

称号及び氏名 博士（工学） 古田 和久

学位授与の日付 平成21年3月31日

論文名 「地震動を受ける自立型二重円筒貯蔵容器の非線形応答特性と制振に関する研究」

論文審査委員 主査 教授 伊藤 智博

副査 教授 井前 讓

副査 教授 三村 耕司

副査 准教授 新谷 篤彦

論文要旨

世界の人口増加と経済発展にともない、エネルギー消費量は今後も増加するものと考えられており、エネルギー安定供給の確保が大きな課題となっている。また化石燃料の使用に端を発する温室効果ガスの排出による地球温暖化問題等の地球環境問題への対策として、エネルギー消費による環境負荷を最小限に抑えることが重要な課題となっている。このような化石燃料代替エネルギーの導入を進めるにあたり、原子力は重要なエネルギー源として注目されている。

平成19年(2007年)3月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、「原子力発電は、供給安定性に優れ、かつ、発電過程において二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギー源であり、エネルギー安全保障の確立と地球温暖化問題との一体的な解決を図る上で要となるものである。このため、安全の確保を大前提に、核燃料サイクルを含め原子力発電を着実に推進する。」と明記されている。現在、我国では、総発電量における原子力発電の割合が年々増加傾向にあり、2008年10月末現在で55基の原子力発電所が存在する。

このために、原子力発電所で生成される高放射性廃棄物の一つである使用済み核燃料は、増加の一途をたどっている。この使用済み核燃料の中には核分裂しなかったウランと新たに生まれたプルトニウムが含まれており、これらを再処理して回収し新しい燃料として再利用する「原子燃料サイクル」が推進されている。前述のように、使用済み核燃料は増加しているため、再処理するまで原子力発電所において貯蔵することが困難になりつつある。そこで使用済み核燃料を一時的に貯蔵する中間貯蔵施設の建設が、青森県むつ市に計画されている。使用済み核燃料の貯蔵方式には、燃料から放出される放射線および熱の除去を、水およびコ

ンクリートの壁で行う「プール方式」と、キャスクと呼ばれる密閉容器によって、放射線の遮蔽および除熱を行う「キャスク方式」とがある。キャスク方式は、水の代わりに空気によって自然冷却する貯蔵方式であり、プール方式と比較して運転コストが低い。またキャスク方式で用いられるキャスクには、鋼鉄製およびコンクリート製のものがあるが、コンクリート構造物によって使用済み核燃料を遮蔽するコンクリートキャスクは、低コストであるとともに、コンクリートは中性子遮蔽材として優れており、さらに、構造体として必要な強度が得られる等の利点がある。前述の中間貯蔵施設では、キャスク方式によって、使用済み核燃料の貯蔵が行われる予定である。キャスク方式では、使用済み核燃料は、キャニスタと呼ばれる容器に収納され、そのキャニスタはキャスクと呼ばれる容器に収納される。一般的に、貯蔵用に用いられるキャスクは、地盤に固縛されずに自立しているため、自立型二重円筒貯蔵容器とみなすことができる。したがって、地震時において、キャスクのすべりやロッキングの発生が懸念されている。

一方、最近、我国では巨大地震が頻繁に発生しており、各地で地震による被害が相次いでいる。たとえば1995年1月に発生した兵庫県南部地震では、神戸市中心部が壊滅的な被害を受けた。また2003年9月に発生した十勝沖地震では、苫小牧の石油タンクから火災が発生し、大きな被害が出た。また2004年10月に発生した新潟県中越地震では、走行中の新幹線が脱線するなど、各種交通機関に甚大な被害を及ぼした。続いて、2005年8月に発生した宮城県沖地震では、東北電力の女川原子力発電所において、従来想定されていた耐震設計上の限界地震の最大加速度を上回る揺れが観測され、原子力施設の耐震設計基準の見直しの必要性が議論となった。さらに2007年7月に発生した新潟県中越沖地震では、東京電力の柏崎刈羽原子力発電所が被災し、非公式ながら同発電所敷地内にある地震計1基において震度7(計測震度6.5)を観測した。このとき発電所内の3号機変圧器からの火災の発生や、低レベル放射性廃棄物の入った多数のドラム缶の転倒が生じている。

