カーボニゼーションが及ぼす水素リサイクリング現象への効果

道園真一郎*・伴野 達也*・金原 繁*

(受付1990年5月12日, 掲載決定1990年7月7日)

Influence of Carbonization on Hydrogen Recycling Phenomena

Shinichiro MICHIZONO*, Tatsuya BANNO* and Akira KINBARA*

(*Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo)

(Received May 12, 1990, Accepted July 7, 1990)

This paper describes experimental results on the recycling of hydrogen on the carbonized wall of a vacuum vessel and the interpretation based on Desorbable phase Model for the recycling mechanism, in order to provide a rational view of the wall pumping phenomena observed in tokamaks. The recycling outflux ϕ_{out} of hydrogen from the amorphous hydrogenated carbon layers during glow discharge with hydrogen or helium gas in the vessel is determined from the pressure measurement of hydrogen. Even after the steady state of the hydrogen surface concentration in the film is reached, the recycling behavior of hydrogen as desorption or absorption is responsible for the energy of hydrogen ions implanted into the film. The typical change of hydrogen concentration for increase or decrease of the ion energy by e.g. 50 eV from a fixed value is, reproducibly, about 10^{15} atoms/cm² within discharge time of 20 s.

1. はじめに

トカマク型核融合炉の第一壁の候補材料として現在はグラファイトが有力である。世界3大トカマクと呼ばれるTFTR, JT-60, JETをはじめとして現存の世界のほとんどのトカマク装置で、第一壁にはカーボンコーティングがなされているかグラファイトタイルが使われており、更にリミターにもグラファイトが使われるようになっている¹⁾。

一般に第一壁からの水素の放出を水素のリサイクリングと呼んでいる。金属系材料については、水素のリサイクリングの機構はよくわかっており、実験結果とモデルがよく一致している²⁾が、炭素系材料の場合リサイクリングの機構が金属材料の場合と大きく異なっていることがわかっている³⁾。炭素系材料の場合、水素のリサイクリングは、材料内部の水素吸蔵度、壁の温度、さらには入射水素のエネルギーにも依存していると考えられ³⁾、トカマク等の実機ではこれらの影響をすべて解析するのは困難である。トカマク運転に際しては、リサイクリ

ングの制御にベーキングや水素またはヘリウムグロー放電などの方法を経験的に利用している⁴⁾。我々はこの研究で、リサイクリング素過程に関する基礎データを得るために、水素化アモルファスカーボン膜(a-C:H)を内壁にコーティングした真空容器(第一壁シミュレーターと呼ぶ)中で水素放電を行ったときの水素の圧力変化を測定し、壁における水素の吸蔵・放出量を定量的に測定した。なお、カーボン膜中の水素の吸蔵度を見積るために、ヘリウム放電を用いて水素の叩きだしを行った。これらのデータをもとにカーボン膜における水素のリサイクリング機構を理解するためのモデルを提案する。

我々は水素のリサイクリングの壁温度依存性、入射エネルギー依存性について文献[5]に報告したが、ここではさらにカーボン膜をコーティングする際の分圧変化及びカーボン膜の水素除去に用いるヘリウム放電の有効性に関して得られた結果を加え報告する。

2. 水素リサイクリング束の測定

2.1 測定原理

水素のリサイクリング束は、一般的に使われている粒

* 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

子数バランスの式に基づいて決定できる²⁾。まず、表面積 $S[\text{cm}^2]$ 、体積 $V[\text{cm}^3]$ の真空容器に一定の水素量 Q_H [atoms/s] が導入され排気速度 $S_p[\text{cm}^3/\text{s}]$ で排気される時、真空容器中の水素原子換算粒子数密度 n_H [atoms/ cm^3] は、

$$V \cdot dn_H/dt = Q_H - S_p \cdot n_H \quad (1)$$

と書ける。一方、時刻 t_0 で水素放電を開始し壁への入射粒子束が ϕ_{in} [atoms/ cm^2s]、壁面からの水素の放出 (リサイクリング) 束が ϕ_{out} [atoms/ cm^2s] である時の真空容器中の粒子数の変化は、

$$V \cdot dn_H/dt = Q_H - S_p \cdot n_H + S \cdot (\phi_{out} - \phi_{in}) \quad (2)$$

