

SSC-Lによるプラント過渡応答試験予備解析

1986年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

SSC-Lによるプラント過渡応答試験予備解析

大岩 章夫* 磯崎 正*
菊池 栄* 山口 勝久*
宮口 公秀*

要 旨

高速炉の1次主冷却系配管破損事故を想定した場合に予想される燃料集合体熱流力過渡事象を調べるため、まず2次ピークを対象とした崩壊熱沸騰試験等が実施された。さらに1次・2次ピークを含む一連の事象推移を模擬した試験を行うため、プラント過渡応答試験施設の建設が計画されている。また、これらの試験の予備解析、試験解析およびそれらの経験に基づいた実機安全評価を行うため、安全解析コードを用いた解析・評価手法の精度を高くしておくことが必要である。配管破損事故を含む各種事故時のプラント過渡応答評価のための手段の一つとしてSSC-Lがある。SSC-Lは、これまで種々の試験解析に適用して解析機能の評価、モデルの改良等の整備作業が進められている。そこで、このSSC-Lを用いて崩壊熱沸騰試験解析を行い、その知見を基にプラント過渡応答試験施設で予定されている代表的な試験ケースについて予備解析を行った。

*大洗工学センター安全工学部高速増殖炉工学室

Mar. 1986

Pre-Test Analysis of the Plant Dynamics Test using SSC-L

A. Oiwa * , T. Isozaki* , S. Kikuchi* ,
K. Yamaguchi* and K. Miyaguchi*

Abstract

The Sodium Boiling Experiment at Decay Heat Levels (DHB) has been performed to study the transient thermal-hydraulics of the liquid metal fast breeder reactor (LMFBR) fuel subassemblies with emphasis on the so-called second temperature peak which might be caused during the hypothetical loss-of-pipe-integrity (LOPI) accident. Furthermore, it is planned to construct a new sodium loop, Plant Dynamics Test Loop (PLANDTL), to conduct a simulation experiment of the whole plant dynamics including the first and second temperature peaks. It is required to establish the analytical means using the safety analysis codes available, preparing not only for the pre-test and post-test analyses of these experiments but also for the safety assessment of the LMFBR plant on the basis of the usage experiences. SSC-L is one of the dynamics analysis codes for evaluating the plant responses to various kinds of accidents including LOPI. It has been checked to verify its ability to become being modified in its analytical models upon requests and being improved to make it handy.

The post-test analysis of the DHB experiment was performed using SSC-L, thus devised, and, based on the exercise, the pre-test analysis was conducted concerning the standard experimental case which would be tested with PLANDTL.

* FBR Engineering Section, Reactor Safety Engineering Division,
O-arai Engineering Center

目 次

1.	はじめに	1
2.	プラント過渡応答試験施設の概要	2
2.1	施設建設の目的	2
2.2	装置構成	2
2.3	試験方法	2
3.	解析モデル	5
3.1	SSC-L のモデル概要	5
3.2	モデルの修正	5
4.	DHB沸騰試験による適用性解析	10
4.1	DHB沸騰試験概要	10
4.2	SSC-L による解析	12
4.3	考 察	13
5.	プラント過渡応答試験施設の過渡応答解析	23
5.1	入力条件	23
5.2	解析結果	23
5.3	考 察	24
6.	まとめ	31
	謝 辞	32
	参考文献	33

表リスト

表 1.	37H 試験体仕様	21
表 2.	DHB 沸騰試験解析ケースの試験条件	22

図リスト

図 1.	プラント過渡応答試験施設フローシート	3
図 2.	プラント過渡応答試験施設主要機器・配管鳥かん図	4
図 3.	SSC に用いられている炉容器内モデル概要図	7
図 4.	SSC でモデル化される熱輸送系概念図 (例)	7
図 5.	配管破損モデル	8
図 6.	主循環ポンプ特性曲線	9
図 7.	ミキシング試験装置および崩壊熱沸騰試験装置フローシート	14
図 8.	崩壊熱沸騰試験装置鳥かん図	15
図 9.	試験部入口流量および試験体各部のナトリウム温度 (ケース I)	16
図 10.	試験部入口流量および試験体各部のナトリウム温度 (ケース II)	17
図 11.	DHB 装置解析モデル	18
図 12.	試験部入口流量および試験体各部のナトリウム温度の解析結果 (ケース I)	19
図 13.	試験部入口流量および試験体各部のナトリウム温度の解析結果 (ケース II)	20
図 14.	トランジェントカーブ標準ケース	25
図 15.	配管破断系への放出流量	26
図 16.	解析に用いた主循環ポンプ印加電圧過渡変化	27
図 17.	試験部入口ナトリウム流量	28
図 18.	放出流量	29
図 19.	上部プレナム出口流量	29
図 20.	上部プレナムナトリウム液位	30
図 21.	試験体各部のナトリウム温度	30

1. はじめに

高速炉の1次主冷却系配管大口径破損事故（LOPI）を想定した場合、配管破損直後、原子炉スクラム以前の急速な炉心流量の低下に伴うナトリウム温度上昇（1次ピークと呼ばれる）および原子炉スクラム後の崩壊熱出力レベルでの熱出力低下割合よりもさらに極端な流量低下に伴うナトリウム温度上昇（2次ピークと呼ばれる）が予想されている。これらの熱流力過渡事象では、強制循環から自然循環へ移行する過程あるいは自然循環条件下での沸騰が考えられるため、沸騰時のプラント過渡応答を調べることは重要な課題である。

高速炉の安全評価においては、「運転時の異常な過渡変化」および「事故」として選定された各種の想定事象に対する安全評価が必要なばかりでなく、いわゆる(5)項事象と呼ばれる「事故」より更に発生頻度は低い結果が重大であると想定される事象については、液体金属冷却高速増殖炉（LMFBR）の運転実績が僅少であることに鑑み、その起因となる事象とこれに続く事象経過に対する防止対策との関連において十分に評価を行い、放射性物質の放散が適切に抑制されることを確認する」ことを要求されている。

「もんじゅ」の安全審査においても、(5)項事象の考え方にに基づき、LOPI時の事象推移について補強することが要求されている。

このような背景から、LOPI事象について各種の試験を実施することにより、データの蓄積を図りかつ安全解析コードによる事象推移の解析・評価を行っていくことが必要となっている。

試験としては、主として2次ピークを対象とした崩壊熱沸騰試験等が実施され、貴重なデータが得られているほか、⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾1次・2次ピークを含む、一連の事象推移を模擬するプラント過渡応答試験施設（PLANDTL（プラントル）、現在建設計画）を用いた配管破損時沸騰試験が予定されている。⁽⁴⁾

安全解析コードとしては、解析対象によりCOMMIX, COBRA, SABENA等が用いられることとなるが、特にプラント全体の過渡事象の解析にはSSC-Lが適しているものと考えられている。

SSC-Lは、これまでにアメリカ、ヨーロッパ各国において高速増殖炉の各種事象解析に適用されてきており、⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾動燃事業団においても常陽の自然循環試験解析等が⁽⁸⁾⁽⁹⁾行われ、多くの使用実績と高い検証度を得られている。さらにその後の研究により、SSC-Lは、配管破損を含む各種事象に対するプラント応答評価および他の計算コード群に対するクロスチェック用コードとして用いられることを期待されている。⁽¹⁰⁾

これらの実績に基づき、高速増殖炉工学室ではSSC-Lを用いてプラントルの設計のクロスチェックを行い、プラントルを用いた試験で得られるデータに対し解析・評価を行うことによってコードの検証を行うことを考えている。さらにこのような過程を通じてLOPI事象に対するデータの蓄積と安全解析手法の確立を図る計画である。

本報では、まず、SSC-Lを用いて崩壊熱沸騰試験のうち代表ケースについて解析を行い、これによって得られた知見によりプラントル概念設計仕様条件での代表的な過渡応答の解析・評価を行う。

2. プラント過渡応答試験施設の概要

2.1 施設建設の目的

LOPI事象に関する研究は、以前より重要性が指摘されてきていた。必要とされる研究のうち、いわゆる2次ピークにおける熱流力過渡事象に関する試験研究はすでに手がけられており、貴重なデータが得られているが、⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾一次ピークに関する試験は行われておらず、データの蓄積は十分であるとはいえない。そのためLOPI事象を模擬した1次・2次ピーク総合試験が必要であると判断された。

プラントルは、このような背景から、「もんじゅ」におけるLOPI時の熱流力過渡事象を⁽⁴⁾模擬した1次・2次ピーク総合試験を行うことを目的として計画されている。さらに、過渡時の集合体内温度挙動、プレナム内温度成層化現象、DRACS作動・不作動時プレナム内過渡的自然循環パス形成挙動、ループ自然循環特性等を評価するため、熱過渡総合試験を行う予定である。本施設には、このような目的を果すため、以下の機能が要求されている。

- (1) 試験体入口/出口の温度・圧力条件の模擬
- (2) 主循環ラインと「もんじゅ」一次系とのナトリウム流動伝熱特性上の相似性

2.2 装置構成

プラントル⁽¹⁾は、「もんじゅ」1次系、2次系を模擬した主循環系、2次系および配管破断系、上部プレナム補助冷却系、純化系等から構成される。図1.にフローシートを、図2.に主要な機器・配管の鳥かん図を示す。

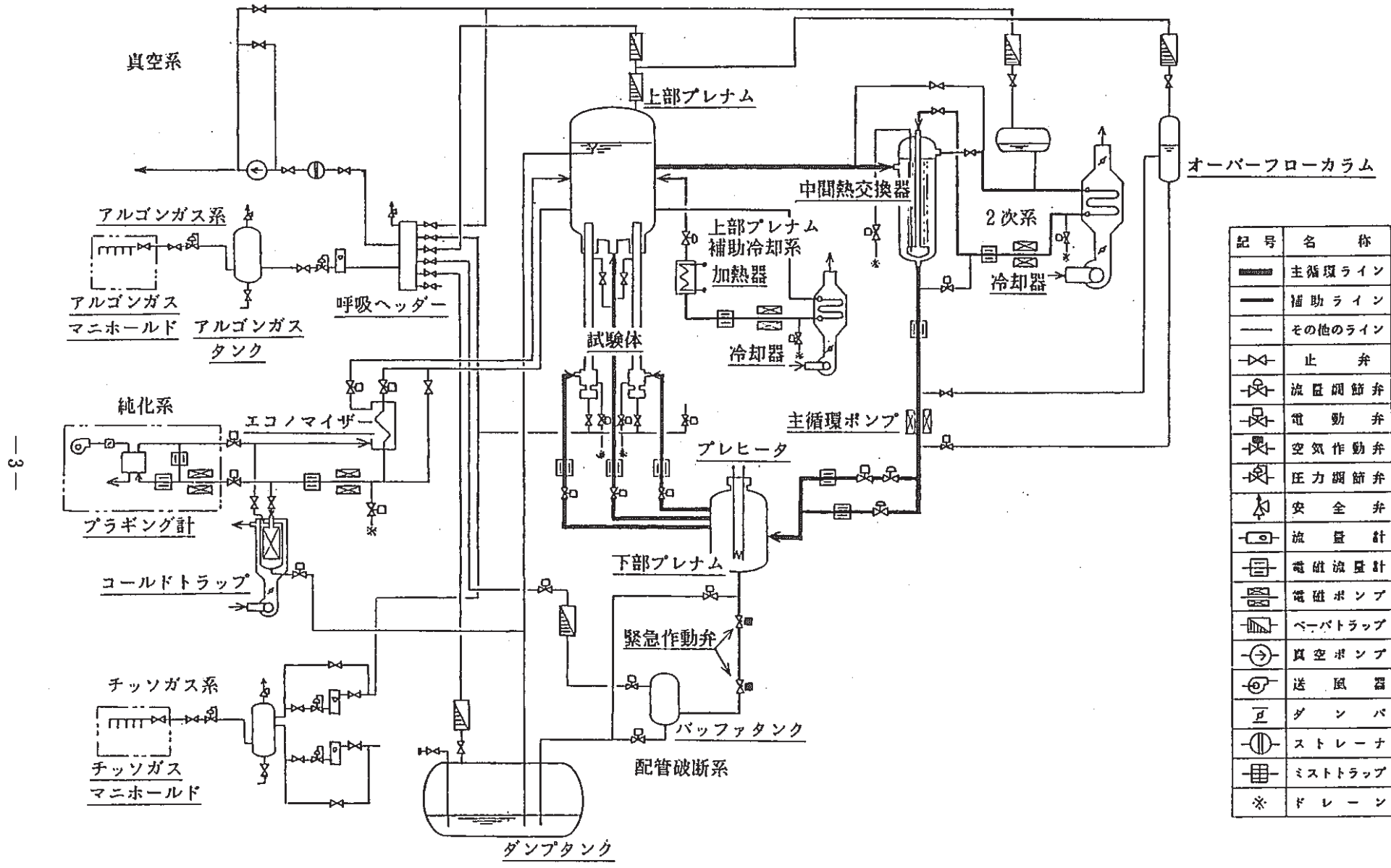
主循環系は、試験体上下の境界条件設定用の上部プレナムおよび下部プレナム、中間熱交換器等から構成され、2次系は、中間熱交換器を介して伝えられる熱を大気へ放出する空気冷却器等から構成される。配管破断系は、LOPIを模擬した急速な流量減少を実現するため、主循環系からナトリウムを系外へ導くもので、緊急作動弁、バッファタンク等から構成される。上部プレナム補助冷却系は、上部プレナムの温度制御に用いられ、空気冷却器、加熱器等から構成される。

