



Japan Atomic Energy Agency

日本語版:

原子炉シビアアクシデント時におけるソース ターム不確かさ評価及び感度解析に関する 総合手法の開発

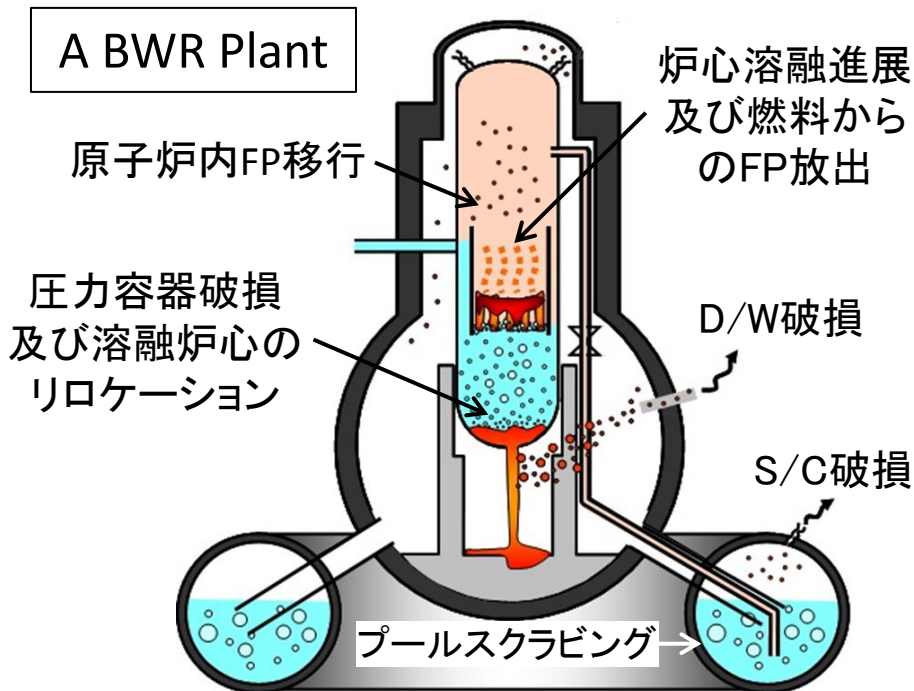
日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター
リスク評価研究ディビジョン
シビアアクシデント評価研究グループ

鄭 嘯宇 (Xiaoyu Zheng)

平成28年度 安全研究センター報告会
平成28年11月22日
富士ソフト アキバプラザ

背景

- ソースターム:シビアアクシデント(SA)時に環境へ放出される放射線物質の特性(種類、量、放出開始及び継続時間)である。
- ソースタームは原子力発電所のリスク評価(レベル2及び3PRA)及び防災計画の立案に寄与する。

