資料番号:15-5



# 振動充てん燃料設計コードの開発

中村 雅弘 関根 伸行 マニュエルA プーション 宮本 寛 中島 靖雄<sup>\*</sup>

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

本社 経営企画本部 FBR サイクル開発推進部

Development of Vibro Packed Fuel Design Code

Masahiro NAKAMURA Nobuyuki SEKINE Manuel A. Pouchon Hiroshi MIYAMOTO Yasuo NAKAJIMA\*

Advanced Fuel Recycle Technology Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

FBR Cycle System Development Office, Executive Office for Policy Planning and Administration, Head Office

高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究における振動充てん燃料の設計評価のため,振動充てん燃料に特有な 三つの物性・挙動モデルを組み込んだ設計コードを開発している。粒子間焼結を考慮するため,Matthewsによ る焼結理論を用いてネック成長速度を評価する。実効熱伝導度・熱伝達率モデルとしてはBottaらによるSPA-CONモデルを使用し充てん体構造に即した熱伝導度・熱伝達率を評価する。実効ヤング率モデルとしては個別 要素法による評価に基づいたモデルを開発した。現在,炉外試験により個々のモデルの信頼性を確認している。 さらに今後,照射試験結果を用いてコードの総合的な検証を実施し,国内照射試験の許認可に備える予定である。

In the feasibility study of a FBR cycle system, Vibro-packed fuel is considered. For the design and evaluation, three Vibro pack specific models are incorporated into the design code. Matthews' sintering model is used to calculate the neck growth rate between particles. The SPACON model, introduced by Botta et al. is used to calculate the effective thermal conductivity of fuel and the heat transport between fuel and cladding. A three dimensional distinct element method is applied to analyze the mechanical properties, resulting in empirical Young's module. Experimental data will be used for the evaluation of each model, and irradiation test data will be used for evaluation of the total code. Consequently, the code reliability will be determined and potentially increased. This will constitute an important step towards fuel licensing.

#### キーワード

振動充てん燃料,スフェアパック燃料,設計コード,熱伝導度,SPACON,ヤング率,ネック成長,離散要素法,焼結理論,FCMI,燃料 被覆管機械的相互作用

Vibro-Packed Fuel, Sphere-Pac Fuel, Design Code, Thermal Conductivity, SPACON, Young's Module, Neck Growth, Distinct Element Method, Mechanistic Sintering Theory, FCMI, Fuel Cladding Mechanical Interaction



# 1.はじめに

振動充てん燃料は,数十から数百ミクロンの顆 粒状燃料を被覆管の中に詰めた燃料である。高速 増殖炉サイクル実用化戦略調査研究においては, 乾式再処理や先進湿式再処理の製品として低除染 のウラン及びプルトニウムを考えており,放射能 の高い原料を取り扱うことになるため,コンパク トな製造工程と粉塵発生量の少なさの点から振動 充てん燃料は有力な選択肢の一つと考えられる。 振動充てん燃料の実用化には,炉内での燃料挙動 を把握することが不可欠であり,サイクル機構で は燃料の熱的,機械的挙動評価コードの開発を実 施している。

振動充てん燃料は,燃料粒子の大きさを複数種 類組み合わせ,粒子の間にさらに小さな粒子を充 てんすることにより,ペレット燃料と同程度のス ミア密度\*とすることができる。この「充てん」作 業において燃料ピンに振動を与えて,粒子の充て ん率(容器に占める粒子の体積割合)を高めるた め,振動充てん燃料と呼ばれる。燃料粒子の形状 は再処理及び粒子製造手法により異なり,球状も しくは非球状のものがある。振動充てん燃料の種 類ごとの呼び方は必ずしも厳密に定義されていな いが,ここでは球形の粒子を充てんした燃料をス フェアパック燃料,非球形の粒子を充てんした燃 料をバイパック燃料と呼び,全体を総称して振動 充てん燃料と呼ぶ。振動充てん燃料模擬体の横断 面写真を写真1に示す。

