

JAERI-Tech

98-025



高燃焼度高温ガス炉用被覆燃料粒子の設計

1998年6月

沢 和弘・吉牟田秀治

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

*This report is issued irregularly.*

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

高燃焼度高温ガス炉用被覆燃料粒子の設計

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

沢 和弘・吉牟田秀治

(1998年6月1日受理)

高温ガス炉 (HTGR) は、被覆燃料粒子を用いることにより高い原子炉出口温度を達成できる。被覆燃料粒子は、直径500~600 $\mu\text{m}$ の燃料核をセラミックで被覆した球である。高温ガス炉では、運転中に被覆燃料粒子の僅かな追加破損が生じる。高温工学試験研究炉 (HTTR) の燃料設計方針では、運転中の被覆層の追加破損は十分小さな値に制限とすることとしている。そのため、初装荷燃料の最高燃料度は33GWd/tに制限している。被覆燃料粒子の被覆層の厚さを調整することで、最高燃焼度を高くすることができると考えられる。そこで、高い燃焼度まで健全性を保てる被覆燃料粒子 (高燃焼度燃料) の設計を行うための手法を検討し、本手法を用いて予備設計を行った。

Design of Coated Fuel Particle for High Burnup High Temperature Gas-cooled Reactor

Kazuhiro SAWA and Shigeharu YOSHIMUTA

Department of HTTR Project  
Oarai Research Establishment  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received June 1, 1998)

The coated fuel particles can offer high temperature outlet gas in the High Temperature Gas-cooled Reactors (HTGR). A coated fuel particle is a sphere which consists of 500-600 $\mu\text{m}$  of fuel kernel and ceramics layers. Small amount of additional failure of HTGR fuel will occur during operation. In the safety design requirements for the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) fuel, the failure fraction in the coating layers of coated fuel particles is limited to be small through the full service period. Then the maximum burnup of the first-loading-fuel of the HTTR is limited to be less than 33GWd/t to meet the design requirements. It is considered that adjustment of coating layer thickness would be able to extend the maximum burnup of coated fuel particles. Then the design method was investigated to develop high burnup coated fuel particles, which can maintain their integrity at higher burnup. A preliminary design was also carried out by the method.

Keywords : Coated Fuel Particles, HTGR, Failure, HTTR, High Burnup, Design

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 照射健全性評価方法 .....	2
2.1 燃料核移動 .....	2
2.2 PdによるSiC層腐食 .....	3
2.3 内圧 .....	4
3. 高燃焼用被覆燃料粒子の予備設計.....	7
3.1 設計手法 .....	7
3.2 計算結果 .....	9
4. まとめ .....	10
謝 辞 .....	10
参考文献 .....	11
付録1 HTTR初装荷炉心の照射条件 .....	24
付録2 HTTR高燃焼度炉心の照射条件 .....	28

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Method of Fuel Integrity Assessment .....	2
2.1 Kernel Migration .....	2
2.2 Pd-SiC Corrosion .....	3
2.3 Pressure Vessel Failure .....	4
3. Preliminary Design of High Burnup Coated Fuel Particle .....	7
3.1 Design Method .....	7
3.2 Calculation Results .....	9
4. Summary .....	10
Acknowledgement .....	10
References .....	11
Appendix1 : Fuel Irradiation Condition in the HTTR First-loading Core.....	24
Appendix2 : Fuel Irradiation Condition in the HTTR High-burnup Core.....	28

This is a blank page.

## 1. はじめに

高温工学試験研究炉 (HTTR) の初装荷燃料体を Fig. 1 に示す。HTTR 燃料はピン・イン・ブロック型であり、燃料棒と六角柱黒鉛ブロックから構成される。被覆燃料粒子は4重被覆のいわゆる TRISO 型で、燃料核は直径 600 $\mu\text{m}$  の低濃縮 (平均 6%) 二酸化ウランである。被覆燃料粒子は黒鉛粉末およびフェノール樹脂バインダとともに焼結し燃料コンパクトとする。燃料棒は、この燃料コンパクトと黒鉛スリーブから成り、六角柱黒鉛ブロックに空けた穴に挿入される。ヘリウムガスは燃料コンパクトを封入している黒鉛スリーブと黒鉛ブロック間の環状流路を流れる。

高温ガス炉燃料の特徴の一つは、燃料からの核分裂生成物の放出を防ぐ機能を主に被覆燃料粒子に持たせていることである。そのため、燃料設計においては、照射中に発生する被覆層の破損を小さくすることが重要である<sup>(1,2)</sup>。運転中の燃料健全性は、温度、燃焼度などの照射条件及び被覆層厚さなどの燃料諸元に影響を受ける<sup>(3,4)</sup>。

HTTR の初装荷燃料 (A 型燃料) においては最高燃焼度 33GWd/t、通常運転時の燃料最高温度 1495 C と制限しているが、被覆層の厚さ等を最適化することにより、被覆燃料粒子は初装荷燃料よりも高い燃焼度まで使用できると考えられる。そこで、高燃焼度の達成を念頭に置いた燃料の設計手法の検討を行い、本手法を用いて高燃焼燃料の予備設計を行った。具体的には、被覆燃料粒子の被覆層厚さの最適化を行い、HTTR 高燃焼度炉心における照射条件下における燃料の破損確率を評価した。

## 2. 照射健全性評価方法

高温ガス炉燃料の特徴の一つは、燃料からの核分裂生成物の放出を防ぐ機能を主に被覆燃料粒子に持たせていることである。各被覆層の主な機能は以下の通りである。

### ①第1層：低密度熱分解炭素（PyC バッファ）層

- ・核分裂片損傷による被覆層破損の防止
- ・気体状核分裂生成物および燃焼に伴い発生する一酸化炭素のガス溜
- ・燃料核のスウェリングの吸収

### ②第2層：高密度熱分解炭素（PyC）層

- ・製造過程における第3層蒸着中の燃料核保護
- ・気体状核分裂生成物の閉じこめ
- ・核分裂生成物と第3層との反応の抑制

### ③第3層：炭化ケイ素（SiC）層

- ・被覆燃料粒子の寸法安定性保持および構造的強度保持
- ・気体状および金属状核分裂生成物の閉じ込め

### ④第4層：高密度熱分解炭素層（PyC）層

- ・SiC層の機械的保護
- ・SiC層が破損した場合の気体状核分裂生成物閉じ込め

運転中の燃料健全性は、温度、燃焼度などの照射条件及び被覆層厚さなどの燃料製造結果に影響を受ける。これまでの研究開発により、燃料健全性を評価するに当たって考慮すべき主要な破損機構が分かっている<sup>(4,5)</sup>。各破損機構が具体的にどのような照射条件及び燃料製造結果に影響を受けるかを整理したものを Table 1 に示す。

以下に、主要な破損機構の概要と、設計に用いる評価方法を示す。

### 2.1 燃料核移動

本現象は、照射下において燃料核が温度勾配の方向に沿って燃料粒子被覆層の中に食い込んでいくものである。酸化物燃料の核移動の機構としては、次のような考え方が提案さ



れている。すなわち、温度勾配が存在すると、被覆粒子燃料の SiC 内側の燃焼に伴って過剰となった酸素が炭素被覆層（バッファー層）と反応して一酸化炭素を生じるが、熱力学的な平衡から、一酸化炭素は低温側に輸送されてそこで酸素と析出炭素に解離する結果、バッファー層の炭素が高温側から低温側へ移動し、燃料核が低温側から高温側へ移動するとするものである<sup>(6)</sup>。原研において取得した被覆燃料粒子の燃料核移動データを Fig. 2 に示す<sup>(4)</sup>。横軸は温度の逆数であり、縦軸は下式に示す燃料核移動速度である。HTTR 初装荷燃料の設計においては、結果が厳しくなるよう片側 95%信頼度で求めた以下の評価式を用いた。

$$KMR = 2 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{1.48 \times 10^4}{T}\right) \times \left(\frac{1}{T^2}\right) \times \left(\frac{dT}{dr}\right)$$

ここで、 KMR : 燃料核移動速度 (m/s)、

T : 燃料温度 (K)、

dT/dr : 燃料温度勾配 (K/m) である。

## 2.2 Pd による SiC 層腐食

HTTR 燃料の Pd による SiC 層腐食について、原研においてデータが蓄積されており、これに基づく腐食挙動のモデルが提案されている<sup>(7)</sup>。本モデルは、Pd による SiC 層の腐食距離の温度、燃焼度および時間への依存性の点で現在までに得られた実測データ全体と矛盾が無く、腐食距離を評価するための妥当性を有するものと判断できる。モデルの基本的な仮定は以下の通りである。

- ① 炉外実験の結果から、Pd と SiC 層の反応深さは、Pd の供給量のみ支配される。
- ② Pd による SiC 層の腐食プロセス全体における律速過程は、燃料核からの Pd の放出であり、燃料核からの放出は反跳と拡散放出によって記述される。
- ③ 高密度熱分解炭素中の Pd の拡散は燃料核中の拡散に比べて十分速いので、燃料核から放出された Pd は瞬時に SiC 層内面に到達するものとする。

これらの仮定に基づき、球座標における 1 次元拡散方程式を解き Pd の放出量を計算す

る。このようにして得られた Pd 放出量 (SiC 層内表面積あたりの Pd 量) の関数として実験データを整理した結果を Fig. 3 に示す<sup>7)</sup>。縦軸は観察された Pd による SiC 層の最大腐食量である。横軸の SiC 内表面積あたりの Pd 量は、拡散及び反跳により燃料核から放出されると仮定し、拡散に関しては Booth モデル<sup>8)</sup>を用いて計算した値である。この結果に基づき、データを包絡する下式を求め、設計式とした。

$$y = 1.15 \times 10^{-12} x^{1/3}$$

ここで、 $y$  : Pd による SiC 層の腐食距離 (m)、  
 $x$  : SiC 内表面積あたりの Pd 放出量 (atoms/m<sup>2</sup>) である。

### 2.3 内圧

内圧破損モデルの特徴は以下のとおりである<sup>9)</sup>。

- ① 破損粒子として貫通破損粒子と SiC 破損粒子を考慮する。貫通破損粒子は、内側 PyC (IPyC)、SiC、外側 PyC (OPyC) 層全てが破損している粒子として定義する。SiC 破損粒子は SiC 層が破損しているが OPyC 層は健全な粒子と定義する。
- ② 各被覆層の破損確率をワイブル分布で表す。各被覆層の破損条件は、これまでの照射試験における観察結果等に基づき定めた。
- ③ 被覆層に加わる応力は、核分裂により発生する希ガス及び遊離酸素による CO ガス内圧及び高速中性子による PyC 層の照射収縮によるものと仮定する。応力の最大値は、簡単な「rigid SiC model」で計算する。

被覆層の破損確率は、表面の微小欠陥が破損の発生原因となるという考え方に基づき、ワイブル分布で表す。本モデルでは、各被覆層の破損確率を以下の式で表す。

$$f_i(t) = 1 - \exp\left(-\ln 2 \times \left(\frac{\sigma_i(t)}{\sigma_{0,i}}\right)^{m_i}\right)$$

ここで、 $f_i$  : 照射時刻  $t$  における被覆層  $i$  の破損確率、  
 $i$  : 照射時刻  $t$  に被覆層  $i$  に加わる応力 (MPa)、

