



JP0050855

JAERI-Research

2000-044



ITER用トリチウム貯蔵ベッドからの トリチウム透過量評価

2000年10月

中村 博文・林 巧・鈴木 卓美・吉田 浩・西 正孝

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

ITER用トリチウム貯蔵ベッドからのトリチウム透過量評価

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部
中村 博文・林 巧・鈴木 卓美・吉田 浩*・西 正孝

(2000年9月7日受理)

通気式熱量計量型トリチウム貯蔵ベッドからのトリチウム透過量を、国際熱核融合実験炉(ITER)で現在提案されている運転モードについて計算・評価した。評価の結果、合理化に伴って新たに提案されている運転モードでは、最もトリチウム透過が大きいと考えられる条件下での評価において、従来の運転方法に比べて積算透過量が約2倍となるとの結果を得た。しかし、透過するトリチウム量としては、ITERでの計量管理精度の範囲内であることを確認した。一方、トリチウムの安全管理や通気式計量ベッドの性能維持の観点からは、熱量測定と真空断熱性能維持のために適切なトリチウムの処理が必要であることが示唆された。

さらに、隔壁の構成材料を316Lステンレス鋼配管から銅製配管に変えることが、透過量低減の観点から有効であることを示した。

Analysis on Tritium Permeation in Tritium Storage Bed with Gas Flowing Calorimetry

Hirofumi NAKAMURA, Takumi HAYASHI, Takumi SUZUKI, Hiroshi YOSHODA*
and Masataka NISHI

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 7, 2000)

Tritium permeation amount in a tritium storage bed with gas flowing calorimetric was evaluated under a condition of new operation mode for International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). As a result, tritium permeation under the new operation mode was estimated to be about twice of that under the practical operation mode. This results was it would be regardless in a view point of material control of tritium, however, it was suggested to be required additional tritium removal or evacuate system in a view points of safety control or performance of accountability or thermal insulating of the tritium storage bed.

Keywords: Tritium, Permeation, 316L Stainless Steel, Copper, Tritium Storage Bed, ITER, Fusion Reactor

* ITER-Joint Centeral Team

目 次

1. 序論	1
2. 通気式熱量計量型 Zr-Co 活性金属ベッド	1
3. 透過評価モデル	2
3. 1 解析手法	2
3. 2 解析モデル	3
3. 3 運転モードの設定	3
3. 4 解析条件	4
4. 計算結果	4
4. 1 各部位におけるトリチウム透過	4
4. 2 各運転モードにおけるトリチウム透過	5
4. 3 ヘリウムループ構成材料の違いによるトリチウム透過	6
4. 4 トリチウム回収装置に求められる性能	6
4. 5 透過トリチウムのトリチウム計量性に及ぼす影響	7
4. 6 透過トリチウムの熱断熱性に及ぼす影響	7
5. まとめ	7
謝辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Zr-Co Tritium Storage Bed with Gas Flowing Calorimetry	1
3. Analytical Procedure	2
3.1 Analytical Method	2
3.2 Analytical Geometry	3
3.3 Setting of Operation Scenario	3
3.4 Analytical Conditions	4
4. Results	4
4.1 Tritium Permeation through Individual Components	4
4.2 Effect of Operation Scenario on the Tritium Permeation	5
4.3 Effect of Component Materials on the Tritium Permeation	6
4.4 Required Capacities for Tritium Recovery Systems	6
4.5 Effect of Tritium Permeation on the Tritium Accountability	7
4.6 Effect of Tritium Permeation on Thermal Insulation	7
5. Summary	7
Acknowledgement	8
References	8

1. 序論

ITER 設計では、燃料であるトリチウムの貯蔵に関し、原研で開発した通気式熱量計量型 Zr-Co 活性金属ベッドが採用されている。Zr-Co 活性金属ベッドは、ジルコニウムーコバルト金属間化合物(Zr-Co) が水素共存下において、常温では水素化物として存在し、高温で水素を解離するという性質を利用したものである。また、通気式熱量計量型ベッドは、Zr-Co 充填槽内に吸蔵されているトリチウムの崩壊熱を、充填槽内に配置した配管内を流れるヘリウムガスの温度上昇によって測定し、吸蔵トリチウム量を計量できるようにしたものである。1998 年に設計がまとめられた ITER-FDR では、350℃程度に加熱し、ベッドから放出されたトリチウムガスを、ガス移送ポンプで一旦計量タンクに送った後に供給する方法が採用されていた。

最近の ITER-FEAT 設計では、核融合燃焼プラズマ運転の標準パルス長の短縮に合わせて、燃料注入系へのトリチウムガスの供給を一元的にベッドから行う燃料の運転モードを採用し、コストの低減を図っている。このモードでは、ベッドを運転時間中常時約 300℃に保持し、貯蔵ベッド内にトリチウムを平衡圧で保持しておくことにより、トリチウム供給が必要な場合に迅速に対応できるようにするものである。このベッドの運転モード（急速供給モード）は、必要に応じて考案された新しい運転モードである。この急速供給モードでは、従来の運転モードと異なり、貯蔵ベッドが高温の状態で長時間、平衡圧のトリチウムがとともに保持されていることになる。

良く知られているように、水素同位体は他の元素と比較して、金属材料中を透過しやすい性質を持つ。その透過量は、透過媒体の温度が高くなるほど、また、水素の圧力が高くなるほど多くなる。ここで、急速供給モードでは従来の運転モードに比べて、トリチウム存在状態で高温に長時間保持されるため、高温となるベッド内の 1 次容器から室温の 2 次系へのトリチウム透過量が増加せざるを得ない。

原研が開発した通気式計量ベッドでは、従来からトリチウムの透過を考慮した設計、すなわち、気密容器の多重化、配管の気密強化等により、直接外部へのトリチウム漏洩が生じないような対策を施している。しかしながら、その評価は、従来運転モードのみを想定していた。このため、新たに考案された急速供給モードに対応し、安全管理上のみならず、トリチウムの計量管理上の観点及び透過したトリチウムの通気式計量ベッドの機能に及ぼす影響の有無を確認するために、急速供給モードにおけるトリチウム透過量を評価する必要があった。

今回、通気式熱量ベッドの運転条件の違いによる Zr-Co 充填槽からのトリチウム透過量の違いを数値計算により解析・評価した。また、透過したトリチウムのトリチウム計量性への影響及び断熱性への影響等も併せて検討を行った。また、構成材料を換えた場合に予期されるトリチウム透過量の変動についても解析を試みた。本報告は、これらの評価結果をまとめたものである。

2. 通気式熱量計量型 Zr-Co 活性金属ベッド

ITER の通気式熱量計量型 Zr-Co 活性金属ベッド（以後、通気式計量ベッドという。）の

原理及び系統図を Fig. 1 に示す。通気式計量ベッドは、原研が開発し、性能を実証して^{1,2)}ITER の採用されたものである。Fig.2 には ITER 用通気式計量ベッドの構造図を示している。Fig.1 及び 2 に示されているように、Zr-Co 充填槽に吸蔵されたトリチウムは、充填槽内に配置されたヘリウム循環コイル（以後「ヘリウムループ」と呼ぶ。）内を流れるヘリウムガスの温度上昇によりトリチウムの崩壊熱を計測することにより計量される。ITER でのトリチウム計量は、貯蔵量の 1%の精度での測定が求められており、この精度を達成するために、外部との断熱性を持たせた構造とするために充填槽の外部は真空断熱されている。

3. 透過評価モデル

3. 1 解析手法

通気式計量ベッドからのトリチウム透過の解析にあたっては、1 次元の拡散モデルを使用した。(1)式は通常知られている金属材料中の水素同位体の拡散方程式である³⁾。

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial J(x,t)}{\partial x} - \frac{\partial C_T(x,t)}{\partial t} + \gamma C(x,t) + S(x,t) \quad (1)$$

$$J(x,t) = -D(T) \left(\frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \frac{C(x,t)Q^*}{kT^2} \right) \quad (2)$$

ここで、 $C(x,t)$ 、 $J(x,t)$ 、 $C_T(x,t)$ は時間 t 、金属中位置 x におけるトリチウム濃度、拡散流及びトラップ原子濃度を意味する。 $D(T)$ は温度 T における拡散係数、 Q^* 、 k は各々輸送熱及びボルツマン常数である。また、 γ 及び S はトリチウムの自然崩壊率及び発生率である。

