

JAERI-M

7 3 4 9

ジルカロイ-2 被覆管の照射クリープ

1977年10月

柳澤和章

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

ジルカロイ-2 被覆管の照射クリープ

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

柳澤和章

(1977年9月28日受理)

JMTR, OWL-1 ループを用い平均 1720 MWd/t まで燃焼させた ATR 用ジルカロイ-2 被覆管の外観検査および照射によるクリープ量の実測値と経験式による計算値との比較から以下の結論を得た。

- (1) 被覆管の曲りは全長 800 mm につき平均 0.33 mm であった。
- (2) クリープ変形量は実測値で $25 \mu\text{m}$ であった。

Irradiation- Induced Creep of Zircaloy-2 Cladding

Kazuaki YANAGISAWA

Division of Reactor Safety, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received, September 28, 1977)

The creep deformation of zircaloy-2 cladding after irradiation was measured and compared with calculated one. Visual inspection of the cladding was also carried out. The ATR type cladding was irradiated up to 1 720 MWd/t (on average) in OWL-1 loop of JMTR. The results are :

- (1) The average value of clad bowing was 0.33 mm in total length 800 mm.
- (2) The measured and the calculated creep deformation were 17 μm and 25 μm respectively.

Keywords: Irradiation, Creep, Zircaloy-2, ATR type cladding, JMTR, OWL-1 Inpile Loop, Bowing, Radiation Effects.

目 次

1. 序	1
2. 照射および照射後試験	1
2.1 照 射	1
2.2 照射後試験	1
3. 被覆管のクリープ変形	2
3.1 被覆管の外観	2
3.2 被覆管の外径寸法測定	2
3.2.1 被覆管長さの測定	2
3.2.2 被覆管の曲り	2
3.2.3 被覆管直径の変化	2
4. 検 討	3
4.1 直径変化におよぼす軸方向位置の影響	3
4.2 クリープダウン量	4
5. 結 言	4
謝 辞	4
参考文献	5
付 録	23
1. 偏心ペレットに作用する軸力の計算	23
2. 外圧による被覆管の歪量の計算	26

Content

1. Introduction	1
2. Irradiation and After Irradiation Experiment	1
2.1. Irradiation	1
2.2. After Irradiation Experiment	1
3. Irradiation Creep Deformation of Cladding	2
3.1. Cladding After Irradiation	2
3.2. Outer Diameter Measurement of Cladding	2
3.2.1. Length Measurement of Cladding	2
3.2.2. Bowing of Cladding	2
3.2.3. Diameter Variation of Cladding	2
4. Discussion	3
4.1. Effect of Axial Position on Diameter Variation	3
4.2. Amount of Creepdown of Cladding	4
5. Result	4
Acknowledgement	4
References	5
Appendix	23
1. Calculation of axial force affecting around an eccentric pellet	23
2. Calculation of a clad strain deformed by external pressure	26

TABLES

- Table 1 Specification for used specimens
- Table 2 Irradiating condition in OWL-1
- Table 3 Dimensions and densities for rod No. 74
- Table 4 Dimensions and densities for rod No. 23 each pellet numbers are correspond to those in Fig. 3

FIGURES

- Fig. 1 Irradiation history for 74LF23A
- Fig. 2 Gamma-scanning for rod No. 74
- Fig. 3 Photograph of UO₂ pellets dismantled from each positions of rod No.23
- Fig. 4 After irradiation sketches of both rods
- Fig. 5 Schematic drawing of fuel rod
- Fig. 6 Variation of diameter and fuel rod after irradiation for No. 74 rod
- Fig. 7 Variation of diameter and fuel rod after irradiation for No. 23 rod
- Fig. 8 Eccentric pellet model
- Fig. 9 Schematic force diagram around an eccentric pellet

1. 序

新型転換炉用燃料の焼きしまり実験結果についてすでに報告をおこなった¹⁾がそれに用いた燃料棒の被覆管 (Zry-2) の外圧によるクリープ変形について結果をまとめたのでここに報告すを。

2. 照射および照射後試験

2.1 照射

照射はJMTRのOWL-1において行なった。燃料試料は74LF23Aと呼ばれ2体より成る。金相試験用の1体にロット番号74(以下“#74ロット”と略記する)、密度試験用の1体にロット番号23(同じく“#23ロット”と以下略記する)と名づけた。使用した燃料ペレット、被覆管の仕様をTable 1に示す。

OWL-1での照射サイクルは第31, 32, 34の3サイクルであった。各サイクルにおける照射履歴をFig. 1に示す。燃料の線出力は最大540W/cm, 平均で400W/cm, 燃焼度は最大2320MWd/t(200GJ/g), 平均で1720MWd/t(150GJ/g)程度であった。総出力は約60kWであった。OWL-1での照射条件をTable 2に示す。

2.2 照射後試験

照射後#74ロットについてγスキャンニングをおこなった。その結果をFig. 2に示す。γスペクトルは燃料棒先端で200cps, 底部で300cps, 中央部で500cps程度であった。図からわかるように燃料体はマーカーによって6グループに分割されており、その各グループ中に製造仕様の異なるA~Fという6種類のUO₂ペレットが詰められていた。γスキャンニングの結果、どのグループでもはっきりとペレット-ペレット間のギャップに相当するスペクトルのくぼみがみられ、中に入っていた燃料はほぼ健全であることがわかった。Table 3は上で説明した6グループ中に配置してあった各燃料の寸法および密度を示したものである。

Fig. 3は#23ロット(密度試験用ロット)の各々の6グループから燃料のUO₂ペレットを取り出したときの外観図である。Table 4はそこで使用されたペレットの寸法と密度を一覧表にしたものでFig. 3の写真中の番号とTable 4の番号は対応している。

1. 序

新型転換炉用燃料の焼きしまり実験結果についてすでに報告をおこなった¹⁾がそれに用いた燃料棒の被覆管 (Zry-2) の外圧によるクリープ変形について結果をまとめたのでここに報告すを。

2. 照射および照射後試験

2.1 照射

照射はJMTRのOWL-1において行なった。燃料試料は74LF23Aと呼ばれ2体より成る。金相試験用の1体にロット番号74(以下“#74ロット”と略記する)、密度試験用の1体にロット番号23(同じく“#23ロット”と以下略記する)と名づけた。使用した燃料ペレット、被覆管の仕様をTable 1に示す。

OWL-1での照射サイクルは第31, 32, 34の3サイクルであった。各サイクルにおける照射履歴をFig. 1に示す。燃料の線出力は最大540W/cm, 平均で400W/cm, 燃焼度は最大2320MWd/t(200GJ/g), 平均で1720MWd/t(150GJ/g)程度であった。総出力は約60kWであった。OWL-1での照射条件をTable 2に示す。

2.2 照射後試験

照射後#74ロットについてγ-スキニングをおこなった。その結果をFig. 2に示す。γスペクトルは燃料棒先端で200cps, 底部で300cps, 中央部で500cps程度であった。図からわかるように燃料体はマーカーによって6グループに分割されており、その各グループ中に製造仕様の異なるA~Fという6種類のUO₂ペレットが詰められていた。γ-スキニングの結果、どのグループでもはっきりとペレット-ペレット間のギャップに相当するスペクトルのくぼみがみられ、中に入っていた燃料はほぼ健全であることがわかった。Table 3は上で説明した6グループ中に配置してあった各燃料の寸法および密度を示したものである。

Fig. 3は#23ロット(密度試験用ロット)の各々の6グループから燃料のUO₂ペレットを取り出したときの外観図である。Table 4はそこで使用されたペレットの寸法と密度を一覧表にしたものでFig. 3の写真中の番号とTable 4の番号は対応している。

3. 被覆管のクリープ変形

3.1 被覆管の外観

被覆管の外観のスケッチを Fig. 4 に示す（写真は後出）。スケッチによれば光沢のない暗褐色の部分の島状に点在しその附近は全体的に地が褐色である。それ以外の部分は明るい褐色の地になっていた。#74 と #23 のロッドを比べると図からは光沢のない暗褐色部分が #74 ロッドに多い様であるが決定的な差異はない。

3.2 被覆管の外径寸法測定

外観検査後燃料棒の全長，曲り，および直径の測定を行った。測定時のセル内での燃料棒の表面温度は約 22.5 °C であった。温度測定はクロメル-コンスタンタン熱電対を用いた表面温度計を用いた。

