

MAAPにおける福島第一原子力発電所事故を踏まえた 発電所安全対策設備のモデル化

Modeling of safety equipment based on Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident
in the severe accident analysis code “MAAP”

楠木 貴世志 (Takayoshi Kusunoki) *¹ 高木 俊弥 (Toshiya Takaki) *¹
中村 晶 (Akira Nakamura) *¹ 佐野 直樹 (Naoki Sano) *¹

要約 東京電力(株)福島第一原子力発電所事故を踏まえ、原子力発電所緊急安全対策ならびにシビアアクシデント (SA) 対策他として導入された設備をMAAPプラントモデルに組み込み、動作を確認した。本稿では恒設代替低圧注水ポンプによる格納容器スプレイのモデル化について説明する。

キーワード MAAP, シビアアクシデント, モデル化, 恒設代替低圧注水ポンプ

Abstract From a consideration of progression of the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, equipment introduced as power station emergency safety measures and severe accident measures were incorporated into the MAAP plant model. Then, we confirmed validation of the model. This paper describes modeling of the containment spray by the permanent alternative low pressure water injection pump.

Keywords MAAP, severe accident, modeling, permanent alternative low pressure water injection pump

1. はじめに

MAAP (Modular Accident Analysis Program) コードとは、1980年代の初めに米国FAI社 (Fauske & Associates, LLC.) によって開発され、米国EPRI (Electric Power Research Institute) が所有権を有するコードである。現在もEPRIを中心としたMAAPユーザーズグループのもとで保守及び改良が進められている。⁽¹⁾⁽²⁾

MAAPは、シビアアクシデントの事象進展の各段階を網羅し、炉心、原子炉压力容器、原子炉格納容器内で起こると考えられる重要な事故時の物理現象をモデル化するとともに、工学的安全施設や炉心損傷防止あるいは格納容器機能喪失防止で想定する各種の緩和設備についてのモデルを備えている。また、核分裂生成物 (FP) に関する物理現象をモデル化しており、事故時に炉心溶融に伴って原子炉压力容器や原子炉格納容器内に放出されるFPの挙動

についても取り扱うことが可能である。このように、広範囲の物理現象を取り扱うことが可能な総合解析コードであり、シビアアクシデントで想定される様々な事故シナリオについて、起因事象から安定した状態、あるいは過圧・過温により原子炉格納容器が機能喪失するまで計算が可能であることが特徴である。⁽¹⁾⁽²⁾

上述したように、MAAPにおいて様々な緩和設備はモデル化されているが、東京電力(株)福島第一原子力発電所事故を踏まえ、近年、日本の原子力発電所において発電所緊急安全対策ならびにシビアアクシデント (SA) 対策他として導入された設備の全ては網羅できていない。そのため、それらの設備については個々のユーザーがMAAP上で性能を設定し、場合によってはモデル化が必要となる場合もある。

本論ではこの内、モデル化の一例として、MAAP Version 4 (MAAP4) における恒設代替低

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

圧注水ポンプによる格納容器スプレイのモデル化について説明する。恒設代替低圧注水ポンプとは、余熱除去ポンプの代替として燃料取替用水タンク又は復水タンクを水源に、余熱除去系を通じて原子炉格納容器内に注水する機能、及び格納容器スプレイ系を通じて原子炉格納容器内へスプレイする機能を有するポンプである。

2. MAAPへのポンプモデル化の概要

2.1 圧力損失を考慮したポンプのモデル化

ポンプ流量は、取水源と移送先の水頭差、及びポンプのQHカーブ（流量と揚程）から決定される。MAAPにおける取水源と移送先の水頭差を式(1)、有効NPSHを式(2)に示す⁽¹⁾。

$$\text{水頭差} = \left(P2 \times \frac{VW2}{GRAV} + DZ_2 \right) - \left(P1 \times \frac{VW1}{GRAV} + DZ_1 \right) \quad (1)$$

