

解 説

ゲッターによるトリチウムプロセッシング

市 村 憲 司・渡 辺 国 昭

富山大学トリチウム科学センター
〒930 富山市五福3190

Tritium Processing by Getter Materials

Kenji ICHIMURA and Kuniaki WATANABE

Tritium Research Center, Toyama University,
Gofuku 3190, Toyama 930, Japan
(Received December 25, 1986)

Abstract

In the research and development of nuclear fusion, getter materials have been widely applied to tritium processing and/or handling techniques such as evacuation, recovery, storage, supply, purification, enrichment, and separation. Some getters have been already developed and applied to tritium handling as well as impurity control in tokamaks. In this paper, we have described the present status of getter applications : (1) plasma-vacuum conditioning, (2) storage-supply-recovery, (3) purification, enrichment and separation, (4) removal and waste management.

The improvement of getter properties, however, is required so as to apply them to a wider variety of the unit processes of the tritium handling techniques. It has been pointed out that there is a need for investigations on (1) the activation-deactivation mechanism, (2) absorption-desorption properties and mechanism, (3) durability and/or reactivity against impurity gases, (4) isotope effect and (5) alloying effect.

1 はじめに

D-T 核融合反応実験装置は、プラズマ容器、即ち真空系、燃料サイクル系、およびブランケット系の基本構成からなり (Fig. 1)、近い将来 $10^6 \sim 10^8 \text{Ci}$ にも及ぶトリチウムが使用される¹⁾。この際、プラズマの安定制御に関連する真空技術、および大量トリチウムの安全

取扱い技術の確立が不可欠である。

真空制御技術の観点から、様々な動作原理に基づく真空ポンプが研究・開発されているが、開放型と閉鎖型の二種類に大別される。前者に属する真空ポンプとしては、拡散ポンプ、ターボ分子ポンプなどがある。後者の閉鎖型ポンプとしては、クライオポンプ、スパッタイオンポンプ、ゲッターサブレーションポンプ、バルクゲッターポンプなどが挙げられる。これらの中で、バルクゲッターポンプ

は、閉鎖型であるのでトリチウムの後処理が簡便であるのに加えて、単純な動作原理および構造、ならびに大排気速度が得られるなどの点において、核融合反応実験装置の真空排気系として注目されている。

また、各種のゲッター材は、上記の真空技術のみならず貯蔵—供給—回収を基本とするトリチウムプロセッシングにたいし、広い応用性を有している。トリチウムの貯蔵—供給—回収材としては、従来からウランあるいはチタンゲッターが用いられてきた。しかし、これらのゲッター材のみでは、トリチウムプロセッシングにおけるさまざまな要求を満たしきれない。そのため、適材適所の最適ゲッターを設計・開発する研究が行われている。

これらの観点から、筆者らは最適ゲッター材の設計のための基礎的知見を得るために、添加元素の種類および添加量の異なる Zr 系合金について、活性化機構ならびに水素同位体 (H_2 , D_2 , T_2) および同位体水 (H_2O , D_2O , T_2O) の吸蔵—脱離機構/同位体効果とその合金化効果について調べてきた²⁻¹³⁾。また、トリチウムガスの貯蔵—供給—回収、トリチウム化メタン等の比較的の不活性な気体からのトリチウムの分離・精製、ならびに雰囲気ガス中からのトリチウムの除去などの評価研究を行ってきた^{2,9,11,14)}。本稿では、これらの結果を中心に、各種ゲッター材によるプラズマ制御およびトリチウムプロセッシングの現状について述べる。

2 プラズマ—真空制御

2-1 プラズマ制御

バルクゲッター材は、炉心即ちプラズマ容器内でのプラズマ温度、密度およびその保持に直結するリサイクリング制御用排気系として注目されている。従来多くのプラズマ実験装置でプラズマ放電に伴ないプラズマ密度が上昇し、そのためプラズマの制御が困難となる現象が認められているが、この現象は種々の機構による容器壁からのガス放出が一因であり、いわゆるリサイクリング率が1以上になるためである。この問題を解決するために、Ti—フラッシュ法が用いられてきた¹⁵⁻³³⁾。

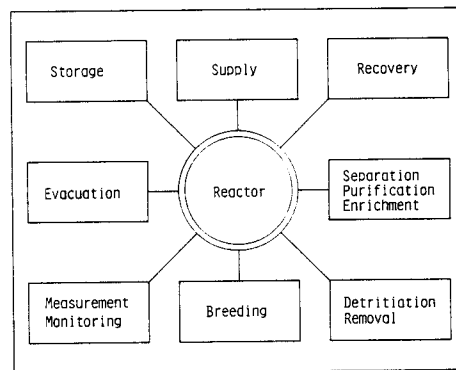


Fig. 1. Tritium processing in fusion devices.

この方法により、リサイクル率は1以下となり、プラズマ密度をガス導入圧で制御することが可能となった。このようにTi-フラッシュ法は有用な方法であるが、その利用にはいくつかの難点もある。例えば、その動作温度を100℃程度に保たなければならないため第一壁を強制冷却する必要があること、蒸着膜が厚くなると剥離すること、各所に蒸着源を装置しなければならないため複雑な構成となること、およびトリチウム回収のためには壁全体を250~300℃にベーキングしなければならないことなどである。

これらの問題を解決するために、近年ではZr系合金のバルクゲッター材が注目されている³⁴⁻⁴⁵⁾。この種のゲッター材では、水素同位体に加えて一酸化炭素のような不純物気体に対しても大きな排気速度が得られるのみならず、水素同位体の吸蔵-脱離は可逆的であり、使用可能温度は200~400℃と比較的高く強制冷却は必ずしも必要ではなく、ゲッター材のみを加熱すればトリチウムを脱離させることができ、かつ複雑な構造・構成を要しない等の利点がある。

2-2 バルクゲッター

この種のバルクゲッター材としては、SAES Getters社のSt101 (Zr84-Al16wt%)、St707 (Zr70-V24.6-Fe5.6wt%)などが知られている。これまでに、構成単体金属および上記合金のさまざまな特性研究が行われているが^{2-14,46-61)}、上記ゲッターの水素および一酸化炭素に対する吸蔵速度定数(排気速度)をTable 1⁵²⁾に示す。これらの結果は、ゲッターの幾何学的面積を50mm²、試料重量を150±5 mgとして比較されており、またZr-Al

Table 1. Comparison of gettering characteristics of St101 and St707 for H₂ at room temperature⁵²⁾.

	(H ₂) Hydrogen			
	Sorptions Speed		Sorptions Capacity	
	Standard 900°×30sec	Low 500°×10min	Standard 900°×30sec	Low 500°×10min
Zr84%-Al16%	100	29	100	3
Zr70%-V24.6%- Fe5.4%	77	59	300	67

	(CO) Carbon monoxide			
	Sorptions Speed		Sorptions Capacity	
	Standard 900°×30sec	Low 500°×10min	Standard 900°×30sec	Low 500°×10min
Zr84%-Al16%	100	13	100	25
Zr70%-V24.6%- Fe5.4%	88	53	179	125

を標準活性化条件(900°C, 30sec)で処理したときに得られた排気能力を100とした相対値で表わされている。なお吸蔵速度は、25°Cで 4×10^{-4} Pa (3×10^{-6} Torr)の H_2 またはCO一定圧力下で測定されたものである。活性化条件(真空加熱温度, 保持時間, 真空の質など)により異なるが、 H_2 およびCOの排気速度は約1 l/sec/cm² (geometrical area)である。これらの値は筆者らの結果⁴⁾と良く一致している。この結果は、1000cm² (300g)ほどのゲッターを使用することにより、約1000 l/secという極めて大きな排気速度(室温)が得られることを示している。

Fig. 2 および Fig. 3 は排気速度の吸蔵量依存性を示しているが⁵²⁾、水素に比べて一酸化炭素の速度低下が著しいことがわかる。この活性低下を避けるために、ゲッターの動作温度は400°C (Zr-Al; St101), 200°C (Zr-V-Fe; St707) が最適とされている。

2-3 バルクゲッターによるプラズマ制御

このバルクゲッターポンプは核融合反応実験装置あるいはその概念設計に多用されてきており、特に TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) では Zr-Al ゲッターを装備して、各種の実験・研究が行われている^{34-37,39-41,43,44,54,55)}。Fig. 4 は TFTR の概念図³⁴⁾ であるが、このプラズマ放電容器内には Zr-Al ゲッターが Fig. 5³⁶⁾ のように装備されている。ゲッターの使用条件は活性化/再活性化温度が600-700°C, 動作温度が200-400°C であり、熱負荷に関わる設計に工夫がなされている。容器壁に対するゲッターの占有面積は約9%であり、重水素に対して 5.4×10^4 l/sec の排気速度が得られている。また、不純物の吸蔵により決定されるゲッターの寿命は約1年であると見積られている。

この Zr-Al ゲッターは直接プラズマには接触しないが、ホスト金属の Zr が高原子番号 (Z=40) であることから、プラズマ中への不純物放出の問題などが検討されている。また、PDX (Poloidal Divertor Experiment) 装置においても Zr-Al ゲッターを装着して、プラズマ特性の評価を行っている³⁶⁾。この際のプラズマ面積に対するゲッターの投影面積は

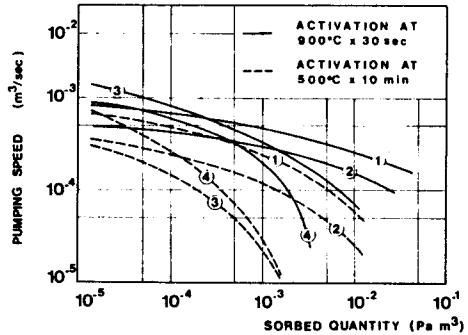


Fig. 2. Gettering characteristics for H_2 at room temperature after activation at high and low temperatures⁵²⁾.

(1) St707, (2) St198, (3) St101, (4) St171

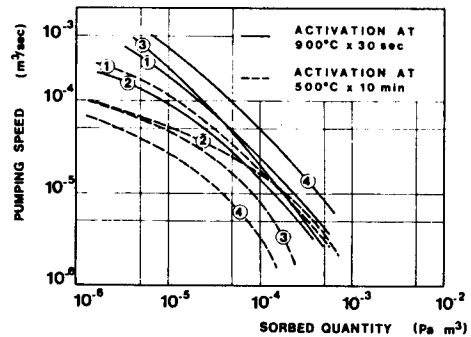


Fig. 3. Gettering characteristics for CO at room temperature after activation at high and low temperatures⁵²⁾.

