

未臨界度測定試験計画の成果と課題

区 分 変 更	
変更後資料番号	PNC TN 9410 90-041
決裁年月日	平成 10 年 3 月 26 日

1990年3月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討及び周知を目的とする社内資料です。刊行物に引用する場合には、事業団の承認が必要です。

未臨界度測定試験結果の成果と課題

* 福村信男, 清野英昭, 吉田 守
** 戸部賢治, 加納享司, 岡村好則

要 旨

未臨界度測定試験計画は核燃料施設の安全性, 経済性向上に資するため, 未臨界度の測定値を精度よく求める測定手法を開発すると共に未臨界度モニタの実用化と臨界安全解析手法の高度化を目的として実施中である。

設計研究においては昭和61年度に概念設計を着手し, 昭和63年度の調整設計で未臨界度測定試験施設の設備仕様を設定した。また, 日米共同臨界実験(昭和58~63年度)では臨界安全性試験及び未臨界度測定装置を実施してきた。

本書は, これまでの研究成果と課題を整理し, 平成2年度以後の実施計画をまとめたものである。

* 大洗工学センター 実験炉部 臨界工学試験室

** 同上 (平成2年1月出向解除)

Sub-criticality measuring experiment

* Nobuo Fukumura, Hideaki Seino, Mamoru Yoshida
Kenji Tobe, Kyoji Kanoh and Yoshinori Okamura

Abstract

Sub-criticality measuring experiment is planning for the purpose of contribution to safety and economy design of a nuclear fuel cycle facility.

This plan includes developing sub-criticality measuring methods and developing sub-criticality monitor.

Regarding as modification, the feasibility study was conducted in 1975.

The adjustment design was conducted to decide the detail specification in 1988.

Regarding as sub-criticality measuring monitor, fundamental study had been developed by the PNC/DOE joint experiment from 1983 to 1988.

This report describes a work of DCA's modification, a study of the monitor, and the schedule for the experiment.

* Experimental Reactor Division, Criticality Engineering Section, Oarai Engineering Center, PNC.

目 次

1. まえがき	1
2. 2領域実験手法の成立性	2
2.1 2領域理論の検討	2
2.2 DCAにおける未臨界度測定	18
2.3 DCA既設利用による実験計画	45
3. 未臨界度測定技術開発	50
3.1 既存未臨界度測定の比較	50
3.2 日米共同臨界実験のまとめ	55
3.3 DCAへの応用	68
4. 改造計画	72
4.1 設計レビュー	72
4.2 炉心部改造設計	86
5. あとがき	110
6. 参考文献	111

1. ま え が き

臨界安全とは、いかなる状況下においても核燃料物質を含む系が臨界に達しないことを確認・保証することである。このことは、体系の臨界条件が明らかにされれば、質量、寸法、濃度等に制限を加えることで原理的に達成できる。しかし核燃料物質の貯蔵量、処理量等に大幅な余裕をとることなく時間、空間的に変化するプロセスを把握し、最も効果的に臨界安全性を確立するためには、単に体系の臨界未満を確認するだけでなく、臨界からどの程度隔たっているかを定量的に把握することが必要である。

高速炉燃料は軽水炉燃料に比べプルトニウム含有割合が多く、特に系統内で相変化を伴う高速炉燃料再処理施設の臨界安全は一段と厳しくなるため、施設の安全性・経済性向上のためには未臨界度の測定値を精度よく求める測定手法を開発すると共に未臨界度モニタの実用化と臨界安全解析手法の高度化を図らねばならない。

このため、動燃事業団では米国と共同で未臨界度測定装置の開発を進める（昭和58年～63年）一方、既設重水臨界実験装置（DCA）を活用した未臨界度測定試験施設の設計研究並びに未臨界測定の予備実験を進めてきた。

未臨界度測定試験はこれらの成果を承けて平成7年度に実証試験実施を目標として実施するものである。

本書は、平成元年度までの成果と課題を整理し、平成2年度以後の作業計画をまとめたものである。

2. 2 領域実験手法の成立性

2.1 2 領域理論の検討

2.1.1 目的

従来の臨界安全のための実験装置は下記の拘束条件を有している。

- (1) 海外および国内ともに臨界安全ハンドブックのための基本データ取得を主目的としているため対象とする実機体系の模擬度はうすれる。
- (2) 実機体系の模擬度を高めると、臨界安全全般を包絡することは困難で使用目的が限られ汎用性に欠ける。
- (3) 溶液燃料、粉末燃料、ピン燃料といった種々の燃料を組み合わせた不定形燃料体系である場合、臨界調整や炉停止といった装置の運転性に大きな制約がある。

上記課題を解決し、図2.1-1に示した各施設からの必要性に対応した実機体系を模擬し、未臨界データを蓄積するためには、既設DCA装置の特徴を最大限生かし(表2.1-1参照)、臨界安全設計の合理化に反映する必要がある。

2.1.2 2 領域理論の概要

上記目的の項で記述したように未臨界実験を行うためには2 領域炉心運転法の採用が最適であることが判明したが、この2 領域炉心運転法を活用し対象としている試験体の未臨界度の絶対値を求める測定法の成立性について検討を行った。

R. Avery⁽²⁾による、N領域よりなる体系の固有値方程式は、全体系実効増倍率をKとすると、マトリックス形式で、次式で与えられる。

$$\{K_{ij}\} S^v = K S^v \quad (i, j = 1 \sim N) \quad (1)$$

ここで、 S^v はN次の列行列を表し、 K_{ij} は、炉心iについて炉心jにより発生する中性子数の期待値を表す。

DCAのような2 領域炉心の場合(1)式は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} K_{11} S_1 + K_{12} S_2 &= K S_1 \\ K_{21} S_1 + K_{22} S_2 &= K S_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$K_{11} + K_{12} = 1 \quad ?$$

ここで、

$$K_{11} = \frac{S_{11}}{S_1}, \quad K_{12} = \frac{S_{12}}{S_1}, \quad K_{21} = \frac{S_{21}}{S_2}, \quad K_{22} = \frac{S_{22}}{S_2} \quad (3)$$

である。また S_{ij} は炉心 j によりひきおこされた炉心 i の中性子源を表し、

$$S_i = \sum_{j=1}^n S_{ij} \quad K_{21} + K_{22} = 1 \quad (4)$$

である。従って、(4)式より、

$$\left. \begin{aligned} S_{11} + S_{12} &= S_1 \\ S_{21} + S_{22} &= S_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

である。(3)式と(5)より、

$$\left. \begin{aligned} K_{11}S_1 + K_{12}S_2 &= KS_1 \\ K_{21}S_1 + K_{22}S_2 &= KS_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となる。(6)式が $(S_1, S_2) = (0, 0)$ 以外の解をもつには、(6)式から

$$\begin{vmatrix} (K_{11}-K) & K_{12} \\ K_{21} & (K_{22}-K) \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

を満足する必要がある。ここで、 K_{12} 、 K_{21} は各々炉心1及び炉心2での相互の中性子の寄与分を示し、領域間の干渉効果の強さを与える。

ここでDCA炉心中央部試験領域をT、周辺部のドライバー領域をDとすると(7)式から、

$$(K - K_{TT})(K - K_{DD}) = K_{TD}K_{DT} \quad (8)$$

となる。

(8)式の原理を応用して、下記の実験式を仮定する。

$$(K - K_T)(K - K_D) = C \quad (9)$$

ここで、 C を結合係数と定義するとともに、 K_T 、 K_D を各々試験体単独およびドライバー領域単独の実効増倍率とする。

今、臨界状態にある体系の任意の領域に変動が生じ、その結果微小な反応度 $\rho (= 1 - 1/K)$ が生ずる場合を考える。この場合(9)式から、

$$C = (\Delta T + \Delta D) \rho + \Delta T \Delta D + E_1 \quad (10)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= (1 - \rho)^{-1} [\Delta T + \Delta D + (1 - \rho)^{-1}] \rho^2 \\ \Delta T &= 1 - K_T, \quad \Delta D = 1 - K_D \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

とする。

さらに臨界状態の場合のサフィックスを0とおくと、(9)式より、

$$(1 - K_T^0)(1 - K_D^0) = C^0$$

即ち、

$$\Delta T^0 \Delta D^0 = C^0 \quad (12)$$

となる。

通常の測定では、 ρ は 10^{-4} 以下のオーダーであるため(11)式で $E_1 \approx 0$ とおける。従って(10)式から、

$$\rho = (C - \Delta T \Delta D) / (\Delta T + \Delta D) \quad (13)$$

(13)式は、臨界状態からのずれを表わすため、下記のように各記号を記述できる。

$$C = C_0 + \delta C, \quad \Delta T = \Delta T^0 + \delta \Delta T, \quad \Delta D = \Delta D^0 + \delta \Delta D \quad (14)$$

従って(13)式は下記となる。

$$\rho = - \frac{\Delta T^0 \Delta D^0}{(\Delta T^0 + \Delta D^0)} \times \frac{\left(\frac{\delta \Delta T}{\Delta T^0} + \frac{\delta \Delta D}{\Delta D^0} + \frac{\delta \Delta T \delta \Delta D}{\Delta T^0 + \Delta D^0} - \frac{\delta C}{\Delta T^0 + \Delta D^0} \right)}{\left(1 + \frac{\delta \Delta T + \delta \Delta D}{\Delta T^0 + \Delta D^0} \right)} \quad (15)$$

ここで反応度摂動をドライバー領域のみで与える運転法を採用すると、 $\delta \Delta T = 0$ となる。また分子括弧内の第3項および第4項、分母の括弧内第2項が各々分母に比べ小さいとすると、(15)式は下式となる。

$$\rho \approx - \frac{\Delta T^\circ \Delta D^\circ}{\Delta T^\circ + \Delta D^\circ} \times \frac{\delta \Delta D}{\Delta D^\circ} \quad (16)$$

(16)式からドライバー領域の情報のみから試験領域の未臨界度が実験的に求められることが判明した。

(16)式は、全体系が任意の臨界状態にある時試験体単独の実効増倍率 K_T はドライバー領域の反応度変化とそれにより生ずる全体系微小反応度より求まることを意味している。

(16)式の ΔD° 、 $\delta \Delta D$ は、ドライバー領域に反応度摂動を加えた時の情報量であり、 ρ が 10^{-4} 程度の小さい値であるため、通常の炉心計算で用いているコードで解析することは殆んど不可能である。そこで数値実験によりドライバー領域に反応度を加えた場合の試験体単独の未臨界度を(16)式から求めた。この場合の試験体は、250g Pu/lの直径40cmの溶液タンクを設定した。臨界調整の結果を表2.1-2に、試験体単独の未臨界度を(16)式から求めた値を図2.1-2に、結合係数の曲線を図2.1-3に示す。

次に(16)式の誤差評価を行う。

誤差伝播の式から(16)式は下式となる。

(16)式より、

$$K_T^* = 1 + \rho \Delta D^\circ / (\rho + \delta \Delta D) \quad (17)$$

$$(\delta K_T^*)^2 = (\delta K_T^*)_{\rho}^2 + (\delta K_T^*)_{\Delta D}^2$$

$$\therefore \delta K_T^* = \left\{ (\Delta D^\circ + \Delta T^\circ)^2 (\delta \rho)^2 + \rho^2 (\delta \Delta D^\circ)^2 \right\}^{1/2} / (\rho + \{\delta \Delta D\}) \quad (18)$$

ここで $\delta \rho$ 、 $\delta \Delta D^\circ$ 、 $\delta \Delta D$ は反応度の測定誤差を示す。次章で記述するようにDCAを用いた測定誤差は、 $\delta \rho \leq 2 \times 10^{-3}$ 、 $\delta \Delta D$ は図2.1-4の下図に示すような値となるので K_T の測定誤差として図2.1-5の上図が得られる。

これらの結果から本手法により K_T が広範囲に求められ(0.3~0.99)、その誤差も2% δK 以内で求められることが判明した。

上述の手法は、(9)式の結合係数の変化を無視できるとした手法であるが、結合係数の変化をとりいれた改良実験式についても検討を行った。この場合、結合係数の変化を積極的にとりいれるため、反応度変化は上述で仮定した 10^{-4} 程度より1桁大きくして検討を行った。

体系は前述と同一であるが、容器の大きさの効果をみるため直径を半分にした体系についても検討した。なお、反応度摂動法については、従来DCAで行ってきた水位摂動法および吸収摂動法についても検討を行った。

以下の様に摂動変化を2点考え、連立方程式により K_t , a_1 , C_i^0 を求める。

$$\begin{cases} (K^0 - K_t) (K^0 - K_{D^0}) = C_i^0 & (19) \\ (K^1 - K_t) (K^1 - K_{D^1}) = a_1 C_i^0 & (20) \\ (K^2 - K_t) (K^2 - K_{D^2}) = a_2 (1 + \beta_2) C_i^0 & (21) \end{cases}$$

なお、

$$\left. \begin{aligned} K_t &= \frac{(a K^1 - K^2)}{a - 1}, \quad a = \sqrt{K^1 \cdot K^2} \cdot \sqrt{K_{D^0}} \quad (\text{任意}) \\ a_2 &= \gamma a_1 \\ \gamma &= \sqrt{K^1 \cdot K^2} \cdot \sqrt{K_{D^0}} \cdot (K^2 - K_{D^2}) / (K^1 - K_{D^1}) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

β_2 - 補正係数 (実験、経験則および計算等により、(22)式で求まる γ 値と真値 γ との誤差を20%で補正できるものと仮定)

(19), (20)および(21)式の連立方程式より K_t を求める。得られた結果を表2.1-3に示す。表2.1-4には(19)~(21)式の各物理量の数値結果を示す。

表2.1-3の結果から今回の検討範囲内では、改良実験式を用いることにより平均±2%以内で試験体単独の未臨界度を広範囲に求められる見通しを得た。

以上は、中性子束および固有値の収束条件を通常使われている 10^{-4} と 10^{-5} を用いたが、今回の解析条件はかなり小さな値の議論であるため、収束条件を中性子束については 10^{-8} 、固有値については 10^{-9} に向上させて解析を行った。この結果を表1.5に示す。解析体系は従来と同じである。

表2.1-5の結果から(16)式の実験式で十分未臨界度を導出することができることがわかった。

2.1.3 課題と今後の予定

2領域理論を応用した2つの実験式について検討を行ったが、これまでの成果から次の課題を今後つめる必要があることが判った。

- (1) 反応度摂動手法は、かなり小さな量を取り扱うので、数値計算で求めた結果にかなりの誤差が見込まれる。今後は、1次摂動近似計算コードにより系統誤差も含めた誤差評価を行う必要がある。
- (2) 改良実験式においては、選択する関数形によって誤差が変動する可能性がある。従ってかなり精度をもった計算機を用い計算を行う必要がある。
- (3) 更にパラメータを変え (溶液濃度, タンク直径) 実験式を評価する必要があるとともに手持ちの燃料を用いた実験が必要である。

表2.1-1 未臨界度測定試験設備の特徴

◇ 4大特徴〔性能〕

1. 実機模擬の多様性	溶液タンク系, タンク・干渉体系, 燃料体配列系 (有限・無限), 垂直方向干渉, 最適減速体系, 構成要素型模擬試験体系。
2. 運転の安定性	ドライバー燃料* による運転が可能で, 臨界調整・炉停止が容易。試験体単独実験は未臨界実験。
3. 広範囲未臨界度測定	試験体実験増倍率を, 広範囲にわたり, 平均した精度でのデータ取得が期待できる。
4. 燃料所要量の削減	反応度測定のための試験体単独で臨界にする必要はなく, 試験燃料所要量が低減する。

* 既設DCA燃料の一部, 反応度制御は, 重水レベル調整による。

表2.1-2 臨界調整 (数値実験) の結果

ケース	溶液 y° cm	** k_T°	重水 x° cm	k_t°	δx , cm	$\% \delta \Delta_D$	C_T° [$\times 10^{-2}$]
1	3.0	0.300	128*	0.997	1	0.200 ₉	0.210
2	9.0	0.550	120*	0.986	1	0.206 ₂	0.630
3	17.5	0.700	110*	0.970	2	0.220 ₀	0.900
4	24.5	0.785	100*	0.952	2	0.244 ₇	1.032
5	41.0	0.915	70*	0.861	2	0.527 ₁	1.182
6	51.5	0.969	40*	0.682	4	2.252	0.986
7	57.0	0.990	18*	0.460	9	11.0	0.540

* 重水ダンブ状態

** 2領域実験手法による未臨界面度測定 $\rho=0.2\%$ (一定)

表2.1-3 改良実験式による数値計算結果

[水位摂動法]	単独K t	改良実験式K t	誤差(% Δ K)	実験単独K t	誤差(% Δ K)
R=20.0, H=40	0.982783	0.980862	0.192	0.963989	-1.879
H=10	0.484297	0.504836	2.054	0.571559	8.726
R=12.5, H=100	0.818434	0.815981	-0.245	0.805479	-1.295
H=14	0.485216	0.483314	-0.190	0.475955	-0.926
二乗平均			<u>1.043</u>		4.533
[吸収摂動法]					
R=20.0, H=40	0.982783	0.981946	-0.084	0.977489	-0.529
H=10	0.484297	0.516515	3.222	0.613337	12.904
R=12.5, H=100	0.818434	0.841918	2.348	0.895687	7.725
H=14	0.485216	0.489847	0.463	0.507453	2.224
二乗平均			<u>2.007</u>		7.606

単独K t : 計算で求めたタンク単独の実効増倍率

改良実験式K t : (19)~(22)式で算出したタンク単独の実効増倍率 (β_2 使用)

実験単独K t : (19)~(22)式で算出したタンク単独の実効増倍率 ($\beta_2 = 0$)

表2.1-4 改良実験式における各パラメータ

(i) 水位摂動法

R = 20 cm H = 40 cm

KT = 0.9827831

K0 = 0.9999725

K1 = 0.9985007

K2 = 0.9969737

KD0 = 0.9176146

KD1 = 0.9133936

KD2 = 0.9089830

CI0 = 1.41568-3

CI0 = 1.33768-3

CI0 = 1.24864-3

R = 20 cm H = 10 cm

KT = 0.4842968

K0 = 0.9999885

K1 = 0.9984689

K2 = 0.9969126

KD0 = 0.9973186

KD1 = 0.9958114

KD2 = 0.9942674

CI0 = 1.37685-3

CI0 = 1.36688-3

CI0 = 1.35597-3

R = 20 cm H = 40 cm

KT = 0.8184335

K0 = 0.9999999

K1 = 0.9980066

K2 = 0.9962859

KD0 = 0.9878359

KD1 = 0.9861061

KD2 = 0.9845487

CI0 = 2.20857-3

CI0 = 2.13701-3

CI0 = 2.08749-3

R = 20 cm H = 40 cm

KT = 0.4852156

K0 = 0.9999984

K1 = 0.9985099

K2 = 0.9969866

KD0 = 0.9986714

KD1 = 0.9971881

KD2 = 0.9956687

CI0 = 6.83117-4

CI0 = 6.78473-4

CI0 = 6.74463-4

(ii) 吸収法

R=20cm H=40cm

KT =0.9827831

K0 =0.9999725

K1 =0.9987350

K2 =0.9978058

KD0=0.9176146

KD1=0.8997206

KD2=0.8825977

CI0=1.41568-3

CI0=1.57947-3

CI0=1.73074-3

R=20cm H=10cm

KT =0.4842968

K0 =0.9999885

K1 =0.9987588

K2 =0.9975268

KD0=0.9973186

KD1=0.9960814

KD2=0.9948420

CI0=1.37685-3

CI0=1.37742-3

CI0=1.37792-3

R=1.25cm H=100cm

KT =0.8184335

K0 =0.9999999

K1 =0.9992448

K2 =0.9984968

KD0=0.9878359

KD1=0.9870185

KD2=0.9862081

CI0=2.20857-3

CI0=2.21065-3

CI0=2.21274-3

R=1.25cm H=14cm

KT =0.4852156

K0 =0.9999984

K1 =0.9987625

K2 =0.9975244

KD0=0.9986714

KD1=0.9974317

KD2=0.9961898

CI0=6.83117-4

CI0=6.83428-4

CI0=6.83727-4

表2.1-5 収束条件変更に伴う計算結果

1. 収束条件

中性子束 $10^{-4} \rightarrow 10^{-8}$

に変更

固有値 $10^{-5} \rightarrow 10^{-9}$

2. 計算結果

R=20cm H=40cm $K_t^\circ = 0.982783$
 $K_t = 0.993660$ (実験式)
 $K^\circ = 0.9999999904$ $K' = 0.9987233973$
 $K_D = 0.9175859522$ $K_D' = 0.8996918178$

R=20cm H=10cm $K_t^\circ = 0.484297$
 $K_t = 0.450990$ (実験式)
 $K^\circ = 0.9999999899$ $K' = 0.9987702742$
 $K_D = 0.9973237488$ $K_D' = 0.9960865070$

R=12.5cm H=100cm $K_t^\circ = 0.818434$
 $K_t = 0.851433$ (実験式)
 $K^\circ = 1.0000000010$ $K' = 0.9992449975$
 $K_D = 0.9878319000$ $K_D' = 0.9870144434$

表2.1-6 収束条件変更に伴う計算結果

1. 収束条件

中性子束 $10^{-4} \rightarrow 10^{-8}$

に変更

固有値 $10^{-5} \rightarrow 10^{-9}$

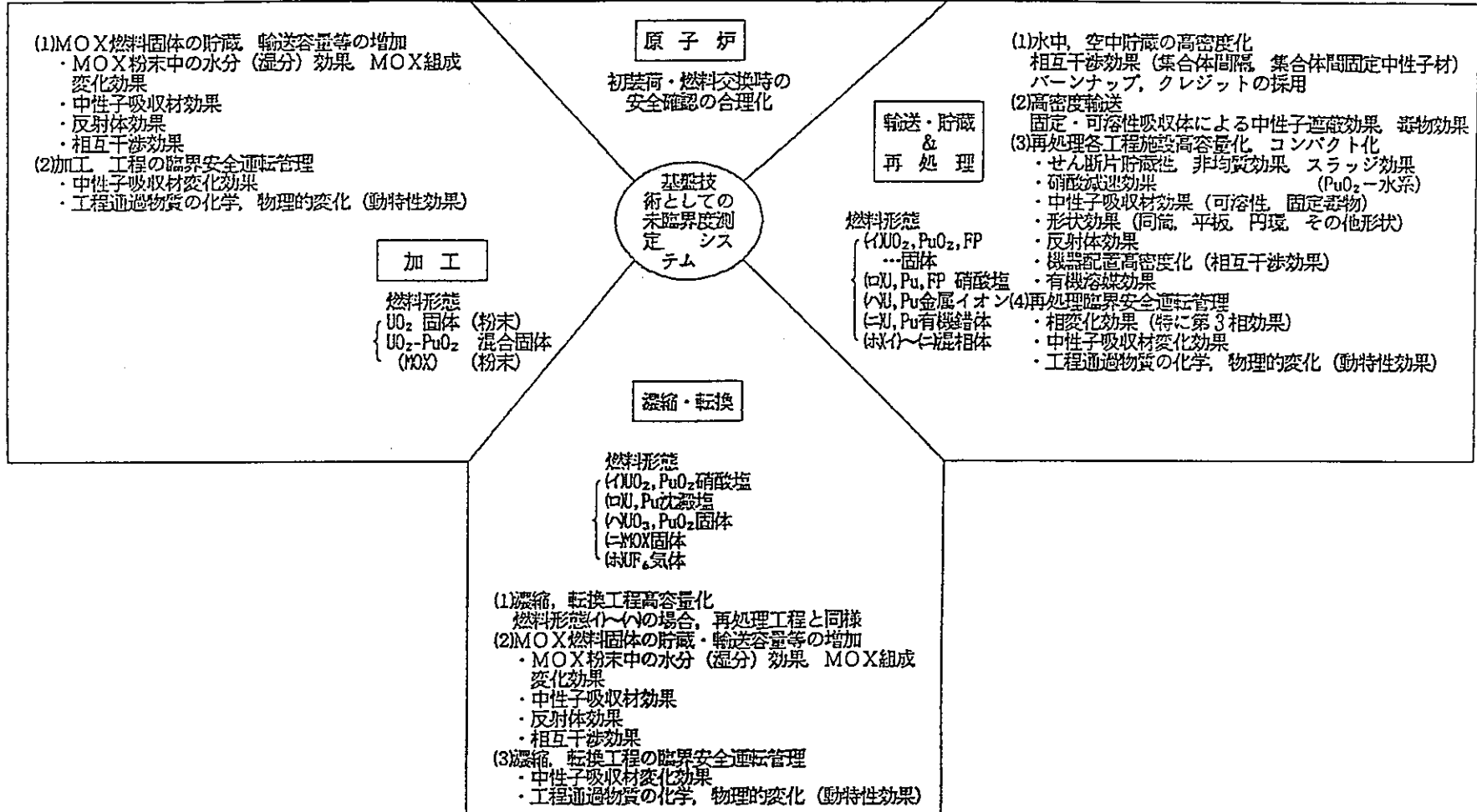
2. 計算結果

R=20cm H=40cm $K_{1,0} = 0.982783$
 $K_{1,1} = 0.993660$
 $K^{\circ} = 0.9999999904$ $K' = 0.9987233973$
 $K_0 = 0.9175859522$ $K_0' = 0.8996918178$

R=20cm H=10cm $K_{1,0} = 0.484297$
 $K_{1,1} = 0.450990$
 $K^{\circ} = 0.9999999899$ $K' = 0.9987702742$
 $K_0 = 0.9973237488$ $K_0' = 0.9960865070$

R=12.5cm H=100cm $K_{1,0} = 0.818434$
 $K_{1,1} = 0.851433$
 $K^{\circ} = 1.0000000010$ $K' = 0.9992449975$
 $K_0 = 0.9878319000$ $K_0' = 0.9870144434$

