

JAERI-M  
90-029

ハフニウム材による燃料棒の  
エンドピーク低減化の研究

1990年2月

笹島 栄夫

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。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 山田軽印刷所

ハフニウム材による燃料棒のエンドピーク低減化の研究

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

笹島 栄夫

(1990年1月31日受理)

NSRRにおいては、反応度事故時の燃料挙動を解明する研究を行っており、これまで未照射燃料を対象とした実験を実施してきたが、平成元年度から、燃焼の進んだ照射済燃料を対象とした実験を開始している。

実験に使用する照射済燃料は、NSRR標準未照射燃料をJMTRにおいて、長期間炉内照射したもの及び我が国の商用炉にて長期炉内照射に供された長尺燃料を短尺化加工したセグメント燃料棒の2種類がある。

セグメント化して実験に供する商用炉燃料は、エンドピークの発生を防ぐために、中性子吸収断面積の大きなハフニウム材のディスク（以下、Hfディスク）を燃料ペレット両端に装荷することにした。

本実験では、Hfディスクの厚さを0.5mm、1.0mm、2.0mm及び4.0mmとパラメータとして、その厚みがどの程度エンドピーク低減化に有効であるかをパルス照射実験を行って確認した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 照射済燃料の濃縮度を模擬した2.6%濃縮の燃料で、パルス照射時に発生するエンドピークをピーキング係数1.18程度に低く抑えるために必要なHfディスクの最小肉厚は約2.0mmであることが分かった。
- (2) 本実験の範囲内では、Hfディスクの厚さを2.0mmより厚くしても、ピーキング係数は、その厚さにほとんど依存しないことが分かった。

Study on Effect of Hafnium Disk to Reduce  
the End Peaking of Fuel Rods

Hideo SASAJIMA

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

(Received January 31, 1990)

The NSRR experiments are directed to the study of fuel behavior under reactivity-initiated accident conditions. In the previous experiments, only unirradiated fresh fuel rods have been used as the test rods. From 1989, experiments on preirradiated fuel rods have started.

The test fuel rods for the preirradiated fuel are prepared by the following two manners:

- (1) Preirradiation of short sized fuel rods, which design is similar to the present NSRR standard test fuel rods, in JMTR, and
- (2) Refabrication of spent fuel rods from commercial BWRs and PWRs into short segment rods.

In order to prevent the power peaking at the ends of fuel stack, hafnium disk, which has large neutron absorption cross section, are loaded at both ends of fuel pellets stack in the segmented fuel rods during refabrication.

Pulse irradiation experiments have been carried out in the NSRR to study the effectiveness of the hafnium disk to reduce the axial power peaking as a function of the disk thickness by using the disks of 0.5mm, 1.0mm, 2.0mm and 4.0mm thick.

Obtained results are:

- (1) Minimum thickness of the hafnium disk to reduce the peaking factor belows 1.18 is 2.0mm for a fuel rod with 2.6 w/o enrichment pellets.
- (2) Within this experimental scope, the peaking factor didn't depend on

the thickness of hafnium disk at thickness above 2.0mm.

Keywords: NSRR, Hafnium Disk, Reduction, Fuel Rod, End Peaking

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実験方法 .....	1
2.1 燃料棒 .....	1
2.2 実験マトリクス .....	2
2.3 パルス照射 .....	2
3. 実験結果と考察 .....	2
3.1 照射後試験 .....	2
4. 結言 .....	3
謝 辞 .....	3
参考文献 .....	4

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental Method .....	1
2.1 Fuel rod .....	1
2.2 Experimental matrix .....	2
2.3 Pulse irradiation .....	2
3. Experimental Results and Discussion .....	2
3.1 Post-Irradiation Examination .....	2
4. Conclusions .....	3
Acknowledgement .....	3
References .....	4

## 1. はじめに

原研では、我が国の商用炉にて使用された照射済の軽水型原子炉燃料を用いて、反応度事故模擬実験を平成元年度より開始した。この計画の目的は、原子力安全委員会が定める安全審査指針「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針（昭和59年1月19日）」の見直しを含めた安全審査時の判断基準データベースの充実・拡大にある。

照射済燃料による反応度事故模擬実験を遂行するためには、実験用燃料棒を作製する必要がある。これまでの反応度模擬実験は、燃料有効長約14 cmの未照射短尺燃料棒を用いて行われて来ており、照射済燃料実験においても、これとほぼ同一長の試験燃料を用いることにした。

照射済の商用炉燃料はいずれも有効長が360 cm程度である。従って、照射済商用炉燃料（長尺燃料）を切断して、NSRR実験用に短尺化する必要が生じた。

過去のNSRR標準燃料を用いた実験の中には、燃料棒の破損は平均出力密度よりも、エンドピークの生じる最高出力密度の付近の位置で起こっている場合がある。これは、燃料ペレットスタック端部で中性子束が歪が生じ、発熱分布に変化をもたらすからであり、燃料の発熱量を正確に評価するには好ましくないことである。よって、出力のエンドピークを低く抑えることは照射済燃料の安全評価を行う上で大切な課題である。従来のNSRR標準燃料棒では、エンドピークを低くするために10%濃縮の $UO_2$ 燃料ペレット両端に、それぞれ5%濃縮及び、天然 $UO_2$ ペレットを1個ずつ装荷した構成となっているが、照射済燃料の場合は、燃料棒の再組立ての上から、低濃縮ペレットを装荷するスペースが無かったため、Hfディスクを装荷することとした。

ハフニウムは、熱中性子及びエピサーマル中性子に対して高い熱中性子吸収断面積（天然Hf：105 barn,  $^{177}\text{Hf}$ ：380 barn）を有しており、照射特性に関しては、照射成長が少なく、照射による物性値変化があまり無いという特徴がある。

本実験では、Hfディスクの厚みがどの程度エンドピーキングを抑えるものなのかを、その厚さをパラメータとして実験を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 燃料棒

