



「もんじゅ」発電所のプラント熱過渡 の考え方

遠藤 秀俊 工藤 文夫 動力炉建設運転本部
坂井 茂 山下 英俊 三菱原子力工業（元FBR開発本部）
柳沢 務

資料番号：54-5

The Basis For MONJU Plant Thermal Transient

Hidetoshi Endo Fumio Kudo
Shigeru Sakai Hidetoshi Yamashita
Tsutomu Yanagisawa
(Reactor Construction and Operation Project
• Formerly FBR Development Project
Presently, MITSUBISHI Atomic Power
Industries, INC)

高速増殖炉「もんじゅ」発電所の機器設備の熱過渡条件を設定するために、プラントにおいて発生する事象と、その発生する頻度に基づき分類を行うとともに、プラントの主冷却系を模擬した解析コードを用いて、プラント熱過渡上、代表的な事象の解析を行った。本報では、「もんじゅ」発電所における状態分類の基本的な考え方と、主要な解析結果のうちプラントトリップ時に関する主冷却系の温度応答の特徴について報告する。

Key Words : MONJU Plant, Thermal Transient, Operation Condition, Thermal Transient Analysis, Reactor Trip.

1. はじめに

発電用原子力設備に属する機器等は、発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令（昭和40年通商産業省令第62号）第9条の規定により、発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和55年通商産業省告示第501号、以下「告示501号」と称す。）に告示された規格に適合する必要がある。

高速増殖炉「もんじゅ」発電所（以下「もんじゅ」発電所」と称す。）に属する主要機器等は、高温のナトリウムにさらされることから、「ナトリウム冷却型高速増殖炉発電所の原子炉施設に関する構造等の技術基準」（科学技術庁安全局、以下「高速炉の構造等の技術基準」と称す。）の規定に適合する必要がある。

高速炉の構造等の技術基準は、告示501号に準拠して作成されたものであり、構造の規格に適合させるための考え方は、基本的には告示501号と変わらない。したがって、原子炉施設に対して運転状態を考え、それに対して構造設計を行うという基本的考

え方は、高速炉の構造等の技術基準においても同じである。

本稿においては、この様な要求事項に対し、「もんじゅ」発電所の設計においてどの様に对应し、プラント熱過渡へ結びつけたかについて述べることにする。

2. 「もんじゅ」発電所における運転状態分類

「もんじゅ」発電所の原子炉施設に対する運転状態分類を設定するにあたっての基本方針は、次の通りである。

- (1) 状態の抽出にあたっては、通常運転時に属する事象及び発電所内の設備の単一の故障、運転員の単一の誤操作に起因して発生する異常事象を考慮し、これら事象によって引き起こされる状態を想定する。
- (2) 想定される事象は、その予想される発生頻度に応じて次の4段階及び試験状態に分類する。

- (a) 運転状態Ⅰ
 - (b) 運転状態Ⅱ
 - (c) 運転状態Ⅲ
 - (d) 運転状態Ⅳ
- (3) 実際の原子炉施設の運転状態としては種々の事態が想定されるが、事象としてはあり得ても、対象とする機器の構造設計上影響を与えないものは考慮せず、また、ある事象を、結果としてそれに似た他の事象に安全側に包含して構造設計することにより、設定する事象の数を少なくする。

各運転状態の定義は、告示501号と同じであるが、その運用も含め、以下に記す。

運転状態Ⅰ—「運転状態Ⅰ」とは、原子炉施設の通常運転時の状態をいう。別の表現でいうと、「運転状態Ⅰ」とは、計画的な運転状態又は、これらの間の計画的移行をいう。

運転状態Ⅱ—「運転状態Ⅱ」とは、運転状態Ⅰ、運転状態Ⅲ、運転状態Ⅳ及び試験状態以外の状態をいう。別の表現でいうと、「運転状態Ⅱ」とは原子炉施設の寿命程度の期間中に予想される機器の単一故障、運転員の単一誤操作等の事象によって原子炉が通常運転状態からはずれるような状態を

