

## リスク部会セッション

PRA の活用に対する課題 ー入力情報の不確かさへの取組みー  
Issues in Application of PRA -Dealing with Uncertainties in Input Information-

## 火災モデルの不確かさへの対応

## Methodology for dealing with fire modelling uncertainty

\*池 正熏<sup>1</sup><sup>1</sup>電力中央研究所 原子力リスク研究センター

## 1. はじめに

確率論的リスク評価 (Probabilistic Risk Assessment; 以下、PRA) に関連する不確かさへの取組みは、PRA による評価内容の容認性 (acceptability) を確立するため、重要な要素[1]であり、U.S.NRC の RG 1.200[2]、ASTM/ANS の PRA 標準[3]にはその容認性の重要性について記述している。さらに、PRA を意思決定に活用する場合にも、評価の不確かさを明示することが重要である。

内部火災 PRA で炉心損傷頻度の評価に影響を与えるインプットとして、火災発生頻度、火災進展の程度、リスク上重要な機器の損傷確率、運転員行動などがあり、それらは不確かさを内包している。そのうち、火災進展の程度は火災進展解析モデル (以下、火災モデル) により評価されるが、火災現象 (乱流の挙動や化学反応など) の複雑さのため、多くの認識論的不確かさが含まれる。この不確かさへの取組みとして、火災モデルの不確かさを明確に把握して、伝播させることが重要である。

本報では、原子力施設を対象とした内部火災 PRA に活用可能な火災モデルの種類や特性の概要を紹介し、火災モデルのインプットパラメータに含まれている不確かさについて説明する。また、NUREG-1824[4]に提示されている火災モデルの不確かさの定量化手法を記述して、火災モデルの不確かさの定量化結果を見せる。加えて、火災モデルの不確かさへの取組みを模索する。

## 2. 火災モデルの概要

## 2-1. 火災モデルの種類および各モデルの特性

原子力施設を対象とした内部火災 PRA を実施する上で、詳細な火災シナリオを想定した場合、熱や煙の伝播挙動などの火災性状予測が必要となる。内部火災 PRA における火災性状予測では、一般的に以下の火災モデルが用いられる。

- ・スプレッドシートモデル (以下、数式モデル)
- ・ゾーンモデル
- ・数値流体力学モデル (以下、CFD モデル)

数式モデルは基礎的な数式を用いて区画内の温度などを評価する最も簡易なモデルであり、火災 PRA に広く使われてきた。しかし、機械式換気条件下のコンパートメントについては火災性状予測の精度が低下し、火災性状の時系列計算は不可能である。

図 1 (a)に、ゾーンモデルの概念図を示す。ゾーンモデルは区画を高温の上部層 (高温ガス層) と低温の下部層に分割し、各層の火災性状 (両層の温度及び境界高さ、酸素濃度など) の時間変化を計算する数値解析モデルである。このため、ゾーンモデルは、ターゲット損傷時間 (火災感知・消火の余裕時間に相当) や火災継続時間等、内部火災 PRA において用いる統合過酷度因子等のパラメータを推定する上で有益な火災モデルである。ただし、ゾーンモデルは両層の物理量 (例: 温度) の平均値を計算する集中定数系モデルであり、水平方向の雰囲気温度や流動分布等は解析できない。

\*Junghoon Ji<sup>1</sup><sup>1</sup>Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)

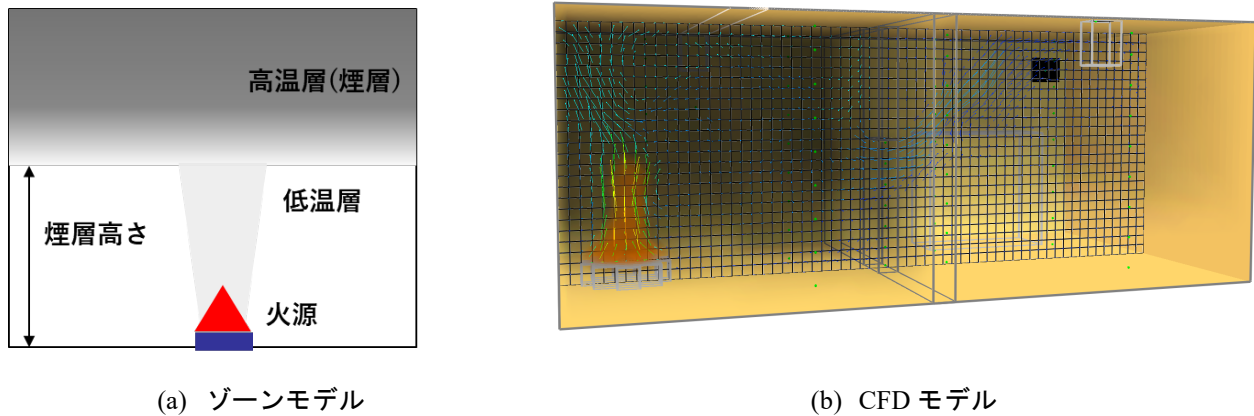


図1 ゾーンモデルと CFD モデルの概念図

また、ゾーンモデルは、一般的に区画形状は矩形を原則としているため、実機における複雑な区画形状をモデル化することはできない。複雑な区画形状を考慮して、三次元で事象進展をモデル化するためには CFD モデルが必要となる。

