

5. 原型炉安全技術 Gr.

5-1 地震・津波時の自然循環による「もんじゅ」炉心冷却性評価
 山田 文昭 (原型炉安全技術グループ)

要旨

東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、地震・津波により「もんじゅ」が全交流電源喪失 (SBO) となった場合の冷却材ナトリウム自然循環による炉心冷却性について、「もんじゅ」ナトリウム自然循環予備試験結果等により解析の妥当性を確認したプラント動特性解析コード (Super-COPD) を用いて解析した。その結果、冷却材の流路が確保されている限り冷却材の自然循環によって炉心が冷却できることを明らかにした。

1. 研究の背景及び目的

「もんじゅ」では、地震を検知して炉心内に制御棒が挿入され、原子炉が停止しても、炉心の崩壊熱があるため、この熱を確実に除去する必要がある。このため原子炉停止後は、仮に外部電源が失われても非常用ディーゼル発電機が起動し、その交流電源により循環ポンプが低速運転され、系統内の冷却材は強制的に循環される。また、蒸気発生器から2次冷却材流路を切り替えた空気冷却器を介して、炉心の崩壊熱は大気へ放散される。但し、その後襲撃する津波の規模によっては、補機冷却海水ポンプから非常用ディーゼル発電機を冷却する冷却水 (海水) が供給されなくなり、非常用ディーゼル発電機が停止し、SBOに至る。万一、このような場合でも、循環ポンプに拠らず冷却材の温度差 (密度差) によって冷却材が系統内を自然循環し、炉心を冷却できるよう、設計段階から炉心と空気冷却器は約 24m の高低差を設けている。また、炉心を冷却する空気冷却器などの安全上重要な設備は、津波の影響を受け難い海拔 21m 以上の高い位置に設置されている (図 1 参照)。

これらを踏まえ、東京電力福島第一原子力発電所事故に鑑み、「もんじゅ」において地震・津波後、SBO になった場合の冷却材の自然循環による炉心冷却性について評価した。

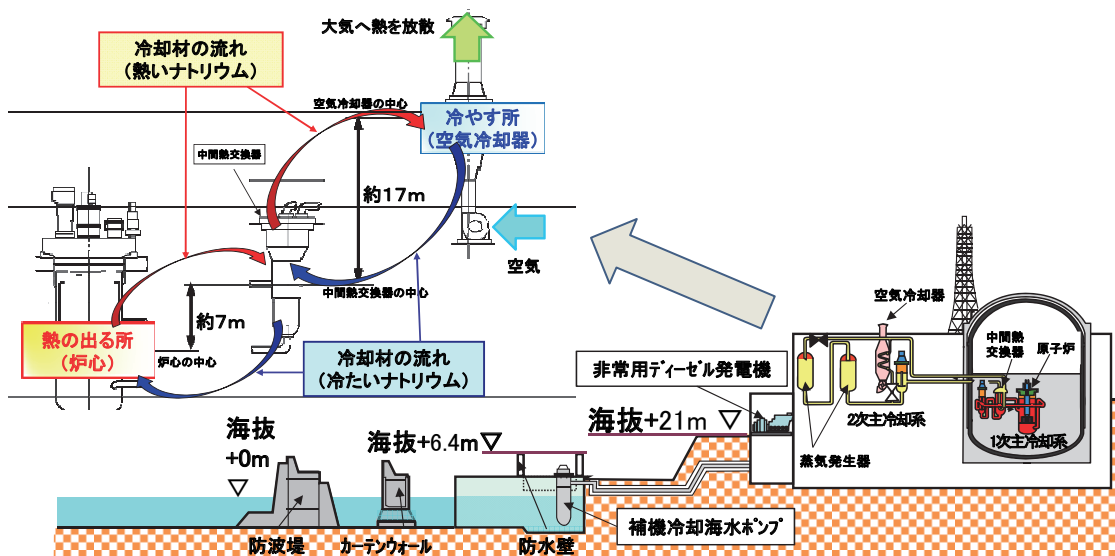


図 1. 「もんじゅ」プラントの高低差と冷却材自然循環の仕組み

2. 評価方法及び評価条件

評価方法は、地震・津波時の基本的な事象推移を設定し、この推移について「もんじゅ」自然循環予備試験結果等により解析モデルの妥当性を確認したプラント動特性解析コード（Super-COPD）^[1]を用いて炉心の冷却性を評価した。

