

JAERI-Research



JP0450275

2004-003



IFMIFターゲット背面壁での中性子照射損傷を
受けた低放射化フェライト鋼の
トリチウム透過量評価

2004年3月

松廣 健二郎・安堂 正巳・中村 博雄・竹内 浩

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。

入手の問い合わせは、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、お申し越してください。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, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

IFMIF ターゲット背面壁での中性子照射損傷を受けた低放射化フェライト鋼の
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
松廣 健二郎・安堂 正巳・中村 博雄・竹内 浩*

(2004年1月29日受理)

IFMIF ターゲット背面壁の候補材である低放射化フェライト鋼 (F82H 鋼) におけるトリチウム透過量に与える中性子照射損傷の影響について評価を行った。その結果、照射損傷により実効拡散係数は 10~20%減少することが予想され、透過開始後数百秒までの範囲では照射損傷によりトリチウム透過量は 10~20%以上減少する。また IFMIF ターゲット背面壁の F82H 鋼における一日あたりのトリチウム透過量は 1.3×10^{-11} g/d (4.7×10^3 Bq/d) であり、316 ステンレス鋼を用いた場合に比べ約 30 倍であり、この量は IFMIF の主ループでのトリチウム透過量の約 8%に相当する。

Estimation of Tritium Permeation through Reduced-activation Ferritic Steel
at IFMIF Target Backwall Damaged by Neutron Irradiation

Kenjiro MATSUHIRO, Masami ANDO, Hiroo NAKAMURA and Hiroshi TAKEUCHI⁺

Department of Fusion Engineering Research
(Tokai Site)

Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 29, 2004)

The effect of neutron irradiation damage on tritium permeation through reduced-activation ferritic steel (F82H) at IFMIF target backwall has been estimated. From the results, it has been estimated that the effective diffusion coefficient of hydrogen in F82H will decrease by 10 % to 20 % under neutron irradiation. Therefore, the amount of tritium permeation for several hundred seconds at the beginning of permeation will be smaller than 80% to 90 % of that before neutron irradiation. The amount of tritium permeation of F82H at IFMIF target backwall is 1.3×10^{-11} g/d (4.7×10^3 Bq/d). It is 30 times larger than that of 316SS, and is about 8 % of tritium permeation at main loop of IFMIF.

Keywords: Reduced-activation Ferritic Steel, Tritium, Permeation, IFMIF, Neutron Irradiation Damage

⁺ Office of Planning

目次

1. 緒言	1
2. IFMIF ターゲット系におけるトリチウム挙動	1
3. 評価手法	2
3.1 透過解析手法	2
3.2 中性子照射損傷の影響評価手法	3
4. 計算結果	4
4.1 実効拡散係数に与える中性子照射損傷の影響	4
4.2 IFMIF ターゲット背面壁におけるトリチウム透過量	4
5. まとめ	5
謝辞	5
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Tritium Behavior in Target System of IFMIF	1
3. Estimation Procedure	2
3.1 Analytical Method for Permeation	2
3.2 Method for Estimation of Effect of Neutron Damage	3
4. Results	4
4.1 Effect of Neutron Damage on Effective Diffusion Coefficient	4
4.2 Tritium Permeation at IFMIF Target Backwall	4
5. Summary	5
Acknowledgement	5
References	6

1. 緒言

核融合炉材料の核融合炉環境の中性子照射条件下での実証試験のために必要不可欠な国際核融合材料照射施設 (International Fusion Material Irradiation Facility: IFMIF)¹⁾では、40MeV重陽子ビームを、流速 20 m/s の液体リチウムに入射して、核融合近似中性子を発生させる。中性子はターゲット背面壁を通過して、テストアセンブリ中の試験片を照射する。そのターゲット背面壁では核融合炉の第一壁・ブランケット構造材料と同様の強度の中性子負荷を受け、対照射特性の観点から低放射化フェライト鋼の適用が検討されている。またターゲット背面壁には、核反応により生成された Li 中のトリチウムの透過が問題となる。低放射化フェライト鋼の水素同位体の透過に関しては様々な研究がなされており、ガス駆動透過実験²⁻⁴⁾やイオン駆動透過実験により透過率、拡散係数やジーベルツ係数などが求められている。しかしながらこれらは未照射損傷材を用いた実験がほとんどであり、将来の原型炉や実証炉に向けたより精度の高い安全評価を行うためには、中性子照射損傷の影響に関する研究が必要である。またフェライト鋼の水素の拡散係数がオーステナイト鋼より約 400 倍大きいことからトリチウム透過量が大きくなることが予想される。

