JNC TJ8410 2002-001

# 振動充填燃料設計用機械特性 モデルの検討(2)

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

## 2002年2月

# 株式会社 日立製作所

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

2002年2月

### 振動充填燃料設計用機械特性モデルの検討(2)

#### (核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

高橋 正典\*1、小貫 徳彦\*1

浅野 林一\*2、沼田 政宣\*2

#### 要 旨

本研究は、燃料粒子を直接に燃料被覆管へ充填する FBR 振動充填燃料の研究・開発の一環として実施しており、振動充填燃料ピンの熱的・機械的挙動を適切に評価する 燃料設計コードの開発を行っている。

昨年度は離散要素解析(PFC計算コード)を用いて基本的な実効弾性率の計算モデ ルを作成した。今年度は、実機の振動充填燃料ピンは粒子充填仕様がばらつくことを 考慮し、燃料ピンへの燃料粒子の充填率及び燃料粒子の粒径分布をパラメータとした 解析や、荷重サイクル模擬したケース及び燃料ピン充填状態を模擬したケースの機械 特性解析を実施した。

粒子充填率パラメータ解析では粒子充填率が約50%~約70%の範囲を設定し、粒径 分布パラメータ解析では粒子粒径の標準偏差を0µm~200µmの範囲を設定し機械特 性解析を実施した。荷重サイクル付加時の機械特性挙動を解析では、応力-歪のヒス テリシスループを評価し、燃料ピン充填状態を模擬した機械特性解析では中心空孔も 考慮した。

以上の解析結果を基に FCMI 評価用の物性式(実効ヤング率、実効ポアソン比)を提 案した。

本報告書は、株式会社日立製作所が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当部課:東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 プルトニウム燃料開発グループ

\*1 株式会社日立製作所

\*2 日立エンジニアリング株式会社

#### JNC TJ8410 2002-001

February, 2002

Evaluation of Mechanical Characteristic Design Models for Vibro-packed Fuel (2) (Document Prepared by Other Institute, Based on the Contract) Masanori Takahashi<sup>\*1</sup>, Norihiko Onuki<sup>\*1</sup> Rinichi Asano<sup>\*2</sup>, Masanobu Numata<sup>\*2</sup>

#### Abstract

This study has been carried out as a link in the research and development of FBR vibro-packed fuel that fuel particles are compacted directly in the fuel cladding. The calculation program code for vibro-packed fuel design has been developed to analyze of the fuel thermal/mechanical performances.

In last year, we investigated material design property equations for vibro-packed fuel by the distinct element method (PFC program code). In this year, considering the vibro-packed fuel pin has variable fuel particle packing conditions, we researched fuel mechanical properties using variable particle packing density and particle size distributions. Mechanical property analyses were carried out at the condition of load cycle and simulated fuel pin conditions, too.

In the analysis, the particle packing density was set up approximately  $50\% \sim$  70%, and particle size distribution was set up  $0 \mu m \sim 200 \mu m$ . The hysteresis loop of stress - strain was investigated in the analysis of load cycle, and simulated fuel pin with center hole was investigated, too.

Vibro-packed fuel's material design property equations (Effect Young's modulus, Effect Poisson's ratio) were proposed based on the above mentioned analysis results.

- JNC Liaison : Plutonium Fuel Technology Group, Advanced Fuel Recycle Technology Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works
- \*1: Hitachi, Ltd.
- \*2: Hitachi Engineering Co.,Ltd.

This work performed by Hitachi Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

	目次	
1	.はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
2	. 研究範囲   • • • • • • • • • • • • • • • • • •	2
3	<ul> <li>. 粒子充填体のモデル化</li> <li>3.1 モデルの作成方法</li> <li>3.2 充填率の評価方法</li> <li>3.3 モデル作成の結果</li> </ul>	4
4	. 粒子充填率をパラメータとした機械特性解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
5	. 粒径分布依存性をパラメータとした機械特性解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5.1 評価方法 5.2 解析条件 5.3 解析結果	41
6	. 荷重サイクルパターンをパラメータとした機械特性解析・・・・・ 6.1 評価方法 6.2 解析条件 6.3 解析結果	54
7	. 燃料ピンへの充填状態を模擬した機械特性解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	66
8	. 燃料設計コード用物性式の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	83
9	.おわりに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	105
1	0.今後の課題 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	108
1	1.参考文献 ······	109

1.はじめに

振動充填燃料における燃料と被覆管の間の機械的な相互作用(FCMI)はペレット燃料に比べ緩やかであることが,経験的に知られている。寿命初期から燃料と被覆管とが接触しているという不利な点があるにもかかわらず,振動充填燃料がFCMI挙動上優れる理由としては,粒子間焼結の進行による燃料の収縮や振動充填燃料では一般にスミア密度が低いこと等もあるが,燃料外周部に存在する未焼結・微焼結粒子充填領域の緩衝効果を無視することはできない。振動充填燃料のFCMI特性を正しく評価するうえでこの効果を適切に取り扱う物性式を作成することが必要であるため,平成12年度には離散要素法を用いた解析を行い,実効弾性率の計算モデルを作成した。今回は平成12年度の結果をベースに,より広い範囲での妥当性を検討し,計算モデルの信頼性を高めることを目的とする。

2.研究範囲

核燃料サイクル開発機構(以下「サイクル機構」という)は,振動充填燃料の熱・機械的 挙動を適切に評価しうる解析手法(燃料設計コード)の開発を行っている。本件はFCMI 挙動に関連するものであり,燃料外周部に存在する未焼結粒子充填領域の緩衝効果を適切に 表現すべく,平成12年度には離散要素解析を適用して燃料の実効的なヤング率及びポアソ ン比の計算モデルを作成した。

今年度は,前節で述べたことを目的とし,粒子充填率・粒径分布・荷重サイクルをパラメ ータとした離散要素解析及び燃料ピン充填状態を模擬した離散要素解析を行い,モデルの信 頼性を検討する。

(1) 粒子充填体のモデル化(離散要素解析用3次元粒子充填体モデルの作成)

高速炉用振動充填燃料を想定した3次元粒子充填挙動解析を行う。解析体系は,粒子数を1000個以上とし,基礎物性については可能な限り公知の値を,また寸法及び充填条件等については(2)~(5)で行う機械特性に関するパラメータ解析を行うために 適切な値を設定するものとする。

解析の対象は球状の単一径粒子(球状1粒子)とするが,必要に応じて球状で2種類の径の粒子(球状2粒子)を対象とした解析を行う。

解析結果に基づき,燃料ピン内における現実的な粒子配置を適切に表現した粒子充填 ベッドの3次元モデル化を行う。

(2)粒子充填率をパラメータとした機械特性解析

(1)で作成した3次元モデルを基に,離散要素法コードを用いて機械特性解析を行う。解析条件は,平成12年度の解析ケースの中から代表的なものを選定し,これに準じるものとする。

解析にあたっては,以下のパラメータの影響について検討する。

・粒子充填率:3水準(50~70%程度の範囲で,最大と最小との間には 10%以上の
 差があること)

(3)粒径分布依存性をパラメータとした機械特性解析

(1)で作成した3次元モデルを基に,離散要素法コードを用いて機械特性解析を行う。解析条件は,平成12年度の解析ケースの中から代表的なものを選定し,これに準じるものとする。

解析にあたっては,以下のパラメータの影響について検討する。

・粒径分布の形:3水準程度解析にあたっては、以下のパラメータの影響について検 討する。 (4)荷重サイクルパターンをパラメータとした機械特性解析

(1)で作成した3次元モデルを基に,離散要素法コードを用いて機械特性解析を 行う。解析条件は,平成12年度の解析ケースの中から代表的なものを選定し,これ に準じるものとする。

解析にあたっては、以下のパラメータの影響について検討する。

・負荷過程中の除荷の回数: 負荷 0% ~ 100%の間に除荷を行うこととし,除荷の回数を4水準程度 ・荷重サイクル数:

負荷が0%~100%~0%の負荷/除荷の繰り返し回数を3水準程度

(5)燃料ピンへの充填状態を模擬した機械特性解析

(1)で作成した3次元モデルを基に,離散要素法コードを用いて機械特性解析を 行う。解析条件は,容器形状については燃料被覆管を模擬した円筒形とし,その他の 条件については受注者とサイクル機構担当者との協議により設定するものとする。 解析にあたっては,以下のパラメータの影響について検討する。