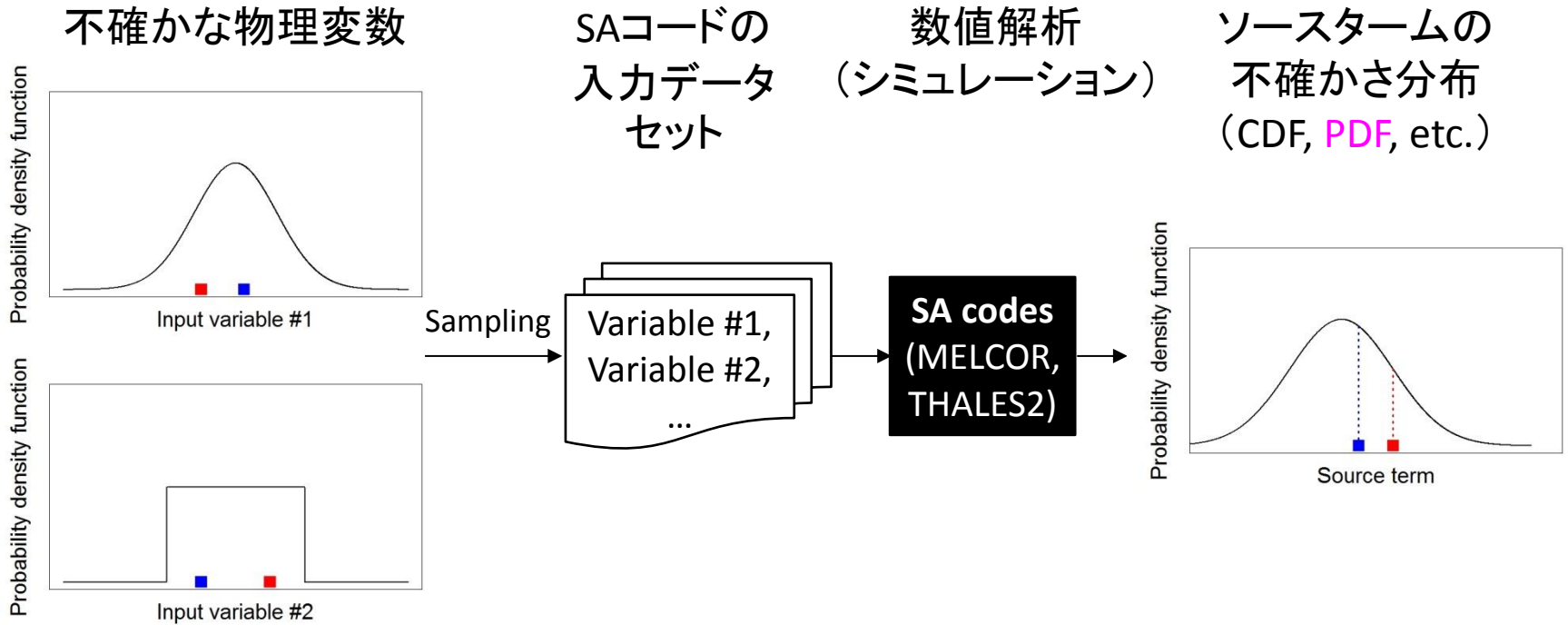


SA総合解析コード(MELCOR, THALES2)を用いたソースターム評価は、一般的に不確かさを伴う。

不確かさ評価はSA時のソースタームの“誤差”を定量的に計算する。

感度解析(Global)はソースターム不確かさの支配的な因子を同定する。

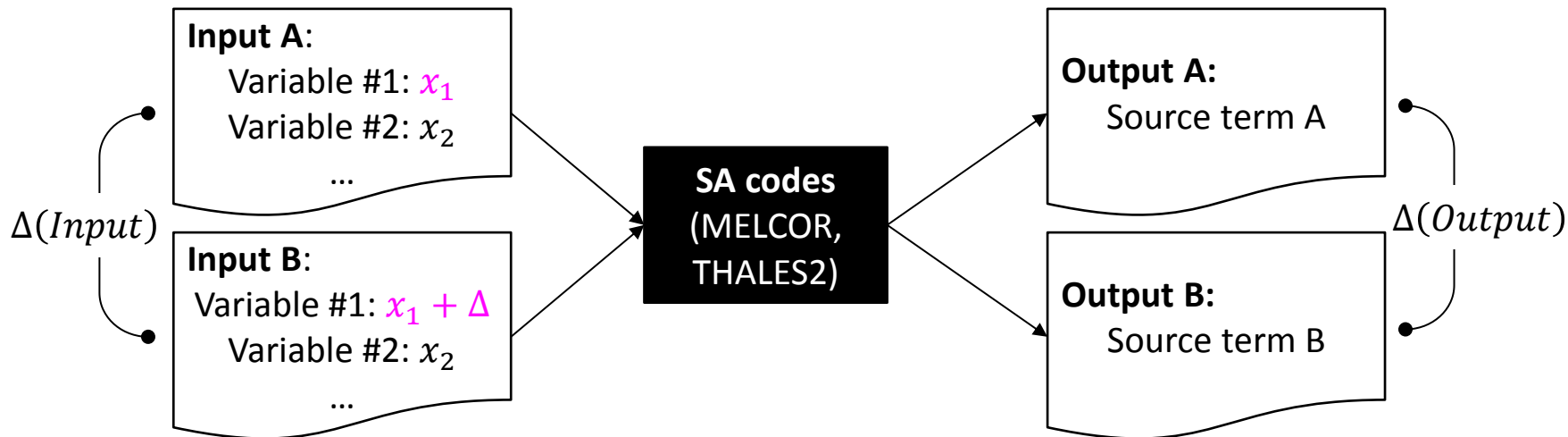
従来の不確かさ評価手法



問題点:

- 重要な物理変数(影響因子)をどのように選定するか?
- サンプルングする変数間に相関があるか?
- 何回のシミュレーションが必要になるか?

従来の感度解析手法(ローカル)



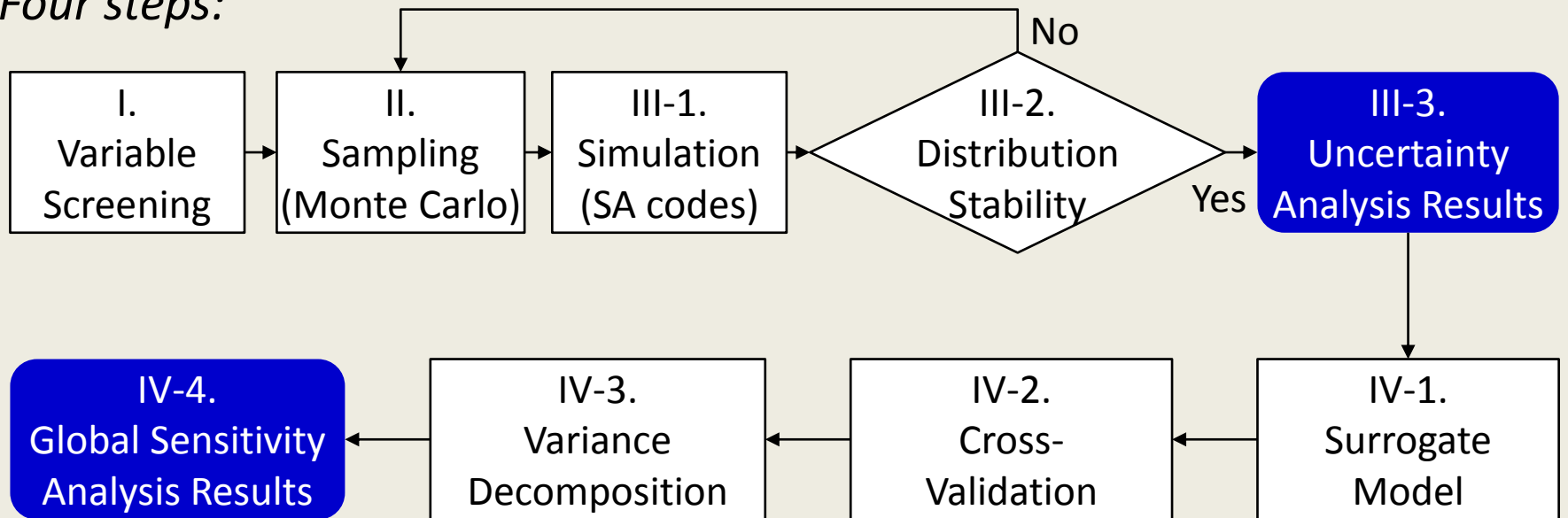
- 例: Variable #1の感度 (Local) を計算: $S_1 = \frac{\Delta(\text{Output})}{\Delta(\text{Input})} = \frac{\text{Output B} - \text{Output A}}{\Delta}$