と表すことができる。

また、壁面に吸蔵されている水素の面密度を C [atoms/ cm^2] とすると、その時間変化は、

$$dC/dt = \phi_{out} - \phi_{in} \quad (3)$$

で表される。

従って、 n_H 及び、 ϕ_{in} を測定すれば、 ϕ_{out} が得られ、更に壁面の水素の面密度の変化 (ΔC) も算出することができる。

ヘリウム放電の場合は、(2) と同様な扱いで、水素分圧の変化により壁面からの水素の放出量がわかる。

我々は、イオンゲージ及び質量分析計を用い、放電中の真空容器中の水素の粒子数変化を測定した。 ϕ_{in} に関しては、本実験の圧力領域では分子イオン (H_3^+) が大部分を占めることを考慮し平均2.8個の原子からなる水素分子イオンが入射すると仮定し ($\text{H}_{2.8}^+$)^{3,6)}、放電電流から求めた。

2.2 水素の脱離過程

Clausing ら³⁾ は、カーボン膜中には脱離しやすい水素の相 (Desorbable phase: D-phase) があると考えたとカーボン膜からの水素の放出を定性的にうまく説明できると述べている。ここでは更に、このモデルを定量的評価にも使えるように、文献[3]の内容をまとめて以下の仮定をし、物理量を導入する。

- D-phase の水素のみが、カーボン膜に入射する水素と相互作用し、その結果粒子衝撃脱離で放出される。
- D-phase 以外の相 (Undesorbable phase: U-phase) の水素は、反応速度 K [atoms/ cm^2s] で D-phase の水素に転換する。
- カーボン膜に入射した水素は、入射直後は U-phase に属する。
- 膜中の水素密度は、深さ方向についてはほぼ一様である。
- 粒子衝撃脱離による水素の放出は、 ϕ_{in} とにある

D-phase の水素の面密度 (v [atoms/ cm^2]) に比例する。

化学反応速度論のもとに以上を定式化できる。

ϕ_{out} は(e)により、

$$\phi_{out}(t) = \sigma \cdot \phi_{in} \cdot v(t) \quad (4)$$

と表すことができる。但し、 σ は面積の次元をもつ反応定数 (脱離断面積) [cm^2] である。

一方、U-phase に属する水素の面密度を C' [atoms/ cm^2] とすると、(c) から、

$$dC'/dt = \phi_{in} - K \quad (5)$$

一方、D-phase の水素の面密度の変化は、

$$dv(t)/dt = -\phi_{out}(t) + K \quad (6)$$

である。 K は(b)により、 C' の関数と考えられるが、U-phase の水素量は D-phase の水素量に比べて充分に大きいとする。また、放電パルス長が短いため、 C' はほとんど変化しないので実験解析では K は一定と見なす。我々の実験では放電開始後は、 ϕ_{in} は一定 (電流一定) となるように制御するので、(4) 及び (6) を連立して解くことができ、

$$v(t) = K/(\sigma \cdot \phi_{in}) + v_0 \cdot \exp(-\sigma \cdot \phi_{in} \cdot t) \quad (7)$$

である。但し、 $v_0 = v(0) - K/\sigma \cdot \phi_{in}$ である。また、D-Phase 以外の水素の面密度は、

$$C'(t) = C'(0) + (\phi_{in} - K) \cdot t \quad (8)$$

従って、壁面上のカーボン膜に吸蔵されている水素の全面密度 $C (= C' + v)$ は、

$$C(t) = C'(0) + K/(\sigma \cdot \phi_{in}) + v_0 \cdot \exp(-\sigma \cdot \phi_{in} \cdot t) + (\phi_{in} - K) \cdot t \quad (9)$$

で与えられる。放電による C の変化 $\Delta C (= C(t) - C(0))$ は

$$\Delta C(t) = v_0 \cdot (\exp(-\sigma \cdot \phi_{in} \cdot t) - 1) + (\phi_{in} - K) \cdot t \quad (10)$$

となる。

(3) 式から求めた $\Delta C(t)$ を (10) 式にあてはめることにより v_0 , σ , K を求めることができ、これから $v(t)$ が得られる。また、今回の解析では用いないが、SIMS などの方法で、カーボン膜に吸蔵されている水素の全面密度 $C(0)$ がわかれば、 C' を求めることができる。

我々の実験では、(10) 式で放電直後に短時間に化する第1項から v_0 , σ を求めた。 K については、放電中の水素ガス導入量のドリフトがあるため決定できなかった。

3. 実験装置とカーボン膜作成

3.1 ガス導入系、及び排気系、粒子数測定

本研究で用いた測定系の概略を Fig. 1 に示す。

使用した主真空槽は、内径10 cm、長さ40 cm のステ

Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup.

