

J A E R I - M

90-112

水中の 2 ユニット体系における
中性子相互干渉効果の測定と解析

1990 年 7 月

三好 慶典・須崎 武則・石川 利光・小林 岩夫

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, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

水中の 2 ユニット体系における
中性子相互干渉効果の測定と解析

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

三好 慶典・須崎 武則・石川 利光
小林 岩夫

(1990 年 6 月 18 日受理)

原研の軽水臨界実験装置 (TCA) において、平断面が正方形の 2 つの矩形炉心を配列した相互干渉体系に関する臨界実験を行った。矩形炉心は、2.6% 濃縮の UO_2 燃料棒を 17×17 本配列して構成され、燃料棒格子の間隔は 1.956 cm、単位燃料セルの水対燃料体積比は 1.83 である。実験では、ユニット間の距離（水ギャップ厚さ）をパラメータとして臨界水位を測定し、各炉心の臨界水位の差から水位法を用いて、一方のユニットが他方のユニットへ与える反応度寄与、水ギャップの負の反応度効果及び片側ユニットの未臨界度を評価した。また、モンテカルロ法コード KENO-IV を用いて、臨界体系に関するベンチマーク計算を行うと共に、反応度効果を解析し実験値との比較を行った。

Measurement and Calculations of Neutron Interaction Effects
of a Two-coupled System in Water

Yoshinori MIYOSHI, Takenori SUZAKI, Toshimitsu ISHIKAWA
and Iwao KOBAYASHI

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 18, 1990)

A critical experiment on the interaction effect between two rectangular cores moderated with light water was performed at Tank-type Critical Assembly (TCA) of JAERI. Each core was composed of the array of UO₂ fuel rods of which ²³⁵U enrichment was 2.6 w/o. The lattice cell was a square type of which the pitch was 1.956 cm corresponding to the water-to-fuel volume ratio of 1.83.

From the obtained critical water heights, reactivity effects from one unit to another through water gap and negative reactivity of water gap and subcriticality of single units were measured by use of water level worth method as a function of the distance between two units.

Calculations for critical configurations were also made with Monte Carlo code KENO-IV in JACS system, and compared with the measured reactivity effects.

Keywords: Neutron Interaction Effect, Two-coupled System, Water, TCA, Critical Experiment

目 次

1. 序 論	1
2. 実 驗	2
2.1 実験体系	2
2.1.1 軽水臨界実験装置	2
2.1.2 燃 料 棒	2
2.1.3 構成炉心	2
2.2 実験結果	3
2.2.1 臨界水位	3
2.2.2 ユニット間の中性子相互干渉効果	3
2.2.3 片側ユニット中性子実効増倍係数	4
2.2.4 水ギャップの反応度効果	4
3. 解析と検討	6
3.1 解析方法	6
3.1.1 臨界解析コード	6
3.1.2 計算モデル	6
3.2 解析結果と検討	7
3.2.1 臨界体系のベンチマーク計算	7
3.2.2 ユニット間の中性子相互干渉効果	7
3.2.3 単一ユニットの中性子実効増倍係数	8
3.2.4 水ギャップの反応度効果	9
4. ま と め	10
謝 辞	11
参考文献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Experiments	2
2.1 Experimental core	2
2.1.1 Tank-type critical assembly (TCA)	2
2.1.2 Fuel rods	2
2.1.3 Core configurations	2
2.2 Experimental result	3
2.2.1 Critical core height	3
2.2.2 Interaction effect between two units	3
2.2.3 Reactivity of single unit	4
2.2.4 Reactivity effect of water gap	4
3. Calculation and discussion	6
3.1 Calculational method	6
3.1.1 Code system	6
3.1.2 Calculation model	6
3.2 Result and discussion	7
3.2.1 Benchmark calculation	7
3.2.2 Interaction effect between two units	7
3.2.3 Effective multiplication factor of single core	8
3.2.4 Reactivity effect of water gap	9
4. Summary	10
Acknowledgements	11
References	11

List of Tables

Table 2.1 Specification of fuel rod	12
Table 2.2 Critical height and differential reactivity worth	13
Table 2.3 Experimental result of reactivity effect	14
Table 3.1 Energy structure of MGCL 137	15
Table 3.2 Atomic number density	16
Table 3.3 Benchmark calculation	17
Table 3.4 Effective multiplication factor of interaction core (H is critical height of single core)	18
Table 3.5 Calculated reactivity effect from unit 2 to unit 1	19
Table 3.6 Effective multiplication factor and reactivity of single unit	20
Table 3.7 Calculated effective multiplication factor of interaction core (H is critical height of core without water gap) ..	21
Table 3.8 Calculated reactivity effect of water gap between two units	22

List of Figures

Fig. 2.1	Vertical cross sectional view of TCA	23
Fig. 2.2	Specification of fuel rod	24
Fig. 2.3	Plan view of experimental core	25
Fig. 2.4	Critical height of interaction core	26
Fig. 2.5	Differential reactivity worth $d\phi/dH$ vs. critical height ..	27
Fig. 2.6	Dependence of the ratio of M^2/K^∞ on the distance between two units	28
Fig. 2.7	Reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21}	29
Fig. 2.8	Dependence of neutron multiplication factor of single unit vs. distance between two units	30
Fig. 2.9	Reactivity effect of water gap ρ_{wg} between two cores ..	31
Fig. 3.1	Calculational flow of JACS system	32
Fig. 3.2	Calculational model	33
Fig. 3.3	Benchmark calculation	35
Fig. 3.4	Variation of effective multiplication factor vs. distance between two units (Model A,B($H=120.59\text{cm}$), Model C)	36
Fig. 3.5	Variation of reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21} vs. distance between two units	37
Fig. 3.6	Correlation of reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21} between measured value and calculational value with model A	38
Fig. 3.7	Comparison of reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21} between measured value and calculational value with model A	39
Fig. 3.8	Comparison of reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21} between measured value and calculational value with model B	40
Fig. 3.9	Comparison of reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21} between measured value and calculational value with model C	41
Fig. 3.10	Correlation of effective multiplication factor of single unit between measured value and calculational value with model A	42
Fig. 3.11	Variation of effective multiplication factor vs. distance between two units (Model A,B($H=41.21\text{cm}$), Model C)	43

Fig. 3.12 Variation of reactivity effect of water gap ρ_{wg} vs. distance between two units	44
Fig. 3.13 Correlation of reactivity effect of water gap ρ_{wg} vs. between measured value and calculational value with model A	45

1. 序論

核燃料施設の燃料貯蔵設備、燃料取扱設備等は、燃料集合体あるいは溶液燃料を包含する機器が複数分散した配列体系を構成している。これらの体系の臨界安全設計・評価を行う場合、個々の機器を評価上の1つの単位として单一ユニットの未臨界性を確保すると同時に、配列全体から成る複数ユニットの未臨界性を確保することが必要である。複数ユニットの中性子実効増倍率 K_{eff} は、1つのユニットからの漏洩中性子が他のユニットに入射することにより各々の单一ユニットの K_{eff} よりも増加する。この中性子相互干渉効果は、ユニットの数、形状寸法、あるいは、ユニット間の距離、中性子遮蔽体の種類により変化する。一般に、各ユニットの条件が一定の下に配列体系の K_{eff} を低減させるためには、ユニット間の距離を十分確保するか、ユニット間に中性子相互干渉を減衰させる遮蔽体を設置するかいずれかの方法が取られる。

従って、合理的なユニット・遮蔽体の配置、あるいは臨界解析モデルの設定を行うためには、中性子遮蔽体（水・ポリエチレン等の水素含有物質、及びコンクリート）による中性子相互干渉効果の減衰特性等を把握することが重要である。

これらの課題に対する炉物理的な基礎データを求めるため、水中の2ユニットにおける中性子相互干渉効果に関する実験解析を行った。

実験では、配列体系の最も基本的な2ユニット体系（相互干渉炉心）を構成し、一方のユニットから他方のユニットへの反応度寄与、と水ギャップの反応度を臨界水位法により測定し、その特性を調べた。

実験を行った体系は、濃縮度 2.6 w/o の UO_2 燃料から成る相互干渉対称炉心で、1つのユニットは、縦横 17 本の燃料棒を配列し、平断面が正方形状をした矩形炉心である。燃料棒の格子間隔は 1.956 cm、単位セルの水対燃料体積比 (V_{H_2O}/V_{Fuel}) は 1.83 である。実験ではユニット間の水ギャップ厚さを 0 から約 25 cm までの範囲で変化させ、各々の配置条件における臨界水位を測定し、單一ユニットが独立に存在する場合の臨界水位との差から微分水位反応度を用いてユニット間の反応度寄与等を評価した。

解析では、原研で開発された JACS コードシステムに内蔵されたモンテカルロコード KENO-IV を用いて、臨界体系に対するベンチマーク計算を行った。また、ユニット間の相互干渉効果の評価法に関して、反応度効果に対する二次元効果を検討するため、形状の異なる解析モデルを用いて実効増倍係数を計算し、実験値との比較を行った。以下、第2章に実験体系及び実験結果を、第3章に解析及びその検討結果を記す。

2. 実験

2.1 実験体系

2.1.1 軽水臨界実験装置 (TCA)

TAC (Tank-type Critical Assembly) は軽水減速の低濃縮 UO_2 燃料棒及び PuO_2-UO_2 燃料棒の格子体系に関する炉物理特性を測定するための臨界実験装置である。炉心タンクは、上部開放型のステンレスチール製の円筒形で、直径が 1.8 m 高さが 2.1 m である。この炉心タンク中央に実験目的に応じて、燃料棒の種類、配列形状、及び格子間隔を変化させて炉心を構成することが可能で、炉心タンク上部から挿入された燃料棒は、上下格子板により支持される。

臨界近接は、炉心タンク下部から給水ポンプ（高速及び低速 2 系統）によって水位を上昇させることにより行う。反応度は炉心水位により制御される（制御棒は基本的に用いない）ので、一様な燃料棒セルから成る炉心領域を構成することが可能である。また、各々の格子間隔における炉心水位の反応度価値が、種々の炉心形状に関する臨界実験データから微分水位反応度として整理されている。Fig. 2.1 に炉心タンクの垂直断面図を示す。

2.1.2 燃料棒

実験に使用した燃料棒は、濃縮度 2.6 w/o の UO_2 燃料棒で、ペレット型とスウェージ型の 2 種類である。燃料棒の仕様を Table 2.1 及び Fig. 2.2 に示す。ペレット型燃料棒は Al 製被覆管の中に $1.25 \text{ cm} \phi$ のペレットが充てんされており、燃料有効長は 144.1 cm である。一方、スウェージ型燃料棒は UO_2 粉末が被覆管内に充てんされ、燃料ピン内にペレット型のような空気間隙はない。

2.1.3 構成炉心

燃料棒格子間隔（ピッチ）が 19.56 mm（水対燃料体積比：1.83、原子個数比 H/U：5.28）の燃料棒格子板を用いて、炉心タンク中央部に平断面が 17 ピッチ × 17 ピッチ (33.25 cm) の正方形形状の燃料集合体ユニットを 2 つ配置し、ユニット間に Fig. 2.3 のように水ギャップを設けて相互干渉炉心を構成した。ユニット間の水ギャップ厚さを 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11 及び 13 ピッチとパラメトリックに変化させ、各々の配置における臨界水位を測定した。また 17×17 ピッチの單一ユニットについても臨界水位（燃料有効部下端からの水位）を測定し、相互干渉効果の評価における基準とした。構成炉心の上部は水減速材のないドライ格子で、燃料有効部下部及び水平方向には 30 cm 以上の水反射体がある。実験中における炉心タンク内の水温変化は 17.0°C ~ 17.7°C の範囲であった。

2.2 実験結果

2.2.1 臨界水位

炉心の臨界水位は、遅発臨界をわずかに超える水位に維持して倍増時間を測定した後、出力が一定になるように炉心水位を調整し、サーボマノメータ方式の水位計によって測定した。水位計の読み取り誤差は±0.1 mmである。単一炉心及び相互干渉炉心における臨界水位の測定値をTable 2.2 及び Fig. 2.4 に示す。臨界到達時の出力は0.3 watt から8 watt の範囲であった。2つのユニットが結合した炉心(17×34 ピッチ)及び片側のユニットだけの単一炉心(17×17 ピッチ)の臨界水位は各々41.21 cm, 及び 120.59 cmで、相互干渉炉心の臨界水位は、両者の間をユニット間距離の増加と共に単調に増加し、単一炉心の臨界水位に漸近する傾向を示している。

2.2.2 ユニット間の中性子相互干渉効果

相互干渉炉心におけるユニット間の中性子相互干渉効果を、TCA で反応度測定の実験的手法として使用している臨界水位法により評価した。

炉心水位(炉心有効部の垂直方向長さ)が一定である場合を考えると、相互干渉炉心の反応度($(k - 1)/k$, k: 中性子実効増倍係数)は、ユニット間距離により変化する。ここでは、水位が一定の条件における相互干渉炉心の反応度と単一炉心の反応度との差(一方のユニットが他ユニットに与える反応度寄与)を中性子相互干渉効果を表す量として用いた。以下に評価手順を示す。

水位が H (cm) であるときの相互干渉炉心の反応度は、

$$\rho^L(H) = -A \left\{ \left(\frac{\pi}{H+\lambda} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{H_c^L + \lambda} \right)^2 \right\} \quad (2.1)$$

で与えられる。

ここで

$\rho^L(H)$: ユニット間距離が L である相互干渉炉心反応度(%Δk/k)

H_c^L : 同上炉心の臨界水位(cm)

λ : 垂直方向の外挿距離[12.2±0.3cm]

A: 炉心垂直方向のバックリング変化と反応度の換算係数

[$(3.205 \pm 0.017) \times 10^3 \% \Delta k/k \cdot \text{cm}^2$]

一方、水位が H (cm) であるときの単一炉心の反応度は式 (2.1) と同様に、

$$\rho_i^s(H) = -A \left\{ \left(\frac{\pi}{H+\lambda} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{H_{ci}^s + \lambda} \right)^2 \right\} \quad (2.2)$$

で与えられる。

ここで

$\rho_i^s(H)$: ユニット i の反応度 (%Δk/k) (i=1, 2)

H_{ci}^s : ユニット i の臨界水位 (cm)

式 (2.1), 及び式 (2.2) の λ は, 水対燃料体積比が 1.83 の格子間隔の炉心に関する一連の出力分布測定により求められた値を用いた¹⁾。また, A は今回の実験体系において, 炉周期法による微分水位反応に基づき測定した値である。微分水位反応度の臨界水位に対する変化を Fig. 2.5 に示す。反応度換算係数 A は, 修正一群理論に基づくと $A = 100 \cdot M^2/K^\infty$ と表される。ここで M^2 は中性子移動面積, K^∞ は無限増倍係数である。構成炉心のユニット間距離と M^2/K^∞ の関係を Fig. 2.6 に示す。

式 (2.1) 及び式 (2.2) より, 水位が H である場合のユニット j からユニット i への反応度寄与 ρ_{ji} は両者の差として

$$\begin{aligned}\rho_{ji}(H) &= \rho^L(H) - \rho_i^s(H) \\ &= -A \left\{ \left(\frac{\pi}{H_{ci}^s + \lambda} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{H_c^L + \lambda} \right)^2 \right\} \quad (2.3)\end{aligned}$$

で求められる。式 (2.3) は, 相互干渉炉心において一方のユニット j が他方のユニット i に与える反応度寄与 ρ_{ji} が, 相互干渉炉心の臨界水位とユニット i の単一炉心の臨界水位の間の反応度価値に等しく, 水位に依存しないことを意味している。

本実験のように, 2つのユニットの形状寸法が同一の対称炉心 (17×17 ピッチ) の場合には, $H_{c1}^s = H_{c2}^s$ であるから, 反応度寄与 ρ_{12} 及び ρ_{21} は等しい。

2.2.3 片側ユニットの中性子実効増倍係数

相互干渉炉心が臨界状態 (炉心水位 $H = H_c^L$) にある場合, 式 (2.2) より,

$$\rho_i^s(H_c^L) = -A \left\{ \left(\frac{\pi}{H_c^L + \lambda} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{H_{ci}^s + \lambda} \right)^2 \right\} \quad (2.4)$$

