JAEA-Technology 2018-010 DOI:10.11484/jaea-technology-2018-010



# 中性子反射体のLi及びU不純物からの トリチウム反跳放出計算 (共同研究)

Calculations of Tritium Recoil Release from Li and U Impurities in Neutron Reflectors (Joint Research)

石塚 悦男 Inesh Kenzhina 奥村 啓介 Hai Quan HO 竹本 紀之 Yevgeni Chikhray

Etsuo ISHITSUKA, Inesh KENZHINA, Keisuke OKUMURA, Hai Quan HO Noriyuki TAKEMOTO and Yevgeni CHIKHRAY

> 高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 高温ガス炉研究開発センター 高温工学試験研究炉部

Department of HTTR HTGR Research and Development Center Oarai Research and Development Institute Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

November 2018

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2018

JAEA-Technology 2018-010

# 中性子反射体の Li 及び U 不純物からのトリチウム反跳放出計算 (共同研究)

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 高温ガス炉研究開発センター 高温工学試験研究炉部

石塚 悦男、Inesh Kenzhina<sup>\*1</sup>、奥村 啓介<sup>+1</sup>、 Hai Quan HO<sup>\*2</sup>、竹本 紀之<sup>+2</sup>、Yevgeni Chikhray<sup>\*3</sup>

(2018年9月13日 受理)

試験研究炉の一次冷却材へのトリチウム放出機構解明の一環として、PHITSを用いてベリリウム、ア ルミニウム及び黒鉛製中性子反射体中のLi及びU不純物から反跳放出するトリチウムについて計算 した。また、この結果を用いて、具体的にJMTR及びJRR-3Mのベリリウム中性子反射体を想定し、 MCNP6及びORIGEN2でLi及びU不純物から生成するトリチウム量を計算してトリチウムの反跳 放出量を評価した結果、Li及びU不純物から反跳放出するトリチウムは、ベリリウムから反跳放出する トリチウムに対して無視できる程度であり、それぞれ2桁及び5桁程度小さいことが明らかとなった。

本研究は日本原子力研究開発機構と国立カザフスタン大学との共同研究に基づいて実施したものである。

大洗研究所:〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

- +1 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉国際共同研究センター 燃料デブリ・炉内状況把 握ディビジョン
- +2 高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 環境技術開発センター 材料試験炉部
- \*1 ユーラシア国立大学(元国立カザフスタン大学)

\*2 博士研究員

\*3 国立カザフスタン大学

JAEA-Technology 2018-010

Calculations of Tritium Recoil Release from Li and U Impurities in Neutron Reflectors (Joint Research)

Etsuo ISHITSUKA, Inesh KENZHINA<sup>\*1</sup>, Keisuke OKUMURA<sup>+1</sup>, Hai Quan HO<sup>\*2</sup>, Noriyuki TAKEMOTO<sup>+2</sup> and Yevgeni CHIKHRAY<sup>\*3</sup>

Department of HTTR, HTGR Research and Development Center, Oarai Research and Development Institute, Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development, Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 13, 2018)

As a part of study on the mechanism of tritium release to the primary coolant in research and testing reactors, tritium recoil release rate from Li and U impurities in the neutron reflector made by beryllium, aluminum and graphite were calculated by PHITS code. On the other hand, the tritium production from Li and U impurities in beryllium neutron reflectors for JMTR and JRR-3M were calculated by MCNP6 and ORIGEN2 code. By using both results, the amount of recoiled tritium from beryllium neutron reflectors were estimated. It is clear that the amount of recoiled tritium from Li and U impurities in beryllium neutron reflectors are negligible, and 2 and 5 orders smaller than that from beryllium itself, respectively.

Keywords : Tritium Recoil Release, Primary Coolant, Neutron Reflectors of Beryllium, Aluminum and Carbon, JMTR, JRR-3M, Lithium and Uranium Impurities in Beryllium, PHITS, MCNP6, ORIGEN2

This work has been performed in Japan Atomic Energy Agency as a joint research with Al-Farabi Kazakh National University.

+1 Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science

 $\pm 2$  Waste Management and Decommissioning Technology Development Center, Department of JMTR

\*1 Gumilyov Eurasian National University (Former Al-Farabi Kazakh National University)

\*2 Post-Doctoral Fellow

\*3 Al-Farabi Kazakh National University

# 目 次

1. F	序 論	1
2. 『	中性子反射体の Li 及び U 不純物からのトリチウム反跳放出率	1
3. ~	ベリリウム中性子反射体中の Li 及び U 不純物によるトリチウム生成	2
4. ~	ベリリウム中性子反射体中の Li 及び U 不純物からのトリチウム反跳放出	4
5. 养	結 論	5
謝	辞	5
参考	文献	6
付	録]	19
А	1. 従来のトリチウム反跳放出式1	19
А	2. PHITS コード入力データ例	20
А	3. ベリリウム反射体の中性子スペクトル	25
А	4. ORIGEN2 コード入力データ例	32

# Contents

1.	Introduction	1
2.	Release rate by tritium recoil from Li and U Impurities in neutron reflectors	1
3.	Tritium production by Li and U impurities in beryllium neutron reflectors	2
4.	Tritium recoil release from Li and U impurities in beryllium neutron reflectors $\ldots$	4
5.	Conclusion	5
Acl	xnowledgements	5
Ref	erences	6
App	pendix1	9
A	A 1. Conventional equations for tritium recoil release1	9
A	A 2. Example of input data for PHITS code2	20
A	A 3. Neutron spectrums of beryllium neutron reflectors2	25
A	A 4. Example of input data for ORIGEN2 code	32

This is a blank page.

#### 1. 序 論

試験研究炉における1次冷却材へのトリチウム放出に関しては、運転・利用及び廃棄物管理の観点 から報告されているが<sup>1-5)</sup>、その放出機構に関しては未解明の部分が残されている。このため、本報告 では、放出機構解明の一環として、中性子反射体中の不純物から反跳放出されるトリチウムについて 検討することとした。

1次冷却材へのトリチウム放出例を Fig.1.1 に示す。この例は、中性子反射体としてベリリウムを使用 している材料試験炉 (JMTR: Japan Materials Testing Reactor)のものであるが、JRR-3M (Japan Research Reactor-3M)等でも同様に原子炉の運転に伴って一次冷却水中のトリチウム濃度増加が確 認されている<sup>1-4)</sup>。この原因の一つとしてベリリウムからのトリチウムの反跳放出<sup>®</sup>が考えられているが、ベ リリウムがトリチウム放出源としてどれほど寄与しているか、ベリリウム以外にもトリチウム放出に寄与して いるものがあるのかについては明らかにされていない。このため 2013 年から、一次冷却水中へのトリチ ウム放出源に関する共同研究を国立カザフスタン大学と開始し、JMTR 及び JRR-3M の運転データか らサイクル毎のトリチウム放出率をまとめるとともに<sup>1)</sup>、PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)<sup>7)</sup>を用いたベリリウムからの反跳トリチウム放出室の計算方法について検討した<sup>8)</sup>。この結果、運 転中における JMTR 及び JRR-3 のトリチウム放出量を明らかにするとともに、ベリリウム中性子反射体を 新規製作品に交換するとトリチウム放出量が一時的に低下するがその後の運転に伴ってふたたび増加 すること(Fig.1.2 参照)<sup>1)</sup>、PHITS でトリトン線源を用いて計算すればトリチウム反跳放出率を比較的簡 単に評価できること<sup>8)</sup>を明らかにした。

トリチウム放出源とその機構について、これまでの知見をもとにまとめた表を Table 1.1 に示す<sup>8</sup>。トリ チウム放出源としては、中性子反射体であるベリリウム自体の他に Li 不純物による(n,α)反応及び U 不純物の三体核分裂が考えられるが、この影響がどの程度影響しているかは明らかになっていない。こ のため、本報告書では、Li 及び U 不純物から生成するトリチウムが1次冷却水中にどの程度の割合で 反跳放出するかについて検討した。計算方法の概要を Fig.1.3 に示す。

第2章では、Liの(n,α)反応及びUの三体核分裂で発生するトリチウムのエネルギーを考慮してトリトン線源とし、PHITS で反跳放出率を求めた。この際、ベリリウム中性子反射体の他にアルミニウム及び 黒鉛も中性子反射体として多用されていることから、アルミニウム及び黒鉛製の中性子反射体について も計算した。第3章では JMTR 及び JRR-3M のベリリウム中性子反射体中の Li 及び U 不純物から生 成するトリチウムを MCNP6 及び ORIGEN2 で計算し、第4章では前章で求めた反跳放出率と生成量 から、トリチウムの反跳放出量を求めた。なお、JMTR では、ベリリウム製の中性子反射体として、炉心を 支える役割も担う井形状のベリリウム(ベリリウム日枠<sup>9</sup>)と一般的な角柱状のベリリウム反射体があるが、 本報告では区別せずにベリリウム中性子反射体と表記するものとする。

