カーボンシートポンプの GAMMA10 における性能評価

石本 祐樹^{*1}・中嶋 洋輔^{*1}・相良 明男^{*2}
森脇 武之^{*1}・広永 行孝^{*1}・谷津 潔^{*1}

(受理1999年12月7日, 掲載決定2000年5月6日)

Evaluation of Carbon Sheet Pump in the GAMMA 10 Tandem Mirror

Yuki ISHIMOTO^{*1}, Yousuke NAKASHIMA^{*1}, Akio SAGARA^{*2},
Takeyuki MORIWAKI^{*1}, Yukitaka HIRONAGA^{*1} and Kiyoshi YATSU^{*1}

^{*1}(Plasma Research Center, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan)

^{*2}(National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292, Japan)

(Received December 7, 1999, Accepted May 6, 2000)

Carbon sheet pump (CSP) is developed for reduction of hydrogen recycling in fusion plasma devices. A small scale test module has been made for the GAMMA 10 tandem mirror and exposed to charge exchange fast neutrals from hot-ion plasmas (~ 5 keV). Pressure difference between the case with exposure of CSP to fast neutrals (CSP-on) and another case without exposure (CSP-off) is observed reproducibly, in which clearly shows the pumping effect of CSP. The life time of CSP is estimated to be 2000 sec, or 10000 shots in GAMMA 10. Pumping efficiency of CSP estimated from the time evolution of total pressure measured in the test module is about 0.5 $\sim$ 0.8. Thermal desorption experiments show that 20 $\sim$ 60% of trapped hydrogen is released by direct joule heating up to 800°C. Partial pressure of impurities during CSP-on and CSP-off are measured. No change of the impurity pressure was observed in the hot-ion plasmas. It is confirmed that CSP is applicable to actual plasma devices.

1. はじめに

今日の大型核融合実験装置において, より高性能なプラズマを生成するために, 水素リサイクリングの低減は必要不可欠である. 水素リサイクリングとは, プラズマからの高速中性粒子やイオン, 電子などが真空容器壁表面に吸着している燃料ガスである水素分子(または原子)を脱離させ, プラズマ中に再び侵入する過程を言う. プラズマに侵入した水素分子(原子)は解離・電離して低温の水素イオンとなる. 水素リサイクリングによって低温イオンがプラズマ中に生成されるとイオン温度が低下する. また, 中性粒子密度の増加により荷電交換するイ

オンが増加し, 高速中性粒子の損失に起因するエネルギー閉じ込め時間の減少が起こる.

プラズマを生成するための燃料は, 主にガスバフや水素の固体であるペレット, 中性粒子ビーム入射(NBI)などによって供給されるが, 水素リサイクリングによっても供給される. ガスバフやペレット, NBIが制御可能な要素であるのに比べ, 水素リサイクリングは, 真空容器内の圧力など真空容器壁が受けた反応の履歴に依存する制御が困難な燃料供給因子であり, プラズマの密度制御の観点から好ましくない現象である.

大型核融合実験装置の第一壁の多くは黒鉛タイルで被われているが, 本実験を開始する前にヘリウム等で放電洗浄を行うことにより, 容器壁表面に吸着している水素や不純物を取り除いている. その結果, 本実験の放電中に水素が第一壁に捕捉される「壁排気」が行われる. し

^{*1} 筑波大学プラズマ研究センター (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

^{*2} 核融合科学研究所 (〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6)

Fig. 1 Schematic view of the CSP test module.