そこで本研究では、中性子照射損傷によって発生する欠陥による水素の捕捉サイトの増加が低放射化フェライト鋼のトリチウム透過に与える影響について評価した。また、IFMIF ターゲット背面壁での低放射化フェライト鋼のトリチウム透過量を計算し、IFMIF 液体リチウムターゲットの主ループにおけるトリチウム透過量と比較することでターゲット背面壁でのトリチウム透過量の影響を評価した。

2. IFMIF ターゲット系におけるトリチウム挙動

IFMIF のターゲット系はターゲットアセンブリ、クエンチタンク、電磁ポンプ、熱交換器等を含む主ループとコールドトラップ、ホットトラップを含むリチウム純化ループから構成されている。IFMIF ターゲット系概念図を図 1 に示す⁵⁾。IFMIF ではリチウム流に 40MeV の重陽子ビームを照射することで、以下のストリッピング反応により中性子を発生させている。



トリチウムは上記の反応により生成される他、発生した中性子とリチウムとの反応



によっても発生する。IFMIF でリチウム中に注入・生成される水素同位体量⁵⁾を表1に示す。

液体リチウム中のトリチウムはリチウム純化系のイットリウムホットトラップにおいて、イットリウムに吸収させることで除去させる。水素同位体はイットリウムに吸収され、イットリウム中の水素同位体濃度が飽和濃度以上になると水素化物 ($\text{YH}_{1.8}$) の形でリチウム中に溶け出す。水素化物が溶け出させないためのリチウム中の許容水素濃度 ($C_{H,Li}$) は次式で求められる。

$$\ln(C_{H,Li}) = \ln(C_{H,Y}) - \ln(K_d) \quad (5)$$

ここで $C_{H,Y}$ はイットリウム中の飽和水素濃度、 K_d は分配係数である。W.H. Mueller⁶⁾, D.R. Vissers⁷⁾, D.L. Smith⁸⁾らによって得られたイットリウムホットトラップを用いたリチウム中の許容水素濃度の温度依存性を図2に示す。IFMIF 運転中のイットリウムホットトラップの温度は 285℃と想定されており、この時のリチウム中の水素同位体濃度は保守的に評価すれば 24 appm であり、リチウム中の水素同位対比を発生水素同位体の原子比 (表1) と同様と仮定するとトリチウム濃度は 0.66 appm となる。

3. 評価手法

3. 1 透過解析手法

解析体系を図3に示す。トリチウムは、リチウム流からのターゲット背面壁に溶解し、バルク内を拡散、裏面で再結合し放出される。解析では、初期のターゲット背面壁中のトリチウム濃度を 0、ターゲット背面壁のリチウム流に接している表面での水素同位体濃度は液体リチウム中での水素同位体濃度と平衡にすぐに達し一定となる、裏面の濃度は 0 とみなせると仮定し、一次元の拡散方程式を解くことでトリチウム透過を計算した。ターゲット背面壁表面の水素濃度は液体リチウムとフェライト鋼での平衡水素濃度の比である分配係数⁶⁾を用いて決定した。リチウム中のトリチウム濃度に関しては保守的な評価をするために2章で述べた許容トリチウム濃度 0.66 appm で一定であると仮定した。

透過フラックスは Fick の法則における一次元有限体系での拡散方程式の解は以下のように表される⁹⁾。

$$J(t) = \frac{DC(0,t)}{d} \times \left[1 + 2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \exp \left[-D \frac{n^2 \pi^2}{d^2} t \right] \right] \quad (6)$$

ここで D は拡散係数、 $C(0,t)$ はリチウム流に接している背面壁表面での水素濃度、 d は背面壁の厚さである。ここで拡散係数は水素濃度に依存しないと仮定した。透過量は透過フラックスを積分することで下式で表される。

$$Q(t) = \frac{DC(0,t)}{d}t - \frac{C(0,t)d}{6} - \frac{2C(0,t)d}{\pi^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-D \frac{n^2\pi^2}{d^2}t\right] \quad (7)$$

