

4-2

炉外燃料貯蔵設備の解析モデルの構築及び  
全交流電源喪失時のプラント挙動評価  
森 健郎 (プラント特性評価G r.)

要旨

炉外燃料貯蔵設備 (Ex-Vessel Fuel Storage System ; EVSS) の除熱能力を確認するため、EVSS のフローネットワーク解析モデルを構築し、全交流電源喪失 (SBO) 時のプラント挙動を評価した。解析モデルは、低流量時の圧力損失特性や伝熱特性を適切に模擬できるように設計情報や既往の研究結果を基に構築した。本モデルを用いて、SBO を想定した解析を行った結果、自然循環能力の維持が使用済燃料及び設備の健全性の維持に重要であることを確認した。

1. 研究目的

2011年3月11日に発生した福島第一原子力発電所事故では、地震発生後の津波により、非常用ディーゼル発電機が停止し、SBOとなった。もんじゅにおいても、長期のSBOは、原子炉の設計基準事象として想定されていないため、本事象の評価を実施した。本研究では、評価対象をEVSSとして、フローネットワーク解析モデルを構築し、SBO時のプラント挙動を評価することを目的としている。

2. 炉外燃料貯蔵設備の概要

EVSSは、燃料取扱い及び貯蔵設備の一部であり、主に炉外燃料貯蔵槽 (EVST) 及びEVST冷却系で構成されている。

EVSTは、たて型円筒二重容器であり、新炉心構成要素及び使用済炉心構成要素合計約250体を1次ナトリウム中に貯蔵できる。炉心構成要素は移送ポットに挿入され、6列同心円状に配置された貯蔵位置に収納される。

図1にEVST冷却系の概要図を示す。EVST内の1次ナトリウムは、崩壊熱による入熱と冷却管による除熱により変化する密度差で生じる自然循環力によって循環させている。

EVST冷却系は、2次ナトリウムを用いた独立した3系統の熱輸送系 (330kW/系統) から成り、電磁ポンプにより、強制的に循環させている。EVST冷却系には、ループ毎に空気冷却器が設置されており、2次ナトリウムの熱は、空気冷却器で外気に放出される。空気冷却器伝熱管の中心位置は、冷却管の中心位置より約13.5m高い位置にあり、また、空気冷却器の出口には、ドラフト力を得るためにダクトが設けられているため、全交流電源が喪失した場合でも、構造上は2次ナトリウム及び空気の自然循環冷却に期待できる。通常の運転は、全3ループのうち2

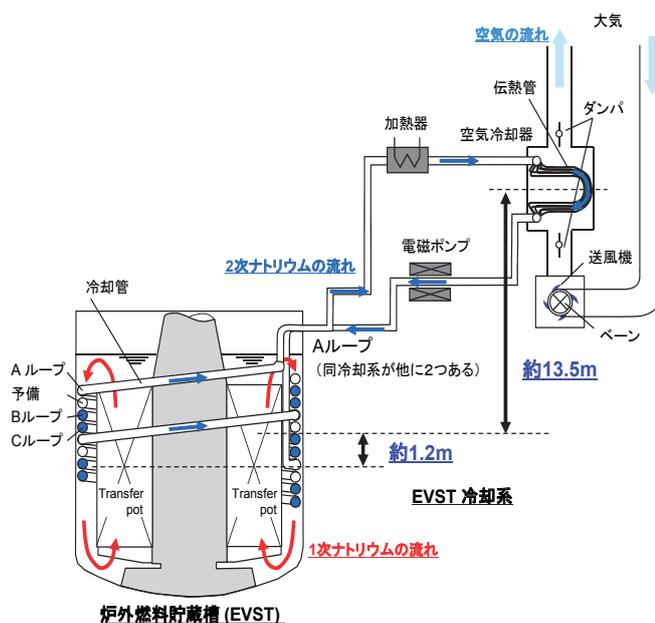


図1 EVST冷却系の概要

ループを使い、最大 660kW の熱を除去する。空気冷却器出口ナトリウム温度を  $200 \pm 5^{\circ}\text{C}$  に保つよう送風機と入口ベーン開度の調整により空気流量を制御している。残りの 1 ループは、出入口ダンパ及び入口ベーンを全閉とし、待機状態としている。

### 3. 全交流電源喪失時の事象推移

津波時の基本的な事象推移を以下に示す。

#### (1)地震発生

地震の影響で外部電源が喪失し、運転していた冷却系の機器（電磁ポンプ及び送風機）が停止する。なお、非常用ディーゼル発電機（EDG）は、「地震加速度大」信号による原子炉側のインターロックによって自動起動する。EDG 起動約 10 分後、オートピックアップにより、冷却系は地震発生前の状態に復旧される。

#### (2)EDG の停止（SBO 発生）

約 13 分後に津波による潮位低下により、原子炉補機冷却海水系の全ての系統で取水できず、EDG などに冷却水を供給することができなくなり、EDG が停止する。これにより、冷却系が再度停止する。すなわち、SBO が発生する。