基本の事象推移の評価条件を図2に示す。この基本ケースでは、本格運転開始直後の原子炉定格出力運転中に地震と同時に外部電源喪失が生じ、別途評価された津波が13分後に来襲することによりSBOに至ると想定した。SBO以降、主循環ポンプ及び空気冷却器送風機は停止し、冷却系は自然循環となる。自然循環は、空気冷却器出口ナトリウム温度制御系（出口ナトリウム温度の設定値になるようベーン及びダンパの開度は制御される）の動作により制御される。ベーン及びダンパ等の電源は、常設の蓄電池により給電されるが、この蓄電池の持続時間を越えた場合には緊急安全対策により配備した電源車から給電される。低温停止（1次冷却材温度250℃以下180℃以上）に至れば、復旧した非常用ディーゼル発電機1台からの給電により1ループポニーモータ運転を再開させるものとした。

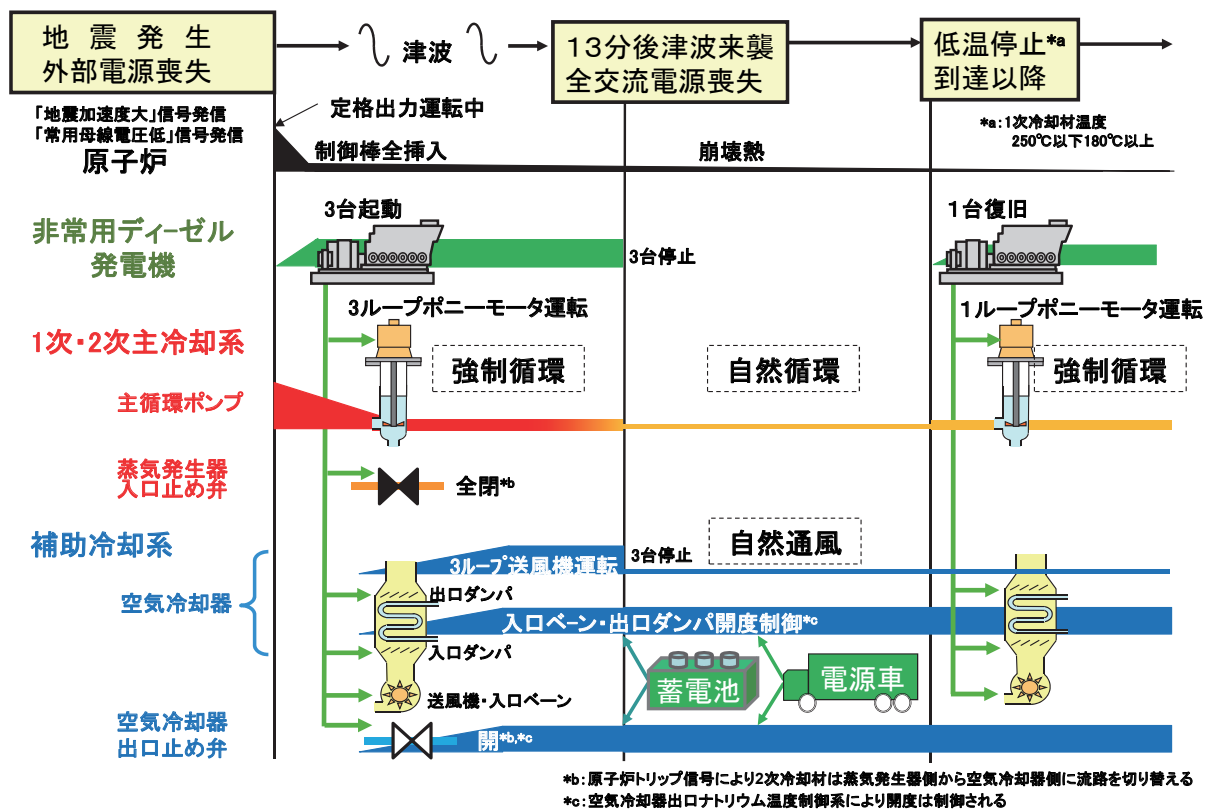


図2.地震・津波時の基本の事象推移

3. 評価結果

この基本の事象推移では、図3に示すように地震と外部電源喪失により、制御棒は炉心内に挿入され、原子炉は自動停止する。13分後、津波来襲によってSBOとなるが、炉心の崩壊熱は、1次及び2次主冷却系の自然循環、及び空気冷却器を介して大気に放散される。こ

