

JAERI - M  
92-158

円環炉心における中性子吸収体の反応度効果の測定

1992年11月

三好 慶典・柳沢 宏司・広瀬 秀幸  
中島 健・青木 功・須崎 武則

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。  
入手の問い合わせは、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、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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, 1992

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 (株)原子力資料サービス

円環炉心における中性子吸収体の反応度効果の測定

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部  
三好 慶典・柳沢 宏司<sup>+</sup>・広瀬 秀幸・中島 健  
青木 功<sup>++</sup>・須崎 武則

(1992年10月1日受理)

中央に中性子吸収体を配置した円環炉心に関する臨界実験を、原研の軽水臨界実験装置 (TC A) を用いて行った。中性子吸収体として装荷したのはアルミ円筒で囲まれたボロンカーバイド (B<sub>4</sub>C) 含有コンクリート模擬体またはアルミ円筒に入ったホウ酸水溶液である。直径とボロン含有率を主要なパラメータとして変化させ、各体系の臨界水位から水位法を用いてその反応度効果を求めた。本実験により、水の方が B<sub>4</sub>C を含まない普通コンクリートよりも中性子吸収効果が大きいこと、また、コンクリート中に 1 wt% 程度のボロンを含有させることでほぼ飽和値に近い吸収体効果を期待できることが分った。

Measurement of Reactivity Effect of Neutron  
Absorbers in an Annular Core

Yoshinori MIYOSHI, Hiroshi YANAGISAWA<sup>+</sup>, Hideyuki HIROSE  
Ken NAKAJIMA, Isao AOKI<sup>++</sup> and Takenori SUZAKI

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

(Received October 1, 1992)

Critical experiments for an annular core with fixed neutron absorbers in the central test region have been performed using the Tank-type Critical Assembly (TCA) at Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Either cylindrical concrete containing boron carbide surrounded by aluminum pipes or boric acid solution contained in an aluminum pipe was placed in the central region for various combinations of the diameters and poison concentrations. The reactivity effect of these absorbers were determined from the measured critical water levels using the water level worth method. It was found that water has larger absorber effect than the concrete without B<sub>4</sub>C, and that by containing about 1 w/o B<sub>4</sub>C in the concrete, almost of the saturated value of the absorber effect can be obtained.

Keywords: Neutron Absorber, Cylindrical Concrete, Boric Acid Solution, Annular Core, Critical Experiment, TCA Reactivity Effect

---

+ Office of NUCEF Project

++ Department of Fusion Facility, Naka Fusion Research Establishment

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 実験体系 .....	1
2.1 軽水臨界実験装置 .....	1
2.2 炉心構成 .....	2
2.3 試験領域装荷物 .....	2
3. 実験結果 .....	3
3.1 臨界水位 .....	3
3.2 反応度 .....	4
3.2.1 測定方法 .....	4
3.2.2 測定結果 .....	4
4. まとめ .....	5
謝 辞 .....	6
参考文献 .....	6

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental Core .....	1
2.1 Tank-type Critical Asembly .....	1
2.2 Core Configuration .....	2
2.3 Test Materials .....	2
3. Experimental Results .....	3
3.1 Critical Water Level .....	3
3.2 Reactivity Effect of Test Material .....	4
3.2.1 Measurement Method .....	4
3.2.2 Measurement Result .....	4
4. Summary .....	5
Acknowledgements .....	6
References .....	6

## 1. 序 論

再処理施設における硝酸プルトニウム溶液貯槽等には、円環形状の貯槽タンクがしばしば用いられる。これは円筒形状よりも円環形状の方が臨界体積が大きく、従って処理容量を大きくとれるためである。しかし円環形状機器は臨界設計上、他の円筒・平板形状の機器に比較して、臨界特性を決定するパラメータが多い<sup>1)</sup>。また、臨界解析コードのベンチマーク計算に有用な実験データが円筒体系等に較べると少ないのが現状である。従って、円環体系に関しては、1) 系統的なベンチマークデータの蓄積、2) 臨界安全設計上妥当なモデル化手法の確立、及び3) 円環領域の内部及び外部における中性子吸収体効果の確認等を行うことが臨界安全設計の合理化を図る上で重要である。

溶液燃料貯蔵用の円環形状タンクの臨界条件を決定する主要な因子には、同位体組成、濃度等の燃料条件、及び円環部の内径・厚さ、円環内筒部に配置するコンクリート、ポリエチレン、カドミウム板等の中性子吸収体条件がある。特に、円環内部に中性子遮蔽体を使用する場合には、燃料所用量を増大する上で、その反応度特性を明確にすることが必要であると考えられる。

本実験は、原研の軽水臨界実験装置(TCA)を用いて円環形状を模擬した炉心を構成し、円環内筒部に相当する炉心中央部の試験領域に、ボロンカーバイト含有コンクリート模擬体またはホウ酸水溶液を充填したアルミニウム管を装荷し、装荷物のボロン含有率を変化させて臨界水位を測定した。

円環模擬炉心は、2.6 w/o 濃縮  $UO_2$  燃料棒の正方格子配列により構成し、等価円環体系の内径及び外径は各々 20.7 cm, 59.4 cm である。円柱状コンクリート模擬体は、直径及びボロンカーバイト粉末の充填量によりボロン含有率を変化させた(最大 1.7 % B)。また、ホウ酸水溶液については、ボロン濃度を最大約 2000 ppm の範囲で実験を行った。試験領域の装荷物の反応度効果は、基準炉心の臨界水位と各炉心の臨界水位の差から、水位法を用いて測定した。

以下、2章で実験体系について記し、3章で主要な実験結果を示す。

## 2. 実験体系

### 2.1 軽水臨界実験装置

TCA (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スチール製の円筒形で、直径 1.8 m, 高さが 2.1 m である。炉心タンクの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ある<sup>2)</sup>。

## 1. 序 論

再処理施設における硝酸プルトニウム溶液貯槽等には、円環形状の貯槽タンクがしばしば用いられる。これは円筒形状よりも円環形状の方が臨界体積が大きく、従って処理容量を大きくとれるためである。しかし円環形状機器は臨界設計上、他の円筒・平板形状の機器に比較して、臨界特性を決定するパラメータが多い<sup>1)</sup>。また、臨界解析コードのベンチマーク計算に有用な実験データが円筒体系等に較べると少ないのが現状である。従って、円環体系に関しては、1) 系統的なベンチマークデータの蓄積、2) 臨界安全設計上妥当なモデル化手法の確立、及び3) 円環領域の内部及び外部における中性子吸収体効果の確認等を行うことが臨界安全設計の合理化を図る上で重要である。

溶液燃料貯蔵用の円環形状タンクの臨界条件を決定する主要な因子には、同位体組成、濃度等の燃料条件、及び円環部の内径・厚さ、円環内筒部に配置するコンクリート、ポリエチレン、カドミウム板等の中性子吸収体条件がある。特に、円環内部に中性子遮蔽体を使用する場合には、燃料所用量を増大する上で、その反応度特性を明確にすることが必要であると考えられる。

本実験は、原研の軽水臨界実験装置(TCA)を用いて円環形状を模擬した炉心を構成し、円環内筒部に相当する炉心中央部の試験領域に、ボロンカーバイト含有コンクリート模擬体またはホウ酸水溶液を充填したアルミニウム管を装荷し、装荷物のボロン含有率を変化させて臨界水位を測定した。

円環模擬炉心は、2.6 w/o濃縮  $UO_2$  燃料棒の正方格子配列により構成し、等価円環体系の内径及び外径は各々 20.7 cm, 59.4 cm である。円柱状コンクリート模擬体は、直径及びボロンカーバイト粉末の充填量によりボロン含有率を変化させた(最大 1.7 % B)。また、ホウ酸水溶液については、ボロン濃度を最大約 2000 ppm の範囲で実験を行った。試験領域の装荷物の反応度効果は、基準炉心の臨界水位と各炉心の臨界水位の差から、水位法を用いて測定した。

以下、2章で実験体系について記し、3章で主要な実験結果を示す。

## 2. 実験体系

### 2.1 軽水臨界実験装置

TCA (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スチール製の円筒形で、直径 1.8 m, 高さが 2.1 m である。炉心タンクの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ある<sup>2)</sup>。

燃料棒は炉心タンク上部から挿入し、炉心タンクに固定した上下の格子板によって支持する。濃縮度が、2.6 w/o の  $\text{UO}_2$  燃料棒の場合、上下格子板を変更することにより格子間隔を 1.849 から 2.293 cm まで範囲で、選択できる。格子間隔に対応する単位セルの減速材（水）対燃料体積比は 1.50 から 3.00 の範囲である。

臨界近接は、炉心タンク下部のダンプタンク（直径 2.1 m、高さ 2 m）から給水ポンプ（高速用、低速用の 2 系統）によって炉心タンク内の水位を上昇させることにより行う。制御棒は通常用いず、反応度は水位制御によるので、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。炉心水位は、炉心タンクと連結された管内の水位をサーボマンオメータで測定することにより得られる。水位計の最小目盛は 0.2 mm である。炉心タンク垂直断面図を Fig. 2.1.1 に示す。

## 2.2 炉心構成

実験に使用した燃料棒は、濃縮度 2.6 w/o  $\text{UO}_2$  燃料棒でペレット型（26PA）とスウェージ型（26SA）の 2 種類である。燃料棒の仕様を Table 2.2.1 及び Fig. 2.2.1 に示す。

燃料棒は単位セルが正方形である正方格子状に配列され、その格子間隔は 1.956 cm である。また対応する単位セルの水対燃料体積比は 1.83 である。

実験では、燃料棒を水平断面が円環形状になるように配列し、中央部に燃料要素 88 本分に相当する試験領域のある炉心を構成した。使用した燃料棒は 636 本で、面積等価直径は内径が 20.70 cm、外径が 59.39 cm である。燃料領域及び中央の試験領域の平断面積は、各々 2433.3  $\text{cm}^2$ 、336.7  $\text{cm}^2$  である。炉心は炉心タンクのほぼ中央に構成し、外周には 50 cm 以上の水反射体がある。また、燃料棒の有効部下端から炉心タンク底面の燃料支持板（ステンレス製）までの距離は 20 cm で、下部水反射体がある。炉心断面の概念図を Fig. 2.4.1 に示す。

## 2.3 試験領域装荷物

試験領域装荷物は、円柱状コンクリート模擬体と寸法の異なるアルミニウム円筒を組合せて使用した。円柱状コンクリート模擬体は、アルミニウム管にセメントを充填固化し、上端部をエポキシコーティングしたものである。ボロンの吸収体効果を調べるために、B<sub>2</sub>C 割合が 0 w/o、0.20 w/o、及び 2.2 w/o の 3 種類の組成のものを製作した。Table 2.3.1 に各試験体の寸法を示す。コンクリート模擬体は、各 B<sub>2</sub>C 含有率毎に円柱直径が異なる 3 体を製作し、試験領域に設置した支持用のアルミニウム管の内部に装荷した。コンクリート模擬体の化学組成を Table 2.3.2 に示す。コンクリート模擬体には砂利、砂等の骨材は含まれていない。

また、円柱状コンクリート模擬体の他に、アルミニウム円筒内部にホウ酸水溶液を充填した装荷物を使用した。試験領域の構成条件を Table 2.4.1 から Table 2.4.3 に示す。これらは、最外アルミ円筒がそれぞれ P3、P2、P1 になっている。また、試験体の断面を Fig. 2.4.2 及び Fig. 2.4.3 に示す。



### 3. 実験結果

#### 3.1 臨界水位

臨界水位（燃料有効部下端からの水位）の測定結果を Table 3.1.1 から Table 3.1.3 に示す。Fig. 3.1.1 は、アルミ円筒内がボイド（中空）である場合と水が充填されている場合の臨界水位の変化である。ここで、大中小のアルミ円筒（P3, P2, P1）を装荷し、（P3）、（P1, P3）、（P2, P3）及び（P1, P2, P3）を組合わせた。アルミ円筒のアルミ部の断面積は、各場合で 18.13 cm<sup>2</sup>、27.03 cm<sup>2</sup>、32.01 cm<sup>2</sup>、及び 40.91 cm<sup>2</sup> である。また、最大アルミ円筒（P3）内のボイド領域面積は、281.7 cm<sup>2</sup> である。アルミ円筒の内部がボイドである場合、最大アルミ円筒（P3）内にある中小アルミ円筒の効果は小さく、臨界水位の変化は 50.11 ～ 50.54 cm の範囲であった。

一方、アルミ円筒内に水がある場合の臨界水位は、66.54 cm から 68.21 cm の範囲で変化し、アルミ円筒のアルミ部断面積が増加するにつれて臨界水位はわずかであるが減少した。これは、中央試験領域の水がアルミ円筒により排除されるので、試験領域における中性子吸収が減少するためであると考えられる。

また、アルミ円筒の内部がボイドである場合と水である場合を比較すると、ボイドの方の臨界水位が約 17 cm 低い。これは、比較的偏平な体系（臨界水位が 50 cm）でも、水の充填により中性子吸収を増大させる効果の方が、ボイド領域における鉛直方向の中性子漏洩を減少させる効果より大きいことを示している。

最大アルミ円筒内に装荷した円柱状コンクリート模擬体、水充填アルミ円筒の直径に対する臨界水位の変化を Fig. 3.1.2 に示す。各装荷物とも直径が大きいほど臨界水位は高く、ボロンカーバイトを含まないコンクリート模擬体（C1A, C2A, C3A）の臨界水位は水の場合に比べて低い。また、ボロンカーバイトを含むコンクリート模擬体では、B<sub>2</sub>C 含有率が 0.20 w/o（C1B, C2B, C3B）及び 2.6 w/o（C1C, C2C, C3C）のいずれの場合も水の場合に比べて高くなった。このことから、ボロンカーバイトを含まない普通コンクリート模擬体の中性子吸収効果は水よりも小さく、炉心燃料領域に対する中性子遮蔽効果は弱いことが分かる。最大アルミ円筒内に円柱状コンクリート模擬体、及びホウ酸水溶液を充填した場合のボロン含有率と臨界水位との関係を Fig. 3.1.3 に示す。円柱状コンクリート模擬体の場合は、コンクリート部直径（コンクリート充填用アルミ管内径）をパラメータとしている。各円柱直径における臨界水位の変化範囲は、49.93 ～ 62.53 cm（C1A, C1B, C1C）、52.40 ～ 87.17 cm（C2A, C2B, C2C）、及び 56.75 ～ 145.18 cm（C3A, C3B, C3C）であった。また、ホウ酸水溶液を最大アルミ円筒（P3）に充填した時の臨界水位は、68.21 cm から 123.54 cm の範囲で単調な増加傾向を示した。

## 3.2 反応度

### 3.2.1 測定方法

各炉心の臨界水位の変化から、試験体の反応度効果を修正一群理論に基づく(3.1)式を用いて測定した。

$$\rho = A/2 \cdot \{1/(H_c + \lambda)^2 - 1/(H_{co} + \lambda)^2\} \quad (3.1)$$

ここで  $\rho$  : 反応度 (cent)

$H_{co}$  : 基準炉心の臨界水位 (cm)

$H_c$  : 炉心の臨界水位 (cm)

$\lambda$  : 鉛直方向の反射体節約 (cm)

$A$  : 炉心鉛直方向のバックリング変化と反応度の換算係数 (cent・cm<sup>2</sup>)

(3.1) 式中の  $\lambda$  は、矩形炉心における鉛直方向の出力分布を cosine フィットングすることにより測定されており、 $12.2 \pm 0.3$  cm である<sup>1)</sup>。反応度換算係数  $A$  は  $(8.63 \pm 0.09) \times 10^6$  (cent・cm<sup>2</sup>) である。この値は、試験領域にコンクリート模擬体及びホウ酸水溶液を含む体系(25 ケース)の臨界水位と微分水位反応度の測定結果に対して最小二乗法により(3.2)式にフィッティングすることにより求めた。

微分水位反応度の測定値及びフィッティング結果を Fig. 3.2.1 に示す。また、微分水位反応度  $d\rho/dH$  の測定値とフィッティング値との差を Fig. 3.2.2 に示す。微分水位反応度の測定値とフィッティング値の差は最大  $0.2$  cent/mm である。なお実効遅発中性子割合  $\beta_{eff}$  には、計算値を用い  $0.007478$  とした<sup>2)</sup>。

$$d\rho/dH_{co} = A/(H_{co} + \lambda)^3 \quad (\text{cent/cm}) \quad (3.2)$$

### 3.2.2 測定結果

炉心中央の試験領域の装荷物の反応度効果を、P3、P2、及びP1のアルミ円筒を用いた体系について各々 Table 3.1.1 から Table 3.1.3 に示す。Table 中の反応度は、各アルミ円筒の内部がボイドである体系を基準としている。Fig. 3.2.3 は、最大アルミ円筒内(P3)が中空である場合と、水を充填した場合の中小アルミ円筒の反応度効果である。最大アルミ円筒内がボイドである場合、ボイド領域(面積  $281.7$  cm<sup>2</sup>)内にアルミ材にして約 10% の面積を占めるアルミ円筒がある場合でも、反応度変化は  $0.1\% \Delta K/K$  以下であった。

また、アルミ円筒内に水がある場合には、中小のアルミ円筒により水が置換されるので、反応度はアルミ円筒のアルミ部断面積が増加するにつれて反応度は約  $0.2\% \Delta K/K$  増加した。また、各アルミ円筒を組合せた体系において、ボイド領域に水を充填することによる反応度は、 $-2.8\% \Delta K/K$  から  $-2.5\% \Delta K/K$  の範囲で、水充填領域の断面積が大きいほど反応度は減少した。中央ボイド領域が小さい体系では、垂直方向の中性子漏洩による反応度減少は少なく、アルミ円筒内部が水で充填された場合には、中性子吸収により円環状の燃料領域間の相互干渉効果が抑制され、負の効果が現れたと考えられる。

最大アルミ円筒内にコンクリート模擬体及び水を充填したアルミ円筒を設置した場合について、吸収体直径に対する反応度変化を Fig. 3.2.4 に示す。コンクリート模擬体の場合、 $B_4C$  含有率に依らずに吸収体直径の増大に伴い、体系の反応度は減少し、 $B_4C$  を含まないコンクリート模擬体 (C1A, C2A, C3A) の反応度は、 $0.14 \sim -2.13 \% \Delta K/K$  であり、 $-0.20 \sim -2.82 \% \Delta K/K$  の水に比べて常に高い。また、 $B_4C$  を含むコンクリート模擬体に関しては、その含有率が  $0.20 \text{ w/o}$  (C1B, C2B, C3B) の場合  $-0.41 \sim -4.34 \% \Delta K/K$ 、 $2.2 \text{ w/o}$  (C1C, C2C, C3C) の場合で  $-1.24 \sim -6.06 \% \Delta K/K$  であった。いずれも水よりも強い吸収効果を示した。このことから、 $B_4C$  を含まない普通コンクリート模擬体は、同一直径の水よりも中性子吸収効果が小さく、円環炉心部間の中性子遮蔽効果は弱いことが分る。円柱状コンクリート模擬体及びホウ酸水溶液充填アルミ円筒について、ボロン含有率と反応度との関係を Fig. 3.2.5 から Fig. 3.2.7 に示す。円柱状コンクリート模擬体の場合は、コンクリート部直径 (コンクリート充填用アルミ管内径) をパラメータとしている。各コンクリート部直径において、反応度のボロン含有率に伴う変化は、 $0.14 \sim 1.24 \% \Delta K/K$  (C1A, C1B, C1C)、 $-0.96 \sim -4.38 \% \Delta K/K$  (C2A, C2B, C2C) 及び  $-2.13 \sim -6.06 \% \Delta K/K$  (C3A, C3B, C3C) の範囲であった。いずれの場合もボロン含有率  $0.16 \text{ w/o}$  は、反応度効果の飽和値に近い傾向を示した (Fig. 3.2.5)。また、最大アルミ円筒 (P3) にホウ酸水溶液を充填した場合、反応度は  $-3.04 \% \Delta K/K$  から  $-5.67 \% \Delta K/K$  の範囲で単調に減少した (Fig. 3.2.6)。Fig. 3.2.7 は、直径の異なる円柱状コンクリート及びホウ酸水溶液に関し、ボロンの添加に伴う反応度変化を示している。ここでは、ボロンを含まない試験体が各々装荷された場合を反応度の基準にしている。コンクリートの場合は、円柱直径が増加するに伴い、ボロン添加による負の反応度効果は増加している。また、試験体直径が同一でコンクリートと水を比較すると、コンクリートの方が水に比べてわずかであるがボロン添加による反応度効果が大きい。

#### 4. ま と め

本実験は、円環状に燃料棒を配列して円環模擬炉心を構成し、炉心中央の試験領域に水、ボロン水溶液、コンクリート、ボロン入りコンクリートを装荷した体系について、臨界量及び吸収体反応度のベンチマークデータを蓄積した。主要な結論を以下に示す。

- (1) 円環内筒が 20 cm の中性子漏洩が少ない体系では、中央のボイド領域に設置した装荷物は、円環状の燃料領域間の相互干渉効果を抑制する吸収体として働き、負の反応度効果を有した。
- (2) 装荷物としてコンクリートと水の場合を比較すると、水の方が  $B_4C$  を含まない普通コンクリートよりも中性子吸収効果が大きい。また、 $B_4C$  を中性子吸収体としてコンクリートに含有させると、含有率が  $0.3 \text{ w/o}$  程度で水よりも大きい中性子吸収体効果を持たせることができる。また、反応度効果としては、コンクリート中に  $1 \text{ w/o}$  程度のボロンを含有させることでほぼ飽和値に近い効果を期待できる。
- (3) 反応度効果のボロン含有率依存性は、水とコンクリートの間に顕著な相違は認められなかつ

最大アルミ円筒内にコンクリート模擬体及び水を充填したアルミ円筒を設置した場合について、吸収体直径に対する反応度変化を Fig. 3.2.4 に示す。コンクリート模擬体の場合、 $B_4C$  含有率に依らずに吸収体直径の増大に伴い、体系の反応度は減少し、 $B_4C$  を含まないコンクリート模擬体 (C1A, C2A, C3A) の反応度は、 $0.14 \sim -2.13 \% \Delta K/K$  であり、 $-0.20 \sim -2.82 \% \Delta K/K$  の水に比べて常に高い。また、 $B_4C$  を含むコンクリート模擬体に関しては、その含有率が  $0.20 \text{ w/o}$  (C1B, C2B, C3B) の場合  $-0.41 \sim -4.34 \% \Delta K/K$ 、 $2.2 \text{ w/o}$  (C1C, C2C, C3C) の場合で  $-1.24 \sim -6.06 \% \Delta K/K$  であった。いずれも水よりも強い吸収効果を示した。このことから、 $B_4C$  を含まない普通コンクリート模擬体は、同一直径の水よりも中性子吸収効果が小さく、円環炉心部間の中性子遮蔽効果は弱いことが分る。円柱状コンクリート模擬体及びホウ酸水溶液充填アルミ円筒について、ボロン含有率と反応度との関係を Fig. 3.2.5 から Fig. 3.2.7 に示す。円柱状コンクリート模擬体の場合は、コンクリート部直径 (コンクリート充填用アルミ管内径) をパラメータとしている。各コンクリート部直径において、反応度のボロン含有率に伴う変化は、 $0.14 \sim 1.24 \% \Delta K/K$  (C1A, C1B, C1C)、 $-0.96 \sim -4.38 \% \Delta K/K$  (C2A, C2B, C2C) 及び  $-2.13 \sim -6.06 \% \Delta K/K$  (C3A, C3B, C3C) の範囲であった。いずれの場合もボロン含有率  $0.16 \text{ w/o}$  は、反応度効果の飽和値に近い傾向を示した (Fig. 3.2.5)。また、最大アルミ円筒 (P3) にホウ酸水溶液を充填した場合、反応度は  $-3.04 \% \Delta K/K$  から  $-5.67 \% \Delta K/K$  の範囲で単調に減少した (Fig. 3.2.6)。Fig. 3.2.7 は、直径の異なる円柱状コンクリート及びホウ酸水溶液に関し、ボロンの添加に伴う反応度変化を示している。ここでは、ボロンを含まない試験体が各々装荷された場合を反応度の基準にしている。コンクリートの場合は、円柱直径が増加するに伴い、ボロン添加による負の反応度効果は増加している。また、試験体直径が同一でコンクリートと水を比較すると、コンクリートの方が水に比べてわずかであるがボロン添加による反応度効果が大きい。

#### 4. ま と め

本実験は、円環状に燃料棒を配列して円環模擬炉心を構成し、炉心中央の試験領域に水、ボロン水溶液、コンクリート、ボロン入りコンクリートを装荷した体系について、臨界量及び吸収体反応度のベンチマークデータを蓄積した。主要な結論を以下に示す。

- (1) 円環内筒が 20 cm の中性子漏洩が少ない体系では、中央のボイド領域に設置した装荷物は、円環状の燃料領域間の相互干渉効果を抑制する吸収体として働き、負の反応度効果を有した。
- (2) 装荷物としてコンクリートと水の場合を比較すると、水の方が  $B_4C$  を含まない普通コンクリートよりも中性子吸収効果が大きい。また、 $B_4C$  を中性子吸収体としてコンクリートに含有させると、含有率が  $0.3 \text{ w/o}$  程度で水よりも大きい中性子吸収体効果を持たせることができる。また、反応度効果としては、コンクリート中に  $1 \text{ w/o}$  程度のボロンを含有させることでほぼ飽和値に近い効果を期待できる。
- (3) 反応度効果のボロン含有率依存性は、水とコンクリートの間に顕著な相違は認められなかつ

た。今回の体系で、円環炉心中央のボイド部全体を装荷物により充填した場合、水、コンクリート共にボロン含有率が0.2w/oで、約3%  $\Delta K/K$  の負の反応度効果を示した。今後は本実験体系をベンチマークデータとして臨界計算コードの検証計算を行うと共に、円環体系の臨界条件を決定する主要なパラメータの特性について検討を行う予定である。

## 謝 辞

本実験で使用した中性子吸収体の成分分析をしていただいた化学部分析センターの樋田 行雄氏、及びデータの整理に御助力いただいた石川 利光氏に感謝致します。また、実験を進めるにあたり、種々の有益な助言をいただいた小林 岩夫 燃料安全工学部長、及び実験遂行に終始御協力いただいた新田 一雄氏に深く謝意を表します。また、懇切丁寧な査読をして下さった核燃料施設安全評価研究室の奥野 浩氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) KITANO, T., et al., "Criticality Safety of the Cylindrical Annular Tanks of NUCEF", Vol. 2 [89], ICNC '91 (1991)
- (2) TSURUTA, H., et al., "Critical Sizes of Light-Water Moderated  $UO_2$  and  $PuO_2-UO_2$  Lattices", JAERI-1254 (1978)

た。今回の体系で、円環炉心中央のボイド部全体を装荷物により充填した場合、水、コンクリート共にボロン含有率が0.2w/oで、約3%  $\Delta K/K$  の負の反応度効果を示した。今後は本実験体系をベンチマークデータとして臨界計算コードの検証計算を行うと共に、円環体系の臨界条件を決定する主要なパラメータの特性について検討を行う予定である。

## 謝 辞

本実験で使用した中性子吸収体の成分分析をしていただいた化学部分析センターの樋田 行雄氏、及びデータの整理に御助力いただいた石川利光氏に感謝致します。また、実験を進めるにあたり、種々の有益な助言をいただいた小林 岩夫 燃料安全工学部長、及び実験遂行に終始御協力いただいた新田 一雄氏に深く謝意を表します。また、懇切丁寧な査読をして下さった核燃料施設安全評価研究室の奥野 浩氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) KITANO, T., et al., "Criticality Safety of the Cylindrical Annular Tanks of NUCEF", Vol. 2 [89], ICNC '91 (1991)
- (2) TSURUTA, H., et al., "Critical Sizes of Light-Water Moderated  $UO_2$  and  $PuO_2-UO_2$  Lattices", JAERI-1254 (1978)

た。今回の体系で、円環炉中央のボイド部全体を装荷物により充填した場合、水、コンクリート共にボロン含有率が0.2 w/oで、約3%  $\Delta K/K$  の負の反応度効果を示した。今後は本実験体系をベンチマークデータとして臨界計算コードの検証計算を行うと共に、円環体系の臨界条件を決定する主要なパラメータの特性について検討を行う予定である。

## 謝 辞

本実験で使用した中性子吸収体の成分分析をしていただいた化学部分析センターの 樋田 行雄氏、及びデータの整理に御助力いただいた石川利光氏に感謝致します。また、実験を進めるにあたり、種々の有益な助言をいただいた小林岩夫 燃料安全工学部長、及び実験遂行に終始御協力いただいた新田一雄氏に深く謝意を表します。また、懇切丁寧な査読をして下さった核燃料施設安全評価研究室の奥野浩氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) KITANO, T., et al., "Criticality Safety of the Cylindrical Annular Tanks of NUCEF", Vol. 2 [89], ICNC '91 (1991)
- (2) TSURUTA, H., et al., "Critical Sizes of Light-Water Moderated  $UO_2$  and  $PuO_2-UO_2$  Lattices", JAERI-1254 (1978)

Table 2.2.1 Specifications of fuel rods

Item	Pellet type	Swage type
Enrichment $^{235}\text{U}$ $^{238}\text{U}$	2.596 w/o 97.404 w/o	2.580 w/o 97.420 w/o
Fuel type	$\text{UO}_2$ Pellet Diameter 12.5 mm Density 10.40 g/cm <sup>3</sup> Height 12.7 mm	$\text{UO}_2$ Powder Density 10.06 g/cm <sup>3</sup>
Cladding Material  Inner diameter Thickness	Aluminum alloy AA6061-T6 14.17 mm 0.76 mm	Aluminum alloy AA6061-T6 14.17 mm 0.71 mm
Loading $\text{UO}_2$ $^{235}\text{U}$	1840g/rod 42.0 g/rod	1842g/rod 41.9 g/rod
Fuel effective length	1441 mm	1441 mm



Table 2.3.1 Dimension of aluminum pipe and cylindrical concrete

Test material	Dimension (mm)	Name
Aluminum pipe	Outer diameter 97.4 Thickness 3.0 Height 1695	P1
	Outer diameter 153.4 Thickness 3.0 Height 1695	P2
	Outer diameter 195.4 Thickness 3.0 Height 1695	P3
Cylindrical concrete (cement)	Diameter 74 Height 1600	C1A
	Al cladding	C1B
	Outer diameter 80 Thickness 3	C1C
	Diameter 130 Height 1600	C2A
	Al cladding	C2B
	Outer diameter 140 Thickness 5	C2C
	Diameter 170 Height 1600	C3A
	Al cladding	C3B
	Outer diameter 180 Thickness 5	C3C

Table 2.3.2 Chemical content of cylindrical concrete

Chemical component (w/o)	C1A, C2A, C3A	C1B, C2B, C3B	C1C, C2C, C3C
SiO <sub>2</sub>	16.44	16.11	15.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.52	4.34	4.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.14	2.15	2.03
CaO	47.12	46.63	44.27
MgO	1.43	1.42	1.46
SO <sub>3</sub>	2.28	2.26	2.19
B <sub>4</sub> C	--	0.20	2.20
ig-loss	13.44	13.00	11.13
Water	11.02	2.02	2.00
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.04	2.02	2.00

Table 2.4.1 Condition of test material (The outermost aluminum pipe is P3)

Case	Condition of test region				
	Material	Area S(cm <sup>2</sup> )			
		Aluminum	Void	Concrete	Water
1-1	P3	18.13	281.74	0.0	0.0
1-2	P3 P1	27.03	272.84	0.0	0.0
1-3	P3 P2	32.01	267.86	0.0	0.0
1-4	P3 P2 P1	40.91	258.96	0.0	0.0
2-1	P3(Water)	18.13	0.0	0.0	281.74
2-2	P3(Water) P1(Water)	27.03	0.0	0.0	272.88
2-3	P3(Water) P2(Water)	32.01	0.0	0.0	267.86
2-4	P3(Water) P2(Water) P1(Water)	40.91	0.0	0.0	258.96
3-1	P3(H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> :53ppmB)	18.13	0.0	0.0	281.74
3-2	P3(H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> :103ppmB)	18.13	0.0	0.0	281.74
3-3	P3(H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> :227ppmB)	18.13	0.0	0.0	281.74
3-4	P3(H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> :504ppmB)	18.13	0.0	0.0	281.74
3-5	P3(H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> :510ppmB)	18.13	0.0	0.0	281.74
3-6	P3(H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> :953ppmB)	18.13	0.0	0.0	281.74
3-7	P3(H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> :2113ppmB)	18.13	0.0	0.0	281.74
4-1	P3 P1 C1A	34.29	222.57	43.01	0.0
4-2	P3 P1 C1B	34.29	222.57	43.01	0.0
4-3	P3 P1 C1C	34.29	222.57	43.01	0.0
4-4	P3 P2 C2A	53.22	113.92	132.73	0.0
4-5	P3 P2 C2B	53.22	113.92	132.73	0.0
4-6	P3 P2 C2C	53.22	113.92	132.73	0.0
4-7	P3 C3A	45.61	27.28	226.98	0.0
4-8	P3 C3B	45.61	27.28	226.98	0.0
4-9	P3 C3C	45.61	27.28	226.98	0.0
5-1	P3 P1(Water)	27.03	207.23	0.0	65.62
5-2	P3(Water) P1	27.20	65.62	0.0	207.23
5-3	P3 P2(Water)	32.01	96.92	0.0	170.64
5-4	P3(Water) P2	32.01	170.64	0.0	96.92
5-5	P3 P2 P1(Water)	40.91	193.35	0.0	65.62
5-6	P3 P2(Water) P1	40.91	162.54	0.0	96.13
5-7	P3(Water) P2 P1	40.91	161.75	0.0	96.92
0	-----	0.0	0.0	0.0	299.87

Table 2.4.2 Condition of test material (The outermost aluminum pipe is P2)

Case	Condition of test region				
	Material	Area S(cm <sup>2</sup> )			
		Aluminum	Void	Concrete	Water
6-1	P2	13.88	170.64	0.0	0.0
7-1	P2 P1	22.78	161.74	0.0	0.0
8-1	P2(Water)	13.88	0.0	0.0	170.64
8-2	P2(Water) P1(Water)	22.78	0.0	0.0	161.74
9-1	P2 P1 C1A	30.04	111.47	43.01	0.0
9-2	P2 P1 C1B	30.04	111.47	43.01	0.0
9-3	P2 P1 C1C	30.04	111.47	43.01	0.0
9-4	P2 C2A	35.09	16.70	132.73	0.0
9-5	P2 C2B	35.09	16.70	132.73	0.0
9-6	P2 C2C	35.09	16.70	132.73	0.0
10-1	P2 P1(Water)	22.78	96.13	0.0	65.62
10-2	P2(Water) P1	22.78	65.62	0.0	96.13

Table 2.4.3 Condition of test material (The outermost aluminum pipe is P1)

Case	Condition of test region				
	Material	Area S(cm <sup>2</sup> )			
		Aluminum	Void	Concrete	Water
11-1	P1	8.90	65.62	0.0	0.0
12-2	P1(Water)	8.90	0.0	0.0	65.62
13-1	P1 C1A	16.16	15.35	43.01	0.0
13-2	P1 C1B	16.16	15.35	43.01	0.0
13-3	P1 C1C	16.16	15.35	43.01	0.0

Table 3.1.1 Critical water level of core and reactivity effect of test material (The outermost aluminum pipe is P3)

Case	Temp. (°C)	Critical water level Hc(cm)	Differential reactivity (cent/mm)	Reactivity (%ΔK/K)	Run No.
1-1	20.90	50.54	3.83±0.10	0.00	7887
1-2	22.49	50.20	4.05±0.09	0.08	7915
1-3	22.38	50.23	4.02±0.03	0.07	7912
1-4	22.82	50.11	4.09±0.16	0.10	7927
2-1	22.93	68.21	1.62±0.06	-2.82	7933
2-2	22.59	67.80	1.63±0.05	-2.77	7918
2-3	22.62	67.40	1.64±0.05	-2.73	7920
2-4	22.83	66.54	1.71±0.04	-2.63	7925
3-1	22.93	70.26	1.47±0.03	-3.04	7934
3-2	22.92	72.34	1.37±0.04	-3.24	7935
3-3	22.91	76.10	1.21±0.02	-3.57	7936
3-4	22.93	85.75	0.89±0.02	-4.25	7938
3-5	22.92	86.00	0.91±0.02	-4.27	7937
3-6	22.94	97.88	0.62±0.02	-4.87	7939
3-7	22.98	123.54	0.33±0.01	-5.67	7940
4-1	21.28	49.93	3.81±0.02	0.14	7900
4-2	21.22	55.21	3.01±0.04	-0.96	7899
4-3	21.12	62.53	2.20±0.02	-2.13	7898
4-4	21.35	52.40	3.24±0.08	-0.41	7903
4-5	21.38	67.39	1.74±0.03	-2.73	7904
4-6	22.29	87.17	0.90±0.01	-4.34	7911
4-7	21.33	56.75	2.52±0.03	-1.24	7902
4-8	20.73	87.91	0.87±0.02	-4.38	7885
4-9	20.40	145.18	0.11±0.00	-6.06	7882
5-1	22.41	50.89	3.55±0.05	-0.08	7914
5-2	22.57	60.79	2.06±0.04	-1.88	7917
5-3	22.40	58.40	2.48±0.05	-1.52	7913
5-4	22.60	50.13	3.70±0.15	0.10	7919
5-5	22.74	51.42	3.55±0.04	-0.20	7922
5-6	22.81	51.06	3.44±0.15	-0.12	7923
5-7	22.82	50.45	3.52±0.12	0.02	7924
0-0	20.65	70.70	1.41±0.03	-3.08	7884

Table 3.1.2 Critical water level of core and reactivity effect of test material (The outermost aluminum pipe is P2)

Case	Temp. (°C)	Critical water level Hc(cm)	Differential reactivity (cent/mm)	Reactivity (% $\Delta$ K/K)	Run No.
6-1	21.18	52.15	3.26 $\pm$ 0.06	-0.36	7894
6-1	22.88	51.79	3.32 $\pm$ 0.04	-0.28	7943
7-1	22.80	51.96	3.26 $\pm$ 0.04	-0.31	7928
8-1	22.88	68.20	3.32 $\pm$ 0.04	-2.82	7944
8-2	22.90	67.85	1.60 $\pm$ 0.03	-2.78	7931
9-1	21.19	54.34	2.88 $\pm$ 0.06	-0.80	7895
9-2	21.21	59.94	2.23 $\pm$ 0.03	-1.76	7896
9-3	21.22	65.48	1.78 $\pm$ 0.03	-2.51	7897
9-4	21.16	60.84	2.07 $\pm$ 0.06	-1.89	7893
9-5	21.06	73.62	1.29 $\pm$ 0.02	-3.36	7892
9-6	20.86	83.97	0.89 $\pm$ 0.01	-4.14	7886
10-1	22.89	57.31	2.47 $\pm$ 0.01	-1.34	7930
10-2	22.90	60.89	2.09 $\pm$ 0.01	-1.90	7932

Table 3.1.3 Critical water level of core and reactivity effect of test material (The outermost aluminum pipe is P1)

Case	Temp. (°C)	Critical water level Hc(cm)	Differential reactivity (cent/mm)	Reactivity (% $\Delta$ K/K)	Run No.
11-1	20.96	62.63	2.01 $\pm$ 0.02	-2.14	7888
12-1	22.90	67.54	1.60 $\pm$ 0.01	-2.75	7942
13-1	21.00	66.18	1.72 $\pm$ 0.32	-2.59	7889
13-2	21.03	69.93	1.48 $\pm$ 0.01	-3.00	7890
13-3	21.05	72.24	1.36 $\pm$ 0.03	-3.23	7891

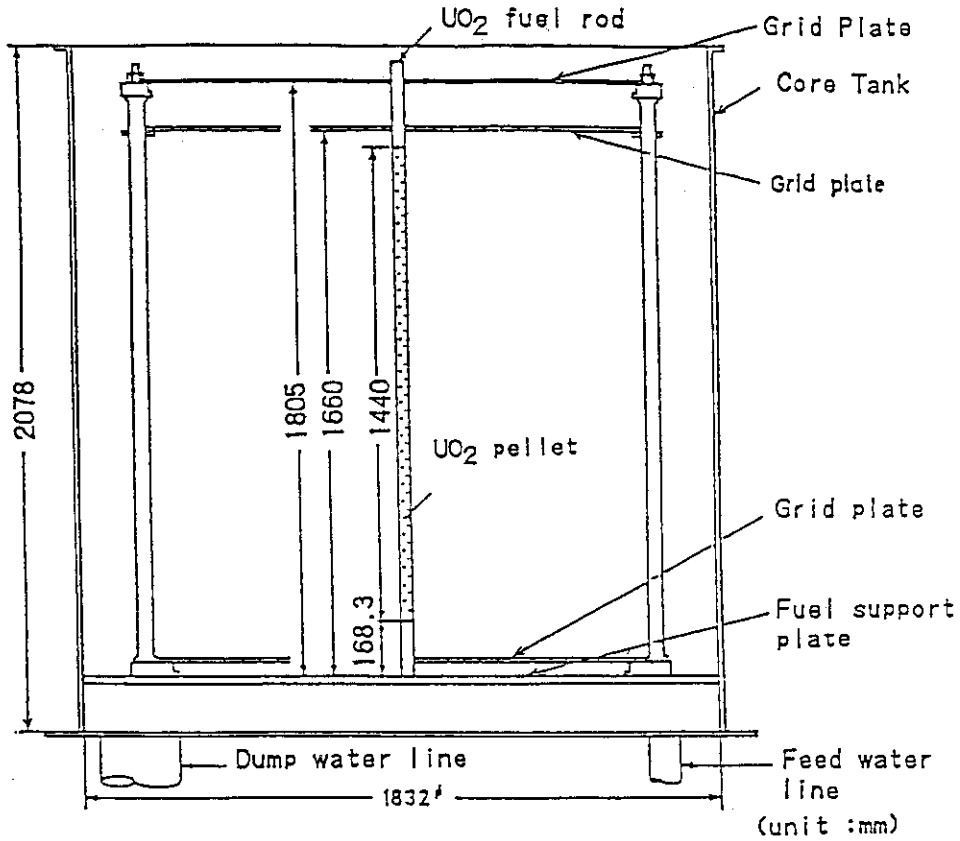


Fig. 2.1.1 Vertical cross sectional view of TCA

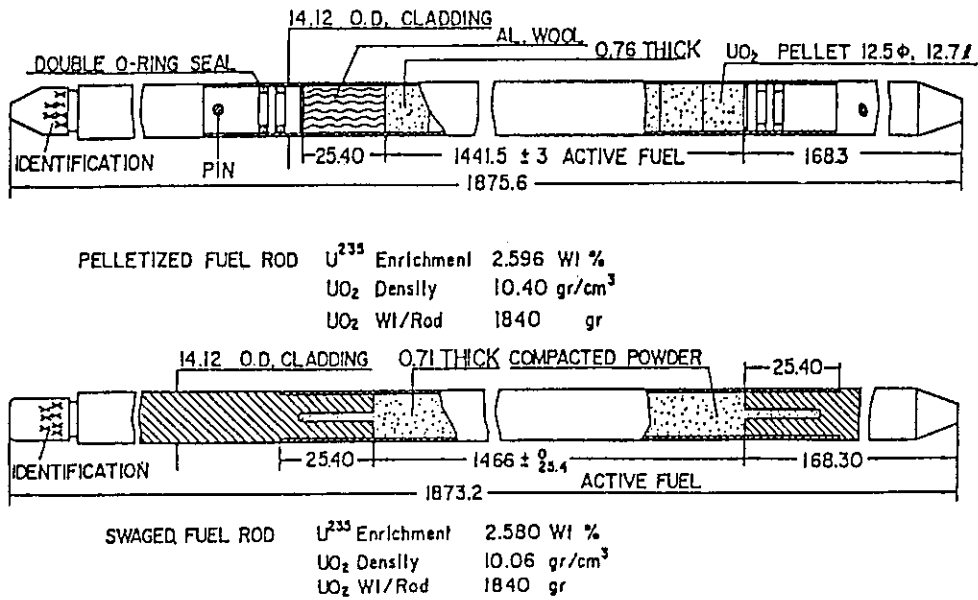
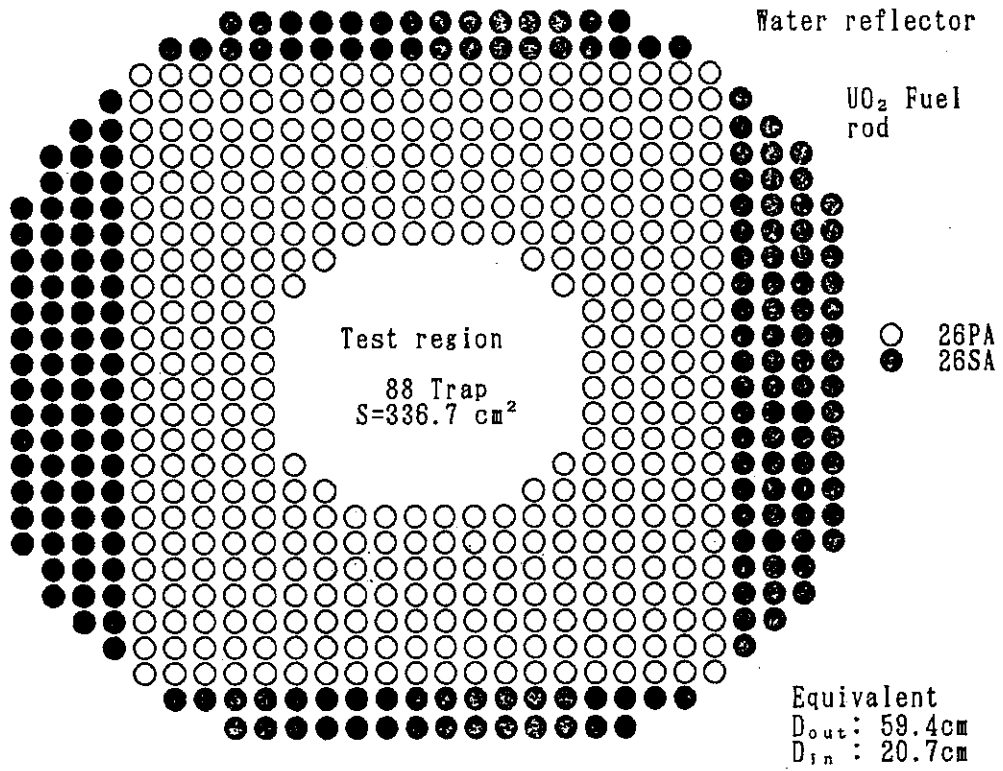
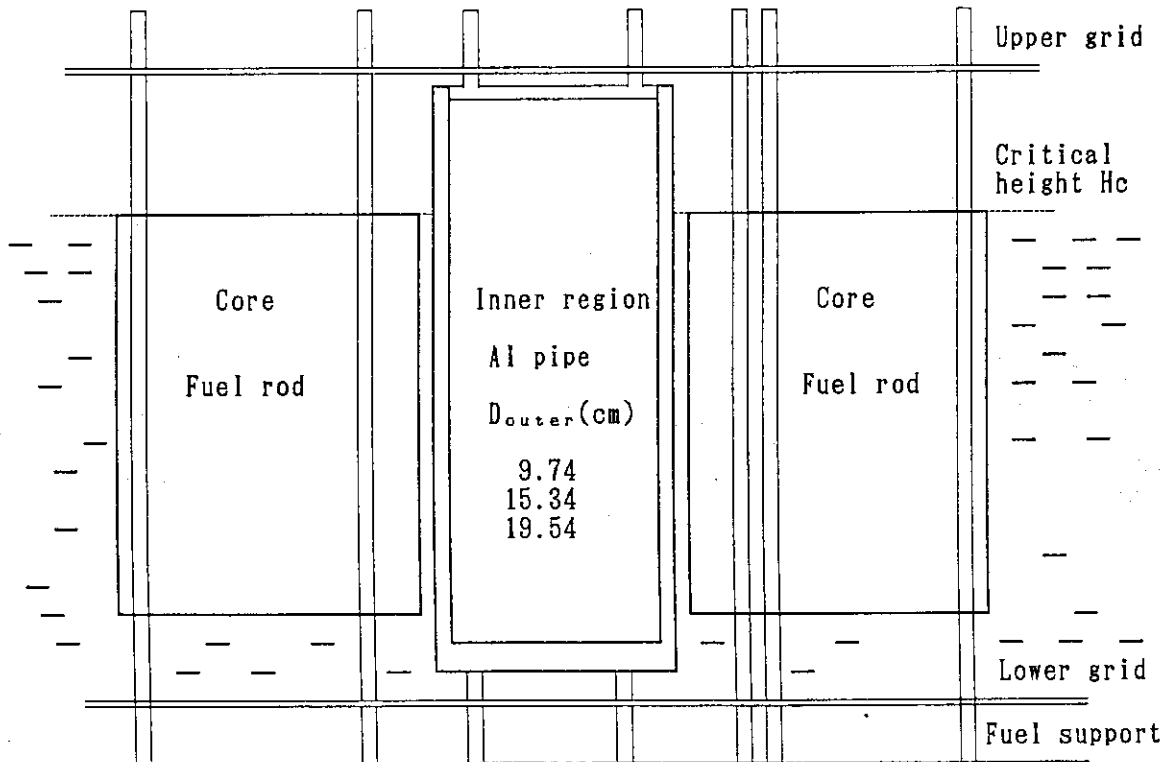


