

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760700

研究課題名（和文） $^{13}\text{CH}_4$ を用いた炭素不純物のプラズマ中での輸送機構の解明研究課題名（英文） Investigation of carbon impurity transport in plasmas by using $^{13}\text{CH}_4$

研究代表者

仲野 友英 (NAKANO TOMOHIDE)

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・研究職

研究者番号：50354593

研究成果の概要（和文）：

炭素材の真空容器保護タイルが損耗しプラズマ中を輸送されて堆積するまでの経路を調べるため、人為的に $^{13}\text{CH}_4$ を注入してそれが堆積する場所とその量を測定した。 $^{13}\text{CH}_4$ は注入口のほぼ正面の保護タイル上に多量の H とともに堆積した。このことから $^{13}\text{CH}_4$ はプラズマ中で解離によって ^{13}C と H に分離されずに、かつイオン化されずに磁力線に無関係に輸送されて保護タイルへの付着と再放出を繰り返しながら正面のタイルまで到達した可能性がある。

研究成果の概要（英文）：

In order to understand the transport of carbon, from erosion to deposition, $^{13}\text{CH}_4$ was injected, and the distribution of the deposited ^{13}C was investigated. It was found that ^{13}C reached, with H atoms, the carbon tiles in front of the $^{13}\text{CH}_4$ injection port. Hence possible transport process of ^{13}C is as follows; $^{13}\text{CH}_4$ neither dissociated into ^{13}C and H, nor ionized, nor traveled along the magnetic field lines. But $^{13}\text{CH}_4$ repeated sticking and reemission with carbon tiles and reached the carbon tile in front of the injection port in the form of $^{13}\text{CH}_x$ ($x=1-4$).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：周辺プラズマ・トカマク・ダイバータ・不純物輸送・不純物発生・プラズマ壁相互作用

1. 研究開始当初の背景

トカマク型と呼ばれる核融合炉では中空のドーナツ状の容器の中にプラズマを閉じ込める。この容器をプラズマの熱から保護するため、容器の内壁にはタイルが取り付けられる。この保護タイルには、プラズマからの

定常的、間欠的および突発的な熱負荷に耐える性能が求められるため、保護タイルの開発は核融合炉の成立を左右する未解決の課題の一つである。

炭素材は保護タイルとして耐熱負荷の観点では優れた特性を持つが、損耗しやすい欠点

を持つ。損耗によって放出された炭素がプラズマ中を輸送されて再び保護タイル上に堆積するときには多量の水素と供堆積する。この性質ため、将来の核融合炉では炉内に燃料であるトリチウム（放射性の水素同位体）を多量に蓄積することになり、安全性・経済性の観点から望ましくない。この理由により国際熱核融合実験炉 ITER ではプラズマ対向壁として炭素ではなくタングステンの使用が検討されている。しかし、炭素の堆積場所を約 200 °C 以上に保持すれば炭素の堆積層中の水素量を減じることが可能であるため、この欠点は現実的な方法で克服される。

しかし、炭素の堆積しやすい場所は明らかになりつつあるものの、どの場所の炭素タイルが損耗しやすく、またどのような経路を経て堆積場所に到達するか、といった知見は装置の設計に反映させるほど十分ではなかった。

現在までに様々なトカマク型の装置でプラズマ放電中に $^{13}\text{CH}_4$ を注入し、放電終了後に装置内部の ^{13}C の堆積場所を調べることで炭素の輸送経路、すなわち $^{13}\text{CH}_4$ の注入場所と ^{13}C の堆積場所の関係が調べられてきた。日本原子力研究開発機構のトカマク装置 JT-60U でも 2008 年 8 月の最終実験日に行われた最後の 13 放電に対して $^{13}\text{CH}_4$ を注入した。他の装置での実験とは異なり $^{13}\text{CH}_4$ を装置のある 1 カ所から注入したため、ポロイダル断面（ドーナツ状容器の縦断面）内だけでなくトロイダル断面（同水平断面）内の $^{13}\text{CH}_4$ の輸送も調べることが可能である。さらに実験運転を終了したので原理的に装置内のすべてのタイルを分析して詳細な $^{13}\text{CH}_4$ 堆積分布を調べることが可能である。このような機会は世界的にも例外的なため、とくに ITER のプラズマ対向壁設計への貢献が大いに期待されている。



図 1. JT-60U のダイバータ領域のポロイダル断面での拡大図。濃い色で塗りつぶしたタイルを分析した。

2. 研究の目的

JT-60U から保護タイルを取り出して分析し、その上に堆積した ^{13}C の量とその場所ごとの分布を調べる。これによって $^{13}\text{CH}_4$ の注入位置と堆積位置の関係を明らかにする。この結果を不純物輸送コードで解析し、炭素の

