

本資料は1998年 3月26日付けで  
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

## 2 領域炉心臨界実験によるテスト領域未臨界度 測定のための実験式の立式とその検証計算

1990年12月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



## 2 領域炉心臨界実験によるテスト領域未臨界度測定のための 実験式の立式とその検証計算

古橋 晃\*， 福村信男\*\*， 相原永史\*\*\*，  
角谷浩亨\*\*\*\*

### 要 旨

R. Averyの結炉理論を発展させ、DCA 2 領域炉心の臨界実験を行い、その情報からテスト領域単独の実効増倍率を導出するための式を考案・立式し、反応度摂動の種類別効果、実験上適当な摂動量の大きさおよび誤差等の評価を行い、式の妥当性と実験の成立性を考察した。

これらの結果から、反応度摂動に伴う結合指数の変化を取り入れる必要があること、通常臨界実験装置の実験に用いられる反応度添加法即ち吸収摂動と水位摂動では結合指数の変化率が異なるとともに、かつその符号も条件により異なり得ること等を明らかにするとともに、結合指数の変化率を一次式でとり入れた改良式により許容できる程度の誤差内でかなりの範囲の体系に適用できることを示した。実験上適当とされる反応度摂動量の大きさについても考察し、吸収法摂動では 0.2%  $\Delta K$ 、水位摂動では 0.01%  $\Delta K$  程度を最大とすることを提案した。この摂動は小さいが、 $^{10}\text{B}$  濃度の測定やドライバー領域水位の測定を高精度で行えば実施可能な範囲である。

---

\* 本社企画部  
\*\* 大洗工学センター実験炉部（現、財団法人原子力安全技術センター）  
\*\*\* 大洗工学センター実験炉部臨界工学試験室  
\*\*\*\* 大洗工学センター実験炉部臨界工学試験室嘱託（センチュリーリサーチセンター株式会社）



# Formulation of a New Empirical Formula for Estimating the Subcriticality of Test-Region from the Critical Experimental Data on Two-Region Coupled Core System and Verification Calculations for the Proposed Formula.

Akira Furuhashi\*, Nobuo Fukumura\*\*, Nagafumi Aihara\*\*\*  
and Hiroyuki Kadotani\*\*\*\*

## Abstract

A new empirical formula which serves for estimating the unknown subcriticality of test region in the two-region coupled reactor system has been formulated as an extension of the coupled reactor theory by R. Avery. This formula will be available for the two-region coupled reactor critical experiment with some reactivity perturbation to the driver region. The validity of this formula has been studied from the view points of reactivity perturbation means, suitable amount of reactivity perturbation, probable error due to the structure of the formula and so on through the computer simulation calculations.

From the results it has been found that the treatment of the change of the coupling index is indispensable but the linear change model of the coupling index adopted in our formula is simple and effective. The rate of the change of the coupling index will be fairly different between the case of absorption perturbation and the case of water level perturbation, but it has been found that our formulas will be applicable to both cases within the allowable error by properly estimating the coefficient of the linear change of coupling index and by choosing the details of the reactivity perturbation to be suited to the cases.

The maximum amount of reactivity perturbation suitable for the present method has been found to be  $0.2\% \Delta K$  in the absorption perturbation method or  $0.01\% \Delta K$  in the water level perturbation method. These values require fairly high precision measurement of boron concentration or of the level of moderator in the driver region, but we expect the experiments will be possible under careful execution of the measurement and suitable application of our formulas.

---

\* General Planning Division, Head Office, PNC.  
\*\* Experimental Reactor Division, O-arai Engineering Center, PNC.  
(Present, Nuclear Safety Technology Center)  
\*\*\* Criticality Engineering Section, O-arai Engineering Center, PNC.  
\*\*\*\* Criticality Engineering Section, O-arai Engineering Center, PNC. (A part-time member of PNC) (Century Research Center Corporation)

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 基本式の立式 .....	2
2.1 記号の説明 .....	2
2.2 結合指数を一定とする場合の基本式 .....	3
2.3 結合指数が一次式で変化するとした場合の基本式 .....	4
3. 基本式の検証計算 .....	6
3.1 計算条件 .....	6
3.2 計算結果(1): 摂動の種類別効果 .....	7
3.3 計算結果(2): $^{10}\text{B}$ 濃度変化による摂動 .....	9
4. 結果の検討 .....	11
4.1 $K_{TT}$ と $K_T$ との差及び $K_{DD}$ と $K_D$ との差について .....	11
4.2 $K_{D \rightarrow T}$ の変化及び $K_{T \rightarrow D}$ の変化について .....	12
4.3 水位摂動の再検討 .....	14
4.4 CITATION計算精度の検討 .....	17
4.5 摂動反応度量の検討 .....	18
4.6 水位摂動実験式の誤差評価 .....	19
5. おわりに .....	24
謝 辞 .....	25
参考文献 .....	26

---

(注) 2.1 ~ 4.2 の主担当は古橋、4.3 ~ 4.6 の主担当は臨界工学試験室。

## 1. はじめに

R. Averyの結炉理論の中で取扱われた積分型固有値方程式<sup>(1)</sup>のアナロジーを考えることによって、2領域炉心の臨界実験からそのテスト領域炉心に係る固有の特性（単独の実効増倍率等）を実験的に導出するための定式化を臨界工学試験室が試みた<sup>(2)</sup>。

この定式化の過程では、投入反応度が微小であることおよびこの反応度変化に対しては結合指数が不変であることの2つの仮定を行った。この仮定はその後2領域DCA臨界実験を対象としたパラメータサーベイによると普遍性に欠けることが判明した<sup>(3)</sup>。

そこで古橋らは、R. Averyの結合炉の理論式の拡張（結合指数の変化量を一次式で取り入れる等）を提案し<sup>(4)</sup>、その式のもとで対象体系及び摂動の範囲を絞ってとり扱えば実用になり得る精度でテスト領域に係る固有の特性を実験的に導出できるであろうことを示した。

本報告書はこの(4)の委員会発表資料に整理・加筆を行い、更に臨界工学試験室らのその後の検討（4.3節以下）も記録にとどめるべく、両者を併合した型の印刷物として作成したものである。

## 2. 基本式の立式

### 2.1 記号の説明

ここでは、試験領域（テスト領域）とドライバー領域との2領域結合炉心を対象にし、以下の記号を用いることとする。なお、ドライバー領域に反応度摂動を与え、摂動前の基準ケースをダッシュなし、摂動後をダッシュ付で区別して示すと共に、基準ケースでは Avery の原式と異なり、全系のKを丁度臨界（ $K=1.0$ ）に限ることなく、 $K \neq 1.0$ からスタートしてもよいものとする。

	摂動前	摂動後	変化量	変化率
テスト領域 (T)				
孤立系増倍率	$K_T$	$K_T$	変化なし	変化なし
結合状態での 単独増倍率	$K_{TT}$	$K'_{TT}$	$K'_{TT}-K_{TT}$ だが微小なので特に記号せず	
結合状態での 単独未臨界度	$\Delta_{TT}=1-K_{TT}$	$\Delta'_{TT}=1-K'_{TT}$		
ドライバー領域 (D)				
孤立系増倍率	$K_D$	$K'_D$	$\delta_D=K'_D-K_D$	$\frac{K'_D}{K_D} - 1 = \frac{\delta_D}{K_D}$
結合状態での 単独増倍率	$K_{DD}$	$K'_{DD}$	$\delta_{DD}=K'_{DD}-K_{DD}$	$\frac{K'_{DD}}{K_{DD}} - 1 = \frac{\delta_{DD}}{K_{DD}} \equiv \gamma$
結合状態での 単独未臨界度	$\Delta_{DD}=1-K_{DD}$	$\Delta'_{DD}=1-K'_{DD}$		
結合系				
全体増倍率	$K$	$K'$	$\delta_K=K'-K$	$\frac{K'}{K} - 1 = \frac{\delta_K}{K}$
TからDへの 増倍率付与	$K_{T \cdot D}$	$K'_{T \cdot D}$		
DからTへの 増倍率付与	$K_{D \cdot T}$	$K'_{D \cdot T}$		

	摂動前	摂動後	変化量	変化率
結合指数	$C_1 = K_{T \rightarrow D} \cdot K_{D \rightarrow T}$ $= (K - K_{TT})(K - K_{DD})$	$C_1' = K_{T \rightarrow D}' \cdot K_{D \rightarrow T}'$ $= (K - K_{TT}') (K - K_{DD}')$		
(みかけの) 結合指数	$C_1 =$ $(K - K_{TT})(K - K_{DD})$	$C_1' =$ $(K - K_{TT}') (K - K_{DD}')$		$\frac{\delta C_1}{C_1} = \frac{C_1'}{C_1} - 1 = \xi \gamma$ にフィットする

$K_{TT}' = K_{TT}$ と近似したみかけの結合指数は、総合指数とあまり変わらないので、通常同一記号  $C_1, C_1'$  のまま記す。

2.2 結合指数を一定とする場合の基本式

Averyの原式を、摂動前において丁度臨界に限ることなく、Kからスタートすると、

$$\begin{vmatrix} K - K_{TT} & K_{D \rightarrow T} \\ K_{T \rightarrow D} & K - K_{DD} \end{vmatrix} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

となるが、これを用いて、摂動前の結合指数は

$$(K - K_{TT})(K - K_{DD}) = K_{D \rightarrow T} \cdot K_{T \rightarrow D} = C_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

同様に、摂動後の結合指数は

$$(K' - K_{TT}') (K' - K_{DD}') = K_{D \rightarrow T}' \cdot K_{T \rightarrow D}' = C_1' \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)式においてドライバー領域のみ摂動を与えるので  $K_{TT}' = K_{TT}$ としても十分よい近似になる。

今結合指数を一定とする場合の式を作ると  $K_{TT}' = K_{TT}$ と近似して(2)、(3)から次式が成り立つ。

$$C_1' = (K' - K_{TT}) (K' - K_{DD}') = (K - K_{TT}) (K - K_{DD}) = C_1 \quad \dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで、} & K' = K + \delta K \\ & K_{DD}' = (1 + \gamma) K_{DD} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

とおく。

(4)、(5)式からドライバー領域増倍率の変化率  $\gamma$  と全体増倍率の変化率  $\frac{\delta K}{K}$  の間の関係式として

$$\gamma = \frac{(K - K_{TT}) + (K - K_{DD}) + K \cdot \frac{\delta K}{K}}{K_{DD} \left( \frac{K - K_{TT}}{K} + \frac{\delta K}{K} \right)} \cdot \frac{\delta K}{K} \quad \dots\dots\dots (6)$$



を得る。

前表の記号を用い、特に摂動前を丁度臨界 ( $K=1.0$ ) とすると、(6)式は、

$$\delta_{DD} = \frac{\Delta_{TT} + \Delta_{DD} + \delta K}{\Delta_{TT} + \delta K} \cdot \delta K \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。

$\delta K$  が微小であることを考慮すると、上式は

$$\delta_{DD} = \frac{\Delta_{TT} + \Delta_{DD}}{\Delta_{TT}} \cdot \delta K \quad \dots\dots\dots (8)$$

と近似できる。これが最もよく用いられる Avery流の原式である。(7)式における  $\delta K$  を温存すると、 $K' - K_{TT}$  を  $\Delta_{TT}''$  とおいて次式を得る。

$$\delta_{DD} = \frac{\Delta_{TT}'' + \Delta_{DD}}{\Delta_{TT}''} \cdot \delta K \quad \dots\dots\dots (9)$$

この(9)式の方が(8)式より若干良いが、(6)式も含め、3.2節で後述するように本節で用いた結合指数一定  $C_1' = C_1$  の近似は、結果としてあまり良くない。そこで次節の近似を考えた。

### 2.3 結合指数が1次式で変化するとした場合の基本式

後述するように3.2節の結算結果、特に図3によれば、結合指数  $C_1$  は摂動の前後で変化するが、その変化はドライバーの領域の増倍率  $K_{DD}$  の変化率  $\frac{\delta_{DD}}{K_{DD}} \equiv \gamma$  の1次式として次の型で十分フィット出来ることが分った。(  $K_{TT}'$  は  $K_{TT}$  と不変と近似)

$$\frac{C_1'}{C_1} = (K' - K_{TT}) (K' - K_{DD}') / (K - K_{TT}) (K - K_{DD}) = 1 + \xi \gamma \quad \dots\dots\dots (10)$$

この(10)式を用いて2.2節と同様な式の操作を行うと、(6)式に対応した(11)式を得る。

$$\gamma = \frac{(K - K_{TT}) + (K - K_{DD}) + K \cdot \frac{\delta K}{K}}{K_{DD} \left( \frac{K - K_{TT}}{K} + \frac{\delta K}{K} \right) + \xi \left( \frac{K - K_{TT}}{K} \right) (K - K_{DD})} \cdot \frac{\delta K}{K} \quad \dots\dots (11)$$

但し、前節同様  $K_{TT}' = K_{TT}$  とした。

上式を古橋の近似式とよぶ<sup>(4)</sup>。この式は  $\xi = 0$  とおけば(6)式に戻るなので、その拡張に当てており、妥当なものである。ある  $\gamma$  を与えた時に生ずる  $\frac{\delta K}{K}$  を算出する型の式になっ

ていないので若干見ずらいが、ある  $\frac{\delta K}{K}$  を生ぜしめるに必要な  $\gamma$  の値を求める式という  
型になっている。以下この(1)式を基本式とする。

### 3. 基本式の検証計算

#### 3.1 計算条件

前章で導いた基本式を検証するための数値計算を行った。その対象体系は、DCA（重水臨界実験装置）炉心の中央部領域にPu溶液燃料タンクを装荷し、その周囲にATRドライバー燃料を装荷した2領域炉心でその体系図を図1に、計算条件を以下に示す。

##### ・テスト領域

Pu (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O 溶液

Pu / (Pu + U) : 100%

Pu 同位体比\* : <sup>239</sup>Pu / <sup>240</sup>Pu / <sup>241</sup>Pu / <sup>242</sup>Pu = 0.58 / 0.24 / 0.14 / 0.04

Pu 濃度 : 250 g / ℓ, 50 g / ℓ

##### ・ドライバー領域

格子ピッチ : 20 cm

燃料 : 1.2% 微濃縮ウラン, 28本 クラスタ ATR 燃料

冷却材ボイド率 : 0% ボイド (軽水冷却材)

