JAEA-Research 2008-123

K PS P3



F82H 鋼のトリチウム透過挙動

ートリチウム水蒸気の増殖材パージガスから冷却材への透過一

Permeation Behavior of Tritium through F82H Stainless Steel - Permeation from Tritiated Water Vapor in Purge Gas for Breeder to Coolant -

> 小栁津 誠 林 巧 山西 敏彦 Makoto OYAIZU, Takumi HAYASHI and Toshihiko YAMANISHI

> > 核融合研究開発部門 トリチウム工学研究グループ

Tritium Technology Group Fusion Research and Development Directorate

March 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

F82H 鋼のトリチウム透過挙動 ―トリチウム水蒸気の増殖材パージガスから冷却材への透過―

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 核融合エネルギー工学研究開発ユニット 小栁津 誠※、林 巧、山西 敏彦

(2008年12月19日 受理)

核融合炉開発において、トリチウム大量に扱うことから、核融合炉各コンポーネントにおける トリチウムの挙動を理解することは安全性の観点から非常に重要である。特にブランケットは高 温であり、高エネルギー高フラックスの中性子にさらされながらトリチウムを生成するコンポー ネントであり、核融合炉の中でも特にトリチウムの挙動を理解する必要のあるコンポーネントで ある。この中でも、固体トリチウム増殖材を用いたブランケットにおいては、トリチウム増殖材 中に生成するトリチウムを回収するためのパージガスから、核融合により発生したエネルギーを 熱エネルギーとして回収するための冷却材への透過挙動の解明は特に重要となる。

以上の観点から、これまでに、ブランケットの構造材として有力視されている、低放射化フェ ライト鋼である F82H 鋼中のトリチウム透過挙動を解明するための研究がなされてきているが、 そのほとんどは、純水素同位体ガスの真空への透過であった。しかしながら、ブランケットにお いては、トリチウムの供給源であるパージガスが純トリチウムであることはありえず、また、透 過側は冷却材であることから、真空であることもまたありえない。特に、増殖材パージガス中に 放出されるトリチウムの化学形は主に水である可能性が高いことが報告されていることから、分 子状の水素同位体の透過挙動とは異なった透過挙動を示すことが予想される。そのため、本研究 は、ヘリウム冷却固体トリチウム増殖ブランケット中のトリチウム増殖材パージガス中から F82H 鋼を通して冷却材であるヘリウムへの透過挙動の解明を目的とした。

トリチウム増殖材パージガス中からヘリウムへの透過を模擬するため、本実験では、トリチウム供給側はヘリウムで希釈したトリチウム水蒸気を用い、透過側はヘリウムによりパージし、573 Kから 873 Kの領域で等温透過実験を行うと共に、773 Kにおいてトリチウム水蒸気分圧を変化させ、等温透過実験を行った。

トリチウム水蒸気透過実験の結果、トリチウムの透過は拡散律速の様相を示した。また、算出 された拡散と透過の活性化エネルギーは、供給側に純水素同位体を、透過側を真空にして行われ た過去の報告とほぼ一致していた一方、それぞれの頻度因子は異なっていた。特に、透過係数に 関しては3桁程度の低下がみられた。以上より、F82H鋼バルク内におけるトリチウムの挙動は 過去の報告と同様であるが、表面の過程が異なることが示唆された。これはトリチウム供給側の 表面がトリチウム水蒸気により酸化され、トリチウム透過防止膜として機能しうる酸化膜を形成 した可能性や、分子状水素と水とでは表面における反応、すなわち、吸脱着、解離、再結合、そ して解離した水素の溶解と言った素過程が異なることが影響を及ぼした可能性が考えられた。ま た、透過したトリチウムの化学状態は水と分子状とが混在していたことから、透過側表面におい ても表面の素過程が異なっており、トリチウム透過挙動に影響を及ぼした可能性もまた示唆され た。

また、本研究から、ブランケット中のトリチウム増殖材パージガスから冷却材であるヘリウム へのトリチウム透過速度は、供給側に純分子状水素同位体、透過側を真空として行われた実験結 果から見積もられたトリチウム透過速度より低い可能性が示唆されたと共に、F82H鋼がトリチ ウム透過防止膜として機能しうる酸化膜を自己形成する可能性が見出された。

Permeation Behavior of Tritium through F82H Stainless Steel —Permeation from Tritiated Water Vapor in Purge Gas for Breeder to Coolant—

Makoto OYAIZUX, Takumi HAYASHI and Toshihiko YAMANISHI

Division of Fusion Energy Technology, Fusion Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 19, 2008)

For the safety issue of fusion reactor, it is important to understand the tritium behavior in each component of a fusion reactor, especially in the blanket system, where tritium will be bred and processed under higher temperature and higher flux of neutrons with higher energy than ever. In the blanket which is designed to apply solid tritium breeding materials, it is one of the most important issue to reveal the tritium permeation behavior from purge gas for recover the bred tritium in solid tritium breeding materials to coolant of which aim is recover the heat energy generated by nuclear fusion.

From these viewpoints, some studies have been performed to reveal the tritium permeation behavior in F82H, one of low-activation ferritic-martensitic steels. These studies, however, were performed with the use of pure hydrogen isotope gas as source of permeant and vacuum for outlet side (named [pure-hydrogenisotope-gas/vacuum] experiments), although the purge gas could not consist of only tritium gas or hydrogen isotope gas and outlet side is not vacuum but coolant. Moreover, it is reported that the chemical states of tritium released from solid tritium breeding materials would not be hydrogen molecule but water. From these viewpoints, it is predicted that the tritium permeation behavior in F82H in blanket is different from that in reported experimental condition. Therefore in the present study, it is subjected to reveal the tritium permeation from feed gas composed from tritiated water vapor diluted by helium to purge gas composed from helium, as a simulation of helium cooled solid breeder (HCSB) blanket.