$\sigma_{0,i}$  : 被覆層  $i$  の強度 (MPa)、  
 $m_i$  : 被覆層  $i$  のワイブル係数 である。

IPyC 及び OPyC 層は高速中性子照射により収縮する。その結果、OPyC 層は SiC 層を締め付け、内圧によって SiC 層に加わる応力を緩和する。同様に、IPyC 層も SiC 内面を引っ張り、内圧による SiC 層応力を緩和する。収縮により PyC 層自身には引張応力が加わる。上述の挙動に基づき各被覆層の破損確率を以下のようにモデル化する。

#### IPyC 層

IPyC 層は SiC 層が破損している粒子において引張応力で破損すると仮定する。すなわち、SiC 層が健全ならば、IPyC 層はより強い SiC 層により支持されるため破損は生じない ( $f_{IPyC}=0$ )。SiC 破損粒子については SiC 層が IPyC 層を支持できないので内圧で生じる引張応力によって破損が生じる ( $f_{IPyC}$ )。

#### SiC 層

高燃焼度下において、SiC 層は内圧により破損すると考えられる。IPyC 及び OPyC 層の照射収縮による圧縮応力は SiC 層応力を緩和する。そのため、SiC 層の破損確率は OPyC 層が健全であるかどうかにより異なると考える。OPyC 層が健全な場合の SiC 層破損確率 ( $f_{SiC}$ ) は、内圧と IPyC 及び OPyC による圧縮応力の差に基づき評価する。

一方、OPyC 層が破損している粒子では、OPyC 層の圧縮応力が期待できないため、SiC 層の破損確率 ( $f_{SiC}$ ) は OPyC が健全な粒子よりも大きくなる。

#### OPyC 層

OPyC 層は内圧により破損する。OPyC 層の内側にある SiC 層が健全ならば、これに保持されるために OPyC 層の破損は生じないと仮定する ( $f_{OPyC}=0$ )。SiC 層破損粒子では内圧によって OPyC 層の破損が生じる ( $f_{OPyC}$ )。

上述した各被覆層の破損確率を用いて、健全粒子が貫通破損粒子に至る確率 ( $F_{TC}$ ) は以下のように表すことができる。

$$F_{TC} = f'_{IPyC} \times f_{SiC} \times f'_{OPyC}$$

被覆燃料粒子の製造工程中に IPyC 層及び SiC 層が破損し OPyC 層が健全な、いわゆる製造時の SiC 層破損粒子が存在することがある。この製造時 SiC 層破損粒子が貫通破損粒子に至る確率 ( $F'_{TC}$ ) は、以下の式で表すことができる。

$$F'_{TC} = f'_{OPyC}$$

内圧は二酸化ウラン燃料核の核分裂により発生する安定希ガス及び遊離酸素によって発生する。被覆層に加わる圧縮応力は、PyC 層の非等方性収縮によってモデル化する。

### 3. 高燃焼用被覆燃料粒子の予備設計

#### 3.1 設計手法

高燃焼度炉心用燃料の設計に当たって、まず前章に示した破損機構毎に照射健全性を評価する。すなわち、考慮すべき主要な破損機構である、燃料核移動、Pd による SiC 層腐食及び内圧により、系統的な破損が起こらない条件（各破損機構により 95%信頼度相当で破損が生じない条件）を把握する。初装荷炉心と高燃焼度炉心の照射条件の比較を Table 2 に示す。詳細な照射条件は、HTTR 初装荷燃料について付録-1 に、HTTR 高燃焼度炉心について付録-2 に示す。

##### (1) 燃料核移動

HTTR 高燃焼度炉心における燃料核移動距離を運転日数の関数として Fig. 4 に示す。高燃焼度炉心では燃料核移動距離は末期で 94 $\mu\text{m}$  に達し、初装荷燃料を用いると、末期の破損確率は 70%を超える評価となる。そのため、燃料核移動による系統的破損を生じさせないよう、バッファ層及び IPyC 層厚さの和は 95%信頼率で 95 $\mu\text{m}$  以上とする必要がある。

##### (2) Pd による SiC 層腐食

HTTR 初装荷燃料を高燃焼度炉心に用いた場合の SiC 層腐食距離の時間変化を Fig. 5 に示す。初装荷燃料を高燃焼度炉心に用いると、Pd による SiC 層腐食距離は約 19 $\mu\text{m}$  に達するが、SiC 層の厚さはそのばらつきを 95%信頼度で評価しても約 22 $\mu\text{m}$  あるため、本機構では系統的な破損は生じないと評価される。

##### (3) 内圧

HTTR 初装荷燃料を高燃焼度炉心に用いた場合、健全粒子が貫通破損に至る確率を照射時間の関数として Fig. 6 に示す。初装荷燃料は、照射末期（5 年）で 100%の破損となると評価された。

以上の結果から、初装荷燃料を用いて HTTR の高燃焼度炉心を構成すると、燃料核移動及び内圧により燃料の系統的な破損が生じ、健全性が保てないと評価されることが分かった。すなわち、高燃焼度炉心においては、被覆燃料粒子の設計を変更する必要がある。燃料核移動に対しては、SiC 層までの距離を大きくする、すなわちバッファ層と IPyC 層を厚くすることにより、より大きな燃料核の移動が起きても SiC 層への接触を防止する必

要がある。また、内圧破損に対しては、バッファ層を厚くすることにより内圧の緩和を図るとともに、SiC 層を厚くすることによって強度を増加する必要がある。これらの考え方は、これまでも定性的には考えられてきており、高燃焼度炉心に対応した高燃焼度燃料の製造試験、照射試験等を行ってきた<sup>(9,10)</sup>。これらの照射試験等に供してきた代表的な高燃焼用燃料の仕様を初装荷燃料と比較して Table 3 に示す。

高燃焼度用被覆燃料粒子の設計を系統的に行うために、以下の設計手法を検討した。

- ① 燃料核直径 ( $r_k$ ) を決める。被覆層を厚くする設計となるために、被覆燃料粒子全体を過剰に大きくしないよう、燃料核直径は小さくすることとした。ここでは、A 型燃料と同じ 600 $\mu\text{m}$  から、550、500、450 $\mu\text{m}$  までとした。
- ② 燃料核を小さくすることによる燃料コンパクト中のウラン量の減少を防止するために、それぞれの燃料核について、燃料コンパクト中のウラン量を A 型燃料用コンパクトと同程度とできるように、全被覆層厚さ ( $r_c$ ) を決める。この時、粒子充填率は A 型燃料用コンパクトの 30vol% から最大 35vol% とできるものとする。粒子充填率が 35vol% を超えると、燃料コンパクトのプレス時に粒子同士の接触が起こりやすくなり、製造時の SiC 層破損率が高くなる可能性がある。燃料コンパクト体積 ( $V$ ) を初装荷燃料から変更しない場合、全被覆層厚さは以下の燃料コンパクト内のウラン量の保存式から算出できる。

$$0.3V\left(\frac{300}{460}\right)^3 = 0.35V\left(\frac{r_k}{r_k + r_c}\right)^3$$

ここで、A 型燃料体の燃料核半径及び被覆燃料粒子半径をそれぞれ 300 及び 460 $\mu\text{m}$  とした。

- ③ 内圧による破損を防止するとともに、SiC 層内面までの距離を大きくして燃料核移動による破損を防止するために、バッファ層を厚くする。燃料核体積当たりのバッファ層体積をパラメータとし、A 型燃料の 1.0、1.5、2.0 倍 ( $f$ ) となるバッファ層厚さ ( $r_b$ ) を以下の関係式から求める。

$$f = \frac{(r_k + r_b)^3 - r_k^3}{(360^3 - 300^3)}$$

ここで、A型燃料体のバッファ層厚さを60 $\mu\text{m}$ とした。

- ④ 内圧に対する被覆燃料粒子の強度を増加させるために、SiC層を厚くする。現在の被覆技術では、SiC層を厚くするために被覆時間を長くすると、流動中の粒子が流動ガスノズルや反応管壁等に接触する確率が大きくなるという問題がある。そのため、現状技術の延長で製造できる最大と考えられる40 $\mu\text{m}$ と30 $\mu\text{m}$ をSiC層厚さとする。
- ⑤ PyC層については、外側PyC層の方をIPyC層と同じかそれよりも厚くすることとした。この時、IPyC層厚さが5 $\mu\text{m}$ を下回る場合は、被覆燃料粒子としての成立性がないものとした。

### 3.2 計算結果

前節の方法により定めた被覆燃料粒子の仕様をTable 4に示す。粒子タイプA、B、C及びDは、燃料核半径がそれぞれ300、275、250及び225 $\mu\text{m}$ に相当するものである。これらの粒子が高燃焼度炉心で用いられた場合の破損確率を計算した。3章の検討結果によると、PdによるSiC層破損は生じないことが分かっている。また、燃料核移動による破損が生じないように、バッファ層及びIPyC層厚さの和が95 $\mu\text{m}$ 以上となるように設計したため、破損機構としては内圧による破損を想定して評価を行った。

健全粒子が貫通破損に至る確率をFig. 7（粒子タイプA=燃料核に対するバッファ層体積比=A型燃料体 $\times 1.0$ ）、Fig. 8（粒子タイプB=燃料核に対するバッファ層体積比=A型燃料体 $\times 1.5$ ）及びFig. 9（粒子タイプC=燃料核に対するバッファ層体積比=A型燃料体 $\times 2.0$ ）に示す。これらの結果から、燃焼末期（1100EFPD）における破損確率が低い粒子タイプは、A-4型及びA-6型であり、これらの被覆燃料粒子を高燃焼炉心において使用した場合、 $10^{-4}$ 以下の破損率となることが分かった。また、本評価により、SiC層厚さが30 $\mu\text{m}$ と40 $\mu\text{m}$ の場合を比較すると破損確率に有意な差があること、すなわちSiC層を厚くすることは、内圧破損を防止する上で有効であることが分かる。また、燃料核体積とバッファ層体積の比が同じ場合、被覆層全体の体積が大きくなる効果により、燃料核が大きい方が破損確率が低くなることが分かった。さらに、燃料核に対するバッファ層体積比を大きくとることにより、内圧上昇を抑えることができるが、その結果PyC層の厚さが薄くなり照射収縮

による締め付け力が失われると、破損確率は小さくならないことが分かった。なお、SiC 層破損粒子はどのケースにおいても照射末期には全て破損に至るという結果が得られた。

#### 4. ま と め

高温ガス炉用被覆燃料粒子を高燃焼度まで使用することを念頭に置いた設計手法の検討を行い、本手法を用いて、被覆燃料粒子の被覆層厚さの最適化を行い、HTTR 高燃焼度炉心における照射条件下における燃料の破損確率を評価した。

まず、燃料核移動、Pd による SiC 層腐食、内圧による破損機構を考慮した結果、高燃焼度炉心に初装荷燃料をそのまま適用すると、燃料核移動及び内圧により燃料の健全性が保てないという結果となることが分かった。そこで、被覆燃料粒子の寸法をパラメータとした評価を行い、高燃焼度下における被覆燃料粒子の挙動を検討することとした。その結果、以下の結果を得た。