いう。

運転状態Ⅲ—「運転状態Ⅲ」とは、原子炉施設の故障、異常な作動等により原子炉の運転の停止が緊急に必要とされる状態をいう。別の表現でいうと、「運転状態Ⅲ」とは、発生頻度が十分に低い事象によって引き起こされる状態をいう。すなわち、運転状態Ⅱでいう機器の単一故障、運転員の単一誤操作等によって引き起こされるもののうち、その発生頻度が十分低いと考えられるものを運転状態Ⅲとして分類したものである。

運転状態Ⅳ—「運転状態Ⅳ」とは、原子炉施設の安全設計上想定される異常な事態が生じている状態をいう。別の表現でいうと、「運転状態Ⅳ」とは、発生頻度が極めて低く、原子炉施設の寿命中に起こるとは考え難い事象によって引き起こされる状態をいうが、万一発生した場合の設計の妥当性を評価するために特に設けたものをいう。

前述の基本方針に則って行った具体的な作業フローは、図1の通りである。事象の抽出にあたっては、プラントを熱源系、熱輸送系及び熱吸収系に分け、この系統ごとに、予想される異常事象の種類、たとえば、熱源の出力上昇型、下降型、あるいは、流量増大型、減少型などの類型を整理し、それに応じた

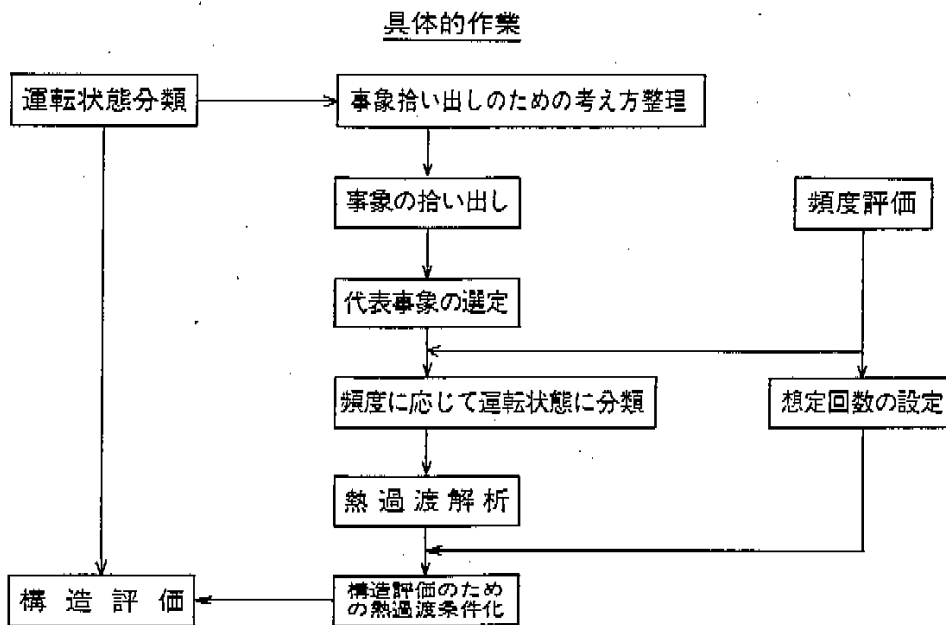


図1 運転状態分類設定と熱過渡解析のフロー

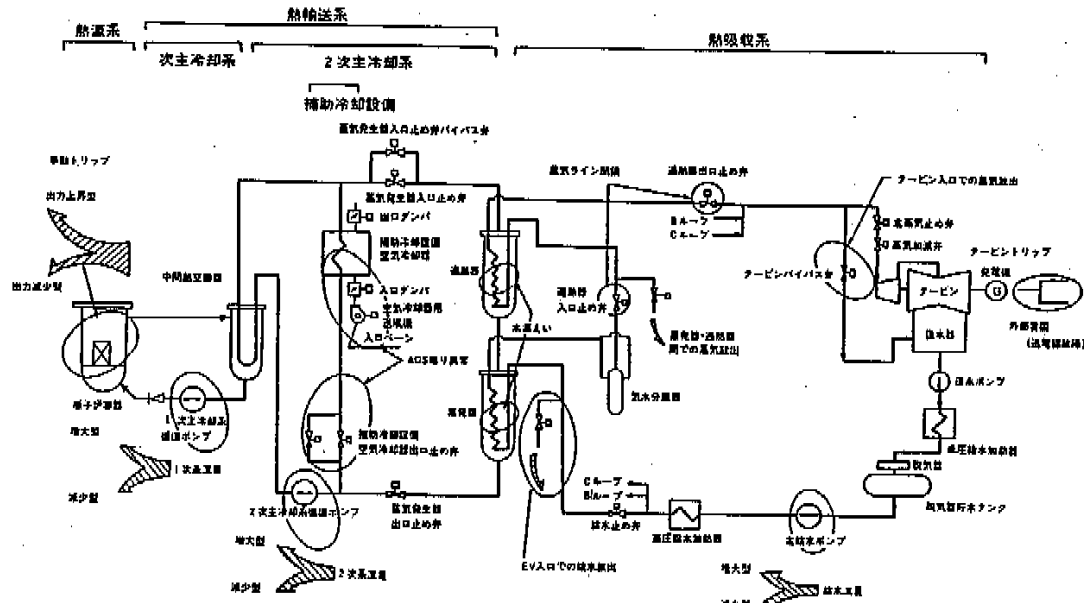


図2 異常事象の類型

異常事象の摘出を行う。異常事象の類型を図2に示す。

摘出された事象について、事象の推移を検討し、発生頻度を考慮した上で、結果として似た事象となるものごとに安全側に包含し、熱過渡の代表事象を選定する。このようにして選定された事象は、運転状態Ⅱ及びⅢに分類されたものであるが、運転の計画に、当然考慮すべき運転状態Ⅰの事象、及び安全設計上の観点から特に考慮すべき運転状態Ⅳの事象がある。それらを整理したものが、運転状態分類となる。「もんじゅ」発電所の各運転状態の例を表1に示す。

8. 熱過渡解析

2. で摘出された事象に対し、代表的な事象の熱過渡解析を実施した。以下において、プラント熱過渡で考慮されるプロセス量とその異常、及び熱過渡応答の特徴について概説する。

3.1 プラント熱過渡解析において考慮すべき条件

「もんじゅ」発電所は、通常運転時には、プラント全体が所定の熱平衡の状態になるように運転されている。その状態より大きく逸脱するとプラントトリップし、主冷却系の流量はコーストダウンし、かつ蒸気発生器と並列に設けられている補助冷却設備

表1 「もんじゅ」発電所の運転状態分類の例 (試験状態を除く)

運転状態Ⅰ	通常起動 通常停止 定常運転 出力変更 充満ドレン
運転状態Ⅱ	手動トリップ 制御棒引き抜き 蒸気器ドレン弁誤開 過熱器出入口蒸気止めの弁誤開 主給水調節弁誤開 汽水分離器ドレン弁誤開 タービンバイパス弁誤開 蒸気発生器伝熱管小破損 給水ポンプ1台停止 空気冷却器出口止めの弁誤開 部分負荷喪失 外部電源喪失 制御系異常
運転状態Ⅲ	1次冷却系循環ポンプ軸固着 2次冷却系循環ポンプ軸固着 主給水管・主蒸気管破損 蒸気発生器伝熱管破損 空気冷却器送風機起動失敗 蒸気発生器ブロー失敗 空気冷却器出口止めの弁誤開
運転状態Ⅳ	1次冷却系漏えい事故 2次冷却系漏えい事故 異常反応度挿入事故 蒸気発生器除熱能力喪失事故

に冷却流路を切り換えるとともに、補助冷却設備の送風機を起動し、崩壊熱除去運転に移行する。その際、原子炉トリップ時の熱源の喪失のため短時間に熱過渡がプラントに生じる。そのようなプラントトリップに至るような異常な事象としては、次のような分類が行える。(図2参照)

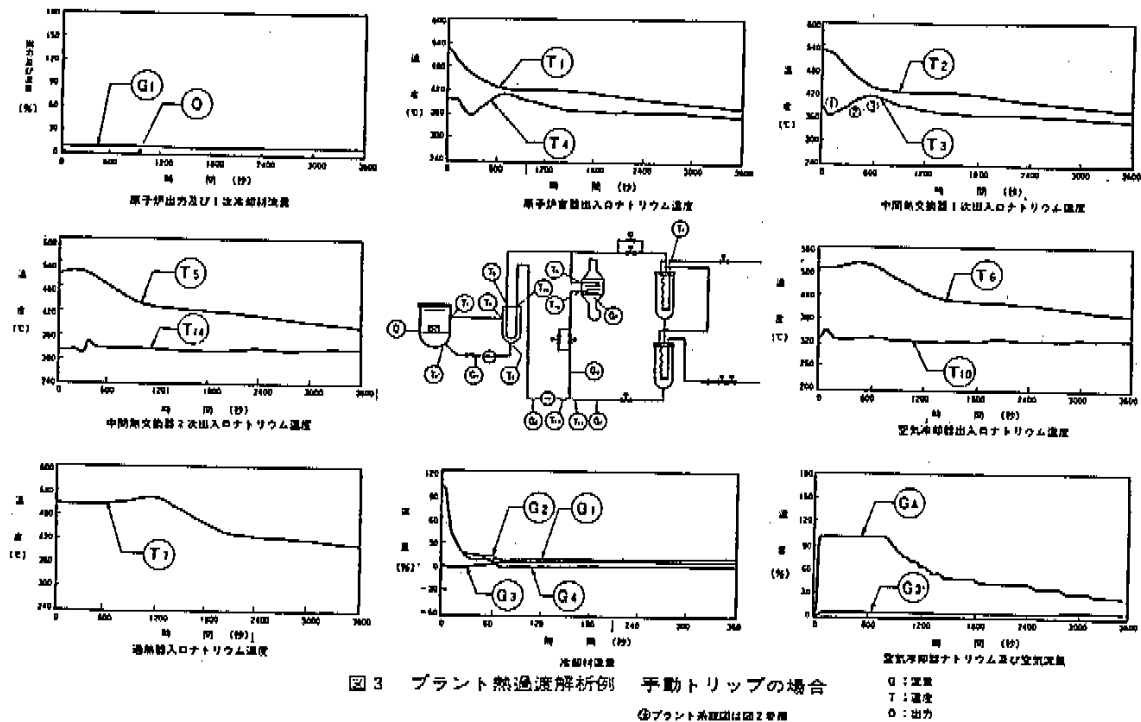


図3 プラント熱過渡解析例 手動トリップの場合

⑧プラント系図は図2参照

1) 熱源の異常

熱源の出力の上昇

熱源の出力の低下

2) 熱輸送系の異常

1次系流量増大、減少

2次系流量増大、減少

補助冷却設備の異常

3) 熱吸収系の異常

水・蒸気系流量の増大

水・蒸気系流量の減少

また、それらを検出して、所定の熱平衡の状態から大きく逸脱しようとした場合に機能する機器保護のためのインタロック回路や炉心及び冷却材バウンダリの損傷防止のための原子炉保護設備も重要な要件である。

このように熱源、熱輸送系、熱吸収系の異常により引き起こされたプラントトリップとそれに続く補助冷却設備の起動による挙動により、プラントトリップ時の温度応答は決まってくる。

3.2 「もんじゅ」発電所のプラント熱過渡の特徴

プラントトリップ時には、主冷却系循環ポンプの主モータをトリップさせることによりポンプをコールドダウンさせ、ボニーモータに引き継がせる。また、3ループの補助冷却設備を待機状態から起動し、冷

却流路を切り換えるとともに、給水を止めることにより蒸気発生器は保有水ブローに移行する。

プラント熱過渡解析結果として図3に最も標準的ケースとしての「手動トリップ」の解析結果の一例を示す。システムの流量変化、温度変化を原子炉容器、中間熱交換器、空気冷却器等ごとに示す。

プラント熱過渡を特徴づけている主な要因としては、次のとおりである。

1) 原子炉容器まわりでは、原子炉上・下部プレナムの熱容量が1次主冷却系のコールドレグより流入する熱量よりも大きいため、1次主冷却系のコールドレグの温度の影響は1次主冷却系のホットレグにほとんど現れてこない。(図3のT1及びT4を参照)

2) 中間熱交換器まわりでは、次の項目の影響が強く出てきている。

- 1次主冷却系及び2次主冷却系循環ポンプのコーストダウン特性の違い(図3の手動トリップのT3の①参照)

- 1次主冷却系及び2次主冷却系循環ポンプボニーモータ運転時の流量の違い(図3のT3の②参照)

- トリップに伴い温度が低下した原子炉容器出口ナトリウム温度の伝達(図3のT3の③参照)

3) 2次主冷却系では、次のような要因がある。

- 補助冷却設備は、空気冷却器出口ナトリウム温度

をトリップ以前の蒸気発生器出口ナトリウム温度になるように制御すること。(図3の T_{10} を参照)

- ・冷却流路切り換え後に蒸気発生器に流れるナトリウム流量が極めて少なくなるため、蒸気発生器出口ナトリウム温度がミキシングティ以降の2次主冷却系、1次主冷却系のコールドレグに伝わりにくい。

このことは、2次主冷却系のホットレグの温度変化と蒸気発生器出口ナトリウム温度変化は、空気冷却器と蒸気発生器よりのナトリウムが合流するミキシングティ以降の2次主冷却系、1次主冷却系のコールドレグにはほとんど影響を与えないことになる。(図3の T_{10} と T_{14} を参照)

このようなことから、「もんじゅ」発電所のプラントトリップ時の全体的な温度応答の特徴としては、次のようにまとめることができる。

- 1) 1次主冷却系コールドレグ温度変化の影響が1次主冷却系ホットレグの温度に強く現れない。1次主冷却系ホットレグ温度については、それらが低下する時間つまり炉心部より流出する低温ナトリウムが中間熱交換器に熱的にほぼ伝わり終るま

での時間(プラントトリップ後約20分)までは、事象ごとに温度応答の差があるが、それ以降は、各事象ともほとんど同じ温度応答を示すことになる。

- 2) 蒸気発生器回りでは主冷却系の異常によるプラントトリップ時には冷却流路を切り換えるため、主冷却系の異常が蒸気発生器に伝わりにくく、トリップを伴う事象は「手動トリップ」の事象とほとんど同じ温度応答を示すことになる。
- 3) トリップ以降の温度応答は、ループごとの2次主冷却系の配管の長さによる時間遅れはあるが、ほとんど同じような応答を示すことになり、主冷却系の温度応答の傾向はよく似てくる。

4. おわりに

「もんじゅ」発電所の熱過渡条件を設定するための基本的な事象の選定の考えかたと、その事象の熱過渡解析の結果に基づいてプラントの温度応答の特徴をまとめたが、これらの事項は「もんじゅ」発電所の機器設備の構造設計に使用するプラント熱過渡条件を合理的に、かつ、適切に作成するために反映される。