



JAEA-Data/Code  
2007-018

## An Application Program for Fission Product Decay Heat Calculations

PHAM Ngoc Son\* and Jun-ichi KATAKURA

Nuclear Data Center  
Nuclear Science and Engineering Directorate

JAEA-  
Data/  
Code

October 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つ  
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
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  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

# An Application Program for Fission Product Decay Heat Calculations

PHAM Ngoc Son\* and Jun-ichi KATAKURA

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

(Received July 10, 2007)

The precise knowledge of decay heat is one of the most important factors in safety design and operation of nuclear power facilities. Furthermore, decay heat data also play an important role in design of fuel discharges, fuel storage and transport flasks, and in spent fuel management and processing. In this study, a new application program, called DHP (Decay Heat Power program), has been developed for exact decay heat summation calculations, uncertainty analysis, and for determination of the individual contribution of each fission product. The analytical methods were applied in the program without any simplification or approximation, in which all of linear and non-linear decay chains, and 12 decay modes, including ground state and meta-stable states, are automatically identified, and processed by using a decay data library and a fission yield data file, both in ENDF/B-VI format. The window interface of the program is designed with optional properties which is very easy for users to run the code.

Keywords: Decay Heat, Average Decay Energy, Decay Chain, Fission Product, Summation Calculation, Uncertainty Analysis, Decay Data, and Fission Yield Data.

---

\* Visiting scientist from the Nuclear Research Institute of Vietnam Atomic Energy Commission (VAEC).

## 核分裂生成物による崩壊熱計算のためのプログラム

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

PHAM Ngoc Son\*、片倉 純一

(2007年7月10日 受理)

崩壊熱を正確に知ることは原子力施設の安全設計や運転における最も重要な因子の一つである。さらに、崩壊熱は燃料排出や貯蔵、輸送、管理、処理においても、重要な役割を果たす。この研究では正確な崩壊熱総和計算や不確実さ解析、個々の核分裂生成物の崩壊熱への寄与を得るために DHP (Decay Heat Power program) という新しいプログラムを開発した。簡略化や近似を排除した解析法を適用し、線形及び非線形の崩壊連鎖と基底状態及び異性体を含む 12 の崩壊モードを自動的に同定するとともに ENDF/B-VI フォーマットの崩壊データや収率データを用いることにより処理される。プログラムは、利用者が使い易い様なオプションを備えた window インターフェースを用いている。

---

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

\*ベトナム原子力研究所（原子力研究交流制度により 2006 年 1 月から 2007 年 1 月まで滞在）

## Contents

1. Introduction.....	1
2. Fission Product Decay Heat Summation Calculations.....	1
3. Uncertainty analysis .....	2
4. Contributor analysis .....	3
5. Description of DHP Program .....	4
6. Applications.....	6
7. Conclusion .....	11
Acknowledgments .....	11
References .....	12

## 目次

1. 序論 .....	1
2. 核分裂生成物の崩壊熱総和計算 .....	1
3. 不確実さ解析 .....	2
4. 寄与する核種の解析.....	3
5. DHP プログラムの詳細 .....	4
6. 適用 .....	6
7. 結論 .....	11
謝辞 .....	11
参考文献.....	12

## List of Figures

Fig. 1 Main contributions to the total beta-ray heat from $^{238}\text{U}$ fast fission calculated at different cooling times by using the DHP program.....	4
Fig. 2 FP Decay heat summation from $^{238}\text{U}$ fast neutron fission calculated based upon the JENDL3.3 Decay Data File by using DHP program.....	5
Fig. 3 FP Decay heat summation from $^{239}\text{Pu}$ thermal neutron fission calculated based upon the JENDL3.3 Decay Data File by using DHP program .....	5
Fig. 4 Beta-ray heat after $^{235}\text{U}$ thermal burst fission, calculated using the DHP program .....	6
Fig. 5 Gamma-ray heat after $^{235}\text{U}$ thermal burst fission, calculated using the DHP program .....	7
Fig. 6 Total decay heat after $^{235}\text{U}$ thermal burst fission, calculated using the DHP program .....	7
Fig. 7 Beta-ray heat after $^{239}\text{Pu}$ fast burst fission, calculated using the DHP program .....	8
Fig. 8 Gamma-ray heat after $^{239}\text{Pu}$ fast burst fission, calculated using the DHP program .....	8
Fig. 9 Total decay heat after $^{239}\text{Pu}$ fast burst fission, calculated using the DHP program .....	9
Fig. 10 Decay heat and uncertainties as functions of cooling time after fast neutron fission of $^{238}\text{U}$ , calculated using the DHP program .....	9
Fig. 11 Decay heat and uncertainties as functions of cooling time after fast neutron fission of $^{232}\text{Th}$ , calculated using the DHP program.....	10
Fig. 12 Total decay heat of U-235 thermal fission after $10^{13}\text{s}$ irradiation, calculated using the DHP program.....	10
Fig. 13 Total decay heat of $^{233}\text{U}$ thermal fission after $2 \times 10^4\text{s}$ irradiation, calculated using the DHP program.....	11

## 1. Introduction

Gamma and beta decay energy released from the delayed natural decay of the fission products (FP) contributes approximately 8% to 12%<sup>1)</sup> of the total energy generated through the fission process, and is called “decay heat”. After a reactor is shutdown, this source of radioactive decay energy still remains to maintain a moderate level of heating in the reactor core. Therefore, after a power reactor has been shutdown, the reactor coolant has to be maintained for an extent period of time determined by means of decay heat calculations. The exact results from decay heat calculations are also important for safety design of a nuclear power facility, design of shielding for fuel discharges, fuel storage and transport flasks, and the management of spent fuel.

Studies on fission product decay heat, both experiment and theory, have been continuously developed since 1940s<sup>2)</sup>. In the recent years, with the great efforts of improvement for the evaluated nuclear data libraries and for new measurements, decay heat calculations are expected to predict the reliable data of decay heat. In this study, a new application program, called DHP (decay heat power program), has been developed for FP decay heat calculations, uncertainty analysis and for determination of the contribution of individual nuclide. The method used in the program is so-called summation calculation, in which the buildups and decay of FP nuclides, following a fission process, are analyzed by a new numerical algorithm for exact analysis of the general solutions of Bateman Equations. Based upon the input data for the program, nuclear decay data and fission yield, the concentration of each FP nuclide at any point of time after a fission burst is determined exactly. The difficulty of solving a complex decay-net system is overcome by using the present algorithm, and all of decay chains and decay modes, excepted for spontaneous fission, are also analyzed automatically by the program. Furthermore, the window interface of the program is designed with optional properties which is very easy for users to perform a calculation process, and the calculated results can be directly displayed in graphical form together with experimental values, and can be saved as an output data file in tabular form.