- ·粒子間摩擦係数:5水準程度
- ・中心管(中子)の有無:有り,無しの2水準
- (6)燃料設計コード用物性式の検討

(振動充填燃料設計コード用実効ヤング率及び実効ポアソン比物性式の作成) 以上の解析より得られた結果に基づき,平成12年度に作成した振動充填燃料体系 に適用する実効的なヤング率及び実効的なポアソン比について,その妥当性を検討す る。また新規の変数の導入等,モデルの信頼性を向上するために必要な方策の検討を 行う。

- 3. 粒子充填体のモデル化
- 3.1モデルの作成方法

粒子充填体のモデルは、平成12年度と同様に球状粒子の集合体を扱うことができる 離散要素解析コード"PFC(version1.2)"を用いて作成した。

図 3-1 にモデル作成のフローを示す。充填空間内でランダムな位置に粒子を生成し、 充填率は粒を目標粒径まで膨らませる過程で生じる粒の再配列により調整した。

粒径分布を持った粒子充填体では、個々の粒子径を正規乱数によりランダムに指定し、 ± 2 を粒子径の上・下限とした。

燃料ピンへの充填状態を模擬した粒子充填体では、燃料被覆管内面を32面体の柱面 で近似した。燃料中心部の焼結領域を考慮するものについては、さらに中央部に32面 体の柱面を設けて模擬した。

3.2充填率の評価方法

平成12年度における充填率の評価は、(粒子体積の合計)/(粒子充填空間体積)の計 算によった。この評価方法では壁面近傍の租空間を粒子充填空間体積の中に含むため、 充填率を低く評価することになる。これを改善するために、今回の充填率評価ではPF Cコードの Measurement Sphere 機能を用い壁近傍を含まない球状の領域内で充填率を 評価した。評価領域は充填空間の長手方向(Z軸方向)に上部、中央部及び下部の3個所 とした。燃料ピン形状への粒子充填体で燃料中心部の焼結領域を模擬したものについて は、上・中・下の各々で外壁面と内壁面の間に4個所の評価領域を設け、上・中・下毎 に4個所の平均値を算出した。

3.3モデル作成の結果

作成した粒子充填ベッドモデルの一覧を、表 3-1 に示す。粒子充填空間形状は、燃料 ピンへの充填状態を模擬した粒子充填体以外は機械的特性を調べる上で単純な形状と する必要があるため直方体とした。

(1)粒子充填率をパラメータとした粒子充填体

機械的特性に与える充填率の効果を調べる目的で、充填率の範囲 50~70%で、5 種類の粒子充填体モデルを作成した。粒径は 800µm、粒子数は 1000 である。粒子 充填空間は、ランダムな配置で目標の充填率を安定して達成できる条件を検討した 結果から、高さ/底辺比=約2の形状を選定した。

(2)粒径分布をパラメータとした粒子充填体

機械的特性に与える粒径分布の効果を調べる目的で、粒径の標準偏差 0~200µm 範囲で、5種類の粒子充填体モデルを作成した。平均粒径は800µm、粒子数は1000 である。粒子充填空間は、(1)と同様に高さ/底辺比=約2の形状を選定した。

(3) 燃料ピンへの充填状態を模擬した粒子充填体

燃料ピンへの充填状態を模擬した粒子充填体では、燃料被覆管内面を32面体の 柱面で近似し、粒径800µmの粒子を1500球充填したものと、燃料中心部の焼結領 域を考慮するためにさらに中央部に32面体の柱面を設けて、その間に粒径800µm の粒子を1350球充填したものの二つを作成した。 表3-1 粒子充填ベッドモデルの纏め

モデル外観等		<b>図</b> 3-2			<u> </u>			<b>図</b> 3-4			<b>図-5</b>			図-6			図-7			<b>図3-8、図3-9</b>			<b>図3-10、図3-11</b>			<b>図3-12、図3-13</b>			<b>図3-14、図3-15</b>			図3-16			<u>                                      </u>	
(mm)	ID	Ι			I			I			Ι						I			Ι			Ι			I						I			2.5	
	(IO	I			I			I			1			I			I			I			Ι			I			I			7.5			7.5	
空間寸法	Ζ	13.60			13.10			12.50			11.86			11.75			12.50			12.50			12.80			13.30			14.30			15.24			16.35	
充填	Y	6.65			6.45			6.25			6.13			6.00			6.25			6.25			6.25			6.25			6.25			I			I	
	Х	6.65			6.45			6.25			6.13			6, 00			6.25			6.25			6.25			6.25			6.25			I				
		平均	50.1		平均	53.6		平均	60.1		平均	65.1		体本	70.9		体本	60.1		餘本	59.9		平均	59.5		平均	60.1		体本	59.9		平均	63.4		平均	60.0
率 (%)	評価領域	49.7	50.6	50.0	54.2	53.5	53.1	59.3	60.8	60.3	63.6	67.2	64.6	68.5	72.4	71.7	59.3	60.8	60.3	60.0	60.2	59.4	59.2	60.1	59.1	58.9	60.7	60.8	60.2	60.5	58.9	63.1	63.3	63.8	58.8	62. 0 59. 3
充填		늬	₽	۲	늬	₽	۲	Ч	₽	۲	늬	₽	۲	귀	₽	۲	Ч	₽	۲	늬	₽	۲	긕	₽	۲	끡	₽	۲	귀	₽	۲	긕	₽	۲	비	⊕⊬
	全体	44.6			49.2			54.9			60.2			63.4			54.9			55.2			55.1			54.7			54.7			60.0			56.7	
粒子数		1000			1000			1000			1000			1000			1000			1000			1000			1000			1000			1500			1350	
(m m)	標準偏差	0			0			0			0			0			0			50			100			150			200			0			0	
粒径 (	平均	800			800			800			800			800			800			800			800			800			800			800			800	
分類		充填率の	影響評価														粒径分布の	影響評価														燃料ビン形状	くの充填			
₹7`N	No.	P-1			P-2			P-3			P-4			P-5			Q-1			Q-2			Q-3			Q-4			Q-5			R-1			R-2	



## 図3-1 粒子充填体のモデル作成フロー



. 1%) 0 8 0 0 μm,充填率; 5 粒径均一の 粒子充填ベッド(粒子数;1000,粒径; 図 3-2





800 h m , 充填率; 60 . 1 ) 粒径均一の 粒子充填ベッド(粒子数;1000,粒径; 図 3-4



















5%) • σ ഹ 6 0 0 h m,充填率; ł 0 100 粒径分布のある 粒子充填ベッド(粒子数:1000, 粒径; 図 3-10









0 % 6 • ი 4 0 0 μm,充填率; 5 ł 0 0 1 2 粒径分布のある 粒子充填ベッド(粒子数;1000,粒径;

図 3-14



### JNC TJ8410 2002-001



図3-16 燃料ピン模擬粒子充填ベッド(ピン内径 7.5mm、粒子数;1500,粒径;800µm,充填率; 63.4%)

### JNC TJ8410 2002-001



図3-17 燃料ピン模擬粒子充填ベッド(ピン内径 7.5mm、中心孔2.5mm、粒子数;1350,粒径;800µm,充填率;60.0%)

- 4. 粒子充填率をパラメータとした機械特性解析
  - 4.1 評価方法

粒子充填体の機械的特性は、2方向の変位を拘束した単軸圧縮により評価した。解析 には、コード"PFC(version1.2)"を使用した。

Z軸方向(3項に示すモデルの長手方向に対応)の圧縮条件では、応力・歪みの関係が 次の式で表される。

$$e_{x} = \frac{1}{E} \{ s_{x} - u(s_{y} + s_{z}) \} = 0$$

$$e_{y} = \frac{1}{E} \{ s_{y} - u(s_{z} + s_{x}) \} = 0$$

$$e_{z} = \frac{1}{E} \{ s_{z} - u(s_{x} + s_{y}) \}$$

$$(1 \ \vec{x} \ )$$

ここで、 (歪み), (応力), E(縦弾性係数), (ポアソン比)は粒子充填ベッドのマク ロな値であり、粒子の配列がランダムと考えられることから等方性の材料とみなした。