ンレス製の円筒容器である。350°Cまで加熱可能で到達圧は 1×10^{-6} Pa 以下である。

排気は、並列につないだ二個のポリイミドストップバルブ (SV1, SV2) を通じて、ターボ分子ポンプにより行われる。SV2 のフランジ部分には直径 1 mm の穴を開けたオリフィスをつけコンダクタンスを小さくしている。その値は水素に対しては、約 0.4 l/s である。放電実験を行う場合は、この SV2 のみを通して排気し (排気速度 S_p)、その他の場合は、SV1, SV2 とともに開いて、排気を行った。

ガス導入部付近にシュルツゲージ (IM1) が、また、ターボ分子ポンプに B-A ゲージ (IM2) がとりつけてある。IM1 は放電ガスを導入したときの圧力を測定するためのものである。放電中は IM1 は安定しなかったため IM2 を用いて圧力を測定した。これらの真空計を取り付けた位置の温度は壁温とは異なる。そのため各温度毎に IM1, IM2 は主真空槽内の粒子数密度に較正した。

質量分析計 RGA (Residual Gas Analyser) の内部は差動排気され、RGA 部の残留ガスは常時 5.0×10^{-7} Pa 以下であった。放電実験中は RGA において 8×10^{-5} Pa を示すまでバリアブルリークバルブ (VV) のコンダクタンス C_L を調整したが、この時 B-A ゲージ及びシュルツゲージ共に圧力変化は見られなかった。 $C_L/S_p < 0.01$ であった。

グロー放電の陽極は、主真空槽の軸上におかれてお

り、直径 3 mm 長さ 30 cm のステンレス棒である。また、ネオントランス (二次電圧 3000 V) をトリガーに用いている。放電は、約 10 Pa で行った。標準的な放電持続時間は、1 分である。また、放電電流 (及び陽極印加電圧 V_a) は、水素放電の場合、0.05 A ($V_a = 270$ V), 0.2 A ($V_a = 320$ A), 0.4 A ($V_a = 345$ V), ヘリウム放電の場合、1.0 A ($V_a = 240$ V) であった。

放電中の電流は、放電安定化抵抗に生じる電圧としてモニターし、デジタル電圧計で測定した。放電電圧をかけるタイミングは、コンピューターで制御されている。

3.2 カーボンコーティング過程とその初期状態

室温で SV2 のみを開き (メタンに対し $S_p = 0.12$ l/s) 主真空槽にメタンを 17 Pa 導入しこの流量を一定に保ちながら放電する。この時 V_a は約 400 V、放電電流は 0.15 A である。メタン放電は約 30 分間行い、これによって主真空槽の内壁全面に水素密度 C_0 の一様なカーボン膜を 40 nm 付着させることができた。この放電前後の分圧変化を測定した結果が Fig. 2 である。放電中は、導入されたメタンは解離し全圧の 10% 以下となり、残りの大部分が水素であることがわかる。加藤ら⁷⁾も実効排気速度の小さい真空系で同様の分圧変化を報告している。メタンの解離から見積った成膜速度は 1.5 nm/min で、得られた膜圧から計算した成膜速度と比較的よい一致を示している。

作成されたカーボン膜の水素吸蔵の程度を知るために、成膜直後に水素放電 ($V_a = 320$ V) を行なった。そ

Fig. 2 Partial pressure changes of hydrogen during carbonization on the vacuum vessel wall. The glow discharge with methane starts at $t=20$ s and ends at $t=620$ s.

の時の圧力の変化 (ΔP) 及び(2), (3)式から導かれるカーボン膜の水素面密度の変化 (ΔC) を Fig. 3 に示す. この時吸蔵された水素は 1.7×10^{15} atoms/cm² であり, 作成されたカーボン膜では吸蔵水素の量が飽和に達していないこと, すなわち C_b は飽和密度より小さいことがわかった.

カーボンコーティングした後は一連のリサイクリングに関する実験を行い, その後300°CでSV1を開いて水素放電を約10時間行いカーボン膜を除去した. 次の放電実験のために再び室温でカーボンコーティングを行なった.

4. 実験結果と考察

4.1 ヘリウム放電による膜中の水素温度の見積り

グラファイトでは, 入射水素粒子のエネルギーにより吸蔵水素の飽和量が決まることが知られている⁸⁾. また, 水素で飽和したグラファイトと, カーボン膜の類似性が指摘されている⁹⁾ので, 我々のつくったカーボン膜に対してもグラファイトと同じような水素のエネルギーにより飽和量が決まると考えられる. 一方, ヘリウム放電によりカーボン膜にヘリウムイオンが入射するとヘリウムイオンの飛程内の水素のほとんどが除去されることを Sugai ら¹⁰⁾は報告している. そこで, 300°Cで水素放電 ($V_a=270$ V) を1分, 4分, 10分行って水素を吸蔵

Fig. 3 Evolution of pressure (ΔP) and areal density in the carbon film (ΔC) during the glow discharge with H_2 for 1 min just after the film deposition.

Fig. 4 Pressure changes of hydrogen during the discharge with He for 1 min. Before the discharge, carbon film was exposed to discharge plasma with H_2 for 1 min. (—), 2 min, (— · —), 4 min, (----), and 10 min. (.....), respectively⁵⁾.

させた後に, ヘリウム放電 ($V_a=240$ V) を1分間行い水素を放出させた. そのときの水素分圧の時間変化を Fig. 4 に示す⁵⁾. 水素放電時間が4分間と10分間の場合では圧力変化にあまり差がないことから4分間の水素放電で膜中の水素は飽和に達しているものと思われる. 室温及び220°Cについても同様にほぼ4分間で水素が飽和

Table 1 Wall temperature dependence for hydrogen release from carbon film by helium discharge⁵⁾

Temperature	Released hydrogen (C_0) ($\times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)
r.t.	4.7
220°C	3.4
300°C	2.9

するという結果が得られた。

また、各温度で水素放電 ($V_a=270 \text{ V}$) での吸蔵水素の飽和量を見積るために、この放電を10分間行った後、ヘリウム放電 ($V_a=240 \text{ V}$) を試みた。この時の膜からの水素の放出量 (C_0) を **Table 1** に示す⁵⁾。壁温が高温になるほど膜からの水素の放出量は小さくなっていることがわかる。この傾向は、グラファイトにおける水素吸蔵の温度依存性と一致する⁸⁾。

4.2 壁温度に対する依存性

カーボン膜で壁の温度によりリサイクリングが変化することは、Clausing ら³⁾が指摘している。室温、220°C、300°Cで、膜中で吸蔵水素の量が飽和状態になるように水素放電 ($V_a=270 \text{ V}$) を10分間行った。次に、電圧を上げて水素放電 ($V_a=320 \text{ V}$) を行い、膜からの水素の放出を測定した。 ΔC から求めた v_0 , σ_H を **Table 2** に示す⁵⁾。

σ_H は $3 \times 10^{-16} \text{ cm}^{-2}$ 程度である。これは水素の古典的衝突断面積の程度である。実験データは少ないが、 σ_H が高温になると大きくなっていく傾向がみられる。

ヘリウム放電の場合も、水素の放出がヘリウムの入射粒子束 ϕ_{in} とヘリウムの入射飛程までの水素の面密度 (C_0) に比例すると考えると水素放出の脱離断面積 σ_{He} を求めることができる。ヘリウム放電の場合は、

$$\Delta C(t) = C_0(\exp(-\sigma_{He} \cdot \phi_{in} \cdot t) - 1) \quad (11)$$

となる。10分間の水素放電 ($V_a=270 \text{ V}$) 後のヘリウム放電 ($V_a=240 \text{ V}$) 後における脱離断面積 σ_{He} を **Table 3** に示す。 σ_{He} はあまり壁温によらないことがわかる。また、 σ_{He} は σ_H はほとんど同程度で、 C_0 が v_0 より数倍大きいことを考慮すればカーボン膜中の水素の除去にヘリウム放電が有効なことがわかる。Langley¹¹⁾はヘリウムによる水素の脱離断面積が入射エネルギーとともに小さくなり入射エネルギー350 eVの時 $1.65 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ であると報告している。我々の結果は、入射エネルギーがより小さいことを考慮すれば、Langley の結果¹¹⁾と矛盾しない。