## 2. Fission Product Decay Heat Summation Calculations

The summation calculation of fission product decay heat after a fission burst is briefly reviewed in this section. The burst function  $f(t)$  (MeV/fission/s) following time  $t$  after a fission burst is defined as:

$$f(t) = \sum_{i=1}^M E_i \lambda_i N_i(t), \quad (2-1)$$

where

- $M$  : The maximum number of FP nuclides,  
 $E_i$  : Mean decay energy per decay of the nuclide  $i$ ,  
 $\lambda_i$  : Decay constant of the nuclide  $i$ ,  
 $N_i(t)$  : Number of the nuclide  $i$  at cooling time  $t$ .

The number of the atom nuclide  $i$  at cooling time  $t$  after burst fission can be calculated from the following formula:

$$N_i(t) = N_i(0) \exp(-\lambda_i t) + \sum_{j \neq i}^M N_{j \rightarrow i}(t), \quad (2-2)$$

in which,  $N_i(0)=y_i$  is the independent yield of the nuclide  $i$ , and the part of  $N_{j \rightarrow i}(t)$  is the number of nuclide  $i$  at cooling time  $t$ , that were formed in all of decay chains originated from the nuclide  $j$ . This term of calculation can be obtained by analysis of the general solutions of the Bateman equation for every particular decay chain. In this work, we developed a numerical algorithm to calculate the term  $N_{j \rightarrow i}(t)$  in equation (2-2) directly by using a decay data file and fission yield data.

The procedure is as the following steps:

- For every nuclide  $j$ , the decay-net that starts from the nuclide  $j$  is separated to form the equivalent liner decay chains, where the concentration of any nuclide depends only on a single parent and its own radioactive decay, and fission yield.
- For each liner decay chain, if nuclide  $i$  is a daughter nuclide in the decay chain, the general solution of Bateman equation<sup>3)</sup> is applied to the liner decay chain to calculate the build up number of nuclide  $i$ , at the cooling time  $t$ , due to the decay of nuclide  $j$  through the present liner decay chain.
- The amount of  $N_{j \rightarrow i}(t)$  can be obtained by summing all of the build up number of nuclide  $i$  from all of the liner decay chains.

In the present program, all of decay chains and 12 decay modes are taken into consider automatically, including beta- decay to ground, fist and second isomer states, double beta-decay, electron capture decay to ground and isomer states, alpha, proton, delay neutron beta-decay and internal transitions.

In addition, the results of calculations and comparison data are shown in the screen window of the program in graph form, and also can be store as an output data file.

### 3. Uncertainty analysis

The analysis of uncertainty in FP decay heat summation calculations can be performed in the DHP program by means of the sensitivity analysis method. Input data for the calculations are mainly based on the uncertainties of decay data and independent fission yield data. The

errors of half-lives and average decay energies for each nuclide are assumed to be uncorrelated, but the errors of fission yields are negative correlated. The uncertainties in decay heat summation calculation respect to half-life, decay energy and fission yield can be derived by the following expressions<sup>4-7)</sup>.

$$\sigma_{\varepsilon}(f) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [\lambda_i n_i(t) \sigma_{\varepsilon}(E_i)]^2}, \quad (3-1)$$

$$\sigma_{\lambda}(f) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [E_i \frac{d(\lambda_i n_i(t))}{d\lambda_i} \sigma_{\lambda}(\lambda_i)]^2}, \quad (3-2)$$

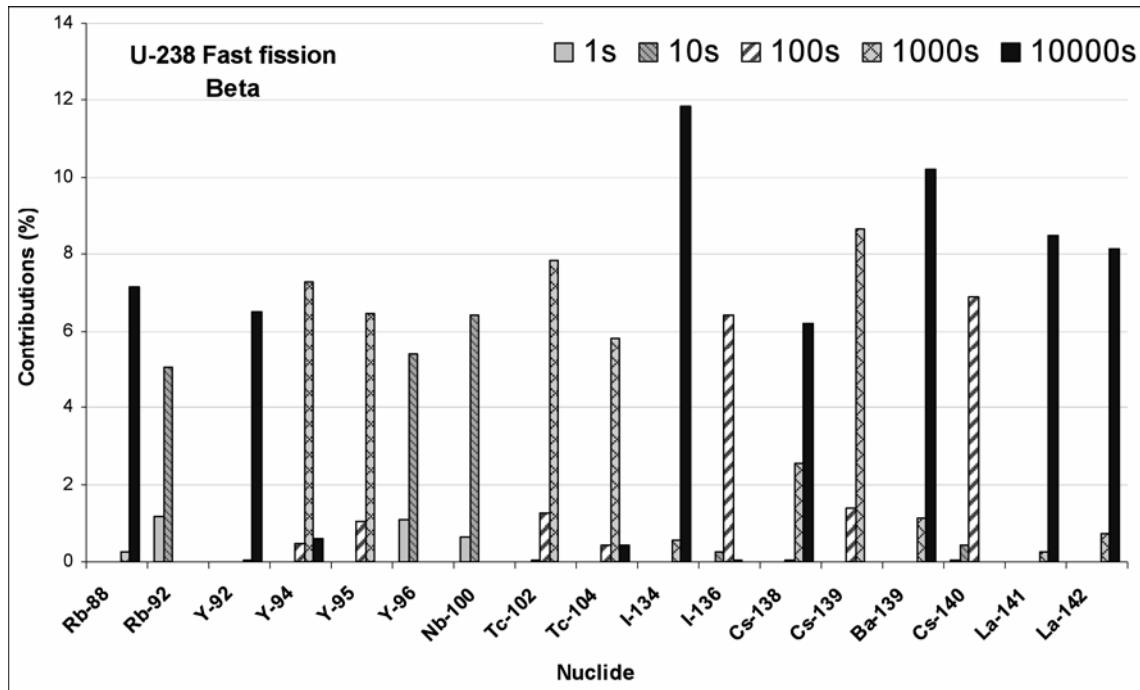
$$\sigma_y(f) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [E_i \lambda_i \frac{d(n_i(t))}{dy_i} \sigma_y(Y_i)]^2 - \frac{1}{\sigma_y^2(Y)} [\sum_{i=1}^N E_i \lambda_i \frac{d(n_i(t))}{dy_i} \sigma_y^2(Y_i)]^2}, \quad (3-3)$$

where  $E_i$ ,  $\lambda_i$ ,  $Y_i$ , and  $n_i(t)$  are average decay energy, decay constant, fission yield and number of  $i$ -th nuclide, respectively, and  $\sigma$  denotes the uncertainty.