したがって、前述した中間貯蔵施設に保管されるキャスクにおいて、強い地震によるすべりおよびロッキングの発生とそれによるキャスク同士または貯蔵施設の壁面への衝突やキャスクの転倒、あるいは内部のキャニスタの破損などが生じることが懸念されており、キャスクのすべりやロッキングを抑制することは非常に重要であると考えられる。

地震時における墓石などの自立した剛体単体のすべり・ロッキング現象に関する研究は、戦前から多くの研究者によって成されている。しかし、いずれも剛体単体のすべり・ロッキング運動を取り扱ったものであり、本研究で対象としている、外部構造物(=キャスク)と内部構造物(=キャニスタ)とからなる自立型二重円筒貯蔵容器のすべり・ロッキング運動を検討した研究は、ほとんど見受けられない。

また、コンクリートキャスクの耐震性を評価するために、コンクリートキャスクの縮尺模型を加振台によって基礎励振させる実験や、縮尺モデルを汎用の有限要素法コードを用いて、転倒・すべり・回転を考慮した地震応答解析を行った研究例がある。しかし、これらの研究は、CADデータを汎用コードで解析した形状に特化した検討に留まっており、二重円筒貯蔵容器のすべり・ロッキング時における内部構造物の影響評価など詳細な検討は成されていない。

本論文は、自立型二重円筒貯蔵容器としての外部構造物および内部構造物が地震外力を受

けたときの挙動および耐震性を明らかにし、自立型二重円筒貯蔵容器の制振手法を提案することを目的として行った研究結果をまとめたものである。本論文は、6つの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章では、自立型二重円筒貯蔵容器の耐震健全性確保の必要性および従来の研究の概要を述べ、続いて本研究の目的および本論文の概要について述べた。

第2章では、後に述べる自立型二重円筒貯蔵容器との比較をするために、キャスク単体を模擬した剛体単体の水平方向加振時の応答挙動について検討した。地震入力を受けるときの外部構造物のすべり運動およびロッキング運動の運動方程式をそれぞれ導出し、数値解析によって、正弦波加振または地震波加振したときの剛体単体の応答特性を確認した。

第3章では、自立型二重円筒貯蔵容器の基礎励振時のすべり運動の解析結果を述べた。自立型二重円筒貯蔵容器において、キャスクを剛体の矩形中空容器、キャニスタを一つの質点として模擬し、両者をばねおよび減衰器によって連結し、キャニスタを模擬した内部構造物は、キャスクを模擬した外部構造物の床面に平行にのみ変位するように支持された解析モデルを構築した。その解析モデルに基づいて、基礎励振時の外部構造物のすべり運動方程式および内部構造物の運動方程式を導出した。まず、自立型二重円筒貯蔵容器を正弦波加振したときの外部構造物の最大すべり量および内部構造物の振幅の周波数応答を数値解析によって求めた。続いて、地震波加振したときの自立型二重円筒貯蔵容器のすべり応答を、数値解析によって求めた。さらに、内部構造物の固有振動数を変化させたときの、内部構造物が外部構造物のすべり運動に及ぼす影響を確認し、最大すべり量の剛体単体との比較、ならびに正弦波加振および地震波加振に対する最適な内部構造物の固有振動数について述べた。

