

京都大学	博士（工学）	氏名	竹田浩文
論文題目	発熱体を有する密封容器内圧力-温度連成挙動解明とそのガス漏えい検知法への応用		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>日本では、使用済燃料のキャスク貯蔵は、現在、金属キャスクのみが使用されているが、欧米では、主としてコンクリートキャスクが使用されている。日本においても、福島原発事故以来、金属キャスクよりもコストが安く、製造期間の短いコンクリートキャスクの早期導入が望まれている。コンクリートキャスクでは、使用済燃料は、キャニスタと呼ばれる金属容器に入れられており、その蓋は溶接され、その密封堅牢性から圧力監視は義務付けられていない。しかし、長期貯蔵管理上、応力腐食割れによる内部ガスの漏えいが懸念されており、キャニスタの漏えい堅牢性を保持したまま漏えいを監視できる手法を確立することによって、コンクリートキャスクの安全性向上が期待される。これに対して、本論文は、使用済核燃料密封容器キャニスタからのガス漏えい時に生じる容器内の圧力変化とそれに応じたガス流動が引き起こす容器内外温度変化の機構を明らかにし、その温度変化をガス漏えい検知へ応用するための詳細な検討結果をまとめたものである。</p> <p>第1章では、使用済燃料の国内外の現状および長期貯蔵における課題、および、キャニスタからのガス漏えいに関する従来研究ならびにキャスクおよびキャニスタの熱流動に関する従来研究についてまとめている。さらに、本論文では、キャニスタの縮尺モデルを用いた自然対流実験を実施することから、実機とモデル間の相似則の考え方について述べている。</p> <p>第2章では、種類の異なる二基の実物大コンクリートキャスクモデルを用いたガス漏えい実験結果に基づき、三種類の漏えい検知手法を独自に提案している。まず、上述実験結果から、漏えい時にキャニスタ底部温度が上昇し、頂部温度が低下することが判明したことから、その両者の温度差を用いた漏えい検知方法で、これをΔTBT法としている。次に、温度センサー取り付けの利便性、交換容易性を考え、キャニスタの上部に設置されているキャスク蓋の中央温度とキャニスタの頂部周辺温度の温度差を用いた漏えい検知法で、これをTT法としている。さらに、キャニスタの底部周辺温度とキャスク給気口から流入する空気温度間の温度差を用いたTB法を提案している。</p> <p>第3章では、実機キャニスタの1/18縮尺モデルを用いた3種類のガス漏えい実験結果について述べられている。初めに、前述のΔTBT法の提案に至ったキャニスタ内部での温度現象のメカニズムを解明することを目的として、正圧状態からのガス漏えい実験を行っている。正圧状態から漏えいが生じるとキャニスタ内の対流熱伝達効果の減少に伴い発熱体温度が上昇し、発熱体が接しているキャニスタ底面温度が上昇することを示し、さらに、漏えい前後で発熱量に変化がないため、キャニスタ上面温度は低下することを明らかにしている。この現象は、数値解析によっても確かめられている。次に、キャニスタモデルを横置き姿勢にした状態で漏えい実験を行い、横置きでの漏えい検知を行う際には、縦置きキャニスタでの漏えい検知に用いる温度差TBとTTに加えて、キャニスタ側面上部と側面下部の2か所の温度を用いて計4つの温度差を利用できることを明らかにしている。さらに、内部構造物を簡素化した1/18縮尺キャニスタモデルを用いて、内部気体に空気、ヘリウムを使用し、初期圧力状態を正圧および負圧状態から大気圧まで変化させる単体気体実験、初期が負圧状態のヘリウムのキャニスタに大気圧まで空気を混入させた混合気体実験を行っている。単体気体実験では、いずれの気体においても正圧から大気圧までの減圧が生じると、自然対流伝熱効果が減少し、発熱体の温度が上昇することで、内部気体のキャニスタ上下での温度勾配が小さくなる一方、発熱体と接しているキャニスタ底部温度が上昇し、上部温度が低下することを明らかにしている。空気による負圧状態か</p>			

京都大学

博士（工学）

氏名

竹田 浩文

ら大気圧までの昇圧実験では、減圧実験とは逆に、自然対流伝熱効果が増大に伴い、内部の気体上下温度勾配が増大し、キャニスタ上部温度が上昇すると同時に、底部温度が減少することを示している。ヘリウムによる同様の昇圧実験では、ヘリウムの熱伝導による伝熱効果が自然対流効果に勝り、内部気体およびキャニスタの温度変化は極めて小さいことを示している。これらから、初期がヘリウムの負圧状態である場合を除き、 Δ TBT法が減圧量および発熱量が大きいほど漏えい検知に有効であることを明らかにしている。混合気体実験では、空気が混入することで内部気体の熱伝導率が低下し、発熱体の温度が上昇する一方で、自然対流伝熱により内部気体の温度勾配が増大し、その結果、キャニスタ上部、底部共に温度の上昇が見られたが、キャニスタ側面温度は低下することを明らかにしている。このため、漏えい検知については、キャニスタ上部温度と側面温度の差を用いることが有効であること、および、この温度差は発熱量が大きいほど大きくなることを示している。さらに、初期に20%程度のヘリウムを封入することで、キャニスタ内部温度は低下するが、漏えいにより空気が僅かに流入するだけでキャニスタ表面温度は急激に上昇することから、漏えい検知に有効であることを明らかにしている。