減速材 : 重水, <sup>10</sup>B 有, 無

##### ・使用コード

格子計算 : WIMS-E コード

炉心計算 : CITATION コード (R, Z 2次元)

エネルギー群数 : 3 群

##### ・メッシュ

テスト領域 : 径方向 8 メッシュ, 軸方向 5 メッシュ (標準ケース)

ドライバー領域 : 径方向 9 メッシュ, 軸方向 15 メッシュ (標準ケース)

テスト領域とドライバー領域の間の空気領域 (ボイド領域) については、エネルギー群 3 群とも共通に、拡散係数  $D = 10$ 、吸収断面積  $\Sigma_a = 1 \times 10^{-10}$ 、 $\nu \Sigma_f = 0$ 、除去断面積  $\Sigma_{R^1 \rightarrow 2}, \Sigma_{R^2 \rightarrow 3} = 0$  という稀薄媒質を仮定した。これらの値は、輸送計算コード TWOTRAN を用いた 2 領域計算と固有値がほぼ同一の値を与えることから採用したものである。

---

\* Pu 同位体比 (0.76 / 0.19 / 0.04 / 0.01) に対する計算も若干行ってみたが、結果に殆んど影響しなかったため、本報告書からは省略した。

### 3.2 計算結果(1): 摂動の種類別効果

標準体系として、テスト領域半径20cm、高さ25cm、ドライバー領域高さ 154.8cm ( $^{10}\text{B}$ 無) をとり、次の各種の反応度摂動をドライバー領域 (D領域) に与えて、その全系に及ぼす効果について調べた。

- (i) ドライバー領域の核分裂中性子発生数  $\nu_D$  変化 (理論的考察のため)
- (ii) ドライバー領域水位変化
- (iii) ドライバー領域部分的水位変化 (D領域の外側約 1/3厚さ部分のみの水位を上げ結合立体角変化を防ぐ)
- (iv) 反射体付加 (D領域の外側に重水反射体を薄く付加する)
- (v)  $\Sigma_{a3}$ 減少 (計算上D領域の熱群吸収断面積のみを下げる:  $^{10}\text{B}$ 濃度変化の模擬)

反応度の摂動の大きさは、原則として全系の増倍率が基準ケース ( $K \approx 1.0$ ) に比して + 0.1%, + 0.2%, + 0.3%程度になるようにした。

上記各ケースにおける計算結果を表1に示す。

ドライバー領域の増倍率変化率  $\gamma = \frac{\delta K_{DD}}{K_{DD}} = \frac{K_{DD}'}{K_{DD}} - 1$  に対する、全系増倍率の変化率  $\frac{\delta K}{K} = \frac{K'}{K} - 1$  の関係として表1の結果を図2に図示し直した。反応度摂動の種類による差異が読みとれるが、この図ではそれ程大きな差に見えない。図中の結合指数一定の線は、(6)式に対応したものであるが、 $\nu_D$  変化や  $\Sigma_{a3}$ 減少の線はこれに近く、結合指数一定の線で近似出来そうに見える。

しかし、これは、結合指数の変化率  $\frac{\delta C_1}{C_1} = \frac{C_1'}{C_1} - 1$  の  $\gamma$  に対するプロット図3に引き直してみると、非常に大きな差になり、結合指数一定の近似では全く不十分で、 $\nu_D$  変化に対する直観的な理論線  $C_1 \propto (1 + \gamma)$  (注、 $K_{D-T}$ : 不変、 $K_{T-D} \propto (1 + \gamma)$  とみた) でも、 $\nu_D$  変化や  $\Sigma_{a3}$ 減少すら十分近似できないことが分る。

従って結合指数の変化を取り入れた式にしなければならないことは明らかであるが、その変化の様子は、幸い図3及び表1から読みとれるように  $\gamma$  に対して線形であり、

$$\frac{\delta C_1}{C_1} = \frac{C_1'}{C_1} - 1 = \xi \gamma$$

の形に十分フィットできる。

以上により、(II)式の  $\gamma$  vs.  $\frac{\delta K}{K}$  の関係から陰に含まれている  $K_{TT}$  を導出するには結合指数に変化ありとして、その係数  $\xi$  を正しく見積ってやる必要があることが分るが、 $\xi$  はシミュレーション計算の経験値等から近似的にしか見積れない。その場合  $\xi$  は図3 或は表1に

示すように摂動の種類によって相当変わることが分ったが、 $\xi$ が小さい方が $K_{TT}$ の導出誤差が小さくてすむことを次に示す。

$$(11)式において \frac{1}{K - K_{TT}} \equiv \chi, \quad \frac{K' - K_{DD}'}{K - K_{TD}} \equiv D \text{とおき、} K' = K + \delta K \text{を用いると}$$

$$(\delta K \chi + 1) D = 1 + \xi \gamma$$

$$D \delta K \chi - \xi \gamma - (1 - D) = 0$$

となるが、更に $D \delta K \equiv a$ ,  $(1 - D) \equiv d$ とおくと

$$a \chi - \xi \gamma - d = 0$$

$$\chi = \frac{\gamma \xi + d}{a} \dots\dots\dots (12)$$

を得る。

ここで $\gamma$ 、 $a$ 、 $d$ が実験で正しく求められ、 $\xi$ も正確に外部見積りされていれば $\chi$ 、従って $K_{TT}$ は真値が導出できる筈である。

(12)式より $\chi$ の誤差巾(絶対値)は $\xi$ の見積り誤差巾(絶対値)に比例する。従って $\xi$ の絶対値の見積り誤差巾を一定に抑え込まねばならぬことになるが、 $\xi$ の絶対値が大きい時は、その絶対値の見積り誤差巾を一定に抑え込むということは、 $\xi$ の相対見積り誤差率を小さくせねばならぬことを意味し、現実には不利な要因になる。このことを $\xi$ の小さい $\Sigma_{33}$ 減小と $\xi$ の大きい水位変化との比較において示す。

表1の $\Sigma_{33}$ 減小の2のケース(約0.2% $\Delta k$ の反応度付加)について数値を出すと、 $\gamma = 0.0022319$ 、 $d = 1 - 0.9881494 = 0.0118506$ 、 $a = 0.9881494 \times 0.0020029 = 0.00197916$ となり、(12)式は

$$\chi = \frac{2.2319 \xi + 11.8506}{1.97916}$$

となる。ここで表1の $\xi = 1.948^4$ の近辺で $\xi$ の外部見積りの誤差巾が1.8~2.1の範囲におさまると仮定して振ってみると、

$\xi$	$\chi$	$K_{TT}$	$K_{TT}$ の真値(0.8778640)との差
1.8	8.017553	0.87531	-0.00255
1.9	8.130323	0.87704	-0.00082
1.9484	8.184904	0.87786	0
2.0	8.243093	0.87872	+0.00086
2.1	8.355863	0.88036	+0.00250

となる。従ってこの程度の $\xi$ の外部見積り変動巾に対して $K_{TT}$ の導出変動巾が約 0.5%  $\Delta k$  ということであり、実用になり得ると考えられる。

これに対して表1の水位変化の2のケース（同じく約 0.2%  $\Delta k$  の反応度付加）について数値を出すと、 $\gamma = 0.0017743$ 、 $d = 1 - 1.0111744 = -0.0111744$ 、 $a = 1.0111744 \times 0.0019273 = 0.00194884$ となり、(12)式は

$$x = \frac{1.7743 \xi - 11.1744}{1.94884}$$

となる。ここで表1の $\xi = 15.28^a$ の近辺で、上記 $\Sigma_{a3}$ 減小の $\xi$ の見積り変動巾 1.8~2.1 と、ほぼ同じ相対誤差率である $\xi = 14 \sim 16.5$ の間に外部見積り出来たと仮定して振ってみると

$\xi$	$x$	$K_{TT}$	$K_{TT}$ の真値 (0.8778640)との差
14.0	7.012274	0.85743	-0.02043
15.0	7.630437	0.86898	-0.00888
15.288	8.194919	0.87786	0
16.0	8.331522	0.88683	+0.00897
16.5	9.288372	0.89238	+0.01452

となる。従ってこの程度の $\xi$ の相対見積り誤差率の下では、 $K_{TT}$ の導出変動巾が 3.5%  $\Delta k$  に及び実用になり難い。 $\Sigma_{a3}$ 減小と同じ 0.5%  $\Delta k$  以内に抑え込むためには、 $\xi$ を15.1~15.5位の範囲に外部見積りしてやらねばならぬことになるが、この $\xi$ の相対見積り誤差率は厳しいので、水位変化摂動は $\Sigma_{a3}$ 減小摂動に比して不利である。しかし実験のやり易さを考えると、水位変化摂動も簡単に諦めるべきでなく、更なる検討をすべきであろう。

### 3.3 計算結果(2): $^{10}\text{B}$ 濃度変化による摂動

前節により、 $\xi$ 値が2以下におさまる $\Sigma_{a3}$ 減少摂動であれば精度として実用になり得ると考えられるが、この計算ケースは $^{10}\text{B}$ なしの $\Sigma_{a3}$ 値から仮想的に値を減らしたものであり、現実を模擬していない。そこで基準ケース自身を $^{10}\text{B}$ 有 (1.0ppm) に置き換え、そこから $^{10}\text{B}$ を抜く ( $\rightarrow 0.9\text{ppm}$ ,  $0.8\text{ppm}$ ) ケースをシミュレーション計算し、この場合の $\xi$ 値も小さくてすむか、又 $\nu_{eff}$ 変化のケースとの違いも $\Sigma_{a3}$ 減小の場合と同程度かを確認してみた。

計算体系としては、テスト領域の寸法変化による低 $K_{TT}$ 化を中心に、 $\text{Pu}$ 濃度変化も含めて6種を行い、反応度変化としては上記の3点づつをとり、直線性 ( $\xi$ の一定性)を確認した ( $\delta K$ は $^{10}\text{B}$ 0.1ppmに対して0.07~0.08%位である)。

計算結果を表2に示したが、いずれに対しても $^{10}\text{B}$ 変化に対する結合指数の変化係数 $\xi$ は2以下に収まっており、 $\nu_D$ 変化との差にも異常はなく、 $\Sigma_{a,3}$ 減少摂動における結論を準用できることが確認された。即ち $K_T$ が0.75程度以上の4体系ではいずれも $\xi$ が1.9台に揃っており、 $K_T$ が0.50程度の2体系では共に $\xi$ が1.7台である。

前者に対して $\xi$ を1.8~2.1、後者に対して $\xi$ を1.6~1.9と、相当に大きい $\xi$ の外部見積り誤差巾を想定してやった時の $K_{TT}$ 導出誤差への影響を表3に示した。これから判断して少なくともここで取り扱った6種の体系の近辺について実験する限りは、 $^{10}\text{B}$ 濃度変化摂動による $K_{TT}$ の導出は実用可能と考えられる。

## 4. 結果の検討

4.1  $K_{TT}$ と $K_T$ との差及び $K_{DD}$ と $K_D$ との差について

以上から判るように(1)式~(11)式に出て来るものは $K_{TT}$ 及び $K_{DD}$ であり、一方、求めたいものは $K_T$ 、実験上出て来るものは $K_D$ であり、共に $K_{TT}$ 、 $K_{DD}$ そのものでないので、これらの差がどうなるかということが一つの問題である。

$K_{TT}$ と $K_T$ との差については表4を、又、その差を生ぜしめるもとになっている中性子束分布(第3群(熱群)中性子束の、軸方向中央面内における半径方向分布)の図を図4に示す。これらにおいて $K_T$ はテスト領域孤立系の計算結果、 $K_{TT}$ は、結合体系においてドライバー領域の $\rho_{\Sigma}$ を3群共0と置いた仮想的体系の計算結果である。

$K_{TT}$ はドライバー領域のもたらす反射体効果(ドライバー領域燃料部分の $\Sigma$ 効果は入っている)をかぶって $K_T$ より若干(約 $0.005 \sim 0.019 \Delta k$ )大きくなる。しかし、これらの計算結果からその大きさ及び若干の規則性を知り得たので、今後現実の実験体系についても、相当精度で差の予測が可能であり、そうした予測差と真差との違いだけが実際上の誤差となるのみである。

つまり、上記の $0.005 \sim 0.019 \Delta k$ がそのまま誤差になるわけではなく、予測失敗誤差だけが残るのだから、これらの数分の1の誤差範囲に抑えられると考えられる。又、もしも予測補正努力をしないとしたり、 $K_T$ を $K_{TT}$ と、大きい側に見誤まるだけであるから、炉物理上の不満足は残るものの、安全側ではある。なお、図4からみて、ここで取扱った程度の体系においては、ドライバー領域のもたらす反射体効果は過大なものではないことが分る。

$K_{DD}$ と $K_D$ との差については表5に結果を示すが、この場合はテスト領域の反射体効果よりも同領域(燃料部分)の吸収効果が勝って $K_{DD}$ は $K_D$ より若干下ることになる。しかしその値は約 $0.002 \sim 0.004 \Delta k$ と、テスト領域における差より小さく、且つこちらは摂動前後の変化量(変化率)が問題となるだけであり、上記 $\Delta k$ 差が直接に響くわけではない(この点テスト領域におけるより問題は少ない)。

従って、ドライバー領域に対しては表5を参考に、現実の実験体系に対して予め、実験的に求まる $K_D$ に若干の補正を施して $K_{DD}$ (の予測値)に引直しておいてから取扱ってもよいし、又、表5に付記したように、 $\frac{K_{DD}}{K_D} - 1$ を $\gamma$ と見做してしまっても大差は生じないようである。

なお全ケースを通じて $K_{TT} - K_T$ や $K_{DD} - K_D$ 自身が反応度摂動に伴って変化する量は無



視し得ること、従って $K_{TT}'$ は $K_{TT}$ と不変とみてよいこと、及び $\nu_D$ 変化ケースでは、 $\gamma = \frac{K_{DD}'}{K_{DD}} - 1 = \frac{K_D'}{K_D} - 1 = \frac{\nu_D'}{\nu_D} - 1$ が正しく成立していることを付記しておく。

