

原子炉冷却系総合試験施設のSG流動安定性評価

—BOSTコードの改修—

1999年1月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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ください。

〒319-1194 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 319-1194,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

原子炉冷却系総合試験施設のSG流動安定性評価

— BOSTコードの改修 —

飯塚 透*、長沢 一嘉**、西村 元彦*、上出 英樹*

要 旨

原子炉冷却系総合試験施設の蒸気発生器（SG）試験体の流動安定性を検討するため、水側流動安定性解析コード「BOST」を用いて解析を実施した。しかし、SG試験体の定格運転条件はコードの使用実績範囲を越える高い圧力条件であるため、BOSTコードの解析結果は他の解析コードの結果や従来知見に比べて著しく安定側の評価結果となり、Na/水流量比を経験的に不安定が予想される程度まで上昇させても、不安定が発生しないという評価結果となった。

そこで、BOSTコードの改修を実施したので、その状況を報告する。

現在までに、いくつかの要改修点が発見され、改修を実施したが、高圧条件において著しく安定となる原因は突き止められておらず、今後以下の検討が必要と考えられる。

- ・コーディング内容の確認
- ・メッシュ数の拡張
- ・出力機能の充実

しかし、BOSTコードは1975年に作成されたコードであり、その後改修を重ねてはいるが、比較的簡単な基礎式を多数のメッシュで解く現代の計算コードと比較すると、コーディング内容が複雑で改修には多大な労力が必要になる。このため、給水圧力が18MPaを越えるような高圧条件のSGを解析対象とする場合には、最新の知見を取り入れた流動安定性解析コードを作成することを今後検討するべきであると考えられる。

* 核燃料サイクル開発機構、大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部
原子炉工学グループ

** 原子力システム（株）

Instability evaluation of steam generator in a large scale sodium test facility of fast reactors
- Modification of BOST code -

T. Iituka,* K. Nagasawa,** M. Nisimura,* and H. Kamide*

ABSTRACT

Instability analysis was carried out using BOST code for a steam generator in a large scale sodium test facility of fast reactors. However, it was found that BOST code gave stable characteristics under the conditions of higher pressure in water-steam system than MONJU conditions, even if the flow ratio of sodium to water was increased as expected to give unstable condition.

Here, modification of BOST code was considered and we found some points to be modified. However, main reasons of stable calculation were not resolved. In this report, the current status of BOST code was summarized especially for the stable calculation under the higher pressure condition for further modification and a new code based on current knowledge and coding technique.

* Reactor Engineering Group, Sodium and Safety Engineering Division, O-arai. Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

** Nuclear Engineering System Incorporation

目 次

序論	1
1. 蒸気発生器試験体の流動安定性解析結果	1
1.1 BOSTコードの概要	1
1.2 BOSTコードによる解析結果	1
1.3 CRESCENDOコードによる解析結果	2
2. BOSTコードの実績	2
3. BOSTコードの改修内容	3
4. BOSTコードの調査内容	4
結論	6
参考文献	7

表リスト

表1.2-1	実機及び試験体の蒸気発生器主要目	8
表1.2-2	流動安定性解析条件	9
表1.2-3	水側圧力を変化させた場合の安定限界	9
表1.2-4	BOSTコードサーベイ解析結果一覧	10
表4-1	BOST変数表	14
表4-2	静特性解析条件（動特性解析との相違点）	21
表4-3	過熱蒸気状態方程式と蒸気表の比較	22

図リスト

図1.2-1	蒸気発生器試験体構造図	23
図1.2-2	静特性解析結果 ($G_{Na}/G_w=9.5$: 定格)	24
図1.2-3	動特性解析結果 ($G_{Na}/G_w=9.5$: 定格)	25
図1.2-4	静特性解析結果 ($G_{Na}/G_w=17.2$)	26
図1.2-5	動特性解析結果 ($G_{Na}/G_w=17.2$)	27
図4-1	サブルーチン構成図	28
図4-2	コード内の主要な変数と領域の対応	29
図4-3	使用説明書で使われる主要な記号と領域の対応	30
図4-4	BOSTとPOPAL-6の静特性解析結果の比較	31
図4-5	BOSTとPOPAL-6の静特性解析結果の比較 (給水圧力151 kg/cm ² a)	32

序論

原子炉冷却系総合試験施設の検討の中で、蒸気発生器試験体の水側流動安定性について、予備的評価を行うことを計画した。ここでは水側流動安定性解析コード「BOST」を用いることとしたが、評価の過程でコードの適用性について課題が生じた。

明らかとなった課題は、試験体の定格運転条件に相当する水側圧力（もんじゅでの圧力より高い）において、従来の知見に比べて著しく安定な結果を与えることである。そこで、コードの改修を視野に入れた検討を行った。

本報告では、コードの改修に関する検討の結果をまとめ、今後の改修あるいは、最新の知見をいれたコードの作成に資する。

1. 蒸気発生器試験体の流動安定性解析結果

1.1 BOSTコードの概要

BOSTコード[1][2]は、Na加熱貫流型蒸気発生器を対象とした時間領域安定性解析コードである。

本作業では、参考文献[2]に示されるbottom-up計算対応版を使用している。これは、1995年7月に実施された「もんじゅ安定性についての検討」において使用されたソースと同じもので、ヘリカルコイル型蒸気発生器試験の過去の解析結果と最もよく一致したことから選定されている。

1.2 BOSTコードによる解析結果

解析対象は、参考文献[3]に示される原子炉冷却系総合試験施設の蒸気発生器(SG)である。SGの主要目を表1.2-1に、他の解析条件を表1.2-2に示す。構造図を図1.2-1に示す。解析では入口上昇管及び出口上昇管(Na中のみ)での収熱を考慮するため、入口上昇管及び出口上昇管(Na中のみ)をヘリカルコイル部に含めている。解析に使用したBOSTコードの入力データを添付資料1に示す。

図1.2-2及び図1.2-3に、定格運転条件(Na/水流量比=9.5)における静特性解析結果及び動特性解析結果を示す。なお、定格給水流量は1533kg/m².s(87ton/hr)である。解析による評価結果は安定である。

図1.2-4及び図1.2-5に、定格運転条件からNa流量を増加させNa/水流量比=17.2とした場合の静特性解析結果及び動特性解析結果を示す。解析による評価結果は安定である。

定格運転の圧力条件(給水圧力18.0MPa(184kg/cm²a))においては、Na流量を最大

260%増加または給水流量を最大50%減少させることによりNa/水流量比を34.5まで増加させた場合でも常に安定側の評価結果となり、不安定現象は現れなかった。

一方、定格運転条件の水側圧力を変化させた場合の安定限界を表1.2-3に示す。解析ではNa流量を増加させる操作による安定限界を把握している。水側圧力が上昇した場合、急激に安定限界となるNa/水流量比が増加し、給水圧力が17.7MPa(180kg/cm²a)以上では不安定現象が現れなかった。

今回の検討で実施したBOSTコードによるサーベイ解析結果の一覧を表1.2-4に示す。前述の水側圧力の影響以外の特記事項として、予熱部及び沸騰部のメッシュ数を減少させると不安定側の評価結果になり、過熱部のメッシュ数を減少させると安定側の評価結果になる傾向がある(No.11、15、16、30~34のサーベイ結果参照)。原因は調査中である。

1.3 CRESCENDOコードによる解析結果

原子炉冷却系総合試験施設のSGは、実証炉SG[4]の部分モデルであるため、流動安定性については実証炉SGと同等と考えられる。そこで、原子炉冷却系総合試験計画の一環として実施した実機評価[5]に示される、CRESCENDOコードによる実証炉SGの安定限界評価結果について添付資料2に示す。この評価で対象としているSGは、前述のBOSTコードによる解析条件に比べてコイル傾斜角等が異なるが、伝熱管寸法、圧力、温度、流量等の条件は同等であり、安定限界もほぼ同等になると考えられる。

CRESCENDOコードによる解析結果によれば、100%出力(蒸気圧力17.3MPa(176kg/cm²a))、30%出力(蒸気圧力16.8MPa(171kg/cm²a))ともに安定限界におけるNa/水流量比は約10.5であり、前述のBOSTコードによる解析結果とは明確な相違がある。

2. BOSTコードの実績

BOSTコードは、これまでに、ITR実験データ、1MWSG実験データ、50MWSG1号機実験データ及び50MWSG2号機実験データを用いた検証[6]がなされている。その結果、安定限界でのNa/水流量比を比較すると、22ケースの解析結果の内20ケースが実験値に対してほぼ±10%の範囲内に入っており、BOSTコードが±10%の範囲内で不安定現象を予測し得ると結論付けている。しかし、安定限界でのNa/水流量比がほぼ±10%の範囲内に入っているデータは蒸気圧力が14.5MPa(148kg/cm²a)以下であり、検証対象外としている蒸気圧力が16.1MPa(164kg/cm²a)及び16.6MPa(169kg/cm²a)である高圧の2ケースについては誤差が大きくなっている。参考文献[6]に示される関連の記

載を添付資料3に示す。評価ケース数が2ケースと少ないため、更にデータを蓄積する必要があるが、BOSTコードは高圧（15.7MPa(160kg/cm²a)程度以上）条件で非安全側（安定限界のNa/水流量比が過大となる）の評価結果を出している。

3. BOSTコードの改修内容

上記より、BOSTコードの高圧条件（15.7MPa(160kg/cm²a)程度以上）における信頼性を高めるため、水側圧力の上昇により影響を受ける部分を中心に調査し、精度が低い等の問題が有る部分について改修を実施した。改修内容を以下に示す。ただし、今回の改修により温度分布等の精度は上がったものの、高圧条件において過度に安定側の評価結果になる点については改善が見られておらず、引き続き検討が必要である。

(1) 物性値計算に蒸気表を使用

BOSTコードでは、水・蒸気の物性値を一部多項式によりコード内で算出しており、高圧条件において蒸気表との差異が拡大していた。そこで、すべての水・蒸気の物性値計算を蒸気表⁷⁾で行うよう改修した。

改修FUNCTIONを以下に示す。

WENT、WTEMP、WCPS、STMENT、STMTEM、STMSPH、SATTF、
SATHF、SATHG、DENSF、DENSE

(2) 物性値の圧力に関する微分計算式の改修

BOSTコードでは、飽和水の密度、飽和水のエンタルピ、及び飽和蒸気のエンタルピの圧力に関する微分値を多項式によりコード内で算出しているが、高圧条件において蒸気表に基づいて算出した場合との差異が拡大していた。そこで、蒸気表に基づいて物性値の多項式を設定し、圧力に関する微分式に展開して上記多項式と入れ替えた。

改修FUNCTIONを以下に示す。

RENSF、RATHF、RATHG

(3) 飽和水表面張力算出式の改修

水側核沸騰部の熱伝達率の計算にRohsenowの式を用いており、飽和水の表面張力が必要となる。飽和水の表面張力は1次式によりコード内で算出していたが、高圧条件において「流体の熱物性値集」（1983）との差異が拡大していた。そこで、「流体の熱物性値集」（1983）に基づき飽和水表面張力の4次式を設定し、上記1次式と入れ替えた。

改修SUBROUTINを以下に示す。

LOAN

(4) Maltinelli-Nelsonの二相流増倍係数の改修（未完成、影響が小さいことを確認）

BOSTコードでは、Maltinelli-Nelsonの二相流増倍係数を複雑な多項式により算出しているが、POPAI-6コード使用説明書^[8]の記載値に比べて高圧条件で低めの値となっていた。

現段階では、BOSTコードにおけるMaltinelli-Nelsonの二相流増倍係数の算出過程を十分に調査していないため、最終的な改修には至っていない。ただし、簡易的に二相流増倍係数をPOPAIコード使用説明書^[8]の記載値に増加させた場合でも、動特性解析結果に大きな影響がないことを確認している。

関係するSUBROUTINを以下に示す。

PRESG1

(5) 過熱部蒸気流量の計算で圧力のZ方向依存性を考慮

BOSTコードでは、動特性計算の過熱部蒸気流量の算出において圧力のZ方向依存性を無視している。これは、圧力波の影響を除くためとされている。そこで、圧力のZ方向依存性を考慮した場合の算出式を導出し、コードに組み込んだ。

参考文献^[1]の関連部分及び式の導出を添付資料4に示す。

改修SUBROUTINまたはFUNCTIONを以下に示す。

DERIV1

4. BOSTコードの調査内容

前述の改修内容以外にもBOSTコードについて調査を実施した。現段階での調査内容を以下に示す。

(1) サブルーチン構成

BOSTコードのサブルーチン構成を図4-1に示す。

(2) 変数表

調査した範囲の変数について、意味、単位及び変数値を設定している行番号を表4-1に示す。また、主要な変数と領域の対応を図4-2に、使用説明書で使われている主要な記号と領域の対応を図4-3に示す。

(3) 静特性解析結果のPOPAI-6コードとの比較

BOSTコードの静特性解析結果について熱交換器静特性計算コードPOPAL-6の解析結果と比較した。

解析対象は、1.2項に示される原子炉冷却系総合試験施設のSGである。解析条件を表4-2に示す。これは、別途実施したSG空間温度分布解析の条件と一致しており、1.2項に示すBOSTコードによる解析とは相違がある。解析に使用したBOSTコード及びPOPAL-6コードの入力データを添付資料1に示す。

定格運転条件及び給水流量を1/2とした場合の解析結果を図4-4に示す。また、給水圧力を14.8MPa(151kg/cm²a)に低下させた場合の解析結果を図4-5に示す。全ての条件でBOSTコードの解析結果とPOPAL-6コードの解析結果は良く一致している。

(4) 過熱蒸気の状態方程式の精度

BOSTコードでは過熱蒸気の状態方程式として以下の式を用いている。

$$V = \frac{1}{\rho_s} = \frac{K}{P}(H_s - H^*)$$

ここで、 $H^* = 459.2 \text{ kcal/kg}$ 、 $K = 9.579 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^3/\text{kcal}\cdot\text{cm}^2$

上記状態方程式による計算結果と蒸気表の値を比較した結果を表4-3に示す。両者は高圧条件においても良く一致しており、相異は1%程度である。

(5) 質量流量計算に関する調査

質量流量の計算についてプログラム内容を調査した。参考文献[1]に示される式との対応を以下に示す。

- ・ 沸騰開始点の圧力を計算する(3.59)式 → 514行「PEIT(I)=……」の式
 - ・ 過熱部の質量流速を計算する(3.69)式 → 426行「GSAT(K,I)=……」の式
- プログラムの意味を記載したメモを添付資料5に示す。

結論

原子炉冷却系総合試験施設の蒸気発生器 (SG) 試験体の流動安定性を検討するため、水側流動安定性解析コード「BOST」を用いて解析を実施した。しかし、SG試験体の定格運転条件程度の高圧条件 (18MPa) において、BOSTコードの解析結果は他の解析コードの結果や従来の知見に比べて著しく安定側の評価結果となり、経験的に不安定が予想される程度までNa/水流量比を上昇させても、不安定が発生しないという評価結果となった。

そこで、BOSTコードの改修を実施した。いくつかの要改修点が発見され、改修を実施したが、高圧条件において著しく安定となる原因は突き止められておらず、今後以下の検討が必要と考えられる。

- ・コーディング内容の確認
- ・メッシュ数の拡張
- ・出力機能の充実

しかし、BOSTコードは1975年に作成されたコードであり、その後改修を重ねてはいるが、基本的に当時の計算機性能を前提に作られているため、メッシュ数や計算時間の低減のため解析的な工夫をしている部分が多くある。また、メモリー節約のためにコンテナメモリー方式を取っており、コードが複雑となっている。そのため、比較的簡単な基礎式を多数のメッシュで解く現代の計算コードと比較するとコーディング内容が複雑で、改修には多大な労力が必要になると考えられる。

このため、最新の知見をいれた流動安定性解析コードを新たに作成することを、今後むしろ検討していくべきであると考えられる。

参考文献

- [1] 門田一雄他、「Na加熱貫流型蒸気発生器時間領域安定性解析コード使用説明書」
PNC ZJ201 75-32 1975年12月
- [2] 岩下強他、「BOST(Ⅲ)改造内容説明書」PNC ZJ901 77-01 1977年10月
- [3] 戸田幹雄、伊藤隆哉、塩崎廣満他、「原子炉冷却系総合試験施設の基本設計-試験
計画および試験施設全体概要-」ZJ9216 97-001 1996年12月
- [4] M. Ueta, T. Inagaki, Y. Shibata, et al., "The development of demonstration fast breeder
reactor (DFBR)," Proceedings of the 3rd JSME/ASME joint international conference on
nuclear engineering (ICONE-3), S207-1 (Vol.2, p.771), April 23-27, 1995, Kyoto, Japan
- [5] 柴田洋二他、「冷却系機器特性試験装置予備設計」PNC ZJ9124 94-006 1994年3月
- [6] 岩下強他、「BOSTコード検証作業報告書」PNC ZJ901 78-05 1978年3月
- [7] 坂間巖、坂本哲「蒸気表計算サブルーチン：STMTBL」PNC ZN952 76-10
1976年8月
- [8] 佐藤博之他、「LMFBR冷却系1次元静特性予測計算コードPOPAL-6の開発(2) (2
重管SGモデルの付加) —コード使用説明書—」PNC TN9460 93-008 1993年4月