図2.1-1 未臨界測定システムの必要性



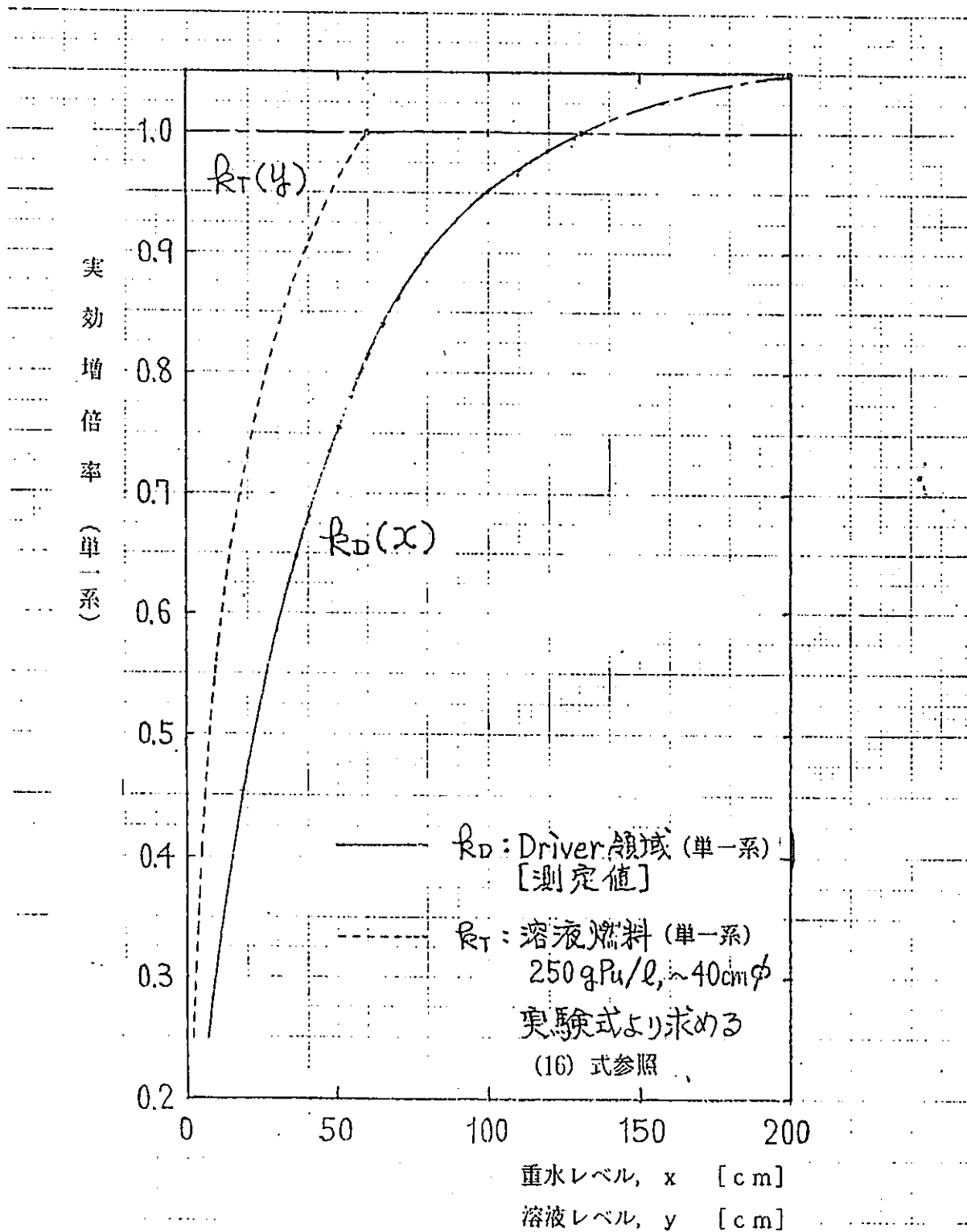


図2.1-2 実効増倍率曲線

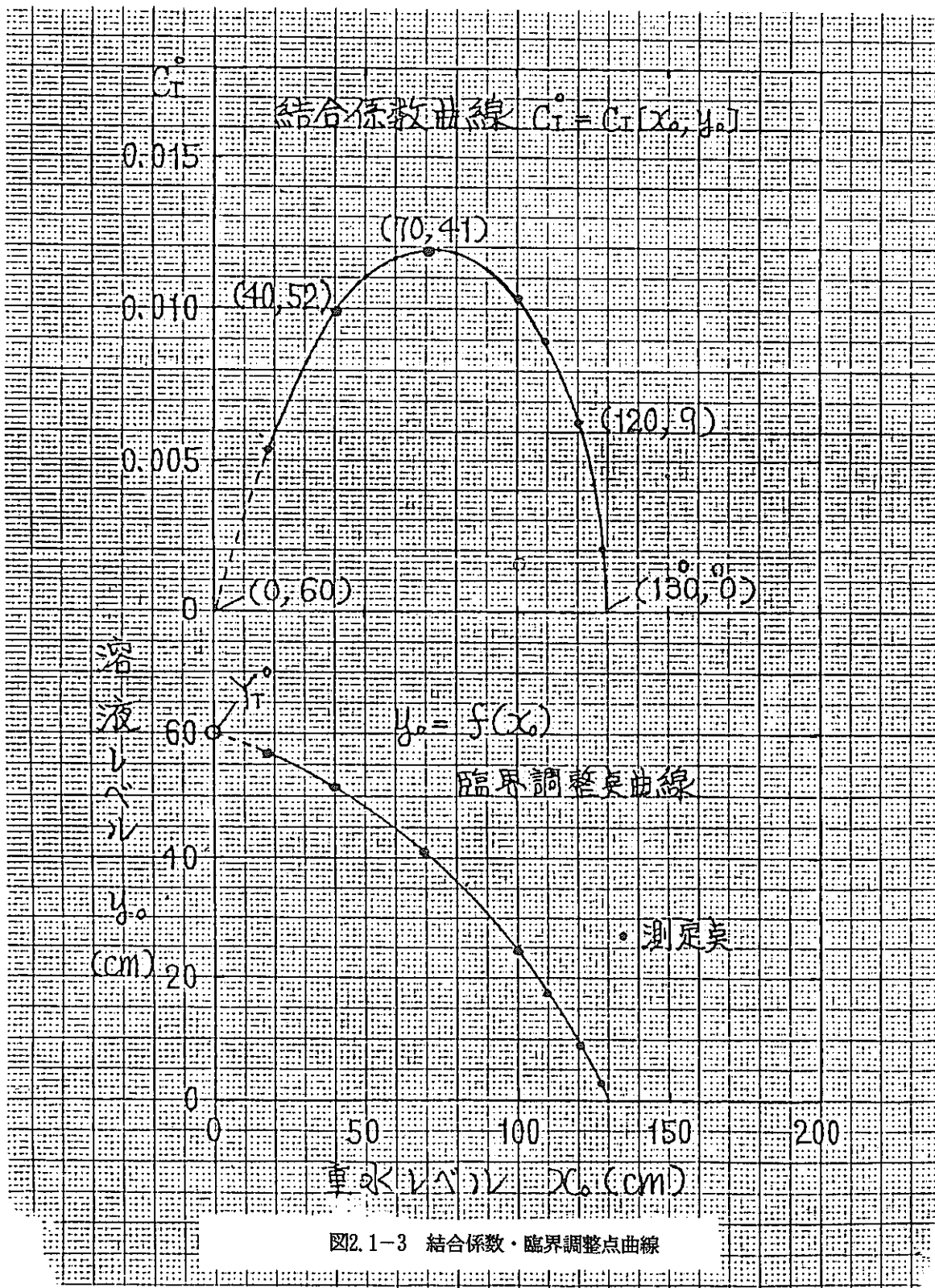


图2.1-3 結合係数・臨界調整点曲線

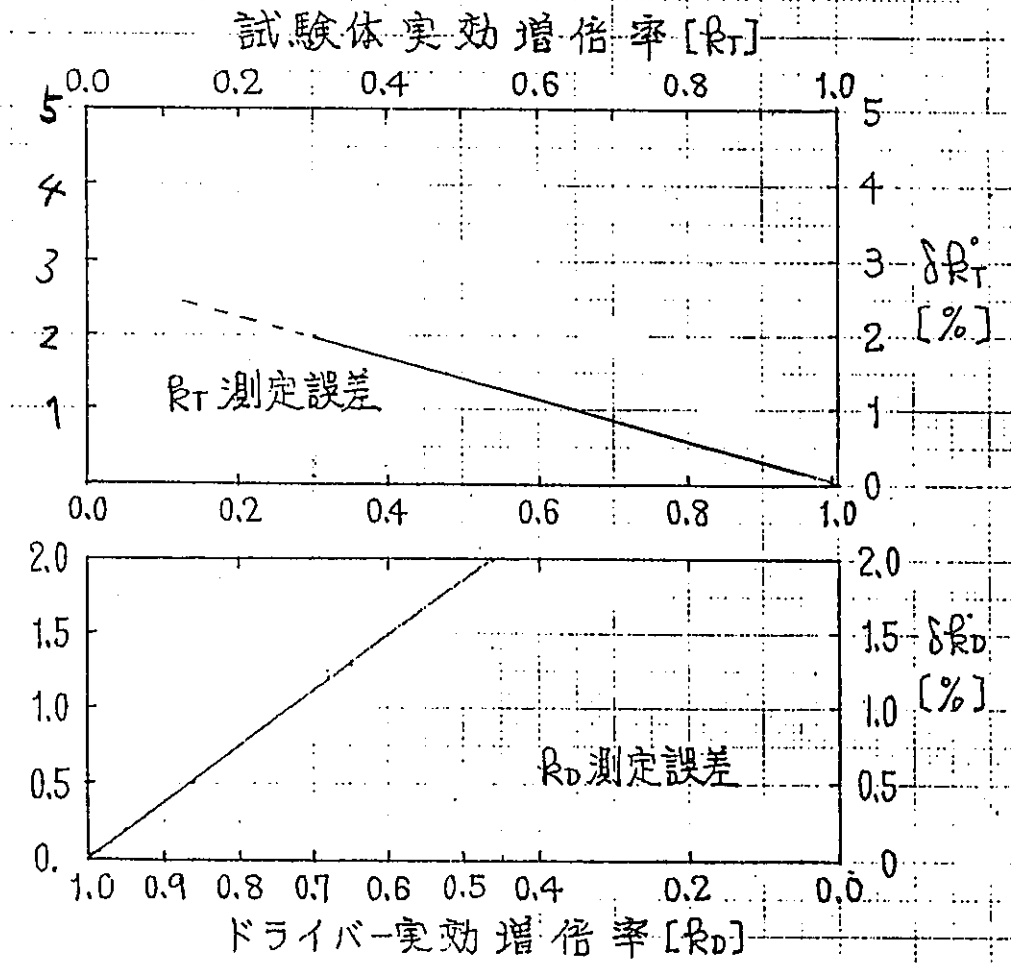


図2.1-4 2領域実験手法による誤差評価

2.2 DCAにおける未臨界度測定

2.2.1 DCAを用いた反応度添加法

重水臨界実験装置（DCA）は、ATRの炉物理実験のために設置されたものである。その設計思想は以下の通りである。

臨界実験装置は、炉心内での中性子の挙動を把握することに主眼がおかれているため、出力レベル（中性子束レベル）は、中性子を十分に検出できる値でよい。従って箔照射（中性子スペクトル情報取得のための実験）を考慮して最大1kWの熱出力（中性子束レベルで $\sim 10^9$ n/cm²・sec）と決定した。

また、核設計手法の精度の確認や向上のためには、できる限りすっきりした体系による実験データが有効である。これにより確立した核計算手法をもとにして実機の体系における複雑さに対するモデル化や近似を行い核設計を行う。

このような観点からDCAは、制御棒による中性子束の乱れや炉心の外側にある物質による炉心内の中性子束が乱れることおよび反射体による炉心内の中性子束の乱れ等を排除した、制御棒を用いない水位制御による裸の炉心をもつ構造になっている。

従ってDCAを用いた反応度添加法としては、次の2種類が考えられる。

- ① 重水水位変化
- ② 重水中のボロン濃度変化

後者の場合ボロン濃度分析の煩雑さのためDCAでは従来から前者の方法を採用している。以下この方法についての原理および実績について述べる。

実効増倍率と反応度の関係は、修正一組拡散理論より次式で表される。

$$K_{\text{eff}} = \frac{K_{\infty}}{1 + Mr^2 \cdot Br^2 + Mz^2 \cdot Bz^2} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{K_{\text{eff}}} = \frac{K_{\text{eff}} - 1}{K_{\text{eff}}} = 1 - \frac{1 + Mr^2 \cdot Br^2 + Mz^2 \cdot Bz^2}{K_{\infty}} \quad (2)$$

有限な炉心のバックリングは、

$$Bz^2 = \left(\frac{\pi}{H + \delta H} \right)^2 : \text{軸方向バックリング} \quad (3)$$

$$Bz^2 = \left(\frac{2.4048}{R + \delta R} \right)^2 : \text{半径方向バックリング} \quad (4)$$

と書かれる。

ここで、 H : 重水水位

R : 炉心の半径

δH : 上下の外挿距離の和

δR : 径方向の外挿距離

(1)式を対数微分することにより水位反応度係数の一般式が得られる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial H} = \frac{1}{K_{eff}} \cdot \frac{\partial K_{eff}}{\partial H} = \frac{2 \pi^2 M_2^2}{1 + M_2^2 B_1^2 + M_2^2 B_2^2} \cdot \frac{1}{(H + \delta H)^3} \quad (5)$$

(5)式が重水水位反応度係数を表し、臨界重水水位H及び $\frac{\partial \rho}{\partial H}$ が測定値となる。(5)式の実験式を得

るためには広範囲なH及び $\frac{\partial \rho}{\partial H}$ の測定が必要である。このためには、DCAでは実験用制御棒を多

数使い臨界重水水位を広範囲に変化させている。この場合、制御棒の吸収体に吸収された中性子は体系

に外漏洩したものとして扱い、炉心に吸収体を挿入することにより炉心定数は不変だが、半径方向バック

リング B_2^2 が δB_2^2 だけ増大したと見なされる。このとき炉を臨界にするために重水水位は H_0 から

H_1 に増大し、軸方向バックリングが $-\delta B_2^2 = \left(\frac{\pi}{H_1 + \delta H} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{H_0 + \delta H} \right)^2$ だけ減少す

るので全中性子漏洩率は不変に保たれる。すなわち

$$M_2^2 B_1^2 = M_2^2 \delta B_2^2 = M_2^2 \left\{ \left(\frac{\pi}{H_0 + \delta H} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{H_1 + \delta H} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

である。

従って、吸収体挿入炉心の臨界水位近傍における水位反応度係数は

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_{\text{poison}} &= \frac{2 \pi^2 M_2^2}{1 + M_2^2 (B_1^2 + \delta B_2^2) + M_2^2 (B_2^2 - \delta B_2^2)} \cdot \frac{1}{(H_1 + \delta H)^3} \\ &= \frac{2 \pi^2 M_2^2}{1 + M_2^2 B_1^2 + M_2^2 B_2^2} \cdot \frac{1}{(H_1 + \delta H)^3} \end{aligned} \quad (7)$$

である。一方、同じ水位で吸収体なしの炉心の水位反応度係数を考えると、

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)_{H_1}^{\text{poison}} &= \frac{2 \pi^2 M_2^2}{1 + M_1^2 B_1^2 + M_2^2 (B_2^2 - \delta B_2^2)} \cdot \frac{1}{(H_1 + \delta H)^3} \\
&= \frac{2 \pi^2 M_2^2}{1 + M_1^2 B_1^2 + M_2^2 \left(\frac{\pi}{H_1 + \delta H}\right)^2} \cdot \frac{1}{(H_1 + \delta H)^3} \quad (8)
\end{aligned}$$

となり、一般に知られているような水位の3乗に逆比例するような関係が成り立たなくなる。

水位 H_1 における吸収体あり、なしの両炉心の反応度係数の比が補正係数となるが、これは(7)、(8)式から、次のように与えられる。

$$\begin{aligned}
\frac{(\partial \rho / \partial H)_{\text{unpois}}}{(\partial \rho / \partial H)_{\text{poison}}} &= \frac{1 + M_1^2 B_1^2 + M_2^2 B_2^2}{1 + M_1^2 B_1^2 + M_2^2 (B_2^2 - \delta B_2^2)} \\
&= 1 + \frac{M_2^2 \delta B_2^2}{1 + M_1^2 B_1^2 + M_2^2 (B_2^2 - \delta B_2^2)} \\
&= 1 + \frac{M_2^2}{1 + M_1^2 B_1^2 + M_2^2 B_2^2} \cdot \\
&\quad \frac{\delta B_2^2}{\left\{ 1 - \frac{M_2^2}{1 + M_1^2 B_1^2 + M_2^2 B_2^2} \cdot \delta B_2^2 \right\}} \\
&= 1 + \frac{C}{2 \pi^2} \cdot \frac{\delta B_2^2}{\left(1 - \frac{C}{2 \pi^2} \cdot \delta B_2^2 \right)} \quad (9)
\end{aligned}$$

ここで、

$$C \equiv \frac{2 \pi^2 M_2^2}{1 + M_1^2 B_1^2 + M_2^2 B_2^2} \quad (10)$$

は臨界点近傍、したがって測定可能な水位反応度係数と常に次式の関係があることは(7)式から明らかである。

$$C = (H + \delta H)^3 \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)^{\text{poison}}$$

全測定データについてのCの平均値はHと $\frac{\partial \rho}{\partial H}$ を測定することにより得られ、 δB_2^2 は水位のみの

関数なので任意水位における補正係数は容易に計算することができる。

補正値が比較的小さいことから、補正係数の(10)式において $\left(1 - \frac{C}{2\pi^2} \cdot \delta B_2^2 \right) \approx 1.0$ と近似し

て補正係数の式をさらに簡単化することができる。すなわち、

$$\frac{(\partial \rho / \partial H)^{\text{unpois}}}{(\partial \rho / \partial H)^{\text{poison}}} \approx 1 + \frac{C}{2\pi^2} \cdot \delta B_2^2 = 1 + \frac{c}{2} \left\{ \frac{1}{(H_0 + \delta H)^2} - \frac{1}{(H + \delta H)^2} \right\} \quad (11)$$

である。(11)式で計算した結果と、(9)式との差は、DCAの場合最大でも0.5%で小さく無視することができる。(表2.2-1参照。)

DCAでは、上述のように、炉心体系がきまれば、水位反応度係数が1点しか求まらないが、吸収体(制御棒、または重水中のボロン)の使用により、(11)式でその効果を補正することによって広範囲に(重水臨界水位の最小値80cm近傍から燃料体有効長200cmまで)水位反応度係数が求められる。

2.2.2 水位反応度係数による未臨度界測定

(1) 水位反応度係数の測定

前述の(5)式より水位反応度係数は、次式より求められる。ここでは単位換算のため β_0 を導入した。

$$\frac{\partial \rho}{\partial H} = \frac{C}{(H + \delta H)^3} \cdot \frac{1}{\beta_0} \quad (\phi/\text{cm}) \quad (12)$$

ここで、 $C : \frac{2\pi^2 M Z^2}{K_\infty}$ ((10)式参照)

H : 重水水位 (cm)

δH : 外挿距離 (cm)

β_0 : 遅発中性子発生割合

上式において測定値は、 $\frac{\partial \rho}{\partial H}$ 、H、 δH である。多数の $\frac{\partial \rho}{\partial H}$ を得るためには、Hを大巾に

変える必要があるが、制御棒挿入あるいは重水中のボロン添加により可能である。Hは、制御盤の重

重水水位の読みとりにより±0.2mmまでの精度で測定可能である。また ∂H は、軸方向の中性子分布を測定することにより求められる。

$\partial \rho / \partial H$ の測定体系例を図2.2-1に示す。また(12)式で求められた水位反応度係数の曲線を図2.2-2に示す、図は表2.2-2に示した実験データを吸収体なしに補正した値をプロットしたものである。表と図からDCA体系での水位反応度係数は装置の限界である80cm近傍から200cm近傍まで広範囲に求められ、かつ反応度の測定誤差は最大0.3セント(ウラン体系で約0.002)の高精度で求められたことが判る。

ここで用いた表2.2の反応度とダブリングタイム(倍增時間)の関係について若干ふれておく。

よく知られているように、原子炉の動特性方程式は下式で与えられる。(1群、1点炉近似、核種1個とする。)

$$\frac{1}{v} \Psi(r) \frac{\partial p(t)}{\partial t} = p(t) \{ \text{div } D \text{ grad } \Psi(r) - (\Sigma_a(r,t) + \Sigma_r(r,t)) \Psi(r) + (1-\beta) \nu \Sigma_f(r,t) \Psi(r) \} + \sum_i \lambda_i C_i(r,t) + Q(r,t) \quad (13)$$

ここで, $\phi(r,t) = \Psi(r) \cdot P(t) \quad (14)$

Q: 外部中性子源

を表わし、その他の記号は通常用いられているものである。

(13)式に定常状態での随伴中性子束 $\phi_0^+(r)$ を乗じ空間積分を行うと次式がえられる。

$$\frac{d p(t)}{d t} = \frac{\rho - \bar{\beta}}{\Lambda} p(t) + \sum_i \lambda_i C_i(t) + S(t) \quad (15)$$

ここで,

$$\rho = \int_v d\vec{r} \phi_0^+(r) \{ \text{div } D \text{ grad } \Psi(r) - (\Sigma_a(r,t) + \Sigma_r(r,t)) \Psi(r) + \nu \Sigma_f(r,t) \Psi(r) \} / N$$

$$\bar{\beta} = \int_v d\vec{r} \phi_0^+(r) \beta \nu \Sigma_f(r,t) \Psi(r) / N$$

$$\Lambda = \int_v d\vec{r} \frac{1}{v} \phi_0^+(r) \Psi(r) / N$$

$$\begin{aligned}
 N &= \int_V d\vec{r} \phi_0^+(r) \nu \Sigma_f(r, t) \Psi(r) \\
 C_i(t) &= \frac{\int_V d\vec{r} \phi_0^+(r) C_i(r, t)}{\int_V d\vec{r} \phi_0^+(r) \frac{1}{v} \Psi(r)} \\
 S(t) &= - \frac{\int_V d\vec{r} \phi_0^+(r) Q(r, t)}{\int_V d\vec{r} \phi_0^+(r) \frac{1}{v} \Psi(r)}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

(16)式の物理的意味は下記の通りである。

$$\rho = \frac{[\text{単位時間に発生する中性子数}] - [\text{単位時間に消滅する中性子数}]}{[\text{単位時間に発生する中性子数}]} = \text{反応度}$$

$$\Lambda = \frac{[\text{炉内中性子数}]}{[\text{単位時間に発生する中性子数}]} = \text{中性子生成時間}$$

N = 単位時間に発生する総中性子数

$C_i(t)$ = 遅発中性子先行核総数

$S(t)$ = 中性子源より単位時間に発生する中性子数

一方遅発中性子先行核の濃度は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C_i(r, t)}{\partial t} = \beta_i \nu \Sigma_f \phi(r, t) - \lambda_i C_i(r, t)
 \tag{17}$$

前式と同様な方法により(17)式は以下の式となる。

$$\frac{d C_i(t)}{d t} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i(t)
 \tag{18}$$

(15), (18)式が一点炉近似の動特性方程式である。

今 $t > 0$ で反応度が

$$\rho(t) = \rho_0 + \delta \rho(t)$$

変化すると, $\rho(t) = \rho_0 + \delta \rho(t)$, $C_i(t) = C_{i0} + \delta C_i(t)$ となる。

これらを(15), (18)両式に代入し微分方程式をラプラス変換をすることにより解くと次式の解が得られる。

$$\frac{\delta P(s)}{P_0} = \frac{\delta \rho / \bar{\beta}}{S \left\{ S \left\{ \frac{\Lambda}{\beta} + \sum_i \frac{\bar{\beta}_i / \bar{\beta}}{S + \lambda_i} \right\} - \frac{\delta \rho}{\beta} \right.}} \quad (19)$$

上式の極は, $s = 0$ および

$$S \left\{ \frac{\Lambda}{\beta} + \sum_i \frac{\bar{\beta}_i / \bar{\beta}}{S + \lambda_i} \right\} - \frac{\delta \rho}{\beta} = 0 \quad (20)$$

の根 ($i = 6$ である) である。(20)式のうち $\rho > 0$ の場合 S_i のみが正となるので出力は漸近的に

$$\delta P(t) \propto e^{s_i t} \quad (21)$$

に従って増加する。 s_i の逆数を原子炉安定周期 T (ペリオド)と呼ぶ。ペリオドは, 出力のダブリングタイム T_d を測定することにより, $T = T_d / \ln 2$ より求められる。従って, (20)式は,

$$\delta \rho = \frac{\Lambda}{T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\bar{\beta}_i}{1 + \lambda_i T} \quad (22)$$

となる。これは逆時間方程式 (公式) と言われている。(22)式から T を測定すれば反応度 ρ が求められる。このようにして求められたのが表2.2-2の水位反応度係数である。

次に重水中ボロン制御の成立性について検討する。前述した体系で, 重水中のボロン濃度を変化させ臨界水位, 水位反応度係数, ボロン反応度を測定した。図2.2-2にはその結果も図示されている。

ボロン濃度は表2.3に示す6点を選択し, ボロン濃度分析は, 同位体希釈法により行った。

一方ボロン濃度反応度は, 既に測定された水位反応度係数の値を用いて次式により求められる。

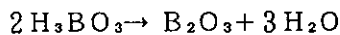
$$\rho(x) = \int_{H_0}^{H_x} \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right) dH \quad (23)$$

ここで $\rho(x)$: ボロン濃度 X ppmの反応度

H_x : X ppmの臨界水位

H_0 : ボロン濃度 0 ppmの臨界水位

このようにして求めたボロン反応度の結果を表2. 2-4と図2. 2-3に示す。図からボロン反応度はボロン濃度と正比例関係にあり、0%ボイド炉心で1.69\$ / ppm ($\approx 1.18\% / \text{ppm}$)、100%ボイド炉心で1.94\$ / ppm ($\approx 1.36\% / \text{ppm}$)となる。表2. 2-2からDCAにおける反応度添加は最大15¢程度であるので、100%ボイド炉心ではボロン換算にすると0.07ppmとなる。表2. 2-3から0.07ppmの分析は十分可能で分析誤差以上となり有異な差であり、ボロン制御の可能性は十分にある。しかし重水中にボロンを添加すると、ボロンを必要に応じ除去する必要がある。このためイオン交換塔を設置しているが、イオン交換膜を通過した後のホウ酸は、下記の過程



を経て無水ホウ酸 (B_2O_3) が分離精製される。このためホウ酸を用いると重水の劣化が軽水により起る。従ってボロンを添加する場合無水ホウ酸を用いる必要があるが、これが吸水性のため管理に注意を要する

いずれにしても周到な準備、保守のもとでは、ボロン制御の可能性がある。

(2) 未臨界度の測定

前述したように精度よい水位反応度曲線を求めることにより、臨界水位差法を用いて未臨界度導出が可能である。前節では、ボロン反応度を約15\$ ($K_{\text{eff}} \approx 0.9$) まで求め、測定精度は0.1%ΔKであることを示した。同様な手法により、制御棒反応度を広範囲に測定した。測定体系は図2. 2-1に示したものである。結果を表2. 2-5に示す。表から制御棒反応度としては約14\$ ($K_{\text{eff}} \approx 0.9$) まで、0.3%ΔKの精度で求められていることが判る。

以上は1領域炉心の場合であるが2領域炉心についても同様な測定が行われた。測定体系を図2. 2-4に、測定結果を表2. 2-6に示す。表から制御棒反応度として約12\$ (この場合プルトニウム炉心としての2領域であるため $K_{\text{eff}} \approx 0.94$) まで0.25%ΔKの精度で求められていることが判る。

2領域炉心の場合、炉周期Tから反応度ρに変換する場合、一点炉近似に従えば(22)式と本質的にかわりはない。前述した手法を適用して2領域炉心の場合の逆時間方程式は次式のようなになる。

$$\delta \rho = \frac{\Lambda}{T} + \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i^k}{1 + \lambda_i T} \frac{\Lambda}{\Lambda^k} \quad (24)$$

ここで

$$\Lambda = \sum_{k=1}^2 \Lambda^k \quad \left. \begin{aligned} \Lambda^k &= \frac{\int_V d\vec{r} \frac{1}{v} \phi_0^+(r) \chi(r)}{\int_V d\vec{r} \phi_0^+(r) \nu^k \Sigma_f^k(r, t) \chi(r)} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

上式を用いることにより水位反応度係数を求めることができ、各種未臨界度が測定できる。

さらにDCAを用いた別の未臨界度測定法にパルス中性子発生装置を用いた実績がある。ATR炉心では、特に冷却材ボイド反応度が重要な炉物理量となっているため、これを中心に測定を行った。

パルス中性子法による未臨界度測定は、古くから行われており確立した手法である。これによるボイド反応度の導出は以下の原理に従って行う。

パルス中性子発生装置から炉心に打ち込まれた中性子は、即発中性子減衰定数 α を用いると、次式に従って減衰する。

$$n(t) = A e^{-\alpha t} + C \quad (26)$$

この α の値を減速材水位即ち軸方向バックリング B_{2z}^2 をパラメータとして求めると次式の関係がなりたつ。

$$\alpha(B_{2z}^2) = \alpha_c + \beta(B_{2z}^2 - B_{2zc}^2) + \gamma(B_{2z}^2 - B_{2zc}^2) \quad (27)$$

ここで α_c および B_{2zc}^2 は、臨界時の即発中性子減衰定数および軸方向のバックリングである。従って冷却材ボイド反応度は、0%ボイド炉心軸方向バックリング B_{2z0}^2 における即発中性子減衰定数 $\alpha(B_{2z0}^2)$ を用いて、

$$\rho(\beta) = \alpha(B_{2z0}^2) / \alpha_c - 1 \quad (28)$$

から求められる。

上式に従って求めた2領域炉心のデータからの格子の冷却材ボイド反応度の結果を表2.2-7に、

この時の実験体系を図2. 2-5に示す。表から冷却材ボイド反応度の未臨界度を最大約30\$ ($K_{eff} \approx 0.85$)まで誤差約2\$ ($\Delta K_{eff} \approx 0.01$)で測定できたことがわかる。

なおパルス中性子法と水位反応度係数を用いた未臨界度測定法との比較検討も行った。その結果を表2. 2-8に示す。表からいずれの方法も測定誤差内で両者の値が一致しておりかつ測定精度もほぼ同一であることが判る。従って未臨界度測定法によらず未臨界度が精度よく求められると言える。

確立された水位差法による未臨界度の測定がさらに複雑な2領域体系で行われた。

表2. 2-9は今回未臨界度測定のために改造を予定している炉心体系とほぼ同等な体系で行われた吸収体(ガドリニア)反応度の測定結果を示している。測定体系は図2. 2-6に示されている。このような体系でも従来とほぼ同等な測定精度で未臨界度が求められることが表2. 2-9の結果から明らかである。

制御棒が挿入された2領域炉心に対しても冷却材ボイド反応度が測定された。その結果を図2. 2-7に測定体系を図2. 2-8に示す。この結果も従来と同じ結果と言える。

以上から2領域炉心になっても、さらに複雑化された体系に対しても未臨界度を精度よく求める見通しが得られた。

それでは、このような未臨界体系に対して、中性子束分布がどのようになっているかを実験でたしかめた。これは未臨界度測定のための検出器配置に対して有力な情報となる。

測定体系を図2. 2-9に示す。結果を図2. 2-10と図2. 2-11に示す。図2. 2-10から中性子源の効果は未臨界度が深くなると大きくなることが判る。(図2. 2-10の3B5の○と○との比較)。また図2. 2-11から自発核分裂のみの中性子束分布と中性子源ありの中性子束分布は異なり今後検出器配置には考慮する必要がある。

2.2.3 課題と今後の予定

以上から未臨界度測定には、水位反応度係数を用いた測定で十分可能であることがわかり、パルス中性子法との組みあわせにより、よい精度が得られる見通しである。

表2.2-1 補正係数の計算例

吸収体挿入炉心の臨界重水々位	(10)式の補正係数	(11)式の補正係数
1000 mm	1.0085	1.0084
1100 mm	1.0277	1.0270
1200 mm	1.0432	1.0414
1300 mm	1.0559	1.0529
1400 mm	1.0663	1.0622
1500 mm	1.0750	1.0698

表2.2-2 : 重水水位反応度係数実験データ
(100%ボイダ炉心)

番号	臨界重水 水位 Hc (cm)	水位 上昇分 ΔH (cm)	H_1 $= H_c + \frac{1}{2} \Delta H$ (cm)	ダブリング タイム (sec)	反応度 Δρ (β)	反応度係数 (β/cm)	
						$(\Delta\rho / \Delta H)_c^A$	$(\frac{\Delta\rho}{\Delta H})^0$
1	114.53	0.36	114.71	6.2	10.97	3.05	3.06
2	120.25	0.49	120.50	43.6±1.1	140.9±0.25	2.88±0.5	2.93
3	125.60	0.50	125.85	44.7±1.0	138.5±0.20	2.77±0.5	2.85
4	123.78	0.50	124.03	46.6±1.2	134.6±0.26	2.69±0.5	2.76
5	116.93	0.40	117.13	48.5±1.3	13.09±0.31	3.27±0.6	3.30
6	139.23	0.55	139.51	55.8±1.1	11.85±0.17	2.15±0.3	2.26
7	148.52	0.68	148.86	53.4±1.0	12.23±0.23	1.80±0.5	1.92
8	136.56	0.55	136.84	56.3±1.5	11.77±0.24	2.14±0.4	2.24
9	113.32	0.23	113.44	79.1±1.5	7.9±0.16		3.44±0.7
10	161.04	0.90	161.49	51.2±1.5	12.60±0.27	14.0±0.3	15.1
11	170.40	1.19	171.00	44.1±1.5	13.98±0.32	11.8±0.3	12.8
12	181.44	1.22	182.05	52.5±0.9	12.37±0.14	10.1±0.1	11.1
13	141.02	0.50	141.27	69.6±0.6	10.07±0.06	20.1±0.1	21.2
14	113.36	0.42	113.57	40.4±0.2	14.84±0.05		35.3±0.1
15	112.57	0.40	112.8	40.9	14.7		36.8
16	139.99	0.40	140.2	22.0	7.4	18.06	19.0
17	185.08	1.20	185.7	59.0	11.38	9.48	10.4
18	185.43	1.20	186.0	59.5	11.32	9.43	10.4

$\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta H} \right)_c^A$: 吸収体入り炉心の水位反応度係数

$\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta H} \right)^0$: 吸収体補正後水位反応度係数

表2.2-3 重水中ボロン濃度分析結果

予想濃度 [ppm]	分析結果		
	$\mu\text{g B/g D}_2\text{O}$	$\mu\text{g B/mL D}_2\text{O}$	$\mu\text{g B}^{10}/\text{g D}_2\text{O}$
0	0.025 ± 0.018	0.028 ± 0.02	0.0049 ± 0.004
1	5.477 ± 0.046	—	1.105 ± 0.008
2	10.951 ± 0.068	—	2.196 ± 0.015
3	16.62 ± 0.040	18.4 ± 0.1	3.297 ± 0.010
4.5	24.63 ± 0.040	27.3 ± 0.1	4.886 ± 0.040
6	32.82 ± 0.252	—	6.430 ± 0.044
7	37.84 ± 0.071	41.8 ± 0.1	7.507 ± 0.019
ボロン除去後	0.048 ± 0.009	0.053 ± 0.01	0.009 ± 0.002

表2.2-4 ボロン反応度測定結果
(1領域 炉心)

