

JNC TJ9400 2001-011

大型炉心における SASS への要求条件の整理

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2001年3月

株式会社 日立製作所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2001

2001年3月

大型炉心におけるSASSへの要求条件の整理

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

糸岡聡(*), 澤田周作(*)

橋口禎郎(**), 藤又和博(**), 堂元昇(**)

要 旨

受動的安全機能の採用によってFBRにおける安全系の信頼度を向上するために、自己作動型炉停止機構(SASS)を具備する平成11年度サイクル機構設計の大型均質炉心を対象として、流量減少型スクラム失敗事象(ULOF)における冷却材最高温度に対する不確実因子の感度を安全解析コード(SAS4A)を用いて解析し、SASSへの要求条件を整理した。

その結果、SASSの切り離し温度への要求は、誤落下防止の観点から638 以上、さらに、ULOF時における冷却材沸騰防止(冷却材最高温度960 以下)の観点から666 以下となった。また、不確実因子の不確定巾の検討結果と感度解析結果を基に感度係数を定量化したところ、最大感度係数を有する不確実因子はSASS隣接集合体出口温度であり、その感度係数は $-20.5 / (1 = 6.7)$ であった。

以上の結果を基に、仮に、SASSの切り離し温度をノミナル値として666 に設計した場合でも、SASS 切り離しの非同時性を適切に考慮するとともに、本炉心における現実的な冷却材沸騰温度(1018)を炉心損傷の判断基準として適用するならば、SASSはULOFに対して最大感度を持つSASS隣接集合体出口温度換算で約3.4 の安全裕度を有するといえる。

本報告書は、株式会社日立製作所が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当部課室：大洗工学センター システム技術開発部 リスク評価技術開発グループ

*：原子力事業部 日立生産本部 燃料サイクル部

**：日立エンジニアリング(株) 電力エンジニアリング第2部

Summary of Requirements on SASS for a Large FBR Core

Satoshi ITOOKA(*), Syuusaku SAWADA(*)

Yoshiro HASHIGUCHI(**), Kazuhiro FUJIMATA(**), Noboru DOUMOTO(**)

Abstract

In order to improve the reliability of safety system of FBR employing passive safety functions, requirements on a self-actuated shutdown system (SASS) have been summarized, which employs Curie-point magnets in its safety rods, for a large homogeneous reactor core (1500MWe), which was designed by JNC in JFY1999 as one of candidates in the Feasibility Studies on Commercialized FBR System. The requirements were based on the sensitivity analyses, conducted by using the safety analysis code SAS4A, of uncertainty factors that affect the maximum coolant temperature in unprotected loss-of-flow events.

The study has given the following requirements:

1) The detachment temperature of the SASS magnet is to be set above 638 (911K) to avoid the possibility of unintended rod drop under normal operations, and to be set below 666 (939K) to prevent coolant boiling under ULOF conditions conservatively assuming a boiling temperature of 960 in the plant.

2) The parameter that has the largest sensitivity on the maximum coolant temperature under ULOF conditions is the exit coolant temperatures of the adjacent fuel assemblies to the SASS assembly, with a sensitivity coefficient of $20.5 / (1 = 6.7$ for the exit coolant temperature) .

It has been concluded based on the parametric analyses that a SASS design even with a nominal detachment temperature of 666 , the SASS has a safety margin of about 3.4 for the exit coolant temperature of the most sensitive adjacent fuel assembly in preventing coolant boiling under ULOF conditions, if the incoherency of SASS detachments are appropriately taken into account together with a more realistic criterion on the coolant boiling temperature (1018) under the ULOF conditions of this plant.

This work was performed by Hitachi,Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Nuclear System Safety Research Group,

System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

* :Advanced Reactor Engineering Section, Nuclear Systems Division, Hitachi, Ltd.

** :Nuclear Power Plant Engineering No.2 Dept. , Hitachi Engineering Co. ,Ltd.

目 次

1 . 目的及び概要	1-1
2 . 不確実因子の抽出と信頼性評価の考え方の整理	2.1-1
2.1 不確実因子の抽出	2.1-1
2.2 不確定巾に関する検討	2.2-1
2.3 信頼性評価の考え方の整理	2.3-1
3 . ULOF感度解析	3.1-1
3.1 解析条件の設定	3.1-1
3.2 非同時性の影響検討	3.2-1
3.3 パラメータ解析	3.3-1
3.4 UTOP/ULOHSについての検討	3.4-1
4 . セーフティマップの作成	4-1
5 . SASSへの要求条件の整理	5-1
6 . まとめ	6-1
7 . 謝辞	7-1
8 . 参考文献	8-1
付録 . FOSTERコードの解析モデルについて	A-1

表 一 覧 表

表2.1-1	代表性のある不確実因子の抽出結果	2.1-6
表2.2-1	制御棒に隣接する集合体の冷却材出口温度(1/2)	2.2-5
表2.2-2	制御棒に隣接する集合体の冷却材出口温度(2/2)	2.2-6
表2.2-2	SAS-4A解析結果(冷却材定常温度)	2.2-7
表2.2-3	不確定巾に対する予備的な感度解析結果	2.2-8
表3.1-1	解析対象炉心の仕様(1/2)	3.1-6
表3.1-2	解析対象炉心の仕様(2/2)	3.1-7
表3.1-3	各チャンネルに属する集合体の出力、流量(1/3)	3.1-8
表3.1-4	各チャンネルに属する集合体の出力、流量(2/3)	3.1-9
表3.1-5	各チャンネルに属する集合体の出力、流量(3/3)	3.1-10
表3.1-6	基準条件のSASS切り離し時間	3.1-11
表3.3-1	SASS切り離し温度を感度としたSASS切り離し時間	3.3-13
表3.3-2	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果	3.3-13
表3.3-3	流量半減時間を感度としたSASS切り離し時間	3.3-14
表3.3-4	流量半減時間のパラメータ解析結果	3.3-15
表3.3-5	流量半減時間の感度係数	3.3-16
表3.3-6	ドブプラ反応度係数を感度としたSASS切り離し時間	3.3-17
表3.3-7	ドブプラ反応度係数のパラメータ解析結果	3.3-18
表3.3-8	ドブプラ反応度係数の感度係数	3.3-19
表3.3-9	冷却材反応度係数を感度としたSASS切り離し時間	3.3-20
表3.3-10	冷却材反応度係数のパラメータ解析結果	3.3-21
表3.3-11	冷却材反応度係数の感度係数	3.3-22
表3.3-12	直接的要因を感度としたSASS切り離し時間	3.3-23
表3.3-13	直接的要因の感度係数の検討結果	3.3-24
表3.3-14	パラメータ解析のまとめ(各感度係数)	3.3-25
表3.4-1	UTOP解析結果のまとめ	3.4-5
表4-1	ULOF事象に対する各不確実因子の感度	4-5
表5-1	SASS切り離し温度と非信頼度の関係	5-5

図 一 覧 表

図2.2-1	検討対象炉心（MOX燃料均質炉心）	2.2-9
図2.2-2	予備的感度解析結果（SASS切り離し温度の影響）	2.2-10
図2.2-3	予備的感度解析結果（SASS初期温度の影響）	2.2-10
図2.2-4	予備的感度解析結果（SASS輸送遅れの影響）	2.2-11
図2.2-5	予備的感度解析結果（SASS 1次遅れの影響）	2.2-11
図2.3-1	SASSの信頼性評価フロ -	2.3-4
図3.1-1	SAS-4Aコード解析用炉心モデル	3.1-12
図3.1-2	ベース解析結果（各反応度、炉心出力、炉心流量）	3.1-13
図3.1-3	ベース解析結果（最短沸騰チャンネル冷却材温度）	3.1-14
図3.1-4	基準条件のSASS切り離し時間（1/2）	3.1-15
図3.1-5	基準条件のSASS切り離し時間（2/2）	3.1-16
図3.2-1	基準条件の解析結果（非同時性考慮）	3.2-3
図3.2-2	基準条件の解析結果（非同時性考慮、冷却材最高温度）	3.2-4
図3.2-3	基準条件の解析結果（非同時性無視）	3.2-5
図3.2-4	基準条件の解析結果（非同時性無視、冷却材最高温度）	3.2-6
図3.3-1	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果	3.3-26
図3.3-2	流量半減時間-1 の解析結果（SASS切り離しを考慮せず）	3.3-27
図3.3-3	流量半減時間-1 のSASS切り離し時間（1/2）	3.3-28
図3.3-4	流量半減時間-1 のSASS切り離し時間（2/2）	3.3-29
図3.3-5	流量半減時間-1 の解析結果（SASS切り離しを考慮）	3.3-30
図3.3-6	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果(流量半減時間-1)(1/2)	3.3-31
図3.3-7	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果(流量半減時間-1)(2/2)	3.3-32
図3.3-8	流量半減時間+1 の解析結果（SASS切り離しを考慮せず）	3.3-33
図3.3-9	流量半減時間+1 のSASS切り離し時間（1/2）	3.3-34
図3.3-10	流量半減時間+1 のSASS切り離し時間（2/2）	3.3-35
図3.3-11	流量半減時間+1 の解析結果（SASS切り離しを考慮）	3.3-36
図3.3-12	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果(流量半減時間+1)(1/2)	3.3-37
図3.3-13	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果(流量半減時間+1)(2/2)	3.3-38
図3.3-14	ドブプラ反応度係数-1 の解析結果（SASS切り離しを考慮せず）	3.3-39
図3.3-15	ドブプラ反応度係数-1 のSASS切り離し時間（1/2）	3.3-40
図3.3-16	ドブプラ反応度係数-1 のSASS切り離し時間（2/2）	3.3-41
図3.3-17	ドブプラ反応度係数-1 の解析結果（SASS切り離しを考慮）	3.3-42
図3.3-18	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (ドブプラ反応度係数-1)(1/2)	3.3-43

図 一 覧 表

図3.3-19	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (ドップラ反応度係数-1)(2/2)	3.3-44
図3.3-20	ドップラ反応度係数+1 の解析結果 (SASS切り離しを考慮せず) ...	3.3-45
図3.3-21	ドップラ反応度係数+1 のSASS切り離し時間 (1/2)	3.3-46
図3.3-22	ドップラ反応度係数+1 のSASS切り離し時間 (2/2)	3.3-47
図3.3-23	ドップラ反応度係数+1 の解析結果 (SASS切り離しを考慮)	3.3-48
図3.3-24	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (ドップラ反応度係数+1)(1/2)	3.3-49
図3.3-25	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (ドップラ反応度係数+1)(2/2)	3.3-50
図3.3-26	冷却材反応度係数-1 の解析結果 (SASS切り離しを考慮せず)	3.3-51
図3.3-27	冷却材反応度係数-1 のSASS切り離し時間 (1/2)	3.3-52
図3.3-28	冷却材反応度係数-1 のSASS切り離し時間 (2/2)	3.3-53
図3.3-29	冷却材反応度係数-1 の解析結果 (SASS切り離しを考慮)	3.3-54
図3.3-30	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (冷却材反応度係数-1)(1/2)	3.3-55
図3.3-31	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (冷却材反応度係数-1)(2/2)	3.3-56
図3.3-32	冷却材反応度係数+1 の解析結果 (SASS切り離しを考慮せず)	3.3-57
図3.3-33	冷却材反応度係数+1 のSASS切り離し時間 (1/2)	3.3-58
図3.3-34	冷却材反応度係数+1 のSASS切り離し時間 (2/2)	3.3-59
図3.3-35	冷却材反応度係数+1 の解析結果 (SASS切り離しを考慮)	3.3-60
図3.3-36	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (冷却材反応度係数+1)(1/2)	3.3-61
図3.3-37	SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (冷却材反応度係数+1)(2/2)	3.3-62
図3.4-1	UTOP解析結果(15度位置SASS、切り離し時間)	3.4-6
図3.4-2	UTOP解析結果(15度位置SASS、切り離し温度の影響)	3.4-7
図3.4-3	UTOP解析結果(誤引抜き位置SASS、切り離し時間)	3.4-8
図3.4-4	UTOP解析結果(誤引抜き位置SASS、切り離し温度の影響)	3.4-9
図3.4-5	UTOP解析結果(30度位置SASS、切り離し時間)	3.4-10
図3.4-6	UTOP解析結果(30度位置SASS、切り離し温度の影響)	3.4-11
図3.4-7	ULOHS解析結果(各反応度及び炉心出力)	3.4-12
図3.4-8	ULOHS解析結果(炉心部近傍温度)	3.4-13
図3.4-9	ULOHS解析結果(バウンダリ温度、SASS温度)	3.4-14

図 一 覧 表

図4-1	セーフティマップの作成方法	4-6
図4-2	SASS切り離し温度と流量半減時間のセーフティマップ	4-7
図4-3	SASS切り離し温度とドップラ反応度係数のセーフティマップ	4-7
図4-4	SASS切り離し温度と冷却材反応度係数のセーフティマップ	4-8
図4-5	SASS初期温度とSASS輸送遅れ時間のセーフティマップ	4-8
図4-6	SASS 1 次遅れ時間とSASS輸送遅れ時間のセーフティマップ	4-9
図5-1	SASS切り離し温度と非信頼度の関係	5-5

1. 目的及び実施内容概要

1500MWeクラスの大型炉心における代表的な原子炉停止機能喪失事象（ATWS：Anticipated Transient Without Scram）に対する自己作動型炉停止機構（SASS：Self Actuated Shutdown System）の有効性に関する評価は、ATWSが設計基準外事象に位置付けられることから設計値としてノミナル値を用いたノミナルベースの解析・評価を基本としている。しかし、SASSを期待することによりATWSを炉心損傷の代表的な要因から排除するためには、SASSがATWSの各事象に対して適切な裕度を持って炉心損傷を回避する性能を有していることを確認しておく必要がある。

本書は、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構と略す）大洗工学センターが中心となって進めているFBRサイクル実用化戦略調査研究（以下、FBR実用化戦略と略す）に資するため、ナトリウム冷却型大型炉心における安全系極限化を念頭に置いて、流量減少型スクラム失敗事象（ULOF：Unprotected Loss of Flow）を想定した場合におけるSASSへの要求条件を整理した成果をまとめたものである。

2. 不確実因子の抽出と信頼性評価の考え方の整理

SASS は、誤落下防止及び過渡時に炉心燃料の健全性を保持するための切り離し温度の観点から温度感知合金の材質及び感知温度応答特性が決定される。ここで、SASS の切り離しの有効性に対して影響を及ぼす直接的要因は、SASS の温度応答特性（冷却材輸送遅れ、感知合金温度の1次遅れ）である。また、SASS の温度応答に対して影響を及ぼす間接要因として、ULOF 時の炉心出口冷却材温度上昇が関与する。この、冷却材温度上昇は、冷却系特性（流量半減時間等）と核的特性（各種反応度係数等）により、決定される。

2.1 不確実因子の抽出

はじめに、上記の直接的要因及び間接的要因に関する項目を抽出し、それらの不確実因子の初期値及び過渡時応答に対する影響の観点で整理し、ULOF 事象を解析する上で想定すべき感度パラメータ項目について整理する。

(1) 直接的要因

直接的要因として、SASS に関する不確実因子として次の5因子（初期温度、輸送遅れ、1次遅れ、形状誤差、キュリー点誤差）が想定される。それぞれの不確実因子について、ULOF 事象に対する感度パラメータの考え方を整理する。

a. SASS 初期温度

SASS を設置した制御棒に隣接する燃料集合体の集合体出口冷却材温度を指し、SASS 初期値及び SASS 過渡時応答に影響する。

解析評価のパラメータ ” SASS 初期温度 ” で影響を把握する。

b. SASS 輸送遅れ

SASS を設置した制御棒に隣接する燃料集合体の集合体出口から、SASS 感知合金近傍までの冷却材輸送遅れ時間を示し、SASS 過渡時応答特性に影響する。なお、ULOF 事象で冷却材流量が減少すると、流量相対値に反比例して、輸送遅れ時間が増加する。

解析評価のパラメータ ” SASS 輸送遅れ ” で影響を把握する。

c. SASS 一次遅れ

SASS を設置した制御棒の感知合金近傍の冷却材温度から感知合金温度までの温

度応答遅れ時定数を示し、SASS 過渡時応答に影響を及ぼす。

解析評価のパラメータ " SASS 一次遅れ " で影響を把握する。

d . SASS 形状誤差

SASS を設置した制御棒に隣接する燃料集合体の集合体出口から SASS 感知合金近傍までの冷却材流路形状の誤差を示し、SASS 過渡時応答に影響を及ぼす。形状誤差は、不確実因子の "SASS 一次遅れ" に含まれる因子でもある。

"SASS 輸送遅れ"の結果より影響の度合いを評価できる。

e . SASS キュリー点誤差

SASS 感知合金の切り離し温度の誤差を示し、SASS 過渡時切り離し温度に影響を及ぼす。

解析評価のパラメータ " SASS 切り離し温度 " で影響を把握する。

(2) 間接的要因 (冷却系特性に影響)

間接的要因のうち、炉心冷却材応答に関する不確実因子として次の 4 因子 (流量半減時間、系統圧損、温度計設定誤差、ポンプ回転慣性) が想定される。それぞれの不確実因子について、ULOF 事象に対する感度パラメータの考え方を整理する。

a . 流量半減時間

過渡時の炉心出口冷却材温度応答及び輸送遅れ時間に影響を及ぼす。過渡時の流量半減時間の不確実因子は、主に系統圧損とポンプ回転慣性の不確実因子により構成される。

解析評価のパラメータ " 流量半減時間 " を介して影響を把握する。

b . 系統圧損

過渡時の炉心冷却材流量を介して、炉心出口冷却材温度応答及び輸送遅れ時間に影響を及ぼす。

"流量半減時間"の結果より影響の度合いを評価できる。

c . 温度計設定誤差

初期の冷却材系統温度を介して、SASS 初期温度に影響を及ぼす。影響の度合いは "SASS 初期温度" よりも小さい。

" SASS 初期温度 " の結果より影響の度合いを評価できる。

d . ポンプ回転慣性

過渡時の炉心冷却材流量を介して、炉心出口冷却材温度応答及び輸送遅れ時間に影響を及ぼす。

"流量半減時間"の結果より影響の度合いを評価できる。

(3) 間接的要因（核的特性に影響）

間接的要因のうち、核的特性に関する不確実因子として次の 12 因子（ドブプラ反応度、燃料密度反応度、被覆管反応度、冷却材反応度、出力分布誤差、集合体流路変形、集合体流量配分誤差、炉心出入口温度誤差、物性値誤差、製作公差、ギャップ熱伝導誤差、ペレット熱伝導誤差）が想定される。それぞれの不確実因子について、ULOF 事象に対する感度パラメータの考え方を整理する。

a . ドブプラ反応度

ドブプラ反応度を介して、過渡時の炉心出力変化に影響するため、結果として炉心出口冷却材温度応答に影響を及ぼす。

解析評価のパラメータ"ドブプラ反応度"で影響を把握する。

b . 燃料密度反応度

燃料密度反応度を介して、過渡時の炉心出力変化に影響するため、結果として炉心出口冷却材温度応答に影響を及ぼす。これまでの検討知見より、応答特性はドブプラ反応度と類似しており、影響の度合いはドブプラ反応度よりも小さいことが知られている。

"ドブプラ反応度"の結果より影響の度合いを評価できる。

c . 被覆管反応度

被覆管反応度を介して、過渡時の炉心出力変化に影響するため、結果として炉心出口冷却材温度応答に影響を及ぼす。これまでの検討知見より、応答特性は冷却材反応度と類似しており、影響の度合いは冷却材反応度よりも小さいことが知られている。

"冷却材反応度"の結果より影響の度合いを評価できる。

d . 冷却材反応度

冷却材反応度を介して、過渡時の炉心出力変化に影響するため、結果として炉心

出口冷却材温度応答に影響を及ぼす。

解析評価のパラメータ ” 冷却材反応度 ” で影響を把握する。

e . 出力分布誤差

SASS 隣接集合体の初期冷却材温度を介して、SASS 初期温度に影響する。また、初期温度との差で評価されるドップラ反応度及び冷却材反応度等を介して、過渡時の炉心出力変化に影響するため、結果として炉心出口冷却材温度応答に影響を及ぼす。

” SASS 初期温度 ” の結果より影響の度合いを評価できる。

” ドップラ反応度 ”、” 冷却材反応度 ” の結果より影響の度合いを評価できる。

f . 集合体流路変形

集合体内の冷却材流量、冷却材反応度を介して、過渡時の炉心出力変化に影響するため、結果として冷却材温度応答に影響を及ぼす。応答特性は冷却材反応度と類似している。

” 冷却材反応度 ” の結果より影響の度合いを評価できる。

g . 集合体流量配分誤差

SASS 設置集合体の初期流量配分誤差は、SASS の初期温度に影響する。

集合体内の冷却材流量、冷却材温度、冷却材反応度を介して、過渡時の炉心出力変化に影響するため、結果として冷却材温度応答に影響を及ぼす。

” SASS 初期温度 ”、” 冷却材反応度 ” の結果より影響の度合いを評価できる。

h . 炉心出入口温度誤差

通常運転時（初期状態）に系統出口温度で制御する温度計に含まれる誤差に起因して系統の冷却材温度の誤差が生じ、SASS の初期温度に影響する。

” SASS 初期温度 ” の結果より影響の度合いを評価できる。

i . 物性値誤差

主に冷却材、被覆管の比熱、熱伝導度等に含まれる物性値の誤差により、主に過渡時の冷却材温度応答、冷却材反応度等を介して、過渡時の炉心出力変化に影響するため、結果として冷却材温度応答に影響を及ぼす。

” 冷却材反応度 ” の結果より影響の度合いを評価できる。

j . 製造公差

冷却材、被覆管、燃料の製作形状の誤差により、主に過渡時の冷却材温度応答、

燃料温度応答、各種反応度を介して、過渡時の炉心出力変化に影響するため、結果として冷却材温度応答に影響を及ぼす。

”ドップラ反応度”、”冷却材反応度”の結果より影響の度合いを評価できる。

k. ギャップ熱伝達率

被覆管と燃料の間の熱伝達率の誤差により、主に過渡時の燃料温度応答、ドップラ反応度等を介して、過渡時の炉心出力変化に影響するため、結果として冷却材温度応答に影響を及ぼす。

”ドップラ反応度”の結果より影響の度合いを評価できる。

l. ペレット熱伝導度誤差

主に燃料の熱伝導度に含まれる誤差により、主に過渡時の燃料温度応答、ドップラ反応度等を介して、過渡時の炉心出力変化に影響するため、結果として冷却材温度応答に影響を及ぼす。

”ドップラ反応度”の結果より影響の度合いを評価できる。

(4) まとめ

以上の検討結果より、代表性のある不確実因子を表 2.1-1 に整理する。表 2.1-1 に示すように、ULOF 事象に対して解析により確認すべき感度パラメータとして、以下の項目が整理される。

- ・ SASS 初期温度 (SASS 初期温度に影響する SASS 隣接集合体出口温度)
- ・ SASS 輸送遅れ (SASS 温度応答に影響する冷却材輸送遅れ時間)
- ・ SASS 一次遅れ (SASS 温度応答に影響する感知合金の応答遅れ時間)
- ・ SASS 切り離し温度 (SASS 切り離しに影響する切り離し温度)
- ・ 流量半減時間 (過渡時流量に影響する流量減少特性)
- ・ ドップラ反応度 (過渡時出力に影響するドップラ反応度係数)
- ・ 冷却材反応度 (過渡時出力に影響する冷却材反応度係数)

表 2.1-1 代表性のある不確実因子の抽出結果

	抽出された 不確実因子	影響する因子	初期値への 影響	過渡時への 影響	代表性のある 不確実因子
直接的要因	SASS 初期温度	SASS 初期温度	あり	あり	SASS 初期温度
	SASS 輸送遅れ	SASS 温度応答	なし	あり	SASS 輸送遅れ
	SASS 一次遅れ	SASS 温度応答	なし	あり	SASS 一次遅れ
	SASS 形状誤差	SASS 温度応答	なし	あり	SASS 輸送遅れ
	SASS キュリー点誤差	切り離し温度	なし	あり	SASS 切り離し温度
間接的要因 (冷却系特性)	流量半減時間	過渡時流量	なし	あり	流量半減時間
	系統圧損	過渡時流量	なし(*)	あり	流量半減時間
	温度計設定誤差	初期系統温度	あり	なし	SASS 初期温度
	ポンプ回転慣性	過渡時流量	なし	あり	流量半減時間
間接的要因 (核的特性)	ドップラ反応度	過渡時出力	なし	あり	ドップラ反応度
	燃料温度反応度	過渡時出力	なし	あり	ドップラ反応度
	被覆管反応度	過渡時出力	なし	あり	冷却材反応度
	冷却材反応度	過渡時出力	なし	あり	冷却材反応度
	出力分布誤差	燃料温度	あり	あり	ドップラ反応度
		冷却材温度	あり	あり	SASS 初期温度 冷却材反応度
	集合体流路変形	冷却材温度	なし(**)	あり	冷却材反応度
	集合体流量配分誤差	冷却材温度	あり	あり	SASS 初期温度 冷却材反応度
	炉心出入口温度誤差	初期系統温度	あり	なし	SASS 初期温度
	物性値誤差	冷却材温度	なし(*)	あり	冷却材反応度
	製造公差	燃料温度	なし	あり	ドップラ反応度
		冷却材温度	なし(*)	あり	冷却材反応度
	ギャップ熱伝達率	燃料温度	あり	あり	ドップラ反応度
ペレット熱伝導度誤差	燃料温度	なし	あり	ドップラ反応度	

(*) 通常運転時(初期状態)は系統出口温度で制御するため、影響しない。

(**) 局所的な温度差は全体挙動的には有意な影響は与えない。

2.2 不確定巾に関する検討

2.1 節で抽出した代表性のある不確定因子に対する不確定巾について、これまでの高速増殖実証炉のプラント設計^{(1),(2)}（以下、実証炉設計と略す）及び現状までの知見より検討・整理し、不確定巾に関する感度について設定する。また、抽出した代表性のある不確定因子以外の不確定因子についても、その感度範囲について考察を加える。

(1) 代表性のある不確定因子の不確定巾

a. SASS 初期温度

炉心燃料集合体の交換パターン及び炉心領域の違い（内側炉心、外側炉心等）による冷却材流量配分を考慮すると SASS を設置した制御棒に隣接する 6 集合体の集合体出口冷却材温度はばらつきを有している。このため、隣接する 6 集合体が混合する SASS 初期温度も分布を有していると判断される。

本作業では、代表的な炉心として、図 2.2-1 に示す平成 11 年度の FBR 実用化戦略で検討された MOX 燃料均質炉心⁽³⁾を検討対象とした。本炉心における制御棒周辺集合体の集合体出口冷却材温度を表 2.2-1 及び表 2.2-2 に示す。また、同表には冷却材平均温度、冷却材最高温度、冷却材最低温度及び冷却材温度の標準偏差も併記する。

同表より SASS 制御棒 16 体の各制御棒隣接 6 集合体の出口温度を平均した冷却材温度に対する標準偏差として、 $1\sigma = 6.7$ が得られる。

一方、本作業で ULOF 事象の過渡解析に用いる安全解析コード SAS4A の解析で得られた SASS 隣接集合体出口温度を表 2.2-3 に示す。ここで、本作業における SASS が設置される制御棒 No. は、16, 46, 53, 99, 109, 136, 144, 152 の 8 体を仮定した。同表に示す SAS4A の結果より、SASS 制御棒 8 体の各制御棒周辺 6 集合体の出口温度を平均した冷却材温度に対する標準偏差は $1\sigma = 7.5$ となっており、表 2.2-2 の結果とほぼ一致している。

従って、本検討では、SASS 初期温度の不確定巾として、 $1\sigma = 6.7$ を用いることとする。なお、SASS の温度挙動は SAS4A の解析結果より、8 本の制御棒個別に求めるので、SASS 初期温度は、表 2.2-3 に示したそれぞれの値とする。

b . SASS 輸送遅れ

実証炉設計では、定格運転状態において、SASS を設置した制御棒に隣接する集合体の出口から、SASS 感知合金近傍までの輸送遅れ時間として 1.0 秒以内を要求しており、その見通しが得られている。また、ばらつきとも最大 0.5 秒以内となる知見が得られている。ばらつきの最大値を 3 に相当するとして、SASS 輸送遅れの不確定巾として、 $1 = 0.2$ 秒を設定する。

本検討では、大型炉が実証炉設計の知見を最大に活用することを前提して、実証炉設計の条件（ノミナル値：1.0 秒、不確定巾： $1 = 0.2$ 秒）を踏襲する。

c . SASS 1 次遅れ

実証炉設計では、SASS の感知合金近傍の冷却材温度に対して、SASS 感知合金の温度応答遅れ時間（1 次遅れ）として 1.0 秒以内を要求しており、その見通しが得られている。

本検討では、大型炉が実証炉設計の知見を最大に活用することを前提して、実証炉設計の条件（ノミナル値：1.0 秒）を踏襲する。なお、不確定巾は、工学的判断により、ノミナル値（1.0 秒）の $\pm 20\%$ に相当する 0.2 を暫定する。

d . SASS 切り離し温度

実証炉設計では、ULOF 事象時の炉心燃料の健全性を維持するために、SASS 切り離し上限値として 680 以下を要求している。これに対し、磁気特性試験結果、保持力特性試験及び各種計算結果から SASS 切り離し温度のノミナル値として 667 が得られている。一方、実証炉設計の不確定巾については、吸着面のセッティング不良 $3 = 15$ 、及び照射による影響 $3 = 20$ を考慮した統計処理により、 $1 = 8$ が得られている。

SASS 切り離し温度は感知合金の選定により比較的自由に選定することができるが、本検討の基準条件として実証炉設計の条件（ノミナル値：667、不確定巾： $1 = 8$ ）を踏襲する。

e . 流量半減時間

実証炉設計では炉心冷却材の流量半減時間として、ノミナル値 6.5 秒及び最小値 5.5 秒が設定されている。ここで、流量半減時間最小値を 3 相当と仮定して、不確

定巾は $1 = (6.5 - 5.5)/3 = 0.33$ 秒と設定した。

大型炉における炉心冷却材の流量半減時間は現時点では決定していないため、本検討では実証炉設計の条件（ノミナル値：6.5 秒、不確定巾： $1 = 0.33$ 秒）を踏襲する。なお、この不確定巾はノミナル値に対して、 $5\% = 0.33$ 秒/6.5 秒に相当する。

f . ドップラ反応度係数

実証炉設計の炉心設計では、ドップラ反応度係数の不確定巾として、 $1 = \pm 10\%$ を想定している。

実証炉設計と本作業で技術的に有意な差異がないことから、本作業でも不確定巾については実証炉設計の値（ $1 = \pm 10\%$ ）を踏襲する。

g . 冷却材反応度係数

実証炉設計の炉心設計では、冷却材反応度係数の不確定巾として、 $1 = \pm 20\%$ を想定している。

実証炉設計と本作業で技術的に有意な差異がないことから、本作業でも不確定巾については実証炉設計の値（ $1 = \pm 20\%$ ）を踏襲する。

(2) それ以外の不確定因子の不確定巾

前項で示した代表性のある不確定因子以外の不確定因子の不確定巾について以下に考察を加える。

はじめに、すでに不確定巾が得られている不確定因子はこれを用いる。

- ・ 温度計設定誤差： $1 = 3$

次に、実証炉設計等で工学的安全係数が得られている不確定因子については、工学的安全係数を 3 相当と位置付け、不確定巾を設定する。

- ・ SASS 形状誤差：工学的安全係数 1.03、不確定巾 $1 = 1.0\%$
- ・ 出力分布誤差：工学的安全係数 1.05、不確定巾 $1 = 1.7\%$
- ・ 集合体流路変形：工学的安全係数 1.03、不確定巾 $1 = 1.0\%$
- ・ 集合体流量配分誤差：工学的安全係数 1.05、不確定巾 $1 = 1.7\%$
- ・ 原子炉出入口温度誤差：工学的安全係数 1.02、不確定巾 $1 = 0.7\%$
- ・ 物性値誤差（冷却材）：工学的安全係数 1.02、不確定巾 $1 = 0.8\%$

- ・製作公差（冷却材）：工学的安全係数 1.03、不確定巾 1 \approx 1.0%
- ・製作公差（燃料）：工学的安全係数 1.08、不確定巾 1 \approx 2.7%
- ・ギャップ熱伝達率誤差：工学的安全係数 1.30、不確定巾 1 \approx 10%
- ・ペレット熱伝導誤差：工学的安全係数 1.03、不確定巾 1 \approx 1.0%

また、実証炉設計等の安全評価で保守値の範囲が知られている不確実因子については、保守値を 3 相当と位置付け、不確定巾を設定する。

- ・系統圧損：保守値の範囲 10%、不確定巾 1 \approx 3.3%
- ・ポンプ回転慣性：保守値の範囲（原型炉の場合）7.5%、不確定巾 1 \approx 2.5%

最後に、上記以外の不確実因子については、これまでの知見による工学的判断により、不確定巾を設定する。

- ・燃料密度反応度：ドップラ反応度と同程度

（3章の ULOF 解析結果より判断する）

- ・被覆管反応度：冷却材反応度の約 40%

（表 3.1-2 の冷却材反応度係数と被覆管反応度係数を参照）

(c) 不確定巾に関する予備的な検討

不確実因子の不確定巾に関する予備検討として、代表的な不確実因子として直接要因の SASS 切り離し温度、SASS 初期温度、SASS 輸送遅れ、SASS1 次遅れが SASS 切り離し時間に与える影響を調べた。なお、3.3 節のパラメータ解析で示すように SASS 切り離し時間と冷却材最高温度の間には正の相関関係がある。

図 2.2-2 から図 2.2-5 に評価結果を示し、表 2.2-4 に評価結果をまとめる。

同表より、SASS 切り離し温度の不確定巾 1 は SASS 切り離し時間に対して約 0.57 秒の感度であることがわかる。また、SASS 初期温度、SASS 輸送遅れ、SASS1 次遅れはそれぞれ SASS 切り離し時間に対して約 0.74 秒、約 0.42 秒、約 0.19 秒の感度であることがわかる。この予備的な検討の結果より、最も感度が大きいのは SASS 初期温度でであることが明らかとなった。

なお、実際に不確実因子が ULOF 時の冷却材最高温度に与える影響は 3.3 節で定量化する。

表2.2-1 制御棒に隣接する集合体の冷却材出口温度(1/2)

制御棒 No.	集合体	集合体出力 MWt	集合体流量 kg/s	出口温度	平均温度
16	9	7.287	30.2	585.9	579.1
	10	7.025	30.2	579.0	
	15	6.836	30.2	574.1	
	17	6.836	30.2	574.1	
	24	7.228	30.2	584.3	
	25	6.957	30.2	577.2	
20	12	6.632	30.2	568.7	577.4
	13	7.025	30.2	579.0	
	19	7.045	30.2	579.5	
	21	7.306	30.2	586.4	
	29	7.228	30.2	584.3	
	30	6.554	30.2	566.7	
46	33	6.734	34.0	551.7	568.7
	34	6.812	31.2	567.7	
	45	7.548	34.0	570.6	
	47	7.360	31.2	581.6	
	60	6.840	31.2	568.4	
	61	6.991	31.2	572.3	
49	36	6.812	31.2	567.7	566.7
	37	6.734	34.0	551.7	
	48	7.111	31.2	575.3	
	50	7.293	34.0	564.7	
	63	6.991	31.2	572.3	
	64	6.840	31.2	568.4	
53	39	7.408	34.0	567.3	568.8
	40	6.626	31.2	563.0	
	52	6.911	34.0	555.8	
	54	6.912	31.2	570.2	
	68	7.011	31.2	572.7	
	69	7.438	31.2	583.6	
56	42	6.812	31.2	567.7	570.4
	43	7.408	34.0	567.3	
	55	7.360	31.2	581.6	
	57	6.911	34.0	555.8	
	71	7.189	31.2	577.3	
	72	7.011	31.2	572.7	
95	76	6.866	31.2	569.1	576.6
	77	7.397	31.2	582.5	
	94	7.330	30.2	587.0	
	96	6.927	30.2	576.4	
	115	6.902	30.2	575.8	
	116	6.632	30.2	568.7	
99	80	6.789	31.2	567.1	574.5
	81	7.228	31.2	578.2	
	98	7.115	30.2	581.4	
	100	6.908	30.2	575.9	
	119	6.632	30.2	568.7	
	120	6.902	30.2	575.8	

表2.2-2 制御棒に隣接する集合体の冷却材出口温度(2/2)

制御棒 No.	集合体	集合体出力 MWt	集合体流量 kg/s	出口温度	平均温度
105	85	7.473	31.2	584.5	574.8
	86	6.789	31.2	567.1	
	104	6.748	30.2	571.7	
	106	6.927	30.2	576.4	
	126	6.722	30.2	571.1	
	127	6.973	30.2	577.7	
109	89	7.390	31.2	582.4	575.7
	90	6.866	31.2	569.1	
	108	6.766	30.2	572.2	
	110	6.908	30.2	575.9	
	130	6.790	30.2	572.8	
	131	7.128	30.2	581.7	
136	113	6.731	28.2	583.8	560.2
	114	6.516	28.2	577.8	
	135	5.657	28.2	553.7	
	137	6.559	35.2	542.4	
	160	5.287	28.7	540.7	
	161	6.596	31.1	562.8	
140	117	6.932	28.2	589.5	571.1
	118	6.751	28.2	584.4	
	139	7.132	35.2	555.3	
	141	8.038	35.2	575.6	
	164	6.683	31.1	565.0	
	165	6.354	31.1	556.6	
144	121	6.908	28.2	588.8	558.0
	122	6.518	28.2	577.8	
	143	6.559	35.2	542.4	
	145	5.657	28.2	553.7	
	168	5.890	31.1	544.8	
	169	5.287	28.7	540.7	
148	124	6.202	28.2	569.0	560.4
	125	6.689	28.2	582.6	
	147	5.812	28.2	558.0	
	149	6.852	35.2	549.0	
	173	6.164	28.7	564.9	
	174	5.647	31.1	538.6	
152	128	6.595	28.2	580.0	572.4
	129	6.932	28.2	589.5	
	151	8.038	35.2	575.6	
	153	6.829	35.2	548.5	
	177	6.682	31.1	565.0	
	178	7.107	31.1	575.8	
156	132	6.367	28.2	573.6	562.2
	133	6.518	28.2	577.8	
	155	6.852	35.2	549.0	
	157	6.008	28.2	563.5	
	181	6.590	31.1	562.6	
	182	5.513	28.7	546.9	
平均				569.8	569.8
最高				589.5	579.1
最低				538.6	558.0
分散				153.5	44.7
標準偏差				12.4	6.7

表2.2-3 SAS-4A解析結果（冷却材定常温度）

制御棒No.	集合体No.	出口温度()	平均温度()
16	9	586.6	579.8
	10	579.7	
	15	574.7	
	17	574.7	
	24	585.1	
	25	577.9	
46	33	552.2	569.4
	34	568.3	
	45	571.3	
	47	582.3	
	60	569.1	
	61	572.9	
53	39	568.0	569.4
	40	563.6	
	52	556.3	
	54	570.9	
	68	573.4	
	69	584.3	
99	80	567.7	575.2
	81	579.0	
	98	582.1	
	100	576.6	
	119	569.4	
	120	576.5	
109	89	583.1	576.4
	90	569.7	
	108	573.0	
	110	576.6	
	130	573.5	
	131	582.4	
136	113	584.6	560.8
	114	578.5	
	135	554.2	
	137	542.9	
	160	541.2	
	161	563.4	
144	121	589.6	558.6
	122	578.5	
	143	542.9	
	145	554.2	
	168	545.3	
	169	541.2	
152	128	580.7	573.1
	129	590.3	
	151	576.3	
	153	549.0	
	177	565.6	
	178	576.5	
平均		570.3	570.3
最高		590.3	579.8
最低		541.2	558.6
分散		179.7	55.5
標準偏差		13.4	7.5

表 2.2-4 不確定巾に対する予備的な感度解析結果

不確定因子	初期温度	輸送遅れ	一次遅れ	切離し温度	切離し時間
標準値	569.8	1.0 s	1.0 s	667	10.144 s
SASS 切離し温度	*	*	*	667+8	10.711 s (+0.567 s)
	*	*	*	667-8	9.571 s (-0.573 s)
SASS 初期温度	569.8+6.7	*	*	*	9.424 s (-0.720 s)
	569.8-6.7	*	*	*	10.904 s (+0.760 s)
SASS 輸送遅れ	*	1.0+0.2 s	*	*	10.561 s (+0.412 s)
	*	1.0-0.2 s	*	*	9.719 s (-0.425 s)
SASS 一次遅れ	*	*	1.0-0.2 s	*	9.947 s (-0.197 s)
	*	*	1.0+0.2 s	*	10.330 s (+0.186 s)

(注)本予備検討は、表 2.2-2 の SASS 初期温度を用いて評価しているため、

3 . 章の SAS-4A コードによる SASS 切り離し時間とは相違がある。

また、表中の * は標準値を用いていることを示している。

切り離し時間の () 内は標準解析条件との時間差を示している。

MOSES入力 1/3体系炉心図

- 内側炉心燃料 378体
- 外側炉心燃料 198体
- SUS遮蔽体 90体
- B4C遮蔽体 198体
- 主炉停止系制御棒 48体
- SUS集合体 1体

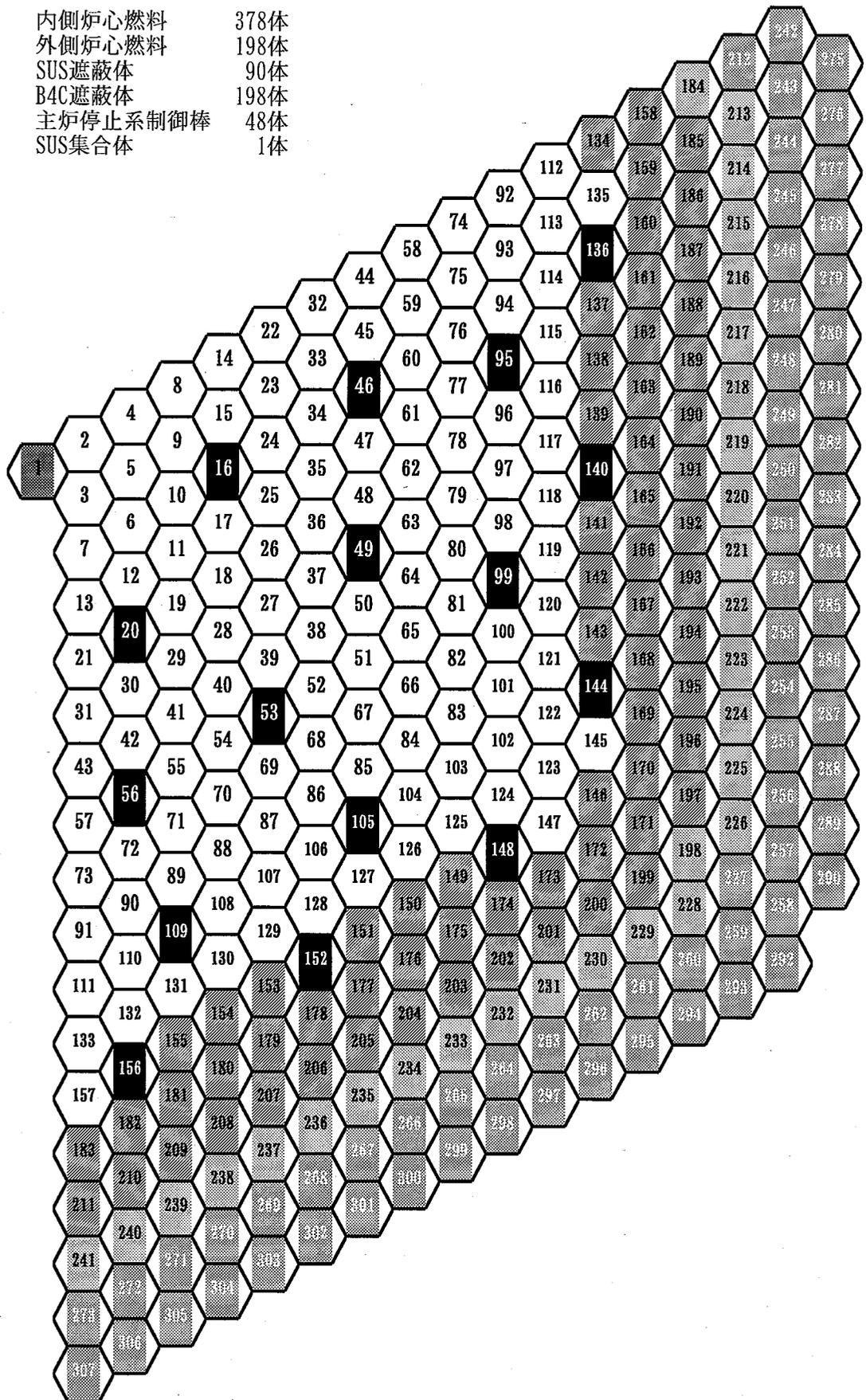


図2.2-1 検討対象炉心 (MOX燃料均質炉心)

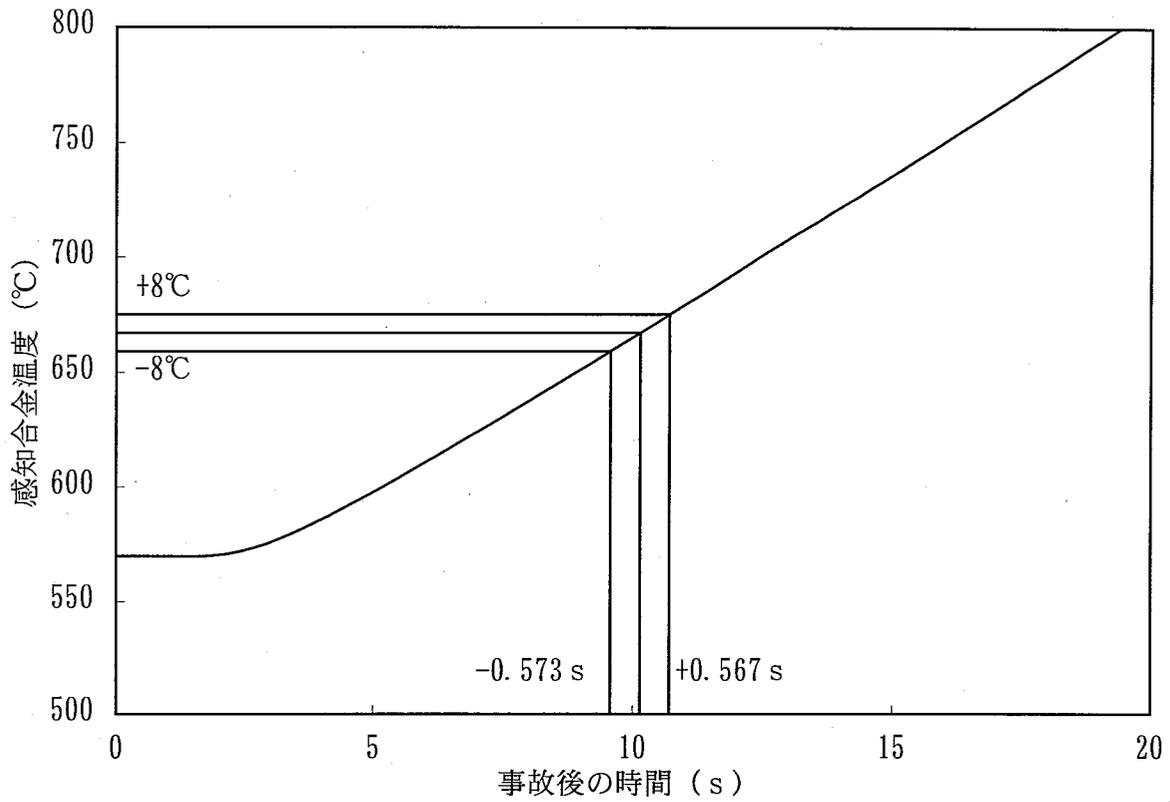


図2.2-2 予備的感度解析結果 (SASS切り離し温度の影響)

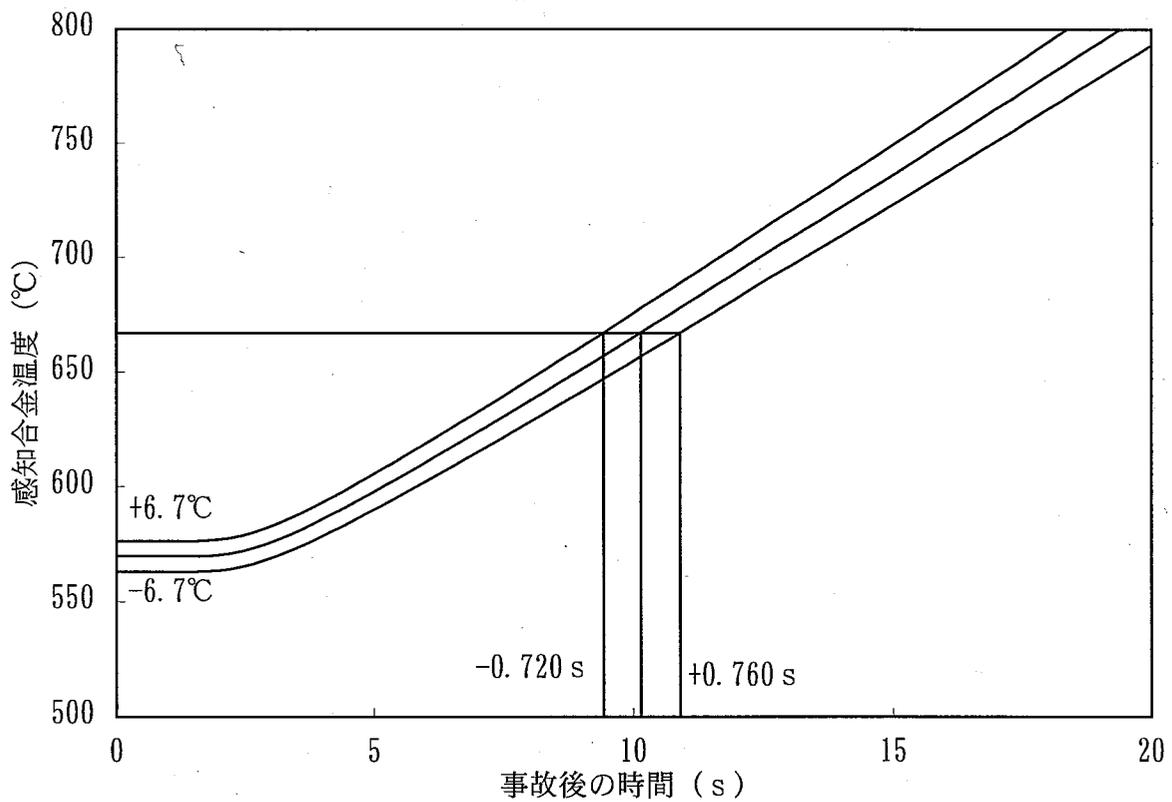


図2.2-3 予備的感度解析結果 (SASS初期温度の影響)

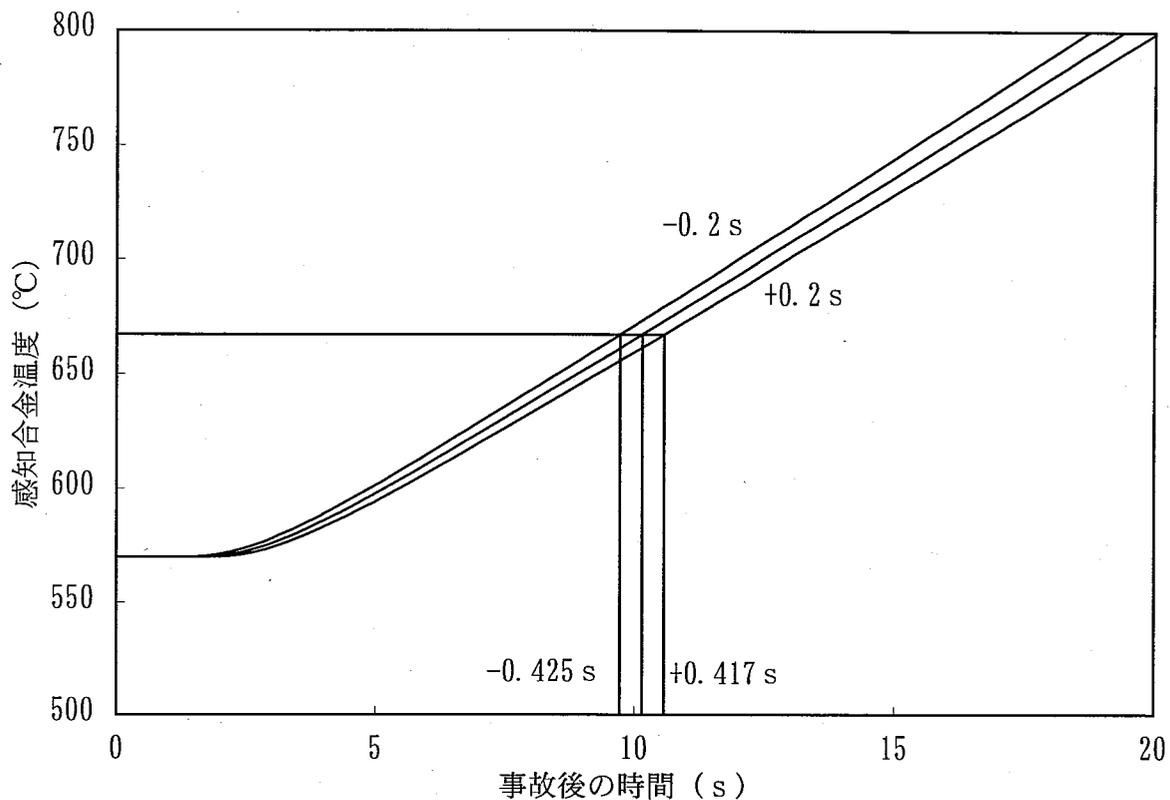


図2.2-4 予備的感度解析結果 (SASS輸送遅れの影響)

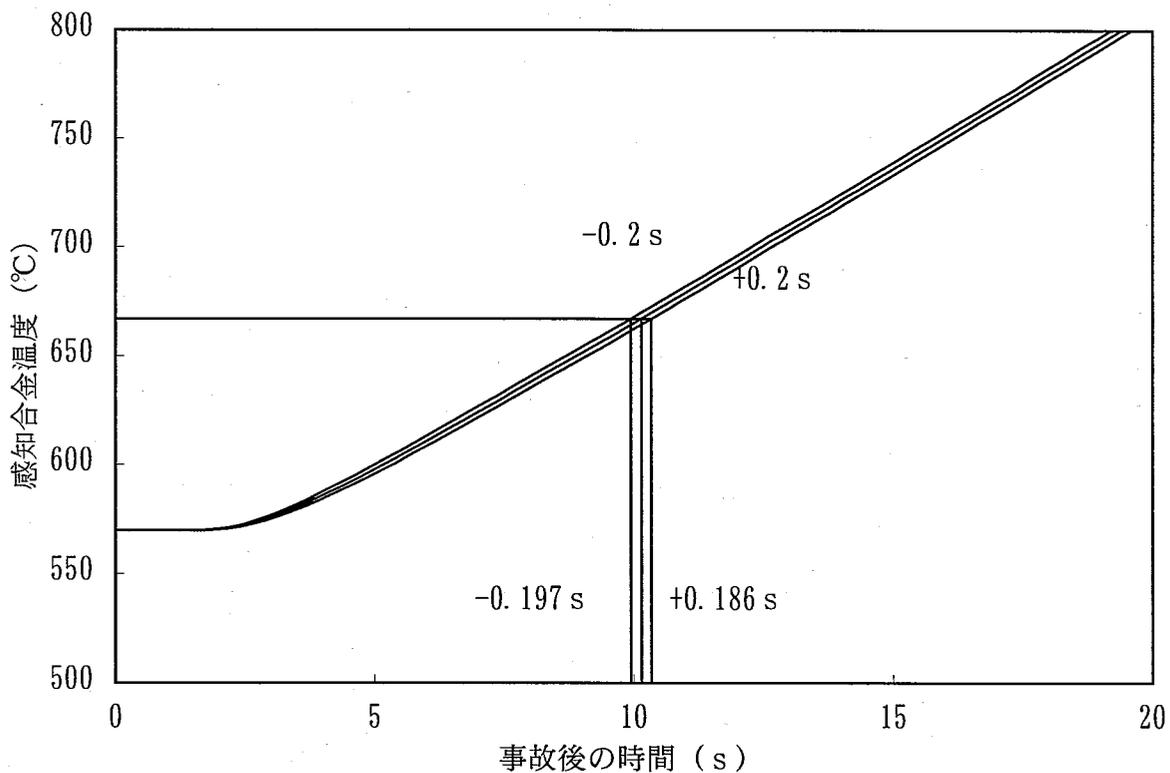


図2.2-5 予備的感度解析結果 (SASS 1次遅れの影響)

2.3 信頼性評価の考え方の整理

システムの信頼性を評価する手法として、応答曲面法（レスポンスサーフェス法）(4)、(5)を使用したモンテカルロ計算による確率分布を用いた評価手法が知られている。実証炉設計における SASS の信頼性は同手法を用いて評価されている。本作業では、大型炉における SASS の信頼性評価は実施しないが、実証炉で適用した方法を例にして本手法を説明する。

(1) 不確かさ評価手法について

実証炉設計では SASS 機能の不確かさ（電磁石の性能の不確かさ及び冷却材流動等の現象の不確かさを総合したもの）を評価する手法として、“応答曲面法”を使用したモンテカルロ計算を適用している。

本手法は、不確かさを定量化する上で、解析における種々の入力変量の確率分布を合成し、求めたい出力変量における確率分布を得るための評価手法を適用するものである。図 2.3-1 に本手法の評価フローをまとめる。

a . 応答曲面法の概要

n 個の入力変数 X_1, X_2, \dots, X_n の関数として表された出力変数

$$y = f (X_1, X_2, \dots, X_n)$$

を考える。

今、関数形 f が複雑であり、1 セットの入力変数 (X_1, X_2, \dots, X_n) に対する計算時間が比較的長いとき、上式のままでモンテカルロ計算による不確かさ解析を行うことは、計算時間の上からも困難な場合が多い。そこで、上式を“応答曲面”と呼ばれる解析的関数

$$y = R (X_1, X_2, \dots, X_n)$$

で近似する。関数 R には、 X_1, X_2, \dots, X_n の 2 次までの多項式

$$y' = a_0 + a_i X_i + a_{ij} X_i X_j$$

を用いる。

上記の近似式が求まれば、出力 y に関する確率分布（不確かさ）はモンテカルロ計算を実施することによって得ることができる。

b . 不確かさ評価手順

不確かさ評価は次の手段により行う。

- ・ 不確かさ評価要因の選定
- ・ 計算ケースの選定
- ・ 上記計算ケースに基づく現象解析 (SASS 作動解析)
- ・ 解析結果の重回帰分析 (応答曲面式の決定)
- ・ 不確かさ解析 (近似式に基づくモンテカルロ計算)

c . 重回帰分析

重回帰分析は、幾つかの不確かさ要因に依存する現象解析の結果を回帰式によって表現する。回帰式は y' 式のように不確かさ要因についての 2 次の多項式で表すものとする。回帰式を求める手法としては、現象解析の結果に影響を与える不確かさ要因を加えながら要因の影響を合成する。

d . 不確かさ解析

前記 c . で求めた近似式に対して、モンテカルロ計算を行うことで求めることができる。(図 2.3-1 参照)

すなわち重回帰式に含まれる各要因に対応する変数 X_n に対して分布形を与え、その分布形に従い乱数を発生させることで X_n の値を決め、着目する出力変量の値を計算する。この操作を 1000 回程度繰り返すことにより着目する出力変量 y' の確率分布を得る。

(2) SASS の信頼性評価について

上記の不確かさ評価手法を、SASS の信頼性評価に適用する方法について記述する。

最初に、SASS により制御棒が切り離されたときの冷却材最高温度に影響がある 2.1 節で抽出した不確定因子について、2.2 節で設定した不確定巾を用いて確率分布を定量化する。

次に不確定要因をパラメータとし、SASS の設置を想定した ULOF 事象解析を行うことにより、不確定要因が様々な値に変わった場合の冷却材最高温度を明らかにし、

重回帰分析を用いて不確定要因と冷却材温度の近似式（レスポンスサーフェイス）を設定する。

この近似式を用い、モンテカルロ計算により不確定要因の確率分布から、冷却材最高温度の確率分布を求め、この分布から SASS を設置した場合でも冷却材最高温度が沸騰温度を超える領域の確率を求め、SASS の非信頼度とする。

(3) 本作業の範囲

本作業における SASS 信頼性評価の作業範囲をまとめる。本項(1)節の b . で示す評価手順のうち、下記を作業範囲としている。

- ・ 不確かさ評価要因の選定
- ・ 計算ケースの選定
- ・ 上記計算ケースに基づく現象解析（SASS 作動解析）

SASSの信頼性：通常のシステムの機械的故障と温度感知合金の感応特性等現象の不確かさを総合したものとなり、フォルトツリー解析のみでは対応できない。

⇒ 応答遅れによるSASSの非信頼度を定量化するための手法の検討

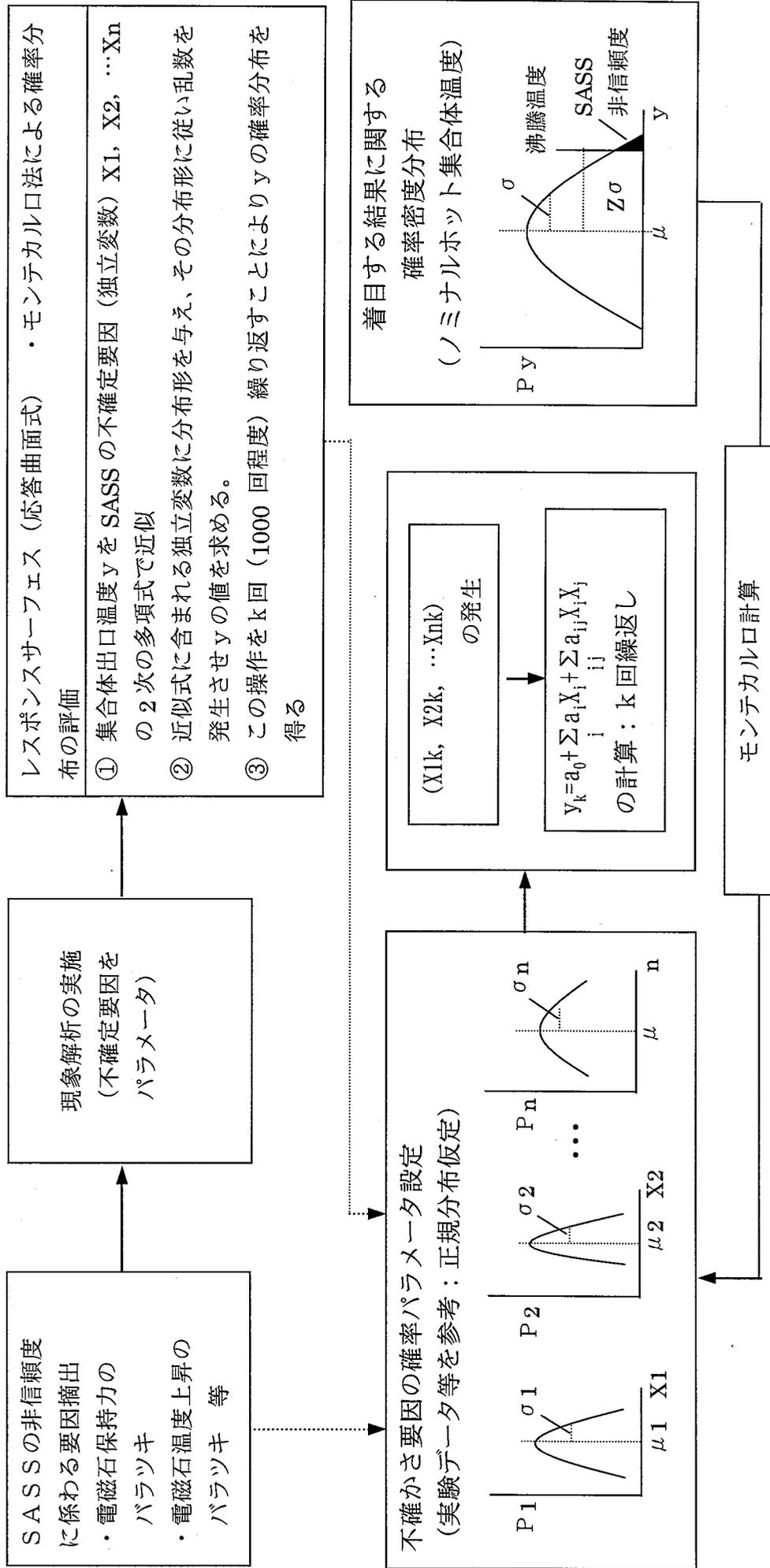


図 2.3-1 SASS の信頼性評価フロー

3 . ULOF 感度解析

2章で抽出した不確実因子に対して、安全解析コード SAS4A⁽⁶⁾を用いて ULOF 事象の感度解析を実施する。また、ULOF 感度解析に加えて、炉心出力上昇時スクラム失敗事象 (UTOP : Unprotected Transient Over Power) 及び除熱源喪失時スクラム失敗事象 (ULOHS : Unprotected Loss of Heat Sink) について、既往研究結果等を用いて定性的な検討を行う。