(1) St707, (2) St198, (3) St101, (4) St171

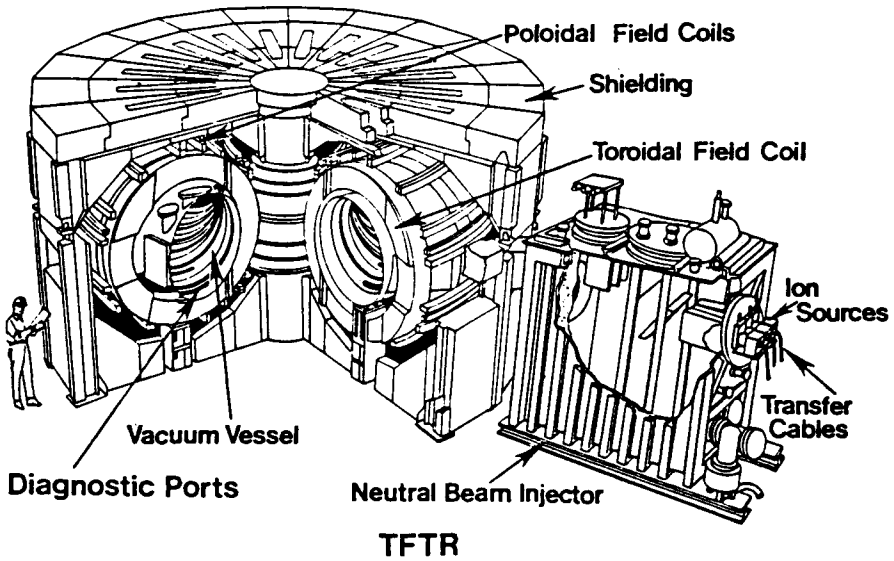


Fig. 4. The tokamak fusion test reactor³⁴⁾.

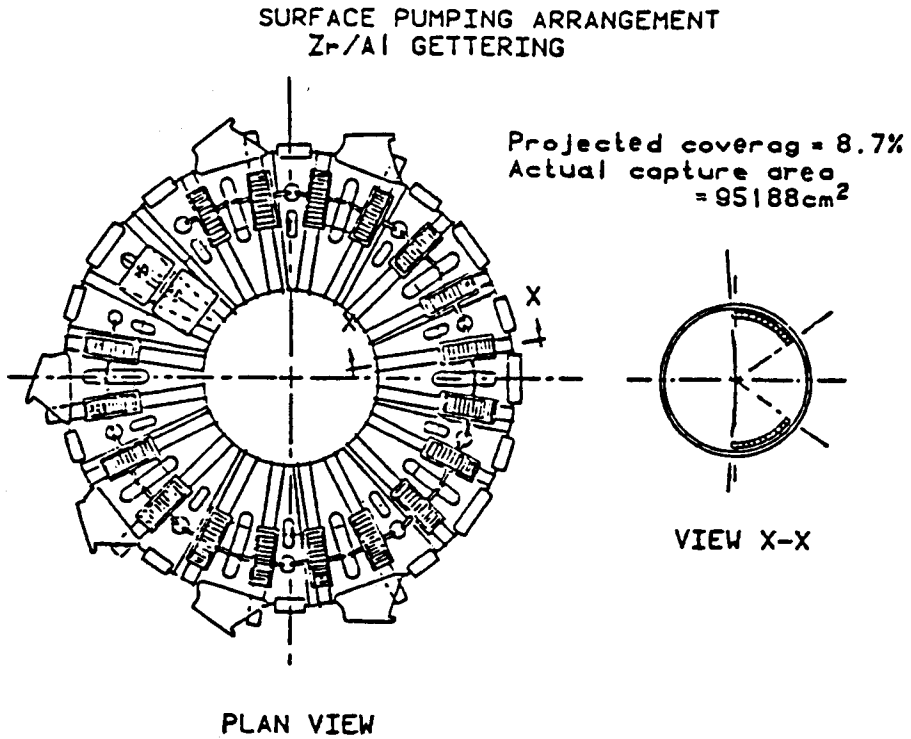


Fig. 5. Conceptual design of a Zr-Al getter system for TFTR. The getter modules are corrugated strips which are combined in arrays and mounted in the bellows regions of the torus³⁶⁾.

約0.4%, H₂に対する排気速度は16000 ℓ/secであった(尚, PDX のターボ分子ポンプの排気速度は3500 ℓ/secである)。オーム放電の際, プラズマポジションがゲッターサイドに移動し, 減衰時間が約340ms から180ms に減少した。この結果から, リサイクリング係数(壁表面での放出粒子数と入射粒子数の比)が10%以上低下したものと評価されている。

このリサイクリング係数の約10%の低下は Ti-フラッシュ (Ti-サブリメーション) 法によって得られたものと同等であり(ただし, Ti-フラッシュ法ではプラズマポジションは変化しない), バルクゲッターポンプの使用によりプラズマに対するゲッター材の投影面積を著しく低下させることができ, かつプラズマ制御が容易にできると結論している。

ただし, この種のバルクゲッター材にも, まだ多くの改良の余地が残されている。例えば, Zr-Al ゲッターでは合金粒集合体がいわれているが, 水素等の吸蔵に伴う脆化-剥離が起り易く, また, 活性化温度および動作温度が比較的高いため, 強制冷却を必要としている。この脆化を抑え, ゲッターの寿命を延ばすためには, 必要に応じた不活性化-再活性化の容易な方法を確認しなければならない。また, リサイクリング係数を更に低下させるには, ゲッター表面での水素の再結合定数をより小さくする必要がある。

2-4 不活性化処理

Zr-Al ゲッター素子は Cr-Ni 合金にゲッター粒を圧着 (~80μm 厚, 0.8kg/array) したものを Fig. 6 に示されるように装着している⁶²⁾。先に述べた PDX 実験では, 放電洗浄により生成される不純物気体によりゲッターは室温で十分に不活性化され, 水素吸蔵に伴う脆化は起らなかった。しかし, TFTR では真空条件が比較的良好ことから, この種の自己不活性化は期待できず, 放電洗浄時の水素吸蔵により脆化等の問題が生ずる。したがって, 積極的な不活性化を in-vacuo で行なう必要がある。

このため, TFTR では以下のような不活性化の検討を行っている。650-700℃で45分間の真空加熱排気により活性化し(残留圧 < 3×10^{-9} Torr), 400℃以下でターボ分子ポンプ(排気速度 1.2×10^4 ℓ/sec)のゲートバルブを閉じ, ゲッターの排気速度を測定した。この温度でのゲッターの排気速度は約 1×10^5 ℓ/sec であり, 冷却後室温においては H₂ およ

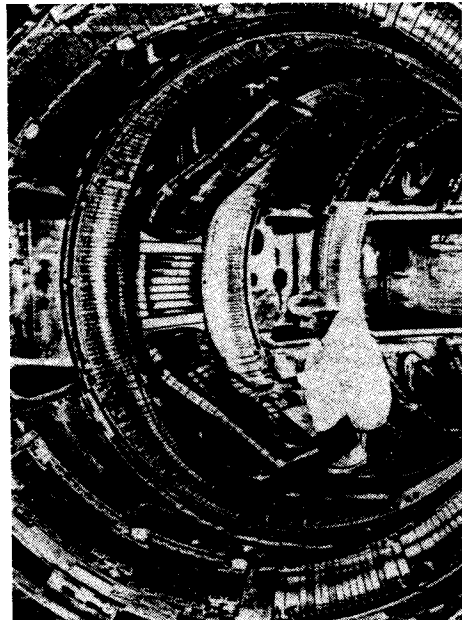


Fig. 6. Photograph of the interior of TFTR showing the prototype Zr-Al alloy bulk getter arrays installed on the top and bottom of the vacuum vessel in the vicinity of the movable limiter⁶²⁾.

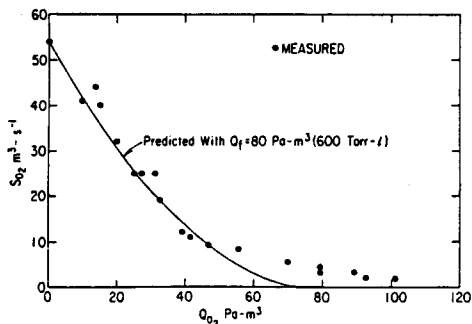


Fig. 7. O₂ pumping speed as a function of the O₂ loading with getters at 25°C⁶²⁾.

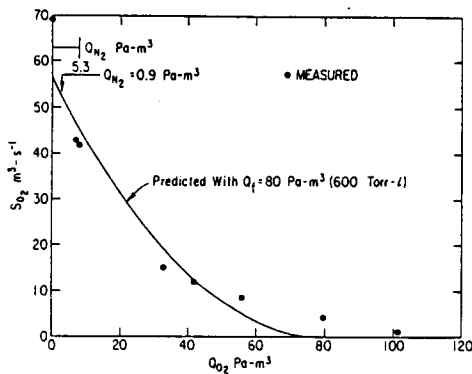


Fig. 8. H₂ pumping speed as a function of the O₂ loading with the getters at 25°C⁶²⁾.

び O₂ に対する排気速度は各々 6.9×10^4 および 5.4×10^4 ℓ/sec であった。次いで、室温にて酸素をパルスの導入し (15 Torr· ℓ /pulse), 水素および酸素の排気速度の変化, ならびに残留ガス分析により真空状態を調べた (ただし, ガス導入系では空気のリークが認められており, 窒素の接触による効果が含まれている)。Fig. 7 および Fig. 8 は, 各々 O₂ 接触量に対する O₂ および H₂ 排気速度の変化を示している。約 50 Pa·m³ (3.8×10^2 Torr· ℓ) までの接触量領域では, 次式で表わされるようなラングミュアタイプで排気速度が減少している。

$$S(\text{O}_2 \text{ or } \text{H}_2) = S_0(\text{O}_2 \text{ or } \text{H}_2) [1 - (Q/Q_f)]^2$$

Q : 酸素吸着(取)量

Q_f : 酸素飽和吸着(取)量

50 Pa·m³ 以上の接触においては, プラズマ容器壁の効果に基づくテーリングが起きていると考えられている。この結果は, 102 Pa·m³ (770 Torr· ℓ) の O₂ の接触で, ゲッター自身の排気作用を約 2~3 桁低下させ得ることを示している。

TFTR 真空容器では, 当初グロー放電洗浄 (GDC : 0.67 Pa H₂ (5×10^{-3} Torr), 10^{-3} A/m², 50h) およびパルス放電洗浄 (PDC : 100KA トカマク様放電 0.05s/6 s) により, Fig. 9 の①のような不純物放出が観測されている。上記の不活性化処理を行った直後ではグラフ②のような不純物放出となり, 酸素種

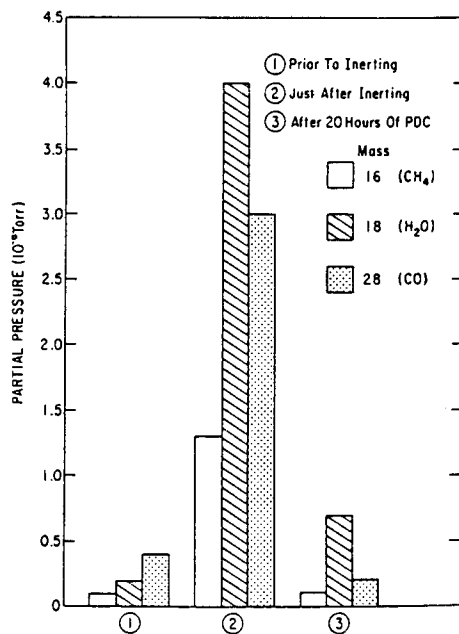


Fig. 9. The partial pressure of masses 16, 18, and 28 during pulse discharge cleaning for three cases : (1) prior to passivation, (2) just after passivation, and (3) after 20 h pulse discharge cleaning (PDC)⁶²⁾.

に加えてメタンの生成も著しいことがわかる。しかし、約20時間のPDCにより、不純物放出はほぼ元の状態と同程度になるとともに、 H_2 に対するゲッターの排気速度は約40 l/secにまで低下している。この低下は、PDC中に生成される酸素を含む不純物の吸着によるものと考えられている。一方、プラズマ容器壁は、このPDCにより十分に洗浄されている。

以上の結果から、TFTRではZr-Alゲッターを使用することにより、プラズマ容器の真空制御技術を著しく改善することができたと結論している。同様の検討は、TEXTORのALT-Iにおいて、St707 (Zr-V-Fe)を用いて行なわれている⁶³⁾。

2-5 ゲッター材の改良点

このような方法により、ゲッター利用上のある程度の進展は認められるものの、まだ不十分な段階にある。不活性処理をはじめとした方法は、筆者らの行っている活性化/不活性化機構および水素同位体等の吸蔵-脱離機構/同位体効果とその合金化効果のような基礎的過程・機構の解明により一層の改善を期待し得る。また、トリチウム理工学の観点から、活性化-不活性化-再活性化サイクル時に大量に生成されると予測されるトリチウム化メタン等の炭化水素種、ならびにトリチウム水を何如に処理するかが問題となる。前者についてはEmersonら⁶⁴⁾あるいはHobson-Chapman⁶⁵⁾の研究報告があるが、今後の検討課題である。後者のトリチウム水については、筆者らは添加元素の違いによる排気作用の改善の一例として、Zr-Ni合金がトリチウム水に対して優れた排気特性を有することを明らかにしている¹⁰⁻¹³⁾。

3 貯蔵-供給-回収

3-1 ウラン・チタンゲッター

Fig. 1に示されるように、トリチウムプロセッシングは貯蔵-供給-回収を基本構成としているが、これに加えて、分離、精製、濃縮および除去等の技術確立が不可欠である。これらの大量トリチウムの安全取扱い技術に対し、ゲッター材は広い応用性を有している。

貯蔵-供給-回収の基本技術に対しては、従来よりウランゲッターが用いられている (Fig. 10)⁶⁶⁻⁷⁰⁾。ウランゲッターは UX_3 ($X=H, D, T$)の水素化物の形で使用され (金属ウラン中への水素の溶解度は、数ppmと極めて小さい)、約360CiT/g (U)の貯蔵能力を有している。平衡解離圧は、たとえば田辺ら⁶⁹⁾によれば

$$\log(P_{H_2}/\text{atm}) = -4366/T + 6.249$$

$$\log(P_{D_2}/\text{atm}) = -4600/T + 6.829$$

と表わされ、トリチウムについては生成のエンタルピーおよびエントロピーの同位体効果を考慮して

$$\log(P_{T_2}/\text{atm}) = -4537/T + 7.03$$

と推定されている。即ち、室温におけるトリチウムの平衡圧は約 10^{-6} Torrとモレキュ

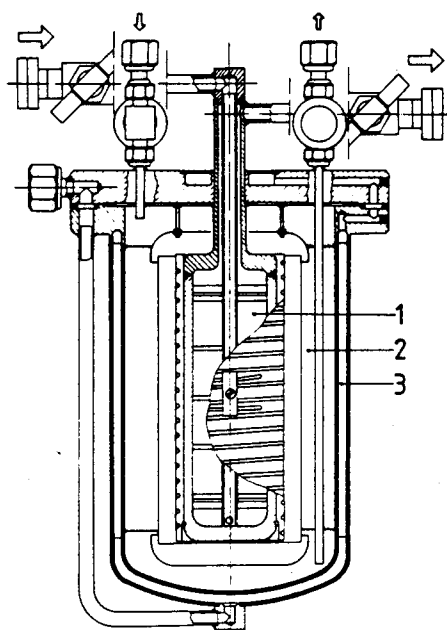
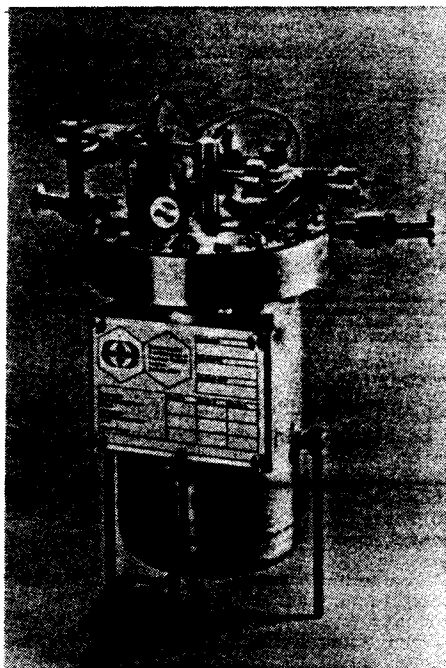


Fig. 10. Uranium tritide container⁷⁰⁾.

1. U-bed, 2. He pressure room, 3. Water cooling room

ラーシーブよりも低く、400℃に加熱すれば1気圧のトリチウムガスが得られる。しかし、ウランゲッターの活性化の方法は煩雑であり（水素還元；例、1気圧水素—250℃）、この目的のためには必ずしも最善ではない。さらに、核燃料物質であることからウラン自身の取り扱いに制限があり、活性化処理に伴う微粉化、空気との接触による発火・燃焼性などの難点がある。

微粉化を避け、室温における水素（トリチウム）の平衡分圧を低くする観点から、チタンゲッターが使用されることもある。この際、チタンゲッターは水素化物の形ではなく水素吸蔵状態で使用され、室温での水素平衡分圧が $10^{-7} \sim 10^{-8}$ Torr と低く、ウランゲッターよりさらに安全な貯蔵材である。他方、Ti—H系は、Fig. 11に示すようなTPC特性（温度—平衡圧—組成）を持ち⁷¹⁾、完全に微粉化した約H/M=1.8の状態のものでも1気圧の平衡圧を得るためには500℃の高温を要する。また、チタンゲッターの活性化に際しては、真

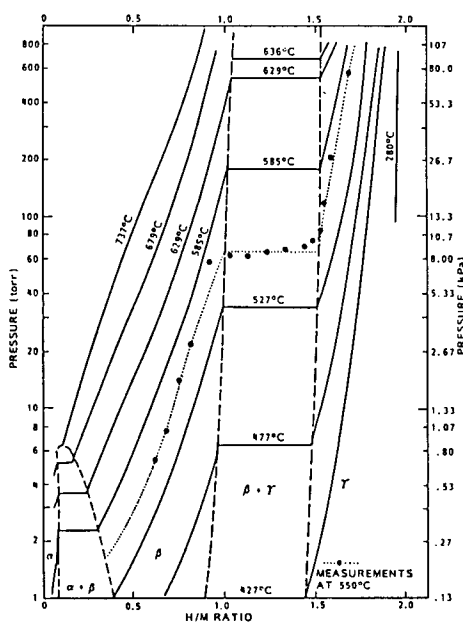


Fig. 11. TPC curves for Ti-H system⁷¹⁾.

空条件にも依存するが900℃以上の高温加熱排気が必要であり、これらの観点からすると、最善の貯蔵—供給—回収とはいえない。

ウランおよびチタンには上記のような利害得失があるが、これらの素材を組を合わせれば、個々の利点を生かすことができる。その一例として、Ontario Hydro Research Divisionの貯蔵—供給—回収システムをFig. 12⁷²⁾に示す。ここでは、Fig. 13に示すようなウランおよびチタンベッドが使用されており、各々供給および回収用として用いられている。これらを2段に組み合わせることにより性能改善がなされたとしている。

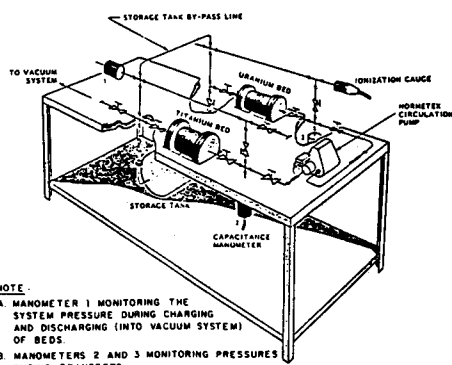


Fig. 12. Gas handling system of Ontario Hydro Res. Div.⁷²⁾.

