

研究課題：JT-60U 内各部におけるプラズマ対向炭素壁の損耗堆積と水素同位体の蓄積

研究代表者：田辺 哲朗（九州大学大学院総合理工学研究院）

原子力機構担当者：林 孝夫

研究協力者：深田智、西川正史、片山一成、大塚哲平（九州大学大学院総合理工学研究院）、竹石敏治（九州大学工学府）、大矢恭久（静岡大学理学部附属放射化学研究施設）、大宅 薫（徳島大学・大学院・ソフテクノサイエンス研究部）

研究期間：平成 22 年度-23 年度

1. 研究目的

核融合炉内へのトリチウムの蓄積分布、および蓄積速度を精度よく求めることは、ITER 或いは、次期炉での炉内設計/運転仕様を改良する上できわめて重要である。これまで報告してきたように JT-60U のタイル分析により得られた水素（含むトリチウム）の蓄積に関する結果は JET 等の大型装置に比べてかなり少ない。また、第一壁（そのほとんどは損耗領域である）での水素蓄積は飽和する傾向があることを見出したことにより、従来のトリチウム蓄積予測を再検討する必要があることが示唆された。今まで、DT 放電時に同時に起こる DD 反応によって生成される高エネルギーのトリチウムが、炉内蓄積量にどの程度寄与するかは殆ど検討されていなかった。

以上を考慮して、本研究期間における研究目的は、水素の蓄積速度に焦点を当て、ダイバータ部および第一壁で使用された炭素タイル中に蓄積したすべての水素同位体(軽水素(H)、重水素(D))およびトリチウム(T)を定量し、それらの蓄積量の場所による違いと、蓄積量が時間と共にどう増加していくかを明らかにすることとした。ここでは、蓄積場所を損耗部、再堆積部およびタイル内部に大別して検討した。さらに、それらのデータを用いて、JT-60U 炉内全体では水素がどのように蓄積していくかをモデル化し、その定量的評価を試みた。

2. 研究成果（全研究期間中）

JT-60U ダイバータ(使用期間：'97~'99)、および第一壁(使用期間：'92~'04)で使用された炭素タイルのうち、放電に曝された期間が異なるタイルを取り出し、それへの水素同位体蓄積量を測定した。取り出されたタイルは、いずれも主放電である DD 放電に曝された後、トリチウム(T)除去のための HH 放電に曝されたものである。採取した炭素タイルから、タイル表面を含む厚さ 1 mm、10 mm 四方の試料を切り出した。また、一部のタイルでは、内部(タイル表面から約 2 mm)の位置から同様の大きさのタイル内部試料を切り出した。各試料中の軽水素(H)および重水素(D)の定量には昇温脱離法(TDS)を、トリチウム(T)の定量には燃焼法を用いた。

図 1 に、タイル表面層での水素同位体(H, D)蓄積量が放電時間と共にどのように増加するかを、タイルを採取した位置を区別して示した。ダイバータの再堆積部での水素蓄積量は、放電時間、すなわちフルエンス(Γ)に対してほぼ線形に増加している($\Gamma^{1.0}$)。これは再堆積層中の水素濃度はプラズマに曝されていた際の温度での飽和濃度(JT-60U では 300 °C 運転で 0.013~0.08 であり、他の大型装置に比べかなり低い濃度である)になっており、また再堆積層の成長速度はプラズマ放電時間に比例しているためである。

他方、ダイバータ損耗部あるいは第一壁の損耗部では水素蓄積量は単純に放電時間に比例していない。これは、放電中には表面近傍に水素飽和層が形成され、その層厚さが徐々に増加するが、同時にこの飽和層がプラズマによって損耗されるため、両者の競合により飽和層の厚さが緩やかに増加したためである。この変化は図 1 に示したようにフルエンスの 0.13~0.16 の累乗で記述できることが明らかとなった。

タイル内部では、放電時間に寄らず水素蓄積量はほぼ一定であった。これは、炭素タイルの黒鉛粒間

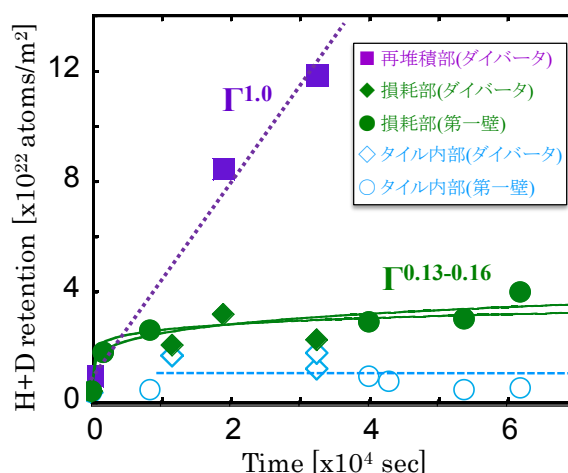


図 1 JT-60U 各部(再堆積層、損耗部およびタイル内部)での水素同位体(H および D)蓄積量の放電時間依存性

隙を通じて水素がタイル内部全体へ進入し、各黒鉛粒表面近傍で捕獲されるが、粒内部への拡散が無視できるほど小さいため、粒表面近傍の水素濃度が直ちに飽和してしまうためである。