A procedure has been developed for this purpose of analysis as a function of the DHP program, and the analysis of uncertainties in decay heat summation calculations can be done directly from the source code.

#### 4. Contributor analysis

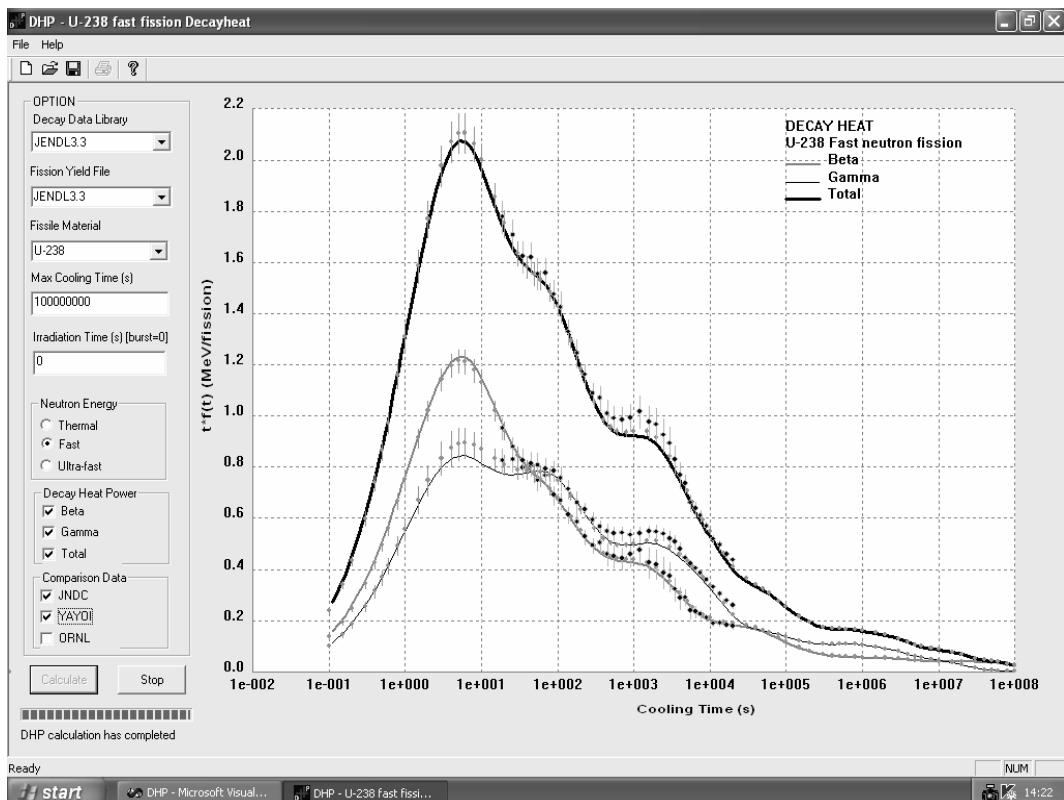
The calculation of contribution of each nuclide to the total FP decay heat following time after fission process is important need in the FP decay heat evaluation and the evaluation of decay data. In this program, the decay heat power due to each fission product nuclide relative to the total decay heat resulted from summation calculation is reported as an output data file for nuclides which contribution is larger than 1%. A result of contributor analysis in FP decay summation calculation for  $^{238}\text{U}$  fast neutron fission is illustrated in Fig. 1.



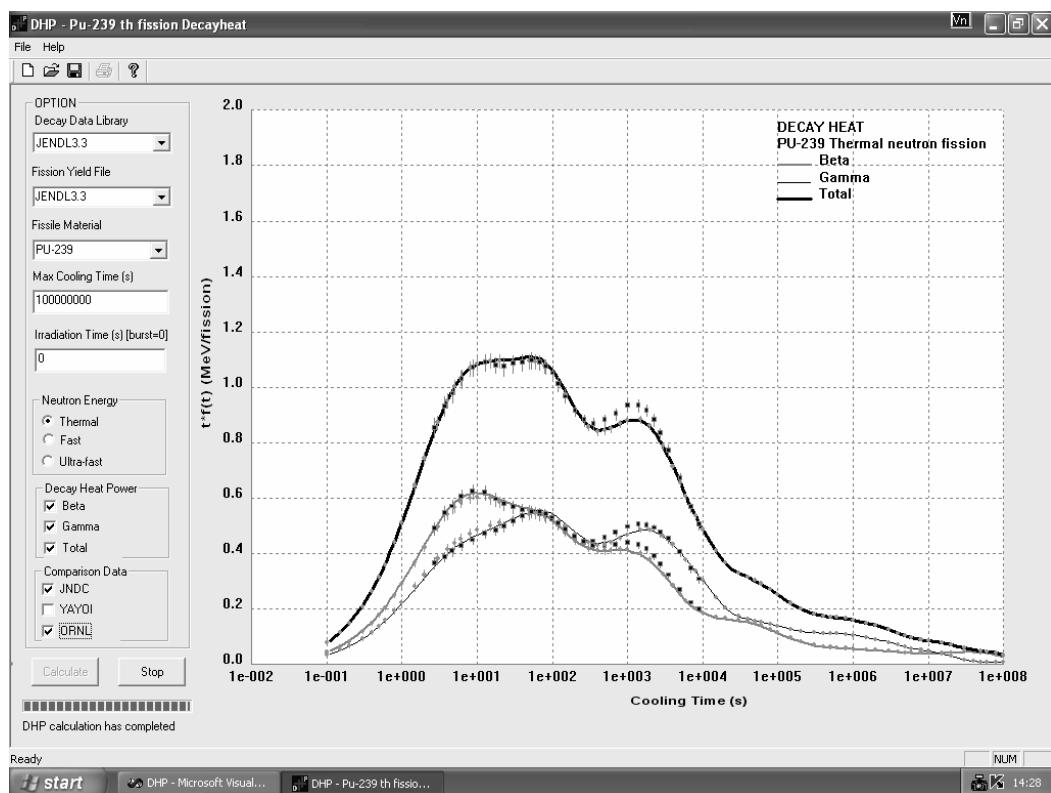
**Fig. 1:** Main contributions to the total beta-ray heat from  $^{238}\text{U}$  fast fission calculated at different cooling times by using the DHP program

## 5. Description of DHP Program

The source code of the program is developed using the C++ compiler, and the window interface of the program is designed with optional style. That makes it easy for user to utilize the program, and the user can choose optionally to calculate FP decay heat after a fission burst or after a period time, T, of irradiation. The input data for the program is loaded from the decay data and fission yield data libraries with ENDF/B-6 format such as FP Decay data File and fission yield data file from JENDL3.3 and JEFF3.1. In addition, the experimental and recommended values for comparison are loaded from files in table form. The screen window of program is illustrated in Figs. 2 and 3.



