

新型転換炉ふげん発電所  
燃料体設計認可申請書

(第18回取替用)

本 文  
添 付 書 類  
添 付 図 面

平成2年7月

動力炉・核燃料開発事業団

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、  
下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2002

燃料体設計認可申請書

2動燃(建運)024

平成2年 7月 24日

通商産業大臣

武藤嘉文殿

住所 東京都港区赤坂1丁目9番13号

名称 動力炉・核燃料開発事業団

代表者の氏名 理事長 石渡鷹雄

電気事業法第45条第2項第1号の規定により次のとおり燃料体の設計の認可を受けたいので申請します。



燃料の種類	ウラン・プルトニウム混合酸化物
初期濃縮度	燃料体平均濃縮度 2.02 wt % 高濃縮度 2.27 wt % (核分裂物質質量) 低濃縮度 1.84 wt % (核分裂物質質量)
燃 焼 率	燃料体最高 20,000 MWd / t 燃料要素最高 23,000 MWd / t 燃料ペレット最高 29,000 MWd / t
燃料材の種類、 組成および組織	(種類) ウラン・プルトニウム混合酸化物焼結ペレット 密度：理論密度の95.0 ± 2.0 % (組成) 酸素対ウラン・プルトニウム比 2.0 ± 0.03 (組織) 焼結により作られた単一相から成る酸化プルトニウム酸ウラン固溶体多結晶組織
燃料被覆材の種類、 組成および組織	1. 燃料被覆材 (種類) Sn-Fe-Cr-Ni系ジルコニウム合金 ( J I S H 4 7 5 1 Z r ) ( T N 8 0 2 D ) (組成) 鉄 0.07 ~ 0.20 wt % スズ 1.20 ~ 1.70 wt % クロム 0.05 ~ 0.15 wt % ニッケル 0.03 ~ 0.08 wt % 鉄+ニッケル+クロム 0.18 ~ 0.38 wt % 酸素 0.09 ~ 0.15 wt %

	ジルコニウム	残 部
	(組織) 結晶粒度	A S T M No. 9 より細粒
	2. 端 栓	
	(種類) Sn-Fe-Cr-Ni系ジルコニウム合金	
		{ A S T M B 3 5 1 }
		{ R 6 0 8 0 2 }
	(組成) 鉄	0.07~0.20 wt %
		スズ
		1.20~1.70 wt %
		クロム
		0.05~0.15 wt %
		ニッケル
		0.03~0.08 wt %
		鉄+ニッケル+クロム
		0.18~0.38 wt %
		酸素
		0.07~0.15 wt %
	ジルコニウム	残 部
	(組織) 結晶粒度	A S T M No. 7 より細粒
燃料材および燃料被覆材以外の部品の種類および組成	1. 二酸化ウラン断熱ペレット	
	(種類) 二酸化ウラン焼結体	
		密度：理論密度の95.0±1.5%
	(組成) 二酸化ウラン	
		(天然ウラン)
		酸素対ウラン比 2.0±0.03
	2. アルミナ断熱ペレット	
	(種類) アルミナ焼結体	
	(組成) アルミナ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
		純 度 99.0 wt %以上

3. 押え板付プレナムスプリング

(1) 押え板

(種類) ステンレス鋼

(J I S G 4 3 0 3 S U S 3 0 4)

(組成) ニッケル 8.00～10.50wt%  
クロム 18.00～20.00wt%  
ケイ素 1.00wt%以下  
マンガ 2.00wt%以下  
イオウ 0.030wt%以下  
炭素 0.08wt%以下  
リン 0.045wt%以下  
鉄 残部

(2) 上部プレナムスプリング

(種類) ステンレス鋼

{ J I S G 4 3 1 4 S U S 3 0 4 }  
W P B

(組成) ニッケル 8.00～10.50wt%  
クロム 18.00～20.00wt%  
ケイ素 1.00wt%以下  
マンガ 2.00wt%以下  
イオウ 0.030wt%以下  
炭素 0.08wt%以下  
リン 0.045wt%以下  
鉄 残部

(3) 下部プレナムスプリング

(種類) 析出硬化型ニッケル基合金

( AMS 5698 )

(組成) ニッケル+コバルト 70.00 wt%以上

クロム 14.00~17.00 wt%

ニオブ+タンタル 0.70~1.20 wt%

チタン 2.25~2.75 wt%

アルミニウム 0.40~1.00 wt%

鉄 5.00~9.00 wt%

イオウ 0.01 wt%以下

マンガン 1.00 wt%以下

コバルト 1.00 wt%以下

銅 0.50 wt%以下

ケイ素 0.50 wt%以下

炭素 0.08 wt%以下

4. スペーサ

(種類) 析出硬化型ニッケル基合金

{ 管材 : AMS 5590  
AMS 5589  
板材 : AMS 5597 }

(組成) ニッケル 50.00~55.00 wt%

クロム 17.00~21.00 wt%

モリブデン 2.80~3.30 wt%

アルミニウム 0.20~0.80 wt%

ニオブ+タンタル	4.75～5.50 wt %
チタン	0.65～1.15 wt %
コバルト	1.00 wt %以下
ホウ素	0.006 wt %以下
銅	0.30 wt %以下
炭素	0.08 wt %以下
マンガン	0.35 wt %以下
ケイ素	0.35 wt %以下
リン	0.015 wt %以下
イオウ	0.015 wt %以下
鉄	残部

#### 5. 上部および下部タイププレート

##### (1) 本体

(種類) ステンレス鋼鋳鋼

( J I S G 5 1 2 1 S C S 1 3 )

(組成) ニッケル	8.00～11.00 wt %
クロム	18.00～21.00 wt %
ケイ素	2.00 wt %以下
マンガン	2.00 wt %以下
イオウ	0.040 wt %以下
炭素	0.08 wt %以下
リン	0.040 wt %以下
鉄	残部



(2) 案内リングばね

(種類) ステンレス鋼

(J I S G 4 3 0 3 S U S 6 3 0)

(組成) クロム 1 5 . 5 0 ~ 1 7 . 5 0 w t %

ニッケル 3 . 0 0 ~ 5 . 0 0 w t %

銅 3 . 0 0 ~ 5 . 0 0 w t %

ニオブ 0 . 1 5 ~ 0 . 4 5 w t %

炭素 0 . 0 7 w t %以下

マンガン 1 . 0 0 w t %以下

リン 0 . 0 4 0 w t %以下

イオウ 0 . 0 3 0 w t %以下

ケイ素 1 . 0 0 w t %以下

鉄 残部

(3) 保持リング

(種類) ステンレス鋼

(J I S G 3 4 6 3 S U S 3 0 4 T B)

(組成) ニッケル 8 . 0 0 ~ 1 1 . 0 0 w t %

クロム 1 8 . 0 0 ~ 2 0 . 0 0 w t %

ケイ素 1 . 0 0 w t %以下

マンガン 2 . 0 0 w t %以下

イオウ 0 . 0 3 0 w t %以下

炭素 0 . 0 8 w t %以下

リン 0 . 0 4 0 w t %以下

鉄 残部

(4) センタリングばね

(種類) 析出硬化型ニッケル基合金

( AMS 5542 )

(組成) ニッケル+コバルト 70.00 wt%以上

クロム 14.00~17.00 wt%

ニオブ+タンタル 0.70~1.20 wt%

チタン 2.25~2.75 wt%

アルミニウム 0.40~1.00 wt%

鉄 5.00~9.00 wt%

イオウ 0.01 wt%以下

マンガン 1.00 wt%以下

コバルト 1.00 wt%以下

銅 0.50 wt%以下

ケイ素 0.50 wt%以下

炭素 0.08 wt%以下

6. スペーサタイロッド

(種類) Sn-Fe-Cr-Ni系ジルコニウム合金

{ 管材 : ASTM B353  
R60802 }

(組成) 鉄 0.07~0.20 wt%

スズ 1.20~1.70 wt%

クロム 0.05~0.15 wt%

ニッケル 0.03~0.08 wt%

鉄+ニッケル+クロム 0.18~0.38 wt%

酸素 0.09～0.15wt%

シリウム 残部

棒材： { ASTM B351 }  
          { R60802 }

鉄 0.07～0.20wt%

スズ 1.20～1.70wt%

クロム 0.05～0.15wt%

ニッケル 0.03～0.08wt%

鉄+ニッケル+クロム 0.18～0.38wt%

酸素 0.07～0.15wt%

シリウム 残部

#### 7. ロッドスプリング

(種類) 析出硬化型ニッケル基合金

( AMS 5698 )

(組成) 3. 押え板付プレナムスプリング

(3) 下部プレナムスプリングに同じ

#### 8. ばねカバー

(種類) ステンレス鋼

( JIS G4307 SUS304 )

(組成) ニッケル 8.00～10.50wt%

クロム 18.00～20.00wt%

ケイ素 1.00wt%以下

マンガ 2.00wt%以下

イオウ 0.030wt%以下

炭素 0.08wt%以下

リン 0.045wt%以下

鉄 残部

9. ロックナット、皿小ねじ

(種類) ステンレス鋼

(JIS G4303 SUS304)

(組成) 3.押え板付プレナムスプリング

(1)押え板に同じ

10. スペーサタイロッド回転防止ねじ

(種類) ステンレス鋼

(JIS G4303 SUS304)

(組成) 3.押え板付プレナムスプリング

(1)押え板に同じ

<p>燃料体の構造および重量</p>	<p>1. 燃料体構造の概要</p> <p>燃料体は、燃料要素28本、スペーサタイロッド4本、スペーサ12個、上部および下部タイプレート各1個により構成される。燃料要素は、内層に4本、中間層に8本および外層に16本、同心円上に配置される。</p> <p>各燃料要素は、ディッシュおよびチャンファを施したウラン・プルトニウム混合酸化物ペレットのスタックをSn-Fe-Cr-Ni系ジルコニウム合金製の燃料被覆材にヘリウム雰囲気中で封入したものである。燃料スタックの上部および下部には、それぞれプレナム部が設けてあり、下部プレナムには、アルミナ断熱ペレットを介して押え板付下部プレナムスプリングが設けられ、燃料スタックをささえている。また、上部プレナムには二酸化ウラン断熱ペレットとアルミナ断熱ペレットを介して、押え板付上部プレナムスプリングが設けられていて、輸送時等のスタックの移動を防いでいる。</p> <p>1組のスペーサタイロッドは、13本のスペーサタイロッド部品をスペーサのタイロッド支持リング部でねじ止めして連結する構造となっており、中間層と外層の間に位置する4組のスペーサタイロッドによって12個のスペーサを所定の位置に支持している。それぞれのスペーサタイロッド部品には、中</p>
--------------------	---

空管の両端にねじを切った端栓が溶接されており、その中空管の上部および下部には冷却水が流れ込むような穴を設けている。さらに、スペーサタイロッドは下部タイプレートにねじ込みで固定され、上部タイプレートには逆ねじを設け、回転が防止される構造となっている。

28本の燃料要素は、上部および下部タイプレートと12個のスペーサによって支持されており、そのうち中間層のタイロッド燃料要素8本は、上部および下部タイプレートにロックナットによりねじ止めされ、燃料体全体を固定している。ロックナットは、タイロッド燃料要素の端栓部に設けたV溝部にかしめることにより、回転による脱落を防止している。

スペーサは、スペーサのリング素子の $120^\circ$ の間隔をなす3方向の突起、すなわち2方向の固定突起と1方向の板ばね型突起によって、それぞれの燃料要素を支持している。これによって燃料要素相互の位置を保持し、十分な冷却水流路断面積を確保している。さらに燃料要素支持部およびスペーサ支持部は、炉内使用条件における燃料要素の熱膨張、照射成長による軸方向伸びおよびスペーサタイロッドと燃料要素の熱膨張差を吸収できる構造となっている。

燃料体は圧力管内に1体ずつ下方より装荷されて

使用されるため、上部および下部タイププレートの円周上に、各々1個のリング状案内リングばねとセンタリングばねにより構成される案内ばねが設けられている。この案内ばねは、燃料体の圧力管内での偏心を防止するとともに振動を吸収し、かつ燃料交換時のガイドとしての機能を有する。

## 2. 燃料体の全重量、寸法

イ) 燃料体の全重量 約 2 2 5 kg/体

ロ) 燃料材 約 1 7 4 kg/体

### ハ) 燃料体の寸法

全長 4, 3 8 8 mm

外径 (案内リングばね部) 1 1 9 mm

## 3. 各部品の重量、寸法、数量

### 3.1 燃料要素

イ) 総重量 約 7. 6 kg

燃料材重量 約 6. 2 kg

### ロ) 寸法

長さ 4, 0 4 5 mm

有効長さ 3, 7 0 0 mm

ペレット径 1 4. 4 mm

ペレット長さ 1 8 mm

燃料被覆材外径 1 6. 4 6 mm

燃料被覆材内径 14.70 mm

燃料被覆材肉厚 0.88 mm

プレナム体積 34.9 cm<sup>3</sup>

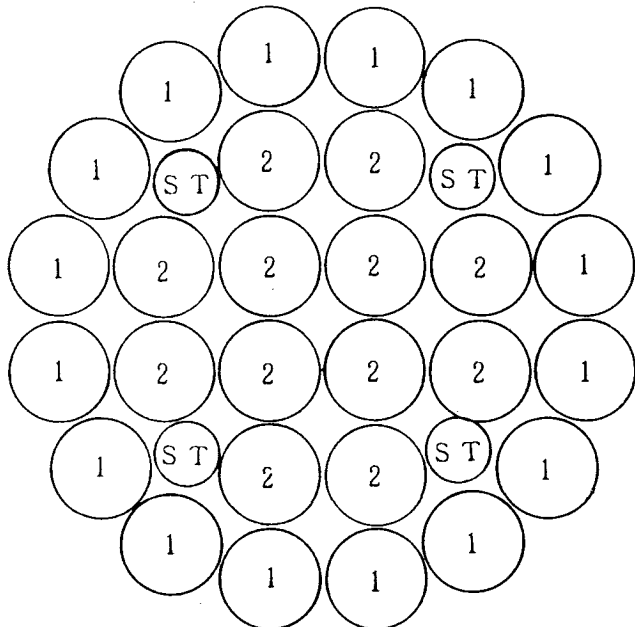
初期ヘリウム圧力 1.0 kg/cm<sup>2</sup>・a

ハ) 種類および数量

- 燃料要素の種類および燃料体当りの数量

燃料要素タイプ	本数	濃縮度(wt%)
1	16	1.84
2	12	2.27

- 燃料要素の配列



注) STはスペーサタイロッドを意味する。



### 3.2 スペーサ

イ) 重量 約0.15 kg

#### ロ) 寸法

外径 116.7 mm

高さ 25 mm

#### リング素子配列中心径

外層リング素子	95.14 mm
中間層リング素子	59.10 mm
内層リング素子	26.43 mm
スペータイロッド支持リング	68.81 mm

#### リング素子外径

外層リング素子	18.56 mm
中間層リング素子	18.69 mm
内層リング素子	18.69 mm
スペータイロッド支持リング	12.18 mm

ハ) 数量 燃料体当たり12個

### 3.3 上部および下部タイプレート

#### イ) 重量

上部タイプレート 約2.3 kg

下部タイプレート 約3.3 kg

#### ロ) 寸法

##### 上部タイプレート

外径 115 mm

全高 145 mm

高さ (胴部) 8 0 mm

下部タイププレート

外径 1 1 4 mm

高さ 1 7 3 mm

ハ) 数 量

上部タイププレート 燃料体当たり 1 個

下部タイププレート 燃料体当たり 1 個

### 3. 4 スペーサタイロッド

イ) 重 量 約 1. 2 kg

ロ) 寸 法

外径 9 mm

肉厚 1. 5 mm

長さ 4, 1 3 2 mm

ハ) 数 量 燃料体当たり 4 組

〔	上部用	1 本 / 組
	中間部用	1 1 本 / 組
	下部用	1 本 / 組

燃料体を使用する発電所の名称および所在地ならびに原子炉の型式および施設番号	発電所の名称 動力炉・核燃料開発事業団 新型転換炉ふげん発電所 所在地 福井県敦賀市明神町3番地 原子炉の型式 重水減速沸騰軽水冷却型 最高使用温度 296℃ 最高使用圧力 8.3 kg/cm <sup>2</sup> ・a
---------------------------------------	--

(備考) 燃料体を製作する事業所の名称および所在地

名称 動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所  
 所在地 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33番地

ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料体製造工程表 (第18回取替用)

年度 工程	2												3												4				
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9					
ペレット																													
燃料被覆材																													
燃料要素																													
その他部材																													
燃料体																													
出荷・装荷																									△ △ △				

(18体)

補 足 說 明 資 料

燃 料 体 主 要 仕 様 比 較 表

燃料体主要仕様比較表

項目	申請番号 (取替燃料体)	49動燃 (新型) 046 (初装荷)	53動燃 (新型)27 (1~3回 取替)	54動燃 (核)50 4回取替	55動燃 (核)15 5回取替	55動燃 (核)33 6回取替	56動燃 (核)16 6回(2)取替
1. 燃料パレット							
(1) ウラン・プルトニウム 混合酸化物パレット							
外径 (mm)	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40
高さ (mm)	18	18	18	18	18	18	18
高密度 (理論密度比)	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0
核分裂分質量							
高濃縮度 (wt%)	約1.0*	約1.0*	約1.0*	約1.0*	約2.0*	約2.0*	約2.0*
低濃縮度 (wt%)	約0.7*	約0.7*	約0.7*	約0.7*	約1.5*	約1.5*	約1.5*
(2) 二酸化ウランパレット (天然)							
外径 (mm)	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4
高さ (mm)	10	10	10	10	10	10	10
高密度 (理論密度比)	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0
2. 燃料要素							
燃料有効長 (mm)	3700	3700	3700	3700	3700	3700	3700
長尺燃料要素	—	—	—	—	—	—	—
セグメント燃料要素	—	—	—	—	—	—	—
上部短尺燃料要素	—	—	—	—	—	—	—
中間短尺燃料要素	—	—	—	—	—	—	—
下部短尺燃料要素	—	—	—	—	—	—	—
燃料要素重量 (kg)	約7.6	約7.6	約7.6	約7.6	約7.6	約7.6	約7.6
長尺燃料要素	—	—	—	—	—	—	—
セグメント燃料要素	—	—	—	—	—	—	—
S1, S2	—	—	—	—	—	—	—
S3	—	—	—	—	—	—	—
プレナム長さ	251	251	251	251	251	251	251
長尺燃料要素	24	24	24	24	24	24	24
上部 (mm)	—	—	—	—	—	—	—
下部 (mm)	—	—	—	—	—	—	—
セグメント燃料要素	—	—	—	—	—	—	—
上部短尺燃料要素	—	—	—	—	—	—	—
中間短尺燃料要素	—	—	—	—	—	—	—
下部短尺燃料要素	—	—	—	—	—	—	—
3. 燃料体							
燃料要素本数 (本)	28	28	28	28	28	28	28
燃料要素束外径径 (mm)	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6
スペーサ							
スペーサ個数 (個)	12	12	12	12	12	12	12
外径 (mm)	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7	116.7
高さ (mm)	25	25	25	25	25	25	25
重量 (kg)	約0.15	約0.15	約0.15	約0.15	約0.15	約0.15	約0.15
上部および下部タイプレート							
上部タイプレート							
外径 (mm)	115	115	115	115	115	115	115
全高さ (mm)	145	145	145	145	145	145	145
高さ (胴部) (mm)	80	80	80	80	80	80	80
重量 (kg)	約2.3	約2.3	約2.3	約2.3	約2.3	約2.3	約2.3
下部タイプレート							
外径 (mm)	114	114	114	114	114	114	114
高さ (mm)	173	173	173	173	173	173	173
重量 (kg)	約3.3	約3.3	約3.3	約3.3	約3.3	約3.3	約3.3
燃料体全長 (mm)	4388	4388	4388	4388	4388	4388	4388
燃料体重量 (kg)	約2.25	約2.25	約2.25	約2.25	約2.25	約2.25	約2.25
燃料材重量 (kg)	約1.74	約1.74	約1.74	約1.74	約1.74	約1.74	約1.74

備考：\*プルトニウム富化率

燃料体主要仕様比較表(続き)

項目	申請番号 (取替燃料体)	57動燃 (核)34 7回取替	58動燃 (核)048 7回(2) 8回取替	59動燃 (核)026 8回取替 (36本)	59動燃 (核)071 10回取替	60動燃 (核)074 (セグメント)	61動燃 (核)012 12回取替
1. 燃料ペレット							
(1) ウラン・プルトニウム 混合酸化物ペレット							
外径(mm)	14.40	14.40	12.40	14.40	14.40	12.40	14.40
高さ(mm)	18	18	13	18	18	13	18
密度(理論密度比)	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0
核分裂分質量							
高濃縮度(wt%)	約2.0*	2.27	3.21	2.27	2.27	3.71	2.27
低濃縮度(wt%)	約1.5*	1.84	1.71	1.84	1.84	2.21	1.84
(2) 二酸化ウランペレット (天然)							
外径(mm)	14.4	14.4		14.4	14.4		14.4
高さ(mm)	10	10		10	10		10
密度(理論密度比)	95.0	95.0		95.0	95.0		95.0
2. 燃料要素							
燃料有効長(mm)							
長尺燃料要素	3700	3700	3647	3700	3700	3647	3700
セグメント燃料要素							
上部短尺燃料要素						752	
中間短尺燃料要素						365	
下部短尺燃料要素						660	
燃料要素重量(kg)							
長尺燃料要素	約7.6	約7.6	約5.7	約7.6	約7.6	約5.7(中実) 約5.3(中空)	約7.6
セグメント燃料要素							
S1, S2						約5.1	
S3						約5.2	
プレナム長さ							
長尺燃料要素							
上部(mm)	251	251	355	251	251	355	251
下部(mm)	24	24	30	24	24	30	24
セグメント燃料要素							
上部短尺燃料要素						355(上部)	
中間短尺燃料要素						92(上部)	
下部短尺燃料要素						92(上部)	
燃料要素重量(kg/cm <sup>2</sup> ・a)						30(下部)	
プレナム封入ガス	He, 1.0	He, 1.0	He, 3.0	He, 1.0	He, 1.0	He, 3.0	He, 1.0
燃料被覆材外径(mm)	16.46	16.46	14.50	16.46	16.46	14.50	16.46
燃料被覆材内径(mm)	14.70	14.70	12.70	14.70	14.70	12.70	14.70
燃料被覆材肉厚(mm)	0.8(最小)	0.8(最小)	0.82(最小)	0.8(最小)	0.8(最小)	0.82(最小)	0.8(最小)
ライナ層厚さ(mm)						0.075	
3. 燃料体							
燃料要素本数(本)	28	28	36	28	28	36	28
燃料要素束外径(mm)	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6	111.6
スペーサ							
スペーサ個数(個)							
外径(mm)	12	12	12	12	12	12	12
高さ(mm)	116.7	116.7	117.2	116.7	116.7	117.2	116.7
重量(kg)	25	25	25	25	25	25	25
上部および下部タイプレート	約0.15	約0.15	約0.2	約0.15	約0.15	約0.2	約0.15
上部タイプレート							
外径(mm)	115	115	115	115	115	115	115
全高さ(mm)	145	145	130	145	145	130	145
高さ(胴部)(mm)	80	80	70	80	80	70	80
重量(kg)	約2.3	約2.3	約2.5	約2.3	約2.3	約2.5	約2.3
下部タイプレート							
外径(mm)	114	114	114	114	114	114	114
高さ(mm)	173	173	173	173	173	173	173
重量(kg)	約3.3	約3.3	約3.3	約3.3	約3.3	約3.3	約3.3
燃料体全長(mm)	4388	4388	4398	4388	4388	4398	4388
燃料体重量(kg)	約22.5	約22.5	約21.5	約22.5	約22.5	約21.0	約22.5
燃料材重量(kg)	約17.4	約17.4	約16.4	約17.4	約17.4	約15.6	約17.4

備考：\*プルトニウム富化率





燃料体主要仕様比較表(続き)

項目	申請番号 (取替燃料体)	6.3 動燃 (核)113 ガドリニア燃料体	
		タイプI	タイプII
1. 燃料ペレット			
(1) ウラン・プルトニウム 混合酸化物ペレット			
外径(mm)	12.40	12.40	12.40
高さ(mm)	13.0	13.0	13.0
密度(理論密度比)	95.0	95.0	95.0
核分裂分質量 (外層)			
高濃縮度(wt%)	3.0	3.0	2.4
低濃縮度(wt%)	2.6	2.6	2.1
(中間層及び内層)			
高濃縮度(wt%)	5.0	5.0	4.8
低濃縮度(wt%)	4.3	4.3	4.1
(2) ガドリニア入り 二酸化ウランペレット			
外径(mm)	12.40	12.40	12.40
高さ(mm)	13.0	13.0	13.0
密度(理論密度比)	95.0	95.0	95.0
核分裂分質量			
高濃縮度(wt%)	3.8	3.8	3.6
低濃縮度(wt%)	3.4	3.4	3.3
ガドリニウム濃度			
高濃度(wt%)	1.4	1.4	1.2
低濃度(wt%)	0.8	0.8	0.7
2. 燃料要素			
燃料有効長(mm)	3640	3640	3640
長尺燃料要素			
燃料要素重量(kg)	約5.7	約5.7	約5.7
長尺燃料要素			
プレナム長さ			
長尺燃料要素	357	357	357
上部(mm)	30	30	30
下部(mm)			
プレナム封入ガス(kg/cm <sup>2</sup> ・a)	He、3.0	He、3.0	He、3.0
燃料被覆材外径(mm)	14.50	14.50	14.50
燃料被覆材内径(mm)	12.70	12.70	12.70
燃料被覆材肉厚(最小)(mm)	0.90	0.90	0.90
ライナ層厚さ(mm)	0.70	0.70	0.70
3. 燃料体			
燃料要素本数(本)	36	36	36
燃料要素束外径円径(mm)	111.6	111.6	111.6
スペーサ			
スペーサ個数(個)	12	12	12
外径(mm)	117.2	117.2	117.2
高さ(mm)	25	25	25
重量(kg)	約0.2	約0.2	約0.2
上部および下部タイププレート			
上部タイププレート			
外径(mm)	115	115	115
全高さ(mm)	130	130	130
高さ(胴部)(mm)	70	70	70
重量(kg)	約2.5	約2.5	約2.5
下部タイププレート			
外径(mm)	114	114	114
高さ(mm)	173	173	173
重量(kg)	約3.3	約3.3	約3.3
燃料体全長(mm)	4393	4393	4393
燃料体重量(kg)	約215	約215	約215
燃料材重量(kg)	約164	約164	約164

# 新 型 転 換 炉 ふ げ ん 発 電 所

## 燃 料 体 設 計 認 可 申 請 書 添 付 書 類

添 付 書 類 〔Ⅰ〕： 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐腐食性その他の性能に関する説明書

添 付 書 類 〔Ⅱ〕： 燃料体の強度計算書

添 付 書 類 〔Ⅲ〕： 燃料体の構造図

添 付 書 類 〔Ⅳ〕： 燃料体加工のフローシート

参 考 資 料 〔Ⅰ〕： 品質保証計画に関する説明書

参 考 資 料 〔Ⅱ〕： 製造業者一覧表

参 考 資 料 〔Ⅲ〕： 原子炉設置（変更）許可，工事計画認可および燃料体設計認可の経緯

添付書類〔Ⅰ〕

燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐腐食性

その他の性能に関する説明書

# 目 次

I	概 要	1
II	設計基準および条件	2
	1. 設計基準	2
	2. 設計条件	3
	3. 設計方法	5
III	燃料の構造および仕様	13
	1. 燃料諸元	13
	2. 燃料材	15
	3. 燃料要素	17
	4. 燃料体	20
IV	耐熱性	26
	1. 燃料要素の熱的挙動	26
	(1) 燃料要素の温度分布	26
	(2) F P ガスの放出とプレナム圧力	35
	(3) ペレットのスエリングおよび熱膨張	36
	(4) 被覆管の歪	38
	2. 使用材料の耐熱性	43
V	耐放射線性	48
VI	耐腐食性	62
	1. 冷却材による腐食	62
	2. 水素吸収	64
	3. フレッキング腐食	68
VII	その他の性能	70
	1. 腐食生成物 (クラッド)	70

2. 熱的余裕の検討 .....	70
VIII 参考文献 .....	72

## I 概要

新型転換炉ふげん発電所（以下「ふげん」という）の燃料体は圧力管内に各1体ずつ下方より装荷され加圧状態で沸騰している軽水中で使用される。

「ふげん」の炉心は標準燃料体、照射用36本燃料体（最大4体）、照射用セグメント燃料体（最大2体）および照射用ガドリニア燃料体（最大6体）の合計220体と圧力管材料の監視試験片の照射機能を満たす特殊燃料体4体によって構成される。

初期炉心では標準燃料体として、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料体96体を中央域に装荷し、二酸化ウラン燃料体124体を周辺域に装荷した。取替用の標準燃料体は初装荷用標準燃料体と同一構造の燃料体を使用する。基本的には取替用の標準燃料体としてウラン・プルトニウム混合酸化物燃料体は炉心中央域に使用し、二酸化ウラン燃料体は炉心周辺域に使用する。

標準燃料体は、ウラン・プルトニウム混合酸化物ペレットまたは二酸化ウランペレットをSn-Fe-Cr-Ni系ジルコニウム合金製（以下「ジルカロイ-2」という）燃料被覆材（以下「被覆管」という）で被覆した燃料要素28本で構成され、内層に4本、中間層に8本、外層に16本が同心円上に配置されている。これら標準燃料体の設計は次章に述べる設計基準を満足し、かつ「ふげん」の性能、特に炉心性能と発電所設計と矛盾のないように決定されている。

この設計の過程においては、既存の軽水炉燃料の技術を適切に採り入れ、かつ「ふげん」燃料に特有な問題については、大洗工学センターの重水臨界実験装置（DCA）による実規模の炉物理実験、流動伝熱試験装置（HTL）および部品機器試験装置（CTL）による熱水力試験、各種燃料の試作および照射試験の蓄積による成果を用いている。

## II 設計基準および条件

燃料設計はプラントの性能、特に炉心性能および設備全体の設計と相互に矛盾なく調和され、かつ安全性、健全性および信頼性が燃料の寿命期間中維持されるよう定められた設計基準に基づいている。

### 1. 設計基準

炉心および燃料の設計基準は、プラント機器、核計装、原子炉保護系等と相まって、通常の運転時および単一の誤作動あるいは誤操作によって生じる過渡状態 (up-set condition) においても燃料破損が生じないようにすることである。

このために、次に述べる熱的および機械的設計基準を満たすように設計している。

#### (1) 熱設計基準

- ① 限界熱流束 (CHF) に関しては、大洗工学センターの流動伝熱試験装置 (HTL) のデータに基づく関係式を用い、定格出力状態で、この CHF と熱流束との比 (CHF R) が炉心内のいかなる点でも、1.9 以上であること。
- ② 通常の運転時および前述の過渡状態において、ペレットの中心温度は融点未満であること。

#### (2) 機械設計基準

- ① 燃料の寿命期間中にわたって被覆管の円周方向平均塑性歪が 1% 以下であること。
- ② 被覆管は、ペレットによる支持および内圧を無視しても、通常の運転状態および前述の過渡状態において外圧に耐え座屈を起さないこと。

また、外圧を無視しても被覆管は通常の運転状態および前述の過渡状態において F P ガス等による内圧により破損しないこと。

- ③ 通常の運転状態および前述の過渡状態において、照射効果、腐食、変動荷重等の燃料の寿命期間中に与える影響を考慮しても、被覆管の著しい損傷、過度のフレッキング腐食等を生じないこと。
- ④ 被覆管の応力については、ASME Sec. IIIに準拠して応力の分類を行ない、その結果が基準を満していること。
- ⑤ 通常の運転状態および前述の過渡状態において予想される出力変動のもとで、被覆管は疲労による破損を起さないこと。

## 2. 設計条件

燃料の設計の基本は、原子炉の定格熱出力 557 MW t が通常の運転条件下で達成されることである。

炉心内の熱出力分布は時間的にも空間的にも変化するので、もっとも厳しい条件を選んで燃料設計を行う。

### (1) プラント側条件 (定格時最大発熱チャンネル)

① 燃料体発熱量 (MW)	3.93
② 冷却材流量 (kg/sec)	8.6
③ 冷却材入口温度 (°C)	279
④ 冷却材出口温度 (°C)	286
⑤ 冷却材出口蒸気重量率 (wt%)	2.6
⑥ 運転圧力 (kg/cm <sup>2</sup> G)	7.2
⑦ 冷却材水質	
pH	5.5~8.5 (25°C)
電導度 (μS/cm)	1.0以下
SiO <sub>2</sub> (ppm)	2以下
Cl <sup>-</sup> (ppm)	0.2以下
溶存酸素 (ppm)	0.4以下



$\text{BO}_3^{--}$ (ppm)	2.0以下 (B量)
不溶性不純物 (ppm)	1.0以下

(2) 核的条件

① 最大線出力密度およびピーキング係数

	寿命初期	寿命中期	寿命末期
最大線出力密度 (定格時出力)	5 7 4 W/cm	4 9 2 W/cm	4 2 7 W/cm
軸方向出力 ピーキング係数	1.0 7	1.0 7	1.0 7
局部出力 ピーキング係数	1.1 8	1.1 0	1.0 8

② 燃焼率

燃料体最高 (MWd/t)	2 0, 0 0 0
燃料要素最高 (MWd/t)	2 3, 0 0 0
ペレット最高 (MWd/t)	2 9, 0 0 0

③ 運転有効日数 (EFPD)

8 8 6 日

④ 炉内滞在日数

1, 5 0 0 日 (但し冷温停止  
は含まない)

⑤ 燃焼に伴う出力履歴

本燃料設計では定格時の燃料体出力履歴として図Ⅱ-1に示す値を用いた。

(3) その他の条件

① 圧力管を含む設計地震力

炉心圧力管は内径117.8mmのZr-2.5wt%Nb製管であり、地震時には燃料体を内蔵した圧力管の最大応答加速度を考慮して動的解析を実施する。

② 過渡状態 (up-set condition)

燃料設計で考慮する通常状態および過渡状態はプラント側条件より次の通りとする。

状態	条件 熱出力 (%)	炉内圧力 (kg/cm <sup>2</sup> G)	備考
通常状態	100	72.0	定格運転
過渡状態 (圧力高)	103	82.0	タービントリップ (バイパス弁不作動) 負荷遮断 (バイパス弁 不作動) * 1
過渡状態 (出力高)	114	73.2	出力運転中制御棒引き抜き * 2

\* 1 ; タービントリップ又は、負荷遮断により原子炉スクラムされるが、ここでは蒸気ドラム圧力高によるスクラムとした。

\* 2 ; 定格出力運転中に、誤操作により制御棒が引抜かれた場合。

なお、この場合、制御棒引き抜き阻止機構により、114%以上の出力上昇は阻止される。

### 3. 設計方法

燃料の性能解析および強度解析は図Ⅱ-2に示す計算体系により実施する。この計算体系の基本となるのは、設計条件（炉心およびプラント条件）、燃料仕様、核熱水力計算結果等を入力として燃料要素寿命中の燃焼挙動を追跡計算し、燃料温度、内圧等の基本的な性能特性を解析することである。これらの結果を用いて実施する応力解析等の強度解析の詳細については添付書類〔Ⅱ〕に記載するので、ここでは燃料挙動解析の方法について説明する。

#### (1) 解析モデル

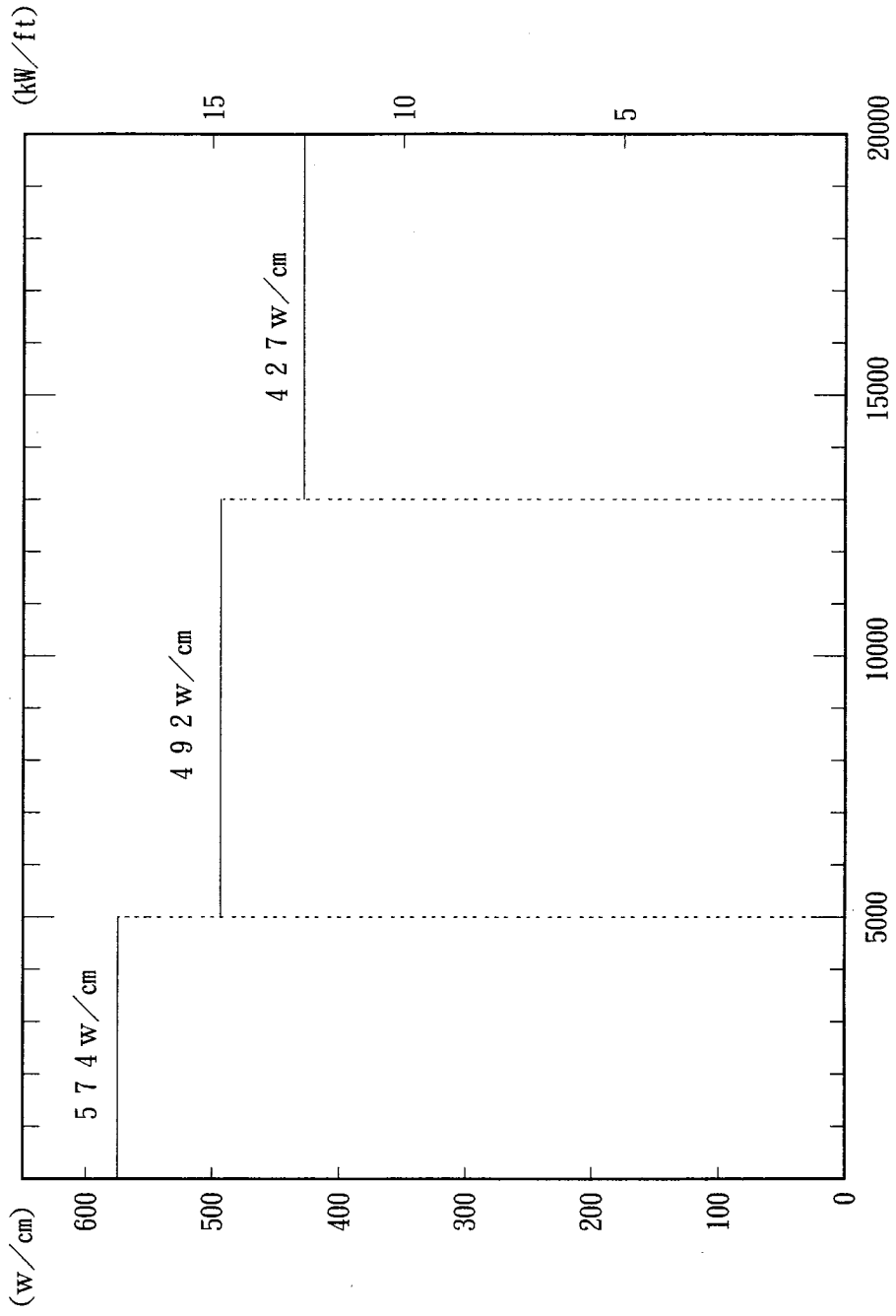
燃料要素の総合的な挙動解析は、ATR燃料設計コードを使用して実施する。燃料要素は、被覆材、ペレット、スプリングを含むプレナムから構成されるとし、ペレット有効長を軸方向および半径方向に分割して

計算する。出力分布はステップ関数の形で入力され、各時間ステップ内では出力一定として計算する。

計算の流れは図Ⅱ－3に示すように照射時間を追いつつ軸方向各メッシュごとに燃料温度、ギャップコンダクタンス、F Pガス放出、ペレットおよび被覆管の変形等を計算し、ついで燃料要素全長に関係したプレナム体積、内圧等を計算する。このような計算を燃料寿命期間中にわたって解析する。

(2) 主要入力データおよび物性値等

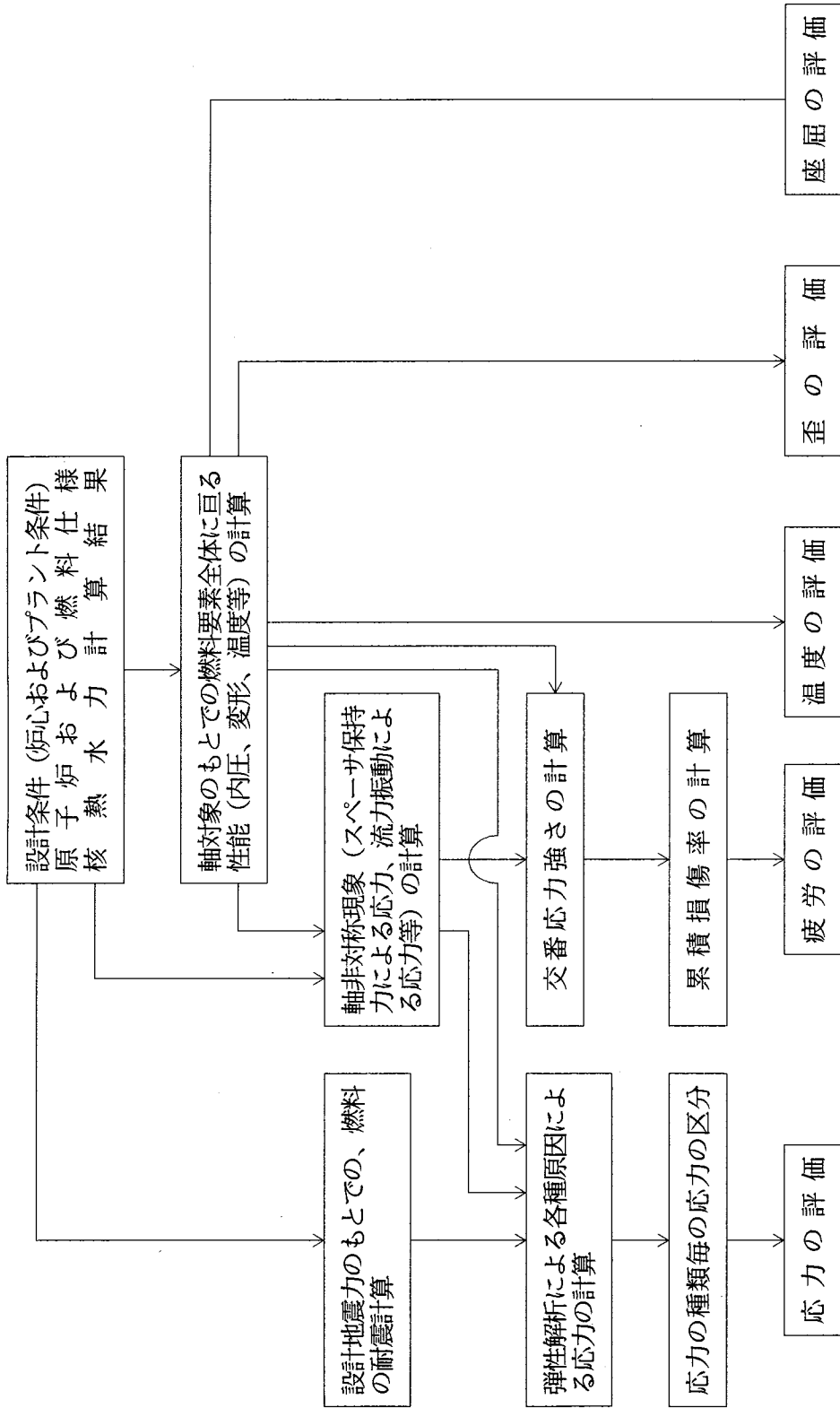
計算に使用する主要な入力物性値を表Ⅱ－1に示す。計算結果は以下の各章ならびに添付書類〔Ⅱ〕に示すとおりである。



燃料体最高燃焼度 (MWd / t)

図II-1 燃料の最大線出力密度の経時変化 (定格時出力)

