電ポテンシャルの磁力線方向の固有関数  
 c: 非線形フェーズ ( $t=700t_A$ ) における静電ポテンシャルの磁力線方向の固有関数 (規格化)

(4) L-H 遷移の簡約化 MHD コードの開発

熱源駆動型の 2 場の簡約化 MHD 方程式に基づく L-H 遷移シミュレーションの先行研究 [L. Chone+ PoP2014, G. Y. Park+ PoP2015] では、①2 場の簡約化 MHD モデルで記述される静電 RBM 乱流、②渦度方程式の n=0 成分に新古典粘性項に由来するダンプ項として導入される径方向の力の釣り合いの式、③圧力方程式の n=0 成分にコア側ソース/周辺側シンク項と乱流輸送のバランスとして導入される動的圧力分布、の 3 要素により L-H 遷移が自己無撞着に記述される。すなわち、コア側のソース強度が閾値を超えると、周辺部のエネルギー堆積の増加による周辺圧力シアの急峻化、力の釣り合いを通じた周辺径電場シアの急峻化、径電場シアによる周辺乱流輸送レベルの低減、からなる正の非線形ループが系に形成されて L-H 遷移が再現される。

上記の枠組みでは標準的な簡約化 MHD モデルにおける平衡圧力は要素③から動的圧力平衡として求まる。そのため、熱源駆動型の L-H 遷移モデルを有限の磁場揺動が存在する電磁プラズマ乱流系へと拡張するためには要素③に対して「揺動圧力と揺動磁場の平均流成分から平衡磁場配位を動的に更新する機構の導入」あるいは、「L-H 遷移閾値に近い周辺圧力勾配を持つプラズマ平衡を設計して系の非線形飽和を得た後に、周辺圧力勾配近傍に十分に小さい熱源を印可してプラズマの応答を調査する摂動論的手法の構築」の様な修正が必要になると考えられる。

図 5-1 と図 5-2 は渦度方程式中の力の釣り合いを記述するダンプ項の時定数を新古典輸送理論から決定される値の 100 倍に設定した 2 場の L-H 遷移モデルによる予備計算の結果である。ここで、この予備計算では渦度方程式の n=0 成分は実質的に径方向の力の釣り合いの式と見なせるため、(3) で報告した数値振動は発生せずに乱流の非線形飽和が得られたと考えられる。

図 5-1 は  $t=7000t_A$  までコア側に弱い熱源を設置して乱流の非線形飽和を得た後、 $t=7000t_A$  から  $t=9000t_A$  まで熱源強度を線形に 2 倍まで増加させた後、熱源強度を一定にした場合の乱流強度、平均流径電場、平均流圧力勾配の時空間構造の応答を表しており、図 5-2 は各物理量の周辺部構造の時間発展 (左図) と周辺部に径電場シアが有る場合 (水色:  $t=13300t_A$ ) と無い場合 (緑色:  $t=14500t_A$ ) における径方向分布 (右図) を表している。これらの図から、熱源増強後に乱流と平均流の位相応答の周期が伸長し、周辺領域で平均流シアの形成と乱流レベルの低減が確認出来る。

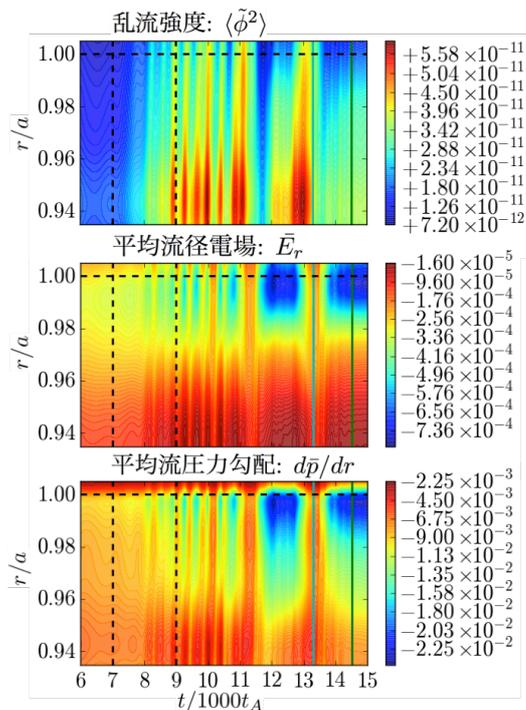


図 5-1 : 2 場の L-H 遷移モデルの予備計算で得られた各物理量の時空間構造。ここで、各図における水色と緑色の実線は図 5-2 で示す各物理量の径方向分布の時刻に対応する ( $t=13300t_A$  および、 $t=14500t_A$ )。また、この計算は円形断面の解析的磁気平衡を用いているため、 $r/a=1.00$  は最外殻磁気面の位置ではなくシンク領域の開始位置を表す。