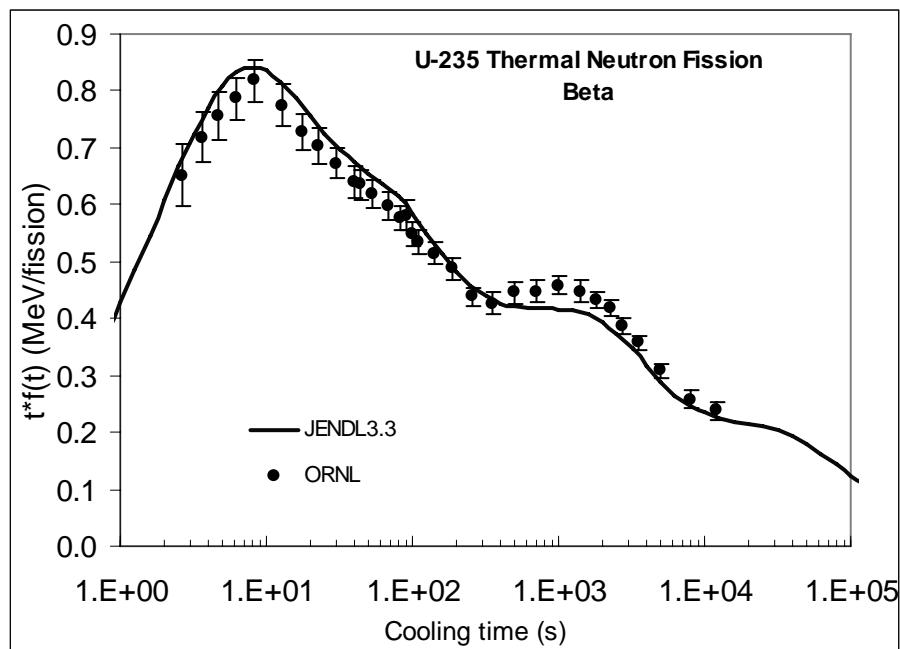
**Fig. 2:** FP Decay heat summation from  $^{238}\text{U}$  fast neutron fission calculated based upon the JENDL3.3 Decay Data File by using DHP program



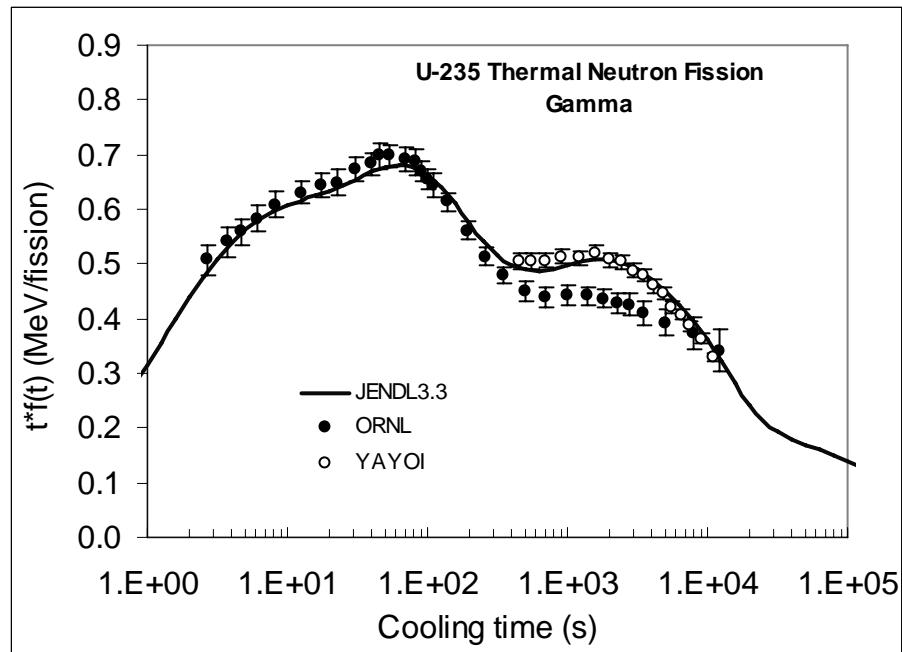
**Fig. 3:** FP Decay heat summation from  $^{239}\text{Pu}$  thermal neutron fission calculated based upon the JENDL3.3 Decay Data File by using DHP program

## 6. Applications

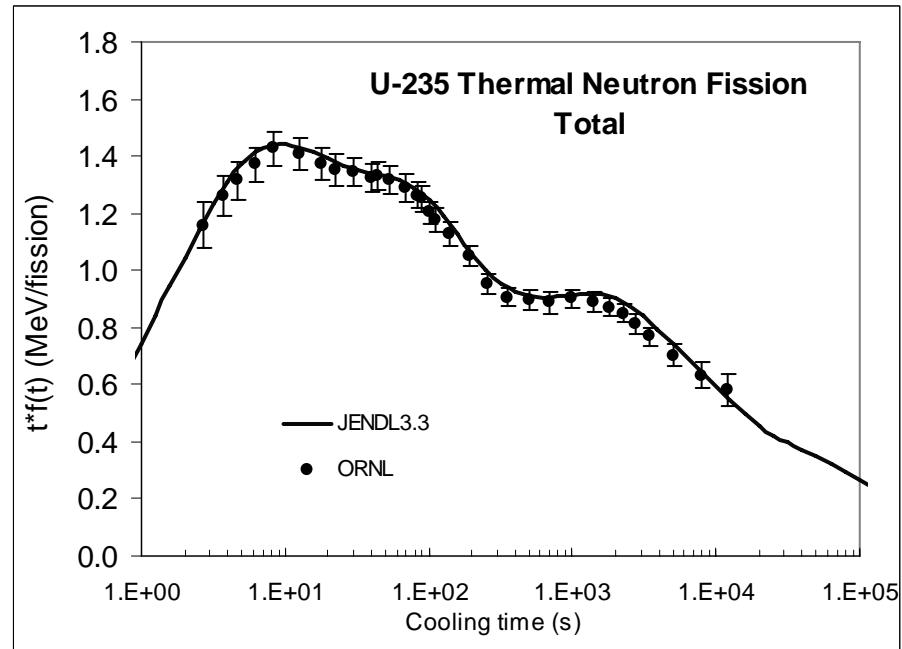
The DHP program has been applied for decay heat summation calculation and uncertainty analysis for several fissile nuclides by using the decay data and fission yield data from JENDL3.3. The results of calculation for fissile nuclides of  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$   $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{232}\text{Th}$  is shown in Figs. 3-13, in comparison with the experimental values from the University of Tokyo (YAYOI)<sup>8-10)</sup>, the Oak Ridge National Laboratory (ORNL)<sup>11-13)</sup>, and Yarnell<sup>14,15)</sup>.