で与えられる。従って, 片側のユニット i の中性子実効増倍係数 $K_i^s(H_c^L)$ は,

$$\begin{aligned}K_i^s(H_c^L) &= \frac{1}{1 - \rho_i^s(H_c^L)} \\ &= \frac{1}{1 + A \left\{ \left(\frac{\pi}{H_c^L + \lambda} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{H_{ci}^s + \lambda} \right)^2 \right\}} \quad (2.5)\end{aligned}$$

となる。

2.2.4 水ギャップの反応度効果

ユニット間の水ギャップの反応度効果 ρ_{wg} は, 2.2.2 と同様に水位が一定の条件における水

ギャップの無い結合炉心 (17×34 ピッチ) と水ギャップのある相互干渉炉心の反応度差であると考えられる。従って、次式のように与えられ、水位 H に依存しない。

$$\begin{aligned}\rho_{wg}(H) &= \rho^L(H) - \rho^D(H) \\ &= A \left\{ \left(\frac{\pi}{H_c^D + \lambda} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{H_c^L + \lambda} \right)^2 \right\}\end{aligned}\quad (2.6)$$

ここで

$\rho^D(H)$: 水ギャップの無い結合炉心の水位 H での反応度 (% $\Delta k/k$)
 H_c^D : 同上炉心の臨界水位 (cm)

Table 2.2 の各臨界水位から、式 (2.3), 式 (2.5), 及び式 (2.6) を用いて求めたユニット間の中性子相互干渉効果、片側ユニットの中性子実効増倍係数、及び水ギャップの反応度効果を Table 2.3、及び Fig. 2.7 から Fig. 2.9 に示す。

Fig. 2.7 から分かるように、一方のユニットから他方のユニットへの反応度寄与は、ユニット間距離が約 3 cm 以下の場合を除いて、指數関数的に減少し、実験における最大距離 25.4 cm (13 ピッチ) の値は 0.027% $\Delta k/k$ で、2 ユニット間の中性子相互干渉効果は十分小さく、両ユニットはほぼ孤立している。

また、相互干渉炉心が臨界状態にある場合、片側ユニットの中性子実効増倍係数は、ユニット間距離が 5 cm 及び 20 cm で、各々 0.95、及び 0.98 である。また、25 cm 以上離れると各ユニットはほぼ単独で臨界になっている (Fig. 2.8)。

水ギャップの反応度効果は、今回構成した水対燃料体積比 (1.83) の炉心においては、常に負であった。また、Fig. 2.9 のようにユニット間距離に対して単調に変化し、ユニット間距離が 10 cm 及び 25 cm での値は、各々 -7.5% $\Delta k/k$ 、及び -9.2% $\Delta k/k$ であった。

3. 解析と検討

3.1 解析方法

3.1.1 臨界解析コード

臨界計算は原研の JACS システムに内蔵されているモンテカルロコード KENO-IV²⁾ を用いて行った。このコードは現在種々の燃料の臨界体系に対して有効な臨界安全評価コードとして開発・整備が進められているものである。

今回の計算では、多群定数ライブラリとして、ENDF/B-IV の核データを MGCL-ACE で処理した MGCL-137 群マスターライブラリを用いた³⁾。MGCL の多群定数は中性子遮蔽因子 $f(\sigma_o, T)$ と無限希釈断面積 σ_∞^j により表現されている。また中性子スペクトルに関しては、核分裂スペクトル、 $1/E$ スペクトル及びマクスウェル分布から成る標準スペクトルが内蔵されている。

KENO-IV 用の巨視的実効断面積 Σ_{eff} は、MGCL 処理コード MAIL により計算体系の各領域について、入力された原子個数密度と幾何形状に基づき以下の式で計算される。

$$\sigma_o^j = \frac{1}{N^j} \sum_{j \neq i} S_{am} N^j \sigma_t^i + \frac{aG}{l}$$

$$\sigma_{eff}^j = \sigma_\infty^j \cdot f(\sigma_o^j \cdot T)$$

$$\Sigma_{eff}^j = \sum_j S_{am} N^j \sigma_{eff}^j$$

ここで

l : 燃料ブロックの平均弦長

G : ダンコフ補正因子

a : ベル補正因子

T : 媒質温度

N^j : 核種原子個数密度

σ_t^i : ミクロ全断積

σ_o^j : バックグラウンド断面積

i, j : 核種を示す添字

JACS システムの計算フローを Fig. 3.1 に、また MGCL マスターライブラリの中性子エネルギー群構造を Table 3.1 に示す。

3.1.2 計算モデル

ベンチマーク計算に用いた単一炉心及び相互涉炉心の計算モデルを Fig. 3.2 に示す。垂直断面

図において燃料有効部のうち燃料下端から臨界水位 H_c までが水減速セル、また H_c から燃料上端までが空気中のドライセルである。計算ではドライセルの部分も考慮した。燃料下部は厚さ 30 cm の水反射条件として取扱った。また、炉心水平方向には、炉心タンク（直径 1.8 m）の側面まで水反射体がある。したがってここでは十分な水反射条件として 30 cm 以上の水で炉心領域を取り囲んだ。アルベド条件は、モデル化した有限体系の境界において $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$ 方向について 0.0 としている。(Model A)

炉心燃料領域の単位セルモデルでは、燃料棒内のペレットと被覆管とのギャップを、被覆管の原子個数密度を補正（体積比で希釈）したアルミでうめ、燃料棒はペレットと被覆管の 2 領域として取扱った。また、炉心上方のドライセルの空気はボイドとして扱った。臨界解析コード KENO-IV で使用する巨視的実効断面積の作成に用いた燃料領域及び水領域の原子個数密度を Table 3.2 に示す。炉心燃料は、ペレット型燃料棒とスウェージ型燃料棒の 2 種類があるが、計算ではペレット型燃料で代表させてセル実効断面積を作成した。KENO-IV の計算条件は、次の通りである。

① エネルギー群数	137
② 一世代当たりの中性子数	1000
③ 計算世代数	210
④ スキップ世代数	10
⑤ 初期中性子発生分布	平坦
⑥ 中性子平均重み	0.5

3.2 解析結果と検討

3.2.1 臨界体系のベンチマーク計算

計算結果を Table 3.3 及び Fig. 3.3 に示す。全ケースの中性子増倍係数 K_{eff} の平均値は 0.99614, バイアスは 0.39% であった。200000 ヒストリによる計算の統計誤差は、1 標準偏差 σ が 0.15% から 0.18% の範囲にあり、ユニット間距離の変化に対する系統的な変化は認められない。また、2 つのユニットの形状寸法が同一である本実験のような相互干渉対称炉心では、 K_{eff} の中性子世代に対する収束性は良く、水ギャップ厚さ 30 cm 以下の範囲においては、平坦な初期中性子束分布を適用できると考えられる。

3.2.2 ユニット間の中性子相互干渉効果

解析では、相互干渉炉心における一方のユニットが他方のユニットへ与える反応度寄与 ρ_{21} を、水位が同一とした単一炉心と相互干渉炉心の中性子実効増倍率計算値から反応度を評価し、以下の式を用いて計算した。

$$\rho_{21}^{cal} = \frac{K^L(H_c^s) - 1}{K^L(H_c^s)} - \frac{K^s(H_c^s) - 1}{K^s(H_c^s)} \quad (3.1)$$

ここで

ρ_{21}^{cal} : 反応度寄与 (% $\Delta k/k$)
 H_c^s : 単一炉心(17×17)の臨界水位, 120.59cm
 $K^s(H_c^s)$: 単一炉心の臨界体系の中性子実効増倍係数
 $K^L(H_c^s)$: 相互干渉炉心の水位 H_c^s での中性子実効増倍係数

反応度寄与の炉心形状依存性を調べるために, Fig. 3.2 (b) に示すような炉心の幅 (Y 方向) を無限長にした体系 (Mode B) と, 炉心の幅及び炉心の高さ (Z 方向) を無限にした無限平板体系 (Model C) についても解析を行った。各体系に対する K_{eff} の計算結果を Table 3.4 及び Fig. 3.4 に示す。Model A, Model B, Model C のいずれの場合も, ユニット間距離が 20 cm 以下の範囲で, 体系の実効増倍係数 K_{eff} は顕著に減少している。また, ユニット間距離が 25 cm を越えると, 相互干渉炉心と単一ユニットの K_{eff} は, 3σ の範囲で一致し, 有為な差は無いと考えられる。

式 (3.1) により評価した反応度寄与 ρ_{21}^{cal} を Table 3.5 及び Fig. 3.5 から Fig. 3.9 に示す。Fig. 3.5 から分るように, 実験炉心をモデル化した Model A は, 測定された ρ_{21} のユニット間距離に対する変化をほぼ再現しており, 測定値と 3σ の範囲で一致している。また, ユニット間距離が小さい範囲を除けば, Model B, 及び Model C の場合も, Model A と同様な結果を与え, この範囲では一次元体系として取扱えることを示している。Fig. 3.6 に ρ_{21} の測定値と Model A による計算値との相関関係を示す。ユニット間の中性子相互干渉効果が 1 % $\Delta k/k$ 以上の領域では, Model A による ρ_{21} の計算値は, ~0.3% $\Delta k/k$ の誤差範囲で測定値と一致した。

Fig. 3.7 から Fig. 3.9 に, ユニット間距離に対する K_{eff} の減少傾向が顕著な領域について, ρ_{21} の実験値と各モデルによる計算値との比較を各々示す。ユニット間距離が 5 cm から 20 cm の範囲における ρ_{21} を指數関数にあてはめた場合の減衰定数の実験値は $0.227 \pm 0.001 \text{ cm}^{-1}$ であった。これに対して Model A による値は $0.197 \pm 0.045 \text{ cm}^{-1}$ でありほぼ実験値を再現した。また, Model B, 及び Model C による減衰定数は, 各々 0.203 ± 0.037 , 及び $0.193 \pm 0.03 \text{ cm}^{-1}$ であり, 2 ユニット間の中性子相互干渉に寄与しない Y, Z 方向への中性子漏割合の違いによる効果は認められない。

3.2.3 単一ユニットの中性子実効増倍係数

実験炉心を模擬したモデル (Model A) により, 相互干渉炉心の臨界水位 H_c^L における单一ユニットの中性子実効増倍係数を計算し, 次式により单一ユニットの反応度を計算した。

$$\rho^{\text{scal}}(H_c^L) = \left(1 - \frac{1}{K^s(H_c^L)} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

ここで

H_c^L : ユニット間距離が L である相互干渉炉心の臨界水位 (cm)
 $K^s(H_c^L)$: 単一ユニットの中性子実効増倍係数の KENO-IV 計算値
 $\rho^{\text{scal}}(H_c^L)$: 単一ユニットの反応度計算値 (% $\Delta k/k$)

計算結果を Table 3.6, 及び Fig. 3.10 に示す。单一ユニットに関する KENO-IV による計算値

$\rho_s^{cal}(H_c^L)$ は、水位法により実験的に求めた片側炉心の反応度 $\rho_i^s(H_c^L)$ と良い相関を示し、 $1\% \Delta k/k$ の範囲で一致した。

3.2.4 水ギャップの反応度効果

相互干渉炉心における水ギャップの反応度効果を、 17×17 ピッチの各ユニットが水ギャップの無い状態で配列された結合体系 (17×34 ピッチ) を基準として、3.2.2 と同様に次式を用いて計算した。

$$\rho_{wg}^{cal} = \frac{K^L(H_c^B) - K^B(H_c^B)}{K^L(H_c^B) + K^B(H_c^B)} \quad (3.3)$$

ここで

ρ_{wg}^{cal} : 水ギャップの反応度効果 (% $\Delta k/k$)

H_c^B : 結合体系 (17×34) の臨界水位

$k^B(H_c^B)$: 結合体系の H_c^B における中性子実効増倍係数

$k^L(H_c^B)$: 相互干渉炉心の H_c^B における中性子実効増倍係数

計算結果を Table 3.7 から Table 3.8、及び Fig. 3.11 から Fig. 3.13 に示す。

Model A を用いた計算値は、実験で得られた ρ_{wg} のギャップ厚さに対する依存性を再現し 1σ の範囲で一致した (Fig. 3.13)。また、ギャップの厚さが 25 cm における ρ_{wg} は、 $-9.3\% \Delta k/k$ であり、単一ユニットの値 (計算値で $-9.4\% \Delta k/k$) と比較しても有意な差は認められない。従って、これ以上水ギャップを増加させても、体系の反応度は各ユニットの持つ反応度によって支配されると考えられる。

一方、Model B 及び Model C を用いた計算では水ギャップの負の反応度価値を過小評価しており、結合炉心を基準とした ρ_{ws} の評価では、炉心高さが低いために有限モデルを用いる必要がある。

4. ま　と　め

本実験では、平断面が正方形状の2つの矩形ユニットを配列した相互干渉炉心に関して、ユニット間の距離（水ギャップ厚さ）をパラメータとして臨界水位を測定し、各体系の臨界水位から、一方の炉心が他方の炉心へ与える反応度寄与、片側ユニットの中性子実効増倍係数、及び水ギャップの負の反応度効果を測定した。

2ユニット体系の相互干渉効果に関して、主要な結果及び今後の課題を以下にまとめる。

- (1) 水ギャップをはさんで配置されたユニットの相互干渉効果は、ユニット間距離が小さい場合を除いて指数関数的に減少する。単一炉心を基準とした反応度寄与の解析方法は、ユニット間距離に対する指数減衰特性と良く一致し、妥当であると考えられる。また、無限平板モデルと有限モデルとの差はわずかであったが、今後、单一ユニットからの漏洩中性子割合の影響等を検討する必要があると考えられる。
- (2) 今回の正方形状のユニットの場合、ユニット間距離を25 cm程度確保することにより、相互干渉炉心と単一炉心との反応度差は、0.3% $\Delta k/k$ 以下まで減少した。各ユニットに関してほぼ孤立化条件を満足しているが、今後、水の隔離効果について炉心形状依存性等を検討する予定である。
- (3) 相互干渉体系に対するベンチマーク計算では、体系の実効増倍係数について、0.5%の範囲で一致した。また、水ギャップ厚さが30 cm以下の範囲において、 K_{eff} の中性子世代に対する収束性は良く、平坦な初期中性子束分布を仮定することは妥当であると考えられる。
- (4) 有限体系モデルによる計算は、対称な相互干渉炉心における片側ユニットの中性子実効増倍係数、及び水ギャップの反応度効果について、実験値の基本的な特性を再現できることができた。今後は、ユニットの形状寸法が互いに異なる非対称な体系、及び多数のユニットが2次元的に配列された体系に対する実験を行ない、有限体系モデルの妥当性を調べる予定である。

謝 辞

本実験を遂行するに当たり村上清信氏、及び広瀬秀幸氏には、炉心構成及び臨界実験装置の運転等で御協力いただいた。計算コード MAIL と KENO-IV を使用するに当っては、プラント安全解析研究室の小室雄一氏、及び片倉純一氏に貴重な助言をいただいた。また、奥野浩氏には懇切な閲読をしていただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) H. Tsuruta, et al., "Critical Sizes of Light-Water Moderated UO₂ and PuO₂-UO₂ Lattices", JAERI 1254 (1978)
- (2) L.M. Pertie and N.F. Cross, "KENO-IV. An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938 (1975)
- (3) Y. Nomura, et al., "Benchmark Calculation by the Nuclear Criticality Safety Analysis Code System JACS (MGCL, KENO-IV)", JAERI 1303 (1986)
- (4) Y. Naito, et al., "MGCL-Processor; A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M 9396 (1981)

謝 辞

本実験を遂行するに当たり村上清信氏、及び広瀬秀幸氏には、炉心構成及び臨界実験装置の運転等で御協力いただいた。計算コード MAIL と KENO-IV を使用するに当っては、プラント安全解析研究室の小室雄一氏、及び片倉純一氏に貴重な助言をいただいた。また、奥野浩氏には懇切な閲読をしていただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) H. Tsuruta, et al., "Critical Sizes of Light-Water Moderated UO₂ and PuO₂-UO₂ Lattices", JAERI 1254 (1978)
- (2) L.M. Pertie and N.F. Cross, "KENO-IV. An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938 (1975)
- (3) Y. Nomura, et al., "Benchmark Calculation by the Nuclear Criticality Safety Analysis Code System JACS (MGCL, KENO-IV)", JAERI 1303 (1986)
- (4) Y. Naito, et al., "MGCL-Processor; A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M 9396 (1981)