第4章では、自立型二重円筒貯蔵容器の基礎励振時のロッキング運動の解析結果を述べた。自立型二重円筒貯蔵容器のロッキングに関し、第3章と同様にして解析モデルを構築した。その解析モデルに基づいて、基礎励振時の外部構造物のロッキング運動方程式および内部構造物の運動方程式を導出した。自立型二重円筒貯蔵容器を正弦波加振したときの外部構造物の最大ロッキング角度および内部構造物の振幅の周波数応答を数値解析によって求めた。続いて、地震波加振したときの自立型二重円筒貯蔵容器のロッキング応答を、数値解析によって求めた。さらに、内部構造物の固有振動数を変化させたときの、内部構造物が外部構造物のロッキング運動に及ぼす影響を確認し、最大ロッキング角度の剛体単体との比較、ならびに正弦波加振および地震波加振に対する最適な内部構造物の固有振動数について述べた。

第5章では、自立型二重円筒貯蔵容器の基礎励振時のすべりの抑制およびロッキングの抑制手法について述べた。すべりについては、外部構造物と内部構造物との隙間部に液体を封入し、その液体の付加質量を利用したすべり抑制手法を提案し、十分な制振効果を有することを確認した。またロッキングについては、外部構造物の上部にロータとジンバルとから成るジャイロ機構を取り付け、そのジャイロモーメントを利用したロッキング抑制手法を提案し、使用済み核燃料が封入されたキャスクのような巨大な円筒構造物に対しても現実的な諸元を有するジャイロ機構で制振可能であることを確認した。

第6章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題について述べた。

審査結果の要旨

本論文は、原子力発電所で生成される使用済み核燃料を貯蔵するキャスクに代表される自立型二重円筒貯蔵容器を対象としており、自立型二重円筒貯蔵容器を構成する外部構造物および内部構造物が地震外力を受けたときの挙動および耐震性を明らかにするとともに、自立型二重円筒貯蔵容器の制振手法を提案しその有効性を検証することによって得られた様々な知見を示したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 自立型二重円筒貯蔵容器において、外部構造物を剛体の矩形中空容器、内部構造物を一つの質点として模擬し、両者がばねおよび減衰器によって連結支持される解析モデルを構築した。その解析モデルに基づいて、基礎励振時の外部構造物のすべり運動方程式および内部構造物の運動方程式を導出した。その上で、自立型二重円筒貯蔵容器を正弦波加振および地震波加振したときの外部構造物の最大すべり量および内部構造物の応答を求め、内部構造物の固有振動特性が外部構造物のすべり運動に及ぼす影響を明らかにし、剛体単体との比較により、正弦波加振および地震波加振に対する最適な内部構造物の固有振動特性を明らかにした。
- (2) 前述と同様の解析モデルに基づいて、基礎励振時の外部構造物のロッキング運動方程式及び内部構造物の運動方程式を導出し、自立型二重円筒貯蔵容器を正弦波加振および地震波加振したときの外部構造物の最大ロッキング角度および内部構造物の応答を求めた。その上で、内部構造物の固有振動特性が外部構造物のロッキング運動に及ぼす影響を明らかにし、剛体単体との比較により、正弦波加振および地震波加振に対する最適な内部構造物の固有振動特性を明らかにした。
- (3) 自立型二重円筒貯蔵容器のすべり運動の制振手法として、外部構造物と内部構造物との隙間部に液体を封入し、その液体の付加質量を利用したすべり制振手法を提案し、十分な制振効果を有することを明らかにした。また、ロッキング制振手法として、外部構造物の上部にロータとジンバルとから成るジャイロ機構を取り付け、そのジャイロモーメントを利用したロッキング制振手法を提案し、使用済み核燃料が封入されたキャスクのような巨大な円筒構造物に対しても現実的な諸元を有するジャイロ機構で十分な制振効果が得られることを明らかにした。

以上の他にも、本論文では多くの新しい知見を得ており、これらの諸成果は、自立型二重円筒貯蔵容器の耐震設計に対して多くの知見を与えているのみならず、制振手法を確立するなど、振動工学および耐震工学の分野の発展ならびに我が国の核燃料サイクル構築に寄与するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。

本委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。