3.1 解析条件の設定

2.2 節の図 2.2-1 で示したように、本作業では代表的な炉心として、平成 11 年度の FBR 実用化戦略で検討された MOX 燃料の均質大型炉心を解析対象とする。本項では、解析条件及び SAS4A コードの入力データを設定し、SASS 切り離しを考慮しないベース解析を実施して、SASS 切り離し時間に対する検討を行う。また、ベース解析の結果を用いて ULOF 事象の判断条件に対する考察も行う。

(1) 解析条件

本作業の対象としている MOX 燃料均質炉心のプラント基本仕様、炉心集合体構成、及び炉心集合体・燃料ピンの主要仕様を表 3.1-1 に、動特性パラメータ、各種フィードバック反応度係数を表 3.1-2 示す。また、サイクル機構殿より貸与頂いた SAS4A コードの基本入力データの炉心モデル図を図 3.1-1 に、各チャンネルに属する集合体の出力、流量を表 3.1-3 から表 3.1-5 に示す。

本作業の対象としている炉心のように、評価対象炉心が大型化し、集合体出力及び冷却材流量配分が複雑になると、炉心を流量領域（内側炉心/外側炉心等）に分割してモデル化する解析では計算精度が低下する懸念がある。このため、本作業では計算精度を高めるために、特性の異なる集合体を1つのSAS4Aチャンネルで表現し、1/3 炉心を合計 145 チャンネルにモデル化して、ULOF 事象の解析を実施する。

ここで、SASS 配置に関してサイクル機構殿との協議により、以下を仮定した。

- ・ SASS 付き制御棒集合体：集合体番号 16, 46, 53, 99, 109, 136, 144, 152
- ・ SASS 無し制御棒集合体：集合体番号 20, 49, 56, 95, 105, 140, 148, 156

また、基準条件として下記を想定する。

- ・ SASS 初期温度：8 本の制御棒の隣接集合体温度より設定
- ・ SASS 切り離し温度：667
- ・ SASS 輸送遅れ時間：1.0 秒（定格流量時）
- ・ SASS 1 次遅れ時間：1.0 秒
- ・ 炉心流量半減時間：6.5 秒
- ・ ドップラ反応度係数：ノミナル値
- ・ 冷却材反応度係数：ノミナル値
- ・ 評価ピン初期温度：被覆管最高温度 632（ノミナルホット条件）

また、ULOF 事象の判断条件は下記について(3)項で検討を行う。

- ・ 評価ピンの冷却材沸騰防止
- ・ 集合体規模での冷却材沸騰防止
- ・ 炉心即発臨界超過防止（燃料ピンの破損を許容）

(2) SASS 切り離し時間の検討

SASS の切り離し時間を定量化するため、基準条件において SASS 切り離しを考慮しないベース解析を SAS4A コードを用いて実施した。ベース解析結果を図 3.1-2 及び図 3.1-3 に示す。

ULOF 発生直後（約 15 秒程度まで）は、炉心の冷却材流量減少により冷却材温度が上昇し、正の冷却材反応度（COOLANT）が挿入されるが、ドップラ反応度（DOPPLER）及び燃料温度反応度等（DENSITY）の負の反応度が挿入されるため、全反応度（NET）はほぼ均衡した（全反応度が 0）状態となり、炉心出力はほぼ一定となる。この状態で、炉心冷却材流量の減少を続けるため、炉心出力流量比は増加し、冷却材温度も上昇する。

その後、ULOF 事象で SASS 切り離しを想定しない場合は、図 3.1-3 に示すように、約 17 秒にチャンネル 59 で最も早く集合体規模での冷却材沸騰が発生し、正の冷却材ボイド反応度が挿入される。また、図 3.1-2 に示すように約 18 秒から冷却材沸騰を生じる集合体の増加に伴い冷却材反応度も増加し、炉心出力も増加する。その後、約 21 秒で全反応度は 1\$ を超え、即発臨界超過となって、炉心損傷にいたる。

なお、集合体内の冷却材温度分布を考慮すると、約 17 秒でチャンネル 59 の集合体規模での冷却材沸騰が開始される以前に局所的な冷却材沸騰が生じることが予想されるが、冷却材反応としては軽微であり炉心出力等への影響はないと判断される。

それぞれの SASS 付き制御棒集合体に設置された SASS 感知合金が SASS 切り離し温度である 667 となる切り離し時間を求めた。それぞれの制御棒の SASS 感知合金の温度応答を図 3.1-4 及び図 3.1-5 に示し、解析結果を表 3.1-6 にまとめた。また、表 3.1-6 には SASS 切り離し時間の平均値も併記した。

ここで、SASS 感知合金の温度は、SASS を設置した制御棒に隣接する 6 集合体出口冷却材温度を用いて以下の効果を考慮して求めた。

- ・ 制御棒に隣接する 6 集合体の集合体出口冷却材温度の混合
- ・ 集合体出口から、SASS 感知合金近傍までの輸送遅れ
(冷却材流量減少に伴い、相対流量に逆比例して輸送遅れ時間が増加)
- ・ SASS 感知合金近傍から、SASS 感知合金までの温度応答遅れ
(温度応答を 1 次遅れ成分として考慮、1 次遅れ時間は一定)

表 3.1-6 に示したように、解析の結果 SASS 感知合金温度が SASS 切り離し温度である 667 に到達する時間の平均値は 10.85 秒となった。また、SASS 感知合金温度が最も早く 667 となる制御棒は、集合体番号 16 で SASS 切り離し時間は 10.02 秒となった。一方、SASS 感知合金温度が最も遅く 667 となる制御棒は、集合体番号 144 で SASS 切り離し時間は 12.34 秒となった。最も早く SASS 切り離しが行われる制御棒の切り離し時間と最も遅く SASS 切り離しが行われる制御棒の切り離し時間の差は 2.32 秒となり、平均切り離し時間の約 21%に相当する。

表 3.1-6 に示すように、SASS 感知合金温度が 667 となる時間が各 SASS 制御棒でまちまちであることから、SASS 切り離しについては非同時性があることがわかる。そこで、基準条件で SASS 切り離しを考慮した基準ケースを設定するうえで、非同時性の影響を事前に把握しておく必要がある。そこで、3.2 節において非同時性の影響を確認する観点から、SASS が非同時に切り離されるケースと全制御棒が SASS 切り離しの平均時間で同時に切り離されるケースについて、ULOF 事象の冷却材最高温度への影響を調べることにとする。

(3) ULOF 事象の判断条件に関する考察

本項では 3.3 節以降で検討する ULOF 事象の判断条件について設定する。

ULOF 事象に対する判断条件として下記を想定することができる。それぞれについて考察を加える。

- ・ 評価ピンの冷却材沸騰防止
- ・ 集合体規模での冷却材沸騰防止（燃料ピン破損を許容）
- ・ 炉心即発臨界超過防止（集合体規模の破損を許容）

a . 評価ピンの冷却材沸騰防止

本判断条件は、基本的に炉心燃料ピンの破損を許容しない判断条件であり、最も保守的なものである。

実証炉設計においては、集合体内において冷却材の局所沸騰が発生した後の燃料ピンの健全性の維持を担保できないことから、本判断条件を採用している。

本判断条件では、集合体内の温度分布を考慮した最も冷却材温度が高いノミナルホットピンを評価ピンとして想定し、ノミナルホットピンが事前に設定した冷却材沸騰温度を超過するか否で健全性を評価するものである。

ここで、冷却材沸騰温度については実証炉設計では保守性を考慮して 960 を想定していた。一方、図 3.1-3 に示した SAS4A コードの解析結果では、集合体平均冷却材温度は約 17 秒で沸騰をしているが、その時点における冷却材最高温度は約 1018 である。このことから、本解析対象炉心において現実的な冷却材沸騰温度は 1018 と考えることができ、実証炉設計で想定していた冷却材沸騰温度 960 の保守性を確認することができる。なお、3.3 節で説明する流量半減時間の感度解析の結果から冷却材沸騰温度を調べると、流量半減時間が 6.17 秒、6.5 秒、6.83 秒の場合の冷却材沸騰温度はそれぞれ 1017.6 、 1018.0 、 1018.3 となり、またドップラ反応度係数+10%、-10%、冷却材反応度係数+20%、-20%の場合の冷却材沸騰温度はそれぞれ 1017.9 、 1018.0 、 1018.2 、 1017.7 となっている。これより、冷却材沸騰温度は流量半減時間や反応度係数への依存性は小さいことが確認できる。

b . 集合体規模での冷却材沸騰防止

本判断条件は、基本的に一部の炉心燃料ピンの破損を許容した上で、集合体規模の燃料ピン破損を防止するための判断条件である。

ULOF 事象を集合体レベルで防止し、全炉心損傷を回避することを念頭においたものであるが、実証炉設計の判断条件に比べると、非保守的なものとなっている。このため、判断条件として受け入れられるかは検討の余地がある。

SAS4A の評価モデルである集合体平均を評価対象としているため、判断条件である冷却材沸騰温度も SAS4A の評価結果を用いることが可能と判断される。

c . 炉心即発臨界超過防止

本判断条件は、基本的に複数の燃料集合体の破損を許容した上で、炉心からの機械的エネルギーの放出を防止するための判断条件であり、ここで想定した判断条件の中では最も非保守的なものである。

本判断条件は、実証炉設計の判断条件に比べ非保守的なものである上に、採用するためには機構論的な解析コードによる評価、検証が必要である。

d . まとめ

本作業における判断条件は、実証炉設計の判断条件を踏襲して、最も保守的なノミナルホットピンの冷却材沸騰防止とする。また、冷却材沸騰の目安温度は実証炉設計と同様に 960 として、SAS4A との温度差である冷却材沸騰温度の保守性は安全裕度として考慮する事とする。

なお、参考までにベース解析の結果より本項で検討した判断条件までの到達時間を以下に整理する。

- ・評価ピンの冷却材沸騰防止（沸騰温度 960 ）: 11.65 秒
- ・評価ピンの冷却材沸騰防止（沸騰温度 1018 ）: 13.48 秒
- ・集合体規模での冷却材沸騰防止 : 17.23 秒
- ・炉心即発臨界超過防止（集合体規模の破損を許容）: 20.74 秒

このことから、健全性の判断条件を緩和することにより、SASS への要求条件も緩和することが可能と考えられる。

表3.1-1 解析対象炉心の仕様 (1/2)

(a) プラント基本仕様

項目	データ	備考
原子力熱出力	3,800 MWt	
原子炉出入口冷却材温度	550 / 395	
原子炉冷却材流量	19400 kg/s	熱出力, 出入口温度より
炉心バンドル部圧損	0.3236 MPa	
冷却材流量半減時間	6.5 s	

(b) 炉心集合体構成 (図2.2-1参照)

集合体種類	集合体体数	備考
内側炉心燃料集合体	378	領域を198 + 180に分離
外側炉心燃料集合体	198	
SUS遮蔽体	90	
B4C遮蔽体	198	
主炉停止系制御棒	48	
SUS集合体	1	

(c) 炉心集合体・燃料ピンの主要仕様

	単位	内側炉心	外側炉心	備考
有効炉心長	mm	800		
ブランケット長 (下部/上部)	mm	400 / 400		
ガスプレナム長 (下部/上部)	mm	1045 / 330		端栓等を含む
遮蔽体等 (下部/上部)	mm	185 / 1090		勘合部を含む
全長	mm	4250		除入口ノズル
集合体配列ピッチ	mm	194.5		
ラッパ管対外/内面距離	mm	191.5 / 181.5		
ラッパ管板厚	mm	5.0		
内部ダクト対外/内面距離	mm	60.0 / 58.0		37ピン相当
内部ダクト板厚	mm	1.0		
燃料ピン本数	本	294		
(上部ブランケット)	本	331		
燃料ピンピッチ	mm	9.85		
燃料ピン被覆管外径/内径	mm	8.80 / 7.60		
燃料ピン被覆管肉厚	mm	0.60		
ワイヤ径	mm	1.00		
ワイヤ巻きピッチ	mm	150.0		
燃料スミア密度	%	82.0		

表 3.1-2 解析対象炉心の仕様 (2/2)

(a) 動特性パラメータ

中性子寿命(μ s)	遅発中性子割合(-)		崩壊定数(1/s)	
0.398	1	7.04×10^{-5}	1	1.30×10^{-2}
	2	7.17×10^{-4}	2	3.12×10^{-2}
	3	6.15×10^{-4}	3	1.34×10^{-1}
	4	1.23×10^{-3}	4	3.46×10^{-1}
	5	5.64×10^{-4}	5	1.39
	6	1.60×10^{-4}	6	3.80
	eff	3.36×10^{-3}		

(b) 各種フィードバック反応度係数

反応度係数	単位	内側炉心	内側炉心	外側炉心
ドップラ反応度係数	Tdk/dT	-6.900×10^{-3}		
上ブランケット		-0.171×10^{-3}	-0.086×10^{-3}	-0.082×10^{-3}
炉心部		-2.638×10^{-3}	-1.808×10^{-3}	-1.141×10^{-3}
下ブランケット		-0.464×10^{-3}	-0.329×10^{-3}	-0.182×10^{-3}
燃料温度反応度係数	dk/kk/	-4.913×10^{-6}		
上ブランケット		-0.009×10^{-6}	-0.009×10^{-6}	-0.009×10^{-6}
炉心部		-1.985×10^{-6}	-1.422×10^{-6}	-1.483×10^{-6}
下ブランケット		$+0.005 \times 10^{-6}$	$+0.005 \times 10^{-6}$	-0.007×10^{-6}
冷却材温度反応度係数	dk/kk/	$+5.187 \times 10^{-6}$		
上ブランケット		-0.046×10^{-6}	-0.032×10^{-6}	-0.032×10^{-6}
炉心部		$+2.816 \times 10^{-6}$	$+1.746 \times 10^{-6}$	$+0.695 \times 10^{-6}$
下ブランケット		$+0.037 \times 10^{-6}$	$+0.027 \times 10^{-6}$	-0.025×10^{-6}
被覆管温度反応度係数	dk/kk/	$+1.888 \times 10^{-6}$		
上ブランケット		-0.018×10^{-6}	-0.014×10^{-6}	-0.012×10^{-6}
炉心部		$+0.993 \times 10^{-6}$	$+0.641 \times 10^{-6}$	$+0.282 \times 10^{-6}$
下ブランケット		$+0.013 \times 10^{-6}$	$+0.011 \times 10^{-6}$	-0.008×10^{-6}
ラッパ管温度反応度係数	dk/kk/	$+0.763 \times 10^{-6}$		
上ブランケット		-0.007×10^{-6}	-0.006×10^{-6}	-0.005×10^{-6}
炉心部		$+0.390 \times 10^{-6}$	$+0.261 \times 10^{-6}$	$+0.124 \times 10^{-6}$
下ブランケット		$+0.005 \times 10^{-6}$	$+0.004 \times 10^{-6}$	-0.003×10^{-6}
炉心支持板反応度係数	dk/kk/	-11.27×10^{-6}		

表3.1-3 各チャンネルに属する集合体の出力、流量 (1/3)

SAS-4A チャンネル番号	集合体番号 (図2.2-1参照)	集合体出力 (MW)	集合体流量 (Kg/s)
1	2	6.81718	34.00
2	3	6.34245	34.00
3	7	6.85272	31.20
4	4,6	6.00392	31.20
5	5	5.64565	31.20
6	11	6.91414	30.20
7	9	6.80405	30.20
8	8	6.43467	30.20
9	10,13	6.33221	30.20
10	12	5.63193	30.20
11	21	6.81577	30.20
12	19	6.34246	30.20
13	15,17	5.96127	30.20
14	14,18	5.78621	30.20
15	22	7.01962	31.20
16	27	6.52027	31.20
17	26	6.92028	30.20
18	24,29	6.74369	30.20
19	23,31	6.42800	30.20
20	25	6.26397	30.20
21	28	6.03197	30.20
22	30	5.55421	30.20
23	39,43	6.91074	34.00
24	32,38	6.18947	34.00
25	33,37	5.70813	34.00
26	34,36,42	5.94882	31.20
27	40	5.62620	31.20
28	41	6.34369	30.20
29	35	5.63530	30.20
30	51	7.29691	34.00
31	45	7.04454	34.00
32	44	6.80802	34.00
33	50	6.57255	34.00
34	52,57	5.87137	34.00
35	47,55	6.86897	31.20
36	48	6.40875	31.20
37	54	6.03714	31.20
38	73	7.25223	34.00
39	67	6.77485	34.00
40	59,65	6.38866	34.00
41	58,66	6.17457	34.00
42	69	6.94549	31.20
43	71	6.48830	31.20
44	68,72	6.13775	31.20
45	61,63	6.11845	31.20
46	60,64	5.82645	31.20
47	62,70	5.89058	30.20
48	82	7.23229	34.00
49	74	7.22135	34.00
50	75,91	6.76247	34.00

表3.1-4 各チャンネルに属する集合体の出力、流量 (2/3)

SAS-4A チャンネル番号	集合体番号 (図2.2-1参照)	集合体出力 (MW)	集合体流量 (Kg/s)
51	83	6.75224	34.00
52	84	6.38200	34.00
53	85	6.98064	31.20
54	77	6.90405	31.20
55	89	6.90405	31.20
56	81	6.52716	31.20
57	76,90	5.85227	31.20
58	80,86	5.78806	31.20
59	79	7.07911	30.20
60	78,87	6.61924	30.20
61	88	6.24683	30.20
62	103,111	6.92640	31.20
63	92	6.33023	31.20
64	102	5.98051	31.20
65	93,101	5.82471	31.20
66	107	6.99195	30.20
67	94	6.84992	30.20
68	98	6.43250	30.20
69	96,106	6.07713	30.20
70	100,110	6.05781	30.20
71	97	5.87983	30.20
72	108	5.77877	30.20
73	104	5.76040	30.20
74	131	6.66733	30.20
75	127	6.31819	30.20
76	115,120	6.24663	30.20
77	130	5.97371	30.20
78	126	5.90605	30.20
79	116,119	5.68421	30.20
80	121	6.46000	28.20
81	113	6.29632	28.20
82	123	6.12172	28.20
83	117,129	6.27730	28.20
84	125	6.05238	28.20
85	122,133	5.89903	28.20
86	118	5.93504	28.20
87	114	5.72239	28.20
88	112	5.42274	28.20
89	128	5.64742	28.20
90	132	5.44507	28.20
91	124	5.30710	28.20
92	157	5.63068	28.20
93	147	5.27539	28.20
94	135,145	4.98776	28.20
95	141,151	7.58733	35.20
96	138,154	6.99920	35.20
97	142	6.45063	35.20
98	139	6.35563	35.20
99	149,155	6.10862	35.20
100	150	6.00952	35.20

表3.1-5 各チャンネルに属する集合体の出力、流量 (3/3)

SAS-4A チャンネル番号	集合体番号 (図2.2-1参照)	集合体出力 (MW)	集合体流量 (Kg/s)
101	153	5.92101	35.20
102	137,143	5.69090	35.20
103	134,146	4.94745	31.10
104	167	6.71491	35.20
105	166	6.27280	35.20
106	175	6.13890	35.20
107	176,179	5.80425	35.20
108	162	5.68035	35.20
109	163	5.42174	35.20
110	180	5.30601	35.20
111	178	6.71491	31.10
112	161	6.23044	31.10
113	181	6.23044	31.10
114	164	6.14920	31.10
115	177	6.13890	31.10
116	165	5.68988	31.10
117	168	5.27053	31.10
118	174	4.92319	31.10
119	173	5.82484	28.70
120	170	5.41925	28.70
121	158	4.90098	28.70
122	159,183	4.95438	28.70
123	171	4.48057	28.70
124	182	4.92742	28.70
125	172	4.58431	28.70
126	160,169	4.60269	28.70
127	192,204	5.18271	28.70
128	189,207	5.13869	28.70
129	202	4.90762	28.70
130	206	4.82910	28.70
131	188,208	4.57278	28.70
132	190	4.53672	28.70
133	193	4.49820	28.70
134	191,205	4.26380	28.70
135	203	4.25468	28.70
136	194	4.06336	28.70
137	186,210	4.14837	25.10
138	195	4.24469	25.10
139	200	3.86533	25.10
140	185,197	3.27067	25.10
141	187,201	3.98769	25.10
142	196	3.63131	25.10
143	211	3.07264	25.10
144	209	3.77182	25.10
145	199	2.90631	25.10

表3. 1-6 基準条件のSASS切り離し時間

制御棒No.	SASS切り離し温度到達時間 (s)
	(SASS切り離し温度) 667℃
16	10. 020
46	10. 643
53	10. 632
99	10. 386
109	10. 251
136	12. 071
144	12. 344
152	10. 459
SASS平均	10. 851

内側炉心燃料数	378体	1/3体系炉心 (合計)	126体
外側炉心燃料数	198体	576体	66体 192体
SUS遮蔽体数	90体	666体	30体 222体

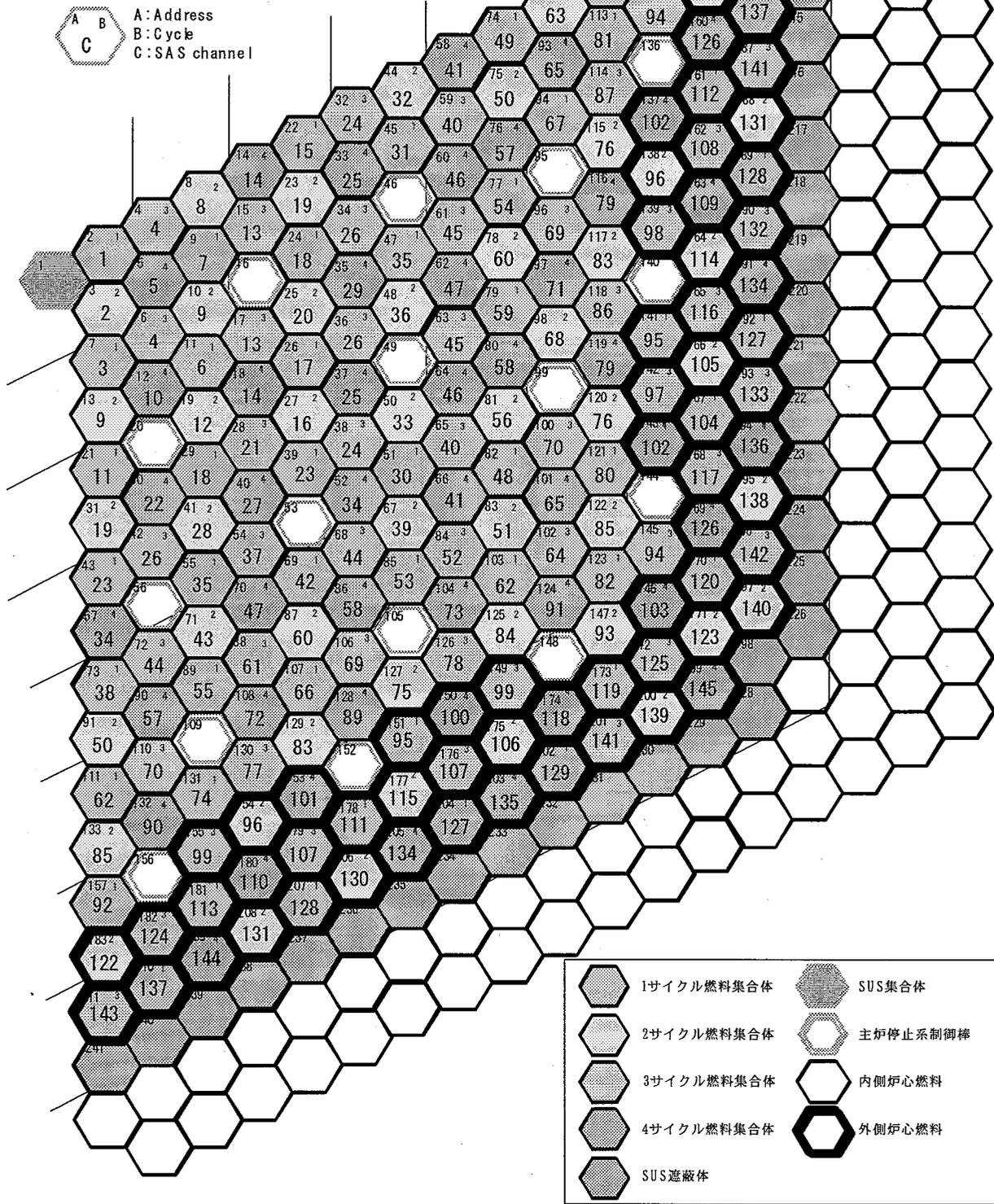


図3. 1-1 SAS-4Aコード解析用炉心モデル

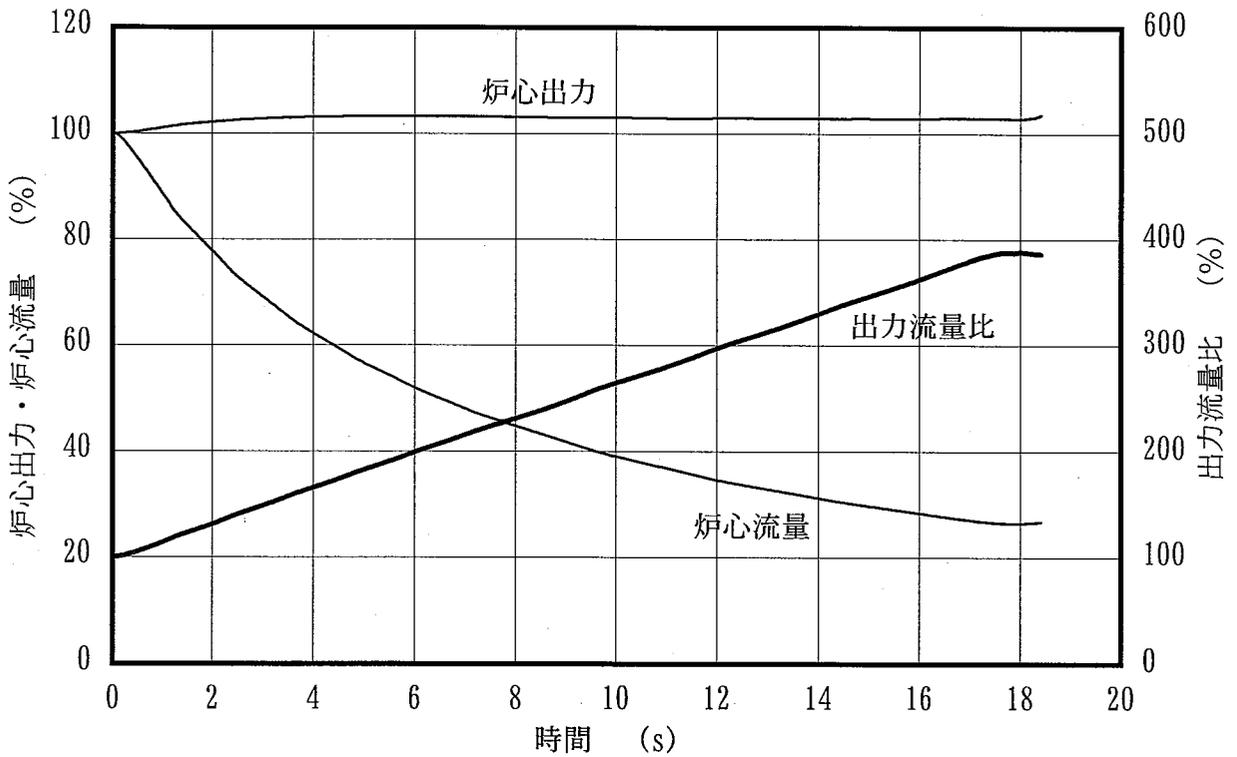
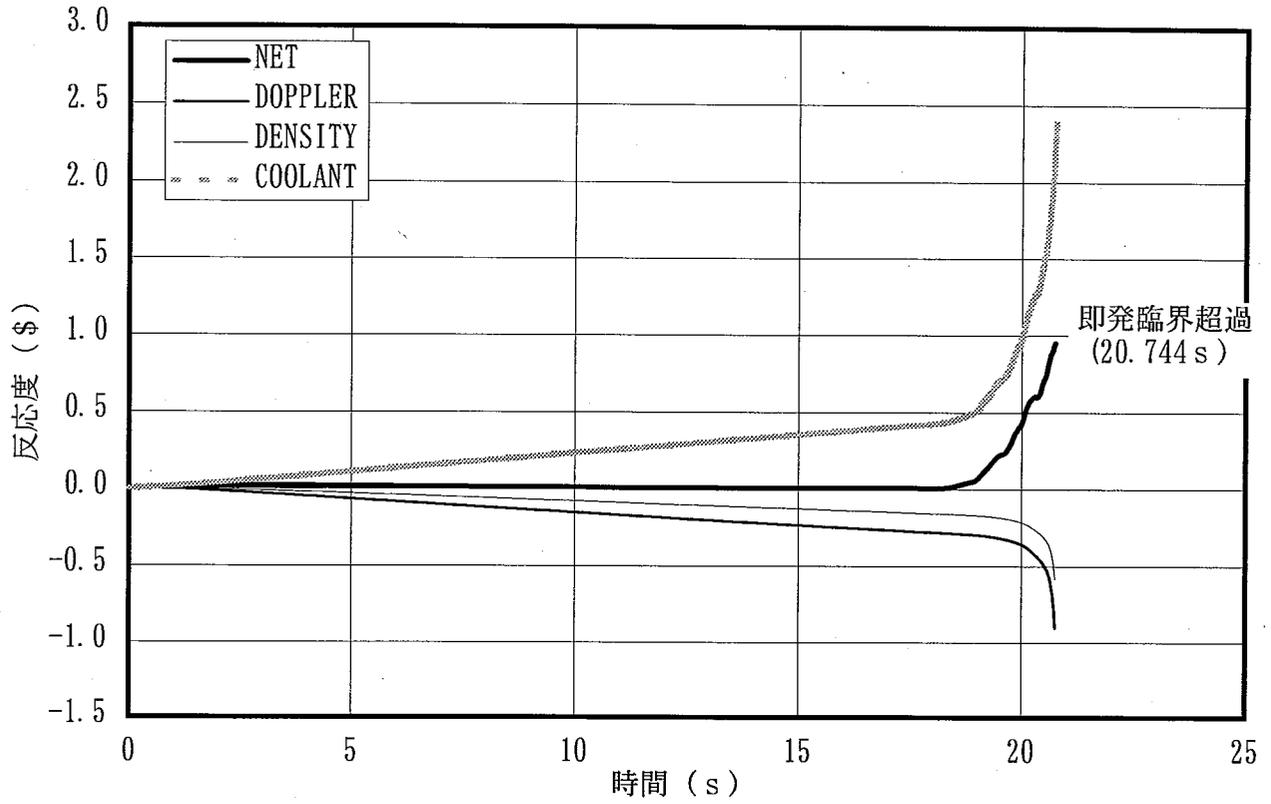


図3.1-2 ベース解析結果 (各反応度、炉心出力、炉心流量)

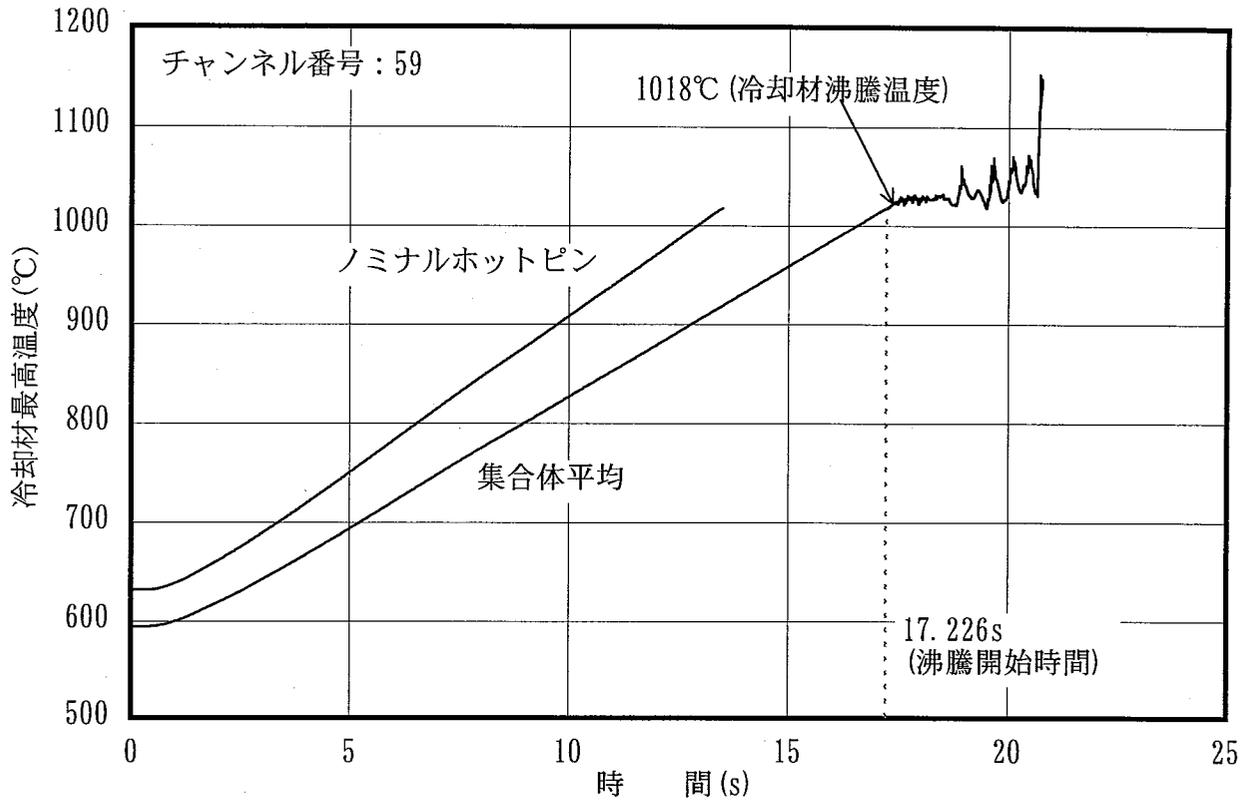


図3.1-3 ベース解析結果 (最短沸騰チャンネル冷却材温度)

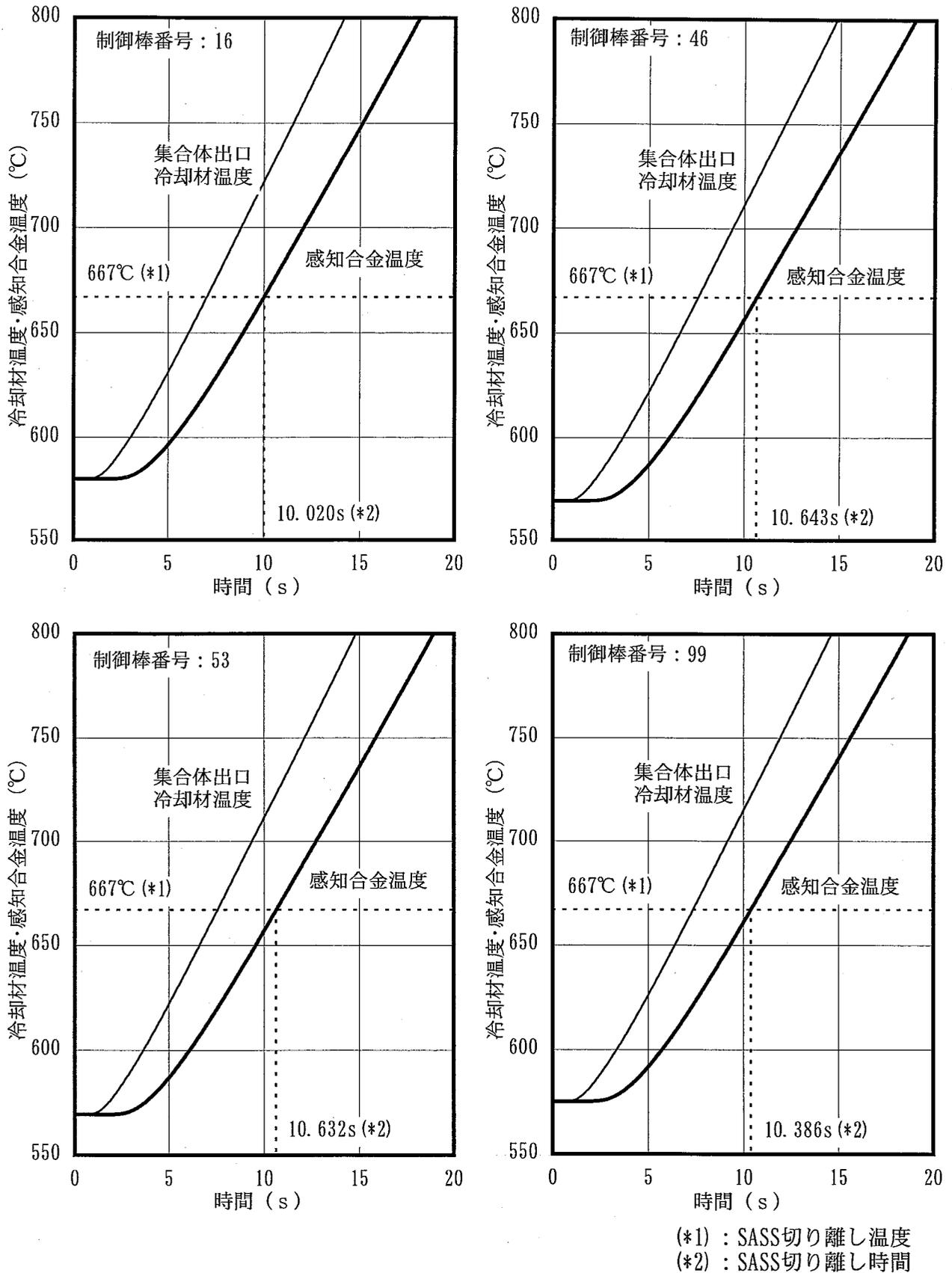


図3.1-4 基準条件のSASS切り離し時間(1/2)

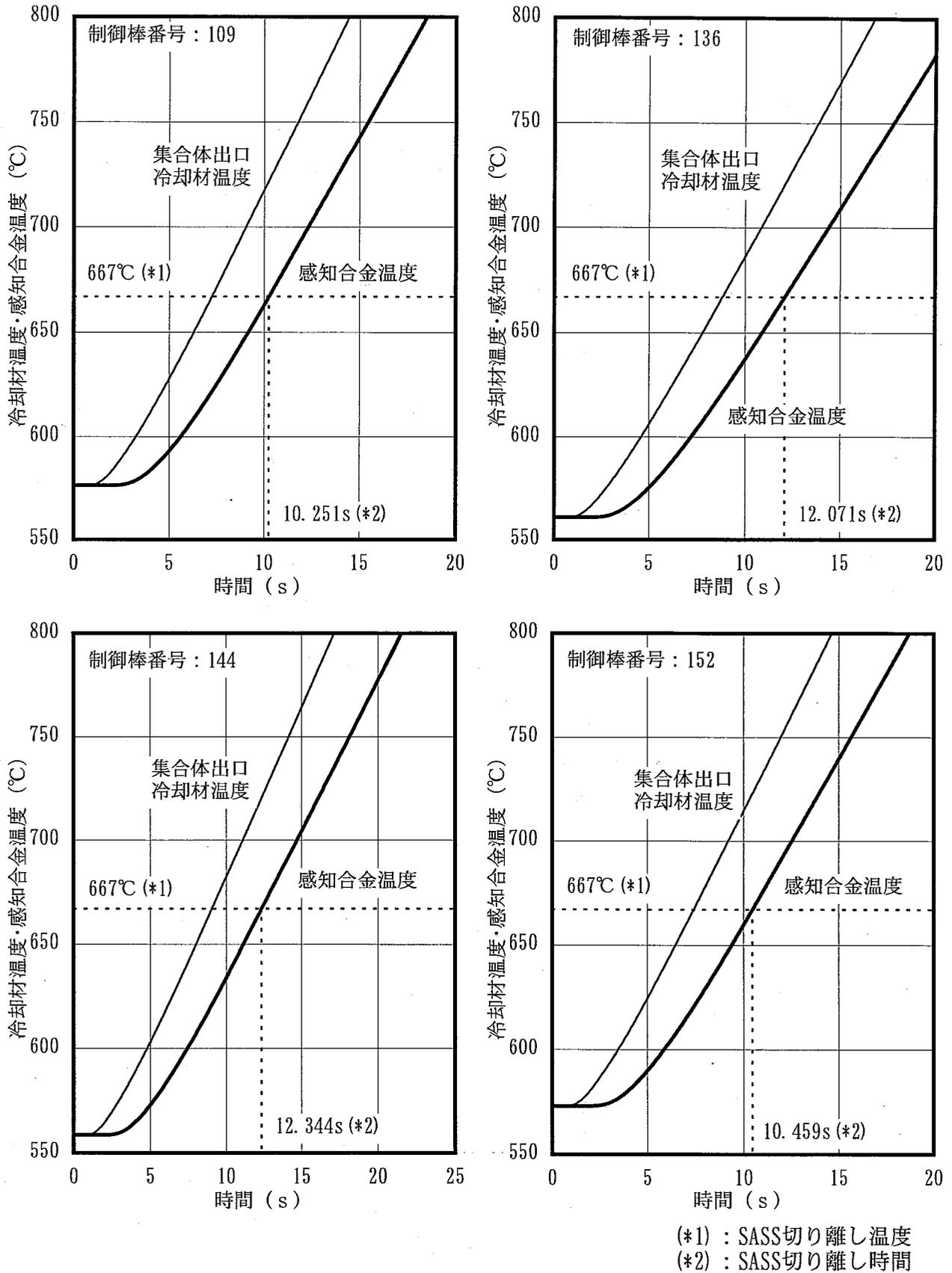


図3.1-5 基準条件のSASS切り離し時間 (2/2)

3.2 非同時性の影響検討

3.3 節で実施するパラメータ解析に先立ち、事前に SASS 切り離しのタイミングが ULOF 事象の冷却材最高温度に与える影響を把握しておく。

ここでは、3.1 節で示したように、SASS が非同時に切り離されたケースと全制御棒が切り離しの平均時間で同時に切り離されるケースについて、冷却材最高温度への影響を調べるととした。解析条件は、いずれも 3.1 節(1)項に示した基準条件である。なお、判断条件は評価ピンの冷却材沸騰防止(960 以下)とした。

(1) SASS が非同時に切り離されるケース

表 3.1-6 に示す検討結果より、SASS 感知合金が切り離し温度 667 に到達する時間は、最も早い制御棒集合体で 10.02 秒である。また、最も遅い制御棒集合体は 12.34 秒である。

ここで、SAS4A コードで解析を前提として SASS の非同時切り離しを模擬するために、表 3.1-6 の結果を踏まえて以下の 3 点のタイミングで制御棒切り離しを模擬するものとする。

- ・最短切り離し制御棒番号：16
- ・中間切り離し制御棒番号：46、53、99、109、152、
- ・最終切り離し制御棒番号：136、144

また、SASS 制御棒は、以下の時間で切り離されるものとした。ここで、同じタイミングで挿入する制御棒の挿入時間は、保守的にその中で最も遅く切り離される制御棒の切り離し時間で切り離されるものとした。また、挿入される反応度は切り離される制御棒の本数に比例するものとした。

- ・最短切り離し時間：10.02 秒
- ・中間切り離し時間：10.64 秒(最も遅く切り離される制御棒番号 46)
- ・最終切り離し時間：12.34 秒(最も遅く切り離される制御棒番号 144)

以上の切り離し条件において、ULOF 事象の解析結果を図 3.2-1 に示す。また、本条件におけるノミナルホットピン及び最短沸騰チャンネルである 59 チャンネル(以下、ノミナルホット集合体と称する)の冷却材最高温度の時間変化を図 3.2-2 に示

す。同図より、ノミナルホットピンの冷却材最高温度は 950 となり、判断基準である冷却材沸騰温度 960 以下に収まる。

(2) SASS が平均時間で切り離される場合

表 3.1-6 に示す検討結果より、SASS 感知合金が切り離し温度 667 に到達する時間を各制御棒集合体で平均すると、10.85 秒となる。この時間で全制御棒が同時に切り離されることを想定する。この場合の反応度条件を以下に整理する。

- ・ SASS100%挿入時反応度： $-2.36\% \text{ dk/kk}'$ (全制御棒の切り離し)
- ・ SASS 反応度挿入曲線： 切り離し後 2.0s で 85%挿入 (等加速度)
4.0s で 100%挿入 (2.0s ~ 4.0s は等速度)

本条件における ULOF 事象の解析結果を図 3.2-3 に示す。また、本条件におけるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の時間変化を図 3.2-4 に示す。同図より、ノミナルホットピンの冷却材最高温度は 962 となり、判断基準である冷却材沸騰温度 960 をわずかに超える結果となった。

(3) まとめ

上記(1)及び(2)に示した解析結果より、各制御棒の SASS 感知合金が切り離し温度である 667 となる平均時間で同時に切り離されるケースのほうが非同時性を考慮した場合より保守的な結果を与えることが確認できた。

非同時性を考慮した場合の冷却材最高温度が低下した理由は、早期に挿入された 1 本の制御棒によって早期に炉心出力低下が得られるため、冷却材温度に影響する出力流量比が早期に低下するためと考えられる。

ULOF 事象の挙動は非同時性を考慮したケースがより現実的と考えられる。ただし、次項のパラメータ解析では、解析の簡易性を考慮して、SASS の切り離し時間は各制御棒集合体で平均した時間とする。なお、SASS 切り離しの非同時性における冷却材最高温度の差は安全裕度として考慮し、5 章の SASS への要求条件の整理で評価する。

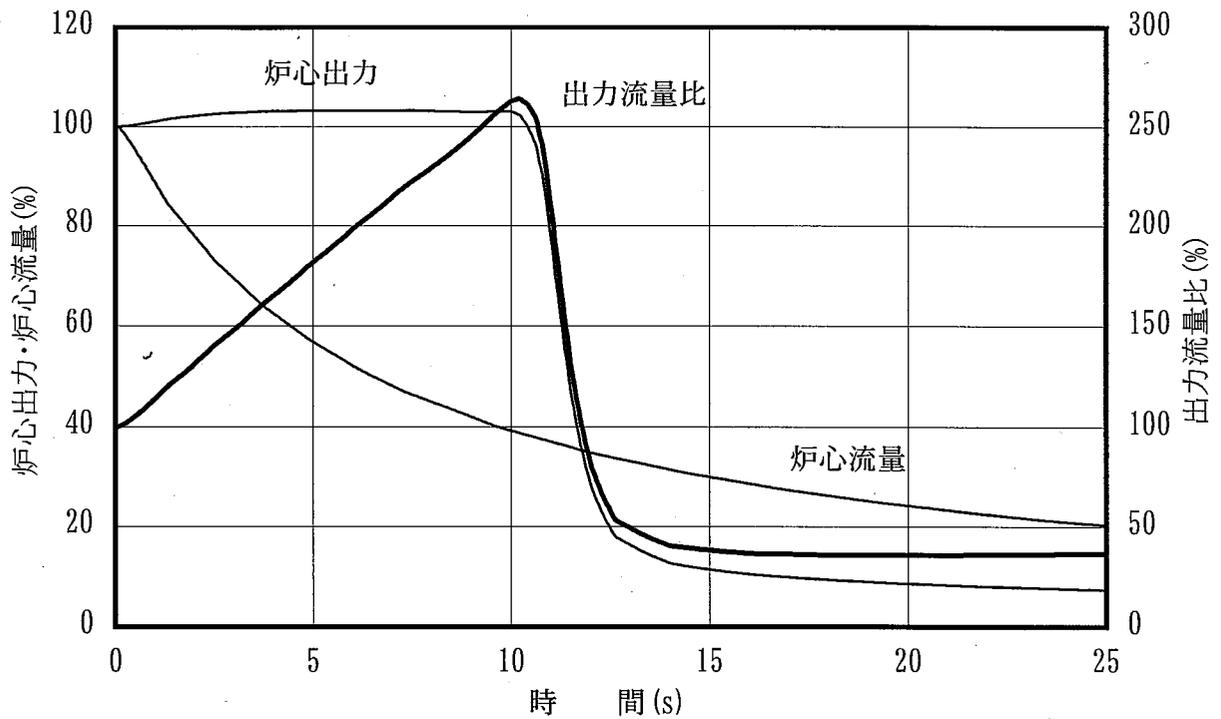
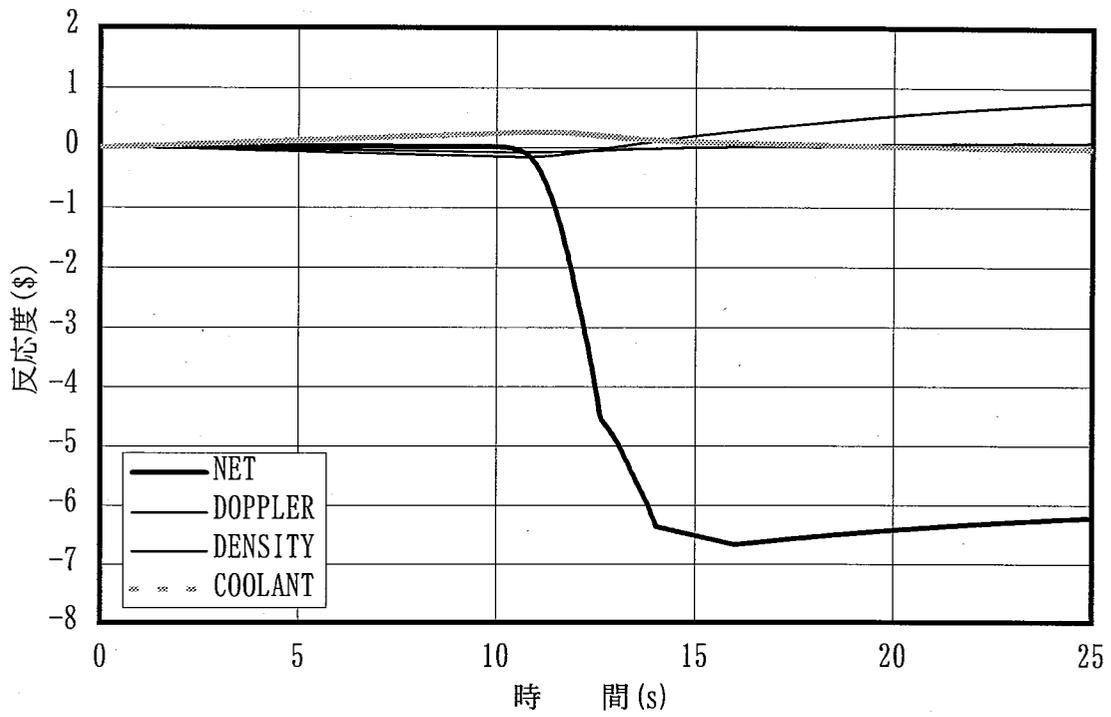


図3. 2-1 基準条件の解析結果 (非同時性考慮)

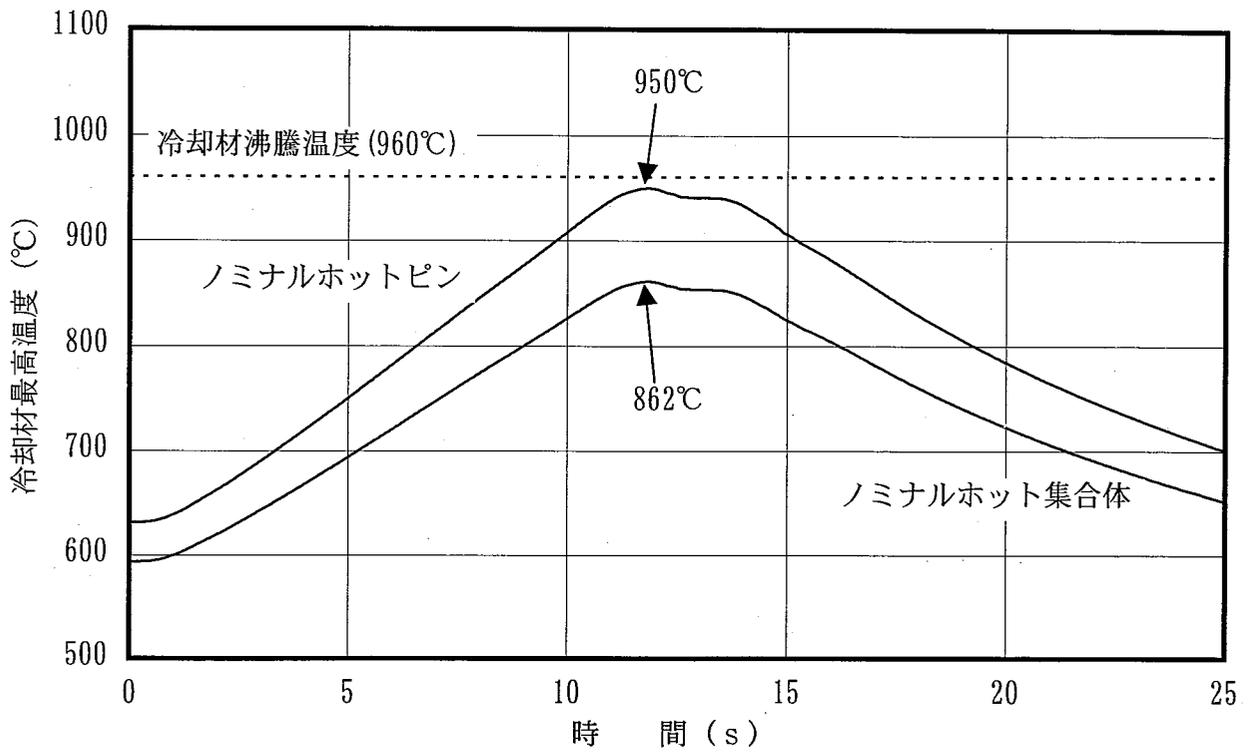


図3.2-2 基準条件の解析結果 (非同時性考慮、冷却材最高温度)

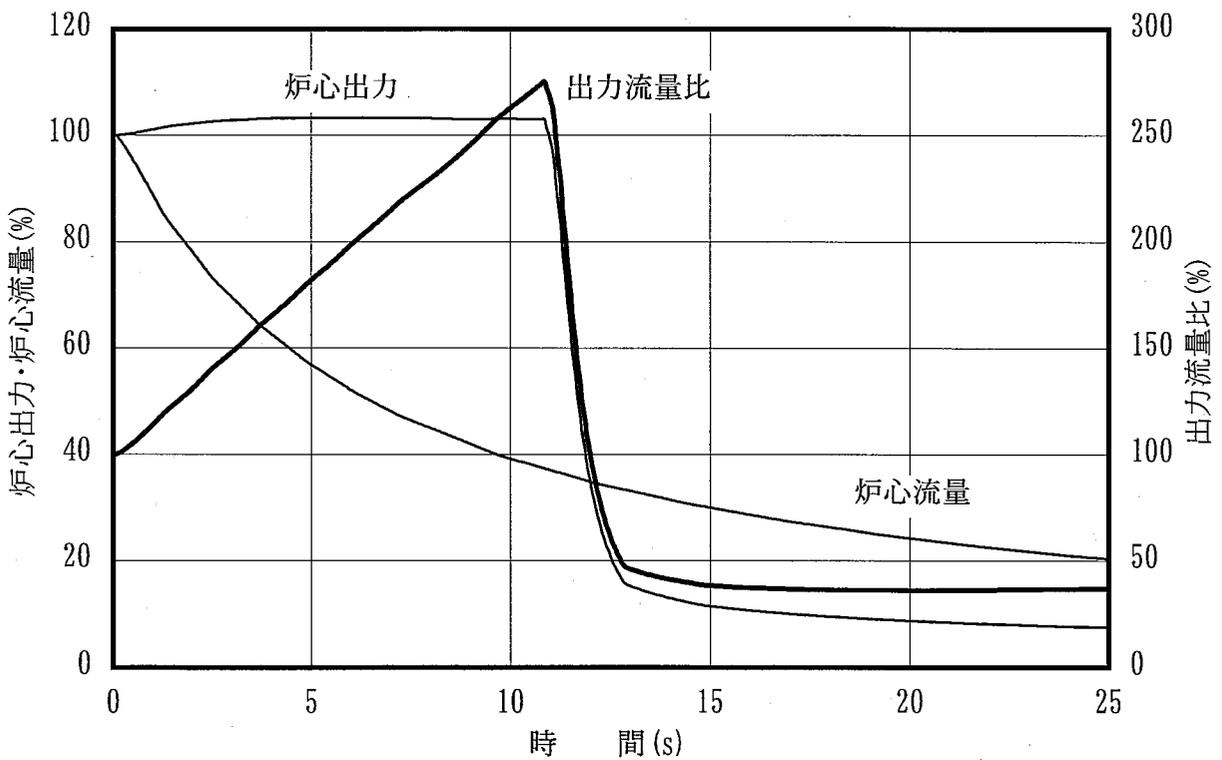
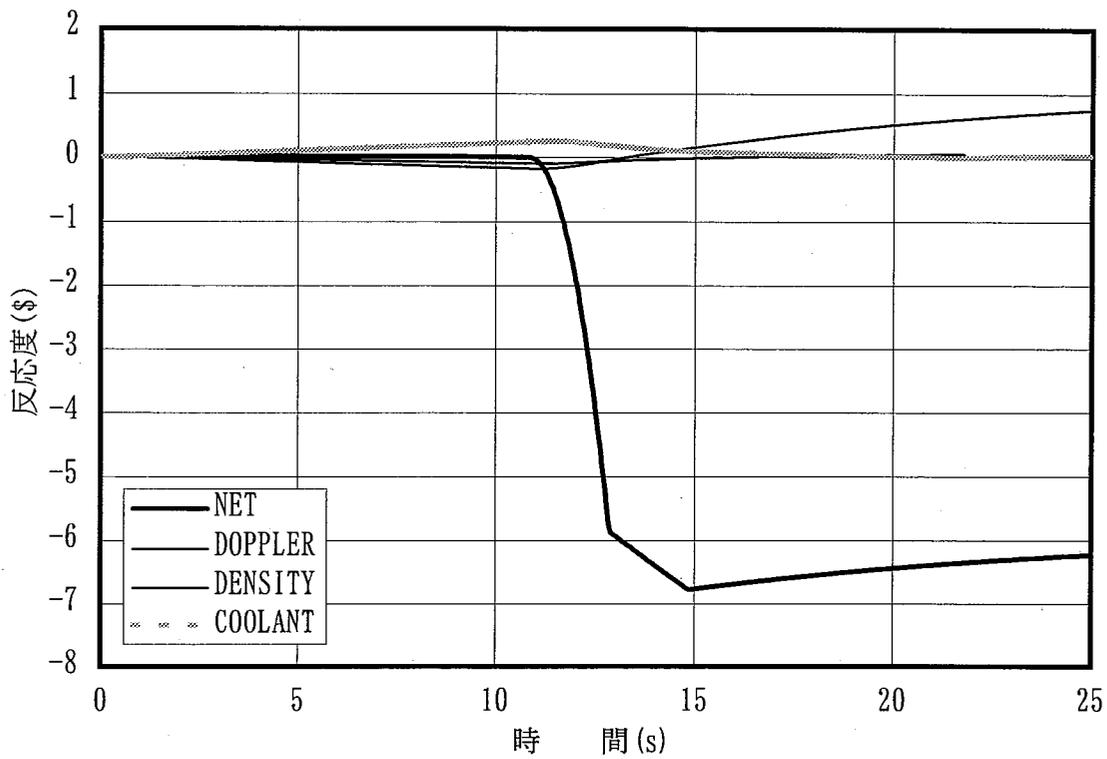


図3.2-3 基準条件の解析結果 (非同時性無視)

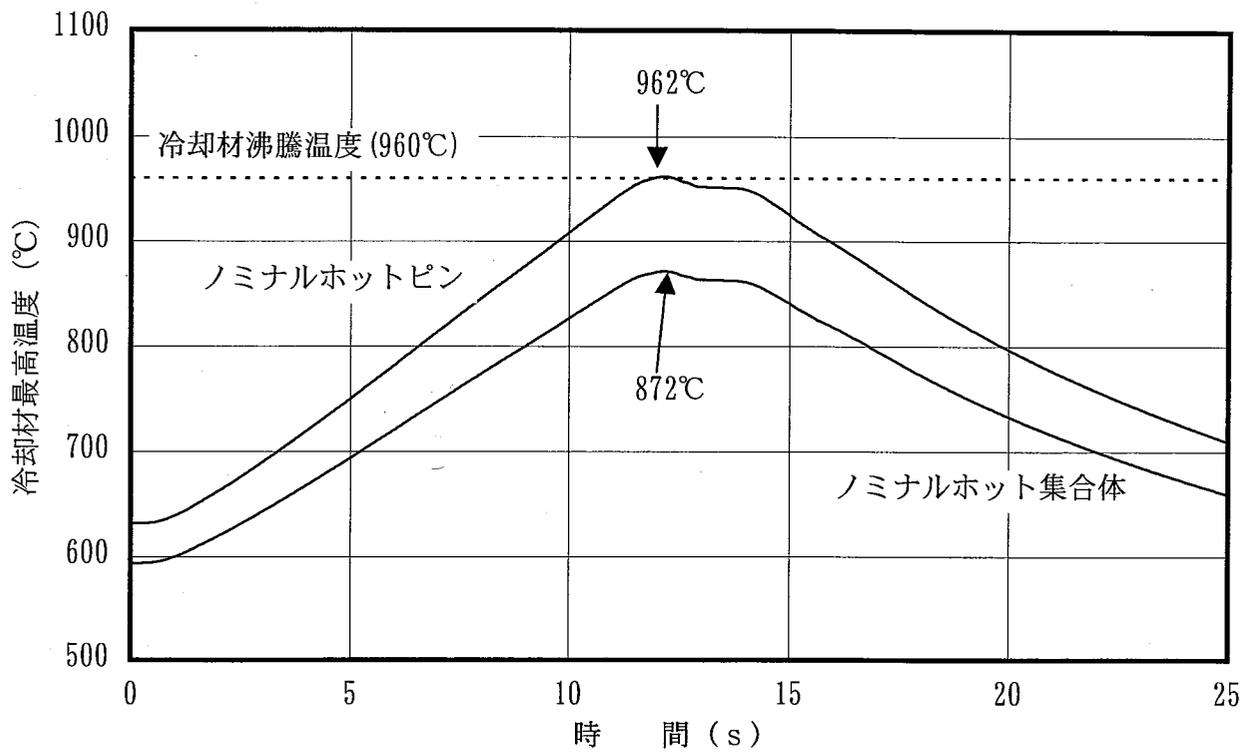


図3.2-4 基準条件の解析結果 (非同時性無視、冷却材最高温度)

3.3 パラメータ解析

(1) 検討の着眼点

前節までの検討結果を踏まえて、ULOF 事象に対して不確実因子である SASS 切り離し温度、流量半減時間、ドブプラ反応度係数及び冷却材反応度係数をパラメータとして、SAS4A コードを用いたパラメータ解析を実施する。ここで、それぞれの不確実因子の不確定巾が ULOF 時の冷却材最高温度に与える影響を定量化する。また、これらの解析結果を用いて、炉心冷却材流量、炉心出力に影響しない直接的要因の不確実因子である SASS 初期温度、SASS 輸送遅れ、SASS 1 次遅れが ULOF 時の冷却材最高温度に与える影響を評価する。

なお、基準条件における冷却材最高温度は、図 3.2-3 及び図 3.2-4 に示したように、冷却材最高温度は 962 であり、冷却材沸騰温度 960 をわずかに超える結果となっている。

(2) SASS 切り離し温度の感度解析

基準条件に対して、SASS 切り離し温度の不確定巾を考慮した SASS 切り離し時間を表 3.3-1 に示す。ここで、パラメータ解析における SASS 切り離し温度の不確定巾としては、直接的要因の影響分析に使用できるように 3 (24、1 = 8 を想定) を設定した。SASS 切り離し温度として、基準条件+3 の 691 (=667 +24) とした場合は SASS 切り離し時間の平均値は 12.40 秒となり、基準条件-3 の 643 (=667 -24) とした場合の SASS 切り離し時間の平均値は 9.26 秒となった。

また、SASS 切り離し温度として、基準条件+3 とした場合及び基準条件-3 とした場合のノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度を図 3.3-1 に示す。

同図より、SASS 切り離し温度を基準条件+3 とした場合は基準条件より SASS 切り離し温度が高い分 SASS 切り離しが 1.55 秒遅れ、ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 1011 と、基準条件の約 962 より約 49 高くなり、さらに厳しい結果となった。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾+1 (+8) に対する、冷却材最高温度の感度を求めると約+16.4 / (= (1011 -962) /3) となる。

一方、SASS 切り離し温度を基準条件-3 とした場合は基準条件より SASS 切り離し温度が低い分 SASS 切り離しが 1.59 秒早まり、ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 912 と、基準条件の約 962 より約 50 低くなり、冷却材沸騰温度以下とすることができた。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾-1 (-8) に対する、冷却材最高温度の感度を求めると約+16.5 / $(=(912 -962)/-3)$ となる。

以上の検討結果を表 3.3-2 にまとめる。不確定因子として SASS 切り離し温度を考慮した場合、不確定巾の方向によらずノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する感度係数は約+16.5 / となる。

(3) 流量半減時間の感度解析

a . 流量半減時間 6.17 秒 (標準値-1) の場合

基準条件に対して、流量半減時間の不確定巾を-1 想定して、流量半減時間 6.17 秒 (=6.50 秒-0.33 秒) とした場合の、SASS 切り離し時間を求める目的で実施した SASS 切り離しを考慮しない場合の ULOF 事象挙動解析結果を図 3.3-2 に示す。基準条件 (図 3.1-2 参照) に比べると流量半減時間が短くなっている分、応答時間が早くなっている (例えば基準条件では約 21 秒である即発臨界超過が約 20 秒となる等) が、挙動自身には有意な差は生じていない。

この解析結果を用いて、SASS の設置を想定した各制御棒の SASS 感知合金の温度応答を求めた結果を図 3.3-3 及び図 3.3-4 に示す。ここで、SASS 感知合金温度が(2) 項と同様に SASS 切り離し温度の基準値及び不確定巾を考慮した温度に到達する時間をまとめ、表 3.3-3 の(a)に整理する。

表 3.3-3 の(a)より、SASS 切り離し時間として、感知合金温度が SASS 切り離し温度の標準値である 667 となる時間を各制御棒集合体で平均すると、10.71 秒となる。この SASS 切り離し時間により ULOF 事象を解析した結果を図 3.3-5 に示す。また、本条件におけるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度を図 3.3-6 の(a)に示す。基準条件に比べて SASS 応答遅れ時間 (輸送遅れ、1 次遅れ) により SASS 切り離し時間における冷却材流量が相対的に減少するため、ノミナルホットピンの冷却材最高温度は 973 と、基準条件の 962 より約 11 高く、さらに

厳しい結果となった。

また、(2)項と同様に SASS 切り離し温度の不確定巾+3 を想定し、SASS 切り離し温度 691 (=667 +24) となる時間を各制御棒集合体で平均すると、12.32 秒となる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-6 の(b)に示す。ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 1024 と基準の SASS 切り離し温度の 973 よりも約 51 高く、さらに厳しい結果となった。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾+1 (+8) に対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約+16.8 / (=(1024 -973)/3) となる。

一方、SASS 切り離し温度の不確定巾-3 を想定し、SASS 切り離し温度 643 (=667 -24) となる時間を各制御棒集合体で平均すると、9.16 秒となる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-7 の(a)に示す。ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 922 と基準の SASS 切り離し温度の 973 よりも約 51 低く、冷却材沸騰温度以下となった。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾-1 (-8) に対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約+17.2 / (=(922 -973)/-3) となる。

以上の検討結果を表 3.3-4 の(a)にまとめる。本条件における不確定因子・SASS 切り離し温度のノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する感度係数は約 +17.0 と基準条件の約+16.5 / よりわずかに上昇する。

b . 流量半減時間 6.83 秒 (標準値+1) の場合

基準条件に対して、流量半減時間の不確定巾を+1 想定して、流量半減時間 6.83 秒 (=6.50 秒+0.33 秒) とした場合の、SASS 切り離し時間を求める目的で実施した SASS 切り離しを考慮しない場合の ULof 事象挙動解析結果を図 3.3-8 に示す。基準条件 (図 3.1-2 参照) に比べると流量半減時間が長くなっている分、応答時間が遅くなるが、挙動自身には有意な差は生じていない。

この解析結果を用いて、SASS の設置を想定した各制御棒の SASS 感知合金の温度応答を求めた結果を図 3.3-9 及び図 3.3-10 に示す。ここで、SASS 感知合金温度が (2)項と同様に SASS 切り離し温度の基準値及び不確定巾を考慮した温度に到達する

時間をまとめ、表 3.3-3 の(b)に整理する。

表 3.3-3 の(b)より、SASS 切り離し時間として、感知合金温度が SASS 切り離し温度の標準値である 667 となる時間を各制御棒集合体で平均すると、10.99 秒となる。この SASS 切り離し時間により ULOF 事象を解析した結果を図 3.3-11 に示す。また、本条件におけるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度を図 3.3-12 の(a)に示す。基準条件に比べて流量半減時間が大きいため、相対的に SASS 応答遅れ時間（輸送遅れ、1 次遅れ）が緩和されるため、ノミナルホットピンの冷却材最高温度は 951 と、基準条件の 962 より約 11 低く、冷却材沸騰温度以下となる。

また、(2)項と同様に SASS 切り離し温度の不確定巾+3 を想定し、SASS 切り離し温度 691 ($=667 + 24$)となる時間を各制御棒集合体で平均すると、12.57 秒となる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-12 の(b)に示す。ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 999 と基準の SASS 切り離し温度の 951 よりも約 48 高く、冷却材沸騰温度を超える結果となった。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾+1 (+8)に対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約 $+16.0 / (= (999 - 951) / 3)$ となる。

一方、SASS 切り離し温度の不確定巾-3 を想定し、SASS 切り離し温度 643 ($=667 - 24$)となる時間を各制御棒集合体で平均すると、9.37 秒となる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-13 の(a)に示す。ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 902 と基準の SASS 切り離し温度の 951 よりも約 49 低く、冷却材沸騰温度からの温度差は拡大した。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾-1 (-8)に対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約 $+16.3 / (= (902 - 951) / -3)$ となる。

以上の検討結果を表 3.3-4 の(b)にまとめる。本条件における不確定因子・SASS 切り離し温度のノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する感度係数は約 +16.2 と基準条件の約+16.5 / よりわずかに小さくなる。

c . 冷却材最高温度に対する流量半減時間の感度係数

以上のパラメータ解析結果をもとに、流量半減時間のノミナルホットピンの冷却材最高温度への依存性を表 3.3-4 の(c)に整理した。また、流量半減時間をパラメータとした場合のノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する SASS 切り離し温度の依存性について表 3.3-5 に整理した。

表 3.3-4 の(c)より、流量半減時間のノミナルホットピン冷却材最高温度に対する感度係数を求めると、流量半減時間を-1 (6.17 秒)とした場合は-11.7 / となり、+1 (6.83 秒)とした場合は-10.6 / となることが明らかとなった。このことから、不確定因子として流量半減時間を想定した場合、不確定巾の方向に依存性はあるもの、ノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する感度係数は約-11.1 / と判断される。

一方、表 3.3-5 より、流量半減時間を延ばすことにより冷却材沸騰防止の目的の SASS 切り離し時間への要求条件は緩和できることがわかった。なお、SASS への要求条件は、5 章で検討する。

(4) ドップラ反応度係数の感度解析

a . ドップラ反応度係数 90% (標準値-1) の場合

基準条件に対して、ドップラ反応度係数の不確定巾を-1 想定して、ドップラ反応度係数 90% (=100%-10%)とした場合の、SASS 切り離し時間を求める目的で実施した SASS 切り離しを考慮しない場合の ULOF 事象挙動解析結果を図 3.3-14 に示す。基準条件 (図 3.1-2 参照) に比べるとドップラ反応度が少なくなっているため、炉心出力が上昇し、出力流量比の増加が大きい。このため、冷却材温度上昇、即発臨界超過に至る時間が早くなっているが、それ以外には有意な差は生じていない。

この解析結果を用いて、SASS の設置を想定した各制御棒の SASS 感知合金の温度応答を求めた結果を図 3.3-15 及び図 3.3-16 に示す。ここで、SASS 感知合金温度が (2)項と同様に SASS 切り離し温度の基準値及び不確定巾を考慮した温度に到達する時間をまとめ、表 3.3-6 の(a)に整理する。

表 3.3-6 の(a)より、SASS 切り離し時間として、感知合金温度が SASS 切り離し温

度の標準値である 667 となる時間を各制御棒集合体で平均すると、10.78 秒となる。この SASS 切り離し時間により ULOF 事象を解析した結果を図 3.3-17 に示す。また、本条件におけるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度を図 3.3-18 の(a)に示す。基準条件に比べて炉心出力の上昇が大きいため、ノミナルホットピンの冷却材最高温度は 968 と、基準条件の 962 より約 6 高く、さらに厳しい結果となった。

また、(2)項と同様に SASS 切り離し温度の不確定巾+3 を想定し、SASS 切り離し温度 691 ($=667 +24$)となる時間を各制御棒集合体で平均すると、12.29 秒となる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-18 の(b)に示す。ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 1019 と基準の SASS 切り離し温度の 968 よりも約 51 高く、さらに厳しい結果となった。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾+1 (+8)に対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約 $+16.9 / (=(1019 -968) / 3)$ となる。

一方、SASS 切り離し温度の不確定巾-3 を想定し、SASS 切り離し温度 643 ($=667 -24$)となる時間を各制御棒集合体で平均すると、9.23 秒となる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-19 の(a)に示す。ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 917 と基準の SASS 切り離し温度の 968 よりも約 51 低く、冷却材沸騰温度以下となった。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾-1 (-8)に対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約 $+17.1 / (=(917 -968) / -3)$ となる。

以上の検討結果を表 3.3-7 の(a)にまとめる。本条件における不確定因子・SASS 切り離し温度のノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する感度係数は約 +17.0 と基準条件の約+16.5 / よりわずかに上昇する。

b . ドブプラ反応度係数 110% (標準値+1)の場合

基準条件に対して、ドブプラ反応度係数の不確定巾を+1 想定して、ドブプラ反応度係数 110% ($=100\%+10\%$)とした場合の、SASS 切り離し時間を求める目的で実施した SASS 切り離しを考慮しない場合の ULOF 事象挙動解析結果を図 3.3-20 に示す。

基準条件（図 3.1-2 参照）に比べると負のドップラ反応度が大きいための炉心出力の上昇が抑制され、約 14 秒以降の炉心出力は定格出力以下となり、出力流量比も小さくなっている。それ以外の挙動は基準条件と有意な差は生じていない。

この解析結果を用いて、SASS の設置を想定した各制御棒の SASS 感知合金の温度応答を求めた結果を図 3.3-21 及び図 3.3-22 に示す。ここで、SASS 感知合金温度が(2)項と同様に SASS 切り離し温度の基準値及び不確定巾を考慮した温度に到達する時間をまとめ、表 3.3-6 の(b)に整理する。

表 3.3-6 の(b)より、SASS 切り離し時間として、感知合金温度が SASS 切り離し温度の標準値である 667 となる時間を各制御棒集合体で平均すると、10.91 秒となる。この SASS 切り離し時間により ULOF 事象を解析した結果を図 3.3-23 に示す。また、本条件におけるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度を図 3.3-24 の(a)に示す。基準条件に比べてドップラ反応度が大きいため、炉心出力の上昇及び冷却材温度の上昇が抑制され、SASS 切り離し時間に対する SASS 応答遅れ時間（輸送遅れ、1次遅れ）の効果が緩和されるため、ノミナルホットピンの冷却材最高温度は 956 と、基準条件の 962 より約 6 低く、冷却材沸騰温度以下となる。

また、(2)項と同様に SASS 切り離し温度の不確定巾+3 を想定し、SASS 切り離し温度 691 ($=667 +24$)となる時間を各制御棒集合体で平均すると、12.50 秒となる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-25 の(b)に示す。ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 1004 と基準の SASS 切り離し温度の 956 よりも約 48 高く、冷却材沸騰温度を超える結果となった。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾+1 (+8)に対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約 $+16.0 / ((1004 - 956) / 3)$ となる。

一方、SASS 切り離し温度の不確定巾-3 を想定し、SASS 切り離し温度 643 ($=667 -24$)となる時間を各制御棒集合体で平均すると、9.30 秒となる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-25 の(a)に示す。ノミナルホットピンの冷却材最高温

度は約 907 と基準の SASS 切り離し温度の 956 よりも約 49 低く、冷却材沸騰温度からの温度差は拡大した。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾-1 (-8) に対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約 $+16.2 / ((907 - 956) / -3)$ となる。

以上の検討結果を表 3.3-7 の(b)にまとめる。本条件における不確定因子・SASS 切り離し温度のノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する感度係数は約 +16.1 と基準条件の約+16.5 / よりわずかに小さくなる。

c . 冷却材最高温度に対するドップラ反応度係数の感度係数

以上のパラメータ解析結果をもとに、ドップラ反応度係数のノミナルホットピンの冷却材最高温度への依存性を表 3.3-7 の(c)に整理した。また、ドップラ反応度係数をパラメータとした場合のノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する SASS 切り離し温度の依存性について表 3.3-8 に整理した。

表 3.3-7 の(c)より、ドップラ反応度係数のノミナルホットピン冷却材最高温度に対する感度係数を求めると、ドップラ反応度係数を-1 (-10%)とした場合は-6.4 / となり、+1 (+10%)とした場合は-5.8 / となることが明らかとなった。このことから、不確定因子としてドップラ反応度係数を想定した場合、不確定巾の方向に依存性はあるもの、ノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する感度係数は約-6.1 / と判断される。

一方、表 3.3-8 より、ドップラ反応度係数を大きくすることにより冷却材沸騰防止の目的の SASS 切り離し時間への要求条件は緩和できることがわかった。なお、SASS への要求条件は、5 章で検討する。

(5) 冷却材反応度係数の感度解析

a . 冷却材反応度係数 80% (標準値-1) の場合

基準条件に対して、冷却材反応度係数の不確定巾を-1 想定して、冷却材反応度係数 80% (=100%-20%) とした場合の、SASS 切り離し時間を求める目的で実施した SASS 切り離しを考慮しない場合の ULOF 事象挙動解析結果を図 3.3-26 に示す。基準条件 (図 3.1-2 参照) に比べると正の冷却材反応度が小さいため炉心出力の上昇

が抑制され、約 7 秒以降の炉心出力は定格出力以下となり、出力流量比も小さくなっている。それ以外の挙動は基準条件と有意な差は生じていない。

この解析結果を用いて、SASS の設置を想定した各制御棒の SASS 感知合金の温度応答を求めた結果を図 3.3-27 及び図 3.3-28 に示す。ここで、SASS 感知合金温度が(2)項と同様に SASS 切り離し温度の基準値及び不確定巾を考慮した温度に到達する時間をまとめ、表 3.3-9 の(a)に整理する。

表 3.3-9 の(a)より、SASS 切り離し時間として、感知合金温度が SASS 切り離し温度の標準値である 667 となる時間を各制御棒集合体で平均すると、11.08 秒となる。この SASS 切り離し時間により ULOF 事象を解析した結果を図 3.3-29 に示す。また、本条件におけるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度を図 3.3-30 の(a)に示す。基準条件に比べて冷却材反応度が小さいため、炉心出力の上昇及び冷却材温度の上昇が抑制され、SASS 切り離し時間に対する SASS 応答遅れ時間（輸送遅れ、1 次遅れ）の効果が緩和されるため、ノミナルホットピンの冷却材最高温度は 946 と、基準条件の 962 より約 16 低く、冷却材沸騰温度以下となる。

また、(2)項と同様に SASS 切り離し温度の不確定巾+3 を想定し、SASS 切り離し温度 691 ($=667 + 24$)となる時間を各制御棒集合体で平均すると、12.74 秒となる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-30 の(b)に示す。ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 992 と基準の SASS 切り離し温度の 946 よりも約 46 高く、冷却材沸騰温度を超える結果となった。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾+1 (+8)に対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約 $+15.3 / (= (992 - 946) / 3)$ となる。

一方、SASS 切り離し温度の不確定巾-3 を想定し、SASS 切り離し温度 643 ($=667 - 24$)となる時間を各制御棒集合体で平均すると、9.41 秒となる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-31 の(a)に示す。ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 899 と基準の SASS 切り離し温度の 946 よりも約 47 低く、冷却材沸騰温

度からの温度差は拡大した。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾-1 (-8)に
 対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約+15.6 / (=(899 -946)/-3
)となる。

以上の検討結果を表 3.3-10 の(a)にまとめる。本条件における不確定因子・SASS
 切り離し温度のノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する感度係数は約
 +15.4 と基準条件の約+16.5 / より小さくなる。

b . 冷却材反応度係数 120% (標準値+1)の場合

基準条件に対して、冷却材反応度係数の不確定巾を+1 想定して、冷却材反応度
 係数 120% (=100%+20%)とした場合の、SASS 切り離し時間を求める目的で実施し
 た SASS 切り離しを考慮しない場合の ULOF 事象挙動解析結果を図 3.3-32 に示す。基
 準条件 (図 3.1-2 参照) に比べると冷却材反応度が大きくなっている、炉心出力の
 上昇が継続され、出力流量比の増加が大きい。このため、冷却材温度上昇、即発臨
 界超過に至る時間も早くなっているが、それ以外には有意な差は生じていない。

この解析結果を用いて、SASS の設置を想定した各制御棒の SASS 感知合金の温度
 応答を求めた結果を図 3.3-33 及び図 3.3-34 に示す。ここで、SASS 感知合金温度が
 (2)項と同様に SASS 切り離し温度の基準値及び不確定巾を考慮した温度に到達する
 時間をまとめ、表 3.3-9 の(b)に整理する。

表 3.3-9 の(b)より、SASS 切り離し時間として、感知合金温度が SASS 切り離し温
 度の標準値である 667 となる時間を各制御棒集合体で平均すると、10.62 秒となる。
 この SASS 切り離し時間により ULOF 事象を解析した結果を図 3.3-35 に示す。また、
 本条件におけるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度を
 図 3.3-36 の(a)に示す。基準条件に比べて炉心出力の上昇が大きいため、ノミナル
 ホットピンの冷却材最高温度は 982 と、基準条件の 962 より約 20 高く、さら
 に厳しい結果となった。

また、(2)項と同様に SASS 切り離し温度の不確定巾+3 を想定し、SASS 切り離し
 温度 691 (=667 +24)となる時間を各制御棒集合体で平均すると、12.05 秒と
 なる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体
 の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-36 の(b)に示す。ノミナルホットピンの冷却

材最高温度は約 1037 と基準の SASS 切り離し温度の 982 よりも約 55 高く、さらに厳しい結果となった。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾+1 (+8)に対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約+18.1 / (=(1037 -982)/3)となる。

一方、SASS 切り離し温度の不確定巾-3 を想定し、SASS 切り離し温度 643 (=667 -24)となる時間を各制御棒集合体で平均すると、9.12 秒となる。この SASS 切り離し時間によるノミナルホットピン及びノミナルホット集合体の冷却材最高温度の解析結果を図 3.3-37 の(a)に示す。ノミナルホットピンの冷却材最高温度は約 928 と基準の SASS 切り離し温度の 982 よりも約 54 低く、冷却材沸騰温度以下となった。これより、SASS 切り離し温度の不確定巾-1 (-8)に対する、冷却材最高温度の感度係数を求めると約+18.2 / (=(928 -982)/-3)となる。

以上の検討結果を表 3.3-10 の(b)にまとめる。本条件における不確定因子・SASS 切り離し温度のノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する感度係数は約 +18.1 と基準条件の約+16.5 / より拡大する。

c . 冷却材最高温度に対する冷却材反応度係数の感度係数

以上のパラメータ解析結果をもとに、冷却材反応度係数のノミナルホットピンの冷却材最高温度への依存性を表 3.3-10 の(c)に整理した。また、冷却材反応度係数をパラメータとした場合のノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する SASS 切り離し温度の依存性について表 3.3-11 に整理した。

表 3.3-10 の(c)より、冷却材反応度係数のノミナルホットピン冷却材最高温度に対する感度係数を求めると、冷却材反応度係数を-1 (-20%)とした場合は+15.8 / となり、+1 (+20%)とした場合は+20.6 / となることが明らかとなった。このことから、不確定因子として冷却材反応度係数を想定した場合、不確定巾の方向に依存性はあるもの、ノミナルホットピンの冷却材最高温度に対する感度係数は約-18.2 / と判断される。

一方、表 3.3-11 より、冷却材反応度係数を小さくすることにより冷却材沸騰防止の目的の SASS 切り離し時間への要求条件は緩和できることがわかった。なお、SASS への要求条件は、5 章で検討する。

(6) 直接的因子の感度係数

SASS の直接的要因の不確実因子である SASS 初期温度、SASS 輸送遅れ、SASS 1 次遅れは、SASS 切り離し前の炉心流量、炉心出力に影響することはない。

このため、SASS 初期温度、SASS 輸送遅れ、SASS 1 次遅れの不確定巾について検討し、SASS 切り離し時間を定量化すれば、表 3.3-2 に示した基準条件の SASS 切り離し時間のサーベイ解析を用いて、冷却材最高温度を求めることができる。

表 3.3-12 に直接的因子が SASS 切り離し時間に与える影響を調べた。不確実因子の組み合わせとしては、SASS 初期温度と SASS 輸送遅れ、SASS 1 次遅れと SASS 輸送遅れとした。表 3.3-2 の SASS 切り離し温度のパラメータ解析結果の SASS 切り離し時間とノミナルホットピンの冷却材最高温度の関係に着目し、表 3.3-12 で得られた SASS 切り離し時間よりノミナルホットピンの冷却材最高温度を求め、表 3.3-13 の (a)及び(b)に示した。これより、直接的要因の不確実因子である SASS 切り離し温度、SASS 初期温度、SASS 輸送遅れ、SASS 1 次遅れのノミナルホットピン冷却材最高温度に対する感度係数を整理して、表 3.3-13 の(c)にまとめた。

表 3.3-13 の(c)に示したように、ノミナルホットピン冷却材最高温度に対する SASS 切り離し温度の感度係数は 16.4 / 、SASS 初期温度の感度係数は -21.3 / 、SASS 輸送遅れの感度係数は 13.4 / 、SASS 1 次遅れの感度係数は 6.1 / となる。

(7) パラメータ解析のまとめ

上記の結果を整理して、ノミナルホットピンの冷却材最高温度の感度係数（不確定因子 1 当たりの振れ巾）を表 3.3-14 にまとめる。同表より、ULOF 時のノミナルホットピンの冷却材最高温度に対して、最大の感度係数を与える不確実因子は、SASS 初期温度（SASS 隣接集合体出口温度）であり、その値は -21.3 / となる。

表3.3-1 SASS切り離し温度を感度としたSASS切り離し時間

制御棒 番号	SASS切り離し温度到達時間 (s)		
	643 *	667 *	691 *
16	8.457	10.020	11.488
46	9.099	10.643	12.158
53	9.091	10.632	12.149
99	8.818	10.386	11.89
109	8.696	10.251	11.755
136	10.392	12.071	13.75
144	10.644	12.344	14.044
152	8.909	10.459	11.957
SASS平均	9.263	10.851	12.399

* : SASS切り離し温度

表3.3-2 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果

SASS切り離し 温度()	SASS切り離し 時間(s)	冷却材最高温度()	
		ノミナル ホットピン	ノミナル ホット集合体
643.0	9.263	912.12	829.93
667.0	10.851	961.61	871.55
691.0	12.399	1010.72	912.86
感度係数 (/)	(-1)	16.50	13.88
	(+1)	16.37	13.77

表3.3-3 流量半減時間を感度としたSASS切り離し時間

(a) 流量半減時間-1 (6.17秒)の場合

制御棒 番号	SASS切り離し温度到達時間 (s)		
	643 *	667 *	691 *
16	8.372	9.887	11.342
46	8.994	10.502	11.989
53	8.986	10.494	11.979
99	8.725	10.250	11.736
109	8.605	10.126	11.602
136	10.268	11.919	13.559
144	10.515	12.188	13.848
152	8.813	10.323	11.798
SASS平均	9.160	10.711	12.232

* : SASS切り離し温度

(b) 流量半減時間+1 (6.83秒)の場合

制御棒 番号	SASS切り離し温度到達時間 (s)		
	643 *	667 *	691 *
16	8.545	10.126	11.642
46	9.208	10.791	12.333
53	9.2	10.783	12.323
99	8.915	10.512	12.052
109	8.791	10.383	11.916
136	10.521	12.231	13.95
144	10.776	12.509	14.248
152	9.009	10.592	12.123
SASS平均	9.371	10.991	12.573

* : SASS切り離し温度

表3.3-4 流量半減時間のパラメータ解析結果

(a) 流量半減時間-1 (6.17秒)の場合

SASS切り離し 温度()	SASS切り離し 時間(s)	冷却材最高温度()	
		ノミナル ホットピン	ノミナル ホット集合体
643.0	9.160	921.85	838.11
667.0	10.711	973.31	881.39
691.0	12.232	1023.61	923.70
感度係数 (/)	(-1)	17.15	14.43
	(+1)	16.77	14.10

(b) 流量半減時間+1 (6.83秒)の場合

SASS切り離し 温度()	SASS切り離し 時間(s)	冷却材最高温度()	
		ノミナル ホットピン	ノミナル ホット集合体
643.0	9.371	902.25	821.62
667.0	10.991	951.04	862.66
691.0	12.573	999.16	903.14
感度係数 (/)	(-1)	16.27	13.68
	(+1)	16.04	13.49

(c) 流量半減時間の感度係数

流量半減 時間(s)	SASS切り離し 時間(s)	冷却材最高温度()	
		ノミナル ホットピン	ノミナル ホット集合体
6.17	10.711	973.31	881.39
6.50	10.851	961.61	871.55
6.83	10.991	951.04	862.66
感度係数 (/)	(-1)	-11.70	-9.84
	(+1)	-10.57	-8.89

表3.3-5 流量半減時間の感度係数

(a) 解析結果のまとめ (冷却材最高温度: °C)

SASS切り離し 温度 (°C)		流量半減時間 (s)		
		6.17 (-1σ)	6.50 (基準)	6.83 (+1σ)
(-3σ)	643.0	921.85	912.12	902.25
(基準)	667.0	973.31	961.61	951.04
(+3σ)	691.0	1023.61	1010.72	999.16

(b) ノミナルホットピン冷却材最高温度への影響

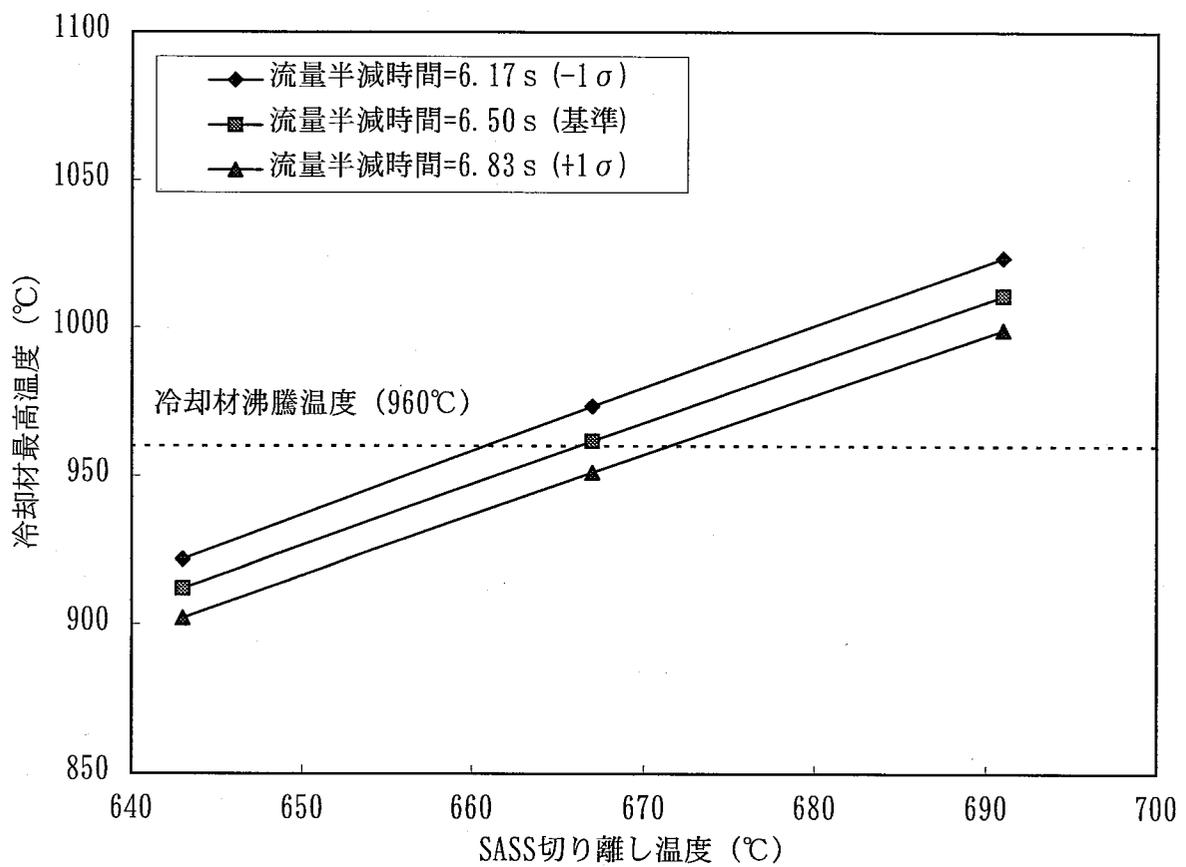


表3.3-6 ドップラ反応度係数を感度としたSASS切り離し時間

(a) ドップラ反応度係数-1 (90%) の場合

制御棒 番号	SASS切り離し温度到達時間 (s)		
	643 *	667 *	691 *
16	8.431	9.956	11.408
46	9.063	10.582	12.058
53	9.055	10.574	12.049
99	8.788	10.324	11.8
109	8.668	10.200	11.669
136	10.338	11.978	13.61
144	10.584	12.244	13.892
152	8.875	10.394	11.859
SASS平均	9.225	10.782	12.293

* : SASS切り離し温度

(b) ドップラ反応度係数+1 (110%) の場合

制御棒 番号	SASS切り離し温度到達時間 (s)		
	643 *	667 *	691 *
16	8.483	10.053	11.566
46	9.134	10.705	12.255
53	9.125	10.696	12.246
99	8.848	10.433	11.978
109	8.724	10.304	11.838
136	10.446	12.163	13.887
144	10.702	12.444	14.19
152	8.942	10.514	12.052
SASS平均	9.301	10.914	12.502

* : SASS切り離し温度

表3.3-7 ドップラ反応度係数のパラメータ解析結果

(a) ドップラ反応度係数-1 (-10%) の場合

SASS切り離し 温度()	SASS切り離し 時間(s)	冷却材最高温度()	
		ノミナル ホットピン	ノミナル ホット集合体
643.0	9.225	916.61	833.70
667.0	10.782	968.03	876.95
691.0	12.293	1018.72	919.58
感度係数 (/)	(-1)	17.14	14.42
	(+1)	16.90	14.21

(b) ドップラ反応度係数+1 (+10%) の場合

SASS切り離し 温度()	SASS切り離し 時間(s)	冷却材最高温度()	
		ノミナル ホットピン	ノミナル ホット集合体
643.0	9.301	907.12	825.72
667.0	10.914	955.81	866.67
691.0	12.502	1003.72	906.97
感度係数 (/)	(-1)	16.23	13.65
	(+1)	15.97	13.43

(c) ドップラ反応度係数の感度係数

ドップラ 反応度係数	SASS切り離し 時間(s)	冷却材最高温度()	
		ノミナル ホットピン	ノミナル ホット集合体
-10%	10.782	968.03	876.95
ノミナル	10.851	961.61	871.55
+10%	10.914	955.81	866.67
感度係数 (/)	(-1)	-6.42	-5.40
	(+1)	-5.80	-4.88

表3.3-8 ドップラ反応度係数の感度係数

(a) 解析結果のまとめ (冷却材最高温度: °C)

SASS切り離し 温度 (°C)		ドップラ反応度係数		
		-10% (-1σ)	(基準)	+10% (+1σ)
(-3σ)	643.0	916.61	912.12	907.12
(基準)	667.0	968.03	961.61	955.81
(+3σ)	691.0	1018.72	1010.72	1003.72

(b) ノミナルホットピン冷却材最高温度への影響

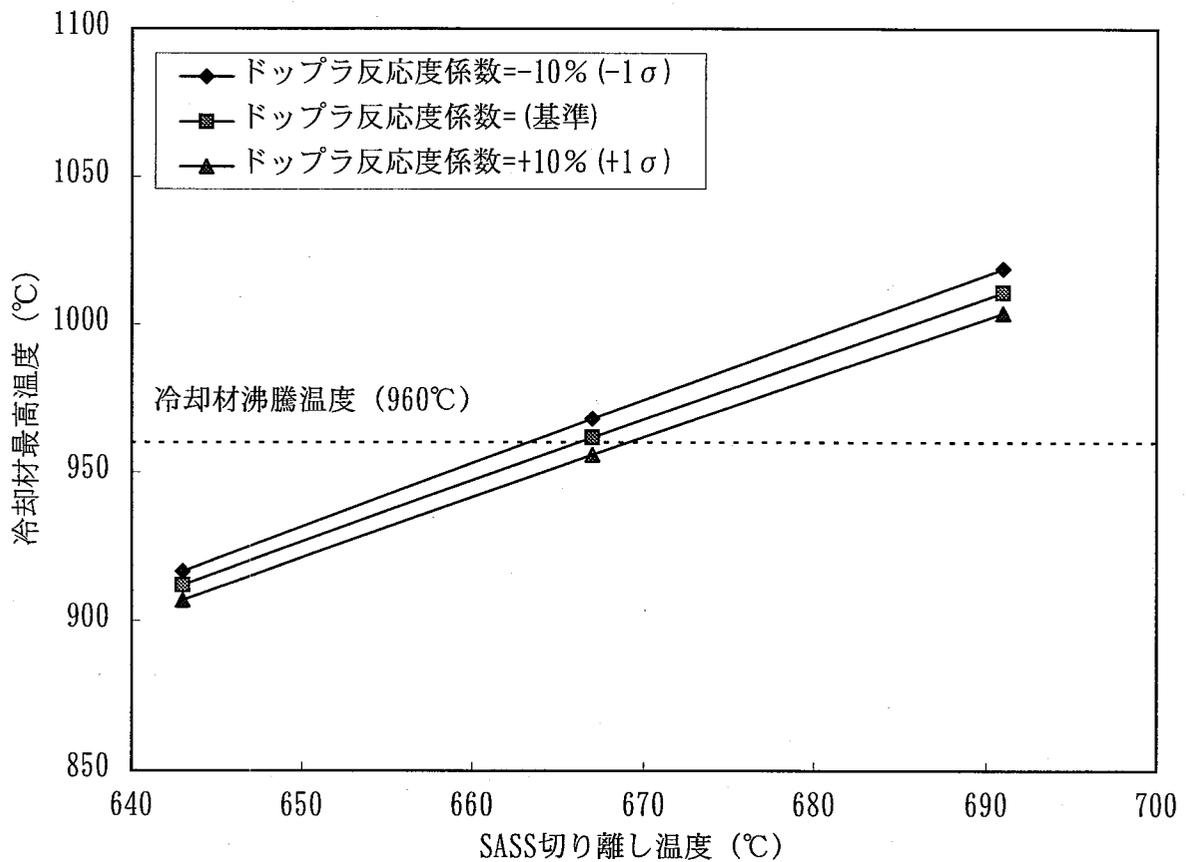


表3.3-9 冷却材反応度係数を感度としたSASS切り離し時間

(a) 冷却材反応度係数-1 (80%) の場合

制御棒 番号	SASS切り離し温度到達時間 (s)		
	643 *	667 *	691 *
16	8.561	10.182	11.759
46	9.234	10.860	12.486
53	9.225	10.851	12.476
99	8.936	10.574	12.19
109	8.808	10.439	12.042
136	10.587	12.383	14.2
144	10.853	12.679	14.523
152	9.039	10.666	12.278
SASS平均	9.405	11.079	12.744

* : SASS切り離し温度

(b) 冷却材反応度係数+1 (120%) の場合

制御棒 番号	SASS切り離し温度到達時間 (s)		
	643 *	667 *	691 *
16	8.354	9.829	11.218
46	8.965	10.426	11.825
53	8.957	10.419	11.818
99	8.701	10.183	11.587
109	8.585	10.065	11.466
136	10.199	11.760	13.296
144	10.433	12.009	13.557
152	8.78	10.243	11.634
SASS平均	9.122	10.617	12.050

* : SASS切り離し温度

表3.3-10 冷却材反応度係数のパラメータ解析結果

(a) 冷却材反応度係数-1 (80%)の場合

SASS切り離し 温度()	SASS切り離し 時間(s)	冷却材最高温度()	
		ノミナル ホットピン	ノミナル ホット集合体
643.0	9.405	899.04	818.93
667.0	11.079	945.81	858.26
691.0	12.744	991.59	896.77
感度係数 (/)	(-1)	15.59	13.11
	(+1)	15.26	12.83

(b) 冷却材反応度係数+1 (120%)の場合

SASS切り離し 温度()	SASS切り離し 時間(s)	冷却材最高温度()	
		ノミナル ホットピン	ノミナル ホット集合体
643.0	9.122	927.59	842.94
667.0	10.617	982.24	888.90
691.0	12.050	1036.51	934.55
感度係数 (/)	(-1)	18.22	15.32
	(+1)	18.09	15.22

(c) 冷却材反応度係数の感度係数

冷却材 反応度係数	SASS切り離し 時間(s)	冷却材最高温度()	
		ノミナル ホットピン	ノミナル ホット集合体
-20%	11.079	945.81	858.26
ノミナル	10.851	961.61	871.55
+20%	10.617	982.24	888.90
感度係数 (/)	(-1)	15.80	13.29
	(+1)	20.63	17.35

表3.3-11 冷却材反応度係数の感度係数

(a) 解析結果のまとめ (冷却材最高温度: °C)

SASS切り離し 温度 (°C)		冷却材反応度係数		
		-20% (-1σ)	(基準)	+20% (+1σ)
(-3σ)	643.0	899.04	912.12	927.59
(基準)	667.0	945.81	961.61	982.24
(+3σ)	691.0	991.59	1010.72	1036.51

(b) ノミナルホットピン冷却材最高温度への影響

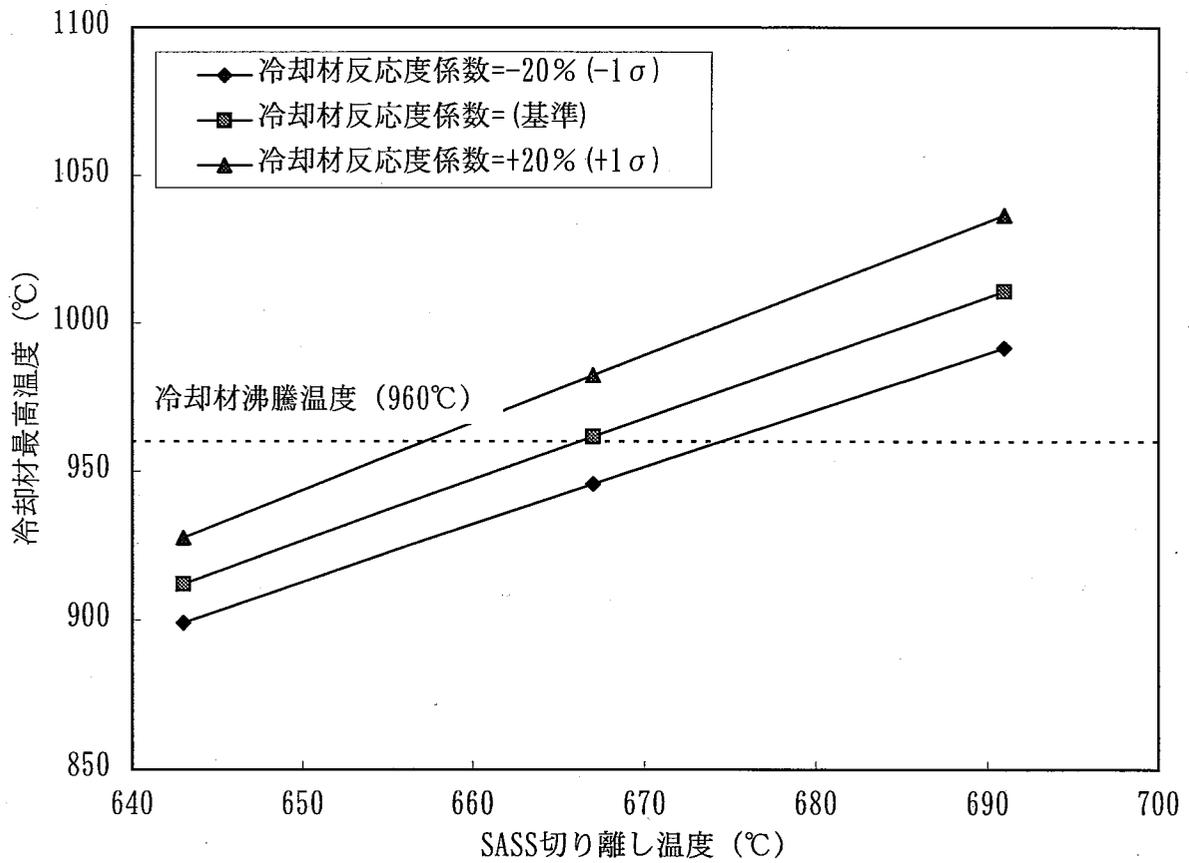


表3.3-12 直接的因子を感度としたSASS切り離し時間

(a) SASS初期温度とSASS輸送遅れの感度

初期温度 輸送遅れ	563.6 (-1)			570.3 (基準)			577.0 (+1)		
	0.8 s	1.0 s	1.2 s	0.8 s	1.0 s	1.2 s	0.8 s	1.0 s	1.2 s
16(*)	10.221	10.641	11.061	9.600	10.020	10.410	9.010	9.400	9.791
46(*)	10.887	11.327	11.767	10.221	10.643	11.067	9.598	10.006	10.414
53(*)	10.879	11.318	11.758	10.213	10.632	11.059	9.590	9.998	10.406
99(*)	10.611	11.040	11.470	9.964	10.386	10.793	9.356	9.755	10.155
109(*)	10.480	10.907	11.333	9.841	10.251	10.664	9.238	9.634	10.028
136(*)	12.399	12.876	13.352	11.616	12.071	12.528	10.894	11.332	11.769
144(*)	12.685	13.169	13.653	11.882	12.344	12.809	11.140	11.584	12.028
152(*)	10.686	11.120	11.554	10.037	10.459	10.873	9.427	9.830	10.233
平均時間	11.106	11.550	11.994	10.422	10.851	11.275	9.782	10.192	10.603

(注) 表中の値はSASS切り離し温度到達時間 (s) を示す。(*)は制御棒番号を示す。

(b) SASS 1次遅れとSASS輸送遅れの感度

一次遅れ 輸送遅れ	0.8 s (-1)			1.0 s (基準)			1.2 s (+1)		
	0.8 s	1.0 s	1.2 s	0.8 s	1.0 s	1.2 s	0.8 s	1.0 s	1.2 s
16(*)	9.407	9.812	10.217	9.600	10.020	10.410	9.790	10.196	10.601
46(*)	10.026	10.449	10.873	10.221	10.643	11.067	10.414	10.837	11.26
53(*)	10.018	10.441	10.864	10.213	10.632	11.059	10.406	10.829	11.252
99(*)	9.771	10.185	10.600	9.964	10.386	10.793	10.156	10.571	10.985
109(*)	9.648	10.059	10.471	9.841	10.251	10.664	10.033	10.444	10.856
136(*)	11.416	11.872	12.327	11.616	12.071	12.528	11.814	12.270	12.727
144(*)	11.683	12.146	12.609	11.882	12.344	12.809	12.081	12.544	13.008
152(*)	9.843	10.261	10.679	10.037	10.459	10.873	10.229	10.647	11.065
平均時間	10.227	10.653	11.080	10.422	10.851	11.275	10.615	11.042	11.469

(注) 表中の値はSASS切り離し温度到達時間 (s) を示す。(*)は制御棒番号を示す。

表3.3-13 直接的因子の感度係数の検討結果

(a) SASS初期温度とSASS輸送遅れの感度

SASS初期温度	SASS輸送遅れ		
	0.8 s (-1)	1.0 s (基準)	1.2 s (+1)
563.6 (-1)	969.70	983.78	997.86
570.3 (基準)	948.23	961.60	975.07
577.0 (+1)	928.28	941.08	953.88

(注)表中の値はノミナルホットピン冷却材最高温度()を示す。

(b) SASS 1次遅れとSASS輸送遅れの感度

SASS1次遅れ	SASS輸送遅れ(s)		
	0.8 s (-1)	1.0 s (基準)	1.2 s (+1)
0.8 s (-1)	942.15	955.44	968.88
1.0 s (基準)	948.23	961.60	975.07
1.2 s (+1)	954.27	967.68	981.22

(注)表中の値はノミナルホットピン冷却材最高温度()を示す。

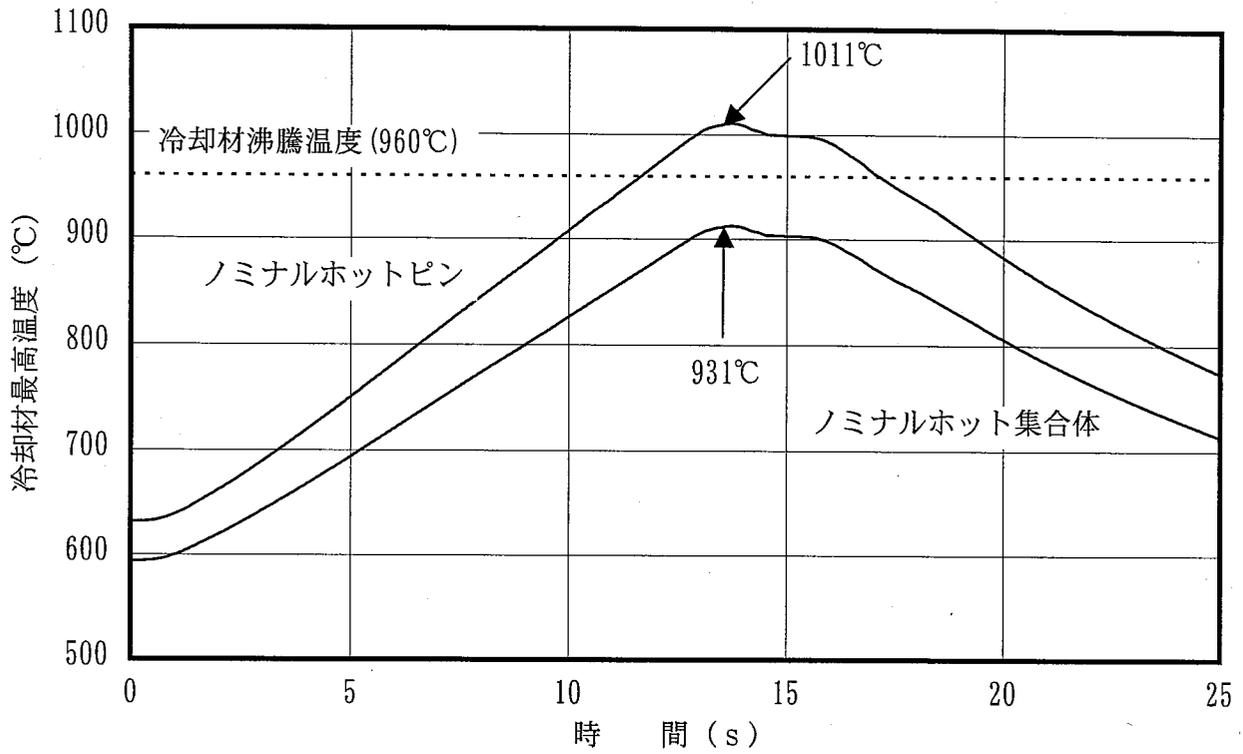
(c) 直接的因子の感度係数

不確定因子	不確定巾 (± 1)	感度係数(/)	
		(-1)	(+1)
SASS切り離し温度	± 8.0	16.50	16.37
SASS初期温度	± 6.7	-22.17	-20.52
SASS輸送遅れ	± 0.2 s	13.37	13.47
SASS 1次遅れ	± 0.2 s	6.16	6.07

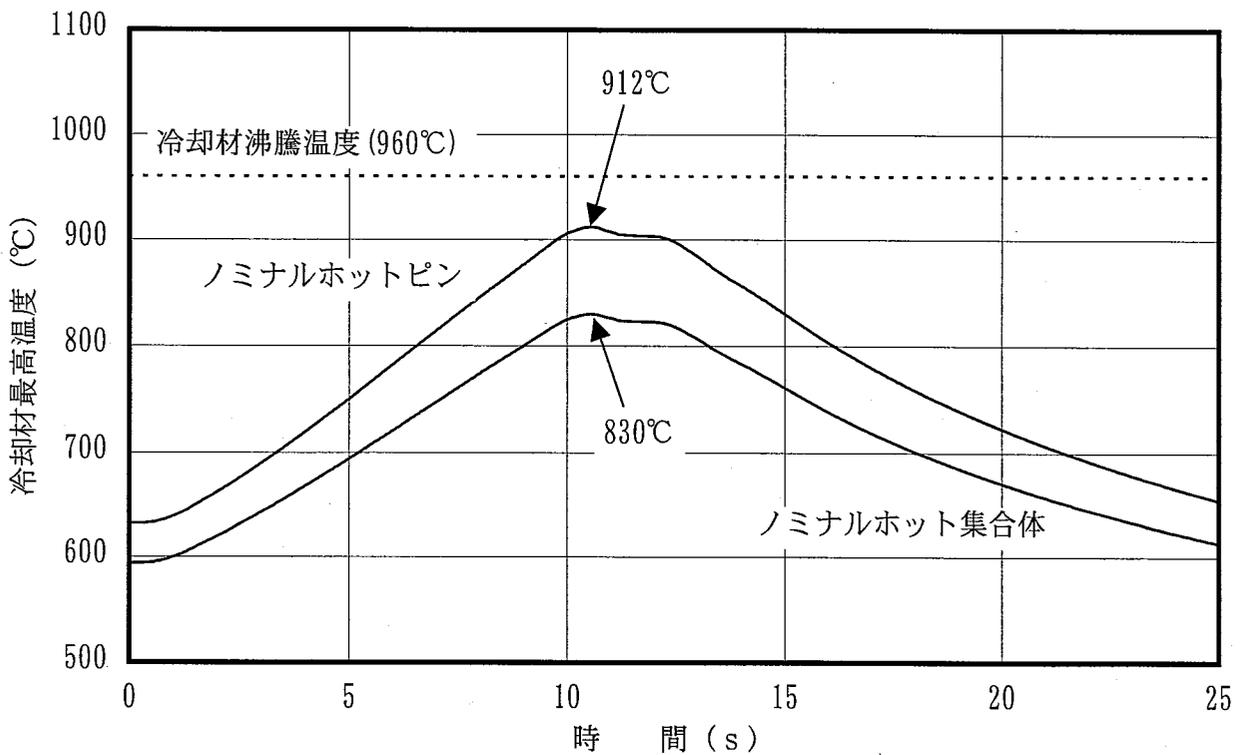
表3.3-14 パラメータ解析のまとめ（各感度係数）

不確定因子	不確定巾	ノミナルホットピン 冷却材最高温度()	感度係数(/)
流量半減時間	-1	973.31	-11.70
	基準状態	961.61	-11.13
	+1	951.04	-10.57
ドブプラ反応度係数	-1	968.03	-6.42
	基準状態	961.61	-6.11
	+1	955.81	-5.80
冷却材反応度係数	-1	945.81	15.80
	基準状態	961.61	18.22
	+1	982.24	20.63
SASS切り離し温度	-3	912.12	16.50
	基準状態	961.61	16.43
	+3	1010.72	16.37
SASS輸送遅れ時間	-1	948.23	13.38
	基準状態	961.61	13.42
	+1	975.07	13.46
SASS初期温度	-1	983.78	-22.17
	基準状態	961.61	-21.35
	+1	941.08	-20.53
SASS 1次遅れ時間	-1	955.44	6.17
	基準状態	961.61	6.12
	+1	967.68	6.07

(注) 各不確定因子の基準状態における感度係数は、平均値を示す。



(a) SASS切り離し温度：691°C (+1σ) の場合



(b) SASS切り離し温度：643°C (-1σ) の場合

図3. 3-1 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果

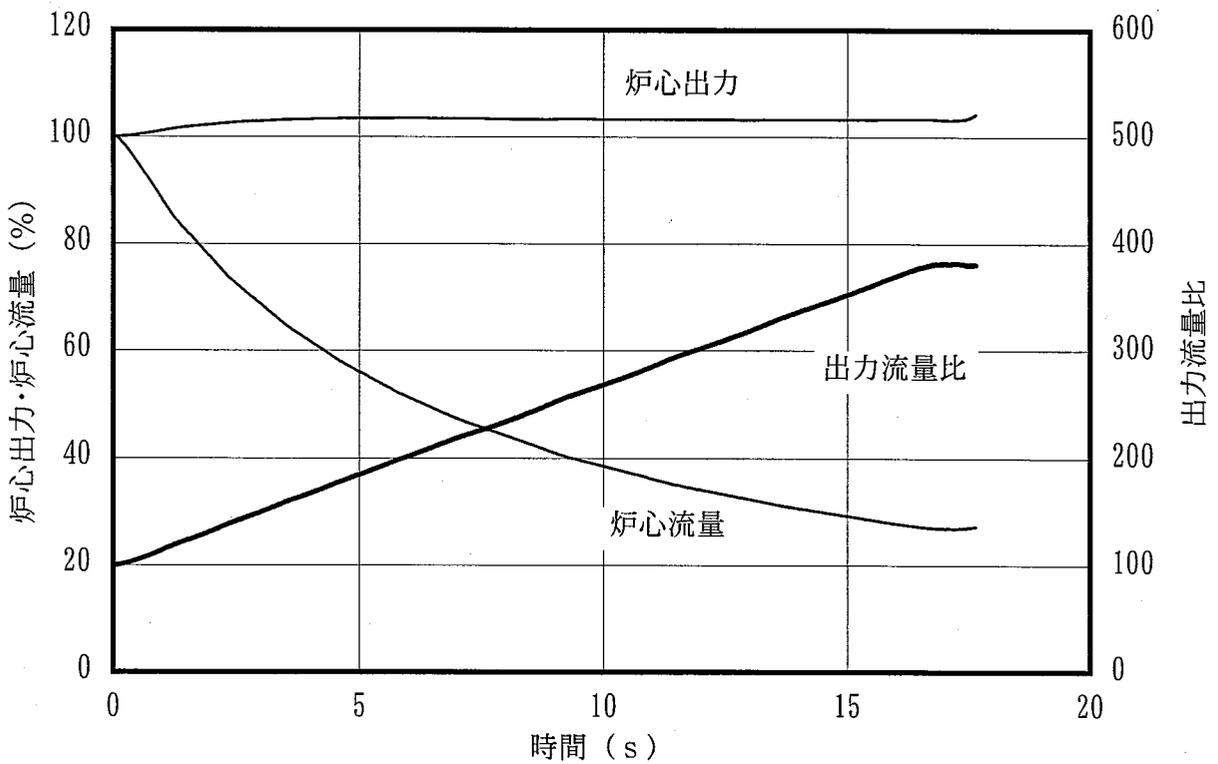
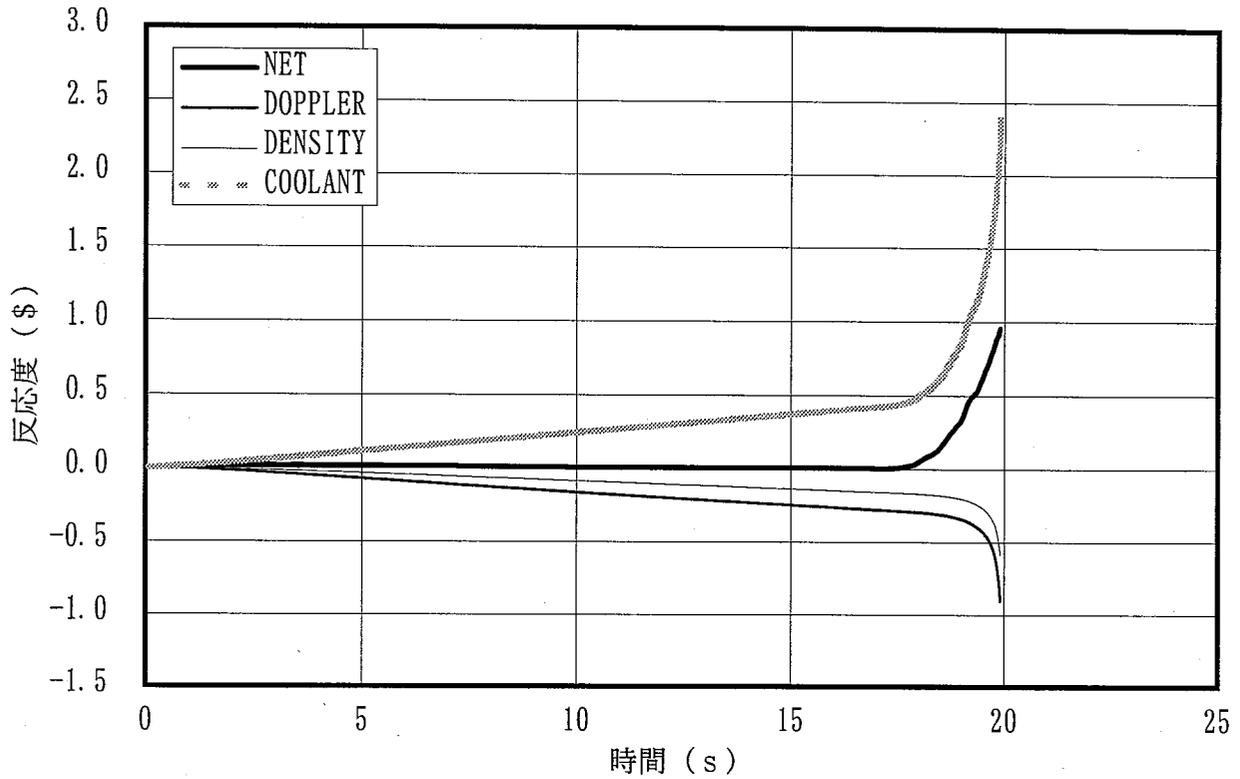
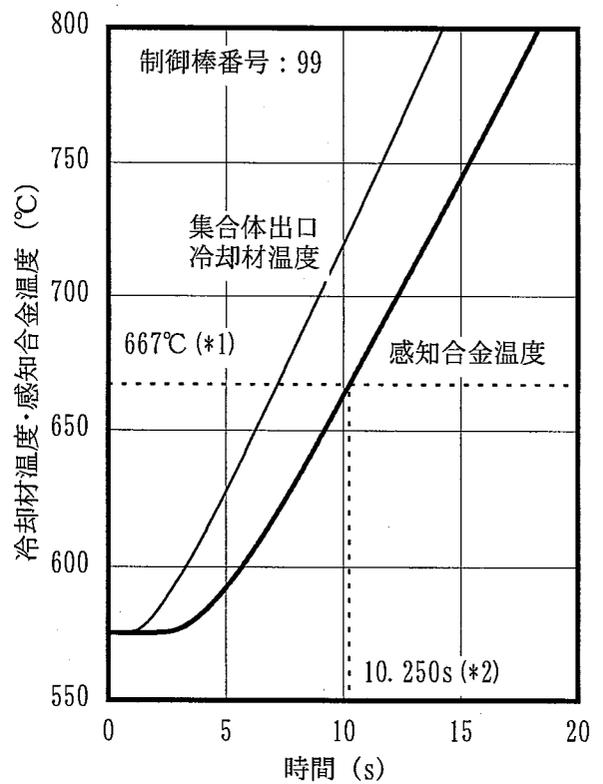
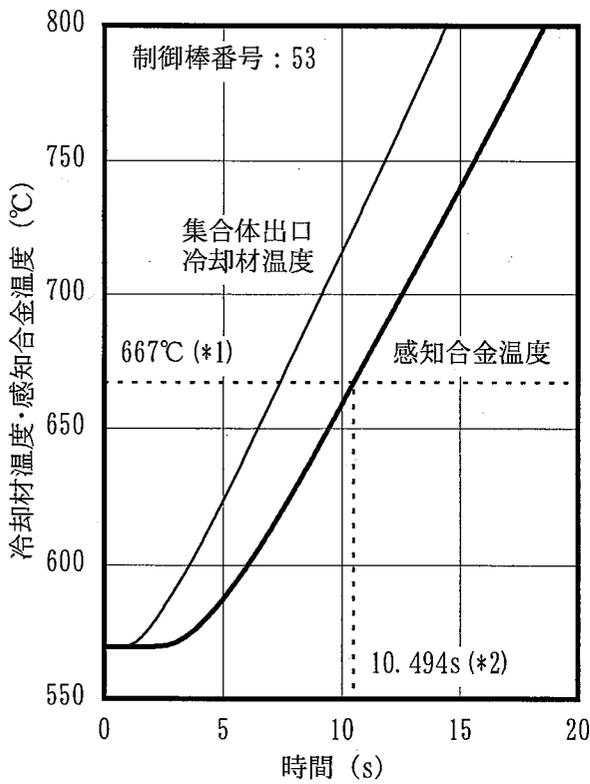
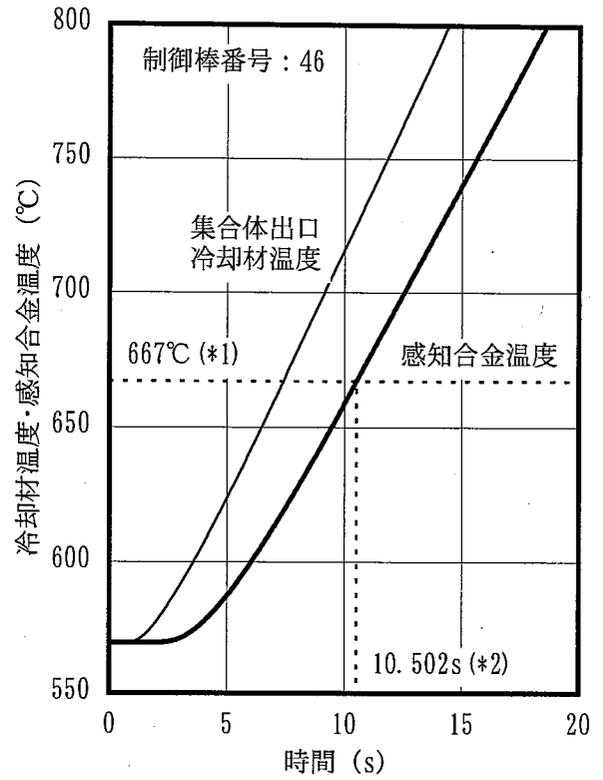
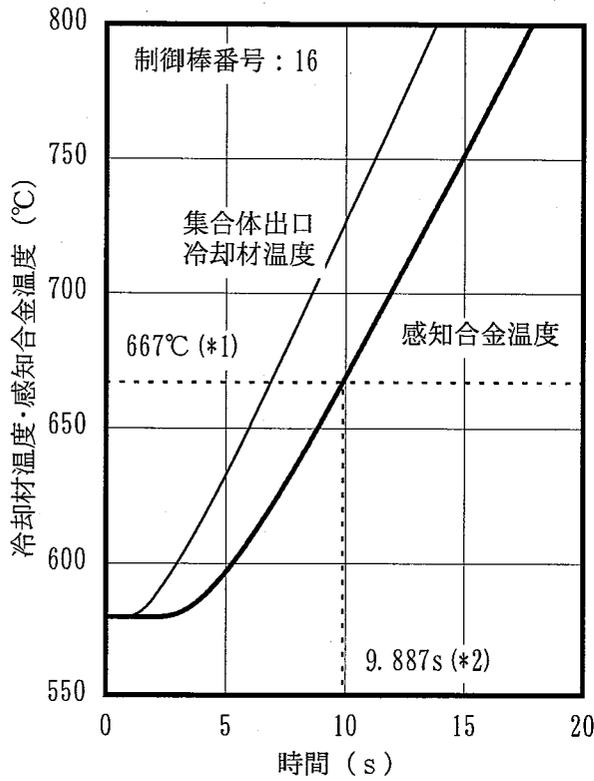


図3.3-2 流量半減時間-1 σ の解析結果 (SASS切り離しを考慮せず)



(*1) : SASS切り離し温度
 (*2) : SASS切り離し時間

図3.3-3 流量半減時間-1σのSASS切り離し時間(1/2)

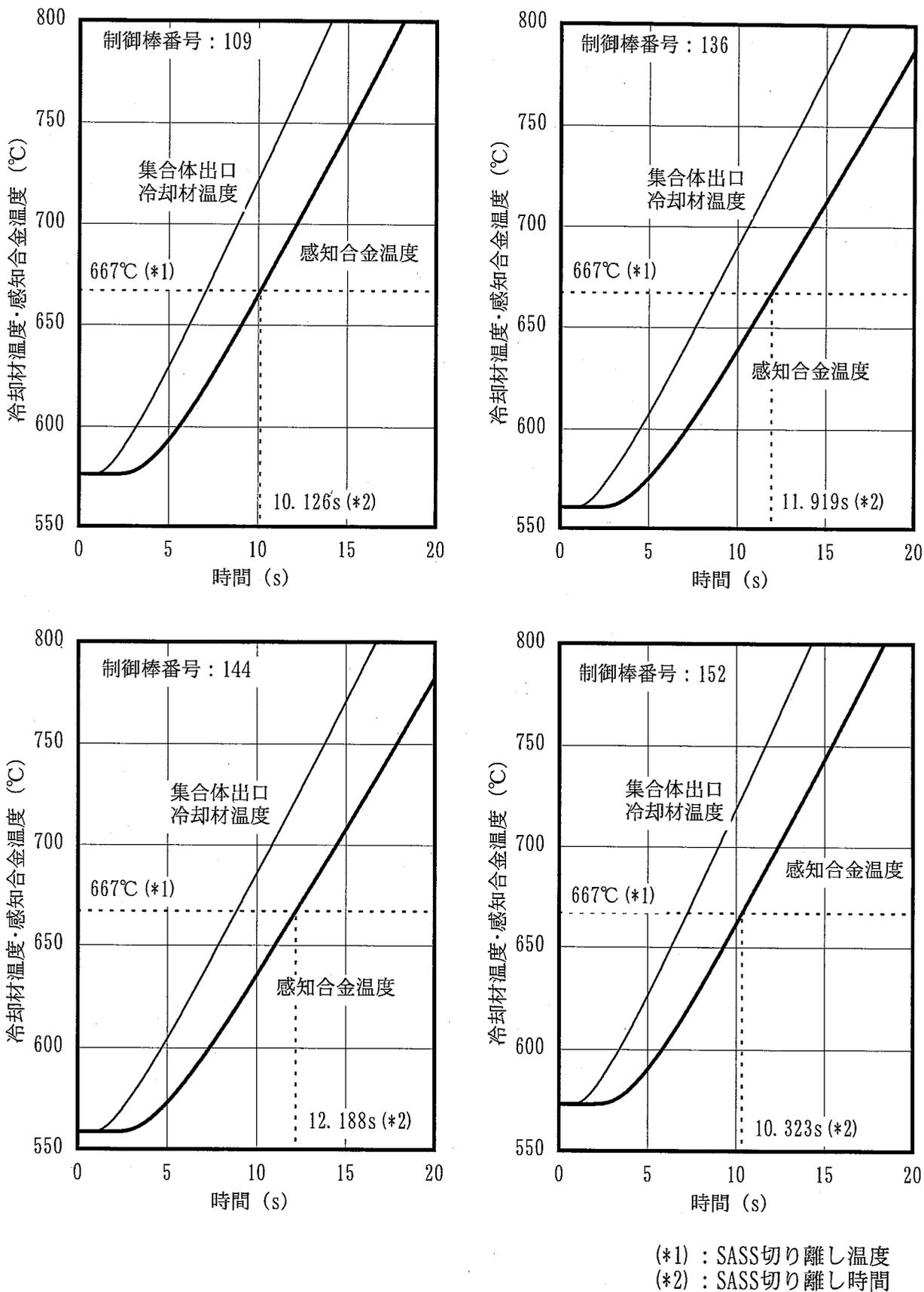


図3. 3-4 流量半減時間-1σのSASS切り離し時間 (2/2)

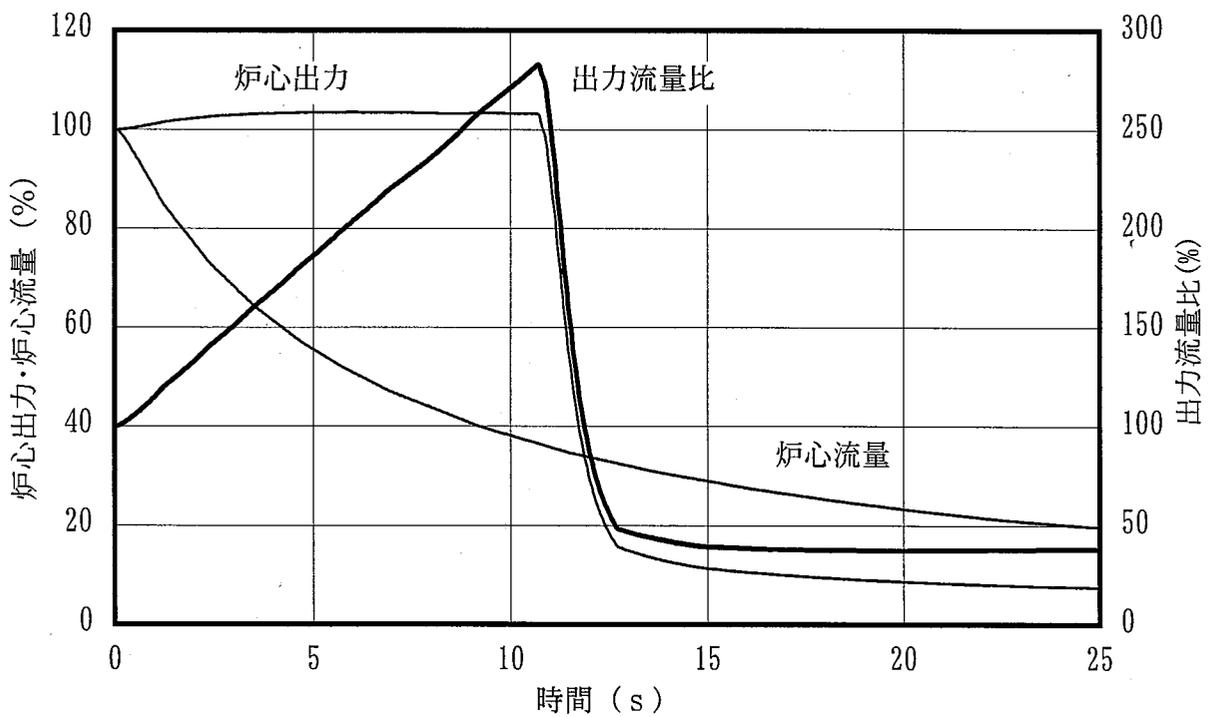
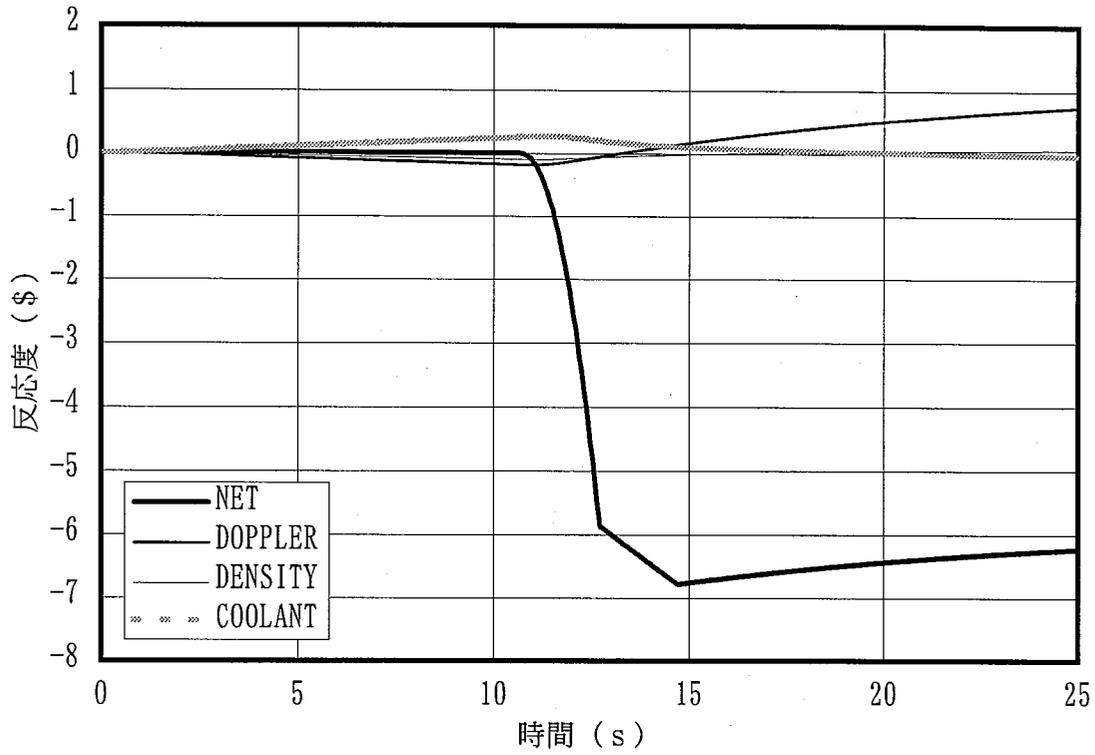
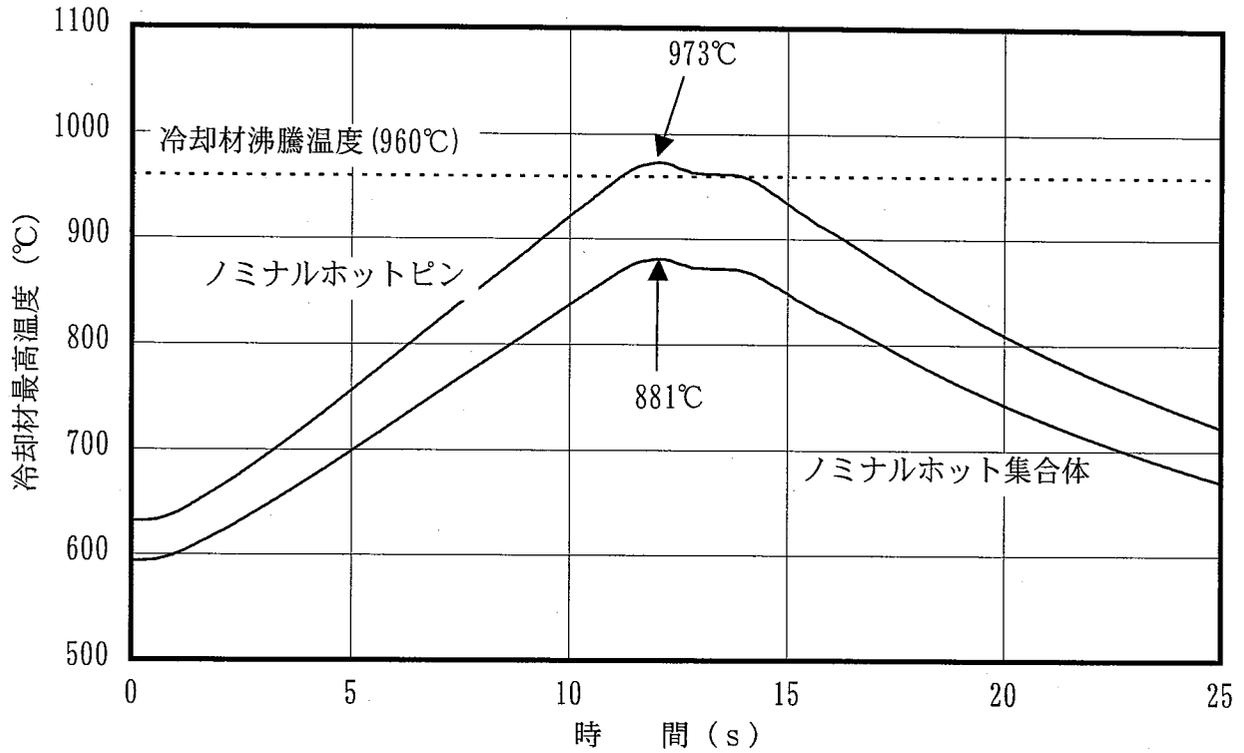
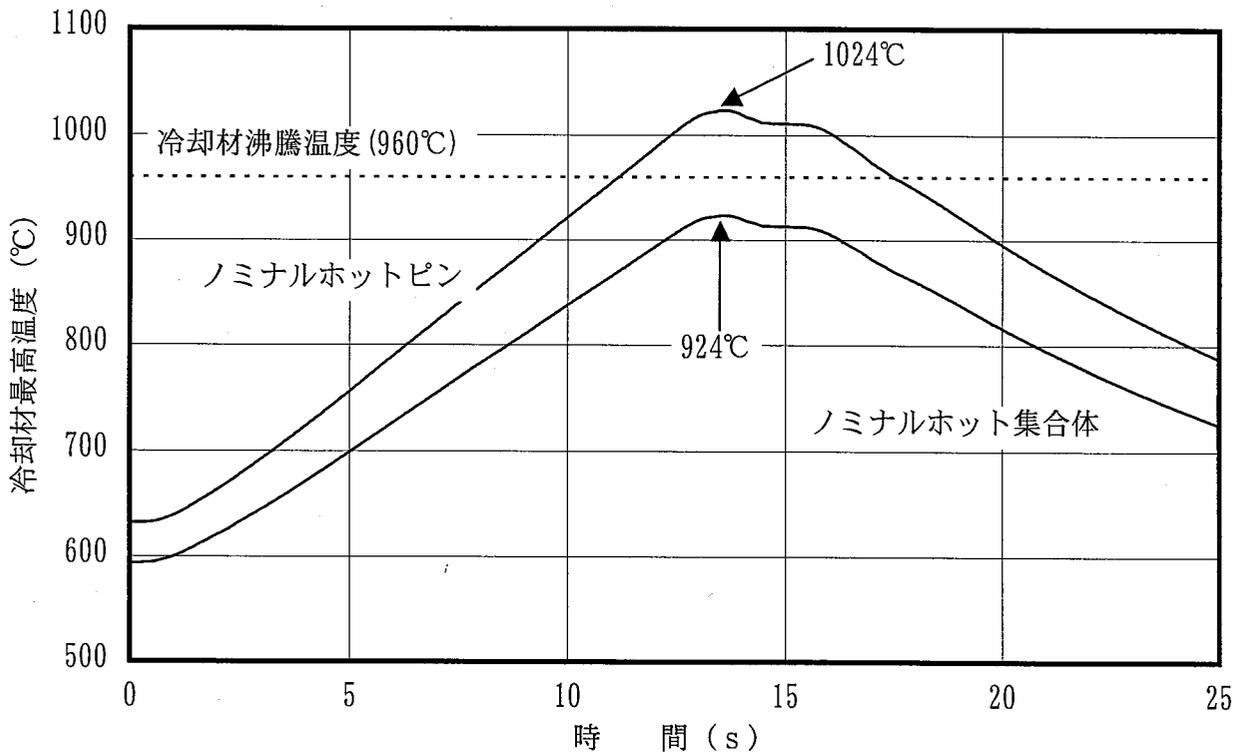


図3.3-5 流量半減時間-1σの解析結果 (SASS切り離しを考慮)

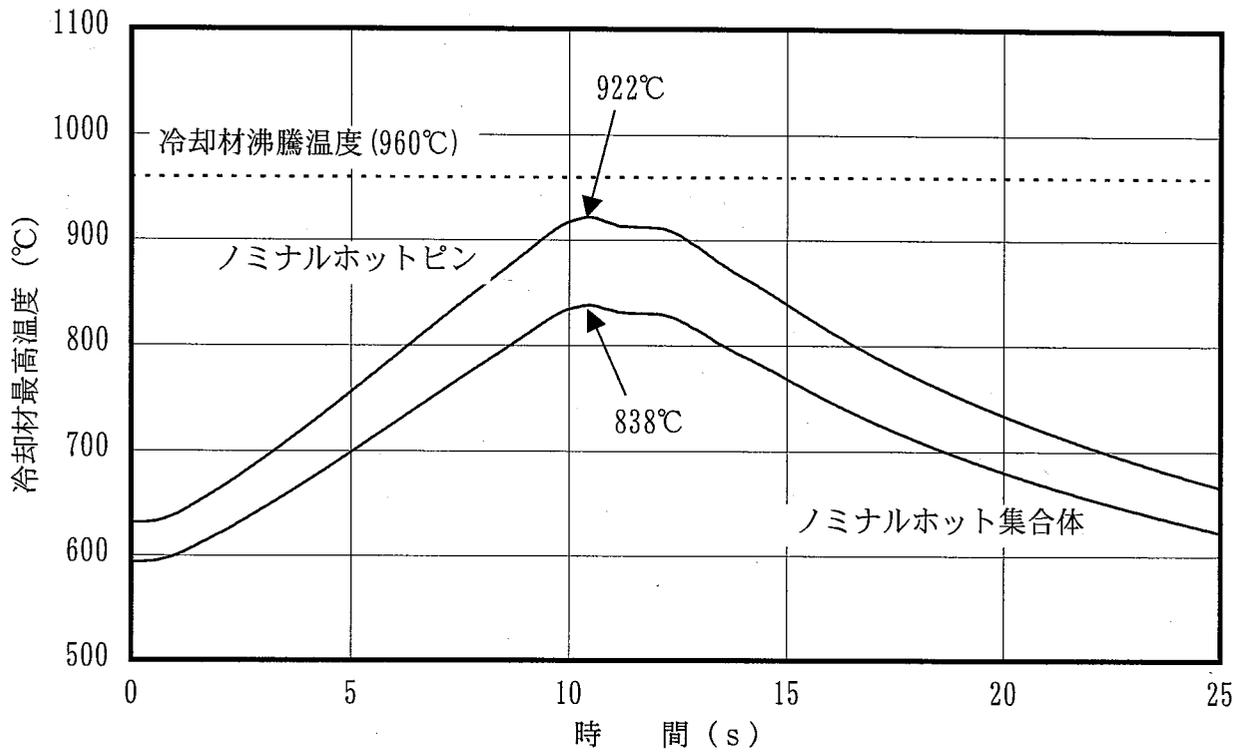


(a) SASS切り離し温度 : 667°C (基準条件) の場合



(b) SASS切り離し温度 : 691°C (+3σ) の場合

図3. 3-6 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (流量半減時間-1σ) (1/2)



(a) SASS切り離し温度: 643°C (-3σ) の場合

図3. 3-7 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (流量半減時間 -1σ) (2/2)

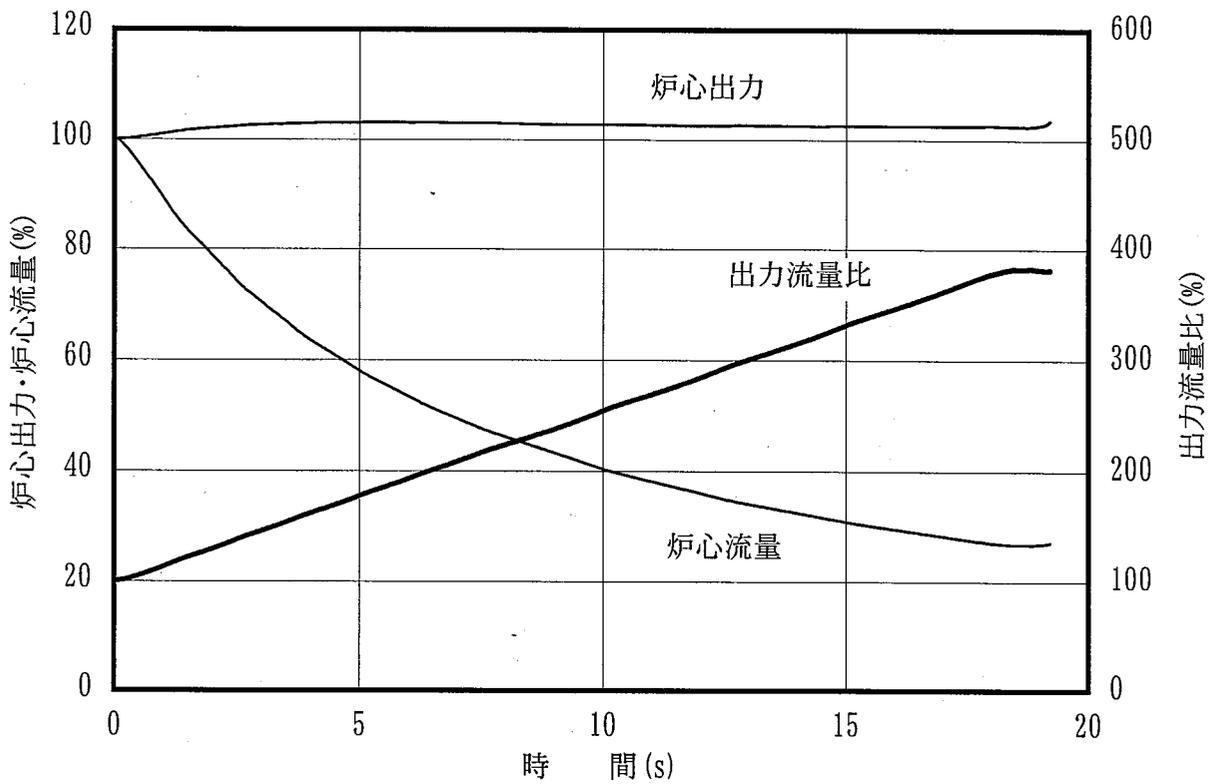
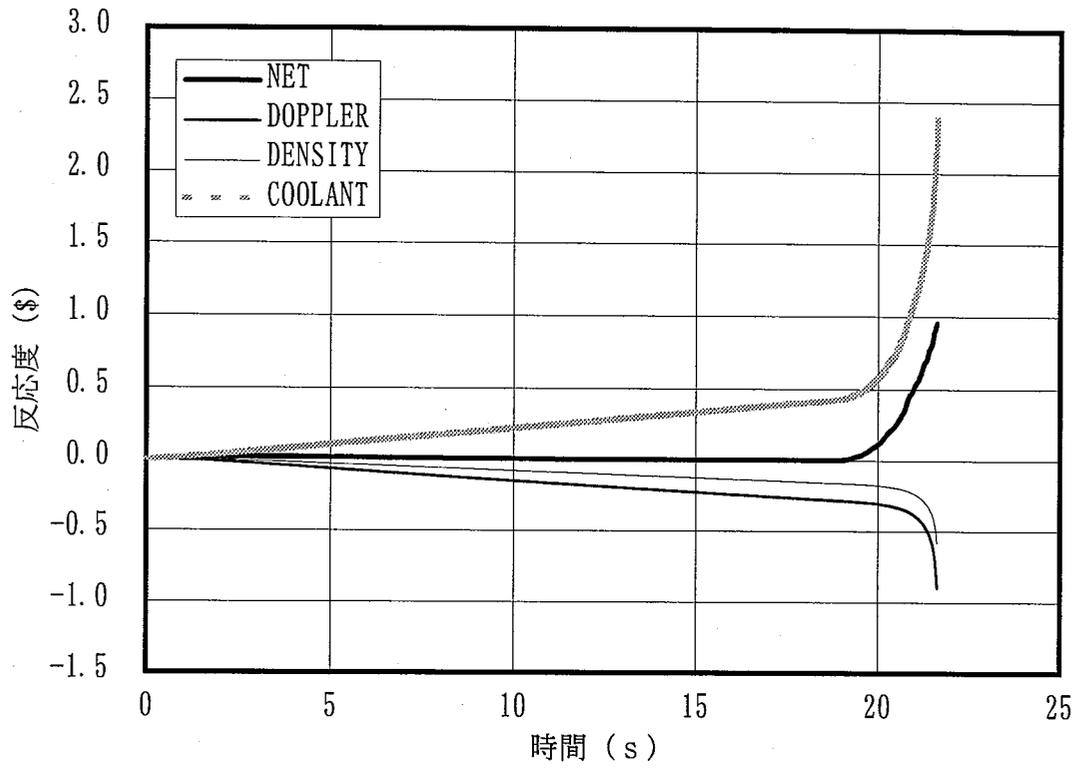
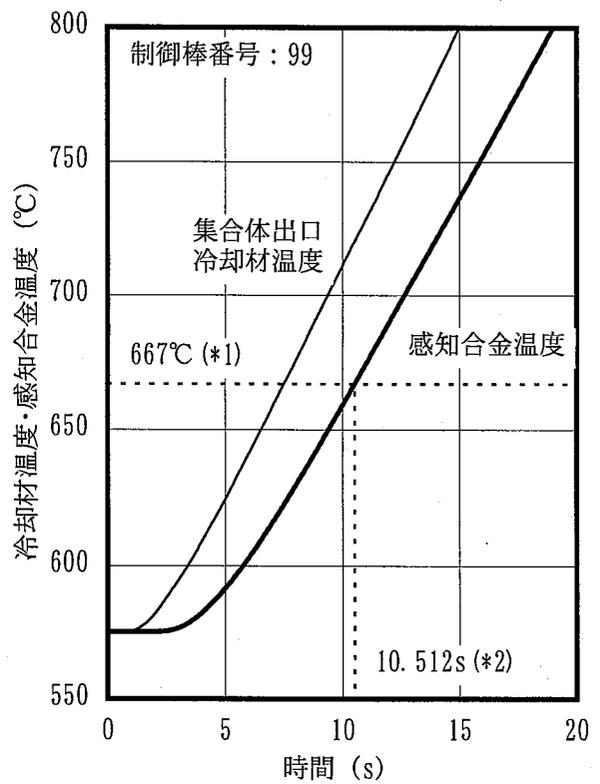
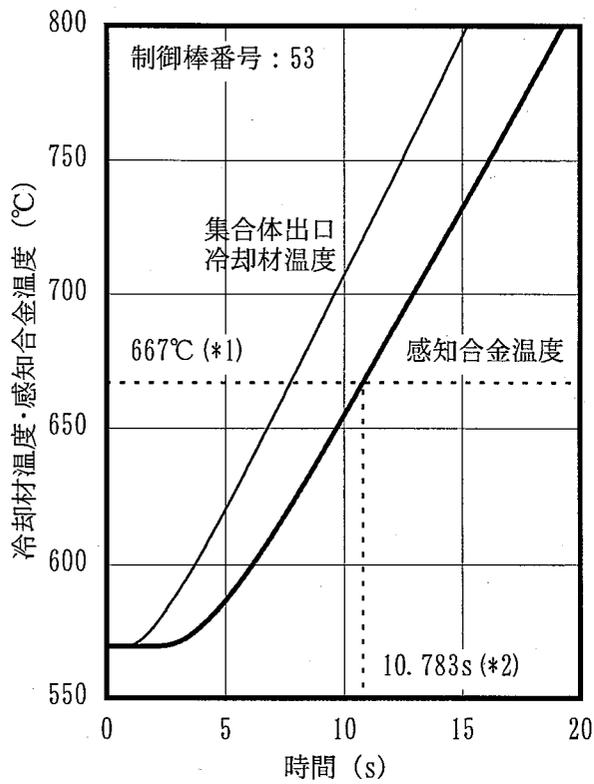
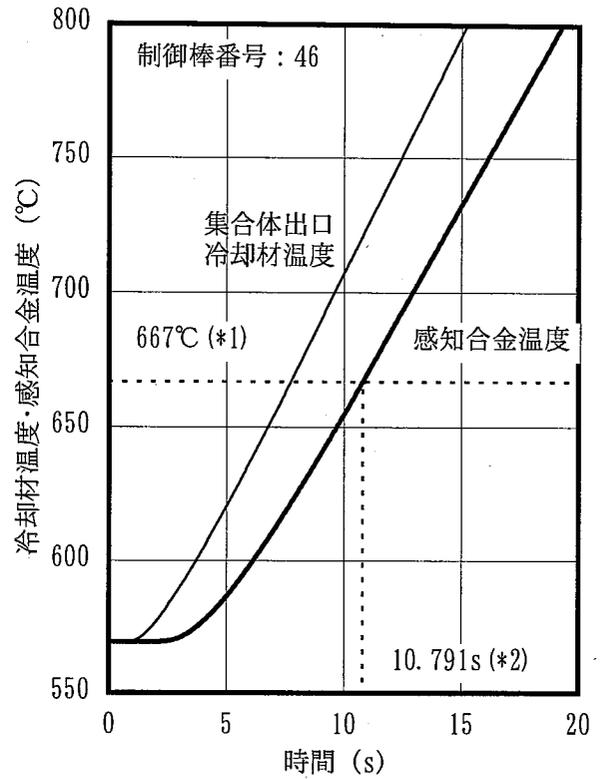
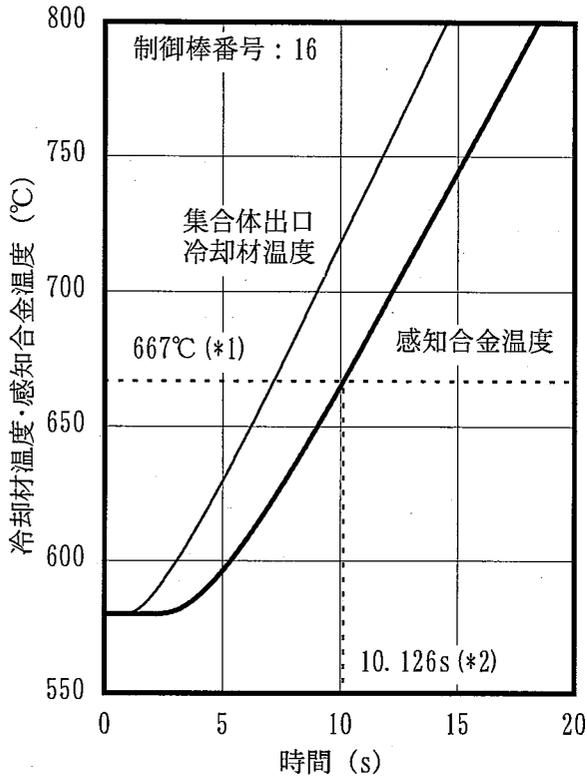
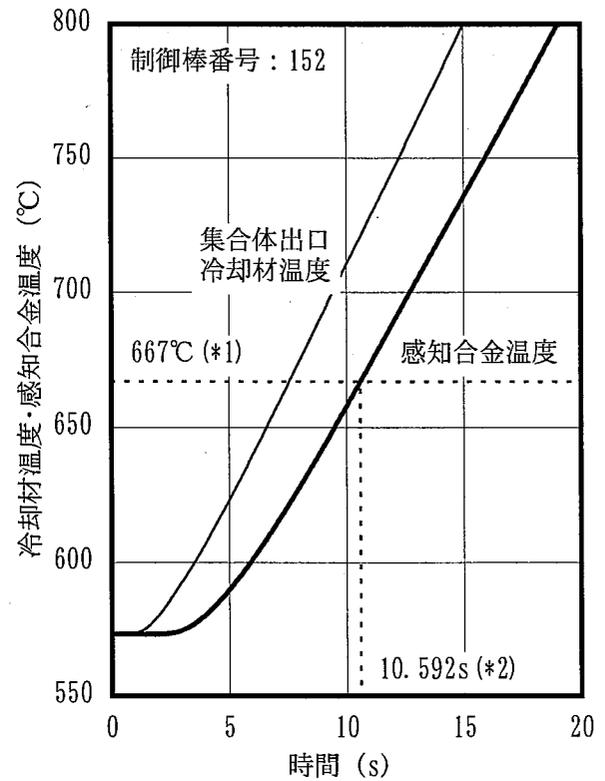
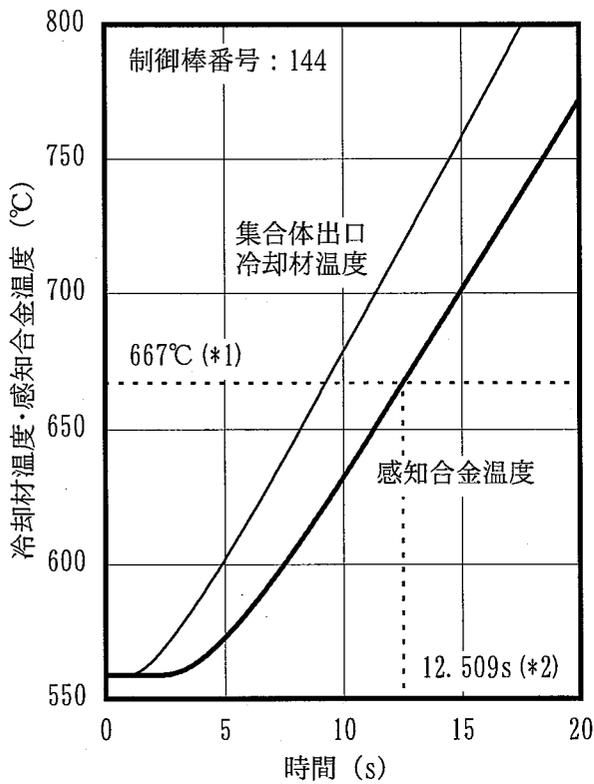
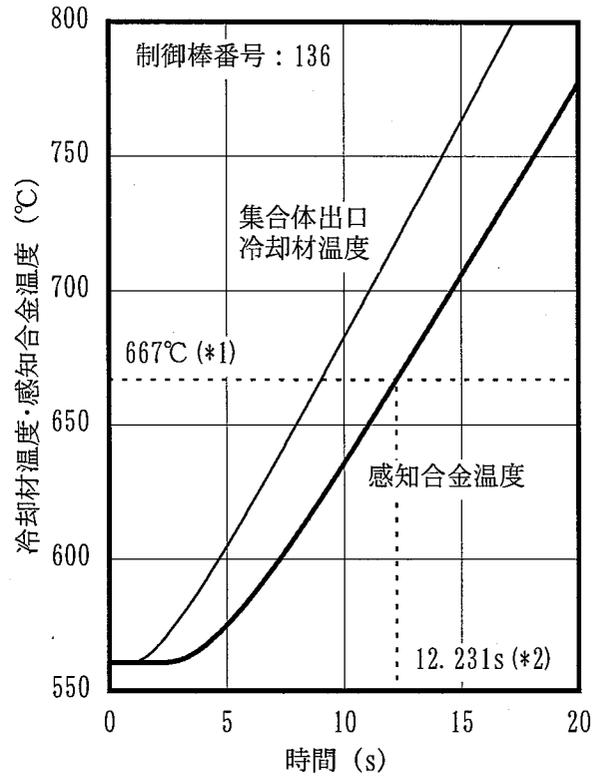
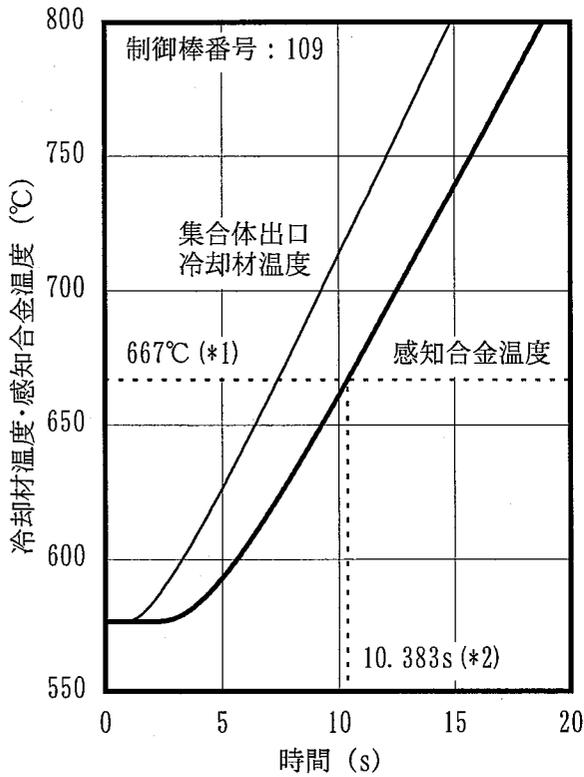


図3.3-8 流量半減時間+1σの解析結果 (SASS切り離しを考慮せず)



(*1) : SASS切り離し温度
 (*2) : SASS切り離し時間

図3.3-9 流量半減時間+1σのSASS切り離し時間(1/2)



(*1) : SASS切り離し温度
 (*2) : SASS切り離し時間

図3.3-10 流量半減時間+1σのSASS切り離し時間 (2/2)

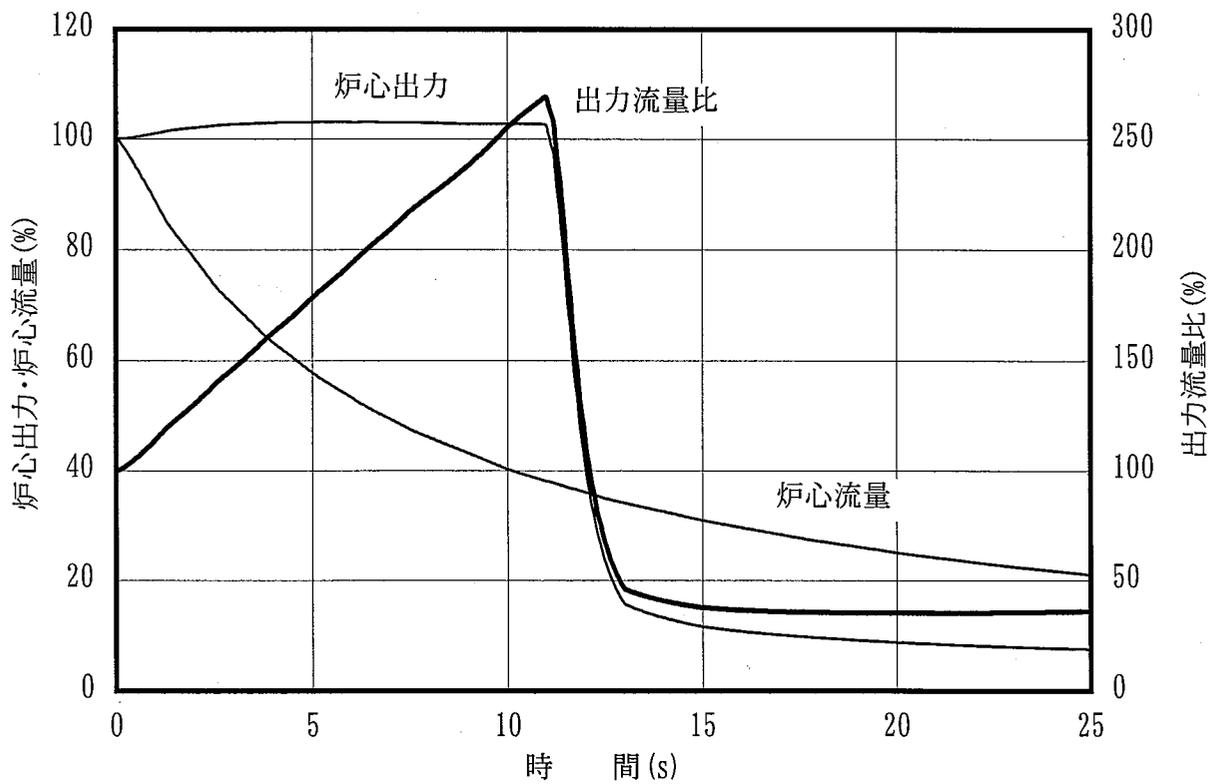
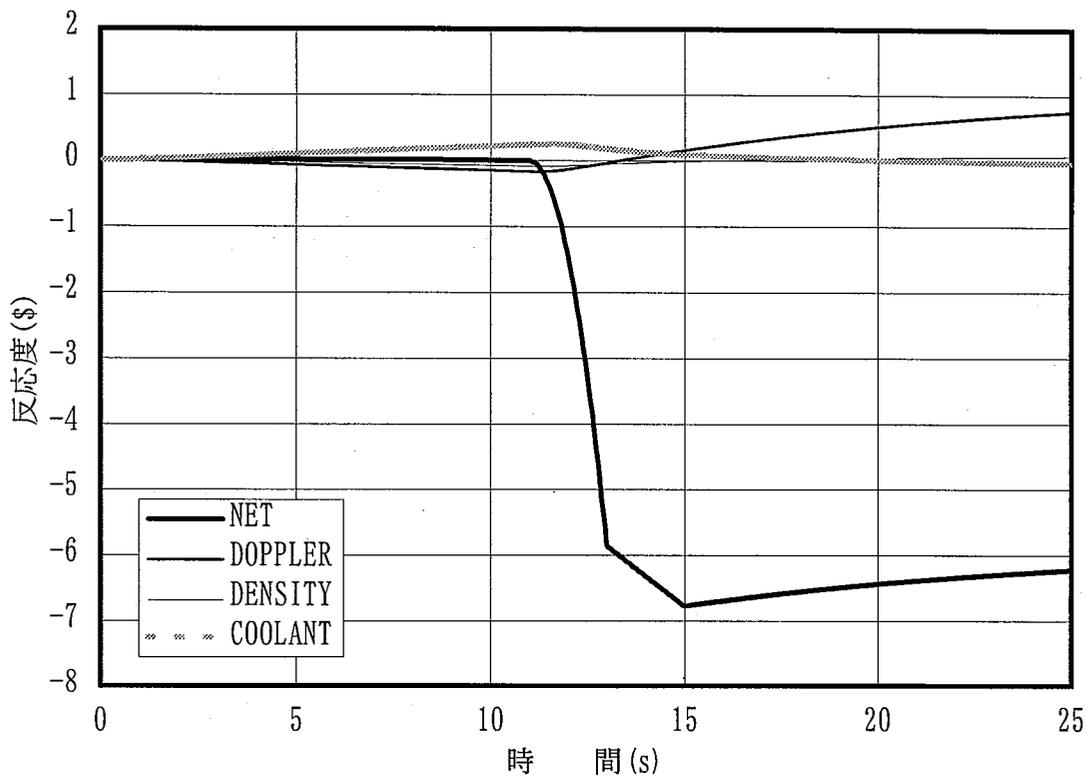
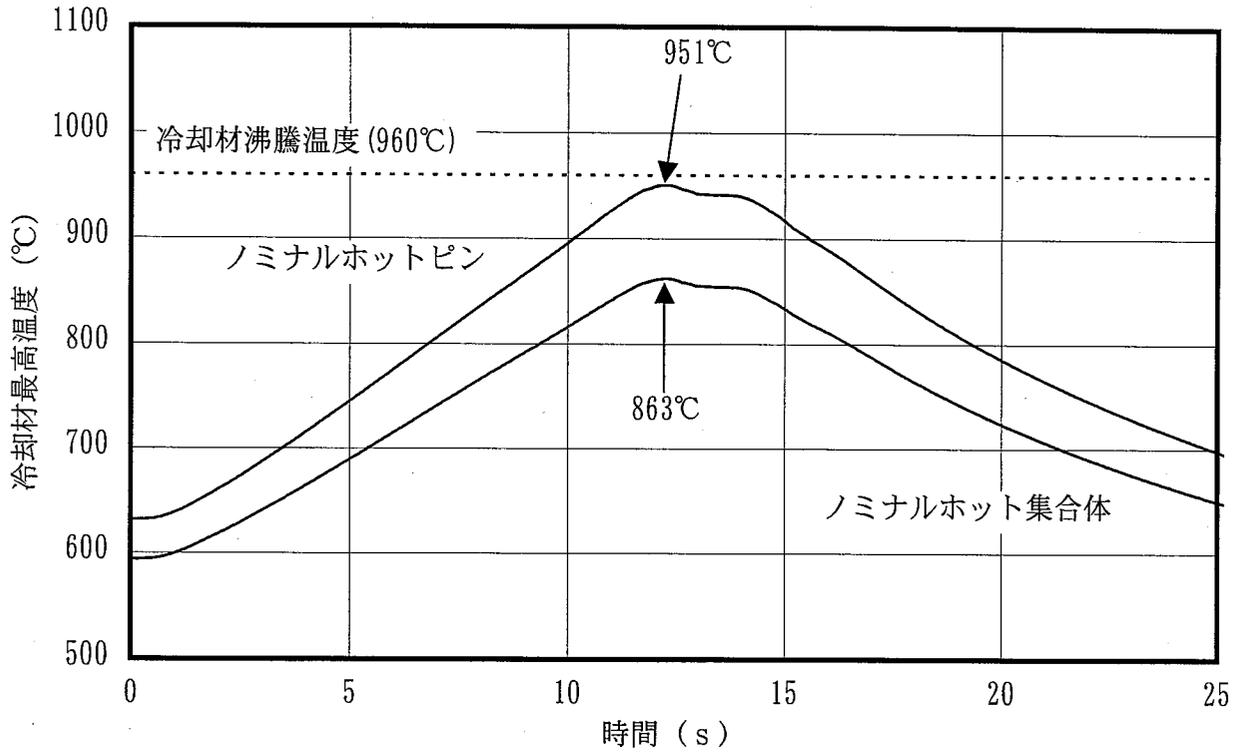
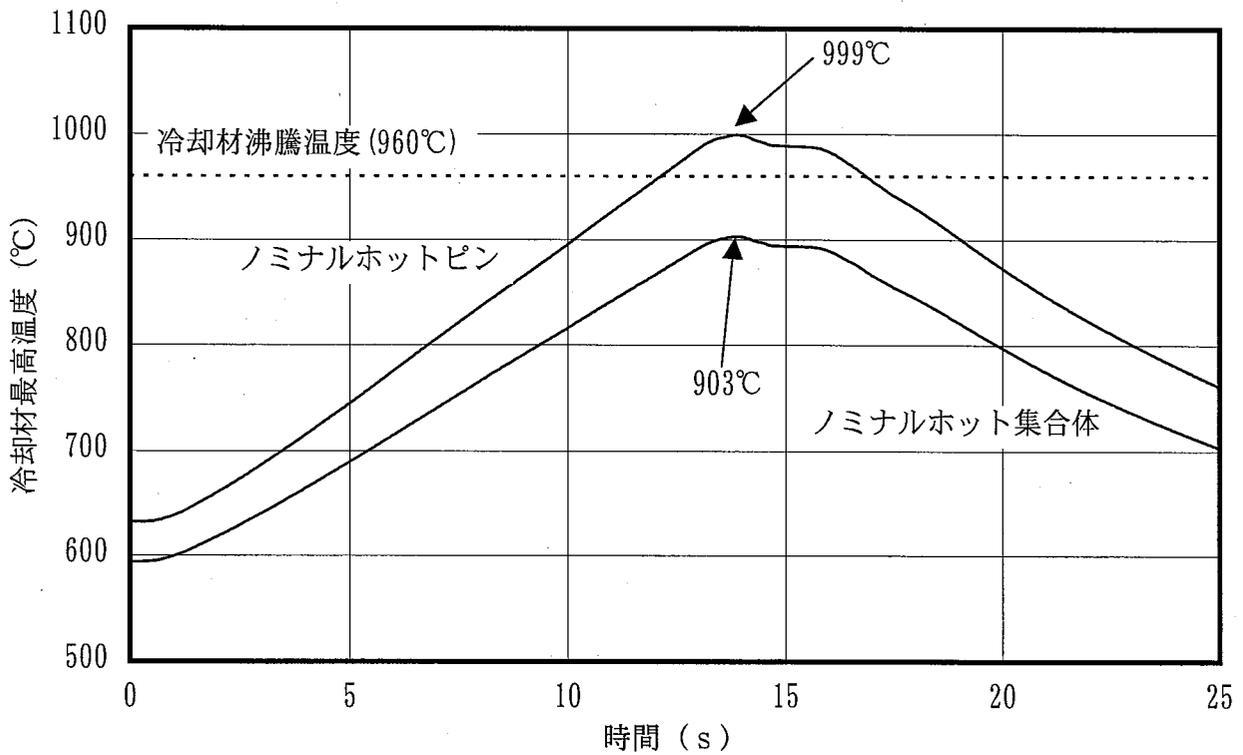


図3.3-11 流量半減時間+1σの解析結果 (SASS切り離しを考慮)

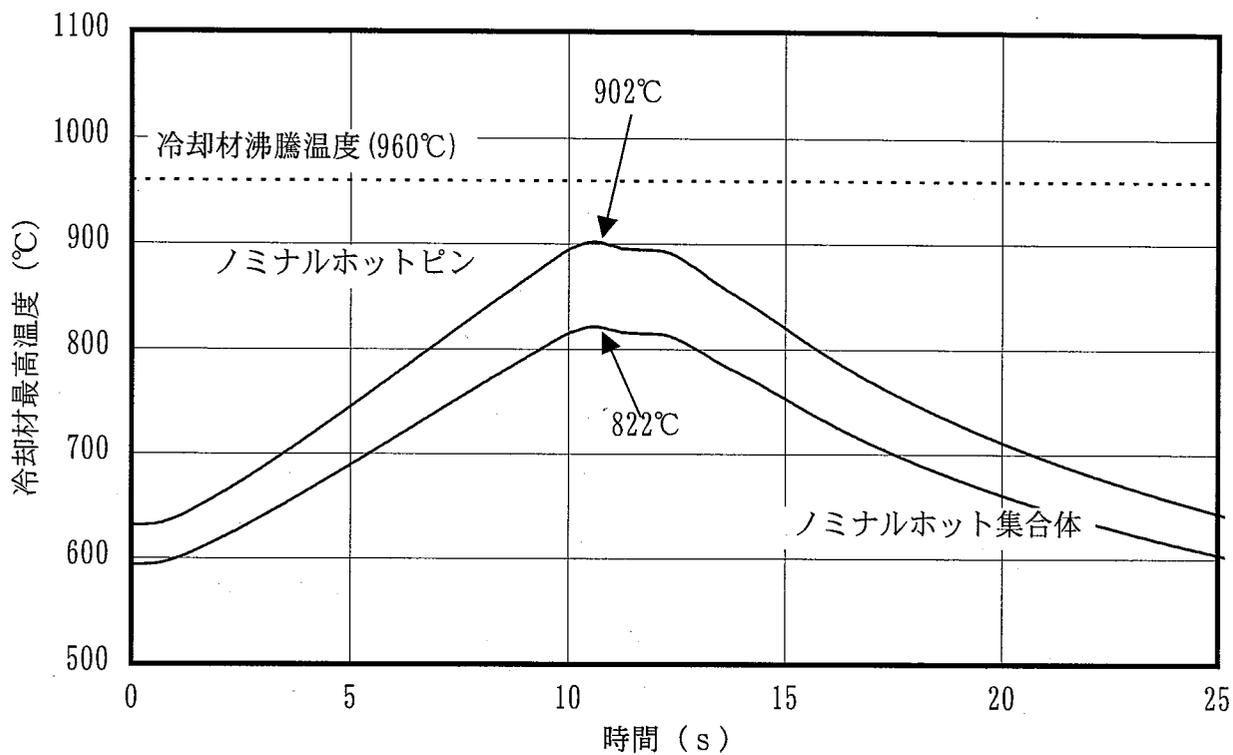


(a) SASS切り離し温度 : 667°C (基準条件) の場合



(b) SASS切り離し温度 : 691°C (+3σ) の場合

図3.3-12 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (流量半減時間+1σ) (1/2)



(a) SASS切り離し温度：643°C (-3σ) の場合

図3. 3-13 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (流量半減時間+1σ) (2/2)

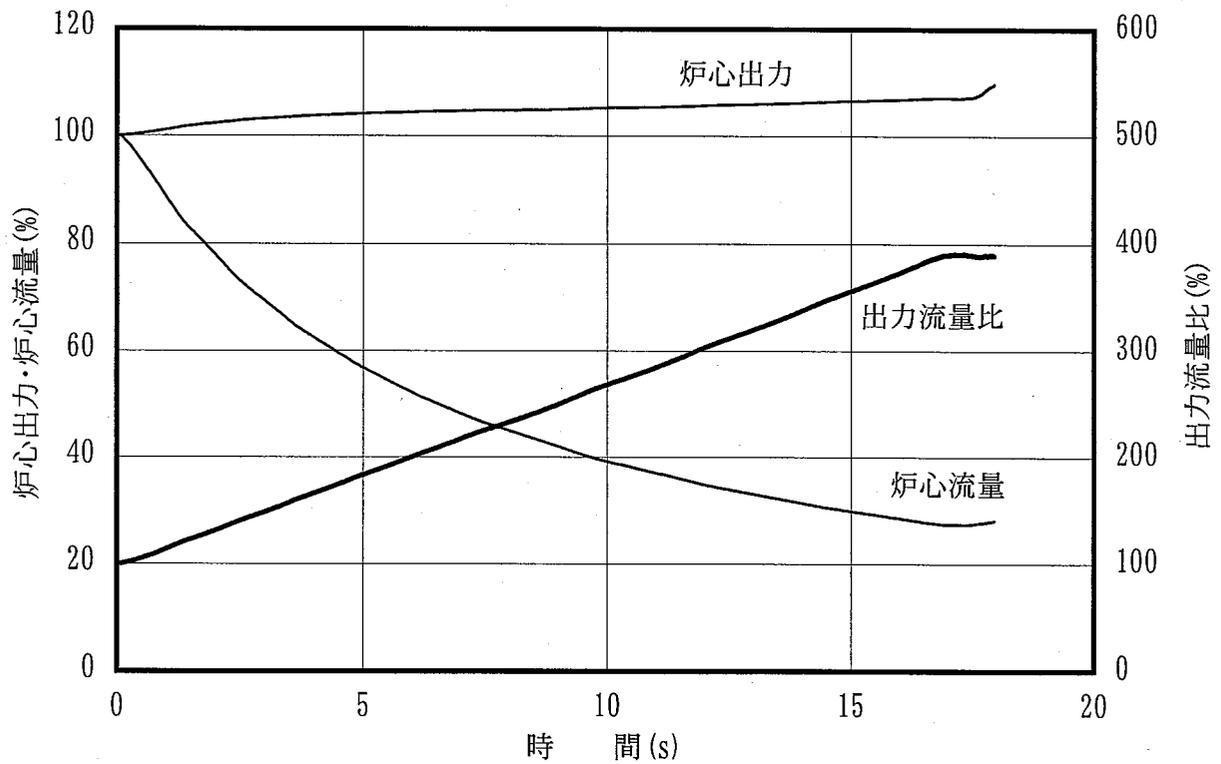
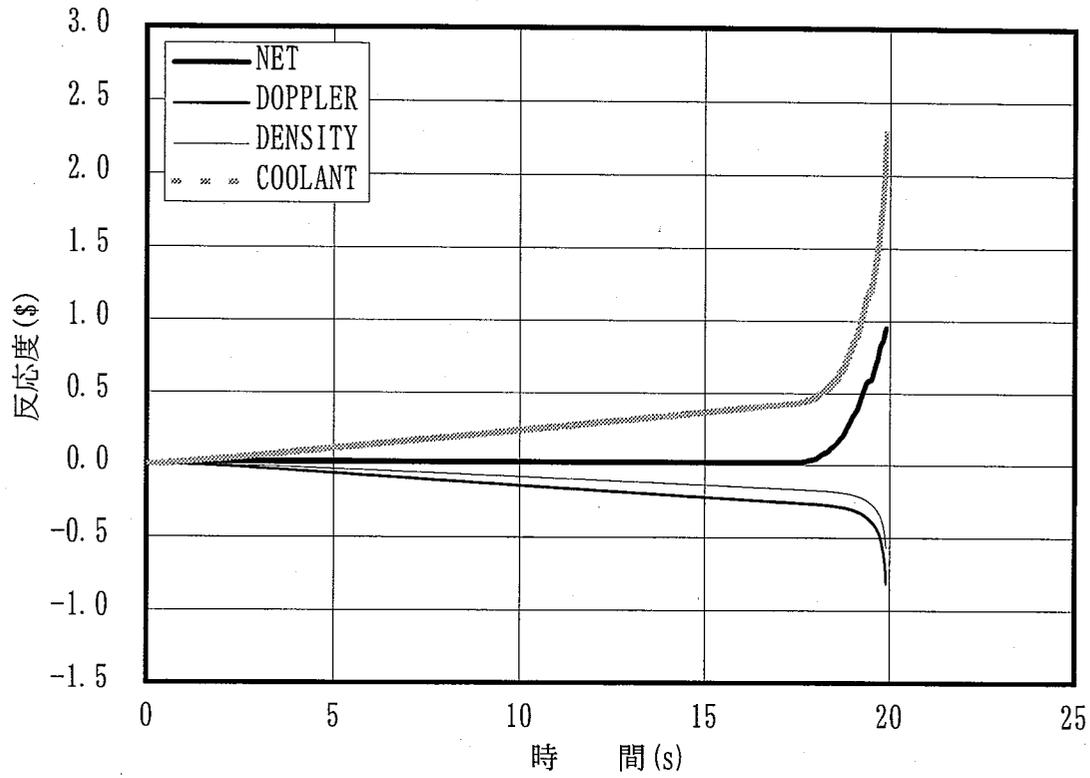
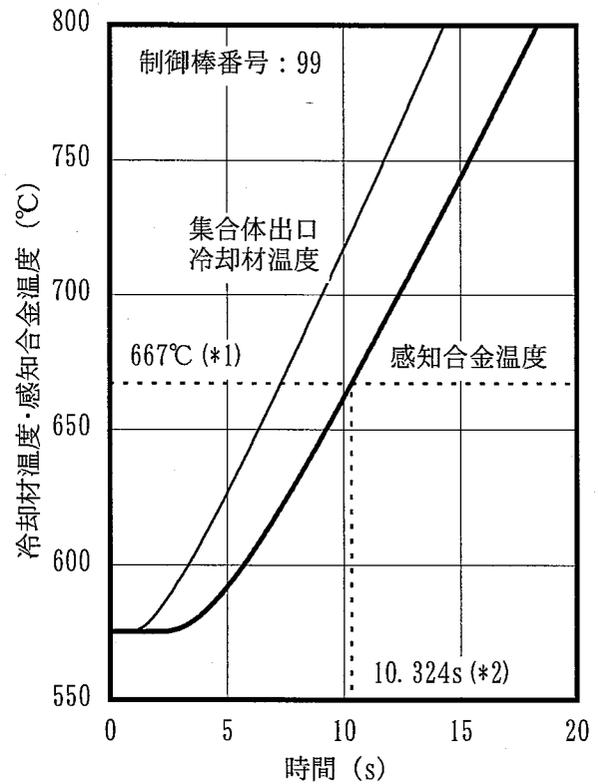
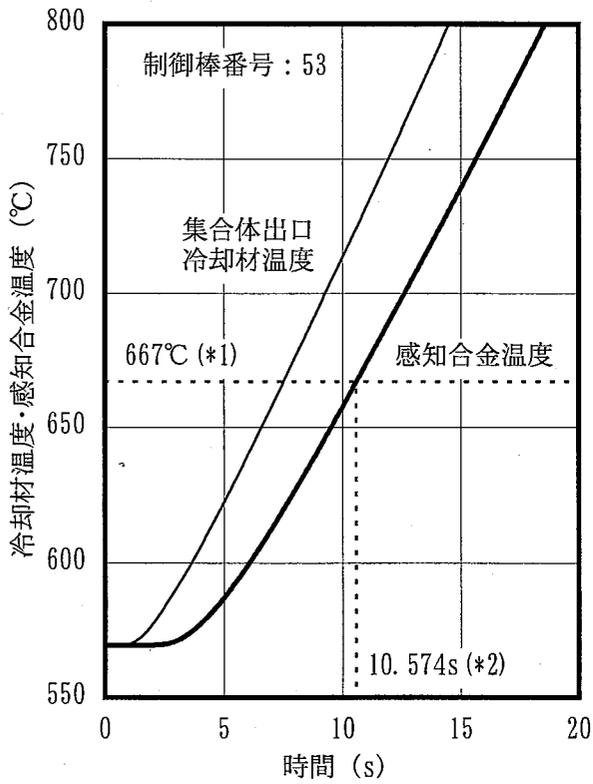
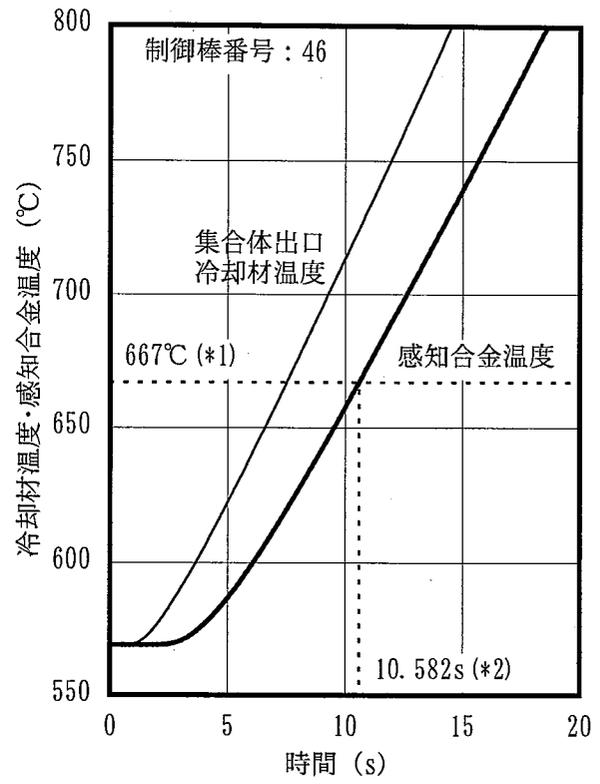
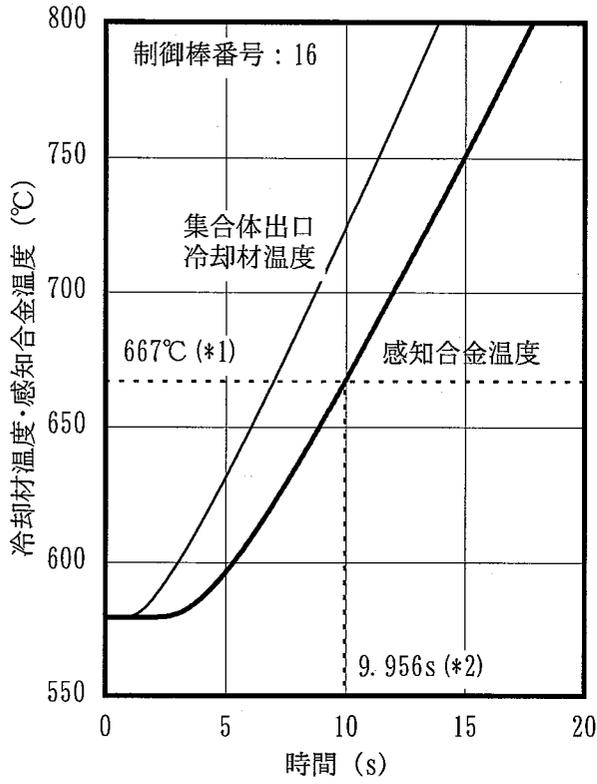
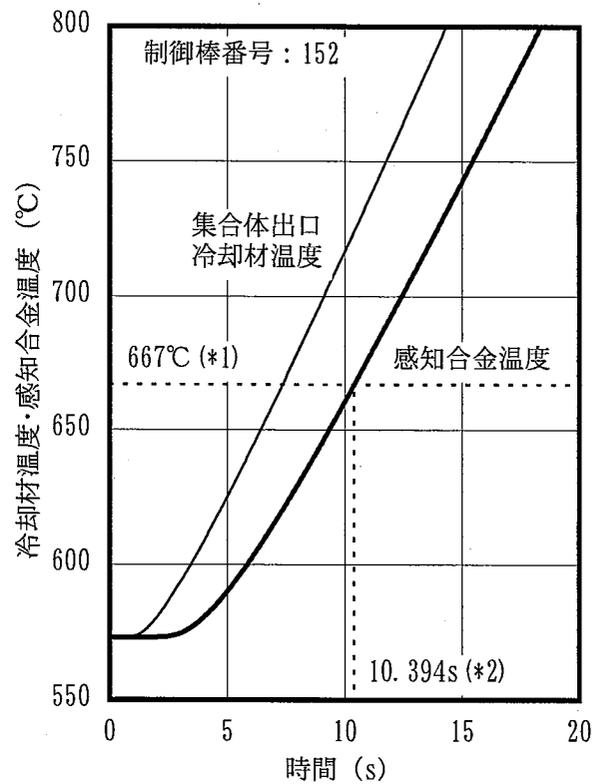
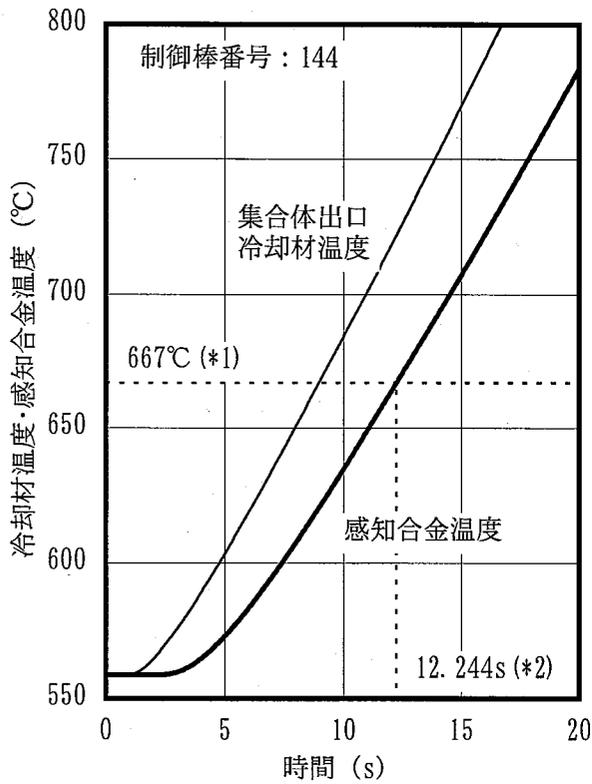
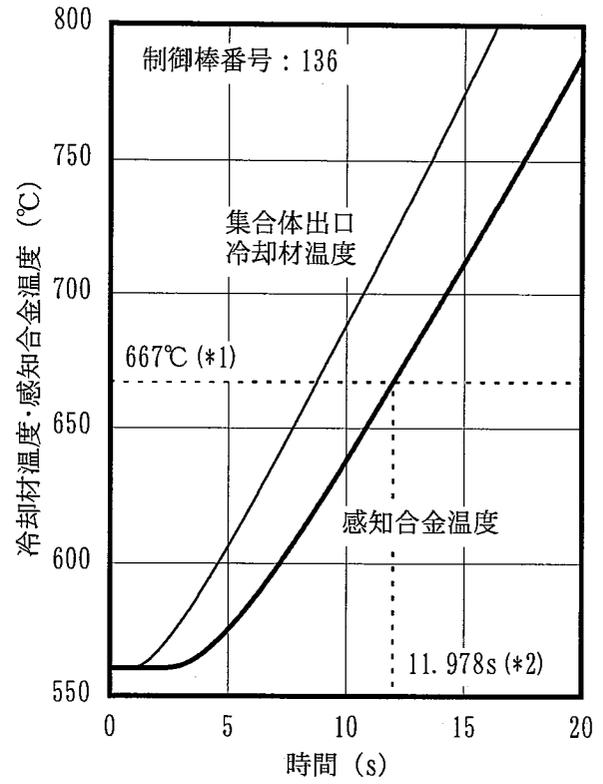
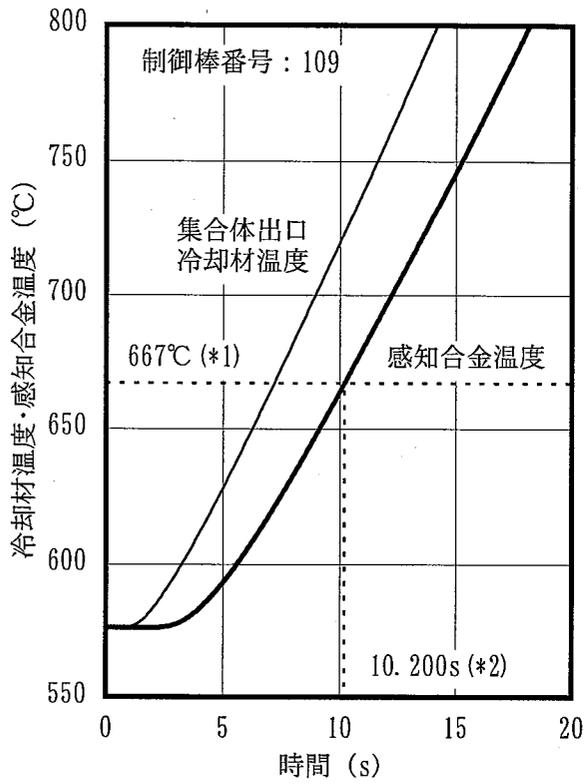


図3. 3-14 ドップラ反応度係数 -1σ の解析結果 (SASS切り離しを考慮せず)



(*1) : SASS切り離し温度
 (*2) : SASS切り離し時間

図3.3-15 ドップラ反応度係数-1σのSASS切り離し時間(1/2)



(*1) : SASS切り離し温度
 (*2) : SASS切り離し時間

図3.3-16 ドップラ反応度係数-1σのSASS切り離し時間 (2/2)

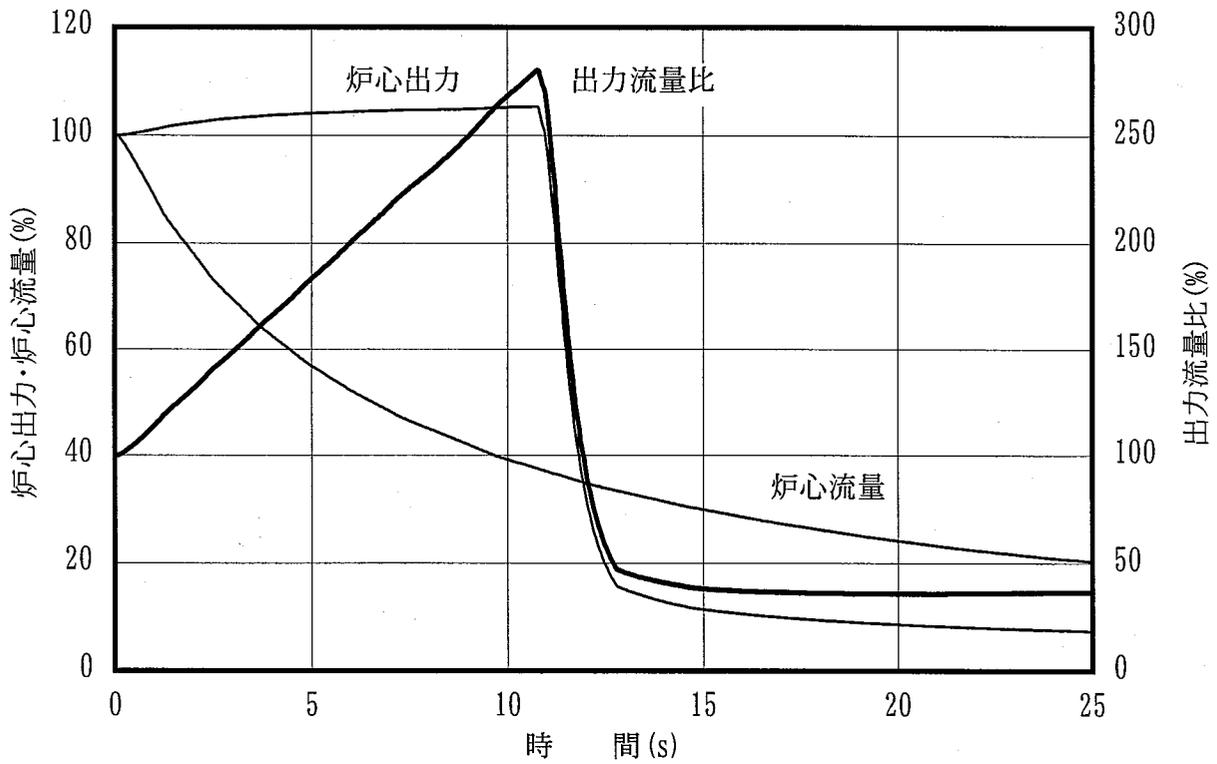
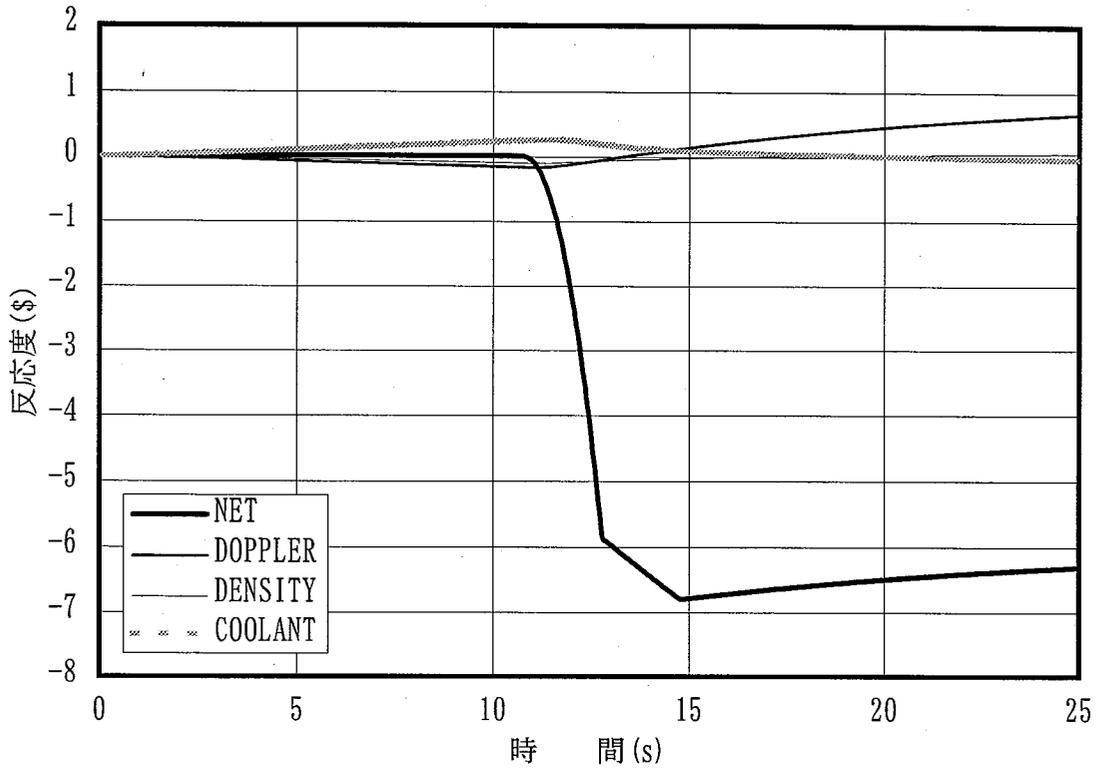
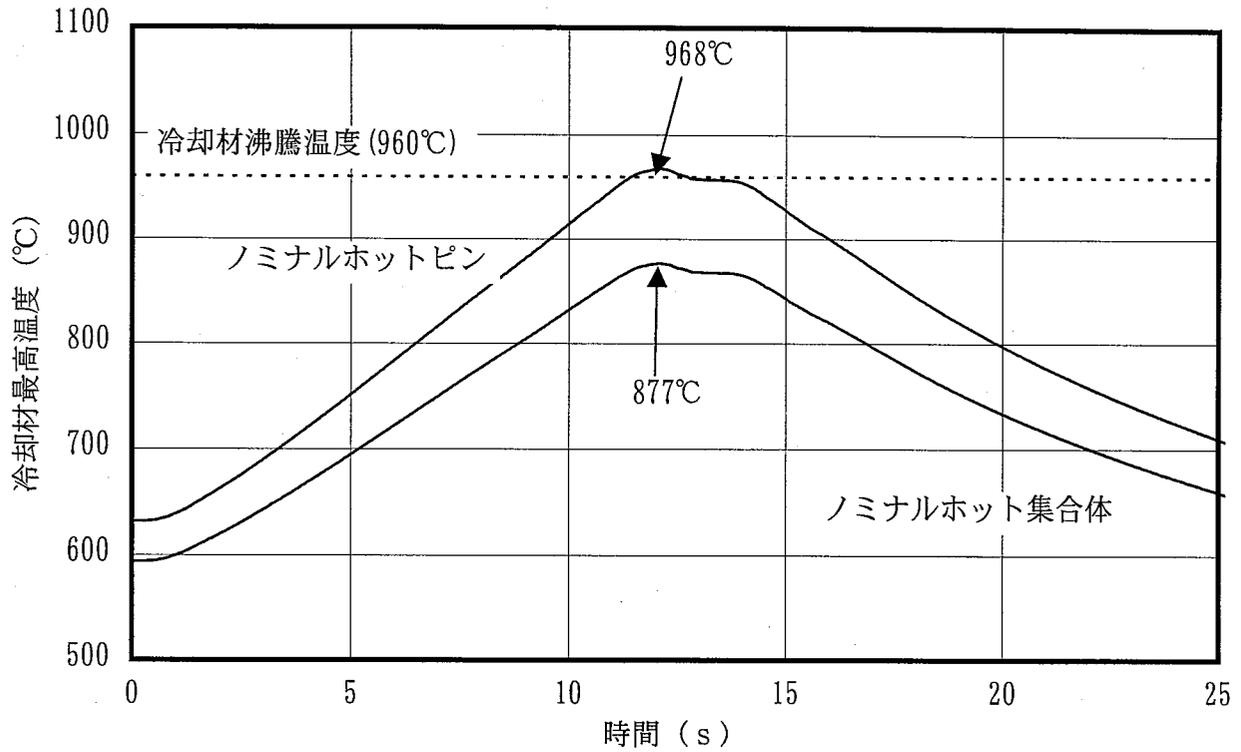
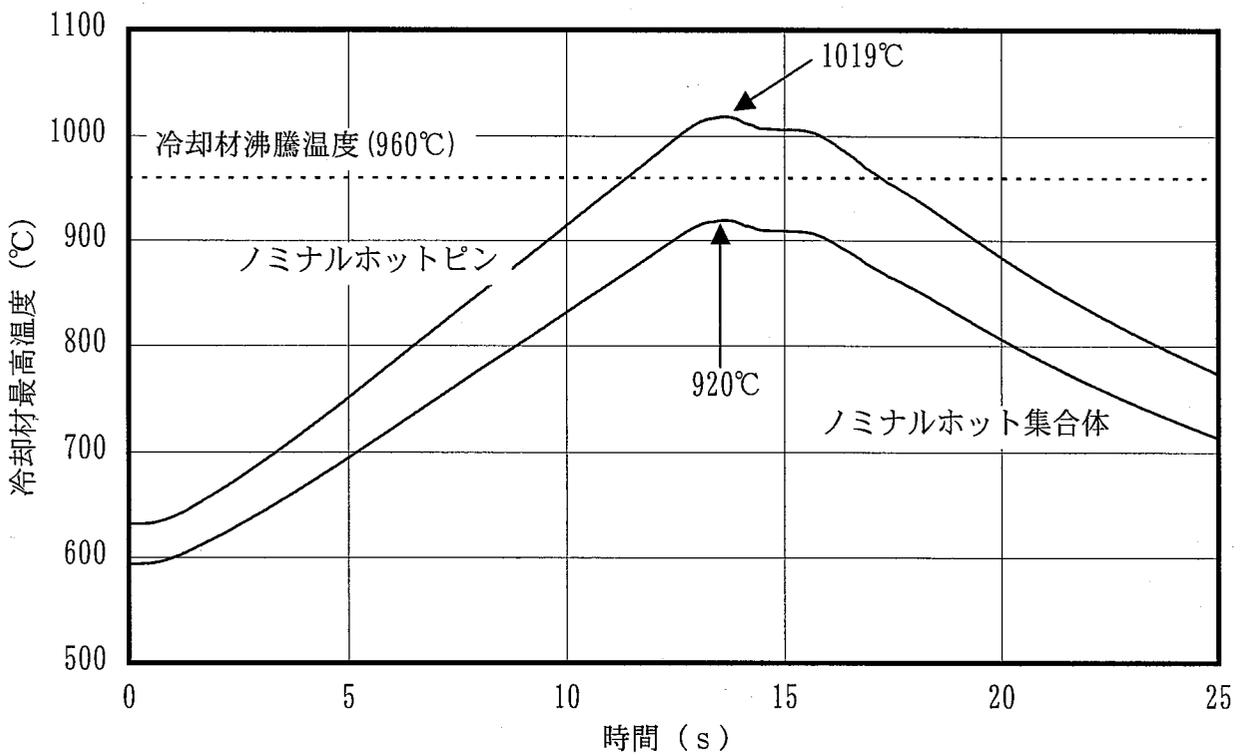


図3.3-17 ドップラ反応度係数 -1σ の解析結果 (SASS切り離しを考慮)

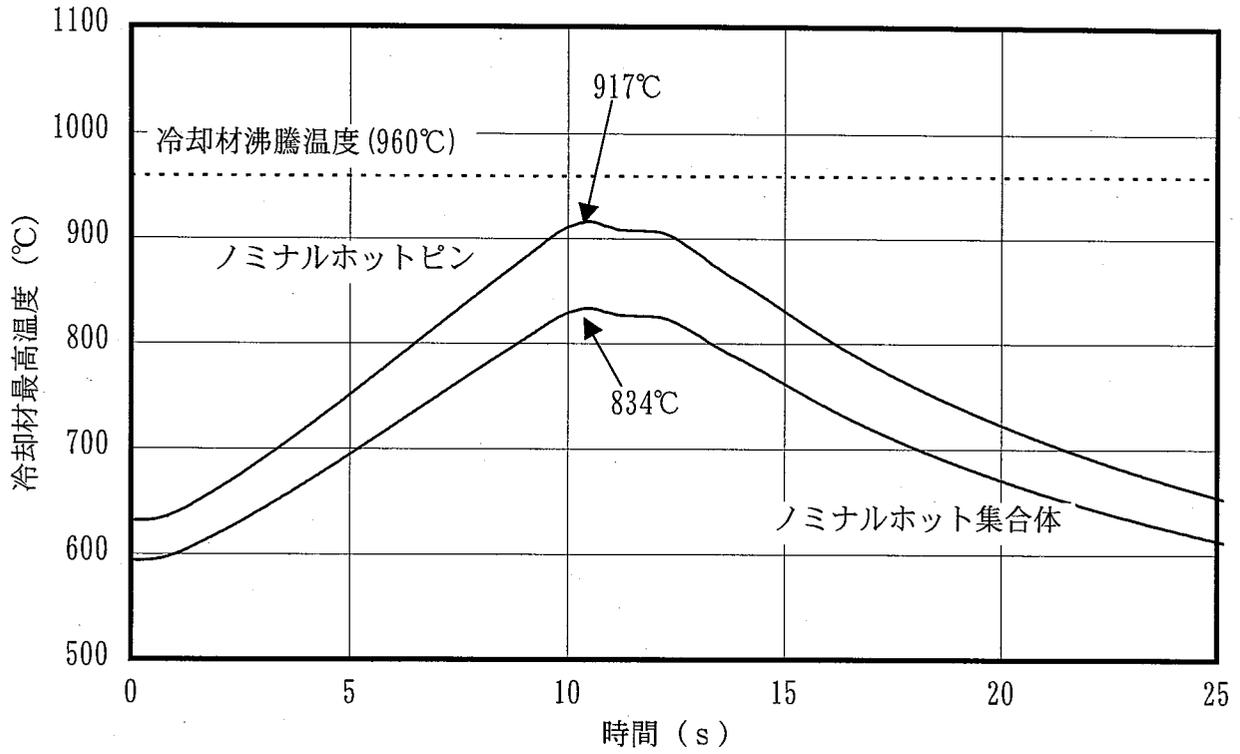


(a) SASS切り離し温度：667°C（基準条件）の場合



(b) SASS切り離し温度：691°C (+3σ) の場合

図3. 3-18 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果（ドップラ反応度係数-1σ）(1/2)



(a) SASS切り離し温度：643°C (-3σ) の場合

図3. 3-19 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (ドップラ反応度係数 -1σ) (2/2)

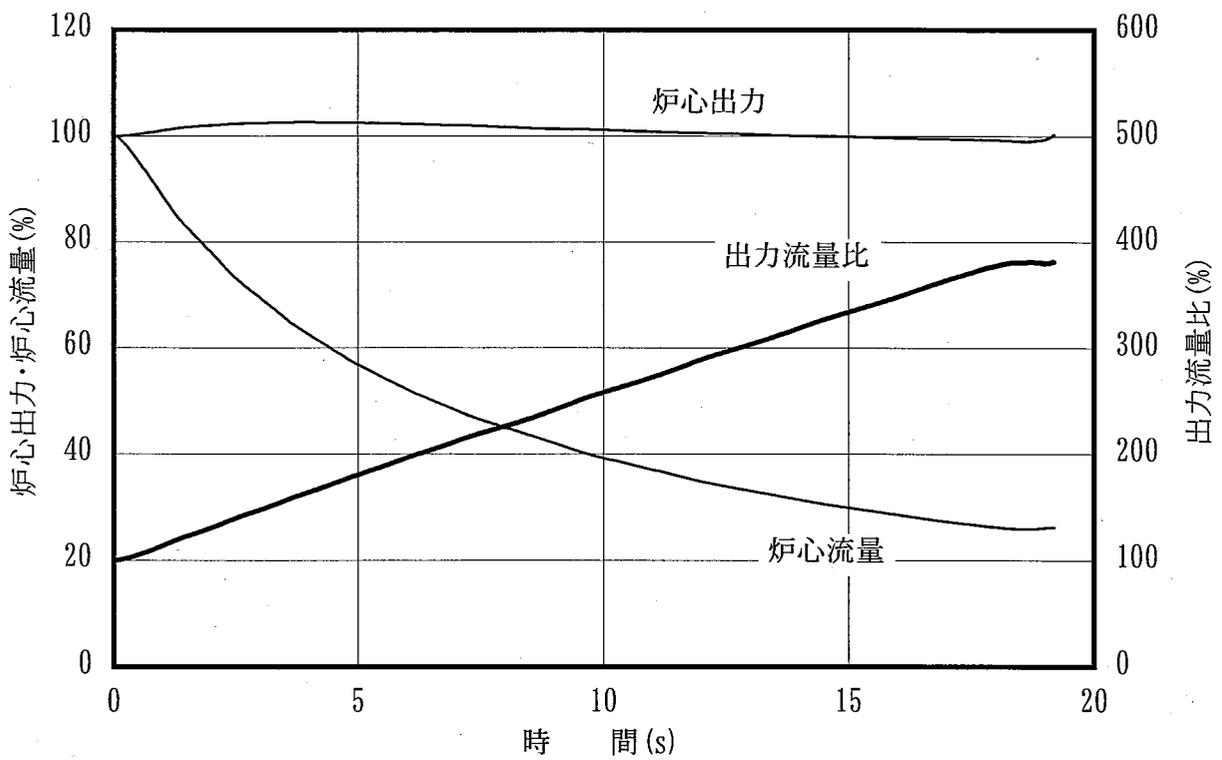
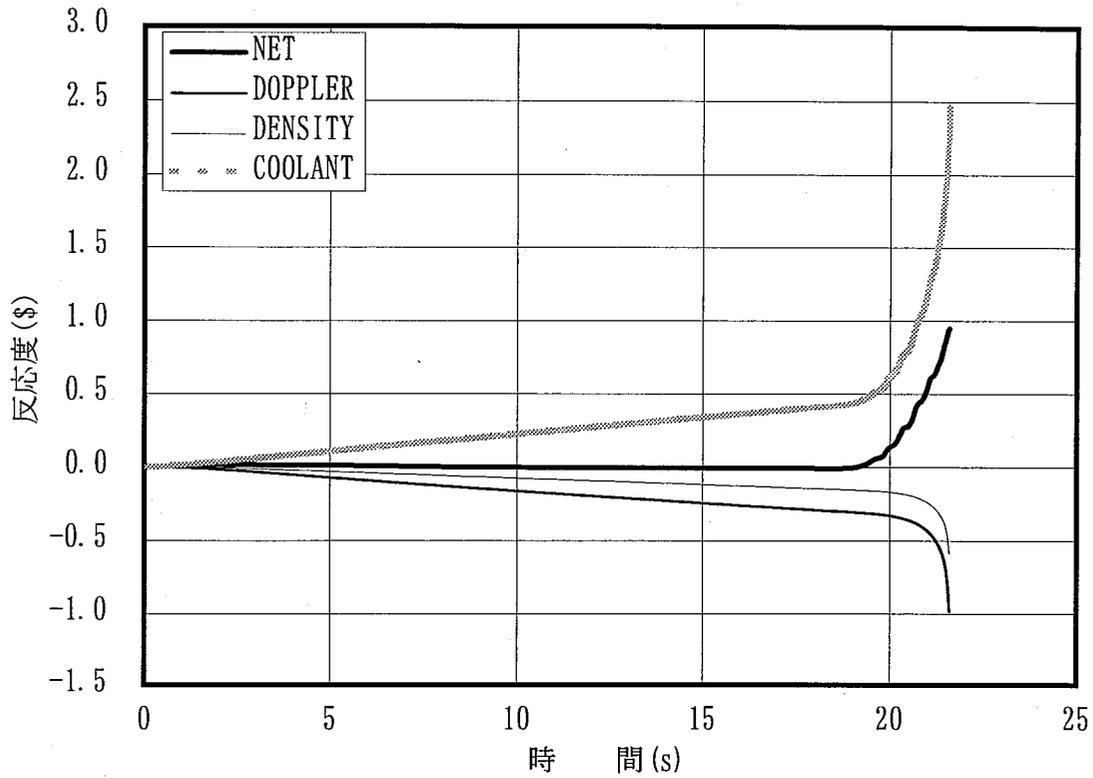


図3. 3-20 ドップラ反応度係数+1σの解析結果 (SASS切り離しを考慮せず)

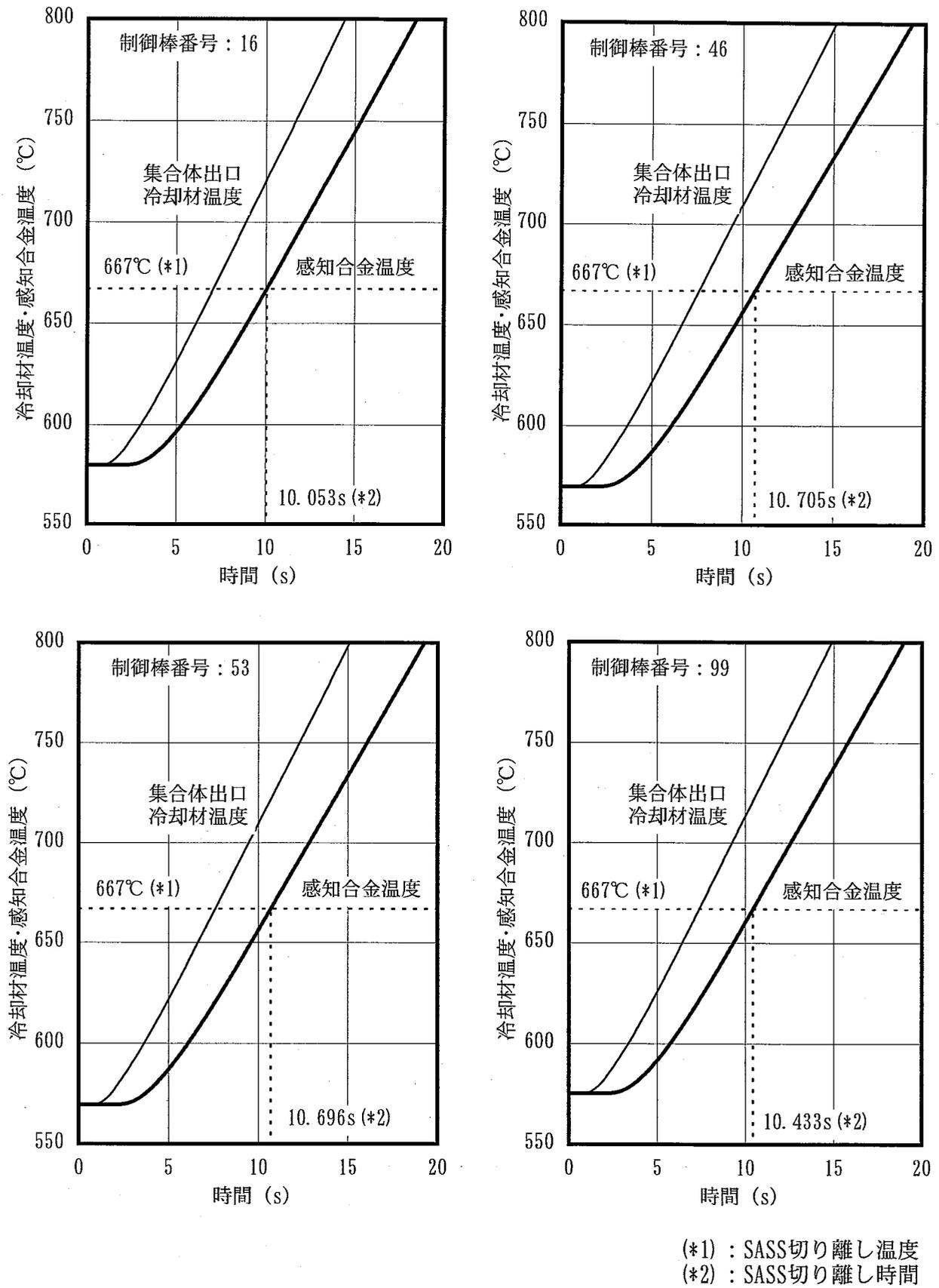
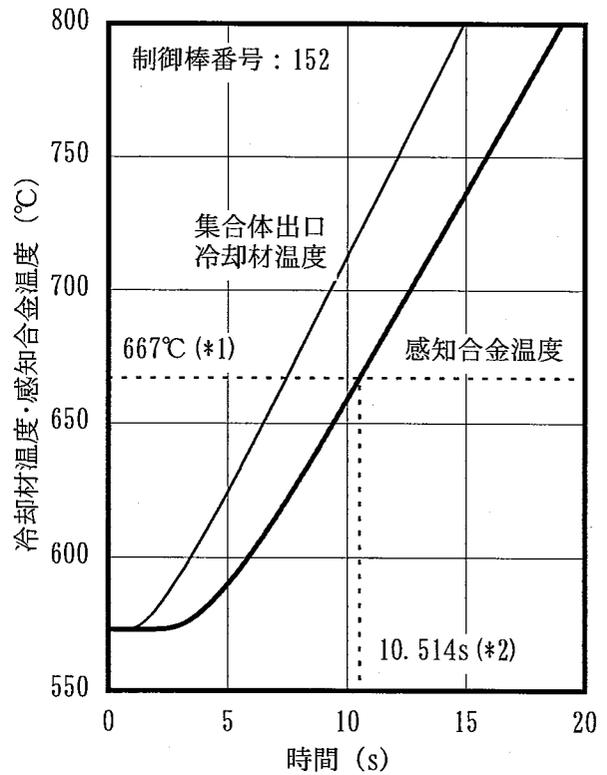
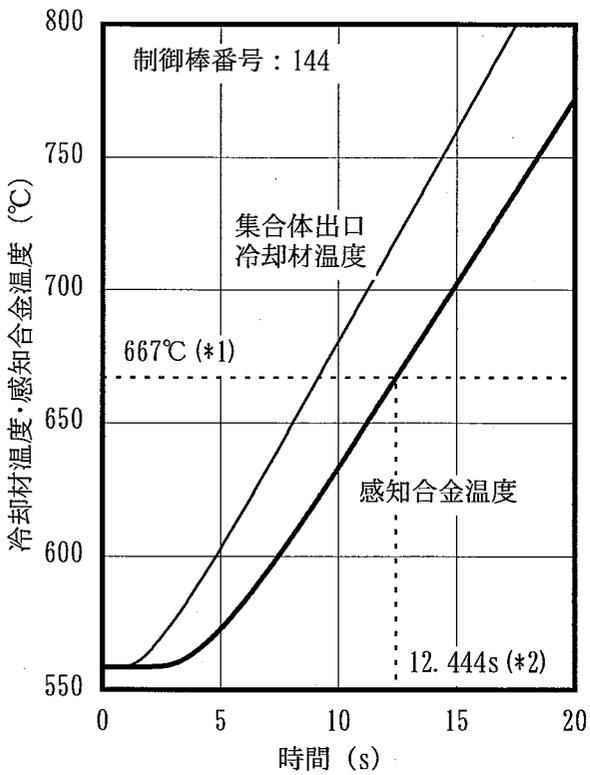
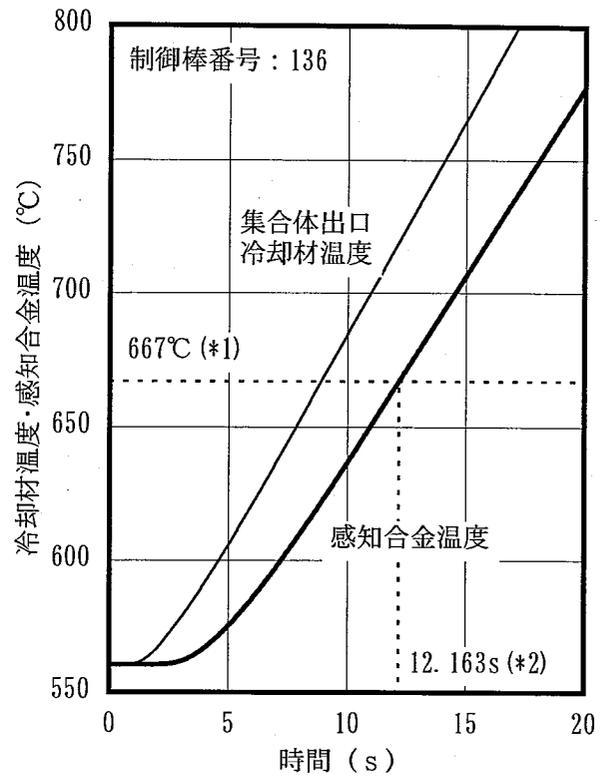
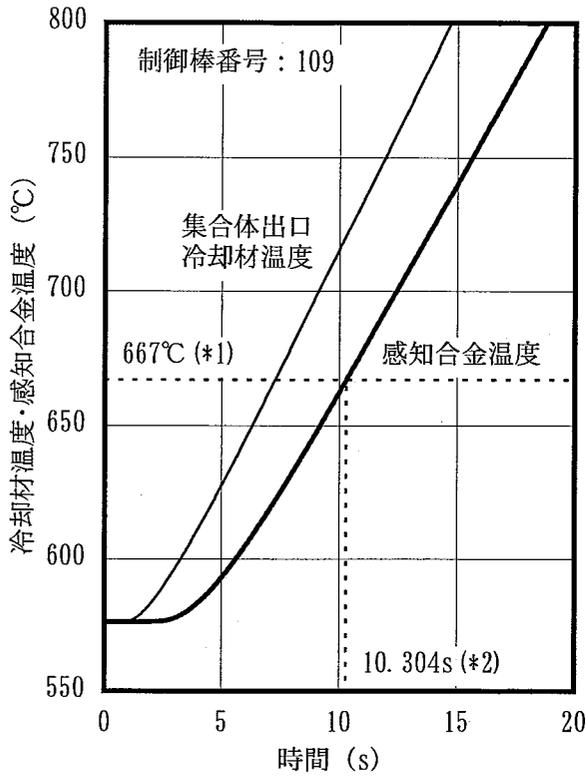


図3.3-21 ドブプラ反応度係数+1σのSASS切り離し時間(1/2)



(*1) : SASS切り離し温度
 (*2) : SASS切り離し時間

図3. 3-22 ドップラ反応度係数+1σのSASS切り離し時間(2/2)

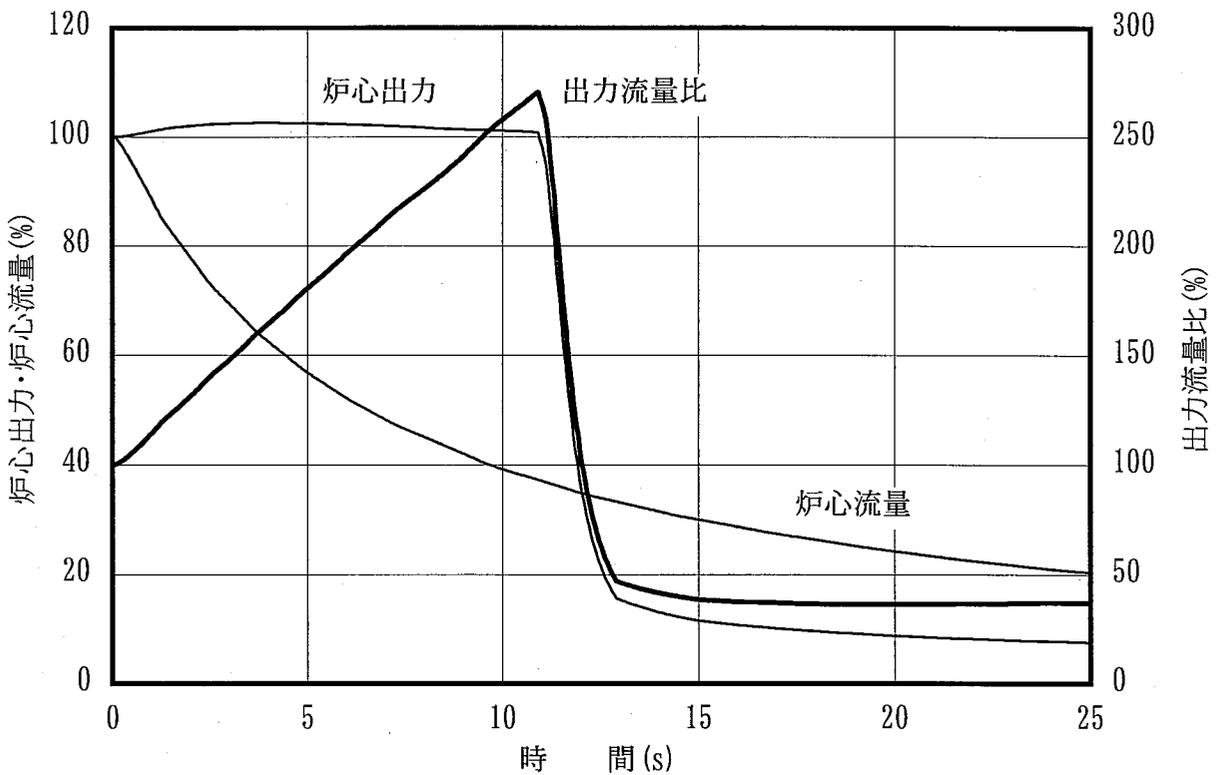
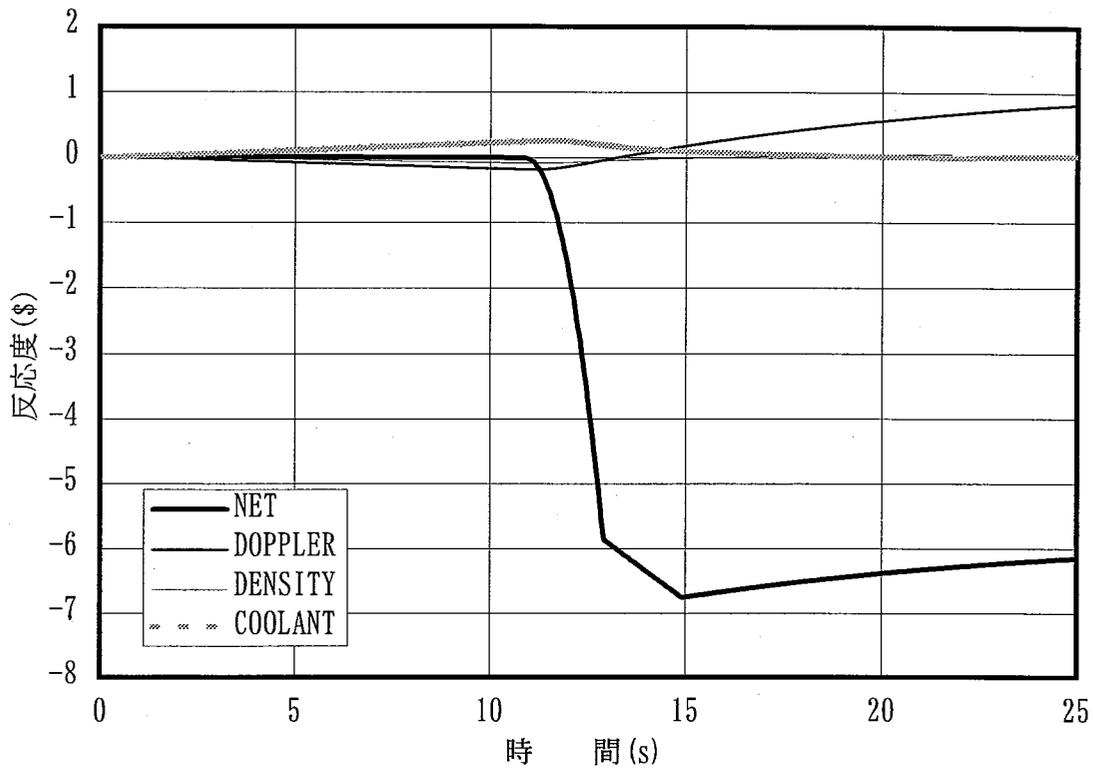
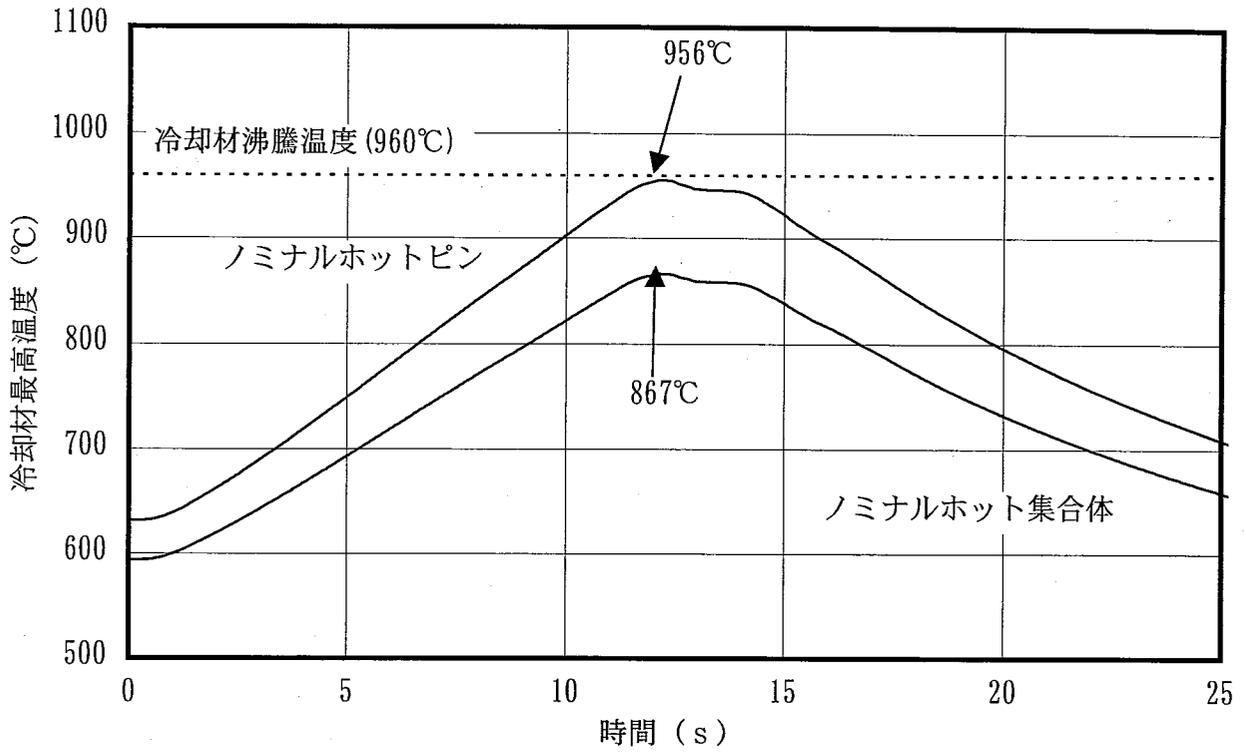
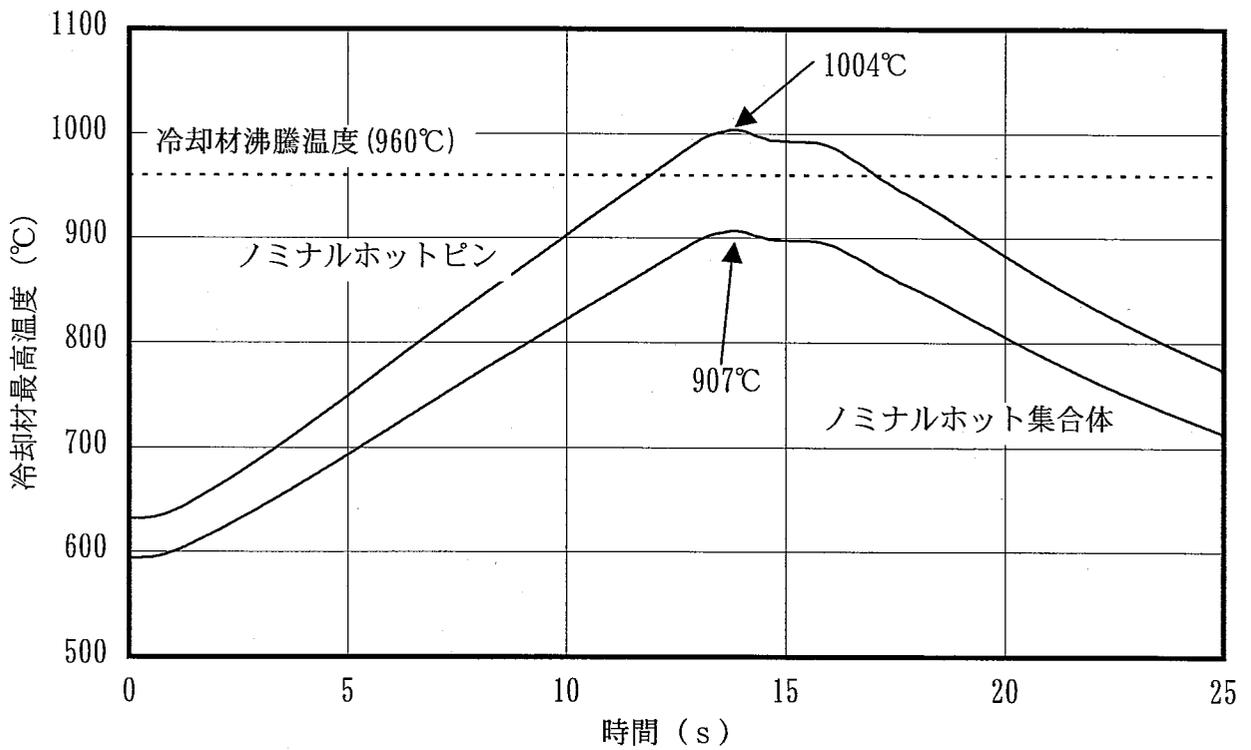


図3.3-23 ドップラ反応度係数+1σの解析結果 (SASS切り離しを考慮)

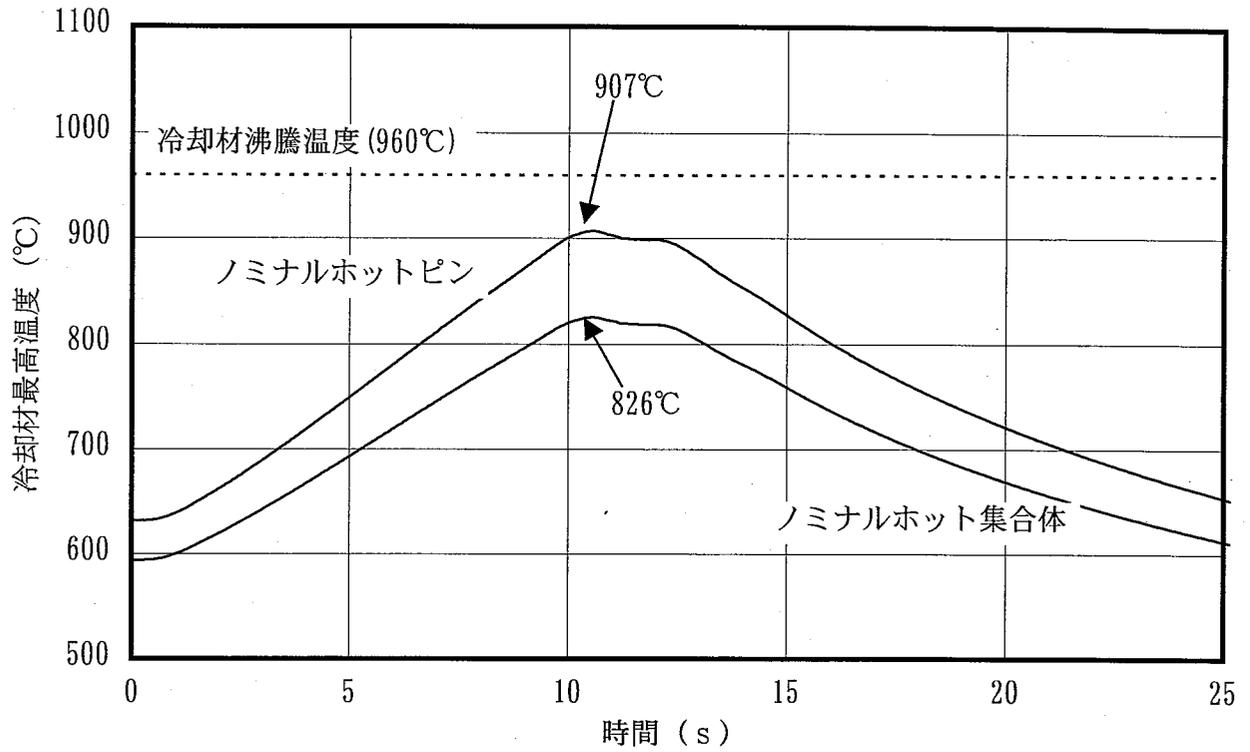


(a) SASS切り離し温度：667°C（基準条件）の場合



(b) SASS切り離し温度：691°C (+3σ) の場合

図3.3-24 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果（ドップラ反応度係数+1σ）(1/2)



(a) SASS切り離し温度：643°C (-3σ) の場合

図3.3-25 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (ドップラ反応度係数+1σ) (2/2)

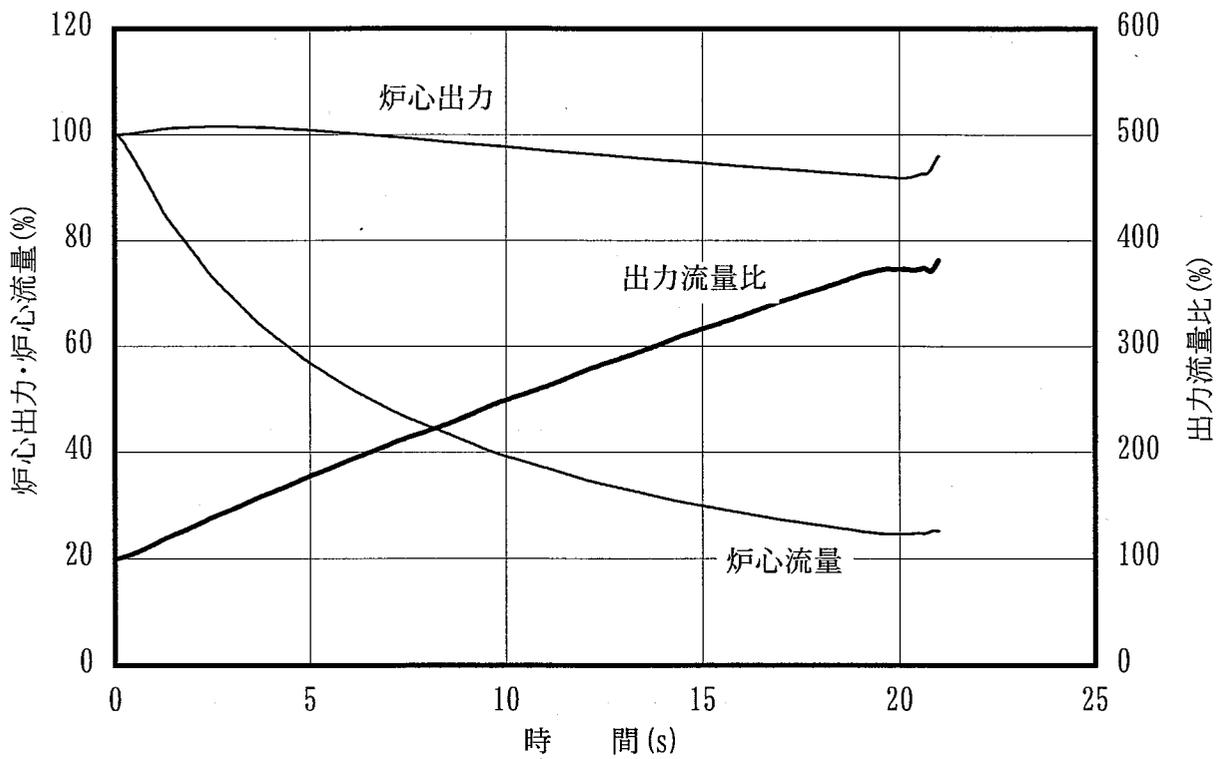
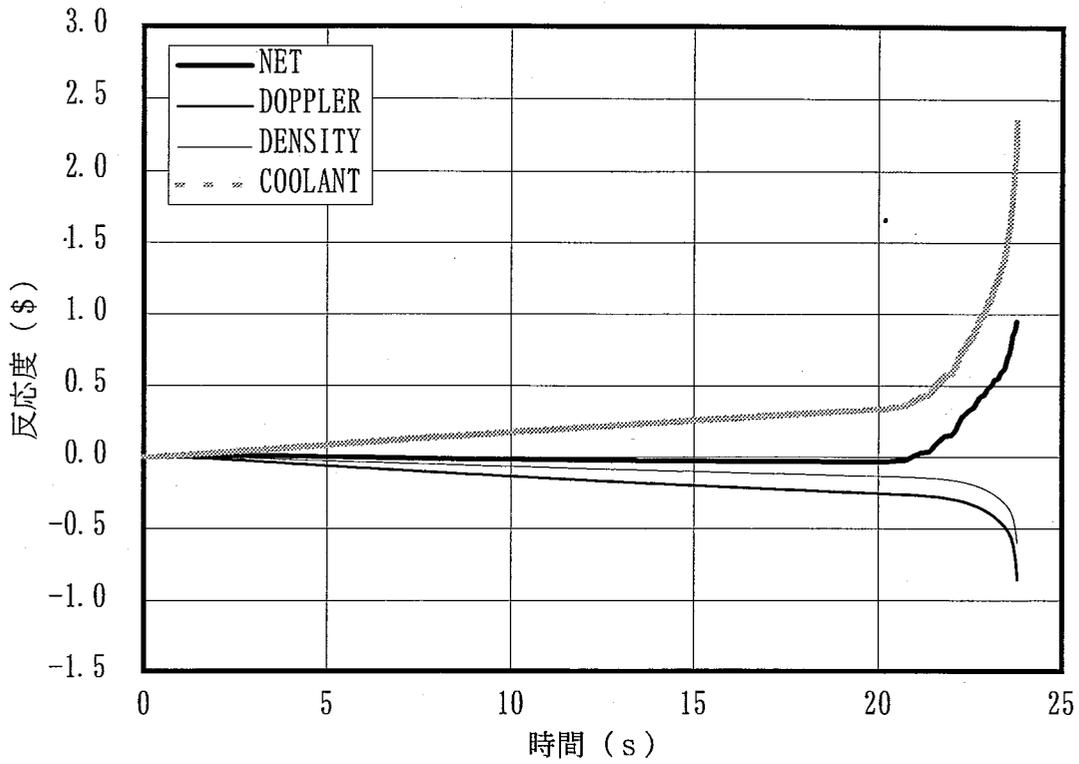
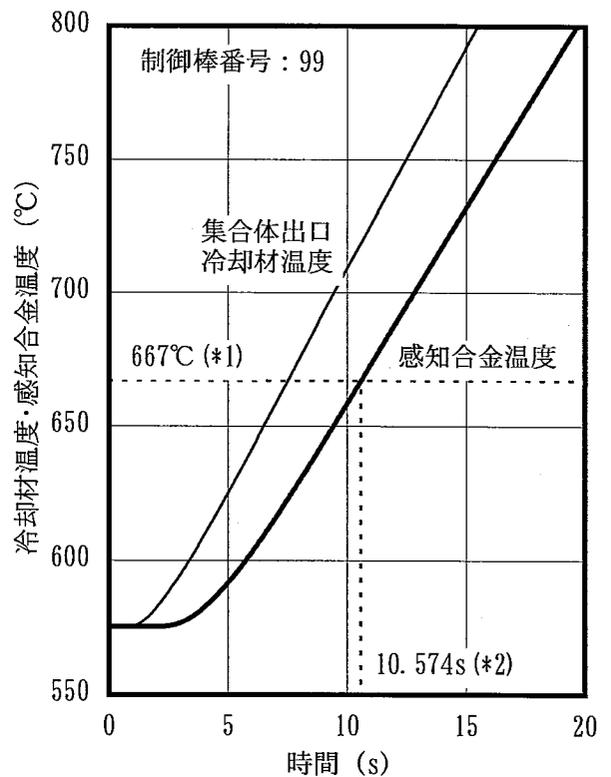
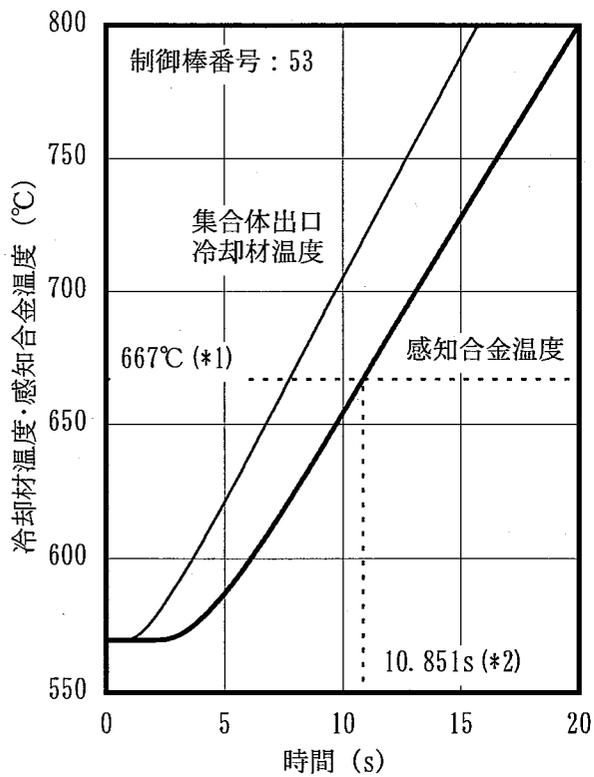
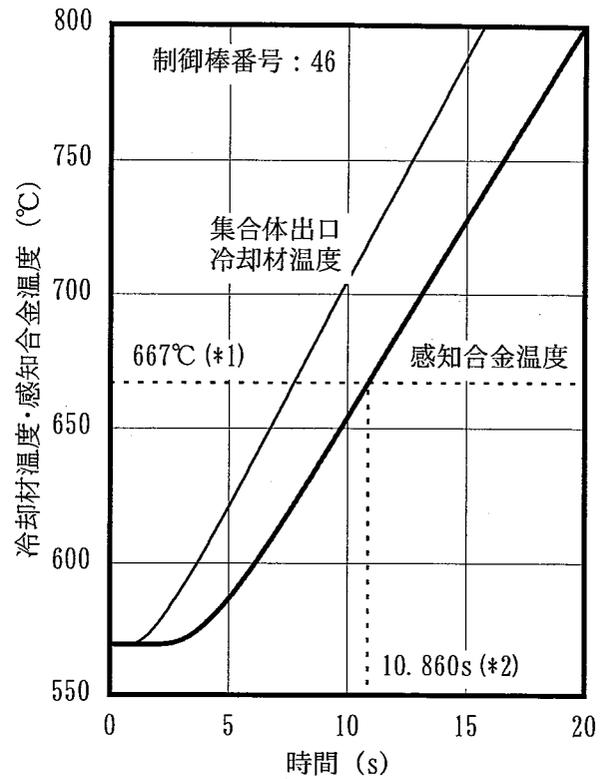
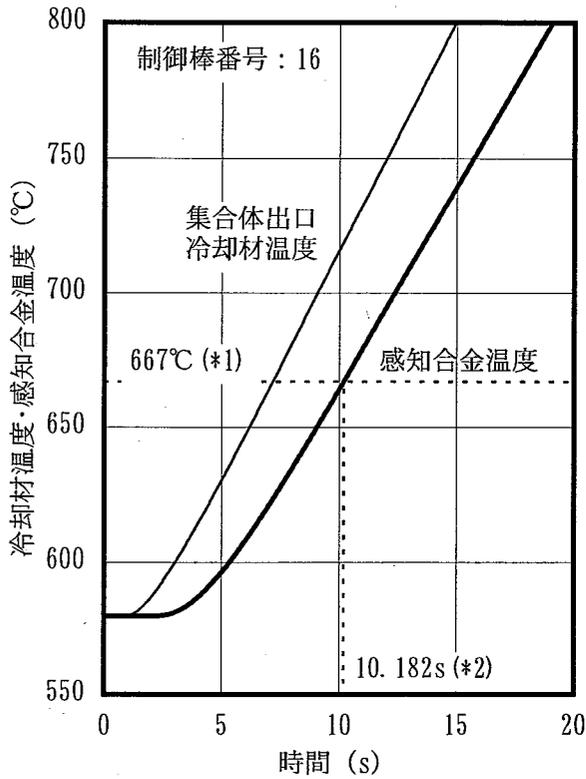
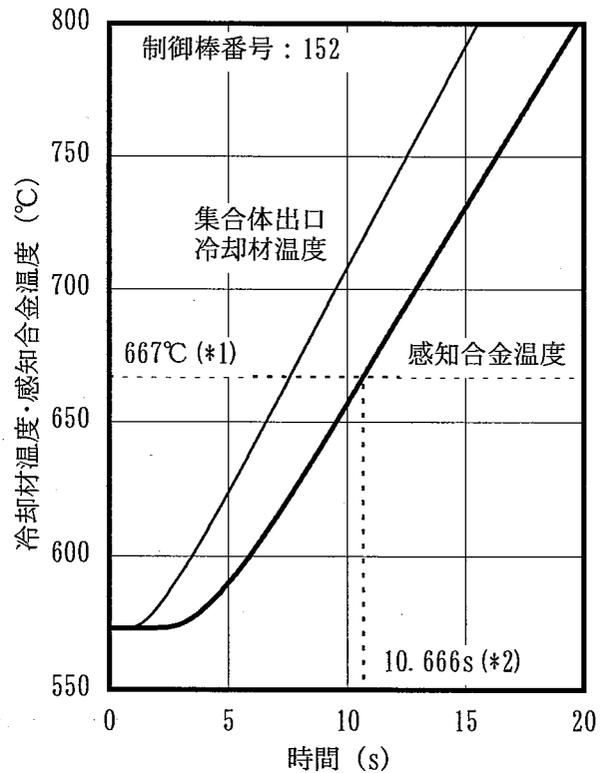
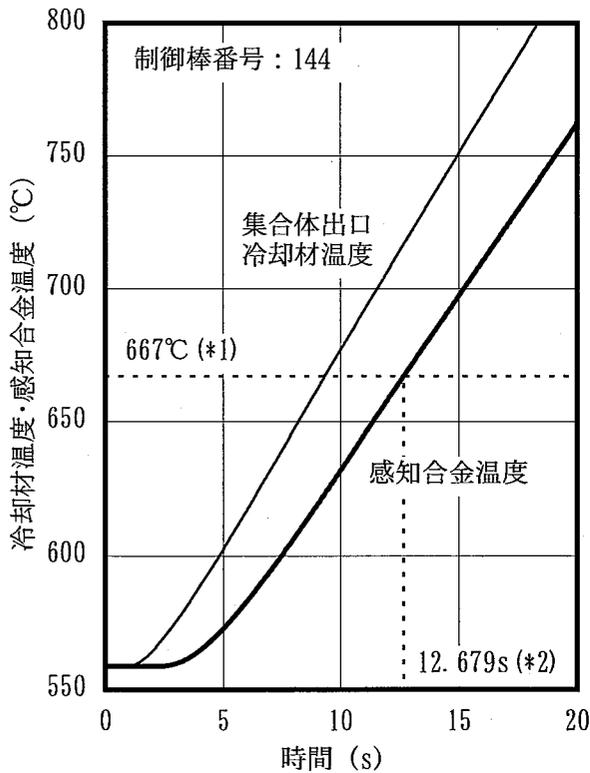
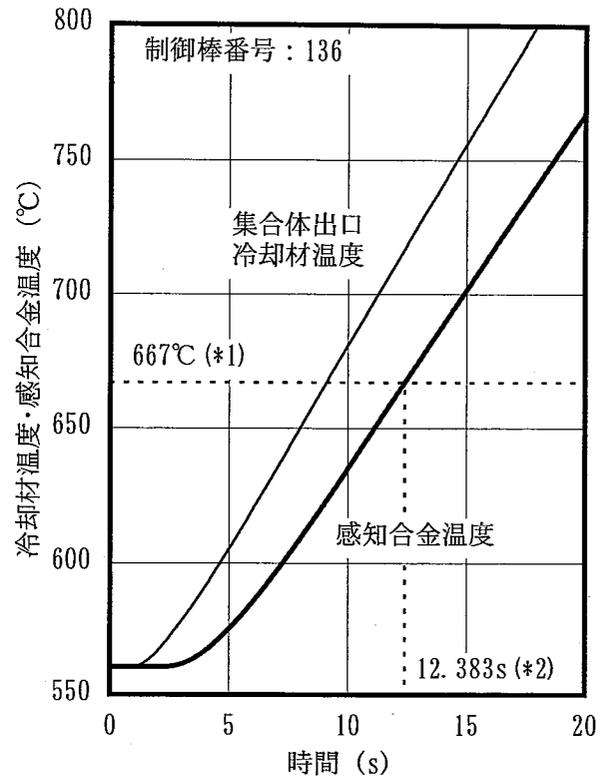
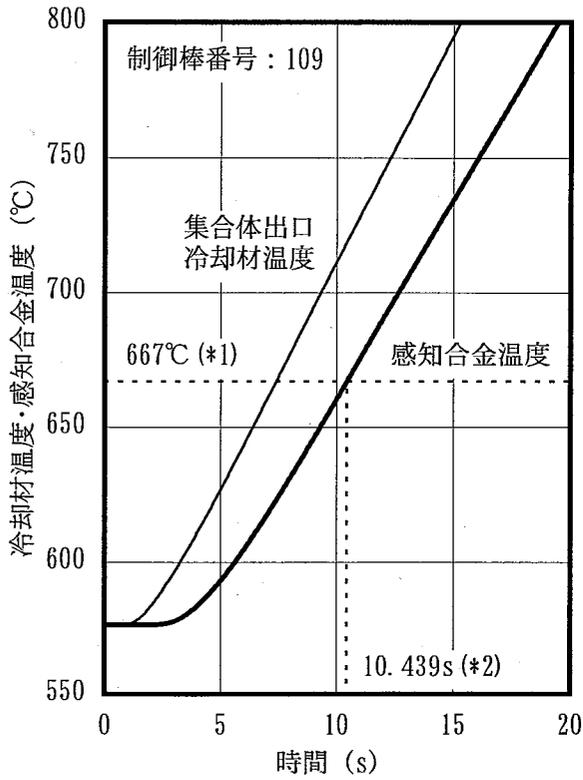


図3.3-26 冷却材反応度係数-1 σ の解析結果 (SASS切り離しを考慮せず)



(*1) : SASS切り離し温度
 (*2) : SASS切り離し時間

図3.3-27 冷却材反応度係数 -1σ のSASS切り離し時間(1/2)



(*1) : SASS切り離し温度
 (*2) : SASS切り離し時間

図3.3-28 冷却材反応度係数 -1σ のSASS切り離し時間(2/2)

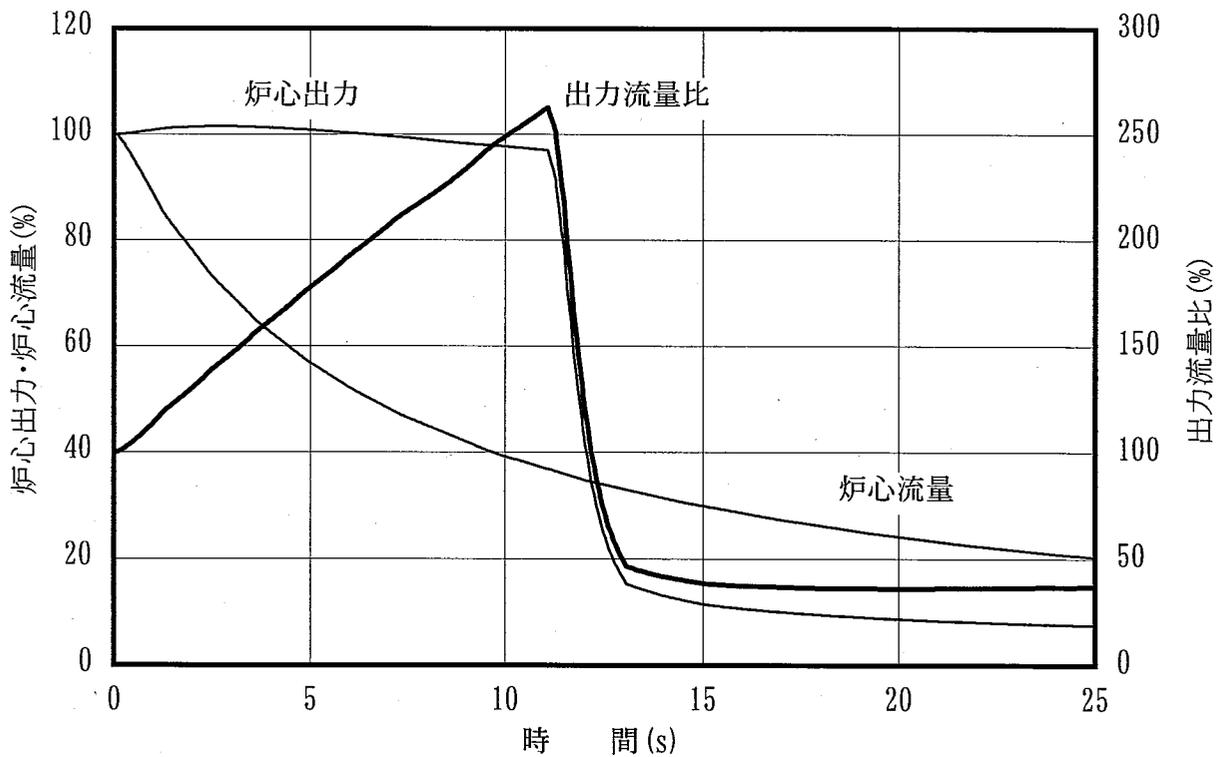
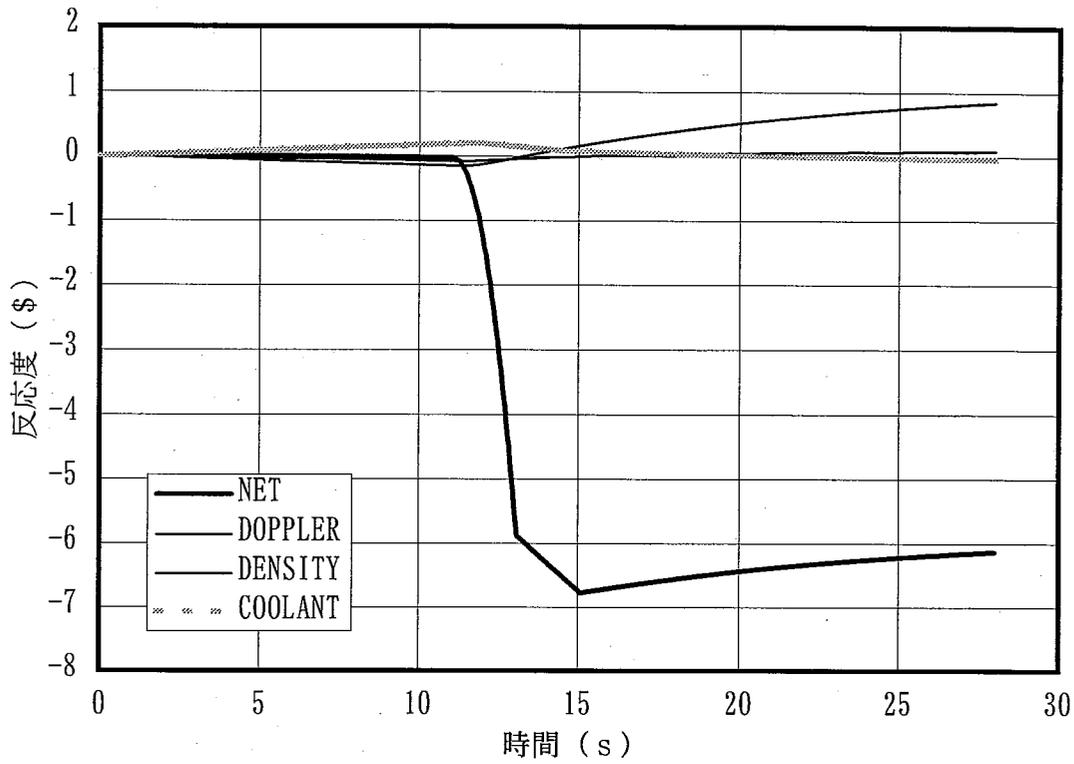
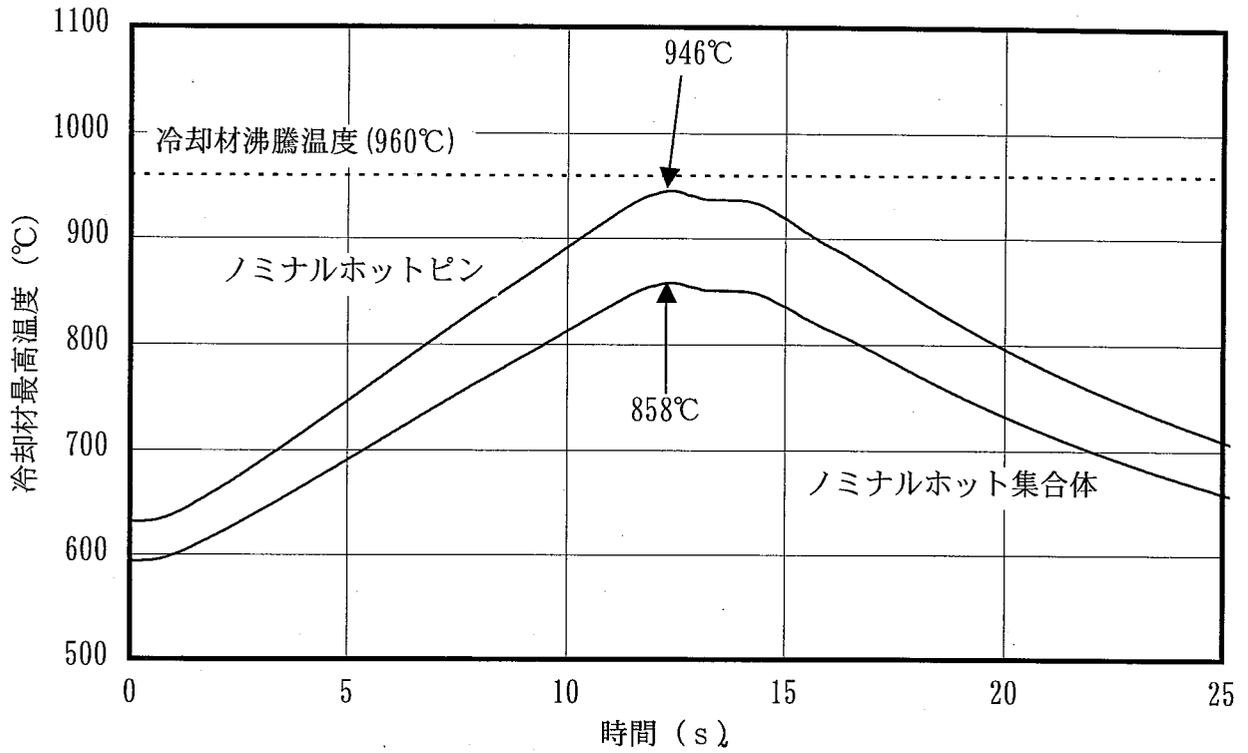
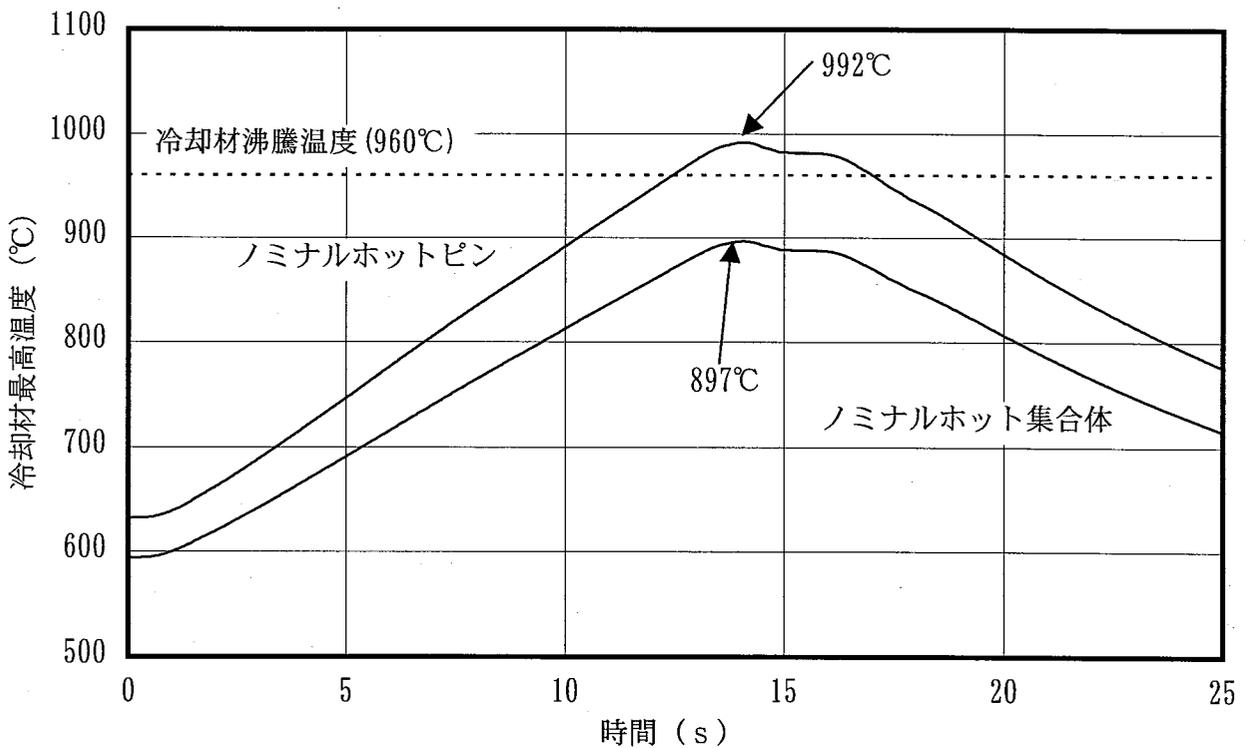


図3. 3-29 冷却材反応度係数 -1σ の解析結果 (SASS切り離しを考慮)

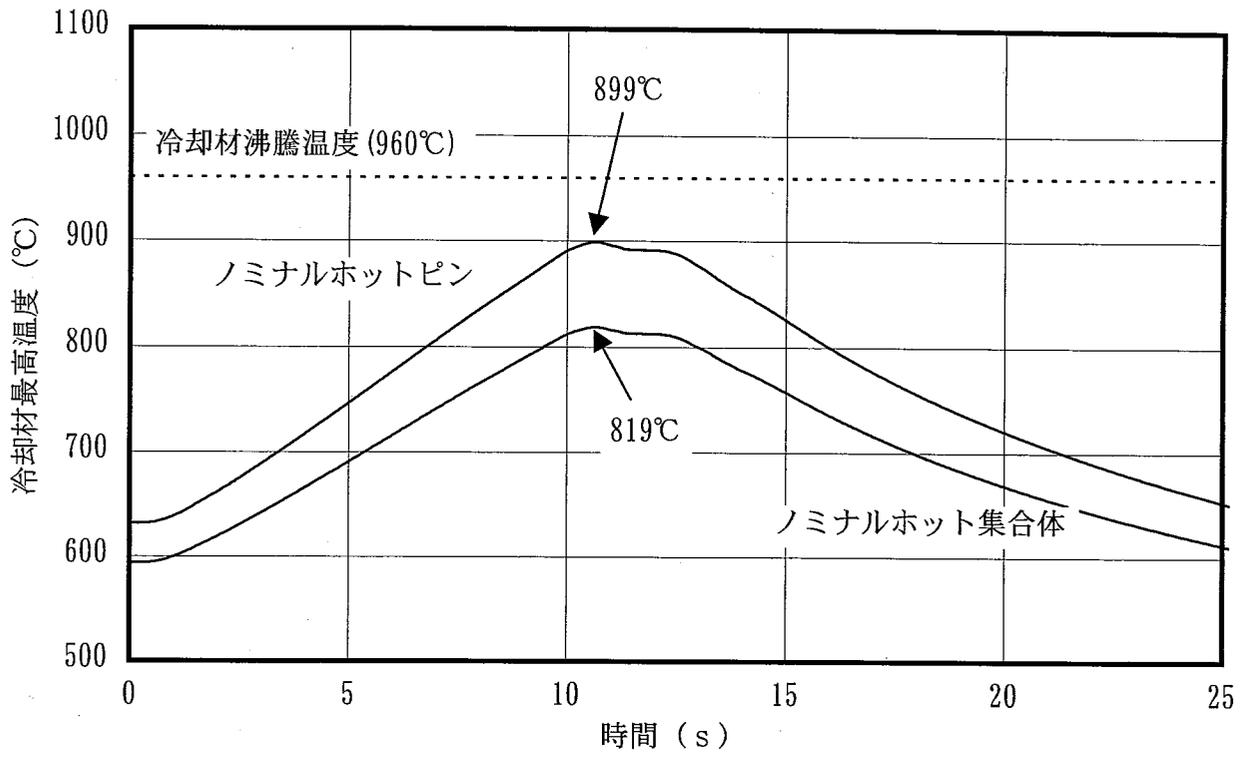


(a) SASS切り離し温度 : 667°C (基準条件) の場合



(b) SASS切り離し温度 : 691°C (+3σ) の場合

図3. 3-30 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (冷却材反応度係数-1σ) (1/2)



(a) SASS切り離し温度 : 643°C (-3σ) の場合

図3. 3-31 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (冷却材反応度係数 -1σ) (2/2)

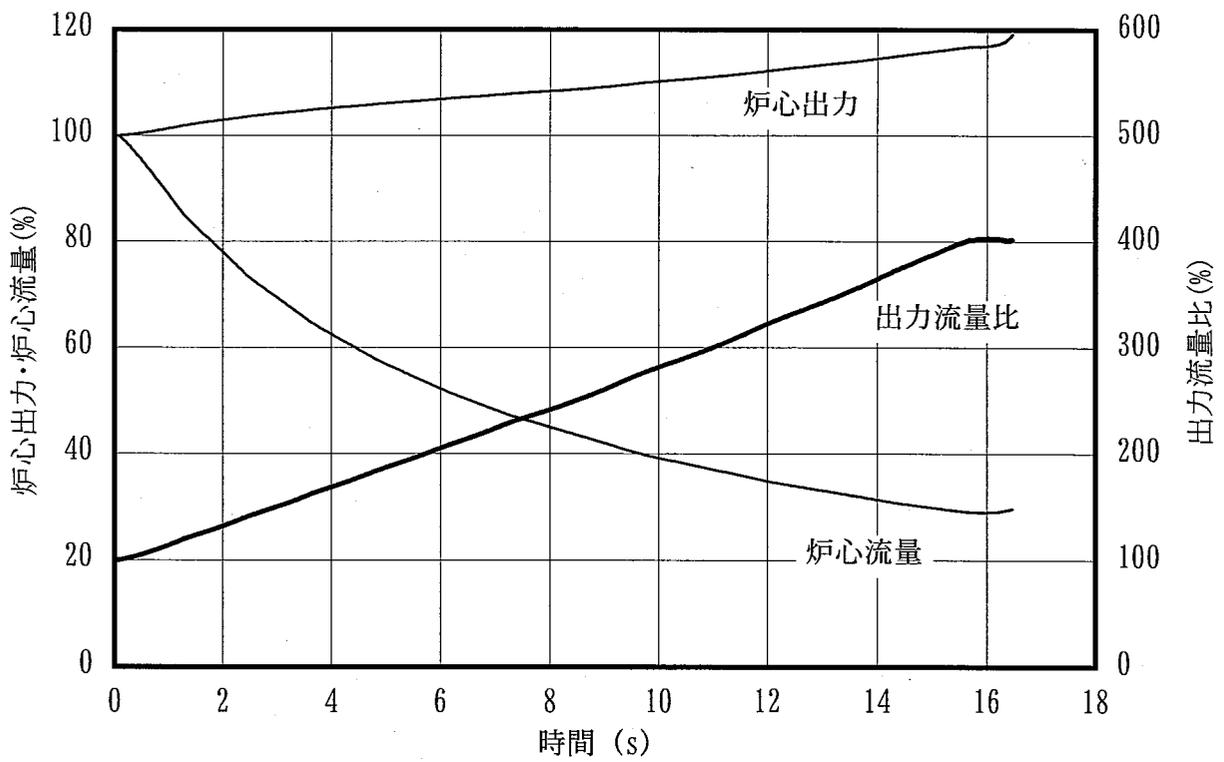
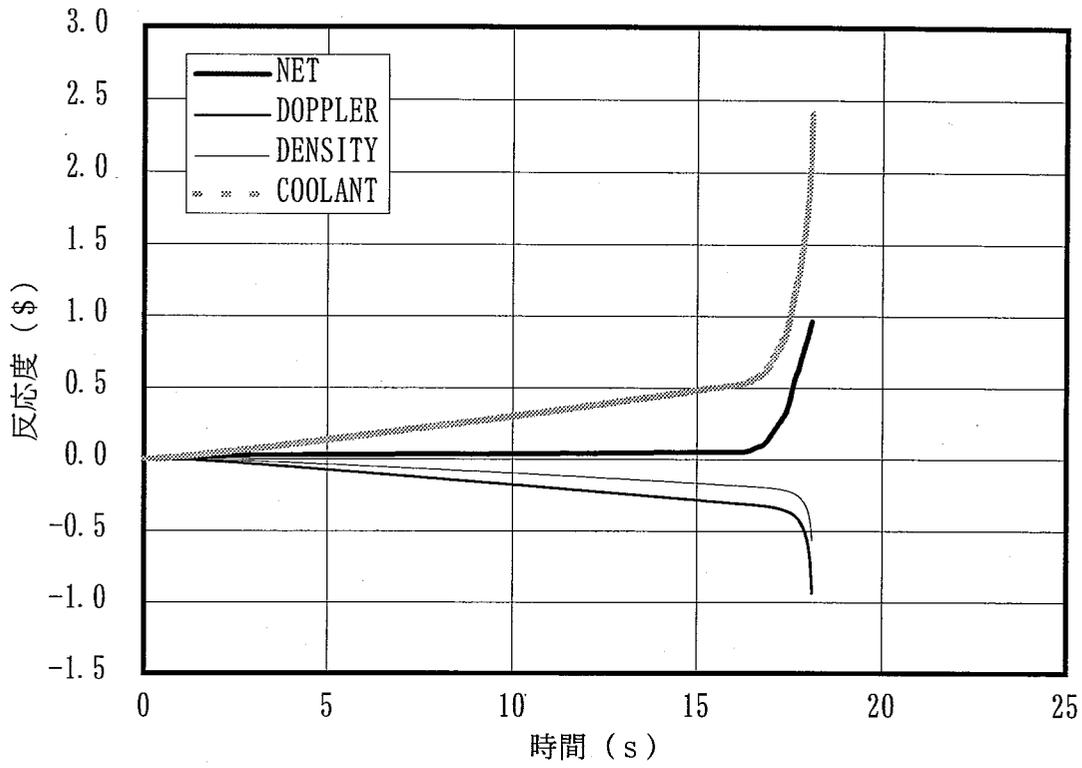
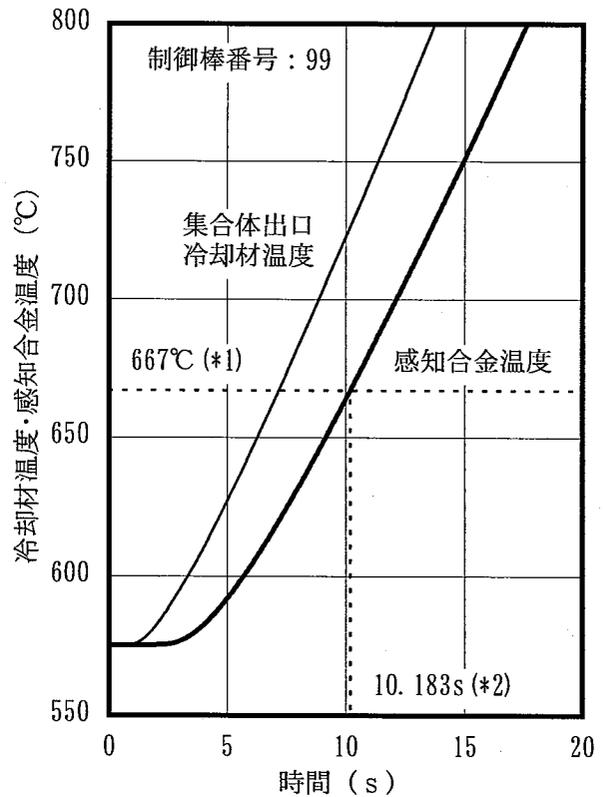
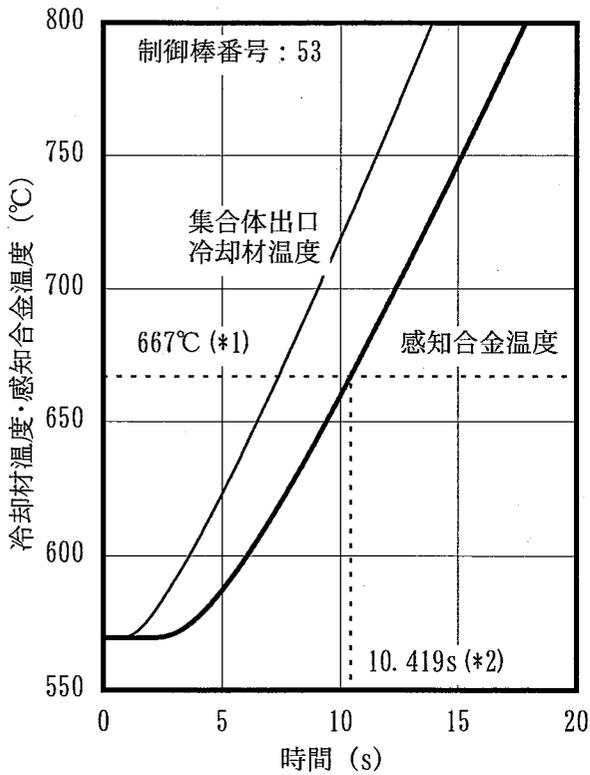
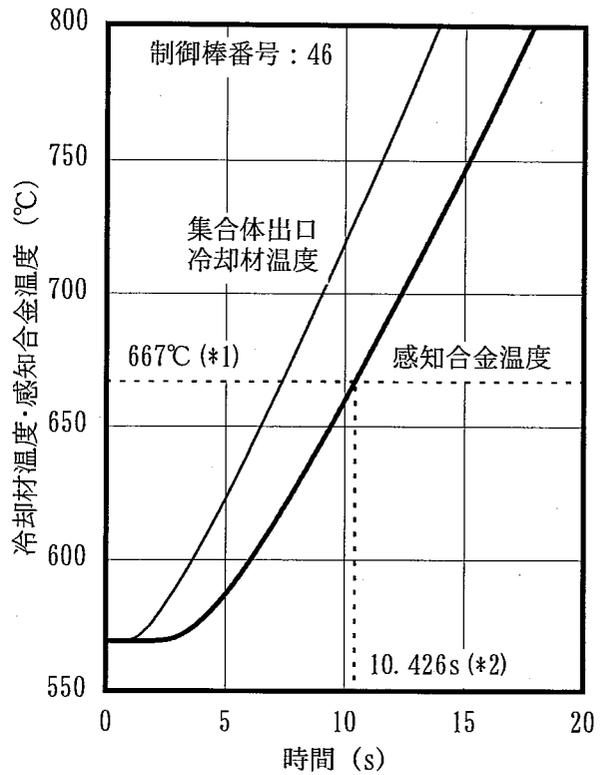
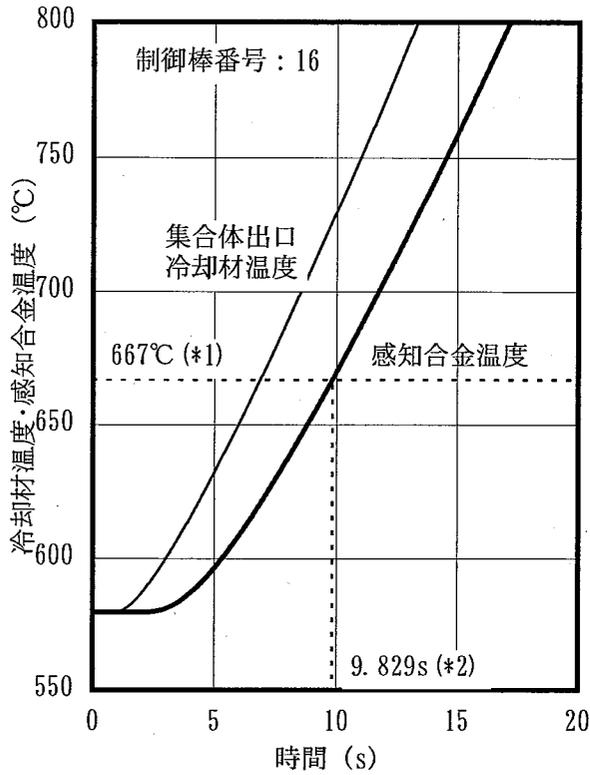
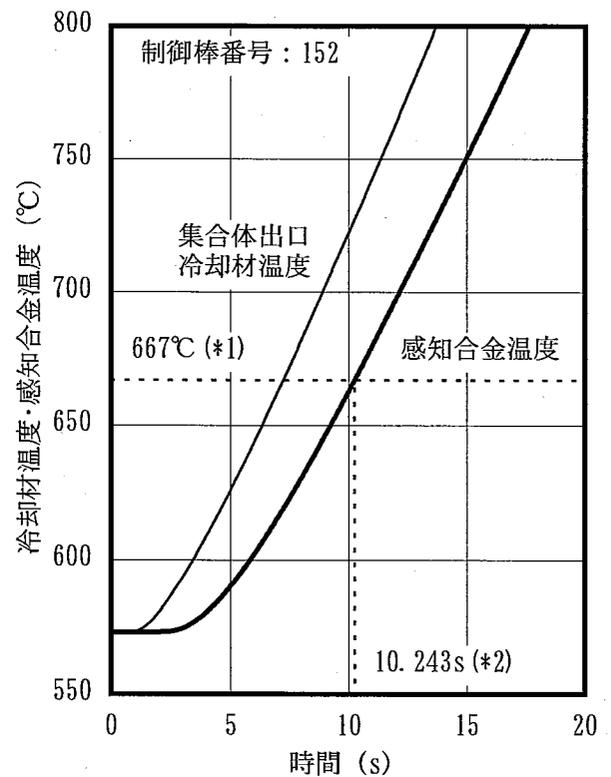
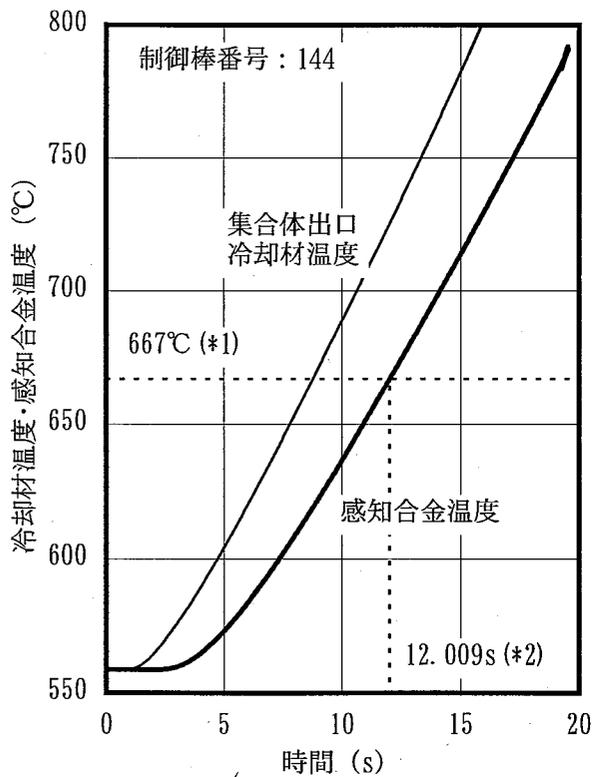
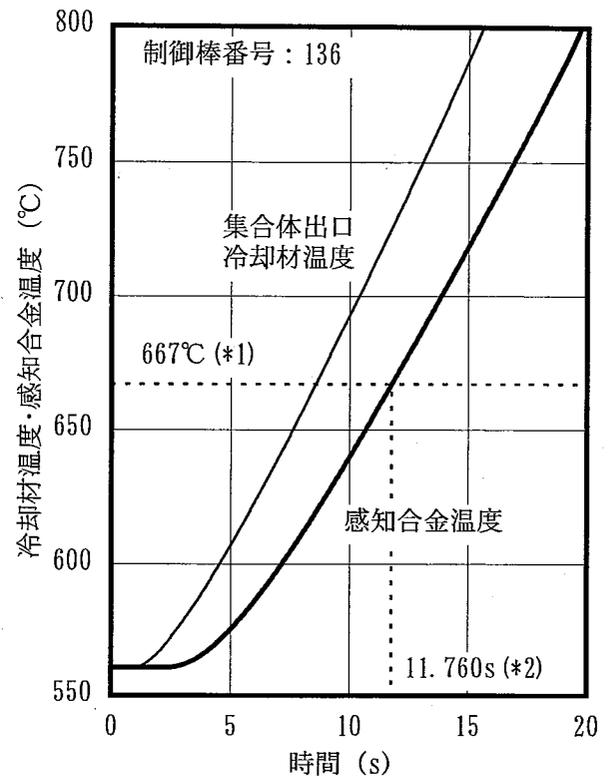
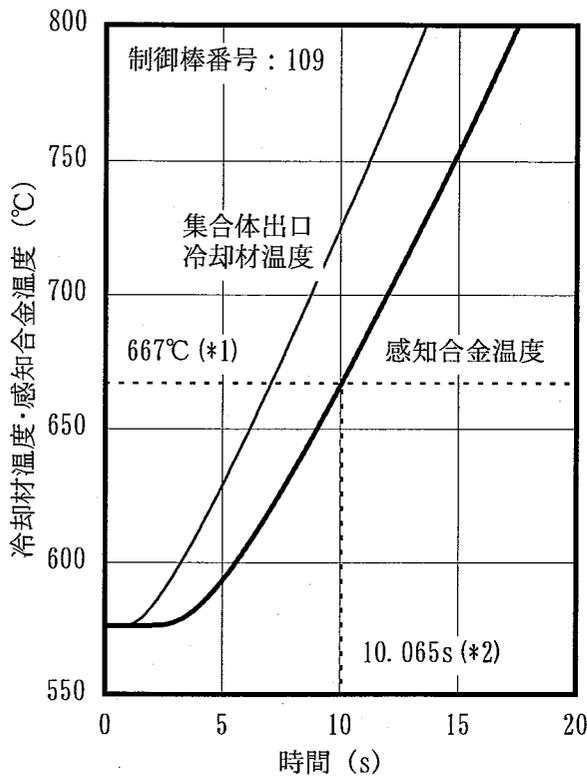


図3. 3-32 冷却材反応度係数+1σの解析結果 (SASS切り離しを考慮せず)



(*1) : SASS切り離し温度
 (*2) : SASS切り離し時間

図3.3-33 冷却材反応度係数+1σのSASS切り離し時間(1/2)



(*1) : SASS切り離し温度
 (*2) : SASS切り離し時間

図3.3-34 冷却材反応度係数+1σのSASS切り離し時間(2/2)

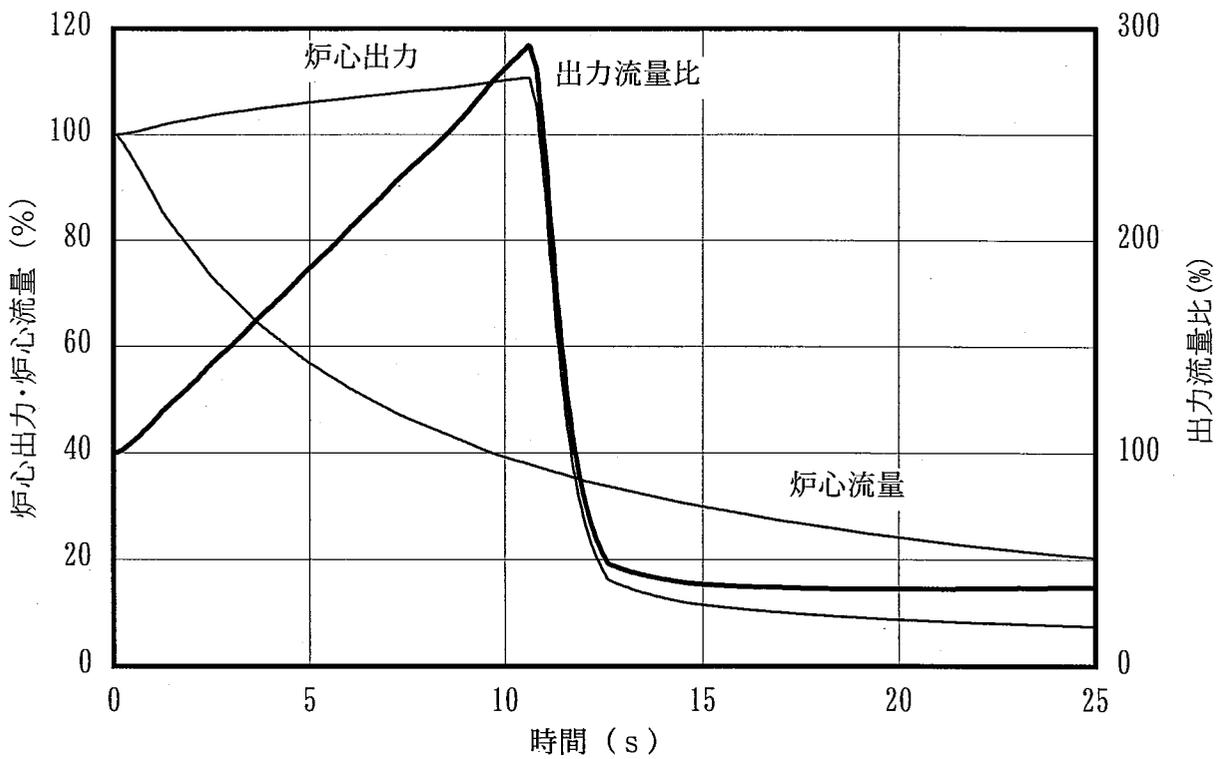
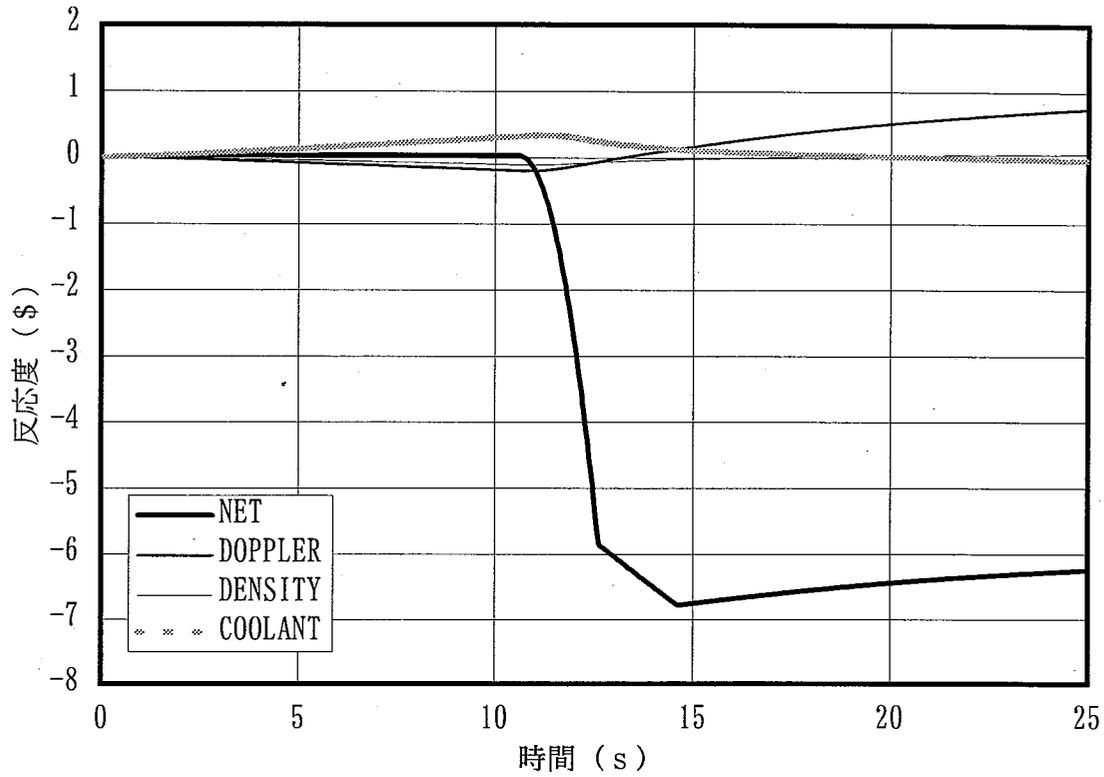
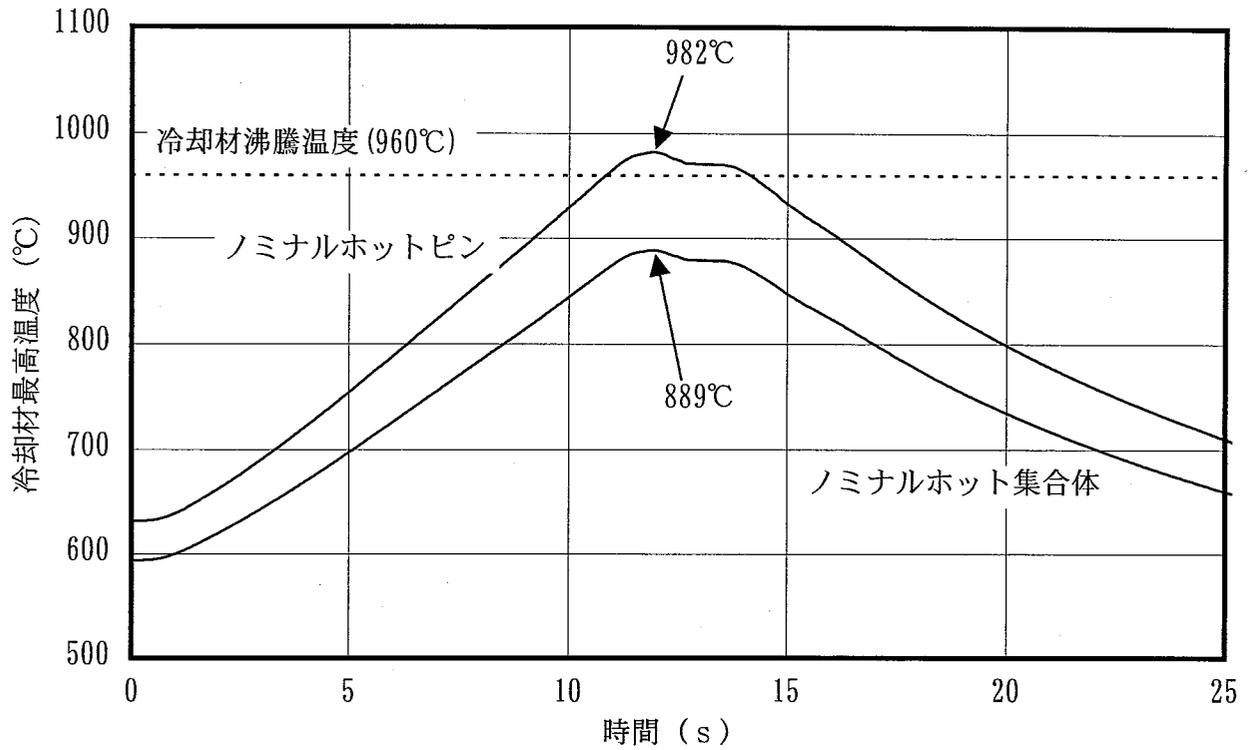
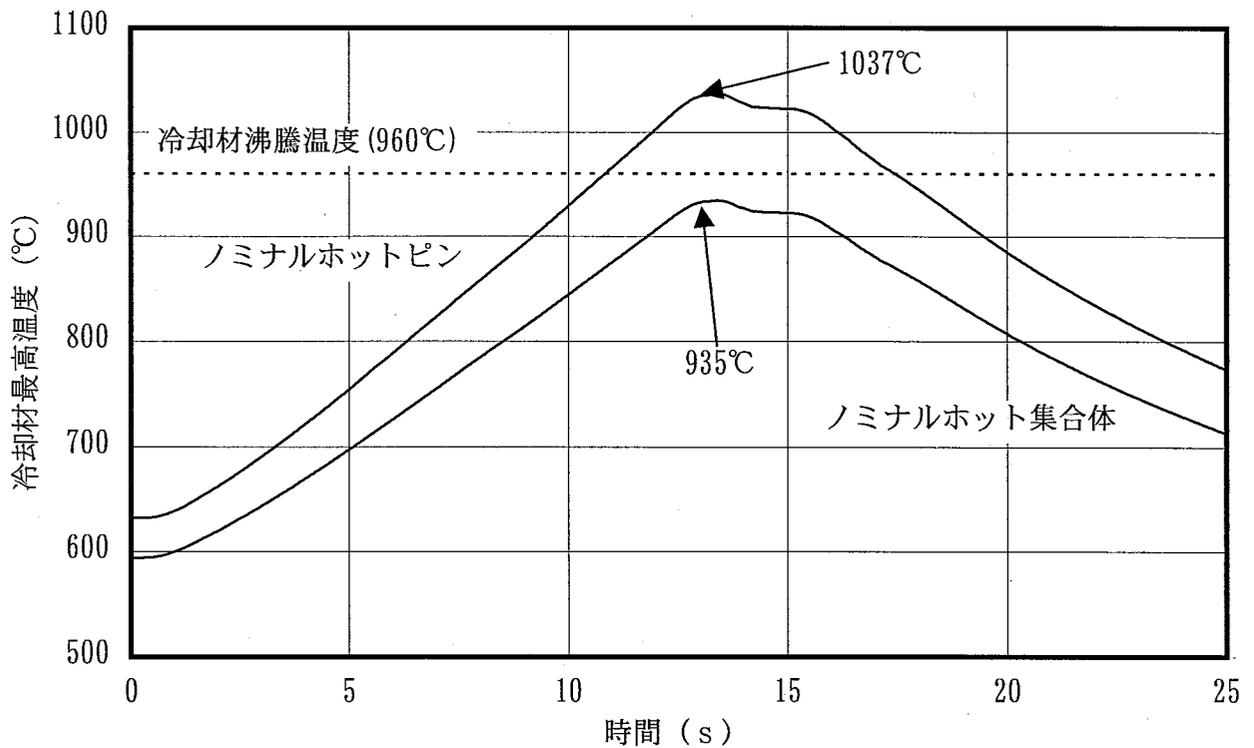


図3.3-35 冷却材反応度係数+1σの解析結果 (SASS切り離しを考慮)

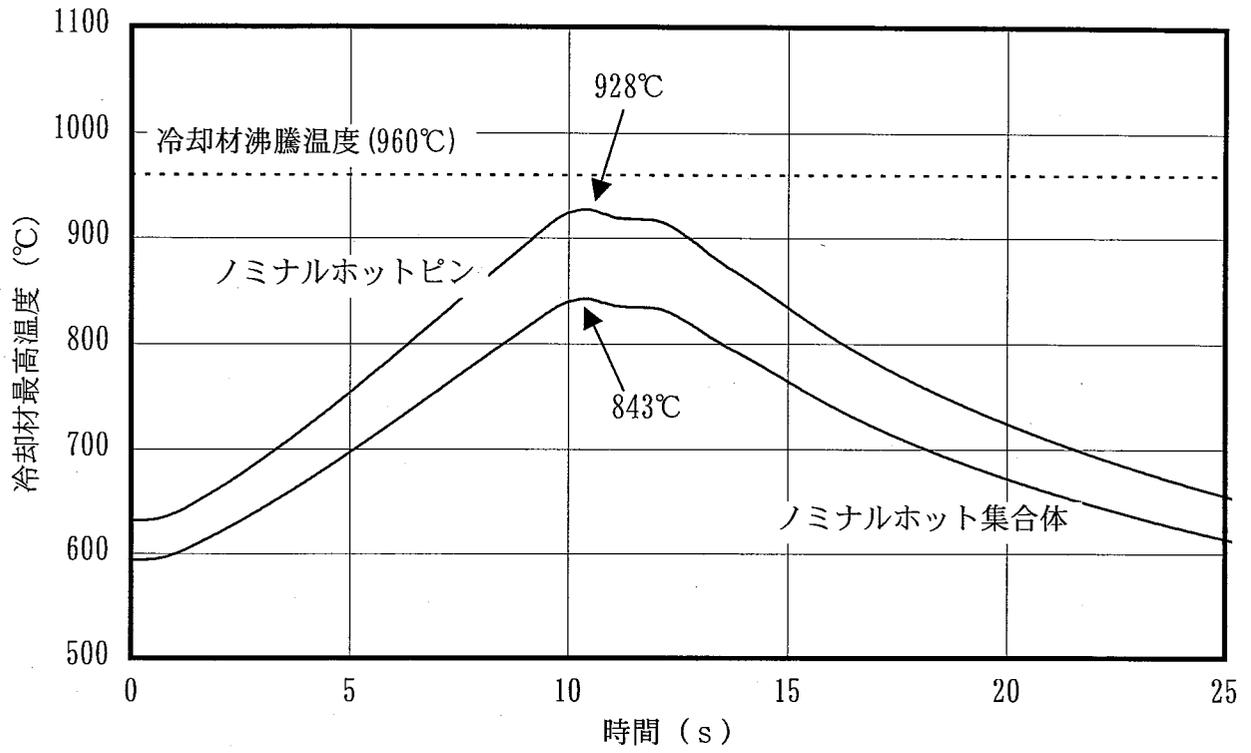


(a) SASS切り離し温度 : 667°C (基準条件) の場合



(b) SASS切り離し温度 : 691°C (+3σ) の場合

図3. 3-36 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (冷却材反応度係数+1σ) (1/2)



(a) SASS切り離し温度：643°C (-3σ) の場合

図3. 3-37 SASS切り離し温度のパラメータ解析結果 (冷却材反応度係数 $+1\sigma$) (2/2)

3.4 UTOP/ULOHS についての検討

(1) 検討の着眼点

大型炉心で制御棒誤引き抜きと炉停止機能の喪失の組み合わせによるUTOPを想定した場合、制御棒誤引き抜きによる炉心出力の歪みが大きいことから、SASSに対して切り離し温度以外に配置に対する要求が発生することも予想される。

ここでは、制御棒誤引き抜きを起因としたUTOPに対して、SASSへの要求条件を従来知見を用いて整理する。

また、代表的な炉停止機能喪失事象であるULOHSに対してもSASSの有効性について、従来知見より検討を加える。

(2) UTOP からの SASS への要求条件

UTOP として制御棒誤引抜を想定して、検討パラメータを以下に整理する。

- ・制御棒引き抜き位置 : 第4リング制御棒
- ・制御棒引き抜き反応度挿入率 : $3 \text{ } \phi / \text{s}$
- ・制御棒引き抜き反応度最大挿入量 : $0.17\% \text{dk/kk}'$
- ・SASS 切り離し温度 : 660 , 680 , 700
- ・SASS を想定する制御棒 : 誤引き抜き制御棒 , 15 度位置 , 30 度位置
- ・過渡解析コード : FOSTER⁽⁷⁾

大型炉心で制御棒 1 本の誤引き抜きを想定すると、引き抜かれた制御棒近傍における集合体の相対出力の上昇は、炉心平均の相対出力の上昇に対して大きく、炉心出力は定格出力に比べて歪んだ状態となる。この制御棒誤引き抜きによる炉心出力の歪みは炉心の周辺に位置する制御棒を引き抜いた場合の方が大きいことが知られている。そこで本検討では、保守的な結果を得る目的で、制御棒誤引き抜き時に最も炉心出力の歪みが大きくなると予想される第4リング制御棒の誤引き抜きを想定した。ここで、炉心出力の歪みに起因して誤引き抜き制御棒から SASS を設置した制御棒までの距離により、SASS 切り離し時間、要求される SASS 切り離し温度が影響される。そこで、炉心設計において制御棒が炉心中心に対してリング状に配置され、同一リング上ではほぼ等間隔に配置されていることに着目して、炉心中心と誤引き抜き制御棒、SASS 設置制御棒でできる角度に着目して、誤引き抜き制御棒から位置

に対する要求条件を定量化した。具体的な対策としては、誤引き抜き制御棒に対して SASS の切り離しを想定するためには誤引き抜きの可能性のあるすべての制御棒に SASS を設置する必要がある。一方、誤引き抜き制御棒から 15 度位置、30 度位置の制御棒で SASS の切り離しを想定することは、それぞれ 30 度おき、60 度おきの制御棒に SASS を設置する（1/12 対象、1/6 対象で SASS を設置する）必要がある。なお、本事象は制御棒誤引き抜きに伴う出力歪みが考慮できる日立開発の FOSTER コードにより解析を実施した。解析コードの概要は付録に示す。

また、燃料健全性の判断条件は下記とする。

- ・ノミナルホットピンの冷却材沸騰防止（960 以下、暫定）
- ・燃料ペレットの溶融防止（2750 以下、暫定）

第 4 リング制御棒誤引き抜きにおいて 15 度位置制御棒の切り離しを想定した場合の解析結果を図 3.4-1 及び図 3.4-2 に示す。また、主要な解析結果を表 3.4-1 にまとめる。制御棒誤引き抜きにより正の反応度が挿入され、炉心出力が上昇し、燃料温度、冷却材温度等も上昇する。このため、正の事故反応度、負のドブプラ反応度、燃料温度反応度、わずかに正な冷却材反応度、被覆管反応度、ラッパ管反応度が挿入され、全反応度は正となる。制御棒が完全に引き抜かれ、事故反応度の増加が無くなると全反応度もほぼバランスする。SASS を設置した制御棒の感知合金温度が上昇して、切り離し温度に到達すると SASS が切り離され、制御棒が炉心に落下して炉心出力の上昇は抑制される。第 4 リング制御棒誤引き抜きにおいて 15 度位置制御棒の切り離しを想定した場合は、SASS 切り離し温度として約 670 以下に設定する必要がある。

第 4 リング制御棒誤引き抜きにおいて引き抜き制御棒の切り離しを想定した場合の解析結果を図 3.4-3 及び図 3.4-4 に示す。また、主要な解析結果を表 3.4-1 にまとめる。本条件の反応度挙動、全体出力挙動は前条件と同一であるが、SASS 位置での出力歪みが増加するため、SASS 切り離し温度への到達時間は早まる。また、誤引き抜き制御棒が切り離されるため、SASS 切り離しと同時に事故反応度の挿入は停止する。第 4 リング制御棒誤引き抜きにおいて誤引き抜き制御棒の切り離しを想定した場合は、SASS 切り離し温度として約 710 以下に設定する必要がある。

第 4 リング制御棒誤引き抜きにおいて 30 度位置制御棒の切り離しを想定した場

合の解析結果を図 3.4-5 及び図 3.4-6 に示す。また、主要な解析結果を表 3.4-1 にまとめる。本条件は、SASS 感知合金温度は 670 以上には上昇せず、仮に SASS 切り離し温度を 660 としても燃料溶融を防止できない結果となった。

以上の感度解析の結果、UTOP 事象に対して、少なくとも誤引き抜き制御棒から 15 度以内に SASS を設置した制御棒を配置し、SASS 切り離し温度を 670 以下に設定する必要があることが明らかとなった。

なお、UTOP 事象については厳しい判断条件でとして、燃料溶融を許容しないことを前提としたが、燃料健全性の判断条件を見直すことにより安全要求が緩和できる可能性もある。

(3) ULOHS に対する SASS の有効性

検討条件を以下にまとめる。

- ・評価対象：飯盒型中間熱交換器を採用したタンク型炉プラント⁽⁸⁾
(FBR 実用化戦略で検討)
- ・想定事象：蒸気発生器水側の瞬時断熱
- ・一次系の運用：定格運転状態
- ・二次系の運用：定格運転状態
- ・各種反応度係数：ノミナル値
- ・炉心崩壊熱：誤差を考慮した最大値
- ・SASS 切り離し温度：670
- ・炉心出力制御系：動作を考慮しない
- ・判断条件の冷却材バウンダリ温度：650 , 750 , 850
- ・過渡解析コード：FOSTER (プラント特性解析に使用)

除熱喪失事象としては、ULOHS と炉停止後の残留熱除去機能失敗事象 (PLOHS : Protected Loss of Heat Sink) が想定される。PLOHS は運転員判断による手動操作で崩壊熱除去系を起動することにより、冷却材バウンダリの健全性が維持できることが知られている。一方、ULOHS は十分な運転員判断時間を確保できないことが懸念される。そこで、ULOHS では冷却材バウンダリ破損以前に SASS で炉停止し、PLOHS に移行できるかに着目した解析・確認が必要となる。

FBR 実用化戦略で検討した飯盒型中間熱交換器を採用したタンク型炉プラントにおいて、ULOHS で SASS の切り離しに期待しない場合の解析結果を図 3.4-7 から図 3.4-9 に示す。

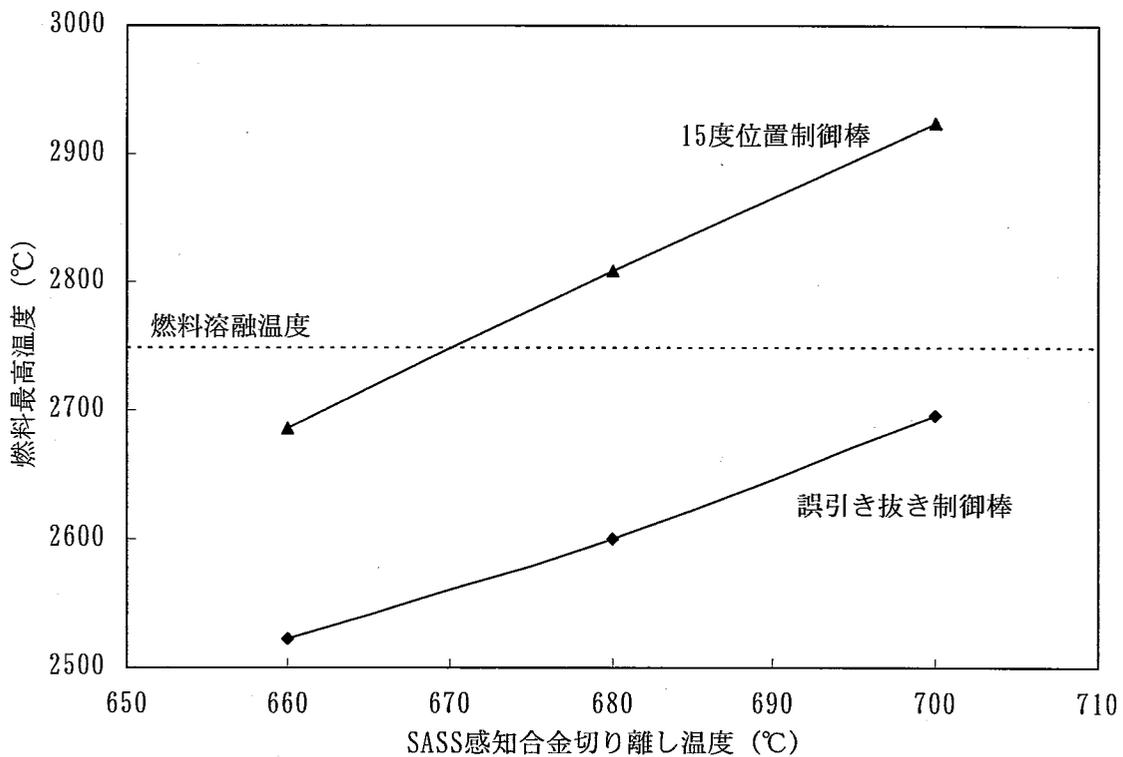
蒸気発生器の除熱喪失により、蒸気発生器出口、IHX二次入口、IHX一次出口、コールドプレナム、炉心入口と次第に冷却材温度が上昇する。炉心入口温度上昇に伴い、負の炉心支持板反応度が挿入され、炉心出力は低下する。

ここで、着目すべきは最も早期に冷却材バウンダリ温度が上昇する IHX 入口近傍温度、及び動的機器である一次主循環ポンプを内包するコールドプレナム温度である。それぞれが、原型炉もんじゅの設置許可申請書に記載されるバウンダリ評価目安温度である 650 に到達するのは、約 110 s , 約 180 s である。また、750 に到達するのは約 204 s , 約 269 s であり、850 に到達するのは約 308 s , 約 374 s である。これに対し、約 90 s 後には SASS 温度は切り離し温度である 670 に到達するため、冷却材バウンダリ温度が原型炉もんじゅの設置許可申請書に記載される評価目安温度に到達する以前に SASS の切り離しにより炉心に制御棒を挿入することが可能となる。

以上の検討結果より、ULOHSを想定しても冷却材バウンダリ温度が制限値に到達する以前にSASSにより炉心に制御棒を挿入することが可能であることが示され、ULOHS に対するSASSの有効性を確認することができた。

表3.4-1 UTOP解析結果のまとめ

誤引抜き, SASS制御棒	SASS感知合金 切離し温度 ℃	SASS切離し 時間 s	最大 出力比 %	冷却材 最高温度 ℃	被覆管 最高温度 ℃	燃料 最高温度 ℃
第4リング 15度位置	700	14.10	211.7	753.3	769.5	2924.
	680	12.57	198.4	730.7	745.9	2809.
	660	10.96	185.0	708.0	722.3	2685.
第4リング 誤引抜き	700	8.95	187.9	710.4	724.9	2696.
	680	10.22	177.7	693.4	707.3	2600.
	660	11.46	167.9	677.3	690.5	2522.
第4リング 30度位置	680	到達せず	235.7	866.2	887.5	3591.
	660	18.75	235.7	812.7	831.2	3230.



誤引抜き：SASS制御棒	SASS切り離し要求温度
第4リング：15度位置制御棒	670 °C
第4リング：誤引き抜き制御棒	711 °C

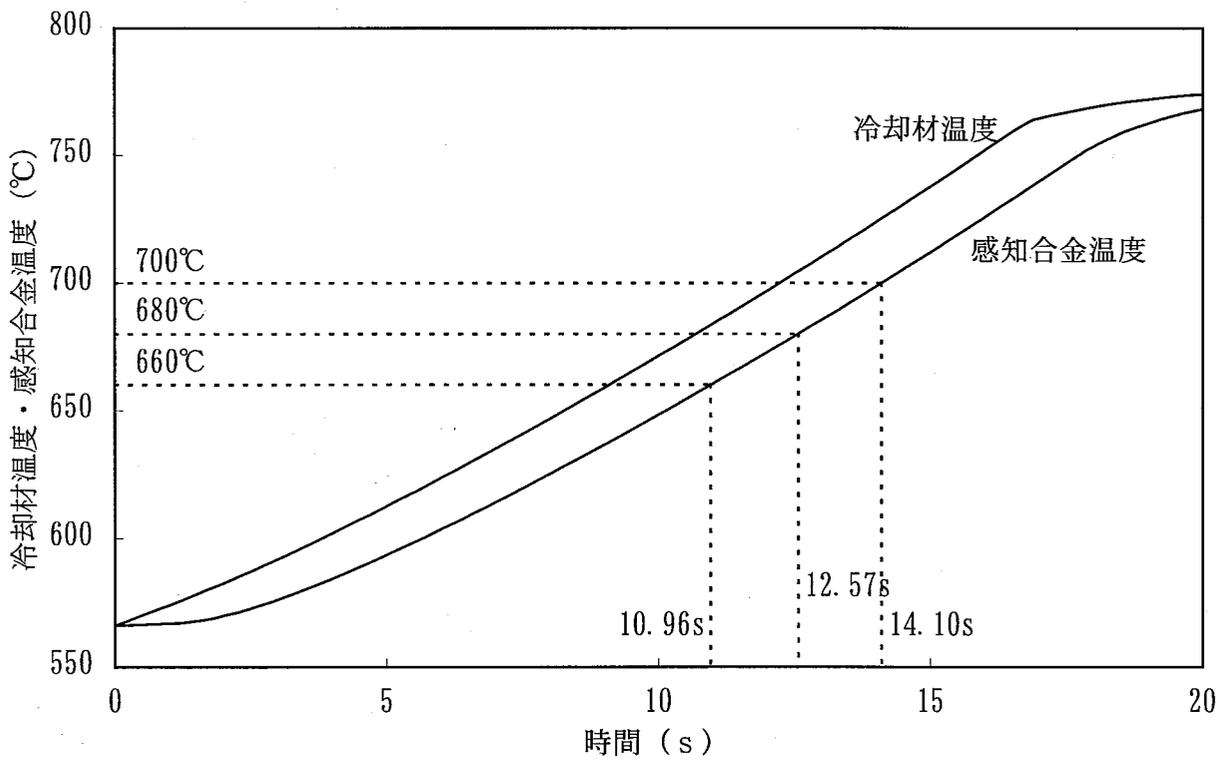
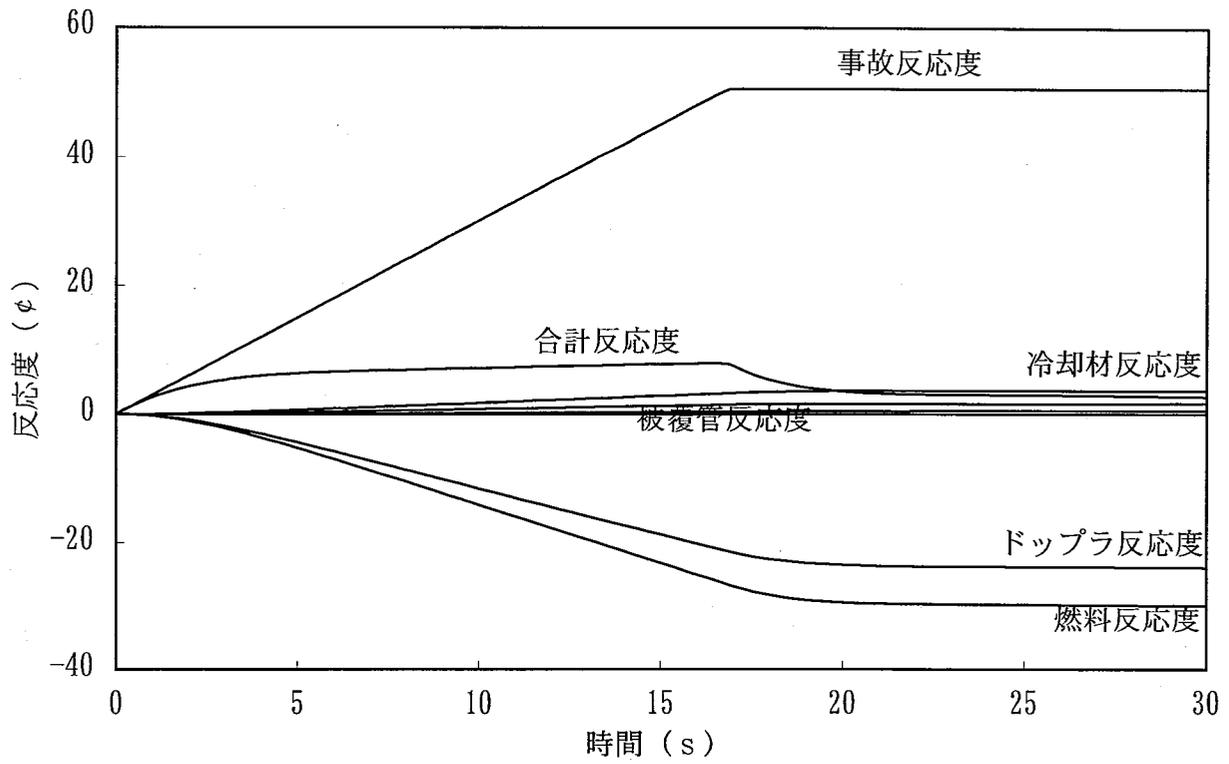


図3.4-1 UTOP解析結果 (15度位置SASS、切り離し時間)

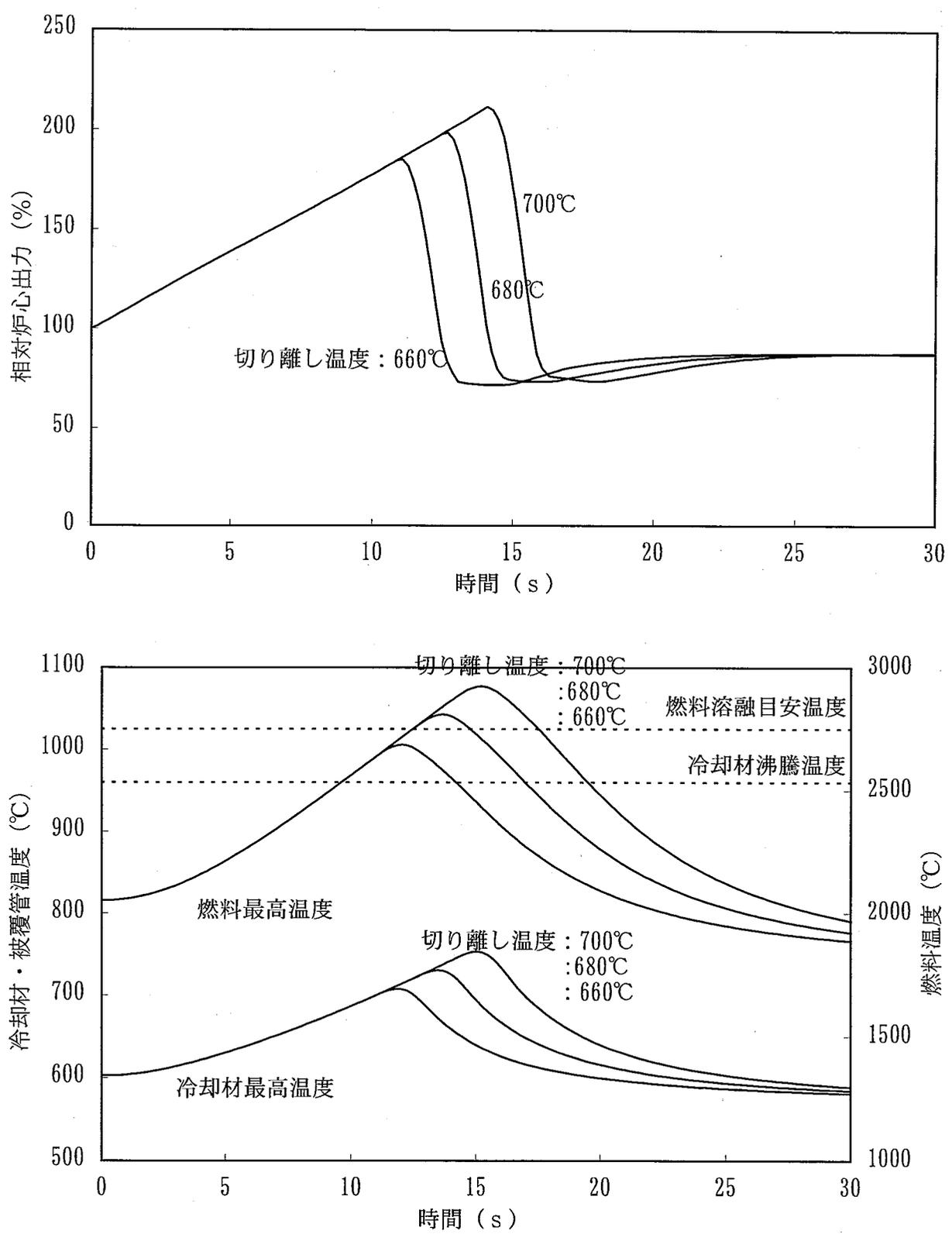


図3.4-2 UTOP解析結果 (15度位置SASS、切り離し温度の影響)

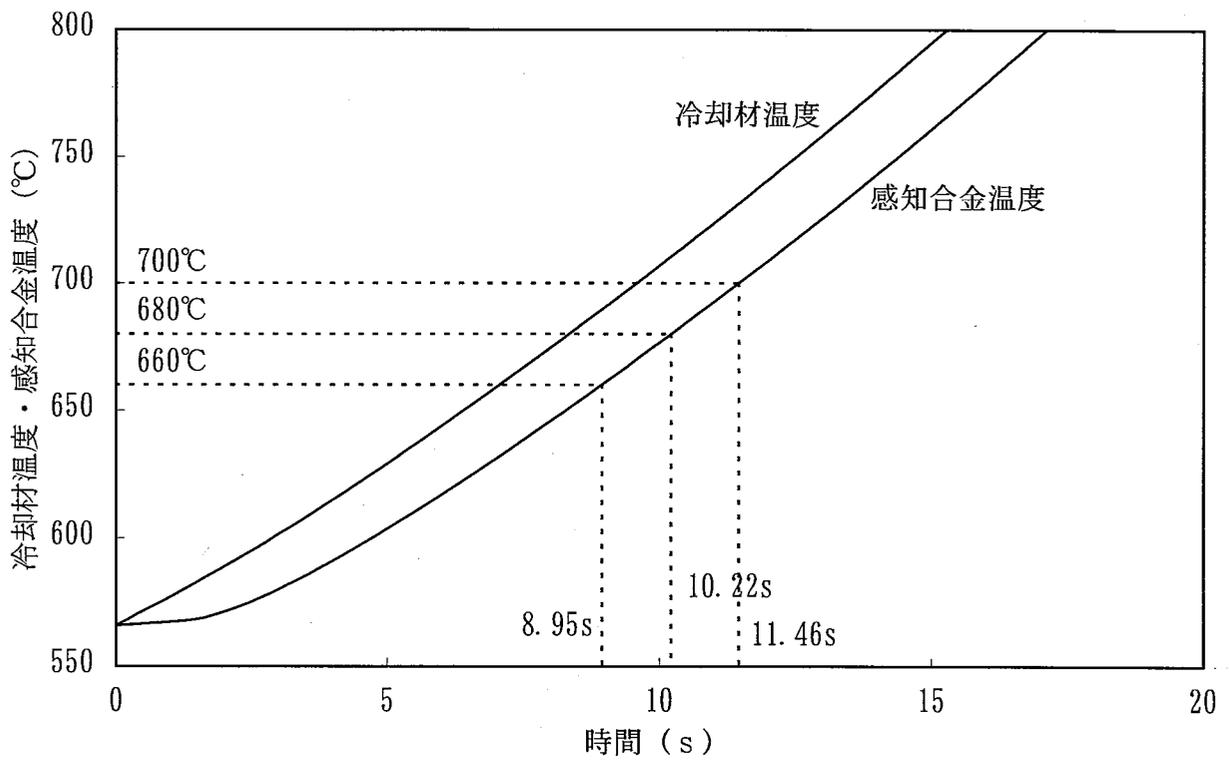
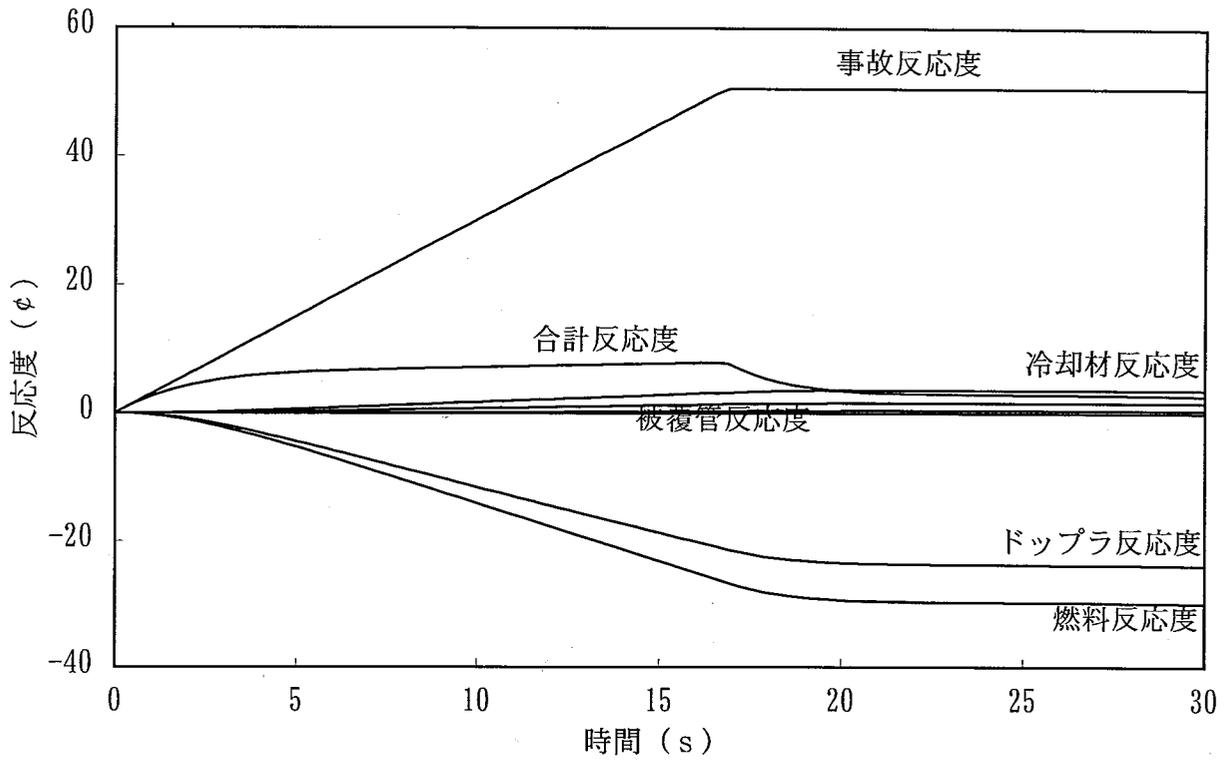


図3.4-3 UTOP解析結果 (誤引き抜き位置SASS、切り離し時間)

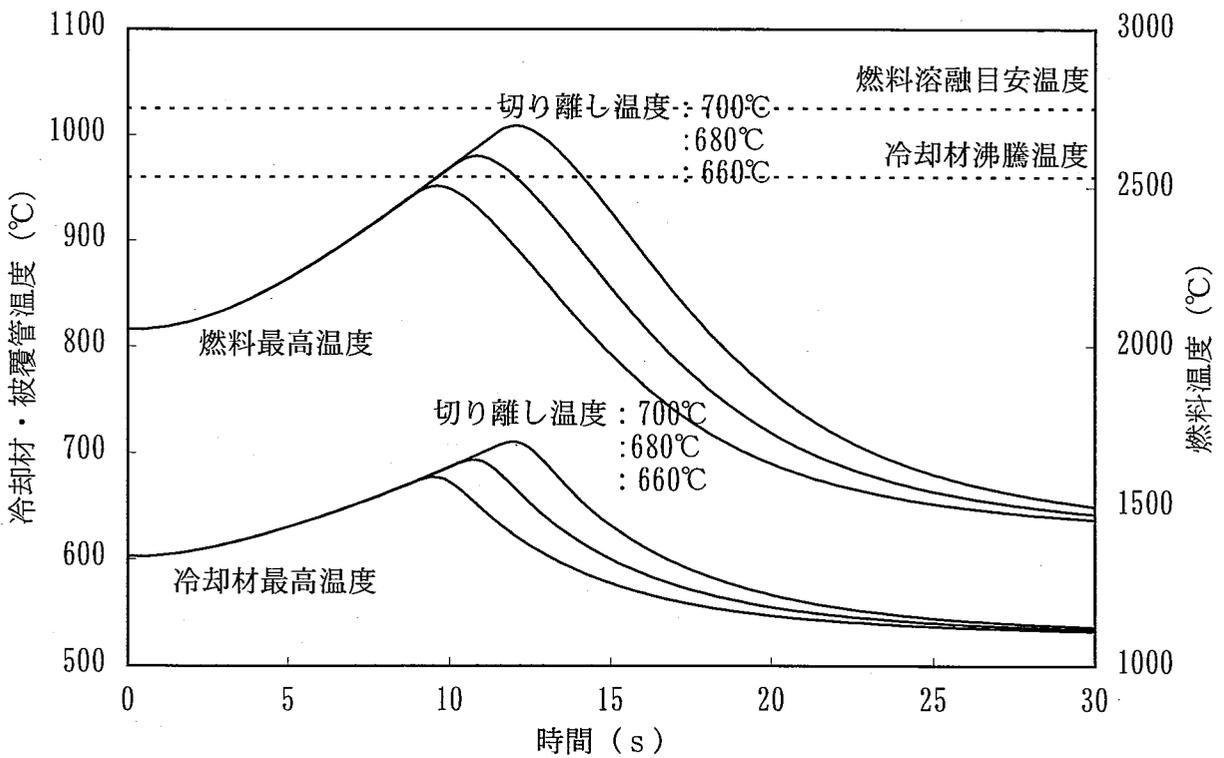
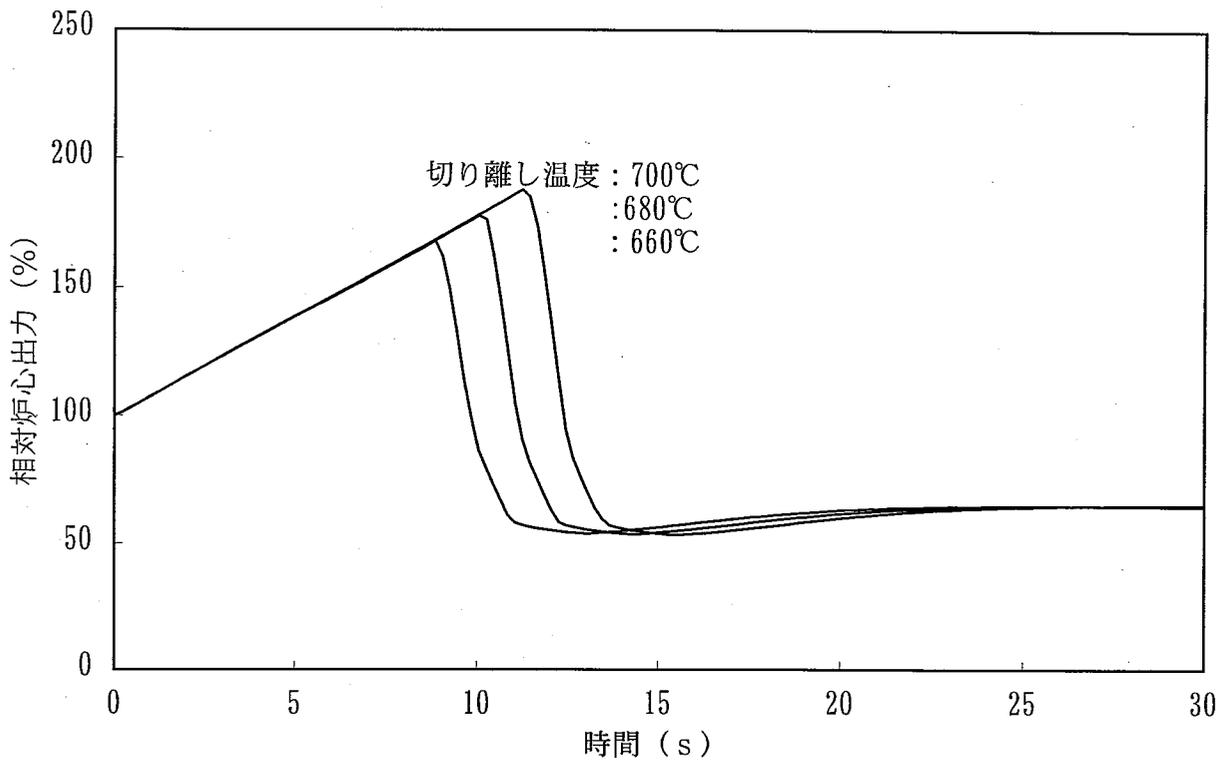


図3.4-4 UTOP解析結果 (誤引き抜き位置SASS、切り離し温度の影響)

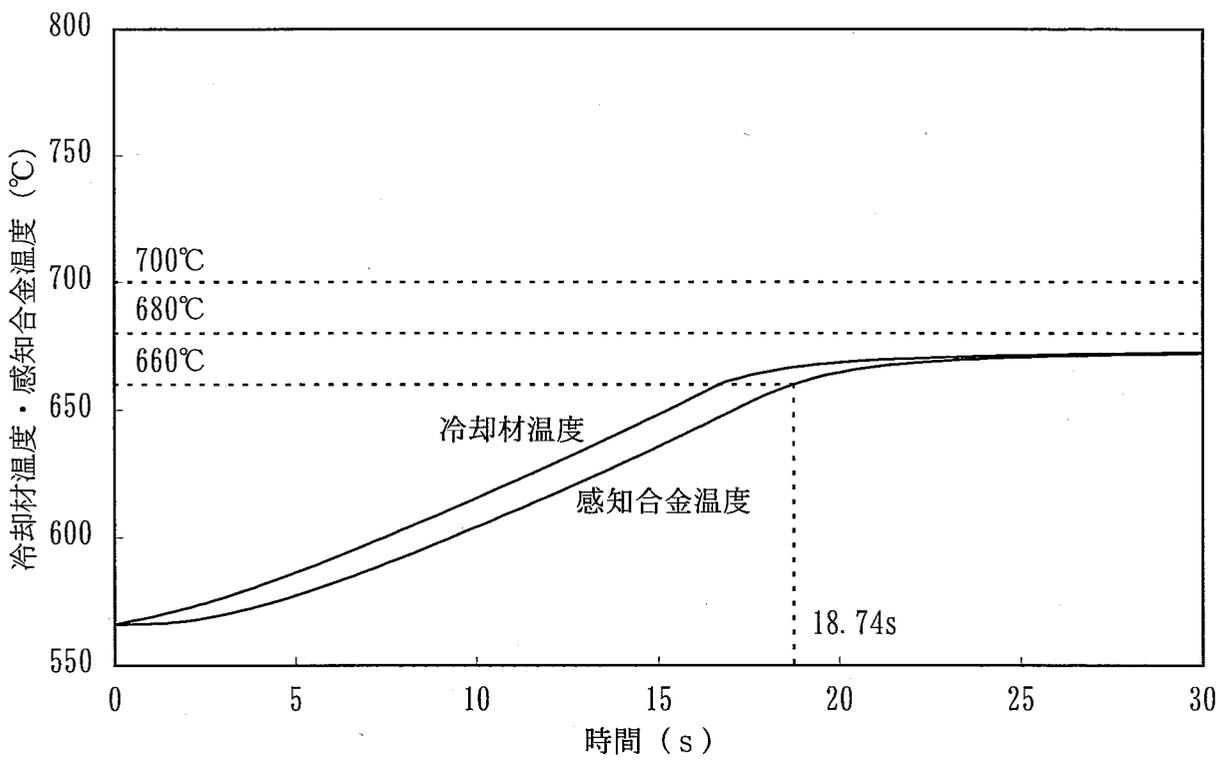
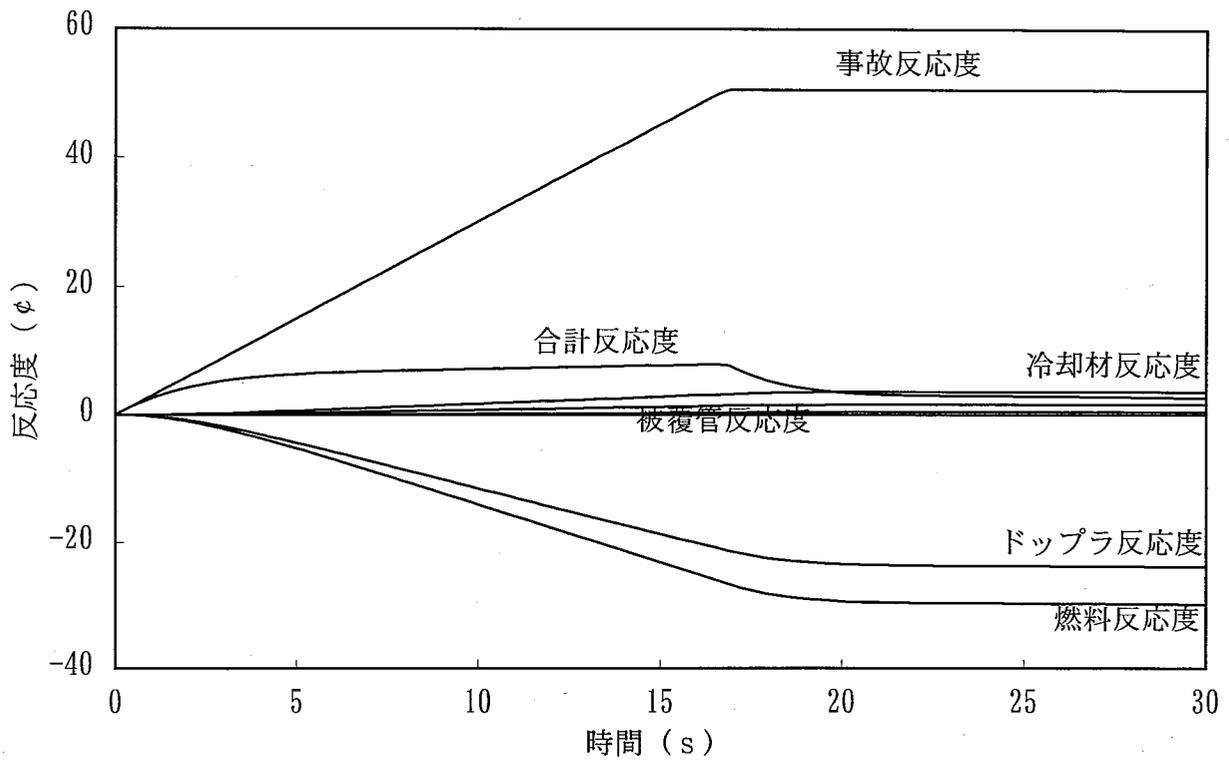


図3. 4-5 UTOP解析結果 (30度位置SASS、切り離し時間)

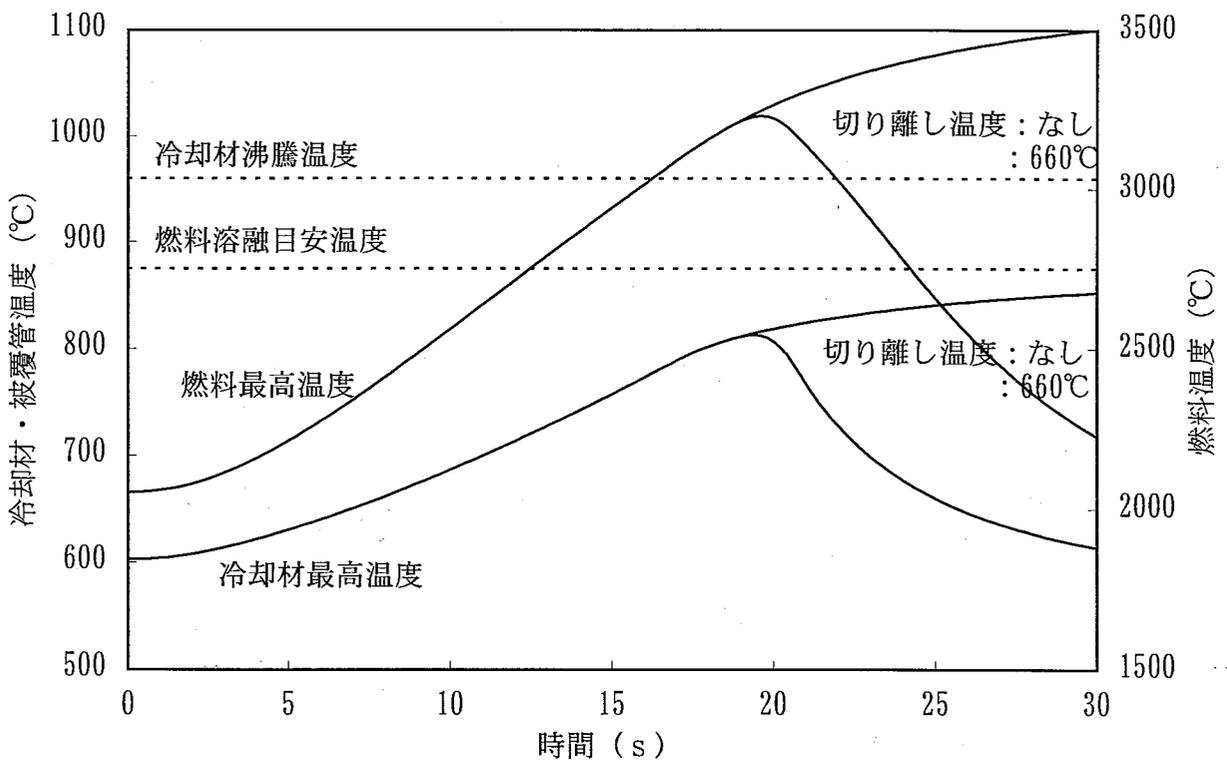
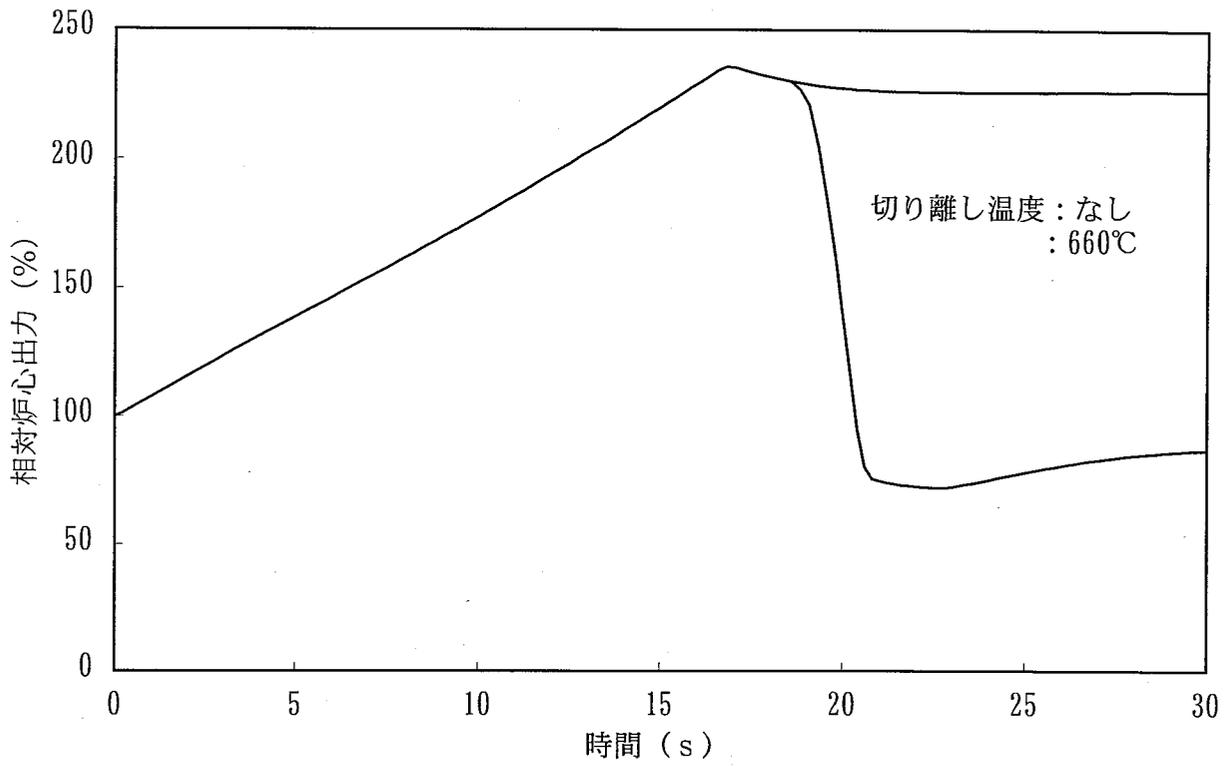


図3.4-6 UTOP解析結果 (30度位置SASS、切り離し温度の影響)

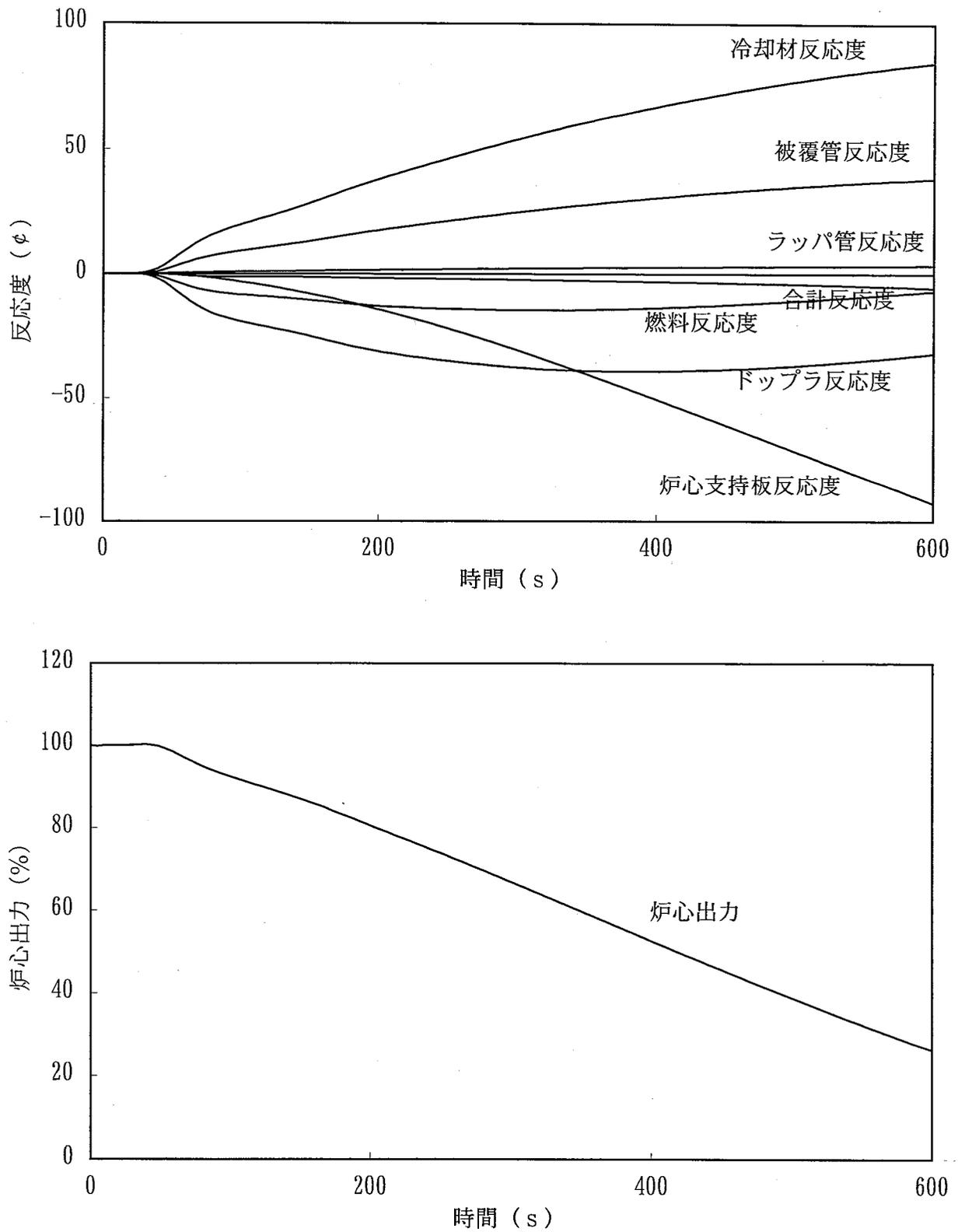


図3.4-7 ULOHS解析結果 (各反応度及び炉心出力)

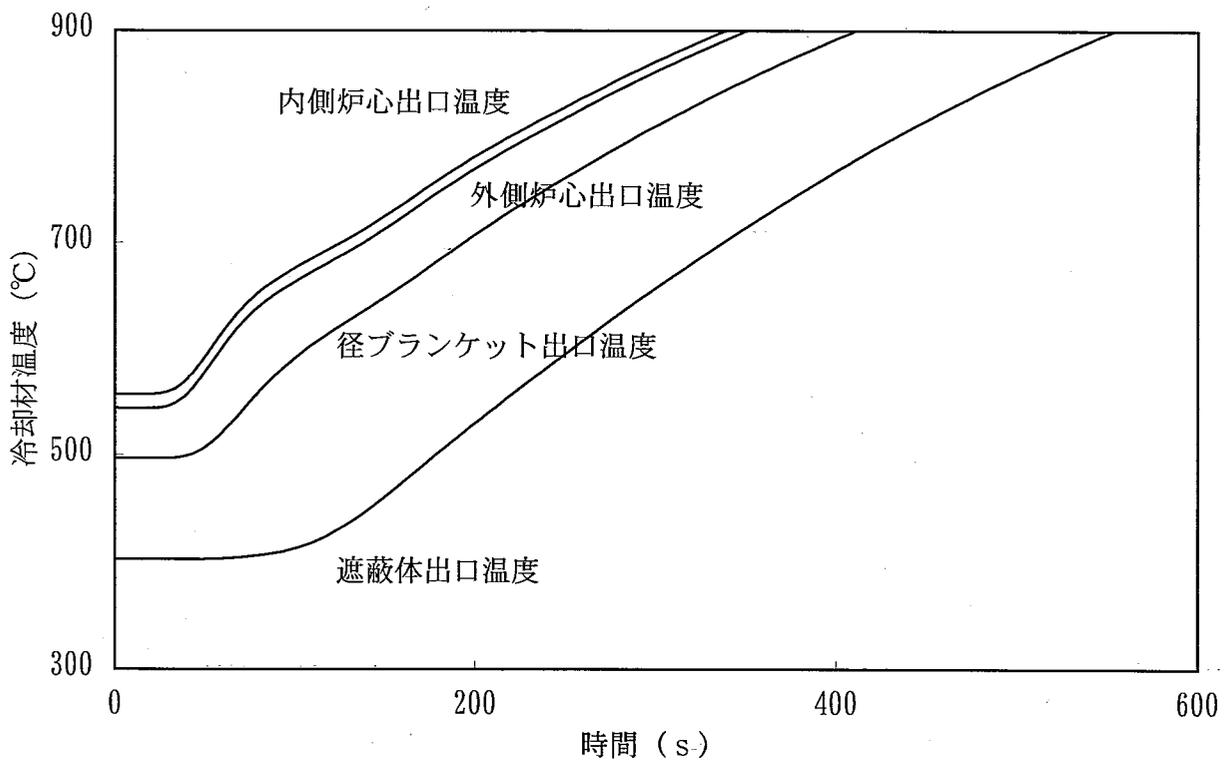
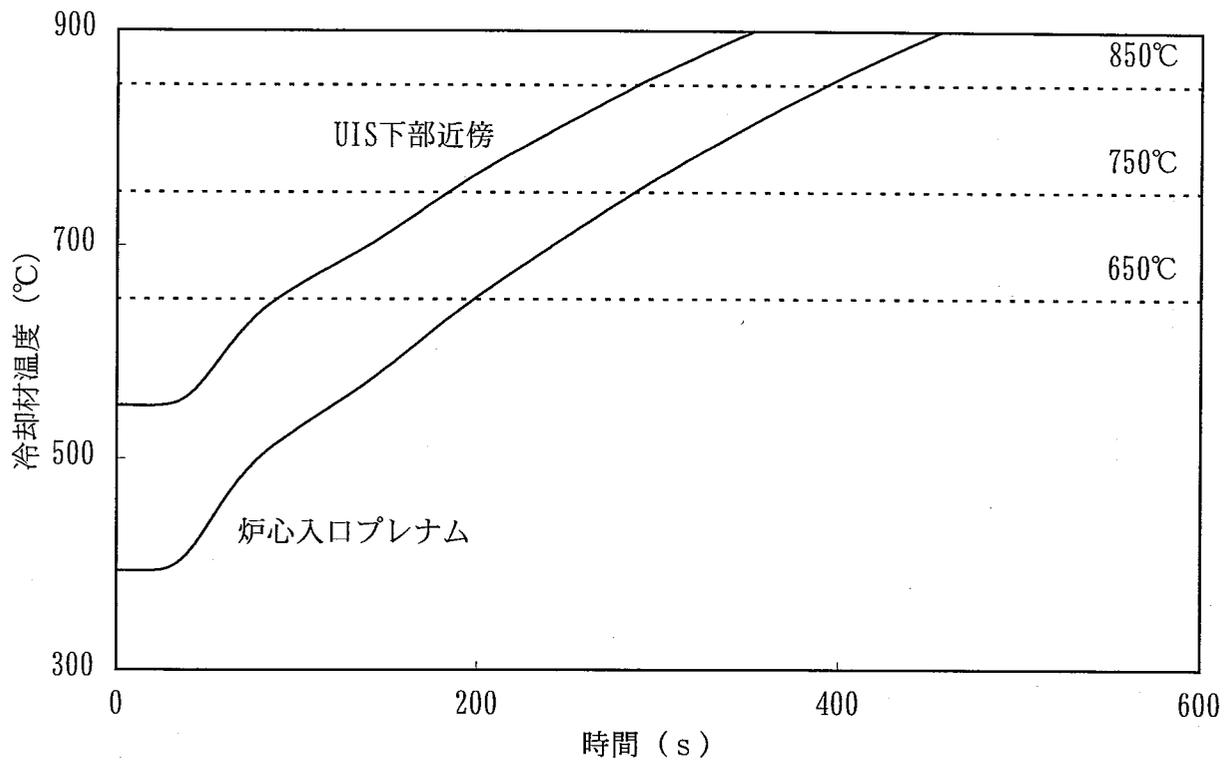


図3. 4-8 ULOHS解析結果 (炉心部近傍温度)

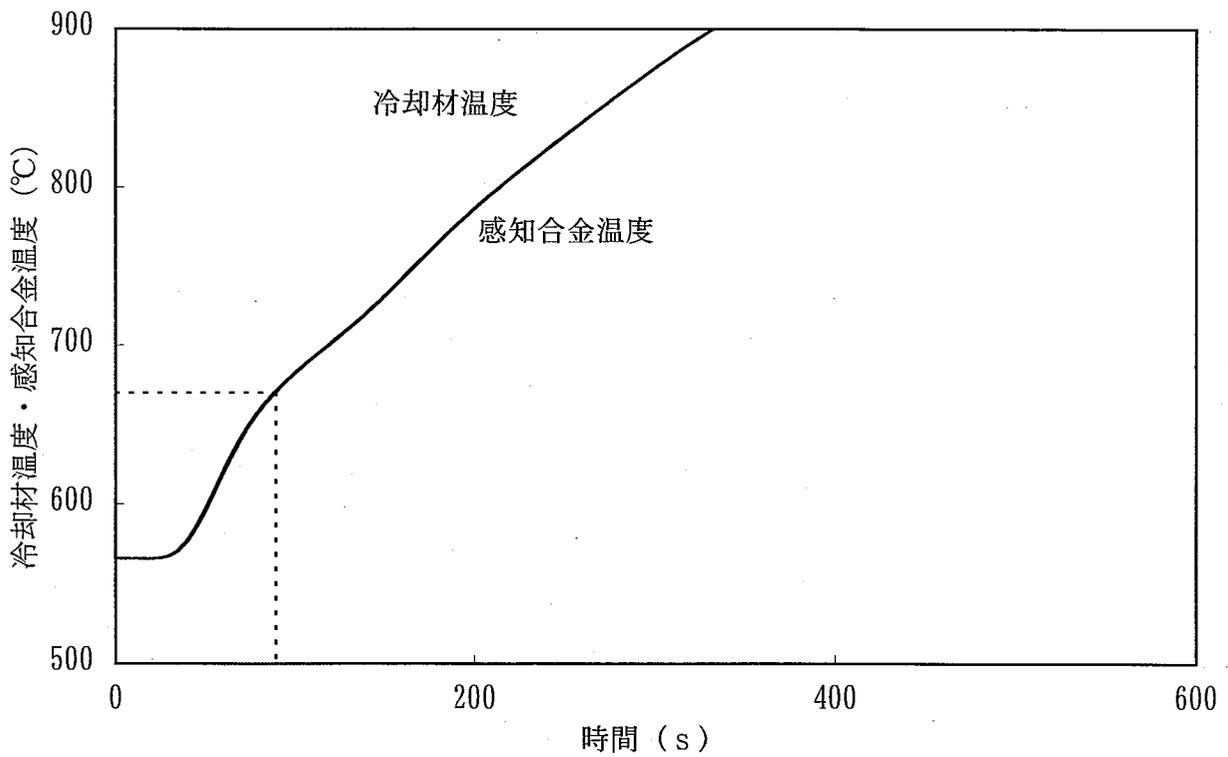
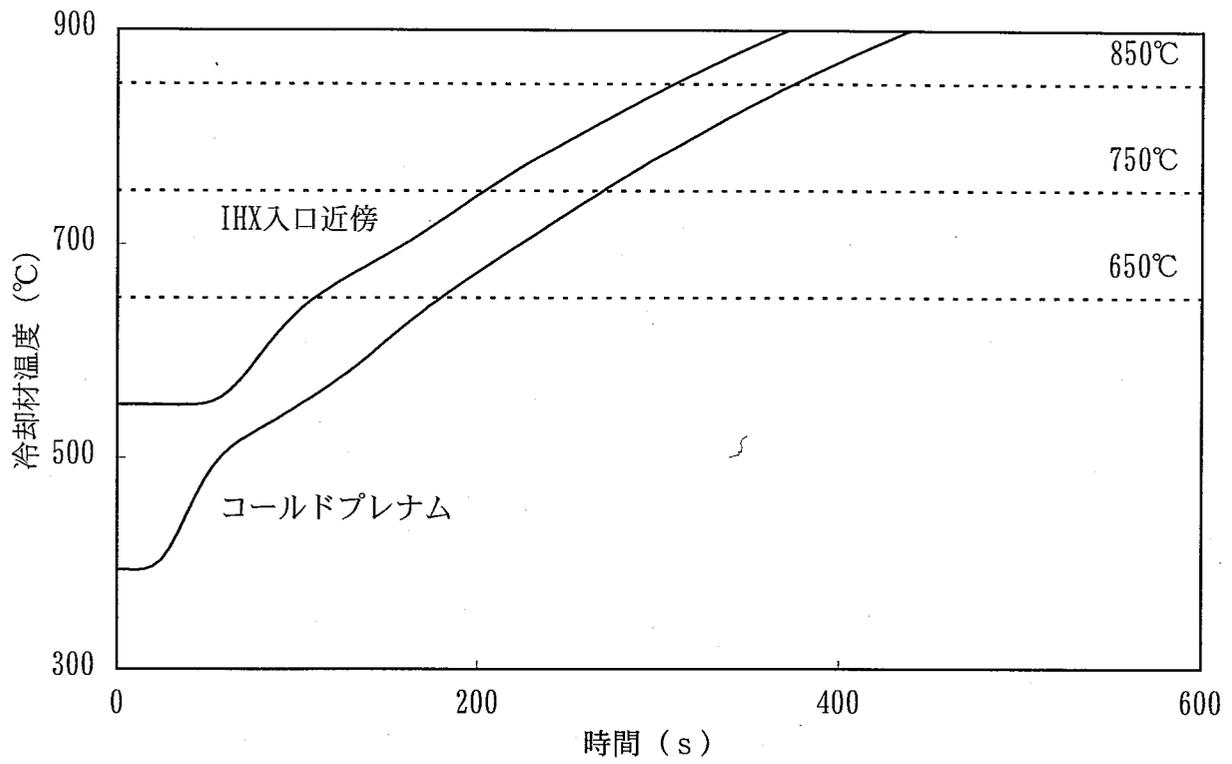


図3.4-9 ULOHS解析結果 (バウンダリ温度、SASS温度)

4 . セーフティマップの作成

2.1節で選定した下記の7種類の代表性のある不確実因子に対して、3章で実施した感度解析の結果より求めた不確実因子の感度係数を用いて、安全性の判断基準として冷却材沸騰防止を想定した場合に対するセーフティマップを作成し、冷却材沸騰までの安全裕度もしくは、冷却材沸騰回避のために要求される不確実因子の変更巾を求めた。

- ・ SASS切り離し温度
- ・ 炉心冷却材流量半減時間
- ・ ドブプラ反応度係数
- ・ 冷却材反応度係数
- ・ 冷却材不要遅れ時間
- ・ SASS隣接集合体出口温度
- ・ SASS電磁石温度応答時定数

ここでは、冷却材沸騰温度として保守的な想定として960 を設定した。なお、参考までに3.1節で検討した本解析対象炉心における現実的な冷却材沸騰温度（約1018 ）もセーフティマップ上には記載する。沸騰温度に対する裕度の考察は次章にて行う。

(1) セーフティマップの作成方法

セーフティマップは、任意に選定した2つの不確実因子に対して、炉心燃料の健全性を維持できる（ここでは冷却材沸騰防止）範囲を示し、基準状態とそれぞれの不確実因子に対する不確定幅の相関関係を示すものと定義する。

セーフティマップの作成手順を図4-1に示す。

本事象では、基準条件においてノミナルホットピンの冷却材最高温度が保守的に設定した冷却材沸騰温度を超えているため、冷却材沸騰を回避するためには、不確定因子の設定をどの程度変更する必要があるかに着目する。一方、同時に本解析対象炉心における現実的な冷却材沸騰温度に着目した場合の安全裕度についても評価する。

はじめに、不確実因子の感度解析の結果より、任意の不確実因子2つを選択して、そのうちの1つの不確実因子を固定することにより、もう一方の不確定因子をどの程度緩和すると冷却材沸騰が回避できるかの要求条件を定量化することができる。

ここで、固定する不確定因子の値に感度を持たせることにより、冷却材沸騰を回避するための第1不確定因子と第2不確定因子の相関関係に整理することができる。

こうして得られた、冷却材沸騰を回避するための要求条件の相関関係を、選択した2つの不確定因子同士の散布図上に展開することにより、セーフティマップの制限曲線（冷却材沸騰防止のサクセス領域境界）を得ることができる。また、それぞれの不確定因子の基準値と不確定巾は得られているので、セーフティマップ上に付記することにより、不確定因子の感度を見ることができる。

(2) 各パラメータに対するセーフティマップ

下記のセーフティマップ作成を介して、ULOF事象に対する各不確定因子に対して冷却材沸騰までの安全裕度もしくは冷却材沸騰回避のために要求される不確定因子の変更巾を表4-1に整理する。

a . SASS切り離し温度と流量半減時間

不確定因子のうちSASS切り離し温度と流量半減時間に関して、冷却材沸騰防止に関するサクセス領域を図4-2に示す。

流量半減時間が冷却材最高温度に対する感度係数は $-10.6 /$ であり、SASS切り離し温度が冷却材最高温度に対する感度係数は $+16.5 /$ である。感度係数としてはSASS切り離し温度の感度が大きい。

また、冷却材沸騰防止に対して要求される不確定因子の変更巾は、流量半減時間に対しては $+0.05$ 秒（ 0.15 ）となり、SASS切り離し温度に対しては -0.8 （ 0.10 ）となる。冷却材沸騰防止に対する不確定巾の緩和条件は感度係数の逆数に比例するので、感度係数の大きなSASS切り離し温度の要求が小さくなる。

なお、本解析対象炉心における現実的な冷却材沸騰温度に対しては、流量半減時間で約 4.8 、SASS切り離し温度で約 3.4 の安全裕度を有する。

b . SASS切り離し温度とドブブラ反応度係数

不確定因子のうちSASS切り離し温度とドブブラ反応度係数に関して、冷却材沸騰防止に関するサクセス領域を図4-3に示す。

ドブブラ反応度係数が冷却材最高温度に対する感度係数は $-5.8 /$ であり、SASS切り離し温度が冷却材最高温度に対する感度係数は $+16.5 /$ である。感度係数と

してはSASS切り離し温度の感度が大きい。

また、冷却材沸騰防止に対して要求される不確定巾の緩和条件は、ドップラ反応度係数に対しては+2.7% (0.277) となり、SASS切り離し温度の0.098 よりも大きい。

なお、本解析対象炉心における現実的な冷却材沸騰温度に対しては、ドップラ反応度係数で約8.8 、SASS切り離し温度で約3.4 の安全裕度を有する。

c . SASS切り離し温度と冷却材反応度係数

不確定因子のうちSASS切り離し温度と冷却材反応度係数に関して、冷却材沸騰防止に関するサクセス領域を図4-4に示す。

冷却材反応度係数が冷却材最高温度に対する感度係数は+15.8 / であり、SASS切り離し温度が冷却材最高温度に対する感度係数は+16.5 / である。感度係数としてはSASS切り離し温度の感度が大きい。

また、冷却材沸騰防止に対して要求される不確定巾の緩和条件は、冷却材反応度係数に対しては-2.0% (0.102) となり、SASS切り離し温度の0.098 よりも大きい。

なお、本解析対象炉心における現実的な冷却材沸騰温度に対しては、冷却材反応度係数で約2.7 、SASS切り離し温度で約3.4 の安全裕度を有する。

d . SASS初期温度とSASS輸送遅れ時間

不確定因子のうちSASS初期温度とSASS輸送遅れ時間に関して、冷却材沸騰防止に関するサクセス領域を図4-5に示す。

SASS初期温度が冷却材最高温度に対する感度係数は-20.5 / であり、SASS輸送遅れ時間が冷却材最高温度に対する感度係数は+13.4 / である。感度係数としてはSASS初期温度の感度が大きい。

また、冷却材沸騰防止に対して要求される不確定因子の変更巾は、SASS初期温度に対しては+0.5 (0.078) となり、SASS輸送遅れ時間に対しては-0.02 s (0.12) となる。不確定巾の感度係数の大きなSASS初期温度の要求が小さくなる。

なお、本解析対象炉心における現実的な冷却材沸騰温度に対しては、SASS初期温度で約2.5 、SASS輸送遅れで約4.2 の安全裕度を有する。

e . SASS 1次遅れ時間とSASS輸送遅れ時間

不確定因子のうちSASS 1次遅れ時間とSASS輸送遅れ時間に関して、冷却材沸騰防止に関するサクセス領域を図4-6に示す。

SASS 1次遅れ時間が冷却材最高温度に対する感度係数は+6.2 / であり、SASS輸送遅れ時間が冷却材最高温度に対する感度係数は+13.4 / である。感度係数としてはSASS輸送遅れ時間の感度が大きい。

また、冷却材沸騰防止に対して要求される不確定巾の緩和条件は、SASS 1次遅れ時間に対しては-0.5秒 (0.26) となり、SASS輸送遅れ時間-0.12 よりも大きい。

なお、本解析対象炉心における現実的な冷却材沸騰温度に対しては、SASS 1次遅れ時間で約9.3 、SASS輸送遅れ時間で約4.2 の安全裕度を有する。

(3) 最大感度係数

以上のセーフティマップの作成を介して、1当たりの冷却材最高温度の感度が最も大きい不確定意因子はSASS初期温度である。このため、冷却材最高温度を保守的な冷却材沸騰温度以下とするためには、流量配分を見直してSASSを配置した制御棒に隣接する燃料集合体の冷却材出口温度を上昇させる対策が最も効果的である。

一方、本解析対象炉心における現実的な冷却材沸騰温度に対しては、最も安全裕度の小さなSASS初期温度においても約2.5 の安全裕度を有していることが確認できた。

次章では、本章の検討結果で得られた最大感度係数を用いて、簡易的な非信頼度評価により、比較的容易に設定できるSASS切り離し温度の設計要求に対する検討を行う。

表4-1 ULOF事象に対する各不確実因子の感度

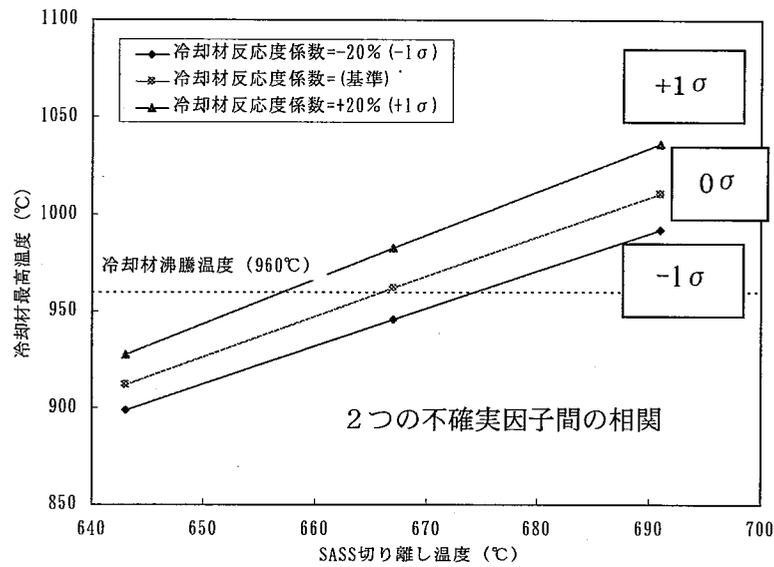
(a) 保守的な冷却材沸騰温度 (960) の場合

不確実因子	適用する 不確定巾	感度係数(/)	冷却材沸騰までの 安全裕度()
流量半減時間	+1	-10.57	-0.152
ドブプラ反応度係数	+1	-5.80	-0.277
冷却材反応度係数	-1	15.80	-0.102
SASS切り離し温度	-1	16.50	-0.098
SASS輸送遅れ時間	-1	13.38	-0.120
SASS初期温度	+1	-20.53	-0.078
SASS 1次遅れ時間	-1	6.17	-0.261

(注)安全裕度が負の場合は、冷却材沸騰回避に要求される変更巾を示す。

(b) 現実的な冷却材沸騰温度 (1018) の場合

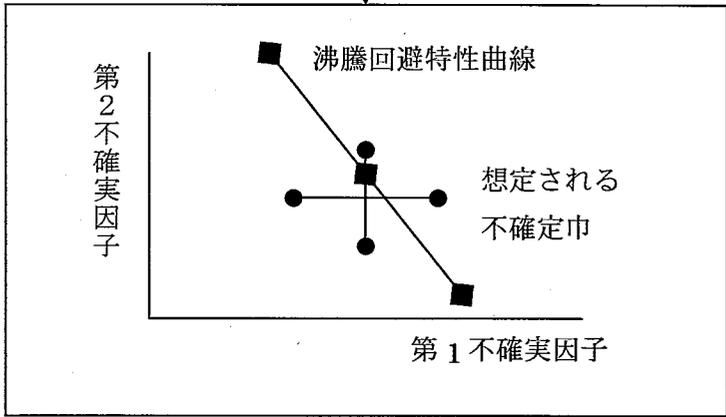
不確実因子	適用する 不確定巾	感度係数(/)	冷却材沸騰までの 安全裕度()
流量半減時間	-1	-11.70	4.820
ドブプラ反応度係数	-1	-6.42	8.786
冷却材反応度係数	+1	20.63	2.734
SASS切り離し温度	+1	16.37	3.445
SASS輸送遅れ時間	+1	13.46	4.189
SASS初期温度	-1	-22.17	2.544
SASS 1次遅れ時間	+1	6.07	9.295



冷却材最高温度に対する解析結果の整理

ひとつの不確実因子(第1因子)を固定し、冷却材沸騰防止のために他方(第2因子)への要求条件の定量化

冷却材沸騰回避を目的とした、第1因子と第2因子の相関関係の整理 (沸騰回避特性曲線)



(注) 冷却材沸騰回避に対するセーフティマップの作成

図 4-1 セーフティマップの作成方法

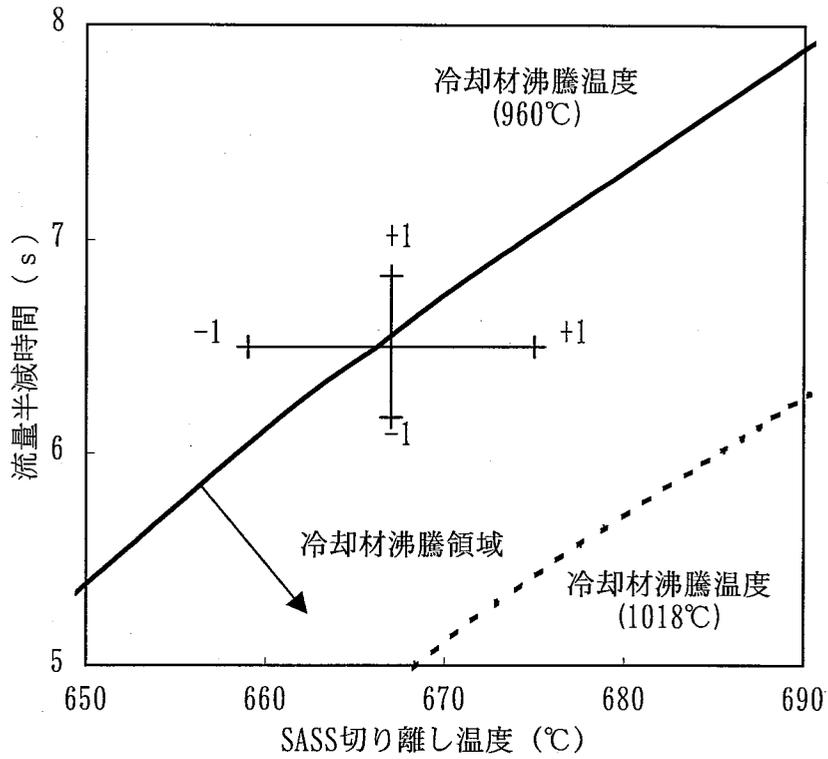


図4-2 SASS切り離し温度と流量半減時間のセーフティマップ

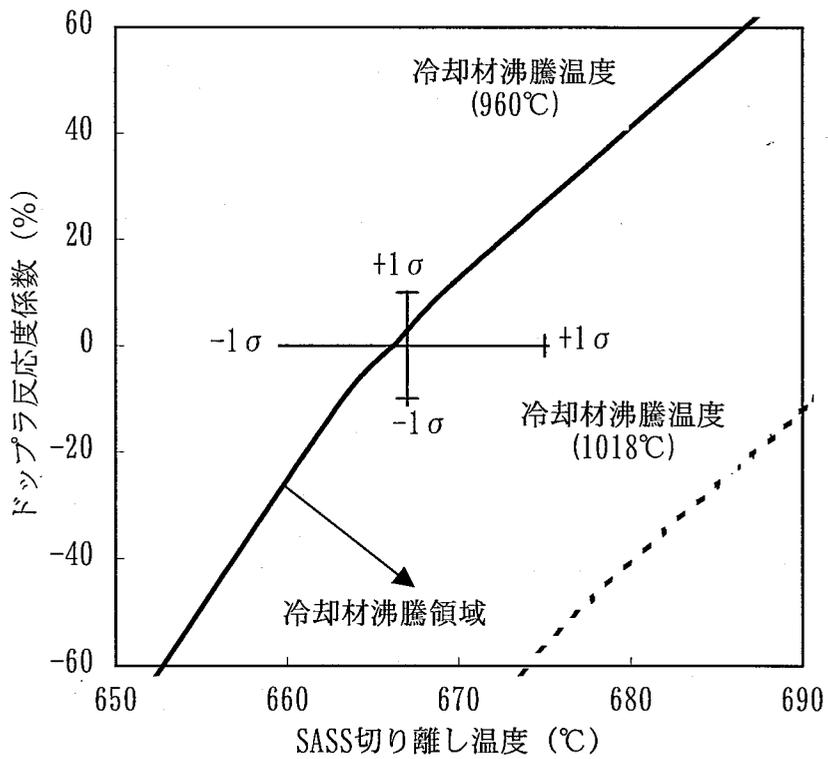


図4-3 SASS切り離し温度とドップラ反応度係数のセーフティマップ

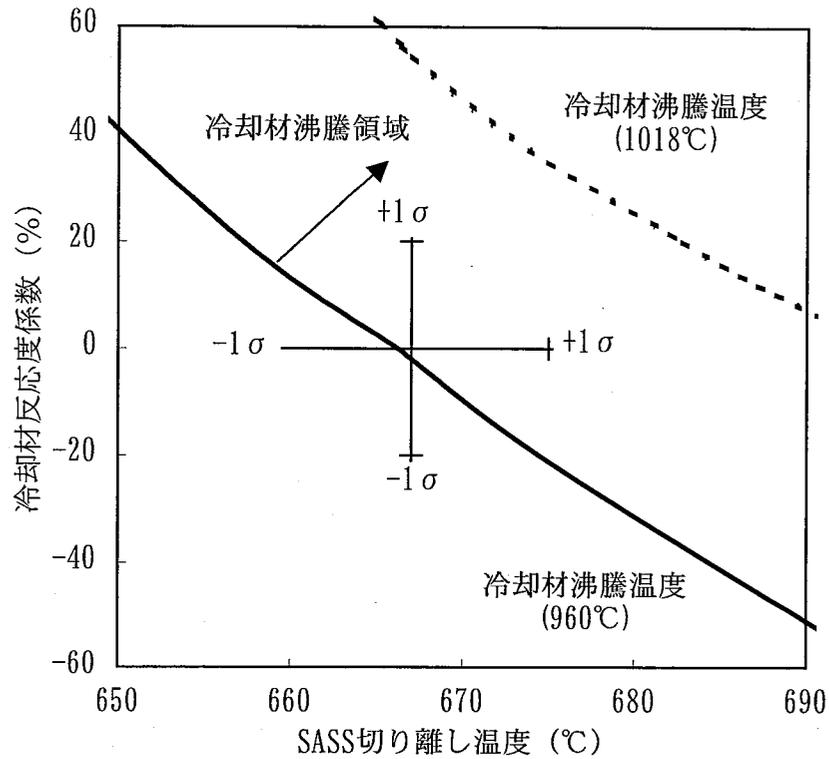


図4-4 SASS切り離し温度と冷却材反応度係数のセーフティマップ

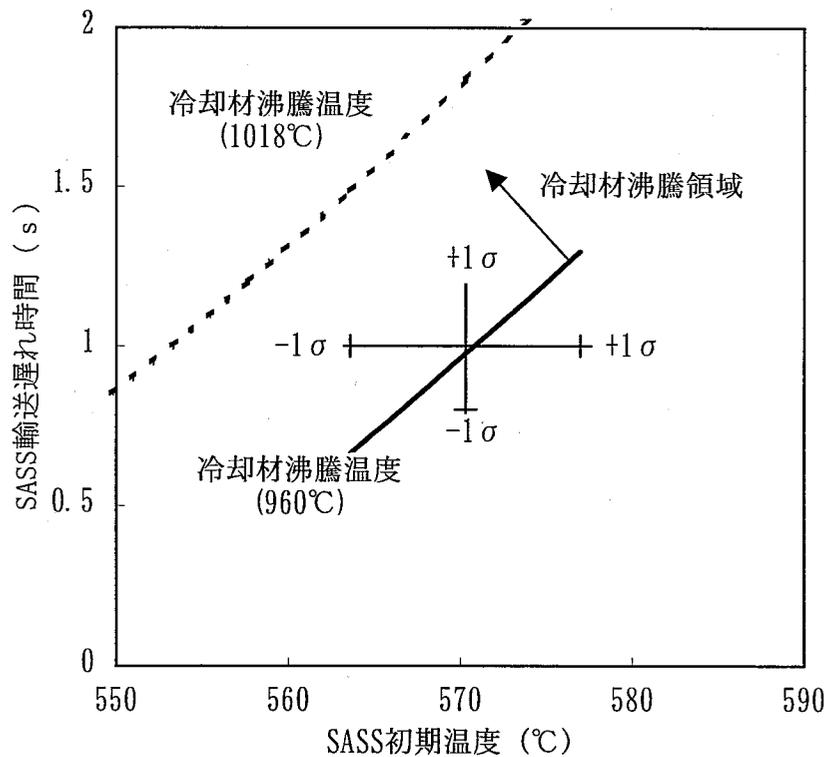


図4-5 SASS初期温度とSASS輸送遅れ時間のセーフティマップ

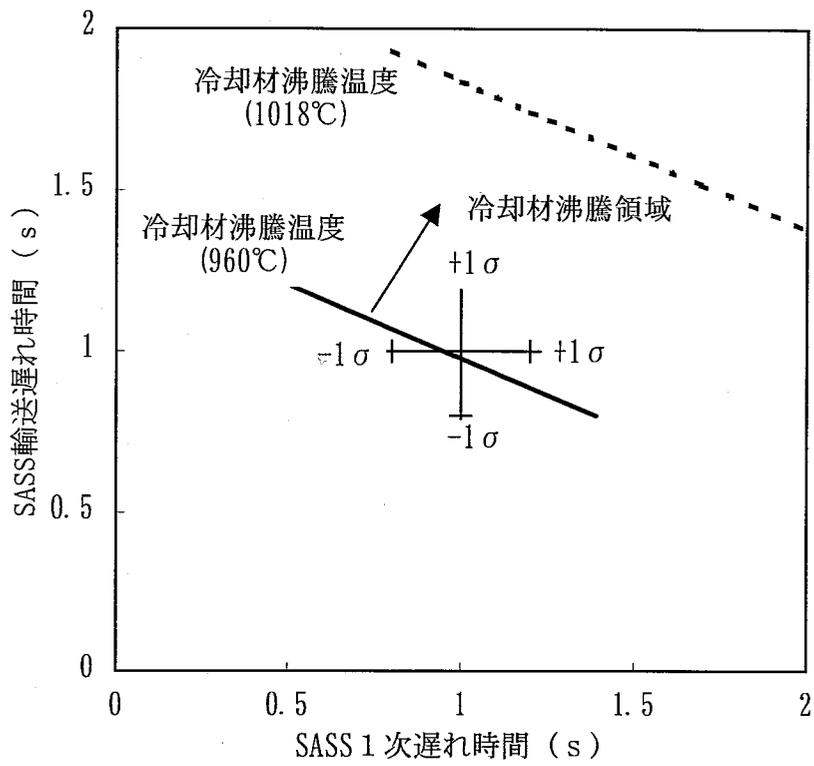


図4-6 SASS 1次遅れ時間とSASS輸送遅れ時間のセーフティマップ

5 . SASS への要求条件の整理

(1) 検討の着眼点

本検討の対象としている炉心では、現時点で SASS をどの制御棒に設置するか、SASS を安全保護系として扱うかの詳細は決定していない。ここでは、実証炉と同様に後備炉停止系のバックアップと位置付け、いずれの制御棒に設置しても支障の無いような SASS への要求条件を整理する。

ここでは、SASS 誤落下防止のための切り離し温度下限値の設定方法、及び仮想的に ULOF 等を想定した場合でも、炉心燃料の健全性を確保するための切り離し温度上限値の設定方法及び信頼性との関係に着目する。

(2) 切り離し温度下限値への要求条件

設備設計において、誤落下防止を目的として SASS の切り離し温度範囲の下限値を考慮してキュリー点合金を選定する。この SASS の切り離し温度範囲の下限値は、代表集合体出口温度計のスクラム設定値以上に設定する必要がある。つまり、出力運転中の何らかの原因で冷却材温度が上昇し、SASS が誤落下するような事象が発生した場合にも、代表集合体出口温度高信号が発信され、SASS の落下を検知するシステムとする。これにより、SASS の誤落下を運転員が検知することが可能となり、仮に SASS 1 本が誤落下し、炉心出力が歪んだ状態での出力運転の継続を防止することができる。

また、誤落下防止への要求条件は設計基準事象対応であるため、考慮する冷却材温度は、工学的安全係数を考慮した最大値とする必要がある。具体的な設定方法としては、表 2.2-1 及び表 2.2-2 に示したように、制御棒に隣接する集合体の集合体出口冷却材最高温度のノミナル値は約 590 である。これに下記の工学的安全係数（実証炉設計の知見より）の合計である $1.16 (= 1.05 \times 1.05 \times 1.02 \times (1 + ((1.03-1)^2 + (1.02-1)^2)))$ を考慮すると、制御棒に隣接するホットテスト集合体の冷却材出口温度は約 621 $(= (590 - 395) \times 1.16 + 395)$ となる。

・出力分布誤差 (1.05 : 乗算処理)

・集合体間流量配分誤差 (1.05 : 乗算処理)

- ・原子炉出入口温度誤差 (1.02 : 乗算処理)
- ・炉内流量配分誤差 (1.03 : 統計処理)
- ・物性値誤差 (1.02 : 統計処理)

これに下記項目を考慮した代表集合体出口温度高信号の設定値である 17 を加えた 638 に SASS の切り離し温度範囲の下限值を設定する。

- ・定常時変動幅 : 7
- ・制御変動幅 : 5
- ・安全保護系計測誤差 : 5

(3) 切り離し温度上限値への要求条件

4章の検討により、基準条件に対して ULOF 事象を想定しても炉心燃料の健全性を維持 (ノミナルホットピンの冷却材沸騰防止 : 960 以下) するためには、SASS 感知合金の切り離し温度を 0.8 (0.1) 低下させて、666 以下 (=667 -0.8) とする必要があることが示された。なお、SAS4A コードで検討した本解析対象炉心における現実的な冷却材沸騰温度 (1018) に対しては、SASS 切り離し温度で約 3.4 の安全裕度を有していることから、冷却材沸騰温度の評価目安値を見直すことにより、この安全裕度に相当する切り離し温度 27 (=3.4 × 8 /) を加えて、SASS 切り離し温度の上限値は 694 以下とすることができる。

本作業では、実証炉設計より用いられている保守的な冷却材沸騰温度である 960 を用いることとし、SASS 感知合金の切り離し温度範囲の上限値として 666 以下を要求条件とする。

(4) SASS 信頼性に対する考察

SASS 信頼性を評価するためには、2.3 節で説明した応答曲面法 (レスポンスサーフェス法) が知られているが、2.3 節に示したように本作業では「解析結果の重回帰分析」及び「不確かさ解析」を作業範囲外としているため、本手法を用いて信頼性を求めることはできない。そこで、ここでは簡易的に標準正規分布を仮定し、感度係数を用いて切り離し温度を変化させた場合の非信頼度について考察する。

標準正規分布を仮定した場合の密度関数は、次式で求めることができる。なお、この分布は平均が 0 で標準偏差が 1 である正規分布に対応している。非信頼度は密度関数の積分値である正規累積分布関数と 1.0 との残差として扱う。

$$\text{正規分布の密度関数 } f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (z=\text{偏差})$$

$$\text{非信頼度} = 1.0 - \text{正規累積分布関数} = 1.0 - \int_0^Z f(z) dz$$

SASS 切り離し温度の制限値 (666) と SASS 切り離し温度の設定値 (666) が一致している場合、SASS の非信頼度は 0.5/d となる。ただし、3.2 節に示したように今回の検討の基準とした各 SASS 切り離し時間の平均時間で全 SASS 制御棒が切り離される想定は、非同時性を考慮した場合に比べ、ノミナルホットピンの冷却材最高温度で約 12 (= 962 : 平均時間 - 950 : 非同時性考慮) の保守性を有している。一方、4 章に示したように、ULOF 事象のノミナルホットピン冷却材最高温度に対して最大の感度係数を有する不確実因子は SASS 初期温度 (SASS に隣接する燃料集合体出口冷却材温度) であり、その感度係数の値は、20.5 / である。つまり、SASS 切り離しの非同時性が有する安全裕度は約 0.59 に相当する。この安全裕度に対応する非信頼度を求めると、 $2.7 \times 10^{-1}/d$ となる。

一方、3.1 節で示したように冷却材沸騰温度についても実証炉設計で想定した保守的な冷却材沸騰温度 960 は、SAS4A コードで求めた本解析対象炉心における現実的な冷却材沸騰温度 1018 に比べ、約 58 (= 1018 : 本解析対象炉心の現実的な沸騰温度 - 960 : 保守的な沸騰温度) の保守性を有している。同様に最大感度係数である SASS 初期温度を用いた安全裕度は約 2.8 に相当し、非信頼度は $2.3 \times 10^{-3}/d$ となる。

さらに、SASS 感知合金の切り離し温度上限値を低下させることにより、ULOF に対する安全裕度は向上する。表 3.3-14 で示したように、SASS 切り離し温度のノミナルホットピン冷却材最高温度に対する感度係数は 16.4 / である。一方、2.2 節で検討したように不確定巾は 1 ± 8 であるため、SASS 切り離し温度を 1 変化させた場合のノミナルホットピン冷却材最高温度の変化量は、 $2.05 /$ (=

16.4 / ÷8 /)と予想される。表 5-1 及び図 5-1 に SASS 切り離し温度を変化させた場合の SASS の非信頼度を整理する。なお、SASS の非信頼度には非同時性の効果を考慮し、冷却材沸騰温度は保守的な温度と本解析対象炉心における現実的な温度を想定する。

同表図に示したように、SASS 切り離し温度（上限値）を下げることにより、SASS 切り離しの信頼度を上げることは可能と考えられる。ただし、SASS 切り離し温度の上限値を下げることは、SASS 切り離し温度の温度幅を狭めることになり、SASS 設計への要求条件を厳しくすることを意味する。このため、制限無く SASS 切り離し温度上限値を下げることはできない。SASS 設計においては、要求される信頼性の観点より留意が必要である。

(5) SASS への要求条件

以上の検討により、本検討の対象炉心に対して SASS 感知合金の切り離し温度範囲として下記を要求する。

- ・切り離し温度下限値：約 638 以上
- ・切り離し温度上限値：約 666 以下

なお、この感知合金の切り離し温度設定範囲は実証炉設計で設定した切り離し温度下限値：640 以上、切り離し温度上限値：680 以下と比べると温度幅は小さく、SASS 感知合金への要求条件は厳しいものとなっている。

また、UTOP 時の炉心出力歪みを考慮しても炉心燃料の健全性を保持させるためには、3.4 節で検討したように SASS を設置する制御棒は誤引き抜き制御棒から 15 度以内に設置する必要がある。加えて、炉心外側の炉心出力歪みが大きいことから、SASS を設置する制御棒も外側に配置することが望ましい。そこで、SASS を設置する集合体としては、図 2.2-1 に示した本検討炉心の集合体番号で表記すると、第 4 リング制御棒（136 集合体、140 集合体、144 集合体、148 集合体、152 集合体、156 集合体）もしくは第 3 リング制御棒（95 集合体、99 集合体、105 集合体、109 集合体）に SASS を設置することが望まれる。

表5-1 SASS切り離し温度と非信頼度の関係

SASS切り離し 温度 (°C)	冷却材最高 温度 (°C)	保守的沸騰温度 (960°C)		現実的沸騰温度 (1018°C)	
		安全裕度	非信頼度 (/d)	安全裕度	非信頼度 (/d)
620	865.1	5.208	9.54×10^{-8}	8.034	
640	906.2	3.207	6.70×10^{-4}	6.033	8.10×10^{-10}
650	926.7	2.207	1.37×10^{-2}	5.032	2.43×10^{-7}
660	947.2	1.206	1.14×10^{-1}	4.032	2.77×10^{-5}
665	957.5	0.706	2.40×10^{-1}	3.531	2.07×10^{-4}
666	959.6	0.606	2.72×10^{-1}	3.431	3.00×10^{-4}
667	961.6	0.506	3.06×10^{-1}	3.331	4.32×10^{-4}
668	963.7	0.406	3.42×10^{-1}	3.231	6.16×10^{-4}
670	967.8	0.206	4.18×10^{-1}	3.031	1.22×10^{-3}
680	988.3	-0.795	7.87×10^{-1}	2.031	2.11×10^{-2}
700	1029.4	-2.796	9.97×10^{-1}	0.030	4.88×10^{-1}

(注) 安全裕度・非信頼度には、SASS切り離しの非同時性を考慮する。

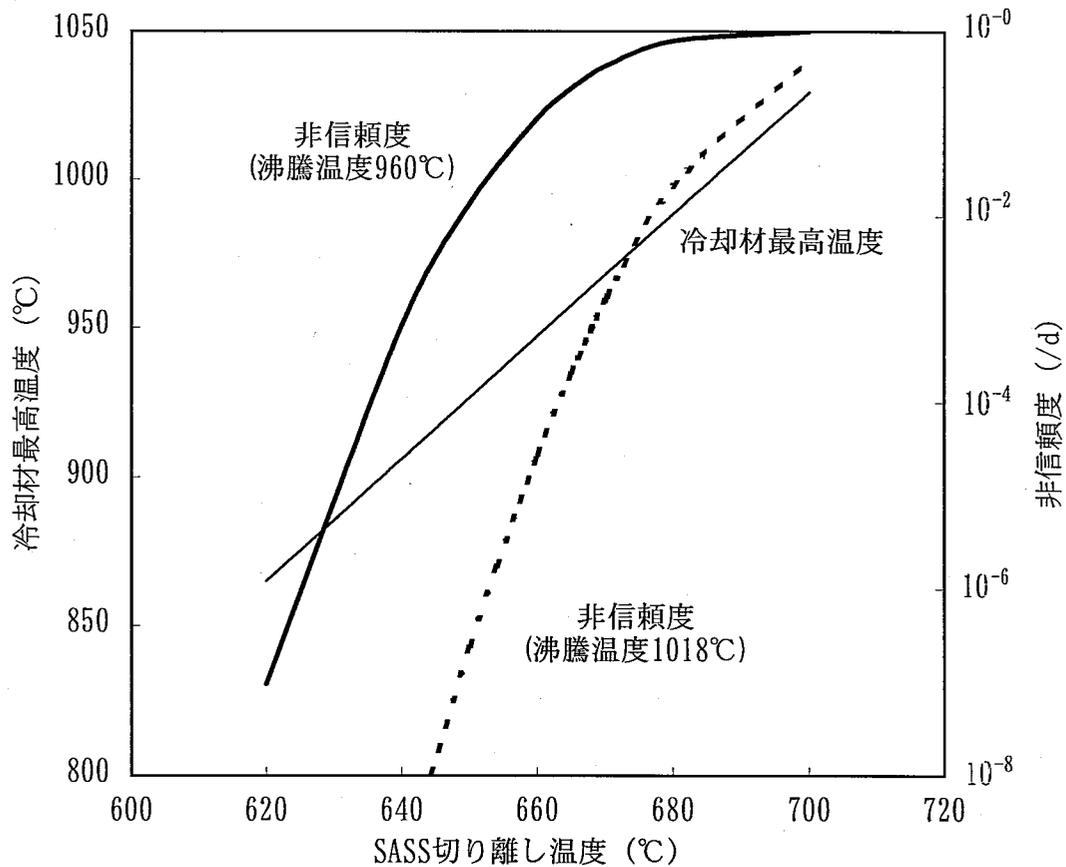


図5-1 SASS切り離し温度と非信頼度の関係

6. まとめ

FBR サイクル実用化研究を実施するに当たって、大型炉心における安全系極限化を念頭に置いた流量減少型スクラム失敗事象 (ULOF) を想定した場合の自己作動型炉停止機構 (SASS) への要求条件を整理することが必要である。

本検討では、ULOF の冷却材最高温度に対する不確実因子の抽出と不確定巾の設定をおこない、抽出した不確実因子に対して安全解析コード (SAS4A) を用いて ULOF の感度解析を実施し、各不確実因子に対する感度係数を定量化した。なお、保守的な想定に基づく基準条件では冷却材最高温度は沸騰温度 (960) を超過する結果となり、SASS 切り離し温度は、実証炉設計の設定値よりも下げる必要があることがわかった。また、炉心出力上昇事象時のスクラム失敗事象/除熱源喪失時のスクラム失敗事象についての定性的な検討も既往研究結果等を基に実施した。

さらに、ULOF の解析結果を用いてセーフティマップを作成し、SASS 切り離し温度と SASS 切り離しの信頼性について考察を加えて SASS 切り離し温度への要求条件を整理した。

本検討による、主要な結果は以下のとおり。

(1) 最大感度係数

冷却材最高温度に対して最大感度係数を有する不確実因子は SASS 隣接集合体出口温度であり、感度係数は $-20.5 / (1 = 8)$ である。

(2) 切り離し温度下限値について

SASS 切り離し温度範囲の下限値は、誤落下防止の観点から、制御棒近傍集合体の集合体出口冷却材最高温度のノミナル値 (約 590) に工学的安全係数及び代表集合体出口温度高信号設定値を考慮した 638 以上とする必要がある。

(3) 切り離し温度上限値について

保守的な想定に基づく検討により、ULOF 時の冷却材最高温度を沸騰温度以下に抑制するためには、SASS 切り離し温度の上限値は 666 以下とする必要がある。

なお、本解析対象炉心で SASS の非同時性が有する安全余裕は約 0.6 (12) であり、正規分布に基づく非信頼度は $2.7 \times 10^{-1}/d$ に相当する。また、本解析対象炉心における現実的な冷却材沸騰温度は 1018 であり、この安全裕度は約 2.8 (58) となり、正規分布に基づく非信頼度では $2.3 \times 10^{-3}/d$ に相当する。

7. 謝辞

本作業の遂行にあたり、核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター システム技術開発部 リスク評価技術開発グループの丹羽元グループリーダー、栗坂健一副主任研究員、石田政義嘱託、原子力システム株式会社 高橋一彦氏をはじめ関係各位に御討論、御指導を頂くことにより本作業を達成することができました。ここにあらためて関係各位に対し謝意を表します。

8. 参考文献

- (1) T.Inagaki, et al. :Development of the Demonstrarion Fast Breeder Reactor in Japan, Proc. of GLOBAL97, Vol.1, Yokohama,Japan(1997-10)
- (2) 若山靖記ほか : 「自己作動型炉停止系に関する研究 (I)、(II)」、日本原子力学会「1996春の年会」E34、E35、1996年3月
- (3) 池上哲雄、林秀行、佐々木誠ほか : 「炉心・燃料(燃料形態)の技術検討書—平成11年度報告—(研究報告)」、JNC TY9400 2000-021、2000年3月
- (4) 水書裕実、糸岡聡ほか : 「地震時応答の不確かさ評価手法の開発」、日本機械学会・精密工学会、日立地方講演会講演論文集202、1990年9月
- (5) Ronald L. Iman and Jon C. Helton : “An Investigation of Uncertainty and Sensitivity Analysis Techniques for Computer Models”, Risk Analysis, Vol.8, No.1,1988
- (6) A. M. Tentner et al.: “The SAS4A LMFBR Whole Core Accident Analysis Code”, Proc.International Meeting on Fast Reactor Safety, pp. 989-998, Knoxville, TN (April 1985).
- (7) 藤又和博ほか : 「高速増殖炉・ネットワーク過渡伝熱流動解析コードの開発」、日本原子力学会「昭和61年会」C59、1986年3月
- (8) 野田宏 : 「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究の取組み状況」、日本原子力学会誌 Vol. 42 No. 7 (2000)

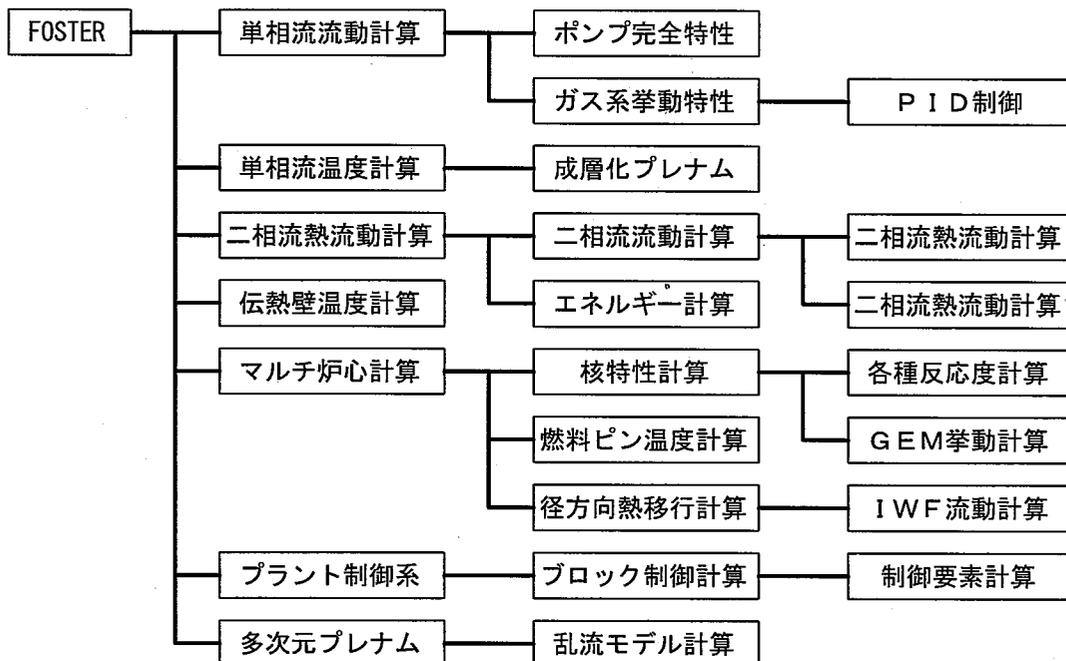
付録 FOSTERコードの解析モデルについて

1. 解析コード概要

FOSTER コードは、高速増殖炉（FBR）の動特性解析を初めとし、プラント全体の伝熱流動・制御系の応答を求める目的で開発された過渡解析コードである。FOSTER コードでは、以下に示す解析評価が可能である。

- ・プラント熱過渡解析
- ・プラント制御特性解析
- ・1次冷却系事故・炉心流量減少型事故解析
- ・熱輸送系事故・除熱喪失型事故解析
- ・反応度事故・炉心出力上昇型事故解析
- ・崩壊熱除去特性解析
- ・系統熱過渡・制御特性解析

本コードは下図に示すように、単相流動計算、単相温度計算、二相流熱流動計算、伝熱壁計算機能、マルチセル炉心、多次元プレナム、プラント制御系の各計算モジュールより構成されている。これらのモジュールの組み合わせにより任意の体系の解析が可能となる。例えば、単相流（Na）と水・蒸気系を伝熱壁で接続することにより蒸気発生器を構成する。このように、計算モデルに1次元のフリーネットワークモデルを採用しており、解析体系をユーザが自由に設定できるため、炉型・系統等の変化に柔軟に対応できる。



FOSTERコードのモジュール構成

2. FOSTER コードの計算モデルの説明

FOSTERコードで、プラントの動特性解析に必要な計算機能（流動計算機能、温度計算機能、伝熱計算機能等）を準備し、これらの機能の任意の組み合わせで解析対象プラントをモデル化する方法を用いている。

この方法を用いることは、解析対象プラントのモデル化が面倒となるが、プラントの仕様変更が生じた場合でも解析コードを変更する事なく柔軟に対応できる特徴を持ち、プラントの仕様を決定するサーベイ計算や、プラント間の比較計算等に適している。

FOSTER コードのプラント構成機器のモデル化の方法は、例えば IHX をモデル化する際に、冷却材流動（1次系，2次系），冷却材温度（1次系，2次系），伝熱管温度，伝熱管と流体の熱伝達の各モデルを用意し、これらを組み合わせてIHX をモデル化する。

以下にFOSTER コードを構成する各モデルの説明を行う。なお、プラント動特性では、解析範囲がプラント全体におよび解析対象時間も数分から数時間の過渡応答が必要となるため、目的に応じてモデルの簡素化を行っている。なお、本文中で使用している記号の意味は、表 A-1に示す。

(1) 炉心の核特性・温度計算モデル

炉心の核特性は、炉心1点近似の動特性方程式(1)，(2)をprompt jump近似を用いて解いて求める。また、遅発中性子は、6群を考慮する。

$$\frac{d}{dt} n = \frac{R - \beta_{\text{all}}}{L_n} n + \sum_{i=1}^6 (\lambda_i \cdot Cn_i) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} Cn_i = \frac{n}{L_n} \beta_i - \lambda_i \cdot Cn_i \quad (2)$$

ここで、原子炉の合計反応度 R には、制御棒の位置効果の他に、フィードバック反応度として、燃料のドップラ効果，燃料・被覆管・冷却材・ラッパ管の密度効果，炉心支持構造の膨張効果，GEM、集合体パッド炉心径方向膨張反応度等の固有の反応度効果が含まれる。

これにより求められた中性子束，すなわち発熱量の時間変化を用いて、熱伝導方程式(3)より、燃料および被覆管の半径方向の温度分布を計算し、被覆管表面における熱流束を求める。ただし、燃料・被覆管の軸方向の伝熱は通常は考慮しない。方程式の解法には、台形則による差分を用いている。

$$Cp \cdot \rho \frac{d}{dt} T = K \cdot \nabla^2 \cdot T + q \quad (3)$$

(2) 単相流動計算モデル（ナトリウム・空気）

ナトリウム系及び空気系は、通常単相流で運転され熱膨張が小さいため、密度の時間変化を無視することにより、流動計算と温度計算を分離して解くことができる。単相流の流動に

については、圧力点（分岐点）、液面を有するタンクとそれらをつなぐ1次元の流路からなるとして、流動の1次元ネットワークを組み、プラントをモデル化する。流路については運動量保存則(4)を、分岐点については質量保存則(5)を連立して解くことにより、各流路の流量と分岐点の圧力を求めることができる。

なお、(4)式の左辺は、慣性項である。また、右辺第2項のポンプヘッドは、ポンプの回転特性方程式(6)を用いて回転数を求め、ポンプ完全特性モデルによってポンプヘッドを計算する。また、第3項の水頭項の密度に温度依存性を持たせることにより、系全体としての自然循環力を考慮することができる。第4項の圧力損失は、システムで定められた圧力損失を流量の関数として入力する。この圧力損失項にはバルブの開閉に伴う圧力損失も圧力損失係数に換算して計算する。

液面を有するタンクは、圧力が既知であるため、これに接続する流路の運動量保存則の右辺第1項のいずれかの圧力は入力で与えられる。液面の変動は、流入・流出の流量バランスより、質量保存則(7)で求めることができる。

これらの流動方程式は連立し線形化して、加重平均差分法により解く。

$$\frac{L}{A} \cdot \frac{d}{dt} W = (P_{in} - P_{out}) + P_{pm} - \rho \cdot \Delta h - \zeta \cdot W |W| \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n (W_i) = 0 \quad (5)$$

$$I_{pm} \cdot \frac{d}{dt} N_{pm} = T_{mt} - T_{pm} - T_{fc} \quad (6)$$

$$\rho \cdot A_{tk} \cdot \frac{d}{dt} X_{tk} = \sum_{i=1}^n (W_i) \quad (7)$$

(3) 単相温度計算モデル（ナトリウム・空気）

ナトリウム系・空気系の流路の温度を計算するために、流路の温度分布が求まるように更にメッシュ分割し、それぞれの温度計算用メッシュについて、1次元のエネルギーバランス式(8)を解いて、温度を計算する。ここで、流路に与えられる熱流束は、流体と伝熱管表面の間の熱伝達式(9)より計算される。なお、流体の流動方向の伝熱は、熱輸送のみを考慮し、熱伝導は考慮しない。分岐点のうち、体積を有するもの及び、液面を有するタンクでは、容積に依存した1次遅れ(10)を考慮する。流体の温度計算では、数値計算に特性曲線法を用い、温度分布の補間に直線補間とスプライン関数による補間を用意する。

一方、伝熱管の温度分布は、軸方向の伝熱を無視して、厚さ方向に関する1次元熱伝導方程式(11)を解いて求める。伝熱管の温度計算用の境界条件としては、伝熱管と流体の間の熱伝達率、流体温度を与える。数値解法には、後方差分を用いる。また、熱伝達率は、流体流速の依存性を考慮する。

$$C_p \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{d}{dt} T = -C_p \cdot W \cdot \frac{d}{dt} T + Q \quad (8)$$

$$Q = h \cdot L_h \cdot \Delta T \quad (9)$$

$$V \cdot \rho \cdot \frac{d}{dt} H = \left\{ \frac{\sum (W_{in} \cdot H_{in})}{\sum (W_{in})} - H \right\} \cdot \sum (W_{in}) + Q \quad (10)$$

$$C_p \cdot \rho \cdot \frac{d}{dt} T = K \cdot \nabla^2 \cdot T \quad (11)$$

(4) 水・蒸気系計算モデル

水・蒸気系に関しても単相流と同様、分岐点、タンク、セパレータとそれらをつなぐ1次元の流路からなるとして、流動の1次元ネットワークを組み、水・蒸気系をモデル化する。ただし、水・蒸気系では、SGの内部等で相変化を生じ、極端な密度変化が生じるため、流動計算と温度計算を分離して解くことができない。このため、流路に関しては質量保存則(12)、運動量保存則(13)及びエネルギー保存則(14)を連立し、接合点に関しては質量保存則(15)とエネルギー保存則(16)を連立して解く必要がある。なお、密度 ρ が、圧力 P とエンタルピ H の関数であることに着目し、密度の時間変化は(17)式に示すように圧力とエンタルピの時間変化に置き換えて計算している。ここで示した式は、計算の容易さとFBRの水・蒸気系の形状を考慮し、スリップを無視した一様流として扱い、水・蒸気系の運動エネルギー、加速による圧力損失は無視するとした。これらの式を、解くことにより、流量、温度(エンタルピ)、圧力等を求めることができる。なお、ポンプに関する回転特性方程式や完全特性モデルについては、単相流の計算の場合と同一である。

数値解法においても単相流と同様に、流量に関しては、線形化して加重平均差分法を用い、温度に関しては、流路をメッシュ分割して、特性曲線法を用いて計算している。さらに、伝熱管の温度計算は、単相流の計算式(11)と同一である。

$$A \cdot \frac{\partial}{\partial t} \rho = -\nabla \cdot W \quad (12)$$

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial t} W = -\nabla \cdot \left\{ P + \left(\frac{W^2}{\rho \cdot A^2} \right) + \rho \cdot \Delta h - P_{pm} + \zeta \cdot W |W| \right\} \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} H = -u \cdot \nabla \cdot H + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial t} P + Q \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (P \cdot V) = \sum_{i=1}^n W_i \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot P \cdot H - P \cdot V) = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot H_i) + Q \cdot \rho \cdot V \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho = \frac{\partial \rho}{\partial P} \cdot \frac{\partial}{\partial t} P + \frac{\partial \rho}{\partial H} \cdot \frac{\partial}{\partial t} H \quad (17)$$

(5) 多次元プレナムモデル

FOSTER コードでは、最大5つの多次元プレナムを考慮することができる。多次元プレナム

ムの挙動計算は日立で開発した THERVIS の計算手法を用いて、連続の式 (18)、運動方程式 (19)、エネルギー式 (20) を連立して解くことにより求める。

$$\gamma v \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \gamma_r \cdot \rho \cdot u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\gamma_\theta \cdot \rho \cdot u_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\gamma_z \cdot \rho \cdot u_z) = 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \gamma v \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \gamma_r \rho u_r^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\gamma_\theta \rho u_r u_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\gamma_z \rho u_r u_z) - \gamma v \rho \frac{u_\theta^2}{r} = \\ & - \frac{\gamma v}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (rP) - P \right\} - \gamma v \zeta \rho u_r |u_r| + \gamma v \rho g_r + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_c \gamma_r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \mu_c \gamma_\theta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r} \right) \right\} - \frac{2}{r} \gamma_r \mu_c \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu_c \gamma_z \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \right\} \\ & \gamma v \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_\theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \gamma_r \rho u_r u_\theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\gamma_\theta \rho u_\theta^2) + \frac{\partial}{\partial z} (\gamma_z \rho u_\theta u_z) - \gamma v \rho \frac{u_r u_\theta}{r} = \\ & - \frac{\gamma v}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \gamma v \zeta \rho u_\theta |u_\theta| + \gamma v \rho g_\theta + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \mu_c \gamma_r \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \right\} \\ & + \frac{\gamma v}{r} \mu_c \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) - \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \mu_c \gamma_\theta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu_c \gamma_z \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right) \right\} \\ & \gamma v \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \gamma_r \rho u_r u_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\gamma_\theta \rho u_\theta u_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\gamma_z \rho u_z^2) = \\ & - \frac{\gamma v}{r} \frac{\partial P}{\partial z} - \gamma v \zeta \rho u_z |u_z| + \gamma v \rho g_z + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \mu_c \gamma_r \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \gamma v \frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \gamma_r \rho u_r T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\gamma_\theta \rho u_\theta T) + \frac{\partial}{\partial z} (\gamma_z \rho u_z T) = \\ & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \gamma_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \gamma_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \gamma_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \end{aligned} \quad (20)$$

プラント全体の一巡流動は1次元ネットワーク解析により求め、流動計算に必要なプレナム部の自然循環力、圧力損失係数及びプレナム部の流出冷却材温度は多次元プレナムにより計算された結果を反映する。一方、多次元プレナム熱流動計算は、プレナムへの流入流量及び流入冷却材温度を境界条件として、1次元ネットワークより与える。これらのデータをタイムステップ毎に更新することにより1次元ネットワークと多次元プレナムを統合した総合的なプラント熱流動挙動が解析可能とする。プログラム全体のコントロールは1次元ネットワーク解析コードで行い、多次元プレナム挙動計算部はモジュールとして用意されて任意に利用することができる。

ただし、多次元プレナムモデルは膨大な計算時間を要するため、通常はプレナムの多次元的な挙動を再現する適切なミキシングボリュームと輸送遅れ要素、圧損抵抗を組み合わせた1次元ネットワークモデルを使用する。

(6) 制御系計算モデル

制御系は、プラントの設計により決定されるため、制御系の計算に必要な16種類の基本的な伝達関数（比例、積分、微分、1次遅れ、不完全微分、遅れ・進み、設定点、むだ時間、低値選択器、高値選択器、不感帯、リミッタ、ヒステリシス、スイッチ、遮断器、外部テーブル）を用意し、任意の組み合わせのネットワークを構成できるようにしてある。また、原子炉出力制御系、主蒸気圧力制御系、給水流量制御系等の主要な制御系回路はコード内で用意し、任意に使用することができる。

プラント挙動計算（伝熱・流動計算）より、炉心の中性子束密度及び、各部の流量、温度、圧力、ポンプ回転数、液位等のプロセス量を制御系モデルに渡し、制御系から制御反応度、ポンプのモータートルク、バルブ開度、ブロー弁開度、原子炉スクラム信号、ポンプトリップ信号、送風器起動信号等の制御信号をプラント挙動計算（伝熱・流動計算）にフィードバックすることにより、プラント制御系による制御特性をモデル化している。

(7) その他の各種モデル（固有の安全モデル等）

自然循環挙動を評価するための成層化プレナムモデル、炉心槽内熱流動モデル、及び集合体パッド膨張による炉心径方向膨張は以下の方法で評価する。

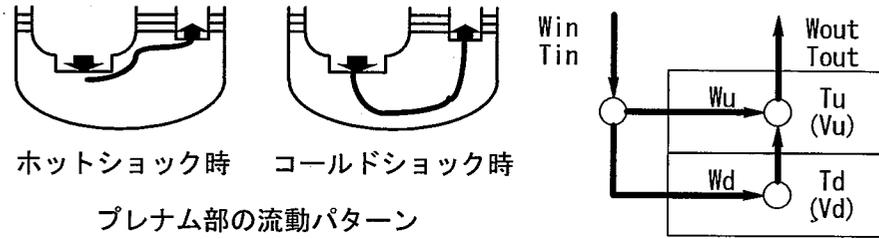
a. 成層化プレナムモデル

自然循環水試験で得られた知見を反映し「成層化プレナムモデル」が組み込まれており、自然循環解析ではこの「成層化プレナムモデル」を使用する。「成層化プレナムモデル」として評価部位にあわせて、「上下2領域・成層化モデル」と「炉心出口成層化モデル」を用意している。

(a) 上下2領域・成層化モデル

IHX下部プレナム及びポンプ容器下部プレナムのように、出入口配管が共にプレナムの上部にある場合は、ホットショック時にはプレナム全体が混合せずに高温の冷却材が入口配管からプレナム上部を沿って出口配管に抜け、プレナム下部には低温の冷却材が残されるため、プレナム内に成層化を生じる現象となる。この挙動を「上下2領域・成層化モデル」によりモデル化する。

上下2領域・成層化モデルは、プレナム内に成層界面を仮定して上下2領域 (V_u, V_d) に分割し、各領域での温度を個別に計算する。プレナム入口温度 (T_{in}) とプレナム平均温度 (T_a) を用いてホットショック及びコールドショックを判別して、リチャードソン数 (Ri) の関数として下部領域に混入する流量割合を決定する。上下2領域・成層化モデルの概念と計算モデル・計算式を以下に示す。



プレナム部の流動パターン

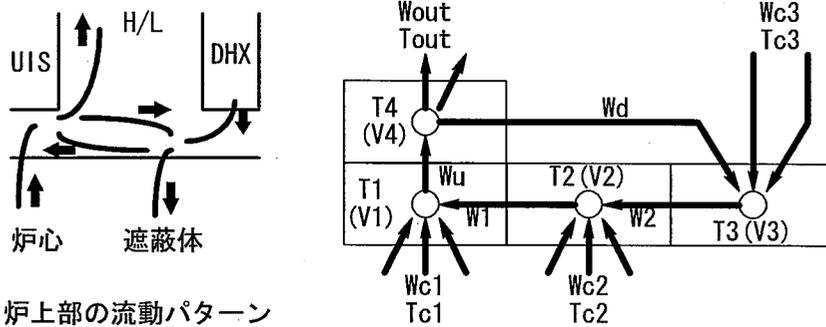
$$Ta = \frac{Tu \cdot Vu + Td \cdot Vd}{Vu + Vd} \qquad Ri = \frac{g \cdot \beta \cdot (Tin - Ta) \cdot De}{Uin^2}$$

$Wd = Win$	$Wu = 0$	$Ri < 0$ の場合
$Wd = Win - Wu$	$Wu = Win \cdot Ri / \alpha$	$0 < Ri < 1$ の場合
$Wd = 0$	$Wu = Win$	$1 < Ri$ の場合
$Wout = Win$	$Tout = Tu$	

(b) 炉心出口成層化モデル

原子炉容器上部プレナム下部領域では、炉心部出口、遮蔽体出口、DHX出口の温度の異なる冷却材が混在し、特にDHX出口の冷却材がそのまま遮蔽体出口より混入し、遮蔽体部での逆流を促進する働きもある。これらの挙動を「炉心出口成層化モデル」でモデル化する。

炉上部プレナムモデルは、原子炉容器上部プレナム下部領域を対象として、炉心部出口近傍 (V1)、遮蔽体出口近傍 (V2)、DHX出口近傍 (V3)、流出領域 (V4) の4領域に分割し、各領域を結ぶ循環流を想定する。各領域では流入流量及び流入冷却材温度を用いて、個別に冷却材温度を計算する。ここで、炉心部出口近傍 (V1) と流出領域 (V4) の温度を用いて、ホットショック及びコールドショックを判別して、リチャードソン数 (Ri) の関数として循環流量を決定する。炉上部プレナムモデルの概念と計算モデル・計算式を以下に示す。



炉上部の流動パターン

$$Ri = \frac{g \cdot \beta \cdot (T1 - T4) \cdot De}{U1^2}$$

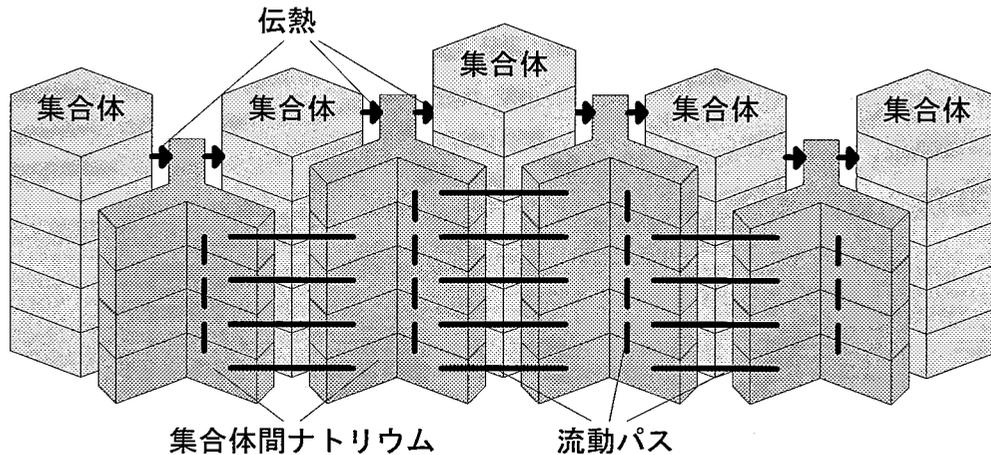
$Wout = Wc1 + Wc2 + Wc3$	$Tout = T4$
$Wu = 0$	$Ri < -1$ の場合
$Wu = Wout \cdot (1 + Ri)$	$-1 < Ri < 1$ の場合
$Wu = 2 \cdot Wout$	$1 < Ri$ の場合

$$\begin{aligned}
 W_d &= W_u - W_{out} \\
 W_2 &= W_d + W_{c3} \\
 W_1 &= W_2 + W_{c2} = W_u - W_{c1}
 \end{aligned}$$

b. 炉心槽内熱流動モデル

炉心槽内での集合体間径方向熱移行効果及びインタラップフロー効果は次に示すモデルで計算する。

FOSTERのマルチセル炉心モデルの概念図を以下に示す。



炉心は、燃料ピンを内包する集合体と集合体間ナトリウム及び、集合体のラップ管で構成されるものとする。集合体内冷却材とラップ管及びラップ管と集合体間ナトリウムとの間での伝熱を考慮する。また、隣接する集合体間ナトリウム同士は流動パスで結ばれており、差圧による流動を考慮する。

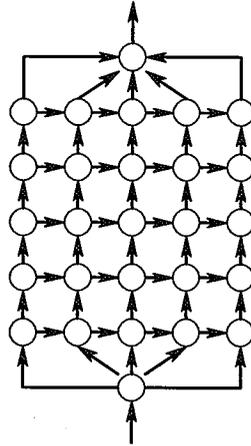
これらのラップ管を介した伝熱及び集合体間ナトリウム間の流動（インタラップフロー）に伴う熱移行を考慮して、集合体間ナトリウムの温度は下式で求める。

$$V_{IP} C_{pI} \frac{\partial T_I}{\partial t} = \sum_{j=1}^n \left\{ U_j A_j (T_{Wj} - T_I) \right\} + \sum_{k=1}^m \left\{ W_k C_{pI} (T_k - T_I) \right\}$$

メッシュ分割したそれぞれの集合体間ナトリウム内での温度は一樣と仮定し、左辺でナトリウム温度 T_I を求める。右辺は熱移行を示しており、右辺第1項はラップ管を介した伝熱を示しており、隣接するラップ管温度 T_{Wj} 及び伝熱面積 A_j 及び総括熱伝達率 U_j により求める。また、右辺第2項ではインタラップフローに伴う熱移行を示しており、各メッシュに対して流入と流出に分けて熱移行量を求める。

$$\sum_{k=1}^m \left\{ W_k C_{pI} (T_k - T_I) \right\} = \sum_{in} (W_{in} C_{pI} T_{in}) + \sum_{out} (W_{out} C_{pI} T_I)$$

$$\sum_{in} (W_{in}) + \sum_{out} (W_{out}) = 0$$



インタラップフローの流動は上図に示すように、メッシュ分割したそれぞれの集合体間ナトリウムを圧力点として、それぞれの圧力点を結ぶ水平方向，垂直方向の流路を設定する。各流路に対しては運動量保存則を、圧力点に対しては質量保存則を設定し、これらの流動方程式を連立し線形化して、荷重平均差分法をにより解く。

$$\frac{L_u}{A_u} \frac{dW_u}{dt} = P_{u1} - P_{u2} - \left(\xi_u + \lambda \frac{L_u}{De_u} \right) \frac{W_u |W_u|}{2g\rho_0 A_u^2}$$

$$\frac{L_v}{A_v} \frac{dW_v}{dt} = P_{v1} - P_{v2} - \Delta H_v (\bar{\rho}_v - \rho_0) - \left(\xi_v + \lambda \frac{L_v}{De_v} \right) \frac{W_v |W_v|}{2g\rho_0 A_v^2}$$

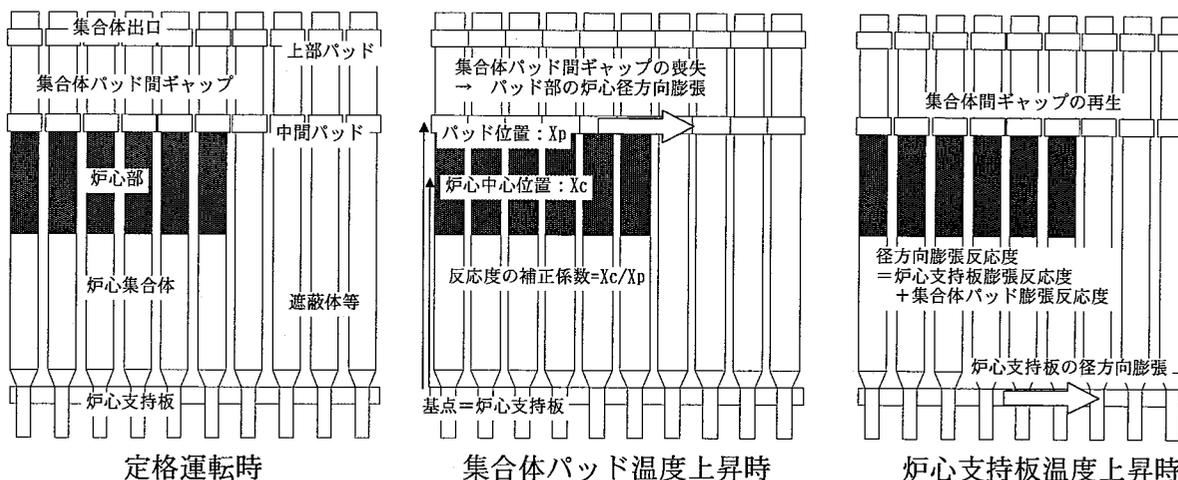
$$\sum_{i=1}^n W_{ui} + \sum_{j=1}^m W_{vj} = 0$$

この方法は基本的には単相流動計算の1次元フローネットワークと同一の考え方であり、サブチャンネル解析等でも用いられている手法である。1つの圧力点に接続する流路パスは任意に設定することが可能で、疑似3次元的な流動も考慮できる。

c. 炉心径方向膨張反応度モデル

集合体パッド膨張による炉心径方向膨張反応度は、次に示すモデルで計算する。

炉心径方向膨張反応度計算モデルの概念図を以下に示す。



b. 項の炉心槽内熱流動モデルにより、集合体毎のラッパ管温度が求められているため、これに集合体パッドの温度応答遅れ（1次遅れ）を考慮して、集合体パッド温度を求める。この集合体パッド温度を用いて、径方向膨張反応度を求める。

$$\text{膨張量} = \sum_{i=1}^{\text{層数}} (\text{パッド温度} - \text{初期温度}) \times \text{膨張係数} \times \text{集合体対面距離}$$

$$\text{パッド膨張寄与分} = (\text{膨張量} - \text{初期ギャップ}) \times \text{補正係数} - \text{炉心支持板膨張量}$$

$$\text{炉心径方向膨張反応度} = \text{パッド膨張寄与分} \times \text{反応度係数}$$

こうして求めた径方向膨張反応度係数は、他のフィードバック反応度と同様に、炉心の核特性計算に反映される。

3. FOSTER コードの検証例

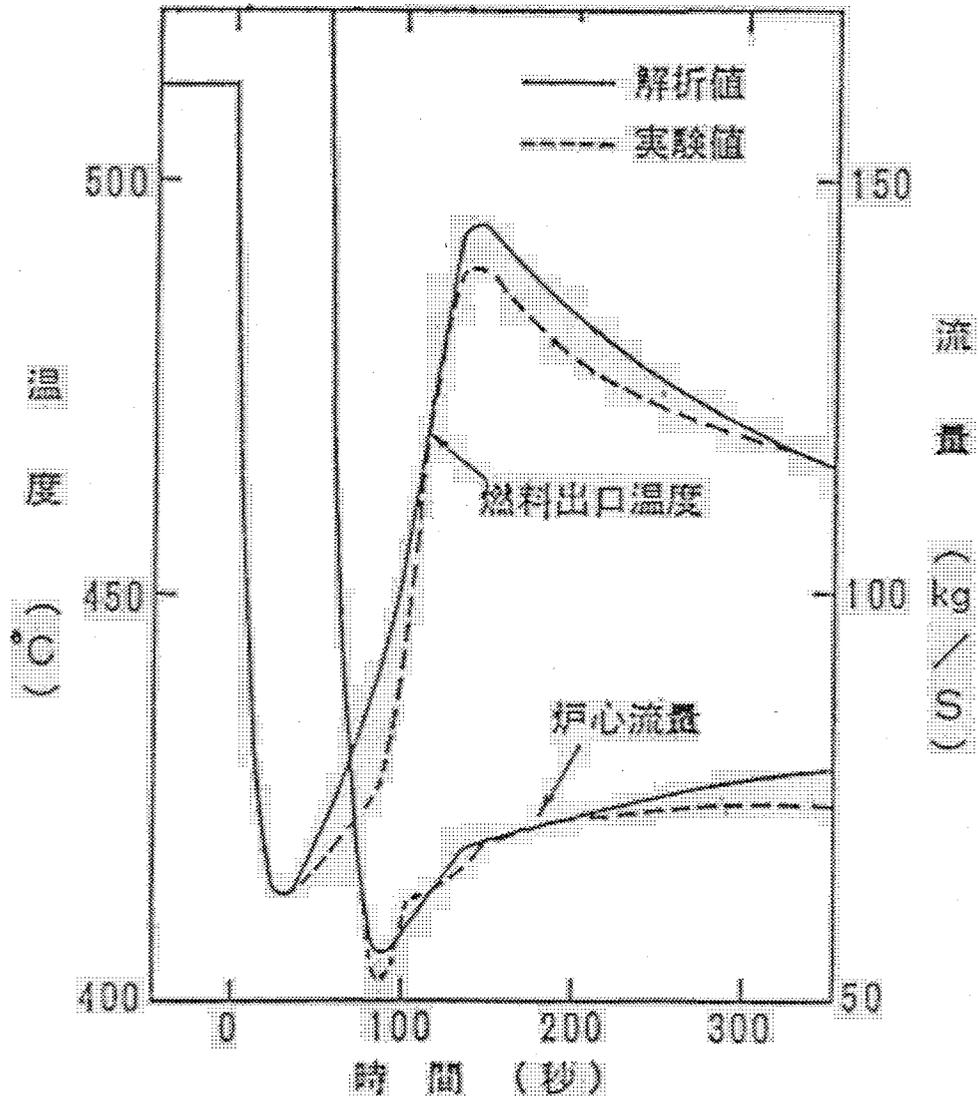
次に、FOSTER コードの検証例を示す。

図A-1には、炉心出力、ナトリウム伝熱・流動計算部の実験検証例として、「常陽」自然循環試験について、試験結果と実験解析結果の比較を示す。また、図A-2には、水蒸気系計算部の実験検証例として、「50 MW蒸気発生器試験設備」で、給水流量の外乱に実験における試験結果と実験解析結果の比較を示す。これらの図よりわかるように、解析コードの解析結果が試験結果をよく模擬していることから、この解析コードは実験検証されたといえる。

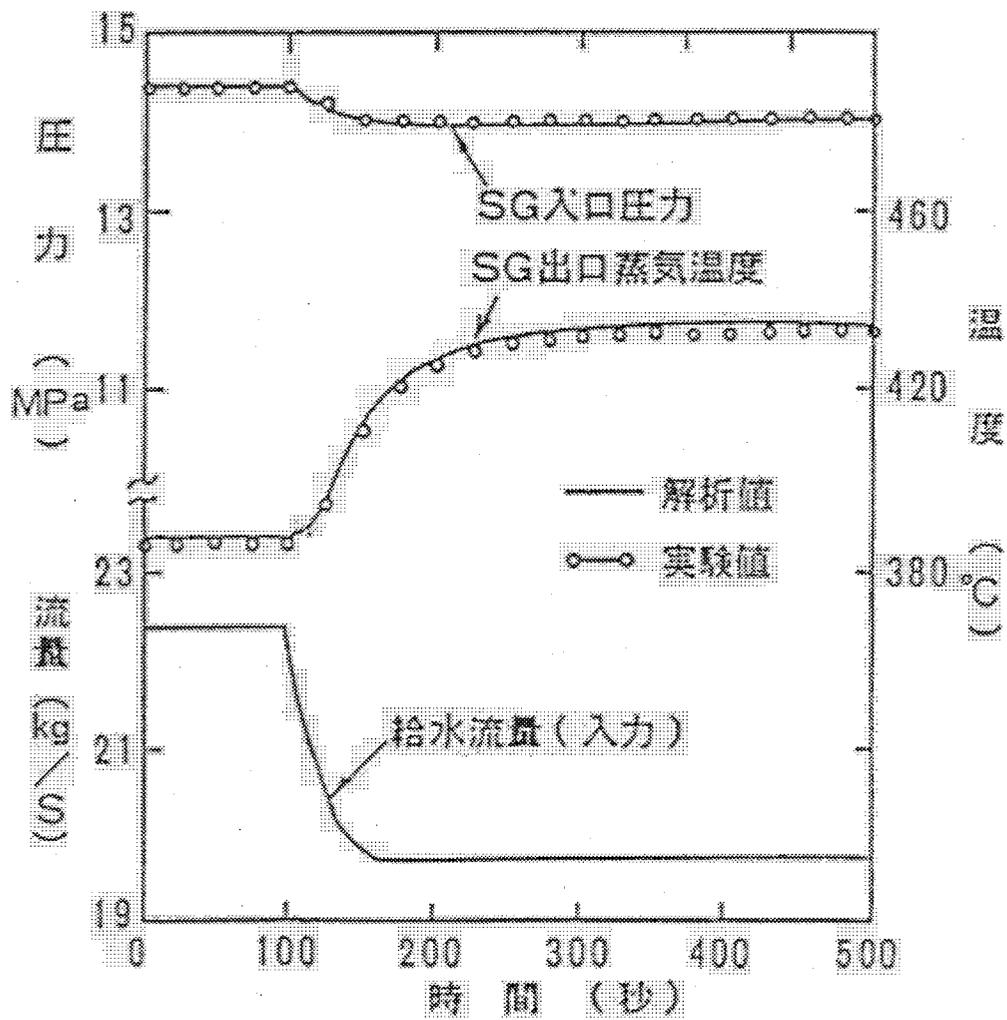
さらに、自然循環水試験、ILONA自然循環試験等の各種試験解析及び他の解析コードとの間での、各種ベンチマーク解析を実施し、解析コードの適用性と精度の確認を実施している。

表A-1 数式の記号の説明

A	: 流路の流路面積	T	: 温度
A _{tk}	: タンクの流路面積	T _{fc}	: ポンプの摩擦トルク
C _{ni}	: i 郡の遅発中性子先行核数	T _{mt}	: ポンプのモータートルク
C _p	: 比熱	T _{pm}	: ポンプのポンプトルク
H	: エンタルピ	t	: 時間
H _{in}	: 流入流体のエンタルピ	u	: 流速
h	: 熱伝達率	V	: 分岐点・タンクの容積
I _{pm}	: ポンプの回転慣性項	W	: 流路の流量
K	: 熱伝導度	W _{in}	: 流入流体の流量
L	: 流路の長さ	X _t	: タンクの液面・液位
L _h	: 伝熱濡れぶち長さ	Z	: 流路の流れ方法の空間座標
L _n	: 中性子寿命	Δh	: 流路の高低差
N _p	: ポンプの回転数	ΔT	: 温度差
n	: 中性子束密度	β _i	: i 郡の遅発中性子生成率
P	: 圧力	β _{all}	: 遅発中性子生成率の合計
P _{in}	: 流路の入口圧力	ζ	: 流路の圧力損失係数
P _{out}	: 流路の出口圧力	λ _i	: i 郡の遅発中性子先行核の崩壊定数
P _{pm}	: ポンプヘッド	ρ	: 密度
Q	: 熱流束		
q	: 発熱割合		
R	: 反応度		



図A-1 実験検証例 (常陽自然循環試験)



図A-2 実験検証例 (50 MW・SG過渡応答)