

## 統計的安全評価における機械学習モデルの適用 (2) 量子回路学習による統計的安全評価値の評価

Application of Machine Learning Models for Statistical Safety Evaluation

(2) Quantum circuit learning for uncertainty analysis of fuel peak cladding temperature

\*木下 郁男

原子力安全システム研究所

RELAP5 コードによる統計的安全評価に対して、機械学習モデルの適用性を検討している。量子回路学習はパラメータ付き量子回路の損失関数を最小化するようにパラメータを最適化して学習を行う。本報では、PWRプラントにおける小破断 LOCA 時高圧注入系不作動事象のアクシデントマネジメント策を対象に、燃料被覆管最高温度の不確かさ解析に量子回路学習を適用し、95%累積確率値の予測精度を検討した。

**キーワード**：統計的安全評価，機械学習，量子回路学習，LOCA，RELAP5

**1. 緒言** 機械学習モデルを統計的安全評価に適用するにあたっては、学習データ以外のデータに対するモデルの汎化性能の確認が必要である。量子回路学習はユニタリー変換のみで回路を構成することが正則化として機能し、過学習が抑えられると期待される。本報では、燃料被覆管最高温度(PCT)の不確かさ解析に対して量子回路学習[1]を適用し、95%累積確率値の予測精度を検討した。

**2. 解析方法** 解析対象は PWR プラントの小破断 LOCA 時高圧注入系不作動事象(1 インチ破断)とした。本事象のアクシデントマネジメント策に対し、RELAP5 コードの計算モデルの不確かさ(10 パラメータ)を変化させた統計解析(1024 サンプル)を行い、PCT の不確かさを評価した。本研究では、この不確かさ解析を対象に、Qulacs [2]を使用して 10 量子ビットの量子回路を定義し、ランダムに選んだ 59 サンプルの RELAP5 計算を学習データに用いて、PCT の予測モデルを構築した。

**3. 解析結果** 図 1 および 2 に、学習データ(59 サンプル)および全データ(1024 サンプル)に対して、量子回路学習により評価した PCT の累積分布関数を RELAP5 計算結果と比較して示す。ここで、測定する計算基底 (Z 基底) の値域を広げる乗数を 4, 8, 10 としている。PCT の累積分布関数は、学習データに対しては、各乗数に対して RELAP5 計算とよく一致している。一方、全データに対しては、乗数が 8 のときに RELAP5 計算とよく一致している。

図 3 に、量子回路学習による 95%累積確率値を、順序統計法および 2 次回帰(Lasso 法)による評価と比較して示す。59 サンプルごとに、それぞれによる評価を行っている。量子回路学習(乗数 8)による評価は RELAP5 計算とよく一致している。

表 1 に、それぞれの評価法で 59 サンプルごとに評価した 95%累積確率値の全 17 ケースの平均値と標準偏差の比較を示す。Z 基底の乗数を適切に選択することによって、量子回路学習による評価は順序統計法や 2 次回帰(Lasso 法)による評価よりも精度がよく、バラツキが小さくなる結果が得られた。

**参考文献** [1] K. Mitarai, et. al., Phys. Rev. A 98, 032309 (2018). [2] Y. Suzuki, et. al., arXiv:2011.13524v4 (2021).

\*Ikuo Kinoshita, INSS

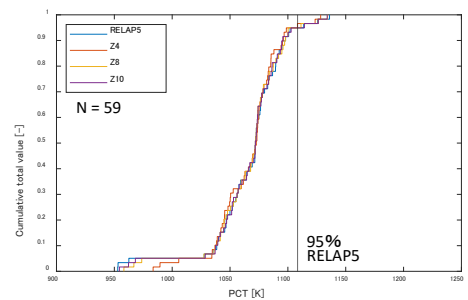


図 1 PCT の累積分布関数 (学習データ)

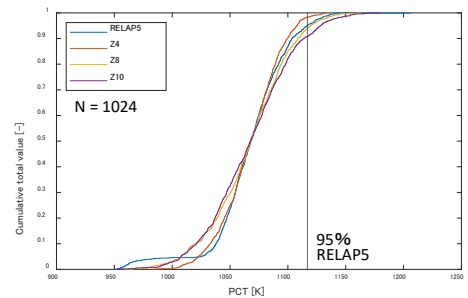


図 2 PCT の累積分布関数 (全データ)

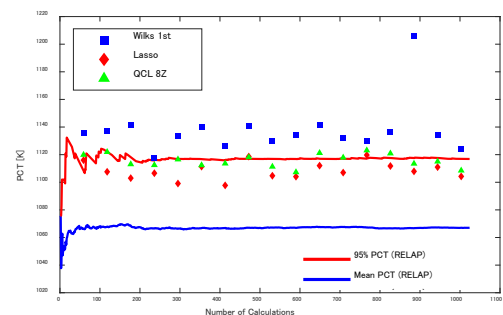


図 3 PCT 95%値の比較

表 1 PCT 95%値の評価 (17 ケースの集計)

評価法	平均値 [K]	標準偏差 [K]	RELAP [K]
順序統計法	1137.7	18.8	1116.4
2 次回帰	1106.4	6.2	
QCL 4Z	1105.1	4.6	
QCL 8Z	1115.7	4.7	
QCL 10Z	1121.8	6.7	