第4章では、相似則を考慮して製作した1/4.5縮尺モデルを用い、実機の応力腐食割れに起因する微小漏えいを模擬した実験を行い、提案している3つの漏えい検知方法(Δ TBT法、TB法、TT法)について、微小漏えい検知可能性を評価している。初期圧力を正圧とし、実機での発熱量が10kW(貯蔵40年)、5kW(貯蔵90年)に相当する熱流束での漏えい実験結果からは、 Δ TBT法およびTB法は、漏えい量の割合に対する漏えい判断に利用する温度差の相関が強いことから、微小な漏えい量に対しても検知できる可能性がある一方、TT法は、漏えい量の割合に対する漏えい判断に使用する温度差が小さく、かつ温度変動の割合が大きいことから、微小な漏えいを判断することが困難であることを明らかにしている。初期状態を負圧の空気とした微小漏えい実験結果からは、初期正圧状態の場合とは、温度変化を逆転して使用することになるが、いずれの検知方法も漏えい時の温度変化は十分に大きいことから、微小漏えい検知に有効であることを明らかにしている。

第5章では、本研究の今後の展開を述べている。本漏えい検知手法では、キャニスタの表面温度変化を利用していることから、実際には、外気(屋外環境)温度の影響、また、崩壊熱の低下による発熱密度変化の影響を受けるため、キャニスタ内圧の変化によるキャニスタ表面温度変化からこれらの影響を分離することが必要であることを指摘しており、この問題に対しては、機械学習による温度外乱を除去するデータ処理手法をアルゴリズムに取り入れることで、より精度の高い監視システムの構築が可能であることを示唆している。さらに、本漏えい検知手法は、キャニスタ内の使用済燃料に破損燃料が生じた際に発生するクリプトンガス等のフィッションガスによるキャニスタ内温度変化を同時に検知ことができ、破損燃料の検知にも使用できる可能性を示唆している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、使用済核燃料密封容器キャニスタからのガス漏えい時に生じる容器内の圧力変化とそれに応じたガス流動が引き起こす容器内外温度変化の機構を明らかにし、その温度変化をガス漏えい検知へ応用するための詳細な検討結果を纏めたもので、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 2種類の実物大キャスクを用いた実験を行い、キャスク内温度を詳細に測定した結果、それぞれに共通して漏えい時に有意に変化する3種の参照温度差、すなわち、キャニスタ底部-頂部間温度差(Δ TBT)、キャスク蓋部中心-キャニスタ頂部周辺間温度差(TB)、およびキャニスタ底部-キャスク吸気口間温度差(TT)を見出している。
2. 実機 1/18 縮尺モデルを用いた単体気体漏えい実験を行い、正圧状態から漏えいが生じるとキャニスタ内の対流伝熱効果の減少に伴い発熱体温度が上昇し、内部気体の高さ方向の温度勾配は小さくなるが、負圧状態から漏洩した場合は、対流効果の増大により発熱体温度が低下し、内部気体の鉛直方向の温度勾配が大きくなることを明らかにしている。
3. 実機 1/18 縮尺モデルを用い、初期状態を負圧のヘリウムとし、空気をインリークさせた混合気体実験を行い、空気が混入することで内部気体の熱伝導率が低下し、発熱体の温度が上昇する一方で、自然対流伝熱により内部気体の温度勾配が増大し、その結果、キャニスタ上部、底部共に温度の上昇が見られたが、キャニスタ側面温度は低下することを明らかにしている。このため、漏えい検知については、キャニスタ上部温度と側面温度の差を用いることが有効であることを明らかにしている。
4. 実機 1/4.5 縮尺モデルを用いた漏えい実験を行い、上述3種の参照温度差を漏えい検知に用いた場合の感度を調べ、 Δ TBTおよびTBでは、漏えい量の割合に対する各温度差の相関が強いことから、微少漏えい事象を検知できる可能性があることを明らかにしている。一方、TT法は、漏えい量の割合に対する漏えい判断に使用する温度差が小さく、かつ温度変動の割合が大きいことから、微少な漏えいを判断することが困難であることを明らかにしている。

以上のように、本論文は、発熱体を有する密封容器からの微量ガス漏えい時の圧力変化に伴う正・負圧状態での自然対流の発生と容器内外温度分布の連成挙動に関して詳細に解析し、その相関を利用したガス漏えい検知法を使用済核燃料長期保管監視へ適用する高い可能性を示しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年8月1日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日：[2022年12月26日以降](#)