また、境界条件として、Zr-Co 充填槽容器の内側表面における容器材料中の表面濃度は Sievert's 則より (3) 式で表される。

$$C(0,t) = K_s(T) P_u^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 $K_s(T)$ は、トリチウムの材料中における溶解度、 P_u は充填槽内のトリチウム分圧である。透過側表面においても同様に(4)式で表わされると仮定し、透過側でのトリチウム分圧が低い場合は、(5)式で表わされる。

$$C(d,t) = K_s(T) P_d^{1/2} \quad (4)$$

$$C(d,t) = 0 \text{ (when } P_d \sim 0 \text{)} \quad (5)$$

ここで、 P_d は透過側におけるトリチウム分圧である。

透過量 ϕ_p は、(3)~(5)式の境界条件の下で、(1)、(2)式を解くことにより、

$$\phi_p = J(d,t) \quad (6)$$

の形で与えられる。

ここで、 $D(T)$ と $K_s(T)$ は、一般に知られているように

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \quad (8)$$

$$Ks(T) = Ks_0 \exp\left(-\frac{Es}{RT}\right) \quad (9)$$

で表されるものとした。ここで、 D_0, E_D はそれぞれ、拡散定数及び拡散の活性化エネルギーであり、 Ks_0, Es はそれぞれ、溶解定数及び溶解熱である。

3. 2 解析モデル

Fig.2 から明らかなようにトリチウムの圧力が最も高く、かつ温度が最も高い部分は Zr-Co の充填槽容器である。よって、トリチウムが最も透過する部分は、この Zr-Co 充填槽に接する部分である。Zr-Co 充填槽に接している部分は、ヘリウムループと充填槽外部の真空断熱槽の 2 カ所である。よって、今回の解析ではこの 2 つの領域を評価対象とした。

透過評価にあたっては、ヘリウムループも真空断熱槽も 3 次元構造であるが、単純化のために、Fig.3 に示すような 1 次元モデルでの評価を行った。ここで Fig.3(a)、(b) はそれぞれヘリウムループと真空断熱部の解析体系である。なお、(b) の真空断熱槽は容器の上下部分と側面の肉厚が異なるため、個別の体系において並列の計算を実施し、その合計により透過量を算出した。

また、ヘリウムループの候補材料としては現設計では 316L ステンレス鋼材であるが、比較のために銅管を使用した場合も併せて評価を試みた。

3. 3 運転モードの設定

トリチウム透過評価にあたって、前述の従来の運転モード及び急速供給モードを想定した。それぞれの運転モードの特徴は以下の通りである。

・従来運転モード⁴⁾

従来想定していた運転モードであり、トリチウムの一時貯蔵用のリザーバタンクを有している。この運転モードでは、ベッドの昇温で放出されたトリチウムは、移送ポンプにより、リザーバタンクに移送される。よって、トリチウム放出中においても、ベッド内のトリチウム圧力は比較的低圧に保持される。トリチウム圧力は移送ポンプの性能に依存する。また、昇温時のトリチウム圧力が低いので、比較的高温まで昇温し、短時間で必要量の放出が可能となる。

・急速供給モード

近年、ITER の燃料注入の運転モードとして提案している運転モードであり、従来運転モードと異なり、リザーバタンクを必要としない運転手法を探る。この運転モードでは、貯蔵ベッドを昇温し、その温度における Zr-Co とトリチウムの平衡圧でベッド内にトリチウムを保持しておき、トカマクへのトリチウム注入が必要な場合に直接ベッドから移送ポン

プを通じてトリチウム供給するモードである。現在の計画では、3000 秒間のトリチウム供給と 9000 秒間の準備時間の繰り返しとなる予定である。

解析を行うにあたって、上記の各運転モードの特徴を考慮して、以下に挙げる 3 つの運転シナリオを仮定した。

(1) 従来運転モード(N-mode)

従来の運転モードのシナリオ

(2) 急速供給高効率モード(RH-mode)

急速供給モードにおいて最もトリチウム供給が順調な場合を仮定した運転シナリオ

(3) 急速供給低効率モード(RL-mode)

急速供給モードにおいて最もトリチウム供給が悪い場合を仮定した運転シナリオ。すなわち、ベッドは待機状態を保つが、トリチウム供給が必要とされずに供給されないシナリオ。

これら 3 つの運転モードの運転条件を Table 1 にまとめている。また、Fig.4 にこの運転シナリオの 1 サイクルのシーケンスを示している。なお、Zr-Co 充填槽のトリチウムの平衡圧は、Fig.5 に示す平衡解離圧⁵⁾から求められる値を大きめに設定し、0.1MPa として計算を実施した。

3. 4 解析条件

計算は、He ループと真空断熱槽部に対し、N、RH、RL の各モードについて実施した。本解析に用いた物性値及び解析条件を Table 2 にまとめた。物性値については、(1)~(6)式にあるように、容器材料中のトリチウムの拡散係数と溶解度が必要となる。今回、前述のように、Zr-Co 充填槽容器として 316L ステンレス鋼を、He 循環コイル材料として、316L ステンレス鋼と銅を想定している。今回の計算に使用した 316L ステンレス鋼と銅に関するトリチウム中の溶解度と拡散係数の温度依存性を Fig.6(a),(b) にそれぞれ示す^{6,7)}。なお、今回の解析においては、(1)式において拡散計算に影響を与えるトラップサイトの存在は 316L ステンレス鋼と銅共に想定していない。

4. 計算結果

4. 1 各部位におけるトリチウム透過

Fig.7 に計算によって求めた、Zr-Co 充填槽からヘリウムループ部への各運転モードにおける 1 サイクル（1 日に相当）あたりのトリチウム透過の経時変化を示す。ここで、ヘリウムループの構成材料は 316L ステンレス鋼の場合の結果である。

また、Fig.8 には Zr-Co 充填槽から真空断熱部への各運転モードにおけるトリチウム透過の経時変化を示している。ここで、15 サイクル分（15 日間に相当）の計算結果を示している。

ここで、各運転モードの温度、圧力は、Fig.4 に示したシーケンスに基づいている。Fig.7,

8 から明らかなように、ヘリウムループ部においては、いずれの運転モードにおいても、昇温後数時間でトリチウム透過フラックスが定常となり、温度、圧力の低下に伴い、透過量が急減するのに対して、真空断熱槽部では、サイクルごとに透過フラックスが増加し、約 10 サイクル（10 日）後にはほぼ定常となる結果を得た。これは、ヘリウムループ部の SUS 管の肉厚が Zr-Co 充填槽容器の肉厚に比べて薄いことに起因する。また、各部位において、各運転モード異なった透過挙動となったのは、Fig.4 に示した温度履歴及び圧力履歴の違いに起因している。

Fig.9 にヘリウムループ部と真空断熱槽部におけるトリチウム透過の積算量の経時変化を示す。トリチウム透過量は、サイクルごとにはほぼ直線的に増加していることがわかる。また、本図より、トリチウムの透過量は充填容器から真空断熱槽への透過よりも、充填槽からヘリウムループ配管への透過の方が大きいことが明らかである。

ヘリウムループへの透過と真空断熱槽への透過に関して、1 サイクルあたりの透過量を比較したのが Fig.10 である。このように、いずれの運転モードにおいても、今回の評価に採用した通気式計量ベッドの設計では、透過トリチウムの約 2/3 以上がヘリウムループ側へのものであるとの結果を得た。

4. 2 各運転モードにおけるトリチウム透過

次に、運転モードの違いによるトリチウム透過量の違いについて考察する。Fig.8 及び 9 で明らかなように、急速供給モードは、従来運転モード（N-Mode）と比較して積算トリチウム透过量が増加していることは明らかである。Fig.11 に従来モードを 1 とした場合における 1 サイクルあたりの積算トリチウム透過量の比を示している。予期されたとおり、ヘリウムループ部及び真空断熱槽いずれも RL モードでのトリチウム透過が最も高く、RH、N の順となっている。

ここで、ヘリウムループへのトリチウム透過に関しては、Fig.7 に示している通り、RH、RL モードにおける透過フラックスは共に、N モード時の約 20%程度の増加にすぎない。一方、Fig.11 において、1 サイクルあたりの積算トリチウム透過量は、RL モードでは N モードの 2 倍程度になっている。これは、RH.RL モードでの高温保持時間が N モードに比較して約 2 倍長いことに起因している。つまり、ヘリウムループへの透過は、配管の肉厚が薄いために、透過が定常状態に至るまでに要する時間が短く、従来運転モードにおいても昇温初期の段階で定常透過に達し、定常透過フラックスに関しては従来モードと急速供給モードでの違いがほとんどなく、高温状態の維持時間に強く依存する結果となっている。

次に、真空断熱槽へのトリチウム透過に関しては、Fig.8 に示した各サイクルごとのトリチウム透過量及び Fig.9 に示した積算トリチウム透過量共に RL モードで最大となっている。ここで、Fig.8 における各サイクルごとのトリチウム透過量に関しては N モードが RH モードを上回っていることわかる。これは、Zr-Co 充填容器の肉厚が比較的厚く、また、N モードが高温状態では RH モードよりも 50 K 高温であることにより、ステンレス容器中の拡散が支配的であることに起因している。積算トリチウム透過量に関しては、ヘリウムループへの透過と同様に高温持続時間が長いために、N,RH,RL の順に増加する結果となっている。

