



JAEA-Data/Code

2011-016

## Code-B-1 for Stress/Strain Calculation for TRISO Fuel Particle (Contract Research)

Jun AIHARA, Shohei UETA, Taiju SHIBATA and Kazuhiro SAWA

Division of Fuels and Material Engineering  
Nuclear Science and Engineering Directorate

December 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

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

**Code-B-1 for Stress/Strain Calculation for TRISO Fuel Particle  
(Contract Research)**

Jun AIHARA, Shohei UETA, Taiju SHIBATA and Kazuhiro SAWA

Division of Fuels and Material Engineering, Nuclear Science and Engineering Directorate,  
Japan Atomic Energy Agency,  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 20, 2011)

We have developed Code-B-1 for the prediction of the failure probabilities of the coated fuel particles for the high temperature gas-cooled reactors (HTGRs) under operation by modification of an existing code. A finite element method (FEM) is employed for the stress calculation part and Code-B-1 can treat the plastic deformation of the coating layer of the coated fuel particles which the existing code cannot treat.

***KEYWORDS: High Temperature Gas-cooled Reactor, Coated Fuel Particle, Silicon Carbide, Zirconium Carbide, Pyrolytic Carbon, Plastic Deformation, Irradiation Swelling, Irradiation Induced Creep, Pressure Vessel Failure***

-----  
Present study is the result of “Research and development for advanced high temperature gas cooled reactor and graphite components” entrusted to the Japan atomic Energy Agency by the Ministry of Education, Culture, Science, and technology of Japan (MEXT).

**TRISO燃料粒子の応力/歪計算のためのCode-B-1**  
**(受託研究)**

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 燃料・材料工学ユニット

相原 純、植田 祥平、柴田 大受、沢 和弘

(2011年10月20日 受理)

高温ガス炉(HTGR)用の被覆燃料粒子の運転時破損率予測のため、既存のコードを改良してCode-B-1を開発した。Code-B-1においては、応力計算部に有限要素法(FEM)を適用し、既存のコードでは取り扱えなかった塑性変形を取り使えるようになった。

-----  
本報告は、文部科学省からの平成20年度エネルギー対策特別会計委託事業により独立行政法人日本原子力研究開発機構が実施した「革新的高温ガス炉燃料・黒鉛に関する技術開発」の成果です。  
大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

Contents

1. Introduction .....	1
2. Details of Code-B-1 .....	1
2.1 Temperature calculation part .....	1
2.2 Internal pressure calculation part .....	1
2.3 Stress/strain calculation part .....	3
3. An example of calculation with Code-B-1 .....	3
4. Conclusion .....	4
Acknowledgements .....	4
References .....	5

目次

1. 序論 .....	1
2. Code-B-1 の詳細 .....	1
2.1 温度計算部 .....	1
2.2 内圧計算部 .....	1
2.3 応力/歪計算部 .....	3
3. Code-B-1 による計算の例 .....	3
4. 結論 .....	4
謝辞 .....	4
参考文献 .....	5

Table list

**Table 1** Calculation conditions.

Figure list

**Fig. 1** SiC-TRISO coated fuel particle.

**Fig. 2** Flow chart of Code-B-1.

**Fig. 3** Assumed burnup and fast neutron fluence histories

**Fig. 4** Assumed PyC irradiation swelling strain rates.

**Fig. 5** Assumed stress-strain curve of the 3<sup>rd</sup> layer.

**Fig. 6** Calculated stress histories.

## 1. Introduction

K. Sawa et al. has developed a pressure vessel failure fraction calculation code for the SiC TRISO coated fuel particles<sup>1,2)</sup> (**Fig. 1**). The time needed for calculation is short in this existing code<sup>1,2)</sup> because rigid SiC model<sup>3)</sup> is employed in the stress calculation part, however, rigid SiC model is an approximate calculation method. Then we have modified the existing code<sup>1,2)</sup> to a code system, named as Code-B-1, in which a finite element method (FEM) code is employed for the stress/strain calculation. Code-B-1 can treat the cases that the 3<sup>rd</sup>. layer deforms plastically, as well as the cases which can be treated with the existing code<sup>1,2)</sup>.