ペレット最大線出力密度



図Ⅱ-2 燃料の設計計算体系

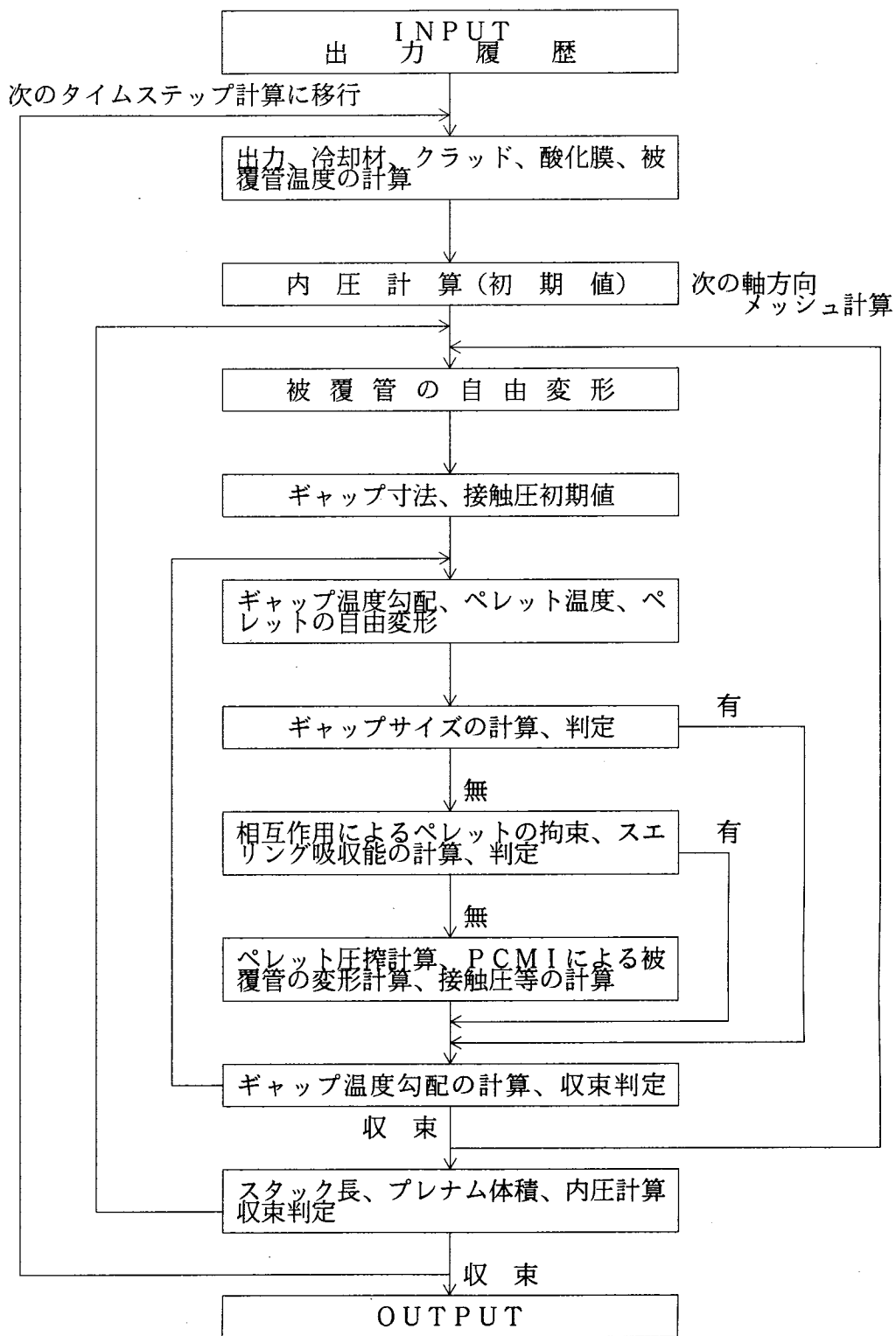


図 II - 3 燃料挙動解析の計算のフロー

表II-1 主要入力データおよび物性値等

項目	計算式等	引用文献
1. 被覆管表面熱伝達係数	$h_{film} = 1.22 (q'')^{3/4} \exp(P/63.3)$ $q'' ; \text{被覆管表面での熱流束 (kcal/hr}\cdot\text{m}^2)$ $P ; \text{冷却材圧力 (kg/cm}^2)$	Jens-Lottesの式 ANL-4627 (1951)
2. クラッドの熱伝導率および付着速度	$\text{クラッドの熱伝導率 } 0.014 \text{ W/cm}\cdot\text{C}$ $\text{付着速度 } 0.01 \text{ mm/年}$	CNA/ANS Topical Meeting, (1975) etc.
3. 酸化膜の熱伝導率および形成速度	$\text{酸化膜の熱伝導率 } 0.014 \text{ W/cm}\cdot\text{C}$ $\text{形成速度 } 0.01 \text{ mm/年}$	Nucl. Eng., 21 253 (1964) Nucl. Eng. & Design 21, 212 (1972) etc.
4. 被覆管の熱伝導率	$K_{clad} = 0.016 [7.71 + 6.10 \times 10^{-3} \times T + 2.9 \times 10^{-6} T^2]$ $K_{clad} ; \text{W/cm}\cdot\text{C}$ $T ; \text{C}$	WCAP-3269-41 (1965)
5. ペレットの熱伝導率	$K_{fuel} = \frac{38.24}{T+402.4} + 6.125 \times 10^{-13} (T+273)^3$ $K_{fuel} ; \text{W/cm}\cdot\text{C}$ $T ; \text{C}$	Docket-50331
6. ギャップ熱伝導率	$h_{gap} = \phi \left( \frac{K}{y+G} + hr \right) + \alpha \cdot P$	修正 Ross & Stouteの式 CRFD-1075, (1962)

表II-1 主要入力データおよび物性値等 (続き)

項目	計算式等	引用文献
	<p>ここで <math>h_r</math> ; 輻射による熱伝導率  <math>K</math> ; ガスの熱伝導率  <math>\gamma</math> ; 半径ギャップサイズ  <math>G</math> ; 固体-気体境界での温度ステップ  <math>\alpha</math> ; 固体-固体接触熱伝達係数  <math>P</math> ; 接触圧  <math>\phi</math> ; 補正係数</p>	
7. ペレット熱膨張係数	$\alpha_{rue1} = 9.61 \times 10^{-6} + 1.57 \times 10^{-9} T$ $\alpha_{rue1}$ ; $^{\circ}C^{-1}$ $T$ ; $^{\circ}C$	AECL-2143, (1964)
8. 被覆管の熱膨張係数	$\alpha_{clad} = 5.675 \times 10^{-6} + 1.7 \times 10^{-9} T$ $\alpha_{clad}$ ; $^{\circ}C^{-1}$ $T$ ; $^{\circ}C$	WAPD-ZH-9, (1958)
9. 被覆管のヤング率	$E = 1 \times 10^4 (1 - 6.36 \times 10^{-4} T)$ $E$ ; $kg/mm^2$ $T$ ; $^{\circ}C$	WCAP-3269-4L, (1965)
10. 被覆管のポアソン比	$\nu = 0.325 (1 + 6.59 \times 10^{-4} T)$ $T$ ; $^{\circ}C$	WCAP-3269-4L, (1965)
11. 冷却材による一様腐食による肉厚減少	$0.01 \text{ mm/年}$	J. Nucl. Mater., <u>20</u> , 9 (1968) etc.



表II-1 主要入力データおよび物性値等 (続き)

項 目	計 算 式 等	引 用 文 献
12. 内圧計算の (1) FPガス生成率 (2) FPガス放出率	$1.35 \times 10^{-3} \text{ gmol/MWd}$ 1, 650°C以上で 1.00% 1, 650°C未満で 4%	GEAP-4418, (1964) Nucl. Eng. & Design <u>21</u> , 167(1972)
13. UO <sub>2</sub> のスエリ グ率	正味スエリング率 $0.4\% \Delta V / V / 10^{20}$ fissions/cm <sup>3</sup> 外部拘束状態での 外部スエリング率 $0.16\% \Delta V / V / 10^{20}$ fissions/cm <sup>3</sup> 内部ポイド完全吸収後 $0.4\% \Delta V / V / 10^{20}$ fissions/cm <sup>3</sup>	J. Nucl. Mat., 68, 360(1977) WAPD-T-1455, (1962) etc.
14. 被覆管と円周方向 クリーブ歪 ( $\epsilon$ )	$\epsilon = 1.869 \times 10^{-7} t^{0.085} \sigma^a \exp \left\{ \frac{1.19(T-300)}{T+273} \right\}$ $+ 1.545 \times 10^{-14} t \sigma^{1.225} \exp \left\{ \frac{-Q}{R(T+273)} \right\} \phi^{0.85}$ t ; 時間 (hr) $\sigma$ ; 円周方向応力 (kg/mm <sup>2</sup> ) T ; 温度 (°C) $\phi$ ; 高速中性子束 (> 1 MeV, n/cm <sup>2</sup> ·sec) Q ; 活性化エネルギー (= 14,000 cal/mol) R ; ガス定数 (= 1.985 cal/mol·K) a ; 定数	J. Nucl. Mater., <u>41</u> , 327 (1971)

### Ⅲ 燃料の構造および仕様

#### 1. 燃料諸元

燃料体の主要諸元は表Ⅲ－１に、燃料体構造は添付書類〔Ⅲ〕に示す通りである。

表Ⅲ－１ 燃料諸元

1) ペレット	
① ウラン・プルトニウム 混合酸化物ペレット	
外 径	14.40 ± 0.03 mm
長 さ	1.8 ± 1 mm
形 状	ディッシュ、チャンファ付
密度 (理論密度比)	95.0 ± 2.0 %
ウラン濃縮度	0.71 ~ 0.90 wt %
プルトニウムフィサイル 富化率 (公称値)	高富化率 1.37 ~ 1.56 wt % (中間層・内層燃料要素)
	低富化率 0.94 ~ 1.13 wt % (外層燃料要素)
	高濃縮度 2.27 ~ 0.09 wt % (中間層・内層燃料要素)
	低濃縮度 1.84 ~ 0.08 wt % (外層燃料要素)
2) 燃料要素	
燃料有効長 (二酸化ウラン 焼結果いペレットを除く)	3,700 ± 5 mm
ペレット-被覆管ギャップ	0.3 mm
プレナム長さ (上部)	251 ± 13 mm
(下部)	24 mm
プレナム封入ガス	He (1 kg/cm <sup>2</sup> ・a)

表Ⅲ－１ 燃料諸元（続き）

被覆管外径	1 6. 4 6 ±0. 0 8 mm
被覆管内径	1 4. 7 0 ±0. 0 5 mm
被覆管肉厚	0. 8 mm（最小）
3) 燃料体	
燃料要素数	2 8 本 （うち、8 本はタイロッド燃料要素）
燃料要素配列中心径	
外 層（1 6 本）	9 5. 1 4 mm
中間層（8 本）	5 9. 1 0 mm
内 層（4 本）	2 6. 4 3 mm
燃料要素ギャップ（公称値）	
外 層	2. 1 mm（最小）
中間層	2. 2 mm（最小）
内 層	2. 2 mm
燃料要素束外接円径	1 1 1. 6 mm
スペーサ个数	1 2 個
スペーサタイロッド本数	4 本
スペーサタイロッド外径	9 ±0. 0 4 mm（円管部）
燃料体全長	4, 3 8 8 ± $\frac{1}{8}$ mm
燃料体重量	約 2 2 5 kg

なお、表Ⅲ－１に示す核分裂物質量は次の通り定義する。

$$\text{核分裂物質量 (w t \%)} = \frac{({}^{239}\text{Pu} + {}^{241}\text{Pu} + {}^{235}\text{U})}{\text{Pu 重量} + \text{U 重量}} \times 100 \text{ w t \%}$$

## 2. 燃料材

燃料体には機械混合、冷間成型および焼結することにより製造された円柱状ウラン・プルトニウム混合酸化物ペレットを使用する。

ウラン・プルトニウム混合酸化物ペレットは1.84ないし2.27wt%程度の核分裂物質質量であり、物性的には二酸化ウランペレットとほぼ同一とみなしうる。

ウラン・プルトニウム混合酸化物ペレットのペレット形状については、両端面にディッシュおよびチャンファを設ける。ディッシュは、ペレット内の径方向温度分布に基づく軸方向熱膨張差を吸収するため、端面中央部に球面状に設けてある。チャンファは、炉内使用下で有害な影響をおよぼすペレットコーナー部のかげの発生を抑えることを主な目的として設ける。また、ペレットの高さと外径の比は燃料製造の容易さをも考慮して約1.3とした。

ウラン・プルトニウム混合酸化物ペレットの酸素対ウラン・プルトニウム比（以下「O/M比」という）は、燃料の化学的安定性の観点から、仕様として $2.00 \pm 0.03$ に定める。全不純物量は熱中性子吸収断面積が、ほう素等価濃度で4ppm相当以下に抑え、個々の不純物に関する規定量は表Ⅲ-2に示す仕様を満たすものとする。これらのうち、特にジルカロイ被覆管の健全性のうえで有害な影響をおよぼすと予想される弗素および塩素については、それぞれ25ppm以下とする。さらに全蒸発性不純物量は $60 \mu\text{l/g MO}_2$ 以下に抑え、そのうち水分については被覆管を密封する前に十分な乾燥を行ない $10 \mu\text{l/g MO}_2$ 以下とする。ペレット密度は、理論密度の95% ( $10.42 \text{ g/cm}^3$ )とする。

なお、再処理回収ウランを使用してウラン・プルトニウム混合酸化物ペレットを製造する場合においても、同等に製造可能である。

表Ⅲ-2 ペレット不純物

<u>元素名</u>	<u>制限量 (ppm)</u>
A l	≤ 4 0 0
A g	≤ 1 0
B	≤ 1.0
C a	≤ 2 0 0
C d	≤ 1.0
C	≤ 2 0 0
C l	≤ 2 5
C r	≤ 2 0 0
C u	≤ 5 0
F	≤ 2 5
F e	≤ 5 0 0
P b	≤ 1 0 0
M g	≤ 1 0 0
M o	≤ 3 0 0
N i	≤ 3 0 0
N	≤ 2 0 0
S i	≤ 4 0 0
S n	≤ 2 0
D y + E u + G d + S m	≤ 1.2

### 3. 燃料要素

#### (1) 被覆管

被覆管は、ジルカロイ-2製とし、材質はJIS H4751、Zr TN802Dの規格に準じたものであって、応力除去焼鈍をほどこした継目無し管である。

主な化学成分および不純物量は表Ⅲ-3に示す通りとする。

表Ⅲ-3 ジロカロイ-2の合金成分および不純物

<u>合金成分</u>	<u>規格値 (wt%)</u>
Sn	1.20~1.70
Fe	0.07~0.20
Cr	0.05~0.15
Ni	0.03~0.08
Fe+Cr+Ni	0.18~0.38
O	0.09~0.15
Zr	残部
<u>不純物</u>	<u>規格値 (ppm)</u>
Al	≤ 75
B	≤ 0.5
Cd	≤ 0.5
C	≤ 270
Co	≤ 20
Cu	≤ 50
Hf	≤ 100
H	≤ 25
Mn	≤ 50
N	≤ 80
Si	≤ 120
Ti	≤ 50
W	≤ 100
U	≤ 3.5

被覆管の寸法および機械的性質に関する仕様は表Ⅲ－４に示す通りである。

表Ⅲ－４ 被覆管の寸法および機械的性質

<u>寸 法</u>		
外 径		1 6. 4 6 $\pm$ 0. 0 8 mm
内 径		1 4. 7 0 $\pm$ 0. 0 5 mm
肉 厚		0. 8 0 mm (最小)
真直度		1 / 1, 2 0 0
<u>機械的性質</u>		
	常 温	3 4 3℃
引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	4 9 以上	2 9 以上
耐 力 (kg/mm <sup>2</sup> )	4 2 以上	2 3 以上
伸 び (%)	2 0 以上	2 0 以上

(2) 燃料要素の種類

燃料要素の種類は表Ⅲ－５に示す通りである。標準燃料体の燃料要素は、中間層に配置されるタイロッド燃料要素と内層および外層に配置されるフリーロッド燃料要素の２種類に分類されるが、両者は端栓形状を除いては同一仕様である。

(3) ペレット－被覆管のギャップ

ペレット－被覆管のギャップの大きさは、後述するギャップ熱伝達率と歪の評価に基づき0.3 mm (直径) とした。



表Ⅲ－５ 燃料要素の種類

燃 料 体	燃料要素の配列	フリーロッドおよびタイロッドの区別	核分裂物質質量
ウラン・プルトニウム混合酸化物	外 層（１６本）	フリーロッド	１．８４ｗｔ％
	中間層（８本）	タイロッド	２．２７ｗｔ％
	内 層（４本）	フリーロッド	２．２７ｗｔ％

(4) ガスプレナムその他

各燃料要素には燃料部上下、それぞれ長さ 24 mm の下部プレナムおよび長さ 251 mm の上部プレナムを設ける。これら上下の有効プレナム体積は合計 32 cm<sup>3</sup> である。これは燃料要素内に放出される F P ガスやペレット内の蒸発性不純物ガスによる燃料要素内圧が過度にならないようにするためである。

上部プレナムには燃料体輸送時および取扱い時のペレットの軸方向移行を防止するため、ステンレス鋼製の押え板付上部プレナムスプリングが設けられ、アルミナ断熱ペレットおよび二酸化ウラン断熱ペレットを介して燃料スタックを押えている。下部プレナムには析出硬化型ニッケル基合金製（以下「インコネル-X」という）の押え板付下部プレナムスプリングが設けられ、アルミナ断熱ペレットを介して燃料スタックをささえている。

4. 燃料体

燃料体は、28本の燃料要素から構成され、4本のスペーサタイロッドに支えられた12個のスペーサにより燃料体内の所定の位置におかれ、燃料要素ギャップを維持する。中間層に配置されるタイロッド燃料要素は、その上端および下端においてロックナットにより、それぞれ上部タイプレ

ートおよび下部タイプレートに連結される。燃料要素の上部端栓と上部タイプレートの間には、つる巻ばねが設けられており各燃料要素間の膨張差等による伸びの差を吸収できる構造となっている。

このような燃料体の構造強度は、主要部分について測定がなされており、地震時における燃料体と圧力管との衝突に際しても十分な強度を有することが確認されている。

(1) 燃料要素配列およびピッチの維持

燃料要素配列およびピッチの維持は次のような方法によって行なう。

- ① 燃料要素上下端栓は、精密に加工された上部および下部タイプレート端栓挿入孔に挿入されて横方向支持がなされる。
- ② 燃料要素自体の曲がりに関連して被覆管は、製造中において応力除去焼鈍を行ない、炉内使用中の残留応力の解放に基づく曲がりやを極力小さく抑えることとしている。
- ③ 燃料要素は12個のスペーサにより横方向に支えられ、燃料要素の曲がり、周方向温度勾配による熱彎曲および流力振動による振動振幅が抑えられる。

(2) スペーサ

スペーサの全体構造は添付書類〔Ⅲ〕に示す通り2種類の28個のリング素子、4個のスペーサタイロッド支持リング、4個の補強リングおよび外リングより構成され、溶接法により精度よく組立てられる。

リング素子は薄肉の円筒であって、2方向の固定突起と1方向の板ばね型突起によりリング素子中央に燃料要素を精度よく保持し、又、燃料要素相互の間隔を保持する。燃料要素相互の間隔は、炉内使用中においても十分に保持されており、燃料要素を冷却するための冷却水流路断面積は十分に確保されている。

スペーサ外周の外リングには、燃料交換時に燃料体の通路となる圧力

管集合体内各接続部において、ひっかかり等が生じないよう滑らかな案内突起を設ける。

スペーサ材質は、ばね特性、高温強度、耐疲労、耐食性および耐放射線性に優れ、軽水炉燃料において実績の豊富な析出硬化型ニッケル基合金（以下「インコネルー 7 1 8」という）材を使用する。材質仕様は AMS 5 5 9 0（管材）、AMS 5 5 8 9（管材）、AMS 5 5 9 7（板材）を基準規格とする。

### (3) スペーサ支持構造

1 2 個のスペーサは 4 本のスペーサタイロッドにより支持される。スペーサタイロッドの最下端は下部タイププレートにねじ構造により固定され、最上端は上部タイププレートの六角孔に軸方向に摺動できるよう取付けられ、燃料要素とスペーサタイロッドの膨張差を吸収する。さらにスペーサは、スペーサタイロッドに摺動できる構造で取付けられ、燃料要素とスペーサタイロッドの膨張差を吸収できるようになっている。

上記設計により燃料要素およびスペーサタイロッドは、軸荷重が作用しても曲がりが生じ難い構造となっている。スペーサタイロッドは、ASTM-B 3 5 3 R 6 0 8 0 2 を基準規格とするジルカロイ-2 管の両端に ASTM-B 3 5 1 R 6 0 8 0 2 を基準規格とするジルカロイ-2 棒製の端栓を溶接して組立てられる。

### (4) 上部および下部タイププレートおよび案内ばね

#### ① 上部および下部タイププレート

上部および下部タイププレートの構造図を添付書類〔Ⅲ〕に示す。

上部タイププレートは吊り下げ用つかみ部を有し、上端部は燃料体を圧力管内に装荷しやすいように滑らかな形状になっている。

また、つかみ部には冷却水の圧力損失を少なくし、冷却効果を高めるため、9 mm の貫通孔を設けている。

下部タイププレートは、中央部が絞られた円筒形をなし、その側面には、燃料体挿入時に入口管からの冷却材軸直角流の流路となる細長い窓を周方向8箇所に向けている。さらに、下部タイププレートの外径を上部タイププレートの外径より1mm小さくして、燃料装荷時に圧力管と下部タイププレートの隙間から冷却水が流れ込むような構造としている。これらの構造は、運転中の燃料交換を行う場合を考慮したものである。下部タイププレートの内側には燃料体遮蔽プラグを連結するためのコレット連結部がある。

上部および下部タイププレートの材質は、ステンレス鋼であり、その材料仕様はJIS G5121 SCS13を基準規格とする。

## ② 案内ばね

案内ばねは上部および下部タイププレート外周に設けた溝に取付けられるリング型のものであって、案内リングばねとセンタリングばねから構成されている。案内ばねには燃料体の圧力管内での偏心を防ぎ、かつ燃料体の圧力管内挿入時のガイドとしての機能を有する。

案内リングばねの外周には、圧力管のフレット腐食を防止するため平滑に表面を仕上げた8箇所の突起と1個の開口部を有する。

センタリングばねは、波状の薄板であって上部および下部タイププレートの案内ばね取付溝内において、上記案内リングばねとタイププレート壁の間に設けられる。

案内ばねの性能に係わるパラメータの決定に当たっては、実寸大の燃料交換モックアップ試験、燃料体の振動試験、案内ばねと圧力管のこすり試験等を実施した。すなわち、燃料交換試験では、案内ばねと圧力管の接触力、案内リングばね外周突起の形状、案内リングばねの外周径等の主要パラメータを種々変えて、常温および高圧条

件での試験を繰り返し、設計の改良を行ない、つぎのとおり決定された。

- ① 案内ばねと内径 117.8 mm の圧力管の接触力は案内リングばね外周突起一点当たり約 1 kg
- ② 圧力管内での燃料体の横方向変位に際してのばね定数は約 4 kg/mm。上述の仕様において、案内ばねと圧力管の接触力と案内ばね外接径の関係は、図Ⅲ-1 に示すとおりとなり、この特性を有するものが上部タイププレートおよび下部タイププレートの外周に取り付けられている。

材質は、案内リングばねには J I S G 4 3 0 3 を基準規格とする SUS 6 3 0 ステンレス鋼を、センタリングばねには、AMS 5 5 4 2 を基準規格とするインコネル-X を使用する。

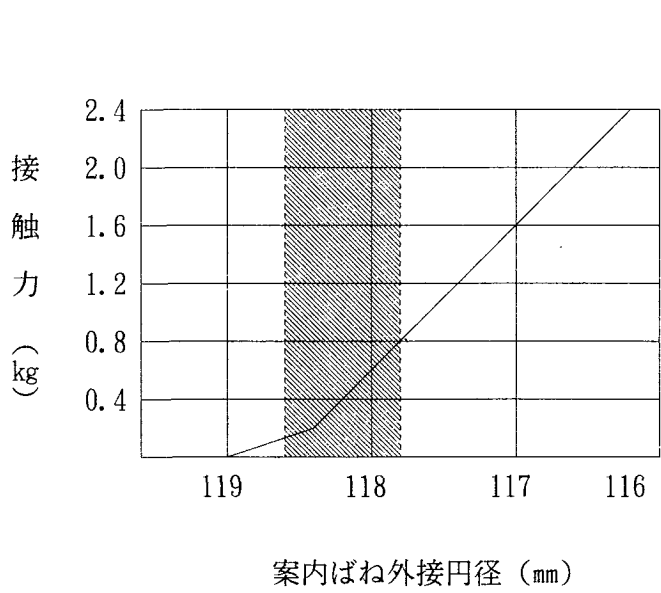
#### (5) 燃料要素および燃料体の識別

ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料体では、核分裂物質量の異なる燃料要素については、燃料要素の刻印によるほか次の方法で容易に識別可能である。

- ① 内層用燃料には端栓に識別マークを付ける。
- ② 中間層燃料要素はねじ付端栓形状である。
- ③ 外層用燃料要素には特別の識別マークを付けない。

さらに、内層用と外層用燃料要素が物理的に入れ替らないように端栓案内部の直径およびそれに対応する上部および下部タイププレートの挿入孔の寸法を決めている。

ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料体ともう一つの標準燃料体である二酸化ウラン燃料体の識別は、後者の上部タイププレートのつかみ部に識別用切欠きを設けることによって行なう。



(注1) 斜線部は圧力管内径製作公差範囲を示す。

注2) 圧力管との接触力は案内ばね外周突起1点当りの値。

図Ⅲ-1 案内ばねの接触力と案内ばね外接円径の関係

## IV 耐熱性

### 1. 燃料要素の熱的挙動

#### (1) 燃料要素の温度分布

燃料温度はF Pガス放出、熱膨張、スエリング、機械的強度等に関係しており、燃料の健全性の上から最も重要な因子の一つである。ここでは燃料最高温度が燃料の寿命期間を通じて定格運転時および通常予想される過渡時においても融点に至らないことを確認する。

燃料の温度分布は燃料要素出力、径方向出力分布、燃料および被覆管の熱伝導率、ペレット-被覆管のギャップ等に依存する。温度分布は各軸方向メッシュ毎に、冷却材温度を出発点として一次元径方向熱流を考えて計算する。以下に、燃料温度に関係する主な影響因子および計算経緯について述べる。

炉心全体のペレット最高線出力密度は、図II-1に従って変化する。

#### ① 被覆管表面境界膜温度勾配

$$\Delta T_{film} = q'' / h_{film}$$

$q''$  ; 被覆管表面熱流束

$h_{film}$  ; 表面熱伝達率

ここで、被覆管外表面での表面熱伝達率  $h_{film}$  は、次の Jens-Lottes の式<sup>(1)</sup> を用いて計算する。

$$h_{film} \text{ (kcal / hr} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{°C)} \\ = 1.22 (q'')^{3/4} \exp(p / 63.3)$$

$p$  ; 冷却材圧力

なお、冷却材温度は入口から出口まで、一定（飽和温度）として、計算している。

#### ② 酸化皮膜および腐食生成物（クラッド）での温度勾配

被覆管表面には燃焼に伴って酸化膜が形成され、また腐食生成物

(クラッド) が付着して熱除去が悪くなる。これらによる温度勾配は次式により求める。

$$\Delta T_{\text{corr}} = q'' \delta_{\text{corr}} / K_{\text{corr}}$$

$$\Delta T_{\text{crud}} = q'' \delta_{\text{crud}} / K_{\text{crud}}$$

$\delta_{\text{crud}}, \delta_{\text{corr}}$  : クラッドおよび酸化膜の厚さで、時間の関数として与える。

$K_{\text{crud}}, K_{\text{corr}}$  : クラッドおよび酸化膜の熱伝導率

ここで、酸化皮膜の形成速度およびクラッドの付着速度は、第VI章において述べる通り、いずれも保守的に年当り0.01mmとする。

### ③ 被覆管内温度勾配

$$\Delta T_{\text{clad}} = \overline{q''} m \cdot t / K_{\text{clad}}$$

$\overline{q''} m$  : 被覆管内平均熱流束

$t$  : 被覆管肉厚

$K_{\text{clad}}$  : 肉厚平均温度での被覆管熱伝導率

ここで、被覆管の熱伝導率 $K_{\text{clad}}$ は次式を用いて計算<sup>(2)</sup>する。

$$K_{\text{clad}} \text{ (W/cm} \cdot \text{°C)}$$

$$= 0.016 \{ 7.71 + 6.10 \times 10^{-3} T + 2.9 \times 10^{-6} T^2 \}$$

上式を図IV-1に破線で示す。上式はその他のデータと対比して、データのばらつきの範囲内である。

### ④ ペレット-被覆管ギャップでの温度勾配

$$\Delta T_{\text{gap}} = \overline{q''} / h_{\text{gap}}$$

$\overline{q''}$  : 被覆管内面での熱流束

$h_{\text{gap}}$  : ギャップ・コンダクタンス

ここで、ペレット-被覆管のギャップ熱伝達率 $h_{\text{gap}}$ は、ガスの熱伝導、輻射および接触熱伝達を考慮して、Ross & Stoutesにより提案されたモデル<sup>(3)</sup>をギャップの存在する場合にまで拡張した次式を用



いて計算する。

$$h_{gap} = \phi \left( \frac{K}{Y+G} + h_r \right) + \alpha \cdot P$$

K ; 混合ガス熱伝導率

Y ; 半径ギャップ

G ; ガス-固体接触面での温度ステップ

h<sub>r</sub> ; 輻射係数

α ; 固体-固体接触熱伝達特性値

P ; 被覆管とペレットの接触圧

φ ; 補正係数

図IV-2に実験データと計算式で求めた値を示す。ここで引用した実測データは、Halden炉において、「ふげん」と同サイズの燃料要素（2本）のペレット中心温度を、熱電対により直接照射中に測定した温度から求めたものである。この図からわかるように本設計で使用するギャップ熱伝達率の式による計算値は実測値に比べて安全側の値を示すものとなっている。

#### ⑤ 燃料内温度勾配

ペレットは、円筒メッシュに分割し個々の分割メッシュについて温度勾配を計算する。径方向熱出力分布としては、燃焼率解析により求められた出力分布を燃焼度の関数として用いる。図IV-3にウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の径方向出力分布の燃焼に伴う変化を示す。

個々の円筒メッシュでの温度勾配は次式で求める。

$$\Delta T = \overline{q}''_{fuel} \cdot \Delta r / \overline{K}_{fuel}$$

$\overline{q}''_{fuel}$  ; 円筒メッシュでの平均熱流束  
 $\Delta r$  ; 円筒メッシュの厚さ

$K_{fuel}$  ; 円筒メッシュの平均温度での燃料熱伝導率  
 ここで、ペレットの熱伝導率 $K_{fuel}$ は次のLyonsの式を用いる。(4)

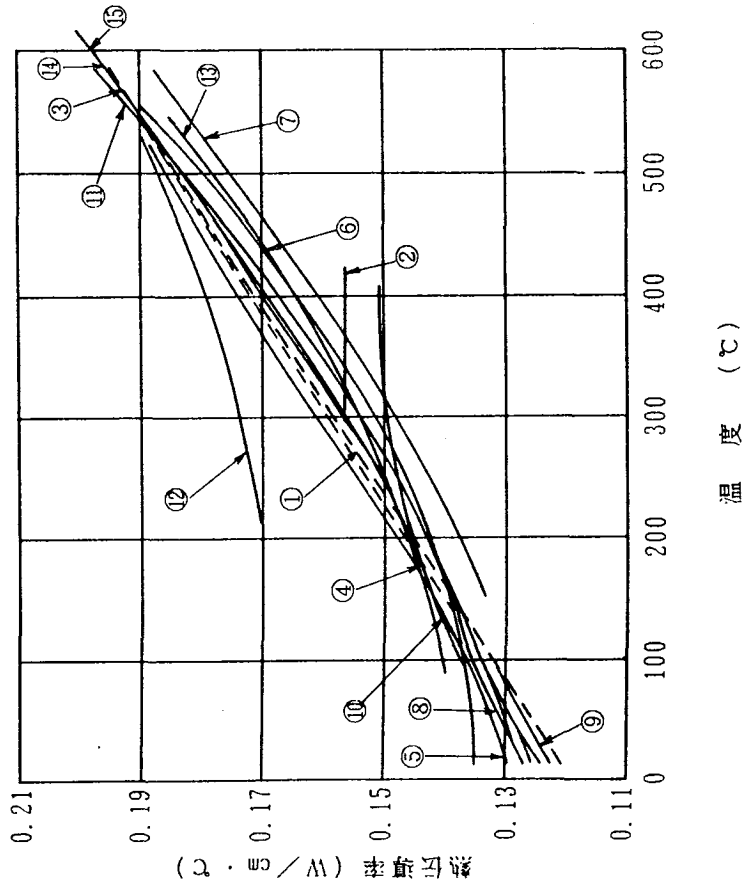
$$K_{fuel} (W/cm \cdot ^\circ C) = \frac{38.24}{T + 402.4} + 6.125 \times 10^{-13} (T + 273)^3$$

本式は図IV-4に破線で示す通り、その他のデータと比較して、保守的な値となっている。

以上の物性値および計算式を用いて計算した被覆管の最高温度を表IV-1に、ペレットの最高温度を表IV-2に示す。

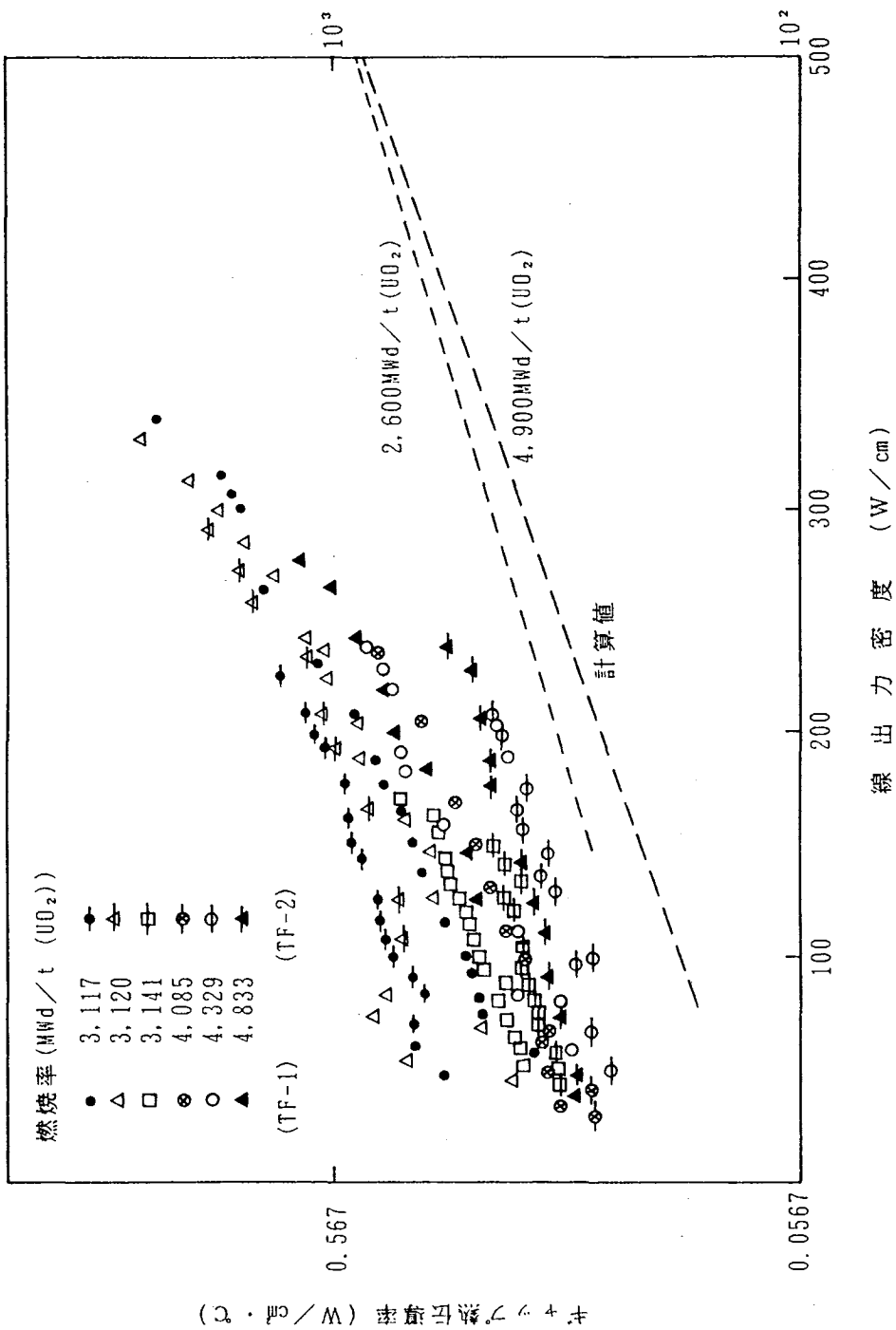
被覆管の温度は、被覆管表面に形成される酸化膜およびクラッドの影響により燃焼率の進行につれて、上昇する傾向にあるが後述するジロカロイ-2の融点(約1,845°C)、相変態点(約860°C)よりかなり低く問題になることはない。

燃料の最高温度は燃料体最高燃焼度が5000 MWd/tの時点の過渡時で最も高く、その温度は約2600°Cである。一方、燃料の融点は燃焼とともに低下するが、この低下を考慮しても寿命を通じて融点に対して十分に低く、燃料は溶融することはない。

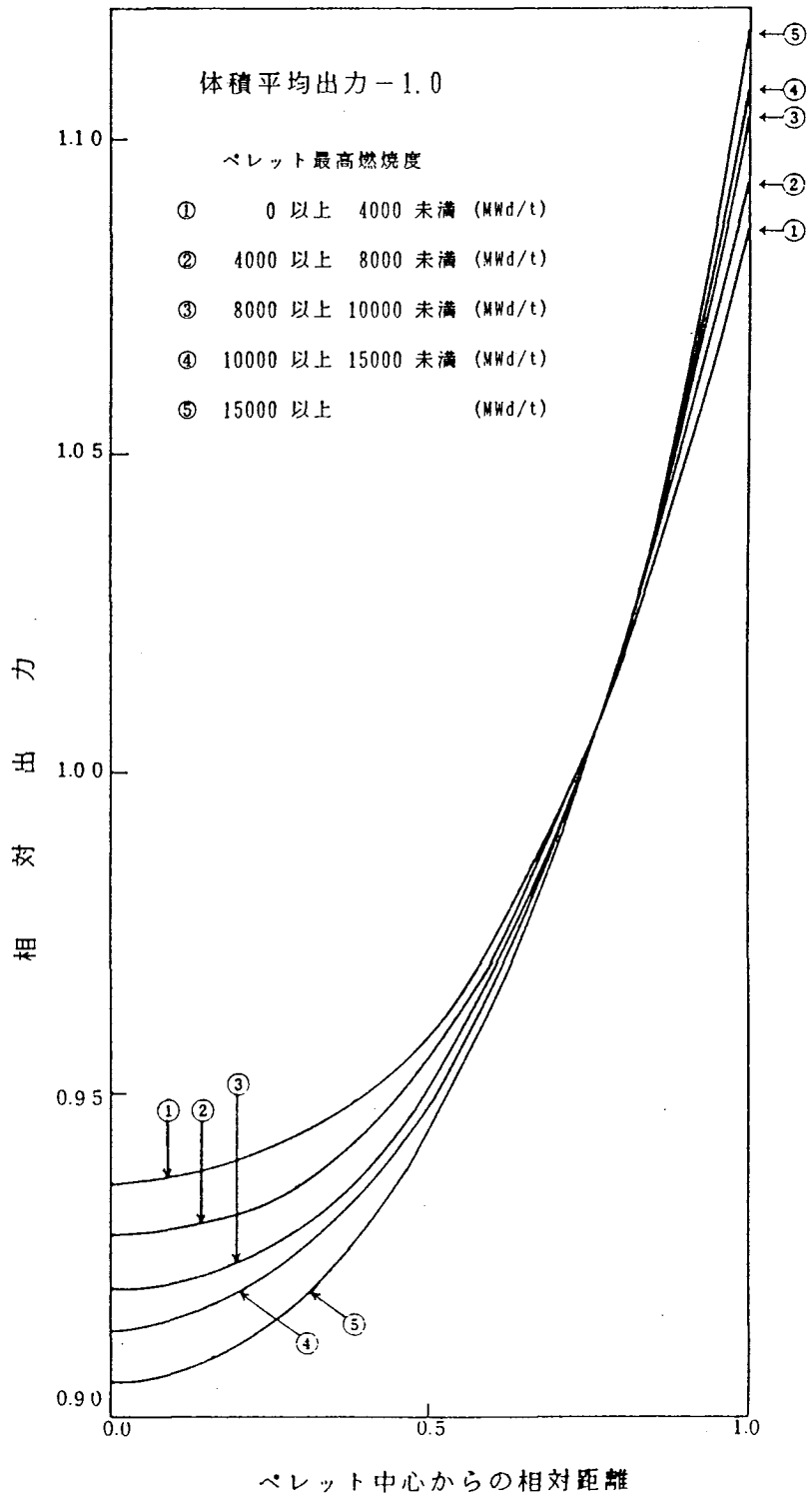


- ① WCAP-3269-41, (1965)
- ② DPNGS-PSAR, General Electric Company.
- ③ ASTM Special Technical Publication, No.314 (1962)
- ④ JAERI-memo 3592. (1970)
- ⑤ "Fuel Element Fabrication", (1961) Academic Press, N. Y.
- ⑥ "Fuel Element Fabrication (Ni-Free) Zry-2", (1961) Academic Press, N. Y.
- ⑦ WAPD-TM-757, (1969).
- ⑧ Westinghouse Reactor Fuel Material Technology, (1964)
- ⑨ BNWL-1778. (1973).
- ⑩ NUREG/CR-0497, "MATPRO-VERSION11", (1979).
- ⑪ WAPD-TM-652. (1969).
- ⑫ GEMP-61, (1966).
- ⑬ J. of Nucl. Sci. and Tech., 12, 661 (1975).
- ⑭ BMI-1273 (1958)
- ⑮ KAPL-2146, (1976).