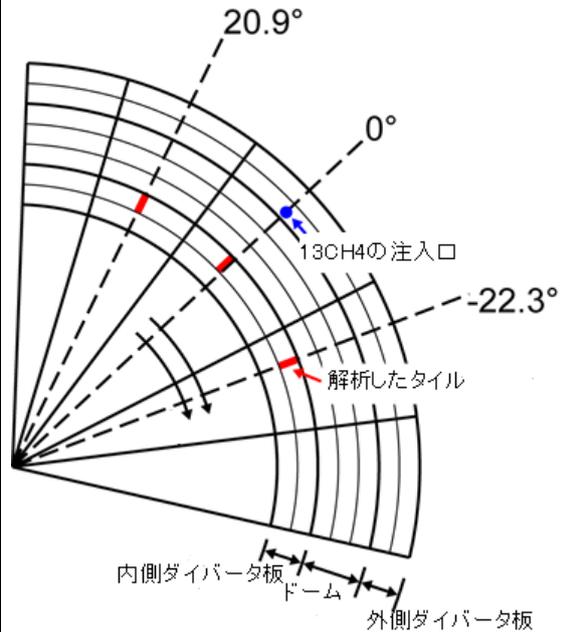


図 2. JT-60U を上方からみたダイバータ構造の模式図。 $^{13}\text{CH}_4$ の注入点のある位置から反時計回り方向にトロイダル方向の角度を定義した。矢印はプラズマ電流およびトロイダル磁場の方向を示す。

輸送経路の解明を目指す。

3. 研究の方法

JT-60U の改善閉じ込めモード・重水素プラズマ（プラズマ電流 1.2 MA, トロイダル磁場 2.3 T, 重水素原子ビームによる加熱パワー 7.5 MW, 重水素ガス注入によりプラズマの密度を一定に制御）を 30 秒間定常に維持し、そこへ $^{13}\text{CH}_4$ を注入した。 $^{13}\text{CH}_4$ の注入場所は図 1 に示すように、最外殻磁気面（プラズマを閉じ込める領域の境界となる磁気面）が外側ダイバータ板と交差する位置、すなわち外側ストライク点の近傍であり、装置の周回方向（トロイダル方向）に 1 箇所のみである。 $^{13}\text{CH}_4$ の注入速度は、プラズマ中の重水素と炭素材ダイバータ板の化学反応によってダイバータ板から放出される $^{12}\text{CD}_4$ と同程度に調整した。このプラズマ放電を 13 回繰り返し行うことによって合計で $^{13}\text{CH}_4$ を 6×10^{21} 個注入した。

(1) プラズマ放電の終了後、JT-60U の装置内に立ち入り、1000 枚におよぶタイルを

回収した。この作業は放射線環境下で長時間に及ぶため、作業者の安全性を考慮してプラズマ放電終了後の 1.5 年後に行った。

取り出したタイルを分析装置に格納可能なサイズ (1 cm x 6 cm, 厚さ 2 mm) に切り出し、二次イオン質量分析法による分析を行った。この分析方法では、切り出したタイルにイオンビームを入射しタイルから放出されたイオンを質量分析することによって ^{12}C , ^{13}C , ^1H , ^2H (= D) などを検出した。これによってタイル上の堆積物の化学組成を決定した。

(2) プラズマ放電中に図 1 に示す視線により軽水素原子からの発光である H \cdot (波長: 410.17 nm) と重水素原子からの発光である D \cdot (波長: 410.06 nm) のスペクトルを同時に可視分光器により測定し、プラズマ中の軽水素原子と重水素原子の割合を推定した。

4. 研究成果

(1) ここでは内側ダイバータ・タイルのうち、図 1 上で濃い色で塗りつぶしたタイルを分析した。図 2 に示すように、 $^{13}\text{CH}_4$ の正面

