

50MW蒸気発生器静特性性能予想

“POPAI2”の紹介

1974年7月

区分変更	
変更後資料番号	PNC TN943 74-02
決裁年月日	平成10年3月26日

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は動燃事業団の開発業務を進めるため限られた関係者だけに配布するものです。したがってその取扱いには充分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載引用等には事業団の承認が必要です

動力炉・核燃料開発事業団
計画管理部技術情報室

50 MW 蒸気発生器 静特性性能予想

“POP AI 2” の紹介

報告者 金森昭士*

白石良二*

山下英俊*

期間 1974年4月1日 ~ 1974年7月30日

目的 50 MW 蒸気発生器の静特性試験および試験計画に先立ち、静特性性能予想コード
“POP AI”を補足するためにそのモデルを簡略化したコード“POP AI 2”を開発し、各種
静特性性能予想を行なったので報告する。

要旨

ヘリカルコイル型蒸気発生器の静特性試験計画にあたり“POP AI”の補助的演算を目的としたコード“POP AI 2”を作成した。コードは“POP AI”のモデルを簡略化したものであり、次の演算が可能である。

- (1) ナトリウム/給水流量比が一定で、水/蒸気側条件を与えた場合のナトリウム入口温度の決定。
- (2) 水/蒸気側条件およびナトリウム入口温度を与えた場合のナトリウム流量の決定。
- (3) ナトリウム/給水流量比が一定で、給水温度およびナトリウム入口温度を与えた場合の出口蒸気温度の決定。

また上記計算が蒸発器、過熱器結合運転モードの場合および、蒸発器単体運転モードの場合の両者についても行なうことができる。本コードを用いて単体および結合運転モードの場合の各種パラメータサーベイを行ない、種々の運転条件下における静特性性能予想を行なった結果、次のことが予想された。

- (イ) 結合運転モード時の操作範囲は各種制限のため極端に狭い領域となる。
- (ロ) 単体運転モード時の操作範囲は結合モード時に比較してやや広いものの非常に狭い領域となる。

目 次

第I章 緒 言	1
第II章 静特性性能予想コード“POPAI”との相異点	2
II-1 モデルおよび仮定	2
II-2 基 礎 式	3
II-3 伝熱計算式	3
II-4 物 性 値	3
第III章 計算コードの構成	7
III-1 微分方程式の解法および収束手法	7
III-2 入 力	7
III-3 出 力	13
第IV章 “POPAI”と“POPAI 2”との演算結果の比較	18
IV-1 水/蒸気側圧力の影響	18
IV-2 ダウンカマの影響	19
第V章 “POPAI 2”による静特性性能予想	24
V-1 蒸発器単体運転モード	26
V-2 蒸発器, 過熱器結合運転モード	33
第VI章 結 言	54
記 号 表	56
参考文献	55

Table List

Table II - 1	仮定項目の比較	2
Table II - 2	" POPAI " の伝熱計算式	4
Table II - 3	" POPAI 2 " 伝熱計算式	5
Table II - 4	ナトリウム物性値計算式	6
Table III - 1	" POPAI 2 " 入力式	11
Table III - 2	" POPAI 2 " 変数対応法	12
Table III - 3	入出力一覧表	13
Table IV - 1	" POPAI " および " POPAI 2 " 入出力条件表 (圧力の影響)	18
Table IV - 2	" POPAI " および " POPAI 2 " 入出力条件表 (ダウンカマの影響)	19
Table V - 1	蒸気発生器設計条件	24
Table V - 2	" POPAI 2 " による計算範囲および定数値	26
Table V - 3	蒸気発生器設計諸式	27

Figure List

Fig. III-1	"POPAI 2" フローチャート	8
Fig. III-2	"POPAI 2" サブプログラム構成	9
Fig. III-3	出力例	14
Fig. III-4	"	15
Fig. III-5	"	16
Fig. III-6	"	17
Fig. IV-1	"POPAI" と "POPAI 2" との比較 (圧力の影響) 100% Load	20
Fig. IV-2	"POPAI" と "POPAI 2" との比較 (圧力の影響) 30% Load	21
Fig. IV-3	"POPAI" と "POPAI 2" との比較 (ダウンカマの影響) 100% Load	22
Fig. IV-4	"POPAI" と "POPAI 2" との比較 (ダウンカマの影響) 30% Load	23
Fig. V-1	蒸気発生器設計運転条件	25
Fig. V-2	単体運転モード (蒸気出口温度の決定)	28
Fig. V-3	単体運転モード (ナトリウム入口温度の決定)	29
Fig. V-4	単体運転モード (ナトリウム流量の決定)	30
Fig. V-5	単体運転モード (感度)	31
Fig. V-6	単体運転モード (ナトリウム入口温度の影響)	32
Fig. V-7	結合運転モード, 設計値評価 (過熱蒸気出口温度の決定)	35
Fig. V-8	結合運転モード, 設計値評価 (ナトリウム入口温度の決定)	36
Fig. V-9	結合運転モード, 設計値評価 (ナトリウム流量の決定)	37
Fig. V-10	結合運転モード, 設計値評価 (流量比 8)	38
Fig. V-11	" " (" 9)	39
Fig. V-12	" " (" 10)	40
Fig. V-13	" " (" 11)	41
Fig. V-14	" " (" 12)	42
Fig. V-15	結合運転モード, 流量比の影響 (蒸発器出口蒸気温度変化)	43
Fig. V-16	" " (過熱器出口ナトリウム温度変化)	44
Fig. V-17	" " (過熱器出口蒸気温度変化)	45
Fig. V-18	結合運転モード, ナトリウム温度の影響 (蒸発器出口蒸気温度変化)	46
Fig. V-19	" " (過熱器出口ナトリウム温度変化)	47
Fig. V-20	" " (蒸発器出口蒸気温度変化)	48
Fig. V-21	" " (過熱器出口蒸気温度変化)	49
Fig. V-22	" " (蒸発器出口蒸気温度変化) R = 9.0	50
Fig. V-23	感度試験条件表	51
Fig. V-24	感度試験条件サーベイ (流量比 10)	52
Fig. V-25	感度試験条件サーベイ (流量比 9)	53

第 I 章 緒 言

現在50MW蒸気発生器試験室では、各種の静特性および動特性試験の試験計画が立案されつつある。

すでに当試験室では静特性性能予想コード“POPAI”および試験解析コード“OLIVE”を開発し、試験計画ならびに試験データ解析に活用しているが、試験計画においては、蒸気発生器の性能を精度よく予想する事が試験の成果を決するものであり、そのためには“POPAI”をいかに効率よく試験計画に役立たせるかによって左右される。“POPAI”はヘリカルコイル型蒸気発生器の性能予想を行なうとともに、試験解析をも主目的としたため、その解析モデルが複雑で、演算にあたっては入出力量演算時間が多大で、計算費、出力データの整理等の面から効率よく活用するにはおのずと限界がある。

また現状では“POPAI”の演算は蒸気発生器の出口蒸気温度を最終的に求めるものであり、蒸気発生器のおおのこの単独性能予想は行なうことができるが、蒸発器、過熱器の結合運動モードの場合の性能予想を行なうことは困難である。

このため“POPAI”の持つ、これらの欠点を補うため、下記の目的性格を持つコードを作成する必要が生じた。

- (1) 演算時間の短縮
- (2) 入出力データの縮小
- (3) 演算能力の増強（単体モード、給合モードの予想および出力変数の多様性）

上記項目のうちいくつかは現在の“POPAI”の改良によっても可能ではあるが、すべての目的を果たすことは困難である。また目的とするコードは“POPAI”モデルの簡略化にあるが、それにより精度が極端に低下することは防がねばならない。

これらの目的にそって“POPAI”の持つ欠点を補足するコード“POPAI 2”を作成し、両コードをもとに50MW蒸気発生器の試験計画ならびに運転性能予想を活用した。

本書は、“POPAI 2”の概略説明を行なうとともに、試験計画を逐行する上で行なった各種計算の一部ならびに、50MW蒸気発生器の各種静特性予想を報告するものである。

第Ⅱ章 静特性性能予想コード“POPAI”と相異点

Ⅱ-1 モデルおよび仮定

“POPAI 2”作成の第1の目的は演算時間の短縮である。

“POPAI”でのモデル¹⁾はヘリカルコイル径によって伝熱管間を分割し、各ナトリウム流路および水/蒸気側流路は互いに独立であると考え、ナトリウム側流路間の運動量および熱量のうず拡散を考慮しながらエネルギーおよび運動方程式群を解くものである。このため“POPAI”における演算時間のほとんどが各流路間の方程式群を解くのに費される。

したがって、まず第1の簡略化は多流路モデル(多管モデル)から、単流路モデル(単管モデル)に変更することである。

この簡略化により、ナトリウム側の運転量および熱量のうず拡散の計算が取り除かれる上に、多流路モデルに欠くことのできない圧力分布計算を同時に省くことができ、さらにもし水/蒸気側の圧力分布計算を省くことができれば、計算はさらに短縮できる。幸いなことに50MW蒸気発生器の設計圧力運転が132 kg/cm²Gと比較的に高い圧力のため、熱伝達等の計算に及ぼす圧力の影響は比較的少いと考えられる。

この理由のため、第2の簡略化としては水/蒸気側の圧力分布計算式を取り除くことである。

“POPAI”においては、水/蒸気側、ナトリウム側それぞれの蒸気発生器出口の圧力損失計算を行なっているが、第2の簡略化により、これらの圧力損失計算も同時に省くことができる。

第3の簡略化としては、ダウンカマの存在を省くことであろう。これによって蒸気発生器の低負荷運転時にはある程度の影響はあるが、高負荷時にはほとんど問題ないと予想される。

以上までの第1～第3までの簡略化をまとめてTable II-1に仮定項目の比較を行なっている。

Table II-1 仮定項目の比較

POPAI (多管モデル)	POPAI 2(単管モデル)
(1) ヘリカルコイル径でナトリウム流路を分割する。	(1) 水/蒸気側およびナトリウム流路は単一である。
(2) 層(流路)内の半径方向、軸方向の速度分布および温度分布は無視できる。	(2) 不要
(3) 流れ方向の熱伝導効果は無視する。	(3) 同 左
(4) ナトリウム側半径方向の静圧分布はないものとし偏流は考えない。	(4) 不要
(5) 流路間のナトリウム混合効果は集中定数系的取り扱いとし、評価は同一手法とする。	(5) 不要
(6) 水/蒸気側伝熱管内流路断面での熱伝達および流体温度は均一とする。	(6) 不要
(7) カバーガス中にある上昇管の伝熱効果は無視する。	(7) 不要
(8) 軸方向の寸法、形状は一定とする。	(8) 同 左
(9) 給水ヘッダーと蒸気出口管板間での水/蒸気側圧力損失は、各流路につき一定である。	(9) 水/蒸気側に圧力分布はない。
	(10) 放熱損失はない。
	(11) SGはヘリカルコイルのみより構成されダウンカマ直管部は存在しない。

II-2 基礎式

先に述べた解析モデルにより、基礎式は非常に単純になる。すなわち、ナトリウム側、水/蒸気側の運転方程式は不必要となりナトリウム側および水/蒸気側のエネルギー式のみとなり、しかも両式はそれぞれ単一の微分方程式で表わすことができる。

ナトリウム側

$$\frac{dH_N(i)}{dZ} = \frac{Q_N(i)}{W_N} \quad (\text{II-1})$$

水/蒸気側

$$\frac{dH_W(i)}{dZ} = \frac{Q_N(i)}{W_W} \quad (\text{II-2})$$

ここで

$$Q_N(i) = A(i) \cdot K(i) \cdot \{T_N(i) - T_W(i)\} \quad (\text{II-3})$$

II-3 伝熱計算式

前節で述べた如く、本コードに使用した伝熱計算式は、“POPAI”で使用したものと全く同一であるが、種々の簡略化を計ったため不必要となったり、また省略した式がいくつかある。

それらは、

(1) カバーガス部の等価熱伝達率

仮定の項で述べた如く、本モデルでは蒸気発生器にはカバーガス層がないので省略される。

(2) ダウンカム、直管部のナトリウム側、水/蒸気側熱伝達率

上記と同様、本モデルではダウンカム部、直管部がないので省略される。

(3) 蒸気発生器外からの放熱損失はない。

以上、本コードに使用した計算式および“POPAI”にて使用した計算式を比較のため Table II-2, II-3 に示す。

II-4 物性値

II-4.1 水/蒸気側物性値

蒸気発生器静特性解析コードにおいては、全演算時間に占める物性値計算の割合が最も大きいと考えられ、コードの作成に当っては、蒸気表をいかにうまく利用するかによって左右される。

このため、日本機械学会の蒸気発生表(1968)をテーブル形式で読み取ることとし、1 MW 蒸気発生器試験室で作成した蒸気表“STABL”を用いた。しかしこの蒸気表は圧力範囲が狭いので、低圧域での計算はできない。このため全範囲にわたる演算も可能となる様に、低圧域のデータをも含めた蒸気表“STABLNEW”を新しく作成した。

“STABLNEW”を組み込む場合には、蒸気表範囲が広がるため、演算時間もそれに対応して

Table II - 2 "POPAI" 伝熱計算式

		単相流域	核沸騰域	膜沸騰域
側 ナ ト リ ヲ ウ ヲ 側	水 / 蒸 気 側 コ ル イ 部 カ リ カ リ 部	液相 (森-中山の式) $\alpha_L = \frac{\lambda_L}{d_i} \left[\frac{1}{41 \text{Pr}_L^{0.6} - 0.0062} \text{Re}_L^{5/6} \left(\frac{d_i}{D_{\text{coil}}} \right)^{1/2} \left[1 + \frac{0.061}{\left\{ \text{Re}_L \left(\frac{d_i}{D_{\text{coil}}} \right)^{2.5} \right\}^{1/6}} \right] \right]$	修正 Schrock - Grossman の式 $\alpha_{NB} = 2.5 \left(\frac{1}{x_{tt}} \right)^{0.75} \xi_P \cdot \alpha_{LX}$	$\alpha_{FB} = \frac{1-X}{1-X_{DNB}} \alpha_{NB} + \frac{X-X_{DNB}}{1-X_{DNB}} \alpha_{GB}$
		ガス層 (森-中山の式) $\alpha_G = \frac{\lambda_G}{d_i} \left[\frac{1}{26.2 \text{Pr}_G^{2/3} - 0.074} \text{Re}_G^{4/5} \left(\frac{d_i}{D_{\text{coil}}} \right)^{1/10} \left[1 + \frac{0.098}{\left\{ \text{Re}_G \left(\frac{d_i}{D_{\text{coil}}} \right)^2 \right\}^{1/6}} \right] \right]$	ここで $\alpha_{LX} = \frac{\lambda_{LB}}{d_i} \left[\frac{1}{41 \text{Pr}_{LB}^{0.6} - 0.062} \text{Re}_{LX}^{5/6} \left(\frac{d_i}{D_{\text{coil}}} \right)^{1/2} \left[1 + \frac{0.061}{\left\{ \text{Re} \left(\frac{d_i}{D_{\text{coil}}} \right)^{2.5} \right\}^{1/6}} \right] \right]$ $\text{Re}_{LX} = \frac{d_i \cdot G \cdot (1-X)}{g_c \cdot \mu_{LB}}$ x _{tt} : Martinelli パラメーター	ここで α_{NB} : 核沸騰域における熱伝達率 $\alpha_{GB} = \frac{\lambda_{GB}}{d_i} \left[\frac{1}{26.2 \text{Pr}_{GB}^{2/3} - 0.074} \text{Re}_{GB}^{4/5} \left(\frac{d_i}{D_{\text{coil}}} \right)^{1/10} \left[1 + \frac{0.098}{\left\{ \text{Re}_{GB} \left(\frac{d_i}{D_{\text{coil}}} \right)^2 \right\}^{1/6}} \right] \right]$ $\text{Re}_{GV} = \frac{d_i G X}{g_c \mu_{GB}}$
		Dittus - Boelter's 式 $\alpha_{LG} = \frac{\lambda_{LG}}{d_i} (0.023 \text{Re}_{LG}^{0.8} \cdot \text{Pr}_{LG}^{0.4})$	同 上	同 上
	Hoe の式 $\alpha_N = \frac{\lambda_N}{d_o} (4.03 + 0.228 \text{Pe}_N^{2/3})$			

Table II - 3 " POPAI 2 " 伝熱計算式

	単相流域	核沸騰域	膜沸騰域
水 / 蒸気側	<p>液相 (森-中山の式)</p> $\alpha_L = \frac{\lambda_L}{di} \left[\frac{1}{41 Pr_L^{0.6} - 0.062} Re_L^{5/6} \left(\frac{di}{Dcoil} \right)^{1/2} \left[1 + \frac{0.061}{\left\{ Re_L \left(\frac{di}{Dcoil} \right)^{2.5} \right\}^{1/6}} \right] \right]$ <p>ガス層 (森-中山の式)</p> $\alpha_G = \frac{\lambda_G}{di} \left[\frac{1}{26.2 Pr_G^{2/3} - 0.074} Re_L^{4/5} \left(\frac{di}{Dcoil} \right)^{1/10} \left[1 + \frac{0.098}{\left\{ Re_G \left(\frac{di}{Dcoil} \right)^2 \right\}^{1/5}} \right] \right]$	<p>修正 Schrock - Grossman の式</p> $\alpha_{NB} = 2.5 \left(\frac{1}{x_{tt}} \right)^{0.75} \cdot \xi_P \cdot \alpha_{LX}$ <p>ここで,</p> $\alpha_{LX} = \frac{\lambda_{LB}}{di} \left[\frac{1}{41 Pr_{LB}^{0.6} - 0.062} Re_{LX}^{5/6} \left(\frac{di}{Dcoil} \right)^{1/2} \left[1 + \frac{0.061}{\left\{ Re \left(\frac{di}{Dcoil} \right)^{2.5} \right\}^{1/6}} \right] \right]$ $Re_{LX} = \frac{di \cdot G \cdot (1 - X)}{g_c \cdot \mu_{LB}}$ <p>*tt : Martinelli パラメーター</p>	$\alpha_{PB} = \frac{1 - X}{1 - X_{DNB}} \alpha_{NB} + \frac{X - X_{DNB}}{1 - X_{DNB}} \alpha_{GB}$ <p>ここで,</p> <p>α_{NB}: 核沸騰域における熱伝達率</p> $\alpha_{GB} = \frac{\lambda_{GB}}{di} \left[\frac{1}{26.2 Pr_{GB}^{2/3} - 0.074} Re^{4/5} \left(\frac{di}{Dcoil} \right)^{1/10} \left[1 + \frac{0.098}{\left\{ Re_{GB} \left(\frac{di}{Dcoil} \right)^2 \right\}^{1/5}} \right] \right]$ $Re_{GB} = \frac{di \cdot G \cdot X}{g_c \cdot \mu_{GB}}$
ナトリウム側	<p>Hoe の式</p> $\alpha_N = \frac{\lambda_N}{d_o} (4.03 + 0.228 Pe_N^{2/3})$		

長くなると考えられる。

このため高圧領域では“STABL”を使用し、低圧領域では“STABLNEW”を使用する様な構成とした。

II-4.2 ナトリウム側物性値

本物性値についても“POPAI”で使用したもので全く同一で、ANL 7323 に記載のものを原則として用い、さらに演算時間を考慮して、動粘性係数、プラントル数および熱伝達率については、ANL 7323 に対して+1.3%、-0.3%の精度で表すことのできる近以多項式を採用した。

本物性値をまとめて、Table II-4 に示す。

Table II-4 ナトリウム物性値計算式

物 性	記 号	計 算 式
動特性係数 (m^2/s)	ν	$200 \leq T \leq 300$ $\nu = 3.4750 \times 10^{-12} T^2 - 2.86475 \times 10^{-9} T + 9.40732 \times 10^{-7}$ $300 < T \leq 550$ $\nu = 1.1892 \times 10^{-12} T^2 - 1.48879 \times 10^{-9} T + 7.31236 \times 10^{-7}$
プラントル数 (-)	Pr	$200 \leq T \leq 400$ $Pr = 3.621 \times 10^{-8} T^2 - 3.41582 \times 10^{-5} T + 1.28792 \times 10^{-2}$ $400 < T \leq 550$ $Pr = 1.346 \times 10^{-8} T^2 - 1.72630 \times 10^{-5} T + 9.76125 \times 10^{-3}$
熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{Hr} \cdot ^\circ\text{C}$)	K	$K = 79.9136 - 5.06588 \times 10^{-2} T + 1.00829 \times 10^{-5} T^2$
比容積 (m^3/kg)	v	$v = \frac{10^{-3}}{0.9514 - 2.392 \times 10^{-4} T}$
熱容量 ($\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)	C_P	$C_P = 0.389 - 1.99 \times 10^{-4} T_K + 1.10 \times 10^{-7} T_K^2$
エンタルピー (kcal/kg)	H	$H = 0.389T - 0.995 \times 10^{-4} (T_K^2 - 273.16^2) + 3.7 \times 10^{-8} (T_K^3 - 273.16^3)$

注) T : 温度($^\circ\text{C}$) , T_K : 温度($^\circ\text{K}$)