4. 3 ヘリウムループ構成材料の違いによるトリチウム透過

ヘリウムループの配管材料として 316L ステンレス鋼の代わりに銅製配管を使用した場合の各運転モードにおけるトリチウム透過量を計算した結果を Fig.12 に示す、なお、比較のために、Fig.7 で示した 316L ステンレス鋼の場合の結果も併せて載せている。本図より、ヘリウムループの配管を銅製配管にした場合、透過量が定常に達する時間は銅製配管の方が短いものの、透過量に関しては約 1 桁の低減が見込まれるとの結果を得た。Fig.13 に各運転モードにおける 1 サイクルあたりの積算トリチウム透過量を比較した結果を示す。この図からも銅製配管を使用した場合にはトリチウム透過の低減が期待できることがわかる。しかしながら、ステンレス材料中のトリチウム（水素）透過に関しては、表面の酸化物相の存在が大きく透過を低減させることができることが報告されている⁸⁾。今回の計算においては、通気式計量ベッドの 316L ステンレス鋼配管に対してどのような表面処理が施される予定かが不明であり、また、供用期間中常に酸化膜の効果が期待できるかが明確でないため、最大透過量を与える最大想定評価として酸化物膜の存在を仮定しない評価を実施した。

しかしながら、ステンレス配管の代わりに銅製配管を使用することにより、何らかの透過量の低減を見込むことができるであろう。

4. 4 トリチウム回収装置に求められる性能

Fig.9 により、ヘリウムループ部及び真空断熱部への 1 サイクル（1 日）あたりのトリチウム透過量が最大想定として、ヘリウムループ（ステンレス）で約 450 GBq/cycle、ヘリウムループ（銅）で約 55 GBq/cycle、及び真空断熱槽で約 4.2 GBq/cycle の結果が得られている。

計量管理上の取扱として、今回予測されたトリチウム透過量は、通気式計量ベッド 1 基あたりのトリチウム貯蔵量 35.5PBq に比べて非常に小さく、1 年間の運転を仮定したとしても最大評価で 1% に満たない。通気式計量ベッドに現在求められているトリチウム計量精度目標値の 1%（定格最大貯蔵時）を考慮しても充分小さい値であり、充填槽からのトリチウム透過は計量管理精度の観点からはほとんど問題ないレベルと考えられる。

前述のトリチウム透過量の評価値から、ヘリウムループの容積を 1L、真空断熱部の容積を 38L と仮定した場合の 1 サイクルあたりのトリチウム濃度上昇を Fig.14 に示す。この濃度上昇率はトリチウムの管理上無視し得ない濃度である。今回予測されたトリチウム透過量は、計量管理上は問題ないレベルであり、透過が想定される部位への透過であって安全上支障がないことが明らかではあるものの、何らかの形で処理する必要がある。真空断熱槽はこのような場合を想定して、トリチウム処理系に直結しており、定期的な排気により透過トリチウムの処理を容易に行うことができる。ヘリウム配管へのトリチウム透過分はヘリウム循環系の一部にトリチウムの回収系を設置する等の措置を講じることによって、処理することができる。

なお、ここでもヘリウム配管を銅製配管とした場合の評価値はステンレス製に比べて小さいことが示唆された。

4. 5 透過トリチウムのトリチウム計量性に及ぼす影響

ここでは、ヘリウムループ配管内に透過したトリチウムがトリチウムの計量性に及ぼす影響を考察した。通気式計量ベッドでは、崩壊熱を(9)式により求めている^{1,2)}。

$$Q = C_p \cdot F \cdot \Delta T \quad (9)$$

ここで、 Q , C_p , F , ΔT はそれぞれ、ヘリウムループへの熱伝達量、パージガスの比熱、パージガス流量及びパージガスの温度変動である。

前述のように、通気式計量ベッドに求められる計量性能は 1%以下の精度である。ヘリウムパージガス中へのトリチウム透過による計量性能への影響が考えられるのは(9)式中の比熱 C_p の項である。一般にヘリウムガスの比熱 5.195 kJ/kg/K に比べ水素ガスの比熱は約 14.5 kJ/kg/K と大きく⁹⁾、少量のトリチウム混入でも影響を与える可能性がある。そこで、各運転モードにおけるパージガス中の比熱の変動を図示したのが Fig.15 である。ただし、これは系統ヘリウムラインの容積を 1L と仮定して計算した結果である。

ベッドの性能要求である 1%の精度を保証するために比熱 C_p の変動を 1%以内にする必要があると仮定すれば、最大の透過量評価を与える 316L ステンレス鋼管を使用した RL モードにおいては、1 サイクルで比熱が約 1%の変動値に近づくことがわかる。実際の運転では、RH モードに近い挙動となると推測されるが、いずれにせよ、数日で比熱の変動値が 1%を上回ることが予想される。

このため、本検討・評価における設計の範囲では、ヘリウム循環ラインにトリチウム除去装置を設置する必要性がある。

なお、銅製配管を使用した場合には、10 サイクル（10 日間）の使用においても比熱の変動が 1%に達しない結果となった。

4. 6 透過トリチウムの熱断熱性に及ぼす影響

Fig.9 の結果より、真空断熱槽に透過するトリチウムの最大想定透過量は 1 サイクルあたり、約 5.97×10^{19} 個 T_2 であることが得られている。これは、真空断熱槽が真空封入されているものとして、約 6.0 Pa/cycle (真空断熱部容積を約 38L と仮定) の圧力上昇に相当する。通常、真空断熱性能は数 Pa 程度で急激に低下することが知られており、今回の評価結果によれば、1 サイクルで断熱性能の低下をきたすことになる。このため、真空断熱槽は常時真空排気を継続する必要があることが示唆される。

5. まとめ

通気式熱量計量型トリチウム貯蔵ベッドから透過が想定される部位（ヘリウム循環配管及び真空断熱槽）へのトリチウム透過量を、想定される運転モード（従来法及び急速供給法）について計算・評価した。

この結果、以下の点が明らかとなった。

- (1)急速供給モードにおいては、積算トリチウム透過量が従来運転モードと比較して2倍程度に増加することが推定されたが、これは、高温持続時間の長期化に起因するものであり、定常状態における透過フラックスとしては従来モードと急速供給モードでは大きな差がないことが判明した。
- (2)Zr-Co 充填容器からのトリチウムの透過により損失するトリチウム量は現在設定している計量管理精度以下のレベルであることを確認した。
- (3)透過トリチウムの通気式計量ベッドの計量機能への影響に関しては、最大透過量を与える評価において、計量性能及び断熱性能に影響を及ぼす可能性があることを明らかにした。よって、ヘリウムループ、真空断熱槽に透過したトリチウムは適切に処理される必要がある。
- (4)ヘリウム循環ライン用配管として、316L ステンレス鋼の代わりに銅製配管を使用することはトリチウム透過防止の観点から有効である。また、崩壊熱測定の観点から熱伝導性能の良い銅が有効なのは自明である。しかしながら、この選択には構造強度の観点及び溶接性等の総合的観点からの検討が今後必要である。これらが、解決されるならば、銅製配管の使用は通気式計量ベッドの使用において有効な効果をもたらす可能性を有している。

謝辞

本研究を行う上で、ご理解、ご指導いただきました関昌弘核融合工学部長に感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Hayashi, T. Suzuki, M. Yamada and K. Okuno: Fusion Technology **30**, 931 (1996).
- 2) S. O'hira, T. Hayashi, H. Nakamura, K. Kobayashi, et. al.: Nuclear Fusion, **40**, 51 (2000).
- 3) G. R. Longhurst, D. F. Holland, J. L. Jones and B. L. Merrill: EGG-FSP-10315 (1998).
- 4) ITER-JCT(Naka): private communication.
- 5) S. Konishi, T. Nagasaki, N. Yokogawa and Y. Naruse: Fusion Eng. Des. **10**, 355 (1989).
- 6) T. Tanabe, Y. Yamanishi, K. Sawada, and S. Imoto: J. Nucl. Mater., **122&123**, 1568 (1984).
- 7) V. W. Eichenauer, W. Losser and H. Witte: Z. Metallkde., **56**, 287 (1965).
- 8) J. T. Bell, J. D. Redman and H. F. Bitter: Proc. Tritium Technology in Fission, Fusion and Isotopic Applications, Dayton, Ohio, Apr. 48 (1980).
- 9) JSME Data book: Heat transfer 4th edition, (1986)

Table 1 Operational conditions of each operation mode

	Heating period	Bed temperature	Tritium partial pressure
N-mode	14,400sec	623 K	1×10^4 Pa
RH-mode	27,000sec	573 K	3,000sec 1×10^4 Pa (Supply) 9,000sec 1×10^5 Pa (Stand by)
RL-mode	27,000sec	573 K	1×10^5 Pa

Table 2 List of calculation conditions, materials and properties for tritium transport of each material.