以上のように、各部で蓄積した水素が時間とともにどのように増加するかを実機のタイル分析に基づいて明らかにしたのは本研究が初めてである。

図 2 には、DD 反応によって生成されたトリチウム(T)が時間とともにどのように第一壁に蓄積されたかを示した。T 量は燃焼法により校正してある。図は、放電時間(T 入射量)の異なる JT-60U 外側第一壁炭素タイル試料中で検出された T 量に、外側第一壁の面積を乗じて求めたものである。JT-60U では、タイルに残存している T は、DD 反応によって生成された高エネルギーの T のうち、エネルギーをあまり損失せずに、1 μm 以上の深い位置に直接入射し残留したものであることが分かっている。図から分かるように、タイルでの残留 T 量が放電時間とともに直線的に増加しており、これは全発生 T 量の内、約 13% が第一壁に蓄積し続けることに相当する。このように、T の定量分析から DD 反応で発生した T の炉内蓄積量およびその蓄積速度が求められたのは本研究が世界的に初めてである。

図 3 は、以上の結果に基づいて作成された JT-60U 炉内の水素蓄積モデルに従って計算された、各部における水素蓄積の時間推移を示したものである。図から分かるように、長期放電後では、炉内の水素蓄積量の大半は、再堆積層での水素蓄積量で占められることになる。これは、他のプラズマ装置で実験結果をもとに評価されている傾向と同様である。しかし、JT-60U の場合、573 K とやや高温状態で運転されたため、水素蓄積速度は他の大型装置で得られている値よりもかなり低い。このことは、ITER 或いは次期炉でも JT-60U 程度の温度で運転されれば、炉内水素蓄積量を現在予測されている値よりもはるかに低く抑えられることを示唆している。なお、高エネルギー粒子による蓄積は、JT-60U では殆ど無視できるものの、DT 反応が行われる ITER 或いは次期炉では DD 反応の確率が、DT 反応の 10% 程度であることから、これにより発生する T が壁へ蓄積されていく可能性がある。

3. まとめ

炉内への水素同位体蓄積予測を可能にするとともに、将来的に炉内で発生する高エネルギー粒子の水素蓄積への寄与を調べるために、JT-60U プラズマ対向壁として使用された炭素タイル(ダイバータおよび第一壁)への全ての水素同位体(H、D、T)の蓄積状態を損耗/再堆積・タイル内部、および放電中のタイル温度・放電時間の観点から調べた。本研究により、炭素材料をプラズマ対向壁として使用する場合については、タイルの損耗/再堆積部およびタイル内部で、全ての水素同位体が放電時間と共にどのように増加していくかを評価出来るようになった。

4. 今後の課題・予定

JT-60U のタイル分析については、内側第一壁を除いてほぼ終了した。内側第一壁タイルには、損耗領域であることには間違いはないが、ボロンニゼーションの際に堆積したボロン膜が厚いため、損耗されずに残留しているものが多くかつ、ボロン膜には膜生成の時に取り込まれていた重水素が残留しているため、プラズマ放電により取り込まれた重水素との区別ができない。残された課題はフェライト鋼への水素蓄積であるが、水素の拡散係数が大きいので、多量の水素が残量していると