ここで、 $P1$ は取水源の圧力、 $VW1$ はポンプ入口配管内の水の比容積、 DZ_1 は取水源からポンプ入口のエレベーション（EL）差、 $P2$ は移送先の圧力、 $VW2$ はポンプ出口配管内の水の比容積、 DZ_2 はポンプ入口から移送先までのEL差、 $GRAV$ は重力加速度を表す。

$$\text{有効NPSH} = \frac{P_a}{\rho g} + Z_i - h_{fi} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (2)$$

ここで、 P_a は取水源の圧力、 Z_i はポンプ入口から水までの高さ、 P_v はポンプ入口の水の蒸気圧、 h_{fi} はポンプ入口までの摩擦損失、 ρg は水の密度と重力加速度の積を表す。

式(1)では圧力損失の項がなく、式(2)ではポンプ入口までの摩擦損失（ h_{fi} ）を0と仮定している。つまり、MAAP4では、圧力損失が考慮されていないため、流量を過大評価してしまう恐れがある。より現実的な設定を行うためには、ポンプ揚程を圧力損失分だけ低く、必要NPSHは圧力損失分だけ高く設定する必要がある。

2.2 格納容器スプレイモデルへの反映

MAAP4では、上述したように式(1)からポンプを隔てた取水源と移送先の水頭差が計算され、計算結果とQHカーブの設定データの対応からポンプ流量が決定される⁽¹⁾。

しかしながら、MAAP4では DZ_2 を定義できる

パラメータがなく、格納容器（CV）上部区画の床面からスプレイヘッドまでの高さを表すパラメータ $ZSPA$ が DZ_2 として用いられている（図1参照）。 $ZSPA$ は水頭差の計算だけでなく、スプレイの落下高さを定義するパラメータとして使用されている。 $ZSPA$ はスプレイ使用時のCV除熱量等に影響を及ぼすと考えられることから、実際のポンプ設置位置から移送先（スプレイヘッド）までの高さとして $ZSPA$ の設定値との差は、ポンプの揚程を変更することで考慮した。

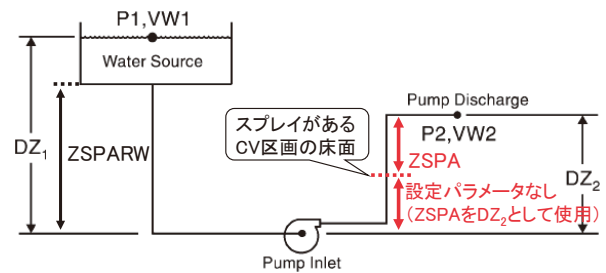


図1 MAAP4におけるモデルの概要⁽¹⁾

3. 格納容器スプレイ時のポンプのモデル化

3.1 モデル化の手順

本研究における格納容器スプレイ時のポンプのMAAP4へのモデル化は以下の手順で行う。

- ① モデル化するポンプのポンプ成績表等から、ポンプ特性（吐出し流量 [m³/s]、全揚程 [m]、必要NPSH [m]）を読み取る。
- ② ポンプの吸込み口中心のエレベーション、及びスプレイヘッドを含む格納容器上部区画床面のエレベーションを調査し、そのエレベーション差を求める。
- ③ 「2.2 格納容器スプレイモデルへの反映」で説明したように、MAAP4では $ZSPA$ が DZ_2 として用いられていることに対応するため、全揚程から②のエレベーション差を差し引いて設定する。
- ④ ポンプによる格納容器スプレイ時の機器圧損と配管及び弁類圧損を求める。
- ⑤ 実際の圧力損失は通水流量に応じて変動することになるため、評価流量に対する圧力損失の評価値が1点しかない場合、圧力損失が流量の2

