

JAERI-M  
88-258

高温工学試験研究炉における被覆燃料粒子の破損  
及びFP放出率の評価法

1988年12月

沢 和弘・藤井 貞夫\* 塩沢 周策・平野 光将

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M 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。  
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura,  
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 横濱野高速印刷

高温工学試験研究炉における被覆燃料粒子の破損  
及びF P放出率の評価法

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉設計室  
沢 和弘・藤井 貞夫・塙沢 周策・平野 光将

(1988年11月30日受理)

高温工学試験研究炉 (HTTR : High Temperature Engineering Test Reactor) の通常運転時における被覆燃料粒子の破損及び希ガス、よう素の放出率を評価するための解析モデル及び評価式についてまとめた。

又、本解析モデル及び評価式に基づいて算出した希ガス、よう素の放出率は、第5次OGL-1燃料体照射試験結果と良い一致を見た。従って、本解析モデル及び評価式を用いた評価法は、HTTRの設に十分適用できるとの結論を得た。

Analysis Method of the Coated Fuel Particle Failure  
and Fractional Release from Fuel Elements of HTTR

Kazuhiro SAWA, Sadao FUJII<sup>\*</sup>, Shusaku SHIOZAWA  
and Mitsumasa HIRANO

HTTR Designing Laboratory  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 30, 1988)

This report summarizes the analytical models and the correlations to evaluate the failure of coated fuel particles and the fission product fractional releases during a normal operation of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR).

The calculational results on the basis of the present analytical models and the correlations are in a good agreement with the fractional releases of noble gases and iodine obtained from the 5th OGL-1 fuel element irradiation experiment. Thus, the analytical models and the correlations developed are concluded to be applicable enough to evaluate the fission products release from the HTTR fuel.

Keywords: HTTR, Failure of Coated Fuel Particle, Fractional Release, Noble Gas, Iodine, 5th OGL-1 Fuel Element

---

\* KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES, LTD.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 評価方法 .....	3
2.1 被覆燃料粒子の破損の評価方法 .....	3
2.2 希ガス, よう素の放出率の評価方法 .....	7
3. 実験との比較 .....	16
3.1 第5次OGL-1燃料体照射試験結果及び計算条件 .....	16
3.2 計算結果 .....	17
4. 結論 .....	28
謝辞 .....	28
参考文献 .....	29
付録 A 第5次OGL-1燃料体の出力, 温度分布 .....	30
付録 B (R/B) 値の非平衡補正 .....	43

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Evaluation Method .....	3
2.1 Coated Fuel Particle Failure .....	3
2.2 Fractional Release of Noble Gases and Iodine .....	7
3. Comparison with Experimental Results .....	16
3.1 Experimental Results of the 5th OGL-1 Fuel Element Irradiation Test .....	16
3.2 Calculation Results .....	17
4. Conclusion .....	28
Acknowledgement .....	28
References .....	29
Appendix A Power and Temperature Data for the 5th OGL-1 Fuel Element Irradiation Test .....	30
Appendix B Non-equilibrium Correction of (R/B) value .....	43

## 1. まえがき

高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor; 以下, H T T R という) の燃料は、微小な燃料核を炭素及び炭化けい素で四重に被覆した被覆燃料粒子を基本としている。燃料体は、被覆燃料粒子を黒鉛マトリックスに分散させた燃料コンパクトと黒鉛スリーブ等から成る燃料棒を、六角柱状黒鉛ブロックの燃料棒そう入孔に保持する構造である。燃料の構造概略図をFig. 1.1 に示す。この燃料の特徴は、燃料からの核分裂生成物 (Fission Product; 以下, F P という) の放出を防ぐ機能を、被覆燃料粒子に持たせていることである。従って、燃料の健全性及び公衆の被ばく評価においては、被覆燃料粒子の被覆層 (以下、被覆層という) の破損評価及び破損した被覆燃料粒子からの F P 放出量評価が重要となる。又、被覆燃料粒子の数は、燃料コンパクト 1 個あたり約 1 3, 0 0 0 個であり、炉心全体では約 1 0 億個にも達する。このため、被覆層の破損や被覆燃料粒子からの F P 放出量の評価においては、膨大な被覆燃料粒子の数を考慮した評価法の開発が必要となる。

本報は、H T T R の燃料を対象として、被覆層の破損及び希ガス、よう素 F P の放出率の評価を行うための角析モデル、評価式等について記述したものであり、さらに、第 5 次 O G L - 1 燃料体照射試験における希ガス、よう素 F P の放出率の評価結果と測定値との比較を行ったものである。

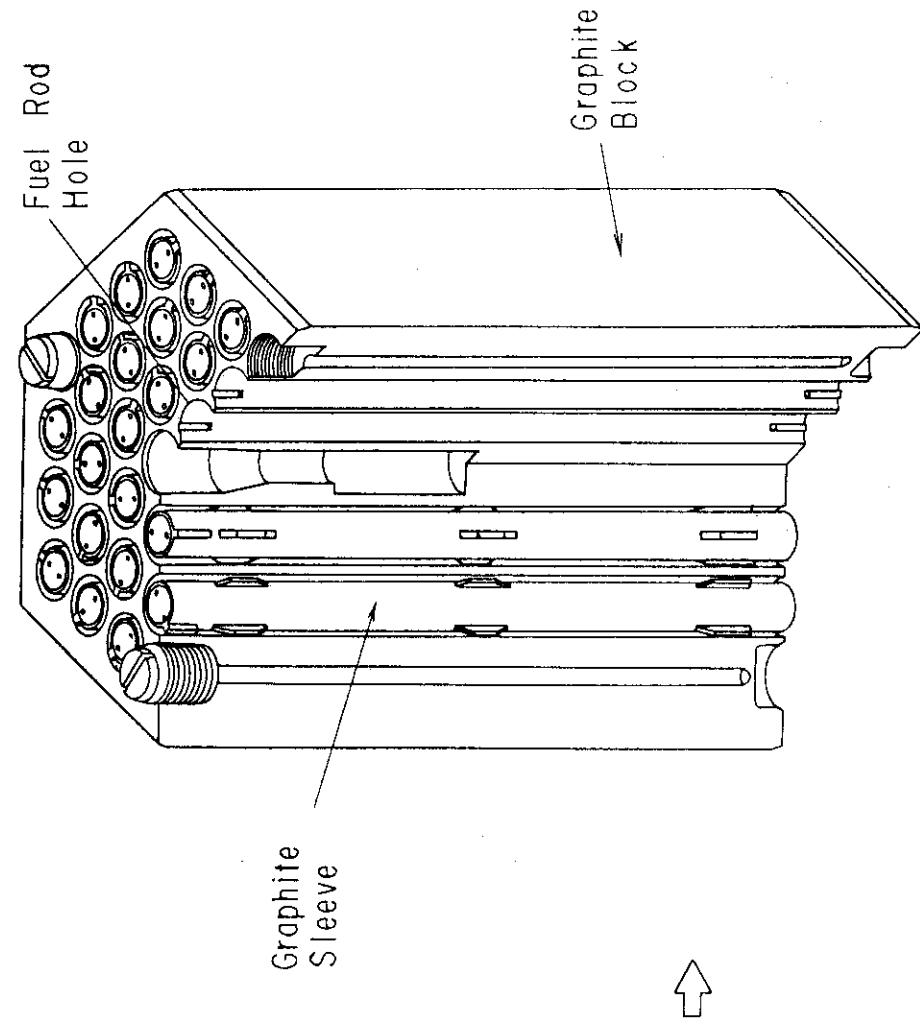
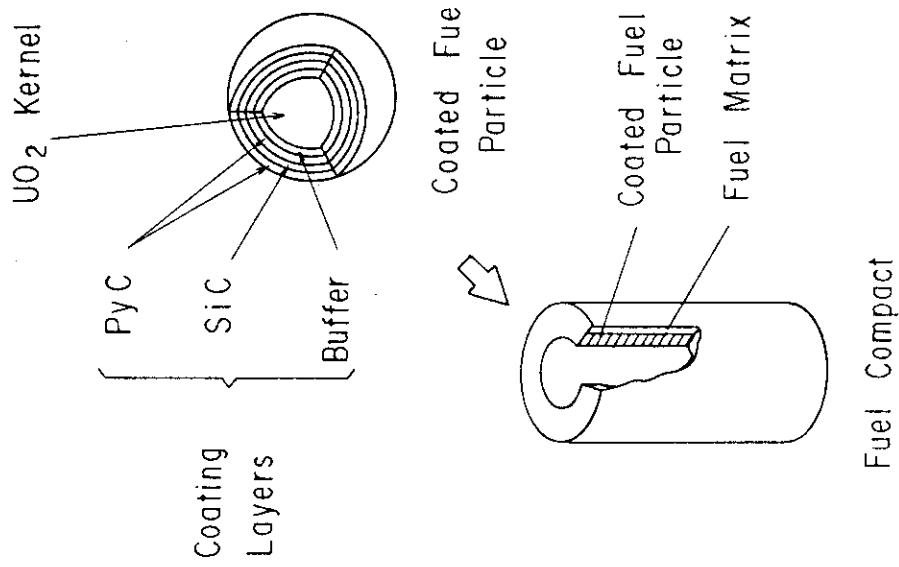


Fig. 1.1 HTTR Fuel Block



## 2. 評価方法

### 2.1 被覆燃料粒子の破損の評価方法

H T T R に用いる被覆燃料粒子の通常運転時の燃焼に伴なう破損機構としては、これまでの国内外における燃料に関する試験結果に基づけば次の 2 つである。<sup>(1)(2)</sup>

(a) 燃料核移動による破損

(b) パラジウム（以下、Pd という）腐食による炭化ケイ素（以下、SiC という）層破損  
なお、被覆燃料粒子の破損の定義は、被覆燃料粒子の F P 保持能力が極端に失われることで、一般には F P 放出の障壁となっている被覆層が破損することを言う。以下、各破損機構について説明するとともに、その評価方法を示す。

(a) 燃料核移動による破損

被覆燃料粒子の燃料核は、照射下で温度勾配の方向に沿ってアーベー効果と呼ばれる現象によって移動し、燃料粒子被覆層の中に食い込み、被覆層が破損する。燃料核移動の機構は、燃焼に伴って過剰となった酸素が炭素被覆層と反応して一酸化炭素となり、これが低温側に輸送されそこで分解して炭素を析出し、その結果燃料核が低温側に押出されるものである。<sup>(3)</sup>

燃料核の移動速度は燃料温度と温度勾配によって決まり、実験結果に基づけば以下の式で表わされる。

$$KMR = KMC \cdot \frac{1}{T^2} \cdot \frac{dT}{dr} \quad (2-1)$$

ここで、 KMR : 燃料核移動速度 (m/s)

KMC : 燃料核移動係数 ( $m^2 \cdot K/s$ )

T : 燃料温度 (K)

$dT/dr$  : 燃料温度勾配 (K/m)

である。

H T T R に使用する燃料の燃料核移動係数は、Fig. 2.1 の様に整理できる。<sup>(4)</sup> ここで、H T T R の設計評価としては、実験データを保守的に評価して次の式を用いている (Fig. 2.1 の実線)。

$$KMC = 2 \times 10^6 \exp \left( -\frac{1.48 \times 10^4}{T} \right) \quad (2-2)$$

時刻 t までの核移動距離 x は、(2-1) 式を積分して、以下の式で表わされる。

$$x = 2 \times 10^6 e^{-\frac{1.48 \times 10^4}{T}} \cdot \frac{t}{T^2} \cdot \frac{dT}{dr} \quad (2-3)$$

破損の評価では、安全側の仮定として、上式で求めた燃料核移動距離が第3層(SiC層)の内面までの厚さに達した時点で被覆層の破損が生じるものとする。これは、SiC層と燃料核が接触した場合、SiC層が燃料核と反応し、SiCが分解し、被覆燃料粒子のFP保持能力が極端に低下するためである。

H T T R の全炉心について被覆層破損を評価するためには、10億個近くの多数の被覆燃料粒子が装荷されることを考慮する必要がある。即ち、燃料温度及び被覆層の厚さに変動があるので、以下の様な統計的手法により破損率を計算する。

燃料核移動距離は、 $x_0 \pm \sigma_x$ であるとする。ここで $\sigma_x$ は、燃料温度及び燃料温度勾配の統計的変動による燃料核移動距離の偏差である。燃料核移動距離が $x$ である確率密度 $f_x(x)$ は、変動に正規分布を仮定して、

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp \left[ -\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} \right] \quad (2-4)$$

となる。

被覆層に破損が生じる閾値 $\ell$ についても被覆層の厚さの変動に正規分布を仮定して、以下の様に閾値が $\ell$ である確率密度 $f_\ell(\ell)$ を求める。

$$f_\ell(\ell) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\ell} \exp \left[ -\frac{(\ell-\ell_0)^2}{2\sigma_\ell^2} \right] \quad (2-5)$$

ここで、 $\ell_0$ ：被覆層の破損が生じる距離の平均値

$\sigma_\ell$ ：被覆層の製造公差等から生じる $\ell_0$ の偏差  
である。

燃料核移動距離が $\ell'$ を超える確率 $p'(\ell')$ は、

$$p'(\ell') = \int_{\ell'}^{\infty} f_x(x) dx \quad (2-6)$$

となる。従って、被覆層の破損確率 $p'(\ell')$ は、

$$\begin{aligned} p'(\ell') &= \int_{-\infty}^{\infty} f_\ell(\ell') \cdot p'(\ell') \cdot d\ell' \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\ell'}{\sqrt{2\pi}\sigma_\ell} \exp \left[ -\frac{(\ell'-\ell_0)^2}{2\sigma_\ell^2} \right] \int_{\ell'}^{\infty} \frac{dx}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp \left[ -\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} \right] \end{aligned} \quad (2-7)$$

となる。ここで、以下の変数変換を行えば、

$$Z = \frac{x - x_0}{\sigma_x}$$

$$\xi = \frac{\ell - \ell_0}{\sqrt{2} \sigma_\ell}$$

(2-7) 式は、

$$P(\ell') = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \exp(-\xi^2) \Psi\left(\frac{\sqrt{2}\sigma_\ell\xi + \ell_0 - x_0}{\sigma_x}\right) \quad (2-8)$$

となる。

ここで、 $\Psi(Z) = P(\ell')$ である。  
計算コードでは、(2-8)式をHermit-Gaussの数値積分公式を用いて解く。<sup>(5)</sup>

### (b) Pd腐食によるSiC層破損

PdによるSiC層の腐食は、燃料核中に生成した核分裂生成物のPdが、燃料核から主に拡散によりSiC層に達し、SiC層と反応して、主としてパラジウムのけい化物と炭素を生成することによって生じるものである。<sup>(6)</sup>その結果、SiC層のF.P.保持能力が低下する。腐食距離は、燃料核からのPd放出が律速となるため、Pdの放出量の関数として表わされる。<sup>(7)(8)</sup>HTTRの使用条件下での試験結果をFig.2.2に示す。

ここで、HTTRの設計評価としては、実験データを保守的に評価して、次の式を用いている。

$$Y = 1.15 \times 10^{-12} X^{1.3} \quad (2-9)$$

ここで、Y : SiC層の腐食距離 (m)

X : SiC層内表面積当りのPdの放出量 (atoms/m<sup>2</sup>)

である。

Xは、燃料核から放出されてSiC層内面に達するPdの量であり、燃料核で発生したPdは拡散及び反跳により、燃料核より放出されると仮定して、拡散に関してはBoothモデルを用いて、次の式で計算する。<sup>(9)</sup>

$$X = \frac{B}{4\pi \cdot r_s^2} \cdot F \\ = \frac{B}{4\pi \cdot r_s^2} \{ Fr + (1 - Fr) F_d \} \quad (2-10)$$

$$Fr = \frac{3}{4} \left( \frac{R}{a} \right) - \frac{1}{16} \left( \frac{R}{a} \right)^3$$

$$Fd = \frac{4\pi a^2}{B} \int_0^T J(a) dt$$

$$J = -D \operatorname{grad} C$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = b - \operatorname{div} J$$