II-4.3 その他の物性値

(1) $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼熱伝導率

$T \leq 500$ のとき

$$\lambda = -7 \times 10^{-5} T^2 + 4.5 \times 10^{-2} T + 23.6$$

$T > 500$ のとき

$$\lambda = 28.6$$

(2) SUS 304 熱伝導率

$$\lambda = 0.012083 T + 12.725$$

第Ⅲ章 計算コードの構成

Ⅲ-1 微分方程式の解法および収束手法

本コードによる計算手法は“POPAL”によるものと全く同一となり、ナトリウム側エネルギー式(Ⅱ-1式)および水/蒸気側エネルギー式(Ⅱ-2式)の両微分方程式をRunge-Kutta-Gill法で解くものである。

“POPAL”においては演算は下降管下端と、上昇管下端での水/蒸気側のエンタルピーおよび圧力が一致するまで蒸気出口条件を修正しながら演算を行なうものであるが、“POPAL 2”では蒸気出口温度の外にナトリウム入口温度およびナトリウム流量の演算が含まれているため、個々の計算によりこれら三種の変数を修正しながらヘリカルコイル下端の温度と給水温度が一致するまで演算を行なうものである。

なお、変数の修正手法はNewton-Raphson法によっている。本コードの概略フローチャートをFig.Ⅲ-1に、サブプログラムの構成および説明をFig.Ⅲ-2に示してある。

Ⅲ-2 入力

TableⅢ-1,Ⅲ-2に入力表および変数対応表を示す。入力データは001～005までの5種類のデータブロックに分割し、各ブロックに含まれる変数は同種のデータ群により構成されている。このようなブロック化により、2ケース以上の演算を行なう場合に変更を行なうデータブロックのみを変更するだけで可能であり、ひいては入力の減少につながるものである。

これらのデータブロックを以下に示す。

001 データブロック

蒸気表データ、現在蒸気表は磁気ディスク装置より読み取る方式となっている。

002 データブロック

構造データ、蒸発器、過熱器それぞれの寸法、形状等のデータ

003 データブロック

制御データ、演算制御用データで、演算種類、収束くり返し最大回数、判定基準値等のデータ

004 データブロック

運転データ、蒸気発生器の運転圧力、出入口温度条件等の運転条件データ

005 データブロック

熱伝達率データ、DNBクオリティおよび汚れ係数値

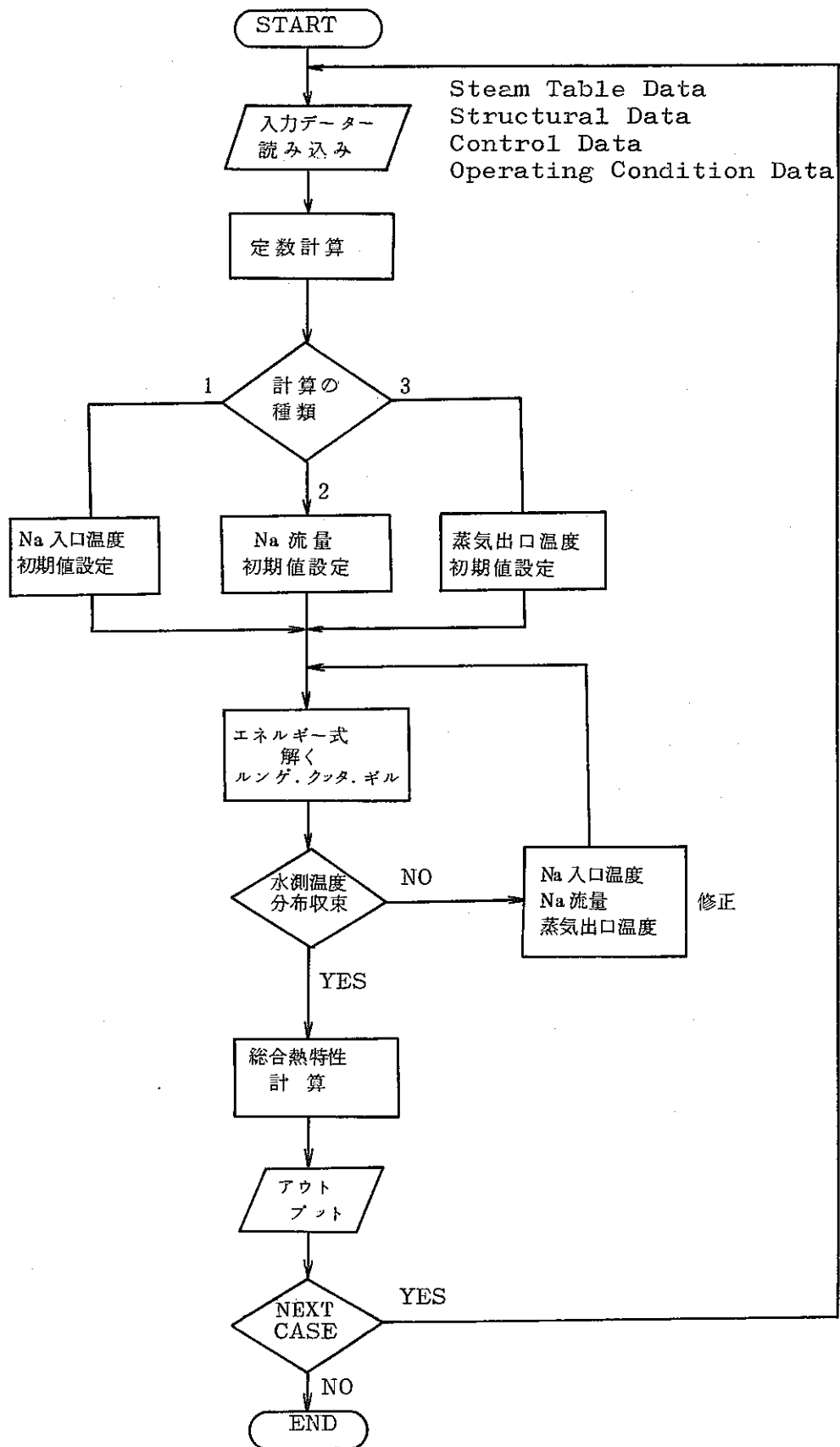


Fig. III-1 "POPAI 2" 概略フローチャート

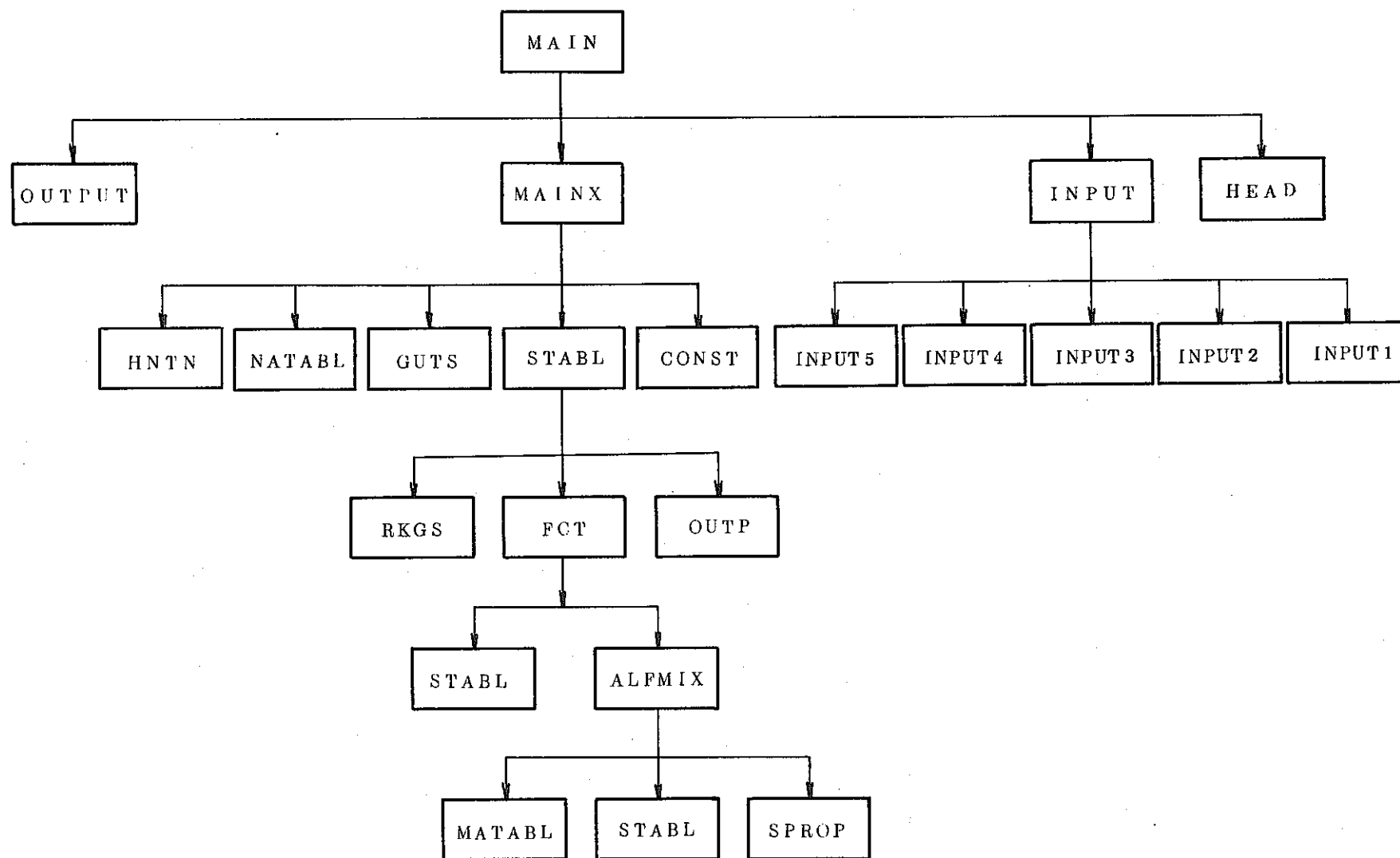


Fig III-21 POPAI2 サブプログラム構成

MAIN	メインプログラムでCPU時間等の計算を行なう。
HGAD	プログラム出力の見出しの書き出しサブプログラム
INPUT	入力データのコントロール用サブプログラム
MAINX	収束半定，初期値の修正等のメインプログラムのサブプログラム
OUTPUT	出力データのコントロール用サブプログラム
INPUT 1	蒸気表データ読み込み用サブプログラム
INPUT 2	構造データ読み込み用サブプログラム
INPUT 3	コントロールデータ読み込み用サブプログラム
INPUT 4	運転データ読み込み用サブプログラム
INPUT 5	熱伝達関係データ読み込みプログラム
CONST	構造データより各種定数計算用サブプログラム
STABL	蒸気表物性計算サブプログラム（エンタルピー，比容積）
GUTS	積分用サブプログラム
NATABL	ナトリウム物性計算用サブプログラム
HNTN	ナトリウムクエンタルピーから温度への変換用プログラム
RKGS	Runge - Kutta - Gill ルーチン（SSP）
OUTP	R - KG による積分過程の出力サブプログラム
ALFMIX	ナトリウム，水／蒸気管系の熱伝達率，熱通過率，熱流束等の伝熱特性計算用サブプログラム
SPROP	蒸気物性（粘性係数，熱伝導度，熱容量等）
MATABL	伝熱管の熱伝導率計算用サブプログラム
FCT	微係数計算用サブプログラム

Fig. III - 2.2 サブプログラムの説明

Table III-2 変数対応表

変数名	TYPE	単 位	説 明
002			構造データブロック
NIO	I	-	入力装置番号 (各ブロック共通)
NCOILE	I	-	蒸発器コイル巻き層数
MESHZE	I	-	" メッシュ分割数
NTUB1E	I	-	" 伝熱管全本数 (ダミー管を含む)
NTUB2E	I	-	" 伝熱管全本数 (ダミー管を除く)
COILDE	F	m	" 代表コイル径
TUBODE	F	m	" 伝熱管外径
TUBODE	F	m	" 伝熱管内径
ZCOILE	F	m	" コイル巻き高さ
NCOILE	I	-	過熱器コイル巻き層数
MESHZS	I	-	" メッシュ分割数
NTUB1S	I	-	" 伝熱管全本数
NTUB2S	I	-	" 伝熱管全本数
COILDS	F	m	" 代表コイル径
TUBODS	F	m	" 伝熱管外径
TUBIDS	F	m	" 伝熱管内径
ZCOILS	F	m	" コイル巻き高さ
ANGLE	F	°	コイル巻き上げ角
003			制御データブロック
JUDGE	I	-	0 ; 収束計算を行なわない 1 ; Na 入口温度の決定
MODEL	I	-	2 ; Na 流量の決定 3 ; 蒸気出口温度の決定
ITER 1	I	-	0 ; 蒸発器, 過熱器の計算 1 ; 蒸発器のみ
EPS 1	F	°C	2 ; 過熱器のみ
XEPS 1	F	-	最大反復数
XEPS 2	F	-	最大誤差
			} Newton-Raphson 法に用いる係数
004			運転データブロック
TWIN	F	°C	給水温度
TWOUT	F	°C	蒸気出口温度
TNIN	F	°C	ナトリウム入口温度
TNOUT	F	°C	ナトリウム出口温度
PWIN	F	kg/cm ² ·a	給水圧力
PWOUT	F	kg/cm ² ·a	蒸気出口圧力
WWT	F	kg/Hr	給水流量
WNT	F	kg/Hr	ナトリウム流量
QULTYO	F	-	出口クオリティ
QULTYI	F	-	入口クオリティ
005			熱伝達率関係データ
DNB	F	-	DNB クオリティ
ALFFE	F	m ² ·Hr·°C/kcal	蒸発器汚れ係数
ALFFS	F	m ² ·Hr·°C/kcal	過熱器汚れ係数

III-3 出力

具体的出力例を Fig. III-3 ~ Fig. III-6 に示す。

本計算例は蒸発器、過熱器結合モード時における蒸気出口温度を求めたものであり、入力、出力値については Table III-3 に示す。

Table III-3 入出力一覧表

項 目			蒸 発 器	過 熱 器
水 / 蒸 気 側	圧 力	kg/cm ² ・G	133	133
	流 量	kg/Hr	80000	80000
	入口温度	℃	220	(377)
	出口温度	℃	(377)	(487)
ナ ト リ ウ ム 側	流 量	kg/Hr	800000	800000
	入口温度	℃	(466)	495
	出口温度	℃	(311)	(466)

注) () 内数値は計算結果を示す。

Fig. III-3 ~ Fig. III-6 の出力例において、第1頁目は入力値のチェックプリント、第2頁目は水/蒸気側温度分布、エンタルピー分布、熱伝導率分布等を表わしたものである。

第3頁目はナトリウム側の温度分布、エンタルピー分布等を等わし、最後の頁は総括熱特性、すなわち熱流束、熱通過率および最終計算結果等を示すものである。

SECTION 001 (STEAM DATA) INPUT DEVICE = 1

SECTION 002 (STRUCTURAL DATA) INPUT DEVICE = 5

EVAPORATOR		SUPERHEATER	
NUMBERS OF COIL	6	NUMBERS OF COIL	5
MESH NUMBERS	20	MESH NUMBER	20
TOTAL TUBE NUMBER	75	TOTAL TUBE NUMBER	60
REAL TUBE NUMBER	75	REAL TUBE NUMBER	60
COIL DIAMETER	1.00000E 00 (M)	COIL DIAMETER	1.00000E 00 (M)
TUBE INNER DIAMETER	1.90000E-02 (M)	TUBE INNER DIAMETER	1.90000E-02 (M)
TUBE OUTER DIAMETER	2.54000E-02 (M)	TUBE OUTER DIAMETER	2.54000E-02 (M)
CORE OUTER DIAMETER	7.65000E-01 (M)	CORE OUTER DIAMETER	7.65000E-01 (M)
SHROUD INNER DIAMETER	1.24500E 00 (M)	SHROUD INNER DIAMETER	1.16500E 00 (M)
HELICALLY COILED TUBE ZONE LENGTH	4.20000E 00 (M)	HELICALLY COILED TUBE ZONE LENGTH	2.80000E 00 (M)
TUBE ROUGHNESS	3.00000E-03 (CM)	TUBE RISING ANGLE	9.00000E 00 (DEG)

SECTION 003 (CONTROL DATA) INPUT DEVICE = 5

ITERATION CONTROL NUMBER		CALCULATION MODEL	
0 = NO ITERATION		0 = CALCULATION OF EV AND SH	
1 = ITERATION		1 = CALCULATION OF EV ONLY	
		2 = CALCULATION OF SH ONLY	
ITERATION NO 1	3	ITERATION NO 2	0
MAXIMUM ERROR	1.000 (DEG-C OR KG/H)		
XEPS1	0.10000E 00	XEPS2	0.50000E 00

SECTION 004 (OPERATION DATA) INPUT DEVICE = 5

WATER SIDE		SODIUM SIDE	
INLET TEMPERATURE	2.20000E 02 (DEG-C)	INLET TEMPERATURE	4.95000E 02 (DEG-C)
OUTLET TEMPERATURE	4.70000E 02 (DEGC)	OUTLET TEMPERATURE	3.00000E 02 (DEG-C)
INLET PRESSURE	1.33000E 02 (KG/CM**2.A)	INLET PRESSURE	0.0 (KG/CM**2.A)
OUTLET PRESSURE	1.33000E 02 (KG/CM**2.A)	OUTLET PRESSURE	0.0 (KG/CM**2.A)
TOTAL FLOW RATE	8.00000E 04 (KG/HR)	TOTAL FLOW RATE	8.00000E 05 (KG/HR)
OUTLET QUALITY	1.00000E 00 (-)	INLET QUALITY	0.0 (-)

SECTION 005 (HEAT TRANSFER DATA) INPUT DEVICE = 5

DNB QUALITY	7.50000E-01		
FOULING FACTOR OF EVAPORATOR	0.0	(M**2.H.DEG-C/KCAL)	
FOULING FACTOR OF SUPERHEATER	0.0	(M**2.H.DEG-C/KCAL)	

Fig. III-3 出力例 (インプットチェックリスト)

SECTION END FINAL CALCULATED RESULTS

*** WATER SIDE RESULTS ***

WATER SIDE TEMPERATURE

0.48694E 03	0.48537E 03	0.48356E 03	0.48148E 03	0.47910E 03	0.47639E 03	0.47328E 03	0.46970E 03	0.46562E 03	0.46094E 03
0.45576E 03	0.44989E 03	0.44330E 03	0.43593E 03	0.42777E 03	0.41880E 03	0.40909E 03	0.39873E 03	0.38785E 03	0.37664E 03
0.35456E 03	0.33447E 03	0.33107E 03	0.33107E 03	0.33107E 03	0.33107E 03	0.33107E 03	0.33107E 03	0.33107E 03	0.33107E 03
0.33107E 03	0.33102E 03	0.32452E 03	0.31699E 03	0.30784E 03	0.29673E 03	0.28312E 03	0.26642E 03	0.24593E 03	0.22060E 03

WATER SIDE ENTHALPY

0.78829E 03	0.78724E 03	0.78603E 03	0.78463E 03	0.78302E 03	0.78118E 03	0.77905E 03	0.77662E 03	0.77392E 03	0.77060E 03
0.76692E 03	0.76272E 03	0.75793E 03	0.75248E 03	0.74629E 03	0.73928E 03	0.73137E 03	0.72247E 03	0.71249E 03	0.70137E 03
0.67548E 03	0.64328E 03	0.59972E 03	0.55034E 03	0.50935E 03	0.47385E 03	0.44563E 03	0.42270E 03	0.40423E 03	0.38958E 03
0.37713E 03	0.36622E 03	0.35561E 03	0.34392E 03	0.33079E 03	0.31582E 03	0.29854E 03	0.27841E 03	0.25469E 03	0.22681E 03

WATER SIDE HEAT TRANSFER COEFFICIENT

0.36101E-78	0.57570E 04	0.57596E 04	0.57626E 04	0.57668E 04	0.57727E 04	0.57811E 04	0.57922E 04	0.58049E 04	0.58193E 04
0.58405E 04	0.58657E 04	0.59027E 04	0.59513E 04	0.60114E 04	0.60867E 04	0.62198E 04	0.63639E 04	0.66132E 04	0.69018E 04
0.67208E 04	0.83696E 04	0.28775E 05	0.44586E 05	0.39740E 05	0.34141E 05	0.28481E 05	0.23012E 05	0.17827E 05	0.14243E 05
0.14243E 05	0.13812E 05	0.13148E 05	0.12512E 05	0.11993E 05	0.11439E 05	0.10873E 05	0.10345E 05	0.97013E 04	0.90375E 04

WATER SIDE REYNOLDS NUMBER

0.0	0.84416E 06	0.84604E 06	0.84820E 06	0.85070E 06	0.85355E 06	0.85685E 06	0.86067E 06	0.86508E 06	0.87020E 06
0.87592E 06	0.88249E 06	0.88974E 06	0.89797E 06	0.90727E 06	0.91773E 06	0.92933E 06	0.94181E 06	0.95301E 06	0.96670E 06
0.79435E 06	0.81446E 06	0.70598E 06	0.79246E 05	0.11775E 06	0.14940E 06	0.17528E 06	0.19631E 06	0.21325E 06	0.22668E 06
0.23810E 06	0.24788E 06	0.23334E 06	0.21851E 06	0.20340E 06	0.18801E 06	0.17225E 06	0.15627E 06	0.13925E 06	0.11903E 06