かし、放電洗浄で第一壁に入射するヘリウムイオンのエネルギーは数100 eVで、これはkeV単位の高速中性粒子の飛程より極めて浅いため、第一壁中に捕捉されている水素のすべてを脱離させることはできない。このことから、高温プラズマ実験下での水素リサイクリング低減の効果的な手法としては限界がある。

しかし、黒鉛中に捕捉されている水素を効率的に取り除くことができれば、より効率的な壁排気が行え、水素リサイクリングを低減させることができる。このことから、カーボンシートポンプ (Carbon Sheet Pump; CSP)¹⁾が提案され、現在、筑波大学プラズマ研究センターのサーマルバリア付きタンデムミラー型プラズマ実験装置 GAMMA10において、テストモジュールを用いた適用試験を行っている²⁾。その初期の適用実験の報告は、文献2)において行われているが、ここでは、それらを含めた詳細な結果について述べる。

2. GAMMA10とCSPテストモジュール

2.1 GAMMA10

タンデムミラー型プラズマ実験装置 GAMMA10³⁾は、全長約27 mで、中央部から順にセントラルセル、アンカーセル、プラグバリアセル、及びエンドセルから構成されている。セントラルセルは、単純ミラー磁場配位の主プラズマの閉じ込め領域であり、アンカーセルでは、MHD不安定性を抑制するための極小磁場をベースボールコイルにより生成する。プラグバリアセルでは、イオンを閉じ込めるためのプラグポテンシャルと電子の熱的絶縁のためのバリアポテンシャルが生成される。エンドセルは、端損失したプラズマが衝突することによる真空容器壁への熱負荷を低減させるため開いた磁力線を持

ち、ここでガス化した粒子を排気速度900 m³/sの液体ヘリウムクライオパネルによって排気し、約10⁻⁶ Paの安定した真空度を得ている。プラズマは、東西両エンド部に設置されたプラズマガンからソースプラズマを入射し、イオンサイクロトロン周波数帯加熱 (ICRF 加熱) によって生成する。このプラズマに電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECR 加熱) を行い、電位による閉じ込め改善の実験を行っている。

2.2 CSP テストモジュール

GAMMA10のセントラルセルに取り付けられたCSPテストモジュールをFig. 1に示す。直径170 mm、厚さ1.5 mmの二次元炭素繊維材 (CX-270、東洋炭素製)のカーボンシートは、水冷式の真空容器内に設置されている。カーボンシートは直接通電できるようになっており、印加電圧~90 V、電流値~30 Aで約800°Cまで昇温される。また、カーボンシートに短冊状に切れ目を入れることにより、均等な加熱が行えるようになっている。加熱時には、クロメル-アルメル熱電対を用いて、カーボンシート中央部の温度計測を行っている。カーボンシートの前面には金メッキをしたSUS316製の回転式の遮蔽板が設置されており、カーボンシートに対して垂直にすることによって、プラズマからの高速中性粒子をカーボンシートに入射させる場合 (CSP-on) と、平行にすることによって高速中性粒子を遮る場合 (CSP-off) とが、選択できるようになっている。また、遮蔽板の位置によるコンダクタンスの違いは、ほとんど無視できることが確認されている。

テストモジュール内の圧力は電離真空計で計測される。四重極質量分析計 (QMS) は、プラズマショット時の脱離ガスの質量数の分析と、昇温脱離実験時の放出

されるガスの分析を行っている。また、磁場中での計測のために、電離真空計とQMSには磁気シールドを施している。GAMMA10真空容器とテストモジュールは、400 mmの延長ダクトを介して接続されている。

3. CSPの排気原理と実験

3.1 CSPの排気原理

CSPは、数keVの水素イオンまたは中性粒子が炭素材料に入射した場合、そのほとんどが表面で反射されず、炭素材料中に捕捉されることを利用して粒子の排気を行っている。エネルギー E を持つ粒子が、一種類の元素からなる物質に入射した場合の反射率 R_N については、すでに多数の実験及び数値計算がある^{4,5)}。プラズマ中から放射される高速中性粒子の炭素材を用いた平均的な排気効率を見積もるために、高速の水素イオンが炭素材料に入射した場合の $R_N(E)$ を多項式で近似した。それをFig. 2に示す。ただし、高速中性粒子の反射率が水素イオンの反射率と同じであると仮定している。また、プラズマから放射される高速中性粒子がイオン温度 T_i においてマクスウェル分布していると仮定し、0.01 keVから1000 keVまで積分することによって規格化したものを $Averaged R_N(T_i)$ としてFig. 2に示す。入射イオンが単一エネルギーの場合は $R_N(E)$: Fitting, イオン温度 T_i においてマクスウェル分布している場合には $Averaged R_N(T_i)$ がそれぞれ粒子の反射率をあらわしている。 E 及び T_i が増加するにつれて反射率が減少し、そのほとんどが炭素材料に捕捉される。GAMMA10の典型的なプラズマの場合 $T_i=5$ keV程度であるから、この図より平均された反射率は約0.04となり、CSPの理想的な排気効率は、約96%と計算できる。