Fig. 2.2.1 Specification of Fuel rod



(a) Plan view of experimental core



(b) Vertical view of experimental core

Fig. 2.4.1 Configuration of experimental core



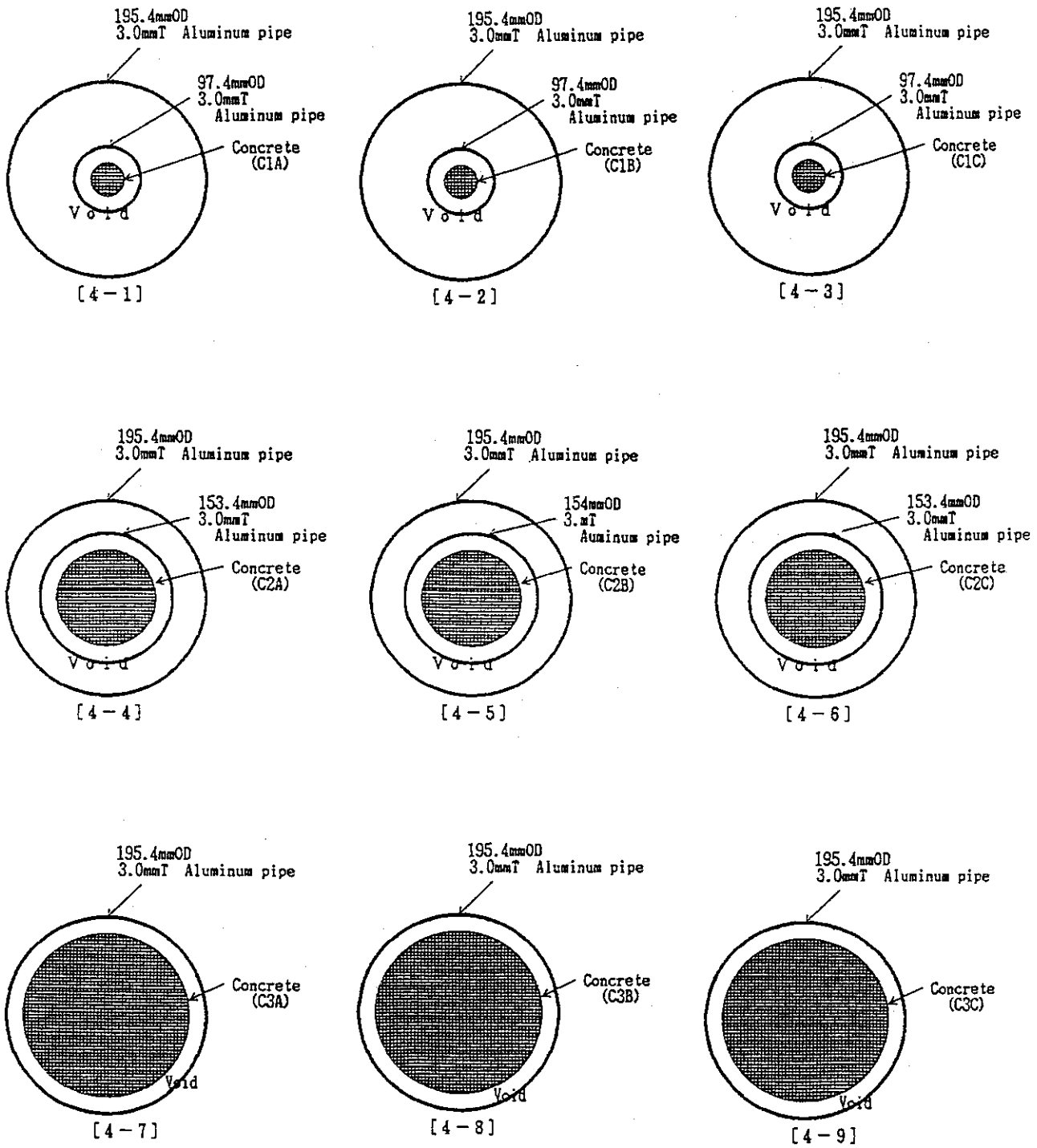


Fig. 2.4.2 Condition of test material (cylindrical concrete)

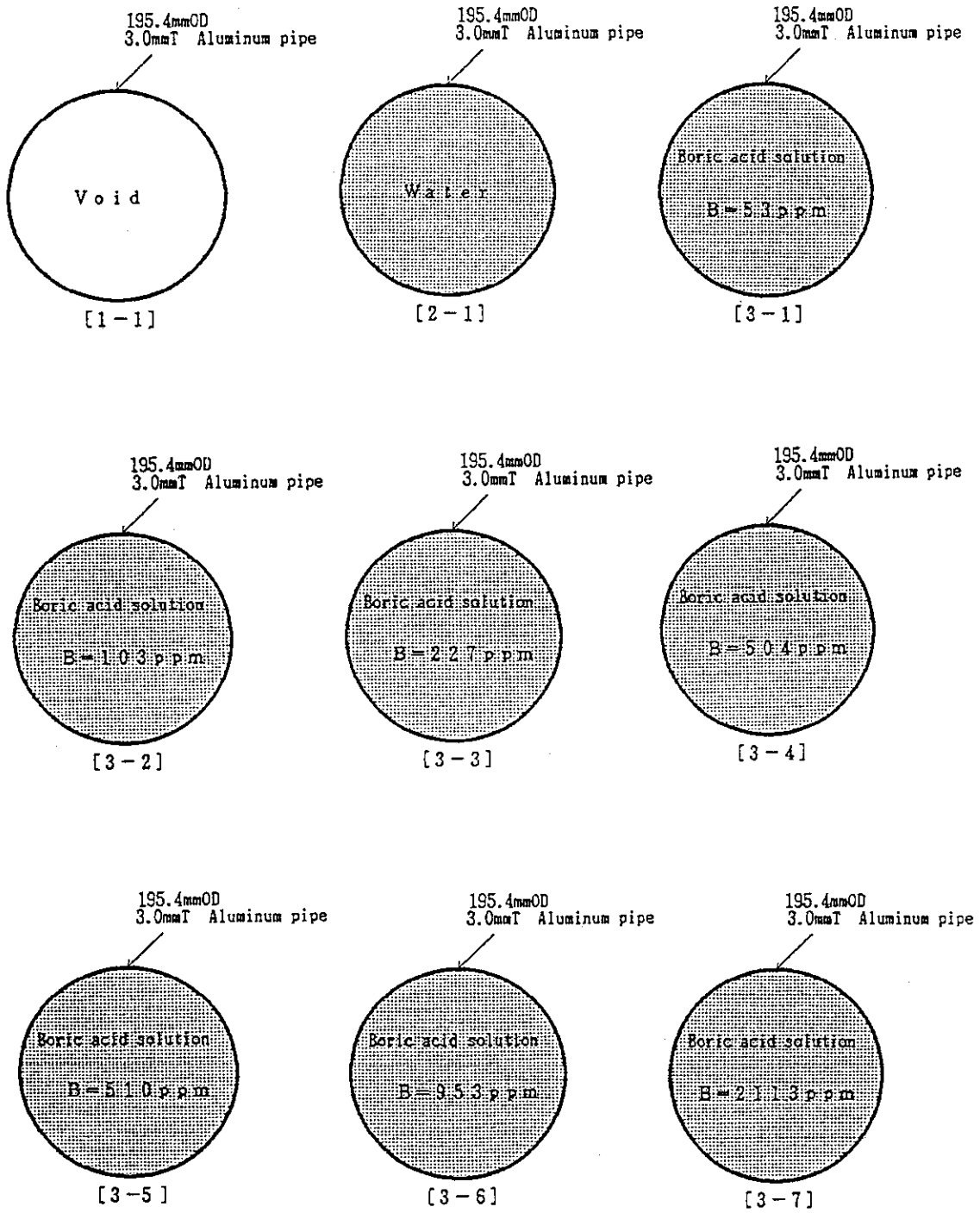


Fig. 2.4.3 Condition of test material (boric acid solution)

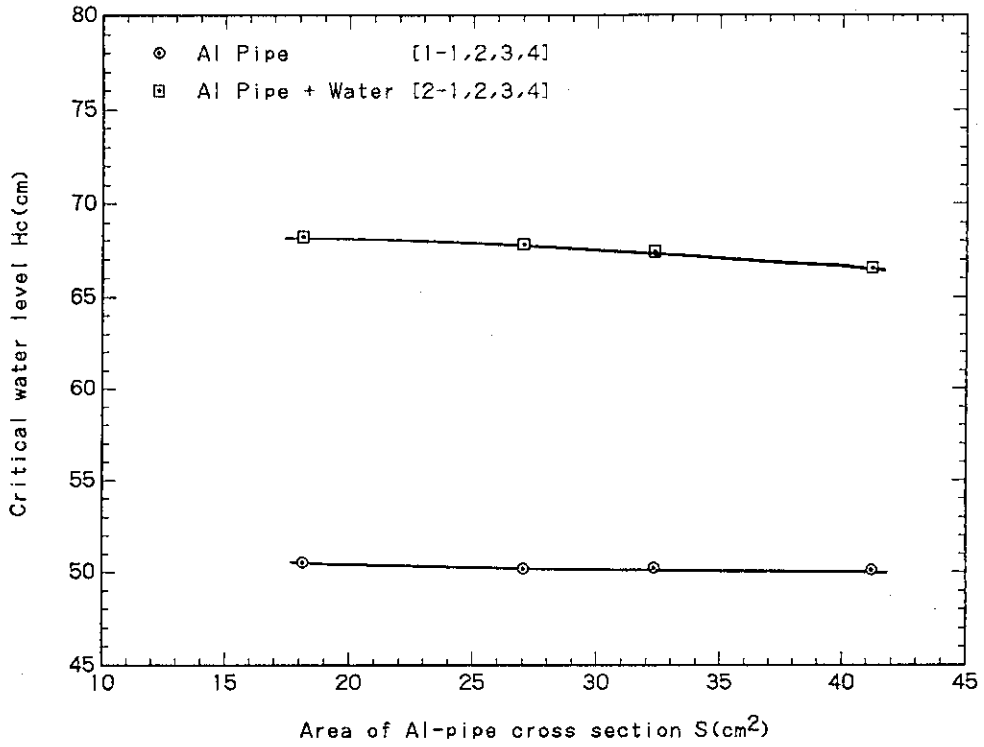


Fig. 3.1.1 Critical water level of core with an aluminum pipe of which the inner region is water or void.

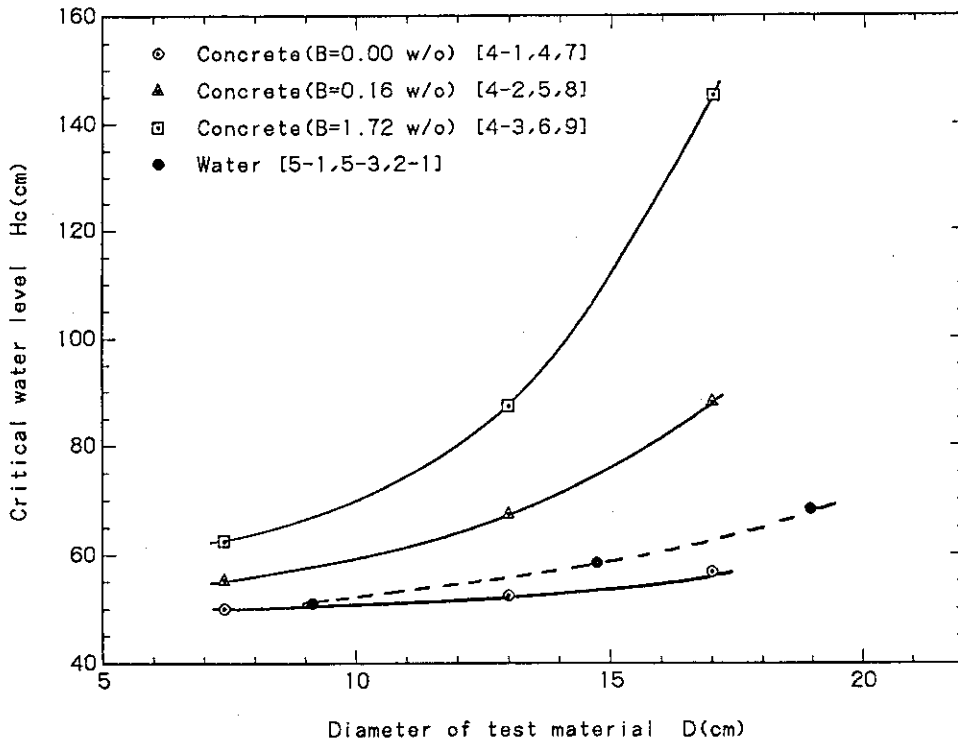


Fig. 3.1.2 Critical water level of core with a cylindrical concrete and water.

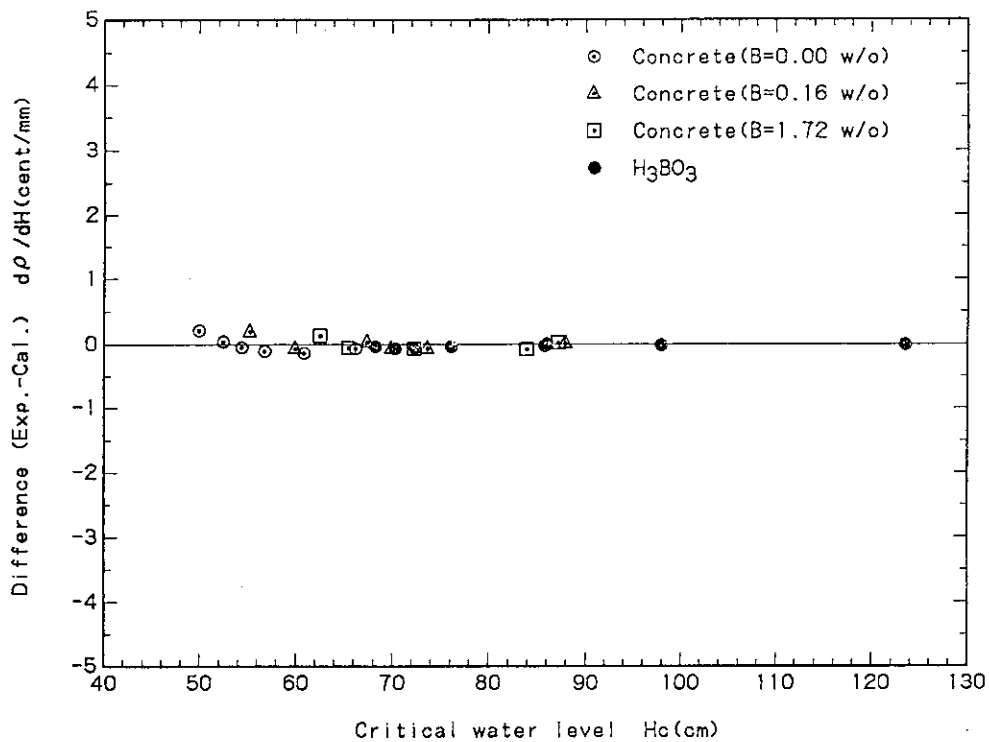


Fig. 3.2.2 Comparison of measured and fitted differential water level worth.

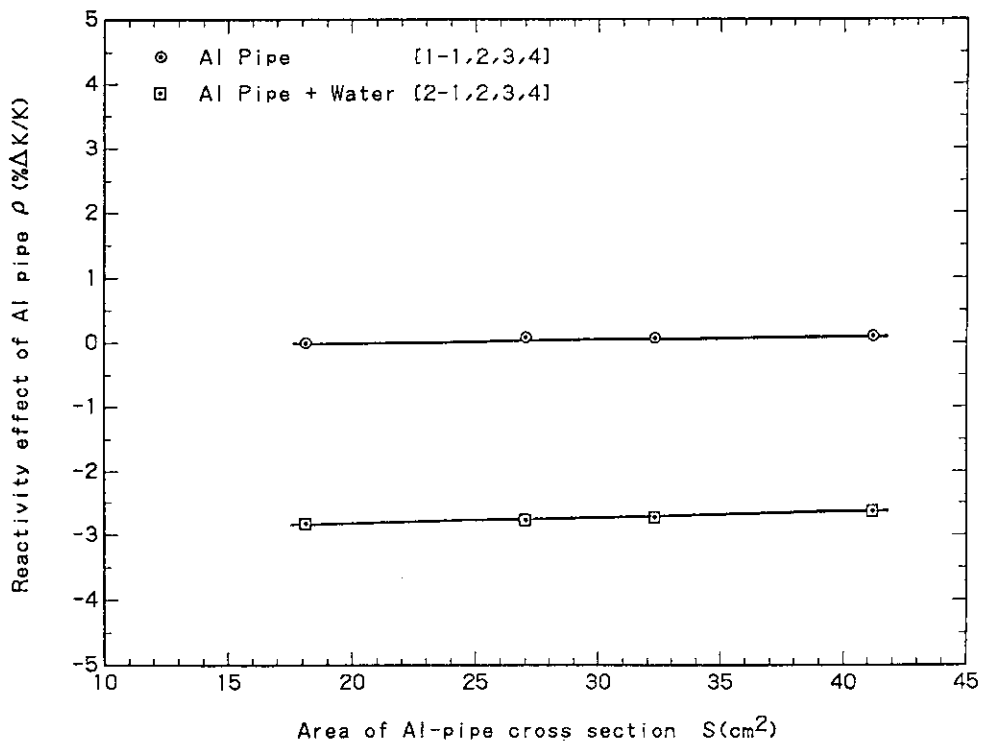


Fig. 3.2.3 Reactivity effect of aluminum pipes of which inner region is filled with water or void.

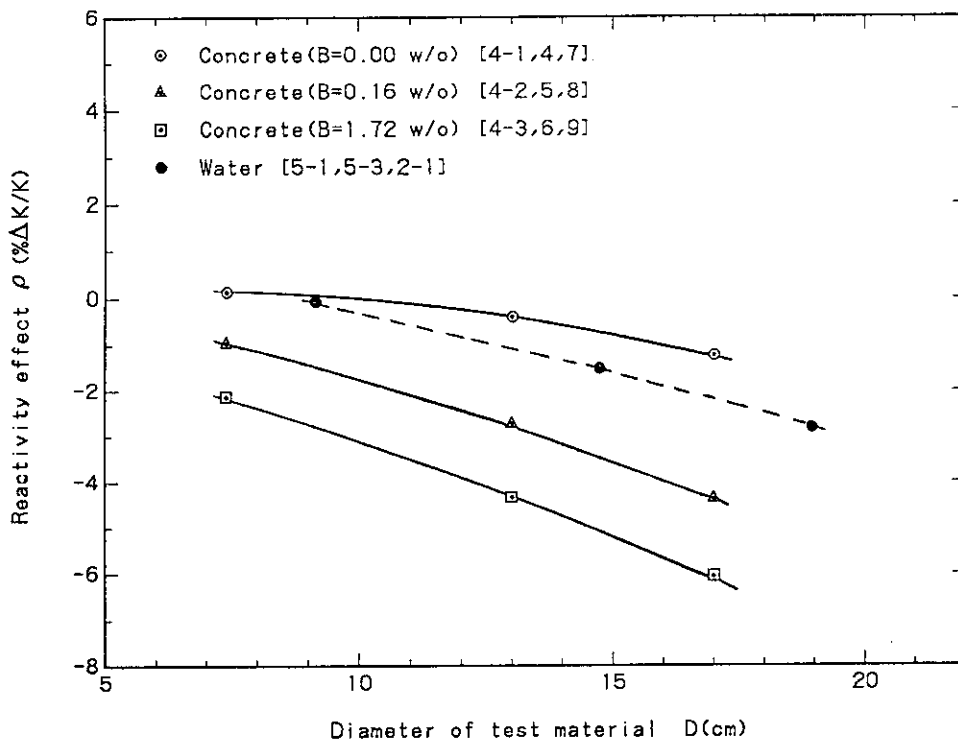


Fig. 3.2.4 Reactivity effect of aluminum pipe containing a cylindrical concrete or water as a function of diameter of the test material.

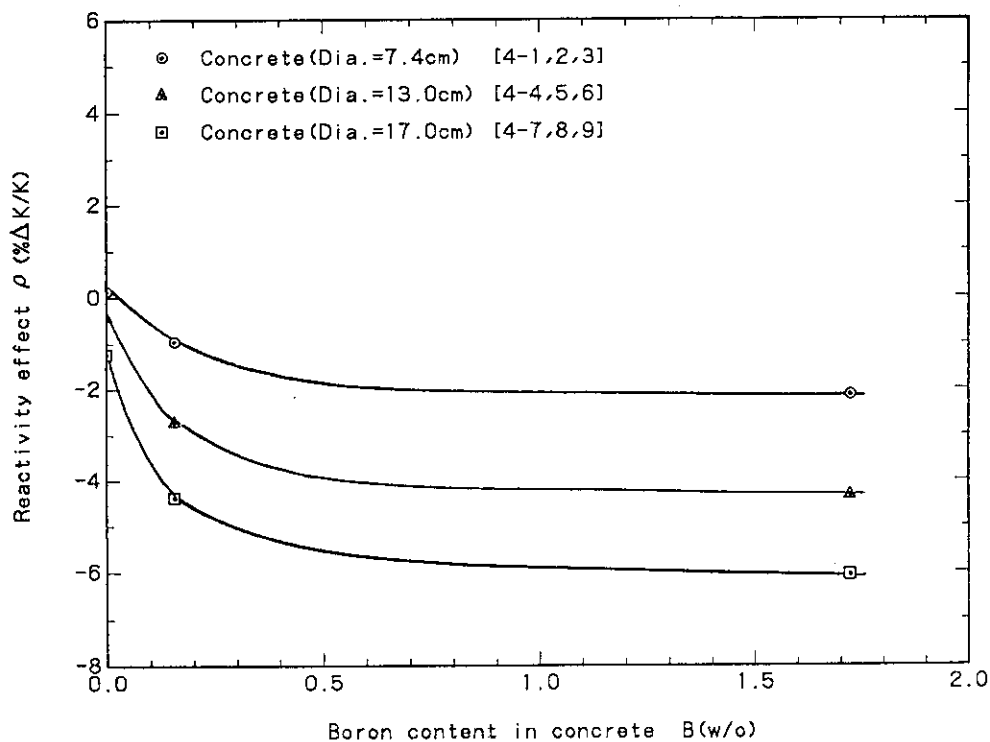


Fig. 3.2.5 Reactivity effect of aluminum pipe containing a cylindrical concrete as a function of boron content in the test material.

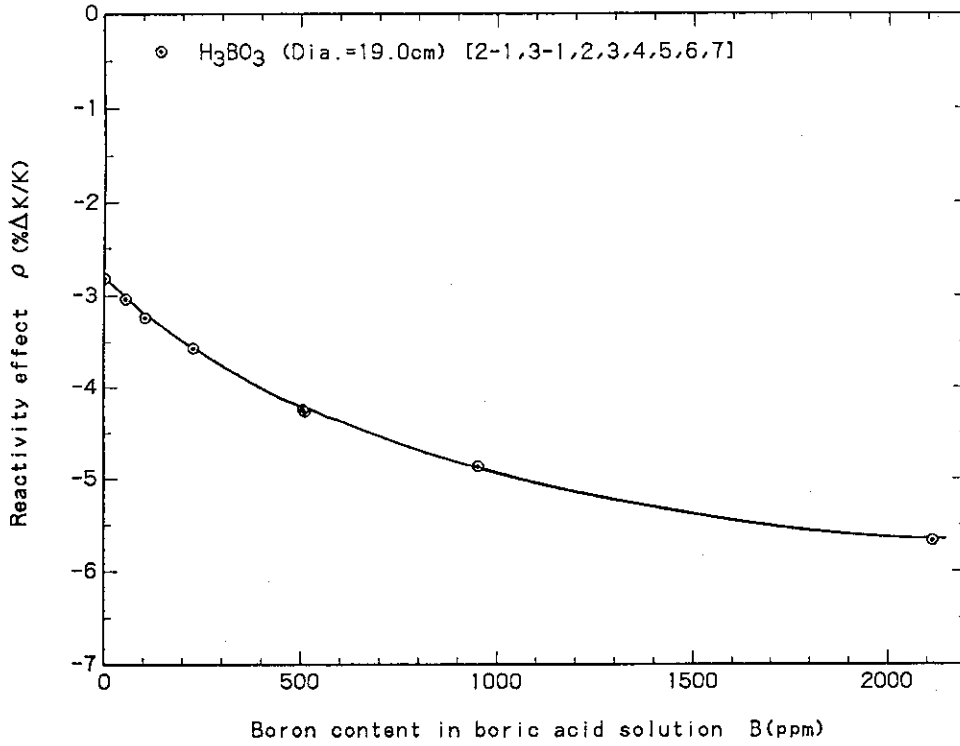


Fig. 3.2.6 Reactivity effect as a function of boron concentration.

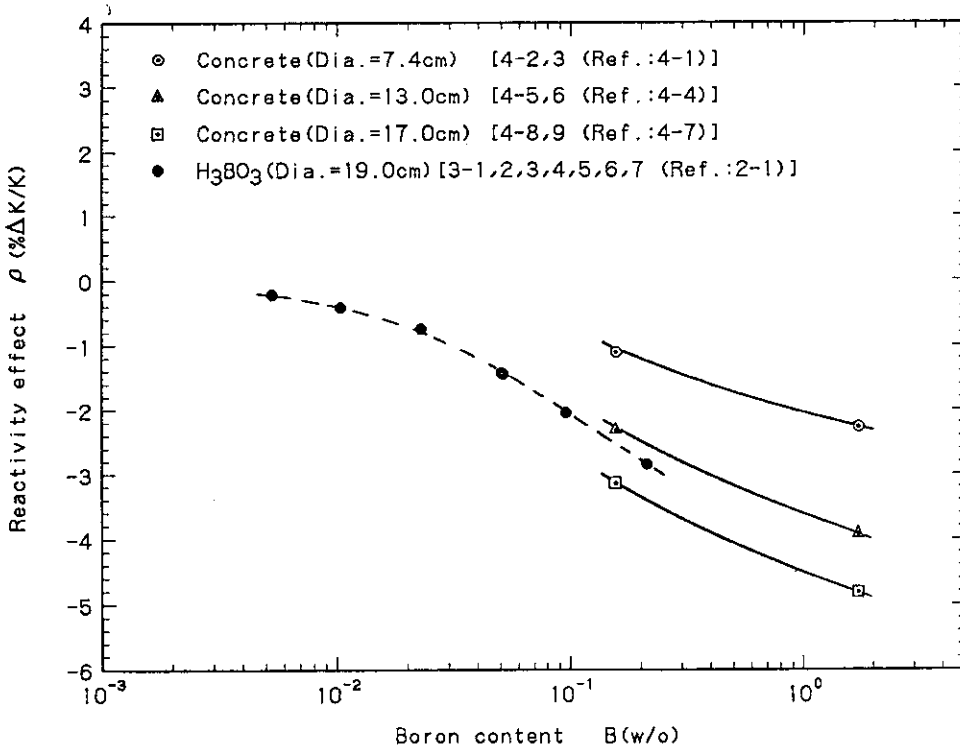


Fig. 3.2.7 Reactivity effect of boron in test region.