WATER SIDE THERMAL CONDUCTIVITY

0.69113E-01	0.68987E-01	0.68842E-01	0.68675E-01	0.68484E-01	0.68267E-01	0.68045E-01	0.67815E-01	0.67553E-01	0.67251E-01
0.66918E-01	0.66544E-01	0.66277E-01	0.65978E-01	0.65648E-01	0.65311E-01	0.65023E-01	0.65617E-01	0.66484E-01	0.67377E-01
0.73084E-01	0.82003E-01	0.83682E-01	0.41380E 00	0.41380E 00	0.41380E 00	0.41380E 00	0.41380E 00	0.41380E 00	0.41380E 00
0.41380E 00	0.41390E 00	0.42699E 00	0.44196E 00	0.46024E 00	0.48018E 00	0.49788E 00	0.51960E 00	0.54424E 00	0.56410E 00

WATER SIDE DENSITY

0.42081E 02	0.42220E 02	0.42381E 02	0.42568E 02	0.42785E 02	0.43037E 02	0.43329E 02	0.43671E 02	0.44078E 02	0.44554E 02
0.45104E 02	0.45745E 02	0.46509E 02	0.47410E 02	0.48478E 02	0.49748E 02	0.51248E 02	0.53035E 02	0.55178E 02	0.57768E 02
0.64706E 02	0.75792E 02	0.89181E 02	0.10902E 03	0.13445E 03	0.16633E 03	0.20634E 03	0.25650E 03	0.31892E 03	0.39521E 03
0.49602E 03	0.63751E 03	0.65805E 03	0.68036E 03	0.70373E 03	0.72843E 03	0.75512E 03	0.78396E 03	0.81522E 03	0.84885E 03

WATER SIDE SPECIFIC VOLUME

-0.99785E-58	0.23686E-01	0.23595E-01	0.23492E-01	0.23372E-01	0.23236E-01	0.23079E-01	0.22899E-01	0.22687E-01	0.22445E-01
0.22171E-01	0.21860E-01	0.21501E-01	0.21093E-01	0.20628E-01	0.20101E-01	0.19513E-01	0.18856E-01	0.18123E-01	0.17311E-01
0.15454E-01	0.13194E-01	0.11213E-01	0.91727E-02	0.74379E-02	0.60121E-02	0.48463E-02	0.38986E-02	0.31356E-02	0.25303E-02
0.20160E-02	0.15686E-02	0.15196E-02	0.14698E-02	0.14210E-02	0.13728E-02	0.13243E-02	0.12756E-02	0.12267E-02	0.11781E-02

Fig. III - 4 出力例 (水/蒸気側計算結果)

*** NA INLET TEMP= CONST 490 N/P=10.0 100% LOAD ***
 *** SODIUM SIDE ***

SODIUM SIDE TEMPERATURE

0.92656E-02	0.49463E 03	0.49423E 03	0.49377E 03	0.49332E 03	0.49286E 03	0.49192E 03	0.49111E 03	0.49019E 03	0.48912E 03
0.48790E 03	0.48651E 03	0.48492E 03	0.48312E 03	0.48117E 03	0.47975E 03	0.47613E 03	0.47319E 03	0.46989E 03	0.46621E 03
0.45766E 03	0.44704E 03	0.43269E 03	0.41646E 03	0.40270E 03	0.39141E 03	0.39219E 03	0.37471E 03	0.36869E 03	0.36293E 03
0.35988E 03	0.35633E 03	0.35289E 03	0.34919E 03	0.34484E 03	0.33999E 03	0.33449E 03	0.32799E 03	0.32024E 03	0.31126E 03

SODIUM SIDE ENTHALPY

0.15737E 03	0.15727E 03	0.15715E 03	0.15711E 03	0.15694E 03	0.15666E 03	0.15645E 03	0.15620E 03	0.15592E 03	0.15560E 03
0.15523E 03	0.15481E 03	0.15434E 03	0.15379E 03	0.15317E 03	0.15247E 03	0.15169E 03	0.15079E 03	0.14979E 03	0.14869E 03
0.14609E 03	0.14287E 03	0.13851E 03	0.13358E 03	0.12939E 03	0.12593E 03	0.12311E 03	0.12031E 03	0.11897E 03	0.11750E 03
0.11626E 03	0.11517E 03	0.11410E 03	0.11294E 03	0.11162E 03	0.11012E 03	0.10849E 03	0.10638E 03	0.10401E 03	0.10122E 03

SODIUM SIDE HEAT TRANSFER COEFFICIENT

0.90000E 01	0.30048E 05	0.30054E 05	0.30060E 05	0.30066E 05	0.30077E 05	0.30097E 05	0.30098E 05	0.30111E 05	0.30126E 05
0.30144E 05	0.30162E 05	0.30185E 05	0.30211E 05	0.30239E 05	0.30272E 05	0.30308E 05	0.30349E 05	0.30394E 05	0.30445E 05
0.27631E 05	0.27763E 05	0.27939E 05	0.28136E 05	0.28300E 05	0.28434E 05	0.28542E 05	0.28630E 05	0.28700E 05	0.28755E 05
0.28803E 05	0.28844E 05	0.28884E 05	0.28928E 05	0.28977E 05	0.29033E 05	0.29099E 05	0.29173E 05	0.29241E 05	0.29365E 05

SODIUM SIDE DENSITY

0.83300E 03	0.83308E 03	0.83318E 03	0.83329E 03	0.83342E 03	0.83356E 03	0.83373E 03	0.83393E 03	0.83415E 03	0.83440E 03
0.83469E 03	0.83503E 03	0.83541E 03	0.83584E 03	0.83633E 03	0.83688E 03	0.83751E 03	0.83821E 03	0.83900E 03	0.83989E 03
0.84193E 03	0.84447E 03	0.84790E 03	0.85178E 03	0.85577E 03	0.85776E 03	0.85995E 03	0.86177E 03	0.86321E 03	0.86435E 03
0.86532E 03	0.86616E 03	0.86699E 03	0.86790E 03	0.86892E 03	0.87017E 03	0.87141E 03	0.87295E 03	0.87490E 03	0.87655E 03

Fig. III - 5 出力例 (ナトリウム側計算結果)

*** NA INLET TEMP= CONST 490 N/W=10.0 100% LOAD

4 PAGE/ 1 CASE

*** OVER ALL RESULTS ***

QUALITY

0.36217E-78	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01
0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01
0.10000E 01	0.10000E 01	0.86319E 00	0.68148E 00	0.52323E 00	0.39763E 00	0.29329E 00	0.20848E 00	0.14019E 00	0.86026E-01		
0.40001E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

HEAT FLUX

0.68579E-78	0.20000E 05	0.23039E 05	0.26540E 05	0.30538E 05	0.35072E 05	0.40087E 05	0.46297E 05	0.53148E 05	0.61025E 05	0.61025E 05	0.61025E 05
0.69684E 05	0.79494E 05	0.90576E 05	0.10299E 06	0.11678E 06	0.13211E 06	0.14894E 06	0.16693E 06	0.18699E 06	0.20775E 06	0.20775E 06	0.20775E 06
0.25803E 06	0.35440E 06	0.51077E 06	0.45953E 06	0.37873E 06	0.31043E 06	0.25315E 06	0.20495E 06	0.14379E 06	0.13223E 06	0.13223E 06	0.13223E 06
0.11598E 06	0.10077E 06	0.11082E 06	0.12800E 06	0.13929E 06	0.15470E 06	0.18519E 06	0.21712E 06	0.25616E 06	0.30024E 06	0.30024E 06	0.30024E 06

OVER ALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT

0.82361E-83	0.21597E 04	0.21597E 04	0.21597E 04	0.21598E 04	0.21602E 04	0.21609E 04	0.21626E 04	0.21630E 04	0.21654E 04	0.21654E 04	0.21654E 04
0.21679E 04	0.21710E 04	0.21760E 04	0.21927E 04	0.21911E 04	0.22035E 04	0.22218E 04	0.22426E 04	0.22791E 04	0.23193E 04	0.23193E 04	0.23193E 04
0.27937E 04	0.31483E 04	0.49200E 04	0.53816E 04	0.52879E 04	0.51453E 04	0.49524E 04	0.46967E 04	0.43538E 04	0.40248E 04	0.40248E 04	0.40248E 04
0.40264E 04	0.39807E 04	0.39062E 04	0.38304E 04	0.37651E 04	0.36915E 04	0.36114E 04	0.35310E 04	0.34427E 04	0.33117E 04	0.33117E 04	0.33117E 04

TUBE HEAT TRANSFER COEFFICIENT

0.92134E 06	0.50623E 04	0.50594E 04	0.50561E 04	0.50524E 04	0.50481E 04	0.50432E 04	0.50408E 04	0.50347E 04	0.50278E 04	0.50278E 04	0.50278E 04
0.50200E 04	0.50111E 04	0.50111E 04	0.49897E 04	0.49748E 04	0.49624E 04	0.49463E 04	0.49285E 04	0.49087E 04	0.48872E 04	0.48872E 04	0.48872E 04
0.81405E 04	0.82044E 04	0.82869E 04	0.83130E 04	0.83230E 04	0.83315E 04	0.83370E 04	0.83409E 04	0.83434E 04	0.83455E 04	0.83455E 04	0.83455E 04
0.83482E 04	0.83503E 04	0.83542E 04	0.83571E 04	0.83602E 04	0.83622E 04	0.83622E 04	0.83622E 04	0.83622E 04	0.83622E 04	0.83622E 04	0.83622E 04

WATER INLET TEMPERATURE	2.20000E 02 (DEG-C)	SODIUM INLET TEMPERATURE	4.95000E 02 (DEG-C)
WATER OUTLET TEMPERATURE	4.70000E 02 (DEG/C)	SODIUM OUTLET TEMPERATURE	3.11240E 02 (DEG-C)
WATER SIDE HEAT OF EXCHANGED	4.40528E 07 (KCAL/H)	SODIUM SIDE HEAT OF EXCHANGED	4.40174E 07 (KCAL/H)
WATER SIDE HEAT OF EXCHANGED	5.12241E 01 (MM)	SODIUM SIDE HEAT OF EXCHANGED	5.22204E 01 (MM)
WATER SIDE FLOW RATE	3.00000E 04 (KG/H)	SODIUM SIDE FLOW RATE	8.00000E 05 (KG/H)

Fig. III - 6 出力例 (総括熱特性)

-17-

Ⅳ-2 ダウンカマの影響

本節ではダウンカマの影響を調査するため、前節と同じ計算を、ダウンカマへの収熱を考慮して行なった。

本計算での入力および出力条件を Table Ⅳ-2 に示す。

Table Ⅳ-2 “POP AI” および “POP AI 2” 入力、出力条件表
(ダウンカマの影響)

		POP AI		POP AI 2	
		100 % Load	30% Load	100 % Load	30% Load
給 水 流 量	Ton/Hr	80	24	80	24
給 水 温 度	°C	240	202	240	202
蒸 気 温 度	°C	(387)	(427)	(387)	(445)
給 水 圧 力	kg/cm ² ・a	(134.8)	(132.8)	135	133
蒸 気 圧 力	kg/cm ² ・a	133	133	135	133
ナトリウム流量	Ton/Hr	800	240	800	240
ナトリウム入口温度	°C	469	469	469	469
ナトリウム出口温度	°C	(317)	(293)	(317)	(290)
シュラウド熱伝達率	kcal/m ² ・Hr・°C	400	400	—	—

Fig. Ⅳ-3 は 100 % 負荷時の結果であり、ダウンカマ収熱を考慮した場合も、その影響はほとんどないと言える。

また Fig. Ⅳ-4 は 30% 負荷時の結果であり、低負荷においてダウンカマの収熱を考慮した場合は、それぞれの変数にかなりの差が見られることがわかる。

以上、Ⅳ-1、Ⅳ-2 節の結果より “POP AI 2” の計算においては、圧力を適当に選べば、高負荷時には、“POP AI” とほとんど同じ精度で結果が得られる。また低負荷時には、若干の誤差が見られるものの、本計算例では蒸気温度にして +15% 程度である。

これらの結果から “POP AI 2” の精度は低負荷時に若干落ちるものの、“POP AI” の精度にかなり近い予想ができると考えられる。

第Ⅳ章 “POP AI” と “POP AI 2” との演算結果の比較

“POP AI 2”作成の第1の目的は先にも述べた如く、演算時間（費用）の短縮であるが、これにより計算精度が大幅に低下するのでは全く意味がない。従って本コード作成に当っては可能な限り“POP AI”の精度に近づけるべく努力を行なってはいるが、特に水/蒸気側圧力を一定にした事、およびダウンコマを省略した事に対しては若干の誤差はまぬがれないと考えられる。そこでここでは“POP AI”と“POP AI 2”との演算結果を比較することによって“POP AI 2”の精度を検討する事にする。

Ⅳ-1 水/蒸気側圧力の影響

Fig. Ⅳ-1, 2は試験計画のうち蒸発器単体試験の100%, 30%負荷時の“POP AI”および“POP AI 2”による性能予想を表わしたものであり、条件はTable Ⅳ-1に示す通りである。

Table Ⅳ-1 “POP AI”及び“POP AI 2”入力、出力条件表(圧力の影響)

		POP AI		POP AI 2	
		100% Load	30% Load	100% Load	30% Load
給水量	Ton/Hr	80	24	80	24
給水温度	℃	240	202	240	202
蒸気温度	℃	(390)	(448)	(387)	(445)
給水圧力	kg/cm ² ·a	(134.8)	(132.8)	133・135	133
蒸気圧力	kg/cm ² ·a	133	133	133・135	133
ナトリウム流量	Ton/Hr	800	240	800	240
ナトリウム入口温度	℃	469	469	469	469
ナトリウム出口温度	℃	(317)	(288)	(317)	(288)

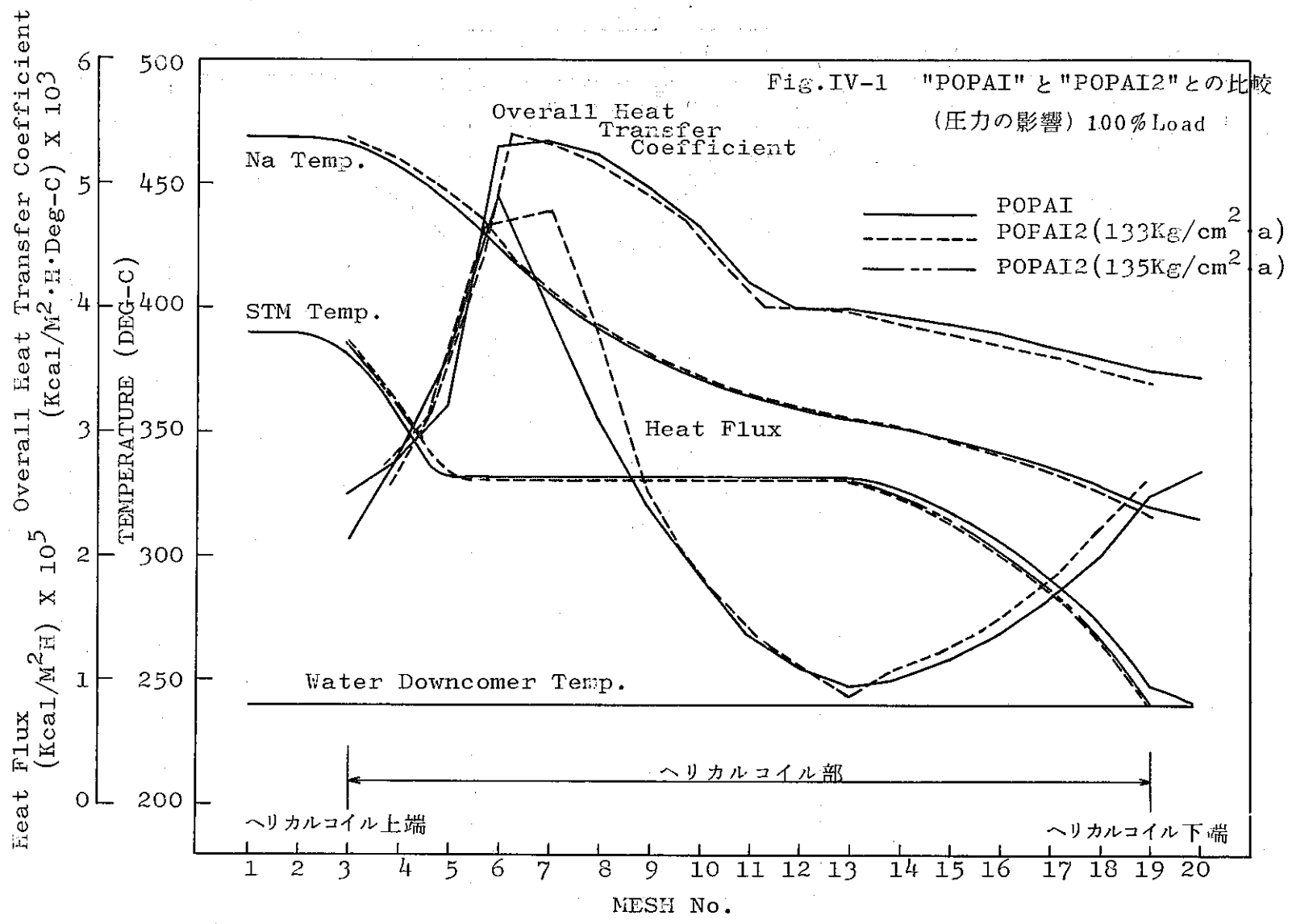
注) () 内数値はコードよりの計算結果を示し、また同一欄の数字のうち左は132kg/cm²·a、右は135kg/cm²·a時の計算結果を示す。

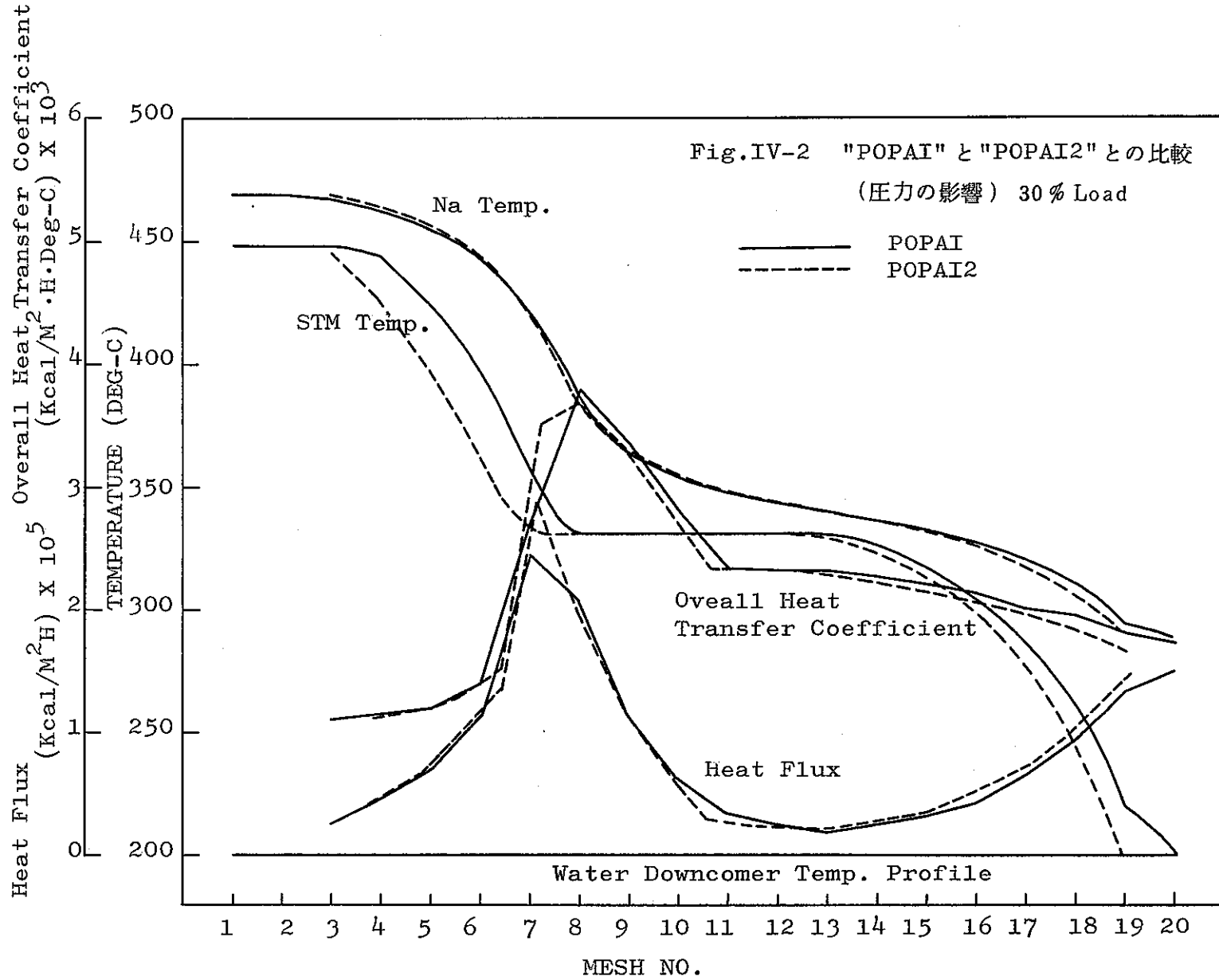
Fig. Ⅳ-1は100%負荷時のナトリウム、水/蒸気系の温度分布熱通過率および熱流束を比較したものであり、両コードによる計算結果は良く一致している。また“POP AI 2”による演算については132kg/cm²·aおよび135kg/cm²·a（POP AIの沸騰部圧力）の両計算結果を示しているが、ほとんど差は見当たらない。

