

氏名	うちやま ともあき 内山 智曜		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成24年3月27日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)技術社会システム専攻		
学位論文題目	原子炉施設の地震時確率論的安全評価における 複合事象評価手法に関する研究		
指導教員	東北大学教授 若林 利男		
論文審査委員	主査 東北大学教授 若林 利男	東北大学教授 斎藤 浩海	
	東北大学教授 中田 俊彦	東北大学准教授 高橋 信	

## 論文内容要旨

原子炉施設は、地球温暖化現象の要因と考えられている温室効果ガスの一つである二酸化炭素の排出をほとんど伴わずに、社会へエネルギーとして電力を供給できる施設である。その反面、原子炉の炉心には放射性核種である核燃料と核分裂生成物が存在し、放射性核種から出る放射線はある線量以上になると人体に有害であることが確認されており、放射性核種の放出によるリスクが常に存在する。実際に、2011年3月に発生した東日本大震災では、地震とそれに伴って発生した津波により、福島第一原子力発電所において炉心損傷が発生して放射性核種が環境に飛散し、その動向が世界的に注目されている。一方、原子炉施設には、このような炉心損傷事故を防止するために非常用炉心冷却系をはじめとしたシステムが備えられており、それらのシステムの信頼性は炉心損傷事故の発生を大きく左右する。本研究では、原子炉施設の地震時のリスクを評価する地震時確率論的安全評価について、通常時の確率論的安全評価に従来用いられてきた解析手法が地震時にも援用されてきている現状に対し、より精度の高い新たな解析手法を開発し、その必要性を明らかにすることを目的としている。本論文はその成果をまとめたものであり、全文5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

確率論的安全評価(以下、PSA と呼ぶ)を行う目的は、複雑かつ巨大なシステムを対象に、リスクを包括的かつ定量的に評価し、そのリスクの要因を詳細に分析することで、対象システムのリスクを低減するような設計や運転管理に資する情報を得ることである。PSA には、評価対象とする範囲によって、レベル1、レベル2、レベル3の3つのレベルに分類され、それぞれにリスクの程度を見るための指標がある。レベル1の評価では炉心損傷を評価対象として炉心損傷頻度を解析する。レベル2の評価では炉心損傷後の格納容器からの放射性核種の放出を評価対象として、格納容器破損頻度、放射性核種の放出量と放出時間を解析する。レベル3の評価では公衆への健康影響を評価対象とする。レベル2はレベル1の評価結果を入力情報として用いており、同様にレベル3はレベル2の評価結果を入力情報として用いているため、根本的なリスク指標はレベル1の評価結果である炉心損

傷頻度である。一方、PSA はリスクの要因によっても分類される。具体的には、原子力発電所の内的な要因によるリスクを評価する内的事象 PSA と、外部からの要因によるリスクを評価する外的事象 PSA、特に後者には、原子力発電所サイト近傍の地震によるリスクの評価も含まれ、そのような評価は地震 PSA と呼ばれる。地震 PSA と内的事象 PSA においてみられる相違のうちの一つは、個々の事象の発生確率の大きさの相違である。地震 PSA では、地震が発生した条件の元での評価、つまり内的事象 PSA で評価する通常条件より厳しい条件における評価を行うため、機器が損傷したり故障したりする確率、つまり解析モデルの中にある個々の事象の発生確率が大きくなる。個々の事象の発生確率が大きくなると、事象の重なり部分が無視できなくなる。事象が重なる組み合わせの数は、事象の数が増えるほど指数関数的に増加し、それを考慮した解析をさらに困難にしている。また、地震 PSA と内的事象 PSA では、個々の事象の間の依存性にも違いがある。内的事象 PSA では、例えばある機器の機能には他のある機器が健全である必要がある、といった論理的に表現できる依存性はフォールトツリーによるロジックで表現し、それで表現しきれない依存性のうちリスクに対する影響が大きいと考えられるものは、共通原因故障として扱う。一方、地震 PSA では、ある地震動が同一プラント内の多くの機器に対して影響し、それらの機器の揺れはそれらの設置位置が近傍であればかなり似通った依存性のあるものになると考えられることから、そのような依存性を内的事象で考慮したような依存性に加えて表現することになる。このような地震時特有の依存性は相関性として扱われる。相関性を考慮すると事象の重なり部分がさらに大きくなることから、適切に考慮する方法が課題となっている。