水素放電 ($V_a=320 \text{ V}$) を行った24時間後に V_a の同じ放電を行っても圧力は変化しなかった。これは、我々の

Table 2 Wall temperature dependence of reaction cross section σ_H and initial density of D-phase v_0 in hydrogen release from carbon film by hydrogen discharge⁵⁾

Temperature	σ_H ($\times 10^{-16} \text{ cm}^2$)	v_0 ($\times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)
r.t.	2.4	1.1
220°C	3.0	1.3
300°C	3.3	0.9

Table 3 Wall temperature dependence of reaction cross section σ_{He} in hydrogen release from carbon film by helium discharge

Temperature	σ_{He} ($\times 10^{-16} \text{ cm}^2$)
r.t.	2.9
220°C	3.1
300°C	3.0

実験では(10)式における K の値が小さいこと、すなわち U-phase の水素が D-phase に熱的に移行していく転換速度は測定できないほど小さいことを意味している。

Clausing ら³⁾実験結果の一つであるリサイクリング束の放電間隔依存性を説明するために K は無視できなかった。また、250°Cにおける σ は $2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ で v_0 は $6 \times 10^{14} \text{ atoms/cm}^2$ であった。我々の結果と異なるのは、成膜条件が異なっていたり (壁温が250°C, $V_a=260 \text{ V}$)、入射エネルギーが彼らの実験では100 eV と小さいことによると考えられるが現在のところ原因はわかっていない。

4.3 入射エネルギーに対する依存性

水素放電 ($V_a=270 \text{ V}$) でカーボン膜中の吸蔵水素の量が飽和した後はこの放電を繰り返して行っても圧力変化は見いだされなかった。しかし、 V_a を50 V 増加し320 V-0.2 A の水素放電を行なうと、カーボン膜から水素の放出が起こることが観測された。そこで、リサイクリング現象のエネルギー依存性を明らかにするため、放電中に V_a を変えて圧力の時間変化を調べた。壁温が220°Cの結果を **Fig. 5** に示す⁵⁾。(a)はかける電圧のモードを示す。放電(i)及び(iii)は、それぞれの V_a で吸蔵水素の量が飽和するように10分程度行なった。Fig. 5(b)に示すように、放電(ii)では V_a の減少 (従って ϕ_{in} の減少) とともに $8 \times 10^{14} \text{ atoms/cm}^2$ の水素が余分に吸蔵された。金属壁の場合は ϕ_{in} が小さくなったとき壁内部の水素の量は減少する ($\Delta C < 0$) ことが知られているが²⁾、

Fig. 5 (a): Illustration of the hydrogen discharge pulses as a parameter of anode voltage V_a . (b)–(e): Evolutions of pressure ΔP and hydrogen areal density ΔC during discharge pulses of (ii), (iv), (v) and (vi). V_a is changed at $t=20$ s⁵⁾.

カーボン膜のリサイクリングは金属のリサイクリングとは機構は異なることが確かめられた。放電(iv), (v)では、 V_a の増加とともに水素の放出が観察されている。また、放電(vi)で V_a を減少させたとき水素は再び吸蔵されていく。放電(ii)の水素の吸蔵量と放電(iii)の水素の放出量は同程度で、放出と吸蔵が可逆な過程であることがわかる。このような入射エネルギーの増減に伴う水素の放出・吸蔵は、壁のポンプ作用 (Wall Pumping)¹²⁾と大きな関係があると考えられる。

V_a の増減による水素の放出・吸蔵は、室温でも観察された。このことから、D-phaseから脱離した水素は、カーボン膜中を熱的に拡散していくのではなく、粒子の衝撃により拡散し表面にいたるのではないかとと思われる¹³⁾。

水素の吸蔵と放出は水素で飽和したグラファイトの水素密度の深さ方向分布の結果¹⁴⁾から定性的に説明づけられる。Fig. 6にその水素密度分布の模式図を示す。高エネルギーの入射粒子で飽和した時の分布が、Fig. 6(a)

Fig. 6 Illustrations of hydrogen absorption (see Fig. 5(b) and (e)), which take account of depth profile of hydrogen. $C(x)$: hydrogen concentration at depth x . C_b : hydrogen concentration in the initially deposited carbon film. r_{p1} : implantation range for hydrogen with higher E_i (E_i : energy of implanted ions). r_{p2} : implantation range for hydrogen with lower E_i . (a): Depth profile for higher E_i . (b): Depth profile during the hydrogen implantation with lower E_i . Hatched area shows "undersaturation". (c): Depth profile after the implantation with lower E_i . Broken line shows the depth profile for higher E_i .