- ① SiC 層を厚くすることは、内圧破損を防止する上で有効である。
- ② 燃料核体積とバッファ層体積の比が同じ場合、燃料核が大きい方が破損確率が低くなる。
- ③ 燃料核に対するバッファ層体積比を大きくとることにより、内圧上昇を抑えることができるが、その結果 PyC 層の厚さが薄くなり照射収縮による締め付け力が失われると、破損確率は予想よりも小さくならない。
- ④ 製造時の SiC 層破損粒子は照射末期には全て破損に至る。

#### 謝 辞

本検討を行うに当たり、御指導、御助言いただいた田中利幸 HTTR 開発部長、茂木春義 HTTR 技術開発室長をはじめとする同部の皆様方に感謝いたします。有益なコメントを頂いた国富一彦 HTTR 技術開発室長代理に感謝いたします。



## 参 考 文 献

- (1) S. Saito, T. Tanaka, Y. Sudo, O. Baba, et al., "Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", JAERI-1332 (1994).
- (2) 林 君夫、塩沢 周策、沢 和弘、佐藤 貞夫、他、「高温工学試験研究炉用燃料の設計方針、製作性及び総合的健全性評価」、JAERI-M 89-161 (1989).
- (3) 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
- (4) 福田 幸朔、小川 徹、鹿志村 悟、林 君夫、他、「高温ガス炉用燃料に関する試験研究」、JAERI-M 89-007 (1989).
- (5) 林 君夫、沢 和弘、塩沢 周策、福田 幸朔、「高温工学試験研究炉用燃料の健全性の評価と許容設計限界」、JAERI-M 89-162 (1989).
- (6) M. Wagner-Loffler, "Amoeba Behavior of UO<sub>2</sub> Coated Particle Fuel", Nucl. Technol., 35, 392 (1977).
- (7) K. Minato, T. Ogawa, S. Kashimura, K. Fukuda, et al., "Fission Product Palladium-Silicon Carbide Interaction in HTGR Fuel Particles", J. Nucl. Mater., 172, 184 (1990).
- (8) A. H. Booth, "A Method of Calculating Fission Gas Diffusion from UO<sub>2</sub> Fuel and Its Application to the X-2-f Loop Test", CRDC-721 (1957).
- (9) 沢 和弘、福田 幸朔、R. ACHARYA、「高温ガス炉燃料の高燃焼度照射試験における燃料温度予測」、JAERI-Tech 94-038 (1995).
- (10) S. SHIOZAWA, K. SAWA, K. FUKUDA and N. KITAMURA, "The Status of HTGR Fuel Development in Japan", Proc. of IAEA TCM on Development Status of HTR and their Future Role", Petten, Netherlands, ECN-R-95-026 (1995).

Table 1 Summary of relations between failure mechanisms, irradiation conditions and fuel particle design.

破損機構	照射条件	燃料製造結果
燃料核移動	燃料温度 燃料温度勾配 照射期間	バッファ層厚さ 内側PyC層厚さ
PdによるSiC層腐食	燃料温度 プルトニウム核分裂割合 照射期間	バッファ層厚さ 内側PyC層厚さ SiC層厚さ
内圧	燃焼度 照射期間 燃料温度 高速中性子照射量	燃料核直径 バッファ層厚さ バッファ層密度 内側PyC層厚さ SiC層厚さ

Table 2 Major core performance of the first core and the high burnup core of the HTTR.

特 性	初装荷炉心	高燃焼度炉心
熱出力 (MW)	30	13~30
原子炉出口冷却材温度 (°C)	850~950	950
出力密度 (W/cm <sup>3</sup> )	2.5	3~7
最高燃焼度 (GWd/t)	33	100
ウラン濃縮度数	12	3

Table 3 Comparison of specifications of the first-loading fuel and high burnup fuel.

仕 様 項 目	初装荷燃料	高燃焼度燃料
燃料核直径 (μm)	600	550
バッファ層厚さ (μm)	60	90
SiC層厚さ (μm)	28~30	35
粒子充填率 (μm)	30	35

Table 4 Dimension of candidate high burnup coated fuel particle.

Particle type	Kernel radius ( $\mu\text{m}$ )	Buffer thickness ( $\mu\text{m}$ )	IPyC thickness ( $\mu\text{m}$ )	SiC thickness ( $\mu\text{m}$ )	OPyC thickness ( $\mu\text{m}$ )	Coated particle diameter ( $\mu\text{m}$ )
A-1	300	60	40	30	55	970
A-2	300	60	40	40	45	970
A-3	300	85	30	30	40	970
A-4	300	85	30	40	30	970
A-5	300	105	20	30	30	970
A-6	300	105	20	40	20	970
B-1	275	70	30	30	40	890
B-2	275	70	30	40	30	890
B-3	275	95	20	30	25	890
B-4	275	95	15	40	20	890
B-5	275	115	10	30	15	890
B-6	275	115	5	40	10	890
C-1	250	80	20	30	25	810
C-2	250	80	15	40	20	810
C-3	250	105	10	30	10	810
C-4	250	105	5	40	5	810
D-1	225	90	20	30	30	790
D-2	225	90	20	40	20	790

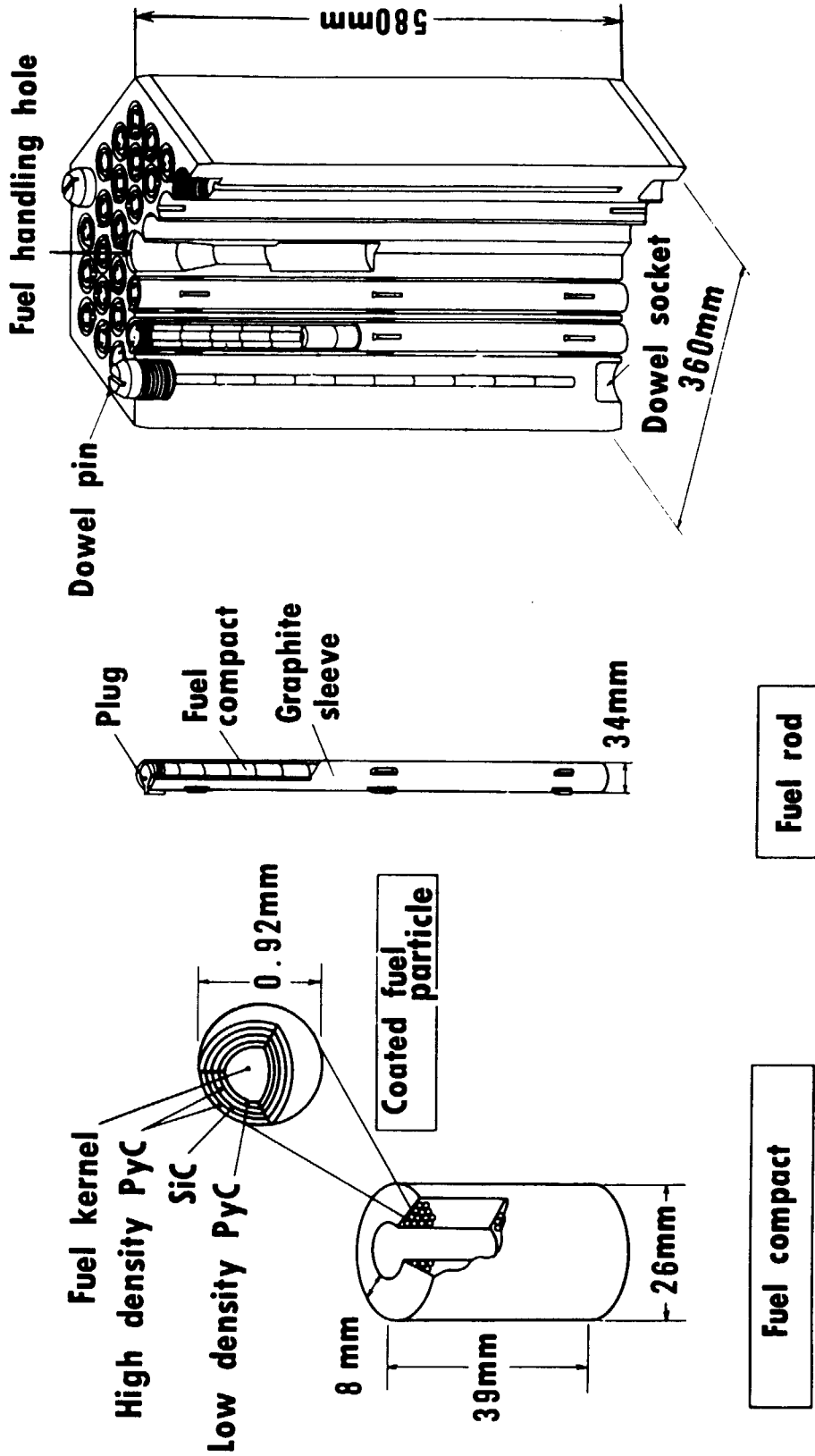


Fig. 1 Fuel assembly of the HTTR.