ここで、 B : Pd の生成量	(atoms)
r <sub>s</sub> : SiC 層内面までの距離	(m)
F : Pd の放出割合	(-)
Fr : 反跳による放出割合	(-)
Fd : 拡散による放出割合	(-)
R : Pd の反跳距離	(m)
a : 燃料核半径	(m)
J : 拡散による Pd 流束	(atoms/m <sup>2</sup> ・s)
D : Pd の拡散係数	(m <sup>2</sup> ・s)
C : Pd の濃度	(atoms/m <sup>3</sup> )
b : Pd の生成率	(atoms/m <sup>3</sup> ・s)
T : 評価期間	(s)

である。

Pd の放出割合 F は、燃料核からの Pd の放出が律速であるため、以下の差分解で解ける。<sup>(10)</sup>

$$F = 1 - \left\{ \sum_{i=1}^{k-1} \left[ b_i (1 - Fr) (\tau_i g_i - \tau_{i+1} g_{i+1}) / D'_i \right] + b_k \Delta t_k g_k \right\} / \sum_{i=1}^k b_i \Delta t_i$$

(2-11)

ここで、 b<sub>i</sub> : i ステップにおける Pd 生成率

$$\Delta t_i : \quad " \quad \text{時間}$$

$$D'_i : \quad " \quad \text{換元拡散係数} \quad D' = D / a^2$$

$$\tau_i = \sum_{j=i}^k D'_j \Delta t_j$$

$$g_i = g(\tau_i) = 1 - 4 \sqrt{\tau_i / \pi} + 3\tau_i / 2 \quad \tau \leq 0.1$$

$$g_i = g(\tau_i) = \frac{1}{15\tau_i} - \frac{6}{\tau_i} \sum_{n=1}^3 \frac{\exp(-n^2\pi^2\tau_i)}{n^4\pi^4} \quad \tau > 0.1$$

である。

Pd 原子の生成量 B の評価は、以下の様にする。

$$B(t) = \frac{3.2 \times 10^{10} PY}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2-12)$$

ここで、 Y : Pd の核分裂収率  $(-)$   
 P : 着目している燃料粒子の出力  $(W)$   
 $\lambda$  : Pd の崩壊定数  $(1/s)$

$$Y(t) = [1 - f_{pu}] \times Y_u + f_{pu} \times Y_{pu}$$

$f_{pu}$ : Pd の Pu 核分裂割合  $(-)$   
 $Y_u$ : Pd のウラン核分裂収率  $(-)$   
 $Y_{pu}$ : Pd のプルトニウム核分裂収率  $(-)$

である。

$f_{pu}$  は、濃縮度と燃焼度の関数である。

破損の評価では、安全側の仮定として、上式で求めた SiC 層の腐食距離が SiC 層の厚さに達した時点で、被覆層の破損が生じるものとする。これは、SiC 層の Pd による腐食はノジュール状であり、たとえ最大腐食距離が SiC 層の厚さまで達したとしても、直ちに SiC 層及び他の熱分解炭素層の FP 保持能力が低下するわけではないが、安全側の仮定として FP 放出評価上破損としたものである。

## 2.2 希ガス、よう素の放出率の評価方法

ある核種 n の放出割合  $F_n$  は以下の様に定義される。

$$F_n = \frac{N_n}{I_n} \quad (2-13)$$

ここで、  $N_n$ : 燃料から漏洩した核種 n の量  $(atom)$   
 $I_n$ : 全系に存在する核種 n の量  $(atom)$   
 (全インベントリ)

である。

$N_n, I_n$  は、以下の式となる。

$$\frac{dN_n}{dt} = R_n - \lambda_n N_n(t) \quad (2-14)$$

$$\frac{dI_n}{dt} = B_n - \lambda_n N_n(t) \quad (2-15)$$

ここで、 $R_n$ : 核種  $n$  の放出速度 (atom/s)

$B_n$ : 核種  $n$  の生成速度 (atom/s)

$\lambda_n$ : 核種  $n$  の崩壊定数 (1/s)

である。

希ガス、よう素の多くは半減期が短いため、(2-14) 及び (2-15) 式は数時間から数日で定常となる。即ち、

$$\frac{dN_n}{dt} = \frac{dI_n}{dt} = 0 \quad (2-16)$$

従って、

$$N_n = \frac{R_n}{\lambda_n} \quad (2-17)$$

$$I_n = \frac{B_n}{\lambda_n} \quad (2-18)$$

となり、(2-13) 式は、

$$F_n = \frac{R_n}{B_n} \quad (2-19)$$

と書ける。従って、特に半減期の長い特別な核種を除き、希ガス、よう素の放出割合は、生成速度と放出速度の比である ( $R/B$ ) 値として表わすことができる。

一般に、数多くある被覆燃料粒子からなる燃料の ( $R/B$ ) 値は、

$$(R/B) = \phi (R/B)_f + (1 - \phi) (R/B)_i \quad (2-20)$$

で表わされる。ここで  $\phi$  は、被覆燃料粒子の破損率であり、希ガス及びよう素 F P の放出の障壁となる第2～第4被覆層が貫通破損している被覆燃料粒子の個数の、全被覆燃料粒子の個数に対する比率である。又、一般には、燃料コンパクトのマトリックス中や最外被覆層に存在する汚染ウラン量の全ウラン量に対する比率（汚染ウラン率）も被覆燃料粒子の破損率の中に含めて考える。 $(R/B)_f$ 、 $(R/B)_i$  はそれぞれ、破損した被覆燃料粒子の、健全な被覆燃料粒子の ( $R/B$ ) 値である。

H T T R の条件においては、 $(R/B)_i$  は、 $(R/B)_f$  に比較して  $10^{-5}$  以上小さいため、一般には、

$$(R/B) \approx \phi (R/B)_f \quad (2-21)$$

と表わすことができる。

$(R/B)_f$  は、約  $1,000^{\circ}\text{C}$  以上の高温では、燃料核中の F P 核種の拡散によって支配され、燃料温度に対して 1 次のアレニウス型の式で表わされる。J M T R のガススイープ照射試験に

よって得られた<sup>88</sup>Krの $(R/B)_f$ をFig. 2.3に示す。

H T T Rの設計評価としては、被ばく評価及び遮へい設計評価としては、実験データを保守的に評価して、次の式を用いている。

$$(R/B)_{f, \text{kr-88}} = 2.70 \times 10^3 \exp \left( -\frac{17750}{T} \right) + 2.24 \times 10^{-2} \quad (2-22)$$

又、実験データを最小自乗法で処理した最適評価式は、

$$(R/B)_{f, \text{kr-88}} = 1.56 \times 10^3 \exp \left( -\frac{17750}{T} \right) + 1.29 \times 10^{-2} \quad (2-23)$$

となる。<sup>(12)</sup>ここで、Tは燃料温度(K)である。

H T T RのF P放出評価においては、先行親核種の影響が小さく、測定精度の良い<sup>88</sup>Krの $(R/B)_f$ を基準として、その他の希ガス及びよう素核種の $(R/B)_f$ を以下の様に算出している。<sup>(11)</sup>

<sup>88</sup>Kr以外の希ガス核種の $(R/B)$ 値は、基本的には各核種の半減期の $\left(-\frac{1}{2}\right)$ 乗に比例するが、<sup>(13)</sup>先行核の影響を補正して、以下に示すモデルを用いて<sup>88</sup>Krの $(R/B)_f$ 値から評価する。

Krについて

$$\frac{(R/B)_{f, \text{kr}}}{(R/B)_{f, \text{kr-88}}} = K \sqrt{\frac{\lambda_{\text{kr-88}}}{\lambda_2}} \quad (2-24)$$

Xeについて

$$\frac{(R/B)_{xe}}{(R/B)_{f, \text{kr-88}}} = K \sqrt{\frac{2\lambda_{\text{kr-88}}}{\lambda_2}} \quad (2-25)$$

ここで、 $\lambda_{\text{kr-88}}$ :<sup>88</sup>Krの崩壊定数 ( $s^{-1}$ )

$\lambda_2$ :当該核種の崩壊定数 ( $s^{-1}$ )

である。Kは以下の式で与えられる。

$$K = \frac{x^3 - 1}{1.209(x^2 - 1)} \quad (2-26)$$

$$\chi = \sqrt{\alpha \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad (2-27)$$

ここで、 $\alpha$ :定数(Xeの場合は1、Krの場合は200)

$\lambda_1$ :当該核種の崩壊定数 ( $s^{-1}$ )

である。

但し、 $^{135}\text{Xe}$ については、吸収による消滅を考慮した実効的な崩壊定数  $\lambda_2^*$  を用いる。

$$\lambda_2^* = \lambda_2 + \sigma \phi_{th} \quad (2-28)$$

ここで、 $\sigma$ ：中性子吸收断面積 ( $\text{cm}^2$ )  
 $\phi_{th}$ ：熱中性子束 ( $\text{cm}^{-2}, \text{s}^{-1}$ )

である。

$^{133}\text{I}$  及び  $^{135}\text{I}$  の  $(R/B)$  値は、燃料核中の拡散係数が  $\text{Xe}$  と同じであることから、同じ質量数の  $\text{Xe}$  の  $(R/B)$  に対する比として以下の式で表わす。

$$\frac{(R/B)_I}{(R/B)_{xe}} = \frac{x(x^2 - 1)}{x^3 - 1} \quad (2-29)$$

$x$  は以下の式で与えられる。

$$x = \sqrt{\frac{\lambda_{xe}}{\lambda_I}} \quad (2-30)$$

ここで、 $\lambda_{xe}$ ： $\text{Xe}$  の崩壊定数 ( $^{135}\text{Xe}$  については (2-28) 式) ( $\text{s}^{-1}$ )  
 $\lambda_I$ ： $I$  の崩壊定数 ( $\text{s}^{-1}$ )

である。

他の  $I$  同位体の  $(R/B)$  値については、以下の式で計算する。<sup>(14)</sup>

$$\frac{(R/B)_I}{(R/B)_{I-133}} = \sqrt{\frac{\lambda_{I-133}}{\lambda_I}} \quad (2-31)$$

HTTR の設計では、各核種について  $(R/B)$  値を各計算点毎に求め、以下の式を用いて炉心平均の  $(R/B)$  値を計算する。

$$\overline{(R/B)_n} = \frac{\sum_j^n (R/B)_{n,j} \times P_j}{\sum_j^n P_j} \quad (2-32)$$

ここで、 $\overline{(R/B)_n}$ ：核種  $n$  の炉心平均の  $(R/B)$  値

$(R/B)_{n,j}$ ：核種  $n$  の、計算点  $j$  における  $(R/B)$  値

$P_j$ ：計算点  $j$  における出力

$J$ ：計算点の総数

である。

HTTR の設計においては、評価点が多いため、COPEDE コードを用いて計算を行っている。設計における計算の流れを Fig. 2.4 に示す。COPEDE は、CITATION で得られた出力分布<sup>(15)</sup> と TEMDIM で得られた温度分布を用いて、各評価点における被覆層の破損率及び希ガス、よう素の放出率等を計算する。

COPEDE の計算の流れを Fig. 2.5 に示す。

解析の対象となる典型的な炉心は、Fig. 2.6 に示す様な 6 角ブロックを 6 分割した 3 角メッシュを基本単位としている。この最小メッシュには数個の燃料コンパクトが含まれる。コードでは、この燃料コンパクトを対象として計算を行う。軸方向には燃料ブロックを 5 段積み重ねており、各段それぞれ 4 等分割したメッシュが最小単位となる。径・軸各メッシュ点は、温度分布計算コード TEMDIM における計算点に 1 対 1 に対応するようになっている。