表1.2-1 実機及び試験体の蒸気発生器主要目

No.	項目	実機設計	SG試験体	
1	型式	一体貫流式有液面ヘリカルコイル型	一体貫流式有液面ヘリカルコイル型	
2	交換熱量	534MWt	54MWt	
3	運転温度			
	Na側 入口/出口	520/335°C	520/335°C	
	水側 入口/出口	240/497°C	240/497°C	
4	運転圧力			
	Na側	3atg	0.8atg	
	水・蒸気側 入口/出口	191/175atg	191/175atg	
5	定格流量			
	Na側	$8.15 \times 10^6 \text{kg/h}$	$8.24 \times 10^5 \text{kg/h}$	
	水・蒸気側	$8.62 \times 10^5 \text{kg/h}$	$8.72 \times 10^4 \text{kg/h}$	
6	設計温度	Na / 水・蒸気	540/535°C	550/550°C
7	設計圧力	Na / 水・蒸気	5/205atg	20/205atg
8	伝熱管仕様	口径 (外径)	31.8mm	31.8mm
		肉厚	3.9mm	3.9mm
		本数	330本	36本
		層数	25層	6層
		ピッチ (縦/半径)	50/50mm	60/50mm
		ヘリカルコイル長さ	86.4~96.1m(av91.5)	91.2~100.2m(av95.0)
		コイルリード角	5.20~5.78deg	4.96~5.45deg
		材質	Mod. 9Cr-1Mo	Mod. 9Cr-1Mo
		管束高さ	8710mm	8670mm
		コイル径(最内層/最外層)	1000/3400mm	1000/1500mm
9	有効伝熱面積	3024m^2	342m^2	

表1.2-2 流動安定性解析条件

No.	項目	解析条件	備考
1	管内汚れ係数	30000 kcal/m ² .hr.°C	50MWSG解析時の値
2	管内粗さ	3×10^{-6} m	50MWSG解析時の値
3	伝熱管熱伝導率	23 kcal/m.hr.°C	
5	DNBクオリティ	0.75	50MWSG解析時の値
4	伝熱管肉厚	4.095 mm	公称値の5%増
2	給水入口上昇管長さ	2.13 m	ヘリカル部として考慮
3	蒸気出口上昇管長さ (Na中)	2.7 m	ヘリカル部として考慮
4	蒸気出口上昇管長さ (カバーガス中)	2.0 m	断熱とする
6	保温材からの放熱	考慮しない	

表1.2-3 水側圧力を変化させた場合の安定限界

No.	給水圧力 (kg/cm ² a)	蒸気圧力 (kg/cm ² a)	安定限界*1での Na/水流量比
1	184	—	常に安定
2	180	—	常に安定
3	175	160	23
4	170	155	16
5	158	143	13
6	145	128	12

*1：Na流量を増加させることにより安定限界を把握

表1.2-4 (1/4) BOSTコードサーベイ解析結果一覧

No.	メンバー名	Na流量 (ton/hr)	Na/水 流量比	給水圧力 (kg/cm ² a)	蒸気圧力 (kg/cm ² a)	判定	特記事項
1	A02	824	9.5	188	177	—	定格条件、POPAI-6との比較計算用、H 8 年度報告書SG空間分布解析に対応
2	A03	412	19	182	177	—	A02の給水流量1/2、POPAI-6との比較計算用
3	A04	824	9.5	151	136	—	A02の水側圧力をもんじゅ並に低下、POPAI-6との比較計算用
4	B01	824	9.5	184	176	安定	定格条件、動特性計算用
5	B02	1500	17.2	184	171	安定	定格条件からNa流量増加
6	B03	1500	17.2	184	171	安定	B02のメッシュ数及び考慮されていないと思われる入力データを50MWSG検証データと同じにする
7	B04	1500	17.2	184	171	安定	B02の管本数を1本とし、流量を1/36とし、シュラウド外径を1.3m、内径を1.2mとする
8	B05	1500	17.2	184	171	安定	B02で「平均圧力の積分を行う」「各部圧力変化を計算」「パラレル管」の計算オプションを使用
9	B06	3000	34.5	184	170	安定	定格条件からNa流量増加
10	B07	1500	17.2	184	171	エラー	B02で「沸騰部・過熱部慣性項考慮」の計算オプションを使用

入力データ名：POD1HA2.BOST3.IIT.DATA

出力データ名：POD1HA2.BOST3.IIT.RESULTS

表1.2-4 (2/4) BOSTコードサーベイ解析結果一覧

No.	メンバー名	Na流量 (ton/hr)	Na/水流量比	給水圧力 (kg/cm ² a)	蒸気圧力 (kg/cm ² a)	判定	特記事項
11	B08	1500	17.2	184	171	安定	B02のメッシュ数を減少 (予熱部 3、沸騰部 3、過熱部 6)
12	B09	2000	23.0	184	171	安定	B08のNa流量増加、結果はB08より安定となった
13	B10	1350	15.5	184	171	安定	B08のNa流量減少、結果は1%程度の振幅で減衰率1%程度
14	B11	1350	15.5	184	171	エラー	B02のメッシュ数を減少 (予熱部 2、沸騰部 2、過熱部 6)
15	B12	1500	17.2	184	171	安定	B02のメッシュ数を減少 (予熱部 5、沸騰部 5、過熱部 6)
16	B13	1500	17.2	184	171	安定	B02のメッシュ数を減少 (予熱部 3、沸騰部 3、過熱部 3)、結果は強い安定となった
17	C01	1100	12.6	158	143	安定限界	定格条件から水側圧力を低下させ、Na流量を増加
18	C02	1400	16.1	170	155	安定限界	定格条件から水側圧力を低下させ、Na流量を増加
19	C03	4000	46.0	180	165	安定	定格条件から水側圧力を低下させ、Na流量を増加、結果はどこまで増加させても安定
20	C04	2000	23.0	175	164	安定限界	定格条件から水側圧力を低下させ、Na流量を増加
21	C05	1100	12.6	145	128	安定限界	定格条件から水側圧力を低下させ、Na流量を増加

表1.2-4 (3/4) BOSTコードサーベイ解析結果一覧

No.	メンバー名	Na流量 (ton/hr)	Na/水流量比	給水圧力 (kg/cm ² a)	蒸気圧力 (kg/cm ² a)	判定	特記事項
22	D01	1500	17.2	184	171	安定	B02にダウンカムを追加
23	D02	1500	17.2	184	171	安定	B02に伝熱管出口圧損係数1.0を追加
24	D03	1500	17.2	184	171	安定	B02で過熱部を固定メッシュとするオプションで計算
25	D04	1500	17.2	184	168	安定	B02のNa入口温度を580℃とする
26	E01	1000	37.3	172	170	安定限界	30%出力条件からNa流量を増加
27	E02	500	18.6	162	160	安定限界	30%出力条件から水側圧力を低下させ、Na流量を増加
28	F01	1500	17.2	184	171	安定	B02のソースを変更し、物性値は変更せず、コード内での圧力の数値のみを $184-20=164\text{kg/cm}^2\text{a}$ と読み代えて計算
29	F02	1500	17.2	184	171	安定	B02のソースを変更し、核沸騰部熱伝達率の温度差依存性を動特性解析で無視して計算
30	G01	1000	11.5	170	157	安定限界	B02のメッシュ数を減少（予熱部3、沸騰部3、過熱部6）、水側圧力を低下、Na流量を増加
31	G02	1050	12.1	175	163	安定限界	B02のメッシュ数を減少（予熱部3、沸騰部3、過熱部6）、水側圧力を低下、Na流量を増加
32	G03	1170	13.4	180	168	安定限界	B02のメッシュ数を減少（予熱部3、沸騰部3、過熱部6）、水側圧力を低下、Na流量を増加

表1.2-4 (4/4) BOSTコードサーベイ解析結果一覧

No.	メンバー名	Na流量 (ton/hr)	Na/水 流量比	給水圧力 (kg/cm ² a)	蒸気圧力 (kg/cm ² a)	判定	特記事項
33	G04	900	10.3	145	132	安定限界	B02のメッシュ数を減少（予熱部3、沸騰部3、過熱部6）、水側圧力を低下、Na流量を増加
34	H01	1000	11.5	145	132	安定限界	B02のメッシュ数を減少（予熱部5、沸騰部5、過熱部6）、水側圧力を低下、Na流量を増加

表4-1(1/7) BOST変数表

変数	意味	単位	変数値設定行
AP		m2	
APH	予熱域各メッシュ長さ		
AS	伝熱管流路断面積、過熱部まで	m2	2369,
AS	ライザ一部流路断面積	m2	
ASD	= 3.14159/4.*DATASG(13)**2 ダウンカマ管流路断面積	m2	2393,
ASS	過熱器部流路断面積	m2	
COB(I,1)	沸騰部平均ボイド率	-	
COB(I,4)	=FS2*RMC(I+1)/2./DATASG(6) *ETA1 沸騰部摩擦係数	1/m	3394,3395,
COB(I,5)	ライザ下端からI番目沸騰部分割点までの距離、静特性	m	
COB(K,2)	沸騰部出口ボイド率		
COEF(1)	比体積計算用定数(K)		
COEF(1)			
COEF(2)	比体積計算用定数(H)		
COEF(2)	(GAMS0+GAMF)/2の逆数	m3/kg	
COEF(3)	過熱器推定長さ	m	
COEF(4)	=FS1/GAMSP/(2.*9.8*DATASG(6)) *1.E-4 *ETA1		3441,
COEF(4)			
COEF(5)			
COEF(6)	給水ヘッドからライザ管入口までの圧損に関する係数 = 0		3443,
COEF(6)			
COEF(7)			
COEF(8)			
COEF(9)			
COEF(10)			
COEF(11)			
COEF(12)			
COEF(13)			
COEF(14)	過熱器部初期質量流速/1本		
COEF(14)			
COEF(15)	=GS 一本当たりの給水質量流速入力値	kg/sec.m2	3452,
COEF(15)	初期質量流速/1本		
COEF(15)	ライザ一部質量流速	kg/m2s	
COEF(16)			
COEF(17)	0.5		
COEF(18)			
COEF(19)	=DATASG(14)*AS/ASD/9.8E4 ダウンカマ管長=0より0		2442,
COEF(19)			

表4-1(2/7) BOST変数表

COEF(20)	=0. (管内径一定の場合) 管内径変化による圧損に関する定数		
COEF(22)	=0. (管内径一定の場合) 管内径変化による圧損に関する定数		
COEF(24)	=AS/ASS =1. 伝熱管流路断面積(m ²) 過熱部まで/過熱器部流路断面積(m ²)		2446,
COEF(26)	=CZS*1.E-4*ETA1 伝熱管傾斜角度(rad)のsin×1.E-4	m ² /cm ²	2448,
COEF(28)	下流非過熱部長さ		
COEF(28)	=DATASG(17)*1.E-4 下流非過熱部長さ×1.E-4		2450,
COEF(34)	=FS4/2./DATASG(11) 過熱器摩擦係数初期値/2/管内径	1/m	3248,
COEF(35)	=-DATASG(28) -給水ヘッダから伝熱部入口までの位置水頭	kg/cm ²	2453,
COEF(35)	給水ヘッダより伝熱部入口までの位置水頭		
COEF(36)	過熱器各メッシュ長さ		
COEF(37)	=GAMSP*CZS*1.E-4*ETA1 予熱部1m当たりの位置水頭	kg/cm ² .m	3456,
COEF(40)	=FS2*RMC(1)/2/DATASG(6) 沸騰開始点摩擦損失に関する係数		3458,
COEH(1)	=DATAPC(22) =H* 過熱蒸気非体積計算用定数	kcal/kg	2456,
COEH(2)	=DATAPC(23) =K 過熱蒸気非体積計算用定数		
COEH(3)	=1./(1./DATAPC(23)-1.E4/DATAPC(24)) =1/(1/K-1E4/J)		2458,
COEH(5)	=1.E-4/9.8	m.sec ² /cm ²	2464,
COEH(10)	=DATATB(9) 給水ヘッダ圧力	kg/cm ²	2460,
CON(1)	Na脱伝達率/di	kcal/m ² s℃	
CON(2)	Na側過熱域1メッシュ当たりの圧力	kg/m ²	
CON(3)	Na密度	kg/m ³	
CON(4)	伝熱管長さ(熱交換部)	m	
CON(5)			
CON(6)	DC流露断面積	m ²	
CON(7)	=ETA1 =1. (不安定現象試験装置以外の時)		2430,
CON(7)			
CON(8)	伝熱管長さ	m	
CON(9)	固定分割点		
CON(10)			
CON(11)	Na側質量流速	kg/m ² s	
CON(12)	Na側定数		
CON(13)			
CON(14)	有効伝熱管長さ-過熱器長さ(推定値)		
CON(14)	Na入口温度	℃	
CON(15)			
CON(16)			
CON(17)			
CON(18)	過熱器部伝熱管内側熱伝達率	kcal/ms℃	
CON(19)			

表4-1(3/7) BOST変数表

CON(20)	蒸気温度差	℃	
CON(21)			
CON(22)			
CON(23)	予熱域 α	kcal/m ² s℃	
CON(24)			
CON(25)	過熱域 α	kcal/m ² s℃	
CON(28)	ライザー部伝熱管内側熱伝達率	kcal/ms℃	
CON(29)	ライザー部水力等価直径の 1/4	m	
CZS	=SIN(DATASG(9)) 伝熱管傾斜角度(rad)のsin		2364,
DATASG(1)	=SGDATA(1) 伝熱管有効本数		SUB. PRESG,PRESG1 引数
DATASG(6)	=SGDATA(6) 伝熱管内径、過熱部まで	m	SUB. PRESG,PRESG1 引数
DATASG(9)	=SGDATA(9) 伝熱管傾斜角度	rad	
DATASG(11)	管内径	m	
DATASG(13)	=SGDATA(13) ダウンカム管内径	m	SUB. PRESG,PRESG1 引数
DATASG(14)	=SGDATA(14) ダウンカム管長さ	m	SUB. PRESG,PRESG1 引数
DATASG(19)	=SGDATA(19) 給水流量入力値	ton/hr	SUB. PRESG,PRESG1 引数
DATATB(5)	給水ヘッドにおける給水温度	℃	
DATATB(9)	給水ヘッド圧力	kg/cm ²	
DATATB(9)	給水ヘッド圧力	kg/cm ²	
DDGEIT	給水質量流速の初期値からの偏差	kg/sec.m ²	1193,
DERVSW(1)	正の時は沸騰部における流量の時間微分を0とする。		792,
DERVSW(2)	正の時はSH partにおける流量の時間微分を0とする。		792,
DERVSW(3)	正の時はSH部における流量の時間微分を0とする。		792,
DGEIT	給水流量外乱		793,858,930,1726,1717,
DGEIT1			1724,
DPSW	正の時、ヘッド間の差圧一定計算		791,
DT	動特性計算における積分の時間刻み	sec	
DTGE	d(給水質量流速×沸騰部長/g)/d t	kg/cm ²	
DTGEIT	d 給水質量流速(kg/sec.m ²)/d 時間(sec)	kg/sec ² .m ²	532,534,
DTMAX	動特性計算における積分の最大時間刻み	sec	
DTMIN	動特性計算における積分の最小時間刻み	sec	
DTZE(L,K)	EQUIVALENCE (DTZE(1,1),ZZ000P(241))		427,
DV(1,I,1)	=XGE2A2		546,
DV(1,I,2)	=XGE3A3		547,
DV(1,I,3)	=XGSAT3		548,
DV1(1)	数値微分を行う時点	sec	286,1614,
DV1(2)	数値微分を行う時点	sec	285,1615,
EPSD(1)	=DATASG(26)/DATASG(13) 管内面粗さ(m)/ダウンカム管内径(m)	-	2423,

表4-1(4/7) BOST変数表

EPSD(2)	=DATASG(26)/DATASG(6) 管内面粗さ(m)/管内径(m)	-	2424,
EPSD(3)	=DATASG(26)/DATASG(11) 管内面粗さ(m)/過熱器管内径(m)	-	2425,
EPSD(4)	=DATASG(26)/DATASG(16) 管内面粗さ(m)/下流非加熱部管内径(m)	-	2427,
ETA1	=1. (不安定現象試験装置以外の時)	-	2382,
FS1	管摩擦係数(-)	-	2588,
FS2	沸騰開始点管摩擦係数初期値	-	2590,
FS4	過熱器摩擦係数初期値	-	
GAMF	飽和水密度	kg/m3	2632,
GAMF	水密度	kg/m3	
GAMSO	ライザ入口部サブクール水密度	kg/m3	2634,
GAMSO	サブクール水密度	kg/cm3	
GAMSD	給水ヘッドにおける給水密度	kg/m3	2401,
GAMSP	=(GAMSO+GAMF)/2. 予熱部水平平均密度	kg/m3	2635,
GAMSP	(GAMSO+GAMF)/2		
GE2	二相流MASS FLOW		
GE3AT	過熱部MASS FLOW		
GEI0T	=COEF(15) 一本当たりの給水質量流速入力値	kg/sec.m2	1662,
GEIT(I)	給水質量流速 (Iは静特性計算における代表管番号)	kg/sec.m2	1668,1738,
GS	=WS/AS 一本当たりの給水質量流速初期値	kg/sec.m2	2547,
GS	ライザ一部質量流速		
GSAT	過熱器部MASS FLOW		436.1675.1733,
GSOT(J)	=GEIT(J)/COEF(25)		1727,
GSS	過熱器部質量流速	kg/m2s	
HE2FT	飽和蒸気温度		
HE2GT	飽和水温度		
HE2GT	新しく求められた飽和蒸気エンタルピ		
HE3AT	初期飽和蒸気エンタルピ		
HE3OT	過熱境界エンタルピ		
HEFGT	飽和蒸気と飽和水の温度差		
HF	飽和水エンタルピ		
HG	飽和蒸気エンタルピ	kcal/kg	
HSIT	過熱領域エンタルピ		
HSOT	過熱器エンタルピ		
HTBOIL	α		
IDB2	=KONT(2,J) 沸騰部全体のメッシュ数 (最大14)		1024,
IDB2A	=KONT(8,N) 沸騰部全体のメッシュ数+1		337,573,692,1600,
IDB2A	= IDB2 + 1 沸騰部全体のメッシュ数+1		1025,
IDB2A	沸騰部全体のメッシュ数+1		