	Vacuum Jacket	Helium loop
Thickness of enclosure (m)	3.0×10^{-3} / 5.0×10^{-3}	5.0×10^{-4}
Surface area(m ²)	9.66×10^{-2} / 3.07×10^{-2}	4.32×10^{-2}
Materials	316L stainless steel	Cu
D ₀ (m ² /s)	5.16×10^{-7} ⁶⁾	5.06×10^{-7} ⁷⁾
E _D (kJ/mol)	47.8 ⁶⁾	37.78 ⁷⁾
K _{S₀} (atoms/m ³)	2.57×10^{23} ⁶⁾	4.1×10^{23} ⁷⁾
E _s (kJ/mol)	13.9 ⁶⁾	35.7 ⁷⁾

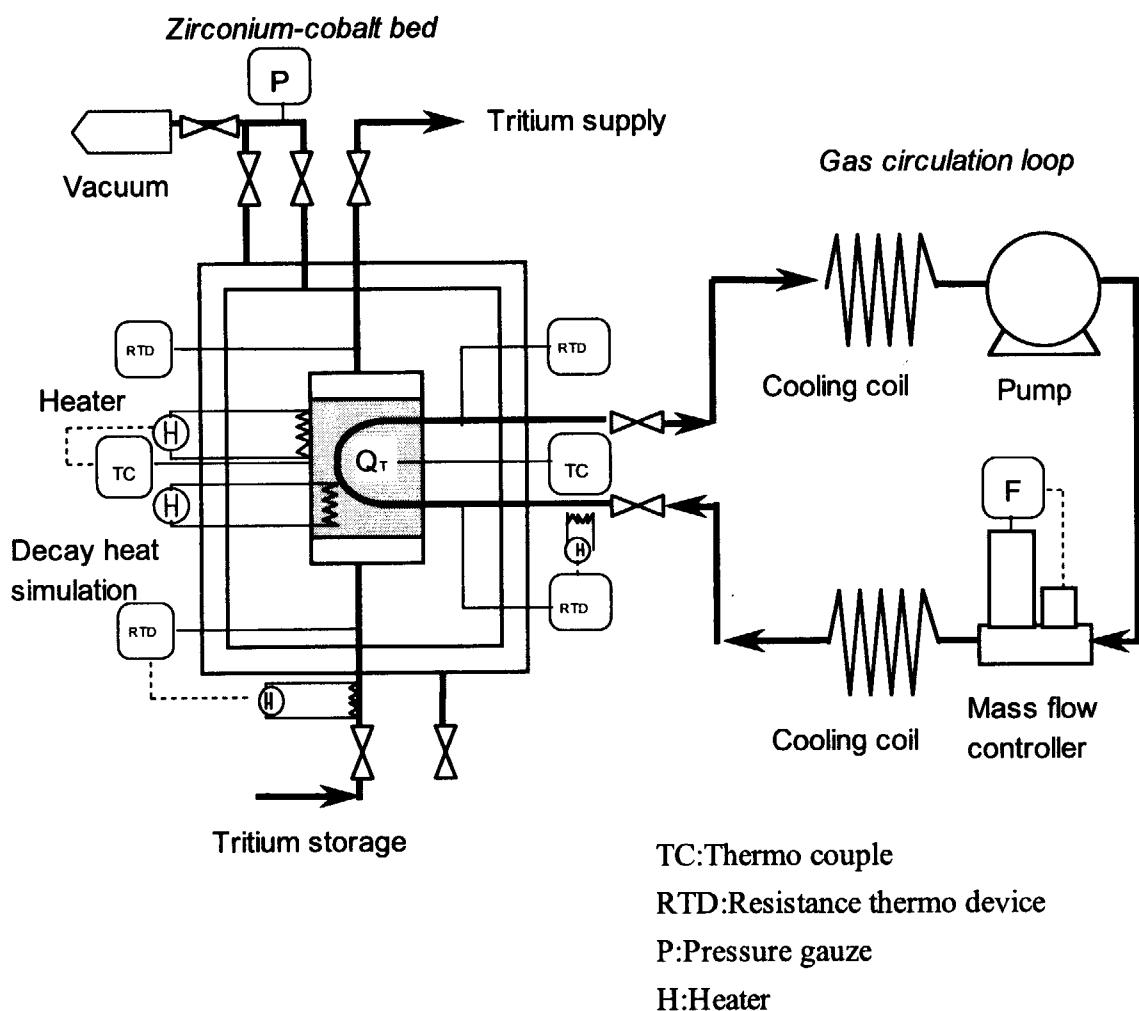


Fig. 1 Conceptual design of the tritium storage bed with gas flowing calorimetry

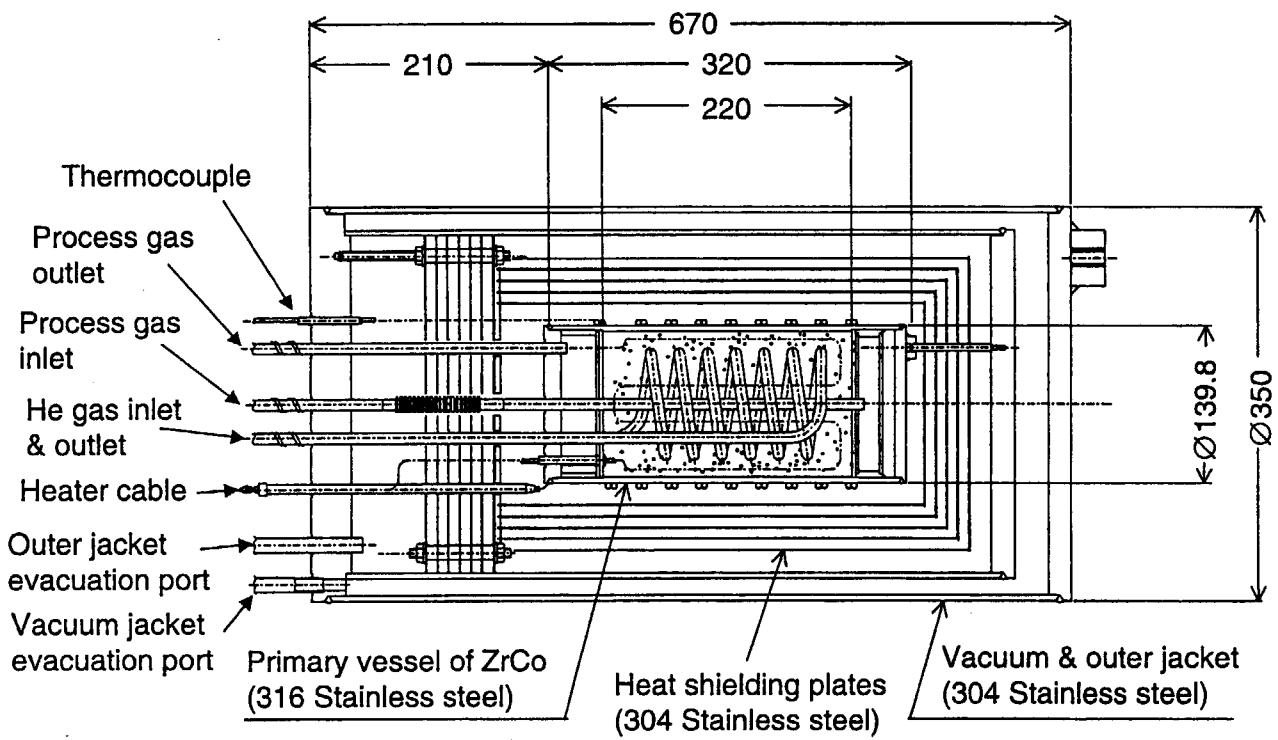
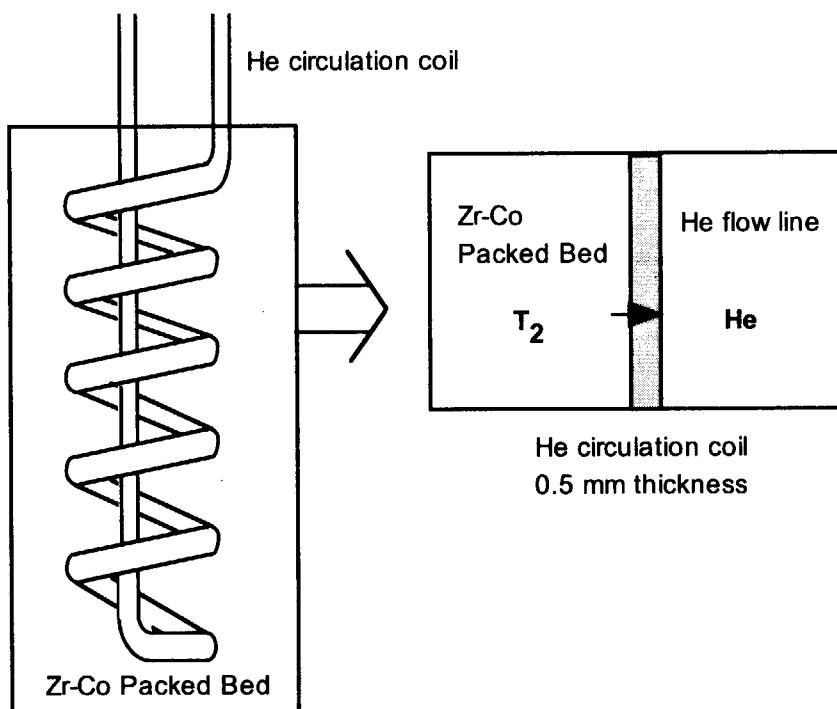
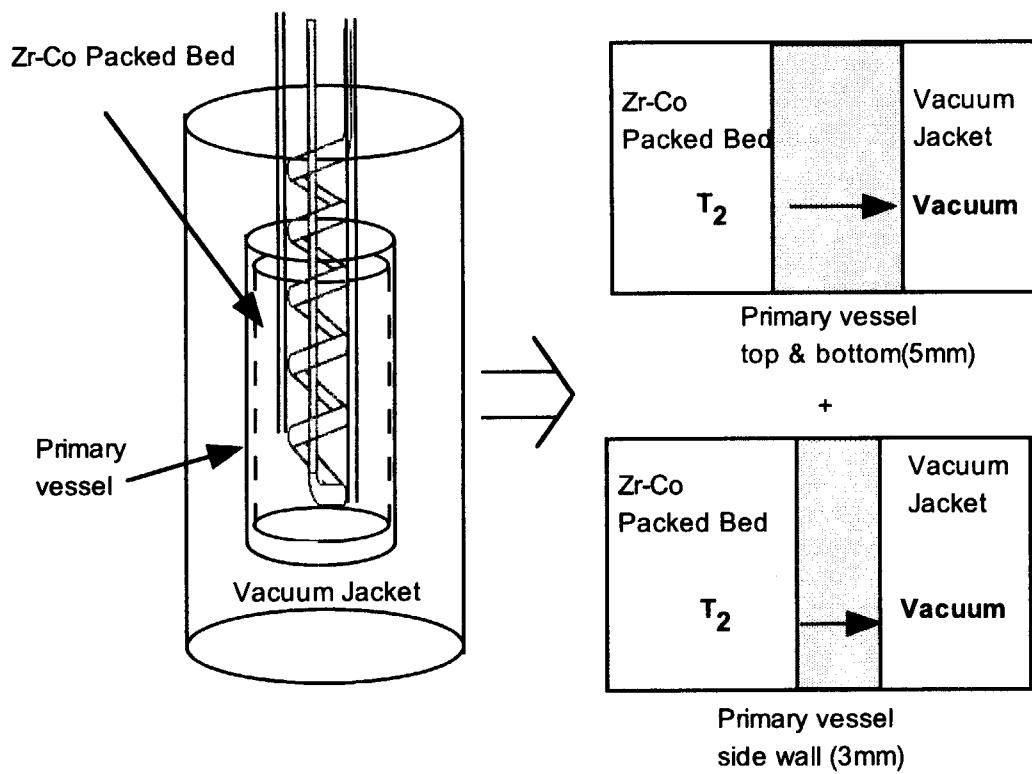