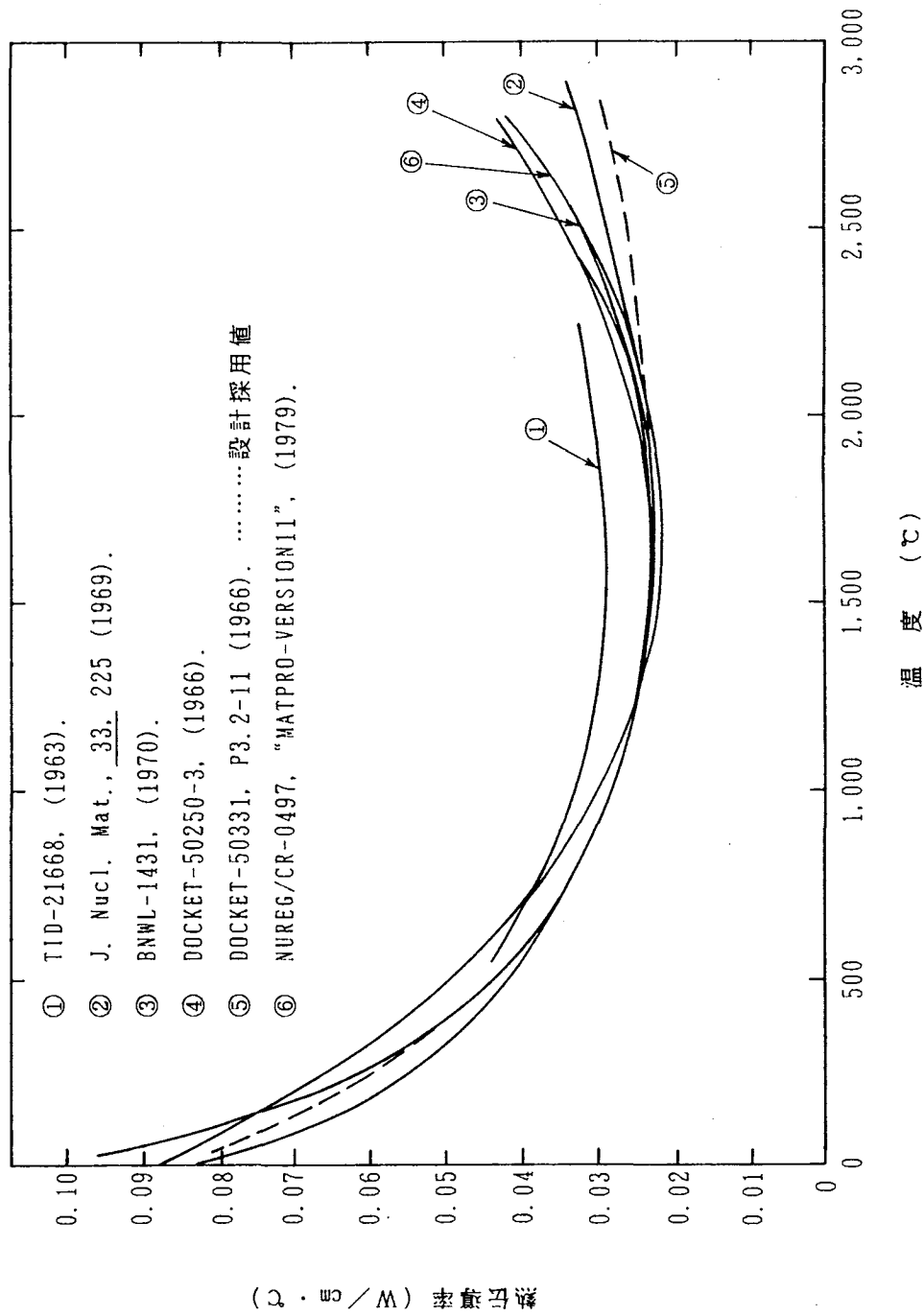
図IV-1 ジロカロイ-2材の熱伝導率



図IV-2 線出力密度とキヤップ熱伝達率の関係



図IV-3  $UO_2-PuO_2$ ペレット内径方向出力分布



図IV-4 燃料の熱伝導率

表IV-1 被覆管の最高温度

条 件	時 期	被覆管最高温度 (°C)		
		外 面	内 面	平 均
定 格 時	寿命初期	294	359	327
	寿命中期	(1) 308	371	340
		(2) 327	381	354
寿命末期	341	387	364	
過 渡 時	寿命初期	296	369	333
	寿命中期	(1) 311	383	347
		(2) 333	394	364
寿命末期	349	402	376	

寿命中期(1)は燃料体最高燃焼度で5,000MWd/t、中期(2)は13,000MWd/tのところである。

表IV-2 ペレットの最高温度

条 件	時 期	ペレット最高温度 (°C)	
		表 面	中 心
定 格 時	寿命初期	584	2257
	寿命中期	(1) 604	2295
		(2) 614	2032
寿命末期	578	1752	
過 渡 時	寿命初期	541	2437
	寿命中期	(1) 647	2599
		(2) 639	2295
寿命末期	625	2031	

(2) F P ガスの放出とプレナム圧力

蒸発性不純物ガスは仕様により酸化物燃料 1 g 当り 60  $\mu$  l 以下としている。

F P ガスの生成率は二酸化ウラン燃料では  $1.35 \times 10^{-3}$  g mol / MW d <sup>(5)</sup> である。

F P ガスの放出率は 1, 650 °C 以上で 100 %、1, 650 °C 未満で 4 % とする。この放出モデルを用いて求めた F P ガス放出率は、燃料体積平均温度に対して図 IV - 5 のようになり、実測データと比較して安全余裕がとられたものとなっている。<sup>(6)</sup>

なお、図 IV - 5 において横軸に示す体積平均温度  $T_v$  は次式で定義されるものである。

$$T_v = \frac{(T_s + T_c)}{2} / F$$

$T_s$  : 熱流束最大点のペレット表面温度

$T_c$  : 熱流束最大点のペレット中心温度

$F$  : 軸方向出力ピーキング係数

燃料要素内の内圧は理想気体として、プレナム温度からボイラーシャルルの法則に基づいて計算する。構成ガスは燃料要素製造時に封入されるヘリウムガス、ペレット中の蒸発性不純物ガスおよび F P 放出ガスより成る。

ヘリウムガスは常温において 1 kg / cm<sup>3</sup> ・ a で封入される。また蒸発性不純物ガスは寿命初期で全て放出されるものとする。

これらのガスによる燃料要素内圧は、寿命末期で表 IV - 3 に示す通りとなる。



表IV-3 燃料要素内圧 (寿命末期)

定 格 時	8 2 kg/cm <sup>2</sup> ・a
過 渡 時	1 1 5 kg/cm <sup>2</sup> ・a

(3) ペレットのスエリングおよび熱膨張

被覆管とペレットの機械的相互作用は、ペレットの燃焼に伴って徐々に進行するスエリングと温度上昇に伴うペレットの熱膨張によって生じる。

ペレットのスエリングによる体積膨張に関する最近のデータ<sup>(7)</sup>によれば、スエリング率は $0.3 \sim 0.4 \% \Delta V / V / 10^{20} \text{ fissions/cm}^3$ の値を示す。

しかし、この値はマトリックスのスエリング率であり、気孔を含んだ燃料全体の体積膨張率としては被覆管の拘束の有無により変化する。

この拘束を受ける場合のスエリング率は、Bettis研究所での実験<sup>(8)</sup>に代表されるように、 $0.16 \% \Delta V / V / 10^{20} \text{ fissions/cm}^3$ である。

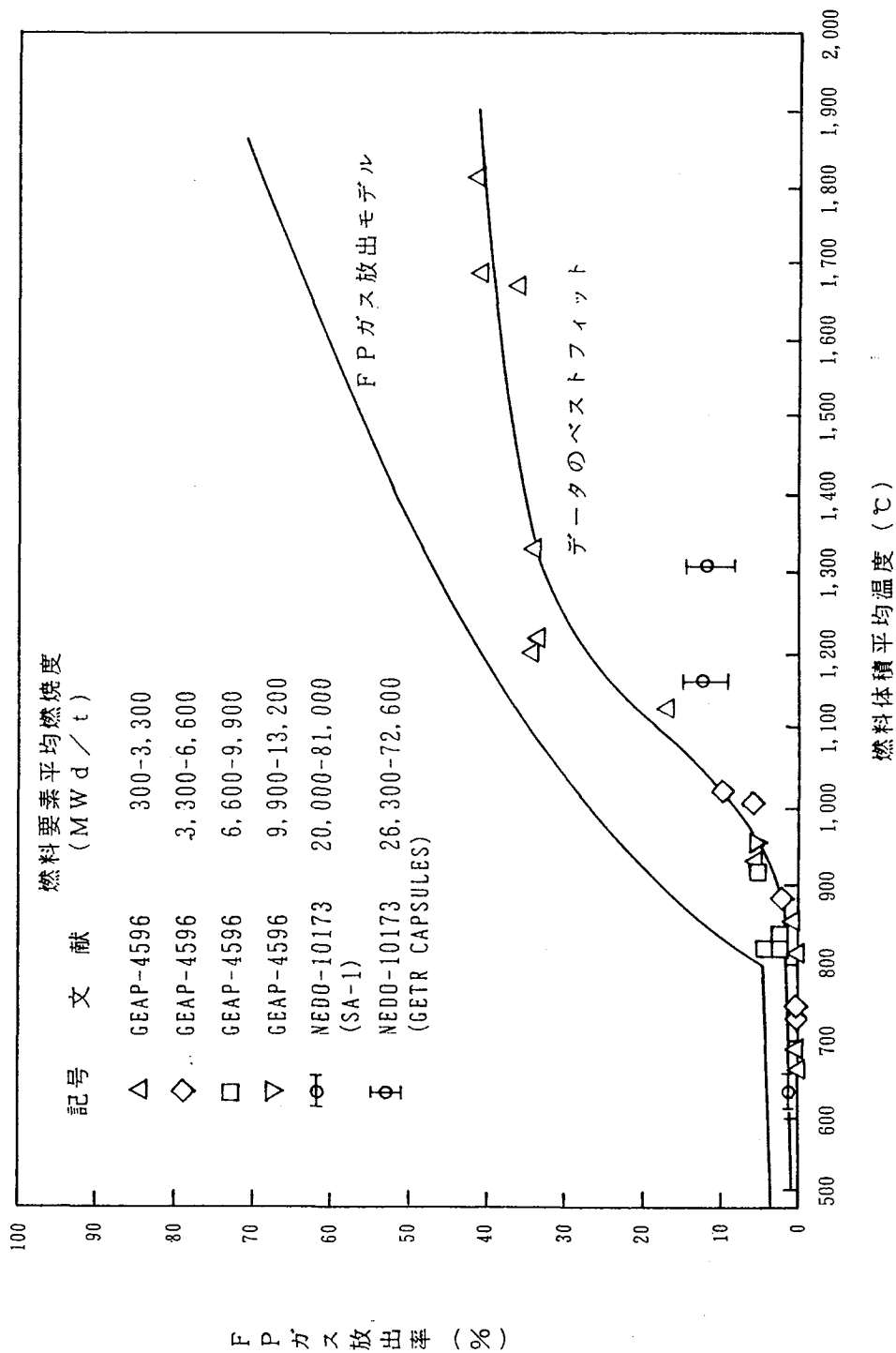
以上のデータに基づき、ペレットのスエリングによる体積膨張は次のモデルで扱う。

すなわち、ペレットと被覆管のギャップが開いている時、被覆管によってペレットが拘束されている時、および内部ボイドが埋め尽された時の3つの状態について、スエリング膨張率が異なるモデルとし、各々 $0.4 \%$ 、 $0.16 \%$ 、 $0.4 \% \Delta V / V / 10^{20} \text{ fissions/cm}^3$ とする。

ペレットの熱膨張係数 $\alpha_f$ は次式で与える。<sup>(9)</sup>

$$\alpha_f (\text{C}^{-1}) = 9.61 \times 10^{-6} + 1.57 \times 10^{-9} T$$

(T ; °C)



図IV-5 UO<sub>2</sub>ペレットからのFPガスの放出率

上式を図IV-6（破線で示す）にその他のデータと比較して示すが、  
個々のデータのバラツキの範囲内である。

ペレットの熱膨張については、ペレット内の径方向温度分布は、中心  
温度を最高としてほぼ放物線状の分布となっている。このため、円柱状  
ペレットは温度上昇に際し、一様な熱膨張とはならず、高温の中心側が  
低温の周辺側に比べて熱膨張が大きくなりつぶみ型の変形をするるととも  
に、周辺部には引張応力、中心側には圧縮応力が生じる。

このため、出力が高くなると低温のペレット周辺部には割れを生じ、  
一方中心側は高温のため塑性的変形をするようになる。

このような現象に対して、燃料設計の点からつぎのような配慮をして  
いる。

ペレット端面には、中央部にディッシュが設けてあり、ペレット中心  
域の熱膨張がこのディッシュで十分吸収されることから、ペレットスタ  
ックの軸方向伸びは、ディッシュがない場合に比べて小さくなり、被覆  
管との相対的拘束が軽減することを期待している。

さらに、ペレット端面コーナには、ペレット端面コーナの割れ、カケ  
を未然に防止することを主たる目的としてチャンファを設けているが、  
付加的効果として、リッジング高さ（つぶみ型変形したペレットの半径  
最大と最小の差）の程度も軽減され、チャンファがない場合に比べて、  
約40%リッジング高さが緩和されることが計算によって予測される。  
チャンファの大きさについては、照射されたペレットのコーナのカケに  
関する観察結果に基づいて決定している。<sup>(10)</sup>

#### (4) 被覆管の歪

被覆管は冷却材運転圧力により圧縮荷重を受け、燃料の燃焼に伴い径  
が徐々に減少する。また、ペレットの径は、燃焼に伴って徐々に進行す  
るスエリングと燃料の温度上昇によるペレットの熱膨張によって増加す

る。したがって、燃焼中にペレットと被覆管は、お互いに接触し、その後にはペレットのスエリングによって被覆管は引張荷重を受け正の歪へと移行する。

以上のような観点から、燃料の寿命期間を通じて、被覆管に生じる円周方向平均塑性歪を求め、最大変動歪幅が被覆管の許容限界値である1%を超えないことを確認する。

この計算において、被覆管は完全軸対称性を有するものと仮定している。歪計算は各寿命時期において、燃料の変形量が最大になる部分で実施する。

ペレット-被覆管ギャップについては以下に述べる2つのケースについて解析を行なった。

① 規格寸法時

ペレット-被覆管ギャップが規格寸法の場合

$$\text{ギャップ} = 0.30 \text{ mm}$$

② 最悪寸法時

ペレットおよび被覆管の製作公差を考慮し、ペレット径最大で被覆管内径を最小とした場合

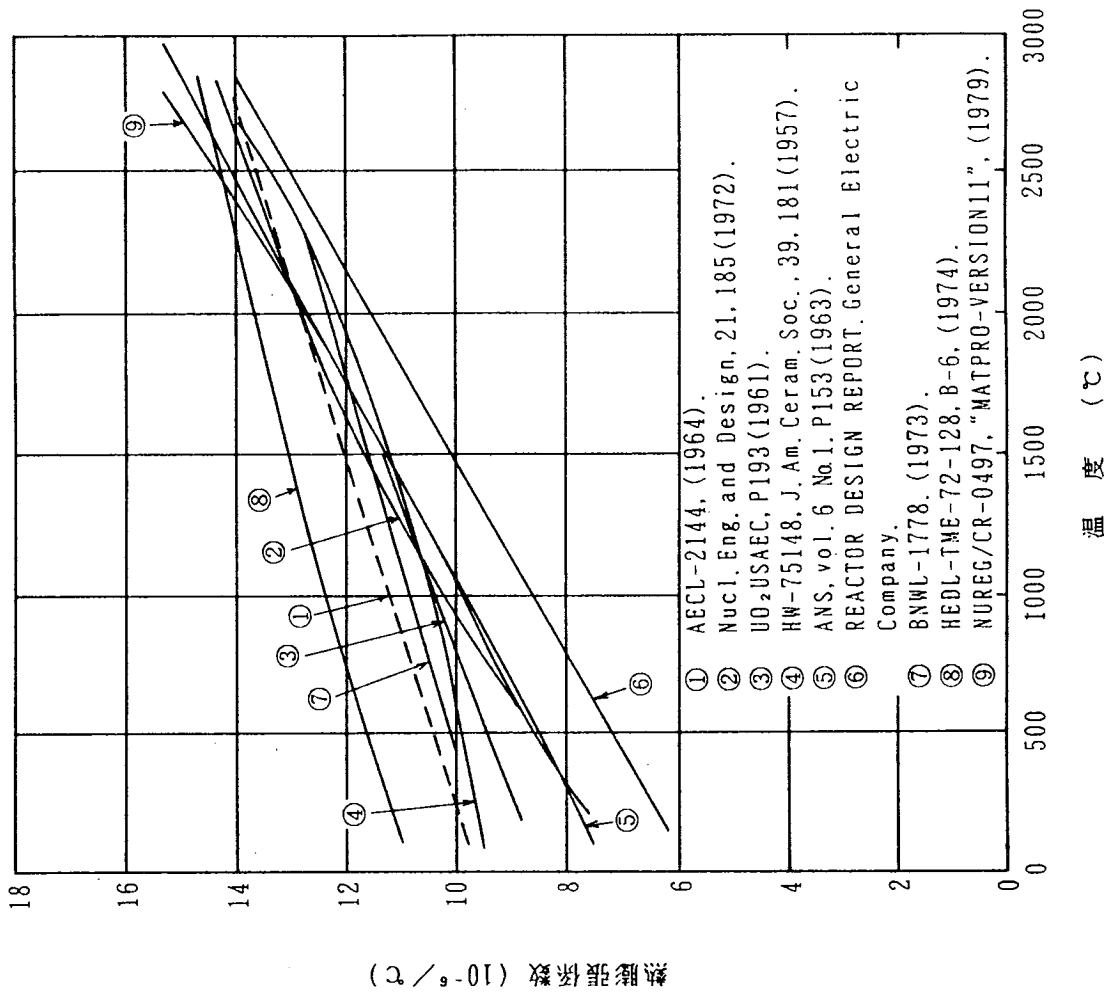
$$\text{ギャップ} = 0.22 \text{ mm}$$

計算の結果、図IV-7に示すように寿命初期では外圧クリープにより圧縮歪を生じるが、燃焼が進行するとペレットとの機械的相互作用により圧縮歪が緩和される方向にある。また、表IV-4には、定常運転時および過渡時の円周方向平均塑性歪の変動幅を寿命初期、中期および末期について示す。これらの歪はクリープにより生じているもので、燃焼とともに徐々に進行している。過渡状態においても短時的な永久変形は起らず、定常運転時と同じ結果になっている。

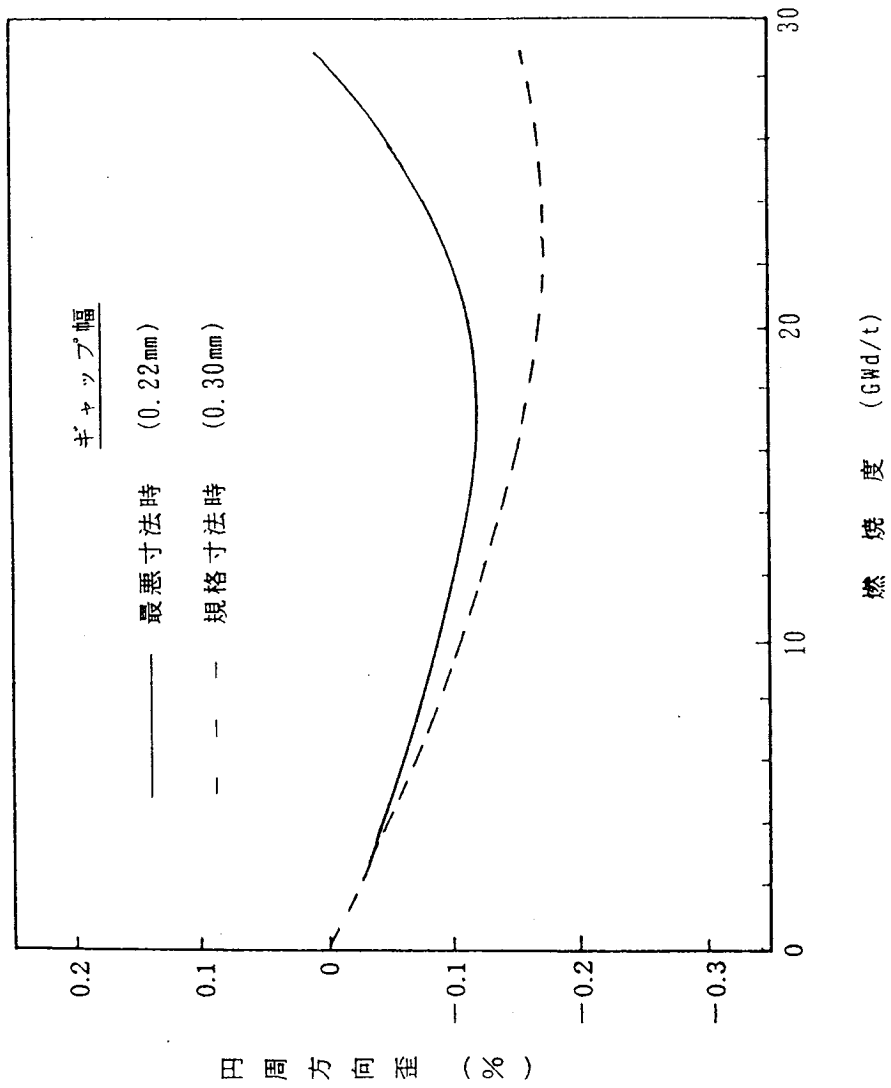
以上の計算結果は、被覆管の許容限界歪1%に対して十分に余裕のある値となっている。

表IV-4 被覆管の円周方向平均塑性歪の全変動幅

運 転 状 態	定 常 時	過 渡 時
寿 命 初 期	0.0 %	0.0 %
寿 命 中 期	0.12 %	0.12 %
寿 命 末 期	0.14 %	0.14 %



図IV-6 UO<sub>2</sub>の熱膨張係数



図IV-7 燃焼に伴う円周方向歪の変化

## 2. 使用材料の耐熱性

### (1) ペレット

未照射の場合の二酸化ウラン燃料の融点は、Latta, Fryxellらによって測定されたデータ<sup>(1)</sup>を使用しており、その値は $2865 \pm 15$ ℃となっている。

ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の融点は、このデータを基本として、プルトニウム富化率、O/M比、燃焼度、融点の測定誤差を考慮し、最も厳しい評価となる値としている。

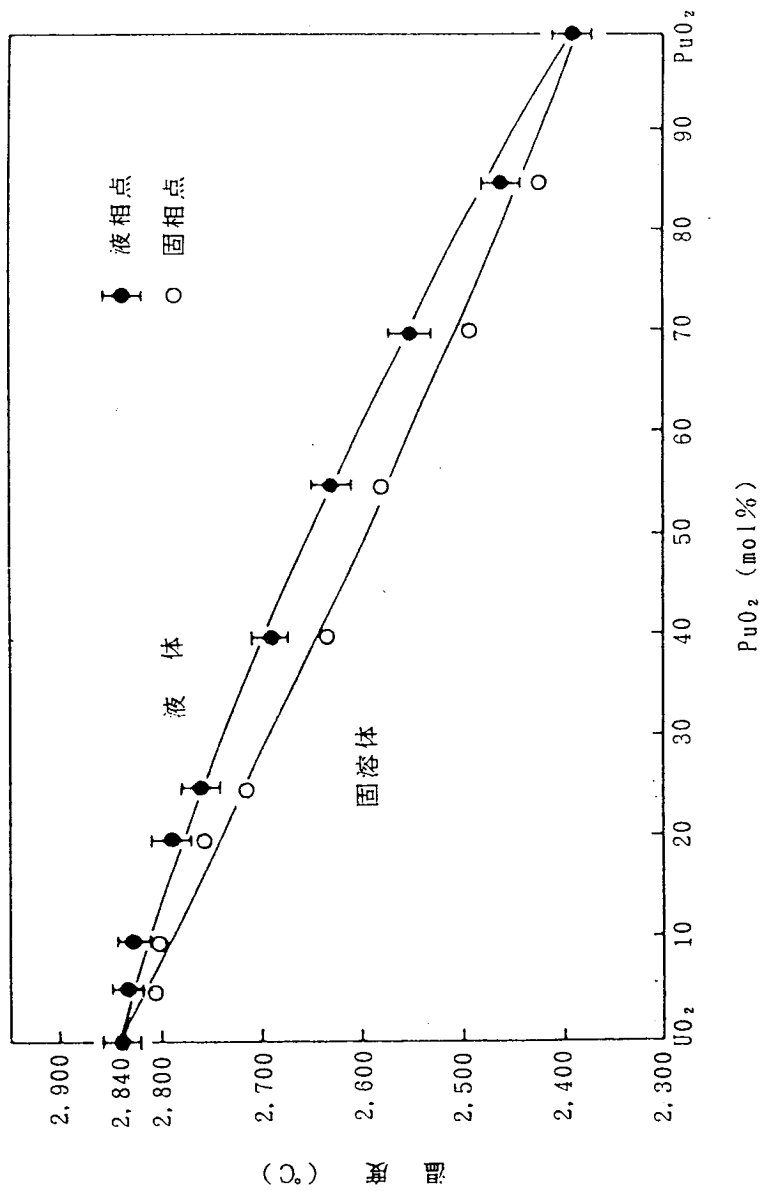
プルトニウム富化率、O/M比、燃焼度が融点に与える影響をそれぞれ以下に示す。

プルトニウム富化率による融点の変化を測定したデータは非常に少なく、 $UO_2$  から  $100\% PuO_2$  までの系統的に測定したデータでは図IV-8に示すLyon-Bailyの $UO_2 - PuO_2$ 系状態図<sup>(12)</sup>が最も信頼性をもっている。また、この状態図の二酸化ウランの融点 $2840 \pm 20$ ℃は、前述したLatta等の測定データを考慮すると、比較的に良い精度のデータとなっている。したがって、燃料のプルトニウム富化率による融点の低下には、このLyon-Bailyの状態図を用いた。この状態図から外層燃料要素よりプルトニウム富化率が高い内層および中間層燃料要素の融点は二酸化ウラン燃料より $16$ ℃低い値となっている。

次にO/M比による融点の変化は、Latta等の測定によると、化学量論的な燃料(O/M=2.00)で最も高い値を示し、O/M比がこれより高い方へずれても、低い方へずれても融点は低くなる。燃料のO/M比による融点の低下は、O/M比が $2.00 \pm 0.05$ の範囲であり、Latta等のデータから最大で $45$ ℃となる。

さらに燃料の燃焼に伴う融点の変化については、次のような報告があ





图IV-8 UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>系状态图

る。二酸化ウランについて行ったChristensenらの実験<sup>(13)</sup>では、  
10,000 MWd/tあたり32°Cの融点の低下が示されているが、  
Bates らの実験<sup>(14)</sup>では、照射に伴う融点の低下はみられない。また、  
Biancheria<sup>(15)</sup>は、Krankotaの20%および25%PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub>の  
混合酸化物に関するデータ<sup>(16)</sup>を統計的に処理しているが、燃焼に伴う  
融点の変化は、ほとんどみられず10,000 MWd/tあたり約2.1  
°Cの低下がある。このように燃焼に伴う融点の低下は実験者により、か  
つ融点そのものの値にも若干の差があつて、燃焼度約5,000 MWd  
/t以上になるとchristensen の提案の方がより低い融点を示す。した  
がつてchistensenのデータから、寿命末期における融点は、初期に比べ  
て93°Cの低下となる。

以上のことから燃料の融点は、プルトニウム富化率、O/M比、燃焼  
率および融点の測定誤差を考慮すると、寿命初期で約2790°C、寿命  
末期で2696°Cとなる。一方、燃料の最高温度は前述の通り寿命期間  
中を通じて融点に対して十分に低く問題になることはない。

## (2) ジルカロイ材

ジルカロイ-2の融点は約1,845°Cである。ジルカロイ-2は約  
860°Cで稠密六方晶のα相から体心立方晶のβ相への相変態を起す。<sup>(17)</sup>  
ジルカロイ-2の成分および機械的性質はそれぞれ表Ⅲ-3、表Ⅲ-4  
に示した通りである。

ジルカロイ-2の使用温度は表Ⅳ-1に示すように上記変態温度より  
かなり低く、また高温強度も十分であり、燃料体の健全性の面で問題に  
なることはない。

## (3) ステンレス鋼

SUS304系ステンレス鋼（鋳鋼はSCS13）は押え板、ばねカ  
バー、ロックナット、上部プレナムスプリング、保持リングおよび上部

および下部タイププレート<sup>(18)</sup>の材料として用いられる。機械的性質<sup>(18)</sup>を表IV-5に示す。融点は約1,400℃であり、使用温度は十分に低く熱的に問題になることはない。

また、SUS630ステンレス鋼は案内リングばねの材料として用いられる。機械的性質を表IV-5に示す。使用温度約300℃では溶融および相変態等は起らず高温強度も十分であり熱的に問題になることはない。

表IV-5 ステンレス鋼の機械的性質

ステンレス鋼		SUS304	SUS630
引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	常 温	61.2	137.8
	370℃	49.2	111.1
耐 力 (kg/mm <sup>2</sup> )	常 温	23.9	12.8
	370℃	11.3	9.7
伸 び (%)	常 温	6.2	1.5
	370℃	4.7	1.0

(4) アルミナ

アルミナの融点は2,015℃であり、使用条件においては溶融は起らず熱的に問題となることはない。また熱膨張係数は、 $8.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ で二酸化ウランと同程度である。<sup>(19)</sup>

(5) インコネル材(-718、-X)

インコネル-718はスペーサの材料として用いられる。またインコネル-Xはロッドスプリング、下部プレナムスプリングおよびセンタリングばねの材料として用いられる。

機械的性質は表IV-6に示す通りである。<sup>(20) (21) (22)</sup>

インコネル-X材は1, 395℃以上の融点を有する。<sup>(22)</sup> インコネル-718材は1, 260℃以上の融点を有し、融点まで相変態がなく安定であり高温強度に優れている。<sup>(23)</sup> 使用温度は約300℃であるので、高温による材料の劣化等熱的に問題になることはない。

表IV-6 インコネル材の機械的性質

インコネル材		インコネル-718	インコネル-X
引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	常 温	126.6	129.0
	316℃	—	123.7
	540℃	118.8	98.0
耐 力 (kg/mm <sup>2</sup> )	常 温	105.3	92.8
	316℃	—	87.9
	540℃	94.8	58.8
伸 び (%)	常 温	12.0	25.0
	316℃	—	28.2
	540℃	24.0	22.0

## V 耐放射線性

### (1) ペレット

ペレット中のU-235、Pu-239等は原子炉運転時に熱中性子を吸収して、核分裂し炉心の発熱源となる。

一回の核分裂により、約0.3個のガス状核分裂生成物と約1.7個の固体状核分裂生成物が生じ、このうちガス状核分裂生成物は主にXe、Krなど燃料への固溶度が小さい不活性ガスである。

燃料内に発生したガス状核分裂生成物の一部は、高温下で主に拡散により燃料外に放出されるが、その残りは燃料内に既存する粒界、気孔等に析出して気泡を生じる。これらの気泡や気孔が燃料内を移動、結合し成長すること。および固体状核分裂生成物の蓄積結果、ペレットにスエリングが生じる。

ペレットのスエリングについては第IV章1(3)に詳述するとおりである。

以上のスエリングは寿命期間を通じて生ずる現象であるが、比較的寿命初期(約5,000MWd/tまでの時点)においては、ペレットが収縮する現象(焼きしまり)が生ずる。焼きしまりは、ペレット焼結温度、初期密度等の因子に依存すると言われているが、本燃料では高密度、高焼結温度を採用しており焼きしまりが問題となることはない。

### (2) ジルカロイ材

被覆管に使用するジルカロイ-2管は冷間加工後、応力除去焼鈍を行なったもので、その機械的性質の仕様は表V-1の通りである。

表V-1 被覆管の機械的性質

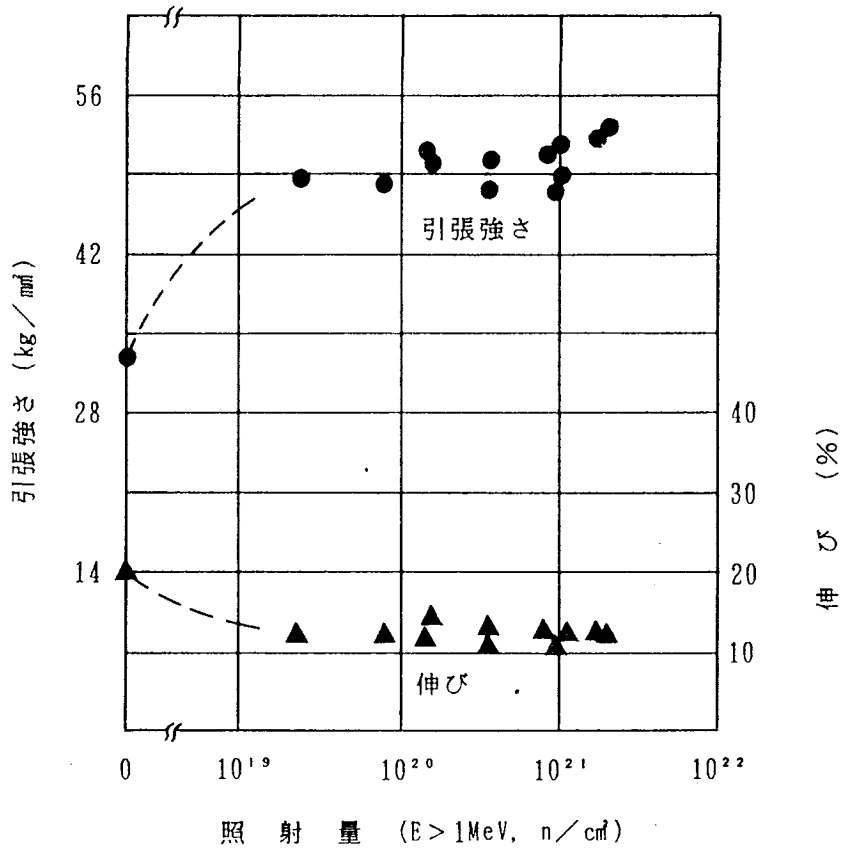
引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )		耐 力 (kg/mm <sup>2</sup> )		伸 び (%)	
常 温	3 4 3℃	常 温	3 4 3℃	常 温	3 4 3℃
≥ 4 9	≥ 2 9	≥ 4 2	≥ 2 3	≥ 2 0	≥ 2 0

ジルカロイ材は一般に照射により引張強さ、耐力は増加し伸びは減少する。図V-1に300℃での引張機械性質の照射量依存性を測定したデータ<sup>(24)</sup>を示す。

被覆管の受ける照射量は最高で $4 \times 10^{21}$  nvt ( $> 1$  MeV)程度であるが、このような機械的性質の変化は約 $5 \times 10^{20}$  nvt ( $> 1$  MeV)の照射量までに起り、これ以上の照射量ではほとんど変化はなくなっている。

被覆管は炉内の使用条件下では2軸応力状態にあるが、このような応力下での歪発生は短時的に生じる場合と徐々に進行する場合に分けられる。前者は、過渡時出力上昇の際に、ペレットと被覆管の熱膨張差によって生じるような歪であり、後者は、内外圧差および燃料のスエリングによって進行するクリープ歪の場合である。

二軸応力下で短時的に歪が発生する場合の機械的性質を調べるのに、通常内圧バースト試験が行なわれている。実際に炉内で使用した燃料から切り出した被覆管のバースト試験結果を表V-2に示す。未照射材の円周伸びは約15%以上であるのに対し、照射によって伸びは表V-2に示すように減少している。



図V-1 ジルカロイ-2材の引張性質と照射量の関係  
(試験温度; 300°C)

表V-2 ジルカロイ-2被覆管の内圧バースト  
(クローズエンド法) 試験結果

	照射量 $n/cm^2 (> 1 MeV)$	試験温度 ( $^{\circ}C$ )	破裂周方向応力 ( $kg/mm^2$ )	円周伸び (%)
ドレスデン Ⅲ-F型燃料 *1	$0.8 \times 10^{21}$	343	64.9	6.22
	$0.8 \times 10^{21}$	343	66.4	7.35
	$10^{21}$	480	48.5	13.56
SGHWR 燃料 *2	$0.58 \times 10^{21}$	300	62.7	4.3
	$0.78 \times 10^{21}$	300	63.7	5.2
	$0.87 \times 10^{21}$	300	62.6	11.9

\*1 ; (Reactor Tech., 14, 68, 1971)

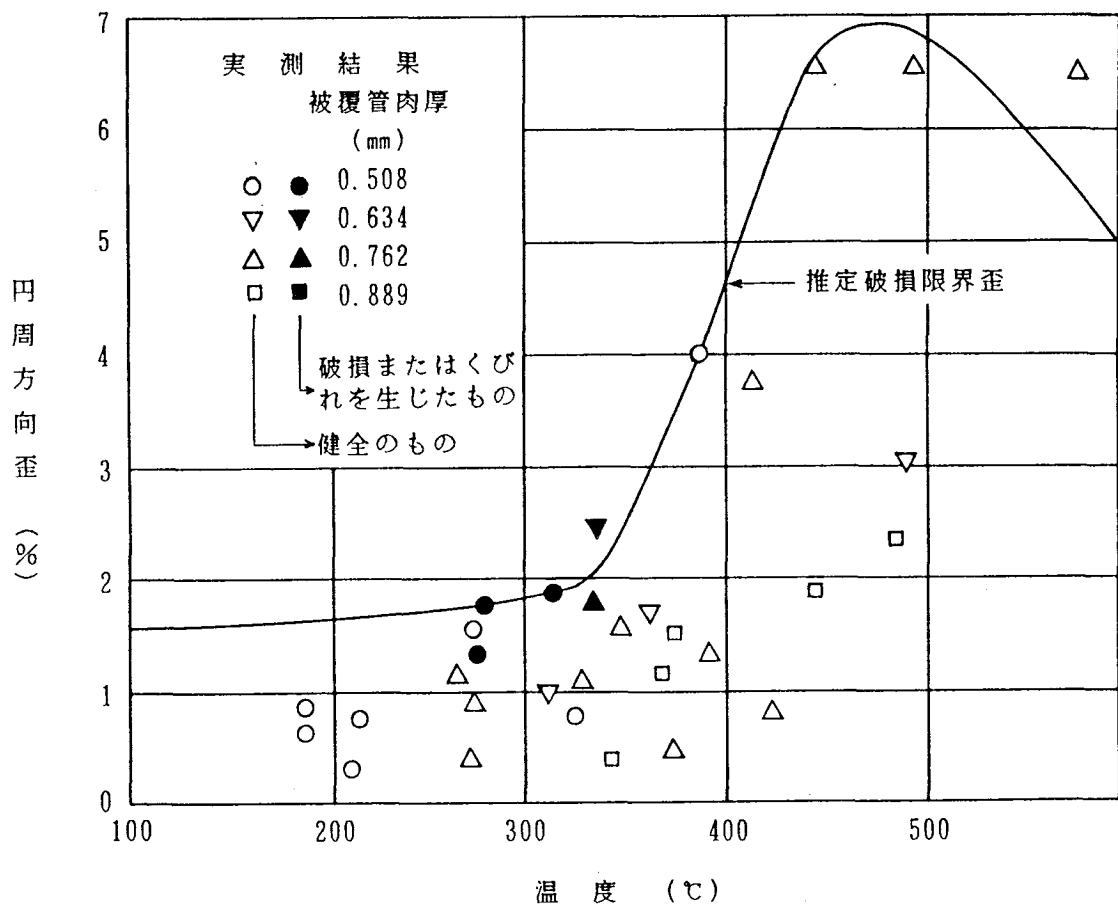
\*2 ; (Nucl. Eng. & Design, 21, 212, 1972)

このような歪速度の早い変形の場合の被覆管の破損は、材料が塑性不安定になった時に起るとの考え方に基づき破損限界歪を推定した報告<sup>(25)</sup>がある。これによれば材料の等方性を仮定し二軸モデルで解析しているが、照射によってジルカロイ材の伸びが減少するのは、照射損傷による加工硬化の低下によるとして解析し、破損限界歪を求めている。図V-2に破損限界歪の推定値を示すが、被覆管の使用温度付近では約2%となっている。同図にはBMIで行なった200 $^{\circ}C$ ~600 $^{\circ}C$ の温度範囲で $2 \times 10^{21}$  nvt ( $> 1 MeV$ )まで照射した燃料要素について、破損燃料をも含めて測定された円周伸びのデータ<sup>(26)</sup>も併せて示されている。

ジルカロイ材のクリープについては炉内クリープ特性が重要である。炉内クリープに関しては、UKAEAおよびAECLで行なったデータが主なものであるが、一般的に照射によってクリープ速度およびクリープ歪量が増加する。図V-3にIbrahim等の内径2.3mmの薄肉(0.38~1.2mm)のジルカロイ-2の炉内および炉外での内圧クリープデータ<sup>(27)</sup>を示す。

なお、このような特性は、300 $^{\circ}C$ 、 $0.4 \sim 1.2 \times 10^{13} n/(cm^2 \cdot sec)$  ( $E > 1 MeV$ )の条件でFidleris等による炉内単軸クリープ実験<sup>(28)</sup>や





図V-2 被覆管の破損限界歪と温度

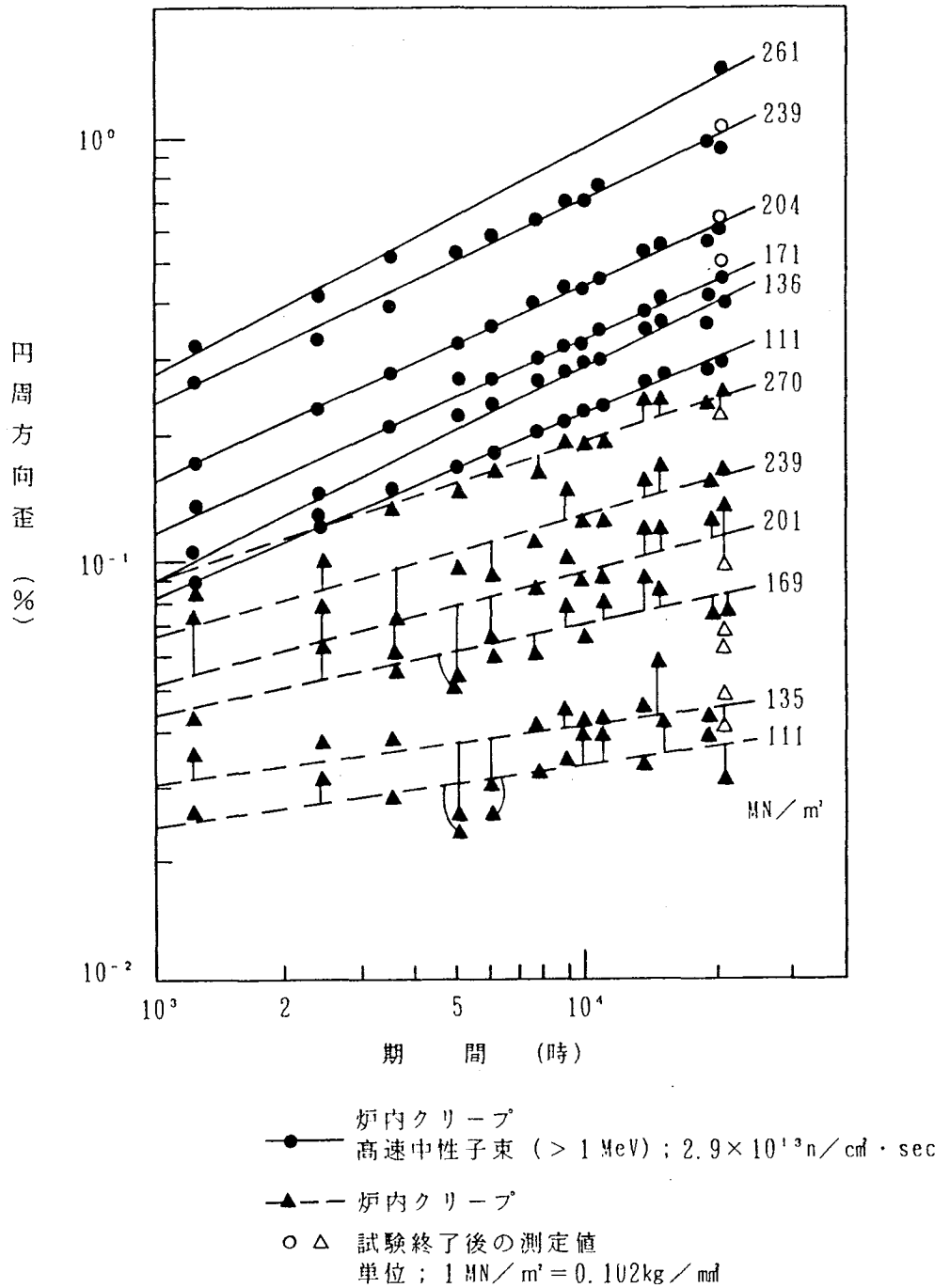
270°C、 $3 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$  ( $E > 1 \text{ MeV}$ ) の条件でRoss-Ross等による内圧クリープ実験<sup>(25)</sup>においても報告されている。

