

原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ
若手原子力研究プログラム 事後評価総合所見

研究開発課題名：核拡散リスクの確率論的定量評価手法の開発					
研究代表者（研究機関名）：小田卓司（国立大学法人東京大学）					
研究期間及び予算額：平成21年度～平成22年度（2年計画） 7百万円					
項目	要 約				
1. 研究開発の概要	緊迫した地球温暖化への対策として原子力の有効性が見直されている中、世界的な利用拡大に対して、日本が国際競争力を維持しつつ貢献するには、安全性・経済性・核拡散抵抗性を同時に最適化した発電炉や燃料サイクルの提案が重要である。本研究では、この3特性の最適化に必要な「核拡散リスクの定量評価手法」を開発する。				
2. 総合評価	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 50px;">A</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・核拡散リスクを決定する因子を整理し、国家間の関係をマルチエージェントシミュレーションによりモデル化し、核拡散リスクを確率論的に数値で評価を行うなど、優れた成果を挙げている。 </td> </tr> <tr> <td></td> <td> <ul style="list-style-type: none"> S) 極めて優れた成果が挙げられている A) 優れた成果が挙げられている B) 一部を除き、相応の成果が挙げられている C) 部分的な成果に留まっている D) 成果がほとんど挙げられていない </td> </tr> </table>	A	<ul style="list-style-type: none"> ・核拡散リスクを決定する因子を整理し、国家間の関係をマルチエージェントシミュレーションによりモデル化し、核拡散リスクを確率論的に数値で評価を行うなど、優れた成果を挙げている。 		<ul style="list-style-type: none"> S) 極めて優れた成果が挙げられている A) 優れた成果が挙げられている B) 一部を除き、相応の成果が挙げられている C) 部分的な成果に留まっている D) 成果がほとんど挙げられていない
A	<ul style="list-style-type: none"> ・核拡散リスクを決定する因子を整理し、国家間の関係をマルチエージェントシミュレーションによりモデル化し、核拡散リスクを確率論的に数値で評価を行うなど、優れた成果を挙げている。 				
	<ul style="list-style-type: none"> S) 極めて優れた成果が挙げられている A) 優れた成果が挙げられている B) 一部を除き、相応の成果が挙げられている C) 部分的な成果に留まっている D) 成果がほとんど挙げられていない 				
3. その他	・研究成果を論文として公表し、多方面からの意見を得るなどして、モデルの有効性検証を深めて欲しい。				

1. 目的・目標	<p>世界的な原子力利用の拡大に対して、日本が競争力を維持しつつ国際社会に貢献するには、核拡散リスクを十分に考慮した発電炉や燃料サイクルを提案することが重要である。しかし、核拡散リスクを評価する手法が十分に整備されていないため、様々な制度や技術の効果を比較することが困難であり、有効な方向性を見出せていないのが現状である。そこで本研究では、核拡散リスクを決定する因子を整理して、国家間の関係をマルチエージェントシミュレーションによりモデル化することで、核拡散リスクを確率論的に定量評価する手法を開発することを目的とする。</p>
2. 研究成果	<p>【研究開発項目1 既往研究からの情報収集と分析】 [得られた成果]</p> <p>核拡散や核拡散抵抗性を分析・評価している既往の文献を調べた。文献調査の結果に基づき、核拡散リスクを決定する因子を抽出し、その因子が核拡散リスクに与える影響の大きさや、核拡散リスクへの影響の及ぼし方を分析・整理した。核拡散リスクと正の相関を持つ因子としては、安全保障上の脅威（隣国の核保有の有無や、隣国との関係性）、技術力（一般的な工学技術、核技術、核物質）などが挙げられた。また、負の相関を持つ因子としては、経済力（GDP、世界経済への依存度）、政治体制（ここでは民主体制の程度、逆に専制体制の程度に対しては正の相関）、核兵器開発の検知確率（NPT参加の有無）、安全保障上の備え（核の傘、核の傘を提供する国との関係性）などが挙げられた。一方で、通常兵力や国の規模は状況に応じて正/負いずれの相関も持ちうるものと考えられた。</p> <p>核拡散リスクの定量的な評価を目的とした既往研究の多くは、①注目する国が保有する燃料サイクル施設や核物質が持つ核拡散抵抗性を評価して核拡散リスクと関連付ける研究と、②国家間の関係性に注目してゲーム理論等を用いて核拡散レジームの堅固さなどを半定量的に分析する研究に、大別できることがわかった。本研究では、核拡散抵抗性ではなく核拡散とより直接的な関連がある核拡散リスクを評価の対象としているため、核物質・核関連技術だけでなく国家間の関係性等も重要である。そのため、国を主体としてとらえるアプローチが必要である。さらに、核拡散リスクに関連のある複数の因子間の複雑な相関を取り扱うにはゲーム理論よりもより柔軟な条件設定が可能な方法（＝マルチエージェントシミュレーション）が必要である。当初の研究計画は以上の条件を満たす内容となっており、計画通りに研究を進めることとした。</p> <p>また、既往の事例研究の調査を進める中で、具体的な核拡散リスクは、国の核開発状況や保有する核技術のレベル等に依存していくつかの種類があることが示唆された。そのため、核拡散を以下の3フェーズに分</p>