旧7×7BWR型原子炉燃料は、照射済商用炉燃料としては、NSRR照射済燃料実験として初めて計画されたものである。よって本実験では、この燃料をNSRR実験用に短尺化した照射済燃料棒を模擬した燃料棒を製作し実験に供した。

実験に用いた燃料棒の概要をFig. 1及びTable 1に示す。初期濃縮度は2.6 w/oであり、これは商用炉燃料の初期濃縮度2.79 w/oにできるだけ近い値にした。燃料有効長も商用炉燃料を

## 1. はじめに

原研では、我が国の商用炉にて使用された照射済の軽水型原子炉燃料を用いて、反応度事故模擬実験を平成元年度より開始した。この計画の目的は、原子力安全委員会が定める安全審査指針「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針（昭和59年1月19日）」の見直しを含めた安全審査時の判断基準データベースの充実・拡大にある。

照射済燃料による反応度事故模擬実験を遂行するためには、実験用燃料棒を作製する必要がある。これまでの反応度模擬実験は、燃料有効長約14 cmの未照射短尺燃料棒を用いて行われて来ており、照射済燃料実験においても、これとほぼ同一長の試験燃料を用いることにした。

照射済の商用炉燃料はいずれも有効長が360 cm程度である。従って、照射済商用炉燃料（長尺燃料）を切断して、NSRR実験用に短尺化する必要が生じた。

過去のNSRR標準燃料を用いた実験の中には、燃料棒の破損は平均出力密度よりも、エンドピークの生じる最高出力密度の付近の位置で起こっている場合がある。これは、燃料ペレットスタック端部で中性子束が歪が生じ、発熱分布に変化をもたらすからであり、燃料の発熱量を正確に評価するには好ましくないことである。よって、出力のエンドピークを低く抑えることは照射済燃料の安全評価を行う上で大切な課題である。従来のNSRR標準燃料棒では、エンドピークを低くするために10%濃縮の $\text{UO}_2$ 燃料ペレット両端に、それぞれ5%濃縮及び、天然 $\text{UO}_2$ ペレットを1個ずつ装荷した構成となっているが、照射済燃料の場合は、燃料棒の再組立ての上から、低濃縮ペレットを装荷するスペースが無かったため、Hfディスクを装荷することとした。

ハフニウムは、熱中性子及びエピサーマル中性子に対して高い熱中性子吸収断面積（天然Hf：105 barn,  $^{177}\text{Hf}$ ：380 barn）を有しており、照射特性に関しては、照射成長が少なく、照射による物性値変化があまり無いという特徴がある。

本実験では、Hfディスクの厚みがどの程度エンドピーキングを抑えるものなのかを、その厚さをパラメータとして実験を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 燃料棒

旧7×7BWR型原子炉燃料は、照射済商用炉燃料としては、NSRR照射済燃料実験として初めて計画されたものである。よって本実験では、この燃料をNSRR実験用に短尺化した照射済燃料棒を模擬した燃料棒を製作し実験に供した。

実験に用いた燃料棒の概要をFig. 1及びTable 1に示す。初期濃縮度は2.6 w/oであり、これは商用炉燃料の初期濃縮度2.79 w/oにできるだけ近い値にした。燃料有効長も商用炉燃料を



短尺化した燃料棒の有効長126mmに近い値の142mmにした。この燃料棒をHf ディスクの厚さを0.5mm, 1.0mm, 2.0mm及び, 4.0mmとし, 燃料ペレット両端に同厚のものを装荷して4本製造した。

## 2.2 実験マトリクス

Table 2に実験マトリクスを示す。実験は208-1及び, 208-2として2回に分けて行った。与えた発熱量は, 燃料棒を破損させないために208-1及び, 208-2実験の両者共に150 cal/g・fuelとした。Hf ディスク厚さは, 燃料棒#1810では0.5mm, #1840では4.0mm, #1820では1.0mm及び, #1083では2.0mmとし, 燃料ペレット両端に装荷した。

## 2.3 パルス照射

実験は, Fig. 2に示した大気圧カプセルに, Hf ディスク厚さの異なる2本の燃料棒を装荷し同時にパルス照射を行った。

パルス照射後, 使用カプセルは冷却ピットで約4週間冷却し, 照射した燃料棒を取り出した後, 照射後試験を実施した。

# 3. 実験結果と考察

## 3.1 照射後試験

供試燃料4本について, 軸方向の出力分布を知るためにFig. 3に示す装置を用いて, 燃料棒軸方向のガンマ線強度測定を行った。測定は, 燃料棒下部側から上部側へ行き, 下部側のペレット端面で1mmおきに約20点, 燃料棒中間部で10mmおきに約10点及び, 上部側のペレット端面で1mmおきに約20点の測定時間1点当り400秒として行った。データは, マルチチャンネルアナライザー, パーソナルコンピューター等により解析し<sup>103</sup>Ru, <sup>137</sup>Cs, <sup>95</sup>Zr及び, <sup>95</sup>Nbの4核種についての測定結果を得た。このうち, 軸方向の出力分布は, 計数効率が高いために, データエラーの最も少ない核種である<sup>95</sup>Nbにより評価した。

Hf ディスク厚さ0.5mmとした#1810燃料棒の軸方向出力分布をFig. 4に示す。図から分かる様に, 燃料棒には上部と下部の2箇所出力ピーキングが生じた。このピーキング係数は, 上部で1.30, 下部で1.34であった。Hf ディスク厚さ1.0mmとした#1820燃料棒, Hf ディスク厚さ2.0mmとした#1830燃料棒及び, Hf ディスク厚さ4.0mmとした#1840燃料棒の軸方向出力分布をFig. 5, Fig. 6及び, Fig. 7にそれぞれ示す。#1820燃料棒のピーキング係数は上部で1.21, 下部で1.26であった。#1830燃料棒のピーキング係数は上部で1.17, 下部で1.19であった。#1840燃料棒のピーキング係数は上部で1.16, 下部で1.14であった。

短尺化した燃料棒の有効長126mmに近い値の142mmにした。この燃料棒をHf ディスクの厚さを0.5mm, 1.0mm, 2.0mm及び, 4.0mmとし, 燃料ペレット両端に同厚のものを装荷して4本製造した。

## 2.2 実験マトリクス

Table 2に実験マトリクスを示す。実験は208-1及び, 208-2として2回に分けて行った。与えた発熱量は, 燃料棒を破損させないために208-1及び, 208-2実験の両者共に150 cal/g・fuelとした。Hf ディスク厚さは, 燃料棒#1810では0.5mm, #1840では4.0mm, #1820では1.0mm及び, #1083では2.0mmとし, 燃料ペレット両端に装荷した。

## 2.3 パルス照射

実験は, Fig. 2に示した大気圧カプセルに, Hf ディスク厚さの異なる2本の燃料棒を装荷し同時にパルス照射を行った。

パルス照射後, 使用カプセルは冷却ピットで約4週間冷却し, 照射した燃料棒を取り出した後, 照射後試験を実施した。

# 3. 実験結果と考察

## 3.1 照射後試験

供試燃料4本について, 軸方向の出力分布を知るためにFig. 3に示す装置を用いて, 燃料棒軸方向のガンマ線強度測定を行った。測定は, 燃料棒下部側から上部側へ行き, 下部側のペレット端面で1mmおきに約20点, 燃料棒中間部で10mmおきに約10点及び, 上部側のペレット端面で1mmおきに約20点の測定時間1点当たり400秒として行った。データは, マルチチャンネルアナライザー, パーソナルコンピューター等により解析し<sup>103</sup>Ru, <sup>137</sup>Cs, <sup>95</sup>Zr及び, <sup>95</sup>Nbの4核種についての測定結果を得た。このうち, 軸方向の出力分布は, 計数効率が高いために, データエラーの最も少ない核種である<sup>95</sup>Nbにより評価した。

Hf ディスク厚さ0.5mmとした#1810燃料棒の軸方向出力分布をFig. 4に示す。図から分かる様に, 燃料棒には上部と下部の2箇所に出力ピーキングが生じた。このピーキング係数は, 上部で1.30, 下部で1.34であった。Hf ディスク厚さ1.0mmとした#1820燃料棒, Hf ディスク厚さ2.0mmとした#1830燃料棒及び, Hf ディスク厚さ4.0mmとした#1840燃料棒の軸方向出力分布をFig. 5, Fig. 6及び, Fig. 7にそれぞれ示す。#1820燃料棒のピーキング係数は上部で1.21, 下部で1.26であった。#1830燃料棒のピーキング係数は上部で1.17, 下部で1.19であった。#1840燃料棒のピーキング係数は上部で1.16, 下部で1.14であった。

Fig. 8 には、Hf ディスク厚さをパラメータとした時のピーキング係数の変化を示す。図から分かる様に、ピーキング係数は、Hf ディスクの厚みの増加とともに小さくなるのが分かる。しかし、Hf ディスク厚さが 2.0 mm と 4.0 mm のピーキング係数を比較してみると、燃料棒の上部平均で、1.18 及び、1.15 となり、ほとんど差異は観られない。よって、本実験の範囲内では、ピーキング係数は、Hf ディスクの厚みの増加とともに小さくなるが、Hf ディスクの厚さが 2.0 mm を超える範囲では、ピーキング係数は Hf の厚さにほとんど依存しないと言える。

## 4. 結 言

旧 7 × 7 BWR 型原子炉燃料を、NSRR 照射済燃料実験用に短尺化した燃料棒を模擬した燃料棒を 4 本準備し、これに厚さの異なる Hf ディスクを 0.5 mm、1.0 mm、2.0 mm 及び、4.0 mm と変えて燃料ペレット両端に装荷した。そして、反応度事故を模擬したパルス出力条件で照射実験を実施し、Hf ディスク厚と、燃料棒両端に発生するエンドピークとの関係について調べた。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 照射済燃料の濃縮度を模擬した 2.6 % 濃縮の燃料で、パルス照射時に発生するエンドピーキングをピーキング係数 1.18 程度に低くおさえるために必要な Hf ディスクの最小肉厚は 2.0 mm であることが分かった。
- (2) 本実験の範囲内では、Hf ディスクの厚さを 2.0 mm より厚くしても、ピーキング係数は、その厚さにほとんど依存しないことが分かった。

## 謝 辞

論文のとりまとめに際し、有益な助言を反応度安全研究室長藤城俊夫氏並びに、同研究室副主任研究員柳澤和章氏から賜りました。また燃料棒の照射後試験に関しては、千代田メンテナンス(株)の吉田敏幸氏の協力を賜りました。

パルス照射実験等は、NSRR 管理室の堀木欧一郎室長をはじめとする諸氏の協力のもとで実施されました。ここに感謝いたします。

Fig. 8 には、Hf ディスク厚さをパラメータとした時のピーキング係数の変化を示す。図から分かる様に、ピーキング係数は、Hf ディスクの厚みの増加とともに小さくなるのが分かる。しかし、Hf ディスク厚さが 2.0 mm と 4.0 mm のピーキング係数を比較してみると、燃料棒の上部平均で、1.18 及び、1.15 となり、ほとんど差異は観られない。よって、本実験の範囲内では、ピーキング係数は、Hf ディスクの厚みの増加とともに小さくなるが、Hf ディスクの厚さが 2.0 mm を超える範囲では、ピーキング係数は Hf の厚さにほとんど依存しないと言える。

## 4. 結 言

旧 7 × 7 BWR 型原子炉燃料を、NSRR 照射済燃料実験用に短尺化した燃料棒を模擬した燃料棒を 4 本準備し、これに厚さの異なる Hf ディスクを 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm 及び、4.0 mm と変えて燃料ペレット両端に装荷した。そして、反応度事故を模擬したパルス出力条件で照射実験を実施し、Hf ディスク厚と、燃料棒両端に発生するエンドピークとの関係について調べた。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 照射済燃料の濃縮度を模擬した 2.6 % 濃縮の燃料で、パルス照射時に発生するエンドピーキングをピーキング係数 1.18 程度に低くおさえるために必要な Hf ディスクの最小肉厚は 2.0 mm であることが分かった。
- (2) 本実験の範囲内では、Hf ディスクの厚さを 2.0 mm より厚くしても、ピーキング係数は、その厚さにほとんど依存しないことが分かった。

## 謝 辞

論文のとりまとめに際し、有益な助言を反応度安全研究室長藤城俊夫氏並びに、同研究室副主任研究員柳澤和章氏から賜りました。また燃料棒の照射後試験に関しては、千代田メンテナンス(株)の吉田敏幸氏の協力を賜りました。

パルス照射実験等は、NSRR 管理室の堀木欧一郎室長をはじめとする諸氏の協力のもとで実施されました。ここに感謝いたします。

Fig. 8 には、Hf ディスク厚さをパラメータとした時のピーキング係数の変化を示す。図から分かる様に、ピーキング係数は、Hf ディスクの厚みの増加とともに小さくなる事が分かる。しかし、Hf ディスク厚さが 2.0 mm と 4.0 mm のピーキング係数を比較してみると、燃料棒の上部平均で、1.18 及び、1.15 となり、ほとんど差異は観られない。よって、本実験の範囲内では、ピーキング係数は、Hf ディスクの厚みの増加とともに小さくなるが、Hf ディスクの厚さが 2.0 mm を超える範囲では、ピーキング係数は Hf の厚さにほとんど依存しないと言える。

## 4. 結 言

旧 7 × 7 BWR 型原子炉燃料を、NSRR 照射済燃料実験用に短尺化した燃料棒を模擬した燃料棒を 4 本準備し、これに厚さの異なる Hf ディスクを 0.5 mm、1.0 mm、2.0 mm 及び、4.0 mm と変えて燃料ペレット両端に装荷した。そして、反応度事故を模擬したパルス出力条件で照射実験を実施し、Hf ディスク厚と、燃料棒両端に発生するエンドピークとの関係について調べた。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 照射済燃料の濃縮度を模擬した 2.6 % 濃縮の燃料で、パルス照射時に発生するエンドピーキングをピーキング係数 1.18 程度に低くおさえるために必要な Hf ディスクの最小肉厚は 2.0 mm であることが分かった。
- (2) 本実験の範囲内では、Hf ディスクの厚さを 2.0 mm より厚くしても、ピーキング係数は、その厚さにほとんど依存しないことが分かった。

## 謝 辞

論文のとりまとめに際し、有益な助言を反応度安全研究室長藤城俊夫氏並びに、同研究室副主任研究員柳澤和章氏から賜りました。また燃料棒の照射後試験に関しては、千代田メンテナンス(株)の吉田敏幸氏の協力を賜りました。

パルス照射実験等は、NSRR 管理室の堀木欧一郎室長をはじめとする諸氏の協力のもとで実施されました。ここに感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) A. Stresser, W. Yano: Control Rod Materials and Burnable Poisons, NP-1974 (November 1981).
- (2) D. Thomas, E. Hayes: The Metallurgg of Hafnium Naval Reactors Division, USAEC, 1960.
- (3) C.V. Taylor, J.G. Gooddwin: A Compilation of the Properties of Hafnium, WAPD-TM-528, August 1966.
- (4) W.K. Anderson, J.S. Theilacker: Neutron Absorber Materials for Reactor Control, United States Atomic Energy Commission, 1962.
- (5) G.I. Salvaggio: Properties of a Hafnium Control Rod After Exposure During Three Seed Lives in PWR Core 1, WAPD-TM-457, June 1965.

Table 1 Design summary of test fuel rod

Fuel Rod Type	Dimension
UO <sub>2</sub> pellets Diameter Length Density Enrichment Shape	10.66 mm 15 mm 95 % T.D. 2.6 % Flat
Cladding Material Wall Thickness	Zircaloy-4 0.62 mm
Pin Outer diameter Pellet-cladding Gap	12.23 mm 0.165mm
Element Overall Length Active Length Weight of Fuel Pellets Number of Pellets Plenum Gas	259 mm 135 mm 132 g 9 2.0 MPa He

Table 2 Outline of experiments

Experiment	208-1		208-2	
Deposited energy (cal/g·fuel)	150		150	
Fuel rod number	1810	1840	1820	1830
Thickness of Hf disk (mm)	0.5	4.0	1.0	2.0
Fill gas pressure at 20 °C immediately before pulse (MPa)	2.0		2.0	
Fill gas comparison (volume %)	100% He		100% He	
Instrumentation equipped T/C	○	○	○	○
Failure(F)/no failure(NF)	NF	NF	NF	NF