Tritium permeation experiments were performed with use of tritiated water vapor diluted by helium as inlet side source and helium as outlet side purge gas. In the present study, two series of experiments were performed: (1) temperature dependence experiment, of which temperature range is from 573 to 873 K, and (2) tritiated water vapor partial pressure dependence experiment.

As the results of experiments, tritium permeation looked limited by diffusion, and the activation energies of diffusion and permeation were comparable to reference data which had been estimated from [pure-hydrogen-isotope-gas/vacuum] experiments, while the pre-exponential factors of them were clearly different. Especially, the permeability and the pre-exponential factor of permeation estimated from the present study were almost three magnitudes smaller than those reference data. Therefore, it is implied that the surface reactions, such as adsorption, desorption, dissociation, recombination and dissolution, would be different, while the tritium behavior in the bulk is comparable, and the difference in surface reaction on inlet side between the present study and reference could result from the deference of permeants of water vapor and hydrogen gas. It is also implied that the existence of water could result in the formation of oxide layer which can work as tritium permeation barrier. On the other hand, there is a possibility that the surface reaction could be different on the outlet surface as well resulting in having an effect on tritium permeation behavior, because the chemical states of permeated tritium were the mixture of water vapor and hydrogen molecule.

For the blanket system in fusion reactor, it was suggested from the present study that F82H ferritic steel could form the oxide layer which can work as tritium permeation barrier in certain condition and/or with pretreatment.

Keywords: Tritium Safety, Helium Cooled Solid Breeder Blanket, F82H, Tritium Permeation

ℜ Post-Doctoral Fellow

目 次

1.	序論	1
	1.1 核融合炉トリチウム増殖ブランケット開発の現状	1
	1.2 トリチウム増殖ブランケット構造材開発の現状	1
	1.3 トリチウム増殖ブランケット中に生成したトリチウムの挙動	2
2.	実験	3
	2.1 実験装置	3
	2.1.1 供給側	3
	2.1.2 透過側	3
	2.2 トリチウム透過実験	3
	2.2.1 温度依存性	3
	2.2.2 トリチウム水蒸気分圧依存性	4
3.	理論	5
	3.1 拡散係数	5
	3.2 透過係数	5
4.	結果	6
	4.1 トリチウム水蒸気分圧依存性実験結果	6
	4.2 温度依存性実験結果	6
	4.2.1 拡散係数	6
	4.2.2 透過係数	6
	4.2.3 透過したトリチウムの化学形	6
5.	考察	7
6.	結論	9
謝	辞	9
参	考文献	10

Contents

1.	Introduction	1
	1.1 Development of Blanket System of Fusion Reactor	1
	1.2 Development of Structural Material for Tritium Breeding Blanket	1
	1.3 Behavior of Tritium Bred in Tritium Breeding Blanket	2
2.	Experimental	3
	2.1 Apparatus ······	3
	2.1.1 Inlet Side	3
	2.1.2 Outlet Side	3
	2.2 Tritium Permeation Experiment	3
	2.2.1 Temperature Dependence	3
	2.2.2 Dependence of Tritiated Water Partial Pressure	4
3.	Theory	5
	3.1 Diffusivity	5
	3.2 Permeability	5
4.	Results	6
	4.1 Dependence of Tritiated Water Partial Pressure	6
	4.2Temperature Dependence	6
	4.2.1 Diffusivity	6
	4.2.2 Permeability	6
	4.2.3 Chemical States of Permeated Tritium	6
5.	Discussion	7
6.	Summary	9
Acl	knowledgement	9
Ref	ference 1	10

図リスト

Fig.	1	トリチウム透過試験装置概略図
Fig.	2	トリチウム透過試験装置透過部位概略図 (Fig.2破線内)
Fig.	3	供給側トリチウム分圧依存性実験結果
Fig.	4	供給側トリチウム分圧依存性実験時における透過トリチウムの化学形ごとの
		透過係数
Fig.	5	573 K におけるトリチウム透過実験結果および式(3)を用いたフィッティング 15
Fig.	6	673 K におけるトリチウム透過実験結果および式(3)を用いたフィッティング 16
Fig.	7	773 K におけるトリチウム透過実験結果および式(3)を用いたフィッティング 17
Fig.	8	873 K におけるトリチウム透過実験結果および式(3)を用いたフィッティング 18
Fig.	9	F82H鋼中におけるトリチウムの拡散係数に関するアレニウスプロット19
Fig.	10	F82H 鋼のトリチウムの透過係数に関するアレニウスプロット
Fig.	11	温度依存性実験時における透過トリチウムの化学形ごとの透過係数
Fig.	12	温度依存性実験時における透過トリチウムの化学組成比の変化
Fig.	13	F82H 鋼中のトリチウムの拡散係数に関するアレニウスプロットの文献値との
		比較
Fig.	14	F82H鋼中のトリチウムの透過係数に関するアレニウスプロットの文献値との
		比較

表リスト

Table 1	F82H鋼に関する本研究と文献における水素同位体透過実験条件および拡散係数と	
	透過係数にかかる前指数因子と活性化エネルギー	25

List of Figures

Fig. 1	Schematic diagram of tritium release experimental apparatus
Fig. 2	Schematic diagram of permeation sample unit for tritium release experimental
e	apparatus (inner figure of broken line box in Fig. 1)
Fig. 3	Experimental results of tritiated water vapor partial pressure dependence
Fig. 4	Permeation rate of each chemical form of tritium during tritiated water vapor partial
	pressure dependence experiment
Fig. 5	A result of tritium release experiment performed at 573 K and its fitting using Eq. (3) 15
Fig. 6	A result of tritium release experiment performed at 673 K and its fitting using Eq. (3) 16
Fig. 7	A result of tritium release experiment performed at 773 K and its fitting using Eq. (3) 17
Fig. 8	A result of tritium release experiment performed at 873 K and its fitting using Eq. (3) 18
Fig. 9	Arrhenius plot for diffusivity of tritium in F82H 19
Fig. 10	Arrhenius plot for tritium permeability in F82H
Fig. 11	Permeation rate of each chemical form of tritium during temperature dependence
	Experiment
Fig. 12	Chemical composition ratio during temperature dependence experiment
Fig. 13	Comparison of the Arrhenius plots about tritium diffusion coefficients for the present result
	and previous reports
Fig. 14	Comparison of the Arrhenius plots about tritium permeation coefficients for the present result
	and previous reports