問題点:

- インタラクション (S_1 の計算値に他の変数が及ぼす影響) を定量的に計算するためには、感度解析 (Global) 手法を適用する必要がある。

JAEAにおける不確かさ及び感度解析手法の流れ

Four steps:



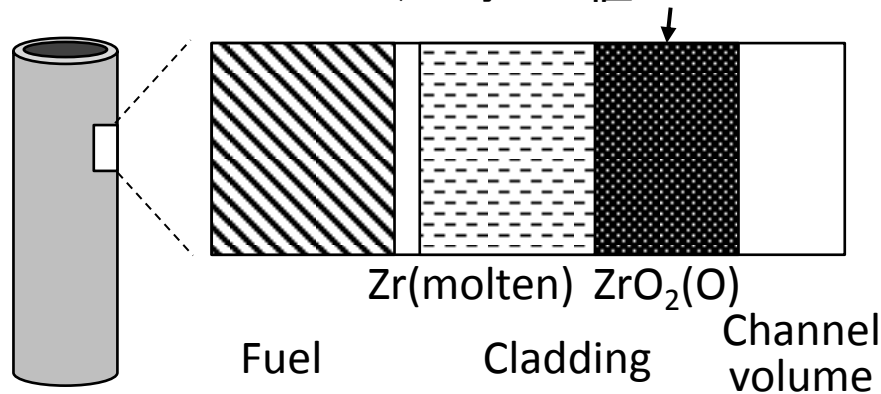
[まとめへ](#)

ソースタームの不確かさ評価

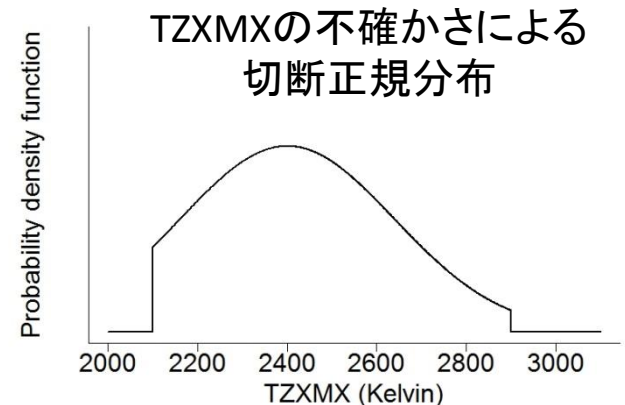
- MELCORを用い、1F2と類似のシナリオについて地震発生後100時間程度の解析を実施した(注水、SRV動作、その他の境界条件は固定)。
- 現象理解が不十分であることに起因して、SA現象に関する物理変数は不確かさを有する。これらのソースタームへの影響を調べる。

ソースタームの不確かさに大きな影響を及ぼす可能性の高い
27個の変数を選定した。

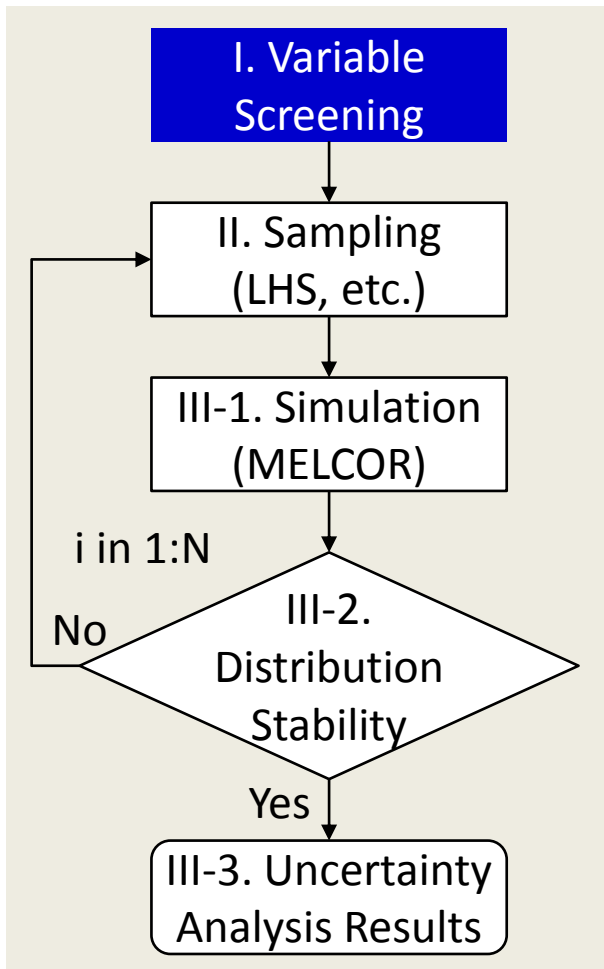
(1/27) TZXMX: 溶融 Zrを保持できる ZrO_2 の最高温度;
MELCOR デフォルト値 = 2400 K