3.2 CSPの寿命

炭素材料中で水素およびその同位体はC-Hまたは、C-D結合の形で捕捉されていることが報告されている^{6,7)}。入射する粒子のエネルギーが増加すれば飛程が増加し、捕捉される粒子数は増加するが、深さ方向分布を考慮すると炭素原子と水素原子の比は、 $H/C=0.4$ 程度で飽和することがわかっている⁷⁻⁹⁾。また、水素で飽和している試料を800°C程度まで加熱することにより、捕捉されている水素のほとんどを脱離させることができる¹⁾。

イオンビームを用いた実験からCSPの飽和捕捉量 N_s は、ビームのエネルギーが5 keVの場合は、

$$N_s = 7 \times 10^{21} \text{ D/m}^2 \quad (1)$$

と見積もることができる⁹⁾。一方、GAMMA10における粒子束 Γ_{CX} は、プラズマパラメーターより $\Gamma_{CX}=3.5 \times 10^{18} \text{ H/m}^2 \text{ sec}$ である。ここでプラズマから放射される

Fig. 2 The energy dependence of reflection coefficient R_N in the case that H^+ is incident on carbon for normal incidence.

高速中性粒子のエネルギーをGAMMA10のイオン温度と同程度の5 keV、イオンと原子状水素の捕捉量が等しいと仮定すればCSPの寿命 τ_s として、

$$\tau_s = N_s / \Gamma_{CX} = 2000 \text{ sec} \quad (2)$$

と見積もることができる。これは、GAMMA10では10000ショット程度に相当する。GAMMA10では1日当たりおよそ70回のプラズマショットが行われているが、現状で5日間の実験後(約300ショット後)でもCSPの排気効果が確認されている。

実際には、GAMMA10のプラズマ生成実験を行っている午前9時から翌日午前0時までCSPを作動させ、プラズマ生成実験が終了した後に再生実験である昇温脱離実験を行っている。排気実験・昇温脱離実験のサイクルは1日から5日間で、最長5日間であるのはGAMMA10の実験が通常連続5日間(月曜日から金曜日)ということによっている。

3.3 プラズマ放電中のCSP排気実験

CSPに入射する高速中性粒子束の強度を変化させた場合の、CSP-on, CSP-offにおけるテストモジュール内の圧力の時間変化をFig. 3に示す。高速中性粒子束の強度は、ICRF加熱の入射電力を変化させることにより調節した。また、このときのテストモジュールとダクトを介して接続されているGAMMA10の圧力の時間変化は、CSP-on, offで差が認められなかったが、テストモジュールでは、CSP-on, offで圧力に差が生じている。CSP-offの場合は、遮蔽板はこれまでの実験において入射した高速中性粒子によって飽和していると考えられるため、入射した高速中性粒子はすべてガスになるものと

Fig. 3 The RF2 power dependence of time evolution of pressure during plasma discharges in the test module.

Fig. 4 Correlation between the number of incident particles and that of trapped particles.