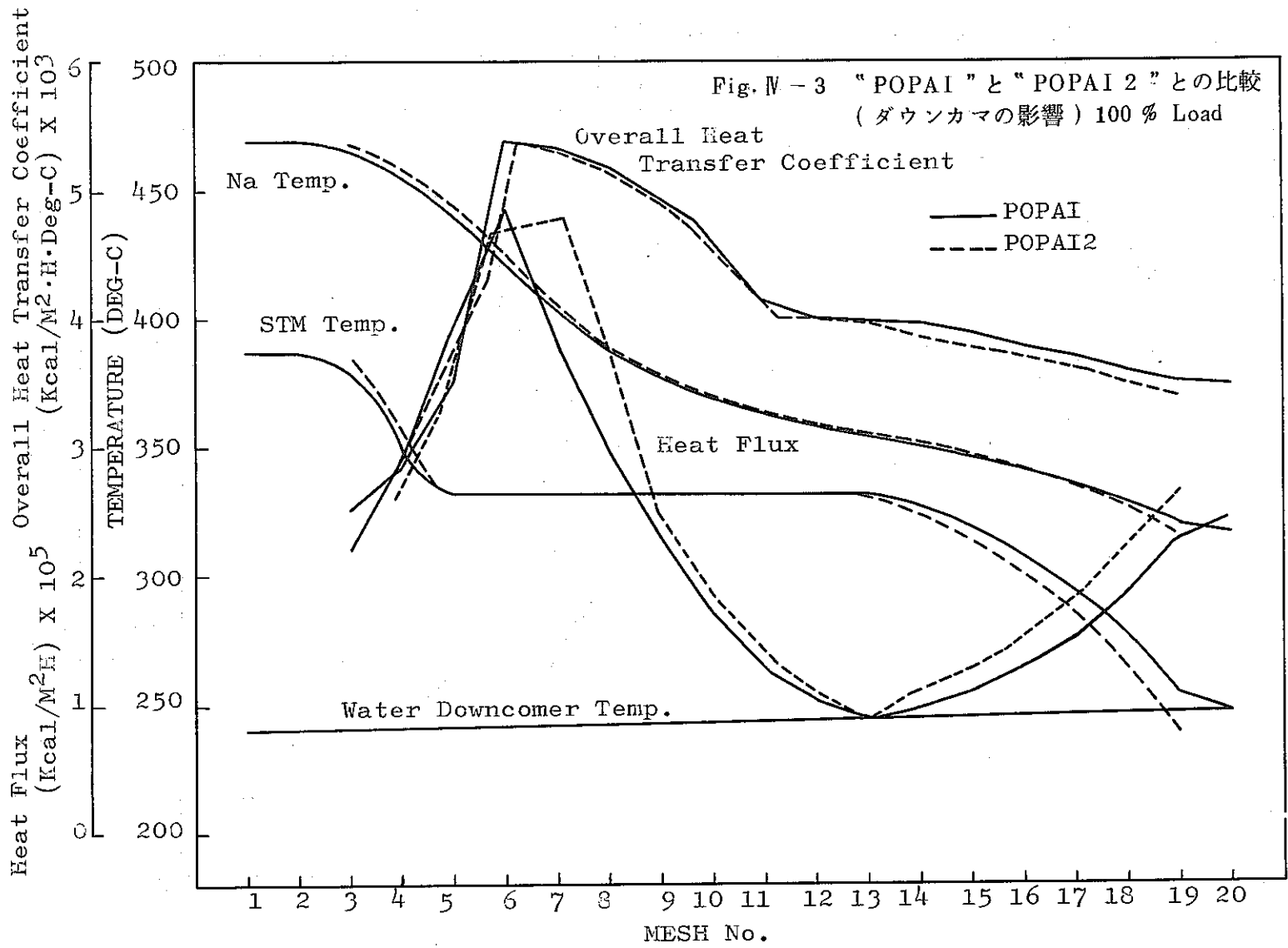
Fig. Ⅳ-2は30%負荷時の比較であり、100%負荷時の結果と比較して、水/蒸気出口温度分布に若干の差は見られるが、最終結果である蒸気出口温度は比較的良く一致している。

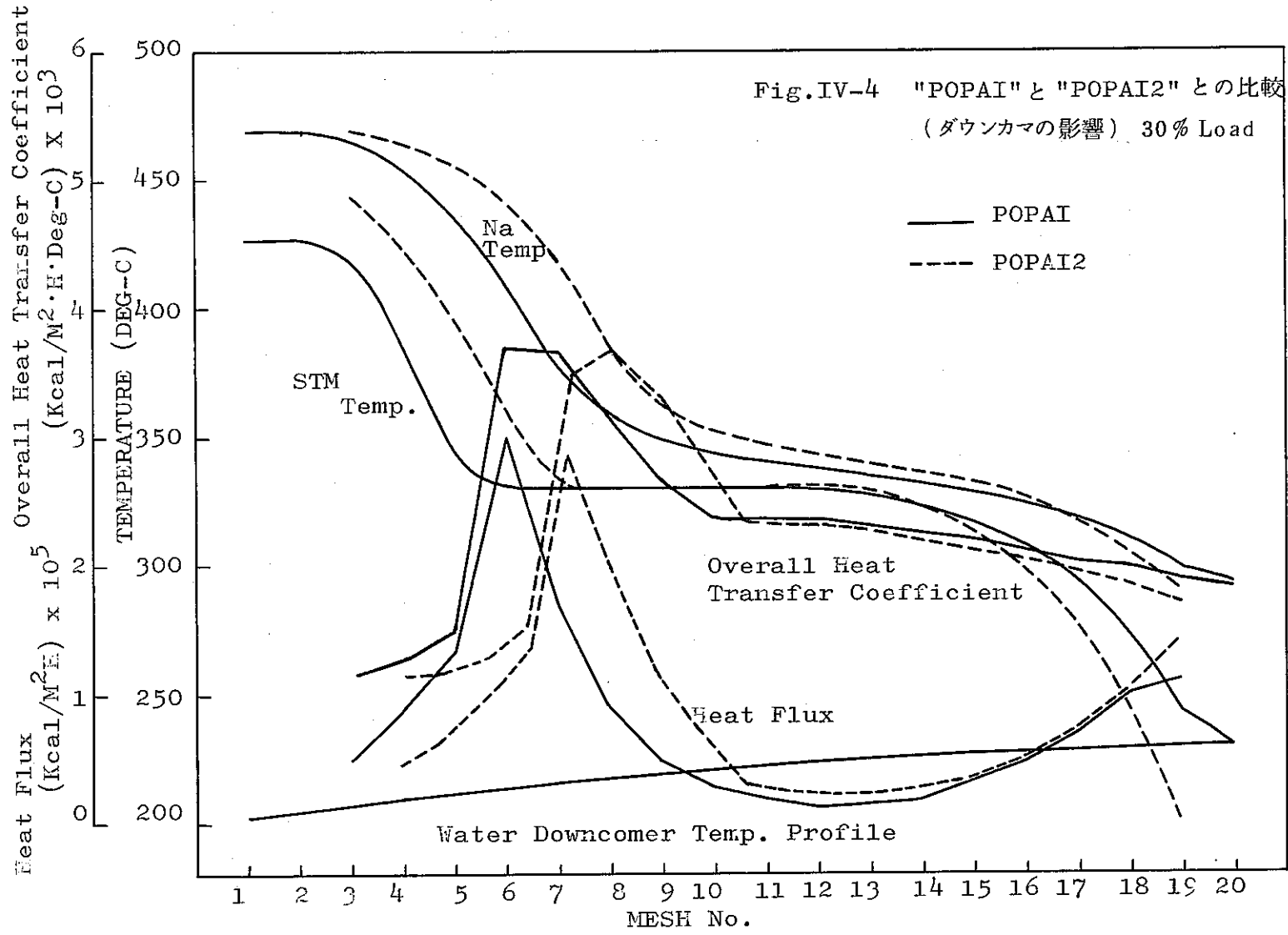
これらの結果から、“POP AI 2”の計算においては、圧力を適当（沸騰圧）に選択すればかなりの精度が得られることが予想される。

なお、これらの計算を“POP AI”で行なうに当っては、圧力の影響のみの比較ができる様に、カバーガス部の熱伝達率、シュラウドの熱伝達率および放熱量を0として計算した。









第V章 “POPAI 2”による静特性性能予想

試験計画における精度の良い性能予想は試験の成否を決するものであり、また試験施設の健全性を保つ上でも大切なものである。すなわち、Table V-1 に蒸気発生器および蒸気発生器廻りの配管設計条件を示してあるが、静特性試験計画はあくまでこの各種制限条件範囲内にて立案しなければならない。

また動特性試験においては、前もって静定状態を十分に把握しておく必要がある。

Table V-1.1 蒸気発生器設計条件

項 目	単 位	蒸 発 器	過 熱 器
設計温度(胴/管)	℃	505 / 480	525 / 510
設計圧力(胴/管)	kg/cm ² ・G	10 / 154	10 / 148

Table V-1.2 蒸気発生器廻り配管設計条件

		設 計 温 度 (℃)	設 計 圧 力 (kg/cm ² ・G)
水 / 蒸 気 側	蒸 発 器 入 口	240	154
	蒸 発 器 出 口	440	151
	過 熱 器 入 口	440	151
	過 熱 器 出 口	500	140
ナ ト リ ウ ム 側	過 熱 器 入 口	525	10
	過 熱 器 出 口	525	10
	蒸 発 器 入 口	505	10
	蒸 発 器 出 口	505	10

これらの要求事項を満たすためには、蒸気発生器の各種変数のうち水/蒸気側では、(1)給水流量、(2)給水温度、(3)圧力、ナトリウム側では、(4)流量、(5)入口温度の各変化が他に及ぼす影響をあらかじめ十分に予測しておかねばならない。

本章では、“POPAI 2”を利用して行なったこれらのパラメータサーベイ結果の一部を記すものである。

また Table V-2 には計算に用いた蒸気発生器の各種定数およびパラメータ値を示してある。

さらに本章ではパラメータサーベイを、設計条件との比較について記した部分が多いので、Fig. V-1 に蒸気発生器および過熱器の設計運転条件²⁾を示す。

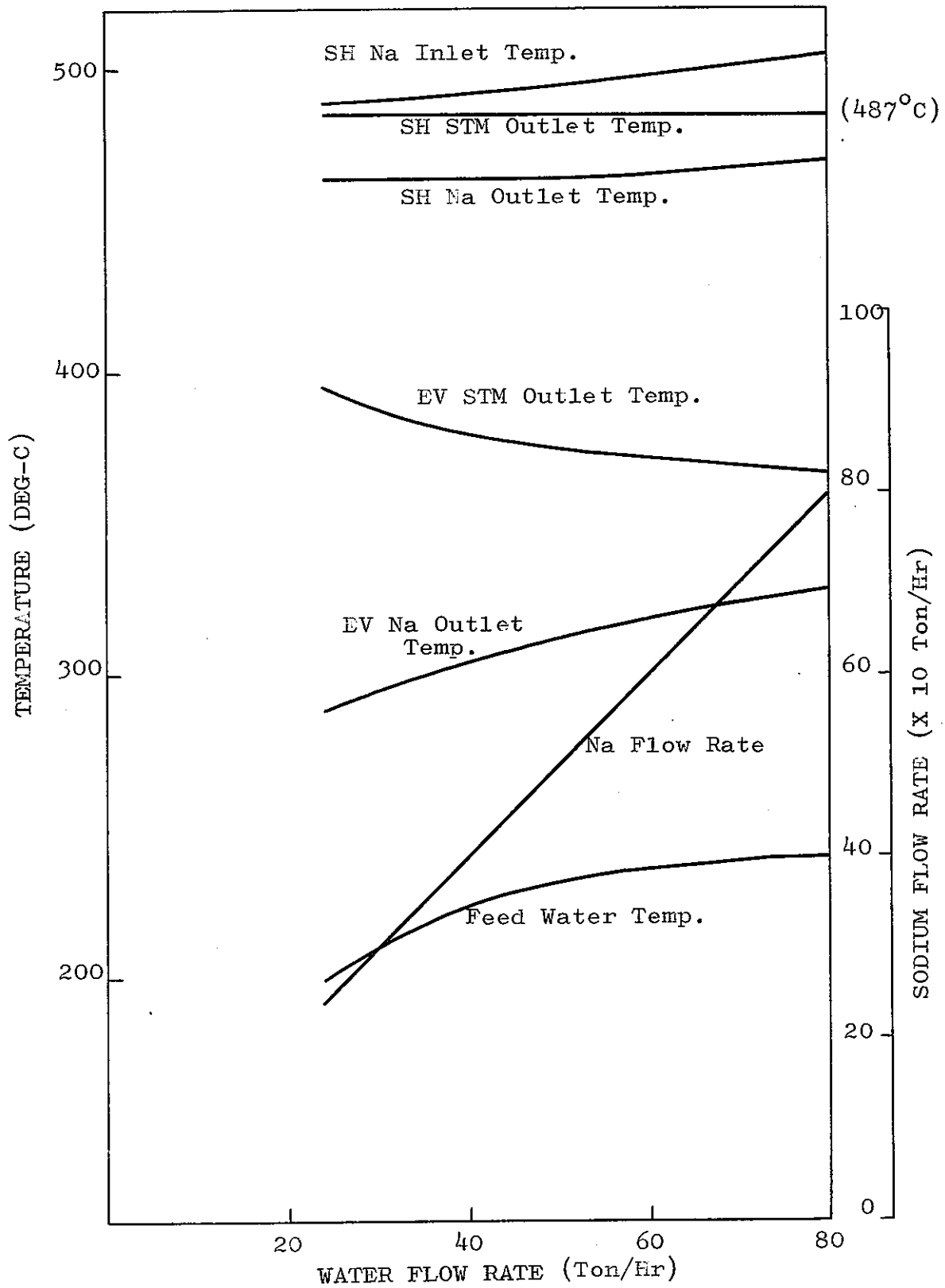


Fig. V-1 蒸気発生器設計運転条件

Table V-2 “POPAI 2”による計算範囲および定数値

項 目		単 位	蒸 発 器	過 熱 器
構 造 デ ー タ	コイル管層数	—	6	5
	伝熱管本数	—	75	60
	代表伝熱管コイル径	m	1.0	1.0
	伝熱管外径	mm	25.4	25.4
	伝熱管内径	mm	19.0	19.0
	内 胴 外 径	m	0.765	0.765
	外 胴 内 径	m	1.245	1.165
	ヘリカルコイル部長さ	m	4.2	2.8
コイル巻き上げ角	°	9	9	
伝 熱 デ ー タ	DNBクオリティ	—	0.75	0.75
	汚 れ 係 数	$m^2 \cdot Hr \cdot ^\circ C / kcal$	0.0	0.0
運 転 条 件	水 / 蒸気側流量	Ton/Hr	24 ~ 80	24 ~ 80
	給 水 温 度	$^\circ C$	200 ~ 240	—
	蒸 気 圧 力	$kg/cm^2 \cdot G$	130 ~ 140	130 ~ 140
	ナトリウム流量	Ton/Hr	240 ~ 800	240 ~ 800
	ナトリウム入口温度	$^\circ C$	510 ~ 460	510 ~ 460
	流 量 比	—	8 ~ 12	8 ~ 12

V-1 蒸発器単体運転モード

V-1.1 設計値評価

本節では、蒸発器単体運転時の静特性性能予想を行なうものである。

試験計画のまず第1歩は運転手法の習熟を第1目的としたため困難あるいは危険だと考えられる試験は避け、比較的簡単と思われる設計条件価評試験を予定しているため、単体のみの各種熱流パラメーターをサーベイし、試験が前節で述べた機械設計条件範囲内で行なうことができるかどうかを予測した。

ここでは最初にその結果を記することとする。

Fig. V-2 ~ Fig. V-4は設計値に対してそれぞれ、蒸気出口温度、ナトリウム入口温度およびナトリウム流量を設計条件に対する非拘束条件として予想を行なったものであり、破線は予想曲線を、一点鎖線は設計値を示す。

これらの結果から、蒸発器は設計に対してかなり余裕があると言えるが、設計では水/蒸気側熱伝達率表示式、伝熱管の熱伝達率表示式等が本コードに使用してあるものに比較して安全側にあることより当然の結果と言えよう。

なお、比較のため蒸気発生器の各種設計条件をTable V-3に示す。

またFig. V-5は、設計条件をもとに給水流量、ナトリウム入口温度およびナトリウム入口流

Table V - 3 蒸気発生器設計諸式

	項 目	表 示 式
水／蒸気側	単相流域 沸騰域 沸騰域	Dittus Boelter の式 Rohsenow の式 ($0 < X_{DNB} \leq 0.6$) Colburn の式の $\frac{1}{2}$ ($0.6 < X_{DNB} < 1.0$)
ナトリウム側	全領域	Hoe の式
その他	熱伝導率	SUS304 15.5 kcal/m・Hr・°C 2¼Cr-1Mo 28.6 kcal/m・Hr・°C

量を変化させた場合の蒸気出口温度の感度を調査したものである。

本図を利用すれば、基準状態からわずかに移動した各種運転条件下（線型性が成立する範囲）での運転状態が予想できる。したが、この様な感度図をいく種類か作成すれば、単体運転モード時の操作範囲が比較的簡単に作成できるであろう。

V-1.2 ナトリウム入口温度の影響

Fig. V-6 は給水温度を 220 °C、ナトリウム／水の流量比を 10 とした場合に、蒸発器入口ナトリウム温度を変化させた場合の出口蒸気温度への影響を予想したものである。

蒸発器は、設計条件および運転上の安全性を考慮して、出口蒸気温度は、飽和温度 + 30 °C 以上、440 °C（蒸発器出口部配管設計条件）以下にて運転しなければならない、またナトリウム側から言えば、蒸発器伝熱管設計温度が 480 °C のため、安全を考えれば、ナトリウム入口温度はこの温度以下でなくてはならない。

以上より、Fig. V-6 において、蒸発器の運転範囲は、三本の二点鎖線で囲まれた範囲で行なわねばならない。すなわち、30% 負荷においては、ナトリウム入口温度は 425 °C 以上、470 °C 以下、また 100% 負荷時には、460 °C 以上、480 °C 以下の範囲に制限されることになる。

以上より、蒸発器単体運転モードの場合には各種運転上、機械的設計上の制限条件があるにもかかわらず、後述の結合運転モード時の運転操作範囲に比べてかなり広い領域の操作範囲を持っていることが判かる。

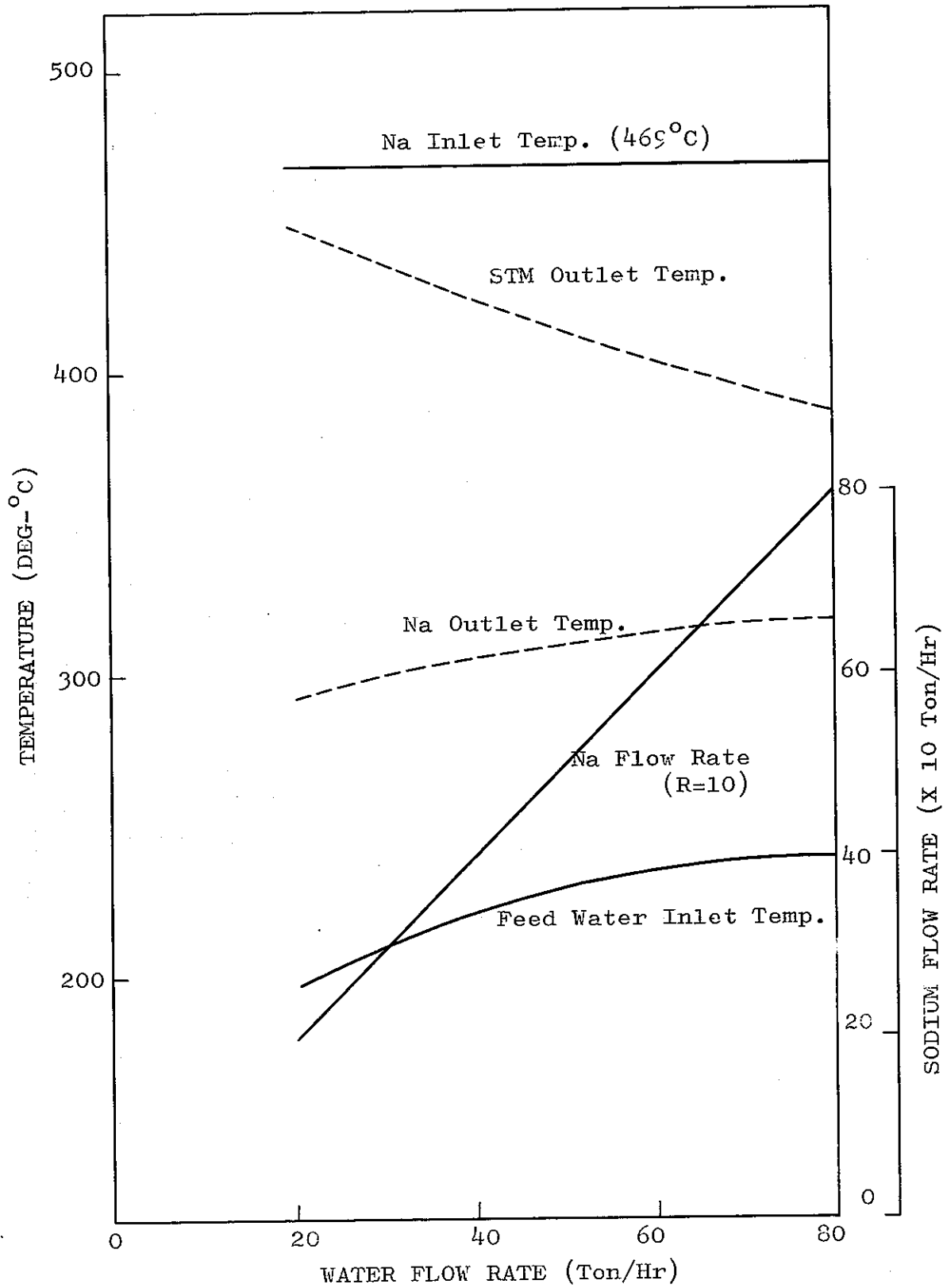


Fig. V-2 単体運転モード (蒸気出口温度の決定)