運転期間（燃焼日数）の設定は、通常は核熱計算の評価日数に一致するように決めている。

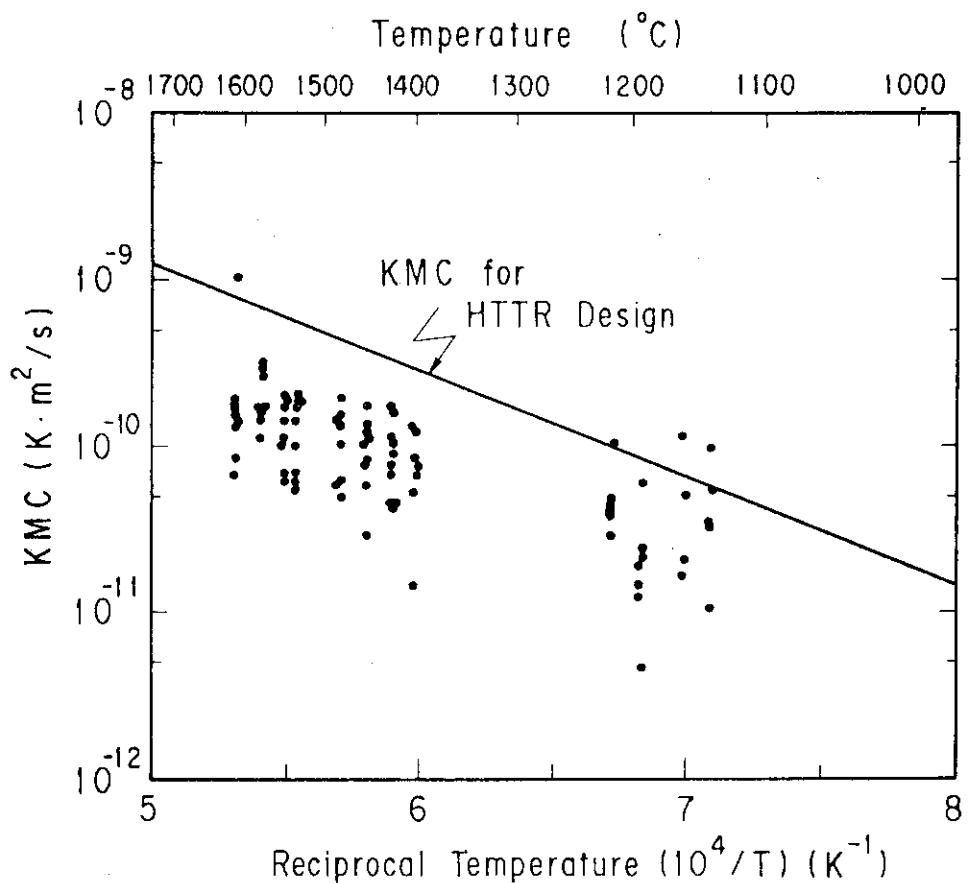


Fig. 2.1 Kernel Migration Coefficient Data

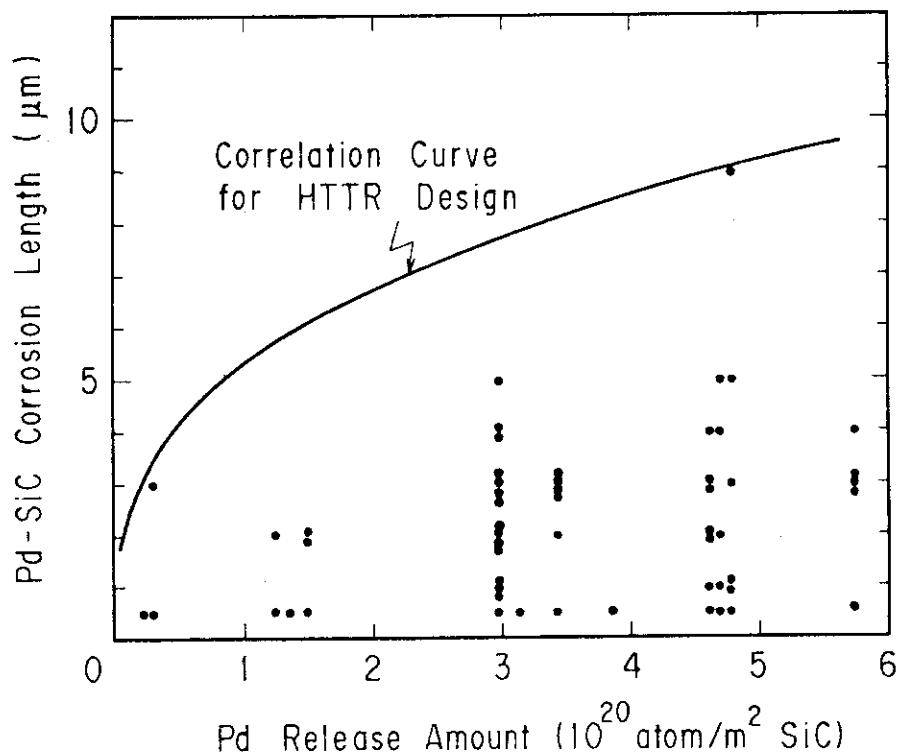
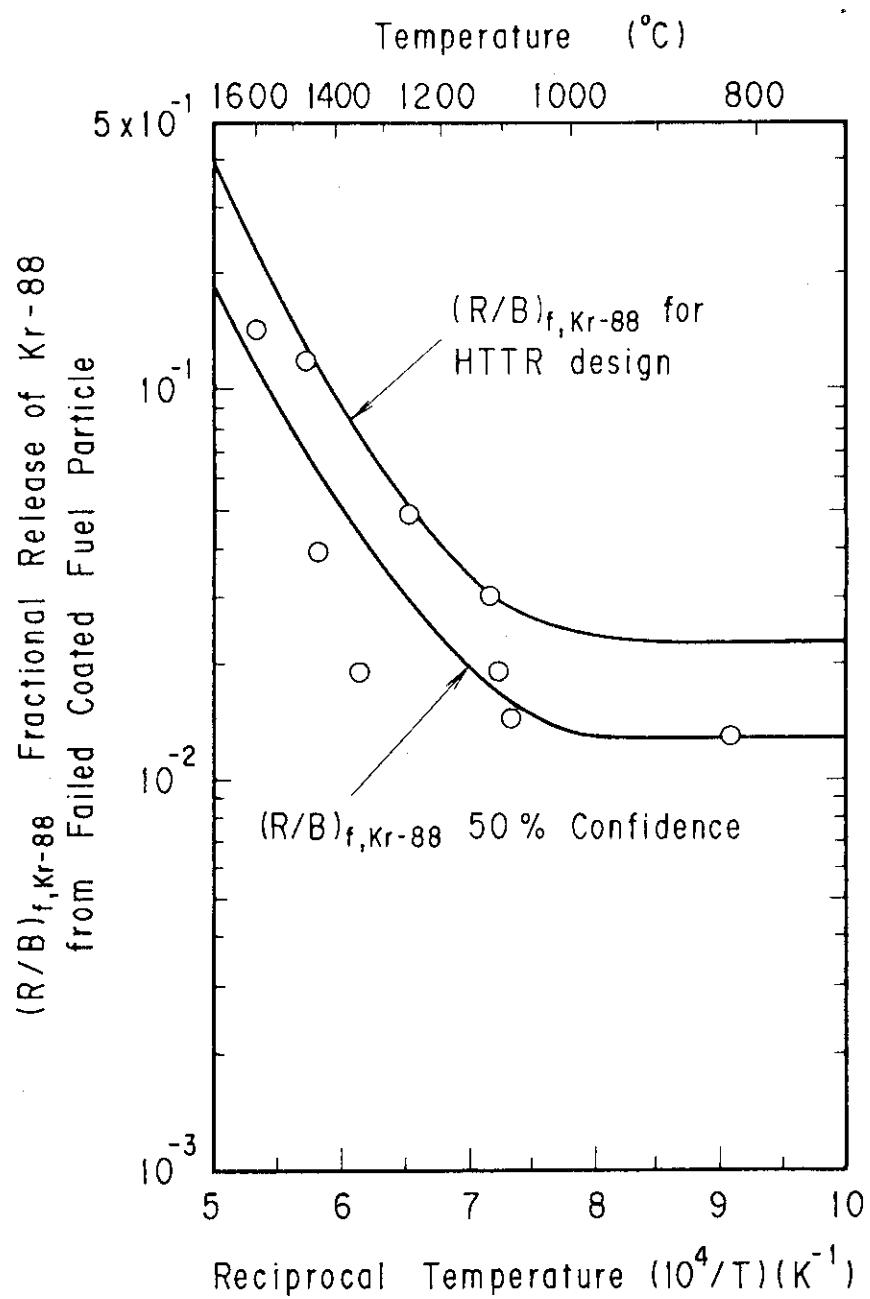


Fig. 2.2 Pd-SiC Corrosion Length Data

Fig. 2.3 (R/B) Value of  $^{88}\text{Kr}$

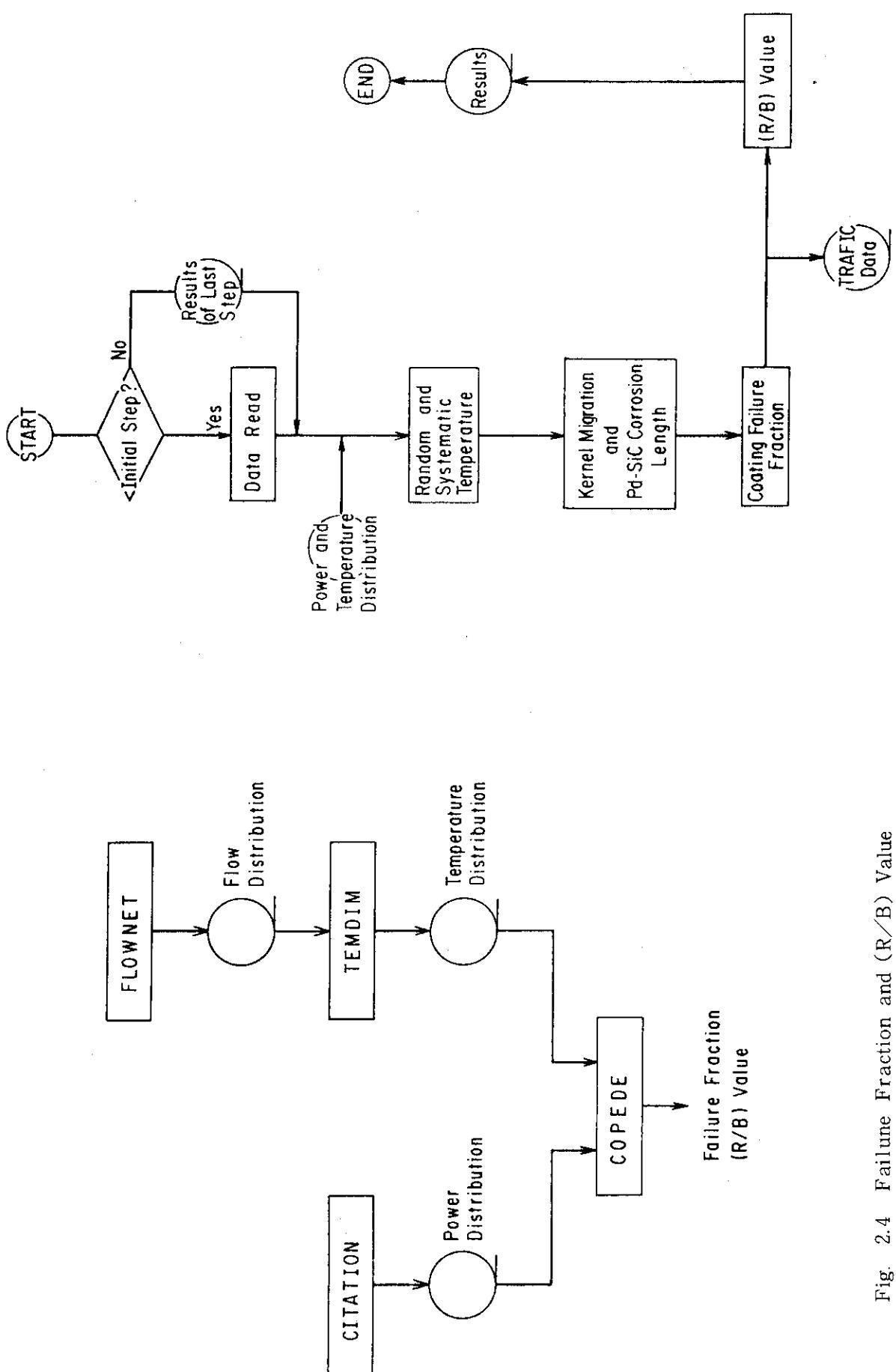


Fig. 2.4 Failure Fraction and (R/B) Value  
Calculation System

Fig. 2.5 Flow of COPEDE Code

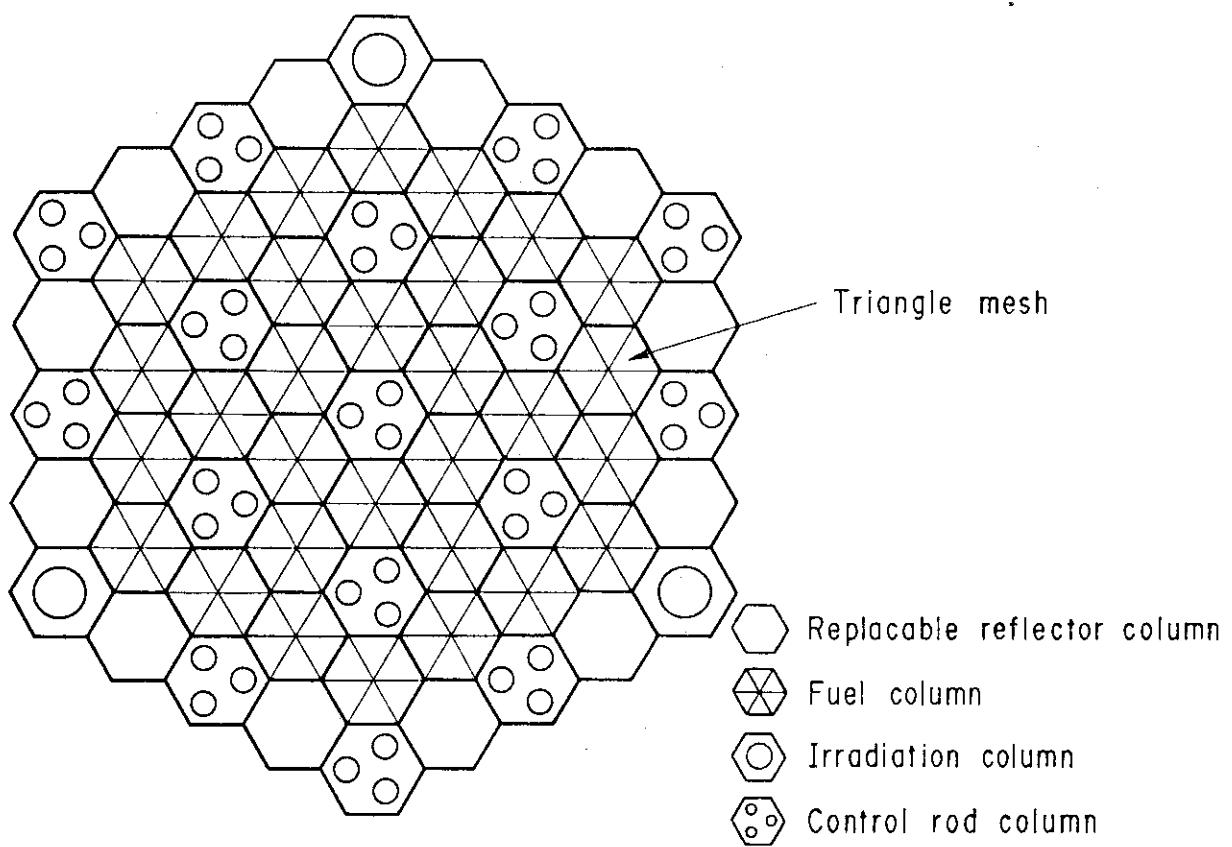


Fig. 2.6 Cross Section of HTTR Core

### 3. 実験との比較

#### 3.1 第5次OGL-1燃料体照射試験結果及び計算条件

H T T R における F P 放出量の評価手法の妥当性を確認するために、第5次OGL-1燃料体照射試験を対象として、希ガス、よう素の放出率を評価し、実測値との比較を行った。その結果を以下に示す。第5次OGL-1燃料体照射試験は、照射後試験が完了した燃料体の中で最も照射期間が長く（約142日）、最高燃焼度は約27GWD/tである。（H T T R の平均燃焼度は約24GWD/t、最高燃焼度は約33GWD/t）。又、燃料最高温度は、約1,360°Cである<sup>(17)</sup>（H T T R のノミナル燃料最高温度は約1,300°C）。

燃料体からの希ガス（Kr, Xe）の（R/B）値は、運転中の1次ヘリウムサンプリングにより測定される。第5次OGL-1燃料体照射試験では、以下の9核種について（R/B）値が得られている。

Kr : <sup>85m</sup>Kr, <sup>87</sup>Kr, <sup>88</sup>Kr, <sup>89</sup>Kr

Xe : <sup>133</sup>Xe, <sup>135m</sup>Xe, <sup>135</sup>Xe, <sup>137</sup>Xe, <sup>138</sup>Xe

これらの核種の（R/B）値の測定値を照射時間の関数としてFig. 3.1 及びFig. 3.2 に示す。<sup>(17)</sup>

燃料体から放出されたよう素は、OGL-1の一次系配管にはほとんど全て沈着するため、沈着したよう素の量が燃料体から放出されたよう素の量とみなすことができる。<sup>(19)</sup> <sup>131</sup>I の各サイクル終了時における総沈着量は、非破壊法によるγ線測定により求められている。<sup>(20)</sup>

OGL-1の1サイクルの運転期間は平均約20日で、またその間に停止期間もあり、<sup>131</sup>I の沈着量は定常となっていないため、測定された沈着量に対して、各サイクル末期の沈着量と定常（飽和）状態の沈着量の比として定義される飽和係数を用いて補正を行う必要がある。飽和係数は、OGL-1の各サイクル途中の中間停止も考慮して計算されている。Table 3.1 に示すよう素の量は、飽和係数を用いて補正を行ったものである。

計算に使用した核種毎の崩壊定数をTable 3.2 に示す。

第5次OGL-1燃料体は3本の燃料棒から構成されており、各燃料棒には20個のコンパクトが収められている。形状諸元をTable 3.3 に示す。

計算に使用した出力分布及び燃料温度分布を照射サイクル毎に付録Aに示す。OGL-1燃料体は、中性子束分布が急激に変化する位置にあるため、燃料棒内部の発熱分布が径方向で大きく異なる。このことによる燃料コンパクト内の径方向の温度変化幅を考慮して、燃料コンパクトの内面及び外表面温度を求めている。計算では、コンパクトの径方向メッシュを9点としている。各メッシュ点の温度は、付録Aに示すコンパクト内／外表面温度から（3-1）式を用いて内挿した。<sup>(23)</sup>

$$T(r) = T_i + \frac{\left(\frac{r}{r_i}\right)^2 - 2\ell \ln\left(\frac{r}{r_i}\right) - 1}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 2\ell \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) - 1} (T_i - T_o) \quad (3-1)$$

ここで, $T(r)$ : コンパクト内の径方向位置 $r$ における温度	(°C)
$T_i$ : コンパクト内面温度	(°C)
$T_o$ : コンパクト外面温度	(°C)
$r_i$ : コンパクト内半径	(cm)
$r_o$ : コンパクト外半径	(cm)
$r$ : 半径 ( $r_i \leq r \leq r_o$ )	(cm)

である。

第5次OGL-1燃料体の照射前試験で破壊検査により測定された露出ウラン率は,  $1.9 \times 10^{-3}$  <sup>(17)(24)</sup>である。照射中の追加破損は, 種々の照射後試験結果から生じていないと結論されている。<sup>(17)</sup>本計算においても, 照射による被覆層の破損は生じなかった。

