JAEA-Research
2010-045

# 高速炉燃料集合体内発熱分布に対する ガンマ線輸送効果の評価

Evaluation of Gamma-Ray Transport Effect on Heating Distribution in a Fast Reactor Fuel Subassembly

千葉 豪
Go CHIBA

原子力基礎工学研究部門
核工学・炉工学ユニット
Division of Nuclear Data and Reactor Engineering
Nuclear Science and Engineering Directorate

January 2011
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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（http://www.jaea.go.jp）
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, 2011

# 高速炉燃料集合体内発熱分布に対する ガンマ線輸送効果の評価

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門
核工学・炉工学ユニット
千葉　豪

(2010 年 11 月 1 日受理)

高速炉の燃料設計では、通常、燃料ピンで発生したガンマ線はエネルギーをその燃料ピンに付与すると見做される。実際にはガンマ線は燃料集合体内を輸送されるため、この手法では燃料ピンの発熱量を過大評価することになる。本検討では、ガンマ線の輸送計算により、高速炉燃料集合体の発熱分布に対するガンマ線の輸送効果を定量的に評価した。

計算には、最新の評価済み核データファイル JENDL-4.0 に基づくガンマ断面積ライブラリ UFGLIB.J40 と、放射線輸送計算コードシステム CBG を用いた。

「もんじゅ」燃料集合体モデルを用いた検討の結果、ガンマ線の輸送を考慮することにより燃料ピンの発熱が 1.35%程度低下することを示した。また、このガンマ線輸送効果の不確かさを評価したところ、0.34%を得た。さらに、燃料集合体のラッパ管より内側の領域の発熱割合は、ガンマ線の輸送を考慮することにより 0.5%程度減少することを示した。

原子力科学研究所（駐在）：〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

# Evaluation of Gamma-Ray Transport Effect on Heating Distribution in a Fast Reactor Fuel Subassembly

Go CHIBA

Division of Nuclear Data and Reactor Engineering
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 1, 2010)

A usual fuel design for fast reactors assumes that an energy of gamma-ray generated in a fuel pin is deposited to the same fuel pin. Since gamma-ray is transported in a fuel subassembly, this usual method overestimates a heating rate in a fuel pin. In the present study, we evaluate a gamma-ray transport effect on a heating distribution in a fast reactor fuel subassembly by gamma-ray transport calculations.

We carry out calculations by using a gamma cross section library UFGLIB.J40 based on the latest nuclear data file JENDL-4.0 and a radiation transport code system CBG.

Numerical calculations with a Monju fuel subassembly model reveal that a heating rate in a fuel pin decreases about 1.35% by considering a gamma-ray transport. In addition, the uncertainty of this gamma-ray transport effect is estimated at 0.34%. It is also shown that a heating rate in a region inside of a wrapper tube decreases about 0.5% by considering the gamma-ray transport.

Keywords: Gamma Heating, Gamma-ray Transport, UFGLIB.J40, JENDL-4.0

# 目 次

1. 背景と目的 . . . . . 1

2. 検討対象 . . . . . 2

3. 検討結果 . . . . . 5

4. 不確かさの評価 . . . . . 15

5. まとめ . . . . . 19

謝辞 . . . . . 20

参考文献 . . . . . 21

付録A 参考資料 . . . . . 22

A.1 ガンマ発熱量に対する均質化の影響 . . . . . 22

A.2 遅発ガンマ線のエネルギーを全て考慮した場合の評価結果 . . . . . 23

# Contents

1. Background and purpose of the present study . . . . . 1

2. Calculation model . . . . . 2

3. Results . . . . . 5

4. Uncertainty quantification . . . . . 15

5. Summary . . . . . 19

Acknowledgment . . . . . 20

References . . . . . 21

Appendix A Some additional data . . . . . 22

A.1 Effect of homogenization on gamma heating . . . . . 22

A.2 Results obtained by considering all the energy of delayed gamma-ray . . . . 23

# List of Tables

Table 1 Nuclide number densities of fuel sub-assembly . . . . . 2
Table 2 Nuclide- and reaction-wise contribution to gamma energy . . . . 3
Table 3 Region-wise contribution to total heat in pincell of inner core . . 7
Table 4 Region-wise contribution to total heat in sub-assembly of inner core 7
Table 5 Region-wise contribution to total heat in pincell of outer core . . 8
Table 6 Region-wise contribution to total heat in sub-assembly of outer core 8
Table 7 Gamma-heating distribution in various calculation conditions (unit: J) . . . . . 13
Table 8 Gamma energy and its uncertainty (unit: MeV/fission) . . . . . 15
Table 9 Range of transport effect on gamma heating . . . . . 16
Table 10 Uncertainty in gamma-ray transport effect . . . . . 18
Table 11 Summary of gamma-ray transport effect on fuel region heating . 19
Table 12 Summary of gamma-ray transport effect on wrapper tube and its outer coolant heating . . . . . 20
Table A.1.1 Cell model dependence on fuel region contribution to total heating 22
Table A.2.1 Region-wise contribution to total heat in sub-assembly of inner core (all the energy of delayed gamma-ray is considered) . . . . . 23
Table A.2.2 Region-wise contribution to total heat in sub-assembly of outer core (all the energy of delayed gamma-ray is considered) . . . . . 23
Table A.2.3 Summary of gamma-ray transport effect on fuel region heating (All the energy of delayed gamma-ray is considered) . . . . . 24

# List of Figures

Fig. 1 Macroscopic total cross section for gamma-ray . . . . . 4
Fig. 2 Macroscopic KERMA factor for gamma-ray . . . . . 4
Fig. 3 Specification of fuel sub-assembly (unit: cm) . . . . . 6
Fig. 4 Group-wise gamma heating contribution in fuel region . . . . . 10
Fig. 5 Gamma-ray transport effect on gamma-heating in fuel region . . . 11
Fig. 6 Pin-wise gamma-ray transport effect on heating distribution . . . . 14
Fig. 7 Gamma heating distribution with point gamma source in central fuel pin . . . . . 14
Fig. 8 Range of group-wise gamma heating contribution in fuel region . . 17

# 1. 背景と目的

原子炉内での発熱は、核分裂により発生した核分裂生成物の運動エネルギーを介した成分が主であるが、その他に、核分裂、捕獲、非弾性散乱反応等により発生したガンマ線による成分も存在する。ガンマ線は中性子と比べて平均自由行程が短いものの、その輸送効果は無視できない程度存在するため、炉内の発熱分布を正確に評価するためにはガンマ線の輸送効果を考慮する必要がある。

燃料ピンセルを考えた場合、ガンマ線は燃料、被覆管、冷却材の各々の領域で発生し、それが輸送され、原子との相互作用を通して熱エネルギーに変換される。燃料ピンセルでは核分裂により生成されるガンマ線源が支配的となるため、ガンマ線の輸送を考慮することで発熱分布はより平坦に近づくものと考えられる。つまり、ガンマ線の輸送を考慮することにより、燃料ピンの発熱量が低減すると考えられる。高速炉の炉心設計では、燃料最高温度や被覆管最高温度が制限因子となる場合があることから、燃料ピンの発熱量が低減することは、設計の合理化に寄与する。

本検討では、「もんじゅ」燃料ピンセル及び燃料集合体のモデルを用いて、発熱分布に対するガンマ線輸送効果を定量的に評価する。

# 2. 検討対象

検討対象は、「もんじゅ」炉心燃料集合体[1)]とした。燃料ペレットと被覆管の間のギャップはペレット領域と混合させた。燃料、被覆管の外側半径はそれぞれ0.278、0.325cmとなる。内側炉心、外側炉心燃料集合体各領域の核種数密度を**Table 1**に示す。なお、配列ピッチ、ラッパ管内対面距離等は文献[1)]記載のデータに依拠する。

**Table 1　Nuclide number densities of fuel sub-assembly**

| Region | Nuclide | Number density (/barn/cm) | |
|---|---|---|---|
| | | Inner core | Outer core |
| Fuel | Pu-239 | 2.54335E-03* | 3.42379E-03 |
| | Pu-240 | 1.04803E-03 | 1.41083E-03 |
| | Pu-241 | 6.08807E-04 | 8.19558E-04 |
| | Pu-242 | 1.73225E-04 | 2.33190E-04 |
| | U-235 | 3.09698E-05 | 2.80175E-05 |
| | U-238 | 1.52587E-02 | 1.38041E-02 |
| | O-16 | 3.84330E-02 | 3.88474E-02 |
| Cladding | Cr-Nat. | 1.70972E-02 | |
| | Fe-Nat. | 6.13318E-02 | |
| | Ni-Nat. | 1.20286E-02 | |
| | Mn-55 | 1.42779E-03 | |
| | Mo-Nat. | 1.36265E-03 | |
| Coolant | Na-23 | 2.25394E-02 | |

* Read as $2.54335\times10^{-3}$.