本研究では(7)式を用いて IFMIF ターゲット背面壁でのトリチウム透過量の評価を行った。

3. 2 中性子照射損傷の影響評価手法

中性子照射損傷のトリチウム透過への影響に関して、本研究では中性子照射損傷により材料中に欠陥が生成され、水素の捕捉サイト数が増加し、それにより、実効拡散係数がどのように変化するかを評価した。低放射化フェライト鋼の水素吸蔵に関する研究は少ない上に、さらに照射損傷の影響について調べられた実験例はほとんど存在しない。そこで本研究では照射損傷による低放射化フェライト鋼中の水素の捕捉サイト数の変化を評価するために、図4に示す 10keV のヘリウムイオン照射により照射損傷を与えた 316 ステンレス鋼の水素吸蔵データ¹⁰⁾を参考にした。本データでは 316 ステンレス鋼に IFMIF ターゲット背面壁で予想される F82H 鋼の損傷量(～50dpa)より大きい～100dpa の損傷を与えており、少なくとも損傷量(dpa)で IFMIF 条件を満たしている。図4より水素吸蔵量はヘリウムの照射量が増加するに従い約4倍まで増加し、さらに照射量が増加すると2倍付近で一定となっていることがわかる。水素吸蔵量は照射損傷により最大で約4倍、高照射量(20dpa～)では約2倍で一定となることから、未損傷の低放射化フェライト鋼における水素の捕捉サイト数が2及び4倍になった時の実効拡散係数を計算した。ただし、水素の捕捉エネルギーについては照射損傷により発生する捕捉サイトは未損傷材に存在する捕捉サイトと同じ種類であり変化しないと仮定した。

金属における水素の実効拡散係数と捕捉サイト数及び捕捉エネルギーとの関係は Oriani によりモデル化されており¹¹⁾、次式のように表される。

$$D_{\text{eff}} = \frac{D_1}{\left[1 + \left(\frac{N_t}{N_1}\right) \exp\left(\frac{E_t}{RT}\right)\right]} \quad (8)$$

ここで D_{eff} は実効拡散係数、 D_1 は格子間水素の拡散係数、 N_t は水素捕捉サイト数、 N_1 は格子間のサイト数、 E_t は捕捉エネルギー、 R は気体定数、 T は温度である。

今回対象とする F82H 鋼については図5に示すように水素の実効拡散係数が透過実験¹⁾により求められている。F82H 鋼の場合鉄鋼材料に特有の低温において捕捉効果の影響が見られる。格子間の水素の拡散係数 D_1 は図5より、捕捉の影響が小さい高温における実効拡散係数より求め、水素捕捉サイト数及び捕捉エネルギーは(8)式を実効拡散係数のデータにフィッティングさせることで以下のように求められている。

$$D_1 = 1.07 \times 10^{-7} \exp(-13950/RT) \text{ (m}^2/\text{s)} \quad (9)$$

$$N_t = 1.6 \times 10^{23} \text{ (sites/m}^3\text{)} \quad (10)$$

$$E_t = 55938 \text{ (J/mol)} \quad (11)$$

格子間のサイト数(N_t)については体心立方格子の中に鉄原子一個あたり 6 つのサイトがある^{12,13)}と仮定し 5.2×10^{29} sites/m³ とした。

本研究では(8)~(11)式を用いて中性子照射損傷による低放射化フェライト鋼中の水素の実効拡散係数への影響を評価した。

4. 計算結果

4. 1 実効拡散係数に与える中性子照射損傷の影響

中性子照射損傷のトリチウム透過への影響は、中性子照射損傷により欠陥が生成され水素の捕捉サイト数が増加することによると仮定し、実効拡散係数の変化を評価した。

計算した実効拡散係数の温度依存性を図 6 に示す。図より、捕捉サイトが増加するに従い実効拡散係数は減少することがわかる。また、温度が低い方が水素の捕捉の効果が大きいことから捕捉サイト数の増加による実効拡散係数の減少率が大きい。運転温度 250℃では未損傷に比べ、捕捉サイト数が 2 倍で実効拡散係数に 10%の減少、捕捉サイト数が 4 倍で 20%の減少が見られることが予想される。捕捉の効果を含む実効拡散係数の変化は初期の透過挙動に影響を与える¹⁾ことから、未損傷材の拡散係数及び捕捉サイト数が 4 倍になった時の拡散係数(未損傷の拡散係数の 0.8 倍)によるターゲット背面壁(厚さ 1.8×10^{-3} m)での初期のトリチウム透過挙動を計算した結果を図 7 に示す。捕捉サイト数が増加した影響は初期における透過の時間遅れの形で見られる。透過開始後数百秒までの範囲では 10~20%以上の減少が見られるものの透過フラックスが定常に達した後は透過量の差は約 2×10^{10} T/m² で一定であり、一時間後にはその差は 1%以下である。

4. 2 IFMIF ターゲット背面壁におけるトリチウム透過量

次に IFMIF ターゲット背面壁での低放射化フェライト鋼のトリチウム透過量を計算した結果について述べる。まずオーステナイト系ステンレス鋼である 316 ステンレス鋼と低放射化フェライト鋼 (F82H 鋼) との定常トリチウム透過量の比較を行った。定常透過量は拡散係数及び分配係数で決定される表面水素濃度に比例することから、それらの係数について表 2 にまとめた。F82H 鋼の分配係数は 316 ステンレス鋼に比べ 0.09 倍と小さいが、拡散係数は 368 倍と大きいため、同一条件ではトリチウム透過率は 316 ステンレス鋼に比べ約 30 倍と大きいものになることが予想される。ただし、トリチウムインベントリーに関しては定常状態では拡散係数には比例せず、分配係数で決定される表面濃度に比例することから、F82H 鋼の方が小さくなると考えられる。

IFMIF ターゲット背面壁でのトリチウム透過量の時間変化を図 8 に示す。F82H 鋼の拡散係

数に関してはトリチウム透過量が照射損傷により減少する傾向にあることから保守的評価として未損傷の F82H 鋼の値を使用した。トリチウム透過フラックスは 1 日経過した時には十分定常に達しておりターゲット背面壁（有効面積 0.05 m^2 ）からの一日あたりのトリチウム透過量は $1.3 \times 10^{-11} \text{ g/d}$ ($4.7 \times 10^3 \text{ Bq/d}$) と予想される。表 3 に IFMIF ターゲット系の主ループ配管等におけるトリチウム透過量を示す。本表からターゲット背面壁からのトリチウム透過量は IFMIF ターゲット系主ループ全体でのトリチウム透過量の約 8% に相当することがわかった。

5. まとめ

IFMIF ターゲット背面壁における低放射化フェライト鋼 (F82H 鋼) のトリチウム透過について中性子による照射損傷の影響を考慮して評価を行った。

この結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 照射損傷により低放射化フェライト鋼 (F82H 鋼) の実効拡散係数は 10~20% 減少することが予想され、透過開始後数秒までの範囲では照射損傷によりトリチウム透過量に 10~20% 以上の減少が見られるものの透過フラックスが定常に達した後は透過量の差は約 $2 \times 10^{10} \text{ T/m}^2$ で一定である。
- (2) IFMIF ターゲット背面壁における一日あたりのトリチウム透過量は $1.3 \times 10^{-11} \text{ g/d}$ ($4.7 \times 10^3 \text{ Bq/d}$) となり、316 ステンレス鋼を用いた場合に比べ約 30 倍大きくなることが予想される。
- (3) IFMIF ターゲット背面壁でのトリチウム透過量は IFMIF ターゲット系の主ループでのトリチウム透過量の約 8% に相当する。