乗に比例すると仮定して式(3)でポンプデータの設定に必要な任意の設定点の流量における圧力損失を算出し(右辺第2項),ポンプの全揚程からその圧損分の揚程を差し引いて設定する。

$$\text{全揚程} = \text{全揚程}_{\text{圧損考慮前}} - \text{揚程評価値} \times \frac{\text{任意流量}^2}{\text{評価流量}^2} \quad (3)$$

- ⑥ ポンプ通水時の取水源からポンプ吸込口までの配管圧損合計を求める。
- ⑦ 実際の圧力損失は通水流量に応じて変動することになるため,評価流量に対する圧力損失の評価値が1点しかない場合,圧力損失が流量の2乗に比例すると仮定して式(2)でポンプデータの設定に必要な任意の設定点の流量における圧力損失を算出し(右辺第2項),ポンプの必要NPSHにこの圧損分を加えてポンプデータとして設定する。

$$\text{NPSH} = \text{NPSH}_{\text{圧損考慮前}} + \text{NPSH評価値} \times \frac{\text{任意流量}^2}{\text{評価流量}^2} \quad (4)$$

3.2 恒設代替低圧注水ポンプのモデル化

以下,恒設代替低圧注水ポンプのモデル化について説明する。但し,本論のポンプ特性,機器のエレベーション,圧力損失,及び解析結果は仮の値とする。

- ① ポンプ成績表(図2参照)からポンプ特性(吐出し流量[m³/h],全揚程[m],必要NPSH[m])を読み取った結果,表1に示す値であった。
- ② 恒設代替低圧注水ポンプの吸込み口中心のエレ

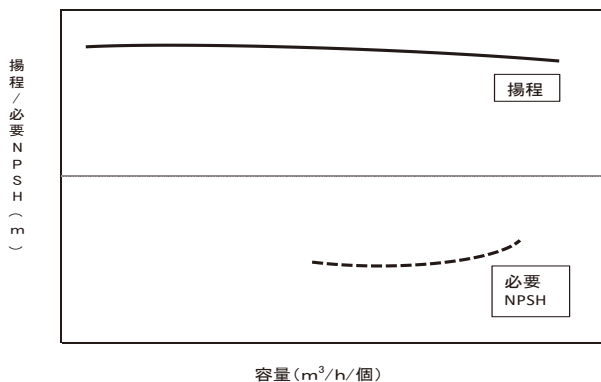


図2 ポンプ成績表

表1 恒設代替低圧注水ポンプのポンプ特性

流量 [m ³ /h]	全揚程 [m]	必要NPSH [m]
0	200	5
100	170	5
120	160	7
140	155	8
160	150	10

ベーションが10 mである。一方,MAAPプラントモデルでスプレイヘッダを含む格納容器上部区画床面のエレベーションは25 mに設定されており,それらのエレベーション差は15 mであった。

- ③ MAAP4のスプレイモデルを実機計算と整合させるために,全揚程から15 mを差し引いて設定した(表2参照)。

表2 MAAP4のスプレイモデルを考慮したポンプ特性

流量 [m ³ /h]	全揚程 [m]	必要NPSH [m]
0	185	5
100	155	5
120	145	7
140	140	8
160	135	10

- ④ 恒設代替低圧注水ポンプによる格納容器スプレイ時の機器圧損と配管及び弁類圧損の合計は,50 mであった(表3参照)。この時の評価対象の流量は100 m³/hであった。

表3 格納容器スプレイ時の圧力損失

項目	必要揚程 [m]
機器圧損	10
配管及び弁類圧損	40
合計	50

- ⑤ ④の評価対象の流量は1点であったため,式(3)を用いて必要な任意の設定点の流量における圧力損失を算出し,全揚程から差し引いて,表4となった。
- ⑥ 図面などを調査した結果,ポンプの流量が120 m³/h通水時に,取水源からポンプ吸込口までの配管圧損合計は5 mであった。

表4 全揚程に圧力損失を考慮したポンプ特性

流量 [m ³ /h]	全揚程 [m]	必要NPSH [m]
0	185	5
100	105	5
120	73	7
140	42	8
160	7	10

- ⑦ ⑥の評価対象の流量は1点であったため、式(4)を用いて必要な任意の設定点の流量における圧力損失を算出し、ポンプ単体の必要NPSHに圧損分を加え、表5のように設定した。

表5 必要NPSHに圧力損失を考慮したポンプ特性

流量 [m ³ /h]	全揚程 [m]	必要NPSH [m]
0	185	5
100	105	8.5
120	73	12
140	42	17.8
160	7	22.8

4. 動作確認

モデル化した恒設代替低圧注水ポンプによる格納容器スプレイが意図した通りに動作するか確認を行った。

事故シナリオは、大破断LOCA (10インチ) 発生+非常用炉心冷却装置 (ECCS) 注入失敗+格納容器スプレイ不作動とし、事象発生7時間後に恒設代替低圧注水ポンプによる格納容器スプレイを開始し、10時間後に停止するように設定した。

図3に格納容器スプレイ流量と圧力の解析結果を

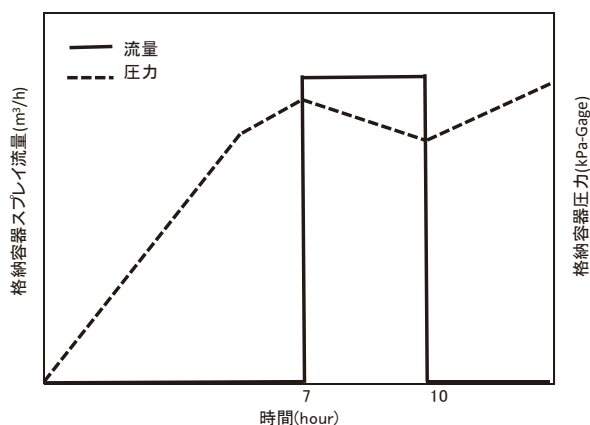


図3 格納容器スプレイ流量と圧力

示す。図3に示すように、制御フラグで恒設代替低圧注水ポンプによる格納容器スプレイの起動・停止が意図した通りに切り替えられている。

5. まとめ

本論では、発電所緊急安全対策ならびにシビアアクシデント対策他として導入された、恒設代替低圧注水ポンプによる格納容器スプレイをMAAP4に組み込み動作確認を実施した。その際、以下の点を踏まえてモデル化を行った結果、制御フラグでスプレイの起動・停止が意図した通りに切り替えられていることが確認できた。

- ・ 恒設代替低圧注水ポンプによる格納容器スプレイ時の圧力損失を考慮した。
- ・ MAAP4では格納容器 (CV) 上部区画の床面からスプレイヘッドまでの高さを表すパラメータ $ZSPA$ が DZ_2 として用いられている。そのため、実際のポンプ設置位置から移送先までの高さ $ZSPA$ の設定値との差を、ポンプの揚程を変更することで考慮した。

なお、本研究で組み込まれたモデルについては、関西電力(株)原子力防災訓練時のプラント事象進展シナリオ解析に活用する⁽³⁾とともに、原子力緊急時においては事象の推移を予測する事象進展解析に用いることとなる。今後もその解析結果を踏まえて様々な知見を蓄積するとともに、新たな設備が導入された場合にはその反映を行い、更なるMAAP解析基盤の充実を図る予定である。

謝辞

本研究にあたり、関西電力(株)池田浩之氏には資料収集、及び開示にご協力いただいた。ここに厚く感謝します。

文献

- (1) Electric Power Research Institute, MAAP4 Users Manual.
- (2) 東海第二発電所, 付録27 計算機プログラム(解析コード)の概要・MAPP, 工事計画審査資料, (2018).
- (3) 川崎郁夫, 高木俊弥, 尾上彰, 池田浩之, 平成30年度 関西電力美浜発電所原子力防災訓練のプラント事象進展シナリオ解析, 日本原子力学会2019年秋の大会, (2019).