振動充てん燃料は,燃料の被覆管に近い部分は 冷却材により冷やされるため,数百 に維持され るが,中心付近は炉内に装荷中に発熱により 2,000 を超える高温に達すると考えられる。した がって原子炉内での振動充てん燃料は図1のよう に,外周部は燃焼が進んでも初期の燃料粒子の組 織が残り,中心へ行くに従って焼結が進み,中心 部はペレット燃料と同様の組織となる。焼結した 部分については,焼結過程が異なるものの豊富な 照射実績に基づいたペレット燃料の挙動モデルを 応用することにより,評価が可能となると考える。 一方,図1に示すように粒子充てん体としての組 織が残った外周部の領域の物性,及び粒子充てん 体の焼結挙動については,振動充てん燃料独自の モデル化が必要であり開発課題であった。本報告



写真1 燃料模擬体の写真 上半分はバイパック燃料模擬体,下半分はスフェアパッ ク燃料模擬体

においては,振動充てん燃料のうち,検討の進ん でいる酸化物のスフェアパック燃料を中心に,評 価コードの開発状況及びこれまでの成果を報告す る。

2.振動充てん燃料設計コードの開発工程

振動充てん燃料設計コードの開発は1996年度に 予備評価を開始し、1998年度より充てん体の熱的, 機械的及び焼結特性モデルのコード組み込みを行 っている(表1)。海外におけるこれまでの振動充 てん燃料とペレット燃料の比較照射試験結果で は,振動充てん燃料の照射挙動とペレット燃料の 照射挙動との間に大差は見られない。したがって, 振動充てん燃料では充てん体としての組織が残っ た領域の熱伝導度等の物性は特有なものである が,燃料形態の違いが挙動解析の考え方や安全確 保の判断基準の変更を迫るようなものではないと 考えられる。このことから設計評価の基本項目は 変更せず,設計コードを開発するに当たっては, ペレット燃料用の設計コードであるSIMPLE (バージョン)及びDIRAD(バージョン)を 基に振動充てん燃料特有の物性に対応することで 進めていくこととした。二つのコードは一組で用 いられ, SIMPLE は燃料の長期照射挙動の評価を

<sup>\*</sup>被覆管の内側に燃料を均一にならしたとしたときの密度,あるいはその密度の燃料の理論密度に対する比率。燃料そのものの密度と区別するため にスミア密度という。通常,燃料密度より数%低く,振動充てん燃料の場合,燃料粒子の平均密度と充てん率の積で表される。



図1 振動充てん燃料に特有な物性・挙動

行い,DIRADは出力上昇時等の比較的短い時間の 精密な熱的評価を実施する。まず,焼結挙動につ いては焼結理論に基づく計算モデルを組み込ん だ。この焼結理論は従来粉体に適用されており, 振動充てん燃料のように大きな粒子の体系に適用 した場合の信頼性を,炉外模擬試験結果との比較 により検討している。また熱的計算モデルに関し ては,共同研究を行っているスイスのポールシェ ラー研究所(PSI)より粒子充てん体の熱伝導度 計算モデルSPACONを導入し、コードへの組み込 みを行うと同時に、炉外試験によりモデルの検証 を実施している。機械的計算モデルに関しては、 個別要素法を用いた圧縮試験模擬計算及び炉外試 験を行い、比較検討により計算モデルの構築を実 施している。これらのモデルを組み込み、設計コー ドSIMPLE S2及びDIRAD S1を開発した。ここで、 SIMPLE は熱的計算モデルと焼結挙動モデルを組 み込んだ際にバージョンS1として開発し、機械的



表1 振動充てん燃料設計コード開発工程

49

50

計算モデルを組み込んだ際にバージョンS2とした。DIRADは機械計算を行わないため,熱的計算 モデルと焼結挙動モデルのみを組み込んだ時点の バージョンS1となっている。今後,PSI及びNRG (ニュークリア・リサーチ・アンド・コンサルタン シー・グループ:オランダ)との共同研究で,オ ランダのペッテン炉にて実施するスフェアパック 燃料・バイパック燃料・ペレット燃料の比較照射 試験結果が得られる予定である。開発したコード は,この照射試験結果と比較し,信頼性を評価す る予定である。