List of Table

 Table 1
 Activation energies for diffusivity and permeability of hydrogen isotopes in F82H
 25

1. 序論

1.1 核融合炉トリチウム増殖ブランケット開発の現状¹⁻³⁾

現在、核融合炉の研究・開発が進められている。特に、その核融合反応の平均反応率から、重 水素(D)とトリチウム(T)を燃料とした DT 核融合反応が最も有望視されており、その実現に向けて、 現在までに様々な研究がなされてきた。そして、現在までの研究の集大成とも言える国際熱核融 合実験炉(ITER)の建設に向けた活動が ITER 機構により進められている。ITER は現在最も注目 される核融合装置であり、その目的はそれに続く DEMO 炉、商業炉に向けた核融合エネルギーの 利用に関する科学的・技術的実証である。この ITER におけるブランケットの役割は主に中性子 の遮蔽であるが、DEMO 炉以降の核融合炉では、核融合反応により生じる中性子の運動エネルギ ーを熱エネルギーとして回収すること、および核融合反応の燃料となるトリチウムを生産するこ とが追加される。ここで、トリチウム生産を担うトリチウム増殖材料は、核融合反応により発生 する中性子を利用した核反応、⁶Li(n,α)T や⁷Li(n,n'α)T によりトリチウムを生成させるため、リチ ウムを含んでいる必要があり、候補材として、酸化リチウム、チタン酸リチウム等の酸化物から なる固体トリチウム増殖材、リチウム鉛(Li17Pb83)等の液体金属、そしてフッ化リチウムベリリウ ム(Flibe)等の溶融塩等が挙げられる。また、高速中性子の運動エネルギーや核反応(主に⁶Li(n,α)T) により発生したエネルギーはブランケット内で熱エネルギーに変換される。その熱エネルギーを 回収するための冷却材としては、水やヘリウム、そしてトリチウム増殖材をかねた上記液体金属 や溶融塩等が提案されており、研究が進められている。現時点では、データの蓄積量や扱いの容 易さから、固体トリチウム増殖材が有力であると考えられており、その場合の冷却材はヘリウム または水となり、その増殖材と冷却方式からそれぞれ HCSB (Helium Cooled Solid Breeder)および WCSB (Water Cooled Solid Breeder)ブランケットと略される。固体トリチウム増殖材中に生成した トリチウムは、He ガスをパージさせ、回収することが考えられており、同位体交換反応により生 成したトリチウムを速やかに回収できるよう、パージガス中に 1000ppm 程度の H₂や水蒸気を添 加することが検討されている。また、核融合炉自身で消費するトリチウムを賄うためには、トリ チウム増殖比(生成するトリチウム量 / 核融合反応その他により消費されるトリチウム量)を1以 上にする必要があり、核融合炉材への中性子の吸収等を考慮に入れると、中性子増倍材が必要と なる。リチウム鉛や Flibe においてはその構成元素である鉛やベリリウムが中性子増倍材として働 くが、固体トリチウム増殖材の場合、別途ベリリウムを中性子増倍材としてブランケット内に組 み込むことが考えられている。

1.2 トリチウム増殖ブランケット構造材開発の現状¹⁻³⁾

前節に示したブランケットの機能材料を保持し、冷却材やパージガスの流路を組み込んだ状態 で真空容器内の真空を維持するための構造材料を選定ないし開発する必要がある。ここで、ITER の構造材料としては、核分裂炉等における使用実績や材料の工業材料としての成熟度からオース テナイト鋼が選ばれており、遮蔽ブランケット材料としても考えられているが、DEMO 炉に向け たトリチウム増殖ブランケットにおいては、更なる耐熱特性と低放射化特性を持つ構造材が要求 される。特に低放射化特性に関しては、高エネルギー中性子が高フラックスで入射するため、放射化により比較的長寿命(T_{0.5}>10年)の放射性核種を生成する Ni(オーステナイト鋼中に 10%程度 含有)や Mo を含むことは好ましく無く、Fe, Ti, Cr, V, Si などの比較的短寿命(T_{0.5}<10年)の放射性核 種を生成する元素のみから構成される材料の開発が望まれてきており、Mo や Ni を W や V など に置換した低放射化フェライト鋼の開発が進められてきた。そして現在、上記観点から日本原子 力研究所(現日本原子力研究開発機構)と NKK(現 JFE スチール)により共同開発された低放射 化フェライト鋼である F82H 鋼がブランケット構造を保持するための有力な候補材として考えら れている。