これら各領域について、その70群実効断面積を、円筒化したピンセルモデルを用いて高速炉用格子計算コードSLAROM-UF[2)]とUFLIB-J4.0（70群）により計算した。この計算においては、各領域の温度は、100%出力に対応させるため、燃料を1370K、冷却材、被覆管を750Kとした。また、SLAROM-UFにより得た実効断面積とJENDL-4.0に基づくガンマ断面積ライブラリUFGLIB.J40[3)]を用いて、各領域の巨視的ガンマ定数を計算した。この際、考慮すべき遅発ガンマ線の寄与量は想定する原子炉の燃焼履歴に依存する。文献[3)]によると、遅発ガンマ線のエネルギーは核分裂開始後1日経過時点で、十分な核分裂生成核種が蓄積された後の放射平衡時放出量の9割程度が放出される。従って、100%出力で1日運転した時点では遅発ガンマ線の9割を考慮すべきであるし、例えばゼロ出力から100%出力に瞬時に移行した時点では遅発ガンマ線の寄与はゼロとすべきである。ガンマ線の輸送効果を考慮することは燃料領域の出力を低減させるため、この輸送効果を保守的に見積もる場合には、遅発ガンマ線の寄与が最も少なくなる時点、すなわ

ち運転開始直後について評価を実施する必要がある。なお、実際の「もんじゅ」の出力上昇では、燃料の再結晶を促進させるため、90%出力状態を約 1 日保持したのち 100%まで出力を上昇させる。従って、本検討では、90%出力状態で 1 日保持した直後を想定し、8 割の遅発ガンマ線を考慮することとした。

**Table 2** に、内側炉心燃料ピンセルで発生するガンマ線の全エネルギーにおける核種、反応毎の寄与を示す（なお、反応毎寄与の和はそれぞれの核種について 1.0 となるように規格化している）。この計算では、ピンセルを中性子束荷重で空間均質化した系に対する一点炉近似の中性子束エネルギースペクトルを用いた（ただし中性子の漏れをバックリングにより考慮した）。なお、ここでは燃料ピンに含まれる核種の情報のみを示している。この表の数値を用いて計算すると、燃料ピンセルで生成するガンマ線エネルギーの 91%が燃料領域で発生すること、そのうち核分裂により生成する成分が 7 割で、残りの 2 割強が捕獲、1 割弱が U-238 の非弾性散乱に起因することが分かる。なお、Pu-242 の遅発ガンマ線のエネルギーがゼロとなっているのは、UFGLIB には当該データが格納されていないためである。ただし、これにより遅発ガンマ線の寄与を少なめに見積もることになるので、前述のように保守側の想定となる。

**Table 2　Nuclide- and reaction-wise contribution to gamma energy**

| Nuclide | Ratio | Reaction-wise contribution [normalized to 1] | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | fission (prompt) | capture | inelastic | fission (delayed) |
| Pu-239 | 0.4241 | 0.555 | 0.108 | 0.014 | 0.322 |
| Pu-240 | 0.0598 | 0.393 | 0.298 | 0.047 | 0.262 |
| Pu-241 | 0.1391 | 0.545 | 0.078 | 0.014 | 0.363 |
| Pu-242 | 0.0059 | 0.496 | 0.413 | 0.091 | 0.000 |
| U-235 | 0.0054 | 0.493 | 0.123 | 0.020 | 0.364 |
| U-238 | 0.2795 | 0.144 | 0.465 | 0.245 | 0.146 |
| O-16 | 0.0011 | 0.000 | 0.162 | 0.838 | 0.000 |
| (sum) | 0.9149 | | | | |

**Figure 1** に、内側炉心ピンセルの各領域のガンマ線に対する巨視的全断面積を、ガンマ線の輸送計算で重要となるガンマ線のエネルギー領域（ガンマ線源全エネルギーに対するガンマ線エネルギー毎の寄与割合については後述の Fig. 5 を参照のこと）について示す。これより、燃料、被覆管領域と比較して、冷却材領域では断面積の値が小さく、ガンマ線が透過し易いことが分かる。また、**Fig. 2** には各領域のガンマ線に対する KERMA 因子[1] を示す。

[1]KERMA は「Kinetic energy release in materials」の略であり、KERMA 因子は反応で発生する熱エネルギー (eV）と反応の断面積（$cm^2$）の積で与えられる。KERMA 因子のデータは UFGLIB に格納されている。なお、Fig. 2 に示しているのは媒質に対する巨視的な KERMA 因子である。