Table 2.1 Specification of fuel rod

Item	Pellet type	Swage type
Enrichment		
^{235}U	2.596 wt%	2.580 wt%
^{238}U	97.404 wt%	97.420 wt%
Fuel type	UO_2 Pellet Diameter 12.5 mm Density 10.40 g/cm ³ Height 12.7 mm	UO_2 Powder Density 10.06 g/cm ³
Cladding Material	Alminum alloy AA6061-T6	Alminum alloy AA6061-T6
Outer diameter	14.17 mm	14.17 mm
Thickness	0.76 mm	0.71 mm
Loading		
UO_2	1840g/rod	1842g/rod
^{235}U	42.0 g/rod	41.9 g/rod
Fuel effective length	1441 mm	1466 mm

Table 2.2 Critical height and differential reactivity worth

Core configuration	Width of water gap (P)	Temperature T (°C)	Critical height Hc (cm)	Period measure height Hp(cm)	Reactor period Tp (sec)	Differential reactivity dρ/dH (cent/mm)	Power (watt)	Run
17x34	0	0.00	17.67	41.210	41.480	55.01+-0.31	5.503	1.5 6937
2[17X17:G1]	1	1.956	17.59	41.995	42.220	72.58+-1.18	5.415	0.5 6936
2[17X17:G2]	2	3.192	17.53	47.855	48.200	64.00+-1.18	3.870	0.7 6935
2[17X17:G3]	3	5.868	17.45	57.360	57.840	73.36+-0.73	2.518	0.7 6934
2[17X17:G5]	5	9.780	17.30	79.970	81.350	57.31+-0.43	1.046	1.6 6932
2[17X17:G7]	7	13.692	17.38	97.920	100.410	54.85+-1.60	0.598	7.9 6931
2[17X17:G9]	9	17.604	17.01	109.920	113.210	58.31+-0.52	0.435	1.2 6929
2[17X17:G11]	11	21.516	17.08	116.580	121.160	47.04+-0.51	0.361	6.5 6928
2[17X17:G13]	13	25.428	17.22	119.620	123.980	55.20+-0.40	0.340	3.2 6930
17x17	--	--	17.73	120.590	124.780	59.51+-0.69	0.336	0.3 6938

Table 2.3 Experimental result of reactivity effect

Unit distance		Reactivity from unit 2 to unit 1 ρ_{21} (% $\Delta K/K$)	Multiplication factor of single unit K_s	Reactivity effect of water gap ρ_{ws} (% $\Delta K/K$)
pitch	cm			
0		9.297±0.053	0.915±0.005	0.000
1	1.956	8.978±0.051	0.918±0.004	-0.319±0.008
2	3.912	6.978±0.040	0.935±0.003	-2.319±0.018
3	5.868	4.745±0.027	0.955±0.002	-4.552±0.029
5	9.780	1.930±0.011	0.981±0.001	-7.367±0.043
7	13.692	0.815±0.005	0.991±0.001	-8.482±0.049
9	17.604	0.327±0.002	0.997±0.001	-8.970±0.051
11	21.516	0.114±0.001	0.999±0.001	-9.183±0.052
13	25.428	0.027±0.001	1.000±0.001	-9.271±0.053
Single core		0.000	1.0	-9.297±0.053

Table 3.1 Energy structure of MGCL 137

Group No.		Upper Energy (eV)		Group No.		Upper Energy (eV)		Group No.		Upper Energy (eV)		Group No.		Upper Energy (eV)	
26G	137G	26G	137G	26G	137G	26G	137G	26G	137G	26G	137G	26G	137G	26G	137G
1	1	1.6487x10 ⁷		4	39	1.4284x10 ⁵		8	75	1.8702x10 ⁻²		18	107	3.6528x10 ⁻¹	
	2	1.4550x10 ⁷			40	1.2588x10 ⁵									
	3	1.2840x10 ⁷			41	1.1109x10 ⁵									
	4	1.1331x10 ⁷			42	9.8037x10 ⁴									
	5	1.0000x10 ⁷			43	8.6517x10 ⁴									
	6	8.8250x10 ⁶			44	7.6351x10 ⁴									
	7	7.7880x10 ⁶			45	6.7379x10 ⁴									
	8	6.8729x10 ⁶			46	5.9482x10 ⁴									
	9	6.0653x10 ⁶													
	10	5.3526x10 ⁶			47	5.2475x10 ⁴									
2	11	4.7239x10 ⁶		5	48	4.6309x10 ⁴									
	12	4.1686x10 ⁶			49	4.0868x10 ⁴									
	13	3.6788x10 ⁶			50	3.6066x10 ⁴									
	14	3.2465x10 ⁶			51	3.1828x10 ⁴									
	15	2.8650x10 ⁶			52	2.8088x10 ⁴									
	16	2.5284x10 ⁶			53	2.4788x10 ⁴									
	17	2.2313x10 ⁶			54	2.1875x10 ⁴									
	18	1.9691x10 ⁶			55	1.9305x10 ⁴									
	19	1.7377x10 ⁶			56	1.7036x10 ⁴									
	20	1.5335x10 ⁶			57	1.5034x10 ⁴									
	21	1.3533x10 ⁶			58	1.1709x10 ⁴									
	22	1.1943x10 ⁶			59	9.1188x10 ³									
3	23	1.0540x10 ⁶		7	60	7.1017x10 ³									
	24	9.3014x10 ⁵			61	5.5308x10 ³									
	25	8.2085x10 ⁵			62	4.3075x10 ³									
	26	7.2440x10 ⁵			63	3.3548x10 ³									
	27	6.3928x10 ⁵			64	2.6126x10 ³									
	28	5.6416x10 ⁵			65	2.0347x10 ³									
	29	4.9787x10 ⁵			66	1.5846x10 ³									
	30	4.3937x10 ⁵			67	1.2341x10 ³									
	31	3.8774x10 ⁵			68	9.6112x10 ²									
	32	3.4218x10 ⁵			69	7.4852x10 ²									
	33	3.0197x10 ⁵			70	5.8295x10 ²									
	34	2.6649x10 ⁵			71	4.5400x10 ²									
	35	2.3518x10 ⁵			72	3.5358x10 ²									
	36	2.0754x10 ⁵			73	2.7536x10 ²									
	37	1.8316x10 ⁵			74	2.1445x10 ²									
	38	1.6163x10 ⁵													
					16	105	4.1399x10 ⁻¹								
					17	106	3.8925x10 ⁻¹								
					26	135	3.341 x10 ⁻³								
					27	136	1.466 x10 ⁻³								
					28	137	3.52 x10 ⁻⁴								
							3.3 x10 ⁻⁴								

Table 3.2 Atomic number density

Region		Nucleide density (n/barn-cm)	Atomic number
Pellet-type fuel rod			
UO_2 Pellete	^{235}U	6.0851×10^{-4}	
	^{238}U	2.2544×10^{-2}	
Cladding (with air gap)	^{16}O	4.7492×10^{-2}	
	^{27}Al	5.5870×10^{-2}	
Swage-type fuel rod			
UO_2 Powder	^{235}U	5.7354×10^{-4}	
	^{238}U	2.1383×10^{-2}	
Cladding (without air gap)	^{16}O	4.3832×10^{-2}	
	^{27}Al	6.1040×10^{-2}	
Water		^1H	6.6760×10^{-2}
		^{16}O	3.3380×10^{-2}

Table 3.3 Benchmark calculation

Case	Width of water gap		Multiplication factor	
	(p)*	(cm)	Average ± 1 sigma	99% confidential band
Single 17×34	0	0.00	0.99395 \pm 0.00175	0.98868 - 0.99921
Interaction core	1	1.956	0.99736 \pm 0.00156	0.99268 - 1.00204
	2	3.192	0.99811 \pm 0.00157	0.99340 - 1.00282
	3	5.868	0.99692 \pm 0.00165	0.99198 - 1.00187
	5	9.780	0.99681 \pm 0.00151	0.99227 - 1.00135
	7	13.692	0.99661 \pm 0.00165	0.99166 - 1.00157
	9	17.604	0.99490 \pm 0.00153	0.99030 - 0.99949
	11	21.516	0.99878 \pm 0.00153	0.99418 - 1.00338
	13	25.428	0.99539 \pm 0.00166	0.99040 - 1.00038
Single 17×17	--	--	0.99253 \pm 0.00172	0.98736 - 0.99770

*Lattice pitch

Table 3.4 Effective multiplication factor of interaction core
(H is critical height of single core)

Unit distance		Multiplication factor		
pitch	cm	Model A	Model B	Model C
		H=120.59 cm Y= 33.252cm	H=120.59cm Y=infinite	H=infinite Y=infinite
0	0.0	1.09135±0.00159	1.27336±0.00141	1.30019±0.00122
1	1.956	1.08915±0.00158	1.26983±0.00145	1.29556±0.00126
2	3.912	1.06709±0.00149	1.24566±0.00142	1.27293±0.00129
3	5.868	1.04678±0.00142	1.21798±0.00142	1.24376±0.00139
4	7.824	1.02871±0.00148	1.19724±0.00135	1.22191±0.00154
5	9.780	1.01618±0.00162	1.18235±0.00156	1.20525±0.00137
7	13.692	1.00452±0.00163	1.16736±0.00147	1.19030±0.00136
9	17.604	0.99762±0.00152	1.16126±0.00152	1.18174±0.00152
11	21.516	1.00094±0.00159	1.15588±0.00152	1.18164±0.00157
13	25.428	0.99654±0.00156	1.15712±0.00154	1.17789±0.00150
15	29.340	0.99572±0.00158	1.15331±0.00154	1.17680±0.00167
18	35.208	0.99790±0.00157	1.15063±0.00148	1.17626±0.00146
Single (17X17)		0.99253±0.00172	1.15553±0.00152	1.17514±0.00159

Table 3.5 Calculated reactivity effect from unit 2 to unit 1

Unit distance		Reactivity effect $\rho_{21}(\% \Delta K/K)$		
pitch	cm	Model A	Model B	Model C
		H=120.590cm Y= 33.252cm	H=120.590cm Y=infinite	H=infinite Y=infinite
0	0.0	9.123 ± 0.220	8.008 ± 0.143	8.184 ± 0.136
1	1.956	8.938 ± 0.220	7.790 ± 0.145	7.910 ± 0.137
2	3.912	7.040 ± 0.218	6.262 ± 0.146	6.537 ± 0.140
3	5.868	5.222 ± 0.217	4.437 ± 0.149	4.695 ± 0.146
4	7.824	3.543 ± 0.224	3.015 ± 0.148	3.257 ± 0.155
5	9.780	2.345 ± 0.235	1.963 ± 0.159	2.126 ± 0.149
7	13.692	1.203 ± 0.238	0.877 ± 0.157	1.084 ± 0.150
9	17.604	0.514 ± 0.232	0.427 ± 0.160	0.475 ± 0.158
11	21.516	0.847 ± 0.236	0.026 ± 0.161	0.468 ± 0.161
13	25.428	0.405 ± 0.235	0.119 ± 0.162	0.199 ± 0.158
15	29.340	0.323 ± 0.236	-0.167 ± 0.162	0.120 ± 0.167
18	35.208	0.542 ± 0.235	-0.369 ± 0.160	0.081 ± 0.156
Single (17X17)		0.000	0.000	0.000

Table 3.6 Effective multiplication factor
and reactivity of single unit

Core height (cm)	Multiplication factor	99% confidential band
41.210	0.90889 ± 0.00163	0.90401--0.91377
41.995	0.90857 ± 0.00173	0.90338--0.91376
47.855	0.93058 ± 0.00174	0.92535--0.93581
57.360	0.94779 ± 0.00159	0.94302--0.95256
79.970	0.97572 ± 0.00164	0.97079--0.98066
97.920	0.98611 ± 0.00161	0.98127--0.99095
109.920	0.99310 ± 0.00164	0.98819--0.99801
116.590	0.99679 ± 0.00161	0.99195--1.00163
119.620	0.99425 ± 0.00147	0.98985--0.99866
120.590	0.99253 ± 0.00172	0.98736--0.99770

Table 3.7 Calculated effective multiplication factor of interaction core (H is critical height of core without water gap)

Unit distance		Multiplication factor	
pitch	cm	Model A	Model B
		H= 41.21 cm Y= 33.252cm	H= 41.21cm Y=infinite
0		0.99395±0.00175	1.16359±0.00155
1	1.956	0.99108±0.00161	1.16077±0.00151
2	3.912	0.97481±0.00167	1.13905±0.00139
3	5.868	0.94980±0.00161	1.11414±0.00148
4	7.824	0.93852±0.00154	1.09321±0.00147
5	9.780	0.92582±0.00160	1.08073±0.00158
7	13.692	0.91654±0.00166	1.06400±0.00156
9	17.604	0.91181±0.00169	1.06135±0.00157
11	21.516	0.90859±0.00175	1.05480±0.00143
13	25.428	0.90972±0.00202	1.05250±0.00147
15	29.340	0.90630±0.00172	1.05302±0.00161
18	35.208	0.90726±0.00177	1.05264±0.00163
Single (17X17)		0.90889±0.00163	1.04958±0.00153

Table 3.8 Calculated reactivity effect of water gap between two units

Unit distance		Reactivity effect of water gap ρ_{ws} (% $\Delta K/K$)		
pitch	cm	Model A	Model B	Model C
		H= 41.210cm Y= 33.252cm	H= 41.210cm Y=infinite	H=infinite Y=infinite
0	0.0	0.000	0.000	0.000
1	1.956	-0.291 ± 0.241	-0.209 ± 0.160	-0.275 ± 0.104
2	3.912	-1.975 ± 0.250	-1.852 ± 0.157	-1.647 ± 0.107
3	5.868	-4.677 ± 0.251	-3.814 ± 0.165	-3.490 ± 0.115
4	7.824	-5.942 ± 0.249	-5.533 ± 0.168	-4.927 ± 0.126
5	9.780	-7.404 ± 0.257	-6.589 ± 0.177	-6.059 ± 0.119
7	13.692	-8.497 ± 0.265	-8.044 ± 0.179	-7.101 ± 0.120
9	17.604	-9.063 ± 0.270	-8.279 ± 0.180	-7.709 ± 0.131
11	21.516	-9.452 ± 0.276	-8.864 ± 0.172	-7.716 ± 0.134
13	25.428	-9.315 ± 0.302	-9.071 ± 0.175	-7.986 ± 0.130
15	29.340	-9.730 ± 0.274	-9.024 ± 0.185	-8.064 ± 0.141
18	35.208	-9.613 ± 0.279	-9.058 ± 0.186	-8.103 ± 0.128
Single (17X17)		-9.416 ± 0.265	-9.335 ± 0.180	-8.184 ± 0.136