Fig. 2 Detail design of the ITER tritium storage bed with gas flowing calorimetry



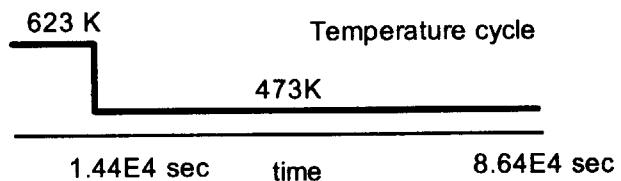
(a) Analytical geometry of T permeation to He circulation coil (He)



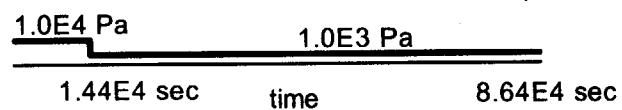
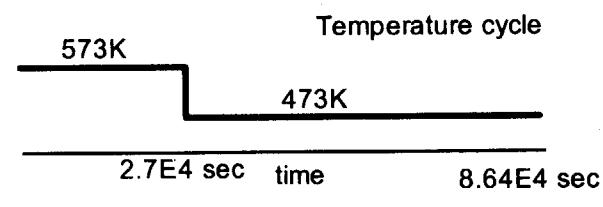
(b) Analytical geometry T permeation to Vacuum Jacket (VJ)

Fig. 3 The Geometry of tritium permeation calculation.

(a) Geometry of the He loop, (b) Geometry of the vacuum jacket

Normal Mode

Pressure cycle

**RH Mode**

Pressure cycle

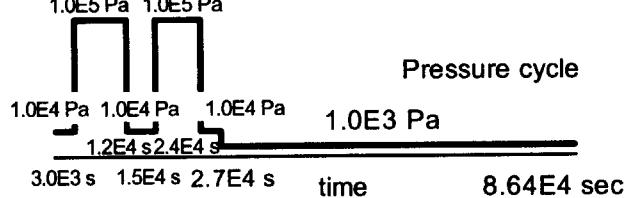
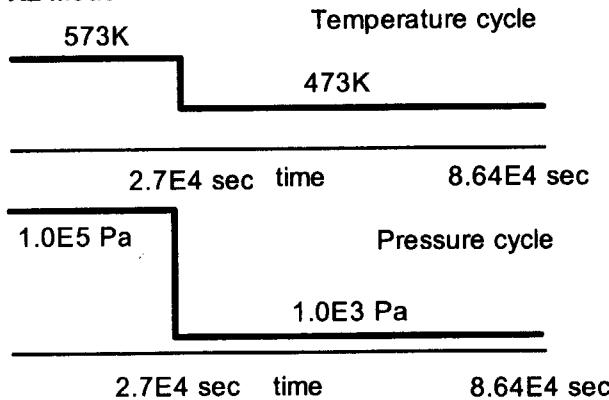
**RL Mode**

Fig. 4 Operation scenario of bed temperature and tritium pressure
in the bed for N, RH, and RL-mode