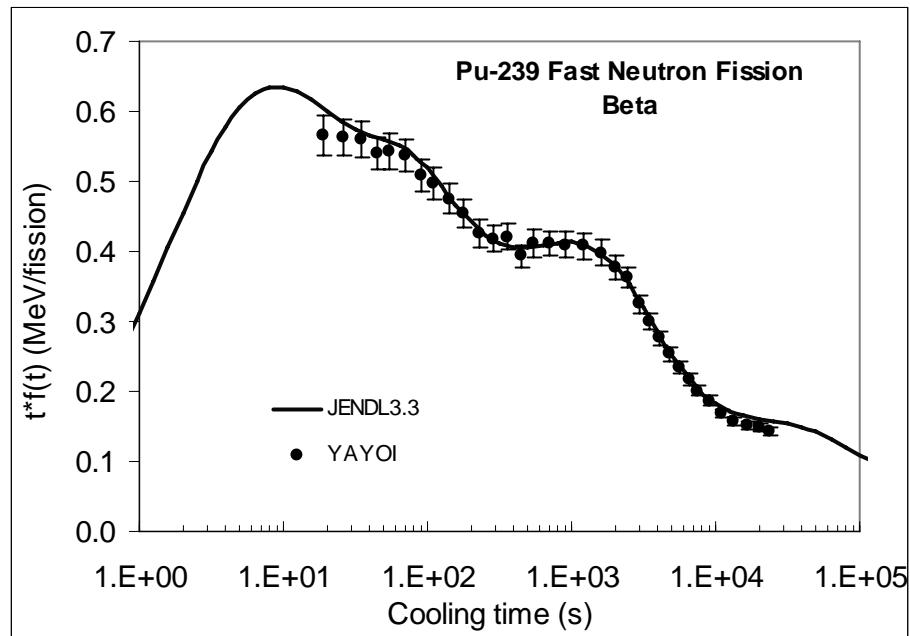
**Fig. 4:** Beta-ray heat after  $^{235}\text{U}$  thermal burst fission,  
calculated using the DHP program



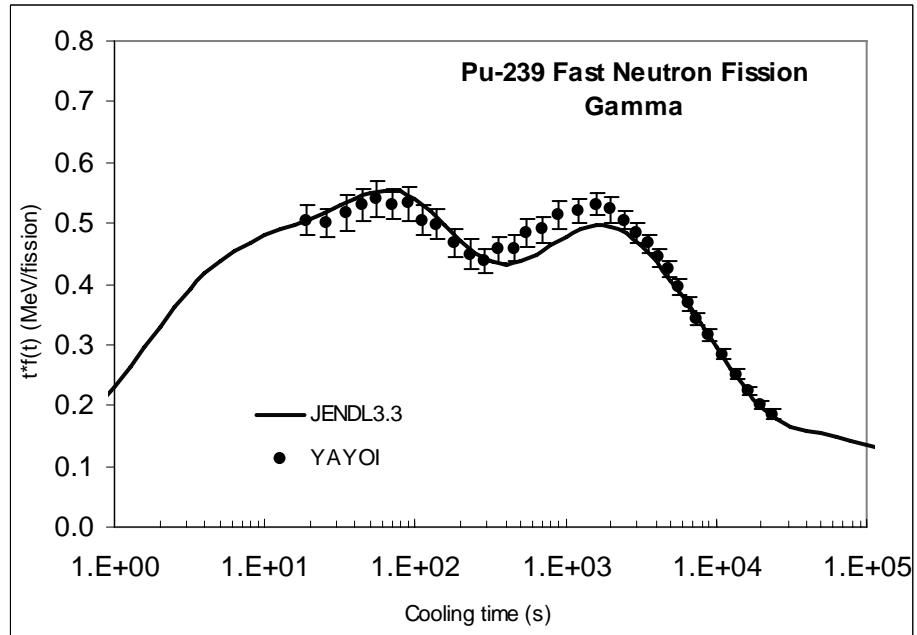
**Fig. 5:** Gamma-ray heat after  $^{235}\text{U}$  thermal burst fission,  
calculated using the DHP program



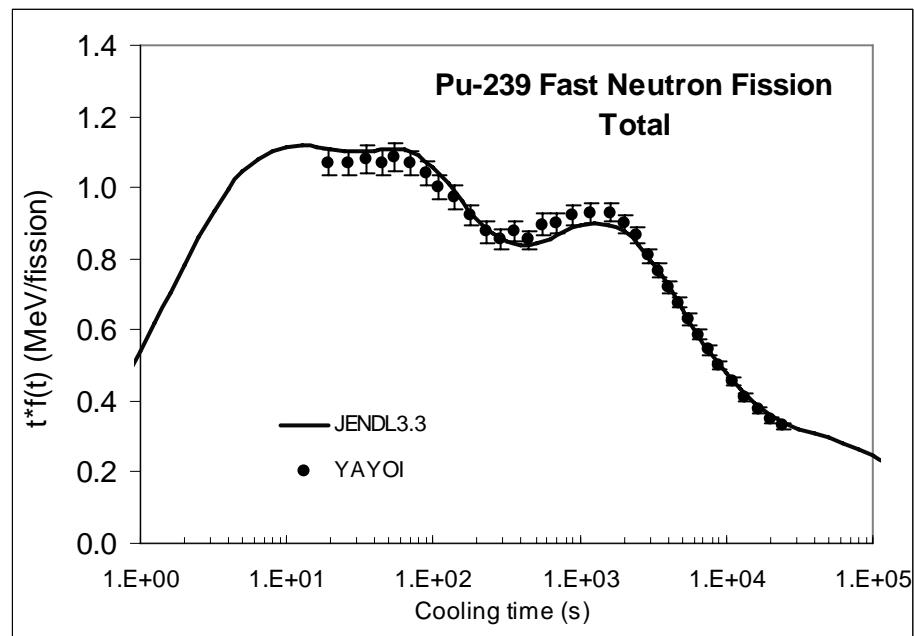
**Fig. 6:** Total decay heat after  $^{235}\text{U}$  thermal burst fission,  
calculated using the DHP program