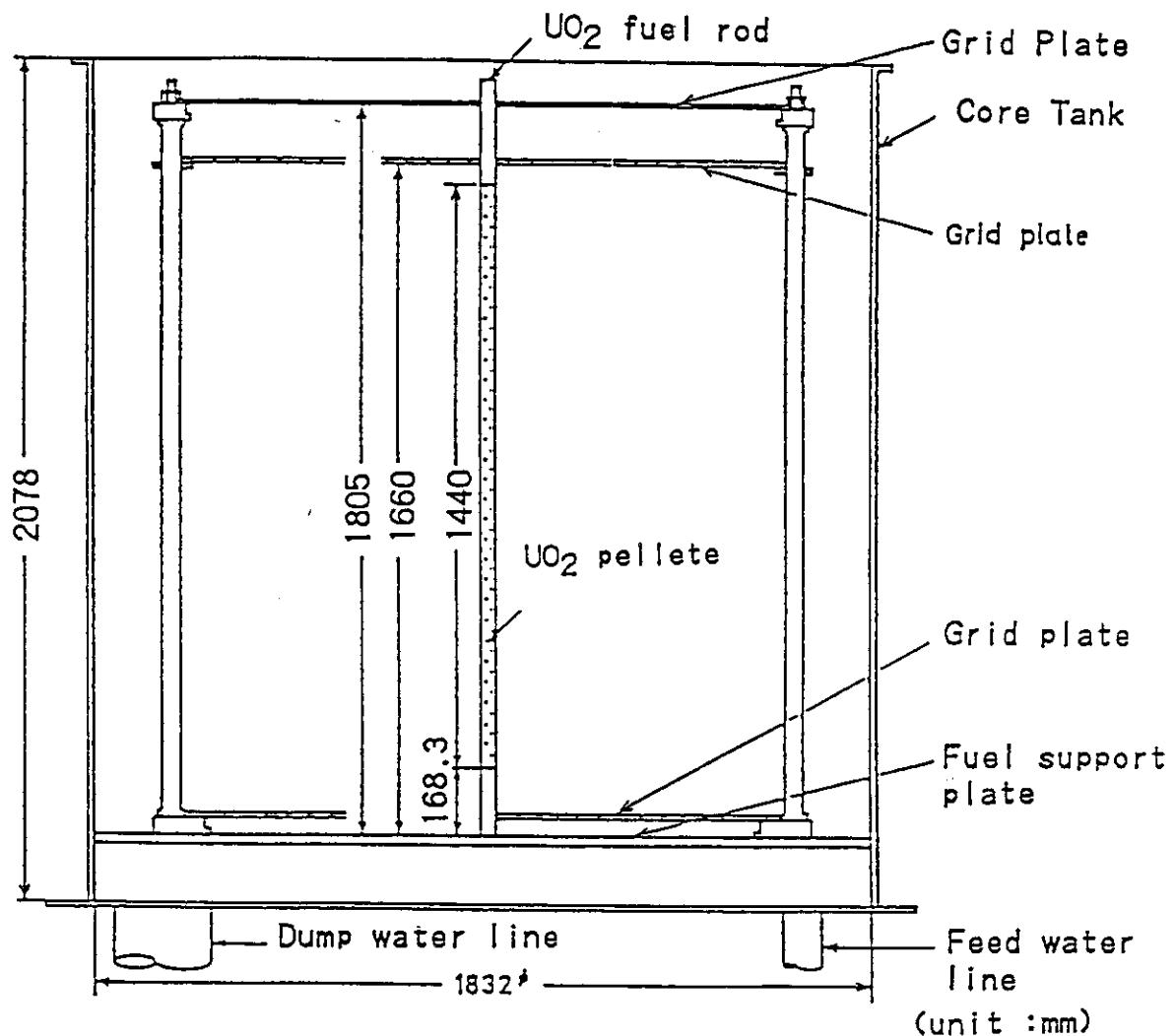


Fig. 2.1 Vertical cross sectional view of TCA

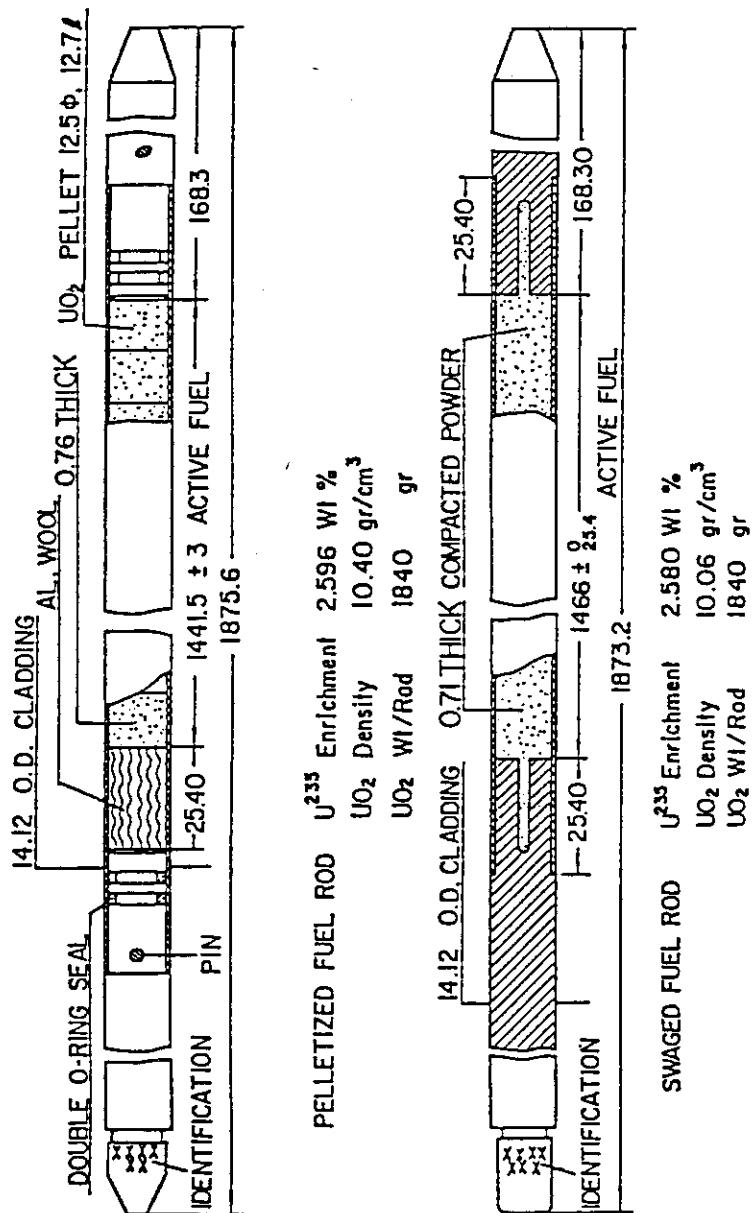


Fig. 2.2 Specification of fuel rod

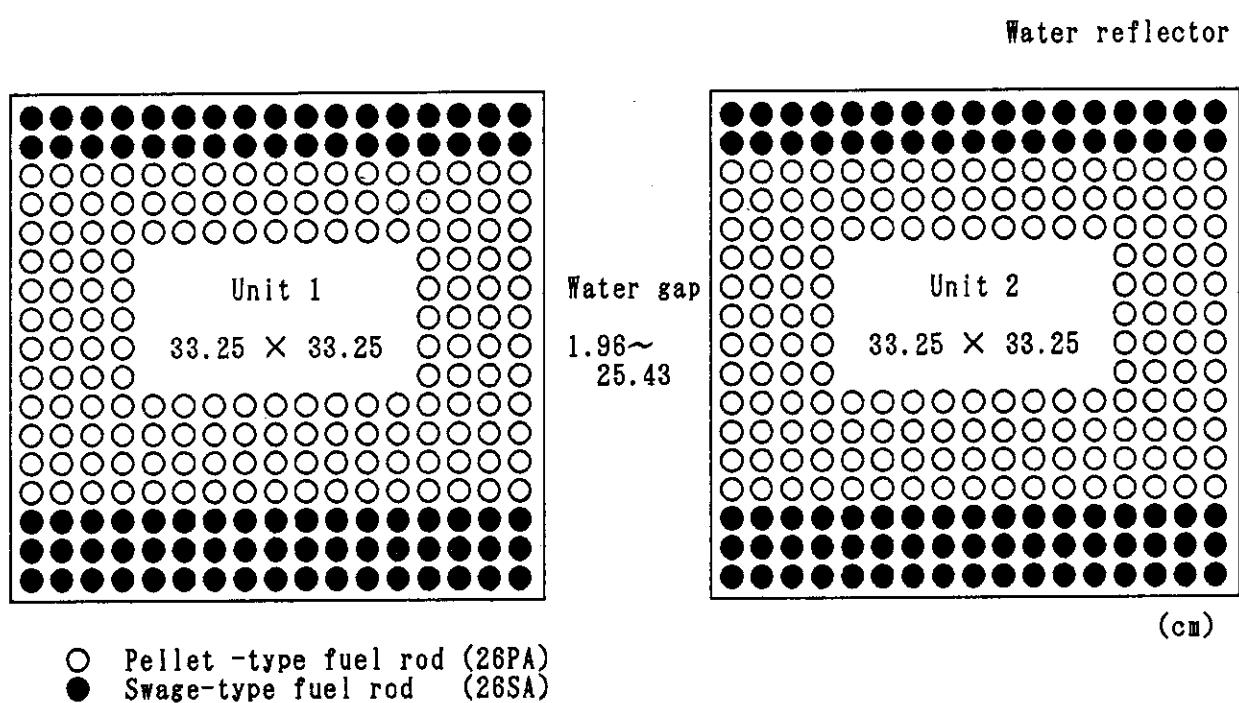


Fig. 2.3 Plan view of experimental core

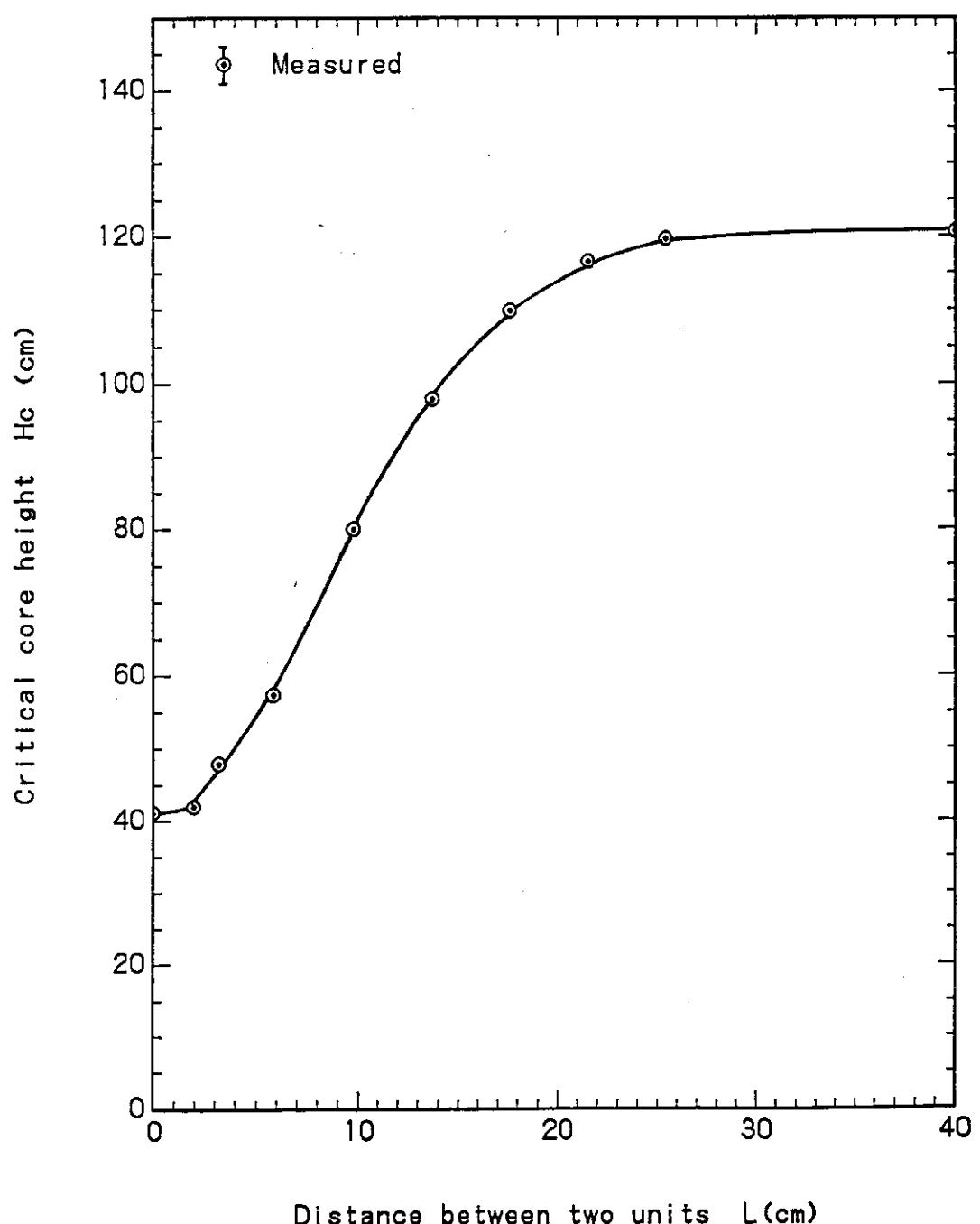


Fig. 2.4 Critical height of interaction core

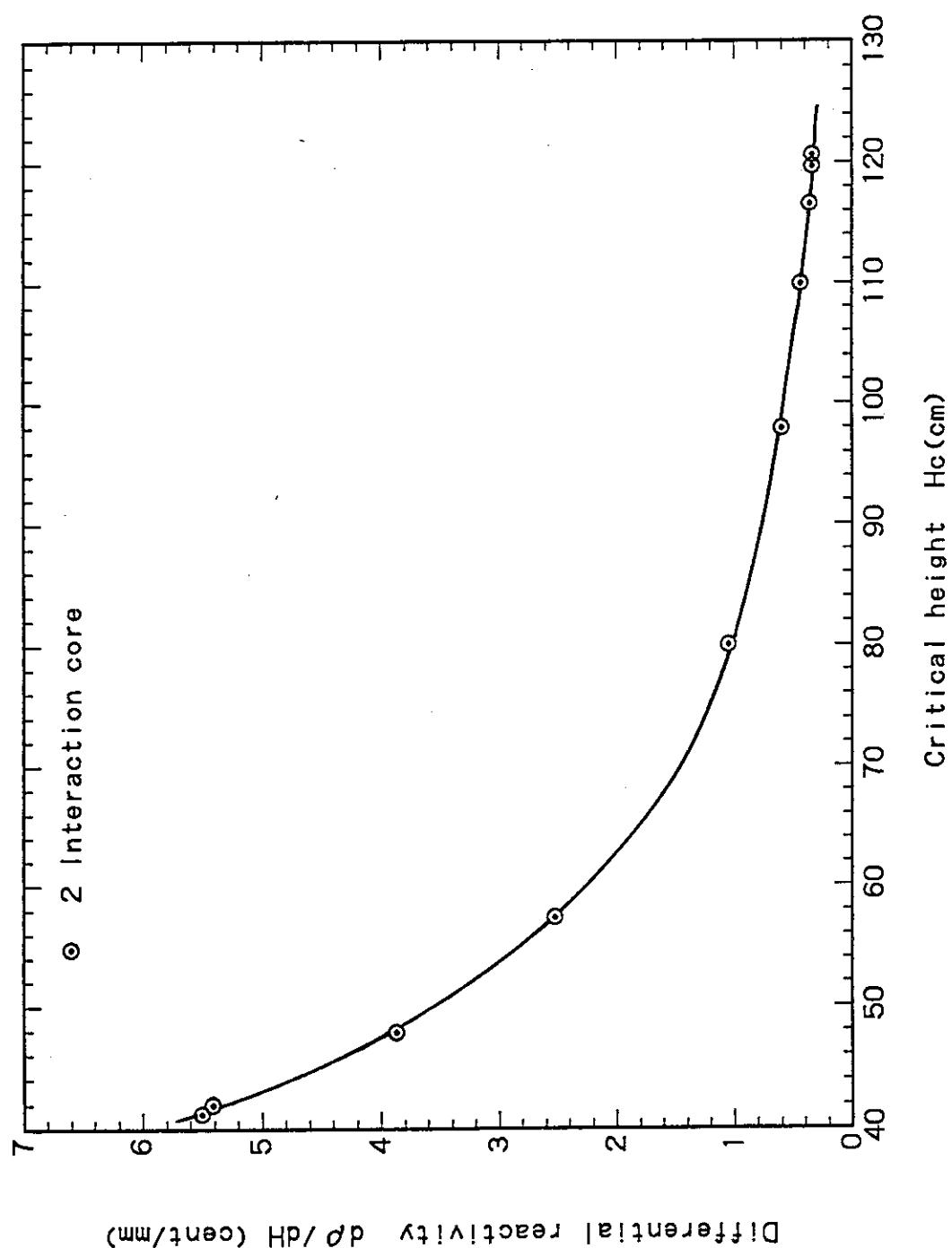