表4-1(5/7) BOST変数表

IDSH			
IDSH	過熱域メッシュ数		
IDSH	=KONT(1,I) 過熱器メッシュ数		
IFIX	固定分割点		
IMLP	動特性解析における代表管数		787,852,923,
ITLP	=KOP(1) 静特性計算における代表管数		765,842,2163,
KGO	簡易グラフ出力データの選定フラッグ(7の時給水質量流速偏差)		
KONT(1,I)	過熱器メッシュ数(最大6、他に過熱部1メッシュ有り)	-	
KONT(8,L)	=IDB2+1 沸騰部全体のメッシュ数+1		2360,
KOP(1)	静特性計算における代表管数		
NAT	ナトリウム温度		
NBOIL	予熱域メッシュ数*2+1		
NOINT	=439		3741,
NPHB	予熱域メッシュ数*2		
P2	沸騰境界における圧力	kg/cm2	
P3	過熱境界における圧力		
P4	過熱器部入口圧力		
PE1T	沸騰開始点圧力		
PE1T(I)	沸騰開始点圧力	kg/cm2	524,
PE2AT	沸騰境界における圧力		
PE3AT	過熱境界における圧力		
PE3T(I)	過熱部入口圧力	kg/cm2	496,
PHDFWT	=COEH(10) 給水ヘッド圧力	kg/cm2	1607,
PLAT	蒸気ヘッド圧力		
PS	内径周長さ	m	
PSAT	過熱境界圧力		
PSIT(I)	過熱器部入口蒸気圧力	kg/cm2	
PSS	過熱器部周長さ	m	
QE1T	予熱部HEAT FLAX		
QE1T	過熱器部HEAT FLAX		
QE1T	単相部(予熱、過熱器部)の単位長さ当り収熱量		
QE2T	二相流HEAT FLAX		
QE2T	沸騰部単位長さ当たりの収熱量		
QE3T	過熱部HEAT FLAX		
QE3T	過熱部の単位長さ当り収熱量		
RE2AT(K)	沸騰部二層流密度	kg/m3	
RE2FT	飽和水密度		
RE2GT	飽和蒸気密度		

表4-1(6/7) BOST変数表

RE3IT	過熱境界密度		
RE3OT	過熱器境界密度		
REB	沸騰開始点Re数初期値	-	2581,
REW	給水レイノルズ数初期値	-	2561,
RMC(1)	二層流部圧損割り増し係数?	-?	3202,
RSIT			
RSOT			
RTT	蒸気温度		
T	Simulation Time	sec	
TEIT	蒸気発生器入口温度		
TEOT	蒸気発生器出口温度		
TEV	予熱部水側温度		
TF	飽和水温度	°C	
TFINAL	動特性計算時間	sec	
TM	伝熱管温度		
TMCSH		kcal/m°C	
TN	ナトリウム温度		
TSH	過熱部蒸気温度		
TSH	蒸気温度		
TSHA	蒸気温度		
TW	水・蒸気温度		
TW(1)	サブクール水温度		
UP	伝熱管内側熱抵抗	m ² h°C/kcal	
VSG	長さ当たり外径-内径の差の体積	m ³	
WAT	水・蒸気温度		
WEIT	蒸気発生器入口流量		
WEOT	蒸気発生器出口流量		
WS	1本当たりの給水流量入力値	kg/sec	2546,
XGE2A	沸騰部摩擦損失	kg/cm ²	520,
XGE2A1	沸騰部位置水頭	kg/cm ²	515,
XGE2A2	給水質量流速×沸騰部長 / g	kg.s/cm ²	517,521,
XGEIT	予熱部摩擦損失	kg/cm ²	530,(376では別の意味),
XGEIT	流速	kcal/m ³	
XGEIT1	沸騰開始点1/2メッシュの摩擦損失	kg/cm ²	519,
XGSAT	=COEF(36) 過熱器各メッシュ長さ	m	430,
XINR	予熱部長(m)×1E-4(m ² /cm ²)/9.8(m/sec ²)	m ² .sec ² /cm ²	529,(279では別の意味),
XPE2A	飽和蒸気体積当たりのエンタルピ		
XPE3T	過熱ハ域,予熱域の熱量		

表4-1(7/7) BOST変数表

XRE	沸騰部メッシュ長/2./密度	m4/kg	508,511,
XRE2A	沸騰部二層流密度	kg/m3	504,
XTGEIT			
XVOIY	給水ヘッドから沸騰開始点までの位置水頭	kg/cm2	531,
XX(L)	簡易グラフ出力データ (給水質量流速偏差等)		
XZE3T	過熱域長さ		
ZE(J,K)	=COB(K,5) ライザ下端からK番目沸騰部分割点までの距離	m	1664,
ZE1T(1)	=ZE(1,1) (EQUIVALENCE文で連結)		1640,
ZE2T	沸騰境界長さ		
ZF	固定分割点メッシュ長さ		
ZFLX	伝熱管長さ/固定分割点数		
ZPH	予熱域長さ		
ZZ000R(433~435)	GEIT(1~3) (COMMON文で連結)		
ZZE	メッシュ長さ		

表4-2 静特性解析条件（動特性解析との相違点）

No.	項目	解析条件	備考
1	管内粗さ	$5 \times 10^{-6} \text{ m}$	設計条件
2	給水入口上昇管長さ	2.13 m	ヘリカル部とは別に考慮
3	蒸気出口上昇管長さ (Na中)	2.7 m	ヘリカル部とは別に考慮

表4-3 過熱蒸気状態方程式と蒸気表の比較

・過熱蒸気の状態方程式

$$v = \frac{1}{\rho_s} = \frac{K}{P} (H_s - H^*)$$

・ $H^* = 459.2 \text{ kcal/kg}$ $K = 9.579 \text{ E-3}$

℃	$\frac{\text{kg}}{\text{cm}^3 \text{a}}$	$H_s \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	$\frac{1}{\rho_s} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$\frac{1}{\rho_s} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ (蒸気表)
350	100	700.4	0.02310	0.02302
500	100	806.6	0.03328	0.03347
400	150	713.4	0.01623	0.01609
500	150	791.6	0.02123	0.02127
400	160	707.0	0.01484	0.01469
500	160	788.5	0.01971	0.01974
400	170	700.2	0.01358	0.01343
500	170	785.3	0.01837	0.01839
600	170	851.5	0.02210	0.02219
400	180	693.0	0.01244	0.01229
500	180	782.1	0.01718	0.01718
600	180	849.4	0.02077	0.02084
400	185	689.2	0.01191	0.01176
500	185	780.4	0.01663	0.01663
600	185	848.4	0.02015	0.02023

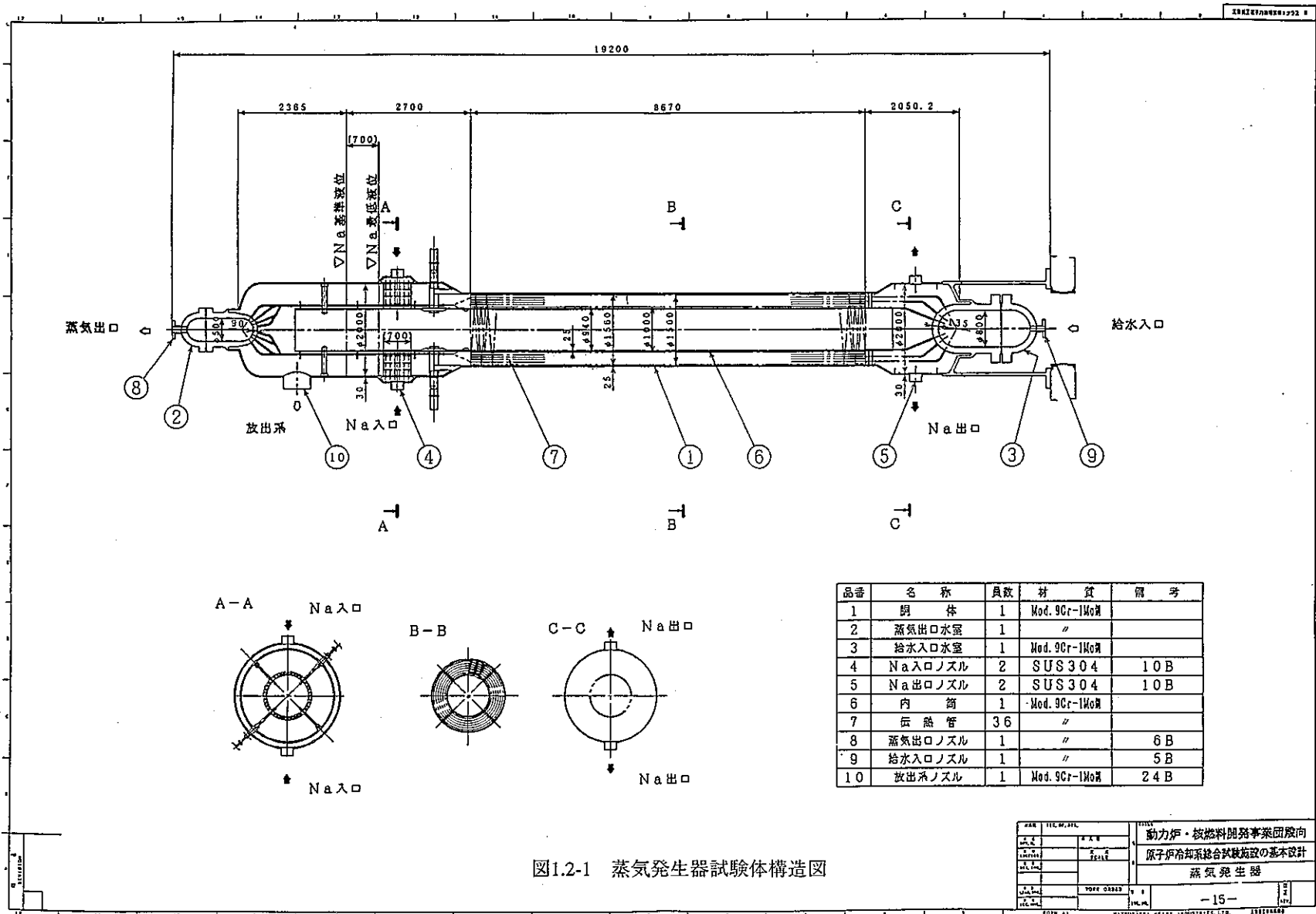


図1.2-1 蒸気発生器試験体構造図

設計	設計者	設計校	設計日	動力炉・核燃料開発事業団 原子炉冷却系総合試験施設の基本設計
製図	製図者	製図校	製図日	蒸気発生器
検査	検査者	検査校	検査日	
承認	承認者	承認校	承認日	
材料	材料者	材料校	材料日	
組立	組立者	組立校	組立日	
検査	検査者	検査校	検査日	
完成	完成者	完成校	完成日	

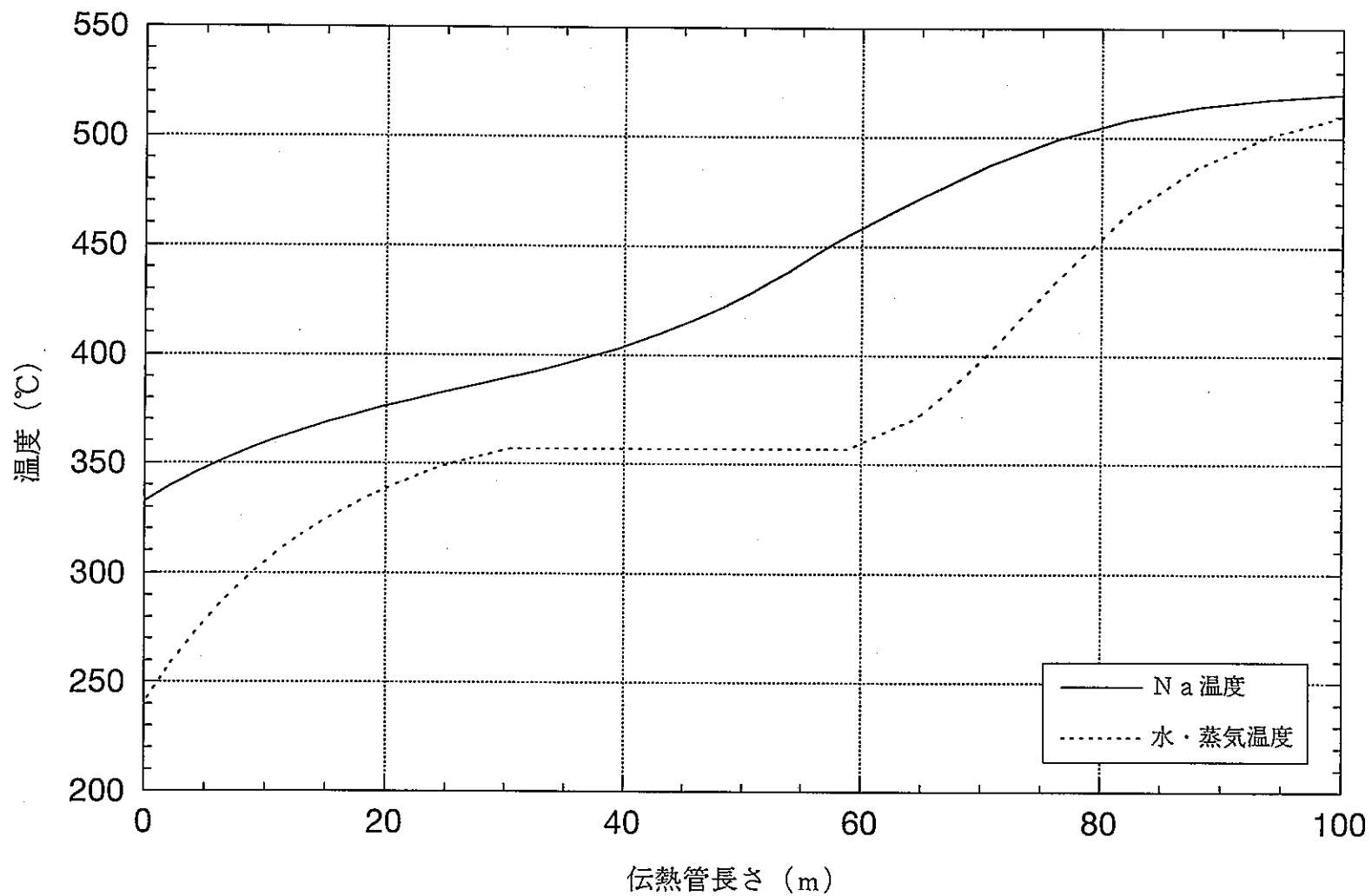


図1.2-2 静特性解析結果 (GNa/Gw=9.5: 定格)