今後の課題として以下の点が挙げられる

- ① IFMIF のより詳細な安全評価を行うためには F82H 鋼の水素捕捉サイト数及びエネルギーの照射特性を実験的に解明することが必要である。
- ② IFMIF の運転条件の最適化やより詳細なトリチウム透過量の過渡変化を評価するためには IFMIF ターゲット系各部におけるトリチウム中の水素濃度の変化を考慮に入れた解析が必要である。
- ③ リチウム純化系ループでは、中性子照射損傷の影響はないものの、トリチウム透過量の評価が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、貴重なご助言等頂きましたトリチウム工学研究室中村博文研究員、核融合炉材料開発推進室杉本昌義室長に感謝いたします。また本研究を行うにあたりご理解いただきました関省吾核融合工学部長、高津英幸核融合工学部次長、辻博史核融合工学部次長に感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Kondo et al., "International Fusion Materials Irradiation Facility Conceptual Design Activity – Present Status and Perspective –", *J. At. Energy Soc. Japan*, Vol. 40, No. 3, 162 (1998).
- 2) E. Serra, A. Perujo and G. Benamati, *J. Nucl. Mater.* **245**, 108 (1997).
- 3) F. Schliefer, Chao Liu and P. Jung, *J. Nucl. Mater.* **283-287**, 540 (2000).
- 4) Yu.N. Dolinsky, Yu.N. Zouev, I.A. Lyasota, I.V. Saprykin and V.V. Sagaradze, *J. Nucl. Mater.* **307-311**, 1484 (2002).
- 5) H. Nakamura, M. Ida, M. Sugimoto, T. Yutani and H. Takeuchi, *Fusion Science and Technology* **41**, 845 (2002).
- 6) W.H. Mueller, *Metal Hydrides* (1968).
- 7) D.R. Vissers, A Hydrogen Activity Meter for Liquid Sodium and its Application to Hydrogen Solubility Measurements, *Nucl. Tech.*, **21**, 228(1974).
- 8) D.L. Smith, et al., Investigation of Nonmetallic Element Interaction in Vanadium-Alloy Lithium System, *Int.Conf. on L.M.T* (1989).
- 9) J. Crank, "The Mathematics of Diffusion, Clarendon press(1975).
- 10) M. Ogawa et al., *J. Nucl. Mater.* **149**, 247(1987).
- 11) B.A. Oriani, *Acta Metall.* **18**, 147(1970).
- 12) J. Volkl, G. Alefeld, in: *Topics in Applied Physics, Hydrogen Metals I*, Vol. 28, eds. G. Alefeld and J. Volkl, 343(1978).
- 13) A. Seeger, *Phys. Lett.* **58A**, 137(1976).

表1 IFMIFにおける水素同位体の発生量⁵⁾

	Type of Isotopes		Weight (g/d)	Concentration
	/deuteron	(atoms/s)		
H	0.06	9.36×10^{16}	1.34×10^{-2}	3.75×10^{-3}
D	1	1.56×10^{18}	4.47×10^{-1}	6.26×10^{-2}
T	0.03	4.68×10^{16}	2.03×10^{-2}	1.89×10^{-3}
Total		1.70×10^{18}	4.81×10^{-1}	6.81×10^{-2}

表2 運転温度 250℃での拡散係数及び分配係数の比較

	Kw	D (m ² /s)
F82H	4.29×10^{-9}	3.90×10^{-9}
316SS	4.76×10^{-8}	1.06×10^{-11}
(F82H)/(316SS)	0.09	368

表3 IFMIF 主ループ配管系におけるトリチウム透過量

	Length (m)	Diameter (10 ⁻³ m)	Area (m ²)	Thickness (10 ⁻³ m)	Temperature (°C)	Permeation (g/d)
Quench Tank - EMP	7.371	248.8	5.76	9.3	285	4.5×10^{-11}
EMP - Heat Exchanger	10.165	199.9	6.38	8.2	285	5.6×10^{-11}
Heat Exchanger - Target	21.433	199.9	13.45	8.2	250	2.4×10^{-11}
Quench Tank	2.000	1200	7.536	12	285	4.5×10^{-11}
合計						1.7×10^{-10}