Fig. 2.5 Differential reactivity worth $d\rho/dH$ vs. critical height

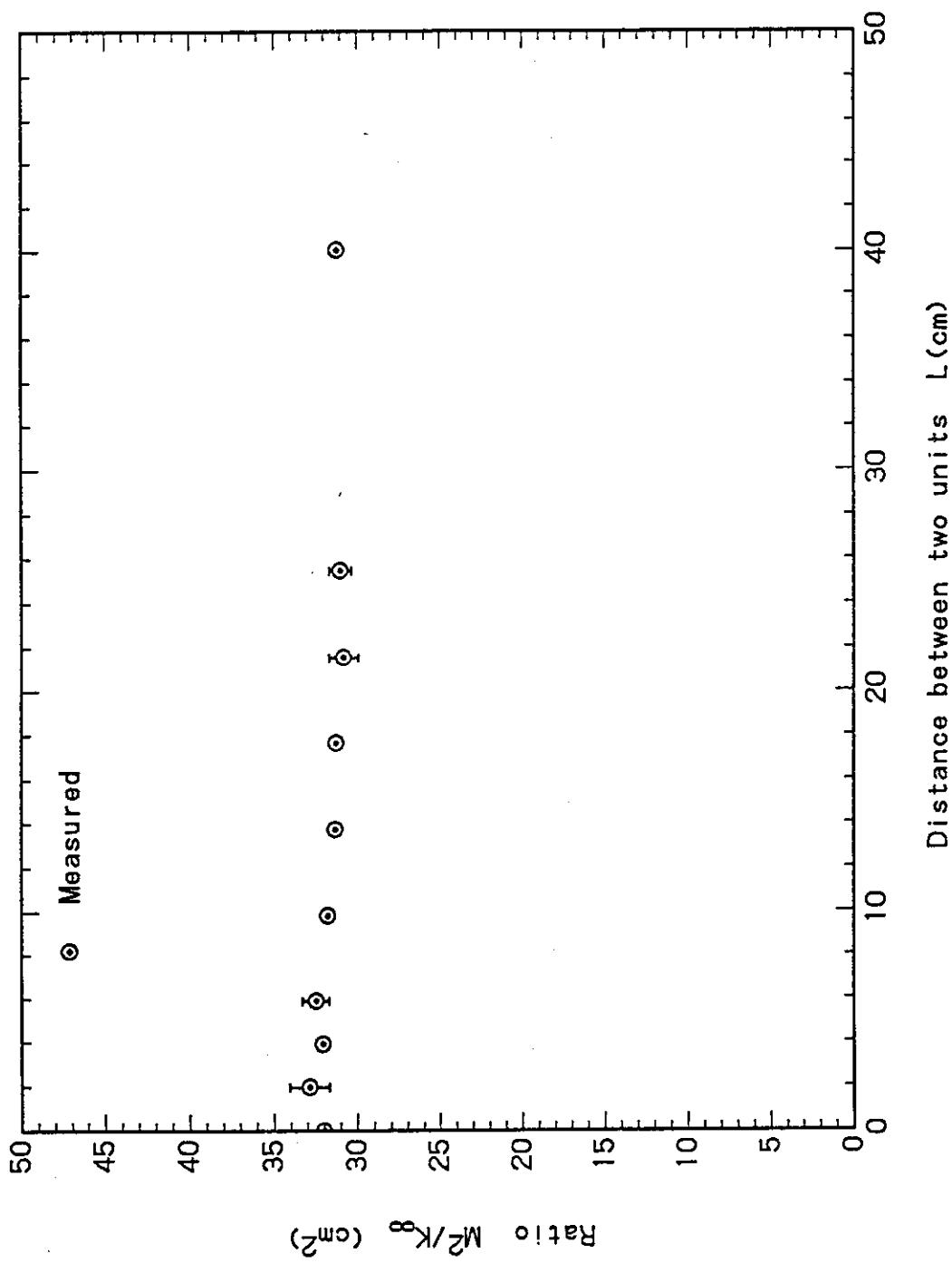
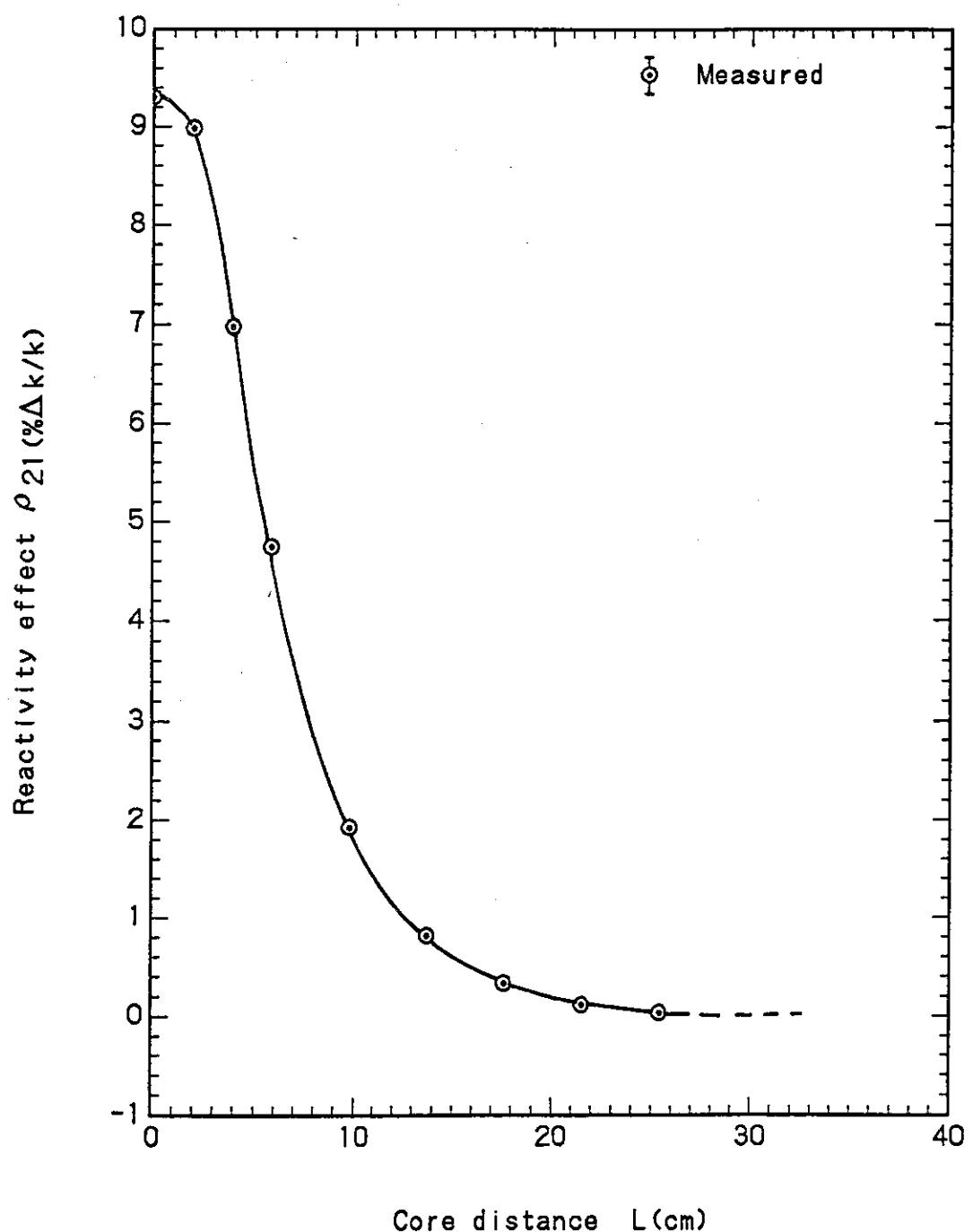


Fig. 2.6 Dependence of the ratio of M^2/K^o on the distance between two units

Fig. 2.7 Reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21}

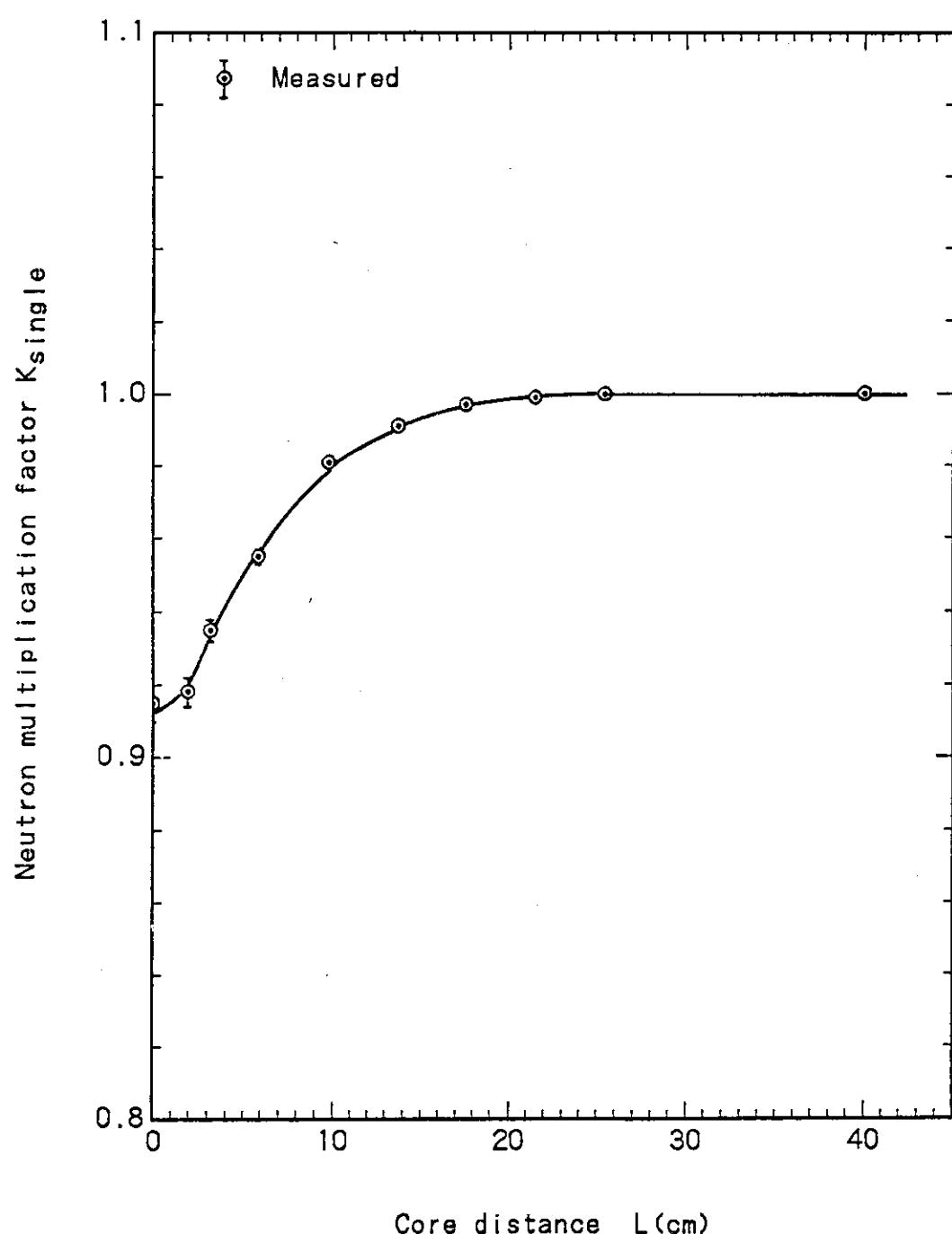


Fig. 2.8 Dependence of neutron multiplication factor of single unit vs. distance between two units