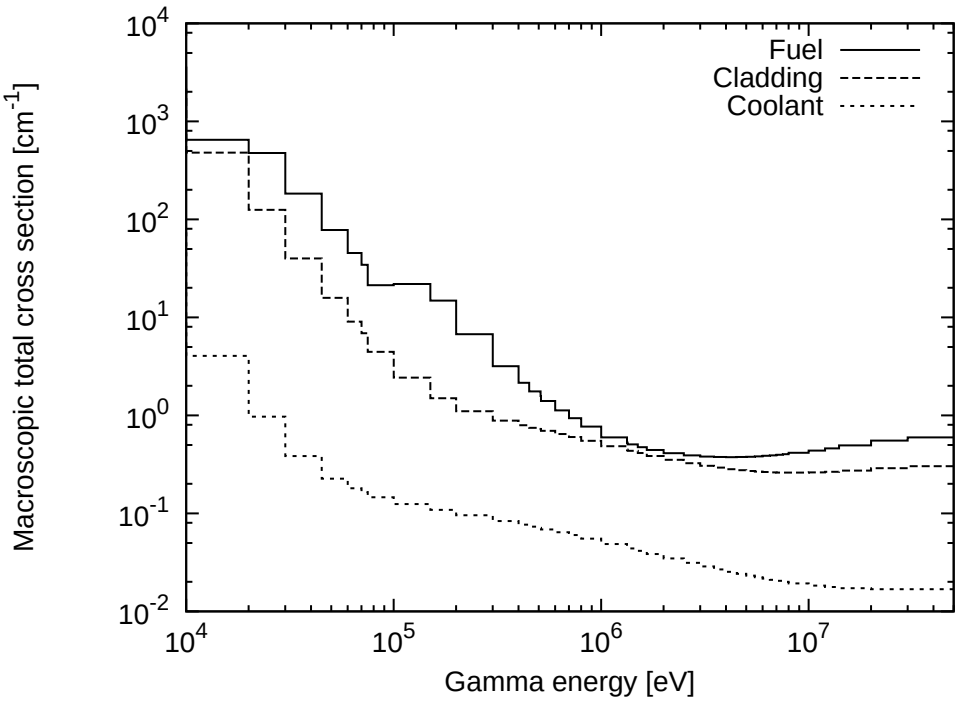


**Fig. 1 Macroscopic total cross section for gamma-ray**

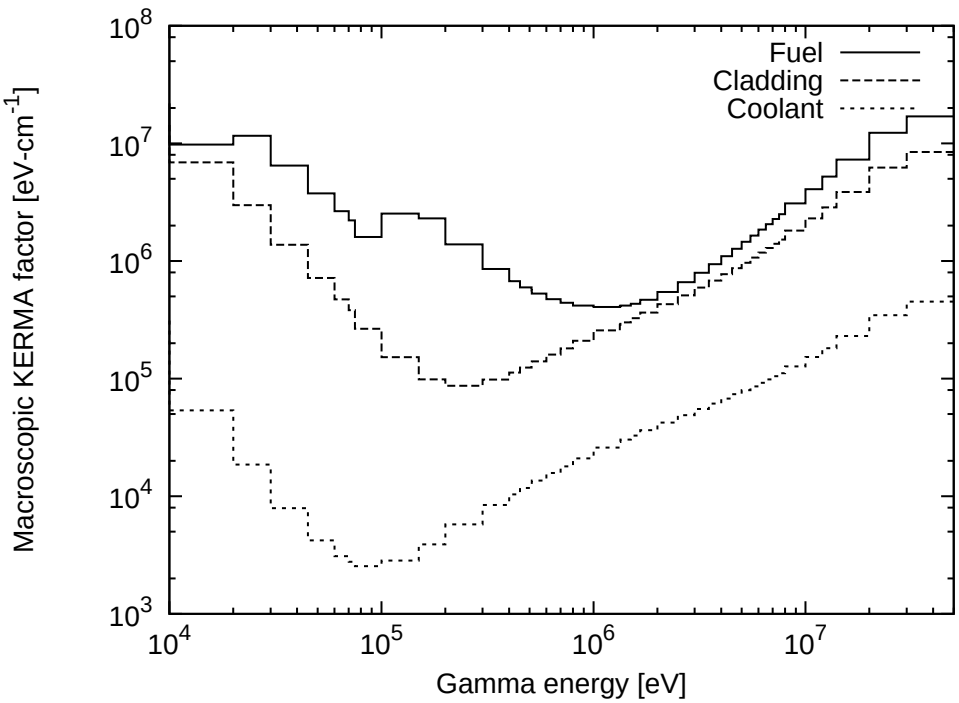


**Fig. 2 Macroscopic KERMA factor for gamma-ray**

# 3. 検討結果

発熱分布の計算は以下の手続きで行った。なお、計算には放射線輸送計算コードシステム CBG[4)] を用いた。

① 体系内の中性子束分布を衝突確率法（CBG/PJI）にて計算する（固有値計算）。

② 計算した中性子束分布から、核分裂反応により核分裂片に付与される運動エネルギー及び核分裂生成物の $\beta$ 崩壊時放出エネルギー、捕獲反応の結果生成する娘核種の崩壊時放出エネルギー[1]、中性子の弾性散乱により原子核に付与される運動エネルギーに起因する発熱分布を計算する。

③ 計算した中性子束分布からガンマ線源を計算する。ガンマ線の輸送効果を無視する場合には、ガンマ線源の全エネルギーがその領域に付与されると見做す。

④ 体系内のガンマ線束分布を衝突確率法（CBG/PJI）にて計算する（固定源計算）。

⑤ 計算したガンマ線束分布と KERMA 因子からガンマ線による発熱分布を計算する。

⑥ ガンマ線の輸送効果を考慮する場合は上記②と⑤で得た発熱分布を、考慮しない場合は上記②と③で得た発熱分布を足し合わせ、全発熱分布を計算する。

計算した体系は、ピンセル（六角）と二次元燃料集合体とした。燃料集合体の体系図を **Fig. 3** に示す。体系の寸法は前述の文献[1)] 記載のデータに依拠する。なお、燃料ピンは対称位置にあるもののみを同一領域と見做した（すなわち、リング毎に同一領域という扱いにはしていない）。

境界条件は、本来なら周期境界条件とするのが望ましいが、近似として計算負荷が小さい等方反射とし、衝突確率計算における射線追跡の条件は、角度分割を 48 [2]、射線の最大幅を 0.01cm とした。また、衝突確率の計算には、中性子、ガンマ線ともに輸送断面積を用いた（輸送近似）。

ピンセル、集合体について、体系の全発熱に対する燃料、被覆管、冷却材領域の寄与割合を、ガンマ線の輸送を考慮した場合としない場合とで計算した。内側炉心の結果を **Table 3** と **Table 4** に、外側炉心の結果を **Table 5** と **Table 6** に、それぞれ示す。

この表より、ガンマ線の輸送を考慮しない場合と比べて、ガンマ線の輸送を考慮することにより、内側炉心、外側炉心ともに、燃料の熱出力がピンセルで 0.9%、集合体で 1.4%程度低下していることが分かる。

[1]例えば、Na-23 の捕獲反応の結果生成した Na-24 が $\beta$-崩壊する際の放出エネルギー。
[2]実際には周方向について 60 度対称であることから 60 度に対して 8 分割としている。

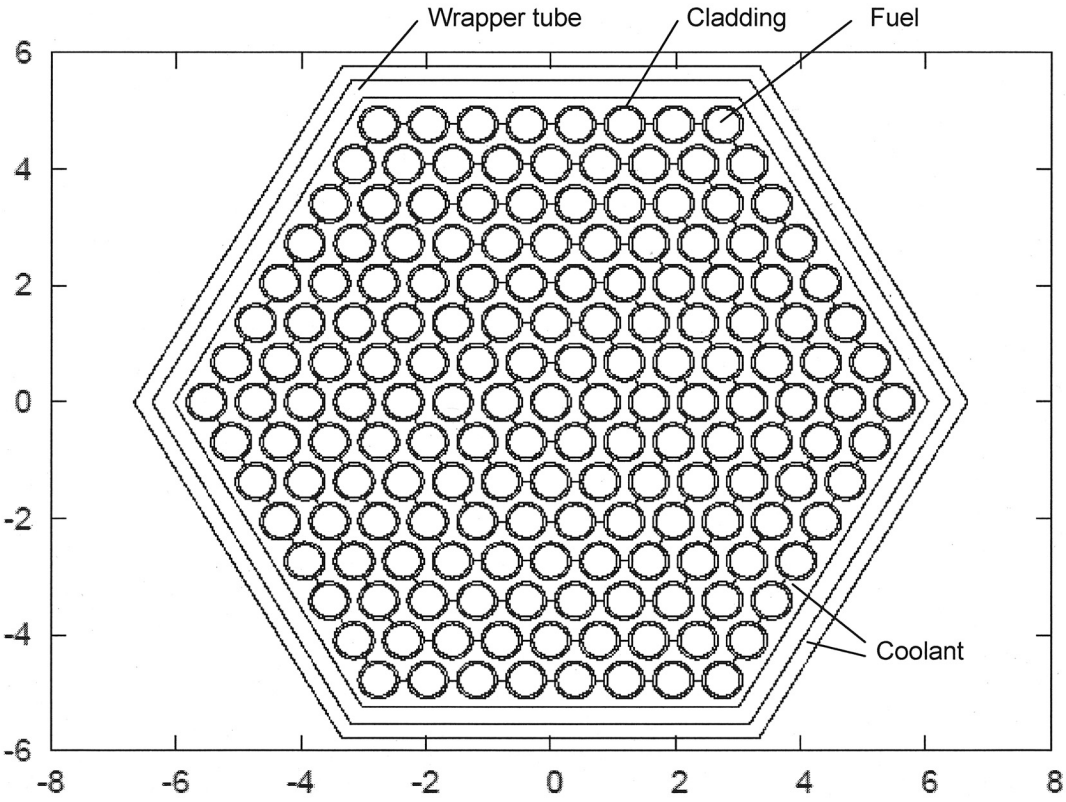


**Fig. 3 Specification of fuel sub-assembly (unit: cm)**

**Table 3 Region-wise contribution to total heat in pincell of inner core**

| | Region | Contribution | Reaction-wise | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fission | Gamma | Elastic Scat. |
| with gamma transport | Fuel | **0.9816** | 0.899 | 0.079 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0143 | 0.000 | 0.013 | 0.001 |
| | Coolant | 0.0041 | 0.000 | 0.003 | 0.001 |
| without gamma transport | Fuel | **0.9909** | 0.899 | 0.088 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0068 | 0.000 | 0.006 | 0.001 |
| | Coolant | 0.0022 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |

**Table 4 Region-wise contribution to total heat in sub-assembly of inner core**

| | Region | Contribution | Reaction-wise | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fission | Gamma | Elas. Scat. |
| with gamma transport | Fuel | **0.9721** | 0.884 | 0.075 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0133 | 0.000 | 0.013 | 0.001 |
| | Coolant (in*) | 0.0042 | 0.000 | 0.003 | 0.001 |
| | Wrapper tube | 0.0094 | 0.000 | 0.009 | 0.001 |
| | Coolant (out**) | 0.0010 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| without gamma transport | Fuel | **0.9860** | 0.884 | 0.089 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0065 | 0.000 | 0.006 | 0.000 |
| | Coolant (in) | 0.0023 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| | Wrapper tube | 0.0047 | 0.000 | 0.004 | 0.001 |
| | Coolant (out) | 0.0006 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

* Inside of wrapper tube

** Outside of wrapper tube

**Table 5 Region-wise contribution to total heat in pincell of outer core**

| | Region | Contribution | Reaction-wise | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fission | Gamma | Elastic Scat. |
| with gamma transport | Fuel | **0.9833** | 0.908 | 0.073 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0129 | 0.000 | 0.012 | 0.001 |
| | Coolant | 0.0037 | 0.000 | 0.003 | 0.001 |
| without gamma transport | Fuel | **0.9926** | 0.907 | 0.082 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0055 | 0.000 | 0.005 | 0.001 |
| | Coolant | 0.0019 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |

**Table 6 Region-wise contribution to total heat in sub-assembly of outer core**

| | Region | Contribution | Reaction-wise | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fission | Gamma | Elastic Scat. |
| with gamma transport | Fuel | **0.9750** | 0.903 | 0.069 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0120 | 0.000 | 0.011 | 0.001 |
| | Coolant (in) | 0.0038 | 0.000 | 0.003 | 0.001 |
| | Wrapper tube | 0.0084 | 0.000 | 0.008 | 0.000 |
| | Coolant (out) | 0.0009 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| without gamma transport | Fuel | **0.9886** | 0.903 | 0.083 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0052 | 0.000 | 0.005 | 0.001 |
| | Coolant (in) | 0.0019 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| | Wrapper tube | 0.0038 | 0.000 | 0.003 | 0.000 |
| | Coolant (out) | 0.0005 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

次に、発熱分布に対するガンマ線輸送効果の計算条件依存性を見るため、内側炉心燃料について計算の条件を変えて同様の評価を行った。

まず、境界条件について検討した。上記の計算では計算負荷の小さい等方反射条件を用いたが、別途、周期境界条件を用いて評価を行った。燃料集合体モデルで計算したところ、ガンマ線の輸送を考慮することによる燃料領域の発熱分担割合の低減幅は 0.01367 となった。等方反射条件のときは 0.01383 であったので、燃料発熱分担割合に対するガンマ線の輸送効果は、相対比で 1%小さくなる程度で、絶対量では 0.02%程度の影響しかないことが分かった。

次に、散乱の非等方性について検討した。今回の計算では衝突確率の計算に輸送断面積を用いたが、別途、全断面積を用いて計算を行った。この計算では、散乱の非等方性は完全に無視される。燃料集合体モデルで計算したところ、ガンマ線の輸送を考慮することによる燃料領域の発熱分担割合の低減幅は 0.01381 となり、輸送近似の場合と比較して 0.00002 程度小さくなった。これは、強い前方性を有するガンマ線の干渉性散乱を等方散乱とすることで、ガンマ線の輸送効果が低減したものと考えられる。発熱分担割合に対するガンマ線の輸送効果について、散乱の非等方性を無視した計算と輸送近似による計算との相対比が 0.2%程度であることから、散乱の非等方性の取り扱いはガンマ線輸送効果の評価に大きく影響しないことを確認した。

空間メッシュ分割についても検討した。単ピンセルについて、空間メッシュ分割を詳細化したモデル（燃料３メッシュ、被覆管２メッシュ、冷却材３メッシュ）を構築し、同様の評価を行った[3] 。その結果、基準メッシュ分割での計算と有意な差が生じないことを確認した。

燃料領域で生成されるガンマ線源全エネルギーのエネルギー群毎の寄与 $R_g$ （すなわち、$g$ 群のガンマ線源を $s_g$、その群の平均エネルギーを $E_g$ としたとき、$R_g = s_g E_g$ で与えられる）を **Fig. 4** に示す（ただし縦軸は任意単位）。これより、燃料領域で生成されるガンマ線源のエネルギーは、主に数百 keV から数 MeV の範囲に分布していることが分かる。

ここで、$g$ 群のガンマ線源が燃料領域に置かれたとき、その線源エネルギーのうち燃料領域に付与される割合を、燃料領域の発熱に対する $g$ 群のガンマ線源の輸送効果 $C_g$ と定義する。全ての線源エネルギーが燃料領域に付与される場合は輸送効果は 1.0 になり、燃料領域に付与される割合が低下するに従い輸送効果は 1.0 から低下していく。燃料領域で発生するガンマ線源全エネルギーのうち燃料領域に付与される割合（すなわち燃料領域の発熱に対するガンマ線輸送効果）$C$ は、$R_g$、$C_g$ を用いると以下のように書ける。

$$C = \frac{\sum_g R_g C_g}{\sum_g R_g} \tag{3.1}$$

ガンマ線源のエネルギースペクトル（すなわち $R_g$）における不確かさがガンマ線輸送効果 $C$ に及ぼす影響は、$C_g$ に強く依存する。すなわち、$C_g$ の $g$ に対する依存性が小さければ、線源スペクトルの不確かさは $C$ に大きく影響しないことになる。

[3]各円環メッシュの外側半径は、小さいものから 0.1、0.22、0.278、0.3、0.325、0.35、0.39cm である。

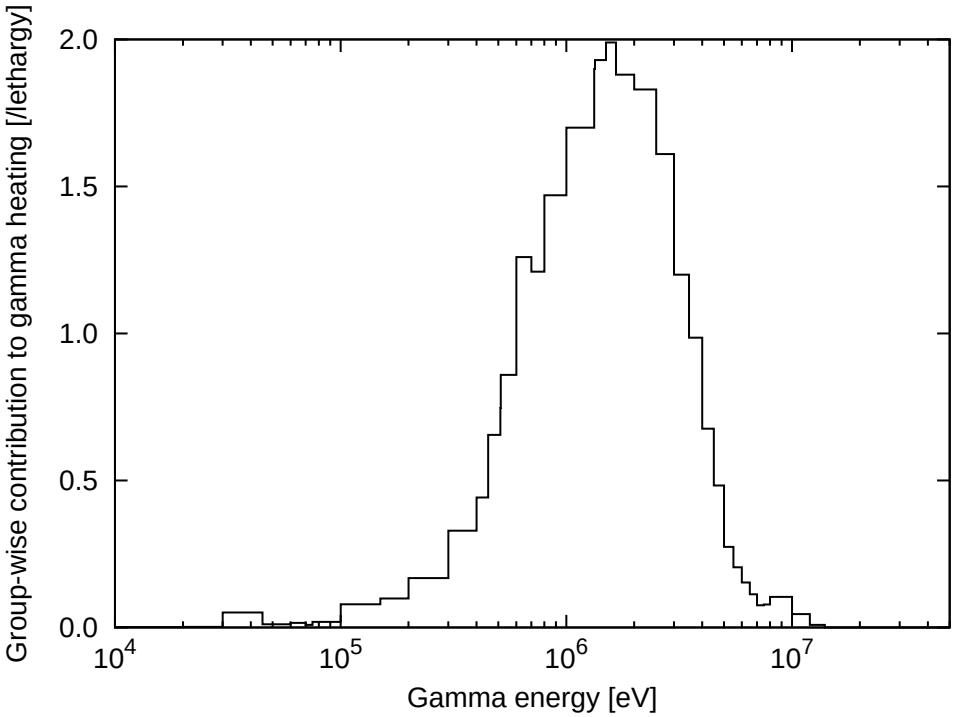


**Fig. 4　Group-wise gamma heating contribution in fuel region**

そこで、ガンマ線源エネルギー群毎の輸送効果 $C_g$ を以下のように定量的に評価した。燃料ピンセルについて、$g$ 群の単色ガンマ線源を燃料領域に与え、ガンマ線の輸送計算を行った。その結果得られたガンマ線束と KERMA 因子から燃料領域の発熱量（全エネルギー群の和）を評価し、ガンマ線源エネルギーに対する比を $C_g$ とした。この計算を全てのガンマ線エネルギー群について行い、全ての群の $C_g$ を得た。内側炉心燃料ピンセルについて、ガンマ線源エネルギー群毎の輸送効果 $C_g$ を **Fig. 5** に示す。1MeV 以上では輸送効果のエネルギー依存性は小さいが、エネルギーが小さくなるにつれてガンマ線に対する吸収断面積が大きくなるため、輸送効果が小さくなっていくことが分かる[4] 。

[4]低いエネルギー領域で輸送効果が 1.0 を越える場合が見られるが、これは物理的には有り得ない（輸送効果が 1.0 を越えた場合、ガンマ線源エネルギーより大きいエネルギーが体系に付与されることを意味するため）。この原因は、線源エネルギーを計算する際の群平均エネルギーの取り扱い方法（群の上限エネルギーと下限エネルギーの積の平方根を平均とする）に起因する。低いガンマ線エネルギー領域のように群内でガンマ線源が大きく変動する場合は、この誤差が顕在化しやすいと言える。