4.2  $K_{D \rightarrow T}$ の変化及び $K_{T \rightarrow D}$ の変化について

前章の3.2節に記したように、基準ケースとしてドライバー領域に $^{10}B$ を1.0ppmを入れ、これから $^{10}B$ を0.9ppm、0.8ppmと抜いて行って反応度振動を与えた場合の(みかけの)結合指数の変化

$$\frac{C_i'}{C_i} = \frac{(K' - K_{TT})(K' - K_{DD}')}{(K - K_{TT})(K - K_{DD})} = \frac{K_{D \rightarrow T}' \cdot K_{T \rightarrow D}'}{K_{D \rightarrow T} \cdot K_{T \rightarrow D}} = (1 + \xi \gamma) \dots\dots\dots (13)$$

ここに  $\gamma = \frac{K_{DD}'}{K_{DD}} - 1$

の係数 $\xi$ は、取扱った体系範囲において1.73~1.98の範囲に収まっており、対応する $\nu_D$ 変化( $\times 1.001, \times 1.002$ )の仮想ケースにおける $\xi$ は1.14~1.54の範囲に収まっていた。本節ではこの変化率係数 $\xi$ の内訳けを、 $K_{D \rightarrow T}$ の変化係数 $\lambda$

$$\frac{K_{D \rightarrow T}'}{K_{D \rightarrow T}} = (1 + \lambda \gamma) \dots\dots\dots (14)$$

と $K_{T \rightarrow D}$ の変化係数 $\mu$

$$\frac{K_{T \rightarrow D}'}{K_{T \rightarrow D}} = (1 + \mu \gamma) \dots\dots\dots (15)$$

とに分離することを試み、結合指数 $C_i$ の変化が主に $K_{D \rightarrow T}$ の変化によるものなのか、或いは $K_{T \rightarrow D}$ の変化によるものなのかを調べ、併せて $^{10}B$ 濃度変化と $\nu_D$ 変化の両振動の違いの原因についても考えてみる。

振動前後における $K_{D \rightarrow T}$ の変化と、 $K_{T \rightarrow D}$ の変化とは、ドライバー領域とテスト領域それぞれ内での発生核分裂中性子数の比( $S_D/S_T$ )の変化を用いて、次式より算出することが出来る。

$$\frac{K_{D \rightarrow T}'}{K_{D \rightarrow T}} = \frac{K' - K_{TT}}{K - K_{TT}} \cdot \frac{(S_D/S_T)'}{(S_D/S_T)} \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{K_{T \rightarrow D}'}{K_{T \rightarrow D}} = \frac{K' - K_{DD}'}{K - K_{DD}} \cdot \frac{(S_D/S_T)'}{(S_D/S_T)} \dots\dots\dots (17)$$

この両式は、R. Averyの論文<sup>(1)</sup>中の式を、当初が必ずしも $K=1.0$  丁度でないとして修正して出したものである。なお、正しくは(13)、(16)両式の分子の $K_{T \rightarrow T'}$ は $K_{T \rightarrow T}$ とすべきであるが、その変化は小さいので $K_{T \rightarrow T}$ で代用し、その僅かな影響は(みかけの)結合指数の変化と(みかけの) $K_{D \rightarrow T}$ の変化という型で $\xi$ と $\lambda$ の中に押し込めるという取り扱いをしている。

CITATIONの計算結果から( $S_D/S_T$ )の変化も読みとり、(14)、(16)両式より $K_{D \rightarrow T}$ の変化率の係数 $\lambda$ を、(15)、(17)両式より $K_{T \rightarrow D}$ の変化率の係数 $\mu$ を算出したところ、表6を得た。但し、反応度摂動としては大きい側のケース( $^{10}\text{B}$ 濃度 $1.0\text{ppm} \rightarrow 0.8\text{ppm}$ 、 $\nu_D$ 変化 $1.000\text{倍} \rightarrow 1.002$ 倍)によった。\*

表6から、ほぼ以下のようなことがいえる。

1.  $\nu_D$ 変化の場合の $\lambda$ は、3.2節で直観的な理論線として述べた $K_{D \rightarrow T}$ 不変： $(\lambda=0)$ が成り立っているようである。
2.  $\nu_D$ 変化の場合の $\mu$ は、同じく3.2節で直観的に述べた $K_{T \rightarrow D} \propto 1 + \gamma$ ： $(\mu=1.0)$ と明らかに異なり、 $C_1'$ を $C_1(1 + \gamma)$ 以上に押し上げる効果を生じている。
3.  $^{10}\text{B}$ 濃度変化の場合の $\mu$ は、 $T \rightarrow D$ への入射後の衝突確率の変化等から考えて $\nu_D$ の場合と違ってもよいように思っていたが、やや意外にも $\nu_D$ 変化の場合の $\mu$ と、むしろ良く合っている(B-3の場合のみやや合いが悪いのは、脚注に記すように、 $0.8\text{ppm}$ の計算結果が良くなかったためらしく、 $0.9\text{ppm}$ の場合をとると $\mu=1.09$ 位になり、 $\nu_D$ 変化の $1.08$ と合ってくる)。
4.  $^{10}\text{B}$ 濃度変化の場合の $K_{D \rightarrow T}$ は明らかに変化(増加： $\lambda$ 正)しており、この $K_{D \rightarrow T}$ の変化が、 $\nu_D$ 変化摂動と $^{10}\text{B}$ 濃度変化摂動の結合指数 $C_1$ の変化の違い(後者の方がやや大)の主原因となっている。これは $D \rightarrow T$ への入射過程の確率変化を考えれば定性的にはうなづけることである。

以上の結果から、3.2節で直観的に述べた $\nu_D$ 変化の場合の理論線： $K_{D \rightarrow T}$ 不変、 $K_{T \rightarrow D} \propto (1 + \gamma)$ による $C_1 \propto (1 + \gamma)$ という考えは棄却すべきであろうが、上記3.というやや望外の好結果も得ており、 $^{10}\text{B}$ 濃度変化摂動が $\nu_D$ 変化摂動に準じて、理論的には最も取り扱い易い実験であるとする考えは裏付けられたようである。但し、上記4項目の物理的メカニズムの定量的検討は、中性子束分布やインポートンス分布の変化等も詳細に論じないと出来ないので、今後の研究課題として残った次第である。

\*表2で見られたように、反応度変化量が中間( $0.9\text{ppm}$ )のケースでも $\xi$ の値が揃っているので、 $\lambda$ 、 $\mu$ はほぼ同一の結果となると考えられる。体系B-3の $^{10}\text{B}$ 濃度変化計算のみ収束が良くなかったせいかわ、 $\xi$ に若干差が出ているが、この体系では $^{10}\text{B}$ 濃度 $0.9\text{ppm}$ のケースの方が正値に近かったらしい。

### 4.3 水位摂動の再検討

これまでの検討結果より、結合指数の変化を無視した従来の実験式では、テスト領域単独の固有値は精度よく求められないこと、および結合指数の変化を考慮しても、水位変化の場合にはかなり大きな変化率となり精度が上りにくいことが明らかとなったが、水位変化摂動については、以下にさらに検討する。

まず従来の実験式を下記に示す。ここでは、記号として従来用いていたものを用い、2.1節のものとは必ずしも一致していないが、本質的な面は変わっていないためあえて統一をはからなかった。また従来は実験値と対応させるため反応度  $\rho$  を導入していたので、本節では  $\frac{\delta K}{K}$  でなく  $\rho$  を用いて立式する。

従来の実験式<sup>(3)</sup>を下記に再掲する。

$$\begin{aligned}
 \rho &= \rho_0 - \rho_0 E_2 - E_1 / (\Delta_T + \Delta_D) \\
 \rho_0 &= - \{ \Delta_{T0} \Delta_{D0} / (\Delta_{T0} + \Delta_{D0}) \} (\delta \Delta_D / \Delta_{D0}) \\
 E_2 &= \{ (\delta C_1 / C_{10}) / (\delta \Delta_D / \Delta_{D0}) \\
 &\quad + \delta \Delta_D / (\Delta_{T0} + \Delta_{D0}) \} \cdot 1 / (1 + \delta \Delta_D / (\Delta_{T0} + \Delta_{D0})) \\
 E_1 &= \{ 1 / (1 - \rho) \} \cdot \{ \Delta_T + \Delta_D + 1 / (1 - \rho) \} \cdot \rho^2 \\
 \Delta_T &= \Delta_{T0} \\
 \Delta_D &= \Delta_{D0} + \delta \Delta_D \\
 \Delta_{T0} &= (1 - K_{T0}) \\
 \Delta_{D0} &= (1 - K_{D0})
 \end{aligned} \quad \dots (18)$$

上式の  $\rho_0$  からテスト領域単独の  $K_{T0}$  を結合指数の変化を無視 ( $E_2 = 0$ ) し導出したのが従来の方法である。即ち下式となる。

$$K_{T0} = 1 + \rho_0 \Delta D_0 / (\rho_0 + \delta \Delta D) \quad \dots (19)$$

(19)式をここでは旧実験式とよぶ。

検討体系は本書で扱っている溶液タンクとし、反応度投入は、ドライバー領域の水位を減少させた場合について(19)式の検討を行った。

計算条件および計算結果を表7に、旧実験式(19)式から求めたテスト領域単独の  $K_{T0}$  の結果を表8に示す。また炉心計算モデルを図1-2に示す。表8の結果からテスト領域溶液水位40cm以外の体系では、旧実験式では単独の実効増倍率導出は、不可能であることが判る。

旧実験式(19)式を満足する為の条件を、これまでの解析結果をもとに一般的に考察してみる。

ドライバー領域の水位が変化した場合（水位低下を想定）、次の現象により実効増率が変化する。

- 1) 体系が小さくなる事による漏れ量の増加。
- 2) 水位低下による核分裂量の減少。
- 3) 水位低下による吸収量の減少。
- 4) スペクトル変化による漏れ量、核分裂量及び吸収量の変化。

4) の効果は水位変化が小さい範囲では間接効果なので無視することができ、主として1)～3) によって水位摂動は支配されていると考えられる。1) 及び2) の効果は実効増倍率を減少させ、3) の効果は増加させる。ドライバー領域は $k_{\infty} > 1.0$  であり、2) の効果は3) の効果より大きく、従ってドライバー領域単独の水位反応度変化は1) の効果とあいまって水位を下げた時通常負となる。

一方、ドライバー領域単独及び2領域体系における水位反応度差について考察すると、2領域体系の場合は、核的重みがテスト領域側にも生じ、ドライバー領域側の核的重みが相対的に減少することになる。従って2領域体系におけるドライバー領域側の2)～3) の効果は、ドライバー領域単独より少なくなる。1) の漏れ量の効果は形状変化による炉心外側へ漏れる量の変化であり、テスト領域が小さい場合は、ドライバー領域の水位変化位置での中性子束がテスト領域を内側に装荷しても大きく変わらない事から、両領域間で差は余りない。またテスト領域の高さが高いケースでも中性子束分布は若干変化するものの、これも領域間で大きな差はない。

従って両領域間の水位反応度の差は主として2) 及び3) によることとなる。ここで2領域体系の水位反応度変化が小さくなるためにはテスト領域の $k_{\infty}$  がドライバー領域の $k_{\infty}$  より大きければ良い。つまりドライバー領域の水位を下げてその領域の核的重みが減少し、テスト領域に核的重みが移行してもテスト領域の $k_{\infty}$  がドライバー領域より大きければ2領域体系の水位反応度係数はドライバー領域単独のそれよりも小さくなる。

以上から考えると、DCA改造炉としての目的及び実験精度等から考えて、DCA改造炉では水位摂動実験を可能にするには下記の条件が満たされる必要があるものと思われる。

- 1) テスト領域単独の未臨界度を測定する目的からも、テスト領域の $K_{eff}$  がある程度小さくなくてはならない。
- 2) 2領域体系が臨界にならなくてはならない。
- 3) テスト領域の $k_{\infty}$  がドライバー領域の $k_{\infty}$  より大きい必要があると考えられる。

4) 2領域体系のテスト領域における核分裂割合がある程度大きくなくてはならない

(3) でテスト領域の $k_{\infty}$ が大きくても、核的重みが少なくても効果が少ない

以上の1)～4)を満足させる炉心を考える事はなかなか困難である。これまでの検討で解析したケースではテスト領域の高さ40cmのケースが比較的上記条件を満足しており(但し $K_{eff}$ は1.0に近い)この場合の旧実験式からのタンク単独 $K_{eff}$ は4%程度の精度で出されている。

以上からも結合指数の変化を無視した旧実験式(18)式では、限界があり実用的でないことがわかる。

そこで2.3節の古橋の式でとり入れた結合指数の変化を水位振動の場合にとり入れた場合を再度検討してみる。

既に3.2節の計算結果のところ記述したように振動条件によっては、結合指数の変化が負になる場合もありうる。この場合でも古橋型の近似式で取り扱えるよう改良を施した。

即ち結合指数の変化を正の場合(吸収振動)と負の場合(水位振動)の2種類に分けた。

・結合指数変化が正の場合(吸収振動に用いる)

$$\gamma = (\zeta (K_{D0} - K_D) + K_{D0}) / K_D \quad \text{(古橋の式)} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\zeta = 0.4 \quad \text{(表9で用いた値)}$$

・結合指数変化が負の場合(水位振動に用いる)

$$\gamma = \{K (K - K_D)\} / \{(K_0 - K_{D0})\} \cdot \alpha \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\alpha = 1 - \beta \quad (\beta \geq 10^{-1})$$

$$\beta = \eta (1 - K_{D0})$$

$$\eta = 0.03 \quad \text{(表9で用いた値)}$$

ただし上式では、結合指数の変化を下記のように仮定した。

$$\delta C_1 / C_{10} = (\gamma K_D / K_{D0}) - 1 \quad \dots\dots\dots (22)$$

(20)式または(21)式を(18)式の $\rho_0$ の式に代入することにより $K_{T0}$ が求められる。

これは吸収振動の場合は、古橋の式をベースにした結合指数変化式( $\zeta$ 値を調整因子として使用)で対応可能であったが、水位振動では誤差が大きくなったためである。 $\zeta$ 値は、吸収振動ケースでの誤差が全体的に少なくなるように決定した。結合指数の変化が負の場合(水位振動)で結合指数変化式は、 $K_T$ を0とした式をもとに、 $\eta$ 値を調整因子として決定した。 $K_T = 0$ の式をもとにした理由は、 $K_T$ が大きい場合は結合指数の感度は小さいが、 $K_T$ が小さいケースでは、結合指数の感度が高くなり誤差が大きくなるためである。