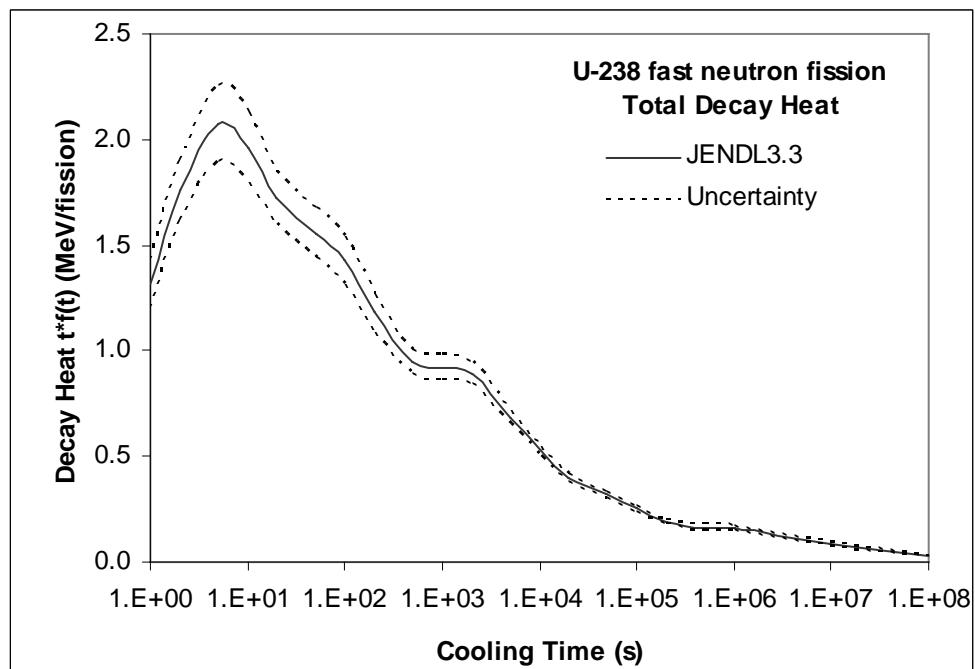
**Fig. 7:** Beta-ray heat after  $^{239}\text{Pu}$  fast burst fission,  
calculated using the DHP program



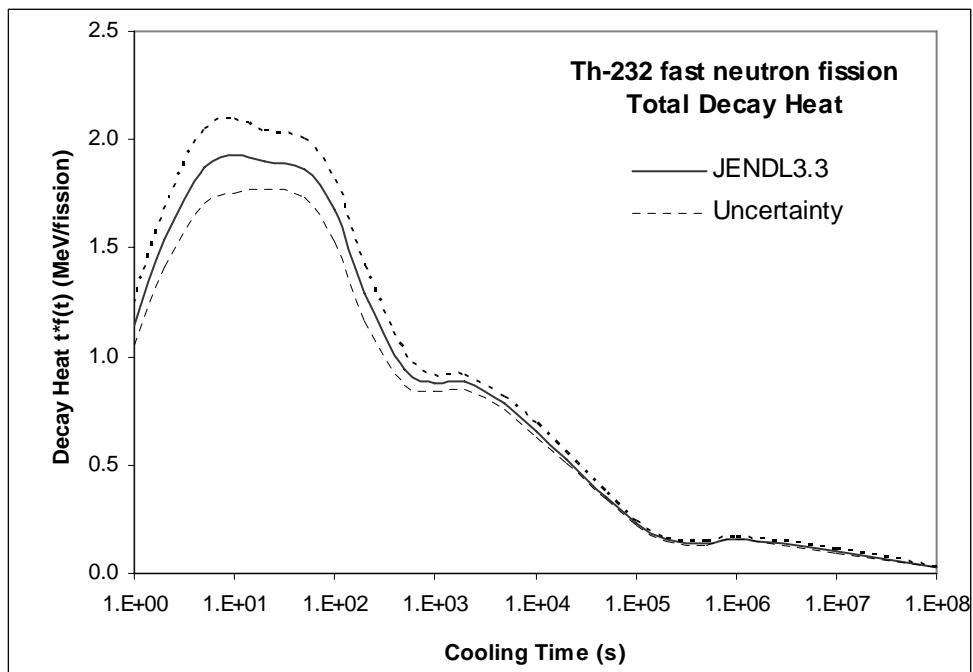
**Fig. 8:** Gamma-ray heat after  $^{239}\text{Pu}$  fast burst fission,  
calculated using the DHP program



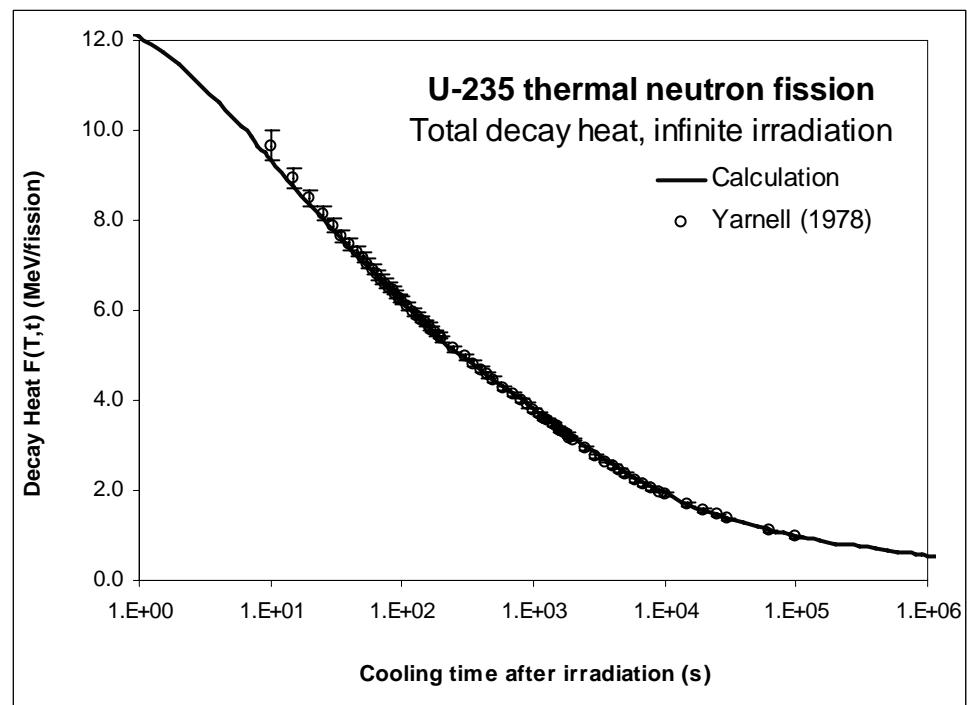
**Fig. 9:** Total decay heat after  $^{239}\text{Pu}$  fast burst fission,  
calculated using the DHP program