以上から、 xy= x= yと置き換えて次式が得られる。

実際の解析では、粒子充填ベッドモデルの×方向及びy方向ベクトルに垂直な境界面 位置を固定し、z方向ベクトルに垂直な境界面位置のみを一定速度で圧縮側に移動させ、 その時の壁面の移動量と各面に作用する抗力の関係を求めた。概要を図 4-1 に示す。解 析結果から得られる応力,歪みは、真応力(変形に伴う面積の変化を補正)、真歪み(即ち、 対数歪み)を用い次式によった。歪みは圧縮側であり本来負の値となるが、便宜上(-)を 乗じて正の値として扱うことにした。

$$e_{Z} = -\ln\left(1 - \frac{\Delta Z}{Z}\right)$$

$$s_{XY} = \frac{1}{2}(s_{X} + s_{Y})$$

$$s_{X} = \left(\frac{F_{X}}{Y(Z - \Delta Z)}\right) \quad s_{Y} = \left(\frac{F_{Y}}{X(Z - \Delta Z)}\right) \quad s_{Z} = \left(\frac{F_{Z}}{XY}\right)$$
(3  $\exists$   $\exists$  )

ここで、

X,Y
 ; × 及び y 方向対向面間距離
 Z, Z
 ; z 方向対向面間距離の初期値及び変位
 Fx, Fy, Fz; 対向面の平均抗力(x, y 及び z 方向)

4.2 解析条件

粒子充填体の機械的特性に関する解析条件を以下に示す。

(1)温度条件

燃料部内部(燃料の焼結速度が比較的遅い範囲)の代表温度として 1000 を選定した。

(2) 歪み負荷範囲

解析コード"PFC"では、平成12年度の報告に示すように荷重作用時の球変形(真 球からのゆがみ)を考慮していない。このため、機械的特性評価は応力が立ち始めた所 を始点とし歪み5%以下の領域を対象とする。ただし、低充填率の場合は、初期の間 隙が埋まり応力が立ち始めるまでに、見かけ上大きな歪みを必要とするので、歪み負 荷範囲は最大約40%までとした。

(3)摩擦係数

平成12年度の評価との整合性を考慮し、摩擦係数は前回評価時の代表値と同じ値の0.5とした。

(4)粒子の弾性応答モデル

平成12年度の評価と同様に、Hertz-Mindlin Contact Mode<sup>1),2),3)</sup>(以下HMモデルと略記する。)を用いた。

4.3 解析結果

ケース No. P-1 から P-5 までの 5 ケースの解析を行った。解析結果を図 4-2 から 図 4-6 に示す。図に示すポアソン比とヤング率は、応力(x, y, z)を用い(2 式) によって算出したものである。

以上の解析結果に対し機械特性を歪み依存の函数で表すために、以下に示す平成1 2年度と同様のフィッティング式を用いた評価をおこなった。

<応力 zのフィッティング式>  

$$\mathbf{s}_{z} = MAX \begin{cases} A1 \times [1 - \exp(B1 \times \mathbf{e}_{z})] \\ A2 \times (\mathbf{e}_{z} - \mathbf{e}_{1})^{n} \end{cases}$$
(4 式)

A1,B1,A2, 1,n はフィッティング係数

z; 粒子充填ベッドのマクロな歪み

<応力比 xy / zのフィッティング式>  

$$\frac{Sxy}{Sz} = MIN \begin{cases} MAX[0, P1 \times (e_z - e_z)] \\ P2 \times e_z^{Q} \end{cases}$$
(5 式)

この時、粒子充填ベッドのマクロなヤング率とポアソン比は次の式で表される。

$$\boldsymbol{u} = \frac{\boldsymbol{s} x y / \boldsymbol{s} z}{1 + \boldsymbol{s} x y / \boldsymbol{s} z} \tag{6 t}$$

$$E = \frac{\mathbf{s}z}{\mathbf{e}z} \left( 1 - 2\mathbf{u} \frac{\mathbf{s}xy}{\mathbf{s}z} \right) \tag{7 ft}$$

個々のケースのフィッティング結果を図 4-7 から図 4-10 に示す。また得られたフィ ッティング係数の一覧を表 4-1 に示す。表 4-1 には比較のために、H12 年度に実施し た結果の一部を合わせて示した。H12 年度分の充填率は、図 4-12 に示す従来の評価方 法と今回採用した評価領域での評価方法の相関関係を用いて、今回の評価方法での値 に換算したものである。

フィッティングは、応力が立ち上がり始めてから約5%の歪みの領域に着目して行った。歪み切片 B1 に着目すると表4-1に示す様に、初期充填率50%では歪み約17% であったものが初期充填率55%では歪み約8%に減少し、初期充填率60%以上では歪み 0.3%程度となる。ヤング率については図4-9に示す様に、初期充填率の増加に伴いヤング率も増加している。

圧縮歪みに伴う粒子充填率の変化に着目し、荷重負荷時の充填率に対する荷重方向

応力の関系を調べた。結果を図 4-11 に示す。初期充填率が低い(50~55%)ものでは、 応力の立ち上がりが見られる荷重負荷時の充填率が約 60%付近から粒子同士の拘束が 生じていると考えられる。荷重負荷時の充填率増加に対する応力増加の傾きは初期充 填率に依存しており、圧縮荷重が作用しても初期の粒子配列が大きく変化しないこと を示唆している。 表4-1 未焼結粒子充填体の機械特性評価係数の充填率依存性

	数  備考		700 H13年度	550 実施分	190	20	250	<u>275</u> H12年度	<u>219</u> 実施分	534	291	236	323	272
数	년 第	0	-0-	-0- -	-0.1	0-	0-	-0.2	-0.2	<u>0</u>	-0.2	0-	° °	-0-
ッティンク、係	歪み切り	ε2(%)	7.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.50	0.00	0.86	0. 00	0.00	0.00	0.00
応力比74	強度係数	P2	0.190	0.180	0.270	0.270	0.170	0.206	0.273	0. 089	0.186	0.241	0.156	0. 202
	強度係数	P1	5.5	10. 0	150.0	150.0	200.0	65. 0	65.0	65. 0	65. 0	65. 0	65.0	65. 0
	歪み切片	ε1(%)	16. 50	7. 50	0.00	0.10	0. 30	1.10	0. 75	1. 70	0. 70	0.65	0.65	0. 70
	指数	B1	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000
	指数	Ч	2.5	2. 3	2. 0	2.0	2. 0	2.0						
数		A2⁄E	0.43	0.27	0.26	0.29	0. 53	0.38	0.33	0.40	0.41	0.36	0.36	0.39
フィッティング 係	系数	A2 (Pa)	8. 71E+10	5. 55E+10	5. 18E+10	5. 81E+10	1. 07E+11	7. 60E+10	6. 60E+10	8. 10E+10	8. 30E+10	7. 30E+10	7. 30E+10	7. 80E+10
σz	強度	A1/E	3. 5E-06	3. 9E-06	I	I	I	7. 2E-07	6. 2E-07	5. 5E-07	8. 7E-07	9. 7E-07	6.4E-07	9. 3E-07
		A1 (Pa)	7.01E+05	7. 94E+05	I	I	I	1. 46E+05	1. 25E+05	1. 11E+05	1. 75E+05	1. 96E+05	1. 29E+05	1.88E+05
母材わが率	(Pa)	ш	2. 019E+11					2. 019E+11	2. 019E+11	2.019E+11	2. 019E+11	2. 019E+11	2.019E+11	2. 019E+11
道度 #	() 0		1000					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
粒径	(m m)		800					200	350	500	650	800		1000
充填率	(%)		50.1	53. 6	60.1	65.1	70. 9	66. 8	66. 1	66. 0	66.9	66. 2	65.8	66.5
解析	<i>ት</i> -ጸ		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	K1	K2	K4	K5	K10	K18	K15

表中の記号の説明

< の274ッティング、式>
 < の2274ッティング、式>
 A1×[ 1-exp( B1×εz ) ]
 のz = MAX
 A1×[ A2×( ε z - ε | ) n
 A1, B1, A2, ε |, n; 74ッティング、係数
 <応力比フィッティング、式>

 MXX [ 0, P1×( ε z - 

 MXX [ 0, P1×( ε z - 

む力比フィッティング式> むxy/σz = MIX{ 0, P1×(εz - ε<sub>2</sub> )} σxy/σz = MIN P2×εz<sup>a</sup> σxy=(σx+σy)/2 P1, ε<sub>2</sub>, P2, q:フィッティング係数