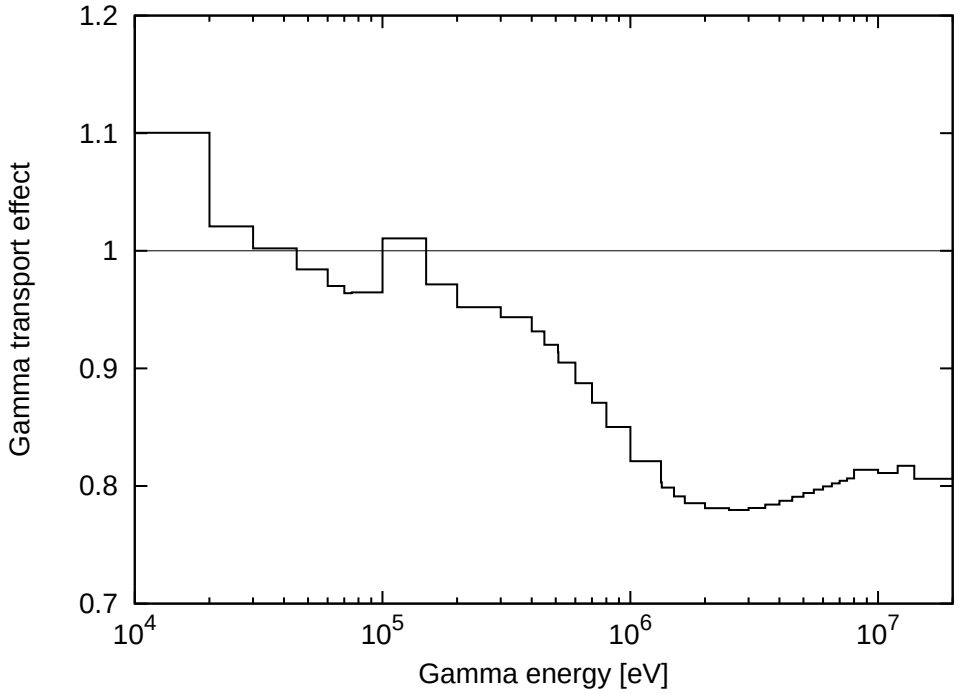


**Fig. 5 Gamma-ray transport effect on gamma-heating in fuel region**

ガンマ線と原子との相互作用は、吸収（光電効果)、電子対生成、干渉性散乱、非干渉性散乱の４種類の反応に分類することができる。高速炉燃料集合体内の発熱分布に対するガンマ線の輸送効果において、どの種の反応が大きく影響するかを把握するために、以下の検討を行った。

まず、この検討を行うため、ガンマ線の輸送を考慮した場合の発熱分布を、KERMA 因子からではなく反応のエネルギーバランスから求めた。具体的には、ガンマ線による発熱エネルギー $E_n$ を、以下の式で計算した。

$$E_n = \sum_g \left( \phi_g \Sigma_{t,g} E_g - \sum_{g'} \phi_g \Sigma_{g \to g'} E_{g'} \right) \tag{3.2}$$

ここで、$\phi_g$ は $g$ 群のガンマ線束であり、$E_g$ は $g$ 群の平均エネルギーである[5]。内側炉心のピンセルについて、各領域のガンマ線による発熱量を KERMA 因子から求めた場合と比較したところ 0.5%以内で一致し、エネルギーバランスからの発熱量の評価が妥当であることを確認した。

次に、内側炉心のピンセルについて、以下の条件でガンマ線束を計算し、ガンマ線による発熱量をエネルギーバランスから計算した。

① ガンマ線の原子に対する反応断面積について、吸収のみを考慮する。

② ガンマ線の原子に対する反応断面積について、吸収と電子対生成を考慮する。

③ ガンマ線の原子に対する反応断面積について、吸収と電子対生成、干渉性散乱を考慮する。

④ ガンマ線の原子に対する反応断面積について、全ての反応を考慮する。

得られた領域毎の発熱量を **Table 7** に示す。なお、ガンマ線の輸送効果を考慮しない場合は、前述のように、ガンマ線のエネルギーは全て発生した領域に付与されると見做している。吸収反応のみを考慮した場合、ガンマ線の輸送を考慮しない場合と比較して燃料ピンでの発熱が増加した。これは、ガンマ線の吸収断面積がウラン、プルトニウムといった重核で大きく、被覆管、冷却材で発生したガンマ線が燃料ピンで吸収されたためである。吸収に加えて電子対生成を考慮した場合は燃料ピンでの発熱量が僅かに減少し、また、さらに干渉性散乱を考慮した場合は発熱分布には殆んど影響しなかった。最後に、非干渉性散乱を考慮した場合、燃料領域の発熱量が大きく低減した。

以上の検討より、発熱分布に対するガンマ線輸送効果に感度を有するガンマ線と原子との相互作用は、主に吸収（光電効果）と非干渉性散乱であることが分かった。

また、燃料集合体内での発熱に対するガンマ線の輸送効果（輸送を考慮した場合の発熱量の、輸送を考慮しない場合の発熱量に対する比）を、燃料ピン毎に **Fig. 6** に示す。集合体外側に位置する燃料ピンで若干輸送効果が大きいことが分かる。燃料ピン平均の輸送効果は 0.986、ガンマ線輸送効果の燃料ピン位置依存性の幅は 0.002 程度であり、ガンマ線輸送効果の空間依存性が有意

[5] $g$ 群の上限エネルギーを $E_{g,u}$、下限エネルギーを $E_{g,l}$ としたとき $E_g = \sqrt{E_{g,u} E_{g,l}}$ で定義する。

**Table 7　Gamma-heating distribution in various calculation conditions (unit: J)**

| | w/o transport | w transport | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Absorption | Abs.+Pair | Abs.+Pair+Coherent | All |
| Fuel | 1.455e-12 | 1.561e-12 | 1.527e-12 | 1.527e-12 | 1.301e-12 |
| | | (1.07*) | (1.05) | (1.05) | (0.89) |
| Cladding | 9.916e-14 | 1.024e-14 | 4.152e-14 | 4.152e-14 | 2.215e-13 |
| Coolant | 1.790e-14 | 8.565e-17 | 3.288e-15 | 3.287e-15 | 4.869e-14 |

* Transport effect (ratio to the value obtained without considering gamma-ray transport)

であることが分かった。

最後に、どの程度ガンマ線が集合体内を輸送するかを把握するため、集合体の中心にある燃料ピンでのみガンマ線源を発生させ、集合体内の燃料ピン毎の発熱割合を計算した。結果を **Fig. 7** に示すが、発生したガンマ線の二割弱がその燃料ピンでの発熱に寄与し、その他が他の燃料ピンの発熱に寄与することが分かる。なお、この計算での発熱寄与であるが、燃料領域が 0.796、被覆管が 0.132、ラッパ管が 0.038、冷却材が 0.038 であった。

