

シビアアクシデント時格納容器ベント操作に対するベイズ的最適化解析

Bayesian optimization analysis of containment venting strategies in a severe accident

*鄭嘯宇¹，石川淳¹，丸山結¹

¹ 日本原子力研究開発機構

ベイズ統計理論を用いた最適化解析手法を構築し、シビアアクシデントマネジメント（SAM）の一つである格納容器ベントの開閉操作を例とした試解析を実施した。その結果、格納容器外に放出される放射性物質量を抑制する条件の効率的な評価に適用できる見通しを得た。

キーワード：ベイズ的最適化解析，格納容器ベント，THALES2/KICHE コード，ガウス過程

1. 緒言 シビアアクシデント（SA）解析コードを用いて SAM 操作の最適条件を求める場合、SA 解析コードは、入力変数の陽な関数として表わすことができないブラックボックス的な目的関数となる。ベイズ的最適化手法は、このようなブラックボックス目的関数を用いる最適化を効率的に行なうことができる手法の一つである。本研究では、SA 総合解析コード THALES2/KICHE[1]を用いた格納容器ベント操作を伴う BWR の SA 解析を例に採り、ベイズ的最適化手法の応用を試みた。

2. シミュレーションによる格納容器ベント操作の最適化解析

2-1. 事故シーケンス 過渡事象に起因する TQUV シーケンスを選定した。このシーケンスでは、原子炉スクラム及び原子炉容器の減圧に成功するが、高圧及び低圧注水系の作動に失敗する。冷却機能の喪失により炉心溶融が進展し、格納容器ベントが作動しない場合には格納容器の過圧破損に至る可能性がある。

2-2. ベイズ的最適化手法・結果 格納容器ベント弁の開閉条件（ドライウェル圧力 P 及びウェットウェル内ヨウ素量 M ）及びベイズ的最適化手法に係わるモデルを表 1 に示す。本解析におけるベイズ的最適化手法[2]では、解析結果に基づいたガウス過程を用いて[3]統計予測モデルを構築し（表 1 中段）、対象とする領域において最適解となり得る入力変数を適合（Adaptive）サンプリングにより探索した（表 1 下段）。図 1 は、図中に示す数字の順序で入力変数（ P_1 及び M_1 ）を設定して 15 回解析した後には得られた予測モデルによる格納容器外へのヨウ素放出量を表わしたものである。図 2 に示すように、5 回目以降の解析結果は最小値に近い値で推移しており、通常のモンテカルロ法に比べて大幅に少ない解析回数で最適条件の範囲を算出し得ることを確認した。

表 1 格納容器ベントの操作条件及びベイズ的最適化手法に関するモデル

Logic control rules for the open/close of the wetwell venting	Vent: open when $(P > P_0) \cup ((P > P_1) \cap (M < M_1))$, close when $(P < P_1) \cup (M > M_1)$ Here, P is the drywell pressure; P_0 is 1.5 times of the design pressure of containment; P_1 and M_1 are the criteria for a venting strategy, the setting of which will be decided via Bayesian optimization.
Prediction model based on Gaussian processes	$f_* X_*, X, f \sim N(K(X_*, X)K(X, X)^{-1}f, K(X_*, X_*) - K(X_*, X)K(X, X)^{-1}K(X, X_*))$ Here, k is the covariance function between any two points, and is defined as $k(x_p, x_q) = \exp(-(x_p - x_q)^2 / 2l^2)$.
Acquisition Function	$a(X) = \kappa\sigma(X) - \mu(X)$ Here, a is used to evaluate the possibility of a point whose output may be the minimum; κ is used to control the trend of exploration (global) or exploitation (local).

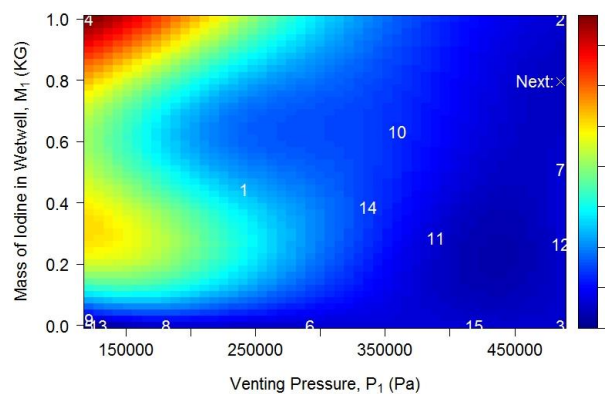


図 1 構築した 2 次元予測モデルと適合サンプリング

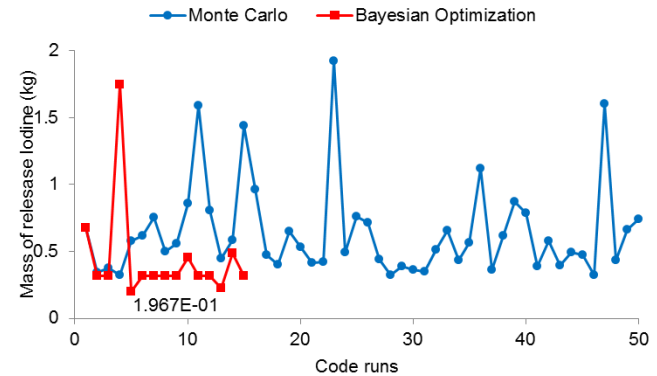


図 2 格納容器外へ放出されるヨウ素の質量

3. 結論 ベイズ的最適化手法を構築するとともに、BWR の代表的な SA シーケンスにおける格納容器ベントの開閉操作を対象とした試解析を通じて、本手法の適用性及び高効率性を確認した。

参考文献 [1] Jun Ishikawa, et al. JAERI-Research 2005-021 (2005) [2] Jasper Snoek, et al. Practical Bayesian optimization of machine learning algorithms, In NIPS (2012) [3] CE Rasmussen & CKI Williams, Gaussian processes for machine learning (2006)

*Xiaoyu Zheng¹, Jun Ishikawa¹ and Yu Maruyama¹. ¹Japan Atomic Energy Agency