ここでの記号は、(13)式で用いたものと同一の記号とした。但し(21)式中に現われた $K$ は、2領域体系での摂動後の固有値を示す。ここではこの改良式(21)式をDCA水位実験式とよぶ。この実験式を用いドライバー領域水位減少摂動の検討を行った結果を反応度摂動に(20)式を用いた時と併せて表9に示した。表9の結果から水位摂動、吸収摂動いずれの場合でも(21)式または(20)式によりテスト領域単独の実効増倍率を $\pm 2.5\%$ 以内で導出できることが判る。しかしいずれの場合でも摂動としてはかなり小さい値を与えている。即ち吸収摂動では、 $0.1 \sim 0.2\% \Delta k$ 、水位摂動では、 $0.01\% \Delta k$ 程度とした。

DCAでは、従来水位反応度係数を求めるために最大 $15\text{¢}$ 程度の反応度添加を行い測定していた。これはウラン体系の場合で $0.1\% \Delta k$ 相当になる。またドライバー領域吸収摂動の場合の $^{10}\text{B}$ 濃度の分析誤差は、 $0.07\text{ppm}$ 以下( $0.08\% \Delta k$ )であり、上記は分析誤差以上の反応度添加量となるので、測定は可能であるが $^{10}\text{B}$ 濃度は十分な高精度で測定する必要がある。同様にドライバー領域水位摂動の場合、重水水位の読みとり精度が、 $\pm 0.2\text{mm}$ ( $0.004\% \Delta k$ )程度であるので今回検討した $0.01\% \Delta k$ 程度の小さい反応度摂動でも測定可能であるが、やはりドライバー水位は十分な高精度で測定する必要がある。

以上により、古橋流の結合指数の変化をとり入れた(20)式又は(21)式を用いると、吸収摂動はもちろん、水位摂動の場合でもテスト領域単独の実効増倍率を導出できることが判明した。この場合水位摂動での投入反応度はかなり小さな値とすべきことになるが、DCAの測定実績からみて水位測定の測定誤差以上の反応度投入量となるので実験可能とみられる。

#### 4.4 CITATION計算精度の検討

既述したように今回の計算はかなり小さな数字を扱っているためCITATION計算の収束条件により結果が変化するおそれがあるので、どれ位変動するかを検討してみた。

計算体系は、従来と同じで、摂動条件は、摂動による結合指数の変化が小さい吸収摂動とした。また収束条件は中性子束で $10^{-4}$ から $10^{-6}$ に、固有値で $10^{-5}$ から $10^{-7}$ に変更した場合を比較した。なお、テスト領域単独の実効増倍率は、4.2節で扱った旧実験式(14)式を用いて導出した。結果を表10に示す。表10の結果から深い未臨界体系では、計算の収束条件によりかなり結果が変化することがわかる。従って、どの実験式を用いるにしろ小さい変化量を計算する場合注意が必要である。

## 4.5 摂動反応度量の検討

次に表8の結果から投入反応度量により、吸収摂動および水位摂動いずれの場合でも旧実験式(9)式を用いると結果がかなり変化することが判る。これについてさらに詳細に検討してみた。

表11に投入反応度量により $K_T$ がどれだけ変わるかを系統的にサーベイした結果を示す。表11の結果から吸収摂動、水位摂動のいずれの場合においても投入反応度量により $K_T$ は変化するが、極端に大きな反応度量でない限り $K_T$ はそれほど変化しないことがわかる。

しかし従来 $E_1$ 、 $E_2$ が小であれば旧実験式(9)式が成立すると述べたが、表11の結果から吸収摂動ではある程度この近似は正しいが、水位摂動では $E_1$ 、 $E_2$ の項が $\rho_0$ に比べかなり小さいにもかかわらず旧実験式(9)式が成立していない。又、 $E_2$ に含まれている結合指数の変化が吸収摂動に比べ負の符号となっているのでこれについてさらに検討した。

4.3節で若干ふれたようにドライバー領域水位変化により摂動を与えた場合には、吸収量、核分裂量およびもれ量等の変化がおこる。これに比べ吸収物質により摂動を与えた場合には、吸収量と核分裂量が変化する。この場合2.1節で記述した記号のうちTからDへの増倍率付与 $K_{T \rightarrow D}$ 及びDからTへの増倍率付与 $K_{D \rightarrow T}$ がどのように変化するかを考察する。吸収摂動の場合D領域（ドライバー領域）に吸収物質を添加するためD領域の吸収量が当然増加する。従ってD領域の核分裂量が減少するため摂動後の $K_D$ は減少する。一方熱中性子束分布はD領域で減少するがT領域（テスト領域）では増加する。このためテスト領域のインポートランスも増大し、 $K_{D \rightarrow T}$ 即ちD領域よりT領域に与えられる反応度は増加する。従って結合指数の変化率 $\frac{C_1'}{C_1} - 1$ は正の値となる（一方この場合T領域からD領域へ与えられる $K_{T \rightarrow D}$ はあまり変化しないとみなせる）。

一方水位摂動の場合は以下のようなになる。

この場合もD領域に負の反応度（水位低下）を与えるので当然D領域での $K_D$ は減少する。しかし吸収摂動と異なり、ドライバー領域の重水の吸収断面積は微少であるためドライバー領域吸収量の減少は無視できる。また水位低下による体系寸法の減少に起因するもれ量の増加は既に述べたように摂動の程度が微少であるため無視できる。従って水位低下の場合ドライバー領域での核分裂量の減少（体積減少）に伴ない $K_{D \rightarrow T}$ は減少する。このため結合指数の変化率は負の値となる。

以上述べたように、同じ負の反応度摂動を与えても水位摂動と吸収摂動とではそのメカニズムが異なるため結合指数の変化率の符号も異なる。従って結合指数の変化をとりいれた式

として4.3節で記述したような異なった式(20)式または(21)式で取り扱うのが適当ということになる。

#### 4.6 水位摂動実験式の誤差評価

以上述べたように今回検討した水位摂動実験式(18)式においても種々の仮定がもちこまれている。この仮定がどの程度適用できるかをサーベイした結果について記す。

R. Averyの手法によった2領域炉心モデルの実験式を再度以下に示す。

$$(K_{TT} - K) \cdot (K_{DD} - K) = K_{TD} K_{DT} \quad \dots\dots\dots (23)$$

この式の各項の意味は従来と同じで記号は若干異なるのみなので記号の説明は省略する。

ここで各領域孤立系の実効増倍率を各々 $K_D$ 、 $K_T$ とし2領域結合系との差異を $\delta K_D$ 、 $\delta K_T$ で表すと、(23)式の $K_{TT}$ 、 $K_{DD}$ は次のように表わせる。

$$\left. \begin{aligned} K_{TT} &= K_T + \delta K_T \\ K_{DD} &= K_D + \delta K_D \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (24)$$

(23)式、(24)式から

$$(-\Delta + \Delta_T - \delta K_T) (-\Delta + \Delta_D - \delta K_D) = K_{TD} K_{DT} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$K = 1$ の場合 $\Delta = 0$ であるから

$$(\Delta_T^\circ - \delta K_T^\circ) (\Delta_D^\circ - \delta K_D^\circ) = K_{TD}^\circ K_{DT}^\circ \quad \dots\dots\dots (26)$$

ここで $K_{TD} K_{DT} = K_{TD}^\circ K_{DT}^\circ$ とすると、(25)、(26)式から

$$(-\Delta + \Delta_T - \delta K_T) (-\Delta + \Delta_D - \delta K_D) = (\Delta_T^\circ - \delta K_T^\circ) (\Delta_D^\circ - \delta K_D^\circ) \quad \dots\dots\dots (27)$$

従って

$$\Delta_D - \delta K_D = \Delta + \frac{(\Delta_T^\circ - \delta K_T^\circ) (\Delta_D^\circ - \delta K_D^\circ)}{-\Delta + \Delta_T^\circ - \delta K_T^\circ} \quad \dots\dots\dots (28)$$

故に、

$$K_D = K - \delta K_D = \frac{E}{K - K_T^\circ - \delta K_T^\circ} \quad \dots\dots\dots (29)$$

但し、

$$E = (\Delta_T^\circ - \delta K_T^\circ) (\Delta_D^\circ - \delta K_D^\circ) \quad \dots\dots\dots (30)$$



ここで $K_D$  を系全体の実効増倍率 $K$ の関数と考え(30)式を $K$ で微分する。

$$K_D' = 1 + \frac{E}{(K - K_T^\circ - \delta K_T^\circ)^2} \dots\dots\dots (31)$$

$$K_D'' = - \frac{2E}{(K - K_T^\circ - \delta K_T^\circ)^3}$$

$$= \frac{2(1 - K_D')}{(K - K_T^\circ - \delta K_T^\circ)} \dots\dots\dots (32)$$

(32)式より $K = 1$ の場合

$$K_T^\circ + \delta K_T^\circ = 1 + \frac{2(K_D' - 1)}{K_D''} \dots\dots\dots (33)$$

上式により測定不可能な $\delta K_D^\circ$  が消去でき $\delta K_T^\circ$  のみが残ることになり評価が容易となる。次にこれらの導出法を示す。

テスト領域の実効増倍率の2領域体系での値と孤立系での値との差異 $\delta K_T$  は以下の方法で算出する。

- (1) 2領域体系での臨界計算を TWOTRANコードを用いて行い、各メッシュ毎の中性子束分布を求める。
- (2) テスト領域単独での計算を TWOTRANコードを用いて行い、単体での実効増倍率 $K_T$  を算出する。
- (3) (1)で得られた中性子束分布を用いてテスト領域単体の計算を行い、この条件下での実効増倍率を算出する。このとき得られる実効増倍率は2領域体系での試験体領域の $K_{TT}$  に相当する。
- (4) (2)と(3)の結果から $\delta K_T = K_{TT} - K_T$  を用いてテスト領域実効増倍率の孤立系での値と2領域系での値の差異 $\delta K_T$  を求める。

$\delta K_T$  の計算は2領域全体結合系の実効増倍率 $K$ が $K = 1$  (臨界)となる重水レベルで行う。すなわち、そうすれば上述の手順で得られる $\delta K_T$  は $\delta K_T^\circ$  に相当する。このようにして得られた $\delta K_T^\circ$  を(33)式に代入し、 $K_D'$  および $K_D''$  が求められれば実験式による $K_T^\circ$  を得る。

次に $K_D'$ 、 $K_D''$  の算出について述べる。

(32)式、(33)式にあらわれる $K_D$  の $K$ に関する1階微分と2階微分は次の差分式で近似した。

$$K_D' = \frac{dK_D}{dK} \approx \frac{K_D - K_D^\circ}{K - 1}$$

$$K_D'' = \frac{d^2 K_D (K_{D1} - K_D^0) - (K_{D2} - K_D^0)}{d K^2 (K_1 - 1) (K_2 - 1)}$$

対象とした計算体系を下記に示す。

- ・テスト領域：UO<sub>2</sub> (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>水溶液  
(遊離硝酸は存在しないものとする)
- 2<sup>35</sup>U濃縮度 5 (wt/o)
- ・H/U : 1.0, 10, 100
- ・円柱半径 : 10, 15, 20, 25 (cm)

但し、ドライバー領域はATR型1.2wt/o<sup>235</sup>U濃縮度28本クラスター、20cm正方格子ピッチの0%ボイド体系とする。なお、重水中のボロンは0 ppmである。また、 $\delta K_T$ はテスト領域で発生した中性子がテスト領域から漏れ出し、これがドライバー領域の存在によって散乱され、テスト領域に戻される反射体効果の寄与とみなせる。すなわち、 $\delta K_T$ は $K_{TD}$ と並んでテスト領域とドライバー領域の結合の強さを表す指標であるといえる。すなわち、 $\delta K_T$ の値が大きいほど結合は強い。

表12に上記の方法(4)で算出した $\delta K_T$ をまとめた。H/U=1.0、半径が10.0cmのケースではこの値は0.00012718と極めて小さくなっている。すなわち、このケースではテスト領域とドライバー領域の結合はたいへん弱いと言える。このケースでは、テスト領域から漏れ出した中性子が再びテスト領域に戻るといことはほとんどおこらない。漏れ出した中性子はドライバー領域で吸収されるか、体系外へ漏れ出てしまう。半径が10.0cmのケースを除けば、H/U=100では半径の増大と共に $\delta K_T$ も増加している。H/U=10.0の場合には、半径が10.0cmのケースを除けば $\delta K_T$ の値は、半径の増大と共に減少していく。これはH/U=1.0と100の場合とまったく逆の傾向である。H/U=10.0と100.0の場合の半径が10cmの場合には特にテスト領域とドライバー領域の結合の傾向が異なる何らかの理由が存在するものとみられる。H/U=100.0の場合の $\delta K_T$ は他の2通りのH/Uの時より1桁大きい値となっている。また、半径の増大と共に増加する傾向にある。 $\delta K_T$ の半径の増加による減少割合は、半径の増大と共に減少していく。以上の結果から、H/U=10.0および100.0の半径10.0cmのケースと残りのケースではまったく異なった傾向になっているといえる。

以上により算出した $K_D'$ 、 $K_D''$ および $\delta K_T$ から実験式による試験体の実効増倍率 $K_T^0$ を(3)式によって算出した。また、試験体の詳細計算による試験体単独の値 $K_T^0$ との差、すなわち実験式の持つ誤差を評価した。この結果を各H/Uに対して表13(i)から(iii)にまと

めた。表中の誤差の欄に示した「差」および「%」は以下のように定義した。

$$〔差〕 = K_{T^c} - K_{T^o}$$

$$〔\%〕 = (1〔差〕 / K_{T^c}) \times 100$$

H/U=1.0の場合には実験式による値 $K_{T^o}$ と詳細計算による値 $K_{T^c}$ の差は許容しがたい値となっている。もっとも差の小さい半径25.0cmのケースでも $K_{T^o}$ と $K_{T^c}$ の差は201%もあり、半径10.0cmの場合などは1000%を越えている。H/U=10.0の場合は半径が10.0cmのケースは誤差が100%を越えるが、15.0cm以上のケースでは半径の増大と共に誤差が減少している。H/U=100.0の場合は、半径が10.0cmのケースで誤差が23.6%となるものの、15.0cmでは8.1%、半径の増大と共に減少し、25.0cmでは0.7%となっている。半径が25.0cmではすべてのケースの中でいちばん誤差が小さい。これらの結果をまとめてみると $\delta K_T$ の場合と同様、H/U=1.0 および10.0の半径10.0cmのケースと残りのケース、すなわち、H/U=10.0の半径15.0cm以上およびH/U=100.0ではまったく異なった傾向になっていることがわかる。誤差の大きさから考えると、H/U=1.0 及びH/U=10.0で半径が10.0cmという条件であられる傾向のもとでは、今回導出した実験式(18)式は適用範囲を越えている。