2.3 試験方法

本施設は種々のモードで運転されるが、1次・2次ピーク総合試験時の運転方法について以下に述べる。

まず、試験体および加熱器により「もんじゅ」定格運転模擬状態を作る。そして、主循環ポンプ停止、配管破断系緊急開放弁開により、試験部の急激な流量減少を得る。所定の流量減少が得られた後、緊急開放弁は閉じられ、主循環ポンプの制御により、試験体流量を変化させる。

このようにして、試験体流量および発熱量をある目標とするカーブとなるよう制御することによって、熱流力過渡事象を発生させる。このとき、制御カーブをパラメータとすることによって過渡事象の違い、除熱限界条件、許容スクラム遅れ等を求める。



記号	名称
	主循環ライン
	補助ライン
	その他のライン
	止弁
	流量調節弁
	電動弁
	空気作動弁
	圧力調節弁
	安全弁
	流量計
	電磁流量計
	電磁ポンプ
	ヘーバトラップ
	真空ポンプ
	送風器
	ダンバ
	ストレーナ
	ミストトラップ
	ドレイン

図1 プラント過渡応答試験施設フローシート

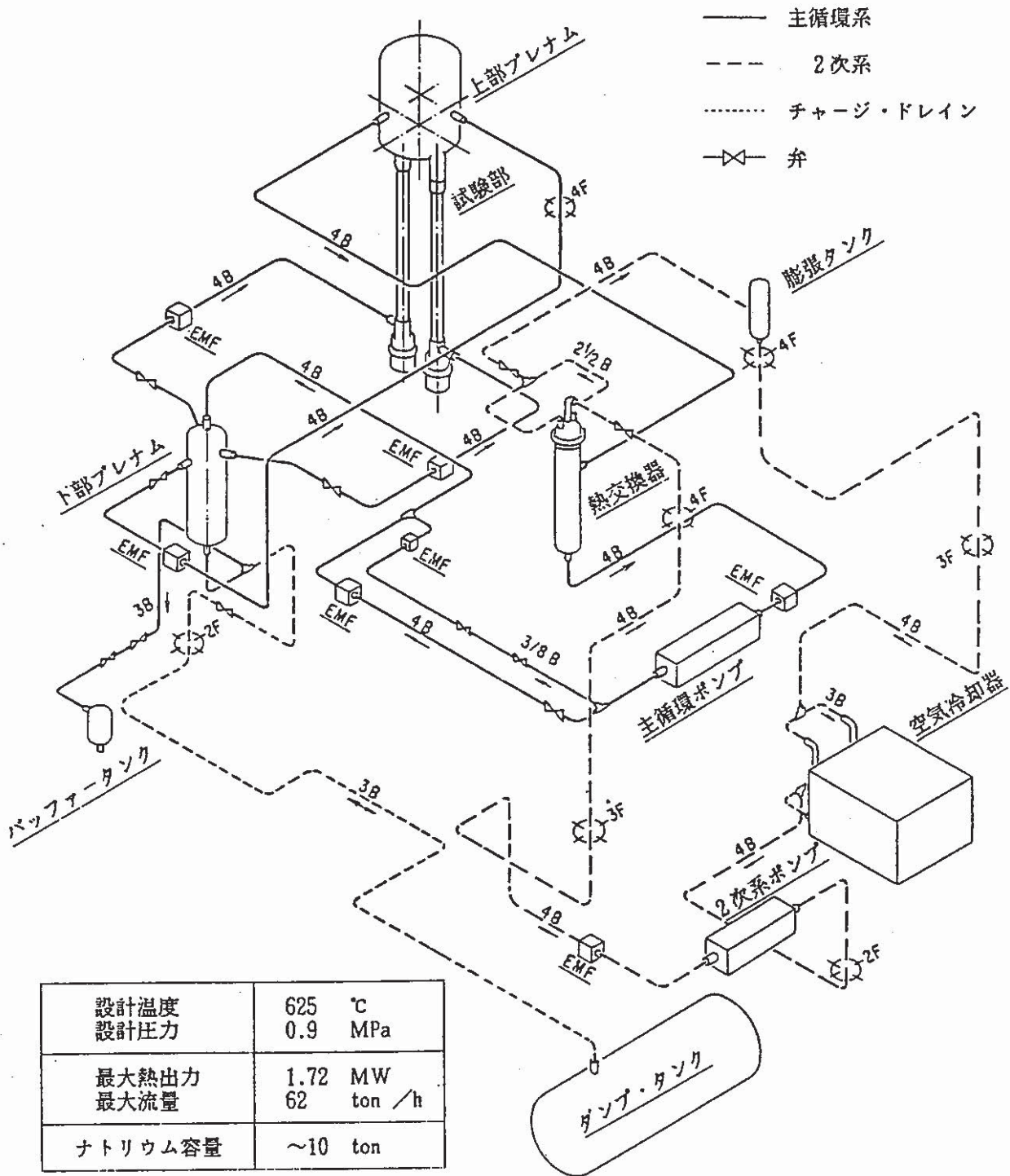


図2 プラント過渡応答試験施設機器・配管鳥かか図

3. 解析モデル

3.1 SSC-Lのモデル概要

SSC-L のモデルは文献(2)に詳しいのでここではその概要について述べる。

(1) 炉容器内

炉容器内部の構成として、図3に示すように下部プレナム、炉心、上部プレナムおよびバイパスを考慮する。炉心は複数のチャンネルに分割できる。各チャンネルは、軸方向および半径方向にいくつかのノードに分割できる。このため、各チャンネルの流量配分、軸方向発熱分布、半径方向発熱分布を考慮できる。また、燃料ペレット部は軸方向に5つの領域に分けることができ、各領域ごとにデフォルト値あるいは任意の材料物性値をセットできる。下部プレナムおよび上部プレナムにおいては、冷却材は完全混合を仮定している。炉容器内の流動は、入口ノズルと出口ノズル間の全圧力損失、燃料ピンのラッピングワイヤを考慮した摩擦圧損、下部プレナム、上部プレナム、炉心入口および炉心出口における形状圧損を入力で与えることによって計算される。

(2) 熱輸送系

熱輸送系は、図4に示すように炉容器出口から過熱器/蒸発器までを考慮している。ポンプとしては、吸込側に自由液面のあるタンクを備えた遠心式ポンプがモデル化されている。中間熱交換器は同心円状シェルアンドチューブ式のものモデル化され、冷却材の温度挙動は軸方向に任意に分割されたノードごとのヒートバランスをとることにより決定される。配管は、機器間を結ぶものごとに一本の配管要素として扱われ、内径、肉厚等の一定な連続したもののみなされる。各々の配管は、軸方向に任意の数に分割され、圧損、エレベーションを考慮して流動および温度挙動が計算される。

(3) 配管破損モデル

配管破損モデルには、図5に示すように、破損面積に比べガードパイプと配管の間のアニュラス部断面積が大きいときには、流出する冷却材はガードパイプに制限されないFree jetモデルを、アニュラス部断面積が小さいときには、ガードパイプに制限されたConfined flowモデルを用いている。この方法の特徴は、破断口面積がいかなる値のときでも適用できることである。

3.2 モデルの修正

SSC-L を用いてプラントルの解析を行うために、いくつかの修正を行ったが、ここでは主なものを述べる。

(1) 電磁ポンプ

主循環系および2次系のポンプは、電磁ポンプが用いられている。その特性は、プラントルについては未定であるが、ほぼ図6に示されるようなカーブで与えられる。

いま、ポンプの揚程を ΔP 、印加電圧を V 、流量を W としたとき、図6より次式の特性を

仮定する。

$$\Delta P = a_0 + a_1 W + a_2 W^2 \quad (3 \cdot 1)$$

$$\text{ここに} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{00} & b_{01} & b_{02} \\ b_{10} & b_{11} & b_{12} \\ b_{20} & b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ V \\ V^2 \end{pmatrix} \quad (3 \cdot 2)$$

また、過渡計算においては、印加電圧をタイムテーブルの形で与え、ポンプの制御を行えるようにする。

(2) 空気冷却器

SSC-L では2次系からの除熱は蒸気発生器によっていたが、プラントでは空気冷却器を用いている。この構成は「常陽」と同一であるため、常陽自然循環試験解析のときに用いられた空気冷却器モデル⁽⁹⁾を本解析でも用いるものとした。