1.3 トリチウム増殖ブランケット中に生成したトリチウムの挙動

上述のように、将来開発されるブランケットにおいては、DT 核融合炉運転中では常に一定量以 上のトリチウムが生成し、連続的に処理されることになる。例えば、現行している火力や原子力 発電の出力と同程度の出力である1GW の電気エネルギーを得る運転を行った場合、ブランケッ トの種類や設計にもよるが、およそ 10 mg/s の速度でトリチウムが生成する計算になる。生成し たトリチウムはパージガスにより回収され、処理されることになるのだが、パージガス中から構 造材を通した冷却材中へのトリチウムの透過が問題となる。したがって、その透過挙動を明らか にすることは、安全性の確立、燃料であるトリチウムの損失の低減、経済性や経済効率の評価等 の観点から非常に重要である。そのため、F82H鋼におけるトリチウムの透過挙動を解明する必要 があり、これまでに様々な研究が報告されてきたが、その多くは、Q2(Q: H, D, T)ガスの構造材料 を通した真空中への透過に関する研究であった³⁻¹⁰⁾。しかしながら、トリチウム増殖材に固体ト リチウム増殖材を用いているブランケットの場合、パージガス中のトリチウムの冷却材中への透 過であり、上記報告中の透過とは異なった挙動を示すことが考えられる。現在考えられている固 体増殖水冷却ブランケット(WCSB)や固体増殖ヘリウム冷却ブランケット(HCSB)において、固体 トリチウム増殖材から放出されるトリチウムは、H2を含有するパージガスを用いても主にトリチ ウム水状である^{12,13}と報告されている一方、条件次第では70%程度 HT ガスとして回収できると の報告もある¹⁴⁾が、少なくとも、トリチウム水蒸気が完全にない、または無視できるほど少ない ということは考えられない。一方、冷却材に関して、水冷却は言うに及ばず、ヘリウム冷却の場 合においても、冷却材から完全に水を取り除くことはほぼ不可能である。また、エネルギー変換 効率の観点から、HCSB ブランケットは WCSB ブランケットより高い温度下での使用が考えられ ていることから、HCSB ブランケットより WCSB ブランケットのほうが、より多量のトリチウム が増殖材パージガスから F82H 鋼を透過し、冷却材中に混入することが予想できる。そのため、 本研究では供給側に He で希釈したトリチウム水蒸気を含むガスを循環させ、透過側に He ガスを パージさせることで、HCSB ブランケット中の固体トリチウム増殖材パージガス中から冷却 He ガ ス中へのトリチウム透過挙動の解明を目的とした研究を行った。

2. 実験

2.1 実験装置

本実験において用いた実験装置の概略図を Fig. 1 に、Fig. 1 の破線で囲まれた、トリチウム透過 部位の概略図を Fig. 2 にそれぞれ示す。本装置は、試料を挟んでトリチウムを含むガスを循環さ せる「供給側」と、透過してきたトリチウムをパージし、トリチウムの測定系である電離箱、バ ブラーへ導入する「透過側」に分かれている。

2.1.1 供給側

供給側は、トリチウム分取容器、圧力計、バッファタンク、モレキュラーシーブ乾燥塔、電離 箱(IC1)、マスフローコントローラ、循環ポンプから構成されており、試料部位を通る循環ライン を形成している。ここで、バッファタンクはトリチウム水蒸気濃度の急激な変化を抑えるために 循環ライン内に設置されており、トリチウム濃度の変化は常時電離箱により測定される。この装 置内をヘリウムで希釈したトリチウム水蒸気を循環させることで、HCSB ブランケットのトリチ ウム増殖材パージガスを模擬した。

また、トリチウム水蒸気の濃度を下げるためにモレキュラーシーブ乾燥塔が設置されている。

2.1.2 透過側

透過したトリチウムの化学形は、主に水素分子状(HT, T₂)と水(HTO, T₂O)であると考えられたた め、電離箱内や配管内におけるメモリー効果を防止するための水蒸気供給ライン(B1 を通るライ ン)、全透過トリチウム量を測定する電離箱(IC2)、水状のトリチウムを捕集するバブラー(B2)、分 子状トリチウムの濃度を測定する電離箱(IC3)、分子状トリチウムを水状に酸化させる酸化触媒(ホ プカライト)塔、そして分子状で放出されたトリチウムを捕集するバブラー(B3)から構成されてお り、ヘリウムガスをパージガスとして流すことにより、HCSB ブランケットの冷却材側を模擬し た。

2.2 トリチウム透過実験

本研究におけるトリチウム透過実験は主に温度依存性実験とトリチウム水蒸気分圧依存性実験 から構成される。温度依存性実験は、各温度におけるトリチウムの透過係数や拡散係数を求め、 そこから透過や拡散の活性化エネルギーを求めることを目的としている。また、分圧依存性実験 は、トリチウム水蒸気の透過が文献にある水素同様、Sieverts 則に従うのかどうかを調べ、温度依 存性実験における透過係数を導出することを目的としている。

2.2.1 温度依存性

本研究における試料として、試料サイズ、直径 19.5 mm×厚さ 3.0 mmの低放射化フェライト鋼 である F82H 鋼(旧 鋼管計測株式会社、現 JFE テクノリサーチ株式会社より購入)を用いた。HCSB ブランケットにおける冷却材の温度領域が 573~773 K 程度と考えられており¹⁾、トリチウム増殖

材およびそのパージガスの温度はそれよりも幾分高いと考えられるため、透過実験の温度条件は 573~873 Kの領域から任意の点を選んだ。Fig. 2 に示す位置に試料を固定し、供給側と透過側を 十分真空排気した後、供給側にトリチウム水蒸気を 20 mCi 程度導入し、He ガスを用いて全圧が 約 9×10⁴ Pa 程度になるように希釈した後、循環ポンプにより供給側系内のガスを 50 sccm (standard cubic centimeter per minute)で循環させ、トリチウム濃度を均一化した。この時のトリチウム濃度は およそ 2 µCi/cc(T₂O とした場合で約 0.1 Pa)程度であった。また、透過側に He ガスを導入し、20 sccm で透過側をパージした。そして石英管内を約 7 slm (standard liter per minute)でパージしながら試料 部位の温度を 573, 673, 773 そして 873 K の各温度に固定した後、供給側試料部位にトリチウムを 含む He ガスを導入し上記各温度における透過実験を行った。透過したトリチウムは He によりパ ージされ電離箱を用いて透過した全トリチウム濃度を常時測定するとともに、電離箱通気後、バ ブラーを通し、水状のトリチウムを捕集した後、再度電離箱を通気し、分子状トリチウムを酸化 させるための触媒を通気後、バブラーを用いて捕集した。そして、各バブラー水を随時サンプリ ングし、捕集されたトリチウム量を測定した。また、各温度における透過実験は、透過速度が定 常に達するまで行った。