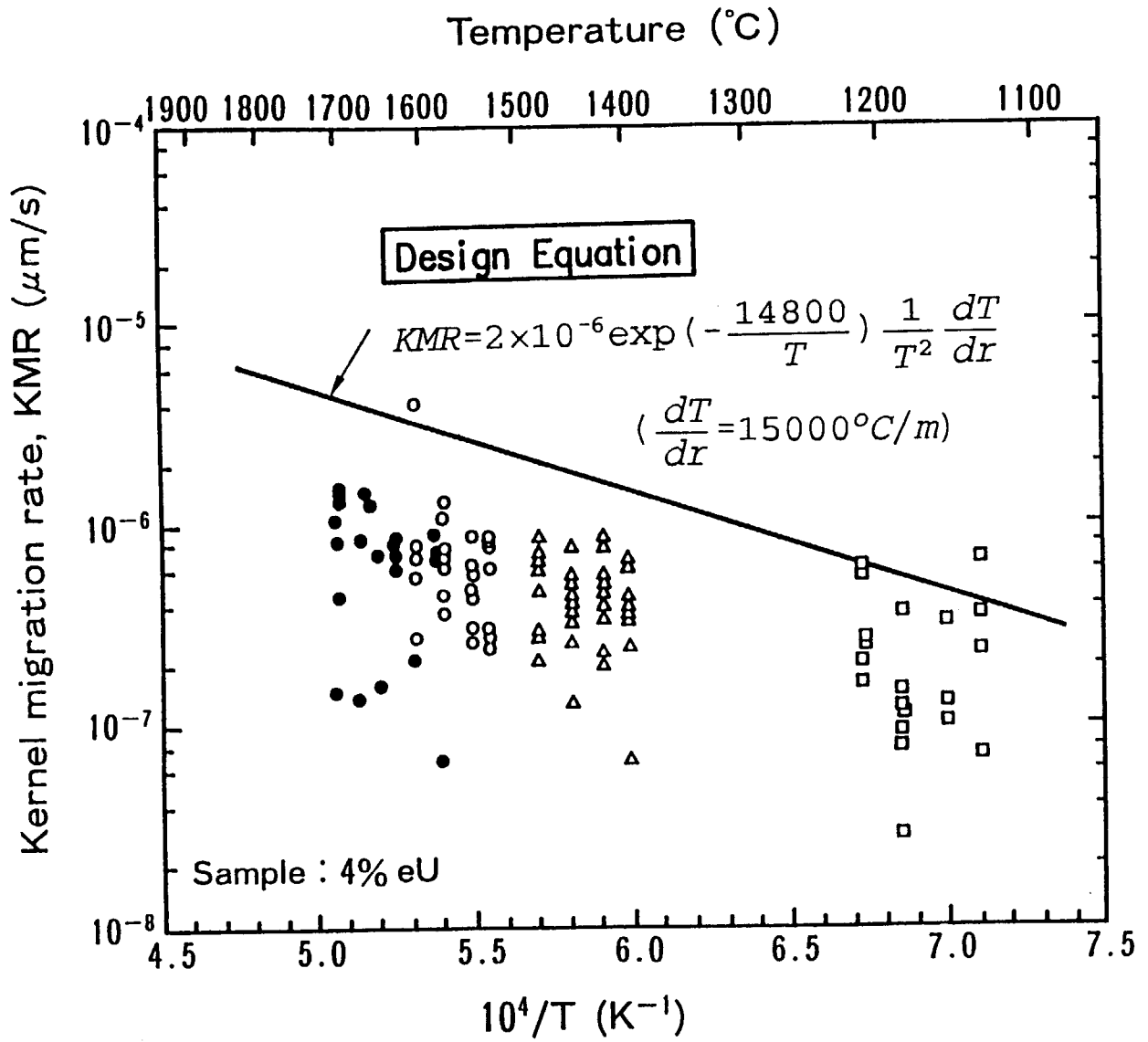
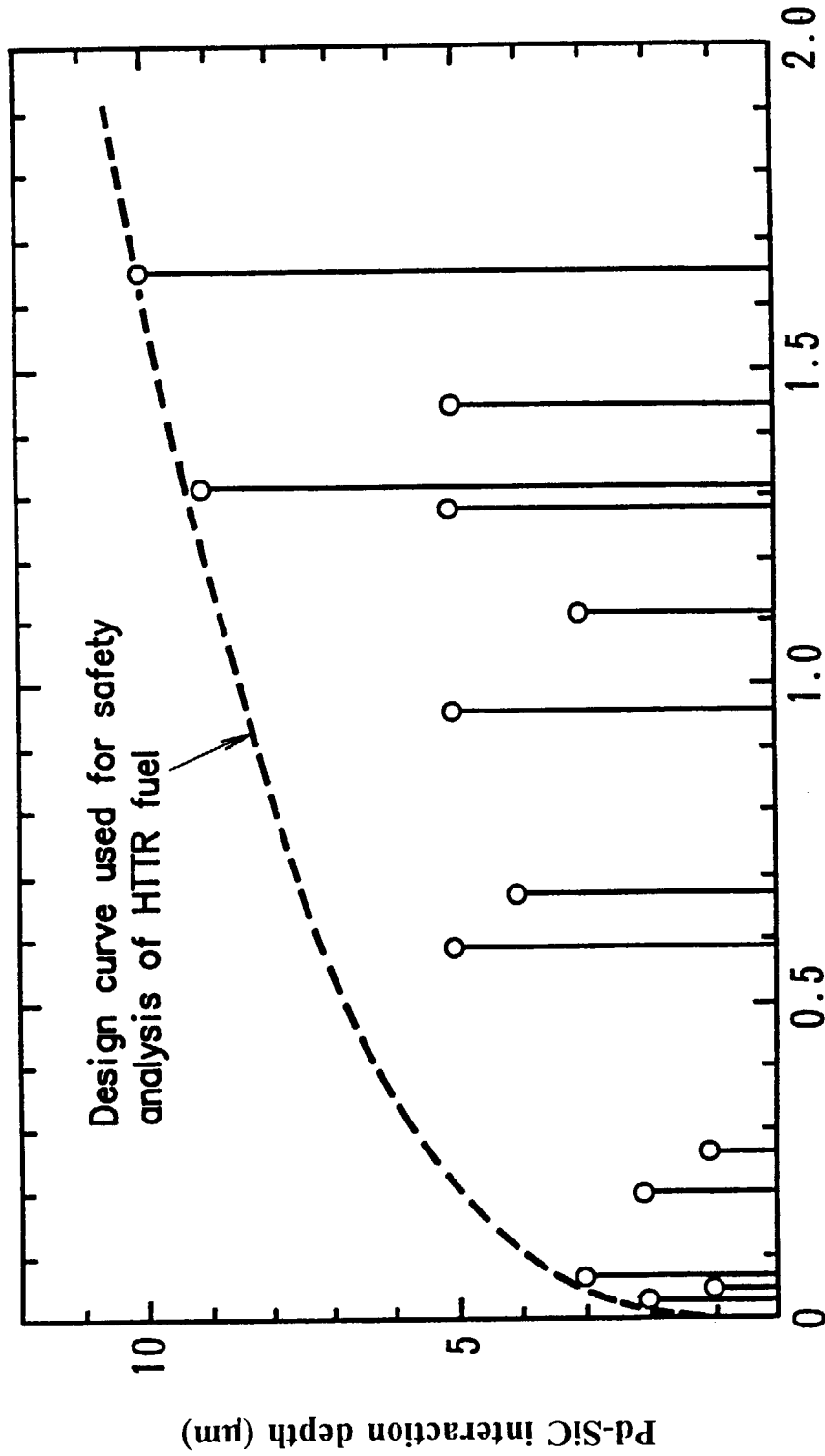


Fig. 2 Experimental data and design equation of kernel migration rate.



Calculated amount of Pd released from kernel ( $10^{15}$  atom)

Fig. 3 Experimental data and design equation of Pd-SiC interaction depth.

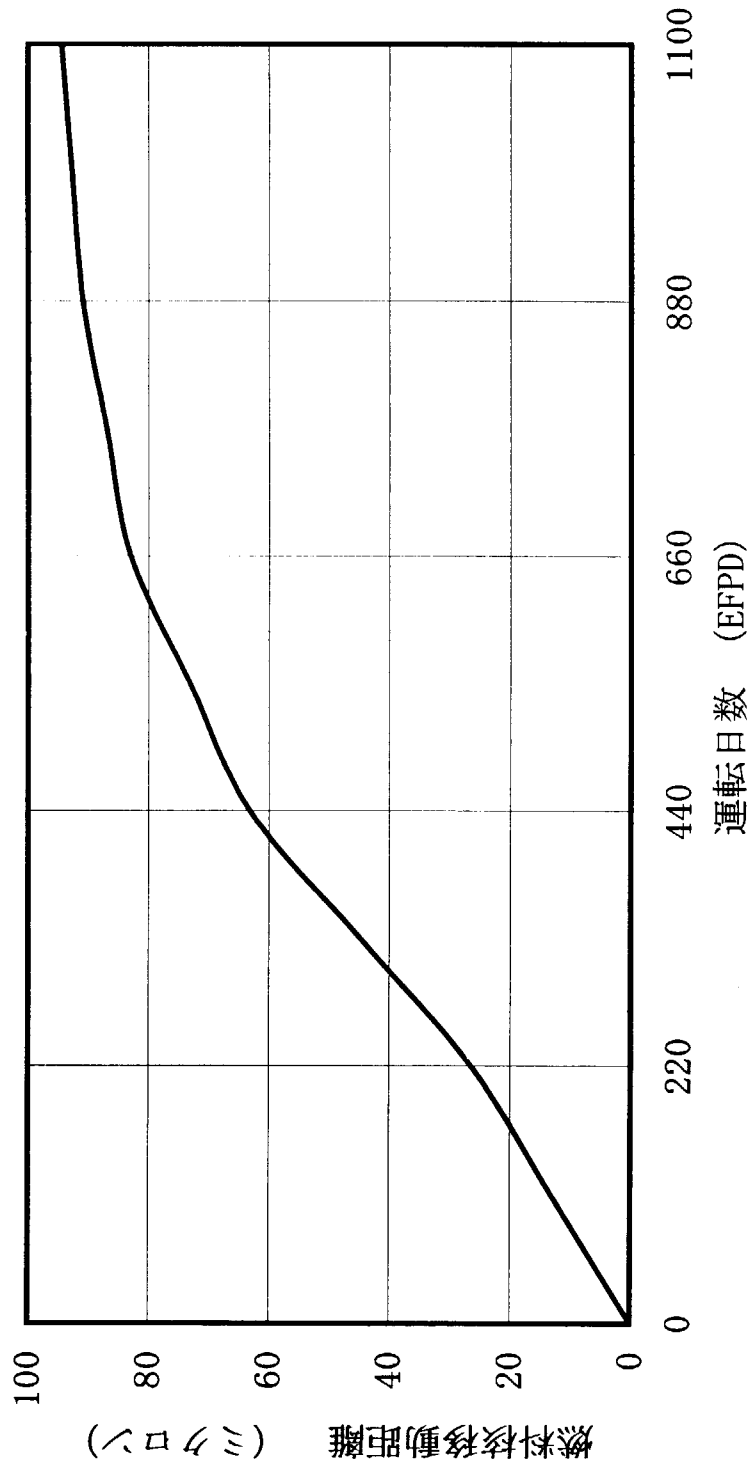


Fig. 4 Kernel migration distance of the HTTR first-loading fuel irradiated in the high burnup core of the HTTR (upper 95% confidence).



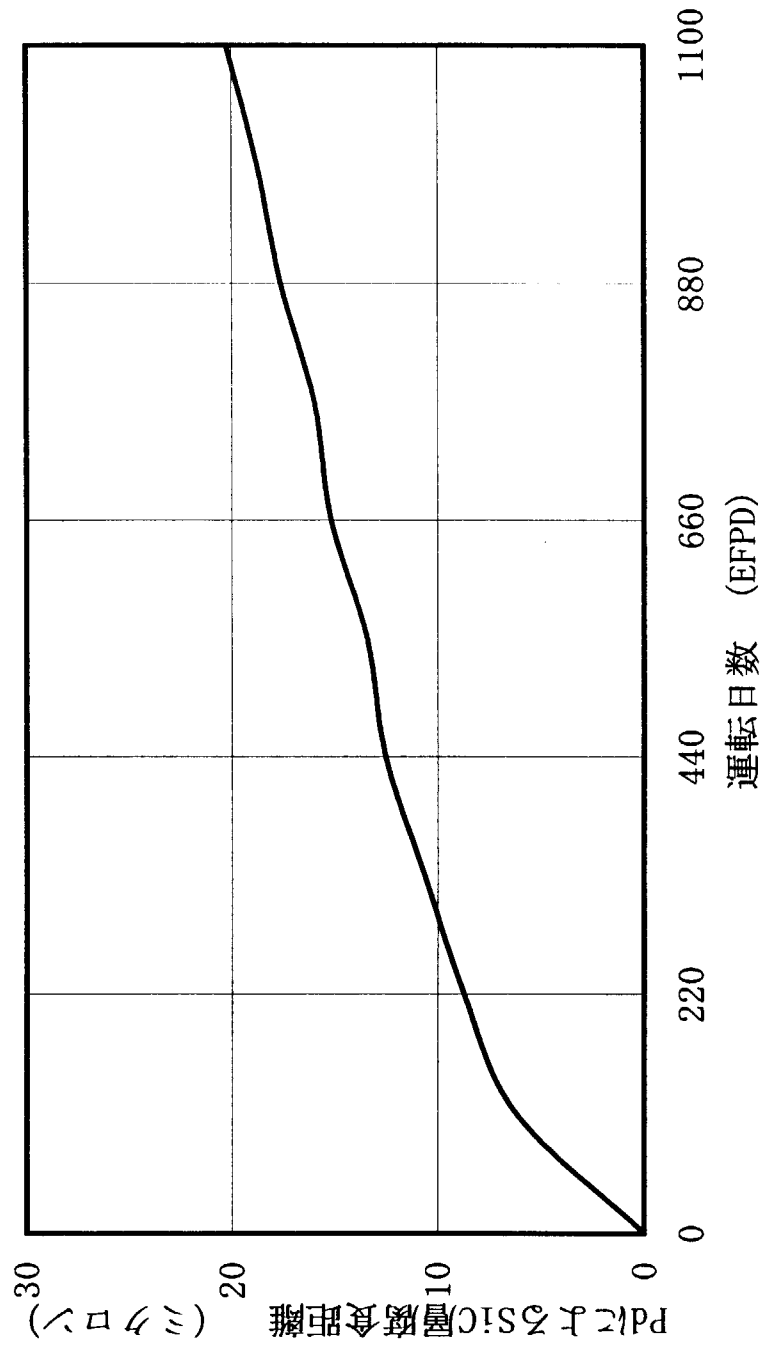


Fig. 5 Pd-SiC interaction depth of the HTTR first-loading fuel irradiated in the high burnup core of the HTTR (upper 95% confidence).