図1 (b)に、CFD モデルの概念図を示す。CFD モデルは区画を三次元メッシュに分割して、質量・運動量・化学種・エネルギーの保存式により火災進展挙動を時間依存で解く。このため、火災における事象進展を詳細に把握することが可能であるが、計算リソースは極めて高い。海外の内部火災 PRA においても、CFD モデルを内部火災 PRA に適用することは稀である。

## 2-2. 火災モデルのインプットパラメータとその不確かさ

火災モデルを構成しているインプットパラメータは主に次の4つのカテゴリーで分類される。

- ・燃料の種類、発熱速度などの火源情報
- ・区画寸法、開口部の寸法などの区画形状に関する情報
- ・機械式換気条件下の換気流量（換気数）、ファンカーブ特性などの換気に関する情報
- ・ターゲットの位置、ターゲットの熱的物性値などのターゲットに関する情報

火源情報のうち、代表的なインプットパラメータは発熱速度である。発熱速度は与えられた火災環境での燃料の単位時間当たりの熱発生量を意味することで、自由空間（周囲に、燃焼に影響を及ぼす物体がないオープン空間）での発熱速度の測定値を計算モデルのインプットパラメータとする場合が多い。この場合、火災モデルには発熱速度の試験的不確かさ（experimental uncertainty）が含まれる。区画形状に関する不確かさの発生は、複雑な区画の形状を簡易にして解析する場合、もしくは、図面を読み取る際に不確かさが含まれる可能性がある。同様に、換気流量、ターゲットの位置においても試験的不確かさの可能性、ファンカーブ特性情報やターゲットの熱物性値には知識不足による認識論的不確かさが含まれる可能性がある。その以外にも、モデルの仮定による不確かさや数値解析的不確かさも含まれる。

## 3. 火災モデルの不確かさの定量化

### 3-1. 火災モデルの不確かさの定量化手法

前述したように、火災モデルの不確かさは火災モデルを構成するインプットパラメータの不完全性やモデルの数値解析的不確かさに起因する。火災モデルの不確かさの定量化手法については U.S.NRC と EPRI により作成された火災モデルの Verification & Validation [4]に提案されている。

$n$ セットの計算データとそれに相応する試験データの差の平均は次式により示される。

$$\overline{\ln(M/E)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(M_i/E_i) \quad (1)$$

ただし、 $M_i$ はモデルの  $i$  番目の計算値、 $E_i$ は $M_i$ に相応する試験値である。モデルの不確かさ（モデルエラーの標準偏差、 $\tilde{\sigma}_M$ ）は次式により計算できる。

$$\sqrt{\tilde{\sigma}_M^2 + \tilde{\sigma}_E^2} \cong \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(M_i/E_i) - \overline{\ln(M/E)}]^2} \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{\sigma}_E$ は試験エラーの標準偏差である。表1に、代表的な評価項目の $\tilde{\sigma}_E$ を示す。偏向(bias factor,  $\delta$ )は次式から求められる。

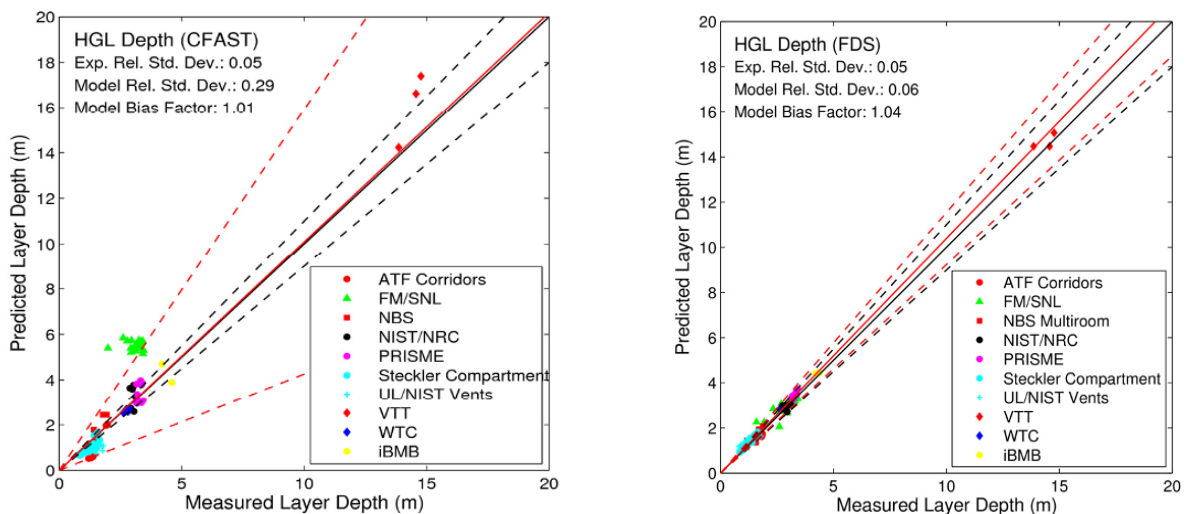
$$\delta = \exp\left(\overline{\ln(M/E)} + \frac{\tilde{\sigma}_M^2 - \tilde{\sigma}_E^2}{2}\right) \quad (3)$$

表1 試験的不確かさ、 $\tilde{\sigma}_E$  [4]

評価項目	試験的不確かさ、 $\tilde{\sigma}_E$ [%]	評価項目	試験的不確かさ、 $\tilde{\sigma}_E$ [%]
煙層などの温度	7	煙濃度	19
煙層高さ	5	圧力	23
ガス濃度	8	熱流束	11

### 3-2. 火災モデルの不確かさの定量化の例

火災モデルの評価項目の中、煙層高さはターゲットが高温のガスに漏出されるかを決定するパラメータとして、さらに、エネルギー保存式により煙層温度にも大きな影響を与えるため、重要な評価項目である。図2に、煙層高さにおけるゾーンモデルの不確かさと CFD モデルの不確かさを示す。黒い実線は試験データと計算データが完全に一致する基準線、黒い破線は基準線からの試験的不確かさ、赤い実線はモデルによる計算値の偏向、赤い破線はモデルの不確かさを意味する。ここで、評価対象になった試験データは様々な研究機関により行われた実規模火災試験データを集めたものである[4]。ゾーンモデルの場合、モデルの不確かさが29%となり、試験的不確かさ5%の約6倍になる。CFDモデルの場合、ゾーンモデルと比べてモデルの不確かさが著しく小さいことが見られる。



(a) ゾーンモデル (CFAST)

(b) CFD モデル (FDS)

図2 煙層高さにおける火災モデルの不確かさと試験的不確かさ[4]

#### 4. 火災進展解析における不確かさへの取組み

##### 4-1. 火災解析のライブラリ化

火災モデルの不確かさは、PRA の評価指標である炉心損傷頻度の不確かさに寄与するため、火災モデルの不確かさの定量化は重要なプロセスである。火災モデルのインプットパラメータの不確かさを明確にする方策として、予め火災進展挙動に係るパラメータを多様なシナリオについて定量化し、その結果をライブラリ化する方法が考えられる。これにより、条件の変動が過酷度因子に与える影響を把握することが可能となる。また、ライブラリを設定する際には、体系的に火災進展解析を実施することから、解析における User Effect を抑制する。

##### 4-2. ディープラーニング技術を用いた CFD 火災モデルの代替モデルの開発

ある評価項目（例えば、ターゲットの損傷確率）について計算する際、複数のモデルを使用（multi-modeling approach）することがより適切な場合がある[6]。最近、ディープラーニング技術の発展により、既往のモデルの代替モデルを開発する事例が多い。上述したように CFD モデルは不確かさが小さいものの、計算負荷が高いため、火災進展解析への適用事例はほとんどない。そこで、ディープラーニング技術を用いて CFD モデルの代替モデルを作成することで、CFD モデルが持つ計算精度と同等な計算結果を活用することが期待できる。図3に、火災室の温度における CFD モデルの計算結果とディープラーニングモデルの計算結果例を示す[5]。ディープラーニングモデルの結果は火源上部のプルームの傾きまでよく再現できていることが分かる。

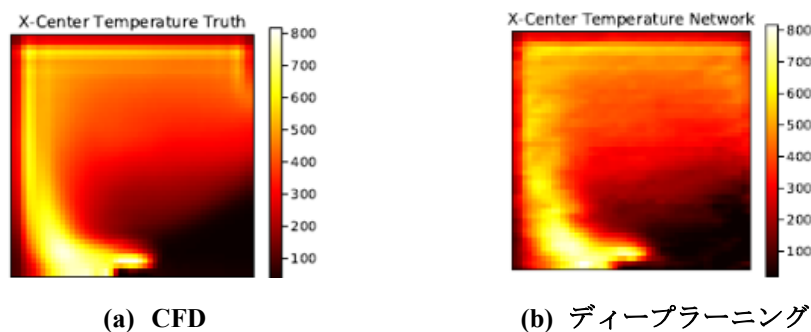


図3 火災室の温度計算結果[5]

#### 参考文献

- 1) NUREG-1855, “Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision-making”, Revision1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2017.
- 2) U.S. Nuclear Regulatory Commission, “An Approach for Determining the Technical Adequacy of Probabilistic Risk Assessment Results for Risk-Informed Activities”, RG 1.200, Revision 2, Washington, D. C., 2009 (ADAMS accession No. ML090410014).
- 3) ASME/American Nuclear Society, “Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications”, ASME/ANS RA-Sa-2009, 2009.
- 4) NUREG-1824, “Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Application”, Supplement 1, Final Report, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2016.
- 5) J.L. Hodges, “Predicting Large Domain Multi-Physics Fire Behavior Using Artificial Neural Network”, Thesis of Virginia Polytechnic Institute and State Univ., 2018.
- 6) NUREG/CR-6850, “Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities”, Vol.2, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2005.