In this paper, we report on the development of Code-B-1.

## 2. Details of Code-B-1

Code-B-1 is modified based on the existing code<sup>1,2)</sup>. Code-B-1 basically consists of temperature calculation part, internal pressure calculation part and stress calculation part. Code-B-1 does not have “failure fraction calculation part”. The original purpose of the development of Code-B-1 is to treat the ZrC layer<sup>4,5)</sup>. On the other hand, there is little knowledge on the failure of the ZrC layer. We think it is reasonable that the failure fraction calculation part is added after the accumulation of the knowledge related to the failure of the ZrC layer. In addition, it is easy to calculate the failure fraction in the same way as the existing code<sup>1,2)</sup>, with some spreadsheet application. **Fig.2** shows the flow chart of Code-B-1.

### 2.1 Temperature calculation part

The temperature distribution in the fuel particle is calculated for each time step with the one dimensional steady state heat equation in the spherically symmetric system, under the following conditions.

- ✓ The temperature on the outer surface of the OPyC layer is given in the input data file for each time step.
- ✓ The heat generation density is uniform in the fuel kernel, and is given in the input data file for each time step.

The heat generation density is set to be 0, when the stresses are calculated under the condition that the temperature is uniform in the fuel particle.

### 2.2 Internal pressure calculation part

Internal gas pressure calculation part consists of (1) fission gases and CO gas generation part and (2) internal pressure part.

(1) Fission gases and CO gas generation<sup>1,2)</sup>

The mole of the gas atoms or molecules released to the buffer layer is calculated in the same way as the existing code<sup>1,2)</sup>.

The internal pressure is generated from stable gaseous fission products and CO gas due to excess oxygen by UO<sub>2</sub> fission.

$$n(\tau) = n_{FP}(\tau) + n_0(\tau) \quad (1)$$

where  $\tau$  [s] is the time,  $n(\tau)$  [mol] is the total number of stable FP noble gas and CO gas molecules released into the buffer layer at time  $\tau$ ,  $n_{FP}(\tau)$  [mol] is the number of stable FP noble gases molecules released into the buffer layer at the time  $\tau$  and  $n_0(\tau)$  [mol] is the number of CO gas molecules released into the buffer layer at the time  $\tau$ .

The number of stable noble gases is calculated by the following equations:

$$n_{FP}(\tau) = 0.31 \cdot F(\tau) \cdot F_R(\tau) \quad (2)$$

$$F_R(\tau) = 1 - \frac{6}{D' \cdot \tau} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \exp[-n^2 \cdot \pi^2 \cdot D' \cdot \tau]}{n^4 \cdot \pi^4} \quad (3)$$

where  $F(\tau)$  [mol] is the integral fission number at the time  $\tau$ ,  $F_R(\tau)$  is the release ratio of the stable fission products noble gas from the fuel kernel at the time  $\tau$  and  $D'$  [s] is the diffusion coefficient of stable fission product noble gas in the fuel kernel.

The following diffusion coefficient is employed:

$$D' = 2.1 \times 10^{-5} \cdot \exp[-15200/T] \quad (4)$$

where  $T$  [K] is the fuel kernel temperature.

The number of free oxygen atoms is calculated by the experimentally obtained equation:

$$n_o(v) = F(v) \cdot \min [t_d^{2.2} \cdot 10^{-21 \cdot 8500/T}, f_{OU} \cdot f_U + f_{OPu} \cdot f_{Pu}] \quad (5)$$

where,  $\tau_d$  [days] =  $\tau / (3600 \times 24)$  is the time,  $f_{OU} = 0.4$  is formation rate of free oxygen from UO<sub>2</sub>,  $f_U = 0.6$  is fission ratio of U to the total fissions,  $f_{OPu} = 0.85$  is formation rate of free oxygen from PuO<sub>2</sub> and  $f_{Pu} = 0.4$  is fission ratio of U to the total fissions.

(2) Internal pressure

The free volume of gas is calculated as following.

$$V = \left(1 - \rho_b / \rho_{PyC}^{th}\right) \cdot V_b \quad (6)$$



where  $V$  is free volume of the gas in the buffer layer,  $V_b$  is volume of the buffer layer,  $\rho_b$  is density of the buffer layer and  $\rho_{PyC}^{th} = 2.2$  [g/cm<sup>3</sup>] is theoretical density of the buffer layer.

The internal pressure  $P(\tau)$  can be calculated by the ideal gas formula or the van der Waals formula. The temperature distribution in the buffer layer can also be taken into consideration with the ideal gas formula.

### 2.3 Stress/strain calculation part

Stress/strain of the IPyC, the 3rd and the OPyC layers are calculated by FEM code ABAQUS. Elastic deformation, plastic deformation (for the 3rd layer), irradiation induced creep (for the IPyC and the OPyC layers), irradiation swelling (for the IPyC and the OPyC layers) and thermal expansion are considered. Irradiation creep strain rate is assumed to be proportional to the first power of the stress. In addition,

- ✓ The detachment of the boundaries of the coating layers can be treated.

The detachment stress is given for the IPyC/the 3rd layer and the 3rd layer/the OPyC boundaries, respectively in the input file. The boundary detaches completely, when the radial stress on the boundary become larger than the detachment stress.

- ✓ The IPyC or the OPyC layers can be failed before the 3rd layer is failed.

The failure stress is given in the input file. The coating layer is failed, when the maximum tangential stress of the coating layer become larger than the failure stress. The failed coating layer is treated as the vanished layer, in the stress calculation.

In the existing code, the IPyC and the OPyC layers are assumed not to fail unless the SiC layer is failed, because it is assumed that the IPyC and the OPyC layers are supported by the SiC layer which is much stronger than the PyC layer<sup>1)</sup>. In Code-B-1, the detachment of the boundaries of the coating layer can be treated. After the detachment, the 3rd layer can not support the PyC layers. Therefore, in Code-B-1, the IPyC or the OPyC layers can be failed before the 3rd layer is failed.

- ✓ The dependence of the stress/strain curve of each layer on the fast neutron fluence and the irradiation temperature can be treated.

### 3. An example of the calculation with Code-B-1

**Table 1** (including **Figs. 3-5**) shows the calculation conditions in this section. It should be noted that material properties shown in **Table 1** are not based on the real ones. **Fig. 6** shows

the stress histories calculated with Code-B-1.

The radial stress at the outer surface of the IPyC layer (the stress between the IPyC and the 3rd layer) reaches 10 MPa, which is the detachment stress (see **Table 1**), between the effective full power days (EFPD) of 42.5 and 45 days. Then the radial stresses become zero at the outer surface of the IPyC layer and the inner surface of the 3rd layer.

The IPyC layer fails when the maximum tangential stress of the IPyC layer reaches 170 MPa, which is the failure stress of PyC (see **Table 1**), between the EFPD of 650 and 653 days. Then the radial stress at the inner surface of the 3rd layer becomes equal to the inner pressure of the fuel particle.

The equivalent stress at the inner surface of the 3rd layer reaches 280 MPa, that is, the inner surface of the 3rd. layer reaches the perfect plastic deformation region (see **Fig. 6**), at the EFPD of about 1010 days. Then the equivalent stress at the inner surface of the 3rd layer becomes constant nevertheless the inner pressure increases after 1010 days.

Thus it should be concluded that Code-B-1 can treat the elastic deformation of each layer, the plastic deformation of the 3rd layer, detachment and failure of the coating layers.

#### 4. Conclusion

We modified the existing code for the calculation of the pressure vessel failure fraction of the HTGR fuel particles into Code-B-1. FEM was employed for the stress/strain calculation part of Code-B-1.

#### Acknowledgements

The present study includes the result of “Development for Advanced High Temperature Gas Cooled Reactor Fuel and Graphite Components” entrusted to the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan (MEXT).