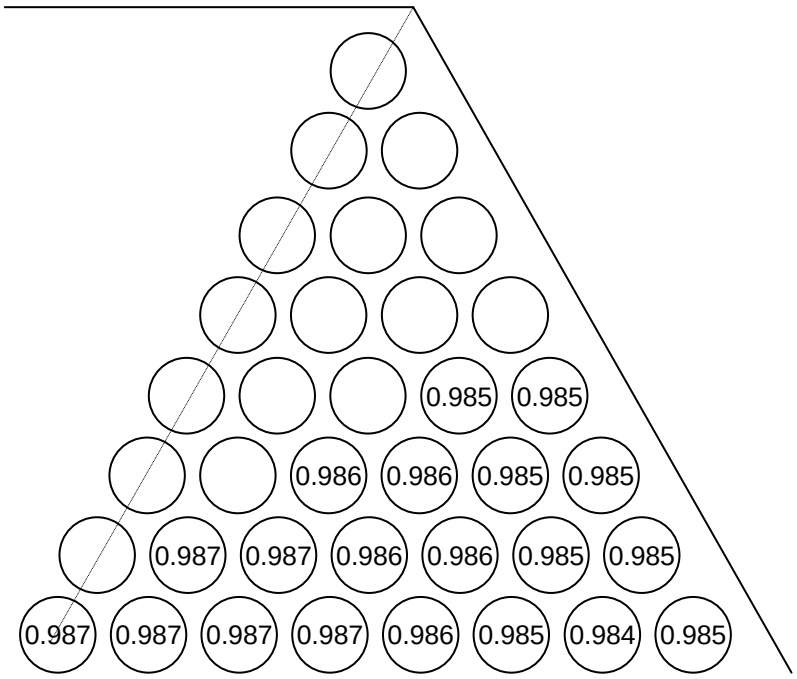


Fig. 6 Pin-wise gamma-ray transport effect on heating distribution

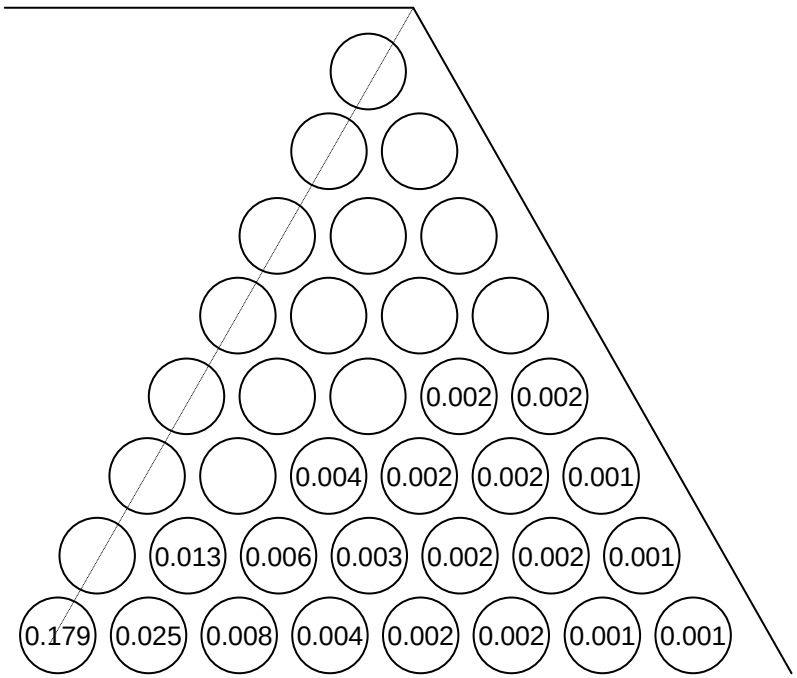


Fig. 7 Gamma heating distribution with point gamma source in central fuel pin

# 4. 不確かさの評価

これまでの検討で、「もんじゅ」内側炉心、外側炉心燃料集合体ともに、ガンマ線の輸送を考慮することにより、燃料領域の発熱が 1.4%程度低下することが示された。本章では、このガンマ線輸送効果の評価値の不確かさを見積もる。なお、不確かさの定義としては、いわゆる「上限誤差」を考えることとする。

ガンマ線の輸送効果は燃料ピンの位置に依存しており、平均値に対する分布の幅は最大で 0.2%程度であった。そこで、ガンマ線輸送効果の燃料ピン位置依存性に起因する不確かさを 0.2%と評価する。

計算手法に起因する不確かさとしては、境界条件の取り扱いが最も大きな要因であり、等方境界条件と反射境界条件とでガンマ線輸送効果に相対値で 1%程度に差異が生じた。そこで、ガンマ線の輸送効果（の絶対値）に対する計算手法に起因する不確かさとして 1.35%の 1%、すなわち 0.02%を見積もる。

生成ガンマ線のエネルギーの不確かさであるが、Sher の文献では、核分裂あたりに発生する即発、遅発ガンマ線の全エネルギーとその不確かさが親核種毎に評価されている [5)]。それをまとめたものを **Table 8** に示す。なお、表に記載されている全エネルギーの不確かさは、即発ガンマ線と遅発ガンマ線の不確かさに相関がないものとして、統計的処理により評価したものである。

**Table 8　Gamma energy and its uncertainty (unit: MeV/fission)**

| Nuclide | Prompt gamma | Delayed gamma | Total |
|---|---|---|---|
| U-238 | 6.54 ± 0.53 | 8.02 ± 0.07 | 14.56 ± 0.53 |
| Pu-239 | 7.76 ± 0.22 | 5.17 ± 0.06 | 12.93 ± 0.23 |
| Pu-241 | 7.64 ± 0.69 | 6.40 ± 0.09 | 14.04 ± 0.70 |

ガンマ線エネルギーの相対誤差の最大値は Pu-241 の 5%となった。この核種毎のガンマ線エネルギーの不確かさを核分裂率に対する分担割合を重みとして合成することで、体系に依存するガンマ線エネルギーの不確かさを評価できるが、ここでは、今回評価したガンマ線輸送効果を種々の燃料組成の集合体に適用できるようにすることを考えて、核分裂生成ガンマ線の全エネルギーに 5%の不確かさを見積もることとする（すなわち、ガンマ線エネルギーの誤差が最も大きい Pu-241 のみから構成される燃料にも適用できることになる）。ガンマ線の全エネルギーの不確かさはガンマ線の輸送効果にそのまま影響するため、ガンマ線全エネルギーの不確かさに起因するガンマ線

輸送効果の不確かさは、輸送効果 1.35%の 5%、すなわち 0.07%となる[1] 。

なお、捕獲反応により生成するガンマ線のエネルギーは Q 値により決まるため、その不確かさは無視できるとする。

生成ガンマ線のエネルギースペクトルの不確かさであるが、これは即発、遅発ガンマ線ともに有意な不確かさが存在すると考えられる。ただし、前章で既に評価したように、ガンマ線輸送効果のエネルギー依存性は 1MeV 以上ではほぼ一定であり、1MeV 以下であっても変動は滑らかである。従って、ガンマ線のエネルギースペクトルに不確かさがあっても、ガンマ線輸送効果への影響は小さいと予想される。

ガンマ線エネルギースペクトルの不確かさは現在の評価済み核データファイルには与えられておらず、その定量的なデータは存在しない。そこで今回は、前節の Fig. 4 で示したガンマ線全エネルギーに対するエネルギー群毎の寄与割合について、工学的判断に基づき、保守側の想定として変動し得る最大の範囲を設定し、それに応じてガンマ線の輸送効果のとる範囲を評価し不確かさを定量化することとした。現状ではこれ以上の不確かさ幅は想定し難いと考える。ガンマ線全エネルギーに対するエネルギー群毎の寄与割合の変動し得る最大の範囲として、ピークエネルギーが倍半分程度ずれる場合を想定した。想定したガンマ線全エネルギーに対するエネルギー群毎の寄与割合を **Fig. 8** に示す。ここでは、ガンマ線全エネルギーに対するエネルギー群毎の寄与割合は、ガンマ線のエネルギースペクトルの不確かさを考慮した場合「Spectrum 1」と「Spectrum 2」の範囲で変動するものと想定する。図中の「Ref.」は前章での検討に用いたノミナル値である。このガンマ線全エネルギーに対するエネルギー群毎の寄与 $\phi_g E_g$ と、前章の Fig. 5 で示した燃料領域のガンマ発熱に対するエネルギー群毎の輸送効果 $C_g$ を用いて、燃料領域の全ガンマ発熱に対する輸送効果 $C$ を以下の式で評価した。

$$C = \frac{\sum_g C_g \phi_g E_g}{\sum_g \phi_g E_g} \tag{4.1}$$

得られた燃料領域の全ガンマ発熱に対する輸送効果を **Table 9** に示す。

**Table 9　Range of transport effect on gamma heating**

| Group-wise contribution to gamma heating | Gamma transport effect |
|---|---|
| Reference | 0.827 (0.173*) |
| Spectrum 1 | 0.807 (0.193) |
| Spectrum 2 | 0.856 (0.144) |

* Gamma transport effect on total heat deposited to non-fuel regions

[1]なお、原子炉の熱出力は一定値であるので、厳密には「ガンマ線エネルギーの割合」の不確かさを考慮しなければならない。ただし、ガンマ線エネルギーの不確かさは、熱出力一定の条件により、緩和されてガンマ線エネルギー「割合」に対する不確かさに伝播するので、今回の評価は保守的と言える。