考えられる。一方、CSP-on の場合は、高速中性粒子は CSP によって捕捉され、真空雰囲気中には戻らない。従って、この差は CSP によって排気された高速中性粒子によるものと考えられる。また、入射電力が増加するにつれて CSP-on, off の差が大きくなっており、入射電力の増加とともに、イオン温度と高速中性粒子束の強度が増加することが中性粒子エネルギー分析器の測定から確認されている。

次に、この圧力差について考察する。ここで、CSP-off の場合のテストモジュールの圧力を $P_{\text{CSP}}^{\text{off}}$, GAMMA10 の圧力を P_{CC} , テストモジュールの体積を V_{CSP} , 高速中性粒子束の強度を Γ_{CX} , GAMMA10 とテストモジュール間のコンダクタンスを C , テストモジュールのポンプの水素の実効排気速度を S_{eff} , 高速中性粒子が入射する CSP の面積を S , 粒子数から $\text{Pa}\cdot\text{m}^3$ への変換係数を A とすると、テストモジュールの圧力変化は、以下の式であらわせる。

$$V_{\text{CSP}} \frac{dP_{\text{CSP}}^{\text{off}}}{dt} = C(P_{\text{CC}} - P_{\text{CSP}}^{\text{off}}) - S_{\text{eff}} P_{\text{CSP}}^{\text{off}} + AS\Gamma_{\text{CX}}, \quad (3)$$

CSP-on の場合は、テストモジュールの圧力を $P_{\text{CSP}}^{\text{on}}$, 排気効率を ξ として、

$$V_{\text{CSP}} \frac{dP_{\text{CSP}}^{\text{on}}}{dt} = C(P_{\text{CC}} - P_{\text{CSP}}^{\text{on}}) - S_{\text{eff}} P_{\text{CSP}}^{\text{on}} + AS(1-\xi)\Gamma_{\text{CX}}, \quad (4)$$

とあらわされる。(3)式と(4)式の差をプラズマ放電の時間で積分することにより、CSP が排気した粒子は、次式であらわされる。

$$AS\xi \int_{t_0}^{t_d} \Gamma_{\text{CX}} dt = V_{\text{CSP}} (P_{\text{CSP}}^{\text{off}} - P_{\text{CSP}}^{\text{on}}) \Big|_{t=t_0}^{t=t_d} + (S_{\text{eff}} + C) \int_{t_0}^{t_d} (P_{\text{CSP}}^{\text{off}} - P_{\text{CSP}}^{\text{on}}) dt \quad (5)$$

Fig. 4 は、CSP に入射した高速中性粒子数と(5)式から求めた CSP が排気した高速中性粒子数の相関を取ったものである。Fig. 4 からこの2つのパラメーターは、比例関係にあり、入射粒子の増加とともに排気される粒子も増加することがわかる。

3.4 プラズマ放電前後の不純物計測

最近の核融合実験装置では第一壁に炭素材料を使用していることはすでに述べたが、これは低 Z 材である炭素材料を第一壁として用いることにより、金属不純物のプラズマへの混入を抑制し、放射損失を低減できることが主な理由である。しかし、炭素材料は金属材料に比べてスパッタされやすく、CSP は高粒子束にさらされることを前提としているため、スパッタ等のエロージョンが起こる可能性がある。

そこで、QMS によってプラズマショット前後の質量数別の分圧を測定した。ここでは炭素原子の分圧が極めて低いため、一酸化炭素・二酸化炭素に着目し、その時間変化の一例を Fig. 5 に示す。CSP-on, off ともにプラズマショット後に分圧が増加しているが、これはプラズマ放電が終了し、プラズマを形成していた粒子がガスになったもので、分圧の上昇は水素ガスとプラズマ中の炭素原子などからなる不純物が原因と考えられる。CSP-on については、CSP-off の場合のプラズマからの水素及び不純物ガスに加えて、カーボンシートに起因する不純

Fig. 5 Time evolution of major impurity pressures measured by quadrupole mass spectrometer (QMS) during and after plasma discharges.

