

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）

第 32 条（炉心等）に係る説明書

（その 2：第 32 条第 4 項）

2019 年 12 月 9 日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

大洗研究所高速実験炉部

1. 要求事項の整理
2. 要求事項への適合性
 - 2.1 炉心燃料集合体の概要
 - 2.2 設計方針
 - 2.3 使用条件
 - 2.4 評価
 - 2.5 要求事項（試験炉設置許可基準規則第 32 条第 4 項）への適合性説明

(別紙)

- 別紙 1 : 燃料要素の熱・機械設計の流れ
- 別紙 2 : 炉心燃料要素の熱設計計算式
- 別紙 3 : 炉心燃料要素の熱設計に用いる物性式
- 別紙 4 : 被覆管歪に係る主要な材料特性式
- 別紙 5 : 被覆管歪の制限
- 別紙 6 : クリープ寿命分数和の計算
- 別紙 7 : 被覆管各部の応力計算式
- 別紙 8 : 設計応力強さ (S_m) 設定における ASME の適用
- 別紙 9 : 疲労損傷和及び累積損傷和の計算
- 別紙 10 : MK-IV 炉心における炉心燃料要素の機械設計結果等の整理
- 別紙 11 : 燃料集合体の機械設計の流れ
- 別紙 12 : 集合体各部の応力計算式
- 別紙 13 : MK-IV 炉心における炉心燃料集合体の機械設計結果等の整理
- 別紙 14 : 輸送時及び取扱い時の評価の整理

MK-IV炉心における炉心燃料要素の機械設計結果等の整理

地震時の強度評価について

1. 地震時の設計基準

地震時の強度評価に際して、燃料要素に対して以下の設計基準を設定する。

(1) 燃料要素は、Ss 地震に対し、被覆管の健全性が確保されること。

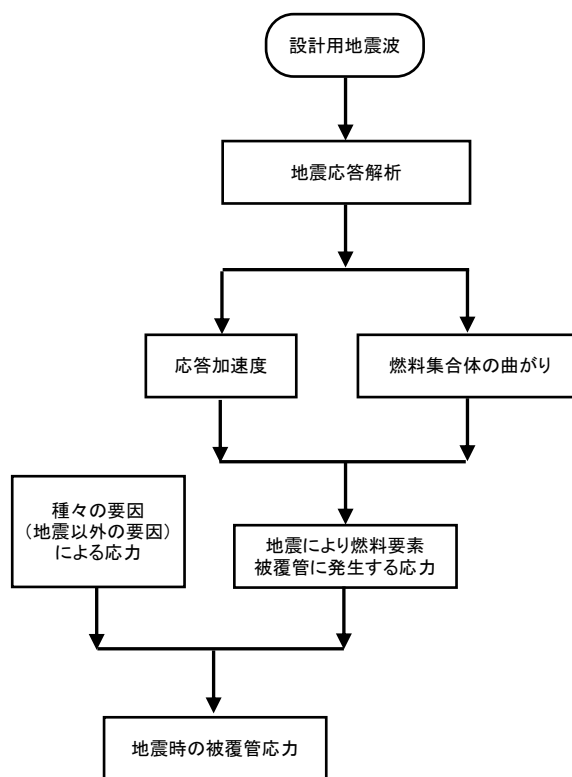
この設計基準は、実用炉設置許可基準規則第 4 条第 5 項における被覆材の密封機能の要求も参考に、燃料破損はプラントの安全性に影響を与えること、を考慮したものである。

第 1.1 表 実用炉設置許可基準規則第 4 条第 5 項における要求事項（参考）

要求事項（参考）
<p>5 炉心内の燃料被覆材は、基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。</p> <p>【解釈】</p> <ul style="list-style-type: none"> 「基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがない」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないことをいう。

2. 地震時の強度評価方法

地震時の強度評価の概要を第 2.1 図に示す。



第 2.1 図 地震時の強度評価の流れ

2.1 地震応答解析

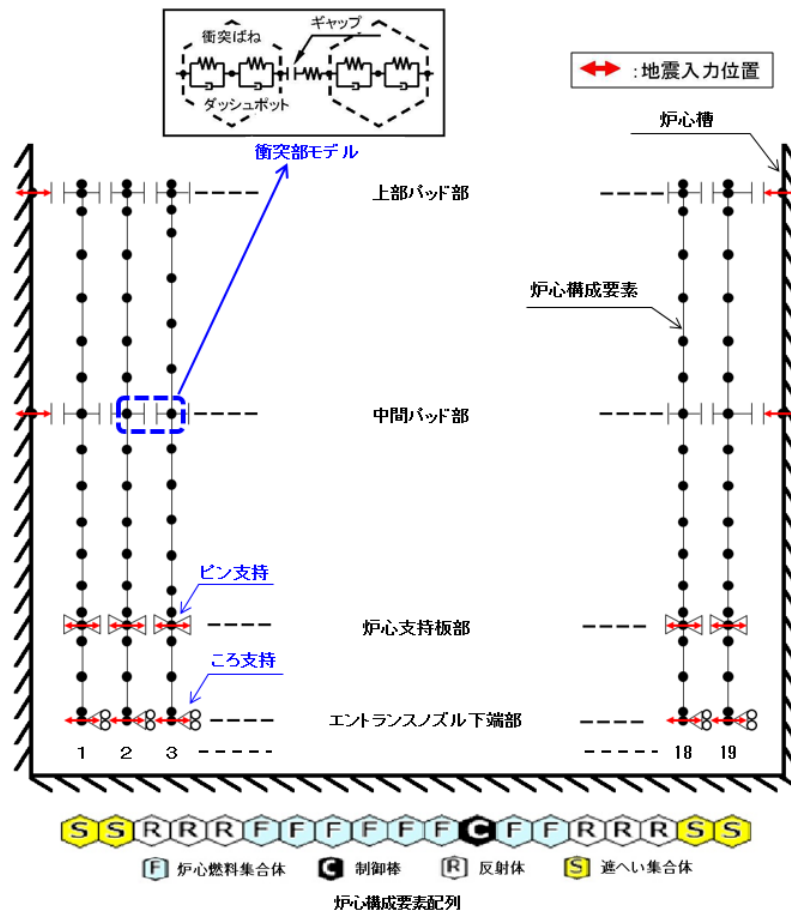
(1) 解析条件

炉心の単列構成要素群の時刻歴応答解析を行う。解析には FINAS コードを用いる。入力地震動等の解析条件は以下の通りである。

- (i) 入力地震動は、基準地震動 S_s に対する炉心支持板位置における時刻歴応答波（加速度）とする。
- (ii) 考慮する地震動は水平方向のみとする¹。
- (iii) 解析対象列は、制御棒を含む最大列とする。