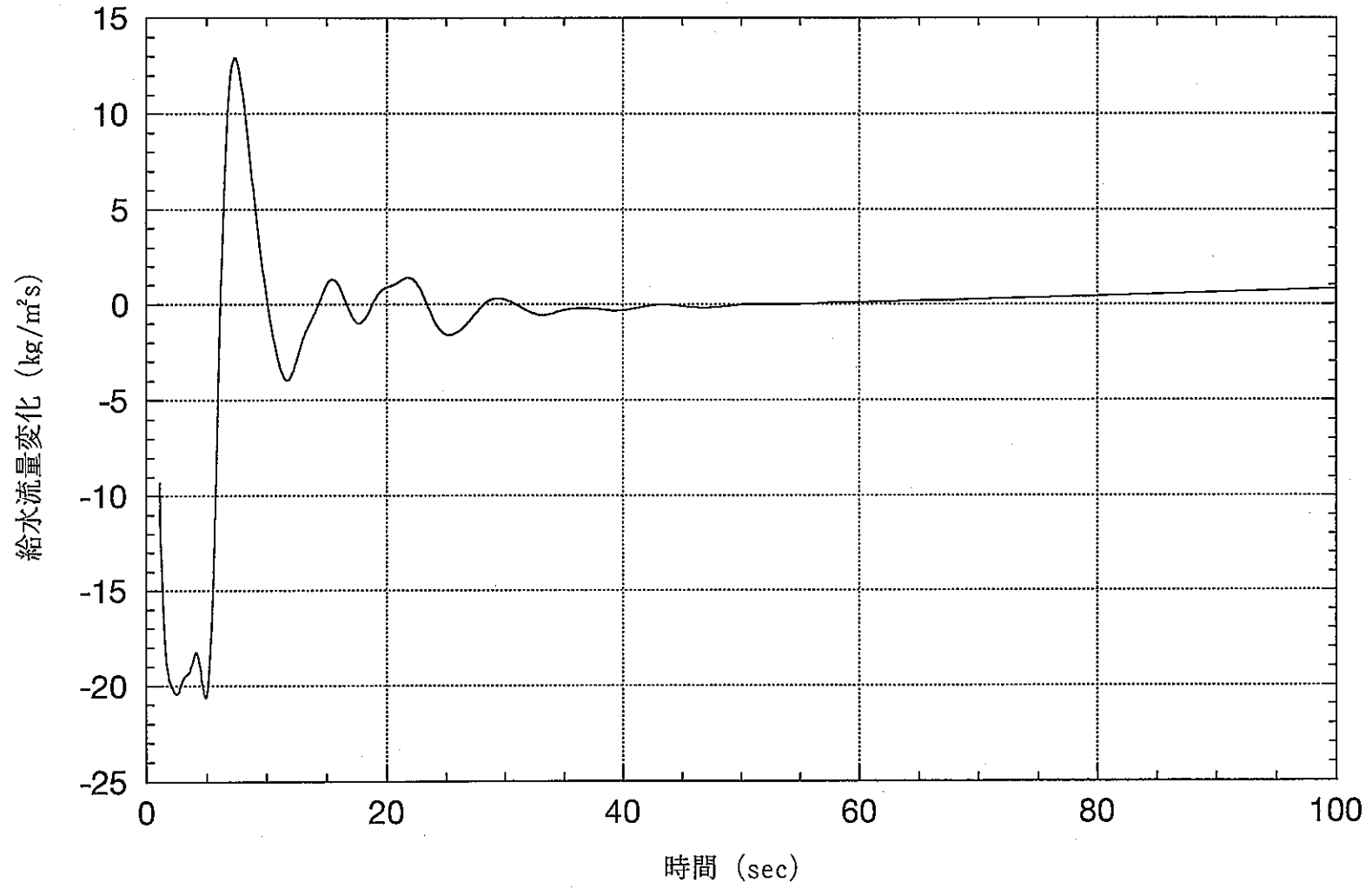
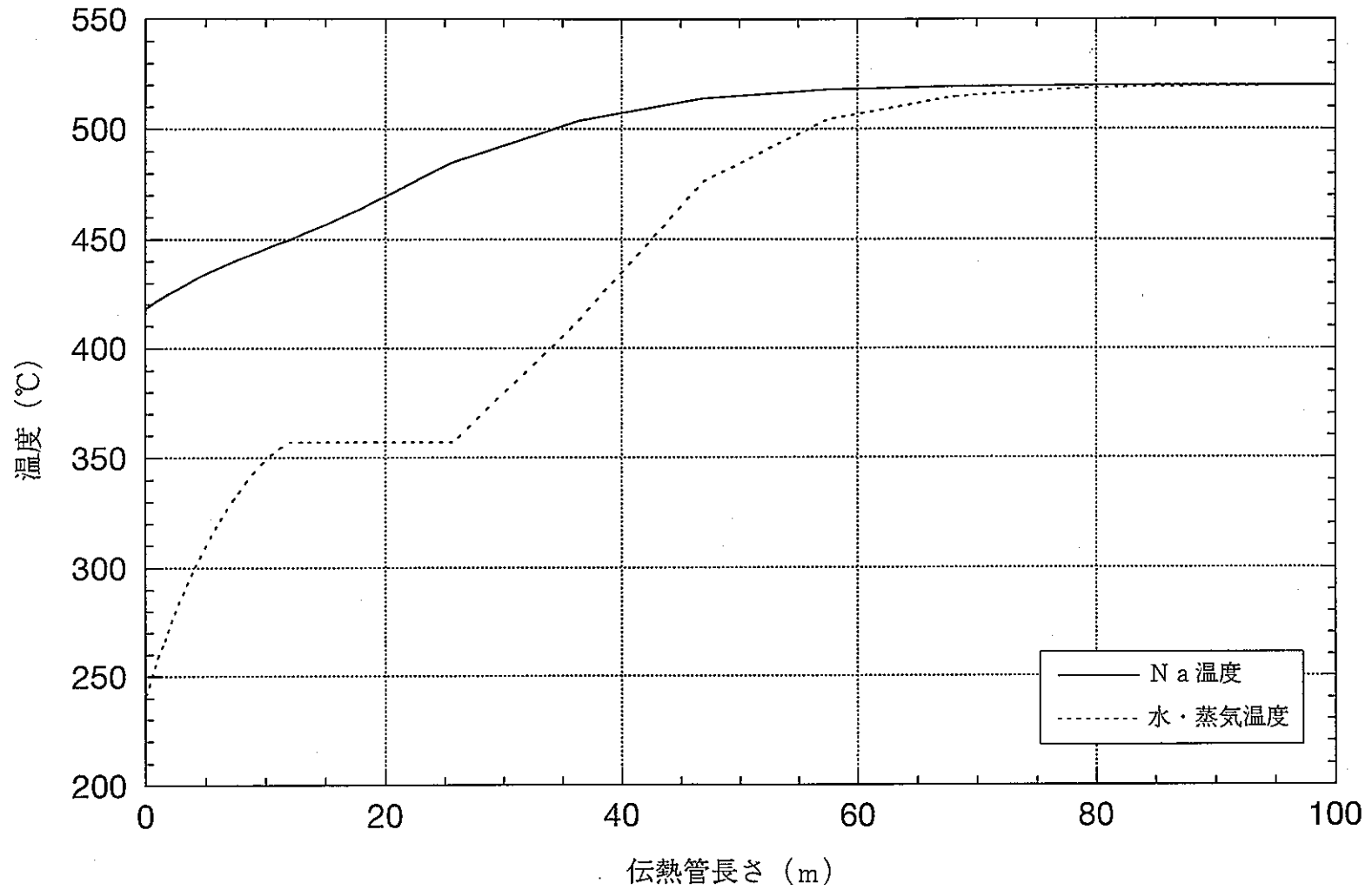


図1.2-3 動特性解析結果 ($G_{Na}/G_w=9.5$)

図1.2-4 静特性解析結果 ($G_{Na}/G_w=17.2$)

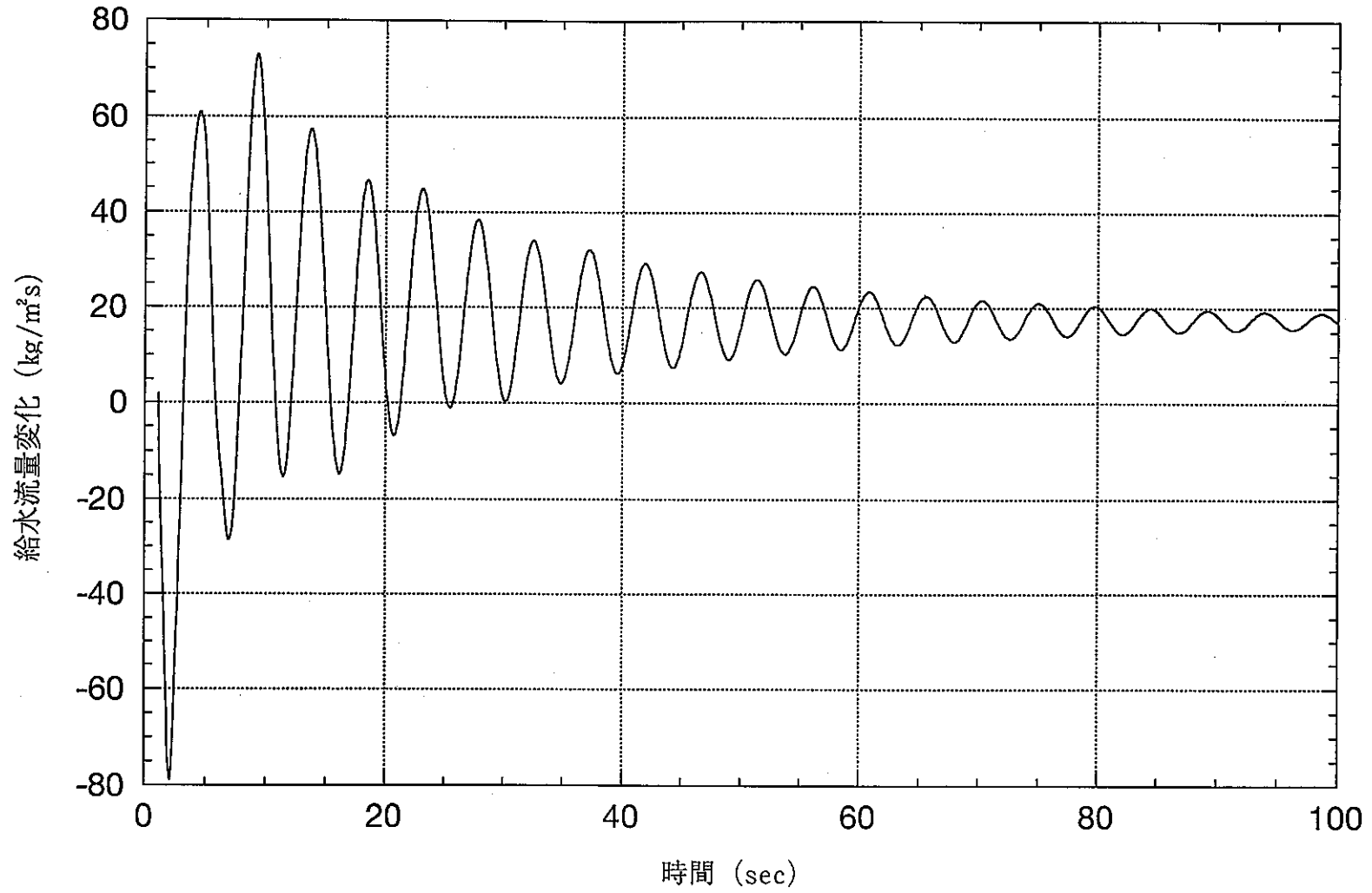


図1.2-5 動特性解析結果 ($GNa/Gw=17.2$)