References

- <sup>1)</sup>K. Sawa, S. Shiozawa, K. Minato and K. Fukuda, "Development of a Coated Fuel Particle Failure Model under High Burnup Irradiation", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **33**, 712-720 (1996) .
- <sup>2)</sup>K. Sawa, J. Sumita and T. Watanabe, *Fuel Failure and Fission Gas Release Analysis Code in HTGR*, JAERI-DATA/Code 99-034, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) (1999). [in Japanese]
- <sup>3)</sup>K. Bongartz, *Status of the Fuel Stress and Failure Rate Calculations at KFA*, Juel-1686, Institut fuer Resktorwerkstoffe (1980).
- <sup>4)</sup>A. Yasuda, S. Ueta, J. Aihara, H. Takeuchi and K. Sawa, *Development of Production Technology of ZrC-coated Particle (No. 1)*, JAEA-Technology 2008-073, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) (2008). [in Japanese]
- <sup>5)</sup>A. Yasuda, S. Ueta, J. Aihara, H. Ishibashi and K. Sawa, *Development of Production Technology of ZrC-coated Particle (No. 2)*, JAEA-Technology 2008-083, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) (2008). [in Japanese]
- <sup>6)</sup>S. Ueta, M. Umeda, K. Sawa, S. Sozawa, M. Shimizu, Y. Ishigaki and H. Obata, "Preliminary Test Results for Post Irradiation Examination on the HTTR Fuel", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44** 1081-1088 (2007).

**Table 1** Calculation conditions.

Kernel diameter	μm	550
Buffer thickness	μm	140
IPyC thickness	μm	25
SiC thickness	μm	40
OPyC thickness	μm	25
Kernel density	g/cm <sup>3</sup>	10.8
Buffer density	g/cm <sup>3</sup>	1.15
Irradiation duration	EFPD	1100
burnup	%FIMA	see <b>Fig. 3</b>
Fast Neutron fluence	10 <sup>25</sup> n/m <sup>2</sup> E>0.18MeV	see <b>Fig. 3</b>
Irradiation temperature	K	1439.2 Uniform in the fuel particle
PyC swelling rate	(dL/L)/(10 <sup>25</sup> n/m <sup>2</sup> ), E>0.18MeV	See <b>Fig. 4</b>
PyC creep coefficient	/MPa/(10 <sup>25</sup> n/m <sup>2</sup> ), E>0.18MeV	2.23 x 10 <sup>-4</sup>
PyC Poisson's ratio in creep		0.5
PyC fracture stress	MPa	170
modulus of elasticity of the 3 <sup>rd</sup> layer	MPa	4.60 x 10 <sup>5</sup>
Poisson's ratio in elasticity of the 3 <sup>rd</sup> layer		0.21
Stress/strain curve of the 3 <sup>rd</sup> layer		See <b>Fig. 5</b>
Failure stress of the 3 <sup>rs.</sup> layer	MPa	1000
Detachment stress between IPyC/the 3 <sup>rd.</sup> layer	MPa	10
Detachment stress between the 3 <sup>rd.</sup> /OPyC layer	MPa	10