なお, 照射後の酸浸出率測定結果によれば, 露出ウラン率には各コンパクトでばらつきはあるものの, 空間的な相関は特に見られなかった。従って, 被覆層の破損率は, 全コンパクトにわたって一定値として, 平均値を使用した。

### 3.2 計算結果

第5次OGL-1燃料体照射試験で測定から得られた( $R/B$ )値と, 2章に示した解析モデルを用いて計算した( $R/B$ )値の比較を核種毎にFig. 3.3からFig. 3.12に示す。図中の点は実測値に基づく( $R/B$ )値, 実線は,  $^{88}\text{Kr}$ の( $R/B$ )<sub>f</sub>の最適評価式(2-22)式に基づいた計算による( $R/B$ )値である。

測定値には, 照射開始直後200~300時間までに( $R/B$ )値が減少する傾向が認められるが, これについてはUO<sub>2</sub>核の焼結の効果など, いくつかの原因が考えられている。前節で述べた様に, 第5次OGL-1燃料体照射試験では, 照射に伴う被覆燃料粒子の追加破損は生じていないことから, 照射開始直後の( $R/B$ )値の減少後の測定値の変動は, 基本的に燃料温度の変動に対応するものである。計算値は, この変動の傾向を再現している。

Fig. 3.13に, 照射開始直後に測定された( $R/B$ )値と, (2-23)式に基づいて計算した( $R/B$ )値の比較を示す。但し, 比較的半減期の長い $^{131}\text{I}$  (8.06日)と $^{133}\text{Xe}$  (5.29日)は, JMT-Rの連続照射期間(半サイクル約10日)では, その放出が平衡に達していないため,  $^{131}\text{I}$ について15%,  $^{133}\text{Xe}$ について10%の非平衡補正を行った結果である。非平衡補正の方法を付録Bに示す。

基準としている $^{88}\text{Kr}$ の( $R/B$ )の計算値は, 測定値の約1.5倍となっている。この原因としては, 露出ウラン率の評価誤差, 冷却材圧力の影響(ガススイープ; 1気圧, OGL-1; 30気圧)等が考えられる。

又, 半減期依存性に基づいたモデルによる各核種の( $R/B$ )の計算値は, 半減期の比較的長い $^{131}\text{I}$ 及び $^{133}\text{Xe}$ が大き目になっている。これは, 定常の( $R/B$ )の式<sup>(13)</sup>

$$(R/B) = 3 \sqrt{\frac{D'}{\lambda}} \left( \coth \sqrt{\frac{\lambda}{D'}} - \sqrt{\frac{D'}{\lambda}} \right) \quad (3-2)$$

を、 $(D/\lambda)$  が十分小さいものとして、

$$(R/B) \cong 3 \sqrt{\frac{D'}{\lambda}} \quad (3-3)$$

と近似し、XeとIの相関式(2-25), (2-29)を作成していることに起因すると考えられる。<sup>(11)(26)</sup>

ここで、 $D'$ は換元拡散係数( $s^{-1}$ )である。

即ち、 $^{133}Xe$ 及び $^{131}I$ の様に比較的半減期の長い( $\lambda$ 小)核種については、燃料温度が高くなる( $D'$ 大)と、(3-3)式を用いて評価した( $R/B$ )値は過大評価となる。その他の核種の( $R/B$ )値は、測定値と良く合っており、評価方法は妥当であると言える。

Fig. 3.1.4 に、( $R/B$ )の測定値と、HTTRの被ばく評価及び遮へい設計に使用している $^{88}Kr$ の( $R/B_f$ )の評価式((2-22)式)に基づいた計算値の比較図を示す。図中の巾は、それぞれの核種の( $R/B$ )値の照射期間中の変動巾である。 $^{88}Kr$ の計算値は、測定値の2~3倍となる。同図より、全ての核種について計算値が測定を上回り、HTTRの被ばく評価及び遮へい設計に使用している評価方法が十分保守的であることが確認できた。

Table 3.1 Released Activity of  $^{131}\text{I}$   
from the 5th OGL - 1 Fuel

JMTR Cycle	Released Activity of $^{131}\text{I}$ (mCi)
5 2	5 2.2
5 3	3 7.9
5 4	5 6.3
5 5	2 4.3
5 6	3 1.8
5 7	2 4.8
5 8	3 3.4

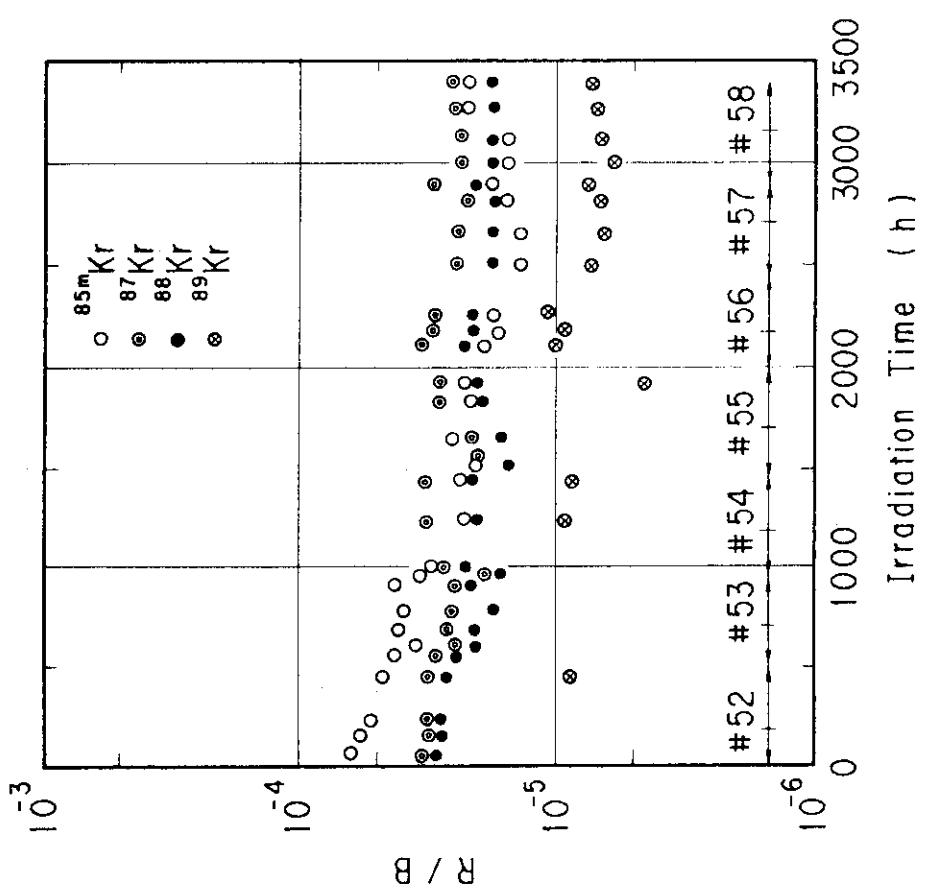
Table 3.2 Decay Constants for  
(R/B) calculation

Nuclide	Decay Constant ( $\text{s}^{-1}$ )	Parent Nuclide	Decay Constant of Parent Nuclide ( $\text{s}^{-1}$ )
Kr- 85m	$4.30 \times 10^{-5}$	Br - 85	$4.03 \times 10^{-3}$
Kr- 87	$1.51 \times 10^{-4}$	Br - 87	$1.24 \times 10^{-2}$
Kr- 88	$6.88 \times 10^{-5}$	—	—
Kr- 89	$3.63 \times 10^{-3}$	Br - 89	$1.58 \times 10^{-1}$
Xe-133	$1.52 \times 10^{-6}$	I -133	$9.26 \times 10^{-6}$
Xe-135m	$7.38 \times 10^{-4}$	I -135	$2.91 \times 10^{-5}$
Xe-135	$1.02 \times 10^{-4}^*$	I -135	$2.91 \times 10^{-5}$
Xe-137	$3.02 \times 10^{-3}$	I -137	$2.83 \times 10^{-2}$
Xe-138	$8.153 \times 10^{-4}$	I -138	$1.80 \times 10^{-1}$
I -131	$9.95 \times 10^{-7}$	—	—

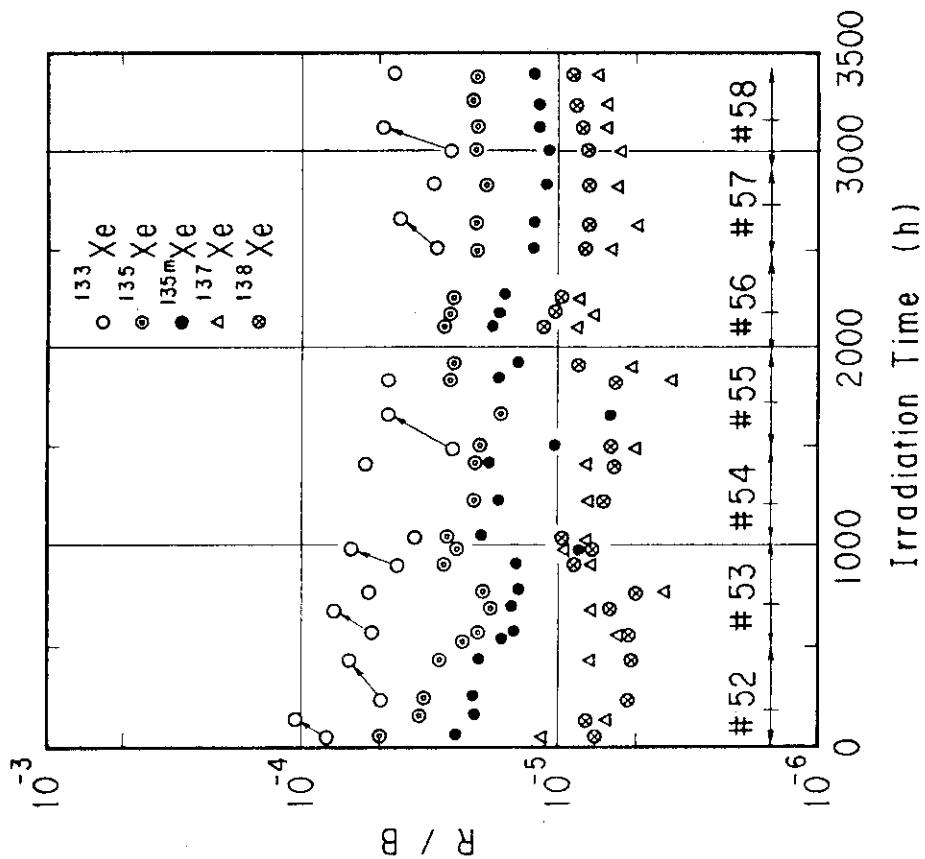
$$\begin{aligned} * & \lambda_{\text{Xe-135}} + \sigma_a \phi \\ & = 2.12 \times 10^{-5} + 2.08 \times 10^{18} \times 3.9 \times 10^{13} \end{aligned}$$

Table 3.3 Design Summary of 5th OGL-1 Fuel

Fuel compact	Inner diameter (cm)	0.80
	Outer diameter (cm)	2.40
	Length (cm)	3.60
Graphite sleeve	Inner diameter (cm)	2.42
	Outer diameter (cm)	3.00
	Compact loading length (cm)	72.0
	No. of compact	20
Fuel assembly	No. of sleeves	3
Coated fuel particle	UO <sub>2</sub> kernel diameter ( $\mu\text{m}$ )	600
	Buffer layer thickness ( $\mu\text{m}$ )	60
	Inner PyC layer thickness ( $\mu\text{m}$ )	30
	SiC layer thickness ( $\mu\text{m}$ )	25
	Outer PyC layer thickness ( $\mu\text{m}$ )	45
	Total diameter ( $\mu\text{m}$ )	920
	U loading (g/compact)	9.0
	<sup>235</sup> U enrichment (w/o)	19.5



-21-



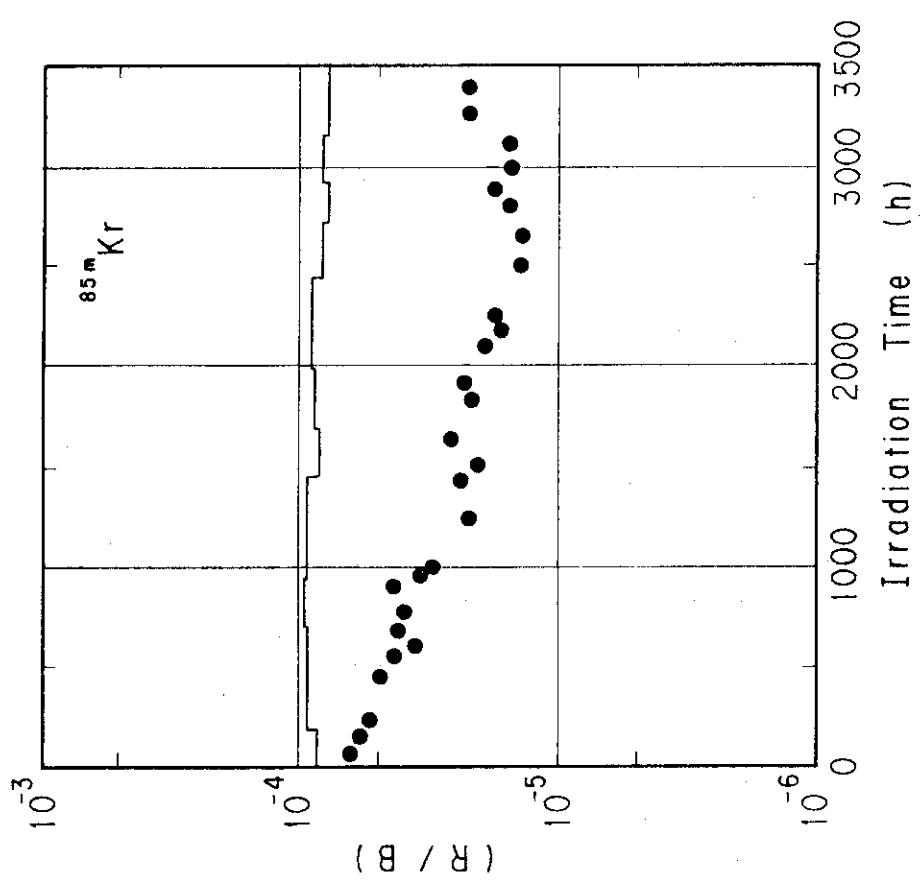


Fig. 3.3 Comparison Measured (●) and Calculated (—) (R/B) values (Kr-85m)

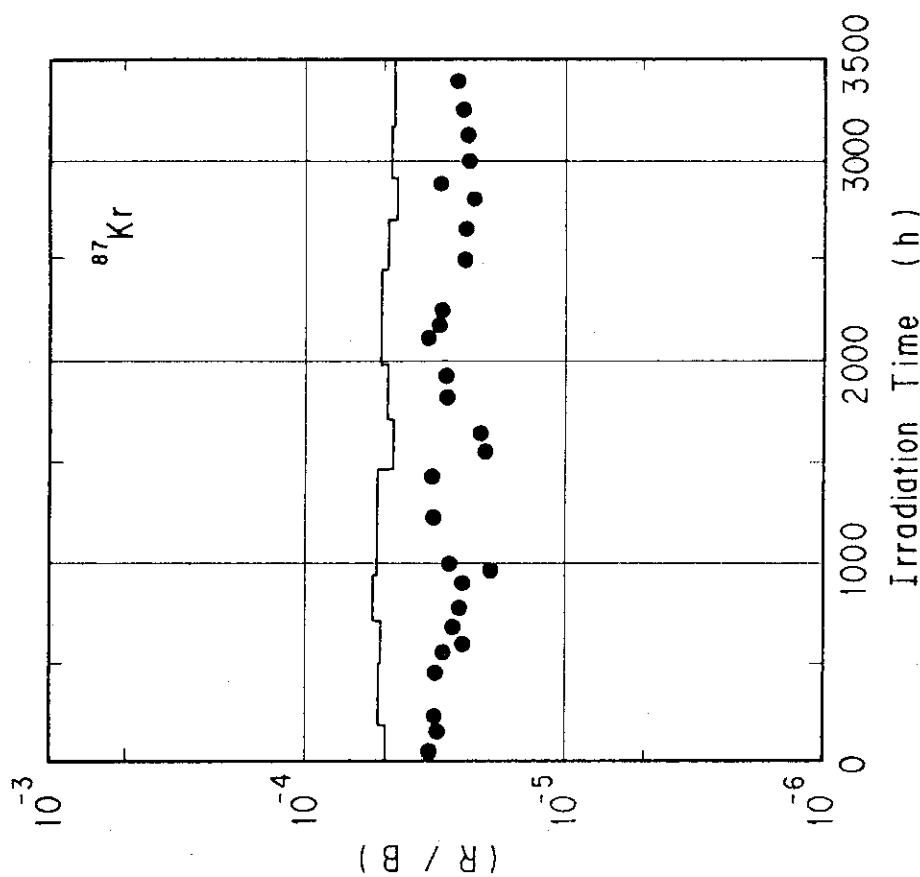


Fig. 3.4 Comparison Measured (●) and Calculated (—) (R/B) values (Kr-87)