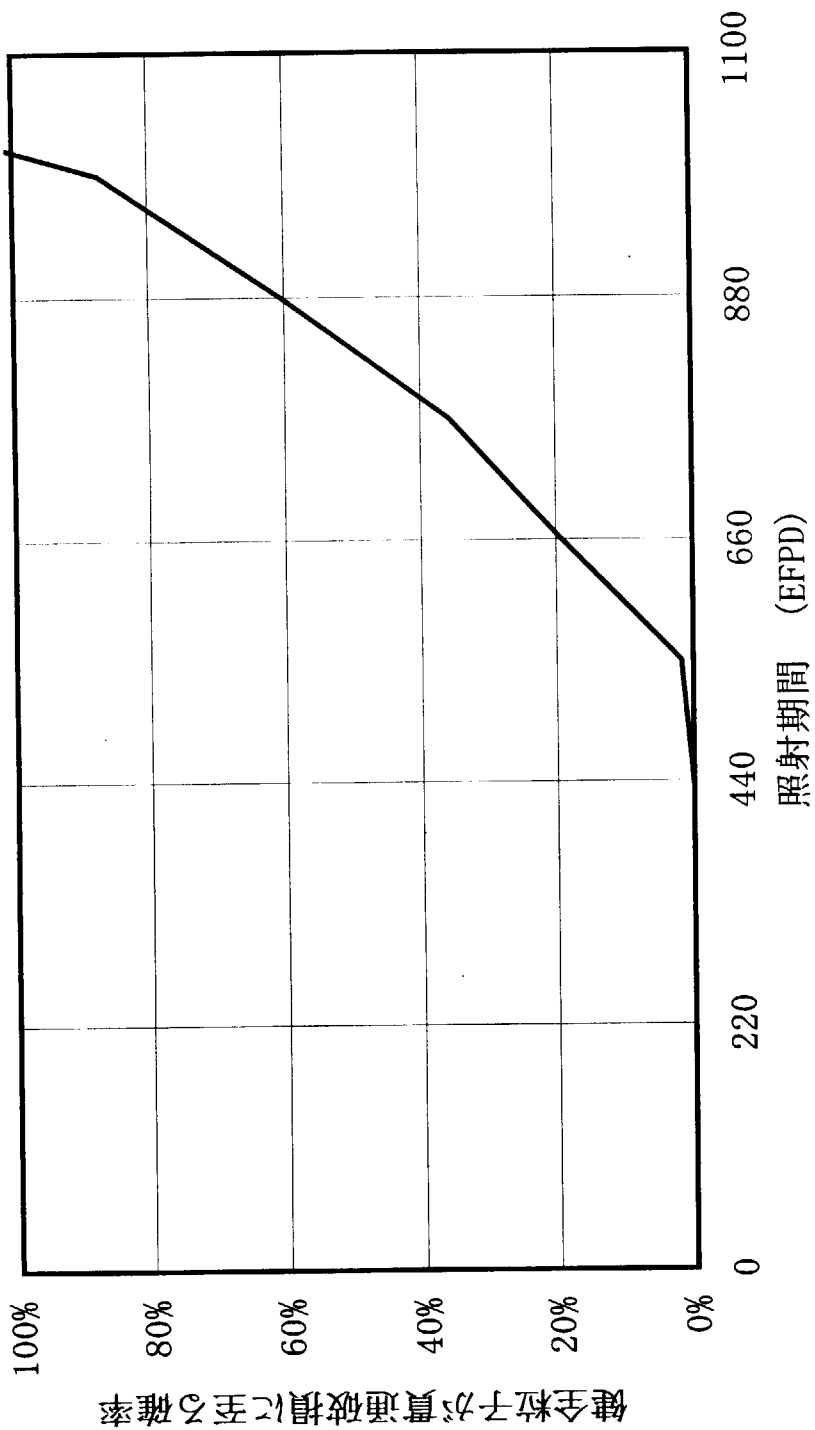


Fig. 6 Pressure vessel failure probability of the HTTR first-loading fuel irradiated in the high burnup core of the HTTR.

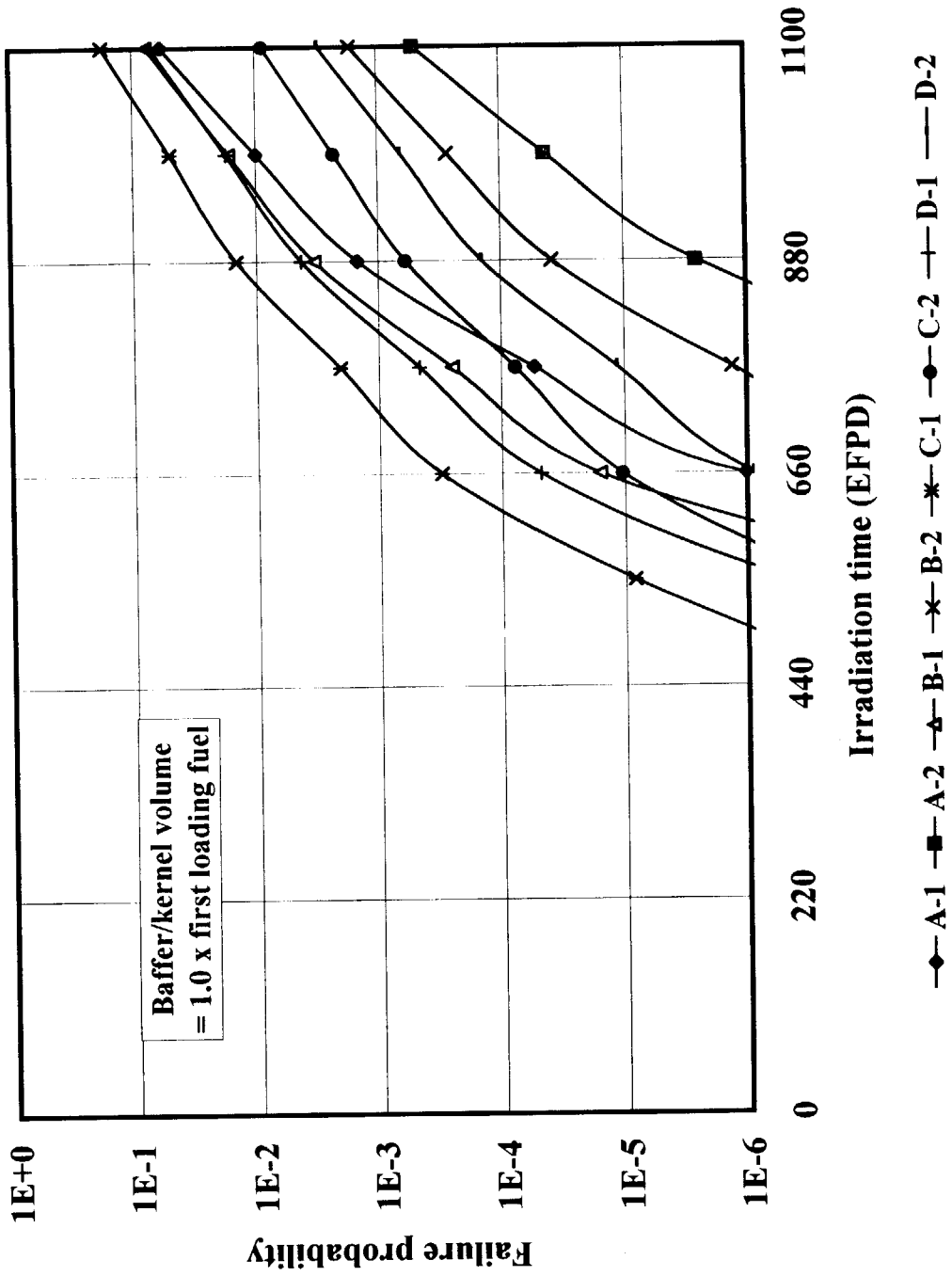


Fig. 7 Pressure vessel failure probabilities of the candidates for high-burnup fuel (ratio of buffer layer and kernel volumes=1.0 × first-loading fuel).