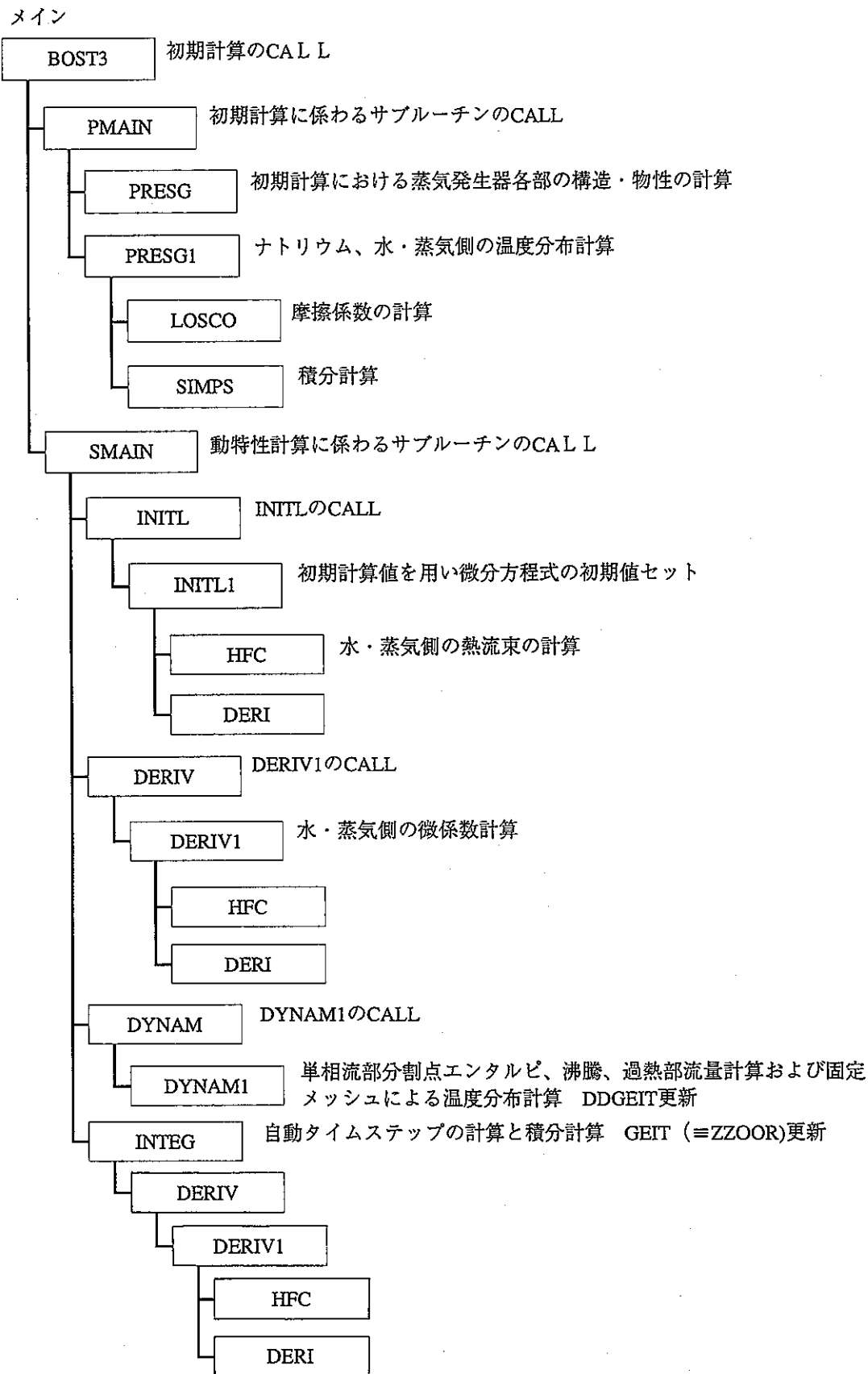


図4-1 サブルーチン構成図

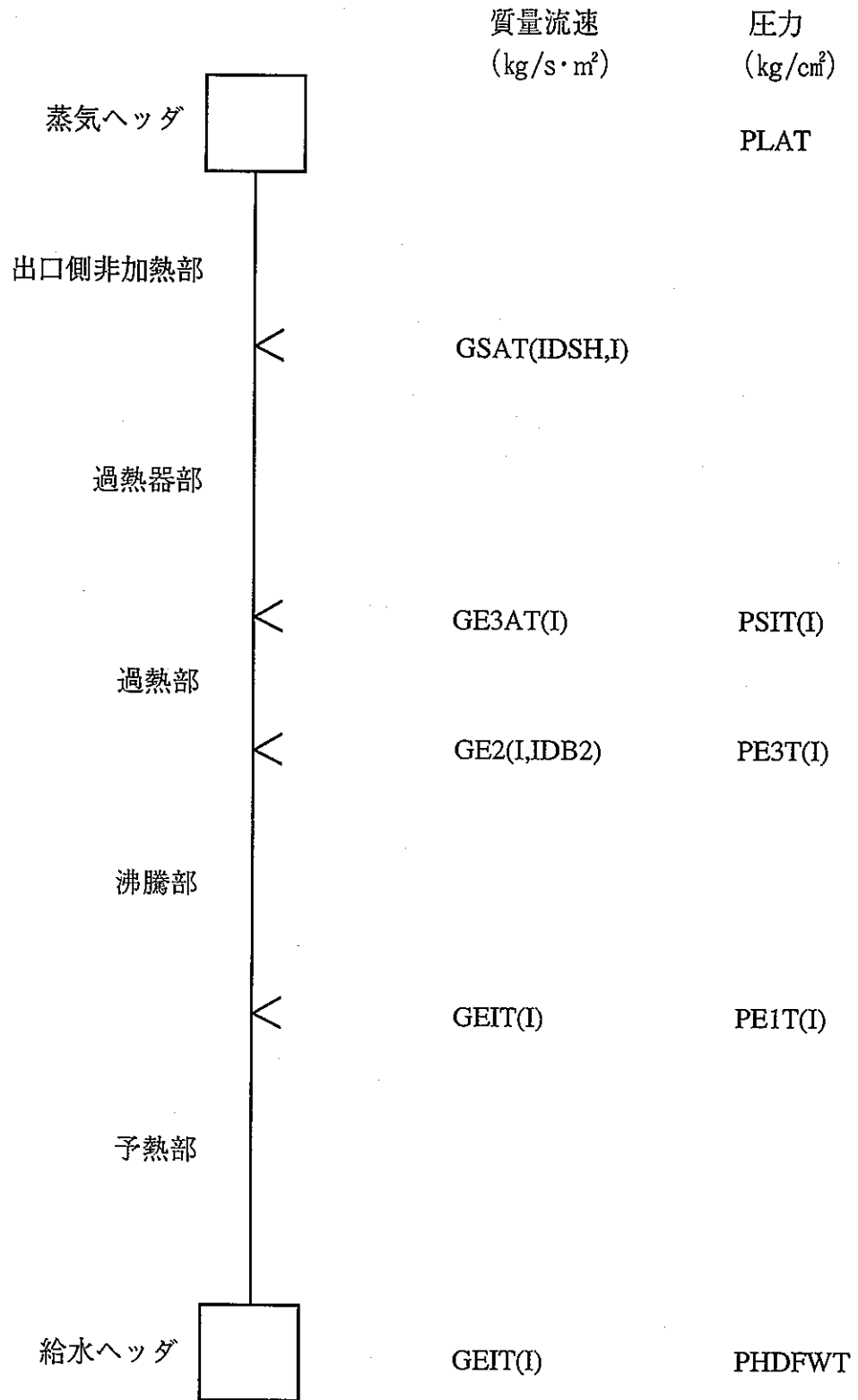


図4-2 コード内の主要な変数と領域の対応

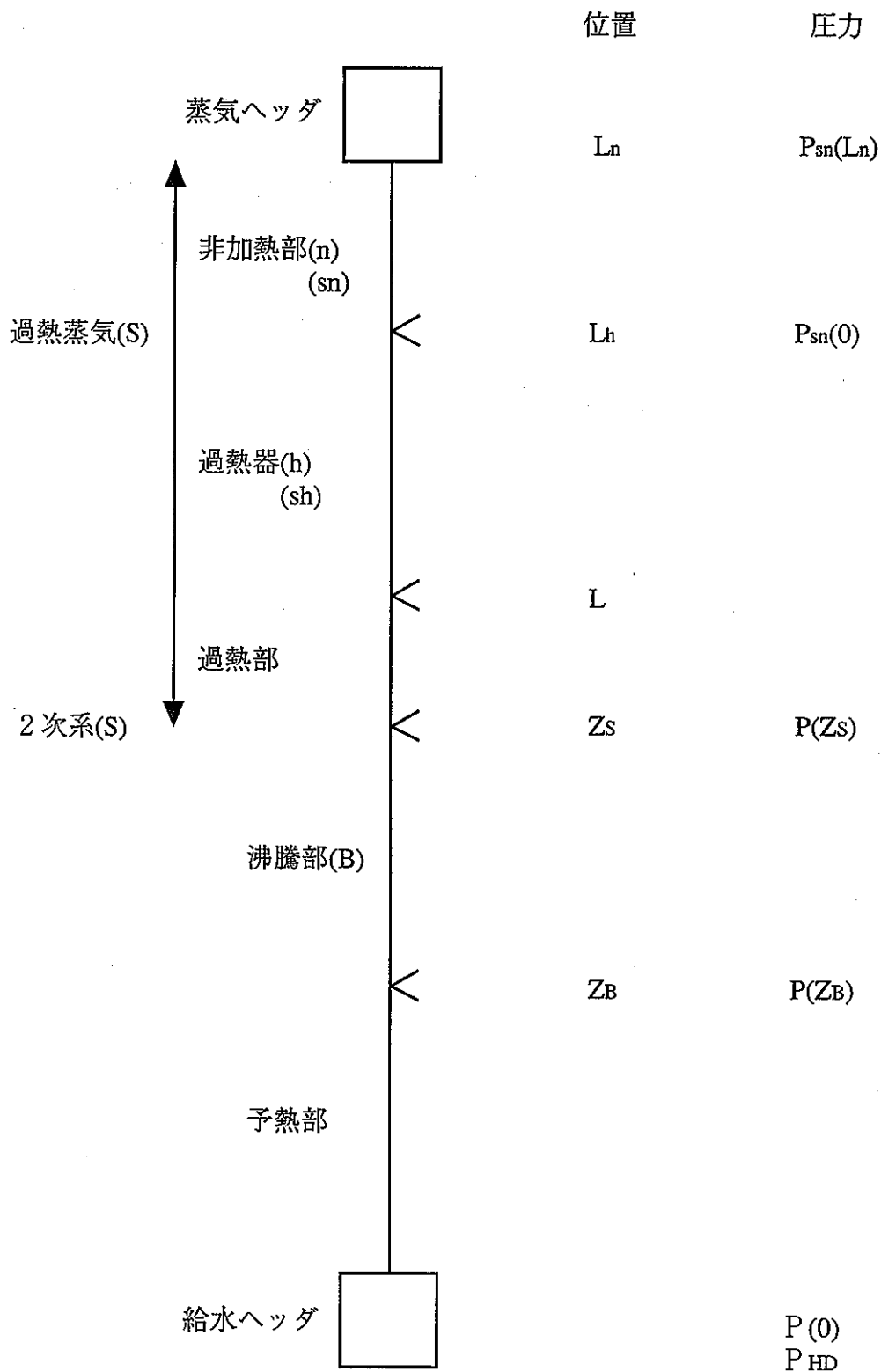


図4-3 使用説明書で使われる主要な記号と領域の対応

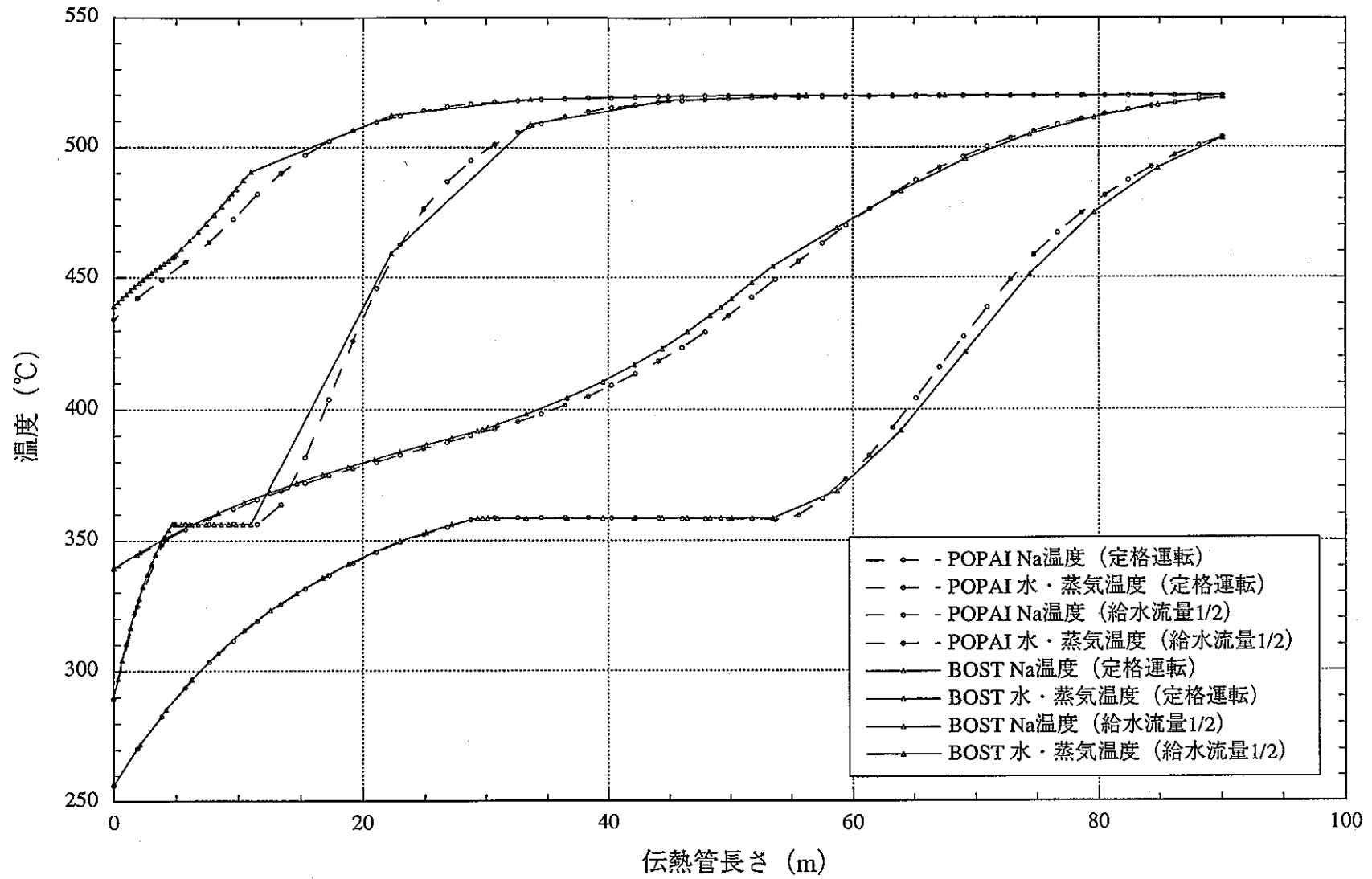


図4-4 BOSTとPOP AI-6の静特性解析結果の比較

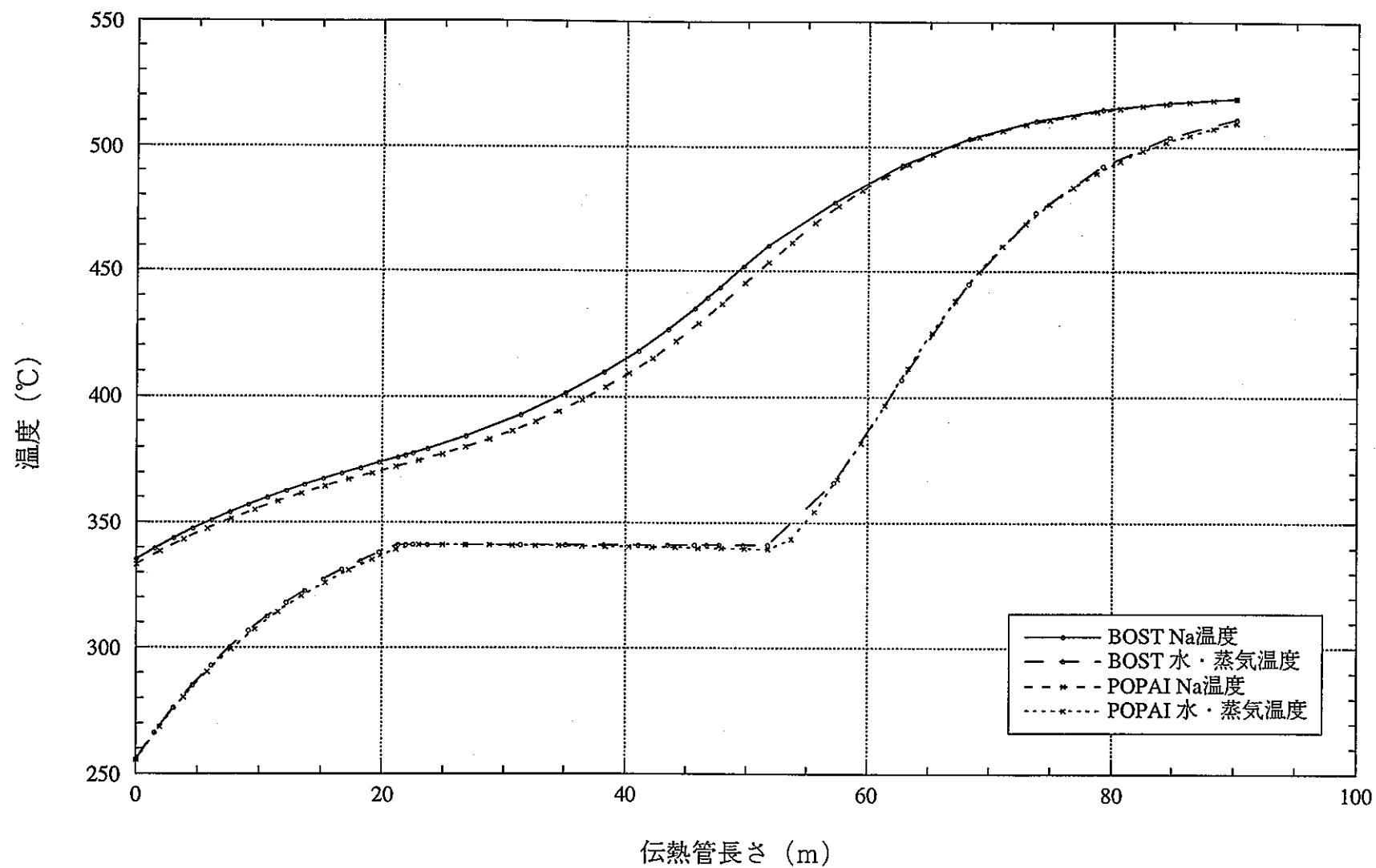


図4-5 BOSTとPOPAI-6の静特性解析結果の比較 (給水圧力 151Kg/cm²a)

BOSTコード入力データ (動特性解析、定格運転条件、Na/水流量比=9.5) 添付資料 1

000001	1	0	0	0	TEST					
000002	GNA/GW=9.5:100%									
000003	F					F				
000004	1	0	0	0	1	150	0	1	0	0
000005	0	0	0	0	0	0	0	1		
000006	7850.0		0.161		23.00		2.663 E-05	1.119 E-01		
000007	3.536		7850.0		0.161		23.00	0.0		
000008	0.0		0.0		0.55624		1.1038	1.1503E-04		
000009	0.82442		0.45752		3.0756E-05		0.07761	1.06674		
000010	828.78		459.2		9.573 E-03		426.9	0.0		
000011	0.0		849.649		0.3041		60.411	2.734		
000012	1.78669		6.644 E-05		5.029 E-03					
000013	176.00		0.13		0.01303		130.0	240.00		
000014	225.00		247.5		87.00		184.00	20.0		
000015	0.013000		0.1288		1.21 E-02		0.8717	79.04		
000016	0.13		497.00							
000017	0.6		0.2		0.2		10.0	0.0		
000018	0.8		-1.0		0.1		0.1	4.0		
000019	0.1		10.0		0.02		0.01	0.01		
000020	0.01		0.02		0.04		0.1	0.2		
000021	0.3		0.4		0.5		0.6			
000022	0.75		0.8		0.9		1.0			
000023	6	14	11	14	0	1				
000024	36.0		1.56		0.94		9.1108	0.0318		
000025	0.02361		99.83		36.0		0.09139	1.25		
000026	0.02361		33.0		0.02361		0.0	0.0		
000027	0.02361		2.0		824.0		87.0	0.75		
000028	240.00		497.00		520.00		335.0	3.0000E+04		
000029	3.0	E-06	0.0		0.0		0.0	0.0		
000030	0.0		0.0		0.0		0.0	12.0		
000031	500	1	1	1						
000032	1.0		1.0		1.0					
000033	5	5	5	3	3	3				
000034	0.1		0.5	E-07	0.2		100.0			
000035	0.0001		1.0		1.0		1.0			
000036	0.1		1.0		1.0		1.0			
000037										
000038	STOP	0	0	0.0						

BOSTコード入力データ (動特性解析、Na流量を増加、Na/水流量比=17.2)

```

000001      1      0      0      0      TEST
000002      GNA/GW=17.2
000003      F          F
000004      1      0      0      0      1  150      0      1      0      0
000005      0      0      0      0      0      0      0      1
000006      7850.0      0.161      23.00      2.663 E-05      1.119 E-01
000007      3.536      7850.0      0.161      23.00      0.0
000008      0.0      0.0      0.55624      1.1038      1.1503E-04
000009      0.82442      0.45752      3.0756E-05      0.07761      1.06674
000010      828.78      459.2      9.573 E-03      426.9      0.0
000011      0.0      849.649      0.3041      60.411      2.734
000012      1.78669      6.644 E-05      5.029 E-03
000013      176.00      0.13      0.01303      130.0      240.00
000014      225.00      247.5      87.00      184.00      20.0
000015      0.013000      0.1288      1.21 E-02      0.8717      79.04
000016      0.13      497.00
000017      0.6      0.2      0.2      10.0      0.0
000018      0.8      -1.0      0.1      0.1      4.0
000019      0.1      10.0      0.02      0.01      0.01
000020      0.01      0.02      0.04      0.1      0.2
000021      0.3      0.4      0.5      0.6
000022      0.75      0.8      0.9      1.0
000023      6      14      11      14      0      1
000024      36.0      1.56      0.94      9.1108      0.0318
000025      0.02361      99.83      36.0      0.09139      1.25
000026      0.02361      33.0      0.02361      0.0      0.0
000027      0.02361      2.0      1500.0      87.0      0.75
000028      240.00      497.00      520.00      335.0      3.0000E+04
000029      3.0      E-06      0.0      0.0      0.0      0.0
000030      0.0      0.0      0.0      0.0      12.0
000031      500      1      1      1
000032      1.0      1.0      1.0
000033      5      5      5      3      3      3
000034      0.1      0.5      E-07      0.2      100.0
000035      0.0001      1.0      1.0      1.0
000036      0.1      1.0      1.0      1.0
000037
000038 STOP      0 0      0.0

```


BOSTコード入力データ (静特性解析、定格運転条件、Na/水流量比=9.5)

```

000001      1  -1   0   0   TEST
000002      BOST SEITOKUSEI, GNA/GW=9.5:100%
000003      F           F
000004      1   0   0   0   1  150   0   1   0   0
000005      0   0   0   0   0   0   0   1
000006  7850.0      0.161      23.00      2.663 E-05  1.119 E-01
000007  3.536      7850.0      0.161      23.00      0.0
000008  0.0      0.0      0.55624      1.1038      1.1503E-04
000009  0.82442      0.45752      3.0756E-05  0.07761      1.06674
000010  828.78      459.2      9.573 E-03  426.9      0.0
000011  0.0      849.649      0.3041      60.411      2.734
000012  1.78669      6.644 E-05  5.029 E-03
000013  177.16      0.13      0.01303      130.0      254.74
000014  225.00      247.5      87.00      187.60      20.0
000015  0.013000      0.1288      1.21 E-02  0.8717      79.04
000016  0.13      503.77
000017  0.6      0.2      0.2      10.0      0.0
000018  0.8      -1.0      0.1      0.1      4.0
000019  0.1      10.0      0.02      0.01      0.01
000020  0.01      0.02      0.04      0.1      0.2
000021  0.3      0.4      0.5      0.6
000022  0.75      0.8      0.9      1.0
000023      6  14  11  14  0  1
000024      36.0      1.56      0.94      8.22      0.0318
000025  0.02361      90.1      36.0      0.091359      1.25
000026  0.02361      33.0      0.02361      0.0      0.0
000027  0.02361      0.0      824.0      87.00      0.75
000028  256.40      503.98      519.04      338.94      3.0000E+04
000029  5.0      E-05  0.0      0.0      0.0      0.0
000030  0.0      0.0      0.0      0.0      12.0
000031  500      1  1  1
000032  1.0      1.0      1.0
000033      5  5  5  3  3  3
000034  0.1      0.5      E-07  0.1      100.0
000035  0.0001      1.0      1.0      1.0
000036  0.01      1.0      1.0      1.0
000037
000038 STOP      0 0      0.0

```

BOSTコード入力データ (静特性解析、給水流量を減少、Na/水流量比=19)

```

000001      1  -1   0   0   TEST
000002      BOST  SEITOKUSEI, GNA/GW=19
000003      F      F
000004      1   0   0   0   1  150   0   1   0   0
000005      0   0   0   0   0   0   0   1
000006  7850.0      0.161      23.00      2.663 E-05  1.119 E-01
000007  3.536      7850.0      0.161      23.00      0.0
000008  0.0      0.0      0.55624      1.1038      1.1503E-04
000009  0.82442      0.45752      3.0756E-05  0.07761      1.06674
000010  828.78      459.2      9.573 E-03  426.9      0.0
000011  0.0      849.649      0.3041      60.411      2.734
000012  1.78669      6.644 E-05  5.029 E-03
000013  177.16      0.13      0.01303      130.0      254.74
000014  225.00      247.5      87.00      181.96      20.0
000015  0.013000      0.1288      1.21 E-02  0.8717      79.04
000016  0.13      503.77
000017  0.6      0.2      0.2      10.0      0.0
000018  0.8      -1.0      0.1      0.1      4.0
000019  0.1      10.0      0.02      0.01      0.01
000020  0.01      0.02      0.04      0.1      0.2
000021  0.3      0.4      0.5      0.6
000022  0.75      0.8      0.9      1.0
000023      6  14  11  14  0  1
000024      36.0      1.56      0.94      8.22      0.0318
000025  0.02361      90.1      36.0      0.091359      1.25
000026  0.02361      33.0      0.02361      0.0      0.0
000027  0.02361      0.0      824.0      43.50      0.75
000028  289.60      519.77      519.97      424.14      3.0000E+04
000029  5.0      E-05  0.0      0.0      0.0
000030  0.0      0.0      0.0      0.0      12.0
000031      500   1   1   1
000032  1.0      1.0      1.0
000033      5   5   5   3   3   3
000034  0.1      0.5      E-07  0.1      100.0
000035  0.0001      1.0      1.0      1.0
000036  0.01      1.0      1.0      1.0
000037
000038 STOP      0 0      0.0