各面の抗力 fx1 : )面bfgcの抗力 fx2 : )面aehdの抗力 fy1 : )面cghdの抗力 fy2 : )面aefbの抗力 fz1 : )面abcdの抗力 fz2 : )面efghの抗力 対向面の平均抗力 x方向対向面 ; Fx = (fx<sub>1</sub>+fx<sub>2</sub>) / 2 y方向対向面 ; Fy = (fy<sub>1</sub>+fy<sub>2</sub>) / 2 *i*方向対向面 ; Fz = (fz<sub>1</sub>+fz<sub>2</sub>) / 2

Z; 本由方向圧縮変位量

## 図4-1 解析結果として得られる壁面抗力



図4-2 充填率をバラメータにした粒子充填体の機械特性解析結果 (ケース P1 :充填率50.1%)



図4-3 充填率をバラメータにした粒子充填体の機械特性解析結果 (ケース P2;充填率53.6%)


図4-4 充填率をパラメータにした粒子充填体の機械特性解析結果 (ケース P3;充填率60.1%)



図 4-5 充填率をバラメータにした粒子充填体の機械特性解析結果 (ケース P4;充填率65.1%)



図 4-6 充填率をバラメータにした粒子充填体の機械特性解析結果 (ケース P5 ;充填率70.9%)



図4-7 荷重方向応力の充填率に対する依存性













-39-



図4-12 粒子充填率評価方法の比較

- 5. 粒径分布依存性をパラメータとした機械特性解析
  - 5.1 評価方法

4.1 項に示す方法と同じ評価方法によった。

## 5.2 解析条件

粒子充填体の機械的特性に関する解析条件を以下に示す。

(1) 温度条件

燃料部内部(燃料の焼結速度が比較的遅い範囲)の代表温度として 1000 を選定した。

(2) 歪み負荷範囲

解析コード"PFC"では、平成12年度の報告に示すように荷重作用時の球変形(真 球からのゆがみ)を考慮していない。このため、機械的特性評価は応力が立ち始めた所 を始点とし歪み5%以下の領域を対象とする。ただし、解析条件としては充填率をパ ラメータとした解析との比較を考慮して、歪み負荷範囲を最大約15%までとした。

(3)摩擦係数

平成12年度の評価との整合性を考慮し、摩擦係数は前回評価時の代表値と同じ値の0.5とした。

(4)粒子の弾性応答モデル

平成12年度の評価と同様に、HM モデル<sup>1),2),3)</sup>を用いた。

## 5.3 解析結果

ケース No. Q-1 からQ-5 までの5 ケースの解析を行った。解析結果を図 5-1 から 図 5-5 に示す。図に示すポアソン比とヤング率は、応力(x, y, z)を用い(2 式) によって算出したものである。

以上の解析結果に対し機械特性を歪み依存の函数で表すために、4.3 項に示すフィ ッティング式を用いた評価をおこなった。個々のケースのフィッティング結果を図 5-6 から図 5-9 に示す。また得られたフィッティング係数の一覧を表 5-1 に示す。

フィッティングは、応力が立ち上がり始めてから約5%の歪みの領域に着目して行った。ヤング率については図 5-9 に示す様に、粒径のバラツキが増加すると一旦増加し、その後減少する傾向がみられる。また、表 5-1 に示す指数nに着目すると、粒径のバラツキ増加に伴い一旦1.7まで減少するが、その後2.4まで増加している。 指数nは粒子間のスベリが生じない粒子配列では、HMモデルにおける接触バネ定数の 変位依存性によりn=1.5になると考えられる。粒子間のスベリがある場合は歪み に対する応力の立ち上がりがより緩やかになるが、歪みの増加と共にスベリの自由度 が減少するため、応力はスベリの無い状態に漸近していくことになる。スベリの大小 と指数nの関係を図 5-10の模式図に示すが、粒子間のスベリが大きい程指数nは1.5 の値よりも大きくなると考えられる。

以上の考えから、粒径分布が大きくなるに従いnが一旦小さくなる現象は、小粒径 の粒子が間隙にはまり込むかたちで粒子のスベリを阻害するためと推定される。また、 粒径分布がより大きくなるとnが増加に転ずる現象は、小粒径の粒子が間隙内で自由 となり、荷重の伝播に寄与する大粒径の粒子がスベリ易くなるためと推定される。 表5-1 未焼結充填ベッド機械特性評価係数の粒径分布依存性

解析	粒径	充填率	道度	母材わが率		σz	フィッティンク、係	数					応力比フィッ	ティング、係数	
<i></i> 4-7	の範囲	(m m)	() ()	(Pa)		強度	係数		指数	指数	歪み切片	強度係数	強度係数	歪み切片	指数
	(mm)			ш	A1 (Pa)	A1 ⁄ E	A2 (Pa)	A2⁄E	٢	B1	ε1(%)	P1	P2	ε2(%)	O
Q-1	800	60. 8	1000	2. 019E+11	I	I	5. 18E+10	0.26	2.0	I	0. 00	150.0	0. 290	0.0	-0.175
Q-2	700~900	60. 2			Ι	I	2. 44E+10	0. 12	1.7	I	0. 00	150. 0	0. 350	0.0	-0.100
Q-3	$600 \sim 1000$	60. 1			I	I	2. 67E+10	0. 13	1.8	I	0.00	150.0	0. 330	0.0	-0.120
Q-4	$500 \sim 1100$	60.8			I	I	7. 25E+10	0.36	2.2	I	0.00	150.0	0. 300	0.0	-0. 180
Q-5	$400 \sim 1200$	60.4			Ι	I	7. 71E+10	0. 38	2.4	I	0. 00	150.0	0. 290	0.0	-0. 240

## 表中の記号の説明

 


図5-1 粒径分布をバラメータにした粒子充填体の機械特性解析結果 (ケースQ1 標準偏差0µm)



図5-2 粒径分布をバラメータにした粒子充填体の機械特性解析結果 (ケース Q2;標準偏差50µm)



図5-3 粒径分布をバラメータにした粒子充填体の機械特性解析結果 (ケース Q3 ;標準偏差100 µ m )



図5-4 粒径分布をパラメータにした粒子充填体の機械特性解析結果 (ケース Q4;標準偏差150µm)



図5-5 粒径分布をパラメータにした粒子充填体の機械特性解析結果 (ケース Q5;標準偏差200µm)



図5-6 荷重方向応力の粒径分布に対する依存性





-51-



図 5-9 ヤング率の粒径分布に対する依存性



(動校財)zで; tt 流向 tt 重荷

- 6.荷重サイクルパターンをパラメータとした機械特性解析
  - 6.1 評価方法

4.1 項に示す方法と同じ評価方法によった。

6.2 解析条件

粒子充填体の機械的特性に関する解析条件を以下に示す。

(1) 温度条件

燃料部内部(燃料の焼結速度が比較的遅い範囲)の代表温度として 1000 を選定した。

(2)荷重サイクル負荷範囲

次に示す3サイクルの荷重サイクルを負荷した。

z;荷重方向の応力(Pa)

0  $1 \times 10^8$   $3 \times 10^7$   $2 \times 10^8$   $3 \times 10^7$   $3 \times 10^8$   $3 \times 10^7$   $4 \times 10^8$ 

(3)摩擦係数

平成12年度の評価との整合性を考慮し、摩擦係数は前回評価時の代表値と同じ値の0.5とした。

(4)粒子の弾性応答モデル

平成12年度の評価と同様に、HM モデル<sup>1),2),3)</sup>を用いた。

6.3 解析結果

表 3-1 に示すモデル No. P-1、P-3 及び P-5 を用いた初期充填率の異なる 3 ケース (50%,60%,70%)の解析を行った。解析結果として、歪みに対する応力の関系を図 6-1 から図 6-3 に、歪みに対する応力比の関系を図 6-4 から図 6-6 に示す。荷重サイクル 時の応力には、ヒステリシスが現れている。初期充填率が 5 0 %の場合は荷重サイク ル中の応力曲線に段差が現れ、荷重サイクル負荷による稠密化が生じている。初期充 填率が 6 0 %では前記の応力曲線の段差が小さくなり、初期充填率が 7 0 %ではほと んど応力曲線の段差が無くなっている。荷重サイクル中の応力比は単純圧縮荷重負荷 時よりも大きく、荷重に垂直方向の応力が残留する傾向が見られる。