れにより 1 次主冷却系ナトリウム温度は低温停止へ向かって緩やかに低下し、約 3 日後にプラントは低温停止に至る。なお、3 日目には、復電によるポニーモータ起動によって、1 ループが強制循環され、その後は低温停止が維持される。

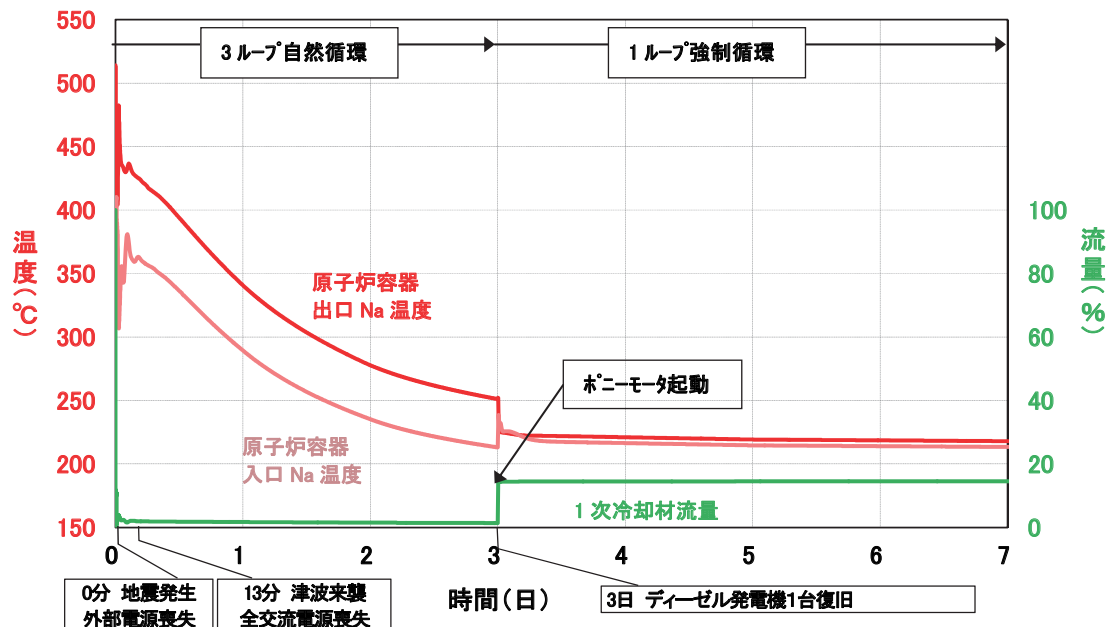


図 3.基本事象推移の冷却材温度変化(解析結果)

4. 自然循環阻害要因の系統的解析と解析評価

以上の基本的な事象推移に対し、自然循環を阻害し得る要因を図 5 に示す通り系統的に分析するとともに、抽出した要因の内、解析評価が必要なものに対して、自然循環の成立性や炉心冷却能力を確認する Super-COPD 評価を実施した。これより、以下のような結果を定量的に明確にした。

(1) 冷却能力

- ① 津波来襲時刻： 津波来襲時刻が変化した場合、9 分後に来襲する場合に燃料被覆管温度が最も高くなり、この場合でも、被覆管最高温度は高々 730°C である。本事象は設計基準を超える事象であるが、より判断基準の厳しい設計基準事象に対する安全評価の「運転時の異常な過渡変化」における被覆管肉厚中心温度 830°C 以下という基準を適用しても、この温度すら下回る (図 4 参照)。

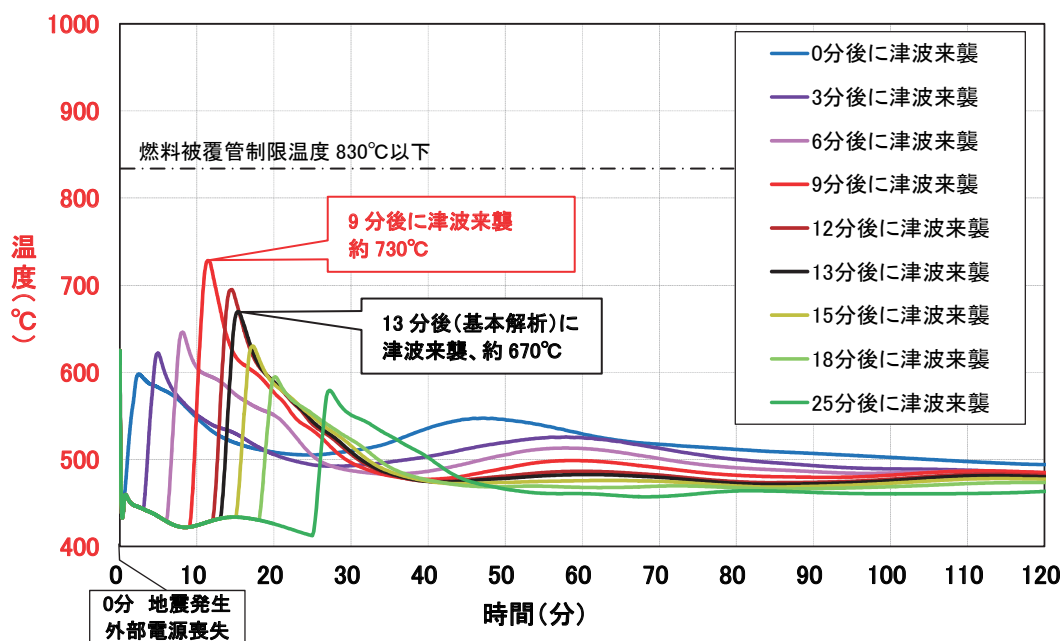


図 4.津波来襲時刻変化の燃料被覆管最高温度(解析結果)

- ② 原子炉出力(炉心崩壊熱)と外気温： 原子炉出力や空気冷却器に取り入れる外気の温度を-10°Cから 40°Cまで変化させても、上記①の判断基準以下となり、自然循環による炉心冷却により低温停止に至る。
- ③ 電源復旧： 非常用ディーゼル発電機を復旧できない場合、あるいは復旧後に再停止した場合でも、自然循環により低温停止を維持できる。

(2) 流路の確保

- ① 蒸気発生器入口止め弁故障： 万一、蒸気発生器入口止め弁が故障し、自動で閉じない場合でも、空気冷却器側への自然循環流により炉心冷却され低温停止に至る。
- ② 空気冷却器ベーン・ダンパ故障： 仮に3ループの空気冷却器のベーン及びダンパが故障し自動で開かない場合でも、現場にアクセスし約30時間までに1ループのベーン及びダンパを手動で開くことで自然循環による炉心冷却により低温停止に至る。
- ③ 予熱電源喪失： 低温停止後、予熱電源が無くとも、空気冷却器のベーン及びダンパを手動で閉とすることにより、約1ヶ月は低温停止を維持できる。

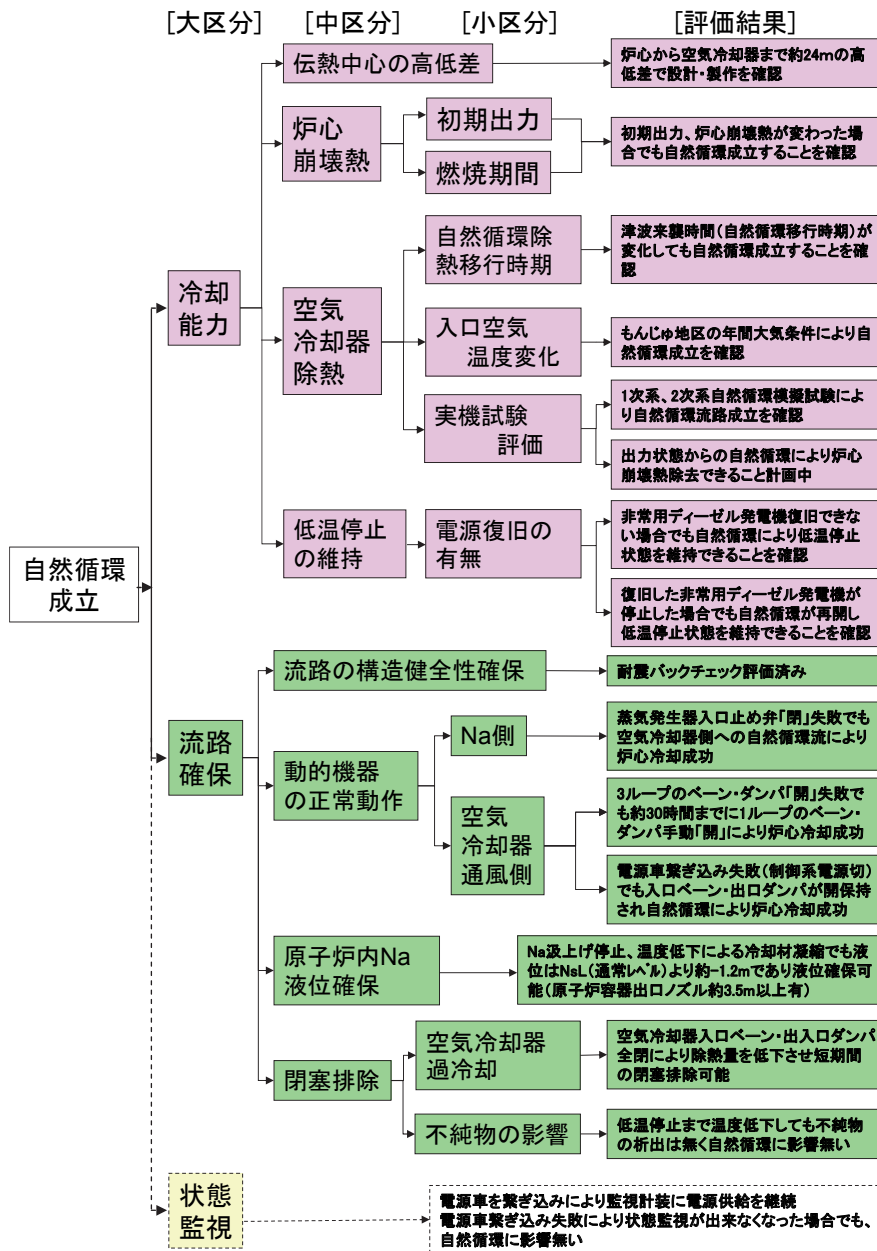


図 5.ナトリウム自然循環成立の評価結果

5. 結論

本研究は、地震・津波によって全交流電源喪失に至ったとしても、「もんじゅ」では、冷却材の流路が確保されている限り、自然循環が成立し、炉心冷却できることを示した。さらに、自然循環を阻害し得る要因を系統的に分析し、個々の要因を解析評価した結果、長期にわたって自然循環冷却が成立し、原子炉の安全が確保されることを明らかにした。

本稿に関する投稿論文

[0] FBR プラント工学研究センター他, 「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」, JAEA-Evaluation 2011-004, pp55-76 (2011 年).

参考文献

[1] Yamada, F., Ohira, H., “2010. Numerical simulation of Monju plant dynamics by SUPER-COPD using previous startup tests data”, ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting.