

機関番号：15501
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560766
 研究課題名（和文） 核燃焼トカマクの運動論的マルチスケール MHD 現象の
 第一原理シミュレーション研究
 研究課題名（英文） First principle simulation of kinetic and
 multi-scale MHD phenomena in burning tokamaks
 研究代表者
 内藤 裕志（NAITO HIROSHI）
 山口大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：10126881

研究成果の概要（和文）：

MHD 現象解析用のジャイロ運動論的粒子コード Gpic-MHD を、8192 論理コアを持つ最新鋭のスカラースMP クラスタシステムである SR16000 にインストールした。最大論理コアまでの良好なスケールリングが得られることを実証した。また大規模・高ベータトカマクのパラメータでのシミュレーションを可能にするため新しいアルゴリズムを提案した。新しいアルゴリズムを適用した Gpic-MHD コードが所期の性能を示すことを実証した。

研究成果の概要（英文）：

The gyrokinetic PIC (particle-in-cell) code for MHD simulation, Gpic-MHD, was installed on SR1600, which is a state-of-the-art scalar SMP (symmetric multiprocessing) cluster system consisting of 8192 logical cores. The good performance was obtained up to the maximum number of logical cores. The new algorithm was proposed to simulate large-scale and high-beta tokamaks. The new version of Gpic-MHD with new algorithm verified the expected performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ、電磁流体力学、ジャイロ運動論、トカマク、超並列計算

1. 研究開始当初の背景

第一原理シミュレーションコードの一つであるジャイロ運動論的粒子コードはトカマク中の輸送解析には大きな成果をあげてきたが、多くは静電近似コードであり、電磁コードの利用はまだ始まったばかりであった。特にトカマクプラズマの磁力線の再結合（内部キンクモード、テアリングモード）を含む MHD 現象を解析可能なジャイロ運動論的電磁コー

ドは開発途上であった。一方で使用可能な並列コンピュータの性能の向上は著しく、第一原理シミュレーションの可能性が極めて高まっていた。従って、MHD 現象のシミュレーションの為に3次元電磁ジャイロ運動論的粒子コードを現実のトカマクシミュレーションに適用する絶好の機会と判断し、本研究計画を企画した。

2. 研究の目的

トカマク実験で観測される MHD 的現象の理解には、従来の MHD 理論を超えた運動論的 MHD 理論に基づくシミュレーション研究が必須である。ジャイロ運動論を基礎とする粒子 (PIC: Particle-In-Cell) シミュレーションは、第一原理シミュレーションであるため莫大な計算機資源を必要とするが、流体系のシミュレーションで用いられるモーメント方程式を求める際の“closure”の問題から自由である特徴がある。我々は、MHD 解析に特化した円柱版のジャイロ運動論的粒子コード Gpic-MHD (Gyrokinetic PIC code for MHD simulation) を開発した。高度計算科学に対応した超高並列化は本コードを実行するために必須である。本研究の目的は Gpic-MHD を超高並列コンピュータに適合して改良し、ITER 等の高温・高密度の核燃焼を含むトカマクプラズマの巨視的・運動論的 MHD 現象を解明することである。

3. 研究の方法

円柱版 Gpic-MHD の概要は以下のとおりである。デルタエフ法を用いたジャイロ運動論的 PIC コード。半径方向は差分法を用い、非一様メッシュに対応している。ポロイダル方向とトロイダル方向は高速フーリエ変換を用いてモード展開している。擬スペクトル法を用いる。フーリエ空間で不必要なモードを消去することにより、時間ステップ幅を大きくしている。スレッド並列 (自動並列コンパイラ使用) とプロセス並列 (MPI 使用) を併用したハイブリッド並列コードになっている。プロセス並列は、領域分割と粒子分割 (場の量のレプリカを用いる) を併用する。

