

JAERI - M
84-020

使用済燃料輸送キャスクの遮蔽実験(4)
—BWR使用済燃料による「線源形状評価の
ための実験」—

1984年2月

田中 俊一・山路 昭雄*・坂本 幸夫・足立 守
近藤 真・内山 順三・佐藤 博・飯田 省三
小林 忠義・広瀬 彰・山原 武・野村 勇
大枝 悅郎・白崎 昭夫・寺門 正吾・片倉 純一
内藤 俶孝

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 埼玉県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財團法人原子力広済会資料センター（〒319-11 埼玉県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費領収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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行　日本原子力研究所
印　　刷　　株式会社原子力資料サービス

使用済燃料輸送キャスクの遮蔽実験(4)
—BWR使用済燃料による「線源形状評価のための実験」—

日本原子力研究所東海研究所

田中俊一⁺¹・山路昭雄^{*}・坂本幸夫⁺²・足立 守⁺³
近藤 真⁺³・内山順三⁺³・佐藤 博⁺³・飯田省三⁺³
小林忠義⁺³・広瀬 彰⁺³・山原 武⁺⁴・野村 勇⁺⁴
大枝悦郎⁺⁴・白崎昭夫⁺⁴・寺門正吾⁺⁴・片倉純一⁺²
内藤淑孝⁺²

+1 原子炉工学部

+2 安全解析部

+3 研究炉管理部

+4 実用燃料試験室

(1 9 8 4 年 1 月 23 日 受理)

使用済燃料取扱施設の遮蔽安全性評価コードシステム、同データライブラリの検証実験計画に基づき、BWR 使用済燃料集合体を利用した「線源形状評価のための実験」を行なった。この実験は燃料集合体を 1 つの体積線源と見做して解析を行なう場合の線源形状の近似手法を評価、検討するために必要な測定データを取得することを目的とするもので、照射履歴のはゞ同じ 2 体の燃料集合体が実験に用いられた。実験は水中においてそれぞれの燃料集合体ごとの測定と 2 体の燃料集合体を近接させた場合の測定が行われ、燃料集合体周囲のガンマ線線量率、²³⁵U および²³²Th の核分裂反応率分布が測定された。この結果、BWR 使用済燃料からのガンマ線、中性子の発生量は燃料の下端から全長約 1/3 上の付近で最大となり上部に行くにつれてかなり少なくなること、そしてこの傾向は中性子の場合より顕著であることなどが実験的に明らかにされた。

本報告書では、詳細な測定結果と合せ、これらの解析に必要な実験条件、測定器の特性などが述べられている。

Shielding Experiments for Evaluating a Shielding Safety Evaluation Code System to Spent Fuel Processing Facilities - (4)

- Experiments for the Assessment on Source Geometry of BWR Spent Fuel Assemblies -

Shun-ichi TANAKA⁺¹, Yukio SAKAMOTO⁺², Akio YAMAJI*, Mamoru ADACHI⁺³, Makoto KONDO⁺³, Junzo UCHIYAMA⁺³, Hiroshi SATO⁺³, Shozo IIDA⁺³, Tadayoshi KOBAYASHI⁺³, Akira HIROSE⁺³, Takeshi YAMAHARA⁺⁴, Isamu NOMURA⁺⁴, Itsuro OOEDA⁺⁴, Akio SHIRASAKI⁺⁴, Shogo TERAKADO⁺⁴, Jun-ichi KATAKURA⁺², Yoshitaka NAITO⁺²

⁺¹ Department of Reactor Engineering
⁺² Department of Nuclear Safety Evaluation
⁺³ Department of Research Reactor Operation
⁺⁴ Department of Reactor Fuel Examination

Tokai Research Establishment, JAERI
(Received January 23, 1984)

Shielding experiments of a spent fuel transport cask were performed using two BWR spent fuel assemblies according to the experimental plan to confirm the reliability of a shielding safety evaluation code system and data libraries. The experiment was made using two BWR spent fuel assemblies with a same burnup and cooling history. The distributions of gamma-ray dose rate and ^{235}U and ^{232}Th fission rates were measured around each assembly and two assemblies. The maxima of gamma-ray exposure dose rate and ^{235}U fission rate were observed at about one to third of fuel length from the bottom. The intensities above the position were decreased along the upper direction, where the fission rate was more steeply than the gamma-ray dose rate.

This report gives the data of the experimental conditions and the detector characteristics necessary for the analysis of the experiments as well as the measured data.

Keywords: Shielding Experiment, BWR Spent Fuel Assembly, Neutron Fission Rate, Radcon, ^{235}U , Fission Counter, ^{232}Th , Gamma-ray Dose Rate, Safety Evaluation, Spent Fuel Processing

* Ship Research Institute

目 次

1. 序 言	1
2. 実験方法	1
3. 測定器の特性	2
3.1 ラドコン線量計	2
3.2 核分裂計数管	3
4. 測定結果	4
4.1 ガンマ線線量率分布測定	4
4.2 中性子の反応率分布測定	5
5. まとめ	5
謝 辞	6
参考文献	7

Contents

1.	Introduction	1
2.	Experimental Procedure	1
3.	Characteristics of Detectors.....	2
3.1	Radcon Dosimeter	2
3.2	Fission Counter	3
4.	Experimental Results	4
4.1	Distributions of Gamma-ray Exposure Dose Rates ...	4
4.2	Distributions of Fission Rates	5
5.	Summary	5
	Acknowledgements	6
	References	7

1. 序 言

使用済燃料取扱施設の遮蔽安全性評価コードシステム、同データライブラリの検証実験計画に基づき、BWR使用済燃料集合体2体を利用して昭和58年6月～7月にかけて「線源形状評価のための実験」が行われた。

本実験は複数の燃料集合体を近接して置いた時、これらの燃料集合体に対する線源評価、線源形状近似の解析手法を評価、検討し、その取扱い手法を確立するために必要な測定データを取得することを目的としている。

実験には、「BWR使用済燃料による「キャスク形状評価のための実験」」¹⁾に使用した2体の燃料集合体を利用した。測定は日本原子力研究所燃料試験施設の燃料貯蔵プール内において、先に実施した「PWR使用済燃料による「線源形状評価のための実験」」²⁾と同じように燃料集合体用水中スタンドを用いて燃料集合体周辺のガンマ線線量率分布、熱中性子および速中性子の反応率分布を測定した。

以下、第2章において実験の方法、第3章で測定器の特性、第4章で測定結果を示し、測定結果についてのまとめを第5章で述べる。

2. 実験方法

本実験で使用したA、B2体の燃料集合体は燃焼度約20300MWD/t、冷却日数が650～680d.である。測定は、A、Bそれぞれ単体についての測定と2体の燃料集合体を組合せた場合について行われた。これは、それぞれの燃料集合体単体での測定値と2体での測定値を比較することにより、燃料集合体間の相互作用（遮蔽効果、増倍効果）のデータを得ると同時に、これらの燃料集合体に対する体積線源としての線源強度特性を把握することを目的としたものである。¹⁾さらに、先に行なった「キャスク形状評価のための実験」から、BWR燃料集合体の線源分布が周方向に関し、不均一性があることが予測されたため、単体の燃料集合体についての測定は、集合体の位置を180°回転した場合についての測定も行ない、周方向の線源強度特性の把握も試みた。測定は以下の5つの場合について行なわれた。

- ① 0°方向にセットしたA燃料集合体についての測定
 - ② 180°方向にセットしたA燃料集合体についての測定
 - ③ 0°方向にセットしたB燃料集合体についての測定
 - ④ 180°方向にセットしたB燃料集合体についての測定
 - ⑤ 180°方向のA燃料集合体と0°方向のB燃料集合体を組合せた場合の測定
- ここで、0°方向とは、後述するFig. 5に示す位置に置かれた状態を表わし、180°方向は、この状態から180°回転した状態を表わしている。

Photo. 1 は実験に利用した燃料集合体スタンドで、Fig. 1 はスタンドの断面図である。この

1. 序 言

使用済燃料取扱施設の遮蔽安全性評価コードシステム、同データライブラリの検証実験計画に基づき、BWR使用済燃料集合体2体を利用して昭和58年6月～7月にかけて「線源形状評価のための実験」が行われた。

本実験は複数の燃料集合体を近接して置いた時、これらの燃料集合体に対する線源評価、線源形状近似の解析手法を評価、検討し、その取扱い手法を確立するために必要な測定データを取得することを目的としている。

実験には、"BWR使用済燃料による「キャスク形状評価のための実験」"¹⁾に使用した2体の燃料集合体を利用した。測定は日本原子力研究所燃料試験施設の燃料貯蔵プール内において、先に実施した"PWR使用済燃料による「線源形状評価のための実験」"²⁾と同じように燃料集合体用水中スタンドを用いて燃料集合体周辺のガンマ線線量率分布、熱中性子および速中性子の反応率分布を測定した。

以下、第2章において実験の方法、第3章で測定器の特性、第4章で測定結果を示し、測定結果についてのまとめを第5章で述べる。

2. 実験方法

本実験で使用したA、B2体の燃料集合体は燃焼度約20300MWD/t、冷却日数が650～680d.である。測定は、A、Bそれぞれ単体についての測定と2体の燃料集合体を組合せた場合について行われた。これは、それぞれの燃料集合体単体での測定値と2体での測定値を比較することにより、燃料集合体間の相互作用（遮蔽効果、増倍効果）のデータを得ると同時に、これらの燃料集合体に対する体積線源としての線源強度特性を把握することを目的としたものである。さらに、先に行なった「キャスク形状評価のための実験」¹⁾から、BWR燃料集合体の線源分布が周方向に関し、不均一性があることが予測されたため、単体の燃料集合体についての測定は、集合体の位置を180°回転した場合についての測定も行ない、周方向の線源強度特性の把握も試みた。測定は以下の5つの場合について行なわれた。

- ① 0°方向にセットしたA燃料集合体についての測定
 - ② 180°方向にセットしたA燃料集合体についての測定
 - ③ 0°方向にセットしたB燃料集合体についての測定
 - ④ 180°方向にセットしたB燃料集合体についての測定
 - ⑤ 180°方向のA燃料集合体と0°方向のB燃料集合体を組合せた場合の測定
- ここで、0°方向とは、後述するFig. 5に示す位置に置かれた状態を表わし、180°方向は、この状態から180°回転した状態を表わしている。

Photo. 1 は実験に利用した燃料集合体スタンドで、Fig. 1 はスタンドの断面図である。この

水中スタンドはPWR燃料集合体4体を立てることが出来るよう作られているため、BWR燃料集合体を収納する場合には燃料集合体スペースにPhoto. 2の測定器案内管のついたスペーサを挿入し、その上でBWR燃料集合体を収納することになる。Fig. 2はBWR燃料集合体用スペーサを挿入した時の水中スタンドの平面図で、Fig. 3は燃料集合体収納部分とスペーサの寸法図である。Fig. 2に見られるように、水中スタンドには17本の固有の測定器案内管とスペーサと一緒に挿入された6本の測定案内管の計23本の案内管がある。測定はカウンタ水封管に封入したラドコン線量計、および²³⁵U、²³²Th核分裂計数管を測定器案内管に沿って移動させながら行われた。カウンタ水封管はPhoto. 3に示すように内径33mm^ø、肉厚0.5 mmのSUS製の水密型構造をしており、ラドコン線量計と核分裂計数管はこの先端部に封入され、それぞれの検出器からの信号は水封管に溶接された外径10mm^øのSUS製のケーブル延長管の中に挿入した信号ケーブルを通して外部に取出された。つまり、測定器案内管の中は水没しており、カウンタ水封管およびケーブル延長管内以外は水が入っていることになる。Fig. 4は水中スタンドに燃料集合体を据付けた時の燃料集合体と測定器案内管の位置関係を表わす立面図で、高さ方向を示すZ軸の原点は燃料集合体の燃料領域の中心とし、上方向をプラス側、下方向をマイナス側としている。Fig. 5は測定器案内管の位置とA、B 2体の燃料集合体の据付位置を示したもので、後述する測定結果はFig. 5の測定器案内管の位置番号とFig. 4のZ軸の高さによって与えられる。

Fig. 6はBWR燃料集合体の寸法図である。8本の“Tie rod”と1本の“Water rod”が組込まれた8行、8列の構造をしている。

3. 測定器の特性

3.1 ラドコン線量計

ガンマ線線量率は、米国Victreen社製の500-6 A型ラドコン線量計により測定した。この検出器は電離箱型の線量計で、検出部の容積はFig. 7に示すように0.326 cm³である。実際の使用にあたってはエネルギーの高いガンマ線に対して検出器壁との荷電平衡を維持するため、54.9 mg/cm²厚のアクリル製のビルドアップキャップで検出器の先端部を覆った。このビルドアップキャップの使用により50 keVから2 MeVのガンマ線に対し、空気に対する相対感度がほぼ一致し、1～2%以下の精度でガンマ線の照射線量が得られる。また、2～10 MeVのガンマ線に対する相対感度のずれも10%以下であり、使用済燃料から放出されるガンマ線のエネルギーは最大3 MeV程度であることを考慮すると、数%以下の精度で照射線量率が測定できると考えられる。Photo. 4は500-6 A型ラドコン線量計で、上側がアクリルのビルドアップキャップを装着したものである。

Fig. 8は日本原子力研究所の⁶⁰Co照射室で、化学線量計(Fricke dosimeter)により予じめ校正された場を利用して行ったラドコン線量計の校正曲線である。

水中スタンドはPWR燃料集合体4体を立てることが出来るよう作られているため、BWR燃料集合体を収納する場合には燃料集合体スペースにPhoto. 2の測定器案内管のついたスペーサを挿入し、その上でBWR燃料集合体を収納することになる。Fig. 2はBWR燃料集合体用スペーサを挿入した時の水中スタンドの平面図で、Fig. 3は燃料集合体収納部分とスペーサの寸法図である。Fig. 2に見られるように、水中スタンドには17本の固有の測定器案内管とスペーサと一緒に挿入された6本の測定案内管の計23本の案内管がある。測定はカウンタ水封管に封入したラドコン線量計、および²³⁵U、²³²Th核分裂計数管を測定器案内管に沿って移動させながら行われた。カウンタ水封管はPhoto. 3に示すように内径33mm^Φ、肉厚0.5mmのSUS製の水密型構造をしており、ラドコン線量計と核分裂計数管はこの先端部に封入され、それぞれの検出器からの信号は水封管に溶接された外径10mm^ΦのSUS製のケーブル延長管の中に挿入した信号ケーブルを通して外部に取出された。つまり、測定器案内管の中は水没しており、カウンタ水封管およびケーブル延長管内以外は水が入っていることになる。Fig. 4は水中スタンドに燃料集合体を据付けた時の燃料集合体と測定器案内管の位置関係を表わす立面図で、高さ方向を示すZ軸の原点は燃料集合体の燃料領域の中心とし、上方向をプラス側、下方向をマイナス側としている。Fig. 5は測定器案内管の位置とA、B 2体の燃料集合体の据付位置を示したもので、後述する測定結果はFig. 5の測定器案内管の位置番号とFig. 4のZ軸の高さによって与えられる。

Fig. 6はBWR燃料集合体の寸法図である。8本の“Tie rod”と1本の“Water rod”が組込まれた8行、8列の構造をしている。

3. 測定器の特性

3.1 ラドコン線量計

ガンマ線線量率は、米国Victreen社製の500-6 A型ラドコン線量計により測定した。この検出器は電離箱型の線量計で、検出部の容積はFig. 7に示すように0.326cm³である。実際の使用にあたってはエネルギーの高いガンマ線に対して検出器壁との荷電平衡を維持するため、54.9mg/cm²厚のアクリル製のビルドアップキャップで検出器の先端部を覆った。このビルドアップキャップの使用により50keVから2MeVのガンマ線に対し、空気に対する相対感度がほぼ一致し、1～2%以下の精度でガンマ線の照射線量が得られる。また、2～10MeVのガンマ線に対する相対感度のずれも10%以下であり、使用済燃料から放出されるガンマ線のエネルギーは最大3MeV程度であることを考慮すると、数%以下の精度で照射線量率が測定できると考えられる。Photo. 4は500-6 A型ラドコン線量計で、上側がアクリルのビルドアップキャップを装着したものである。

Fig. 8は日本原子力研究所の⁶⁰Co照射室で、化学線量計(Fricke dosimeter)によりはじめ校正された場を利用して行ったラドコン線量計の校正曲線である。

3.2 核分裂計数管

熱・熱外中性子は ^{235}U 核分裂計数管、速中性子は ^{232}Th 核分裂計数管で測定した。この計数管は約 30 mm 直径 × 100 mm 長の有効体積があり、それぞれの核分裂物質が約 1 mg/cm² の厚さで 165 cm² の面積に塗付されている。Fig. 9 は核分裂計数管による中性子測定系のブロックダイアグラムである。燃料集合体近傍の高線量のガンマ線バックグランドと検出器それ自身から放出されるアルファ線のバックグランドのパイアルアップパルスを除くため 10~20 nsec. の短時間でパルスを処理している。すなわち、核分裂計数管からの電流パルスを約 40 m の triaxial ケーブルにより "Current sensitive preamp." まで導き、Shaping amplifier で波形整形し、"Fast discriminator" と "Fast stretcher and linear gate" で中性子とそれ以外のパルスを弁別した後で、中性子パルスのみ 0.5~1 μsec. 巾まで拡げ、多重波高分析器により波高スペクトルを測定している。Photo. 5 は測定に使用した英國 Centronic 社製の FC-165 A 型核分裂計数管である。

これらの核分裂計数管による測定値は、それぞれの核分裂反応の反応率として得られ、 ^{235}U 核分裂計数管の熱中性子に対する検出効率(反応率/計数率)を η_u とすると、 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反応の反応率と計数率の関係は次式で与えられる。

$$\int_0^{\text{Cd}} \sigma_u(E) \phi(E) dE = \bar{\sigma}_u \int_0^{\text{Cd}} \phi(E) dE = \eta_u \cdot C \quad (1)$$

ここで、

$\sigma_u(E)$: エネルギ E の中性子に対する $^{235}\text{U}(n, f)$ 反応の反応断面積

$\phi(E)$: エネルギ E の中性子束 (n/cm² · sec · MeV)

$\bar{\sigma}_u$: Cd カットオフエネルギー以下の熱中性子に対する平均断面積 (cm²)

C : ^{235}U 核分裂計数管の計数率 (cps)

^{235}U 核分裂計数管の計数率から、 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反応の反応率を得るために検出効率は黒鉛パイアルからの熱中性子を利用して求めた。黒鉛パイアルからの熱中性子場は Maxwell 分布しているとして本 ^{235}U 核分裂計数管の検出効率は 5.71×10^{-21} で与えられた。

実際の測定では、計数管は 0.5 mm 厚の SUS 製の水封管に入れられたため、この SUS 壁での熱中性子の吸収によりカウンタ水封管に封入した状態での検出効率は 6.04×10^{-21} となる。

一方、 ^{232}Th 核分裂計数管の検出効率は線源強度の分っている ^{252}Cf 中性子源を用いて校正した。すなわち、 ^{232}Th 核分裂計数管の検出効率を η_{Th} とすると $^{232}\text{Th}(n, f)$ 反応の反応率は次式で与えられる。

$$\int_0^{\infty} \sigma_{Th}(E) \phi^{Cf}(E) dE = \eta_{Th} \cdot C \quad (2)$$

ここで、

$\sigma_{Th}(E)$: エネルギ E の中性子に対する $^{232}\text{Th}(n, f)$ 反応の反応断面積 (cm²)

$\phi^{Cf}(E)$: ^{252}Cf 中性子源からの中性子スペクトル

であり、 ^{252}Cf の中性子スペクトルは次式³⁾で与えられる。

$$\phi_{\text{cf}}(E) = 0.373 \exp(-0.88E) \sinh(\sqrt{2E}) \quad (3)$$

SAND-II ライブリィ⁴⁾より採った $\sigma_{\text{Th}}(E)$ を用いて得られた ^{232}Th 核分裂計数管の検出効率は 3.03×10^{-21} である。なお、 ^{232}Th 計数管も実際の測定ではカウンタ水封管に封入されたが、これによる速中性子への影響は無視できるので、結果として ^{232}Th 核分裂計数管の検出効率の変化もない。

4. 測 定 結 果

4.1 ガンマ線線量率分布測定

Tables 1(1), 1(2)は、燃料集合体Aを 0° の位置に設置した時のガンマ線線量率の測定結果で、Table 2(1), 2(2)は 180° の位置に設置した時の結果である。Figs. 10, 11はこれらの結果を図示したものである。これらの図において、 $Z \approx +50 \text{ cm}$ と -100 cm 付近に見られる谷間は、Fig. 1に見られるように燃料集合体水中スタンドに付いている20mm厚さのSUS製の集合体支持板のラドコンに対する遮蔽効果によるものである。

Tables 3(1)～4は燃料集合体Bを 0° , および 180° の位置に設置した時のガンマ線線量率の測定結果で、Figs. 12, 13はこれを図示したものである。

Photo. 6はA燃料集合体を水中スタンドにセットし、測定器案内管Eに沿ってガンマ線線量率を測定中の写真である。また、Photo. 7は燃料集合体Bを水中スタンドにセットした時の写真である。これらの写真は真上から見たものであるが、燃料集合体の据付位置が、燃料集合体収納スペースの中心からかなりずれている。これは、BWR燃料集合体の形状が $133 \times 133 \text{ mm}^2$ に対し、集合体収納スペースが $(147 \pm 2.5) \times (147 \pm 2.5) \text{ mm}^2$ とかなり余裕があるためである。この結果、幾何学的に対称となることが期待された案内管（例えば、B₁とB₃, B₄とB₅, JとM, JとE）について、十分な対称性が得られていない。

Tables 5(1), 5(2)は、A, B 2体の燃料集合体についてのガンマ線線量率の測定結果で、Fig. 14(1), 14(2)はこれらを図示したものである。この場合のA, Bの燃料集合体の据付け位置はA集合体は 180° , B集合体は 0° 方向となっている。

ガンマ線線量測定における測定誤差の1つにラドコン線量計からの微小電流の読み取り誤差があり、数 10 R/hr で10%以下、 10 R/hr で20～30%となるが、数 100 R/hr ではほとんど無視できる。この他の誤差としてはSUS製のカウンタ水封管（0.5mm厚）とアルミニウム製の測定器案内管（3mm厚）によるガンマ線の吸収があり、ラドコン線量計による測定値はその分だけ過少評価となる。これら管壁でのガンマ線の吸収に伴う誤差はガンマ線のエネルギーによって異なるが、ガンマ線の吸収断面積から計算した各エネルギーでの減衰は以下のようになる。

であり、 ^{252}Cf の中性子スペクトルは次式³⁾で与えられる。

$$\phi_{\text{cf}}(E) = 0.373 \exp(-0.88E) \sinh(\sqrt{2E}) \quad (3)$$

SAND-II ライブライリ⁴⁾より採った $\sigma_{\text{Th}}(E)$ を用いて得られた ^{232}Th 核分裂計数管の検出効率は 3.03×10^{-21} である。なお、 ^{232}Th 計数管も実際の測定ではカウンタ水封管に封入されたが、これによる速中性子への影響は無視できるので、結果として ^{232}Th 核分裂計数管の検出効率の変化もない。

4. 測 定 結 果

4.1 ガンマ線線量率分布測定

Tables 1(1), 1(2)は、燃料集合体Aを 0° の位置に設置した時のガンマ線線量率の測定結果で、Table 2(1), 2(2)は 180° の位置に設置した時の結果である。Figs. 10, 11はこれらの結果を図示したものである。これらの図において、 $Z \approx +50 \text{ cm}$ と -100 cm 付近に見られる谷間は、Fig. 1に見られるように燃料集合体水中スタンドに付いている20mm厚さのSUS製の集合体支持板のラドコンに対する遮蔽効果によるものである。

Tables 3(1)～4は燃料集合体Bを 0° , やり 180° の位置に設置した時のガンマ線線量率の測定結果で、Figs. 12, 13はこれを図示したものである。

Photo. 6はA燃料集合体を水中スタンドにセットし、測定器案内管Eに沿ってガンマ線線量率を測定中の写真である。また、Photo. 7は燃料集合体Bを水中スタンドにセットした時の写真である。これらの写真は真上から見たものであるが、燃料集合体の据付位置が、燃料集合体収納スペースの中心からかなりずれている。これは、BWR燃料集合体の形状が $133 \times 133 \text{ mm}^2$ に対し、集合体収納スペースが $(147 \pm 2.5) \times (147 \pm 2.5) \text{ mm}^2$ とかなり余裕があるためである。この結果、幾何学的に対称となることが期待された案内管（例えば、B₁とB₃, B₄とB₅, JとM, JとE）について、十分な対称性が得られていない。

Tables 5(1), 5(2)は、A, B 2体の燃料集合体についてのガンマ線線量率の測定結果で、Fig. 14(1), 14(2)はこれらを図示したものである。この場合のA, Bの燃料集合体の据付け位置はA集合体は 180° , B集合体は 0° 方向となっている。

ガンマ線線量測定における測定誤差の1つにラドコン線量計からの微小電流の読み取り誤差があり、数 10 R/hr で10%以下、 10 R/hr で20～30%となるが、数 100 R/hr ではほとんど無視できる。この他の誤差としてはSUS製のカウンタ水封管（0.5mm厚）とアルミニウム製の測定器案内管（3mm厚）によるガンマ線の吸収があり、ラドコン線量計による測定値はその分だけ過少評価となる。これら管壁でのガンマ線の吸収に伴う誤差はガンマ線のエネルギーによって異なるがガンマ線の吸収断面積から計算した各エネルギーでの減衰は以下のようになる。

ガンマ線エネルギー	推定誤差
1.0 MeV	0 ~ 7.2 %
0.5	0 ~ 9.5
0.1	9 ~ 15
0.08	18 ~ 34

ここで、誤差の上限は、それぞれのエネルギーでの全断面積⁵⁾を用いて算出した値で、下限値は光電吸收断面積⁵⁾のみを用いて算出した値である。

4.2 中性子の反応率分布測定

Tables 6(1)~10は、燃料集合体A, B単体の0°, 180°, および2体を同時にいた場合に、²³⁵U核分裂計数管により測定した反応率分布で、Figs. 15~19(2)はこれらの結果を図示したものである。表中に示された測定誤差は計数率の統計誤差を意味する。Tables 11~15は同じく²³²Th核分裂計数管により測定した反応率分布で、Figs. 20~21はTables 11, 12を図示したものである。²³²Th核分裂計数管による計数率は極めて少なく、測定点あたり5~20時間の測定時間が必要である。このため、測定した位置も限定されており、測定値の統計誤差もかなり大きくなっている。

5. まとめ

燃焼度、冷却日数のはう同じ、2体の使用済燃料集合体についての測定結果から、BWR燃料集合体のガンマ線、中性子線源としての幾つかの特性が把握できる。

Fig. 22~25は燃料集合体の胴部に面した測定器案内管（A燃料集合体に対しB₄とB₅, B燃料集合体に対しB₁とB₃）に沿って得られたガンマ線線量率と²³⁵Uの核分裂反応率分布を各燃料集合体ごとにまとめたものである。これらの図から次のような結論が得られる。

- ① ガンマ線の線源強度分布は中性子と比べかなり平坦であるが、燃料長の下端から全長の約1/3上の付近で最大の強さを示し、下端から2/3より上では上端に近づくにつれて急激に減衰する。
- ② 中性子の線源強度は燃料の全長にわたって大きく変化する。下端から約1/3付近で最大になるのはガンマ線と同じであるが、燃料上部に行くにつれてガンマ線よりも急に減衰する。
- ③ BWR使用済燃料の線源強度の集合体全体の平均値と最大値との間に大きな差異が生じるので、BWR燃料集合体を線源とする遮蔽計算を行なう場合には燃料長に沿った線源強度分布についての考慮が重要である。

ガンマ線エネルギー	推定誤差
1.0 MeV	0 ~ 7.2 %
0.5	0 ~ 9.5
0.1	9 ~ 15
0.08	18 ~ 34

ここで、誤差の上限は、それぞれのエネルギーでの全断面積⁵⁾を用いて算出した値で、下限値は光電吸収断面積⁵⁾のみを用いて算出した値である。

4.2 中性子の反応率分布測定

Tables 6(1)~10は、燃料集合体A、B単体の0°、180°、および2体を同時にいた場合に、²³⁵U核分裂計数管により測定した反応率分布で、Figs. 15~19(2)はこれらの結果を図示したものである。表中に示された測定誤差は計数率の統計誤差を意味する。Tables 11~15は同じく²³²Th核分裂計数管により測定した反応率分布で、Figs. 20~21はTables 11、12を図示したものである。²³²Th核分裂計数管による計数率は極めて少なく、測定点あたり5~20時間の測定時間が要した。このため、測定した位置も限定されており、測定値の統計誤差もかなり大きくなっている。

5. まとめ

燃焼度、冷却日数のはう同じ、2体の使用済燃料集合体についての測定結果から、BWR燃料集合体のガンマ線、中性子線源としての幾つかの特性が把握できる。

Fig. 22~25は燃料集合体の胴部に面した測定器案内管（A燃料集合体に対しB₄とB₅、B燃料集合体に対しB₁とB₃）に沿って得られたガンマ線線量率と²³⁵Uの核分裂反応率分布を各燃料集合体ごとにまとめたものである。これらの図から次のような結論が得られる。

- ① ガンマ線の線源強度分布は中性子と比べかなり平坦であるが、燃料長の下端から全長の約1/3上の付近で最大の強さを示し、下端から2/3より上では上端に近づくにつれて急激に減衰する。
- ② 中性子の線源強度は燃料の全長にわたって大きく変化する。下端から約1/3付近で最大になるのはガンマ線と同じであるが、燃料上部に行くにつれてガンマ線よりもさらに急に減衰する。
- ③ BWR使用済燃料の線源強度の集合体全体の平均値と最大値との間に大きな差異が生じるので、BWR燃料集合体を線源とする遮蔽計算を行なう場合には燃料長に沿った線源強度分布についての考慮が重要である。

なお、A集合体に関するB₄とB₅、B集合体に関するB₁とB₃は幾何学的に対称で、0°と180°の測定により各集合体の4面に面した線源強度分布が得られることが期待されたが、実際はPhoto 6, 7に示めしたように燃料集合体の収納位置が、水中スタンドの所定の収納スペースの中心から偏心しているため、Fig. 22~25の各測定値は面毎の線源強度分布のバラツキを正確に反映したものとはなっていない。

Tables 16, 17は2つの集合体の相互効果を見るため、A, Bの燃料集合体単体での測定値と、2体の集合体を同時に置いた時の測定値を比較したものである。すなわち、燃料集合体それぞれ単独で得られた値の和(β)と2体で得られた値(α)の比をガンマ線線量率、²³⁵U(n, f)反応率ごとに比較したものである。表中、JとI-lineは2体の集合体の間にあり、αとβの比はガンマ線線量率で約1.1で、²³⁵U(n, f)反応率で1.06~1.1になっている。一方、B₁とB₅のlineは互いの影響がもっとも少ない位置であり、B₁の場合は、B集合体のみ、B₅の場合はA集合体のみの測定値と比べα/βの比はガンマ線で0.95~0.98、一方中性子で1.0~1.04とほどんど1に近い値を示している。JとI-lineではα/βの比がわずかに1を超えており、ガンマ線と中性子とは同じであり、各測定時における集合体の据付精度などを考慮すると、測定誤差の範囲内でαとβはほど一致していると見なされる。以上の結果をまとめると次の結論が得られる。

- ① BWR 2体についての今回の実験配置では、実効増倍係数の増加はほとんど観測されない。
先に実施したキャスク形状評価のための実験¹⁾では、2体の燃料集合体が今回と比べて極めて近接しているため実効増倍係数の増加によると思われる中性子強度の明確な増加が見られたが、本実験配置では集合体間が70~90mm離れ、その間に10mmのSUSがあるため実効増倍係数の増加には致らなかったものと予想される。
- ② 燃料集合体に狭まれている点のガンマ線、中性子の強度は、それぞれの単体の寄与の和になっており、燃料集合体相互の干渉はない。
- ③ 燃料集合体1体は、反対側の燃料集合体に対してほど完全な遮蔽効果を示す。例えばB₅ lineの測定値はB燃料集合体の影響はほとんど受けず、逆にB₁ lineの測定値はA燃料集合体の影響を受けない。こうした事実は、多数の集合体を収納する大型のキャスクでは、燃料集合体自身による遮蔽効果が期待できることを意味する。

謝 辞

BWR使用済燃料による「線源形状評価実験」は、一連の遮蔽安全実験計画の中で、燃料集合体そのものを使う大規模実験の最後であり、残す実験は使用済燃料の小試験片についての線源強度測定だけである。一連の実験がこゝに至るまでには、前々安全解析部長桂木 学氏、前同部長平田実穂氏、同次長佐藤一男氏、現安全解析部長石川迪夫氏、同事務長宮川邦男氏をはじめ多くの方々の計画遂行のための努力があったことを記し、深甚の意を表します。また、使用済燃料集合体の受入れをはじめ、本実験の実施に当って岩本多実前実用燃料試験室長、児玉敏夫現実用燃料試験室長、八巻治恵燃料試験技術課長、坂倉 敦燃料試験課長、神原駿一郎燃料試験業務課長

なお、A集合体に関するB₄とB₅、B集合体に関するB₁とB₃は幾何学的に対称で、0°と180°の測定により各集合体の4面に面した線源強度分布が得られることが期待されたが、実際はPhoto 6, 7に示めしたように燃料集合体の収納位置が、水中スタンドの所定の収納スペースの中心から偏心しているため、Fig. 22～25の各測定値は面毎の線源強度分布のバラツキを正確に反映したものとはなっていない。

Tables 16, 17は2つの集合体の相互効果を見るため、A, Bの燃料集合体単体での測定値と、2体の集合体を同時に置いた時の測定値を比較したものである。すなわち、燃料集合体それぞれ単独で得られた値の和(β)と2体で得られた値(α)の比をガンマ線線量率、²³⁵U(n, f)反応率ごとに比較したものである。表中、JとI-lineは2体の集合体の間にあり、αとβの比はガンマ線線量率で約1.1で、²³⁵U(n, f)反応率で1.06～1.1になっている。一方、B₁とB₅のlineは互いの影響がもっとも少ない位置であり、B₁の場合は、B集合体のみ、B₅の場合はA集合体のみの測定値と比べα/βの比はガンマ線で0.95～0.98、一方中性子で1.0～1.04とほど1に近い値を示している。JとI-lineではα/βの比がわずかに1を超えており、ガンマ線と中性子とほど同じであり、各測定時における集合体の据付精度などを考慮すると、測定誤差の範囲内でαとβはほど一致していると見なされる。以上の結果をまとめると次の結論が得られる。

- ① BWR 2体についての今回の実験配置では、実効増倍係数の増加はほとんど観測されない。
先に実施したキャスク形状評価のための実験¹⁾では、2体の燃料集合体が今回と比べて極めて近接しているため実効増倍係数の増加によると思われる中性子強度の明確な増加が見られたが、本実験配置では集合体間が70～90mm離れ、その間に10mmのSUSがあるため実効増倍係数の増加には致らなかったものと予想される。
- ② 燃料集合体に狭まれている点のガンマ線、中性子の強度は、それぞれの単体の寄与の和になってしまっており、燃料集合体相互の干渉はない。
- ③ 燃料集合体1体は、反対側の燃料集合体に対してほど完全な遮蔽効果を示す。例えばB₅ lineの測定値はB燃料集合体の影響はほとんど受けず、逆にB₁ lineの測定値はA燃料集合体の影響を受けない。こうした事実は、多数の集合体を収納する大型のキャスクでは、燃料集合体自身による遮蔽効果が期待できることを意味する。

謝　　辞

BWR使用済燃料による「線源形状評価実験」は、一連の遮蔽安全実験計画の中で、燃料集合体そのものを使う大規模実験の最後であり、残す実験は使用済燃料の小試験片についての線源強度測定だけである。一連の実験がこゝに至るまでには、前々安全解析部長桂木 学氏、前同部長平田実穂氏、同次長佐藤一男氏、現安全解析部長石川迪夫氏、同事務長宮川邦男氏をはじめ多くの方々の計画遂行のための努力があったことを記し、深甚の意を表します。また、使用済燃料集合体の受入れをはじめ、本実験の実施に当って岩本多実前実用燃料試験室長、児玉敏夫現実用燃料試験室長、八巻治恵燃料試験技術課長、坂倉 敦燃料試験課長、神原駿一郎燃料試験業務課長

をはじめ実用燃料試験室室員の方々の多大な協力を得ました。こゝに記して謝意を表します。さらに、朝岡卓見原子炉工学部長、松浦祥次郎同次長、鈴木友雄遮蔽研究室長には実験の遂行に当たり多くの御援助をいただきましたことを記し篤く御礼申し上げます。

最後に、本実験のためにBWR使用済燃料集合体の借用を許可された日本原子力発電株式会社に謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中俊一、坂本幸夫、山路昭雄他：“使用済燃料輸送キャスクの遮蔽実験(3), BWR 使用済燃料による「キャスク形状評価のための実験」”, JAERI-M 84-019(1984)
- 2) 田中俊一、山路昭雄、坂本幸夫他：“使用済燃料輸送キャスクの遮蔽実験(2), PWR 使用済燃料による「線源形状評価のための実験」”, JAERI-M 82-202(1982)
- 3) Stoddard D. H. and Hootman H. E. : “ ^{252}Cf Shielding Guide”, DP-1246(1971)
- 4) Mc Eloy W. N. et al. : AFWL-TR-67-41(1967)
- 5) Hubbell J. H. : “Photon Cross Section, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV”, NSRDS-NBS 29 (1969)

をはじめ実用燃料試験室室員の方々の多大な協力を得ました。こゝに記して謝意を表します。さらに、朝岡卓見原子炉工学部長、松浦祥次郎同次長、鈴木友雄遮蔽研究室長には実験の遂行に当たり多くの御援助をいただきましたことを記し篤く御礼申し上げます。

最後に、本実験のためにBWR使用済燃料集合体の借用を許可された日本原子力発電株式会社に謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中俊一、坂本幸夫、山路昭雄他：“使用済燃料輸送キャスクの遮蔽実験(3), BWR 使用済燃料による「キャスク形状評価のための実験」”, JAERI-M 84-019(1984)
- 2) 田中俊一、山路昭雄、坂本幸夫他：“使用済燃料輸送キャスクの遮蔽実験(2), PWR 使用済燃料による「線源形状評価のための実験」”, JAERI-M 82-202(1982)
- 3) Stoddard D. H. and Hootman H. E. : “ ^{252}Cf Shielding Guide”,, DP-1246(1971)
- 4) Mc Eloy W. N. et al. : AFWL-TR-67-41(1967)
- 5) Hubbell J. H. : “Photon Cross Section, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV”, NSRDS-NBS 29 (1969)

Table 1(1) Gamma-ray exposure dose rates around the A-fuel assembly
of the 0° arrangement

(R/hr)

Z (cm)	Counter guide tube						E	I
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆		
229				1.54 +02	2.12 +02	1.11 +02		1.03 +02
219				4.15	4.95			
209				9.20				
204	8.28 +01	5.94 +01	1.38 +02		1.59 +03	6.02	1.06 +02	5.86
199				1.15 +03		6.28		
189				1.42	1.78	7.91		
179	1.17 +02	7.20	1.98	2.27	2.91	1.15 +03	1.70	1.11 +03
169				2.91	3.64	1.47		
159				3.13		1.60		
154	1.70	1.02 +02	3.05		4.12	1.73	2.75	1.70
149				4.23		2.06		
139				5.73	6.84	2.82		
129	2.63	1.55	4.98	7.06	8.34	3.35	4.46	3.28
119				7.93	9.48	3.83		
109				8.38		4.05		
104	3.07	1.66	5.88		9.90	4.09	5.33	3.90
99				9.09		4.37		
89				9.95	1.14 +04	4.71		
79	3.20	1.68	6.58	1.04 +03	1.16	4.71	5.94	4.66
69				1.06	1.19	4.91		4.66
59				1.05				4.32
54	2.72	1.47	5.51		1.09	4.77	3.21	
49				1.08		4.94		4.02
39				1.16	1.22	5.26		4.87
29	3.41	1.91	7.80	1.21	1.25	5.48	7.32	5.28
19				1.24	1.28	5.58		5.27
9				1.23	1.27	5.50		5.19
4	3.59	1.85	7.56		1.22	5.42	7.06	
-1				1.24	1.26	5.48		5.25
-11				1.25	1.27	5.10		5.58
-21	3.86	1.98	8.58	1.38	1.38	6.03	7.88	5.73
-31				1.41	1.43	6.29		5.66
-41				1.41		6.32		5.85
-46	4.25	2.34	8.82		1.35		8.06	
-51				1.38		1.12		5.76
-61				1.45	1.42	6.30		5.97
-71	4.04	2.15	9.12	1.47	1.43	6.54	7.76	5.47
-81				1.47	1.43	6.54		5.73
-91				1.45		6.46		5.23
-96	3.70	2.04	8.16		1.36		6.53	
-101				1.38		6.20		5.72
-111				1.40	1.32	6.23		5.91
-121	4.12	2.25	9.18	1.38	1.30	6.16	8.30	5.82
-131				1.38		6.00		5.65
-141				1.33		5.69		5.40
-146	3.43	1.80	7.75	7.47	1.16		6.82	
-151				1.23		5.22		4.94
-161				1.13		4.72		4.46
-171	2.04	1.02	5.26	9.78 +03	8.76 +03	4.02	4.57	3.78
-181				2.67		3.00		
-191				4.79		1.82		
-196			1.75		2.54		1.02	1.22
-201						8.79 +02		
-211				1.87	8.14 +02	4.79		

Table 1(2) continued

(R/hr)

Z (cm)	Counter guide tube						
	J	K	L	M	O	P	Q
229	1.25 +02			1.57 +02			
219							
209							
204	8.12	1.59 +02		1.55 +03	2.52 +02		
199							
189							
179	1.70 +03	2.66	1.20 +03	3.01	3.58	1.80 +02	1.62 +02
169							
159							
154	2.60	4.32	1.80	4.26	5.38	2.83	2.36
149							
159							
129	5.17	7.54	2.83	8.74	9.59	4.60	3.69
119							
109							
104	6.41	9.30	3.29	1.04 +04	1.13 +03	5.49	4.34
99							
89							
79	7.76	1.06 +03	3.86	1.18	1.26	6.06	4.64
69	7.92		3.80	1.20			
59	7.76		2.71	1.14			
54		7.60 +02	1.77		8.58 +02	4.25	1.97
49	7.59		2.20	1.08			
39	8.69		4.07	1.21			
29	9.18	1.26 +03	5.11	1.25	1.42 +03	7.20	5.68
19	9.30			1.25			
9	9.24			1.23			
4		1.22	4.57		1.38	6.73	5.02
-1	9.34			1.23			
-11	1.01 +04			1.32			
-21	1.05	1.31	4.87	1.36	1.45	7.08	5.24
-31	1.07			1.36			
-41	1.07			1.32			
-46		1.43	5.36		1.47	7.80	5.60
-51	1.08			1.29			
-61	1.12			1.34			
-71	1.15	1.44	5.17	1.34	1.49	7.92	5.26
-81	1.13			1.31			
-91	1.09			1.23			
-96		1.32	4.19		1.32	7.20	4.17
-101	1.11			1.22			
-111	1.15			1.22			
-121	1.15	1.45	5.72	1.19	1.38	7.76	5.38
-131	1.15			1.15			
-141	1.11			1.09			
-146	1.08	1.26	4.47		1.14	6.29	4.01
-151				9.86 +03			
-161				8.94			
-171	8.38 +03	8.52 +02	2.75	7.62	7.80 +02	4.13	2.59
-181							
-191							
-196	3.03	2.48		2.29	1.63	8.28 +01	
-201				1.14			
-211				7.86 +02			

Table 2(1) Gamma-ray exposure dose rates around the A-fuel assembly
of the 180° arrangement

Z (cm)	Counter guide tube							(R/hr)
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	E	
229				1.86 +02	1.72 +02	1.27 +02		1.20 +02
219				4.91	5.06	3.02		2.84
209				1.15 +03	1.19 +03	5.90		5.22
204							9.9 +01	
199				1.34	1.41	6.76 +02		5.60
189				1.57	1.70	8.14		7.19
179	1.35 +02	6.54 +01	2.02 +02	2.31	2.75	1.23 +03	1.79 +02	1.12 +03
169				2.88	3.57	1.52		1.42
159				3.02	3.71	1.62		1.49
154	1.92	1.00 +02	3.00				2.74	
149				4.02	4.96	2.11		1.92
159				5.53	6.86	2.82		2.58
129	2.73	1.55	4.97	6.80	8.40	3.43	4.52	3.16
119				7.53	9.36	2.84		3.58
109				7.85	9.78	4.05		3.78
104	3.23	1.75	5.82				5.45	
99				8.43	1.05 +04	4.32		4.07
89				9.02	1.13	4.62		4.38
79	3.49	1.79	6.40	9.35	1.18	4.83	5.96	4.57
69				9.42	1.19	4.86		4.61
59				9.30	1.17	4.82		4.33
54	3.01	1.63	5.38				3.32	
49				9.53	1.19	4.87		4.02
39				1.02 +04	1.28	5.14		4.90
29	3.88	2.06	7.46	1.06	1.32	5.32	7.27	5.25
19				1.09	1.34	5.36		5.29
9				1.08	1.32	5.31		5.20
4	3.92	2.05	7.47				7.16	
-1				1.09	1.33	5.22		5.26
-11				1.09	1.34	4.92		5.60
-21	4.26	2.19	8.25	1.22	1.46	5.86	7.85	5.83
-31				1.25	1.49	6.05		5.92
-41				1.25	1.47	6.10		5.88
-46	4.21	2.26	8.43				7.97	
-51				1.21	1.43	5.92		5.82
-61				1.28	1.50	6.09		6.03
-71	4.11	2.21	8.49	1.30	1.52	6.33	7.97	6.01
-81				1.30	1.52	6.29		5.64
-91				1.30	1.49	6.17		5.30
-96	3.84	2.10	7.71				6.71	
-101				1.25	1.42	6.04		5.68
-111				1.25	1.43	5.94		5.87
-121	4.14	2.08	8.37	1.24	1.43	5.92	8.33	5.76
-131				1.22	1.40	5.82		5.56
-141				1.16	1.34	5.55		5.29
-146	3.40	1.68	6.97				6.68	
-151				1.07	1.22	4.97		4.84
-161				9.83 +03	1.13	4.47		4.36
-171	2.16	9.54 +01	4.64 +02	8.39	9.57 +03	3.92	4.43	3.77
-181				6.35	7.41	2.91		2.83
-191				3.71	4.55	1.77		1.71
-196			8.79 +01				9.48 +02	
-201				1.86	2.57	8.92 +02		8.47 +02
-211				1.06	1.81	3.76		3.87

Table 2(2) continued

(R/hr)

Z (cm)	Counter guide tube						
	J	K	L	M	O	P	
229	1.46 +02			1.58 +02			
219	3.86			4.28			
209	8.64			1.06 +03			
204		1.71 +02			2.20 +02	1.24 +02	7.38 +01
199	1.08 +03			1.26			
189	1.27			1.55			
179	1.90	2.63	1.38 +02	2.59	3.40	2.03	1.56 +02
169	2.31			3.49			
159	2.41			3.56			
154		4.22	1.96		5.33	3.04	2.21
149	3.15			4.83			
139	4.32			6.74			
129	5.36	7.22	2.98	8.32	9.30	4.58	3.45
119	5.99			9.31			
109	6.30			9.85			
104		8.43	2.44		1.13 +03	5.35	3.99
99	6.74			1.07 +04			
89	7.28			1.16			
79	7.58	9.21	3.58	1.21	1.28	5.85	4.25
69	7.63			1.22			
59	7.37			1.19			
54		6.23	1.22		8.94 +02	4.00	1.70
49	7.11			1.14			
39	8.11			1.31			
29	8.50	1.10 +03	4.43	1.36	1.50 +03	6.99	5.56
19	8.62			1.36			
9	8.52			1.34			
4		1.05	3.99		1.43	6.25	4.79
-1	8.59			1.33			
-11	9.23			1.43			
-21	9.64	1.15	4.27	1.47	1.54	6.41	5.01
-31	9.89			1.49			
-41	9.82			1.47			
-46		1.21	4.78		1.60	7.28	5.50
-51	9.66			1.41			
-61	1.02 +04			1.48			
-71	1.04	1.23	4.55	1.48	1.60	7.19	5.19
-81	1.01			1.43			
-91	9.82 +03			1.36			
-96		1.13	3.62		1.43	6.56	4.15
-101	9.94 +03			1.34			
-111	1.01 +04			1.37			
-121	9.94 +03	1.20	4.92	1.35	1.55	7.45	5.70
-131	9.73			1.29			
-141	9.37			1.25			
-146		1.01	3.79		1.30	6.02	4.20
-151	8.68 +03			1.14			
-161	7.99			1.02			
-171	6.95	6.81 +02	2.21	3.68 +03	9.00 +02	3.69	2.56
-181	5.36			6.64			
-191	3.13			4.14			
-196		1.26			2.70	6.48 +01	
-201	1.46			2.31			
-211	8.28 +02			1.66			

Table 3(1) Gamma-ray exposure dose rates around the B-fuel assembly
of the 0° arrangement

(R/hr)

Z (cm)	Counter guide tube					
	B ₁	B ₂	B ₃	A	C	D
229						
219						
209						
204					1.97 +02	
199	2.31 +02	6.52 +02	1.36 +03			
189	1.73 +03	8.43	1.66			
179	2.94	1.24 +03	2.53		3.08	1.87 +02
169	3.72	1.51	3.94			
159	3.72	1.60	3.05			
154				1.72 +02	4.77	2.57
149	5.06	2.02	4.00			
139	7.00	2.75	5.47			
129	8.54	3.34	6.64	2.89	8.55	4.33
119	9.53	3.68	7.42			
109	9.98	3.88	7.72			
104				3.46	1.05 +03	5.21
99	1.08 +04	4.18	8.38			
89	1.17	4.51	9.04			
79	1.22	4.69	9.46	3.82	1.20	5.95
69	1.24	4.72	9.46			
59	1.23	4.68	9.28			
54				1.44	8.49 +02	3.98
49	1.25	4.77	9.46			
39	1.35	5.08	1.00 +04			
29	1.40	5.27	1.05	5.30	1.46 +03	7.35
19	1.42	5.34	1.05			
9	1.41	5.21	1.05			
4				4.93	1.47	6.45
- 1	1.42	5.02	1.07			
- 11	1.42	4.75	1.08			
- 21	1.56	5.83	1.19	5.69	1.50	7.23
- 31	1.59	5.98	1.22			
- 41	1.59	5.98	1.20			
- 46				6.14	1.58	8.01
- 51	1.55	5.64	1.18			
- 61	1.63	5.91	1.27			
- 71	1.65	6.08	1.30	5.49	1.67	8.07
- 81	1.64	6.10	1.31			
- 91	1.60	5.98	1.28			
- 96				4.57	1.53	7.41
-101	1.52	5.72	1.22			
-111	1.55	5.71	1.23			
-121	1.54	5.67	1.21	5.96	1.64	7.77
-131	1.50	5.47	1.18			
-141	1.44	5.25	1.14			
-146				4.71	1.40	6.50
-151	1.33	4.84	1.04			
-161	1.21	4.50	9.63 +03			
-171	1.04	3.75	8.38	2.91	8.67 +02	4.31
-181	7.36 +03	2.93	6.34			
-191	5.22	1.73	3.90			
-196				1.00	3.61	1.17
-201	3.44	1.04	2.33			
-211	2.80	6.69 +02	1.71			

Table 3(2) continued

(R/hr)

Z (cm)	Counter guide tube				
	E	I	J	K	L
229					
219					
209					
204	—	1.20 +03			
199	1.10 +03	5.75 +02			
189	1.31	7.59	1.50		
179	2.17	1.13 +03	2.11	2.71 +02	
169	2.83	1.36	2.64		
159	2.90	1.45	2.62		
154		2.64	4.01	1.73 +02	
149	3.83	1.84	3.44		
139	5.44	2.50	2.63		
129	6.73	3.10	5.55	7.17	2.74
119	7.56	3.41	6.28		
109	7.99	3.60	6.64		
104		9.21	3.29		
99	8.59	3.84	7.12		
89	9.39	4.12	7.51		
79	9.79	4.26	7.84	1.01 +03	3.56
69	9.87	4.26	7.84		
59	9.61	3.98	7.42		
54		6.57 +02	1.47		
49	9.42	3.71	7.00		
39	1.07 +04	4.51	8.11		
29	1.12	4.83	8.50	1.13 +03	4.60
19	1.13	4.84	8.50		
9	1.13	4.75	8.50		
4		1.08	4.01		
- 1	1.13	4.81	8.56		
- 11	1.20	5.07	9.22		
- 21	1.25	5.25	9.58	1.24	4.28
- 31	1.28	5.31	9.76		
- 41	1.27	5.25	9.76		
- 46		1.30	4.73		
- 51	1.25	5.18	9.58		
- 61	1.29	5.34	1.01 +04		
- 71	1.31	5.43	1.04	1.34	4.50
- 81	1.28	5.06	1.02		
- 91	1.23	4.68	9.64 +03		
- 96		1.25	3.81		
-101	1.22	5.12	9.76		
-111	1.27	5.32	9.94		
-121	1.27	5.19	9.70	1.31	4.59
-131	1.23	5.01	9.37		
-141	1.18	4.77	9.04		
-146		1.11	3.78		
-151	1.08	4.37	8.32		
-161	9.82 +03	3.90	7.36		
-171	8.44	3.29	6.34	7.83 +02	2.33
-181	6.58	2.45	5.02		
-191	4.34	1.53	2.88		
-196	—	2.31			
-201	2.76	8.73 +02	1.62		
-211	2.50	5.19	1.29		

Table 4 Gamma-ray exposure dose rates around the B-fuel assembly
of the 180° arrangement

Z (cm)	Counter guide tube								(R/hr)
	B ₁	B ₂	B ₃	C	E	I	J	K	
229									
219									
209									
204				3.79 +02					
199	1.32 +03	5.07 +02	9.11 +02		1.92 +03	6.97 +02	1.10 +03		
189	1.54	6.50	1.13 +03		2.71	1.02 +03	1.55		
179	2.36	9.29	1.71	4.89	3.34	1.31	2.00	3.39 +02	
169	2.81	1.12 +03	2.12		3.40	1.47	2.11		
159	2.85	1.23	2.29		4.47	1.87	2.79		
154				7.40				5.39	
149	3.72	1.56	3.00		6.25	2.52	2.82		
139	5.20	2.05	4.10		7.86	3.12	4.81		
129	6.34	2.54	5.03	1.12 +03	8.77	3.53	5.42	7.89	
119	7.12	2.84	5.69		9.19	3.76	5.78		
109	7.36	3.00	6.02		9.72	4.03	6.28		
104				1.26				8.89	
99	7.96	3.22	6.59		1.05 +04	4.38	6.88		
89	8.68	3.49	7.16		1.09	4.59	7.30		
79	9.04	3.66	7.52	1.32	1.10	4.66	7.42	9.37	
69	9.22	3.71	7.70		1.07	4.60	7.42		
59	9.10	3.71	7.71		1.05	4.44	7.42		
54				9.26 +02				6.22	
49	9.34	3.83	7.97		1.09	4.47	7.78		
39	1.00 +04	4.07	8.63		1.18	5.17	8.50		
29	1.05	4.23	9.05	1.48	1.20	5.39	8.86	1.15 +03	
19	1.07	4.32	9.29		1.17	5.32	8.80		
9	1.07	4.31	9.29		1.16	5.32	8.92		
4				1.38				1.06	
- 1	1.08	4.37	9.53		1.24	5.62	9.58		
- 11	1.10	4.03	9.65		1.28	5.86	1.00 +04		
- 21	1.22	4.86	1.08 +04	1.53	1.29	5.96	1.02	1.19	
- 31	1.25	5.06	1.10		1.28	5.92	1.02		
- 41	1.25	5.10	1.11		1.23	5.86	1.02		
- 46				1.50				1.22	
- 51	1.21	5.01	1.10		1.29	6.10	1.08		
- 61	1.28	5.19	1.15		1.32	6.28	1.11		
- 71	1.30	5.33	1.18	1.50	1.31	6.34	1.11	1.25	
- 81	1.30	5.39	1.20		1.24	5.80	1.08		
- 91	1.28	5.30	1.19		1.13	5.17	1.02		
- 96				1.29				1.13	
-101	1.22	5.18	1.16		1.18	5.80	1.11		
-111	1.24	5.24	1.20		1.16	5.93	1.13		
-121	1.22	5.24	1.21	1.30	1.11	5.72	1.11	1.26	
-131	1.19	5.13	1.20		1.05	5.43	1.08		
-141	1.13	4.92	1.17		9.64 +03	5.00	1.00 +04		
-146				9.98 +02				9.85 +02	
-151	1.04	4.52	1.09		8.74	4.52	9.25 +03		
-161	9.46 +03	4.11	1.01		7.48	3.94	8.02		
-171	8.26	3.49	8.81 +03	5.38	6.57	2.98	6.28	5.38	
-181	6.26	2.66	6.77		4.30	1.91	3.96		
-191	3.77	1.65	4.35		2.75	1.19	2.66		
-196				8.00 +01				1.03	
-201	2.14	1.02	2.99		2.25	8.23 +02	2.48		
-211	1.58	1.71 +02	2.58						

Table 5(1) Gamma-ray exposure dose rates around the A-fuel (180°) and B-fuel (0°) assemblies

(R/hr)

Z (cm)	Counter guide tube						A	C
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆		
209	2.0 +02	1.27 +02	1.85 +02	2.04 +02	1.65 +02	1.39 +02		
219								
209								
204	1.35 +03	6.33	1.27 +03	1.43 +03	1.29 +03	6.54		2.13 +02
199								
189								
179	2.73	1.15 +03	2.39	3.79	2.57	1.22 +03	1.36 +02	3.45
169								
159								
154	3.81	1.65	3.26	5.11		1.76	2.01	5.00
149								
139								
129	7.75	3.16	6.54	7.93	3.79	3.43	3.08	9.09
119								
109								
104	9.31	3.90	7.93	9.37	7.77	4.17	3.99	1.13 +03
99								
89								
79	1.13 +04	4.51	9.43	1.09 +04	9.14	4.79	4.99	1.29
69	1.15	4.57	9.60	1.10	1.10 +04	4.81		
59	1.15	4.57	9.49	1.09	1.09	4.77		
54							2.07	9.09 +02
49	1.17	4.67	9.67	1.12	1.13	4.88		
39	1.27	4.99	1.04 +04	1.20	1.22	5.21		
29	1.33	5.25	1.09	1.26	1.28	5.35	5.84	1.56 +03
19	1.35	5.21	1.12	1.27	1.28	5.41		
9	1.34	5.25	1.12	1.26	1.28	5.39		
4							5.31	1.51
-1	1.35	5.28	1.13	1.27	1.28	5.33		
-11	1.37	4.87	1.15	1.27	1.28	4.95		
-21	1.51	5.81	1.28	1.41	1.43	5.84	5.66	1.63
-31	1.53	6.02	1.33	1.44	1.45	6.10		
-41	1.52	6.09	1.33	1.43	1.45	6.13		
-46							6.21	1.69
-51	1.49	6.02	1.32	1.40	1.41	6.02		
-61	1.57	1.33	1.40	1.47	1.48	1.60		
-71	1.59	6.43	1.44	1.50	1.51	3.13	5.97	1.71
-81	1.57	6.43	1.44	1.49	1.51	6.41		
-91	1.56	6.25	1.43	1.47	1.48	6.34		
-96							4.79	1.57
-101	1.48	6.19	1.38	1.42	1.41	6.17		
-111	1.51	6.08	1.40	1.43	1.43	6.22		
-121	1.49	6.10	1.40	1.41	1.42	6.13	6.50	1.69
-131	1.48	5.90	1.36	1.37	1.39	6.02		
-141	1.42	5.66	1.31	1.33	1.34	5.70		
-146							5.33	1.47
-151	1.33	4.29	1.21	1.22	1.22	5.26		
-161	1.20	4.75	1.12	1.13	1.10	4.71		
-171	1.03	4.07	9.85 +03	9.79 +03	9.43 +03	4.02	3.59	1.02
-181	1.93 +03	3.16	7.87	7.57	7.45	3.08		
-191	5.31	1.98	4.97	4.75	4.54	2.05		
-196							1.33	3.63 +02
-201	3.38	1.22	2.80	2.47	2.53	1.02		
-211	3.21	8.19 +02	2.31	1.45	1.79	4.47 +02		

Table 5(2) continued

Z (cm)	Counter guide tube								(R/hr)	
	D	E	I	J	K	L	M	O	P	Q
209										
219										
209	1.95 +02		3.00 +02							
204	1.24 +03	1.27 +03	2.37 +03	4.12 +02			1.42 +03	2.44 +02		
199										
189										
179	1.91 +02	2.64	2.48	4.44	6.07	2.49 +02	2.79	3.93	2.15 +02	1.59 +02
169										
159										
154	2.88	3.70	3.54	6.04	9.27	3.88	4.23	5.70	3.18	2.34
149										
139										
129	4.47	7.57	6.91	1.21 +04	1.64 +03	6.02	8.76	9.81	5.10	3.63
119										
109										
104	5.61	9.25	8.29	1.46	1.97	7.47	1.05 +04	1.17 +03	6.09	4.37
99										
89										
79	6.21	1.11 +04	9.73	1.71	2.26	8.13	1.25	1.13	6.63	5.04
69	1.11	9.79	1.71				1.27			
59	1.07	9.31	1.65				1.22			
54	3.59			1.61	3.80			9.15 +02	4.12	2.31
49	1.04	8.79	1.61				1.16			
39	1.21	1.05 +04	1.79				1.34			
29	7.29	1.25	1.11	1.87	2.59	1.02 +03	1.39	1.57 +03	7.89	5.97
19	1.27	1.11	1.89				1.38			
9	1.25	1.10	1.87				1.36			
4	6.63			2.54	9.39 +02			1.50	6.83	5.21
-1	1.25	1.10	1.89				1.36			
-11	1.34	1.17	2.06				1.46			
-21	7.07	1.38	1.21	1.16	2.78	1.02 +03	1.50	1.61	7.29	5.40
-31	1.40	1.23	2.20				1.52			
-41	1.39	1.22	2.19				1.49			
-46	8.01			2.92	1.09			1.67	8.19	5.93
-51	1.35	1.21	3.15				1.46			
-61	1.40	1.24	2.27				1.52			
-71	8.49	1.42	1.26	2.31	3.03	1.07	1.52	1.67	8.13	5.21
-81	1.38	1.19	2.27				1.45			
-91	1.30	1.12	2.19				1.37			
-96	7.89			2.79	8.73 02			1.50	7.95	4.29
-101	1.32	1.19	2.21				1.37			
-111	1.36	1.22	2.24				1.40			
-121	8.49	1.35	1.19	2.21	2.94	1.11 +03	1.38	1.62	8.55	5.83
-131	1.31	1.15	2.17				1.34			
-141	1.26	1.10	2.09				1.27			
-146	7.11			2.57	8.97 +02			1.36	6.87	4.47
-151	1.15	1.01	1.93				1.16			
-161	1.04	9.13 +03	1.78				1.04			
-171	4.66	9.01 +03	7.79	1.56	1.87	5.81	8.89 +03	9.03 +02	4.42	2.79
-181	6.85	6.21	1.20				6.91			
-191	4.51	3.78	7.69 +03				4.30			
-196	1.42			6.65 +02	1.47			2.91	1.05	4.80 +01
-201	2.97	2.29	4.38				2.43			
-211	2.58	1.45	3.01				1.76			

Table 6(1) ^{235}U fission rates around the A-fuel assembly of the 0° arrangement

(1/sec)

z (cm)	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	E	
							Counter	guide
179				(2.33±0.27)-21	(2.90±0.30)-21	(1.57±0.22)-21		
154	(1.91±0.20)-21	(1.56±0.15)-21	(1.10±0.091)-20	(5.02±0.19)-20	(6.34±0.22)-20	(3.74±0.17)-20		
129				(2.28±0.083)-19	(2.7±0.091)-19	(1.61±0.070)-19	(6.10±0.43)-21	
104				(4.57±0.12)	(5.03±0.12)	(2.96±0.094)		
79	(6.22±0.43)	(5.07±0.32)	(2.99±0.15)	(6.68±0.14)	(6.92±0.14)	(4.42±0.12)	(1.51±0.067)-20	
54			(3.25±0.16)	(7.11±0.15)	(7.57±0.15)	(4.73±0.12)		
29	(8.09±0.49)	(5.98±0.35)	(4.30±0.18)	(8.74±0.16)	(9.10±0.17)	(5.53±0.11)	(1.91±0.076)	
-4			(4.85±0.19)	(9.84±0.17)	(9.82±0.14)	(5.92±0.13)		
-21	(1.09±0.057)-20	(8.55±0.51)	(5.93±0.21)	(1.20±0.019)-18	(1.22±0.019)-18	(7.76±0.15)	(2.75±0.091)	
-46			(6.27±0.22)	(1.29±0.020)	(1.32±0.020)	(7.98±0.16)		
-71	(1.47±0.067)	(8.76±0.51)	(6.34±0.22)	(1.45±0.021)	(1.43±0.021)	(8.52±0.16)	(3.46±0.10)	
-96			(6.21±0.22)	(1.36±0.020)	(1.35±0.020)	(8.21±0.16)		
-121	(1.12±0.058)	(7.73±0.48)	(6.19±0.22)	(1.24±0.019)	(1.19±0.019)	(7.42±0.15)	(2.86±0.093)	
-146			(4.62±0.19)	(1.91±0.017)	(9.04±0.17)-19	(5.98±0.13)		
-171	(5.41±0.40)-21	(3.87±0.23)	(2.54±0.14)	(5.19±0.089)-19	(4.87±0.12)	(3.03±0.096)	(1.30±0.063)	
-186			(1.31±0.10)	(2.16±0.040)	(2.11±0.080)	(1.29±0.031)		
-200			(4.14±0.35)-21	(5.22±0.20)-20	(4.73±0.19)-20	(3.22±0.16)-20		

Table 6(2) continued

(1/sec)

Z (cm)	I	J	K	L	M	O
Counter	guide	tube				
179	(1.09±0.18)-21	(1.97±0.20)-21				(2.20±0.074)-21
154	(2.70±0.14)-20	(3.50±0.16)-20	(4.98±0.61)-21			(5.29±0.20)-20
129	(1.12±0.058)-19	(1.63±0.070)-19	(2.14±0.13)-20	(4.17±0.35)-21	(2.30±0.042)-19	(4.11±0.18)-20
104	(2.20±0.082)	(2.99±0.095)	(4.26±0.36)		(4.53±0.096)	(7.47±0.24)
79	(3.26±0.099)	(4.74±0.12)	(5.65±0.41)	(1.11±0.058)-20	(6.45±0.14)	(1.02±0.028)-19
54	(2.63±0.073)	(4.02±0.11)	(4.74±0.38)		(5.16±0.12)	(7.75±0.24)-20
29	(4.35±0.11)	(6.54±0.14)	(8.49±0.51)	(1.36±0.064)	(8.16±0.16)	(1.30±0.031)-19
4	(4.65±0.12)	(7.01±0.15)	(9.06±0.52)		(8.47±0.13)	(1.44±0.033)
-21	(5.54±0.13)	(8.92±0.16)	(1.28±0.062)-19	(1.17±0.071)	(1.08±0.018)-18	(1.62±0.035)
-46	(6.15±0.14)	(9.51±0.17)	(1.34±0.064)		(1.08±0.018)	(1.71±0.036)
-71	(7.07±0.15)	(1.03±0.018)-18	(1.46±0.066)	(2.27±0.083)	(1.18±0.019)	(1.86±0.037)
-96	(6.12±0.14)	(9.53±0.17)-19	(1.41±0.065)		(1.07±0.018)	(1.65±0.035)
-121	(5.90±0.13)	(9.40±0.17)	(1.24±0.061)	(2.10±0.080)	(9.90±0.17)-19	(1.42±0.033)
-146	(4.83±0.12)	(7.75±0.15)	(1.04±0.056)		(7.57±0.15)	(1.07±0.028)
-171	(2.61±0.089)	(4.30±0.11)	(5.32±0.40)-20	(8.82±0.52)-21	(3.85±0.11)	(5.22±0.20)-20
-186	(1.13±0.058)	(1.74±0.073)	(2.57±0.14)		(1.69±0.036)	(2.23±0.13)
-200	(2.73±0.14)-20	(4.48±0.18)-20	(8.08±0.78)-21		(4.30±0.18)-20	(6.34±0.52)-21

Table 7(1) ^{235}U fission rates around the A-fuel assembly of the 180° arrangement

(1/sec)

z (cm)	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	Counter		
					guide	tube	E
179				(2.08±0.25)-21	(3.17±0.31)-21		(1.37±0.17)-21
154	(2.80±0.29)-21	(1.89±0.20)-21	(1.16±0.084)-20	(2.45±0.061)-19	(5.57±0.29)	(2.85±0.15)-20	
129				(4.38±0.081)	(4.80±0.085)	(2.52±0.062)	(6.64±0.63)-21
104	(7.37±0.67)	(4.32±0.36)	(2.97±0.21)	(6.13±0.096)	(6.63±0.10)	(3.49±0.073)	(1.776±0.10)-20
79				(6.69±0.10)	(7.59±0.11)	(3.95±0.077)	
54	(9.60±0.76)	(5.74±0.59)	(4.29±0.25)	(8.34±0.11)	(8.94±0.12)	(4.63±0.084)	(2.23±0.12)
29				(8.73±0.11)	(9.70±0.12)	(5.04±0.087)	
4				(1.09±0.013)-18	(1.17±0.013)-18	(5.98±0.095)	(3.26±0.14)
-21	(1.22±0.086)-20	(9.42±0.75)	(5.54±0.29)	(1.17±0.013)	(1.28±0.014)	(6.54±0.099)	
-46				(1.27±0.014)	(1.39±0.014)	(7.22±0.10)	(3.79±0.15)
-71	(1.47±0.094)	(9.54±0.76)	(6.39±0.31)	(1.21±0.014)	(1.35±0.014)	(6.93±0.10)	
-96				(1.09±0.013)	(1.21±0.014)	(6.22±0.097)	(3.54±0.15)
-121	(1.04±0.097)	(7.31±0.66)	(5.99±0.30)	(8.60±0.11)-19	(9.43±0.12)-19	(5.03±0.087)	
-146				(4.50±0.082)	(4.87±0.086)	(2.54±0.062)	(1.59±0.098)
-171	(4.71±0.53)-21	(3.74±0.34)	(2.52±0.20)	(4.71±0.27)-20	(5.61±0.28)-20	(3.19±0.22)-20	
-196							

Table 7(2) continued

Z (cm)	I	J	K	L	M	N	(1/sec)	
							Counter	guide
179	(1.45±0.21)-21	(1.60±0.22)-21					(3.20±0.25)-21	
154	(3.02±0.15)-20	(3.87±0.17)-20					(4.76±0.19)-20	(9.15±0.17)-21
129	(1.41±0.046)-19	(1.77±0.052)-19	(2.23±0.18)-20	(3.50±0.33)-21	(2.25±0.085)-19	(3.53±0.10)-20		
104	(2.62±0.063)	(3.45±0.072)	(4.23±0.025)		(4.45±0.082)	(6.58±0.22)		
79	(3.83±0.076)	(4.87±0.086)	(5.96±0.30)	(1.03±0.079)-20	(6.33±0.098)	(9.89±0.27)		
54	(3.09±0.068)	(4.04±0.078)	(4.09±0.25)		(5.54±0.091)	(7.59±0.24)		
29	(5.27±0.089)	(6.50±0.099)	(7.76±0.34)	(1.41±0.092)	(8.37±0.11)		(1.32±0.032)-19	
4	(5.62±0.092)	(6.88±0.10)	(7.97±0.35)		(8.94±0.12)		(1.40±0.032)	
-21	(6.74±0.10)	(8.86±0.12)	(1.03±0.040)-19	(1.73±0.10)	(1.13±0.013)-18			
-46	(7.44±0.11)	(9.28±0.12)	(1.14±0.041)		(1.20±0.013)		(1.77±0.052)	
-71	(7.92±0.11)	(1.05±0.013)-18	(1.14±0.041)	(2.28±0.12)	(1.31±0.014)		(1.78±0.052)	
-96	(7.26±0.10)	(1.00±0.012)	(1.13±0.041)		(1.21±0.014)		(1.64±0.050)	
-121	(6.66±0.10)	(8.71±0.11)-19	(9.69±0.38)-20	(1.93±0.11)	(1.08±0.013)		(1.57±0.049)	
-146	(5.57±0.092)	(6.89±0.10)	(8.03±0.35)		(8.76±0.11)-19		(1.22±0.043)	
-171	(2.91±0.066)	(3.64±0.074)	(4.33±0.26)	(7.19±0.66)-21	(4.64±0.084)		(6.37±0.22)-20	
-196	(2.94±0.15)-20	(3.44±0.23)-20	(4.53±0.58)-21		(4.62±0.19)-20		(6.49±0.70)-21	

Table 8(1) ^{235}U fission rates around the B-fuel assembly of the 0° arrangement

z (cm)	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	Counter	guide	tube	(1/sec)		
								B ₅	B ₆	C
179										
154	(5.45±0.29)-20	(2.57±0.14)-20	(4.22±0.18)-20							(8.53±0.80)-21
129	(2.54±0.044)-19	(1.29±0.044)-19	(2.15±0.057)-19	(1.48±0.15)-20	(2.69±0.28)-21	(1.93±0.34)-21	(2.75±0.20)-21			(5.66±0.29)
104	(4.68±0.084)	(2.27±0.059)	(3.95±0.077)	(2.43±0.19)						(8.05±0.35)
79	(6.66±0.10)	(3.48±0.072)	(5.54±0.092)	(4.03±0.25)	(6.04±0.68)	(3.93±0.44)	(6.39±0.31)			(1.14±0.041)-19
54	(7.53±0.11)	(3.84±0.076)	(5.99±0.95)	(3.88±0.24)						(1.29±0.44)
29	(9.02±0.12)	(4.57±0.083)	(7.41±0.11)	(4.76±0.27)	(7.70±0.76)	(5.89±0.54)				(1.56±0.048)
4	(9.71±0.12)	(5.00±0.087)	(8.31±0.11)	(4.88±0.27)						(1.63±0.050)
-21	(1.18±0.013)-18	(6.10±0.096)	(9.94±0.12)	(6.27±0.31)	(8.68±0.81)	(8.61±0.81)	(1.58±0.049)			(1.61±0.049)
-46	(1.27±0.014)	(6.47±0.099)	(1.08±0.013)-18	(7.23±0.33)						(1.46±0.047)
-71	(1.43±0.015)	(7.12±0.10)	(1.21±0.014)	(7.28±0.33)	(1.37±0.10)-20	(9.61±0.70)				(1.21±0.043)
-96	(1.31±0.014)	(6.98±0.10)	(1.18±0.013)	(7.50±0.34)						(6.10±0.30)-20
-121	(1.22±0.014)	(6.13±0.096)	(1.05±0.013)	(6.49±0.31)	(1.23±0.096)	(9.06±0.83)				(1.14±0.093)
-146	(1.00±0.012)	(4.90±0.086)	(8.47±0.11)-19	(5.29±0.28)						
-171	(5.22±0.087)-19	(2.73±0.064)	(4.49±0.082)	(2.96±0.21)	(4.23±0.56)-21	(3.78±0.44)				
-196	(8.05±0.35)-20	(4.45±0.026)-20	(7.64±0.34)-20	(7.02±0.73)-21						

Table 8(2) continued

(1/sec)

z (cm)	E	T	Counter guide tube		
			J	K	L
179			(1.99±0.25)-21		
154	(4.53±0.26)-20	(3.19±0.22)-20	(4.00±0.25)-20	(5.23±0.51)-21	
129	(2.11±0.056)-19	(1.28±0.44)-19	(1.74±0.051)-19	(2.20±0.18)-20	(3.81±0.34)-21
104	(3.95±0.77)	(2.38±0.060)	(3.26±0.070)	(4.24±0.25)	(5.69±0.54)-21
79	(5.64±0.092)	(3.52±0.073)	(4.61±0.083)	(5.62±0.29)	(1.16±0.094)-20
54	(4.90±0.086)	(2.64±0.063)	(4.23±0.080)	(4.47±0.26)	(1.78±0.16)-20
29	(7.70±0.11)	(4.45±0.082)	(6.19±0.097)	(7.29±0.33)	(2.01±0.10)
4	(8.14±0.11)	(5.02±0.087)	(6.86±0.10)	(8.59±0.36)	
-21	(1.03±0.012)-18	(6.15±0.096)	(8.21±0.11)	(9.95±0.39)	(1.81±0.17)
-46	(1.06±0.013)	(6.46±0.099)	(9.03±0.12)	(1.17±0.042)-19	(2.81±0.15)
-71	(1.21±0.014)	(7.14±0.10)	(1.00±0.012)-18	(1.24±0.043)	
-96	(1.10±0.013)	(6.47±0.099)	(9.32±0.12)-19	(1.17±0.041)	(3.19±0.16)
-121	(1.04±0.013)	(6.07±0.096)	(8.50±0.11)	(1.08±0.040)	(2.73±0.20)
-146	(8.57±0.11)-19	(4.65±0.084)	(6.95±0.10)	(8.40±0.36)-20	
-171	(4.43±0.082)	(2.39±0.060)	(3.58±0.074)	(4.70±0.27)	(8.00±0.78)-21
-196	(7.38±0.24)-20	(3.99±0.25)-20	(5.87±0.30)-20		(1.96±0.17)

Table 9 ^{235}U fission rates around the B-fuel assembly of the 180° arrangement

z (cm)	B ₁	B ₂	B ₃	Counter guide tube			J
				E	I	T	
179							
154	(4.70±0.27)-20	(1.99±0.17)-20	(3.40±0.23)-20	(1.02±0.082)-19	(5.51±0.29)-20	(6.93±0.32)-20	
129	(2.23±0.082)-19	(8.76±0.51)	(1.71±0.072)-19	(3.03±0.086)	(1.61±0.049)-19	(2.17±0.057)-19	
104	(4.10±0.11)	(9.39±0.53)	(3.10±0.097)	(4.98±0.061)	(2.76±0.065)	(3.60±0.074)	
79	(5.89±0.13)	(2.33±0.084)-19	(4.43±0.061)	(6.10±0.096)	(3.61±0.074)	(4.67±0.084)	
54	(6.29±0.14)	(2.47±0.086)	(5.10±0.12)	(5.34±0.090)	(2.90±0.066)	(4.44±0.082)	
29	(7.57±0.15)	(3.34±0.10)	(6.40±0.14)	(7.91±0.11)	(4.82±0.085)	(6.61±0.10)	
4	(8.33±0.11)	(3.68±0.11)	(7.29±0.15)	(8.56±0.11)	(5.56±0.092)	(7.55±0.11)	
-21	(1.08±0.018)-18	(4.61±0.12)	(9.16±0.17)	(1.06±0.013)-18	(6.66±0.10)	(8.95±0.12)	
-46	(1.14±0.019)	(5.15±0.12)	(9.78±0.17)	(1.09±0.013)	(6.78±0.10)	(9.71±0.12)	
-71	(1.25±0.014)	(5.67±0.13)	(1.08±0.018)-18	(9.23±0.37)-19	(7.50±0.11)	(1.06±0.013)-18	
-96	(1.17±0.015)	(5.55±0.092)	(1.05±0.018)	(1.02±0.012)-19	(6.46±0.099)	(9.79±0.12)-19	
-121	(1.03±0.018)	(5.17±0.12)	(1.01±0.017)	(8.82±0.12)-19	(6.02±0.095)	(9.21±0.12)	
-146	(8.50±0.16)-19	(4.43±0.12)	(8.85±0.16)-19	(6.21±0.097)	(4.12±0.079)	(6.61±0.10)	
-171	(4.45±0.12)	(2.28±0.083)	(4.61±0.12)	(2.42±0.060)	(1.59±0.049)	(2.55±0.062)	
-196	(7.91±0.49)-20	(4.08±0.25)-20	(6.98±0.46)-20	(2.05±0.18)-20	(1.29±0.099)-20	(1.95±0.12)-20	

Table 10(1) ^{235}U fission rates around the A-fuel (180°) and B-fuel (0°) assemblies placed together
(1/sec)

Z (cm)	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	Counter guide tube		
							Counter	guide	tube
179	(3.99±0.35)-21	(1.36±0.20)-21	(2.20±0.26)-21	(2.99±0.30)-21	(2.63±0.28)-21	(1.54±0.22)-21			
154	(5.41±0.20)-20	(2.58±0.14)-20	(4.80±0.27)-20	(6.30±0.31)-20	(5.68±0.29)-20	(2.66±0.20)-20	(7.78±0.77)-21		
129	(2.38±0.060)-19	(1.20±0.043)-19	(2.18±0.057)-19	(2.63±0.063)-19	(2.54±0.06)-19	(1.36±0.045)-19	(3.10±0.22)-20		
104	(4.71±0.084)	(2.21±0.058)	(4.17±0.079)	(4.61±0.083)	(4.83±0.09)	(2.63±0.063)	(5.50±0.29)		
79	(6.68±0.10)	(3.12±0.069)	(6.04±0.096)	(6.66±0.10)	(6.96±0.10)	(3.76±0.075)	(7.63±0.34)		
54	(7.62±0.11)	(3.50±0.073)	(6.33±0.098)	(7.44±0.11)	(7.65±0.11)	(4.02±0.078)	(6.31±0.31)		
29	(9.16±0.12)	(4.39±0.081)	(7.90±0.11)	(8.80±0.12)	(9.42±0.12)	(4.88±0.086)	(1.17±0.042)-19		
4	(9.71±0.12)	(4.89±0.086)	(8.72±0.11)	(9.53±0.12)	(1.02±0.01)	-18	(5.40±0.090)	(1.40±0.046)	
-21	(1.24±0.014)-18	(5.88±0.094)	(1.10±0.013)-18	(1.19±0.013)-18	(1.25±0.014)	(6.52±0.099)	(1.53±0.048)		
-46	(1.31±0.014)	(6.62±0.10)	(1.19±0.013)	(1.25±0.014)	(1.32±0.014)	(7.09±0.10)	(1.65±0.050)		
-71	(1.43±0.015)	(7.14±0.10)	(1.34±0.014)	(1.42±0.015)	(1.43±0.015)	(7.75±0.11)	(1.70±0.051)		
-96	(1.35±0.014)	(7.14±0.10)	(1.29±0.014)	(1.32±0.014)	(1.36±0.014)	(7.48±0.11)	(1.50±0.048)		
-121	(1.23±0.014)	(6.29±0.097)	(1.17±0.013)	(1.16±0.013)	(1.25±0.014)	(6.80±0.10)	(1.52±0.048)		
-146	(9.94±0.12)-19	(5.25±0.089)	(9.22±0.12)-19	(9.30±0.12)-19	(1.02±0.012)	(5.48±0.091)	(1.24±0.043)		
-171	(6.78±0.10)	(2.76±0.065)	(5.05±0.087)	(5.18±0.088)	(5.21±0.089)-19	(2.82±0.065)	(5.83±0.30)-20		
-196	(8.92±0.37)-20	(4.82±0.27)-20	(8.27±0.35)-20	(8.67±0.36)-20	(8.55±0.36)-20	(4.30±0.025)-20	(1.33±0.14)		

Table 10(2) continued

Z (cm)	E	I	Counter			L	M	O
			J	K	guide tube			
179	(2.42±0.27)-21	(3.84±0.34)-21	(4.00±0.55)-21				(2.49±0.43)-21	
154	(4.98±0.17)-20	(6.81±0.20)-20	(8.73±0.36)-20	(1.20±0.078)-20	(2.33±0.27)-21	(5.52±0.29)-20	(8.73±0.51)-21	
129	(9.04±0.23)	(3.19±0.069)-19	(3.99±0.078)-19	(4.33±0.26)	(7.78±0.77)	(2.51±0.062)-19	(3.44±0.23)-20	
104	(4.31±0.081)-19	(5.95±0.095)	(7.41±0.11)	(9.32±0.38)	(1.40±0.15)-20	(4.58±0.083)	(6.73±0.32)	
79	(6.30±0.098)	(8.40±0.11)	(1.02±0.012)-18	(1.19±0.030)-19	(1.94±0.17)	(6.73±0.10)	(1.00±0.33)-19	
54	(5.46±0.091)	(6.69±0.10)	(8.81±0.12)-19	(9.34±0.27)-20	(1.69±0.16)	(5.60±0.092)	(7.31±0.33)-20	
29	(8.32±0.11)	(1.07±0.013)-18	(1.34±0.014)-18	(1.58±0.035)-19	(2.99±0.21)	(9.04±0.12)	(1.28±0.044)-19	
4	(8.91±0.12)	(1.19±0.013)	(1.46±0.015)	(1.79±0.037)	(3.13±0.22)	(9.45±0.12)	(1.40±0.046)	
-21	(1.09±0.013)-18	(1.39±0.014)	(1.79±0.016)	(2.09±0.040)	(3.53±0.23)	(1.18±0.013)-18	(1.68±0.050)	
-46	(1.16±0.013)	(1.46±0.015)	(1.92±0.017)	(2.32±0.042)	(4.14±0.25)	(1.24±0.014)	(1.72±0.051)	
-71	(1.29±0.014)	(1.59±0.015)	(2.16±0.018)	(2.53±0.044)	(4.76±0.27)	(1.36±0.014)	(1.92±0.054)	
-96	(1.18±0.013)	(1.49±0.013)	(2.04±0.018)	(2.50±0.043)	(4.41±0.26)	(1.25±0.014)	(1.72±0.051)	
-121	(1.13±0.013)	(1.32±0.014)	(1.84±0.017)	(2.20±0.041)	(3.74±0.24)	(1.16±0.013)	(1.56±0.049)	
-146	(8.93±0.12)-19	(1.05±0.013)	(1.44±0.015)	(1.75±0.036)	(3.05±0.21)	(9.26±0.12)-19	(1.23±0.043)	
-171	(4.73±0.085)	(5.49±0.091)-19	(7.83±0.11)-19	(9.51±0.38)-20	(1.71±0.16)	(4.72±0.084)	(6.33±0.31)-20	
-196	(9.88±0.39)-20	(9.26±0.37)-20	(1.35±0.045)	(3.99±0.49)-21	(8.03±0.35)-20	(1.22±0.078)		

Table 11 ^{232}Th fission rates around the A-fuel assembly of the 0° arrangement

z (cm)	Counter guide tube				(1 / sec)
	B ₄	B ₅	J	I	
79	(2.68 ± 0.15) -23	(4.58 ± 0.36) -23			
4	(5.45 ± 0.45)	(7.00 ± 1.15)	(4.00 ± 0.24) -23		
-71	(9.15 ± 0.76)	(7.54 ± 0.21)	(6.91 ± 0.81)	(3.94 ± 0.36) -23	(3.36 ± 0.15) -23
-146	(7.15 ± 0.67)	(6.70 ± 0.55)			

Table 12 ^{232}Th fission rates around the A-fuel assembly of the 180° arrangement

z (cm)	Counter guide tube				(1 / sec)
	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	
79					(3.94 ± 0.15) -23
4					(6.82 ± 0.48)
-71					(6.61 ± 0.70) -23
-146					(5.09 ± 0.18) (6.03 ± 0.48)

Table 13 ^{232}Th fission rates around the B-fuel assembly of the 0° arrangement

z (cm)	Counter guide tube				(1/sec)
	B ₁	B ₂	B ₃	J	
-71	(8.73 _± 0.39)-23	(2.64 _± 0.17)-23	(6.85 _± 0.48)-23	(6.09 _± 0.21)-23	(2.66 _± 0.15)-23

Table 14 ^{232}Th fission rates around the B-fuel assembly of the 180° arrangement

z (cm)	Counter guide tube				(1/sec)
	B ₁	B ₂	B ₃	J	
-71	(6.24 _± 0.55)-23	(2.49 _± 0.15)-23	(5.39 _± 0.45)-23	(6.09 _± 0.21)-23	

Table 15 ^{232}Th fission rates around the A-fuel (180°) and B-fuel (0°) assemblies placed together
(1/sec)

z (cm)	B ₁	B ₃	B ₄	B ₅	Counter		guide	tube	J
					I	J	guide	tube	
4									$(8.82 \pm 0.48) -23$
-71	$(7.91 \pm 0.21) -23$	$(7.64 \pm 0.42) -23$	$(8.03 \pm 0.36) -23$	$(7.54 \pm 0.24) -23$	$(5.70 \pm 0.24) -23$	$(5.70 \pm 0.24) -23$	$(1.26 \pm 0.045) -22$		

Table 16 Interactions between the A and B fuel assemblies to the gamma-ray dose rate

Line	Pos. Z(cm)	Exposure dose rates (R/hr)				Ratio (α/β)	
		A(180°)	B(0°)	SUM(β)	A;B(α)	average	
J	79	7.58 +03	7.83 +03	1.54 +04	1.71 +04	1.11	1.11
	4	8.55	8.53	1.71	1.88	1.10	
	-71	1.04 +04	1.04 +04	2.08	2.31	1.11	
I	79	4.57 +03	4.26 +03	8.83 +03	9.73 +03	1.10	1.10
	4	5.23	4.78	1.00 +04	1.10 +04	1.10	
	-71	6.01	5.43	1.14	1.24	1.09	
B_1	79		1.22 +04		1.13 +04	0.926	0.947
	4		1.42		1.35	0.951	
	-71		1.65		1.59	0.964	
B_5	4	1.33 +04			1.28 +04	0.962	0.978
	-71	1.52			1.51	0.993	

Table 17 Interactions between the A and B fuel assemblies to the ^{235}U fission rate

Line	Pos. Z(cm)	^{235}U fission rates (1/sec)				Ratio (α/β)	
		A(180°)	B(0°)	SUM(α)	A;B(β)	average	
J	79	4.87 -19	4.61 -19	9.48 -19	1.02 -18	1.08	1.06
	4	6.88	6.86	1.37 -18	1.46	1.06	
	-71	1.05 -18	1.00 -18	2.05	2.16	1.05	
I	79	3.83 -19	3.52 -19	7.35 -19	8.40 -19	1.14	1.10
	4	5.62	5.02	1.06 -18	1.19	1.12	
	-71	7.92	7.14	1.51	1.59	1.05	
B_1	79		6.66 -19		6.68 -19	1.00	1.00
	4		9.71		9.71	1.00	
	-71		1.43 -18		1.43 -18	1.00	
B_5	79	6.63 -19			6.96 -19	1.05	1.04
	4	9.70			1.02 -18	1.05	
	-71	1.39 -18			1.43	1.03	

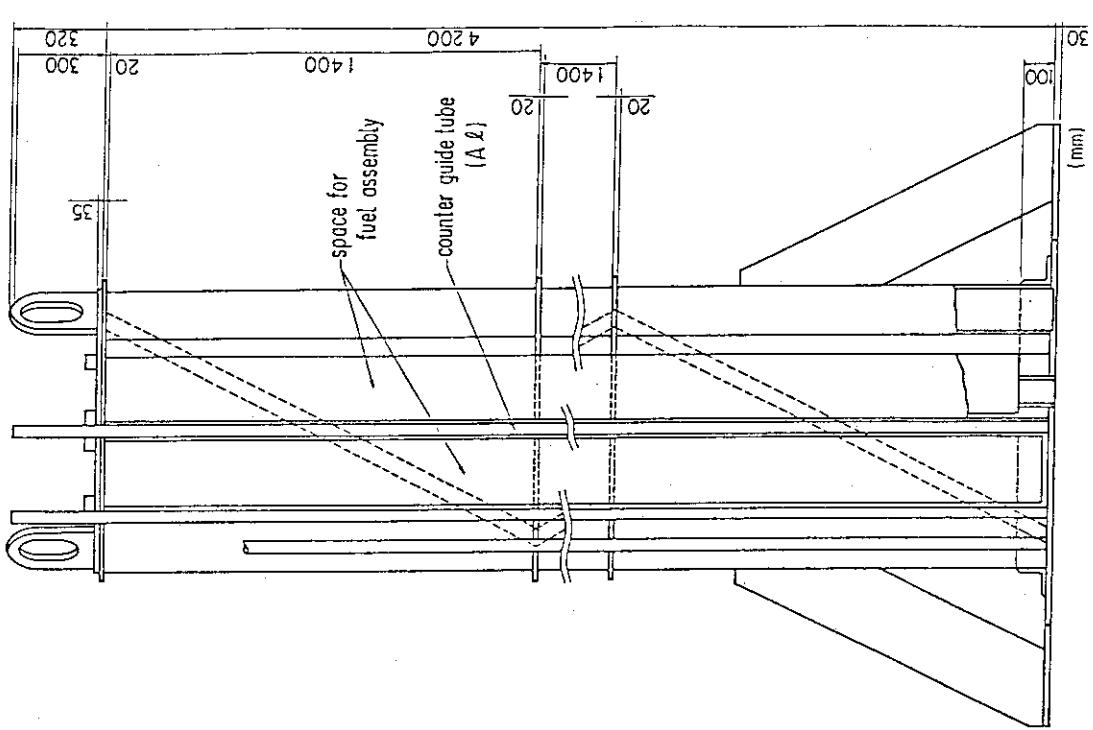


Fig. 1 A vertical cross sectional view of the fuel assembly stand

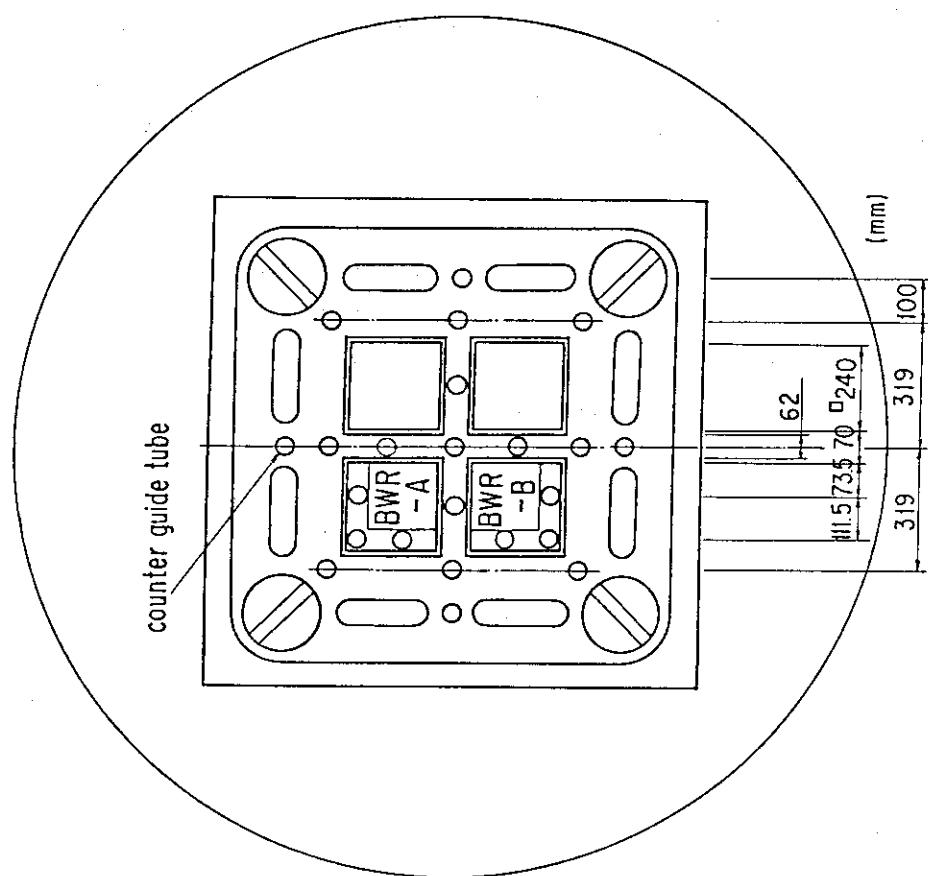


Fig. 2 A plane view of the fuel assembly stand

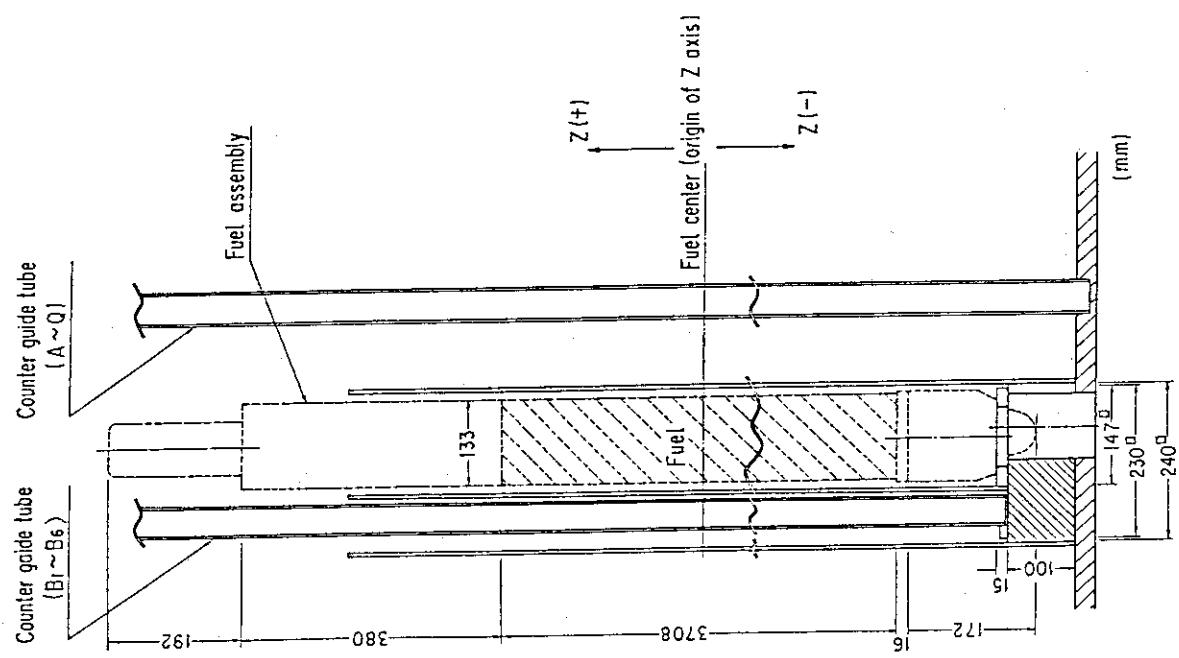


Fig. 4 The geometrical relation between the BWR fuel assembly and the counter guide tube

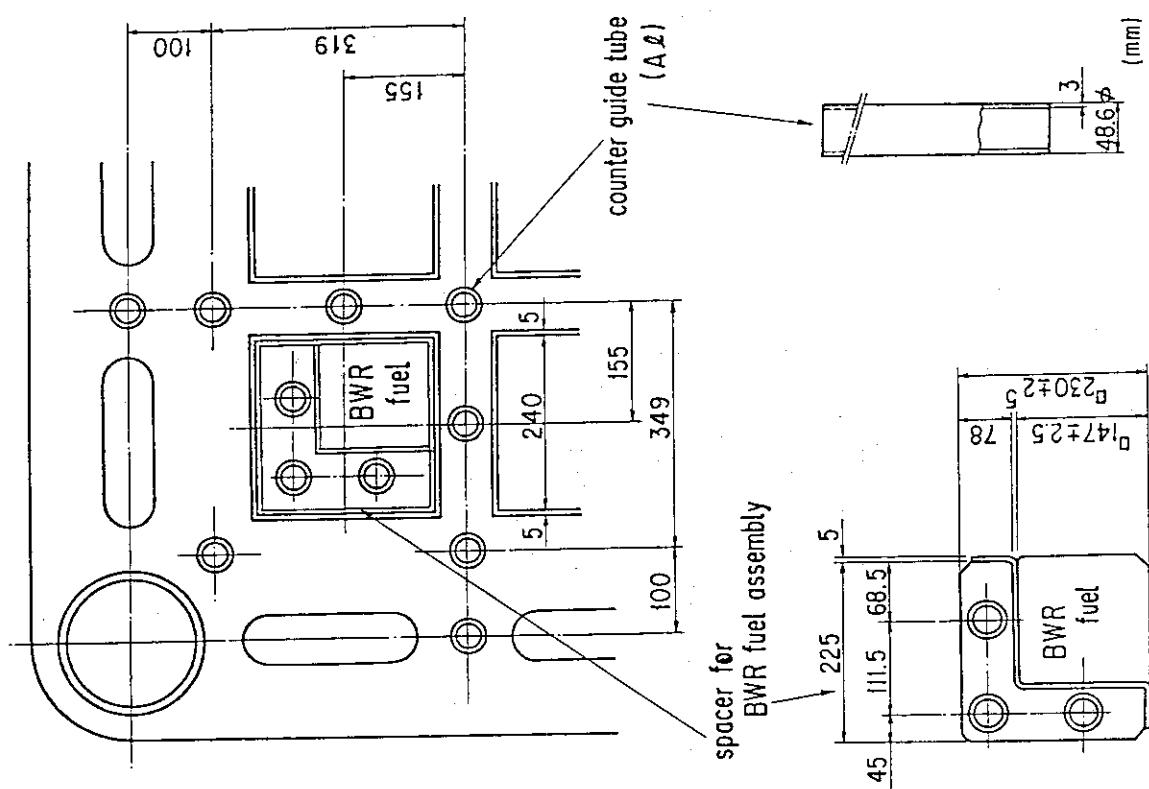


Fig. 3 A detail of the fuel assembly stand

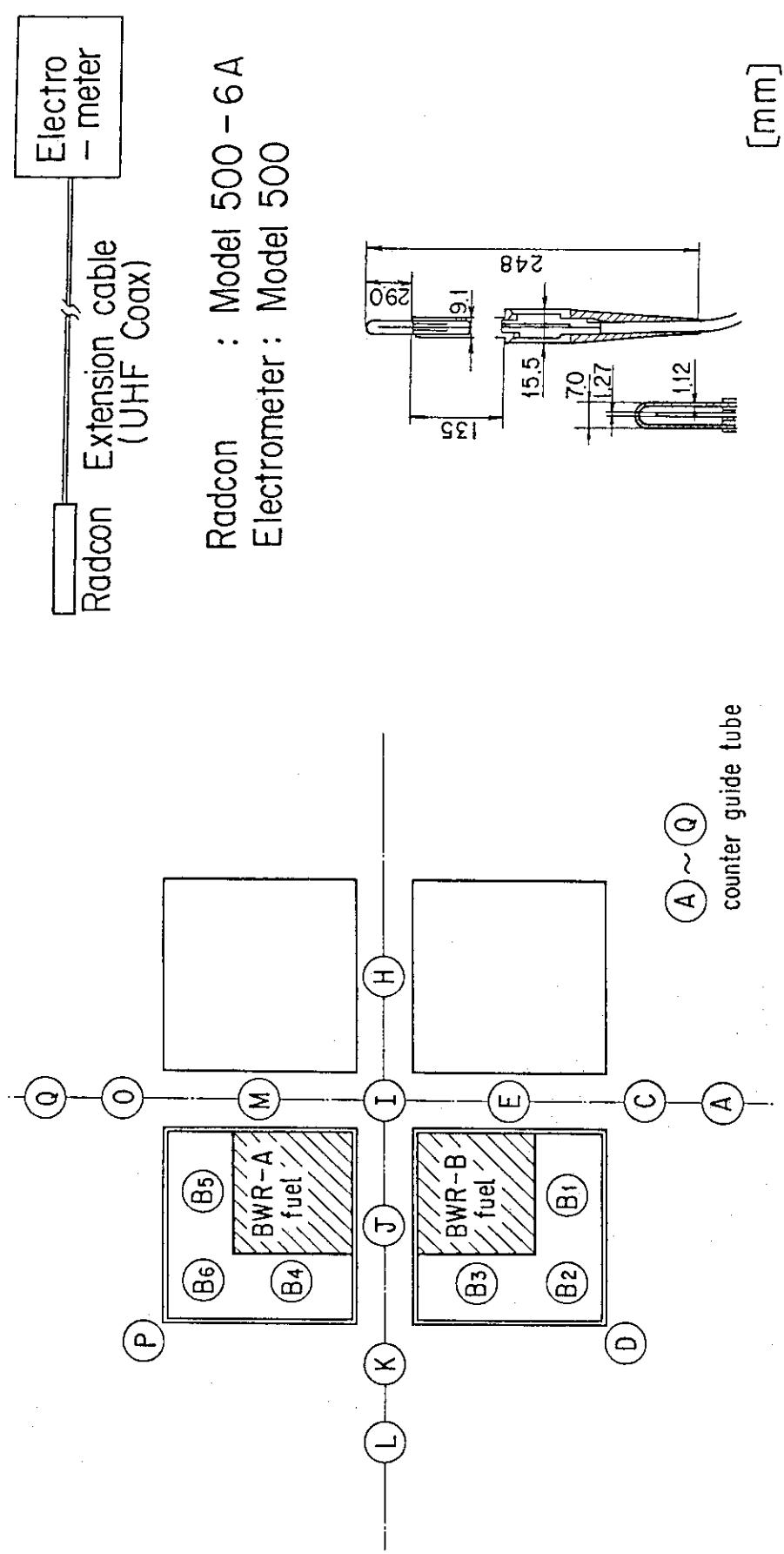


Fig. 5 A and B fuel assemblies set in the 0° direction and the counter guide tubes

Fig. 7 Model 500-6A Radcon dosimeter and the measuring system

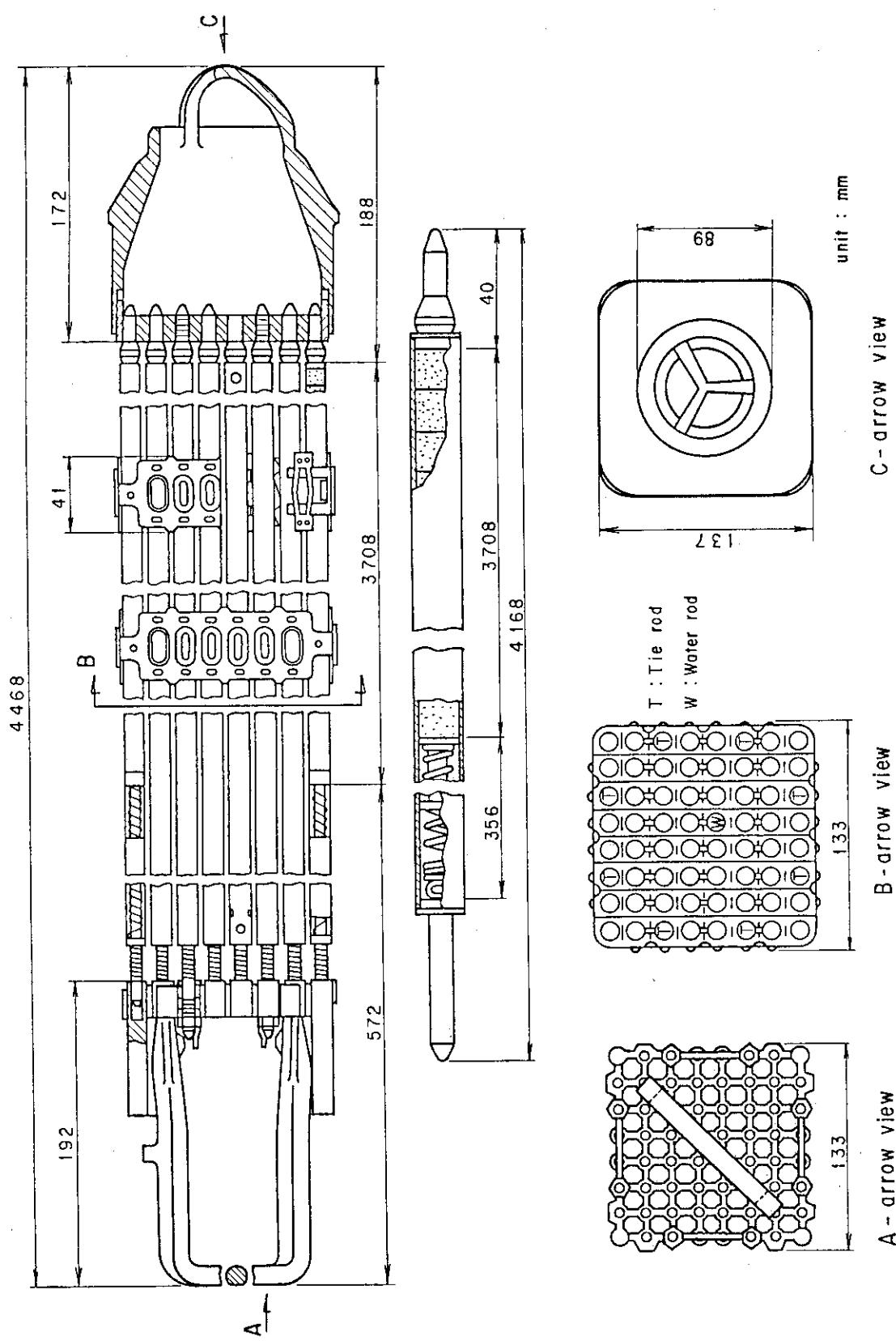


Fig. 6 Dimensions of a BWR fuel assembly

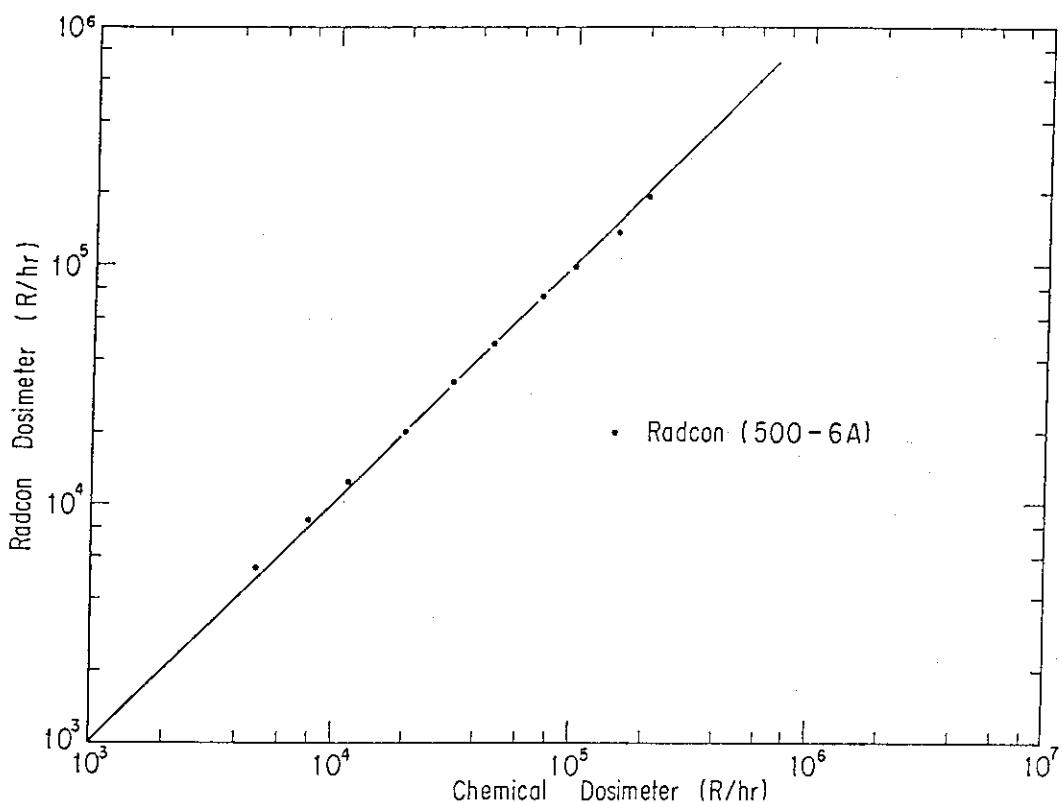
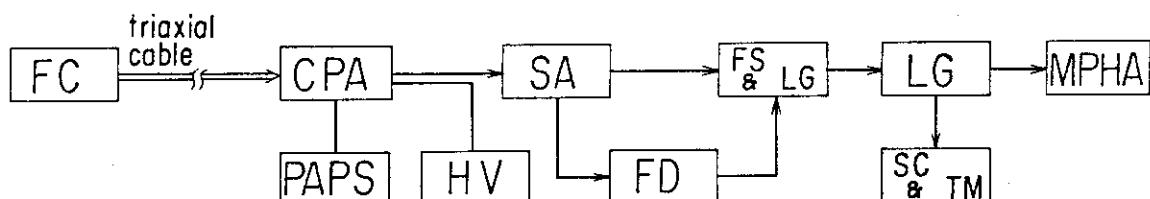


Fig. 8 Calibration curve of the 500-6A Radcon dosimeter vs. a Frike dosimeter



- FC : Fission counter
- CPA : Current-type preamplifier
- PAPS : Preamp. power supply.
- HV : High voltage power supply
- SA : Shaping amplifier
- FD : Fast discriminator
- FS & LG : Fast stretcher and linear gate
- LG : Linear gate
- SC & TM : Scaler and timer
- MPHA : Multi-channel pulse height analyzer

Fig. 9 Block diagram for neutron measurements with the FC-165A fission counter

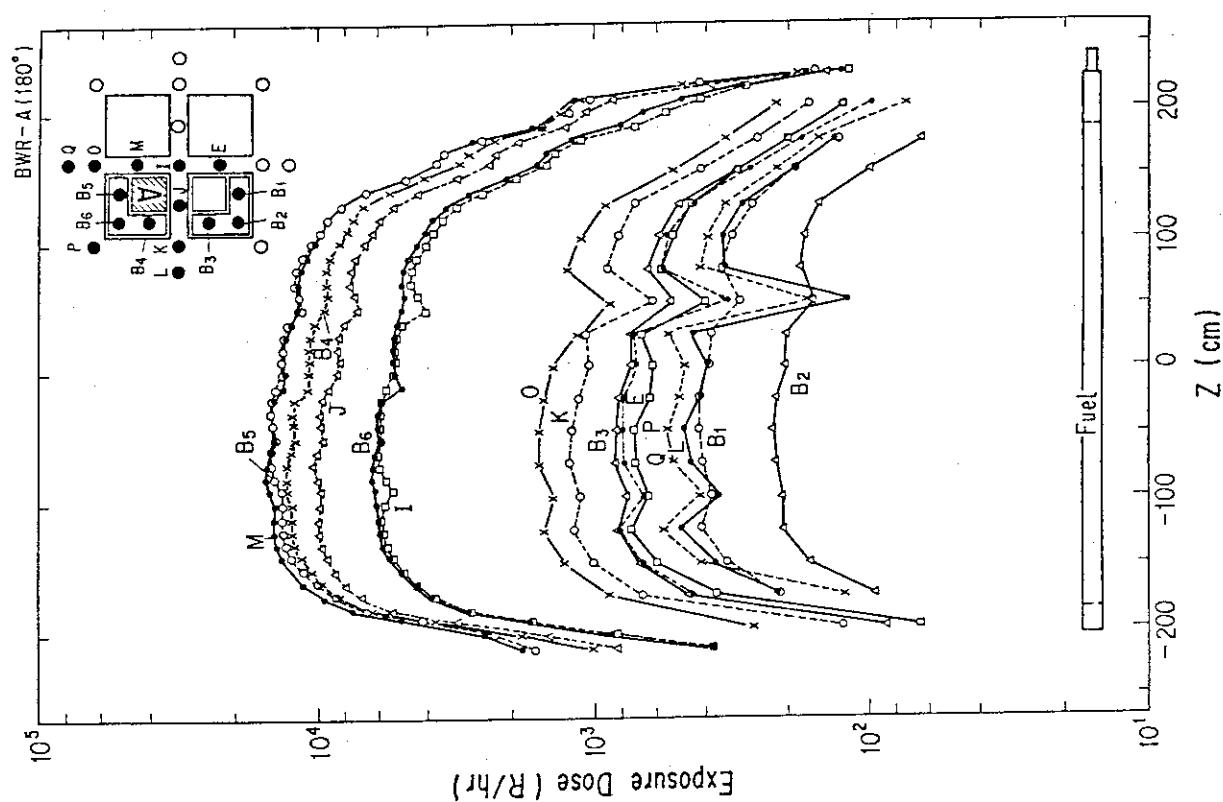


Fig. 11 Distributions of gamma-ray exposure dose rates around the A-fuel assembly of the 180° arrangement

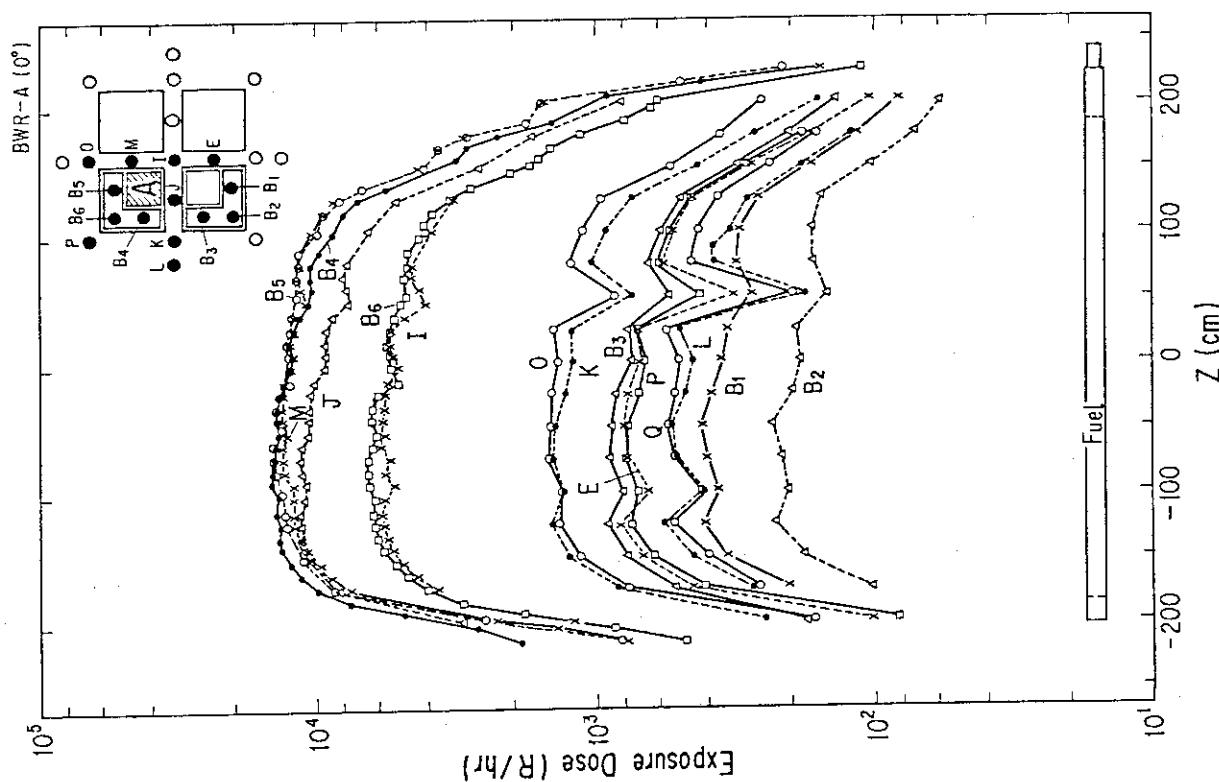


Fig. 10 Distributions of gamma-ray exposure dose rates around the A-fuel assembly of the 0° arrangement

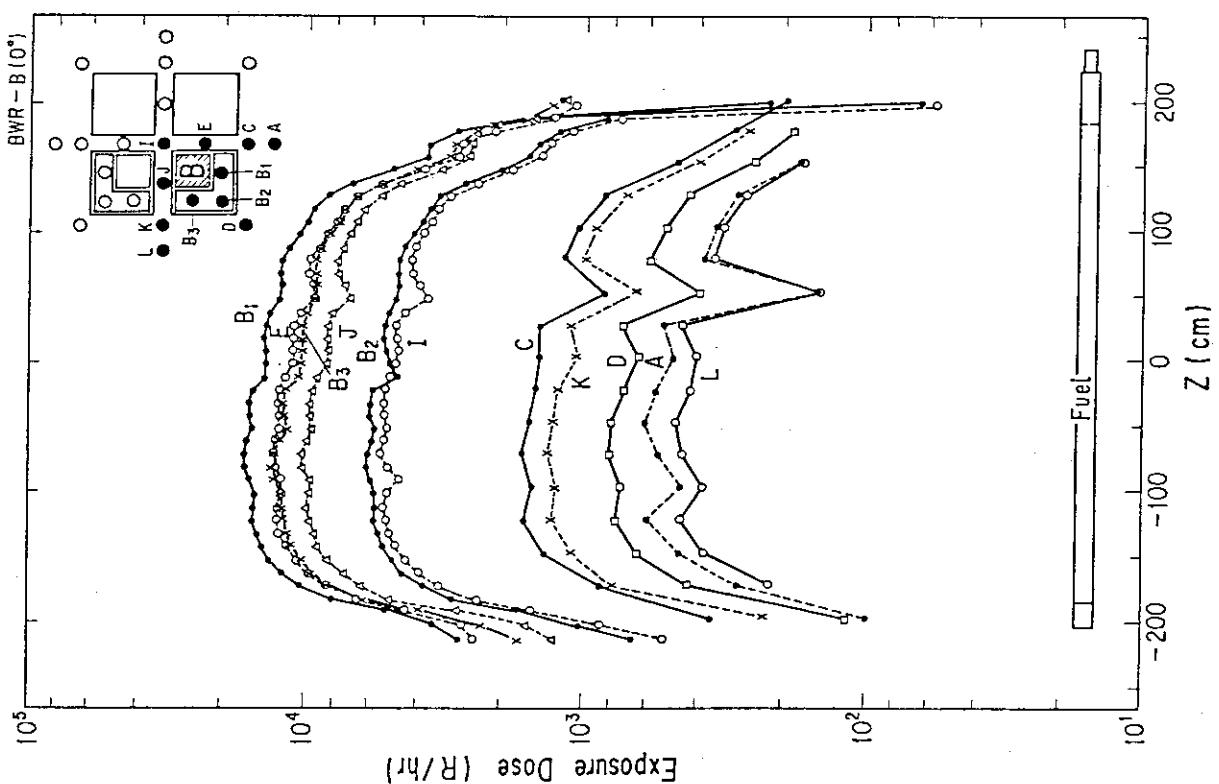
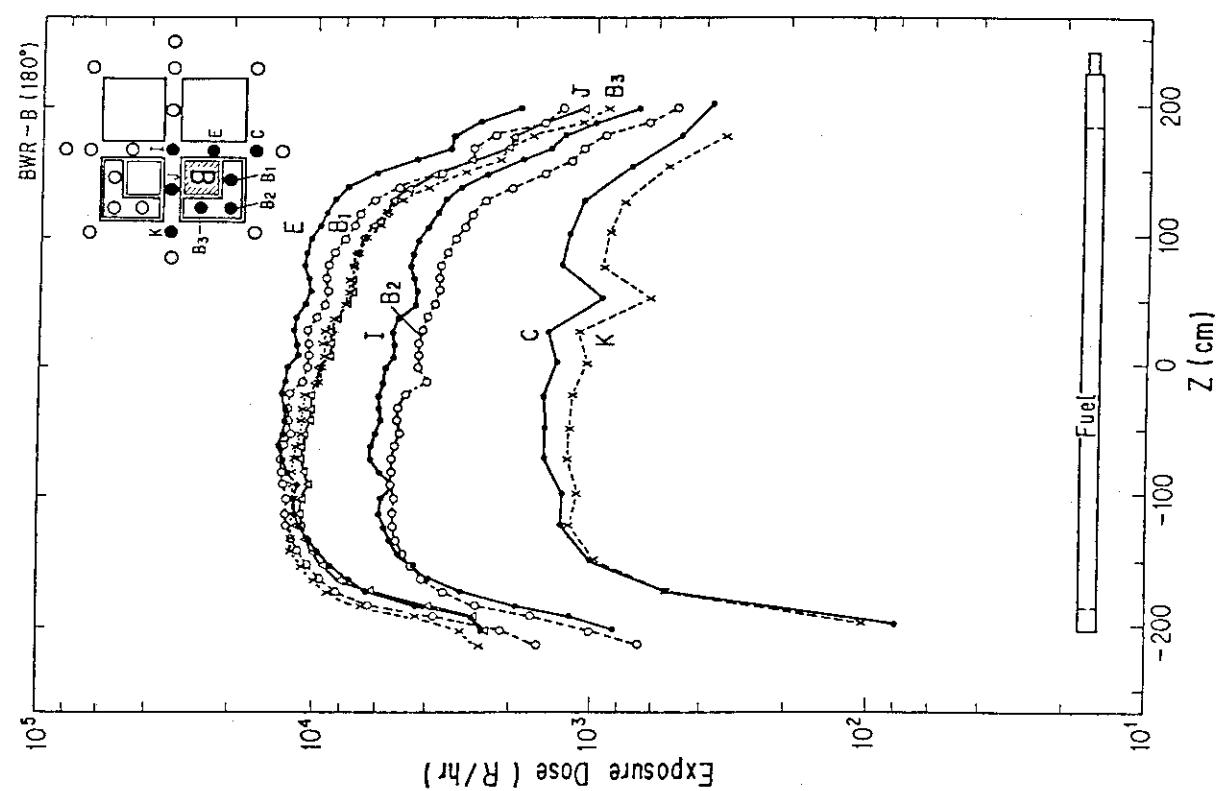


Fig. 12 Distributions of gamma-ray exposure dose rates around the B-fuel assembly of the 0° arrangement

Fig. 13 Distributions of gamma-ray exposure dose rates around the B-fuel assembly of the 180° arrangement

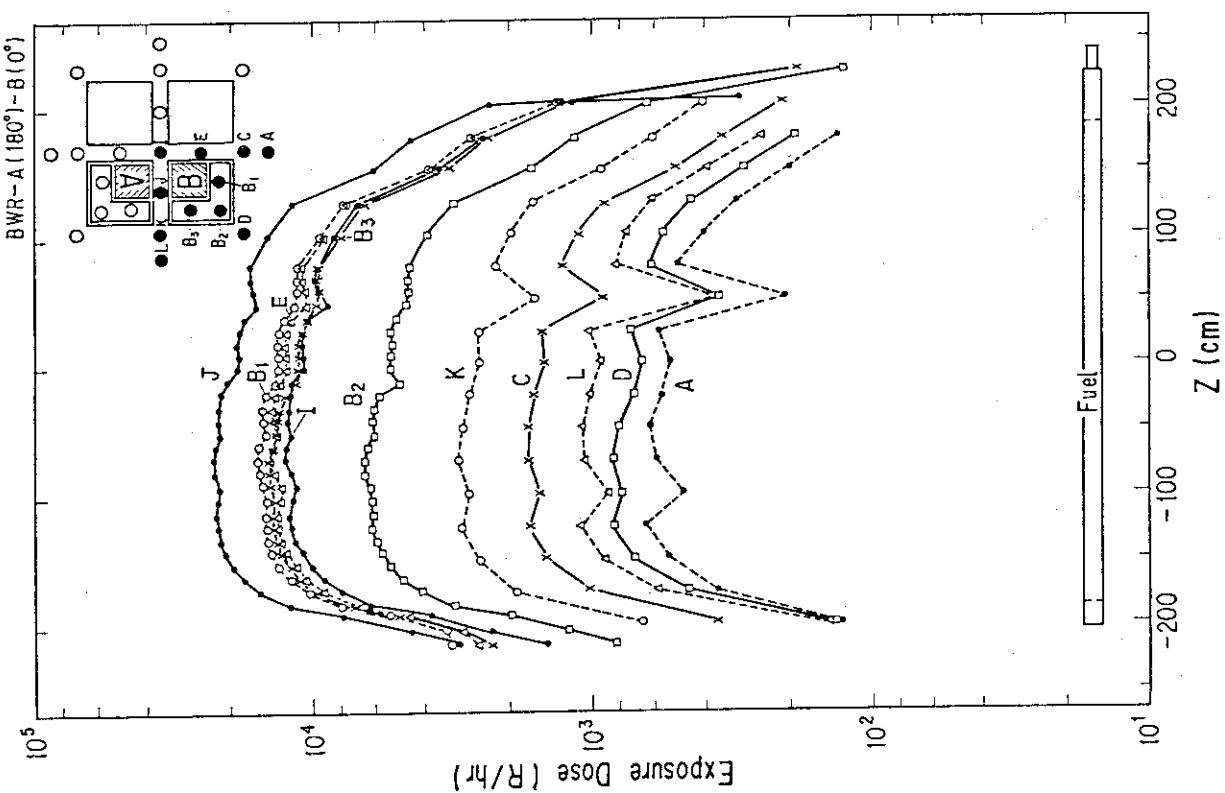
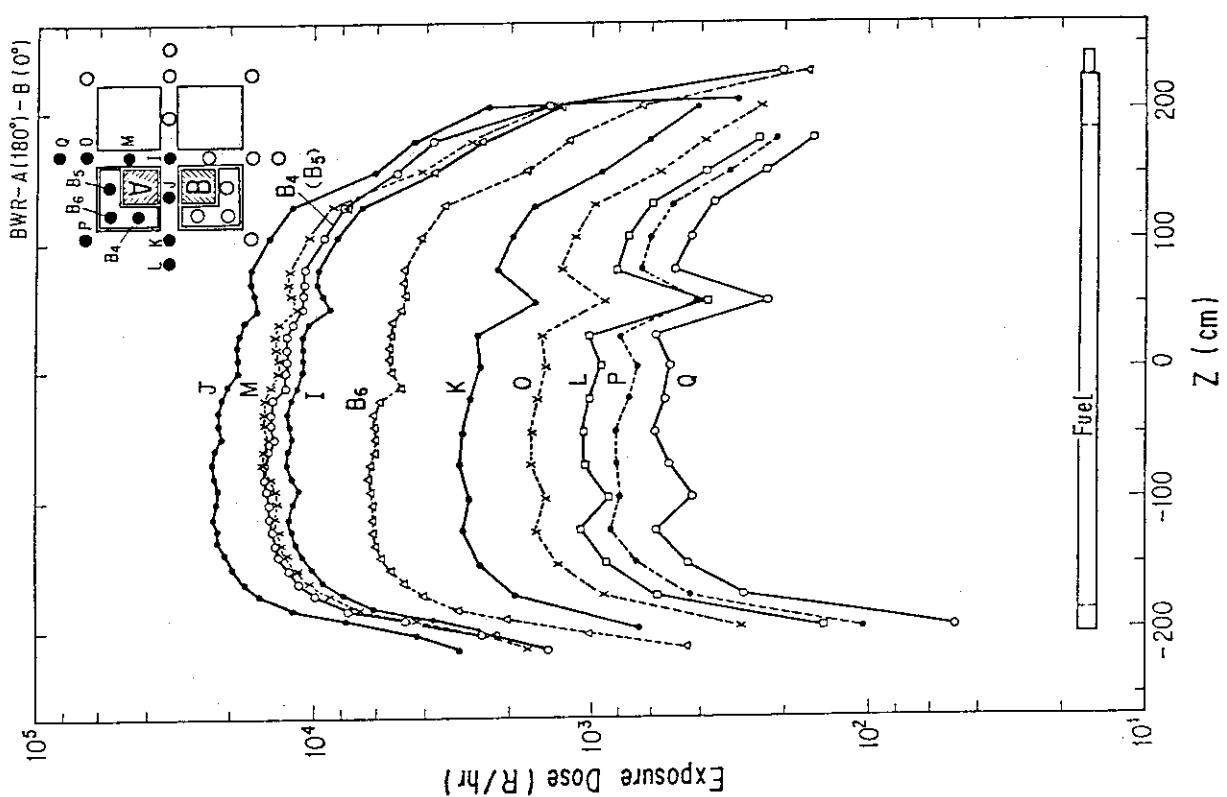


Fig. 14(1) Distributions of gamma-ray exposure dose rates around the A-fuel (180°) and B-fuel (0°) assemblies placed together

Fig. 14(2) continued

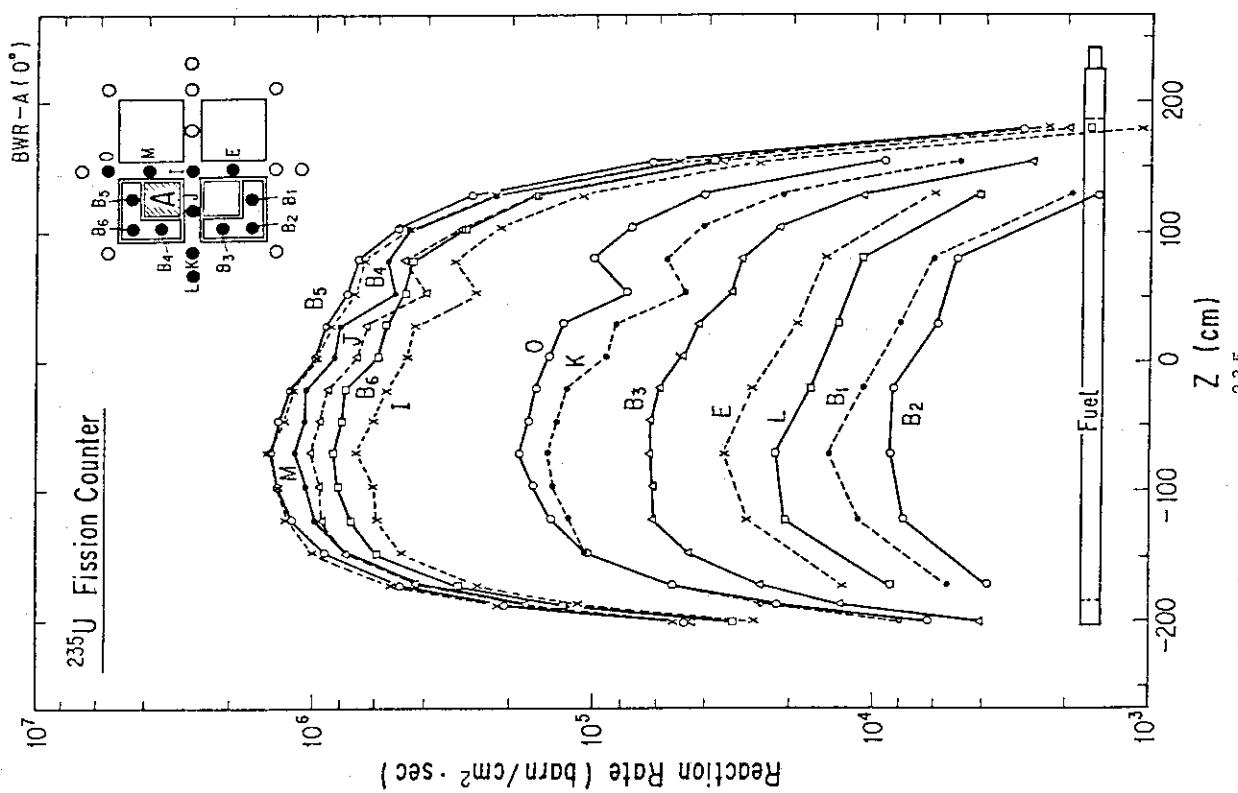


Fig. 15 Distributions of ^{235}U fission rates around the 0° A-fuel assembly of the 0° arrangement

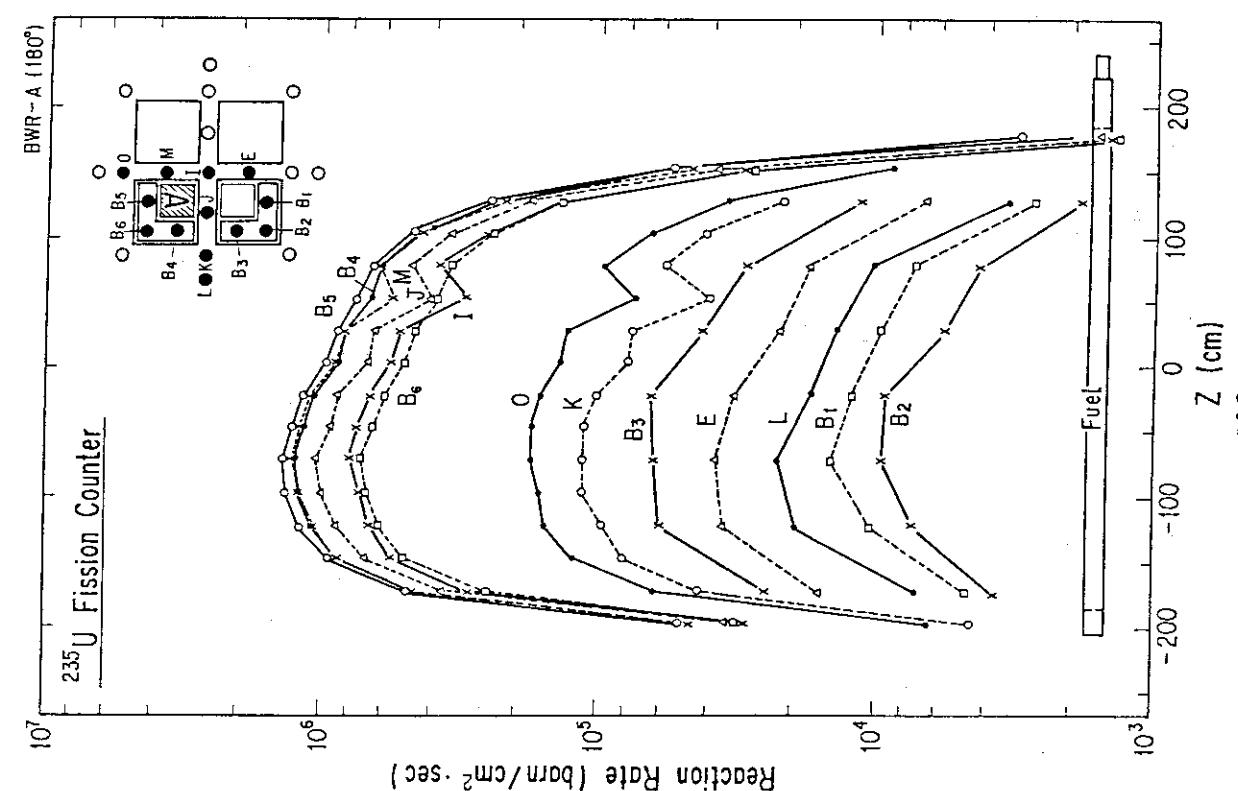


Fig. 16 Distributions of ^{235}U fission rates around the 180° A-fuel assembly of the 180° arrangement

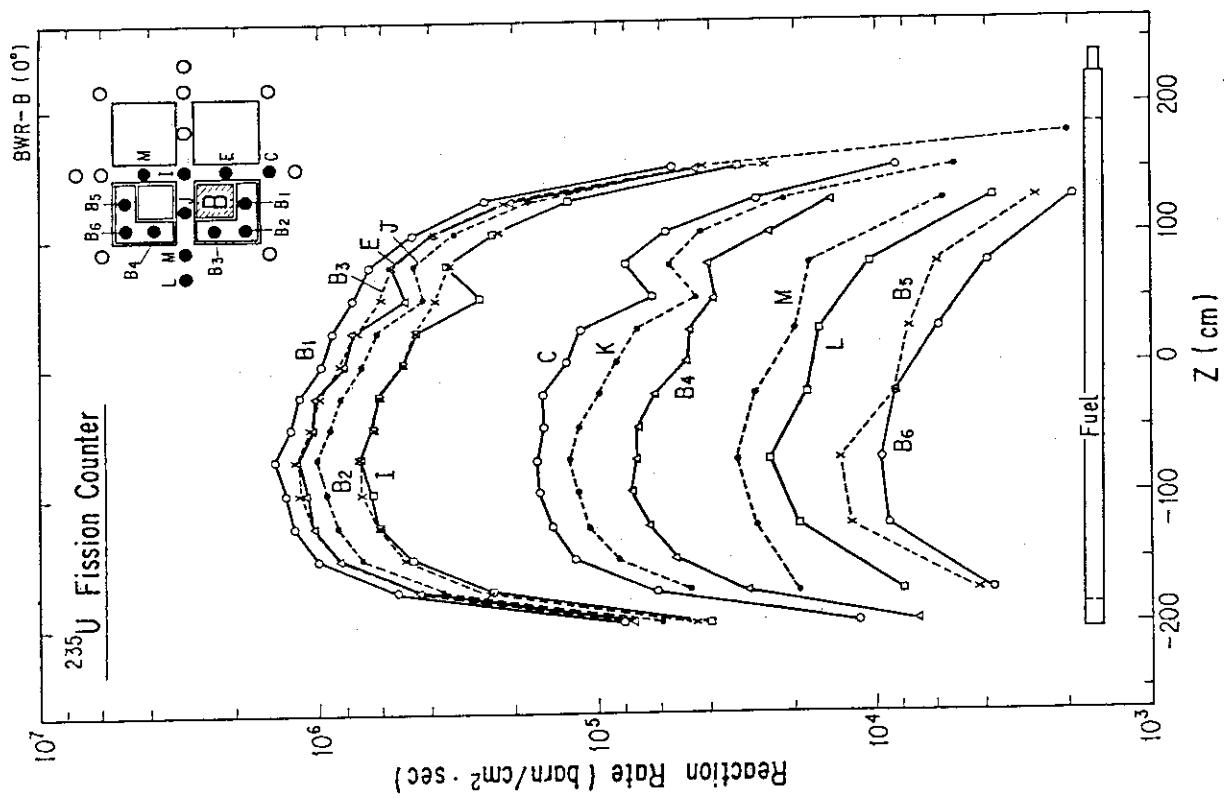
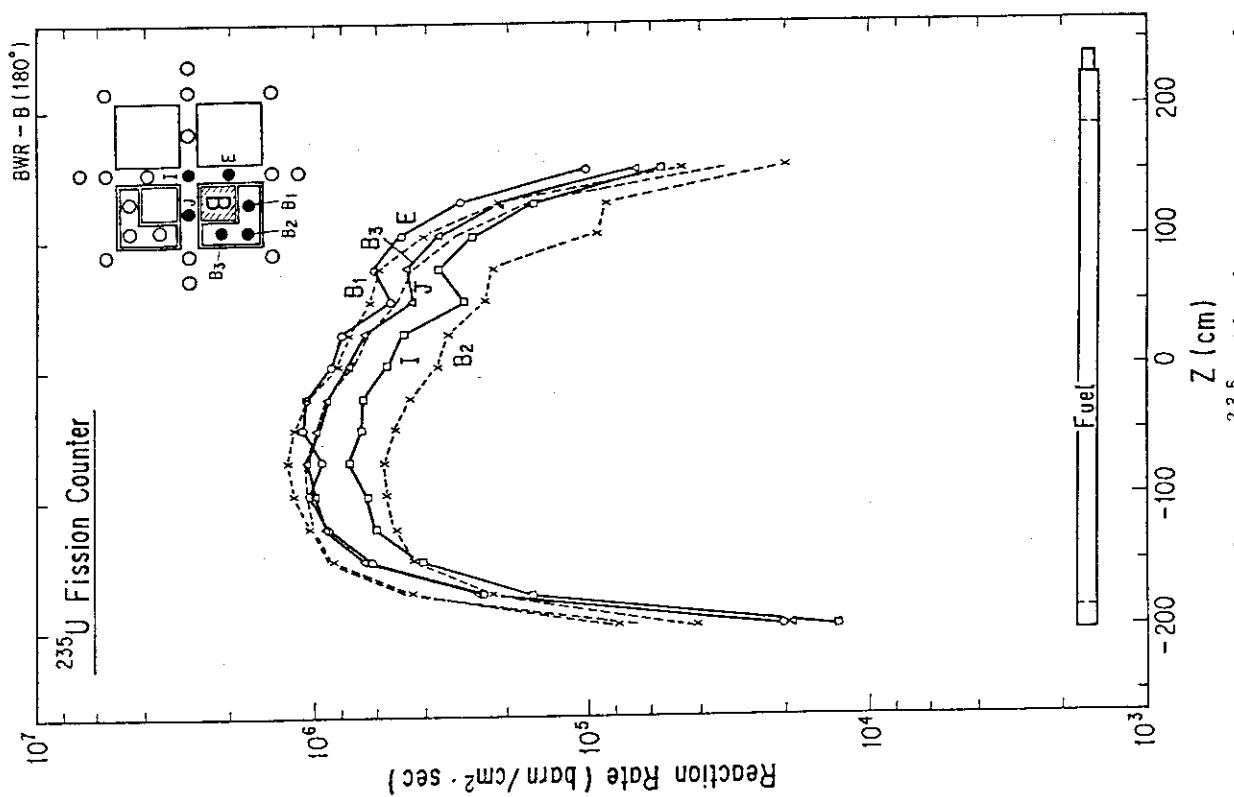


Fig. 17 Distributions of ^{235}U fission rates around the B-fuel assembly of the 0° arrangement

Fig. 18 Distributions of ^{235}U fission rates around the B-fuel assembly of the 180° arrangement

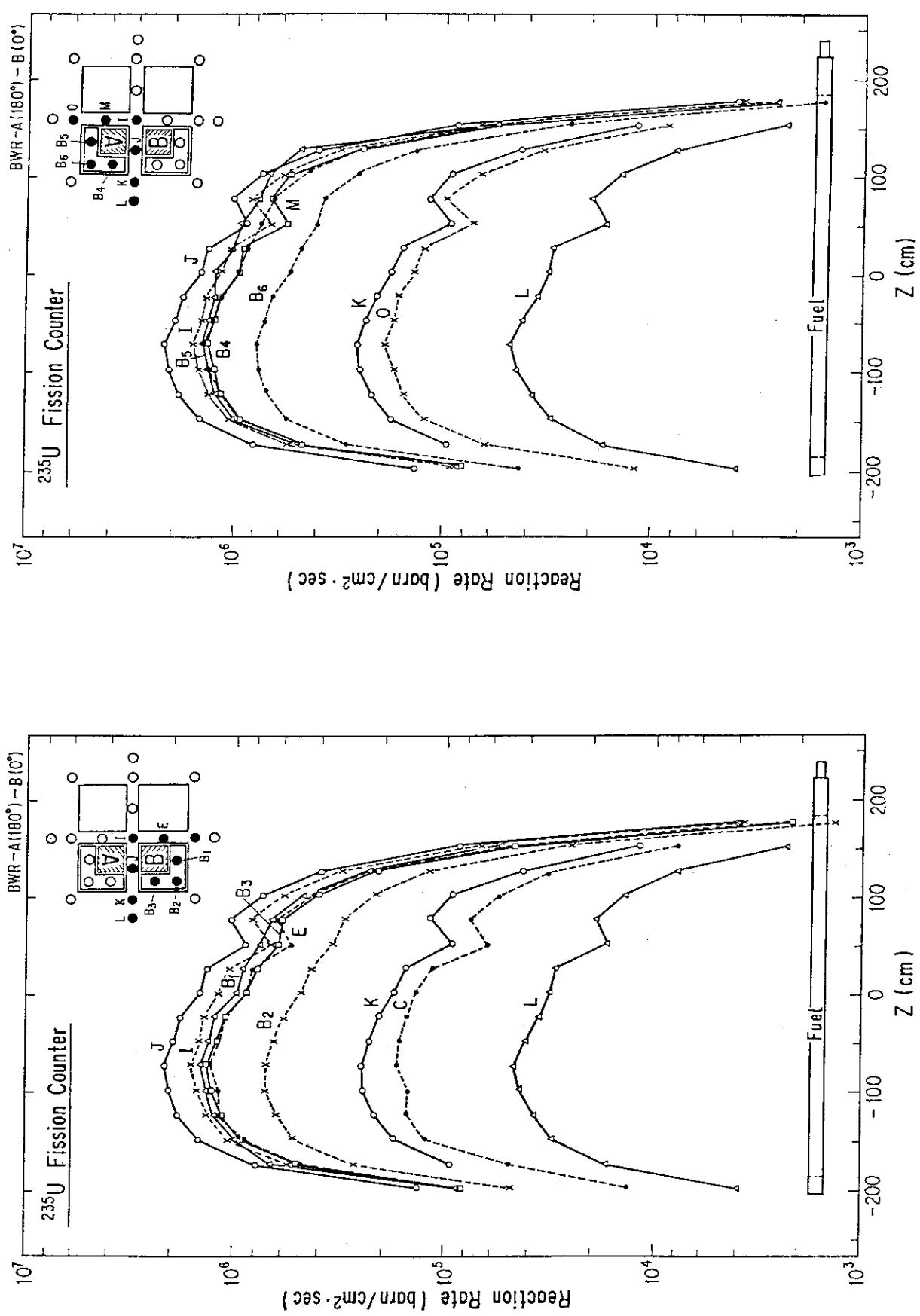


Fig. 19(1) Distributions of ^{235}U fission rates around the A-fuel (180°) and B-fuel (0°) assemblies placed together

Fig. 19(2) continued

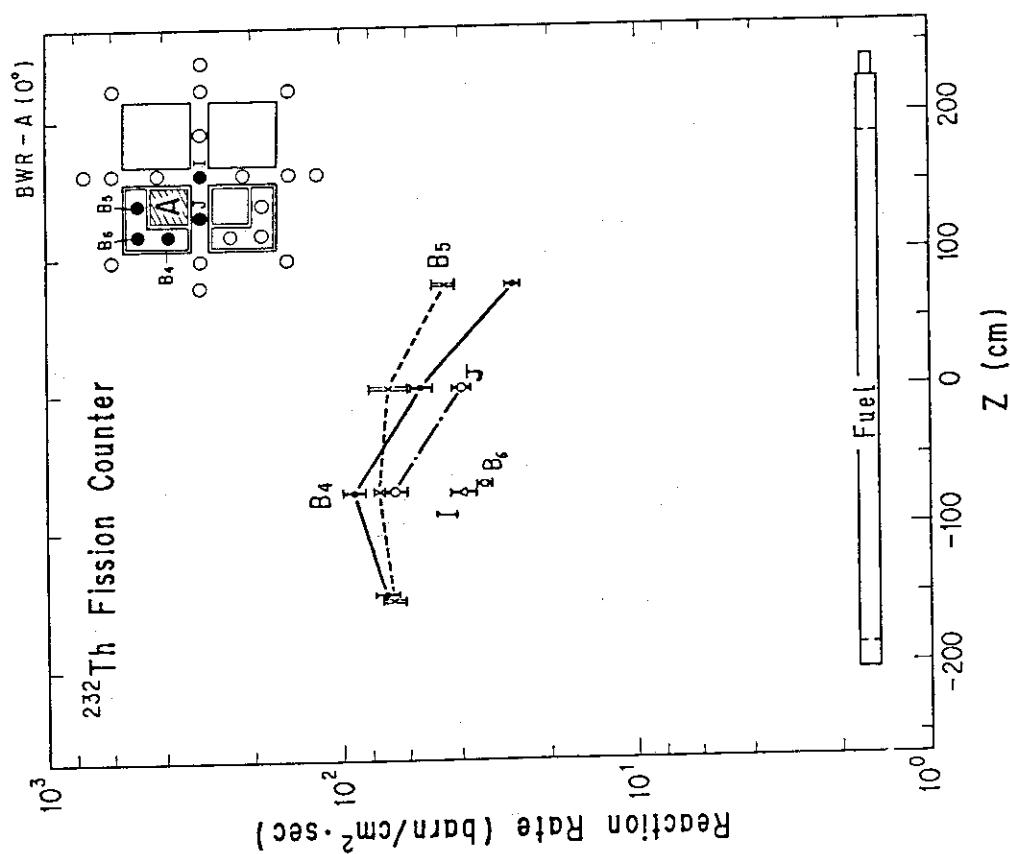
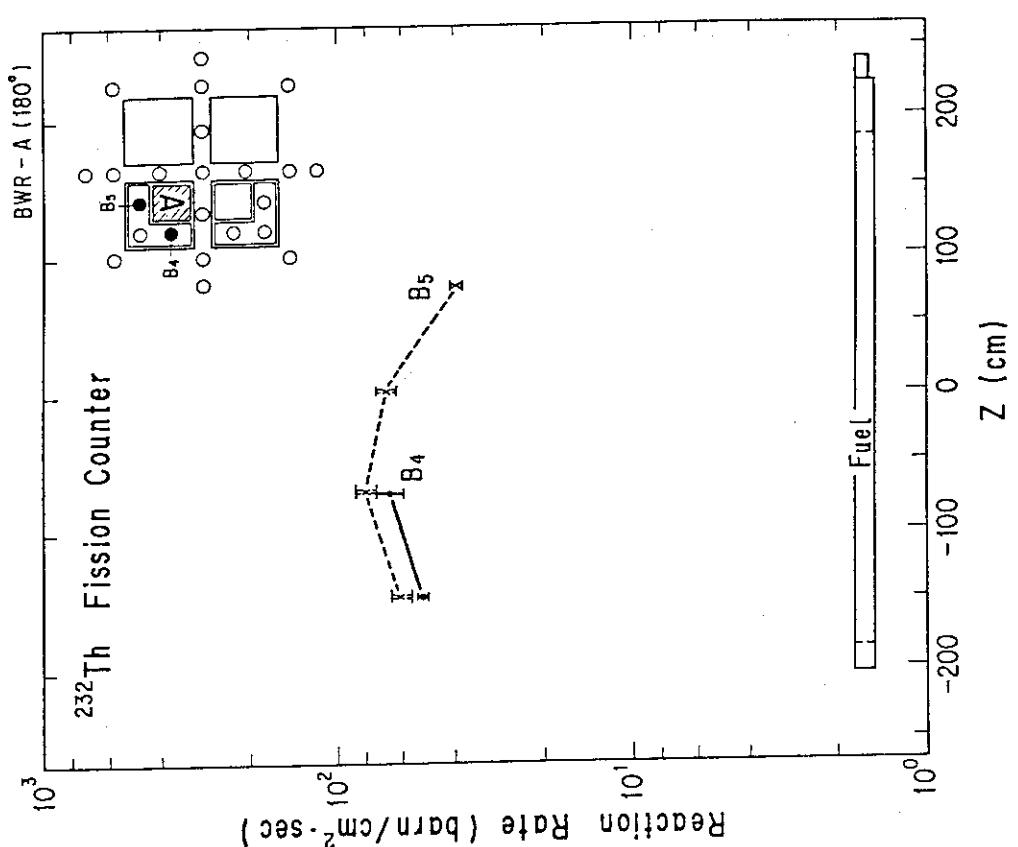


Fig. 20 Distributions of ^{232}Th fission rates around the A-fuel assembly of the 0° arrangement

Fig. 21 Distributions of ^{232}Th fission rates around the A-fuel assembly of the 180° arrangement

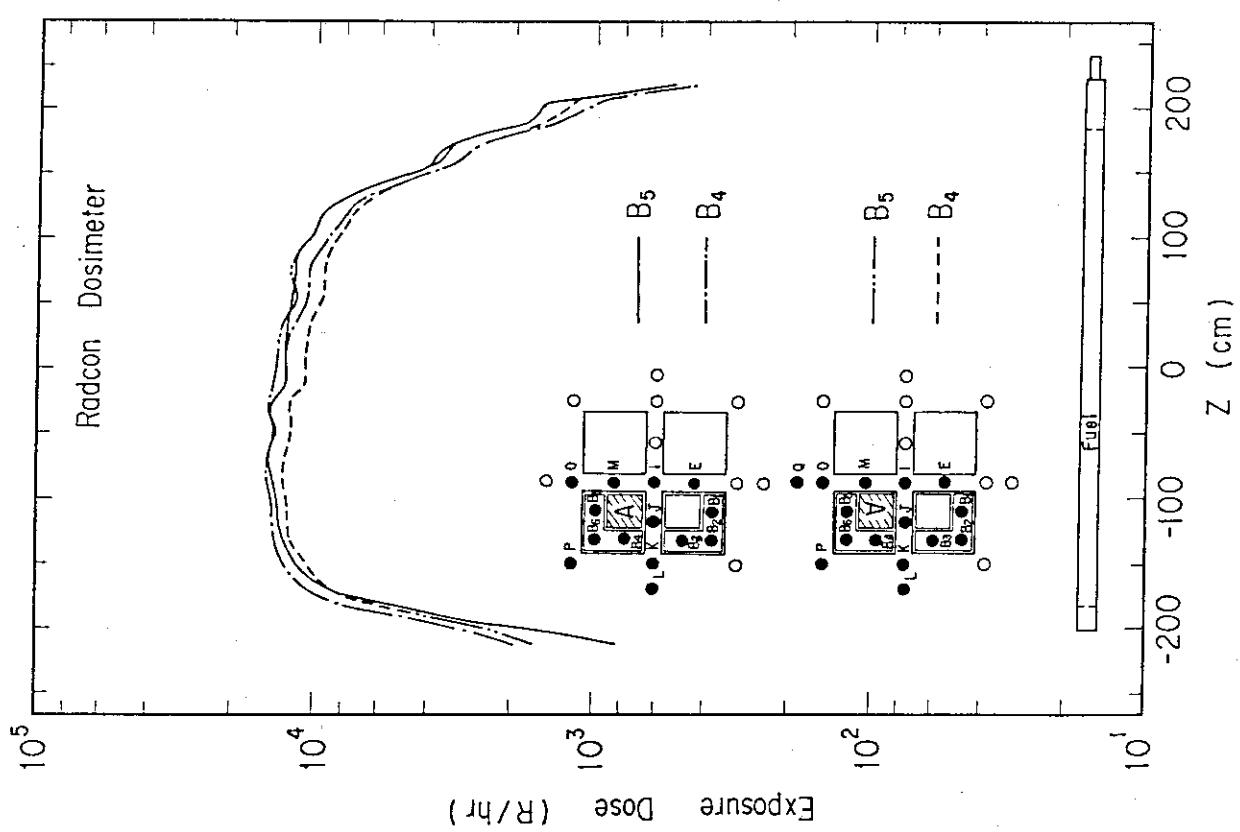


Fig. 22 The comparison of four gamma-ray exposure dose rate distributions facing on the A-fuel assembly

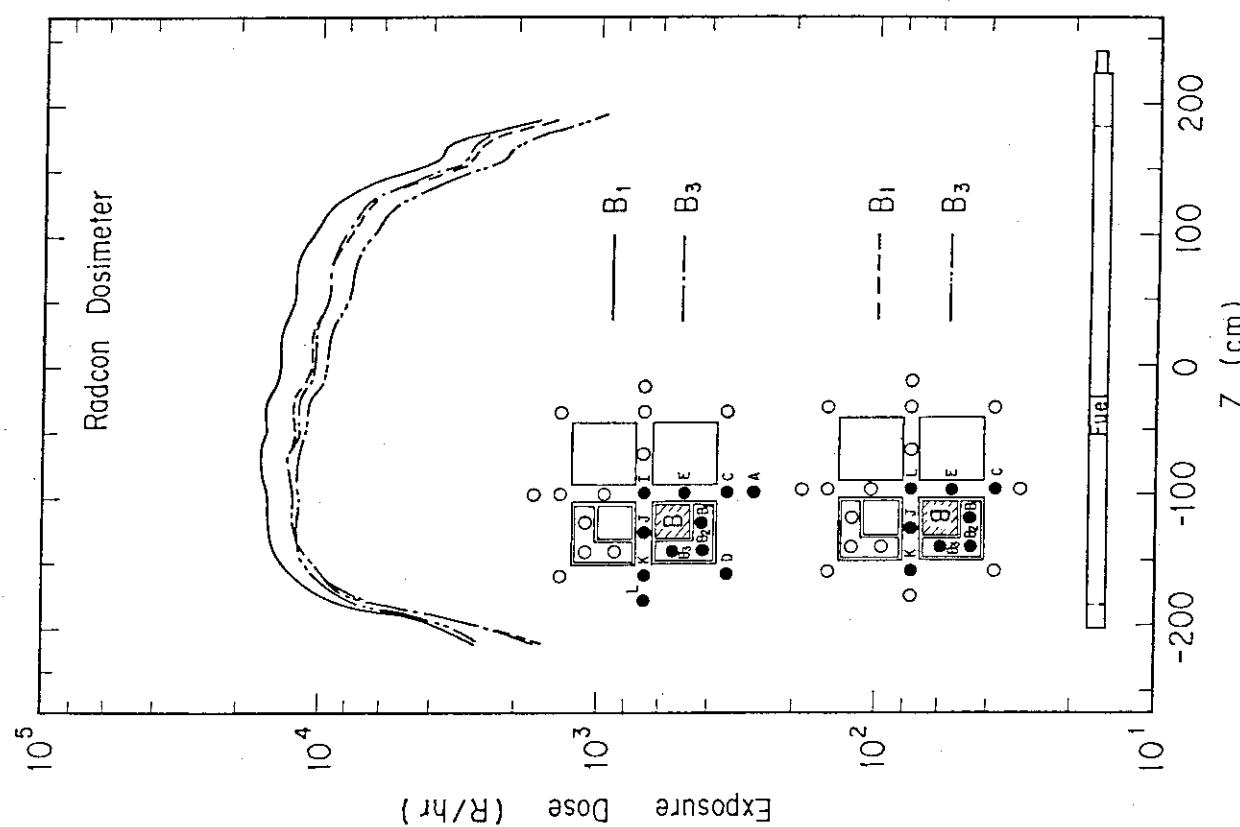


Fig. 23 The comparison of four gamma-ray exposure dose rate distributions facing on the B-fuel assembly

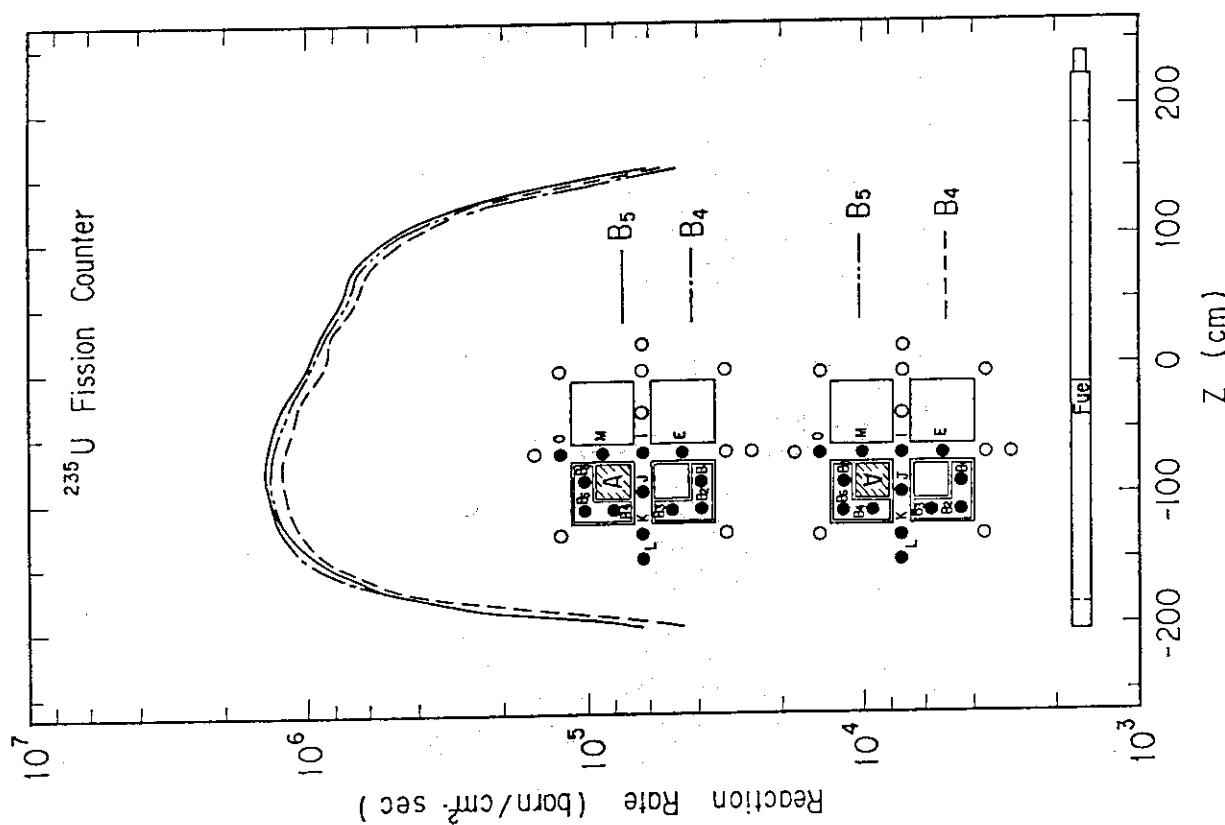
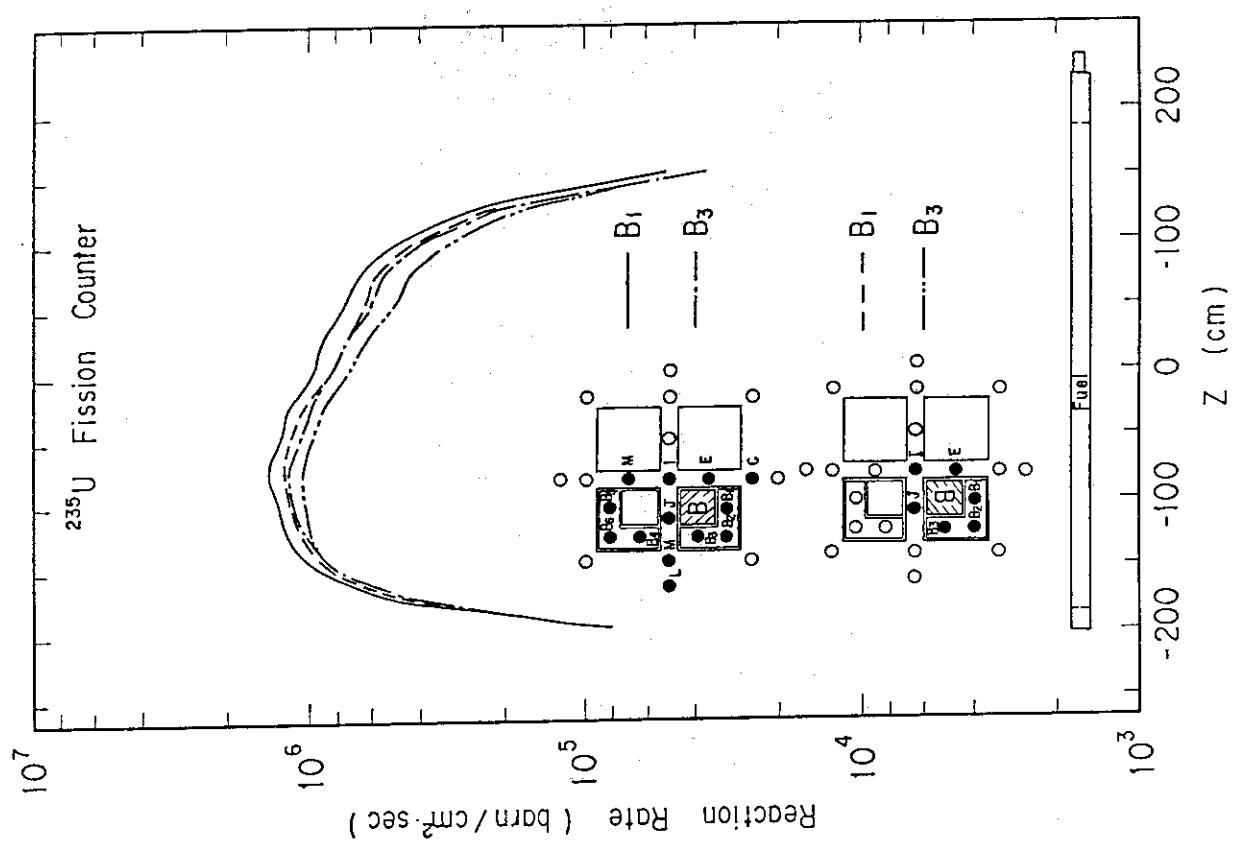


Fig. 24 The comparison of four ^{235}U fission rate distributions facing on the A-fuel assembly

Fig. 25 The comparison of four ^{235}U fission rate distributions facing on the B-fuel assembly

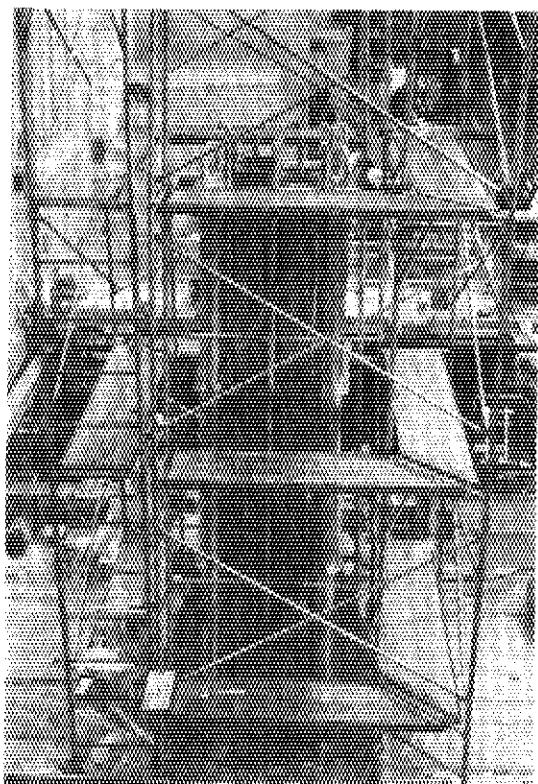


Photo. 1 The fuel assembly stand used in a fuel pond

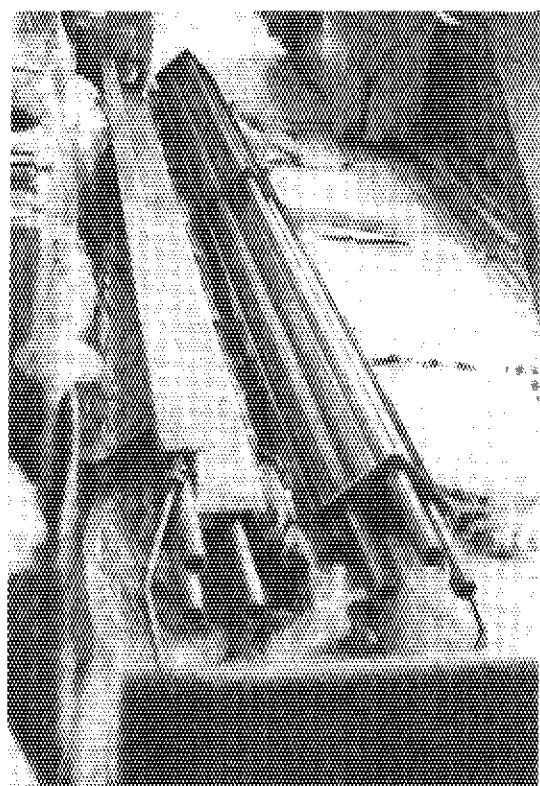


Photo. 2 The spacer for the BWR fuel assembly inserted in the fuel assembly stand

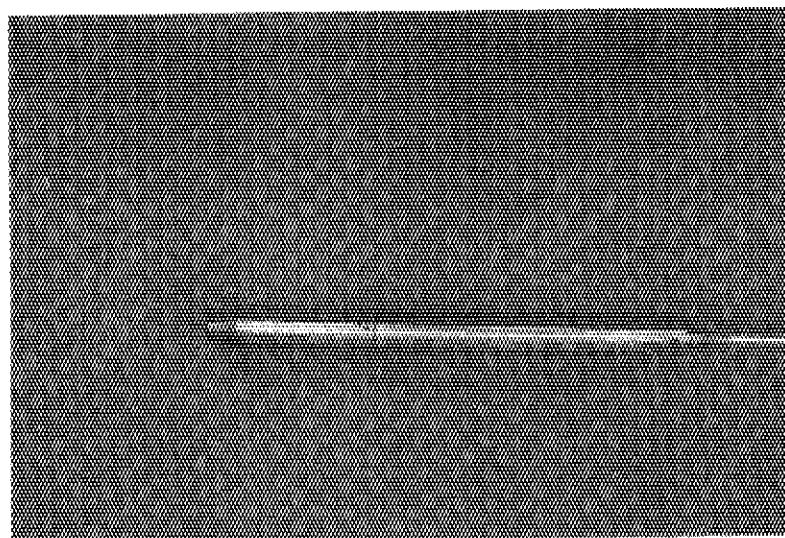


Photo. 3 The water proofed type counter housing for the Radcon dosimeter and fission counter

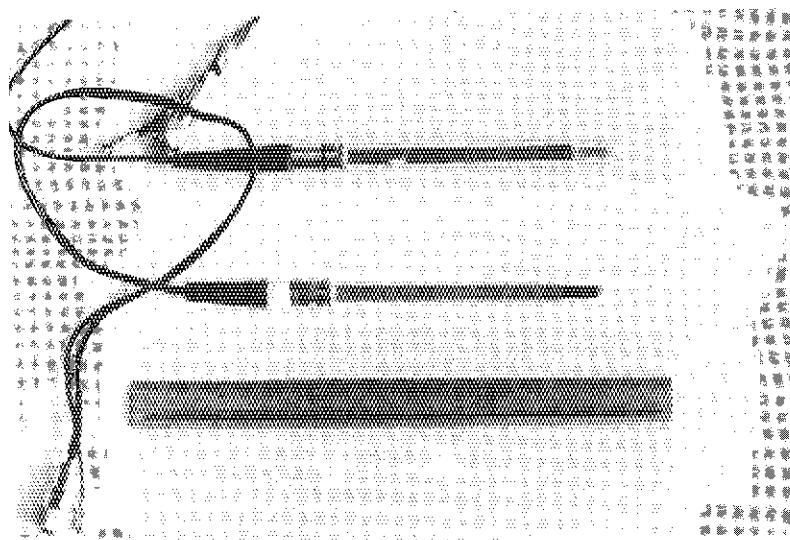


Photo. 4 A Radcon dosimeter and one covered with a buildup cap

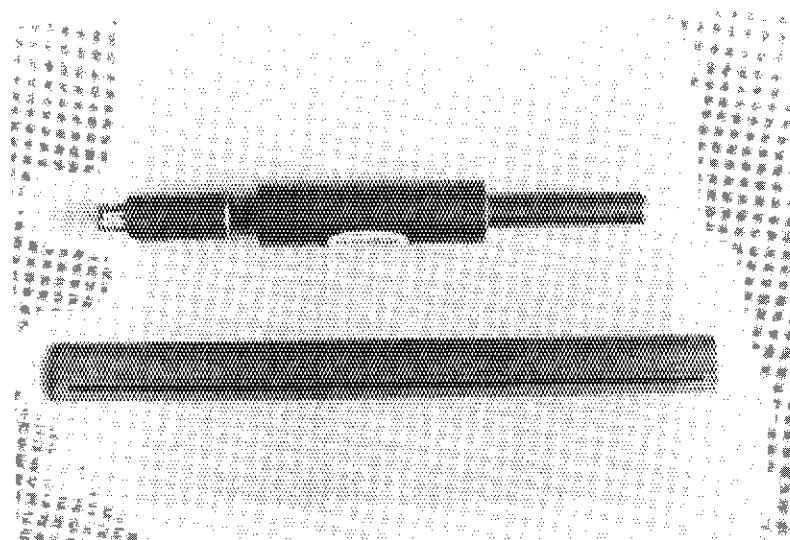


Photo. 5 A FC-165A fission counter

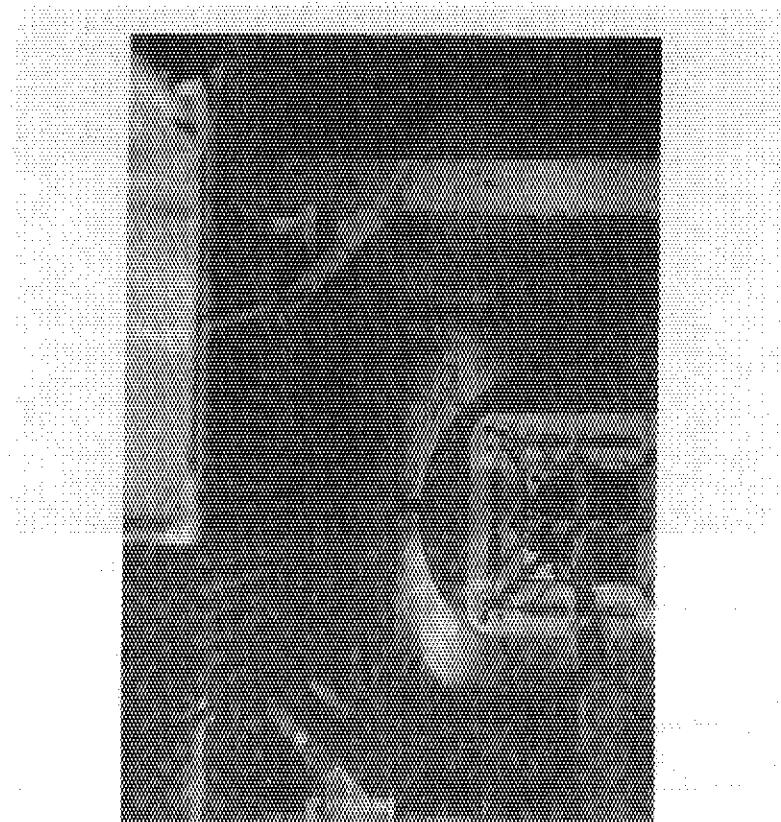


Photo. 6 The A-fuel assembly set in the fuel assembly stand
in a fuel pond

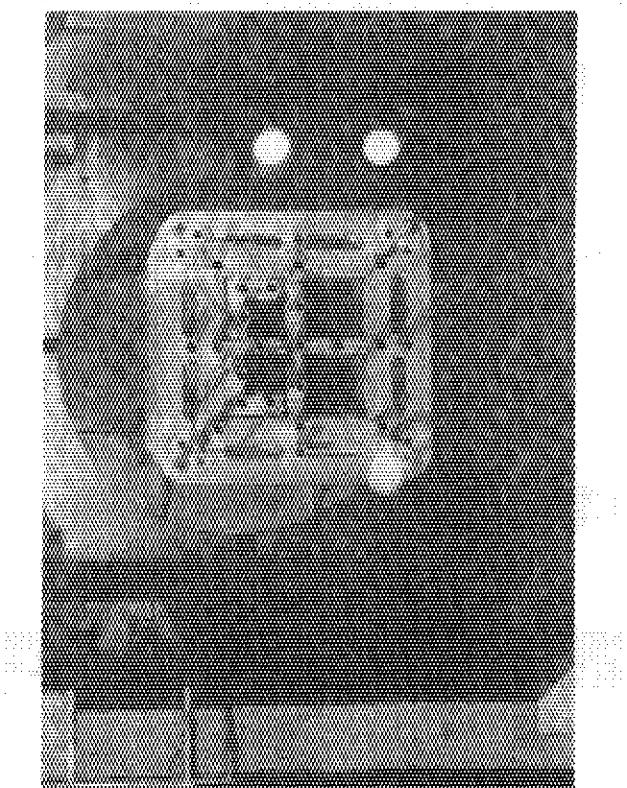


Photo. 7 The B-fuel assembly set in the fuel assembly stand
in a fuel pond