物が存在すると考え、この測定をCSP-on, offについて行い、その分圧を比較することで評価を行った。また、スパッタによって炭素原子が真空雰囲気中に放出された場合、炭素原子がプラズマに混入することが考えられる。セントラルセルにおけるプラズマ放電中の分光計測からも、炭素原子の線スペクトル強度がCSP-on, offの違いで変化していないことが確認されている。これらの結果から、現在の測定器では、有意な差が認められず、カーボンシートにおいて生成される不純物は、極めて少量であることを示唆する結果が得られた。

3.5 昇温脱離実験

CSPの再生実験である昇温脱離実験で得られた全圧及び各質量数における分圧の時間変化の一例をFig. 6に示す。昇温速度は、600°Cまでは $\sim 11^\circ\text{C/s}$ であった。水分子である $m/e=18$ は、加熱開始から増加し始め、200°Cでピークを持ち、以後はなだらかに減少している。 H_2 である $m/e=2$ 、及び、 CO と考えられる $m/e=28$ は、ともに約400°Cでピークを持っている。 $m/e=15$ は他と比べると少量ではあるが、 H_2 とほぼ同じ温度でピークを持っている。 $m/e=44$ は、他の質量数と異なり、約300°Cでピークをもっている。昇温脱離時に水素以外の炭素原子を含む気体が観測されているが、これは昇温脱離時に化学的に活性な水素がカーボンシートの炭素原子と反応していると考えられ、イオンビームを使用した実験における昇温脱離実験においても同様の結果が得られている。昇温脱離実験は捕捉した水素を脱離させ、CSPを再生する次の実験サイクルへの準備であるが、次節で述べるように圧力の時間変化からCSPが排

Fig. 6 An example of thermal desorption spectra.

気した高速中性粒子を見積もる手法として重要である。

4. CSPの排気性能

ここではポンプとしてのCSPの性能を評価する。

4.1 排気効率

プラズマショット中のCSPテストモジュール内の圧力上昇の原因は、GAMMA10からのガス流入量 $C(P_{\text{CC}} - P_{\text{CSP}}^{\text{off}})$ とプラズマから放射される高速中性粒子 $AS\Gamma_{\text{CX}}$ であると考えられる。一般に、ポンプで排気される流量に比べ、流入するガスが十分大きければ、圧力 P は流量 Q_{tot} に比例し、 $P \propto Q_{\text{tot}}$ となる。プラズマ放電中のテストモジュールは、この条件が満たされている。これより、CSP-onとoffのテストモジュールに流れ込む流量の比をとり、有限のバックグラウンドを差し引いた圧力の増分にかけることによって、 ξ を仮定した場合のCSPテストモジュールの圧力変化が計算できる。

$$P_{\text{CSP cal}}^{\text{on}} = \left\{ 1 - \frac{AS\Gamma_{\text{CX}}}{C(P_{\text{CC}} - P_{\text{CSP}}^{\text{off}}) + AS\Gamma_{\text{CX}}} \right\} \times (P_{\text{CSP}}^{\text{off}} - P_{\text{CSP}}^{\text{BG}}) + P_{\text{CSP}}^{\text{BG}} \quad (6)$$

$P_{\text{CSP}}^{\text{BG}}$ は、テストモジュールのバックグラウンドの圧力である。この結果をFig. 7に示す。この図から ξ は0.5~0.8と求められる。

4.2 CSPから脱離した水素原子の定量評価

昇温脱離実験中においてテストモジュールがカーボンシート、真空容器、ポンプ、そしてポンプと真空容器を接続する導管から構成されるとして単純化すると、水素分圧に換算したCSPテストモジュールの圧力の時間変化は次式で表せる。

Fig. 7 Estimation of the pumping efficiency of CSP. CSP-on and CSP-off are measured data. Other lines represent the results of calculating when the pumping efficiency ξ are assumed to be 0.2~1, respectively.

$$V_{\text{CSP}} \frac{d\alpha P_{\text{CSP}}}{dt} = Q - S_{\text{eff}} \alpha P_{\text{CSP}}, \quad (7)$$