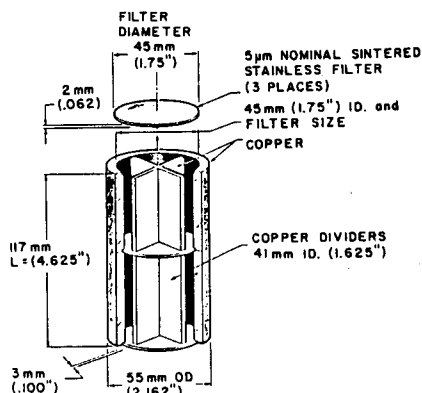
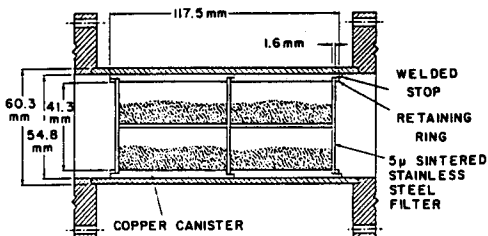
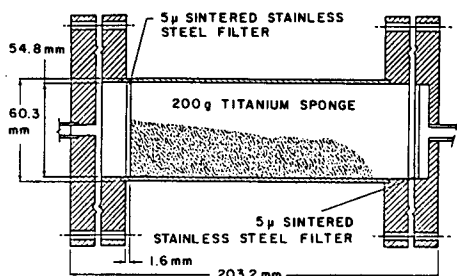


Fig. 13. Titanium bed, uranium bed, and copper container for U^{72} .

3-2 バルクゲッター

一方、チタンゲッターの利点を有し、より低温で活性化できる合金ゲッターが研究されている。その一例が、前節2でも述べたZr—AlあるいはZr—V—Fe合金(SAES Getters S. p. A)である。これらの合金ゲッターはTable 1に示したように比較的低温で活性化でき、優れた排気特性 (Fig. 2, Fig. 3) を有している。

Zr—Al (St101) および Zr—V—Fe (St707) 合金ゲッターの水素平衡分圧は、温度 T お

Table 2. Parameters of Sieverts' law and molar enthalpies for H₂ and D₂ solutions in St101, St707, and Ti⁵⁶⁾.

System	Parameters of Sieverts' law			Range of validity		Reference
	A	B	ΔH Kcal/g at H	P (Pa)	T (K)	
St 101/H ₂	2.28	-7000	-16.0	10 ⁻⁴ -10 ¹	673-873	13
	2.87	-7340	-16.7	10 ⁻³ -10 ⁰	750-1050	14
	2.70	-7280	-16.6	10 ⁻¹ -10 ²	773-1073	present work
St 101/D ₂	3.18	-7296	-16.6	10 ⁻³ -10 ⁰	750-1050	14
	2.78	-7220	-16.5	10 ⁻¹ -10 ²	773-1073	present work
St 707/H ₂	3.14	-6250	-14.2	10 ⁻⁶ -10 ⁻¹	673-1173	10
	2.68	-6116	-13.9	10 ⁻¹ -10 ²	773-1073	present work
St 707/D ₂	3.0	-6327	-14.4	10 ⁻¹ -10 ²	733-1073	present work
Ti/Hg	1.675	-5287	-12.05	10 ⁻⁶ -10 ⁻¹	623-1073	10
	1.08	-4700	-10.7	10 ⁻¹ -10 ²	773-1073	present work
Ti/D ₂	1.764	-5244	-11.95	10 ⁻⁶ -10 ⁻¹	623-1073	16
	0.92	-4340	-9.9	10 ⁻¹ -10 ²	773-1073	present work

よび吸蔵量 q の関数であり、次式で与えられる。

$$\log P = A + \log q^2 + B/T$$

なお、この平衡分圧関数は Sieverts 則として知られている。定数 A 、 B および吸蔵熱は、Boffito ら⁵⁶⁾ により Table 2 の値が報告されている。筆者らが吸蔵-脱離の正逆方向の速度から速度論的に求めた値もほぼこれらの値に等しい^{3,4,10,11)}。これらの合金ゲッターの TPC 特性の報告は見当たらないが、Fig. 14⁵⁶⁾ に 550°C での H₂ および D₂ の平衡分圧と濃度 (吸蔵量または組成) との関係を示す。

U, Ti, Zr-Al および Zr-V-Fe ゲッターの水素平衡分圧と温度の関係をまとめると、Fig. 15 のようになる。なお、ここでは Ti, Zr-Al および Zr-V-Fe については Sieverts 則が成立しているものとして、上限は最大吸蔵量の 90%、下限は 10% として計算した結果について表わしている。Sieverts 則から外れる場合、この帯巾はさらに広がることになる。図より、1 気圧の平衡分圧を示す大凡の温度として、400°C (U-UH₃)、500°C (Ti)、650°C (Zr-V-Fe)、および 800°C (Zr-Al) の値が得られる。なお、後のゲッター三者については、最大吸蔵量の 90% のときの値を示している。

上記のように、Zr-V-Fe 合金ゲッター

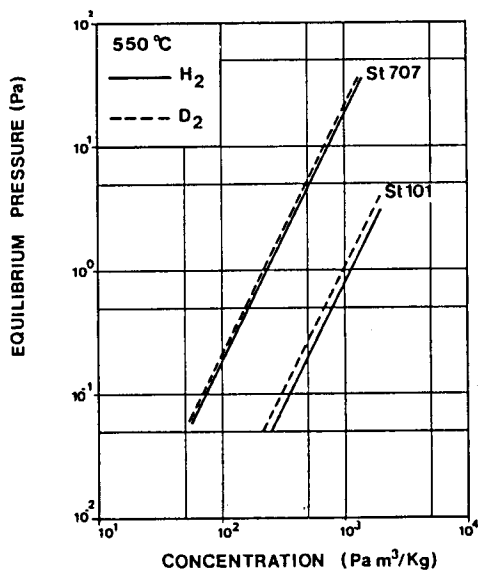


Fig. 14. H₂ and D₂ equilibrium pressure as a function of concentration for St101 and St707 alloys⁵⁶⁾.

ゲッターによるトリチウムプロセッシング

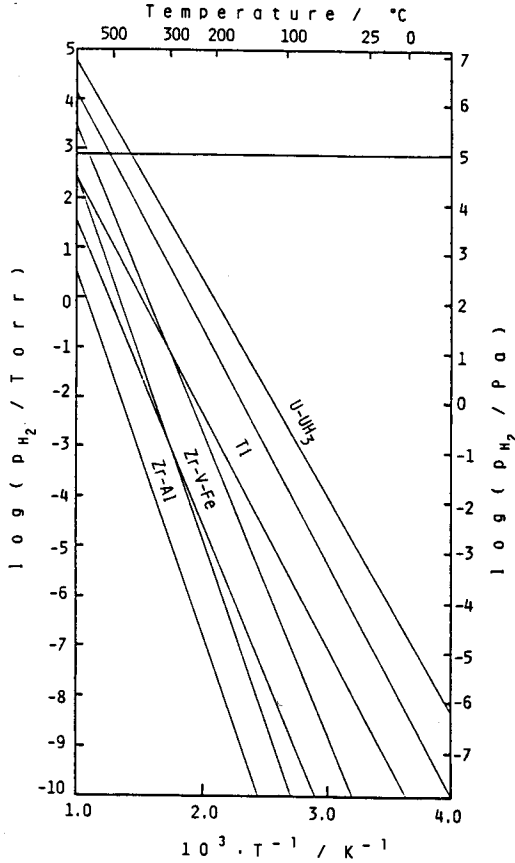


Fig. 15. Equilibrium pressure of hydrogen for U, Ti, Zr-V-Fe, and Zr-Al getters.

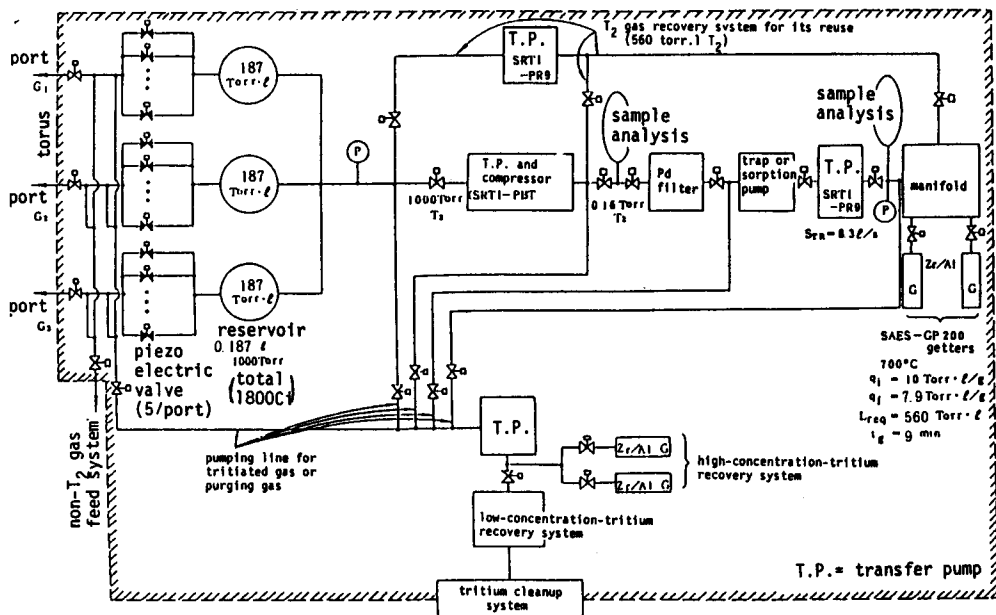


Fig. 16. Schematic diagram of T_2 gas feed system for R-tokamak⁷³⁾.