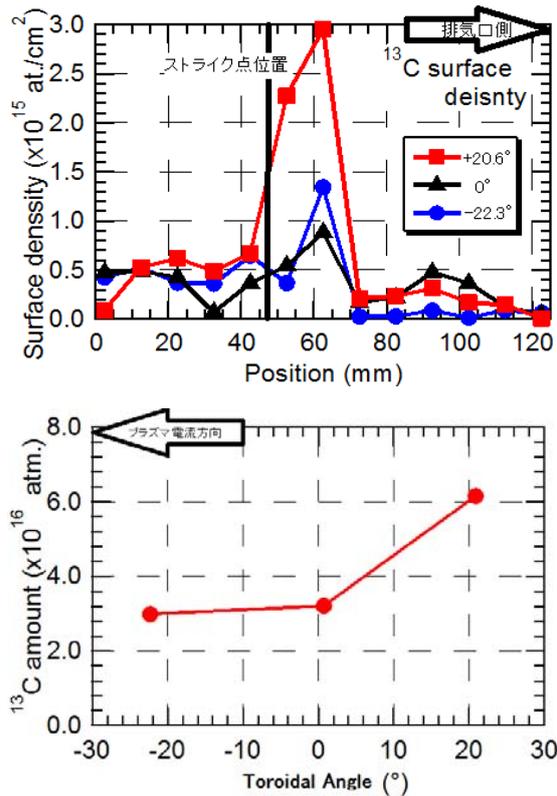


図 3. ^{13}C の内側ダイバータ・タイル (図 1 に示す濃い色のタイル) 上での (上) ポロイダル方向分布, および (下) トロイダル方向分布. ただし上図では図 1 に示す濃い色のタイルの上端を座標原点に排気溝に向かう座標を, 下図のトロイダル角度は図 2 に示す角度で定義されている。

に位置するタイルに加えて、 $^{13}\text{CH}_4$ の注入位置に対してトロイダル方向に反時計回りに $+20.9^\circ$ と -22.3° の位置にあるタイルを分析した。分析の結果、以下の①から③の結果が得られた。

- ① 図 3 の上図に示すように、 ^{13}C のポロイダル方向の堆積分布は内側ストライク点から排気溝よりに 1 cm 程度の位置にピークを持つ。
- ② 図 3 の下図に示すように、 ^{13}C のトロイダル方向の堆積分布はプラズマ電流の逆方向に増加する傾向を持つ。
- ③ 内側ダイバータ・タイル上の堆積層の表面では ^{13}C に加えて軽水素 (H) と重水素 (D) が検出され、その割合は $\text{H}/(\text{H}+\text{D}) = 0.5$ である。

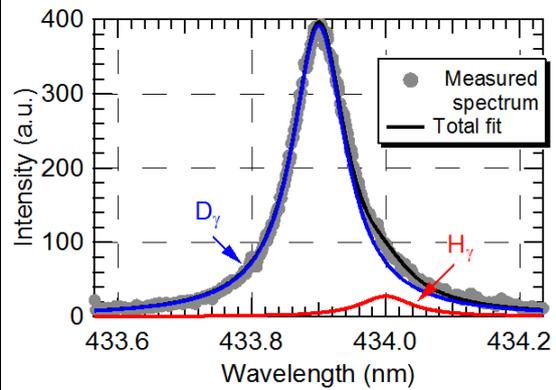


図 4. 可視分光により観測された H γ および D γ スペクトルとローレンツ型関数によるフィッティング結果。

(2) 図 4 には可視分光により観測された H \cdot および D \cdot スペクトルを示す。観測されたスペクトルは特に裾野でなだらかに広がっていることから、水素原子が高密度プラズマ中でシュタルク効果の影響を受けていると推測し、ここではその形状をよく表すローレンツ型関数によるフィッティングを行った。これにより H \cdot および D \cdot の分離を行い、その強度比は $\text{H}\cdot/(\text{H}\cdot + \text{D}\cdot) = 0.04 \sim 0.07$ であった。一方、 $^{13}\text{CH}_4$ を注入するまでは $\text{H}\cdot/(\text{H}\cdot + \text{D}\cdot) = 0.02$ であった。よって、 $^{13}\text{CH}_4$ を注入している間には軽水素の比率が上昇したことから、可視分光では注入した $^{13}\text{CH}_4$ に由来する軽水素が検出されたという解釈が成立する。

(1) -①の結果から、注入された $^{13}\text{CH}_4$ の多くは、ポロイダル断面上では図 1 に矢印で示すような経路を経て内側ダイバータ・タイル上まで到達したと推測される。(1) -②の結果に以前の研究成果 (図 3 で 60° の位置では 0° の位置と比較して ^{13}C の堆積量が

半減する)を加味すると、 $^{13}\text{CH}_4$ はトロイダル方向にはあまり輸送されず、注入口の正面付近に向かうと推測される。この両者を考慮すると、注入口からほぼ正面に向かって図 1 に示すドームに沿うような経路によって対面のタイル上に到達する可能性が高い。