ここで算出した実験式(18)式の誤差と $\delta K_T$ の値の関係について考察する。表12によれば、H/U=1.0のときの $\delta K_T$ はH/U=10.0、100.0に比べて1桁小さい値である。ところで、 $\delta K_T$ はテスト領域とドライバー領域の結合の強さを表す一つの指標であった。実験式(18)式導出の仮定によれば、実験式(18)式の誤差はテスト領域とドライバー領域の結合が弱いほど小さくなるはずである。表12の傾向はこれに矛盾するように見える。しかし、この理由は以下のように説明できる。 $\delta K_T$ はテスト領域で発生した中性子がテスト領域から漏れ出し、これがドライバー領域の存在によって散乱され、テスト領域に戻される効果を表す因子である。すなわち、テスト領域からみたドライバー領域との結合の強さを示す因子であるといえる。

逆にドライバー領域からみたテスト領域との結合の強さは同様の方法で導出される $\delta K_D$  ( $\delta K_D = K_{DD} - K_D$ )で計られる。本来であれば、2領域の結合の強さは $K_{TD}$ もしくは $K_{DT}$ で計られるべきであるが、これらは直接測定不可能であるので $\delta K_T$ 、 $\delta K_D$ を用いて結合の強さを判断できる。2領域の結合の強さはテスト領域からみたもの、ドライバー領域からみたものの両方で判定すべきである。H/U=1.0の場合にはテスト領域からみたドライバー領域への結合は表12にみられるように小さい。これはテスト領域からドライバー領域への寄与が小さいということである。しかし、表14にみられるように単体ではきわめて小さい実効増倍率( $K_{T^c}$ )であるテスト領域を体系の中に含みながら、全体として臨界を達成するにはド

ライバー領域がテスト領域に与える寄与が $H/U=10.0$ 、 $100.0$ の場合に比べて相当大きくなっているはずである。すなわち、ドライバー領域からみたテスト領域との結合が他の場合に比べて強くなっている。 $H/U=1.0$ において実験式の誤差が大きくなるのはこのためである。

最後に4.6節以下の溶液系の計算結果が妥当であることの一つの裏付けを以下に示す。

今回対象にした体系における無限増倍率の計算結果を表15に示す。一方図5に「臨界安全ハンドブック」<sup>(5)</sup>に掲載された $H/U$ による均質 $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液の無限増倍率の濃縮度依存性を示す。今回の計算では、 $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液のウラニウム濃縮度は5W/Oであり、図中の14番目の曲線が対応する。このグラフから $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液の無限増倍率は $H/U=1.0$ では0.95、 $H/U=10.0$ では1.30、そして $H/U=100.0$ では0.85とよみとれる。今回の計算結果の表15は定性的に図5と非常によく一致していることが判る。従って今回の計算モデル、計算システムは妥当であったとみなせる。

## 5. おわりに

R. Averyの結合炉理論を発展させ、DCA 2領域炉心の臨界実験よりテスト領域単独の実効増倍率を導出する式を考案・立式し、その妥当性を検討した。

検討結果から以下の事が判明した。

- (1) 反応度添加（摂動）前後の結合指数の変化は無視できず、これを一定とする古い理論式では不十分である。
- (2) 結合指数の変化率を一次式でとり入れることにより許容できる程度の誤差の範囲でテスト領域の実効増倍率を導出できる式を考案・立式し、その誤差等について考察した。
- (3) 吸収摂動と水位摂動とでは、条件により結合指数の変化率の符号が異なり得るが、一次式のとり入れ方を工夫することにより吸収摂動に対しては勿論水位摂動にも適用できる式を工夫した。
- (4) 実験上の摂動量の大きさは、吸収摂動では  $0.2\% \Delta k$ 、水位摂動では  $0.01\% \Delta k$  程度を最大とすることが望ましく、それは高精度の実験を行えば実施可能な範囲である。

謝 辞

本件に関するCITATION計算を具体的に担当して頂いたCRC鷹見益夫氏とCSK田中健一氏の両氏に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) R. Avery, "Theory of Coupled Reactors" : Proc. of the Second U.N. Inter. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, P/1858 (1958).
- (2) 福村信男, 八谷雄喜, 「臨界安全研究のためのD C A改造計画」京都大学原子炉実験所臨界安全専門研究会 (第3回臨界安全研究会報告書) KURRI-TR-319 (1988).
- (3) 福村信男, 「D C Aにおける未臨界度測定」日本原子力研究所核燃料施設安全性研究委員会臨界安全性特別専門委員会 (第2回) 配布資料 (1989年5月).
- (4) 古橋晃, 福村信男, 「D C Aにおける未臨界度測定について (その2)」同上委員会 (第4回) 配布資料 (1990年7月).
- (5) 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課編, 「臨界安全ハンドブック」, にかん書房 (1988).

表1 ドライバー領域への反応度摂動と全系増倍率及び結合指数の変化の関係

ケース	D領域増倍率の 変化率 $\gamma = \frac{\delta K_{DD}}{K_{DD}}$	全系増倍率の 変化率 $\frac{\delta K}{K}$	(みかけの) 結合 指数の変化率 $\frac{C_1' - C_1}{C_1} = \xi \gamma$	$\frac{\delta C_1}{C_1} = \xi \gamma$ 近似での $\xi$ 値	備 考
基 準 ( 摂 動 前 )	( $K_{DD}=0.9837686$ )	( $K=1.0000379$ )	( $C_1$ = $0.001987684$ ) $K-K_{TT}$ = $0.1221739$ $K-K_{DD}$ = $0.0162693$		
$\nu_D$ 変化 1	0.0009726	0.0008671	0.0015445	1.588	変化最小であるが、 $\xi=1.0$ にならなかった。
" 2	0.0020011	0.0017861	0.0032449	1.622	
" 3	0.0029995	0.0026796	0.0049047	1.635	
水位変化 1	0.0009744	0.0010492	0.0142044	14.58	$\xi$ として甚だ大きい値となった。
" 2	0.0017743	0.0019272	0.0271255	15.29	
" 3	0.0024851	0.0026937	0.0376900	15.17	
部分水位変化 1	0.0008724	0.0009415	0.0128657	14.75	全水位変化にほぼ同じ。
反射体付加 1	0.0040342	0.0030224	-0.0348582	-8.64	意外にも負となり、絶対値としても大。
" 2	0.0066000	0.0049754	-0.0569345	-8.54	
$\Sigma_{23}$ 減少 1	0.0011173	0.0010016	0.0021497	1.924	$\nu_D$ 変化より変化大だが、それほど大きくない。
" 2	0.0022319	0.0020028	0.0043487	1.948	
" 3	0.0033550	0.0030117	0.0064250	1.915	

$K_{TT}=0.8778640$   
不変と近似した。

テスト領域 : 半径20.0cm、高さ25.0cm、Pu濃度 250g/l、 $K_T=0.8736554$   
 ドライバー領域 : 基準水位 154.8cm、 $^{10}B$ 無、 $K_D=0.9882071$



表2 ドライバー領域の<sup>10</sup>B濃度変化摂動におけるξ値のサーベイ結果

体系	ケース	D領域増倍率の 変化率 $\gamma = \frac{\delta_{DD}}{K_{DD}}$	全系増倍率の 変化量 $\delta K$	(みかけの)結合 指数の変化率 $\frac{\delta C_1}{C_1} - 1 = \frac{\delta C_1}{C_1}$	$\frac{\delta C_1}{C_1} = \xi \gamma$ 近似でのξ値		
A	R <sub>T</sub> = 20.0cm	<sup>10</sup> B = 1.0ppm	(K <sub>DD</sub> = 0.9840064)	(K = 0.9999914)	(C <sub>1</sub> = 0.001799970)		
	1	H <sub>T</sub> = 25.0cm	0.9	0.0008037	0.0007149	0.0015641	1.946
	1	K <sub>T</sub> = 0.8701785	0.8	0.0016178	0.0014394	0.0031143	1.925
A	R <sub>T</sub> = 20.0cm	1.0	(K <sub>DD</sub> = 0.9909534)	(K = 1.0000016)	(C <sub>1</sub> = 0.002088641)		
	1	H <sub>T</sub> = 17.84cm	0.9	0.0008072	0.0007837	0.0015985	1.980
	2	K <sub>T</sub> = 0.7499972	0.8	0.0016245	0.0015773	0.0032054	1.973
A	R <sub>T</sub> = 20.0cm	1.0	(K <sub>DD</sub> = 0.9945154)	(K = 1.0000002)	(C <sub>1</sub> = 0.002710084)		
	1	H <sub>T</sub> = 10.31cm	0.9	0.0008085	0.0008026	0.0014028	1.735
	3	K <sub>T</sub> = 0.4999939	0.8	0.0016272	0.0016156	0.0028622	1.759
B	R <sub>T</sub> = 12.5cm	1.0	(K <sub>DD</sub> = 0.9894453)	(K = 0.9999954)	(C <sub>1</sub> = 0.002436776)		
	1	H <sub>T</sub> = 47.86cm	0.9	0.0008064	0.0007789	0.0015652	1.941
	2	K <sub>T</sub> = 0.7499992	0.8	0.0016231	0.0015680	0.0031624	1.948
B	R <sub>T</sub> = 12.5cm	1.0	(K <sub>DD</sub> = 0.9969315)	(K = 0.9999903)	(C <sub>1</sub> = 0.001514391)		
	1	H <sub>T</sub> = 14.57cm	0.9	0.0008097	0.0008069	0.0014988	1.851
	3	K <sub>T</sub> = 0.500006	0.8	0.0016305	0.0016241	0.0028212	1.730
C	R <sub>T</sub> = 20.0cm	1.0	(K <sub>DD</sub> = 0.9876067)	(K = 0.9999965)	(C <sub>1</sub> = 0.001822287)		
	1	H <sub>T</sub> = 25.0cm	0.9	0.0008055	0.0007516	0.0015407	1.913
	1	K <sub>T</sub> = 0.8354920	0.8	0.0016214	0.0015132	0.0030923	1.908

体系A, Bは共にテスト領域Pu濃度 250 g/l  
 体系Cはテスト領域Pu濃度 50 g/l  
 Pu組成はすべて 58/24/14/4 (w/o)

(参考) 上記体系に対するν<sub>D</sub>変化摂動におけるξ値

体系	ケース	ξ値	体系	ケース	ξ値	体系	ケース	ξ値
A	ν <sub>D</sub> × 1.001	1.530	A	ν <sub>D</sub> × 1.001	1.502	A	ν <sub>D</sub> × 1.001	1.142
	1	ν <sub>D</sub> × 1.002		1.516	2		ν <sub>D</sub> × 1.002	1.491
C	ν <sub>D</sub> × 1.001	1.538	B	ν <sub>D</sub> × 1.001	1.467	B	ν <sub>D</sub> × 1.001	1.255
	1	ν <sub>D</sub> × 1.002		1.516	2		ν <sub>D</sub> × 1.002	1.517

表3 ドライバー領域の $^{10}\text{B}$ 濃度変化振動における $\xi$ 値見積り誤差の $K_{TT}$ 導出への影響度  
 ( $^{10}\text{B}$ 濃度変化 1.0ppm  $\rightarrow$  0.8ppm について検討)

体 系	$\xi$ の外部見積り 想 定 値	左の $\xi$ 値により 導出した $K_{TT}$ 値	$K_{TT}$ 真値との差 ( $\Delta k$ )
A-1	1.8	0.8856	-0.0018
	1.925	0.8874	0
	2.1	0.8898	+0.0024
A-2	1.8	0.7592	-0.0100
	1.973	0.7692	0
	2.1	0.7759	+0.0067
A-3	1.6	0.4738	-0.0409
	1.759	0.5147	0
	1.9	0.5460	+0.0313
B-2	1.8	0.7605	-0.0085
	1.948	0.7690	0
	2.1	0.7771	+0.0081
B-3	1.6	0.4706	-0.0343
	1.730	0.5049	0
	1.9	0.5434	+0.0385
C-1	1.8	0.8503	-0.0026
	1.908	0.8529	0
	2.1	0.8572	+0.0043

(注) 体系番号の-1は $K_T \sim 0.85$

-2は $K_T \sim 0.75$

-3は $K_T \sim 0.50$ ということでした。

各体系の寸法等の数値については表2、表4、表5参照

表4 孤立系の増倍率と結合系での単独増倍率との差異(1)

K<sub>T</sub> と K<sub>TT</sub>との差異

体 系		ケ ー ス	T領域孤立増倍率 K <sub>T</sub>	結合系でのT領域 単独増倍率 K <sub>TT</sub>	差 K <sub>TT</sub> - K <sub>T</sub>
A	Pu 250g/ℓ	<sup>10</sup> B = 1.0ppm	0.8701785	0.8873877	0.01721
	R <sub>T</sub> = 20.0cm	0.9	"	0.8873901	0.01721
	H <sub>T</sub> = 25.0cm	0.8	"	0.8873923	0.01721
A	Pu 250g/ℓ	1.0	0.7499972	0.7691666	0.01917
	R <sub>T</sub> = 10.0cm	0.9	"	0.7691694	0.01917
	H <sub>T</sub> = 17.84cm	0.8	"	0.7691722	0.01918
A	Pu 250g/ℓ	1.0	0.4999939	0.5147395	0.01475
	R <sub>T</sub> = 20.0cm	0.9	"	0.5147445	0.01475
	H <sub>T</sub> = 10.31cm	0.8	"	0.5147495	0.01476
B	Pu 250g/ℓ	1.0	0.7499992	0.7690236	0.01902
	R <sub>T</sub> = 12.5cm	0.9	"	0.7690268	0.01903
	H <sub>T</sub> = 47.86cm	0.8	"	0.7690299	0.01903
B	Pu 250g/ℓ	1.0	0.5000006	0.5048970	0.00490
	R <sub>T</sub> = 12.5cm	0.9	"	0.5048992	0.00490
	H <sub>T</sub> = 14.57cm	0.8	"	0.5049013	0.00490
C	Pu 50g/ℓ	1.0	0.8354920	0.8529169	0.01742
	R <sub>T</sub> = 20.0cm	0.9	"	0.8529191	0.01743
	H <sub>T</sub> = 25.0cm	0.8	"	0.8529213	0.01743