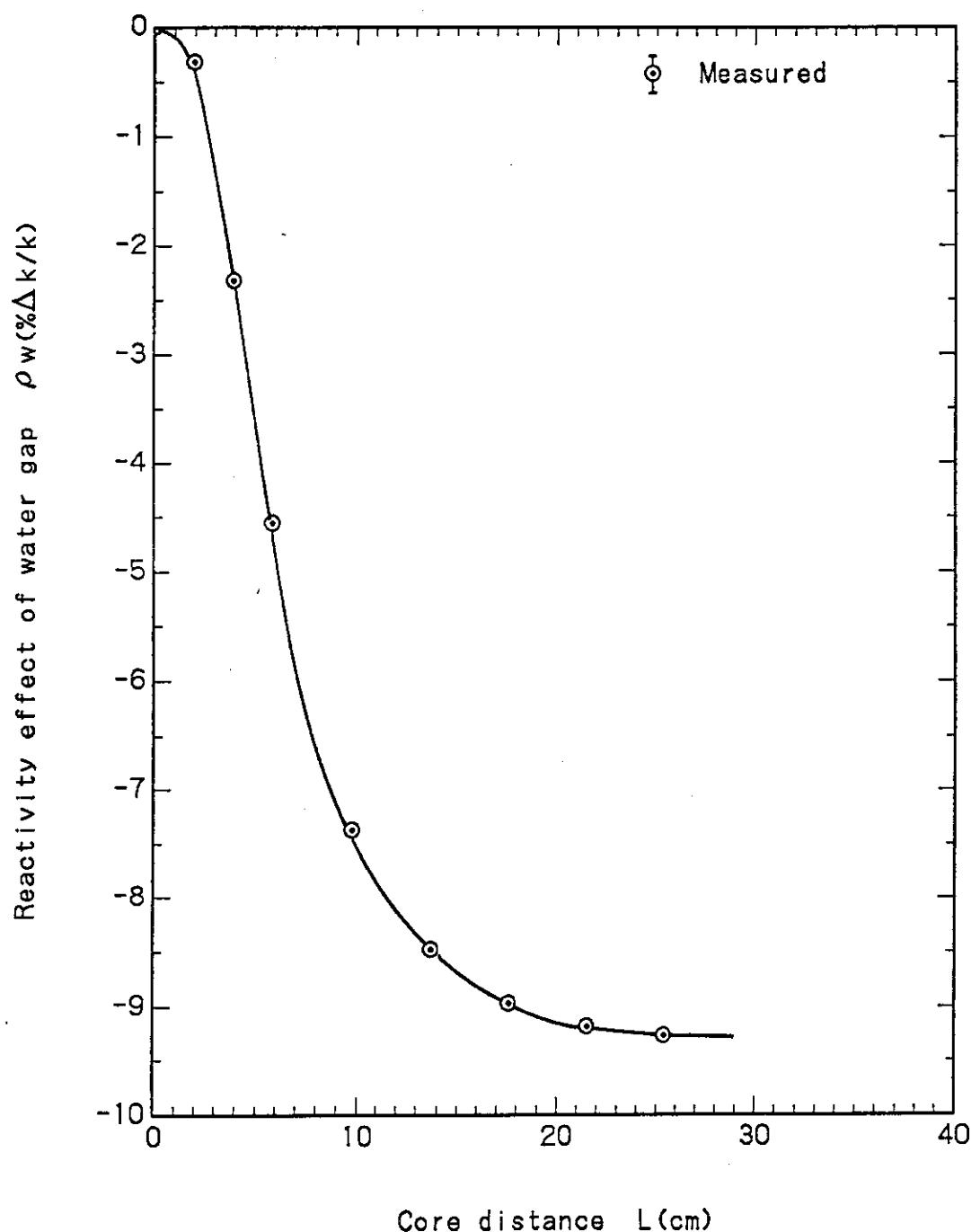


Fig. 2.9 Reactivity effect of water gap ρ_{wg} between two cores

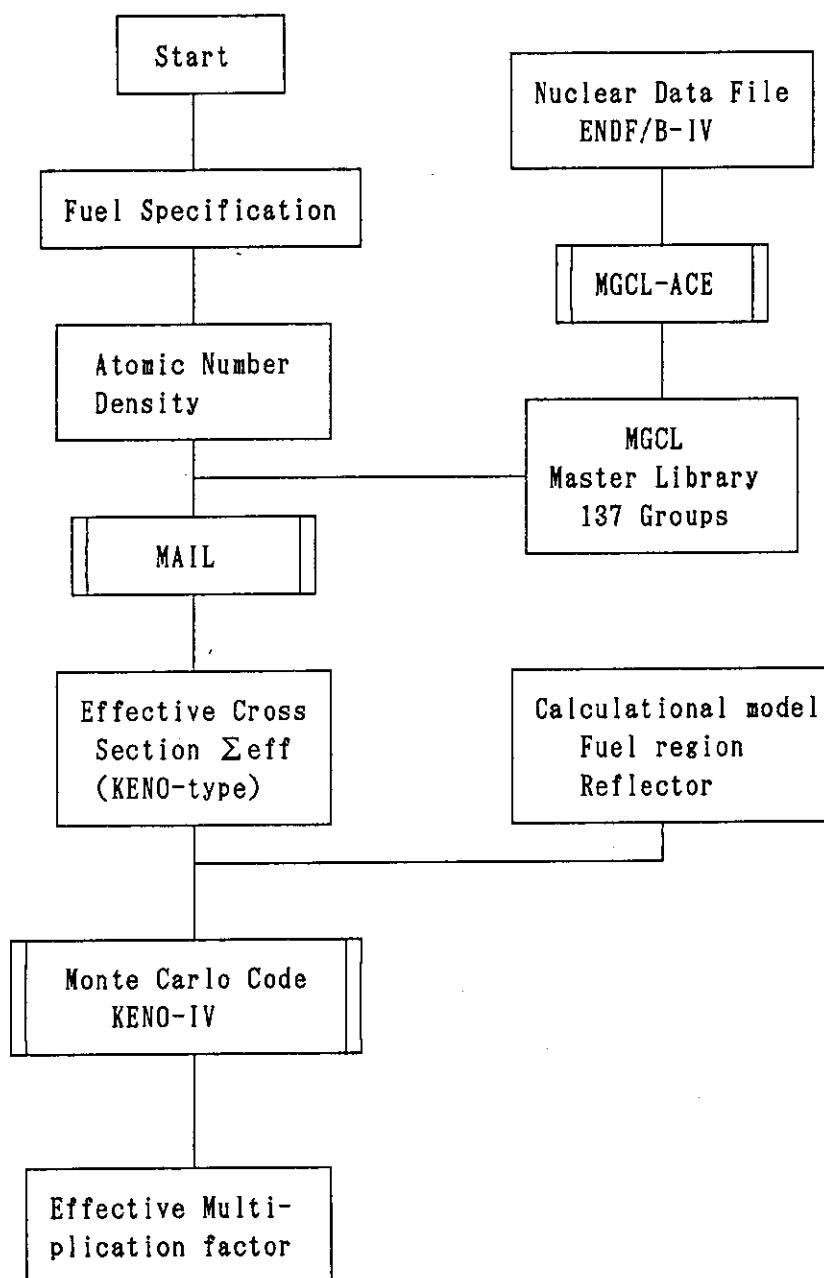


Fig. 3.1 Calculational flow of JACS system

Interaction coreSingle core

(1) Model A

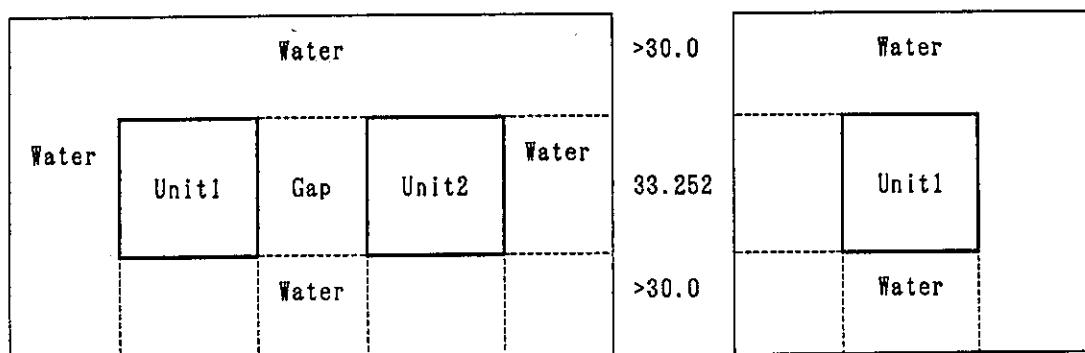
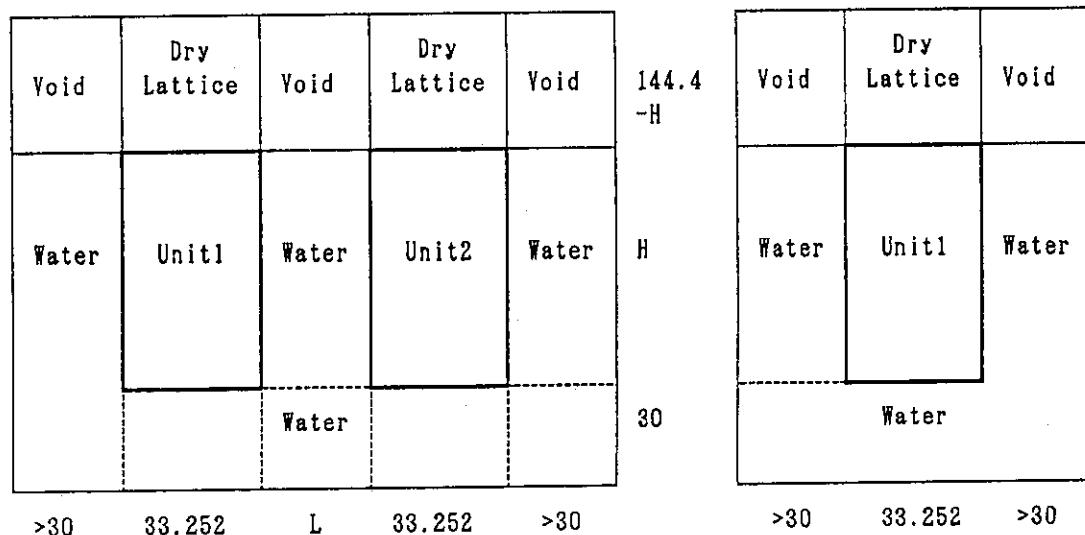
[X-Y plane] $\beta \pm X=0.0$ $\beta \pm Y=0.0$ [X-Z plane] $\beta \pm Z=0.0$ 

Fig. 3.2 Calculational model

Interaction coreSingle core

(2) Model B

[X-Y plane] $\beta \pm X=0.0$ $\beta \pm Y=1.0$

Water	Unit1	Gap	Unit2	Water	33.252
-------	-------	-----	-------	-------	--------

Water	Unit1	Water
-------	-------	-------

[X-Z plane] $\beta \pm Z=0.0$

Void	Dry Lattice	Void	Dry Lattice	Void	144.4 -H
Water	Unit1	Water	Unit2	Water	H
		Water			
					30

Void	Dry Lattice	Void
Water	Unit1	Water
Water		

(3) Model C

[X-Y plane] $\beta \pm X=0.0$ $\beta \pm Y=1.0$

Water	Unit1	Gap	Unit2	Water	33.252
-------	-------	-----	-------	-------	--------

Water	Unit1	Water
-------	-------	-------

[X-Z plane] $\beta \pm Z=1.0$

Water	Unit1	Gap	Unit2	Water	H
>30	33.252	L	33.252	>30	

Water	Unit1	Water
>30	33.252	>30

Fig. 3.2 (continued)

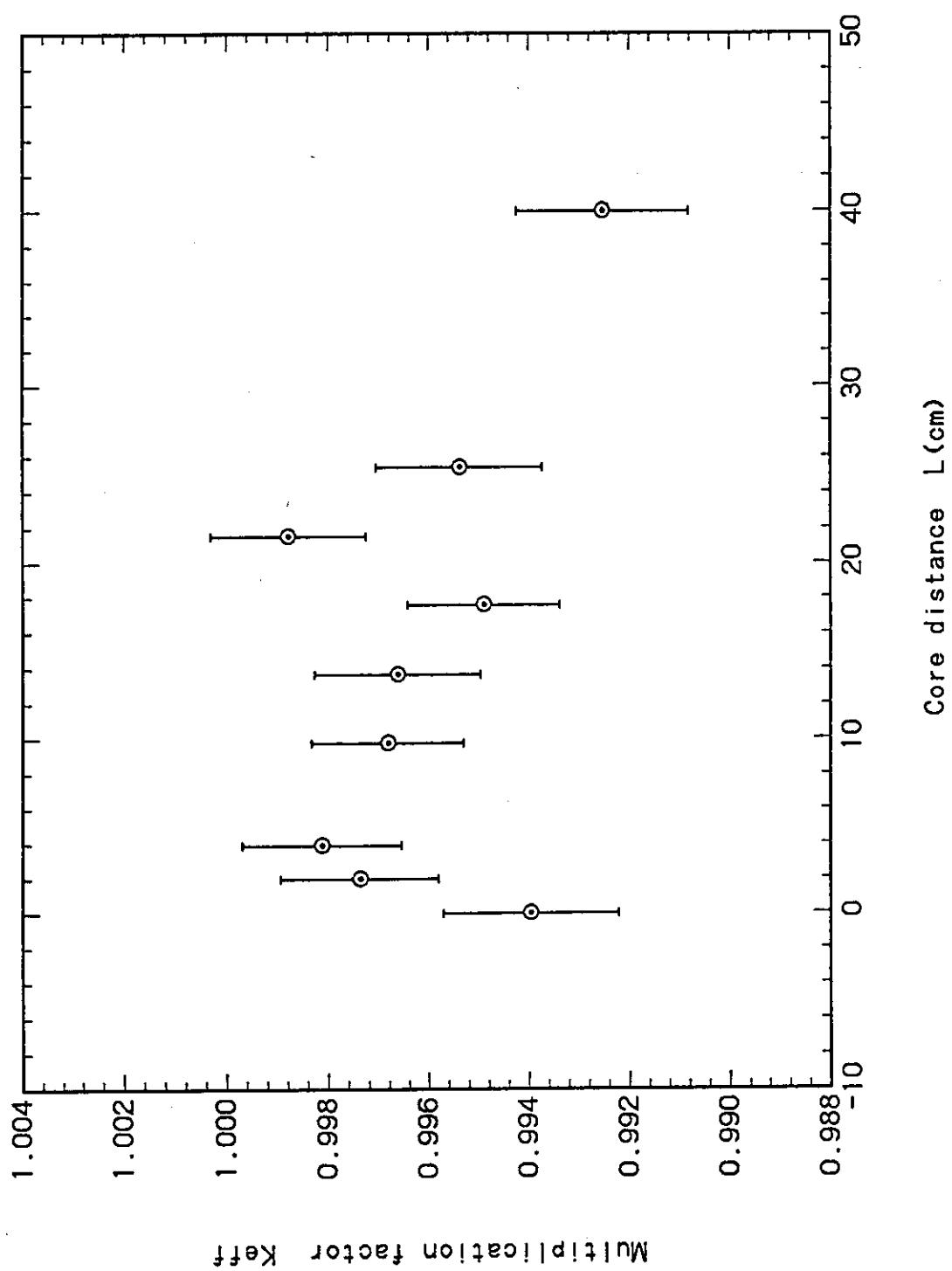


Fig. 3.3 Benchmark calculation

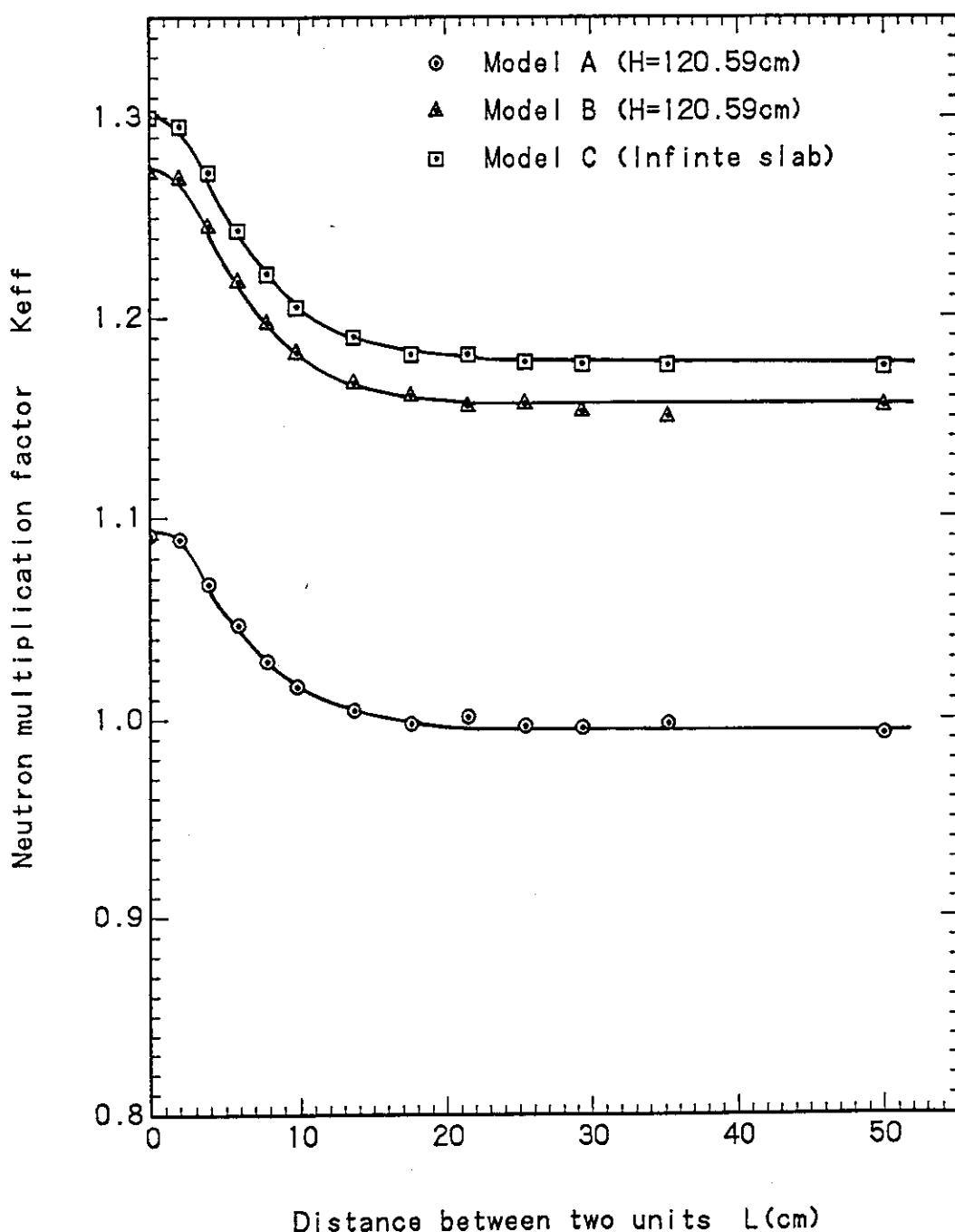


Fig. 3.4 Variation of effective multiplication factor vs. distance between two units
 (Model A,B(H=120.59cm), Model C)

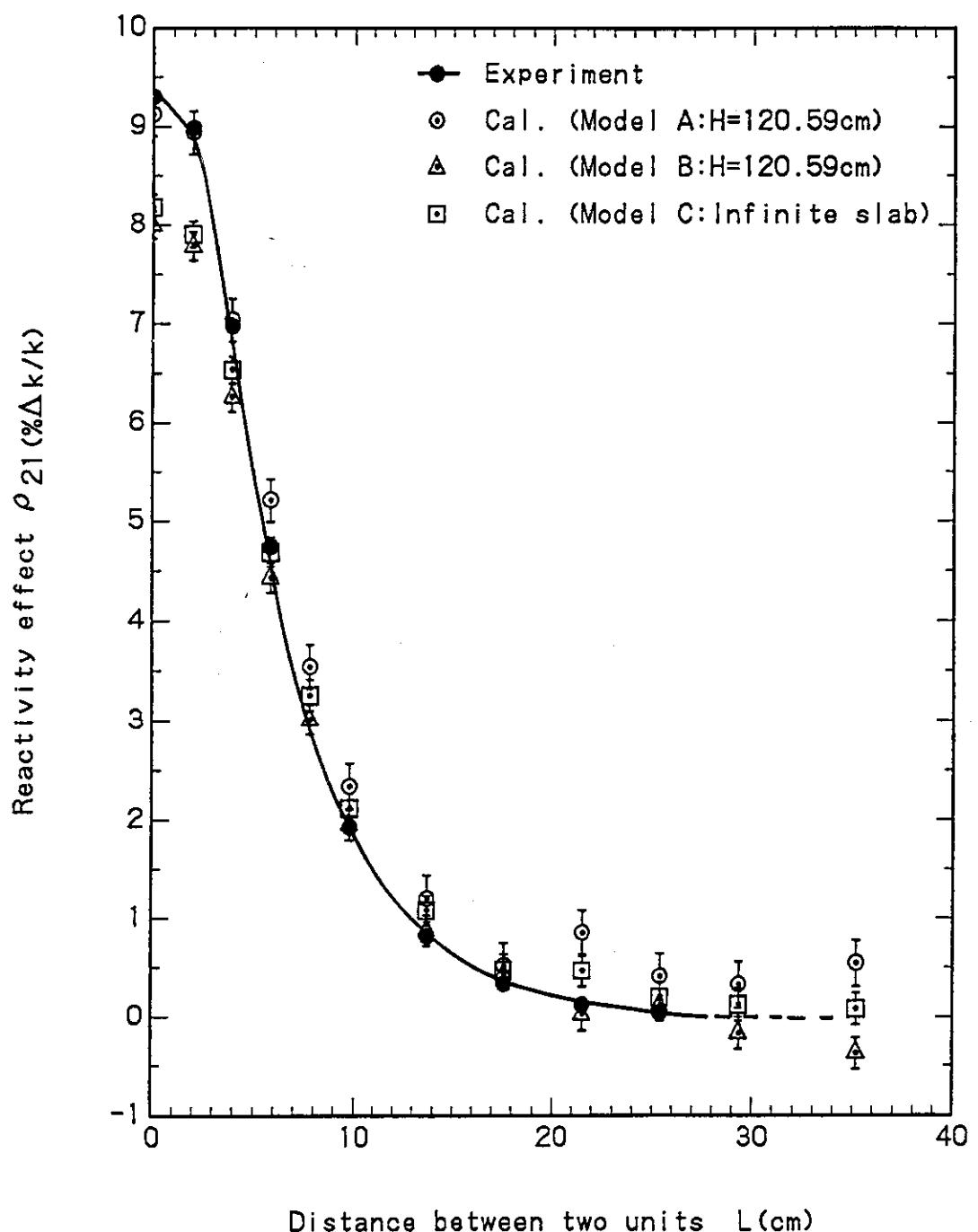


Fig. 3.5 Variation of reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21} vs. distance between two units