(3) 配管破断系

プラントの配管破断系のうち、SSC-L の配管破損モデルに含まれていない事項として、以下のものがある。

- (a) 配管破断系の配管、弁等による流動圧損
- (b) 配管破断系弁の締切り
- (c) バッファタンク内初期圧力の設定

いま、図5に示すモデルにおいて、弁の相対開度を f 、流動による圧損係数を K としたとき、次の式を付け加える。

$$P_j' = P_j + K \cdot \frac{W \cdot |W|}{2\rho} \quad (3 \cdot 3)$$

$$A_3' = f \cdot A_3 \quad (3 \cdot 4)$$

$$A_4' = f \cdot A_4 \quad (3 \cdot 5)$$

ここに W' ; 放出流量

P_j ; 外部圧力

P_j' ; 圧損を考慮した等価な外部圧力

A_3' , A_4' ; 弁の開度に応じた放出流の断面積

$f = 0$ となる時刻 T_s 以降においては放出流速 $v_j = 0$ とし、配管破損に関する計算をバイパスする。

また、SSC-L では、大気圧を P_a 、ガードパイプ内冷却材液位を h 、重力加速度を g とすると、外部圧力は、

$$P_j = P_a + \rho \cdot g \cdot h \quad (3 \cdot 6)$$

なる関係によって求められているが、 P_a としてバッファタンク初期圧力を入力によって与えられるようにした。

なお、炉心に相当する試験体の各種物性値、プラントの機器構成等、SSC-L のモデルと相違する部分があるが、これらは入力データによって容易に対応できる。

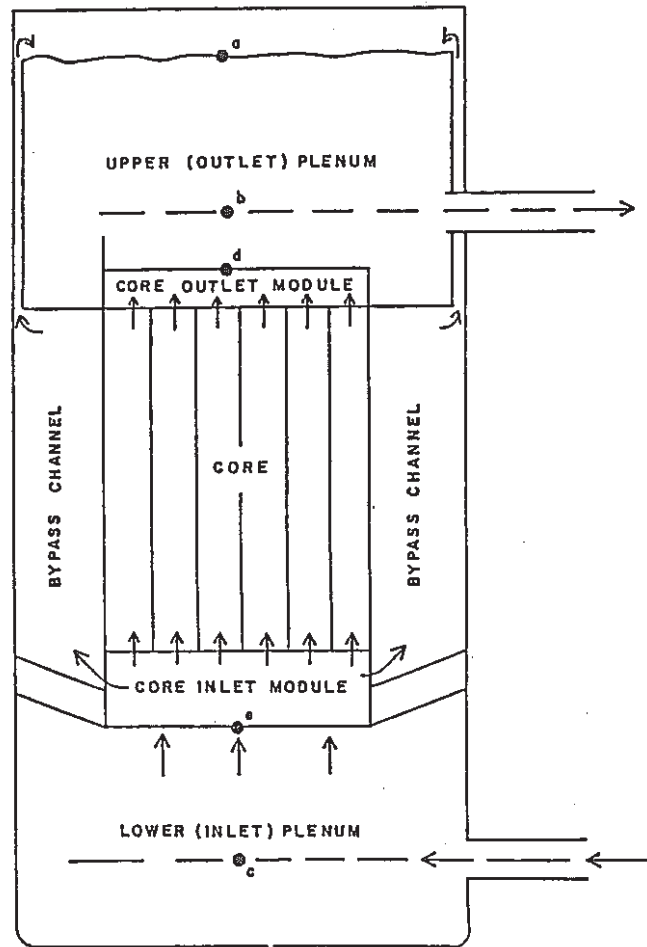


図3 SSCに用いられている炉容器内モデル概要図

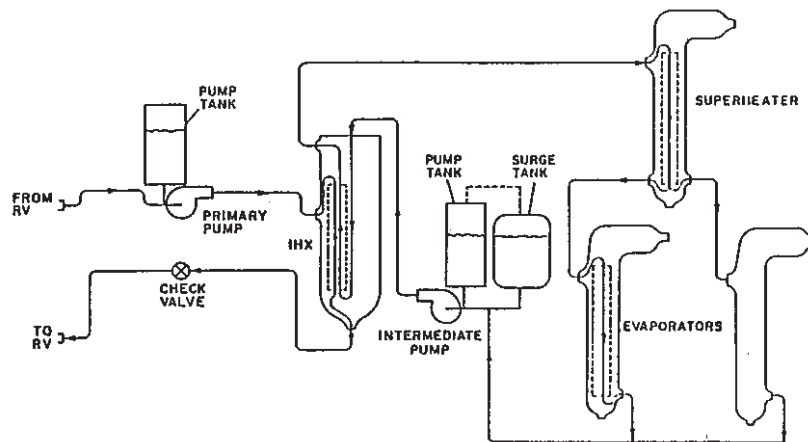


図4 SSCでモデル化される熱輸送系概念図(例)

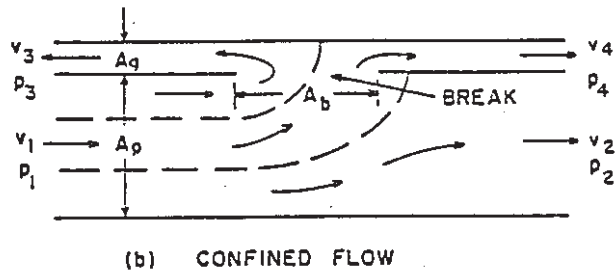
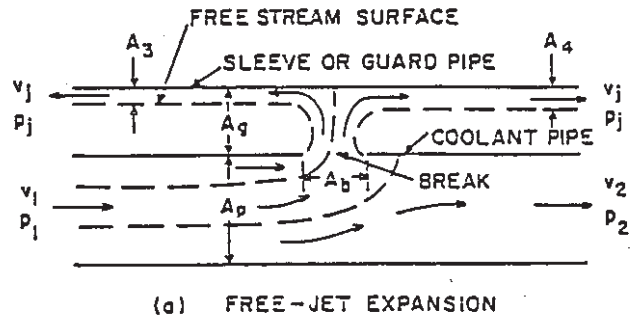


図5 配管破損モデル

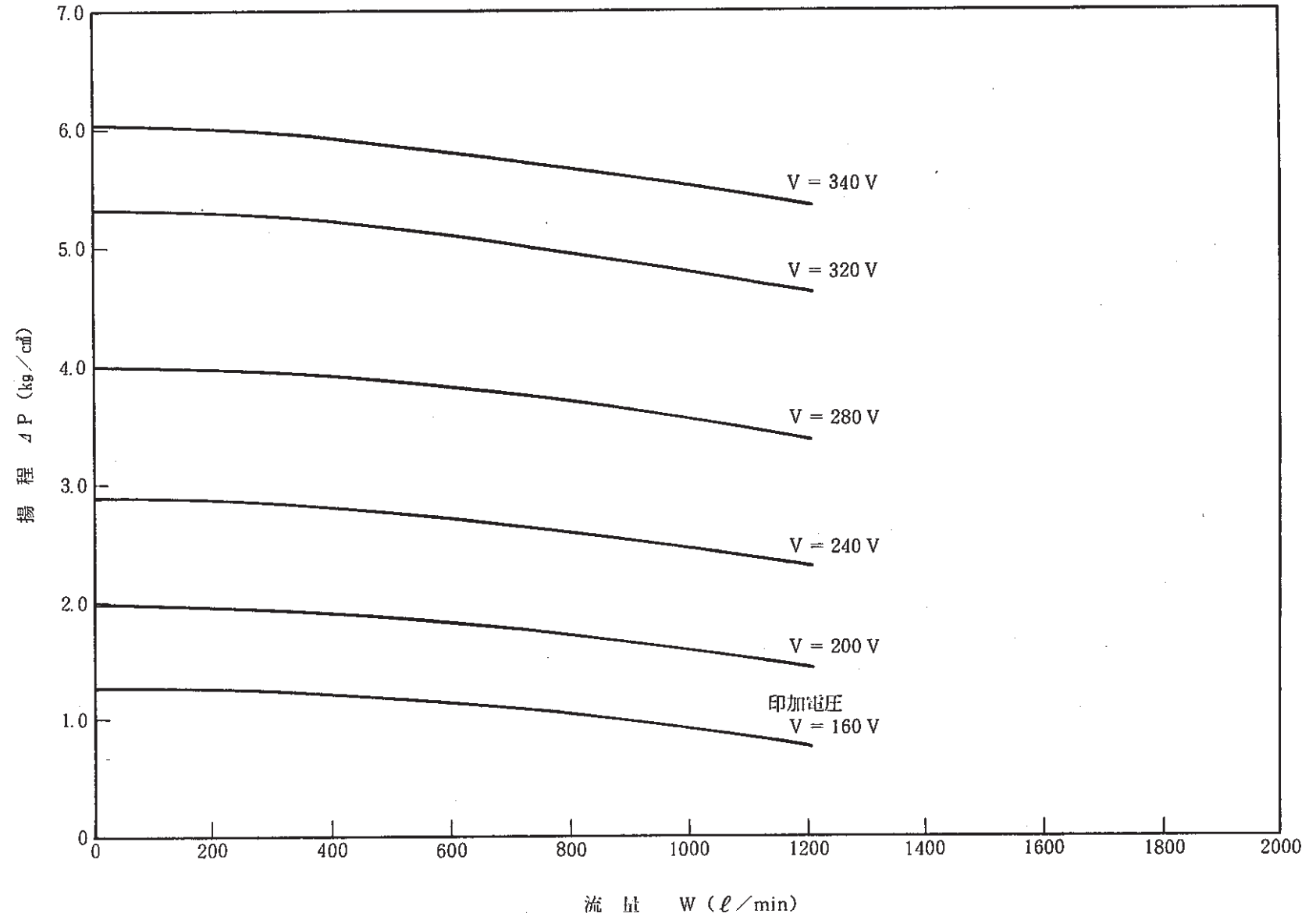


図6 主循環ポンプ特性曲線

4. D H B 沸騰試験による適用性解析

SSC-L によるプラントル過渡応答解析に先だち、実験データの得られている D H B 沸騰試験の解析を行い、コードの適用性評価を行った。

4.1 D H B 沸騰試験の概要

4.1.1 装置構成

崩壊熱沸騰試験は、高速炉の L O P I や崩壊熱除去系機能喪失事故 (L O H S) などを想定したときの燃料集合体でのナトリウムの沸騰による除熱能力を調べることを目的としている。

試験装置は、既設のミキシング試験装置をマザーループとし、ミキシング試験装置のクールドラグ配管とホットドラグ配管の間に、接続配管と所定の機能要求を満たすべく設計された試験部が配置された形となっている。試験部は、試験体、上部プレナム、下部プレナムから構成される。図 7 にミキシング試験装置および崩壊熱沸騰試験装置のフローシートを、図 8 に崩壊熱沸騰試験装置の鳥かみ図を示す。

試験体 (37 H) は、「もんじゅ」炉心燃料ピンと同一の外径、発熱長および発熱分布特性をもった 37 本のヒータピンによる模擬燃料集合体、六角ラッパ管容器、容器上部の流路形成多重管部等から構成される。主要諸元を表 1 に示す。また、試験体周辺には放熱を補償するためのガードヒータが設けられている。

上部プレナムは、膨張タンクとしての機能と、試験体出口での温度、圧力条件制御の機能がある。上部プレナムには沸騰した高温のナトリウムが流入するため、空気冷却器、電磁ポンプからなる補助冷却系を備えるとともに、胴部にはフィンが取付けられ空気冷却される。

下部プレナムは、試験体入口温度を一定に保つ機能を持ち、電気ヒータが備えられている。また、逆流試験のために補助冷却系が備えられている。

なお、本試験装置の詳細については別途報告書⁽¹³⁾を参照のこと。

4.1.2 試験条件

試験は、L O F (Loss Of Flow) 試験と L H F (Low Heat Flux) 試験とに分けて行われた。⁽³⁾

(1) L O F 試験

試験体入口流量 (およびバイパス流量) 、試験体熱出力およびガードヒータの制御により所定の定常状態を保持した後、電磁ポンプをトリップさせることで流量を喪失させた。試験装置の流動パスは、D H B 装置を用い試験体バイパス有、試験体バイパス無およびミキシング装置を用い試験体バイパス無の大きく分けて 3 種類とした。それぞれの条件は以下の通りである。

(a) D H B L O F 試験

・初期定常流速（試験体）	0.68～0.72m/s
・初期バイパス流量	0あるいは19.7～20.2ℓ/min
・入口温度	400℃
・平均熱流速	5.93～17.42W/cm ²

(b) ミキシング L O F 試験

・初期定常流速	3.65～3.70m/s
・入口温度	400℃
・平均熱流速	5.92～14.86W/cm ²

(2) L H F 試験

試験体入口流量，バイパス流量，試験体熱出力およびガードヒータの制御により所定の設定状態を保持後，試験体熱出力を準定常的に上昇させ沸騰に至らせる。

・初期設定流速	0.10～0.16m/s
・初期設定バイパス流量	18.5ℓ/min
・入口温度	400℃

なお，解析では，代表ケースとしてD H B L O F 試験のうち2ケースを取上げた。この2ケースの試験条件を表2に示す。

4.1.3 試験結果

解析で取上げた代表2ケースについて示す。

図9に，ケースⅠの結果のうち，試験体入口流速，入口温度および試験体発熱部上端中央部，周辺部および発熱中心中央部におけるナトリウム温度の変化を示す。このケースでは沸騰に至らなかった。試験体入口流量はポンプトリップ後急激に減少し，約10秒後に最小値0.04m/s（0.030kg/s）を示した後，自然循環力により漸増する。試験体ナトリウム温度は，発熱部上端中央部（TS-202BS）が最高値を示しており，約140秒後に約760℃となっている。発熱部上端周辺部（ラップ管近傍）（TW-402BS）は，周囲への放熱や，ラップ管の熱容量のために，温度が低くなっている。

図10にケースⅡの結果を示す。試験体流量は，約9秒後に最小値0.07m/s（0.054kg/s）を示した後漸増するが，沸騰が始まるとともにパルス的变化を示す。試験体ナトリウム温度は，最高値を示した発熱部上端中央（TS-202BS）が約70秒後に飽和温度に達し，約70秒間沸騰を継続する。発熱部上端周辺部（TW-402BS）は，放熱等ケースⅠの場合と同じ理由により，温度上昇が低く，最高値でも飽和温度に達していない。発熱中心中央部（TS-202BJ）は流量増加の影響を受け，約50秒後に最高値約750℃を示した後早くも減少に転じている。

4.2 SSC-L による解析

4.2.1 入力条件

SSC-L のコード上のモデルは、3章で述べたプラントル用に修正したものをを用いた。ただし、図7からわかるとおり、DHB試験ループは、以下の点でSSC-Lのモデルと異っている。

- (a) IHXがなく独立した2次系がない。
- (b) ポンプオーバーフローコラムがなく、1次系は、上部プレナムにしか自由液面がない。
- (c) 上部プレナムに補助冷却系がある。

そこで、次の条件によりDHB試験ループと等価と思われるループを考え、入力データのみの修正により解析を行った。

- (a) 2次系を付加する必要があるが、試験部より遅い過渡応答特性を持ち解析結果に影響をもたらさないことが望ましい。そこで幾何学的条件がプラントルと同一の2次系を仮定した。
- (b) 上部プレナム補助冷却系、配管からの放熱等主循環系からの除熱量と同一の交換熱量を持った仮想のIHXを組入れた。
- (c) この仮想IHXと上部プレナムを同一視できることが理想であるが、そのような取扱いはできないので、IHXを上部プレナムの下流側直近に配置した。
- (d) SSC-Lでは、ポンプ（ポンプタンク）および上部プレナムの2つの自由液面間で流量計算を行っているため、ポンプをIHXの直後に配置し、ポンプ（ポンプタンク自由液面）→配管系→試験体→上部プレナム（自由液面）の流動パスによって、試験装置の上部プレナム→循環系→試験体→上部プレナムというパスを模擬できるようにした。
- (e) ポンプおよび下部プレナムヒータ部分についてはそれぞれ配管要素として考え、圧損等を評価できるようにした。

図11にループの解析モデルを示す。

4.2.2 解析結果

ケースIおよびケースIIに対するポンプトリップ後360秒までの解析結果を図12および図13に示す。

ケースIでは、試験体流量の解析結果は試験結果と同様の傾向を示す。最低流量は、約13秒後に0.056kg/sと試験結果よりも80%程度多いが、その後の流量の回復状態がやや悪く、150秒後ではほぼ同程度となっている。試験体温度の解析結果は、発熱部上端に注目すると、試験結果よりも初期の試験体流量が大きいことから温度上昇率が低い形となっている。その後の温度上昇の様子はほぼ試験の発熱部上端周辺部での温度挙動と同じであるが、最高温度の出現は試験結果よりも遅く約200秒後に約760℃を示している。また、試験体上端では、発熱部上端から試験体上端間の構造材等の熱容量により、発熱部上端より温度が上がらず、ナトリウムの輸送遅れにより、約150秒後に温度ピークが現われている。

ケースⅡでも、試験体流量の解析結果は、試験結果と同様の傾向で示し、また、最低流量もケースⅠと同様、 0.075kg/s と試験結果より約40%多い。120秒後に沸騰が開始すると、大きく流量が変動するが、図中に点線で示したように、全体的には流量回復傾向を示している。

SSC-L では沸騰は均質流による簡易モデルを用いて解析しているため、沸騰が起ると、部分的に（軸方向分割ノード内で）ナトリウムの密度が急激に低下し、重量流量が減少するが、浮力効果により、その後急速に流量が増加する。沸騰が収まる場合はこれと逆の現象が起る。このような理由により沸騰時に試験体流量は大きく変動する。試験体ナトリウム温度は、ケースⅠと同じく発熱部上端では、試験体の発熱部上端周辺部の温度上昇の様子と類似している。120秒後に沸騰が開始されると試験結果よりもはかるに長く約140秒間沸騰が継続される。発熱中心中央部の温度挙動は、約90秒後にピーク温度約700℃となり以後下降してゆく解析結果となっている。

4.3 考 察

SSC-L では、集合体内部のサブチャネル間での温度分布は考慮せず温度は半径方向均一としているため、解析結果は実際の場合の半径方向平均値が現われるものと考えられる。このことを考慮すると、ケースⅠおよびⅡで解析による発熱部上端での温度挙動が、試験による発熱部上端周辺のそれに近いこと、およびケースⅡで解析による発熱部中央部の温度挙動が試験によるものより低めに推移していることは妥当である。よって、試験体ナトリウム流量および温度について解析結果と試験結果は定性的によく一致していると言える。

しかしながらいくつかの問題点もある。まず、流量の絶対値が一致せず、自然循環力による流量の回復挙動もあまり良く一致しているとは言えない。これは、試験結果が強制循環から自然循環へ推移する過程で得られたものであるが、SSC-L では、流動伝熱の相関式が強制循環の場合の式のみであり範囲を超えることや、上部プレナムが試験では、補助冷却系の運転により複雑な流動となっていることが予想されるが、⁽¹⁴⁾ SSC-Lの上部プレナムモデルではそのような現象は考えていないこと等、主にコードのモデルの限界によると考えられる。また、解析では沸騰が試験よりも長時間継続する。これは試験ではガードヒータにより放熱を抑えているものの、温度が上昇していくと放熱が無視できなくなることや、試験体から400℃に保たれている上部プレナムへ向って熱伝導により放熱していることが考えられるが、SSC-L では、集合体周辺への吸放熱および軸方向の熱伝導は考慮されておらず、流量増加による除熱量の増加しか考慮できないためと考えられる。

このように、解析結果と実験結果にくい違いがみられる原因は、主にSSC-Lのモデルが試験条件に合致していないことによると考えられる。また、SSC-Lはプラント全体の動特性解析コードであるので、本試験のように沸騰を含む集合体内の局所的な現象の解析には限界があると言える。

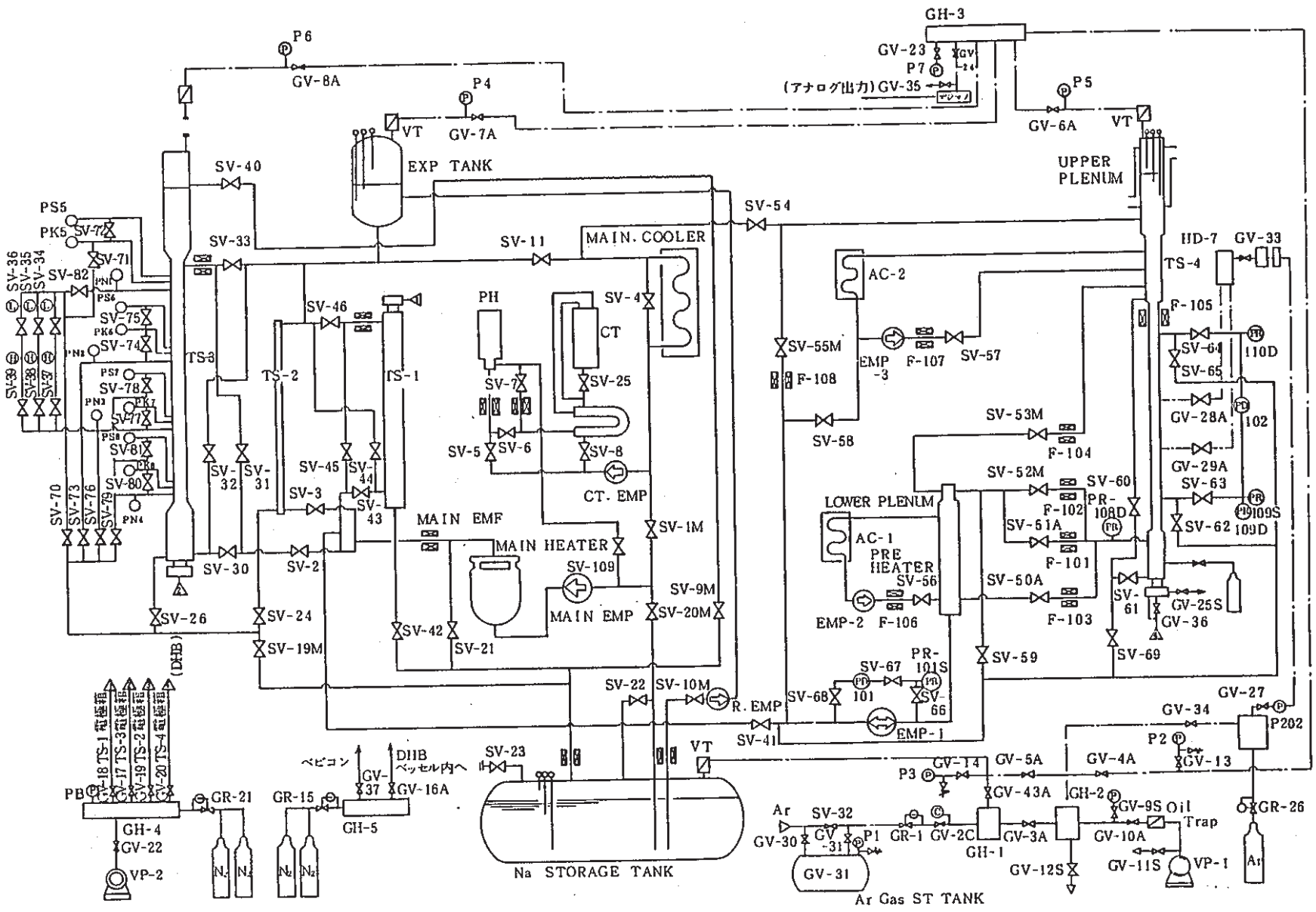


図7 ミキシング試験装置および崩壊熱沸騰試験装置フローシート (S59.10現在)

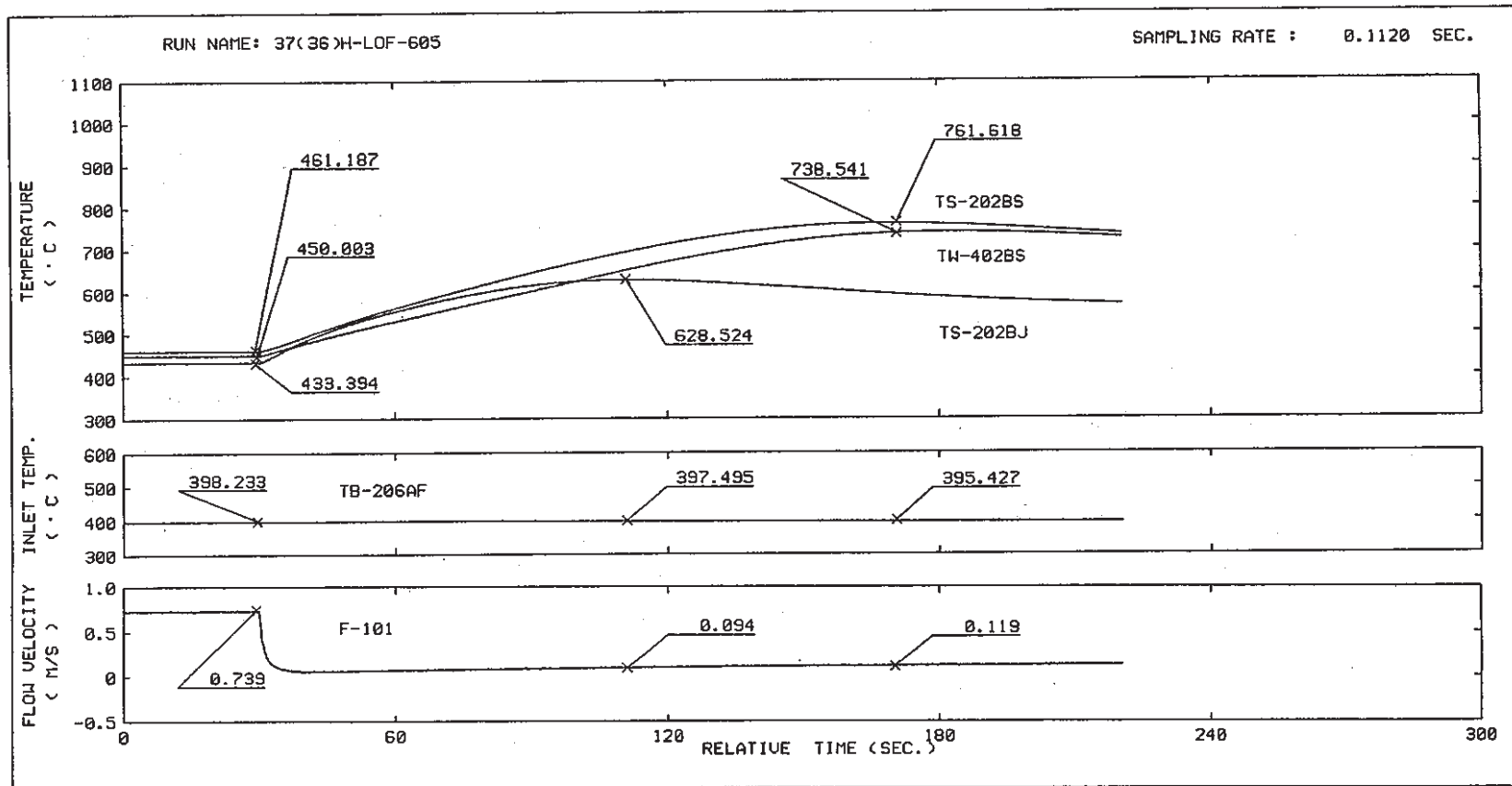


図9 試験部入口流量および試験体各部のナトリウム温度(ケースI)

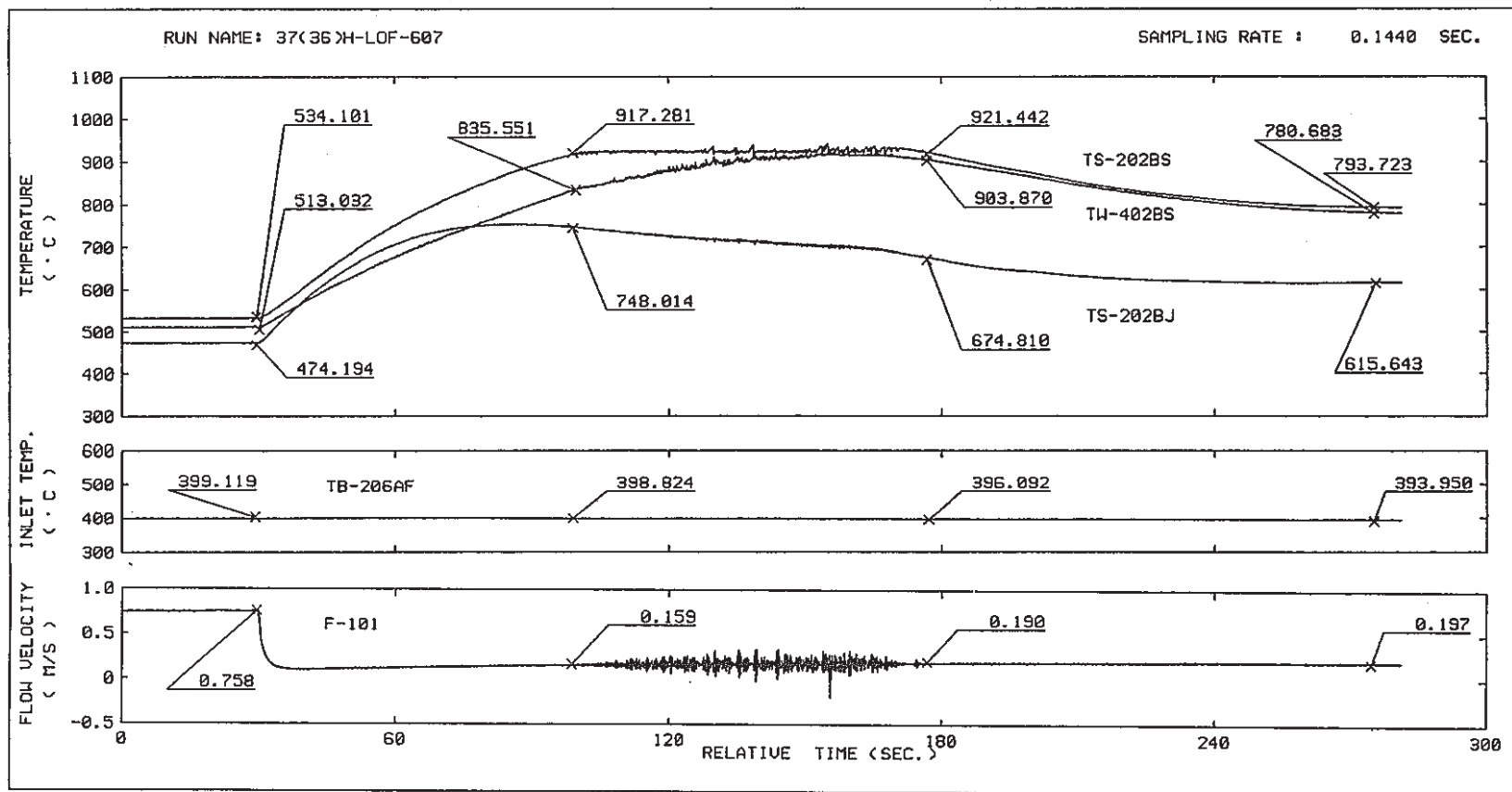


図10 試験部入口流量および試験体各部のナトリウム温度(ケースII)

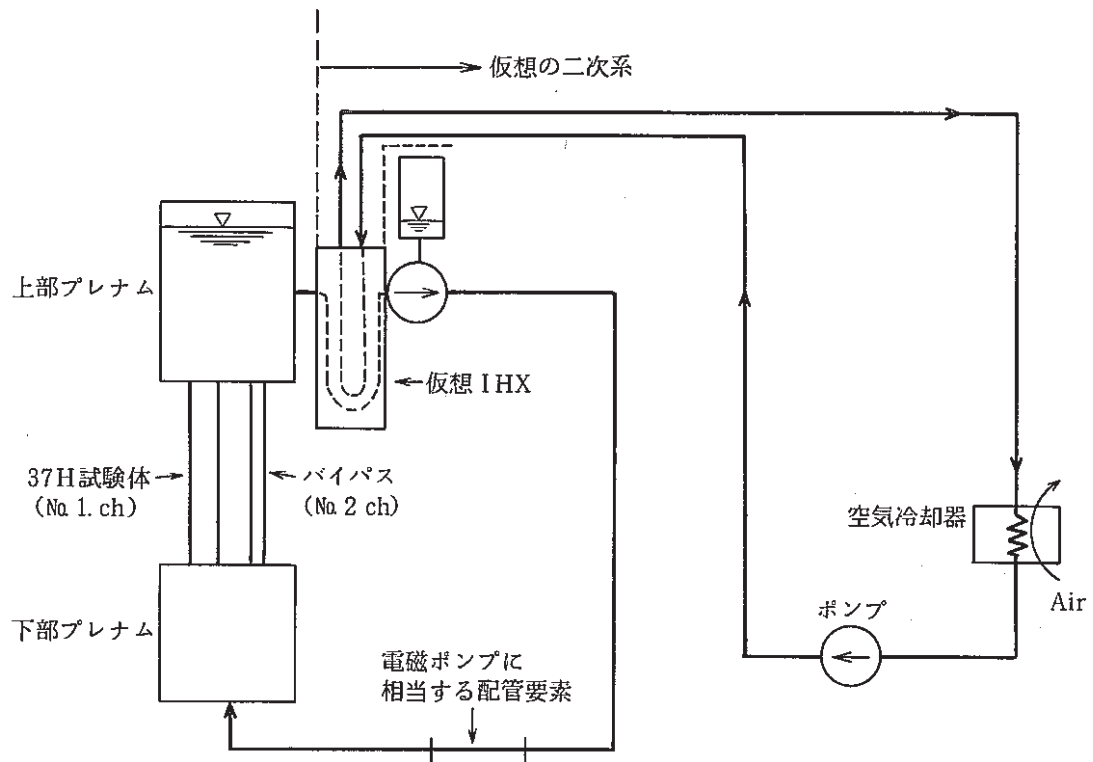


図11 DHB装置解析モデル

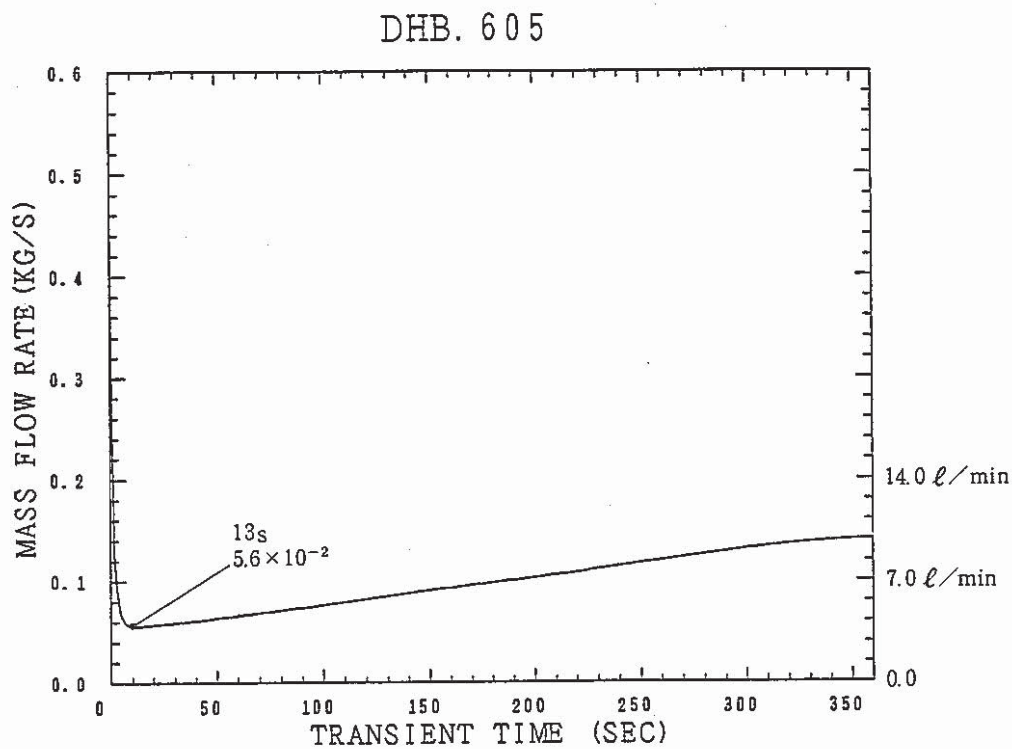
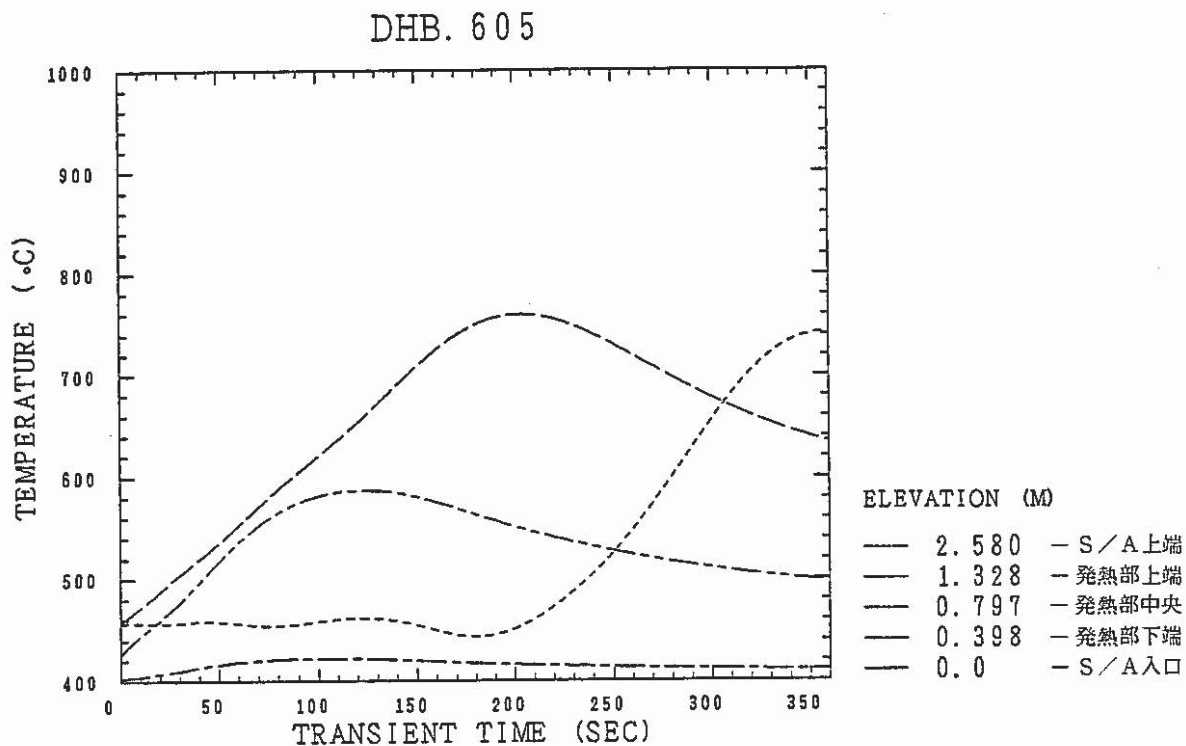