表5 孤立系の増倍率と結合系での単独増倍率の差異(2)

$K_D$  と  $K_{DD}$  との差異

体系	ケース	D領域の孤立増倍率	結合系でのD領域	差	$K_D$ の変化率	$K_{DD}$ の変化率
		$K_D$	単独増倍率 $K_{DD}$		$K_{DD} - K_D$	$\frac{K_D' - 1}{K_D}$
A	<sup>10</sup> B=1.0ppm	0.9879644	0.9840064	-0.00396	0.0	0.0
	0.9	0.9887600	0.9847973	-0.00396	0.0008052	0.0008037
	0.8	0.9895658	0.9855984	-0.00397	0.0016209	0.0016178
A	1.0	0.9942918	0.9909534	-0.00334	0.0	0.0
	0.9	0.9950958	0.9917533	-0.00334	0.0008086	0.0008072
	0.8	0.9959099	0.9925633	-0.00335	0.0016273	0.0016245
A	1.0	0.9971493	0.9944154	-0.00273	0.0	0.0
	0.9	0.9979569	0.9952194	-0.00274	0.0008079	0.0008064
	0.8	0.9987747	0.9960336	-0.00274	0.0016262	0.0016231
B	1.0	0.9934848	0.9894453	-0.00404	0.0	0.0
	0.9	0.9942875	0.9902432	-0.00404	0.0008079	0.0008064
	0.8	0.9951005	0.9910513	-0.00405	0.0016262	0.0016231
B	1.0	0.9985390	0.9969315	-0.00161	0.0	0.0
	0.9	0.9993484	0.9977388	-0.00161	0.0008105	0.0008097
	0.8	1.0001681	0.9985570	-0.00161	0.0016314	0.0016305
C	1.0	0.9911152	0.9876067	-0.00351	0.0	0.0
	0.9	0.9919149	0.9884023	-0.00351	0.0008068	0.0008055
	0.8	0.9927248	0.9892081	-0.00352	0.0016240	0.0016214

ドライバー領域水位

ケースA-1 : 163.39cm

A-2 : 171.90cm

A-3 : 176.71cm

B-2 : 171.48cm

B-3 : 178.56cm

C-1 : 167.63cm

表6 結合指数の変化率係数 $\xi$ の $K_D \rightarrow T$ の変化率係数 $\lambda$ と $K_T \rightarrow D$ の変化率係数 $\mu$ への分離結果

体 系	$\nu_D$ 変化(1.000倍 $\rightarrow$ 1.002倍)			$^{10}\text{B}$ 濃度変化(1.0ppm $\rightarrow$ 0.8ppm)		
	$\xi$	$\lambda$	$\mu$	$\xi$	$\lambda$	$\mu$
A-1	1.516	-0.17	+1.68	1.925	+0.24	+1.69
A-2	1.491	+0.18	+1.31	1.973	+0.66	+1.31
B-2	1.517	+0.19	+1.33	1.948	+0.65	+1.30
A-3	1.140	+0.07	+1.07	1.759	+0.70	+1.06
B-3	1.254	+0.18	+1.08	1.730	+0.76	+0.97

(注)  $\lambda$ 、 $\mu$ は算出過程の誤差を考慮して小数以下2位迄にとどめた。

なお、 $\lambda$ の算出の際(10)式で $K_{TT}$ の $K_{TT}'$ への変化を正しく取り入れると、 $^{10}\text{B}$ 濃度変化の場合の $\lambda$ は次の値に変わる( $\nu_D$ 変化では $K_{TT}$ は不変)。

	$\lambda$
A-1	+0.21
A-2	+0.64
B-2	+0.62
A-3	+0.69
B-3	+0.76

この変化は、本文4.2節中の記述を変える程のものではない。

表7 水位振動の検討 (CITATION計算結果)

テスト領域溶液水位 : 10cm ケース

(ドライバー領域水位) cm	keff	ケース番号
テスト領域単独	: 0.4842902	
2 領域体系 (165.75)	: 0.9999522	基 準
2 領域体系 (164.50)	: 0.9990071	1
2 領域体系 (161.00)	: 0.9962869	2
2 領域体系 (156.00)	: 0.9921668	3
ドライバー領域単独 (165.75)	: 0.9972826	基 準
ドライバー領域単独 (164.50)	: 0.9963444	1
ドライバー領域単独 (161.00)	: 0.9936401	2
ドライバー領域単独 (156.00)	: 0.9895659	3

テスト領域溶液水位 : 20cm ケース

テスト領域単独	: 0.8776876	
2 領域体系 (154.72)	: 0.9999929	基 準
2 領域体系 (152.72)	: 0.9982760	1
2 領域体系 (149.72)	: 0.9955964	2
ドライバー領域単独 (154.72)	: 0.9885886	基 準
ドライバー領域単独 (152.72)	: 0.9868484	1
ドライバー領域単独 (149.72)	: 0.9841476	2

テスト領域溶液水位 : 40cm ケース

テスト領域単独	: 0.9827691	
2 領域体系 (101.30)	: 0.9999643	基 準
2 領域体系 ( 98.30)	: 0.9977014	1
ドライバー領域単独 (101.30)	: 0.9174827	基 準
ドライバー領域単独 ( 98.30)	: 0.9110729	1

表 8 旧実験式によるテスト領域単独実効増倍率算出の結果

テスト領域溶液水位 (cm)	ケース	旧実験式値	CITATION計算値
10	1	1.04850	0.48429
	2	1.11994	0.48429
	3	1.12030	0.48429
20	1	-0.49041	0.87769
	2	-1.82725	0.87769
40	1	0.95370	0.98277

表9 DCA水位振動実験式の検討

(1) 溶液テスト領域 (ドライバー領域吸収振動)

ケース① R=20.0cm、H=40cm  
Keff(T) : 0.98278(計算値)

投入反応度 (%)	DCA吸収振動 実験式(20)式値	誤差 (%)	第三項実験式値*	旧実験式(19)式値**
-3.63E-2	0.9922	0.94	0.9929	0.9929
-1.28E-1	0.9921	0.93	0.9938	0.9937

ケース② R=20.0cm、H=10cm  
Keff(T) : 0.48430(計算値)

投入反応度 (%)	DCA吸収振動 実験式(20)式値	誤差 (%)	第三項実験式値*	旧実験式(19)式値**
-3.05E-2	0.4680	-1.63	0.6122	0.5392
-6.16E-2	0.4679	-1.64	0.6629	0.5132
-1.23E-1	0.4675	-1.68	0.7626	0.4519
-2.47E-1	0.4688	-1.75	0.9477	0.2670

ケース③ R=12.5cm、H=100cm  
Keff(T) : 0.81843(計算値)

投入反応度 (%)	DCA吸収振動 実験式(20)式値	誤差 (%)	第三項実験式値*	旧実験式(19)式値**
-3.21E-2	0.8420	2.36	0.8564	0.8519
-7.56E-2	0.8420	2.36	0.8620	0.8514

ケース④ R=12.5cm、H=14cm  
Keff(T) : 0.48522(計算値)

投入反応度 (%)	DCA吸収振動 実験式(20)式値	誤差 (%)	第三項実験式値*	旧実験式(19)式値**
-3.07E-2	0.4762	-0.90	0.6673	0.5192
-6.19E-2	0.4760	-0.92	0.7687	0.4578
-1.24E-1	0.4756	-0.96	0.9591	0.2747
-2.48E-1	0.4748	-1.04	---	---

(Continued)



表9 (Continued)

(2) 溶液テスト領域 (ドライバー領域水位摂動)

ケース①  $R=20.0\text{cm}$ 、 $H=40\text{cm}$   
 $K_{\text{eff}}(T) : 0.98278$ (計算値)

投入反応度 (%)	D C A 水位 実験式(21)式値	誤差 (%)	第三項実験式値*	旧実験式(19)式値**
-7.57E-5	0.9727	-1.01	0.9525	0.9524

ケース②  $R=20.0\text{cm}$ 、 $H=10\text{cm}$   
 $K_{\text{eff}}(T) : 0.48430$ (計算値)

投入反応度 (%)	D C A 水位 実験式(21)式値	誤差 (%)	第三項実験式値*	旧実験式(19)式値**
-1.50E-7	0.4988	-1.45	---	1.3528
-1.50E-6	0.4988	-1.45	---	1.3524
-1.50E-5	0.4988	-1.45	---	1.3515
-1.50E-4	0.4987	-1.44	---	1.3445
-1.52E-3	0.4983	-1.40	---	1.2848
-8.06E-3	0.4964	-1.21	---	1.1576

ケース③  $R=12.5\text{cm}$ 、 $H=100\text{cm}$   
 $K_{\text{eff}}(T) : 0.81843$ (計算値)

投入反応度 (%)	D C A 水位 実験式(21)式値	誤差 (%)	第三項実験式値*	旧実験式(19)式値**
-9.87E-5	0.8206	0.22	---	1.0907

ケース④  $R=12.5\text{cm}$ 、 $H=14\text{cm}$   
 $K_{\text{eff}}(T) : 0.48522$ (計算値)

投入反応度 (%)	D C A 水位 実験式(21)式値	誤差 (%)	第三項実験式値*	旧実験式(19)式値**
-7.35E-6	0.4995	1.43	---	1.3687

\* (18)式で $E_2$ 項を無視した実験式にあたる。\*\* (18)式で $E_1$ 、 $E_2$ 項を無視した実験式にあたる。

表10 収束条件の差による固有値の差

$\phi : 10^{-4}, K_{eff} : 10^{-5}$		$\phi : 10^{-8}, K_{eff} : 10^{-9}$	
<u>R = 20cm H = 40cm</u>			
$K_{T0} = 0.9827831$	$K_T = 0.993727$ (19式)	$K_{T0} = 0.982783$	
$K_0 = 0.9999725$	$K_{D0} = 0.9176146$	$K_T = 0.993660$ (19式)	
$K_1 = 0.9987350$	$K_{D1} = 0.8997206$	$K_0 = 0.999999904$	$K_1 = 0.9987233973$
		$K_{D0} = 0.9175859522$	$K_{D1} = 0.8996918178$
<u>R = 20cm H = 10cm</u>			
$K_{T0} = 0.4842968$	$K_T = 1.6015$ (19式)	$K_{T0} = 0.484297$	
$K_0 = 0.9999885$	$K_{D0} = 0.9973186$	$K_T = 0.450990$ (19式)	
$K_1 = 0.9987588$	$K_{D1} = 0.9960814$	$K_0 = 0.9999999899$	$K_1 = 0.9987702742$
		$K_{D0} = 0.9973237488$	$K_{D1} = 0.9960865070$
<u>R = 12.5cm H = 100cm</u>			
$K_{T0} = 0.8184335$	$K_T = 0.85088$ (19式)	$K_{T0} = 0.818434$	
$K_0 = 0.9999999$	$K_{D0} = 0.9878359$	$K_T = 0.851433$ (19式)	
$K_1 = 0.9992448$	$K_{D1} = 0.9870185$	$K_0 = 1.0000000010$	$K_1 = 0.9992449975$
		$K_{D0} = 0.9878319000$	$K_{D1} = 0.9870144434$

表11 投入反応度量による効果

〔吸収振動〕 負振動 $\Sigma a$ (%)	$\rho$	$\rho_0$	$-\rho_0 E_2$	$-E_1 / (\Delta_r + \Delta_D)$	単独 $K_r$	旧実験式(19)式 $K_r$
R = 20.0 cm						
H = 40cm 0.625	-3.628E-4	-7.863E-4	4.249E-4	-1.394E-6	0.982783	0.992859( 1.01)*
2.5	-1.278E-3	-3.092E-3	1.830E-3	-1.550E-5		0.993660( 1.09)
H = 10cm 0.0375	-3.050E-4	-3.052E-4	4.599E-7	-2.723E-7	0.484297	0.539177( 5.49)
0.075	-6.157E-4	-6.159E-4	1.297E-6	-1.108E-6		0.513164( 2.89)
0.15	-1.231E-3	-1.231E-3	4.049E-6	-4.425E-6		0.451917(-3.24)
0.3	-2.468E-3	-2.464E-3	1.393E-5	-1.771E-5		0.267022(-21.7)
R = 12.5 cm						
H = 100cm 0.0423	-3.210E-4	-3.255E-4	5.186E-6	-6.334E-7	0.818434	0.851884( 3.35)
0.1	-7.556E-4	-7.661E-4	1.404E-5	-3.500E-6		0.851430( 3.30)
H = 14cm 0.0375	-3.066E-4	-3.066E-4	3.315E-7	-2.758E-7	0.485216	0.519183( 3.40)
0.075	-6.188E-4	-6.187E-4	1.042E-6	-1.123E-6		0.457823(-2.74)
0.15	-1.237E-3	-1.236E-3	3.559E-6	-4.482E-6		0.274678(-21.1)
0.3	-2.480E-3	-2.475E-3	1.302E-5	-1.794E-5		-1.24833 (-173)
〔水位振動〕						
負振動 ( cm )						
R = 20.0 cm						
H = 10cm 0.0002	-1.500E-7	-1.481E-7	-1.907E-9	-6.592E-14	0.484297	1.35277 (86.85)
0.002	-1.500E-6	-1.481E-6	-1.907E-8	-6.592E-12		1.35238 (86.81)
0.02	-1.500E-5	-1.481E-5	-1.905E-7	-6.594E-10		1.35152 (86.72)
0.2	-1.502E-4	-1.483E-4	-1.871E-6	-6.607E-8		1.34447 (86.02)
2.0	-1.521E-3	-1.499E-3	-1.533E-5	-6.748E-6		1.28475 (80.05)
10.0	-8.057E-3	-7.879E-3	-8.089E-6	1.858E-4		1.15763 (67.33)

\* 単独  $K_r$  との差 (%)

表12  $\delta K_1$  の計算値

		テスト領域半径 (cm)			
		10.0	15.0	20.0	25.0
H/U	1.0	0.00012718	0.01456946	0.025994867	0.04809558
	10.0	0.03873670	0.08672100	0.072708010	0.05467076
	100.0	0.19595945	0.15235043	0.157095431	0.16207176