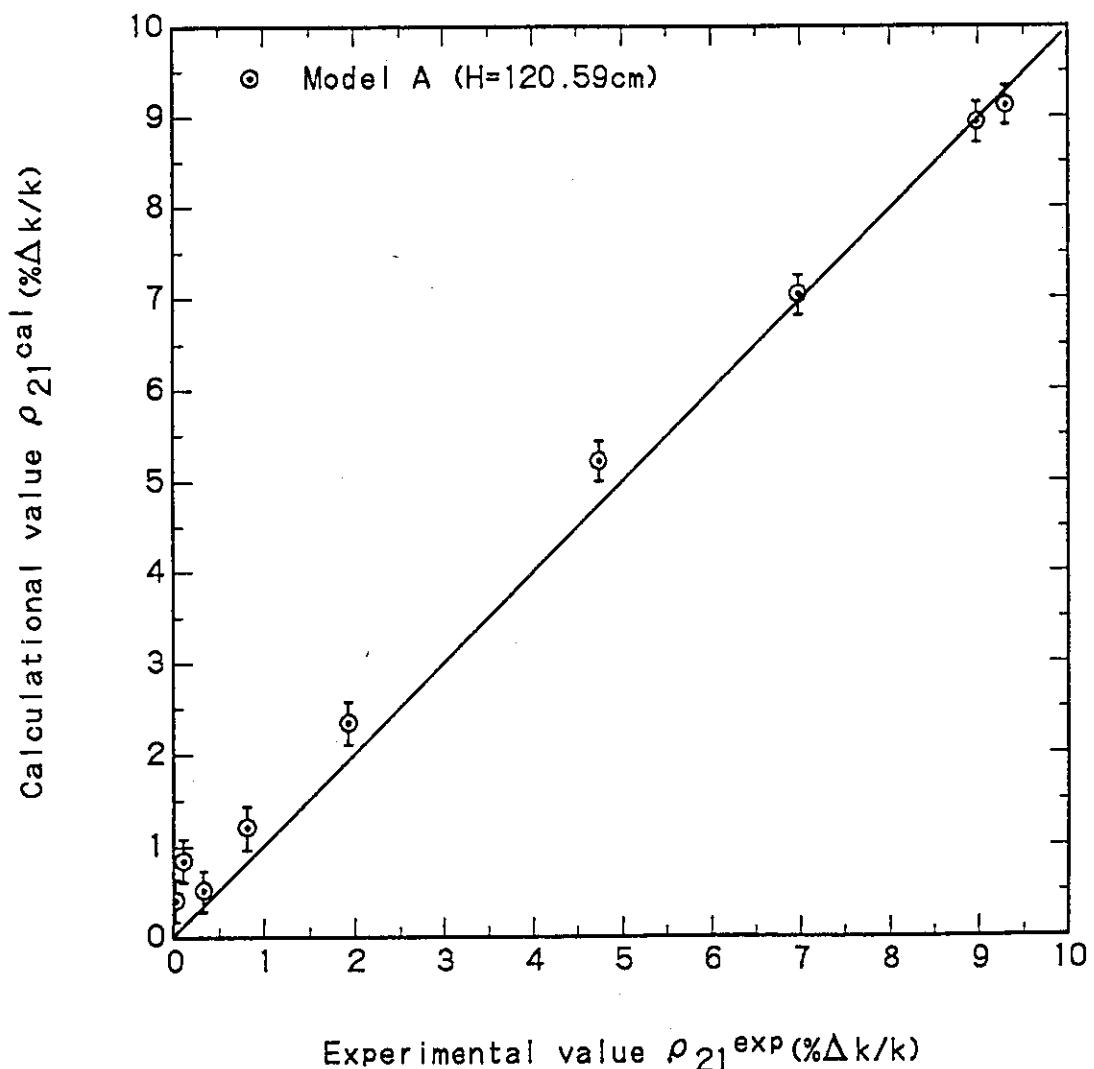


Fig. 3.6 Correlation of reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21} between measured value and calculational value with model A

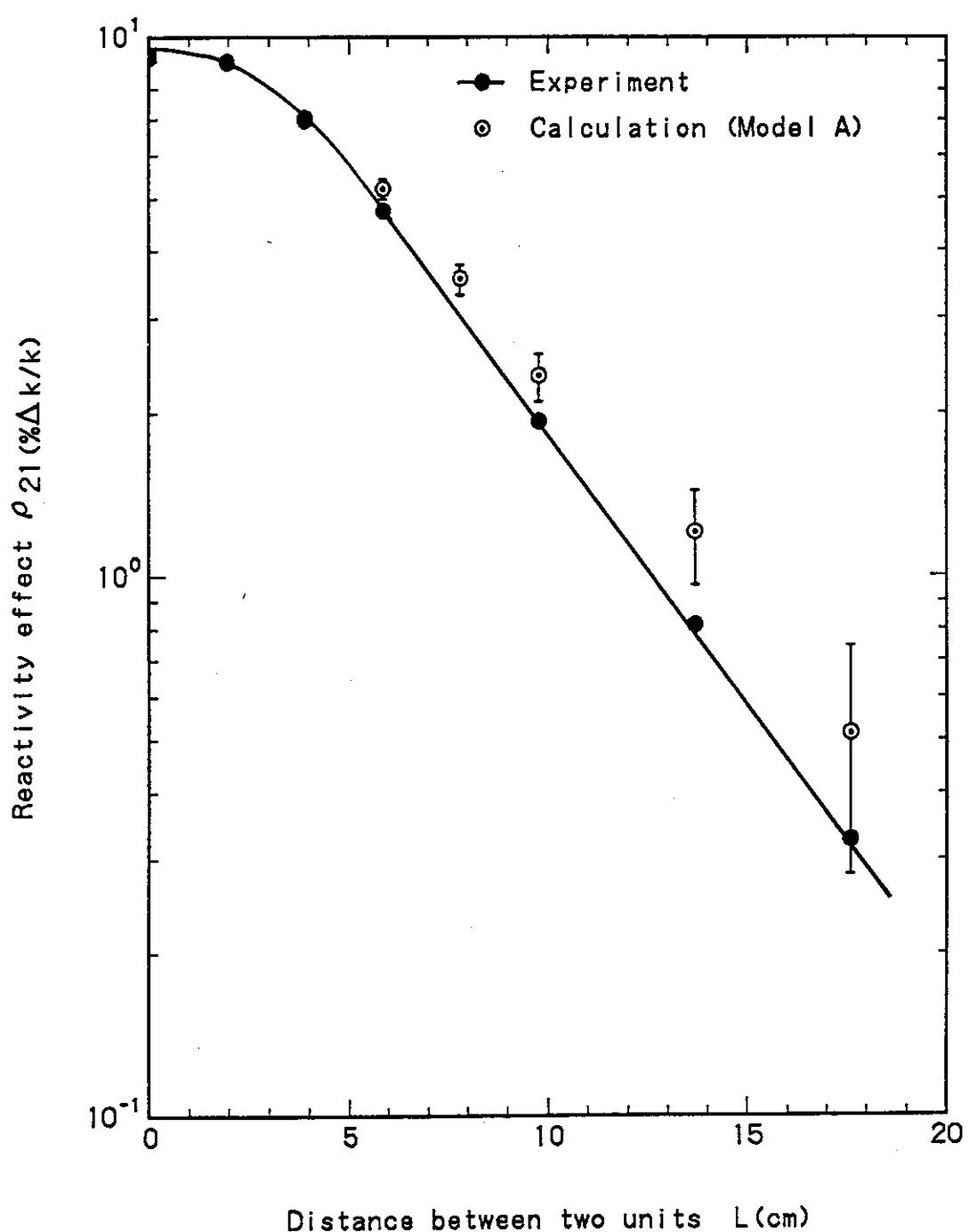


Fig. 3.7 Comparison of reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21} between measured value and calculational value with model A

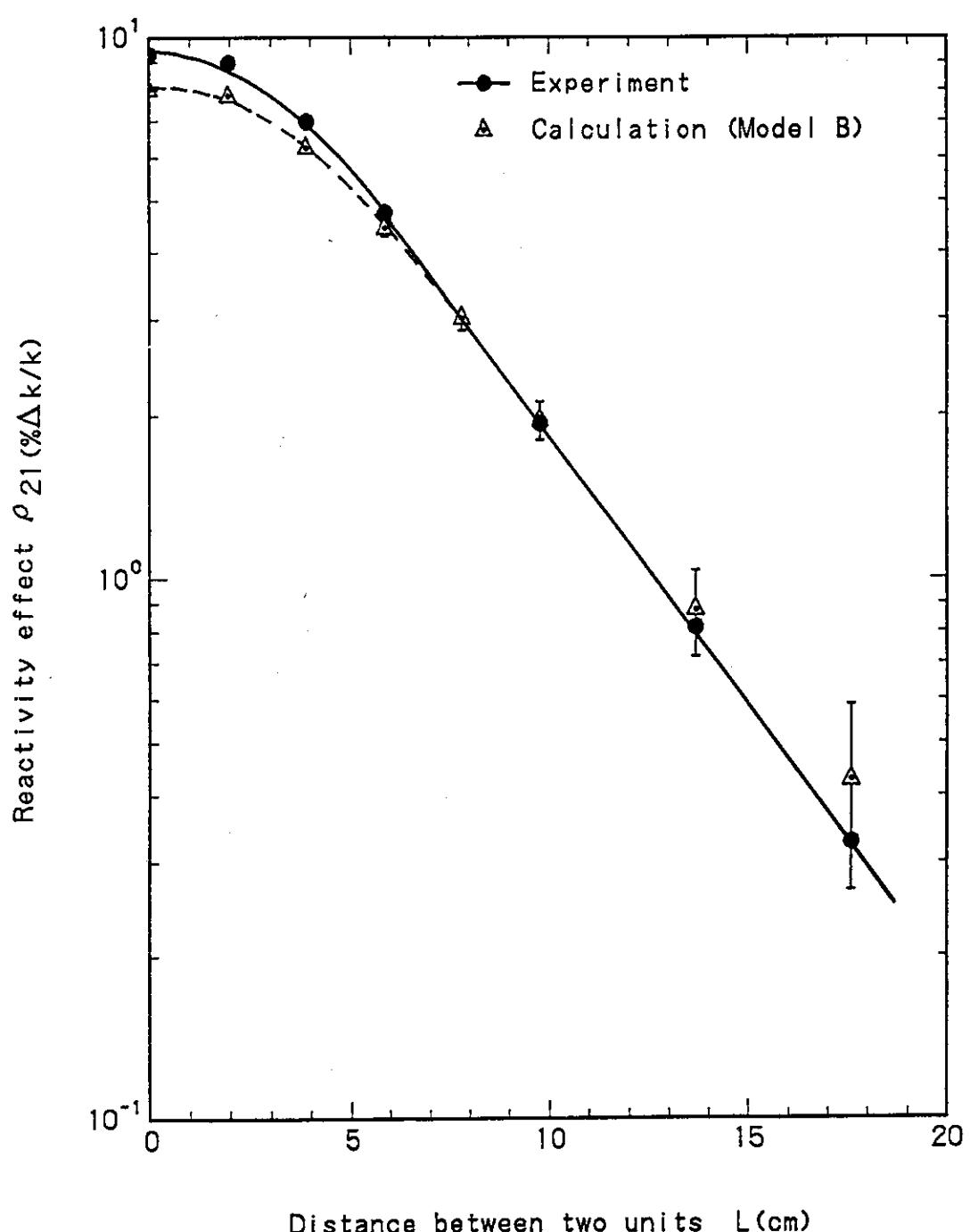


Fig. 3.8 Comparison of reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21} between measured value and calculational value with model B

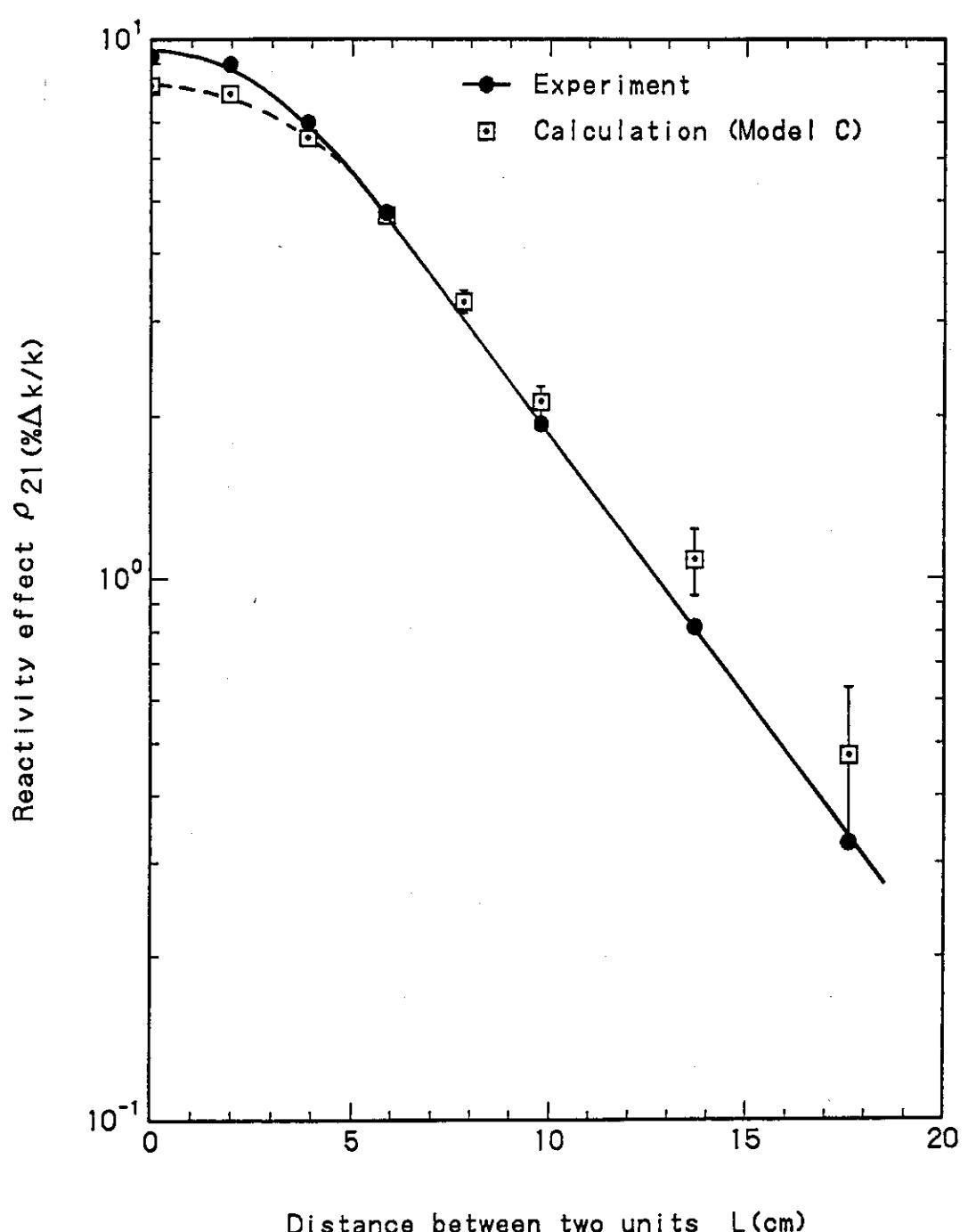


Fig. 3.9 Comparison of reactivity effect from unit 2 to unit 1 ρ_{21} between measured value and calculational value with model C