3.2.1 被覆管長さの測定

被覆管の長さは Fig. 5 に示すように底部 V みぞから頂部 V みぞ間 L_1 ， L_2 を測定し

	L_1	L_2	(単位 mm)
#74	810.92	810.92	
#23	811.29	811.21	

の値を得た。

3.2.2 被覆管の曲り

最大曲りは #23 ロッドで Fig. 5 の V みぞ方向 (L_1 方向) を基準とした角度で 40 度，#74 ロッドが 130 度方向にそれぞれ次のとおりであった。但し燃料棒 800 mm に対する値である。

	最大曲り (単位 mm)
#74	0.37
#23	0.28

3.2.3 被覆管直径の変化

直径寸法の変化は #74，#23 ロッド各々に対し 2 方向について測定をおこなった。すなわち Fig. 5 の A (基準軸) 方向についてまず行ない続いて B (基準軸から 90 度回転した) 方向について行なった。測定方向は底部から頂部に向かい，基準位置は底部の V みぞ位置であった。

Fig. 6 および Fig. 7 はそれぞれ # 74 ロッド, # 23 ロッドについての測定結果である。照射前の被覆管の直径は平均 16.437 mm であったので照射後の直径は 16.000 mm を基準にしてそこからの変化をプロットしている。したがって図中 415 μm にある点は実際の直径では 16.415 mm の長さであったことを意味する。A は基準軸 L_1 についての, B は A から 90 度回転した L_2 軸に沿っての測定である。

Fig. 6 および 7 から以下の事がわかる。

- (i) 直径の変化は中心部から底部にかけて場所 (軸方向) による変動が大きく, 頂部附近は変動が一定している。
- (ii) 直径変化に平均径 16.437 mm より全て小さく照射中に外圧等により被覆管に内側に働くクリープが作用した。変動量を Δd とおくと

	Δd_{max}	Δd_{min}	(単位 μm)
# 74	46	1	
# 23	44	1	

となることがわかる。 Δd は分布しているが

概略

# 74 で	$\Delta d_{\text{mean}} = 22 \mu\text{m}$
# 23 で	" = 12 "

となり全体的には約 17 μm 程度の被覆管直径の減少 (クリープダウン) があつた。

- (iii) 変動の大きかった位置は Fig. 4 のスケッチおよび Fig. 6, Fig. 7 の写真でみる如く光沢のない暗褐色もしくは褐色部と位置がほぼ対応していた。(照射前試験で燃料棒には割れ, 腐蝕等の異状がなかった事が明らかになっている¹⁾)

4. 検 討

4.1 直径変化におよぼす軸方向位置の影響

直径の変化は軸方向位置に対して一様でない。すなわち頂部から底部にむかうにしたがって変動量が大きくなる (Fig. 6 および Fig. 7)。これはペレットと被覆管との間に働く摩擦力に起因した PCI の^{2) 3)} 1 種であると考えられる。その摩擦力の発生原因には下記のものと考えられる (特に a), b) は有効である)。

- a) 燃料棒中のペレットは必ずしも中心軸が一致しておらず偏心して並んでいる。
- b) ペレットクラックの発生は低出力でおこり, 生じたペレット破片が被覆内面に密着する。
- c) ペレット端面が直角になっていない。
- d) UO_2 のかけや粉末化がおこる。

ペレットに作用する軸力について計算した^(*)。それによれば上から (n-1), (n) 番目のペレットに作用する軸力を P_{n-1} , P_n として (偏心量を見捨て)

(*) 付録 1 参照

Fig. 6およびFig. 7はそれぞれ#74ロッド, #23ロッドについての測定結果である。照射前の被覆管の直径は平均16.437mmであったので照射後の直径は16.000mmを基準にしてそこからの変化をプロットしている。したがって図中415 μm にある点は実際の直径では16.415mmの長さであったことを意味する。Aは基準軸 L_1 についての, BはAから90度回転した L_2 軸に沿っての測定である。

Fig. 6および7から以下の事がわかる。

- (i) 直径の変化は中心部から底部にかけて場所(軸方向)による変動が大きく, 頂部附近は変動が一定している。
- (ii) 直径変化に平均径16.437mmより全て小さく照射中に外圧等により被覆管に内側に働くクリープが作用した。変動量を Δd とおくと

	Δd_{max}	Δd_{min}	(単位 μm)
#74	46	1	
#23	44	1	

となることがわかる。 Δd は分布しているが

概略

#74で..... $\Delta d_{\text{mean}} = 22 \mu\text{m}$

#23で..... " = 12 "

となり全体的には約17 μm 程度の被覆管直径の減少(クリープダウン)があった。

- (iii) 変動の大きかった位置はFig. 4のスケッチおよびFig. 6, Fig. 7の写真でみる如く光沢のない暗褐色もしくは褐色部と位置がほぼ対応していた。(照射前試験で燃料棒には割れ, 腐蝕等の異状がなかった事が明らかになっている¹⁾。

4. 検 討

4.1 直径変化におよぼす軸方向位置の影響

直径の変化は軸方向位置に対して一様でない。すなわち頂部から底部にむかうにしたがって変動量が大きくなる(Fig. 6およびFig. 7)。これはペレットと被覆管との間に働く摩擦力に起因したPCI^{2) 3)}の1種であると考えられる。その摩擦力の発生原因には下記のものと考えられる(特にa, b)は有効である)。

- a) 燃料棒中のペレットは必ずしも中心軸が一致しておらず偏心して並んでいる。
- b) ペレットクラックの発生は低出力でおこり, 生じたペレット破片が被覆内面に密着する。
- c) ペレット端面が直角になっていない。
- d) UO_2 のかけや粉末化がおこる。

ペレットに作用する軸力について計算した^(*)それによれば上から(n-1), (n)番目のペレットに作用する軸力を P_{n-1} , P_n として(偏心量を見捨て)

(*) 付録1参照

$$P_n / P_{n-1} = \frac{H/D + \mu_c}{H/D - \mu_m} > 1$$

が成立する。ここに

2H : ペレット高さ

2D : ペレット直径

μ_c : ペレットと被覆管の間の静摩擦係数

したがって $P_n > P_{n-1}$ となりスタックの底部では大きな軸力が働く。 P_n はペレット位置によって値が異なり頂部で小さく底部にいくに従って等比級数的に大きくなる。この位置における軸力の値の違いが外圧による被覆管のクリープダウンに影響をおよぼしたと考えられる。つまり、照射によるペレットと被覆管の PCI は頂部でごく弾性的であり軸力の値も小さかったために被覆管のクリープダウンによる永久歪も小さく均一的であった。しかし底部では軸力が大きくペレットの移動が拘束されているところに被覆管が接触して来てペレットと（頂部に比して）大きな相互作用をした結果永久歪も大きくかつ不均一に残ったと考えられる。

4.2 クリープダウン量

外圧による被覆管のクリープによる変形量を計算した結果^(*) 径方向について $25 \mu\text{m}$ という値を得た。これは実測による被覆管の変形量 $17 \mu\text{m}$ にかなり近かった。

5. 結 言

JMTR, OWL-1 で照射した 2 体の燃料棒の被覆管の外観検査および照射クリープ（外圧によるクリープ）の実測値と経験式からの計算値との比較を行ない下記の結論を得た。

- 1 被覆管の曲りは全長 800 mm につき平均 0.33 mm であった。
- 2 外圧による被覆管の永久変形（クリープ変形）量は実測値で平均 $17 \mu\text{m}$ 、計算値で $25 \mu\text{m}$ であり（ともに直径減少）実測値は計算値を越えなかった。

謝 辞

論文の執筆に際し共同研究の相手方である動力炉・核燃料開発事業団（ATR 本部）の林清純氏に適切な助言と協力を賜りました。また当研究室の市川達生氏には有益なディスカッションをして載しました。御礼申し上げます。

* "付録 2" 参照

$$P_n / P_{n-1} = \frac{H/D + \mu_c}{H/D - \mu_m} > 1$$

が成立する。ここに

2H : ペレット高さ

2D : ペレット直径

μ_c : ペレットと被覆管の間の静摩擦係数

したがって $P_n > P_{n-1}$ となりスタックの底部では大きな軸力が働く。 P_n はペレット位置によって値が異なり頂部で小さく底部にいくに従って等比級数的に大きくなる。この位置における軸力の値の違いが外圧による被覆管のクリープダウンに影響をおよぼしたと考えられる。つまり、照射によるペレットと被覆管の PCI は頂部でごく弾性的であり軸力の値も小さかったために被覆管のクリープダウンによる永久歪も小さく均一的であった。しかし底部では軸力が大きくペレットの移動が拘束されているところに被覆管が接触して来てペレットと（頂部に比して）大きな相互作用をした結果永久歪も大きくかつ不均一に残ったと考えられる。

4.2 クリープダウン量

外圧による被覆管のクリープによる変形量を計算した結果^(*) 径方向について $25 \mu\text{m}$ という値を得た。これは実測による被覆管の変形量 $17 \mu\text{m}$ にかなり近かった。

5. 結 言

JMTR, OWL-1 で照射した 2 体の燃料棒の被覆管の外観検査および照射クリープ（外圧によるクリープ）の実測値と経験式からの計算値との比較を行ない下記の結論を得た。

- 1 被覆管の曲りは全長 800 mm につき平均 0.33 mm であった。
- 2 外圧による被覆管の永久変形（クリープ変形）量は実測値で平均 $17 \mu\text{m}$ 、計算値で $25 \mu\text{m}$ であり（ともに直径減少）実測値は計算値を越えなかった。

謝 辞

論文の執筆に際し共同研究の相手方である動力炉・核燃料開発事業団（ATR 本部）の林清純氏に適切な助言と協力を賜りました。また当研究室の市川達生氏には有益なディスカッションをして載しました。御礼申し上げます。

* "付録 2" 参照

$$P_n / P_{n-1} = \frac{H/D + \mu_c}{H/D - \mu_m} > 1$$

が成立する。ここに

2H : ペレット高さ

2D : ペレット直径

μ_c : ペレットと被覆管の間の静摩擦係数

したがって $P_n > P_{n-1}$ となりスタックの底部では大きな軸力が働く。 P_n はペレット位置によって値が異なり頂部で小さく底部にいくに従って等比級数的に大きくなる。この位置における軸力の値の違いが外圧による被覆管のクリープダウンに影響をおよぼしたと考えられる。つまり、照射によるペレットと被覆管の PCI は頂部でごく弾性的であり軸力の値も小さかったために被覆管のクリープダウンによる永久歪も小さく均一的であった。しかし底部では軸力が大きくペレットの移動が拘束されているところに被覆管が接触して来てペレットと（頂部に比して）大きな相互作用をした結果永久歪も大きくかつ不均一に残ったと考えられる。

4.2 クリープダウン量

外圧による被覆管のクリープによる変形量を計算した結果^(*) 径方向について $25 \mu\text{m}$ という値を得た。これは実測による被覆管の変形量 $17 \mu\text{m}$ にかなり近かった。

5. 結 言

JMTR, OWL-1 で照射した 2 体の燃料棒の被覆管の外観検査および照射クリープ（外圧によるクリープ）の実測値と経験式からの計算値との比較を行ない下記の結論を得た。

- 1 被覆管の曲りは全長 800 mm につき平均 0.33 mm であった。
- 2 外圧による被覆管の永久変形（クリープ変形）量は実測値で平均 $17 \mu\text{m}$ 、計算値で $25 \mu\text{m}$ であり（ともに直径減少）実測値は計算値を越えなかった。

謝 辞

論文の執筆に際し共同研究の相手方である動力炉・核燃料開発事業団（ATR 本部）の林清純氏に適切な助言と協力を賜りました。また当研究室の市川達生氏には有益なディスカッションをして載しました。御礼申し上げます。

* "付録 2" 参照

参考文献

- 1) K. Yanagisawa; M. Uchida; K. Hayashi; "Study on Densification of Uranium Dioxide Fuel Pellets", JAERI-M 7210
- 2) V. Albergamo; "Fuel-Clad Interaction in Pellet Fuel Rods with Large Initial Diameter Clearance" Sander-Stölen Conf. HPR 173, Session 1, Paper No.3 (1973)
- 3) E. Rolstad; "A Qualitative Description of the Dimensional Changes of Pelletized UO₂ Fuel and the Resulting Force Interaction with Clad During Start-Up and Early Operation" Enlarged HPG Irradiation Experience from the Halden Reactor, Ustaoset, Norway, March, (1971)

Table 1 Specification for used specimens

Cladding

Material : Zircaloy-2
Total length: 848 mm.
Fuel length: 698 mm.
Dimensions : 16.4mm O.D.
 : 0.8mm thickness.
Gap size : 0.3mm diametral.

Fuel Pellet

Material : Uranium Dioxide (UO_2)
Enrichment : 1.8 w/o
End Form : Dished at both ends with chanfer.
Dimensions : 14.40 mm diameter.
 18.0 mm height.
Density : 92.5, 95, 97 %TD

TABLE 2. Irradiating Condition in OWL-1

ITEMS	VALUE DESINED	IRRADIATION CYCLE		
		31	32	33
clad inlet temp. (C)	-	N: 258.9-265.3 L: 107.3-143.7	249.6-257.1	249.0-253.4
clad outlet temp. (C)	-	N: 273.9-280.7 L: 114.0-150.2	268.2-274.8	266.0-271.6
fuel inlet temp.(C)	-	N: 271.2-277.7 L: 109.2-146.4	264.8-271.1	262.7-268.0
fuel outlet temp.(C)	280	N: 284.4-292.3 L: 115.1-155.0	281.4-287.5	278.1-284.5
clad inlet flow (kg/min.)	45	N: 42.3 -45.8 L: 153.6-157.7	42.9 -45.8	43.8 -45.7
clad inlet press.(MPa)	9.4	N: 9.33 -9.44 L: 30	9.32 -9.41	9.27 -9.45
PH	5.5-8.5	6.9-7.3	6.2-8.4	5.2-7.7
oxygen dissolved (ppb)	≤ 400	40 -133	2 -58	≤ 8.3
electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	≤ 1	0.1-0.4	0.1 -0.3	0.3 -0.8
total power level (kW)	-	50.9-60.2	57.9 -67.7	56.1 -64.2
average B.U. (MWd/t)	-	554.5	573.7	595.3
max. "	-	707.4	742.7	769.7

* N: normal operating condition , L: low temp.operating condition.

Table 3. Dimensions and densities for rod No. 74
relating to Fig. 2.

PELLET NUMBER	DIAMETER (MM)	HEIGHT (MM)	WEIGHT (GR)	DENSITY(100% T.D.) (GEOMETRY) IMMERSION
A18	14.400	17.790	29.170	93.070 94.270
B22	14.400	18.080	29.677	93.080 93.160
C21	14.410	17.890	30.099	95.280 95.370
D21	14.370	17.830	29.873	95.520 95.690
E14	14.400	17.910	30.230	95.600 95.950
F17	14.420	17.980	30.942	97.340 97.620
A27	14.410	17.790	29.164	92.920 94.120
B17	14.410	18.060	29.637	92.920 93.290
C22	14.410	17.850	30.057	95.370 95.460
D22	14.370	17.870	29.935	95.500 95.680
E15	14.400	17.920	30.238	95.770 95.950
F18	14.410	18.000	30.950	97.490 97.610
A25	14.410	17.800	29.228	93.070 94.270
B33	14.370	17.940	29.296	92.950 93.450
C25	14.410	17.850	30.053	95.350 95.470
D24	14.370	17.910	29.972	95.400 95.660
E20	14.410	17.920	30.257	95.690 95.980
F19	14.420	17.930	30.855	97.340 97.630
A24	14.400	17.760	29.154	93.170 94.270
B34	14.420	17.950	29.524	93.010 93.200
C27	14.420	17.830	30.035	95.270 95.460
D26	14.370	17.840	29.956	95.730 95.820
E19	14.420	17.910	30.267	95.650 95.970
F22	14.410	17.860	30.710	97.400 97.580
A21	14.420	17.790	29.157	92.760 94.340
B49	14.380	17.950	29.398	93.090 93.160
C19	14.410	17.880	30.059	95.210 95.330
D19	14.370	17.880	29.959	95.530 95.690
E31	14.400	17.880	30.231	95.960 95.930
F21	14.420	17.890	30.768	97.280 97.640
A20	14.410	17.780	29.109	92.790 94.300
B 8	14.380	17.950	29.384	93.040 93.390
C20	14.410	17.900	30.117	95.290 95.430
D20	14.370	17.920	30.033	95.540 95.630
E46	14.400	17.900	30.200	95.760 95.900
F15	14.410	17.950	30.863	97.390 97.660

Table 4. Dimensions and densities for rod No. 23 each pellet numbers are correspond to those in Fig. 3.

PELLET NUMBER	DIAMETER (MM)	HEIGHT (MM)	WEIGHT (GR)	DENSITY(O/O T.D.) (GEOMETRY)	IMMERSION
A11	14.410	17.800	29.161	92.850	94.100
B52	14.370	17.930	29.291	92.980	93.500
C12	14.410	17.690	30.109	95.310	95.450
D12	14.370	17.880	29.992	95.630	95.720
E29	14.430	17.940	30.340	95.580	95.880
F24	14.410	17.890	30.771	97.430	97.600
A 9	14.420	17.780	29.202	92.960	94.390
B56	14.390	17.960	29.379	92.840	93.490
C11	14.420	17.850	30.073	95.280	95.430
D 8	14.370	17.900	29.987	95.510	95.720
E13	14.400	17.920	30.282	95.910	95.970
F23	14.420	18.030	31.057	97.430	97.700
A 8	14.410	17.800	29.167	92.870	94.320
B12	14.380	17.930	29.365	93.090	93.480
C 9	14.420	17.840	30.020	95.170	95.460
D 6	14.380	17.900	30.017	95.470	95.790
E 5	14.420	17.870	30.207	95.670	95.870
F 7	14.420	17.910	30.806	97.290	97.590
A 5	14.410	17.790	29.183	92.980	94.420
B11	14.410	18.030	29.602	92.970	93.200
C 7	14.420	17.860	30.045	95.140	95.430
D18	14.370	17.930	30.030	95.480	95.710
E 1	14.410	17.910	30.241	95.700	96.000
F 5	14.420	17.920	30.828	97.310	97.660
A15	14.410	17.790	29.154	92.380	94.170
B53	14.370	17.960	29.366	93.060	93.450
C18	14.410	17.900	30.096	95.220	95.370
D16	14.370	17.940	30.043	95.470	95.710
E21	14.430	17.960	30.344	95.480	95.900
F14	14.410	17.940	30.877	97.490	97.690
A13	14.410	17.790	29.132	92.810	94.300
B 2	14.400	18.090	29.653	92.950	93.180
C13	14.420	17.560	30.468	94.930	95.160
D14	14.370	17.990	30.094	95.360	95.710
E17	14.410	17.900	30.235	95.730	96.000
F25	14.410	17.890	30.771	97.430	97.600

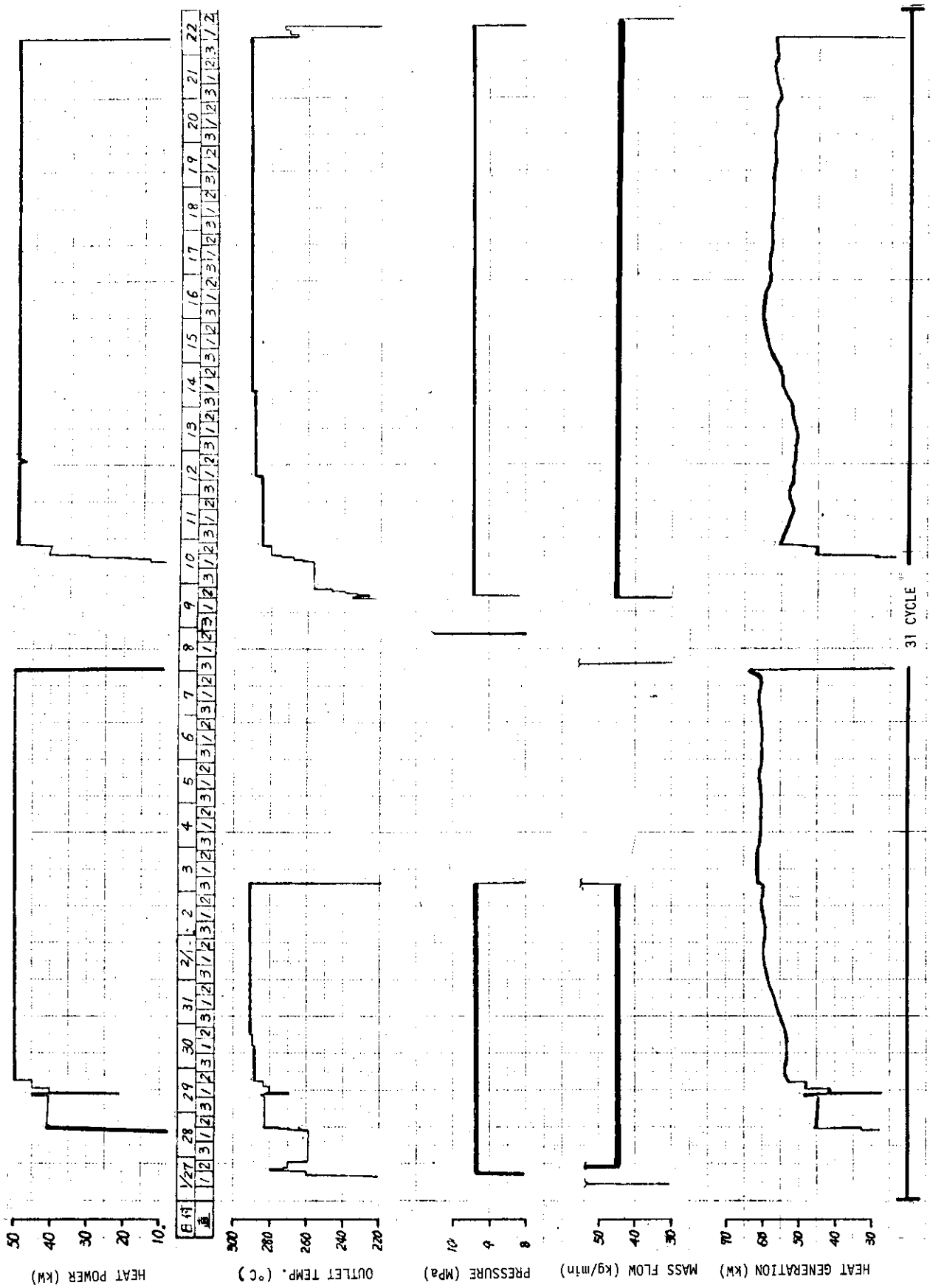


Fig. 1 Irradiation history for 74LF23A (1)



Fig. 1 Irradiation history for 74LF23A (2)

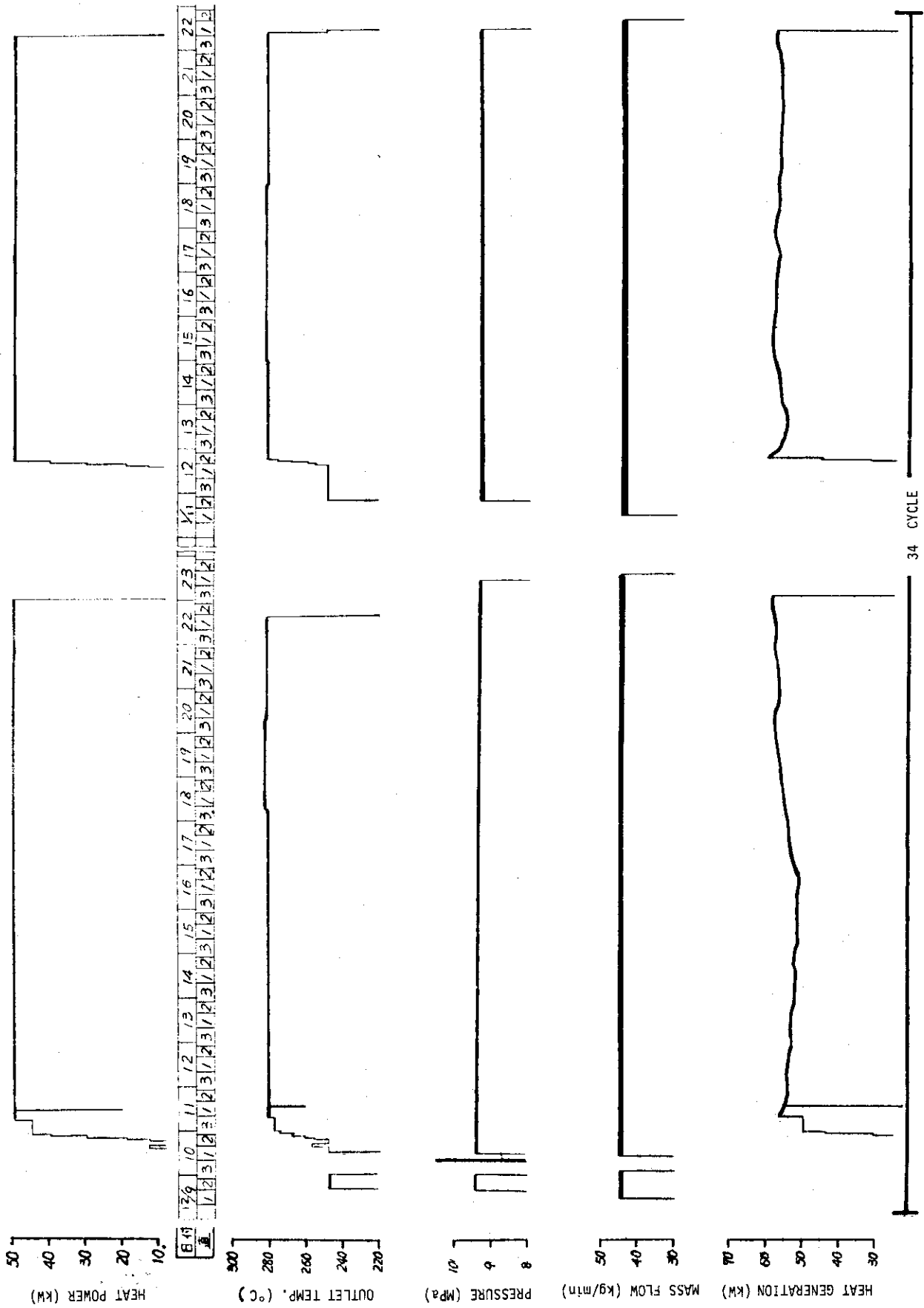


Fig. 1 Irradiation history for 74LF23A (3)

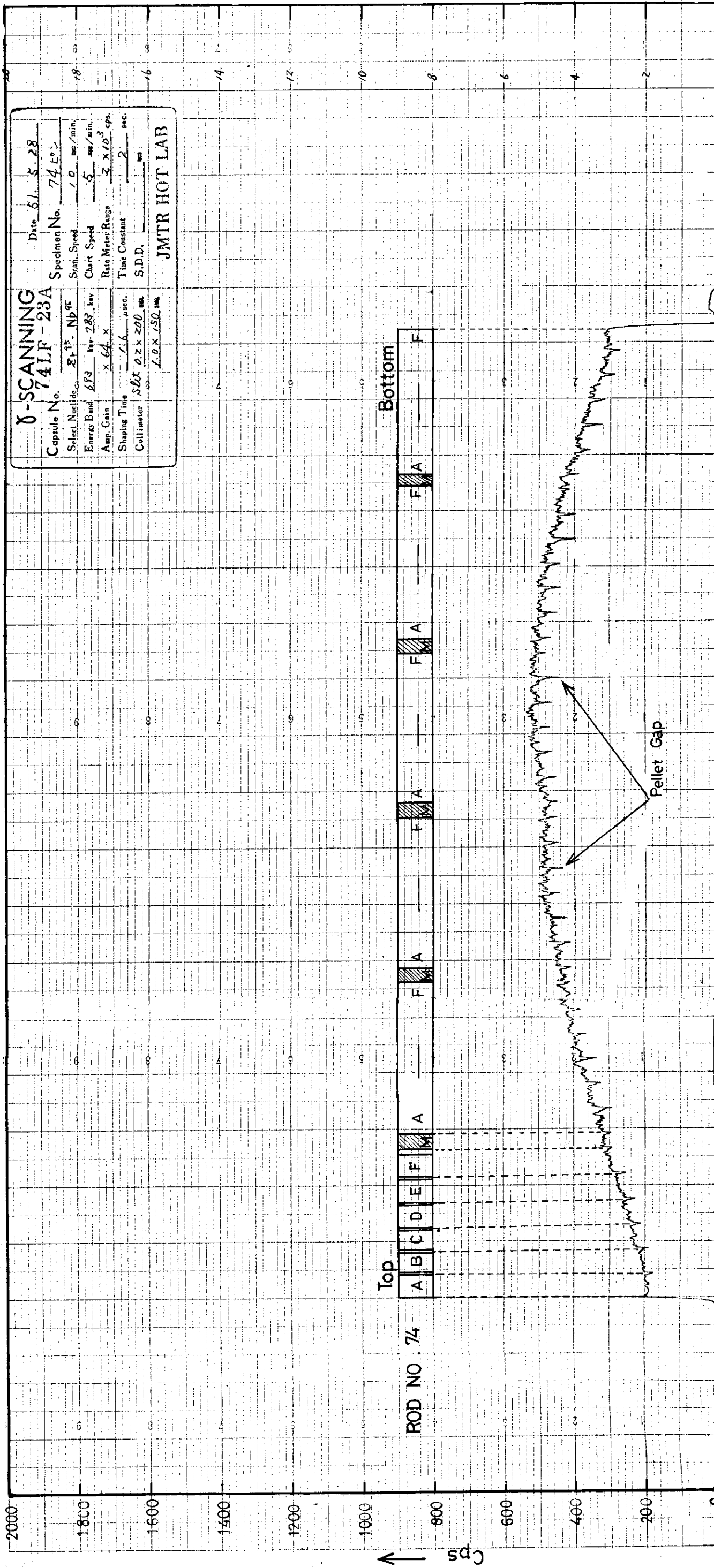


Fig. 2 Gamma-scanning for rod No. 74

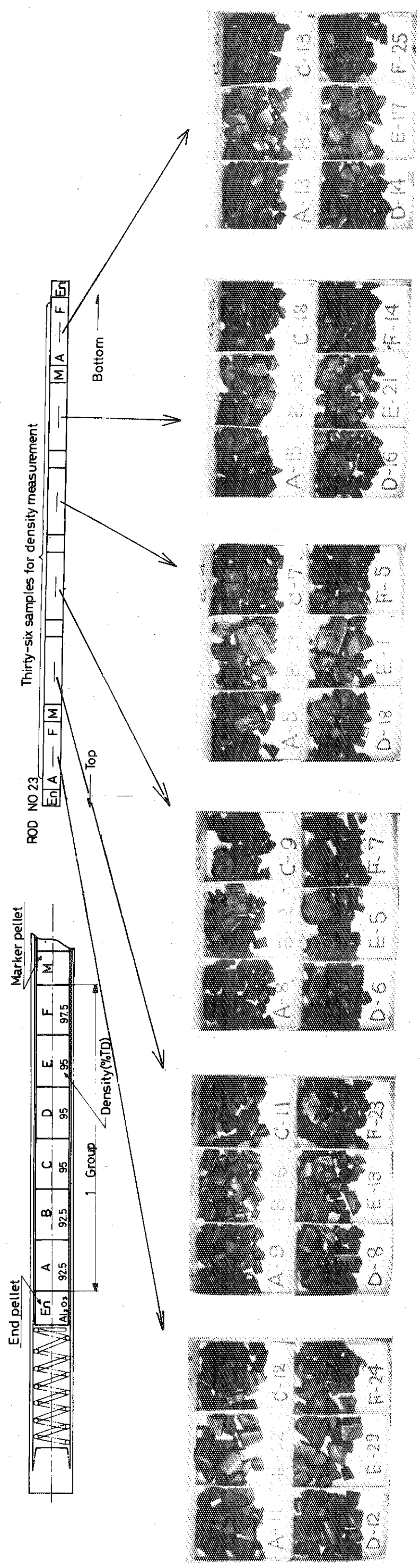


Fig. 3 Photograph of UO₂ pellets dismounted from each positions of rod No.23

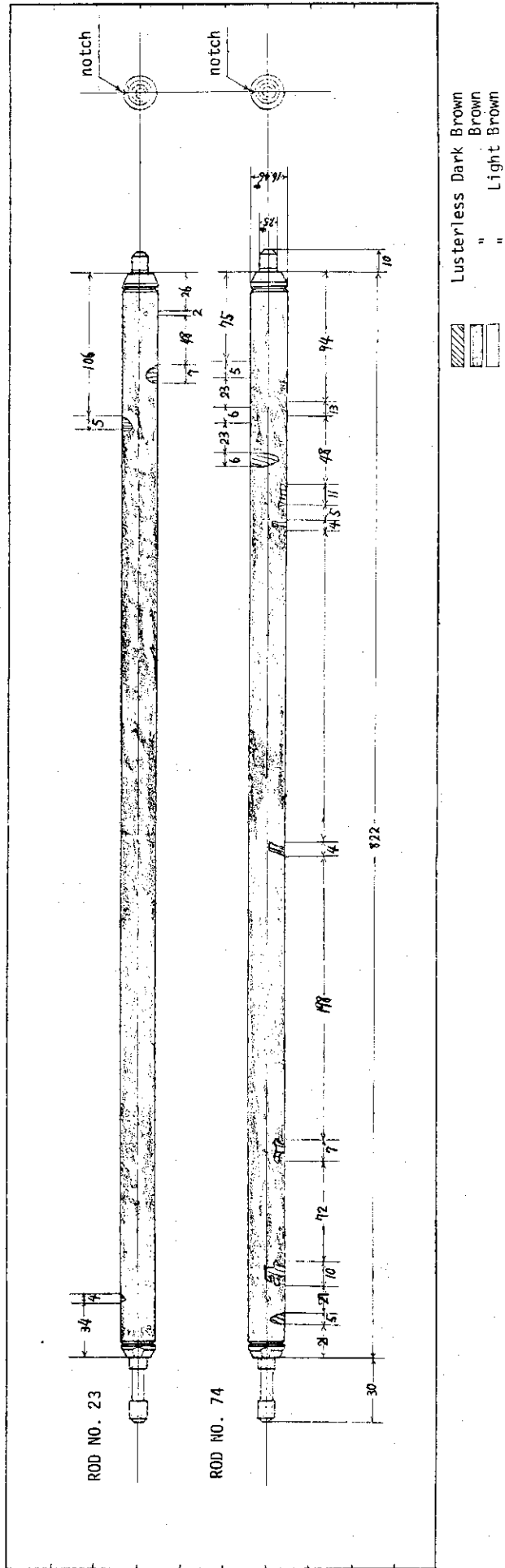


Fig. 4 After irradiation sketches of both rods

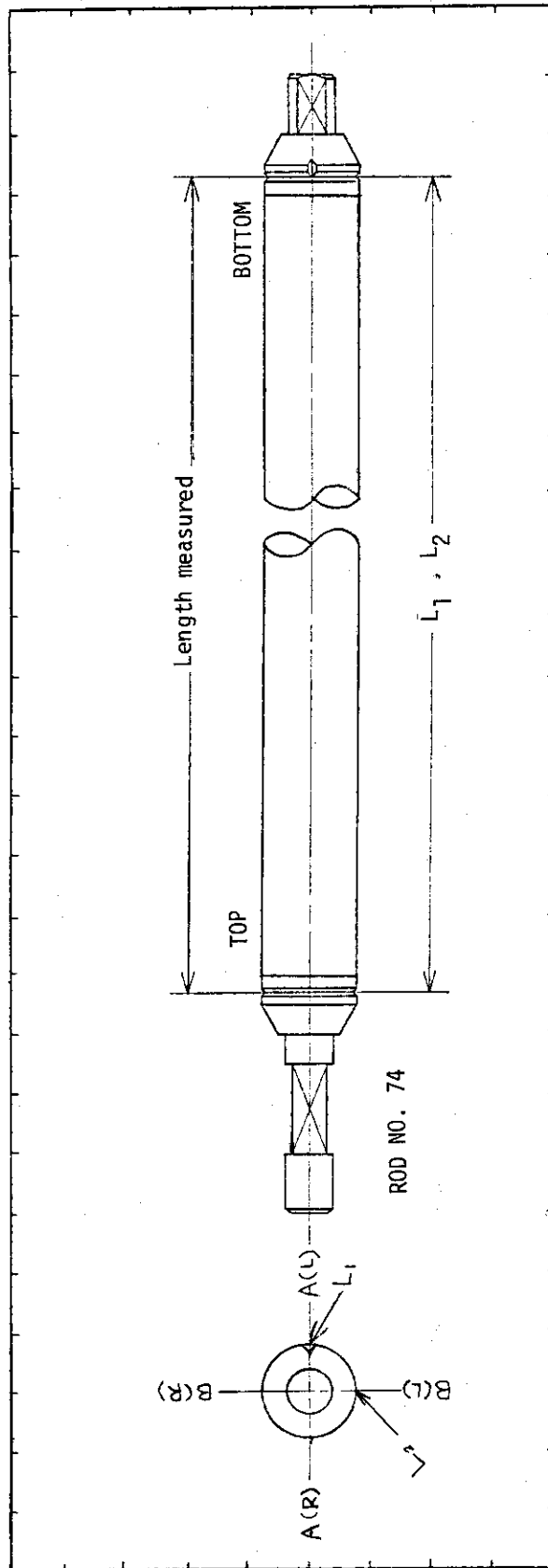


Fig. 5 Schematic drawing of fuel rod

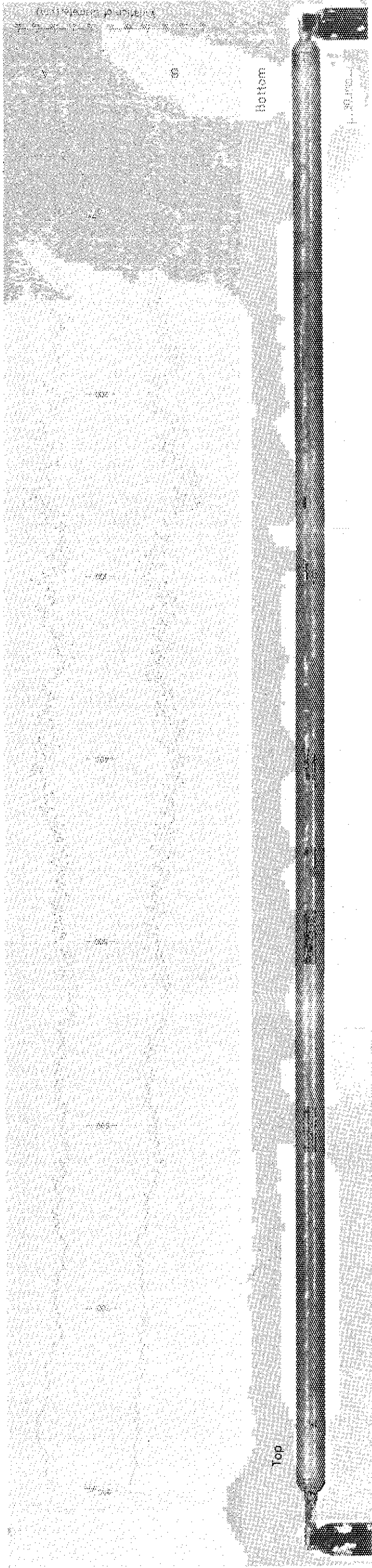


Fig. 6 Variation of diameter and fuel rod after irradiation for
No. 74 rod

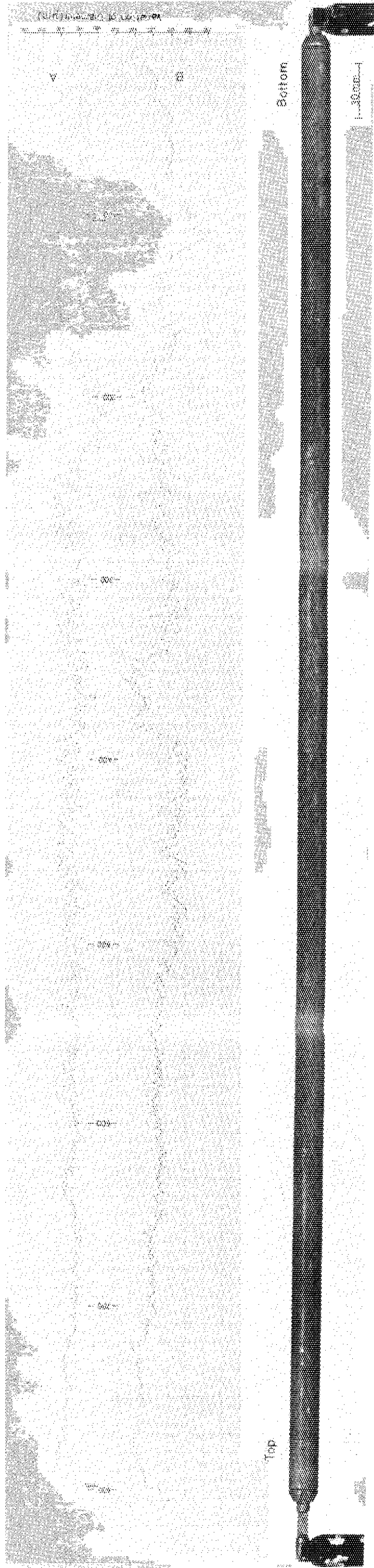


Fig. 7 Variation of diameter and fuel rod after irradiation for
No. 23 rod

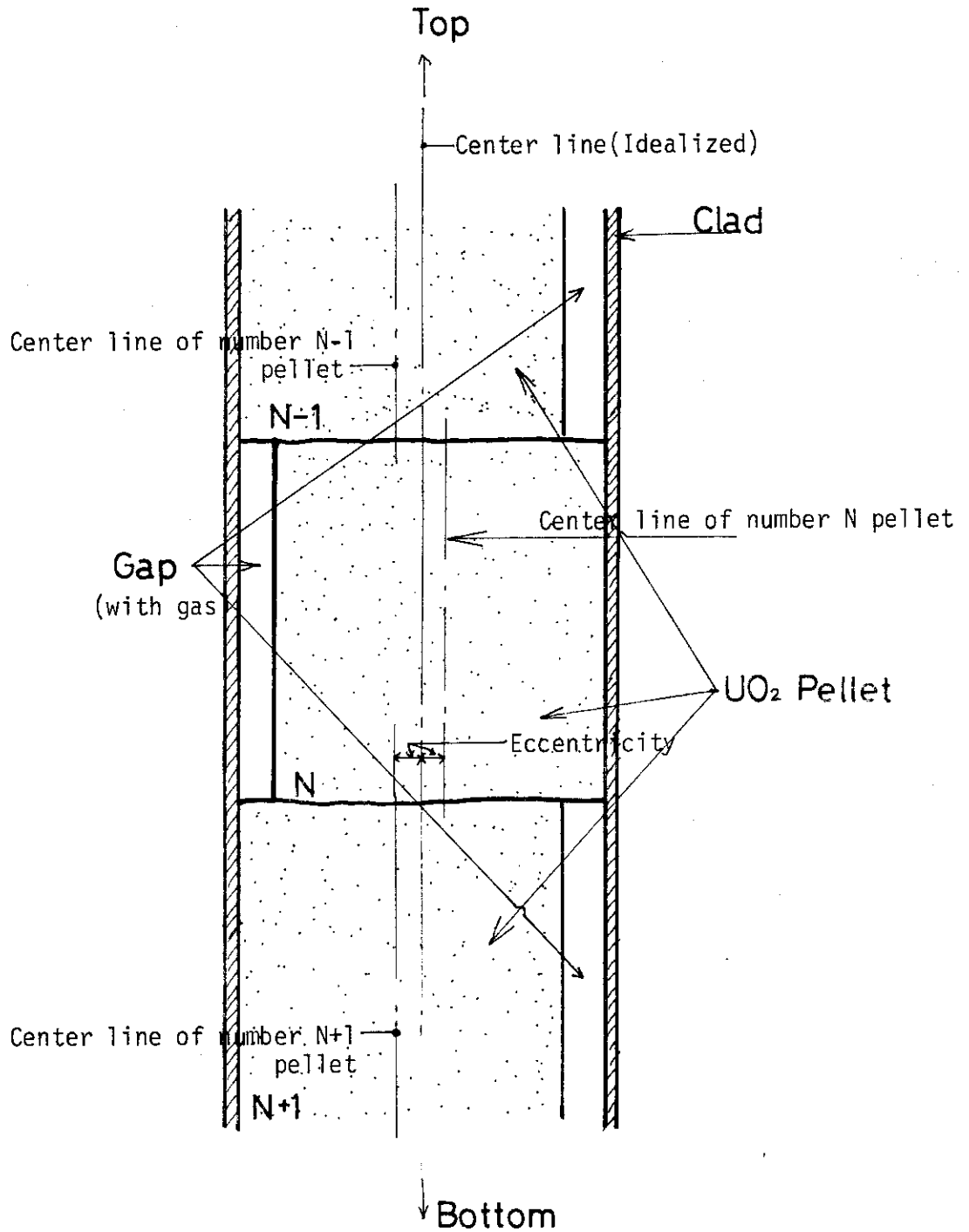


Fig. 8 Eccentric pellet model

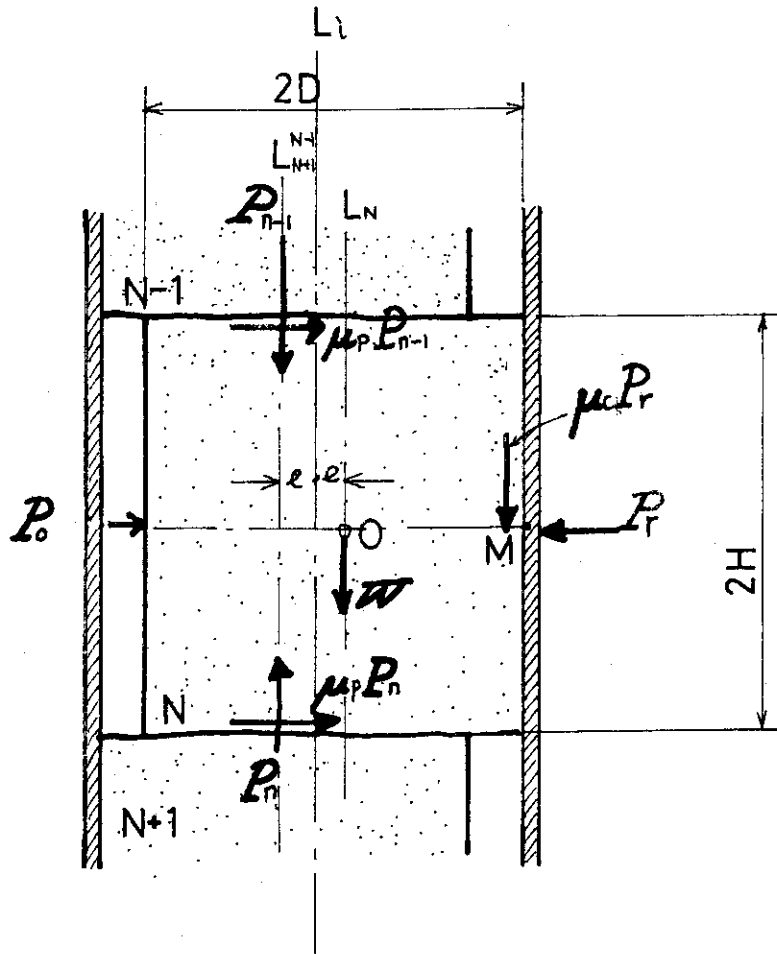


Fig. 9 Schematic force diagram around an eccentric pellet

付 録 1

“偏心ペレットに作用する軸力の計算”

ペレット間に偏心が生じている場合のある任意のペレットに働く力関係を解析する。

いま上部からそれぞれ (N-1), (N), (N+1) 番目に位置しているペレットが Fig. 8 のような位置関係になっているとする。(N-1), (N+1) ペレットの中心は理想的な中心から左へある量だけ偏心して被覆管に接触している。一方 (N) 番目のものは理想中心から右側に (N-1) 番目のものと同量だけ偏心して被覆管に接触している。ギャップにはガスが詰まっているとする。

そこで (N) 番目のペレットに着目してそこに作用する力を表示してみると Fig. 9 のようになる。 P_{n-1} , P_n は N 番目のペレットと (N-1) 番, (N+1) 番目のペレットとの接触による作用力である。N 番目のペレットに対し力の衡合をとると次のようになる。

$$0 = \Sigma X \quad \text{より}$$

$$0 = P_0 - (P_r + P_0) + \mu_p \cdot P_{n-1} + \mu_p \cdot P_n$$

$$\therefore P_r = \mu_p (P_{n-1} + P_n) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに μ_p はペレット間の静摩擦係数, P_0 は管内ガス圧による力である。

$$0 = \Sigma Y \quad \text{より}$$

$$0 = -P_{n-1} - W + P_n - \mu_c P_r \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに W : N 番目のペレットの重さ

μ_c : ペレットと被覆管が接触していることにより生じた静摩擦係数。

P_r : 径方向に働く外力

摩擦力 $\mu_c P_r$ はペレットが熱的な膨脹をおこして全体的に頂部にむかって伸びることを仮定し下向きにとった。

(2) 式の P_r に(1)式を代入して整理すると

$$P_n = \frac{1 + \mu_c \mu_p}{1 - \mu_c \mu_p} P_{n-1} + \frac{1}{1 - \mu_c \mu_p} W \quad \dots\dots\dots (3)$$

を得る。

$0 = \Sigma M$ より Fig. 9 で M 点についてモーメントの衡合をとる。(反時計方向 > 0)

$$0 = (D+e) P_{n-1} - H \cdot \mu_p P_{n-1} + (D-e) W +$$

$$H \cdot \mu_p P_n - (D+e) P_n \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\therefore P_n = P_{n-1} + \frac{(D-e)}{(D+e) - \mu_p H} W \quad \dots\dots\dots (5)$$

(3)および(5)式より P_{n-1} , P_n を求める。

$$P_{n-1} = \frac{W}{2 \mu_c \mu_p} \left\{ \frac{(D-e)}{(D+e) - \mu_p H} (1 - \mu_c \mu_p) - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$P_n = \frac{W}{2 \mu_c \mu_p} \left\{ \frac{(D-e)}{(D+e) - \mu_p H} (1 + \mu_c \mu_p) - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

P_n / P_{n-1} を作ると(8)式を得る。

$$\frac{P_n}{P_{n-1}} = \frac{(1 + \mu_c \mu_p) - \frac{(D+e) - \mu_p H}{D-e}}{(1 - \mu_c \mu_p) - \frac{(D+e) - \mu_p H}{D-e}} \equiv r \quad \dots\dots\dots (8)$$

(8)式右辺は明らかに1より大きい。(8)式について検討を加える。

検討1 $D \gg e$ (偏心量を無視しうる場合)

このとき(8)式右辺を r_e とおくと(9)式を得る。

$$\begin{aligned} r_e &= \frac{1 + \mu_c \mu_p - (1 - \mu_p \frac{H}{D})}{1 - \mu_c \mu_p - (1 - \mu_p \frac{H}{D})} \\ &= \frac{\mu_p \frac{H}{D} + \mu_c \mu_p}{\mu_p \frac{H}{D} - \mu_c \mu_p} \\ &= \frac{H/D + \mu_c}{H/D - \mu_c} \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

検討2 任意のペレットにおける n 値

(8)式は等比級数であるから

$$\left(\frac{P_{n+1}}{P_n} \right) \cdot \left(\frac{P_n}{P_{n-1}} \right) \cdot \dots\dots\dots \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = r^n$$

$$\therefore P_{n+1} = P_1 \cdot r^n \quad \rightarrow \quad P_n = P_1 \cdot r^{n-1}$$

(8)式の r の値を代入して

$$P_n = P_1 \left\{ \frac{1 + \mu_c \mu_p - \frac{(D+e) - \mu_p H}{D-e}}{1 - \mu_c \mu_p - \frac{(D+e) - \mu_p H}{D-e}} \right\}^{n-1} \dots\dots\dots (10)$$

偏心量を無視した(9)式を用いれば(10)式を得る。

$$P_n = P_1 \left\{ \frac{H/D + \mu_c}{H/D - \mu_c} \right\}^{n-1} \dots\dots\dots (11)$$

簡単化のために以下では偏心量を無視した場合 ($r \rightarrow re$ とした場合) について考える。

ところで P_1 は一番上ののっかっているペレットに作用する力でこれはばね力である。

$$P_1 \equiv f_0 \dots\dots\dots (12)$$

従って(11)式は

$$P_n = f_0 \left\{ \frac{H/D + \mu_c}{H/D - \mu_c} \right\}^{n-1} \dots\dots\dots (13)$$

で与えられる。

検討3 各ペレットに作用する n の和 sum

$$P_{sum} = \sum_1^n P_n = f_0 + f_0 r + f_0 r^2 + \dots\dots\dots + f_0 r^{n-1} \quad (*)$$

但し $r = \frac{H/D + \mu_c}{H/D - \mu_c}$, (偏心量 e を無視したもの)

$$(*) = f_0 \frac{r^n - 1}{r - 1}$$

$$P_{sum} = f_0 \cdot \frac{H/D - \mu_c}{2 \mu_c} \left\{ \left(\frac{H/D + \mu_c}{H/D - \mu_c} \right)^n - 1 \right\} \dots\dots\dots (14)$$

検討4 ペレットの全のび量

n 個あるペレットを集めて1本のペレットと等価としそれに sumなる引張力が働くとする
と

$$\Delta l = \frac{P_{sum} \cdot 2 n H}{\frac{\pi}{4} (2D)^2 \cdot E}$$

$$= \frac{2 H}{\pi D^2 \cdot E} n \cdot f_0 \frac{H/D - \mu_c}{2 \mu_c} \left\{ \left(\frac{H/D + \mu_c}{H/D - \mu_c} \right)^n - 1 \right\}$$

$$\Delta l = \frac{H \cdot f_0}{\pi D^2 \cdot E} \cdot \frac{H/D - \mu_c}{\mu_c} \cdot n \left\{ \left(\frac{H/D + \mu_c}{H/D - \mu_c} \right)^n - 1 \right\} \dots\dots (15)$$

ここに E は UO_2 ペレットのヤング率である。

付 録 2

“外圧による被覆管の歪量の計算”

外圧による被覆管のクリープ歪量を計算する。照射条件は下記のとおりである。

被覆管平均温度	388 °C (661K)
速中性子束	2×10^3 n/cm ² ·sec
照射時間	1519 h (3サイクル)

外圧による応力	$\sigma_r = 12.07$ MPa
	$\sigma_\theta = 124.59$ MPa
	$\sigma_z = 65.24$ MPa

次の計算式で相当歪量を求める。

$$\bar{\epsilon} = \beta \cdot A \cdot B \cdot C \cdot \tau$$

記号の意味は次の通りである。

$$(イ) \beta : \text{クリープ速度定数} = \frac{1.02}{10^{13}}$$

$$(ロ) A : \sinh \left\{ Sc \cdot \bar{\sigma} \right\} = \sinh \left\{ \frac{1.67}{10^8} \cdot \bar{\sigma} \right\}$$

$\bar{\sigma}$ は相当応力で与えられた外圧による $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ から次のようにして求める。

(von Mises の式)

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(12.07 - 124.59)^2 + (65.24 - 12.07)^2 + (124.59 - 65.24)^2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{19010.22} \\ &= 97.49 \text{ [MPa]} = 97.49 \times 10^6 \text{ [Pa]} \end{aligned}$$

従って

$$A = \sinh \left\{ \frac{1.67}{10^8} \bar{\sigma} \right\}$$

$$= \sinh \left\{ \frac{1.67}{10^8} \times 97.49 \times 10^6 \right\}$$

$$= \sinh (1.63)$$

$$= 2.44$$

$$(c) B : \exp \left\{ - \frac{Q}{RT} \right\} = \exp \left\{ - \frac{58.62 \text{ [kJ/mol]}}{8.31 \text{ [J/mol K]} \cdot 661 \text{ [K]}} \right\}$$

$$= \exp (-10.67)$$

$$= \frac{2.32}{10^5}$$

$$(d) C : \phi^{0.85} = \text{速中性子束 [n/cm}^2 \cdot \text{sec]}^{0.85}$$

$$= (2 \times 10^{13})^{0.85}$$

$$= 2.02 \times 10^{11}$$

(e) τ : 照射時間

$$\tau = 1.519 \times 10^3 \text{ [h]}$$

(f)~(h) を用いて $\bar{\epsilon}$ を計算すると

$$\bar{\epsilon} = \left(\frac{1.02}{10^{13}} \right) \times (2.44) \times \left(\frac{2.32}{10^5} \right) \times (2.02 \times 10^{11}) \times (1.519 \times 10^3)$$

$$\bar{\epsilon} = 1.77 \times 10^{-3}$$

$\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z$ 方向の歪は次式により求める。

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{1}{2\sigma} (2\sigma_r - \sigma_\theta - \sigma_z) \cdot \bar{\epsilon} \\ \epsilon_\theta = \frac{1}{2\sigma} (2\sigma_\theta - \sigma_z - \sigma_r) \cdot \bar{\epsilon} \\ \epsilon_z = \frac{1}{2\sigma} (2\sigma_z - \sigma_r - \sigma_\theta) \cdot \bar{\epsilon} \end{cases}$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{2 \times 97.49 \text{ [MPa]}} \left\{ 2 \times 12.07 - 124.59 - 65.24 \right\} \times (1.77 \times 10^{-3})$$

$$= 1.50 \times 10^{-3}$$

$$|\epsilon_\theta| = 1.56 \times 10^{-3}$$

$$|\epsilon_z| = 5.6 \times 10^{-3}$$

従って照射前被覆管の外径の平均値 $\bar{d} = 16437 \text{ [mm]}$ を用いれば径方径のクリープ変形量が求まる。

$$\begin{aligned}\frac{\Delta d}{d} &= \epsilon_r = 1.50 \times 10^{-3} \\ \therefore \Delta d &= (1.50 \times 10^{-3}) \times 16.437 \text{ [mm]} \\ &= 0.02466 \text{ [mm]} \\ &\approx 25 \text{ [\mu m]}\end{aligned}$$

径方向の被覆管の縮みは $\Delta d = 25 \text{ [\mu m]}$ となった。