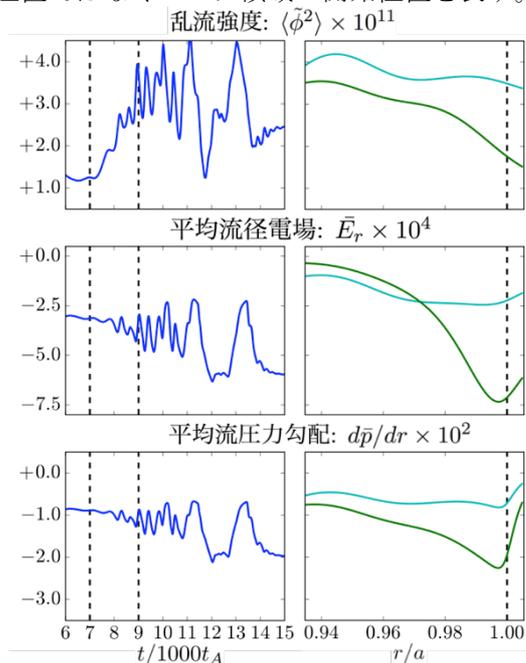


図 5-2 : 2 場の L-H 遷移モデルの予備計算で得られた各物理量の周辺構造の時間発展 (左) と径方向分布 (右)。ここで、右図の周辺構造の時間発展は各物理量の  $0.98 < r/a < 1.0$  における径方向平均量の時間発展、左図の径方向分布は図 5-1 の水色の実線 ( $t=13300t_A$ ) と緑色の実線 ( $t=14500t_A$ ) に対応する時刻における径方向分布をそれぞれ表す。

## 5. 主な発表論文等

(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 H. Seto, M. Yagi, G. Breyiannis, Development of L-H Transition Simulation Framework with BOUT++ Code, in Proceedings of 12th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting, 査読無, 2014

[学会発表] (計 7 件)

- ① 瀬戸春樹、矢木雅敏、X. Q. Xu、熱源駆動型乱流輸送モデルによる L/H 遷移シミュレーション研究、日本物理学会第 71 回年次大会、2016-03-19、東北学院大学泉キャンパス (宮城県・仙台市)
- ② H. Seto and M. Yagi, Flux-driven turbulence simulation of L-H transition, 2015 BOUT++ Mini Workshop, 2015-12-18, リバモア (米国)
- ③ H. Seto, M. Yagi and X. Q. Xu, Flux-driven turbulence simulation of L-H transition with BOUT++ code, 15th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, 2015-09-09, 奈良春日野国際フォーラム (奈良県・奈良市)
- ④ H. Seto and M. Yagi, Current Status of Development of L-H Transition Simulation Framework with BOUT++ code, 10th Japan-Korea workshop on "Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas", 2015-07-13, 日本原子力研究開発機構六ヶ所核融合研究所 (青森県・六ヶ所村)
- ⑤ 瀬戸春樹、矢木雅敏、Development of L-H Transition Simulation Framework with BOUT++ code, 第 20 回数値トカマク研究会、2015-01-13、京都テルサ (京都府・京都市)
- ⑥ 瀬戸春樹、矢木雅敏、Development of L-H Transition Simulation Framework with BOUT++ code, 第 12 回核燃焼プラズマ統合コード研究会、2014-12-11、九州大学応用力学研究所 (福岡県・春日市)
- ⑦ H. Seto, G. Breyiannis, M. Yagi, B. D. Dudson and X. Q. Xu, Simulation of L-H transition in BOUT++ framework, 24th International Toki Conference, 2014-11-04、セラトピア土岐 (岐阜県・土岐市)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀬戸 春樹 (SETO HARUKI)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所 博士研究員

研究者番号 : 90733692