は低温活性化型 (400°C 真空加熱排気) で、室温における平衡分圧が約 10^{-12} Torr と極めて低く、かつ、活性化された Zr-V-Fe 合金が室温において空気と接触しても発火・燃焼しないことから、大量トリチウムの安全な貯蔵材として優れている。また、Zr-V-Fe ゲッターの比排気速度は約 $1 \text{ l/sec}\cdot\text{cm}^2$ と著しく大きく⁴⁾、回収材としても極めて優れた特性を有している。

筆者らはこれらの特性から Zr-V-Fe ゲッターは排気素子としてばかりではなく、貯蔵-供給-回収材としても有用であることを指摘してきた²⁻¹⁴⁾。名古屋大学プラズマ研究所の R 計画⁷³⁾ では、これらの特長に注目し、排気系ならびにトリチウム貯蔵-供給-回収系に対して Zr-Al 合金ゲッターの利用が評価・検討されている (Fig. 16)。

一方、供給の観点においては、現時点では D-T 燃料の導入様式が議論されている段階であり (ガス導入圧制御方式、ペレット打ち込み方式など)、例えば T_2 ガス導入の場合の供給圧力あるいは供給速度の目安は定まっていない。したがって、平衡分圧を一つの目安とするならば、1 気圧の必要性の有無あるいはどれ位の平衡圧が適切であるかを検討することが課題である。現時点において、Zr-V-Fe は熱負荷に対する工学的な設計が容易である約 650°C で 1 気圧の水素平衡分圧が得られることにより、供給材としても有用である。しかし、Zr-V-Fe 合金ゲッターにも数々の改良すべき点が残されており、例えば不純物に対する耐久性、貯蔵時の水素同位体純度あるいは回収時の不純物濃度などの点について更に検討・改良を加える必要がある。

3-3 バルクゲッターの改良点

供給圧を増大させる観点からは、Fig. 17 に一例として示されるような水素平衡分圧を有

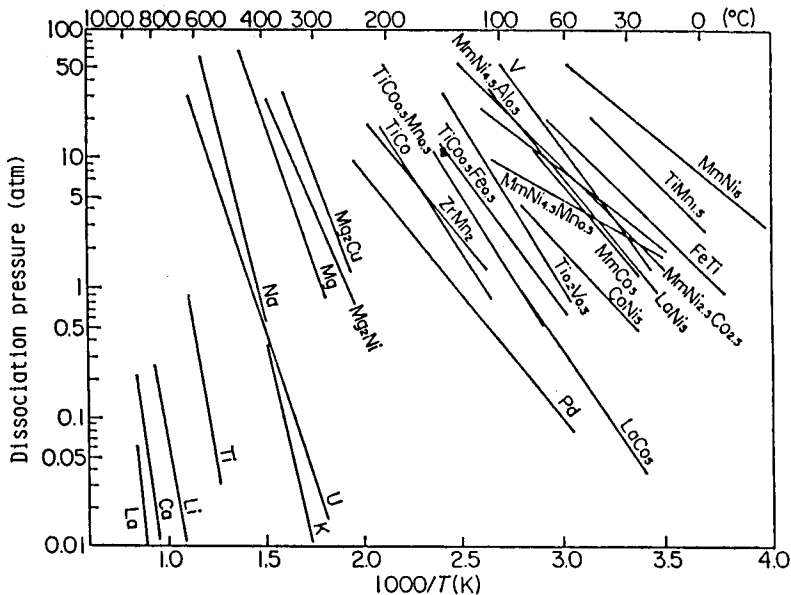


Fig. 17. Dissociation equilibrium pressures of various metal-hydrogen systems⁷⁴⁾.

する水素吸蔵-貯蔵合金⁷⁴⁻⁷⁶⁾の利用あるいは併用が考えられる。トリチウム貯蔵-供給系への応用された例として、Ortmanらによる $\text{LaNi}_{5-x}\text{Al}_x$ ⁷⁷⁾あるいはNagasakiらの ZrCo ⁷⁸⁾など⁷⁹⁾が挙げられる。Mendelsohnら⁸⁰⁾により報告されている水素の解離平衡圧を、Fig. 18に示す。2気圧の平衡圧を示す大凡の温度は、25°C (LaNi_5)、50°C ($\text{LaNi}_{4.8}\text{Al}_{0.2}$)、70°C ($\text{LaNi}_{4.6}\text{Al}_{0.4}$)、90°C ($\text{LaNi}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$)、180°C ($\text{LaNi}_{4.0}\text{Al}_{1.0}$)、および240°C ($\text{LaNi}_{3.5}\text{Al}_{1.5}$)である。また、Fig. 19はNagasakiらによる ZrCo 合金の水素平衡圧特性を示しており、ウランゲッターより高い供給圧が得られている。因に、平衡圧が1気圧となる温度は約370°Cであり、ウランゲッターより約50°C低温となっている。ただし、この種の合金は、室温付近における平衡圧が高いことより、トリチウムの安全貯蔵材を兼ねて使用するには難点があり、上に述べたように安全貯蔵材との併用が望ましい。このように吸蔵エンタルピーの異なる素材を組み合わせるのも一方法であるが、吸蔵エンタルピーの大きい合金を設計し、200~300°Cで1気圧を示し、かつ、室温においては極めて低い平衡分圧を有する合金を開発することも必要である。

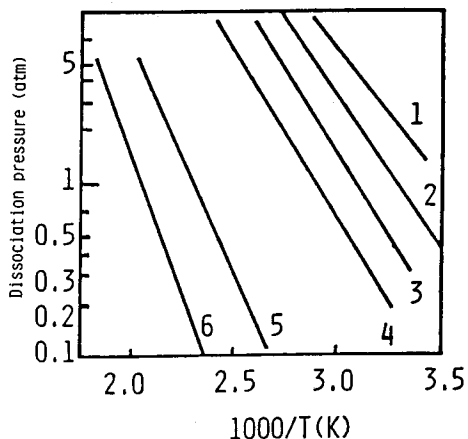


Fig. 18. Dissociation pressure of $\text{LaNi}_{5-x}\text{Al}_x\text{-H}$ systems⁸⁰⁾.

1. LaNi_5 , 2. $\text{LaNi}_{4.8}\text{Al}_{0.2}$,
3. $\text{LaNi}_{4.6}\text{Al}_{0.4}$, 4. $\text{LaNi}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$,
5. $\text{LaNi}_{4.0}\text{Al}_{1.0}$, 6. $\text{LaNi}_{3.5}\text{Al}_{1.5}$.

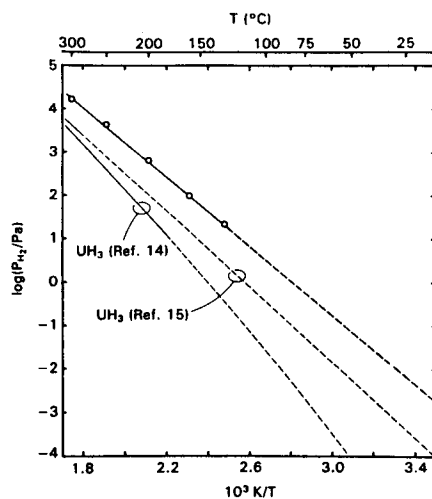
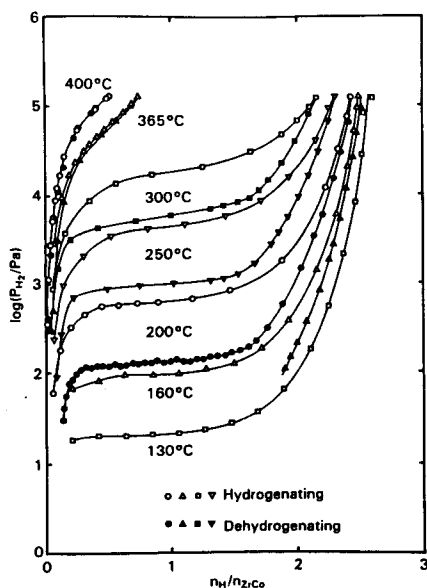


Fig. 19. TPC curves and equilibrium pressure of H_2 for ZrCo ⁷⁸⁾.

4 精製・濃縮・分離

4-1 精製・濃縮

プラズマ排ガスからの水素同位体の分離一回収には、現時点では、ウランゲッターあるいはPd分離膜-Uゲッターが用いられている。たとえば、米国ロスアラモス国立研究所のTSTA (Tritium System Test Assembly) では、日本原子力研究所との共同研究により、Pd膜を使用した燃料精製システム(FCU)を製作し、その性能試験を行っている⁸¹⁾。Pdは水素化物の平衡分圧が高く (Fig. 17)、分離・精製膜として知られている。Fig. 20は、従来TSTAで用いられていたモレキュラーシーブに置換した形での使用を示している。使用したPd膜の水素同位体の透過速度に関しては、Fig. 21のような測定結果が得られている。また、プラズマ排ガス中には多量の同位体水の生成が予測されるが、FCUではセラミックス電解セルにより水素同位体に変換している。

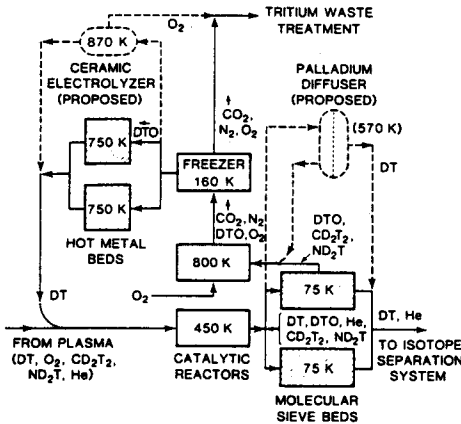


Fig. 20. The Fuel Cleanup System (FCU) for TSTA, showing proposed locations of the ceramic electrolysis cell and palladium diffuser (dashed lines) as replacements for the present hot metal beds and molecular sieve beds (shaded components)⁸¹⁾.

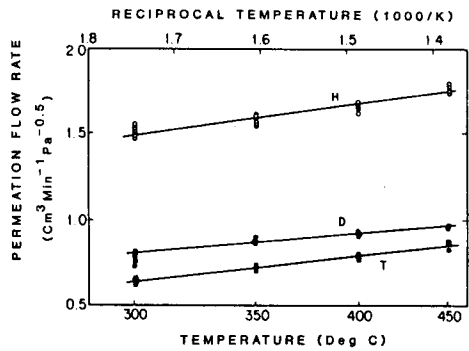


Fig. 21. Temperature dependence of permeation rates of hydrogen isotopes through JAERI diffuser⁸¹⁾.