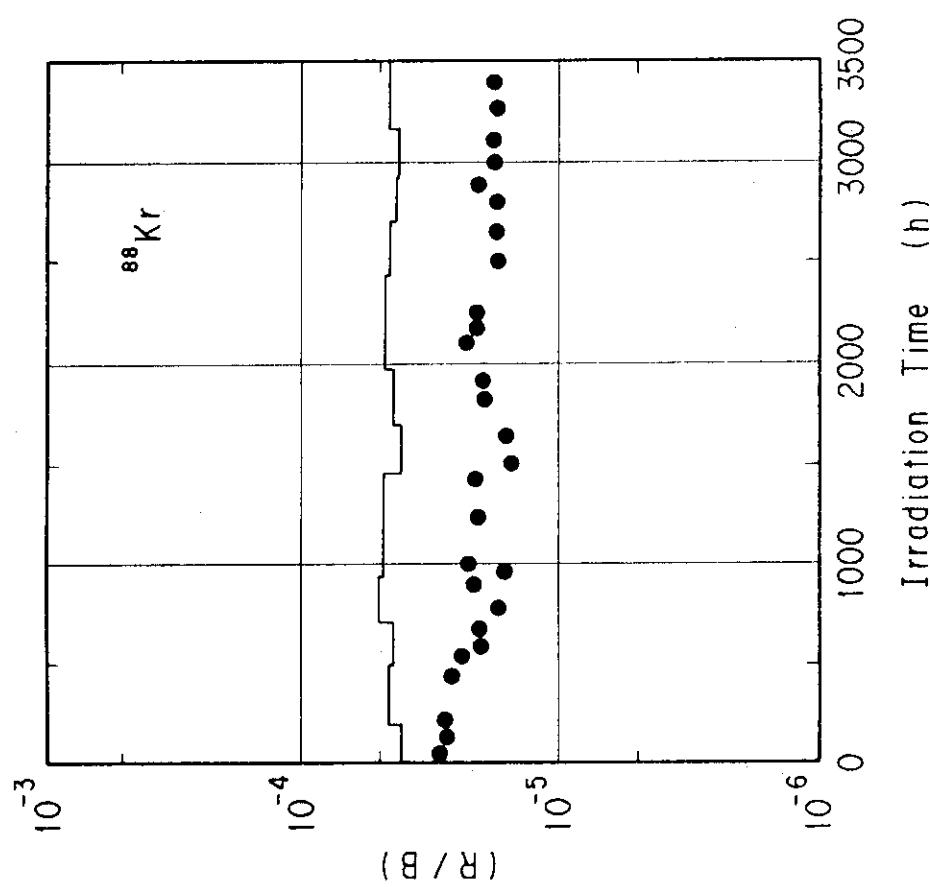


Fig. 3.5 Comparison Measured (●) and Calculated (-) (R/B) values (Kr-88)

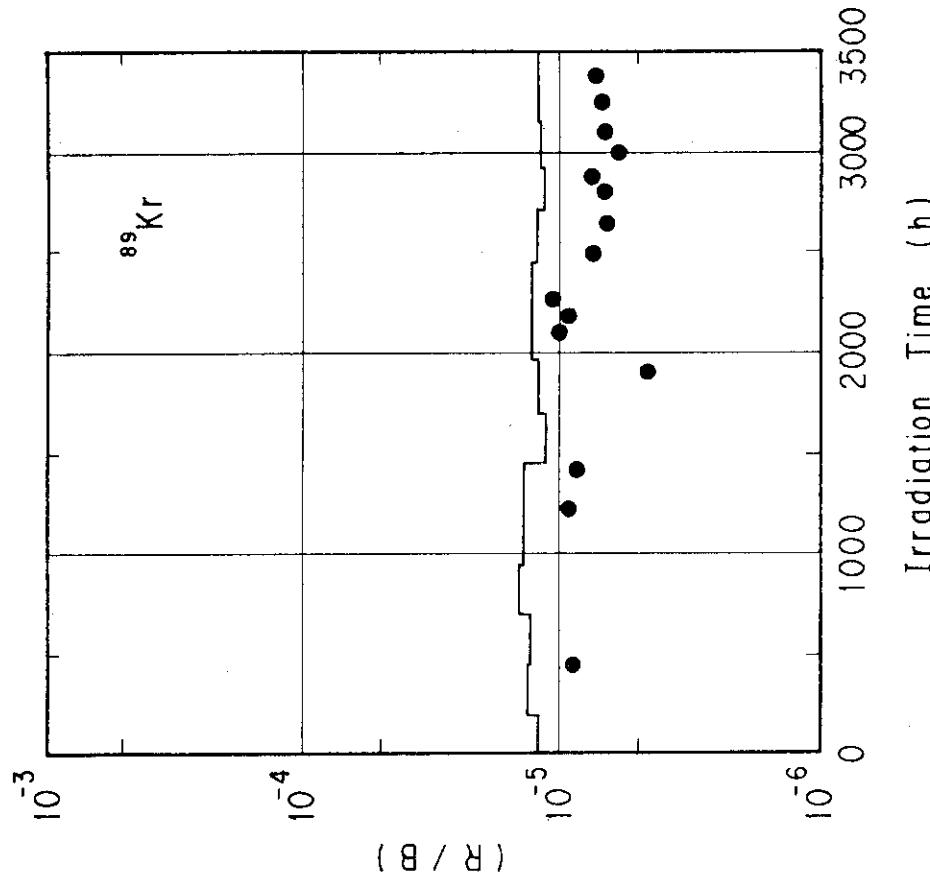


Fig. 3.6 Comparison Measured (●) and Calculated (-) (R/B) values (Kr-89)

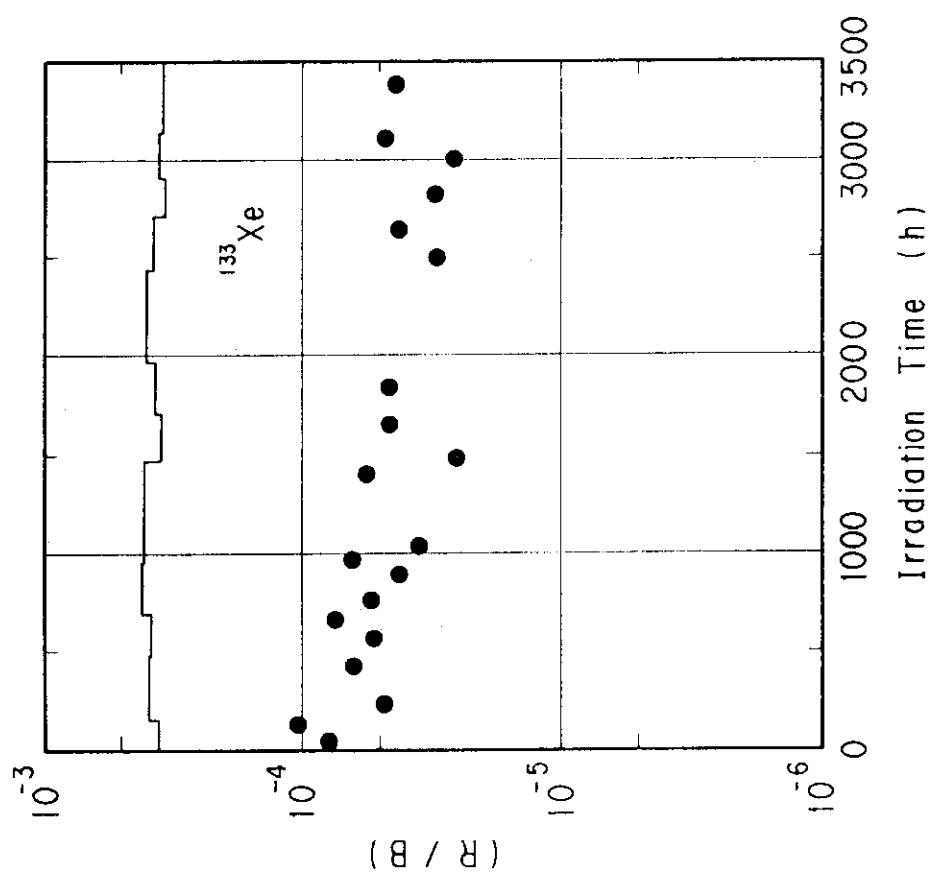


Fig. 3.7 Comparison Measured (●) and Calculated (- - -)  $(R/B)$  values ( $Xe-133$ )

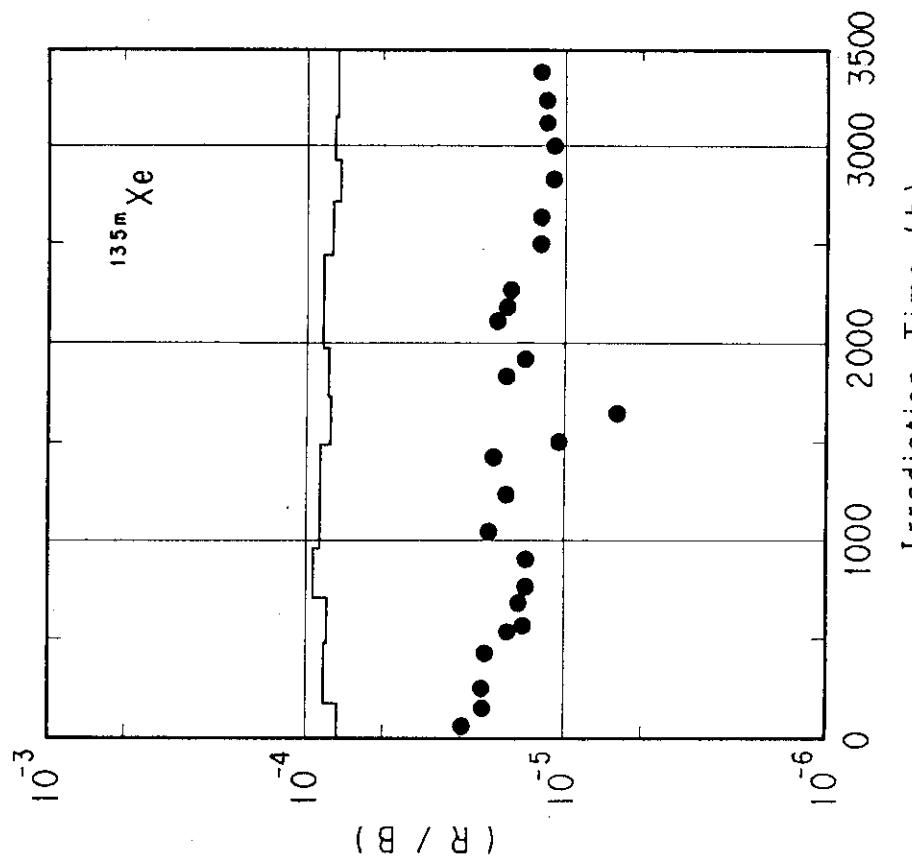


Fig. 3.8 Comparison Measured (●) and Calculated (- - -)  $(R/B)$  values ( $Xe-135m$ )

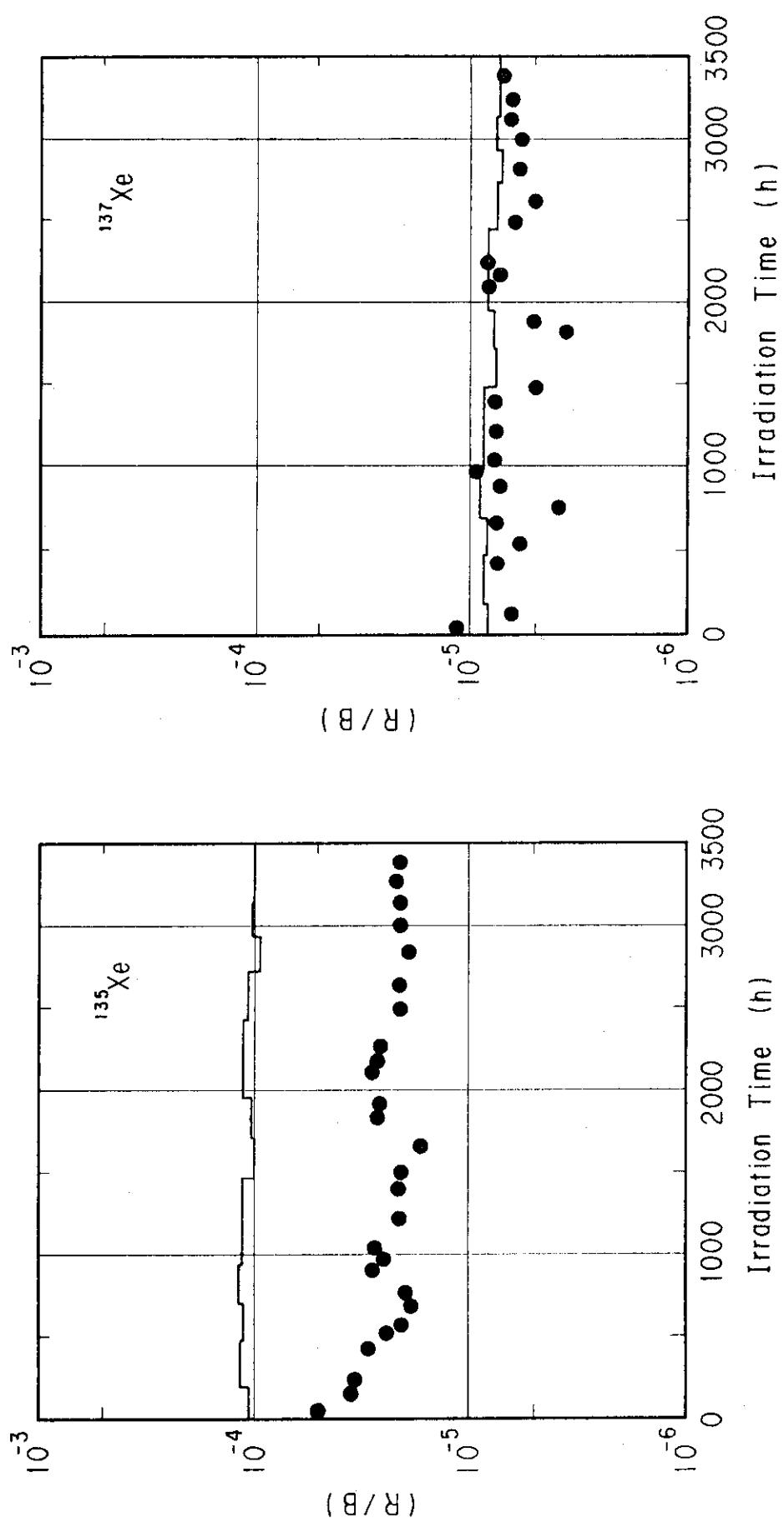


Fig. 3.9 Comparison Measured (●) and Calculated (—)  $(R/B)$  values ( $\text{Xe-135}$ )