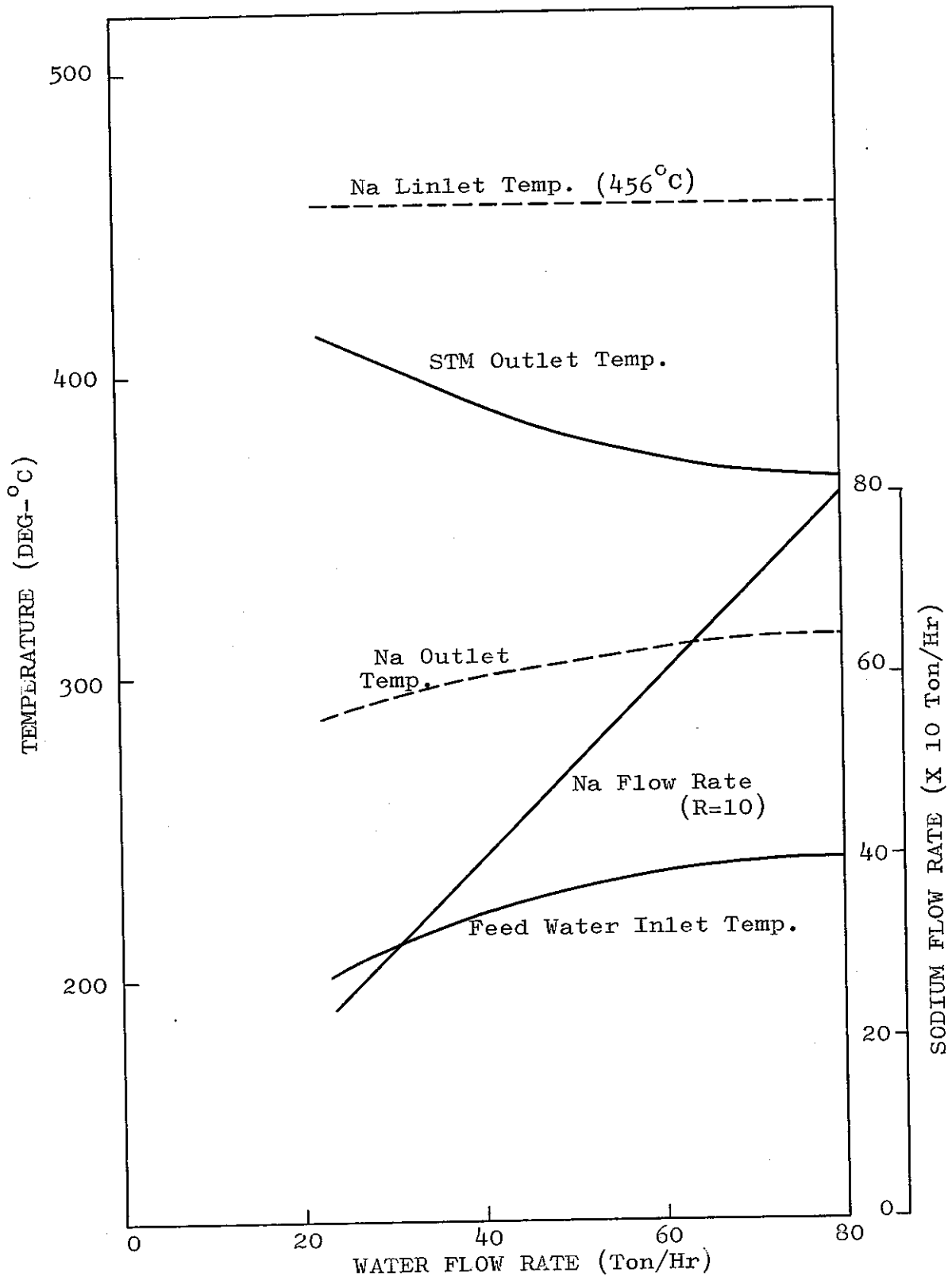


Fig. V-3 単体運転モード (ナトリウム入口温度の決定)

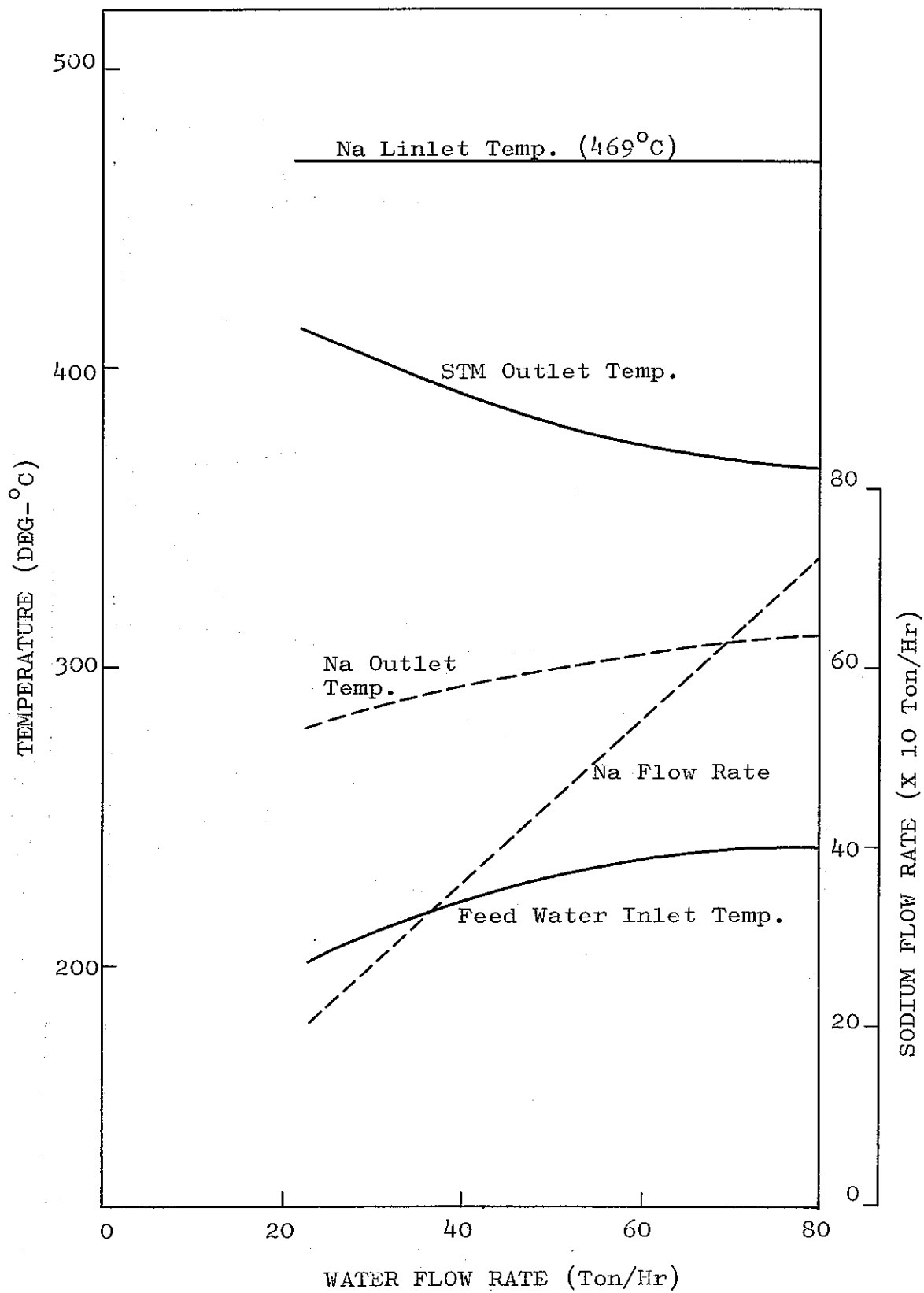


Fig. V-4 単体運転モード (ナトリウム流量の決定)

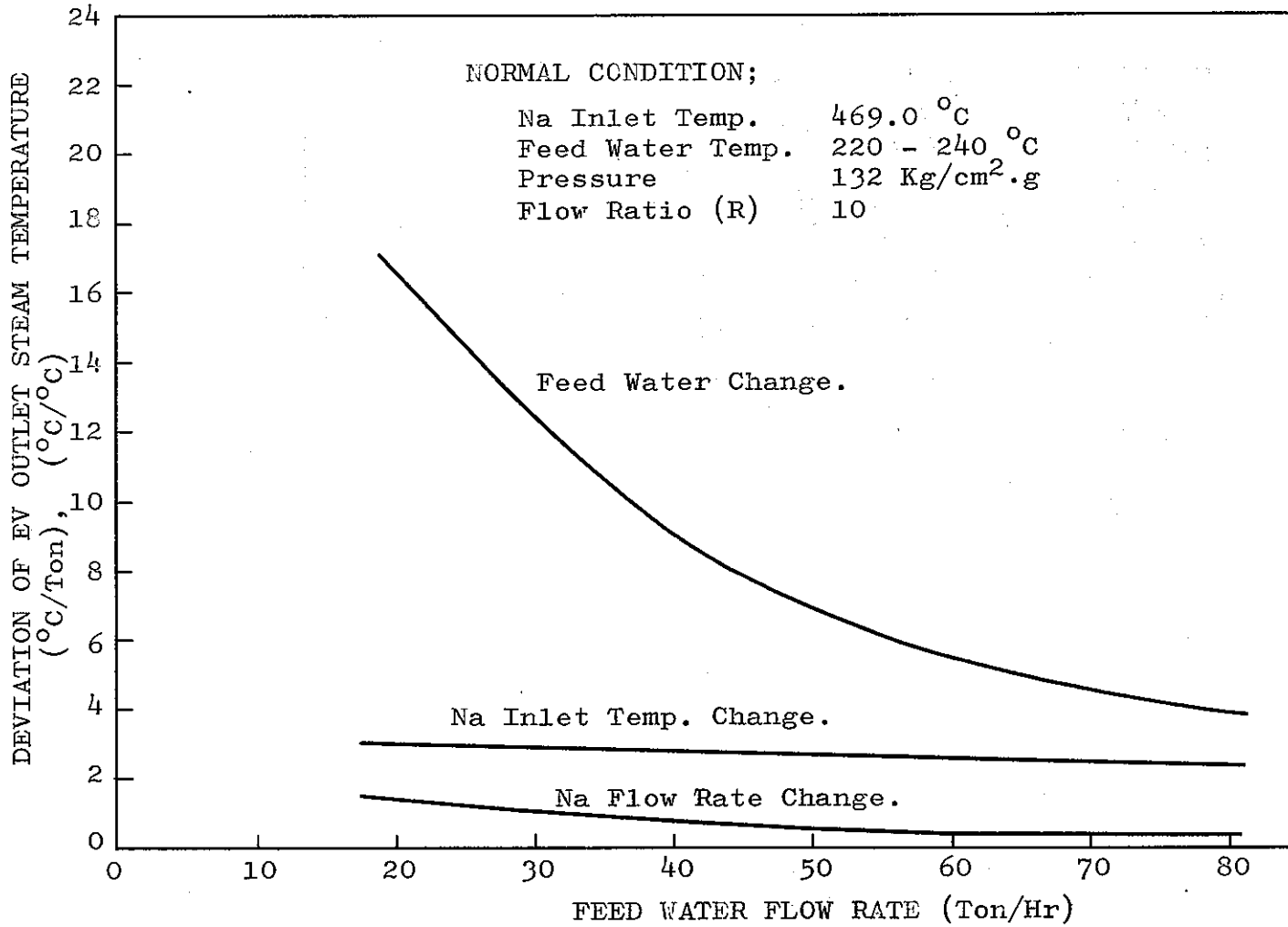


Fig. V-5 単体運転モード(感度)

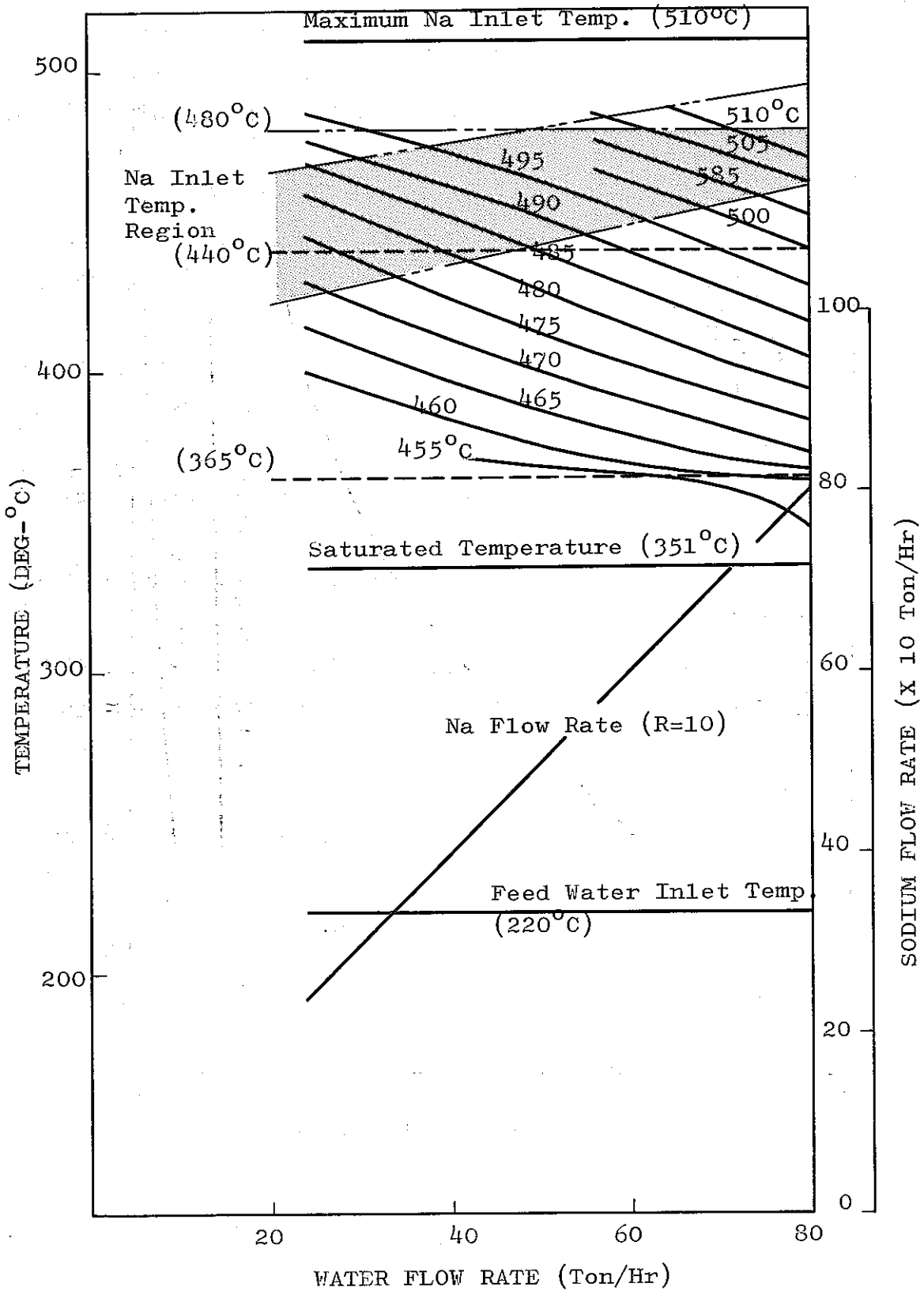


Fig. V-6 単体運転モード (ナトリウム入口温度の影響)

V-2 蒸発器，過熱器結合運転モード

V-2.1 設計値評価

本節では，蒸発器および過熱器の結合運転時の静特性性能予想を行なうものである。

蒸発器単体モードと同様，結合モードにおいても，まず試験は設計値の評価から出発することとなった。Fig. V-7は，ナトリウム入口温度，給水温度，流量比を設計値に合わせ，蒸気出口温度を非拘束条件としたものであるが，予想によれば，伝熱面積加乗のため，蒸発器出口条件が，全負荷範囲において機械的設計条件を越えてしまう。

また Fig. V-8は，過熱器出口蒸気温度，給水温度および流量比を設計条件に合わせ，ナトリウム入口温度を非拘束条件としたものであるが，ナトリウム入口温度は設計条件内に入るが，蒸発器出口蒸気温度が飽和状態（二相流状態）となり，このような条件下での運転は不可能だと予想される。

Fig. V-9は，過熱器出口蒸気温度，給水温度およびナトリウム入口温度を設計条件に合わせ，流量比（ナトリウム流量）を非拘束条件としたものであり，これについても前例と同様蒸発器出口状態が飽和状態となるため，運転は不可能である。

以上，三種類の条件を固定して，設計値評価を行なったが，いずれの場合においても設計値を満足する様な運転は不可能であると予想される。

このため，設計値の評価試験は，流量比を減少させ，過熱器出口条件を非拘束条件とする様な方法でしか行なうことができないと考えられる。

また Fig. V-10～Fig. V-14は，給水温度（220℃），蒸気出口温度を個定し，流量比(R)を8～12の範囲で変化させた場合のナトリウム入口温度条件を求めたものであるが，流量比が8および9の場合は蒸発器出口条件が飽和となり，また11および12の場合には，低負荷における蒸発器出口温度が設計値を越えることになる。

また流量比10の場合には，高負荷時に，蒸発器出口蒸気温度が飽和に近づくため，この場合も安全な運転ができない。

以上の諸条件から，結合モード時の安定運転範囲はかなり範囲の狭いものと予想される。

V-2.2 安定操作範囲

前項で結果から，結合モード時の安定操作範囲はかなり狭い領域であろうと予想されたので，本項では，この安定範囲を予想することとする。

(1) 流量比(R)の影響

Fig. V-15は，給水温度（220℃），過熱器入口ナトリウム温度（490℃）を一定とし，流量比を変化させた時の蒸発器出口温度の変化を表わしたものである。

グラフから，設計，運転上の拘束条件（蒸発器出口蒸気温度は，440℃以下，365℃以上）内での流量比範囲を表わすと，二点鎖線で囲まれた非常に狭い領域での運転を行なう必要があることがわかる。また Fig. V-16は，同一条件での蒸発器入口ナトリウム温度を表わしたもの

であるが、これについても設計値より 480℃以下が安全だと考えられる。したがって、安定運転操作範囲はさらに狭くなる。Fig. V-17は、参考のため、上記条件下での過熱器出口蒸気温度を表わしたものである。

(2) ナトリウム入口温度の影響

Fig. V-18は、給水温度（220℃）、流量比（10）を一定とし、ナトリウム温度を変化させた時の蒸発器出口温度の変化を表わしたものである。

同じ様に運転上、設計上の制限条件よりナトリウム入口温度領域は、二本の二点鎖線で囲まれた範囲内に制限しなければならない。またFig. V-19は、同じく蒸発器入口ナトリウム温度を表わしたものであるが、制限条件により、過熱器入口ナトリウム温度は、二点鎖線の下側の領域でなくてはならず、Fig. V-18の領域は、さらに狭く制限されることとなる。またFig. 20, 21は同条件下での過熱器出口蒸気温度を表わしたものである。

Fig. V-22は、Fig. V-18の条件において、流量比を9とした場合の蒸発器出口温度を表わしたものであり、その様相が一変することが予想される。

以上の検討結果から、結合運転モードの場合には最も大きな制限条件は蒸発器出口条件であり、またその値は、流量比Rをわずかに変化させるだけで大幅な変動が予想される。このため、安定運転範囲は非常に小さな領域となり、運転操作手法は非常に困難な作業になると予想される。

なお、最後に以上までの検討結果をもとに結合運転モードにおける感度試験に採用した基準状態をFig. V-23に示す。

試験計画では、基準状態を設定し、その状態を基準として各変数を微小変動させた場合の応答を調査するものである。基準状態はナトリウム入口温度、給水温度を一定（それぞれ495℃および220℃）に保ち、流量比を9～10の範囲内で変化させる様な条件である。

参考のため、Fig. V-25, 26に同条件で流量比が9および10の場合の状態を予想してあるが、これからも流量比の影響がいかに大きいか明らかである。

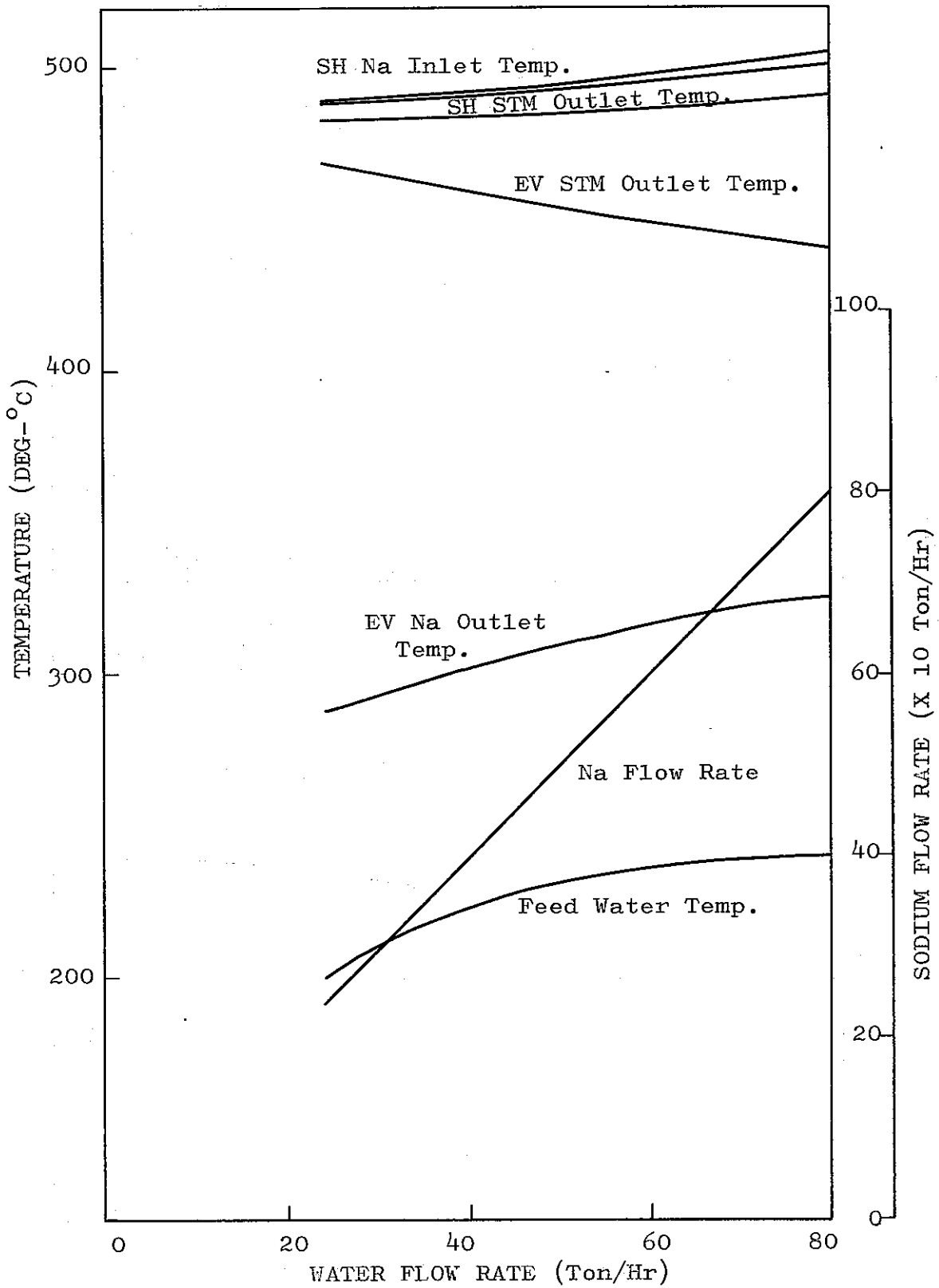


Fig. V-7 結合運転モード，設計値評価（過熱器蒸気出口温度の決定）

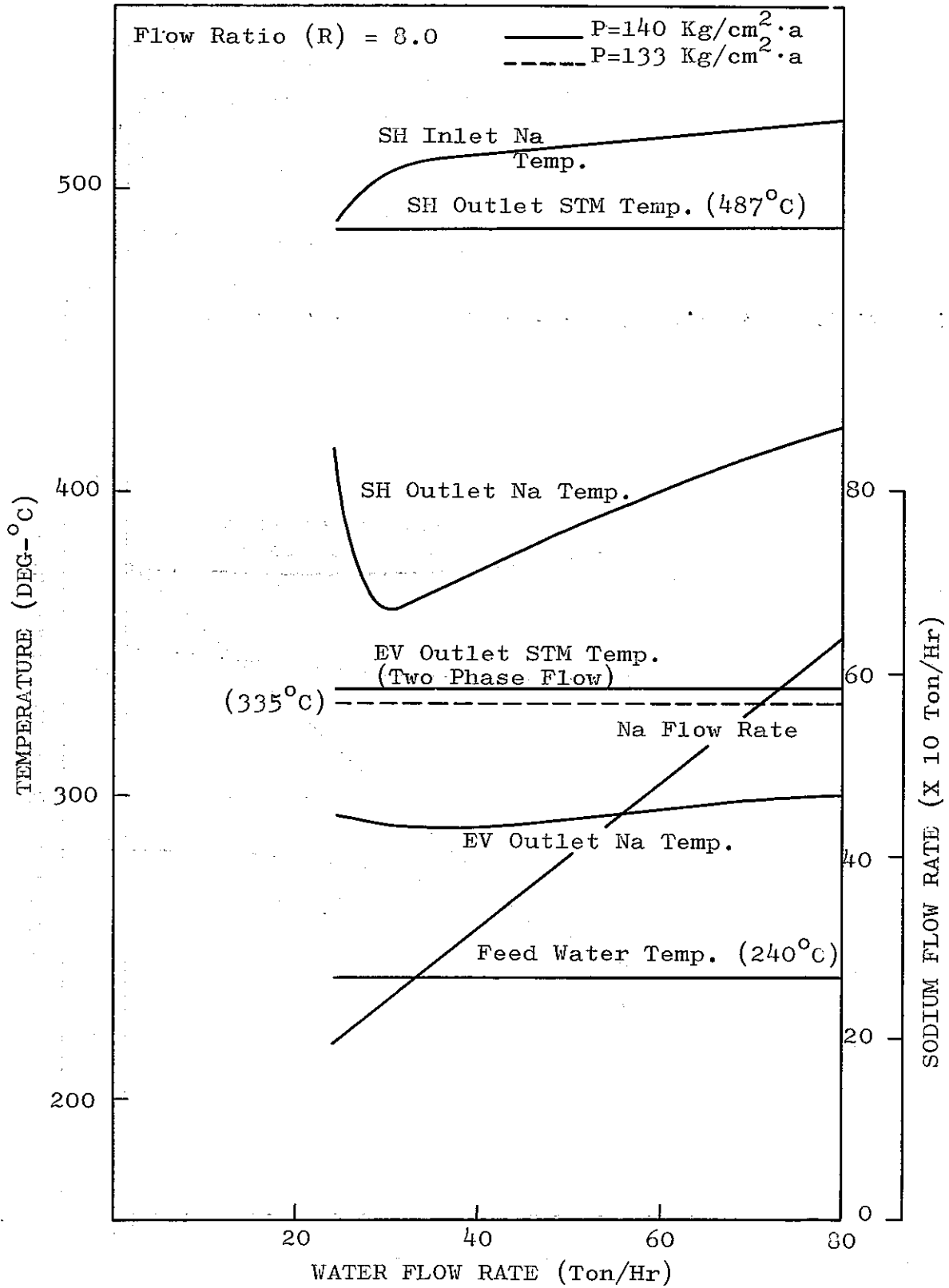


Fig. V-10 結合運転モード，設計値評価（流量比8）

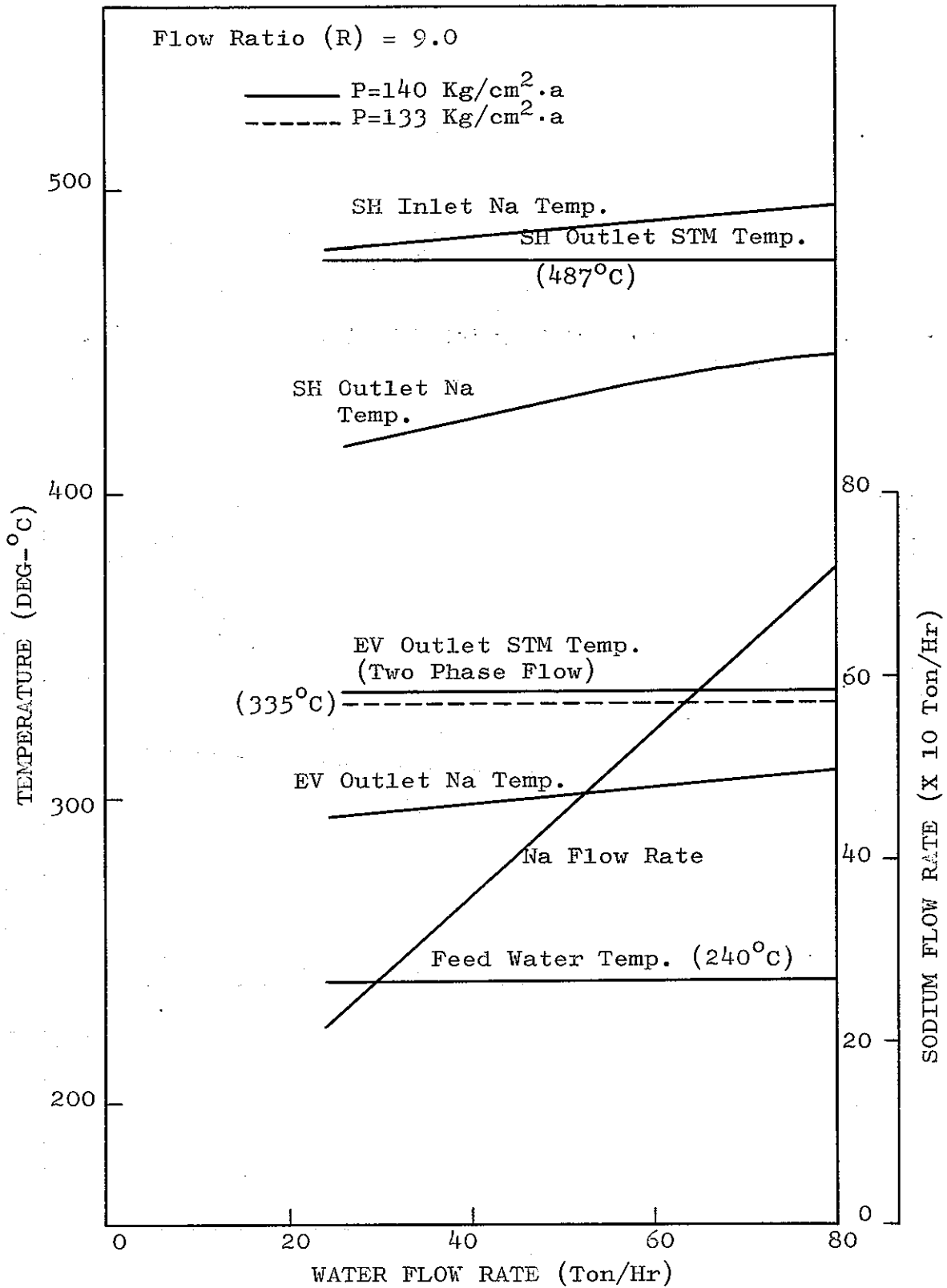


Fig. V-11 結合運転モード，設計値評価（流量比9）

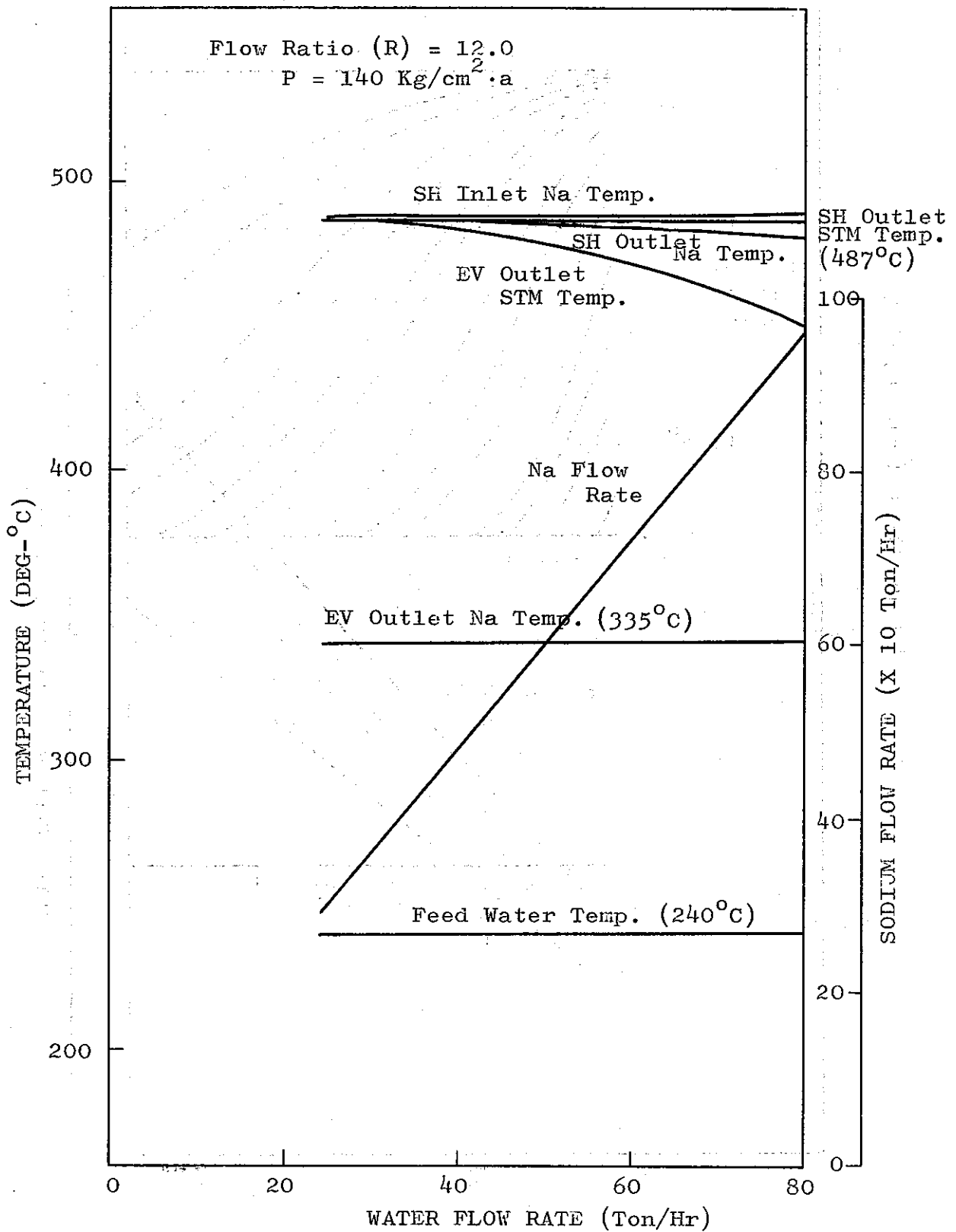


Fig. V - 14 結合運転モード，設計値評価（流量比12）

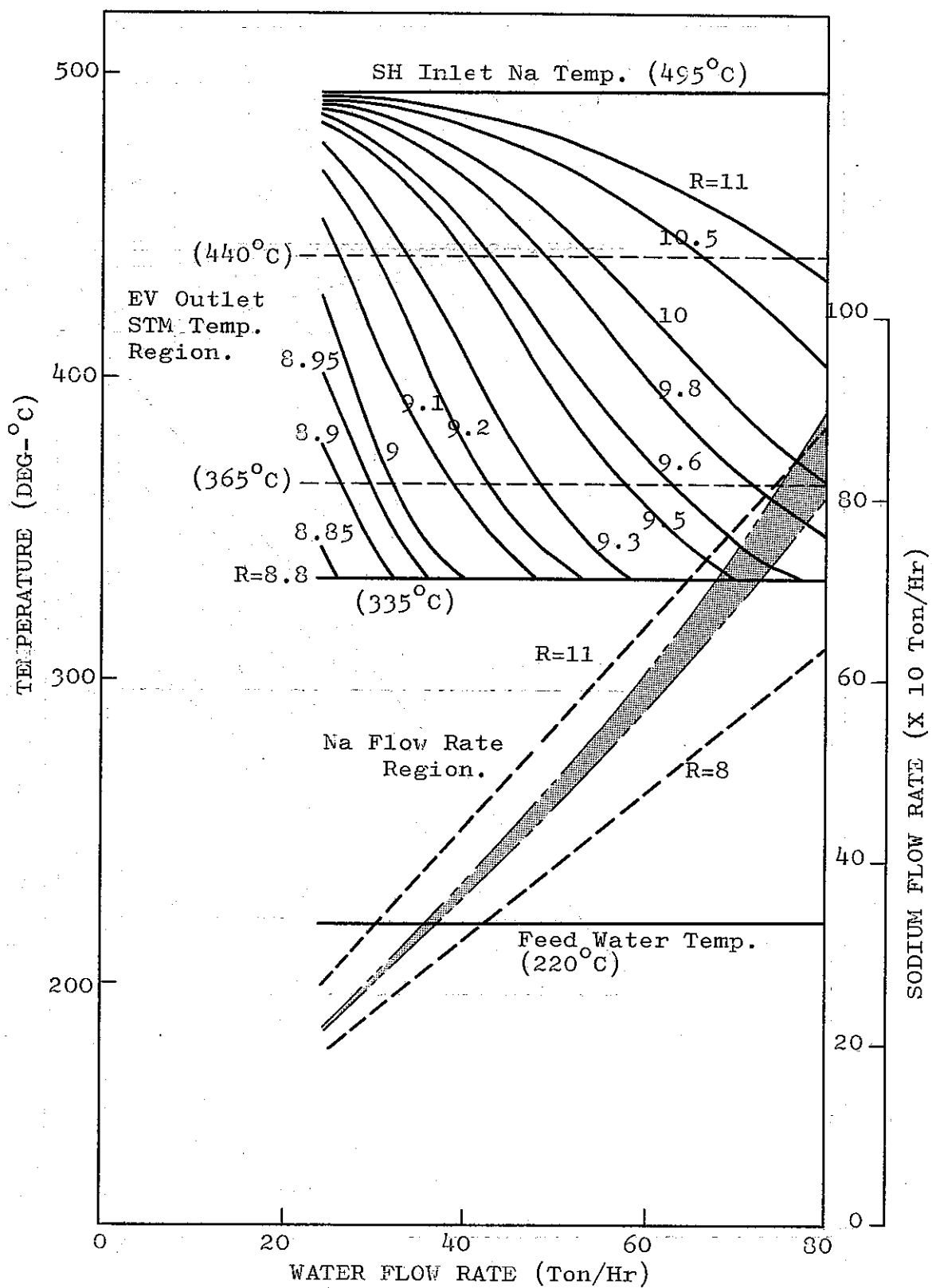


Fig. V-15 結合運転モード，流量比の影響
(蒸発器出口蒸気温度変化)

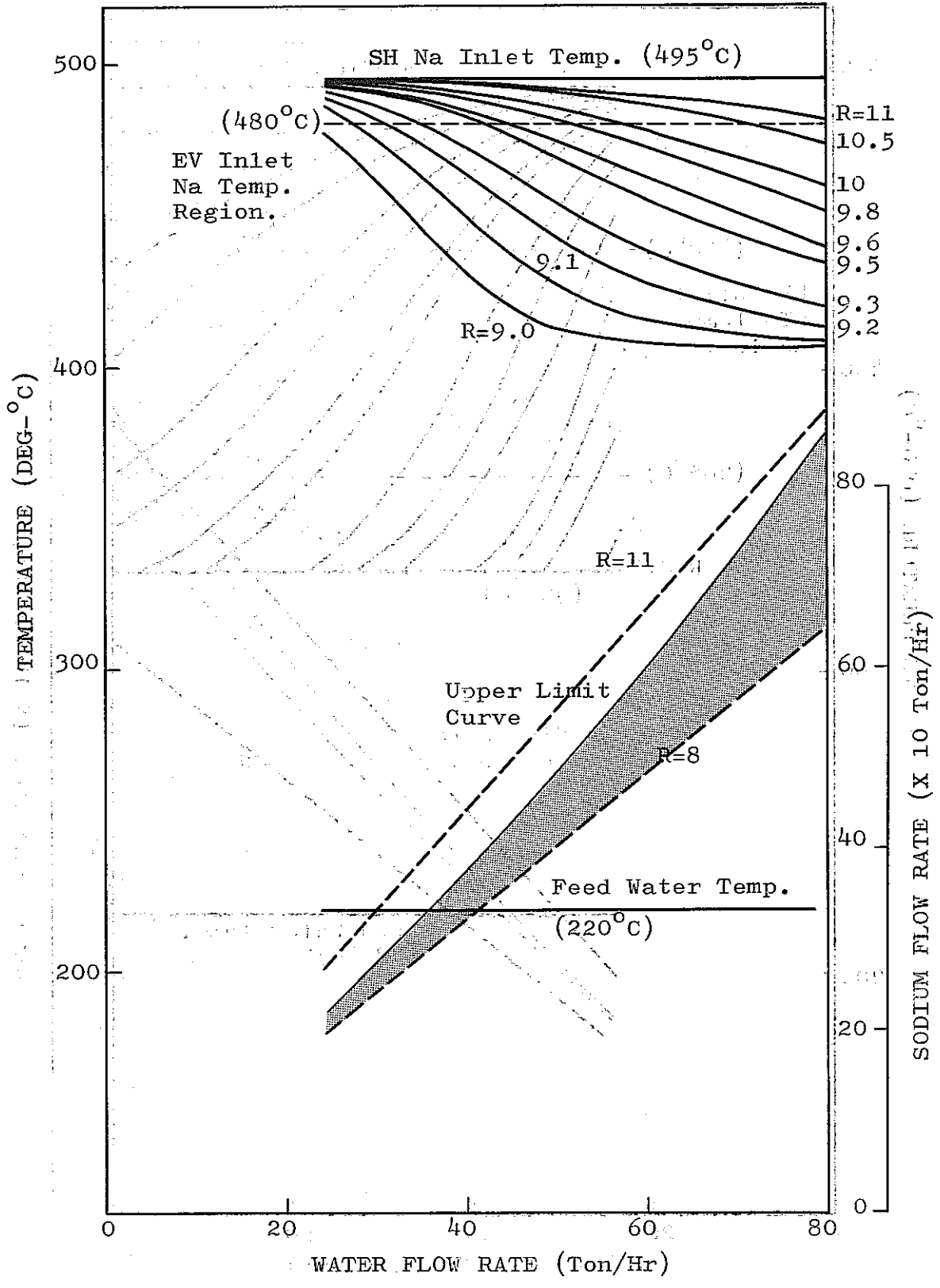


Fig. V-16 結合運転モード, 流量比の影響
(過熱器出口ナトリウム温度変化)