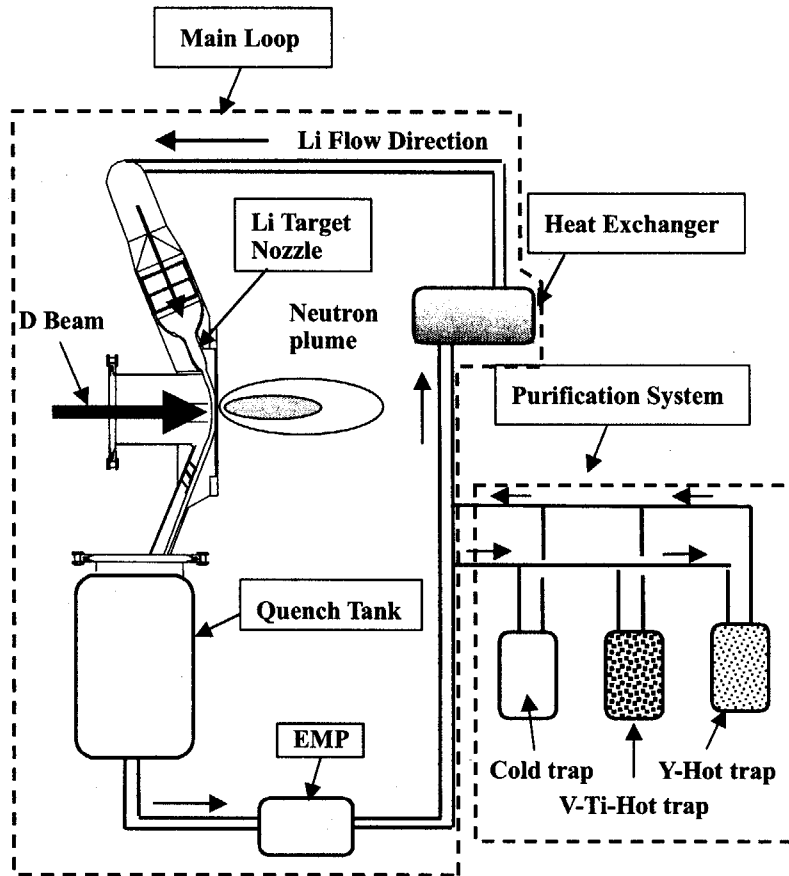


図1 IFMIF ターゲット系概念図⁵⁾

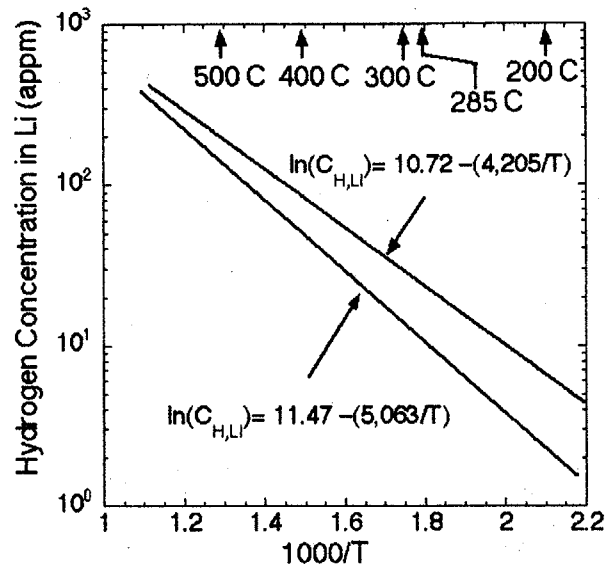


図2 イットリウムホットトラップを用いたリチウム中の許容水素濃度
(Upper Curve^{6,7}, Lower curve⁸)

