ニッケルのヘリウムイオン・リテンション*

柳原 英人**・藤田 一郎**・日野 友明**・山科 俊郎**

(受理1993年11月29日, 掲載決定1994年2月5日)

Helium Retention of Nickel

Hideto YANAGIHARA, Ichiro FUJITA
Tomoaki HINO and Toshiro YAMASHINA

(Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita-13, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060)

(Received November 29, 1993, Accepted February 5, 1994)

1. はじめに

重水素 (D) と三重水素 (T) を燃料とする核融合炉において, 核融合反応の結果ヘリウムが生成される. この生成ヘリウムは, 燃料希釈や輻射損失等の原因となり, 自己点火条件の保持を困難にするなどの理由で炉外に排出すべきものであり, ヘリウム灰と呼ばれる. そして炉心プラズマ中へのヘリウム灰の濃度は約10%以下程度にすることが要求されている. 一般に, このヘリウムの排気はダイバータで行われるが, その排気効率を向上させるためにダイバータ近傍にニッケル等の金属を設置することが検討されている^{1,2,3,4)}. すなわち, ニッケルやバナジウム, 鉄, タンタル等の金属は, 燃料粒子と比較してヘリウムを選択的に保持でき, 排気する能力を持つと考えられているからである⁵⁾. しかし, その保持 (リテンション) 量や, トラップ特性等については, まだ十分詳細には検討されていない.

本研究では, ニッケルにヘリウムイオンや水素イオンを種々の温度下で照射し, ヘリウムのリテンション量の温度依存性について調べた. この結果より, ヘリウムを多く保持できる温度範囲について評価した. また, ヘリウムトラップに対する水素イオン照射効果について検討した.

2. 実験方法

2.1 試料

試料として, 鏡面研磨し, エタノール中で超音波洗浄したニッケル板 (99.9%) を使用した.

2.2 プラズマ照射

Fig. 1 に使用した ECR プラズマ照射装置の概略図^{6,7)}を示す. この装置では, 装置上部において ECR 放電によりプラズマを生成し, その下部にあるサンプルホルダーにバイアス電圧を印加してイオンを加速し, サンプルホルダー上の試料に照射した. また, プローブ計測並びに発光分析が可能である. 今回の一連の照射実験では, これらのプラズマ計測により, 照射条件を変えた場合でも, ニッケル試料に対してもヘリウム照射量がほぼ同程度となるようにした.

Fig. 1 ECR plasma implantation apparatus.

* 平成5年10月29日第34回真空に関する連合講演会で講演 (29pB-10)

** 北海道大学工学部原子工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

照射前、サンプルホルダーに試料を装着後、800°C、2時間の脱ガス処理を行った。自然冷却した後、ECR イオン源を放電圧力5 Paで運転し、基板バイアス電圧を-1 kVに固定して、ヘリウムプラズマ、水素プラズマ、ヘリウム-水素混合プラズマ（ガス流量比：He/H=2/1）を試料に照射した。プラズマ照射時の試料の照射温度は室温から700°Cまで変化させた。

2.3 トラップ量の測定

試料中にトラップされたヘリウムの放出挙動、ヘリウムリテンション量を昇温脱離分析（TDS）法にて調べた^{8,9)}。昇温脱離分析装置の分析前の到達圧力は約 2×10^{-6} Paである。昇温速度を10°C/minとし、照射されたニッケル試料を室温から1000°Cまで加熱し、1000°Cで30分間ホールドした。この間放出されるHeおよびH₂の脱離量を四重極質量分析計（QMS）で定量的に測定した。

3. 実験結果および検討

ヘリウムトラップ特性の基礎データを得るため、まずヘリウムのみ、および水素のみを照射した場合の結果を示す。次に、実機においてはヘリウム、水素イオンが同時に入射しているので、ヘリウムと水素の混合ガスのプラズマで照射した場合について示す。ヘリウムの単独照射と比べ、水素イオンがヘリウムトラップ挙動に影響を与える可能性もあると考えられるので、この点についても検討した。

Fig. 2 Thermal desorption spectra of helium for nickel samples irradiated with He⁺ ions at heating temperatures of (a) 200°C, (b) 400°C and (c) 600°C.

3.1 ヘリウムのみあるいは水素のみ照射後のトラップ特性

Fig. 2はヘリウムのみ照射したときのヘリウムのTDSスペクトルである。ヘリウム照射量は、 4.5×10^{18} He/cm²であった。このスペクトルより、まず、照射温度以下ではヘリウムの脱離は認められなかった。また、ヘリウムの脱離ピーク群は大きく2つに分類できることがわかった。低温側のものは、照射温度によりピーク位置が高温側にシフトするという性質を持っており、高温側のものは、照射温度に依存せずどの場合でも約800°C付近に見られた。なお、この傾向があることを再実験にて確認した。これらのピーク挙動の違いの原因についての詳細は不明であるが、低温側のピークは照射条件により欠陥の状態、あるいは拡散挙動が異なってくるためと考えられる。

Fig. 3はヘリウムのみ照射したときのヘリウムのトラップ量、および水素のみ照射したときの水素のトラップ量を示したものである。水素の照射量は 4.8×10^{18} H₂/cm²であった。照射温度が100°C以上では水素はほとんどトラップされていなかった。この結果は、今後選択排気について考慮する際、照射温度が100°C以上ではヘリウムのみについて議論すればよいことを示している。また、ヘリウムは照射温度に対し、約200°C、約600°Cでピークを持っていた。約200°Cのピークは低温側で脱離するヘリウムに、約600°Cのピークは高温側（800°C）で脱離するヘリウムにほぼ対応している。

これらの結果をもとに核融合炉への適用について考えてみる。Fig. 2において見られるように照射温度以下でヘリウムの脱離は認められなかった。従って、Fig. 3の横軸は核融合炉でのニッケルの使用温度と考えてよい。

Fig. 3 Retention amounts of hydrogen atom and helium atom per unit area of nickel samples as a function of irradiation temperature.

Fig. 4 Thermal desorption spectra of helium for nickel samples irradiated with He-H₂ plasma at heating temperatures of (a) 200°C, (b) 400°C and (c) 600°C.

ニッケルの温度を約200°C, もしくは約600°Cにして使用すれば最もヘリウムを多く排気できることになる。しかし, ITER 等¹⁰⁾の次期核融合装置ではベーキング温度が約300°C以上とみなせるため, ニッケルを若干加熱し, 約600°Cにして利用すれば最も効率よくヘリウムを選択排気できることになる。

3.2 ヘリウム-水素混合プラズマ照射によるヘリウムのトラップ特性

Fig. 4 はヘリウム-水素混合プラズマを照射したときのヘリウムの TDS スペクトルである。この時のヘリウム照射量は $4.2 \times 10^{18} \text{ He/cm}^2$ であった。ヘリウムのみの照射の場合 (Fig. 2) と同様に混合プラズマ照射の場合もヘリウムの脱離ピーク群は, 照射温度とともにピーク位置がシフトする低温側と, 照射温度に依存せず約 800°C 付近に見られる高温側の 2 つに分類できることがわかった。しかし, 低温側のピーク位置に着目すると, ヘリウムのみの照射の場合と比較して, 明らかに高温側にシフトしていた。

Fig. 5 はトラップ量について, ヘリウムのみ照射した場合と比較したものである。この図では水素トラップ量を示していないが, ヘリウムと水素の同時照射の場合でも, 水素のトラップ量には変化が見られなかった。ヘリウムトラップ量はヘリウムのみ照射の場合とはほぼ同程度であったが, 低温側で増える傾向にあった。また約 100°C 低温側にピーク位置がシフトしており, 約 100°C と約 500°C においてトラップ量が極大となった。すなわち, 同時照射の場合, ヘリウムトラップ量を最大とする温度は, ヘリウムのみの照射と比較して約 100°C 低温側にシフトした。

Fig. 5 Retention amounts of helium atom per unit area of nickel samples, after the irradiation of He-H₂ plasma and the irradiation of He plasma.

この結果から実機においては, 約 100°C もしくは約 500°C でのニッケルの使用が最適と考えられる。ベーキング温度を考慮すると¹⁰⁾, ニッケルを約 500°C に加熱して使用することが望ましい。

4. ま と め

ニッケルに様々な温度条件下でヘリウムプラズマ, 水素プラズマ, ヘリウム-水素混合プラズマを ECR プラズマ照射装置で照射し, TDS 測定によりヘリウム, 水素のリテンション特性を調べた。以下, 結果の要点を示す。

- (1) ヘリウムプラズマのみ照射の場合, ヘリウムの脱離ピーク群は照射温度によりピーク位置がシフトする低温側のものと照射温度に依存しない高温側のものの 2 つに分類でき, 照射温度に対しトラップ量は, 200°C と 600°C でピークを持つことがわかった。
- (2) 水素は照射温度が 100°C 以上ではほとんどトラップされなかった。
- (3) ヘリウム-水素混合プラズマの場合, ヘリウムのみの照射と比較して, トラップ量はほぼ同程度であったが, 低温側で増える傾向にあった。また, ヘリウムのみの照射と比べて TDS スペクトルでの低温側での脱離挙動が異なっていた。トラップ量は, 約 100°C および約 500°C で最大となった。
- (4) 核融合炉への適用の際, ベーキング温度を考慮すると, ニッケルを加熱し, 約 500~600°C に保持すれば, 最も効率よくヘリウムを選択排気できると考えられる。

謝 辞

本研究は1993年度核融合科学研究所共同研究（研究代表者：日野友明）の一環として行われたものである。

〔文 献〕

- 1) J. N. Brooks, R. E. Nygren, K. H. Dippel, B. L. Doyle, K. H. Finken, Y. Hirooka, A. Krauss, R. F. Mattas, R. T. McGrath, D. L. Smith and D. Walsh: J. Nucl. Mater., **176 & 177** (1990) 635.
- 2) K. H. Finken, D. L. Hillis, K. H. Dippel, A. Hardtke, J. T. Hogan, R. A. Moyer, A. Pospieszczyk, D. Rubuldt, K. Akaishi, R. W. Conn, H. Euringer, D. S. Gray, L. D. Horton, R. A. Hulse, R. C. Isler, C. C. Klepper, P. K. Mioduszewski, A. Miyahara, S. Sengoku, J. G. Watkins and G. H. Wolf: J. Nucl. Mater., **176 & 177** (1990) 816.
- 3) R. E. Nygren, B. L. Doyle, W. Ottenberger, J. N.

Brooks and A. Krauss: J. Nucl. Mater., **196-198** (1992) 558.

- 4) J. N. Brooks, A. Krauss, R. E. Nygren, B. L. Doyle, K. H. Dippel and K. H. Finken: J. Nucl. Mater., **196-198** (1992) 664.
- 5) J. N. Brooks and R. F. Mattas: J. Nucl. Mater., **121** (1984) 392.
- 6) 藤田一郎, 日野友明, 山科俊郎: 真空, **35** (1992) 117.
- 7) 日野友明, 藤田一郎, 山科俊郎: 核融合研究, **68** (1992) 557.
- 8) T. Yamashina and T. Hino: J. Nucl. Mater., **48 & 49** (1991) 483.
- 9) 広畑優子: 真空, **33** (1990) 488.
- 10) K. Tomabechi et al., "ITER Conceptual Design", Proc. 13th Int. Conf. on plasma physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Washington (1990), IAEA-CN-53/F1-1.