Fig. 3.10 Comparison Measured (●) and Calculated (—)  $(R/B)$  values ( $\text{Xe-137}$ )

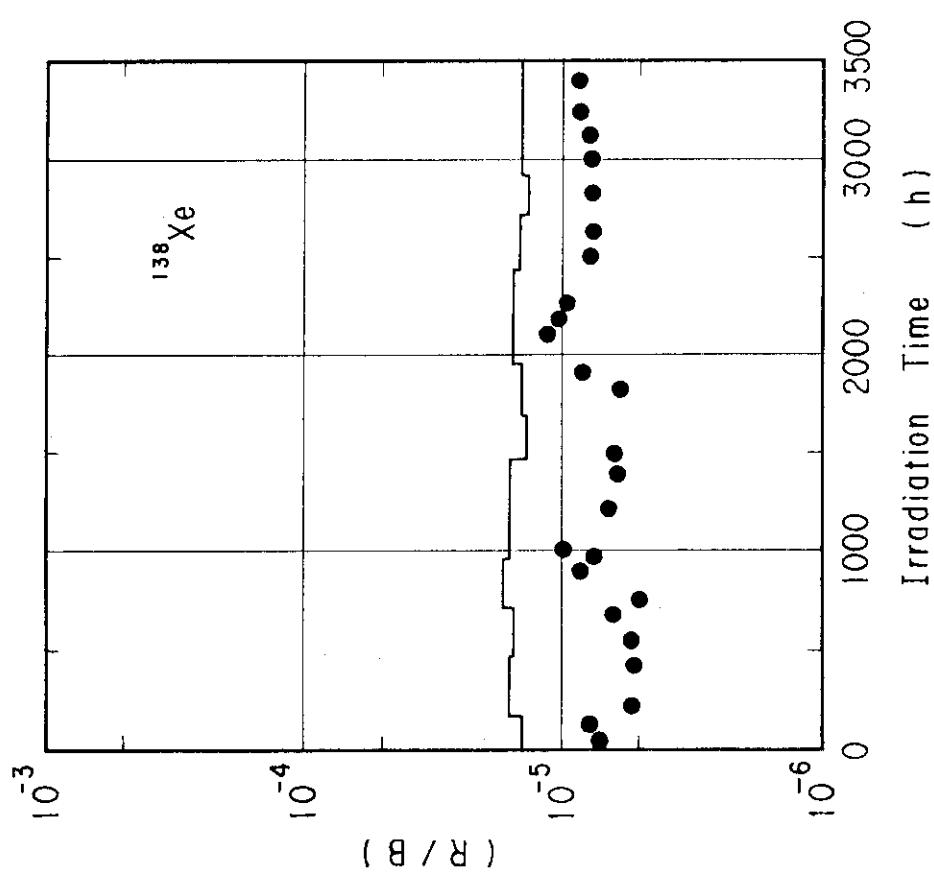


Fig. 3.11 Comparison Measured (●) and Calculated (—) (R/B) values (Xe-138)

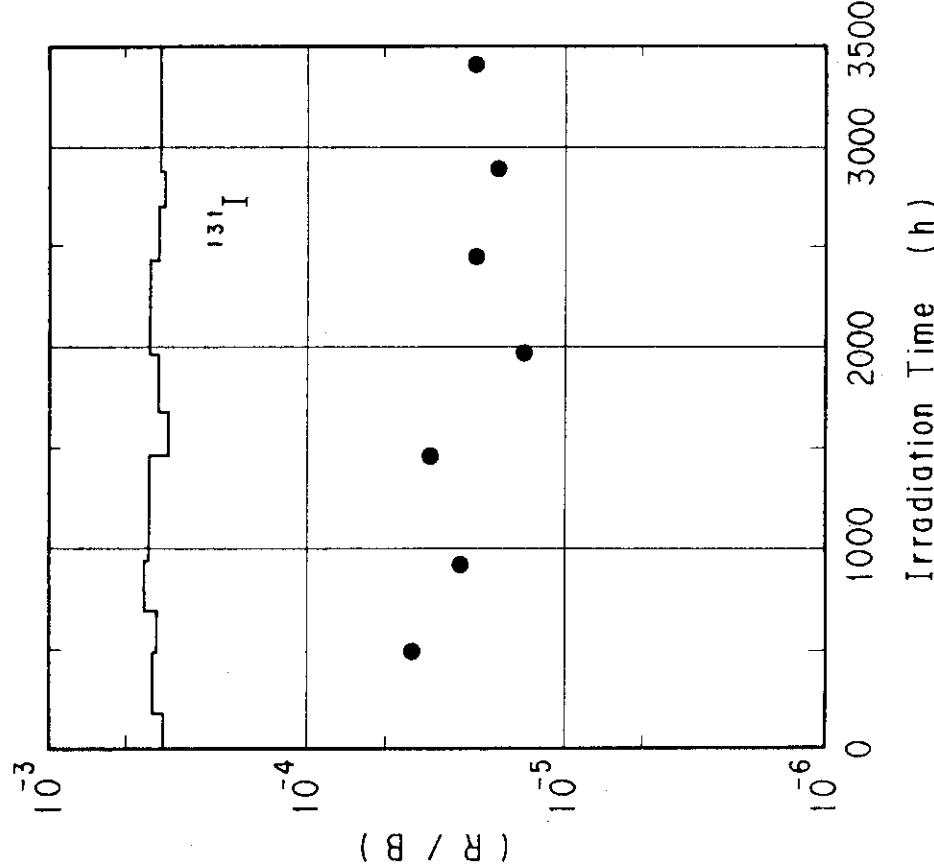


Fig. 3.12 Comparison Measured (●) and Calculated (—) (R/B) values (I-131)

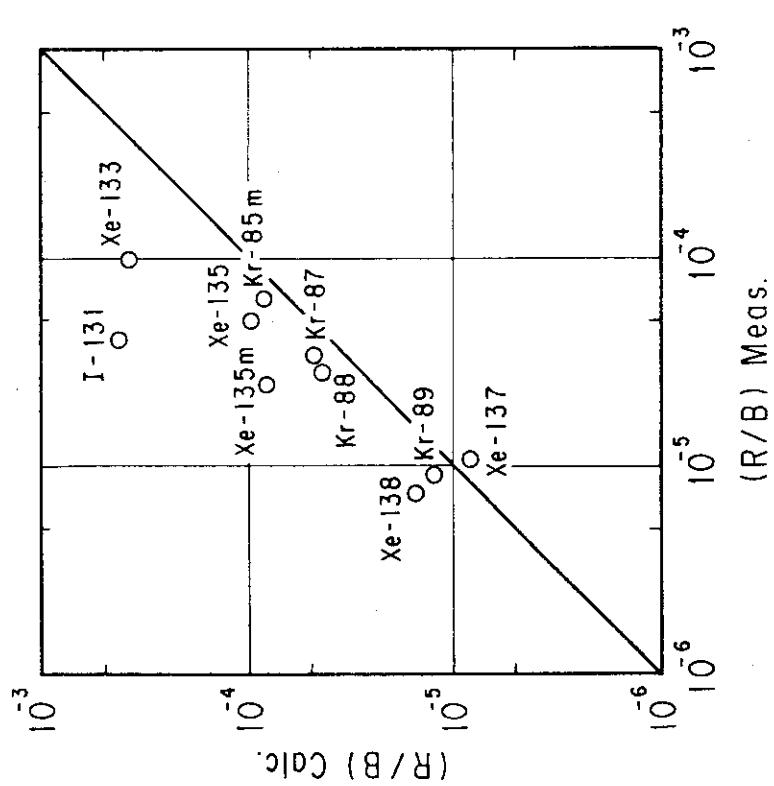


Fig. 3.13 Comparison of Measured and Calculated  
( $R/B$ ) Values (50 % confidence)  
(Kr, Xe, I)

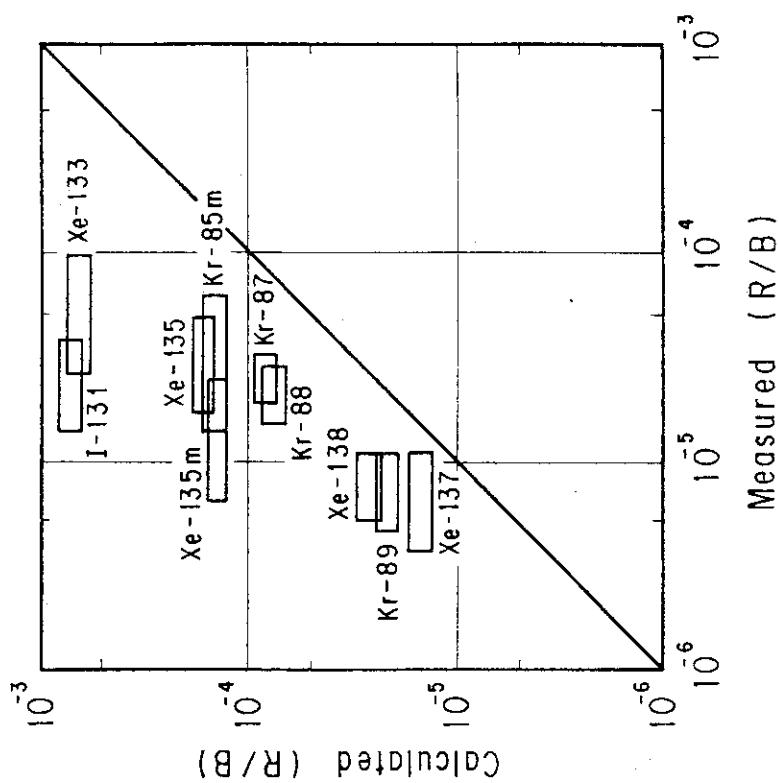


Fig. 3.14 Comparison of Measured and Calculated  
( $R/B$ ) Values (HTTR Design)  
(Kr, Xe, I)

## 4. 結 論

H T T R における被覆燃料粒子の破損及び F P 放出率の評価方法に関し、解析モデル、評価式等をまとめた。

又、第 5 次 O G L - 1 燃料体照射試験について、(R/B) 値の比較計算を行い、以下のことを確認した。

- ① 最適評価式を用いた<sup>88</sup>Kr の (R/B) 計算値は、測定値の約 1.5 倍となる。
- ② 本解析モデルによる短半減期核種の (R/B) 値は、測定値と良い一致を示している。
- ③ H T T R の被ばく評価及び遮へい設計に用いている (R/B) 値の評価方法は、全ての核種について測定値を上回る結果を与え、適切な保守性を有している。

以上の結果より、本報で述べた希ガス・よう素の放出率の評価法は、H T T R の設計に十分適用できるといえる。

## 謝 辞

本報告の作成にあたり、種々の御助言をいただいた斎藤室長をはじめとする高温工学試験研究炉設計室の皆様に深謝いたします。又、燃料照射研究室の皆様、特に小川徹氏には放出率のデータベースについて、小林紀昭氏には第 5 次 O G L - 1 燃料体照射試験データについて貴重な教唆を頂いた。深く感謝いたします。

## 4. 結 論

H T T R における被覆燃料粒子の破損及び F P 放出率の評価方法に関し、解析モデル、評価式等をまとめた。

又、第5次 O G L - 1 燃料体照射試験について、(R/B) 値の比較計算を行い、以下のことを確認した。

- ① 最適評価式を用いた<sup>88</sup>Kr の (R/B) 計算値は、測定値の約 1.5 倍となる。
- ② 本解析モデルによる短半減期核種の (R/B) 値は、測定値と良い一致を示している。
- ③ H T T R の被ばく評価及び遮へい設計に用いている (R/B) 値の評価方法は、全ての核種について測定値を上回る結果を与える、適切な保守性を有している。

以上の結果より、本報で述べた希ガス・よう素の放出率の評価法は、H T T R の設計に十分適用できるといえる。

## 謝 辞

本報告の作成にあたり、種々の御助言をいただいた斎藤室長をはじめとする高温工学試験研究炉設計室の皆様に深謝いたします。又、燃料照射研究室の皆様、特に小川徹氏には放出率のデータベースについて、小林紀昭氏には第5次 O G L - 1 燃料体照射試験データについて貴重な教唆を頂いた。深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

1. 安野 武彦, 他, 日本原子力学会誌, Vol. 24, No. 6 (1982)
2. H. Nickel, et. al., Nucl. Technol., Vol. 35 (1977)
3. M. W. Loffler, Nucl. Technol., Vol. 35 (1977)
4. O. M. Stansfield, et. al., Nuch. Technol., Vol. 25 (1975)
5. 山内 二郎, 他, 「電子計算機のための数値計算法Ⅲ」, 培風館
6. 難波 隆司, 他, JAERI-M 87-218, (1987)
7. 淢 和生, 他, 「照射済被覆燃料粒子におけるPdとSiC層の反応」, 日本原子力学会62年度秋の分科会(札幌)
8. T. Ogawa, et. al., High Temperature Science, Vol. 22 (1986)
9. A. H. Booth, et. al., AECL-692 (1958)
10. ANSI/ANS-5.4 (1982)
11. 小川 徹, 他, JAERI-M 86-146 (1986)
12. 燃料照射研究室, to be published.
13. S. D. Beck, BMI-1433 (1960)
14. M. H. Haire, et. al., GA-A 12946 (1974)
15. T. B. Fowler, ORNL-TM-2496 (1971)
16. 丸山 創, 他, JAERI-M 88-170 (1988)
17. 福田 幸朔, 他, JAERI-M 86-092 (1986)
18. 井川 勝市, 他, JAERI-M 83-012 (1983)
19. 露崎 典平, 他, 原研所内資料
20. 露崎 典平, 他, JAERI-M 88-225 (1988)
21. 小林 紀昭, 私信
22. 福田 幸朔, 他, JAERI-M 84-183 (1984)
23. M. M. El-Wakil, 「原子炉の熱工学」, 同文書院
24. 小林 紀昭, 私信
25. B. F. Myers, et. al., GA-A 13723 (1977)
26. 小川 徹, 私信

## 付録A 第5次OGL-1燃料体の出力、温度分布

計算に使用した第5次OGL-1燃料体の出力分布と温度分布をTable A.1～A.12に示す。時間点としては、基本的に各サイクルを前半、後半の2つに分けているが、前半と後半で温度変化が小さい第5・4、5・6サイクルは、前後半とも同一の出力及び温度分布を用いた。

これらの出力及び温度は、燃料照射研究室で評価したものである。<sup>(22)</sup>

Table A.1 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (52 cycle)

1/2

Compact No.	Linear heat rate (w/cm)	Rod No. 1		Rod No. 2		Rod No. 3			
		Compact Inside	Compact outside	Linear heat rate (w/cm)	Compact Inside	Compact outside	Linear heat rate (w/cm)		
1	222.6	923.8	899.2	300.4	1019.6	985.5	318.0	1031.8	995.5
2	250.1	965.6	937.6	337.5	1079.8	1040.9	357.7	1092.8	1051.4
3	273.7	1003.9	1004.6	369.3	1135.4	1092.1	391.4	1148.7	1102.7
4	302.9	1038.0	1004.6	395.3	1185.5	1138.5	418.9	1198.6	1148.7
5	307.6	1067.6	1032.3	415.1	1229.1	1179.2	439.9	1241.8	1188.7
6	317.4	1092.4	1055.6	428.3	125.6	1213.5	453.9	1277.7	1222.4
7	322.1	1111.9	1074.3	434.8	1294.4	1241.1	460.7	1305.9	1249.3
8	321.9	1125.9	1088.2	434.4	1315.0	1261.5	460.3	1326.0	1269.0
9	316.5	1134.3	1097.2	427.1	1327.1	1274.2	452.6	1337.7	1281.5
10	306.1	1136.9	1101.0	413.2	1330.3	1279.1	437.8	1341.1	1286.6
11	290.9	1133.8	1099.6	392.7	1324.9	1276.3	416.1	1335.9	1284.2
12	271.2	1125.0	1093.3	366.0	1310.7	1265.6	387.8	1322.3	1274.3
13	247.1	1110.5	1081.7	333.5	1288.1	1247.2	353.4	1300.4	1256.9
14	219.2	1090.4	1064.9	295.8	1257.3	1221.3	313.4	1270.4	1232.1
15	187.8	1064.9	1043.3	253.4	1218.7	1188.2	268.5	1232.7	1200.2
16	153.4	1034.3	1016.7	207.0	1173.1	1148.5	219.4	1187.5	1161.3
17	116.6	998.8	985.6	157.4	1121.0	1102.6	166.8	1135.5	1115.9
18	81.6	962.7	953.5	110.1	1068.5	1055.8	116.7	1082.6	1069.1
19	69.1	947.4	930.6	93.3	1046.5	1035.8	98.9	1060.3	1048.9
20	58.6	933.4	926.9	79.0	1026.2	1017.5	83.8	1040.0	1030.4