3.振動充てん燃料計算モデルの作成

## 3.1 組織変化モデル

振動充てん燃料は照射中に高温等により組織の 構造が変化する。まず,充てんされた粒子間に焼 結により結合領域(ネック)を生じる。この状態 をペレット焼結体と区別するために,ここでは粒 子間焼結と呼ぶ。ネックは時間,温度及び圧力に よりさらに成長し,やがて粒子としての形状を失 ってペレットのような連続体の組織となる。ペレ ット組織となった燃料は,更に結晶粒成長やボイ ドの移動による柱状晶の成長により更に緻密化す

る。設計評価は連続的に変化する燃料組織を三つ の領域に区分して行っており,温度の低い被覆管 に近い部分より粒子領域及びペレット領域を設定 し、ペレット領域の中をさらに等軸晶領域、柱状 晶領域及び中心空孔部に分けて熱計算を行う<br />
(図 2) 粒子領域とペレット領域は 形状が熱伝導度 に及ぼす影響の程度より境界を設定している。 SPACON による計算によれば,充てん体の熱伝導 度はネック比\*0 45程度において同じ密度のペレ ットの熱伝導度と同程度となる。このネック比に よる条件判定,もしくはこのネック比に速やかに 達する温度を1 400 と設定し 温度による条件判 定によって,粒子領域とペレット領域を決定して いる。等軸晶領域及び柱状晶領域については,ペ レット燃料と同様の組織変化の結果として,燃料 密度が大きくなると考えられるが,これらの領域 の燃料密度としてペレット燃料の評価における各 領域の密度を用いることが妥当かどうかについて は、今後の課題となっている。

## 32 ネック成長速度評価

粒子領域の熱・機械的挙動は粒子間焼結の程度 に強く影響を受けると考えられる。燃料の熱伝導



図2 振動充てん燃料における組織変化モデル

<sup>\*</sup> 充てん体粒子間の焼結領域の半径と粒子半径の比。

度は,気体の熱伝導度が固体の熱伝導度と比較し て数分の1と小さいため,未焼結状態の粒子領域 の熱伝導度は母材の熱伝導度\*よりかなり小さい。 焼結が進んで、粒子間の接触が点から面へと移行 することにより,この熱伝導度は母材の熱伝導度 に近づいていくと考えられる。一方,燃焼初期か ら燃料と被覆管が接しており,燃料から被覆管へ の熱伝達率はペレット燃料と比較して大きいと考 えられ,振動充てん燃料の長所となっている。こ の熱伝達率は,充てん体が焼結による体積収縮で 縮んだ場合、燃料と被覆管の間にギャップを生じ ることとなり,熱伝達率が小さくなることが予想 される。燃料と被覆管の機械的相互作用において は、個々の充てん粒子が再配置することにより、 燃料の熱膨張により被覆管に発生する応力が緩和 されることが期待される。焼結により再配置が起 こらなくなると、この緩衝効果も減少する。この ように粒子間焼結の進行状況は燃料挙動に大きな 影響を与えるため定量的に見積もる必要がある。 焼結によるネックの成長挙動を把握するために理 論と実験の両方からのアプローチを試みた。

(1) 焼結理論

Matthews<sup>1)</sup>は粒子間焼結に寄与する様々な素過 程を粉体焼結の場合と同様に考えることにより, ネック成長を定式化している。

# ・表面拡散によるネック成長速度

$$\dot{x} = \frac{25}{6} \frac{a^2}{x^5} \frac{\delta_s D_s}{kT} \Omega \gamma_s.$$
<sup>(1)</sup>

・粒界拡散によるネック成長速度

$$\dot{x} = \frac{32a^2}{x^5} \frac{\delta_g D_g}{kT} \Omega \left( \gamma_s + \frac{F_a}{4\pi a} \right).$$
<sup>(2)</sup>

・体積拡散によるネック成長速度 表面再分布によるもの

$$\dot{x} = \frac{25}{3} \frac{a}{x^3} \frac{D_v}{kT} \Omega \gamma_s.$$
(3)

接触面からの質量移動によるもの

$$\dot{x} = \frac{8aD_V\Omega}{x^3kT} \left(\gamma_s + \frac{F_a}{4\pi a}\right).$$
(4)