2.2.2 トリチウム水蒸気分圧依存性

透過実験温度を 773 K とし、変化させるトリチウム水蒸気分圧以外の条件や実験手順は上節 2.2.1 温度依存性実験時と同様とした。トリチウム水蒸気分圧は、循環している混合ガスをモレキ ュラーシーブ乾燥塔に一定時間通気することにより減少させた。この時、供給側のトリチウム濃 度はそれぞれおよそ 0.4, 0.2 および 0.1 μCi/cc であった。

3.1 拡散係数

本実験結果に関し、その透過速度は拡散律速であると仮定し、拡散係数を求めるため、Fick の 法則からのフィッティングを試みた。Fick の第二法則は

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{1}$$

で表わされる。ここでDは拡散係数(m²/s)を、cは拡散種の濃度(mol/m⁻³)をを示している。この一次解より次式(2)が得られる。

$$\frac{J(t)}{J(\infty)} = 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \left\{ (-1)^n \exp\left(-\frac{D\pi^2 n^2}{d^2}t\right) \right\}$$
(2)

ここで、*J*(*t*)および *J*(∞)は時間 *t* および∞における透過速度(mol/s)を、*d* は試料厚(m)をそれぞれ示している。そして、上式(2)を時間について積分することで、時間 t における総トリチウム透過量、 Q(t)に関する式(3)が得られる。

$$Q(t) = \int J(t')dt' = J(\infty) \left[t - \frac{d^2}{6D} - \frac{2d^2}{\pi^2 D} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-D\frac{n^2\pi^2}{d^2}t\right) \right]$$
(3)

3.2 透過係数

透過速度は供給側のトリチウム分圧と透過側のトリチウム分圧に依存することが知られている が、本研究において、透過側は常にヘリウムによりパージしていることから、透過側のトリチウ ム分圧は '0' と考えられる。また、本研究における供給側のトリチウムはトリチウム水(T₂O or HTO)の形で供給しているが、供給側試料表面で解離し、溶解・拡散すると考えられる。そのため 本研究においても、トリチウムの透過が拡散律速であると仮定すると過去の文献同様、Sieverts 則 に従うことが考えられ³⁾、下記の式により透過係数 *P*(mol m⁻¹ s⁻¹ Pa^{-1/2})が求められると考えられる。

$$P = \frac{J(\infty) \times d}{A \times p^{1/2}} \tag{4}$$

ここで、Aは試料表面積(m²)を、pは供給側トリチウム水蒸気(T₂O)分圧(Pa)をそれぞれ示している。

4. 結果

4.1 トリチウム水蒸気分圧依存性実験結果

トリチウム水蒸気分圧依存性実験結果を Fig. 3 に示す。この図から、トリチウムの透過量は供 給側トリチウム水蒸気分圧の約 0.5 乗に比例することが明らかとなった。このことから、供給側 にトリチウム水蒸気を用いた場合でも、分子状水素同位体と同様、トリチウムの透過は Sieverts 即に従うことが示唆された。また、本実験中の透過側のトリチウムの化学形に関して、分子状(HT) と水状(HTO)の化学形ごとのトリチウム透過速度に関して、Fig.4 に示すように、分子状成分のト リチウム透過速度は供給側トリチウム濃度の増減によらずほとんど一定であった一方、水状トリ チウムの透過速度は供給側トリチウム濃度の増加とともに急激に増加した。

4.2 温度依存性実験結果

4.2.1 拡散係数

573K において得られた透過実験結果に対し、式(3)を用いてフィッティングを行った結果を Fig. 5 に示す。この図から、上記式を用いたフィッティングはよく実験結果を再現していることがわ かり、同様のフィッティングを Fig. 6~8 にそれぞれ示すように、673, 773 および 873 K において 得られたトリチウム透過実験結果に対しても行った。上記フィッティングにおいて得られた拡散 係数のアレニウスプロットを Fig. 9 に示す。そして、このアレニウスプロットより、F82H 鋼中の トリチウムの拡散に関する前指数因子、*D*₀、および活性化エネルギー、*E*_aがそれぞれ(2.9±0.1)×10⁹ m²/s および 10±1 kJ と算出された(参照: Table 1)。

4.2.2 透過係数

前節、4.1 のトリチウム水蒸気分圧依存性実験の結果から、式(4)を用いて透過係数、Pの導出を 各温度に関して行い、Fig. 10 に示すようにアレニウスプロットを行った。このアレニウスプロッ トより F82H 鋼中のトリチウムの透過に関する前指数因子、 P_0 、および活性化エネルギー、 E_a が それぞれ(6.8±0.1)×10⁻¹⁰ mol m⁻¹ s⁻¹ Pa^{-1/2} および 56±1 kJ と算出された(参照: Table 1)。

4.2.3 透過したトリチウムの化学形

各温度における透過したトリチウムの化学形に関して、分子状と水状の化学形ごとの透過係数 温度変化を Fig. 11 に、それらの比率を Fig. 12 に示す。Fig. 11 から分子状、水状の両化学形の透過 係数は温度の上昇とともに増加する傾向が見られた。一方、Fig. 12 から、分子状で放出されるト リチウムの比率は 773 K 辺りまでは減少し、それ以上で増加する傾向にあることが示唆された。