上記の応力ヒステリシスは、荷重時の粒子のスベリ挙動に関系すると考えられるの で、粒子間の摩擦係数をパラメータとした追加解析を実施した(粒子充填体は、H12年 度に作成した M1-5 モデルを使用)。結果を図 6-7~図 6-10 に示す。応力ヒステリシス は、摩擦係数=0(粒子同士の拘束無し)及び摩擦係数=100(粒子同士の完全拘束を 模擬)の場合には現れず、摩擦係数=0.5(粒子同士の拘束状況が荷重状況により変化 する)場合のみ現れている。図 6-10 に、応力ヒステリシスの発生原因を模式的に示す。 負荷時に稠密化した粒子同士の摩擦力によって、除荷時の粒子のスベリが阻害され、 荷重方向に垂直な応力成分が残留するものと推測される。





図6-2 サイクル荷重の応力(1000球、初期充填率;60%、摩擦係数;0.5)





















図6-10 応力ヒステリシスが生じる推定原因(摸式図)

- 7. 燃料ピンへの充填状態を模擬した機械特性解析
  - 7.1 評価方法

オンパワーの燃料ピンで生じる燃料及び被覆管の熱膨張を、充填粒子の粒径増加及び 粒子充填空間を形作る壁面の移動で模擬し、FCMIで生じる被覆管内圧を評価した。 評価のフローを図 7-1 に示す。

7.2 解析条件

粒子充填体の機械的特性に関する解析条件を以下に示す。

(1) 温度条件

次の温度条件を仮定した。

		被覆管平均温度	燃料外周	燃料中心
初期状態	;	2 0	20	20
0 %出力時	;	550	550	550
100%出力時	;	650	700	2000

燃料温度の出力比による変化は、0%出力~100%出力間を直線内挿して算出する。

燃料温度の径方向分布は、燃料中心での温度勾配を0とし燃料外周と中心温度を結 ぶ径方向位置の2次関数で近似した。図7-2に、評価に用いた燃料ピンの温度分布を 示す。

(2)燃料ピンの出力レベル

燃料ピンの出力は、0% 100%出力の間を出力増分10%で11段階に変化させた。

(3) 熱膨張

燃料の熱膨張率(20 評価温度)は、MATPRO-Ver.11(Revision2)<sup>4)</sup>に示された評価式を用い、U0,とPu0,の各々の値を重量分率で平均したものとした。

(30%MOXの熱膨張)=0.7×(U02の熱膨張)+0.3×(Pu02の熱膨張)

被覆管の熱膨張率(20 評価温度)は、SUS316相当の値を用いた。図 7-3 に、評価に用いた熱膨張率を示す。

(4) 摩擦係数及び軸方向の拘束条件

摩擦係数及び軸方向の拘束条件の設定を、表 7-1 に示す。燃料ピンに充填された粒 子体の軸方向拘束は、着目する評価領域の上部に積み重なった燃料部と被覆管の間の 摩擦力によって生じると考えられる。図 7-2 から、出力が 25%を超えると燃料部の平 均温度が約 1000 以上となる。被覆管温度は約 600 であるため、図 7-3 に示す熱膨 張率の関系から燃料部の軸方向伸びは被覆管の伸びを上回る。このとき、燃料部(即 ち着目する粒子充填体)の高さ変化を被覆管の熱膨張量と同じに拘束する条件(被覆 管とのスベリ無しの条件)が最も厳しい拘束条件となり、上部燃料による拘束がより 弱い場合はある時点から燃料部と被覆管の間で軸方向のスベリが生じることになると 考えられる。本評価では、表 7-1 に示す各部の摩擦係数とともに、図 7-4 に示す模式 図のようにスベリ発生時の軸方向拘束力をパラメータとして選定した。図 7-4 の <sup>0</sup>の 値は、表 7-1 に示すケース No.R-2 とケース No.R-8 の解析結果を用い、1.54×10<sup>7</sup>Pa(中 央焼結部無し)及び 1.03×10<sup>7</sup>Pa(中央焼結部無し)とした。

(5)粒子の弾性応答モデル

他の評価と同様に、HM モデル<sup>1),2),3)</sup>を用いた。機械特性を定める物性値は、各粒子の中心位置における温度で MATPRO-Ver.11(Revision2)<sup>4)</sup>に示された評価式を用い算出した。

7.3 解析結果

ケースNo.R-1からR-10の解析結果を、図7-5から図7-14に示す。比出力0.3程度からFCMIが生じている。

焼結部が無い解析結果では、燃料部の軸方向平均応力に比べて被覆管内圧の方が常に 大きくなっている。摩擦係数を 0.3、0.5 及び 1.0 と増加させた場合は、燃料部の軸方 向平均応力及び被覆管内圧ともに大きくなる傾向を示す。被覆管内面で燃料部との軸方 向のスベリが生じた場合は、FCMIによる被覆管内圧が緩和されている。

燃料中心の焼結部を模擬した解析結果では、燃料部の軸方向平均応力に比べて被覆管 内圧の方が小さい結果となった。中央の焼結部とそれに接する粒子間の摩擦係数を0.0、 0.5 及び100(固着模擬)と変化させた解析結果では、摩擦係数に対する依存性が見られ なかった。被覆管内面で燃料部との軸方向のスベリが生じた場合は、焼結部が無い解析 結果と同様にFCMIによる被覆管内圧が緩和されている。

焼結部の有無により燃料部の軸方向平均応力と被覆管内圧の大小関係が異なる結果 となったことについては、次に示すような原因と推定される。即ち、焼結部は燃料中央 部の壁要素で表し、焼結部の径方向熱膨張のみを壁の移動として模擬しているのに対し、 焼結部が無い場合は燃料中央の高温部を含む領域を軸方向に拘束しているため、中央部 の軸方向熱膨張による体積変化が粒子の再配列を介して径方向の変位として現れ、被覆 管内圧を高める結果となったものと考えられる。実際の燃料ピンでは、粒子の焼結に伴 い空孔が消滅することにより、焼結部は焼結前に比べて軸方向に縮小する効果があると 考えられ、今回の解析条件に近いことが推定される。
解析ケース	粒子充填体	軸方向拘束	摩擦係数			備考
No.		(図7-4参照)	_ 被覆管~粒子	   粒子~粒子	 	
R-1	  中央焼結部無し	スベリ無し	0.3	0.3	_	
R-2			0.5	0.5	_	
R-3			1.0	1.0	_	
R-4		スベリ発生 ; σ ₀/2	0.5	0.5	_	
R-5		スベリ発生 ; σ₀/4	0.5	0.5	_	
R-6	中央焼結部有り	スベリ無し	0.5	0.5	0.0	
R-7			0.5	0.5	0.5	
R-8			0.5	0.5	100(固着模擬)	
R-9	]	スベリ発生 ; σ₀/2	0.5	0.5	100(固着模擬)	
R-10	1	スベリ発生 ; σ ₀/4	0.5	0.5	100(固着模擬)	

表7-1 燃料ピン形状充填体の解析ケース

## JNC TJ8410 2002-001



図7-1 燃料ピンへの充填状態を模擬した機械特性解析のフロー























-77-











-82-

- 8. 燃料設計コード用物性式の検討
- (1)方針

以下の方針で、未焼結充填ベッドの機械特性モデルを検討する。 H12 年度報告の未焼結ベッドに対する機械特性モデルをベースとする。 上記モデルに、初期充填率依存性の補正を導入する。 上記モデルに、粒径分布依存性の補正を導入する。 摩擦係数の補正及び、の補正は独立に寄与すると仮定する。 サイクル荷重負荷時の扱いについて検討する。

(2)ベースとなる機械特性モデル

H12年度に報告した、1粒径球状粒子充填ベッドの機械特性モデルを以下に示す。

$$E = \frac{a}{e} \left( 1 - \frac{2b^2}{1+b} \right)$$
(4 II)  
$$u = \left( \frac{b}{1+b} \right)$$
(5 II)

$$\begin{cases} \boldsymbol{a} = MAX \begin{cases} A1 \times [1 - \exp(B1 \times \boldsymbol{e})] \\ A2 \times (\boldsymbol{e} - \boldsymbol{e}_1)^n \end{cases}$$

$$\boldsymbol{b} = MIN \begin{cases} MAX[0, P1 \times (\boldsymbol{e} - \boldsymbol{e}_2)] \\ P2 \times \boldsymbol{e}^{\mathcal{Q}} \end{cases}$$
(6  $\vec{\pi}$ )

$$\begin{cases} n = 2.0 \\ \mathbf{e}_1 = 0.893 \times 10^{-2} \\ \mathbf{e}_2 = 0.230 \times 10^{-2} \\ A1 = 7.57 \times 10^{-7} \times E_0 \\ A2 = E_0 \times \{-0.441 \times \exp(-1.12f) + 0.609\} \\ P1 = 65.0 \\ P2 = 0.885 \times \exp(-3.45f) + 0.035 \\ Q = 0.601 \times \exp(-1.43f) - 0.601 \end{cases}$$
(7  $\overrightarrow{\text{st}}$ )

## ; 未焼結ベッドのマクロな歪み E<sub>0</sub> ; 母材のヤング率(温度、富化度等に依存) f ; 粒子同士の摩擦係数(標準値=0.5) , ; (4式)の z、及び(5式)の xy/ z に対応

(3)初期充填率依存性の補正

表 4-1 に示す結果から、フィッティング係数 A1,A2,n, 1,P1,P2, 2 及び Q に初期充 填率に対する依存性が認められた。以下にこれらに対する補正の検討結果を示す。なお、 A1 については荷重負荷初期段階の低レベル応力状態を表すパラメータであり、モデル全 体への影響が小さいので補正を行わないこととした。

パラメータnの初期充填率依存性

パラメータnと初期充填率の関系を、図 8-1 に示す。パラメータnの内、初期充填率 Rの依存項をn1(R)とすると、n1(R)は次の式で表される。

 $n1(R) = \begin{cases} 5.278 - 5.556 \times R & \text{R} \le 0.59 \\ \\ 2.0 & \text{R} \ge 0.59 \end{cases}$ (8 式)

R ;初期充填率(0~1の値) n1(R);パラメータnのR依存項

適用範囲; R = 0.5~0.71(ランダム配置)

立方配列(充填率 0.524)<sup>5)</sup>や菱面体配列(充填率 0.741)<sup>5)</sup>のように規則的に粒子が並 んだ場合、nの値は充填体を構成する粒子の変形バネ定数の性質を直接反映して n=1.5 になり、充填率に依存しない。(8)式の関係式は、圧縮荷重時に粒子のスベリが生じるラ ンダム配置の粒子充填体にのみ適用できることに注意する必要がある。

パラメータ A2 の初期充填率依存性

パラメータ A2 と初期充填率の関系を、図 8-2 に示す。A2 / E<sub>0</sub>を初期充填率Rの2次 式でフィトした関数を A22'(R)とすると、A22'(R)は次式となる。

A22' (R) =  $20.67 \times R^2 - 24.32 \times R + 7.404$  (9式)

初期充填率が表 4-1 のH 1 2 年度結果の平均 R = 0.663 で、ベースとなる評価式(7式) に一致するように規格化を行うと、A2 の初期充填率依存項 A21(R)は次式となる。

A22(R) = A22'(R) / A22'(0.663)

 $= 56.52 \times R^2 - 66.50 \times R + 20.24 \quad (10 \text{ } \texttt{I})$ 

このとき、摩擦係数f及び初期充填率Rの依存性を含むA2は次式となる。

 $A2 = E_0 \times A21(f) \times A22(R)$ 

A21(f) ; (7式)のf依存項

パラメータ 1の初期充填率依存性

パラメータ 1 と初期充填率の関系を、図 8-3 に示す。(8式)と同様に2直線で近似 した式を以下に示す。折れ曲がり点は、(8式)と同様にR=0.59 とした。

 $e1(R) = \begin{cases} 0.009633 - 0.01621 \times R & R \le 0.59 \\ 0.0067 & R \ge 0.59 \end{cases}$  (11 式)

## パラメータ P1 の初期充填率依存性

パラメータ P1 と初期充填率の関系を、図 8-4 に示す。P1 を 2 直線で近似した式を以下に示す。

$$P1(R) = \begin{cases} 0.0 & \text{R} \le 0.486 \\ \\ 535.3 \times R - 259.9 & \text{R} \ge 0.486 \end{cases}$$
(12 式)

パラメータ P2 の初期充填率依存性

パラメータ P2 と初期充填率の関系を、図 8-5 に示す。H12 年度分と今回の分を合わせると、パラメータ P2 に初期充填率依存性は特に認められない。図に示す値は、摩擦係数f=0.5 の場合であるが、P2 の平均値は 0.203 となる。

P2 は (7式) に示すように摩擦係数依存性がある。H12 年度の評価では f = 0.5 におけ る値を P2 = 0.193(H12 年度分の平均値)に合う様に補正を行っている。今回は、H12 年度 分と今回の分を合わせた平均値 P2 = 0.203 と一致するように補正を見直した。結果を、 図 8-6 に示す。得られた P2 の摩擦係数依存項 P21(f)は、次式となる。

 $P21(f) = 0.885 \times Exp(-3.20 \times f) + 0.035$ (13式)

パラメータ 2の初期充填率依存性

図8-7にパラメータ 2と初期充填率の関系を、また図8-8に 1と 2の関系を示す。 H12年度のデータについてみると、 2は初期充填率よりも 1との相関が大きいと判断 される。このことから、 2は 1の関数として表すことにした。 1の1次式で近似し た結果は次の式となる。

 $e2(e1) = \begin{cases} 0.0 & e1 \le 0.00485 \\ 0.409 \times e1 - 0.001983 & e1 \ge 0.00485 \end{cases}$ (14 式)

パラメータQの初期充填率依存性

図 8-9 にパラメータ Q と初期充填率の関系を示す。Q を初期充填率 R の 2 次式でフィトした関数を Q2'(R)とすると、Q2'(R)は次式となる。

 $Q2'(R) = -17.25 \times R^2 - 22.65 \times R + 7.708$ (15 式)

初期充填率が表 4-1 のH 1 2 年度結果の平均 R = 0.663 で、ベースとなる評価式(7 式) に一致するように規格化を行うと、Q の初期充填率依存項 Q2(R)は次式となる。

Q2(R) = Q2'(R) / Q2'(0.663) =  $63.04 \times R^2$  -  $82.78 \times R$  + 28.17 (16 式)

このとき、摩擦係数f及び初期充填率Rの依存性を含むQは次式となる。

 $Q = Q1(f) \times Q2(R)$ 

Q1(f) ; (7式)のf依存項

(4)粒径分布依存性の補正

表 4-1 に示す結果から、フィッティング係数 A2,n,P2,Q に粒径分布に対する依存性が 認められた。以下に、これらに対する補正についての検討を示す。粒径分布の指標とし ては、S = (粒径の標準偏差)/(平均粒径)を用いた。

パラメータnの粒径分布依存性

パラメータ n と粒径分布の指標 S の関系を、図 8-10 に示す。n を S の 3 次式でフィト した関数を n2 '(S)とすると、n2 '(S)は次式となる。

 $n2'(S) = -204.8 \times S^3 + 100.6 \times S^2 - 10.74 \times S + 2.006$  (17式)

S = 0.0 でベースとなる評価式(7式)に一致するように規格化を行うと、n の粒径分 布依存項 n2(S)は次式となる。

n2(S) = n2'(R) / n2'(0.0)

 $= -102.09 \times S^{3} + 50.15 \times S^{2} - 5.354 \times S + 1.0 \quad (18 \text{ t})$ 

このとき、初期充填率 R 及び粒径分布 S の依存性を含む n は次式となる。

 $n = n1(R) \times n2(S)$ 

n1(R) ; (8式)に示すR依存項

パラメータ A2 の粒径分布依存性

パラメータ A2 と粒径分布の指標 S の関系を、図 8-11 に示す。A2 / E<sub>0</sub>を S の 3 次式でフィトした関数を A23 ' (S)とすると、A23 ' (S)は次式となる。

A23 '(S) =  $-4.802 \times S^3 + 2.907 \times S^2 - 3.585 \times S + 0.2520$  (19 式)

S=0.0 でベースとなる評価式(7式)に一致するように規格化を行うと、A2/E<sub>0</sub>の粒 径分布依存項 A23(S)は次式となる。

A23(S) = A23'(S) / A23'(0.0)= -19.06 × S<sup>3</sup> + 11.54 × S<sup>2</sup> - 14.23 × S + 1.0 (20 式)

このとき、摩擦係数f、初期充填率R及び粒径分布Sの依存性を含むA2は次式となる。

 $A2 = E_0 \times A21(f) \times A22(R) \times A23(S)$ 

- A21(f) ; (7式)中のf依存項
- A22(R) ; (10式)に示すR依存項

パラメータ P2 の粒径分布依存性

パラメータ P2 と粒径分布の指標 S の関系を、図 8-12 に示す。P2 を S の 3 次式でフィトした関数を P22 '(S)とすると、P22 '(S)は次式となる。

 $P22'(S) = 17.00 \times S^3 - 9.468 \times S^2 + 1.254 \times S + 0.2938 \quad (21 \text{ } \ddagger)$ 

S=0.0 でベースとなる評価式(10式)に一致するように規格化を行うと、P2 の粒径 分布依存項 P22(S)は次式となる。

P22(S) = P22'(S) / P22'(0.0)

 $= 57.86 \times S^3 - 32.23 \times S^2 + 4.268 \times S + 1.0 \qquad (22 \text{ } \exists)$ 

このとき、摩擦係数f、及び粒径分布Sの依存性を含むA2は次式となる。

 $P2 = P21(f) \times P22(S)$ 

P21(f) ; (13式)に示すf依存項

パラメータQの粒径分布依存性

パラメータQと粒径分布の指標Sの関系を、図8-13に示す。QをSの2次式でフィト した関数をQ3'(S)とすると、Q3'(S)は次式となる。

 $Q3'(S) = -6.276 \times S^2 + 1.286 \times S - 0.1800 \qquad (23 \pi)$ 

S = 0.0 でベースとなる評価式(7式)に一致するように規格化を行うと、Q の粒径分 布依存項 Q3(S)は次式となる。

$$Q3(S) = Q3'(S) / Q3'(0.0)$$
  
= 34.87 × S<sup>2</sup> - 7.144 × S + 1.0 (24 式)

このとき、摩擦係数 f、初期充填率 R 及び粒径分布 S の依存性を含む Q は次式となる。 Q = Q1(f) × Q2(R) × Q3(S)

Q1(f) ; (7式)中のf依存項

Q2(R) ; (16式)に示すR依存項

(5)荷重サイクル時の挙動

6章に示した粒子充填体における荷重サイクル負荷時のマクロな歪み - 応力の関系では、次のことが特徴的である。

荷重サイクル負荷時の応力にヒステリシスが現れ、その程度は粒子同士の摩擦係数に 依存する。

除荷及び再荷重の過程では、荷重方向に直交する応力成分と荷重方向の応力成分の比 が、単純圧縮荷重負荷時の場合と異なる挙動を示す。

荷重サイクル負荷による粒子充填体の稠密化が生じる。この現象は、初期充填密度が 低い程顕著である。

上記の挙動をモデル化するに当たっては、サイクル荷重負荷時の粒子のマクロな再配 列と関係付けて体積変化を伴う塑性変形を考慮する必要がある。このような現象には、 ペレット燃料で用いられるような通常の固体を対象とした弾塑性機械モデルは適用でき ないため、本検討の対象外とした。

粒子充填体の塑性変形に関するモデル化は今後の課題となるが、可能性として土壌の 機械特性モデル<sup>6)</sup>等の適用が考えられる。 (6)燃料設計コード用物性式の検討結果の纏め

燃料設計コード用物性式の見直し結果

初期充填率、粒径分布にたいする依存項を含む、未焼結粒子充填体の機械特性モデル として、以下を得た。

$$E = \frac{a}{e} \left( 1 - \frac{2b^2}{1 + b} \right)$$
(4  $\vec{x}$ )  
$$u = \left( \frac{b}{1 + b} \right)$$
(5  $\vec{x}$ )

$$\begin{cases} \boldsymbol{a} = MAX \begin{cases} A1 \times [1 - \exp(B1 \times \boldsymbol{e})] \\ A2 \times (\boldsymbol{e} - \boldsymbol{e}_1)^n \end{cases}$$

$$\boldsymbol{b} = MIN \begin{cases} MAX[0, P1 \times (\boldsymbol{e} - \boldsymbol{e}_2)] \\ P2 \times \boldsymbol{e}^Q \end{cases}$$
(6  $\vec{z}$ )

$$\begin{split} \mathsf{n} &= \mathsf{n} 1(\mathsf{R}) \times \mathsf{n} 2(\mathsf{S}) \\ &= \left[ \begin{array}{ccccc} 5.278 - 5.556 \times \mathsf{R} & \mathsf{R} & 0.59 & (\mathsf{8}\, \texttt{I}) \\ 2.0 & \mathsf{R} & 0.59 & (\mathsf{8}\, \texttt{I}) \end{array} \right] \\ &= \left[ \begin{array}{ccccc} 0.09 \times \mathsf{S}^3 + 50.15 \times \mathsf{S}^2 - 5.354 \times \mathsf{S} + 1.0 & (\mathsf{18}\, \texttt{I}\, \texttt{I}) \\ 1(\mathsf{R}) &= \left[ \begin{array}{ccccc} 0.009633 - 0.01621 \times \mathsf{R} & \mathsf{R} & 0.59 & (\mathsf{11}\, \texttt{I}\, \texttt{I}) \\ 0.0067 & \mathsf{R} & 0.59 & (\mathsf{11}\, \texttt{I}\, \texttt{I}) \\ 0.0067 & \mathsf{R} & 0.59 & (\mathsf{14}\, \texttt{I}\, \texttt{I}) \\ 0.409 \times & \mathsf{1} - 0.001983 & \mathsf{1} & 0.00485 & (\mathsf{14}\, \texttt{I}\, \texttt{I}) \\ 0.409 \times & \mathsf{1} - 0.001983 & \mathsf{1} & 0.00485 & (\mathsf{14}\, \texttt{I}\, \texttt{I}) \\ \mathsf{A2} &= \mathsf{E}_0 \times \mathsf{A21}(\mathsf{f}) \times \mathsf{A22}(\mathsf{R}) \times \mathsf{A22}(\mathsf{R}) \times \mathsf{A23}(\mathsf{S}) \\ \mathsf{A21}(\mathsf{f}) &= -0.441 \times \mathsf{exp}(-\mathsf{1}.12 \times \mathsf{f}\,) + 0.609 \\ \mathsf{A22}(\mathsf{R}) &= 56.52 \times \mathsf{R}^2 - 66.50 \times \mathsf{R} + 20.24 & (\mathsf{10}\, \texttt{I}\, \texttt{I}\, \texttt{I}) \\ \mathsf{A23}(\mathsf{S}) &= -\mathsf{19.06} \times \mathsf{S}^3 + \mathsf{11.54} \times \mathsf{S}^2 - \mathsf{14.23} \times \mathsf{S} + \mathsf{1.0} & (\mathsf{20}\, \texttt{I}\, \texttt{I}) \\ \mathsf{B1} &= -\mathsf{1000} \\ \mathsf{P1}(\mathsf{R}) &= \left[ \begin{array}{cccccc} 0.0 & \mathsf{R} & 0.486 & (\mathsf{12}\, \texttt{I}\, \texttt{I}) \\ 535.3 \times \mathsf{R} - 259.9 & \mathsf{R} & 0.486 \\ \mathsf{P2} &= \mathsf{P21}(\mathsf{f}) \times \mathsf{P22}(\mathsf{S}) \\ \mathsf{P21}(\mathsf{f}) &= 0.885 \times \mathsf{exp}(-\mathsf{3.20} \times \mathsf{f}\,) + 0.035 & (\mathsf{13}\, \texttt{I}\, \texttt{I}\, \texttt{I} \\ \mathsf{P22}(\mathsf{S}) &= 57.86 \times \mathsf{S}^3 - 32.23 \times \mathsf{S}^2 + 4.268 \times \mathsf{S}\, + \mathsf{1.0} & (22\, \texttt{I}\, \texttt{I}) \\ \end{split}$$

$$Q = Q1(f) \times Q2(R) \times Q3(S)$$

$$Q1(f) = 0.601 \times \exp(-1.43 \times f) - 0.601 \quad (7 \text{ cm})$$

$$Q2(R) = 63.04 \times R^2 - 82.78 \times R + 28.17 \quad (16 \text{ cm})$$

$$Q3(S) = 34.87 \times S^2 - 7.144 \times S + 1.0$$
 (24 式)

以上において、

- ; 未焼結ベッドのマクロな歪み
- E<sub>0</sub>; 母材のヤング率(温度、富化度等に依存)
- f ; 粒子同士の摩擦係数(標準値=0.5)
- R ; 初期充填率
- S ; (粒径の標準偏差)/(平均粒径)
- , ; (4式)の z、及び(5式)の xyに対応

適用範囲

- a.対象; ランダム配置の粒子充填体(球状粒子)
- b.荷重範囲; 0~5% 圧縮歪み(サイクル荷重時は適用外)
- c.粒子間の摩擦係数;0~10
- d.初期充填率;50~71%
- e.粒径分布;

平均粒径 200~1000µm

(粒径の標準偏差)/(平均粒径)の比 0~0.25

















図8-5 初期充填率とP2の関系







ε2;H12 ε2;H13











図8-12 粒径の標準偏差とP2の関系


- 9. おわりに
- (1) 未焼結粒子充填体の機械特性モデル

粒子充填率及び粒径分布をパラメータとした解析結果から、未照射粒子充填体の機械特性モデルとして以下の物性式を得た。

$$E = \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{e}} \left( 1 - \frac{2\mathbf{b}^2}{1 + \mathbf{b}} \right) \tag{4 ft}$$

$$\boldsymbol{u} = \left(\frac{\boldsymbol{b}}{1+\boldsymbol{b}}\right) \tag{5 $\vec{\pi}$}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{a} = MAX \begin{cases} A1 \times [1 - \exp(B1 \times \boldsymbol{e})] \\ A2 \times (\boldsymbol{e} - \boldsymbol{e}_1)^n \end{cases} \\ \boldsymbol{b} = MIN \begin{cases} MAX [0, P1 \times (\boldsymbol{e} - \boldsymbol{e}_2)] \\ P2 \times \boldsymbol{e}^Q \end{cases} \end{cases}$$
(6  $\vec{z}$ )

$$\begin{split} n &= n1(R) \times n2(S) \\ n1(R) &= \begin{bmatrix} 5.278 - 5.556 \times R & R & 0.59 & (8 \ ext{I}) \\ 2.0 & R & 0.59 & (8 \ ext{I}) \end{bmatrix} \\ n2(S) &= -102.09 \times S^3 + 50.15 \times S^2 - 5.354 \times S + 1.0 & (18 \ ext{I}) \end{bmatrix} \\ 1(R) &= \begin{bmatrix} 0.009633 - 0.01621 \times R & R & 0.59 & (11 \ ext{I}) \\ 0.0067 & R & 0.59 & (11 \ ext{I}) \end{bmatrix} \\ 2(1) &= \begin{bmatrix} 0.0 & 1 & 0.00485 & (14 \ ext{I}) \\ 0.409 \times & 1 - 0.001983 & 1 & 0.00485 & (14 \ ext{I}) \\ 0.409 \times & 1 - 0.001983 & 1 & 0.00485 & (14 \ ext{I}) \end{bmatrix} \\ A2 &= E_0 \times A21(f) \times A22(R) \times A23(S) \\ A21(f) &= -0.441 \times exp(-1.12 \times f) + 0.609 \\ A22(R) &= 56.52 \times R^2 - 66.50 \times R + 20.24 & (10 \ ext{I}) \\ A23(S) &= -19.06 \times S^3 + 11.54 \times S^2 - 14.23 \times S + 1.0 & (20 \ ext{I}) \end{bmatrix} \\ B1 &= -1000 \\ P1(R) &= \begin{bmatrix} 0.0 & R & 0.486 & (12 \ ext{I}) \\ 535.3 \times R - 259.9 & R & 0.486 & (12 \ ext{I}) \\ P21(f) &= 0.885 \times exp(-3.20 \times f) + 0.035 & (13 \ ext{I}) \\ P22(S) &= 57.86 \times S^3 - 32.23 \times S^2 + 4.268 \times S + 1.0 & (22 \ ext{I}) \end{bmatrix} \end{split}$$

$$Q = Q1(f) \times Q2(R) \times Q3(S)$$

$$Q1(f) = 0.601 \times exp(-1.43 \times f) - 0.601 \qquad (7 \ \ensuremath{\vec{\pi}}\ )$$

$$Q2(R) = 63.04 \times R^2 - 82.78 \times R + 28.17 \qquad (16 \ \ensuremath{\vec{\pi}}\ )$$

 $Q3(S) = 34.87 \times S^2 - 7.144 \times S + 1.0$  (24 式)

## 以上において、

- ; 未焼結ベッドのマクロな歪み
- E<sub>0</sub> ; 母材のヤング率(温度、富化度等に依存)
- f ; 粒子同士の摩擦係数(標準値=0.5)
- R ; 初期充填率
- S ; (粒径の標準偏差)/(平均粒径)
  - , ; (4式)の z、及び(5式)の xy/ zに対応

## <適用範囲>

a.対象; ランダム配置の粒子充填体(球状粒子)

- b.荷重範囲;0~5% 圧縮歪み(サイクル荷重時は適用外)
- c.粒子間の摩擦係数;0~10
- d.初期充填率;50~71%
- e. 粒径分布;

平均粒径 200~1000µm

(粒径の標準偏差)/(平均粒径)の比 0~0.25

(2)荷重サイクル負荷時の挙動

粒子充填体の荷重サイクル負荷時の挙動では、次の特徴的がある。

荷重サイクル負荷時の応力にヒステリシスが現れ、その程度は粒子同士の摩擦係数に 依存する。

除荷及び再荷重の過程では、荷重方向に直交する応力成分と荷重方向の応力成分の比 が、単純圧縮荷重負荷時の場合と異なる挙動を示す。

荷重サイクル負荷による粒子充填体の稠密化が生じる。この現象は、初期充填密度が 低い程顕著である。

上記の挙動をモデル化するに当たっては、サイクル荷重負荷時の粒子のマクロな再配 列と関係付けて体積変化を伴う塑性変形を考慮する必要がある。粒子充填体の塑性変形 に関するモデル化は今後の課題となるが、可能性として土壌の機械特性モデル<sup>7)</sup>等の適 用が考えられる。 (3) 燃料ピンへの充填状態を模擬した機械特性解析

燃料ピンへの充填状態を模擬した機械特性解析から次の結果が得られた。

FCMIによる被覆管内圧上昇は、約30%出力時から生じている。

燃料の熱膨張による軸方向伸びが被覆管により完全に拘束される条件では、出力比1 00%時の被覆管内圧は、燃料中央の焼結領域無しの場合に約28MPa以下、燃料 中央の焼結領域有りの場合に約8.5MPa以下と評価される。

燃料中央の焼結領域有りの場合、焼結部とそれに接する粒子間の拘束条件はFCMI の大きさにほとんど影響しない。

燃料と被覆管の間の熱膨張差によるスペリを考慮すると、FCMIによる被覆管内圧 上昇は緩和される。

なお、本結果は(1)項の機械モデルを組み込んだ燃料設計コードによる予測結果との比較に用いることができる。

10.今後の課題

本報告の結果から、今後の課題として以下が考えられる。

- (1) サイクル荷重負荷時の挙動
  - 試験データとの比較検討
- (2) 粒子充填体の弾・塑性機械モデルの検討
  - 土壌機械モデル等の適用性

## 11.参考文献

- 1) T.L.George, T.C.Kennedy, K.L. Peddicord ; "An elastic stress-strain relation for sphere arrays undergoing initial stage sintering", J. of Applied Mechanics (1984)
- 2)M.A.Abdou, A.Ying, Zi Lu; "Thermo and mechanical properties of ceramic blanket particle bed materials: Numerical derivation", J.Nucl.Mat., 258, 576(1998)
- 3)R.D.Mindlin, H.Deresiewicz, "Elastic spheres in contact under varying oblique forces", J.Appl.Mech., 20, 327(1953)
- 4) MATPRO-VERSIN11 (REVISION 2), NUREG/CR-0497, TREE-1280, Rev.2 (Aug. 1981)
- 5) 三輪茂男 、「粉体工学(第6章粒子群の堆積構造)」、朝倉書店、128(1972)
- 6)Drucker,D.C.,and W.Prager, "Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design", Quarterly of Applied Mathematics, vol.10, pp.157-165 (1952)