Molten Material Holdup Model in MELCOR



I. 不確かさ評価：変数のスクリーニング

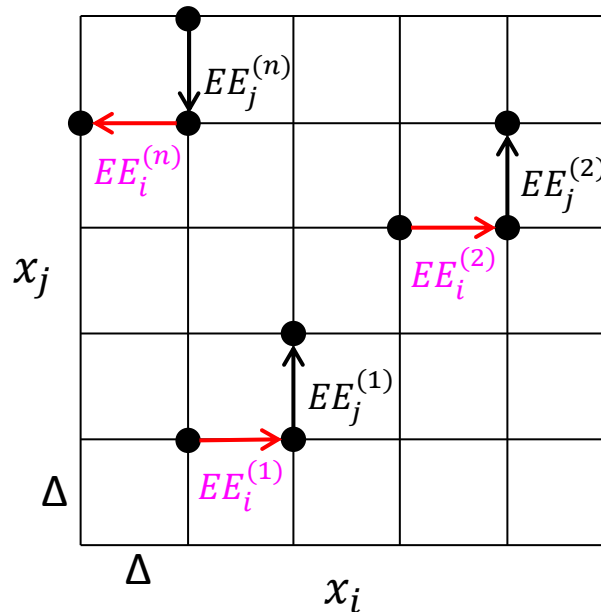


- 入力: 27 → 10 (Elementary Effect法を用いるスクリーニング過程)

Elementary effect (EE) of an input:

$$EE_i = \frac{f(x_i + \Delta, \mathbf{x}_{\sim i}) - f(x_i, \mathbf{x}_{\sim i})}{\Delta}$$

$$\mathbf{x}_{\sim i} = [x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots]$$



平均感度:

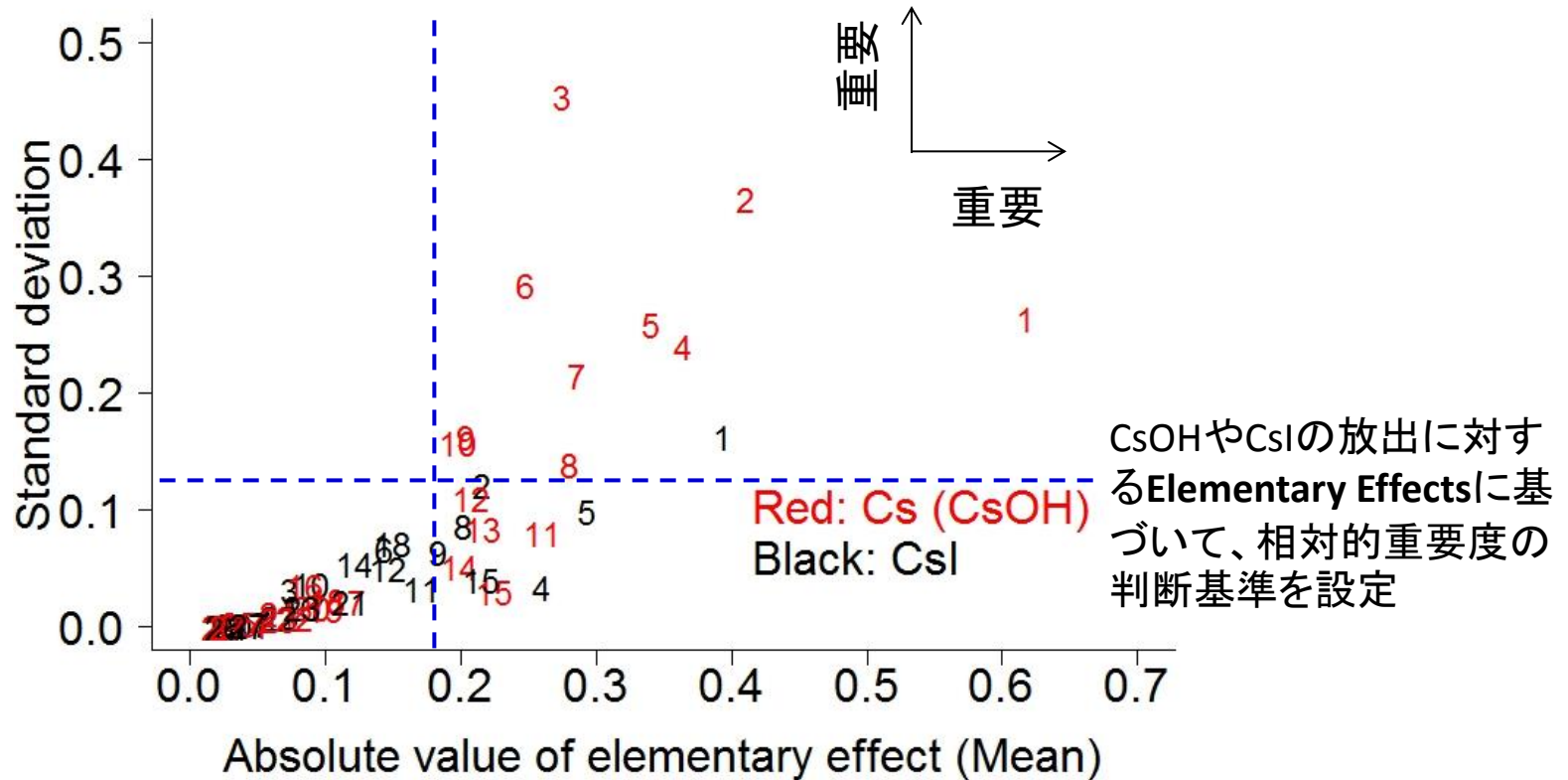
$$\mu_i = \frac{\sum_{k=1}^n |EE_i^{(k)}|}{n}$$

標準偏差 (他の変数とのインタラクション):

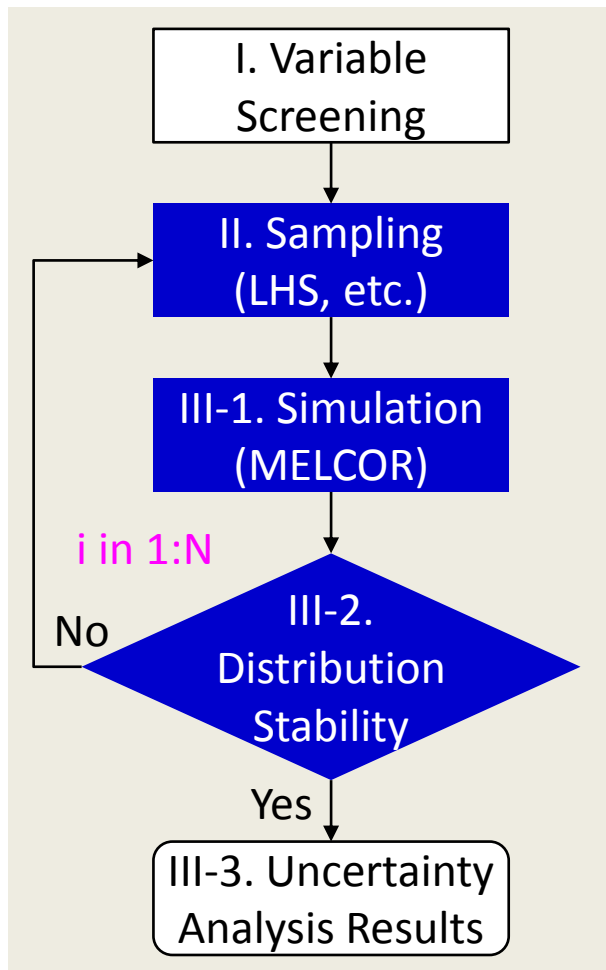
$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (EE_i^{(k)} - \mu_i)^2}{n - 1}$$

I. 不確かさ評価:スクリーニング解析の結果

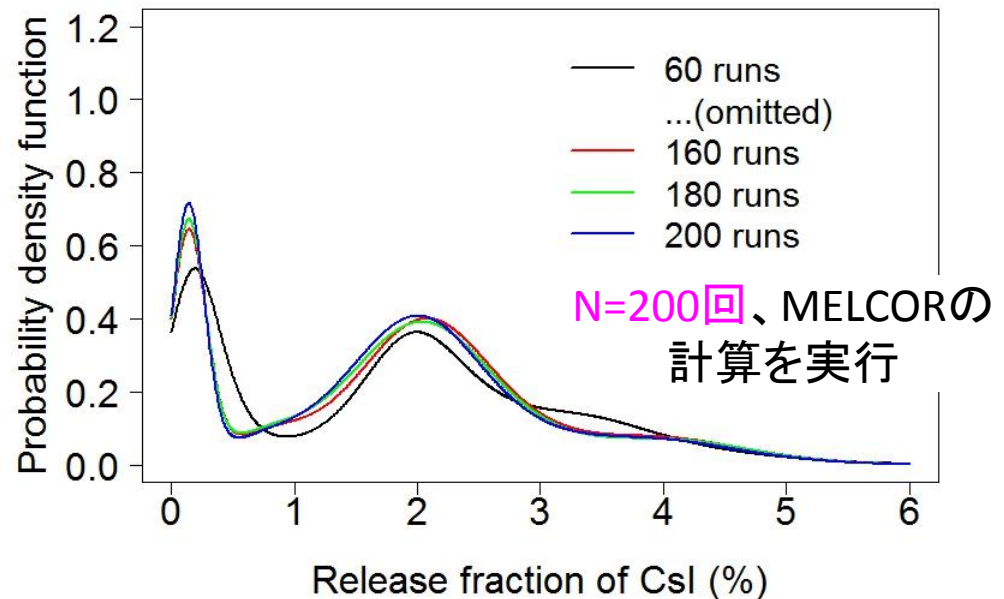
- 6回の繰り返し計算で、10個の相対的に重要な入力変数を選択した。



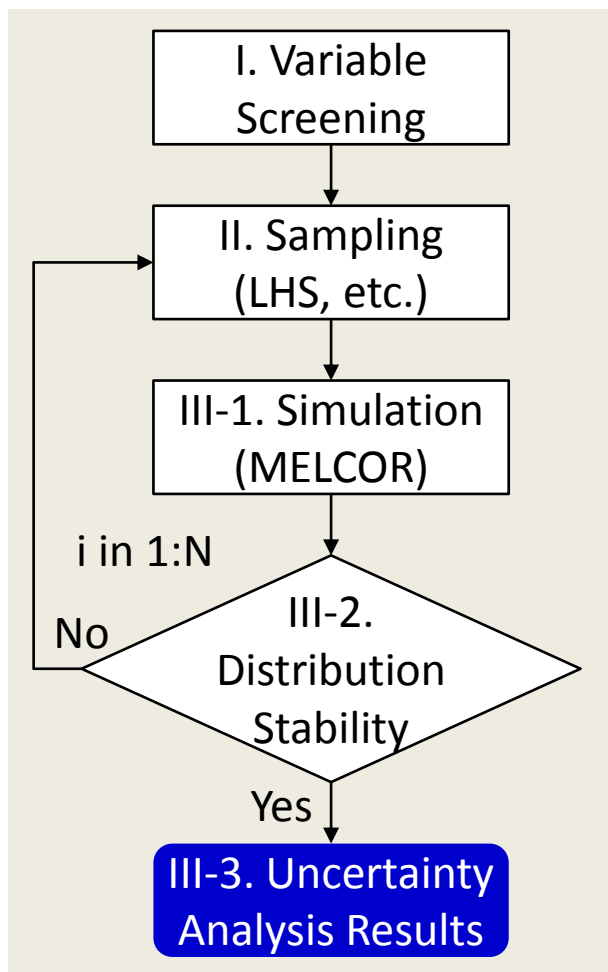
II. ~ III-2. サンプリングに基づいたソースタームの 繰り返し計算



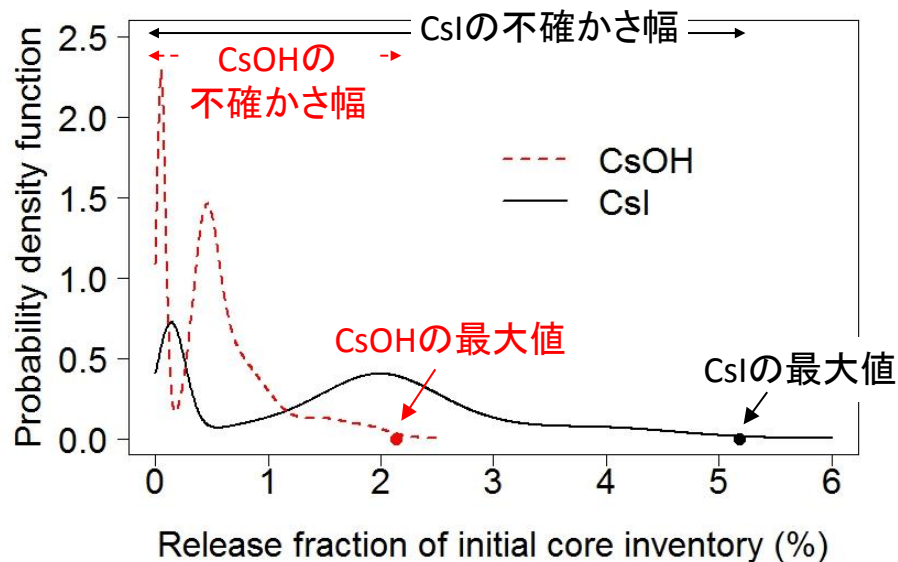
- 入力変数間の相関を考慮したモンテカルロ法(ラテン超方格法)を用い、サンプリングする。
- 計算結果の確率密度関数が収束するまで、解析を繰り返す。



III-3. ソースターム不確かさ評価の結果



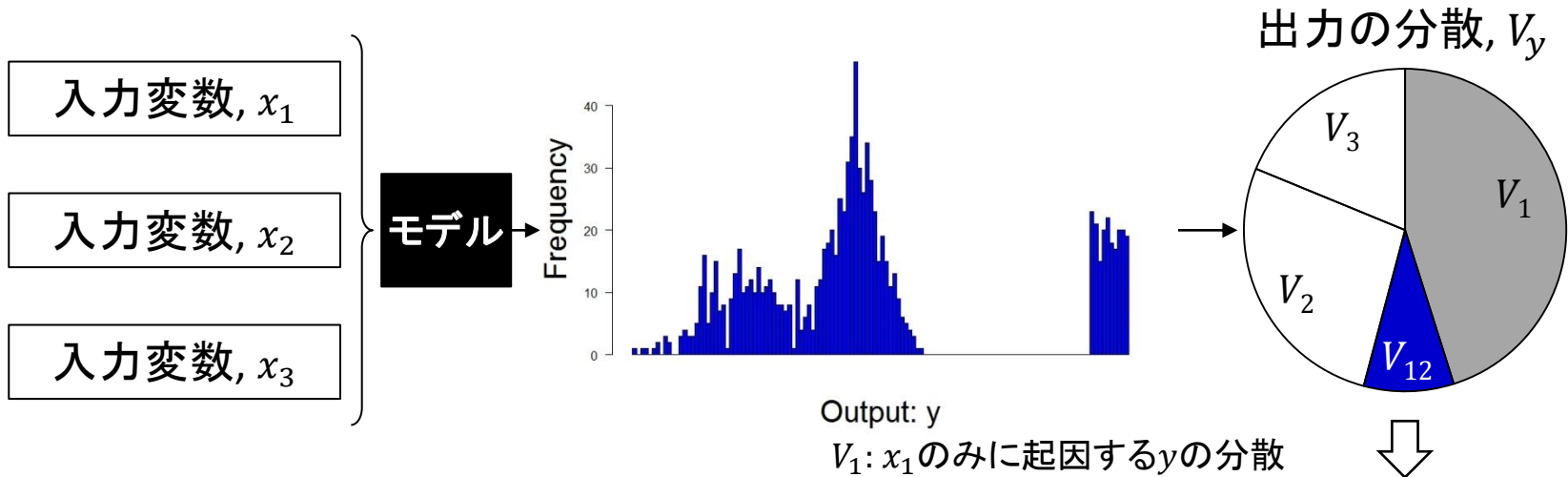
- MELCORの計算結果により、環境へ放出された代表的なソースターム (CsOH, CsI, Ba, Te) の不確かさ分布を得た。



