

高温ガス炉の事故時崩壊熱除去用受動的 冷却システムの設計・評価手法の研究

学位論文内容の要旨

高出力密度化を達成しつつ、固有の安全性を高めた高温ガス炉（HTGR）の開発には、崩壊熱除去のために高性能な受動的冷却システムの開発が必要不可欠である。HTGR 用受動的冷却システムには、原子炉压力容器（以下、压力容器と略す）をある距離においてパネル状に取り囲むように配置した冷却管に冷却水を強制的に流して压力容器を間接的に冷却し崩壊熱を除去する水冷形、或いは、空気を自然循環させ除熱する空冷形冷却パネルシステムが提案されている。冷却パネルシステムの設計にあたっては、事故時に過熱したガスの自然対流により压力容器等の重要な構造物にそれらの健全性を損なうホットスポットの発生が予想されるため、最適の受動的冷却システムの設計・評価手法を構築し、過熱したガスの自然対流の影響を受ける構造物の温度分布を適切に評価することが重要である。

本研究では、HTGR 用冷却パネルシステムの除熱特性と構造物の温度分布を評価するために、炉心の崩壊熱を模擬する 100kW のヒータを内蔵する高さ 3m の压力容器と压力容器を囲むよう配置した冷却パネルを有する冷却パネル特性試験装置により実験を行った。実験は水冷形と空冷形冷却パネルの 2 形式を模擬して行った。一方、HTGR 用受動的冷却システムの設計・評価を行うため、新たに放射伝熱機能を付加して、放射伝熱、熱伝導および自然対流熱伝達を考慮し、流れと各構造物の温度分布を同時に解く数値解析コード THANPACST2 を開発した。THANPACST2 は自然対流の流れを考慮しない従来の HTGR 設計・評価コードに比較して、過熱したガスの自然対流による構造物温度や除熱特性への影響が評価できる。THANPACST2 を本実験に適用し各構造物のホットスポット評価に関する信頼性を検証するとともに、冷却パネルシステムの除熱特性を明らかにした。なお、解析は、過熱したガスの自然対流による構造物温度分布や除熱特性への影響が評価できるよう冷却パネル全除熱量に占める放射伝熱割合が約 75% と高く、かつ、炉室内空気の自然対流による割合が高くなる压力容器最高温度が約 210℃ となる条件から、压力容器最高温度が約 510℃ で放射伝熱割合が約 98% と高くなる事故時温度条件の範囲で検討した。また、黒鉛及び炭素ブロックにより構成され、複雑な構造を有する高温の炉内構造物の保有熱が低温の压力容器等の金属構造物を加熱する熱過渡挙動を評価するために、炉心を支持する HTGR 炉床部の実寸大モデルである HENDEL-T2 試験部における強制循環喪失時の熱過渡試験を行った。また、THANPACST2 を本試験に適用し各構造物のホットスポット評価に関する信頼性を検証するとともに、炉床部構造物の熱過渡挙動を明らかにした。この結果、HTGR 用受動的冷却システムの設計・評価の基盤となる重要な知見を得ることができ

た。また、冷却パネル特性試験により得られた実験結果は HTGR 事故時崩壊熱除去システムの高度化のための IAEA 主催の国際協力研究でベンチマーク問題として採用されるなど本研究の学術的価値及び波及効果は大きい。本論文は 6 章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章の「序論」では、高温ガス炉の受動的冷却システムの概要と、システムに要求される条件等を述べている。次に、高温ガス炉の受動的冷却システムの設計に関する研究の歴史を振り返り、本研究の目的と意義を述べる。

第 2 章の「高温ガス炉の崩壊熱除去用水冷形冷却パネルシステムの設計・評価手法の研究」では、水冷形冷却パネルシステムを模擬した冷却パネル特性試験装置により得られた実験結果に、新たに開発した解析コード THANPACST2 を適用し、コードの解析手法、モデル及び使用した物性値の妥当性を検証した。これより、事故時の機器の健全性を評価する上で重要となるホットスポット評価の信頼性に関し、数値解析は高温となる圧力容器上鏡部が圧力容器内のガスの自然対流により加熱される様子を適切に評価することができた。

第 3 章の「水冷形冷却パネルシステムにおけるスタンドパイプによる除熱抑制効果の解析」では、圧力容器内の高温のガスの自然対流により過熱された圧力容器上鏡部から冷却パネルへの除熱が、制御棒駆動装置等を収納するスタンドパイプにより抑制されることによる影響を評価するため、冷却パネル特性試験装置の圧力容器上鏡部に模擬スタンドパイプを付けて実験を行った。圧力容器上鏡部に三次元形状で林立する複数のスタンドパイプをポーラスボディセルにより模擬した軸対称モデルを提案しその妥当性を検証した。ホットスポットの評価の信頼性に関し、数値解析は、圧力容器内のガスの自然対流が高温の圧力容器上鏡部を過熱するとともに、スタンドパイプの設置により上鏡部から冷却パネルへの放射伝熱が抑制され、かつ、上鏡部の放熱面積が減少し、上鏡部温度が急峻に上昇する様子を適切に評価できることがわかった。