```

POPAL-6コード入力データ (静特性解析、定格運転条件、Na/水流量比=9.5)

```

000001 POPAI-6 , GNA/GW=9.5:100%
000002      1
000003 1    1.0
000004 101 824.0 520.0 335.0 87.0 240.0 497.0 175.0 175.0/
000005 116 1.0 0.0/
000006 122 6.0 50.0 36.0 36.0 1.25/
000007 127 0.02361 0.0318 0.02361 0.0318/
000008 129 0.02361 0.0318 0.0/
000009 132 5.0E-5 /          ROUGH
000010 133 2.0 2.0 2.7 2.7/      ZL1,ZH1,ZL2,ZH2
000011 137 10.961 8.22/
000012 139 2.13 2.13/          ZL3,ZH3
000013 141 2.1 0.05 0.06/      ZH4 PITCHR,PITCHA
000014 151 0.94 1.56 1.61 1.56 1.61/SHROUD
000015 181 4.0/
000016 187 4.0/          SODIUM HEAT TRANSFER
000017 221 2.0/          PRE-HEAT
000018 233 4.0/          NUCLEATE-BOILING
000019 239 5.0/          FILM-BOILING
000020 245 3.0/          SUPER-HEAT
000021 251 0.75/          DRYOUT QUALITY
000022 303 2.0/          SLIP
000023 321 99.0/
000024 323 23.00/          MOD.9CR-1MO THERMAL CONDUCTIVITY
000025 329 3.3E-5/          FOULING FACTOR
000026 330 7850.0/
000027 359 25.0/          ROOM TEMP.
000028 9999

```

POPAI-6コード入力データ (静特性解析、給水流量を減少、Na/水流量比=19)

```

000001 POPAI-6 , GNA/GW=19
000002      1
000003 1    1.0
000004 101 824.0 520.0 335.0 43.5 240.0 497.0 175.0 175.0/
000005 116 1.0 0.0/
000006 122 6.0 50.0 36.0 36.0 1.25/
000007 127 0.02361 0.0318 0.02361 0.0318/
000008 129 0.02361 0.0318 0.0/
000009 132 5.0E-5 /          ROUGH
000010 133 2.0 2.0 2.7 2.7/      ZL1,ZH1,ZL2,ZH2
000011 137 10.961 8.22/
000012 139 2.13 2.13/          ZL3,ZH3
000013 141 2.1 0.05 0.06/      ZH4 PITCHR,PITCHA
000014 151 0.94 1.56 1.61 1.56 1.61/SHROUD
000015 181 4.0/
000016 187 4.0/          SODIUM HEAT TRANSFER
000017 221 2.0/          PRE-HEAT
000018 233 4.0/          NUCLEATE-BOILING
000019 239 5.0/          FILM-BOILING
000020 245 3.0/          SUPER-HEAT
000021 251 0.75/          DRYOUT QUALITY
000022 303 2.0/          SLIP
000023 321 99.0/
000024 323 23.00/          MOD.9CR-1MO THERMAL CONDUCTIVITY
000025 329 3.3E-5/          FOULING FACTOR
000026 330 7850.0/
000027 359 25.0/          ROOM TEMP.
000028 9999

```

POPAI-6コード入力データ (静特性解析、給水圧力151kg/cm²a)

```

000001 POPAI-6 EXPERIMENTAL CALCULATION ( GENSIRO.DATA 100% )
000002      1
000003 1  1.0
000004 101 824.0 520.0 335.0 87.0 240.0 497.0 151.0 151.0/
000005 116 1.0 0.0/
000006 122 6.0 50.0 36.0 36.0 1.25/
000007 127 0.02361 0.0318 0.02361 0.0318/
000008 129 0.02361 0.0318 0.0/
000009 132 5.0E-5 /          ROUGH
000010 133 2.0 2.0 2.7 2.7/      ZL1,ZH1,ZL2,ZH2
000011 137 10.961 8.22/
000012 139 2.13 2.13/          ZL3,ZH3
000013 141 2.1 0.05 0.06/      ZH4 PITCHR,PITCHA
000014 151 0.94 1.56 1.61 1.56 1.61/SHROUD
000015 181 4.0/
000016 187 4.0/          SODIUM HEAT TRANSFER
000017 221 2.0/          PRE-HEAT
000018 233 4.0/          NUCLEATE-BOILING
000019 239 5.0/          FILM-BOILING
000020 245 3.0/          SUPER-HEAT
000021 251 0.75/          DRYOUT QUALITY
000022 303 2.0/          SLIP
000023 321 99.0/
000024 323 23.00/          MOD.9CR-1MO THERMALCONDUCTIVITY
000025 329 3.3E-5/          FOULING FACTOR
000026 330 7850.0/
000027 359 25.0/          ROOM TEMP.
000028 9999

```

BOSTコード入力データ (静特性解析、給水圧力151kg/cm²a)

```

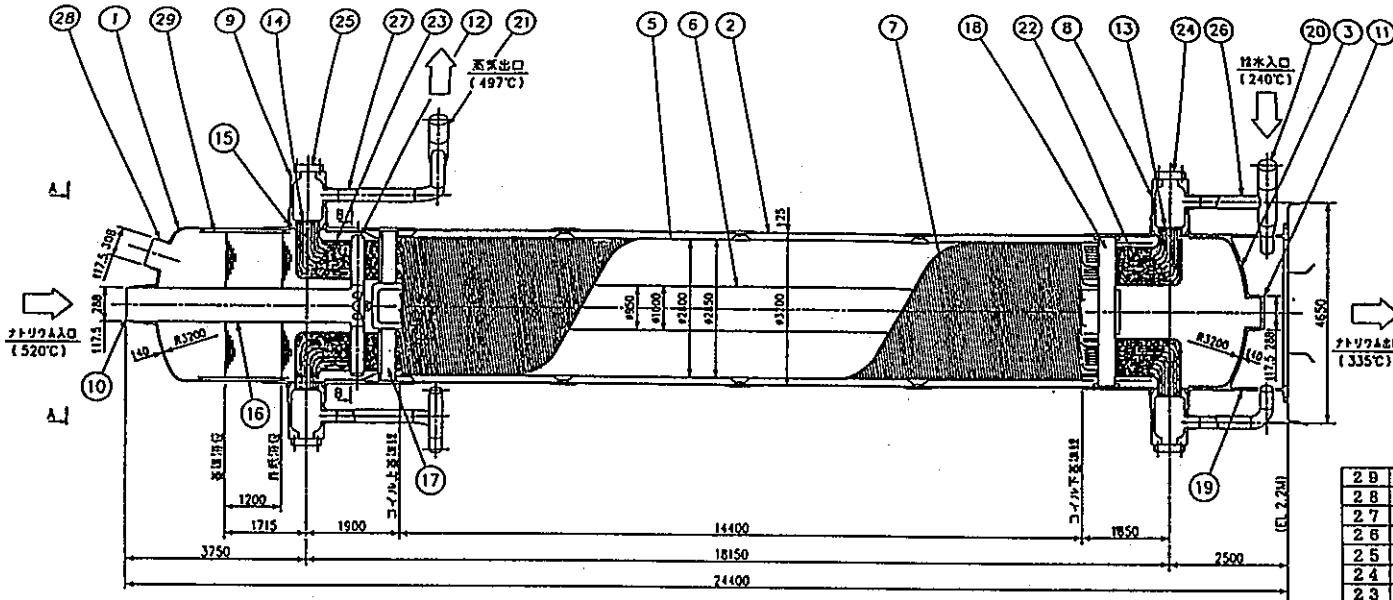
000001 1 -1 0 0 TEST
000002 GENSIRO.DATA(100%) BOST3 (BOTTOM UP)
000003 F F
000004 1 0 0 0 1 150 0 1 0 0
000005 0 0 0 0 0 0 0 1
000006 7850.0 0.161 23.00 2.663 E-05 1.119 E-01
000007 3.536 7850.0 0.161 23.00 0.0
000008 0.0 0.0 0.55624 1.1038 1.1503E-04
000009 0.82442 0.45752 3.0756E-05 0.07761 1.06674
000010 828.78 459.2 9.573 E-03 426.9 0.0
000011 0.0 849.649 0.3041 60.411 2.734
000012 1.78669 6.644 E-05 5.029 E-03
000013 135.58 0.13 0.01303 130.0 255.35
000014 225.00 247.5 87.00 151.89 20.0
000015 0.013000 0.1288 1.21 E-02 0.8717 79.04
000016 0.13 509.73
000017 0.6 0.2 10.0 0.0
000018 0.8 -1.0 0.1 0.1 4.0
000019 0.1 10.0 0.02 0.01 0.01
000020 0.01 0.02 0.04 0.1 0.2
000021 0.3 0.4 0.5 0.6
000022 0.75 0.8 0.9 1.0
000023 6 14 11 14 0 1
000024 36.0 1.56 0.94 8.22 0.0318
000025 0.02361 90.1 36.0 0.091359 1.25
000026 0.02361 33.0 0.02361 0.0 0.0
000027 0.02361 0.0 824.0 87.00 0.75
000028 255.35 509.73 519.40 333.22 3.0000E+04
000029 5.0 E-05 0.0 0.0 0.0 0.0
000030 0.0 0.0 0.0 0.0 12.0
000031 500 1 1 1
000032 1.0 1.0
000033 5 5 5 3 3 3
000034 0.1 0.5 E-07 0.1 100.0
000035 0.0001 1.0 1.0 1.0
000036 0.01 1.0 1.0 1.0
000037
000038 STOP 0 0 0.0
    
```

PNC ZJ 9124 94-006
 「冷却系機器特性試験装置予備設計」
 1994.3

平成3年度「予備的概念設計研究」
 最終報告書

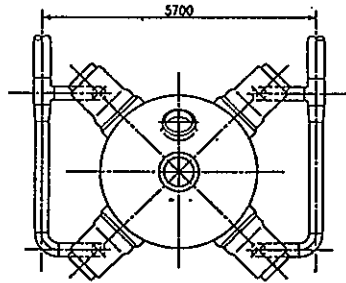
表 1 蒸気発生器主要目表

項 目		単 位	仕 様	備 考	
型 式		—	一体貫流ヘルカリ コイル型		
基 数		基/ループ	1		
交換熱量 (1基当り)		MW t	534		
最高使用圧力 (Na/水)		a t g	5/200		
最高使用温度 (Na/水)		℃	535/530		
運 転 条 件	圧 力	Na	a t g	3	
		水/蒸気 (入口/出口)	a t g	189/175	
	温 度	Na (入口/出口)	℃	520/335	
		水/蒸気 (入口/出口)	℃	240/497	
	流 量	Na (入口/出口)	kg/hr	8.17×10^6	
		水/蒸気 (入口/出口)	kg/hr	8.62×10^5	
	Na 圧 損	摩擦・転向による圧損	kg/cm ²	1.0	
		位置による圧損	kg/cm ²	-1.9	
	構 造 主 要 目	伝熱管材質		—	Mod.9Cr-1Mo 鋼
		伝熱管外径/肉厚		mm	31.8/3.9
伝熱管本数		本	361		
伝熱管ピッチ (径/軸)		mm	50/50		
最内層伝熱管本数		本	10		
コイル層数		層	19		
コイル径 (最内層/最外層)		mm	1000/2800		
コイル傾斜角		D e g	9		
有効伝熱面積		m ²	3300		
必要伝熱面積		m ²	3000		
コイル高さ		m	14.4		

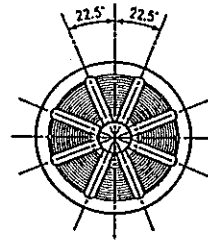


設計仕様	
型式	一体貫流ヘリカルコイル型
基 数	1基/ループ
交換熱量	53.4 MWt
伝熱面積	3300 m ²
最高使用圧力	水/Na 200/- kg/cm ² G
最高使用温度	水/Na 530/535°C
適用基準	MITI 告示501号
	4 種容器

2 B	上部ライナ	1	Mod. 8Cr-1No	
2 8	放出系管台	1	Mod. 8Cr-1No	
2 7	蒸気出口連結管	4	Mod. 8Cr-1No	
2 6	給水入口連結管	4	Mod. 8Cr-1No	
2 5	蒸気出口閉止弁	4	Mod. 8Cr-1No	
2 4	給水入口閉止弁	4	Mod. 8Cr-1No	
2 3	伝熱管出口連結管	361	Mod. 8Cr-1No	
2 2	伝熱管入口連結管	361	Mod. 8Cr-1No	
2 1	蒸気出口パイプヘッド	1式	Mod. 8Cr-1No	
2 0	給水入口パイプヘッド	1式	Mod. 8Cr-1No	
1 9	本体支持スカート	1	Mod. 8Cr-1No	
1 8	内部設置下部支持梁	8	Mod. 8Cr-1No	
1 7	内部設置上部支持梁	8	Mod. 8Cr-1No	
1 6	ナトリウム流入管	1	Mod. 8Cr-1No	
1 5	熱遮断板	8	SUS304	
1 4	蒸気出口管板	4	Mod. 8Cr-1No	
1 3	給水入口管板	4	Mod. 8Cr-1No	
1 2	ナトリウム入口分配管	8	Mod. 8Cr-1No	
1 1	ナトリウム出口管台	1	Mod. 8Cr-1No	
1 0	ナトリウム入口管台	1	Mod. 8Cr-1No	
9	蒸気出口ヘッド	4	Mod. 8Cr-1No	
8	給水入口ヘッド	4	Mod. 8Cr-1No	
7	伝熱管 (コイル)	361	Mod. 8Cr-1No	φ31.8×13.9
6	内筒	1	Mod. 8Cr-1No	
5	シユラウド	1	Mod. 8Cr-1No	
4	ライナ	1	SUS304	
3	下部横板	1	Mod. 8Cr-1No	
2	胴	1	Mod. 8Cr-1No	
1	上部横板	1	Mod. 8Cr-1No	
符号	名 称	数量	材質	備考
主要部品一覧表				



A-A



B-B

平成3年度「予備の概念設計研究」
最終報告書

図1 蒸気発生器概念図

表 1

解析条件 (検討用運転条件)

項目	単位	100%出力		30%出力	
		Fouling	Clean	Fouling	Clean
主蒸気温度	℃	495	←	←	←
主蒸気圧力	kg/cm ² g	169	←	←	←
主給水温度	℃	240	←	180	←
主給水流量	Ton/h	862	←	269	←
SG 出口蒸気温度	℃	497	←	495	←
SG 出口蒸気圧力	kg/cm ² g	175	←	170	←
SG 入口Na 温度	℃	520	514.3	495.6	495.2
SG 出口Na 温度	℃	335	332.5	289.6	289.2
2次Na 流量	Ton/h	8170	←	2550	←
交換熱量	MW t	534	←	187	←
2次Na 流量 主給水流量	-	9.5	←	←	←

表 2

解析条件 (検討用運転条件)

項 目	単位	100%出力			30%出力		
		Na流量 +10%	Na流量 +20%	Na流量 +30%	Na流量 +10%	Na流量 +20%	Na流量 +30%
主蒸気温度	℃	495	←	←	←	←	←
主蒸気圧力	kg/cm ² g	169	←	←	←	←	←
主給水温度	℃	240	←	←	180	←	←
主給水流量	Ton/h	862	←	←	269	←	←
SG出口蒸気温度	℃	508	512	514.5	495.4	495.4	495.5
SG出口蒸気圧力	kg/cm ² g	175	←	←	170	←	←
SG入口Na温度	℃	520	←	←	495.6	←	←
SG出口Na温度	℃	349	362.2	374.2	308	323.5	336.5
2次Na流量	Ton/h	8987	9804	10621	2805	3060	3315
交換熱量	MW t	542.5	545	547	187.1	187.1	187.2
$\frac{2次Na流量}{主給水流量}$	-	10.4	11.4	12.3	10.4	11.4	12.3

表 5

100%出力時 流動安定性解析結果 (Na 流量サーベイ)

JNC TN9410 99-004

	Na 流量 +10%	Na 流量 +20%	Na 流量 +30%
静特性解析結果	<p>Temperature (DEG.C) vs Tube Length (Z) for Na flow +10%. The Na temperature curve starts at ~350°C and rises to ~510°C. The water/steam temperature curve starts at ~250°C and rises to ~500°C.</p>	<p>Temperature (DEG.C) vs Tube Length (Z) for Na flow +20%. The Na temperature curve starts at ~350°C and rises to ~510°C. The water/steam temperature curve starts at ~250°C and rises to ~500°C.</p>	<p>Temperature (DEG.C) vs Tube Length (Z) for Na flow +30%. The Na temperature curve starts at ~350°C and rises to ~510°C. The water/steam temperature curve starts at ~250°C and rises to ~500°C.</p>
流動安定性解析結果	<p>Stability plot for Na flow +10% showing a spiral converging to the origin, labeled "安定" (Stable).</p>	<p>Stability plot for Na flow +20% showing a spiral diverging from the origin, labeled "不安定" (Unstable).</p>	<p>Stability plot for Na flow +30% showing a spiral diverging from the origin, labeled "不安定" (Unstable).</p>

