

ボロン入り炉心実験

1973年10月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

ボロン入り炉心実験

報告者 小綿 泰樹
浅野 雄一郎
池上 哲雄
菊地 宏
坂田 肇

期間 1972年9月11日～1972年11月16日

目的 DCAウラン炉心の重水中にボロン (B^{10}) を0～約7.5 ppm の濃度で添加したボロン入り炉心の特性を実験的に把握する。

要旨

格子ピッチ22.5 cm, 1.2 w/o濃縮ウラン燃料121体装荷炉心において, その減速材重水中にホウ酸 (H_3BO_3) を逐次溶解させることにより, 重水中ボロン濃度を0, 3.30, 4.89, 6.43, 7.51 ppm に変化させ, (1)ボロン濃度反応度, (2)制御棒反応度, (3)100%ボイド反応度および1/2炉心100%ボイド反応度を正炉周期法と臨界水位差法を用いて測定した。また銅線の放射化法により, (4)半径方向および軸方向中性子束分布も測定した。得られた実験結果を表1～表3に示す。

*大洗工学センター重水臨界実験室

DCA実験グループ

坂田肇, 宮脇良夫, 樋口幸次郎, 八谷雄喜, 竹下徳人, 柴公倫, 福村信男, 仁紫明人, 飯島一敬, 村松精, 浅野雄一郎, 相原永史, 戸村和二, 米田平, 平山卓, 若林利男, 小綿泰樹, 磯村和利, 菅原昇三, 池上哲雄(実験炉), 菊地宏(現日立), 楠善次(現東芝)

表1 ボロン濃度反応度，制御棒反応度，ボイド反応度

B ¹⁰ 濃度 (ppm)	100%ボイドチャンネル数	臨界水位 (cm)	ボロン濃度反応度 (β)	制御棒反応度 (β)*	ボイド反応度 (β)
0	0	96.70	/	1.64 ± 0.13	—
	60	102.77		—	-2.13 ± 0.11
	121	112.43		—	-6.71 ± 0.14
3.30	0	119.13	5.63 ± 0.11	1.55 ± 0.10	—
	60	125.22	5.79 ± 0.11	—	-1.26 ± 0.10
	121	134.50	6.39 ± 0.11	—	-3.96 ± 0.13
4.89	0	136.18	8.35 ± 0.10	/	-0.73 ± 0.04
	60	141.18	8.56 ± 0.12		-0.87 ± 0.08
	121	150.01	9.50 ± 0.13		-2.56 ± 0.06 -2.70 ± 0.26
6.43	0	161.65	10.99 ± 0.13	1.51 ± 0.04	—
7.51	0	186.84	12.73 ± 0.14	/	0.10 ± 0.10
	60	185.37	13.21 ± 0.15		-0.14 ± 0.14
	121	188.40	14.58 ± 0.17		

* 制御棒は1本炉心中央のごく近傍に挿入された。

** パルス中性子法によって測定した値

表2 ボイド反応度のボロン濃度依存性

B ¹⁰ 濃度 (ppm)	$\partial \rho_{void} / \partial B^{10}$ (β/ppm B ¹⁰)	
	1/2炉心100%ボイド	100%ボイド
0	-2.4 ± 0.4	-1.15 ± 0.2
3.30	-4.2 ± 0.6	-1.71 ± 0.3
4.89	-5.6 ± 0.9	-1.97 ± 0.2
7.51	-7.6 ± 0.7	-2.41 ± 0.2

表3 半径方向および軸方向バックリング

B ¹⁰ 濃度 (ppm)	0%ボイド炉心半径方向バックリング (m ⁻²)	100%ボイドチャンネル数	軸方向バックリング (m ⁻²)
0	2.48 ± 0.01	0	9.09 ± 0.18
		121	6.45 ± 0.12
4.89		0	4.49 ± 0.02
		60	4.11 ± 0.03
7.51		121	3.64 ± 0.02
		0	2.50 ± 0.01
	121	2.37 ± 0.01	

1, Dec, 1973.

Experiment of Boron Contained Core

Adstarct Yasuki Kowata *
Yuichiro Asano *
Tetsuo Ikegami *
Hiroshi Kikuchi **
Hajime Sakata *

The basic lattice used in the experiment arranged in 22.5cm square pitch in DCA core. The core consisted of one hundred and twenty-one 28-element 1.2% enriched UO₂ fuel assemblies. In this core, Boron (B¹⁰) concentration in the moderator has been successively changed from 0 to 3.30, 4.89, 6.43 and 7.51 ppm by liquefying Boric Acid (H₃BO₃) into D₂O moderator and made the following measurements;

- (1) Boron reactivity.
- (2) Control Rod reactivity.
- (3) 100% void reactivity and 1/2 core 100% void reactivity.
- (4) Radial and axial neutron flux distribution.

Obtained results are shown in Table 1~3.

* Deuterium Critical Assembly O-arai Engineering Center.

** Atomic Energy Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Table 1 Boron Reactivity, Control Rod Reactivity and Void Reactivity.

B ¹⁰ (ppm)	% of 100% Void Channel	Critical Level (cm)	Boron Reactivity (β)	Control Rod* Reactivity (β)	Void Reactivity (β)
0	0	9 670	/	1.64 ± 0.13	
	60	102.77		—	-2.13 ± 0.11
	121	112.43		—	-6.71 ± 0.14
3.30	0	119.13	5.63 ± 0.11	1.55 ± 0.10	—
	60	125.22	5.79 ± 0.11	—	-1.26 ± 0.10
	121	134.50	6.39 ± 0.11	—	-3.96 ± 0.13
4.89	0	136.18	8.35 ± 0.10	/	-0.73 ± 0.04
	60	141.18	8.56 ± 0.12		-0.87 ± 0.08**
	121	150.01	9.50 ± 0.13		-2.56 ± 0.06 -2.70 ± 0.26**
6.43	0	161.65	10.99 ± 0.13	1.51 ± 0.04	—
7.51	0	186.84	12.73 ± 0.14	/	—
	60	185.37	13.21 ± 0.15		-0.10 ± 0.10
	121	188.40	14.58 ± 0.17		-0.14 ± 0.14

* Control Rod was inserted at the position near the core center

** Measured value obtained by Pulsed Neutron Method

Table 2 Dependence of Void Reactivity on Boron Concentration.

B ¹⁰ (ppm)	∂ρ _{void} /∂B ¹⁰ (β/ppmB ¹⁰)	
	1/2 Core 100% Void	100% Void
0	-2.4 ± 0.4	-1.15 ± 0.2
3.30	-4.2 ± 0.6	-1.71 ± 0.3
4.89	-5.6 ± 0.9	-1.97 ± 0.2
7.51	-7.6 ± 0.7	-2.41 ± 0.2

Table 3 Radial and Axial Buckling.

B ¹⁰ (ppm)	Radial Buckling of 0% Void Core (m ⁻²)	% of 100% Void Channel	Axial Buckling (m ⁻²)	
0	2.48 ± 0.01	0	9.09 ± 0.18	
		121	6.45 ± 0.12	
4.89		0	4.49 ± 0.02	
		60	4.11 ± 0.03	
7.56		121	3.64 ± 0.02	
		0	2.50 ± 0.01	
			121	2.37 ± 0.01

目 次

1. 概 要	1
2. 炉心条件および実験内容	2
3. 実験方法	3
3.1 ボロン添加	3
3.2 重水々位反応度係数の測定	3
3.3 中性子束分布の測定	4
3.4 反応度の算出	4
(1) ボロン濃度反応度	4
(2) 制御棒反応度	5
(3) ボイド反応度	5
(4) パルス中性子法によるボイド反応度の測定	6
3.5 半挿入された運転用制御棒反応度の補正について	7
4. 実験結果および検討	9
4.1 水位差効果の補正と臨界重水々位の誤差について	9
4.2 重水々位反応度係数	10
4.3 ボロン濃度反応度	11
4.4 制御棒反応度	11
4.5 ボイド反応度	12
4.6 ボイド反応度のボロン濃度依存性	13
4.7 中性子束分布	14
5. 結 論	16
6. 参考文献	17
7. 謝 辞	17

付録1 ボロン添加の方法

- (1) ボロン試薬について
- (2) ボロン溶解重水の作成

付録2 ボロン除去について

- (1) ボロン除去後の臨界水位確認
- (2) 重水の劣化
- (3) 精製によるボロン除去

付録3 任意の重水々位をもつ炉心における制御棒反応度

1. 概 要

新型転換炉「ふげん」は初期余剰反応度を抑制するために減速材重水中にボロン (B^{10}) が最大約 10 ppm 添加される。減速材中に添加されたボロンは炉心中性子束分布を大きく変化させずに余剰反応度を抑制する働きをするが、ボロン入り炉心における制御棒反応度、ボイド反応度などはボロンの入らない、いわゆるクリーン炉心に比べてやや異なるふるまいをすることが予想される。

われわれは減速材重水中にボロンを添加した重水減速型炉の炉心特性を明らかにするために DCA において反応度と中性子束分布に着目して実験を行なった。

反応度の測定は正炉周期法と臨界水位差法によって求めた。また中性子束分布は銅ワイヤの放射化法によって測定した。

2. 炉心条件および実験内容

(1) 炉心条件

実験を行なった炉心 (Fig.1~Fig.2) の主要条件は下記の通りである。

格子 : 22.5 cm ピッチ 正方格子

燃料 : 1.2 % 濃縮ウラン, 28 本クラスタ, 121 体装荷

減速材重水濃度 : 約 99.50 mol %

減速材重水中ボロン濃度 : 0, 3.30, 4.89, 6.43, 7.51 ppm B¹⁰

冷却材チャンネル : 全炉心 0 % ボイド (Fig.1 参照)

: 1/2 炉心 100 % ボイド (60 Ch 100 % ボイド Fig.2 参照)

: 全炉心 100 % ボイド (Fig.1 参照)

以下, 全炉心 0 % ボイド炉心及び全炉心 100 % ボイド炉心を単に 0 % ボイド炉心及び 100 % ボイド炉心と呼ぶことにする。

(2) 実験内容

減速材重水中ボロン (B¹⁰) 濃度を 0, 3.30, 4.89, 6.43, 7.51 ppm に変化させて下記項目について測定を行なった。

1) 重水々位反応度係数

2) ボロン濃度反応度

3) 制御棒反応度 (0, 3.30, 6.43 ppm 炉心, 制御棒 1 本全挿入, 挿入位置 : 1C1, Fig.1 参照)

4) 100 % ボイド反応度および 1/2 炉心 100 % ボイド反応度 (0, 3.30, 4.89, 7.51 ppm)

臨界水位差法によるボイド反応度とパルス中性子法によるボイド反応度を比較するために

4) に関しては特にボロン濃度 4.89 ppm 炉心においてパルス中性子法によっても測定した。

ボロン添加は重水中ボロン濃度の目標値 (0, 3, 4.5, 6, 7 ppm) を設定して行なわれ, 真の濃度は同位体希釈法を用いた化学分析によって決定された。但し, 目標としたボロン濃度と分析後の真の濃度との対応は Table 1 に示してある。

以下ボロン濃度の表示は分析後のボロン濃度を小数点以下 2 桁までとり, 0, 3.30, 4.89, 6.43, 7.51 ppm とした。なお, Table 1 には参考のために測定した吸光々度法を用いた分析結果も併記した。

3. 実験方法

3.1 ボロン添加

減速材重水中に添加したボロンはモル重量 61.83, 純度 99.5% の J I S 特級ホウ酸 (H_3BO_3) である。

ボロン添加の方法はあらかじめボロン溶解タンク内に高濃度の 1% ホウ酸濃度の重水 (ボロン溶解重水) 約 600 l を作製しておき, このボロン溶解重水を目標とするボロン濃度になるまで炉心の減速材重水系に注入することにより行なった。更に, 注入されたボロンが減速材中で均一に混合するように適当な時間重水を循環させたのち使用された。

ボロン添加に用いた J I S 特級ホウ酸の同位体比 B^{10}/B^{11} は分析の結果

$$B^{10}/B^{11} = 0.2475 \pm 0.0005$$

であり, 分析で得られたボロン濃度は目標ボロン濃度とともに Table 1 に示す。ボロンの分析値は天然ボロン濃度 ($\mu g B/g D_2O$) で与えられているため, Table 1 に示すボロン (B^{10}) 濃度 ($\mu g B^{10}/g D_2O$ および $\mu g B^{10}/ml D_2O$) は分析された上記同位体比を用いて換算したものである。また, 臨界水位のみを測定した炉心の目標ボロン濃度 1, 2 ppm および 6 ppm の重水の分析は行なわなかつたので, 分析されたボロン濃度と (A1-4) 式とから減速材重水全量を逆算し, 注入したボロン溶解重水量から真のボロン濃度を計算したものである。(付録 1 参照)

3.2 重水々位反応度係数の測定

重水々位反応度係数は正炉周期法によって測定した。但し, 炉周期から反応度へ変換する場合, 重水中にボロンや制御棒の吸収体加わったり, ボイドが生じたりすることによる体系の変化は無視して求めた。重水々位反応度係数はクリーン炉心 (吸収体の入らない炉心) および吸収体 (ボロン, 制御棒) 挿入炉心のそれぞれの臨界水位近傍で測定した。

測定した臨界重水々位とその水位における重水々位反応度係数 $(\partial \rho / \partial H)^M$ は C と λ をパラメータとして修正一群理論により算出される次式の関数形

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^M = \frac{C}{(H + \lambda)^3} \quad (\phi/cm) \quad (3-1)$$

にフィットして求めた。

ここで, この重水々位反応度係数の実験式 $(\partial \rho / \partial H)^M$ は 0% ボイド炉心, 1/2 炉心 100% ボイド炉心および 100% ボイド炉心ごとに求められる。

従って, ボロン濃度 x ppm 炉心の重水々位反応度係数 $(\partial \rho / \partial H)^{xppm}$ の測定値は臨界炉心 (臨界水位 $H = H^x$) で求めた一点だけであるので, 臨界水位を超えた水位 ($H = H^{x'}$) における重水々位反応度係数 $(\partial \rho / \partial H)^{xppm} \Big|_{H=H^{x'}}$ は $(\partial \rho / \partial H)^M \Big|_{H=H^x}$ に, 吸収体を挿入して測定したところによる補正を行なうと

$$\frac{(\partial\rho/\partial H)^{x \text{ ppm}} \Big|_{H=H^{x'}}}{(\partial\rho/\partial H)^M \Big|_{H=H^{x'}}} = 1 + \frac{C}{2} \left\{ \frac{1}{(H^{x'} + \lambda)^2} - \frac{1}{(H^{x'} + \lambda)^2} \right\} \beta_{\text{eff}} \quad (3-2)$$

なる関係式で表わされる。但し、 β_{eff} は実効遅発中性子生成割合である。

3.3 中性子束分布の測定

重水中ボロン濃度を 0, 3.30, 4.89, 7.51 ppm に変化させ、0%ボイド炉心、1/2炉心100%ボイド炉心、100%ボイド炉心および制御棒挿入0%ボイド炉心の半径方向あるいは軸方向中性子束分布を燃料中と重水中で照射した銅ワイヤの放射化量から求めた。

半径方向中性子束分布測定に用いた試料は一測定点あたり、3mmφ×50mmの銅ワイヤ3本で、これをAβ試料容器に直列に入れて各試料が炉心の同一高さ位置（いずれの炉心においても燃料下端から60cm）になるようにセットした。また、軸方向中性子束分布測定に用いた試料は3mmφ×250mmの銅ワイヤで、その下端が燃料下端に等しくなるようにセットした。

炉心にセットした銅ワイヤを約300Watt×10min照射したのち、銅ワイヤを取り出しその0.51MeV消滅γ線をガンマ線スキャン装置にて計数して放射化量を測定した。

γ線強度の測定は、半径方向中性子束分布の測定の場合、一測定点あたり照射された試料3本をひとまとめにして計測し、また軸方向中性子束分布測定の場合は、燃料下端の位置から5cmおきに臨界重水々位に相当する位置まで計測した。

燃料中および重水中にセットした銅ワイヤの位置はいずれの場合も燃料集合体の中心および互いに隣接した4つの燃料チャンネルの中心である。半径方向中性子束分布測定位置をFig.3に示す。

3.4 反応度の算出

正炉周期法によって各炉心の臨界水位近傍で重水々位反応度係数を測定し、臨界水位差法を用いて反応度を求めた。但し、臨界水位は出力が1wattで、100%ボイド炉心以外は臨界重水々位と軽水々位が等しくなるような値を用いた。

(1) ボロン濃度反応度

ボロン濃度 x ppm 添加された臨界炉心からボロンのみをすべて取除いた場合に加わる反応度（正）をボロン濃度 x ppm 炉心のボロン濃度反応度 $\rho_{\text{boron}}(x \text{ ppm})$ と定義すれば、これは次式で示される。

$$\begin{aligned} \rho_{\text{boron}}(x \text{ ppm}) &= \int_{H^0}^{H^x} \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)^{0 \text{ ppm}} dH \\ &= \rho_{\text{boron}}^M(x \text{ ppm}) \left[1 + \frac{1}{2} \beta_{\text{eff}} \rho_{\text{boron}}^M(x \text{ ppm}) \right] \quad (\$) \quad (3-3) \end{aligned}$$

$$\rho_{\text{boron}}^M(x \text{ ppm}) = \int_{H^0}^{H^x} \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)^M dH \quad (\$) \quad (3-4)$$

但し

H, H^x : ボロン濃度 0 ppm および x ppm 炉心の臨界水位

$(\partial \rho / \partial H)^0$ ppm : ボロン濃度 0 ppm 炉心の臨界水位における重水々位反応度係数から (3-2) 式を用いて求めたその炉心の重水々位反応度係数

$(\partial \rho / \partial H)^M$: (3-1) 式で表わされるクリーン炉心および吸収体 (ボロン, 制御棒) の入った臨界炉心の重水々位反応度係数の測定値

(3-3) 式中の実効遅発中性子生成割合 β_{eff} を含む項は, 吸収体が重水々位反応度係数に及ぼす影響を補正する項であるため, 炉心がボイドになつたり, 重水中にボロンが添加されても変わらないとして, 1.2% ウラン燃料, 0% ボイド炉心の値 $\beta_{\text{eff}} = 0.0072$ を用いた。

(2) 制御棒反応度

制御棒が全挿入されたボロン濃度 x ppm の臨界炉心から制御棒のみを全引抜した場合に印加される反応度 (正) をボロン濃度 x ppm 炉心における制御棒反応度 $\rho_{\text{rod}}(x \text{ ppm})$ と定義すれば, これは次式で示される。

$$\begin{aligned} \rho_{\text{rod}}(x \text{ ppm}) &= \int_{H^x}^{H_{\text{rod}}^x} \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)^{x \text{ ppm}} dH \\ &= \rho_{\text{rod}}^M(x \text{ ppm}) \left[1 + \frac{1}{2} \beta_{\text{eff}} \rho_{\text{rod}}^M(x \text{ ppm}) \right] \quad (\$) \quad (3-5) \end{aligned}$$

$$\rho_{\text{rod}}^M(x \text{ ppm}) = \int_{H^x}^{H_{\text{rod}}^x} \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)^M dH \quad (\$) \quad (3-6)$$

但し, H_{rod}^x : 制御棒全挿入されたボロン濃度 x ppm 炉心臨界水位

$(\partial \rho / \partial H)^{x \text{ ppm}}$: ボロン濃度 x ppm 炉心臨界水位における重水々位反応度係数から, (3-2) 式を用いて求めたその炉心の重水々位反応度係数

炉心中心領域 (1C1) に全挿入された制御棒反応度をボロン濃度 0, 3.30, および 651 ppm それぞれの炉心で求めた。

(3) ボイド反応度

ボロン濃度 x ppm 炉心において, 冷却材ボイド率が 0% で臨界になっている炉心から, 炉心のすべての冷却材チャンネルあるいは 1/2 炉心の冷却材チャンネルのボイド率が 100% (空気) になったときに炉心に加わる反応度を, ボロン濃度 x ppm 炉心における 100% ボイド反応度, あるいは 1/2 炉心 100% ボイド反応度と定義する。

ボイド反応度 $\rho_{\text{void}} (x \text{ ppm})$ の定義式は次式で示される。

$$\begin{aligned} \rho_{\text{void}} (x \text{ ppm}) &= \int_{H_v^x}^{H^x} \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_{\text{void}}^{x \text{ ppm}} dH \\ &= \rho_{\text{void}}^M (x \text{ ppm}) \left[1 + \frac{1}{2} \beta_{\text{eff}} \rho_{\text{void}}^M (x \text{ ppm}) \right] \quad (\$) \quad (3-7) \end{aligned}$$

$$\rho_{\text{void}}^M (x \text{ ppm}) = \int_{H_v^x}^{H^x} \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_{\text{void}}^M dH \quad (\$) \quad (3-8)$$

但し、

H_v^x : ボロン濃度 $x \text{ ppm}$ でのボイド炉心臨界水位

$(\partial \rho / \partial H)_{\text{void}}^M$: (3-1) 式で表わされるボイドの発生したクリーン炉心およびその炉心に吸収体の入った臨界炉心の重水々位反応度係数測定値 (3-7), (3-8) 式を用いてボロン濃度 0, 3.30, 4.89, 7.51 ppm 炉心における 100% ボイド反応度および 1/2 炉心 100% ボイド反応度を求めた。

(4) パルス中性子法によるボイド反応度の測定

ボロン濃度 4.89 ppm 炉心における 100% ボイド反応度および 1/2 炉心 100% ボイド反応度をパルス中性子法によって測定した。

未臨界状態にあるボイド炉心に 14 MeV のパルス中性子を打込み、即発中性子減衰定数 α を減速材水位を変化させながら測定し、 α と軸方向バックリングとの関係を求めた。即発中性子減衰定数 α は各減速材水位で測定された中性子密度 $n(t)$ を最小二乗法により、 $n(t) = Ae^{-\alpha t} + C$ を関数にフィットして算出した。

中性子密度の減衰は BF₃ 計数管 4 本をそれぞれ炉心の垂直実験孔 5A5, 5B5, 5C5 および 5D5 に挿入して測定した。BF₃ 計数管の軸方向位置は減速材水位のほぼ中点である。また、軸方向バックリングを算出する際に使用された軸方向外挿距離は銅ワイヤの照射によって求められた。

これらの結果からボイド炉心における即発中性子減衰定数 $\alpha (B_z^2)$ を次式の軸方向バックリング B_z^2 の関数として表わし、臨界炉心の軸方向バックリングまで外挿して α_c を求めた。

$$\alpha (B_z^2) = \alpha_c + \beta (B_z^2 - B_{zc}^2) - \gamma (B_z^2 - B_{zc}^2)^2 \quad (3-9)$$

ここで、 α_c および B_{zc}^2 は臨界時の即発中性子減衰定数および軸方向バックリングであり、 β, γ は定数である。

ボイド反応度 $\rho (\$)$ は 0% ボイド炉心軸方向バックリング B_{z0}^2 における即発中性子減衰定数 $\alpha (B_{z0}^2)$ を用いて

$$\rho (\$) = \alpha (B_{z0}^2) / \alpha_c - 1 \quad (3-10)$$

として求められる。

3.5 半挿入された運転用制御棒反応度の補正について

3.30, 4.89 および 6.43 ppm のボロン入り炉心の実験をするに当たって2本の運転用制御棒(炉心平面位置1B7および7D5)が誤って炉心下端からの位置で125cmまで半挿入されていたまま運転が行なわれた。このため上記ボロン入り炉心で臨界水位が125cm以上である炉心ではこれらの運転用制御棒が半挿入されたままで実験が行なわれた。

従って、臨界水位125cm以上の炉心で反応度を測定する場合は運転用制御棒反応度の影響を取除く必要がある。半挿入状態の運転用制御棒反応度はS字曲線を用いて計算し、実際に求めるべき反応度からその分を差し引くことにより補正した。

例えば、ボイド反応度を補正する場合、真のボイド反応度 ρ_{void} は

$$\rho_{\text{void}} = \rho'_{\text{void}} - (\rho_{\text{C/R}}^{\text{void}} - \rho_{\text{C/R}}^{\text{no void}}) \quad (3.5.1)$$

から求められる。

ここで

ρ'_{void} : 運転用制御棒が半挿入されたままで測定された見かけのボイド反応度

$\rho_{\text{C/R}}^{\text{no void}}, \rho_{\text{C/R}}^{\text{void}}$: 非ボイド炉心及びボイド炉心に半挿入されている運転用制御棒反応度

また、 $\rho'_{\text{void}}, \rho_{\text{C/R}}^{\text{no void}}$ および $\rho_{\text{C/R}}^{\text{void}}$ は次のようにして求められる。

$$\rho'_{\text{void}} = \int_{H'_{\text{no void}}}^{H'_{\text{void}}} \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_{\text{void}} dH \quad (3.5.2)$$

$$\rho_{\text{C/R}}^{\text{no void}} = \rho_{\text{C/R max}}^{\text{no void}} \left[\frac{x_{\text{no void}}}{H'_{\text{no void}}} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi x_{\text{no void}}}{H'_{\text{no void}}} \right) \right] \quad (3.5.3)$$

$$\rho_{\text{C/R}}^{\text{void}} = \rho_{\text{C/R max}}^{\text{void}} \left[\frac{x_{\text{void}}}{H_{\text{void}}} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi x_{\text{void}}}{H_{\text{void}}} \right) \right] \quad (3.5.4)$$

但し、

$H'_{\text{no void}}, H'_{\text{void}}$: 運転用制御棒が半挿入されたままで測定された非ボイド炉心およびボイド炉心臨界水位

$x_{\text{no void}}, x_{\text{void}}$: 非ボイドおよびボイド臨界炉心に半挿入されている運転用制御棒の挿入長さ

$\rho_{\text{C/R max}}^{\text{no void}}, \rho_{\text{C/R max}}^{\text{void}}$: 非ボイド炉心およびボイド炉心に全挿入された場合の運転用制御棒反応度

吸収体（実験用制御棒，ボロン）反応度を求める場合は（3.6.1）式右辺の（ ）内の項をそれぞれ吸収体挿入前および吸収体挿入後の炉心における運転用制御棒反応度におきかえることによって同様にして求められる。しかし，運転用制御棒反応度の補正量は最大でも 5.4 % であった。

4. 実験結果

4.1 水位差効果の補正と臨界重水々位の誤差について

臨界水位差法によって反応度を求めようとする場合、反応度印加前および反応度印加後の臨界水位を正確に把握しておくことが重要である。ボロン入り炉心実験では100%ボイド炉心以外はほとんどの場合軽水々位と臨界重水々位は異なっており、データ整理の都合上それらの水位が等しくなるような臨界水位を求めることが要求される。従って、臨界重水水位と軽水々位が異なる炉心の場合は、両者の水位が等しくなるように補正しなければならない。

補正はボロン添加前(ボロン濃度0 ppm)の炉心の補正式(4.1.1)式がボロン入り炉心にも適用できるものと仮定して等水位臨界水位を求めた。しかし、1/2炉心100%ボイド炉心ではそのまま適用するのは困難であるので、以下に示すようにその補正量 $\Delta\lambda_{1/2}$ は非ボイド炉心の補正量 $\Delta\lambda$ にボイドチャンネルと非ボイドチャンネルの体積比で重みをつけることにより求めた。

0%ボイド炉心の補正量

$$\Delta\lambda = (2000 - H^e) \times 10^{-3} \frac{23.24\Delta h}{\Delta h + 0.3667(2000 - H^e)} \quad (\text{mm}) \quad (4.1.1)$$

1/2炉心100%ボイド炉心の補正量

$$\Delta\lambda_{1/2} = (2000 - H^e) \times 10^{-3} \frac{23.24\Delta h(61\text{ch}/121\text{ch})}{\Delta h(61\text{ch}/121\text{ch}) + 0.3667(2000 - H^e)} \quad (\text{mm}) \quad (4.1.2)$$