この分離一回収技術は、トリチウム増殖ガスからのトリチウム回収でも重要である。ブリーディングの方式は二種類に大別され、液相循環系と固体-ヘリウム循環系がある。前者の場合、例えば熔融リチウム相内で安定なゲッター材 (Y など) が研究されており^{82,83)}、後者では上記の技術およびゲッターの応用に関する研究・開発が進められている^{11,84-88)}。特に、リチウム酸化物系の増殖材を用いたときには、多量のトリチウム水の生成が予測され、水素同位体ガスのみならず同位体水の分離一回収技術の確立が不可欠である。

この観点より、筆者らは単純な方式として、ゲッター材による直接排気あるいは分離一回

収を提唱してきた^{2-6,8-11,14}). Zr-V-Fe および Zr-Ni 合金ゲッターは、水素同位体のみならず同位体水に対しても大きな排気作用を示す (Fig. 22, Fig. 23)。因に、室温付近における同位体水蒸気の水素同位体ガスに対する比排気速度(比吸蔵速度定数)は、1/40 (Zr-V-Fe)および1/4 (Zr-Ni)である。したがって、プラズマ排ガス処理の場合、プラズマ容器の排気系ラインにこれらのゲッターを配置すれば、トリチウムを直接回収し得る。また、トリチウム増殖ガスからのトリチウム回収についても、ヘリウムガスに対する排気作用がないことより基本的には応用できる。ただし、これらの技術に応用する際、ゲッターの動作温度、酸素・一酸化炭素などの不純物に対する排気特性、ゲッターの寿命などが問題となり、今後の検討課題である。

この種の応用例として、上記ゲッターによるヘリウムガス中のトリチウム水の回収の実験結果を挙げる¹¹⁾。Zr-V-Fe 合金は350°Cにおいては水蒸気の水素に対する比排気速度は約1/8となるが、この動作温度下では99.99%のHe 雰囲気ガス中では発火・燃焼する。これは、Zr-V-Feゲッターのヘリウムガス中に含まれる酸素等の不純物に対する著しい排気作用によると考えられる。一方、Zr-Ni 合金ゲッターを用いて、350°Cの動作温度で同様な回収実験を行ったところ、発火することなく安定した吸蔵作用を示した。これは、合金化効果によりゲッター特性が改善される一例である。

4-2 同位体分離

同位体分離に対してはさまざまな原理に基づく技術があるが⁸⁹⁾、先の一例として挙げた

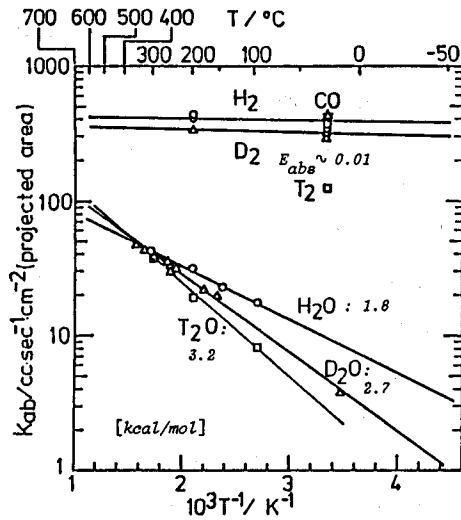


Fig. 22. Temperature dependence of absorption rate constants for hydrogen isotopes and isotopic waters for Zr-V-Fe getter.

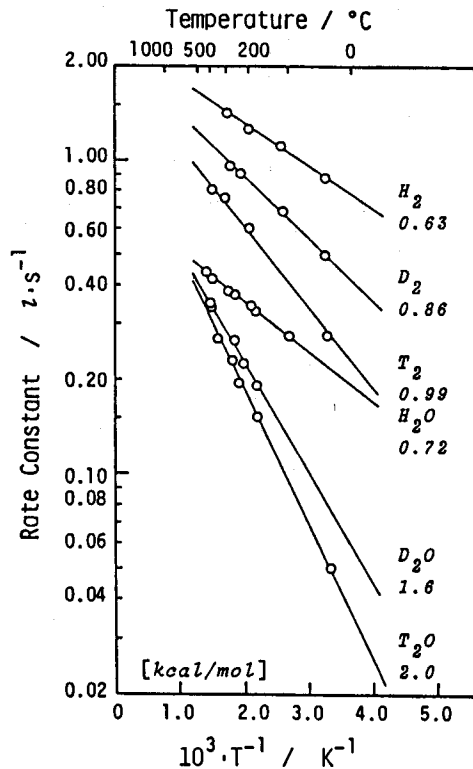


Fig. 23. Temperature dependence of absorption rate constants for hydrogen isotopes and isotopic waters for Zr-Ni getter.

TSTA では深冷分離法が採用・検討され、99%以上の純度の水素同位体が得られている。この技術に対して、金属および合金—水素系の応用がこれまでに多く研究されている^{74,90)}。

水素同位体の気相および金属(合金)相間の平衡状態での分離係数は、H—D間では α_{eq} 、H—T間では β_{eq} とすると、次式で定義される。

$$\alpha_{eq} = \left(\frac{[D]}{[H]} \right)_{solid} / \left(\frac{[D]}{[H]} \right)_{gas}$$

$$\beta_{eq} = \left(\frac{[T]}{[H]} \right)_{solid} / \left(\frac{[T]}{[H]} \right)_{gas}$$

また、この α_{eq} と β_{eq} の関係は、Bigeleisen⁹¹⁾ によれば一般に

$$\ln \beta_{eq} = 1.4 \ln \alpha_{eq}$$

である。 β_{eq} に関する報告値の一例を、Table 3⁹²⁾ に示す。表に示されるように、約0.5~2の値が得られている。1は同位体効果が現われず分離・濃縮ができないことを意味する。上記定義では、1より大きい場合は金属相、1より小さい場合は気相に分離・濃縮されることになる。これは、各素過程に基づく平衡状態に、正・逆および相殺の同位体効果があることによる。この平衡状態の分離係数については、操作温度と温度依存性の最適化、組成依存性などの検討が行われている。

一方、分離・濃縮のためのもう一つの方法として、吸蔵過程あるいは脱離過程の速度論的同位体効果の利用がある。後者については、水素同位体間の交換および平衡化反応を考慮すると、複雑な過程であり難点が多い。しかし、吸蔵過程は比較的単純であり、利用しやすい。筆者らはバルクゲッターの速度論的同位体効果を利用した水素同位体分離を提唱している。例えば、Zr—V—Fe合金ゲッターの水素同位体に対する排気速度(吸蔵速度定数)

Table 3. Separation factors of various metal-hydrogen systems⁹²⁾. *R.E.: misch-metal; mixture of rare-metals (Ce50%, La27%, Nb16%, Pr 5%, and other rare-earth metals 2%)

Hydrides	T(°C)	β
TiH ₂	350	0.67
TiVH _{4.5}	40	1.18
TiCrH _{2.35}	40	1.54
TiCr ₂ H _{1.68}	-20	2.01
TiCr ₂ H _{1.48}	0	2.03
TiCrMnH _{2.19}	-20	2.05
TiCrMnH _{1.28}	0	1.80
TiMoH _{4.77}	40	1.61
TiMoH _{2.99}	40	1.61
TiMo ₂ H _{1.10}	-20	1.87
TiMnH _{1.99}	40	1.37
FeTiH _{1.88}	0	0.92
FeTiH _{1.69}	0	0.95
FeTiH _{1.21}	40	1.0
Fe _{0.6} TiMn _{0.2} H _{1.67}	40	1.0
TiCoH _{1.44}	40	0.85
TiNiH _{1.44}	40	0.74
VH _{0.65}	210	1.10
VH _{0.85}	30.6	1.40
VH ₂	0	1.91
VH ₂	0	1.96
VH ₂	28.0	1.72
VH ₂	28.2	1.70
VH ₂	28.2	1.77
VH ₂	28.2	1.77
VH ₂	45.2	1.61
Mg ₂ NiH ₄	325	0.46
Mg ₂ NiH ₄	251	0.48
LaNi ₅ H _{6.6}	0	1.25
LaNi ₅ H _{6.6}	79—30	1.23
LaNi ₅ H _{6.6}	27.7	1.12
LaNi ₅ H _{6.6}	47.0	1.09
R. E. Ni ₅ H ₆₋₆ *	0	1.29
R. E. Ni ₅ H ₆₋₆ *	0	1.29
V _{0.9} Cr _{0.1} H ₂	28.4	1.66
ZrNiH ₃	27.6	1.05

の温度依存性は極めて小さく (Fig. 24), 77K~200°Cでほとんど変わらず約 $1 \ell (\text{H}_2)/\text{sec} \cdot \text{cm}^2$ である。即わち, 吸蔵過程の同位体効果は, 主として頻度因子に現われている。この同位体効果を利用したときの分離係数は,

$$\alpha_{\text{abs}} \equiv ((\text{D})/(\text{H}))_{\text{OUT}} / ((\text{D})/(\text{H}))_{\text{INPUT}} \approx 1.3$$

$$\beta_{\text{abs}} \equiv ((\text{T})/(\text{H}))_{\text{OUT}} / ((\text{T})/(\text{H}))_{\text{INPUT}} \approx 3.0$$

の値が室温付近で得られる。一方, Zr-Ni 合金では, 吸蔵の活性化エネルギーおよび頻度因子に同位体効果が現われ (Fig. 25), β_{abs} の値として室温付近では約 3, 液体窒素温度では約 18 の大きな値が期待できる。

5 除去—保管廃棄

空気中のトリチウムの除去技術としては, 現時点では, 触媒酸化—モレキュラーシーブ吸収の方法が一般に用いられている。しかし, モレキュラーシーブに吸収されたトリチウム水の平衡蒸気圧は室温において比較的高く, 安全な保管廃棄材とはいえない。また, モレキュラーシーブは一般に再生使用されるが, このとき生物学的影響の大きいトリチウム水が大量に生じ, その保管廃棄処理の方法が問題となる。一方, ゲッター材の応用も考えられるが, 現在迄に研究・開発されている金属・合金では空気中からトリチウムを直接かつ選択的に吸蔵—除去することは困難である。ただし, 除去—回収したトリチウム水蒸気を効率良く吸蔵し, かつ安全に貯蔵することは可能である。その概念図を, Fig. 24 に示す。水蒸気吸蔵用ゲッターとして, 先に述べた Zr-Ni (St199) を用いた場合, 約 4.6 Torr (0°C における飽和蒸気圧) 下においてゲッターの動作温度を 350~400°C とすると, 1 時間で約