炉心	ボロン濃度 [ppm]	臨界重水水位 [cm]	ボロン反応度 [β]
0% ボイド	0	9.670	—
	1.11	10.253	1.776 ± 0.132
	2.20	11.004	3.712 ± 0.120
	3.30	11.913	5.634 ± 0.113
	4.89	13.559	8.348 ± 0.104
	6.43	16.165	10.985 ± 0.125
	7.51	18.684	12.726 ± 0.136
100% ボイド	0	11.243	—
	3.30	13.450	6.386 ± 0.109
	4.89	15.001	9.499 ± 0.128
	7.51	18.840	14.576 ± 0.171

表2.2-5 制御棒反応度測定結果 (1領域 炉心)

挿入制御棒本数	ボイド率	実験値* (ドル) (E)	計 算 値 (ドル)			
			AA法 a (C)	C-E % E	マルチセル法 b (C)	C-E % E
1	0	1.51	1.646	+ 9.0	1.57	+ 4.0
	100	2.23	2.069	- 7.2	2.23	0.0
1	0	0.90	0.971	+ 7.9	0.92	+ 2.2
2	0	2.15	2.313	+ 7.6	2.17	+ 0.9
4	0	4.85	5.247	+ 8.2	4.84	- 0.2
8	0	6.70	7.379	+10.1	7.02	+ 4.8
8	0	7.52	8.324	+10.7	7.91	+ 5.2
8		8.37	9.272	+10.8	8.80	+ 5.1
9	0	8.75	9.790	+11.9	9.28	+ 6.1
9	100	14.16	12.269	-13.4	13.53	- 4.4

a 吸収面積法 (METHUSELAH コード)
 b マルチセル法 (WIMS-ATR Kコード)
 * 誤差 ±3%

表2.2-6 制御棒反応度測定結果 (1領域 炉心)

ボイド率	制 御 棒 挿 入*		$K_{off}^{out, 2}$ (B ₂ ,out)	$K_{eff}^{in, 2}$ (B ₂ ,out)	計算値* (C) (\$)	実験値 (\$) (E)	Δ** (%)
	パターン	位 置					
0 (%)	-	-	1.0000	-	-	-	-
	A	5B7	"	0.9982	-0.30	-0.37±0.03	-18.6
	B	1B5	"	0.9923	-1.30	-1.32±0.08	+ 1.4
	C	1B1	"	0.9838	-2.74	-2.61±0.16	+ 4.9
	D	1B5-1D5	"	0.9817	-3.13	-2.90±0.18	+ 7.8
	E	5A1-1B5-5C1-1D5	"	0.9576	-7.28	-7.01±0.43	+ 3.9
	F	{ 5A1-1B5-5C1-1D5 } { -7A5-5B7-7C5-5D7 }	"	0.9489	-8.96	-8.73±0.54	+ 2.6
100 (%)	-	-	1.0000	-	-	-	-
	A	5B7	"	0.9967	-0.56	-0.57±0.03	- 1.7
	B	1B5	"	0.9894	-1.80	-1.77±0.07	+ 1.7
	C	1B1	"	0.9805	-3.30	-3.23±0.12	+ 2.3
	D	1B5-1D5	"	0.9752	-4.24	-4.16±0.16	+ 1.8
	E	5A1-1B5-5C1-1D5	"	0.9444	-9.54	-9.15±0.35	+ 4.3
	F	{ 5A1-1B5-5C1-1D5 } { -7A5-5B7-7C5-5D7 }	"	0.9547	-12.66	-12.24±0.48	+ 3.4

* WIMS-ATR Kコード

a : 図2.2-4 参照

Δ** (C/E - 1) × 100

表2.2-7 冷却材ボイド反応度の結果

格子ピッチ (cm)	燃料種類	冷却材ボイド率 (%)	冷却材ボイド反応度 (ドル)	
			実験値	計算値*
22.5	1.2 UO ₂	0 → 30	-0.22 ± 0.06	-0.16
		0 → 70	-2.01 ± 0.26	-2.00
		0 → 87	-2.51 ± 0.31	-2.32
		0 → 100	-6.31 ± 0.43	-6.31
		30 → 70	-1.74 ± 0.25	-1.81
		30 → 87	-2.22 ± 0.29	-2.12
		30 → 100	-6.00 ± 0.41	-6.06
22.5	0.54(S) PuO ₂ -UO ₂	70 → 87	-0.30 ± 0.09	-0.15
		70 → 100	-3.96 ± 0.33	-3.72
		87 → 100	-3.64 ± 0.32	-3.54
		0 → 30	-2.24 ± 0.54	-2.02
		0 → 70	-6.81 ± 0.75	-7.84
		0 → 87	-9.36 ± 0.88	-10.17
		0 → 100	-18.39 ± 1.30	-18.28
22.5	0.87(R) PuO ₂ -UO ₂ 0.87(S) PuO ₂ -UO ₂	30 → 70	-4.49 ± 0.63	-5.47
		30 → 87	-6.79 ± 0.76	-7.60
		30 → 100	-15.09 ± 1.14	-15.24
		70 → 87	-1.74 ± 0.46	-1.67
		70 → 100	-8.63 ± 0.86	-8.21
		87 → 100	-6.42 ± 0.76	-6.24
		0 → 100	-19.30 ± 1.30 -28.30 ± 2.08	-20.87 -29.89
25.0	1.2 UO ₂ 0.54(S) PuO ₂ -UO ₂ 0.87(S) PuO ₂ -UO ₂	0 → 100	-0.06 ± 0.02 -5.89 ± 0.77 -14.21 ± 1.46	+0.20 -6.33 -14.31

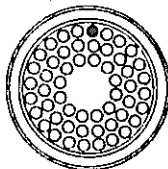
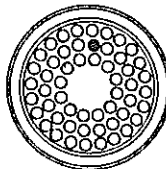
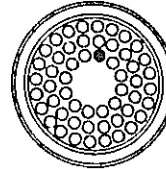
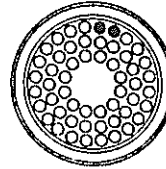
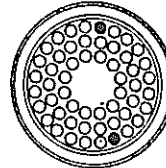
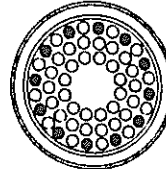
*WIMS-ATR コード

表2.2-8 未臨界と測定法の比較

測定項目	測定結果* (ドル)	測定体系
制御棒反応度	-7.01±0.43 (-6.58±0.43)	2領域炉心, 0%ボイド 制御棒4本挿入
	-9.15±0.35 (-9.18±0.39)	2領域炉心, 0%ボイド 制御棒4本挿入
冷却材ボイド反応度	-2.557±0.059 (-2.697±0.255)	1領域炉心, ウラン燃料 121体装荷, ボイド入り

* () 内はパルス中性子法

表2.2-9 ガトリニア反応度

冷却材 ボイド	Gd ₂ O ₃ 濃度 (wt %)	Gd ₂ O ₃ 燃料* ピン装荷位置 (54ピン)	反応度 (C)	
			実験値	計算値**
H ₂ O	1.0		-53.8	-55.5
	0.5		-51.6	-52.1
	0.1		-36.1	-37.7
Air	1.0		-69.0	-74.0
H ₂ O	1.0		-40.6	-37.6
H ₂ O	1.0		-38.4	-35.0
H ₂ O	1.0		-90.4	-89.1
H ₂ O	1.0		-107.2	-103.9
H ₂ O	1.0		-356.4	-388.5
Air	1.0		-430.8	-467.9

* ○ 1.5wt% UO₂ 燃料ピン
 ● Gd₂O₃-UO₂ 燃料ピン

測定誤差 : ±4.0% , ** WIMS-ATR コード

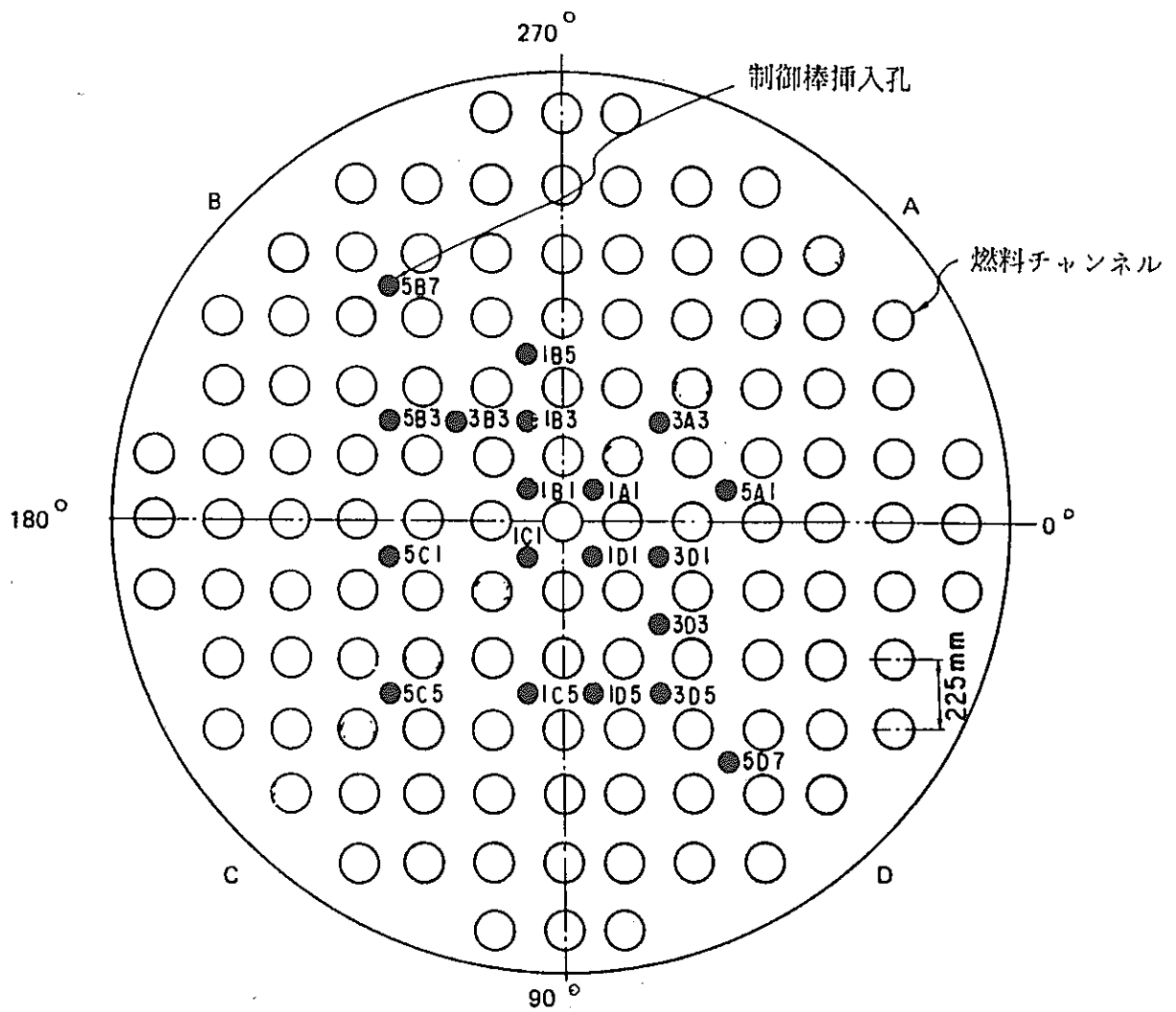


図2.2-1 水位反応度係数及び制御棒反応度測定体系

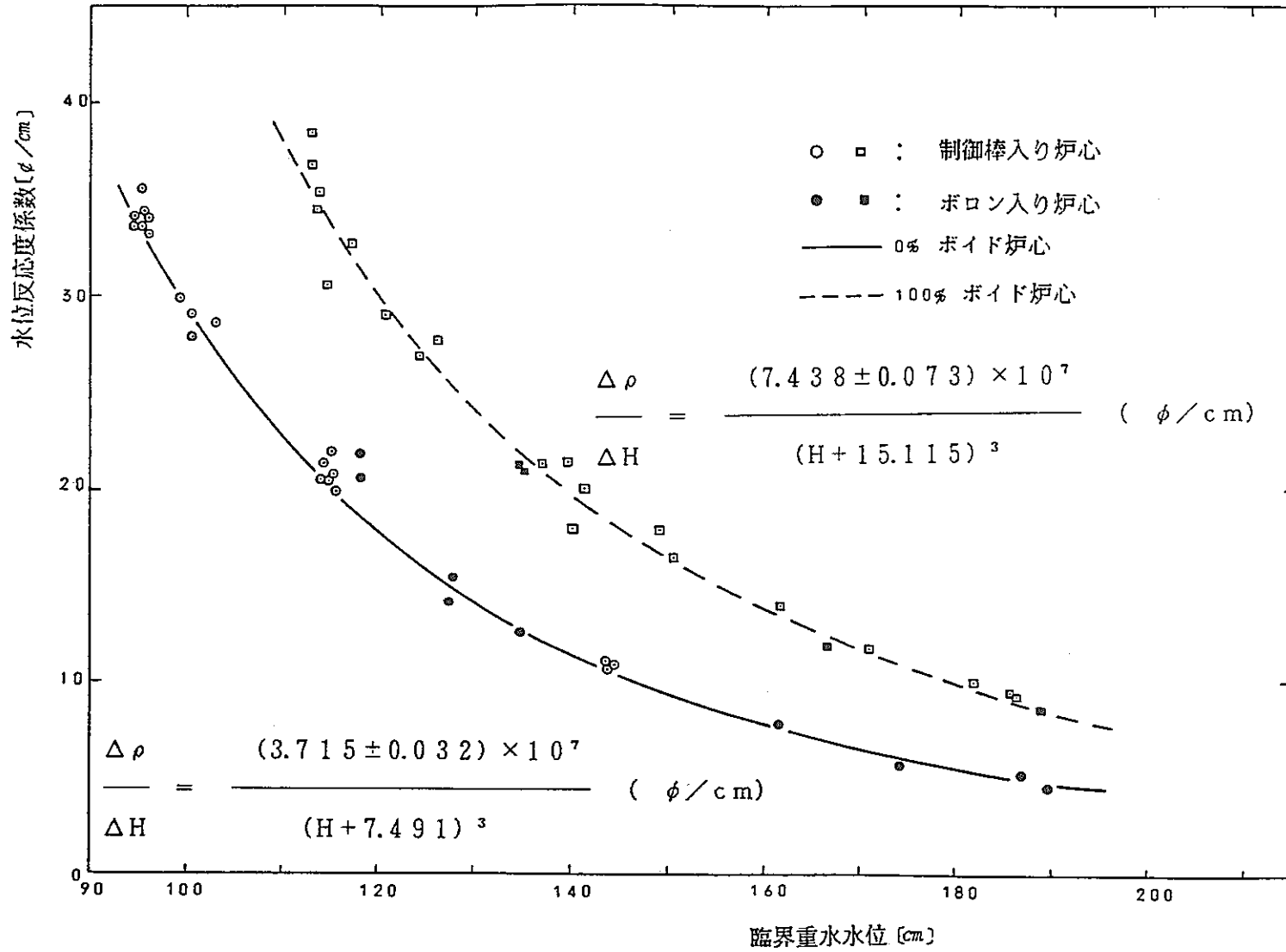


図2.2-2 水位反応度係数の測定値

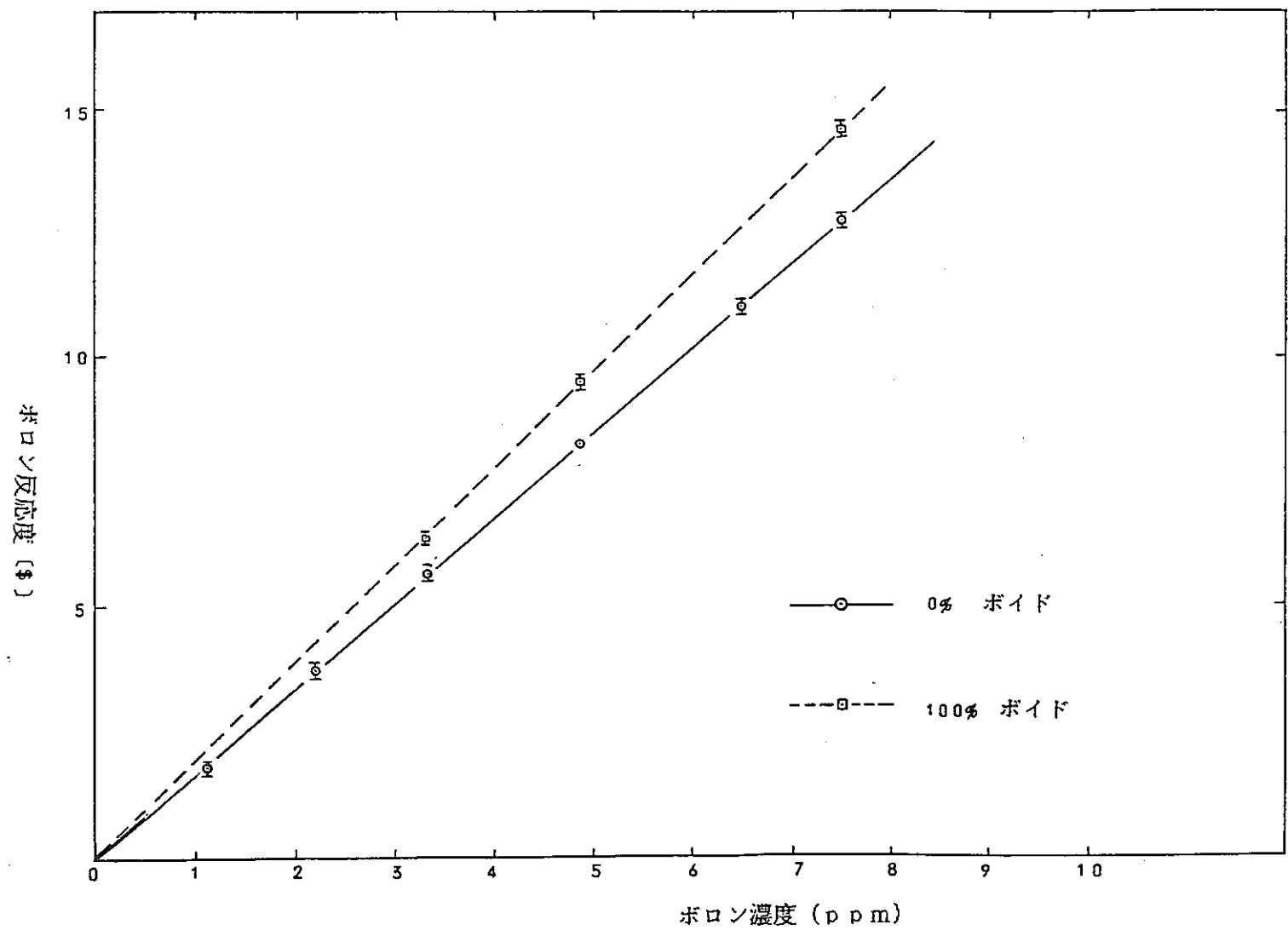
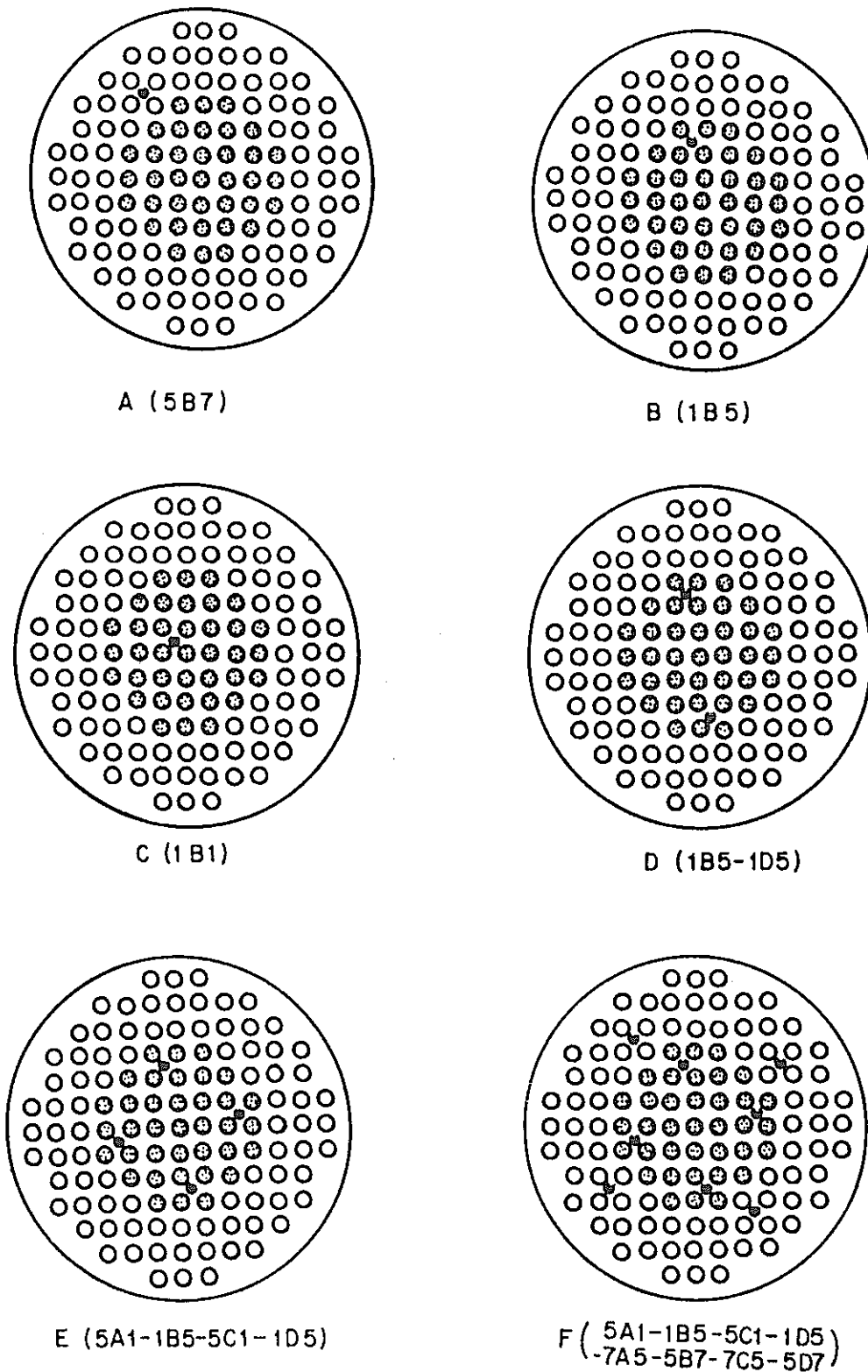


図2.2-3 ボロン反応度の測定結果



- 1.2^w/_oUO₂燃料
- ⊗ 0.54^w/_o(S)PuO₂UO₂燃料
- 制御棒挿入位置

図2.2-4 制御棒反応度測定体系 (2領域炉心)

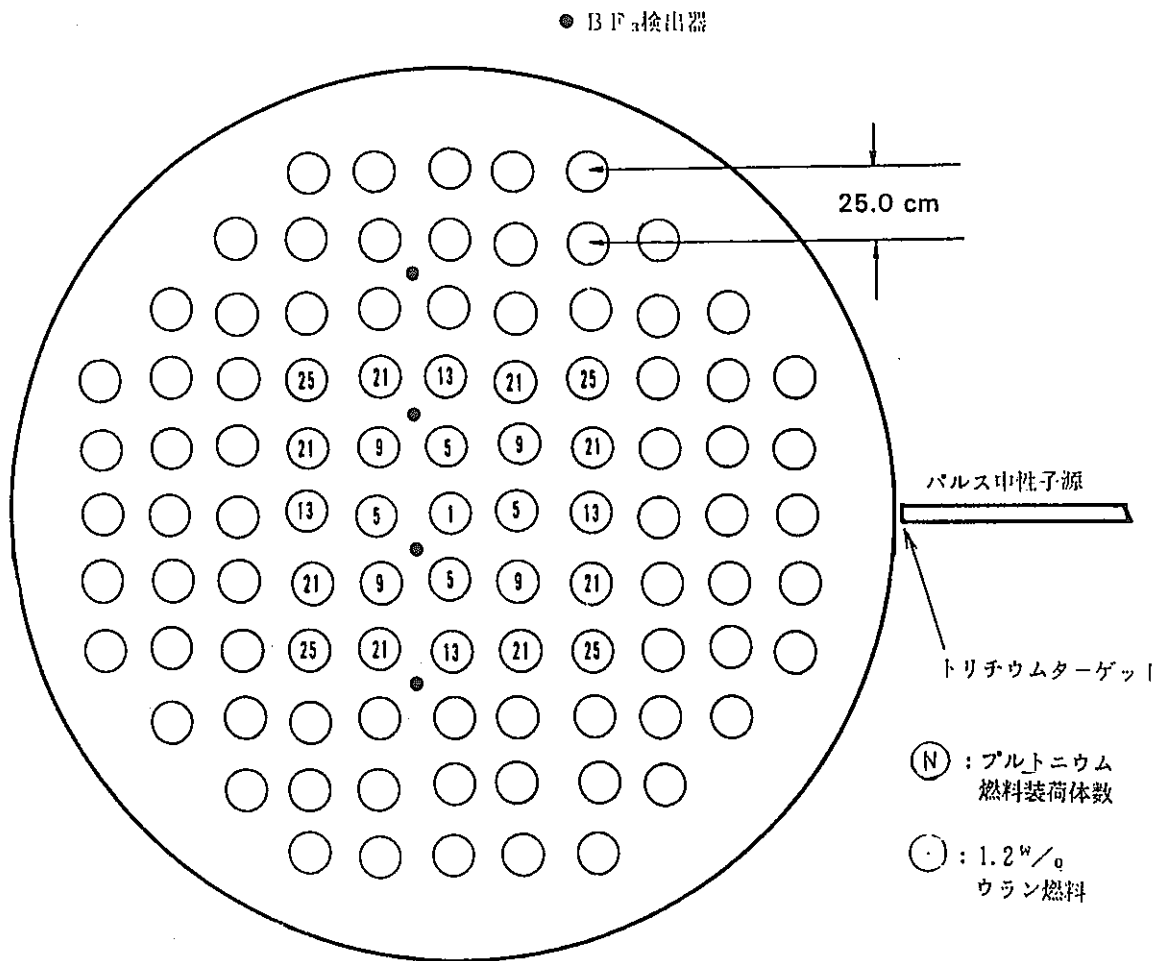


図2.2-5 冷却材ボイド反応度測定体系
(2領域炉心)

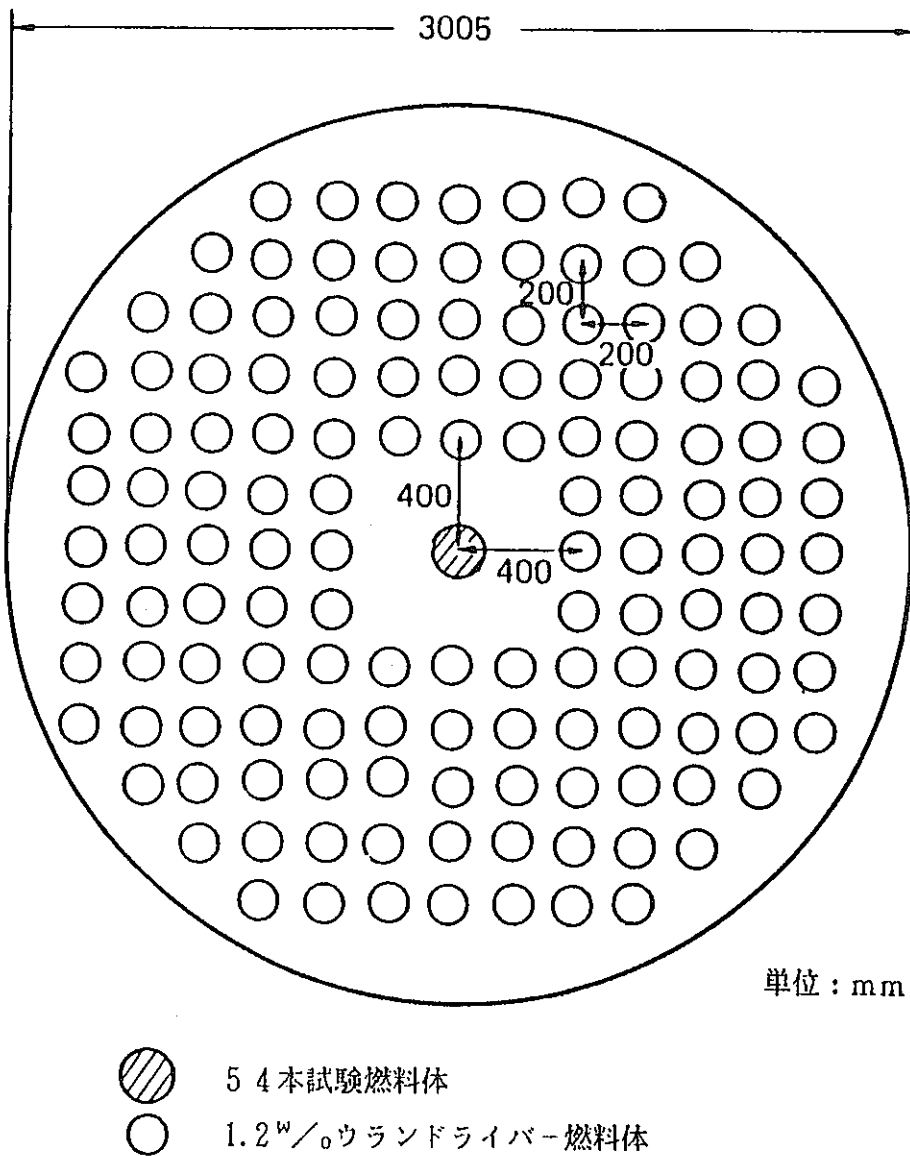


図2.2-6 ガドリニア反応度測定体系

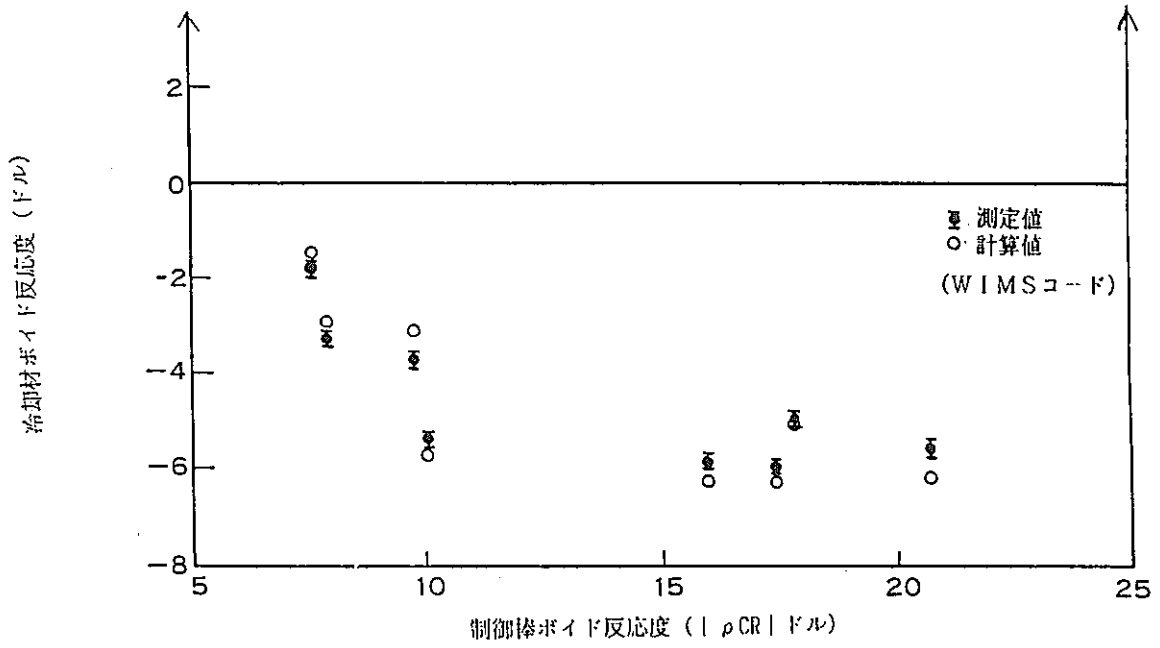


図2.2-7 制御棒入り2領域炉心体系の冷却材ボイド反応度

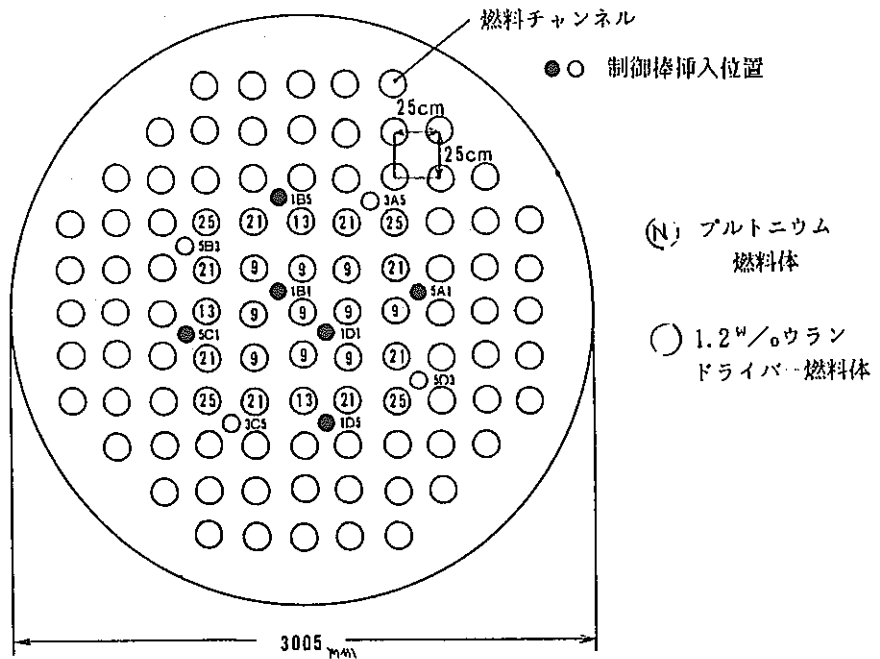
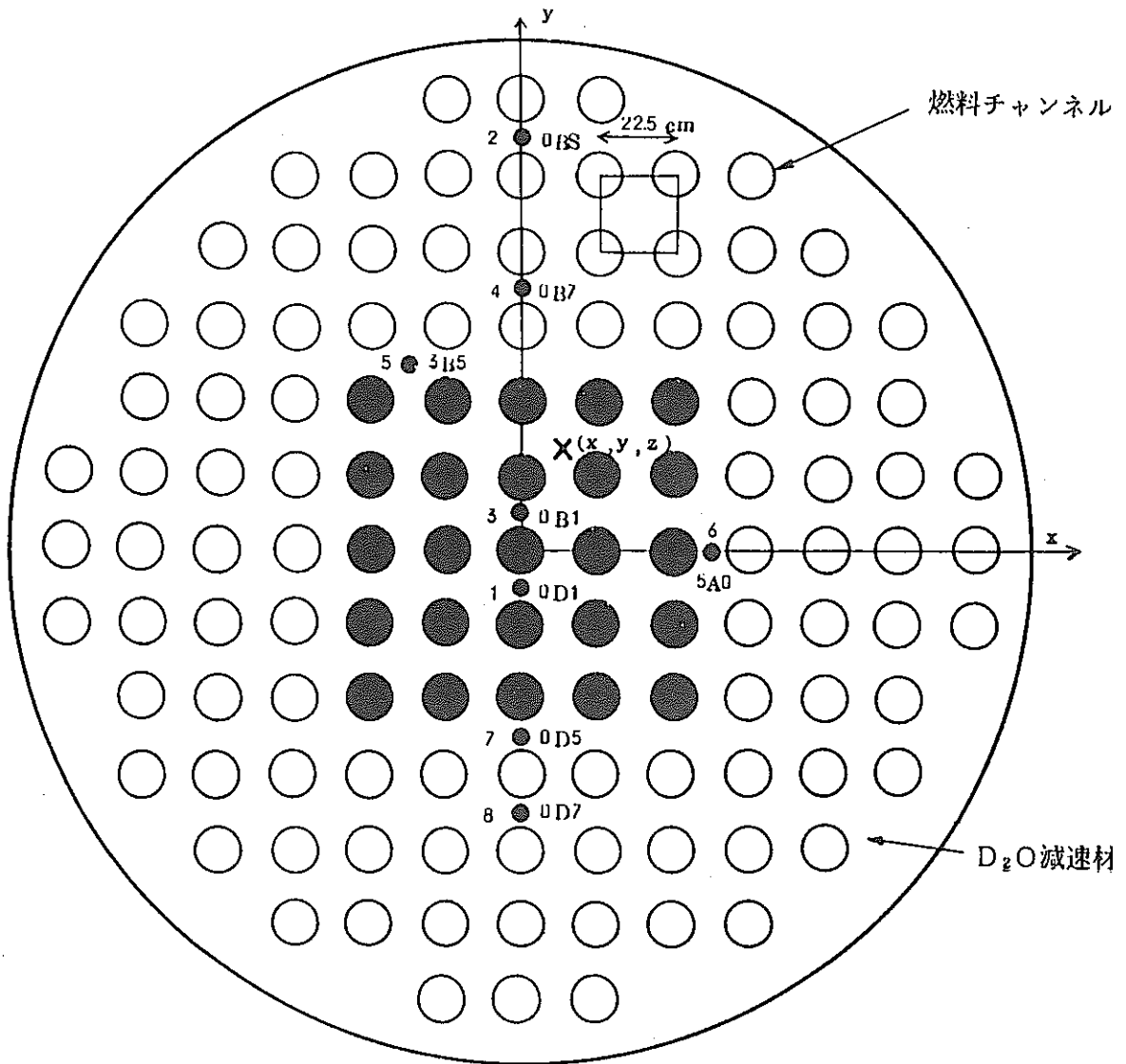


図2.2-8 制御棒入り2領域炉心体系



- 0.87 w/o (R·G) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料 (25)
- 1.2 w/o UO_2 燃料 (96)

● BF_3 検出器 (No 1~No 8)

X 中性子源位置 (10 Ci Am-Be, 位置:
 $(x, y, z) = (11.25, 32.0, 26.5)$ cm)

図2.2-9 中性子束分布測定体系
 (未臨界体系)

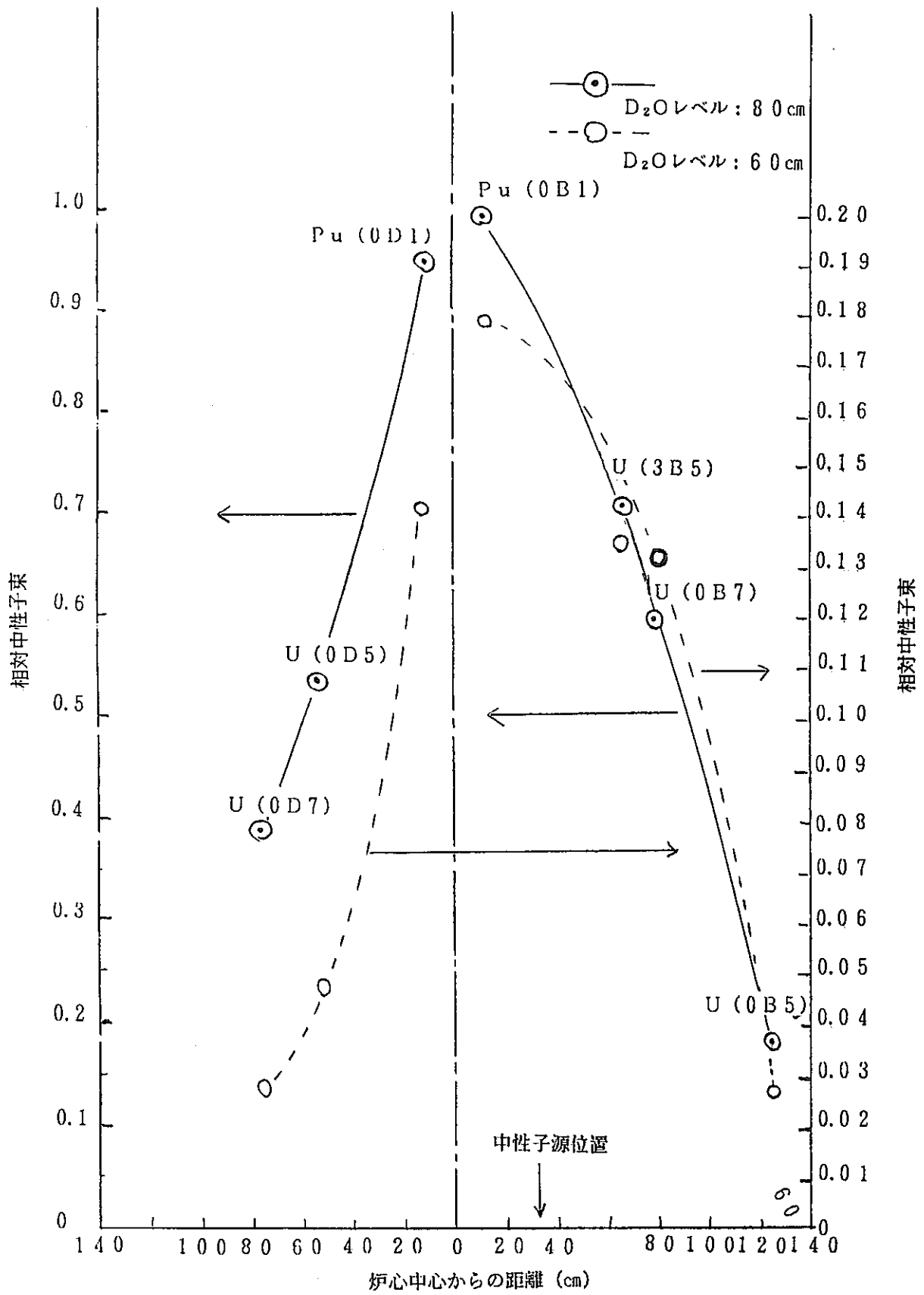


図2.2-10 中性子束分布の未臨界度依存性

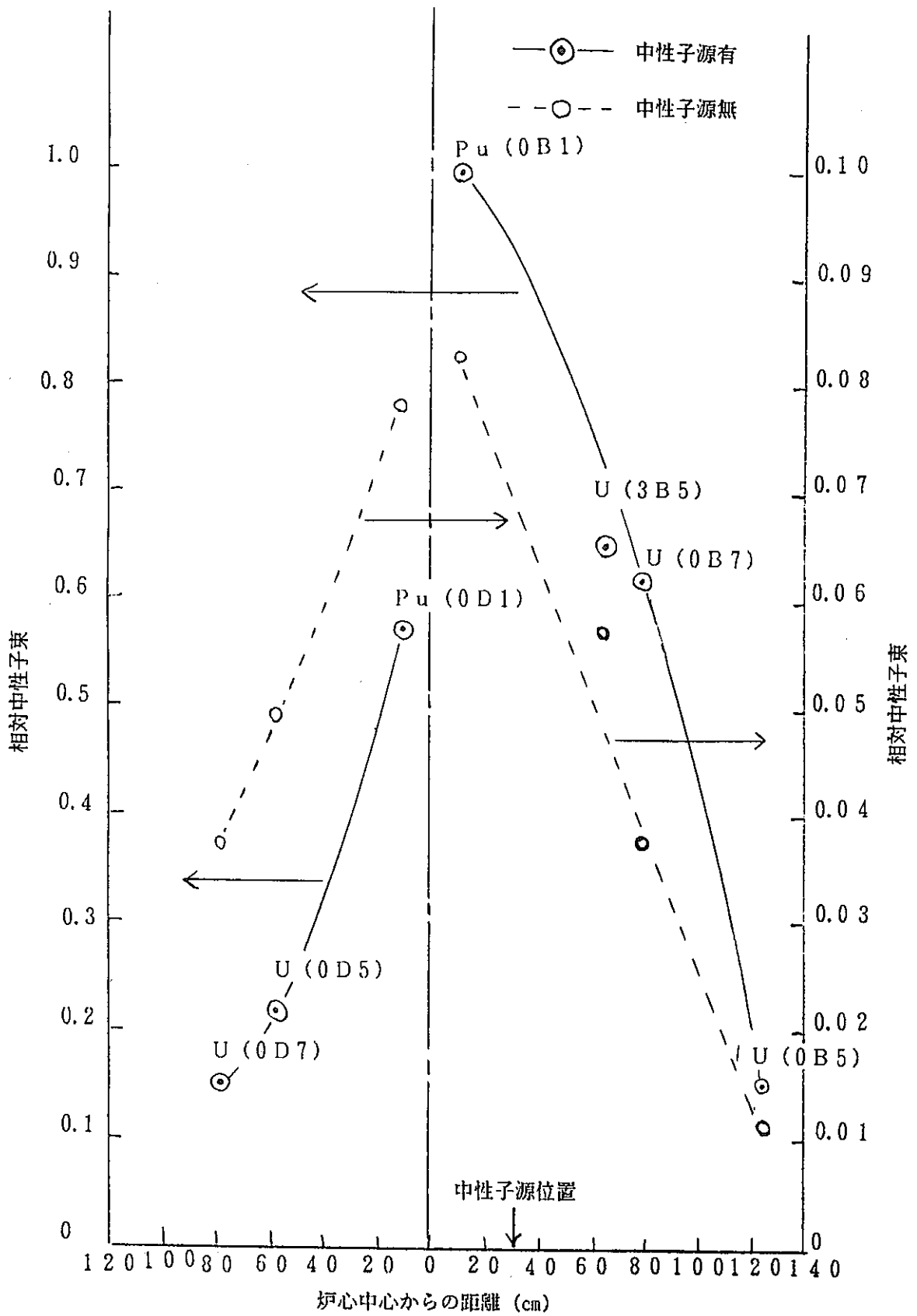


図2.2-11 中性子束分布の中性子源依存性

2.3 DCA既設利用による実験計画

(1) 目的

既存のDCA施設を利用し、2領域法による未臨界度測定実験を行うことにより、2領域法測定技術の基本特性の把握、測定手法の確立を行う。

又、ミハルゾ法やPNS法による測定を合せて実施し、それぞれの手法の特徴を比較検討する。

(2) 実験の概要

25cmピッチの炉心構成とし、中央に約70cm□の中央タンクを設置し、中央を試験領域、周辺をドライバ領域に区分する。(図2.3-1)一方、2領域法検証用として特殊集合体を組立て、供試体とする。

中央タンク内に供試体である特殊集合体を設置し、全体として臨界にすることにより、2領域法により特殊集合体の未臨界度の測定を行う。

測定が終了した時点でドライバ領域の燃料を退避させミハルゾ法、PNS法で供試体の未臨界度を測定する。

供試体の未臨界度の調整は集合体中の燃料棒の本数、種類を変えることにより行う。

(3) 特殊集合体

既存の燃料集合体を組合せ、又は分解、再組立てすることにより実効増倍率 $K_{eff}=0.9$ 程度の特殊集合体を組立てる。

図2.3-2に概要を示す。

タイプ3は外径約410mmφのアルミ管の内に36本又は28本燃料集合体が最大7本挿入できる様な工夫がなされており、測定直前に管内に軽水を充填することで実効増倍率を上昇させる。

燃料集合体の隙間には制御棒を挿入できる構造となっており、燃料取扱時の安全性を高めることができる。

タイプ1は外径が450mmφとなる他はタイプ3と同様である。

タイプ2は外径が310mmφのアルミ管内に燃料集合体が最大3本挿入できる様工夫がされており管中央に制御棒が挿入できる構造となっている。

(4) 実験手順

Kd曲線を測定した後、以上の手順で実験を行う。

- ① 炉心タンクに中央タンクを設置。
- ② 中央タンク内に集合体容器を固定。
- ③ 集合体容器に集合体を装荷。
- ④ 集合体容器に制御棒を挿入、駆動装置を組立。

- ⑤ ドライバーゾーンに集合体を装荷。
- ⑥ 集合体容器内に一定の軽水を入れた後、制御棒を引き抜き、炉全体で未臨界である事を確認。
- ⑦ ドライバーゾーンの水重水位を上昇させ、臨界水位を測定する。
- ⑧ 各種集合体 (E U 2.7 ~ 0.7 o/w, P u 0.8 ~ 0.5 o/w) にて試験領域のkeffを変化させ実験。

(5) 実験内容

① 未臨界度の測定実験 I

Type 3 の容器に E = 2.7, 1.5, 0.7 の燃料集合体を装荷し水位差法による未臨界度の測定を行う。

ドライバー燃料の装荷量の変更と重水中ボロン濃度の変更により、各燃料集合体において臨界水位を努めて一定にした上程で臨界に達し、水位差に起因する誤差の影響を受けない測定法についても検討を行う。

本実験にて基本的な 2 領域法の妥当性を確認する。

② 未臨界度の測定実験 II

Type 3 の容器に E = 2.7, P u = 0.8 の集合体を装荷、それぞれについて 2 領域法 P N S 法, M 法にて測定を行い、それぞれの手法の特徴を把握する。

③ 2 領域法の実用化

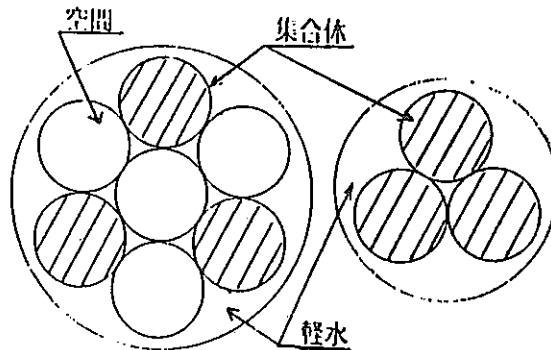
1) 容器効果の確認

Type 1 及び 3 を使用し、Type 3 の外側に 2.5 cm の水反射 (半反射相当) があつた場合においても精度良く測定できる事を確認する。

2) 形状、効果の補正 I

Type 2 と Type 3 の容器に同じ種類の集合体をそれぞれ 3 本装荷し、Type 3 については空間にアルミ中空管を挿入することに軽水量を調整する。

同じ燃料体数であっても、形状のちがいによる keff の相異を 2 領域法により測定できる事を確認する。



3) 形状効果の補正Ⅱ

Type 2 と Type 3 の容器を使用

Type 2 には $E = 2.7$ の集合体を Type 3 にはそれと同様の k_{eff} となる集合体を装荷し、両者とも 2 領域法にて精度良く測定できる事を確認する。

実験No	テスト領域			ドライバ領域		備考
	容器No	集合体	推定keff	推定臨界水位	集合体	
1)-1	3	EU2.7(7)	0.88223 ±0.000221		EU1.2(52) Pu8R (16) Pu8S (24) } *	M法, PNS法 についても実験
1)-2	3	EU1.5(7)	0.76219 ±0.00198		*	M法について も実験
1)-3	3	N.U. (7)	0.57547 ±0.00161		*	
1)-4	3	EU2.7(7)	—		EU1.2(92)	
1)-5	3	EU1.5(7)	—		EU1.2(80) EU1.5(12)	1)-3の臨界水位と同じになる様B濃度調整
2)-1	3	Pu8R (7)	0.74124 ±0.00193		*	M法, PNS法 についても実験
2)-2	3	Pu5S (7)	0.76365 ±0.00229		*	
3)-1	1	EU2.7(7)	0.92756 ±0.00245		*	
3)-2	1	EU1.5(7)	0.80516 ±0.00197		*	
3)-3	3	EU2.7(3)	0.41233 ±0.0182		*	制御棒引抜による摂動測定
3)-4	2	EU2.7(3)	0.65325 ±0.00207		*	
3)-5	3	NUO.7(4) EU1.2(3)	0.66851 ±0.00161		*	3)-4と同じkeffとなる様にする

注) 臨界水位は2領域実験コードの整備 終了後, 計算を実施。

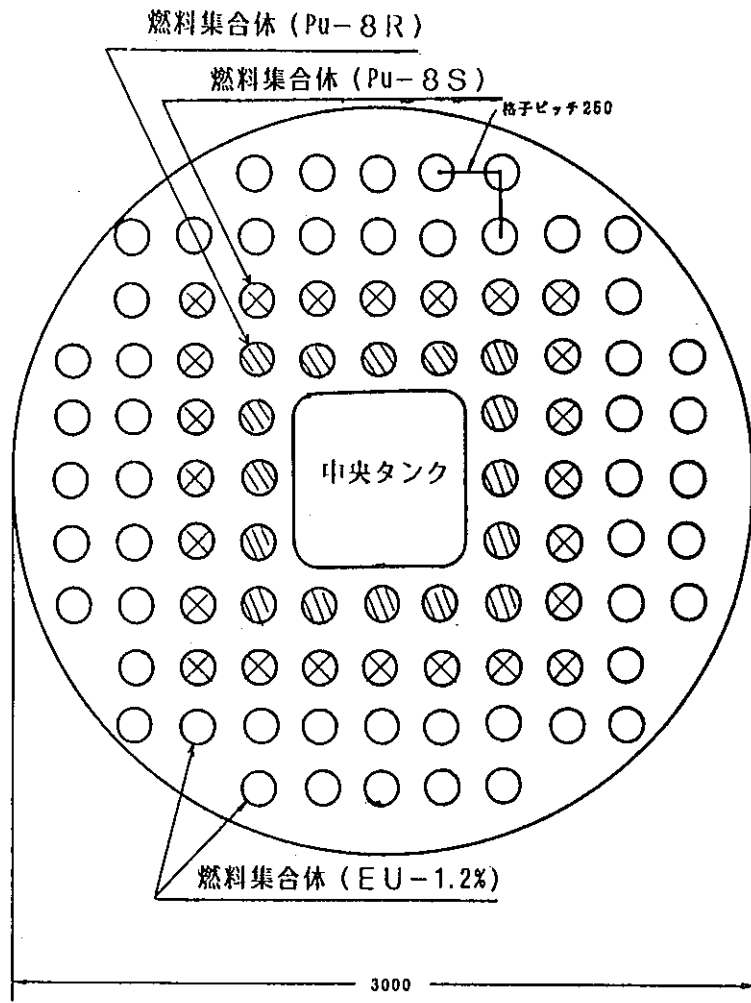


図2.3-1 炉心構成

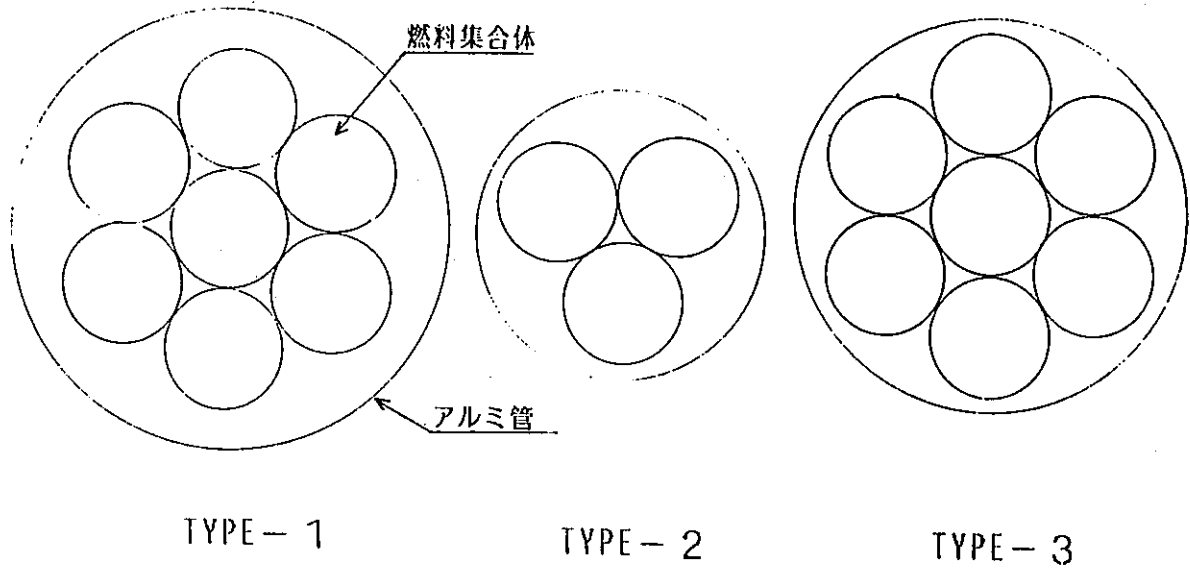


図2.3-2 容器の種類

3. 未臨界度測定技術開発

3.1 既存未臨界度測定法の比較

(1) 未臨界度測定法に対する要請

再処理施設等の核燃料施設への適用を考慮した場合には、核燃料施設の特徴に留意し次の要求を満たす未臨界度測定法が必要である。

未臨界度測定システムに要求される事項

○高いバックグラウンド域で精度良く深い未臨界度が測定可能であること

・範囲 $0.3 \leq k_{eff} \leq 0.99$

精度 ± 0.003 ($0.095 \leq k_{eff} \leq 0.99$)

± 0.04 ($0.3 \leq k_{eff} < 0.95$)

○測定処理時間が短く、プロセス変動による応答性が良いこと

・目標 10秒以内

○測定、処理に関して、種々のプロセスパラメータによる較正を必要としないこと

(例) ・体系の臨界データ

・測定場所の限定 (検出器に場所依存性がないこと)

○測定システムがコンパクトであること

・データ処理機能が簡単であること

○安価でメンテナンスフリーであること

(2) 既存未臨界度測定法の比較

未臨界度測定法として可能性のあるものは大別すると

- ① 中性子雑音法
- ② 中性子源増倍法
- ③ パルス中性子法
- ④ その他

であり、その原理、実績、特徴及び課題をまとめると表3.1-1に示す通りである。

① 中性子雑音法

中性子連鎖反応において、ある種の確率モデルを適用して計測と未臨界度の関係を導き、その計測から未臨界度を求める方法で、外部中性子源を必要とするMihalcz法と、必要としないFeynman- α 法、Rossi- α 法がある。

Mihalcz法は臨界近傍での反応度較正を必要とせず、検出器感度や1次中性子源の強度情報が不要

という未臨界度モニタに適した特長を有している。但し、高次空間モードの検討等の課題を有している。

Feynman- α 法及びRossi- α 法は中性子寿命の情報を必要とする点で未臨界モニタへの適用という面で不利である。

② 中性子源増倍法

外部中性子源による中性子の空間分布から反応度を測定する方法である。この方法は臨界近傍での反応度校正を必要としていたが、パルス中性子法の空間積分法（後述）と同じ考え方を適用した修正中性子源法（MSM法）は、臨界時の情報が不要となり、未臨界度モニタへの適用も可能である。

③ パルス中性子法

加速器等で中性子パルスを打ち込み、その後の媒質中での中性子密度の時間的変化で反応度を求める方法である。この中性子密度の時間的変化を解析する方法により、微分法-Simmon・King法、SevisedSK法や積分法-Sjostland-Gozani法、Integral VersionSG法がある。

これらのうち、Integral VersionSG法が臨界点での校正を必要としない点で未臨界度モニタ向きである。

④ その他

その他の方法として、水位差法や2領域法があり未臨界度モニタの校正としては候補となる。このうち、2領域法は測定対象の周囲を空気雰囲気にすることが出来るため実機の未臨界度モニタの校正用として適する。

(3) まとめ

今後の研究開発によっては(1)項に示した要請に近づき得る方法として、Mihalcz法、MSM法、Integral VersionSG法があげられるが選定する段階にはない。

Mihalcz法は限られた条件下ではあるが高未臨界度までの測定が可能であることが示され、未臨界度モニタに適する特長を有している。

Mihalcz法に関わる炉物理的課題は、他の方法にもほぼ共通であり、また、Mihalcz法の測定データは他の方法の検証にも使える。

従って、長期的にはMihalcz法は数ある測定法の一部と位置付けるが、当面はMihalcz法を対象とした研究を進めることとしたい。

表3.1-1(1) 未臨界度測定技術の現状と課題- (1)

未臨界度 測定法	名称	測定原理	測定実績		特徴と課題	備考
			未臨界度	測定精度		
中性子雑音法 (ノイズ法)	Mihalczko法	$\rho = \frac{C_1 G_{12} G_{13} / G_{11} G_{23}}{1 - C_2 G_{12} G_{13} / G_{11} G_{23}}$ <p> G_{11}: 自己出力スペクトル密度 G_{12}, G_{13}, G_{23}: 相互出力スペクトル密度 C_1, C_2: 定数 </p>	$k_e \geq 0.4$	$\pm 4\%$	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界または臨界近傍の情報不要 ・検出器効率, 中性子源強度情報不要 ・高次空間モードの検討が必要 ・システムが複雑である。しかし簡易ミハルツ法として古橋方式の2計数管法が提案されている。 ・中性子寿命 (ℓ) の情報が不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・未臨界度の絶対値が求められるため未臨界度モニターとして有望 ・日米共同臨界実験で実績がある。 ・簡易ミハルツ法も有望である
	Feynman- α 法	<p>中性子検出の分散と平均の比(V/M) から未臨界度を求める方法</p> $V/M = 1 + \epsilon \frac{\langle \nu(\nu-1) \rangle}{\alpha_0^2 \cdot l \cdot K} \left\{ 1 - \frac{1 - e^{-\alpha_0 t}}{\alpha_0 t} \right\}$	$\rho \geq 30s$	—	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子寿命 (ℓ) の情報が必要 ・外部中性子源不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・単独で未臨界度が求められないためモニターとしては不適
	Rossi- α 法	<p>時刻 t_1 に1個の中性子を検出した場合に $t_2 (t_2 > t_1)$ の周りの Δt_2 に検出する確率 $P_c(t_1, t_2)$ Δt_2 は次式となる。</p> $P_c(t_1, t_2) \Delta t_2 = \epsilon \langle N \rangle dt_2 + \epsilon \frac{\nu(\nu-1)}{2\alpha_0 \ell^2} \rho^{-\alpha_0(t_2-t_1)} \cdot dt_2$ <p> $\langle N \rangle$: 平均中性子密度, ϵ: 検出効率 ℓ: 中性子寿命, α_0: 即発中性子減衰定数 $\left(= \frac{1-k(1-\beta)}{l} \right)$ </p>	$k_e \geq 0.7$ (=50s)	$\pm 5\%$	<ul style="list-style-type: none"> ・未臨界度測定の場合中性子寿命 (ℓ) が判明していないと求められない。 ・中性子束分布が基本モードと仮定 ・外部中性子源不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上

表3.1-1(2) 未臨界度測定技術の現状と課題-(2)

未臨界度 測定法	名称	測定原理	測定実績		特徴と課題	備考
			未臨界度	測定精度		
中性子源増倍法 (SM法)	中性子源 増倍法 (SM法)	$K=1 - \left[\frac{\alpha}{\alpha_0} \right] \left[\frac{C_0}{C} \right] (1-K_0)$ α : 未知体系の検出効率, α_0 : 既知体系の 検出効率, C, C_0 : 各体系の検出器計数率 K_0 : 既知反応度	$K_e \geq 0.77$ (=50%)	$\pm 7\%$	<ul style="list-style-type: none"> 絶対測定が不可, 従って既知の反応度の較正が必要。 測定システムが簡単 パルス中性子法の空間積分法と同じ考えを適用すると深い未臨界度も測定可能。即ち修正中性子源法(MSM)によると, $\rho = \frac{\rho_2(C)}{\rho_1(C)} \times \frac{C_2}{C_1} \times \frac{E_1}{E_2}$ $\times \rho_1(E)$ サフィックス1,2: 既知体系, 未知体系 C: 計算での計数値 E: 実験での計数値	未臨界度モニターとして有望
指数実験法	バックリング法	$\rho = \frac{M^2}{K_\infty} (r + B^2 z)$ r : 中性子束の空間減衰定数 $B^2 z$: 臨界時の軸方向バックリング M^2, K_∞ : 移動面積, 無限実効増倍率, 臨界時の水位反応度係数より算出	$K_e \geq 0.5$	—	<ul style="list-style-type: none"> 臨界時の情報必要 深い未臨界度での精度が問題 	未臨界度モニターの較正としては有望
その他	水位差法	$\rho = -\frac{C}{2} \left[\left(\frac{1}{H+\lambda} \right)^2 - \left(\frac{1}{H_c+\lambda} \right)^2 \right]$ H_c : 臨界水位, H : 未臨界水位 λ : 外挿距離, C : 定数	$\rho \geq 15\%$	—	<ul style="list-style-type: none"> 臨界時の情報必要 深い未臨界度での精度が問題 	<ul style="list-style-type: none"> 未臨界度モニターの較正としては有望 DCA ではATR 炉心の制御棒反応度, 冷却材ボイド反応度の測定法として確立
	2領域法	$K_T = 1 + \frac{\rho}{\rho - \delta K_0} (1 - K_0)$ ρ : 全体系の反応度添加率 K_0 : ドライバー領域の実効増倍率 (2領域臨界) δK_0 : 反応度添加前後のドライバー領域の K_0 の変化量 K_T : 試験体の実効増倍率	$K_e \geq 0.6$	$\pm 6\%$	<ul style="list-style-type: none"> 臨界時の情報必要 深い未臨界度での精度が問題 	<ul style="list-style-type: none"> 未臨界度モニターの較正としては有望 DCA では予備実験として$K_e \geq 0.7$の実績あり

表3.1-1(3) 未臨界度測定技術の現状と課題- (3)

未臨界度測定法	名称	測定原理	測定実績		特徴と課題	備考
			未臨界度	測定精度		
パルス中性子法 (PNS法)	Simmons-King法 (SK法)	$\rho/\beta = 1 - \frac{\alpha}{\alpha_c} \cdot G$ $\alpha_c: \text{臨界時即発中性子減衰定数}$ $\alpha: \text{未臨界時即発中性子減衰定数}$ $G: \text{中性子生成時間の補正項}$	$K_e \geq 0.8$ (=40%)	~±2%	<ul style="list-style-type: none"> 臨界時の情報が必要 中性子生成時間を計算値で補正 測定時間が長い (~1 時間) 	<ul style="list-style-type: none"> 未臨界度モニターとしては不適 DCA 実績では未臨界度30%まで±7%
	Revised-SK法 (RSK法)	$\rho/\beta = \frac{\alpha - \alpha_c}{\alpha_c} \cdot f + \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ $f, \varepsilon_1, \varepsilon_2: \text{計算による中性子生成時間, 遅発中性子寄与の補正項}$	$K_e \geq 0.75$ (=50%)	~±5%	<ul style="list-style-type: none"> 臨界時の情報が必要 測定時間が長い (~1 時間) 	<ul style="list-style-type: none"> 未臨界度モニターとしては不適
	Sjostland-Gozani法	$\rho/\beta = A_p/A_d$ $A_p, A_d: \text{即発, 遅発各成分の全計数 (面積)}$	$K_e \geq 0.9$	~±10%	<ul style="list-style-type: none"> 臨界時の情報不要 空間高次モードおよび即発成分と遅発成分との中性子束分布の相違により A_p が場所依存を示す。 Cdカバー検出器により場所依存を消去した例もある。 	<ul style="list-style-type: none"> A_p の場所依存のため未臨界度モニターとしては不適
	Integral-Version SG法 (空間積分面積比法)	$\rho/\beta = \overline{A_p}/\overline{A_d}$ $\overline{A_p} = \int_{V_m} d\vec{r} A_p(\vec{r}) \int n^*(\vec{r}, E) f(E) dE$ $\overline{A_d} = \int_{V_m} d\vec{r} A_d(\vec{r}) \int n^*(\vec{r}, E) f(E) dE$ $V_m: \text{検出器を含む領域}$ $n^*(\vec{r}, E): \text{検出器位置における随伴固有関数}$ $f(E): \text{核分裂スペクトル}$	$K_e \geq 0.5$ (=125%)	~±5%	<ul style="list-style-type: none"> 臨界時の情報不要 多数の検出器による測定のため計測手順が煩雑 上記手順を簡略化した修正パルス中性子法 (MPNS法) の提案もあり。即ち実測値を計算値によって係数処理する方法 $\rho/\beta = C(A_p/A_d)$ 実測 $C = (A_p/A_d)^{-1}$ 計算 $(\overline{A_p}/\overline{A_d})$ 計算 	<ul style="list-style-type: none"> 未臨界度モニターとして有望

3.2 日米共同臨界実験のまとめ

(1) はじめに

動力炉・核燃料開発事業団（以下「動燃」と略す）は、昭和58年8月より約5年の歳月をかけて米国エネルギー省（以下「DOE」と略す）と共同で、核燃料施設のための臨界安全性実験と未臨界度測定装置の開発を実施し、昭和63年8月をもってその全てを終了させた。それらの実験と開発の成果はその都度、米国原子力学会の年会および冬の大会で発表してきたが、平成元年6月の年会での発表をもってその全てを終了した。一方、国内では、日本原子力学会の年会や京大炉の短期研究会並びに臨界安全国際セミナーで、それぞれの時期に応じて最新の情報を盛り込んで発表してきた。また、計画終了時点での全体概要については、原子力学会の臨界安全性特別専門委員会の第一回会合（昭和63年12月）で発表した。

(2) 日米共同研究の目的

核燃料サイクル施設で臨界安全性を確保しつつ、過剰な裕度を取り除いた合理的な設計を達成するためには、臨界解析手法の信頼性を向上させるとともに解析モデルを現実的なものにする必要がある。そのために下記の二つに大別される研究開発を日米共同で実施することとした。

① Pu+Uの溶液燃料および燃料ピンを用いた臨界実験の実施

プルトニウム燃料の実用規模のリサイクル利用を達成する上で臨界解析コードと断面積ライブラリの果たす役割は大きい。これらの信頼性は臨界実験データをもってしか確認できない。実験データは、主として高速炉燃料再処理にかかわる分野で不足していた。本計画では、米国の既存施設を利用して臨界実験を実施することにより不足データを取得した。合わせて、日米双方で共通に使用している臨界解析コードシステムの検証を行った。

② 未臨界度測定装置の開発と試験

核燃料施設の臨界安全性を解析によって担保する場合、中性子実効増倍係数に十分な余裕を取って低く抑えるだけでなく、解析モデルを極めて保守的に設定することが多い。これは単に安全側であるからという理由だけではなく、核燃料プロセスをモデル化する上でパラメータが多いため、程良い裕度をもった条件というものを決めがたいためであることが多い。程良い裕度を持った臨界安全解析モデルを設定するには、実際にプロセスの中性子増倍特性を知ることが大きな助けになる。しかしこれまでには、そういう目的のための未臨界度測定装置が開発されることがなかった。本計画では、臨界に近いところでの較正が不要かつ深い未臨界度まで測定できるコンパクトな測定装置を、これまで米国で地味に続けられてきた研究をベースとして開発し、製作した。またその装置の信頼性を実験で実証した。

(3) 成果

① 臨界実験

- 1) これまで実施されたことのない高濃度や低濃度の燃料領域での実験やGd入りのプルトニウム燃料を使った実験など、非常にコストのかかる領域で、信頼度の高い臨界データを得ることができた。これらのデータは、特に高速炉燃料サイクル施設の設計や安全解析には不可欠である。表3.2-1に臨界実験パラメータを、図3.2-1に従来データとの関係を示す。
- 2) それらのデータを使って、日米双方で共通に使用しているSCALEコードシステムの信頼性を確認した。日米でそれぞれ独立に解析して、両者とも、実験との良い一致を示した。

図3.2-2にSCALEコードシステムでの計算結果と実測値の比較を示す。

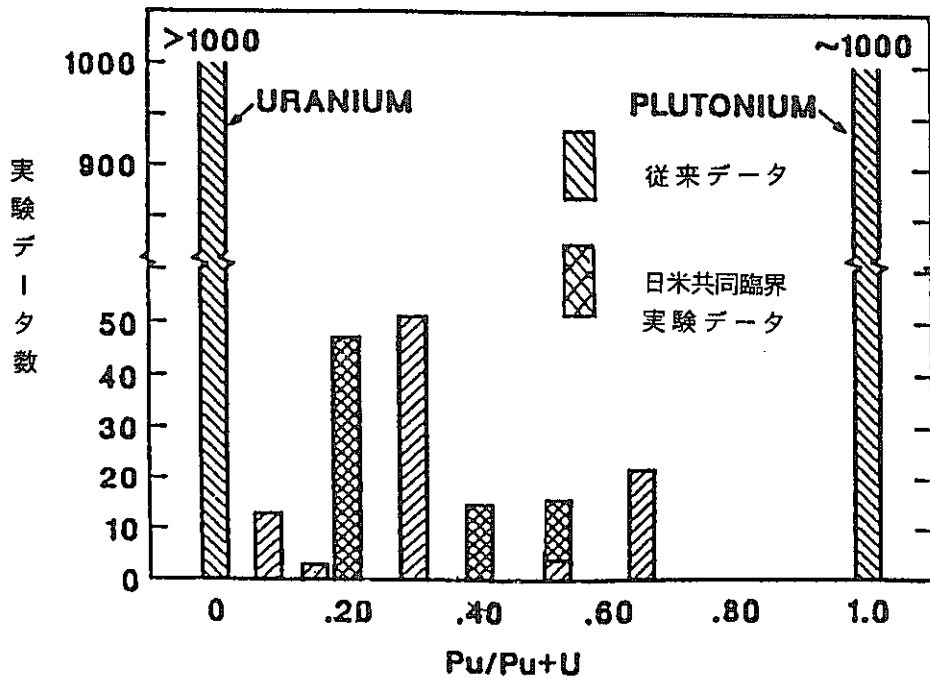


図3.2-1 日米共同臨界実験と従来実験の範囲

② 未臨界度測定装置の開発と試験

1) 試験内容

a) 静的未臨界度測定

Pu富化度40%のPu+U硝酸水溶液を使用して、平板、円環形状について測定を行った。

- b) U水溶液を使用して円筒容器から液を抜くことにより、実効増倍率を約 1分間で約0.95から0.3まで変化させ、それを約6秒ごとに測定した。

2) 試験結果

- ・ 平板タンクに対するMihalcz法とBreak Frequency Noise Analysis法の K_{eff} の測定結果は図3. 2-3に示す通り。特に $K_{eff} \approx 0.7 \sim 0.95$ の範囲で良い一致を示した。
- ・ Mihalcz法における各種パラメータの感度評価(表3. 2-2)を行い、 K_{eff} への寄与の度合いを求めた。
- ・ 円筒形容器から溶液を抜きながら未臨界度を測定した結果(図3. 2-4)約6秒ごとの測定結果、約100秒ごとの測定結果及びHR-KENOによる計算結果で良い一致をみた。

以上より次の結論を得た。

- ① 平板タンクに対するMihalcz法での $K_{eff} < 0.70$ の測定能力が実証された
- ② Mihalcz法の測定値は別の測定法(BFNA法)のそれと良い一致を示し、その相違は実験上の誤差範囲内であった。
- ③ 今回の実験は一点炉近似に基づく検出システム配置のクライテリア*を満足させるものとなった。
- ④ Mihalcz法は未臨界度の測定を短時間で行うことができ、プロセス条件の変化をダイナミックに追従出来ることが証明された。
- ⑤ プルトニウム溶液系の対して、Mihalcz法の適用性と測定理論に対する理解が実証された。
- ⑥ K_{eff} の計算値と実測値は約0.002以内の誤差で一致した。

* 一点炉近似に基づく検出配置のクライテリア

- (i) 中性子源は中心に配置
- (ii) 検出器は中性子源に対称配置
- (iii) 検出器は中性子源から十分隔てる
 - 〔 ・ 中性子源から直接計数の防止 〕
 - 〔 ・ 高次空間モード効果の排除 〕
- (iv) 検出器は体系の全域をカバーするように用いる
- (v) 低周波数域でのスペクトル比を使用する

表3.2-1 臨界実験パラメータ

燃料形態	実施項目	ケース数	実験容器	Pu 富化度 (Pu/Pu-U) (w/o)	燃料溶液中 HM濃度 (g/l)	反射体	その他
Pu-U水溶液 体系	低濃度実験 (Subtask 110)	2	円筒 (直径69cm)	50 20	20 50	水 "	
	基本ケース実験 (Subtask 120)	32	円筒 (直径35cm)	50 40 20	100 300, 450 300, 450	裸, 水, コンクリート "	
			平板 (厚さ可変)	50 40 20	100, 200, 300 100, 300, 450 300, 450	裸, 水 " "	
固定中性子吸収材実験 (Subtask 140)	17	円環	100	50, 100, 200	50, 100, 200	水	円環内部の中性子吸収材: ボロンコンクリート(B.C 2w/o)
			50	100, 200, 300 450	100, 200, 300 450	"	" (")
			20	200, 300, 450	200, 300, 450	"	ポリエチレン+Cd, 普通コンクリート, ボロンコンクリート(B.C : 1, 2, 6 w/o), 空気
有機溶液中燃 料ビン体系	基本ケース実験 (Subtask 220)	5	—	25 (ビン)	—	(減速材/反射体) TBP + Normal Paraffin Hydrocarbon	ピッチ(cm) : 0.761, 0.968, 1.242, 1.537, 1.935
燃料ビン・集 合体体系	燃料溶液・可溶性中性子 吸収材実験 (Subtask 320)	10	ボイラーチュー ブ槽	20 (溶液) 25 (ビン)	0, 100, 200, 300, 450	水	溶液中Gd濃度(g/l) : 0
				"	450	"	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.2

(合計: 66 ケース)

表3. 2-2 Sensitivity of keff to Parameters used in interpretation of the experimental data for various keff values for a solution height of ~ 71 cm

Parameter	Sensitivity coefficient ^a for three different slab thicknesses		
	11.43 cm (Keff=0.71)	13.97 cm (Keff=0.84)	16.51 cm (Keff=0.90)
Ratio	-4.39	-1.91	-0.87
SR	-4.24	-1.93	-0.82
I_c/I	3.45	1.65	0.74
I_i/I	-0.52	-0.13	-0.03
R, X, ν	-2.78	-1.54	-0.77
ν_i	0.47	0.12	0.02
ν_c	4.28	1.82	0.78
ν_i^2	-0.52	-0.13	-0.03
ν_c^2	-0.53	-0.12	-0.02
β_{eff}	-0.01	<0.01	<0.01

^aValues were obtained by increasing each parameter by 10%. Values tabulated are the percentage change $\Delta k/k$ for a 10% change in the parameter, P.

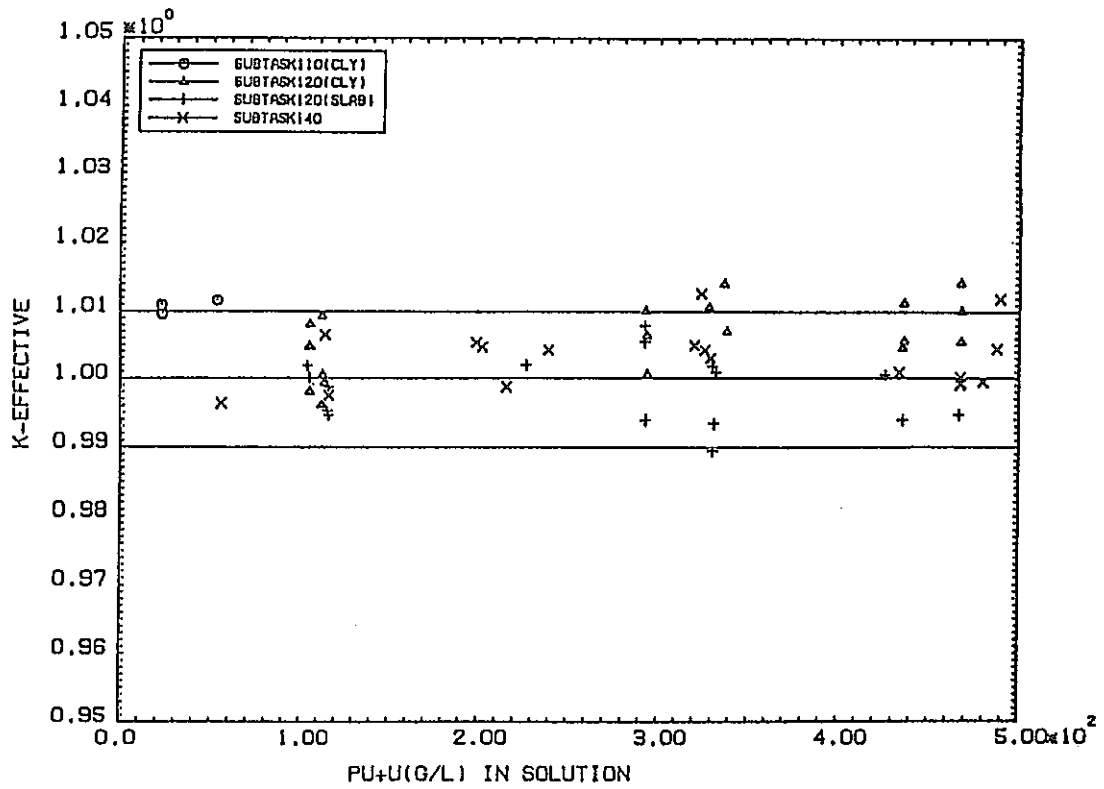
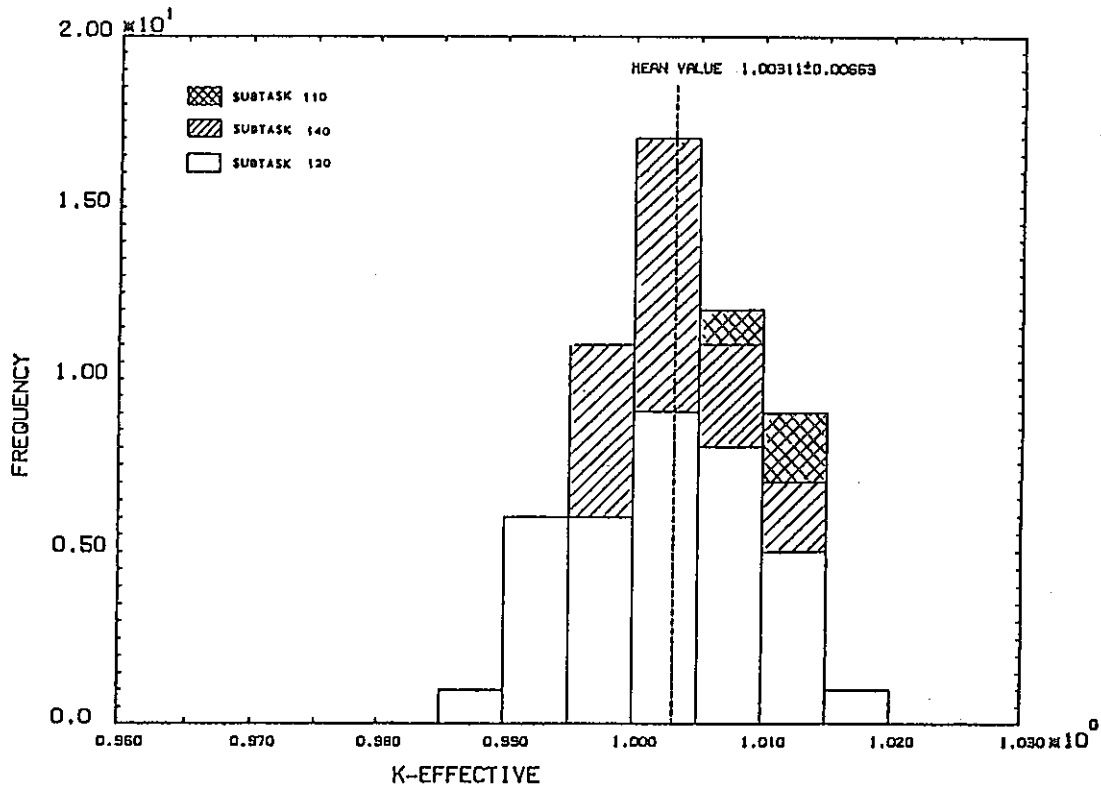
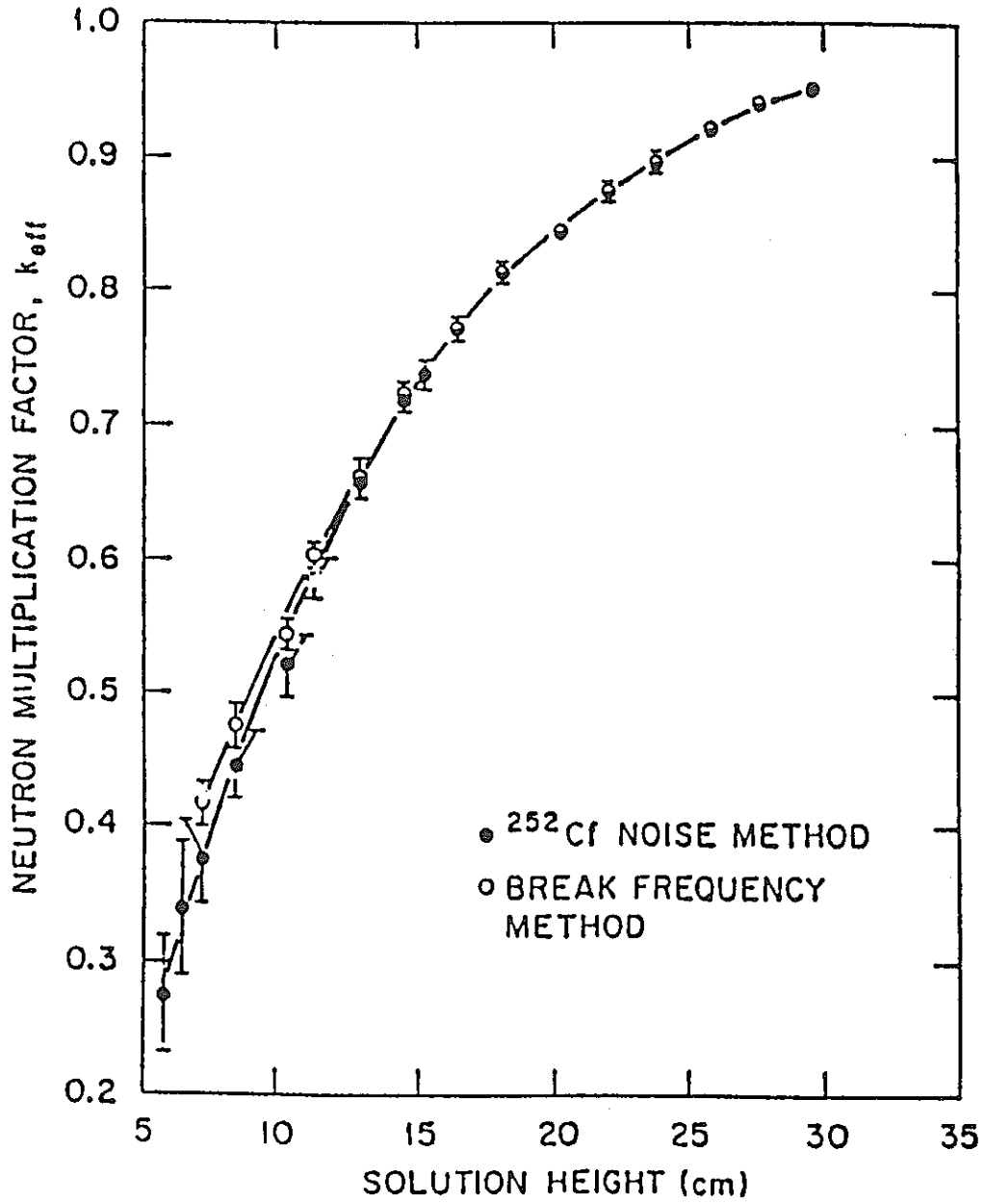


図3.2-2 PNC計算結果 (Subtask 110, 120, 140)

Fig. 3.2-3 Comparison of neutron multiplication factors from BFNA with those from ratios of spectral densities.



測定値間の比較 及び 計算値との比較

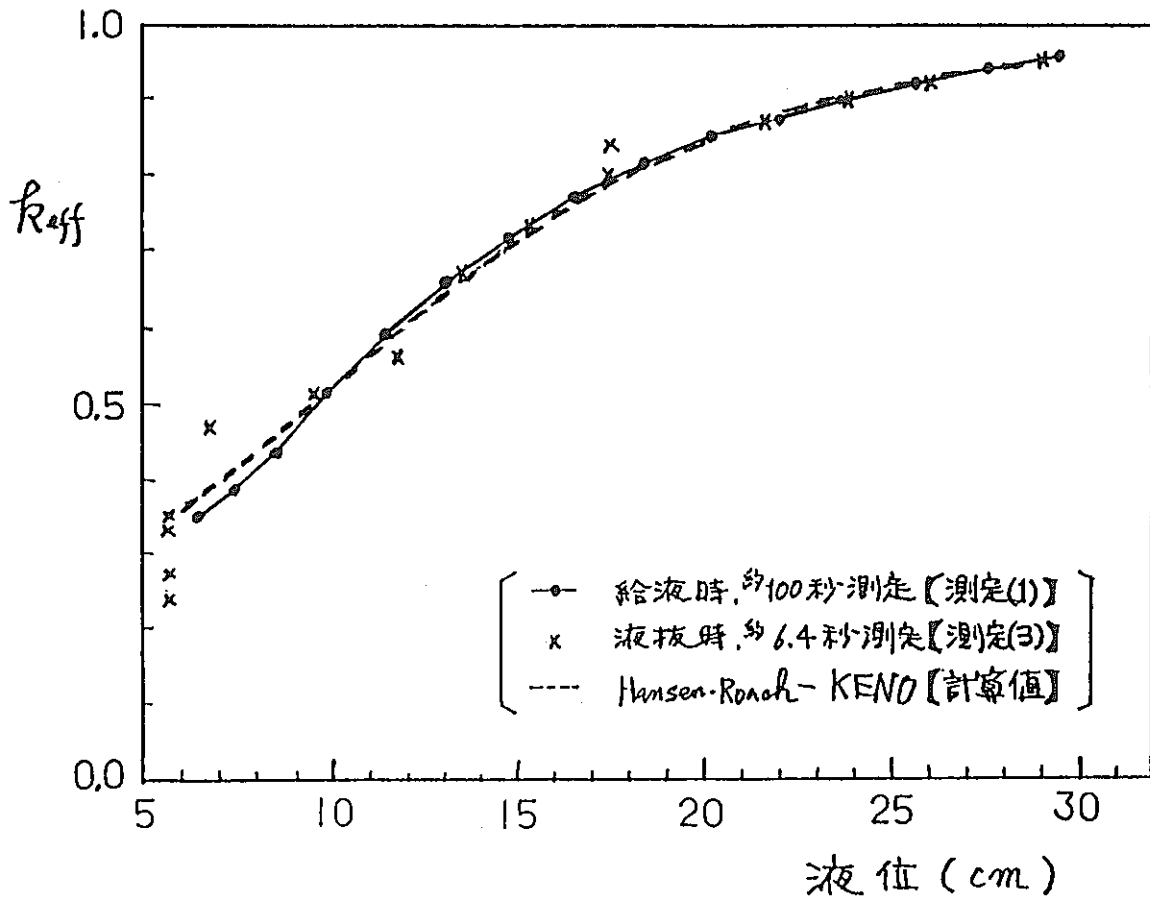


図3.2-4 炉心燃料液位と K_{eff} の関係

(4) 米国側実験結果の評価

ORNLが実施したMihalczó実験結果の評価を名古屋大学に委託して実施した。その目的は次の3点である。

- ① ORNLが製作した測定・データ処理装置を使った実験法の信頼性確認 [現地見学]
- ② データ解析の前段—検出器出力を高速フーリエ変換処理してスペクトル比を算出する手順—の
確証 [解析評価]
- ③ データ解析の後段—スペクトル比から未臨界評価までの解析手順—の確証 [解析評価]

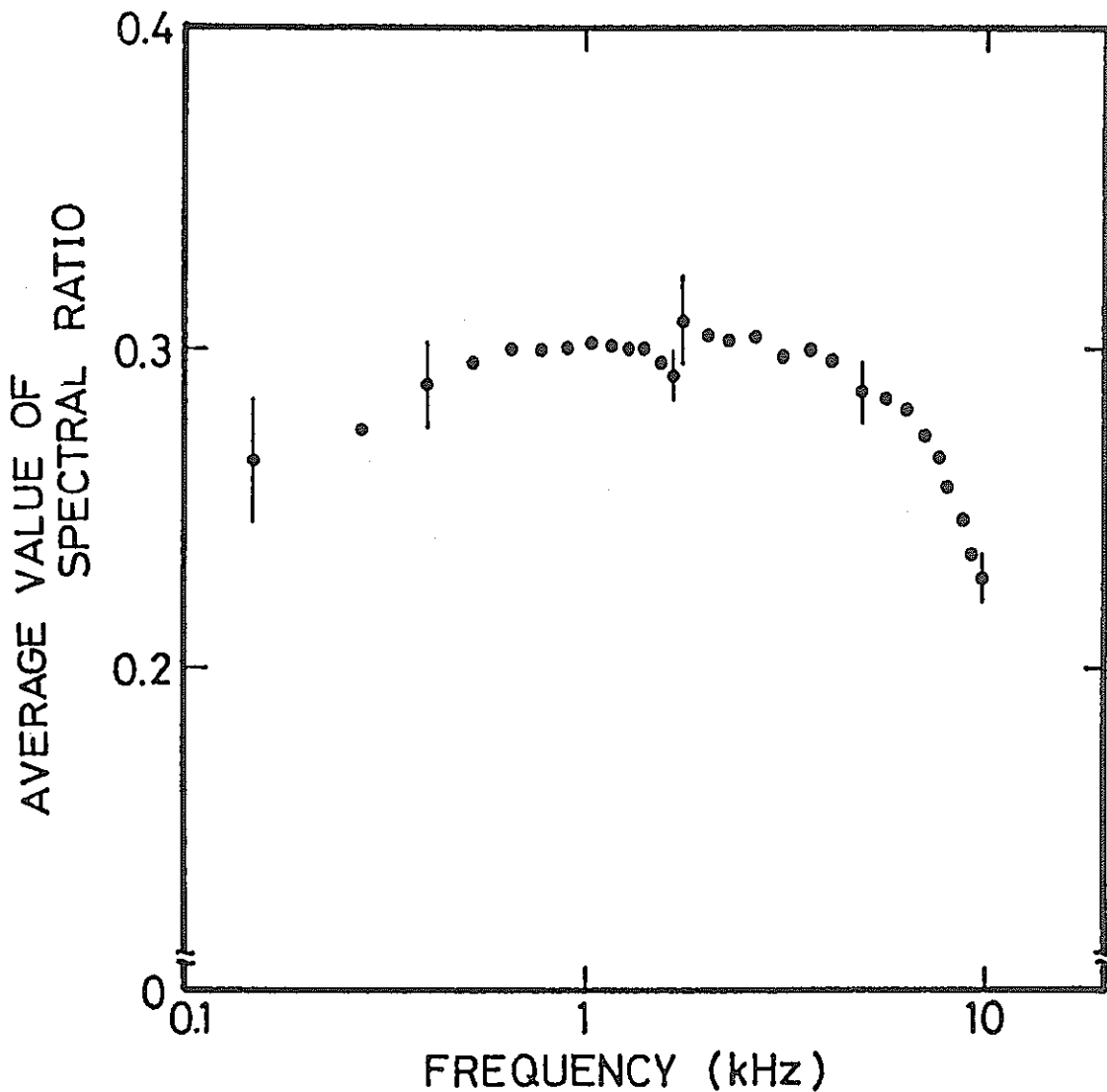
1) スペクトル比 (SR値) の解析評価

米国側実験データを日本側で処理解析して次の結果を得た。

- a) SRの計算結果 (平均値) を図3.2-5に示す。これより、SRが一定値をとっている4.15 kHzまでの平均値を求めると 0.2966 ± 0.0096 となりORNLの計算値 (5 kHzまで) より約5%大きい値となった。

但し、4.9 kHzまでの平均値は 0.2871 ± 0.0093 となりORNLの計算値とほぼ一致した。

このようにSR値は低周波数域では一点炉近似から期待されるように一定値をとること、SR (f) から平均値を評価する際には、どの周波数域を使うかによって5%程度の差が生ずることがわかった。



3.2-5 Average Value of Spectral Ratio

b) $SR(f)$ 値の各実験ケース毎のプロットを図3.2-6に示す。

図中の123, 145シリーズは検出器がc f 中性子源に対して片側に配置されたケース (Aグループ) でその他のシリーズは検出器がc f 中性子源をはさむように配置されたケース (Bグループ) である。

図3.2-6より, AグループとBグループでは $SR(f)$ に明らかな差があり, 未臨界度が大きくなる (AS, AO, AL, BNの順に未臨界度が大きい) につれてこの差は広がっている。これより, 低周波数領域においても, 異なった平均スペクトル比の値を示す検出器配置があること, そしてこのスペクトル比の差は体系の未臨界度が大きくなるほど著しくなる傾向があることが判った。

従って, 一点炉近似を利用する限りは, この近似が成立するような平均スペクトル比を与える検出器配置について予め検討する必要がある。

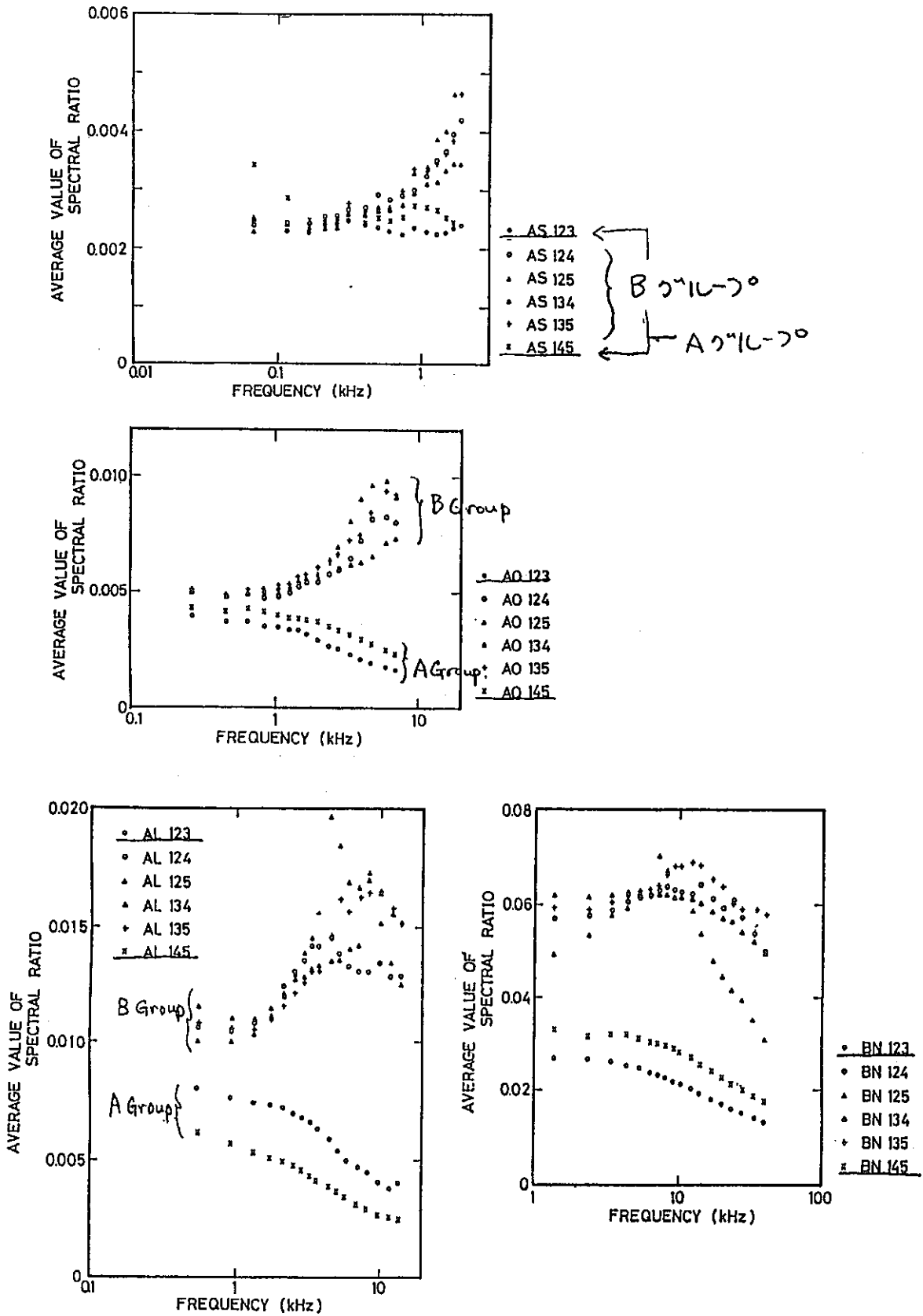


図3.2-6 Average Value of Spectral Ratio

2) スラブ体系Mihalczó実験の補正因子と実効増倍係数

未臨界度評価式に従い、各種補正因子を計算して実効増倍係数を計算した結果を表3. 2-3に示す。

表3. 2-3 Results of effective multiplication factors

Exp. ID	$ \rho $ [$\Delta k/k$]	keff (SMS)	keff (KENO)	keff (SMS)/ keff (KENO)
AS	$(8.40 \pm 0.31) \times 10^{-3}$	0.9917	0.9830 ± 0.0026	1.0088
AD	$(1.75 \pm 0.03) \times 10^{-3}$	0.9828	0.9673 ± 0.0030	1.0160
AL	$(8.40 \pm 0.31) \times 10^{-3}$	0.9655	0.9545 ± 0.0028	1.0115
BN	$(8.40 \pm 0.31) \times 10^{-3}$	0.8403	0.8158 ± 0.0028	1.0300

表中keff (SMS) は、平均インポートランス及び空間補正因子をエネルギー2群の拡散計算によって解析的に求めて得たものであり、keff (KENO)はSCALE-2コードシステムでエネルギー27群定数を作りモンテカルロ計算コードKENO-IVで計算したものである。

K (SMS)/K (KENO)より明らかなように、簡単な計算モデルでも、評価された実効増倍係数は比較の対象としたエネルギー27群のモンテカルロ計算値とよく一致していた。

3) まとめ

米国側実験結果の評価をまとめると次の通りである。

- a) 検出器出力をフーリエ変換し、スペクトル比を評価するまでの米国側の処理手順に、特に問題はない。
- b) 検出器配置によっては、スペクトル比の平均値が低周波数領域においても互いに異なった値を示す場合がある。そして、この空間依存性は未臨界度が大きくなるほど顕著になる。したがって、一点炉近似に基づく未臨界度評価式を使う場合には、この近似にかなう平均スペクトル比を与え検出器配置の選択原理を、確立しておく必要がある。
- c) 上の意味で適切な検出器配置の下で測定されたスペクトル比から算出した未臨界度（または実効増倍係数）は、モンテカルロ計算値と一致した。さらにこれは我々とは全く独立に評価された米国側評価結果と極めて良く一致していた。

実用的な未臨界度モニターの候補として、Mihalczó法の研究開発に、今後集中的な努力を傾注することは、十分に意味があると結論できる。ただし実用化のためには、②に述べた検出器配置の選択原理を確立することが、今後の大きな課題である。このために今までの一点炉近似によるものではなく、空間依存性を陽に取込んだMihalczó法実験公式の導出が必要である。

(5) 今後の課題

① 検出器配置依存性

一点炉心近似にかなう平均スペクトル比を与える検出器配置の選択原理を確立しておく必要がある。このため、空間依存性を陽に取込んだMihalczko法実験公式の導出が必要である。

② 高次プルトニウム効果

第I章で記述したように、中性子源入り自発核分裂体系では、未臨界度の大きさにより中性子束分布が異なる。このことは、未臨界度評価に必要なインポートンス分布が未臨界度に依存することを意味する。従ってMihalczko法の特徴である ^{252}Cf 中性子源入り検出器によるインポートンス分布の変化が炉心のインポートンス分布の変化に比べてどのような挙動を示すかを自発核分裂数の異なる高次プルトニウム組成を変化させ評価しておく必要がある。

③ 複雑体系への適用性

これまでの実験で円筒容器や平板容器のような単純体系に対してはデータを取得してきたが、核燃料施設への適用性を見通すためには、上記の課題を解決していくと共に複数ユニット、複雑形状に関する相互干渉効果や固液混合溶液に関する不均一系相互干渉効果を条件に入れた実験が必要である。

3.3 DCAへの応用

DCAを応用した未臨界度測定技術開発には表2.1-1に示した優位性がある。

一方、DCA応用の前提となる2領域実験解析手法については2章にまとめた通りの見通しが得られ、更に、未臨界度測定装置のデータ収録、処理部についても整備を終えた。(但し、cf線源付検出器については平成3年度に調達予定)

従って、DCAを応用した未臨界度測定技術開発の準備は整ったと判断する。

未臨界測定装置データ収録・処理部の構成及び仕様を図3.3-1、表3.3-2に示す。

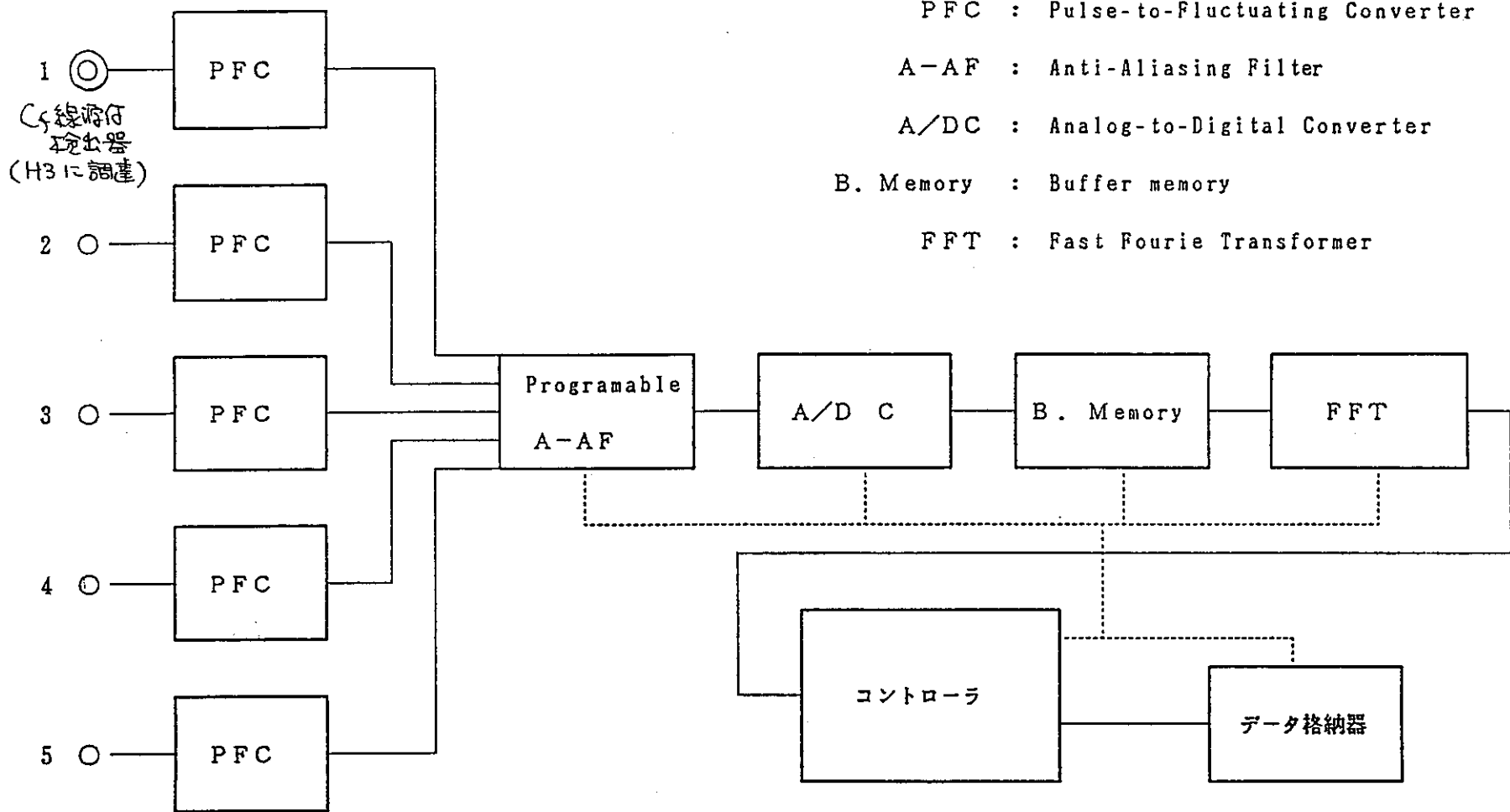


図3.3-1 SMS データ集録・処理部

表3.3-2(1/2) 未臨界度測定装置データ集録・処理部の仕様

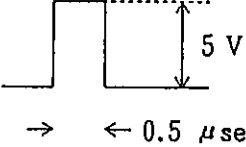
機 器 名	仕 様
<p>1. パルス—交流波 変換器 (5チャンネル)</p>	<p>(1) 入力波</p>  <p>(2) RC Averaging network (leaky charge collection capacitor)</p> <p>(3) バンド巾切換 (スイッチ) 五段 0~5 kHz 0~10 kHz 0~20 kHz 0~50 kHz 0~100 kHz</p> <p>(4) 出力電流 (mA) 1.75 , 3.5 , 7 , 14 , 28</p> <p>(5) 内蔵フィルタ (RLC filter) 500 kHz以上に対し、12dB/oct</p> <p>(6) Crest factor 11.5</p>
<p>2. アンチエリア スイングフィルタ (5チャンネル) Precision Filters 社 model 616相当</p>	<p>(1) 6-pole ,6-zero elliptic (2) リップル 0.1 dB peak-to-peak (3) 減衰率 -70 dB/octave (4) 入力 ± 10V (5) 入力抵抗 10MΩ (6) コントローラにてfilter gain 設定可能とする。 (7) 利得 1, 2, 3.5, 5, 7, 10, 17.5, 35 (8) 10Hz~150kHz 60 ステップ</p>

表3.3-2(2/2) 未臨界度測定装置データ集録・処理部の仕様

機 器 名	仕 様
3. 高速A/D 変換器	(1) 12 bit A/D Converter (2) 5 track and hold (3) 5入力 (4) Sampling frequency 13.333 MHz (5) ダイナミックレンジ 72dB (6) 最多取込み数 325000 samples/s
4. バッファメモリ	(1) 16~65,536 点/ブロック (2) ブロックサイズ 1024 (16 bit)
5. 高速フーリエ 変換器	(1) 機器 自己相関, 相互相関, 伝達関数, コーヒレンス関数 (2) 周波数レンジ 0~100kHz (3) サンプリング点数 1024
6. データ格納器	(1) フロッピーディスク 456 Mbites 20 Mbites
7. コントローラ	(1) Basic 及び FORTRAN ソフトウェア 一式 (2) メモリ 2Mbite (3) RS-232 ライン結合
8. その他付属品	(1) ラック

4. 改造計画

4.1 設計レビュー

4.1.1 調整設計の実施

概念設計Ⅱは概念設計Ⅰの成果を踏え実施したもので、核燃料施設としての機能は一定程度満足しているものの、大洗という特殊性を考慮した場合、種々の問題点を解決せねばならないことが解った。

又、施設概要が固ったことから、建設費用を他施設から類推した結果、大巾なコストダウンが必要であることが判明した。

(1) 大洗特有の問題点

- ① Puを大気排水とも放出した実績がなく地元を含めた合意が必要となる可能性がある。
- ② Pu取扱いの熟練者の確保が困難。
- ③ 未臨界度実験が主体であり、溶液の調整に人員を多く割当ることができない。
- ④ Puをバルクで管理する技術要員、体制ができていない。

等が揚げられる。調整設計の設計条件として以下の項目を付加し、建設費削減を最大目標に採用技術の見直しを含め、抜本的な見直しを行った。

- ① 排出する廃液は大洗の廃液処理施設（WDF及び原研廃液処理施設）の能力の範囲内であること。

なお、本条件野具体的数値は原研との協議により決定されるものであることから最も厳しい数値となった場合でも対応が可能でなければならない。

- ② 改造であることから放出に起因する被ばく線量が申請書上無視できる範囲内に留まること。
- ③ 少数の操作員で運転が可能であること。又、熟練を要する操作を極力減らすこと。この条件は処理能力の条件に優先する。
- ④ 操作の中断が容易な設備であること。
- ⑤ 全実験終了後、廃棄物の管理が容易な技術を採用すること。

(2) 対外協議等

調整設計と併行し、運開までに必要な諸協議について、検討若しくは協議を開始した。

- ① 地盤調査及び耐震設計（工建室、工務課）
 - ・必要最小限の調査、項目の決定
 - ・実施体制の確立
- ② Pu取扱いに係る保証措置上の問題点の摘出及び解決手順の決定（核管部、核センター）
- ③ 改造計画の米国、IAEAへの説明（米国、IAEA）

・合意に至るまでの作業内容分担の協議

- ④ 排出可能な排水仕様の決定 (WDF, 原研)
- ⑤ 大気放出に伴う被ばく評価の評価体制 (安対)

(3) 成果の概要

- 大洗でプルトニウムを非密封で大量に取扱うことに惹起する諸問題についてイオン交換法やマイクロ波加熱の積極的な利用等最深技術の導入により技術的な部分についての解決を図ることができた。
- 設備の共用や能力の削減, 新技術の採用により分析, 濃縮, 分離, 実験工程において大巾なコストダウンを図ることができた。
しかし, 概念設計Ⅱで指摘された不足分を追加したため, 結果的には小規模なコストダウンに留まっている。
- 炉心タンクの改造について1 m×1 mのテスト領域を設けた場合でも臨界にすることができることが判った。

成果としての一覧を次に示す。

小 項 目	調 整 設 計 成 果
試験領域構成要素分類	<ul style="list-style-type: none">◦ 実験の目的と装置の運用計画を考慮して、試験領域構成上の考え方を整理し、試験領域構成の具体的な提案をした。◦ 実験実施スケジュールを提案し、初期実施予定の物理試験工程における必要な試験体の仕様範囲を明確にした。
代表炉心の選定	<ul style="list-style-type: none">◦ 反応度事故解析上重要と考えられるパラメータを選定し、解析（炉心）モデルの候補を選定した。

小 項 目	調 整 設 計 成 果
全般 (合理化項目の提案)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 現在計画中的の実験が実施できるための基本条件を守れる限りの範囲で、次の観点を主に、可能な限りの合理化項目を洗い出した。 ① システムの単位機能で削除可能なものはないか。 ② 類似機能を有する機器の共用化は図れないか。 ③ 実験スケジュールを考慮して、適切な運用で合理化できないか。 <p style="text-align: center;">および</p> <ul style="list-style-type: none"> ④ 適切なプロセス、方式を採用しているか。 <p><具体化成果></p> <ul style="list-style-type: none"> ①項 実験系の槽類換気洗浄設備の洗浄塔削除 ②項 調整系の溶解槽と調整槽の共用 ③項 調整系の貯槽数見直し削除 ④項 <ul style="list-style-type: none"> ・イオン交換法の選定 ・PuCON容器でのMOX搬入 ・廃液処理設備プロセス最適化 ・実験系－調整系間の溶液移送を配管にて行う方式の選定

小 項 目	調 整 設 計 成 果
燃料溶液系実験装置	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 炉室内で燃料溶液を取扱う事に対し、以下の点について検討、および動燃内実績調査を行ない、系統設計に反映させた。 <ul style="list-style-type: none"> ① 炉室内のα汚染管理方法について、エリア区分、換気方法を検討し、適切な管理方法を具体化した。 ② グローブボックス内漏洩対策について、考え方を整理したうえで、概（Ⅱ）設計をレビューした。基本的には、概（Ⅱ）の妥当性確認。 ③ 溶液系内の洗浄方法や、実験スケジュールを考慮し、溶液供給タンク構成を見直した。具体的には、ダンプタンクと供給タンクを共用し、小タンク×2＋予備1とし、使い勝手を良くし、裕度も増した。 ◦ 合理化として、下記を実施 <ul style="list-style-type: none"> ① 槽類換気洗浄設備では、ミスト量、ミストセパレータ性能を具体的に評価し、洗浄塔削除可能との結論を得、合理化した。 ② 調整系との溶液移送で、容器／台車方式と配管方式を比較し、効率がよく、合理的な配管方式を選定した。 ③ その他、①、②項の成果を受け、炉室2FのG/Bを1Fに集約するなどの合理化を行った。 <p>* 配管方式は、液量の多い洗浄廃液の移送にも有効。</p>

小 項 目	調 整 設 計 成 果
燃料溶液調整・貯蔵設備及び付帯設備（出入れ工程）	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 本設備にMOXペレットを受入れるためのPUCON/A型輸送容器とTN-9121/A型輸送容器について受入設備の比較検討を行い、PUCON/A型輸送容器を選定した。これより、解体GBの削除が可能となった。輸送されたMOXペレット一次貯蔵施設を設けることにより、輸送計画の制限を緩和できた。
燃料溶液調整貯蔵設備及び付帯設備（溶液出入れ工程）	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 実験系への溶液の受払は配管移送する計画を受けて本工程は削除できた。
燃料溶液調整・貯蔵設備及び付帯設備（溶解工程）	<ul style="list-style-type: none"> ◦ PuO₂ 単体及び高富化度MOXの溶解について文献調査を行い、PuO₂ 単体及び高富化度MOXを溶解することのメリットは小さいことを確認した。 ◦ 溶解槽に燃料溶液の濃縮、希釈、混合等の調整機能を付加することにより、濃縮缶及び調整槽を削除できた。また、これにより、溶解槽は実験期間を通じて稼働する工程機器とすることとなる。

小 項 目	作 業 項 目	調 整 設 計 成 果
燃料溶液調整貯蔵設備および付帯設備（分離工程）	<ol style="list-style-type: none"> 1. 分離工程の選定 2. その他の検 3. 設備の具体 	<p>イオン交換法及び溶媒抽出法について長所・短所を検討し、プロセス選定書を作成し最終的にイオン交換法を選定した。</p> <p>上記選定プロセスについて、酸回収設備の付加の特典について検討し設置することとした。これにより、廃液量の削減が図られた。</p> <p>選定されたプロセス（イオン交換法）のプロセス設計・機器設計を行った。</p>
同 上 （その他の設備）	<ol style="list-style-type: none"> 1. 溶液燃料の貯槽検討 2. 粉末燃料の貯蔵の検討 3. 固化工程 	<p>溶液燃料の貯槽について実験スケジュールを考慮し貯蔵容量を検討し、基数及び容量の見直しを行った。</p> <p>実験終了後のPu燃料の貯蔵方法について粉末化貯蔵とし、必要スペースを確保した。</p> <p>分離工程でのイオン交換法選定により発生する1U含有廃液についても粉末化して暫定保管する方法の検討を行ない、固化工程設備を当初から設置することとした。これにより、液状での保管廃棄最小限にとどめるとともに最終的に固化する目途をつけることができた。</p>

小 項 目	作 業 項 目	調 整 設 計 成 果
燃料溶液調整貯蔵設備および付帯設備（廃棄物処理設備）	<ol style="list-style-type: none"> 1. 液体廃棄物処理設備の選定検討 2. 固体廃棄物の検討 3. 設備の具体化検討 	<p>凝集沈殿法，蒸発濃縮法，浸透膜法について比較検討し，蒸発濃縮法を選定した。</p> <p>蒸発濃縮法の選定により，処分の困難な2次廃棄物（スラッジ）の発生しないプロセスを構成できた。</p> <p>固体廃棄物の発生量を算定し，保管廃棄の方法について検討し，保管所要スペースを確定した。</p> <p>選定プロセス（蒸発濃縮工程，低レベル廃液処理工程）のプロセス設計・機器設計を行った。</p>
同 上 （その他の設備）	<ol style="list-style-type: none"> 1. 設備の見直し検討 	<p>分離工程及び廃棄物処理設備の見直し成果を含めてオフガス処理工程等の設備の見直し検討を行った。又，電気計装設備についても見直しの設備検討を行った。</p>

小 項 目	調 整 設 計 成 果
燃料溶液調整・貯蔵設備及び付帯設備（分析設備）	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 調整系及び実験系設備の見直しに伴い、分析設備設計の見直しを行い、スペース及び設備の簡素化が図られた。 ◦ 分析手順を詳細に検討し、合理的なGB配列を行うことにより、トンネルBOX方式を廃止し、スペース、設備の削減が達成できた。
モニター設備	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 設備の系統設計及び配置の見直しに伴う見直し。
配置、建屋換気設備、ユーティリティー、電気、計装設備	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 調整系等の設備設計の見直しに伴い、合理化を考慮して見直した。 ◦ 建屋換気は、可能と考えられる一部フィルターの削除等の合理化を行なった。 ◦ 増設建物内配置については、工程機器の合理化に伴う見直しを行なうとともに、概Ⅱ設計後に必要性を指摘された。出入り管理室、放管室、ランドリー設備、固廃保管、制御等、必要なスペースを確保しつつ、可能な限りの合理的配置とした。

小 項 目	調 整 設 計 成 果
安全に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 溶液取扱系の臨界安全管理について、臨界事故を想定しない設計が成立することに対し、下記手順で具体的に検討し、見通しを得た。 <ul style="list-style-type: none"> ① 臨界安全設計基準を想定する。 ② 通常時、異常時、事故時における未臨界性維持のロジックが主要工程機器について成立性があることを確認する。 ◦ 指針類適合性検討および安全審査補足説明リストの見直しを維持し、安全審査対応準備を進めた。 ◦ 平常時、事故時の放出量の算定方法について検討を行ない、必要な検討事項の洗いだしを行った。
計量管理に関する検討	<p>計量槽等の構成方法について文献調査し、DCAへの適用できる校正方法及び問題点について検討した。</p>

4.1.2 ウラン実験のための設備対応

(1) 概要

調整設計ではプルトニウム溶液を取扱う施設として設計が行われたが、実験計画の都合上、全施設完成前にウラン溶液による未臨界面度測定実験を実施する可能性もでてきた。

そこで最小限の費用と工事期間でかつ、プルトニウム溶液取扱い施設へ円滑に移行できるウラン溶液実験対応設備の検討を行った。

(2) 設計

設計条件として、

- ① 調整系建物は建設しない。
- ② 放射性廃液はDCA内で処理する。
- ③ 官庁検査、IAEAのPITの受験は操業後でも可能であること。

が揚げられ、対応策を以下とした。

- ① ウラン溶液貯槽を溶液供給槽と兼ねる。
- ② 廃液は中和沈殿法及びキレート樹脂吸着法により 10^{-8} μCi オーダー（一般排水レベル）まで除染する。

本設備は調整系の稼働後撤去する。

- ③ 溶液供給槽は検査が容易な平板型に変更する。

本設備で最大の課題はウラン含有廃液の処理であった。

蒸発濃縮法は確実に2次廃棄物を発生しないという点で有利であるがコスト、設置面積及び液体廃棄物の保管という欠点を有している。

凝縮沈殿法が安価であるが大量のスラッジ状の2次廃棄物を産する欠点を有している。

DCAは上記いずれも実現性に乏しいと判断、人形峠事業所環境資源開発部、転換技術開発課にキレート樹脂利用による廃液処理技術の採用の可能性について助言を仰いだ。同課では、実験にて中和沈殿法とキレート樹脂吸着を組み合わせることにより所定の目的は十分達成できると及び操作条件、必要容量、概略フローを決定し、DCAに報告した。

報告書を基に調整設計レベルのプロセスフローを作成、図4.1-1と表4.1-1にその結果を示す。

なお、本廃液処理工程においては塩の除去は不可能であり、排出量を希釈処理が可能な範囲に抑える必要がある。

表4.1-2 (1/2)

設置 室名	機器 番号	機器名称	基 数	形 式	概 略 寸 法	主要材料	耐 震 クラス	流体	圧 力		温 度		備 考
									設計	使用	設計	使用	
		河 津 受 槽	1	縦型円筒 円錐底	φ350×400H 30ℓ	塩ビ	C	塩	2	<1	60	20	
		中 和 槽	1	縦型円筒	φ600×600H 120ℓ	SUS	C						水冷ジャケットにて冷却 攪拌器付
		河 過 器	1	ガラス ファーパー フィルタ					5	2	60	20	
		キレート 樹脂塔	2	縦型円筒	φ160×600H 10ℓ	塩ビ	C	塩	5	2	60	20	20%臨界安全直径
		送 液 受 槽	1	定量ポンプ									
		廃 液 受 槽	1	縦型円筒	φ650×700H 150ℓ	FRP	C	塩		<1	40	20	
		ブース型フード	1		W 1,000 D 1,500 H 3,000	塩ビ	C						換気系あり

表4.1-2 (2/2)

設置 室名	機器 番号	機器名称	基 数	形 式	概 略 寸 法	主要材料	耐 震 クラス	流体	圧 力		温 度		備 考
									設計	使用	設計	使用	
		苛性ソーダヘッドタンク	1	角 型 式	□350×420H 36ℓ	塩ビ	C	NaOH	水頭	水頭	60	40	
		硝酸ヘッドタンク	1	豎型円筒	250A×350 10ℓ	SUS 304	C	HNO ₃	水頭	水頭	60	40	
		純水ヘッドタンク	1	角 型 式	□450×450H 80ℓ	FRP	C	水	水頭	水頭	60	20	
		沈 澱 槽	1	豎型円筒 円錐底	φ600×600H 120ℓ	SUS	C	HNO ₃ NaOH	3	<2	100	60	水冷ジャケットにて冷却 攪拌器付
		送液ポンプ	1	定量ポンプ		SUS	C	塩				40	
		汙 過 器	1	焼結SUS フィルタ	φ100×350H	SUS	C	塩	10	5	60	40	
		送液ポンプ	1	ダ イ ヤ フ ラ ム				塩	5	<1	60	40	

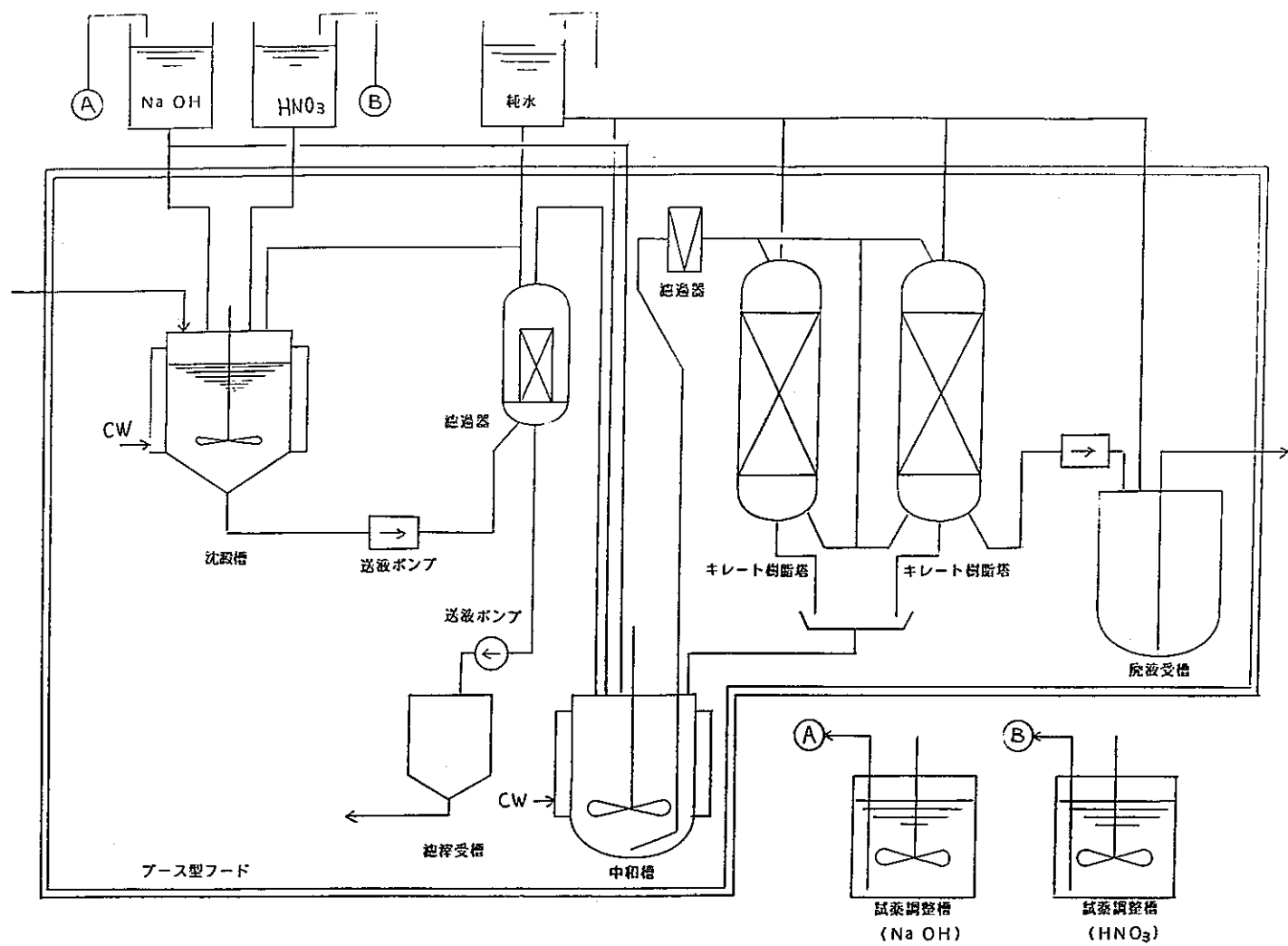


図4.1-1 低レベル廃液処理工程プロセスフローダイアグラム

4.2 炉心部改造計画

調整設計までに実施した炉心部改造設計の内容及び実験成立性の検討結果を以下に示す。

(1) 炉心部改造設計

炉心部の改造に当っては実験装置として持つべき機能（使用目的）と既設DCA装置の特徴に留意して表4.2-1に示す基本概念を設定した。

この基本概念に基づく炉心タンク廻りの構造を図4.2-1に示す。

炉心タンク廻りの構造設定上重要な実機模擬の多様性は次の3点の工夫によって得られる。

- ① 試験体単独で運転（臨界調整・炉停止）する必要がなく、反応度制御関連の拘束が少ない。試験体単独実験は、未臨界実験とする。
- ② 試験体系支持機構を基本的に構成要素配列型（グリッド）とし、水平方向模擬自由度を増大させる。
- ③ 下部支持板の半分を上下駆動可能とし、垂直方向の模擬自由度を増大させる。

最後に、試験燃料所要量の削減は、上記①の直接的な結果である。

なお、基本概念を設定するに当り調査した実験ニーズを表4.2-2に示す。

(2) 実験成立性

① 単一溶液タンクの臨界性検討

試験領域に設置される溶液タンク（円筒、板状、円環）に対し、

Pu溶液濃度は7～250 g/lについて

5% ²³⁵U濃縮度のU溶液濃度は100～450 g/lについて最適反射条件においても臨界安全基準をクリアするものとしてサーベイ計算を実施し概略寸法条件を得た。

② ドライバー領域単独での臨界性

試験体領域を空にした状態でドライバ領域単独で臨界 ($k_{eff} \approx 1.05$) に出来る条件を解析し（表4.2-3参照）配列ピッチ25cmでは不十分でDCA手持ちの最小ピッチ20cmでは条件を満足することを確認した。

③ 運転余裕の確認

最低濃度溶液の場合にも運転余裕が十分とれるかどうかを確認するため、UおよびPu溶液タンクを装荷したモデルで臨界性を計算（表4.2-4参照）し、最高レベルを200cm下げて全体系を臨界調整して運転することが可能という結果を得た。

④ 反応度制御特性

1) 重水レベルによる反応度調整

反応度制御条件が最も厳しくなると考えられる最大濃度 (250 g/l) のPu溶液の場合についてその反応度特性を検討 (表4.2-5) し、単位容量当りの添加率 ($\Delta \rho / l$) は常にレベルによる臨界調整の方が圧倒的に容易であることを明らかにした。

2) 制御棒挿入時の反応度効果

溶液タンクの中心軸方向に棒上の制御棒を挿入した場合の反応度効果を計算した。この結果、Cd棒の場合は炉停止に必要な $1 \$$ 以上を確認することが不可能である (図4.2-2) こと、Pu溶液の濃度が高い場合の溶液中のスペクトルは極めて硬く (図4.2-3及び4参照) 高速炉のそれに近づいているため、かかる体系の直接的制御には注意を要することが判った。

3) 可動グリッド落下による炉停止性

可動グリッド落下による炉停止 (落下による中性子漏洩の増大) は実効増倍率変化が極めて大きく (表4.2-4参照) 有効に機能するという結果を得た。

⑤ Pu所要量の検討

Pu所要量について検討した結果 (図4.2-5) 円環の 61.5 kg を除外すると全Pu-kg数は40で良いという結論を得た。

表4.2-1 未臨界度測定実証試験設備
〔基本概念〕

◇ 2大使用目的〔機能〕

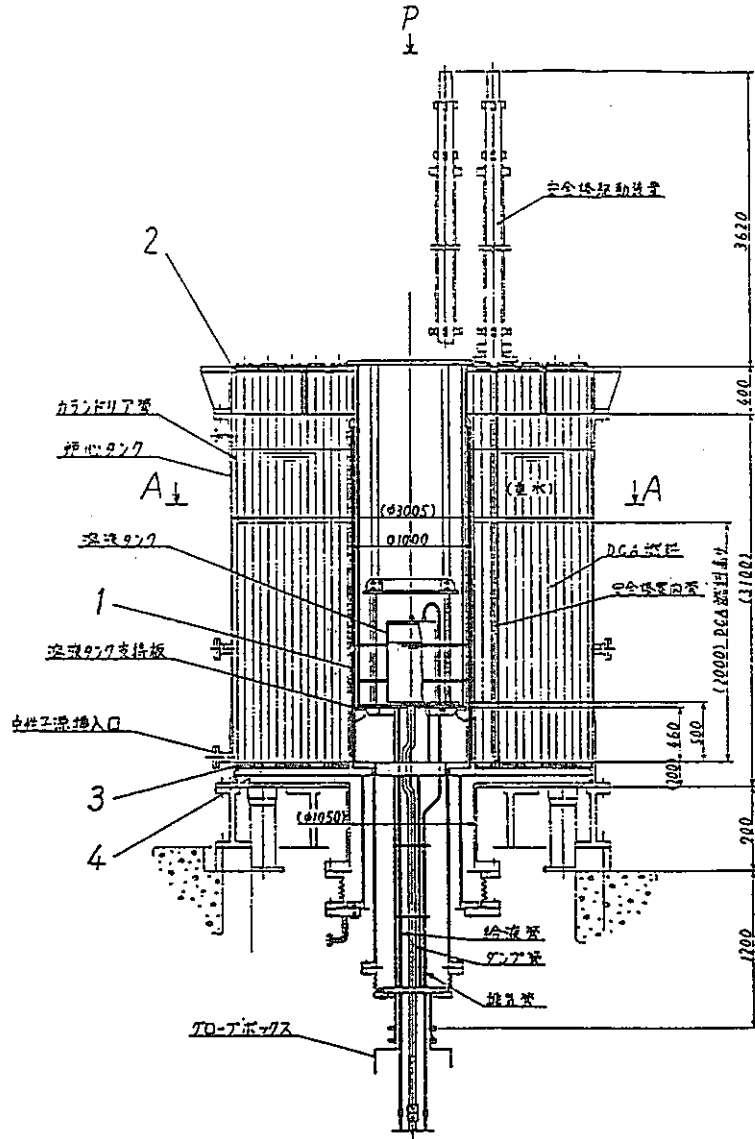
- | | |
|------------------|--|
| 1. 未臨界度測定装置の実証試験 | より現実的な実機模擬体系につき、未臨界度測定装置の性を検証あるいは実証する。 |
| 2. 安全裕度検証データの取得 | 過大な設計余裕を削除して実機設計合理化に資する未臨界度測定データを取得して、案安全裕度検証データとする。 |

◇ 4大特徴〔性能〕

- | | |
|--------------|--|
| 1. 実機模擬の多様性 | 溶液タンク系、タンク・干渉体系、燃料体配列系（有限・無限）、垂直方向干渉、最適減速体系、構成要素型模擬試験体系。 |
| 2. 運転の安定性 | ドライバ燃料* による運転が可能で、臨界調整・炉停止が容易。試験体単独実験は未臨界実験。 |
| 3. 広範囲未臨界度測定 | 試験体実験増倍率を、広範囲にわたり、平均した精度でのデータ取得が期待できる。** |
| 4. 燃料所要量の削減 | 反応度測定のための試験体単独で臨界にする必要はなく、試験燃料所要量が低減する。 |

* 既設DCA燃料の一部、反応度制御は、重水レベル調整による。

** DD実験の手法確立



部番	名称	個数	材質	備考
1	テストゾーンタンク	1	アルミニウム合金 ステンレス鋼	
2	上部グリッド板	1	アルミニウム合金	
3	下部グリッド板	1	.	
4	下部吸収体	1	.	

テストゾーン仕様
 傾斜寸法：約 01000 mm
 深さタンク最大寸法：約 870 mm (内筒タンク外径)
 燃料搭載レベル：DCA燃料干渉が 500 mm 以上 1500 mm 以下
 安全棒：テストゾーン中 1本 (約 800 mm 必要の場合)
 ドライバーゾーン 最大 4本

Pから見る

断面 A-A

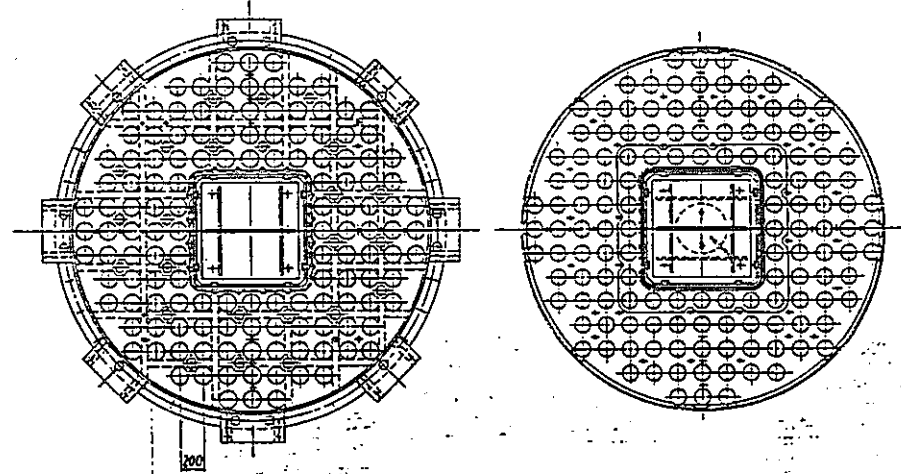


図4.2-1 炉心タンク廻り組立概念図 (I)

表4.2-2(1/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

Job No	工程 (機器) 名称	優先度	DCA本設備改造の概要	DCA本設備改造 (要 不要) (立面図)
(T) SL- (DD) - (P)	溶解槽			
実験目的	実験の分類	成果の反映先	追加装置・設備の概要	
⑤ 測定装置の実証 A. 臨界安全データの取得 B. 解析手法の検証 ⑥ 未臨界反応度特性の取得 D. 臨界反応度特性の取得 ⑦ 工学的モック・アップ実験	0. 反応度較正実験 1. 臨界実験 2. 臨界近接実験 ⑧ 未臨界実験	① 測定法上必要 ① パイロット・プラント ② 能力増強・実用化 3. 臨界管理方式の研究・開発		
期待する成果 (予測)	FBR, P.P, RETFに於ける溶解槽への未臨界度計の装着により, 溶解槽の臨界安全担保の方策の一助とする。 (模擬実験容器形状による未臨界度データ取得及び実機への測定装置の装着性)			
燃料形態の概略	被覆管+燃料ペレット+ (U+Pu) 硝酸溶液 (不溶解残渣)			
特記事項	・未臨界度計は, 再処理施設の溶解槽に装着できる寸法であること。及び信頼性が必要		(実験用燃料体) ・Annules : (Pu, U) 混合硝酸溶液燃料 ・Cylinder : 固形燃料 (ピンまたはピン格子, ペレット等) を含む水 (またはポリスチレン) の非均質体系。 (測定法; 手順) ・Cylinder部固定, Annules部溶液レベルをパラメータとする臨界近接実験および未臨界度測定。 ・未臨界度測定装置の配置検討。 (反応度制御系統) Tank実験系統 (安全系統) (同上) 実施上の課題 ・Cylinder部非均質体系の構成法。 ・AnnulesとCylinder部の燃料交換した実験も考えられる。	

表4.2-2(2/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

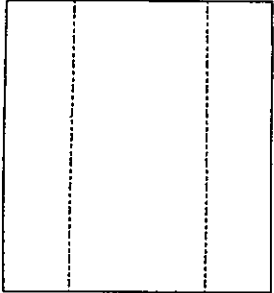
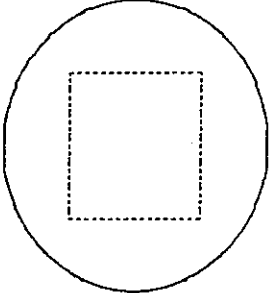
Job No	工程(機器)名称		優先度
	溶解槽		
実験目的	実験の分類	成果の反映先	
E. 測定装置の実証 ① 臨界安全データの取得 B. 解析手法の検証 ② 未臨界反応度特性の取得 D. 臨界反応度特性の取得 ③ 工学的モック・アップ実験	0. 反応度較正実験 1. 臨界実験 ② 臨界近接実験 ③ 未臨界実験	0. 測定法上必要 ① パイロット・プラント ② 能力増強・実用化 3. 臨界管理方式の研究・開発	
期待する成果 (予測)	溶解槽において、剪断時のランダムな配列を解析する場合、未臨界度測定手法により、溶解槽設計のためのモデル化の見直しを行い、方法論の検証、確認を行う。 (剪断片のランダム配列及び溶解槽内部品のモデル化の適応製)		DCA本設備改造の概要 追加装置・設備の概要 実施上の課題
燃料形態の概略	被覆管+燃料ペレット (不溶解残渣+ (U+Pu) 硝酸溶液)		
特記事項	補足：ペレットを含む非均質体系の解析モデル化の妥当性検証。		
DCA本設備改造 <input checked="" type="radio"/> 要 <input type="radio"/> 不要 以下 (P) 01に同じ。			
		(立面図) 	
		(断面図) 	
(実験用燃料体) (測定法;手順) (反応度制御系統) (安全系統)			

表4.2-2(3/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

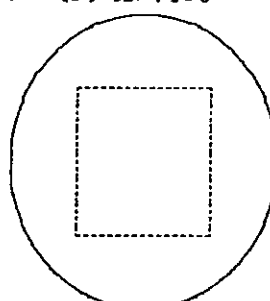
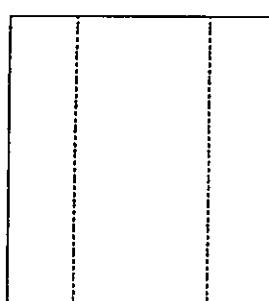
Job No	工程 (機器) 名称		優先度	DCA本設備改造の概要
	全般：硝酸系、酸化系ウラン同時受入槽			
実験目的	実験の分類	成果の反映先	DCA本設備改造 <input checked="" type="radio"/> 要 <input type="radio"/> 不要 以下 (P) 01に同じ。	
E. 測定装置の実証 ① 臨界安全データの取得 B. 解析手法の検証 C. 未臨界反応度特性の取得 D. 臨界反応度特性の取得 ○ 工学的モック・アップ実験	0. 反応度較正実験 1. 臨界実験 ② 臨界近接実験 ③ 未臨界実験	0. 測定法上必要 1. パイロット・プラント ② 能力増強・実用化 ③ 臨界管理方式の研究・開発	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  (断面図) </div> <div style="text-align: center;">  (立面図) </div> </div>	
期待する成果 (予測)	UNH とUO ₂ -H ₂ O の両方が入る槽においては、安全側のUO ₂ -H ₂ O で評価しているのが通常で、このため安全裕度が大。従って本データの取得により、安全裕度の取り方が検討し得る。			
燃料形態の概略			追加装置・設備の概要	
			(実験用燃料体)	
			(測定法；手順)	
			(反応度制御系統)	
			(安全系統)	
特記事項	補足：(Pu, U) O ₂ -H ₂ O 体系モデルの安全裕度の検証。		実施上の課題	

表4.2-2(4/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

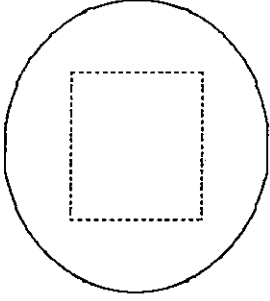
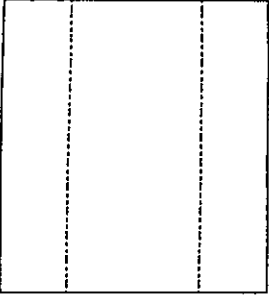
Job No	工程 (機器) 名称		優先度
	溶解工程 (溶解槽)		
実験目的	実験の分類	成果の反映先	
E. 測定装置の実証 A. 臨界安全データの取得 B. 解析手法の検証 C. 未臨界反応度特性の取得 D. 臨界反応度特性の取得 o 工学的モック・アップ実験	0. 反応度校正実験 1. 臨界実験 2. 臨界近接実験 3. 未臨界実験	0. 測定法上必要 1. パイロット・プラント 2. 能力増強・実用化 3. 臨界管理方式の研究・開発	
期待する成果 (予測)	溶解槽の未臨界度を直接測定する事により、溶解槽の臨界管理が可能である事を実証する。		DCA本設備改造の概要 追加装置・設備の概要 実施上の課題
燃料形態の概略	溶解槽の形式により異なる。 燃料ピンと溶解液の混合状態。		
特記事項	高レベルγ線、n線場での測定が必要。 燃料の溶解による溶解槽内の状態変化をシミュレートできる必要がある。		
DCA本設備改造 (要 不要)			
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>(断面図)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(立面図)</p> </div> </div>			
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">(実験用燃料体)</div> <div style="width: 45%;">(測定法; 手順)</div> </div>			
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">(反応度制御系統)</div> <div style="width: 45%;">(安全系統)</div> </div>			

表4.2-2(5/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

Job No	工程 (機器) 名称	優先度	DCA本設備改造 (要) 不要	
(A) S- (DD) - (P)	全般: 溶解系, 抽出系各機器			
実験目的	実験の分類	成果の反映先	DCA本設備改造の概要	
E. 測定装置の実証	① 反応度校正実験	① 測定法上必要		
A. 臨界安全データの取得	1. 臨界実験	1. パイロット・プラント		
② 解析手法の検証	② 臨界近接実験	2. 能力増強・実用化		
③ 未臨界反応度特性の取得	③ 未臨界実験	3. 臨界管理方式の研究・開発		
D. 臨界反応度特性の取得 o 工学的モック・アップ実験			追加装置・設備の概要	
期待する成果 (予測)	未臨界領域における内封溶液温度の反応度への影響		(実験用燃料体) 1. Annules : Pu-U混合硝酸溶液燃料 2. 加熱タンク: ガス・サイクル, 内部に燃料ピン集合体を装荷することも考えられる。 溶液平衡温度<約70℃	
燃料形態の概略	1. 溶解槽の温度 2. 溶解液受槽池 3. 抽出系 濃縮工程		(測定法; 手順) ・DD実験 : 溶液レベルは固定 ・ガス給熱システムによる温度変化 (常温→設定温度ステップ) 熱平衡確認後反応度測定 (各ステップ毎)	
			(反応度制御系統) Array - DD実験系統	
			(安全系統) (同上)	
特記事項			実施上の課題	

表4.2-2(6/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

Job No.	工程(機器)名称	優先度	DCA本設備改造の概要	
(A) PP-(SD) - (P)	U, Pu転換 加工工程の機器		DCA本設備改造 (要) 不要 (立面図)	
実験目的	実験の分類	成果の反映先		
E. 測定装置の実証 A. 臨界安全データの取得 B. 解析手法の検証 C. 未臨界反応度特性の取得 D. 臨界反応度特性の取得 o 工学的モック・アップ実験	0. 反応度校正実験 ① 臨界実験 ② 臨界近接実験 ③ 未臨界実験	0. 測定法上必要 1. パイロット・プラント ② 能力増強・実用化 ③ 臨界管理方式の研究・開発	<p>構成要素(物体)配置位置</p> <p>(断面図)</p> <p>(立面図)</p>	
期待する成果 (予測)	MOX粉末の臨界量, 形状管理方法 (MOX粉末の湿分を考慮)		追加装置・設備の概要	
燃料形態の概略	MOXの組成 ・U, Pu組成 ・U, Pu同位体		<p>(実験用燃料体) 構成要素 : 粉末燃料体 (同一形状) 円筒または直方体 粉末内湿分は, ポリスチレンにて模擬。 (0~5wt%)</p> <p>(測定法; 手順) ・可動側グリッドの上下駆動による臨界近接実験。 ・構成要素の配列と可動側グリッドの上下位置により燃料体および相互干渉体系を模擬する。</p> <p>(反応度制御系統) Array実験系統</p> <p>(安全系統) (同上)</p>	
特記事項	MOX粉末の気送等による工程間の輸送の高速化, 取扱い量の増大のため及び計算コード, ライブラリの検証, 中間保管のために臨界量及び相互干渉を調査する。		実施上の課題	

表4.2-2(7/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

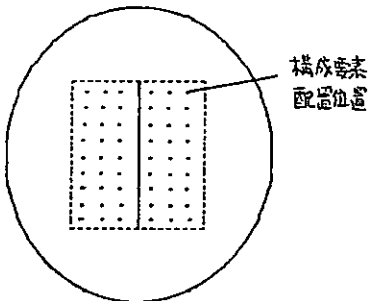
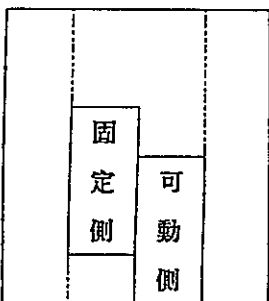
Job No	工程 (機器) 名称	優先度	DCA本設備改造の概要
(A) SP- (DD) - (P)	調整工程 (調整槽) 共除染・分配工程 Pu精製工程 (抽出器)		
実験目的	実験の分類	成果の反映先	
E. 測定装置の実証	0. 反応度校正実験	0. 測定法上必要	<p>DCA本設備改造の概要</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>DCA本設備改造 (要 不要)</p>  <p>断面図</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(立面図)</p>  </div> </div>
A. 臨界安全データの取得	1. 臨界実験	1. パイロット・プラント	
B. 解析手法の検証	2. 臨界近接実験	2. 能力増強・実用化	
C. 未臨界反応度特性の取得	3. 未臨界実験	3. 臨界管理方式の研究・開発	
D. 臨界反応度特性の取得			
o 工学的モック・アップ実験			
期待する成果 (予測)	* Puポリマの生成を未臨界度測定装置で監視できれば、硝酸供給系の硝酸濃度担保のためのシステムの簡略化が可能となる。		追加装置・設備の概要
燃料形態の概略	<p>(調整槽) EXXONでは濃度管理。 340g U/l, 3.1g Pu/l (ノミナル値)</p> <p>(抽出器) バルスカラム ・ EXXONのHCカラム <90g U/l, <1g Pu/l (共除染・分配工程) ・ EXXONの3Bカラム (Pu構築工程) <20g U/l 5°の円筒の形状管理</p>		<p>(実験用燃料体) 構成要素 : 定形溶液燃料体 粉体燃料体 形状 : 直方体</p> <p>(測定法; 手順)</p> <p>(反応度制御系統) Array実験系統</p> <p>(安全系統)</p>
特記事項	注) Puポリマの不均質分布		実施上の課題

表4.2-2(8/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

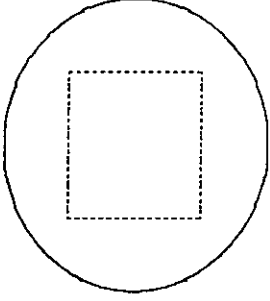
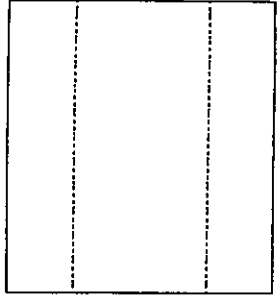
Job No	工程（機器）名称		優先度	DCA本設備改造の概要	
	Pu溶液を含むパルスカラム等の（長い）機器			DCA本設備改造の概要	
実験目的	実験の分類	成果の反映先		DCA本設備改造（要 不要）	（立面図）
E. 測定装置の実証 A. 臨界安全データの取得 B. 解析手法の検証 C. 未臨界反応度特性の取得 D. 臨界反応度特性の取得 o 工学的モック・アップ実験	0. 反応度校正実験 1. 臨界実験 2. 臨界近接実験 3. 未臨界実験	0. 測定法上必要 1. パイロット・プラント 2. 能力増強・実用化 3. 臨界管理方式の研究・開発		 断面図	 立面図
期待する成果（予測）	長さの長い機器等の内でPu濃度の不均一（極端な場合には下部でのPu重合物や、Pu固体の沈澱）がある場合にも、その状態に対応した未臨界度を測定しうることの実証。*		追加装置・設備の概要		
燃料形態の概略	均質 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$, $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 溶液			（実験用燃料体）	
				（測定法；手順）	
				（反応度制御系統）	
				（安全系統）	
特記事項	注] *一般的には非均質体系の測定例に含まれる。			実施上の課題	

表4.2-2(9/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

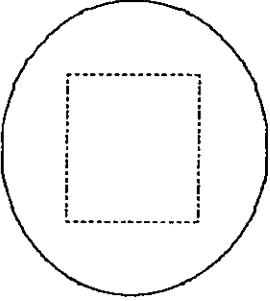
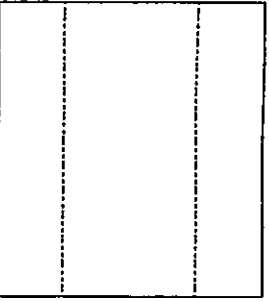
Job No	工程 (機器) 名称	優先度	DCA本設備改造の概要	DCA本設備改造 (要 不要)	(立面図)
	清澄工程 (遠心清澄機のスラッジの貯槽)				
実験目的	実験の分類	成果の反映先	追加装置・設備の概要	 <p>断面図</p>	
E. 測定装置の実証	0. 反応度校正実験	0. 測定法上必要			
A. 臨界安全データの取得	1. 臨界実験	1. パイロット・プラント			
B. 解析手法の検証	2. 臨界近接実験	2. 能力増強・実用化			
C. 未臨界反応度特性の取得	3. 未臨界実験	3. 臨界管理方式の研究・開発			
D. 臨界反応度特性の取得					
o 工学的モック・アップ実験					
期待する成果 (予測)	未臨界度測定装置により、スラッジ貯槽の臨界管理を行う事によりスラッジ貯槽の形状制御を緩和する。			(実験用燃料体)	
燃料形態の概略	Exxon PSARではSolid Catch Tankとして円環槽(1'1/2"厚 OD 12'0")になっている。臨界上はPu(NO ₃) ₄ 中にPuO ₂ が均質にまじった状態を仮定している。 不溶解残渣は、主にFP()とFP _{0x} であると言われているが、中にPuO ₂ 、UO ₂ が含まれる可能性が大きい。*		(測定法;手順)		
			(反応度制御系統)		
			(安全系統)		
特記事項	注) *スラッジ中のPuO ₂ 、UO ₂ を検出する問題。		実施上の課題		

表4.2-2(10/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

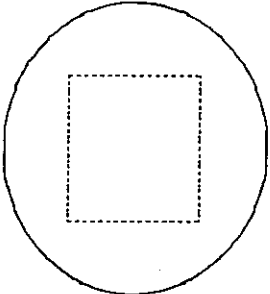
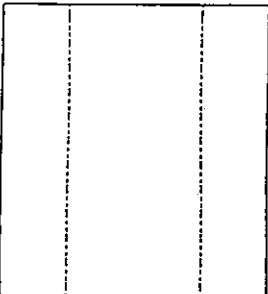
Job No	工程 (機器) 名称	優先度	DCA本設備改造 (要 不要)	
	溶媒再生, HAW処理, U精製工程入口部の受槽		DCA本設備改造の概要	
実験目的	実験の分類	成果の反映先	 <p>(断面図)</p>	 <p>(立面図)</p>
E. 測定装置の実証 A. 臨界安全データの取得 B. 解析手法の検証 C. 未臨界反応度特性の取得 D. 臨界反応度特性の取得 o 工学的モック・アップ実験	0. 反応度校正実験 1. 臨界実験 2. 臨界近接実験 3. 未臨界実験	0. 測定法上必要 1. パイロット・プラント 2. 能力増強・実用化 3. 臨界管理方式の研究・開発		
期待する成果 (予測)	溶媒再生, HAW処理, U精製工程入口にある一時受槽の臨界管理を未臨界度測定装置により担保する事により臨界安全設計の信頼性が向上する。		追加装置・設備の概要	
燃料形態の概略	溶媒再生, HAW処理工程では (U1-Pu)濃度は~0g/l U精製工程 (Exxon ICU デカンタ) では90g U/l 東海工場では質量管理されている。		(実験用燃料体) (測定法; 手順) (反応度制御系統) (安全系統)	
特記事項	HAW処理工程は高レベルγ線 n線場での測定が必要。		実施上の課題	

表4.2-2(11/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

Job No	工程 (機器) 名称	優先度	DCA本設備改造 (要) 不要	
(T) SA- (SD) - (P)	全般: 不溶性中性子毒の臨界安全データ			
実験目的	実験の分類	成果の反映先		
E. 測定装置の実証 ① 臨界安全データの取得 B. 解析手法の検証 C. 未臨界反応度特性の取得 D. 臨界反応度特性の取得 ② 工学的モック・アップ実験	0. 反応度較正実験 1. 臨界実験 ② 臨界近接実験 ③ 未臨界実験	0. 測定法上必要 1. パイロット・プラント 2. 能力増強・実用化 ③ 臨界管理方式の研究・開発	DCA本設備改造の概要 (断面図) 反射体 (ポリスチレン) ラシヒリング等を含む溶液燃料タンク (立面図)	
期待する成果 (予測)	ボロン入り, ラシヒリング等の不溶性中性子毒による臨界安全データの取得。(事故時評価解析) (例えば, 臨界事故時のドリフトレイでの臨界安全評価データに利用可能)		追加装置・設備の概要	
燃料形態の概略	U, U+Pu, Puの硝酸溶液		(実験用燃料体) ・NSE 50 127 (1973)* : Lloyd et alの実験に対応した内容で(Pu, U)混合硝酸溶液について実施する。 ・反射体: ポリスチレン (測定法; 手順) 溶液タンク内のレベルをパラメータとする。 臨界近接実験 (反応度制御系統) Tank実験系統 (安全系統) (同上)	
特記事項	不溶性中性子毒の臨界安全データは, 世界的に非公開であり, 詳細は不明。		実施上の課題 * Pu硝酸溶液の場合のみ。 * 可溶性Cd, Bなど	

表4.2-2(12/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

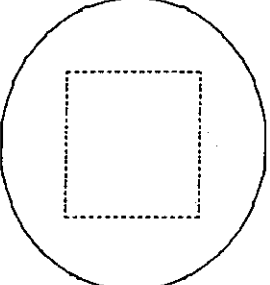
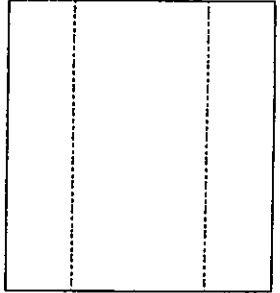
Job No	工程(機器)名称	優先度	DCA本設備改造の概要	DCA本設備改造 <input checked="" type="radio"/> 要 <input type="radio"/> 不要	(立面図)
() (00) - ()	全般: 臨界警報装置 (臨界事故検出器)				
実験目的	実験の分類	成果の反映先	DCA本設備改造の概要		
(E) 測定装置の実証 (A) 臨界安全データの取得 B. 解析手法の検証 C. 未臨界反応度特性の取得 D. 臨界反応度特性の取得 o 工学的モック・アップ実験	0. 反応度校正実験 ① 臨界実験 ② 臨界近接実験 ③ 未臨界実験	0. 測定法上必要 1. パイロット・プラント 2. 能力増強・実用化 ③ 臨界管理方式の研究・開発			
期待する成果 (予測)	(1) 中性子スペクトルを変化させた場合の検出器の応答 (エネルギー感度試験) しゃへい体効果 (2) 動的応答性 Spike (Peak Power: 高さ&巾), 総核分裂数		追加装置・設備の概要	(実験用燃料体) 任意: 他目的の実験体系を利用	
燃料形態の概略				(測定法; 手順) 任意(同上) "	
				(反応度制御系統)	
				(安全系統)	
特記事項	臨界 未臨界度検出器 (SCD) 臨界事故検出器 (CAD) ←—————→		実施上の課題	1) 急激 (パルス状) な時間応答は不可。	

表4.2-2(13/13) 未臨界度測定実証試験装置における実験項目 調査表

Job No	工程 (機器) 名称	優先度	DCA本設備改造の概要
(T) S- (SD) - (U)	全般: 反射容器の作成		
実験目的	実験の分類	成果の反映先	
E. 測定装置の実証 A. 臨界安全データの取得 ② 解析手法の検証 C. 未臨界反応度特性の取得 D. 臨界反応度特性の取得 o 工学的モック・アップ実験	0. 反応度校正実験 1. 臨界実験 ② 臨界近接実験 3. 未臨界実験	①. 測定法上必要 1. パイロット・プラント 2. 能力増強・実用化 3. 臨界管理方式の研究・開発	<p>DCA本設備改造 (要 不要) (立面図)</p>
期待する成果 (予測)	DD実験とSD実験体系間の中性子スペクトル相違と整合性の検証。 (反射容器内の減速材 (H ₂ O, D ₂ O, N ₂ ...) の有無による未臨界度の比較を行い, 解析手法, パラメータの影響について考察する。)		追加装置・設備の概要
燃料形態の概略			
特記事項	補足: DD実験およびSD実験手法のための予備実験 (?)		
			<p>(実験用燃料体) U溶液 (U+Pu溶液, Pu溶液) ①</p> <p>(測定法; 手順) (検討中)</p> <p>(反応度制御系統) Tank実験系統</p> <p>(安全系統) (同上)</p> <p>実施上の課題 ・反射容器内の減速材は, 体系外で充填することが望ましい。 — 安全上および設備簡略化のため。 1) U溶液ケースのみでよいのでは。</p>

表4.2-3 DCA燃料配列と実効増倍率の関係*

(keff)

DCA燃料配列			test 領域雰囲気 *密度 0.1 g/cm ³	test 領域雰囲気 *密度 1.0 g/cm ³
250 mm ピッチ	test 領域 5×5列	1列	0.7242	0.6917
		2列	0.8809	0.8634
		全装荷	0.9151	0.8953
	test 領域 3×3列	2列	0.9566	0.9203
200 mm ピッチ	test 領域 5×5列	2列	1.0499	1.0305
	全装荷		1.1305	1.1214

*溶液タンク無し。

重水液面レベル 200 cm

表4.2-4 低fissile燃料溶液装荷時の臨界性の確認

(Test 領域雰囲気 *密度 0.1 g/cm³)

実験体系	燃料溶液	実効増倍率 (keff)
DD-System*	φ 90cm U 100g/L	1.0301
	H120cm Pu 7g/L	1.0357
SD-System**	φ 90cm H120cm U 450g/L	1.0398

*DCA燃料ピッチ 200 mm (2列)

重水液面レベル 200 cm

**DCA燃料引抜き (200 mmピッチ空領域設定)

重水液面レベル 200 cm

表4.2-5 燃料溶液および重水レベルによる反応度調整

[Pu 250g/l 溶液円筒タンク]

体系 1)	調整液面	反応度添加率 2)
φ30cm DD-System	Pu 溶液面	$0.03 \% \Delta \rho / cm = 4 \times 10^{-2} \% \Delta \rho / l$
	重水液面	$0.2 \% \Delta \rho / cm = 4 \times 10^{-3} \% \Delta \rho / l$
φ90cm SD-System	Pu 溶液面	$1.2 \% \Delta \rho / cm = 6 \times 10^{-4} \% \Delta \rho / l$
	重水液面	$0.03 \% \Delta \rho / cm = 6 \times 10^{-4} \% \Delta \rho / l$

$$\Delta \rho = \Delta k / k k$$

注1) 体系パラメータ

(1) φ30 DD-System, $k_{eff} = 1.0$

溶液面 $H = 30cm$

重水レベル = 120cm

Test 領域界囲気水密度 $\rho = 0.1 g/cm^3$

(2) φ90 SD-System, $k_{eff} = 1.0$

溶液面 $H = 20cm$

重水レベル = 120cm

Test 領域界囲気水密度 $\rho = 0.1 g/cm^3$

注2) 現レベル±10cm液位を変更したときの反応度変化率より算定したものである。

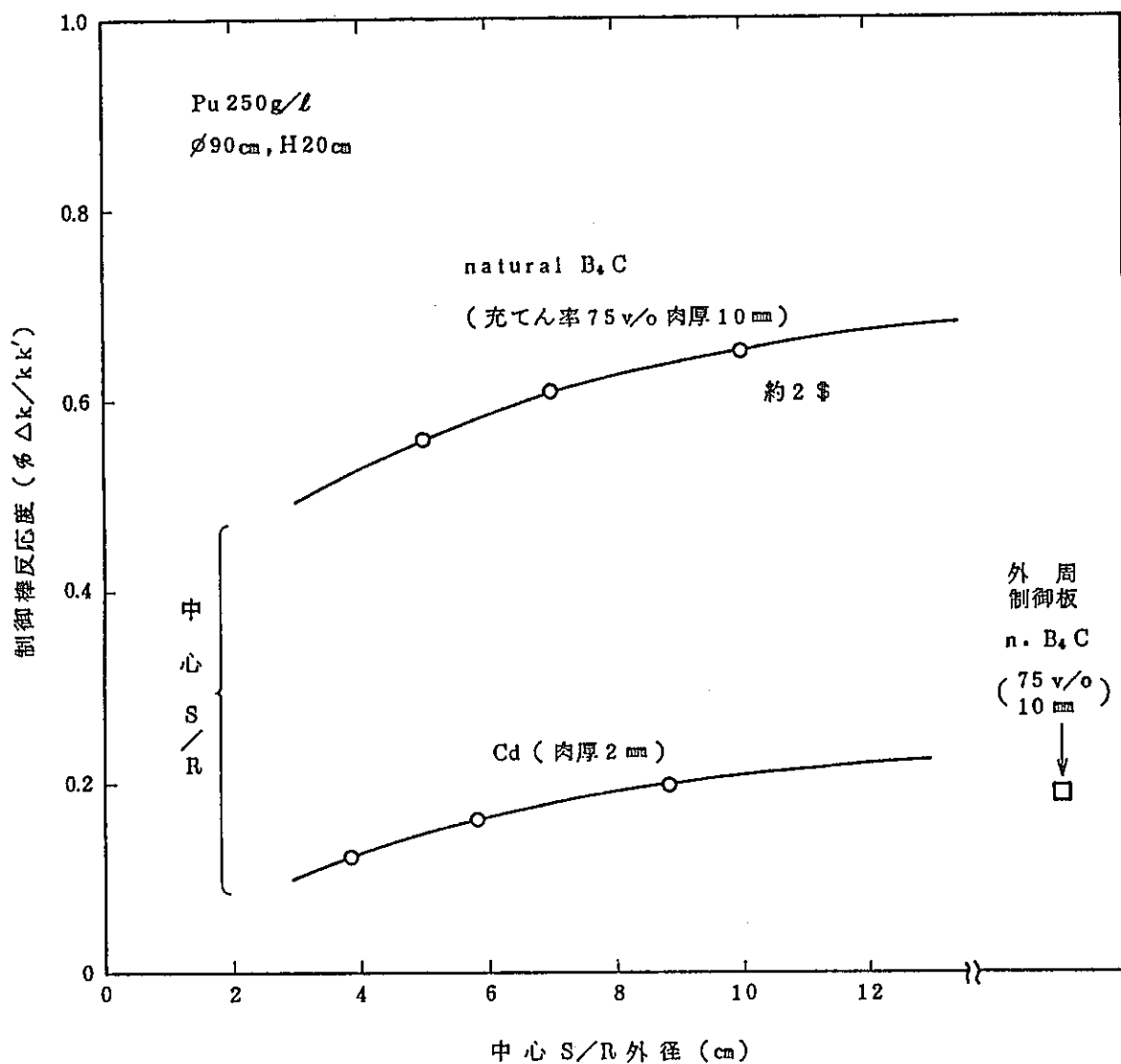


图4.2-2 SD-System中心S/R反应度

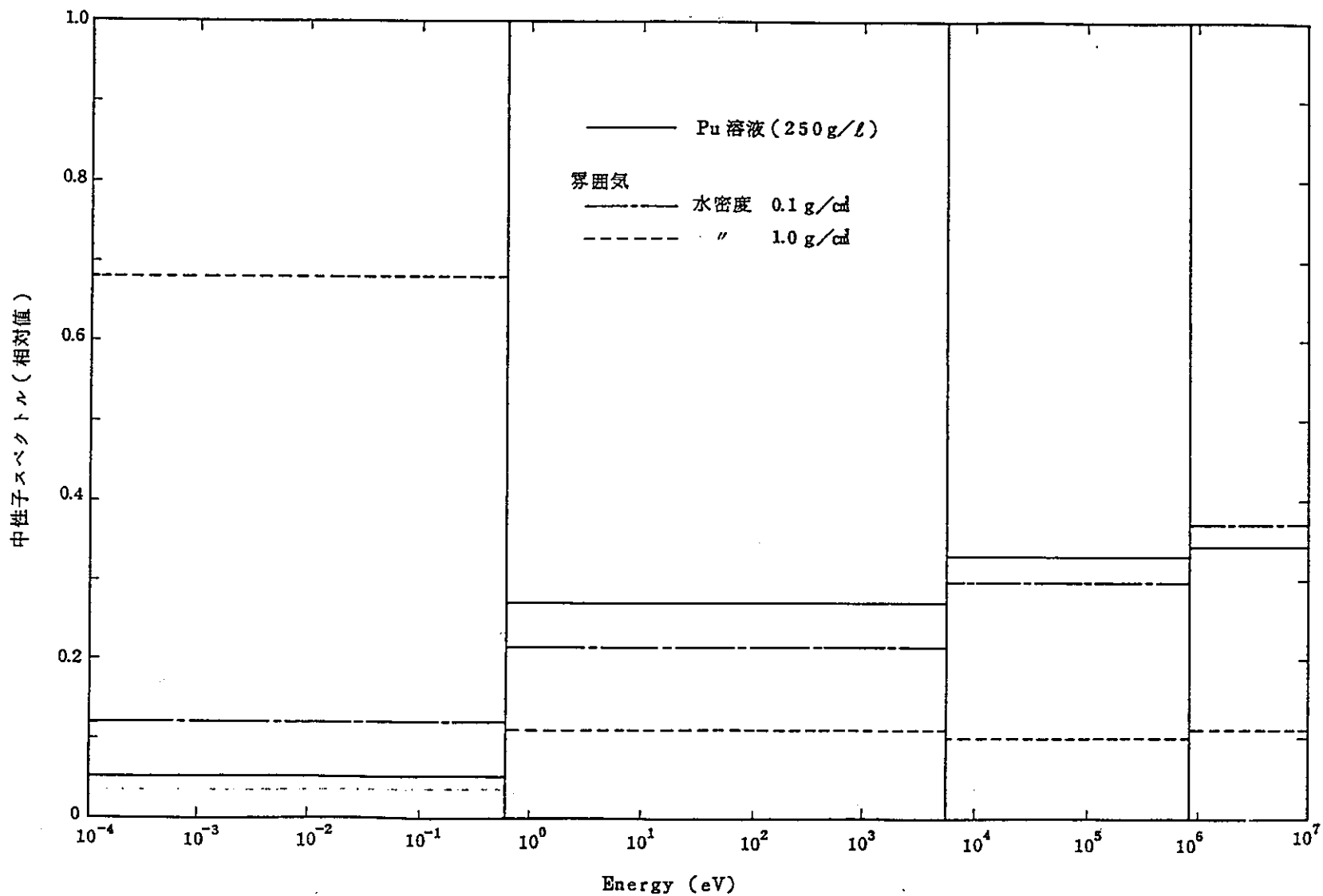


図4.2-3 Pu 溶液と霧囲気の中性子スペクトル [SD実験]

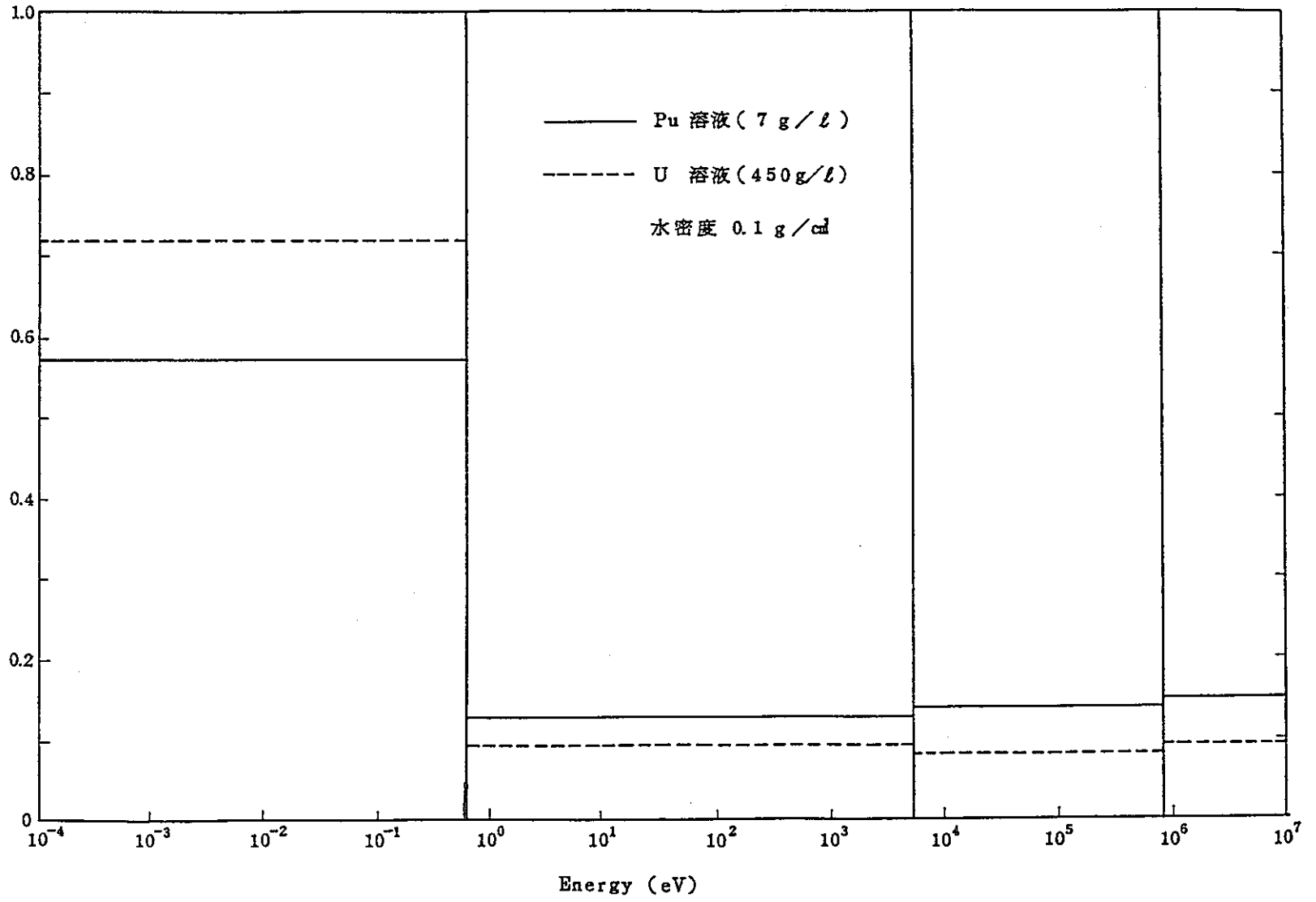
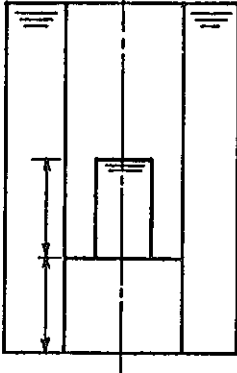
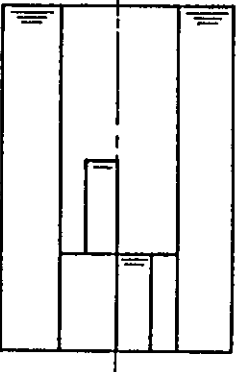
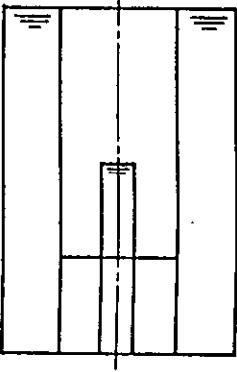


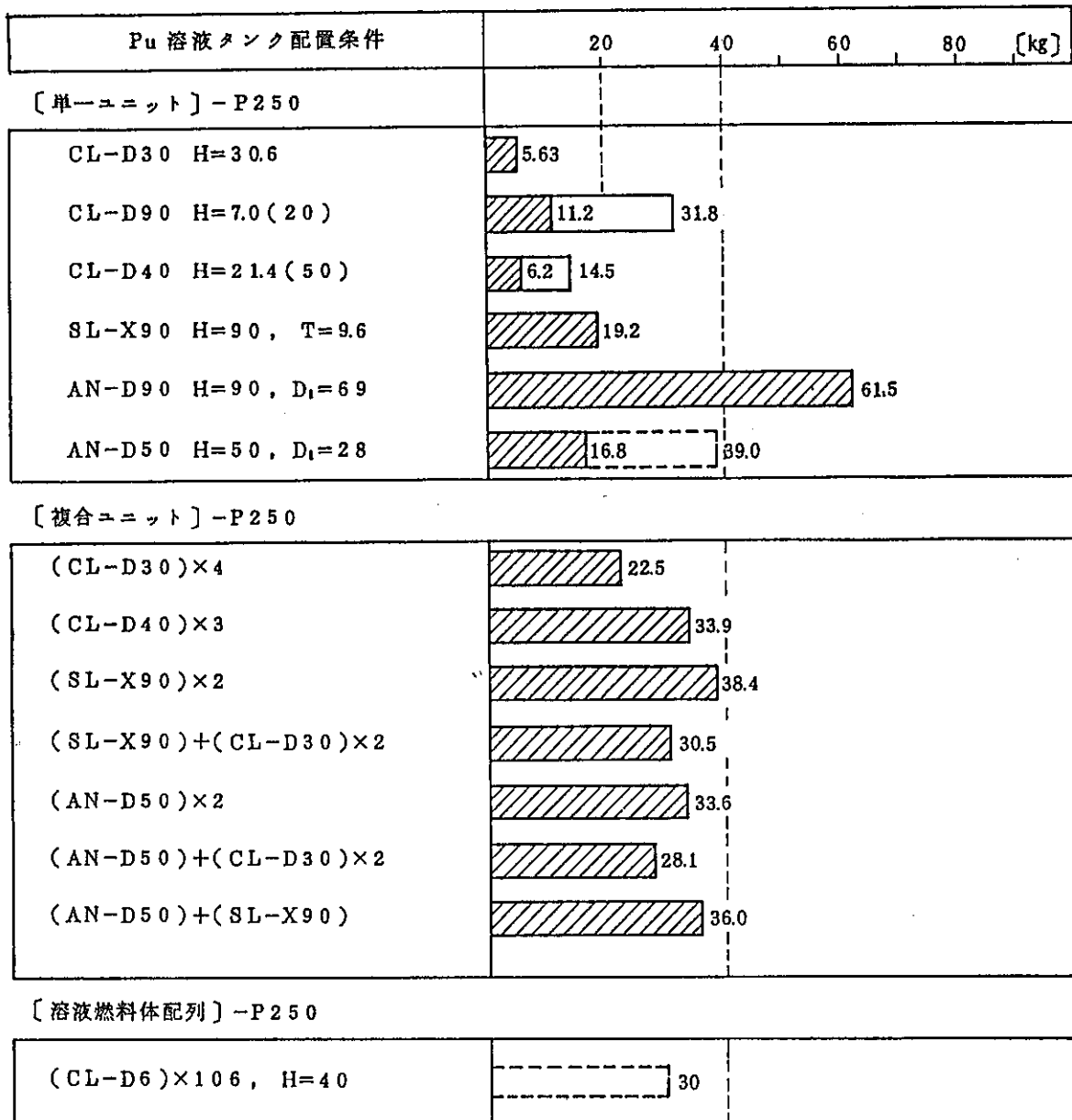
図4.2-4 低fissileの中性子スペクトル [DD実験]

図4.2-5 可動グリッド落下による炉停止

[Pu 250g/L SD-System]

体 系	燃 料 配 置	計 算 モ デ ル	実 効 増 倍 率
同一 レベルモデル		同 左 ($\phi 38.4\text{cm}$)	1.000
可動グリッド 下端モデル		 ($\phi 27.2\text{cm}$)	0.870

反 応 度 価 値	$15\% \Delta k / k k'$
-----------	------------------------




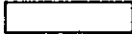
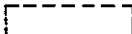
- 注1]  DD実験 $k_T = 0.95$ 達成
 SD実験 $k_{eff} = 1$ 達成 (但し重水有: 参考用)
 最大推定値
- 2] 複合ユニットの場合は, 単一ユニットの値を単純に加算した時の値である。

図4.2-6 Pu所要量の算定

5. あとがき

以上、昭和58年度から平成元年度までの成果と課題を示した。

これまでに得られた成果を要約すると次の通りである。

- (1) 2領域理論を応用した2つの実験式を検討し、未臨界度測定には水位反応度係数を用いた測定が十分可能であることがわかり、パルス中性子法との組合せにより、よい精度が得られる見通しを得た。
- (2) 日米共同臨界実験でミハルゾ法の原理的確認を行い、検出器配置の依存性、高次プルトニウム効果、複雑体系への適用性等の課題を明らかにした。
- (3) 既設重水臨界実験装置を活用した未臨界度測定試験施設の機能、設計条件、設計仕様、配置計画及び安全解析方針をまとめた。

6. 参 考 文 献

- (1) PNC ZN9410 89-173 FBR再処理に係わる日米共同臨界実験解析
- (2) PNC ZJ6603 87-001 プルトニウム燃料溶液中等の反応率実験解析
- (3) (DRAFT) CF-252 Source-Driven Measurement of Sub-criticality for a slab Tank
of Aqueous Pu-U Nitrate, (J.T.Mihalczko et al)
- (4) (DRAFT) Subcriticality Measurement by the CF-252 Source Driven Noise Analys
(J.T.Mihalczko) Jan. 4, 1989
- (5) PNC ZJ9068 87-002 未臨界度測定実証試験設備の概念設計
- (6) PNC ZJ2068 88-002 未臨界度測定実証試験設備の概念設計 (II)
- (7) PNC ZJ2068 89-001 未臨界度測定実証試験設備の調整設計
- (8) Theory of Coupled Reactors, R.Avery, 2nd Inter conf.on Peaceful uses of Atomic Energy (1958)