5. 考察

前節にて得られた拡散係数および透過係数のアレニウスプロットに関し、文献 ³⁻¹⁰との比較を それぞれ Fig. 13 および Fig. 14 に、各係数をまとめたものを Table 1 に示す。まず、トリチウムの 拡散に関して、前指数因子は文献値よりも 1 桁程度低い値であったが、活性化エネルギーはほぼ 一致を示した。活性化エネルギーが一致したことと、トリチウム水蒸気分圧依存性実験の結果、 トリチウムの透過速度は Sieverts 則に従っていたことから、本研究における F82H 鋼中のトリチウ ム透過は、過去の文献、すなわち、供給側に分子状水素を用い、透過側は真空で行われた実験と 同様の、拡散により律速されている様相を示した。また同様に、バルク内の拡散挙動もまた文献 における実験条件下のそれと同様であること、すなわち、供給側や透過側の条件が変化しても、 バルク内に拡散に影響を及ぼすようなトリチウムトラップサイトの新規出現や増加は見られない こと、が示唆された。一方、トリチウムの透過に関して、活性化エネルギーは文献値と近しい値 が得られたが、前指数因子は文献値とは大きく異なり、2~3 桁程度低下していた。このことから、 供給側、透過側の両方、またはどちらかの表面反応が大きな影響を及ぼしていたことが考えられ る。

さて、本実験における表面の反応に関し、トリチウムの透過挙動に影響を及ぼす可能性があり、 文献とは異なる条件として、

- (i) 供給側トリチウムがトリチウム水蒸気であること
- (ii) 透過側パージガス中に微量の酸素または水が存在していた可能性
- (iii) 透過側表面が酸化膜に覆われていた可能性

があげられる。(i)に関しては、水蒸気が存在することにより供給側試料表面に緻密な酸化膜が形 成され、それが透過防止膜として機能した可能性と、供給側試料表面における吸着・解離の速度 定数やその活性化エネルギーが分子状と水状とでは異なることが影響を及ぼした可能性が考えら れる。また、(ii)および(iii)に関しては、透過したトリチウムの化学形は水と分子状とが混在して いたことから、そのどちらかまたは両方が寄与していた可能性が考えられる。ここで、Shestakov らにより行われた清浄と思われる("clean")表面と大気にさらした("contaminated")表面を持つ F82H 鋼中重水素透過実験結果を比較すると、Fig. 13 および 14 中にも重ねてあるように、清浄と考えら れる表面を持つ試料中の重水素拡散係数および透過係数は、表面を大気にさらした試料中の拡散 係数や透過係数の数倍に相当した、すなわち、表面を大気にさらすことにより重水素の拡散係数 や透過係数は数分の1程度に減少したことを報告しており、このことは、「表面効果」として言及 されていた¹⁰⁾。しかし、実験条件に関して、他の報告と同様、供給側に純重水素ガスを用い、透 過側は真空であったことは明記されていたものの、何を以って 'clean'であるのか、どちらの表面 (または両方か)をどれくらい大気にさらしたのかは明記されておらず、また、表面の分析等も行わ れていなかった。このことから、供給側、透過側の片方もしくは両方の表面の酸化膜が大きな影 響を及ぼしていることが示唆された。一方で、透過したトリチウムの放出される化学形の組成比 が条件ごとに異なっていたことから、表面の酸化膜だけでなく、表面反応も少なからず影響を及 ぼしていることが示唆された。

さて、本研究の結果に関し、これまでに報告されてきた[供給側:純水素同位体ガス / 透過側: 真空]、の条件で得られてきた透過係数と比較すると、実験した温度領域(573~873 K)の範囲内で、 およそ3 桁程度低いトリチウム透過係数が得られた。このことから、現在さまざまなトリチウム 透過防止膜の研究・開発が進められているが、条件次第では F82H 鋼自身が実用に耐えうるトリ チウム透過防止膜を自己形成する可能性が見出された。しかしながら、本研究では供給側・透過 側、それぞれ酸化膜の形成や表面反応の相違等がトリチウム透過挙動に影響を及ぼすことが考え られるが、詳細については、さらなる再現性実験を含め、今後解明してゆく必要がある。特に、 最も影響を及ぼす可能性が高いと考えられる表面の酸化膜に関し、その表面状態や酸化膜内部の 化学状態、厚さ等を測定すると共に、酸化膜の形成条件を変化させ、透過実験を行うことにより、 どのような酸化膜がどのように影響を及ぼしているか、そして F82H 鋼自身が自己形成する酸化 膜がブランケット内のトリチウム増殖材パージガスから冷却材へのトリチウム透過防止膜として 十分な性能を持ちえるかどうかを明らかにしてゆく必要がある。

6. 結論

核融合炉トリチウム増殖ブランケットにおけるトリチウム安全性評価の観点から、固体トリチ ウム増殖材パージガスから構造材候補である低放射化フェライト鋼である F82H 鋼を透過し冷却 材中へ漏出するトリチウムの F82H 鋼中における挙動の解明を目的として、供給側に He で希釈し たトリチウム水蒸気を、透過側にヘリウムパージガスを用いて研究を行った。その結果を、供給 側に純水素同位体ガスを、透過側を真空にした条件下で行われた研究報告と比較すると、拡散の 活性化エネルギーや前指数因子がほぼ一致しており、本研究における透過もまた、文献同様拡散 律速であり、バルク内の拡散は文献と同様であったことが示唆された。一方、透過の活性化エネ ルギーは文献値に近しい値を示したが、前指数因子が文献値に比べ 2~3 桁程度の低下が見られ、 供給側、透過側両面ないしどちらかの面の表面反応が大きな影響を及ぼしていることが示唆され た。特に、水蒸気の存在により材料表面に酸化膜ができ、トリチウム透過防止膜として働いたこ とが、影響を及ぼした大きな要因である可能性が高いと考えている。

以上より、現在さまざまなトリチウム透過防止膜の研究・開発が進められているが、条件次第 では F82H 鋼自身が実用に耐えうるトリチウム透過防止膜を自己形成する可能性が見出された。 しかしながら、本実験の結果からは、どのような過程がトリチウム透過挙動に影響を及ぼし、本 結果を生じたのかまでの解明には至らなかったが、その解明は、今後のトリチウム増殖ブランケ ットの設計や安全評価において非常に重要であると考えられる。

謝 辞

本研究におきまして、当研究グループの皆様からは有益な助言およびコメントいただきました。 特に、当研究グループの中村博文氏および磯部兼嗣氏には実験の計画段階から様々な助言および コメントをいただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 関昌弘: "核融合炉工学概論 未来エネルギーへの挑戦", 日刊工業新聞社, pp. 145-182 (2001).