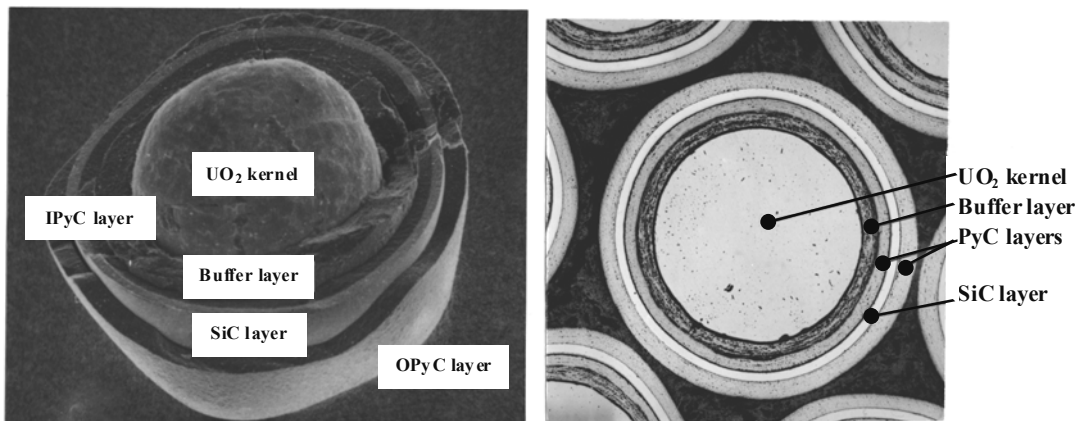


Fig. 1 SiC-TRISO coated fuel particle<sup>6)</sup>

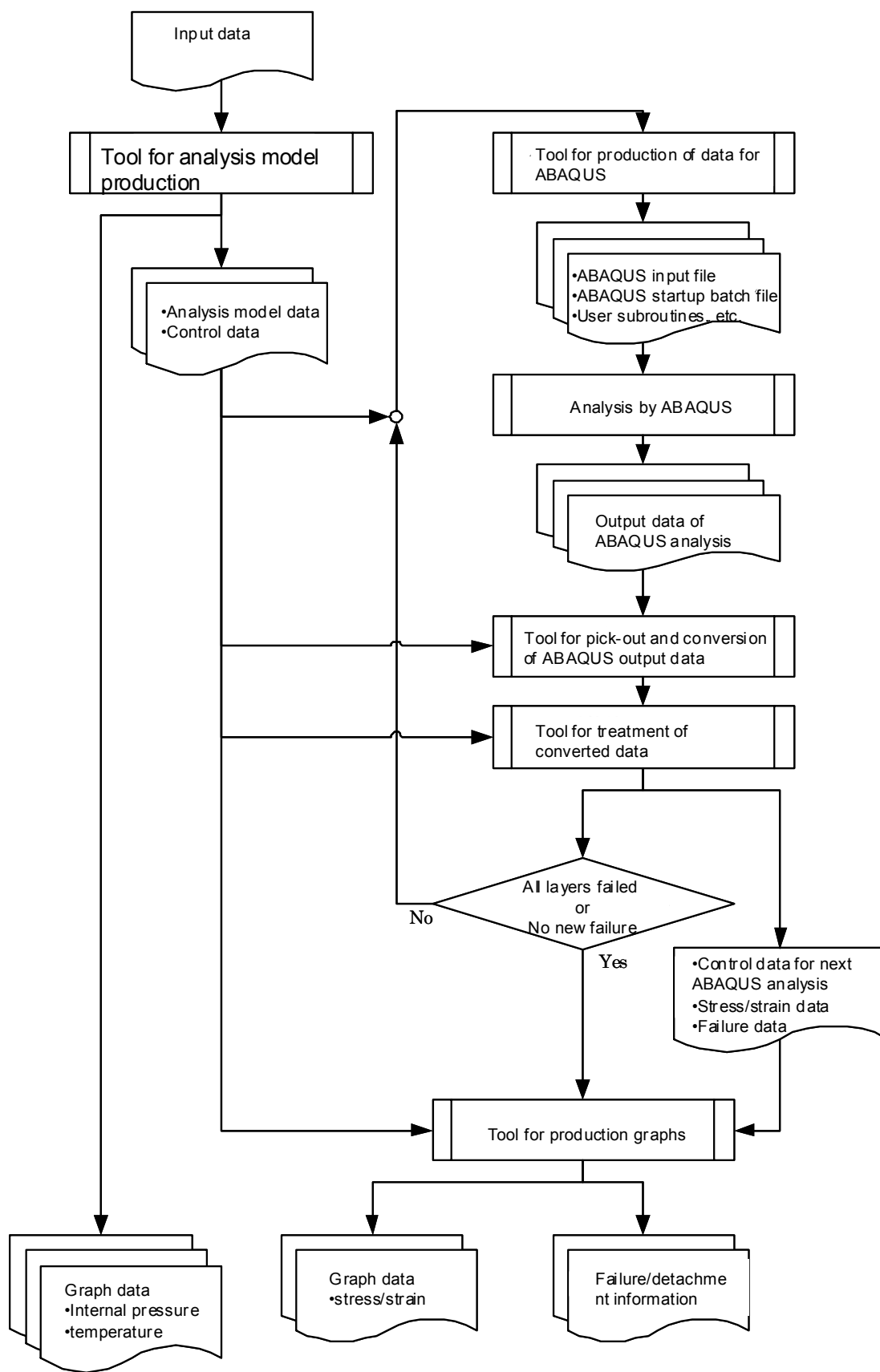


Fig. 2 Flow chart of Code-B-1.

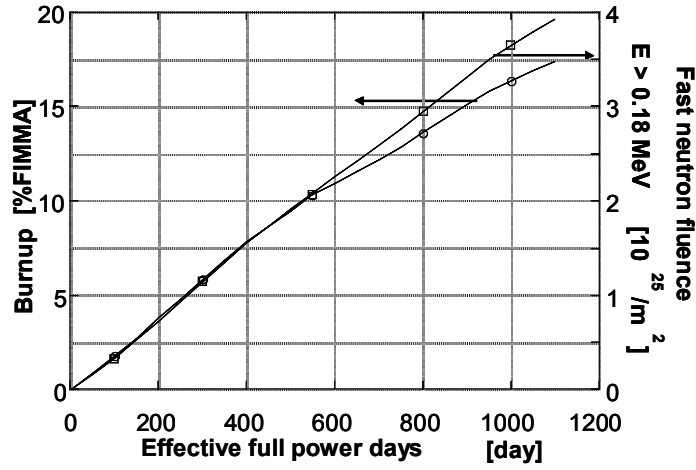


Fig. 3 Assumed burnup and fast neutron fluence histories.

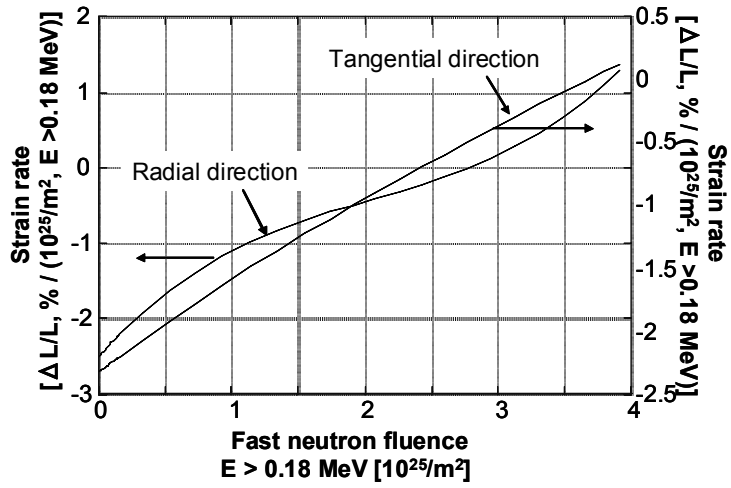


Fig. 4 Assumed PyC irradiation swelling strain rates.

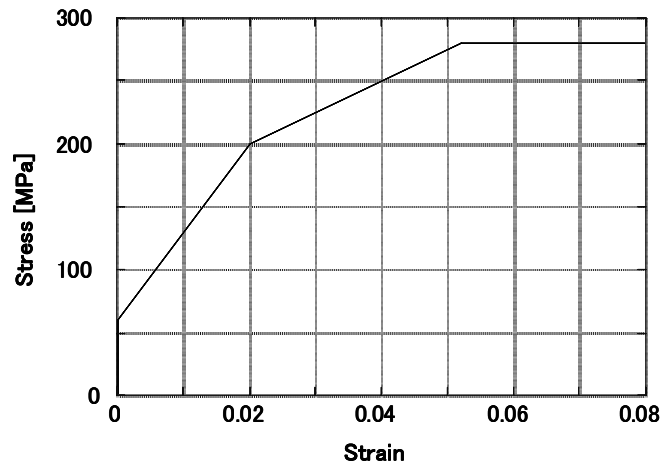


Fig. 5 Assumed stress-strain curve of the 3<sup>rd</sup> layer.