表14 テスト領域単体での実効増倍率  $K_1^c$

		テスト領域半径 (cm)			
		10.0	15.0	20.0	25.0
H/U	1.0	0.06219849	0.14693862	0.230540037	0.31630743
	10.0	0.39484614	0.72584951	0.882894635	0.98512137
	100.0	0.65038455	0.78382259	0.82331395	0.84419131

表15 WIMS-ATRによるテスト領域の無限増倍率

		テスト領域半径 (cm)			
		10.0	15.0	20.0	25.0
H/U	1.0	0.93185	0.94229	0.94690	0.94944
	10.0	1.29055	1.29647	1.29867	1.29990
	100.0	0.83383	0.88773	0.89006	0.89495

表13 実験式の誤差評価表

(i)  $H/U = 1.0$ 

半 径 (cm)	$K_T^c$	$K_T^o$	誤 差 *	
			差	%
10.0	0.062198495	0.999859520	-0.937661025	—
15.0	0.146938622	0.985499749	-0.838561127	570.0
20.0	0.230540037	0.974012883	-0.743472846	322.0
25.0	0.316307425	0.952102417	-0.635794992	201.0

(ii)  $H/U = 10.0$ 

半 径 (cm)	$K_T^c$	$K_T^o$	誤 差 *	
			差	%
10.0	0.394846141	0.905527299	-0.510681158	129.0
15.0	0.725849509	0.913161997	-0.187312488	25.8
20.0	0.882894635	0.929064990	-0.046170355	5.2
25.0	0.985121369	0.940373244	0.044748125	4.5

(iii)  $H/U = 100.0$ 

半 径 (cm)	$K_T^c$	$K_T^o$	誤 差 *	
			差	%
10.0	0.650384545	0.803940552	-0.153556007	23.6
15.0	0.783822596	0.847641233	-0.063818637	8.1
20.0	0.823313945	0.842997265	-0.019683315	2.3
25.0	0.844191313	0.838206235	-0.005985078	0.7

\* [差] =  $K_T^c - K_T^o$ (% ) = ( | [差] | /  $K_T^c$  ) × 100

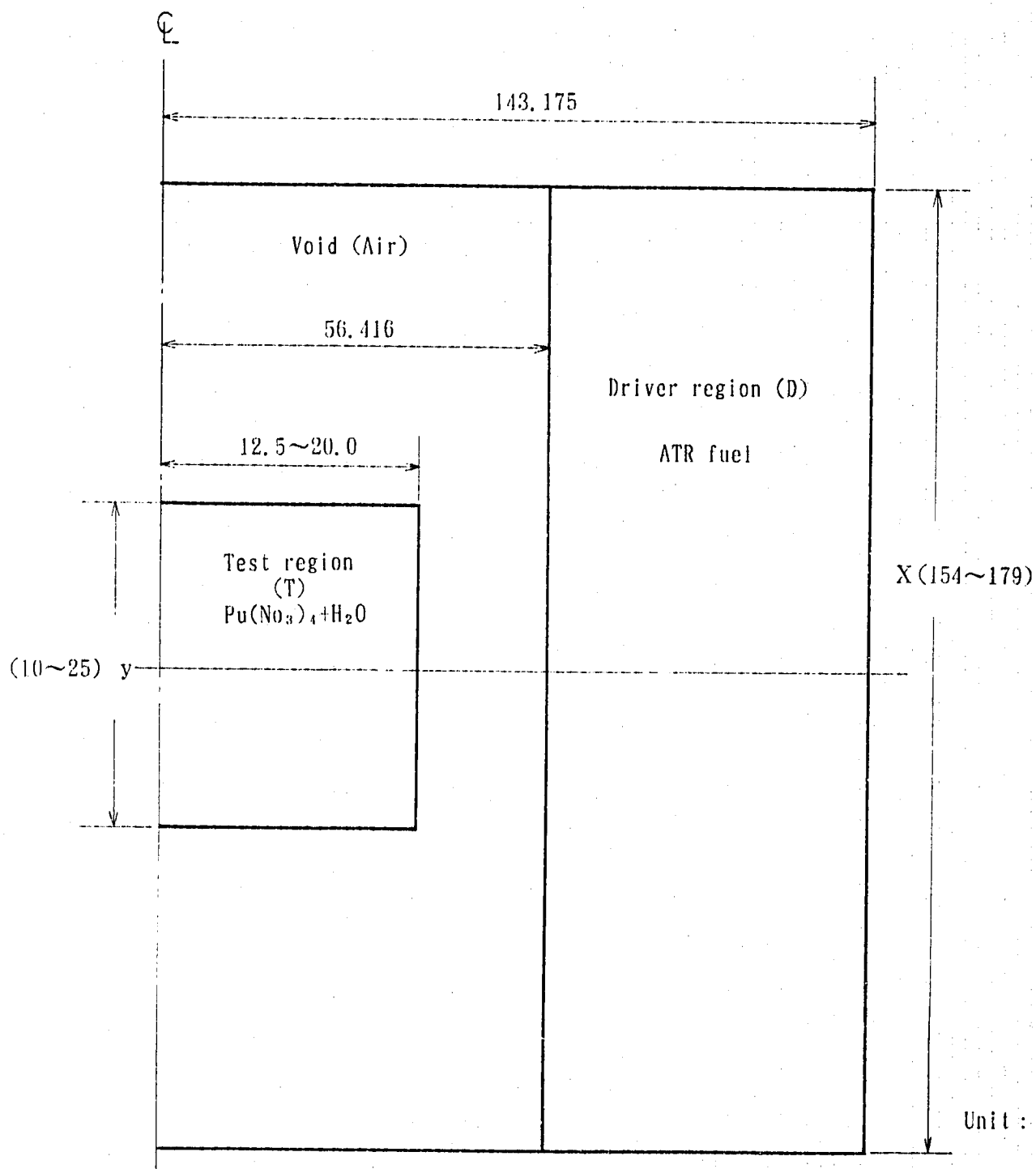


図1-1 CITATION用計算モデル (R, Z 2次元: 古橋モデル)

(注) 古橋の計算では、ドライバー領域水位変化の場合は、基準ケースに比して上下両方向に同一量のドライバー領域寸法変化を与えて対称性を持たせている。

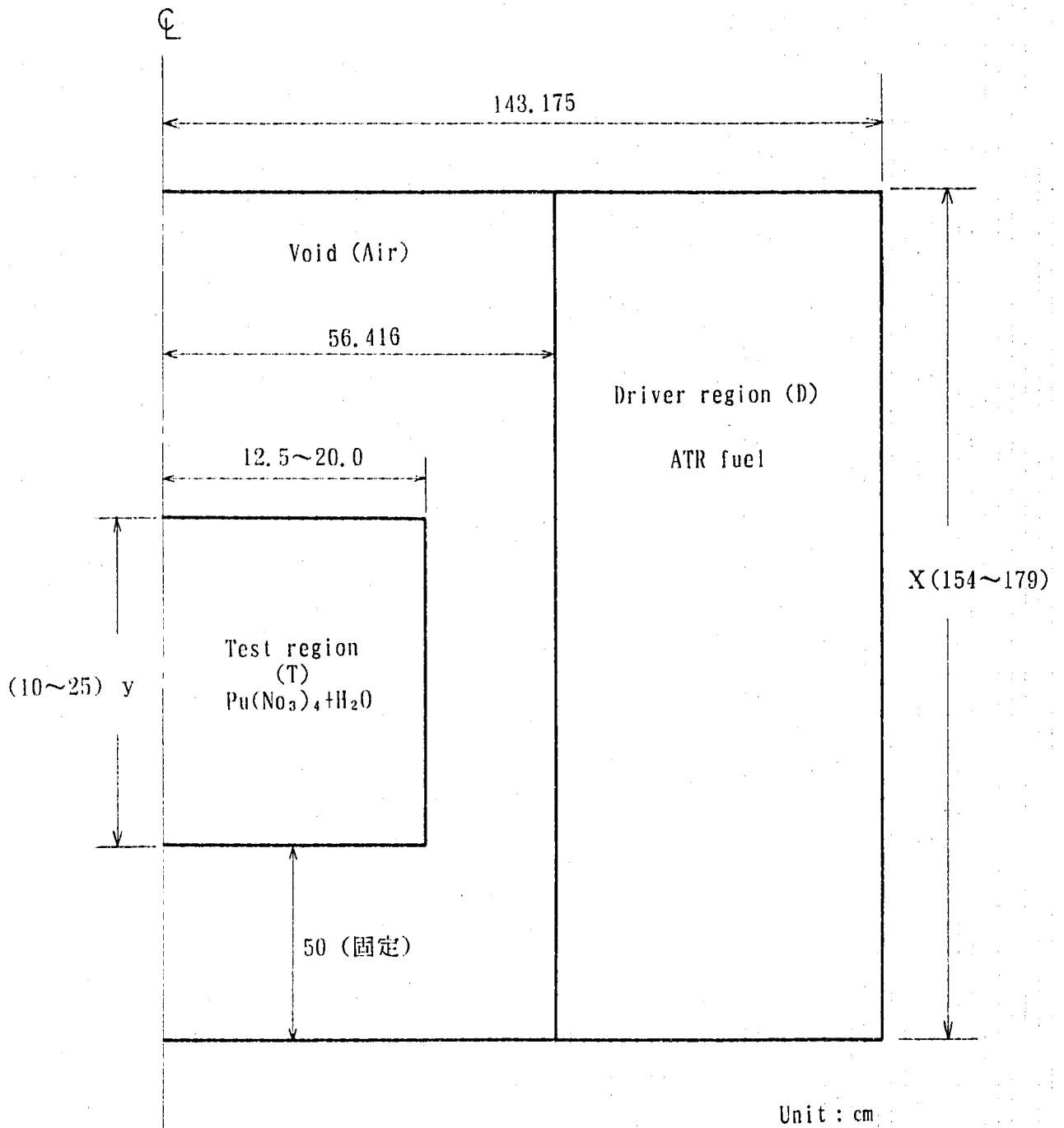
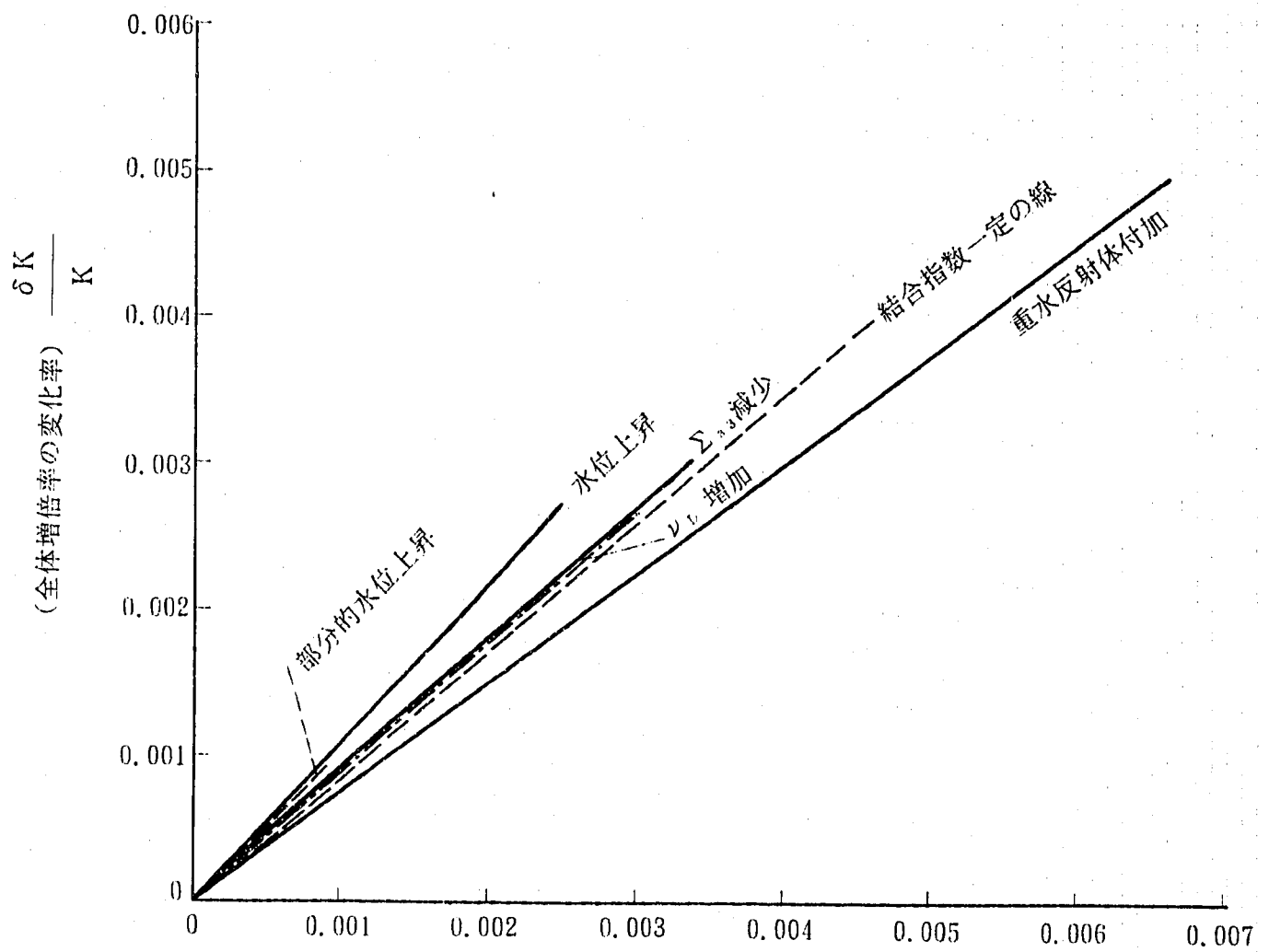


図1-2 CIRATION用計算モデル (R,Z 2次元: DCAモデル)



$$\gamma = \frac{\delta_{DD}}{K_{DD}} \quad (\text{ドライバー領域増倍率の変化率})$$

図2 ドライバー領域への反応度摂動の方法と全体の増倍率変化の関係 (増倍率付加)