4. 研究成果

単一ヘリシティを仮定した 2 次元版 Gpic-MHD と、マルチヘリシティに対応した 3 次元版 Gpic-MHD を核融合科学研究所の並列コンピュータである SR16000 にインストールし、並列化性能を検証した。また、標準的なジャイロ運動論的 PIC コードのアルゴリズムに加えて先進的アルゴリズムの開発研究も行った。研究成果は以下のようにまとめられる。

(1) 標準的な Gpic-MHD により、鋸歯状振動の崩壊過程に関連する運動論的内部キンクモードの線形・非線形のシミュレーションが可能であることを示した [雑誌論文 6]。Gpic-MHD は「クロージャー」の問題がないため、流体コードの結果の正当性・健全性をチェックするためにも有用である。

(2) 2 次元版 Gpic-MHD は、SMP 自動並列化と粒子分割を用いた MPI 並列化のハイブリッド並列化により、8192 論理コアまで良好な並列化性能が得られることを実証した。

(3) 3 次元版 Gpic-MHD は、場の量の計算

が増大するため、並列化のため領域分割を利用している。トロイダル方向のみの 1 次元領域分割の場合 [雑誌論文 1]、トロイダル方向と半径方向の 2 次元領域分割の場合 [雑誌論文 1,2] に対して良好な並列化スケールリングを得た。図 1 は 2 次元領域分割の場合の FLOPS 値の論理コア数依存性を示したものである。場の量を表すメッシュ数は $1025 \times 128 \times 128$ とし、81.92 億個の粒子 (電子とイオン) を使用して、1000 時間ステップを追跡した場合の結果である。軸方向と半径方向の分割数、コピーの数を適切に選択することにより、計算性能の論理コア数に対する良好なスケールリングが得られることを示している。

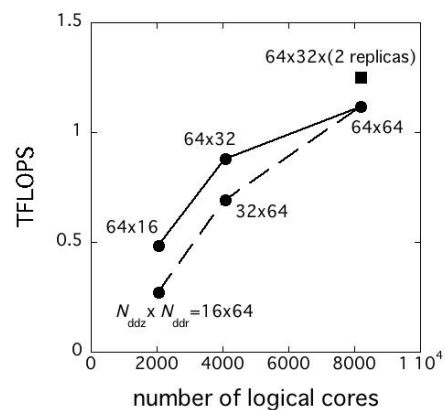


図 1. FLOPS 値の論理コア数依存性
ddr と ddz はそれぞれ半径方向とトロイダル方向の領域分割数を示している。

(4) 標準的なジャイロ運動論的 PIC コードは、大規模・高ベータのプラズマを取り扱う場合、電流密度から磁場を求める際に大きな誤差が生じることが知られている (「キャンセル」の問題)。この問題の解決法として split-weight-scheme があるが、我々は場の量の計算に渦方程式と磁力線方向のオームの法則を用いる方法を提唱し、大規模・高ベータの領域でも精度良く運動論的内部キンクモードがシミュレーションできることを実証した [H. Naitou, Y. Yamada, K. Kajiwara, W. W. Lee, S. Tokuda, M. Yagi, Global and Kinetic MHD Simulation by the Gpic-MHD Code, 査読有, 投稿中]。新しいアルゴリズムでは、場の量は時間差分により求められる。図 2 は、大規模 ($d_e/a \ll 1$) 高ベータ ($b_e m_i/m_e \gg 1$) の円柱トカマクにおいても、無衝突プラズマの内部キンクモードの成長率が正しくシミュレーションできることを示している。

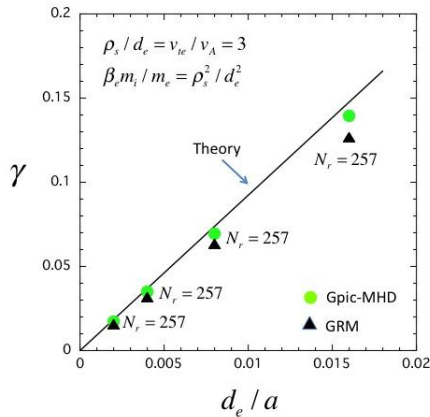


図2. 内部キンクモードの線形成長率の無衝突スキン長依存性

(5) トロイダル化の為に定式化等の検討を行った。円柱版の拡張で対応できる見通しであるが、実際のコード化は今後の課題として残された。

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 10 件)