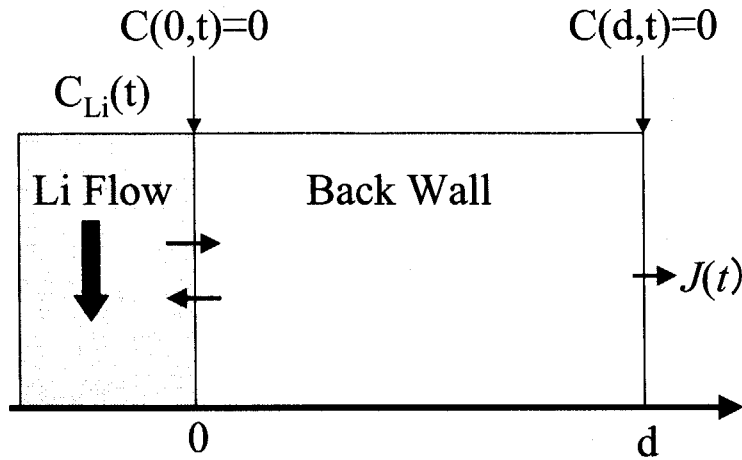


図3 解析体系

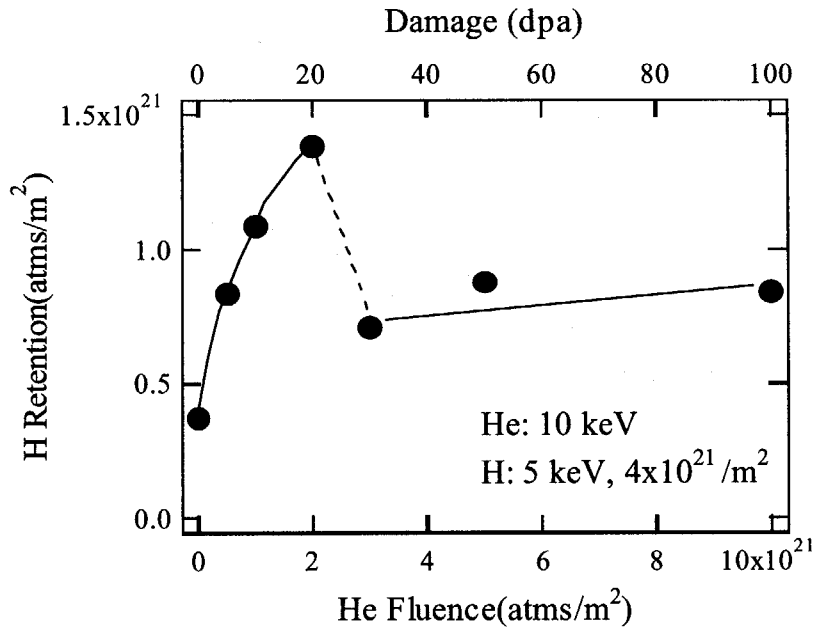


図4 316 ステンレス鋼における水素吸蔵量のヘリウム照射量依存性

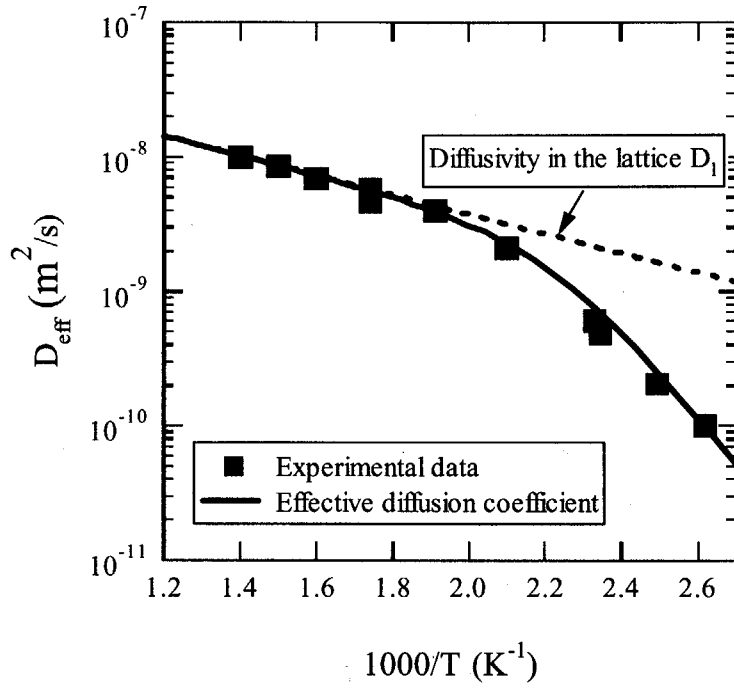


図5 F82H鋼における水素の拡散係数

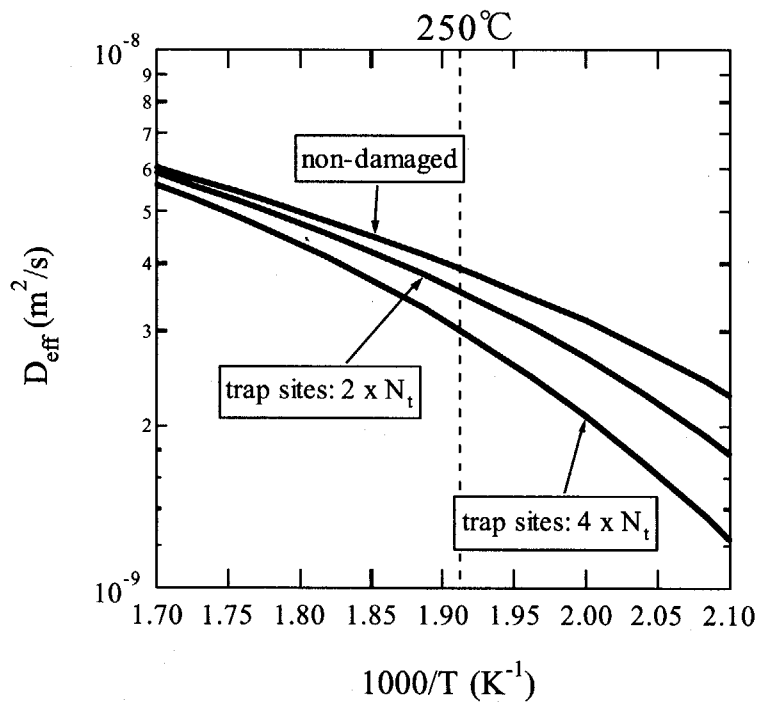


図6 実効拡散係数

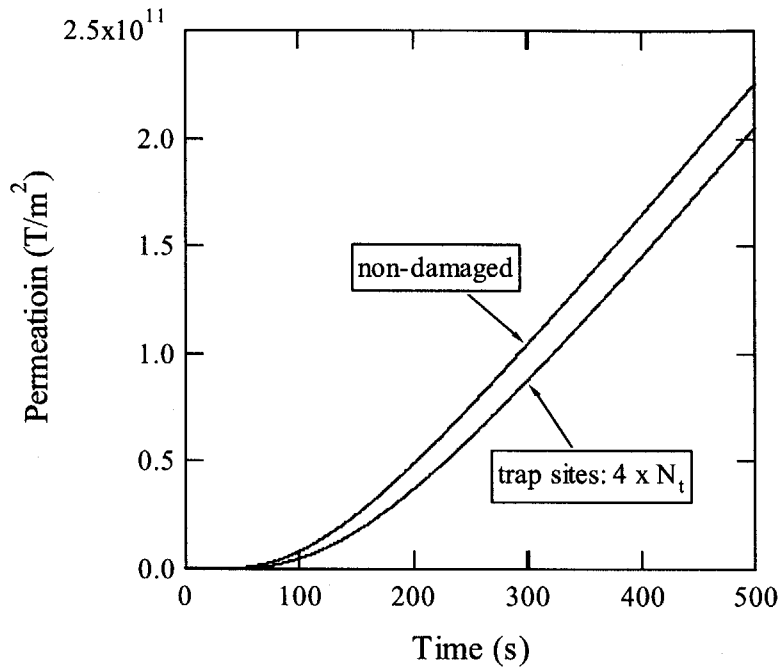


図7 IFMIF ターゲット背面壁からの初期のトリチウム透過挙動

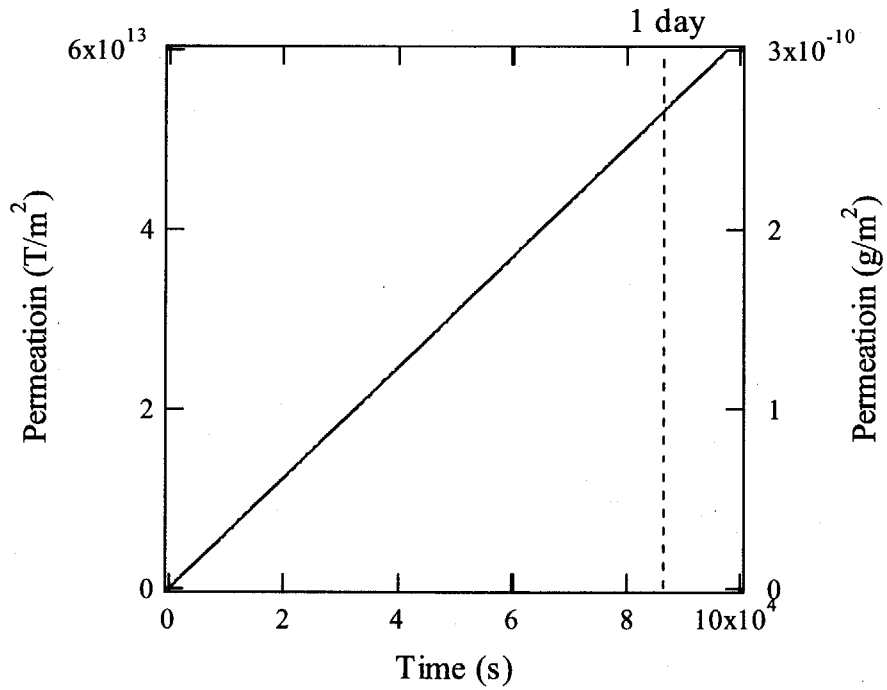


図8 IFMIF ターゲット背面壁からのトリチウム透過量

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
工率, 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
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
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	
光強度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量	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	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	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	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

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, 1 eVおよび1 u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は省略した。
- 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。
- EC関係理事会指令では 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。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
力	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
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

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	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 ⁻¹⁹	1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1

1 cal= 4.18605J (計量法)
= 4.184J (熱化学)
= 4.1855J (15°C)
= 4.1868J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS(仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 ⁻¹¹
	3.7×10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

IFMIFターゲット背面壁での中性子照射損傷を受けた低放射化フェライト鋼のトリチウム透過量評価