(2) 解析モデル

解析モデルの概要を第 2.2 図に示す。同図の下方に、対象とした集合体配列を示す。炉心構成要素の寸法は、室温での公差を見込まないノミナル寸法とする。



第 2.2 図 解析モデル（概要）

¹ 鉛直方向加速度に基づく評価から、炉心構成要素の鉛直方向の跳び上がりは生じず、パッド外れも生じない。

2.2 地震時の応力評価

炉心燃料要素の応力評価は、地震による加速度によって発生する応力と、炉心湾曲によって発生する応力を組合せて行う。

地震により炉心燃料要素に発生する応力は、次に示すものを考慮する。

① 加速度に基づく応力

地震により外筒部が振動する結果、その内部に収納された炉心燃料要素に働く加速度により発生する応力である。

② 外筒部のたわみに基づく応力

地震により外筒部がたわむ結果、その内部に収納された炉心燃料要素が強制変位を受けることにより発生する応力である。

以下にこれらの詳細について示す。

(1) 評価条件

(i) 使用材料

- ① 被覆管材質：高Niオーステナイト系ステンレス鋼(A) *
- ② 被覆管材質：SUS316相当ステンレス鋼*

* 冷間加工度 $20 \pm 5\%$

(ii) 温度条件

		通常運転時	運転時の異常な過渡変化時 (1次冷却材流量減少)
下部端栓部	BOL	350 °C	350 °C
	EOL	350 °C	350 °C
最大発熱部	BOL	515 °C	595 °C
	EOL	515 °C	595 °C
最高温度部	BOL	620 °C	700 °C
	EOL	620 °C	700 °C
上部端栓部	BOL	615 °C	695 °C
	EOL	615 °C	695 °C

(iii) 地震時水平方向震度 4.00 G

2.1 地震応答解析の最大加速度から設定。

(iv) 集合体曲率半径 1.69×10^5 mm

2.1 地震応答解析の最大変位量から設定。

(v) 基本寸法

被覆管寸法については、公差を考慮した最小値にナトリウムによる外面腐食及びF.P.による内面腐食を考慮し、最も厳しい条件となる使用末期における被覆管寸法を使用する。

① 高Niオーステナイト系ステンレス鋼(A)	
平均半径	2.575 mm
肉厚	0.207 mm
② SUS316相当ステンレス鋼	
平均半径	2.575 mm
肉厚	0.196 mm

(vi) 許容応力

地震と組み合わせるプラントの運転状態における圧力荷重と基準地震動 S_s により定まる地震力との組み合わせに対して、許容限界を以下のとおりとする。

$$\text{一次膜応力(PL)} + \text{一次曲げ応力(Pb)} \leq \text{設計降伏点(Sy)}$$

※「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について」(平成29年2月15日 原子力規制庁)では、燃料被覆管の閉じ込め機能が維持できることの判断基準として、 S_s 地震に対しては設計引張強さ(S_u)を下回ることに、 S_d 地震に対しては設計降伏点(S_y)を下回ることにしている。ここでは、 S_s 地震に対して S_d 地震の許容限界である S_y 以下であることを確認することで、 S_d 地震の評価も包絡させている。

(2) 曲げ応力の評価

(i) 使用記号一覧表

σ_x	: 軸方向応力	(kgf/mm ²)
M	: 曲げモーメント	(kgf・mm)
Z	: 断面係数	(mm ³)
ρ	: 単位長さ当たりの重量	(kgf)
α	: 加速度	(G)
L	: 支持点間距離	(mm)
E	: ヤング率	(kgf/mm ²)
I	: 断面二次モーメント	(mm ⁴)
γ	: 外筒部の曲率半径	(mm)

(ii) 応力計算式

① 加速度に基づく応力の計算式

$$\sigma_x = \frac{M}{Z}$$

$$M = \frac{1}{12} \rho \alpha L^2$$

② 外筒部のたわみに基づく応力の計算式

$$\sigma_x = \frac{M}{Z}$$

$$M = \frac{EI}{\gamma}$$

3. 地震時の強度評価結果

地震時の強度評価結果を第3.1表及び第3.2表に示す。

いずれの位置においても設計比は1以下であり、炉心燃料要素の地震時の健全性は確保されている。

第3.1表 地震時の強度評価結果（高Ni オーステナイト系ステンレス鋼(A)）(1/2)
[単位 N/mm² (kgf/mm²)]

運転状態	評価位置	評価時期	使用初期		使用末期	
		応力分類	<PL+Pb>		<PL+Pb>	
通常運転時	下部栓部	応力強さ	13.0	(1.32)	41.1	(4.18)
		運転中	6.3	(0.64)	34.4	(3.50)
		地震時	6.66	(0.679)	6.66	(0.679)
		加速度		(0.399)		(0.399)
		たわみ		(0.280)		(0.280)
		許容値	498	(50.8)	498	(50.8)
		設計比	0.03		0.09	
	最大発熱部	応力強さ	14.4	(1.46)	96.3	(9.81)
		運転中	7.5	(0.76)	88.3	(9.00)
		地震時	6.87	(0.700)	7.95	(0.810)
		加速度		(0.440)		(0.550)
		たわみ		(0.260)		(0.260)
		許容値	471	(48.1)	430	(43.9)
		設計比	0.04		0.23	
	最高温度部	応力強さ	14.4	(1.47)	105.0	(10.70)
		運転中	7.6	(0.77)	96.8	(9.87)
		地震時	6.79	(0.692)	8.13	(0.829)
		加速度		(0.446)		(0.584)
		たわみ		(0.246)		(0.245)
		許容値	417	(42.6)	291	(29.7)
		設計比	0.04		0.37	
上部栓部	応力強さ	12.9	(1.31)	42.7	(4.35)	
	運転中	6.4	(0.65)	36.1	(3.68)	
	地震時	6.41	(0.653)	6.54	(0.666)	
	加速度		(0.406)		(0.420)	
	たわみ		(0.247)		(0.246)	
	許容値	421	(43.0)	298	(30.4)	
	設計比	0.04		0.15		

第 3.1 表 地震時の強度評価結果 (高 Ni オーステナイト系ステンレス鋼(A)) (2/2)

[単位 N/mm² (kgf/mm²)]