このような背景を踏まえ、本論文では、地震時の評価に対して新たな解析手法を提案し、その有効性について明らかにしている。

第2章においては、モンテカルロ法に基づいて開発した新たな解析手法について説明するとともに、システムの機能喪失や事故シーケンスの発生といった観点から従来の手法との評価結果の相違について明らかにし、その相違の原因について分析した。また、評価結果が異なることによって、その評価を利用する際にどのような影響を及ぼすかについて検討した。

原子力発電所は、多重性及び多様性を考慮した設計が為されており、内包する系統や機器の数は膨大であり、その構成は非常に複雑である。従って、その機能をリスクの観点で表現する目的でプラントを模擬した PSA モデルも非常に複雑であることを避けられない。これまで用いられてきた、評価対象事象が発生する最小限の事象の組み合わせであるミニマルカットセット(以下、MCS)に基づいた手法では、複雑な PSA モデルで表現された論理から解析解に相当する MCS を得て、その MCS に基づいて事象の発生確率または発生頻度を計算する、という2つのステップを踏む。しかし、1つ目のステップにおいては、原子力発電所規模の PSA モデルを対象とすると、MCS が膨大な数となるため全ての MCS を導出することができないという課題があった。また、2つ目のステップでは前述した希少事象近似式や上限近似式による近似計算が行われ、その結果は必ず保守的な評価とな

ってしまうという課題があった。

本章では、モンテカルロ法に基づく新たな解析手法により、これらの課題を解決している。一般に、モンテカルロ法は PSA において確率や頻度のありうる値の幅を求める、いわゆる不確実さ解析に対して用いられてきた。従って、リスクすなわち CDF の値そのものを求める、いわゆる点推定解析に対してモンテカルロ法を用いたような前例はほとんど無い。新たな解析手法は、これまで近似計算が行われてきた複数事象の発生確率の計算において、その近似による影響を低減することを目的のひとつとして開発された。新たな解析手法では、応答や耐力、機器の損傷や故障に関するパラメータ(中央値及び標準偏差)に基づいて擬似的な応答や耐力を発生させる。応答が耐力を上回った場合には機器損傷が発生することになり、そのように擬似的に発生させた機器の損傷を、その機器を含むシステムの機能を表現した論理式に相当するフォールトツリーやイベントツリーに直接代入する。すなわち、論理式を一切簡略化せず、そのまま解く。この点が他の解析手法との最大の相違であり、モンテカルロ法による乱数誤差を除けば厳密解が得られるという利点を得ることができた。

第3章においては、第2章で開発した新たな解析手法の利点を生かしたまま、地震時のシステム信頼性に大きな影響を及ぼしうる機器の応答及び耐力の相関性を相関係数で扱うことができるよう、新たな解析手法を拡張した。また、与える相関係数を推定するための手法について検討した。さらに、推定した相関係数とそれを扱うことができる解析手法を組み合わせ、2基の原子炉を評価対象として相関性を考慮することによる影響について明らかにした。

地震時には、ある地震動が同一プラント内の多くの機器に対して影響する。それらの機器の設置フロアや設置位置が近い場合や、それらの機器の固有振動数が近い場合には、それらの機器の応答はかなり似通った依存性のあるものになると考えられる。このような地震時特有の機器損傷の間の依存性は、相関性と呼ばれている。相関性を考慮すると事象の重なり部分が大きくなることから、適切に考慮する方法が課題となっている。相関性は、上記の応答の相関だけではなく、例えば機器の仕様や支持構造が類似している場合、機器の耐力にも少なからず存在すると考えられている。

本章では、第2章で検討したモンテカルロ法に基づいて、事象の重なり、すなわち複数の事象の和事象と積事象の両方を適切に評価できる利点を生かしたまま相関性を考慮できるようにした。また、入手しうる情報から相関係数を推定する手法について検討した上で、推定した相関係数に基づいて相関性を考慮することによる結果の影響を明らかにした。

第4章においては、地震起因の様々な要因による炉心損傷を1つの統合モデルで評価することを提案した。

一般の建築や構造物は、通常時の状況よりも地震後の状況のほうが、より多く火災に見舞われる傾向がある。つまり、通常時よりも火災の条件付発生確率は大きいと考えられるため、これまで火災発生のメカニズムや影響

が分析されてきている。原子力発電所を対象に考えた場合、防火を考慮した設計が施されていることから一般建造物よりは火災の条件付発生確率は小さいと考えられるが、通常時の条件付発生確率よりは地震時の条件付発生確率のほうが大きいと考えられる。実際に、2007年の新潟県中越沖地震地震において、柏崎刈羽原子力発電所では地震に起因した火災と内部溢水が発生している。しかしこれまで、地震そのもの、地震に起因する火災や内部溢水について、統合的に評価されたことは無かった。

本章では、これらを統合的に評価した結果、要因を単独に評価した場合の炉心損傷頻度が十分小さくとも、全ての要因を考慮した炉心損傷頻度は単独要因の総和より増加することを明らかにした。また、福島第一原子力発電所における事故を受けて、統合モデルに津波を考慮した試験的な解析を実施し、設計基準を超えた津波が炉心損傷に直結するような条件では、津波による炉心損傷はリスクの主要な寄与因子となることを明らかにした。

第5章では、本研究のまとめと今後の展望を述べている。

本論文では、地震時の確率論的安全評価における新たな解析手法を開発し、その利点を生かした相関性を考慮した解析や統合的な評価を提案し、そのような評価の必要性を明らかにした。本研究が、今後、原子炉施設の地震時における残余のリスクの把握や、地震に対する原子力施設の設計や運転方針に対するより精度の高い情報の提供に寄与することを期待する。

# 論文審査結果の要旨

原子力発電所は、地球温暖化現象の要因と考えられている温室効果ガスの1つである二酸化炭素の排出をほとんど伴わずに、社会へエネルギーとして電力を供給できる施設である。その反面、放射性核種の放出によるリスクが常に存在する。実際に、2011年3月に発生した東日本大震災では、地震とそれに伴って発生した津波により、福島第一原子力発電所において炉心損傷が発生して放射性核種が環境に飛散し、その動向が世界的に注目されている。一方、原子力発電所には、このような炉心損傷事故を防止するために非常用炉心冷却系をはじめとしたシステムが備えられており、それらのシステムの信頼性は炉心損傷事故の発生を大きく左右する。本研究では、原子炉施設の地震時のリスクを評価する地震時確率論的安全評価にたいして、より精度の高い新たな解析手法を開発し、その有用性を明らかにすることを目的としている。本論文はその成果をまとめたものであり、全文5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章においては、モンテカルロ法に基づいて開発した地震PSA解析手法について述べるとともに、システムの機能喪失や事故シーケンスの発生といった観点から従来の手法との評価結果の相違について明らかにし、その相違の原因について分析した。また、評価結果が異なることによって、その評価を利用する際にどのような影響を及ぼすかについて明らかにした。

第3章においては、第2章で開発した地震PSA解析手法の利点を生かしたまま、地震時のシステム信頼性に大きな影響を及ぼしうる機器の応答及び耐力の相関性を相関係数で扱うことができる解析手法を開発した。また、相関係数を推定するための手法についても開発した。さらに、推定した相関係数とそれを扱うことができる解析手法を組み合わせ、2基の原子炉を評価対象として相関性を考慮することによる影響について明らかにした。

第4章においては、地震起因の様々な要因による炉心損傷を1つの統合モデルで評価することを提案した。地震起因の災害例としては、地震起因の火災や内部溢水が実際に発生している。これまでこれらを統合的に評価したことは無かった。これらを統合的に評価した結果、要因を単独に評価した場合の炉心損傷頻度が十分小さくとも、全ての要因を考慮した炉心損傷頻度は単独要因の総和より増加することを明らかにした。また、福島第一原子力発電所における事故を受けて、統合モデルに津波を考慮した解析を実施し、設計基準を超えた津波が炉心損傷に直結するような条件では、津波による炉心損傷はリスクの主要な寄与因子となることを明らかにした。

第5章では、本研究のまとめと今後の展望を述べている。

以上、本論文では、地震時の確率論的安全評価において、モンテカルロ法を用いた精度の高い新たな解析手法を開発し、その有用性を明らかにした。本論文は、今後、原子炉施設の地震時における残余のリスクの評価や、地震に対する原子力施設の安全性の高い設計に貢献するのみならず、原子炉安全工学、リスク評価・管理学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。