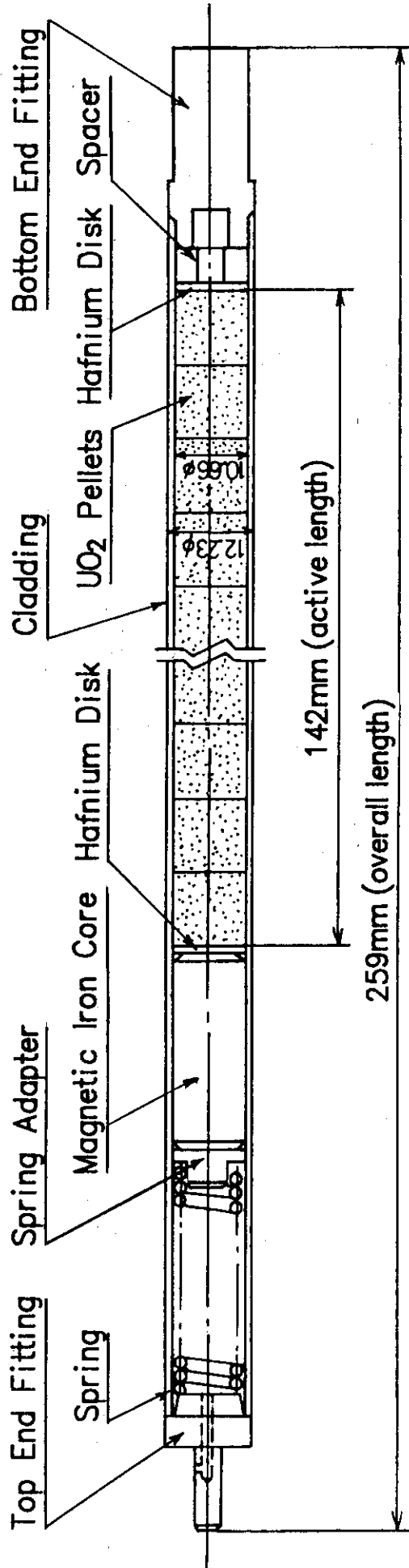
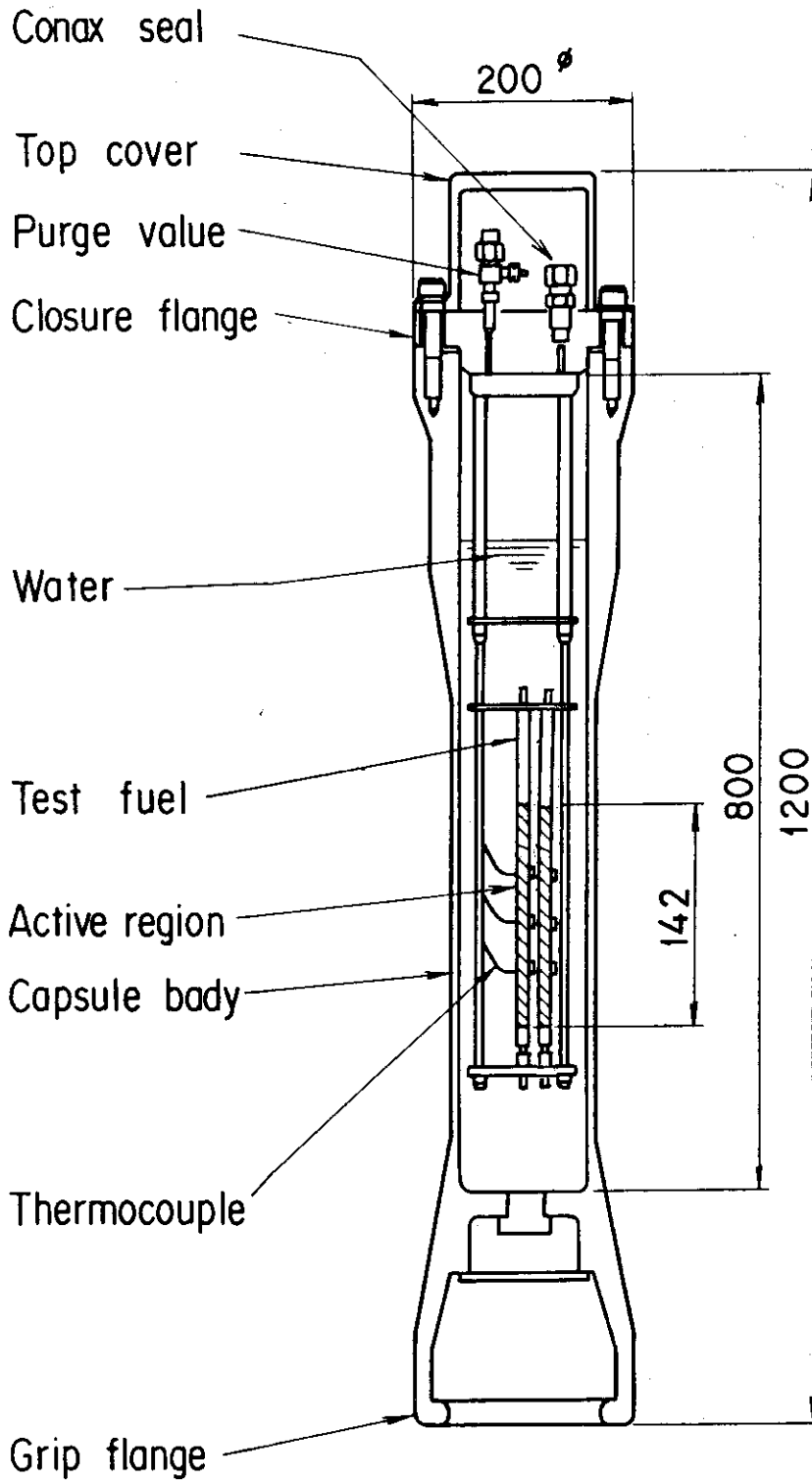


Fig. 1 Schematic drawing of fuel rod.



(Unit : mm)

Fig. 2 Schematic of test capsule.

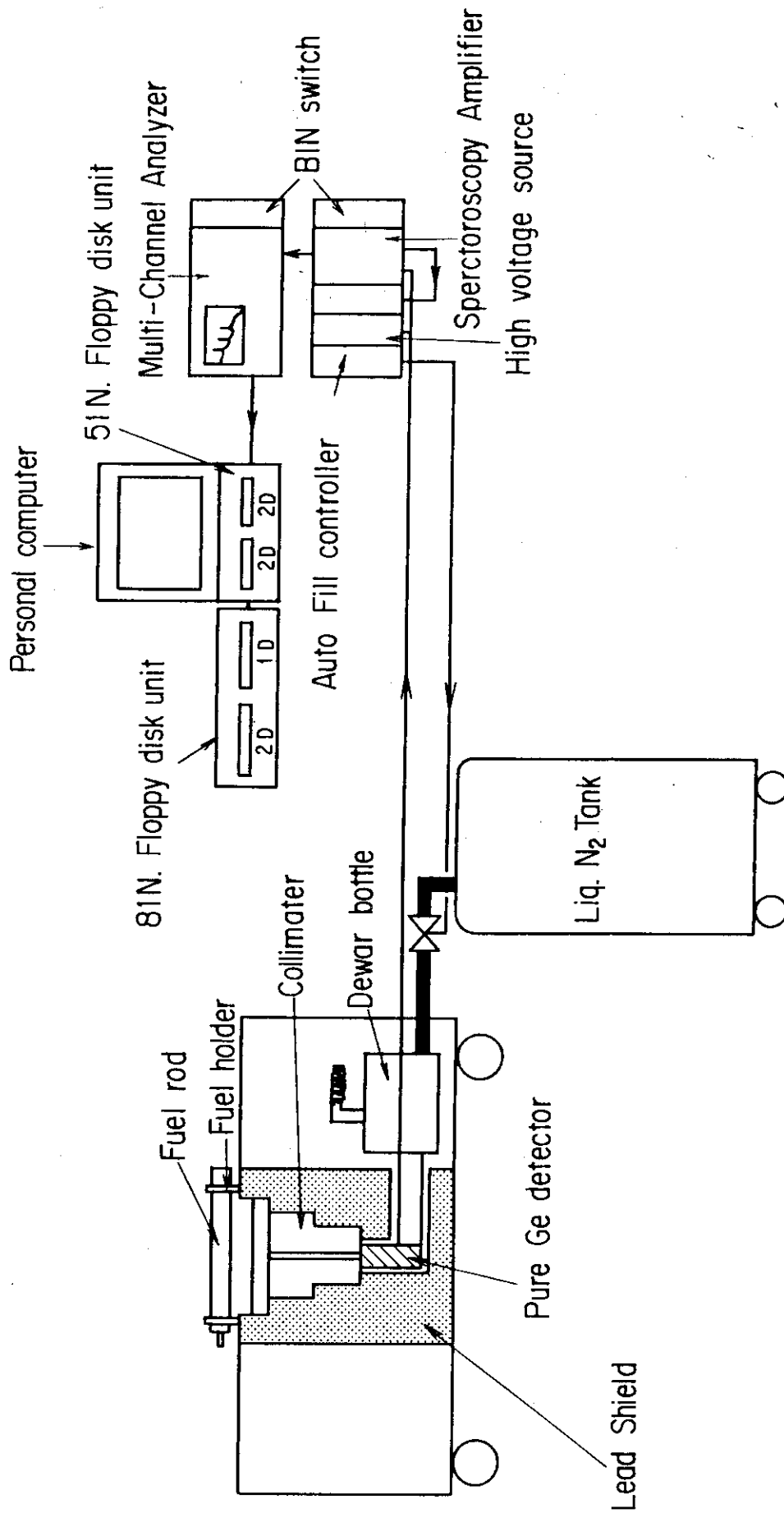


Fig. 3 System of gamma-ray measurement.

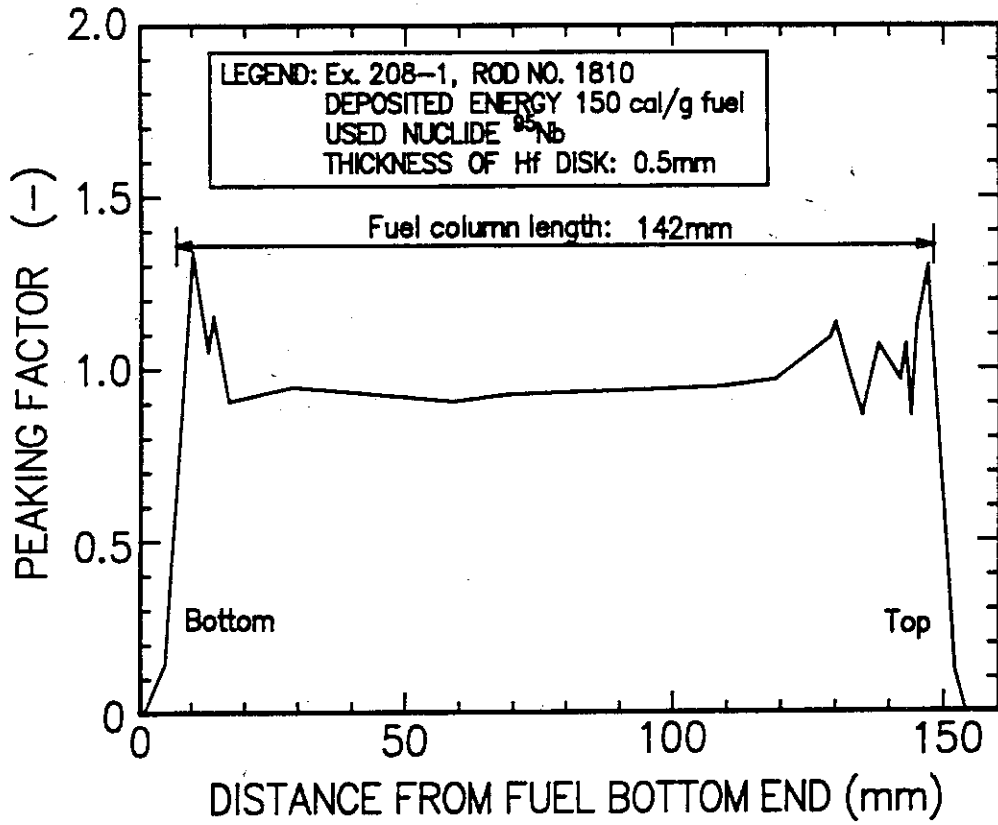


Fig. 4 Axial gamma scan of fuel rod 1810 in experiments 208-1.

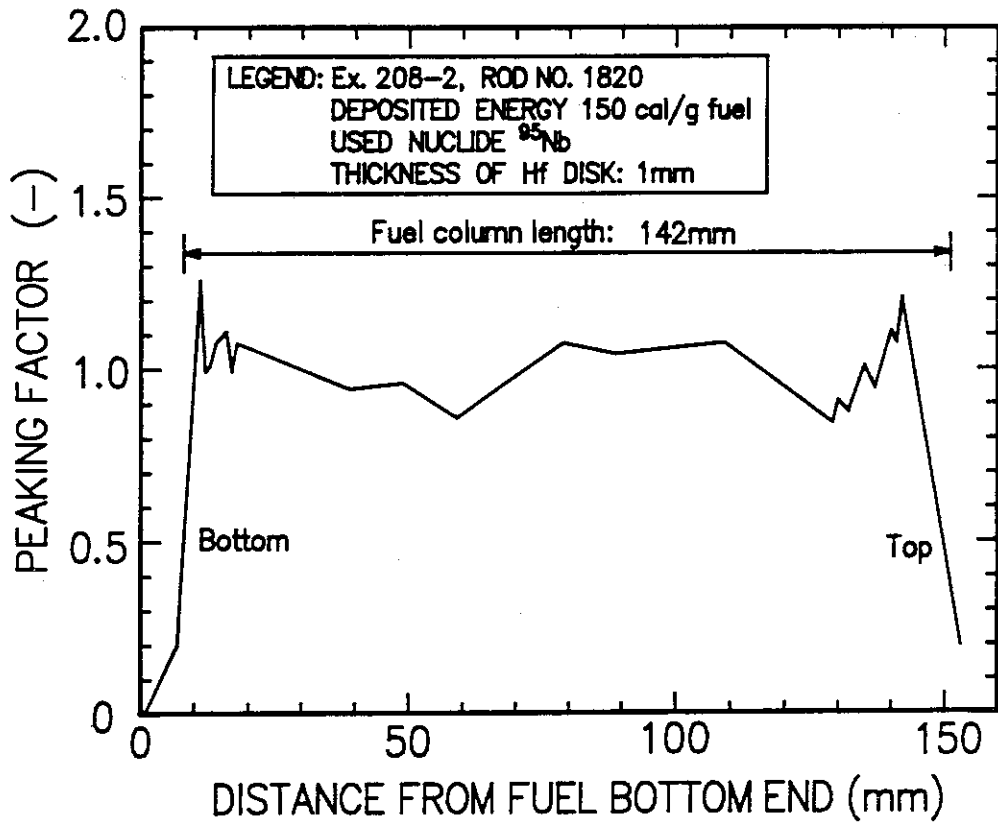


Fig. 5 Axial gamma scan of fuel rod 1820 in experiments 208-2.

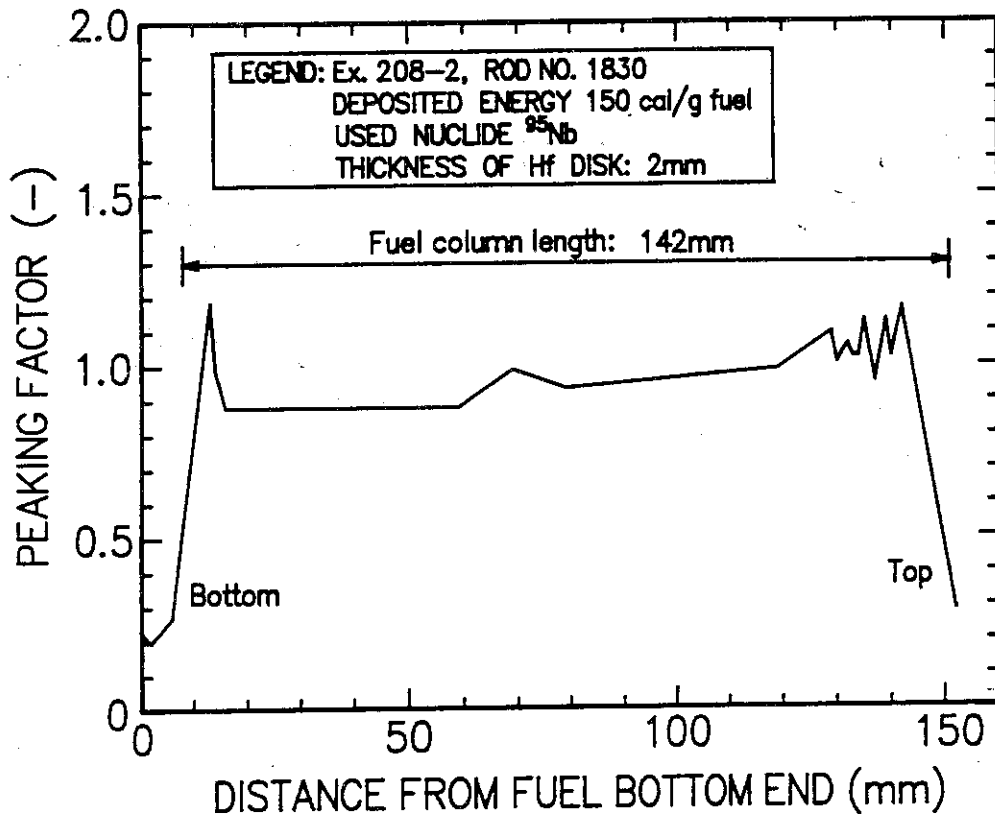


Fig. 6 Axial gamma scan of fuel rod 1820 in experiments 208-2.

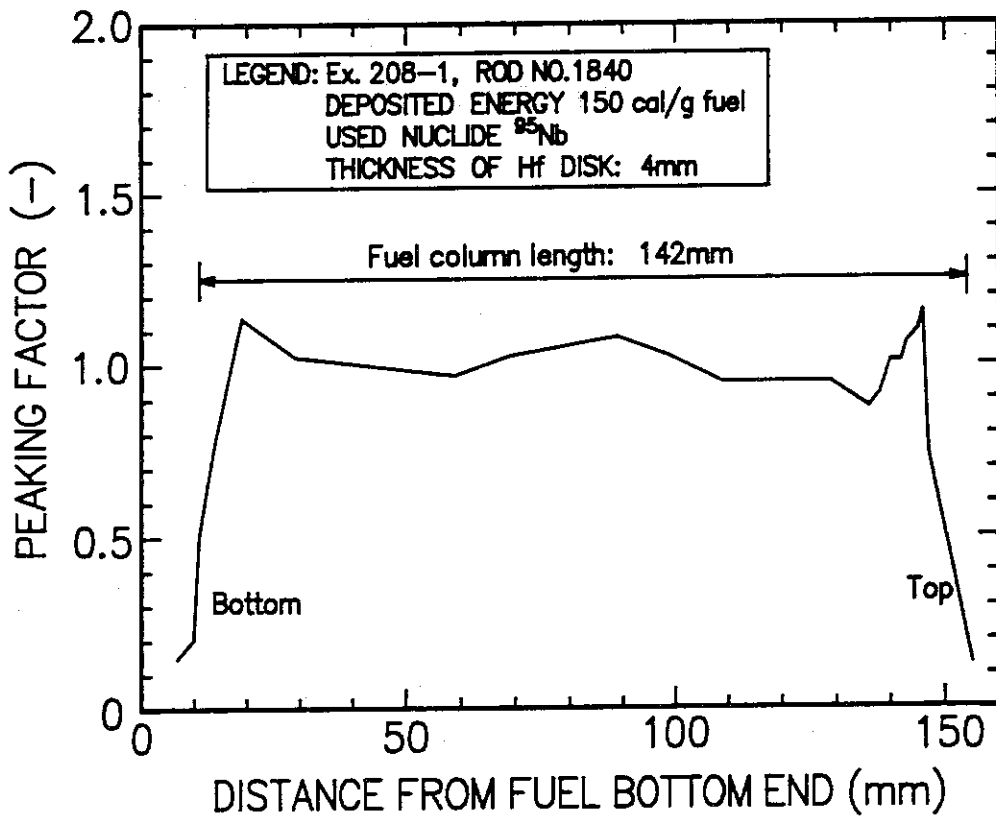


Fig. 7 Axial gamma scan of fuel rod 1840 in experiments 208-1.

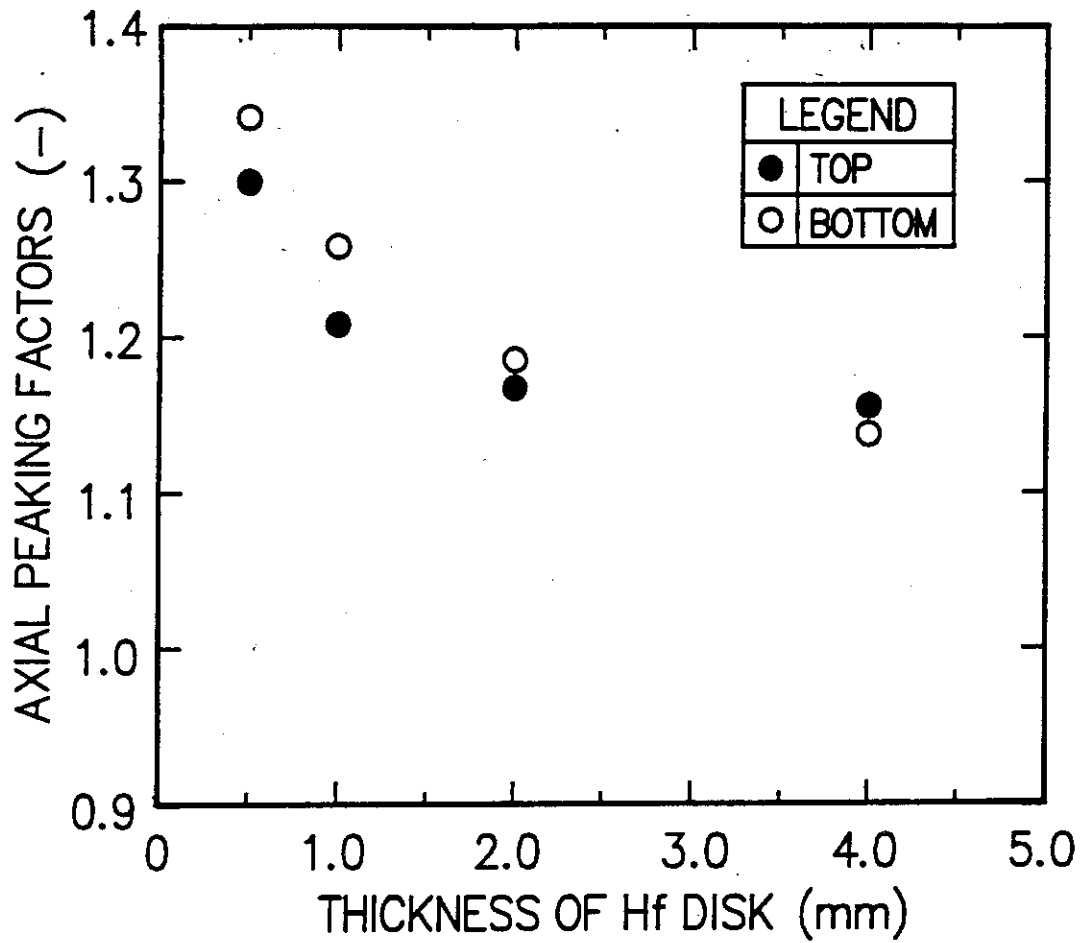


Fig. 8 Axial peaking factors as a function of thickness of Hf disk.