運転状態	評価位置	評価時期	使用初期		使用末期	
		応力分類	<PL+Pb>		<PL+Pb>	
運転時の異常な過渡変化時	下部端栓部	応力強さ	13.3	(1.35)	43.9	(4.47)
		運転中	6.6	(0.67)	37.2	(3.79)
		地震時	6.66	(0.679)	6.66	(0.679)
		加速度		(0.399)		(0.399)
		たわみ		(0.280)		(0.280)
		許容値	498	(50.8)	498	(50.8)
		設計比	0.03		0.09	
	最大発熱部	応力強さ	15.1	(1.53)	104.4	(10.63)
		運転中	8.2	(0.83)	96.4	(9.82)
		地震時	6.87	(0.700)	7.95	(0.810)
		加速度		(0.440)		(0.550)
		たわみ		(0.260)		(0.260)
		許容値	435	(44.4)	397	(40.5)
		設計比	0.04		0.27	
	最高温度部	応力強さ	15.1	(1.54)	113.9	(11.60)
		運転中	8.3	(0.84)	105.7	(10.77)
		地震時	6.79	(0.692)	8.13	(0.829)
		加速度		(0.446)		(0.584)
		たわみ		(0.246)		(0.245)
		許容値	345	(35.2)	240	(24.5)
		設計比	0.05		0.48	
	上部端栓部	応力強さ	13.3	(1.35)	45.8	(4.66)
		運転中	6.8	(0.69)	39.2	(3.99)
		地震時	6.41	(0.653)	6.54	(0.666)
		加速度		(0.406)		(0.420)
		たわみ		(0.247)		(0.246)
		許容値	350	(35.7)	247	(25.2)
		設計比	0.04		0.19	

第 3.2 表 地震時の強度評価結果 (SUS316 相当ステンレス鋼) (1/2)

[単位 N/mm² (kgf/mm²)]

運転 状態	評価 位置	評価時期	使用初期		使用末期	
		応力分類	<PL+Pb>		<PL+Pb>	
通 常 運 転 時	下 部 端 栓 部	応力強さ	13.1	(1.33)	41.2	(4.19)
		運転中	6.3	(0.64)	34.4	(3.50)
		地震時	6.72	(0.685)	6.72	(0.685)
		加速度		(0.399)		(0.399)
		たわみ		(0.286)		(0.286)
		許容値	505	(51.5)	505	(51.5)
		設計比	0.03		0.09	
	最 大 発 熱 部	応力強さ	14.3	(1.45)	87.3	(8.90)
		運転中	7.4	(0.75)	79.3	(8.08)
		地震時	6.86	(0.699)	7.97	(0.812)
		加速度		(0.439)		(0.552)
		たわみ		(0.260)		(0.260)
		許容値	461	(47.1)	377	(38.5)
		設計比	0.04		0.24	
	最 高 温 度 部	応力強さ	14.1	(1.44)	110.7	(11.28)
		運転中	7.4	(0.75)	102.2	(10.42)
		地震時	6.69	(0.682)	8.41	(0.857)
		加速度		(0.439)		(0.616)
		たわみ		(0.243)		(0.241)
		許容値	393	(40.1)	276	(28.2)
		設計比	0.04		0.41	
上 部 端 栓 部	応力強さ	12.7	(1.29)	44.2	(4.50)	
	運転中	6.3	(0.64)	37.5	(3.82)	
	地震時	6.31	(0.643)	6.31	(0.643)	
	加速度		(0.399)		(0.437)	
	たわみ		(0.244)		(0.241)	
	許容値	398	(40.6)	280	(28.6)	
	設計比	0.04		0.16		

第 3.2 表 地震時の強度評価結果 (SUS316 相当ステンレス鋼) (2/2)

[単位 N/mm² (kgf/mm²)]

運転状態	評価位置	評価時期	使用初期		使用末期	
		応力分類	<PL+Pb>		<PL+Pb>	
運転時の異常な過渡変化時	下部端栓部	応力強さ	13.4	(1.36)	44.0	(4.48)
		運転中	6.6	(0.67)	37.2	(3.79)
		地震時	6.72	(0.685)	6.72	(0.685)
		加速度		(0.399)		(0.399)
		たわみ		(0.286)		(0.286)
		許容値	505	(51.5)	505	(51.5)
		設計比	0.03		0.09	
	最大発熱部	応力強さ	15.1	(1.53)	94.4	(9.63)
		運転中	8.2	(0.83)	86.4	(8.81)
		地震時	6.86	(0.699)	7.97	(0.812)
		加速度		(0.439)		(0.552)
		たわみ		(0.260)		(0.260)
		許容値	414	(42.3)	338	(34.5)
		設計比	0.04		0.28	
	最高温度部	応力強さ	14.9	(1.52)	120.1	(12.23)
		運転中	8.2	(0.83)	111.6	(11.37)
		地震時	6.69	(0.682)	8.41	(0.857)
		加速度		(0.439)		(0.616)
		たわみ		(0.243)		(0.241)
		許容値	301	(30.7)	211	(21.6)
		設計比	0.05		0.57	
	上部端栓部	応力強さ	13.0	(1.32)	47.3	(4.82)
		運転中	6.6	(0.67)	40.6	(4.14)
		地震時	6.31	(0.643)	6.65	(0.678)
加速度			(0.399)		(0.437)	
たわみ			(0.244)		(0.241)	
許容値		307	(31.4)	216	(22.1)	
設計比		0.05		0.22		

4. 地震時の強度評価のまとめ

燃料要素は、Ss 地震に対し、被覆管の健全性が確保される設計とする。ここでは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に被覆管の各部に生じる応力に、加速度に基づく応力及び外筒部のたわみに基づく応力を考慮しても設計比は 1 以下であり、被覆管の健全性が確保されることを確認した。なお、地震応答解析（炉心群振動解析）との整合から、鉛直方向地震力に対して燃料集合体が跳び上がらないことも確認した。

(参考) 実用炉設置許可基準規則第 4 条第 5 項)

(地震による損傷の防止)

第四条 (省略)

2 (省略)

3 (省略)

4 (省略)

5 炉心内の燃料被覆材は、基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

6 (省略)

7 (省略)

集合体各部の応力計算式

1. 集合体各部応力評価について

燃料集合体の機械設計において、被覆管の各部にかかる荷重に対する応力計算値は、ASME Sec. IIIの基準に準拠して設定した値を満たすように設計する。

集合体の各部応力評価については、「通常運転時」と「運転時の異常な過渡変化時」を対象に行う。集合体に発生する応力としては、第1表に示す応力を考慮し、その原因に応じて一次応力と二次応力に分類している。集合体の応力評価を行う部位については、「エントランスノズル部」、「エントランスノズルラップ管接合部」、「中間パッド部」、「ハンドリングヘッドラップ管接合部」、「上部パッド部」を対象に評価を行う。

第1表 応力要因

応力要因	応力分類
冷却材圧力	一次一般膜応力、一次曲げ応力
管壁温度差による熱応力	二次応力
軸方向温度差による熱応力	二次応力
湾曲拘束による応力	二次応力
湾曲拘束によるパッド部反力による応力	二次応力
接合部構造不連続による応力	一次膜応力、二次応力
接合部温度差による応力	二次応力
接合部スエリング差による応力	二次応力

2. 使用記号一覧表

炉心燃料集合体の応力評価式に用いる記号は次のとおり定義する。

記号	項目	単位
P_{mr}	半径方向一次一般膜応力	(kgf/mm ²)
$P_{m\theta}$	円周方向一次一般膜応力	(kgf/mm ²)
P_{mz}	軸方向一次一般膜応力	(kgf/mm ²)
$P_{L\theta}$	円周方向一次局部膜応力	(kgf/mm ²)
P_{Lz}	軸方向一次局部膜応力	(kgf/mm ²)
$P_{b\theta}$	円周方向一次曲げ応力	(kgf/mm ²)
P_{bz}	軸方向一次曲げ応力	(kgf/mm ²)
$Q_{in\theta}$	円周方向二次応力 (集合体内面)	(kgf/mm ²)
Q_{inz}	軸方向二次応力 (集合体内面)	(kgf/mm ²)
$Q_{out\theta}$	円周方向二次応力 (集合体外面)	(kgf/mm ²)
Q_{outz}	軸方向二次応力 (集合体外面)	(kgf/mm ²)
P	内外圧力差	(kgf/mm ²)
a_i	エントランスノズル内径	(mm)
a_o	エントランスノズル外径	(mm)
D_i	ラップ管内対辺間距離	(mm)
t	ラップ管肉厚	(mm)
E	ヤング率	(kgf/mm ²)
ν	ポアソン比	—

記号	項目	単位
α	熱膨張率	(1/°C)
ΔT	管壁温度差	(°C)
a	上部パッド部内半径	(mm)
Do	上部パッド部外対辺間距離	(mm)
A ₀	ラップ管外面辺長	(mm)
A ₁	ラップ管内面辺長	(mm)
Z	断面係数	(mm ³)
Fu	上部パッド部にかかる荷重	(kgf)
Fm	中間パッド部にかかる荷重	(kgf)
xi	集合体支持部から評価位置までの距離	(mm)
li	集合体支持部から荷重作用点までの距離	(mm)
Re	等価半径 (= $\sqrt{3} \cdot D_i / \pi$)	(mm)
ϕt	高速中性子照射量 [E > 0.1MeV]	(n/cm ²)
T ₁	温度	(°C)
$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_{AN}$	アニール材のスエリング率	(%)
$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_{1520CW}$	高Niオーステナイト系ステンレス鋼 (A) のスエリング率	(%)
$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_{SUS316CW}$	SUS316相当ステンレス鋼のスエリング率	(%)

3. 応力計算式

(i) 冷却材圧力による応力

炉心燃料集合体内外面の冷却材の圧力差により発生する応力は、以下の計算式で算出する。

① エントランスノズル部

$$P_{mr} = -P \quad (\text{内面}) \quad P_{mr} = 0.0 \quad (\text{外面})$$

$$P_{m\theta} = \frac{\sigma_{\theta_{\max}} + \sigma_{\theta_{\min}}}{2}$$

$$P_{mz} = 0.0$$

$$P_{b\theta} = \sigma_{\theta_{\max}} - P_{m\theta} \quad (\text{内面}) \quad P_{b\theta} = \sigma_{\theta_{\min}} - P_{m\theta} \quad (\text{外面})$$

$$P_{bz} = 0.0 \quad (\text{内面}) \quad P_{bz} = 0.0 \quad (\text{外面})$$

$$\sigma_{\theta_{\max}} = \frac{ao^2 + ai^2}{ao^2 - ai^2} \times P \quad (\text{内面})$$

$$\sigma_{\theta_{\min}} = \frac{2 \cdot P \cdot ai^2}{ao^2 - ai^2} \quad (\text{外面})$$

② 中間パッド部

$$P_{m\theta} = \frac{P \cdot Di}{2 \cdot t}$$

$$P_{mz} = 0.0$$

$$P_{b\theta} = \pm \frac{6 \cdot Mo}{t^2}$$

$$Mo = -\frac{P \cdot a^2}{4} \cdot \frac{(u - \tanh u)}{u^2 \cdot \tanh u}$$

$$u = \sqrt{\frac{s \cdot a^2}{4 \cdot D}}$$

$$s = \frac{P \cdot Di}{2}$$

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

$$a = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot Di$$

$$P_{bz} = 0.0$$

③ 上部パッド部

$$P_{m\theta} = P_{mz} = 0.0$$

$$P_{b\theta} = P_{bz} = 0.0$$

(ii) 管壁温度勾配による熱応力

ラップ管内外面の温度差により生じる熱膨張差が拘束されることにより発生する応力は、以下の計算式で算出する。

① ハンドリングヘッドーラップ管接合部、中間パッド部

$$Q_{in\theta} = \frac{-\alpha \cdot E \cdot \Delta T}{2(1-\nu)} \qquad Q_{out\theta} = \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta T}{2(1-\nu)}$$

$$Q_{inz} = Q_{in\theta} \qquad Q_{outz} = Q_{out\theta}$$

② 上部パッド部

$$Q_{in\theta} = 0.85 \cdot \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta T}{2(1-\nu) \log_e(b/a)} \cdot \left(1 - \frac{2b^2}{b^2 - a^2} \log_e(b/a)\right)$$

$$Q_{out\theta} = 0.85 \cdot \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta T}{2(1-\nu) \log_e(b/a)} \cdot \left(1 - \frac{2a^2}{b^2 - a^2} \log_e(b/a)\right)$$