#### (3)現場手動操作開始（アクシデントマネジメント）

SBO 発生 30 分後、運転していた 2 ループの入口ベーン、待機状態であった残りの 1 ループの出入口ダンパ及び入口ベーンを手動で全開にすることにより、自然循環冷却を促進させる。

#### (4)代替発電機設備起動（緊急安全対策）

約 8 時間後に、電源車の繋ぎ込みにより冷却系に電源が供給され、電磁ポンプが起動し、強制循環により、EVST 内の使用済燃料の崩壊熱は除去される。

### 4. 解析モデルの構築

炉心冷却評価に用いている 1 次元のプラント動特性解析コード Super-COPD を用いて、EVST から空気冷却器までの機器・配管等の圧力損失特性や伝熱特性を考慮した解析モデルを構築した[1]。解析モデルの概要を図 2 に示す。移送ポットは、ポット内の自然対流は考慮せず、ポット内の各部を一様に混合させた物質とし、等価物性値[2]を用いてモデル化した。EVST の上部及び下部プレナム部は、完全混合モデルと配管モデルで構成した。冷却管は、それぞれのループのヘリカル型伝熱管が、貯蔵槽の側面に約 2 周する形で設置されている。そこで、各ループ 1 周分を一つの向流型熱交換モデルとした。管外（1 次ナトリウム）側はループを区別せず伝熱管の配置の順に直列に連結し、管内（2 次ナトリウム）側はループ毎に直列に連結することでモデル化した。これにより EVST 冷却系は、3 ループを模擬し、運転想定に応じてループを切り替えることを可能とした。空

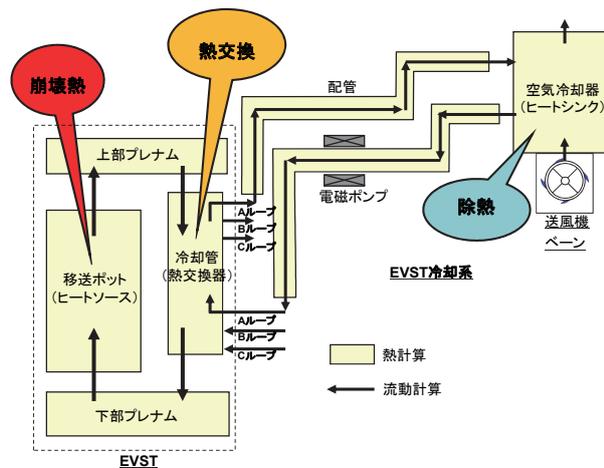


図 2 解析モデルの概要

気冷却器の解析モデルは、冷却管同様、向流型熱交換モデルを採用した。

EVST 関連の総合機能試験の中で、電磁ポンプを停止した際の運転データが収録されており、その状態を本解析モデルで解析した結果、2次ナトリウムの流量変化は運転データとほぼ一致しており、解析モデルが妥当であることを確認した。

## 5. SBO 時のプラント挙動評価

### 5.1 基準シナリオによる解析

3章の事象推移に基づき解析を実施した(基準解析 B)。また、8時間後に電源を復旧しないケースも実施した(基準解析 A)。ここでは、設計の最大崩壊熱である 660kW が貯蔵された状態を想定し、また、運転ループは B および C ループ、待機ループは A ループとする。

解析結果を図 3 に示す。地震発生から約 1 時間は、各部温度及び流量は振動的な挙動となったがそれ以降は、自然循環・自然通風の冷却が安定し、安定的な挙動となった。基準解析 A において、EVST 内の 1 次ナトリウムの流量は、初期流量約 32kg/s から約 13kg/s まで低下したが、その後約 26kg/s (定格流量の 85%) となった。EVST の高温領域のナトリウム温度は、初期温度約 230°C から約 80 時間後に約 320°C まで上昇し、それ以降は緩やかに低下した。EVST 冷却系各ループの 2 次ナトリウムの流量は、EVST 冷却系停止により初期流量約 13kg/s から約 0.7kg/s まで低下するが、ホットレグとコールドレグの温度差が大きくなり、その密度差によって生じる自然循環により、約 1.5kg/s (定格流量の 12%) となった。冷却管出口ナトリウム温度は、EVST の温度とほぼ同等の温度となり、約 80 時間後には約 320°C まで上昇し、それ以降は緩やかに低下した。空気冷却器の風量は、送風機停止により自然通風となり、初期流量約 2.0kg/s (C ループ) から、約 0.5kg/s (定格風量の約 25% (C ループ)) まで低下するが、入口ベーンを手動で全開とすることにより、両ループ約 0.8kg/s (定格流量の約 40% (C ループ)) となった。空気冷却器出口空気温度は、両ループ共に、初期温度約 160°C から約 250°C まで上昇し、それ以降は緩やかに低下した。

一方、基準解析 B すなわち地震発生後 8 時間後に冷却系を復旧する場合、EVST 冷却管入口ナトリウム温度は、約 260°C までの上昇に留まり、それ以降は緩やかに低下した。冷却管出口ナトリウム温度は、復旧直前の約 260°C から約 240°C まで低下し、それ以降は緩やかに低下した。冷却管出入口温度差は、復旧直前は B ループで約 84°C、C ループで約 83°C であるが、それぞれ約 18°C、約 16°C となる結果が得られた。

### 5.2 各種条件解析

EVSS の冷却能力に影響する要因は、自然循環力、自然循環流路及び状態監視の確保の 3 つに分類できる。これらに関連す

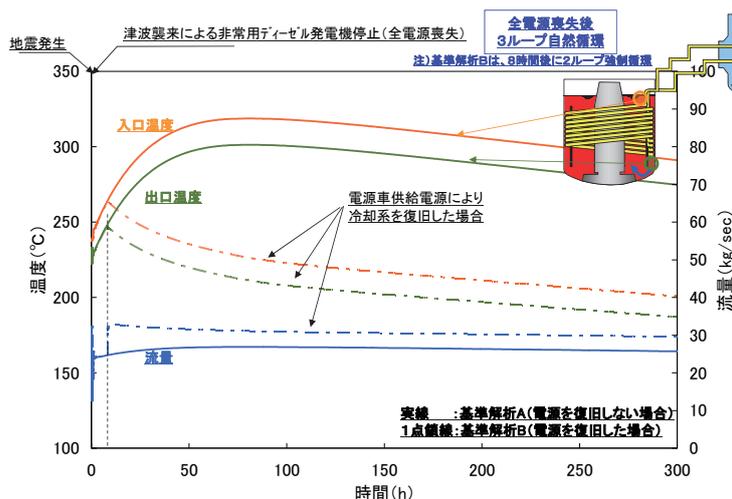


図 3 EVST 冷却管部出入口ナトリウム温度及び流量 (1 次系)

表 1 各解析ケースの各部の最高温度

るパラメータを解析条件として抽出し、感度解析を実施した。解析条件を表 1 に示す。ケース 1.1 及び 1.2 は 2 ループによる自然循環、ケース 2 は空気冷却器ベーンの手動全開 1 ループ失敗、ケース 3.1 及び 3.2 は外気温度及びケース 4 は電源車繋ぎ込みによる電源復旧後の 1 ループの制御系故障を想定した解析条件とした。

	解析条件	EVST ナトリウム最高温度	冷却系コールドレク ナトリウム最高温度	空気冷却器出口 空気最高温度
基準解析A	電源車による電源復旧無	約320℃	約220℃	約250℃
基準解析B	電源車による電源復旧有	約260℃	約230℃	約200℃
ケース 1.1	1. 冷却系統故障 2ループ自然循環冷却[660kW]	約450℃	約320℃	約350℃
ケース 1.2	1. 冷却系統故障 2ループ自然循環冷却[580kW]	約410℃	約280℃	約316℃
ケース 2	2. 機器故障 1ループ手動開操作失敗	約340℃	約250℃	約270℃
ケース 3.1	3. 気象条件 外気温度-10℃	約280℃	約200℃ (初期温度より 上昇しない)	約200℃
ケース 3.2	3. 気象条件 外気温度40℃	約350℃	約250℃	約280℃
ケース 4	4. 制御系誤動作 1ループ制御系停止	約260℃	約230℃	約200℃

各部の最高温度を表 1 に示す。最も温度が高かったケースは、ケース 1.1 であり EVST 高温領域の温度は 450℃まで上昇した。この温度を用いて別途評価した使用済燃料の被ふく管温度は、約 604℃であり、異常な過渡変化時の被ふく管最高温度 675℃を下回る結果が得られた。

6. まとめ

EVSS の過渡挙動を評価するため、本研究において新たに EVSS のフローネットワーク解析モデルを構築した。解析モデルは、冷却系の運転データとの比較により、SBO 時のような低流量時のプラント挙動を適切に評価できることを確認した。本解析モデルを用いて SBO を模擬した解析を実施すると共に、冷却能力に影響する因子を評価し、感度解析を行った結果、EVST 内のナトリウムの温度が最大となるケースでも約 450℃までの上昇に留まり、使用済燃料及び設備の健全性は維持されることを示した。本評価により、SBO 時の崩壊熱除去において、自然循環能力の重要性を明らかにすることができた。

本稿に関する投稿論文

- [0-1] Mori, et al., “Plant dynamics evaluation of a Monju ex-vessel fuel storage system during a station blackout,” ICONE20-POWER2012, 2012.
- [0-2] JAEA-Evaluation 2011-004, "地震・津波発生時の「もんじゅ」の安全確保の考え方と炉心冷却等に関する評価", 2012

参考文献

- [1] 日本機械学会, "管路・ダクトの流体抵抗", 1979
- [2] 日本機械学会, "伝熱工学資料 改訂第 5 版", 2009