Table A.2 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (52 cycle)

2/2

Compact No.	Linear heat rate (w/cm)	Rod No. 1		Rod No. 2		Rod No. 3	
		Temperature (°C)		Temperature (°C)		Temperature (°C)	
		Compact inside	Compact outside	Compact inside	Compact outside	Compact inside	Compact outside
1	214.5	943.1	919.2	289.1	1035.9	1002.9	306.4
2	241.8	984.7	957.5	325.8	1095.8	1058.1	345.3
3	265.2	1023.0	992.8	357.4	1151.3	1109.3	378.8
4	284.4	1057.3	1024.7	383.4	1201.5	1155.8	406.2
5	299.2	1087.1	1052.5	403.2	1245.5	1196.7	427.3
6	309.2	1112.2	1076.2	416.8	1282.5	1231.5	441.7
7	314.4	1132.1	1095.3	423.7	1311.9	1259.7	449.0
8	314.6	1146.7	1109.7	424.0	1333.4	1280.8	449.3
9	309.9	1155.8	1119.2	417.6	1346.5	1294.5	442.5
10	300.2	1159.1	1123.6	404.6	1350.9	1300.4	428.8
11	285.8	1156.8	1123.1	385.2	1346.7	1298.6	408.2
12	267.0	1148.9	1117.5	359.8	1333.8	1289.1	381.3
13	243.9	1135.3	1106.7	328.7	1312.6	1271.9	348.3
14	216.9	1116.2	1090.9	202.4	1283.2	1247.4	309.8
15	186.6	1091.8	1070.1	251.4	1246.1	1215.6	266.4
16	153.3	1062.2	1044.5	206.5	1202.0	1177.2	218.9
17	117.5	1027.8	1014.4	158.4	1151.3	1132.6	167.9
18	81.0	990.2	981.0	109.2	1096.5	1083.8	115.7
19	68.6	974.8	967.1	92.5	1074.5	1063.8	98.0
20	58.1	960.9	954.3	78.4	1054.5	1045.5	83.0

Table A.3 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (53 cycle)

1/2

Compact No.	Rod No. 1			Rod No. 2			Rod No. 3		
	Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C) Compact inside	Compact outside	Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C) Compact inside	Compact outside	Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C) Compact insid	Compact outside
1	214.5	942.7	918.9	288.6	1034.6	1001.7	305.8	1046.3	1011.3
2	214.4	984.0	956.8	325.4	1094.0	1056.3	344.8	1106.5	1066.4
3	269.9	1021.8	991.7	357.0	1149.0	1107.0	378.3	1161.7	1117.0
4	284.2	1055.8	1023.2	383.0	1198.7	1153.0	405.9	1211.3	1162.7
5	299.0	1185.4	1050.8	103.0	1242.2	1193.5	427.1	1254.4	1202.6
6	309.1	1110.2	1074.2	416.6	1278.8	1228.0	441.5	1290.4	1236.3
7	314.4	1129.9	1093.1	423.7	1308.0	1255.8	449.0	1318.9	1263.5
8	314.6	1144.4	1107.4	424.1	1329.2	1276.7	449.4	1339.5	1283.7
9	310.0	1153.3	1116.8	417.7	1342.1	1290.2	442.7	1352.1	1296.9
10	300.4	1156.6	1121.1	404.8	1346.4	1295.9	429.0	1356.4	1302.8
11	286.1	1154.3	1120.5	385.5	1342.2	1294.2	408.6	1352.4	1301.4
12	267.2	1146.4	1114.9	360.2	1329.4	1284.7	381.7	1340.1	1292.6
13	244.2	1132.9	1104.2	329.1	1308.3	1267.7	348.8	1319.8	1276.6
14	217.3	1113.9	1088.5	292.9	1279.2	1243.4	310.4	1291.5	1253.4
15	187.0	1089.6	1067.8	252.0	1242.4	1211.8	267.0	1255.5	1223.0
16	153.7	1060.2	1042.5	207.2	1198.6	1173.8	219.5	1212.3	1185.8
17	118.0	1026.1	1012.6	159.1	1148.4	1129.6	168.6	1162.2	1142.2
18	81.2	988.3	979.1	109.4	1093.5	1080.8	115.9	1107.0	1093.4
19	68.8	973.2	965.5	92.7	1071.7	1060.9	98.2	1084.9	1073.5
20	53.3	959.4	952.8	78.5	1051.9	1042.9	83.2	1064.8	1055.2

1/2

Table A.4 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (53 cycle)

Compact No.	Linear heat rate (w/cm)	Rod No. 1		Rod No. 2		Rod No. 3			
		Temperature (°C) Compact inside	Compact outside	Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C) Compact inside	Compact outside	Linear heat rate (w/cm) Compact insid Compact outside		
1	218.5	955.7	931.3	294.5	1049.3	1015.6	312.1	1060.9	1025.1
2	246.6	997.7	969.8	332.4	1109.8	1071.1	352.2	1122.1	1081.0
3	270.8	1036.1	1005.2	365.0	1165.8	1122.7	386.8	1178.4	1132.5
4	290.7	1070.7	1037.2	391.9	1216.5	1169.5	415.3	1228.8	1178.9
5	306.1	1100.7	1065.1	412.6	1260.9	1210.9	437.2	1272.7	1219.4
6	316.6	1126.0	1089.0	426.8	1298.4	1246.0	452.3	1309.4	1253.7
7	322.2	1146.1	1108.2	434.3	1328.2	1274.4	460.2	1338.5	1281.3
8	322.6	1160.9	1122.8	434.9	1350.0	1295.8	460.8	1359.5	1301.9
9	318.0	1170.0	1132.3	428.6	1363.3	1309.7	454.2	1372.4	1315.4
10	308.3	1173.4	1136.8	415.6	1367.9	1315.8	440.4	1376.9	1321.5
11	293.8	1171.2	1136.3	396.1	1363.7	1314.1	419.7	1373.0	1320.3
12	274.7	1163.3	1130.8	370.3	1350.9	1304.6	392.4	1360.8	1311.7
13	251.2	1149.7	1120.1	338.6	1329.6	1287.5	358.8	1340.3	1295.6
14	223.8	1130.6	1104.3	301.6	1300.1	1262.9	319.7	1311.7	1272.2
15	192.8	1106.0	1083.5	259.9	1262.7	1231.0	275.4	1275.4	1241.7
16	158.8	1076.3	1058.0	214.1	1218.3	1192.5	226.9	1231.6	1204.2
17	122.3	1041.8	1027.8	164.9	1167.3	1147.7	174.7	1181.0	1160.1
18	83.9	1002.9	993.4	113.0	1110.5	1097.3	119.8	1123.9	1109.8
19	70.9	987.3	979.3	95.6	1088.0	1076.9	101.3	1101.2	1089.4
20	60.1	973.2	966.5	81.0	1067.8	1058.4	85.8	1080.7	1070.8

Table A.5 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (54 cycle)

Compact No.	Rod No. 1		Rod No. 2		Rod No. 3	
	Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C) Compact inside	Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C) Compact inside	Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C) Compact inside
1	243.5	927.5	900.5	328.3	1032.7	995.3
2	272.8	972.1	941.6	367.8	1097.2	1054.6
3	297.8	1012.9	979.2	401.5	1156.7	1109.5
4	318.1	1049.2	1012.8	428.9	1210.1	1158.8
5	333.4	1080.4	1042.0	449.6	1256.4	1201.9
6	343.4	1106.4	1066.5	463.1	1294.9	1238.2
7	348.0	1126.7	1086.0	469.3	1325.1	1267.1
8	347.2	1141.1	1100.4	468.1	1346.4	1288.2
9	340.8	1149.4	1109.3	459.6	1358.4	1301.0
10	329.1	1151.6	1112.8	443.8	1360.9	1305.4
11	312.2	1147.5	1110.8	421.0	1353.9	1301.3
12	290.4	1137.5	1103.4	391.5	1337.5	1288.8
13	246.0	1121.3	1090.4	355.9	1312.1	1268.1
14	233.4	1099.1	1071.9	314.7	1277.9	1239.4
15	199.1	1071.1	1048.1	268.5	1235.4	1202.9
16	161.7	1037.6	1019.1	218.1	1185.4	1159.4
17	121.8	999.1	985.3	164.2	1128.6	1109.3
18	86.6	962.6	952.9	116.8	1075.5	1062.0
19	73.4	946.3	938.1	99.0	1052.1	1040.7
20	62.2	931.4	924.5	83.9	1030.8	1021.2

Table A.6 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (55 cycle)

1/2

Compact No.	Linear heat rate (w/cm)	Rod No. 1		Rod No. 2		Rod No. 3	
		Temperature (°C)		Temperature (°C)		Temperature (°C)	
		Compact inside	Compact outside	Compact inside	Compact outside	Compact inside	Compact outside
1	246.7	892.5	865.4	332.6	996.8	959.4	352.5
2	275.6	935.7	905.1	371.6	1059.0	1016.4	393.8
3	300.1	975.0	941.4	404.7	1116.1	1069.0	428.7
4	319.9	1009.9	973.7	431.4	1167.1	1116.1	457.2
5	334.7	1039.7	1001.6	451.3	1211.0	1157.1	478.3
6	344.1	1064.3	1024.8	464.1	1247.3	1191.2	491.8
7	348.2	1083.3	1043.1	469.5	1275.3	1218.2	497.6
8	346.8	1096.5	1056.3	467.6	1294.6	1237.3	495.6
9	339.9	1103.7	1064.2	458.3	1304.8	1248.5	485.7
10	327.6	1104.8	1066.7	441.8	1305.7	1251.4	468.2
11	310.2	1099.8	1063.7	418.3	1297.3	1246.0	443.3
12	287.8	1088.9	1055.5	388.2	1279.9	1232.4	411.4
13	261.0	1071.9	1041.8	352.0	1253.0	1210.7	373.0
14	230.0	1049.0	1022.7	310.2	1218.9	1181.7	328.7
15	195.4	1020.6	998.3	263.5	1176.1	1144.8	279.2
16	157.7	986.8	969.0	212.7	1128.2	1101.9	225.4
17	117.5	948.1	935.0	158.5	1059.7	1048.4	168.0
18	85.2	914.7	905.3	114.8	1021.3	1008.2	121.7
19	72.2	898.9	890.9	97.3	998.8	987.7	103.1
20	61.1	884.5	877.8	82.4	978.4	969.1	87.4

Table A.7 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (55 cycle)

2/2

Compact No.	Rod No. 1			Rod No. 2			Rod No. 3		
	Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C)		Temperature (°C)		Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C)		Linear heat rate (w/cm)
		Compact inside	Compact outside	Compact inside	Compact outside		Compact inside	Compact outside	
1	256.3	894.8	866.7	345.7	1003.6	964.6	366.4	1017.2	975.7
2	286.0	939.3	907.5	385.8	1067.8	1023.5	408.8	1082.1	1035.0
3	311.2	979.6	944.7	419.7	1126.6	1077.7	444.8	1141.1	1089.0
4	331.5	1015.4	977.9	447.1	1179.1	1126.2	473.8	1193.3	1137.0
5	346.6	1046.0	1006.5	467.4	1224.2	1168.2	495.3	1238.0	1178.4
6	356.1	1071.2	1030.2	480.3	1261.4	1203.2	509.0	1274.5	1212.6
7	360.1	1090.5	1048.9	485.7	1290.0	1230.6	514.7	1302.4	1239.3
8	358.4	1103.8	1062.2	483.4	1309.5	1250.1	512.3	1321.4	1258.2
9	351.0	1110.9	1070.0	473.4	1319.7	1261.3	501.8	1331.2	1269.1
10	338.1	1111.8	1072.4	456.1	1320.2	1263.9	483.3	1331.9	1272.1
11	319.9	1106.4	1069.2	431.5	1311.1	1258.0	457.3	1323.4	1266.8
12	296.6	1094.9	1060.5	400.1	1292.6	1243.6	424.0	1305.7	1253.6
13	268.7	1077.1	1046.0	362.4	1265.1	1221.0	384.1	1279.1	1232.1
14	236.5	1053.3	1026.1	319.0	1228.8	1190.4	338.0	1243.7	1202.8
15	200.6	1023.7	1000.9	270.5	1184.2	1152.0	286.7	1200.1	1165.7
16	161.5	988.7	970.4	217.8	1132.3	1106.7	230.8	1148.5	1121.3
17	119.9	948.5	935.1	161.7	1073.5	1054.8	171.3	1089.7	1069.8
18	87.5	915.0	905.3	118.0	1025.0	1011.6	125.0	1040.7	1026.4
19	74.1	898.8	890.6	100.0	1001.8	990.5	105.9	1017.1	1005.0
20	62.8	884.0	877.1	84.7	980.8	971.3	90.0	995.7	985.5

Table A.8 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (56 cycle)

Compact No.	Linear heat rate (w/cm)	Rod No. 1		Rod No. 2		Rod No. 3	
		Temperature (°C)		Temperature (°C)		Temperature (°C)	
		Compact inside	Compact outside	Compact inside	Compact outside	Compact inside	Compact outside
1	217.8	930.3	906.2	293.6	1026.1	992.7	311.1
2	245.1	971.6	944.2	330.3	1085.6	1047.5	350.0
3	268.4	1009.3	979.0	361.8	1140.6	1098.2	383.3
4	287.6	1043.0	1010.2	387.6	1190.0	1143.9	410.7
5	302.2	1072.1	1037.3	407.3	1233.0	1184.0	431.6
6	312.0	1096.3	1060.2	420.5	1268.9	1217.8	445.6
7	316.9	1115.4	1078.5	427.1	1297.2	1244.8	452.6
8	316.8	1129.1	1092.0	427.0	1317.4	1264.8	452.5
9	311.7	1137.2	1100.7	420.2	1329.1	1277.1	445.2
10	301.7	1139.5	1104.2	406.7	1332.2	1281.8	431.0
11	287.0	1136.3	1102.6	386.8	1326.4	1278.5	409.9
12	267.7	1127.4	1096.1	360.8	1312.1	1267.7	382.3
13	244.2	1112.8	1084.4	329.1	1289.4	1249.1	348.8
14	216.8	1092.8	1067.6	292.2	1258.7	1223.1	309.7
15	186.0	1067.3	1045.9	250.8	1220.2	1190.0	265.7
16	152.3	1036.8	1019.4	205.3	1174.6	1150.2	217.6
17	116.2	1001.5	988.3	156.7	1122.6	1104.3	166.0
18	80.8	964.4	955.4	108.9	1068.8	1056.2	115.4
19	68.5	949.2	941.6	92.3	1046.8	1036.2	97.8
20	58.0	935.3	928.9	78.2	1026.9	1018.0	82.8

Table A.9 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (57 cycle)