水位差補正後の臨界水位 H^c は

$$H^c = H^e + \Delta\lambda$$

で示される。ここで

H^e : 測定された臨界重水々位

$$\Delta h = (\text{軽水々位}) - (\text{臨界重水々位})$$

補正された臨界水位は一部等水位にして測定された臨界重水々位と比較し、それらのずれから補正された臨界水位の誤差評価を定めることにした。

ボロン濃度0, 4.89, 7.51 ppm 炉心の0%ボイド炉心あるいは1/2炉心100%ボイド炉心において、臨界重水々位と軽水々位とができるだけ等しくなるようにして測定された臨界水位(A)と軽水々位よりも低くなるようにして測定された臨界重水々位に(4.1.1)(4.1.2)式を用いて両者が等水位になるように補正した臨界水位(B)との比較はTable 3の如くである。(4.1.1), (4.1.2)式の重水, 軽水水位差補正式の妥当性を検討し, 補正された等水位臨界水位の誤差を求めるため, ボロン濃度0, 4.89, 7.51 ppm 炉心で得られた等水位臨界水位(水位差が±5 mm以内で測定された臨界水位)の測定値と比較した。その結

果も Table 3 に示してある。

Table 3 において、測定された等水位臨界水位と水位差効果を補正した臨界水位との差の二乗平均誤差を 0% ボイド炉心および 1/2 炉心 100% ボイド炉心の各々で計算するとそれぞれ 2.1 mm および 0.7 mm である。また重水濃度 99.5 mol/o, 格子ピッチ 22.5 cm, 1.2 w/o UO₂ 燃料 121 体装荷炉心で測定した臨界水位の再現性をチェックした結果、重水、軽水のわずかな温度変化および制御棒、安全棒の案内管の位置、本数などにより、0% および 100% ボイド炉心で土約 1.5 mm の範囲で変化することが分った。このため、100% ボイド炉心および軽水、重水等水位炉心臨界水位の誤差（再現性）は、水位計の誤差（±0.2 mm）を含めて最大 ±2 mm であるとした。従つて、水位差補正後の臨界水位は水位差補正による誤差と再現性を考慮して、0% ボイド炉心では ±4.0 mm, 1/2 炉心 100% ボイド炉心では ±2.5 mm の誤差を含めた。

4.2 重水々位反応度係数

冷却材 100% ボイドチャンネル数 (0, 60, 121) をパラメータとして、ボロン濃度を变化させ、あるいは制御棒を挿入した炉心の臨界水位、重水々位反応度係数の測定値を Table 2 に示す。Table 2 中の Corrected Level は (4.1.1) あるいは (4.1.2) 式を用いて、軽水、重水水位差補正した臨界水位もしくは等水位臨界水位の測定値であり、以下臨界水位はこの Corrected Level を指すものとする。

ボロン入り炉心で測定した臨界水位に対する重水々位反応度係数をボイド炉心ごとに Fig 4 に ● ▲ ■ 印で示す。また、ボロン濃度 0 ppm, 制御棒挿入炉心での測定値も合わせて載せ、○△□印で示す。臨界水位に対する重水々位反応度係数はボロン濃度を増して水位を高くしても、各ボイド炉心ごとに実験誤差範囲内で同一実験式 $(\partial \rho / \partial H)^M = C / (H + \lambda)^3$ で表わされることが明らかになつたので両者の測定データを合わせて上記実験式にフィットして求めた。但し、100% ボイド炉心の場合には、ボロン精製途中で測定された重水々位反応度係数の値 (Table A-3) も含めて求めた。

この結果、各ボイド炉心ごとに吸収体を加えて炉心を高くした任意の臨界水位 H における重水々位反応度係数の測定値 $(\partial \rho / \partial H)^M$ として、次に示す結果が得られた。

0% ボイド炉心

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)_{\text{no void}}^M = \frac{(3.715 \pm 0.032) \times 10^7}{(H + 7.491)^3} \quad (\phi/cm) \quad (4-1)$$

1/2 炉心 100% ボイド炉心

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)_{1/2 \text{ void}}^M = \frac{(5.404 \pm 0.045) \times 10^7}{(H + 15.455)^3} \quad (\phi/cm) \quad (4-2)$$

100%ボイド炉心

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)_{\text{void}}^{\text{M}} = \frac{(7.438 \pm 0.073) \times 10^7}{(H + 15.115)^3} \quad (\$/\text{cm}) \quad (4-3)$$

また、得られた(4-1), (4-2), (4-3)式をFig. 4 にそれぞれ実線, 一点鎖線, 破線で示す。

4.3 ボロン濃度反応度

(3-3), (3-4)式を用いて求めたボロン濃度反応度を0%ボイド炉心, 1/2炉心, 100%ボイド炉心および100%ボイド炉心の各々についてTable 4とFig. 5に示した。Fig. 5からボロン濃度と反応度との関係はいずれの炉心においても測定した範囲では直線になっている。また, 同一ボロン濃度をもつ炉心であつてもボロン濃度反応度は炉心のボイド化されるチャンネルが増加するほど大きくなつていく。これは炉心がボイド化するほど移動面積が大きくなつたことが利いているためと考えられる。

従つて, ボロン濃度反応度係数 $d\rho_{\text{boron}}/dB^{10}$ ($\$/\text{ppm B}^{10}$) はボイドチャンネルが増すほど大きくなり, 0%ボイド炉心, 1/2炉心, 100%ボイド炉心および100%ボイド炉心でそれぞれ次の結果が得られた。

0%ボイド炉心:

$$(d\rho_{\text{boron}}/dB^{10})^{0\text{ void}} = 1.69 (\$/\text{ppm B}^{10})$$

1/2炉心 100%ボイド炉心:

$$(d\rho_{\text{boron}}/dB^{10})^{1/2\text{ void}} = 1.76 (\$/\text{ppm B}^{10})$$

100%ボイド炉心:

$$(d\rho_{\text{boron}}/dB^{10})^{\text{void}} = 1.94 (\$/\text{ppm B}^{10})$$

4.4 制御棒反応度

0%ボイド炉心の中央領域(1C1)に全挿入された制御棒反応度の実験値をボロン濃度0, 3.30, 6.43 ppm炉心について(3-5), (3-6)式を用いて求めた。その結果をTable 5に示す。Table 5を見るとボロン濃度0 ppm~6.43 ppmの臨界炉心で測定した制御棒反応度は1.64\$~1.50\$であつて, ボロン濃度の増加によつてわずかながら減少している様相を示しているが, 実験誤差が大きく, むしろこのボロン濃度の範囲では変つてしないとみなせる。ボロン濃度0 ppm~6.43 ppmの範囲内で制御棒反応度の減少量は約9%であるに過ぎない。

ここで, ボロン濃度の変化が制御棒反応度に及ぼす影響を調べるために, 重水々位Hを任意の高さに固定した炉心の制御棒反応度を実験値から算出した。重水々位H, ボロン濃度x ppm炉心における制御棒反応度 $\rho_{\text{rod}}(x \text{ ppm}, H)$ は次式で表わされる(付録3参照)。

$$\rho_{\text{rod}}(x \text{ ppm}, H) = \rho_{\text{rod}}(x \text{ ppm}) + \left[\int_{H_{\text{rod}}^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)^{x \text{ ppm}} dH - \int_{H_{\text{rod}}^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_{\text{rod}}^{x \text{ ppm}} dH \right] \quad (4-4)$$

ここで

$(\partial \rho / \partial H)^{x \text{ ppm}}$, $(\partial \rho / \partial H)_{\text{rod}}^{x \text{ ppm}}$: ボロン濃度 $x \text{ ppm}$ 炉心で制御棒全引抜および全挿入時の臨界水位における重水々位反応度係数から (3-2) 式を用いて求めたそれぞれの炉心の重水々位反応度係数

H_{rod}^x : 制御棒全挿入されたボロン濃度 $x \text{ ppm}$ 炉心臨界水位

(4-4) 式の右辺の [] 内の値は重水々位 H が制御棒挿入臨界水位 H_{rod}^x からずれたことによる中性子漏洩量の変化および吸収体の影響を補正する量に相当する。

(4-4) 式を用いて求められた $\rho_{\text{rod}}(x \text{ ppm}, H)$ の値を Table 6 および Fig. 6 に示す。この場合、重水々位 H をパラメータにとり、制御棒全挿入されたボロン濃度がそれぞれ 0, 3.30, 6.43 ppm 炉心の臨界水位に選んである。Table 6 および Fig. 6 に示すように炉心高さを一定にして、重水々位 H である炉心を考えてみると、どの炉心高さにおいても (4-4) 式を用いて計算した制御棒反応度はボロン濃度が増加とともに、あるいは体系が小さくなるとともに減少してゆく傾向を示しているが、やはりその減少量も誤差に比べて小さく、ボロン濃度 0 ~ 7 ppm の範囲では誤差範囲でしか減少していない。但し、臨界からずれた炉心では (4-4) 式で定義されるように制御棒非挿入炉心および挿入炉心それぞれの余剰反応度 (あるいは未臨界度) の差分となるため、誤差伝播によって反応度の誤差は臨界炉心で測定された反応度の誤差よりも大きくなっている。

4.5 ボイド反応度

(3-7), (3-8) 式を用いて算出したボロン濃度 0, 3.30, 4.89, 7.51 ppm 炉心における 1/2 炉心 100% ボイド反応度および 100% ボイド反応度の実験値を Table 7 に示す。

Fig. 7 には 0% ボイド炉心臨界重水々位に対する 1/2 炉心 100% ボイド反応度および 100% ボイド反応度の値を図示した。Fig. 7 はボロン濃度の増加とともに臨界水位もそれに応じて高くなつた炉心で測定されたボイド反応度を示しており、体系が大きくなると中性子漏洩率が小さくなるため、明らかにボイド反応度は正に向っている。しかし、この傾向は炉心にボロンが添加されたことと体系が変つたことの 2 つの変化が同時に作用した結果、観測されたものである。

ボロン濃度 4.89 ppm 炉心においてパルス中性子法を用いて測定した 1/2 炉心 100% ボイド反応度および 100% ボイド反応度も合わせて Fig. 7 に示した。1/2 炉心 100% ボイド炉心および 100% ボイド炉心の減速材水位を変化させながら測定した即発中性子減衰定数 α の値をそれぞれ Table 10 および Table 11 に示す。また、軸方向バックリング $B_{\frac{z}{2}}$ と α の値を (3-9) 式にフィットして得られた定数 α_c , β , τ および (3-10) 式から算出され

たボイド反応度の値を Table 12 に示す。パルス中性子法によつて測定した 100% ボイド反応度は臨界水位差法によつて求めた値と実験誤差範囲内で一致したが、1/2 炉心 100% ボイド反応度は臨界水差法による値より約 16% 負側になつた。

4.6 ボイド反応度のボロン濃度依存性

ボイド反応度の実験値は臨界炉心でしか測定できなく、ボロン添加によつて臨界体系が大きくなり、その結果中性子漏洩率が変化してしまふため、ボロン濃度の変化によつてボイド反応度がいずれの側に作用するかは実験値だけでは明確にならないし、測定もできない。

そこで、上記の事を明らかにするために任意の重水々位 H である炉心におけるボイド反応度のボロン濃度依存性を次のようにして計算した。即ち、重水々位 H を固定したまま、ボロン濃度のみを変化させた炉心を想定し、この炉心におけるボイド反応度を算出してみた。

ボロン濃度 x ppm で重水々位 H における非ボイド炉心 (0% ボイド炉心) およびボイド炉心 (100% ボイド炉心あるいは 1/2 炉心 100% ボイド炉心) のそれぞれの余剰反応度 (あるいは未臨界度) の差分として、重水々位 H でボロン濃度 x ppm である炉心のボイド反応度: $\rho_{\text{void}}(x \text{ ppm}, H)$ と定義すれば

$$\rho_{\text{ex}}^{\text{no void}}(x \text{ ppm}, H) = \int_{H_0^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_{\text{no void}}^{x \text{ ppm}} dH \quad (4-5)$$

$$\rho_{\text{ex}}^{\text{void}}(x \text{ ppm}, H) = \int_{H_v^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_{\text{void}}^{x \text{ ppm}} dH \quad (4-6)$$

であるから、

$$\begin{aligned} \rho_{\text{void}}(x \text{ ppm}, H) &= \rho_{\text{ex}}^{\text{void}}(x \text{ ppm}, H) - \rho_{\text{ex}}^{\text{no void}}(x \text{ ppm}, H) \\ &= \rho_{\text{void}}(x \text{ ppm}) + \left[\int_{H_0^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_{\text{void}}^{x \text{ ppm}} dH - \int_{H_0^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_{\text{no void}}^{x \text{ ppm}} dH \right] \quad (4-7) \end{aligned}$$

となる。但し、

$\rho_{\text{ex}}^{\text{no void}}(x \text{ ppm}, H)$, $\rho_{\text{ex}}^{\text{void}}(x \text{ ppm}, H)$: ボロン濃度 x ppm, 重水々位 H における非ボイド

炉心, ボイド炉心それぞれの余剰反応度 (あるいは未臨界度)

H_0^x , H_v^x : ボロン濃度 x ppm の非ボイド炉心およびボイド炉心それぞれの臨界水位

$\rho_{\text{void}}(x \text{ ppm})$: ボロン濃度 x ppm 臨界炉心で測定したボイド反応度

$\left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_{\text{no void}}^{x \text{ ppm}}$, $\left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_{\text{void}}^{x \text{ ppm}}$: ボロン濃度 x ppm の非ボイド炉心, ボイド炉心の

臨界水位における重水々位反応度係数の測定値から (3-2) 式を用いて求められ

るそれぞれの炉心の重水々位反応度係数

いま、重水々位 H をパラメータとして、ボロン濃度 0, 3.30, 4.89, 7.51 ppm の測定した 0% ボイド炉心臨界水位に選び、(4-5), (4-6), (4-7) 式を用いて各ボロン濃度

炉心におけるボイド反応度を計算してみた。この結果を Table 8 に示し、1/2 炉心 100% ボイド反応度については Fig. 8 に、100% ボイド反応度については Fig. 9 に図示する。Fig. 8 および Fig. 9 から炉心高さを一定にして考えれば、1/2 炉心 100% ボイド反応度および 100% ボイド反応度はボロン濃度の増加とともに、ほぼ直線的にわずかに負側に作用するとみなすことができる。そこで、重水々位が H である炉心のボイド反応度とボロン濃度の関係を

$$\rho_{\text{void}}(B^{10}, H) = \rho_{\text{void}}(B^{10} = 0 \text{ ppm}, H) + \frac{\partial \rho_{\text{void}}(B^{10}, H)}{\partial B^{10}} B^{10} \quad (\%) \quad (4-9)$$

なる式にフィットした結果を Table 9 に示す。但し、 B^{10} はボロン濃度 (ppm) である。Table 9 および Fig. 8, Fig. 9 をみると $|\partial \rho_{\text{void}} / \partial B^{10}|$ は 1/2 炉心 100% ボイド炉心よりも 100% ボイド炉心の方が大きくなっており、後者の方がボロン添加によるボイド反応度抑制効果が大きいことを示している。また、重水々位が高く体系が大きくなった炉心ほどボイド反応度に及ぼす影響は大きくなることが分る。以上の事からボロン添加がボイド反応度を負側に移行させる効果は小さく、Fig. 7 で臨界水位の上昇とともにボイド反応度が正に向うのは主として体系が大きくなった結果中性子漏洩率が小さくなったことが大きく利いているためと思われる。

4.7 中性子束分布

照射した銅ワイヤの放射化量の測定値にバックグラウンド、崩壊時間、不感時間の補正を行ない炉停止時における相対的な放射化量 (中性子束) を求めた。

制御棒を挿入しない 0% ボイド炉心の半径方向中性子束分布をボロン濃度 0, 3.30, 7.51 ppm 炉心の燃料中および重水中で測定し、Table 16~21 および Fig. 10~12 に示す。

Table 16~21 の中の記号は、R が炉心中心からの距離、P が炉心座標、RAW がバックグラウンドを含めた銅ワイヤ放射化量の生データ、CORRECT が補正後の炉停止時における放射化量、FIT は CORRECT 値を $\text{ArJo}(B_r r)$ 関数にフィットした値である。

ボロン濃度 0, 3.30, 4.51 ppm の 0% ボイド炉心で測定した放射化量 (CORRECT) を燃料中および重水中ごとに $\text{ArJo}(B_r r)$ 関数にフィットして半径方向バックリングを求めた。この結果を Table 13 に示す。Table 13 をみるとボロン濃度 0~7.51 ppm 炉心で測定した半径方向バックリングは燃料中で測定しても、あるいは重水中で測定しても実験誤差の中で一致しており、半径方向バックリングはボロン濃度に依存しないとみることができるので、各炉心の半径方向バックリングの平均値 (Average Value: B_r^2) $B_r^2 = (2.482 \pm 0.011) \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ を 0% ボイド炉心の半径方向バックリングとして採用した。

また、0% ボイド炉心のボロン濃度変化による重水中と燃料中の中性子束分布の最大値の比 ($A_{\text{D}_2\text{O}} / A_{\text{Fuel}}$) を調べるとボロン濃度 0 ppm および 3.30 ppm 炉心で殆んど変化していな

いが、7.51 ppm 炉心ではやや小さくなっており、0 ppm 炉心に比べて約 2.7% 小さい。

制御棒 1 本挿入 (挿入位置 1C1), 0% ボイド炉心の半径方向中性子束分布はボロン濃度 0, 3.30 ppm 炉心の燃料中と重水中で測定された。この結果を Table 22~25 に示し、Fig. 13~14 に燃料中で測定した中性子束分布を示す。また、1/2 炉心 100% ボイド炉心の半径方向中性子束分布をボロン濃度 7.51 ppm 炉心でのみ測定し、Table 26 に示す。

次に、制御棒の挿入しない炉心の軸方向中性子束分布はボロン濃度 0, 3.30, 4.89, 7.51 ppm 炉心の種々の位置で測定された。ボロン濃度 0, 3.30 ppm 炉心では 0% ボイド炉心でのみ測定したが、その他の炉心では 100% ボイド炉心および 1/2 炉心 100% ボイド炉心においても測定した。これらの結果を Table 27~54 および Fig. 15~22 に示す。Table 27~54 の中で Z は燃料下端からの距離 (cm) であり、FIT は CORRECT を $A_z \cos B_z (Z-C)$ 関数にフィットした値である。RAW, CORRECT は半径方向放射化量分布測定値の Table で説明したものと同様である。また、CORRECT を $A_z \cos B_z (Z-C)$ 関数にフィットした結果より軸方向バックリング B_z^2 , 軸方向外挿距離 λ_z を求めて Table 14 に示す。Table 14 をみると 0% ボイド炉心あるいは 100% ボイド炉心で測定した軸方向バックリングはおおむね燃料中より重水中の方が大きい。この傾向はボロン濃度が低く、体系の小さい炉心ほど顕著であり、ボロン濃度が増し、体系が大きくなると燃料中と重水中での軸方向バックリングの差はなくなつて、ボロン濃度 7.51 ppm 炉心ではボイド炉心ごとにほぼ一致している。これは臨界水位の低い炉心ほど臨界水位以上に存在する燃料が反射体として働いていることが大きく影響し、重水中よりも燃料中の軸方向バックリングをより小さくしているためと思われる。

Table 14 の測定データのうち臨界重水々位と軽水々位とができる限り等しくした炉心、あるいは 100% ボイド炉心の燃料中と重水中で測定した各軸方向バックリングを燃料と重水の体積および測定点の中性子束で重みをとつて平均化し、セル平均軸方向バックリング³⁾を算出してみた。この結果 Table 15 に示す。

5. 結 論

格子ピッチ 22.5 cm, 1.2%濃縮ウラン燃料 121体装荷炉心の減速材にボロンを 0~7.51 ppm 添加し, 重水々位反応度係数, ボロン濃度反応度, 制御棒反応度, 100%ボイド反応度ならびに中性子束分布が測定された。

その結果, 以下のような結論が明らかになった。

(1) これまで重水々位反応度係数曲線は炉心に挿入する制御棒の本数と配置を種々に変え, 炉心高さを変化させて測定されてきた。

しかし, 冷却材ボイド率が同じである炉心ならば, 吸収体としてボロンを添加して測定しても, 重水々位反応度係数曲線は制御棒挿入炉心で得られたものと同一になる。

(2) ボロン濃度とボロン濃度反応度との関係は直線であり, ボロン濃度反応度係数 $d\rho_{\text{boron}} / dB^0$ の値は炉心のボイド化されるチャンネルが増加する程大きくなる。

(3) 炉心中心領域の同一位置に全挿入された1本の制御棒反応度はボロン濃度の増加とともに減少する傾向を示す。

(4) ボロンを添加し, 体系を大きくした炉心のボイド反応度は正に向かうが, ボイド反応度のボロン濃度に対する微係数 $\partial\rho_{\text{void}} / \partial B^0$ の値は全て負になっており, ボロン濃度の増加はボイド反応度を負側に移行させる効果をもっている。

(5) 炉心半径方向中性子束分布から求められた半径方向バックリングはボロン濃度に依らず一定であり, ボロン添加によっても半径方向漏洩率は変らないとみなすことができる。

6. 参考文献

- 1) DCA-Memo E0002 炉心特性実験データ
- 2) SN 943 72-03 制御棒反応度効果および軸方向移動面積の測定
- 3) SN 943 71-12 β_{eff}/ρ , ボイド反応度及材料バックリングの実験
- 4) SN 941 73-10 ATR型炉の冷却材ボイド反応度の測定
- 5) SN 943 71-10 ボイド反応度及チェスボード炉心実験

7. 謝 辞

今回の実験を実施するにあたり、重水中ボロン濃度の分析をして戴いた原研東海研究所原子炉化学部分析センターの大西寛室長、田村修三氏、樋田行雄氏に深く感謝の意を表します。

また、実験に協力していただいた楠善次氏(現東芝)およびボロン注入、精製などに協力してくれた運転グループの方々に深く感謝します。

Table 1 Analytical Values of Boron Concentration

Expected Boron Concentration [ppm]	Isotopes Dilution Method			Colorimetric Method
	$\mu\text{g B/g D}_2\text{O}$	$\mu\text{g B/mL D}_2\text{O}$	$\mu\text{g B}^{10}/\text{g D}_2\text{O}$	$\mu\text{g B/mL D}_2\text{O}$
0	0.025 ± 0.018	0.028 ± 0.02	0.0049 ± 0.004	<0.01
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	19.0
4.5	24.63 ± 0.040	27.3 ± 0.1	4.886 ± 0.040	28.5
6	32.82 ± 0.252	—	6.430 ± 0.044	—
7	37.84 ± 0.071	41.8 ± 0.1	7.507 ± 0.019	43.0
after purification	0.048 ± 0.009	0.053 ± 0.01	0.009 ± 0.002	0.03

Table 2 Experimental Results for Boron Contained Core

Boron concentration (ppm)	No. of Control Rod (1C1)	% of 100% Void Channel	Coolant Level (cm)	Critical Moderator Level: H (cm)			$H + \frac{1}{2} \Delta H$ (cm)	Doubling Time (sec)	$\frac{\Delta\rho}{\Delta H}$ (¢/cm)	Remarks		
				Power		Corrected Level (cm)						
				1 W	100W or 300W							
0	0	0	970	9670	—	9670	—	—	③ ①			
	0	0	2300	9501	9499	9688	5242	3549				
	1	0	2300	10028	10030	10206	5759	2895				
	0	60	2300	10132	10133	10277	4772	3310				
1.11	/	0	2300	11245	11241	11243	—	—	—			
							10076	10075	10253		—	—
				220			10840	10839	11004		—	—
330	0	0	2300	11765	—	11913	6210	2192	③ ①			
	0	0	2300	11766	11767	11792	6430	2054				
	1	0	2300	12715	12714	12847	7870	1530				
	0	60	2300	12408	12407	12522	6300	2085				
489	0	121	—	13450	13453	13450	5530	2129				
	/	0	2300	13439	13439	13559	9273	1264				
		0	1250	13799	—	—	—	—		—		
		0	1360	13618	13634	13618	—	—		—		
		60	1359	14159	—	14116	—	—		—		
		60	1403	14122	—	14116	—	—		—		
60		1412	14118	—	14118	—	—	—				
645	0	0	1412	14150	—	—	—	—	② ②			
	0	60	2300	14034	14036	14126	7507	1464				
751	1	121	—	15001	15000	15001	4530	1653				
	0	0	2300	16101	16103	16175	7428	767				
	0	0	2500	16091	—	16165	8574	775				
	1	0	2300	18611	18609	18639	7935	522				
	0	0	1890	18674	—	18684	9468	520	③ ③ ②			
	0	0	1890	18781	18788	18787	—	—				
	60	2300	18510	18514	18537	18585	6882	682				
	121	—	18840	18838	18840	18894	7800	856				

①: Radial neutron flux distribution has been measured in the core.
 ②: Axial " " " " " " " " " " " "
 ③: Radial and axial neutron flux distributions have been measured in the core.

Table 3 Comparison between Critical Moderator Level Which D₂O and H₂O Level are Equivalent and Which is Corrected a Difference between D₂O and H₂O Level.

Boron Concentration [ppm]	% of 100 % Void Channel	Item	Coolant Level [mm]	Measured Critical Level [mm]	Corrected Level [mm]	Difference between Correct Level (A) and (B) [mm]
0	0	(A)	970.0	967.0	967.0	—
		(B)	2300.0	950.1	968.8	- 1.8
4.89	0	(A)	1360.0	1361.8	1361.8	—
		(B)	2300.0	1343.9	1355.9	5.9
	60	(A)	1412.0	141.18	141.18	—
		(B)	1359.0	141.59	141.16	0.2
* 7.51	0	(B)	1403.0	141.22	141.16	0.2
		(B)	2300.0	1403.4	141.26	- 0.8
* 7.51	0	(A)	1885.0	188.50	188.50	—
		(B)	2300.0	188.45	188.69	- 1.9
	60	(A)	1858.0	186.26	186.26	—
		(B)	2300.0	185.74	186.00	2.6

(A): Equalized critical D₂O level and H₂O level as much as possible.

(B): Critical D₂O level was different from H₂O level.

*: The core in which two operating control rods were inserted.

Table 4 Experimental Results of Boron Reactivity

% of 100% Void Channel	Boron Concentration [ppm]	Critical Level (Corrected) [cm]	Boron Reactivity [β]
0	0	96.70	—
	1.11	102.53	1.776 ± 0.132
	2.20	110.04	3.712 ± 0.120
	3.30	119.13	5.634 ± 0.113
	4.89	135.59	8.348 ± 0.104
	6.43	161.65	10.985 ± 0.125
	7.51	186.84	12.726 ± 0.136
60	0	102.77	—
	3.30	125.22	5.794 ± 0.111
	4.89	141.18	8.561 ± 0.118
121	0	112.43	—
	3.30	134.50	6.386 ± 0.109
	4.89	150.01	9.499 ± 0.128
	7.51	188.40	14.576 ± 0.171

Table 5 Experimental Results of Control Rod Reactivity

Coolant Void Fraction: 0% (All Channel)

Inserted Number of Control Rod: 1 Rod

Inserted Position: 1C1 (Central Region)

Boron Concentration [ppm]	Critical Level [cm]		Control Rod Reactivity [β]	$\beta_{rod}^x \text{ ppm} / \beta_{rod}^0 \text{ ppm}$
	Non-insertion	Insertion		
0	96.70	102.06	1.643 ± 0.133	—
3.30	119.13	128.47	1.545 ± 0.096	0.940
6.43	161.65	186.39	1.506 ± 0.040	0.917

Table 6 Control Rod Reactivity at Fixed Moderator Level

Boron Concentration [ppm]	Moderator Level : H (cm)		
	10206	12847	18639
0	*1.643±0.135	1.707±0.206	1.767±0.244
330	1.485±0.143	*1.545±0.096	1.602±0.156
643	1.388±0.122	1.449±0.074	*1.506±0.040

* Measured value at critical core.

Table 7 Void Reactivity of Boron Contained Core

Boron Concentration [ppm]	Critical Moderator Level (cm)			Void Reactivity [β]
	0% Void Core	% of 100% Void Channel	Void Core	
0	9670	60	10277	-2.132±0.112
		121	11243	-6.714±0.138
330	11913	60	12522	-1.258±0.101
		121	13450	-3.964±0.133
489	13618	60	141.18	-0.731±0.042 -0.866±0.079*
		121	150.01	-2.557±0.059 -2.697±0.255*
751	18684	60	18537	0.097±0.032
		121	18840	-0.139±0.041

* Measured by Pulsed Neutron Method

Table 8 Void Reactivity at Fixed Moderator Level : H

B ¹⁰ [ppm]	Critical Level [cm]		H [cm]	$\rho_{ex}^{no\ void}$ [\$]	ρ_{ex}^{void} (x ppm, H)	ρ_{void} (x ppm, H) [\$]	
	H _o	H _v				1/2 Core 100% Void	100% Void
0	H _o	96.70	96.70	0±0	-2.132±0.112	-2.132±0.112	-6714±0.138
	H _v '	102.77	119.13	5.634±0.113	4.484±0.130	2.243±0.146	-3391±0.185
	H _v	112.43	136.18	83.48±0.104	7.787±0.114	6.772±0.111	-1576±0.152
		186.84	186.84	12.726±0.136	13.311±0.149	1.4423±0.173	1.697±0.220
3.30	H _o	119.13	96.70	-5.415±0.105	-7.606±0.106	-12.511±0.157	-7096±0.189
	H _v '	125.22	119.13	0±0	-1.258±0.101	-3.964±0.133	-3964±0.133
	H _v	134.50	136.18	2.610±0.082	1.915±0.061	0.367±0.062	-2243±0.103
		186.84	186.84	6.826±0.099	7.230±0.085	7.698±0.099	0.872±0.140
4.89	H _o	136.18	96.70	-7.874±0.093	-10.073±0.111	-15.173±0.171	-7299±0.195
	H _v '	141.18	119.13	-2.562±0.079	-3.849±0.096	-6.821±0.138	-4259±0.159
	H _v	150.01	136.18	0±0	-0.731±0.042	-2.557±0.059	-2.557±0.059
		186.84	186.84	4.140±0.049	4.485±0.055	4.621±0.068	0.481±0.084
7.51	H _o	186.84	96.70	-11.656±0.114	-13.994±0.131	-19.215±0.197	-7.559±0.228
	H _v '	185.37	119.13	-6.506±0.090	-7.974±0.107	-11.168±0.155	-4.662±0.182
	H _v	188.40	136.18	-4.020±0.046	-4.960±0.053	-7.078±0.081	-3.058±0.093
		186.84	186.84	0±0	0.097±0.031	-0.139±0.040	-0.139±0.041

H_o : Critical level of 0% void core.

H_v' : " " of core with 1/2 core 100% void.

H_v : " " of 100% void core.

Table 9 1st-Differential Coefficient to Boron
Concentration of Void Reactivity

Core	Moderator Level:H [cm]	$\rho_{\text{void}}(0 \text{ ppm, H})$ [β]	$\frac{\partial \rho_{\text{void}}(B^{10}, H)}{\partial B^{10}}$ [β/ppm]
Core with 1/2 Core 100% Void	96.70	-2.122±0.018	-0.024±0.004
	119.13	-1.122±0.027	-0.042±0.006
	136.18	-0.482±0.049	-0.056±0.009
	186.84	0.674±0.046	-0.076±0.007
100% Void Core	96.70	-6.717±0.009	-0.115±0.002
	119.13	-3.401±0.014	-0.171±0.003
	136.18	-1.591±0.093	-0.197±0.002
	186.84	1.670±0.012	-0.241±0.002

here:

$$\rho_{\text{void}}(B^{10}, H) = \rho_{\text{void}}(0 \text{ ppm}, H) + \frac{\partial \rho_{\text{void}}(B^{10}, H)}{\partial B^{10}} \cdot B^{10}$$

Table 10 Experimental Results of Decay Constants in Boron 489ppm Core

Core with 1/2 Core 100% Void

Core Condition		Decay Constants in Each Position α [sec ⁻¹]				
D ₂ O Level [cm]	H ₂ O Level [cm]	Axial Buckling * [m^{-2}]	5 A 5	5 B 5	5 C 5	5 D 5
9 990	10 000	7.586 ± 0.047	239.46 ± 2.93	238.03 ± 2.29	243.30 ± 3.93	236.39 ± 4.19
10 439	10 439	7.023 ± 0.041	210.0 ± 2.77	204.11 ± 2.21	207.26 ± 3.64	211.77 ± 4.15
10 875	10 878	6.533 ± 0.037	176.91 ± 1.70	177.0 ± 1.42	174.0 ± 2.18	177.03 ± 2.27
11 317	11 317	6.088 ± 0.033	148.35 ± 1.82	152.0 ± 1.62	150.0 ± 2.24	154.98 ± 2.56
11 753	11 756	5.691 ± 0.030	126.20 ± 1.12	130.31 ± 0.97	130.0 ± 1.42	128.18 ± 1.52
12 189	12 195	5.332 ± 0.027	106.19 ± 0.73	107.20 ± 0.67	106.78 ± 0.91	106.49 ± 0.96
12 634	12 634	5.000 ± 0.025	83.95 ± 0.57	85.91 ± 0.51	85.03 ± 0.72	86.01 ± 0.72
13 073	13 073	4.701 ± 0.023	64.92 ± 0.50	65.73 ± 0.49	67.14 ± 0.63	67.61 ± 0.70
13 292	13 293	4.562 ± 0.022	56.82 ± 0.44	58.02 ± 0.40	56.39 ± 0.49	56.42 ± 0.49
13 508	13 512	4.431 ± 0.021	48.37 ± 0.74	46.33 ± 0.67	—	48.16 ± 0.94
13 726	13 732	4.305 ± 0.020	41.05 ± 0.45	39.92 ± 0.40	40.59 ± 0.58	41.0 ± 0.58
13 950	13 951	4.180 ± 0.019	32.11 ± 0.38	31.51 ± 0.35	32.84 ± 0.45	32.46 ± 0.44
H _c = 14 150	14 125	B _{ZC} ² = 4.073 ± 0.023	$\alpha_c = 25.17 \pm 0.28$			

* Evaluated using 14.16 ± 0.44 cm as an extrapolated length

Table 11 Experimental Results of Decay Constants in Boron 4.89 ppm Core

100% Void Core

Core Condition			Decay Constants α [sec ⁻¹]
D ₂ O Level [cm]	H ₂ O Level [cm]	Axial Buckling * [m ⁻²]	
10.999	0	6.354±0.054	25.151±3.39
11.396	0	5.968±0.049	22.171±2.86
11.797	0	5.612±0.045	17.853±2.32
12.195	0	5.290±0.041	17.020±2.10
12.605	0	4.986±0.037	13.827±1.61
12.997	0	4.720±0.034	11.431±0.93
13.397	0	4.504±0.032	9.555±0.79
13.798	0	4.237±0.029	7.569±0.62
14.196	0	4.025±0.027	5.756±0.44
14.397	0	3.923±0.026	4.986±0.56
14.597	0	3.826±0.025	4.247±0.42
H _c = 15.001	0	B _{zc} ² = 3.641±0.017	α_c = 2.614±1.08

* Evaluated using 14.64±0.38cm as an extrapolated length

Table 12 Measurement of Void Reactivity by Pulsed Neutron Method

Boron; 4.89 ppm Core.

Measured Values	Core with 1/2 Core 100% Void	100% Void Core
Critical Heavy Water Level [cm]	14.150	15.000
Axial Extrapolated Length [cm]	13.43±0.47	14.61±0.36
Axial Buckling B _z ² [×10 ⁻⁴ cm ⁻²]	4.112±0.025	3.643±0.016
α_c [sec ⁻¹]	27.94±0.40	26.09±1.54
$\alpha(B_{z0}^2)$ [sec ⁻¹]	5.213±2.07	9.645±3.45
β [×10 ⁻⁴ cm ² sec ⁻¹]	65.33±0.64	83.97±2.77
γ [×10 ⁻⁸ cm ⁴ sec ⁻¹]	-1.30±0.18	-0.47±0.97
Void Reactivity [β]	-0.866±0.079	-2.699±0.26

here; $\alpha(B_z^2) = \alpha_c + \beta(B_z^2 - B_{zc}^2) + \gamma(B_z^2 - B_{zc}^2)^2$

B_{zc}²: Axial Buckling of Critical Void Core.

B_{z0}²: Axial Buckling of Critical 0% Void Core.

Table 13 Experimental Results of Radial Buckling (0% Void Core)

B ¹⁰ Concentration (ppm)	Critical Level (cm)	Coolant Level (cm)	Measured Region	Amplitude A (x10 ⁶)	Radial Buckling B _r ² (x10 ⁻⁴ cm ⁻²)	Extrapolated Length: λ _r (cm)	A _{D₂O} /A _{Fuel}
0	9.499	230.0	Fuel	1.389±0.0005	2.475±0.0022	128.4±0.70	3.476±0.032
			D ₂ O	4.830±0.040	2.553±0.063	10.54±1.86	
3.30	11.767	230.0	Fuel	1.790±0.0007	2.488±0.0024	124.5±0.76	3.490±0.029
			D ₂ O	6.249±0.044	2.489±0.053	12.42±1.63	
7.51	187.88	189.5	Fuel	0.305±0.001	2.456±0.021	134.3±0.68	3.382±0.023
			D ₂ O	1.034±0.0006	2.481±0.041	12.65±1.27	
Average Value							12.65±0.33

Table 14 Experimental Results of Axial Buckling

Boron Concentration (ppm)	% of 100% Void Channel	Critical Level (mm)	Coolant Level (mm)	Measured Position	Amplitude A_z ($\times 10^{-4}$)	B_z^2 ($\times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$)	Extrapolated Length λ_z (cm)
0	0	9499	2300	0D2 (Fuel)	2283 ± 0.008	8.0449 ± 0.0748	1577 ± 0.51
				1D1 (D ₂ O)	7.998 ± 0.021	8.7088 ± 0.0563	1.147 ± 0.34
330	0	117.67	2300	0D2 (Fuel)	2.636 ± 0.008	5.431 ± 0.053	17.13 ± 0.66
				1D1 (D ₂ O)	9.029 ± 0.018	5.695 ± 0.032	1.397 ± 0.37
489	60	1363.4	1360	0 (Fuel)	1.432 ± 0.003	4.434 ± 0.031	1.285 ± 0.54
				1D1 (D ₂ O)	4.578 ± 0.011	4.498 ± 0.028	1.177 ± 0.47
				0 (Fuel, 0% void)	17.04 ± 0.003	4.086 ± 0.022	1.391 ± 0.42
				0B6 (Fuel, 0% void)	1.563 ± 0.003	4.178 ± 0.024	1.202 ± 0.44
				6C0 (Fuel, 100% void)	1.261 ± 0.002	4.053 ± 0.021	1.454 ± 0.41
				0D6 (Fuel, 100% void)	1.269 ± 0.002	3.967 ± 0.024	1.633 ± 0.50
				1B5 (D ₂ O)	4.019 ± 0.008	4.297 ± 0.020	1.005 ± 0.36
				5B1 (D ₂ O)	3.408 ± 0.005	4.137 ± 0.026	1.295 ± 0.49
				1D1 (D ₂ O)	4.408 ± 0.009	4.085 ± 0.022	1.393 ± 0.43
				1D5 (D ₂ O)	2.859 ± 0.005	4.011 ± 0.029	1.435 ± 0.58
				0 (Fuel)	1.139 ± 0.002	3.601 ± 0.022	1.553 ± 0.52
				1D1 (D ₂ O)	2.874 ± 0.004	3.656 ± 0.019	1.429 ± 0.43
0	0	187.88	1890	0D2 (Fuel)	1.099 ± 0.002	2.481 ± 0.017	1.155 ± 0.70
				1D1 (D ₂ O)	3.778 ± 0.007	2.479 ± 0.011	1.090 ± 0.47
751	60	1851.4	2300	2B6 (Fuel, 0% void)	0.419 ± 0.001	2.501 ± 0.024	1.349 ± 0.98
				2C0 (Fuel, 100% void)	0.535 ± 0.002	2.499 ± 0.025	1.358 ± 0.99
				2C6 (Fuel, 100% void)	0.648 ± 0.002	2.504 ± 0.025	1.337 ± 1.02
				6D2 (Fuel, 100% void)	0.368 ± 0.001	2.481 ± 0.029	1.431 ± 1.20
				3B5 (D ₂ O)	0.595 ± 0.002	2.509 ± 0.024	1.316 ± 0.98
				1B1 (D ₂ O)	1.041 ± 0.002	2.530 ± 0.015	1.236 ± 0.62
				7D1 (D ₂ O)	0.437 ± 0.001	2.534 ± 0.023	1.219 ± 0.90
121	0	188.38	—	0 (Fuel)	0.395 ± 0.001	2.374 ± 0.025	1.549 ± 1.11
				1D1 (D ₂ O)	1.032 ± 0.003	2.372 ± 0.023	1.558 ± 0.99

Table 15 Cell Average Values of Axial Buckling and Total Buckling.

Boron Concentration (ppm)	% of 100% Void Channel	Critical Level (cm)	Coolant Level (cm)	Axial Extrapolated Length λ_z (cm)	Axial Buckling B_z^2 ($\times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$)	Total Buckling B^2 * ($\times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$)
489	0	13.634	136.0	1.200 ± 0.029	4.485 ± 0.021	6.967 ± 0.024
	60	14.150	141.25	1.343 ± 0.47	4.112 ± 0.027	—
	121	150.00	—	1.461 ± 0.36	3.642 ± 0.018	6.124 ± 0.021
751	0	18.788	189.0	1.101 ± 0.16	2.495 ± 0.006	4.977 ± 0.013
	121	18.840	—	1.556 ± 0.02	2.373 ± 0.005	4.855 ± 0.012

* $B^2 = B_r^2 + B_z^2$

here. $B_r^2 = (2482 \pm 0.011) \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ (B_r^2 is regarded as a constant value in each boron contained core)

Table 16 Boron 0 ppm, 0% Void,

Radial Cu wire's Activity in Fuels

Critical D₂O Level --- 94.99cm

unit : counts/120 sec

R (cm)	P	R A W	CORRECTED	F I T
12730	(8C8)	12376	32594	30871
11250	(6C8)	19946	49844	49655
11250	(8C6)	19908	49784	49655
9546	(6C6)	28678	71962	70963
6364	(4C4)	42633	107449	106240
5031	(2C4)	47032	118825	118018
5031	(4C2)	46221	116960	118018
3182	(2C2)	52787	134020	130375
4500	(4C0)	48659	123659	122070
2250	(2C0)	54180	138132	134262
0	(0)	54007	137952	138946
2250	(2A0)	53002	135667	134627
5031	(4B2)	44867	114889	118018
3182	(2B2)	50843	130635	130375
2250	(0B2)	52511	135230	134627
3182	(2A2)	50296	129767	130375
6364	(4B4)	39879	102886	106240
5031	(2B4)	44749	115868	118018
6364	(4A4)	40013	103735	106240
8112	(6A4)	33043	85727	87865
8112	(4B6)	33582	87327	87865
7115	(2B6)	37877	98802	98706
8112	(4A6)	33242	86821	87865
9546	(6A6)	27200	71112	70963
10060	(4B8)	24857	65090	64632
9277	(2B8)	28732	75537	74227
12120	(4BR)	14810	38836	38594
11470	(2BR)	17715	46748	46859

Table 17 Boron 0 ppm, 0% Void,

Radial Cu wire's Activity in D₂O

Critical D₂O Level --- 94.99cm

unit : counts/120 sec

R (cm)	P	R A W	CORRECTED	F I T
11340	(7C7)	65196	163191	160840
4773	(3C3)	154999	417717	415277
3558	(3B1)	166250	449279	444754
1591	(1A1)	174518	473265	475229
6560	(3B5)	131605	355584	359164
7955	(5A5)	112929	305241	306739
10670	(3B9)	73047	196385	190846
5736	(1B5)	143030	389633	386767
3558	(1B3)	163604	447505	444754
1591	(1B1)	176487	484523	475229
5756	(5D3)	144113	364732	386767

Table 18 Boron 330 ppm, 0% Void,
Radial Cu wire's Activity in Fuels
Critical D₂O Level--- 117.67cm
unit : counts/120 sec

R (cm)	P	R A W	CORRECTED	F I T
12.730	(8C8)	12530	40763	39257
11.250	(6C8)	20759	63744	63523
11.250	(8C6)	20792	63932	63523
9.546	(6C6)	29463	90875	91072
6.364	(4C4)	44267	137091	136722
5.031	(2C4)	49033	152310	151971
5.031	(4C2)	49301	153508	151971
3.182	(2C2)	54593	170465	167974
4.500	(4C0)	50450	157800	157219
2.250	(2C0)	56597	177545	173482
0.	(0)	57509	180894	179077
2.250	(2A0)	56390	177702	173482
5.031	(4B2)	47431	149372	151971
2.250	(0B2)	54347	172340	173482
3.182	(2A2)	52563	167099	167974
6.364	(4B4)	40902	130208	136722
5.031	(2B4)	45965	146455	151971
6.364	(4A4)	42355	135572	136722
8.112	(6A4)	35429	113474	112939
8.112	(4B6)	35023	112482	112939
7.115	(2B6)	38907	125303	126969
8.112	(4A6)	34606	111575	112939
9.546	(6A6)	28459	91928	91072
10.060	(4B8)	25519	82524	82885
9.277	(2B8)	29764	96702	95295
12.120	(4BR)	15566	50442	49231
11.470	(2BR)	18648	60793	59910

Table 19 Boron 330 ppm, 0% Void,
Radial Cu wire's Activity in D₂O
Critical D₂O Level--- 117.67cm
unit : counts/120 sec

R (cm)	P	R A W	CORRECTED	F I T
11.340	(7C7)	65837	221021	216398
4.773	(3C3)	158971	529123	539467
3.558	(3B1)	170955	570956	576709
1.591	(1A1)	183845	616283	615182
6.560	(3B5)	136246	454820	468479
7.955	(5A5)	120811	404063	402039
10.670	(3B9)	76166	253265	254680
5.736	(1B5)	149144	503170	503414
3.558	(1B3)	168859	571637	576709
1.591	(1B1)	185100	629041	615182
5.736	(5D3)	152769	518685	503414

Table 20 Boron 7.51 ppm, 0% Void,
Radial Cu wire's Activity in Fuels
Critical D₂O Level--- 187.88cm
unit : counts/30 sec

R (cm)	P	R A W	CORRECTED	F I T
12730	(8C8)	6682	6871	6934
11250	(6C8)	10947	11033	11055
11250	(8C6)	10774	10857	11055
9546	(6C6)	15719	15920	15724
6364	(4C4)	23550	24028	23445
5031	(2C4)	26156	26755	26021
5031	(4C2)	25562	26158	26021
3182	(2C2)	27927	28669	28722
4500	(4C0)	26242	26919	26907
2250	(2C0)	29215	30074	29651
0	(0)	30262	31200	30595
2250	(2A0)	28785	29670	29651
5031	(4B2)	25281	26004	26021
3182	(2B2)	27383	28242	28722
2250	(0B2)	28473	29422	29651
3182	(2A2)	27008	27905	28722
6364	(4B4)	22175	22833	23445
5031	(2B4)	24948	25781	26021
6364	(4A4)	22236	22948	23445
8112	(6A4)	18636	19189	19425
8112	(4B6)	19000	19588	19425
7115	(2B6)	21520	22047	21797
8112	(4A6)	18818	19436	19425
9546	(6A6)	15153	15761	15724
10060	(4B8)	13855	14278	14337
9277	(2B8)	16237	16795	16439
12120	(4BR)	8338	8562	8629
11470	(2BR)	10165	10494	10442

Table 21 Boron 7.51 ppm, 0% Void,
Radial Cu wire's Activity in D₂O
Critical D₂O Level--- 187.88cm
unit : counts/30 sec

R (cm)	P	R A W	CORRECTED	F I T
11340	(7C7)	34858	37032	35994
3558	(3B1)	86481	94786	95512
1591	(1A1)	91660	100951	101836
6560	(3B5)	70003	75922	77642
7955	(5A5)	61222	66049	66669
10670	(3B9)	39952	42395	42322
5736	(1B5)	77114	84343	83411
3558	(1B3)	86010	94756	95512
1591	(1B1)	94176	104431	101863
5736	(5D3)	76791	84181	83411

Table 22 Boron 0 ppm, 0% Void,
Radial Cu wire's Activity in Fuels
Critical D₂O Level--- 100.30cm
unit : counts/60 sec

Control Rod : 1C1

R (cm)	P	R A W	CORRECTED
12730	(8C8)	7355.	7831.
11250	(6C8)	11585.	11603.
11250	(8C6)	11570.	11601.
9546	(6C6)	16183.	16274.
6364	(4C4)	21825.	22196.
5031	(2C4)	22767.	23199.
5031	(4C2)	22657.	23137.
3182	(2C2)	20575.	21019.
4500	(4C0)	24518.	25150.
2250	(2C0)	21869.	22460.
0.	(0)	22806.	23472.
2250	(2A0)	28468.	29395.
5031	(4B2)	24907.	25745.
3182	(2B2)	26790.	27763.
2250	(0B2)	28114.	29199.
3182	(2A2)	29481.	30693.
6364	(4B4)	24199.	25213.
5031	(2B4)	27283.	28512.
6364	(4A4)	26617.	27871.
8112	(6A4)	23079.	24199.
8112	(4B6)	22110.	23227.
7115	(2B6)	24702.	26022.
8112	(4A6)	22878.	24141.
9546	(6A6)	19520.	20629.
10060	(4B8)	17144.	18145.
9277	(2B8)	19914.	21151.
12120	(4BR)	10628.	11276.
11470	(2BR)	12248.	13061.

Table 23 Boron 0 ppm, 0% Void,
Radial Cu wire's Activity in D₂O
Critical D₂O Level--- 100.30cm
unit : counts/60 sec

Control Rod : 1C1

R (cm)	P	R A W	CORRECTED
11340	(7C7)	39302.	43020.
4773	(3C5)	75965.	81977.
3558	(3B1)	85497.	92512.
1591	(1A1)	94150.	102210.
6560	(3B5)	84528.	91834.
7955	(5A5)	80544.	87680.
10670	(3B9)	51826.	56245.
5736	(1B5)	92023.	100724.
3558	(1B3)	95033.	104239.
1591	(1B1)	83761.	91897.
5736	(5D5)	95462.	105267.

Table 24 Boron 330 ppm, 0% Void,
Radial Cu wire's Activity in Fuels
Critical D₂O Level--- 127.14cm

unit : counts/120 sec

Control Rod : 1C1

R (cm)	P	R A W	CORRECTED
12730	(8C8)	9908	11090
11250	(6C8)	15907	16559
11250	(8C6)	16177	16855
9546	(6C6)	22325	23330
6364	(4C4)	42804	44985
5031	(2C4)	31688	33311
5031	(4C2)	31082	32778
3182	(2C2)	27639	29200
4500	(4C0)	33165	35148
2250	(2C0)	29070	31253
0	(0)	30173	33085
2250	(2A0)	38266	41391
5031	(4B2)	34106	36919
3182	(2B2)	35943	39029
2250	(0B2)	38100	41494
3182	(2A2)	39554	43172
6364	(4B4)	32868	35924
5031	(2B4)	36382	39907
6364	(4A4)	36173	39750
8112	(6A4)	30992	34120
8112	(4B6)	29685	32734
7115	(2B6)	33302	36852
8112	(4A6)	31468	34875
9546	(6A6)	26047	28922
10060	(4B8)	23230	25828
9277	(2B8)	26364	29433
12120	(4BR)	13734	15307
11470	(2BR)	16910	18961

Table 25 Boron 330 ppm, 0% Void,
Radial Cu wire's Activity in D₂O
Critical D₂O Level---127.14cm

unit : counts/120 sec

Control Rod : 1C1

R (cm)	P	R A W	CORRECTED
11340	(7C7)	52339	54282
4773	(3C3)	94151	95966
3558	(3B1)	112964	115659
1591	(1A1)	124177	127668
6560	(3B5)	111611	114765
7955	(5A5)	106749	110059
10670	(3B9)	68466	70296
5736	(1B5)	121076	125594
3558	(1B3)	125965	131054
1591	(1B1)	109182	113530
5736	(5D3)	124390	130112

Table 26 Boron 751 ppm, 1/2 Core 100% Void,
 Radial Cu wire's Activity in Fuels
 Critical D₂O Level--- 185.14cm

unit : counts/80 sec

R (cm)	P	R A W	CORRECTED
13500	(0BT)	3266.	3366.
11250	(0BR)	7455.	7481.
9000	(0B8)	11265.	11329.
6750	(0B6)	15335.	15457.
4500	(0B4)	17902.	18077.
2250	(0B2)	19840.	20066.
2250	(0D2)	18504.	18750.
4500	(0D4)	16433.	16660.
6750	(0D6)	14187.	14391.
9000	(0D8)	10966.	11126.
11250	(0DR)	7056	7159.
13500	(0DT)	3136	3182.
3182	(2A2)	18868.	19247.
6364	(4A4)	15265.	15574.
9546	(6A6)	10184.	10388.
12730	(8A8)	4310.	4395.
2250	(2A0)	19355.	19835.
4500	(4A0)	17496.	17941.
6750	(6A0)	14989.	15377.
9000	(8A0)	11490.	11789.
11250	(RA0)	7619.	7819.
13500	(TA0)	3375.	3463.
3182	(2D2)	17800.	18353.
9564	(6D6)	14042.	14498.
12730	(8D8)	9384.	9688.

Table 27 Boron 0 ppm, 0% Void,
Axial Cu wire's Activity in Fuel (00D2)
Critical D₂O Level--- 94.99cm

unit : counts/120 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
500	2133.	6273.	6327.
1000	3175.	9358.	9365.
1500	4111.	12143.	12215.
2000	4935.	14609.	14819.
2500	5831.	17300.	17127.
3000	6495.	19310.	19090.
3500	6934.	20659.	20670.
4000	7244.	21629.	21835.
4500	7700.	23039.	22561.
5000	7608.	22809.	22835.
5500	7558.	22706.	22650.
6000	7312.	22012.	22010.
6500	6823.	20589.	20929.
7000	6380.	19282.	19427.
7500	5701.	17264.	17535.
8000	5111.	15508.	15291.
8500	4173.	12686.	12740.
9000	3344.	10185.	9933.
9500	2384.	7276.	6927.

Table 28 Boron 0 ppm, 0% Void,
Axial Cu wire's Activity in D₂O (1D1)
Critical D₂O Level--- 94.99cm

unit : counts/120 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
500	6965.	21994.	22391.
1000	10700.	33873.	33437.
1500	13810.	43829.	43757.
2000	16868.	53669.	53125.
2500	19263.	61438.	61339.
3000	21165.	67656.	68220.
3500	22940.	73499.	73619.
4000	24117.	77444.	77417.
4500	24654.	79339.	79533.
5000	24667.	79539.	79921.
5500	24302.	78521.	78571.
6000	23225.	75186.	75514.
6500	21800.	70700.	70816.
7000	20075.	65237.	64579.
7500	17669.	57508.	56939.
8000	14913.	48620.	48061.
8500	11878.	38785.	38138.
9000	7911.	25871.	27387.
9500	3723.	12193.	16040.