- ① H. Naitou, H. Hashimoto, Y. Yamada, S. Tokuda, M. Yagi, Parallelization of Gyrokinetic PIC Code for MHD Simulation, PNST, 査読有, 受理
- ② H. Naitou, Y. Yamada, S. Tokuda, Y. Ishii, M. Yagi, HPC parallel programming model for MHD simulation, PFR SERIES, 査読有, 受理
- ③ J. Shiraishi, S. Tokuda, Numerical Matching Scheme for Stability Analysis of Flowing Plasmas, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Vol.38 (2010), 2169-2176.
- ④ J. Shiraishi, S. Tokuda, N. Aiba, A matching problem revisited for stability analysis of resistive wall modes in flowing plasmas, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.17 (2010), 012504-1-012504-9.
- ⑤ Y. Ishii, Magnetic island formation by external cyclic perturbation in rotating and non-rotating plasmas, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.5 (2010), 002-1-002-7.
- ⑥ H. Naitou, K. Kobayashi, H. Hashimoto, S. Tokuda, M. Yagi, Development and parallelization of gyrokinetic PIC code for MHD simulation, J. Plasma and Fusion

Res. SERIES, 査読有, Vol.8 (2009), 1158-1161.

- ⑦ M. Yagi, S.-I. Itoh, K. Itoh, Multi-scale interaction between MHD, turbulence and transport in tokamak plasmas, J. Plasma Fusion Res. SERIES, 査読有, Vol.8 (2009), 122-125.
- ⑧ Y. Ishii, A.I. Smolyakov, M. Takechi, Plasma rotation effects on magnetic island formation and the trigger of disruptions in reversed shear plasma, Nuclear Fusion, 査読有, Vol.49 (2009), 085006-1-085006-10.
- ⑨ 中島徳嘉, 内藤裕志, 藤堂泰, 石澤明宏, 流体としての磁場閉じ込め核融合プラズマ—実験を意識した電磁流体力学方程式の拡張—, プラズマ・核融合学会誌, 査読無, 85巻 (2009), 105-118
- ⑩ Y. Kagei, S. Tokuda, Numerical Matching Scheme for Linear Magnetohydrodynamic Stability Analysis, 査読有, Vol.3 (2008), 039-1-039-5 (公開 2009年2月)

[学会発表] (計 47 件)

- ① H. Naitou, S. Tokuda, Y. Ishii, M. Yagi, Parallelization of Gyrokinetic PIC code for MHD simulation, US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling and Simulation in Toroidal Plasmas, 京都・Kyoto University, March 10, 2011.
- ② 山田雄介, 内藤裕志, 田内康, 徳田伸二, 矢木雅俊, 3次元ジャイロ運動論的粒子コードのハイブリッド並列化, プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部 第14回支部大会, 2010年12月18日, 福岡・九州大学。
- ③ H. Naitou, Y. Yamada, S. Tokuda, Y. Ishii, M. Yagi, HPC Parallel Programming Model for Gyrokinetic MHD Simulation, 20th International Toki Conference (ITC-20) on the Next Twenty Years in Plasma and Fusion Science, December 7, 2010, Csratopia Toki, Toki-City, Gifu, Japan.
- ④ 影井康弘, 徳田伸二, 非適合型ベクトル有限要素法によるMHD安定性解析手法の開発と応用, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 2010年12月2日, 北海道大学学術交流会館, 北海道札幌市。
- ⑤ 篠田佳祐, 内藤裕志, 原田直幸, ジャイロ簡約MHDコードの並列化, 平成22年度(第60回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2010年10月23日, 岡山・岡山県立大学。
- ⑥ 梶原健司, 内藤裕志, 原田直幸, 徳田伸二, 矢木雅俊, 新しいGpicMHDコードによる運動論的內部キンクモードのシミュレーショ

- ン、平成22年度(第60回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2010年10月23日、岡山・岡山県立大学。
- ⑦山田雄介、内藤裕志、田内康、徳田伸二、矢木雅俊、2次元方向領域分割によるジャイロ運動論的粒子コードの並列化(1)、平成22年度(第60回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2010年10月23日、岡山・岡山県立大学。
- ⑧高木脩至、内藤裕志、田内康、徳田伸二、矢木雅俊、2次元方向領域分割によるジャイロ運動論的粒子コードの並列化(2)、平成22年度(第60回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2010年10月23日、岡山・岡山県立大学。
- ⑨H. Naitou, Y. Yamada, S. Tokuda, M. Yagi, Parallelization of Gyrokinetic PIC Code for MHD Simulation, Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA+MC2010), October 20, 2010, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan.
- ⑩徳田伸二、影井康弘、磁気流体シミュレーションのための非適合型ベクトル有限要素法、日本物理学会2010秋季大会、2010年9月2日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス、大阪府堺市。
- ⑪H. Naitou, Y. Yamada, K. Kajiwara, W. W. Lee, S. Tokuda, M. Yagi, Global and Kinetic MHD Simulation by the Gpic-MHD Code, China-Japan CUP seminar on 'Modeling of Theory and Simulation of Fusion Plasmas', August 31, 2010, Beijing, China.
- ⑫H. Naitou, Y. Yamada, K. Kajiwara, W. W. Lee, S. Tokuda, M. Yagi, Gyrokinetic PIC simulation for kinetic MHD phenomena in tokamaks, 5th Japan-Korea Workshop on 'Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas', July 29, 2010, POSCO International Center, POSTECH, Pohang Korea, .
- ⑬白石淳也、徳田伸二、プラズマ流の安定性解析における接続問題、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月22日、岡山大学、岡山県岡山市。
- ⑭H. Naitou, K. Kobayashi, H. Hashimoto, Y. Yamada, S. Tokuda, M. Yagi, Parallelization of the gyrokinetic PIC code for MHD simulation, 15th NEXT workshop, March 18, 2010, Kyodai-Kaikan, Kyoto.
- ⑮山田雄介、内藤裕志、田内康、徳田伸二、矢木雅俊、2次元方向領域分割によるジャイロ運動論的粒子コードの並列化、プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第13回支部大会、2009年12月22日、山口大学工学部、山口県宇部市。
- ⑯豊原準、内藤裕志、矢木雅敏、徳田伸二、4場のジャイロ簡約MHDモデルによるトカマクの内部キンクモードのシミュレーション、プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第13回支部大会、2009年12月22日、山口大学工学部、山口県宇部市。
- ⑰橋本啓樹、内藤裕志、徳田伸二、矢木雅敏、1次元方向領域分割によるジャイロ運動論的粒子コードの並列化、プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第13回支部大会、2009年12月22日、山口大学工学部、山口県宇部市。
- ⑱今石直之、内藤裕志、田内康、GPUを用いたPICコードの高速化の研究、プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第13回支部大会、2009年12月22日、山口大学工学部、山口県宇部市。
- ⑲安達貴久、内藤裕志、矢木雅敏、徳田伸二、運動論的內部キンクモードに対するポロイダルシア流と密度勾配の相乗効果、プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第13回支部大会、2009年12月22日、山口大学工学部、山口県宇部市。
- ⑳小林健一、内藤裕志、徳田伸二、矢木雅敏、新しい巨視的・運動論的MHD解析用ジャイロ運動論的PICコードの提案、プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第13回支部大会、2009年12月22日、山口大学工学部、山口県宇部市。
- ㉑内藤裕志、PCクラスタの原理と基礎、プラズマ・核融合学会第22回専門講習会、2009年12月16日、東京大学山上会館、東京都。
- ㉒H. Naitou, W. W. Lee, S. Tokuda, M. Yagi, New algorithm of the gyrokinetic PIC code for MHD simulation, US-Japan JIFT Workshop on 'Advanced Simulation Methods in Plasmas', Dec. 14, 2009, NIFS, Gifu-ken, Toki-city.
- ㉓白石淳也、徳田伸二、流れをもつプラズマの安定性解析における接続問題—抵抗性壁モードへの応用—、第26回プラズマ・核融合学会年会、2009年12月4日、国際交流会館、京都府京都市。
- ㉔H. Naitou, K. Kobayashi, H. Hashimoto, T. Andachi, W. W. Lee, S. Tokuda, M. Yagi, Proposal of a brand-new gyrokinetic algorithm for global MHD simulation, 51st annual meeting of the division of plasma physics, American Physical Society, Nov. 2, 2009, Hyatt Regency, Atlanta, Georgia, USA.
- ㉕豊原準、内藤裕志、矢木雅敏、徳田伸二、4場のジャイロ簡約MHDコードによるトカマクの内部キンクモードの安定性解析、電気・情報関連学会中国支部第60回連合大会、