ここでカーボンシートからの脱ガス量を Q 、圧力を P_{CSP} 、すべての分圧の和に対する水素とメタンの分圧の和の割合を α とする。ただし、メタンは水素分子2個と換算してある。バックグラウンドについては、加熱を開始する前の10秒間の圧力の平均をとったものを差し引くことにより処理した。CSPに入射した高速中性粒子数は、電子線密度、反磁性能等のプラズマパラメーターから、昇温脱離実験によってカーボンシートから脱離した粒子数は(7)式を用いて見積もった。その両者の相関を Fig. 8 に示す。図中の直線は ξ が1、つまり入射した粒子がすべて排気され、昇温脱離によってすべて脱離した場合である。点線は、 $\xi=0.5$ の場合を示す。この図において、 ξ が0.2~0.6の領域に測定点が分布している。この結果から、800℃、100秒間の昇温脱離では、捕捉された粒子の約半分はカーボンシート中に残ると考えられる。これをすべて脱離させるには、1000℃以上に加熱する必要があるが^{10,11)}、試料の温度を10分間700℃に保持することにより、捕捉粒子の7~8割が脱離することがわかっている¹⁾。また、実際には5分間の昇温脱離を10回程度行い、十分に水素を脱離させた上で、次の実験を行っている。

5. ま と め

水素リサイクリング低減を目的とした高速中性粒子排

Fig. 8 Correlation between the number of incident particles and that of desorbed particles.

気装置であるカーボンシートポンプの実際の、プラズマ実験装置への適用試験を、タンデムミラー型プラズマ実験装置 GAMMA10 において行った。CSP を作動させた場合と作動させなかった場合において、テストモジュール内に圧力差が生じ、CSP の排気効果が確認された。CSP が排気する粒子数は、カーボンシートに入射する高速中性粒子と比例関係にあることがわかった。また、プラズマショット中の圧力変化から見積もった排気効率 ξ は0.5以上であった。入射粒子数と昇温脱離実験から見積もった粒子数との間に正の相関がみられ、測定点はほぼ $\xi=0.2\sim0.6$ の間に分布した。現状では5日間の実験後(約300ショット後)においてもCSPの排気効果が確認されているが、これはGAMMA10の実験日数で制限されている値であり、イオンビームを用いた実験から寿命は2000秒程度であると見積もられた。プラズマショット時の不純物分圧の測定において、現在の測定装置ではCSPを作動させた場合と作動させなかった場合の差がみられないことから、カーボンシートにおいて生成される不純物は、極めて少量であることを示唆する結果が得られた。以上のことから、カーボンシートポンプが実際のプラズマ実験装置における高速中性粒子排気について有効であると結論できる。

謝辞

実験を進める上で協力していただいた GAMMA10 グループの皆さんに深く感謝します。また、議論に参加していただいた核融合科学研究所の諸先生方に厚く感謝いたします。

〔文 献〕

- 1) 相良明男：真空，**41** (1998) 837.
- 2) Y. Nakashima et al.: J. Nucl. Mater., **266-269** (1999) 901.
- 3) 谷津 潔：プラズマ・核融合学会誌，**74** (1998) 1372.
- 4) W. Eckstein and H. Verbeek: Nucl. Fusion Special Issue (1984) 12.
- 5) W. Eckstein and H. Verbeek: Max Plank Institut für Plasma physik, IPP-9/32 (1979).
- 6) K. Ashida et al.: J. Nucl. Mater., **111 & 112** (1982) 769.
- 7) A. Miyahara and T. Tanabe: J. Nucl. Mater., **155-157** (1988) 49.
- 8) 田辺哲朗，丸山忠司：プラズマ・核融合学会誌，**69** (1993) 415.
- 9) G. Staudenmaier et al.: J. Nucl. Mater., **84** (1979) 149.
- 10) Y. Yaita et al.: Fusion Technol., **28** (1995) 1294.
- 11) V. Phillips et al.: J. Nucl. Mater., **145-147** (1987) 292.