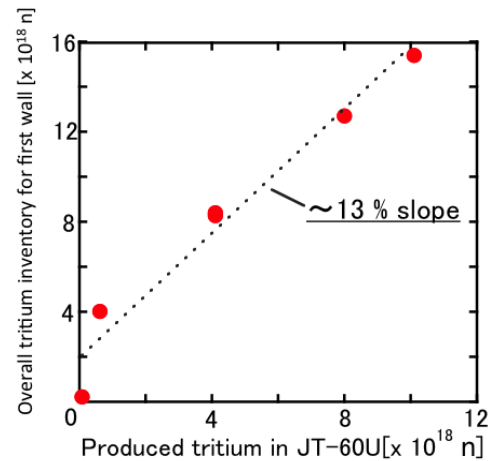


図 2 燃焼法により得られた第一壁タイル表面での T 蓄積量の T 発生量依存性

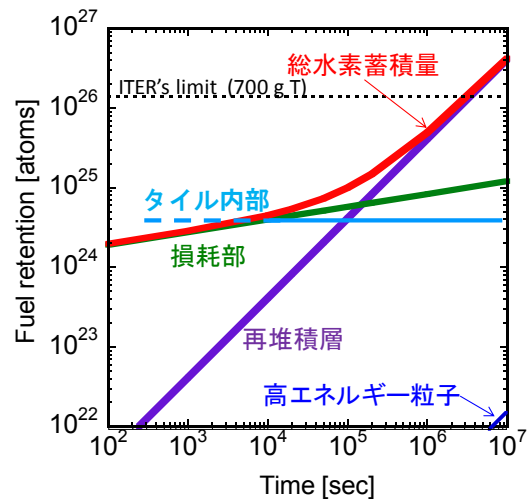


図 3 JT-60U 炉内水素蓄積モデル

は考えにくい上、放射化により、トリチウムの計測も難しいので、一連の研究としては、これで閉じるにさせていただきます。

全研究期間中の成果リスト（公表論文のみ、口頭発表は省略）

1. M. Yoshida, T. Tanabe, Y. Nobuta, K. Sugiyama, T. Hayashi, K. Masaki, J. Yagyu and M. Sato, Hydrogen Retention in the First Wall Tiles of JT-60U, *J. Plasma and Fusion Research, SERIES 8*(2009)pp.1253-1255
2. T. Tanabe, K. Masaki and K. Sugiyama, Overview of recent erosion-deposition and hydrogen retention studies in JT-60U, *Physica Scripta*, **T138** (2010) 01402
3. K. Sugiyama, Y. Sakawa, T. Tanabe, D. Watanabe, T. Shibahara and K. Masaki, Removal of the deposition on JT-60 tile by nano-second pulsed-laser irradiation, *J. Nucl. Mater.*, **405** (2010) 70-73
4. M. Yoshida, T. Tanabe, K. Sugiyama, T. Hayashi, T. Nakano, J. Yagyu, Y. Miyo, K. Masaki, K. Itami, "Long term hydrogen retention in the plasma facing carbon tiles in JT-60U", *J. Nucl. Mater.* **417** (2011) 620-623
5. K. Ohya, K. Inai, M. Inoue, Y. Tomita, G. Kawamura, T. Tanabe, Toroidal and Poloidal Asymmetry in Carbon Deposition on Gaps of Plasma Facing Tiles, *J. Nucl. Mater.*, **417**(2011) pp. 602-606
6. K. Ohya, K. Inai, Y. Kikuhara, N. Mohara, A. Ito, H. Nakamura, T. Tanabe, Molecular Dynamics Study on Hydrocarbon Interaction with Plasma Facing Walls, *J. Nucl. Mater.*, **417**(2011) pp.637-642
7. T. Tanabe, Tritium Handling Issues in Fusion Reactor Materials, *J. Nucl. Mater.*, **417**(2011) pp.545-550
8. T. Tanabe, K. Masaki, Y. Gotoh, K. Sugiyama, Y. Hirohata, K. Sibahara, Y. Oya, Hayashi, T. Arai, N. Miya, Review of retention of hydrogen isotopes (H, D, T) and carbon erosion/deposition in JT-60U, *Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion*, Volume **15**(2011) pp.101-123
9. Tetsuo Tanabe, Tritium issues in plasma wall interactions, *Plasma Interactions in Controlled Fusion Devices, Proc. 3rd ITER International Summer School: Ed. S. Benkadda (Amer. Inst. Phys., 2010) pp.106-121*
10. M. Yoshida, T. Tanabe, K. Sugiyama, T. Hayashi, H. Nakano, J. Yagyu, Y. Miyo, K. Masaki and K. Itami, Characterization of In-vessel Hydrogen Isotope Retention of JT-60U, *J. Nucl. Mater.*, **415**(2011)S752-S756.
11. M. Yoshida, T. Tanabe, K. Sugiyama, T. Takeishi, T. Hayashi, T. Nakano, J. Yagyu, Y. Miyo, K. Masaki and K. Itami, Tritium distribution on first wall carbon tiles in JT-60U, *Fusion Science and Technology*, **60**(2011)1560-1563
12. M. Yoshida, T. Tanabe, T. Hayashi, H. Nakano, K. Masaki and K. Itami, Construction of fuel retention model for full carbon devices, *Physica Scripta*, **T145** (2011) 014023 (5pp)
13. T. Tanabe, Tritium issues to be solved for establishment of a fusion reactor, 10th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, 11-16 September 2011, Portland, USA, *Fusion Eng. Design*, (2012) in press.
14. Masafumi Yoshida, Tetsuo Tanabe, Takao Hayashi, Tomohide Nakano, Junnichi Yagyu, Yasuhiko Miyo, Kei Masaki and Kiyoshi Itami, *Proc. 15th Intern. Conf. Fusion Reactor Materials, Oct. 16-22, 2011, Charleston, USA, J. Nucl. Mater.* (2012). in press