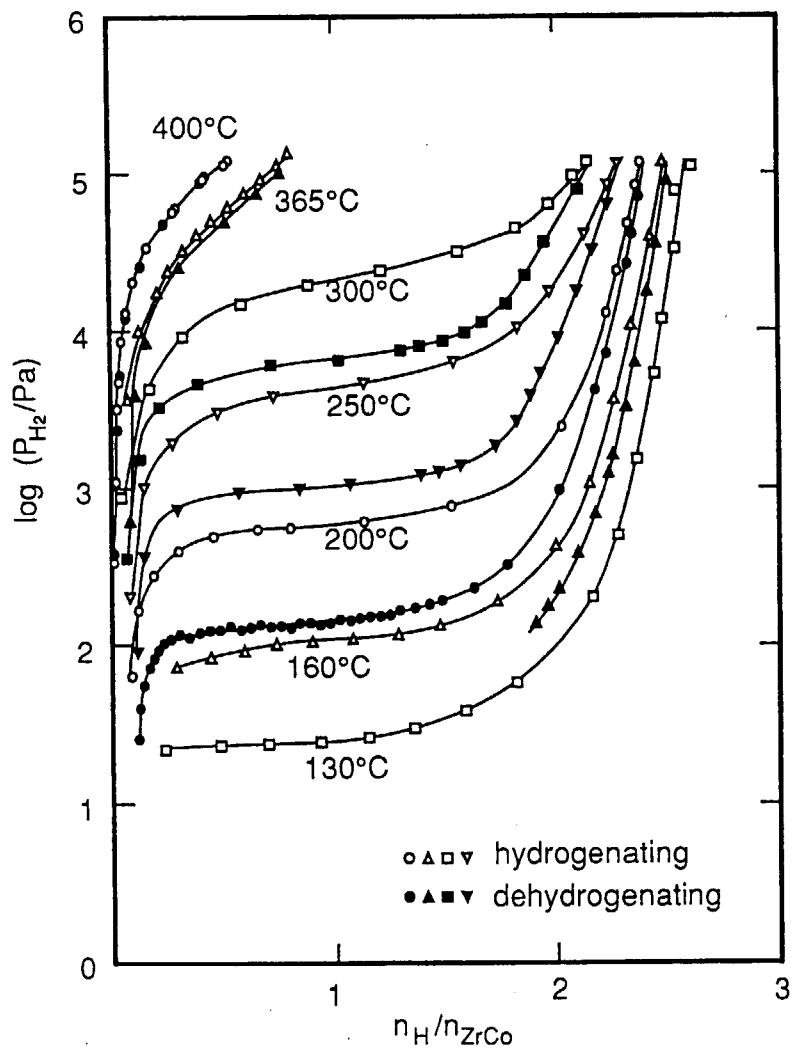


Fig. 5 Equilibrium pressure of the hydrogen - Zr-Co system

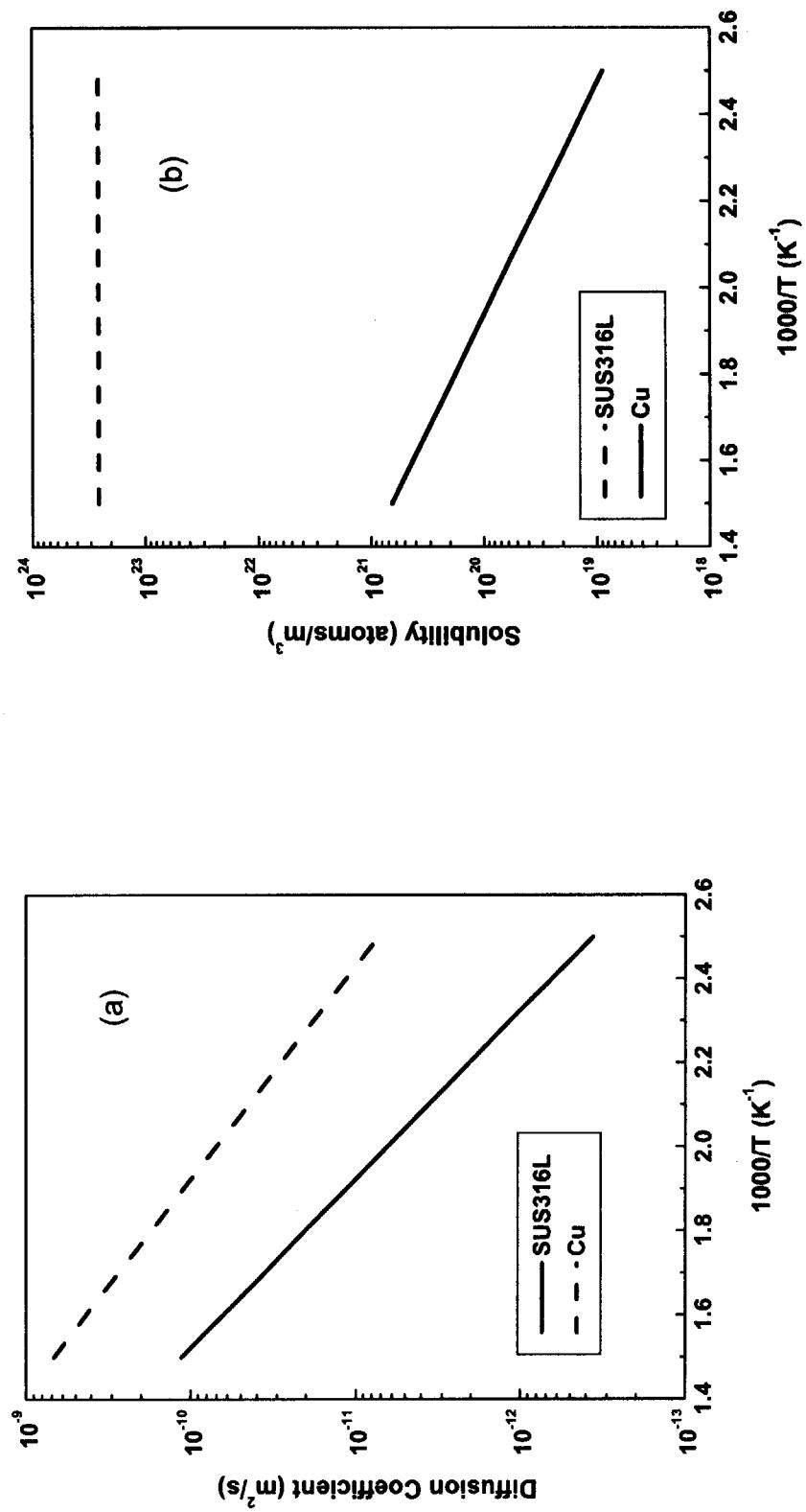


Fig. 6 Temperature dependence of the tritium transport properties of the materials used in the calculation.
 (a) Diffusion coefficient, (b) Solubility

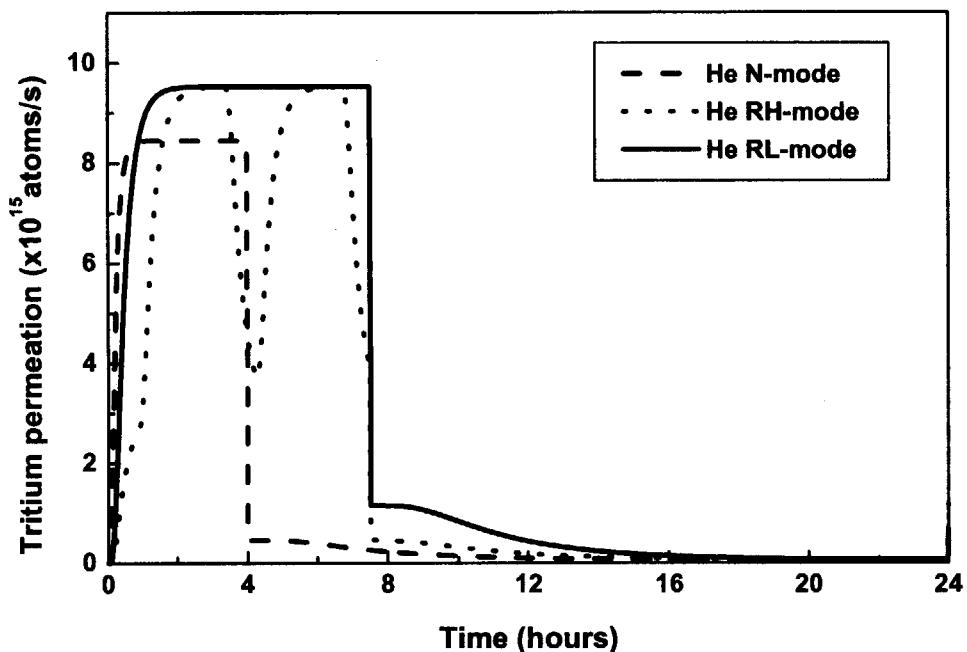


Fig. 7 Time sequence of tritium permeation rate through
the He circulation tube (He loop)
(Results of one cycle)

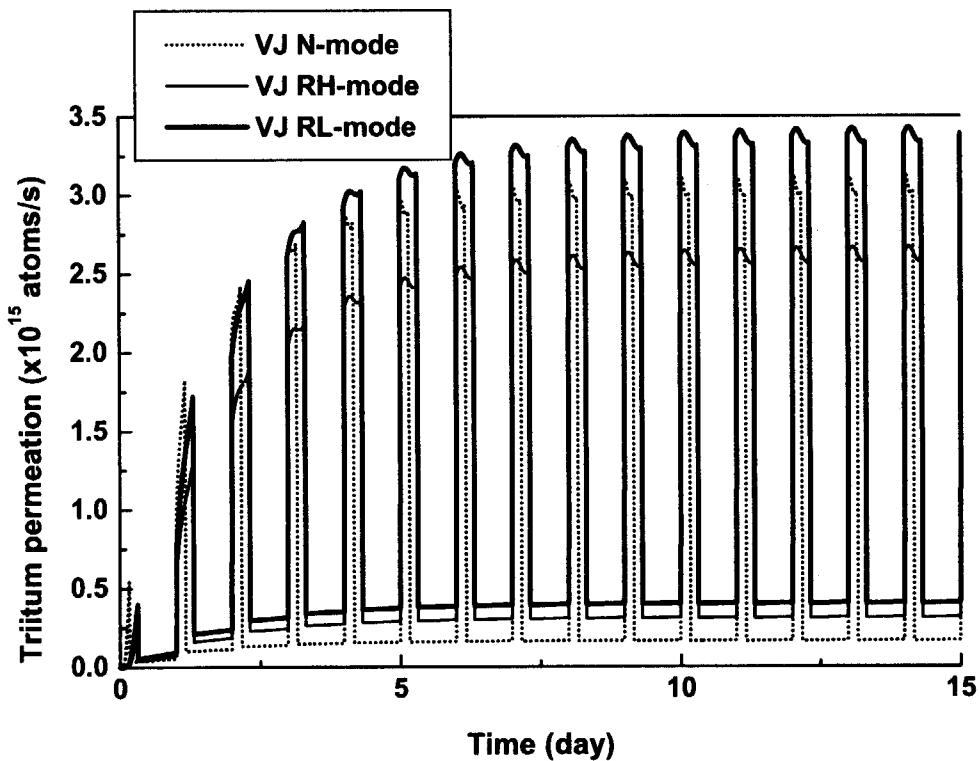


Fig. 8 Time sequence of tritium permeation rate through the wall of the Zr-Co packed bed to the vacuum jacket.
(Results of 15 cycles)