- 2) 實川資朗: "講座 核融合炉構造材料の照射損傷 2. 核融合炉開発と照射損傷課題" J. Plasma Fusion Res., <u>84</u>, P253(2008).
- 3)田中知, 秋場真人, 榎枝幹男, 長谷川晃, 小西哲之, 室賀健夫, 相良明男: "総合解説 ITER テストブランケット開発の現状" J. Plasma Fusion Res., <u>81</u>, P434(2005).
- 4)E. Serra, A. Eerujo and G. Bewnamati : "Influence of traps on the deuterium behaviour in the low activation martensitic steels F82H and Batman", J. Nucl. Mater., <u>245</u>, P108(1997).
- 5)E. Serra, E. Rigal and B. Benamati : "Hydrogen and deuterium permeation measurements on the double-wall tubes material for the water-cooled Pb–17Li DEMO blanket", Fusion Eng. Des., <u>51-52</u>, P675(2000).
- 6)F. Schliefer, Chao Liu and P. Jung : "Diffusion and permeation of hydrogen in low-activation martensitic stainless steel effect of irradiation", J. Nucl. Mater., <u>283-287</u>, P540(2000).
- 7)Yu. N. Dolinsky, Yu. N. Zouev, I.A. Lyasota, I.V. Saprykin, V.V. Sagaradze : "Permeation of deuterium and tritium through the martensitic steel F82H", J. Nucl. Mater., <u>307-311</u>, P1484(2002).
- 8)V. Shestakov, A. Pisarev, V. Sobolev, S. Kulsartov and I. Tazhibaeva : "Gas driven deuterium permeation through F82H martensitic steel", J. Nucl. Mater., <u>307-311</u>, P1914(2002).
- 9)T.V. Kulsartov, K. Hayashi, M. Nakamichi, S.E. Afanasyev, V.P. Shestakov, Y.V. Chikhray, E.A. Kenzhin and A.N. Kolbaenkov : "Investigation of hydrogen isotope permeation through F82H steel with and without a ceramic coating of Cr₂O₃–SiO₂ including CrPO₄ (out-of-pile tests)", Fusion Eng. Des., <u>81</u>, P818(2006).
- 10)M. Nakamichi, T.V. Kulsartov, K. Hayashi, S.E. Afanasyev, V.P. Shestakov, Y.V. Chikhray, E.A. Kenzhin and A.N. Kolbaenkov : "In-pile tritium permeation through F82H steel with and without a ceramic coating of Cr₂O₃–SiO₂ including CrPO₄", Fusion Eng. Des., <u>82</u>, P2246(2007).
- 11)T. Hirose, K. Shiba, M. Enoeda and M. Akiba, : "Corrosion and stress corrosion cracking of ferritic/martensitic steel in super critical pressurized water", J. Nucl. Mater., <u>367-370</u>, P1185(2007).
- 12)M. Nishikawa, T. Kinjyo, Y. Nishida and T. Tanifuji :"Chemical form of tritium released from solid breeder materials", J. Nucl. Maters., <u>325</u>, P87(2003).
- 13)T. Kinjo, M. Nishikawa, N. Yamashita, T. Koyama, T. Tanifuji and M. Enoeda, : "Chemical form of released tritium from solid breeder materials under the various purge gas conditions", Fusion Eng. Des., 82, P2147(2007).
- 14)K. Tsuchiya, M. Nakamichi, A. Kikukawa, Y. Nagao, M. Enoeda, T. Osaki, K. Ioki and H. Kawamura, : "In-pile test of Li₂TiO₃ pebble bed with neutron pulse operation", J. Nucl. Mater., <u>307-311</u>, P817(2002).



Fig.1 トリチウム透過試験装置概略図



Fig.2 トリチウム透過試験装置透過部位概略図 (Fig.2 破線内)



Fig.3 供給側トリチウム分圧依存性実験結果



Fig.4 供給側トリチウム分圧依存性実験時における透過トリチウムの化学形ごとの透過係数



Fig. 5 573 K におけるトリチウム透過実験結果および式(3)を用いたフィッティング



Fig. 6 673 K におけるトリチウム透過実験結果および式(3)を用いたフィッティング



Fig. 7 773 K におけるトリチウム透過実験結果および式(3)を用いたフィッティング



Fig. 8 873 K におけるトリチウム透過実験結果および式(3)を用いたフィッティング



Fig.9 F82H 鋼中におけるトリチウムの拡散係数に関するアレニウスプロット



Fig. 10 F82H 鋼のトリチウムの透過係数に関するアレニウスプロット



Fig. 11 温度依存性実験時における透過トリチウムの化学形ごとの透過係数



Fig. 12 温度依存性実験時における透過トリチウムの化学組成比の変化



Fig. 13 F82H 鋼中のトリチウムの拡散係数に関するアレニウスプロットの文献値との比較 4.7-9)



Fig. 14 F82H 鋼中のトリチウムの透過係数に関するアレニウスプロットの文献値との比較 4.7-9)