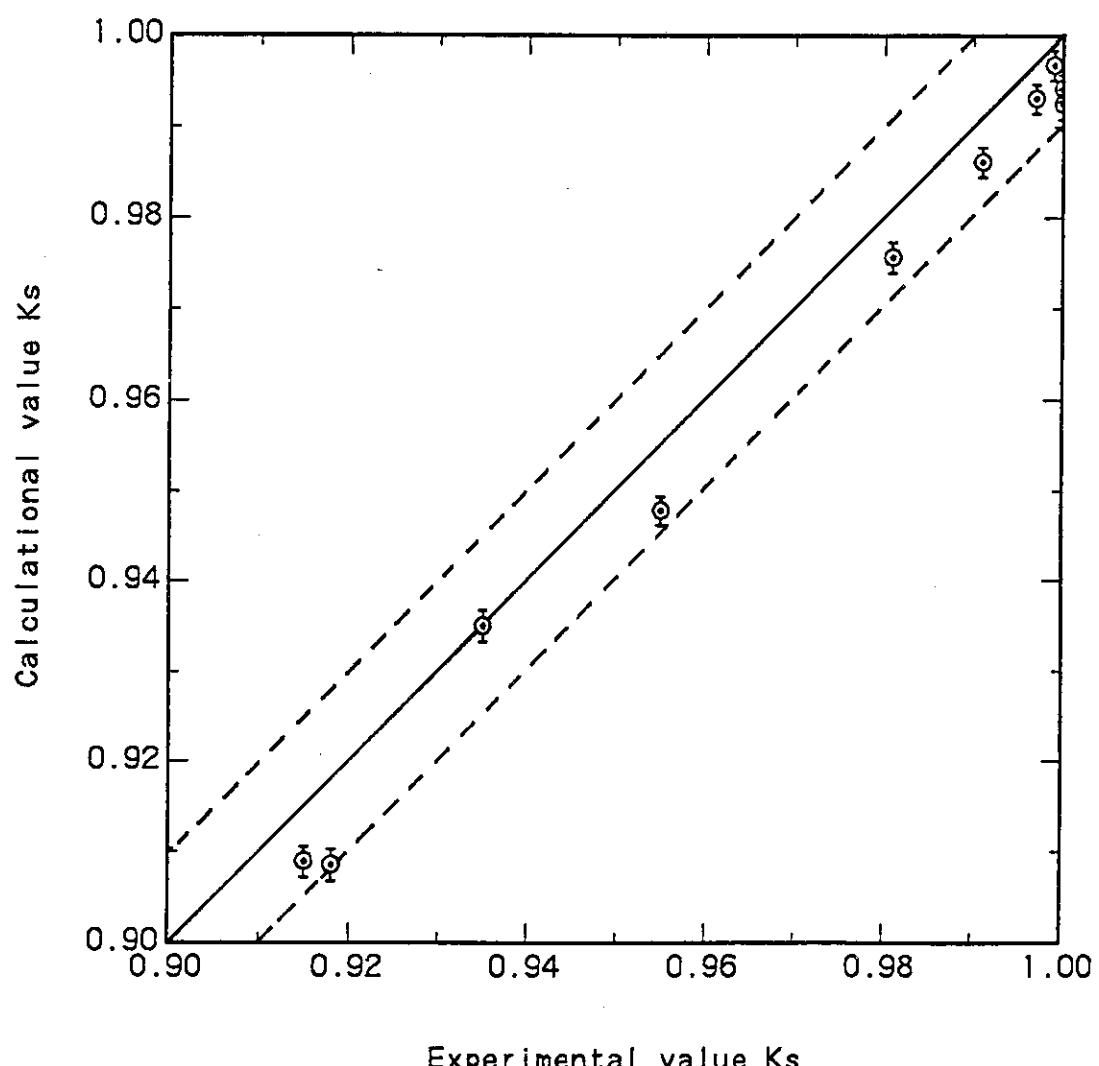


Fig. 3.10 Correlation of effective multiplication factor of single unit between measured value and calculational value with model A

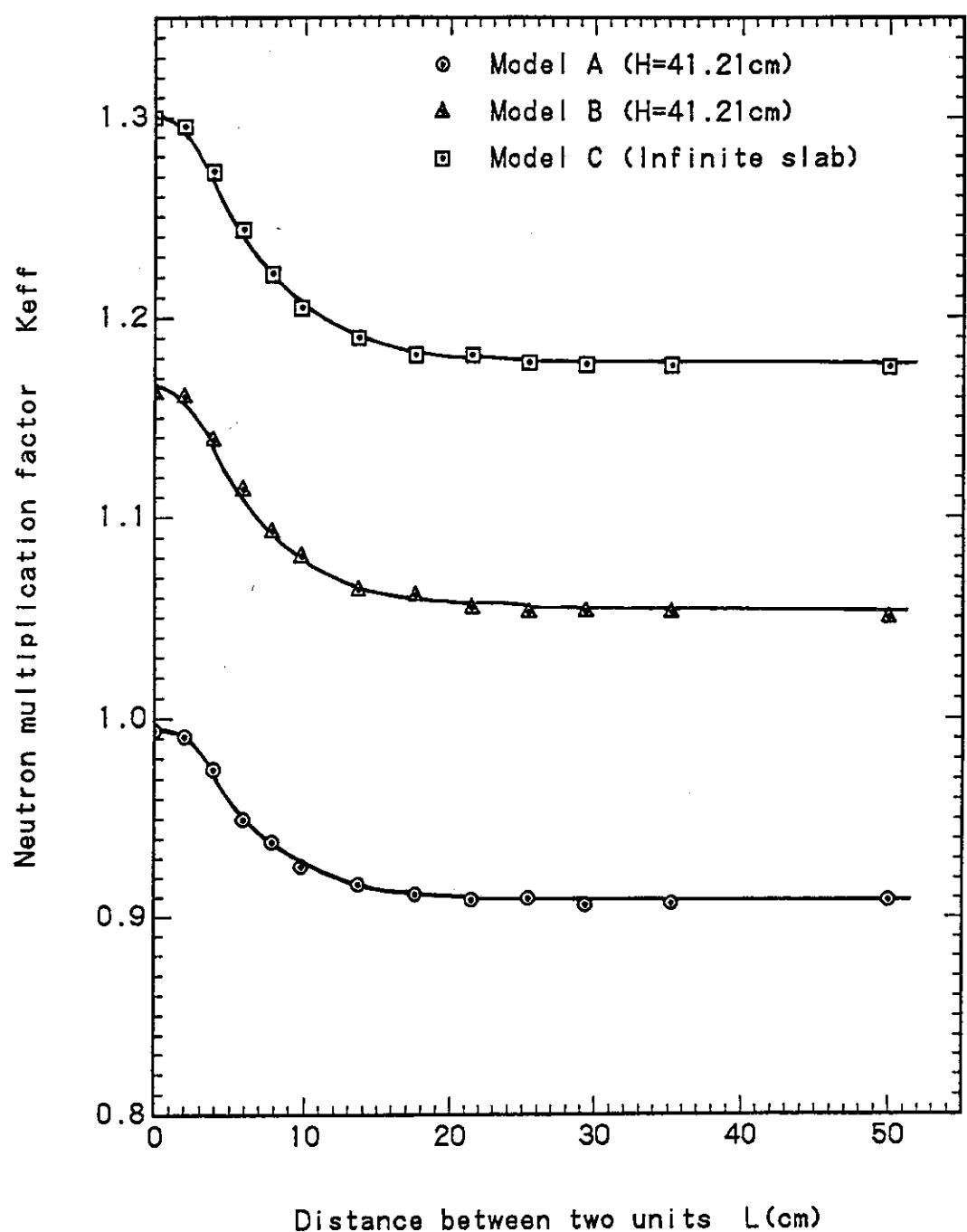


Fig. 3.11 Variation of effective multiplication factor vs. distance between two units
(Model A,B(H=41.21cm), Model C)

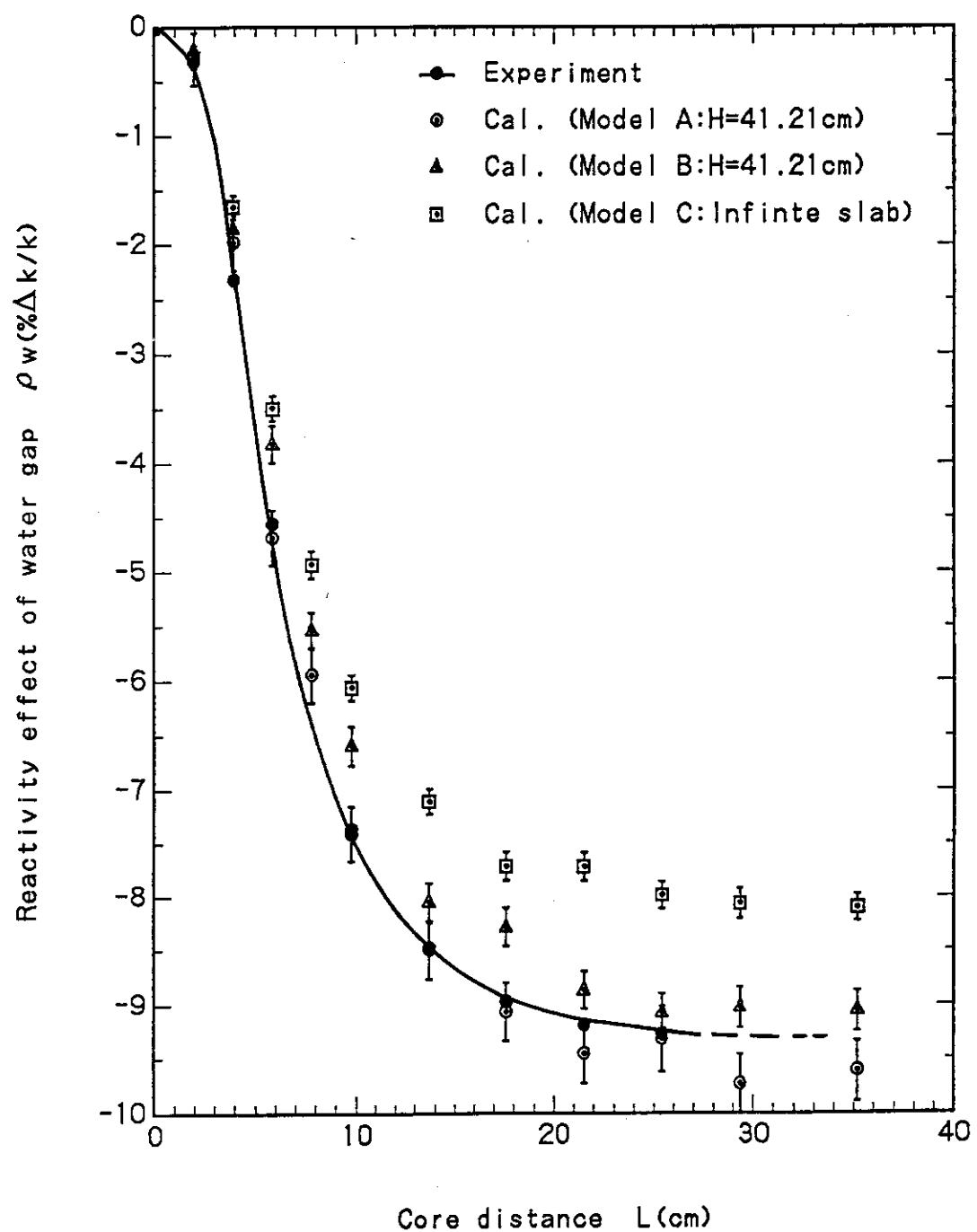


Fig. 3.12 Variation of reactivity effect of water gap ρ_{wg} vs. distance between two units

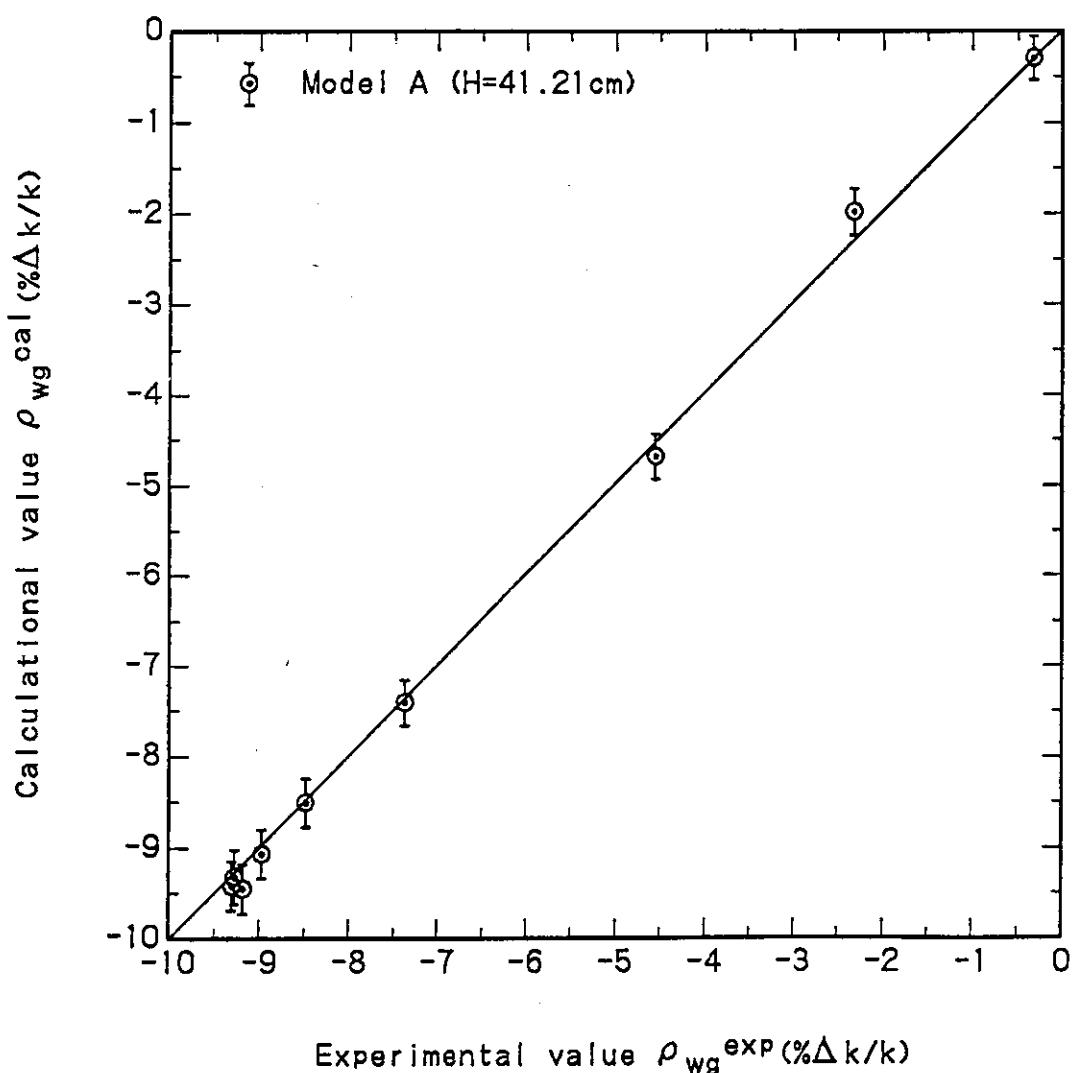


Fig. 3.13 Correlation of reactivity effect of water gap ρ_{wg} vs. between measured value and calculational value with model A