1/2

Compact No.	Linear heat rate (w/cm)	Rod No. 1		Rod No. 2		Rod No. 3	
		Temperature (°C) Compact inside	Compact outside	Linear heat rate (w/cm) Compact inside	Temperature (°C) Compact outside	Linear heat rate (w/cm) Compact inside	Temperature (°C) Compact outside
1	214.0	919.0	895.3	288.4	979.9	305.6	989.4
2	240.6	959.4	932.5	324.3	1033.3	343.6	1043.2
3	263.4	996.2	966.5	355.0	1124.1	376.2	1092.5
4	282.1	1029.1	997.0	380.2	1172.2	402.9	1184.4
5	296.3	1057.5	1023.6	399.4	1214.1	423.2	1175.1
6	305.9	1081.1	1045.8	412.2	1249.0	436.8	1260.1
7	310.6	1099.7	1063.7	418.6	1276.4	443.6	1286.9
8	310.4	1113.0	1076.8	418.4	1295.9	443.4	1305.9
9	305.4	1120.8	1085.2	411.6	1307.2	436.1	1316.8
10	295.5	1123.0	1088.4	398.2	1310.0	422.0	1319.6
11	281.0	1119.6	1086.8	378.6	1304.1	1257.6	401.2
12	262.0	1110.8	1080.3	353.1	1289.9	1246.7	374.1
13	238.9	1096.3	1068.6	321.9	1267.6	1228.4	341.2
14	212.0	1076.5	1052.0	285.7	1237.3	1202.8	302.8
15	181.8	1051.4	1030.5	245.0	1199.6	1170.3	259.6
16	148.7	1021.3	1004.4	200.4	1154.8	1131.1	212.4
17	113.3	986.6	973.9	152.7	1103.9	1086.1	161.8
18	79.0	950.6	941.8	106.4	1051.8	1039.6	112.8
19	66.9	935.6	928.2	90.2	1030.3	1020.0	95.6
20	56.7	922.2	915.9	76.4	1011.0	1002.3	81.0

Table A.10 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (57 cycle)

2/2

Compact No.	Linear heat rate (w/cm)	Rod No. 1		Rod No. 2		Rod No. 3	
		Temperature (°C)		Temperature (°C)		Temperature (°C)	
		Compact inside	Compact outside	Compact inside	Compact outside	Compact inside	Compact outside
1	218.1	898.4	874.4	249.0	994.0	961.0	311.5
2	244.5	938.9	911.8	329.5	1052.4	1014.7	349.2
3	267.0	975.9	946.0	359.9	1105.9	1064.2	381.3
4	285.3	1008.8	976.5	384.5	1153.9	1147.6	407.5
5	299.1	1037.1	1003.0	403.1	1195.5	1147.6	427.2
6	308.2	1060.6	1025.3	415.4	1230.0	1180.1	440.1
7	312.4	1078.8	1042.8	421.0	1256.9	1205.9	446.2
8	311.7	1091.7	1055.7	420.1	1275.8	1224.6	445.2
9	306.1	1099.0	1063.5	412.5	1286.2	1235.8	437.1
10	295.6	1100.7	1066.4	398.4	1288.2	1239.4	422.2
11	280.5	1096.7	1064.2	378.1	1281.3	1235.2	400.6
12	261.0	1087.1	1056.9	351.8	1266.1	1223.3	372.7
13	237.3	1071.9	1044.5	319.9	1242.7	1204.0	339.0
14	210.0	1051.3	1027.2	283.0	1211.3	1177.4	299.8
15	179.2	1025.3	1004.9	241.6	1172.4	1143.8	256.0
16	145.7	994.4	978.0	196.4	1126.5	1103.5	208.1
17	109.9	958.7	946.5	148.1	1074.5	1057.4	156.9
18	78.0	924.7	916.0	105.1	1025.4	1013.4	111.3
19	66.1	909.8	902.5	89.0	1004.0	993.9	94.3
20	56.0	896.2	890.0	75.4	984.6	976.1	79.9

Table A.11 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (58 cycle)

1/2

Compact No.	Rod No. 1			Rod No. 2			Rod No. 3		
	Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C)		Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C)		Linear heat rate (w/cm)	Temperature (°C)	
		Compact inside	Compact outside		Compact inside	Compact outside		Compact inside	Compact outside
1	215.3	906.4	882.7	290.1	1003.0	970.2	307.4	1014.6	979.8
2	241.5	947.3	920.4	325.4	1061.8	1024.5	344.8	1074.0	1034.4
3	263.8	984.5	954.8	355.6	1115.8	1074.4	376.8	1128.2	1084.2
4	282.0	1017.5	985.6	380.1	1164.3	1119.4	402.8	1176.3	1128.7
5	295.8	1046.0	1012.2	398.7	1206.2	1158.7	422.4	1217.7	1167.2
6	304.9	1069.6	1034.5	410.9	1241.1	1191.5	435.4	1251.9	1199.3
7	309.2	1088.0	1052.3	416.7	1268.3	1217.6	441.6	1278.5	1224.7
8	308.6	1101.0	1065.2	415.9	1287.4	1236.6	440.7	1297.0	1243.0
9	303.2	1108.5	1073.2	408.6	1298.1	1248.0	432.9	1307.4	1254.1
10	202.9	1110.2	1076.1	394.8	1300.1	1251.7	418.3	1309.4	1258.0
11	278.1	1106.3	1074.0	374.8	1293.4	1247.5	397.1	1303.3	1254.4
12	258.8	1096.8	1066.8	348.8	1278.3	1235.7	369.6	1288.8	1243.5
13	235.5	1081.7	1054.5	317.4	1254.8	1216.3	336.3	1266.1	1225.2
14	208.5	1061.0	1037.1	281.0	1223.4	1189.6	297.7	1235.6	1199.7
15	178.2	1035.1	1014.8	240.1	1184.4	1155.8	254.4	1197.4	1167.0
16	145.0	1004.2	987.8	195.4	1138.3	1115.3	207.1	1152.0	1127.5
17	109.6	968.4	956.2	147.7	1085.9	1068.8	156.5	1099.7	1081.5
18	77.5	933.7	925.1	104.4	1035.7	1023.7	110.6	1049.1	1036.4
19	65.6	918.6	911.4	88.4	1014.0	1003.9	93.7	1027.2	1016.5
20	55.6	904.9	898.7	74.9	994.4	985.9	79.4	1007.2	998.2

Table A.12 Power and Temperature Distribution of the 5th OGL-1 Fuel (58 cycle)

2/2

Compact No.	Linear heat rate (w/cm)	Rod No. 1		Rod No. 2		Rod No. 3	
		Temperature (°C) Compact inside	Compact outside	Temperature (°C) Compact inside	Compact outside	Linear heat rate (w/cm) Compact inside	Linear heat rate (w/cm) Compact outside
1	213.7	909.9	886.4	288.0	1005.1	972.6	305.2
2	240.0	950.3	923.6	323.4	1063.3	1026.2	342.7
3	262.4	987.1	957.6	353.6	1116.8	1075.6	374.8
4	280.7	1019.9	988.1	378.3	1164.7	1120.1	400.9
5	294.6	1048.1	1014.4	397.1	1206.3	1158.9	420.8
6	303.9	1071.5	1036.6	409.5	1240.9	1191.6	434.0
7	308.3	1089.8	1054.2	415.5	1267.9	1217.4	440.3
8	307.9	1102.8	1067.2	415.0	1287.0	1236.3	439.8
9	302.7	1110.2	1075.0	407.9	1297.7	1247.7	432.2
10	292.6	1112.0	1078.0	394.4	1300.0	1251.6	417.9
11	278.0	1108.3	1076.0	374.6	1293.5	1247.6	397.0
12	259.0	1099.0	1069.0	349.0	1278.7	1236.1	369.8
13	235.8	1084.1	1056.9	317.8	1255.6	1217.0	336.8
14	209.0	1063.8	1039.7	281.7	1224.7	1190.8	298.5
15	178.9	1038.2	1017.8	241.0	1186.2	1157.5	255.4
16	145.9	1007.7	991.2	196.6	1140.7	1117.6	208.4
17	110.7	972.5	960.0	149.1	1089.1	1071.8	158.0
18	77.7	937.2	928.6	104.8	1038.1	1026.1	111.0
19	65.9	922.2	914.9	88.8	1016.6	1006.5	94.1
20	55.8	908.7	902.5	75.2	997.2	988.7	79.7

## 付録B (R/B) 値の非平衡補正

(R/B) 値は、放射化学的平衡に達した時点における平衡値として計算される。この仮定は、連続照射時間が半減期に較べて十分長ければ正しい。

OGL-1燃料体照射試験の連続照射期間は半サイクル約10日程度であり、測定されている希ガス、よう素の大部分の核種の(R/B) 値は平衡になっている。但し、比較的半減期の長い<sup>131</sup>I (8.06日) 及び<sup>133</sup>Xe (5.29日) については、平衡の仮定に基いて計算された(R/B) 値は、過大評価となっていると予想される。この過大評価の割合がどの程度となっているのかを、以下の概略計算を行って評価した。

Boothの拡散モデルに基づく(R/B) 値の解は以下の様になる。<sup>(13)</sup>

$$(R/B) = 3 \left( \sqrt{\frac{D'}{\lambda}} \coth \sqrt{\frac{\lambda}{D'}} - \frac{D'}{\lambda} \right) - 6 e^{-\lambda t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-n^2 \pi^2 D' t}}{n^2 \pi^2 + (\lambda/D')} \quad (B.1)$$

ここで、(R/B) : 時核tにおける(R/B) 値 (-)

D' : 換元拡散係数 (s<sup>-1</sup>)

$\lambda$  : 崩壊定数 (s<sup>-1</sup>)

t : 時刻 (s)

である。

照射開始後十分に長い時間が経過すると、(B.1) 式は

$$(R/B)_{\infty} = 3 \left( \sqrt{\frac{D'}{\lambda}} \coth \sqrt{\frac{\lambda}{D'}} - \frac{D'}{\lambda} \right) \quad (B.2)$$

となる。ここで、(R/B)<sub>∞</sub> は、平衡状態における(R/B) 値である。(R/B) 値の計算は、基本的に(B.2) 式を用いて行っている。

第5次OGL-1燃料体照射試験の始めの半サイクルについて計算された(R/B) 値は、

<sup>133</sup>Xe :  $3.87 \times 10^{-4}$

<sup>131</sup>I :  $4.26 \times 10^{-4}$

である。被覆燃料粒子の被覆層破損率(露出ウラン率)は  $1.9 \times 10^{-3}$  だから、破損粒子からの平衡時の(R/B) 値の計算値は、それぞれ以下の様になる。

<sup>133</sup>Xe :  $2.0 \times 10^{-1}$

<sup>131</sup>I :  $2.2 \times 10^{-1}$

(B.1), (B.2) 式中でD'が未知であるから、Dをパラメータとして(B.2) 式を計算した結果をFig.B.1に示す。同図より、第5次OGL-1燃料体照射試験時の破損粒子からの(R/B) 計算値のD'は、約  $7 \times 10^{-9}$  (s<sup>-1</sup>) となる。

\* 厳密には2章に示した様に、先行核の影響をモデルに含めている。(詳細は文献[11]を参照)。

この値を用いて、照射日数の関数として(B 1)式で( $R/B$ )値を計算し、平衡値との比として表わしたもの(Fig. B. 2)を示す。同図より、約10日の照射期間では、 $^{133}\text{Xe}$ と $^{131}\text{I}$ の( $R/B$ )値は平衡とはなっていらず、平衡値に対する比率はそれぞれ、 $^{133}\text{Xe}$ が約0.9、 $^{131}\text{I}$ が約0.85となる。すなわち、平衡値に基づく( $R/B$ )値の計算値は $^{133}\text{Xe}$ について約10%， $^{131}\text{I}$ について約15%過大評価となっている。

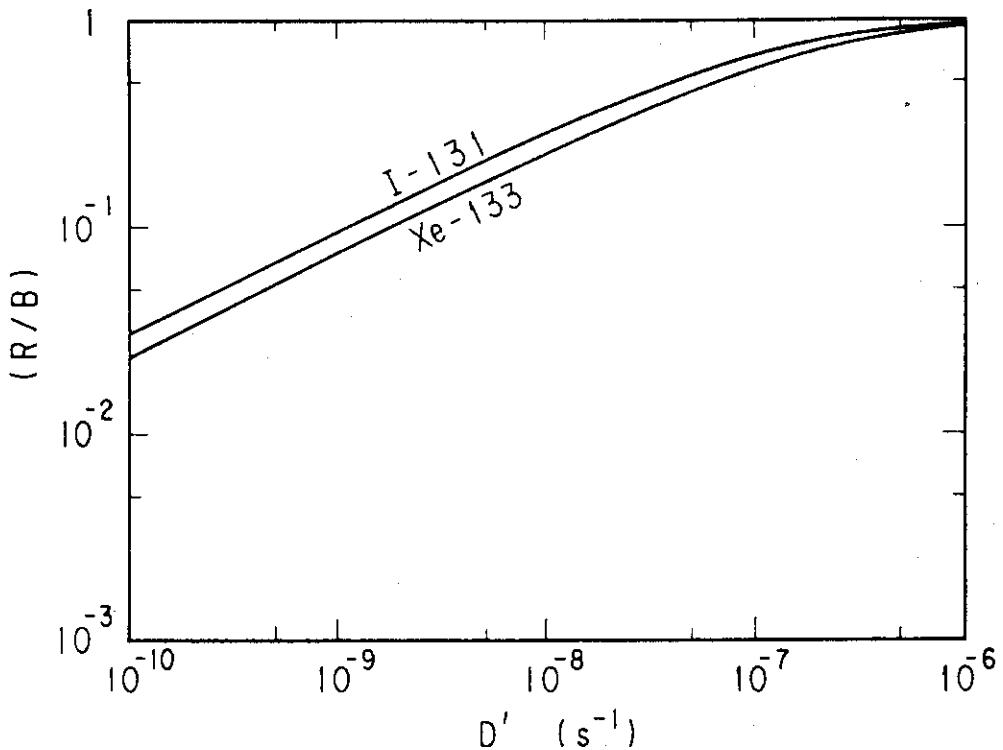


Fig. B.1 (R/B) Value Calculated by Eq. (B.2)

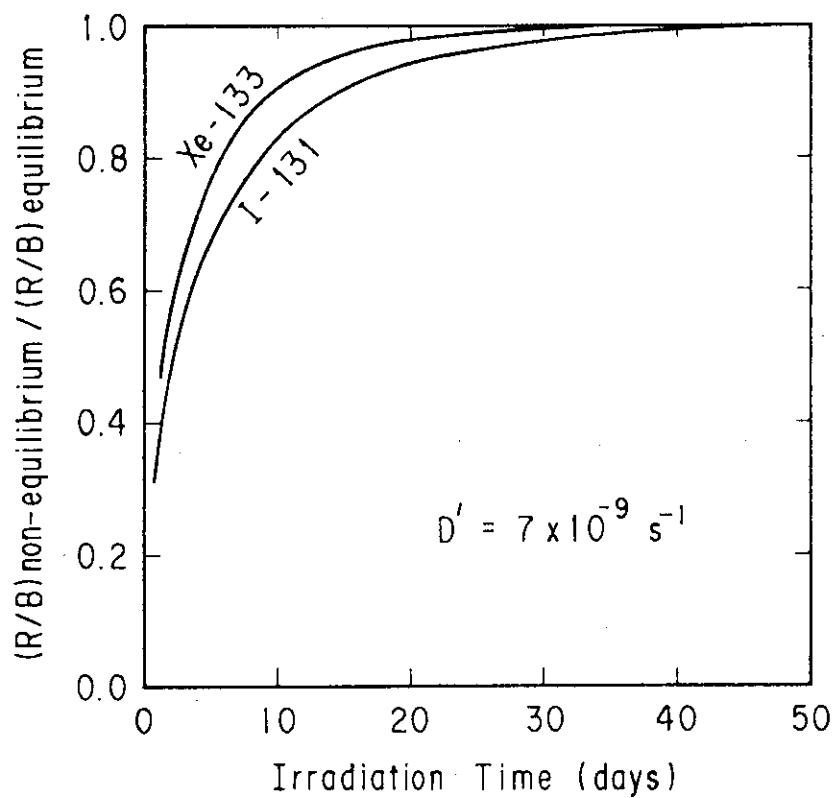


Fig. B.2 Ratio of Non-equilibrium (R/B) Value to Equilibrium (R/B) Value