第 4 章の「高温ガス炉の空冷パネルによる受動的熱除去特性の解析」では、冷却パネル特性試験装置の冷却パネルに空気を流すことができるよう改造し、空冷形冷却パネルシステムの除熱特性を評価するとともに、THANPACST2 の解析手法とモデルを検証した。空冷パネルの冷却管内では空気が加熱されながら上昇するために軸方向に大きな温度分布が生じ上部で高温となるが、数値解析は、圧力容器温度が冷却パネルとほぼ平行に上部で高温となり、スタンドパイプにより上部冷却パネルへの放射伝熱が抑制され、かつ、放熱面積が減少した圧力容器上鏡部は、模擬炉心で加熱され上昇するヘリウムガスにより加熱され、上鏡頂部で最高温度が現れる様子を適切に評価できることがわかった。

第 5 章の「高温ガス炉炉床部の実寸大モデルによる強制循環喪失時熱過渡挙動の解析」では、HENDEL-T2 試験部での強制循環喪失時の熱過渡試験結果に解析コード THANPACST2 を適用し、HTGR 炉床部の熱過渡特性を明らかにするとともに、構造物のホットスポットの解析手法及びモデルの妥当性を検証した。構造物温度が最高値に到達するまで数十時間かかる緩慢な熱過渡挙動を有したが、解析では、長時間の伝熱流動計算を実時間程度の計算時間で行うことができ、かつ、ホットスポットの評価の信頼性に関し、各構造物温度の過渡変化を適切に評価できることがわかった。

第 6 章の「結論」では、各章において得られた結論を要約し、本研究の結論と今後の展望を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 熊 田 俊 明

副 査 教 授 成 田 正 邦

副 査 教 授 粥 川 尚 之

副 査 教 授 板 垣 正 文

学 位 論 文 題 名

高温ガス炉の事故時崩壊熱除去用受動的 冷却システムの設計・評価手法の研究

高温ガス炉の固有の安全性を高めるためには、事故時の崩壊熱除去のために高性能な受動的冷却システムの開発が必要である。高温ガス炉用受動的冷却システムには、原子炉压力容器（以下、压力容器と略す）からある距離をおいてパネル状に取り囲むように配置した冷却管に冷却水を強制的に流して間接的に冷却する水冷形、あるいは空気を自然循環させ除熱する空冷形冷却パネルシステムが提案されている。高温ガス炉の事故時には、過熱したガスの自然対流により压力容器等の重要な構造物の健全性を損なうホットスポットの発生が予想される。このため、冷却パネルシステムの設計にあたっては、最適の受動的冷却システムの設計・評価手法を確立する必要がある。

本研究では、高温ガス炉の事故時の冷却パネルシステムの除熱特性と原子炉構造物の健全性を評価するために、模擬試験およびその数値解析コードの開発と計算を行った。これによって1998年10月に臨界に達した日本初の高温ガス炉（高温工学試験研究炉）の冷却パネルシステム設計の基礎データを与え、高温ガス炉の受動的冷却システムの精度よい設計計算が可能となった。本研究の重要な成果は以下のように要約される。

1. 炉心の崩壊熱を模擬する 100kW のヒータを内蔵する高さ 3m の压力容器とそれを囲むよう配置した水冷形と空冷形の2形式の冷却パネルの特性試験装置により実験を行い、冷却パネルの基礎データを得た。

2. 高温ガス炉用受動的冷却システムの設計・評価を行うため、放射伝熱、熱伝導および自然対流熱伝達を考慮し、流れと各構造物の温度分布を同時に解く数値解析コード THANPACS T2 を開発した。このコードは、従来の自然対流を考慮しない設計・評価コードに比較して、過熱ガスの自然対流による構造物温度や除熱特性への影響を精度よく評価できるようになった。

3. THANPACST2 を種々の条件で行われた本実験の解析に応用し、通常運転および事故時の過熱ガスの自然対流による構造物の温度分布や除熱特性を計算した。これによって各構造物

のホットスポットの評価を精度よく行うことができることを実証し、冷却パネルシステムの除熱特性を明らかにした。

4. 黒鉛ブロックにより構成される高温の炉内構造物の保有熱が低温の圧力容器等の金属構造物を加熱する熱過渡挙動を評価するために、炉心を支持する高温ガス炉炉床部の実寸大試験装置 HENDEL-T2 を用いて強制循環喪失時の熱過渡試験を行った。

5. THANPACST2 を HENDEL-T2 の試験に適用し、各構造物のホットスポット評価に関する計算結果の信頼性を検証するとともに、炉床部構造物の熱過渡挙動を明らかにした。

これらの成果は、IAEA 主催の国際協力研究でベンチマーク問題として採用されている。

これを要するに、著者は、高温ガス炉の事故時に原子炉構造物を冷却する受動的冷却システムの設計に必要な基礎データを模擬実験により得るとともに、数値シミュレーションコードの開発および検証を行ったもので、その成果は原子炉安全工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。