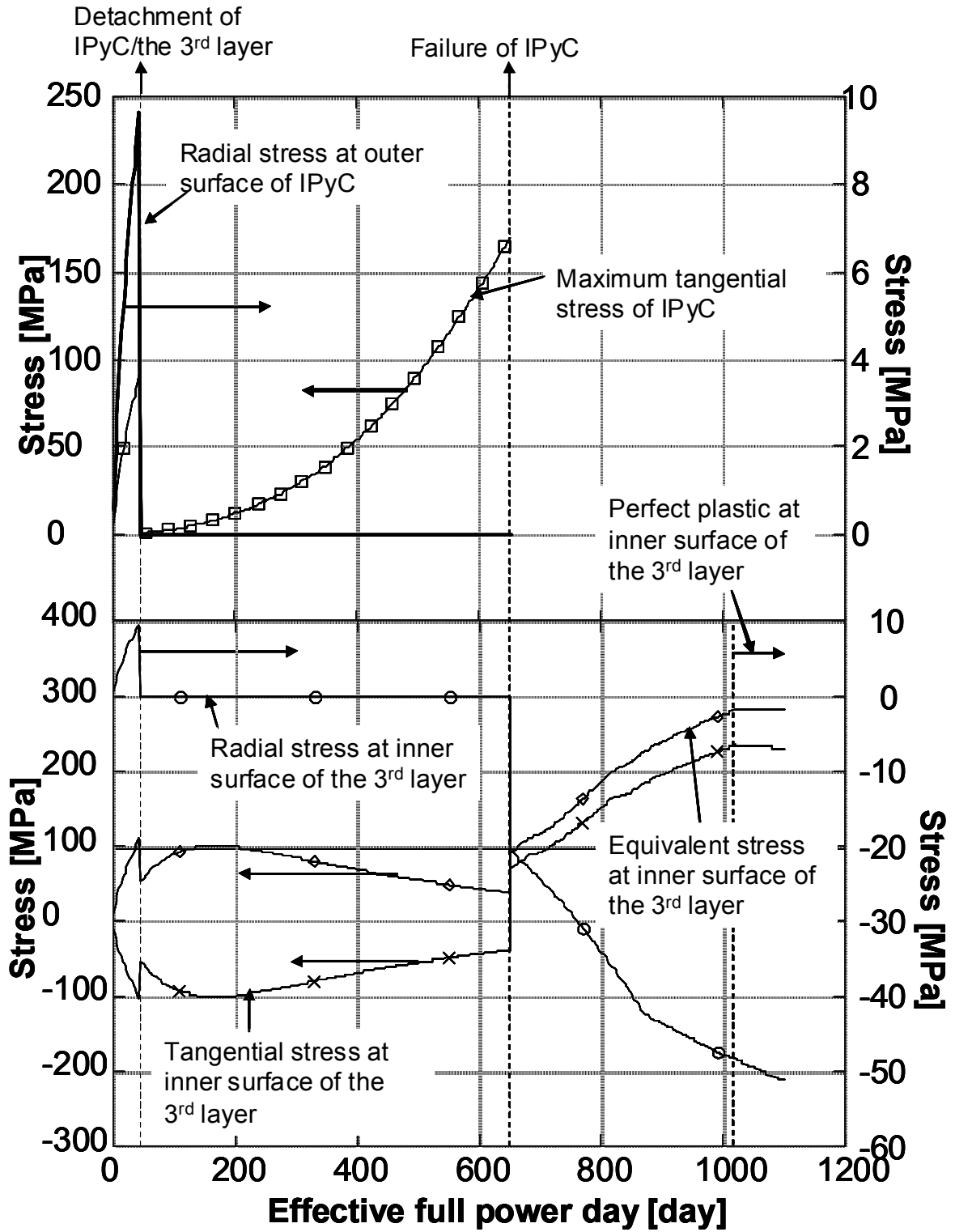


Fig. 6 Calculated stress histories.



# 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
物質の量	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 <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
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ル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	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ル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	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) 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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	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>
電界の強さ	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>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</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
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	ジュール毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	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	1 h=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	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, 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 t=10 <sup>3</sup> 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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	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=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	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	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(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=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