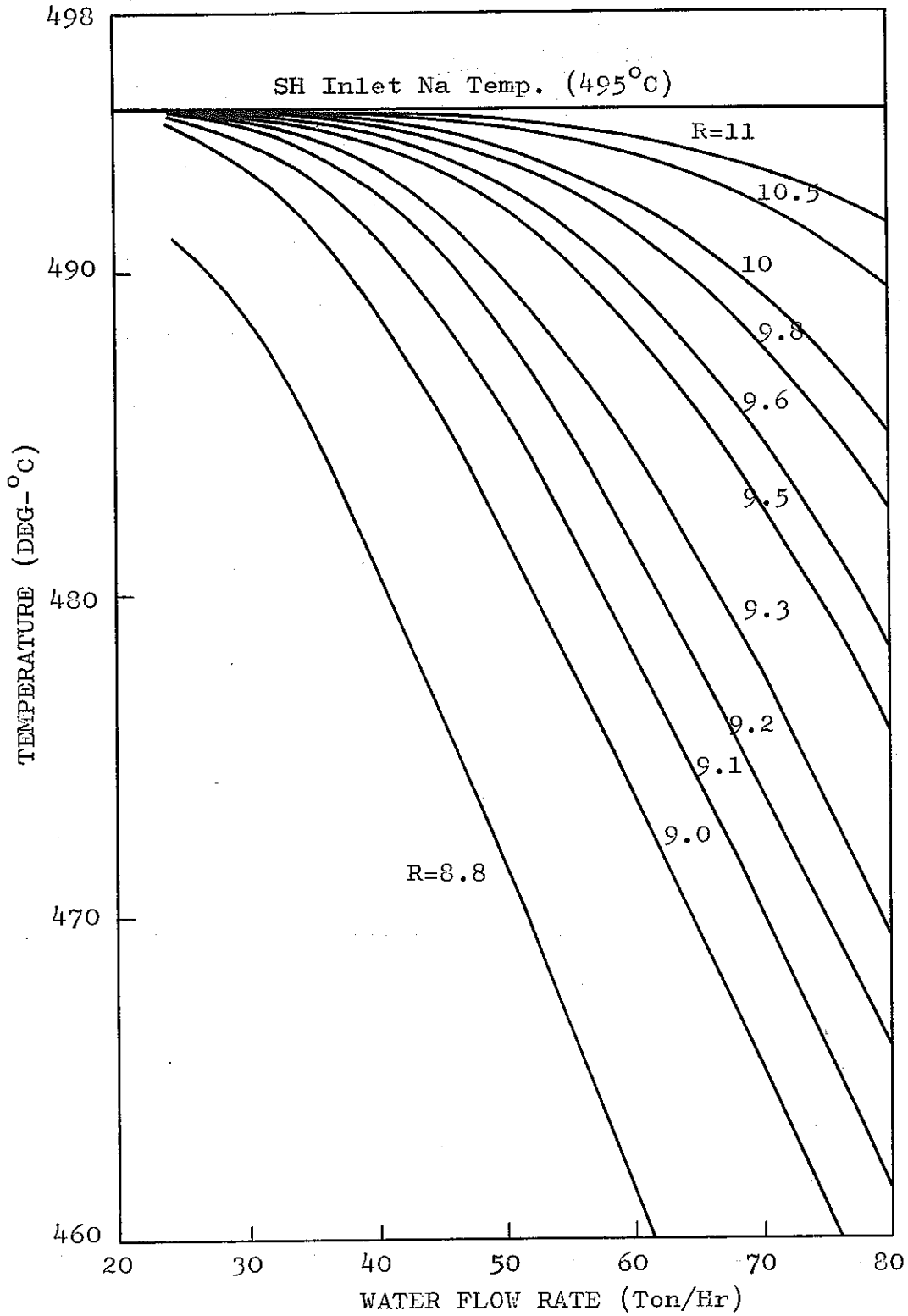


Fig. V-17 結合運転モード，流量化の影響（過熱器出口蒸気温度変化）

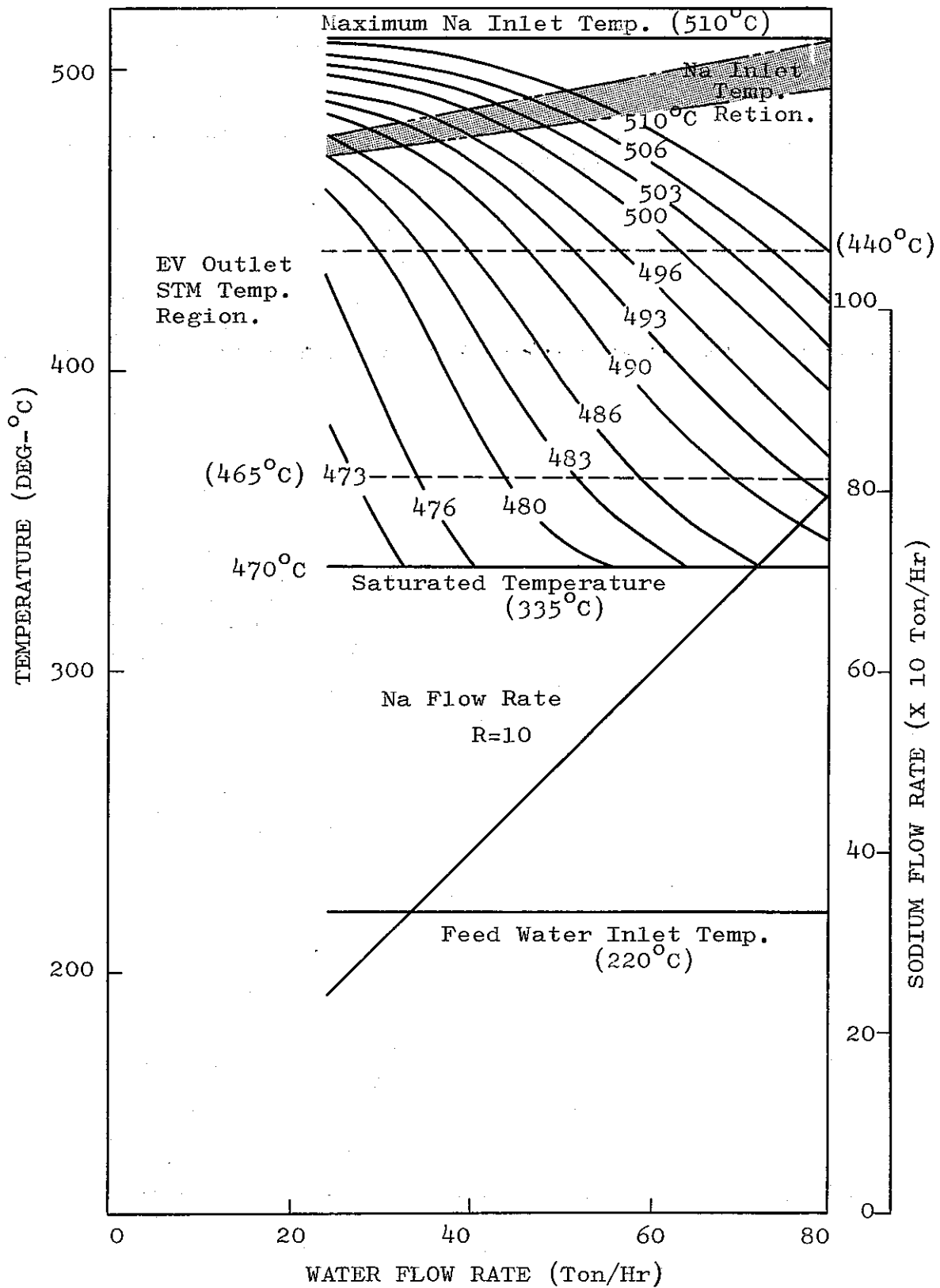


Fig. V-18 結合運転モード，ナトリウム温度の影響（蒸発器出口温度変化）

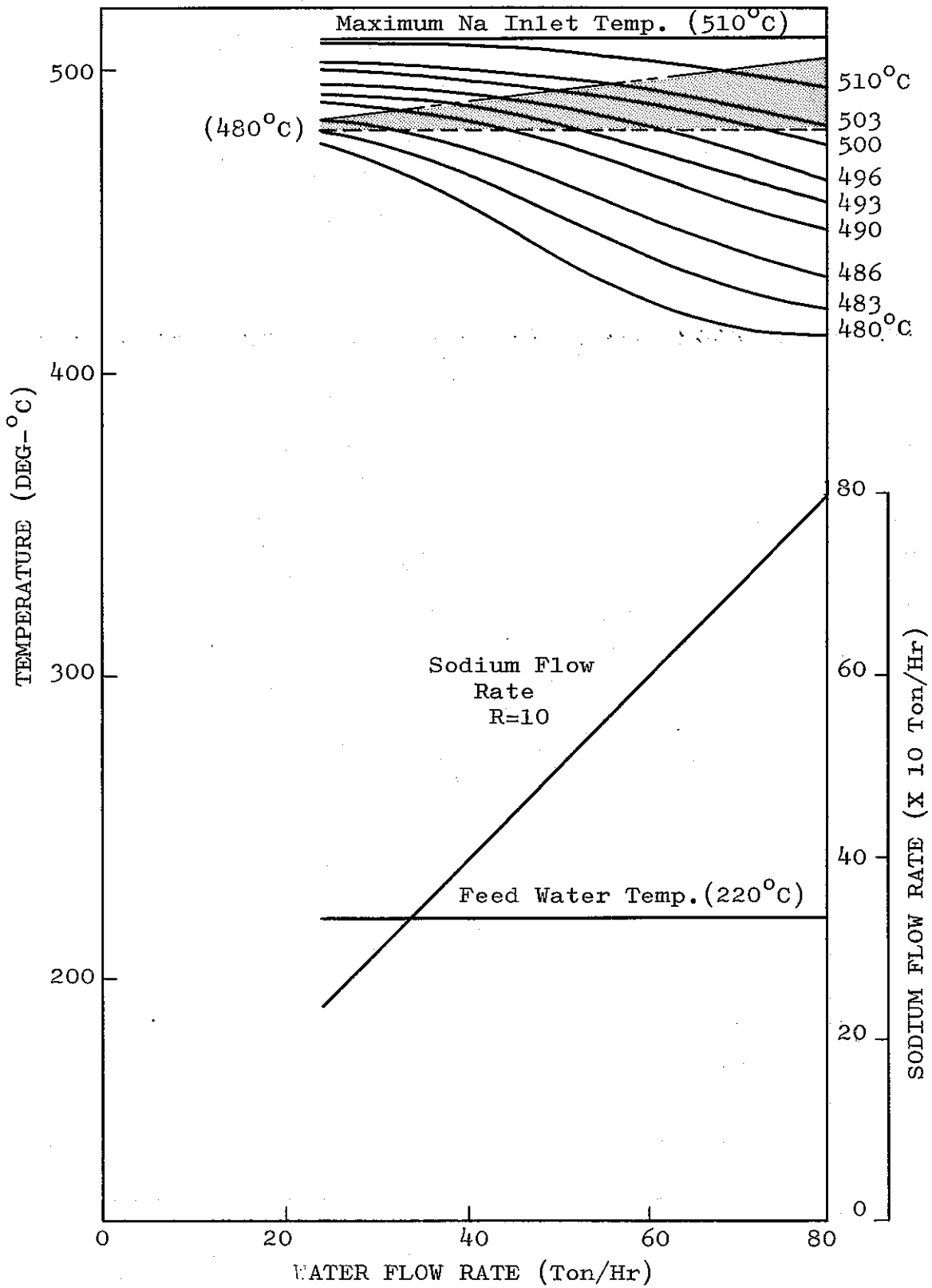


Fig. V-19 結合運転モード，ナトリウム温度の影響（過熱器出口ナトリウム温度変化）

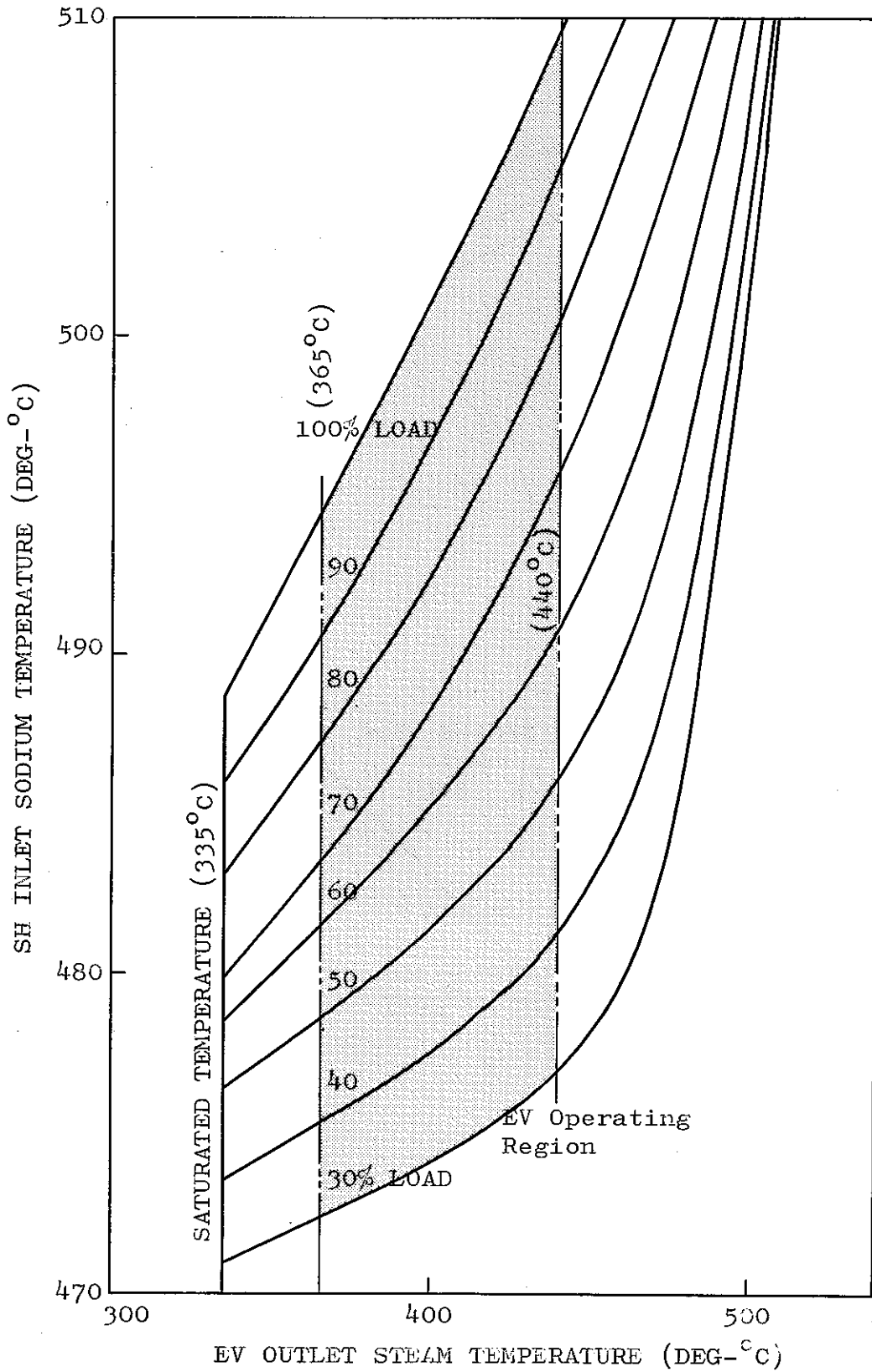
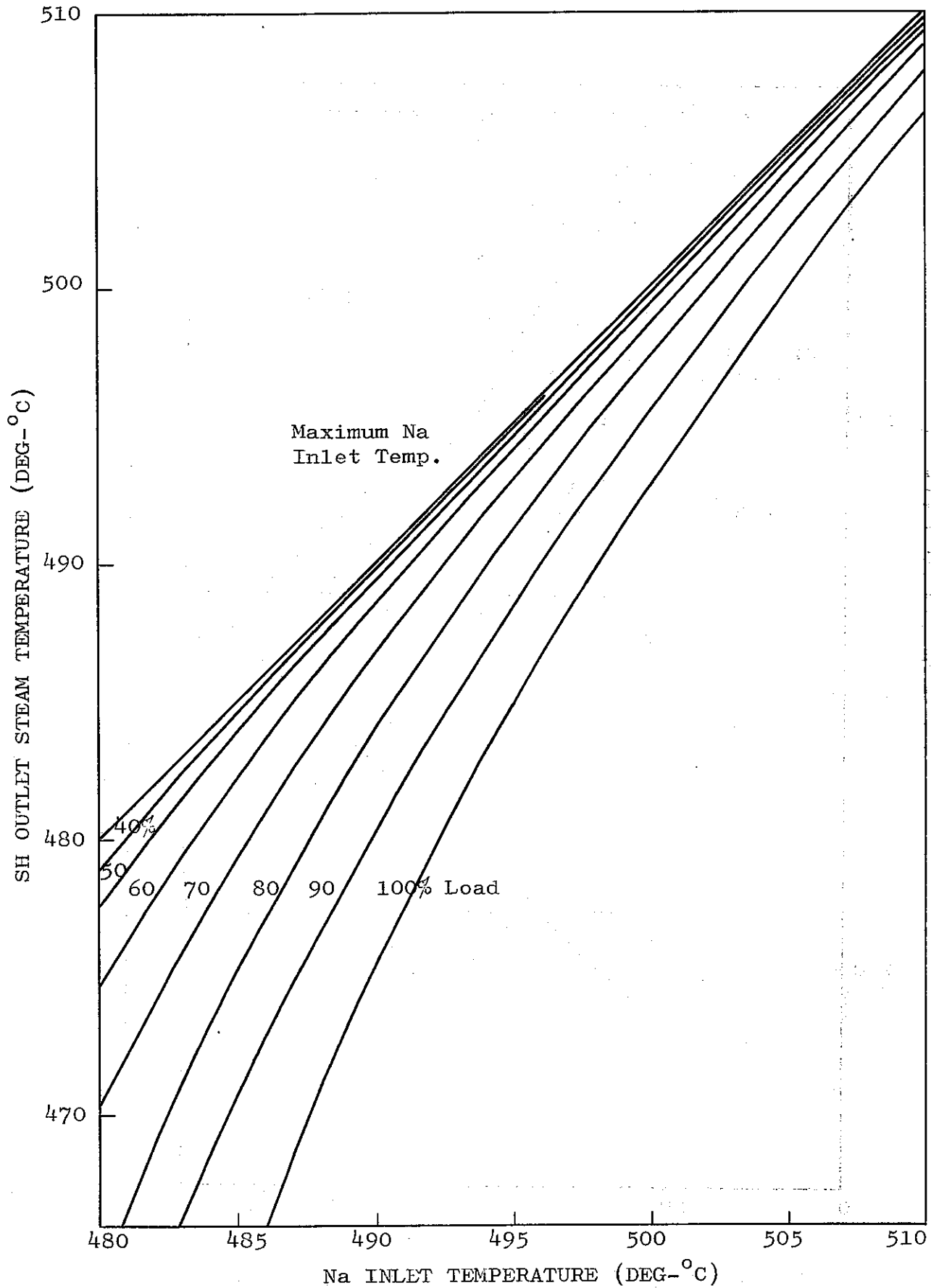


Fig. V-20 結合運転モード, ナトリウム温度の影響
(蒸発器出口蒸気温度変化)



Na INLET TEMPERATURE (DEG-°C)
Fig. V-21 結合運転モード, ナトリウム温度の影響
(過熱器出口温度変化)

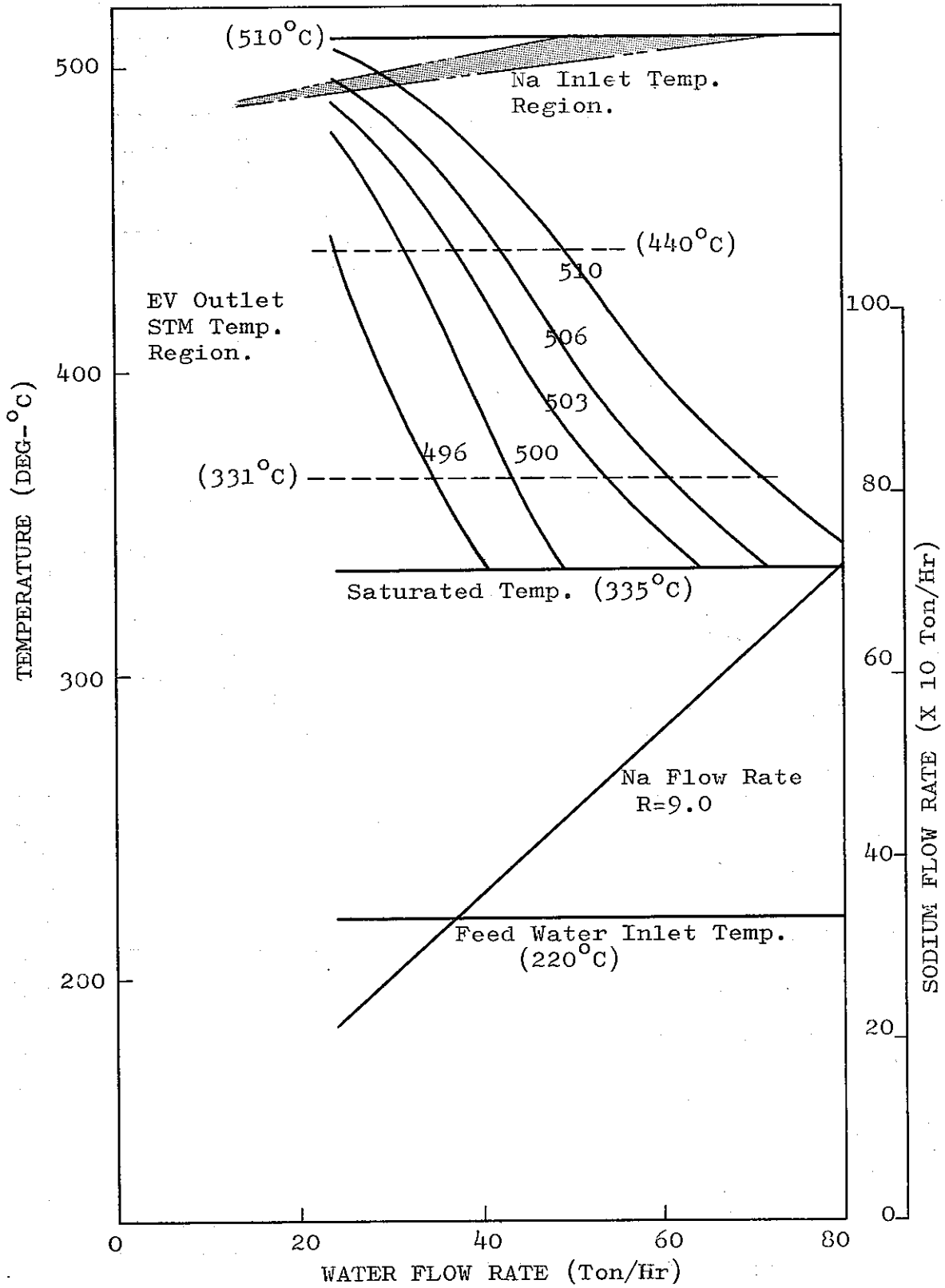


Fig. V-22 結合運転モード、ナトリウム温度の影響 (R=9)
 (蒸気器出口蒸気温度変化)

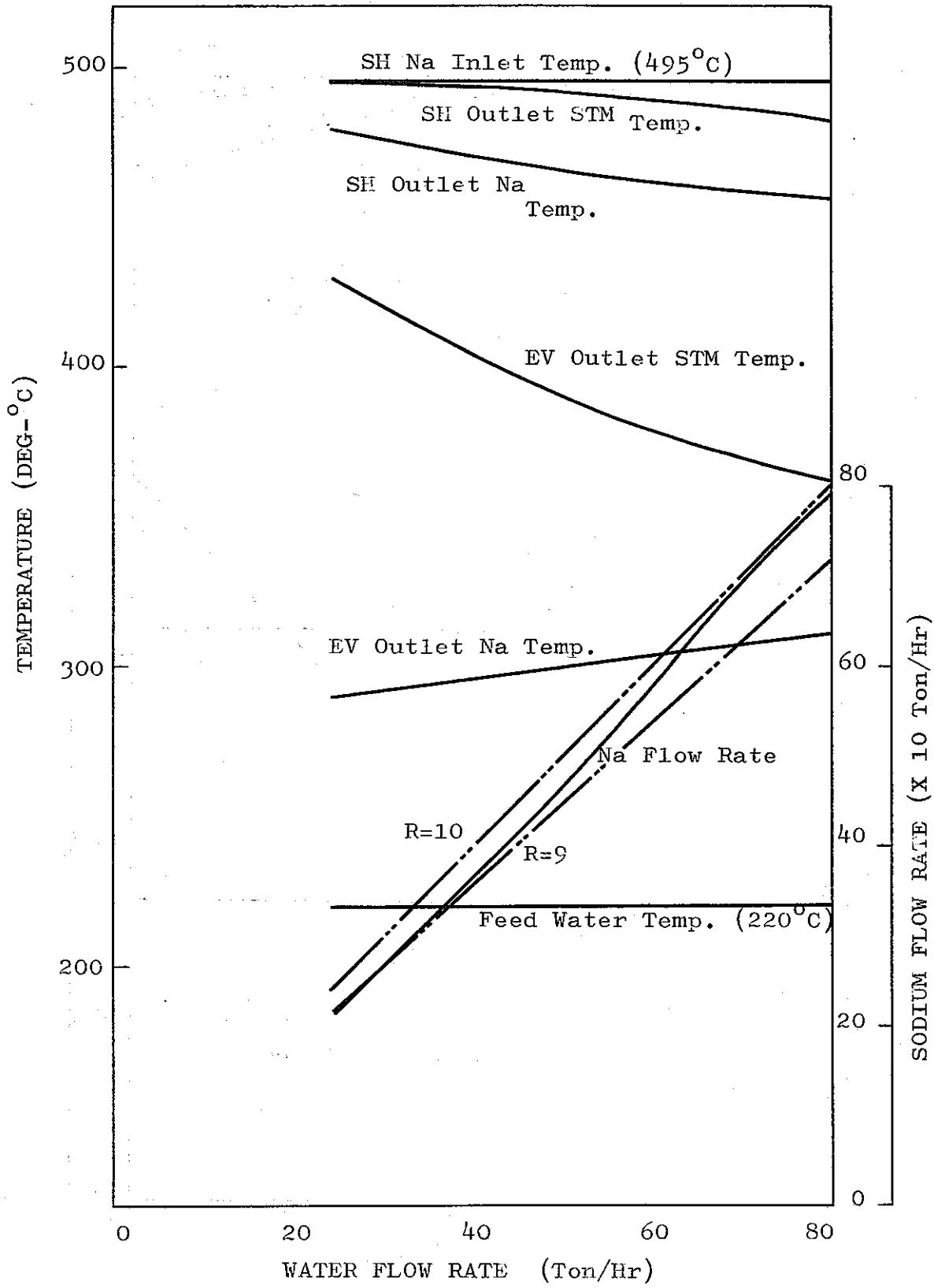


Fig. V - 23 結合運転モード，感度試験条件表

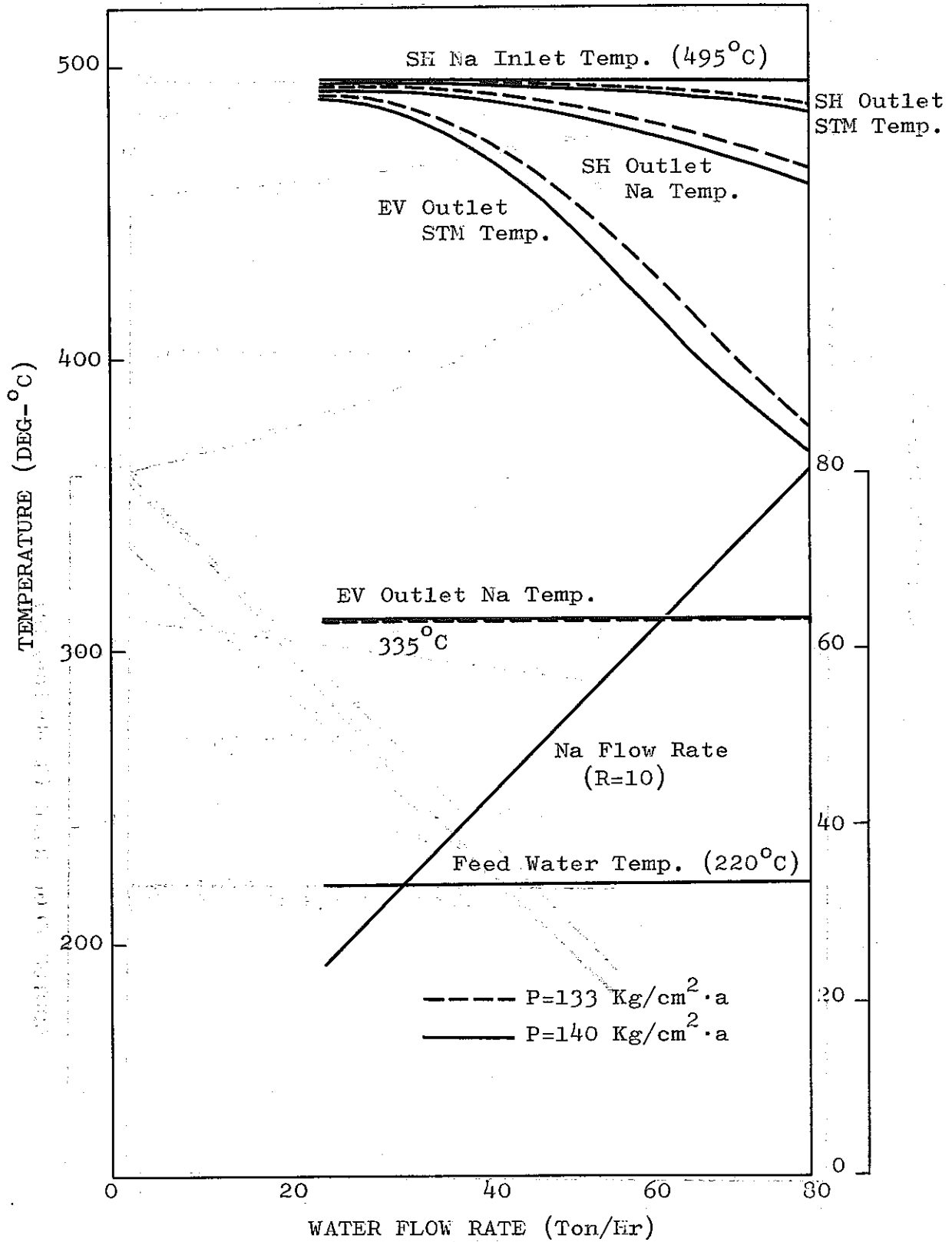


Fig. V-24 感度試験条件サーベイ, 流量比10

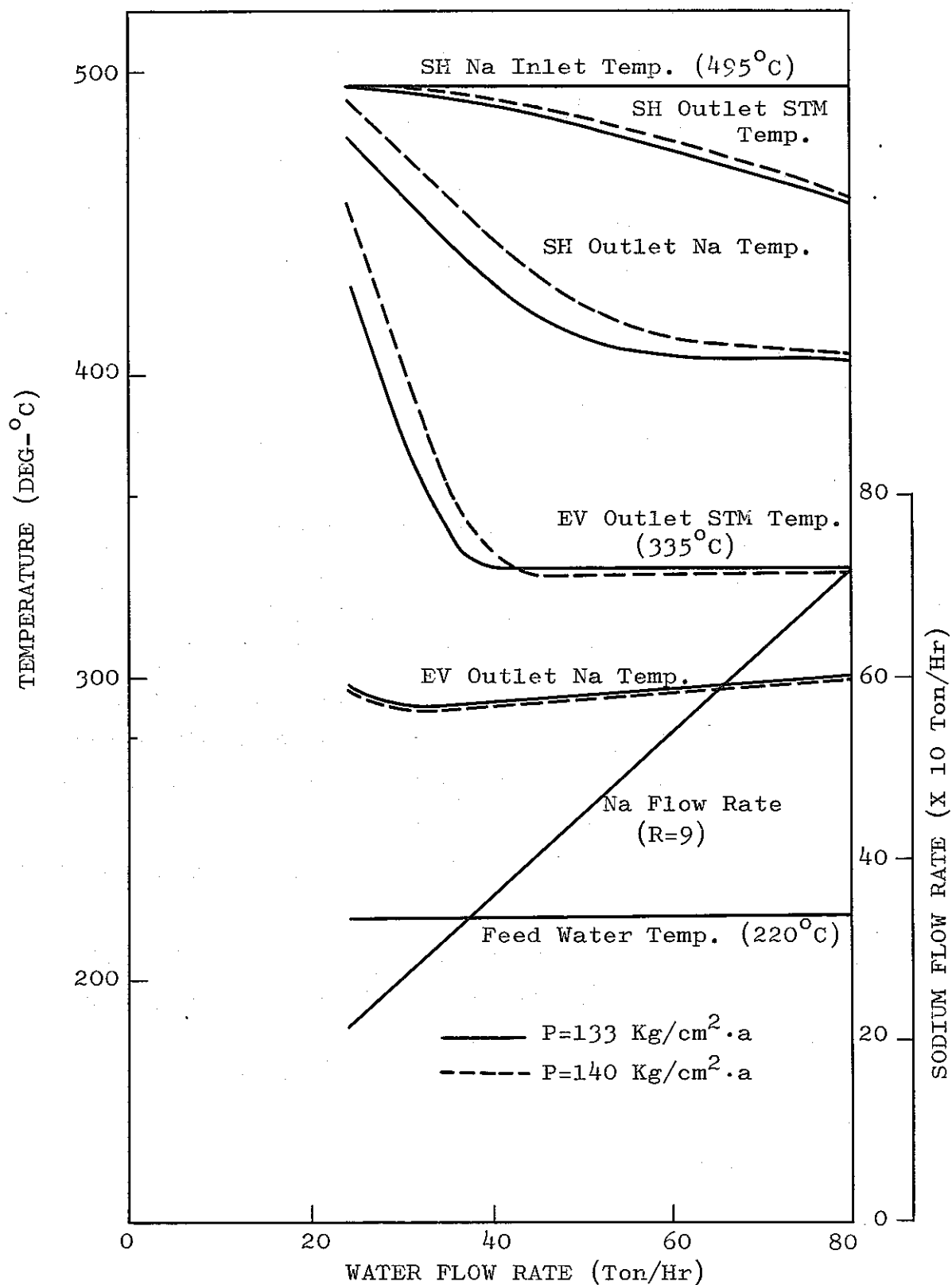


Fig. V - 25 感度試験条件サーベイ, 流量 9

第Ⅵ章 結 言

静特性性能予想コード“POPAl”の補助コードとして開発した“POPAl 2”の構成および本コードを使用して各種静特性性能予想を行なった。

“POPAl 2”は“POPAl”の簡略化を計ったため次の利点、欠点を持っている。

利点

- (1) 演算時間が少ない。
- (2) 入出力量が少ない。
- (3) 結合運転モードの予想が可能である。
- (4) 蒸気出口温度、ナトリウム入口温度およびナトリウム流量の計算が可能である。

欠点

- (1) 単管モデルのため、詳細解析ができない。
- (2) 各種の簡略化のため、計算精度が落ちる。

本コードを用いて蒸発器単体運転モード、蒸発器、過熱器結合運転モード時の静特性性能予想を行なった結果、次のことが予想された。

- (1) 蒸発器単体運転モードの場合には、かなり広い操作範囲が存在する。
- (2) 結合運転モードの場合には、操作範囲が非常に狭い領域に限定される。
- (3) 結合運転モード時の操作範囲に対する制限条件としては、蒸発器出口蒸気条件の制限が最も大きい。
- (4) 低負荷においては、流量比(R)の変動により蒸発器出口温度は非常に大きな影響を受ける。

各種パラメーターサーベイの結果、結合運転モード時には蒸気発生器の操作範囲は非常に狭い領域に制限される。特に蒸発器出口条件は、運転上、機械的設計条件上の各種条件に制約されているため、操作範囲を狭ばめる因子のうち最も大きなものとなっている。

これは蒸気発生器が分離型、すなわち蒸発器と過熱器が分離した構成を持つための必然的な結果であろう。

今後、本コードおよび“POPAl”を用いて静特性試験計画を立案し、さらに動特性試験における静定状態を予測して、試験、運転操作の効率を計るとともに、試験結果を比較、検討しながらコードの精度を高め、蒸気発生器の操作範囲図を作成しなければならない。

参 考 文 献

- (1) 大石, 山川, 白石, “ヘリカルコイル型蒸気発生器性能予想コードの開発” ZN941 74-34
(PNC) (1974-4)
- (2) 日立製作所, “50 MW蒸気発生器設計計算書”

記 号 表

大 文 字

A	:	面 積	(m^2)
A_f	:	自由流路面積	(m^2)
C_D	:	伝熱管管群外直交流における抵抗係数	($-$)
C_f	:	平板上における抵抗係数	($-$)
C_P	:	熱 容 量	($Kcal/kg \cdot ^\circ C$)
D_e	:	相当直径	(m)
E_H	:	熱量のうず拡散係数	(m^2/hr)
E_M	:	運動量のうず拡散係数	(m^2/hr)
E_{mix}	:	混合係数	($-$)
G	:	質量速度	($kg/m^2 \cdot hr$)
H	:	エンタルピー	($Kcal/kg$)
K	:	熱通過率	($Kcal/m^2 \cdot hr \cdot ^\circ C$)
L	:	長 さ	(m)
N	:	コイル全層数	($-$)
N_O	:	コイル各層の伝熱管本数	($-$)
N_T	:	全伝熱管本数	($-$)
Nu	:	Nusselt 数	($-$)
P	:	圧 力	(kg/cm^2)
Pe	:	Poclet 数	($-$)
Pr	:	Prndtle 数	($-$)
$Pr(t)$:	乱流Prandtle 数	($-$)
Q	:	熱移動量	($Kcal/hr/m$)
Re	:	Reynolds 数	($-$)
T	:	温 度	($^\circ C$)
T_K	:	絶対温度	($^\circ K$)
V	:	速 度	(m/hr)
W	:	流 量	(kg/hr)
X	:	クオリティ	($-$)
X_{DNB}	:	DNBクオリティ	($-$)
Y_{ED}	:	強制混合による補正係数	($-$)
Z	:	メッシュ長さ	(m)

添 字

大 文 字

FB : Film Boiling
 G : Gas
 GB : Gas. at Boiling State
 IS : Core
 L : Liquid
 LB : Liquid at Boiling State
 N : Sodium
 NB : Nucleate Boiling
 OS : Shroud
 SF : Single Flow
 SL : Shell
 T : Total
 TPF : Two Phase Flow
 W : Water

小文字, その他

acce : accleration
 av : average
 bulk : bulk
 coil : coil
 dc : downcomer
 foul : fouling
 film : film
 fric : friction
 gas : gas
 i : inside
 in : inlet
 insu : insulation
 mix : mixing
 o : outside
 out : outlet
 row : row
 st : Straight
 stat : Static
 tube : tube
 ∞ : infinite

小文字

a	: ナトリウム温度伝導率	(—)
d_o	: 伝熱管又は配管外径	(m)
d_i	: " " 内径	(m)
e	: 管 粗 さ	(cm)
f	: 摩擦損失係数	(—)
f_g	: ボイド率	(—)
g_0	: 重力換算定数	(m/Hr ²)
l	: 周方向混合距離	(m)
l_p	: 軸方向伝熱管ピッチ	(m)
l_d	: 半径 " " "	(m)
r	: 半径方向距離	(m)
v	: 比 容 積	(m ³ /kg)

ギリシャ文字

α	: 熱伝達率	(Kcal/m ² .Hr.°C)
δ	: 代表距離	(m)
ϵ	: 誤 差	(—)
θ	: 伝熱管上昇角	(°)
λ	: 熱伝導率	(Kcal/m. Hr.°C)
μ	: 粘性係数	(kg/m.Hr)
ν	: 動粘性係数	(m ² /Hr)
ξ_H	: 核沸騰補正係数	(—)
ξ_P	: 抵抗係数	(—)
ρ	: 密 度	(kg/m ³)
τ	: 剪断応力	(kg/m ²)
ϕ	: Martinelli -Nelson の圧力損失補正係数	(—)
χ_{tt}	: Martinelli パラメータ	(—)