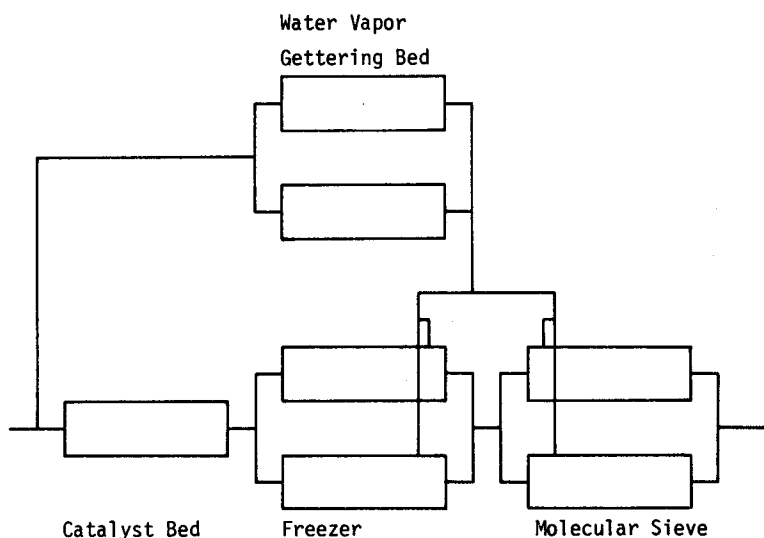


Fig. 24. Schematic diagram of a system for getting water vapor.

80mg (水)/g (ゲッター) の水蒸気が吸蔵される⁹³⁾。したがって、約125Kg の Zr-Ni 合金を用いれば、1時間で10ℓのトリチウム水を処理することができる。なお、この合金ゲッターの容量は約20ℓ弱であり、かなりの小型化が図れることになる。さらに、Zr-Ni 合金の室温における水素平衡分圧は、先に述べた Zr-V-Fe とほぼ同程度 (飽和吸蔵量の90%、室温付近で約 10^{-12} Torr; Fig.15) で著しく低く、貯蔵材としても優れた特性を有している。これらのゲッター材によるトリチウム除去-保管廃棄技術は、酸素等の不純物に対する耐久性の向上、あるいは水素同位体に対する高選択性透過膜との併用などにより一層の進展が期待される。また、保管廃棄時においては、約100年、10半減期程度の長期にわたる保存を考えると、システムとしての耐久性あるいは安定性が解決すべき課題であろう。

一方、近年、有機物ゲッター材による空気中からのトリチウム除去技術の報告もなされている⁹⁴⁻⁹⁷⁾。Miller ら⁹⁴⁾ は二種類のアセチレン誘導體 ($C_6H_5C\equiv C-C\equiv C-C_6H_5$, $C_6H_5C\equiv CCH_2CH_2OH$) を用い、10~500ppm (約 $25\mu Ci/cm^3\sim 1.2mCi/cm^3$) の T_2 ガスを6~48時間でバックグラウンドレベルまで除去できることを報告している。ただし、有機ゲッター材系の液相に約50%のトリチウムが分布することから、電解方式のゲッター材の開発へと研究が進められている^{95,96)}。

液体および固体の有機物ゲッターによる空気中トリチウムの除去技術は、Weichselgartner⁹⁷⁾ によっても報告されている。特許の関係から材料物質は明らかにされていない

Table 4. Criteria for assessing solid organic getters⁹⁷⁾.

	Solid Organic Getter, SOG, samples								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
absorption of H ₂ moles	2	1	6	3	2	4	1	1	2
absorption of H ₂ ml/g	18	8.5	25	24	8	10	6	—	18
absorption of H ₂ relative to SOG $1 \hat{=} 1$	1	0.45	1.4	1.3	0.44	0.55	0.33	—	1
absorption of H ₂ within 10'	17	7	25	24	8	10	3	—	15
—after flushing 120 h	6	4.5	2.5	} not jet tested					
290h	6	4	1						
600h	6	—	—						
"log-time"percentage	30	50	4						
relative cost (1 Kg SOG $1 \hat{=} 1$)	1	3.6	12.5	7	200	500	5	14	5

が、Table 4 のような固体有機物ゲッターを開発している。この有機ゲッターを用いた場合、約2 nCi/cm³ の濃度まで除去できる (Fig.25)。この到達トリチウム濃度は、有機ゲッター自身の蒸気圧に基づいているものと考えられている。したがって、温度に対する安定性ならびにトリチウム分圧などの点について、さらに改善が必要である。

6 ま と め

核融合研究における各種トリチウムプロセッシング技術へのゲッター材の応用に関する研究の現状について述べてきたが、さまざまな分野においてゲッター材が利用されてきていることが知られる。ただし、トリチウムプロセッシングのさまざまな要求を満たすためには、今後も適材適所の最適ゲッター材を開発する必要がある。そのためには、筆者らの行っているような各素過程・機構および合金化効果の基礎的研究ならびに応用の際の特性評価の研究が重要である。例えば、今後の検討課題として、(1)活性化の容易・単純性、(2)操作温度下における不燃焼性・耐微粉化性、(3)トリチウムおよびトリチウム化合物(水、メタンなど)に対する吸蔵-脱離特性、(4)不純物気体に対する耐久性ならびに選択排気・吸蔵特性、(5)不活性化/再活性化条件の容易・単純性、(6)室温におけるトリチウムの極低平衡圧、(7)適当な操作温度における高平衡圧、(8)大きな同位体効果などが挙げられる。

これらの改良によって、各種トリチウムプロセッシングならびにトリチウム取り扱い技術への応用性が一層広がるものと期待される。

文 献

- 1) K. Kawamura, PHYSICS, **3** (1982)262.
- 2) K. Ashida, K. Ichimura, M. Matsuyama, N. Inoue, K. Watanabe and T. Takeuchi, Ann. Rept. TRC, Toyama Univ., **2**(1982)69.
- 3) N. Inoue, K. Ichimura, K. Watanabe and T. Takeuchi, *ibid.*, **3**(1983)33.
- 4) K. Ichimura, N. Inoue, K. Watanabe and T. Takeuchi, J. Vac. Sci. Technol., **A2**(1984)1341.
- 5) K. Ichimura, N. Inoue, K. Ashida, K. Watanabe and T. Takeuchi, J. Nucl. Mater., **128/129**(1984)876.
- 6) K. Ichimura, K. Ashida, M. Matsuyama, K. Watanabe and T. Takeuchi, Ann. Rept. TRC, Toyama Univ., **4**(1984)37.
- 7) K. Ichimura, K. Ashida and K. Watanabe, J. Vac. Sci. Technol., **A3**(1985)36.
- 8) K. Ichimura, Matsuyama, K. Watanabe and T. Takeuchi, Fusion Technol., **8**(1985)

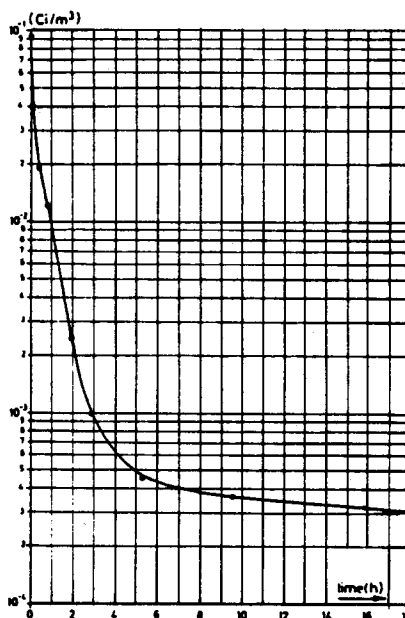


Fig. 25. Tritium removal by solid organic getter⁹⁷⁾.

2407.

- 9) K. Watanabe and K. Ichimura, Solid State Physics (Japanese), **20**(1985) 865.
- 10) K. Ichimura, M. Matsuyama and K. Watanabe, J. Vac. Soc. Jpn., **29**(1986) 364.
- 11) K. Ichimura, K. Watanabe, M. Matsuyama and T. Takeuchi, Proc. Intern. Symp. on Fusion Reactor Blanket and Fuel Cycle Technology (Oct. 27-29, 1986, Tokai-mura, Ibaraki, Japan), V-11, in press.
- 12) K. Watanabe and K. Ichimura, *ibid*, V-13, in press.
- 13) K. Ichimura, M. Matsuyama and K. Watanabe, J. Vac. Sci. Technol., **A5**(1987) in press.
- 14) M. Matsuyama, H. Miyake, K. Ichimura, K. Ashida and K. Watanabe, in this Journal.
- 15) H. F. Dylla, J. Nucl. Mater., **93/94**(1980) 61.
- 16) D. K. Owens et al., *ibid.*, **93/94**(1980) 213.
- 17) S. J. Fielding and A. D. Sanderson, *ibid.*, **93/94**(1980) 220.
- 18) S. J. Fielding and A. J. Wootton, *ibid.*, **93/94**(1980) 226.
- 19) N. Suzuki et al., *ibid.*, **93/94**(1980) 282.
- 20) D. P. Drake, G. Deis, M. Richardson and T. C. Simonen, *ibid.*, **93/94**(1980) 291.
- 21) J. H. Shea, C. J. Sofield, G. M. McCracken, J. H. Evans, L. B. Bridwell and M. Malinowski, *ibid.*, **93/94**(1980) 299.
- 22) R. J. Taylor and R. F. Bunshah, *ibid.*, **93/94**(1980) 338.
- 23) A. J. Wootton, P. H. Edmonds, R. C. Isler and P. Mioduszeuski, *ibid.*, **111/112**(1982) 479.
- 24) L. Keller, L. Oren, R. J. Taylor, F. Schwirzke, R. F. Bunshah and C. N. J. Wagner, *ibid.*, **111/112**(1982) 493.
- 25) J. E. Simpkins, P. Mioduszeuski and L. W. Stratton, *ibid.*, **111/112**(1982) 827.
- 26) J. E. Simpkins, W. A. Gabbard, L. C. Emerson and P. K. Mioduszeuski, *ibid.*, **122/123**(1984) 1481.
- 27) S. L. Allen and the TMX-U/MFTF-B Experimental Team, *ibid.*, **128/129**(1984) 26.
- 28) T. Yamashina and M. Mohri, *ibid.*, **128/129**(1984) 208.
- 29) J. S. deGrassie, R. Gallis, G. Campbell, J. Garcia, E. Ledin, C. Meyer, J. Miller, P. Pedersen, J. Smith, R. Stav, T. Taylor and the Doublet III Group, J. Vac. Sci. Technol., **18**(1981) 1102.
- 30) M. E. Malinowski, *ibid.*, **18**(1981) 1106.
- 31) P. H. Edmonds, K. Mioduszeuski, J. E. Simpkins and A. J. Wootton, *ibid.*, **20**(1982)