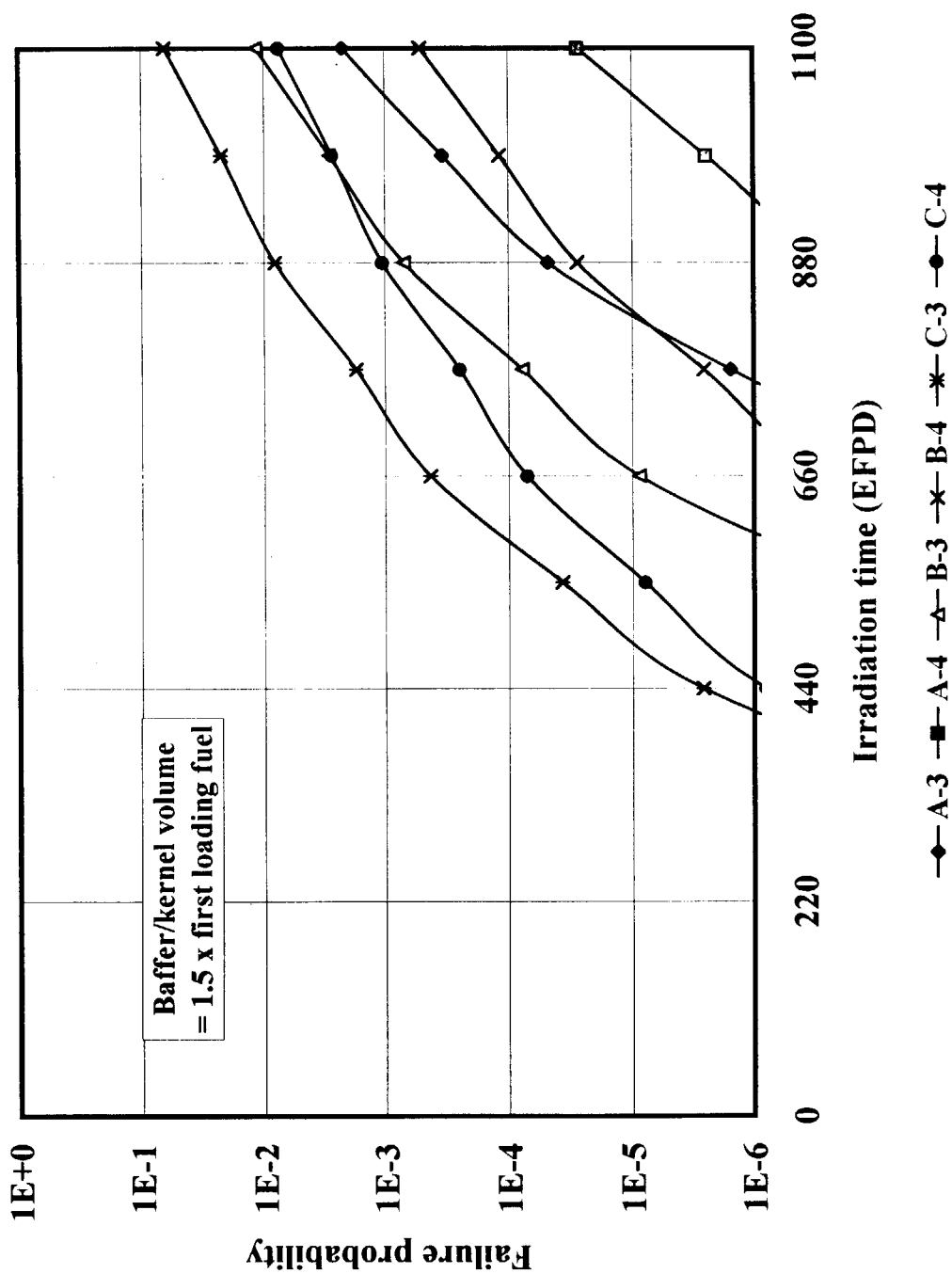


Fig. 8 Pressure vessel failure probabilities of the candidates for high-burnup fuel (ratio of buffer layer and kernel volumes=1.5× first-loading fuel).

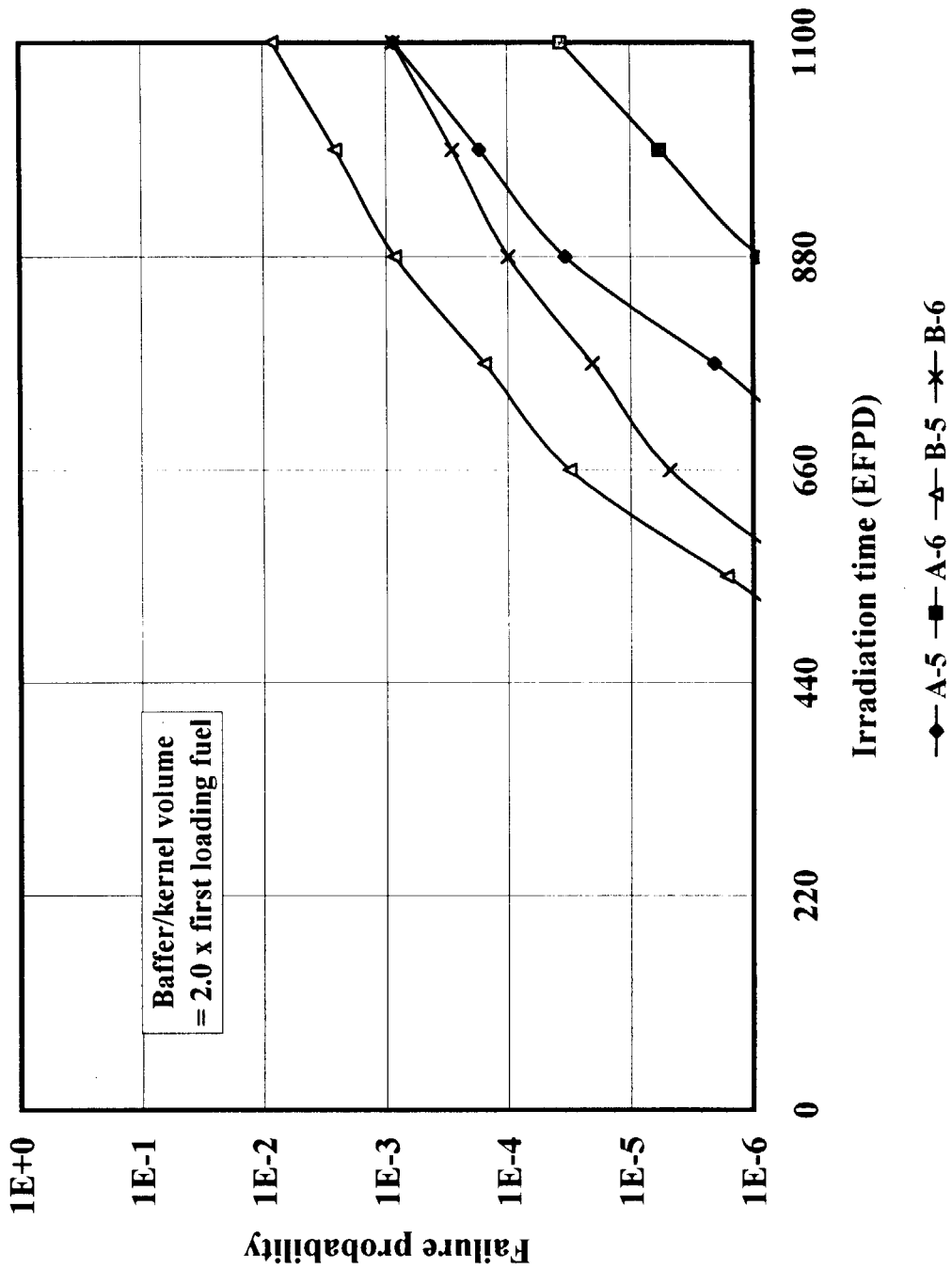


Fig. 9 Pressure vessel failure probabilities of the candidates for high-burnup fuel (ratio of buffer layer and kernel volumes=2.0 × first-loading fuel).

## 付録 1 HTTR 初装荷炉心の照射条件

初装荷燃料は、実際の原子炉で使用される日本で初めての高温ガス炉燃料である。初装荷燃料は、燃料核の直径に対してガス溜であるバッファ層及び SiC 層の厚さが比較的薄い  
ため、最高燃焼度は 33GWd/t に制限されている。通常運転時の燃料最高温度は、運転中  
に著しい追加破損を生じさせないよう、1495℃に制限するとともに、原子炉出口冷却材温  
度を 950℃とする高温試験運転期間は最大 220EFPD (Effective Full Power Days) に制限し  
ている<sup>(A1-1)</sup>。

HTTR 初装荷炉心の定常運転時の核熱設計は既に終了している。評価上の不確かさを  
含まない、いわゆるノミナルの燃焼度、燃料温度、高速中性子照射量の分布をそれぞれ Figs.  
A1.1～A1.3 に示す<sup>(A1-1)</sup>。これらの計算において、運転開始後 0～220EFPD (Effective Full  
Power Days) は原子炉出口冷却材温度 850℃の運転、220～330EFPD は原子炉出口冷却材  
温度 950℃の高温試験運転、330～660EFPD は原子炉出口冷却材温度 850℃の運転を仮定  
している。燃焼度は、軸方向 2 段目 (燃料体上面からの位置で 0.58～1.16m) で最大とな  
り、EOL (End Of Life) で約 33GWd/t に達する。燃料温度は、領域 1 の燃料コンパクト内  
面温度を示した。3 段目から 5 段目にかけて高くなり、各運転モードの最高温度は、定格  
運転で約 1150℃、高温試験運転で約 1300℃、照射運転で約 1200℃である。高速中性子照  
射量は、燃焼度と同じく 2 段目で最高となり、EOL で約  $1.3 \times 10^{25} \text{m}^{-2}$  (中性子エネルギー  
0.18MeV 以上) と評価されている。

(A1-1) S. Saito, T. Tanaka, Y. Sudo, O. Baba, et al., "Design of High Temperature Engineering  
Test Reactor (HTTR)", JAERI-1332 (1994).

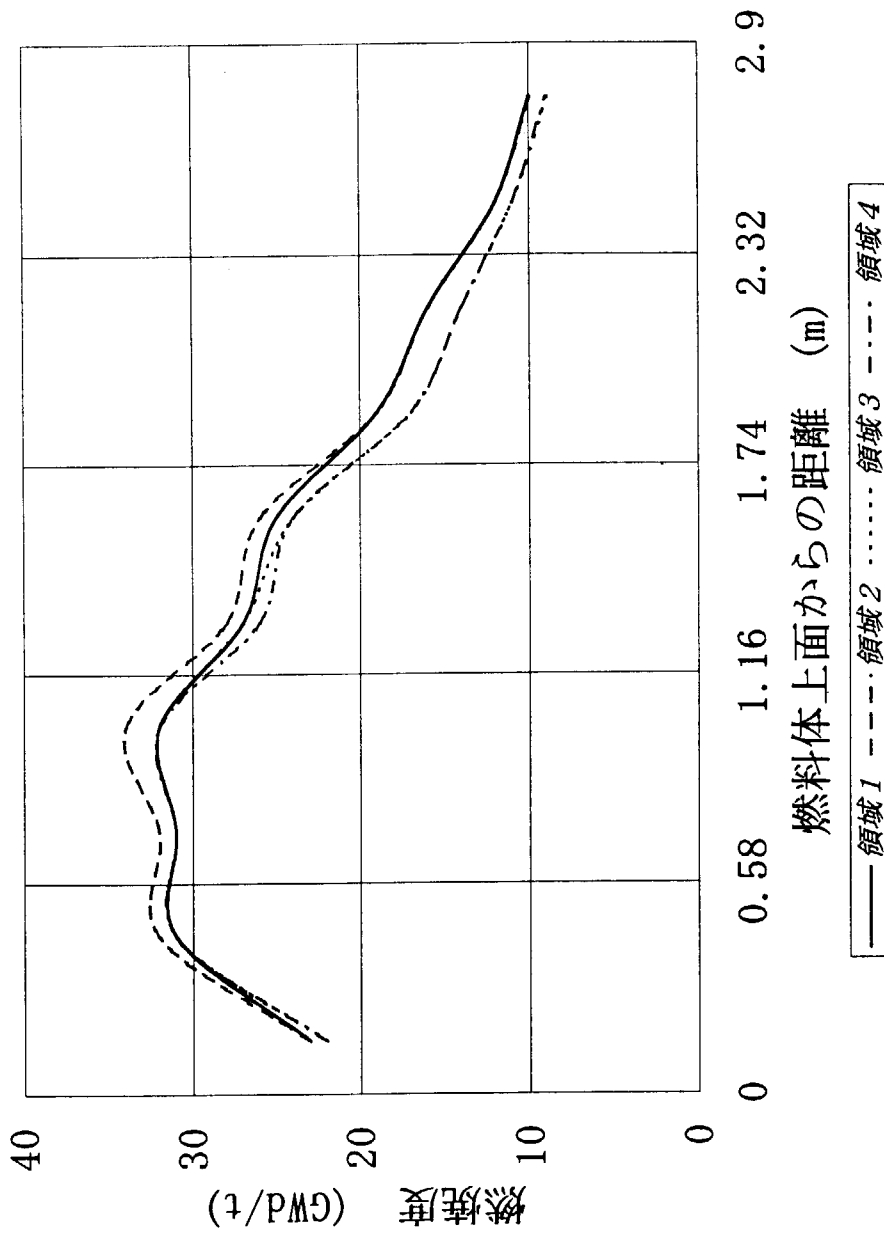


Fig. A1.1 Burnup distributions in the HTTR first-loading core at EOL.