	Present study	Serra4)	Dolinksy7)		Kulsartov9)		Shestakov8)	
Temperature range /K	573-873	523-743	490-1000	490-1000	573-873	573-873	523-873	523-873
Permeant	T ₂ O	D_2	D_2	T_2	H_2	D_2	\mathbf{D}_2	D_2
Sample thickness /mm	3.0	0.8-0.5	0.85		1.0			
Inlet Q ₂ partial pressure	0.03-0.1 Pa	0.5-100 kPa	800-2000	0 Pa	100-100	0 Pa	100-1	000 Pa
Inlet condition	He balance	Pure D ₂	Pure D ₂	Pure T_2	Pure H_2	Pure D ₂	Pure D ₂	Pure D_2
Outlet	He sweep	10^{-7} Pa	10 ⁻⁵ P.	а	10^{-7} P	a	10	⁷ Pa
$D_0 / m^2 s^{-1}$	$(2.9 \pm 0.5) \times 10^{-9}$	1.1×10^{-7}	3.9×10^{-8}	3.3×10^{-8}	2.8×10^{-8}	2.3×10^{-8}	1.0×10^{-8}	4.8×10^{-8}
$E_{\rm a}(D)$ / kJ	12 ± 2	14	8.0	7.8	8.0	7.8	7.4	10
$P_0 / \text{mol m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1/2}$	$(6.8\pm0.2) \times 10^{-10}$	4.0×10^{-8}	4.7×10^{-8}	3.7×10^{-8}	1.1×10^{-7}	9.7×10^{-8}	5.7×10^{-8}	1.3×10^{-8}
$E_{\rm a}(P)/{ m kJ}$	56 ± 2	41	42	41	41	44	49	49
Memo							clean	contaminated

Table 1 F82H 鋼に関する本研究と文献における水素同位体透過実験条件および拡散係数と透過係数にかかる前指数因子と活性化エネルギー

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位							
甘木昌	SI 基本ì	单位					
本平里	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	А					
熱力学温度	ケルビン	Κ					
物質量	モル	mol					
光度	カンデラ	cd					

和午春	SI 基本単位			
和卫星	名称	記号		
面積	平方メートル	m ²		
体積	立法メートル	m ³		
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s		
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2		
波 数	毎メートル	m ⁻¹		
密度,質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³		
面 積 密 度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²		
比 体 積	立方メートル毎キログラム	m³/kg		
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2		
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m		
量濃度 ^(a) ,濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³		
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³		
輝 度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²		
屈折率	(数字の) 1	1		
比透磁率) (数字の) 1	1		

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度 無彼及 (andwine concentration) ともよばれる。 これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

(b)

表3.固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 組立単位	
組立量	反敌	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
	山小	16.7	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$\rm sr^{(c)}$	1 ^(b)	$m^{2/}m^2$
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{\cdot 3}$
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	\mathbf{S}	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 1}$
磁 束 密 度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	.I/kg	m ² e ⁻²
カーマ		Чy	6/Kg	ili s
線量当量,周辺線量当量,方向	SUNCE (g)	Sv	.I/kg	m ² e ⁻²
性線量当量, 個人線量当量	2 · · · / /	51	5/Kg	ш о
<u>酸素活性</u>	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)Siggajihi(面有)の名称と記方を持つ組立単位と組み合わせくも使用(さる。しか)(接頭)論を行した単位はもはや コヒーレントではない。 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。 (c)潮光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(6)ヘルンは周期現象についてのみ、ベタレルは抜射性接種の統計的過程についてのみ使用される。 (a)ヘルンは周期現象についてのみ、ベタレルは抜射性接種の統計的過程についてのみ使用される。 (a)セルシウス度はケルビンの特別た名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度開隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。 (g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4.	単位の中に固有の)名称と記号を含むSI組立里位の例	

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$	
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m'^{1} s'^{1} = s'^{1}$	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$	
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA	
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA	
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{2} K^{1} mol^{1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{\cdot 3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	$m^2 m^{-2} kg s^{-3} = kg s^{-3}$	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol	

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭調	語	記号	乗数	接頭語	記号	
10^{24}	ш	Þ	Y	10^{-1}	デシ	d	
10^{21}	ゼ	9	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エク	サ	Е	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	\sim	A	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テ	ラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギ	ガ	G	10^{-12}	Ъ, Ъ	р	
10^{6}	メ	ガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^{3}	キ	Ц	k	10^{-18}	アト	a	
10^{2}	ヘク	ŀ	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デ	力	da	10^{-24}	ヨクト	У	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位						
名称	記号	SI 単位による値				
分	min	1 min=60s				
時	h	1h=60 min=3600 s				
日	d	1 d=24 h=86 400 s				
度	۰	1°=(п/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad				
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^{2}=10^{4}m^{2}$				
リットル	L, 1	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{\cdot 3}m^3$				
トン	t	1t=10 ³ kg				

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J				
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg				
統一原子質量単位	u	1u=1 Da				
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m				

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

	名称		記号	SI 単位で表される数値
バ	-	ン	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロ・	- A	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	Μ	1 M=1852m
バ	-	ン	b	$1 \text{ b}=100 \text{fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{cm})2=10^{\cdot 28} \text{m}^2$
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np ¯	の逆伝しの粉伝的な間接け
ベ		ル	в	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ	ジベ	ル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s				
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$				
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd} \text{ cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd} \text{ m}^{-2}$				
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm 2 10 ⁴ lx				
ガル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²				
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{\cdot 2} = 10^{\cdot 4} \text{T}$				
エルステッド ^(c)	Oe	$1 \text{ Oe} \triangleq (10^3/4\pi) \text{A m}^{-1}$				

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例 名称 記号 SI 単位で表される数値 キ IJ Ci 1 Ci=3.7×10¹⁰Bq 2 ゲ ŀ $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ V \sim 2 R ラ rad 1 rad=1cGy=10⁻²Gy V 1 rem=1 cSv=10⁻²Sv rem ガ $\mathbf{\mathcal{V}}$ 1 γ =1 nT=10-9T 5 ν フ т N 1フェルミ=1 fm=10-15m S メートル系カラット 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg ŀ 1 Torr = (101 325/760) Pa Torr л 準 大 気 標 圧 atm 1 atm = 101 325 Pa 1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J 力 IJ cal П _ (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー) ク $1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$ ξ П