炉内クリープの特徴は、炉外クリープに比べてクリープ速度が加速されることおよび2次クリープ領域が増加して容易に3次クリープに達しないことである。図V-4にWatkins等による単軸クリープデータを示す<sup>(30) (31)</sup>が、炉外データでは2.5~3.5%の歪量で3次クリープに達し、10~12%の歪でクリープ破断しているのに対し同じような応力レベルで行なった炉内クリープデータによると、試験終了時点では2次クリープの範囲内になり3次クリープへの移行はなく、歪量は夫々5%、8.5%および10%に達している。

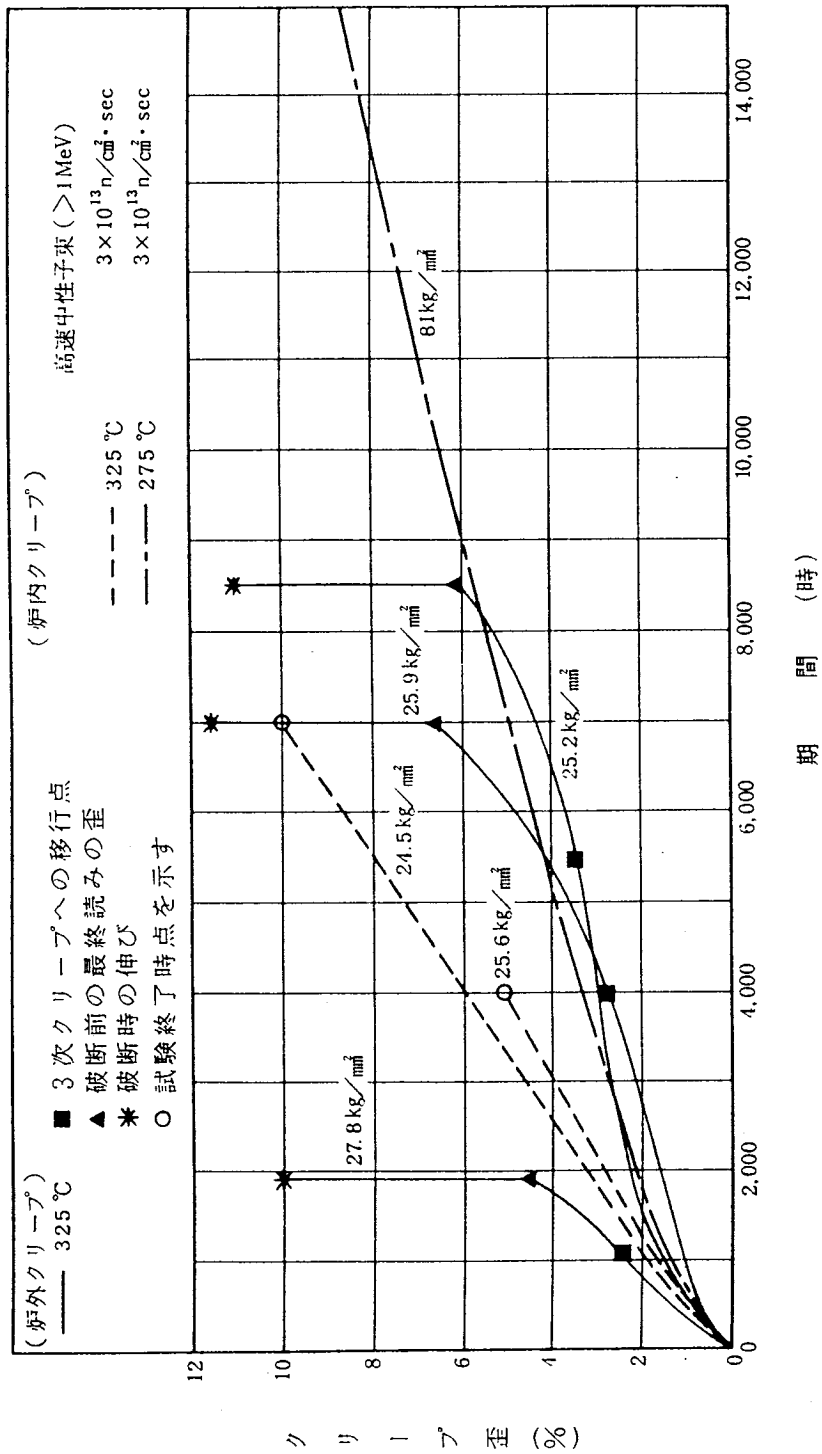
以上のデータから、ジルカロイ材の短時的変形の場合の破損に至る限界歪は約2%となっているが、クリープ変形の場合の2次クリープ末期の歪は、後述のように2軸クリープに換算してもこれよりさらに大きいものとなっている。

燃料設計では、燃料の寿命期間を通じての円周方向平均塑性歪量の制限値を短時的変形の場合の限界歪をもとに1%に設定した。

歪解析結果の内容については、第IV章1-(4)において述べたが照射による加速クリープをも考慮したクリープ歪の具体的計算に当っては、WatkinsとWood<sup>(31)</sup>等のデータおよび実験式をもとに次式を用いて実施している。



図V-3 ジルカロイ材の内圧クリープ歪 (試験温度; 263°C)



図V-4 ジルカロイ材の単軸クリープ歪

$$\varepsilon_{\text{clad}} = 1.869 \times 10^{-7} t^{0.085} \cdot \sigma^a \cdot \exp \left\{ \frac{1.19 (T - 300)}{T + 273} \right\} \\ + 1.545 \times 10^{-14} t \sigma^{1.225} \cdot \exp \left\{ \frac{-Q}{R (T + 273)} \right\} \phi^{0.85}$$

$\varepsilon_{\text{clad}}$  : 円周方向歪

t : 時間 (hr)

$\sigma$  : 円周方向応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

T : 温度 (°C)

$\phi$  : 高速中性子束 (> 1 MeV、n/cm<sup>2</sup>·sec)

R : ガス定数 (1.985 cal/mol·K)

Q : 活性化エネルギー (14,000 cal/mol)

a : 定数

このような2軸クリープの場合の円周歪と図V-4に示すような単軸クリープの歪との関係は、Ibrahimによって整理されており<sup>(31)</sup>、被覆管相当の材質の場合は、周方向応力 $\sigma$ のもとでの2軸クリープ歪速度は、 $1/2\sigma$ の応力のもとでの単軸クリープ歪速度に対応するものとなっている。この提案に準じると、前述した図V-4に示す炉内単軸クリープデータの場合の歪量は、同じ応力レベルでの2軸クリープの場合の円周歪に換算すると夫々約2%、3.5%および4%となる。

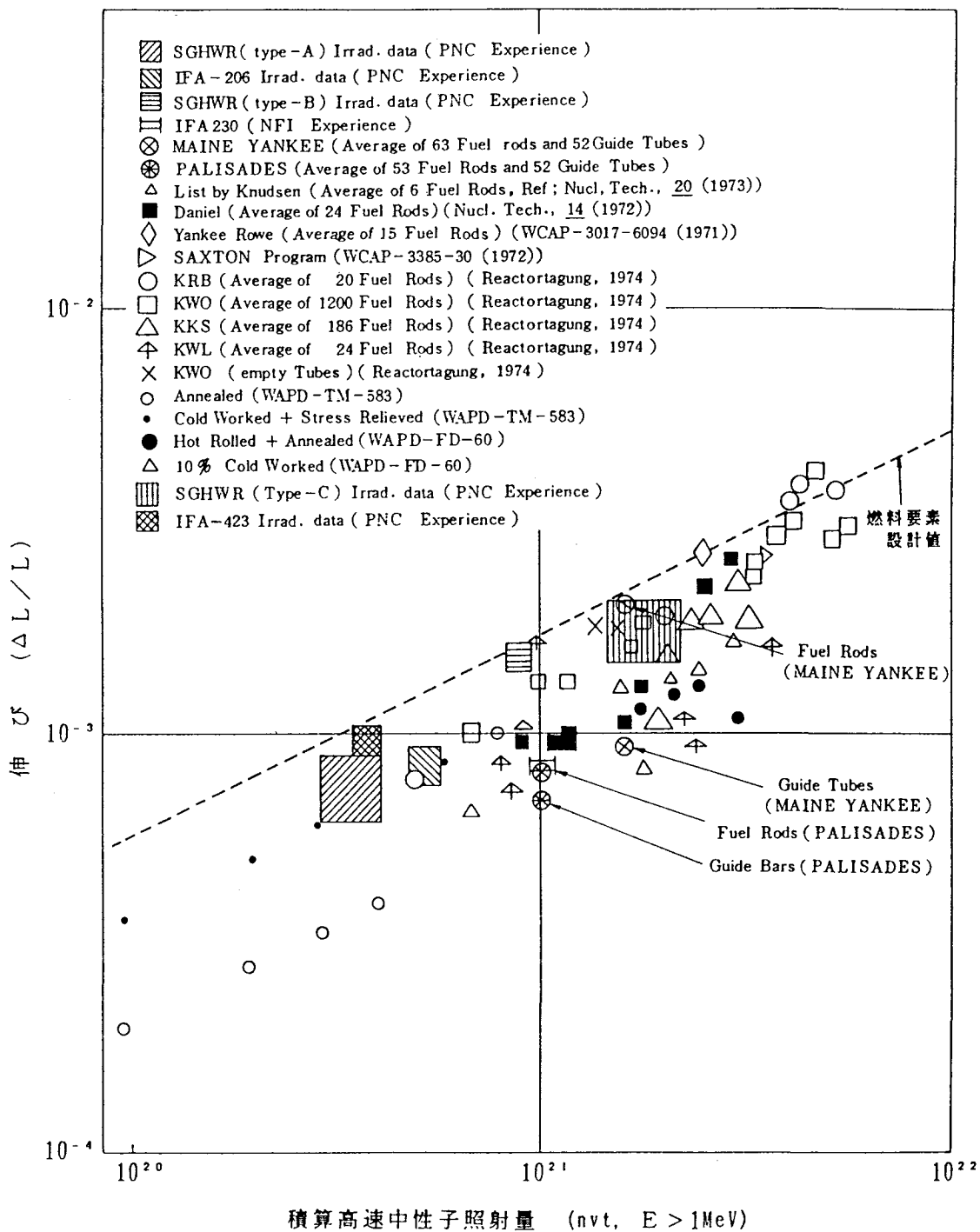
その他、ジルカロイに対する放射線の影響として照射成長がある。高速中性子照射による照射成長はジルカロイの非等方性の結果として起るものであり、柱面軸方向に伸び、基底面軸方向に縮む。被覆管の場合、その標準的な製造工程によると基底面軸が管の軸方向に垂直にそろっており、さらに冷間加工の方向に伸びる効果もあるため、被覆管は軸方向に伸びる。図V-5に軽水動力炉での燃料要素の伸びのデータおよびHalden炉と

SGHWRで照射した「ふげん」標準燃料体と同じサイズの燃料要素の伸びのデータを示すが、照射成長は高速中性子照射量とともに増加しており、伸びの比率は高速中性子照射量 ( $E > 1 \text{ MeV}$ ) のほぼ平方根に比例しているとみなしうる。<sup>(33)</sup>

燃料設計では、このような照射成長による伸びが起こったとしても問題のないよう、応力除去焼鈍の被覆管については図V-5のデータの上限に近い破線で示すまで照射成長を起すと仮定して、各部構造の設計を行なっている。

### (3) アルミナ

アルミナの照射による諸性質の変化を表V-3に示す。アルミナの寸法は照射によって異方性のある増加をするが、その程度は極くわずかなものであり、密度変化も1%程度以下である。機械的性質は照射によって実質的变化はなく、また、熱伝導率は、照射によって低下しており、アルミナの耐放射線性については問題はない。<sup>(34)</sup>



図V-5 燃料要素の照射成長

表V-3 アルミナの諸性質の照射による変化

性 質	変化量 (%)	照射量 (n/cm <sup>2</sup> )
格子定数 a 軸方向 c 軸方向	変化なし +0.08	$1.6 \times 10^{19}$ $1.6 \times 10^{19}$
密 度	-0.98 -0.17	$6 \times 10^{20}$ $3 \times 10^{19}$
熱伝導率	-4.2 -7.8	$3 \times 10^{19}$ $4 \times 10^{20}$
ヤング率	<-1.0 <-1.0	$(3 \sim 6) \times 10^{19}$ $1.6 \times 10^{20}$

(4) ステンレス鋼

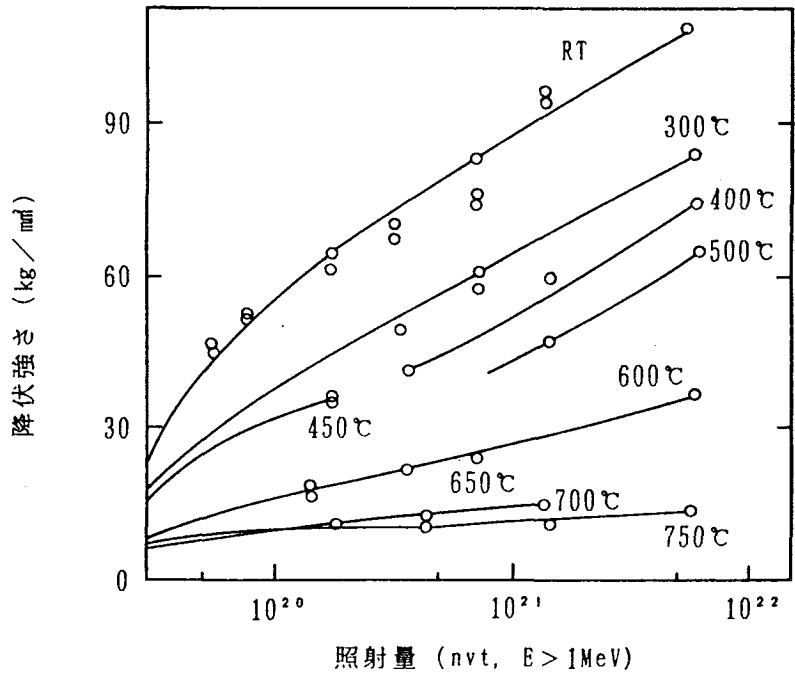
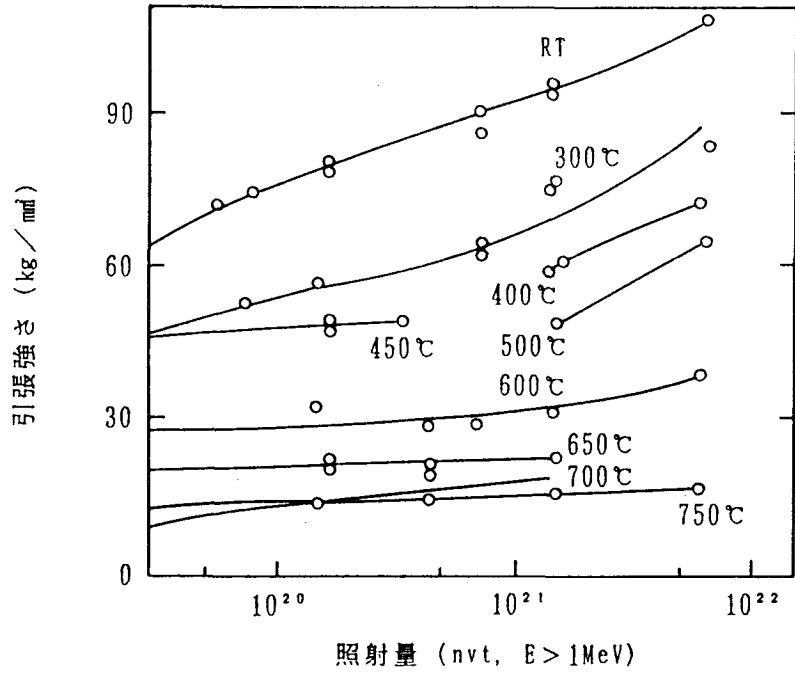
ステンレス鋼の照射データは数多く報告されているが、一例としてSUS 304 ステンレス鋼を290℃で照射し、種々の温度での引張性質に及ぼす照射量の影響を測定したデータ<sup>(35)</sup>を図V-6に示す。このようにステンレス鋼は、高速中性子照射により引張強さおよび耐力は上昇し、伸びは多少減少する。

ステンレス鋼の使用条件では、耐放射線性は問題になることはない。

(5) インコネル材

インコネル-718を280℃の高温水中で $5.4 \times 10^{20}$  nvtの高速中性子束を照射した後の機械的性質は表V-4に示す<sup>(36)</sup>ように数パーセント減少するのみであり、使用条件下でインコネル-718の耐放射線性が問題になることはない。





図V-6 SUS304 ステンレス鋼の引張強度に及ぼす照射の影響  
(照射温度290°C)

表V-4 インコネル-718の機械的性質の照射特性

照射量 > 1 MeV (n/cm <sup>2</sup> )	引張強さ		耐 力		伸 び	
	照射前	照射後	照射前	照射後	照射前	照射後
4.5×10 <sup>19</sup>	133~141	138	111~114	125	12~21	9
5.9×10 <sup>19</sup>	133~141	144	111~114	135	12~21	12~14
7.2×10 <sup>19</sup>	133~141	126~132	111~114	112~119	12~21	7~12
1.1×10 <sup>20</sup>	133~141	115~125	111~114	95~105	12~21	17~25
5.4×10 <sup>20</sup>	133~141	119~130	111~114	102~115	12~21	10~20

耐 力、引張強さ : (kg/mm<sup>2</sup>)  
伸 び : (%)

インコネル-Xは表V-5に示すように照射により伸びは、一様に減少するが、耐力は照射により増加する。引張強さは照射により、わずかに低下するが、照射量が増すと高くなっていく。<sup>(37)</sup>

使用条件下でインコネル-Xの耐放射線性が問題になることはない。

表V-5 インコネル-Xの機械的性質の照射特性

照射量 > 1 MeV (n/cm <sup>2</sup> )	引張強さ		耐 力		伸 び	
	照射前	照射後	照射前	照射後	照射前	照射後
1×10 <sup>18</sup>	123	114	81	94	25	21
1×10 <sup>19</sup>	123	109	81	101	25	17
1×10 <sup>20</sup>	123	110	81	105	25	13.5
1×10 <sup>21</sup>	123	119	81	114	25	13.0

耐 力、引張強さ : (kg/mm<sup>2</sup>) 伸 び : (%)

## VI 耐腐食性

### 1. 冷却材による腐食

#### (1)ジルカロイ材

ジルカロイ材の水および水蒸気による腐食は、原子炉内での照射条件下で、若干増加する傾向にある。図VI-1に炉内での水および水蒸気中の腐食データ<sup>(38)</sup>とドレスデン-IおよびVBWRでのジルカロイ-2被覆管の腐食量に関するデータ<sup>(39)</sup>を示す。炉内データによると約300°Cの水中では1年間当りの腐食増量は146 mg/d m<sup>2</sup>であり、厚さにすると約0.0092 mmとなる。

また、沸騰水型軽水炉での実績データによると、冷却水による腐食によって生ずる被覆管の肉厚減少は、3年当り10 μm程度であろうと報告されている。<sup>(40)</sup>

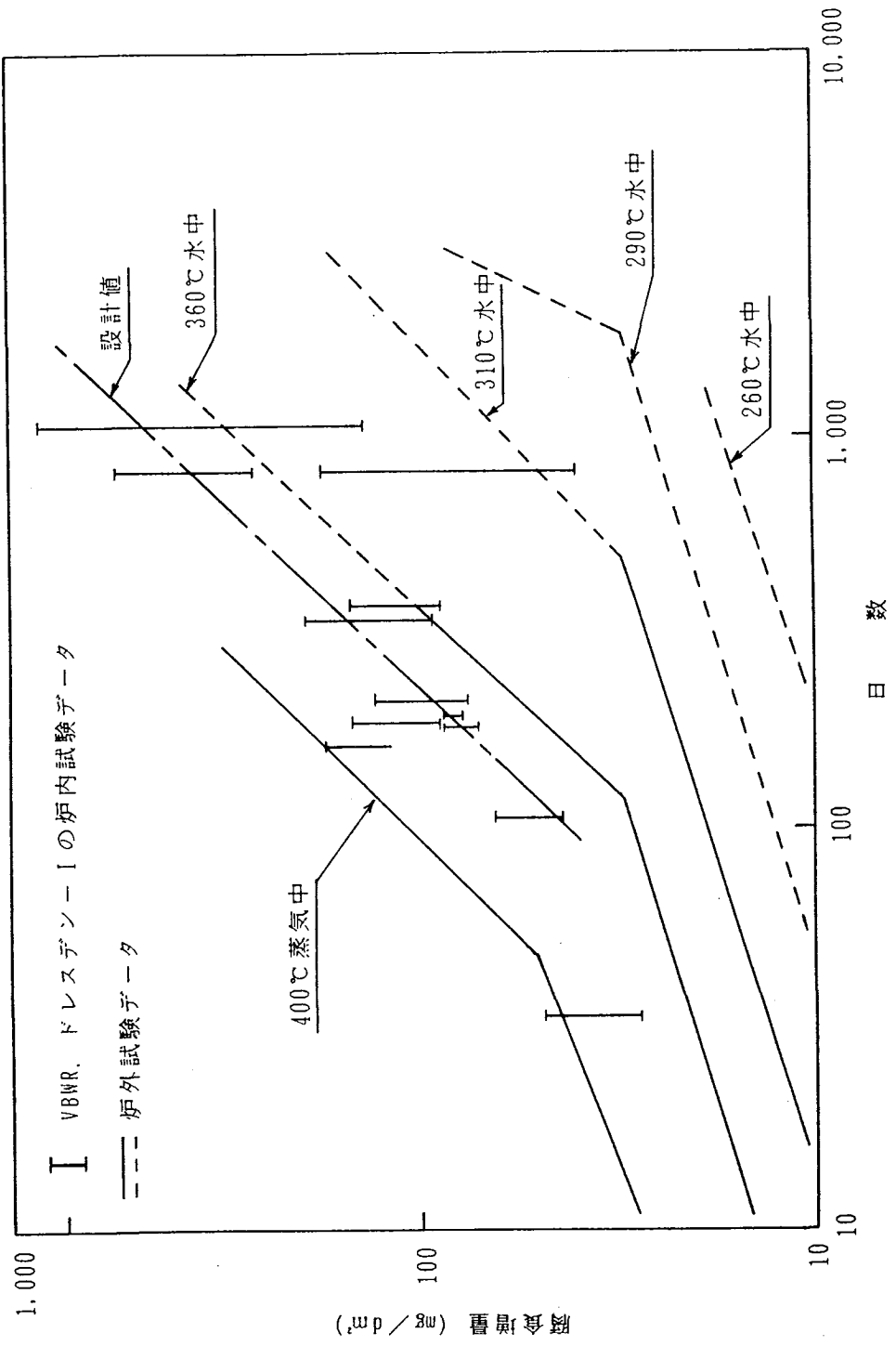
又、10年間の照射でも均一な酸化膜の厚さは15 μmを越えないという報告も出されている。<sup>(41)</sup>

燃料体の設計では、上記腐食データに基づき設計値として1年間当りの被覆管の肉厚減少量を0.01 mmとして温度および強度計算を行なっている。

#### (2)ステンレス鋼

SUS304系ステンレス鋼の高温の水蒸気による腐食量はpH値および温度により影響されるが、320~360°Cの高温水では $7.62 \times 10^{-4} \sim 10.16 \times 10^{-4}$  mm/年であり、約1,200時間で腐食速度は減少し腐食量は飽和しており<sup>(42)</sup>耐食性は問題ない。

SUS630の200°Cおよび250°Cの純水中の耐食性試験結果を表VI-1に示すが、SUS304系ステンレス鋼と比較してやや腐食が大きいが、実用上耐食性は問題ない。



図VI-1 ジルカロイ-2 の高温水中での腐食増量

表VI-1 SUS 630の純水中腐食試験結果

温度 \ 試験時間	500 h r
200℃	0.0049 mg/cm <sup>2</sup>
250℃	0.0059 mg/cm <sup>2</sup>

### 3) インコネル材

インコネル-718の腐食に関するデータ<sup>(43)</sup>によればインコネル-718の腐食量は320℃の高温水中5,000時間で19 mg/d m<sup>2</sup>となり、また腐食率は最初約4 mg/d m<sup>2</sup>/月であり5,000時間後は約1 mg/d m<sup>2</sup>/月に減少し、それ以後腐食量は飽和する傾向にある。

また、インコネル-Xの腐食についてもほぼインコネル-718と同程度である。したがって、使用条件下でインコネル材の耐食性は問題とならない。

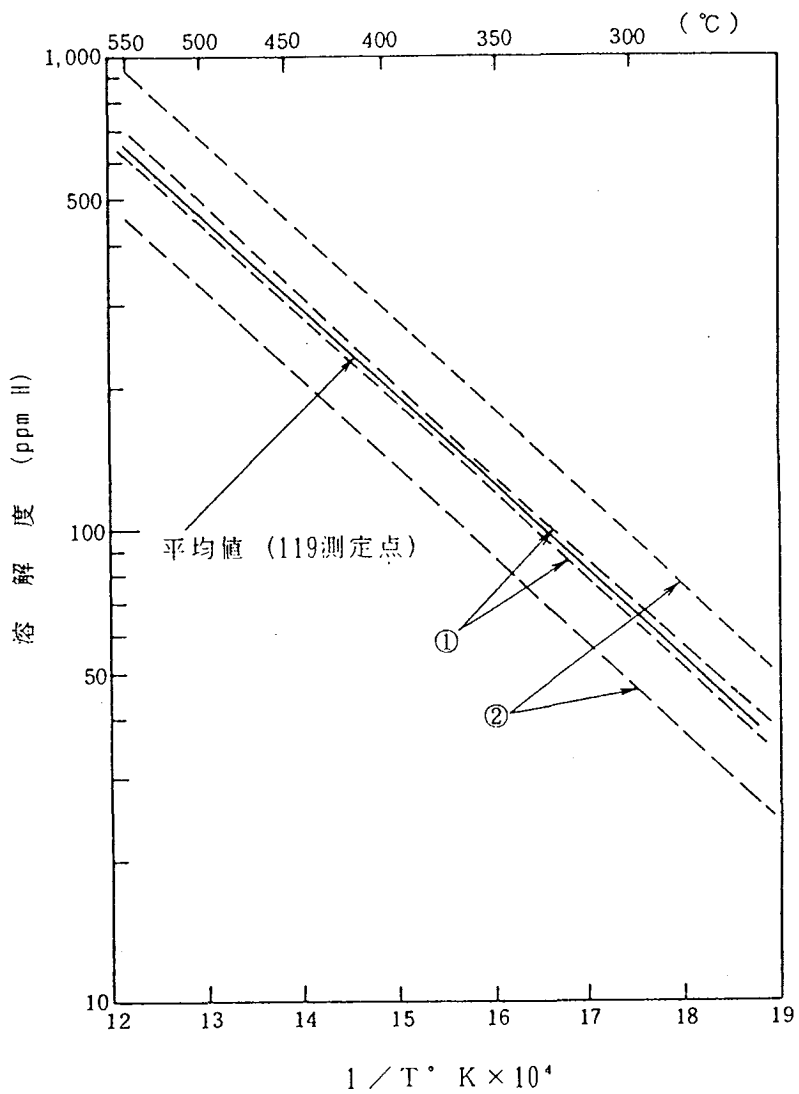
## 2. 水素吸収

### (1) 水素吸収

ジルカロイ中の水素の固溶限界はKearnsによって図VI-2のようにまとめられており<sup>(44)</sup>、300℃での水素の固溶量は50~100 ppmである。固溶限界以上の水素はZrH<sub>2</sub>に近い組成の水素化物として析出し、その配向性によっては機械的性質、特に延性に悪影響をおよぼすことになる。

ジルカロイ被覆管の中に吸収される水素は製造時に吸収されていたものを除くと主として冷却材との腐食反応およびペレットから放出された水の吸収によって供給される。

「ふげん」燃料被覆管の水素吸収量は、製作時に25 ppm以下とし、



図VI-2 ジルコニウム、ジルカロイ-2、ジルカロイ-4への水素の溶解度  
 { 点線①は、平均値の95%信頼限界、点線②は、95%の信頼  
 度で99%が含まれる範囲を示す。 }

使用中は年間 25 ppm<sup>(45)</sup> の水素吸収があるとして、燃料の寿命末期では約 130 ppm 程度と予想される。

ジルカロイ-2 の水素吸収量と引張強さおよび伸びとの関係を図 VI-3 および図 VI-4 に示す。<sup>(46)</sup>

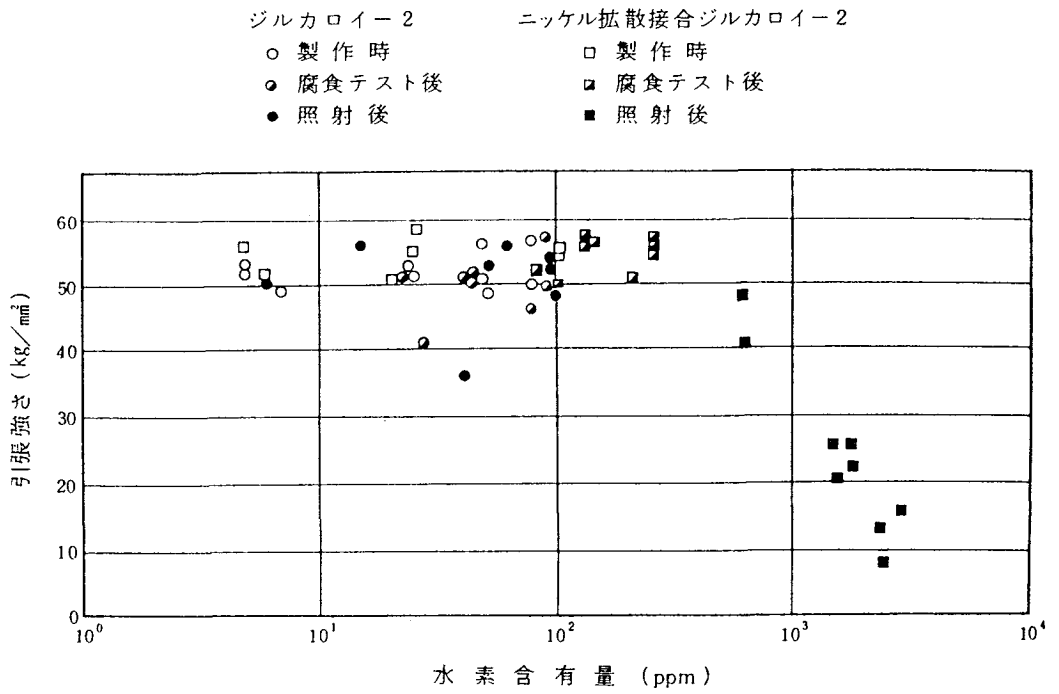
これらの図からジルカロイ-2 の引張強さは水素吸収量が約 400 ppm になるまで低下しない。また、伸びは水素吸収量が約 400 ppm 以上で 1% 以下に低下する。

したがって被覆管が燃料の寿命末期で 130 ppm 程度の水素を吸収した場合でも強度及び伸びに問題はない。<sup>(47)</sup>

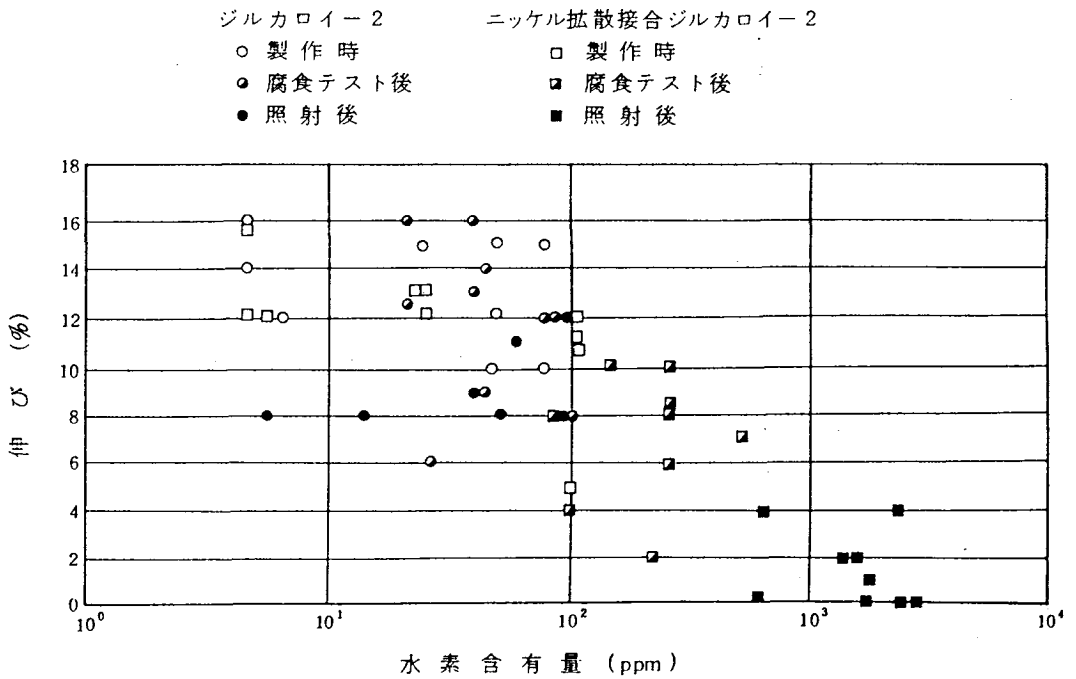
水素量以外に、水素化物の配向性が機械的特性に影響をもつ。配向性を示す指標の  $F_n$  値が大きい場合は伸びの低下が著しいが<sup>(48)</sup>、「ふげん」燃料の場合  $F_n(40^\circ) \leq 0.35$  と定めており、実用上の問題はない。

ジルカロイ管内面から水素化については、Joonらによれば<sup>(49)</sup>、ジルカロイ被覆管の内部水素化による破損の限界値として、被覆管内表面積あたり  $50 \mu\text{g H}_2\text{O}/\text{cm}^2$ 、要素内自由体積あたり  $2 \sim 3 \text{mg H}_2\text{O}/\text{cm}^3$  の値が報告されている。

ペレット中の蒸発性不純物のうち水分を  $10 \mu\text{l}/\text{g MO}_2$  以下に規定しているが、これは管内表面積あたり約  $30 \mu\text{g H}_2\text{O}/\text{cm}^2$ 、要素内自由体積あたり約  $0.8 \text{mg H}_2\text{O}/\text{cm}^3$  に相当し、十分な余裕が見込まれている。



図VI-3 ジルカロイ-2の水素吸収による引張強さの変化



図VI-4 ジルカロイ-2の水素吸収による伸びの変化



### 3. フレッチング腐食

燃料のスペーサは、フレッチングを抑えるため、次の配慮を行っている。

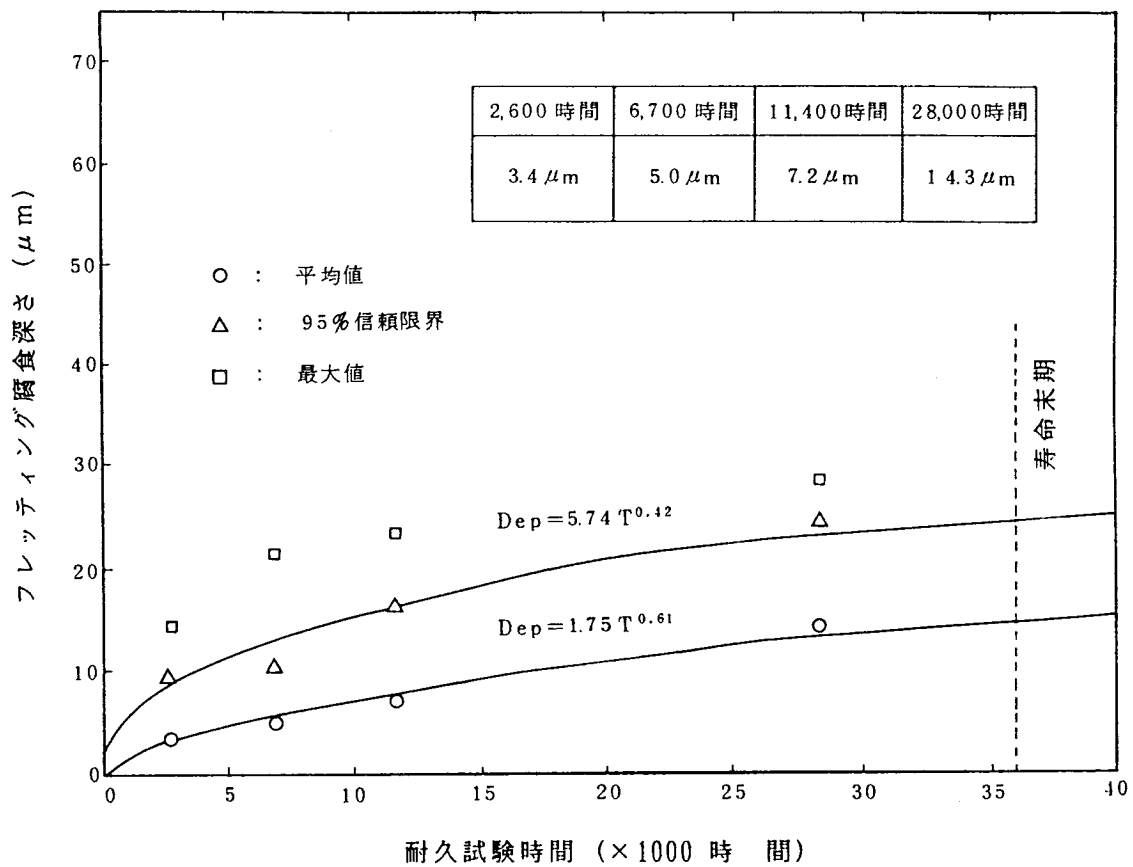
スペーサがジルカロイ管に直接接触する球面状の打出し部分の表面は滑らかな状態に仕上げを施し、また被覆管を保持するスプリングの強さは疲労および照射下での応力緩和を考慮しても、運転中にスペーサと被覆管とが離れることはないよう初期保持力を約2.7 kgに設定している。

フレッチング腐食に関するデータとしては、大洗工学センターのCTLループを用いて「ふげん」と同様な試験条件でのふげん標準燃料体に関する耐久試験と英国SGHWRでの照射後試験があり、ばね設計が適切な場合には、フレッチング腐食深さは、被覆管の肉厚の1/10よりも十分に下回っていることを確認している。

図VI-3にこれまで実施してきたふげん標準燃料体の28,000時間のフレッチング腐食深さの試験時間に対する変化を示すが、本耐久試験結果を基にフレッチング腐食深さの評価を行っている。

この結果、燃料の寿命末期（炉内滞在；36,000時間）における腐食深さの外挿値は約25  $\mu\text{m}$ であり、設計許容値である約80  $\mu\text{m}$ を十分下回る値となる。

また、SGHWRで照射した標準燃料体（SGHWR Type-C、D）の場合でもフレッチング腐食は極めて小さく、外観から見て最大深さは約15  $\mu\text{m}$ 程度であった。



図VI-3 フレッシング腐食深さの時間変化

## VII その他の性能

### 1. 腐食生成物

被覆管表面に付着する腐食生成物（クラッド）は、その形態の面から大別すると鉄の酸化物（ $Fe_2O_3$ ）を主成分とする多孔質のクラッドと銅の酸化物を主成分とする非多孔質のクラッドが考えられる。

多孔質のクラッドの場合は開いた空隙を持った組織であり水や水蒸気が自由に拡散しうるので熱抵抗とはならない。<sup>(50)</sup> また、銅濃度が多い場合（2ppb～5ppb）に生じる非多孔質クラッドの場合は、その熱伝導がよく100 $\mu$ mの厚さでも温度上昇は50 $^{\circ}C$ 程度である。<sup>(51)</sup>

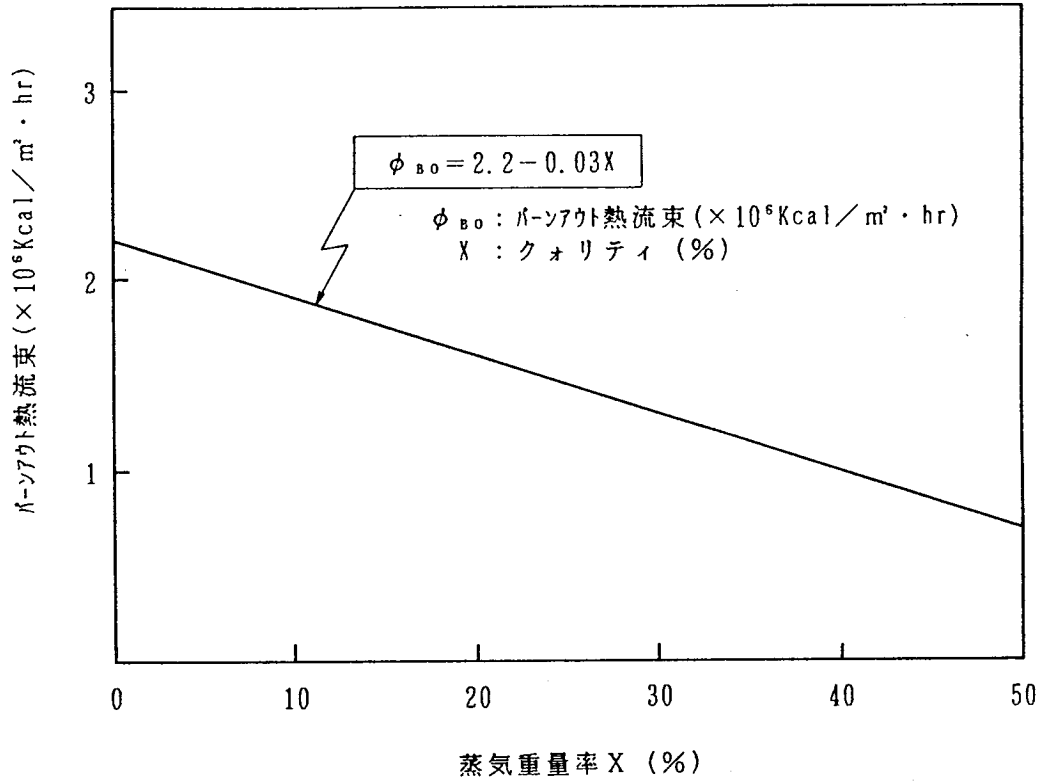
クラッドの付着厚さについてはDresden炉のSA-1燃料についての測定によれば1,568日当り28 $\mu$ mと報告されている。<sup>(52)</sup>

「ふげん」では1次系の水質はBWRの場合に準じて管理され、かつ冷却水が接する系の構成材料からみて、被覆管表面に付着するクラッドの形態は、鉄の酸化物（ $Fe_2O_3$ ）を主成分とする多孔質のものと考えられることから、クラッドによる温度上昇は余り問題とされないと考えられる。<sup>(50)</sup> 燃料設計では安全余裕をみてクラッドの熱伝導率を0.014w/cm $^{\circ}C$ 、付着速度を0.01mm/年として温度計算を行なっている。