- ・蒸発 凝縮によるネック成長速度  $\dot{x} = \frac{25}{12} \frac{1}{x} \left( \frac{\Omega}{kT} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{P_{v} \gamma_{s}}{(2\pi d)^{1/2}}.$  (5)
- ・クリープ変形によるネック成長 線形クリープの場合

$$\dot{x} = \frac{3\pi}{8} \frac{a}{x} B \left( \gamma_s + \frac{F_a}{2\pi x} \right).$$
(6)
非線形クリープの場合

$$\dot{x} = \frac{9\pi B'a}{8} \left[ \frac{2n-1}{3nx} \left( \gamma_s + \frac{F_a}{2\pi x} \right) \right]^n.$$
 (7)

ここで, $\dot{x}$ はネック成長速度,aは粒子半径,xはネック半径,s,gは表面拡散及び粒界拡散 における有効厚さ, $D_s$ , $D_g$ , $D_r$ は表面,粒界及び 体積拡散係数,kはボルツマン定数,Tは温度,

は原子体積, 。は表面エネルギー, Faは接触面 に垂直な外力, Paは平衡蒸気圧, dは密度, B, B'は線形及び非線形のクリープ係数, nは非線形 クリープの場合の次数である。

図3にこれらの式により算出されるネック成長 速度の一例を示す。この焼結理論に基づいて粒子 間焼結モデルを作成し,NECKルーチンとして コードに組み込んだ。このルーチンはネック成長速 度を逐次計算し時間ごとのネック比を算出する。 (2)実験による焼結現象の把握

前段で述べた焼結理論はサブミクロンオーダー の粉体の焼結現象に対して構築された理論である ため,実際に数十~数百ミクロンの粒子に適用可 能かどうかについて,実験的な確証を得る必要が ある。2000年度より炉外試験によるネック測定試 験を実施している。試験は不活性ガス雰囲気で実 施し,模擬物質として3%イットリア混合安定化 ジルコニアの800 µm 及び60 µm の球状粒子を用い て実施した。予備評価として,充てん体には自重 のみがかかっている状況下で温度を1,500 , 1,700,1,800 と変化させ,それぞれ3時間加 熱した結果,1,700 までは充てん体は固着せず, したがってネック成長もほとんど見られないと判 断した。温度を1,800,1,900,2,000 時間を 3,10,50時間とし,焼結状況を評価した。焼結 した充てん体をエポキシ樹脂で固定し,断面を顕 微鏡で観察することにより,ネックが存在するこ とが確認できた(写真2)。写真から分かるとおり, 自重のみがかかっている条件下では,粒子間焼結 は2,000 以下の温度では進みづらい。充てん体 の焼結には圧力の影響が大きいことも考えられる ため,現在,圧力を変化させた試験を実施中であ る。SPACON ではネック比を指標として粒子間焼 結の度合いを評価するため,断面観察により試料

<sup>\*</sup> 粒子中の気孔を考慮した材料の熱伝導度。



図3 種々の焼結機構によるネック成長速度 (30%MOX,粒子径100 µm,ネック径1 µm,接触圧1 MPa)

の平均的なネック比を同定したいと考えている が、ネック比が球の切断位置により変化すること、 粒径に10%のばらつきがあること、粒子の接触状 況にもばらつきがあることから、測定が困難な状 況である。そこで、充てん体の電気伝導度や比表 面積の変化を充てん体の焼結度合いの新しい指標 として検討中である。

#### 33 熱計算

振動充てん燃料は熱伝導度が小さく,燃焼時に 中心部が高温となることが,燃料の熱的性能の面 で短所となっている。逆に,照射初期から燃料・ 被覆管熱伝達率が大きいことは長所となってい る。焼結や結晶粒成長による組織変化は燃料の熱 伝導度を大きくするため,振動充てん燃料の短所 は燃焼が進めば軽減される。前章で述べたとおり, 振動充てん燃料の評価では燃料を三つの領域に区 分して評価する。そのうち,ペレット領域につい ては燃料母材の熱伝導度を用いて熱計算を実施し ている。最も外側にある粒子領域の熱伝導度は実 験による測定が十分でないため,粒子形状を考慮 した理論的モデルにより評価している。このモデ ルにより焼結進行の効果を取り込んだ熱計算が可 能となっている。



**写真2 焼結体断面レーザ顕微鏡写真** (無荷重,2,000,50時間加熱後)

(1) 理論的熱伝導・熱伝達率モデル

PSIにおいて開発されたSPACON<sup>2)</sup>は,熱流方 向に接する二つの粒子もしくは粒子と壁面を単位 セルとし,単位セルの熱伝導度を詳細に計算する モデルである。このうち二つの粒子の単位セルを 図4に示す。SPACONでは1)粗粒子 粗粒子単 位セル,2)微粒子 微粒子単位セル,3)粗粒子

微粒子単位セル,4)粗粒子 被覆管単位セル, 5)微粒子 被覆管単位セルを考えることにより,



図4 SPACON モデルの単位セル

2成分充てん体をモデル化し,実効的な熱伝導度 を計算している。単位セルは円筒状のメッシュで 分割されそれぞれのメッシュにおいて,

$$dq = dA\Delta T \left[ \frac{2z}{\lambda_s} + \frac{1}{\frac{\lambda_i}{2(R-z+i)} + \alpha_{rad}} \right]^{-1}, \quad (8)$$

で表される平行熱流を考えることにより単位セルの実効熱伝導度を算出する。ここで, dA は円筒 メッシュの面積, 7 は上面と下面の温度差, 2 はメッシュの固体部分の長さ, R は粒子の半径,

。は固体の熱伝導度, は粒子間領域の熱伝導 度, / は界面温度ジャンプ距離で固体 気体界面に おける熱抵抗をガスの長さとして取り扱った値,

(a) は輻射熱伝達率である。円筒メッシュは内側 より固体のみのネック領域,固体と気体を熱が通 過する領域,気体のみの領域があり,単位セルの サイズを変更することにより固体と気体の占める 割合を調節し,充てん体の充てん率に合わせた熱 伝導度を見積もることができる。

(2) 充てん体熱伝導度測定試験

充てん体の熱伝導度は, SPACON によりかなり 精度良く見積もられると考えられるが, 検証実験 を実施し精度を確認する必要がある。このため, 二重円管による比較熱伝導度測定法を用いて充て ん体の熱伝導度測定を実施している。これまでの 試験においては,中心にあるタングステンヒータ を加熱源として,モリブデンの内筒とステンレス の外筒の間に模擬物質であるジルコニア粒子の充 てん体を作成し,モリプデン内筒外表面,ステン レス外筒内表面及びステンレス外筒外表面温度を 測定した。充てん体に生じた温度差と,熱伝導度 が既知であるステンレス(標準物質)外筒に生じ た温度差を比較することにより熱伝導度の測定を 試みた。この手法においては,次のような誤差要 因により十分な測定精度を得るに至っていない。

模擬物質を用いた試験においては,実燃料との 対比が難しい。振動充てん燃料の熱伝導は固体部 分の熱伝導,気体部分の熱伝導,輻射による熱伝 導が寄与している。ジルコニアを用いた試験にお いては,ジルコニアの透過率が実燃料と比較して 大きいと考えられ,熱伝導度への輻射の寄与が大 きかったと考えている。次に温度測定が困難であ る。充てん体は熱絶縁物質に近い熱伝導度である ため,熱電対を挿入することによる測定への外乱 を保証することが難しい。さらに標準物質の選定 が難しい。標準物質の熱伝導度は充てん体の熱伝 導度と比較するため充てん体の熱伝導度に近いも のが望ましい。試験においては当初熱伝導度が小 さいガラス管を標準物質として用いたが,ジルコ ニアの熱膨張により破壊されてしまった。この点 において外筒に用いる物質として金属のように延 性のあるものを選択したが,温度測定誤差が熱伝 導度の誤差に大きく影響するため,問題となって いる。最後に対流の影響の評価が難しい。充てん 体の平均温度が1,000 程度である試験において は 試料の内面と外面において500 程度の温度差 を生じており、粒径1成分系のように充てん率が 低い体系では試料全体を循環する対流の効果が無 視できないと考えている。今後,実験装置の改良 によりこれらの問題を克服したいと考えており、 模擬物質としてUO₂を用い,外筒と内筒の間の温 度差を小さく押さえ,温度として表面のみならず 肉厚中心についても測定するような実験体系を考 えている。

## 34 機械計算

振動充てん燃料は,製造時より燃料が被覆管と 接しており,ペレット燃料のように燃料と被覆管 の間にギャップが無いために燃焼初期から FCMI (燃料 被覆管機械的相互作用)が発生すると考え られる。しかしながら、振動充てん燃料のFCMI はペレットと被覆管の接触時に発生するものと比 較して、粒子の再配置による緩衝の効果により接 触圧力が緩和されている。燃料に実効的に作用す る圧力を評価することは,ペレットの製造時ギャ ップに劣らない,振動充てん燃料の優れたFCMI 特性を活かした燃料設計が可能となるのみなら ず,振動充てん燃料の熱伝導度に大きな影響を及 ぼす粒子間焼結挙動を把握するために重要であ る。そのため,個別要素法によるシミュレーショ ンを用いて充てん体の機械的挙動評価を実施し た。ホッパー等の粒子挙動を解析するPFC (Particle Flow Code)を用いて直方体の充てん体を作 成し(図5)単軸圧縮のシミュレーションを行う ことで,実効的なヤング率 E 及びポアッソン比」 を求めた。計算で求められたこれらの物性値は固 体と異なり歪み依存性をもっており、次式で表さ れる。

$$E = \frac{\alpha}{\varepsilon} \left( 1 - \frac{2\beta^2}{1 + \beta} \right), \tag{9}$$



図5 PFC コードにより作成した充てん体(充てん 率60 4%)

$$\nu = \left(\frac{\beta}{1+\beta}\right). \tag{10}$$

ここで, は圧縮方向応力であり,

$$\alpha = MAX \begin{cases} A_1 [1 - \exp(B_1 \varepsilon)] \\ A_2 (\varepsilon - \varepsilon_1)^2 \end{cases},$$
(11)

また, は圧縮方向に垂直な方向と圧縮方向の応 力比であり,

$$\beta = MIN \begin{cases} MAX[0, P_1(\varepsilon - \varepsilon_2)] \\ P_2 \varepsilon^2 \end{cases},$$
(12)

として計算される。ここで,それぞれの値は以下 のとおりである。

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = 8.93 \times 10^{-3} \\ \varepsilon_2 = 2.30 \times 10^{-3} \\ A_1 = 7.57 \times 10^{-7} E_0 \\ A_2 = [-0.441 \exp(-1.12f) + 0.609] E_0 \\ B_1 = -1.00 \times 10^3 \\ P_1 = 65.0 \end{cases}$$

- $P_2 = 0.885 \exp(-3.45 f) + 3.50 \times 10^{-2}$
- $Q = 0.601 \exp(-1.43f) 0.601$

*E*<sub>0</sub>: 母材のヤング率

- f: 粒子同士の摩擦係数
- ε: 充てん体のマクロな歪み

モデル化に当たっては, E<sub>0</sub>をUO<sub>2</sub>のヤング率であ る0 2TPa,摩擦係数を0 5とし,0~0 05の歪み領 域において検討した。

# 4.振動充てん燃料設計コードの作成

4.1 SIMPLE S2の作成

高速炉燃料設計コードSIMPLE IIにスフェアパック燃料の燃料組織変化モデル,熱計算モデルと 機械計算モデルをそれぞれ組み込み,SIMPLE S2 パージョンを作成した。図6にメインフローを示 す。

(1) 組織変化モデルの組み込み

スフェアパック燃料の焼結挙動に係るネック比 の計算のため,新たにNECKルーチンを用意し, 照射中の焼結挙動を評価する。メインルーチンで



図6 SIMPLE S2のフロー図

の径方向温度分布の計算の後,粒子領域 ペレッ ト領域境界温度を下回る各ノードにおいてネック 成長速度を計算し,各タイムステップにおけるネ ック比を計算する。この値は充てん体の熱伝導度 に反映される。

(2)熱計算モデルの組み込み

スフェアパック燃料の燃料 被覆管熱伝達率モ デルであるSPACONを組み込んだ。SIMPLE で は燃料 被覆管熱伝達率計算サブルーチンと燃料 熱伝導度計算サブルーチンが独立しているため, SPACON ルーチンと必要なデータの受け渡しを 行うサブルーチンをそれぞれ設けた。

(3)機械計算モデルの組み込み

SIMPLE では,燃料と被覆管のギャップ幅, 接触圧力の収束計算をTHGAPサブルーチンで行っている。この収束計算ルーチン内のペレット燃料のヤング率計算に,開発した振動充てん燃料の 実効ヤング率モデルを組込んだ。このモデルは充 てん燃料単体のヤング率,充てん粒子同士の摩擦 係数,及び充てん体のマクロな歪みより充てん体 の実効的なヤング率を算出する。このヤング率は 弾・塑性境界温度より被覆管側の領域に対して適 用される。

#### 42 SIMPLE S2の検証

作成したコードの評価精度を検証するため,照 射試験模擬計算を実施した。

#### (1) 熱計算検証

設計コードの熱計算検証のためには,燃料の中 心温度が測定されている試験を用いるのが最も適 当である。米国オークリッジ研究炉プールサイド 施設において照射されたスフェアパック燃料ピン は燃料中央部に熱電対が設置されており,20%Pu 混合酸化物燃料で,最大線出力52kW/m,照射時 間2,180時間である。この燃料の被覆管外表面温度 は675 , 最大中心温度が2,000 と計測された<sup>3)</sup>。 この照射条件を用いてSIMPLE S2で計算し,さら に中性子スペクトルの影響を加味した燃料中心温 度は2,100 から2,200 と評価され,測定結果よ りも若干高温となることが分かった。したがって、 本コードの評価結果は数百 のずれがあるが保守 側であり,暫定的に燃料設計に利用可能であると 考えられる。今後も試験結果との比較検討を実施 し,コードの精度及び保守性を評価する予定であ る。

## (2) 機械計算検証

設計コードのFCMI 挙動評価精度を検討するた め,照射後試験における被覆管外径変化量を測定 値と計算結果で比較した。本来なら本設計コード の評価対象である酸化物燃料でかつ被覆管がステ ンレス製の照射後試験結果と比較すべきところで あるが,現在入手できているステンレス製被覆管 の外径変化量は炭化物燃料との組み合わせの照射 試験のもののみであった。そのため,炭化物燃料 の物性をコードに組み込み,炭化物燃料の照射後 試験結果<sup>4)</sup>と比較した。20%Pu混合炭化物燃料の スフェアパック燃料で、被覆管はD9ステンレス製 である。米国高速実験炉において最大線出力 84 kW/mで620日間照射されている。被覆管外径変 化量の測定結果が191%であったのに対して,計 算では158%となり,被覆管変形量を小さく見積 もっている。この結果は試験よりも被覆管が破損 しずらい評価となっており、本コードは燃料の機 械的設計に使用するには問題があることを示して いる。被覆管変形量は燃料のスエリングや焼きし まりの評価によっても変化するため,今回の評価 結果の原因を作成したヤング率モデルの評価に直 接結びつけることはできないが, 求めたヤング率 が実際の燃料よりも小さいことが一因ではないか と考えている。

計算機上に作成した充てん体は,初期状態で充 てん体にかかる圧力が無い状態,すなわち粒子同 士の反発力が0となっている。実際の充てん体で は,粒子同士がひしぎあうように充てんされてお り,互いに反発力を発生していることから,計算 体系の充てん率は実際より若干低めとなってい る。したがって,求められたヤング率は粒子の再 配置挙動が支配的な低歪み領域で,実際以上に再 配置が起こることで小さいことが考えられる。今 後,圧縮特性評価試験との比較検討により,モデ ルの充てん率依存性等を考慮し,モデルの精度を 向上させたいと考えている。