- 2009年10月17日、広島市立大学、広島県広島市。
- ②6 安達貴久、内藤裕志、矢木雅敏、徳田伸二、ポロイダルシア流と密度勾配がある場合の運動論的内部キンクモードの安定性解析、電気・情報関連学会中国支部第60回連合大会、2009年10月17日、広島市立大学、広島県広島市。
- ②7 今石直之、内藤裕志、田内康、GPUを用いた粒子シミュレーションの高速化の研究、電気・情報関連学会中国支部第60回連合大会、2009年10月17日、広島市立大学、広島県広島市。
- ②8 小林健一、内藤裕志、徳田伸二、矢木雅敏、MHD解析用ジャイロ運動論的粒子コードにおける新しいアルゴリズムの提案、電気・情報関連学会中国支部第60回連合大会、2009年10月17日、広島市立大学、広島県広島市。
- ②9 橋本啓樹、内藤裕志、徳田伸二、矢木雅敏、ハイブリッドモデルによるジャイロ運動論的粒子コードの並列化、電気・情報関連学会中国支部第60回連合大会、2009年10月17日、広島市立大学、広島県広島市。
- ③0 山田雄介、内藤裕志、田内康、OpenMPによる粒子コードの並列化、電気・情報関連学会中国支部第60回連合大会、2009年10月17日、広島市立大学、広島県広島市。
- ③1 H. Naitou, K. Kobayashi, H. Hashimoto, T. Andachi, W.W. Lee, S. Tokuda, M. Yagi, Gyrokinetic particle simulation code for global MHD, 4th Japan-Korea workshop on 'Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas', Aug. 3, 2009, JAEA, Ibaraki-ken, Naka-city.
- ③2 Y. Ishii, Trigger of MHD activities by external magnetic perturbations, The 4th IEAA-TM on the Theory of Plasma Instabilities, May 19, 2009, Kyoto University, Kyoto.
- ③3 H. Naitou, W.W. Lee, S. Tokuda, M. Yagi, Development of gyrokinetic PIC code for global kinetic MHD simulation, The 4th IEAA-TM on the Theory of Plasma Instabilities, May 18, 2009, Kyoto University, Kyoto.
- ③4 徳田伸二、白石淳也、影井康弘、MHD安定性解析における接続問題、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月27日、立教大学、東京。
- ③5 H. Naitou, K. Ishida, K. Ishida, K. Kobayashi, M. Yagi, S. Tokuda, Development of gyrokinetic PIC code for MHD simulation, 第14回NEXT研究会、2009年3月10日、京大会館、京都。
- ③6 H. Naitou, W.W. Lee, S. Tokuda, M. Yagi, Global kinetic MHD simulation by the gyrokinetic PIC code, 7th Burning Plasma Simulation Initiative Meeting, December 19, 2008, RIAM, Kyushu University, Fukuoka.
- ③7 影井康弘、徳田伸二、MHD発展方程式及び固有値問題の数値接続法、第25回プラズマ核融合学会年会、2008年12月3日、栃木県総合文化センター、宇都宮市。
- ③8 H. Naitou, W.W. Lee, S. Tokuda, M. Yagi, Global kinetic MHD simulation by the gyrokinetic PIC code, 2008 U.S.-Japan Workshop, Progress of Multi-Scale Simulation Models, November 21, 2008, Hyatt Regency Dallas, Dallas, USA.
- ③9 J. Shiraishi, S. Tokuda, N. Aiba, A New Matching Method for the Resistive Wall Mode Analysis of Rotating Plasmas, 50th annual meeting of the division of Plasma Physics, American Physical Society, November 21, 2008, Hyatt Regency Dallas, USA.
- ④0 H. Naitou, K. Kobayashi, H. Hashimoto, T. Andachi, S. Tokuda, M. Yagi, Comparison of kinetic MHD simulation results between gyrokinetic PIC and gyro-reduced-MHD codes, 50th annual meeting of the division of Plasma Physics, American Physical Society, November 17, 2008, Hyatt Regency Dallas, USA.
- ④1 S. Tokuda, J. Shiraishi, Y. Kagei, N. Aiba, A New Matching Scheme for Resistive Wall Mode Analysis, 22nd IEA Fusion Energy Conference, November 17, 2008, Geneva, Switzerland.
- ④2 安達貴久、内藤裕志、矢木雅敏、徳田伸二、ポロイダルシア流がある場合の運動論的内部キンクモードの安定性解析、平成20年度電気・情報関連学会中国支部連合大会、2008年10月25日、鳥取大学、鳥取市。
- ④3 橋本啓樹、内藤裕志、徳田伸二、矢木雅敏、ジャイロ運動論的粒子コードの並列化、平成20年度電気・情報関連学会中国支部連合大会、2008年10月25日、鳥取大学、鳥取市。
- ④4 小林健一、内藤裕志、徳田伸二、矢木雅敏、MHD解析用ジャイロ運動論的粒子コードにおける新しいアルゴリズムの検討、平成20年度電気・情報関連学会中国支部連合大会、2008年10月25日、鳥取大学、鳥取市。
- ④5 今石直之、内藤裕志、田内康、福政修、GPUを用いた高速粒子シミュレーション手法の開発、平成20年度電気・情報関連学会中国支部連合大会、2008年10月25日、鳥取大学、鳥取市。
- ④6 H. Naitou, K. Kobayashi, H. Hashimoto, S. Tokuda, M. Yagi, Development and parallelization of gyrokinetic PIC code