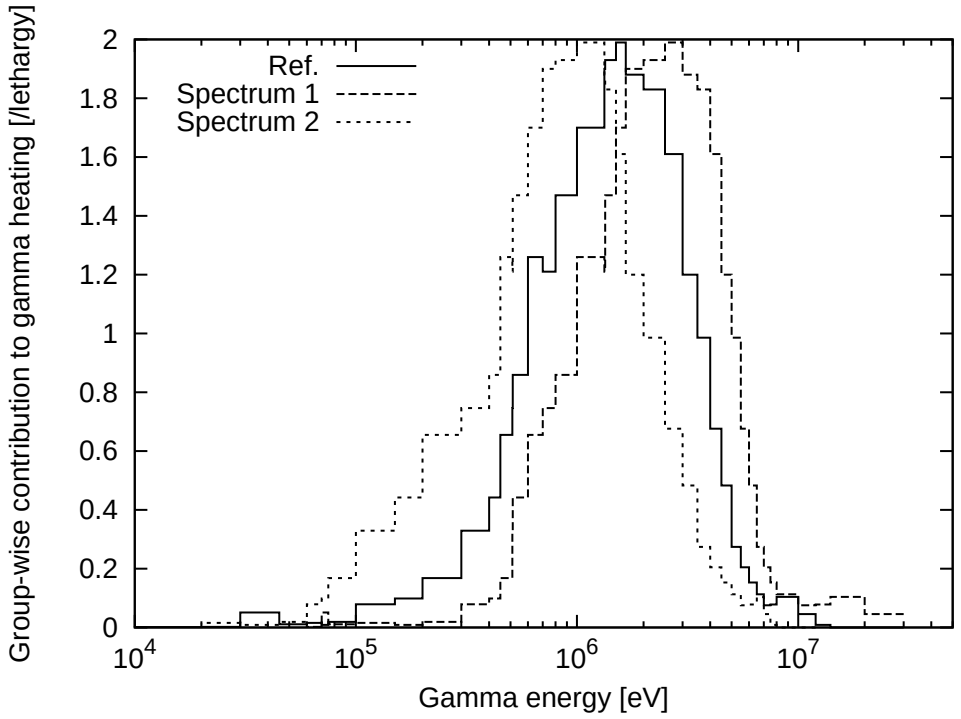


**Fig. 8　Range of group-wise gamma heating contribution in fuel region**

ノミナルの寄与割合で計算した場合は全発熱の 17.3%が燃料以外の領域で発生する一方、ガンマ線の低エネルギー成分が大きい場合（ガンマ線のエネルギースペクトルが軟化した場合）は燃料以外の領域の発熱割合が 14.4%に低下した（ノミナルの計算結果に対して相対値で約 17%低い値となった）。

これらの検討結果より、ガンマ線エネルギースペクトルの不確かさに起因するガンマ線輸送効果の不確かさとしては、輸送効果 1.35%の 20%、すなわち 0.27%と評価する。

ガンマ線と原子との相互作用にも不確かさが存在すると考えられる。今回の評価に用いたガンマ断面積ライブラリ UFGLIB.J40 のガンマ線の原子に対する反応断面積は光子データライブラリ EPDL97[6] に基づいている。EPDL97 の文献[6] には photoatomic データの不確かさについての記述があり、例えば光電効果（文献中では「photoionization」と記載）の反応断面積の不確かさとして、0.1-10MeV のエネルギー領域では固体原子に対して 1 から 2%と評価されている。また、非干渉性散乱断面積についての精度についても良好であるという記述がある[2]。今回の評価で、ガンマ線の輸送効果に主に寄与する反応が光電効果と非干渉性散乱であることを特定したが、以上のように、これらの反応断面積の精度が良好であるとされていることから、ガンマ線と原子との相互作用の不確かさは他の不確かさに比較すれば無視できる程度に小さいものと評価される。

[2]「The incoherent cross section derived by integrating the product of Compton scattering defined by the Klein-Nishina formula and scattering functions, will be accurate at higher energy」

以上の不確かさの評価結果を **Table 10** にまとめる。これより、ガンマ線輸送効果を考慮することにより生じる不確かさは 0.34%となった。

**Table 10　Uncertainty in gamma-ray transport effect**

| Item | Uncertainty |
|---|---|
| Spatial dependence | 0.0020 |
| Calculation method | 0.0002 |
| Fission gamma-ray total energy | 0.0007 |
| Gamma-ray energy spectrum | 0.0027 |
| Total | 0.0034 |

# 5. まとめ

「もんじゅ」燃料集合体について、全発熱に対する燃料領域の寄与割合におけるガンマ線輸送効果の評価結果を **Table 11** にまとめる。燃料領域以外の発熱に対する寄与割合は Table 4 及び Table 6 に示した通りである。ガンマ線の輸送効果は、内側炉心燃料集合体では-1.38%、外側炉心燃料集合体では-1.36%と評価された。本検討では、これらを保守側（小さい側）に丸めることにより、ガンマ線輸送効果の評価値として-1.35%を得た。また、その不確かさについては、Table 10 より 0.34%と評価された。

**Table 11　Summary of gamma-ray transport effect on fuel region heating**

| Sub-assembly | Contribution of fuel region to total heating | |
|---|---|---|
| | [w/o gamma transport] | [w gamma transport] |
| Inner core | 0.9860 | 0.9721 (-0.0138) |
| Outer core | 0.9886 | 0.9750 (-0.0136) |

これらをまとめると、燃料領域の発熱に対するガンマ線の輸送効果は、内側炉心、外側炉心燃料集合体ともに、

**-1.35 ± 0.34%**

と評価された。

以上、燃料領域の発熱割合に対するガンマ線の輸送効果を示した。この評価では、集合体内の発熱を燃料領域だけでなく被覆管や冷却材領域についても厳密に評価した。これに対して、集合体内の発熱を全てラッパ管内領域（ただしラッパ管自体は除く）からの発熱と保守的に想定して温度評価する場合には、むしろラッパ管内全領域とラッパ管及び外周部冷却材領域とのガンマ線輸送効果が重要となる。

参考のために、そのような場合を想定して、ラッパ管内の領域の発熱割合に対するガンマ線の輸送効果を評価した。**Table 12** に、ラッパ管とラッパ管の外側の冷却材領域における発熱割合に対するガンマ線輸送効果を示す。この結果より、ガンマ線の輸送を考慮することにより、ラッパ管とその外側冷却材の出力寄与が 0.5%程度増加すること、すなわち、ラッパ管内領域の発熱割合が 0.5%減少することが分かる。発熱割合の 0.5%の減少は、燃料最高温度の約 10 度の低減に相当し、燃料温度上は有意であると言える。

**Table 12　Summary of gamma-ray transport effect on wrapper tube and its outer coolant heating**

| Subassembly | Contribution to total heating | |
|---|---|---|
| | [w/o gamma transport] | [w gamma transport] |
| Inner core | 0.0053 | 0.0104 (+0.0051) |
| Outer core | 0.0043 | 0.0093 (+0.0050) |

# 謝辞

本検討については、元米国ローレンスリバモア研究所の Dermott Cullen 氏よりご助言をいただくとともに、別途用意した英文サマリに目を通していただき「reasonable である」との技術的な確認をいただきました。また、FBR プラント工学センターの西裕士氏には本報告書全般に渡って大変有意義なコメントをいただきました。さらに、FBR プラント工学センターの金城秀人氏、原子力基礎工学部門の石川眞氏、久語輝彦氏、横山賢治氏には、本検討についてのご助言をいただきました。ここに謝意を表します。

# 参考文献

1) 高下、他、「核設計手法報告書」、PNC TN8410 2000-011 (2000).

2) T. Hazama, *et al.*, 'SLAROM-UF: Ultra fine group cell calculation code for fast reactor - version 20090113 -,' JAEA-Review 2009-003 (2009).

3) 千葉、他、「高速炉のガンマ発熱計算のためのガンマ断面積ライブラリの整備」、JAEA-Data/Code 2010-013 (2010).

4) 千葉、「中性子輸送計算システム CBG による小林ベンチマーク問題の計算」、JAEA-Research 2009-012 (2009).

5) R.Sher,'Fission-energy release for 16 fissioning nuclides,' *Proc. Conf. on Nucl. Data Evaluation Method and Procedures,* BNL (1980).

6) D.E.Cullen, J.H.Hubbel, L.Kissel, 'EPDL97: The evaluated photon data library 97 version,' UCRL-LR50400 Vol 6 Rev 5 (1997).

# 付録A　参考資料

## A.1　ガンマ発熱量に対する均質化の影響

高速炉の炉心設計計算では一般に、それぞれの集合体について格子計算の段階で均質化断面積を求め、それを用いて炉心計算を行う。断面積の均質化は、通常、反応率が保存されるように中性子束を重みとして行われるため、それぞれの核種の微視的反応率も保存され、中性子核反応の結果生成するガンマ線源数も均質化前後で保存される。今回の評価では燃料ピンセル、燃料集合体モデルを非均質体系のままで扱ったが、炉心設計計算のように均質化を行ったとしても、ガンマ線源は保存されることが期待される。

この点を数値的に確認するため、以下のような計算を行った。

内側炉心燃料ピンセルについて SLAROM-UF により均質断面積を計算し、均質ピンセル系での中性子スペクトルを用いて発熱量を計算した。ここで、燃料領域に含まれる核種の寄与を評価するため、被覆管、冷却材領域に含まれる核種の数密度をゼロにすることにより、それらの核種の発熱への寄与を無視する計算も併せて行った（ガンマ発熱については UFGLIB.J40 に付属のユーティリティrscn を変更し、ガンマ線巨視的ガンマ定数を計算する際に燃料領域に含まれる核種（重核種と O-16）のみからのガンマ線源を考慮するようにした）。

全発熱に対する燃料領域核種の寄与割合を反応毎に **Table A.1.1** に示す。これより、非均質モデル、均質モデルの結果がよく一致していることが確認できる。

**Table A.1.1　Cell model dependence on fuel region contribution to total heating**

| | Contribution of fuel region to total heating | | |
|---|---|---|---|
| | [Fission] | [Gamma] | [Elastic scattering] |
| Heterogeneous cell | 0.894 | 0.094 | 0.003 |
| Homogenized cell | 0.894 | 0.094 | 0.003 |

## A.2　遅発ガンマ線のエネルギーを全て考慮した場合の評価結果

遅発ガンマ線のエネルギーを全て考慮した場合、すなわち、十分な核分裂生成核種が蓄積されたあとの放射平衡強度の場合について、同様の評価を内側炉心、外側炉心燃料集合体に対して行った。結果を **Table A.2.1**、**Table A.2.2** に示す。

**Table A.2.1　Region-wise contribution to total heat in sub-assembly of inner core (all the energy of delayed gamma-ray is considered)**

| | Region | Contribution | Reaction-wise | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fission | Gamma | Elas. Scat. |
| with gamma transport | Fuel | **0.9710** | 0.889 | 0.079 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0139 | 0.000 | 0.013 | 0.001 |
| | Coolant (in) | 0.0044 | 0.000 | 0.003 | 0.001 |
| | Wrapper tube | 0.0097 | 0.000 | 0.009 | 0.001 |
| | Coolant (out) | 0.0010 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| without gamma transport | Fuel | **0.9860** | 0.889 | 0.094 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0064 | 0.000 | 0.006 | 0.001 |
| | Coolant (in) | 0.0023 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| | Wrapper tube | 0.0047 | 0.000 | 0.004 | 0.001 |
| | Coolant (out) | 0.0006 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

**Table A.2.2　Region-wise contribution to total heat in sub-assembly of outer core (all the energy of delayed gamma-ray is considered)**

| | Region | Contribution | Reaction-wise | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fission | Gamma | Elastic Scat. |
| with gamma transport | Fuel | **0.9738** | 0.898 | 0.073 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0126 | 0.000 | 0.012 | 0.001 |
| | Coolant (in) | 0.0039 | 0.000 | 0.003 | 0.001 |
| | Wrapper tube | 0.0088 | 0.000 | 0.008 | 0.000 |
| | Coolant (out) | 0.0009 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| without gamma transport | Fuel | **0.9887** | 0.898 | 0.088 | 0.003 |
| | Cladding | 0.0052 | 0.000 | 0.005 | 0.001 |
| | Coolant (in) | 0.0019 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| | Wrapper tube | 0.0038 | 0.000 | 0.003 | 0.000 |
| | Coolant (out) | 0.0005 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

また、全発熱に対する燃料領域の発熱割合についてまとめたものを **Table A.2.3** に示す。この場合、ガンマ線の輸送効果は-1.5%程度となった。

**Table A.2.3　Summary of gamma-ray transport effect on fuel region heating (All the energy of delayed gamma-ray is considered)**

| Sub-assembly | Contribution of fuel region to total heating | |
|---|---|---|
| | [w/o gamma transport] | [w gamma transport] |
| Inner core | 0.9860 | 0.9710 (-0.0150) |
| Outer core | 0.9887 | 0.9738 (-0.0149) |

# 国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

| 基本量 | SI 基本単位 | |
|---|---|---|
| | 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 |

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量 | SI 基本単位 | |
|---|---|---|
| | 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 | $m^3/kg$ |
| 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[b] | （数字の） 1 | 1 |
| 比透磁率[b] | （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

| 組立量 | SI 組立単位 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 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 |
| 平面角 | ラジアン[b] | rad | 1 [b] | m/m |
| 立体角 | ステラジアン[b] | sr[c] | 1 [b] | $m^2/m^2$ |
| 周波数 | ヘルツ[d] | Hz | | $s^{-1}$ |
| 力 | ニュートン | N | | $m\ kg\ s^{-2}$ |
| 圧力，応力 | パスカル | Pa | $N/m^2$ | $m^{-1}\ kg\ s^{-2}$ |
| 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 | $m^2\ kg\ s^{-3}$ |
| 電荷，電気量 | クーロン | C | | s A |
| 電位差（電圧），起電力 | ボルト | V | W/A | $m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$ |
| 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 | $m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$ |
| 磁束 | ウエーバ | Wb | Vs | $m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$ |
| 磁束密度 | テスラ | T | $Wb/m^2$ | $kg\ s^{-2}\ A^{-1}$ |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A | $m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$ |
| セルシウス温度 | セルシウス度[e] | ℃ | | K |
| 光束 | 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, 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[g] | Sv | J/kg | $m^2\ s^{-2}$ |
| 酸素活性 | 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)ヘルツは周期現象についてのみ、ベク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)セル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。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、温度差や温度間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組立単位の例

| 組立量 | SI 組立単位 | | |
|---|---|---|---|
| | 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 | $m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$ |
| 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 | $m^2\ s^{-3}$ |
| 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 | 接頭語 | 記号 | 乗数 | 接頭語 | 記号 |
|---|---|---|---|---|---|
| $10^{24}$ | ヨタ | Y | $10^{-1}$ | デシ | d |
| $10^{21}$ | ゼタ | Z | $10^{-2}$ | センチ | c |
| $10^{18}$ | エクサ | E | $10^{-3}$ | ミリ | m |
| $10^{15}$ | ペタ | P | $10^{-6}$ | マイクロ | μ |
| $10^{12}$ | テラ | T | $10^{-9}$ | ナノ | n |
| $10^{9}$ | ギガ | G | $10^{-12}$ | ピコ | p |
| $10^{6}$ | メガ | M | $10^{-15}$ | フェムト | f |
| $10^{3}$ | キロ | k | $10^{-18}$ | アト | a |
| $10^{2}$ | ヘクト | h | $10^{-21}$ | ゼプト | z |
| $10^{1}$ | デカ | da | $10^{-24}$ | ヨクト | y |

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 | ° | 1°=(π/180) rad |
| 分 | ’ | 1’=(1/60)°=(π/10800) rad |
| 秒 | ” | 1”=(1/60)’=(π/648000) rad |
| ヘクタール | ha | $1ha=1hm^2=10^4m^2$ |
| リットル | L, l | $1L=1l=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$ |
| 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 | $1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$ |
| ダルトン | Da | $1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$ |
| 統一原子質量単位 | u | 1u=1 Da |
| 天文単位 | ua | $1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$ |

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 |
|---|---|---|
| バール | bar | $1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$ |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa |
| オングストローム | Å | $1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$ |
| 海里 | M | 1 M=1852m |
| バーン | b | $1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$ |
| ノット | kn | 1 kn=(1852/3600)m/s |
| ネーパ | Np | SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。 |
| ベル | B | |
| 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 | P | $1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$ |
| ストークス | St | $1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$ |
| スチルブ | sb | $1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$ |
| フォト | ph | $1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$ |
| ガル | Gal | $1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$ |
| マクスウェル | Mx | $1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$ |
| ガウス | G | $1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$ |
| エルステッド[c] | Oe | $1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$ |

(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 |
|---|---|---|
| キュリー | Ci | $1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$ |
| レントゲン | R | $1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$ |
| ラド | rad | $1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$ |
| レム | rem | $1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$ |
| ガンマ | γ | 1 γ =1 nT=10-9T |
| フェルミ | | 1フェルミ=1 fm=10-15m |
| メートル系カラット | | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg |
| トル | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm = 101 325 Pa |
| カロリー | cal | 1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー） |
| ミクロン | μ | 1 μ =1μm=$10^{-6}$m |

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています