特集 新型動力炉

U.D.C. 621.039.526.034.6: [621.039.536:624.953.046].001.57

タンク型高速増殖炉原子炉上部構造の成立性評価 Feasibility Study on Roofslab Structure of Tank Type FBR

高速増殖実証炉の炉型を適切に選ぶためにはタンク型炉の設計技術を早急に整 備し、その成立性を評価する必要がある。そのため、財団法人電力中央研究所と原 子力メーカーによりタンク型高速増殖炉の研究開発が進められている。タンク型炉 では、原子炉容器及び一次系の主要な機器を支持する原子炉上部構造は、原子炉構 造成立性評価上重要な機器である。

そこで,原子炉上部構造の構造健全性を確認することを目的として,全体及び部 分モデル実験と有限要素法による実験シミュレーション解析を実施した。その結果, 原子炉上部構造の剛性及び応力の評価に関するデータを蓄積するとともに強度評価 手法を確立し、構造成立性の見通しを得た。

河島弘明*	Hiroaki Kawashima
重田政之**	Masayuki Shigeta
間所 学***	Manabu Madokoro

言 1 緒

タンク型高速増殖炉(以下,タンク型FBRと略す。)は、図1 に示すように炉心及び主循環ポンプ(以下,ポンプと略す。), 中間熱交換器(以下, IHXと略す。)を原子炉容器内に設置し, 全体の構造をコンパクトにまとめた原子炉である。したがっ て,一次系の境界が原子炉容器及び原子炉上部構造(以下ルー



フスラブと略す。)に限定され、ループ型に比べ一次系の境界 の形状、範囲及び設計条件が大幅に単純化されている。

しかし、タンク型FBRの原子炉構造は原子炉容器の直径及 び高さが共に約20m, 原子炉構造の総重量は約1万tに達する 大型の構造物であり,原子炉容器内には重量約3,000tの一次系 冷却材ナトリウムを内包している。

したがって、タンク型FBRの原子炉構造の成立性を評価す る場合、厳しい地震条件下で、原子炉容器を支持し一次系の 主要な機器を位置決めするルーフスラブの評価が重要となる。 図2にルーフスラブ構造を示す。

本研究は、昭和56年度から3年間にわたって、財団法人電 カ中央研究所と日立製作所の共同研究として実施した「タン ク型FBRフィージビリティ・スタディ」の中の「原子炉上部 構造の熱・荷重変形特性」に関するものであり、その研究内 容は、地震時のルーフスラブの変形・強度の予測評価、ルー フスラブの温度分布を予測するための伝熱特性評価及び温度 分布が与えられたときの変形・強度評価に関する実験並びに 解析的な検討から構成されている。

以下に,実験結果及び検討内容について述べる。

2 研究の背景

2.1 成立性評価の基本課題

ルーフスラブの課題は、次に示すように地震荷重に対する 剛性及び強度の確保と熱遮へい性能の確保の二つである。

(1) 剛性及び強度の確保

ルーフスラブは直径約20mの大型構造物であり、回転プラグ、 IHX, ポンプなど多数の機器を搭載し位置決めするものであ る。これには、 地震荷重を含め種々の荷重に対し適切な機器 フスラブの強度及び剛性の評価手法の確立が必要である。 支持機能を維持するのに十分な強度及び剛性を確保している ことが必要条件である。 一方,我が国での地震荷重がヨーロッパ諸国に比べて厳し

図 | タンク型FBR原子炉構造 炉心のほか,中間熱交換器,ポンプ などの一次系機器を一つの大きな容器に収容する構造で、プラントのコンパク ト化が可能となる。

いこと、ルーフスラブが多数のリブを強度部材とする複雑な 構造物であることから、合理的な構造設計のためには、 ルー

(2) 熱遮へい性能の確保

ルーフスラブ上面には各種電気品やオイルを使用する機器

33

* 日立製作所日立工場 工学博士 ** 日立製作所機械研究所 *** 日立製作所日立工場

882 日立評論 VOL. 67 No. 11(1985-11)



図2 ルーフスラブ構造 回転プラグ,中間熱交換器,ポンプ などの搭載機器と原子炉容器を支持 位置決めするとともに,原子炉カバ ーガスバウンダリとしての機能をもつ。

を設置するため室温程度に維持することが要求される。一方, その下面は約530℃のナトリウムの液面に対している。このた め,熱遮へい構造及び冷却構造の設置が必要となる。特に熱 遮へい構造は冷却構造が機能を喪失した場合(この場合,炉は 停止される。)でも強度部材を約100℃以下に保つことが要求さ れる。この熱遮へい構造はナトリウム蒸気を含むアルゴンカ バーガス中で使用され,また地震時でのスロッシングにより 直接ナトリウムと接触することが予想される。更に,ルーフ スラブに多数存在する機器貫通孔近傍には,温度の不均一な 分布による熱応力の発生及び変形が生ずることが予想される。 したがって,合理的な構造設計のためには,熱遮へい構造に 及ぼすナトリウム蒸気の影響と機器貫通部での熱伝達特性及 び温度分布特性の評価手法が必要となる。

2.2 検討方法

以上に述べたルーフスラブ成立性評価手法の開発・検証を 図ることを目的として,

荷重変形特性実験(静及び動荷重実験)

(2) 熱荷重変形特性実験

(3) 熱遮へい機能実験

(4) 機器貫通部伝熱特性実験

を行なった。これらの実験は、次のような考えに基づいて行 なった。

(a) ルーフスラブの模型としては,実験装置の製作性及び 取扱性も考慮に入れ,実機の性能を予想できると考えられ る約¹/₆縮尺模型を用いる。

(b) 熱遮へい特性実験についても、できるだけ実機の運転 状態を模擬する。 材の変形とひずみを測定した。荷重は油圧ジャッキにより与 え、変形の測定は、供試体と独立に設置されたはりにダイヤ ルゲージを取り付け、 $\frac{1}{100}$ mmまで測定した。また、ひずみは 3軸のひずみゲージを用いて測定した。

実験の結果について、有限要素法による構造解析プログラ ムADINAを用いシミュレーション解析を実施した。





3 荷重変形特性

3.1 静荷重実験

34

静荷重実験概要を図3に示す。本実験は、ルーフスラブ 供試体にS₂地震^{*1}に相当する静的な垂直荷重を加え、強度部

※1) 地震学的な見地から推定される限界地震動

図3 静荷重実験装置概要 油圧ジャッキにより,実機搭載機器荷重を 模疑し,ルーフスラブの荷重変形特性を把握する。

ルーフスラブは、垂直荷重によって内周部が下側に変形し、 回転プラグ貫通孔近傍に円周方向応力を生じ,上面で圧縮, 下面では引張りとなる。また、スカート上端部が半径方向へ 大きく変形し、外面で円周方向の引張応力が発生した。図4 にスカート外面の応力分布を示す。

静荷重実験とシミュレーション解析とは良い一致を示して おり、変形及び応力の評価手法を確立することができた。

3.2 動荷重実験

動荷重実験の概要を図5に示す。本実験では、インパクト

(打撃)ハンマによる打撃実験及び慣性加振機による正弦波加 振実験を行ない固有振動数と振動モードを測定した。

動荷重実験に対してもADINAを用いたシミュレーション解 析を実施した。ルーフスラブの代表的な固有モードは、一次 上下モード,二次水平モード,三次オーバリングモードであ る。図6に実験結果と固有振動数解析結果を示す。図7に代 表的な固有モードの解析結果を示す。実験値と解析結果は良 い一致を示しており、 ルーフスラブの機械的荷重に対する振 動状態の評価手法を確立することができた。



静荷重によるスカート上端の応力分布 図 4 ルーフスラブスカー ト部の発生応力と解析結果は、良い一致を示している。





(a) ハンマリング試験

(b) 正弦波慣性加振実験

35

図5 動荷重実験の概要 打撃試験により、ルーフスラブの振動モード及び固有振動数を把握し、解析コードを検証する。 884 日立評論 VOL. 67 No. 11(1985-11)



フスラブの一次固有モードは、中心が上下する軸対称の振動モードである。

図8 熱荷重実験装置 ルーフスラブに実機と同様な熱負荷を与え、温度分布による変形モード及び熱応力を把握する。

3.3 熱荷重実験

36

熱荷重実験装置を図8に示す。本実験はルーフスラブ供試体下面を電気ヒータにより加熱(約60℃)し、上面を水で冷却(約20℃)することによりルーフスラブ冷却系の機能喪失時の温度分布を模擬し、その際に生ずる変形、ひずみを測定した。

変形の測定は静荷重実験と同様にダイヤルゲージにより測 定した。ひずみは、3軸の高温ひずみゲージ及び防水型ひず みゲージを用いた。

ルーフスラブの冷却機能が停止した場合には,ルーフスラブの下面が半径方向に膨張しスカート上端部を押し広げる。 また,ルーフスラブの内周は下側に変形し回転プラグ貫通孔 部に鉛直荷重を与えた変形状態に等しくなる。したがって, スカート上端部近傍に応力が集中するが,二次応力で9kg/ mm²,ピーク応力で18kg/mm²程度であり,構造材の許容応力 41kg/mm²に比べて十分小さかった。

実験に対応したシミュレーション解析を実施した。解析コードはMSC/NASTRANを用いた。

図9にルーフスラブの温度分布解析結果と実験結果を、図 10に熱変形を示す。

温度分布,変形及び応力について実験値と解析値とは良い 一致を示し,熱荷重が与えられた場合の応力評価手法を確立 することができた。



図 9	ルーフスラブの温度分
布(軸	方向加熱シミュレーショ
ン)	熱荷重として与える温度分
布であ	り、実験値と解析値を示す。

タンク型高速増殖炉原子炉上部構造の成立性評価 885



4 機器貫通部伝熱特性

ルーフスラブの機器貫通部は,貫通孔と貫通機器により下 端開放の環状空間を形成する。この環状空間は上方が低温, 下方が高温と流体力学的に不安定な状態にあるため,カバー ガスの自然対流を生ずる。従来の研究^{1),2)}によれば,この自然 対流によって,上昇流と下降流及び周方向循環流が生じその 結果周方向に温度分布が生じる。この温度分布に伴い,機器 貫通部近傍に熱応力の発生及び熱変形がもたらされることが 予想される。



このため、ルーフスラブ機器貫通部を模擬した部分模型を 使用し、貫通部幾何形状、上下温度差、圧力などを変えて貫 通部の対流による伝熱特性を調べた。

実験は、流体に水を用いた実験装置(環状空間間隙4.5mm及 び 6 mmの 2 種)と、流体にアルゴンガスを用いた実験装置(間 隊 3 mm)によって行なった。水を用いた実験装置は実機の $\frac{1}{5.5}$ モデルであり、レイレイ数^{*2)}を実機の運転状態に合わせて対 流の発生条件を模擬する。また、外筒はアクリル樹脂とし、 対流状況を観察する。流体が水であるので、環状空間高さは 液位を変えることにより変化可能である。

アルゴンガスを用いた実験装置は軸方向 $\frac{1}{6}$,径方向 $\frac{1}{8}$ のモ デルであり、レイレイ数は実機より小さい領域($\frac{1}{100}$ 程度)に設 定されている。いずれの装置も下部をヒータで加熱し、上部 を冷却して流体力学的に不安定な状態として自然対流を発生 させた。

図11に対流状況を示す。一対の周方向循環流が確認できる。温度測定の結果から、上昇流位置が高温、下降流位置が低温となり、上昇流側では軸方向の温度変化があまりなく、下降流側では下部ほど低温になる傾向がそれぞれ分かった。

実験結果をレイレイ数と周方向温度差の関係として整理したものを、図12に示す。実機運転条件のレイレイ数の領域では無次元化した周方向温度差は、レイレイ数の増加に伴い減少することが分かる。これは、レイレイ数が大きいほど強い循環流を生じ、温度の均一化が進むためと考えられる。

図12は環状空間の幾何形状が実機に近く、定格運転時及び

図|| 対流観察結果 自然対流可視化試験装置で円筒下端から発生した 上昇流は、180度反対側で下降流となって循環する。

が必要となる。

5 熱遮へい機能実験

プラント運転中でのルーフスラブの熱変形を与える温度分
布は、ルーフスラブの下面に設置される熱遮へい構造の性能
に負うところが大きく、この性能把握のための基礎実験を行
なった。
実験装置は積層板構造の部分モデルであり、積層板へのナ
トリウム付着状況を評価できるように、間隙、板厚を実機と
同じとした。また、軸方向への伝熱特性が評価しやすいよう
に、熱遮へい層厚さと半径の比をできるだけ小さくするため