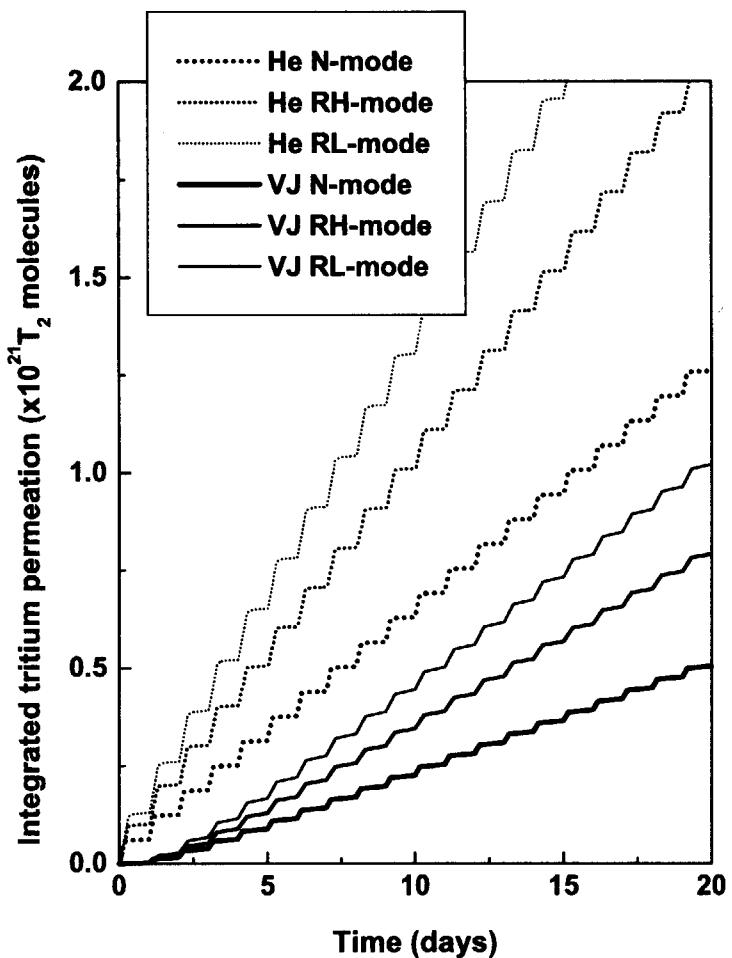


Fig. 9 Integrated tritium permeation amount at the He loop
and the vacuum jacket for each operation mode

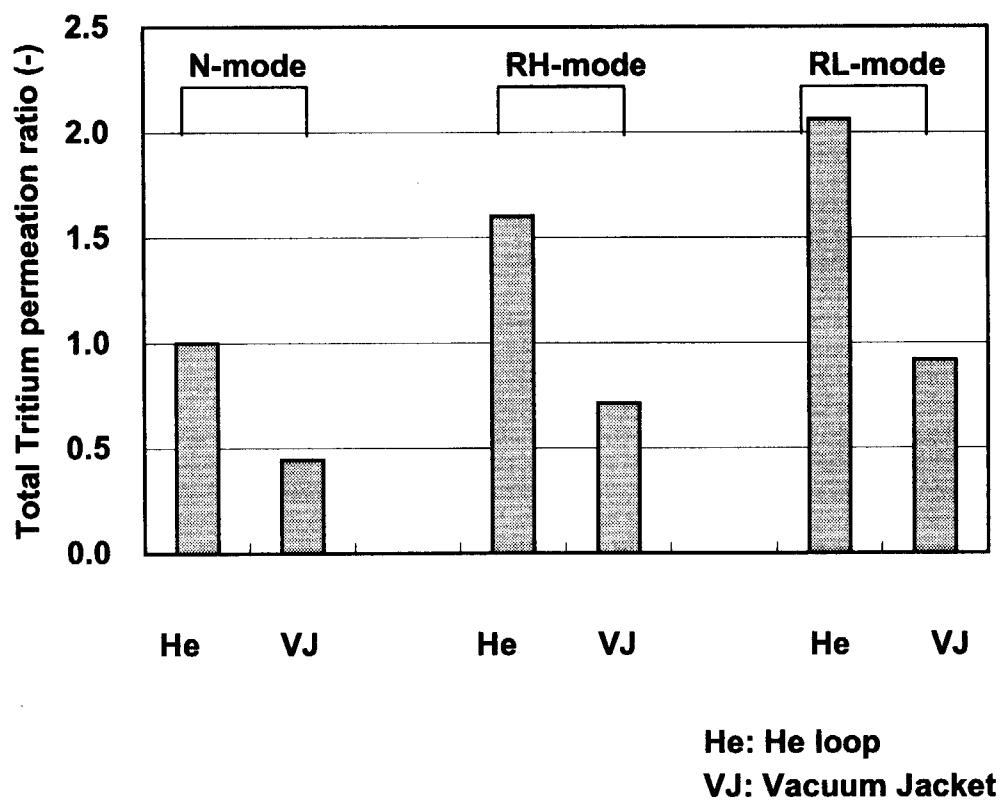


Fig. 10 Comparison of tritium permeation amount between the He loop and the vacuum jacket.

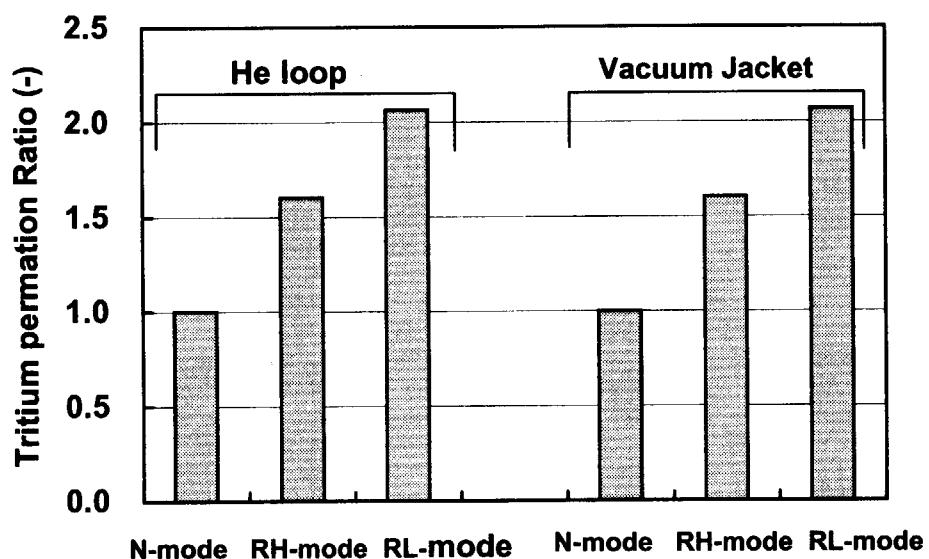


Fig. 11 The effect of the operation mode on tritium permeation rate at the He loop and the vacuum jacket.

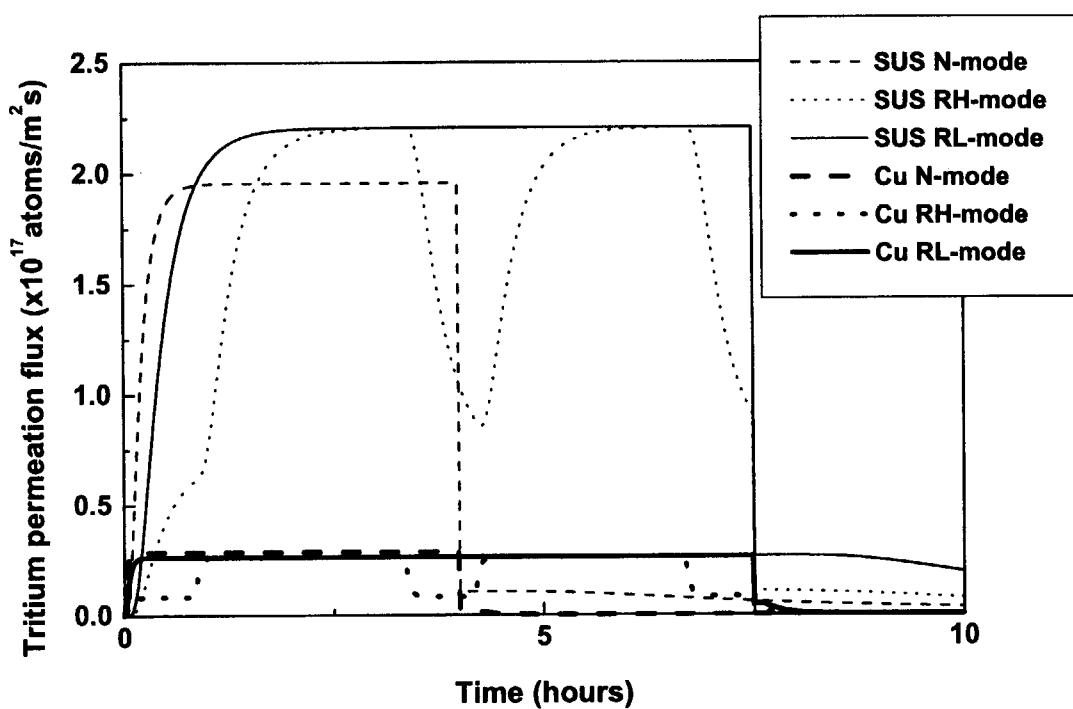


Fig. 12 Time sequences of tritium permeation rate through the copper tube for He loop.
The results of 316L SS is also shown for comparison.

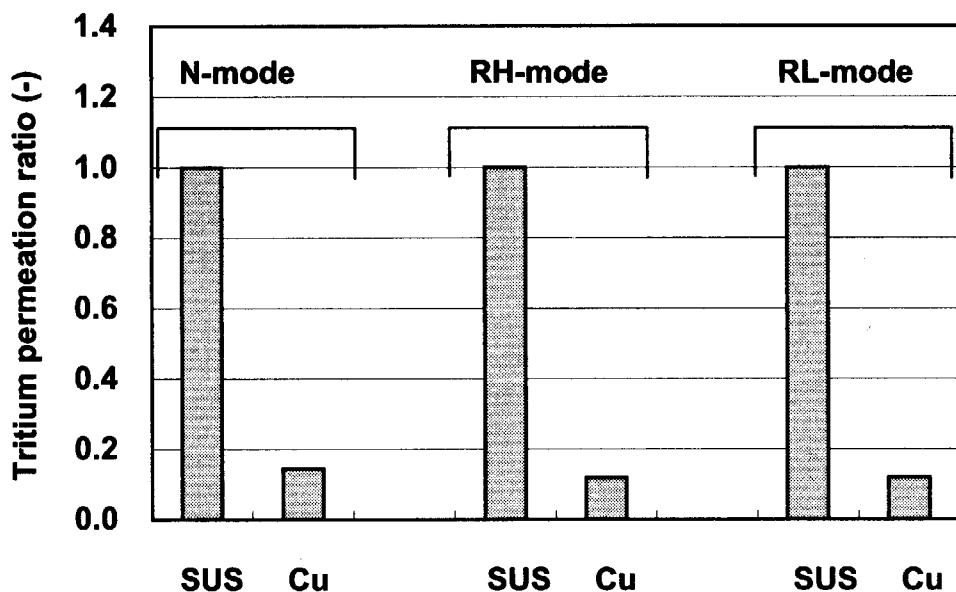


Fig. 13 Difference of tritium permeation rate between the stainless piping He loop and the copper piping He loop.

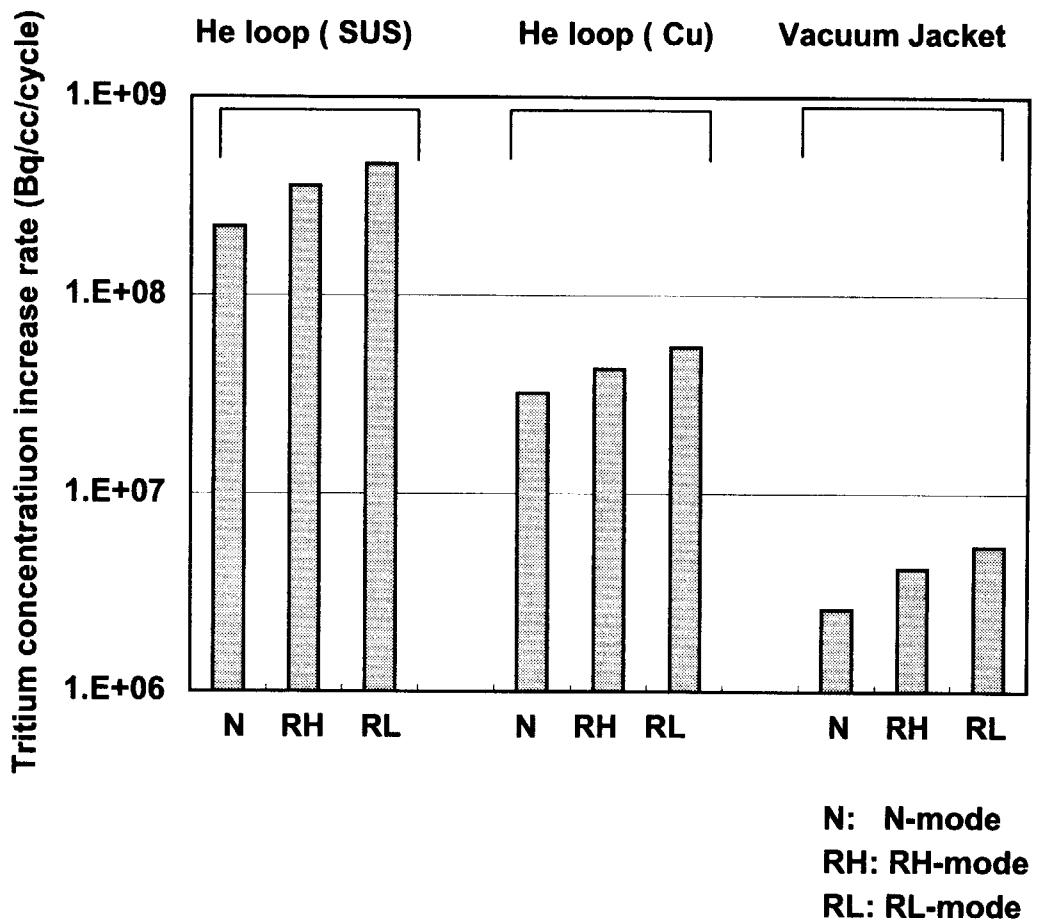


Fig. 14 Comparison of tritium concentration increase rate in every cycle at the He loop and the vacuum jacket for each operation mode.

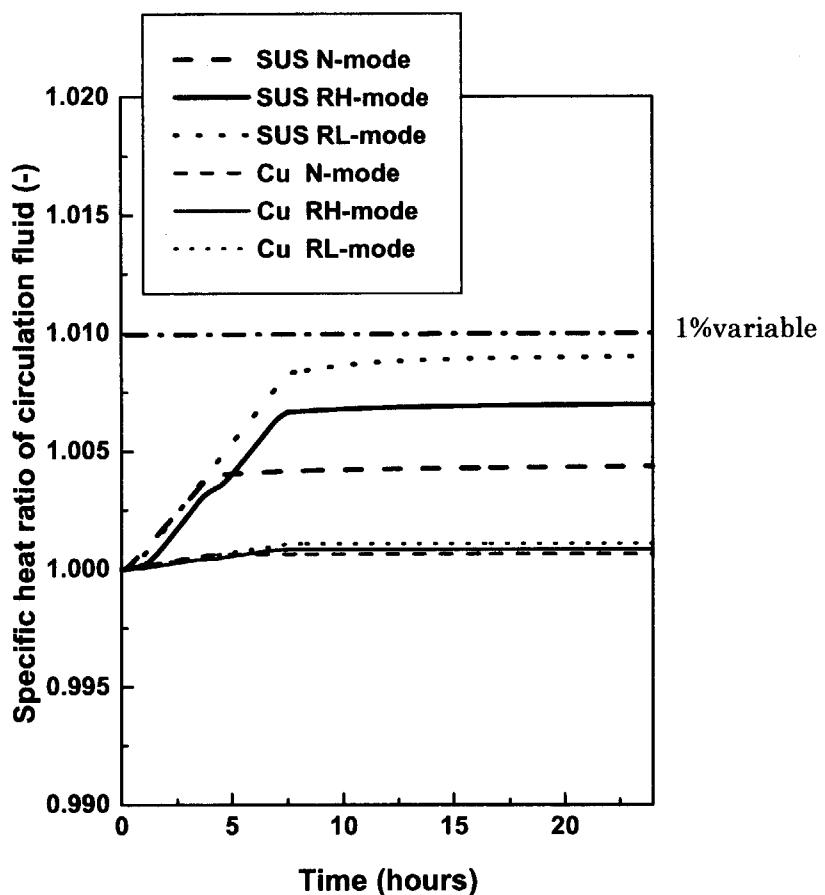


Fig. 15 Change of specific heat of purge gas flowing in the helium loop induced by tritium permeation during one cycle operation.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここで省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m

1 b=100fm²=10⁻²⁸m²

1 bar=0.1MPa=10⁵Pa

1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²

1 Ci=3.7×10¹⁰Bq

1 R=2.58×10⁻⁴C/kg

1 rad=1cGy=10⁻²Gy

1 rem=1cSv=10⁻²Sv

換 算 表

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
粘度	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1
	1Pa·s(N·s/m ²)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))				
	動粘度 1m ² /s=10 ⁴ St(ストークス)(cm ² /s)				

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal= 4.18605J (計量法)	
								= 4.184J (熱化学)	= 4.1855J (15°C)
1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸			
9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹			
3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵			
4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹			
1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹			
1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸			
1.60218×10 ¹⁰	1.63377×10 ²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ¹⁹	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270×10 ⁻¹¹		1	100		1	3876		1	100
	3.7×10 ¹⁰	1		0.01	1		2.58×10 ⁻⁴	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

ITER用トリチウム貯蔵ベッドからのトリチウム透過率評価