$$b = D_o/\sqrt{3}$$

$$Q_{inz} = Q_{in\theta} \qquad Q_{outz} = Q_{out\theta}$$

(iii) 軸方向温度勾配による熱応力

炉心燃料集合体の軸方向温度勾配は小さく、応力は発生しない。

① 中間パッド部

$$Q_{in\theta} = Q_{out\theta} = 0.0 \qquad Q_{inz} = Q_{outz} = 0.0$$

② 上部パッド部

$$Q_{in\theta} = Q_{out\theta} = 0.0 \qquad Q_{inz} = Q_{outz} = 0.0$$

(iv) 湾曲拘束による応力

炉心燃料集合体の径方向温度分布・照射量の不均一に起因する湾曲により発生する応力は、以下の計算式で算出する。

$$Q_{in\theta} = v \cdot Q_{inz} \quad Q_{out\theta} = v \cdot Q_{outz}$$

$$Q_{inz} = \pm \frac{M}{Z} \quad Q_{outz} = Q_{inz}$$

① ハンドリングヘッドラップ管接合部

$$Z = \frac{5\sqrt{3}}{16} \cdot \frac{A_0^4 - A_1^4}{A_0}$$

$$M = Fu(l_2 - x_3)$$

② 中間パッド部

$$Z = \frac{5\sqrt{3}}{16} \cdot \frac{A_0^4 - A_1^4}{A_0}$$

$$M = Fu(l_2 - l_1)$$

③ エントランスノズルラップ管接合部

$$Z = \frac{5\sqrt{3}}{16} \cdot \frac{A_0^4 - A_1^4}{A_0}$$

$$M = Fu(l_2 - x_1) + Fm(l_1 - x_1)$$

④ エントランスノズル部

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{a_0^4 - a_1^4}{a_0}$$

$$M = Fu \cdot l_2 + Fm \cdot l_1$$

(v) 湾曲拘束によるパッド部反力による応力

① 上部パッド部、中間パッド部

別途、構造解析コードで得られた評価結果を使用する。

(vi) 接合部構造不連続による応力

エントランスノズル及びハンドリングヘッドとラップ管の取付部位において、冷却材の内外圧力差により発生する応力は、以下の計算式で算出する。

$$P_{L\theta} = 0.0$$

$$P_{Lz} = 0.0$$

$$Q_{in\theta} = v \cdot Q_{inz} + 0.55 \cdot \frac{P \cdot Re}{t}$$

$$Q_{out\theta} = -v \cdot Q_{inz} + 0.55 \cdot \frac{P \cdot Re}{t}$$

$$Q_{inz} = 2 \cdot \frac{3 \cdot Di}{\pi \cdot t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - v^2}} \cdot P \qquad Q_{outz} = -Q_{inz}$$

(vii) 接合部温度差による応力

ハンドリングヘッドとラップ管の取付部位における温度差に起因して生じる熱膨張の差が拘束されることにより発生する応力は、以下の計算式で算出する。

$$Q_{in\theta} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T - v \sqrt{\frac{3}{1 - v^2}} E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$Q_{out\theta} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T + v \sqrt{\frac{3}{1 - v^2}} E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$Q_{inz} = -\sqrt{\frac{3}{1 - v^2}} E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$Q_{outz} = -Q_{inz}$$

(viii) 接合部スエリング差による応力

エントランスノズル及びハンドリングヘッドとラッパ管の取付部位において、材料の違いによるスエリング歪の差が拘束されることにより発生する応力は、以下の計算式により算出する。

$$Q_{inZ} = E \cdot \sigma \sqrt{\frac{3}{1 - \nu^2}}$$

$$Q_{outZ} = -Q_{inZ}$$

$$Q_{in\theta} = \nu \cdot Q_{inZ} - E \cdot \sigma$$

$$Q_{out\theta} = \nu \cdot Q_{outZ} - E \cdot \sigma$$

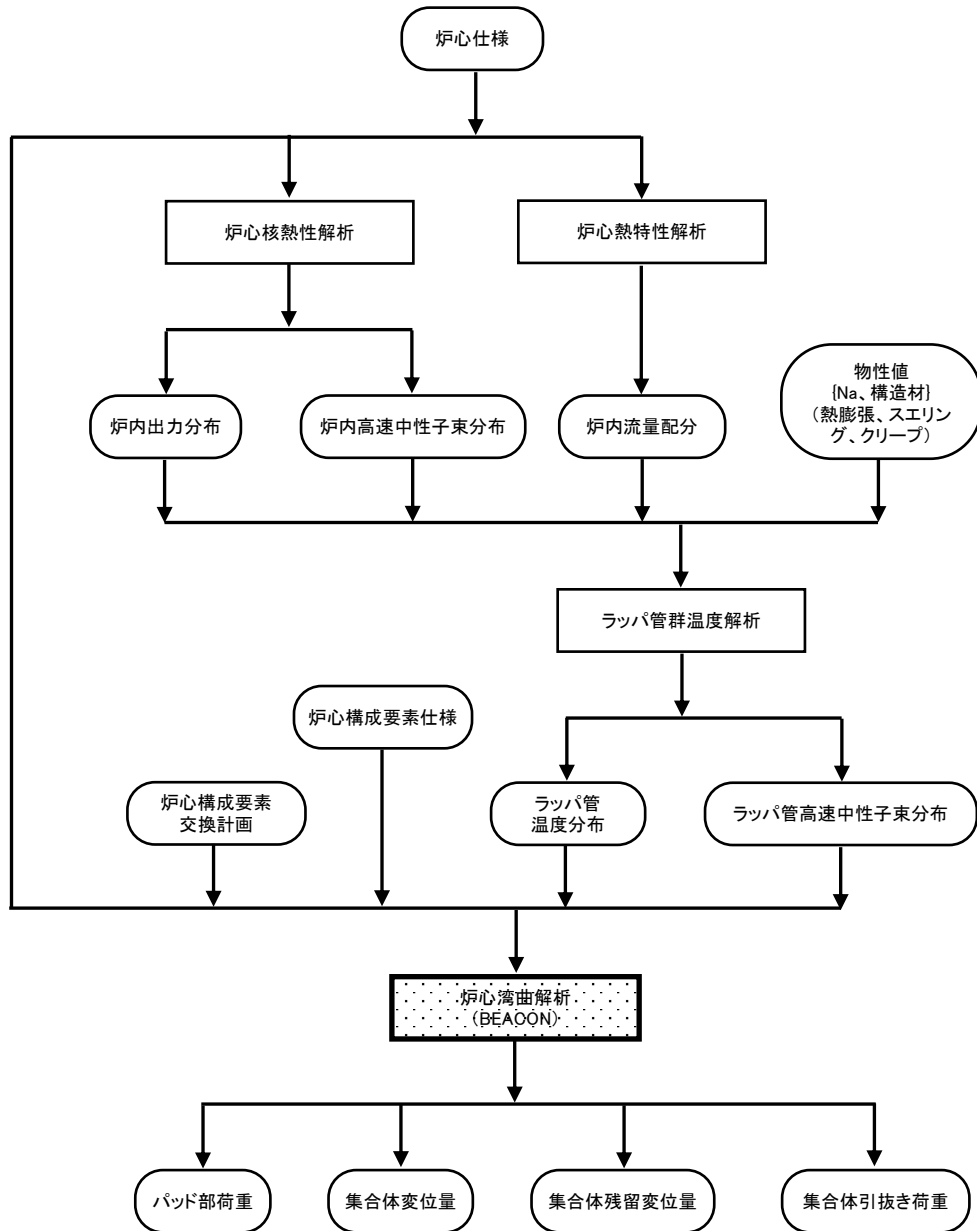
$$\sigma = \left\{ \left(\frac{\Delta r}{r} \right)_{1520CW, SUS316CW} - \left(\frac{\Delta r}{r} \right)_{AN} \right\} \times 10^{-2}$$

湾曲拘束による応力について

1. 炉心湾曲計算の概要

高速炉炉心では、径方向温度分布・照射量の不均一に起因して炉心構成要素の湾曲が生じる。炉心温度分布・中性子束分布及び炉心湾曲計算の流れを第 1.1 図に示す。

炉心湾曲解析コード“BEACON”では、計算されたラップ管の温度分布及び中性子束分布等を入力とし、真直ビームモデルにより、ラップ管面に垂直な 3 方向について熱膨張、スエリング、クリープによる変位を計算し、これをベクトル合成することにより、各集合体の原子炉運転中の変位量、原子炉停止中の残留変位、接触荷重等を計算する。



第 1.1 図 炉心湾曲の計算フロー

2. 炉心湾曲計算

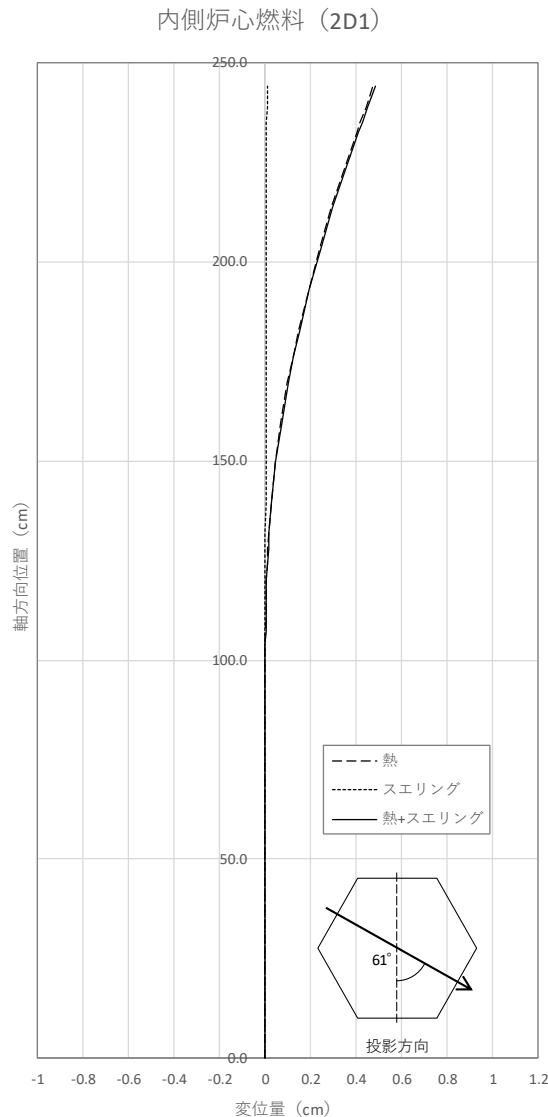
2.1 解析コード

BEACON は、原子炉の起動から停止に至るまでの炉心変形現象を 3 次元的に解析し、各炉心構成要素の 3 次元湾曲形状及び炉心構成要素に作用する荷重と応力を原子炉運転中の各時点毎に計算するコードである^[1]。解析炉心形状として全炉心モデル及び回転対象炉心モデルに加え、単体モデルや単列群モデルの解析も可能である。

2.2 全炉心解析（熱及びスエリングによる湾曲変形）

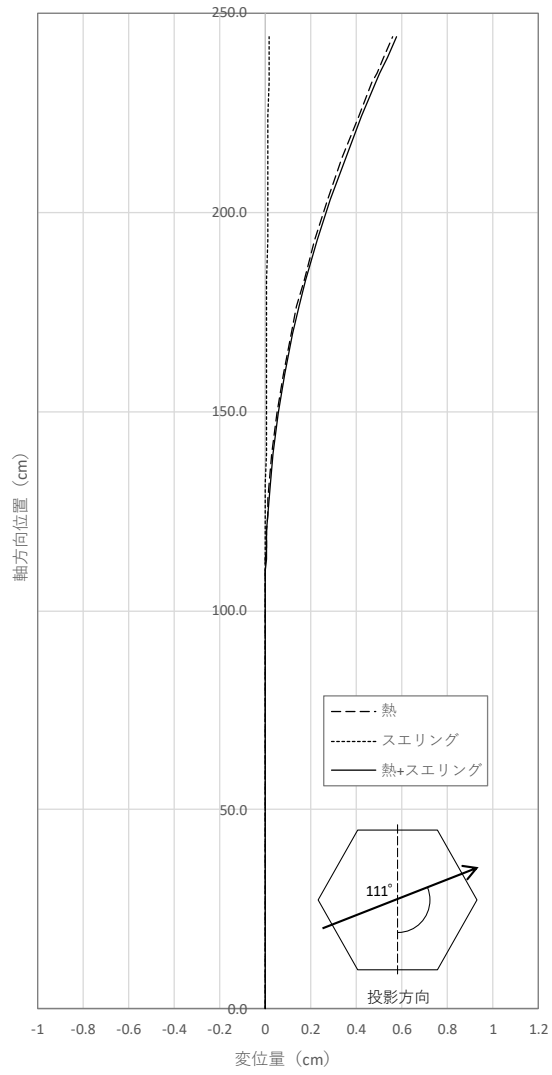
MK-III 炉心条件での全炉心解析について。炉心燃料集合体の熱及びスエリングによる湾曲変位について、内側炉心燃料集合体と外側炉心燃料集合体それぞれについて第 2.1 図及び第 2.2 図に示す。

内側も外側も制御棒と隣接する集合体において、燃料に接するラップ管面と制御棒に接するラップ管面の温度差が大きいため、熱による湾曲が顕著になっている。また、内側、外側ともスエリングによる湾曲は小さなものとなっている。



第 2.1 図 内側炉心燃料集合体の炉心湾曲

外側炉心燃料 (5C3)



第 2.2 図 外側炉心燃料集合体の炉心湾曲

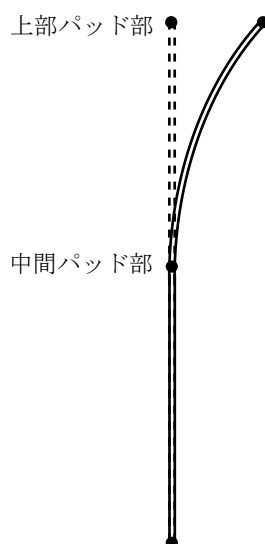
2.3 集合体単体解析

2.3.1 計算方法

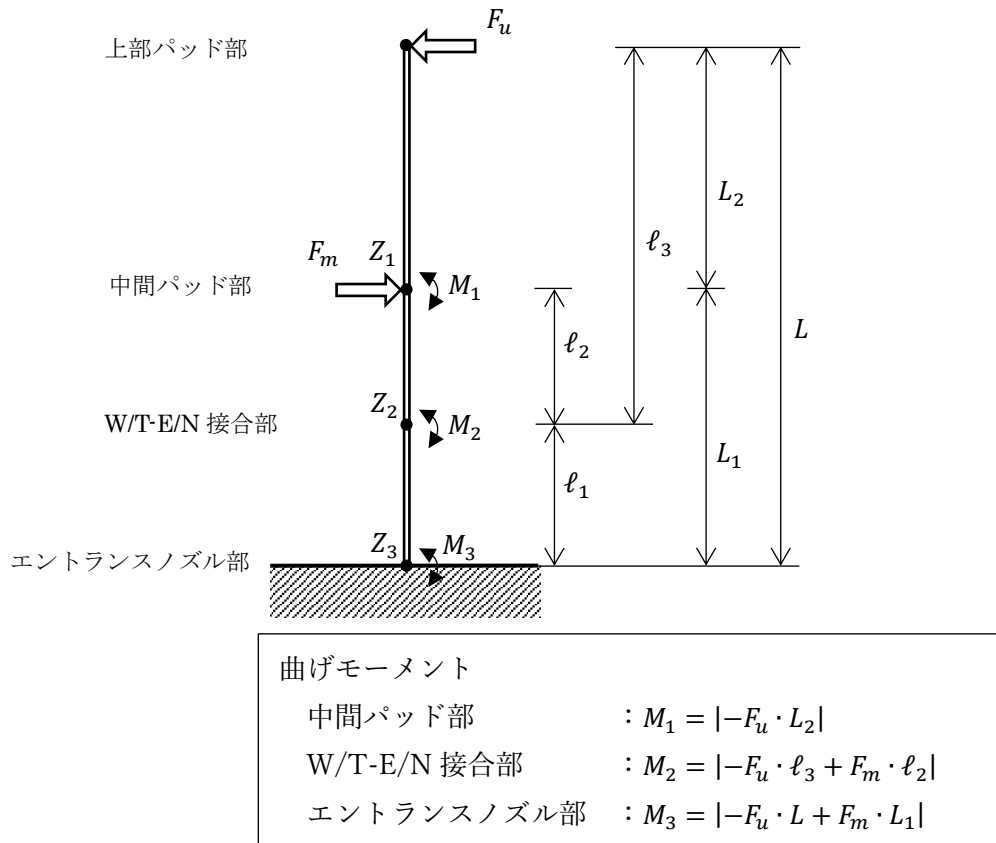
炉心湾曲解析コード“BEACON”を用いた複数の集合体解析により、真直矯正するときに発生する曲げ荷重を計算する。

第2.1図及び第2.2図に示すように炉心構成要素の軸方向曲がりモードは、第2.3図のように表される。この曲がりモードにおいて、上部パッド部及び中間パッド部の湾曲変位を強制的に0とするため、上部パッド部及び中間パッド部に F_u , F_m を同時に作用させる（第2.4図）。発生するパッド部荷重からパッド部荷重から曲げモーメントを計算する。

発生する曲げ荷重は、上部及び中間パッド部で、作用させた荷重 F_u , F_m 、また、発生する曲げモーメントは、 M_1 , M_2 , M_3 である。



第2.3図 炉心構成要素軸方向曲がりモード



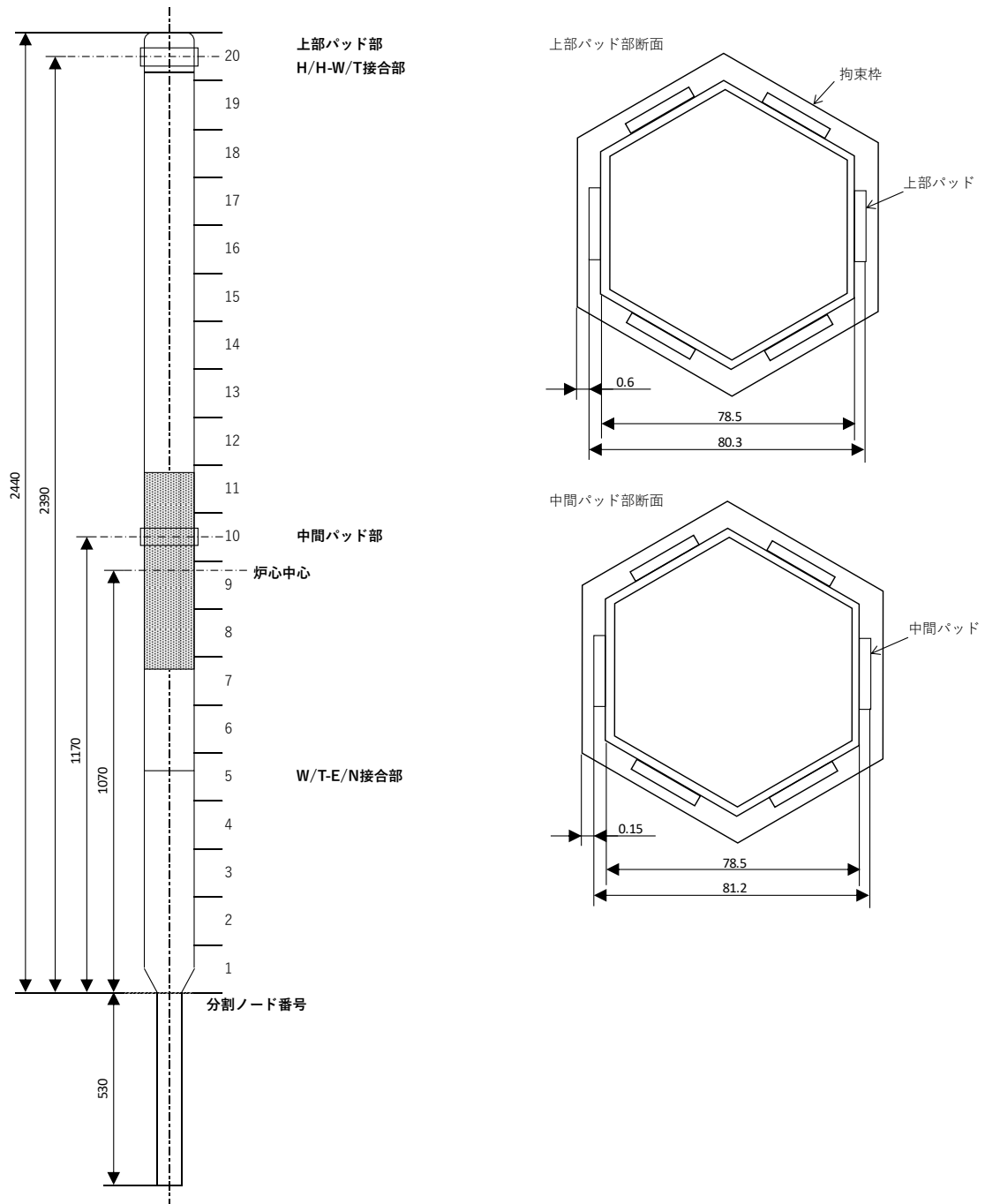
第 2.4 図 曲げモーメント算出方法

2.3.2 解析条件

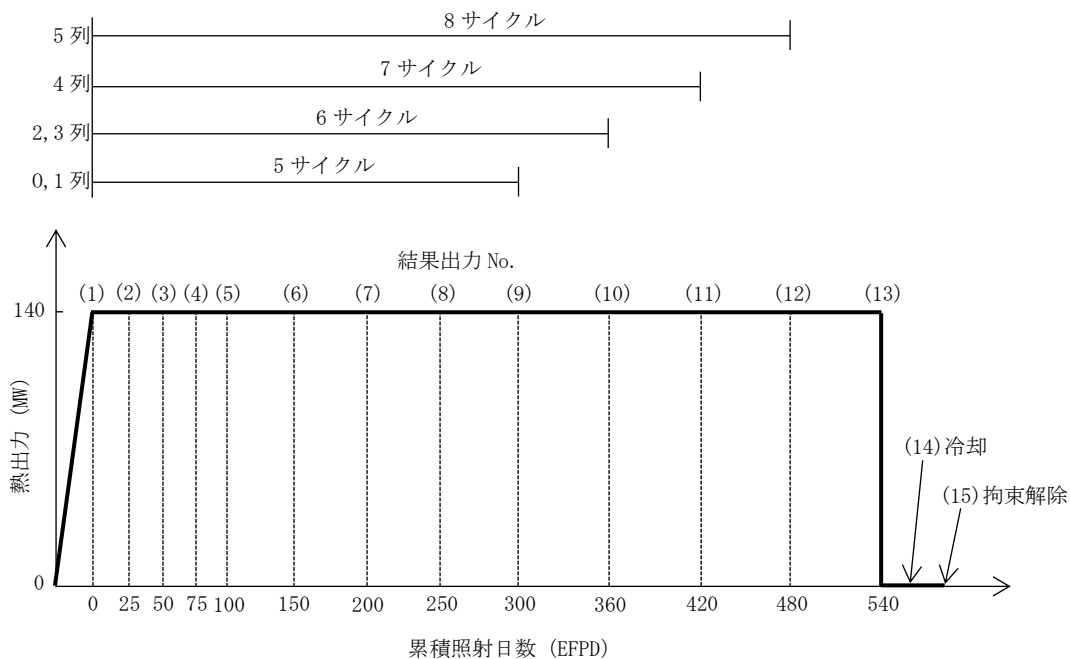
MK-IV炉心で使用する燃料集合体はMK-III炉心で使用していた炉心燃料集合体と同じであり、仕様を変更しない。MK-III炉心で使用していた炉心燃料集合体を継続使用する。炉心燃料集合体においては、湾曲は主に熱湾曲であり、熱湾曲条件はMK-III炉心条件の方が厳しいため、MK-III炉心での条件をもとに設定する。

解析モデルを第 2.5 図に示す。解析は、炉心支持板（球面座）より上の集合体領域 2440mm を軸方向に均等に 20 分割し、周囲に拘束枠を設定した単体解析モデルで行う。上部及び中間パッド部の拘束枠とのギャップは、実際に炉内に装荷される時の隣接集合体とのギャップの 1/2 としている。

解析日数は第 2.6 図に示す分割で行った。ただし、燃料装荷位置によって照射期間が異なるため、得られた値は各位置（各列）で定められている照射期間までの値を使用する。



第 2.5 図 集合体モデル



第 2.6 図 解析日数

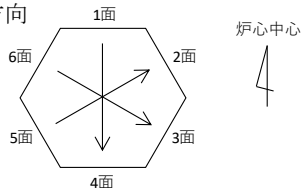
2.3.3 解析結果

照射開始時の熱湾曲に起因する応力が最も大きく、最大応力の発生する集合体についての結果を第 2.1 表に示す。

第 2.1 表 BEACON 単体解析結果 (最大)

ラッパ管解析面*1	パッド部荷重		備考
	上部パッド部	中間パッド部	
1 面			<ul style="list-style-type: none"> 照射期間(1) 照射日数 0 EFPD*2 照射量 0 n/cm² 装荷位置 2D1
4 面			
6 面		41.29 kgf	
3 面	-17.23 kgf		
5 面		9.14 kgf	
2 面	-3.90 kgf		

*1 ラッパ管解析面定義と荷重方向



*2 Effective Full Power Day (定格出力運転日数)

3. 応力評価のための湾曲拘束条件

第 3.1 表及び第 3.2 表に応力評価に用いる湾曲拘束条件一覧を示す。

第 3.1 表 湾曲拘束条件 (通常運転時)

部位	最大曲げ荷重	最大曲げモーメント
エントランスノズル部	—	0.7130×10^4 kgf/mm
W/T-E/N 接合部	—	0.7066×10^4 kgf/mm
中間パッド部	41.29 kgf	2.102×10^4 kgf/mm
H/H-W/T 接合部	—	0.1103×10^4 kgf/mm
上部パッド部	-17.23 kgf	—

第 3.2 表 湾曲拘束条件 (運転時の異常な過渡変化時)

部位	最大曲げ荷重	最大曲げモーメント
エントランスノズル部	—	1.051×10^4 kgf/mm
W/T-E/N 接合部	—	0.9618×10^4 kgf/mm
中間パッド部	58.21 kgf	2.940×10^4 kgf/mm
H/H-W/T 接合部	—	0.1543×10^4 kgf/mm
上部パッド部	-24.10 kgf	—

参考文献

- [1] 株式会社日立製作所, 「炉心湾曲解析コードの改良 (平成 2 年度作業)」, PNC-TJ9124 91-002, 1991 年 3 月.