37

冷却機能喪失時に対応する実験の結果であり,環状部に自然 対流防止機構を設けない場合には,周方向温度差が発生する ことを示している。したがって,機器貫通孔には対流防止板

※2) 気体の浮力,粘性力の比及び伝導熱と蓄積熱の比の積で示される 気体の熱伝達に関する無次元数。 886 日立評論 VOL. 67 No. 11(1985-11)



図12 レイレイ数-周方向温度差相関図 レイレイ数が大きくなる(上下温度差が大きい。)と,自然対流が強くなり,無次元周方向温度差は小さくなる。



積層板枚数を5枚(実機は20枚)とした。本装置は下部(実験容器)をヒータで加熱し、上部を空気で冷却して積層板温度分布 を測定した。

実験は,真空中,アルゴンガス中及びナトリウム充てんの 三つの場合について実施し,アルゴンガスの対流及びナトリ ウム蒸着による輻射,対流の効果を分離して把握できるよう にした。また,短時間ナトリウムの液位を積層板の上まで 上げ,再びもとの液位に戻す実験を行ない積層板へのナトリ ウムの付着状況を観察した。

実験の結果,熱遮へい構造は所定の断熱性能を満足した。 熱遮へい層(積層板)を一時的にナトリウム中に浸した際のナ トリウム付着状況を図13に示す。本図から下部4枚の積層板 には膜状に,下から5枚目には液滴状に,また最上部には微 粒子状にそれぞれ付着していることが分かる。微粒子状及び 液滴状の付着物はナトリウム蒸気によるものと考えられ,下 部の4枚の積層板はナトリウムの液位を上げた際に,微粒子 状及び液滴状の付着物が洗われ膜状に残ったものと考えられ る。また,本実験結果から積層板間隙を20mmとした熱遮へい 構造は,ナトリウムが積層板に達した場合でも積層板間が閉 塞されることなく,断熱性能が満足されることを確認した。

6 構造評価

検証された解析手法を用い,自重,地震荷重及び熱荷重を 加えた際のルーフスラブの応力を求めた。表1に代表位置の 応力評価結果を示す。その結果,応力は許容値以内であり健 全であることが示された。

ナトリウム 膜状 オーバ チャージ レベル 微粒子 液滴状

図13 ナトリウムの付着状況 熱遮へい層(積層板)を一時的にナトリウム中に浸した際のナトリウム付着状況を示す。積層板間が20mmあれば層間をナトリウムが埋めつくすことはない。

表1 ルーフスラブ外周部の応力評価 自重, 地震荷重及び熱荷重に よるルーフスラブ構造強度部材の発生応力と許容応力を示す。

荷重条件	/ (kg/	P_m (kg/mm ²)		$P_L + P_b$ (kg/mm ²)		$P_L + P_b + Q$ の振幅(kg/mm ²)	
-	発生値	許容値	発生値	許容値	発生値	許容値	
自 重	4.3	13.8	6.3	20.7			
自重+S1地震	12.0	21.2	18.3	31.8	21.8	41.4	
自重+S2地震	15.9	25.5	24.2	38.3	32.8	41.4	
自重+熱				-	3.7	41.4	

ない, ルーフスラブに関する伝熱流動及び剛性強度評価の解 析手法の妥当性を検証した。

上記の解析手法と実験データを適用し,自重,地震荷重及 び熱荷重下の実機ルーフスラブの構造健全性を評価し,ルー フスラブ構造成立性の見通しを得た。

7 結 言

 $\mathbf{38}$

タンク型FBRの原子炉上部構造の構造成立性評価のための 模型実験として、(1)荷重変形実験、(2)熱荷重変形特性実験、 (3)熱遮へい機能実験、(4)機器貫通部伝熱特性実験を行ない、 基礎データを蓄積した。

これらの各実験データに対応しシミュレーション解析を行

参考文献

- T. Sakai : Analysis of Natural Convection in a Narrow Annular Gap in a Liquid Metal Cooled FBR, ANS, 47, 476 Winter Meeting, WASHINGTON. DC. (1984-11)
 D. T. M. T. M.
- 日本機械学会論文集(B編),47巻,417号(昭56-5),他下部を 加熱された狭い環状空間内自然対流(第1報,対流発生限界)