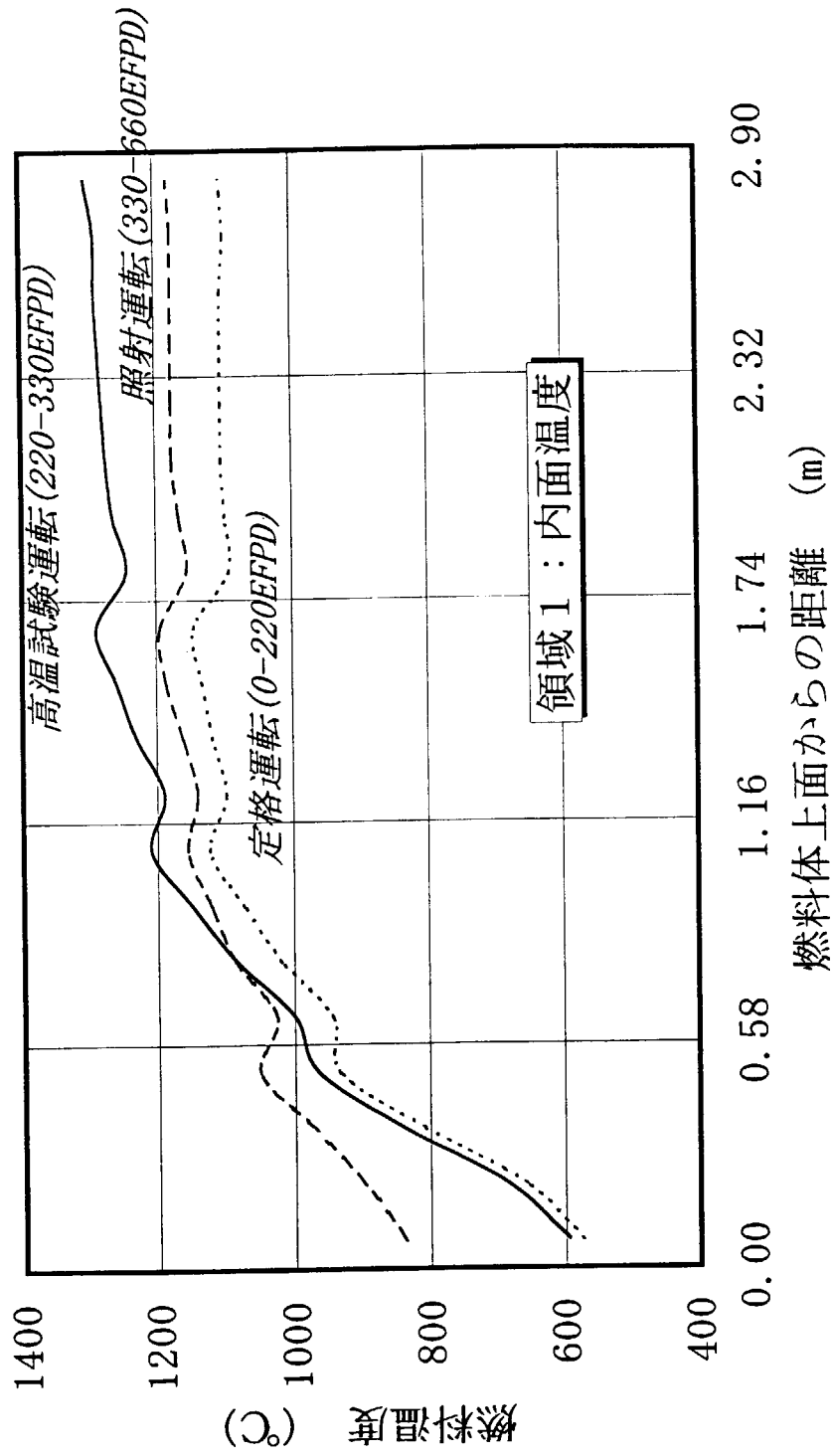


Fig. A1.2 Fuel temperature distributions in the HTTR first-loading core.



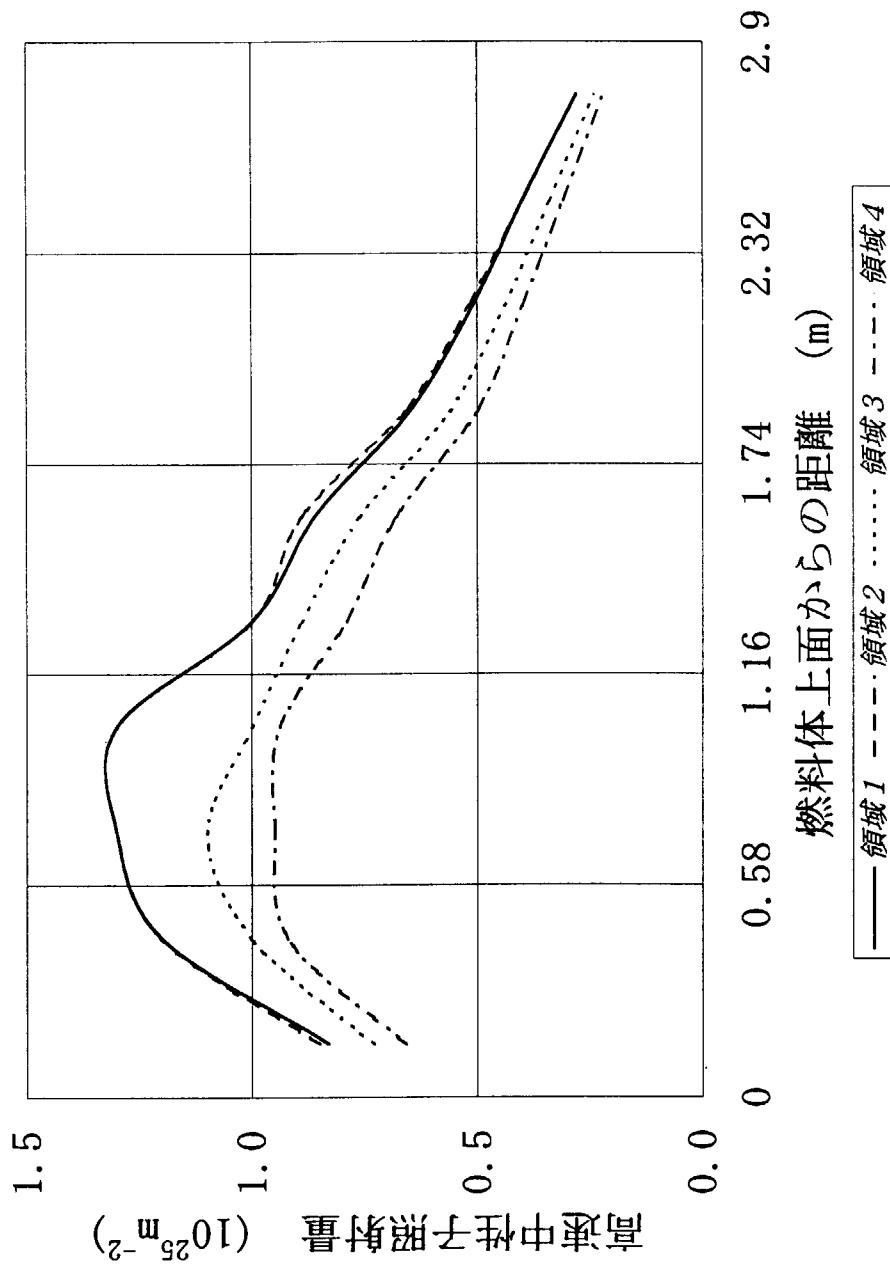


Fig. A1.3 Fast neutron fluence distributions in the HTTR first-loading core at EOL.

付録 2 HTTR 高燃焼度炉心の照射条件<sup>(A2-1)</sup>

この炉心の特徴は、軸方向シャッフリング（いわゆるだるま落とし）方式により高性能炉心とすることである。目標とする核熱特性を初装荷炉心と比較して Table A2.1 に示す。高燃焼度炉心では、出力密度を上げて高い中性子束を得るとともに、常時 950℃の原子炉出口冷却材温度を達成することを目標としている。原子炉出力を 30MW に保ちつつ出力密度を向上させるために、燃料体数は初装荷炉心の 150 体（30 カラム）から 60 体（12 カラム）に減少する。現在想定している炉心断面図を Fig. A2.1 に示す。燃料の濃縮度数は 3 に減らしており、燃料の燃焼期間は 1100EFPD（約 5 年間）を想定している。高燃焼度炉心では、軸方向シャッフリングを行うため、燃焼が進んだ状態で炉心下部に装荷されることになり、照射温度は高くなる。

高燃焼度炉心の詳細設計はまだ行われていないが、これまでの予備検討結果<sup>(A2-2)</sup>から、Figs. A2.2～A2.4 に示すような燃焼度、燃料温度、高速中性子照射量を仮定した。

(A2-1) 山下清信、中野正明、野尻直喜、藤本望、他、「高温工学試験研究炉（HTTR）の高性能炉心概念の検討」, JAERI-Tech 97-055 (1997).

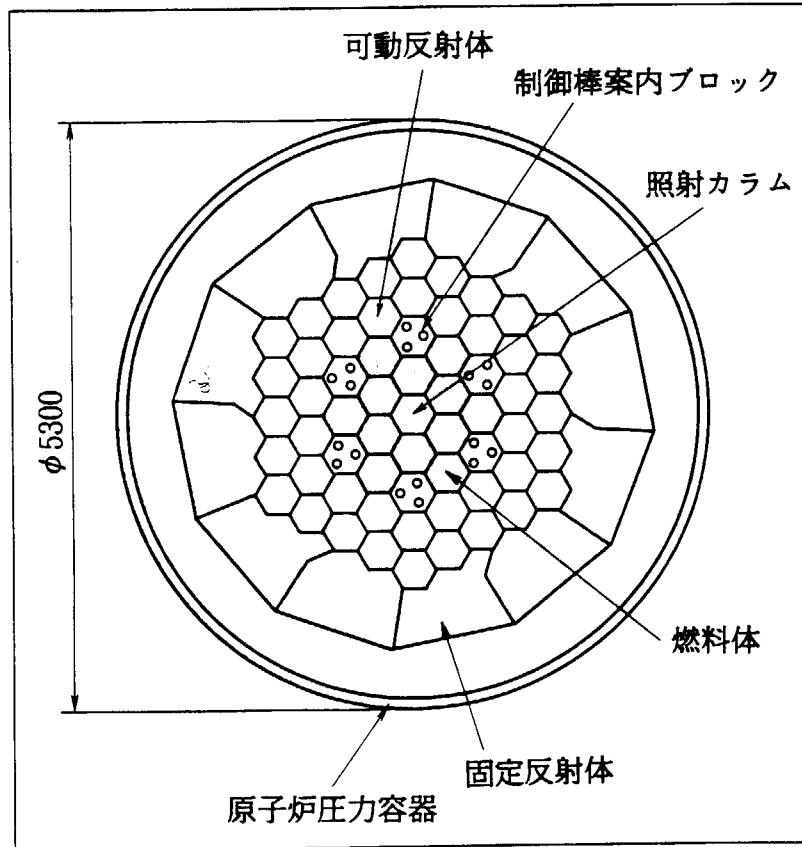


Fig. A2.1 Horizontal view of the high-burnup core of the HTTR.

