

# 超高温ガス炉(VHTR)開発のための 黒鉛の照射挙動に関する研究

## 学位論文内容の要旨

950℃以上の高温のガスを取り出すことを目標とした VHTR は、米国において提唱された第 4 世代原子力システムの一つとして、世界的に高い優先度で開発が進められている。この VHTR では、炉心の出力や出力密度が大きく、温度条件が高温ガス炉 (HTGR) と比較して厳しくなることから、VHTR の炉心で使用される黒鉛構造物に関して、使用期間中の健全性を確認すること及び高照射量、高温における挙動を確認することが重要である。また、VHTR において炉心の出力や出力密度を大きくするためには、事故時の燃料最高温度の上昇を抑制する必要がある、そのためには黒鉛材料の熱伝導率の正確な評価が重要である。さらに、VHTR では炉内に黒鉛材料を大量に使用するため、廃棄物としての黒鉛の処分等は避けられない問題であり、黒鉛廃棄物を低減することが重要である。加えて、VHTR の開発においては水素製造設備に供給する熱源及びガスタービン発電効率の向上をめざして冷却材の高温化が重要であり、これに伴う炉内の高温化に耐え安全性を向上させる方法として、金属に替わるより高温で使用できる耐熱性セラミックス材料の炉内構造物への適用が望まれる。

本研究では、VHTR で使用される黒鉛材料の開発に資することを目的として、高温工学試験研究炉 (HTTR) の炉心で使用されている黒鉛構造物について健全性評価手法の確立、HTTR に装荷された黒鉛の照射前特性評価、事故時の燃料最高温度の評価に係わる黒鉛の熱伝導率データの取得・評価、照射済黒鉛の埋設処分の検討及び黒鉛構造物の使用期間長期化による黒鉛廃棄物の低減化のための技術開発を行う。また、VHTR で使用される新しいセラミックス材料の開発に資することを目的として、耐熱性セラミックス材料の VHTR への適用性について検討を行う。

本論文は 6 章から構成されている。第 1 章では、研究の背景として世界のエネルギー情勢、高温ガス炉開発の歴史と今後の展望を示し、VHTR で使用される黒鉛材料の開発に必要な課題と本研究の目的を明らかにした。

第 2 章では、VHTR 設計の基礎となる HTTR の概要を示し、供用期間中における HTTR 黒鉛構造物の健全性評価手法として、TV カメラを用いて黒鉛構造物の表面を目視により観察する供用期間中検査装置を開発し、本装置を用いた目視検査及びサーベイランス試験による供用期間中の黒鉛の特性値評価を行う黒鉛構造物の健全性評価手法を確立した。また、HTTR に装荷された黒鉛の照射前特性評価を行い、HTTR 炉内に装荷されている黒鉛の特性値は、データのばらつきが少なく良好で、強度及び破壊確率等が黒鉛構造設計方針で規定されている設計用データより優れた強度特性であることを確認した。

第 3 章では、減圧事故時の燃料最高温度評価に重要である黒鉛熱伝導率の焼きなまし効果 (アニー

リング効果)について、黒鉛熱伝導率のアニーリング効果を適切に考慮することにより、合理的に保守性を排除することが可能となることを解析的に確認した。また、実験データを基にアニーリング効果を定量的に評価し、任意の照射温度及び照射量においてアニーリング効果を考慮した熱伝導率の導出を可能とし、炉内構造物の温度をこれまでより正確に評価できることを示した。

第4章では、VHTRを対象とした照射済黒鉛ブロックの埋設処分の検討を行い、黒鉛ブロックの埋設においては黒鉛中に含まれる窒素の量及びC-14量を精度よく測定することが重要であることを示した。また、黒鉛構造物の寿命の要因である照射残留応力を直接測定する方法として圧子押し込み特性測定による残留応力評価手法の開発を行い、照射後の黒鉛構造物の残留応力は圧子押し込み深さを測定することで評価できる可能性があり、黒鉛構造物の残留応力を評価し、低い残留応力の黒鉛構造物を再利用することで黒鉛構造物の使用期間の長期化によって黒鉛廃棄物が低減化できる見通しを得た。

第5章では、セラミックス製炉内構造物として、C/C複合材や超塑性ジルコニアを適用する際の構造設計手法の検討を行うとともに、代表的な構造物への応用にあたり基礎的な成立性を検討し、C/C複合材の強度評価において競合リスク理論を用いた評価が有用であり、C/C複合材をVHTRの炉内構造物として適用できる見通しを得た。

第6章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の展望を示した。

以上、本研究により高温ガス炉の黒鉛構造物について供用期間中における健全性評価手法が確立し、アニーリング効果を考慮して事故時の黒鉛材料の正確な熱伝導率の導出が可能になるとともに、残留応力を評価する技術を用いた黒鉛廃棄物の低減化及び耐熱性セラミックス材料のVHTRへの適用の見通しを得ることができた。これらの成果は今後のVHTRの開発に大いに役立つことが期待できる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 住 吉 孝  
副 査 教 授 鬼 柳 善 明  
副 査 教 授 日 野 友 明  
副 査 教 授 渡 辺 精 一