燃料のスエリングや焼きしまり挙動について も、今後計算精度を向上するために検討する必要 がある。現状振動充てん燃料に対するこれらの特 性はペレット燃料と同等として評価している。ス エリングについては、振動充てん燃料がペレット 燃料と比較して気孔率が高いため、FPガスを放出 しやすく、小さいと考えている。しかしながら、 FPガスの放出には結晶粒径が影響するため、振動 充てん燃料の製法によって変わってくると考えら れる。焼きしまりについても,振動充てん燃料の 気孔率が高いためペレット燃料と比較して焼きし まりやすいと考えている。このように,基本的振 動充てん燃料におけるこれらの特性をペレット燃 料と同等と評価することは,機械的相互作用を大 きく見積もる方向であり,暫定的な評価方法とし て有効であると考えている。

#### 43 DIRAD S1の作成

ペレット型燃料の照射初期における熱的評価に 使用されているDIRAD コードにスフェアパッ ク燃料照射挙動モデルの組み込みを行った。図7 にフローを示す。なお,DIRADでは機械計算を行 わないため,実効ヤング率モデルは組み込んでい ない。

(1) 組織変化モデルの組み込み

SIMPLEの場合と同様にネック比計算のために NECKルーチンを作成し、各ノードについて、各 タイムステップにおけるネック成長速度を計算 し、ネック比を算出する。スフェアパック燃料内 温度分布計算後、NECKルーチンで各ノードのネ ック比を計算し燃料変形計算FPEFサブルーチン に戻る。SIMPLEの場合と異なるのは、ここで計 算したネック比の値に基づいて粒子領域とペレッ ト領域の境界判定を行うことである。



# (2)熱計算モデルの組み込み

SIMPLEと同様に,スフェアパック燃料の熱伝 導度及び燃料・被覆管熱伝達率モデルSPACONを 組み込んだ。DIRADとSPACON間での必要なデー タの設定を行うため,SPASETサブルーチンを作 成した。従来,被覆管・ペレット熱伝達率により 計算されていた燃料表面温度は,SPACONが計算 する燃料・被覆管熱伝達率により算出される。ま た,NECKにより計算されたネック比を反映して, スフェアパック燃料熱伝導度を計算し,粒子領域 の燃料内温度分布を計算する。

# 5.おわりに

振動充てん燃料設計コードの開発状況について 報告した。本コードには振動充てん燃料に特徴的 な挙動・物性のうち,粒子間焼結挙動,熱伝導度, 熱伝達率,FCMI挙動のモデルを内蔵している。 燃料の機械計算には現状問題があるが,熱計算に ついては燃焼初期の評価が可能となった。

今後2003年度まで,本文中にて述べたような改 良を加えた熱伝導度及び粒子間焼結挙動に関する 試験を実施し,それぞれのモデルの信頼性を評価 する。実効ヤング率モデルについては,充てん体 の圧縮特性試験が実施されており、その結果を用 いた実効ヤング率モデルの精度向上を図る。2005 年の高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究 Phase 2の終了までに PSI及びNRGとの共同研究 において実施する予定の照射試験結果との比較に 基づいた総合的な検証を実施し、燃料性能の比較 評価に用いる予定である。また、振動充てん燃料 が実用化される際には、国内において照射試験が 実施されると考えられる。本コードを用いてこの 照射試験の許認可に備えたいと考えている。

## 参考文献

- J.R. Matthews: "The Initial Stages of Sintering and Hot Pressing in Vibro Compacted Fuels", J. Nucl. Mater., Vol.87, p.356 (1979)
- 2) F. Botta and C. Hellwig: SPACON A Theoretical Model for Calculating the Heat Transport Properties in Sphere Pac Fuel Pins ", Nucl. Sci. Eng., Vol.135, p.165(2000)
- 3 ) R.B. Fitts: " A Comparison of Sphere Pac and Pellet (U,Pu )O2 Fuel Pins in Low Burnup Instrumented Irradiation Tests ", Nucl. Technol., Vol.21, p.26(1974)
- 4) R.E. Mason, C.W. Hoth, et al., "Irradiation and Examination Results of the AC 3 Mixed Carbide Test ", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.66, p.215(1992)