類することを提案した：

(1)非兵器国が核開発の動機を獲得するフェーズ（動機を獲得した場合に核開発を開始する可能性が発生）

(2)非兵器国が核開発を継続あるいは断念するフェーズ

(3)核兵器国が核の保有を継続あるいは断念するフェーズ

この中で、(2)および(3)について精緻な分析を行うためには機微な核技術に関する情報が不可欠であること、また近年の核拡散リスク（テロを除く）に対する注意は主に新興国が核開発を開始する可能性に向けられていることから、本研究では(1)を対象にすることとした。そして、核拡散リスクを「ある注目する地域内で、ある注目する期間内に、核開発の動機を有する国家が出現する確率」と定義し、その定義のもとで核拡散リスクを定量評価する手法を開発することとした。なお、核開発の動機は、「核開発のメリットがデメリットを上回ったときに発生する」と仮定した。

事例研究の調査では、核開発国としては北朝鮮、インド、パキスタン、イランに、非開発国としては日本、韓国に主に注目した。そして、主要な周辺諸国との関係性や核開発等に関する歴史的経緯を調べ、本研究で構築する核拡散リスク評価手法の妥当性を検証するために必要なデータを収集した。

研究を効果的かつ有意義に遂行するためのアドバイスを多様な視点から受けることを目的として、核不拡散、保障措置、国際政治、核燃料サイクル等の専門家を委員とする委員会を進捗状況に応じて適宜開催した。委員会では、核兵器開発の要因として国家安全保障の確保・向上が重要視される場合が多いため国力の定義においては軍事力を重視すべきであること、実用を考えた場合には核拡散リスクを求めるだけではなく核拡散抵抗性との関連性を示すべきであること、*など*の指摘を受けた。また、軍事力や経済力の定義として利用可能なデータベースの紹介を受けた。それらのコメント・アドバイスに従って研究の内容や方向性を見直しを行いつつ、本項目を遂行した。

【研究開発項目2 マルチエージェントモデルの開発】

[得られた成果]

項目1で分析・抽出した核拡散リスクを決定する因子やその関係性を基礎として、「ある注目する地域内で、ある注目する期間内に、核開発の動機を有する国家が出現する確率」として定義した核拡散リスクを評価する方法を開発するために、まず、①核開発のメリットとデメリットを、軍事力、経済力、国家間の関係性等の関数として表わす数値モデルを構築し、次に②その数値モデルを利用して国家をエージェントとするマルチエージェントシミュレーションコードを開発することとした。①

においては、項目 1 と同様の評価検討委員会を適宜開催し、そこで受けたコメントを反映させて、数値モデルの内容やモデル化手順の改善を進めた。また、②においては、国家間の関係性や経済力等の時間変化の予測が困難な因子については、乱数を利用してある妥当と考えられる範囲内でランダムに変化させるというアプローチを採用することで、確率論的に核開発リスクを評価する枠組みを構築した。

【研究開発項目 3 モデルを利用した核拡散リスク評価とモデルの改良】

[得られた成果]