学位論文題名

## 超高温ガス炉(VHTR)開発のための 黒鉛の照射挙動に関する研究

950℃以上の高温のガスを取り出すことを目標とした VHTR は、米国において提唱された第 4 世代原子力システムの一つとして、世界的に高い優先度で開発が進められている。この VHTR では、炉心の出力や出力密度が大きく、温度条件が高温ガス炉 (HTGR) と比較して厳しくなることから、VHTR の炉心で使用される黒鉛構造物に関して、使用期間中の健全性を確認すること及び高照射量、高温における挙動を確認することが重要である。また、VHTR において炉心の出力や出力密度を大きくするためには、事故時の燃料最高温度の上昇を抑制する必要がある、そのためには黒鉛材料の熱伝導率の正確な評価が重要である。さらに、VHTR では炉内に黒鉛材料を大量に使用するため、廃棄物としての黒鉛の処分等は避けられない問題であり、黒鉛廃棄物を低減することが重要である。加えて、VHTR の開発においては水素製造設備に供給する熱源及びガスタービン発電効率の向上をめざして冷却材の高温化が重要であり、これに伴う炉内の高温化に耐え安全性を向上させる方法として、金属に替わるより高温で使用できる耐熱性セラミックス材料の炉内構造物への適用が望まれる。

本研究では、VHTR で使用される黒鉛材料の開発に資することを目的として、高温工学試験研究炉 (HTTR) の炉心で使用されている黒鉛構造物について健全性評価手法の確立、HTTR に装荷された黒鉛の照射前特性評価、事故時の燃料最高温度の評価に係わる黒鉛の熱伝導率データの取得・評価、照射済黒鉛の埋設処分の検討及び黒鉛構造物の使用期間長期化による黒鉛廃棄物の低減化のための技術開発を行った。また、VHTR で使用される新しいセラミックス材料の開発に資することを目的として、耐熱性セラミックス材料の VHTR への適用性について検討を行っている。

本論文は全 6 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、研究の背景として世界のエネルギー情勢、高温ガス炉開発の歴史と今後の展望を示し、VHTR で使用される黒鉛材料の開発に必要な課題と本研究の目的を明らかにしている。

第 2 章では、供用期間中における HTTR 黒鉛構造物の健全性評価手法として、TV カメラを用いて黒鉛構造物の表面を目視により観察する供用期間中検査装置を開発し、本装置を用いた目視検査及びサーベイランス試験による供用期間中の黒鉛の特性値評価を行うことによる黒鉛構造物の健全性

評価手法を確立している。また、HTTR に装荷された黒鉛の照射前特性評価を行い、HTTR 炉内に装荷されている黒鉛の特性値は、データのばらつきが少なく良好で、強度及び破壊確率等が黒鉛構造設計方針で規定されている設計用データより優れた強度特性であることを確認している。

第3章では、減圧事故時の燃料最高温度評価に重要である黒鉛熱伝導率の焼きなまし効果(アニーリング効果)について、黒鉛熱伝導率のアニーリング効果を適切に考慮することにより、合理的に保守性を排除することが可能となることを解析的に確認している。また、実験データを基にアニーリング効果を定量的に評価し、任意の照射温度及び照射量においてアニーリング効果を考慮した熱伝導率の導出を可能とし、炉内構造物の温度をこれまでより正確に評価できることを示している。

第4章では、VHTR を対象とした照射済黒鉛ブロックの埋設処分の検討を行い、黒鉛ブロックの埋設においては黒鉛中に含まれる窒素の量及びC-14量を精度よく測定することが重要であることを示している。また、黒鉛構造物の寿命の要因である照射残留応力を直接測定する方法として圧子押し込み特性測定による残留応力評価手法の開発を行い、照射後の黒鉛構造物の残留応力は圧子押し込み深さを測定することで評価できる可能性があり、黒鉛構造物の残留応力を評価し、低い残留応力の黒鉛構造物を再利用することで黒鉛構造物の使用期間の長期化によって黒鉛廃棄物が低減化できる見通しを得ている。

第5章では、セラミックス材料のVHTR 炉内構造物への適用について、C/C 複合材を用いた構造設計手法の検討を行うとともに、代表的な構造物への応用にあたり基礎的な成立性を検討し、C/C 複合材の強度評価において競合リスク理論を用いた評価が有用であり、C/C 複合材をVHTR 炉内構造物として適用できる見通しを得ている。

第6章では、本研究で得られた成果を総括している。

これを要するに著者は、高温ガス炉の黒鉛構造物について供用期間中における健全性評価手法を確立し、アニーリング効果を考慮して事故時の黒鉛材料の正確な熱伝導率の導出を可能とすることで、VHTR の高性能化に大きく貢献している。また、残留応力を評価する技術を用いた黒鉛廃棄物の低減化及び耐熱性セラミックス材料のVHTR への適用の見通しを得ることで、VHTR の高性能化のみならず経済性及び安全性を考慮したVHTR の開発の道を示している。これらの知見は、原子力工学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があるものと認める。