なお、上述の条件のもとで計算した「ふげん」標準燃料体のクラッドによる温度上昇は最大25 $^{\circ}C$ となる。

### 2. 熱的余裕の検討

燃料体の熱的検討では、大洗工学センターでの実験結果を基礎としている。すなわち、燃料体の圧力損失については、CTLの実験結果を用いている。またバーンアウト熱流束については、HTLの実験結果より導びかれた図VII-1に示す設計式を用いて保守的に評価している。



図VII-1 限界熱流束と蒸気重量率の関係

## VIII 参考文献

- (1) ANL-4627, (1951)
- (2) WCAP-3269-41, (1965)
- (3) CRFD-1075, (1962)
- (4) DOCKET-50331
- (5) GEAP-4418, (1964)
- (6) NEDO-10173, (1970)
- (7) J. Nucl. Mat., 68, 360 (1977)
- (8) WAPD-T-1455, (1962)
- (9) AECL-2143, (1964)
- (10) 日本原子力学会誌、15, 822 (1973)
- (11) J. Nucl. Mat., 35, 195 (1970)
- (12) J. Nucl. Mat., 22, 332 (1967)
- (13) WCAP-6065, (1965)
- (14) J. Nucl. Mat., 36, 234 (1970)
- (15) ANS Conf. -710414-1, (1971)
- (16) GEAP-13515, (1969)
- (17) Reactor Handbook, McGraw-Hill, New York, (1955)
- (18) ステンレス鋼便覧、日刊工業新聞、(1973)
- (19) 耐熱材料ハンドブック、朝倉書店、(1965)
- (20) AMS 5597A
- (21) AMS 5590
- (22) Reactor Handbook, McGraw-Hill, New York, (1955)
- (23) International Nicke 社 技術資料
- (24) ASTM STP, 458, 141, (1969)
- (25) WAPD TM-651, (1967)

- (26) BMI-SA-653, (1966)
- (27) J. Nucl. Mat., 46, 169 (1973)
- (28) J. Nucl. Mat., 26, 51 (1968)
- (29) J. Nucl. Mat., 26, 12 (1968)
- (30) ASTM STP, 458, 226, (1968)
- (31) J. Nucl. Mat., 41, 327 (1971)
- (32) ASTM STP, 458, 18, (1968)
- (33) J. Nucl. Mat., 30, 219 (1969)
- (34) Effects of Radiation on Materials and Components, Reinhold  
Publishing Corp., New York, (1964)
- (35) BNWL-532, (1967)
- (36) Battelle Memorial Institute : Radiation Effects Information  
Center, REIC Report, No.45, (1967)
- (37) APEX-676, (1961)
- (38) Nucl. Eng. & Design, 21, 200 (1972)
- (39) J. Nucl. Mat., 28, 9 (1968)
- (40) CNA/ANS Topical Meeting, (1975)
- (41) ASTM STP-68, 94 (1978)
- (42) 特殊金属材料、コロナ社、(1968)
- (43) WAPD TM-1049, (1973)
- (44) J. Nucl. Mat., 22, 292 (1967)
- (45) J. Nucl. Mat., 28, 1 (1968)
- (46) ORNL-3281 (1962)
- (47) ASTM STP, 458, 141 (1969)
- (48) Trans. ASM. 56, 693 (1963)
- (49) Halden Programme Group-Meeting, (1971)

(50) CNA/ANS Topical Meeting, (1975)

(51) Netherland-Norwegian Reactor School, (1974)

(52) GEAP-10371, (1971)

添付書類〔Ⅱ〕

燃 料 体 の 強 度 計 算 書



# 目 次

I	概 要 .....	1
II	燃料要素の強度計算 .....	2
	1. 強度計算の考え方 .....	2
	2. 応力解析 .....	2
	3. 疲労解析 .....	3 9
	4. 座屈解析 .....	4 3
III	燃料体の地震時の評価 .....	4 5
	1. 設計震度 .....	4 5
	2. 設計地震波 .....	5 0
	3. 解析モデル .....	5 0
	4. 解析結果 .....	5 2
	5. 解析に用いた計算式 .....	5 6
IV	輸送時の健全性 .....	5 8
V	参考文献 .....	6 0

## I 概要

「ふげん」取替用標準燃料体が原子炉の使用条件下で安全性、健全性以及信頼性を燃料の寿命期間中維持できることを燃料体の強度計算により評価するとともに地震時の評価も併せて行なうことによって確認する。

燃料要素の強度計算は、プラント側条件および核・熱水力的条件に基づいて実施し、被覆管の機械的設計基準に合致していることを確認する。

燃料体の耐震強度は、プラント側より与えられた設計地震力を入力とした動的解析により、スペーサに加わる衝撃力および燃料要素に生じる応力について評価し、その健全性の確認を行なう。

## II 燃料要素の強度計算

### 1. 強度計算の考え方

強度計算および性能評価にあたっては、添付書類〔I〕の図Ⅱ-2に示す計算体系によって実施する。すなわち、定格出力条件のもとで、燃料要素の性能について時間依存の挙動を解析し、弾性応力、歪および座屈については、燃焼各段階で過渡状態を含む運転状態のもとで評価し、設計基準を満足していることを確認する。

また、疲労については表Ⅱ-1、表Ⅱ-2、図Ⅱ-1および図Ⅱ-2に示す運転条件および運転状態図に基づく原子炉サイクルに基づいて評価する。

### 2. 応力解析

#### (1) 応力計算の方法

応力は、ASME Sec. IIIに準拠して分類し、弾性解析で求めた応力を評価する。弾性応力解析は、時間無依存の短時的な延性破壊を起こさないことの確認を行なうためのものである。したがって応力計算は定格時とともに過渡状態の最も厳しい条件のもとで行なう。さらに、被覆管の寸法は最悪の場合を仮定し、さらに0.01mm/年の割合で腐食による肉厚減少するものとする。

応力計算には、つぎの原因による応力を考慮する。

<u>応力の原因</u>	<u>応力の種類</u>
① 内圧および外圧による応力	( $P_m$ )
② 被覆管楕円度による曲げ応力	( $P_b$ )
③ 被覆管肉厚方向温度勾配による応力	( $Q$ )
④ 流力振動による応力	( $P_b$ )
⑤ スペーサ支持点での保持力による応力	( $Q$ )

- ⑥ 周方向温度勾配による熱彎曲矯正により生じる応力 ( Q )
- ⑦ 軸方向温度勾配による応力 ( Q )
- ⑧ 端栓部圧力不連続による応力 ( P<sub>L</sub> , Q )
- ⑨ 端栓部温度不連続による応力 ( Q )
- ⑩ 地震力による応力 ( P<sub>b</sub> )

ここで、P<sub>m</sub> : 一般1次膜応力

P<sub>L</sub> : 局部1次膜応力

P<sub>b</sub> : 1次曲げ応力

Q : 2次応力

(2) 許容応力強さ

許容応力強さは、次の通りとする。

応力の種類	許容応力強さ
1次膜応力 ( P <sub>m</sub> )	S m
1次膜応力 ( P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub> )	1.5 S m
1次膜応力+1次曲げ応力(P <sub>m</sub> +P <sub>L</sub> +P <sub>b</sub> )	1.5 S m
1次応力+2次応力(P <sub>m</sub> +P <sub>L</sub> +P <sub>b</sub> +Q)	3 S m

なお、S mの値は2/3σ<sub>y</sub>または1/2σ<sub>u</sub>の小さい方の値をとる。

(ただし、σ<sub>y</sub> : 耐力、σ<sub>u</sub> : 抗張力)

ジルカロイ-2材の耐力および抗張力の値は添付資料〔I〕で述べたように照射によって高くなるが、本設計では未照射の「ふげん」燃料用被覆管の実測データを統計的に処理した結果から、S mの値として図Ⅱ-3に示す温度依存の値を採用した。

(3) 応力計算式

① 内圧および外圧による応力 ( $P_m$ )

内圧および外圧によって生じる応力は次式を用いて計算する。

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 \cdot r_o^2 (P_o - P_i)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} + \frac{P_i \cdot r_i^2 - P_o \cdot r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_\theta = \frac{-r_i^2 \cdot r_o^2 (P_o - P_i)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} + \frac{P_i \cdot r_i^2 - P_o \cdot r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_z = \frac{P_i \cdot r_i^2 - P_o \cdot r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$\sigma_r$  : 半径方向応力

$\sigma_\theta$  : 円周方向応力

$\sigma_z$  : 軸方向応力

$P_i$  : 内 圧

$P_o$  : 外 圧

$r_i$  : 被覆管内面半径

$r_o$  : 被覆管外面半径

$r$  : 被覆管任意位置での半径

② 被覆管楕円度による曲げ応力 ( $P_b$ )

被覆管は製作公差による楕円度を有することから、外圧によって円周方向曲げ応力が生ずる。

$$\sigma_\theta = \pm \frac{6 P_o \cdot r_m}{t^2} \cdot \frac{\omega}{1 - P_o / P_{cr}}$$

ここで

$$P_{or} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{r_m} \right)^3$$

$$\omega = \frac{1}{4} \{ D_o (max) - D_o (min) \}$$

t : 被覆管肉厚

P<sub>o</sub> : 外圧

r<sub>m</sub> : 被覆管平均半径  $\left( r_m = \frac{r_o + r_i}{2} \right)$

ω : 被覆管楕円度

D<sub>o</sub> (max) : 被覆管最大直径

D<sub>o</sub> (min) : 被覆管最小直径

E : ヤング率 (kg/mm<sup>2</sup>)

ν : ポアソン比

③ 被覆管肉厚方向温度勾配による応力 (Q)

被覆管の肉厚方向に温度勾配がある場合被覆管に熱応力が生じる。

熱応力は、次式を用いて計算する。

$$\sigma_r = \frac{E \alpha}{r^2 (1-\nu)} \left( - \int_{r_i}^r T(r) r dr + \frac{r^2 - r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr \right)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{E \alpha}{r^2 (1 - \nu)} \left( -T(r) r^2 + \int_{r_i}^r T(r) r dr + \frac{r^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr \right)$$

$$\sigma_z = \frac{E \alpha}{1 - \nu} \left( -T(r) + \frac{2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr \right)$$

ここで

$$T(r) = \frac{T_i - T_o}{\ln r_i - \ln r_o} \ln r + \frac{T_o \ln r_i - T_i \ln r_o}{\ln r_i - \ln r_o}$$

$r_o$  : 被覆管外面半径

$r_i$  : 被覆管内面半径

$r$  : 被覆管任意位置での半径

$T(r)$  : 被覆管任意位置での温度

$E$  : ヤング率 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$\nu$  : ポアソン比

$\alpha$  : 熱膨張係数 ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$T_i$  : 被覆管内面温度

$T_o$  : 被覆管外面温度

#### ④ 流力振動による曲げ応力 ( $P_b$ )

燃料要素は、冷却材の流れによって振動し、燃料要素に曲げ応力が生ずる。この流れによる振動は次式で表わされるPaidoussisの式<sup>(1)</sup>を用いて計算する。

$$\frac{\delta}{D_o} = \alpha^{-4} \left( \frac{u^{1.6} \varepsilon^{1.8} N R^{0.25}}{1 + u^2} \right) \left( \frac{D_h}{D_o} \right)^{0.4} \left( \frac{\beta^{2/3}}{1 + 4\beta} \right)$$

$$\times (5 \times 10^{-4} \text{K})$$

$\delta$  : 流力振動による振幅

$D_o$  : 被覆管外径

$$u : \left( \frac{M}{E I} \right)^{1/2} U \ell$$

$M$  : 単位長さ当りの流体の質量

$U$  : 燃料要素軸方向に沿った流速

$D_h$  : 水力学的等価直径

$NR$  : レイノルズ数

$$\beta : \frac{M}{(M+m)}$$

$m$  : 単位長さ当りの燃料要素質量

$\varepsilon$  :  $\ell / D_o$

$\alpha$  : 両端支持 (燃料要素)  $\pi$

$K$  : 流れの乱れのレベルを表わす因子

(実際の流れでは  $K = 5$ )

$E$  : ヤング率 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$\ell$  : スペーサスパン

$I$  : 被覆管断面 2 次モーメント

計算結果、最大振動振幅は 0.01 mm であるが応力値としてはこの 2 倍の値を振動幅として計算する。

流力振動は、スペーサ位置を節とする振動であり、最大曲げ応力はスペーサ間中央に生じ次の式を用いて計算する。

$$\sigma_z = \frac{24 E D_o \delta}{5 \ell^2}$$



⑤ スペーサ支持点での保持力による応力 (Q)

次式を用いて計算する。

$$\sigma_{\theta} = - \frac{P}{t^2} \left[ 0.42 \log \left( \frac{0.215}{b} r_m \right) \frac{6}{4\pi} \right]$$

$$\sigma_z = - \frac{P}{t^2} \left[ 0.42 \log \left( \frac{0.215}{b} r_m \right) \frac{6\nu}{4\pi} \right]$$

t : 被覆管肉厚

r<sub>m</sub> : 被覆管平均半径

P : 接触力 (3.5 kg)

b : 接触面積半径 (25 μm)

ν : ポアソン比

⑥ 周方向温度勾配による熱彎曲矯正により生ずる応力 (Q)

周方向温度分布の不均一による燃料要素の熱彎曲をスペーサで矯正することにより生ずる応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_z = \frac{MD_0}{2I}$$

D<sub>0</sub> : 被覆管外径

I : 断面2次モーメント

$$M = E \alpha \cdot \Delta T \cdot \frac{I}{D_0}$$

E : ヤング率

α : 熱膨張係数

ΔT : 周方向最大温度差

⑦ 軸方向温度勾配による応力 (Q)

冷却水の温度は、279℃の入口温度から、燃料体部を通過する

につれて直線的に上昇し、約1m通過した点で沸騰温度286℃に達する。このため、被覆管には軸方向に沿って温度勾配の非直線性が生じるため応力が生じる。

応力は次式を用いて計算する。

$$\sigma_{\theta} = \frac{2 M_0}{t} \beta^2 r_m \pm \frac{6 \nu M_0}{t^2}$$

$$\sigma_z = \pm \frac{6 M_0}{t^2}$$

ここで  $t$  : 被覆管肉厚

$r_m$  : 被覆管平均半径

$\alpha$  : 熱膨張係数 ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\nu$  : ポアソン比

$$M_0 = \frac{-\beta D \alpha \cdot r_m \cdot \Delta T}{2}$$

$\Delta T$  : 単位長さ当りの軸方向温度勾配

$$\beta^4 = \frac{3(1-\nu^2)}{r_m^2 t^2}$$

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12 \times (1-\nu^2)}$$

### ⑧ 端栓部圧力不連続による応力 ( $P_L$ 、 $Q$ )

端栓連結部において被覆管は自由変形が拘束され、局部膜応力および曲げ応力が生ずる。

応力は、次式を用いて計算する。

$$\sigma_{\theta} = \frac{E \omega_p}{r_0} \pm \frac{6 \nu M_p}{t^2}$$

$$\sigma_z = \pm \frac{6 M_p}{t^2}$$

ここで、 $\omega_p = (1 - \nu / 2) (P_o - P_i) r_m r_i / E \cdot t$   
 $M_p$  は次式により求める。

$$\left( \frac{1}{2 \beta^3 D} \right) Q_p + \left( \frac{1}{2 \beta^2 D} \right) M_p = W_p$$

$$\left( \frac{1}{2 \beta^2 D} \right) Q_p + \left( \frac{2}{2 \beta D} \right) M_p = 0$$

$r_o$  : 被覆管外面半径

$t$  : 被覆管肉厚

$P_o$  : 外 圧

$P_i$  : 内 圧

$r_i$  : 被覆管内面半径

$r_m$  : 被覆管平均半径

$E$  : ヤング率 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$\nu$  : ポアソン比

$$\beta^4 = 3 (1 - \nu^2) / r_m^2 t^2$$

$$D = E t^3 / 12 (1 - \nu^2)$$

⑨ 端栓部温度不連続による応力 (Q)

端栓連結部において、端栓温度と被覆管の内面および外面の温度の違いにより応力が生ずる。

応力は、次式を用いて計算する。

$$\sigma_\theta = \frac{E \omega_t}{r_o} \pm \frac{6 \nu M_t}{t^2}$$

$$\sigma_z = \frac{6 M_t}{t^2}$$

ここで、 $M_t$ 、 $\omega_t$ は次式により求まる。

$$\left(\frac{1}{2\beta^3 D}\right)Q_t + \left(\frac{1}{2\beta^2 D}\right)M_t + \frac{\alpha(T_i + T_o)r_o}{2} + \left(\frac{1}{2\beta^2 D}\right)\frac{E\alpha(T_i + T_o)t^2}{12(1-\nu)} = \alpha T_o \cdot r_o$$

$$\left(\frac{1}{2\beta^3 D}\right)Q_t + \left(\frac{1}{\beta D}\right)M_t + \left(\frac{1}{\beta D}\right)\frac{E\alpha(T_i + T_o)t^2}{12(1-\nu)} = 0$$

$$\omega_t = \left(\frac{1}{2\beta^3 D}\right)Q_t + \left(\frac{1}{2\beta^2 D}\right)M_t$$

$r_o$  : 被覆管外面半径

$t$  : 被覆管肉厚

$T_i$  : 端栓部内面温度

$T_o$  : 端栓部外面温度

$E$  : ヤング率 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$\nu$  : ポアソン比

$\alpha$  : 熱膨張係数 ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$T_o$  : 端栓部温度 ( $286^{\circ}\text{C}$ )

$\beta^4 = 3(1-\nu^2)/r_m^2 t^2$

$D = E t^3 / 12(1-\nu^2)$

⑩ 地震力による応力 ( $P_b$ )

地震時には圧力管との衝突に伴う衝撃が付加され、燃料要素のスペーサ支持部において軸方向最大曲げ応力が生じる。

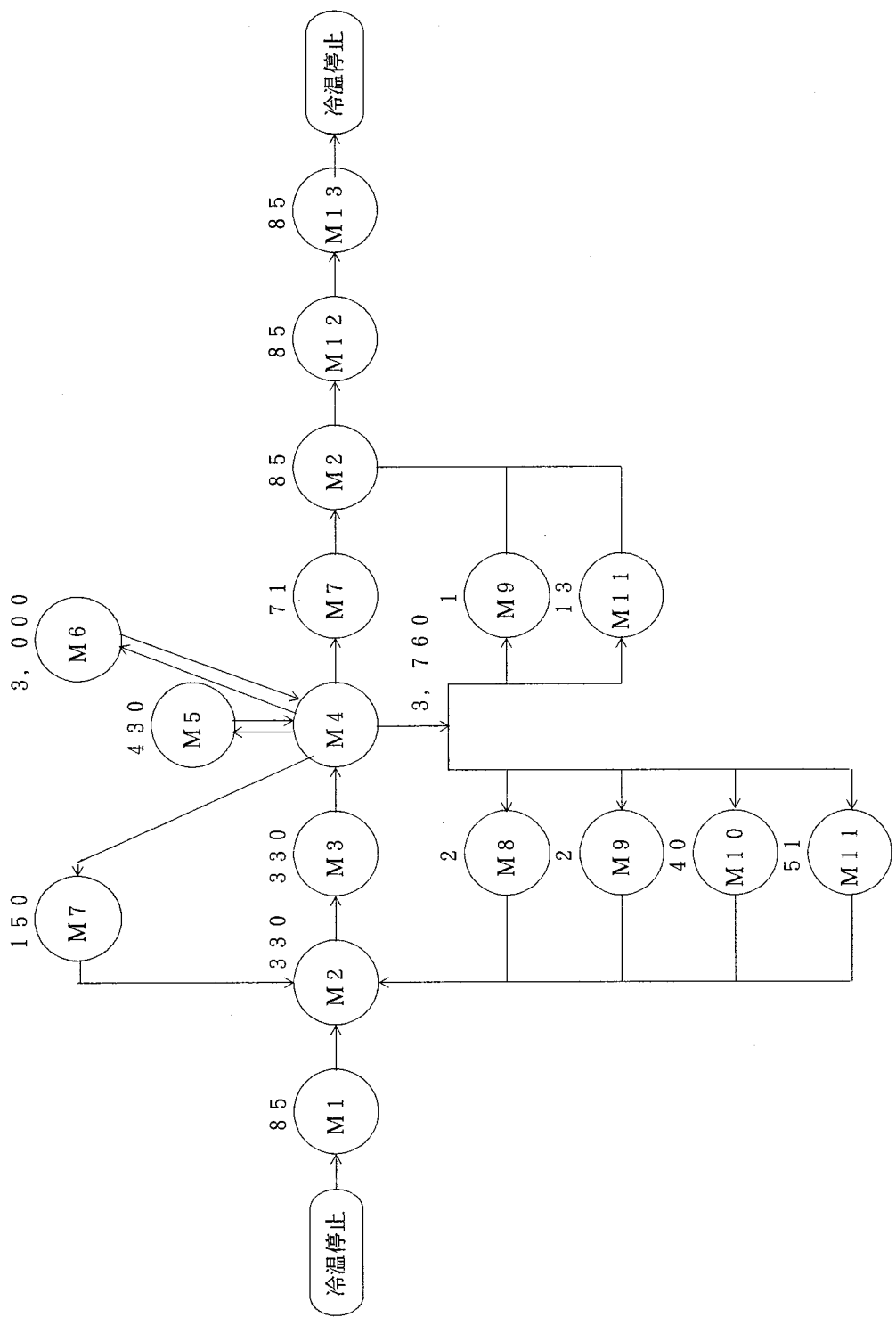
計算方法は第Ⅲ章に述べる。

(4) 応力計算結果

弾性応力解析は、定格時と過渡時最高の各々の場合について、内圧もしくは外圧のいずれか高い方が作用するとして、寿命初期、寿命中期および寿命末期に分けて実施した。

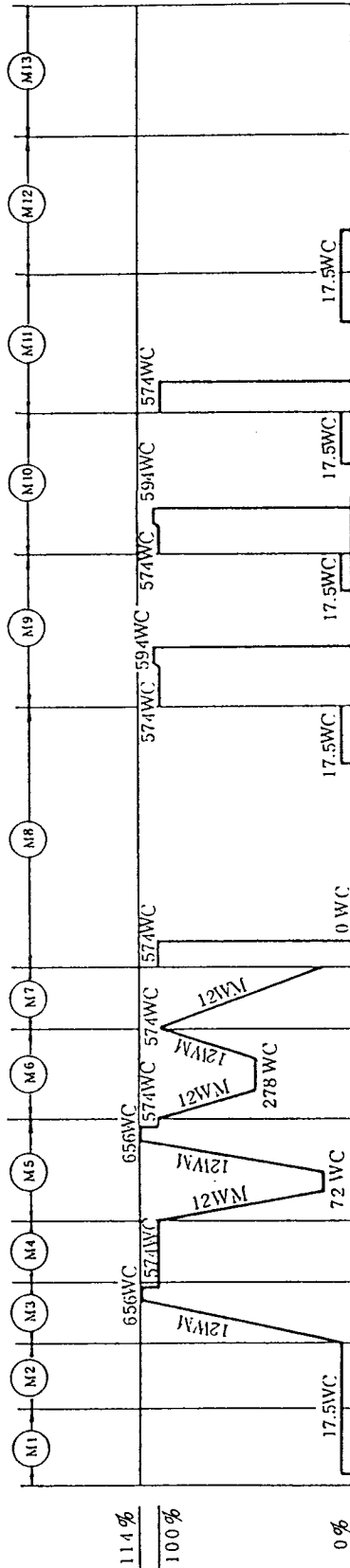
応力計算に使用した各時点での圧力、温度および寸法は表Ⅱ-3に示す。計算結果は定格時を表Ⅱ-4～表Ⅱ-6に過渡時最高を表Ⅱ-7～表Ⅱ-9に寿命初期、寿命中期、寿命末期に分けて示す。各表はさらに直管部（スペーサ部）、直管部（スペーサ間中央）および端栓連結部に分けて示す。

各種原因による応力値をASME Sec. Ⅲに準じて応力の種類毎にまとめて表Ⅱ-10（定格時）、表Ⅱ-11（過渡時最高）に示す。直管部についてはスペーサ部とスペーサ間中央のうち大きい方の値を示している。表Ⅱ-10、表Ⅱ-11において応力の強さとその許容応力の割合を示す。定格時では、寿命末期の直管部一次膜応力 ( $P_m$ ) が、また過渡時最高では寿命末期の直管部一次膜応力 ( $P_m$ ) が一番きびしく、応力強さと許容力の割合は各々0.65、0.94であり、寿命期間中を通じていずれの位置においても許容応力の範囲内にあり設計基準をみたしている。



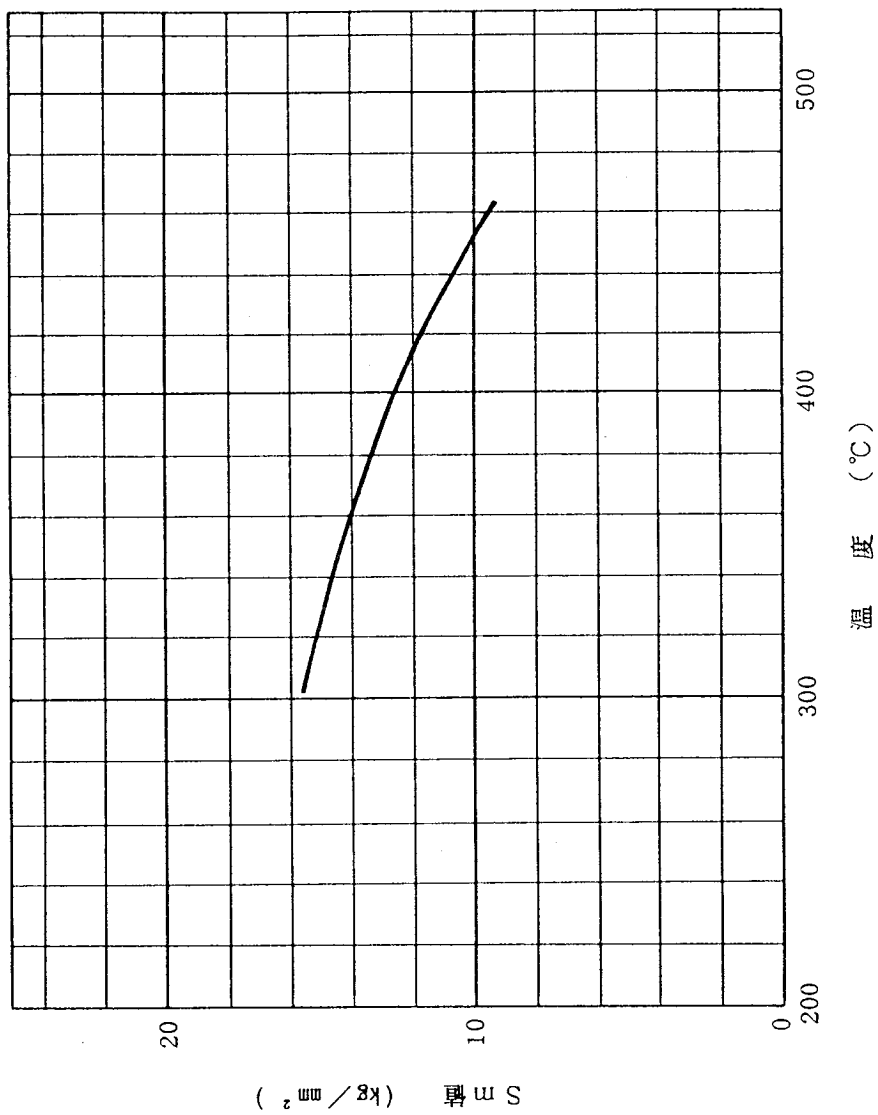
図II-1 運転状態図 (数字は回数を示す)

燃料要素発熱量



W C : 燃料要素発熱量 W / cm  
 W M : 燃料要素発熱変化 W / cm / min

図II-2 燃料の熱サイクル図



図II-3 S mの温度依存性



表II-1 原子炉出力変化

モード番号	運転条件	運転条件の説明	繰返し回数	備考
M 1	起動 (I)	冷温停止から高温停止までの原子炉温度上昇	8 5	5 5 °C/H
M 2	高温停止	高温停止	4 1 5	
M 3	起動 (II)	高温停止から出力運転まで	3 3 0	
M 4	出力運転	定格出力運転	3, 7 6 0	
M 5	出力変化 (I)	発電出力変化	4 3 0	電気出力が 0 % まで
M 6	出力変化 (II)	発電出力変化	3, 0 0 0	電気出力が 3 5 % まで。制御棒引き抜き阻止
M 7	停止 (I)	出力運転から高温停止まで	2 2 1	
M 8	所内電源喪失	出力運転中の所内電源喪失	2	R I C により蒸気ドラム水位圧力の維持
M 9	スクラム (I)	タービントリップ	3	
M 10	スクラム (II)	タービントリップ	4 0	
M 11	スクラム (III)	手動その他	6 4	
M 12	停止 (II)	給水により水位を保ちながら原子炉圧力低下	8 5	高温停止から余熱除去系作動領域まで
M 13	停止 (III)	原子炉温度低下	8 5	余熱除去系により原子炉温度低下

表II-2 原子炉の出力変動モードと繰返し回数

運転条件		起 動 (I)	高 温 停 止	起 動 (II)	出 力 運 転	出 力 変 化 (I)	出 力 変 化 (II)	停 止 (I)	所 内 電 源 喪 失	ス ク ラ ム (I)	ス ク ラ ム (II)	ス ク ラ ム (III)	停 止 (II)	停 止 (III)
運転条件の説明		冷 却 停 止 後 高 温 停 止	高 温 停 止	高 温 停 止 後 出 力 運 転 まで	定 格 出 力 運 転	発 電 出 力 変 化 0% まで)	発 電 出 力 変 化 35% まで)	出 力 運 転 中 高 温 停 止 まで	出 力 運 転 中 所 内 電 源 喪 失	タ ー ビ ン ス ト リ ッ プ 作 動)	タ ー ビ ン ス ト リ ッ プ 作 動)	手 動 ・ そ の 他	給 水 系 原 子 炉 圧 力 保 持 下	原 子 炉 温 度 低 下
出力変動モード番号		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13
原子炉の運転履歴 (出力変動モード)		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13
1	100% → 0% e → 114% → 100%				M4 → M5 → (M4)	430	430							
2	100% → 35% e → 114% → 100%				M4 → M5 → (M4) → M6	3000	3000							
3	100% → Hot → 114% → 100%		150	150	M4 → M7 → M2 → M3 → (M4)	150		150						
4	100% → Hot (S) → 114% → 100%		2	2	M4 → M8 → M2 → M3 → (M4)	2			2					
5	100% → 103% → Hot (S1) → 114% → 100%		2	2	M4 → M9 → M2 → M3 → (M4)	2				2				
6	100% → 103% → Hot (S2) → 114% → 100%		40	40	M4 → M10 → M2 → M3 → (M4)	40					40			
7	100% → Hot (S3) → 114% → 100%		51	51	M4 → M11 → M2 → M3 → (M4)	51						51		
8	Cold → Hot → 114% → 100% → 103% → Hot → Cold	1	1	1	冷 → M1 → M2 → M3 → M4 → M9 → M2 → M12 → M13 → (冷)	1				1			1	1
9	Cold → Hot → 114% → 100% → 103% → Hot (S3) → Cold	13	13	13	冷 → M1 → M2 → M3 → M4 → M11 → M2 → M12 → M13 → (冷)	13						13	13	13
10	Cold → Hot → 114% → 100% → Hot → Cold	71	71	71	冷 → M1 → M2 → M3 → M4 → M7 → M2 → M12 → M13 → (冷)	71		71					71	71
運転条件毎の繰返し回数		85	330	330	3760	430	3000	221	2	3	40	64	85	85

・ 100% : 100%出力    ・ 114% : 114%出力    ・ 0% e : 電気出力0%    ・ Cold : 冷温停止  
 ・ 103% : 103%出力    ・ 35% e : 電気出力35%    ・ Hot : 高温停止    ・ 冷 : "

表Ⅱ-3 各時点での圧力、寸法および温度

時 期 項 目	定 格 時			過 渡 時 最 高		
	寿命初期	寿命中期	寿命末期	寿命初期	寿命中期	寿命末期
$P_o$ (kg/mm <sup>2</sup> ・a)	0.73	—	—	0.83	—	—
$P_i$ (kg/mm <sup>2</sup> ・a)	—	0.75	0.82	—	1.05	1.15
$r_i$ (mm)	7.375	7.375	7.375	7.375	7.375	7.375
$r_o$ (mm)	8.095	8.075	8.054	8.095	8.075	8.054
$r_m$ (mm)	7.735	7.724	7.714	7.735	7.724	7.714
$t$ (mm)	0.720	0.700	0.679	0.720	0.700	0.679
直 管 部						
$T_i$ (°C)	359	381	387	369	394	402
$T_o$ (°C)	294	327	341	296	333	349
端 栓 部						
$T_i$ (°C)	338	358	362	350	369	374
$T_o$ (°C)	293	318	328	295	323	330

表Ⅱ-4-(1) 応力計算結果 (定格時 寿命初期)

応力の原因	種類	直管部 (スパーサ部)					
		円周方向 応力 ( $\sigma_t$ )		軸方向 応力 ( $\sigma_z$ )		半径方向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	-8.47	-7.75	-4.24	-4.24	0.00	-0.72
② 被覆管橢円度による 曲げ応力	$P_b$	$\pm 2.08$	$\pm 2.08$	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	$Q$	-2.73	2.57	-2.73	2.57	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$						
⑤ スパーサ支持点での 保持力による応力	$Q$	7.19	-7.19	5.52	-5.52	—	—
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	$Q$	—	—	$\pm 0.25$	$\pm 0.25$	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	$Q$	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$						
	$Q$						
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	$Q$						
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	$\pm 0.21$	$\pm 0.21$	—	—
(ま と め)							
①	$P_m$	-8.11		-4.24		-0.36	
		7.75					
①+②+⑩	$P_m + P_L + P_b$	-10.55	-9.83	-4.45	-4.45	0.00	-0.72
		10.55					
①+②+③+⑤ +⑥+⑦+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	-6.09	-14.46	-1.91	-7.65	0.00	-0.72
		13.74					

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)



表II-4-(3) 応力計算結果 (定格時 寿命初期)

応力の原因	種類	端 栓 連 結 部					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸 方 向 応力 ( $\sigma_z$ )		半 径 方 向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内 面	外 面	内 面	外 面	内 面	外 面
① 内外圧による応力	$P_m$	-8.47	-7.75	-4.24	-4.24	0.00	-0.72
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	±2.07	±2.07	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	$Q$	-1.90	1.78	-1.90	1.78	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	—	—	±0.18	±0.18	—	—
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	$Q$						
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	$Q$	—	—	±0.25	±0.25	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	$Q$	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	5.66	5.66	—	—	—	—
	$Q$	-4.38	4.38	-11.16	11.16	—	—
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	$Q$	-1.99	-2.81	1.05	-1.05	—	—
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.16	±0.16	—	—
(ま と め)							
①+⑧	$P_m + P_L$	-2.81	-2.09	-4.24	-4.24	0.00	-0.72
		4.24					
①+②+④+⑧+⑩	$P_m + P_L + P_b$	-4.88	-4.16	-4.58	-4.58	0.00	-0.72
		4.88					
①+②+③+④+⑥ +⑦+⑧+⑨+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	-13.15	3.34	-16.84	8.26	0.00	-0.72
		16.84					

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)

表Ⅱ-5-(1) 応力計算結果 (定格時 寿命中期)

応力の原因	種類	直管部 (スペーサ部)					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸方向 応力 ( $\sigma_z$ )		半径方向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	8.24	7.49	3.74	3.74	-0.75	0.00
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	$\pm 0.00$	$\pm 0.00$	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	Q	-2.26	2.12	-2.26	2.12	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$						
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	Q	7.50	-7.50	5.78	-5.78	—	—
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	Q	—	—	$\pm 0.25$	$\pm 0.25$	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	Q	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$						
	Q						
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	Q						
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	$\pm 0.21$	$\pm 0.21$	—	—
(ま と め)							
①	$P_m$	7.86		3.74		-0.37	
		8.24					
①+②+⑩	$P_m + P_L + P_b$	8.24	7.49	3.95	3.95	-0.75	0.00
		8.99					
①+②+③+⑤ +⑥+⑦+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	13.48	2.11	7.72	-0.55	-0.75	0.00
		14.23					

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)





表Ⅱ-5-(3) 応力計算結果 (定格時 寿命中期)

応力の原因	種類	端 栓 連 結 部					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸 方 向 応力 ( $\sigma_z$ )		半 径 方 向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内 面	外 面	内 面	外 面	内 面	外 面
① 内外圧による応力	$P_m$	8.24	7.49	3.74	3.74	-0.75	0.00
② 被覆管桁円度による 曲げ応力	$P_b$	±0.00	±0.00	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	$Q$	-1.68	1.58	-1.68	1.58	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	—	—	±0.18	±0.18	—	—
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	$Q$						
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	$Q$	—	—	±0.25	±0.25	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	$Q$	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	-6.01	-6.01	—	—	—	—
	$Q$	4.72	-4.72	11.87	-11.87	—	—
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	$Q$	-2.02	-4.73	3.41	-3.41	—	—
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.16	±0.16	—	—
(ま と め)							
①+⑧	$P_m + P_L$	2.23	1.48	3.74	3.74	-0.75	0.00
		4.49					
①+②+④+⑧+⑩	$P_m + P_L + P_b$	2.23	1.48	4.08	4.08	-0.75	0.00
		4.83					
①+②+③+④+⑥ +⑦+⑧+⑨+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	3.24	-6.39	17.93	-10.54	-0.75	0.00
		18.68					

(単位 : kg/mm<sup>2</sup>)

表Ⅱ-6-(1) 応力計算結果 (定格時 寿命末期)

応力の原因	種類	直管部 (スペーサ部)					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸方向 応力 ( $\sigma_z$ )		半径方向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	9.14	8.32	4.16	4.16	-0.82	-0.00
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	±0.00	±0.00	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	Q	-1.92	1.81	-1.92	1.81	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	/					
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	Q	7.70	-7.70	5.93	-5.93	—	—
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	Q	—	—	±0.24	±0.24	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	Q	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	/					
	Q	/					
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	Q	/					
	Q	/					
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.21	±0.21	—	—
(ま と め)							
①	$P_m$	8.73		4.16		-0.41	
		9.14					
①+②+⑩	$P_m + P_L + P_b$	9.14	8.32	4.37	4.37	-0.82	-0.00
		9.96					
①+②+③+⑤ +⑥+⑦+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	14.92	2.43	8.62	0.49	-0.82	-0.00
		15.74					

(単位 :  $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

表II-6-(2) 応力計算結果 (定格時 寿命末期)

応力の原因	種類	直管部 (スペーサ間中央)					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸方向 応力 ( $\sigma_z$ )		半径方向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	9.14	8.32	4.16	4.16	-0.82	-0.00
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	$\pm 0.00$	$\pm 0.00$	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	Q	-1.92	1.81	-1.92	1.81	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	—	—	$\pm 0.18$	$\pm 0.18$	—	—
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	Q	(X)					
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	Q	—	—	$\pm 0.24$	$\pm 0.24$	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	Q	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	(X)					
	Q	(X)					
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	Q	(X)					
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	$\pm 0.16$	$\pm 0.16$	—	—
(ま と め)							
①	$P_m$	8.73		4.16		-0.41	
		9.14					
①+②+④+⑩	$P_m + P_L + P_b$	9.14	8.32	4.49	4.49	-0.82	-0.00
		9.96					
①+②+③+④ +⑥+⑦+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	7.22	10.13	2.82	6.55	-0.82	-0.00
		10.13					

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)

表II-6-(3) 応力計算結果 (定格時 寿命末期)

応力の原因	種類	端 栓 連 結 部					
		円周方向 応力 ( $\sigma_t$ )		軸方向 応力 ( $\sigma_z$ )		半径方向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	9.14	8.32	4.16	4.16	-0.82	-0.00
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	±0.00	±0.00	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	Q	-1.42	1.34	-1.42	1.34	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	—	—	±0.18	±0.18	—	—
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	Q	X					
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	Q	—	—	±0.25	±0.25	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	Q	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	-6.67	-6.67	—	—	—	—
	Q	5.25	-5.25	13.17	-13.17	—	—
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	Q	-1.86	-5.30	4.31	-4.31	—	—
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.16	±0.16	—	—
(ま と め)							
①+⑧	$P_m + P_L$	2.47	1.65	4.16	4.16	-0.82	-0.00
		4.98					
①+②+④+⑧+⑩	$P_m + P_L + P_b$	2.47	1.65	4.50	4.50	-0.82	-0.00
		5.32					
①+②+③+④+⑥ +⑦+⑧+⑨+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	4.43	-7.57	20.80	-12.57	-0.82	-0.00
		21.62					

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)

表II-7-(1) 応力計算結果 (過渡時 寿命初期)

応力の原因	種類	直管部 (スパーサ部)					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸方向 応力 ( $\sigma_z$ )		半径方向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	-9.65	-8.83	-4.82	-4.82	0.00	-0.82
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	±2.60	±2.60	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	$Q$	-3.07	2.88	-3.07	2.88	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	X					
⑤ スパーサ支持点での 保持力による応力	$Q$	7.19	-7.19	5.53	-5.53	—	—
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	$Q$	—	—	±0.25	±0.25	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	$Q$	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	X					
	$Q$	X					
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	$Q$	X					
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.21	±0.21	—	—
(ま と め)							
①	$P_m$	-9.24		-4.82		-0.41	
		8.83					
①+②+⑩	$P_m + P_L + P_b$	-12.25	-11.43	-5.03	-5.03	0.00	-0.82
		12.25					
①+②+③+⑤ +⑥+⑦+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	-8.12	-15.74	-2.82	-7.93	0.00	-0.82
		14.92					

(単位:  $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

表Ⅱ-7-(2) 応力計算結果(過渡時 寿命初期)

応力の原因	種類	直管部(スペーサ間中央)					
		円周方向 応力( $\sigma_r$ )		軸方向 応力( $\sigma_z$ )		半径方向 応力( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	-9.65	-8.83	-4.82	-4.82	0.00	-0.82
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	±2.60	±2.60	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	Q	-3.07	2.88	-3.07	2.88	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	—	—	±0.18	±0.18	—	—
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	Q	(この行は図で示されたように斜線が引かれています)					
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	Q	—	—	±0.25	±0.25	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	Q	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$ Q	(この行は図で示されたように斜線が引かれています)					
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	Q	(この行は図で示されたように斜線が引かれています)					
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.16	±0.16	—	—
(ま と め)							
①	$P_m$	-9.24		-4.82		-0.41	
		8.83					
①+②+④+⑩	$P_m + P_L + P_b$	-12.25	-11.43	-5.17	-5.17	0.00	-0.82
		12.25					
①+②+③+④ +⑥+⑦+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	-15.31	-8.54	-8.48	-2.53	0.00	-0.82
		15.31					

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)

表II-7-(3) 応力計算結果 (過渡時 寿命初期)

応力の原因	種類	端 栓 連 結 部					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸 方 向 応力 ( $\sigma_z$ )		半 径 方 向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内 面	外 面	内 面	外 面	内 面	外 面
① 内外圧による応力	$P_m$	-9.65	-8.83	-4.82	-4.82	0.00	-0.82
② 被覆管槽円度による 曲げ応力	$P_b$	±2.59	±2.59	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	Q	-2.31	2.18	-2.31	2.18	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	—	—	±0.18	±0.18	—	—
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	Q	X					
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	Q	—	—	±0.25	±0.25	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	Q	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	6.44	6.44	—	—	—	—
	Q	-5.01	5.01	-12.71	12.71	—	—
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	Q	-2.43	-3.46	1.32	-1.32	—	—
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.16	±0.16	—	—
(ま と め)							
①+⑧	$P_m + P_L$	-3.20	-2.38	-4.82	-4.82	0.00	-0.82
		4.82					
①+②+④+⑧+⑩	$P_m + P_L + P_b$	-5.79	-4.97	-5.17	-5.17	0.00	-0.82
		5.79					
①+③+④+⑥+ ⑦+⑧+⑨+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	-15.54	3.92	-19.13	9.34	0.00	-0.82
		19.13					

(単位 :  $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

表Ⅱ-8-(1) 応力計算結果 (過渡時 寿命中期)

応力の原因	種類	直管部 (スペーサ部)					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸方向 応力 ( $\sigma_z$ )		半径方向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	11.42	10.28	5.19	5.19	-1.04	-0.00
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	±0.00	±0.00	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	$Q$	-2.55	2.40	-2.55	2.40	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	(この行は図で示されたように、軸方向応力にのみ影響する)					
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	$Q$	7.50	-7.50	5.78	-5.78	—	—
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	$Q$	—	—	±0.24	±0.24	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	$Q$	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	(この行は図で示されたように、軸方向応力にのみ影響する)					
	$Q$	(この行は図で示されたように、半径方向応力にのみ影響する)					
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	$Q$	(この行は図で示されたように、半径方向応力にのみ影響する)					
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.21	±0.21	—	—
(ま と め)							
①	$P_m$	10.90		5.19		-0.52	
		11.42					
①+②+⑩	$P_m + P_L + P_b$	11.42	10.38	5.40	5.40	-1.04	-0.00
		12.46					
①+②+③+⑤ +⑥+⑦+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	16.38	5.28	8.88	2.26	-1.04	-0.00
		17.42					

(単位 :  $\text{kg}/\text{mm}^2$ )



表Ⅱ-8-(2) 応力計算結果 (過渡時 寿命中期)

応力の原因	種類	直管部 (スペーサ間中央)					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸方向 応力 ( $\sigma_z$ )		半径方向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	11.42	10.38	5.19	5.19	-1.04	-0.00
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	±0.00	±0.00	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	$Q$	-2.25	2.40	-2.25	2.40	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	—	—	±0.18	±0.18	—	—
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	$Q$	(この行は削除された)					
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	$Q$	—	—	±0.24	±0.24	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	$Q$	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	(この行は削除された)					
	$Q$	(この行は削除された)					
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	$Q$	(この行は削除された)					
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.16	±0.16	—	—
(ま と め)							
①	$P_m$	10.90		5.19		-0.52	
		11.42					
①+②+④+⑩	$P_m+P_L+P_b$	11.42	10.38	5.53	5.53	-1.04	-0.00
		12.46					
①+②+③+④ +⑥+⑦+⑩	$P_m+P_L+P_b+Q$	8.88	12.78	3.23	8.17	-1.04	-0.00
		12.78					

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)

表Ⅱ-8-(3) 応力計算結果 (過渡時 寿命中期)

応力の原因	種類	端 栓 連 結 部					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸 方 向 応力 ( $\sigma_z$ )		半 径 方 向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内 面	外 面	内 面	外 面	内 面	外 面
① 内外圧による応力	$P_m$	11.42	10.38	5.19	5.19	-1.04	-0.00
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	±0.00	±0.00	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	$Q$	-1.93	1.81	-1.93	1.81	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	—	—	±0.18	±0.18	—	—
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	$Q$	X					
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	$Q$	—	—	±0.25	±0.25	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	$Q$	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	-8.33	-8.33	—	—	—	—
	$Q$	6.57	-6.57	16.45	-16.45	—	—
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	$Q$	-2.31	-5.44	3.92	-3.92	—	—
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.16	±0.16	—	—
(ま と め)							
①+⑧	$P_m + P_L$	3.09	2.05	5.19	5.19	-1.04	-0.00
		6.23					
①+②+④+⑧+⑩	$P_m + P_L + P_b$	3.09	2.05	5.53	5.53	-1.04	-0.00
		6.57					
①+③+④+⑥+ ⑦+⑧+⑨+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	5.42	-8.14	24.22	-13.95	-1.04	-0.00
		25.26					

(単位:  $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

表Ⅱ-9-(1) 応力計算結果 (過渡時 寿命末期)

応力の原因	種類	直管部 (スペーサ部)					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸方向 応力 ( $\sigma_z$ )		半径方向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	12.79	11.64	5.82	5.82	-1.15	-0.00
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	$\pm 0.00$	$\pm 0.00$	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	$Q$	-2.21	2.08	-2.21	2.08	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$						
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	$Q$	7.70	-7.70	5.94	-5.94	—	—
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	$Q$	—	—	$\pm 0.24$	$\pm 0.24$	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	$Q$	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$						
	$Q$						
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	$Q$						
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	$\pm 0.21$	$\pm 0.21$	—	—
(ま と め)							
①	$P_m$	12.21		5.82		-0.58	
		12.79					
①+②+⑩	$P_m + P_L + P_b$	12.79	11.64	6.03	6.03	-1.15	-0.00
		13.94					
①+②+③+⑤ +⑥+⑦+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	18.28	6.02	10.00	2.41	-1.15	0.00
		19.43					

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)

表Ⅱ-9-(2) 応力計算結果 (過渡時 寿命末期)

応力の原因	種類	直管部 (スペーサ間中央)					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸方向 応力 ( $\sigma_z$ )		半径方向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	12.79	11.64	5.82	5.82	-11.5	-0.00
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	±0.00	±0.00	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	Q	-2.21	2.08	-2.21	2.08	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	—	—	±0.17	±0.17	—	—
⑤ スペーサ支持点での 保持力による応力	Q	/					
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	Q	—	—	±0.24	±0.24	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	Q	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	/					
	Q	/					
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	Q	/					
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.16	±0.16	—	—
(ま と め)							
①	$P_m$	12.21		5.82		-0.58	
		12.79					
①+②+④+⑩	$P_m + P_L + P_b$	12.79	11.64	6.15	6.15	-1.15	-0.00
		13.94					
①+②+③+④ +⑥+⑦+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	10.58	13.71	4.19	8.47	-1.15	-0.00
		13.71					

(単位 :  $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

表Ⅱ-9-(3) 応力計算結果 (過渡時 寿命末期)

応力の原因	種類	端 栓 連 結 部					
		円周方向 応力 ( $\sigma_r$ )		軸方向 応力 ( $\sigma_z$ )		半径方向 応力 ( $\sigma_r$ )	
		内面	外面	内面	外面	内面	外面
① 内外圧による応力	$P_m$	12.79	11.64	5.82	5.82	-11.5	-0.00
② 被覆管楕円度による 曲げ応力	$P_b$	±0.00	±0.00	—	—	—	—
③ 被覆管肉厚方向温度勾配 による応力	$Q$	-1.84	1.73	-1.84	1.73	—	—
④ 流力振動による曲げ応力	$P_b$	—	—	±0.18	±0.18	—	—
⑤ スペース支持点での 保持力による応力	$Q$	(この行は図で示されたように打ち消されている)					
⑥ 周方向温度勾配による 熱湾曲による応力	$Q$	—	—	±0.25	±0.25	—	—
⑦ 軸方向温度勾配による 応力	$Q$	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	—	—
⑧ 端栓部圧力不連続による 応力	$P_L$	-9.33	-9.33	—	—	—	—
	$Q$	7.38	-7.38	18.42	-18.42	—	—
⑨ 端栓部温度不連続による 応力	$Q$	-2.29	-5.94	4.56	-4.56	—	—
⑩ 地震力による応力	$P_b$	—	—	±0.16	±0.16	—	—
(ま と め)							
①+⑧	$P_m + P_L$	3.46	2.31	5.82	5.82	-11.5	-0.00
		6.97					
①+②+④+⑧+⑩	$P_m + P_L + P_b$	3.46	2.31	6.16	6.16	-11.5	-0.00
		7.31					
①+③+④+⑥+ ⑦+⑧+⑨+⑩	$P_m + P_L + P_b + Q$	6.70	-9.28	27.54	-16.02	-11.5	-0.00
		28.69					

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)

表II-10 応力計算のまとめ (定格時)

位 置	応力の種類	応力強さ* および設計比**	寿命初期	寿命中期	寿命末期
スペーサ部	P <sub>m</sub>	応力強さ	7.75	8.24	9.14
		設計比	0.52	0.58	0.65
	P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub>	応力強さ	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>
		設計比	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>
	P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>	応力強さ	10.55	8.99	9.96
		設計比	0.47	0.42	0.48
	P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub> + Q	応力強さ	13.74	14.23	15.74
		設計比	0.30	0.33	0.38
	S <sub>m</sub>	許容応力	15.04	14.29	13.96
	スペーサ/スペーサ 中間部	P <sub>m</sub>	応力強さ	7.75	8.24
設計比			0.52	0.58	0.65
P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub>		応力強さ	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>
		設計比	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>
P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>		応力強さ	10.55	8.99	9.96
		設計比	0.47	0.42	0.48
P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub> + Q		応力強さ	13.29	9.61	10.13
		設計比	0.29	0.22	0.24
S <sub>m</sub>		許容応力	15.04	14.29	13.96
端 栓 部		P <sub>m</sub>	応力強さ	<del>          </del>	<del>          </del>
	設計比		<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>
	P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub>	応力強さ	4.24	4.49	4.98
		設計比	0.18	0.20	0.23
	P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>	応力強さ	4.88	4.83	5.32
		設計比	0.21	0.22	0.24
	P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub> + Q	応力強さ	16.84	18.68	21.62
		設計比	0.37	0.42	0.50
	S <sub>m</sub>	許容応力	15.29	14.75	14.56

\* 応力強さ: 単位 (kg/mm<sup>2</sup>)

\*\* 設計比=応力強さ/許容応力

応力の種類	許容応力
P <sub>m</sub>	S <sub>m</sub>
P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub>	1.5 S <sub>m</sub>
P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>	1.5 S <sub>m</sub>
P <sub>m</sub> + P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub> + Q	3 S <sub>m</sub>



### 3. 疲労解析

疲労解析の手法は A S M E S e c. Ⅲ に準拠した方法により評価し後述する累積損傷率が 1 を越えないことを確認する。

#### (1) 疲労解析に考慮する応力変動

疲労解析は以下に述べる応力変動を考慮する。

- ① 内圧による応力変化
- ② 外圧による応力変化
- ③ 冷却材および出力変化に伴う温度変化
- ④ ペレットと被覆管の機械的相互作用による応力変化

#### (2) 原子炉の運転履歴

燃料設計に用いる原子炉の運転履歴は表Ⅱ-1、表Ⅱ-2、図Ⅱ-1 および図Ⅱ-2 に示すものを用いる。

#### (3) 交番応力強さ

出力変動モードの各状態に対して寿命初期、中期および末期の三主応力の値  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 、をそれぞれ求める。

主応力差  $S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$ 、 $S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$ 、 $S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$  をそれぞれ  $S_{ij}$  とする。各々の応力差  $S_{ij}$  の最大変化量を求めこれを

$S_{rij}$  とし、これの  $\frac{1}{2}$  を交番応力強さ  $S_{alt}$  とする。

#### (4) 許容サイクル数

設計疲労曲線 (S-N 曲線) としては、照射したジルカロイ-2 材に関する図Ⅱ-4 に示す曲線を使用する。(2)

この設計曲線は、広く軽水炉燃料の設計においても使用されているが、実測データに対して試料寸法、環境、表面状況等の影響およびデータのバラツキを十分カバーしうよう、交番応力値についてはファクター 2、サイクル数についてはファクター 20 の安全率をとって作成されたもの



である。

図Ⅱ－４に示す設計疲労曲線の縦軸上に出力変動モード毎に求めた交番応力強さ  $Salt$  をとり、それに対する横軸上のサイクル数を求めるとこれが許容サイクル数となる。

(5) 累積損傷率

2つまたはそれ以上の負荷サイクルがある時累積損傷率は次の様にして求められる。

- ① 各負荷サイクル毎のサイクル数を  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ ……とする。
- ② 負荷サイクルのそれぞれについて交番応力強さ  $Salt$  をそれぞれ  $Salt_1$ 、 $Salt_2$ 、 $Salt_3$ ……とする。
- ③ それぞれの  $Salt$  に対する許容サイクル数を設計疲労曲線から求めこれらの値を  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ ……とする。
- ④ 負荷サイクルのそれぞれについて  $U_1 = n_1 / N_1$ 、 $U_2 = n_2 / N_2$ 、 $U_3 = n_3 / N_3$ ……から損傷率を求める。
- ⑤ 累積損傷率は次式を用いて計算する。

$$U = \sum_{i=1}^k U_i = \sum_{i=1}^k n_i / N_i$$

ここで  $U$  : 累積損傷率

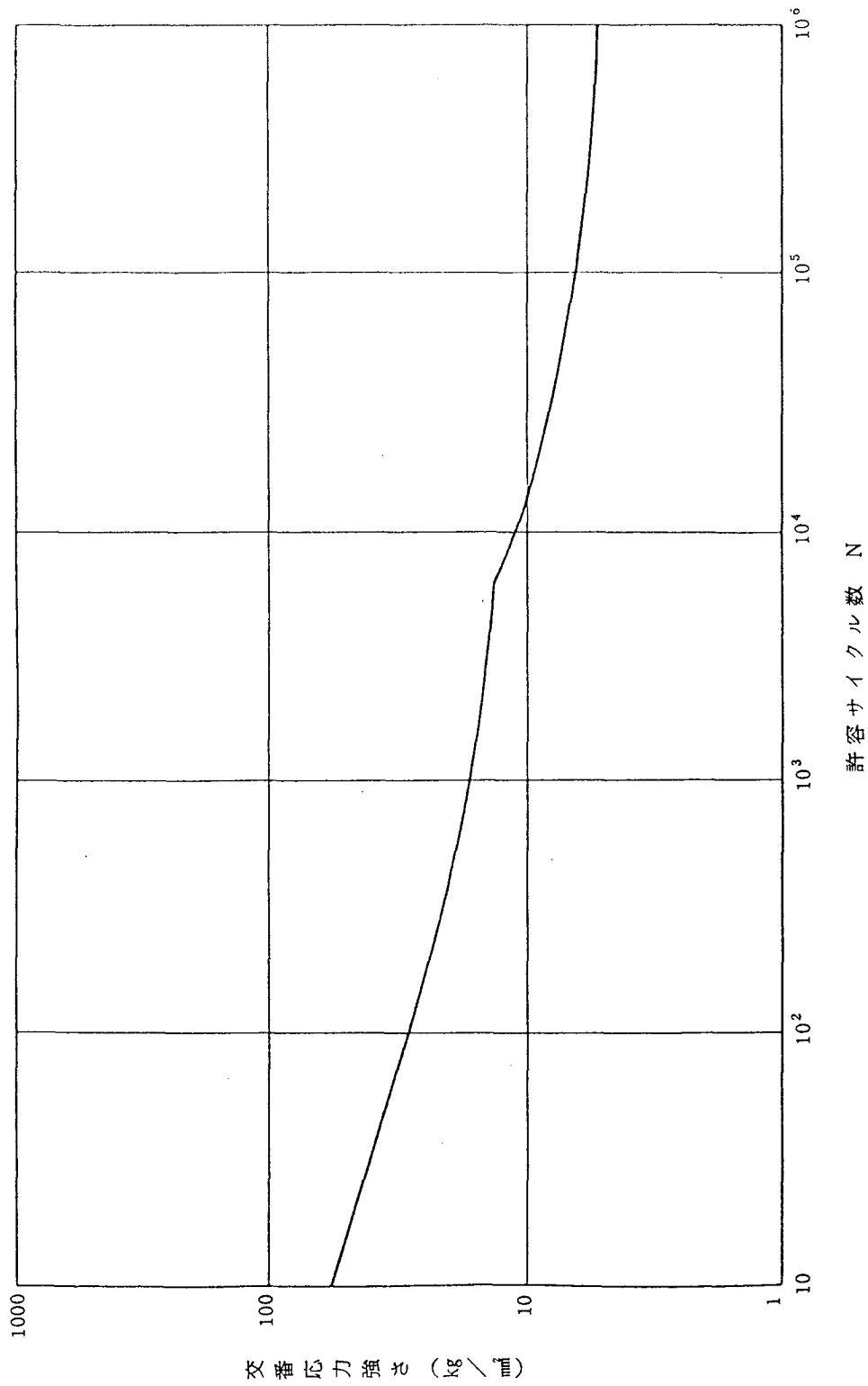
$n_i$  : サイクル数

$N_i$  : 許容サイクル数

$k$  : 出力変動モード数 (本解析においては  $k = 10$ )

上記条件を用いて計算した結果を表Ⅱ－１２に示す。

計算の結果、被覆管の全寿命期間中の累積損傷率は、0.17となり1より十分小さく疲労による破損を生じることはない。



図II-4 設計疲労曲線

II-1.2 疲勞解析結果

出力變動モード	寿命初期			寿命中期			寿命末期		
	Ni	ni	Ui	Ni	ni	Ui	Ni	ni	Ui
(1) 100%→0%→114%→100%*	1.64×10 <sup>4</sup>	143	8.749×10 <sup>-3</sup>	1.93×10 <sup>4</sup>	143	7.396×10 <sup>-3</sup>	5.13×10 <sup>4</sup>	144	2.806×10 <sup>-3</sup>
(2) 100%→35%e→114%→100%	1.64×10 <sup>4</sup>	1,000	6.118×10 <sup>-2</sup>	2.30×10 <sup>4</sup>	1,000	4.353×10 <sup>-2</sup>	4.19×10 <sup>4</sup>	1,000	2.386×10 <sup>-2</sup>
(3) 100%→Hot→114%→100%	1.64×10 <sup>4</sup>	50	3.059×10 <sup>-3</sup>	1.69×10 <sup>4</sup>	50	2.959×10 <sup>-3</sup>	2.89×10 <sup>4</sup>	50	1.733×10 <sup>-3</sup>
(4) 100%→Hot(サイクル)→114%→100%	1.64×10 <sup>4</sup>	1	6.118×10 <sup>-5</sup>	1.69×10 <sup>4</sup>	1	5.918×10 <sup>-5</sup>	2.89×10 <sup>4</sup>	1	3.465×10 <sup>-5</sup>
(5) 100%→103%→Hot(サイクル(I))→114%→100%	1.64×10 <sup>4</sup>	1	6.118×10 <sup>-5</sup>	1.69×10 <sup>4</sup>	1	5.918×10 <sup>-5</sup>	2.89×10 <sup>4</sup>	1	3.465×10 <sup>-5</sup>
(6) 100%→103%→Hot(サイクル(II))→114%→100%	1.64×10 <sup>4</sup>	13	7.954×10 <sup>-4</sup>	1.69×10 <sup>4</sup>	13	7.693×10 <sup>-4</sup>	2.89×10 <sup>4</sup>	14	4.851×10 <sup>-4</sup>
(7) 100%→Hot(サイクル(III))→114%→100%	1.64×10 <sup>4</sup>	17	1.040×10 <sup>-4</sup>	1.69×10 <sup>4</sup>	17	1.006×10 <sup>-3</sup>	2.89×10 <sup>4</sup>	17	5.891×10 <sup>-4</sup>
(8) Cold→Hot→114%→100%→103%→Hot→Cold	1.64×10 <sup>4</sup>	1	6.118×10 <sup>-5</sup>	1.25×10 <sup>4</sup>	1	8.015×10 <sup>-5</sup>	1.80×10 <sup>4</sup>	1	5.545×10 <sup>-5</sup>
(9) Cold→Hot→114%→100%→103%→Hot(サイクル(III))→Cold	1.64×10 <sup>4</sup>	5	3.059×10 <sup>-4</sup>	1.25×10 <sup>4</sup>	5	4.008×10 <sup>-4</sup>	1.80×10 <sup>4</sup>	5	2.772×10 <sup>-4</sup>
(10) Cold→Hot→114%→100%→Hot→Cold	1.64×10 <sup>4</sup>	24	1.488×10 <sup>-3</sup>	1.25×10 <sup>4</sup>	24	1.924×10 <sup>-3</sup>	1.80×10 <sup>4</sup>	24	1.331×10 <sup>-3</sup>
各寿命の累積損傷率	0.07680			0.05820			0.03120		
積算した累積損傷率	0.07680			0.13500			0.16600		

\* (略号説明)

114% : 114%出力  
 103% : 103%出力  
 100% : 100%出力  
 35% e : 電気出力35%

0% e : 電気出力0%  
 Hot : 高温停止  
 Cold : 低温停止

全寿命期間の累積損傷率 0.17

ni : 各負荷サイクル毎のサイクル数  
 Ni : 許容サイクル数  
 Ui : 各負荷サイクルの累積損傷率

#### 4. 座屈解析

被覆管は、製作公差に基づく初期橢円度（外径最大－外径最小）があるので、外圧クリープにより、橢円度が進行する。

座屈の有無を評価するため次の仮定をおいて計算する。

- 1) 被覆管は十分長く端部効果はないものとする。
- 2) 初期橢円度および管の変位は長手方向には同一とする。
- 3) 初期変形は弾性変形とする。
- 4) 温度および応力は径方向座標のみの関数とする。
- 5) 内圧およびペレットによる支持を無視する。

数値計算は、微少時間ステップ毎に変形を追跡していく。燃料寿命期間にわたる橢円度の変化を図Ⅱ－5に示す。

一方、冷却材圧力のもとでの臨界座屈橢円度はTimoshenkoらによる座屈論<sup>(3)</sup>から求まり、最高冷却材圧力（ $8.3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{a}$ ）のもとでの値を図Ⅱ－5に一点鎖線で示す。

計算結果から燃料要素の寿命末期での橢円度は臨界座屈橢円度に対して約69%であり、被覆管は使用期間中に座屈を起こすことはない。

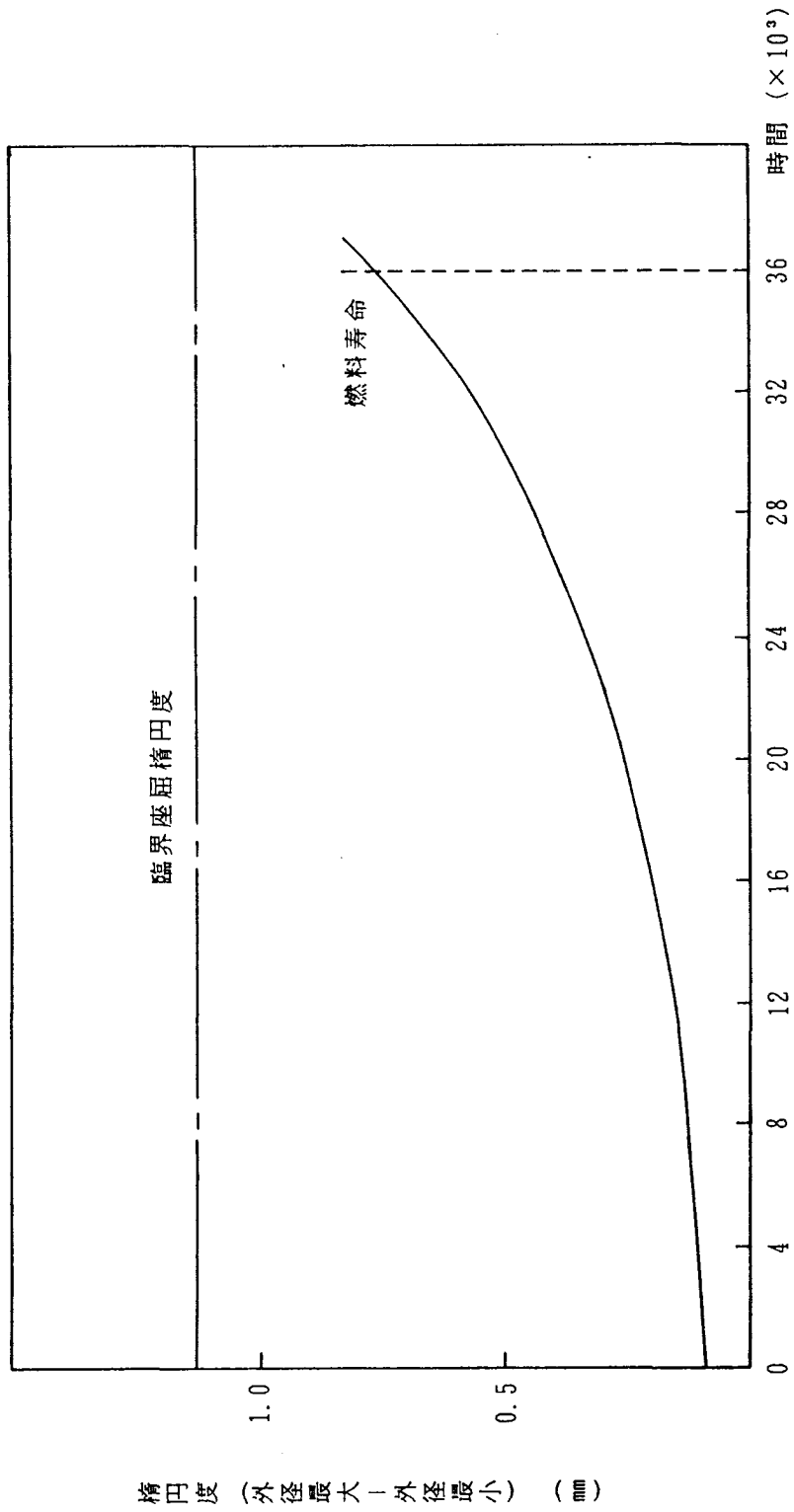


図 II - 5 燃焼に伴う被覆管精度の変化

### Ⅲ 燃料体の地震時の評価

燃料体はコレット機構により下部タイプレートが遮蔽プラグによって支えられており、また、上部および下部タイプレート位置に設けた案内ばねを介して圧力管内に保持されている。

ここでは、地震時の燃料体の動的応答を考慮して燃料体の健全性を評価する。

#### 1. 設計震度

燃料体の耐震設計で設計震度として採用する圧力管の地震時最大応答加速度は次の解析により求めたものである。

図Ⅲ－1に示した原子炉本体を図Ⅲ－2に示すように分岐のある無質量の垂直弾性はりによって支持した60質点集中質量のモデルとして、支持構造物の応答加速度を使用して時刻歴モデル解析を行なう。動的震度は原子炉建屋基盤における最大0.25Gの地震波で、次の3波とし、各々について入力方向はプラントのN－SおよびE－Wの2方向の計6波を用いる。

Golden Gate Park (1957 S80E)

El Centro (1949 N.S)

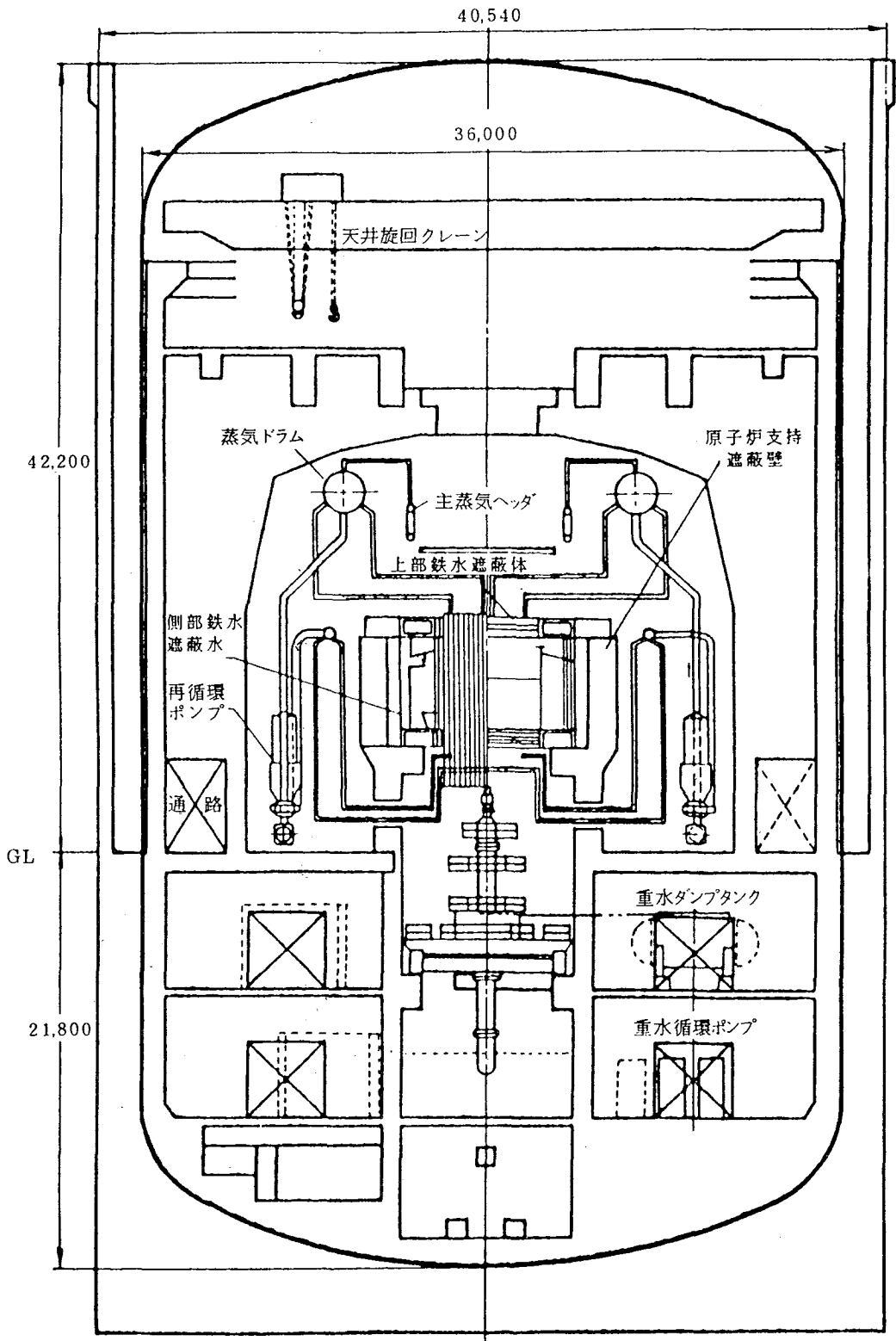
Taft (1952 S69E)

また、減衰定数は表Ⅲ－1の値の様にして動的解析を行っている。

表Ⅲ－１ 減衰定数

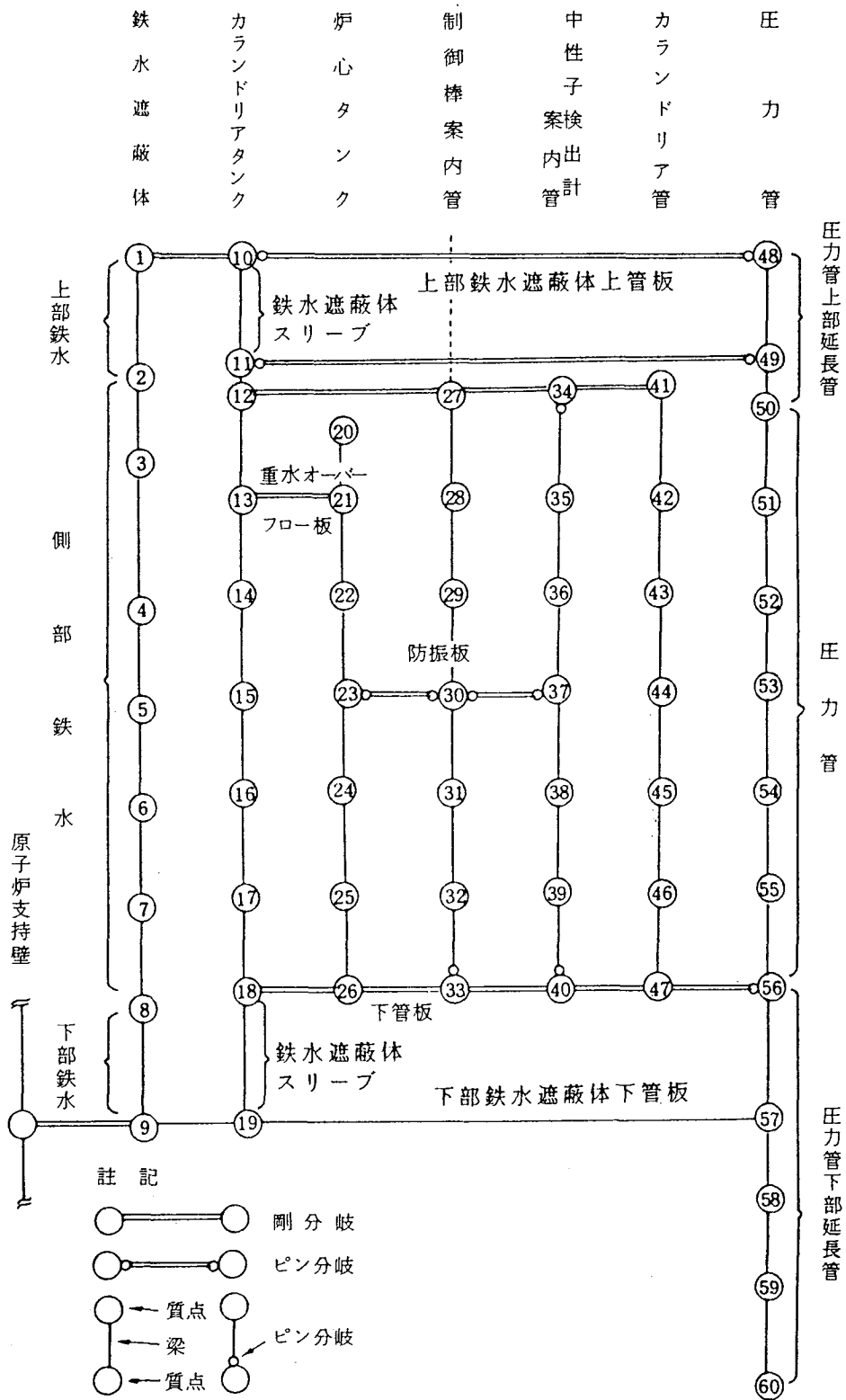
部 材	減衰定数
原子炉建屋	0.05
原子炉支持遮蔽壁	0.05
原子炉本体 カランドリア管および圧力管 (水中) その他の構造部材	0.05 0.01
燃料体	0.08
制御棒案内管	0.05
制御棒駆動装置ケーシング	0.01

解析のフローチャートを図Ⅲ－３に示す。

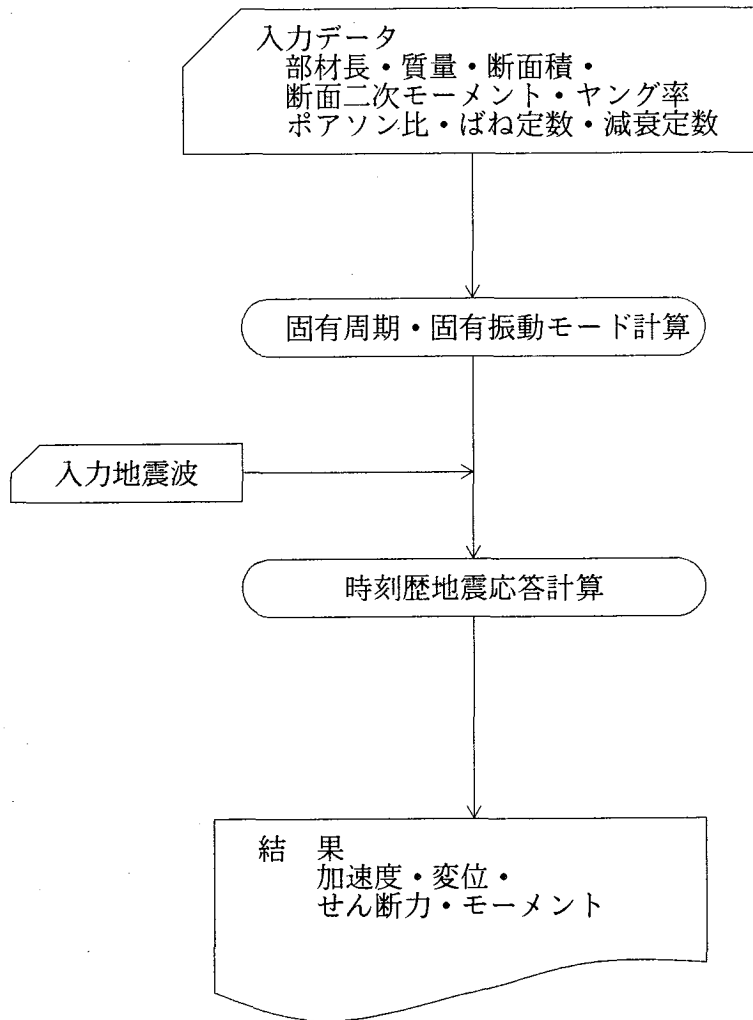


図Ⅲ-1 原子炉全体図





図Ⅲ-2 原子炉本体耐震解析モデル



図Ⅲ－３ 解析のフローチャート

## 2. 設計地震波

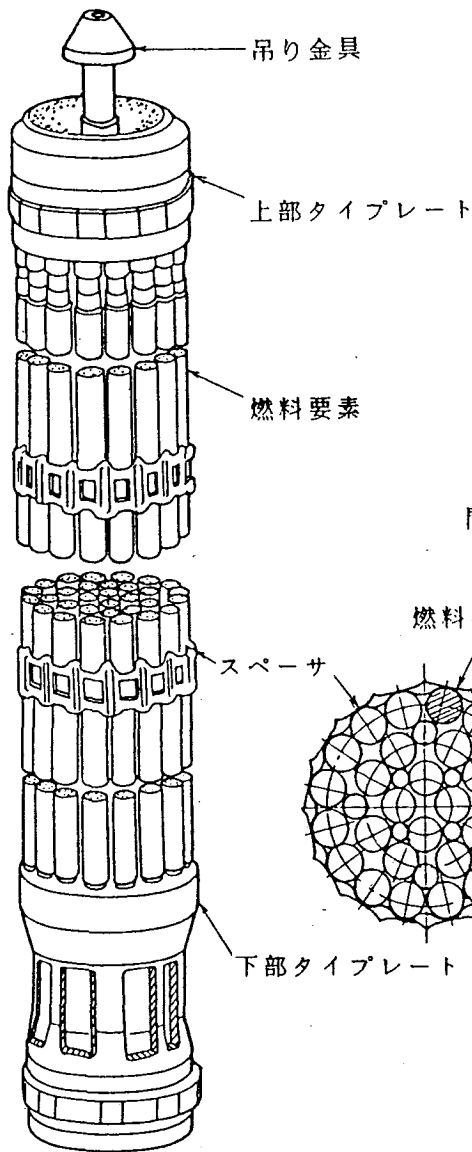
設計地震波としては、前述のようにGolden Gate波、El Centro波およびTaft波の3波について、原子炉サイトの基盤が南北方向（x方向）および東西方向（y方向）に最大加速度0.25Gで振動した場合の炉心構造物の動的解析より得られる圧力管の時刻歴応答波を入力波とした。

なお、各設計地震波によって生ずる燃料体の上部、下部に位置する圧力管の振動応答は、位相および加速度ともに有意な差はないため、加速度がやや大きめ（数%）に応答している圧力管上部での振動波形を、入力波とした。燃料体の概要を図Ⅲ-4に示す。

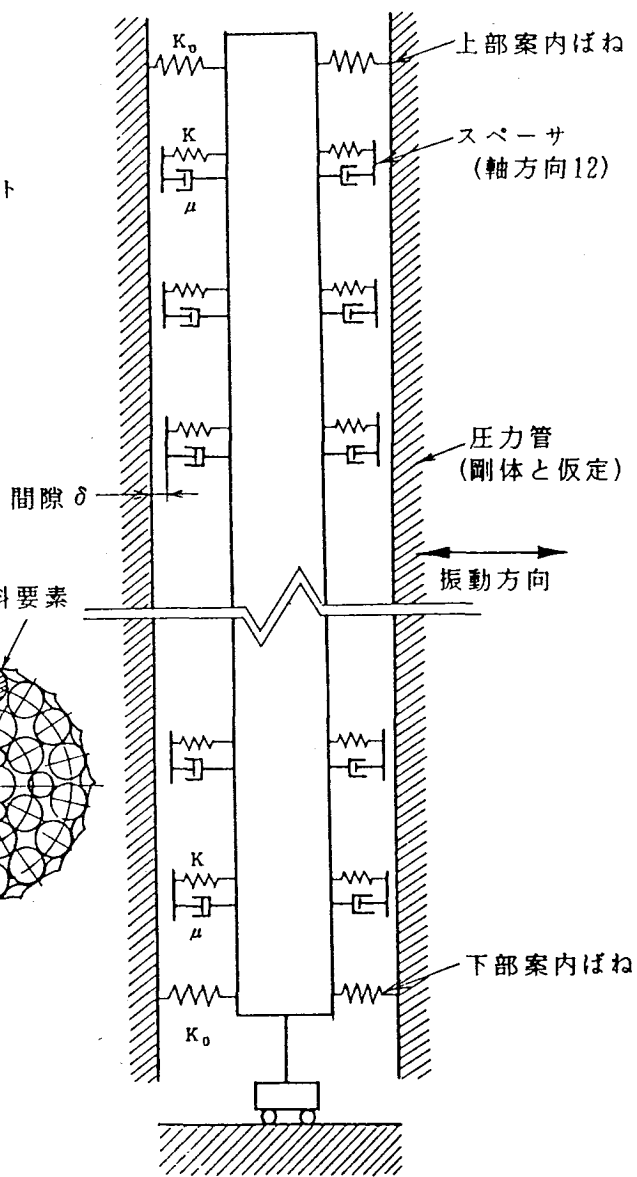
## 3. 解析モデル

燃料体は、1体ずつ圧力管内に挿入されており、圧力管群振動実験結果から管群の相互作用を無視することができるので、燃料体の耐震解析は単一の燃料体と圧力管の間の衝突を含む振動状況を、次の仮定のもとに図Ⅲ-5に示すモデルで解析する。

- ① x-yの2次元問題として扱う。
- ② 圧力管の基本波形での固有振動数（約7Hz）が燃料体（約2Hz）に比べて大きいため、圧力管を剛体と仮定する。
- ③ 燃料体は1本の弾性梁とみなす。
- ④ 燃料体の軸（高さ）方向に配置されるスペーサは、弾性ばねおよび衝撃吸収エレメントを含むものとしてモデル化する。
- ⑤ 入力波は、燃料体の全体に同一位相で圧力管から伝わると仮定する。



図III-4 燃料体図



図III-5 解析モデル

#### 4. 解析結果

スペーサ外周の案内突起が圧力管と衝突する場合各設計入力波によって生じる燃料体の被覆管最大曲げ応力およびスペーサ最大衝撃力の解析結果は表Ⅲ－２に示す通りである。

表Ⅲ－２ 耐震解析結果

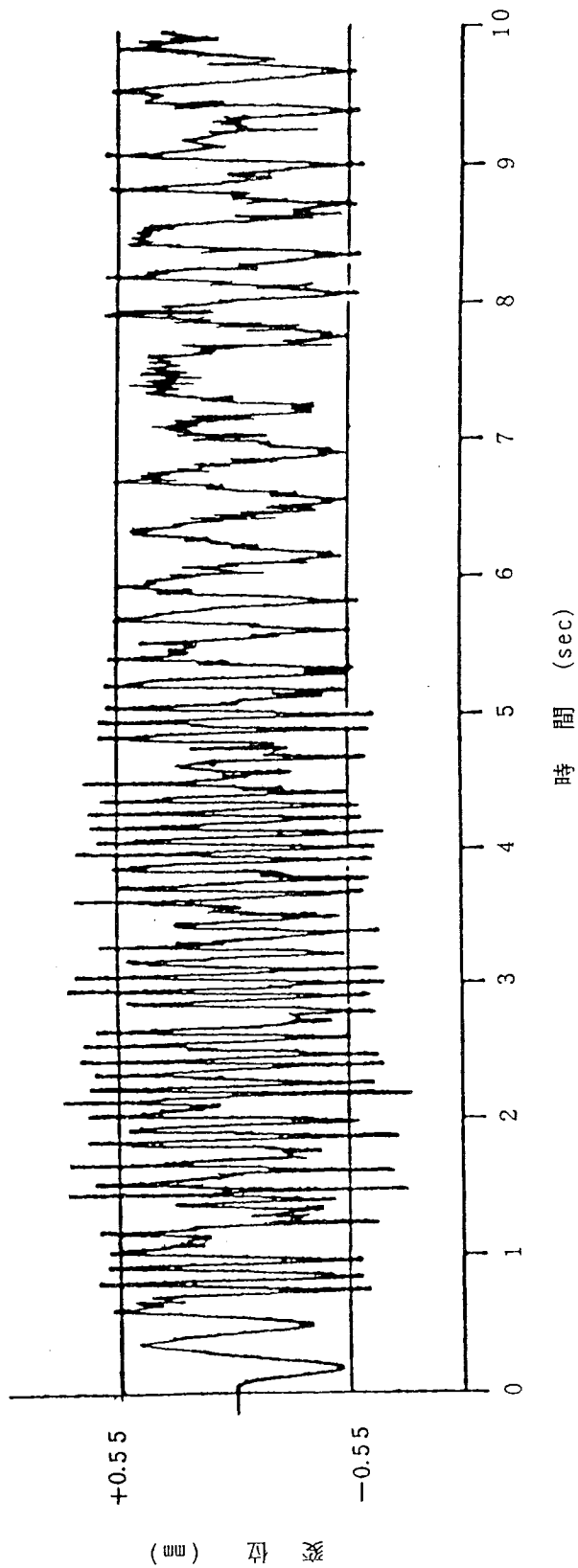
設計入力波	振動 方向	スペーサが受ける最大衝撃力				被覆管に生じる最大曲げ応力 (kg/mm <sup>2</sup> )
		時間 (sec)	スペーサ No.	衝撃力 (kg)	最大加速度 (G)	
Golden Gate 波	x	2.18	5	52	3.4	0.18
	y	1.48	4	33	2.2	0.13
El Centro 波	x	2.52	5	47	3.1	0.15
	y	9.75	9	55	3.7	0.21
Taft 波	x	2.38	8	47	3.1	0.14
	y	6.73	6	50	3.4	0.15

また、各設計入力波における燃料体の最大衝撃力発生位置での時間と燃料体中心軸の変位の関係をそれぞれ図Ⅲ－６－(1)～図Ⅲ－６－(3)に示す。

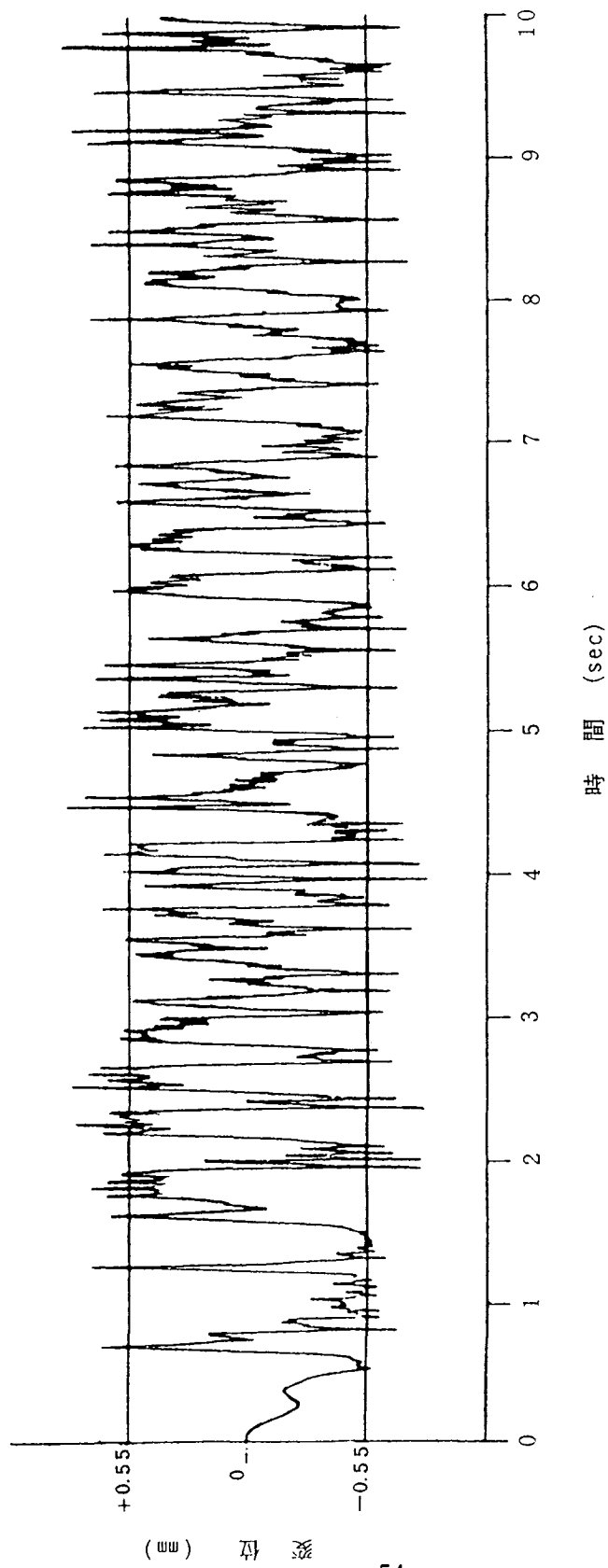
以上の計算結果より、被覆管の最大曲げ応力およびスペーサ最大衝撃力はともにEl Centro波がy方向に起きた場合に生じ、これらの値はそれぞれ0.21 kg/mm<sup>2</sup>および55 kgである。

なお、本解析において圧力管は剛体として仮定したが、実際を模擬して弾性変形すると仮定して解析した場合、曲げ応力およびスペーサ衝撃力とも上記解析結果よりも小さくなり、El Centro波がy方向に起きた場合、スペーサの最大衝撃力は49 kgであった。

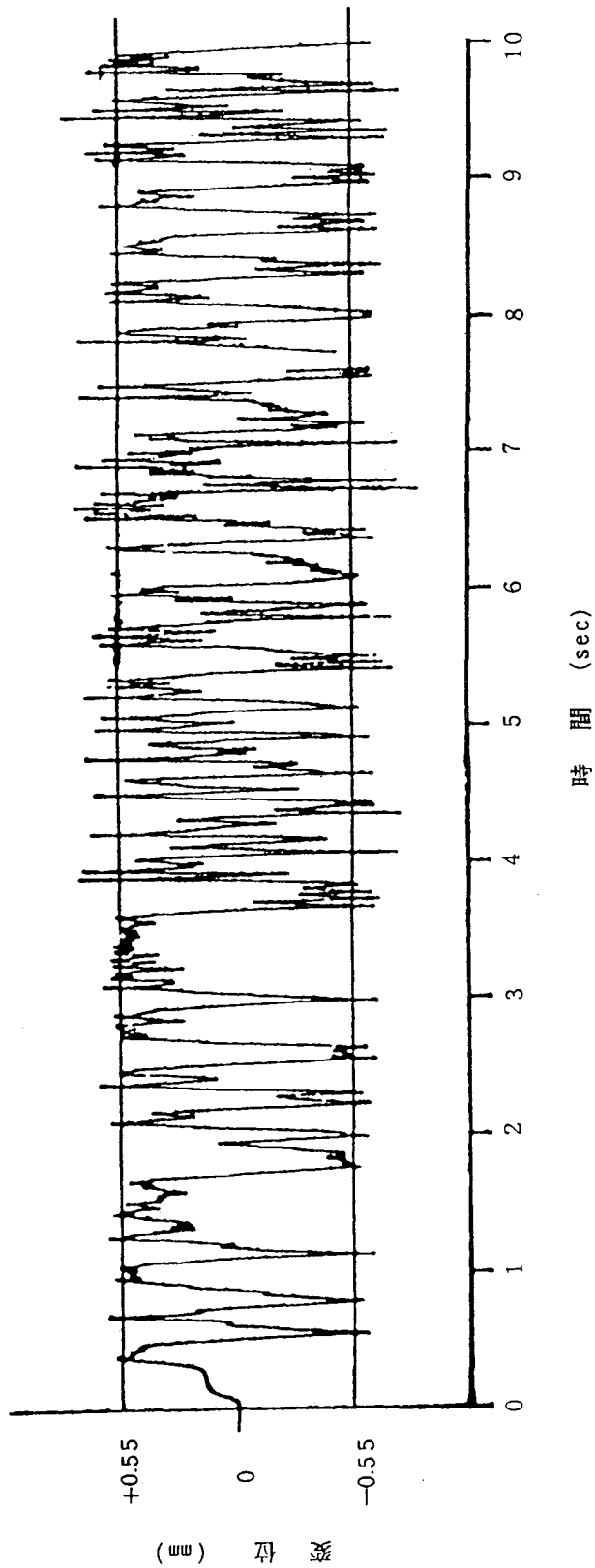
このことから、圧力管を剛体であると仮定した本解析モデルが安全側の解析であるということが云える。



図III -- 6 -- (1) 燃料体中央部での地震時の振動特性 (Golden Gate波 x方向による)



図Ⅲ—6—(2) 燃料体中央部での地震時の振動特性 (E1 Centro波 y方向による)



図Ⅲ-6-6-(3) 燃料体中央部での地震時の振動特性 (Taft波 y方向による)



以上の解析結果より被覆管の曲げ応力およびスペーサ最大衝撃力とも、いずれの入力波の場合も地震時以外の原因で生じた応力と合わせて評価しても許容応力を超えることはなく問題ない。また、スペーサの耐衝撃力強度は650kgであることをスペーサ強度試験で確認しており、スペーサは地震時の衝撃力のもとで十分健全である。

5. 解析に用いた計算式

燃料体の基礎振動式を次式で与える。

$$\frac{A r}{g} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} + C \frac{\partial Y}{\partial t} + E I \frac{\partial^4 Y}{\partial X^4} = \frac{A r}{g} \cdot \frac{\partial^2 Y_0}{\partial t^2} + P$$

- X : 軸方向の位置
- Y : 燃料体のたわみ
- Y<sub>0</sub> : 地震による変位
- C : 燃料体の粘性係数
- A r : 燃料体単位長重量
- E I : 燃料体の曲げ剛性
- P : スペーサと圧力管の衝突による反発力

スペーサの反発力Pは、基礎試験で求めたばね定数Kおよび粘性係数μより次式で与える。

$$P = K (Y - \delta) + \mu \dot{Y} \quad \dots\dots\dots \left| y \right| \geq \delta$$

$$= 0 \quad \dots\dots\dots \left| y \right| < \delta$$

- K : スペーサバネ定数
- δ : スペーサと圧力管ギャップ

$\mu$  : スペーサの粘性係数  
 $\dot{Y}$  :  $\partial Y / \partial t$

解析は、耐震計算コードを用いて行なうが、計算に必要な入力としての燃料体の固定特性、固有振動数、減衰係数、剛性、スペーサ特性等の値は、実測により求められたものに安全余裕を考慮した値を採用する。

被覆管に生じる曲げ応力は、燃料要素の変形曲率が燃料体中心軸の変形曲率と同じであることから、前述の計算によって求まる燃料体の変形曲率から次式を用いて計算する。

$$\sigma = E \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \cdot \frac{D}{2} + \frac{W \ell D}{8 I}$$

E : 被覆管のヤング率

D : 被覆管の直径

I : 断面二次モーメント

$\partial^2 y / \partial x^2$  : 燃料体変形曲率

$\ell$  : スペーサ突起のスパン

W : 衝撃荷重

上式の第1項は、燃料体の変形曲率によって生じる応力であり、スペーサと圧力管の衝突時にスペーサ位置で最大となる。第2項は、衝突時にスペーサの突起部近傍において付加される局所曲げ応力である。

## IV 輸送時の健全性

### (1) 輸送容器の概要

本燃料体は、B（U）型輸送物の基準を満足する鋼製輸送容器に入れて輸送される。本輸送容器は、図IV－1に示すように燃料体を収納する内容容器と、輸送中内容器を保護する外容器から構成される。外容器は軟鋼製の外筒、内筒と耐熱性耐衝撃性およびしゃへい機能を有する充填材（バーミキュライト入りコンクリート）および内筒内側に緩衝機能を有するエサフォーム、バルサウッド等から構成し、外部からの衝撃を吸収する構造ならびに断熱性を有する構造となっている。内容器は外容器に保護される円筒2連のステンレス製密封容器である。

### (2) 燃料体の保持

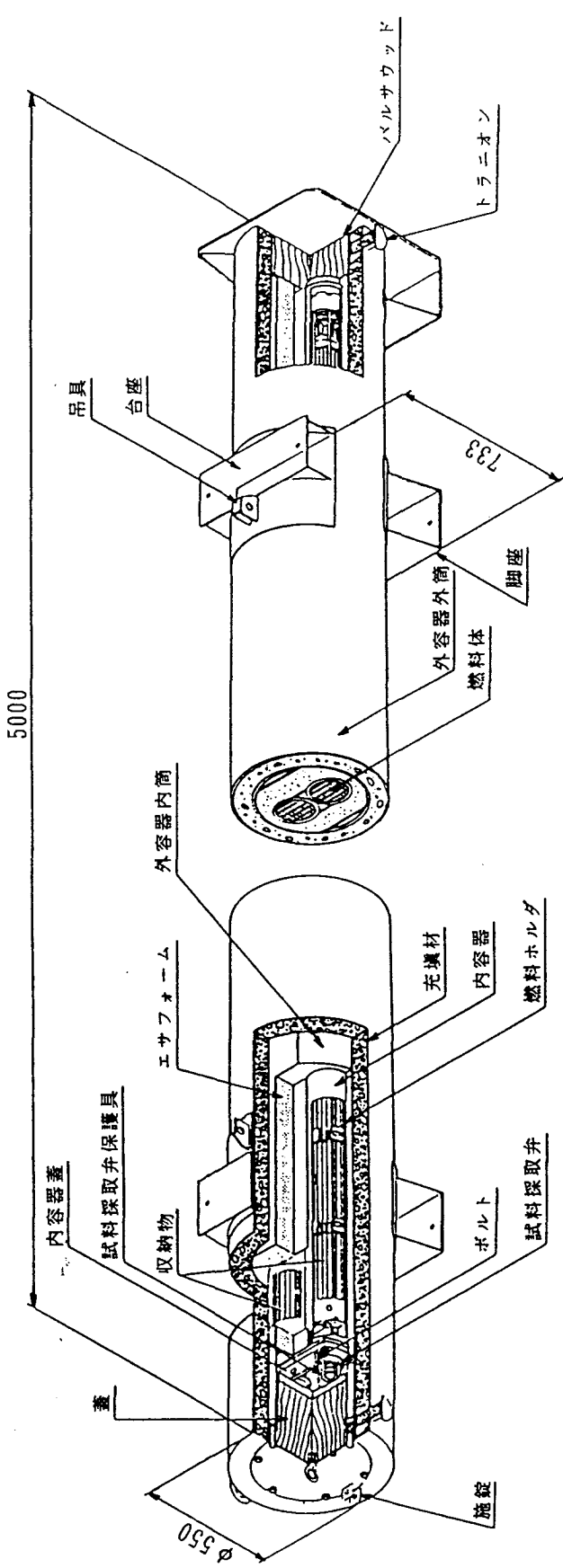
燃料体は、外部の振動衝撃から燃料体を保護する役割を有する燃料ホルダーに入れられて内容器に収納される。燃料ホルダーは2つ割りの円筒形ホルダー12組と同じく2つ割り円筒のホルダートップとホルダーボトムおよび6本のステーロッドで構成したケージ状のもので、2つ割り式に開閉するヒンジ構造になっている。この燃料ホルダー中で燃料体は過度な締付力がかからないように設計されている。

### (3) 輸送方法および輸送結果

輸送容器は空気ばねを利用した緩衝台の上に乗せてトラック輸送を行い車体の振動が直接輸送容器に伝わらないようになっている。

また、模擬燃料体を輸送容器に収納して輸送試験を実施し、燃料体にかかる加速度、寸法等の問題のないことを確認している。

これらの輸送方法については「ふげん」標準燃料体、照射用36本燃料体および照射用セグメント燃料体および照射用ガドリニア燃料体の輸送実績があり、受入れ検査に寸法検査、外観検査等を実施し、輸送時の燃料の健全性を確認している。



図IV-1 TN-9180/A型輸送物全体図 単位 (mm)

V 参考文献

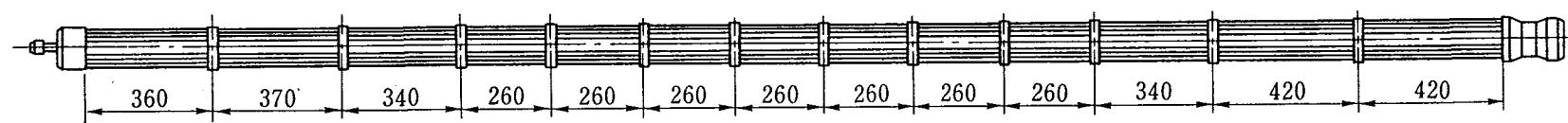
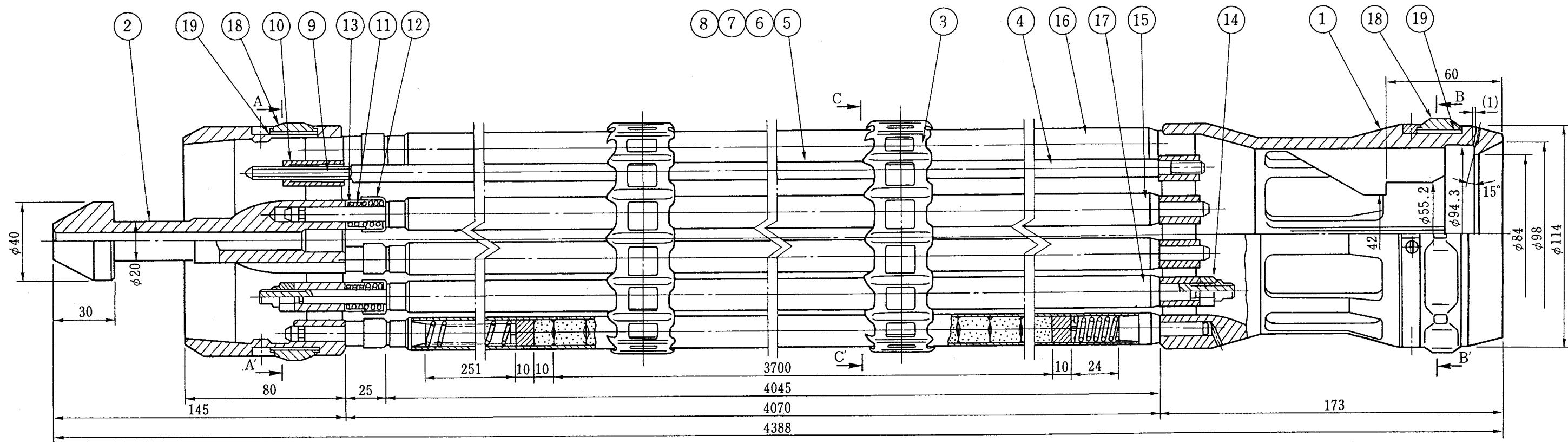
- (1) Nucl. Sci. & Eng., 35, 127, (1969)
- (2) Nucl. Sci. & Eng., 20, 1, (1964)
- (3) Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, New York, (1961)

添付書類〔Ⅲ〕

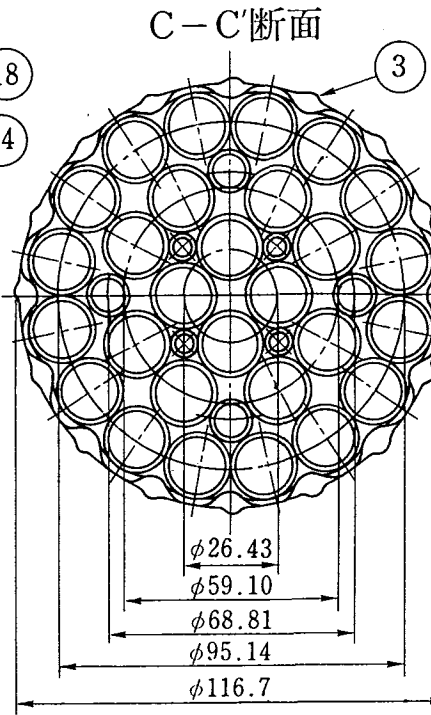
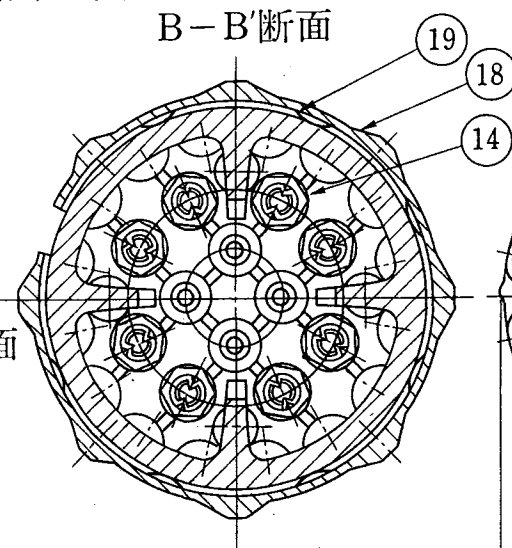
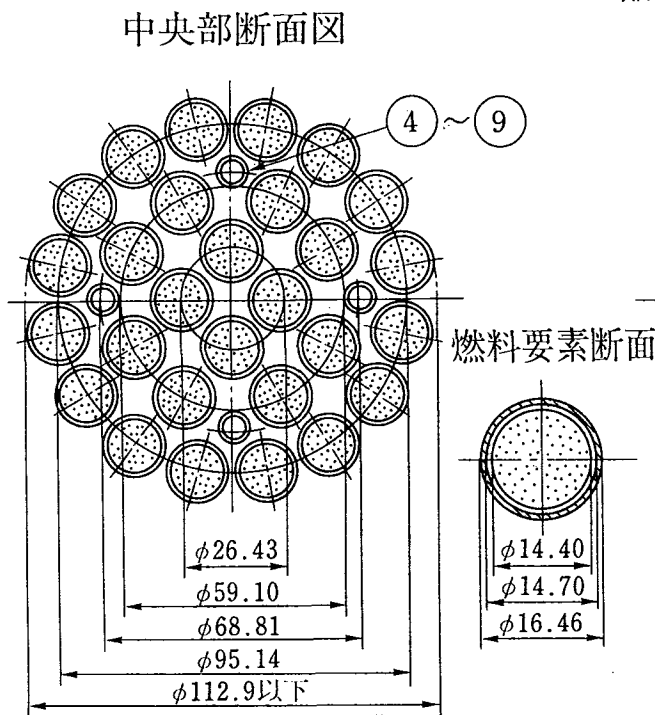
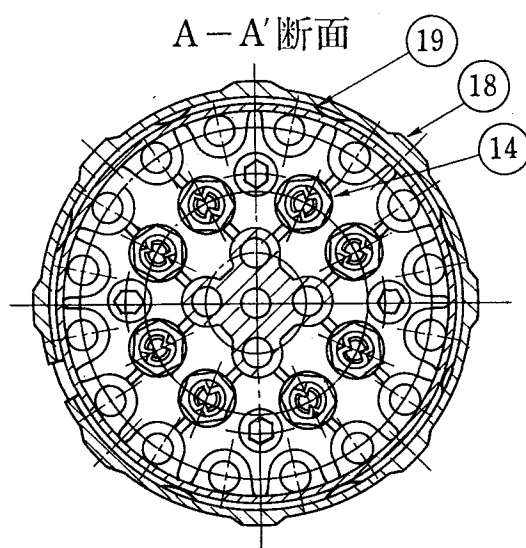
燃料体の構造図

## 図面目録

1. 図-1 燃料体組立図
2. 図-2 ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料体燃料要素組立図
3. 図-3 ペレット
4. 図-4 スペーサ組立図
5. 図-5 スペーサタイロッド
6. 図-6 上部および下部タイププレート組立図



縮尺図



19	センタリングパネ	インコネルX	2		
18	案内リングパネ	SUS630	2		
17	燃料要素(中間層)		8		
16	燃料要素(外層)		16		
15	燃料要素(内層)		4		
14	ロックナット	SUS304	16		
13	スプリングカバー(B)		28		
12	スプリングカバー(A)		28		
11	ロッドスプリング	インコネルX	28		
10	スペーサタイロッド	SUS304	4		
9	スペーサタイロッド(C)	Zry-2	4		
8	"(B-4)		4		
7	"(B-3)		28		
6	"(B-2)		8		
5	"(B-1)		4		
4	スペーサタイロッド(A)		4		
3	スペーサ	インコネル	12		
2	上部タイプレート	SUS304	1		
1	下部タイプレート	SUS304	1		
品番	図番	品名	材質	個数	備考

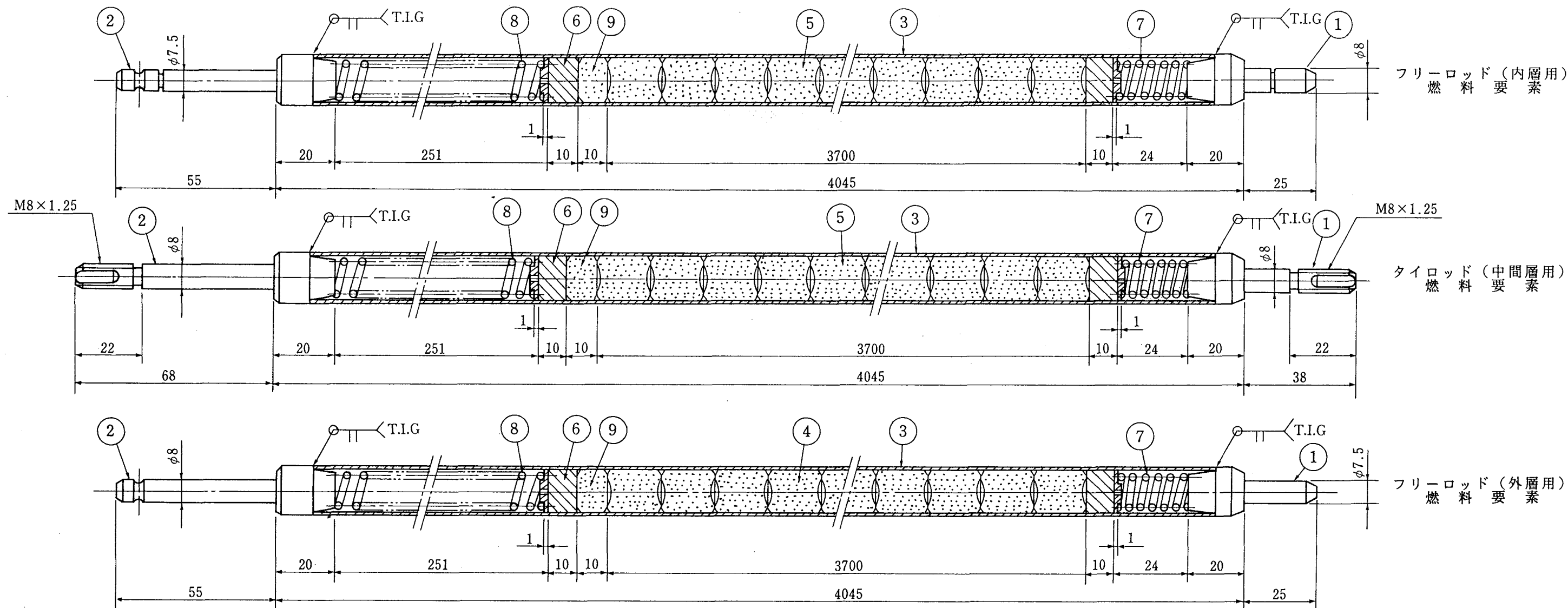
新型転換炉ふげん発電所

名称 燃料体組立図

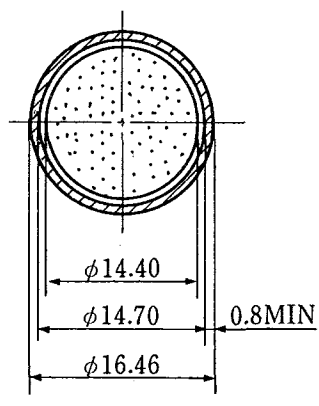
図番 図 - 1

動力炉・核燃料開発事業団





燃料部断面



⑧上部プレナムスプリング要目表 ⑦下部プレナムスプリング要目表

材	料	SUS 304-WPB
線	径	φ2.3
コイル	外径	φ13.5
有効	巻数	69 1/2
座	巻数	両端各1
巻	方向	右
自	由長	310
パ	ネ定数	0.27kg/mm

材	料	インコネル-X
線	径	φ3.2
コイル	外径	φ14
有効	巻数	4 1/2
座	巻数	両端各1
巻	方向	右
自	由長	24.2
パ	ネ定数	18kg/mm

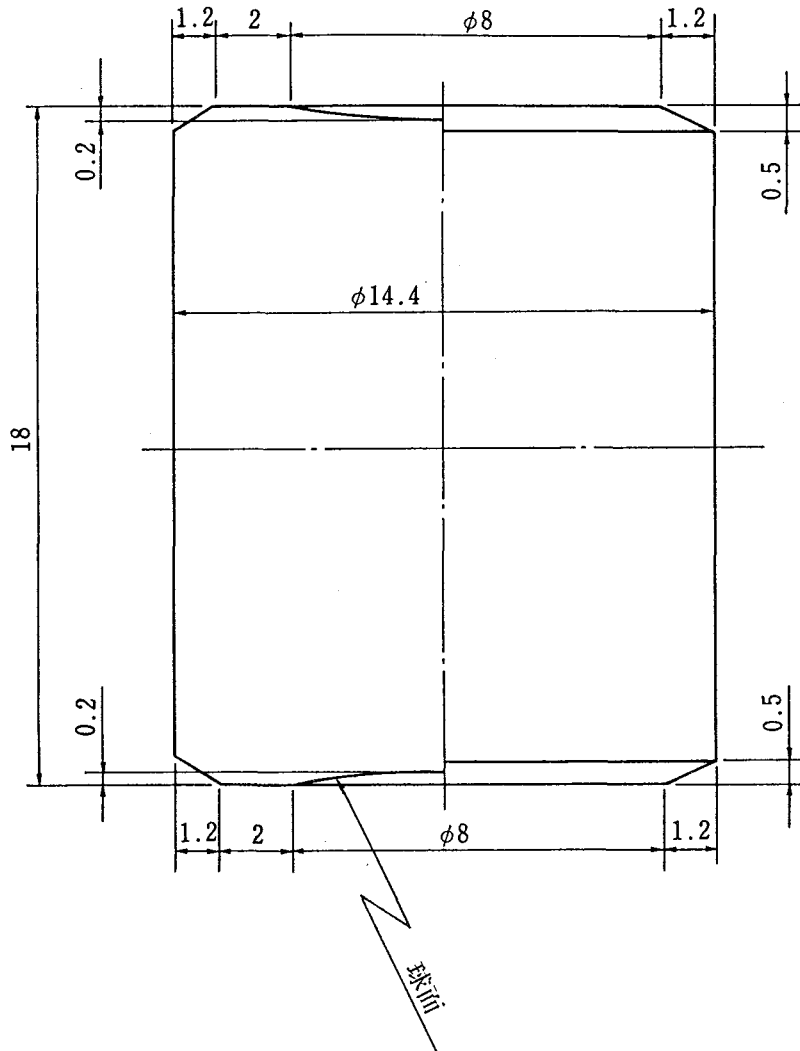
品番	図番	品名	材質	個数	備考	
1	1	1	9	天然ウランペレット	天然UO <sub>2</sub>	
1	1	1	8	押え板付 上部プレナムスプリング		スプリング SUS304-WPB 押え板 SUS304
1	1	1	7	押え板付 下部プレナムスプリング		スプリング インコネル-X 押え板 SUS304
2	2	2	6	アルミナ断燃ペレット	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	断熱材
			5	ウラン・プルトニウム混合 酸化物焼結ペレット	PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	2.27wt%(核分裂物質量)
			4	ウラン・プルトニウム混合 酸化物焼結ペレット	PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	1.84wt%(核分裂物質量)
1	1	1	3	被覆管	Zry-2	
1	1	1	2	上部端栓	"	
1	1	1	1	下部端栓	Zry-2	

燃料要素(内層)	燃料要素(中間層)	燃料要素(外層)	個数
C	B	A	4
			8
			16
			仕
			作
			業

**新型転換炉ふげん発電所**

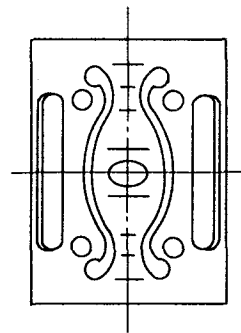
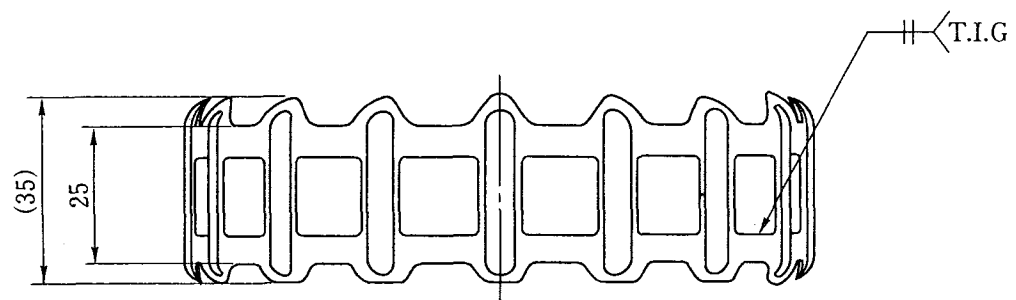
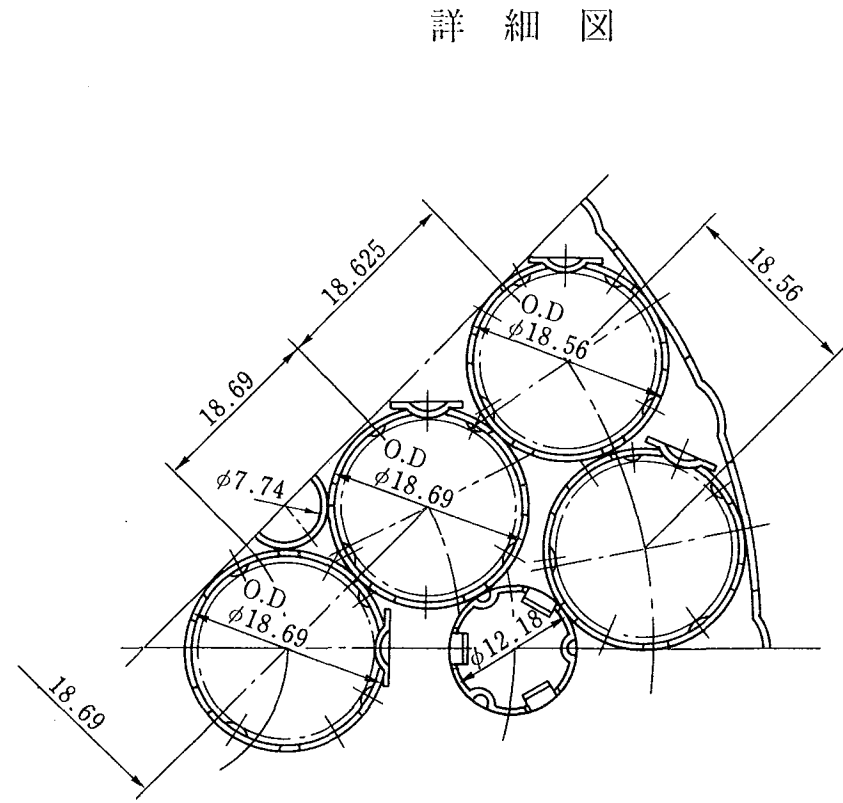
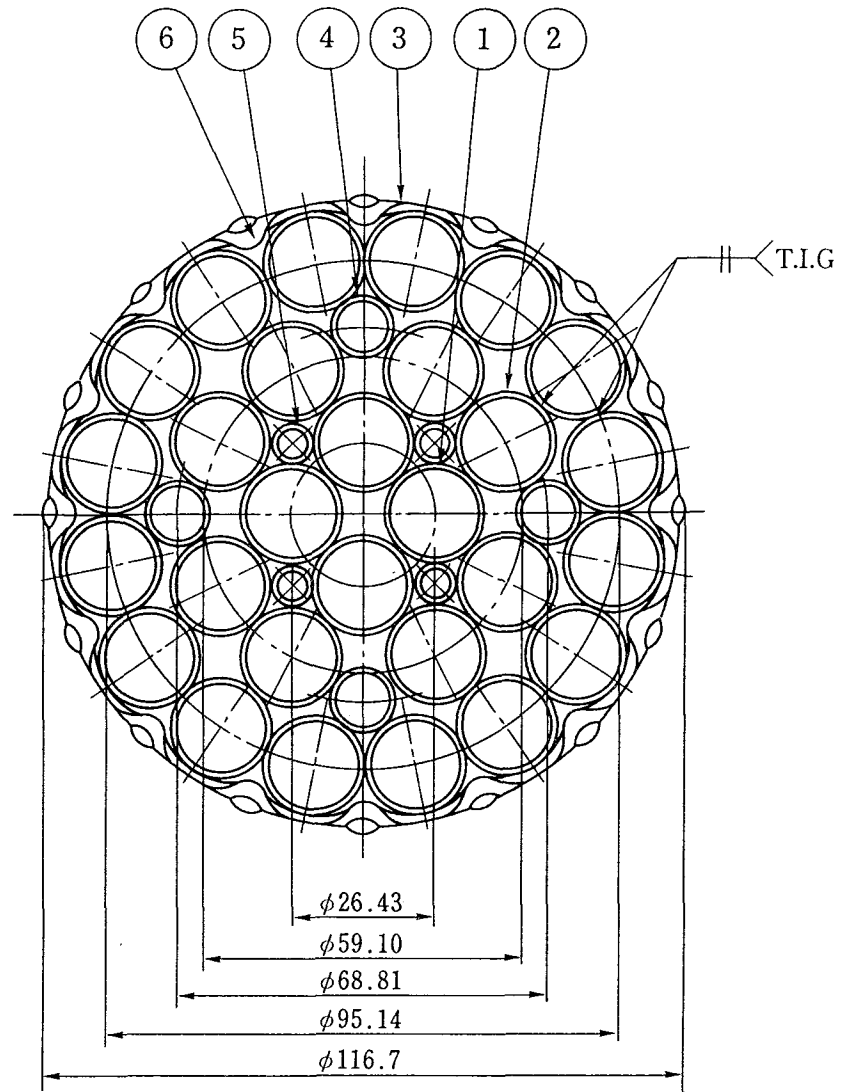
名称	ウラン・プルトニウム 混合酸化物燃料体 燃料要素組立図
図番	図 - 2

動力炉・核燃料開発事業団



1		ペレット	PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>		1.84 wt% (核分裂物質量) 2.27 wt% (核分裂物質量)
品番	図番	品名	材質	個数	備考

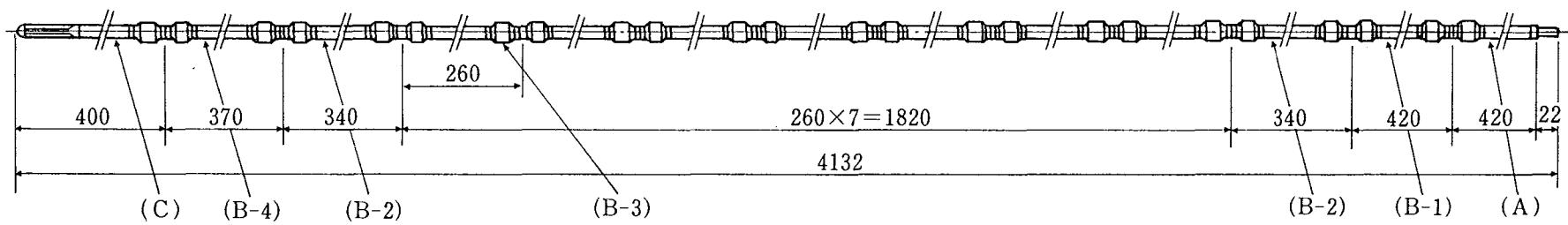
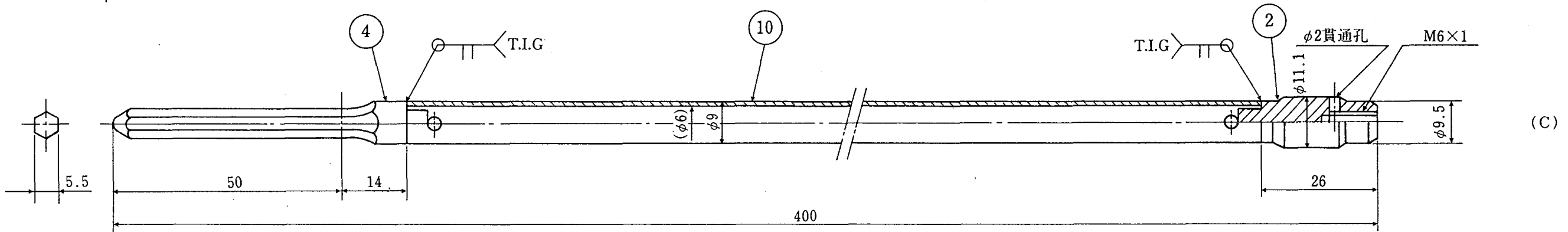
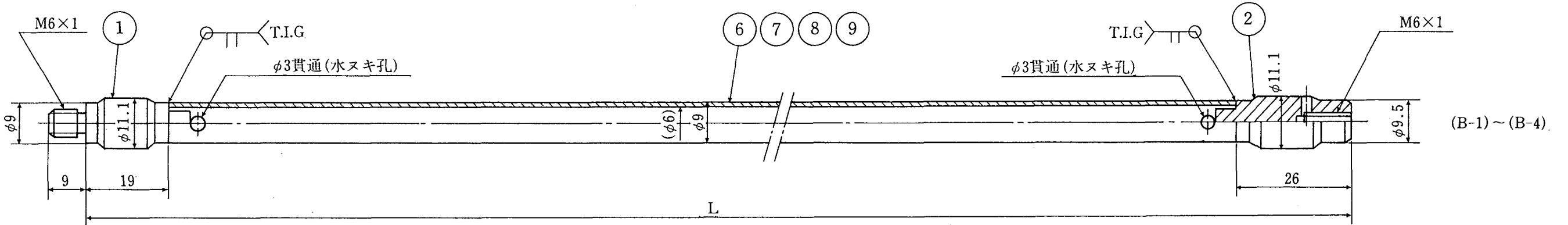
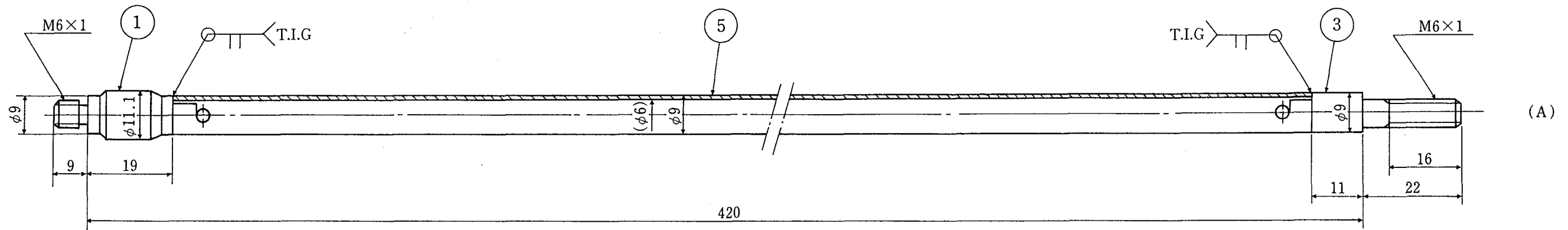
新型転換炉ふげん発電所	
名称	ペレット
図番	図 - 3
動力炉・核燃料開発事業団	



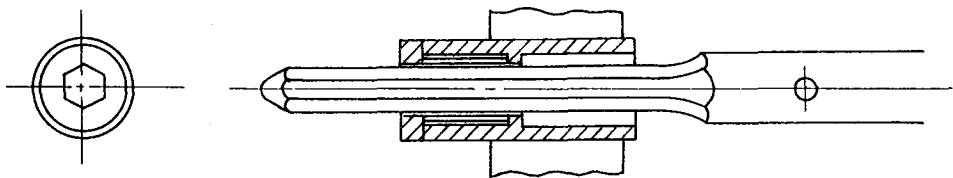
リング素子図

6	外リング	インコネル-718	1	t=0.7	
5	補強リング	"	4	t=0.35	
4	スペーサタイロッド	"	4	t=0.4	
3	外層リング素子	"	16	t=0.35	
2	中間層リング素子	"	8	t=0.35	
1	内層リング素子	"	4	t=0.35	
品番	図番	品名	材質	個数	備考

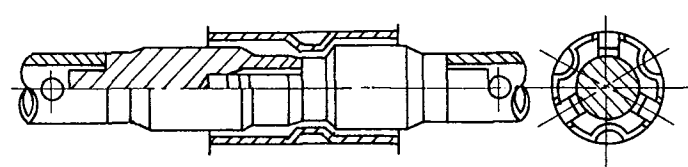
新型転換炉ふげん発電所	
名称	スペーサ組立図
図番	図 - 4
動力炉・核燃料開発事業団	



スペーサタイロッド組立図



スペーサタイロッド上部回転防止構造

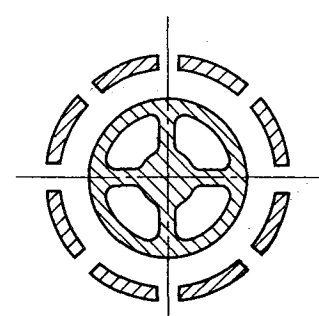
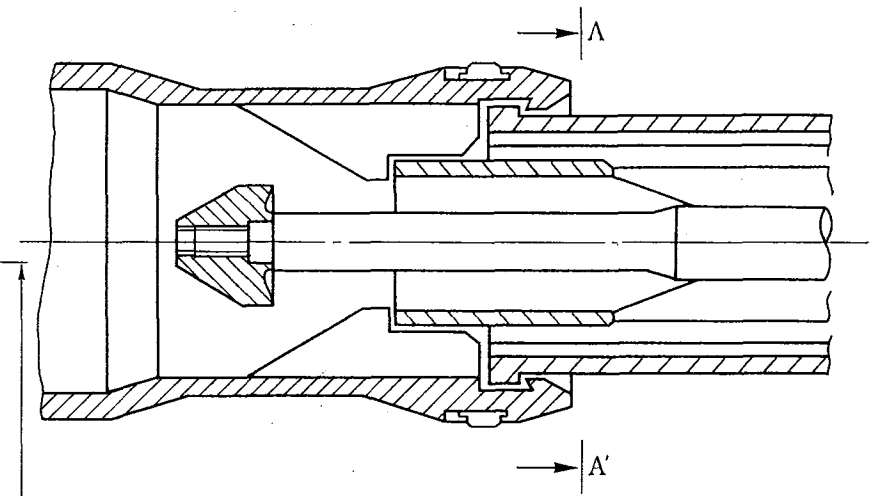
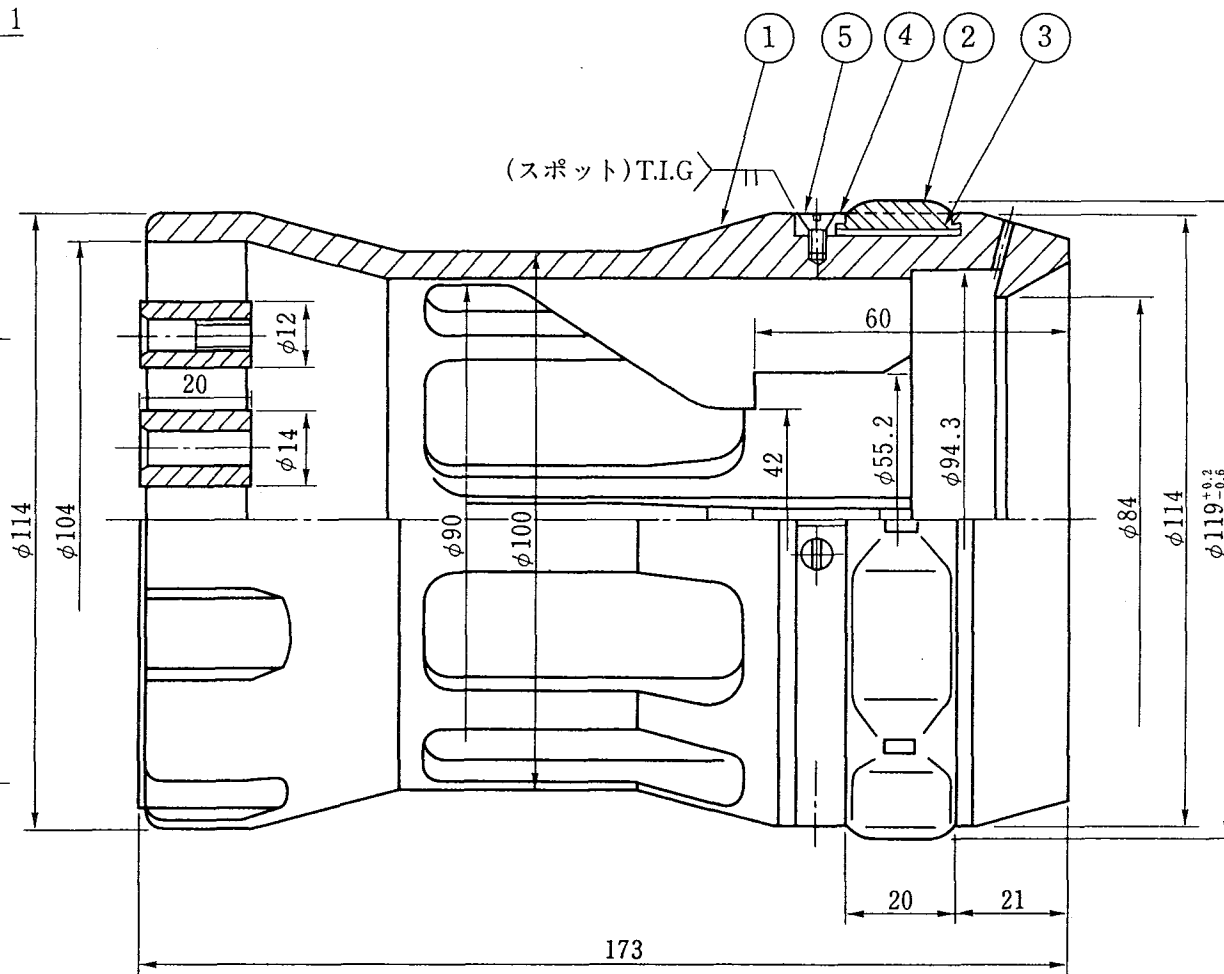
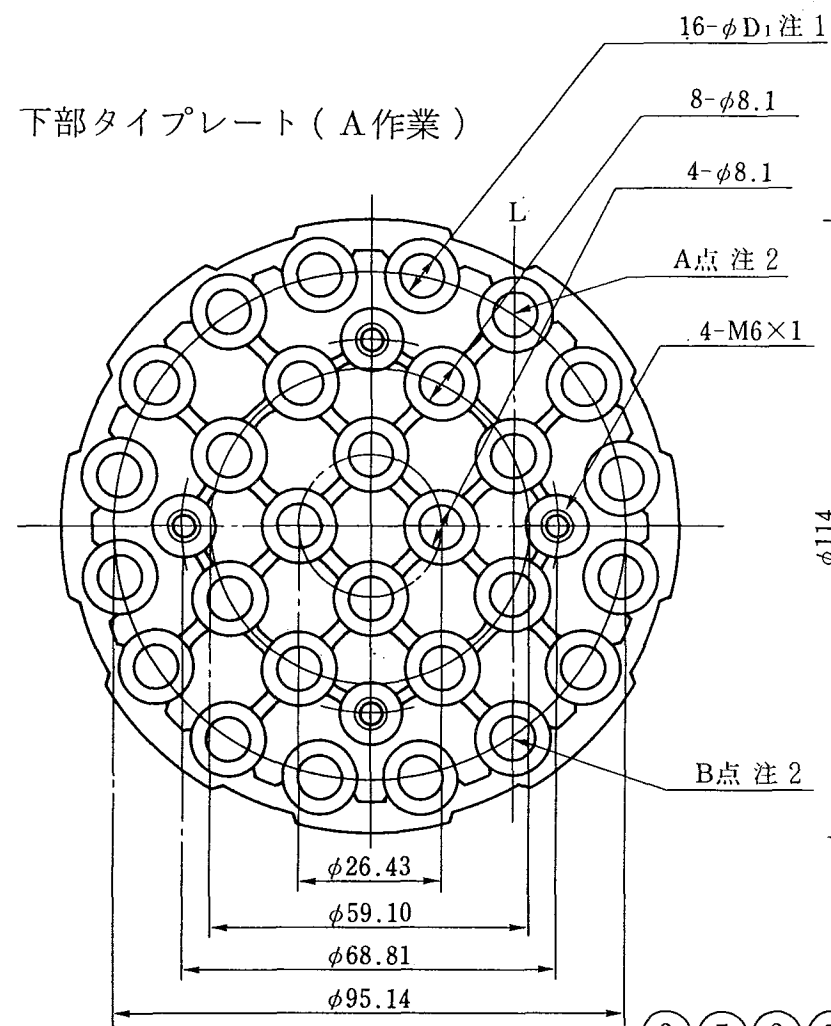


スペーサ支持部構造

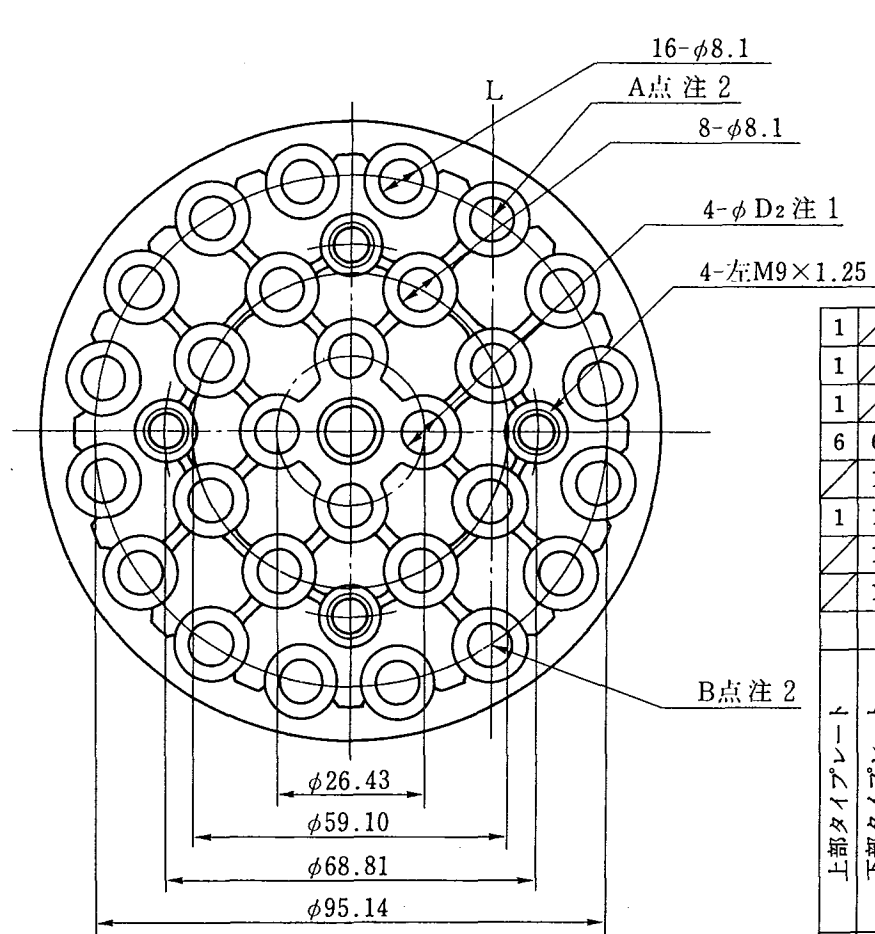
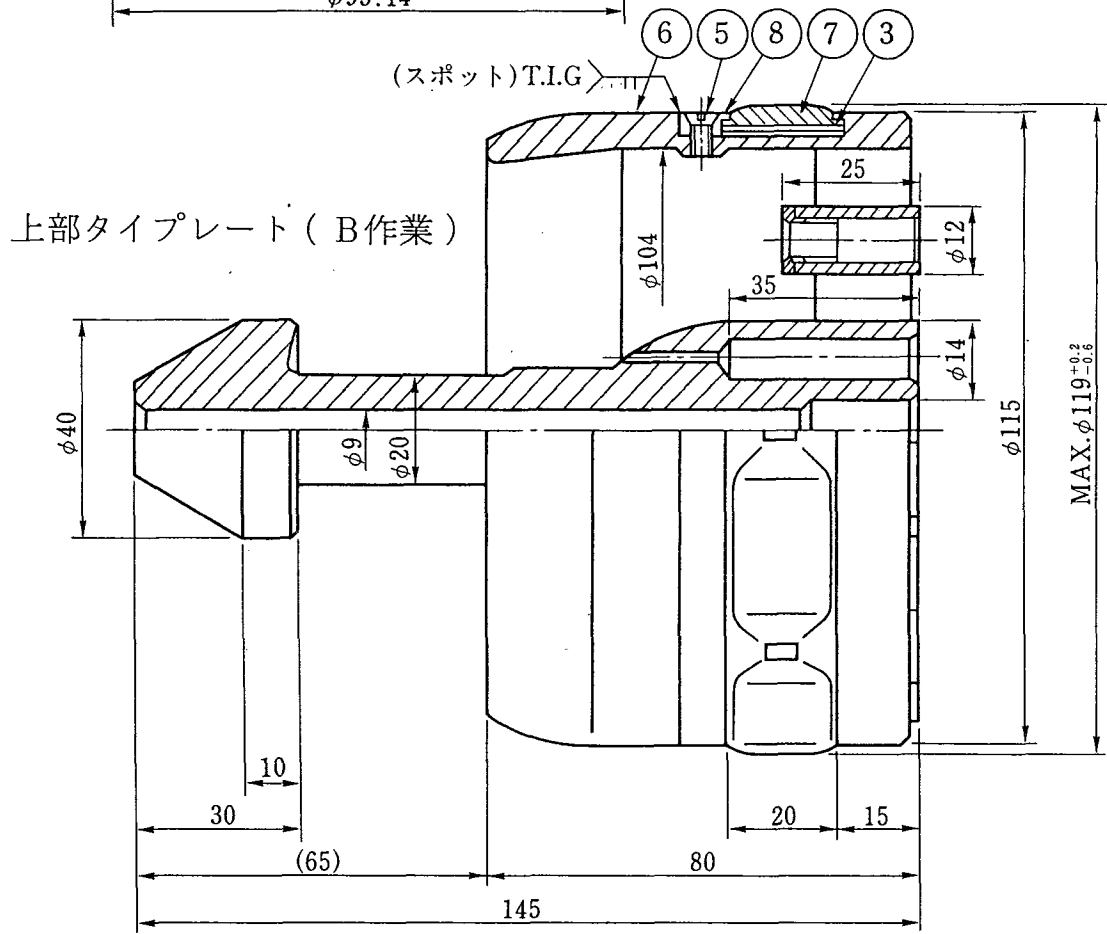
作業	仕	様	個数	品番	図番	品名	材質	個数	備考
F	A	(B-1)	4	1	1	" (A)	"		
E	B	(B-2)	8	2	2	" (B)	"		
D	C	(B-3)	28	3	3	" (C)	"		
C	D	(B-4)	4	4	4	端栓 (D)	"		
B	E	(A)	4	5	5	" (A)	"		
A	F	(C)	4	6	6	" (B-1)	"		
				7	7	" (B-2)	"		
				8	8	" (B-3)	"		
				9	9	" (B-4)	"		
				10	10	支持管 (C)	Zry-2		最上部
									中間部 L=370
									" L=260
									" L=340
									" L=420
									最下部

新型転換炉ふげん発電所	
名称	スペーサタイロッド
図番	図 - 5
動力炉・核燃料開発事業団	



A-A'断面  
コレット結合図



注2

縦方向の燃料要素挿入孔ピッチは、点A、Bを通る線Lを基準とし、横方向のピッチはA点を通り線Lに直角な線を基準として、各孔間距離公差(±0.08)

注1

	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
ウラン・プルトニウム 富化燃料体	7.6	7.6
二酸化ウラン 燃料体	8.1	8.1

1	8	(上部タイププレート用) 保持	SUS304	2ツ割	
1	7	案内リングパネ	SUS630		
1	6	上部タイププレート	SCS13		
6	5	皿 小 ネ ジ	SUS304		
1	4	(下部タイププレート用) 保持	SUS304	2ツ割	
1	3	センターリングパネ	インコル-X		
1	2	案内リングパネ	SUS630		
1	1	下部タイププレート	SCS13		
番号	図番	品名	材質	個数	備考

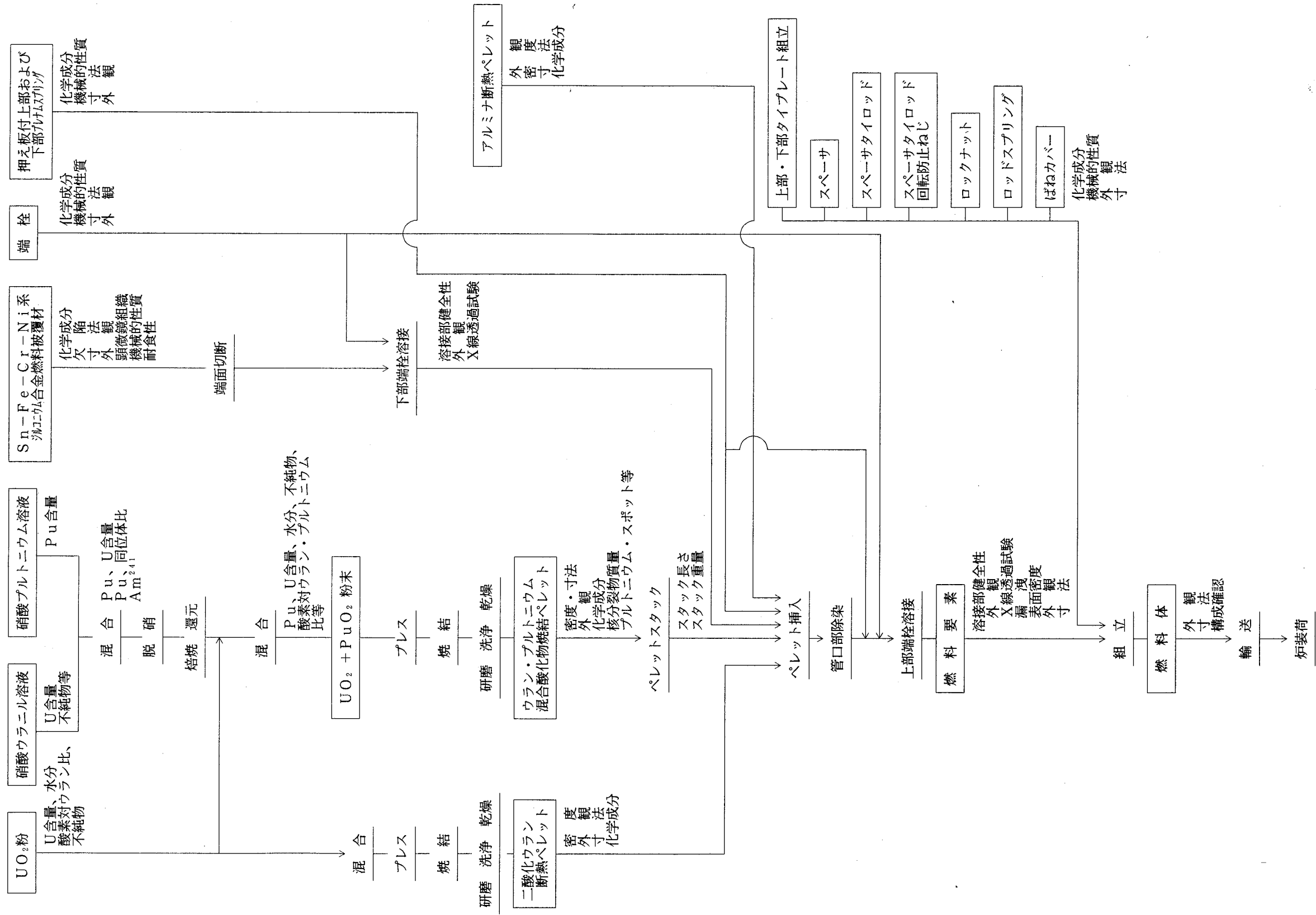
ト	上部タイププレート	仕
ア	下部タイププレート	
B	作業	

新型転換炉ふげん発電所	
名称	上部及び下部タイププレート 組立図
図番	図 - 6
動力炉・核燃料開発事業団	

添付書類〔Ⅳ〕

燃料体加工のフローシート

新型転換炉原型炉燃料体製造・検査工程管理図（ウラン・プルトニウム混合酸化燃料体）



参考資料〔Ⅰ〕

品質保証計画に関する説明書



## 1. 品質保証の基本方針

燃料体の製造にあたり、将来原子炉に装荷され炉心の主要部となる燃料体が炉内滞在期間を通じて、良好な性能を発揮して、原子炉の安全運転を維持できるものとするため、燃料体の設計、製造検査、原子炉への装荷、運転に至るまでの各段階において、十分な品質保証活動を行う。

動燃事業団は、下記の方針により品質保証活動を実施する。

- (1) 動燃事業団は新型転換炉ふげん発電所燃料体についての品質保証活動を実施する。
- (2) 動燃事業団は、品質保証活動に参画するすべての組織について、その業務分担と責任並びに権限の範囲を明確にするとともに、品質保証活動が正しく遂行されていることを監査、試験検査等により確認する。
- (3) 動燃事業団は、燃料体の設計、製作、検査、輸送等の各段階において、それらに適用される法律、法令、規則、基準、規格および設計条件を明確にし、これらを満足していることを確認する。
- (4) 図面、仕様書、試験・検査記録、監査記録等品質保証に関する文書については保管管理すべきものを明確にし、担当部署が責任をもって管理する。
- (5) 二酸化ウラン燃料体とウラン・プルトニウム混合酸化物燃料体の品質保証は独立に行う。

## 2. 適用基準等

本品質保証計画書は、日本電気協会の電気技術指針原子力編「原子力発電所の品質保証指針、(J E A G 4 1 0 1 - 1 9 8 1)」および米国原子力委員会基準 1 0 C F R 5 0、AppendixB、1 9 7 1 の“Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plant and Fuel Reprocessing Plants” に準拠して次の項目について記述する。

- (イ) 品質保証組織
- (ロ) 文書管理
- (ハ) 工程管理および検査管理
- (ニ) 製品の識別管理

### 3. 品質保証組織

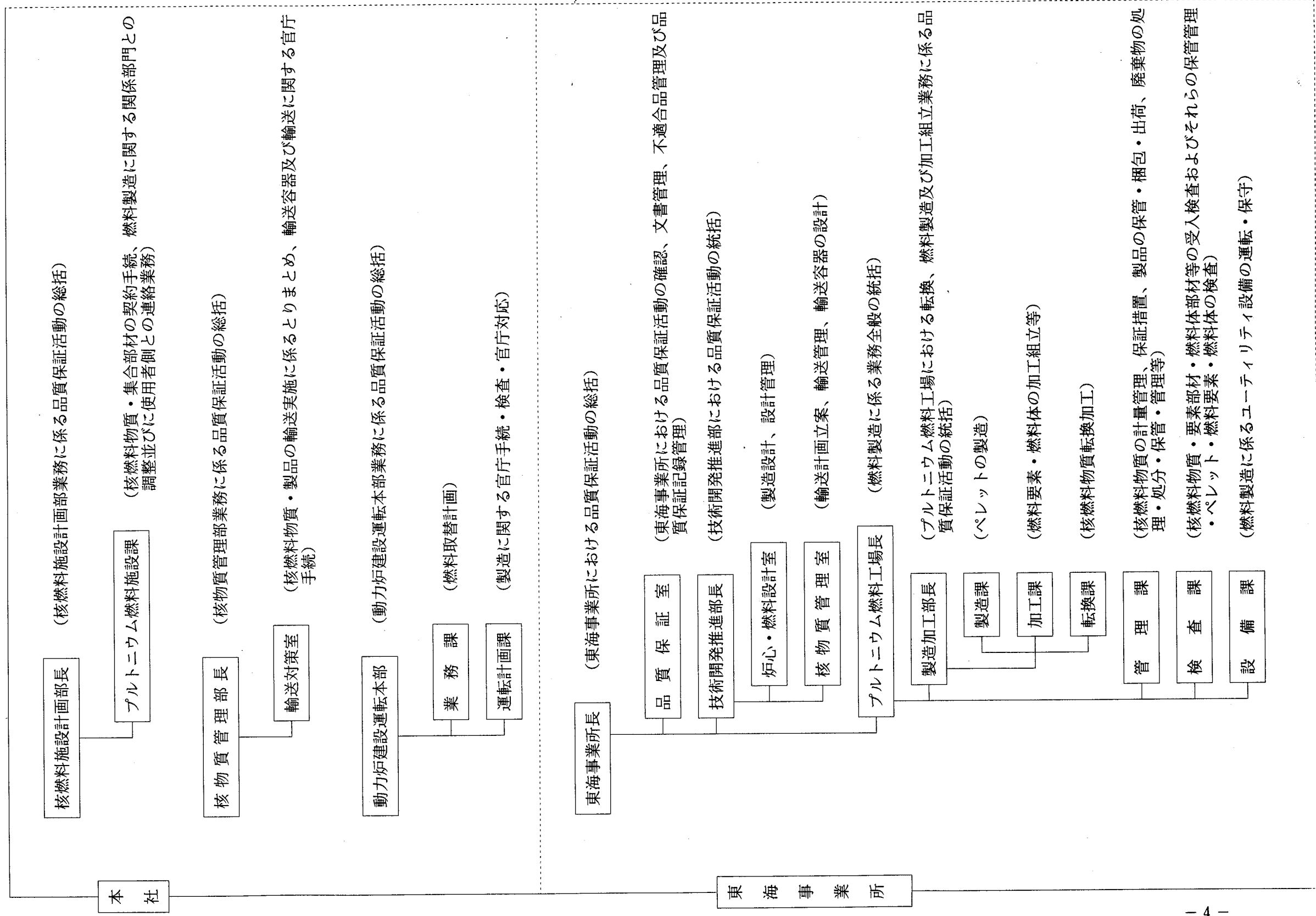
新型転換炉ふげん発電所燃料体の設計，製造，検査，原子炉への装荷，運転に係わる動力炉・核燃料開発事業団の品質保証組織図を別図1に示す。

燃料体の設計・製造は動力炉建設運転本部が提示する燃料取替え計画に基づいて、核燃料施設計画部及び東海事業所が行う。

燃料体の製造工程中における検査は動力炉建設運転本部が行う。

製造された燃料体はふげん発電所において核燃料施設計画部よりふげん発電所に引渡す。

別図1. 品質保証組織図



#### 4. 文書管理

燃料の製造から原子炉サイトへの輸送受入れ、原子炉への装荷、使用済燃料の取出し、サイトからの搬出に至る燃料の流れに於て、燃料の品質に影響する活動を規定するために必要な文書を制定し、それを規定された活動を実施する個所に配布し、その遵守、徹底をはかる。

品質保証活動に必要とする制定文書類の他、各種連絡事項等もできるだけ文書化して、連絡事項の確実な伝達の徹底をはかることにし、品質保証組織内で発効される文書類は相互に区分等を明確にして管理、保管し、常時速かに検索できるようにする。

また、文書内容の変更に伴い、差換の必要が生じた場合には速かに関係部門に連絡、変更文書の差換等変更事項の徹底を行い、品質等に不具合状態が生じないようにつとめる。

なお、燃料体の設計、製造に係わる制定文書の作成、合議、決定、承認、登録、配布、改訂、廃止などの手続は文書管理要領書によって行う。

## 5. 工程管理および検査管理

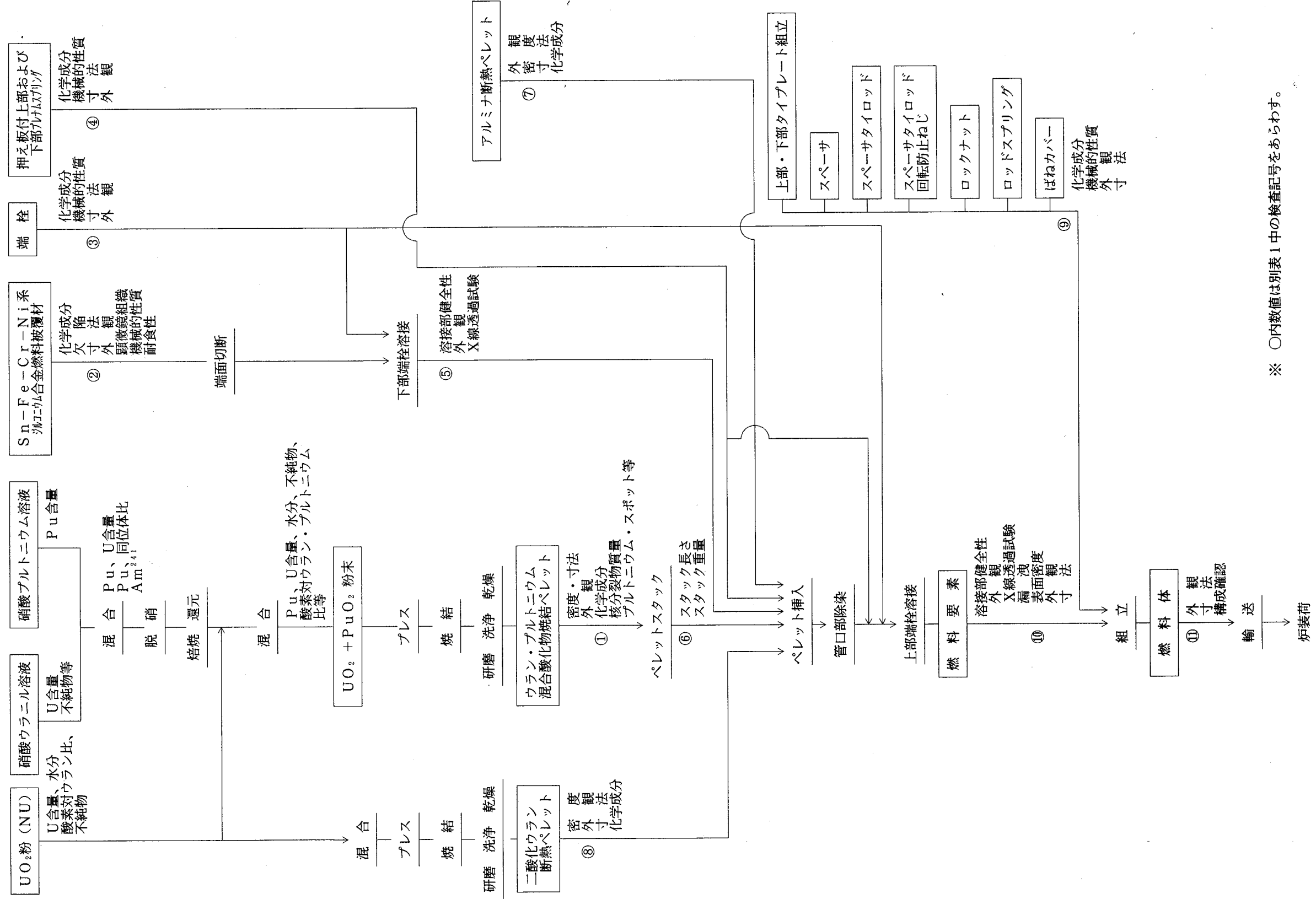
取替燃料の必要量、必要時期を設定して、原子炉の定常運転を妨げないよう、燃料体製造の工程管理を行う。工程管理の対象範囲は原料粉末および燃料体部材等の受入から燃料体をふげん発電所まで搬入する輸送工程までとする。

検査および検査の一環としての試験は、製造仕様書、製造図面等に基づいて製品が適切に製造されているかを確認するために、試験、検査要領書によって行う。

この検査には、燃料製造に用いる購買品の受入検査製造工程中の検査製品の検査を含み、また、動力炉建設運転本部においてもそれらの確認のための検査を行う。

燃料体の製造・検査工程管理図を別図2.に、また、検査担当部署を別表1.に示す。

別図2. 新型転換炉原型炉燃料体製造・検査工程管理図（ウラン・プルトニウム混合酸化燃料体）



※ ○内数値は別表1中の検査記号をあらわす。

別表1. 検査担当部署

検査記号	検査対象物	検査項目	検査担当課
①	ウラン・プルトニウム 混合酸化物ペレット	密度・寸法 外観 化学成分 富化率 プルトニウム・スポット等	検査課
②	Sn-Fe-Cr-Ni系 ジルコニウム 合金燃料被覆材	化学成分 欠陥 寸法 外観 顕微鏡組織 機械的性質 耐食性等	検査課
③	端栓	寸法 外観 化学成分 機械的性質等	検査課
④	押え板付上部および 下部プレナムスプリング	寸法 外観 化学成分	検査課
⑤	下部端栓溶接部	外観 X線透過試験等	検査課
⑥	ペレットスタック	スタック長さ スタック重量等	製造加工部
⑦	アルミナ断熱ペレット	密度 寸法 外観 化学成分等	検査課
⑧	二酸化ウラン断熱ペレット	密度 寸法 外観 化学成分等	検査課



別表1. (続き)

検査 記号	検査対象物	検査項目	検査担当課
⑨	燃料体部材 ・上部・下部 タイプレート組立体 ・スペーサ ・スペーサタイロッド ・スペーサタイロッド 回転防止ねじ ・ロックナット ・ロッドスプリング ・ばねカバー	寸法 外観 化学成分 機械的性質等	検査課
⑩	燃料要素	寸法 外観 漏洩 X線透過試験 表面密度等	検査課
⑪	燃料体	寸法 外観 構成等	検査課

<検査順序>

検査課 → 動力炉建設運転本部 → 官庁

## 6. 部材および製品の識別管理

製品となる燃料体の識別は、燃料体の識別番号により行なう。

識別番号は燃料体の上部および下部タイプレート部へ刻印法により刻字する。

なお、製品に用いた原材料、部品のロットとの対応は、明確に記録を残しており、これらはその履歴を製品から検索できるようにしている。ペレット、燃料要素、燃料体部材、燃料体の識別管理を別表2.に示す。

別表2. 部材および製品の識別管理

部 品		識 別 管 理
1.	ウラン・プルトニウム 混合酸化物焼結ペレット	製造ロット番号により識別管理する。
2.	燃料要素	燃料要素番号により識別管理する。
3. 部 材	二酸化ウラン断熱ペレット	製造ロット番号により識別管理する。
	押え板付プレナム スプリング上・下部	製造ロット番号により識別管理する。
	アルミナ断熱ペレット	製造ロット番号により識別管理する。
	燃料被覆材	燃料被覆材番号により識別管理する。
	端 栓	製造ロット番号により識別管理する。
	スペーサ	スペーサ番号により識別管理する。
	スペーサタイロッド	製造ロット番号により識別管理する。
	ロッドスプリング	製造ロット番号により識別管理する。
	ばねカバー	製造ロット番号により識別管理する。
	ロックナット	製造ロット番号により識別管理する。
	上部および下部タイププレート	タイププレート番号により識別管理する。
4.	燃料体	燃料体番号により識別管理する。

参考資料〔Ⅱ〕

製造業者一覽表

製造業者一覧表

項 目	材料または工程の名称	調達・加工先
1. ペレット	(1) $PuO_2$	
	(2) $UO_2$ 粉末	日本核燃料 コンバージョン(株)
2. 被覆管	(1) Zry-2 素管	Wah Chang
	(2) 機械加工	(株)神戸製鋼所 住友金属工業(株)
3. 端 栓	(1) Zry-2 棒	Wah Chang P. U. K 日本鋳業(株)
	(2) 機械加工	(株)タツミ製作所
4. 押え板付上・下部 プレナムスプリング	(1) SUS-304 鋼線 (上部プレナム スプリング)	日本精線(株) 住友電気工業(株)
	(2) インコネル-X線 (下部プレナム スプリング)	日立金属(株)
	(3) SUS-304 棒	愛知製鋼(株) 大同特殊鋼(株)
	(4) つる巻ばね加工	相互発條(株)
	(5) 押え板加工	(株)タツミ製作所
	(6) 溶接加工	原子燃料工業(株)
5. アルミナ断熱ペレット	(1) $Al_2O_3$ ペレット	京セラ(株)
6. ロッドスプリング	(1) インコネル-X線	日立金属(株)
	(2) つる巻ばね加工	相互発條(株)
7. スペーサ	(1) インコネル-718 素管	The International Nickel Company Inc. (株)神戸製鋼所
	(2) インコネル-718 板	日立金属(株)
	(3) インコネル-718 管 冷間加工	東成鋼管(株)

項 目	材料または工程の名称	調達・加工先
	(4) プレス加工	(株)有田製作所
	(5) 熱処理	金属技研(株)
	(6) 組立・溶接	原子燃料工業(株)
8. 上・下部タイププレート	(1) 鋳物	カントク精密鑄造(株)
	(2) 機械加工	三益工業(株)
	(3) SUS-630棒	大同製鋼(株) 日立金属(株)
	(4) SUS-304管、棒	住友金属(株) 愛知製鋼(株)
	(5) インコネル-X板	日立金属(株)
	(6) センタリングばね加工	(株)有田製作所
	(7) 熱処理	金属技研(株)
	(8) 組立・溶接	原子燃料工業(株)
9. スペーサタイロッド	(1) Zry-2管	(株)神戸製鋼所
	(2) Zry-2棒	Wah Chang P. U. K 日本鋳業(株)
	(3) 端栓加工	(株)タツミ製作所
	(4) タイロッド管加工、 穴あけ	(株)タツミ製作所
	(5) 溶接	原子燃料工業(株)
10. ばねカバー	(1) SUS-304鋼帯	日本金属(株) 日本鋳業(株)
	(2) プレス加工	エレバム精機(株)
11. ロックナット	(1) SUS-304棒	大同特殊鋼(株)
	(2) 機械加工	(株)タツミ製作所

参考資料〔Ⅲ〕

原子炉設置（変更）許可，工事計画認可および

燃料体設計認可の経緯

1. 原子炉設置（変更）許可の経緯（抜粋）

認可年月日	認可番号	備考
昭和45年11月30日	45原第7659号	新型転換炉原型炉「ふげん」の設置のため
昭和47年 2月28日	47原第1731号	プルトニウム富化燃料の使用等
昭和49年 8月31日	49原第7136号	プルトニウム富化燃料の種類等
昭和55年 7月 7日	55安（原規） 第88号	燃料の富化度またはフィッサイル量の変更
昭和59年 3月17日	59安（原規） 第28号	照射用36本燃料体の装荷のため
昭和60年11月25日	60安（原規） 第 150号	照射用セグメント燃料体の装荷のため
昭和63年 9月22日	63安（原規） 第 300号	照射用ガドリニア燃料体の装荷のため



2. 工事計画認可の経緯（抜粋）

認可年月日	認可番号	備考
昭和50年 1月 6日	49資庁第19710号	原子炉．構造，燃料，減速材，反射材
昭和55年 3月17日	55資庁第 1931号	燃料（取替炉心）
昭和55年 8月 6日	55資庁第 9451号	燃料（タイプ B 炉心）
昭和59年10月18日	59資庁第11003号	燃料（照射用36本燃料体装荷のため）
昭和62年 3月 3日	62資庁第 1350号	燃料（照射用セグメント燃料体装荷のため）
平成 2年 4月20日	2 資庁第 4035号	燃料（照射用ガドリニア燃料体装荷のため）

### 3. 燃料体設計認可の経緯

#### (1) ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料体

認可年月日	認可番号	体数	備考
昭和50年 1月 8日	49資庁第20655号	100体 (タイプA)	初 装 荷
昭和53年11月28日	53資庁第13690号	40体 (タイプA)	
昭和55年 4月24日	55資庁第 3116号	8体 (タイプA)	
昭和55年 8月 6日	55資庁第 9593号	20体 (タイプB)	
昭和56年 1月19日	55資庁第14388号	28体 (タイプB)	
昭和56年 8月25日	56資庁第10559号	56体 (タイプB)	
昭和57年11月18日	57資庁第16901号	44体 (タイプB)	
昭和58年11月24日	58資庁第15921号	36体 (タイプB)	4体は回収ウラン使用
昭和59年 9月 7日	59資庁第10636号	4体	照射用 36本燃料体
昭和60年 3月29日	60資庁第 3042号	32体 (タイプB)	外層に回収ウラン使用
昭和61年 4月 4日	61資庁第 4168号	2体	照射用セグメント燃料体
昭和61年 7月 7日	61資庁第 9331号	32体 (タイプB)	外層に回収ウラン使用
昭和62年 5月12日	62資庁第 4803号	4体 (タイプB)	「ふげん」回収Pu使用
昭和62年 9月17日	62資庁第10551号	24体 (タイプB)	
昭和63年 5月18日	63資庁第 2975号	34体 (タイプB)	
平成元年 5月17日	元資庁第 4340号	6体	照射用ガドリニア燃料体
平成元年10月25日	元資庁第12084号	10体 (タイプB)	
平成2年 4月20日	2資庁第 3797号	10体 (タイプB)	

(2) 二酸化ウラン燃料体（標準）

認可年月日	認可番号	体数	備考
昭和50年 1月 8日	49資庁第20655号	132体（タイプA）	初 装 荷
昭和54年11月21日	54資庁第13622号	84体（タイプA）	
昭和55年11月 4日	55資庁第12308号	16体（タイプA）	
昭和56年 1月 9日	55資庁第14389号	41体（タイプB）	
昭和56年10月20日	56資庁第10719号	15体（タイプB）	
昭和58年11月10日	58資庁第13094号	42体（タイプB）	
昭和60年10月17日	60資庁第12072号	40体（タイプB）	
平成元年 5月 9日	元資庁第 2012号	52体（タイプB）	
平成2年 4月 9日	2 資庁第 2870号	32体（タイプB）	

(3) 特殊燃料体

認可年月日	認可番号	体数	備考
昭和51年11月 1日	51資庁第11034号	5体（タイプA）	
昭和53年12月26日	53資庁第14855号	3体（タイプA）	
昭和56年 5月19日	56資庁第 4472号	3体（タイプB）	
昭和58年 9月 8日	58資庁第13093号	3体（タイプB）	
昭和62年 7月23日	62資庁第 8731号	3体（タイプB）	
平成2年 2月14日	元資庁第15348号	3体（タイプB）	