for MHD simulation, International Congress on Plasma Physics 2008, September 9, 2008, International Congress Center, Fukuoka.

- ④7 徳田伸二、影井康弘、MHD 発展方程式及び固有値問題における数値接続法、第 57 回理論応用力学講演会、2008 年 6 月 11 日、日本学術会議、東京都。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内藤 裕志 (NAITO HIROSHI)
山口大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：10126881

(2) 研究分担者

徳田 伸二 (TOKUDA SHINJI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
核融合研究開発部門
研究開発部門・研究主幹→研究職
研究者番号：60354578
(H20 年 4 月-H21 年 9 月)
(H22 年 4 月-H23 年 3 月)

大原 渡 (OHAR WATARU)
山口大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：80312601

石井 康友 (ISHII YASUTOMO)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
核融合研究開発部門
研究開発部門・研究副主幹
研究者番号：70354579
(H21 年 10 月-H22 年 3 月)

(3) 連携研究者

矢木 雅敏 (YAGI MASATOSHI)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号：70274537

松本 太郎 (MATSUMOTO TARO)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
核融合研究開発部門
研究開発部門・研究副主幹
研究者番号：50354676

武智 学 (TAKECHI MANABU)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
核融合研究開発部門
研究開発部門・研究員→研究副主幹 (H20
年 7 月-)
研究者番号：40370423

石井 康友 (ISHII YASUTOMO)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
核融合研究開発部門
研究開発部門・研究副主幹→研究主幹 (H22
年 7 月-)
研究者番号：70354579
(H22 年 4 月-H23 年 3 月)