#### 2. 中性子反射体の Li 及び U 不純物からのトリチウム反跳放出率

中性子反射体からのトリチウム反跳放出率は、PHITS でトリトン線源を用いれば比較的簡単に求める ことができる<sup>8</sup>。Li 不純物の(n, α)反応に関しては参考文献 8 と同様に計算できるが、U 不純物の三 体核分裂で生成するトリチウムのエネルギーは、単色スペクトルではなくガウス分布を有するスペクトル になる点が<sup>6</sup>Li(n、 $\alpha$ )<sup>3</sup>H 反応と異なる。三体核分裂で生成するトリチウムのエネルギーに関しては、 1960 年代から 1980 年代にかけて研究されているが、本計算では直近に報告された P.D'hundt 他の 値<sup>10)</sup>を用い、PHITS に用いるトリトン線源のエネルギーを中心エネルギー8.4 MeV、半値幅 6.7 MeV の ガウス分布とした。また、トリチウム反跳放出率の計算においては、2×10<sup>4</sup> (triton/cm<sup>3</sup>)程度のトリトン密 度まで計算すれば、有効数字 2 桁の計算精度が得られることが明らかとなっていることから<sup>8)</sup>、本計算 においても 2×10<sup>4</sup> (triton/cm<sup>3</sup>)以上のトリトン密度が得られるまで計算した。なお、計算には Mac mini (Mid 2011, MacOS 10.10, 2.7 GHz Intel Core i7, 8GB 133MHz DDR3)等を用いた。

PHITS の計算モデルは、球状のベリリウムが水中に配置されたものとし、半径を 0.05、0.2、1.0、4.0、20.0、50.0cm として計算した。また、PHITS の計算結果と従来式との比較も行った。従来式を用いたトリ チウム反跳放出式を付録 A.1 に示す<sup>11,12)</sup>。半径をパラメータとして計算した理由は、同付録(A1.2)式の 様に放出率が表面積と体積(或いは重量)の比で定まることが明らかになっていることから、PHITS の計 算結果が同じ傾向になっていることを確認するためである。また、この関係が分かれば、大きさや形状 が異なっていてもトリチウム反跳放出率を求めることができる。なお、使用したベリリウムの物性値は参考 文献 13 及び 14 の値を用いた。

半径 0.2cm の球状ベリリウムの計算において、ベリリウムと水との境界付近の1次元トリトンフラックス 分布を Fig. 2.1 に示す。同図(a)及び(b)は、それぞれ Liの(n,α)反応及び U の三体核分裂に相当す るトリトンエネルギーを線源として計算したもので、三体核分裂に相当するトリトンエネルギーの方が(n,α) 反応より高いため、より遠方に到達していることが分かる。

ベリリウム中性子反射体における Li 及び U 不純物からのトリチウム反跳放出率の計算結果を Fig. 2.2 に示す。同図(a)及び(b)は、放出率と表面積/体積及び表面積/重量で整理したものであり、付録 A.1の(A1.2)式と同様に線形となった。また、PHITSの計算結果と従来のトリチウム反跳放出式との比較 に関しては、U の三体核分裂の方が Li の(n, α)反応より近い結果となったが、(A1.2)式はスペクトル状 の反跳エネルギーに対応していないことから特別な意味はないものと考えられるが、ここでは単なる比較の目安との意味合いで掲載している。

同様に、アルミニウム及び黒鉛中性子反射体における Li 及び U 不純物からのトリチウム反跳放出率の計算結果を Fig. 2.3 及び 2.4 に示す。Li の (n, α)反応に関しては、従来のトリチウム反跳放出式の 方が PHITS の計算結果より数倍から1桁程度大きい結果となっている。なお、黒鉛中性子反射体に関 する PHITS の計算モデルは、HTTR を想定して黒鉛中性子反射体が 4MPa のヘリウムガス中に配置さ れているものとした。U の三体核分裂によるトリチウム反跳放出を計算する際の PHITS の入力データ例 を付録 A.2 に示す。

#### 3. ベリリウム中性子反射体中の Li 及び U 不純物によるトリチウム生成

本章では、具体的に JMTR 及び JRR-3M のベリリウム中性子反射体を想定し、Li 及び U 不純物から生成するトリチウム量を評価した。

JMTR 及び JRR-3M のベリリウム中性子反射体の重量・表面積及び不純物をそれぞれ Table 3.1 及び 3.2 に示す。JMTR のベリリウム中性子反射体重量及び表面積は参考文献 1 の値を再掲したものであるが、JRR-3M のベリリウム中性子反射体重量及び表面積は、ほとんどの運転が 8 本のベリリウムプラグ全てを装荷した状態で行われたことから、参考文献 1 の値に 8 本分のベリリウムプラグの重量及び表面積を加算した値を採用した。

U 不純物に関しては、JMTR のベリリウム中性子反射体では 30ppm の天然ウランが不純物として含ま れている。JRR-3 のベリリウム中性子反射体に関しては、測定データがないが JMTR のベリリウム中性子 反射体と同様に米国のブラッシュウェルマン(現在名:マテリオン)社製であること、これまでの測定デー タが 9.6~42ppm と報告されていることから<sup>15)</sup>、JMTR のベリリウム中性子反射体と同程度の天然ウラン が不純物として含まれているものと想定して 30ppm とした。なお、Li 不純物に関しては、検出限界以下 であるが 3ppm(<sup>6</sup>Li としては 0.2ppm)と想定した。この値は、JMTR 及び JRR-3M に於いてベリリウムの (n<sub>f</sub>、α)反応で生成する<sup>6</sup>Li の飽和値が 5~21ppm<sup>8)</sup>であることを考慮すると、1次冷却水中へのトリチウ ム放出に寄与する割合は数%に留まる量であると予想できる。

Li 不純物の(n, α) 反応及び U 不純物の核反応によって生成するトリチウムは ORIGEN2<sup>16)</sup>で求める ことができるが、その計算に当たっては適切な ORIGEN2 ライブラリを用いる必要がある。ORIGEN2 に は、軽水炉をはじめとした代表的な炉心スペクトルに対するライブラリが用意されているが、JMTR 及び JRR-3M のベリリウム中性子反射体領域について計算するためには、中性子スペクトルが異なるため使 用できない。このため、JMTR 及び JRR-3M のベリリウム中性子反射体領域に適した ORIGEN2 ライブラ リを作成する必要がある。

ORIGEN2 ライブラリの作成及びトリチウム生成量の計算手順を以下に示す。

- (1) MCNP6<sup>17)</sup>で炉心とベリリウム中性子反射体を含む体系の臨界計算を行い、ベリリウム中性子反射体の中性子束(絶対値)と 200 群程度の多群中性子スペクトルを求める。この際、臨界計算では中性子束の相対値しか得られないため、炉心部の核分裂率をタリーしておく。また、後述の(3)のために、炉心部とベリリウム中性子反射体領域の1群中性子束の比を得ておく。
- (2) 多群放射化断面積ライブラリを中性子スペクトルで1群に縮約することによりベリリウム中性子反射 体部分に特化した ORIGEN2 用ライブラリを作成する<sup>18,19</sup>。
- (3) 原子炉の運転出力履歴から、反射体領域での中性子束(1 群)の履歴を(1)で得た中性子束の比から求める。
- (4) (2)で作成した ORIGEN2 ライブラリを使用して、(3)の中性子束履歴にそって、トリチウム生成量を 計算する。

ベリリウム中性子反射体における中性子スペクトルの計算に関しては、JMTR 及び JRR-3M の炉心 を MCNP6 で計算し、ベリリウム中性子反射体の平均的な 190 群の中性子スペクトルを求めた。この結 果を Fig. 3.1 及び付録 A.3 に示す。JMTR のベリリウム中性子反射体は、JRR-3M より約 8 倍大きいた め、熱化の影響がより大きく現れている。なお、ベリリウムの体積については、密度を 1.8477 g/cm<sup>3</sup> とし て<sup>13)</sup> Table 3.1 の重量から求めた。計算で得られた中性子スペクトルは、参考文献 1 の 137 群スペクト ルと同様な値となったが、JRR-3M の場合、ベリリウムプラグの体積を考慮したことから 1 割程度小さい 値となった。

得られたベリリウム中性子反射体の中性子スペクトルを使用し、ベリリウム中性子反射体部分に特化 した ORIGEN2 用の1群断面積ライブラリを多群放射化断面積ライブラリから作成した。作成した ORIGEN2 ライブラリと Table 3.3 に示す Li 及び U の不純物重量を用いて、Li 及び U 不純物から生成 するトリチウム量を計算することができるが、その前に<sup>235</sup>U 燃焼速度を確認する必要があると考えた。こ のため、<sup>235</sup>U の燃焼を MCNP6 及び ORIGEN2 で計算して比較した。この結果を Fig. 3.2 に示す。な お、MCNP6 による<sup>235</sup>U 燃焼計算は、計算で求まる運転後の<sup>235</sup>U 量を次の運転サイクルのベリリウム中 性子反射体の物性値に入力し、次の運転サイクル後の<sup>235</sup>U 量を求める方法を繰り返す方法で実施し た。また、ORIGEN2 による<sup>235</sup>U 燃焼計算は、中性子束として、それぞれ JMTR 及び JRR-3M の中性 子スペクトルから求めた値、2.63×10<sup>14</sup> 及び 1.29×10<sup>14</sup> (n/cm<sup>2</sup>/s) を用いた。この際、両コードによる計 算は、トリチウムの半減期(12.32 年)がサイクル間の停止期間(数ヵ月)より十分に長く計算結果に影響 しないことから、停止期間を無視して定格出力で連続運転したものとして計算した。

Fig. 3.2 の計算結果から、ORIGEN2 計算による<sup>235</sup>U 燃焼速度は、MCNP6 の計算結果と比べて遅 いことが明らかとなった。一般に、MCNP6 の計算結果の方が精度が高いものと考えられることから、 ORIGEN2 の計算を MCNP6 に合わせることとし、このため、以後の ORIGEN2 の計算では JMTR 及び JRR-3M の中性子束を2.99×10<sup>14</sup> 及び1.88×10<sup>14</sup> (n/cm<sup>2</sup>/s) とし、ORIGEN2 による<sup>235</sup>U 燃焼計算を MCNP6 に合わせるようにして計算した。ORIGEN2 の入力データ例を付録 A.4 に示す。

ORIGEN2 による Li 及び U 不純物から生成する核種の計算結果及び Be から生成する <sup>6</sup>Li の計算 結果を Fig. 3.3 及び 3.4 に示す。JMTR における U 不純物から生成する核種の計算結果は、参考文 献 15 とほぼ同じ値となった。ORIGEN2 によるベリリウム中性子反射体及びその中に含まれる Li 及び U 不純物から生成するトリチウムの計算結果を Fig. 3.5 及び 3.6 に示す。なお、トリチウム生成量は、ベリ リウムから生成されるトリチウムと比較するため、ベリリウムから生成するトリチウムがほぼ飽和値に達した 値で規格化して表示している。この結果から、ベリリウム中性子反射体に含まれる Li 及び U 不純物か ら生成するトリチウムは、ベリリウムから生成されるトリチウムより、それぞれ 2 桁及び 6 桁程度小さいこと が明らかとなった。

#### 4. ベリリウム中性子反射体中の Li 及び U 不純物からのトリチウム反跳放出

前章の結果から、ベリリウム中性子反射体に含まれる Li 及び U 不純物から生成するトリチウム量が 明らかとなったため、Fig. 2.2 に示したトリチウム反跳放出率の計算結果を用いて、ベリリウム中性子反 射体から放出される反跳トリチウムを求めることができる。

JMTR ベリリウム中性子反射体からのトリチウム反跳放出率に関しては、表面積と重量の比から、ベリ リウム及び Li 不純物の(n,  $\alpha$ )反応の場合 1.5×10<sup>-4</sup>、U 不純物の三体核分裂の場合 8.9×10<sup>-4</sup>となる。 これらの値と Fig. 3.5 に示したトリチウム生成量から反跳トリチウムを求めると Fig. 4.1 となる。同様に、 JRR-3M ベリリウム中性子反射体からのトリチウム反跳放出率に関しては、ベリリウム及び Li 不純物の(n,  $\alpha$ )反応の場合 2.1×10<sup>-4</sup>、U 不純物の三体核分裂の場合 1.2×10<sup>-3</sup>となる。これらの値と Fig. 3.6 に示 したトリチウム生成量から反跳トリチウムを求めると Fig. 4.2 となる。なお、Fig. 3.5 及び Fig. 3.6 は、ベリ リウムから生成するトリチウムがほぼ飽和値に達した値で規格化して表示している。

以上の結果から、ベリリウム中性子反射体に含まれる Li 及び U 不純物から反跳放出するトリチウムは、ベリリウムから反跳放出するトリチウムより、それぞれ2桁及び5桁程度小さいことが明らかとなった。

## 5. 結 論

試験研究炉の一次冷却材へのトリチウム放出機構解明の一環として、中性子反射体中の Li 及び U 不純物から反跳放出するトリチウムについて評価した結果、以下が明らかとなった。

- (1) Li の(n, α)反応及び U の三体核分裂に相当するトリトンエネルギーを線源とし、ベリリウム、アル ミニウム及び黒鉛製中性子反射体から反跳放出するトリチウムを PHITS で計算した結果、トリチ ウム反跳放出率は、従来の評価式と同様に表面積/体積(或いは重量)と線形関係にあること、 三体核分裂によるトリトンエネルギーの方が(n, α)反応より高いため、反跳トリチウムがより遠方に 到達することが明らかとなった。
- (2) (1)の結果から、JMTR 及び JRR-3M のベリリウム中性子反射体からのトリチウム反跳放出率は、 ベリリウム及び Li 不純物の(n, α)反応の場合 1.5×10<sup>-4</sup> 及び 2.1×10<sup>-4</sup>、U 不純物の三体核分 裂の場合 8.9×10<sup>-4</sup> 及び 1.2×10<sup>-3</sup>となった。
- (3) JMTR 及び JRR-3M のベリリウム中性子反射体中の Li 及び U 不純物から生成するトリチウムを MCNP6 及び ORIGEN2 で計算した結果、Li 及び U 不純物から生成するトリチウムは、ベリリウム から生成されるトリチウムより、それぞれ 2 桁及び 6 桁程度小さいことが明らかとなった。
- (4) (2)及び(3)の計算結果をもとに、JMTR 及び JRR-3M のベリリウム中性子反射体中の Li 及び U 不純物から反跳放出するトリチウム量を評価した結果、ベリリウムから反跳放出するトリチウムより、 それぞれ 2 桁及び 5 桁程度小さいことが明らかとなった。

以上の結果から、ベリリウム、アルミニウム及び黒鉛製の中性子反射体中のLi及びU不純物から反跳放出するトリチウム量が明らかになったとともに、具体的にJMTR及びJRR-3Mのベリリウム中性子反射体を想定してトリチウム反跳放出量を評価した結果、Li及びU不純物の影響はベリリウムから反跳放出するトリチウムより、十分小さいことが明らかとなった。

#### 謝 辞

PHITS の計算にあたっては、PHITS 事務局から多くの情報を頂いた。また、本報告書をまとめるに当たり、Byung Jin JUN 氏(元リサーチフェロー、元韓国原子力研究院)、高速炉・新型炉研究開発部門 炉設計部 高温ガス炉設計グループの深谷裕司研究副主幹に貴重なご意見を頂いた。以上、記して 謝意を表します。

## 参考文献

- 石塚悦男,本橋純,塙 善雄,米田政夫,綿引俊介,A.Mukanova, I.Kenzhina, Y.Chikhray, "試験研究炉における一次冷却水中へのトリチウム放出源に関する検討 JMTR、JRR-3M 及び JRR-4 運転データから評価したトリチウム放出率 -", JAEA-Technology 2014-025 (2014), 77p.
- 2) 照沼直弘,長尾美春,横内猪一郎,佐藤政四,"JMTR 運転中における1次冷却水中の放射性核 種濃度", JAEA-Review 2007-034 (2007), 60p.
- 3) 研究炉部, "平成 3 年度研究炉部年報 (運転・利用と研究・技術開発)", JAERI-M 92-154, (1992), p.39.
- 4) 山口武憲, "JRR-3M のスタックから放出されるトリチウムの発生源", 保健物理, vol.29 (1994) pp.366-368.
- 5) Arnoldus Lambertus Dipu, H.Ohashi, S.Hamamoto, H.Sato, T.Nishihara, "Assessment of amount and concentration of tritium in HTTR-IS system based on tritium behavior during hightemperature continuous operation of HTTR ", Annals of Nuclear Energy, vol.88 (2016) pp.126-134.
- 6) 石塚悦男,河村 弘,須貝宏行,棚瀬正和,中田宏勝, "ベリリウム中のトリチウム挙動実験(2) 反跳放出及び拡散挙動-", JAERI-M 90-013 (1990), 37p.
- 7) T.Sato, K.Niita, N.Matsuda, S.Hashimoto, Y.Iwamoto, S.Noda, T.Ogawa, H.Iwase, H.Nakashima, T.Fukahori, K.Okumura, T.Kai, S.Chiba, T.Furuta and L.Sihver, "Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52", J. Nucl. Sci. Technol., vol.50, no.9 (2013), pp.913-923.
- 8) 石塚悦男, Inesh Kenzhina, 奥村啓介, 竹本紀之, Yevgeni Chikhray, "PHITS コードによる中性子 照射下ベリリウムからの反跳トリチウム放出率計算", JAEA-Technology 2016-022 (2016), 35p.
- 9) 綿引俊介,塙 善雄,浅野典一,檜山和久,伊藤祥人,坪井一明,深作秋富, "ベリリウム枠及び γ線遮へい板の製作及び交換作業", JAEA-Review 2012-013 (2012), 92p.
- 10) P.D'hundt, C.Wagemans, A.Declercq, G.Barreau and A.Deruytter, "Energy distributions and absolute yields of the charged light particles emitter during the thermal neutron induced ternary fission of <sup>235</sup>U", Nucl. Phys. vol.346, no.3 (1980) pp.461-472.
- 11) J.C.Ward, "Radioactivity of Nuclear Reactor Cooling Fluids", ORNL-3152 (1961).
- 12) R.A.Schmitt and R.A.Sharp, "Measurement of the range of recoil atoms", Third-Annual Radiation Effects Symposium, III (1958).
- A.J.Stonehouse, "Physics and chemistry of beryllium", J.Vac.Sci.Technol., vol.3, no.3 (1986) pp.1163-1170.
- 14) IAEA Nuclear Section, "Isotope Browser app, Ver.1-Db Ver.10".
- 15) 山本克宗, 横内猪一郎, 比佐 勇, 米沢仲四郎, 中山富佐雄, "JMTR 1 次冷却水中の放射性ヨウ 素の放出源", 日本原子力学会誌, vol.29, no.8 (1987) pp.717-723.
- 16) K. Suyama, "ORIGEN2.2-UPJ: A Complete Package of ORIGEN2 libraries based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3", NEA-1642, OECD NEA Data Bank (2006).
- 17) Goorley, T. et al., "Initial MCNP6 Release Overview", Nuclear Technology, vol.180, no.3 (2012)

pp.298-315.

- 18) 奥村啓介, 杉野和輝, 小嶋健介, 神 智之, 岡本 力, 片倉純一, "JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット:ORLIBJ40", JAEA-Data/Code 2012-032 (2012), 148p.
- K.Okumura and K.Kojima, "Development of multi-group neutron activation cross-section library for decommissioning of nuclear facilities", Proceedings of the 2014 Symposium on Nuclear Data (2014), pp.43-47.

Table 1.1 Summary of tritium release into primary coolant from beryllium neutron reflector

Element	Reactions	Core components, etc.	Release mechanism	Contribution to tritium release
<sup>2</sup> H	(n, γ)	Coolant	Direct	Negligible <sup>1)</sup> ~1Bq/cm³ ~0.2Bq/Wd (JMTR)
61 :	(7	Impurity of beryllium components	Diffusion	Negligible: low temp*.
°L1	(n <sub>t</sub> , α)		Recoil	? **
<sup>9</sup> Be	$(n_{f}, \alpha)$ <sup>6</sup> He and <sup>6</sup> Li $(n_{t}, \alpha)$	Beryllium components	Diffusion	Negligible: low temp*.
			Recoil	How to calculate ? Calculation method by PHITS code were proposed <sup>8)</sup>
	Ternary fission	Contamination of fuel plates	Direct	?
225		Impurity of beryllium components Impurity of other components (Al, etc.)	Diffusion	Negligible : low temp*.
<sup>235</sup> U			Recoil	? **
			Diffusion	Negligible: low temp*.
			Recoil	? **

\* : Coolant temperature  $< 50^{\circ}C$ 

\*\*: MCNP6(Ver.1.0), ORIGEN2(Ver.2upj), PHITS (Particle and Heavy Ion Transport

code System, Ver.3.020)

Reactor	Weight (kg)	Surface area (cm <sup>2</sup> )
JMTR	$7.50 imes10^2$	$3.32 \times 10^{5}$
JRR-3M	$9.13 \times 10^{1}$	$5.68 \times 10^{4}$

Table 3.1 Weight and surface area of beryllium neutron reflectors

JMTH		R JRR-3M		3M
Element	Element (Lot No.		(Lot No	. 3947)
	Тор	Bottom	Тор	Bottom
Be	99.14	99.01	98.88	99.88
BeO	1.08	1.16	1.52	1.53
Fe	0.1030	0.1050	0.0905	0.0910
С	0.0520	0.0680	0.1460	0.1010
Al	0.0420	0.0260	0.0340	0.0350
Mg	0.0130	0.0160	0.0300	0.0300
Si	0.0280	0.0255	0.0285	0.0290
Ν	0.0240	0.0235	0.0305	0.0335
Mn	0.0085	0.0100	0.0075	0.0075
Cr	0.0065	0.0065	0.0090	0.100
Ni	0.0125	0.0125	0.0095	0.0095
Со	0.0004	0.0004	0.0005	0.0007
Cu	0.0050	0.0050	0.0020	0.0020
Li	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
U	0.0030	<0.0030	-	-
"Top" "_"	', "Bottom"	: Sampling	position on p	roduction lots

Table 3.2 Impurities of beryllium neutron reflectors (wt %)

: not measured

 Table 3.3
 Impurities weight of beryllium neutron reflector

		Weight (g)
Reactor	Li	U
JMTR	$2.25 \times 10^{0}$	$2.25 \times 10^{1}$
JRR-3M	$2.74 \times 10^{-1}$	$2.74 \times 10^{\circ}$



(from reference 1)

Fig. 1.1 Tritium concentration of JMTR primary coolant during operation



Fig. 1.2 Tritium release rate for JRR-3M operation cycle



Fig. 1.3 Outline of calculation method for impurities in beryllium neutron reflector



(b) Ternary fission

Fig. 2.1 1D distribution of triton flux at near boundary



Fig. 2.2 Tritium release rate (R/P) from Li and U impurities in beryllium neutron reflector



(b) Relation of surface and weight

Fig. 2.3 Tritium release rate (R/P) from Li and U impurities in aluminum neutron reflector



(b) Relation of surface and weight

Fig. 2.4 Tritium release rate (R/P) from Li and U impurities in carbon neutron reflector



Fig. 3.1 Neutron spectrums of beryllium neutron reflectors



Fig. 3.2 Change of amount for <sup>235</sup>U in beryllium neutron reflectors



Fig. 3.3 Change of nuclides in beryllium neutron reflectors (JMTR)



Fig. 3.4 Change of nuclides in beryllium neutron reflectors (JRR-3M)



\* : Accumulated values, and normalized values with produced tritium radioactivity from beryllium at 550 days operation.

Fig. 3.5 Tritium production in beryllium neutron reflectors (JMTR)



Fig. 3.6 Tritium production in beryllium neutron reflectors (JRR-3M)



\* : Accumulated values, and normalized values with produced tritium radioactivity from beryllium at 550 days operation.

Fig. 4.1 Tritium recoil release from beryllium neutron reflectors (JMTR)



\* : Accumulated values, and normalized values with produced tritium radioactivity from beryllium at 1200 days operation.

Fig. 4.2 Tritium recoil release from beryllium neutron reflectors (JRR-3M)

付 録

A.1 従来のトリチウム反跳放出式

トリチウムの反跳放出量は次式で求めることができる<sup>11)</sup>。

$$R = S \frac{R_t}{4} \rho_t \tag{A1.1}$$

- R : トリチウム反跳放出量 (個)
- S: 中性子反射体の表面積 (cm<sup>2</sup>)

R<sub>t</sub> : 中性子反射体中のトリチウム反跳距離 (cm)

 $\rho_t : {}^{6}Li(n_t, \alpha){}^{3}H 反応密度=トリチウム密度 (個/cm^3)$ 

トリチウム反跳放出率(R/P)は、中性子反射体の体積を $V(cm^3)$ とするとトリチウム生成量P(個)が  $\rho_t V$ となることから次式となる。

$$R/P = \frac{R_t}{4} \frac{S\rho_t}{\rho_t V} = \frac{R_t}{4} \frac{S}{V} = \rho \frac{R_t}{4} \frac{S}{W}$$
(A1.2)

また、中性子反射体中のトリチウム反跳距離は以下の Nielsen の式<sup>11,12)</sup>で求めることができる。

$$R_{t} = \frac{0.6 \leftrightarrow 10^{-3} (Z_{t}^{2/3} + Z^{2/3})^{1/2} (A_{t} + A) A E_{tr}}{Z_{t} Z A_{t} \rho}$$
(A1.3)

$Z_t$	: トリチウムの原子番号	1
Ζ	: 中性子反射体の原子番号	Be:4、Al:13、C:6
$A_t$	: トリチウムの質量数 <sup>14)</sup>	3.016049
A	: 中性子反射体の質量数 14)	<sup>9</sup> Be:9.012183、 <sup>27</sup> Al: 26.981538、 <sup>12</sup> C:12
$E_{tr}$	: トリチウムの反跳エネルギー (MeV)	(nt,α):2.73、三体核分裂:8.4
ρ	: 中性子反射体の密度 <sup>13,14)</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	Be:1.8477, Al:2.7, C:1.77

### A.2 PHITS コード入力データ例

[Title] Recoiled Tritium by U impurity from Be Sphere r=1.0cm [Parameters] # (D=0) 3:ECH 5:NOR 6:SRC 7,8:GSH 11:3DSH 12:DUMP
# (D=10) number of particles per one batch
# (D=10) number of batches = 0 icntl = 100000 maxcas = maxbch 10000maxbcn – 10000 # (D-10) number of b # for nuclear data, cut-off and data max. energy (MeV) emin(2) = 1.00000000E-10 # neutron cut-off dmax(2) = 20.000000 # neutron data max. emin(12) = 1.00000000E-03 # electron cut-off dmax(12) = 1000.00000 # electron data max. emin(14) = 1.00000000E-03 # photon cut-off dmax(14) = 1000.00000 # electron data max. dmax(14)= 1000.00000# photon data max. 

 amax(14)
 - 1000.00000
 # photon d.

 # only for cut-off energy (MeV)
 emin(1)
 = 1.00000000E-03 # proton

 emin(13)
 = 1.00000000E-03 # positron

 emin(15)
 = 1.00000000E-03 # deuteron

 emin(16)
 = 1.00000000E-06 # triton

 emin(18)
 = 1.00000000E-03 # alpha

 # for low E d -->Be = 1.000000000E-06 # min energy of range calculation for charged particle (MeV) = 3.000000000E5 # max energy of range calculation for charged particle (MeV) = 1.00000000E-03 # (D=1.0) cut-off energy of INCL model (MeV) esmin esmax einclmin # # (D=0) 0:No, 1:Old, 2:EBITEM, 3:EBITEM+Isomer # (D=0) photonuclear GDR = 1 igamma = 1 ipnint # Shielding : e-mode = 0 # (D=0) 0: Normal, 1: Event generator mode, 2: New event generator mode # (D=0) 0: no, 1: with e straggling, 10: ATIMA # (D=0) 0: no, 1:orig. 2:first Moliere, 10: ATIMA = 1 e-mode = 0 nedisp = 1 nspred # file(6)# (D=phits.out) general output file name = phits.out file(0) = /Users/ishi/phits/data/xsdir.jnd # (D=xdirs) nuclear data input file name file(14) = /Users/ishi/phits/data/trxcrd.dat # (D=trxcrd.dat) photon data input file name file(20) = /Users/ishi/phits/XS/egs # (D=/phits/XS/egs) EGS data folder name # (D=0) 0:no tally at batch, 1:over write, 2:different # (D=0) -1:continuous itall = 1 istdev =-1# [Source] totfact = 1.0 <source> = 1.0 s-type = 10 proj = triton # sphere type source (energy distribution) # kind of incident nucleus # kind of incident nucleus
# center position of x-axis [cm]
# center position of y-axis [cm]
# center position of z-axis [cm]
# inner radious [cm]
# outer radious [cm]
# angle of z-direction
# gaussian type energy
# center energy [MeV/u] 8.4/
# FWHM [MeV/u] 6.7/3
# min cut off energy [MeV/u]
# man cut off energy [MeV/u]  $x_{0}^{0} = 0.0$ y0 = 0.0z0 = 0.0r1 = 0.0  $r^{1}_{2} = 0.99999$ dir = all2 e-type = = 2.8= 2.23 = 1.0E-6 eg08.4/3 eg1 eg2 eğ3 = 7.0 [Material] m1 #He (0.19 g/cm3) 4He 100 # Be (1.85 g/cm3) m29Be 1.0 (0.99 g/cm3 at 50C) m3 # H2O 1H 160 1 # BeO (3.02 g/cm3) m4 9Be 1.0 160 1.0

[Mat Name Color] mat size color name He pastelyellow 0  $\frac{1}{2}$ Вe pastelmagenta 1 H2O  $1\\1$ pastelcyan 4 BeO pastelgreen [Surface] 500. 1 110 120 130 SO 1.0 1.5 100.0 SOSO SO [<u>C</u>ell] 5 20 30 1  $\frac{1}{2}$  $\frac{3}{3}$  $-1.85 \\ -0.99$ -110 #20 #20 -120110  $-130 \\ #40$ 40 -0.99120 #30 -1 50 -1 #20 #30 [Volume] reg 20 30 vol 4.19E+00 9.94E+00 40 4.19E+6[ T - G s h o w ] title = Recoiled Tritium by U impurity from Be Sphere r=1.0cm mesh = xyzx-type = 2nx = 100min = -2.0max = 2.0xmax = 1 z-type = nz = 1 -0.001 0.001 y-type = 2 ny = 100 ymin = -2.0 ymax = 2.0 axis = xy output = 6file = gshow.dat epsout = 1 [T - Product] title = Triton source energy (Recoiled Tritium by U impurity from Be Sphere r=1.0cm) mesh = reg reg = 20 part = triton e-type = 2 ne = 100  $\begin{array}{ll} \text{emin} = & 0.\\ \text{emax} = & 30. \end{array}$ axis = engoutput = source axis = eng unit = 1 file = Nsource-energy.dat epsout = 1[T - Product] title = Source check geometry (Recoiled Tritium by U impurity from Be Sphere r=1.0cm) mesh = xyz x-type = 2 nx = 100min = -2.0max = 2.0z-type = 1 nz = 1-0.001 y-type = 2 0.001 ny = 100 ymin = -2.0ymax = 2.0e-type = 1

```
ne = 1
              0.
                   30.
     axis = xy
   output = source
      unit = 1
     file = source-geometry.dat
  epsout = 1
gshow = 1
[T-Product]
  title = Nuclear geometry (Recoiled Tritium by U impurity from Be Sphere r=1.0cm)
  mesh = xyzx-type = 2nx = 100
     m = -2.0
m = 2.0
  z-type = 1
nz = 1
  y-type = 2
                        0.001
     ny = 100
     y_{min} = -2.0
y_{max} = 2.0
   e-type = 1
     ne = 1
              0.
                   30.
  axis = xy
output = nuclear
unit = 2
      file = nuclear-geometry.dat
   epsout = 1
   gshow = 1
[T - T r a c k]
title = Triton flux (0.67MeV-30MeV) (Recoiled Tritium by U impurity from Be Sphere r=1.0cm)
  mesh = xyz
x-type = 2
     nx = 100
     min = -2.0
max = 2.0
  z-type = 1
nz = 1
  -0.001
y-type = 2
ny = 100
                         0.001
     ymin = -2.0
ymax = 2.0
   part = triton
  e-type = 1
ne = 1
              0.67 30.0
     unit = 1
     axis = xy
  file = flux1.dat
epsout = 1
  angel = \min[2.E-3] \max[2.E+03]
gshow = 1
\begin{bmatrix} T - T r a c k \end{bmatrix}
title = Triton flux (0.683eV-0.67MeV) (Recoiled Tritium by U impurity from Be Sphere
r=1.0cm)
  mesh = xyz
x-type = 2
     nx = 100
  mx = 100

min = -2.0

max = 2.0

z-type = 1
     nz = 1
  0.001
     ymin = -2.0
ymax = 2.0
   part = triton
```

```
e-type = 1
     ne = 1
              0.683E-06 0.67
     unit = 1
     axis = xy
     file = flux2.dat
  epsout = 1
  angel = cmin[2.E-3] cmax[2.E+03]
gshow = 1
 \begin{bmatrix} T - T r a c k \end{bmatrix}
title = Triton flux (0-0.683eV) (Recoiled Tritium by U impurity from Be Sphere r=1.0cm)
  mesh = xyzx-type = 2nx = 100
  xmin = -2.0
xmax = 2.0
z-type = 1
  y-type = 2
     nz = 1
                         0.001
     ymin = -2.0
ymax = 2.0
  part = triton
  e-type = 1
     ne = 1
             0.0
                               0.683E-06
     unit = 1
     axis = xy
     file = flux3.dat
  epsout = 1
angel = cmin[2.E-3] cmax[2.E+03]
gshow = 1
[T - Cross]
  mesh = reg
reg = 2
      r-in r-out
20 30
30 40
                          area
                           1.0
                           1.0
  e-type = 3
ne = 100
     emin = 1E-10
     emax = 30.0
     axis = eng
unit = 1
  output = flux
     part = triton alpha
file = cross.dat
  epsout = 1
[T - T r a c k]
title = Tritium line distribution (Recoiled Tritium by U impurity from Be Sphere r=1.0cm)
  mesh = xyz
  y-type = 1
     ny = 1
             -0.001
                       0.001
  z-type = 1
     nz = 1
  -0.001
x-type = 2
nx = 201
                        0.001
     xmin = 0.9
     xmax = 1.3
 part = triton
  e-type = 1
     ne = 1
              0
                  30.0
  unit = 1
  axis = x
  file = tlinedis.dat
                            # file name of output for the above axis
  epsout =
                  1
```

## A.3 ベリリウム中性子反射体の中性子スペクトル

JMTR 及び JRR-3M の炉心を MCNP6(Ver.1.0)で計算し、炉心内のベリリウムについて、平均の中性 子スペクトルを求めた。この結果を Table A.3.1 に示す。

C	Neutron energy (eV)		Flux (n/cm²/s)	
Group	Lower	Upper	JMTR	JRR-3
1	1.87E+07	2.12E+07	2.31E+07	2.86E+07
2	1.65E+07	1.87E+07	1.34E+08	1.68E+08
3	1.45E+07	1.65E+07	5.56E+08	6.64E+08
4	1.28E+07	1.45E+07	1.93E+09	2.23E+09
5	1.13E+07	1.28E+07	5.38E+09	6.34E+09
6	1.00E+07	1.13E+07	1.35E+10	1.55E+10
7	8.82E+06	1.00E+07	3.07E+10	3.46E+10
8	7.78E+06	8.82E+06	5.90E+10	6.65E+10
9	6.87E+06	7.78E+06	1.07E+11	1.19E+11
10	6.06E+06	6.87E+06	1.77E+11	2.02E+11
11	5.35E+06	6.06E+06	2.56E+11	2.96E+11
12	4.72E+06	5.35E+06	3.58E+11	4.18E+11
13	4.17E+06	4.72E+06	4.54E+11	5.29E+11
14	3.68E+06	4.17E+06	5.25E+11	6.30E+11
15	3.24E+06	3.68E+06	5.73E+11	7.21E+11
16	2.86E+06	3.24E+06	6.41E+11	8.73E+11
17	2.53E+06	2.86E+06	7.59E+11	1.03E+12
18	2.23E+06	2.53E+06	1.12E+12	1.35E+12
19	1.97E+06	2.23E+06	1.28E+12	1.36E+12
20	1.74E+06	1.97E+06	1.54E+12	1.53E+12
21	1.53E+06	1.74E+06	1.78E+12	1.67E+12
22	1.35E+06	1.53E+06	1.69E+12	1.57E+12
23	1.19E+06	1.35E+06	1.58E+12	1.47E+12
24	1.05E+06	1.19E+06	1.47E+12	1.37E+12
25	9.30E+05	1.05E+06	1.36E+12	1.24E+12

Table A.3.1 Neutron spectrum of beryllium core components (1/7)

Carrier	Neutron energy (eV)		Flux (n/cm²/s)	
Group	Lower	Upper	JMTR	JRR-3
26	8.20E+05	9.30E+05	1.48E+12	1.35E+12
27	7.24E+05	8.20E+05	1.48E+12	1.39E+12
28	6.39E+05	7.24E+05	1.41E+12	1.31E+12
29	5.64E+05	6.39E+05	1.11E+12	1.09E+12
30	4.98E+05	5.64E+05	1.46E+12	1.30E+12
31	4.39E+05	4.98E+05	1.47E+12	1.25E+12
32	3.88E+05	4.39E+05	1.41E+12	1.17E+12
33	3.42E+05	3.88E+05	1.41E+12	1.18E+12
34	3.02E+05	3.42E+05	1.35E+12	1.10E+12
35	2.66E+05	3.02E+05	1.33E+12	1.08E+12
36	2.35E+05	2.66E+05	1.24E+12	1.02E+12
37	2.07E+05	2.35E+05	1.19E+12	9.24E+11
38	1.83E+05	2.07E+05	1.12E+12	8.92E+11
39	1.62E+05	1.83E+05	1.08E+12	8.34E+11
40	1.43E+05	1.62E+05	1.05E+12	7.57E+11
41	1.26E+05	1.43E+05	1.07E+12	8.60E+11
42	1.11E+05	1.26E+05	1.03E+12	7.83E+11
43	9.80E+04	1.11E+05	9.82E+11	7.43E+11
44	8.65E+04	9.80E+04	9.47E+11	6.54E+11
45	7.63E+04	8.65E+04	9.40E+11	6.95E+11
46	6.73E+04	7.63E+04	9.34E+11	7.31E+11
47	5.94E+04	6.73E+04	9.04E+11	6.76E+11
48	5.24E+04	5.94E+04	8.88E+11	6.56E+11
49	4.63E+04	5.24E+04	8.60E+11	6.27E+11
50	4.08E+04	4.63E+04	8.59E+11	6.13E+11
51	3.60E+04	4.08E+04	8.30E+11	5.50E+11
52	3.18E+04	3.60E+04	8.07E+11	5.31E+11
53	2.81E+04	3.18E+04	8.15E+11	6.29E+11
54	2.48E+04	2.81E+04	8.09E+11	5.81E+11
55	2.19E+04	2.48E+04	7.91E+11	5.63E+11
56	1.93E+04	2.19E+04	7.96E+11	5.68E+11

Table A.3.1 Neutron spectrum of beryllium core components (2/7)

Carry	Neutron energy (eV)		Flux (n/cm²/s)	
Group	Lower	Upper	JMTR	JRR-3
57	1.70E+04	1.93E+04	7.88E+11	5.55E+11
58	1.50E+04	1.70E+04	7.74E+11	5.39E+11
59	1.33E+04	1.50E+04	7.34E+11	5.10E+11
60	1.17E+04	1.33E+04	7.77E+11	5.37E+11
61	1.03E+04	1.17E+04	7.67E+11	5.27E+11
62	9.11E+03	1.03E+04	7.32E+11	5.02E+11
63	8.04E+03	9.11E+03	7.39E+11	5.04E+11
64	7.10E+03	8.04E+03	7.31E+11	4.98E+11
65	6.26E+03	7.10E+03	7.37E+11	5.00E+11
66	5.53E+03	6.26E+03	7.20E+11	4.81E+11
67	4.88E+03	5.53E+03	7.26E+11	4.93E+11
68	4.31E+03	4.88E+03	7.18E+11	4.80E+11
69	3.80E+03	4.31E+03	7.24E+11	4.84E+11
70	3.35E+03	3.80E+03	7.24E+11	4.84E+11
71	2.96E+03	3.35E+03	7.08E+11	4.71E+11
72	2.61E+03	2.96E+03	7.17E+11	4.78E+11
73	2.30E+03	2.61E+03	7.21E+11	4.78E+11
74	2.03E+03	2.30E+03	7.09E+11	4.70E+11
75	1.79E+03	2.03E+03	7.14E+11	4.71E+11
76	1.58E+03	1.79E+03	7.06E+11	4.66E+11
77	1.40E+03	1.58E+03	6.84E+11	4.49E+11
78	1.23E+03	1.40E+03	7.31E+11	4.79E+11
79	1.09E+03	1.23E+03	6.81E+11	4.46E+11
80	9.61E+02	1.09E+03	7.09E+11	4.63E+11
81	8.48E+02	9.61E+02	7.04E+11	4.59E+11
82	7.48E+02	8.48E+02	7.05E+11	4.56E+11
83	6.60E+02	7.48E+02	7.02E+11	4.55E+11
84	5.83E+02	6.60E+02	6.96E+11	4.49E+11
85	5.14E+02	5.83E+02	7.07E+11	4.55E+11
86	4.54E+02	5.14E+02	6.96E+11	4.47E+11

Table A.3.1 Neutron spectrum of beryllium core components (3/7)

Constant	Neutron energy (eV)		Flux (n/cm²/s)	
Group	Lower	Upper	JMTR	JRR-3
87	4.00E+02	4.54E+02	7.09E+11	4.53E+11
88	3.53E+02	4.00E+02	6.99E+11	4.47E+11
89	3.12E+02	3.53E+02	6.92E+11	4.41E+11
90	2.75E+02	3.12E+02	7.05E+11	4.49E+11
91	2.43E+02	2.75E+02	6.92E+11	4.39E+11
92	2.14E+02	2.43E+02	7.10E+11	4.49E+11
93	1.89E+02	2.14E+02	6.94E+11	4.38E+11
94	1.67E+02	1.89E+02	6.91E+11	4.36E+11
95	1.47E+02	1.67E+02	7.12E+11	4.48E+11
96	1.30E+02	1.47E+02	6.88E+11	4.31E+11
97	1.15E+02	1.30E+02	6.83E+11	4.28E+11
98	1.01E+02	1.15E+02	7.25E+11	4.53E+11
99	8.94E+01	1.01E+02	6.81E+11	4.24E+11
100	7.89E+01	8.94E+01	6.97E+11	4.32E+11
101	6.96E+01	7.89E+01	6.99E+11	4.33E+11
102	6.14E+01	6.96E+01	6.99E+11	4.31E+11
103	5.42E+01	6.14E+01	6.96E+11	4.26E+11
104	4.78E+01	5.42E+01	7.00E+11	4.26E+11
105	4.22E+01	4.78E+01	6.95E+11	4.24E+11
106	3.72E+01	4.22E+01	7.02E+11	4.27E+11
107	3.29E+01	3.72E+01	6.83E+11	4.12E+11
108	2.90E+01	3.29E+01	7.01E+11	4.25E+11
109	2.56E+01	2.90E+01	6.94E+11	4.17E+11
110	2.26E+01	2.56E+01	6.92E+11	4.17E+11
111	1.99E+01	2.26E+01	7.05E+11	4.20E+11
112	1.76E+01	1.99E+01	6.80E+11	4.05E+11
113	1.55E+01	1.76E+01	7.04E+11	4.19E+11
114	1.37E+01	1.55E+01	6.83E+11	4.06E+11
115	1.21E+01	1.37E+01	6.88E+11	4.05E+11
116	1.07E+01	1.21E+01	6.81E+11	4.01E+11

Table A.3.1 Neutron spectrum of beryllium core components (4/7)

Course	Neutron energy (eV)		Flux (n/cm <sup>2</sup> /s)	
Group	Lower	Upper	JMTR	JRR-3
117	9.42E+00	1.07E+01	7.08E+11	4.16E+11
118	8.31E+00	9.42E+00	6.98E+11	4.09E+11
119	7.33E+00	8.31E+00	7.02E+11	4.11E+11
120	6.47E+00	7.33E+00	6.91E+11	3.97E+11
121	5.71E+00	6.47E+00	6.87E+11	3.96E+11
122	5.04E+00	5.71E+00	6.91E+11	3.97E+11
123	4.45E+00	5.04E+00	6.88E+11	3.93E+11
124	3.93E+00	4.45E+00	6.90E+11	3.92E+11
125	3.46E+00	3.93E+00	7.21E+11	4.03E+11
126	3.06E+00	3.46E+00	6.99E+11	3.87E+11
127	2.70E+00	3.06E+00	7.15E+11	3.94E+11
128	2.38E+00	2.70E+00	7.17E+11	3.97E+11
129	2.10E+00	2.38E+00	7.15E+11	3.96E+11
130	1.85E+00	2.10E+00	7.28E+11	3.98E+11
131	1.64E+00	1.85E+00	6.96E+11	3.79E+11
132	1.44E+00	1.64E+00	7.56E+11	4.10E+11
133	1.27E+00	1.44E+00	7.36E+11	3.96E+11
134	1.12E+00	1.27E+00	7.40E+11	3.94E+11
135	9.93E-01	1.12E+00	7.17E+11	3.79E+11
136	8.76E-01	9.93E-01	7.54E+11	3.95E+11
137	7.73E-01	8.76E-01	7.64E+11	3.94E+11
138	6.82E-01	7.73E-01	7.79E+11	3.95E+11
139	6.02E-01	6.82E-01	7.85E+11	3.97E+11
140	5.31E-01	6.02E-01	8.05E+11	3.99E+11
141	4.69E-01	5.31E-01	8.14E+11	3.96E+11
142	4.14E-01	4.69E-01	8.29E+11	4.00E+11
143	3.65E-01	4.14E-01	8.54E+11	4.06E+11
144	3.22E-01	3.65E-01	8.75E+11	4.07E+11
145	2.84E-01	3.22E-01	9.21E+11	4.17E+11
146	2.51E-01	2.84E-01	9.74E+11	4.26E+11

Table A.3.1 Neutron spectrum of beryllium core components (5/7)

Constant	Neutron e	nergy (eV)	Flux (n/cm²/s)		
Group	Lower	Upper	JMTR	JRR-3	
147	2.21E-01	2.51E-01	1.14E+12	4.73E+11	
148	1.95E-01	2.21E-01	1.36E+12	5.30E+11	
149	1.72E-01	1.95E-01	1.77E+12	6.37E+11	
150	1.52E-01	1.72E-01	2.32E+12	7.91E+11	
151	1.34E-01	1.52E-01	3.24E+12	1.03E+12	
152	1.19E-01	1.34E-01	3.91E+12	1.24E+12	
153	1.05E-01	1.19E-01	5.18E+12	1.62E+12	
154	9.23E-02	1.05E-01	6.87E+12	2.03E+12	
155	8.15E-02	9.23E-02	7.49E+12	2.29E+12	
156	7.19E-02	8.15E-02	8.37E+12	2.58E+12	
157	6.35E-02	7.19E-02	9.20E+12	2.76E+12	
158	5.60E-02	6.35E-02	9.64E+12	2.91E+12	
159	4.94E-02	5.60E-02	9.72E+12	2.93E+12	
160	4.36E-02	4.94E-02	9.99E+12	2.87E+12	
161	3.85E-02	4.36E-02	8.54E+12	2.73E+12	
162	3.40E-02	3.85E-02	8.52E+12	2.55E+12	
163	3.00E-02	3.40E-02	7.34E+12	2.35E+12	
164	2.65E-02	3.00E-02	6.68E+12	2.10E+12	
165	2.33E-02	2.65E-02	5.98E+12	1.91E+12	
166	2.06E-02	2.33E-02	5.81E+12	1.59E+12	
167	1.82E-02	2.06E-02	4.25E+12	1.38E+12	
168	1.60E-02	1.82E-02	3.79E+12	1.22E+12	
169	1.42E-02	1.60E-02	2.85E+12	9.50E+11	
170	1.25E-02	1.42E-02	2.46E+12	8.49E+11	
171	1.10E-02	1.25E-02	2.10E+12	7.01E+11	
172	9.73E-03	1.10E-02	2.26E+12	5.51E+11	
173	8.59E-03	9.73E-03	1.48E+12	4.59E+11	
174	7.58E-03	8.59E-03	1.20E+12	3.74E+11	
175	6.69E-03	7.58E-03	9.33E+11	3.01E+11	
176	5.90E-03	6.69E-03	6.61E+11	2.43E+11	

Table A.3.1 Neutron spectrum of beryllium core components (6/7)

Carrier	Neutron e	nergy (eV)	Flux (n/cm <sup>2</sup> /s)			
Group	Lower	Upper	JMTR	JRR-3		
177	5.21E-03	5.90E-03	4.92E+11	1.93E+11		
178	4.60E-03	5.21E-03	3.91E+11	1.55E+11		
179	4.06E-03	4.60E-03	3.34E+11	1.23E+11		
180	3.58E-03	4.06E-03	3.19E+11	9.88E+10		
181	3.16E-03	3.58E-03	3.96E+11	7.82E+10		
182	2.79E-03	3.16E-03	1.91E+11	6.13E+10		
183	2.46E-03	2.79E-03	1.11E+11	4.91E+10		
184	2.17E-03	2.46E-03	1.03E+11	3.86E+10		
185	1.92E-03	2.17E-03	6.62E+10	2.95E+10		
186	1.69E-03	1.92E-03	5.37E+10	2.41E+10		
187	1.49E-03	1.69E-03	4.86E+10	1.87E+10		
188	3.52E-04	1.49E-03	1.53E+11	6.30E+10		
189	1.00E-05	3.52E-04	3.72E+09	3.89E+09		
190	0.00E+00	1.00E-05	3.39E+04	4.11E+06		

Table A.3.1 Neutron spectrum of beryllium core components (7/7)

# A.4 ORIGEN2 コード入力データ例

(1) JMTR ベリリウム中性子反射体中の U 不純物

-1	
-1	
-1	
TIT	TRITIUM RELEASE FROM BE IN IMTR
BAS	FROM U IMPURITY
RDA	-1
CUT	-1
I IP	
I PI I	-1
RD4	1
	DECAVING VECTING fort 0 VAD VECT
	DECAY LIDS ASECT LIDS INT. $9$ VAR.ASECT
	0 123 703 704 705 9 0 0 4 0 JMIR-Be
RDA	
RDA	PHOTON LIBS fort.10
PHO	101 102 103 10
RDA	
TIT	INITIAL FUEL COMPOSITION
INP	-1 1 $-1$ $-1$ 1 1
MOV	-1 1 0 1.0
HED	1 CHARGE
BUP	
RDA	days nflux
IRF	50.0 2.99E+14 1 2 4 2
IRF	100.0 2.99E+14 2 3 4 0
IRF	150.0 2.99E+14 3 4 4 0
IRF	200.0 2.99E+14 4 5 4 0
IRF	250.0 2.99E+14 5 6 4 0
IRF	300.0 2.99E+14 6 7 4 0
IRF	350.0 2.99E+14 7 8 4 0
IRF	400.0 2.99E+14 8 9 4 0
IRF	450 0 2 99E+14 9 10 4 0
IRF	510.0 2.99 $F+14$ 10 11 4 0
IRF	550.0 2.99E+14 11 12 4 0
RUP	
OPTI	888858588888888888888888888888888888888
OPTA	
OPTE	
OUT	
MON	12 1 -1 0
MOV	
	JMTR COOLING
DEC	1.0 -1 2 5 4 COOLING YEARS
OPTL	888888888888888888888888888888888888888
OPTA	*****
OPTF	888888888888888888888888888888888888888
OUT	2 1 -1 0
END	
5 9200	000 22.5 0 0.0
0	

(2) JRR-3M ベリリウム中性子反射体中の Li 不純物

-1																	
-1																	
-1																	
TIT	TR	ITIUN	M RE	ELEA	ASE	FI	RON	Λl	BE	IN	٧J	RR	23				
BAS	FR	OM	Li IN	/IPU	RITY	7											
RDA	-1																
CUT	-1																
LIP	000	)															
LPU	-1																
RDA																	
RDA	DEC	AY I	JBS	XS	SEC	Γ	LIB	S f	ort	.9	)	VA	٩R	.Х	(SI	ECT	
LIB	0 1	23	70	3 70	4 70	5	90	0	4 0	)	JF	R:	3-	B	е		
RDA																	
RDA	PHO	TON	LIE	SS :	fort.	10	)										
PHO	101	102 1	103	10													
RDA																	
TIT	INITIA	AL F	UEL	СО	MPO	DS	ITI	NC	J								
INP	-1 1	-1	-1	1	1												
MOV	-1	1	0	1.0													
HED	1	CHA	RGI	E													
BUP																	
RDA	days		nflu	X													
IRF	100.0	1	.88E	+14	1		2		4		2						
IRF	200.0	1	.88E	+14	2		3		4		0						
IRF	300.0	1	.88E	+14	3		4		4		0						
IRF	400.0	1	.88E	+14	4		5		4		0						
IRF	500.0	1	.88E	+14	5		6		4		0						
IRF	600.0	1	.88E	+14	6		7		4		0						
IRF	700.0	1	.88E	+14	7		8		4		0						
IRF	800.0	1	.88E	+14	8		9		4		0						
IRF	900.0	1	.88E	+14	9		10		4		0						
IRF	1000.0	1	.88E	+14	10		11		4		0						
IRF	1200.0	1	.88E	+14	11		12		4		0						
BUP																	
OPTL	88	88	585	588	88	8	8 8	8	88	8	8 8	8	8	8	8	8	
OPTA	88	88	585	588	888	8	88	8 8	8	8	8 8	8 8	8	8	8	8	
OPTF	88	88	585	588	88	8	8 8	8	8 8	8	8 8	8 8	8	8	8	8	
OUT	12 1	-1	0														
MOV	12 -	·1	0 1.	0													
TIT	JRR3	B CO	OLI	NG													
DEC		1.0			-1		2	5	4	Ł	С	00	ЭL	II	NC	ŕ	YEARS
OPTL	88	88	888	888	88	8	8 8	8	8 8	8	8 8	88	8	8	8	8	
OPTA	88	88	888	888	88	8	8.8	8	8	8	8 8	8	8	8	8	8	
OPTF	88	88	888	888	88	8	8 8	8	88	8	8 8	8 8	8	8	8	8	
OUT	2	1 -	-1	0													
END																	
4 30	000 0.2	274	0 (	0.0													
0																	

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本ì	龟位			
盔半里	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			

表2.基本単位を用いて表されるSI組立単位の例						
an de La SI 組立単位	SI 組立単位					
名称	記号					
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>					
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>					
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 <sup>-1</sup>					
密度,質量密度キログラム毎立方メート/						
面積密度キログラム毎平方メート/	$\nu$ kg/m <sup>2</sup>					
比体積 立方メートル毎キログラ」	m <sup>3</sup> /kg					
電 流 密 度 アンペア毎平方メート/	$\nu$ A/m <sup>2</sup>					
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m					
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>					
質量濃度 キログラム毎立方メート/						
輝 度 カンデラ毎平方メート/	$\nu$ cd/m <sup>2</sup>					
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1					
比 透 磁 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1					
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野-	では物質濃度					

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) 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。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 旭立単位					
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方		
平 面 隹	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 (в)	m/m		
立 体 催	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 (b)	$m^2/m^2$		
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	1	s <sup>·1</sup>		
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>		
压力,応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>		
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	$m^2 kg s^{-3}$		
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	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$		
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$		
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$		
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$		
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$		
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K		
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd		
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$	m <sup>-2</sup> cd		
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>		
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^{-2}$		
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$		
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol		

酸素活性(カタール) kat [s<sup>1</sup> 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 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)測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。
 (d)へルツは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。やレシウス度とケルビンの
 (d)ペルジは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センシウス度はケルビンの特別な名称で、1、通知を実現医開路を実す数値はどちらの単位であしても同じである。
 (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組立単位の例

	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 <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>	
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>	
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 <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>	
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 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A	
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A	
誘 電 卒	コァラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>	
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 <sup>-1</sup> s A	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$	
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 <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$	

表 5. SI 接頭語							
乗数	名称	記号 乗数		名称	記号		
$10^{24}$	э 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d		
$10^{21}$	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	с		
$10^{18}$	エクサ	Е	$10^{-3}$	ミリ	m		
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ		
$10^{12}$	テラ	Т	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n		
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р		
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f		
$10^{3}$	+ 1	k	$10^{-18}$	アト	а		
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z		
$10^1$	デ カ	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=60 s			
時	h	1 h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	٥	1°=(π/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=( π/648 000) rad			
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>			
トン	t	$1 \pm 10^3 \text{ kg}$			

### 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	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J		
ダル	ŀ	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg		
統一原于	子質量単	单位	u	1 u=1 Da		
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海 里	М	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{ cm})^2=10^{\cdot 28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	の単位しの教徒的な問題は
ベル	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デシベル	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 <sup>-7</sup> J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =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	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx			
ガル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>			
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>			
(a) 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						
	4	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	-	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	Ξ		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg
ŀ				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	ц	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$