疑問: ソースタームの不確かさに大きな影響を及ぼす不確かな入力変数は何か？

分散分解法に基づくグローバル感度解析

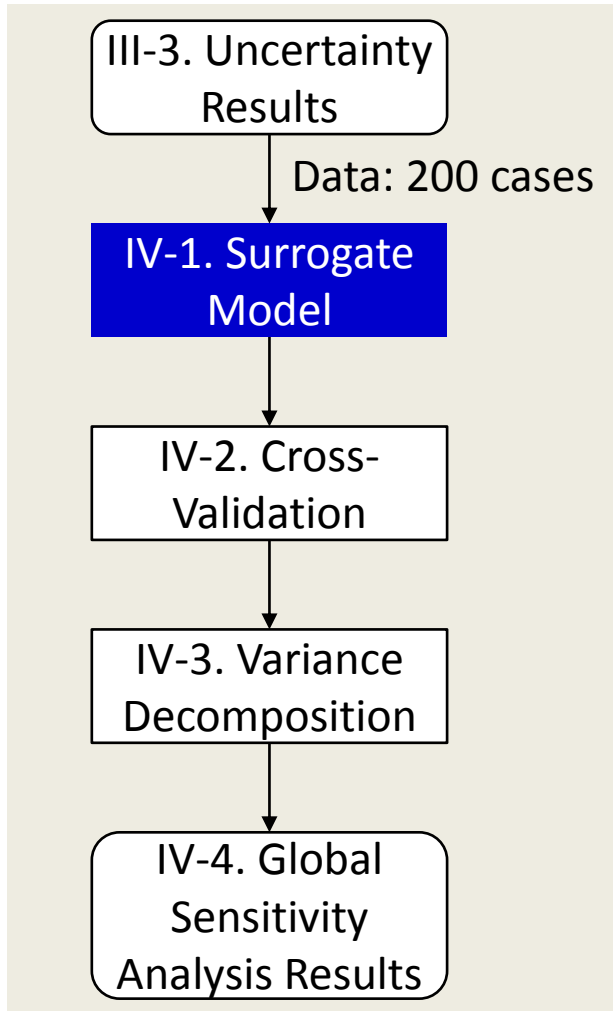
- 出力 y の不確かさ(分散)は、各入力変数に起因する出力の分散, V_i , 及び他の変数との**インタラクション**に起因する出力の分散, V_{ij} に分解することができる。



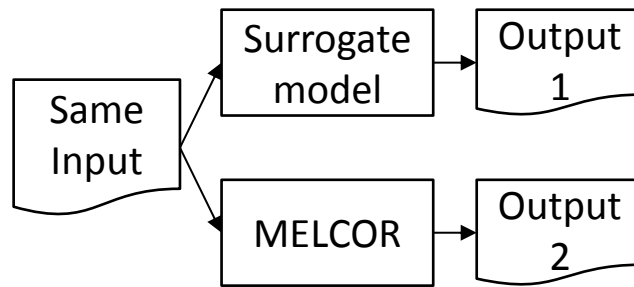
$$x_1 \text{ に対するグローバル感度指標 (SI): } SI_1 = \frac{V_1 + V_{12}}{V_y}; SI_1 > SI_2 > SI_3$$

- 高次元の入力に対して、各分散 (V_i, V_{ij}, \dots) を計算するには、**膨大な計算**が必要である。計算時間がかかるシビアアクシデント解析コードを直接使用するのは困難である。

IV-1. MELCORコードの代替統計モデル



- MELCOR結果を予測できる簡単な代替統計モデル(surrogate model)を構築して、グローバル感度解析を行う。
 - 不確かさ評価で得たMELCOR解析結果を用いて、モデルを構築する(非線形回帰)。
 - 計算時間が短い統計モデルにより、多数の繰り返し計算ができる。



基本的なロジック:

If Output 1 \approx Output 2:
MELCORの代わりに代替モデルを使う

Else:
MELCORの計算を追加し、代替モデルの精度を向上させる

IV-1. ノンパラメトリック・ベイズ法を用いた 代替統計モデルの構築

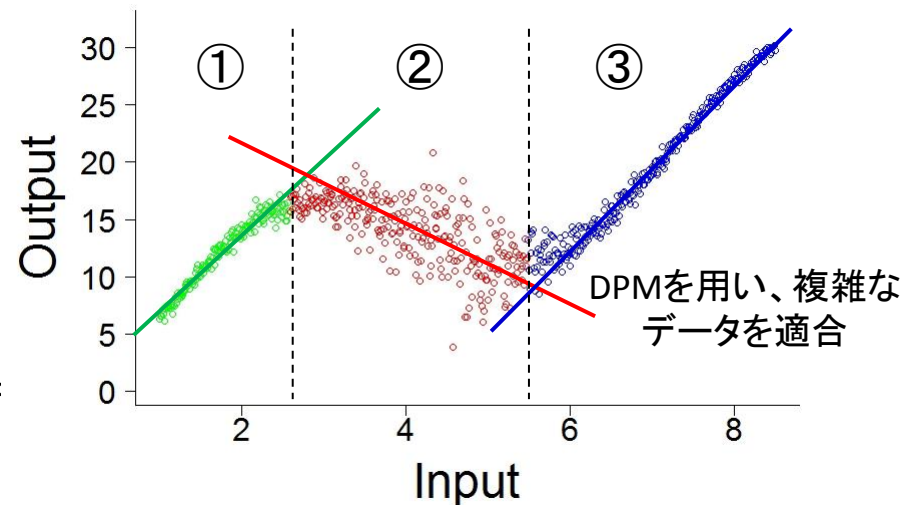
- ① 高次元のデータベースでは、入力と出力の関係を可視化できない。
- ② 代替統計モデルの予測精度が低い場合には、より多くのMELCORの計算データが必要になり、それに伴って代替統計モデルの構造が変化する。
- ③ 過剰適合や未適合を避ける必要がある。 Why do we use DPM?

➤ 無限混合モデルで回帰 (ディリクレ過程ガウス混合モデル、DPM)

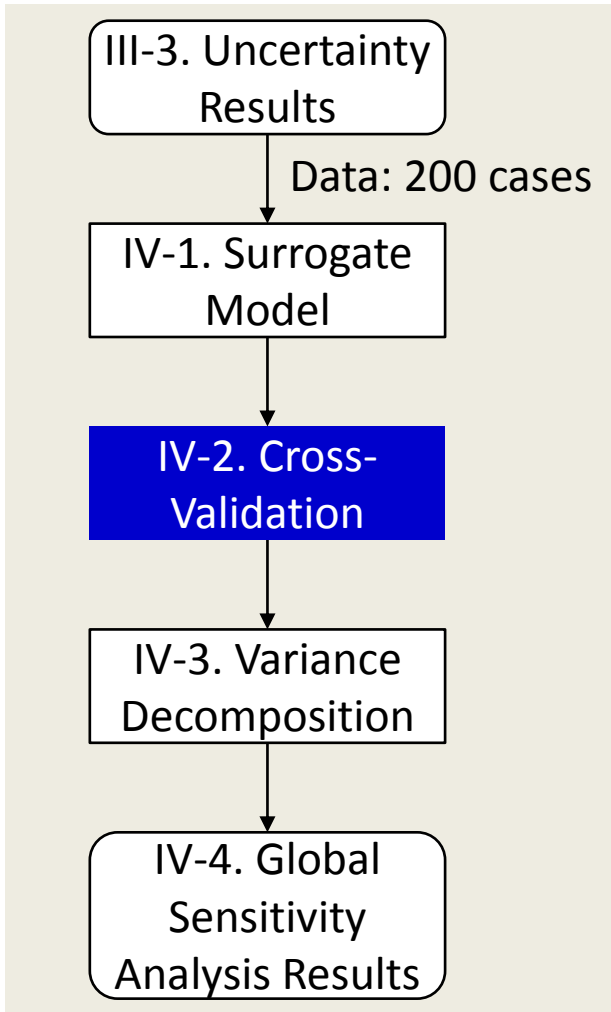
$$f(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^{K \rightarrow \infty} \pi_k(\mathbf{x}) N(\mu_k(\mathbf{x}), \sigma_k^2)$$

➤ DPMで構築した代替統計モデルは予測精度が良く、MELCORを代替できる。代替統計モデルは、新しいデータが得られた場合に、それに合わせて「改善」することができる。

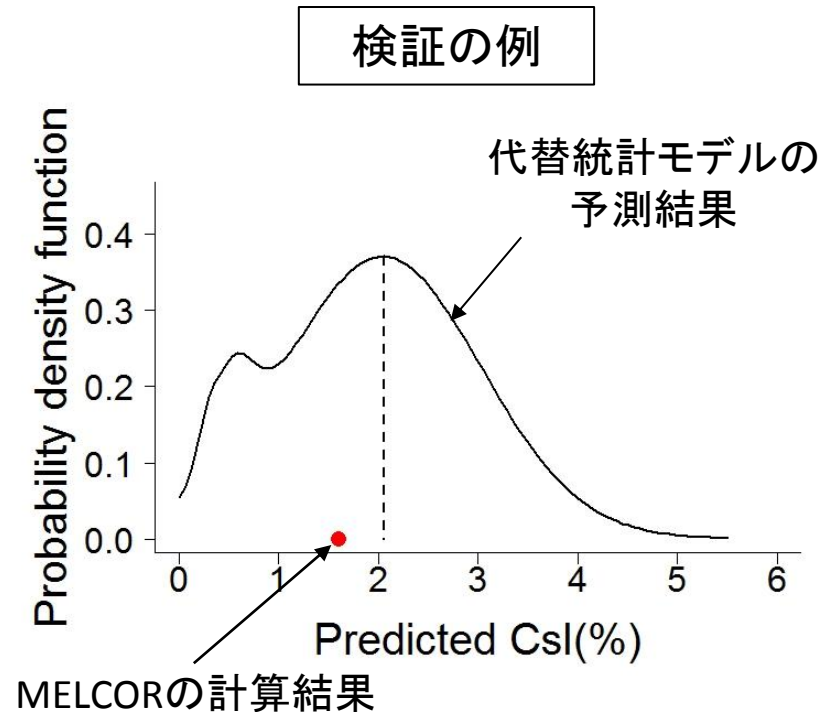
混合数 ($K = 3$) 等はMCMC Gibbs sampling法により推定できるため、事前設定などはいらない。



IV-2. 代替モデルの検証



- 不確かさ評価で得たMELCORの入力と出力セットの多く(190/200)を用いて代替統計モデルを構築し、残りのセット(10/200)でモデルの予測性を検証する。



IV-3&4. グローバル感度解析の結果

- グローバル感度指標 (SI) を計算するため、代替統計モデルを用いた繰り返し計算を21000回実行した。(MELCORでの1ケースの計算時間: 6時間; 代替モデルでの計算時間: < 1分)
- 入力変数の重要度を定量的に順位付けした。高精度でソースタームを評価するため、重要な変数とそのモデルを特定し、改良する必要がある。

| 入力変数 | SI | ランク(GSA) | 関する現象 | ランク (EE) |
|---------------|-------|----------|-------------------------|--------------------|
| TZXMX | 0.802 | 1 | Molten Zirconium holdup | 4 |
| DELDIF | 0.736 | 2 | Aerosol dynamics | 7 |
| TRDFAI | 0.725 | 3 | Fuel rod degradation | 1 |
| SC7155 (1) | 0.556 | 4 | Pool scrubbing | 3 |
| SC7160 | 0.518 | 5 | Chemisorption | 5 |
| Others (6-10) | | | | $(\mu + \sigma^2)$ |

参考文献:

- (1) X. Zheng, et al. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 53(3): 333-344 (2016)
- (2) X. Zheng, et al. *Reliability Engineering and System Safety*, 138: 253-262 (2015)

まとめ

- ソースタームの不確かさ評価及び感度解析[総合手法](#)を開発した。
- ノンパラメトリック・ベイズ法に基づいて、MELCORと同様の解析結果を与え得る代替統計モデル([surrogate model](#))を構築した。
- 代替統計モデルを用いてソースタームの不確かさに大きな影響を及ぼす因子・モデルを同定した。変数(係数)やモデルは一般にSAコードでは簡略化されるが、それらの不確かさを低減するためには一層の努力が必要である。
- 今後、本手法を、事故シナリオの不確かさ評価に適用する。代替統計モデルを含む本手法は原子力のPRA研究において非常に有効である。