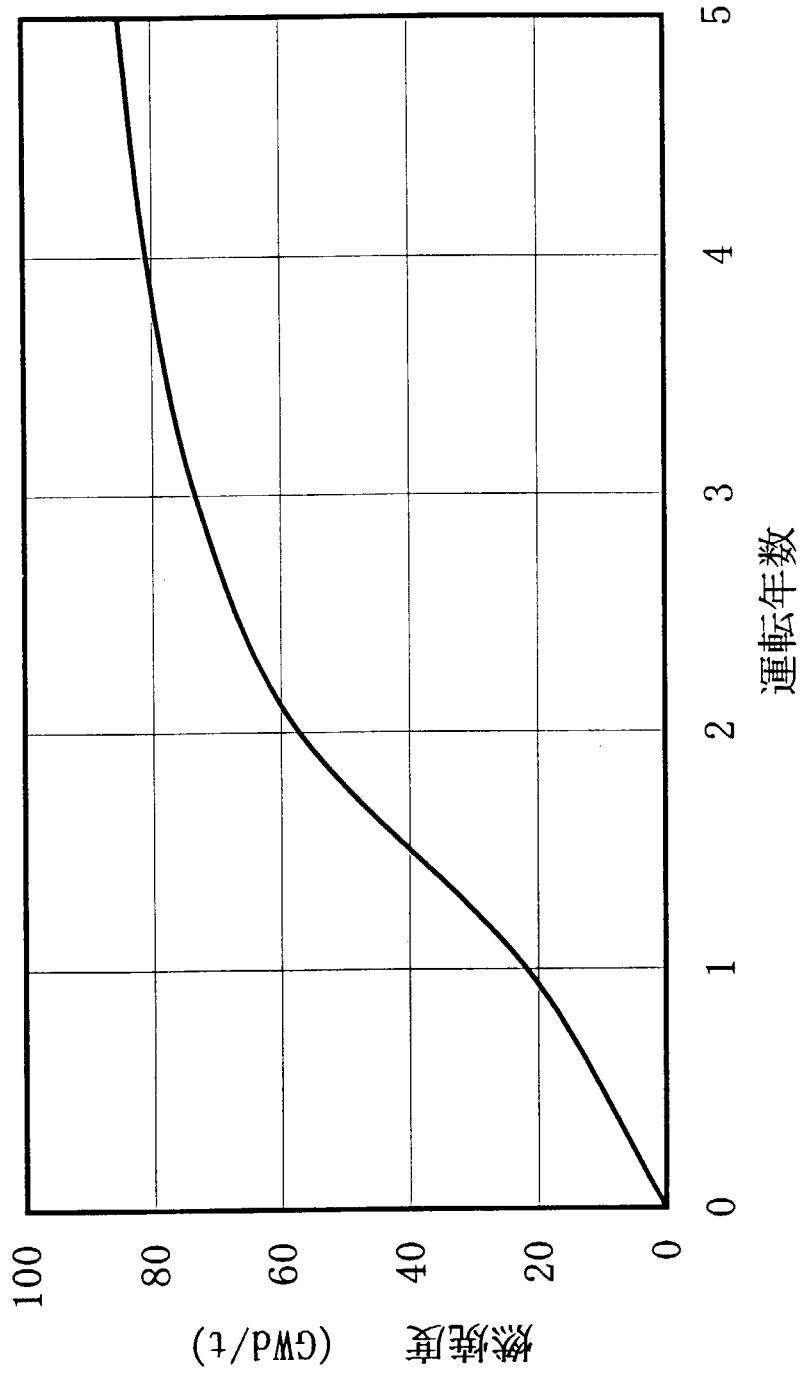


Fig. A2.2 Burnup in the high-burnup core of the HTTR.

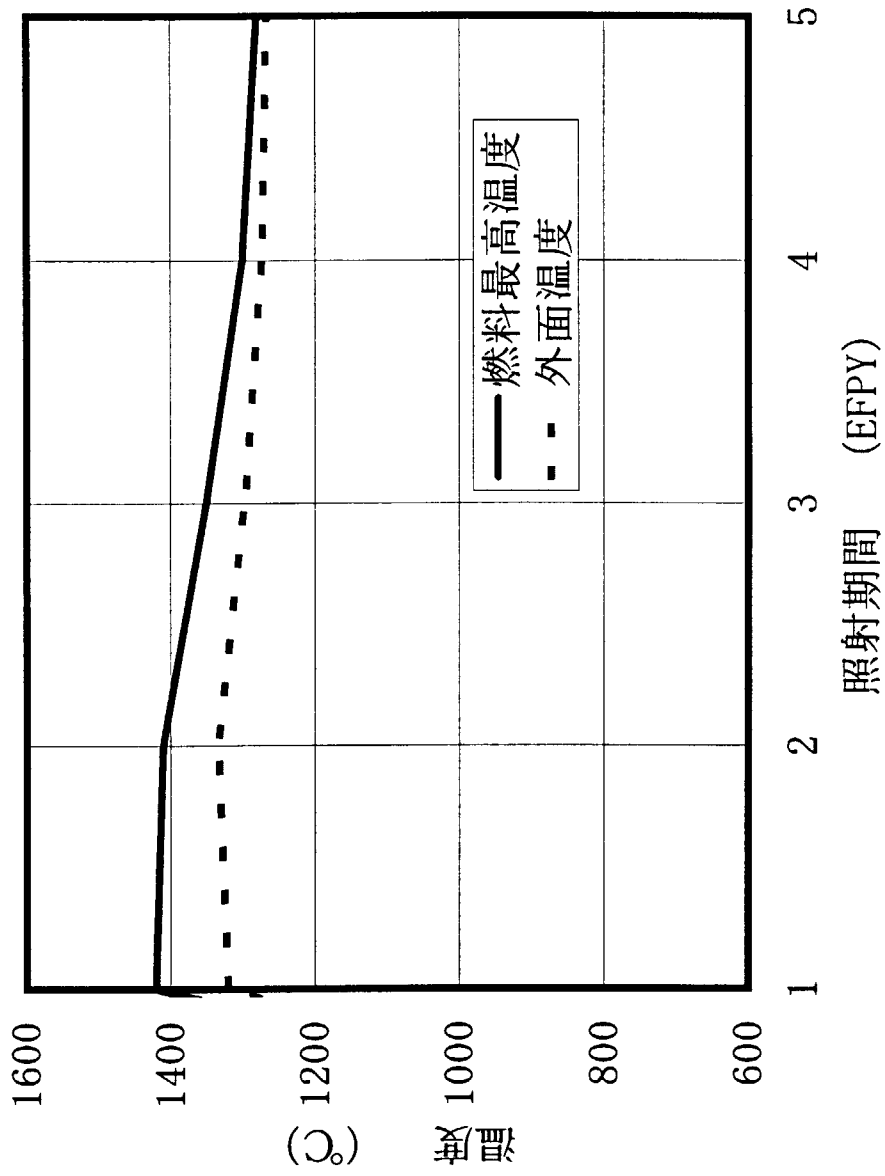


Fig. A2.3 Fuel temperature in the high-burnup core of the HTTR.

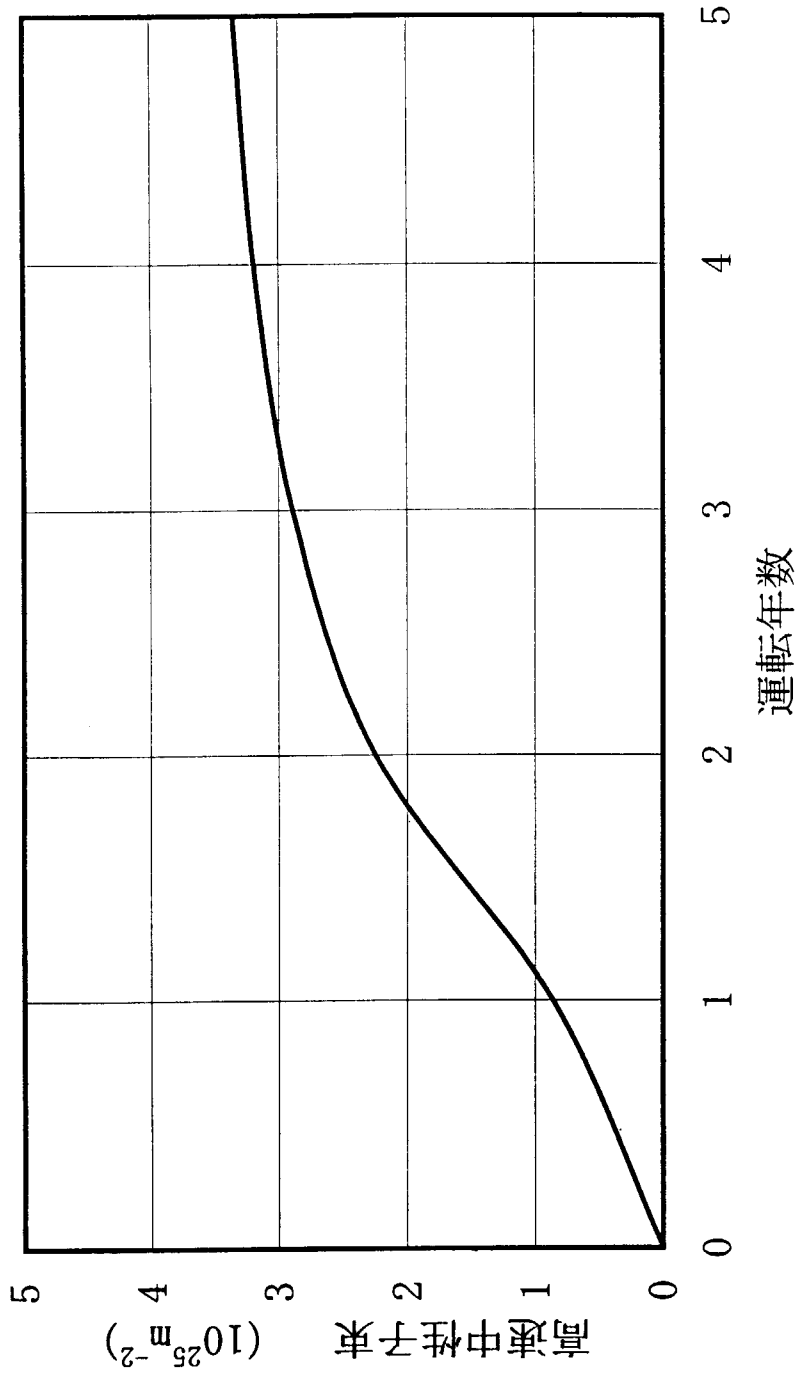


Fig. A2.4 Fast neutron fluence in the high-burnup core of the HTTR.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
 1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <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>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
 1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
 1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
 1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
 1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
 1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
 1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
 1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

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

粘 度 1 Pa·s (=N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS (仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	
	1.60218 × 10 <sup>19</sup>	1.63377 × 10 <sup>20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

高燃焼度高温ガス炉用被覆燃料粒子の設計