項目 2 で作成したシミュレーションコードおよびそのコンセプトの妥当性を確認・担保するために、既往の核開発の事例との比較を行い、適当な比較結果が得られるように、モデル式の改良とモデルパラメータの調整を行った。核開発の事例としては、北朝鮮、インド、パキスタン、イランの例をとりあげた。また、核開発を断念した国および試みなかった国として、韓国と日本の事例についてもモデルの妥当性確認の参照データとして利用した。加えて、モデルパラメータの感度分析を行い、モデルパラメータの変化に対する応答について国家ごとにその傾向（応答の方向、応答の大きさ）を調べ、計算結果の妥当性を議論した。本項目においても、項目 1 と同様の評価検討委員会を適宜開催し、多様な専門家からのアドバイスを反映してモデルの改良を行い、信頼性の高いモデルの構築を狙った。

そして、構築したモデルを利用して、核拡散リスクと、地域内の核兵器国の数、地域内の隣国の数（国境の数）、検知確率や制裁リスク感度（国がどの程度まで経済制裁・軍事制裁のリスクを許容できるかの指標）、地域内の国家の数等との相関を評価した。その結果、例えば、核兵器国の増大や隣国の数の増加により核拡散リスクが高まること、一方で、ステークホルダー（地域内の国家の数）が増加するに従ってリスクが減少すること、また、核開発の検知確率の増加は一般に核拡散リスクを低減させる効果を有するが、その関係は線形ではなく、その効果は制裁リスク感度に大きく依存すること、などが示唆された。

【研究開発項目 4 まとめ】

[得られた成果]

本研究では、既往の事例研究等を参考にしながら核拡散のメリットとデメリットを評価する数値モデルを構築し、その構築した数値モデルを国をエージェントとするマルチエージェントシミュレーションに組み込むことで、核拡散リスク（「ある注目する地域内で、ある注目する期間内に、核開発の動機を有する国家が出現する確率」と定義）を定量的に評価する方法を開発した。また、それを利用して、核拡散リスクと核拡

散抵抗性との相関が評価可能であることを示した。

核セキュリティーが世界的な注目を集める中、有効ではない可能性がある施策が「持たざる国」に強要されて過度な負担となる状況が生じれば、核不拡散レジームの権威・正当性を低下させ、結果として核拡散のリスクを増加させる可能性すらある。そのために、定量的な指標を得て効果的な施策のみを採用することが重要である。また、核不拡散体制に対する国際的なコンセンサスを得るためにも定量的な評価結果をもとに議論することが建設的である。本研究で開発したアプローチはその一つの方法として有望であり、先駆的なものである。

今後の課題としては以下の2つが挙げられる、まず、信頼性の高いモデルの構築の困難さである。モデルを律するパラメータや、そもそもモデルで採用する式型など、細かい部分を挙げれば自由度は無限にある。今回は最終的に試行錯誤の結果として一つの数値モデルを構築したが、高い自由度を適切に包含できるような、応用数学やシミュレーション科学のアプローチについてもより広範に検討し、採用していく必要があると考えられる。そしてもう一点は、評価検討委員会でも指摘されたように、そもそも核拡散のゲーム自体が変わった場合（（国際社会の規範やルール、核保有が持つ意味等が変わった場合）には、今回のように歴史事例を参照するアプローチでは対応できない可能性である。それに対しては、多数の専門家に聞き取りを行い、個々のエキスパート・ジャッジメントに基づいて複数の異なるモデルを構築し、その複数のモデルにより得られる結果の総体から核拡散リスクを議論するようなアプローチが有効であると考えられる。

【論文、特許等】

[口頭発表]

- 1) 小田卓司, 田中知, 「核拡散リスクの確率論的評価手法の検討」, 2010年原子力学会春の年会, 2010年3月
- 2) 小田卓司, 「核拡散リスクの確率論的定量評価手法-事例との比較を通じたモデル構築手法の検討-」核物質管理学会日本支部第8回研究会, 2010年8月
- 3) 小田卓司, 田中知, 「事例との比較を通じた核拡散リスク定量評価手法の妥当性検証」, 2011年原子力学会春の年会, 2011年3月
- 4) Yusuke Kuno, Takuji Oda, et al., “Study on Effectiveness Assessment of Proliferation Resistance”, INMM 2011, 2011年7月, Orland USA
- 5) 小田卓司, 田中知, 「定量評価手法を利用した核拡散リスクと核拡散抵抗性との相関分析」, 2012年原子力学会秋の大会, 2011年9月

[ポスター発表]

- 1) 小田卓司, 「核拡散リスクの確率論的評価手法の検討」, 原子力学会
北関東支部 若手発表会, 2010年4月