である。Waelbroeckら¹⁵⁾が指摘しているように、入射粒子が低エネルギーの時の方が高エネルギーの場合よりも表面近傍の水素密度は大きくなる。Fig. 6(b)の点線で示されている低エネルギーの入射粒子による分布と、高エネルギーの入射粒子による分布が交差する深さ r_{p2} までのカーボン膜では、水素が飽和量に達していない。従って、入射粒子のエネルギーが低くなると、Fig. 6(c)で示される飽和状態に至るまで水素は吸蔵される。入射エネルギーが再び高くなると水素密度の深さ方向分布がFig. 6(a)のようになるまで水素の放出が起こる。

D-phaseを形成しているのは表面から深さ r_{p2} までのカーボン膜中の水素で、高エネルギーの入射粒子に対して過飽和になっている部分と考えられる。我々は、Fig. 5(c), (d)で示されるような低エネルギーから高エネルギーに入射イオンのエネルギーを変えたときの水素

の放出に対し、D-phase モデルを適用し、(10)式をあてはめて脱離断面積を見積ることができることを示した。

5. ま と め

本研究では、内壁がカーボンコーティングされた真空槽中で水素放電を行い、水素の圧力の変化を測定することによりカーボン膜からの水素のリサイクリングを計測した。作成したカーボン膜は水素放電 ($V_a=270$ V, 0.05 A) を4分間行くと、この入射エネルギーに対して水素量がほぼ飽和に達する。高エネルギーの水素放電で起こる膜からの水素の放出を D-phase モデルで説明した。このモデルを適用することにより求めた水素の衝撃脱離断面積 σ_H は、 220°C で $3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 程度であった。また、 σ_{He} は壁温によらず $3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ であった。水素のリサイクリングには、入射粒子のエネルギー依存性があり、これは、入射粒子の粒子密度の深さ方向の分布を考慮することにより、説明できることがわかった。

謝辞：

本研究にあたってご協力をいただきました高エネルギー物理学研究所の斉藤芳男助教授ならびに東京電機大学の松田七美男講師に感謝致します。

本研究の一部は昭和63年度文部省科学技術研究費の補助により行われたものである。

[文 献]

- 1) J. Winter: J. Nucl. Mater. 145-147 (1987) 131
- 2) F. Waelbroeck, J. Winter and P. Wienhold: J. Nucl. Mater. 103 & 104 (1981) 471
- 3) R. E. Clausing and L. Heatherly: J. Nucl. Mater. 145-147 (1987) 317
- 4) F. Waelbroeck, Vacuum 39 (1989) 821
- 5) S. Michizono, T. Banno and A. Kinbara: Vacuum (to be published)
- 6) I. B. Ortenburger, M. Hertzberg and R. A. Ogg: Jr., J. Chem. Phys. 33 (1960) 579
- 7) 加藤茂樹ら：真空材料におけるガス放出量の試験評価法に関する調査研究報告書(Ⅱ) 日本機械工業連合会
- 8) M. Braun and B. Emmoth: J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657
- 9) E. Vietzke and V. Philipps: Nucl. Inst. and Meth. B 23 (1987) 449
- 10) H. Sugai, H. Toyoda, S. Ohshita, S. Yoshida and A. Sagara: J. Nucl. Mater. 162-164 (1989) 1035
- 11) R. A. Langley: J. Nucl. Mater. 162-164 (1989) 1030
- 12) J. Winter: J. Nucl. Mater. 161 (1989) 265
- 13) J. Pillath, J. Winter and F. Waelbroeck: J. Nucl. Mater. 162-164 (1989) 1046
- 14) W. R. Wampler, D. K. Brice and C. W. Magee: J. Nucl. Mater. 102 (1981) 304
- 15) F. Waelbroeck, T. Banno, H. G. Esser, L. Könen, V. Philipps, P. Wienhold and J. Winter: J. Nucl. Mater. 162-164 (1989) 496