- 1317.
- 32) J. E. Simpkins and P. Mioduszeuski, *ibid.*, **20**(1982)1321.
 - 33) W. R. Hsu, R. Bastasz, W. Bauer, M. E. Malinowski, B. E. Mills, S. L. Allen and C. A. Clower, *ibid.*, **A2**(1984)1222.
 - 34) J. L. Cecchi, *J. Nucl. Mater.*, **93/94**(1980)28.
 - 35) R. J. Knize, J. L. Cecchi and H. F. Dylla, *ibid.*, **103/104**(1981)539.
 - 36) J. L. Cecchi, R. J. Knize, H. F. Dylla, R. J. Fonck, D. K. Owence and J. J. Sredniawski, *ibid.*, **111/112**(1982)305.
 - 37) R. J. Knize and J. L. Cecchi, *ibid.*, **111/112**(1982)645.
 - 38) P. Mioduszewski et al., *ibid.*, **121**(1984)1481.
 - 39) R. J. Knize, J. L. Santon and J. L. Cecchi, *ibid.*, **122/123**(1984)1553.
 - 40) J. L. Cecchi et al., *ibid.*, **128/129**(1984) 1.
 - 41) H. F. Dylla et al., *ibid.*, **128/129**(1984)861.
 - 42) C. H. Wu, R. L. Moore and S. A. Cohen, *J. Vac. Sci. Technol.*, **18**(1981)1098.
 - 43) H. F. Dylla, J. L. Cecchi and M. Ulrickson, *ibid.*, **18**(1981)1111.
 - 44) J. L. Cecchi and R. J. Knize, *ibid.*, **A2**(1984)1214.
 - 45) L. C. Emerson, P. K. Mioduszewski and J. E. Simpkins, *ibid.*, **A2**(1984)1583.
 - 46) Y. Hirooka, M. Miyake and T. Sano, *J. Nucl. Mater.*, **96**(1981)227.
 - 47) J. A. Llauger and G. N. Walton, *ibid.*, **97**(1981)185.
 - 48) B. L. Doyle and D. K. Brice, *ibid.*, **122/123**(1984)1523.
 - 49) M. B. Lewis, *ibid.*, **125**(1984)152.
 - 50) Y. Baba and T. A. Sasaki, *ibid.*, **132**(1985)173.
 - 51) J. S. Moenich, *J. Vac. Sci. Technol.*, **18**(1981)1114.
 - 52) C. Boffito, B. Ferrario, P. dell Porta and L. Rosai, *ibid.*, **18**(1981)1117.
 - 53) W. V. Lampert, K. D. Rachocki, B. C. Lamartine and T. W. Haas, *ibid.*, **18**(1981)1121.
 - 54) R. J. Knize, J. L. Cecchi and H. F. Dylla, *ibid.*, **20**(1982)1135.
 - 55) R. J. Knize and J. L. Cecchi, *ibid.*, **A1**(1983)1279 ; J. L. Cecchi and R. J. Knize, *ibid.*, **A1**(1983)1276.
 - 56) C. Boffito, B. Ferrario and D. Martelli, *ibid.*, **A1**(1983)1279.
 - 57) H. C. Hseuh and C. Lanni, *ibid.*, **A1**(1983)1283.
 - 58) G. B. Hoflund, D. F. Cox and R. E. Gilbert, *ibid.*, **A1**(1983)1837.
 - 59) Y. Hirooka, *ibid.*, **A2**(1984)16.
 - 60) T. Okano, A. Ohsaki and Y. Tuzi, *ibid.*, **A2**(1984)191.
 - 61) T. K. Mehrhoff and L. W. Barnes, *ibid.*, **A2**(1984)1210.

- 62) J. L. Cecchi, P. H. LaMarche, H. F. Dylla and R. J. Knize, *ibid.*, **A3**(1985)487.
- 63) M. E. Malinowski, *ibid.*, **A3**(1985)483.
- 64) J. C. Emerson, R. J. Knize, J. L. Cecchi and O. Auciello, *ibid.*, **A4**(1986)297.
- 65) J. P. Hobson and R. Chapman, *ibid.*, **A4**(1986)300.
- 66) A. G. Richie, *J. Nucl. Mater.*, **120**(1984)143.
- 67) S. A. Swansinger, V. K. Gabrielson and R. W. Bradshaw, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A2**(1984)721.
- 68) C. R. Walthers, *ibid.*, **A2**(1984)722.
- 69) T. Tanabe, S. Miura and S. Imoto, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **16**(1979)690 and references therein.
- 70) G. Luthardt and H. Ebinger, *Fusion Technol.*, **8**(1985)2395.
- 71) R. L. Beck, USAEC Rept. LAR-10, Denver Research Inst., (1960)60, 77.
- 72) N. P. Kherani and W. T. Shmayda, *Fusion Technol.*, **8**(1985)2399.
- 73) R-Project Design Team, "The Second Phase Design of R-Tokamak (Low Radioactivity Design)" (*Inst. Plasma Phys., Nagoya Univ.*, 1983), p.76-91.
- 74) 大角泰章, 化学, 3 (1981)145; 大角泰章, 「水素貯蔵合金」(与野書房, 1985); 大角泰章, 「金属水素化合物——その物性と応用——」(化学工業社, 1986).
- 75) W. M. Mueller, J. P. Blackledge and G. G. Libowitz, "Metal Hydrides" (Academic Press, New York, 1986).
- 76) "Hydrogen in Metals I & II" (Edited by G. Alefeld and J. Völkl; Springer-Verlag, Berlin, 1978).
- 77) M. S. Ortman, T. J. Warren and D. J. Smith, *Fusion Technol.*, **8**(1985)2330.
- 78) T. Nagasaki, S. Konishi, H. Katsuta and Y. Naruse, *ibid.*, **9**(1986)506.
- 79) Y. Yamamoto, T. Yoneoka, S. Kokubo and M. Yamawaki, *Proc. Intern. Symp. on Fusios Reactor Blanket and Fuel Cycle Technology* (Oct. 27-29, 1986, Tokai-mura, Ibaraki, Japan), V-12, in press.
- 80) M. H. Mendelsohn, D. M. Gruen and A. E. Dwight, *Nature*, **269**(1977)45.
- 81) S. Konishi, H. Yoshida, H. Ohno, Y. Naruse, D. O. Coffin, C. R. Walthers and K. E. Binning, *Fusion Technology*, **8**(1985)2042.
- 82) J. B. Talbot, P. W. Fisher and S. D. Clinton, *J. Nucl. Mater.*, **103/104**(1981)681.
- 83) H. U. Borgstedt, *ibid.*, **103/104**(1981)693.
- 84) M. Nishikawa, H. Kido, K. Kotoh and M. Sugisaki, *ibid.*, **115**(1983)101.
- 85) D. H. W. Carstens and W. R. Davis, *ibid.*, **115**(1983)203.
- 86) K. Nakamura and T. Hoshi, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A3**(1985)34.
- 87) N. Mitsuishi, S. Fukada, T. Yuki and K. Kuroiwa, *J. Atomic Soc. Jpn.*, **27**(1985)

457.

- 88) M. Mitsuishi, S. Fukada, S. Kitajima and H. Nishino, Proc. Intern. Symp. on Fusion Reactor Blanket and Fuel Cycle Technology (Oct. 27-29, 1986, Tokai-mura, Ibaraki, Japan), IV-6, in press.
- 89) K. Ichimura, N. Inoue, K. Watanabe and I. Matsuura, Ann. Rept. Toyama Univ., **5**(1985)15.
- 90) 「トリチウムの化学」(日本原子力学会, 1982) p. 225-227.
- 91) J. Bigeleisen, "Tritium in the Physical and Biological Science Vol. 1" (IAEA, 1962) p.161-168.
- 92) J. J. Reilly, Zeit. Physik. Chem., **117**(1979)655.
- 93) Private communication to SAES Getters S. p. A.
- 94) H. H. Miller, E. R. Bissell, R. T. Tsugawa and P. C. Souers, J. Nucl. Mater., **101**(1981)238.
- 95) P. C. Souers, R. T. Tsugawa and C. G. Stevens, J. Vac. Sci. Technol., **A2**(1984)717.
- 96) P. C. Souers, F. S. Uride, C. G. Stevens and R. T. Tsugawa, *ibid.*, **A4**(1986)1150.
- 97) H. Weichselgartner, Proc. Intern. Symp. on Fusion Reactor Blanket and Fuel Cycle Technology (Oct. 27-29, 1986, Tokai-mura, Ibaraki, Japan), IV-14, in press.

正 誤 表

訂	正	箇所	誤	正
11 ^頁 - ^ウ *	Table 2	最左欄 下から2段目	Ti/Hg	Ti ³ /H ₂
		右より第2欄上から5段目	773-1073	773-1073
		右より第2欄下から5段目	733-1073	773-1073
		最右欄 下から4段目	10	16
17 ^頁 - ^ウ *	Table 3	左欄 上から2段目	TiVH _{4.5}	TiVH _{4.15}
		左欄 上から9段目	TiMoH _{2.99}	TiMo ₂ H _{2.99}
		中欄 下から7段目	79-30	29-30
19 ^頁 - ^ウ *	Table 4	右欄 最上段	Soldi Organic ----	Solid Organic ---- [†]
		最右欄 最下段	5	4