図12 試験部入口流量および試験体各部のナトリウム温度の解析結果 (ケース I)

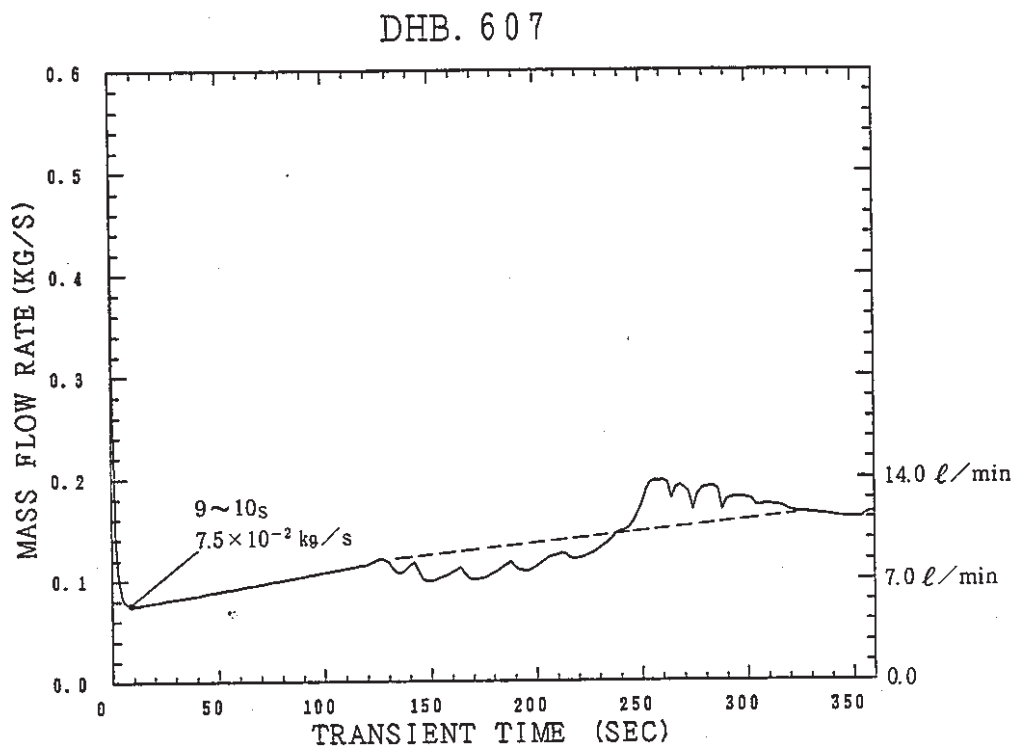
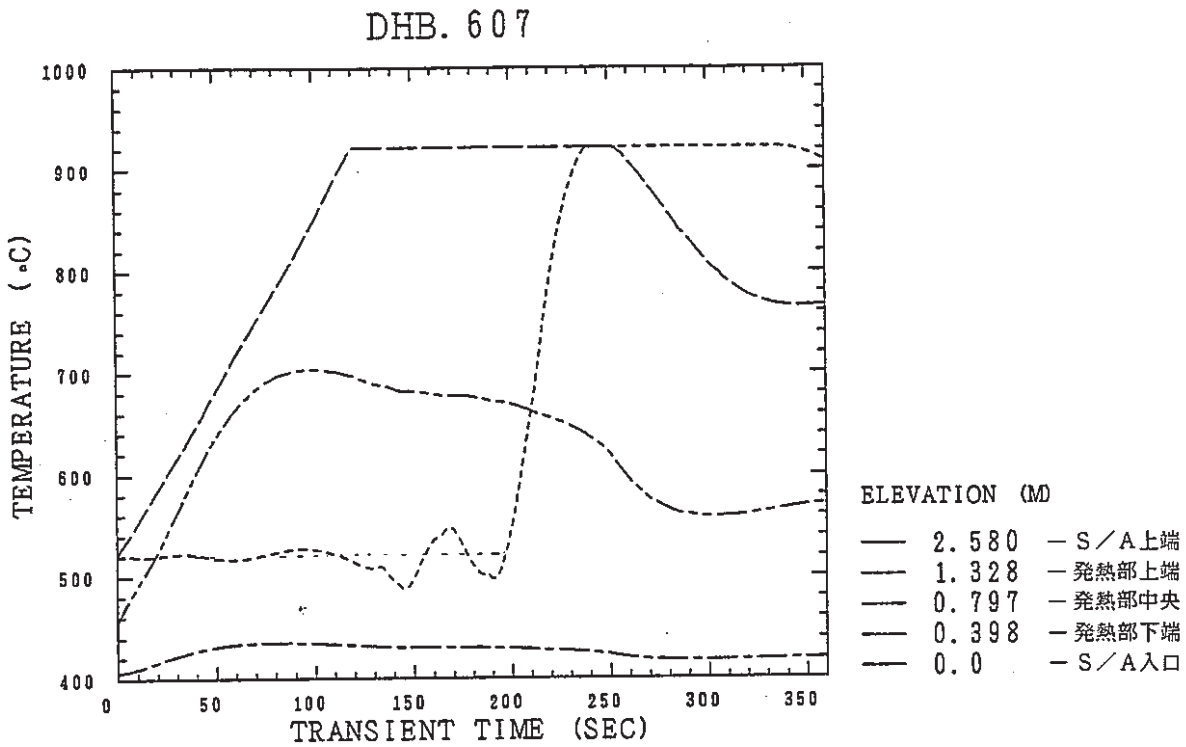


図13 試験部入口流量および試験体各部のナトリウム温度の解析結果 (ケース II)

表1 37H試験体仕様

Item	Unit	37H test section	Monju fuel subassembly
Number of pins		37	169
Diameter of pins	mm	6.5	6.5
Pin pitch	mm	7.87	7.87
Total length of pins	mm	2988	2818
Length of unheated entrance region	mm	398	398
Length of heated region	mm	930	930
Length of unheated downstream region	mm	1490	1490
Heat flux	W / cm ²	Ave. 166.1 Max. 200	Ave. 101.9 Max. 176.0
Heat flux shape		Chopped-cosine	Chopped-cosine
Material of heating element		Kantal + NCH	UO ₂ + PuO ₂
Material of clad		SUS 316	SUS 316
Thickness of clad	mm	0.47	0.47
Diameter of spacer wire	mm	1.32	1.32
Wrapping pitch of spacer wire	mm	307	307
Flow area	mm ²	921	3636
Equivalent hydraulic diameter	mm	3.40	3.22
Inner flat-to-flat distance of wrapper tube	mm	50.4	104.6
Thickness of wrapper tube	mm	10	3
Material of wrapper tube		Inconel 600	SUS 316
Gap between outer pin surface and wrapper tube	mm	1.50	1.34

表 2 D H B 沸騰試験解析ケースの試験条件

項目 ケース	試験初期流量 (l/min)	入口温度 ($^{\circ}C$)	試験体出力 (KW)	初期出口度 ($^{\circ}C$)	最高温度 ($^{\circ}C$)	最高温度到達時間 (s)
ケース I	38.9	400	40.53	451	758	139
ケース II	39.2	400	85.49	479	915 (sat.)	83

5. プラント過渡応答試験施設の過渡応答解析

5.1 入力条件

プラントルを用いた、1次・2次ピーク総合試験時に想定される標準的な流量カーブ、試験体出力、圧力等を図14に、この状態を実現させるために必要と考えられている標準的な配管破断系への放出流量および主循環ポンプのコストダウン特性⁽¹⁾を図15に示す。

SSC-L では、このような標準的ケースを解析するものとし、以下の条件を設定した。

- (a) 初期定常計算においては概念設計どおりのデータを用いる。
- (b) プラントルでは、下部プレナムに配管破断系が接続されているため、そのままではコード上炉容器破損の状態となる。そのため、下部プレナムは一つの配管として設定する。
- (c) 0.0秒で主循環ポンプトリップ、その後図16に示すような、印加電圧の変化を与え、ポンプのコストダウンおよび配管破断系弁閉後のポンプ再起動を模擬する。
- (d) 0.0秒で配管破断（配管破断系急速開放弁閉）、3.3秒で弁閉とする。
- (e) 配管破断系の圧損はパラメータとする。
- (f) バッファタンク初期圧力は $0 \text{ kg/cm G } (1.01325 \times 10^5 \text{ Pa})$ とする。
- (g) 4.0秒でマニュアルスクラム、以降は崩壊熱レベルの出力とする。

なお、本解析では、プラントルの概念設計が主循環系を中心に行われたことを考慮し、2次系の過渡応答やこれが影響を及ぼすいわゆる2次ピークの部分については言及しない。

5.2 解析結果

図17に試験体およびバイパス部を合計したナトリウム流量の時間変化を示す。解析時間は20秒とし、このときの配管破断系の圧損は、設計値の6倍とした。この条件での流量変化は、図14に示されている流量カーブをほぼ再現しており、0秒で配管破断系弁閉と同時に急激に流量が低下し、その後やや回復するが、再び減少していくことがわかる。なお、配管破断系弁閉後の流量変化は、ポンプの印加電圧を変化させることにより変更できる。

図18に配管破断系への放出流量の時間変化を示す。図15に比べると2倍程解析結果の方が大きい。

図19に上部プレナム出口流量の時間変化を示す。配管破断系の作動により系外へ流出する冷却材の加速力が働き、一時的に流量が増大するが、加速力の減少により上部プレナム出口流量も減少し、配管破断系弁閉後は、ポンプの駆動力に合致するようゆるやかに減少してゆく。このとき上部プレナムナトリウム液位は、図20に示すように、20秒間で約7.5cm低下する。配管破断系弁閉後も引き続き液位が低下するが、これはポンプオーバーフローカラムへのナトリウムの移動によるものである。なお図20に示されている高さは試験体上端を基準としたものである。

図21に試験体ナトリウム温度の時間変化を示す。配管破断系弁閉後急速に温度が上昇するが、4.0秒でスクラムがかかるため、最高温度890℃を示した後、すみやかに温度が下降する。なお、4.3項で述べたように図21に示された温度は、各高さにおける半径方向断面の平均値であるこ

とを考慮すると、最高温度部では、一部沸騰が生じることも予想される。

5.3 考 察

本ケースでは、配管破断直後の数秒のトランジェント（いわゆる1次ピーク）を扱っており、また、ループは強制循環の状態にあるので、4章で問題となったコード内での各種相関式の問題や放熱、軸方向への熱伝導等による影響は無視できるものと考えられる。したがって、試験体温度変化や流量変化は、図23に示された主循環ポンプ印加電圧カーブおよび配管破断系に設計値の6倍の圧損特性を仮定した場合、定性的にも定量的にも実機に近いものと考えられる。

配管破断系の圧損と配管破断系への放出流量が解析結果と設計値とでくい違っている原因は、両者の解析モデルの違いによるものと考えられる。設計値は、主循環ポンプコストダウンカーブを配管破断系を作動させない時の予想値で代用している。このため、配管破断直後の上部プレナムおよびポンプオーバーフローカラムからナトリウムが補給される効果は無視した形となる。したがって、配管破断系の設計は、全面的に見直す必要がある。また、現在のプラントの構成では、5.1 (b)で述べたように、配管破断系を作動させると炉容器破損と同等になり、実機の模擬という点で問題となる可能性がある。そのため、配管破断系は下部プレナム入口配管に接続し、破断口と下部プレナムの間に所定の圧損を持たせうる構成にすることが望ましい。この場合SSC-Lの配管破損モデルとの整合性も良くなるので、解析結果の信ぴょう性も高くなるものと予想される。

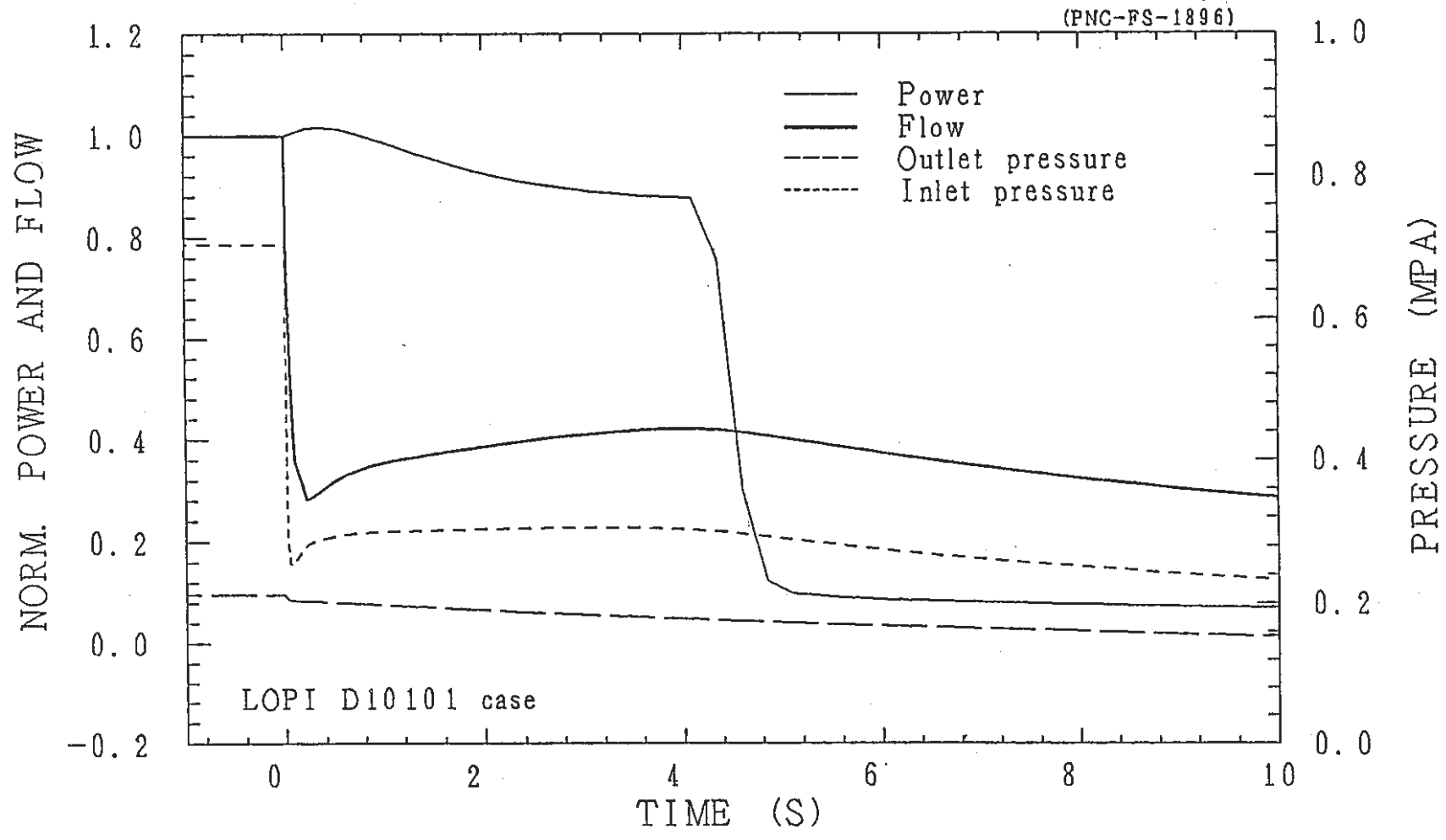


図14 トランジェットカーブ標準ケース

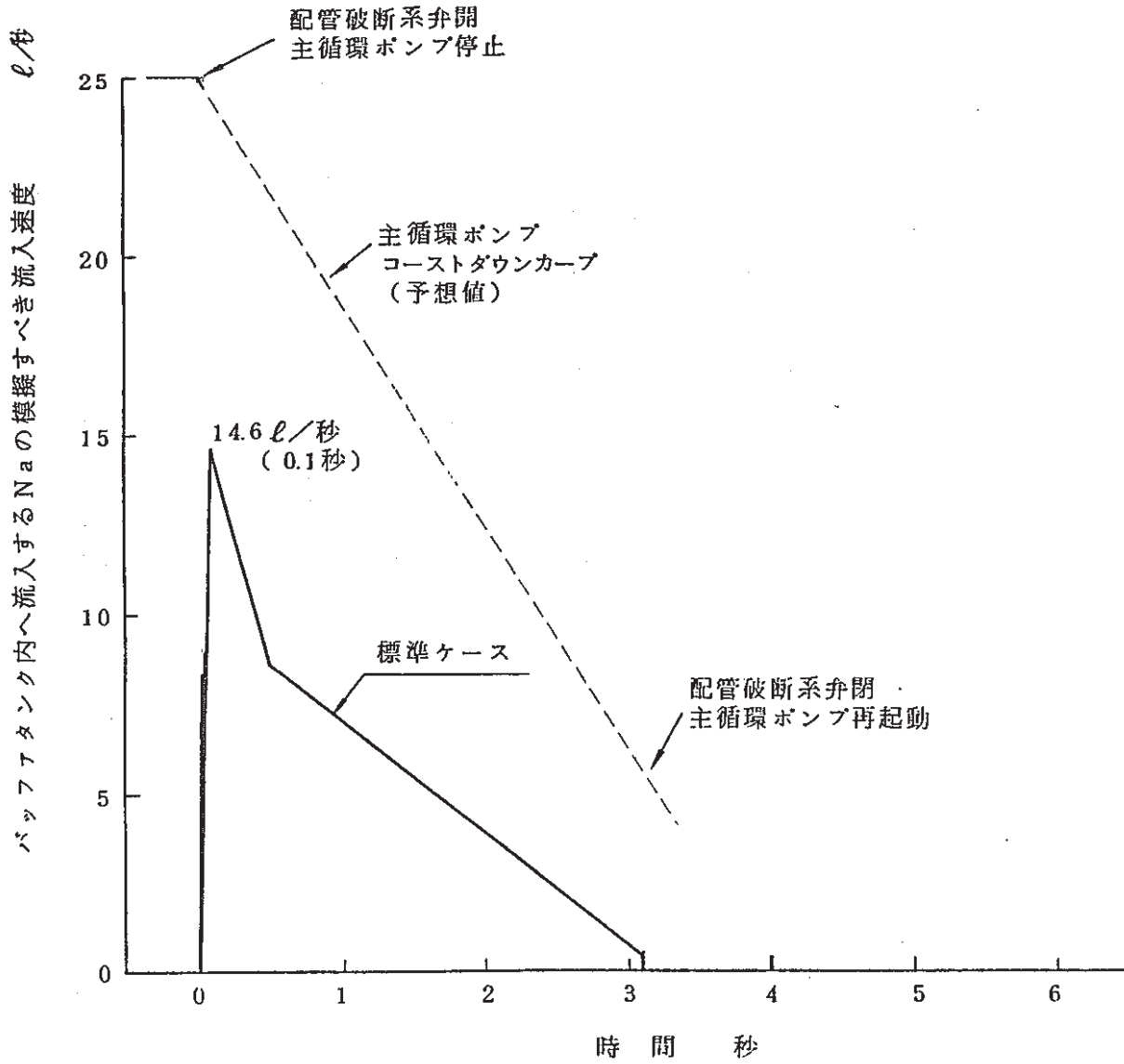


図15 配管破断系への放出流量

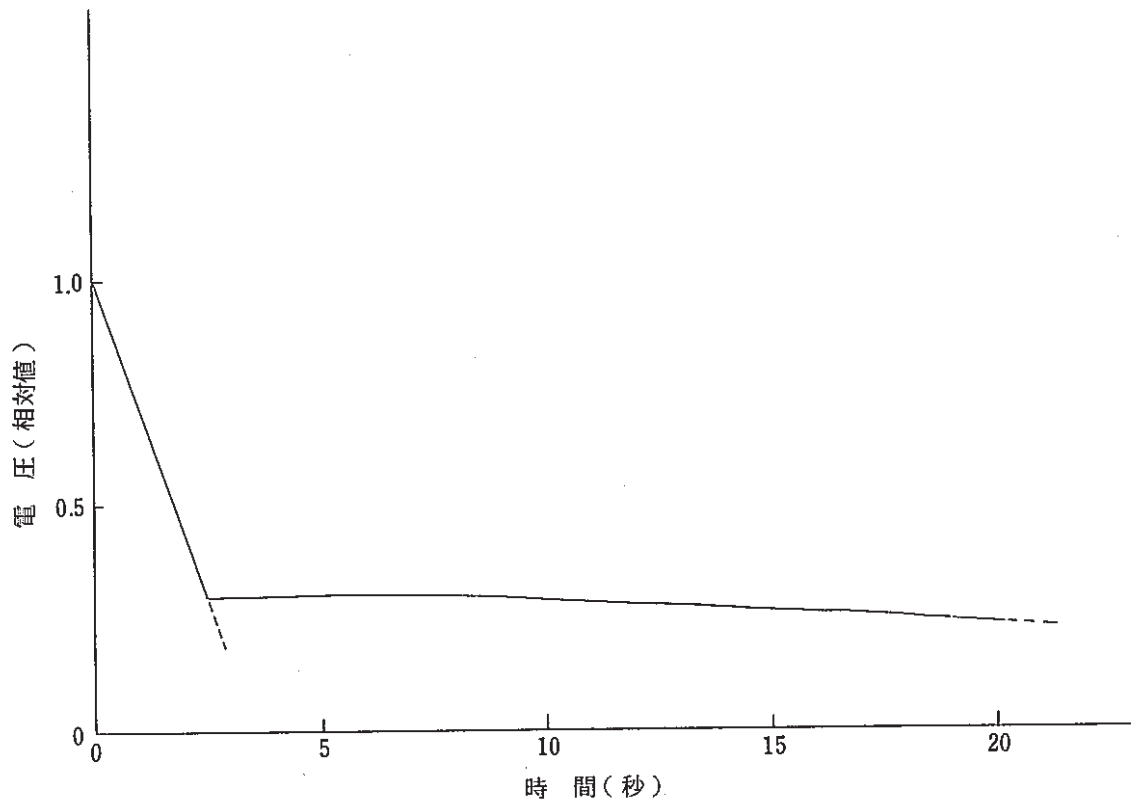


図16 解析に用いた主循環ポンプ印加電圧過渡変化

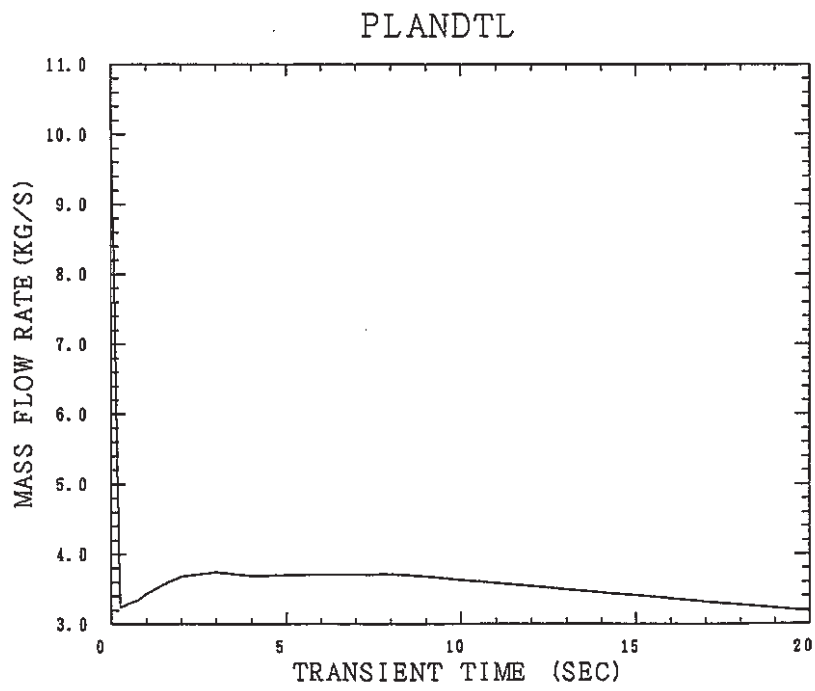


図17 試験部入口ナトリウム流量

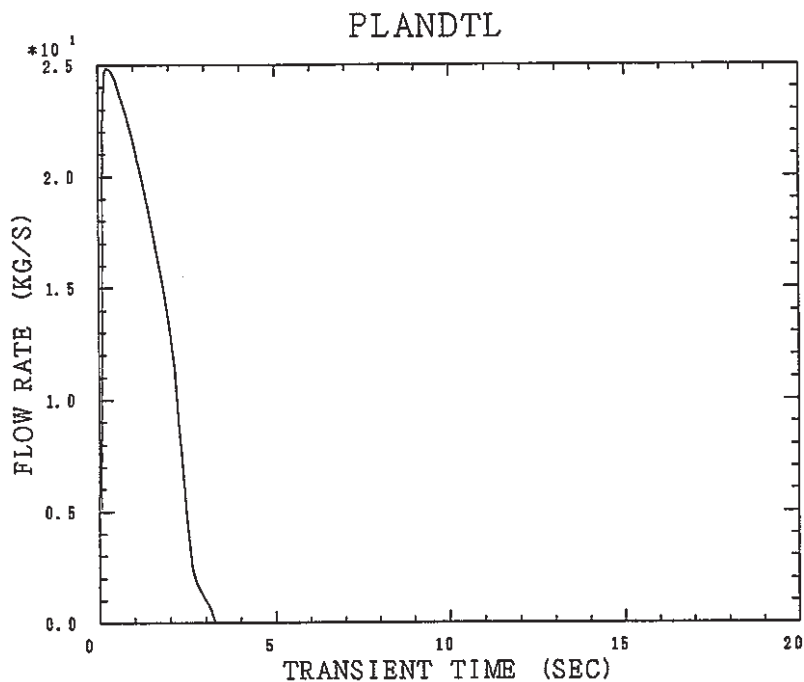


図18 放出流量

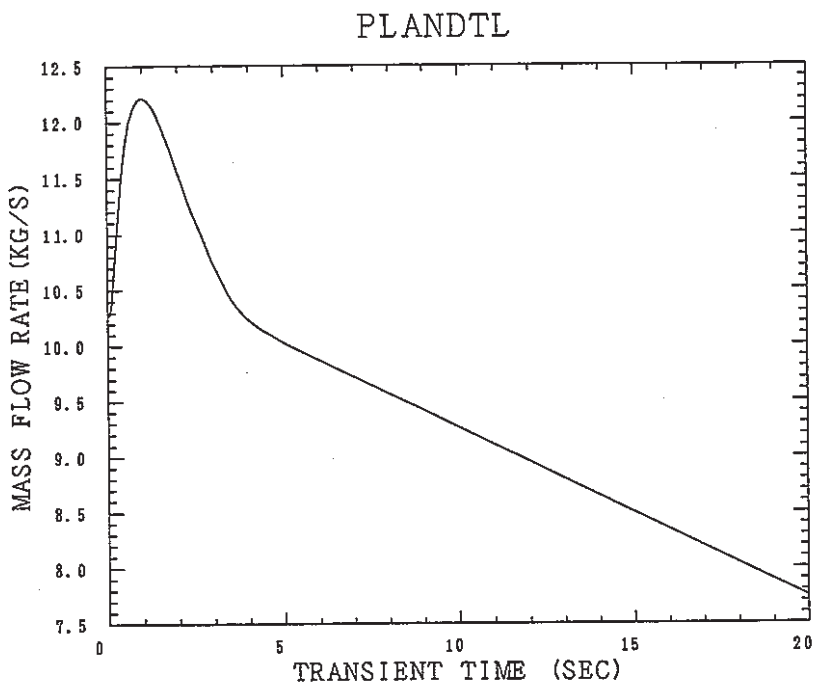


図19 上部プレナム出口流量

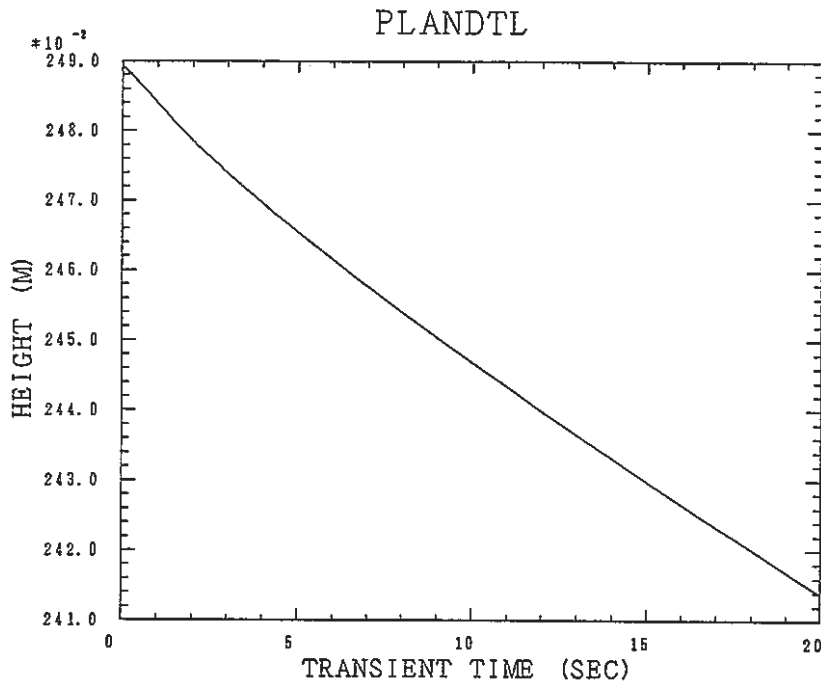


図20 上部プレナムナトリウム液位

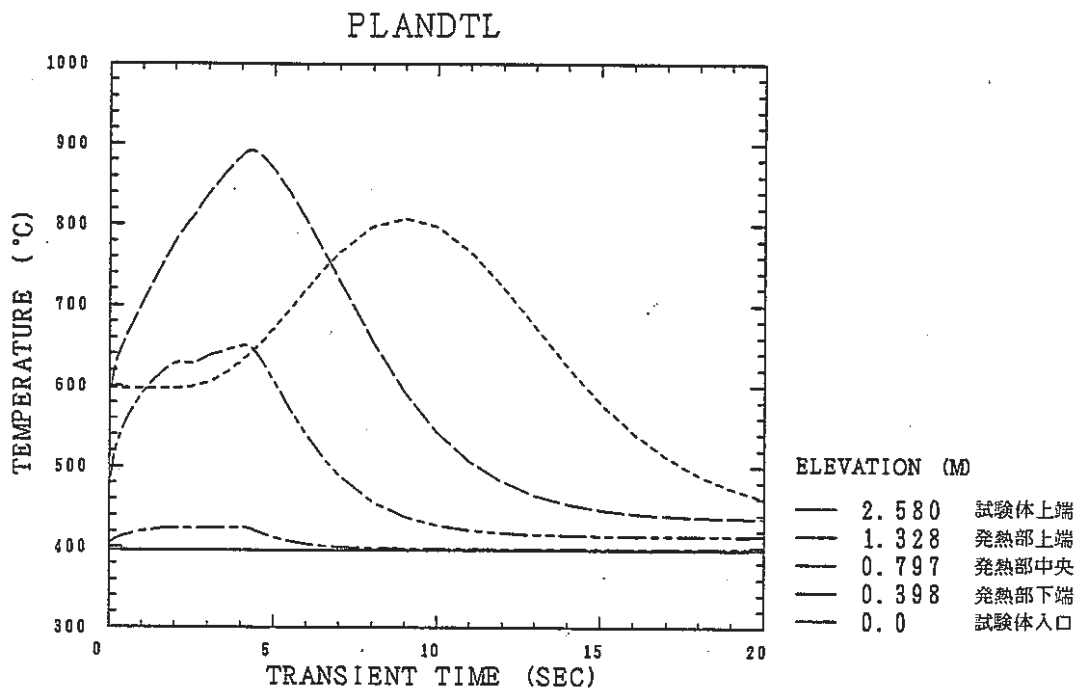


図21 試験体各部のナトリウム温度

6. ま と め

崩壊熱沸騰試験のうち代表ケースについてSSC-Lを用いて解析し、これによって得られた知見を基にプラントルの標準的な過渡応答ケースについて解析した。その結果、崩壊熱沸騰試験解析では、SSC-Lのモデルの限界に起因するくい違いが見られるものの、定性的な結果は、解析と試験ではほぼ一致することがわかった。プラントルの過渡応答解析では、得られた結果は実機の過渡応答に近いものと判断でき、1次ピークの過渡変化に対するループ設計はほぼ妥当と考えられる。しかし、配管破断系については機器・配管仕様および系統構成上問題があり、今後詳細設計に当たって検討の必要なことがわかった。

謝 辞

本研究実施に当り，解析モデルの検討や解析作業上貴重な助言をいただくなど全面的に協力して下さった高速増殖炉工学室の山口彰研究員ならびに吉川信治研究員，崩壊熱沸騰試験実施に協力いただいた同室磯崎三喜男氏，中嶋健次氏には，ここに深く感謝するものであります。

参 考 文 献

- (1) K. Yamaguchi and K. Haga, "Low-Heat-Flux Sodium Boiling Experiment with a 37-pin Bundle (37F)", PNC SN941 83-129, Aug. 1983
- (2) K. Yamaguchi, et al. "Sodium Boiling Experiments at Decay Power Levels (4) Summary Assessment of the Low-Flow and Low-Heat-Flux Sodium Boiling Experiments at PNC", PNC SN941 85-56, Mar. 1985
- (3) 山口勝久他, 「崩壊熱沸騰試験(5) 自然循環沸騰時のループ・集合体熱過渡応答」(予定)
- (4) 高速炉工学室編, 「プラント過渡応答試験施設 建設計画」, PNC N908 84-03, 1984年5月
- (5) W. C. Horak, et al. "Validation of SSC Using the FFTF Natural-Circulation Tests", BNL-NUREG-31437, Dec. 1982
- (6) W. C. Horak, et al., "Long-Term Post-Test Simulation of the FFTF Natural-Circulation Tests Using SSC", Trans. Am. Nucl. Soc., 46, pp798 (1984)
- (7) J. G. Guppy, et al., "Independent Assessment of the Natural-Circulation Capability of the Heterogeneous Core CRBR", Trans. Am. Nucl. Soc., 45, pp416 (1983)
- (8) 吉川信治, 井口達郎, 「SSC-L の適用解析 (I) もんじゅ一次系自然循環解析」, PNC N941 84-26, 1984年2月
- (9) 吉川信治他, 「SSC-L による常陽自然循環試験の解析 集合体出口冷却材挙動に関するパラメータ・サーベイ」, PNC SN941 84-134, 1984年10月
- (10) 山口彰, ニノ方寿, 「高速増殖炉各種事象解析に対するSSC-L の適用性評価」, PNC SN941 85-62, 1985年3月
- (11) 川崎重工業(株), 「崩壊熱沸騰試験装置設計 概念設計書」, PNC SJ913 84-01, 1983年12月
- (12) J. G. Guppy, et al., "Super System Code (SSC, Rev. 2) An Advanced Thermohydraulic Simulation Code for Transients in LMFBRs", BNL-NUREG-51650, April 1983
- (13) 磯崎正他, 「崩壊熱沸騰試験(1) 試験装置の概要」, PNC SN941 85-54, 1985年3月
- (14) 山口勝久他, 「崩壊熱沸騰試験(2) 試運転および熱流動解析による装置機能評価」, PNC SN941 85-36, 1985年2月