

## QUEST壁モデルによる定常粒子バランス研究

花田, 和明  
九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ理工学研究センター : 教授

<https://doi.org/10.15017/1924420>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 153, pp.109-112, 2017-09. 九州大学応用力学研究所  
バージョン :  
権利関係 :

# QUEST 壁モデルによる定常粒子バランス研究

花田 和明\*

(2017 年 7 月 31 日受理)

「Study on particle balance in steady state operation with the QUEST wall model」

Kazuaki HANADA

Email of corresponding author: [hanada@triham.kyushu-u.ac.jp](mailto:hanada@triham.kyushu-u.ac.jp)

## Abstract

QUEST which was constructed as plasma boundary device in Kyushu University is aimed to make a steady state operation of spherical tokamak. Recently, plasma facing surface on QUEST was intensively investigated and presence of plasma-induced thin film has been confirmed. The thin film plays essential role in particle balance on steady state condition. In this report, I will describe the effect on the thin film in steady state operation using the QUEST wall model.

Key words: steady state operation, fuel particle balance

## 1. 序文

磁場核融合炉において発電のエネルギー源となる核燃焼を維持することは重要な課題である。核燃焼の維持には重水素 (D)、三重水素 (T) の核融合反応に必要な 1 億度以上の温度を持つイオンを  $1\text{m}^3$  あたり  $10^{20}$  個以上閉じ込めておくことが必要となる。DT 核融合反応では、 $14\text{MeV}$  のエネルギーを持つ中性子と  $3.5\text{MeV}$  のヘリウム原子核 ( $\alpha$  粒子) を生じるため、 $3\text{GW}$  で設計された核融合炉 SlimCS [1] では単位時間当たり  $1.06 \times 10^{21}$  回の核融合反応が起こることとなる。この核融合反応を維持するために供給される DT 粒子は合計で 1 秒当たり  $1 \times 10^{23}$  個と計算されている。これまでの実験結果からプラズマ反応容器内に入射された DT 粒子のうち、20-50%程度しかイオン化されないことを考えて、計算では 1 秒当たり  $5 \times 10^{22}$  個のイオンがコアプラズマに供給されたと仮定している。この結果から核融合反応を起こす DT 粒子は供給された DT 粒子のうちのわずか 2%程度であり、その他の DT 粒子のうちコアプラズマ内に到達できない DT 粒子が半数存在していることになる。最近の高磁場側ペレット入射でも燃焼率は 5%程度と試算されている [2]。現在想定されている核融合炉の燃料粒子バランスは、このように極めて効率の悪いものとなっている。ここでなされた計算では、壁に到達したイオンは壁で 100%反射されると仮定している。実際には壁でのイオンの反射は 10-20%程度と想定され、イオンのエネ

ルギーが上がればその確率は上昇する。ここでなされた計算は、DT 粒子の燃焼効率が最高となる条件であり、壁の状況を考慮すると DT 反応の効率はさらに下がるものと考えられる。

粒子バランスを考えると、核融合反応で生じるヘリウム灰は全体の 1-3%程度であり、燃料粒子である DT 粒子の挙動が大半であることがわかる。一方わずかなヘリウムの混在が壁表面の状況を一変させる可能性も危惧されるが、ここでは考慮しないこととする。将来の核融合炉では定常運転が想定されており、定常状態での粒子バランスを考えることは重要である。また、実際の装置では完全な定常状態はあり得ないので、プラズマ状態の変化に対する安定性を議論しておく必要がある。DT 反応で生じた  $\alpha$  粒子によるプラズマ加熱で維持される核燃焼プラズマの安定性は熱バランスを考慮したポップコーンダイアグラムで詳細に調べられているが、壁の状態を取り込んだ粒子バランスではあまり調べられていない。このような背景から、今回、壁の状況を定式化した QUEST 壁モデルを使って粒子バランスの解析を行った結果について報告する。この解析の中でプラズマ内での輸送は粒子閉じ込め時間  $\tau_p$  のみで規定しており、電子温度の変化によるイオン化率の変化も考慮していない。単純化された系での計算結果であることに注意していただきたい。

\*応用力学研究所 高温プラズマ理工学研究センター

## 2. 核融合実験装置における粒子バランス研究の現状

エネルギー閉じ込め時間は、核融合炉の成否のカギを握る最重要なパラメータなので、数多くの研究報告がなされている。これらの研究成果をまとめて国際熱核融合実験炉(ITER)が設計され、そのベースとなる学術基盤は定期的な報告 ITER Physics Basis [3]にまとめられている。一方、粒子閉じ込め時間は計測例も少なく、スケールリング等も整理されていない。一般的にエネルギー閉じ込め時間の3倍—10倍程度に設定されていることが多いようである。以下にプラズマ、真空領域、壁、系外との粒子のやり取りを記載する。

$$\Gamma_{p \rightarrow W} = V_{plasma} \left( \frac{H^+}{\tau_p} + \frac{H_2^+}{\sqrt{2}\tau_p} + \frac{H_3^+}{\sqrt{3}\tau_p} + \gamma_{cx} H \right) [H]: \tau_p = \frac{a^2}{2\alpha D}$$

$$\Gamma_{W \rightarrow V} = k S_W \frac{H_W^2}{(S_W d_{dep})^2} [H_2] + R_{re} \Gamma_{p \rightarrow W} [H]:$$

$$\Gamma_{p \rightarrow V} = -\frac{H_2}{\tau_n} [H_2] - \frac{H}{\tau_n} [H]:$$

$$\Gamma_{out \rightarrow V} = \Gamma_{in} [H_2] - S_{pump} (H [H] + H_2 [H_2])$$

ここで、 $\Gamma_{p \rightarrow W}$  はプラズマから壁への粒子束、 $\Gamma_{W \rightarrow V}$  は壁から真空領域への粒子束、 $\Gamma_{p \rightarrow V}$  はプラズマから真空領域からプラズマへの粒子束、 $\Gamma_{p \rightarrow V}$  はプラズマから真空領域への粒子束であり、 $\Gamma_{in}$  は外部から供給されている水素分子束である。[ ]内はそれぞれの粒子種を表している。 $H$  や  $H_2$  等はその粒子種の密度を表している。また、 $H_W$  は壁の中に吸蔵されている水素原子密度、 $V_{plasma}$  はプラズマ体積、 $\tau_p$  は水素イオンに対する粒子閉じ込め時間、 $a$  は分布による $\tau_n$  は真空領域からプラズマ領域への粒子移動時間、 $\gamma_{cx}$  は荷電交換率、 $k$  は表面再結合係数、 $S_W$  は壁の表面積、 $S_{pump}$  は有効排気速度である。この計算で、中性粒子のイオン化を担うスクレイブオフ層(SOL)の存在を含めていない。SOLを考慮することは重要であるが、ここでは簡単のためにプラズマ全体にイオン化の役割を担わせる。QUESTのような低密度の実験では、平均自由行程が数十cm程度になるためこの仮定は良い近似になっていると考えられる。SOLを含めると仮定するパラメータが増えるので実験の再現は容易になるが、現実には起こっていることと乖離してしまう可能性も有しており、ここでは簡単なポイントモデルでの解析に合わせてできるだけ簡略化をする。計算で重要なパラメータは中性粒子がどのような時間スケールでプラズマ内に入り、イオン化されるかである。ガスパフで導入された燃料水素分子は室温程度の熱速度で拡散することが考えられる。この場合には、1mの容器を横切るのに0.3ms程度となる。中性粒子は磁場に影響を受けないので、実効的な移動距離はイオンに比べて短い。一

方、プラズマ内でのイオン化には多くの過程が関与する。今回の計算で考慮した過程を表1に示す。この中で粒子バランスとして重要なのは、イオンの損失と荷電交換である。イオンの損失については粒子閉じ込め時間 $\tau_p$ に質量の平方根の質量依存性( $H_3^+$ だと $\sqrt{3}\tau_p$ )を設定していることと荷電交換した高速の水素原子は反応が生じると同時に壁への粒子束となることを仮定していることである。荷電交換した水素原子は磁場を容易に横切り、壁へと到達する。この際に核融合炉級の高密度のプラズマの場合には再電離の効果を考慮する必要があるが、QUESTのような低密度の放電では影響が少ないと考えている。実験結果と比較する対象はQUESTでの長時間放電なのでここでは再電離を無視した計算を行う。

Electron collisions with H,H <sup>+</sup>		
(1) Excitation	e + H → e + H*(n=2,n=3)	R1
(2) Ionization	e+H→ e + H <sup>+</sup> + e	R2
(3) Recombination	e + H <sup>+</sup> → H	R3
Electron collisions with H <sub>2</sub> ,H <sub>2</sub> <sup>+</sup> andH <sub>3</sub> <sup>+</sup>		
(4) Dissociation	e + H <sub>2</sub> → e + H + H	R4
(5) Ionization	e + H <sub>2</sub> → e + H <sub>2</sub> <sup>+</sup> + e	R5
(6) Dissociative ionization	e + H <sub>2</sub> → e + H <sup>+</sup> + H + e	R6
(7) Dissociation	e + H <sub>2</sub> <sup>+</sup> → e + H <sup>+</sup> + H	R7
(8) Dissociative recombination	e + H <sub>2</sub> <sup>+</sup> → H + H	R8
(9) Dissociative recombination	e + H <sub>3</sub> <sup>+</sup> → H + H + H	R9
Ion impact reactions		
(10) Charge exchange	H <sup>+</sup> + H → H + H <sup>+</sup>	R10
(11) Formation of H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> <sup>+</sup> → H <sub>3</sub> <sup>+</sup> + H	R11
(12) Ionization	H <sup>+</sup> + H → e + H <sup>+</sup> + H <sup>+</sup>	R12

表1：計算で考慮した水素関連の反応

QUESTでは計画当初からプラズマ・壁相互作用(PWI)が研究の一つの柱とされていた。TRIAM-1Mの長時間運転の経験から定常運転の実現には壁に吸蔵された燃料水素の挙動把握が重要との認識から、実験開始当初から壁の変遷については詳細に調べられてきている。また、カラーメータによるプラズマ対向の壁の状態の定量的な観測がまとめられている[4]。本報告で注目している粒子バランスにとって、最も重要な微視的観測からの知見は、再結合係数の算出と水素バリア形成の確認である。再結合係数の定量的な評価は京都大学の高木教授らのグループにより実施され、報告されている[5,6]。この計算ではQUESTの壁の値として典型的な再結合係数 $kr=1 \times 10^{-38} \text{ m}^4/\text{s}$ を採用[6-8]し、再堆積層と母材間で完全な水素バリア形成を仮定し、再堆積層の厚みとして100nmを採用する。計測されている再堆積層の厚みは真空容器上側(エロージョン領域)で10-20nm、下

側（デポジション領域）で 60-100nm[4]であるが、ここでは主に水素吸蔵に関わると考えられるデポジション領域の厚みを採用した。このモデルで QUEST[9]の 1 時間 55 分放電[10]のパラメータを入力して計算した結果を図 1 に示す。

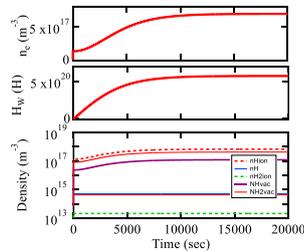


図 1 QUEST 壁モデルを用いた場合の電子密度(上)、壁に吸蔵されている水素原子数(中央)、それぞれの粒子種類(下)の時間変化

電子密度が定常状態に落ち着くまで 10000 秒近くを要している。これは、図 1 に示されている壁に吸蔵される水素原子数と脱離する水素分子に含まれている水素原子が釣り合って定常状態となる時間に対応している。壁で完全反射すると仮定した計算の場合には数秒で定常状態となるため壁モデルによって時間発展は大きく異なっている。

様々な計算で採用されている完全反射壁だと水素原子の状態壁から戻ってくるが、壁モデルでは、壁表面の再結合により分子の状態に戻ってくる等の違いが起こる。このため最終的に定常に落ち着く電子密度も異なっている。壁モデルを使った場合に定常状態でのプラズマ密度が少し高くなるが、これは水素分子と水素原子に関して同じ有効排気速度を仮定しているため、水素分子と原子の割合の差とイオン化効率の差から生じたものである。実際には水素原子と水素分子で排気速度に差があるかどうかは不明である。特に水素原子の場合には化学的に活性なので水素同士で結びついて分子となったり、酸素と結びついて水になったり、炭素と結合してメタンとして排気される可能性もある。ためである。実際には水素原子と水素分子で排気速度に差があるかどうかは不明である。特に水素原子の場合には化学的に活性なので水素同士で結びついて分子となったり、酸素と結びついて水になったり、炭素と結合してメタンとし

て排気される可能性もある。いずれにせよ、壁モデルの有無で、定常化に要する時間が大きく異なることから、定常状態から少し外れた場合の安定性等に大きな違いがあると思われる。この簡単な計算でもわかるように、核融合炉の粒子バランスを考える場合に、壁モデルを含めることは重要なことである。

QUEST で実施された実験では、7000 秒付近で密度が上昇しプラズマ放電が終了している[11]。この場合には H $\alpha$ 線強度が一定になるように制御して放電を行ったため、この計算とは厳密には異なるが 10000 秒程度まで密度が上昇する時定数は実験とよく似ている。QUEST 以外の核融合実験装置では壁の状態を壁全体にわたって詳細に調べている例はなく、また据え置き資料に関しても様々な観点から微視的に調べられてもいない。今後の課題である。

## 謝辞

TRIAM-1M、QUEST の研究を通じて、中村一男氏には多くのことをご教授いただき、また装置の管理に関して多大な貢献をしていただきました。中村氏の存在なしには、これらの巨大な装置を円滑かつ安全に運用することはできませんでした。継続的にご支援いただきました中村一男氏に深く感謝の意を表します。

本稿を執筆にあたり全くの素人である私にとって吉田直亮氏、田辺哲朗氏のご指導・ご支援は何よりの救いでした。また、京都大学の髙木郁二氏、静岡大学の犬矢恭久氏、島根大学の宮本光貴氏、慶応大学の畑山明聖氏、大阪大学の土田良夫氏、名古屋大学の野野哲靖氏、核融合科学研究所の時谷政行氏、笠原寛史氏にも多くのことを教えていただきました。この研究のために九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター（2017 年度より九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ理工学研究センター）の関係者、共同利用研究者の皆様は大変お世話になりました。また、この研究は科学研究費補助金基盤研究 (S) 24226020 代表者：関子秀樹 平成 24 年度～平成 28 年度、及び科学研究費補助金基盤研究 (A) 16H02441 代表者：花田和明 平成 28 年度～平成 31 年度で推進されたものです。また、QUEST 装置及び関連機器は核融合科学研究所双方向型共同研究 (NIFS05KUTRO14) によって整備されたものです。研究費の一部は科学研究費(補助金挑戦的萌芽)24656559 代表者：花田和明 平成 24 年度～平成 26 年度、及び核融合科学研究所双方向型共同研究 (NIFS13KUTR085, NIFS15KUTR109, NIFS13KUTR093, NIFS09KUTR047)、応用力学共同研究拠点 (国際化推進 2017 年度 No.8 代表者: NELSON, Brian, A, No.4 代表者: GAO, Xiang, No.12 代表者: QIAN, Jinping,)、一般研究 (28FP-10、28FP-11、

28FP-16、28FP-20、28FP-23、28FP-32) によって支援されました。ここにご支援に対する感謝の意を表します。

## References

- [1] N. Asakura et al., *Nucl. Fusion* **53** (2013) 123013.
- [2] S.Tokunaga et al., *Fusion Engineering and Design* **123** (2017) 620–623
- [3] ITER Physics Basis., Nuclear Fusion
- [4] Z.Wang and K.Hanada, et al., *Review of Scientific Instruments* **88** (2017) 093502.
- [5] T. Murakami<sup>1</sup>, T. Hirata<sup>1</sup>, I. Takagi<sup>1</sup>, et al., ICFRM-18 (2017), 8PT-37
- [6] T.Hirata, 京都大学工学部特別研究報告書
- [7] K.Hanada, *et al.*, *J. Nucl. Materials*, 463 (2015), 1084-1086
- [8] T. Honda, 九州大学総合理工学府修士論文
- [9] K. Hanada *et al.*, *Plasma Science and Technology*, 13 (2011), 307
- [10] K.Hanada et al., *Nucl. Fusion* **57** (2017) 126061.