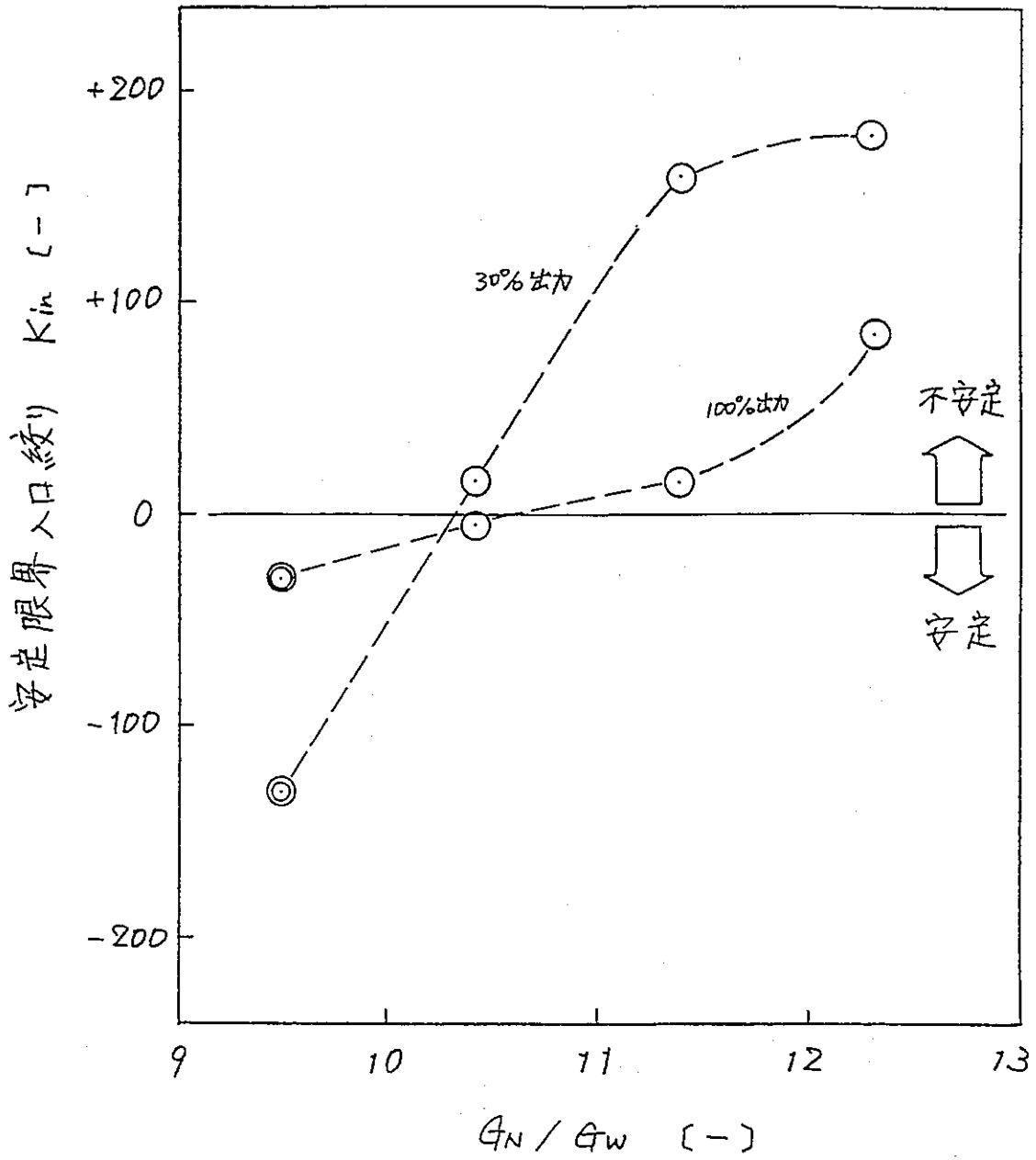


図 1

安定限界入口絞リ

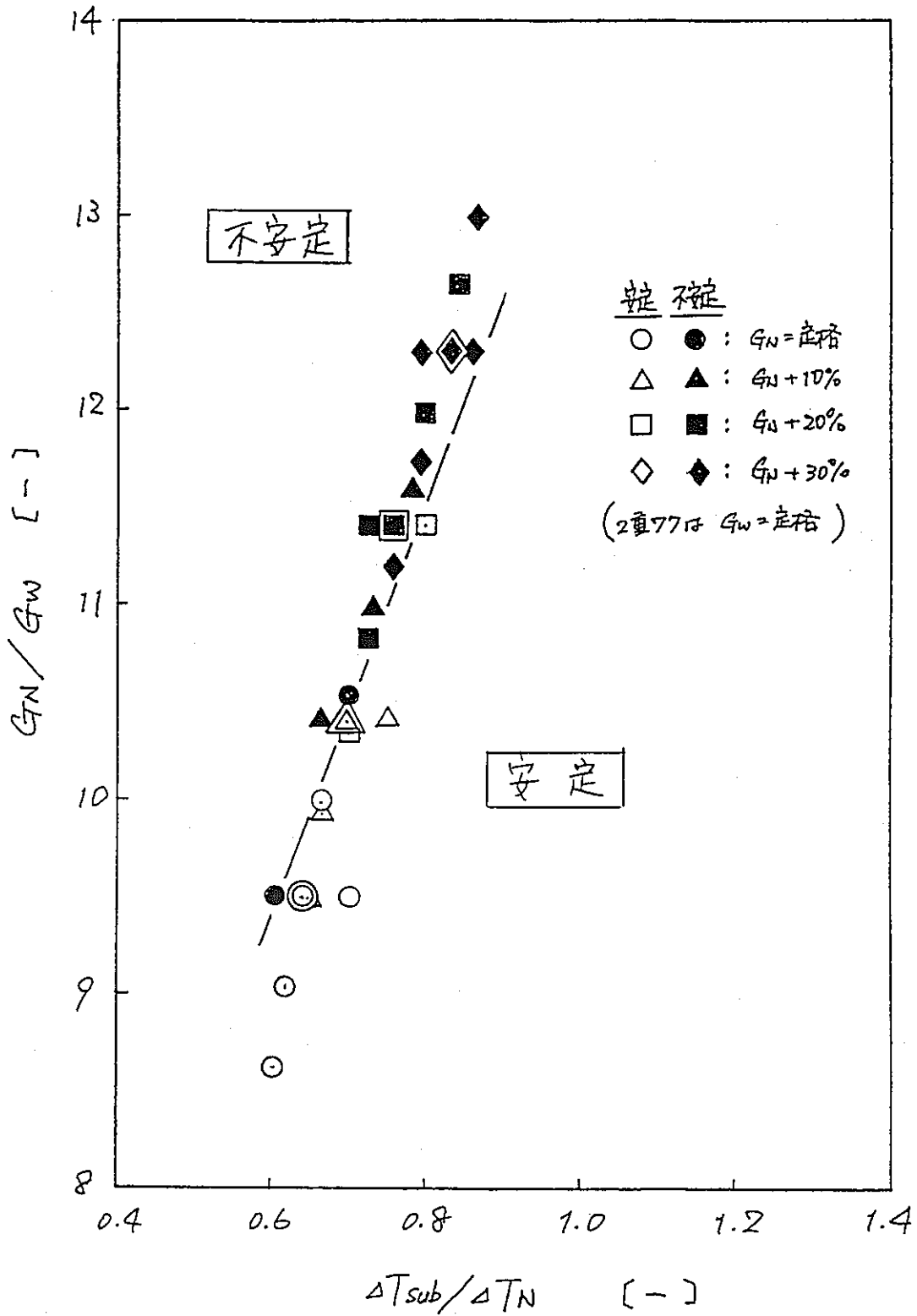


図 4 流動安定性判別マップ B (100%出力)

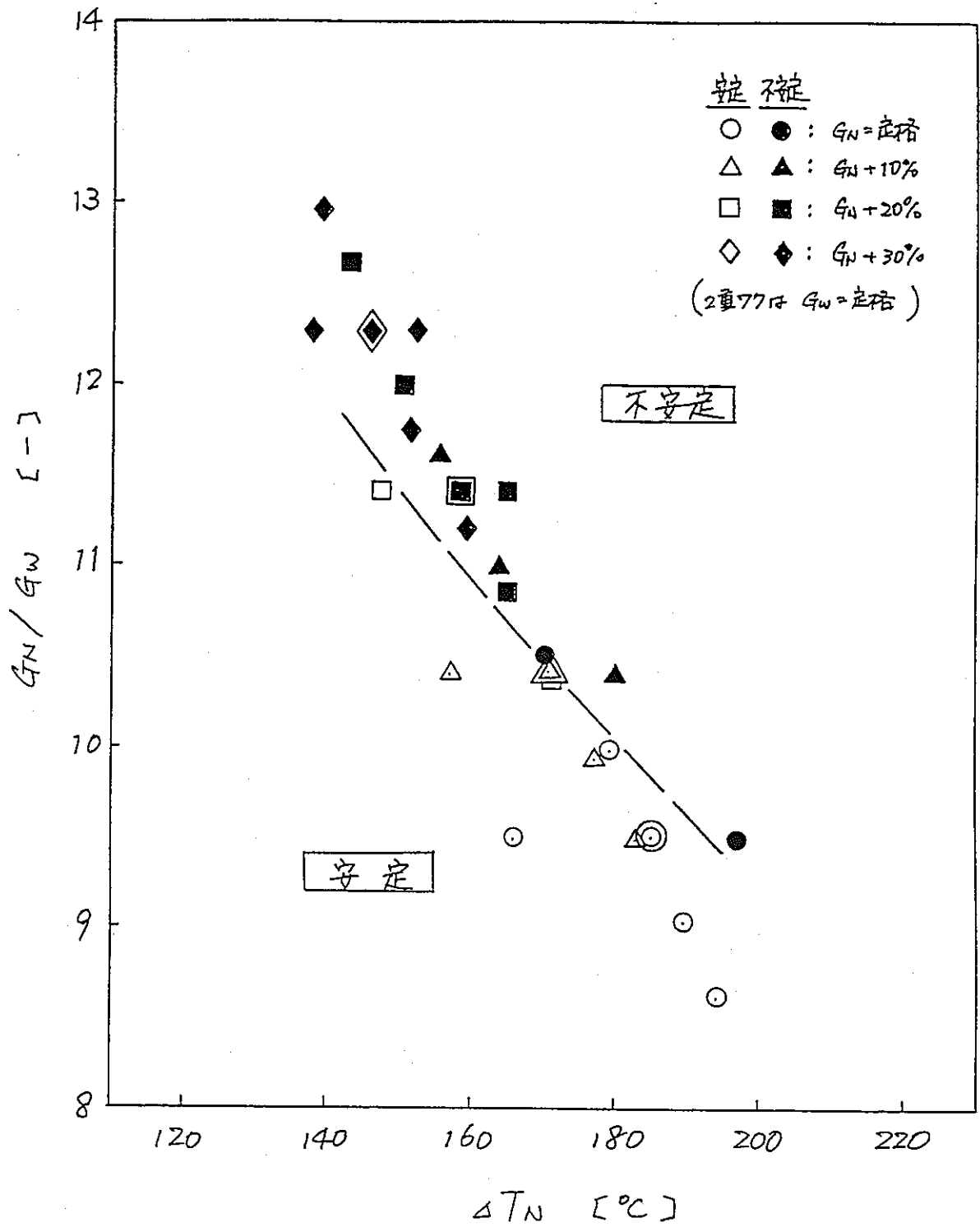


图 5

流動安定性判別マップ (700%出力)

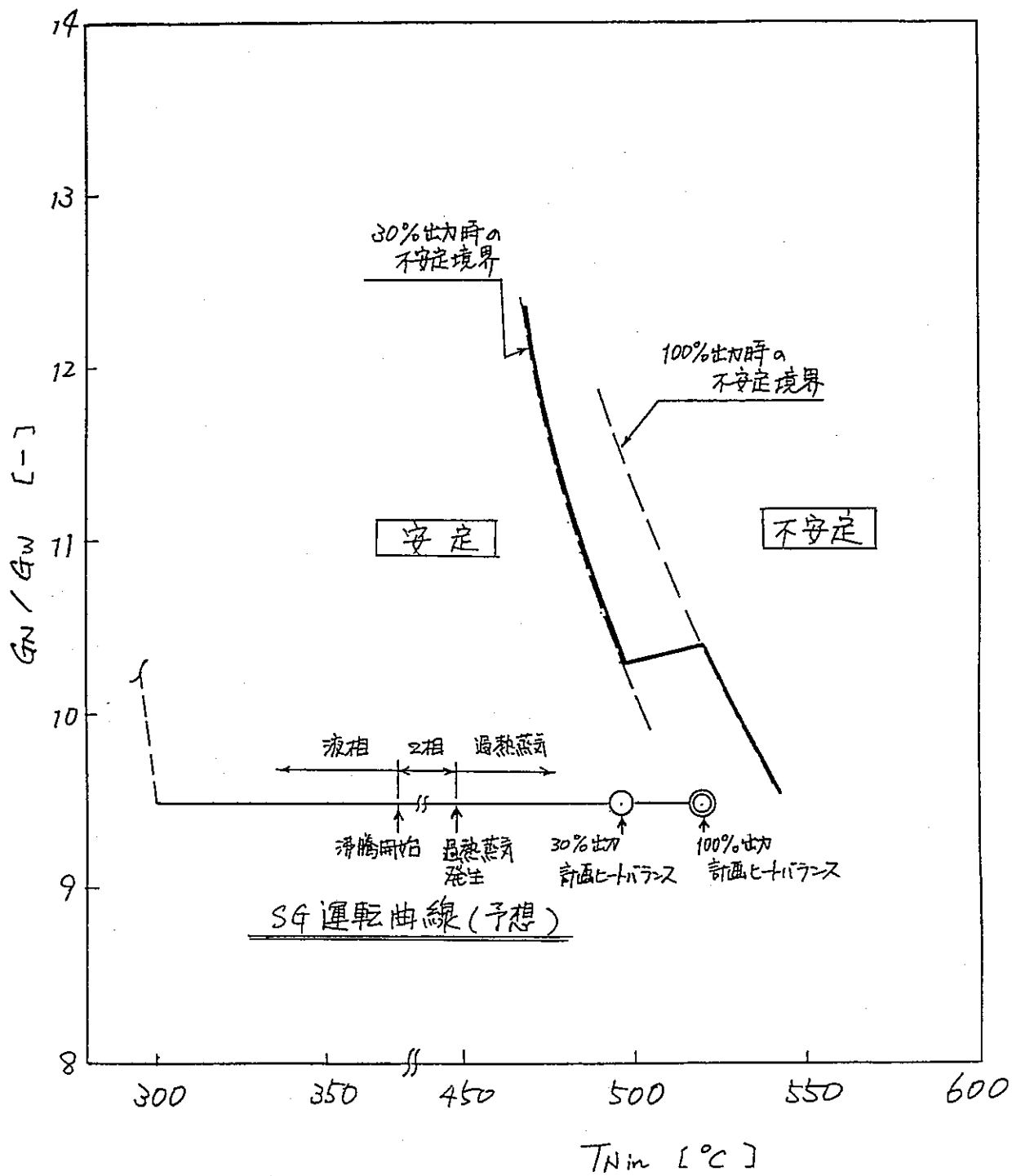


図 6 SG運転時の安定性

PNC ZJ901 78-05 VOL.1
「BOSTコード検証作業報告書」1978.3

b) 1 MW SG 解析結果

安定限界点における振動波形は Fig 49 ~ Fig 57 に示す若干サンプル点を経て、振動波形の短時間では波形が凸凹しているが、蒸気圧力 100 at_a の 4413E を除いてほぼ正弦波状である。BOST コードでは、一般に、沸騰領域が長く、しかも、沸騰領域入口でのナトリウム水の温度差が小さい条件（すなわち、高圧、低流量の条件）において、振動波形はいくつかのモードが現れる傾向がある。このような条件では、沸騰開始点においてナトリウムと水の温度差が小さいため、この点の収熱量は少ない。一方、沸騰領域出口では温度差が大きい（Fig 15, 16, 31, 36, 37 等）ため収熱量が大きい。すなわち、沸騰領域入口と出口で HEAT FLUX の差が大きく、その分布が極端になっている。たとえば、50 MW SG #1 の 60 at_a の条件 8334N (Fig 31), 50 MW SG #2 の IO2-31406 (Fig 36), IO6-50405 (Fig 37), の各ケースにおける安定限界点の温度分布図によれば、ナトリウム温度は沸騰領域に入ると極端に温度が下り、沸騰開始点直傍では水側との温度差は 6°C ~ 8°C 程度になっている。今回解析した 1 MW SG の条件では、沸騰部でのナトリウムと水の温度差が比較的大きく、上記の各条件に較べると沸騰部の Heat Flux 分布は比較的小さいものである。このため、振動波形は単一モードの正弦波状になっているものと思われる。

安定判別結果を流量比対ナトリウム流量の図に記したものを Fig 70 に示す。高圧の条件 (4134J, 4411D) と圧力 130 at_a の条件 (6737) で実験とはずれているその他のケースは、流量比が 1 ~ 2 程度のずれと見られる。この結果を実験の安定限界流量比 vs 計算の安定限界流量比として整理したものを Fig 74 に示す、上記 3 ケースを除くとほぼ ±10% に入っている。

この高圧のケースについて調べるためには、振動周期と水側各部における通過時間を Table 36 に示す。又沸騰部通過時間と振動周期の関係を Fig 79 に示す。但し、実際の通過時間として用いたのは、実験の安定限界条件における BOST ユードの計算結果である。Fig 79 の○印を調べると、他のケースは皆沸騰部の通過時間より通過時間の2倍程度の振動周期を得、○印に対して、高圧の条件(4411D, 4134J)では振動周期が既述非常に短くなっている。このことから、これらのケースの振動モードが他のものと異なることがわかる。振動周期がもっともはずれている4134Jのケースについて温度分布図を見ると Fig 30 に示すようにナトリウム側の温度落差が約6℃と非常に小さく沸騰部と予熱部では水側との温度差が大きい。このナトリウム条件では加熱量が水側の流量変動によりあまり変化しない加熱様式、すなわち電熱加熱の蒸気発生器と同様の条件に近接していることが推察される。一般に電熱加熱の試験では、予熱部通過時間より予熱部通過時間+沸騰部通過時間に起因した振動モードが現れることが知られている^{*}。Table 36 に示した水側各部の通過時間を見ると、4411Dは予熱部通過時間と振動周期が、4134Jは予熱部通過時間+沸騰部通過時間と振動周期が対応していることがわかる。このことに対し BOST ユードの解析結果は Fig 79 の□印に示すように全ケース共に皆沸騰部通過時間の order で振動周期が定まっている。以上のことから上記振動モードを BOST ユードが表現し得ていないと考えられ、その原因としてはサブクール沸騰を考慮しては無い等、あるいは予熱部エントリで輸送モデルが適切ではないのでは無いか等推察されるが、上記2ケースのみの結果からでは明確なことはわかりず、詳細は検討を要する。

*) 有富：東京工業大学 博士論文(1977)

但し、このような条件は本来熱交換型の加熱様式であるナトリウム加熱器発生器においては通常の運転条件で実現し得ず、実機への適用に対しては除外してよい現象と考える。このステップを除いて実験。安定限界流置圧と実験のそれとを比較し、その結果 Fig. 74 に示す。

核動領域については実験結果と比較すると Fig. 81 に示すように約 70% の範囲に入っている。

1 MW SG の解析においても、I.T.R. の安定限界 ($\Delta P - G_w$) 特性曲線上に安定限界を記入すると明瞭に安定限界線が得られる (Fig. 85)。核動の輸水流量は Total の輸水流量であるから、伝熱管 1 本当りの流量はこの半分である。I.T.R. の ($\Delta P - G_w$) 特性曲線と比較すると 1 MW SG の方が圧損が大きい、これは Fig. 1 と Fig. 2 にその形状を示したように伝熱管内径が I.T.R. は 18.3 mm、1 MW SG は 16.16 mm となっており 1 MW SG の方が管径が小さい事によると思われる。このように形状により安定限界圧損も変化するため、このような安定判別図は撹拌が異なることにより若干変化する。この安定判別図のその他の特性はともに I.T.R. で示した事か 1 MW SG の解析でも確認される。

* 鈴置：Na 技術専門委員会蒸気発生器安定性検討会報告書

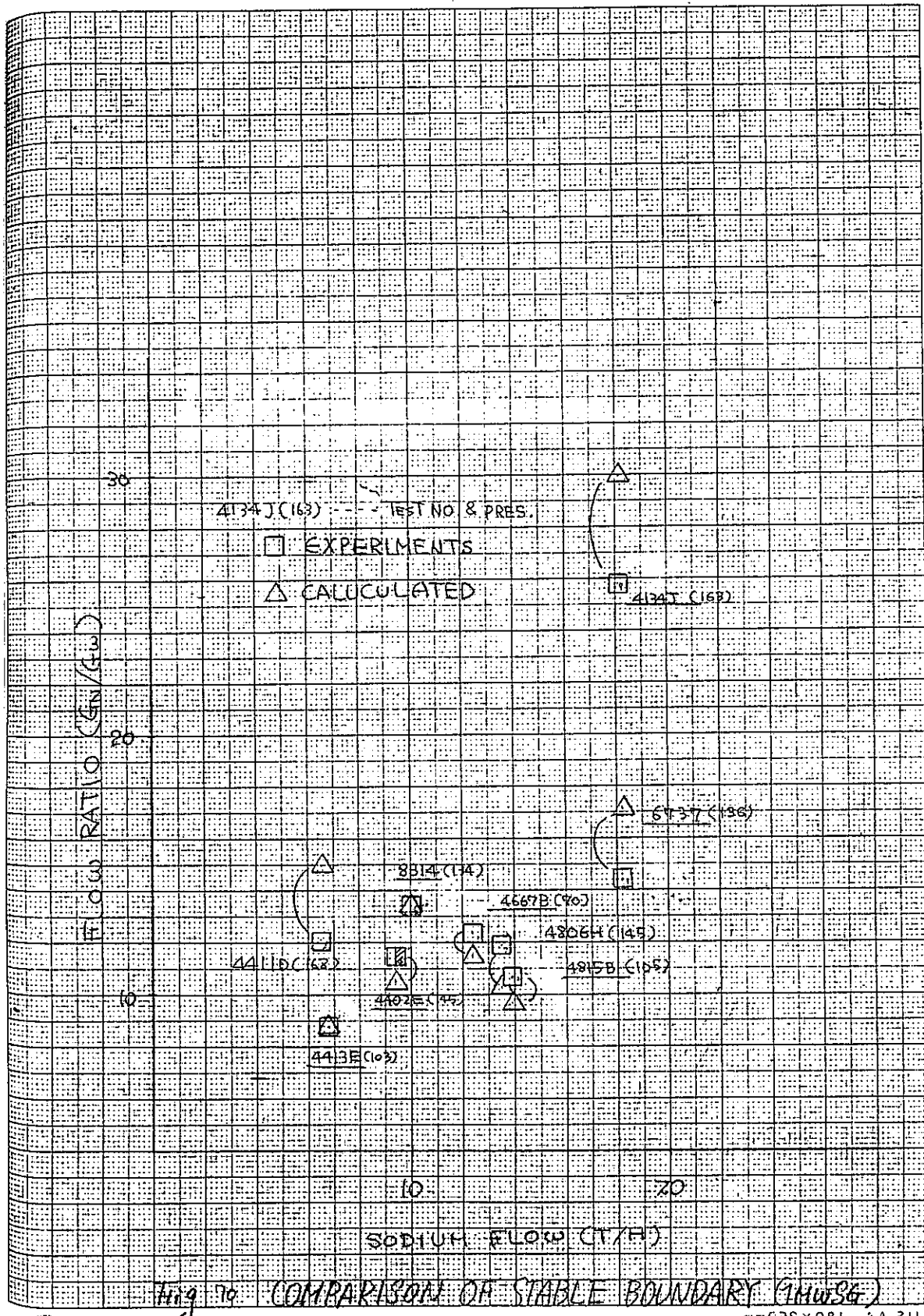


Fig 7c COMPARISON OF STABLE BOUNDARY (MWSG)



H 37 I

m:GDSx081 4A 21L

PNC ZJ201 75-32

Na加熱蒸気発生器時間領域安定性解析コード使用説明書

3.2.4 過熱部

すでに述べたごとく、過熱蒸気は過熱部、過熱器（旧1 MW SGの過熱部に対応）、および直管非加熱部に存在するものとする。（図3.7参照）

過熱蒸気についてはその数学モデルを解析的に扱えるようにするために、その状態方程式を次式で近似する。

$$v = \frac{1}{\rho_s} = \frac{K}{p} (H_s - H^*) \quad (3.66)$$

エネルギー保存則は少し書きかえを行うと

$$\frac{\partial H_s}{\partial t} + u \frac{\partial H_s}{\partial z} = v \phi_s + \frac{v}{J} \frac{dp}{dt} \quad (3.67)$$

質量保存則および上式より

$$\left(\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial p} + \frac{1}{J} \frac{\partial v}{\partial H} \right) \frac{dp}{dt} = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial H_s} \phi_s \quad (3.68)$$

たゞし圧力PについてはそのZ依存性を無視して、圧力波の影響を除くようにしている。また沸騰部においてすでに述べたように圧力変化は蒸気発生器全体で評価するので、その導出については後述する。

dp/dt を既知として(3.68)を微小区間(Z_i, Z_{i+1})について積分し $U=vG_s$ を用いて書なおすと

$$G_s(Z_{i+1}) = \left\{ \phi_{s,i} \Delta Z_i + G_s(Z_i) \cdot (H_s(Z_i) - H^*) - \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{J} \right) \frac{dp}{dt} \Delta Z_i \right\} \\ \times \frac{1}{H_s(Z_{i+1}) - H^*} \quad (3.69)$$

となる。

・過熱部蒸気流量関係式の導出

過熱部蒸気流量の計算で圧力のZ方向依存性を考慮した場合の関係式を導出する。

エネルギー保存則

$$\rho_s \frac{\partial H_s}{\partial t} + G_s \frac{\partial H_s}{\partial z} = \phi_s + \frac{1}{J} \frac{\partial P}{\partial t}$$

$$\frac{G_s}{\rho_s} = u \quad \frac{1}{\rho_s} = V \quad \text{及び} \quad \rho_s \quad \text{より}$$

$$\frac{\partial H_s}{\partial t} + u \frac{\partial H_s}{\partial z} = V \phi_s + \frac{V}{J} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (3.67)$$

$$V = \frac{1}{\rho_s} = \frac{K}{P} (H_s - H^*) \quad (3.66)$$

(3.66)式を代入すると、

$$\frac{\partial H_s}{\partial t} + u \frac{\partial H_s}{\partial z} = \frac{K}{P} (H_s - H^*) \phi_s + \frac{K}{J P} (H_s - H^*) \frac{\partial P}{\partial t} \quad \textcircled{1}$$

質量保存則

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial G_s}{\partial z} = 0$$

$$\frac{G_s}{\rho_s} = u \quad \frac{1}{\rho_s} = V \quad \text{及び} \quad \rho_s \quad \text{より}$$

$$\frac{\partial V^{-1}}{\partial t} + \frac{\partial u V^{-1}}{\partial z} = 0$$

(3.66)式を代入すると、

$$\frac{dP}{dt} - \frac{P}{(H_s - H^*)} \frac{\partial H_s}{\partial t} + P \frac{\partial u}{\partial z} + u \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{uP}{(H_s - H^*)} \frac{\partial H_s}{\partial z} = 0 \quad \textcircled{2}$$

①式と②式より $\frac{\partial H_s}{\partial t} + u \frac{\partial H_s}{\partial z}$ を消去すると、

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{K}{P} \phi_s + \frac{1}{P} \left(\frac{K}{J} - 1 \right) \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{u}{P} \frac{\partial P}{\partial z} \quad \textcircled{3}$$

③式にて、圧力PのZ方向依存性を無視して $\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{dP}{dt}$ 、 $\frac{\partial P}{\partial z} = 0$ とし、 $V = \frac{K}{P} (H_s - H^*)$ 、

$\frac{\partial V}{\partial P} = -\frac{K}{P^2}(H_s - H^*)$ 及び $\frac{\partial V}{\partial H_s} = \frac{K}{P}$ の関係を用いれば(3.68)式が導かれる。

③式を Z_i から Z_{i+1} で積分する。

$$\begin{aligned} \text{(③式左辺の積分)} &= \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial u}{\partial z} dz = u(z_{i+1}) - u(z_i) = V(z_{i+1})G(z_{i+1}) - V(z_i)G(z_i) \\ &= \frac{K}{P(z_{i+1})}(H_s(z_{i+1}) - H^*)G(z_{i+1}) - \frac{K}{P(z_i)}(H_s(z_i) - H^*)G(z_i) \end{aligned} \quad \text{④}$$

③式の右辺を積分するに当たり、以下のごとき近似を行う。ここで、 \bar{X} は Z_i から Z_{i+1} での X の平均値を示す。

$$\begin{aligned} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{K}{P} \phi_s dz &= \frac{K}{\bar{P}} \bar{\phi}_s \Delta z_i \\ \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{1}{P} \left(\frac{K}{J} - 1 \right) \frac{\partial P}{\partial t} dz &= \frac{1}{\bar{P}} \left(\frac{K}{J} - 1 \right) \frac{dP}{dt} \Delta z_i \\ \int_{z_i}^{z_{i+1}} -\frac{u}{P} \frac{\partial P}{\partial z} dz &= -\frac{\bar{u}}{\bar{P}} P(z_{i+1}) - P(z_i) \end{aligned}$$

以上より

$$\text{(③式右辺の積分)} = \frac{K}{\bar{P}} \bar{\phi}_s \Delta z_i + \frac{1}{\bar{P}} \left(\frac{K}{J} - 1 \right) \frac{dP}{dt} \Delta z_i - \frac{\bar{u}}{\bar{P}} P(z_{i+1}) - P(z_i) \quad \text{⑤}$$

④式=⑤式より、以下の式が導かれる。

$$\begin{aligned} G(z_{i+1}) &= \left\{ \frac{P(z_{i+1})}{\bar{P}} \bar{\phi}_s \Delta z_i + G(z_i)(H_s(z_i) - H^*) \frac{P(z_{i+1})}{P(z_i)} \right. \\ &\quad \left. - \frac{P(z_{i+1})}{\bar{P}} \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{J} \right) \frac{dP}{dt} \Delta z_i - \frac{P(z_{i+1})}{\bar{P}} \frac{\bar{u}}{K} (P(z_{i+1}) - P(z_i)) \right\} \frac{1}{H_s(z_{i+1}) - H^*} \end{aligned} \quad \text{⑥}$$

⑥式は圧力の Z 方向依存性を考慮した場合の(3.69)式に相当する。

以上の導出により、BOSTコード内の(3.69)式を⑥式に入れ替えた。

＜質量流速の計算に関するメモ＞

- 1193 DDGEIT = GEIT(I) - COEF(15) [DYNAM1]
 質量流速偏差 給水質量流速 給水質量流量初期値
 動特性計算結果
- COMMON 文にて、ZZ000R(433~435)≡GEIT(1~3) [INTEG]
- 1824 ZZ001R() = ZZZ000R(ZZ000I)
- 1849 ZZ000A = ZZ002R() + ZZ000H × ZZ000P()
- 1854 ZZ000R() = ZZ000A
- 320 EQUIVALENCE() (DTGEIT(1), ZZ000P(433)) [DERIV1]
- 522 DTGEIT(I) = (PHDFWT - PE1T(I) - XGEIT -
 d 給水流量/dt (kg/m²·s²) 給水ヘッパ^{*}圧力 (kg/cm²) 沸騰開始点圧力 (kg/cm²) 予熱部摩擦損失
 XVOIY) / XINR
 予熱部位置水頭(kg/cm²) (m²·s²/cm)
- 514 PE1T(I) = PE3T(I) + XGE2A + XGE2A1 + DTGE +
 (3.59式) 沸騰開始点圧力 (kg/cm²) 過熱部入口圧力 沸騰部摩擦損失 沸騰部位置水頭 d(給水流速・メッシュ長/g)/dt
 (GE2(I,IDB2) × GE2(I,IDB2) / RE2GT -
 二相流質量出口流速 (kg/m²·s) 二相流質量流速 飽和蒸気密度 (kg/m³)
 GEIT(I) × GEIT(I) / RE2FT) × COEH(5) -
 給水質量流速 (kg/m²·s) 飽和水密度 10E-4/9.8 (m·s²/cm)
 (DTZE(I,IDB2A) × GE2(I,IDB2) -
 DTZE(I,1) × GEIT(I) × COEH(5)
- 510 XGE2A = XGE2A + XGEIT1
 沸騰部摩擦損失
- 506 XGE2A = XGE2A + COB(K,4) × GE2(I,K)2 × XRE ×
 (沸騰部で積算) 沸騰部摩擦係数/2・管内径 二相流質量流速 (m⁴/kg)
 COEH(5)
- 509 XGEIT1 = COEF(40) × GEIT(I)2 / RE2FT ×
 沸騰開始点1/2メッシュの摩擦損失
 (ZE(I,2) - ZE(I,1) / 2. × COEH(5)
 K番目沸騰部分割点までの距離
- 3448 COEF(40) = FS2 × RMC(1)/2./DATASG(6) × ETA1
 沸騰開始点管摩擦係数 管内径(m) =1.0
- REB = GS × DATASG(6) / DATAPC(32)
 沸騰開始点Re数初期値 質量流速 (kg/m²·s) 管内径(m) 飽和水粘性係数 (kg/m·s)
- 509 XRE = (ZE(I,K+2) - ZE(I,K)) / (2. × RE2FT)
 K番目沸騰部分割点までの距離(m) 飽和水密度(kg/m³)
- 501 XRE = (ZE(I,IDB2A) - ZE(I,IDB2)) / (2. × RE2GT)
 沸騰部最終メッシュのみ 飽和蒸気密度(kg/m³)
- 3397 COB(K-1,4) = FS2 × RMC(K) / 2. / DATASG(6) × ETA1
 沸騰部摩擦係数/2・管内径(1/m)
- 3397 COB(IDB2,4) = FS3 / 2. / DATASG(6) × ETA1
- 2584 CALL LOSCO (FS2, EPSD(2), REB)
 摩擦係数の計算 沸騰開始点摩擦係数 管内面粗さ/管内径 沸騰開始点Re数初期値

$$GE2(I, IDB2) \times COEH(5) + XGE3A + XGE3A1 + XGE3A2$$

二相流出口質量流速

463

$$PSIT(I) = PLAT + COEF(21) \times GSOT(I)^2 / RSOT(IDSH) +$$

過熱部入口蒸気圧力 蒸気ヘッダ圧力

$$RSOT(IDSH) \times COEF(28) - COEF(20) \times$$

下流非加熱部長さ 管径差=0

$$GSAT(IDSH, I)^2 / RSOT(IDSH) + XGSAT1 + XGSAT2 +$$

過熱器部質量流速 過熱器摩擦損失

$$COEF(34) / COEF(33) / 2. \times GSAT0^2 / RSIT(1) +$$

$$COEH(5) \times (GSAT(IDSH, I)^2 / RSOT(IDSH) -$$

10⁴/9.8(m·s²/cm) 過熱器部出口質量流速 過熱器部出口密度

$$GSAT0^2 / RSIT(1)) - COEF(22) \times GE3AT(I)^2 /$$

過熱部入口密度 管径差=0 過熱部質量流速

$$RE3OT + DTGSAT$$

過熱部境界密度 -0

456

$$XGSAT1 = XGSAT1 + COEF(34) / COEF33 \times GSAT(K, I)^2 /$$

過熱部摩擦損失 過熱部質量流速

RSATC

過熱部各メッシュ出入口の平均密度

$$COEF(34) = FS4 / 2. / DATASG(11)$$

過熱器部摩擦係数初期値 管内径(m)

426

(3.69式)

$$GSAT(K, I) = (COEF(36) \times QE1T(I, J)$$

過熱部質量流速 過熱器部初期値長さ(m) 過熱器部単位長さ当たりの収熱量(kcal/m)

$$+ GSATX \times (HSIT(K) - COEH(1))$$

1メッシュ上流側の過熱部質量流速 エンタルピ(kcal/kg) 比体積計算用定数 H*(kcal/kg)

$$- DTPE3A(I) \times XGSAT / COEH(3))$$

dP/dt メッシュ長さ

$$/ (HSIT(K+1) - COEH(1))$$