Table 29 Boron 330 ppm, 0% Void,
Axial Cu wire's Activity in Fuel (0D2)
Critical D₂O Level--- 117.67cm
unit : counts/120sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
500	2713	6546	6219
1000	3718	8988	9155
1500	4885	11843	11968
2000	6082	14774	14618
2500	7039	17147	17070
3000	7930	19355	19290
3500	8653	21179	21249
4000	9511	23323	22919
4500	9804	24108	24279
5000	10131	24958	25309
5500	10447	25808	25996
6000	10602	26262	26330
6500	10471	26008	26308
7000	10434	25962	25928
7500	10254	25583	25197
8000	9681	24195	24124
8500	9085	22766	22723
9000	8542	21442	21015
9500	7521	18928	19021
10000	6645	16767	16770
10500	5615	14192	14291
11000	4513	11425	11618
11500	3407	8648	8788

Table 30 Boron 350 ppm, 0% Void
Axial Cu wire's Activity in D₂O (1D1)
Critical D₂O Level--- 117.67cm
unit : counts/120sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
500	7566	20449	22072
1000	11722	31785	32337
1500	15559	42324	42142
2000	18790	51228	51348
2500	22319	61038	59824
3000	24665	67599	67449
3500	26949	74083	74114
4000	28932	79694	79726
4500	30269	83621	84204
5000	31374	86844	87485
5500	32440	90044	89521
6000	32329	89901	90285
6500	31967	89134	89764
7000	31563	88159	87967
7500	30242	84684	84919
8000	28841	80892	80664
8500	26910	75661	75261
9000	24493	68969	68788
9500	21980	62040	61337
10000	18976	53637	53013
10500	15387	43592	43936
11000	11748	33327	34234
11500	7345	20881	24045

Table 31 Boron 489 ppm, 0% Void
Axial Cu wire's Activity in Fuel (0)
Critical D₂O Level--- 136.34cm

unit : counts/80sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
500	3209	3332	3210
1000	4460	4638	4659
1500	5892	6136	6057
2000	7192	7501	7387
2500	8237	8603	8636
3000	9244	9669	9788
3500	10212	10697	10833
4000	11393	11951	11758
4500	11976	12581	12552
5000	12573	13227	13207
5500	12997	13693	13716
6000	13149	13874	14073
6500	13384	14142	14275
7000	13417	14198	14318
7500	13566	14376	14202
8000	13189	13997	13930
8500	12760	13561	13503
9000	12316	13108	12926
9500	11465	12220	12206
10000	10466	11172	11352
10500	9766	10440	10371
11000	8800	9421	9275
11500	7464	8002	8077
12000	6321	6786	6790
12500	4949	5321	5427
13000	3733	4020	4004
13500	2097	2261	2536

Table 32 Boron 489 ppm, 0% Void
Axial Cu wire's Activity in D₂O (1D1)
Critical D₂O Level--- 136.34cm

unit : counts/40sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
500	4385	4788	5058
1000	6603	7216	7393
1500	8945	9784	9645
2000	10756	11775	11788
2500	12572	13774	13799
3000	14357	15744	15655
3500	15670	17198	17335
4000	17172	18862	18821
4500	18347	20170	20094
5000	19451	21402	21142
5500	20069	22101	21953
6500	20577	22681	22827
7000	20578	22701	22882
7500	20123	22218	22679
80	20147	22263	22221
8500	19491	21557	21514
9000	18626	20617	20564
9500	17643	19546	19384
10000	16143	17899	17986
10500	14968	16611	16386
11000	13179	14638	14602
11500	11510	12795	12653
12000	9439	10502	10563
12500	7340	8173	8354
13000	4870	5427	6051
13500	2179	2430	3679

Table 34 Boron 751 ppm, 0% Void,
Axial Cu wire's Activity in D₂O (1D1)
Critical D₂O Level--- 18788cm

unit : counts/20 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
2000	7565.	7614.	7578.
2500	8667.	8732.	8920.
3000	10168.	10257.	10207.
3500	11503.	11616.	11429.
4000	12596.	12730.	12581.
4500	13493.	13649.	13654.
5000	14265.	14442.	14642.
5500	15369.	15573.	15538.
6000	16161.	16387.	16338.
6500	16776.	17021.	17035.
7000	17302.	17560.	17626.
7500	17642.	17910.	18107.
8000	18070.	18351.	18476.
8500	18584.	18879.	18728.
9000	18571.	18868.	18864.
9500	18517.	18814.	18882.
10000	18604.	18901.	18783.
10500	18399.	18689.	18566.
11000	18009.	18286.	18233.
11500	17459.	17724.	17787.
12000	17011.	17261.	17229.
12500	16486.	16719.	16564.
13000	15581.	15793.	15795.
13500	14422.	14604.	14928.
14000	13875.	14043.	13968.
14500	12797.	12940.	12921.
15000	11652.	11770.	11793.
15500	10470.	10567.	10591.
16000	9422.	9499.	9323.
16500	7912.	7968.	7997.
17000	6511.	6549.	6622.
17500	5171.	5195.	5204.

Table 33 Boron 751 ppm, 0% Void
Axial Cu wire's Activity in Fuel (0D2)
Critical D₂O Level--- 18788cm

unit : counts/40sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
2000	4194.	4202.	4152.
2500	5012.	5023.	4941.
3000	5689.	5703.	5698.
3500	6434.	6452.	6421.
4000	7158.	7180.	7103.
4500	7625.	7651.	7742.
5000	8208.	8238.	8352.
5500	8716.	8749.	8871.
6000	9283.	9322.	9355.
6500	9683.	9725.	9781.
7000	9981.	10025.	10146.
7500	10635.	10685.	10448.
8000	10669.	10720.	10686.
8500	10794.	10846.	10857.
9000	10824.	10877.	10961.
9500	10859.	10913.	10997.
10000	10990.	11045.	10964.
10500	10937.	10991.	10864.
11000	10564.	10615.	10696.
11500	10428.	10479.	10462.
12000	10261.	10309.	10164.
12500	9614.	9657.	9802.
13000	9462.	9503.	9379.
13500	8942.	8979.	8898.
14000	8122.	8153.	8362.
14500	7768.	7797.	7774.
15000	7213.	7238.	7138.
15500	6495.	6516.	6458.
16000	5720.	5736.	5738.
16500	4949.	4962.	4982.
17000	4029.	4038.	4195.
17500	3419.	3425.	3382.

Table 35 Boron 489 ppm, 1/2 core 100% Void,
Axial Cu wire's Activity in Fuel (0)
Critical D₂O Level--- 14.150cm

unit : counts/80 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
5.00	3838.	3877.	3913.
10.00	5520.	5542.	5568.
15.00	7278.	7320.	7165.
20.00	8687.	8752.	8689.
25.00	10077.	10169.	10124.
30.00	11415.	11539.	11456.
35.00	12231.	12385.	12672.
40.00	13514.	13707.	13757.
45.00	14376.	14604.	14703.
50.00	15222.	15488.	15498.
55.00	15811.	16113.	16135.
60.00	16288.	16625.	16608.
65.00	16567.	16934.	16911.
70.00	16479.	16868.	17041.
75.00	16691.	17110.	16997.
80.00	16415.	16851.	16780.
85.00	16065.	16515.	16392.
90.00	15432.	15885.	15836.
95.00	14657.	15107.	15119.
100.00	13984.	14432.	14247.
105.00	12748.	13173.	13230.
110.00	11639.	12041.	12078.
115.00	10408.	10780.	10803.
120.00	8912.	9242.	9417.
125.00	7708.	8003.	7935.
130.00	6116.	6357.	6373.
135.00	4579.	4765.	4745.
140.00	2736.	2850.	3069.

Table 36 Boron 489 ppm, 1/2 core 100% Void,
Axial Cu wire's Activity in Fuel (0B6)
Critical D₂O Level--- 14.150cm

unit : counts/80 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
5.00	3501.	3508.	3241.
10.00	4878.	4897.	4786.
15.00	6218.	6253.	6281.
20.00	7676.	7732.	7710.
25.00	8914.	8994.	9059.
30.00	10194.	10303.	10312.
35.00	11394.	11535.	11458.
40.00	12121.	12291.	12484.
45.00	13148.	13354.	13380.
50.00	13948.	14189.	14135.
55.00	14425.	14697.	14743.
60.00	15091.	15399.	15196.
65.00	15250.	15585.	15490.
70.00	15053.	15405.	15623.
75.00	15172.	15549.	15592.
80.00	14883.	15275.	15397.
85.00	14691.	15099.	15042.
90.00	14073.	14483.	14530.
95.00	13575.	13989.	13865.
100.00	12838.	13247.	13055.
105.00	11629.	12014.	12109.
110.00	10791.	11162.	11036.
115.00	9473.	9811.	9848.
120.00	8242.	8546.	8557.
125.00	6822.	7082.	7176.
130.00	5481.	5697.	5720.
135.00	4021.	4184.	4204.
140.00	2305.	2401.	2645.

Table 37 Boron 4.89 ppm, 1/2 Core 100% Void
Axial Cu wire's Activity in Fuel (6C6)

Critical D₂O Level--- 14.150cm
unit : counts/80sec

Z (cm)	R A W	CORRECTID	F I T
5.00	3091.	3097.	3023.
10.00	4245.	4261.	4238.
15.00	5455.	5484.	5411.
20.00	6488.	6534.	6528.
25.00	7546.	7612.	7580.
30.00	8308.	8394.	8555.
35.00	9383.	9495.	9443.
40.00	10159.	10297.	10235.
45.00	10653.	10815.	10924.
50.00	11394.	11585.	11502.
55.00	11738.	11953.	11964.
60.00	11986.	12223.	12305.
65.00	12221.	12482.	12521.
70.00	12275.	12555.	12610.
75.00	12214.	12511.	12572.
80.00	12126.	12438.	12406.
85.00	11856.	12178.	12115.
90.00	11359.	11683.	11701.
95.00	10950.	11278.	11168.
100.00	10227.	10547.	10523.
105.00	9592.	9905.	9771.
110.00	8562.	8853.	8920.
115.00	7739.	8012.	7978.
120.00	6768.	7015.	6956.
125.00	5540.	5750.	5864.
130.00	4467.	4642.	4712.
135.00	3203.	3332.	3512.
140.00	2051.	2136.	2277.

Table 38 Boron 4.89 ppm, 1/2 Core 100% Void
Axial Cu wire's Activity in Fuel (0D6)

Critical D₂O Level--- 14.150cm
unit : counts/80sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
5.00	3202.	3209.	3237.
10.00	4346.	4362.	4441.
15.00	5552.	5582.	5601.
20.00	6628.	6675.	6705.
25.00	7800.	7868.	7743.
30.00	8753.	8844.	8705.
35.00	9449.	9563.	9580.
40.00	10325.	10466.	10361.
45.00	10771.	10935.	11039.
50.00	11434.	11626.	11607.
55.00	11806.	12023.	12061.
60.00	11963.	12201.	12396.
65.00	12392.	12657.	12608.
70.00	12366.	12649.	12695.
75.00	12350.	12651.	12656.
80.00	12143.	12456.	12492.
85.00	11833.	12155.	12205.
90.00	11504.	11834.	11796.
95.00	10907.	11234.	11271.
100.00	10343.	10667.	10635.
105.00	9717.	10035.	9893.
110.00	8923.	9227.	9053.
115.00	7885.	8164.	8124.
120.00	6810.	7059.	7114.
125.00	5788.	6007.	6034.
130.00	4578.	4757.	4894.
135.00	3143.	3270.	3706.
140.00	1920.	2000.	2481.

Table 39 Boron 489 ppm, 1/2 Core 100% Void,
Axial Cu wire's Activity in D₂O (1D1)
Critical D₂O Level--- 141.50cm

unit : counts/40 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
500	4720.	4732.	5317.
1000	7227.	7259.	7447.
1500	9302.	9359.	9502.
2000	11481.	11570.	11460.
2500	13314.	13438.	13301.
3000	14917.	15077.	15006.
3500	16560.	16763.	16558.
4000	17802.	18045.	17941.
4500	18806.	19086.	19141.
5000	19905.	20227.	20146.
5500	20384.	20736.	20945.
6000	21078.	21465.	21530.
6500	21567.	21983.	21896.
7000	21465.	21898.	22038.
7500	21256.	21704.	21955.
8000	21330.	21795.	21649.
8500	20639.	21103.	21121.
9000	19715.	20168.	20378.
9500	19058.	19506.	19427.
10000	17900.	18329.	18278.
10500	16689.	17095.	16942.
11000	15176.	15550.	15433.
11500	13442.	13776.	13767.
12000	11859.	12155.	11960.
12500	9648.	9890.	10031.
13000	7665.	7858.	8000.
13500	5247.	5378.	5888.
14000	2406.	2466.	3715.

Table 40 Boron 489 ppm, 1/2 Core 100% Void,
Axial Cu wire's Activity in D₂O (1D5)
Critical D₂O Level--- 141.50cm

unit : counts/40 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
500	3223.	3230.	3464.
1000	4776.	4793.	4834.
1500	6189.	6219.	6155.
2000	7322.	7367.	7414.
2500	8718.	8784.	8599.
3000	9642.	9726.	9698.
3500	10673.	10780.	10699.
4000	11378.	11505.	11594.
4500	12072.	12220.	12372.
5000	12638.	12807.	13026.
5500	13345.	13538.	13550.
6000	13827.	14041.	13938.
6500	14008.	14238.	14186.
7000	13925.	14165.	14292.
7500	13958.	14211.	14255.
8000	14085.	14352.	14075.
8500	13563.	13829.	13755.
9000	12983.	13247.	13296.
9500	12322.	12580.	12704.
10000	11671.	11922.	11984.
10500	10957.	11199.	11145.
11000	10043.	10269.	10194.
11500	8978.	9184.	9141.
12000	7943.	8129.	7996.
12500	6634.	6792.	6771.
13000	5129.	5253.	5478.
13500	3576.	3663.	4131.
14000	1655.	1696.	2742.

Table 41 Boron 489 ppm, 1/2 Core 100% Void
Axial Cu wire's Activity in D₂O (1B5)
Critical D₂O Level--- 14.50cm

unit : counts/40 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
5.00	4007.	4017.	4133.
10.00	6096.	6120.	6145.
15.00	8259.	8306.	8091.
20.00	9867.	9938.	9950.
25.00	11470.	11569.	11703.
30.00	13057.	13189.	13330.
35.00	14620.	14788.	14814.
40.00	15864.	16067.	16139.
45.00	16983.	17223.	17291.
50.00	18280.	18561.	18257.
55.00	18680.	18987.	19027.
60.00	19201.	19538.	19593.
65.00	19730.	20094.	19948.
70.00	19687.	20070.	20090.
75.00	19750.	20150.	20016.
80.00	19289.	19693.	19727.
85.00	18715.	19119.	19226.
90.00	18128.	18532.	18519.
95.00	17053.	17441.	17614.
100.00	16069.	16442.	16519.
105.00	15046.	15402.	15247.
110.00	13486.	13809.	13811.
115.00	11884.	12171.	12227.
120.00	10327.	10579.	10512.
125.00	8561.	8771.	8684.
130.00	6527.	6688.	6763.
135.00	4497.	4608.	4769.
140.00	2013.	2063.	2724.

Table 42 Boron 489 ppm, 1/2 Core 100% Void,
Axial Cu wire's Activity in D₂O (5B1)
Critical D₂O Level---14.50cm

unit : counts/40 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
5.00	3599.	3607.	3934.
10.00	5615.	5636.	5597.
15.00	7040.	7077.	7202.
20.00	8691.	8749.	8732.
25.00	10251.	10334.	10172.
30.00	11383.	11490.	11508.
35.00	12525.	12659.	12724.
40.00	13492.	13654.	13809.
45.00	14653.	14846.	14751.
50.00	15348.	15568.	15540.
55.00	15878.	16123.	16169.
60.00	16467.	16739.	16631.
65.00	16707.	16998.	16921.
70.00	16909.	17219.	17036.
75.00	16620.	16937.	16976.
80.00	16127.	16447.	16739.
85.00	15858.	16185.	16330.
90.00	15419.	15747.	15752.
95.00	14598.	14916.	15011.
100.00	13843.	14152.	14115.
105.00	13020.	13318.	13073.
110.00	11639.	11909.	11897.
115.00	10421.	10667.	10597.
120.00	8957.	9171.	9187.
125.00	7626.	7811.	7683.
130.00	5754.	5894.	6099.
135.00	4071.	4171.	4453.
140.00	1799.	1843.	2760.

Table 43 Boron 7.51 ppm, 1/2 Core 100% Void,
Axial Cu wire's Activity in Fuel (2B6)

Critical D₂O Level---185.14cm

unit : counts/40sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
20.00	1738	1739	1716
25.00	1944	1946	2013
30.00	2158	2160	2298
35.00	2596	2599	2569
40.00	2793	2796	2823
45.00	3138	3142	3060
50.00	3409	3414	3277
55.00	3478	3483	3475
60.00	3636	3642	3650
65.00	3850	3857	3803
70.00	3886	3893	3932
75.00	4113	4121	4036
80.00	4109	4117	4115
85.00	4112	4120	4168
90.00	4225	4233	4196
95.00	4133	4141	4197
100.00	4120	4128	4171
105.00	4040	4048	4120
110.00	3995	4003	4043
115.00	3922	3929	3941
120.00	3794	3801	3814
125.00	3667	3674	3663
130.00	3508	3514	3490
135.00	3356	3362	3294
140.00	3077	3082	3078
145.00	2865	2869	2843
150.00	2522	2526	2590
155.00	2322	2325	2321
160.00	2015	2017	2037
165.00	1809	1802	1740
170.00	1431	1432	1433
175.00	1105	1106	1117

Table 44 Boron 7.51 ppm, 1/2 Core 100% Void
Axial Cu wire's Activity in Fuel (2C0)

Critical D₂O Level---185.14cm

unit : counts / 40 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
20.00	2175	2177	2117
25.00	2460	2463	2499
30.00	2847	2850	2865
35.00	3150	3154	3214
40.00	3469	3474	3542
45.00	3839	3845	3848
50.00	4105	4112	4131
55.00	4487	4496	4387
60.00	4715	4725	4616
65.00	4787	4797	4817
70.00	5042	5053	4987
75.00	5075	5086	5126
80.00	5327	5339	5233
85.00	5105	5117	5307
90.00	5406	5419	5348
95.00	5282	5295	5356
100.00	5258	5271	5330
105.00	5174	5186	5272
110.00	5198	5210	5180
115.00	5052	5064	5055
120.00	5007	5019	4900
125.00	4731	4742	4713
130.00	4547	4557	4497
135.00	4166	4175	4254
140.00	3918	3926	3983
145.00	3679	3686	3688
150.00	3336	3342	3369
155.00	2997	3002	3030
160.00	2749	2753	2672
165.00	2338	2341	2297
170.00	1934	1936	1907
175.00	1436	1437	1506

Table 45 Boron 751 ppm, 1/2 Core 100% Void
Axial Cu wire's Activity in Fuel (2C6)

Critical D₂O Level--185.14 cm

unit : counts / 60 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
5.00	1286	1293	1243
10.00	1669	1680	1742
15.00	2268	2286	2231
20.00	2794	2820	2706
25.00	3184	3219	3164
30.00	3544	3588	3602
35.00	3913	3967	4017
40.00	4361	4428	4407
45.00	4566	4643	4770
50.00	4966	5056	5103
55.00	5311	5415	5414
60.00	5376	5489	5671
65.00	5882	6014	5903
70.00	5925	6066	6098
75.00	6071	6224	6254
80.00	6321	6489	6372
85.00	6194	6367	6449
90.00	6309	6494	6486
95.00	6311	6505	6493
100.00	6433	6640	6439
105.00	6221	6429	6355
110.00	6052	6262	6231
115.00	5862	6074	6068
120.00	5566	5774	5867
125.00	5368	5576	5629
130.00	5187	5395	5356
135.00	4750	4946	5049
140.00	4439	4628	4711
145.00	4129	4310	4344
150.00	3872	4047	3949
155.00	3450	3589	3530
160.00	2932	3072	3088
165.00	2487	2609	2627
170.00	2050	2153	2150
175.00	1610	1693	1659
180.00	1058	1114	1158

Table 46 Boron 751 ppm, 1/2 Core 100% Void
Axial Cu wire's Activity in Fuel (6D2)

Critical D₂O Level--185.14 cm

unit : counts / 40 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
20.00	1611	1612	1585
25.00	1795	1796	1823
30.00	2008	2010	2069
35.00	2340	2342	2302
40.00	2451	2454	2521
45.00	2751	2754	2725
50.00	2965	2969	2912
55.00	3035	3039	3080
60.00	3201	3206	3230
65.00	3369	3374	3359
70.00	3518	3523	3468
75.00	3557	3563	3555
80.00	3628	3634	3620
85.00	3611	3617	3663
90.00	3748	3754	3683
95.00	3577	3583	3680
100.00	3606	3612	3654
105.00	3570	3576	3606
110.00	3592	3598	3535
115.00	3512	3518	3442
120.00	3394	3400	3328
125.00	3179	3184	3194
130.00	3018	3023	3039
135.00	2864	2868	2866
140.00	2465	2468	2675
145.00	2484	2487	2468
150.00	2294	2297	2245
155.00	2007	2009	2008
160.00	1764	1766	1759
165.00	1529	1531	1498
170.00	1244	1245	1229
175.00	940	941	952

Table 47 Boron 751 ppm, 1/2 Core 100% Void,
Axial Cu wire's Activity in D₂O (3B5)
Critical D₂O Level---185.14 cm

unit : counts / 40 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
20.00	2460.	2462.	2495.
25.00	2987.	2991.	2915.
30.00	3294.	3298.	3316.
35.00	3738.	3744.	3697.
40.00	4018.	4025.	4054.
45.00	4367.	4375.	4386.
50.00	4697.	4696.	4691.
55.00	4949.	4959.	4966.
60.00	5028.	5039.	5210.
65.00	5392.	5411.	5421.
70.00	5628.	5641.	5598.
75.00	5830.	5844.	5740.
80.00	5759.	5773.	5847.
85.00	5831.	5846.	5916.
90.00	6065.	6080.	5948.
95.00	6046.	6062.	5944.
100.00	6017.	6033.	5901.
105.00	5664.	5678.	5822.
110.00	5631.	5645.	5706.
115.00	5674.	5688.	5555.
120.00	5220.	5233.	5368.
125.00	5079.	5091.	5148.
130.00	4858.	4869.	4896.
135.00	4658.	4668.	4613.
140.00	4247.	4256.	4301.
145.00	4000.	4003.	3962.
150.00	3529.	3535.	3599.
155.00	3239.	3244.	3212.
160.00	2821.	2825.	2806.
165.00	2401.	2404.	2382.
170.00	1950.	1952.	1943.
175.00	1476.	1478.	1491.

Table 48 Boron 751 ppm, 1/2 Core 100% Void,
Axial Cu wire's Activity in Fuel (2C0)
Critical D₂O Level---185.14 cm

unit : counts / 60 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
20.00	4066.	4072.	4129.
25.00	4989.	5003.	4876.
30.00	5521.	5546.	5591.
35.00	6226.	6263.	6271.
40.00	6875.	6925.	6912.
45.00	7426.	7492.	7509.
50.00	7892.	7973.	8058.
55.00	8563.	8663.	8556.
60.00	8801.	8917.	9001.
65.00	9349.	9486.	9588.
70.00	9591.	9744.	9716.
75.00	9848.	10019.	9983.
80.00	10061.	10249.	10186.
85.00	10046.	10247.	10325.
90.00	10135.	10351.	10399.
95.00	10062.	10291.	10407.
100.00	10073.	10315.	10350.
105.00	9721.	9966.	10226.
110.00	9887.	10150.	10039.
115.00	9718.	9989.	9787.
120.00	9299.	9570.	9474.
125.00	8789.	9056.	9101.
130.00	8455.	8722.	8670.
135.00	7950.	8211.	8185.
140.00	7346.	7595.	7648.
145.00	6780.	7018.	7062.
150.00	6290.	6519.	6432.
155.00	5537.	5745.	5761.
160.00	4901.	5090.	5054.
165.00	4135.	4299.	4315.
170.00	3394.	3553.	3548.
175.00	2597.	2706.	2759.

Table 49 Boron 751 ppm, 1/2 Core 100% Void,
Axial Cu wire's Activity in D₂O (3C5)
Critical D₂O Level---185.14 cm

unit : counts / 40 sec

Z (cm)	RAW	CORRECTED	F I T
20.00	1547.	1674.	1769.
25.00	1853.	2007.	2042.
30.00	2167.	2349.	2305.
35.00	2387.	2590.	2554.
40.00	2612.	2837.	2788.
45.00	2817.	3062.	3007.
50.00	2958.	3219.	3209.
55.00	3077.	3351.	3392.
60.00	3172.	3458.	3556.
65.00	3489.	3807.	3700.
70.00	3430.	3745.	3823.
75.00	3694.	4037.	3924.
80.00	3733.	4083.	4003.
85.00	3713.	4065.	4059.
90.00	3602.	3947.	4092.
95.00	3712.	4071.	4101.
100.00	3771.	4159.	4087.
105.00	3709.	4074.	4050.
110.00	3579.	3935.	3990.
115.00	3613.	3975.	3908.
120.00	3392.	3735.	3803.
125.00	3288.	3623.	3676.
130.00	3105.	3424.	3529.
140.00	2930.	3234.	3174.
145.00	2762.	3051.	2970.
150.00	2480.	2741.	2748.
155.00	2331.	2579.	2511.
160.00	1993.	2206.	2259.
165.00	1847.	2046.	1995.
170.00	1556.	1725.	1719.
175.00	1246.	1382.	1433.

Table 50 Boron 751 ppm, 1/2 Core 100% Void,
Axial Cu wire's Activity in D₂O (7D1)
Critical D₂O Level---185.14 cm

unit : counts / 40 sec

Z (cm)	RAW	CORRECTED	F I T
20.00	1782.	1783.	1754.
25.00	2150.	2132.	2067.
30.00	2523.	2525.	2368.
35.00	2689.	2692.	2653.
40.00	2898.	2902.	2921.
45.00	3108.	3112.	3171.
50.00	3287.	3292.	3401.
55.00	3623.	3629.	3609.
60.00	3849.	3855.	3795.
65.00	4015.	4022.	3956.
70.00	4100.	4107.	4093.
75.00	4121.	4128.	4203.
80.00	4280.	4288.	4287.
85.00	4505.	4513.	4344.
90.00	4357.	4365.	4373.
95.00	4359.	4367.	4374.
100.00	4389.	4398.	4348.
105.00	4307.	4315.	4294.
110.00	4180.	4188.	4213.
115.00	4097.	4105.	4106.
120.00	3997.	4004.	3972.
125.00	3711.	3718.	3813.
130.00	3637.	3643.	3630.
135.00	3378.	3384.	3425.
140.00	3214.	3219.	3197.
145.00	3039.	3044.	2949.
150.00	2799.	2803.	2683.
155.00	2369.	2372.	2399.
160.00	2051.	2054.	2100.
165.00	1797.	1799.	1788.
170.00	1466.	1467.	1465.
175.00	1053.	1054.	1132.

Table 51 Boron 4.89 ppm, 100% Void

Axial Cu wire's Activity in Fuel(0)

Critical D₂O Level---150.00 cm

unit : counts / 80 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
5.00	2651.	2656.	2704.
10.00	3709	3723	3741
15.00	4674.	4699.	4743.
20.00	5712.	5752.	5703.
25.00	6636.	6693.	6612.
30.00	7462.	7539.	7461.
35.00	8197.	8295.	8244.
40.00	8747.	8865.	8952.
45.00	9475.	9618.	9579.
50.00	9904.	10069.	10120.
55.00	10418.	10608.	10570.
60.00	10617.	10829.	10925.
65.00	10725.	10958.	11182.
70.00	11125.	11376.	11358.
75.00	11149.	11413.	11392.
80.00	11006.	11288.	11344.
85.00	10773.	11069.	11194.
90.00	10741.	11049.	10942.
95.00	10413.	10725.	10593.
100.00	9811.	10119.	10148.
105.00	9418.	9727.	9611.
110.00	8734.	9032.	8989.
115.00	8148.	8437.	8285.
120.00	7195.	7460.	7507.
125.00	6434.	6679.	6661.
130.00	5471.	5687.	5755.
135.00	4605.	4793.	4798.
140.00	3533.	3681.	3797.
145.00	2482.	2589.	2763.

Table 52 Boron 4.89 ppm, 100% Void,

Axial Cu wire's Activity in D₂O (1D1)

Critical D₂O Level---150.00 cm

unit : counts / 40 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
5.00	2974.	2980.	3358.
10.00	4501.	4517.	4677.
15.00	6018.	6048.	5954.
20.00	7264.	7310.	7176.
25.00	8344.	8408.	8333.
31.00	9297.	9380.	9413.
35.00	10338.	10444.	10408.
40.00	11090.	11217.	11307.
45.00	11886.	12036.	12103.
50.00	12520.	12692.	12789.
55.00	13333.	13531.	13358.
60.00	13550.	13765.	13804.
65.00	13813.	14045.	14125.
70.00	14180.	14431.	14317.
75.00	13984.	14244.	14378.
80.00	13920.	14190.	14307.
85.00	13880.	14161.	14106.
90.00	13535.	13819.	13776.
95.00	13133.	13417.	13320.
100.00	12510.	12788.	12743.
105.00	11712.	11980.	12049.
110.00	10977.	11233.	11245.
115.00	10121.	10362.	10338.
120.00	9283.	9508.	9337.
125.00	7962.	8158.	8251.
130.00	6937.	7114.	7089.
135.00	5620.	5762.	5863.
140.00	4470.	4585.	4582.
145.00	2922.	2998.	3261.

Table 53 Boron 751 ppm, 100% Void,

Axial Cu wire's Activity in Fuel(0)

Critical D₂O Level---18838 cm

unit : counts / 40 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
20.00	1845.	1846.	1753.
25.00	2001.	2003.	2020.
30.00	2251.	2253.	2276.
35.00	2486.	2489.	2519.
40.00	2673.	2676.	2746.
45.00	2983.	2987.	2957.
50.00	3153.	3157.	3151.
55.00	3335.	3340.	3326.
60.00	3516.	3521.	3481.
65.00	3577.	3583.	3616.
70.00	3617.	3623.	3729.
75.00	3864.	3870.	3820.
80.00	3851.	3858.	3888.
85.00	3904.	3911.	3933.
90.00	3973.	3980.	3955.
95.00	3972.	3979.	3954.
100.00	4059.	4066.	3929.
105.00	3876.	3883.	3880.
110.00	3843.	3850.	3809.
115.00	3556.	3562.	3715.
120.00	3630.	3636.	3599.
125.00	3468.	3474.	3462.
130.00	3323.	3328.	3304.
135.00	3099.	3104.	3126.
140.00	2891.	2895.	2930.
145.00	2687.	2691.	2717.
150.00	2544.	2547.	2487.
155.00	2219.	2222.	2243.
160.00	1965.	1967.	1985.
165.00	1732.	1734.	1716.
170.00	1414.	1415.	1436.
175.00	1165.	1167.	1148.

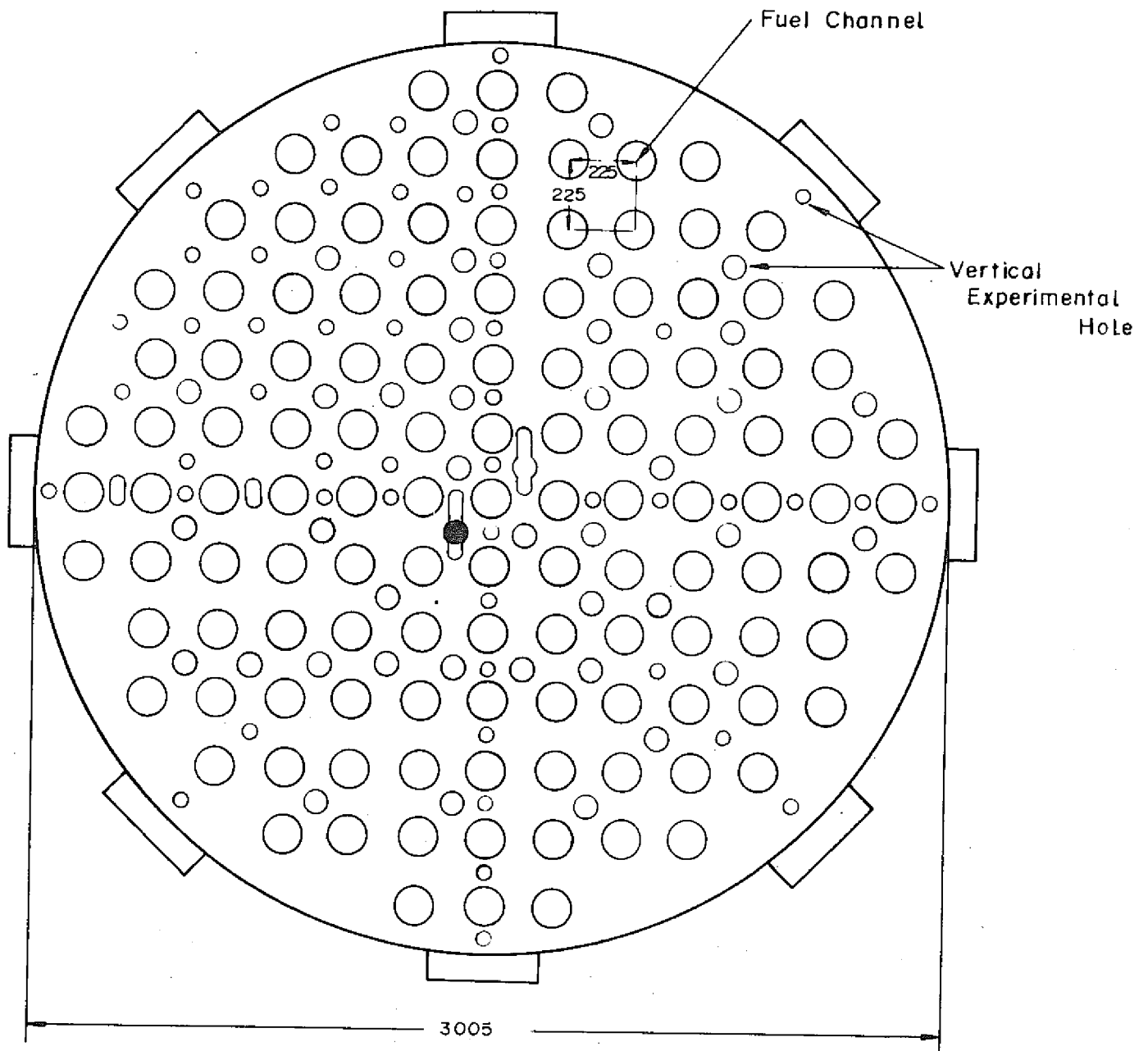
Table 54 Boron 751 ppm, 100% Void,

Axial Cu wire's Activity in D₂O(1D1)

Critical D₂O Level---18338 cm

unit : counts / 40 sec

Z (cm)	R A W	CORRECTED	F I T
20.00	4378.	4386.	4548.
25.00	5321.	5332.	5248.
30.00	5839.	5853.	5916.
35.00	6658.	6675.	6550.
40.00	6957.	6977.	7145.
45.00	7801.	7825.	7697.
50.00	8114.	8140.	8204.
55.00	8608.	8638.	8662.
60.00	9098.	9131.	9069.
65.00	9199.	9234.	9422.
70.00	9895.	9934.	9719.
75.00	10200.	10242.	9958.
80.00	10104.	10146.	10139.
85.00	10431.	10475.	10259.
90.00	10142.	10184.	10518.
95.00	10276.	10320.	10317.
100.00	10105.	10147.	10254.
105.00	9893.	9935.	10150.
110.00	9917.	9958.	9946.
115.00	9672.	9711.	9704.
120.00	9151.	9187.	9404.
125.00	9105.	9140.	9048.
130.00	8543.	8574.	8638.
135.00	8139.	8168.	8177.
140.00	7557.	7582.	7668.
145.00	7076.	7098.	7113.
150.00	6644.	6663.	6516.
155.00	5931.	5947.	5880.
160.00	5239.	5252.	5210.
165.00	4567.	4577.	4509.
170.00	3695.	3702.	3780.
175.00	3036.	3041.	3030.

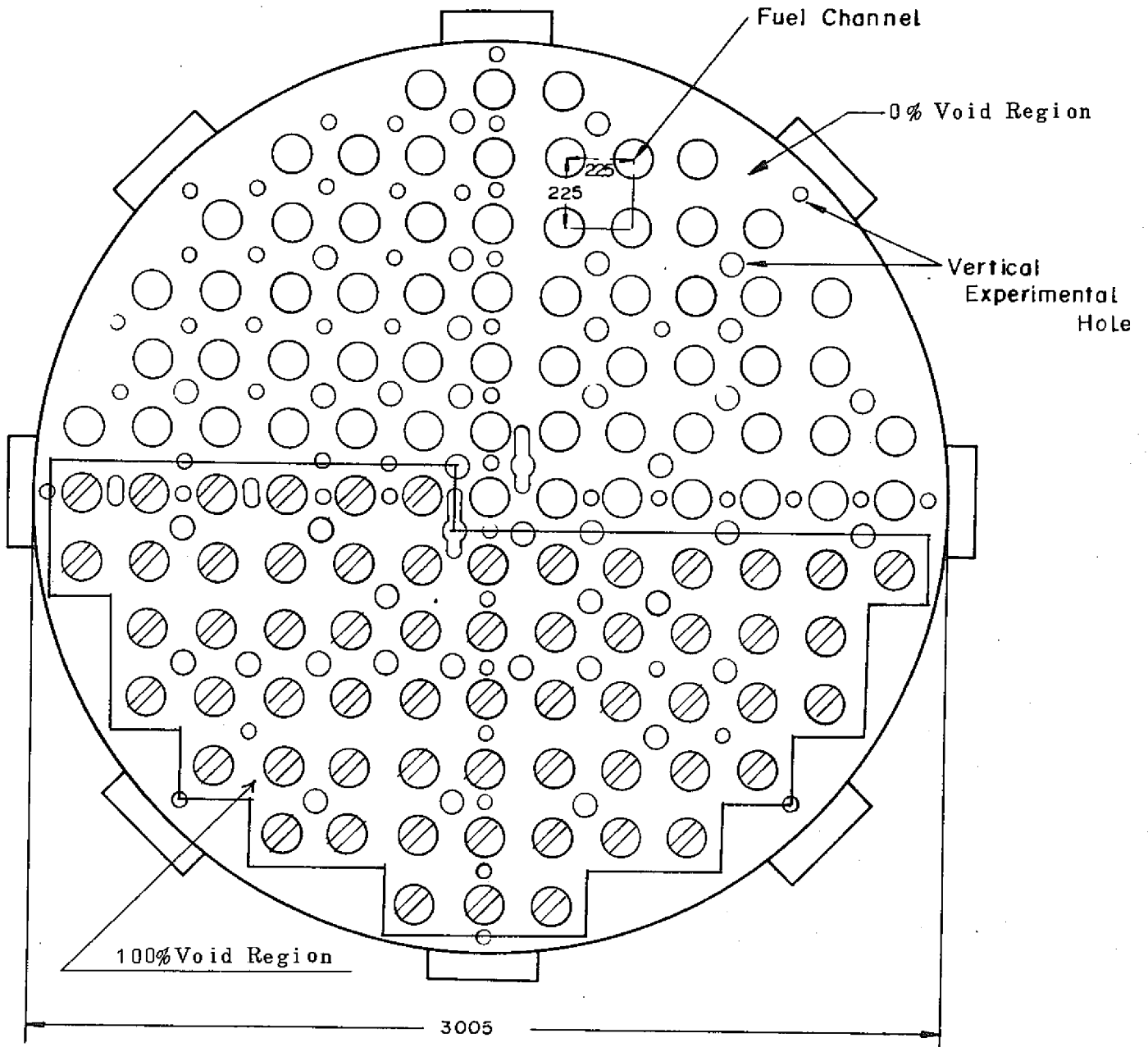


Total Number of Fuel Channel : 121

○ : 1.2 w/o UO₂ Fuel Assembly (Coolant Void Fraction: 0% or 100%)

● : Inserted Position of Control Rod (1C1)

Fig. 1 Configuration of 0% or 100% Void Core

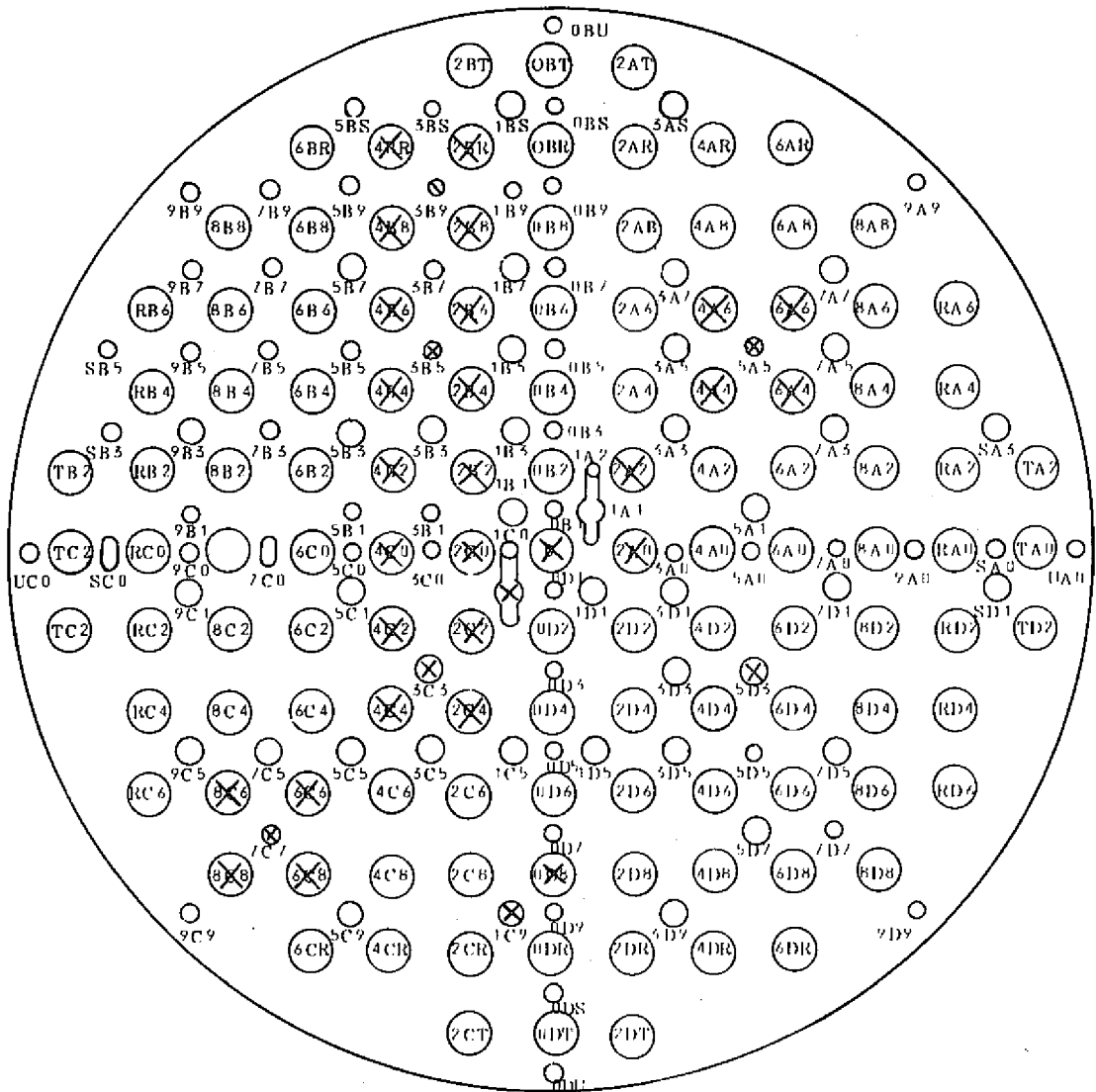


Total Number of Fuel Channel : 121

: 1.2w/o UO₂ Fuel Assembly (Coolant Void Fraction:0%)

: " (Coolant Void Fraction:100%)

Fig.2 Configuration of Core with 1/2 Core 100% Void



X : Position of which Neutron Flux has been measured
 ○ : 1.2w/o UO₂ Fuel Assembly

Fig.3 Measured Position of Radial Neutron Flux

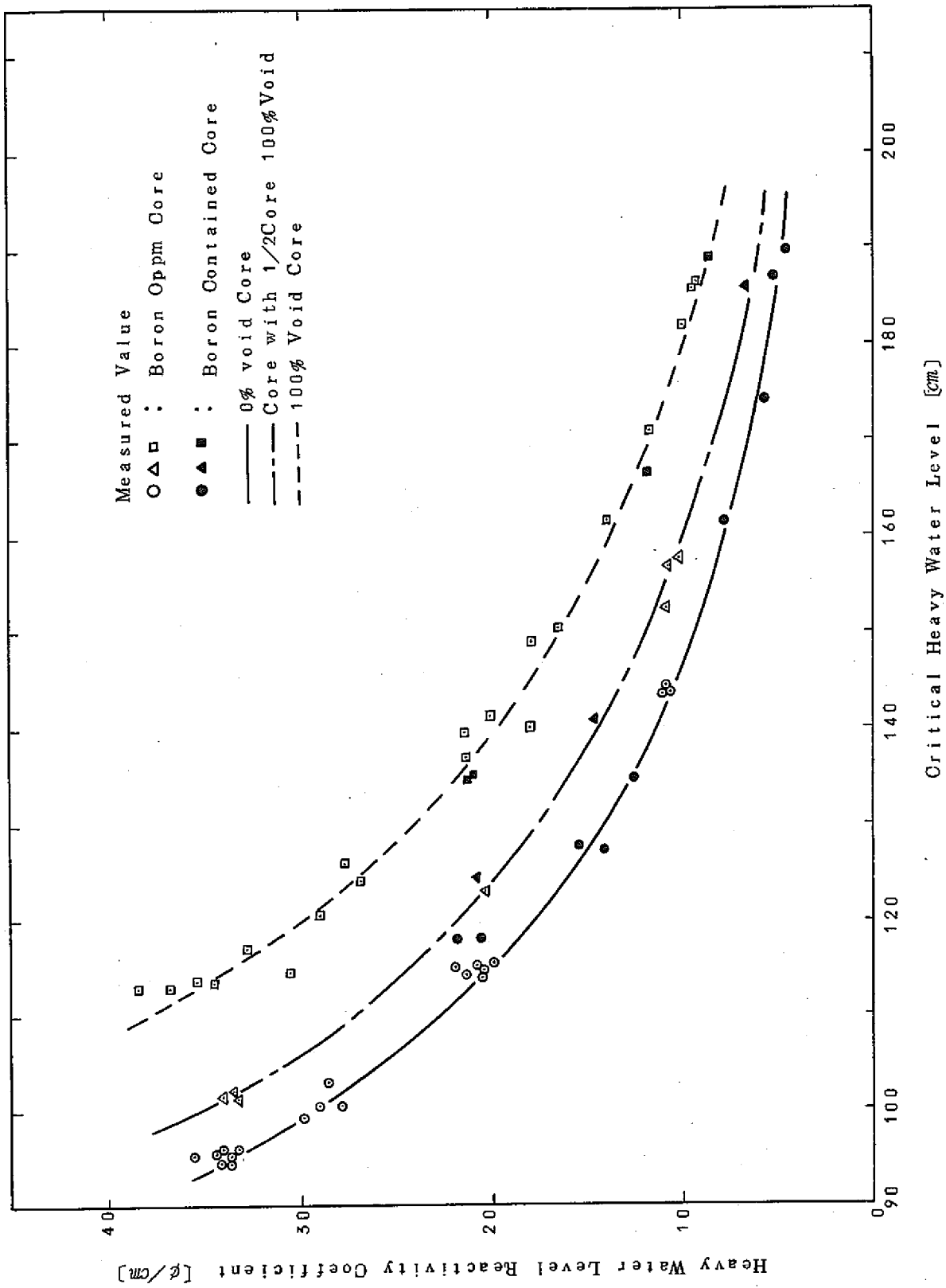


Fig. 4 Heavy Water Level Reactivity Coefficient

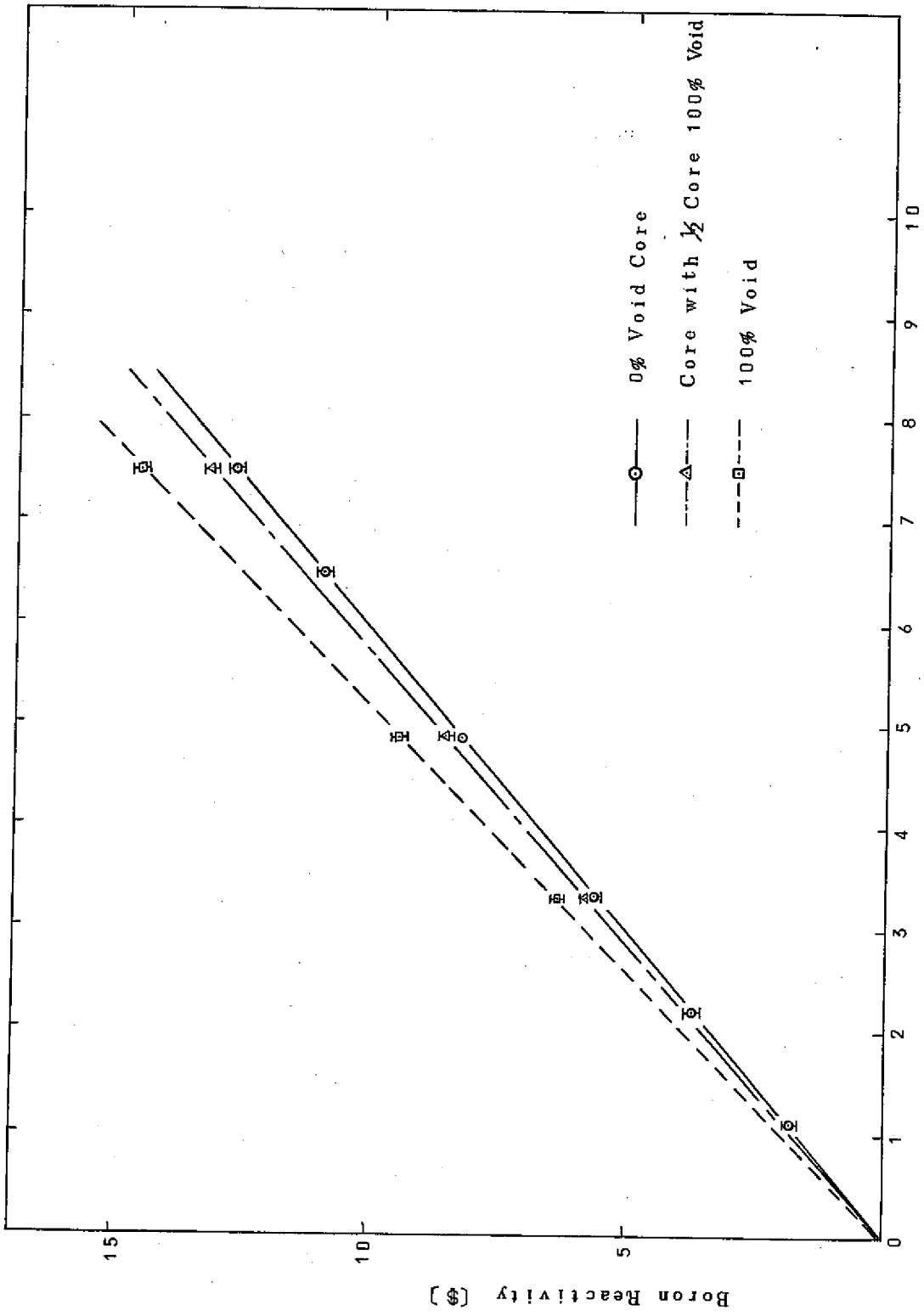


Fig. 5 Boron Reactivity

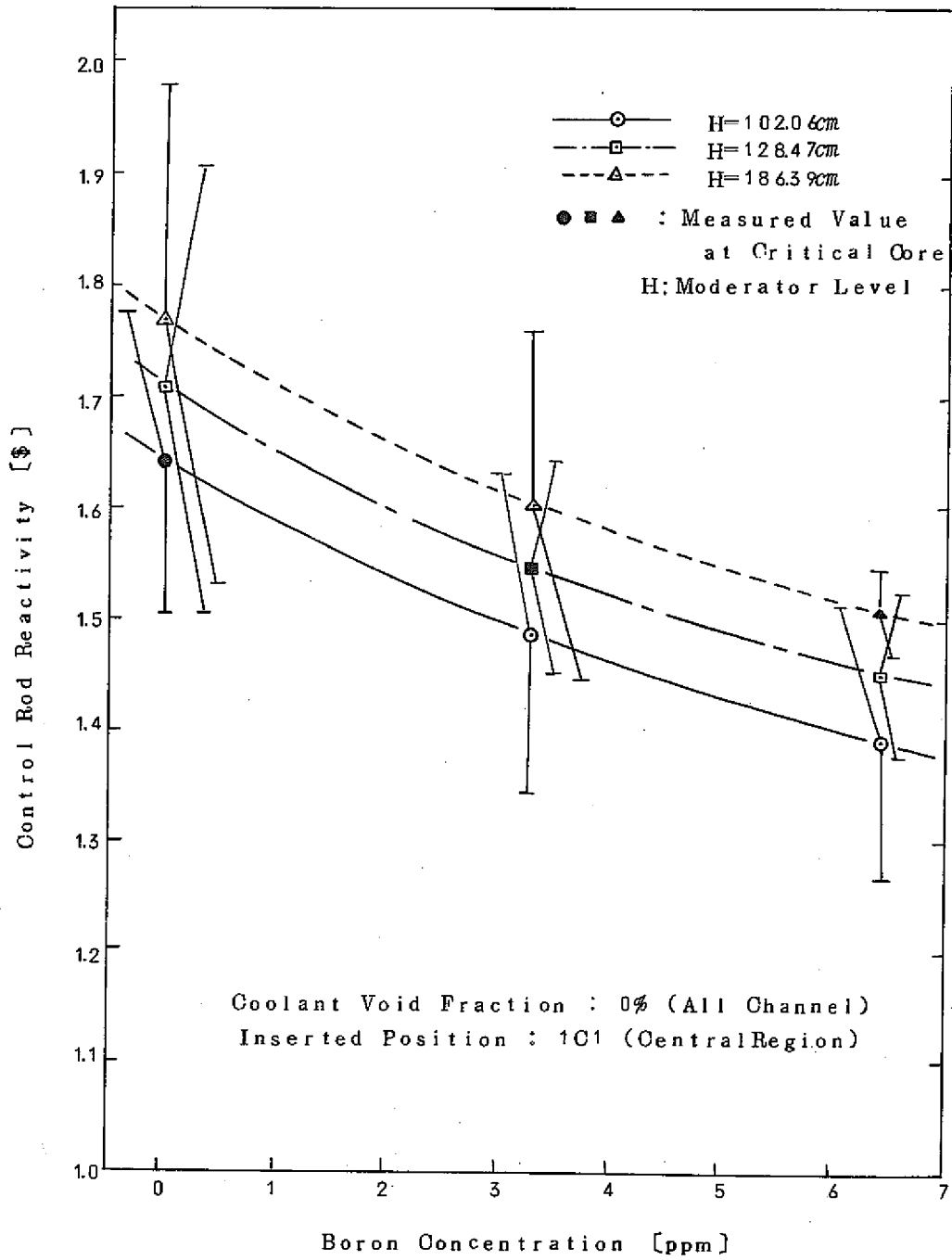
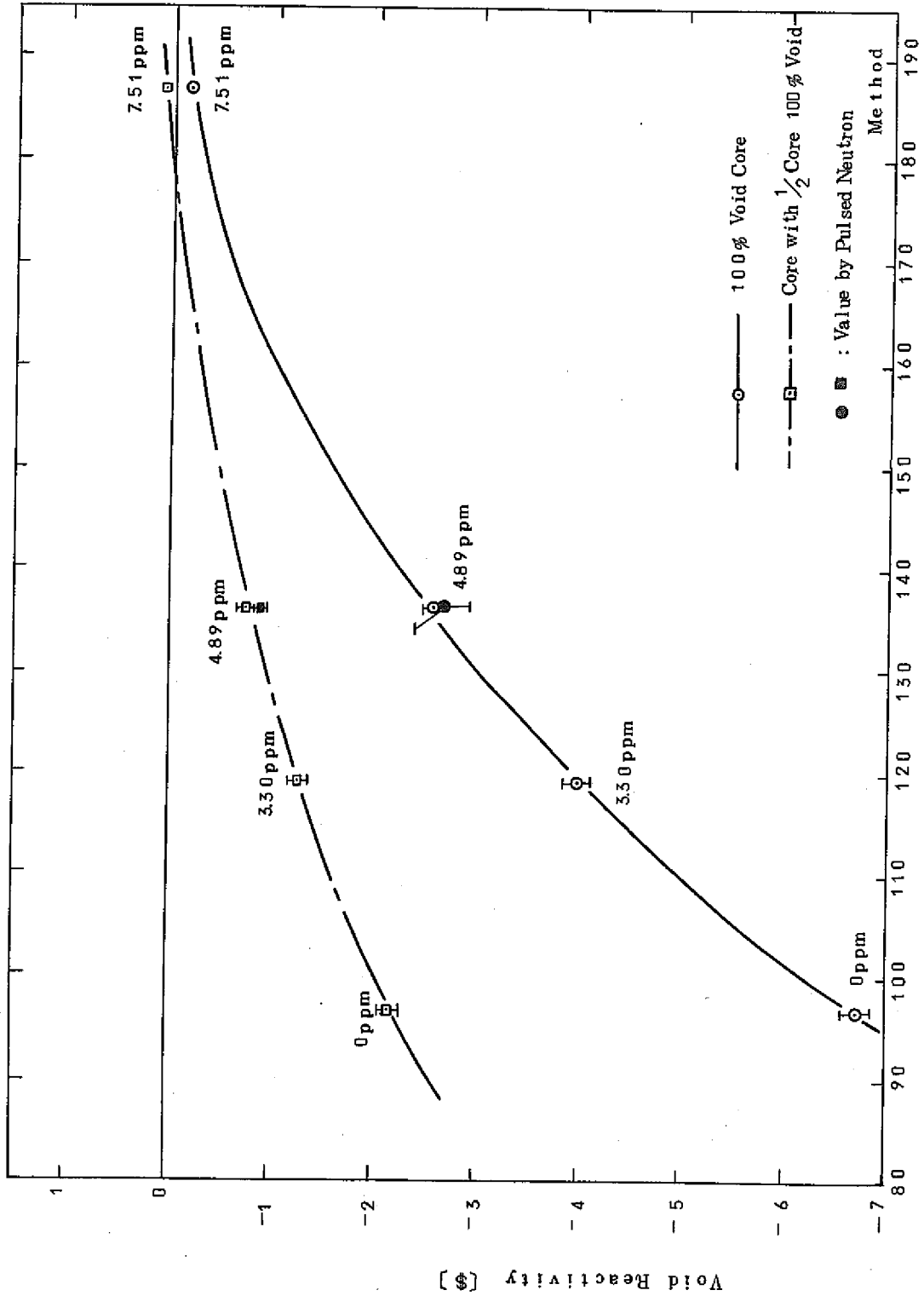


Fig 6 Control Rod Reactivity



Critical Moderator Level [cm]
 Fig. 7 Void Reactivity in Boron Contained Core

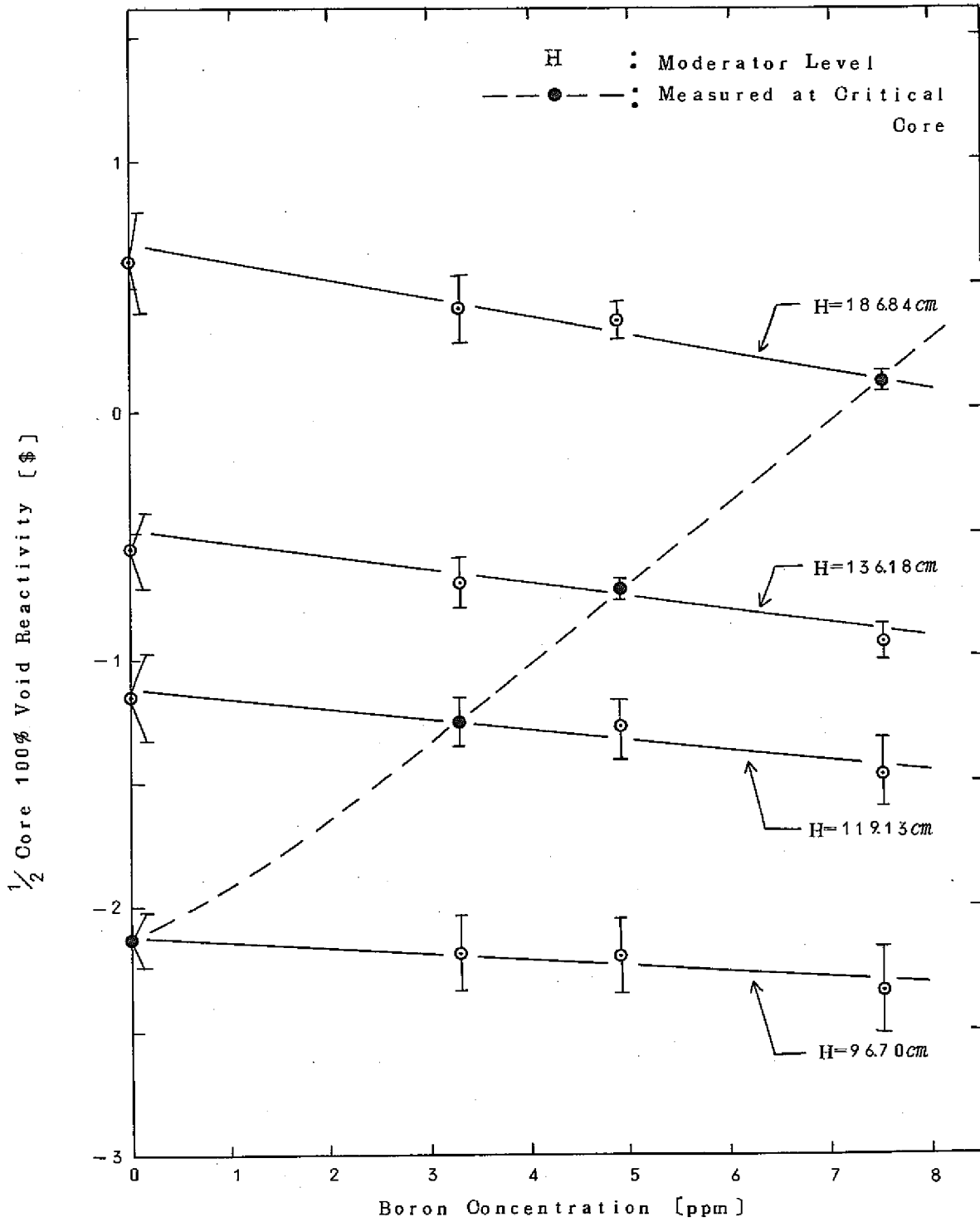


Fig. 8 Dependence of $1/2$ Core 100% Void Reactivity on Boron Concentration

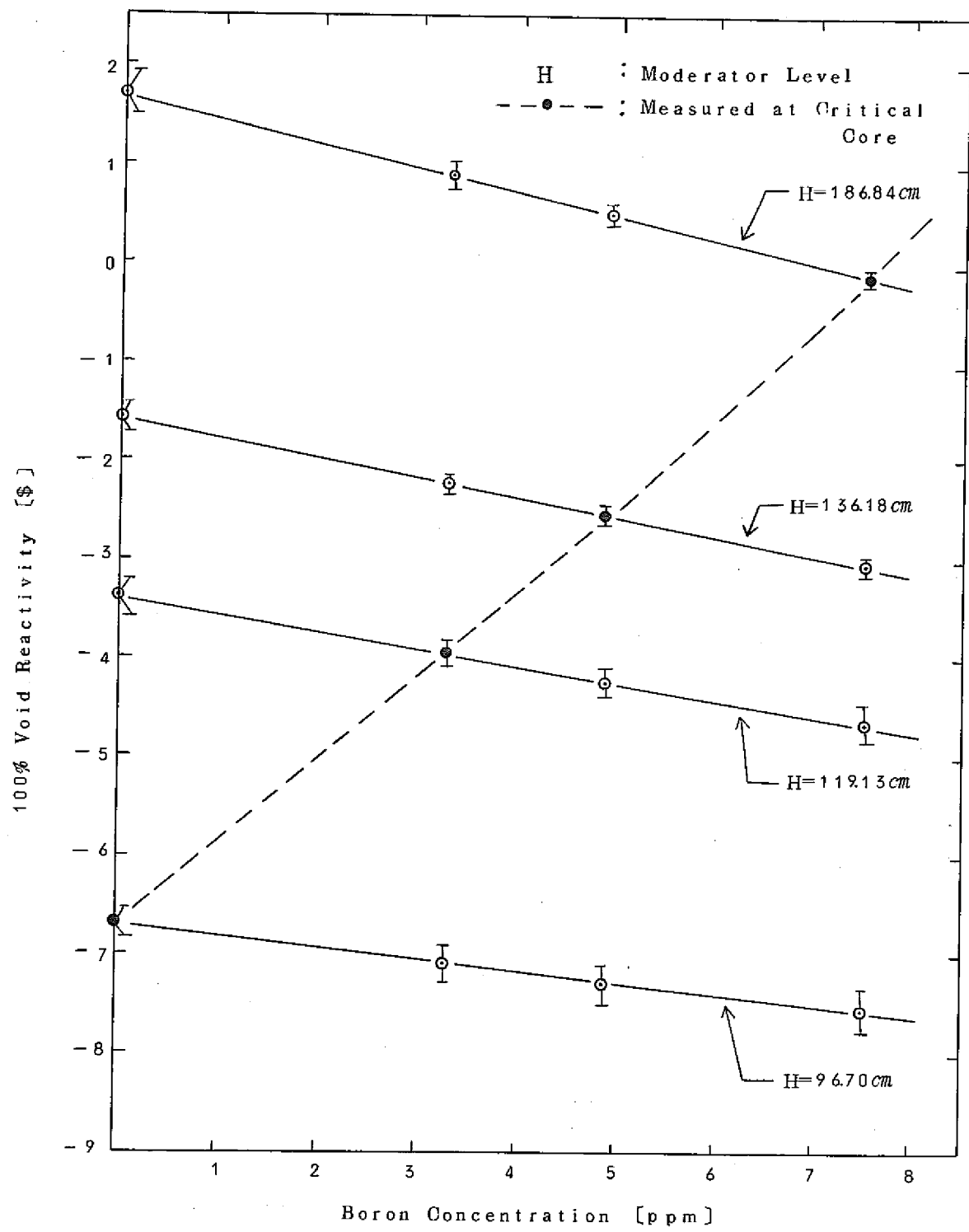


Fig.9 Dependence of 100% Void Reactivity on Boron Concentration

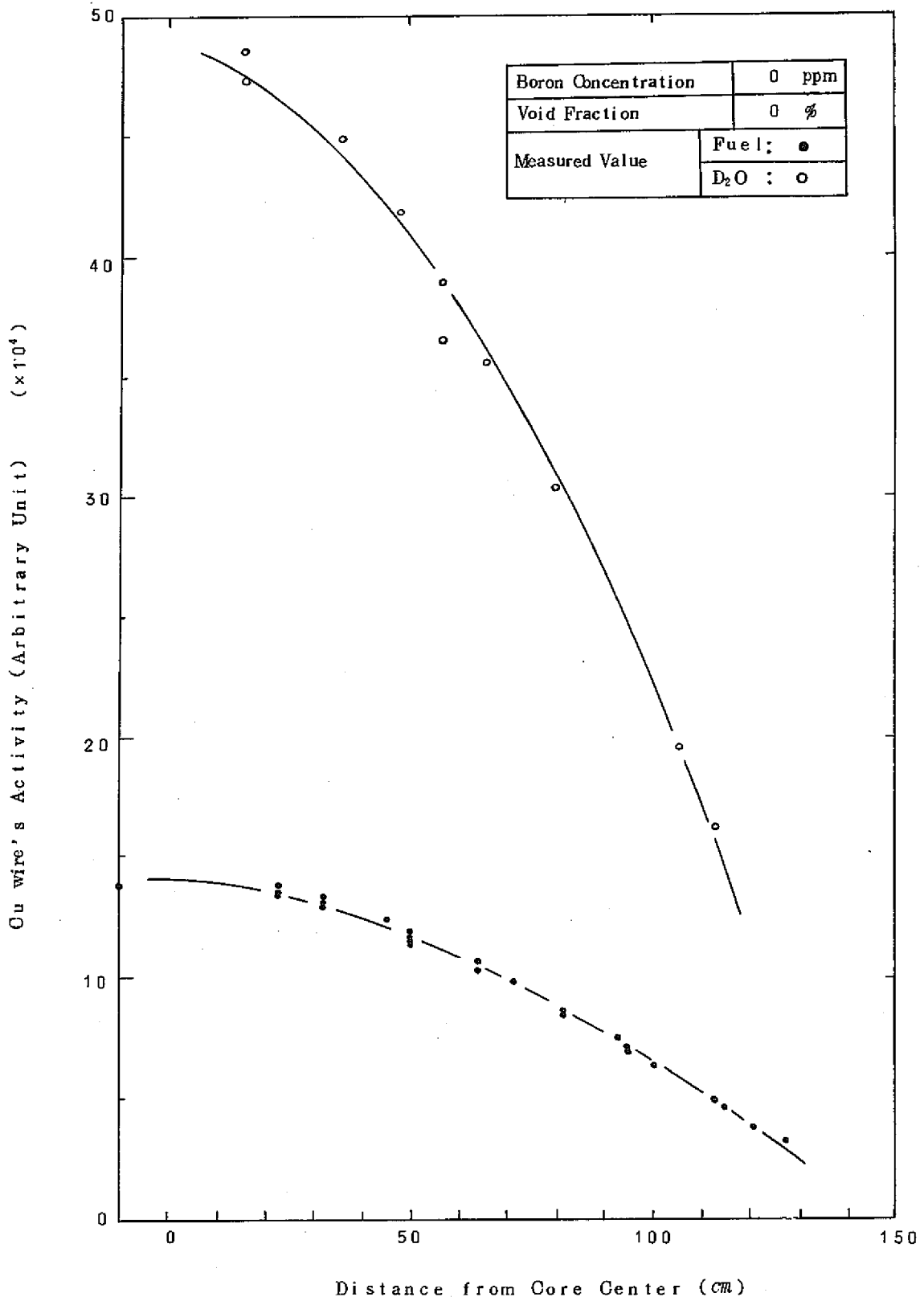


Fig. 10 Radial Flux Distribution

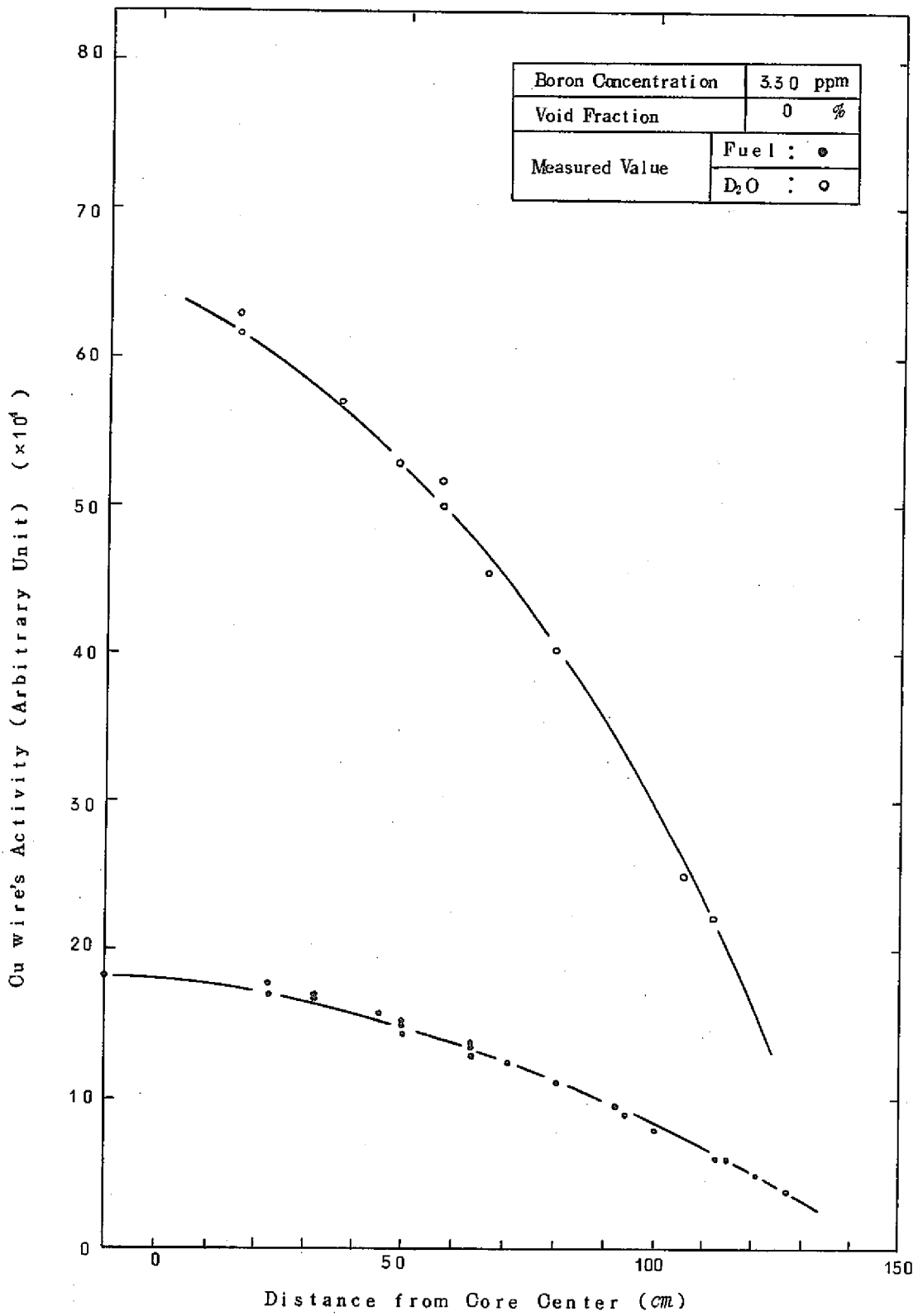


Fig.11 Radial Flux Distribution

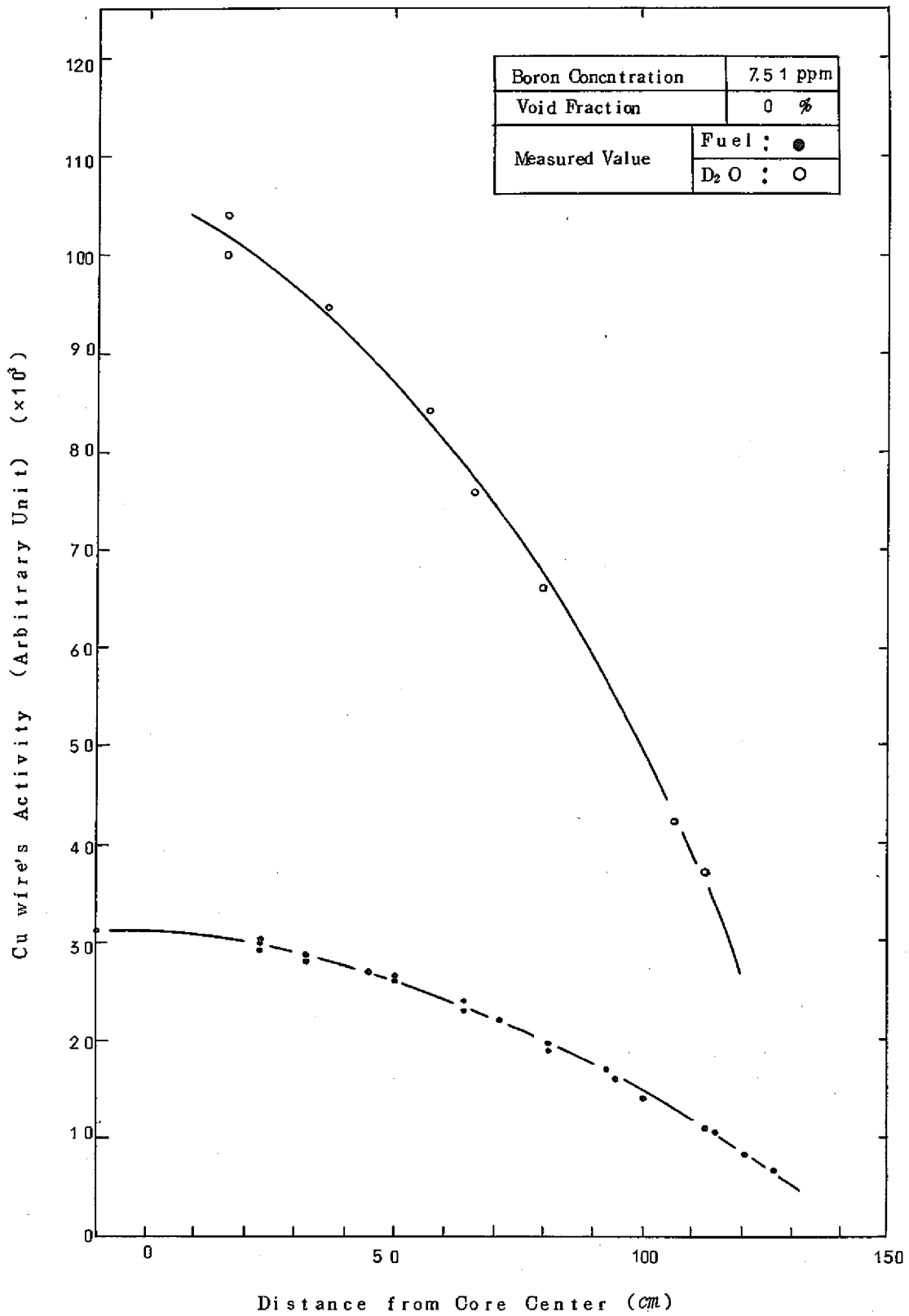


Fig. 12 Radial Flux Distribution

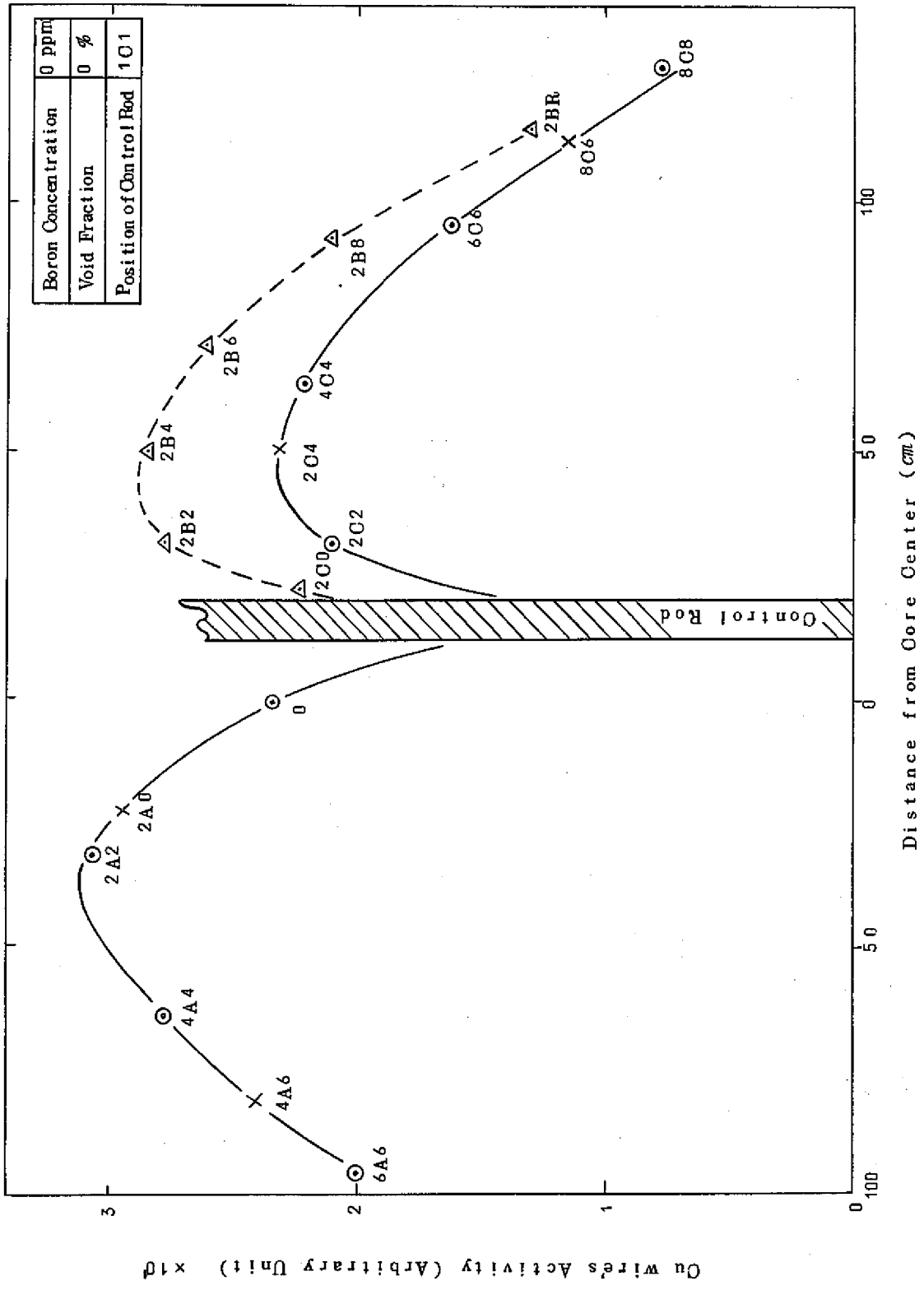


Fig. 13 Radial Flux Distribution in Fuel Channels of Control Rod Inserted Core

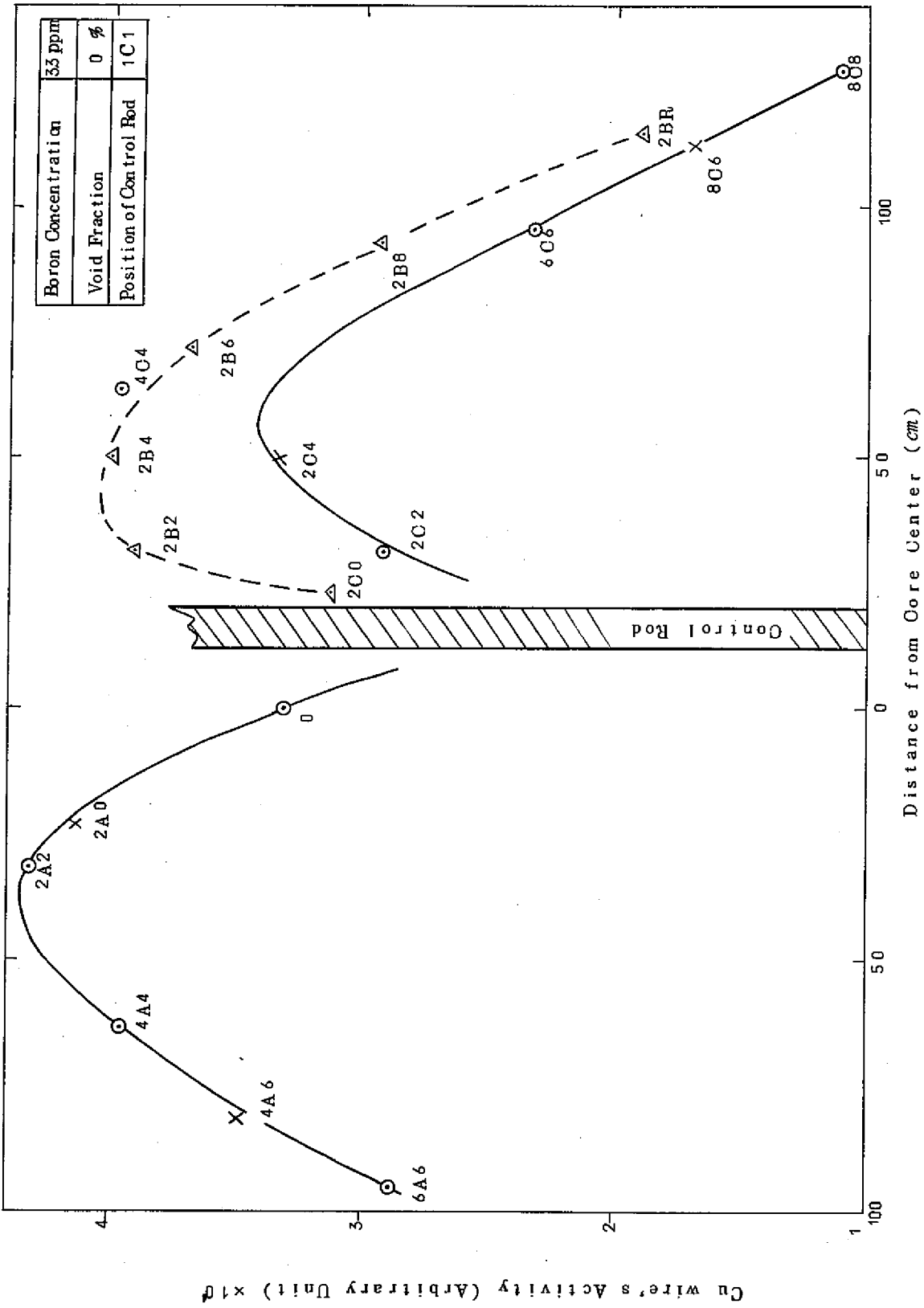


Fig.14 Radial Flux Distribution in Fuel Channels of Control Rod
Inserted Core

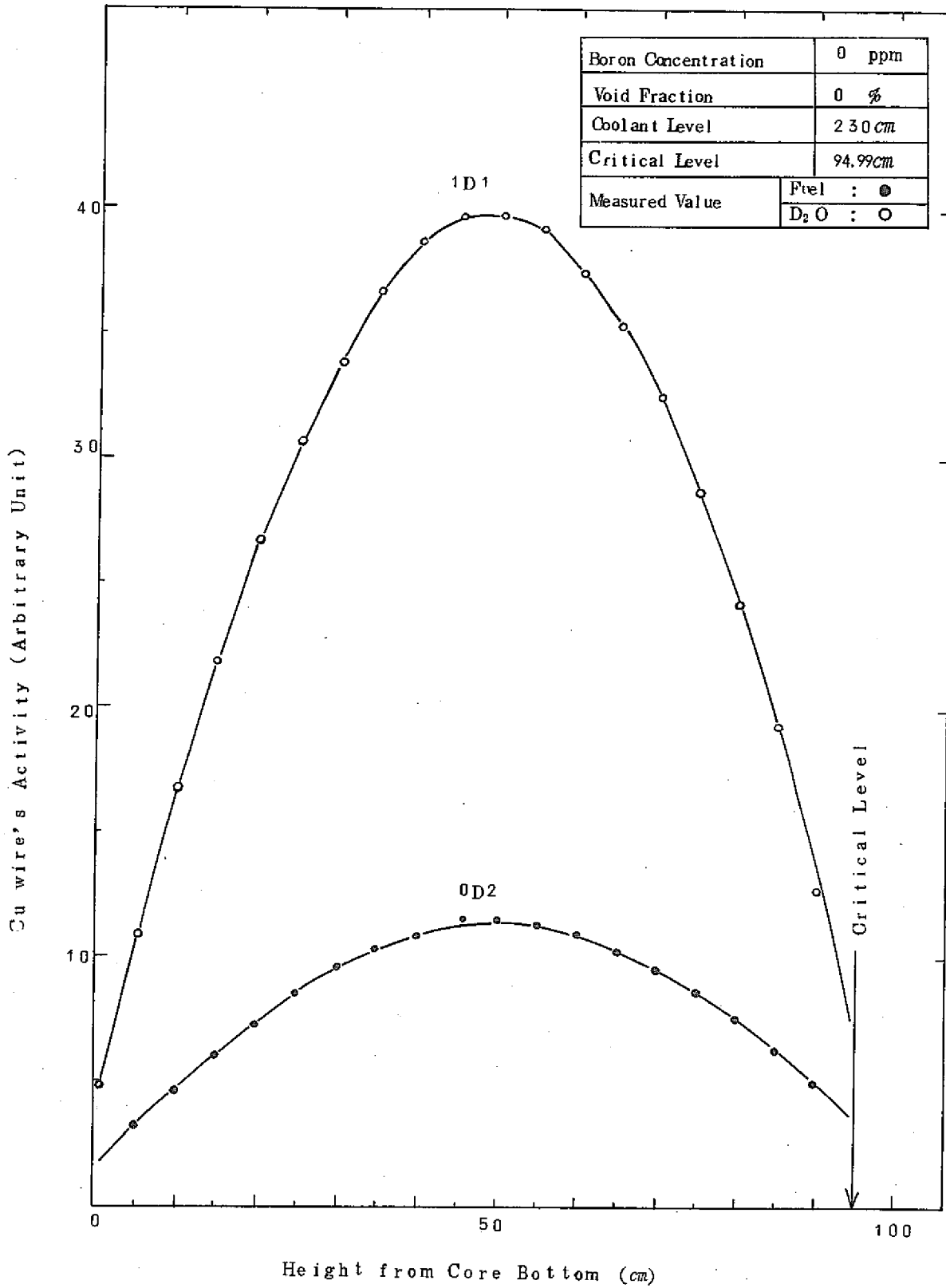


Fig. 15 Axial Flux Distribution

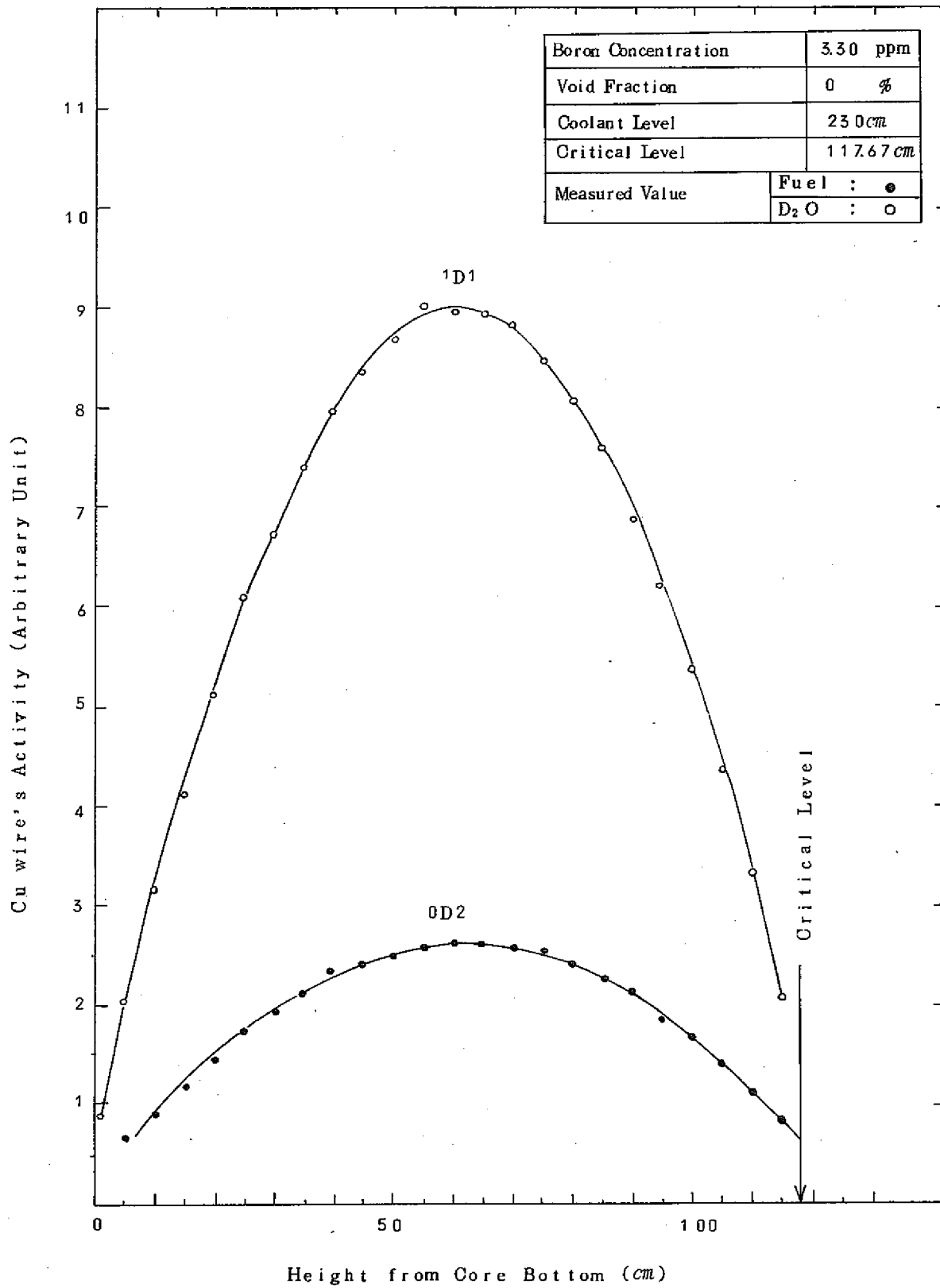


Fig.16 Axial Flux Distribution

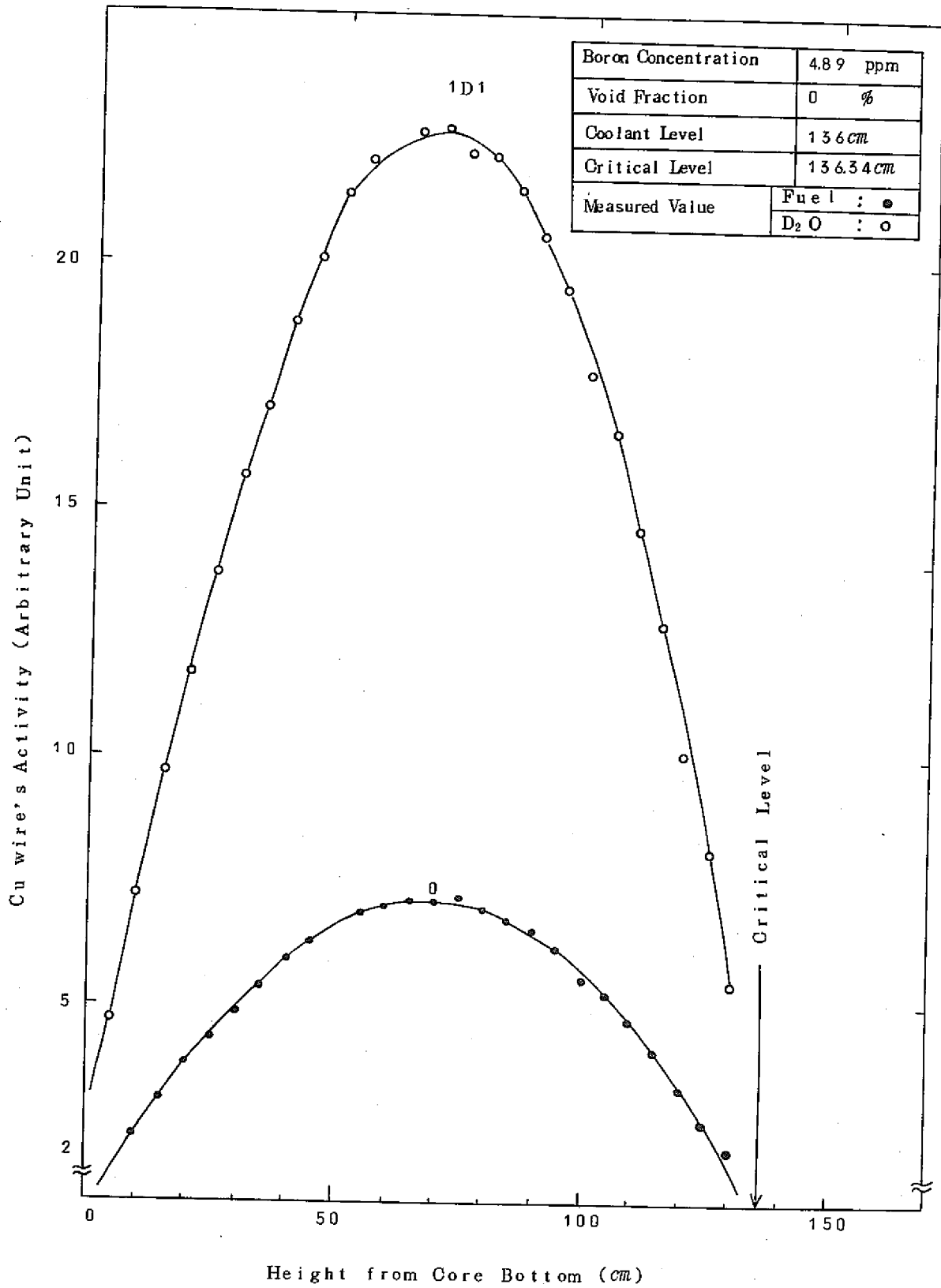


Fig. 17 Axial Flux Distribution

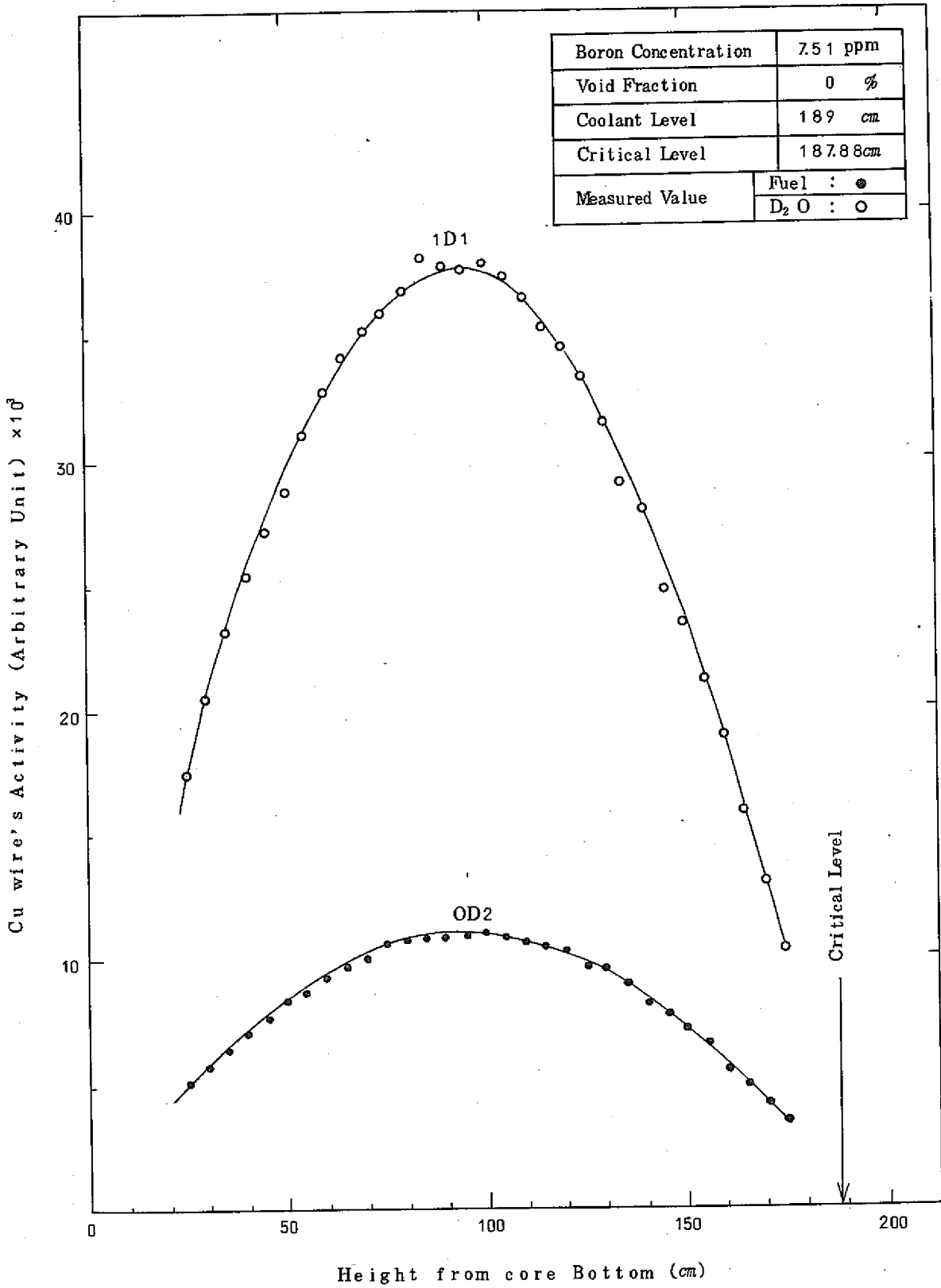


Fig.18 Axial Flux Distribution

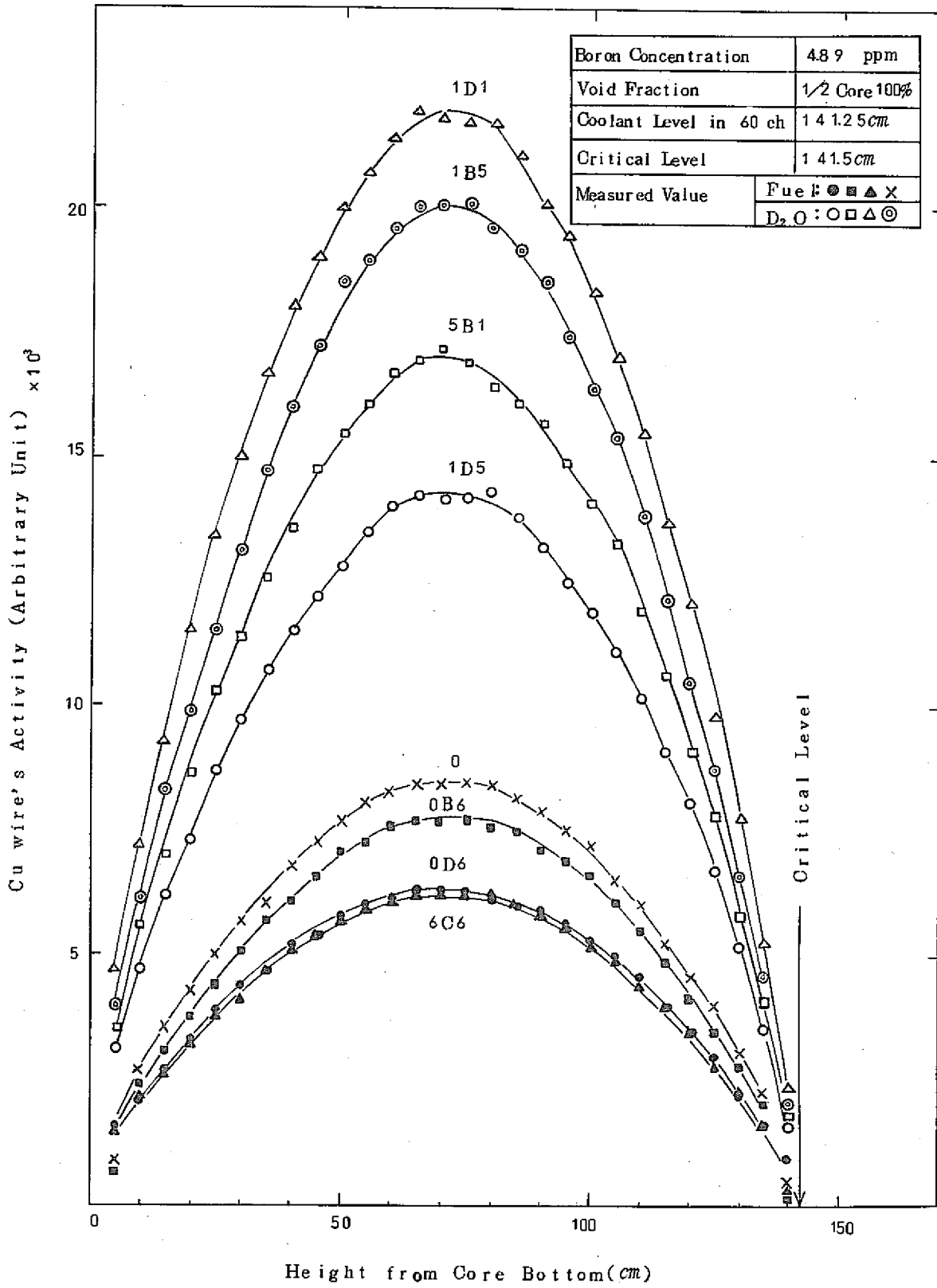


Fig. 19 Axial Flux Distribution

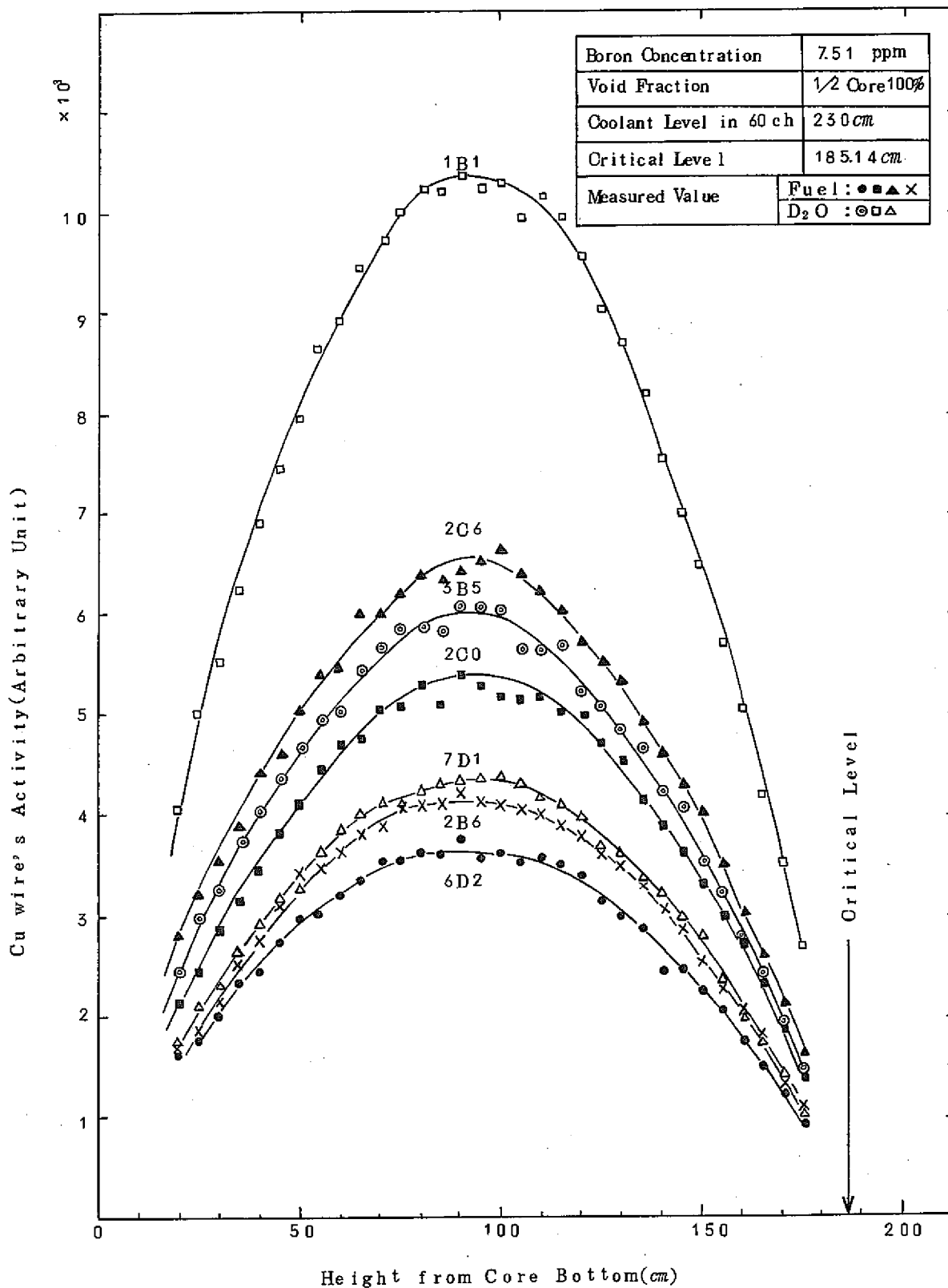


Fig.20 Axial Flux Distribution

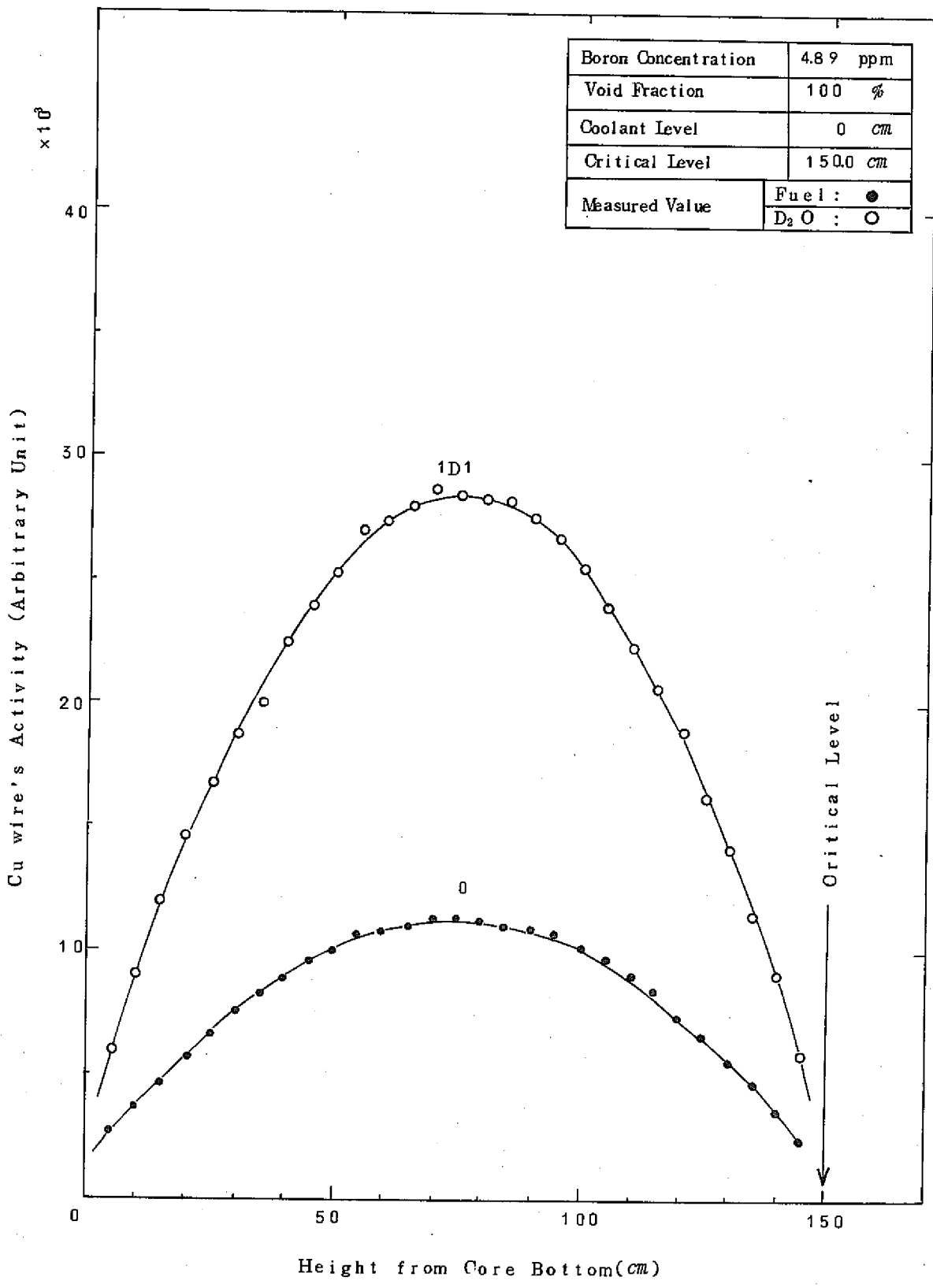


Fig.21 Axial Flux Distribution

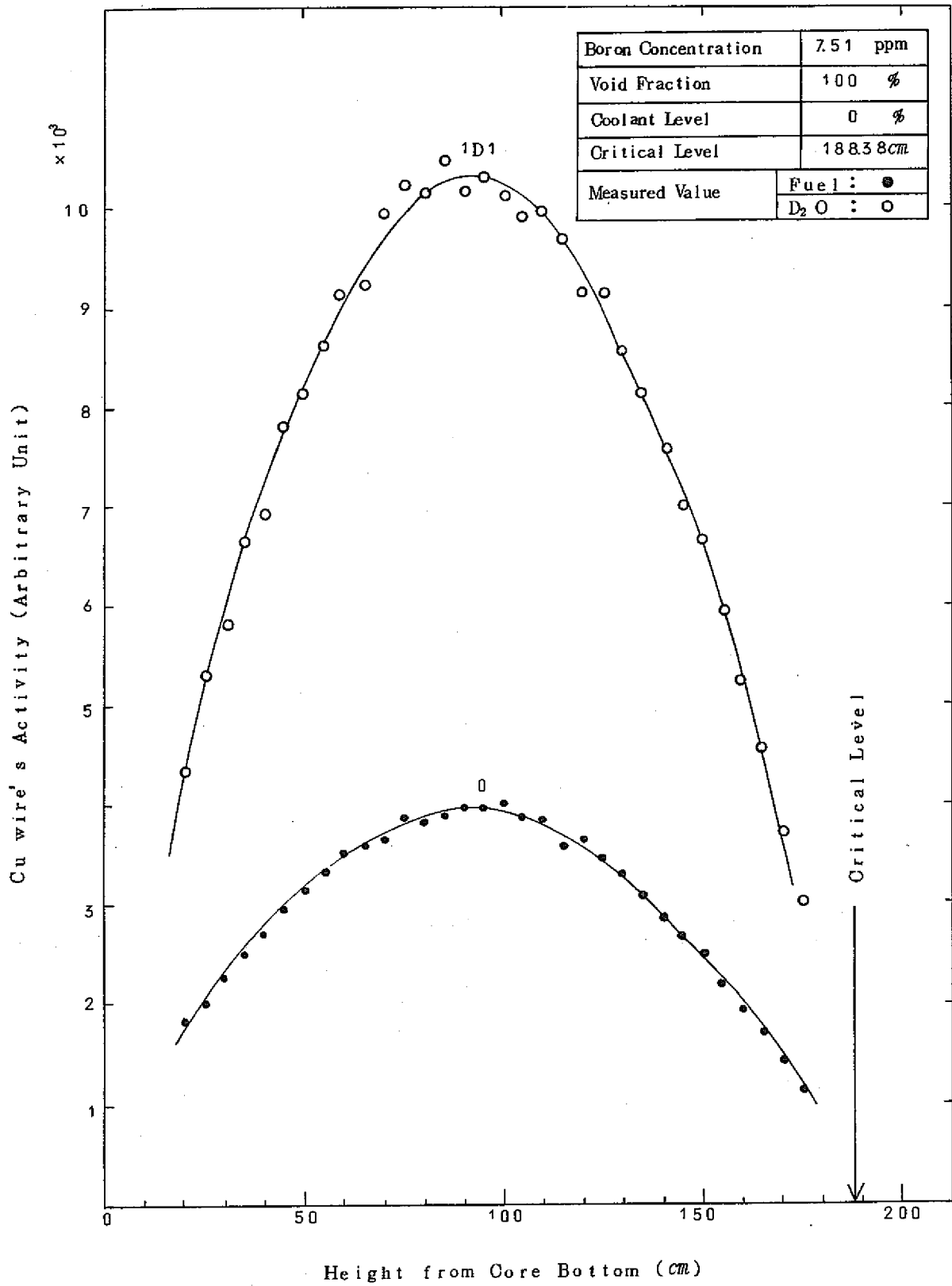


Fig.22 Axial Flux Distribution

付録 1. ボロン添加の方法

(1) ボロン試薬について

重水中に添加するボロン試薬として無水ホウ酸 (B_2O_3)、或いはホウ酸 (H_3BO_3) の 2種類が考えられる。しかし、一般に無水ホウ酸はホウ酸に比較して純度が悪いため、ボロン試薬はホウ酸を用いることに決定した。ボロン試薬中のボロンの同位体比 B^{10}/B^{11} が一定でなければならないので、ホウ酸は同一ロット、同一バッチで製造された J I S 特級試薬を使った。ボロン試薬として用いた J I S 特級ホウ酸 (Boric Acid) の指標は次の通りである。

$$\text{Mol. wt} = 61.83$$

$$\text{Minimum purity} = 99.5\%$$

(2) ボロン溶解重水の作成

減速材重水中にボロンを添加する方法は、まずボロン溶解タンク (溶解タンクと呼ぶ) 内に比較的高濃度のボロン入り重水 (ボロン溶解重水と呼ぶ) をあらかじめ作っておき、このボロン溶解重水を目標とするボロン濃度になるまで減速材重水系に導くことにより行なった。

減速材重水全量 (約 $20 m^3$) を約 7 ppm のボロン濃度にするためには、容量が約 600ℓ の溶解タンク内重水のホウ酸濃度を約 1% 程度にすればよい。溶解タンク内重水中ホウ酸度は 1% にするのに必要なホウ酸重量 x は

$$x = \frac{0.01}{1 - 0.01} W_D$$

から求められる。但し、 W_D は溶解タンク内の重水重量である。溶解タンク内に注入した重水重量 W_D は 665 Kg としたので、溶解タンク内重水中ホウ酸濃度を 1% にするのに必要となるホウ酸重量 x は 6.717 Kg となる。

(3) 減速材重水中に注入するボロン溶解重水量

溶解タンク内のボロン溶解重水をホウ酸濃度が C_1 である減速材重水系に注入したとき、減速材重水中のホウ酸濃度 C は次式である。

$$C = \frac{C_0 W_0 + C_1 W_1}{W_0 + W_1} \quad (\text{A 1-1})$$

但し、 $W_0 W_1$: 減速材重水中に注入したボロン溶解重水量および減速材重水全量
 C_0 : 溶解タンク内ボロン溶解重水のホウ酸濃度

となるから減速材重水中ホウ酸濃度を C_1 から C にするために注入すべきボロン溶解重水量 W_0 は

$$W_0 = \frac{C - C_1}{C_0 - C} W_1 \quad (A1-2)$$

となる。ここで、ボロン (B^{10}) 濃度 C' とホウ酸濃度 C との関係は、ボロンの同位体化 $B^{10} / (B^{10} + B^{11})$ を考慮すれば次のようになる。

$$C = \frac{B^{10} + B^{11}}{B^{10}} \cdot \frac{M_{H_3BO_3}}{M_B} C' = 28.85 C' \quad (A1-3)$$

但し、 $B^{10} / (B^{10} + B^{11}) = 0.1983$ (NBSデータ) であり、 H_3BO_3 及び B (天然) の分子量は $M_{H_3BO_3}$, M_B はそれぞれ 61.833, 10.811 である。

今、減速材重水中初期ボロン濃度は零であるから、(A1-2)式で $C_1 = 0$ とおけば、 W_0 は

$$W_0 = \frac{C}{C_0 - C} W_1 \quad (A1-4)$$

となる。ここで、実験すべき各ボロン濃度について、減速材重水中に注入した1%ホウ酸濃度のボロン溶解重水量 W_0 を Table A-1 に示す。但し、減速材重水全量 W_1 は 2×10^4 Kg として計算した。

Table A-1 Quantity of D_2O poisoned with boron which added to moderator.

Expected B^{10} ppm	Expected H_3BO_3 ppm.	W_0 [Kg]
1	28.85	57.89
2	57.70	116.11
3	86.55	174.67
4.5	129.83	263.16
6	173.10	352.42
7	201.95	412.37

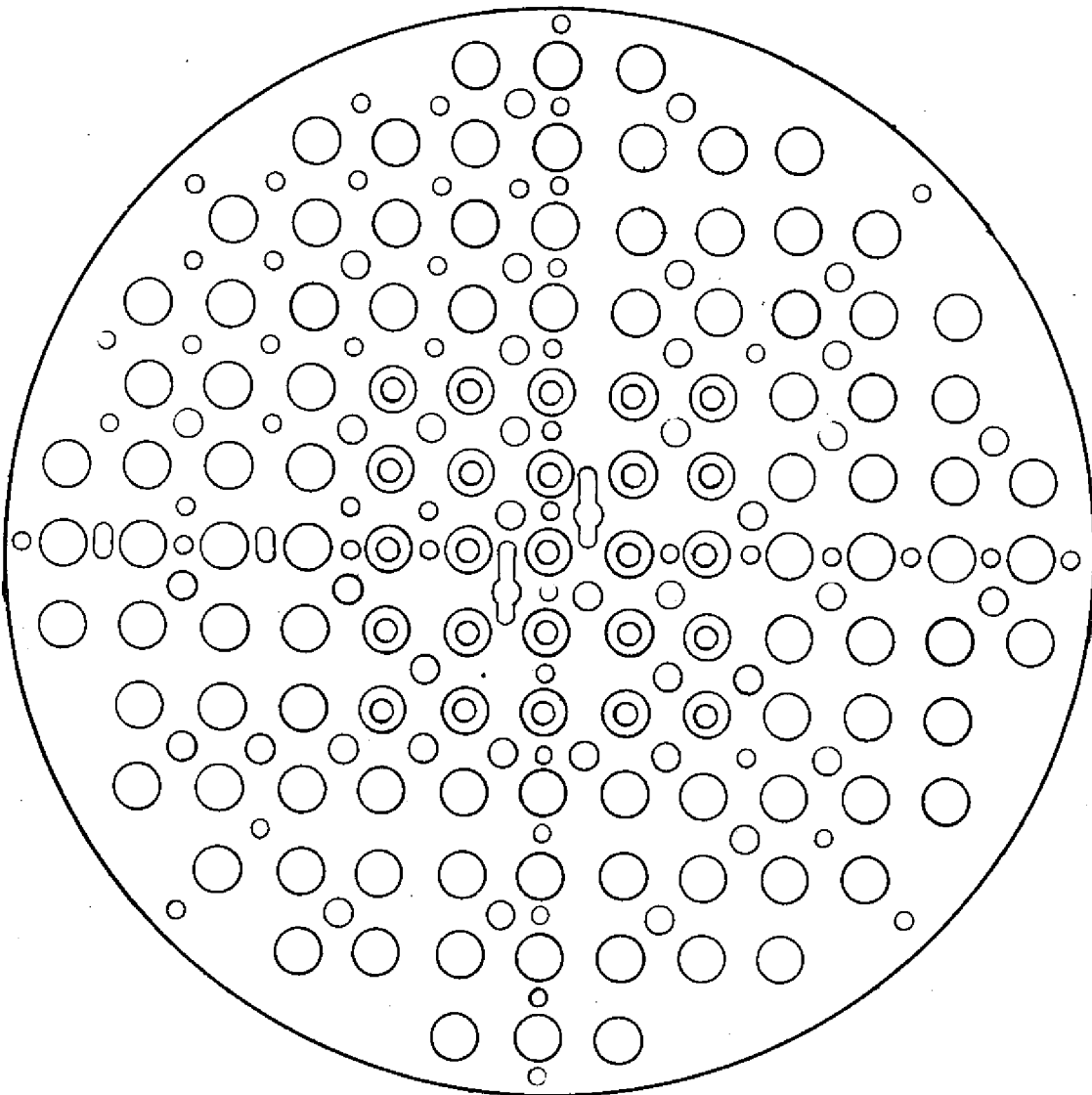
付録 2. ボロン除去について

(1) ボロン除去後の臨界水位確認

Fig. A-1に示す 1.2% UO_2 燃料 25 体装荷炉心 (圧力管内軽水々位 2300 mm) を組み, できる限り臨界水位が高く, 重水々位反応度係数の小さい炉心のボロン添加前とボロン精製後の臨界水位を測定し, 臨界水位差でもって臨界水位の再現性と重水劣化の程度をチェックする参考にした。又, あわせて重水系の温度も測定したので, その結果を Table A-2 に示す。

Table A-2 をみるとボロン添加前とボロン精製後での臨界水位の測定は, 約 2 ヶ月にわたっているが, 重水系の温度は補助タンク内の温度が約 4℃低い 外は変化してなく, 炉心内の重水温度は変化していないとみなせる。従って, ボロン添加前とボロン精製後とのそれぞれの状態における臨界水位の差は重水劣化のみに依存したものである。

その臨界水位差は 1.42 ~ 1.55 mm の幅で変化しており, 反応度にして約 1.1% である。



⊙ : 1.2% EU. 0% Void
○ : Air only

Fig. A-1. Configuration of Core with 25 fuel Assemblies

Table A-2

Number	Before Boron added						After purification	
	1st	2nd	3rd	4th	5th	1st	2nd	
Date	Sept. 11	Sept. 12	Sept. 12	Sept. 12	Sept. 13	Nov. 15	Nov. 16	
Critical level (cm)	184.76(1w)	184.80(1w)	184.85(100w)	184.85(100w)	184.81(100w)	186.60(1w)	186.51(100w)	
Coolant level (cm)	230.0	230.0	230.0	230.0	230.0	230.0	230.0	
Purification time	—	—	—	—	—	157 hr + 05 min	174 hr + 48 min	
$H + \frac{1}{2} \Delta H$ (cm)	1855.4	*2135.05						
Doubling time(sec)	57.5	90.0						
$\Delta p / \Delta H$ (g/cm)	7.43	8.28						
Temperature of D ₂ O	a	25.0	25.2	25.4	25.2		25.0	
	b	25.3	25.2	25.5	25.6	25.5	25.2	
	c	24.8	24.8	24.8	25.2	25.0	24.8	
	d	24.6	24.6	24.8	24.9	24.8	24.7	
	e	25.3	25.4	25.2	25.5	25.4	25.2	
	f	26.8	26.4	28.8	25.6	25.5	22.3	

* D₂O Level of safety rod half inserted core

a : strange tank #6 ↑ d : way out of D₂O cooler

b : " " #62 e : way out of D₂O heater

c : entrance of D₂O cooler f : auxiliary tank

(2) 重水の劣化

実験終了後、重水はイオン交換樹脂塔を通して精製された。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。

精製後、ホウ酸に含まれている軽水がそのまま重水に残留するため、この軽水が重水を劣化させることになる。従って、重水に残留する軽水の重量 $W_{\text{H}_2\text{O}}$ は次のようになる。

$$W_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{3 \times (2M_{\text{H}} + M_{\text{O}})}{2M_{\text{H}_3\text{BO}_3}} C_0 W$$

ここで、

$M_{\text{H}}, M_{\text{O}}, M_{\text{H}_3\text{BO}_3}$: 水素, 酸素及びホウ酸の原子量及び分子量

C_0 : 溶解タンク内ボロン溶解重水のホウ酸濃度

W : 減速材重水系へ注入したホウ酸濃度 C_0 をもつボロン溶解重水の全量

実験では $C_0 = 0.01$, Table A-1 から $W = 412.37 \text{Kg}$ であるから、残留した軽水重量は約 1.8Kg であり、ボロンの精製が理想的に行なわれたとしても、ホウ酸を重水に溶解させたことによつて、なお重水中に約 1.8Kg の軽水が残留し、重水を劣化させたことになる。

(3) 精製によるボロン除去

分析されたボロン濃度とそのボロン濃度をまつ炉心の臨界水位を示した Fig. A-2 の結果を用いて、精製開始後 t 時間における臨界水位を測定することにより、その時刻でのボロン濃度を推定した。このようにして、精製開始後 t 時間経過時における重水中ボロン濃度が臨界水位を測定することによつて得られた。

Table A-3 と Fig. A-3 に精製途中に測定された精製時間 t とボロン濃度を示す。精製によるボロン除去式は、イオン交換樹脂を通過するボロン含有重水中のボロンはすべて除去されるものとするれば、精製時間 t (時間) におけるボロン濃度 $C(t)$ は

$$C(t) = Ae^{-\lambda t} \quad (\text{ppm}) \quad (\text{A 2-1})$$

$$\lambda = v/D \quad (\text{A 2-2})$$

但し、

v : 重水流速 ($\text{m}^3/\text{hr.}$)

D : 重水全量 (m^3)

A : 初期ボロン濃度 (ppm)

で示されることが分っているので、Table A-3 の測定データを (A 2-1) 式にフィット

した。Fig. A-3の実線がフィットした結果を示す。

その結果、精製によるボロン除去式は

$$C(t) = 7.507 \cdot \text{Exp}[-(0.0414 \pm 0.0019)t] \quad (\text{ppm}) \quad (\text{A2-3})$$

なる実験式で表わされる。精製によるボロン濃度の半減期 $T_{1/2}$ は次式で示される。

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 16.75 \pm 0.78 \quad (\text{hr}) \quad (\text{A2-4})$$

Table A-3

No. of 100% Void Channel	Purification Time (hr)	Boron Con- centration (ppm)	Critical Level:H (TW)(cm)	Coolant Level (cm)	$H + \frac{1}{2}\Delta H$ (cm)	Doubling Time (sec)	$\Delta\rho/\Delta H$ (ϕ/cm)
121	4	6.15	166.11	0	166.55	66.92	11.92
121	17	3.35	134.62	0	134.87	65.38	21.10
121	45.5	1.05	117.80	0			
121	61.5	0.5	114.65	0			

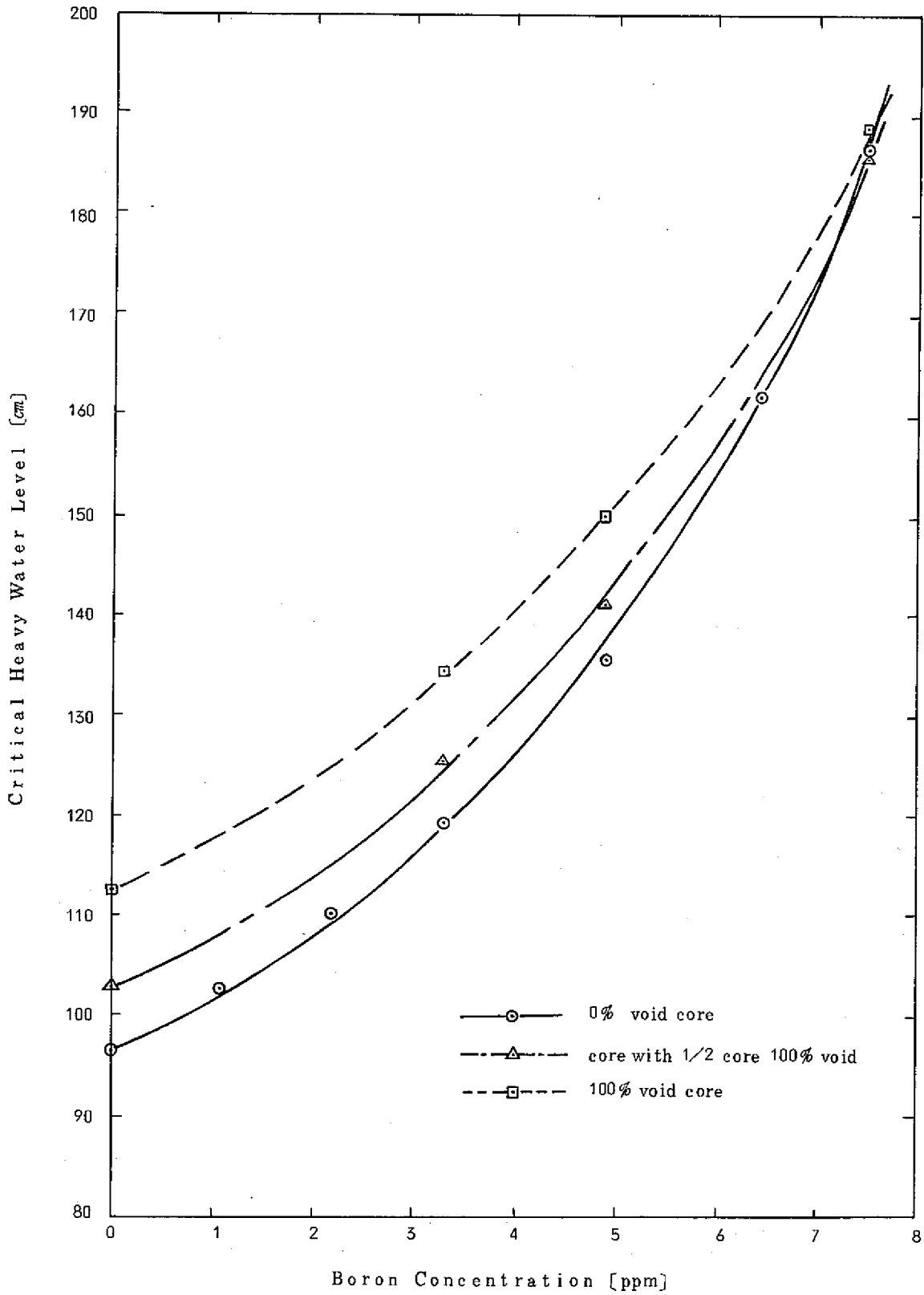


Fig. A-2 Critical Level of Boron Contained Core

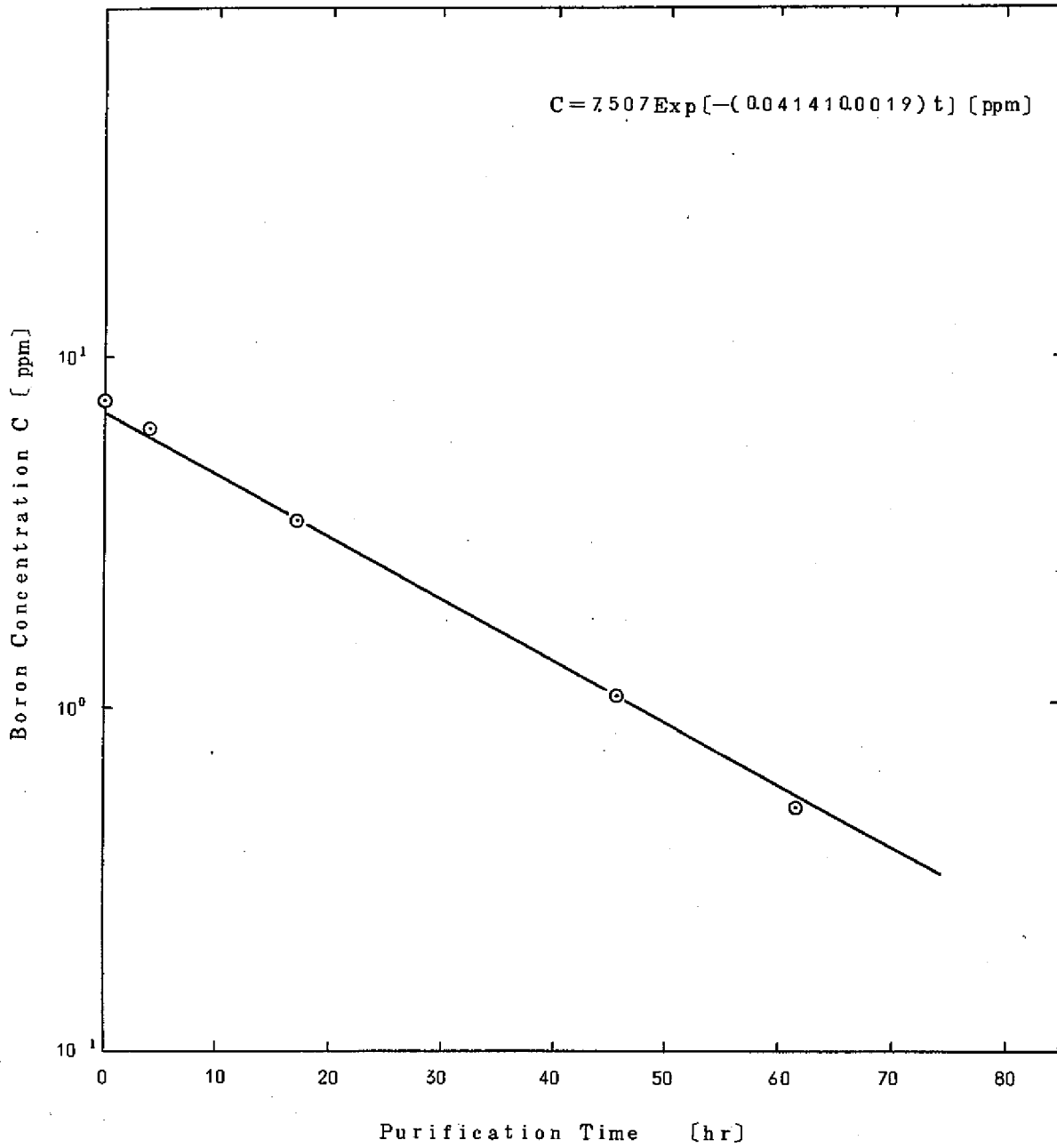


Fig A- 3 Purification Time v.s Boron Concentration

付録3 任意の重水々位をもつ炉心における制御棒反応度

ボロン濃度 x ppm で重水々位 H の炉心における制御棒全引抜きおよび全挿入されたそれぞれの炉心の余剰反応度 (未臨界面) $\rho_{ex}^{no\ rod}(x\ ppm)$ および $\rho_{ex}^{rod}(x\ ppm)$ の差分として、重水々位 H であるボロン濃度 x ppm 炉心の制御棒反応度 $\rho_{rod}(x\ ppm, H)$ が

$$\begin{aligned} \rho_{rod}(x\ ppm, H) &= \rho_{ex}^{no\ rod}(x\ ppm) - \rho_{ex}^{rod}(x\ ppm) \\ &= \int_{H_0^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^{x\ ppm} dH - \int_{H_{rod}^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^{x\ ppm}_{rod} dH \quad (A3-1) \end{aligned}$$

なる式から算出できる。

ここで、重水々位 H である炉心の制御棒全引抜き炉心に対して、制御棒を挿入したことによる吸収体の影響および制御棒挿入炉心臨界面 H_{rod}^x からずれたことに対する中性子漏洩量の変化を補正することを考える。

(A3-1) 式を変形すると 4.3 節に示した (4-4) 式となる。

$$\rho_{rod}(x\ ppm, H) = \rho_{rod}(x\ ppm) + \left[\int_{H_{rod}^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^{x\ ppm} dH - \int_{H_{rod}^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^{x\ ppm}_{rod} dH \right] \quad (4-4)$$

吸収体の影響を除き、中性子漏洩量の変化の補正項である (4-4) 式右辺の [] 内の第 1 項 (ρ_1 とおく)、第 2 項 (ρ_2 とおく) は任意の重水々位 H が制御棒の挿入されないボロン濃度 x ppm 炉心の臨界面 H^x との大小関係によって次のように表わされる。

(1) $H \leq H^x$ のとき

$$\rho_1 = \left| \int_{H_{rod}^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^M dH \left\{ 1 + \frac{\beta_{eff}}{2} \int_{H_{rod}^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^M dH \right\} \right| \quad (A3-2)$$

$$\rho_2 = \rho_{rod}(x\ ppm) + \left| \int_{H^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^M dH \left\{ 1 + \frac{\beta_{eff}}{2} \int_{H^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^M dH \right\} \right| \quad (A3-3)$$

(2) $H^x \leq H$ のとき

$$\rho_1 = \int_{H^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^M dH \left\{ 1 + \frac{\beta_{eff}}{2} \int_{H^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^M dH \right\} - \rho_{rod}(x\ ppm) \quad (A3-4)$$

$$\rho_2 = \int_{H_{rod}^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^M dH \left\{ 1 + \frac{\beta_{eff}}{2} \int_{H_{rod}^x}^H \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^M dH \right\} \quad (A5-5)$$