他方、 $^{13}\text{CH}_4$ の注入口の付近にはプラズマが存在するため、プラズマ中で電子と衝突することによって $^{13}\text{CH}_4$ から $^{13}\text{CH}_3$ などへ解離し、また $^{13}\text{CH}_3^+$ などにイオン化すると考えるのが自然である。トカマク装置ではトロイダル方向に磁力線が存在するので、一旦 $^{13}\text{CH}_3^+$ などのイオンへイオン化するとそれらは磁力線の方向、つまりトロイダル方向に移動する性質がある。この性質に従うと $^{13}\text{CH}_4$ の注入口の正面方向へ多くの ^{13}C が輸送されて正面の内側ダイバータ・タイル上で検出されることはない。この考え方は上記の観測結果に矛盾するため、注入された $^{13}\text{CH}_4$ は $^{13}\text{CH}_4^+$ などへイオン化されない状態で内側ダイバータ・タイルまで輸送された可能性が高い。これまでの常識的な考え方ではこのような輸送機構が支配的であるとは考えられていなかった。この問題には国際トカマク物理活動 (ITPA) の周辺プラズマ物理の専門家からも興味を示し、輸送機構の解明を試みたが観測事実を説明するには至っていない。

我々は上記の解釈に加えて (1)-(3) と (2) の結果を併せて考察することにより、 $^{13}\text{CH}_4$ は完全に乖離せず分子内に軽水素原子をもつ状態、すなわち $^{13}\text{CH}_x$ ($x=1\sim 4$) の状態で内側ダイバータ・タイルまで輸送される、という仮説を立てるに至った；上記 (2) の方法では原理的に D $\cdot\cdot$ に対する H $\cdot\cdot$ の強度比はプラズマ中の重水素イオンに対する軽水素イオンの密度比に対応する。すなわち、プラズマ中では $\text{H}^+ / (\text{H}^+ + \text{D}^+) = 0.04\sim 0.07$ である。 $^{13}\text{CH}_4$ から乖離した H がプラズマを経由して内側ダイバータ・タイルまで輸送されたと仮定すると、そのタイル上の堆積層での軽水素の割合はプラズマ中のそれに近くなるはずであるが、上記 (1)-(3) の結果から $\text{H} / (\text{H} + \text{D}) = 0.5$ と両者の間には一桁の隔りがある。そのため上記の仮定は否定される。すなわち、H はプラズマ中を輸送されて内側ダイバータ・タイルに到達した可能性は低い。にもかかわらず、内側ダイバータ・タイル上の堆積層では $\text{H} / (\text{H} + \text{D}) = 0.5$ と軽水素の割合が高いため、別の輸送機構で H が輸送されたと考えられる。 $^{13}\text{CH}_4$ は完全に乖離せずむしろ分子内に H を多く含んだまま注入口から内側ダイバータ・タイルまで輸送された可能性がある。図 1 中の矢印で示す輸送経路では、プラズマの密度が低いため $^{13}\text{CH}_4$ はプラズマにより乖離されにくい。ドーム (炭素材) と衝突してもその一部は再放出される可能性もある。現段階では、このような

過程を繰り返しながら輸送され、分子内に多量の H を含んだまま内側ダイバータ・タイルまで到達したと推測している。

この仮説を立証するには、ドーム上の堆積物を分析して ^{13}C , H および D などの化学組成を測定し、そのトロイダル方向の分布を調べることが有効である。これらは今後の課題である。また、ドーム表面での炭化水素の付着および再放出などの過程を扱うコードを不純物輸送コード (分子の乖離・電離過程なども同時に扱う) に組み込み、解析を進めてゆく予定である。このようなプラズマ壁相互作用を考慮した不純物輸送コードの開発は世界的にも特に日本で先行しており、コードの開発状況に応じて本実験結果の解析に適用してゆく予定である。

本実験結果では、炭素の輸送の空間スケールは磁力線に沿った運動のスケール (装置のサイズ程度 \sim m のオーダー) でもなく磁力線に巻き付く運動のスケール (\sim mm のオーダー) でもなく、その中間のスケール (\sim cm から 10 cm のオーダー) であり、磁力線とは無関係の輸送機構が示唆される。このような輸送ではプラズマ壁相互作用が不純物の輸送を支配している可能性があり、このようなプラズマ壁相互作用と不純物輸送の複合的な輸送機構の研究を今後より一層進展させてゆく必要があると考える。

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)

[学会発表] (計 1 件)

- ① M. Fukumoto, T. Nakano, K. Itami, Y. Ueda and T. Tanabe, "Carbon-13 deposition on the inner divertor tiles in JT-60U", International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 2012/5/22 Aachen, Germany.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲野 友英 (NAKANO TOMOHIDE)

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・研究職

研究者番号：50354593