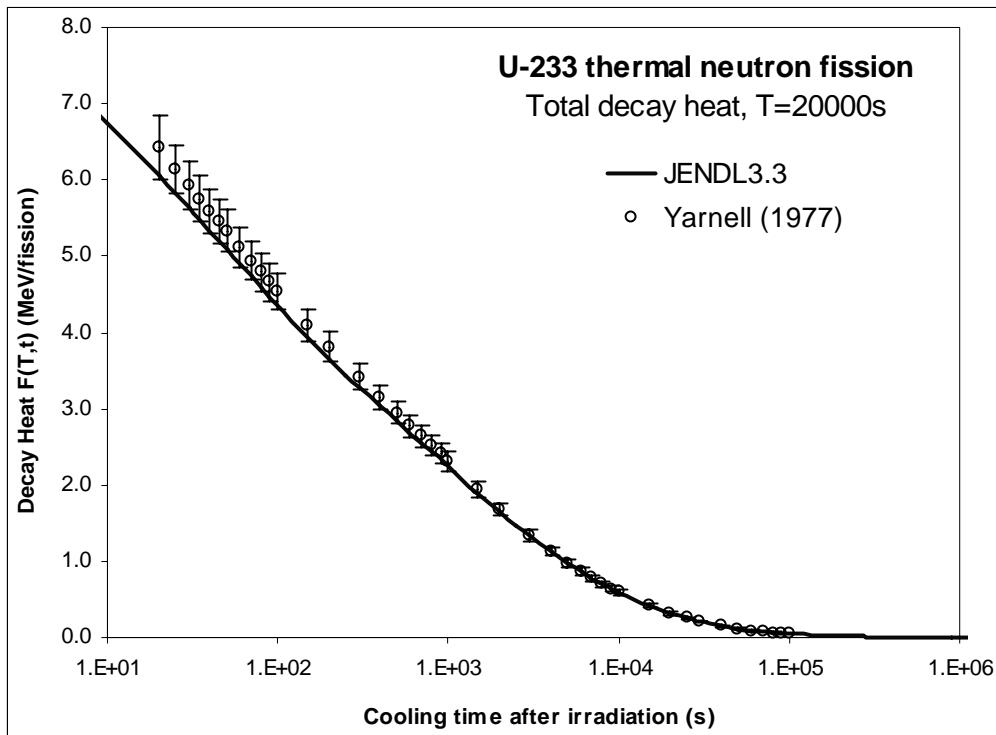
**Fig. 10:** Decay heat and uncertainties as functions of cooling time after fast neutron fission of  $^{238}\text{U}$ , calculated using the DHP program



**Fig. 11:** Decay heat and uncertainties as functions of cooling time after fast neutron fission of  $^{232}\text{Th}$ , calculated using the DHP program



**Fig. 12:** Total decay heat of U-235 thermal fission after  $10^{13}\text{s}$  irradiation, calculated using the DHP program



**Fig. 13:** Total decay heat of  $^{233}\text{U}$  thermal fission after  $2 \times 10^4$  s irradiation, calculated using the DHP program

## 7. Conclusion

In the present work, an application program, called DHP, has been developed for FP decay heat summation calculation, uncertainty and contributor analysis in decay heat evaluation. In the present program, all of decay chains and 12 decay modes are taken into account. The main characteristics of DHP program are exact calculation, fast and easy to use. In conclusion, we thought that the DHP program would be a significant tool in fission product decay heat evaluations.

## Acknowledgments

The authors are grateful to the members of Nuclear Data Center of Nuclear Science and Engineering Directorate, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), for their great help and encouragement to the present work. This work was supported by the Nuclear Researchers Exchange Program (MEXT) of JAEA.

## References

- 1) A.L. Nichols: "Nuclear Data Requirements for Decay Heat Calculations", Lectures given at the Workshop on Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors: Physics, Design and Safety, Trieste, 25 February – 28 March 2002.
- 2) A. Tobias: Prog. Nucl. Ener., 5, 1 (1980).
- 3) J. Katakura, T. Yoshida, K. Oyamatsu and T. Tachibana "JENDL FP Data File 2000", JAERI-1343 (2001).
- 4) J. Katakura and S. Iijima: J. Nucl. Sci. Tech., 29, 1 (1992).
- 5) F. Schmitroth: Nucl. Sci. Eng., 59, 117 (1976).
- 6) B. I. Spinrad: Nucl. Sci. Eng., 62, 35 (1977).
- 7) F. Schmitroth and R. E. Schenter: Nucl. Sci. Eng., 63, 276 (1977).
- 8) M. Akiyama, et al.: J. Atom. Ener. Soc. of Japan, 24, 709 (1982).
- 9) M. Akiyama, et al.: ibid., 24, 803, (1982).
- 10) M. Akiyama and S. An: " Measurement of fission products decay heat for fast reactor", Proc. of Int. Conf. on Nucl. Data for Science and Techno. , Antwerp Belgium, P.237 (1982).
- 11) J. K. Dickens et al.: "Fission Products Energy Release for Time following Thermal Neutron Fission of  $^{235}\text{U}$  between 2 and 14000 seconds", ORNL/NUREG-14 (1977); Nucl. Sci. Eng., 74, 106 (1980).
- 12) J. K. Dickens et al.: "Fission Products Energy Release for Time following Thermal Neutron Fission of  $^{239}\text{Pu}$  between 2 and 14000 seconds", ORNL/NUREG-34 (1978); Nucl. Sci. Eng., 78, 126 (1981).
- 13) J. K. Dickens et al.: "Fission Products Energy Release for Time following Thermal Neutron Fission of  $^{241}\text{Pu}$  between 2 and 14000 seconds", NUREG/CR-0171, ORNL/NUREG-47 (1978).
- 14) J. L. Yarnell and P. J. Bendt: "Decay heat from products of  $^{235}\text{U}$  thermal fission by fast response boil-off calorimetry", LA-NUREG-6713 (1977).
- 15) J. L. Yarnell and P. J. Bendt: "Calorimetric fission products decay heat measurement of  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$  and  $^{235}\text{U}$ ", LA-7452-MS, NUREG/CR-0349 (1978).
- 16) K. Oyamatsu, H. Takeuchi, M. Sagisaka and J. Katakura: J. Nucl. Sci. Tech., 38, 477 (2001).
- 17) K. Oyamatsu: "Easy-To-Use Application Programs to Calculate Aggregate Fission Product Properties on Personal Computers", JAERI-Conf 99-002 (1999).
- 18) K. Tasaka, J. Katakura and T. Yoshida: "Recommend Values of Decay Heat Power and Method to Utilize The Data", JAERI-M-91-034, (1991).

# 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 質 時 間	メートル キログラム 秒	m kg 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	SI 基本単位による表し方
面 体 波 数	積 平 方 積 立 法 メ 一 ト ル	$m^2$	$m^2$
速 度 加 速	度 メ 一 ト ル 每 秒	$m/s$	$m/s$
密 度 波 数	度 メ 一 ト ル 每 秒 每 秒	$m/s^2$	$m/s^2$
密度 (質量密度)	キログラム每立法メートル	$kg/m^3$	$kg/m^3$
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	$m^3/kg$	$m^3/kg$
電 流 密 度	アンペア每平方メートル	$A/m^2$	$A/m^2$
磁 界 の 強 度	アンペア每メートル	$A/m$	$A/m$
(物質量の) 濃 度	モル每立方メートル	$mol/m^3$	$mol/m^3$
輝 度 屈 折 率	カンデラ每平方メートル (数の)	$cd/m^2$	$cd/m^2$
	1	1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表される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
平 面 角	ラジアン (a)	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立 体 角	ステラジアン (a)	sr (c)	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周 波 数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
压 力 , 応 力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー , 仕事 , 熱量	パスカル	Pa	$N/m^2$
工 率 , 放 射 束	ジュール	J	$N \cdot m$
電 荷 , 電 気 量	ワット	W	$N \cdot m \cdot s^{-2}$
電位差 (電圧) , 起電力	クーロン	C	$J/s$
静 電 容	ボルト	V	$W/A$
電 気 抵 抗	アンドラード	F	$C/V$
コンダクタンス	オーム	$\Omega$	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
磁 束 密 度	スレーヴィス	S	$V/A$
イ ン ダ ク タ ン ス	エーバ	T	$A/V$
セ ル シ ウ ス 温 度	セルシウス度	$^\circ C$	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
照 度	ルクス	lx	$V \cdot s$
(放射性核種の) 放射能	ヘンリイー	H	$Wb/m^2$
吸 収 線 量 , 質 量 エネルギー	セレンウス度	$^\circ C$	$Wb/A$
ギ 一 分 与 , カ 一 マ 線 量 当 量 , 周 边 線 量 当 量	ルクス	lm	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
人 線 量 当 量 , 方 向 性 線 量 当 量 , 個 人 線 量 当 量 , 組 織 線 量 当 量	ベクセル	Bq	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
	イ	Gy	$J/kg$
	シベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 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“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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 力 の モ 一 メ ン 度	バースカル	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表 面 張 力	ニュートンメートル	N	$N \cdot m$
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
角 加 速 度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
熱 流 密 度 , 放 射 照 度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$W/m^2$
熱 容 量 , エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K	$kg \cdot s^{-3}$
質 量 热 容 量 (比熱容量) , 質量エンントロピー	ジュール每キログラム	J/(kg · K)	$kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質 量 エ ネ ル ギ 一 (比エネルギー)	一	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱 伝 導 率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体 積 エ ネ ル ギ 一	ジュール每立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電 界 の 強 度	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体 積 電 荷	クーロン每立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電 気 変 位	クーロン每平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘 透 電 磁 率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
モ ル エ ネ ル ギ 一	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モ ル エ ネ ト ロ ピ 一	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モ ル 热 容 量	ジュール每モルケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸 収 線 量 率	グレイ每秒	Gy/s	$kg^2 \cdot s^{-3}$
放 射 强 度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^3 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot kg \cdot s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot kg \cdot s^{-3}$

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	E	$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{15}$	ペタ	P	$10^{-6}$	マイクロ	u
$10^{12}$	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	$10^{-21}$	ゼット	z
$10^1$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
分	,	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L = dm^3 = 10^{-3} m^3$
トン	t	$1t = 10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1Np = 1$
ベル	B	$1B = (1/2) ln 10 (Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV = 1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u = 1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua = 1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海 里	里	1海里=1852m
ノ ッ ト	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
ア ー ル	a	$1a = dam^2 = 10^3 m^2$
ヘ ク タ ー ル	ha	$1ha = 1 hm^2 = 10^4 m^2$
バ ー ル	bar	$1 bar = 0.1 MPa = 100kPa = 1000hPa = 10^5 Pa$
オ ン グ スト ロ ー ム	Å	$1 \text{ \AA} = 0.1 nm = 10^{-10} m$
バ ー ジ ン	b	$1 b = 100f m^2 = 10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エ ル グ	erg	$1 erg = 10^{-7} J$
ダ イ ン	dyn	$1 dyn = 10^{-5} N$
ボ ー ッ プ	P	$1 P = 1 dyne \cdot s/cm^2 = 0.1 Pa \cdot s$
ス ト ー ク	St	$1 St = 1 cm^2/s = 10^{-4} m^2/s$
ガ ウ ス	G	$1 G = 10^{-4} T$
エ ル ス テ ッ ド	Oe	$1 Oe = (1000/4\pi) A/m$
マ ク ス ウ ェ ル	Mx	$1 Mx = 10^{-8} Wb$
ス チ ル ブ	sb	$1 sb = 1 cd/cm^2 = 10^4 cd/m^2$
ホ ト プ	ph	$1 ph = 10^4 lx$
ガ ル	Gal	$1 Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キ ュ リ ー	Ci	$1 Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$
レ ン ト ゲ ン	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラ ド	rad	$1 rad = 1 Gy = 10^{-2} Gy$
レ ム	rem	$1 rem = 1 cSv = 10^{-2} Sv$
X 線 単 位		$1 X unit = 1.002 \times 10^{-1} nm$
ガ ン マ レ ベ ル	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9} T$
ジ ャ ン ス キ ー	Jy	$1 Jy = 10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フ エ ル ミ	fermi	$1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
ト リ ッ	Torr	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
標 準 大 気 圧	atm	$1 atm = 101.325 Pa$
カ ロ リ ー	cal	
ミ ク ロ ン	μ	$1 \mu = 1 pm = 10^{-6} m$

**R100**  
古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています。