

「常陽」MK-Iブランケット燃料集合体 (NFJI0U)の照射後試験

燃焼率測定試験

1986年1月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	PNC TN9410 86-133
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

「常陽」MK-Iブランケット燃料集合体(NFJI0U)の照射後試験

燃焼率測定試験

実施責任者 山 内 勘^{*}報 告 者 滑川 卓志^{*} 小部 昭^{*} 三次 岳志^{*}吉川 勝則^{*} 近藤 優^{*} 富永 功^{*}薄井 啓二^{*} 立花 利道^{*}

要 旨

「常陽」MK-I ブランケット燃料の照射挙動を把握するため、NFJI0U ブランケット燃料集合体の照射後試験として燃焼率測定試験を実施した。本燃料集合体は、炉内位置 5E1 で低出力試験から 75 MW 第 6 サイクルまで照射され、集合体平均燃焼度は約 910 MWD/MTM (計算値)である。試験試料は、炉心方向列の 3 本の燃料ピンの軸方向中心位置から 3 点採取した。測定は、¹⁴⁸Nd 法を用いた。試験の結果から以下の事を確認した。

- (1) 燃焼率の実測値は、JYHST コードによる計算値より大きな値が得られた。
- (2) 集合体内の径方向における燃焼率の分布は、実測値の方が計算値より約 40 %ほど緩い傾斜で変化した。
- (3) 集合体内の径方向における Pu 含有率の分布は、燃焼率に比例して変化するが、変化の割合は燃焼率の変化より小さい。
- (4) 炉心内の第 6 ～第 8 列に装荷され NFJI0U と同じ照射履歴をもつ他の 3 体の集合体の測定結果と合わせて、ブランケット領域全体の径方向における燃焼率及び Pu 含有率の分布曲が得られた。得られた分布曲線は、燃焼率及び Pu 含有率とも $\exp b \cdot (-a \cdot r)$ (r は炉心中心からの距離, a, b は定数) で近似される。

目 次

1. 序 論	1
2. 燃料ピン	2
3. 照射条件	3
4. 照射後試験	3
4.1 燃焼率測定試験	3
5. 参考文献	5

1. 序 論

「常陽」MK-I ブランケット燃料集合体 NFJI0U は、炉心方向を D として、炉内位置 5E1 で 50 MW 低出力試験から 75 MW 第 6 サイクルまで照射された集合体であり、集合体の平均燃焼度は約 910 MWD/MTM と計算されている。

ブランケット燃料の照射挙動のうち径方向の燃焼率勾配を確認するため、3本の燃料ピン(7408, 7410 及び 7412 ピン)を選び燃焼率測定試験を行い、試験が終了したので報告する。

2. 燃 料 ピ ン

本集合体に用いられているブランケット燃料ピンの仕様を Table2-1 に示す。

3. 照 射 条 件

本集合体の炉心装荷位置を Fig.3-1 に示す。また本集合体において破壊試験を実施したブランケット燃料ピンの集合体内装荷位置を Fig.3-2 に示す。さらに集合体の照射条件を以下に記す。

- | | |
|---------------------------|------------------|
| ① 燃焼度 (集合体平均, JYHIST 計算値) | 910 MWD/MTM |
| ② 照射サイクル | 50 MW (第 0 サイクル) |
| | } |
| | 75 MW (第 6 サイクル) |
| ③ 照射位置 | 5 E1 |

試験に供したブランケット燃料ピンの軸方向燃焼度分布を Fig.3-3 ~ Fig.3-5 に示す。

4. 照射後試験

4.1 燃焼率測定試験

(1) 試料調製方法

試料調整の方法と手順を Fig.4-1 に示す。

(2) 結果

得られた測定データをまとめた結果を Table4-1 に示す。表示の「Measured Burnup」は、 ^{148}Nd を指標核種として測定した実測値であり、「Calculated Burnup」は、JYHIST コードから得られた燃焼度値(単位は MWD/MTM)を中性子捕獲反応や γ 線による発熱等を除外補正して燃焼率(単位 atom%)に換算した値である。また「Pu content」は、各試料の Pu 含有率の測定結果を示したものであり、生成-消滅過程を経て試料中に生産された Pu 量を示している。Table4-2 に、今回の測定で使用した ^{148}Nd 、 ^{146}Nd 及び ^{145}Nd の実効核分裂収率の計算例を示した。Table4-3 に、同位体希釈分析計算に使用したスパイク液の濃度及び組成等のデータを示す。各試料ごとの質量分析データ及び同位体希釈分析から得られた情報をまとめて Table4-4 ~ 4-6 に示す。

これらの測定データを基に、NFJ10U ブランケット集合体の径方向の燃焼率及び Pu 含有率の分布を規格化して比較したものを Fig.4-2 に示す。ここで、径方向の燃焼率分布について実測値と計算値との差を明確にする為に、直線近似により求めたそれぞれのピーキング・ファクターを比較したものを Table4-7 に示す。同表には、今回測定した NFJ10U と同じ照射履歴(MK-I 炉心の全サイクル照射)を持つ NFJO 4K、NFJO 64 及び NFJO 5L の 3 集合体(照射位置は第 6 ~ 第 8 列)での同様の比較結果を合わせて示した。また、これらの 3 集合体と NFJ10U の測定結果をもとに、炉心第 5 列から炉心第 8 列までの径方向ブランケット領域全体における燃焼率および Pu 含有率の分布曲線が得られたので、その結果を Fig.4-3 に図示する。図中の破線がフィッティング曲線で、それぞれ

$$\text{BU} = 15.0 \exp(1.06 \times 10^{-2} r)$$

$$\text{Pu} = 5.26 \exp(4.35 \times 10^{-3} r)$$

ここで BU ; 燃焼率 (atom%)

Pu ; Pu 含有率 (atom%)

r ; 炉心中心からの距離 (mm)

で表わされる。

以上の結果、以下のことを確認した。

- ① NFJI0U の燃焼率の実測値は、JYHIST コードによる計算値より全て大きな値が得られた。
- ② NFJI0U集合体内の径方向の燃焼率分布は、実測値の方が計算値より約 40 %ほど緩やかな傾斜で変化した。
- ③ NFJI0U 集合体内の径方向の Pu 含有率の分布は、燃焼率に比例して変化するが、変化の割合は燃焼率より小さい。
- ④ ブランケット領域全体の径方向における燃焼率および Pu 含有率の分布は、全体的には $b \cdot \exp(-a \cdot r)$ (r は炉心中心からの距離, a 及び b は定数) の式で近似される。

5. 参 考 文 献

- 1) PNC I941 85-07 「常陽」MK-I ブランケット燃料 (NFJI 11, NFJO 4K, NFJO 64 及び NFJO 5L) の照射後試験。

製造及び照射データ

Table 2-1 Fabrication parameters of NFJIOU
blanket full pin

Blanket fuel	
Pellet diameter (mm)	13.6
Pellet length (mm)	20
Composition	Depleted UO ₂
O/U ratio	2.00 ~ 2.02
Pellet density (% T.D)	94.0
Cladding	
Material	SUS316
Outer/inner diameter (mm)	15.0/13.8
Lot identification	K002
Blanket fuel pin	
Pin length (mm)	1915
Pin outer diameter (mm)	15.0
Blanket fuel stack length (mm)	1400
Fuel/Cladding gap (mm)	0.1

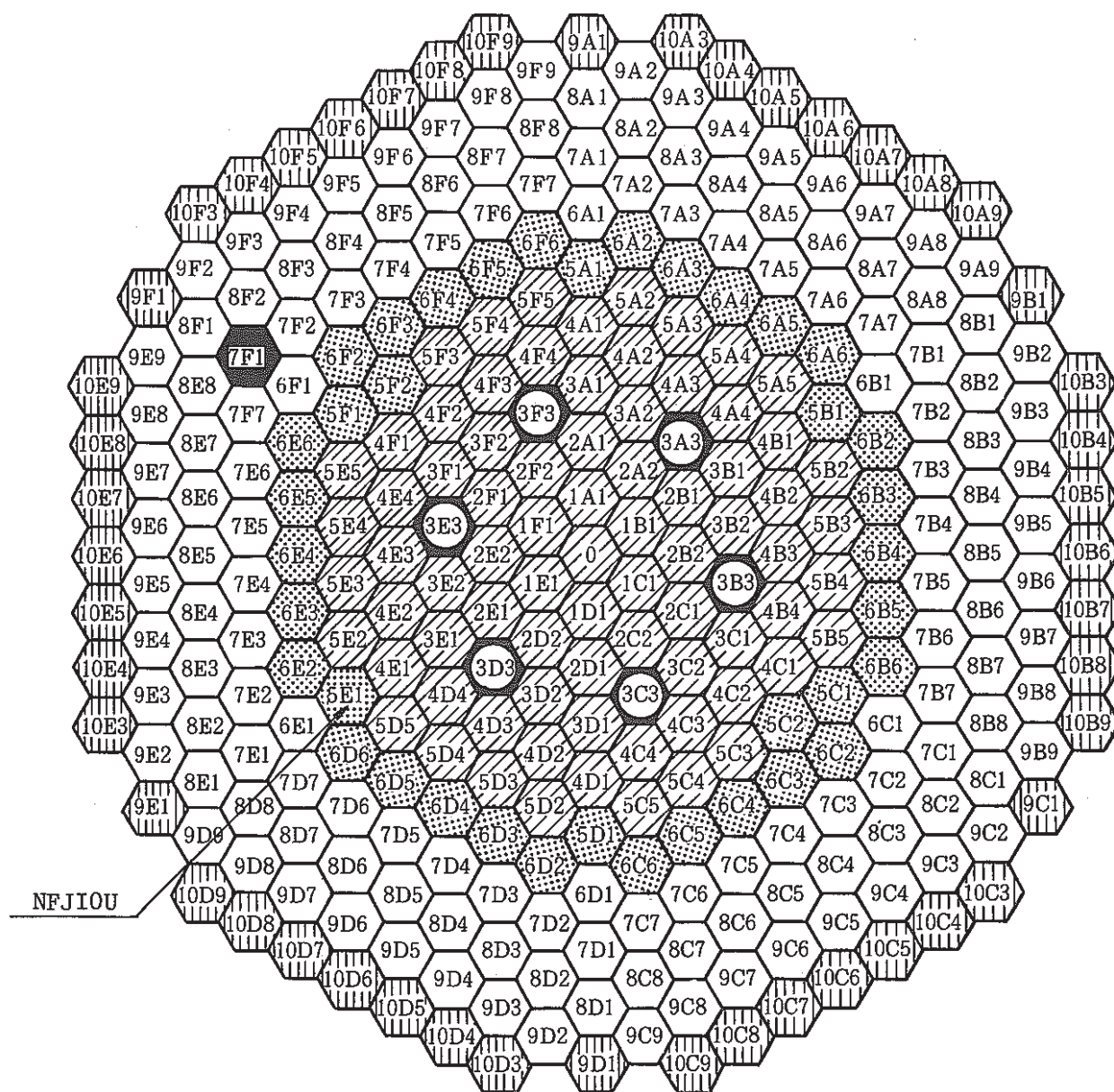


Fig. 3-1 Irradiation position of NFJIOU subassembly
in JOYO MK-I core

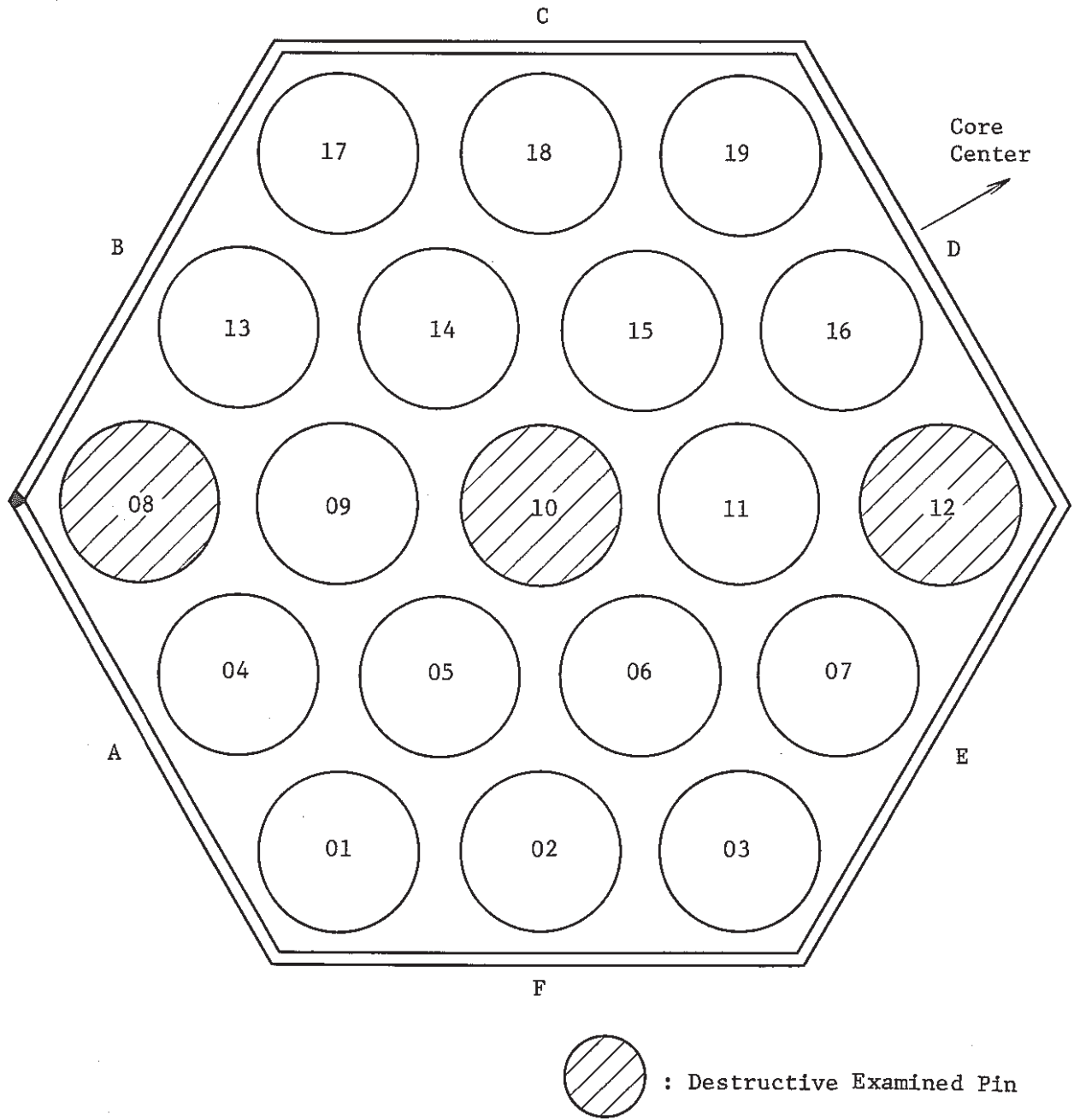


Fig. 3-2 Fuel pin position in a NFJIOU subassembly

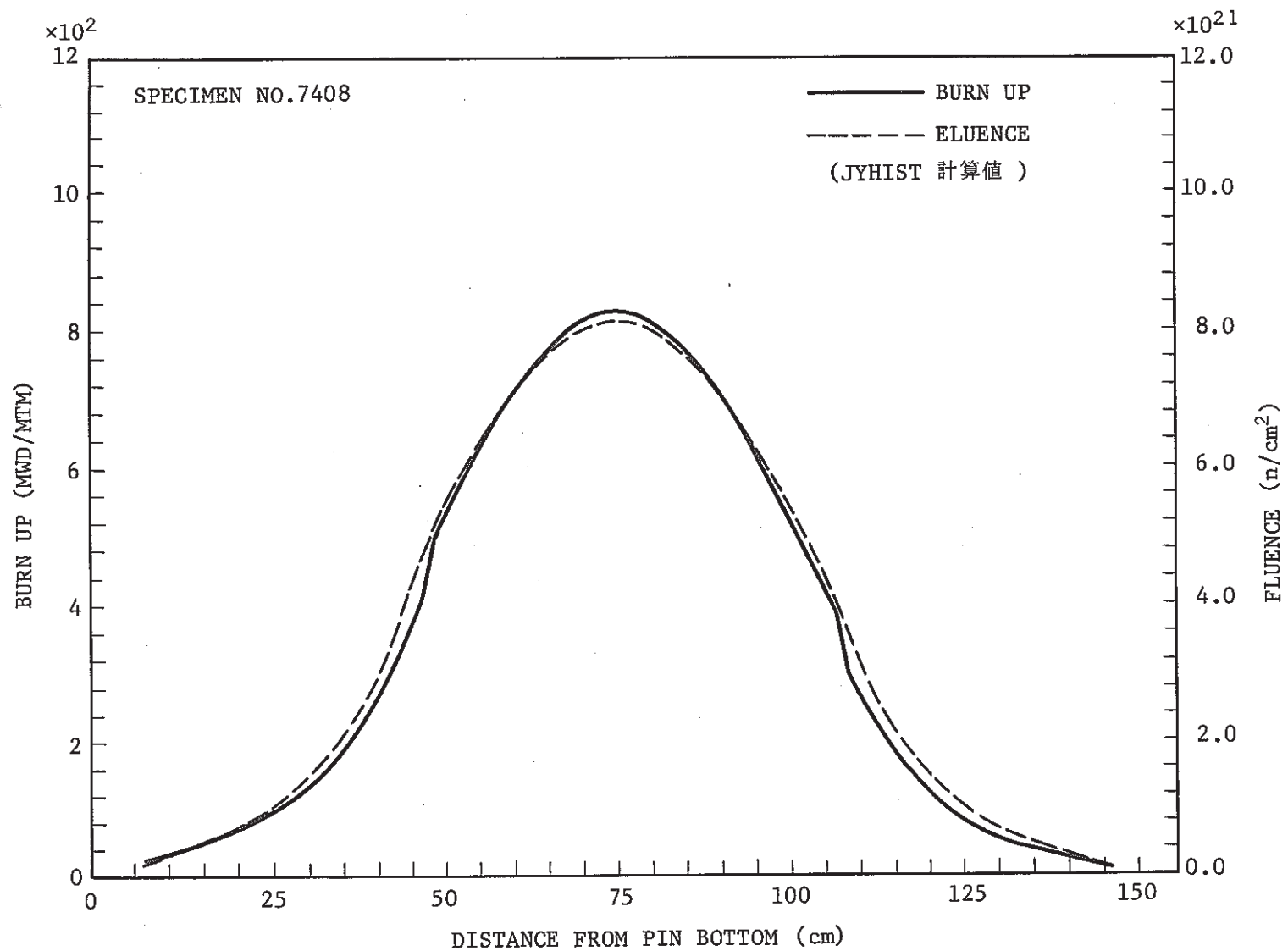


Fig. 3-3 Burnup of No.7408 pin

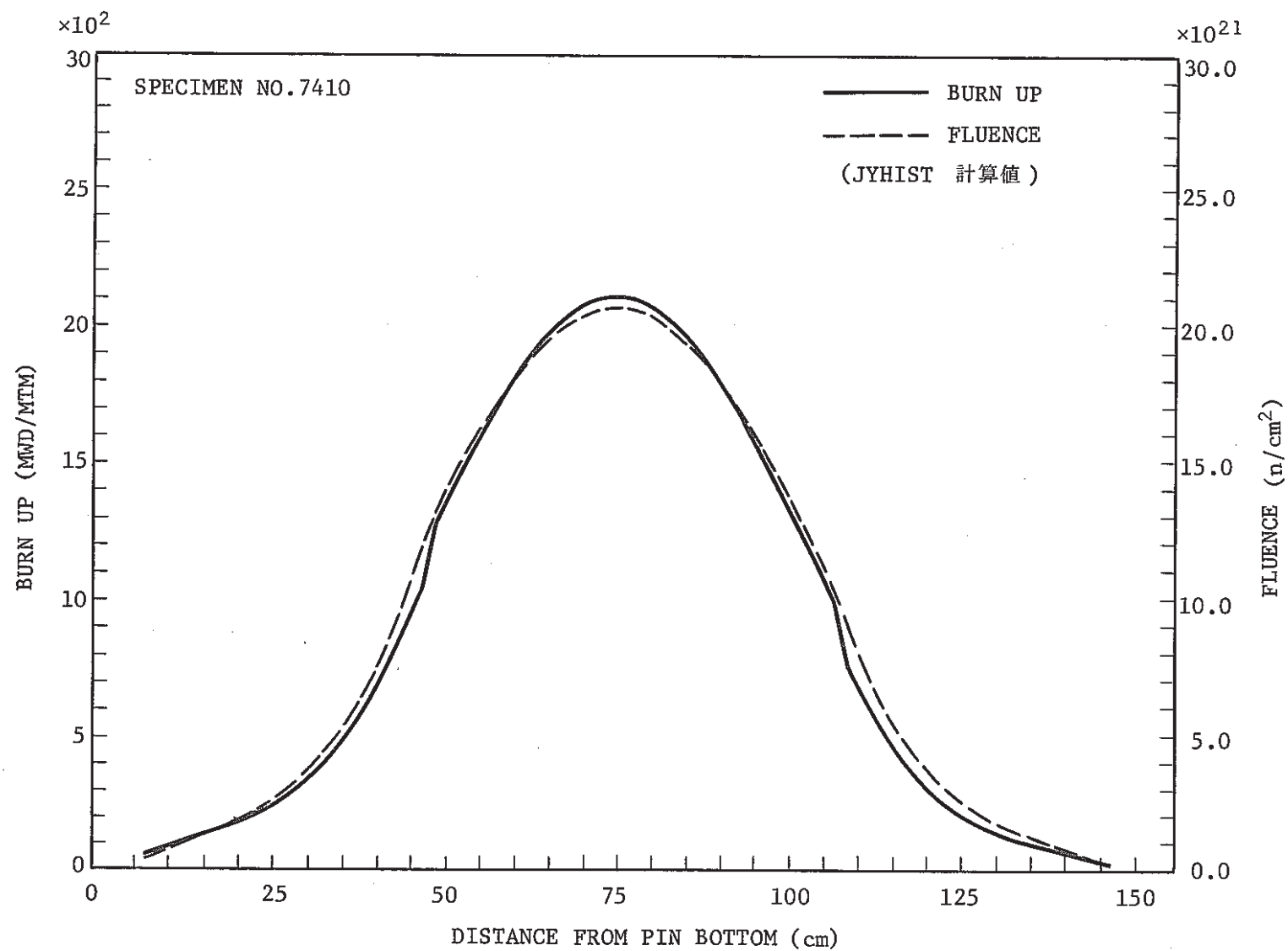


Fig. 3-4 Burnup of No.7410 pin