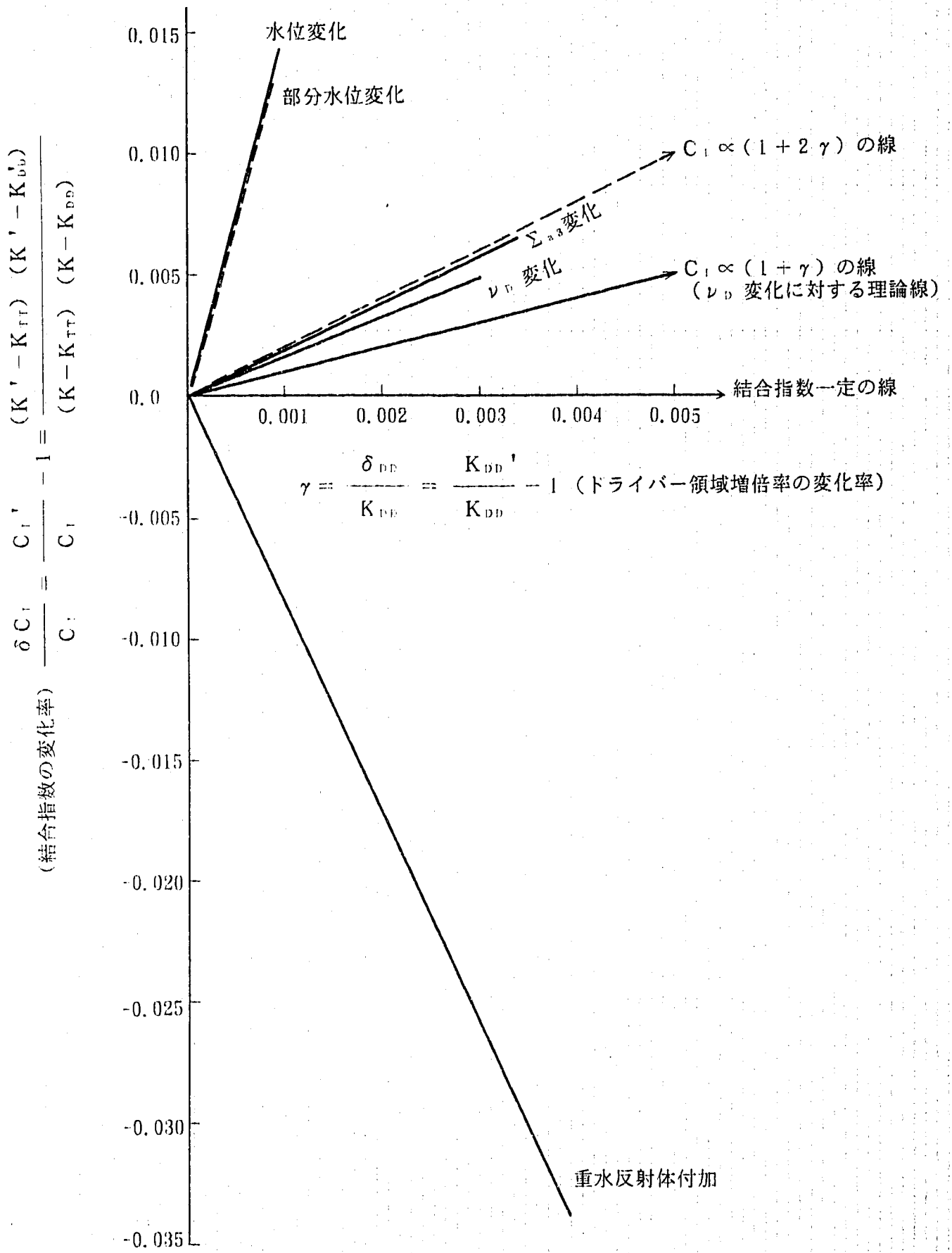


図3 ドライバー領域への反応度摂動の方法と（みかけの）結合指数の変化の関係（増倍率付加）

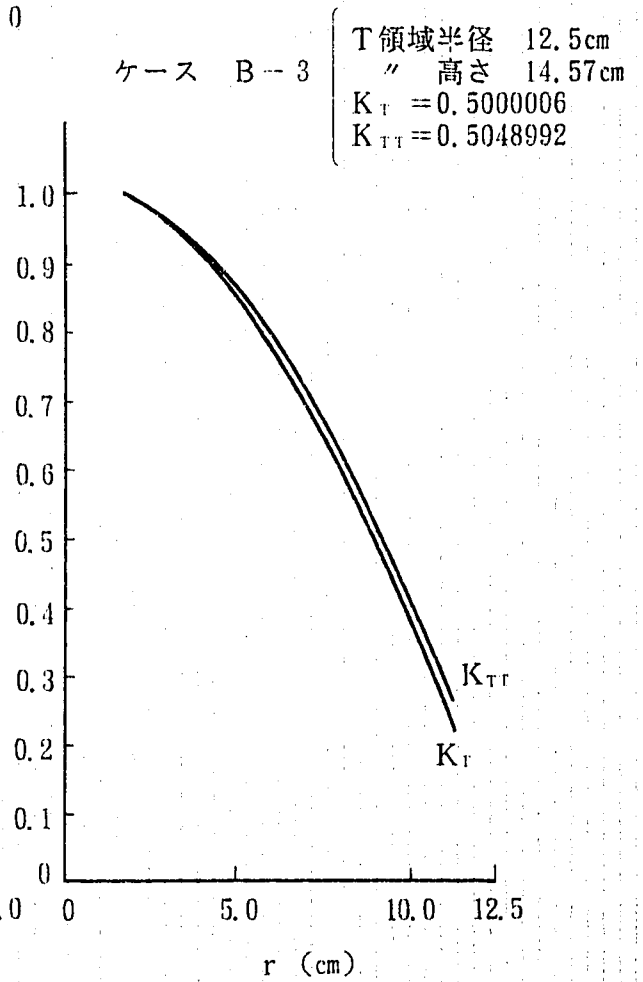
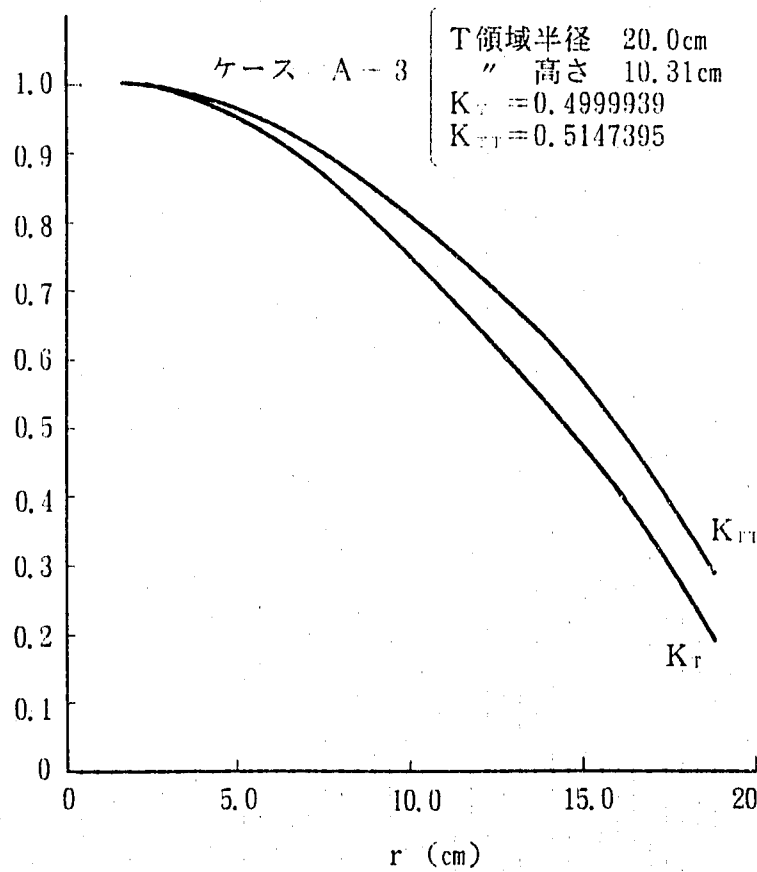
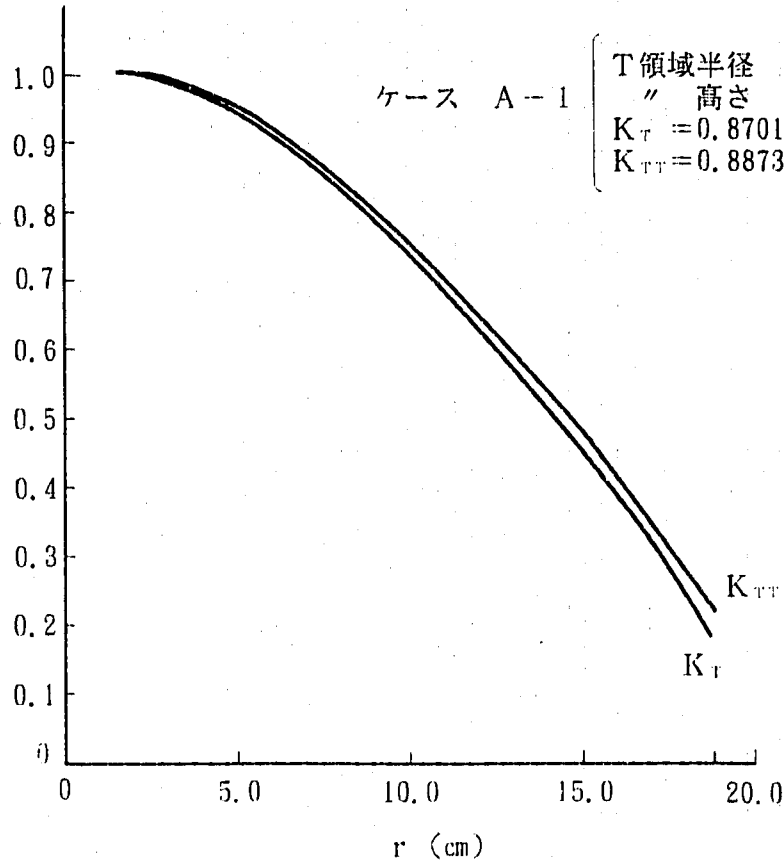
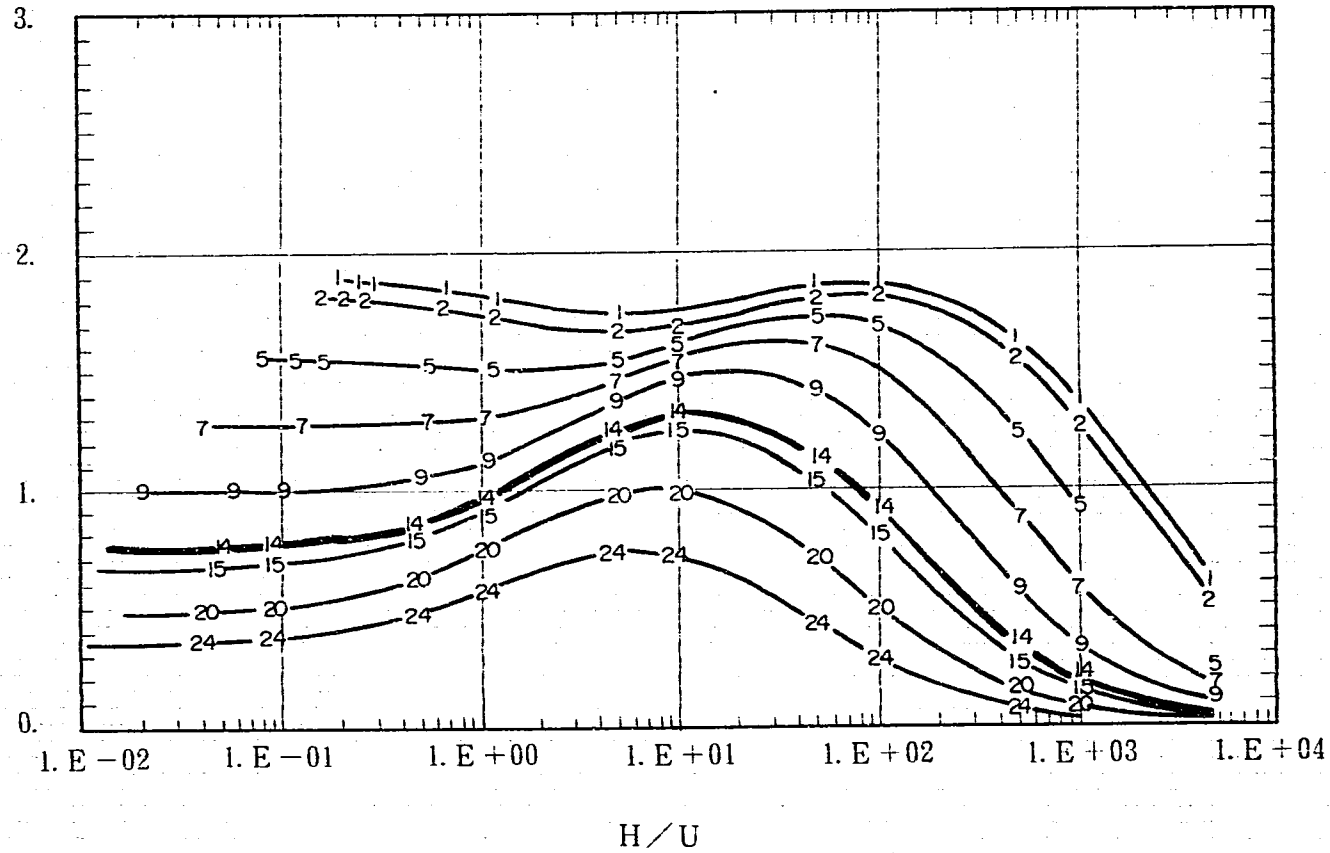


図4 孤立系との比較：D領域の反射体効果によるT領域熱中性子束分布の変化

無限増倍率



濃縮度 (%)

1	1.000E+02
2	8.000E+01
3	6.000E+01
4	5.000E+01
5	4.000E+01
6	3.000E+01
7	2.000E+01
8	1.030E+01
9	1.000E+01
10	9.700E+00
11	9.500E+00
12	9.300E+00
13	9.000E+00
14	5.000E+00
15	4.000E+00
16	3.000E+00
17	2.150E+00
18	2.100E+00
19	2.050E+00
20	2.000E+00
21	1.950E+00
22	1.900E+00
23	1.850E+00
24	1.000E+00

図5 「臨界安全ハンドブック」による硝酸ウラニウム水溶液の無限増倍率