

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760711

研究課題名(和文) 運動論の効果を取り入れた流体モデルによる非接触ダイバータプラズマの動的挙動の解明

研究課題名(英文) Study on dynamic behaviors of detached divertor plasma by using fluid modeling incorporating kinetic effects

研究代表者

中村 誠 (Nakamura, Makoto)

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 六ヶ所核融合研究所・研究員

研究者番号：80462886

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)：イオン温度非等方性を考慮に入れ、ダイバータプラズマ流体の振る舞いを記述するために、従来のモデルを拡張した新しいダイバータプラズマ流体モデルを開発した。新たに開発したモデルを用いた周辺プラズマ解析により、プラズマが衝突領域にある場合、イオン温度は等方的であり従来のダイバータプラズマ流体モデルに基づく解析と一致するが、プラズマが無衝突領域にある場合、イオン温度の非等方性が確認された。さらに、新たに開発したモデルを用いて、シース入り口におけるプラズマの超音速流を記述できることを示した。新たなモデルを用いて評価した非等方的イオン温度を用いて粘性項を評価した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new, extended fluid model of SOL-divertor plasma with incorporating anisotropy of the plasma ion temperature in order to depict behavior of the SOL-divertor plasma. We found that while in collisional plasma, the ion temperature calculated by using the new model agree with that derived by the conventional model, in collisionless plasma the ion temperature is anisotropic. It was also found that the supersonic flow of the divertor plasma at the sheath entrance can be simulated by using the extended fluid model. We evaluated the viscous term by using the anisotropic ion temperature calculated.

研究分野：核融合炉工学

キーワード：核融合 周辺プラズマ ダイバータ 非接触プラズマ 動的解析

1. 研究開始当初の背景

トラス型磁場閉じ込め核融合装置において、ダイバータは炉心プラズマから流出する熱・粒子の制御という極めて重要な役割を担う。ダイバータには炉心から流出する熱・粒子負荷が集中するので、この除熱は磁場閉じ込め制御核融合の成立の鍵を握る。国際熱核融合実験炉(略称 ITER)のプラズマ設計では、工学的制約から平均値で 10 MW/m^2 以下にすることが求められている。ダイバータの除熱のためには、非接触ダイバータプラズマの形成が必要不可欠である。非接触ダイバータプラズマは、ダイバータ板近傍での中性粒子等によるプラズマの運動量・エネルギーの損失、体積再結合反応によるプラズマ粒子の損失により形成される。このときプラズマはダイバータまで到達しない(つまり非接触な)状態にある。これによりダイバータ熱・粒子負荷を大幅に低減化できる。このように、ダイバータの熱・粒子負荷の低減化、ひいては将来の核融合炉の実現に向けて、非接触ダイバータプラズマの物理特性の解明が鍵を握る。

現在世界各国で非接触ダイバータプラズマの研究が行われている。JET(英)、DIII-D(米)、ASDEX-U(独)、JT-60U(日)等の多くのプラズマ実験装置で非接触ダイバータプラズマが観測されている。これらの実験から、赤道面セパトロクス密度が上昇し、ある閾値を超えると、プラズマ熱流束と粒子束が減少(ロールオーバー)し、プラズマは接触状態から非接触状態に遷移することが分かった。モデリング研究も盛んに行われている。モデリング手法としては、2次元プラズマ流体コードと中性粒子モンテカルロコードを併用した統合ダイバータシミュレーションが主流であり、これまでに SOLPS(独)、UEDGE(米)、SONIC(日)といった大規模統合コードが開発された。これらのコードにより、熱流束のロールオーバーは再現できた。しかし、イオン粒子束のロールオーバーは再現できていない。以上のように、非接触ダイバータプラズマの発現機構は、いまだ解明されていないのが現状である。

このため、非接触ダイバータモデルの改善のために、様々な物理効果が調べられている。その中で、運動論的效果はとりわけ重要と考えられている。運動論的效果とは局所熱平衡からのズレ、すなわち速度分布関数の等方的 Maxwell 分布からのズレである。接触状態のプラズマとは異なり、非接触プラズマは極めて低密度であるので、プラズマ粒子の衝突頻度が小さいので、局所熱平衡に達せず、巨視的には磁力線に平行方向と垂直方向でのイオン温度の非等方性($T_{i||} \neq T_i$)が現れる可能性がある。

このような運動論的效果を大規模統合コードに導入すれば、モデリングは大幅に改善されるであろう。しかし、計算 1 ケースあたり数日から数週間要するため、大規模統合コ

ードに運動論的效果を導入するのは、計算時間の観点から難しい。従って、非接触ダイバータモデルの改善に向けて運動論的效果を解析するには、簡易的な物理モデルを用いる必要がある。

申請者はこれまでに、1次元流体モデルを用いて非接触ダイバータプラズマの数値解析を行ってきた。周辺プラズマ領域を径方向に内側・外側に分け、径方向輸送をソース項としてモデル化し、動的シミュレーションを行った。非接触ダイバータプラズマの安定性には、径方向輸送のモデル化が重要であることが明らかになった。最近になり、申請者が開発した 1次元流体モデルに運動論的效果を取り入れることで、現実的な計算時間の範疇で非接触ダイバータプラズマにおける運動論的效果の寄与を解析し、非接触状態への遷移と維持の動的解析を行うことができるに至った。計算時間をあまり必要しない点、ならびに、運動論的效果と他の物理効果の定量的比較が行いやすい点において、大規模統合コードモデリングと比較して 1次元モデルは有利である。

2. 研究の目的

この研究の目的は、運動論的效果をプラズマ流体モデルに取り入れ、非接触ダイバータプラズマの発現と維持の動的挙動を解明することにある。イオン温度非等方性を考慮に入れるように、従来の 1次元プラズマ流体モデルを拡張する。従来の等方的イオン温度を仮定した流体モデルとの比較を行い、この効果が非接触ダイバータプラズマの発現に及ぼす影響を解明する。

3. 研究の方法

イオン温度非等方性を考慮に入れるように、従来のプラズマ流体モデルを拡張する。従来のダイバータプラズマ解析におけるプラズマ流体方程式は、(i)連続の式(イオン粒子保存式)、(ii)イオンの運動量保存式、(iii)電子のエネルギー保存式、(iv)イオンのエネルギー保存式から構成される。従来のプラズマ流体モデルでは、磁力線に平行方向と垂直方向でイオン温度は等しい($T_{i||} = T_i = T$)と仮定していた。本研究ではイオンのエネルギー保存式を磁力線に平行方向の温度($T_{i||}$)成分と垂直方向の温度(T_i)成分の方程式に分割する。さらに、 $T_{i||} = T_i$ の仮定に由来している粘性による速度拡散項は、運動量保存式から取り除かれる。

上に記した物理モデルを用いて、様々なプラズマ条件のもとで非接触ダイバータプラズマの発現の動的挙動を解析する。特に興味があるのは、高リサイクリングダイバータから非接触ダイバータへの遷移である。高リサイクリングダイバータでは、イオン温度は等方的と考えられる。しかし、非接触ダイバータになるとプラズマ密度が極端に小さくなるため、等方化時間が極めて大きくなり、イ

オン温度の非等方性が極めて強くなると考えられる。このため、イオン温度の非等方性は高リサイクリングダイバータから非接触ダイバータへの遷移に大きな影響を与えると考えられる。

従来のプラズマ流体モデルでは、イオン運動量保存式の境界条件として、上流の流速をゼロ ($V = 0$) とし、ダイバータ板での流速はイオン音速に等しい ($M = 1$, M : マッハ数=イオン流速/イオン音速) と置いていた。しかし、イオン温度非等方性を導入した拡張プラズマ流体モデルにおいては、イオンの運動量保存式は1階の偏微分方程式であるので、上流の流速を仮定すればダイバータ板での境界条件を課す必要がない。一方、非接触ダイバータプラズマを対象とした粒子シミュレーションにおいて、 $M > 1$ の超音速流の解が得られている。このため、上記の拡張プラズマ流体モデルを用いれば、高リサイクリング状態から非接触状態に移行に伴う亜音速・超音速遷移が解析できる。

4. 研究成果

4.1 拡張したプラズマ流体モデルの開発
イオン温度非等方性を考慮に入れ、ダイバータプラズマ流体の振る舞いを記述するために、従来のモデルを拡張した新しいダイバータプラズマ流体モデルを開発した。

運動論的方程式(ボルツマン方程式)のモーメントを計算することにより、プラズマ密度 n 、流速 V 、磁力線に並行方向のイオン温度 $T_{i||}$ 、磁力線に垂直方向のイオン温度 T_i 、電子温度 T_e について、磁力線に並行方向の拡張された1次元流体方程式を導出した。導出した方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nV)}{\partial s} = S \quad (1)$$

$$\frac{\partial(m_i n V)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} (m_i n V^2 + n T_{i||} + n T_e) = M_m \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} m_i n V^2 + \frac{1}{2} n T_{i||} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{1}{2} m_i n V^3 + \frac{3}{2} n T_{i||} V + c q_{i||}^{eff} \right) \\ & = Q_{i||} + \frac{n(T_{i\perp} - T_{i||})}{t_{rx}} + \frac{m_e n(T_e - T_{i||})}{m_i t_e} - V \frac{\partial(n T_e)}{\partial s} \end{aligned} \quad (3)$$

(3)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(n T_{i\perp})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} (n T_{i\perp} V + (1-c) q_{i\perp}^{eff}) \\ & = Q_{i\perp} - \frac{n(T_{i\perp} - T_{i||})}{t_{rx}} + \frac{2m_e n(T_e - T_{i\perp})}{m_i t_e} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n T_e \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{5}{2} n T_e V + q_e^{eff} \right) \\ & = Q_e + \frac{3m_e n(T_i - T_e)}{m_i t_e} + V \frac{\partial(n T_e)}{\partial s} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで t は時刻、 s は磁力線方向の距離の座標、 m_i はイオン質量、 m_e は電子質量である。実効イオン温度 T_i は、

$$T_i = \frac{T_{i||} + 2T_{i\perp}}{3} \quad (6)$$

と表される。 $q_{i||}^{eff}$ 、 q_i^{eff} 、 q_e^{eff} はそれぞれ $T_{i||}$ 、 T_i 、 T_e についての熱流束である。

4.2 拡張したプラズマ流体モデルに適合する新しい数値流体解析手法の適用

第3節(研究の方法)で指摘したように、従来のプラズマ流体モデルでは、イオン運動量保存式の境界条件として、上流の流速をゼロ ($V = 0$) とし、ダイバータ板での流速はイオン音速に等しい ($M = 1$, M : マッハ数=イオン流速/イオン音速) と置いていた。しかし、イオン温度非等方性を導入した拡張プラズマ流体モデルにおいては、イオンの運動量保存式は1階の偏微分方程式であるので、上流の流速を仮定すればダイバータ板での境界条件を課す必要がない。しかしながら、一般的にダイバータ近傍シース入り口において、プラズマ流体は $M \geq 1$ (ボーム条件) を満たす必要がある。この問題を解決するため、本研究では「擬似ダイバータモデル」を新たに導入した。このモデルの概略を図1に示す。

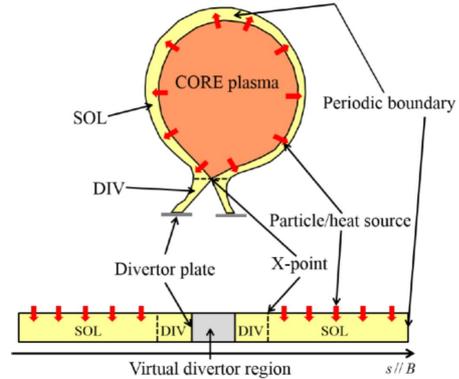


図1 擬似ダイバータモデルの概略図

「擬似ダイバータモデル」の基本的な考え方は以下のとおりである。

- i. ダイバータ内部まで流体方程式を擬似的に延長する。
- ii. シース入り口においてプラズマ流体がボーム条件を満足するように、ダイバータ内部の流体方程式に擬似的ソースタームを付加する。
- iii. ダイバータ内部(擬似ダイバータ領域)で周期境界条件を課し、反対側のダイバータ内部と擬似的に接続する。
擬似ダイバータ領域まで拡張したプラズ

マ流体方程式のソースタームを、以下のようにモデル化した。

$$S = \begin{cases} \Gamma_{sep}/A_{\parallel}L_{SOL} & (\text{in SOL plasma}) \\ 0 & (\text{in divertor plasma}) \\ -n/t^{VD} & (\text{in VD region}) \end{cases} \quad (7)$$

$$M_m = \begin{cases} 0 & (\text{in SOL \& divertor plasma}) \\ -\frac{m_i n V}{t^{VD}} + \frac{\partial}{\partial s} \left(m_i n D_m^{VD} \frac{\partial V}{\partial s} \right) & (\text{in VD region}) \end{cases} \quad (8)$$

$$Q_{\parallel} = \begin{cases} P_{sep}/6A_{\parallel}L_{SOL} & (\text{in SOL plasma}) \\ 0 & (\text{in divertor plasma}) \\ -\frac{1}{t^{VD}} \left(\frac{1}{2} m_i n V^2 + g_{\parallel} \frac{1}{2} n T_{\parallel} \right) & (\text{in VD region}) \end{cases} \quad (9)$$

$$Q_{i\perp} = \begin{cases} P_{sep}/3A_{\parallel}L_{SOL} & (\text{in SOL plasma}) \\ 0 & (\text{in divertor plasma}) \\ -\frac{g_{i\perp} n T_{i\perp}}{t^{VD}} & (\text{in VD region}) \end{cases} \quad (10)$$

$$Q_e = \begin{cases} P_{sep}/2A_{\parallel}L_{SOL} & (\text{in SOL plasma}) \\ Q_{rad} & (\text{in divertor plasma}) \\ -\frac{1}{t^{VD}} \left(g_e \frac{3}{2} n T_e \right) & (\text{in VD region}) \end{cases} \quad (11)$$

シース入り口においてボーム条件を再現できるように、擬似ダイバータ領域におけるモデルソースタームを構築した。

4.3 解析結果

4.3.1 擬似ダイバータモデルの妥当性

本研究に適用した擬似ダイバータモデルの妥当性の検証を行った。SOL 領域長 $L_{SOL} = 2$ m、ダイバータプラズマ領域長 $L_{div} = 1$ m、擬似ダイバータ領域長 $L_{VD} = 1.5$ m の系について、擬似ダイバータモデルソースタームを拡張したダイバータプラズマ流体方程式に付加し、検証数値計算を行った。

検証計算の結果を図2に示す。ここでは、数値計算におけるメッシュ幅 s に対するマッハ数 M の依存性を表示している。図2(c)はシース入り口 ($s = 2.0$ m) 近傍の拡大図である。メッシュ幅 s を小さくすると、シース入り口において $M = 1$ となり、擬似ダイバータモデルを用いてボーム条件を記述できることすなわち擬似ダイバータモデルの妥当性を示している。

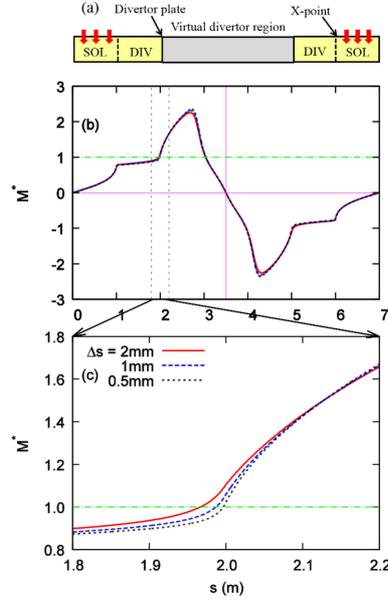


図2 (a) 計算体系の模式図、(b) マッハ数の空間分布、(c) マッハ数分布のシース入り口近傍の拡大図

4.3.2 イオン温度の非等方性

次に、典型的な周辺プラズマ条件下で、拡張したダイバータプラズマ流体モデルを用いてプラズマパラメータの空間分布の解析を行った。系の幾何形状条件は図3(a)に示している。中心プラズマからセパトリクスを横切って SOL 領域に流入する粒子ソース、パワーをそれぞれ $\dot{N}_{sep} = 4 \times 10^{22} /s$, $P_{sep} = 2$ MW の場合 (衝突領域) $\dot{N}_{sep} = 2 \times 10^{22} /s$, $P_{sep} = 4$ MW の場合 (無衝突領域) の定常状態における各種物理量の空間分布を図3に示す。

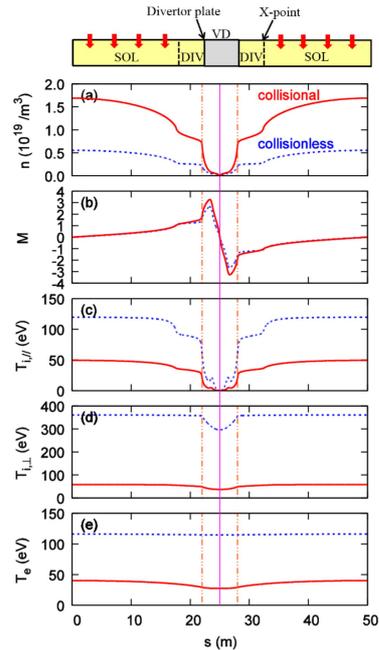


図3 本研究で開発したダイバータプラズマモデルを用いた計算で得られた周辺プラズマ物理量の空間分布

プラズマが衝突領域にある場合、おおむね $T_{i||} = T_i$ が満たされており、従来のダイバータプラズマ流体モデルに基づく解析と一致する。しかし、プラズマが無衝突領域にある場合、幅広い領域において $T_i > T_{i||}$ になっており、イオン温度の非等方性が確認された。

4.3.3 シース入り口における超音速流の再現

ダイバータ流体方程式系のうち、電子エネルギーバランス式において、ダイバータプラズマ領域における放射パワー損失項 Q_{rad} についてパラメータサーベイを行い、シース入り口におけるマッハ数 M_i の依存性を計算した。さらに、シース入り口近傍で発生するの超音速に関する従来の理論モデル(T. Takizuka et al., J. Nucl. Mater. 290-293 (2001) 753)との比較も行った。

解析で得られたマッハ数を図4に示す。ここで、放射パワー損失項 Q_{rad} は以下で定義されるパラメータ C に対応する。

$$C = \frac{M_X + M_X^{-1}}{M_i + M_i^{-1}} \quad (12)$$

ここで、 M_X , M_i はそれぞれ X 点、シース入り口におけるマッハ数である。本解析で得られた M_X , M_i は従来の理論モデルと良く一致している。これは本研究で開発したモデルを用いて、シース入り口における超音速流を適切に記述しつつ、ダイバータプラズマ流体をモデル化できることを示している。

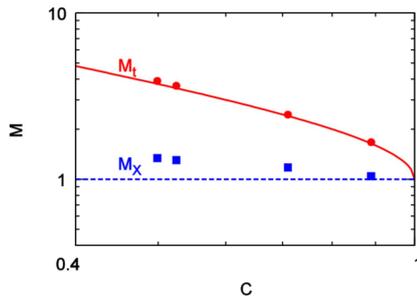


図4 本研究で開発したモデルを用いた解析で得られたマッハ数(点)と従来の理論モデル(実線、点線)で得られたものとの比較

4.3.4 従来のダイバータプラズマ流体モデルとの比較

従来のダイバータプラズマ流体モデルでは、イオン温度の非等方性を直接的に記述するかわりに、イオン流体の運動量保存式において、粘性項を導入していた。従来用いられる2通りのモデル粘性項は以下のとおりである。

$$\mathbf{p}^{BR} = -\mathbf{h}_{i||} \frac{\partial V}{\partial S}, \quad \mathbf{h}_{i||} = 0.96nT_i \mathbf{t}_i \quad (13)$$

$$\mathbf{p}^{\text{lim}} = \left(\frac{1}{\mathbf{p}^{BR}} - \frac{1}{bnT_i} \right)^{-1} \quad (14)$$

本研究で得られたイオン温度 $T_{i||}$, T_i より、

定義に従って粘性項を計算することができる。

従来のダイバータ流体モデルで用いられてきた2種類の粘性項と、本解析で得られた $T_{i||}$, T_i を用いて定義に従って計算した粘性項との比較を、図5に示す。粘性項^{BR}は無衝突領域において粘性効果を過大評価している。これは無衝突領域においてイオン温度の非等方性が強くなるためである。一方、粘性項^{BR}はダイバータプラズマ領域(粒子ソースが存在しない領域)において、イオン温度の非等方性を考慮したモデルと良く一致していることが分かる。しかし、SOL領域(粒子ソースが存在する領域)では、粘性効果を過大評価している。

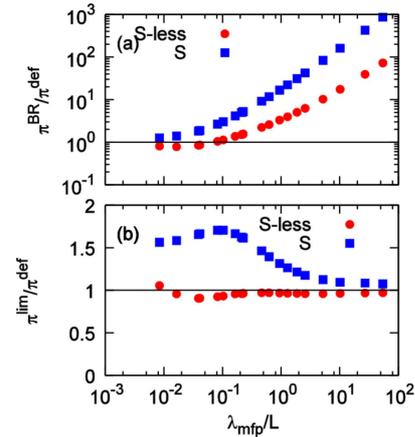


図5 従来のダイバータプラズマ流体モデルで用いられる粘性項と定義に従って評価した粘性項との比較 (S-less: ダイバータプラズマ領域、S: SOL領域)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

S. Togo, T. Takizuka, M. Nakamura, K. Hoshino, Y. Ogawa, SOL-Divertor Plasma Simulations Introducing Anisotropic Temperature with Virtual Divertor Model, Journal of Nuclear Materials, 査読有, 印刷中 2015.

S. Togo, M. Nakamura, Y. Ogawa, K. Shimizu, T. Takizuka, K. Hoshino, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.8, 2013, pp. 2403096.

S. Togo, M. Nakamura, Y. Ogawa, K. Shimizu, T. Takizuka, K. Hoshino, Effects of Radial Losses of Particle and Energy on the Stability of Detachment Front in a Divertor Plasma, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.7, 2012, pp. 2403087.

[学会発表](計5件)

S. Togo, T. Takizuka, M. Nakamura, K. Hoshino, K. Imano, T.L. Lang, Y. Ogawa, Simulation Study of Detached Plasmas by Using One-Dimensional SOL-Divertor Fluid Code with Virtual Divertor Model, 15th International Workshop on Plasma

Edge Theory in Fusion Devices, Sep. 9-11, 2015, Nara, Japan.

S. Togo, T. Takizuka, M. Nakamura, K. Hoshino, K. Imano, T.L. Lang, Y. Ogawa, Improvement of One-Dimensional Fluid Modeling of the SOL-Divertor Plasmas and Neutrals Concerning the Anisotropy of Ion Temperature and the Diffusion Coefficient of Neutrals, 42nd European Physical Society Conference on Plasma Physics, Jun. 25, 2015, Lisbon, Portugal.

S. Togo, T. Takizuka, M. Nakamura, K. Hoshino, Y. Ogawa, Simulation Study Using a Virtual Divertor Model on the Supersonic Flow in SOL-Divertor Plasmas Considering the Anisotropic Ion Temperature, PLASMA Conference 2014, Nov. 20, 2014, Niigata, Japan.

S. Togo, T. Takizuka, M. Nakamura, K. Hoshino, Y. Ogawa, SOL-Divertor Plasma Simulations Introducing Anisotropic Temperature with Virtual Divertor Model, 21st International Conference on Plasma Surface Interactions, May. 27, 2014, Kanazawa, Japan.

S. Togo, M. Nakamura, Y. Ogawa, K. Shimizu, T. Takizuka, K. Hoshino, Effects of Neutral Particles on the Stability of Detachment Fronts in Divertor Plasmas, 22nd International Toki Conference, Nov. 20, 2012, Toki, Japan.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

中村 誠 (NAKAMURA, Makoto)

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六ヶ所核融合研究所・研究員

研究者番号：80462886