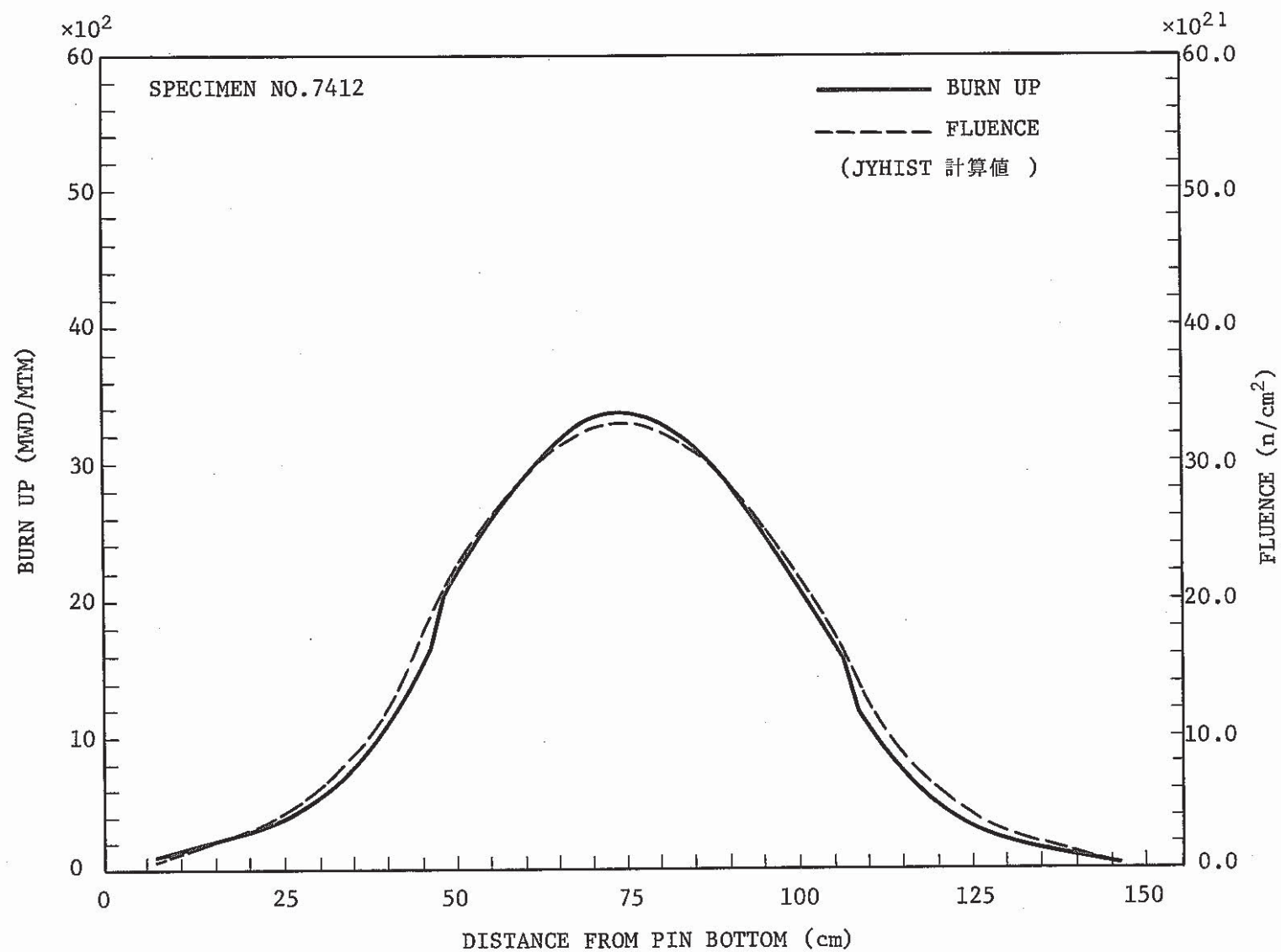


Fig. 3-5 Burnup of No.7412 pin

燃焼率測定試験データ

Table 4-1 Summary data of burnup measurement by Nd-method

Pin No.	Sample No.	Distance from ¹⁾ fuel bottom (mm)	Pu content ²⁾ (atom %)	Burnup (atom %)	
				Calculated ³⁾	Measured ⁴⁾
7408	740822	669.3 ~ 674.0	0.807	0.060	0.139
7410	741022	669.2 ~ 673.0	0.908	0.153	0.202
7412	741222	668.6 ~ 672.9	0.949	0.244	0.283

1) Distance from pin bottom - 75

2) $\text{Pu}/(\text{Pu}+\text{U}) \times 100$

3) Calculated by JYHIST code (corrected for fission heat/total heat)

4) Measured by ^{148}Nd monitor methode

Table 4-2 Calculation of effective fission yield for NFJIOU 741022 (example)

Nuclide	Composition (Atom Fraction) (AF)	Fission Cross Section (CS) barn	Nd-148		Nd-146		Nd-145	
			Fission Yield (FY) %	Fractional Fission Yield	Fission Yield (FY) %	Fractional Fission Yield	Fission Yield (FY) %	Fractional Fission Yield
U-233	nd	- 1)	1.14 2)	-	3.20 2)	-	4.10 2)	-
U-234	0.000014	- 1)	1.44 2)	-	3.08 2)	-	4.00 2)	-
U-235	0.001835	2.173 1)	1.68 3)	0.105	2.94 3)	0.184	3.76 4)	0.235
U-236	0.000066	9.610×10^{-2} 1)	1.81 2)	0.000	3.06 2)	0.000	3.77 2)	0.000
U-238	0.989002	4.200×10^{-2} 1)	2.08 3)	1.354	3.40 3)	2.214	3.50 2)	2.279
Pu-238	0.000001	- 1)	1.76 2)	-	2.79 2)	-	3.24 2)	-
Pu-239	0.008993	2.027 1)	1.65 3)	0.472	2.46 3)	0.703	3.01 3)	0.860
Pu-240	0.000087	3.820×10^{-1} 1)	1.84 2)	0.001	2.88 2)	0.001	3.34 2)	0.002
Pu-241	0.000001	2.964 1)	1.94 2)	0.000	3.01 2)	0.000	3.52 2)	0.000
Pu-242	0.000001	2.728×10^{-1} 1)	2.04 2)	0.000	3.18 2)	0.000	3.70 2)	0.000
Effective Fission Yield			1.93		3.10		3.38	

Note; nd = not detected

Fractional FY = $(AF)(CS)(FY) / \Sigma (AF)(CS)$

Effective FY = $\Sigma (\text{Fractional FY})$

1) SMART code

2) TRG-2143-R

3) ICP-1050-1

4) AERE-R-8753

Table 4-3 Composition of spike solutions and
natural Neodymium

スパイク中の原子数 (atoms/ml)	U 233	4.3914×10^{18}	S 3*
	Pu 242	7.9674×10^{17}	A 242
	Nd 150	7.1740×10^{15}	A 50
天然ネオジムの 同位体比	Nd142/Nd150	4.824980	C42/50
	Nd145/Nd150	1.472180	C45/50
	Nd146/Nd150	3.050830	C46/50
	Nd148/Nd150	1.021325	C48/50
ネオジムスパイクの 同位体比	Nd142/Nd150	0.008937	S42/50
	Nd145/Nd150	0.004336	S45/50
	Nd146/Nd150	0.009122	S46/50
	Nd148/Nd150	0.007046	S48/50
ウランスパイクの 同位体比	U234/U233	0.014108	S 43
	U235/U233	0.000401	S 53
	U238/U233	0.006410	S 83
プルトニウムスパイクの 同位体比	Pu239/Pu242	0.001309	S 92
	Pu240/Pu242	0.013696	S 02
	Pu241/Pu242	0.000859	S 12

* 計算コードで使用している記号

Table 4-4 Result of isotope analysis and burnup calculation for
NFJIOU 740822 sample

S/A NO.(FAB) ; NFJIOU	PIN NO.(PIE) ; 7408
SAMPLE NO. ; 740822	SAMPLE POSITION ; 669.3 ~ 674.0 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 0.250

ISOTOPIC ARTIO OF U,Pu,Nd IN (a) SAMPLE AND (b) SAMPLE-SPIKE MIXTURE ;

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]	
nd	0.000017	0.001880	0.000062	-(a)
0.007339	0.000110	0.001892	0.000073	-(b)
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]	
0.000062	0.009609	0.000052	0.000022	-(a)
0.000062	0.011889	0.000163	0.165006	-(b)
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150] [Nd148/150]
0.009654	3.873630	3.680341	3.062895	2.751772 1.689517
0.011689	2.232613	2.122543	1.764693	1.587756 0.974126
				-(a)
				-(b)

ISOTOPIC COMPOSITION OF U,Pu,Nd IN SAMPLE (atom%) ;

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]	
nd	0.0017	0.1876	0.0062	99.8045	
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]	
0.0061	99.0349	0.9516	0.0051	0.0022	
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148] [Nd150]
0.0601	24.1080	22.9051	19.0623	17.1260	10.5149 6.2236

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 0.807/0.810

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.5110×10^{22}

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)	4.0910×10^{17}	6.6713×10^{17}	7.4431×10^{17}
EFFECTIVE FISSION YIELD	1.94×10^{-2}	3.12×10^{-2}	3.39×10^{-2}
NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**	2.1088×10^{19}	2.1382×10^{19}	2.1956×10^{19}
BURNUP (atom%)#	0.139	0.141	0.145
SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##	1240	1260	1300

NOTE ; * Distance from fuel bottom (DFFB)
 ** FISSIONS = NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD
 # BURNUP = $100 \times \text{FISSIONS} / (\text{TOTAL HEAVY ELEMENT} + \text{FISSIONS})$
 ## 1.12 atom% B.U = 10000 MWD/MTM B.U
 nd = not detected

Table 4-5 Result of isotope analysis and burnup calculation for NFJIOU 741022 sample

S/A NO.(FAB) ; NFJIOU	PIN NO.(PIE) ; 7410
SAMPLE NO. ; 741022	SAMPLE POSITION ; 669.2 ~ 673.0 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 0.250

ISOTOPIC ARTIO OF U,Pu,Nd IN (a) SAMPLE AND (b) SAMPLE-SPIKE MIXTURE ;

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]	
nd	0.000014	0.001855	0.000067	-(a)
0.008058	0.000107	0.001896	0.000078	-(b)
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]	
0.000134	0.009696	0.000078	0.000063	-(a)
0.000134	0.013905	0.000713	0.160813	-(b)
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150] [Nd148/150]
0.009660	3.804070	3.625933	3.030621	2.733613 1.679333 -(a)
0.012600	2.460393	2.344617	1.954094	1.763332 1.079817 -(b)

ISOTOPIC COMPOSITION OF U,Pu,Nd IN SAMPLE (atom%) ;

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]	
nd	0.0014	0.1851	0.0067	99.8068	
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]	
0.0133	99.0127	0.9600	0.0077	0.0062	
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148] [Nd150]
0.0608	23.9502	22.8287	19.0806	17.2107	10.5730 6.2959

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 0.908/0.912

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.3775×10^{22}

		[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	;	5.3834×10^{17}	8.8319×10^{17}	9.8394×10^{17}
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	;	1.93×10^{-2}	3.10×10^{-2}	3.38×10^{-2}
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>	;	2.7893×10^{19}	2.8490×10^{19}	2.9111×10^{19}
<u>BURNUP (atom%)#</u>	;	0.202	0.206	0.211
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##</u>	;	1800	1840	1880

NOTE ; * Distance from fuel bottom (DFFB)
 ** FISSIONS = NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD
 # BURNUP = $100 \times \text{FISSIONS} / (\text{TOTAL HEAVY ELEMENT} + \text{FISSIONS})$
 ## 1.12 atom% B.U = 10000 MWD/MTM B.U
 nd = not detected

Table 4-6 Result of isotope analysis and burnup calculation for
NFJIOU 741222 sample

S/A NO.(FAB) ; NFJIOU	PIN NO.(PIE) ; 7412
SAMPLE NO. ; 741222	SAMPLE POSITION ; 668.6 ~ 672.9 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 0.250

ISOTOPIC ARTIO OF U,Pu,Nd IN (a) SAMPLE AND (b) SAMPLE-SPIKE MIXTURE ;

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]	
nd	0.000013	0.001863	0.000070	-(a)
0.007840	0.000101	0.001888	0.000066	-(b)
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]	
0.000224	0.009379	0.000040	0.000039	-(a)
0.000224	0.011484	0.000146	0.149622	-(b)
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150] [Nd148/150]
0.000000	3.791671	3.635432	3.027986	2.733934 1.674101 -(a)
0.008028	2.729132	2.625128	2.182007	1.976303 1.209213 -(b)

ISOTOPIC COMPOSITION OF U,Pu,Nd IN SAMPLE (atom%) ;

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.0013	0.1859	0.0070	99.8058		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.0222	99.0411	0.9289	0.0040	0.0039		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0000	23.9024	22.9175	19.0882	17.2345	10.5534	6.3039

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 0.949/0.953

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 1.4164×10^{22}

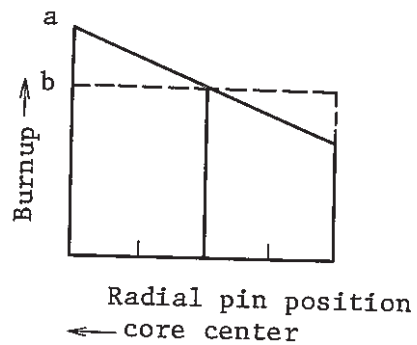
	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)	; 7.7693×10^{17}	1.2703×10^{18}	1.3998×10^{18}
EFFECTIVE FISSION YIELD	; 1.93×10^{-2}	3.09×10^{-2}	3.37×10^{-2}
NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)*:	; 4.0255×10^{19}	4.1109×10^{19}	4.1537×10^{19}
BURNUP (atom%)#	; 0.283	0.289	0.292
SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##	; 2530	2580	2610

NOTE ; * Distance from fuel bottom (DFFB)
 ** FISSIONS = NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD
 # BURNUP = $100 \times \text{FISSIONS} / (\text{TOTAL HEAVY ELEMENT} + \text{FISSIONS})$
 ## 1.12 atom% B.U = 10000 MWD/MTM B.U
 nd = not detected

Table 4-7 Relation between Measured and Calculated
Radial Peaking Factor

S/A No.	Loading Position	Radial Peaking Factor*		Ratio Meas. vs Calc.
		Calculated	Measured	
NFJIOU	5E1	0.6031	0.3474	0.576
NFJO4K	6D1	0.6833	0.3766	0.551
NFJO64	7D1	0.5058	0.3939	0.779
NFJO5L	8D1	0.3480	0.3750	1.078

* Radial Peaking Factor = $\frac{a}{b}$



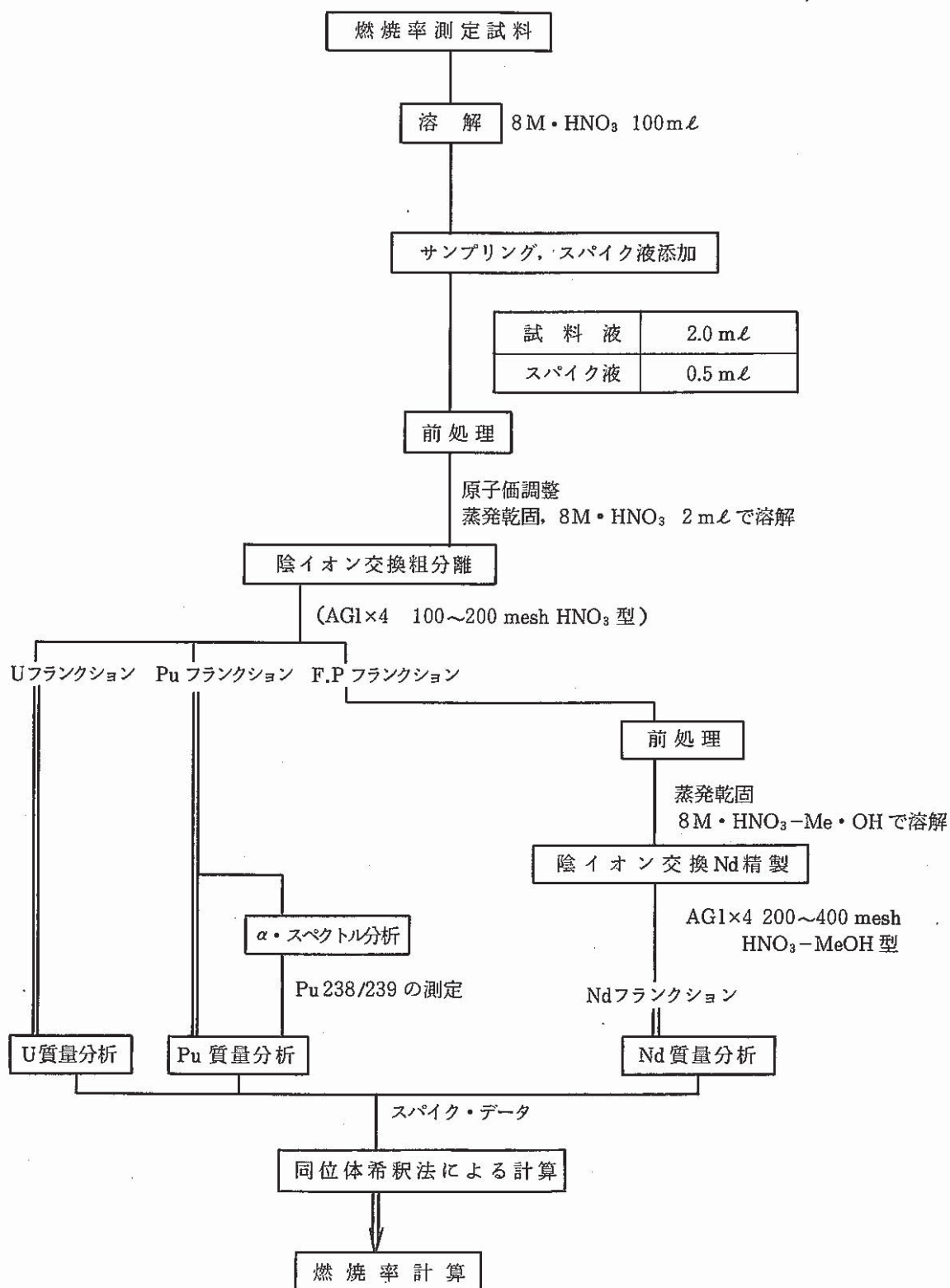


Fig. 4-1 Specimen preparation process for burnup measurement in AGS

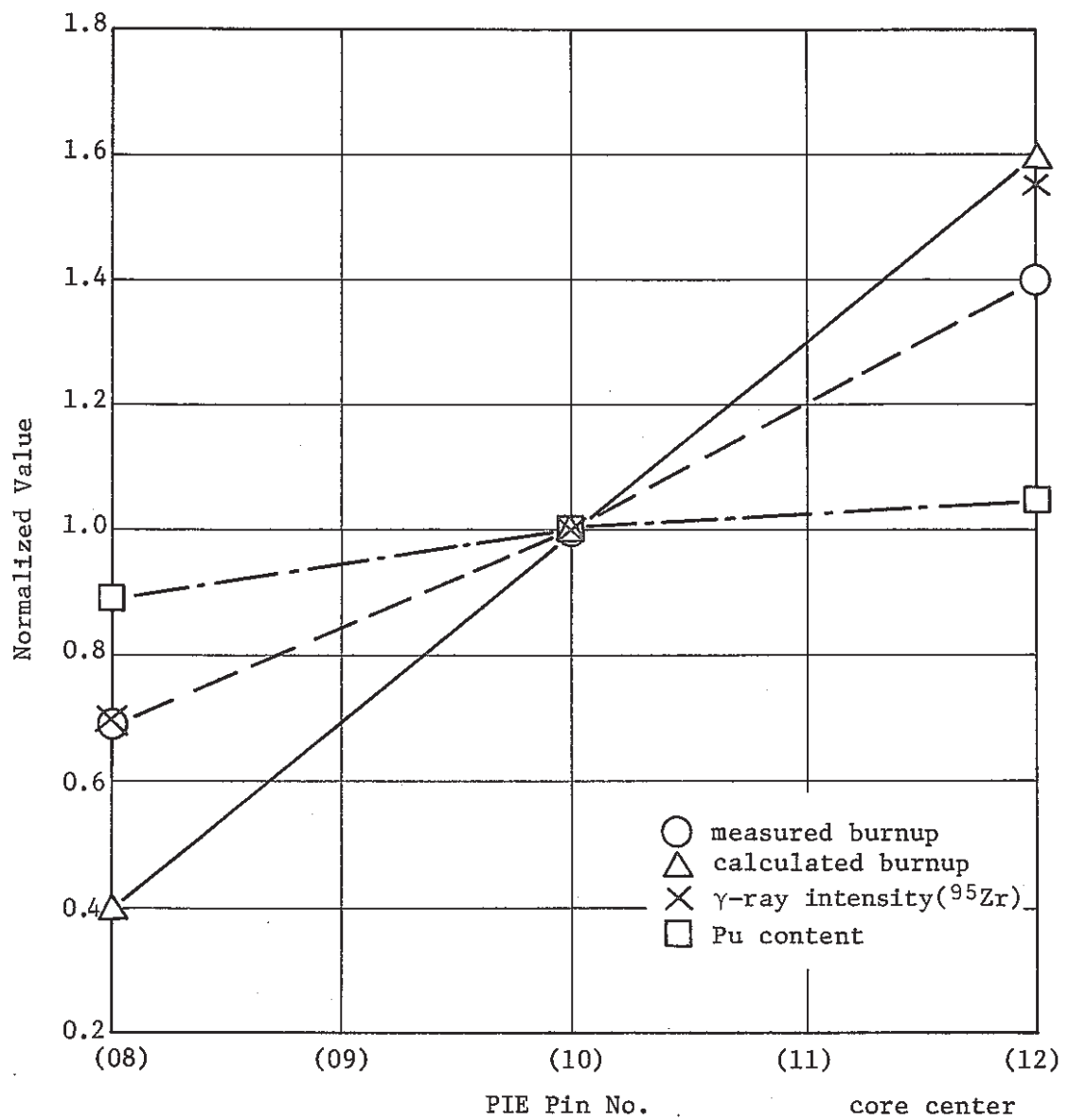


Fig. 4-2 Radial distribution of burnup and Pu content in NFJIOU subassembly

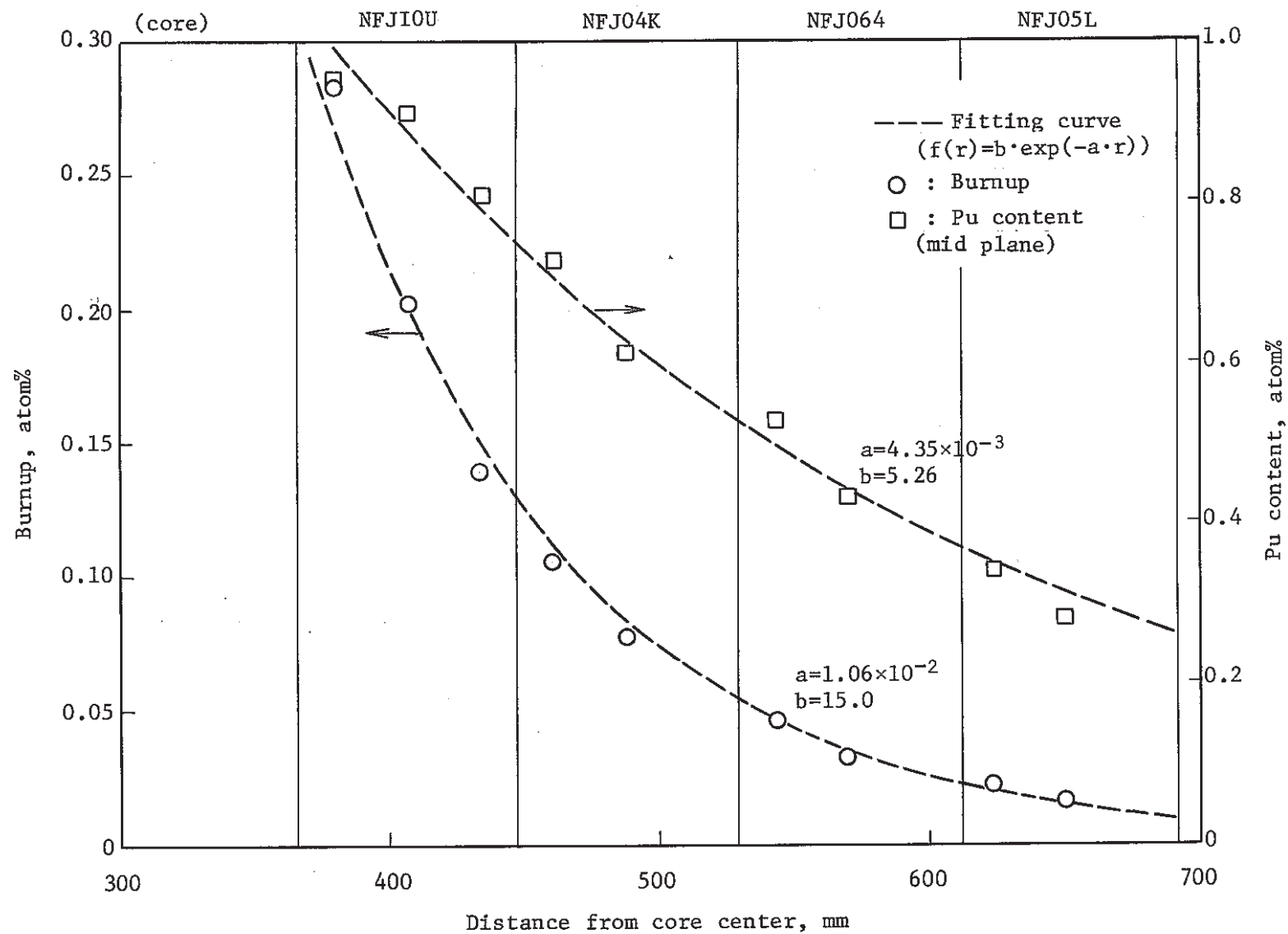


Fig. 4-3 Radial distribution of burnup and Pu content in the radial blanket fuel