

宇宙・地上・深海高速炉ガスタービン発電システム
定常解析コード“STEDFAST”

使用説明書

区分変更	
変更後資料番号	PNC TN9520 95-002
決裁年月日	平成10年8月27日

1995年2月

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、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒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

技術開発部・技術管理室

宇 宙 ・ 地 上 ・ 深 海
高速炉ガスタービン発電システム定常解析コード
“STEDFAST” 使用説明書

大坪 章*、関口 信忠**

要 旨

本解析コードSTEDFAST(Space, TErrestrial and Deep sea FAST reactor・gas turbine system)は、深海、宇宙及び地上でのコジェネレーション用の動力源として用いるガスタービン発電方式高速炉システムにつき、システムパラメータの最適値を得るためのものである。本解析コードの特徴は次の通りである。

- ・対象とする高速炉システムは深海炉、宇宙炉、及び地上炉である。
- ・作動流体としては1次系でNaK, Na, Pb, Hg, Li を2次系でHeとXeの混合ガス(混合比は任意)を扱うことができ適用範囲が広い。
- ・システムに含まれる機器のモデル化については、将来の詳細化が容易なるように、また過渡解析コード作成が容易なように配慮されている。
- ・プログラム言語はMAC-FORTRAN で、パソコンにより容易に計算可能である。

本解析コードの作成により、システムに含まれる密閉ブレイトンサイクルの状態値が直ちに計算可能となると共に、サイクル熱効率に係わる数多くのパラメータの影響の把握及び最適化計算が可能となった。

今後各種機器のモデルをより詳細化するとともに、更に将来においては、本解析コードをベースとして、過渡解析コードを作成する予定である。

* 大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室

** 大洗工学センターシステム部

Stationary Analysis Program Code STEDFAST for
Space, Terrestrial and Deep Sea Fast Reactor • Gas Turbine Power Generation System
(User's Manual)

Akira OTSUBO *, Nobutada SEKIGUCHI **

ABSTRACT

This analysis program code STEDFAST; Space, Terrestrial and Deep sea FAST reactor • gas turbine system; is used to get the adequate values of system parameters on fast reactor • gas turbine power generation systems used as power sources for deep sea, space and terrestrial cogeneration.

Characteristics of the code are as follows.

- Objective systems of the code are a deep sea, a space and a terrestrial reactors.
- Primary coolants of the systems are NaK, Na, Pb and Li. Secondary coolant is the mixture gas of He and Xe. The ratio of He and Xe is arbitrary.
- Modeling of components in the systems was performed so that detailed modeling might be capable in future and that a transient analytical code could be easily made by using the code.
- A programming language is MAC-FORTRAN. The code can be easily used in a personal computer.

The code made possible instant calculation of various state values in a Brayton

* Frontier Technology Development Section, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center.

** System Engineering Division, O-arai Engineering Center.

cycle, understanding the effects of many parameters on thermal efficiency and finding the most adequate values of the parameters.

From now on, detailed modeling of the components will be performed. After that, the transient program code will be made.

目 次

1	基本設計条件	1
2	解析対象システム	2
3	計算モデルと計算式	5
3. 1	概要	5
3. 2	ヒートバランス計算	5
3. 3	伝熱計算	11
3. 4	機器データの計算	17
3. 5	最適化ロジック	22
4	計算フローとプログラム構成	28
5	入出力データ	32
6	サンプル計算	35
6. 1	テスト計算	35
6. 2	深海炉のサンプル計算	37
6. 3	宇宙炉のサンプル計算	44
6. 4	地上炉のサンプル計算	47
7	まとめ	64
	謝辞	65

【参考文献】

添付資料 A	米国の機器重量簡易評価式	A - 1
添付資料 B	流体の物性値	B - 1
添付資料 C	プログラム設計書	C - 1

表リスト

表 3 - 1	文字記号の説明	23
表 3 - 2	20kWe 宇宙炉システムに対する 3 つの候補の最適設計点 (仏国の例)	24
表 3 - 3	20kWe 宇宙炉システムに対する 3 つの候補の装置重量 (仏国の例)	25
表 6 - 1	ブレイントンサイクルの各部温度サーベイ	50
表 6 - 2	ブレイントンサイクルの各部温度サーベイの比較	51
表 6 - 3	深海炉のサンプル計算ケース	52
表 6 - 4	宇宙炉のサンプル計算ケース	53
表 6 - 5	レキュパレータ温度効率を変化させた場合の主要計算結果 (ケース 2a1)	54
表 6 - 6	レキュパレータ温度効率を変化させた場合の主要計算結果 (ケース 2b1)	54
表 6 - 7	熱交換器圧損率を変化させた場合の主要計算結果 (ケース 2a2)	55
表 6 - 8	熱交換器圧損率を変化させた場合の主要計算結果 (ケース 2b2)	55
表 6 - 9	コンプレッサ圧縮比を変化させた場合の主要計算結果 (ケース 2a3)	56
表 6 - 10	コンプレッサ圧縮比を変化させた場合の主要計算結果 (ケース 2b3)	56
表 6 - 11	コンプレッサ入口温度を変化させた場合の主要計算結果 (ケース 2a4)	57
表 6 - 12	コンプレッサ入口温度を変化させた場合の主要計算結果 (ケース 2b4)	57
表 6 - 13	装置重量計算結果の比較 (ケース 2a)	58
表 6 - 14	装置重量計算結果の比較 (ケース 2b)	59
表 6 - 15	地上炉のサンプル計算ケース	60
表 6 - 16	伝熱管本数を変化させた場合の主要計算結果	61
表 6 - 17	コンプレッサ段数を変化させた場合の主要計算結果	61
表 6 - 18	1 次系冷却材の種類を変えた場合の主要計算結果	61
表 6 - 19	原子炉出入口温度を変化させた場合の主要計算結果	62

図リスト

図 2 - 1	ガスタービン発電方式高速炉システムの例	3
図 2 - 2	10kWe-20kWe クラスの深海炉概念の例	4
図 3 - 1	ガスタービン発電システム構成図	26
図 3 - 2	ラジエータ部のガス流路概念	27
図 4 - 1	全体計算フロー	29
図 4 - 2	ブレイトンサイクル計算フロー	30
図 4 - 3	プログラム概略構成	31
図 6 - 1	装置重量の主要パラメータに対する依存性(BRATO設計)	63

1 基本設計条件

本解析コードSTEDFAST(Space, Terrestrial and Deep sea FAST reactor ・ gas turbine system) は深海、宇宙及び地上コジェネレーション用の動力源として用いるガスタービン発電方式高速炉システム¹⁾につき、システムパラメータの最適値を得るための定常解析を行うものである。

- ・ 高速炉システムのタイプは次の3つとし、それらの電気出力は5kWe-100MWe 規模とする。
(深海炉 5-400kWe, 宇宙炉 20kWe-1MWe, 地上炉 10-100MWe)
- ・ 冷却材はナック, ナトリウム, 水銀, 鉛, リチウムとする。
- ・ 発電は2次系に密閉ブレイトンサイクルを用いて行うものとし、その作動流体はHeとXe混合ガスとする。
- ・ システムに含まれる機器のモデルについては、将来の詳細化が容易に行えるようにコード化する。
- ・ 将来過渡解析コードを作成する場合、本解析コードの出力を初期値として使用できるように配慮する。
 - ・ 特性計算は機器ごとに行い、サブルーチン化する。
 - ・ プロセス計算データ, 機器設計計算データはメインプログラムに戻す。
- ・ 使用言語はFORTRAN (MACで計算可能なこと) とする。

尚、stedfastはsteadfast と同じ意味の単語で、その意味は、しっかりした、断固とした、ぐらつかない、不変の、不動の、である。

2 解析対象システム

解析対象システムである、ガスタービン発電方式高速炉システムの系統図を、図 2 - 1 に示す。²⁾ 本図ではラジエータ（前置冷却器）として耐圧殻と記しているがこれは深海炉の場合であって、ラジエータは各システムの用途別に次のようになる。

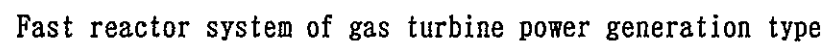
深海炉……海水への耐圧殻からの放熱（図 2 - 2 に概念図を示す。）

宇宙炉……宇宙空間への冷却パネルからの熱放射

地上炉……強制水冷

図 2 - 1 では 1 次系は 1 ループ、2 次系は 4 ループとなっているが、各ループ数は第 6 章でのサンプル計算で説明するように可変である。

また、図 2 - 1 のコンプレッサの段数としては単段だけで無く、インタークーラ付の多段のものも可能である。



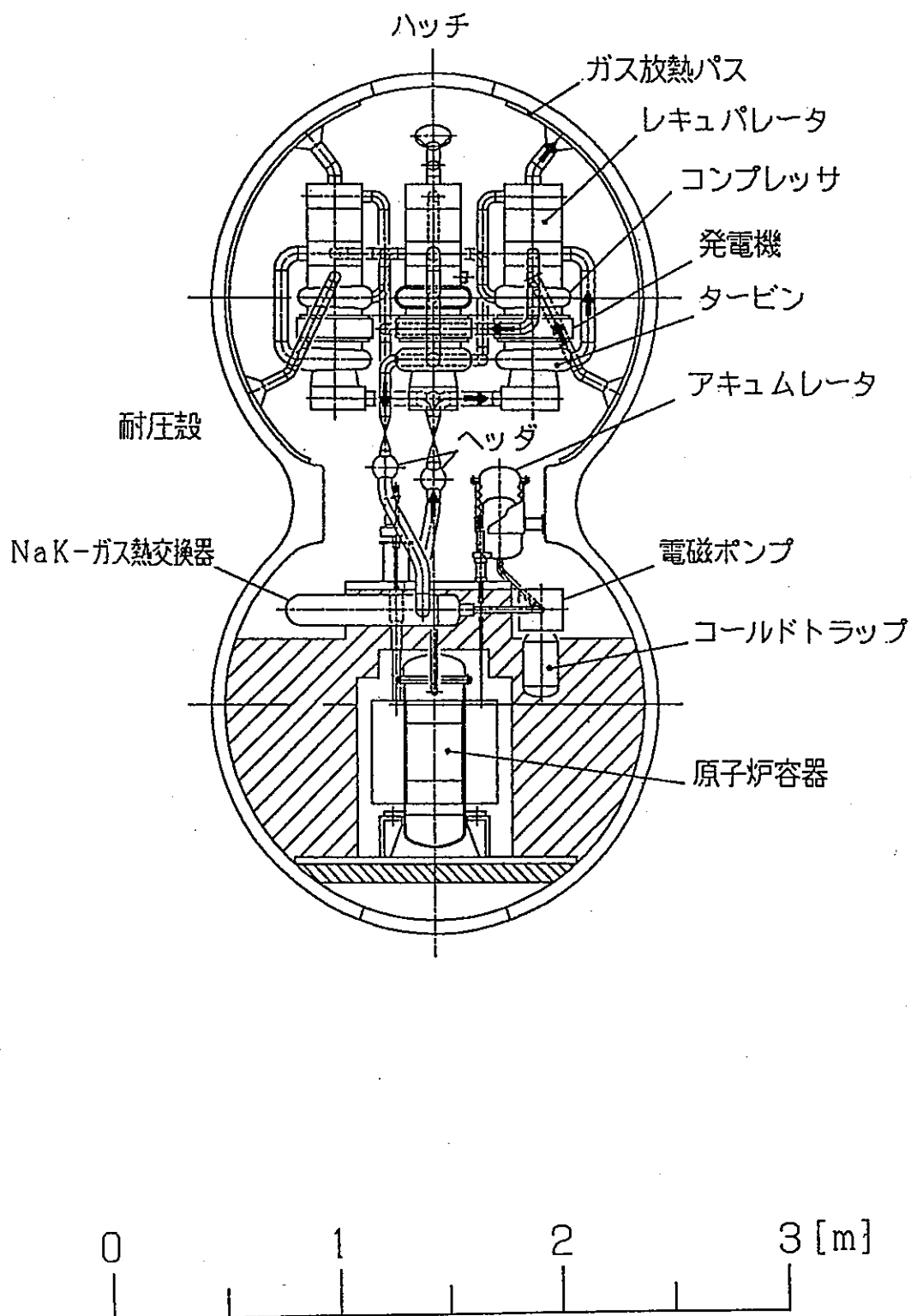


図 2 - 2 10kWe-20kWe クラスの深海炉概念の例

Concept of 10 to 20kWe class deep sea reactor

3 計算モデルと計算式

3. 1 概要

システムの静特性検討のためには通常以下の3ステップが踏まれる。

第1のステップでは、例えばブレイトンサイクルの場合には、サイクル作動流体の温度・圧力・流量、ターボ機械の膨張比・圧縮比・断熱効率、熱交換器の温度効率・圧力損失率等をパラメータとする特性評価³⁾を実施し、サイクル各点での（例えば図3-1のポイント1～6）状態量を定める。

第2のステップでは、これらの状態量よりシステムを構成する諸機器（ターボ機械・熱交換器・配管等）の設計（所謂熱流体力設計と強度設計）を実施し構造を決定する。

第3のステップは、第1・第2のステップを踏まえた最適システム（往々にして作動流体がガス流体の場合、サイクル熱効率と熱交換器類のサイジングは相反する結果となる。）を詳細に検討するために、状態量の異なる数サイクルを選定しパラメータ解析による感度評価を実施し、プラントシステムを絞り込む。

本コードでは、第2章の基本設計条件に基づき第1ステップの云々ゆるヒートバランス計算は、1次系と2次系（ブレイトンサイクル）に分け、また、第2ステップの設計計算は、伝熱計算と機器構造データ計算に分けてモデル化した。また、第3ステップでは、本コードで採用する最適化ロジックを検討した。これらのモデル化につき、順次記載する。

3. 2 ヒートバランス計算

表3-1に本節で用いる記号の説明を行う。

(1) 1次系

原子炉を含めた1次系については、原子炉熱出力と原子炉出入口温度を入力して、1次冷却材流量を求める。

$$W_1 = \frac{Q_{RV}}{(T_{RV2} - T_{RV1}) \bar{C}_{P1} N_{LOOP1}} \quad (1)$$

従って、2次系以降とは計算モデル上、完全に分離された扱いとなる。

（但し、ブレイトンサイクルのサーベイから得られるIHX 2次側入口温度が原子炉入口温度より低く、且つ、適切な温度差であることを確認する必要がある。）

(2) ブレイトンサイクル

第 2 章の基本設計条件に基づき、機器ごとに特性計算を行う。

① タービン

$$\Delta h_T = \eta_T \cdot C_{p2} \cdot T_1 \{1 - \pi_T^{-(\kappa-1)/\kappa}\} \quad (2)$$

$$T_2 = T_1 - \frac{\Delta h_T}{C_{p2}} \quad (3)$$

$$P_2 = P_1 / \pi_T \quad (4)$$

② コンプレッサ

コンプレッサはインタークーラを含む N_{STP} 段のものを考える。各段の特性は次の通り。

$$\Delta h_c = \frac{C_{p2} \cdot T_1}{\eta_c} \{ \pi_c^{(\kappa-1)/\kappa} - 1 \} \quad (5)$$

$$T_2 = T_1 + \frac{\Delta h_c}{C_{p2}} \quad (6)$$

$$P_2 = P_1 \pi_c \quad (7)$$

尚、システムの各部の圧損率を次の様に定義すれば、タービン圧力比（膨張比） π_T とコンプレッサ圧力比（圧縮比） π'_c の間には以下の関係が成立する。

タービン出口→レキュパレータ→コンプレッサ入口圧損率

$$X_{p1} = \frac{\text{タービン出口圧力 } (P_{T2}) - \text{コンプレッサ入口圧力 } (P_{c1})}{\text{タービン出口圧力 } (P_{T2})} \quad (8)$$

$$P_{c1} = (1 - X_{p1}) P_{T2} \quad (8')$$

コンプレッサ出口→レキュパレータ→IHX→タービン入口圧損率

$$X_{p3} = \frac{\text{コンプレッサ出口 } (P_{c2}) - \text{タービン入口圧力 } (P_{T1})}{\text{コンプレッサ出口圧力 } (P_{c2})} \quad (9)$$

$$P_{T1} = (1 - X_{p3}) P_{c2} \quad (9')$$

インタークーラ（各段毎）の圧損率

$$X_{p_2} = \frac{\text{インタークーラ入口圧力 (P'_1)-次段のコンプレッサ入口圧力 (P'_{c1})}{\text{インタークーラ入口圧力 (P'_1)}} \quad (10)$$

$$P'_{c1} = (1-X'_{p2})P'_1 \quad (10')$$

系内一循での圧力バランスを考えると

$$\pi_T = (1-X_{p1})(1-X_{p3})(1-X'_{p2})^{N_{STP}-1} \pi'_c \quad (11)$$

$$\pi_c = \pi'_c \quad (11')$$

ここで X'_{p2} , π'_c は、それぞれコンプレッサの各段の圧損率及び圧縮比を示す。

尚、コンプレッサは1段の場合通常は、インタークーラを設けないため圧損率にかかる項の次数は $N_{STP}-1$ となる。

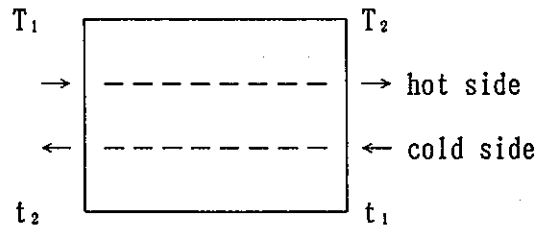
③ レキュパレータ

レキュパレータの熱収支計算は温度効率 η_x の形で、圧力収支計算は前述の圧力損失率 X_{p1} , X_{p3} の形とし、予めその値を検討しておきこれを入力して評価する。

$$\eta_x = \frac{\text{実際に交換される熱量}}{\text{理想的に交換される熱量}} \quad \text{で定義される。}$$

作動流体の比熱がHe-Xe混合ガスのように圧力にあまり依存しない場合は、

$$\eta_x = \frac{\text{注目している流体の温度差}}{2 \text{ 流体の入口部における温度差}}$$



$$= \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1} \quad (12)$$

であり、例えば、 T_1 (タービン出口温度) と t_1 (コンプレッサ出口温度) T_2 と t_2 を求める場合は、次通りである。

$$T_2 = T_1 - \eta_x \times (T_1 - t_1) \quad (13)$$

$$t_2 = t_1 + \eta_x \times (T_1 - t_1) \quad (14)$$

尚、レキュパレータを設置しない場合は $\eta_x=0$ とする。

④ 前置冷却器

前置冷却器（プレクーラ）のように加熱側と非加熱側で作動流体が異なる場合は、レキュパレータの場合の様な温度でなくエンタルピーで評価する。

ただし、密閉ブレイトンサイクルでは、前置冷却器の作動流体出口温度即ち圧縮機入口温度は、システム効率に大きな影響を及ぼすパラメータの一つであるため、計算上は入力値として処理する。

⑤ 配管類

密閉ブレイトンサイクルでは、機器における圧力損失はプラントの熱効率に対して悪影響を及ぼす大きな因子の一つであり、可能な限り短配管とする設計が多い。

したがって、配管に対しては熱交換器で用いた圧力損失率で評価し、熱計算上は放熱を無視する。

⑥ サーベイパラメータ

密閉ブレイトンサイクルのシステムパラメータは、各機器の性能パラメータも含めて前述の様な式で表されるが、サーベイパラメータの選び方によっては、計算ロジック（手順）が異ってくる。

ここでは、設計的観点から必要なサーベイパラメータを整理しておく。

〔システムパラメータ〕	〔機器性能パラメータ〕	〔その他〕
タービン入口圧力	タービン断熱効率	He-Xe混合比 (モル分率)
コンプレッサー圧縮比 (又はタービン膨張比)	コンプレッサ //	
コンプレッサー段数	レキュパレータ温度効率	
IHX 2 次側出口温度 (タービン入口温度)	システム圧損率	
コンプレッサー入口温度		

これらのパラメータがサーベイ出来るよう、コーディングしている。

⑦ システム熱効率

密閉ブレイトンサイクルの正味熱効率 η_{net} は、タービンにおける仕事 L_T より圧縮

機駆動のための仕事 L_c と発電機駆動のための損失仕事 L_g を差し引いた仕事量を加熱に要した仕事量（原子炉での加熱量に等しい） Q_{RV} で除する事で算出される。

$$\eta_{net} (\%) = \frac{L_T - (L_c + L_g)}{Q_{RV}} \times 100 \quad (15)$$

なお、 L_T 、 L_c については、①、②で述べた熱落差に作動流体流量を乗じたもの、また、 L_g についてはターボ軸とカップリングを介して発電機が駆動されるものと想定されるため、発電端出力に対して発電機効率やカップリング部での損失率などを考慮して設定する。

便宜上（ $L_T - L_c$ ）に発電機に係る損失率（ η_g ）を乗ずることで処理する。

但し、計算手順については、発電端出力が与えられている場合と、逆に原子炉熱出力が与えられている場合の2通りを考える。

〈発電端出力所与の場合〉

単位流量当たりの発電量

$$Q_{ELU} = \eta_g (\Delta h_T - \Delta h_c) \quad (16)$$

作動流体流量

$$W_2 = \frac{Q_{EL}}{Q_{ELU} \times N_{LOOP2}} \quad (17)$$

IHX熱出力

$$Q_{IHx} = \frac{N_{LOOP2}}{N_{LOOP1}} \times W_2 \times \bar{C}_{p2} (T_2 - T_1) \quad (18)$$

原子炉熱出力は、1次系の熱伝達効率を η_1 とすると

$$Q_{RV} = \frac{Q_{IHx} \cdot N_{LOOP1}}{\eta_1} \quad (19)$$

従って、システム熱効率は

$$\eta_{net} (\%) = \frac{Q_{EL}}{Q_{RV}} \times 100 \quad (20)$$

となる。

また、ブレイトンサイクルのサイクル熱効率は次式で定義される。

$$\eta_{cyc} = \frac{\Delta h_T - \Delta h_c}{\bar{C}_{p2} \cdot (T_2 - T_1)} \quad (20)'$$

〈原子炉熱出力所与の場合〉

$$Q_{IHx} = \eta_1 \cdot Q_{RV} / N_{LOOP1} \quad (21)$$

$$Q_{ELU} = \eta_G (\Delta h_T - \Delta h_c) \quad (22)$$

$$W_2 = \frac{Q_{IHx} \cdot N_{LOOP1}}{\bar{C}_{p2} \cdot (T_2 - T_1) \cdot N_{LOOP2}} \quad (23)$$

$$Q_{EL} = N_{LOOP2} \cdot Q_{ELU} \quad (24)$$

$$\eta_{net}(\%) = \frac{Q_{EL}}{Q_{RV}} \times 100 \quad (25)$$

$$\eta_{cyc} = \frac{\Delta h_T - \Delta h_c}{\bar{C}_{p2} (T_2 - T_1)} \quad (25)'$$

⑧ 熱交換器容量

IHX : (18)又は, (21)式

$$\text{前置冷却器} : Q_{PRC} = W_2 \cdot \bar{C}_{p2} \cdot (T_2 - T_1) \quad (26)$$

$$\text{インタークーラ} : Q_{INTC} = W_2 \cdot \bar{C}_{p2} \cdot (T_2 - T_1) \quad (27)$$

$$\text{レキュパレータ} : Q_{REC} = W_2 \cdot \bar{C}_{p2} \cdot (T_2 - T_1) = W_2 \cdot \bar{C}_{p2} \cdot (T_2 - T_1) \quad (28)$$

3. 3 伝熱計算

ここでは、高速炉ガスタービン発電システムに含まれる各種熱交換器の中、密閉ブレイトンサイクルの中の前置冷却器について、最も重要な設計パラメータとなる熱交換器の伝熱面積を算出する。前置冷却器については、第2章で述べた通り3つの種類について考える。

(1) 深海炉用

レキュパレータからの作動流体を耐圧殻の内側に導き、耐圧殻（の熱伝導）を介して海水へ放熱するものである。（図2-2の概念図参照）⁸⁾

計算内容と手順は次り通り。

〈ブレイトンサイクル計算結果から与えられるもの〉

交換熱量	Q kcal/h
混合ガス入口/出口温度	T_1/T_2 °C
“ 圧力	P kg/cm ² a
“ 流量	W kg/h

〈入力データとして与えられるもの〉

海水温度	t °C
ガス流路高さ	H m
ガス平均流速	V_{av} m/s
耐圧殻 厚さ	t_{sh} m
“ 熱伝導率	λ_{sh} kcal/m ² h °C
海水側熱伝達率	α_o kcal/m ² h °C
フィンによる熱伝達率向上係数	K_{fin} —

尚、混合ガスの物性値は、出入口平均温度での値を用いる。

〈計算〉

$$\begin{aligned}
 \text{体積流量} \quad W_v &= W / \gamma \\
 \text{流路巾} \quad WID &= W \gamma / (3600 \times V_{av} \times H) \\
 \text{流路等価直径} \quad D_e &= 4(\text{流路断面}) / \ell (\text{ぬれぶち長さ}) \\
 &= 4 \times WID \times H / (2 \times (WID + H))
 \end{aligned}$$

$$Re = \frac{Y_{av} \cdot D_i}{\nu}$$

$$Nu = 0.019 Re^{0.6} \cdot Pr^{0.5}$$

$$\alpha'_i = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_i}$$

$$\alpha_i = k_{fin} \times \alpha'_i$$

$$\text{熱貫流率} \quad \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{t_{sh}}{\lambda_{sh}} + \frac{1}{\alpha_o}$$

$$\text{平均温度差} \quad \Delta t_{im} = \frac{(T_1 - t)/(T_2 - t)}{\ln((T_1 - t)/(T_2 - t))}$$

$$\text{必要伝熱面積} \quad A'_{sh} = Q / (\Delta t_{im} \cdot k)$$

伝熱面積は、20% の余裕を見て

$$A_{sh} = 1.2 \times A'_{sh}$$

とする。

(2) 宇宙炉用

レキュパレータからの作動流体をNaKで冷却する。このNaKを更に、熱放射パネル（ラジエータ）に導き、これにより、熱を宇宙空間に熱放射する。

ここでは、ラジエータの伝熱面積を参考文献4)のモデルにより算出する。

尚、NaK 冷却の前置冷却器そのものは、特に計算せず、ラジエータ運転温度は、ガス側平均温度とNaK 側平均温度の差を入力として与えて、設定することとする。

〈ブレイトンサイクル計算結果から与えられるもの〉

交換熱量 〈ラジエータ放熱量〉	Q	MW
--------------------	---	----

前置冷却器入口／出口混合ガス温度	T_1/T_2	℃
------------------	-----------	---

〈入力データとして与えるもの〉

ラジエータ表面の輻射率	ε	— (0.9)
-------------	---------------	---------

ステファンボルツマン定数	σ	W/m ² K ⁴ (5.67×10^{-8})
--------------	----------	---

前置冷却器 1 次側／2 次側平均温度差	ΔT	℃
----------------------	------------	---

〈計 算〉

$$\text{ラジエータ運転温度} \quad T = \frac{T_1 + T_2}{2} - \Delta T$$

ラジエータの運転温度と面積の関係は次式で与えられる。

$$\alpha_s \cdot F_s G_s + \alpha_r \cdot F_r A_p G_s + \alpha_e \cdot F_e E_e + Q/A = \varepsilon \sigma T^4$$

$$\alpha_s = 0.21 \quad ; \text{太陽放射の吸収率}$$

(solar absorptivity)

$$F_s = 1.0 \quad ; \text{太陽に向かう方向と表面に垂直なベクトルの角度の余弦}$$

(cosine of the angle between the unit surface normal
vector and the direction to the Sun)

$$G_s = 1371 \text{ W/m}^2 \quad ; \text{太陽に向かって垂直な単位面積で受ける太陽放射の熱流束}$$

(solar radiation incident on a plane normal to the Sun)

$$\alpha_r = 0.21 \quad ; \text{地球による太陽放射の反射の放射の吸収率}$$

(absorptivity to solar radiation reflected from the Earth)

$$F_r = 0.015 \quad ; \text{地球による反射放射に対する形態係数}$$

(view factor for solar radiation reflected by Earth)

$$A_p = 0.30 \quad ; \text{太陽放射に対する地球の反射率}$$

(Earth's albedo : the fraction of incident solar radiation
that is reflected by the Earth and its atmosphere to space)

$$\alpha_e = 0.30 \quad ; \text{地球からの熱放射の吸収率}$$

(absorptivity to radiation emitted by the Earth)

$$F_e = 0.30 \quad ; \text{地球からラジエータ表面への形態係数}$$

(view factor for radiation emitted by the Earth to the
radiator surface)

$$E_e = 243 \text{ W/m}^2 \quad ; \text{地球のふく射能}$$

(earth-emitted radiation)

$$Q = \text{ラジエータの放熱量 (MW)}_t$$

$$A = \text{ラジエータの面積 (m}^2\text{)}$$

$\varepsilon = 0.9$; ラジエータ表面積の放射率
 (emissivity of the radiator surface)
 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ (ステファンボルツマン定数)
 T = ラジエータの運転温度(K)

$K1 = \alpha_{\text{FsGs}} + \alpha_{\text{FrApGs}} + \alpha_{\text{FeEe}}$ とおけば

$$K1 + \frac{Q}{A} = \varepsilon \sigma T^4$$

$$\frac{Q}{A} = \varepsilon \sigma T^4 - K1$$

伝熱面積 (m^2) は

$$A = \frac{Q \times 10^6}{\varepsilon \sigma T^4 - K1} \times 1.2 \quad (\text{余裕} 20\%)$$

$$K1 = 311.08 (\text{W/m}^2)$$

(3) 地上炉用

混合ガスと加圧水の熱交換器であり、シェルアンドチューブ型⁵⁾のものを考える。

〈ブレイトンサイクル計算結果から与えられるもの〉

交換熱量	Q	kcal/h
混合ガス入口／出口温度	T_1 / T_2	°C
“ 圧力	P	kg/cm ² a
混合ガス流量	W	kg/h
水側入口温度	t_1	°C
“ 流量	ω	kg/h

〈入力データとして与えられるもの〉

伝熱管内径	d_i	m
“ 外径	d_o	m
“ ピッチ	S_T	m
	S_L	m
バッファル板間隔	L_B	m
シェル内径	d_s	m
伝熱管本数	N	本

水側汚れ係数 γ_{fi} kcal/m²・h・°C

伝熱管熱伝導率 λ_T kcal/m・h・°C

伝熱面積補正係数 K_A —

尚, 混合ガスの物性値は, 出入口平均温度での値を用いる。

〈計 算〉

水 側

$$A_{tube} = N \times \frac{\pi d_i^2}{4}$$

$$v = \omega / (A_{tube} \times \gamma_w \times 3600)$$

$$R_{ew} = \frac{v \cdot d_i}{\nu}$$

$$\alpha_i = \frac{\lambda_w}{d_i} \times 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3}$$

ガス側

$$\varepsilon = \frac{S_T \cdot S_L \sin \beta - \frac{\pi}{4} d_o^2}{S_T \cdot S_L \sin \beta}$$

$$A_G = d_s \cdot L_B \cdot \varepsilon$$

$$V = W / (A_G \times \gamma_G \times 3600)$$

$$R_e = \frac{V \cdot d_o}{\nu_G}$$

$$\alpha_o = \frac{\lambda_G}{d_o} \cdot 0.3 \times R_e^{0.65} \times Pr^{0.36}$$

熱貫流率

$$\frac{1}{K_o} = \frac{d_o}{d_i \cdot \alpha_i} + \frac{d_o}{\gamma_{fi} \cdot d_i} + \frac{d_o}{2 \lambda_T} \cdot \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{\alpha_o}$$

平均温度差

$$\Delta t_{im} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln((T_1 - t_2) / (T_2 - t_1))}$$

伝熱面積は, 20%の余裕を見て,

$$A = 1.2 \times \frac{Q}{(\Delta t_{im} \cdot K_o \cdot K_A)}$$

伝熱管長さ

$$L = \frac{A}{\frac{\pi}{4} d_o^2 \cdot N}$$

3. 4 機器データの計算

3.4.1 概要

ここでは、システム最適化の指標となる装置重量、容積、コスト等に係わる各機器データを算出する。また、将来的には、本節で機器設計計算を行い、過渡解析用機器データを準備することとなる。但し、今回は、コード整備の第1歩であるため、次の2項目の計算を行うこととする。

- ① 宇宙用原子炉については最適化を目標として、装置重量を簡単に算定する。
- ② 深海用原子炉については、特にTAC 寸法、耐圧殻寸法及び重量、並びに遮へい体重量の計算を行う。

3.4.2 宇宙炉の装置重量

装置重量については、仏国 BRATO (宇宙炉 20kWeクラス) のデータ⁶⁾を基に計算する。

BRATO データでは装置を原子炉、遮へい体、1次系、発電系、ラジエータ、及びその他に分けて整理されている。(表3-2, 表3-3参照)ここでは、それらが出力等に比例するものとして算出する。

また、機器重量の算定については、米国宇宙炉を対象とした簡易評価式も提案されている。⁷⁾この評価式、及びBRATO の宇宙炉に適用した場合の重量算定結果を付録Aに示す。

尚、計算プログラムでは、入力パラメータによりこれら双方のいずれかの評価式が選択できるようにしている。

① 原子炉

$$M_{RV} \text{ (kg)} = 375 \times \frac{Q_{RV}}{119} \quad Q_{RV} : \text{kWt}$$

② 遮へい体

$$M_{SHIELD} \text{ (kg)} = 189 \times \frac{Q_{RV}}{119}$$

③ 1次系

$$M_1 \text{ (kg)} = 90 \times \frac{Q_{IHx}}{110.5} \quad Q_{IHx} : \text{kWt}$$

④ 発電系

$$M_2 \text{ (kg)} = 186 \times \frac{Q_{IHX}}{110.5}$$

⑤ ラジエータ

$$M_{RAD} \text{ (kg)} = 523 \times \frac{Q_{PRC}}{88} \times \left(\frac{402.5}{T} \right)^4 \quad Q_{PRC} : \text{kWt}, T(\text{K})$$

⑥ その他

$$M_{OTH} \text{ (kg)} = 926 \times \frac{Q_{RV}}{119}$$

⑦ 装置全重量

$$M_{TOT} \text{ (kg)} = M_{RV} + M_{SHILD} + M_1 + M_2 + M_{RAD} + M_{OTH}$$

3.4.3 深海炉の耐圧殻及び遮へい体重量

(1) 耐圧殻（ラジエータ）の重量

(a) タービン、アルタネータ、コンプレッサ（TAC）寸法

これは、耐圧殻寸法設定のベースデータとして計算し、出力する。

$$\text{TAC 径 (mm)} = D_{TAC} - 51.7 + 177 Q^{1/2} \quad \text{..... (1)}$$

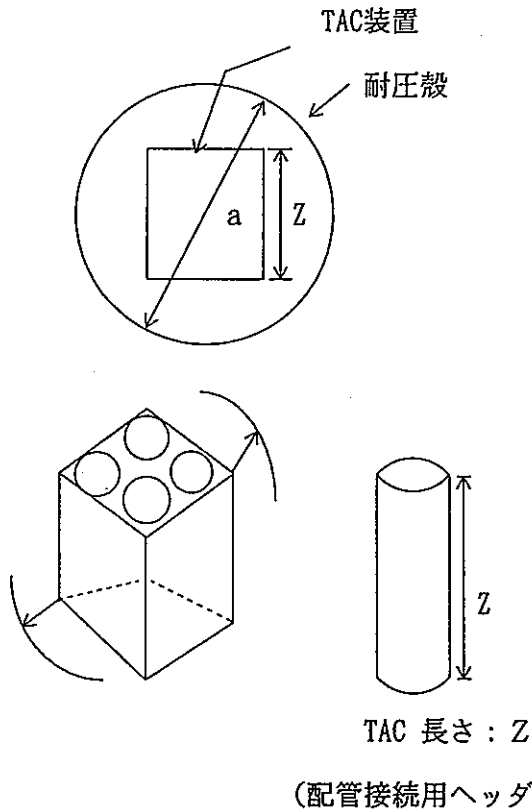
$$\text{TAC 長さ (mm)} = Z_{TAC} - 44.2 + 303 Q^{1/2} \quad \text{..... (2)}$$

但し、Q：電気出力(kWe) (1ループ当り)

下記の長さのデータを基にフィッティング式の係数を算出する。

	BRU	MINI-BRU
出力	10 kWe	1.3 kWe
TAC径	508 mm	150 mm
TAC長さ	914 mm	302 mm

(b) 耐圧殻内径



TAC 寸法を基に設定する。 TAC 4 組の装置は立体として構成されるものとする。（左図参照）

殻内径を次式で表現する。

$$a \text{ (mm)} = \sqrt{3} Z + A Z + B \text{ ----- (3)}$$

$Z = 1.5 \times Z_{\text{TAC}}$ (TAC長さに配管接続用

A, B : 定数 ヘッダ部高さを考慮)

(3) 式の右辺第 1 項は、立方体の対角長さである。

B は、0 またはラジエータ高さの 1 倍或いは 2 倍とすることが考えられる。

ここでは、 $B = 0$ とし、配置余裕（製作時等作業スペース）を考慮して A を 0.4 とする。すなわち、殻内径は次式となる。

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{3} Z + 0.4 Z \\ &= 2.13 Z \end{aligned} \text{ ----- (3)}$$

(3)式を用いて、耐圧殻内径を算出し、従来設計値^{2), 8)}と比較することにより、妥当性を吟味する。

	2次系1ループ当りの電気出力 (kWe)	(3)式での評価値			従来設計値 a (mm)
		Z _{TAC} (mm)	Z (mm)	a (mm)	
平成3年度設計 ²⁾	50	2098	3150 ^{注1)} (1400)	6700 (2982)	3000
平成4年度設計 ³⁾	5	633	955	2034	2000

注1), (2)式を用いた計算結果。() 内数値は報告書記載図の読みとり値である。

上表より, TAC 長さ と 殻内径 の相関式(3)式は妥当と考えられる。むしろ, TAC 長さを計算する(2)式は, 1 ループ当たりの電気出力が10kWe を越える場合, TAC 長さを大きめに計算する可能性がある。

(c) 耐圧殻板厚

外圧による座屈を考えると次の関係がある。

$$t \propto a \cdot \sqrt{p} \quad (\text{機械工学便覧 A4-77})^{9)}$$

t : 板厚 (mm)

a : 殻内径 (mm)

p : 荷重 (kg/cm²)

設計例 10%Ni鋼の場合²⁾ 設計深度6500m, 内径3000mmで板厚75mm

チタン合金の場合⁸⁾ 設計深度6500m, 内径2000mmで板厚75mm

(しんかい6500)

これにより, 次の様に定式化する。

10%Ni鋼の場合

$$t = 75 \times \sqrt{\frac{L}{6500}} \times \frac{a}{3000} \quad \text{----- (4)}$$

チタン合金の場合

$$t = 75 \times \sqrt{\frac{L}{6500}} \times \frac{a}{2000} \quad \text{----- (5)}$$

但し, L = 設計深度 (m)

(d) 耐圧殻重量

2 連球の耐圧殻を考え, 球 2 つ分の殻重量とする。

$$A_{\text{shell}} \text{ (m}^2\text{)} = 2 \times 4 \pi \left(\frac{a}{2 \times 1000} \right)^2 \quad \text{----- (6)}$$

$$W_s \text{ (kg)} = A_{\text{shell}} \times \frac{t}{1000} \times \gamma \quad \text{----- (7)}$$

但し, γ : 殻比重量 7900kg/m³ (10%Ni鋼)

4400kg/m³ (チタン合金)

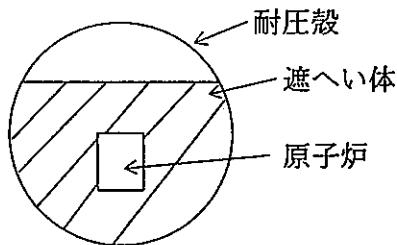
(e) 冷却性能のチェック

4.2(1)で計算した伝熱面積が, この2連球の表面積の70%以上であることを確認する。
すなわち,

$$A_{sh} \leq 0.7 \cdot A_{shell}$$

ならOK。相違していれば, 殻表面積不足のメッセージを出す。

(2) 遮へい体重量



設計例⁸⁾より

遮へい体体積 (V_{shld})

$$= \frac{2}{3} \cdot \text{耐圧殻体積} - \text{原子炉体積}$$

とする。

$$= \frac{2}{3} \cdot V_{shell} - V_{RV}$$

$$V_{shell} \text{ (m}^3\text{)} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2 \times 1000} \right)^3$$

但し, RVの寸法は, 次の通りとする。

40kWe 以下 850 mm / ϕ 280 mm

400kWe 1,400 mm / ϕ 450 mm

40-400kWe 上2式の内挿 $\begin{pmatrix} D_{RV} \text{ (mm)} = 0.4722Q + 261. \\ L_{RV} \text{ (mm)} = 1.528Q + 788.9 \end{pmatrix}$ 但し, Q:kWe)

400kWe以上 上2式の外挿

遮へい体重量

$$W_2 \text{ (kg)} = V_{shld} \times \gamma$$

但し, $\gamma = 1.84 \text{ t/m}^3$ (ベリリウム, 理科年表)

$\gamma = 0.77 \text{ t/m}^3$ (LiH, 理化学辞典)

3. 5 最適化ロジック

ここでは、最適化の考え方（ロジック）と計算内容を示す。最適化の指標は原子炉システムの使用目的と制限条件により異なるが、システム熱効率、重量、スペース、コスト等が考えられる。また、パラメータとしては、第4.2節(2)⑥項に示す様なものが考えられる。

本コードでは、開発第1ステップとして、最適化指標は、システム熱効率及び宇宙炉用では、これに加えて、装置重量もサーベイ可能なものとする。

(1) システム熱効率

第4.2節(2)⑥項に示す任意のパラメータを変化させ、それぞれのシステム熱効率を求め、最大効率を与えるパラメータを選ぶ。

$$\text{システム熱効率最大点} = \text{MAX} (\eta_{\text{net}}(1), \eta_{\text{net}}(2), \dots, \eta_{\text{net}}(\text{NPAR}))$$

ここで、NPARは、パラメータサーベイ点の数を示す。

(2) 装置重量

宇宙炉用システムに適用する。考え方は、システム熱効率の場合と同じであるが、最適点は、装置重量最小値を与える点である。

$$\text{装置重量最小点} = \text{MIN} (M_{\text{TOT}}(1), M_{\text{TOT}}(2), \dots, M_{\text{TOT}}(\text{NPAR}))$$

表 3 - 1 文字記号の説明

Nomenclature

C_p :	定圧比熱	kcal/ kg. deg.	($\overline{C_p}$ は各部温度間の平均値を示す)
L :	仕事	kcal/ h	
N :	整数値	—	(N_{LOOP1}, N_{LOOP2} はそれぞれ 1 次元ループ数 2 次系ループ数を示す)
P :	圧力	kg/ cm ² · a	
Q :	熱出力	kcal/ h	(添字が E L の場合電気出力)
T :	温度	K, °C	(小文字 t はレキュパレータ cold side を示す)
W :	流量	kg/h	
X_p :	各部圧損率	—	
h :	エンタルピー	kcal/ kg	(Δh はエンタルピー差を示す)
κ :	比熱比	—	
π :	圧縮比又は膨張比	—	
η :	効率	—	(η_x はレキュパレータ温度効率を示す)

(添 字)

1, 2 : 各部の入口, 出口又は 1 次系, 2 次系を示す

C : コンプレッサ

T : タービン

G : 発電機

RV : 原子炉

IHx : 中間熱交換器

PRC : 前置冷却器

INTC : コンプレッサのインタークーラ

REC : レキュパレータ

BL : Q_{EL} で電気出力を示す (Q_{ELV} は冷却材単位重量当りの電気出力を示す)net : システム全体を示す (η_{net} はシステム全体の熱効率を示す)cyc : ブレイトンサイクルを示す (η_{cyc} はブレイトンサイクルの熱効率を示す)

表 3 - 2 20kWe 宇宙炉システムに対する 3 つの候補の最適設計点 (仏国の例)

Most adequate design points for 20kWe space reactor system(France)

		<u>925 k</u>	<u>1125 k</u>	<u>1350 k</u>
	W_{net} 20 kWe	UO ₂ /Na/SS <u>650°C</u>	HTGR der. <u>850°C</u>	UN/Li/Mo <u>1123°C</u>
REACTOR	Peak Coolant T (K)	943	1123	1423
	Coolant Outlet T (K)	923	1113	1387
	Coolant T Rise (K)	114	312	135
	Power (kW)	<u>119</u>	<u>115</u>	<u>114</u>
INTERMEDIATE HEAT EXCHANGER	Pinch Point ΔT (K)	9.6		40
	Gas T Rise (K)	218		411
	Power (kWth)	110.5		98
ALTERNATOR	Rot. Speed (rpm)	40 000	45 000	48 000
	Efficiency	<u>0.859</u>	<u>0.858</u>	<u>0.866</u>
COMPRESSOR	Inlet Pressure (MPa)	0.40	0.30	0.21
	Inlet Temperature (K)	<u>324</u>	<u>390</u>	<u>403</u>
	Pressure Ratio	1.95	2.09	2.36
	Efficiency	0.850	0.847	0.828
TURBINE	Inlet Temperature (K)	<u>912</u>	<u>1113</u>	<u>1339</u>
	Efficiency	<u>0.888</u>	<u>0.892</u>	<u>0.874</u>
RECUPERATOR	Power (kWth)	128	97	78
	Effectiveness	0.843	0.746	0.764
RADIATOR	Power (kWth)	88	98	76
	Inlet/Outlet T (K)	488/317	633/382	703/390
	Area (m ²)	<u>116</u>	<u>56</u>	<u>38</u>
THERMODYNAMIC CYCLE	HeXe mol. w. (g/mol)	50	55	60
	Gas flow rate (Kg/s)	1.24	1.03	0.71
	$\Sigma(\Delta P/P)$ (%)	7.5	9.0	9.0
	Efficiency	<u>0.201</u>	<u>0.209</u>	<u>0.220</u>
SYSTEM	Recycled power (kWe)	2.74	1.65	2.18
	Overall efficiency	<u>0.168</u>	<u>0.173</u>	<u>0.176</u>

20 kWe systems

key data

表 3 - 3 20kWe 宇宙炉システムに対する 3 つの候補の装置重量 (仏国の例)

Weight of 20kWe space reactor systems(France)

	<u>925 K</u>	<u>1125 K</u>	<u>1350 K</u>
COMPONENT MASS (KG)	UO ₂ /Na/SS 650°C	HTGR der. 850°C	UN/Li/Mo 1123°C
REACTOR BLOCK			
Reactor	564	807	612
Shield	<u>375</u> 189	<u>437</u> 370	<u>440</u> 172
PRIMARY SYSTEM			
Primary Heat Exchanger	99		65
E.M. pumps	45		22
Piping	32		25
	22		18
CONVERSION SYSTEM			
Brayton Rotating Unit	207	138	155
Recuperator	<u>83</u>	<u>80</u>	<u>81</u>
BRU vessel + piping	84	33	46
	40	25	28
MAIN RADIATOR	<u>623</u>	<u>302</u>	<u>209</u>
Power Conditionning	158	155	155
Auxiliary Power Units	354	288	376
Instrumentation + Actuators + Wiring	205	164	205
Auxiliary Radiator	9	6	7
Structures	100	100	100
TOTAL SYSTEM MASS (Kg)	<u>2319</u>	<u>1960</u>	<u>1884</u>
SPECIFIC MASS (Kg/kWe)	<u>116</u>	<u>98</u>	<u>94</u>

20 kWe systems
mass estimates

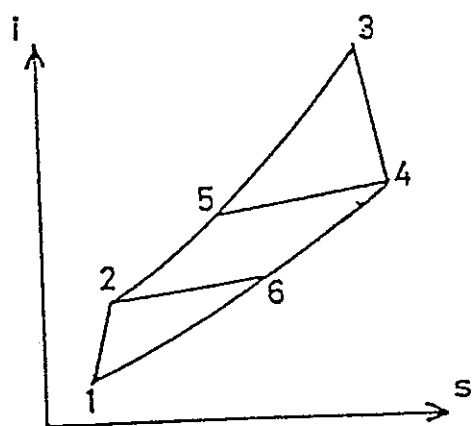
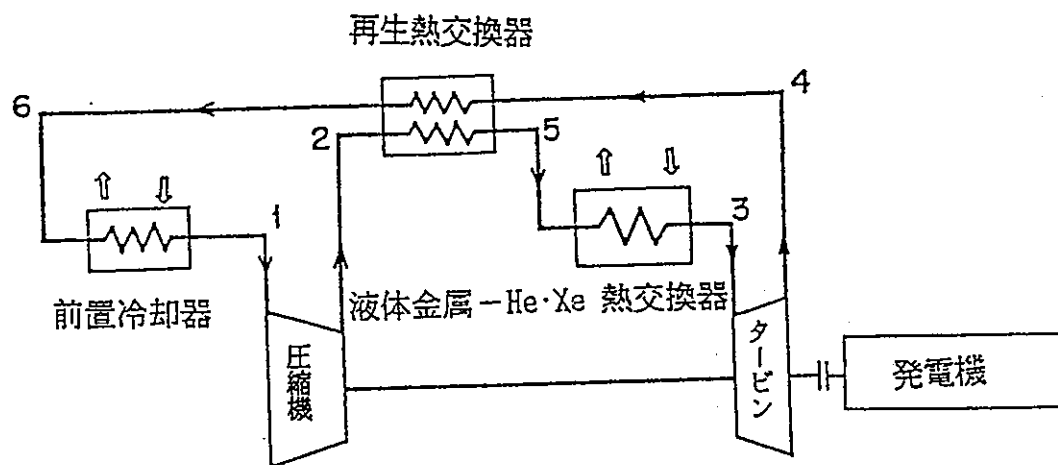
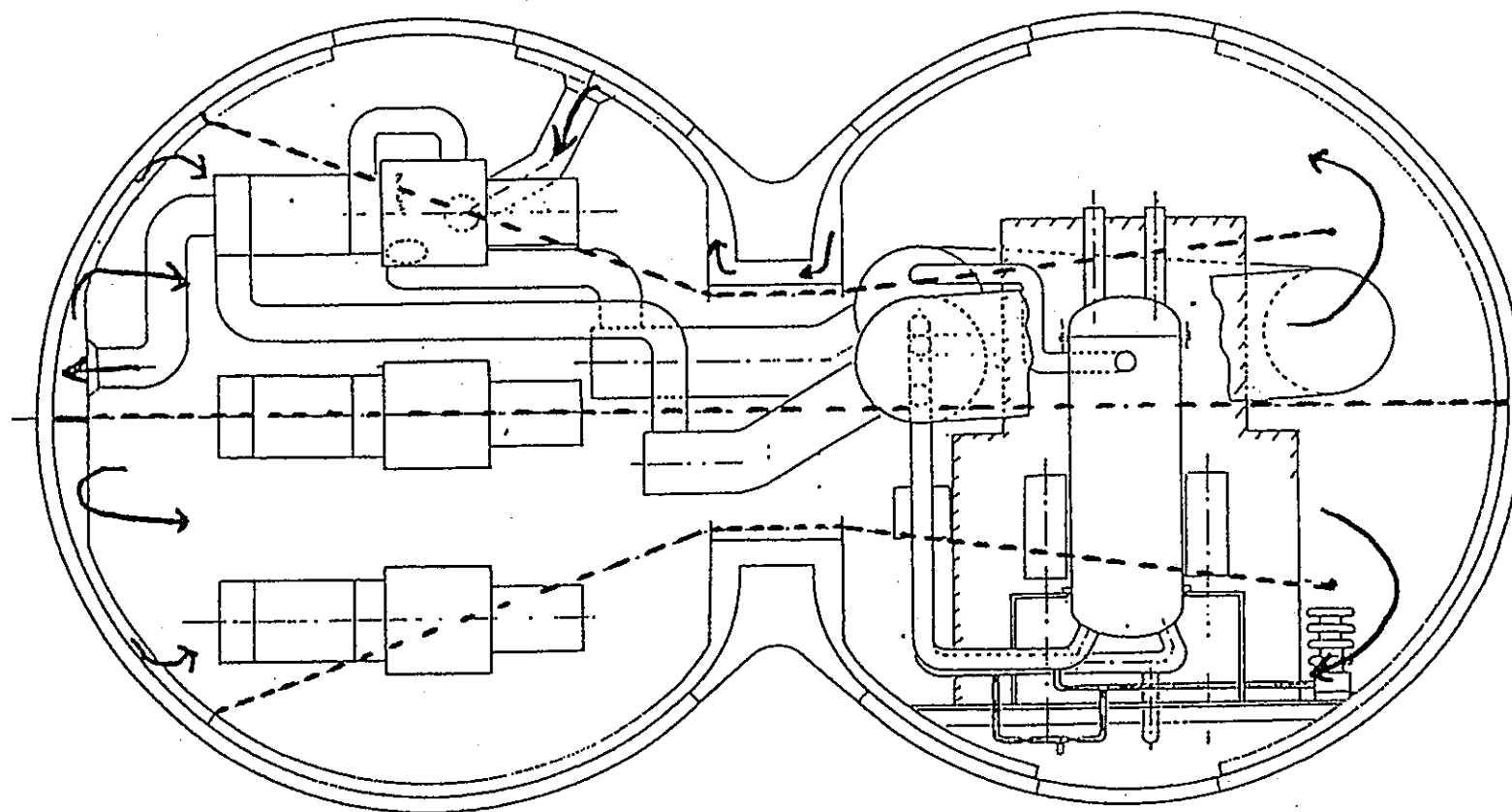


図 3 - 1 ガスタービン発電システム構成図

Gas turbine power generation system.



0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0m
スケール

図 3 - 2 ラジエータ部のガス流路概念

Concept of gas flow pass in a radiator

注) 2連球接続部での流路高さを高くして、高流速化を制限する。
紙面の手前側2系統記載したが、
紙面の裏側に別に2系統あり、
全部で4系統とする。

4 計算フローとプログラム構成

全体計算フローとブレイトンサイクル計算フローを図4－1と図4－2に示す。また、プログラム概略構成を図4－3に示す。

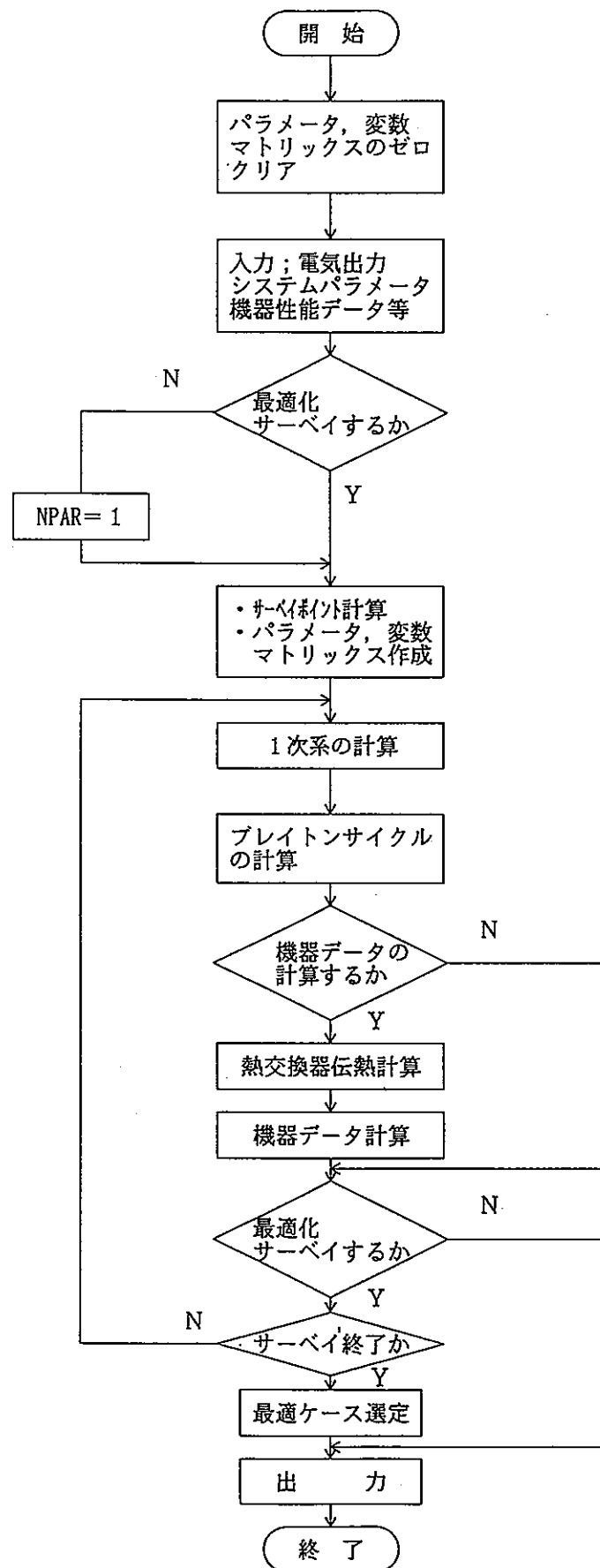


図 4 - 1 全体計算フロー
Whole calculation flow

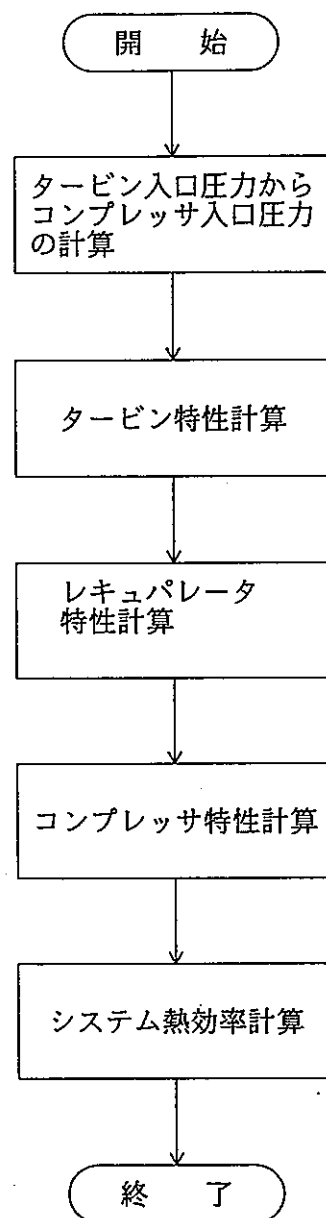


図 4 - 2 ブレイトンサイクル計算フロー
Brayton cycle calculation flow.

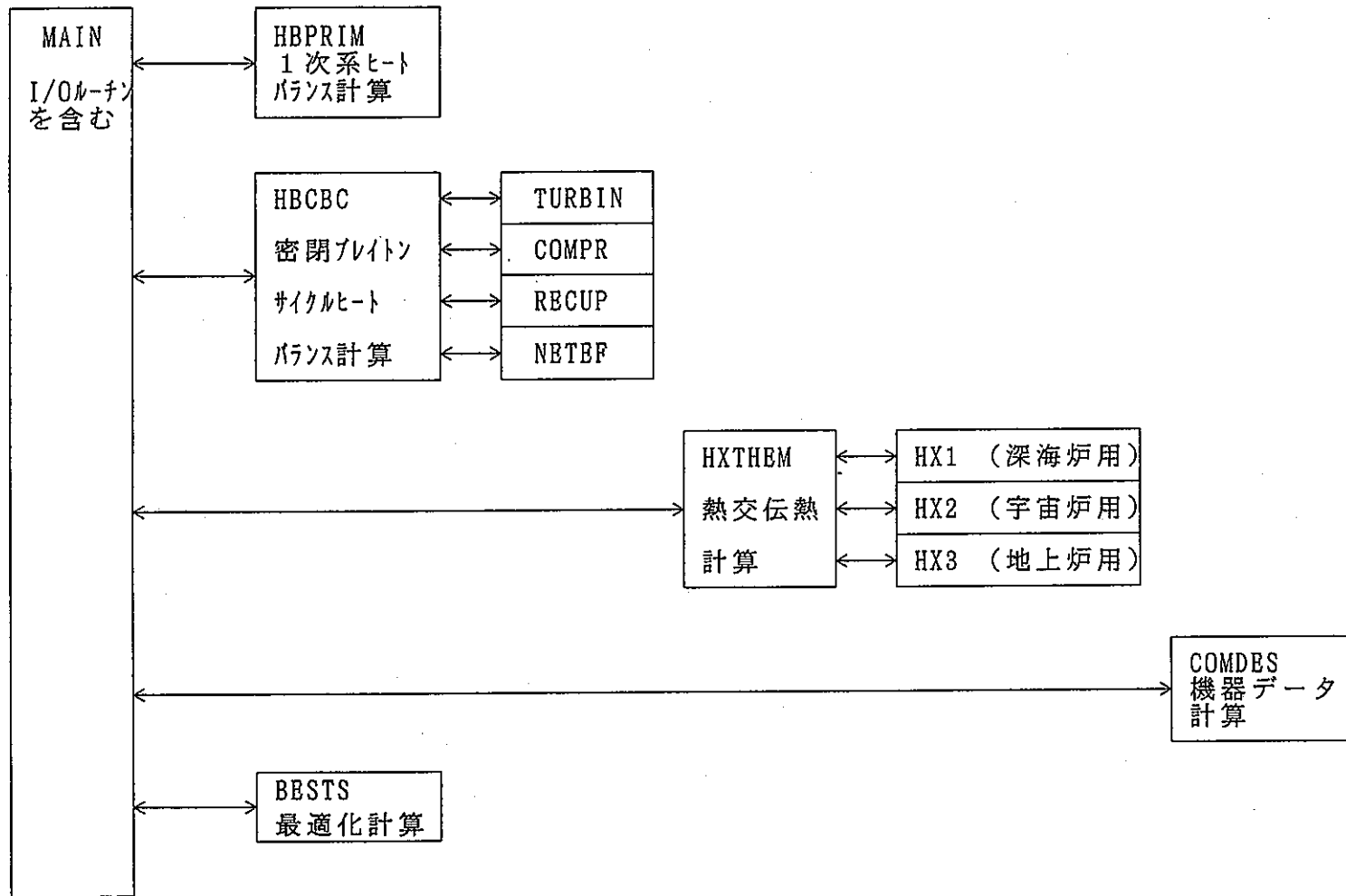


図 4 - 3 プログラム概略構成
Program structure

5 入出力データ

5. 1 入力データ

主な入力データを以下に示す。詳細については、添付資料Cのプログラム設計書参照。

〈計算コントロール〉

タイトル

計算のタイプ (ヒートバランスまでか, 機器データまでか)

ICAL

最適化計算の要否

IBEST

サーベイパラメータの指定

IPAR

パラメータサーベイの点数

NPAR

パラメータサーベイ範囲最大、最小

PARMAX, PARMIN

プラントタイプ (深海炉用, 宇宙炉用, 地上炉用)

IPLANT

1次冷却材の種類

ICLT 1

〈システムパラメータ〉

原子炉熱出力 (又は電気出力)

$Q_{RV} (Q_{EL})$

原子炉入口出口温度

T_{RV1}, T_{RV2}

1次系熱伝達効率

η_1

1次系ループ数

N_{LOOP1}

2次系ループ数

N_{LOOP2}

He-Xeモル分率

R_{XE}

IHX 2次側出口温度 (タービン入口温度)

$T_{IHx} (T_{TRB1})$

コンプレッサ入口温度

T_{CMP1}

タービン入口圧力

P_{TRB1}

コンプレッサ圧縮比 (又はタービン膨張比)

$\pi'_c (\pi_T)$

コンプレッサ段数

N_{STP}

〈機器性能パラメータ〉

発電機効率	η_G
タービン断熱効率	η_T
コンプレッサ "	η_C
レキュパレータ温度効率	η_X
システム圧力損失率	X_{P1}, X'_{P2}, X_{P3}

〈熱交換器設計用データ〉

第3.3節参照

5.2 出力データ

主な出力データを以下に示す。詳細については添付資料Cのプログラム設計書参照。

タイトル

原子炉

熱出力

出入口温度

流量

1次系熱伝達効率

ブレイトンサイクル He-Xeモル分率化

流量

IHX

熱出力

出入口温度

タービン

出入口圧力

出入口温度

断熱効率

コンプレッサ

出入口圧力

出入口温度

断熱効率

レキュパレータ

熱出力

低圧側出入口温度

高圧側 " "

前置冷却器

熱出力

出入口温度

伝熱面積

サイクル熱効率

システム熱効率

その他 計算入力データ

機器重量データ

原子炉

遮へい体

1次系

発電系

ラジエータ

その他

合計

6 サンプル計算

本章では、先ず、過年度研究⁸⁾で行われたガスタービン発電システムの設計計算例を対象にして本解析コードにより解析計算を実施し、結果を比較することにより、コードの妥当性を確認する。

次いで、深海炉、宇宙炉及び地上炉を対象に代表的設計因子をパラメータとした各種ケースの計算を実施し、結果について検討を加えた。

6. 1 テスト計算

表 6. 1⁸⁾ に示すケース A, B を対象に計算を実施した。

(1) テスト計算条件

以下のような条件で、テスト計算を行った。

<計算コントロール>

タイトル	/' ***** TEST CAL. (1). ***** '/
計算のタイプ (ヒートバランスまでか、機器データまでか)	機器データまで
最適化計算の要否	要
サーベイパラメータの指定	コンプレッサ入口温度
パラメータサーベイの点数	2 点
パラメータサーベイ範囲	2 0 °C ~ 3 5 °C
プラントタイプ (深海炉用, 宇宙炉用, 地上炉用)	深海炉用
1 次冷却材の種類	NaK (Na: 0. 22, K: 0. 78)

<システムパラメータ>

原子炉熱出力 (又は電気出力)	電気出力 : 1 0 kWe
原子炉出入口温度	出口 : 550 °C, 入口 : 448 °C
1 次系熱伝達効率	1. 0
1 次系ループ数	1 ループ
2 次系ループ数	2 ループ

He - Xe モル分率

I H X 2 次側出口温度 (タービン入口温度)	Xe : 4 0 % (0. 4)
コンプレッサ入口温度	5 3 5 °C
タービン入口圧力	サーベイ
コンプレッサ圧縮比	1. 0. 0 kg/cm ² a
コンプレッサ段数	2. 0 6
	1 段

<機器特性パラメータ>

発電機効率	0. 8 9 0
タービン断熱効率	0. 8 8 6
コンプレッサ断熱効率	0. 8 3 8

レキュパレータ温度効率
システム圧力損失率

0.842

$\chi_{P1} : 0.03, \chi_{P2} : 0, \chi_{P3} : 0.03$

<深海炉用パラメータ>

機器重量評価式
深海炉耐圧殻材料
深海炉設計深度
海水温度
ガス流路高さ

米国式データベース

チタン合金

5000m

2℃

0.015m

ガス平均流速

25m/s

耐圧殻厚さ

0.058m

耐圧殻熱伝導率

7.7382kcal/mh℃

海水側熱伝達率

100kcal/m²h℃

フィンによる熱伝達率向上係数

1.0

(4) テスト計算評価〔解析コードによる計算結果と前設計結果について〕

表 6-2 にケース A とケース B について実施したチェック計算の結果を示す。

タービン入口或いは、コンプレッサ出口等、各部の温度はよく一致している。一方、システム熱効率と原子炉熱出力では幾らかの差が生じているが、これ以下の要因によるものと考えられる。

前設計では、システム熱効率と原子炉熱出力を算出する場合、各部の比熱を考慮せず、簡易的に温度のみで算出していた。一方今回の解析コードでは、各部の温度、圧力から得られる以下の比熱を考慮している。

(前設計)

$$\eta_{net} = \frac{\eta_G \{(T_3 - T_4') - (T_2' - T_1)\}}{T_3 - T_5}$$

(今回の計算の内容)

$$\eta_{net} = \frac{\eta_G \{C_{P1}(T_3 - T_4') - C_{P2}(T_2' - T_1)\}}{C_{P3}(T_3 - T_5)}$$

タービン(C_{P1}) : 0.365[kJ/kg K]

コンプレッサ(C_{P2}) : 0.377[kJ/kg K]

IHX(C_{P3}) : 0.367[kJ/kg K]

従って、本解析コードから得られた結果はより妥当であると言える。

6. 2 深海炉のサンプル計算

ここでは、代表的設計因子のうち、13個をパラメータとして選び、それぞれ2～3ケースの計算を実施した。

計算条件を表 6-3 に示す。表中○印で示した番号の項目が、計算パラメータであり、値の欄にケース内容を示す。値の欄で○印を付した数値がレファレンスケースである。

計算パラメータ毎に結果と検討をまとめて以下に示す。

(1) 電気出力

電気出力を変化させた場合の主要計算結果は次の通りである。

電 気 出 力 (kWe)	20 (レベルズ)	40	200
T A C 基 数	10kWe×4	20kWe×4	100kWe×4
原子炉出力(kWt)	109	218	1090
耐圧殻 径(m)	2.92	4.19	9.54
“ 板厚 (mm)	96	138	314
全 重 量 (t)	23.5	67.8	792

耐圧殻の系は、ほぼ（電気出力） $^{1/2}$ に比例して増加する。また、全重量のうち、耐圧殻重量の占める割合が大きいため、全重量はほぼ（電気出力） $^{3/2}$ に比例して増加している。但し、前に述べた通り、本解析コードに組み込んだ相関式では1次系1ループ当りの電気出力が10kWe を越える場合、TAC 径、ひいては、耐圧殻径を大き目に評価するため、40kWe、200kWeの場合のそれぞれの寸法、重量は過大に評価しているものと考えられる。

(2) 原子炉出入口温度

原子炉出入口温度を変化させた場合の主要計算結果は次の通りである。

原子炉出口温度(℃) (入口 : (出口-100)℃)	550 (レベルズ)	600	650
サイクル熱効率 (%)	20.6	23.7	26.4
原子炉 出力(kWt)	109	94.7	85.1
全 重 量 (t)	23.5	23.5	23.5
耐圧殻必要伝面 (㎡)	10.7	8.76	7.44

ブレイトンサイクルの熱効率は、原子炉出入口温度の増加に伴い比較的大きく向上し、一方、原子炉出力は効率に反比例して減少している。原子炉出力の変化により、原子炉等の重量は若干変化しているものの、電気出力の関数とした、全重量支配要素である耐圧殻重量は不変なため、全重量もほとんど変化しない。

(3) 1次系ループ数

1次系ループ数を変化させた場合の主要計算結果は次の通りである。

1 次 系 ル ー プ 数	1 (1777ℓ/s)	2
1 次系流量(kg/h/ループ)	4470	2230
全 重 量 (t)	23.5	23.5

熱輸送系重量等を原子炉出力の関数としているものの、ループ数の関数とはしていないため、全重量を始め、1次系流量を除く他のパラメータも全く変化しない。

(4) 2次系ループ数

2次系ループ数を変化させた場合の主要計算結果は次の通りである。

2 次 系 ル ー プ 数	1	2 (1777ℓ/s)	4
T A C 基 数	20kWe×4	10kWe×4	5kWe ×4
2 次系流量 (kg/h/ループ)	5380	2690	1345
耐圧殻径(m)	4.19	2.92	2.02
全 重 量 (t)	67.7	23.5	8.4

2次系ループ数を増加させた場合、1ループ当りの2次系流量が反比例して減少する。
また、1ループ当りの電気出力が減少するため耐圧殻径、全重量とも減少する。

但し、上表のTAC 基数から理解できる通り、ループ数1の場合は、2次系1ループで全電気出力20kWe を出力することを意味しており、残り3ループは待機（予備）ループとして、設備されている。

逆に、ループ数4の場合は、待機ループ（予備）ループは存在しないことになる。このループ稼動状態の差が、耐圧殻径、重量の減少傾向を加速している。

(5) Xeモル分率

Xeモル分離を変化させた場合の主要計算結果は次の通りである。

Xeモル分率 (－)	0.3	0.4 (レファレンス)	0.5
サイクル熱効率 (%)	21.1	20.6	20.1
原子炉出力 (kWt)	107	109	112
耐圧殻必要伝面 (㎡)	10.4	10.7	11.1
2次系流量 (kg/h/ループ)	2030	2690	3360

Xeモル分率を変化させた場合、サイクル熱効率が変化する。これは、混合ガスの比熱の温度依存性がXeモル分率によって変わることによると考えられる。また、Xeモル分率が大きくなると、比熱が小さくなるのが主要因で、2次系流量（重量流量）が増大している。

更に、耐圧殻での必要伝熱面積が増加しているが、これは、Xeモル分率が大きくなると、混合ガスの熱伝達特性が悪化することが主要因と考えられる。

(6) コンプレッサ入口温度

コンプレッサ入口温度を変化させた場合の主要計算結果は次の通りである。

コンプレッサ入口温度 (℃)	15	30 (レファレンス)	45
サイクル熱効率 (%)	23.3	20.6	18.0
原子炉出力 (kWt)	96.6	109	125
耐圧殻必要伝面 (㎡)	12.6	10.7	10.3

コンプレッサ入口温度を小さくすると、サイクル熱効率は向上する。且つ、その影響の度合は比較的に大きい。一方、耐圧殻の必要伝熱面積は、海水側との温度差が小さくなる為、増大する。

(7) タービン入口圧力

タービン入口圧力を変化させた場合の主要計算結果は次の通りである。

タービン入口圧力 (kg/cm ² a)	8	10 (1777ps)	12
システム圧損率 (—)	0.06 (0.075)	0.06	0.06 (0.048)
サイクル熱効率 (%)	21.1 (19.6)	20.6	20.2 (21.3)
原子炉出力(kWt)	107 (115)	109	111 (106)
耐圧殻必要伝面 (m ²)	10.7(11.7)	10.7	10.8(10.1)

タービン入口圧力を増加させた場合、サイクル熱効率は僅かに減少している。これは、混合ガスの比熱の圧力依存性によるものと考えられる。但し、この結果は、システム圧損率一定とした場合であり、実際には、配管・機器等は同一寸法であり、この時系の圧力を増加させると、2次系流量（重量）はほぼ一定なため、流速は減少し、システム圧損率も系の圧力にはほぼ反比例して減少する。この効果を見るために、システム圧損率を圧力に反比例させて変えた場合の結果を、上記表中に（ ）を付して示した。これによればタービン入口圧力増加に伴うシステム圧損率低減の効果が顕著で、システム熱効率は増加する。

(8) 機器重量評価式

機器重量評価式を変えた場合の主要計算結果は次の通りである。

機 器 重 量 評 価 式	米 国 式 (1777ps)	仏 国 式
(各部重量 (kg))		
原 子 炉	348	344
遮 へ い 体	16	16
発 電 系	487	{ 88 184
熱 輸 送 系	26	—
耐 圧 殻	22600	22600
そ の 他	—	849
全 重 量 (t)	23.5	24.1

全重量のうち、耐圧殻の占める割合が大きく、また、耐圧殻重量評価式は、両者で同一のため、全重量の計算結果に大きな差はない。

(9) 深海炉耐圧殻材料

耐圧殻材料を変えた場合の主要計算結果は次の通りである。

耐 圧 殻 材 料	チタン合金 (ヴァレンス)	10%Ni鋼
耐圧殻 径 (m)	2.92	2.92
“ 板厚 (mm)	96	64
“ 重量 (t)	22.6	27.1
耐圧殻必要伝面 (㎡)	10.7	10.7

10% Ni鋼の場合、チタン合金に比べて、強度がやや大きい為、耐圧殻の板厚は小さくなるものの、比重量大きい為、重量は大きくなる。

(10) 設計深度

設計深度を変化させた場合の主要計算結果は次の通りである。

設 計 深 度 (m)	4000	5000 (ヴァレンス)	6000
耐圧殻 板厚 (mm)	85.9	96	105
“ 重量 (t)	20.3	22.6	24.8
耐圧殻必要伝面 (㎡)	10.7	10.7	10.7

設計深度を増加させた場合、耐圧殻板厚、重量とも増大する。

(11) ガス流路高さ

ガス流路高さを変化させた場合の主要計算結果は次の通りである。

ガ ス 流 路 高 (m)	0.010	0.015 (ヴァレンス)	0.020
耐圧殻 必要伝面 (㎡)	10.6	10.7	10.8

ガス流路高さの増大に伴い、耐圧殻必要伝熱面積はやや増大するが、増加率は小さい。この増大傾向は、ガス流路高さ増大が流路面積の増大となり、これが流速減少、熱伝達率減少につながるためである。尚、今回サーベイしている深海炉では、構造から決まる伝熱面積が53.6㎡と必要面積よりかなり大きいことに留意しておく必要がある。

(12) 海水側熱伝達率

海水側熱伝達率を変化させた場合の主要計算結果は次の通りである。

海水側熱伝達率 (kcal/㎡/h)	100 (レファレンス)	300	600
耐圧殻必要伝面 (㎡)	10.7	7.15	6.26

同上熱伝達率を大きくすると、必要伝熱面積は小さくなる。

(13) フィンによる熱伝達率向上係数

フィンによる熱伝達率向上係数を変化させた場合の主要計算結果は次の通りである。

フィン熱伝達率向上係数	1.3	1.4 (レファレンス)	1.5
耐圧殻必要伝面 (㎡)	10.8	10.7	10.6

同上向上係数を変化させた場合、必要伝熱面積は僅かに小さくなる。

6. 3 宇宙炉のサンプル計算

仏国 BRATOの20kWe の宇宙炉設計¹⁰⁾ (表3-2, 表3-3, 図6-1参照)のうち UO_2/Na /SS (原子炉出口温度 650°C) とUN/Li/Mo (原子炉出口温度1123°C)を対象として, 代表的設計因子であるレキュパレータ温度効率, 熱交換器(コンプレッサ出口~タービン入口)圧損率, コンプレッサ圧縮比及びコンプレッサ入口温度をパラメータとして選び, それぞれ5ケースの計算を実施した。

各パラメータのサーベイ範囲は BRATO設計点(装置重量最小点)の約±10%とした。

計算条件を表6-4に示す。表中, ○印をした番号の項目が計算パラメータである。尚, これには1次系熱伝達効率, Xeモル分率等, BRATO 設計値から, 本計算用入力データへの換算の根拠も備考として記載した。

また, 機器重量計算には主に米国式を適用した。装置重量については, 本節の(4)項で述べており, ここでは仏国式を適用したケースについても含めた。

計算パラメータ毎に主要結果と検討をまとめて以下に示す。

(1) レキュパレータ温度効率

ケース2a1 とケース2b1 の主要計算結果をまとめて表6-5と表6-6に示す。

ケース2a1 とケース2b1 は定性的に同じ傾向を示すため, 一括して議論する。(以下同様)

レキュパレータ効率を増加させるとサイクル熱効率も上昇する。これに伴い, 原子炉出力は減少する。原子炉, シャヘイ体等の重量は原子炉出力が減少するに伴い減少する。一方, ラジエータ重量はこれらとは反対にやや増加傾向にある。ラジエータ重量については, レキュパレータ温度効率が増大すると前置冷却器出力が低下し, これはラジエータ表面積を減少させる傾向だが, 一方前置冷却器入口温度が低下し, これはラジエータ運転温度を低下させるため, ラジエータ表面積を増大させる傾向となる。

計算結果では, ラジエータ重量(表面積に比例)は, レキュパレータ温度効率増加傾向にあり, 後者(運転温度の低下)の影響がややまさっているものと考えられる。

いずれにしても, これらを総じた装置全体重量はレキュパレータ温度効率の上昇に伴い, 減少傾向にある。

仏国データと比べるとサイクル熱効率に関して今回計算値の方が約20%弱大きい。この要因は, 資料不足のため説明できないが, He-Xe 混合ガスの物性値の可能性もある。

また, 装置重量について, 仏国サーベイでは, ミニマム点が見られるが, 本計算では見ら

れない。これは、機器重量評価式が、原子炉出力の単純な式で表現しているためと考えられる。例えば、レキュパレータ熱効率を増加させた場合、レキュパレータの大きさも大きくなるはずであるが、これが十分に評価式に反映されていない等の欠点があることが考えられる。

更に、ケース2a1 とケース2b1 を比較すると、ケース2b1 の方が、ラジエータ運転温度が高く、ラジエータ表面積は、ケース2a1 の約 $\frac{1}{4.5}$ となっているのが特徴である。

(以下同様)

(2) 熱交換器圧損率

ケース2a2 とケース2b2 の主要計算結果をまとめて表 6-7 と表 6-8 に示す。

圧損率がサイクル熱効率に及ぼす影響はレキュパレータ温度効率に比べて小さい。

影響の因果関係の定性的傾向は次の様に考えられる。圧損率が大きいとコンプレッサ入口圧力が大きくなり、その分タービンでの圧力降下が小さくなり、タービン出口温度が高くなる。このため、前置冷却器入口温度は高く、サイクル熱効率は小さくなる。

上記の通り、圧損率のサイクル熱効率への影響は小さいため、装置重量もほとんど変化していない。種々のパラメータの中でも、影響が最も小さいという傾向は BRATO のサーベイと同様である。

(3) コンプレッサ圧縮比

ケース2a3 とケース2b3 の主要計算結果をまとめて表 6-9 と表 6-10 に示す。

コンプレッサ圧縮比がサイクル熱効率に及ぼす影響は、レキュパレータ温度効率ほど大きくないが、圧損率よりも大きい。

影響の因果関係の定性的傾向は次の様に考えられる。コンプレッサ圧損率が大きくなると、タービン膨張率も大きくなり、これに伴いコンプレッサ出口温度は上昇し、タービン出口温度は低下する。これに伴い前置冷却器出力は小さく、同入口温度は高くなる。サイクル熱効率は、タービン出力とコンプレッサ出力の比に依存するが、本計算結果では、圧縮比が大きいほどサイクル熱効率が大きくなる傾向にあるが、その増加率はサーベイ上限で 0.1 となっており、この辺りにサイクル熱効率最適点があると予想される。

(4) コンプレッサ入口温度

ケース2a4 とケース2b4 の主要計算結果をまとめて表 6-11 と表 6-12 に示す。

パラメータ変化巾は絶対温度で $\pm 10\%$ としている。コンプレッサ入口温度がサイクル熱効

率に及ぼす影響は、レキュパレータ温度効率より大きい。（この傾向は BRATOのサーベイと同様である。）

コンプレッサ入口温度を下げるとサイクル熱効率は増加、原子炉出力は低下する。原子炉出力低下に伴い、原子炉、しゃへい体等の重量は減少するが、ラジエータ運転温度が下がるため、ラジエータの表面積（重量）は増加する。このバランスにより、装置重量最小点が現われるものと考えられる。ケース2a4 では、BRATO 設計の51℃と異なるが、入口温度35℃に最適点が現われている。

ここで、ケース2a4-3 と2b4-3 の装置重量の計算結果と BRATO設計結果を比較して見る。結果を表 6 -13と表 6 -14に示す。これには、仏国式（BRATO 設計データベースの評価式）による結果（ケース2a4' -3とケース2b4' -3）も示している。

今回計算結果は、総じて、BRATO設計値よりも小さい。特に米国式での計算結果は、BRATO設計値の1/2 程度であり、この傾向は添付資料表A - 1の結果と同様である。また仏国式による結果でも、設計値より小さいが、これは、主にラジエータ重量の差に起因しており、つきつめればサイクル熱効率の計算結果による。

いずれにしても、我国独自のデータベースを構築する必要がある。

6. 4 地上炉のサンプル計算

本節では、発電と共に、民生用熱供給も行うコジェネレーション用地上炉（電気出力100MWe）についてサンプル計算を行った。計算条件を表6-15に示す。主冷却系各部温度、圧力条件は宇宙炉のケース2aシリーズとほぼ同じとしている。計算パラメータは、下記とし、表6-15中○印を付したものをレファレンスケースとした。

- ・ 熱交換器（前置冷却器）設計仕様 （ケース3aシリーズ）
- ・ コンプレッサ段数 （ケース3b）
- ・ 1次冷却材の種類 （ケース3c）
- ・ 原子炉出入口温度 （ケース3dシリーズ）

このうち、熱交換器設計仕様については、伝熱管本数を主要パラメータとして変化させた。但し、熱交換器設計上、伝熱管本数に強く依存するシェル内径については、伝熱管本数に依存して、同時に変化させた。伝熱管本数とシェル内径の関係は、概ね次の通り。

熱交換器は、Uチューブタイプでシェル側2パス、管側は4パスとして想定した。また、この伝熱管寸法の場合、伝熱管を千鳥配列とすると、伝熱管配置上必要な面積は、 $3.18 \times 10^{-3} \text{ m}^2/7\text{本}$ であり、本値をベースに、伝熱管本数により、面積を算定した。

但し、面積は管側パス/シェル側パスは2であるから、この値を2倍し、これより、等価直径を求め、10%程度の余裕を見てシェル内径とした。

$$\left[\begin{array}{l} \text{伝熱管 700本の場合} \\ 700\text{本} \times 3.18 \times 10^{-3} \text{ m}^2/7\text{本} \times 2 = 0.636 \text{ m}^2 \\ \text{シェル内径} \\ ds = \sqrt{0.636 \times 4 / \pi} = 0.90 \rightarrow 1.0\text{m} \end{array} \right]$$

また、水側流量については、予備計算を実施し、水側出口温度が、民生熱供給に必要な温度レベル約 100℃となる様、これを設定した。

(1) 伝熱管本数

伝熱管本数を変化させた場合の主要計算結果を表6-16に示す。主要プロセス値は、当然のことながら変化していない。（この結果は、モデルによるもので、詳細には、熱交換器寸法が、圧損に影響を及ぼすため、若干の変化が予想される。）伝熱面積は、伝熱管本数

の増加に伴い、増大しているが、これは、伝熱管本数が増加すると管内流速が減り、水側熱伝達率が減少するためと考えられる。

尚、レファレンスケースのデータから熱交換器の概略寸法を検討して見る。

700本の伝熱管の単位長さ（1 m）当りの表面積

$$700 \times \pi \times 0.0254 \times 1 = 55.8 \text{ m}^2/\text{m}$$

伝熱管必要長さ

$$2780/55.8 = 49.8\text{m}$$

管側 4 パスであるから、熱交換器長さは、

$$49.8/4 = 12.5 \approx 14\text{m}$$

シェル側 2 パスであるから、熱交換器直径は、

$$\sqrt{2} \times 1.0 = 1.4 \approx 1.5\text{m}$$

熱交換器直径に比べて長さが大きいので、長さを半分程度とし 2 基並列とすることも考えられる。この場合の熱交換器は次の通りとなる。

$$\text{径} 1.5\text{m} \times \text{長さ } 7 \sim 8\text{m} \times 2 \text{ 基} / 1 \text{ ループ}$$

(2) コンプレッサ段数

コンプレッサ段数を変化させた場合の主要計算結果を表 6-17 に示す。

コンプレッサ段数を 1 段から 2 段とした場合、サイクル熱効率が増大する。これは、2 段の場合コンプレッサで中間冷却を行うことにより、コンプレッサ作動温度が低下しコンプレッサ作動に要するエネルギーが 1 段の場合よりも小さくなるためである。また、これに伴い、前置冷却器（熱交換器）出力も低下する。

尚、ケース 3b1 では、水側出口温度が 74.5℃であるため 100℃とするよう水側流量を小さく（合わせて、伝熱管本数も小さく）したのがケース 3b2 であり、結果を参考のため表 7.4-3 に追記した。

(3) 1 次冷却材の種類

1 次冷却材の種類を変化させた場合の主要計算結果を表 6-18 に示す。

1 次冷却材を Pb とした場合、比熱が Na の約 1/8.25 倍に小さくなった分だけ流量が反比例して増大している。但し、比重量は、Pb が約 13.6 倍大きいいため体積流量は逆に減少することと

なる。

(4) 原子炉出入口温度

原子炉出入口温度を変化させた場合の主要計算結果を表 6 - 19 に示す。

原子炉出入口温度を下げた場合、第 6 . 2 節でも見られた通りサイクル熱効率は減少する。
一方、熱交換器出力はやや増大する。

尚、ケース 3d1 では、水側出口温度が 111℃であるため、100℃とするよう水側流量を大きくしたのがケース 3d2 である。結果を参考のため、表 7 - 19 に追記した。

表 6 - 1 ブレイントンサイクルの各部温度サーベイ

Temperatures in Brayton cycle

		ケース A	ケース B	ケース C	ケース D
システム圧力損失		6%* ¹	6%* ¹	10%* ²	10%* ²
ラジエータ出口温度	T ₁	293K (20°C)	308K (35°C)	323K (50°C)	293K (20°C)
	T ₂	391K(118°C)	411K(138°C)	431K(158°C)	391K(118°C)
コンプレッサ出口温度	T ₂ '	410K(137°C)	431K(158°C)	452K(179°C)	410K(137°C)
	T ₄	620K(347°C)	621K(348°C)	630K(357°C)	630K(357°C)
タービン入口温度	T ₃	808K(535°C)	808K(535°C)	808K(535°C)	808K(535°C)
タービン出口温度	T ₄ '	641K(368°C)	642K(369°C)	650K(377°C)	650K(377°C)
レキュパレータ出口温度	T ₅	605K(332°C)	609K(336°C)	619K(346°C)	612K(339°C)
ラジエータ入口温度	T ₆	446K(173°C)	464K(191°C)	483K(210°C)	448K(175°C)
タービン断熱効率	η_T	0.886* ³			
コンプレッサ断熱効率	η_C	0.838* ³			
発電機効率	η_G	0.890* ³			
レキュパレータ効率	η_R	0.842* ³			
システム熱効率	η_{TH}	0.219	0.192	0.137	0.186
熱出力	Q _t	45.7kWt	52.1kWt	73.0kWt	53.7kWt

* 1 : ERATOに準じた。(5.7%)

* 2 : * 1を丸めた。

* 3 : ERATOデータ による

表 6 - 2 ブレイントンサイクルの各部温度サーベいの比較

Comparison between temperatures in Brayton cycle

		ケース A	ケース B	ケース C	ケース D
システム圧力損失		6%* ¹	6%* ¹	10%* ²	10%* ²
ラジエータ出口温度	T ₁	293K (20°C)	308K (35°C)	323K (50°C)	293K (20°C)
	T ₂	391K (118°C)	411K (138°C)	431K (158°C)	391K (118°C)
コンプレッサ出口温度	T ₂ '	410K (137°C)	431K (158°C)	452K (179°C)	410K (137°C)
	T ₄	620K (347°C)	621K (348°C)	630K (357°C)	630K (357°C)
タービン入口温度	T ₃	808K (535°C)	808K (535°C)	808K (535°C)	808K (535°C)
タービン出口温度	T ₄ '	641K (368°C)	642K (369°C)	650K (377°C)	650K (377°C)
レキュパレータ出口温度	T ₅	605K (332°C)	609K (336°C)	619K (346°C)	612K (339°C)
ラジエータ入口温度	T ₆	446K (173°C)	464K (191°C)	483K (210°C)	448K (175°C)
タービン断熱効率	η_T	0.886* ³			
コンプレッサ断熱効率	η_C	0.838* ³			
発電機効率	η_G	0.890* ³			
レキュパレータ効率	η_R	0.842* ³			
システム熱効率	η_{TH}	0.219 [0.198]	0.192 [0.175]	0.137	0.186
熱出力	Q _t	45.7kWt [55.5]	52.1kWt [57.2]	73.0kWt	53.7kWt

* 1 : ERATOに準じた。(5.7%)

* 2 : * 1を丸めた。

* 3 : ERATOデータ による

[] 内数値は、解析コードによる計算結果。

表 6-3 深海炉のサンプル計算ケース

Sample calculation cases for deep sea reactor

項 目 名 称	値
プラントタイプ	深海炉用
1次冷却材の種類	NaK(Na:0.22, K:0.78)
①-原子炉熱出力(又は電気出力)	電気出力: ②0, 40, 200 kWe
②-原子炉出入口温度	出口: ⑤50, 600, 650 °C 入口: (出口-100) °C
1次系熱伝達効率	1.0
③-1次系ループ数	①, 2 ループ
④-2次系ループ数	1, ②, 4 ループ
⑤-He-Xeモル分率	Xe: 30, ④0, 50 %
IHX 2次側出口温度(タービン入口温度)	(原子炉出口-15) °C
⑥-コンプレッサ入口温度	15, ③0, 45 °C
⑦-タービン入口圧力	12, ①0, 8 kg/cm ² a
コンプレッサ圧縮比	2.06
コンプレッサ段数	1段
発電機効率	0.890
タービン断熱効率	0.886
コンプレッサ断熱効率	0.838
レキュパレータ温度効率	0.842
システム圧力損失率	$\chi_{P1}: 0.03, \chi_{P2}: 0, \chi_{P3}: 0.03$
⑧-機器重量評価式	⑥米国式、⑦仏国式
⑨-深海炉耐圧殻材料	○チタン合金、10%Ni鋼
⑩-深海炉設計深度	4000, ⑤5000, 6000 m
海水温度	2 °C
⑪-ガス流路高さ	0.010, ⑧0.015, 0.020 m
ガス平均流速	25 m/s
耐圧殻厚さ	0.058 m
耐圧殻熱伝導率	7.7382 kcal/mh°C
⑫-海水側熱伝達率	○100, 300, 600 kcal/m ² h°C
⑬-フィンによる熱伝達率向上係数	1.3, ⑨1.4, 1.5

表 6-4 宇宙炉のサンプル計算ケース

Sample calculation cases for deep sea reactor

項 目 名 称	値		備 考
計算ケース	2aシリーズ	2bシリーズ	
プラントタイプ (宇宙炉)	UO ₂ /Na/SS	UN/Li/Mo	
1次冷却材の種類	Na	Li	
電気出力	20 kWe	20 kWe	
原子炉出入口温度	650℃ 536℃	1114℃ 979℃	
1次系熱伝達効率	0.93	0.86	注1)
1次系ループ数	1	1	
2次系ループ数	2	2	
He-Xeモル分率	0.36	0.44	注2)
IHX 2次側出口温度 (タービン入口温度)	639℃	1066℃	
④ コンプレッサ入口温度	19~83℃	90~170℃	
タービン入口圧力	7.65kg/cm ² a	4.83kg/cm ² a	注3)
③ コンプレッサ圧縮比	1.76~2.15	2.12~2.60	
コンプレッサ段数	1	1	
発電機効率	0.859	0.866	
タービン断熱効率	0.888	0.874	
コンプレッサ断熱効率	0.850	0.828	
① レキュパレータ温度効率	0.76~0.93	0.69~0.84	
システム圧力損失率 (X _{P1})	0.037	0.045	注4)
② システム圧力損失率 (X _{P3})	0.034~0.042	0.041~0.050	注4)
機器重量評価式	米国式	米国式	

注1) 1次系熱伝達効率=IHx出力/原子炉出力

ケース2aシリーズ 0.93=110.5/119 ケース2bシリーズ 0.85=98/114

注2) Xeモル分率 RXBと、混合ガス分子量 M_{mix} の関係はHeとXeの分子量がそれぞれ 4.0 g/mol, 131.3 g/mol であるから、次式で示される。

$$4(1-RXB) + 131.3 RXB = M_{mix}$$

この式を用いて、 M_{mix} より、RXB を算定した。

注3) タービン入口圧力とコンプレッサ入口圧力には次の様に関係がある。

$$P_{T1} = (1 - X_{P3}) \pi_c \cdot P_{C1}$$

BRATO 設計値のコンプレッサ入口圧力より、本式を用いてタービン入口圧力の入力値を求めた。

注4) BRATO 設計値はシステム全体での圧力損失率が示されている。本計算では、これをモデル上低温側、高温側に2分割して入力した。また、低温側の値をパラメータとした。

表 6-5 レキュパレータ温度効率を変化させた場合の主要計算結果 (ケース2a1)

Main calculational results in the variable parameter case of recuperator temperature efficiency (case 2a1)

レキュパレータ温度効率 (-)	0.76	0.803	0.845	0.888	0.930
原子炉出力 (kWt)	118	112	106	99.5	93.2
前置冷却器出力 (kWt)	43.2	40.3	37.4	34.4	31.5
“ 入口温度 (°C)	240	227	214	201	188
サイクル熱効率 (%)	21.2	22.3	23.7	25.2	26.9
ラジエータ表面積 (㎡)	45.6	46.1	46.5	46.8	46.8
装置重量 (t)	1.21	1.19	1.17	1.14	1.12

表 6-6 レキュパレータ温度効率を変化させた場合の主要計算結果 (ケース2b1)

Main calculational results in the variable parameter case of recuperator temperature efficiency (case 2b1)

レキュパレータ温度効率 (-)	0.69	0.728	0.765	0.803	0.840
原子炉出力 (kWt)	111	107	103	98.5	94.4
前置冷却器出力 (kWt)	35.9	34.2	32.4	30.7	29.0
“ 入口温度 (°C)	462	445	429	413	397
サイクル熱効率 (%)	24.3	25.2	26.2	27.3	28.4
ラジエータ表面積 (㎡)	9.45	9.57	9.68	9.78	9.86
装置重量 (t)	1.19	1.17	1.16	1.14	1.13

表 6-7 熱交換器圧損率を変化させた場合の主要計算結果 (ケース2a2)
Main calculational results in the variable parameter case of heat exchanger
pressure loss efficiency (case 2a2)

圧損率 (-)	0.034	0.036	0.038	0.040	0.042
原子炉出力 (kWt)	104	105	106	107	108
コンプレッサ入口圧力 (kg/cm ² a)	4.06	4.07	4.08	4.09	4.10
タービン出口温度 (°C)	468	469	469	470	470
前置冷却器出力 (kWt)	36.7	37.1	37.5	37.9	38.3
“ 入口温度 (°C)	214	214	214	215	215
サイクル熱効率 (%)	24.0	23.8	23.6	23.4	23.2
ラジエータ表面積 (m ²)	45.5	46.0	46.5	47.0	47.5
装置重量 (t)	1.16	1.16	1.17	1.17	1.18

表 6-8 熱交換器圧損率を変化させた場合の主要計算結果 (ケース2b2)
Main calculational results in the variable parameter case of heat exchanger
pressure loss efficiency (case 2b2)

圧損率 (-)	0.045	0.0463	0.0475	0.0488	0.050
原子炉出力 (kWt)	103	103	103	104	104
コンプレッサ入口圧力 (kg/cm ² a)	2.14	2.15	2.15	2.15	2.15
タービン出口温度 (°C)	759	759	759	760	760
前置冷却器出力 (kWt)	32.5	32.6	32.8	32.9	33.1
“ 入口温度 (°C)	430	430	430	430	430
サイクル熱効率 (%)	26.2	26.1	26.0	25.9	25.8
ラジエータ表面積 (m ²)	9.68	9.72	9.76	9.80	9.84
装置重量 (t)	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16

表 6-9 コンプレッサ圧縮比を変化させた場合の主要計算結果 (ケース2a3)
Main calculational results in the variable parameter case of compression ratio in compressor (case 2a3)

圧縮比 (-)	1.76	1.858	1.955	2.053	2.15
原子炉出力 (kWt)	110	108	106	105	106
コンプレッサ入口圧力 (kg/cm ² a)	4.52	4.28	4.07	3.87	3.70
タービン出口温度 (°C)	496	482	469	456	445
コンプレッサ出口温度 (°C)	147	157	167	177	187
前置冷却器出力 (kWt)	39.7	38.2	37.5	37.2	37.2
“ 入口温度 (°C)	202	208	215	221	227
サイクル熱効率 (%)	22.7	23.3	23.6	23.7	23.7
ラジエータ表面積 (m ²)	53.5	49.4	46.4	44.1	42.4
装置重量 (t)	1.22	1.19	1.17	1.15	1.15

表 6-10 コンプレッサ圧縮比を変化させた場合の主要計算結果 (ケース2b3)
Main calculational results in the variable parameter case of compression ratio in compressor (case 2b3)

圧縮比 (-)	2.12	2.24	2.36	2.48	2.60
原子炉出力 (kWt)	106	104	103	102	102
コンプレッサ入口圧力 (kg/cm ² a)	2.39	2.26	2.14	2.04	1.95
タービン出口温度 (°C)	796	777	759	742	726
コンプレッサ出口温度 (°C)	300	314	328	342	355
前置冷却器出力 (kWt)	33.9	33.0	32.5	32.2	32.2
“ 入口温度 (°C)	417	423	430	436	443
サイクル熱効率 (%)	25.4	25.9	26.2	26.3	26.3
ラジエータ表面積 (m ²)	10.6	10.1	9.68	9.36	9.12
装置重量 (t)	1.17	1.16	1.16	1.15	1.15

表 6-11 コンプレッサ入口温度を変化させた場合の主要計算結果 (ケース2a4)
Main calculational results in the variable parameter case of entrance i
temperature in compressor (case 2a4)

入口温度 (°C)	19	35	51	67	83
原子炉出力 (kWt)	89.4	97.0	106	117	132
前置冷却器出力 (kWt)	29.8	33.3	37.5	42.7	49.4
“ 入口温度 (°C)	178	196	214	233	251
サイクル熱効率 (%)	28.0	25.8	23.6	21.3	19.0
ラジエータ表面積 (㎡)	61.6	52.5	46.5	42.6	42.4
装置重量 (t)	1.17	1.16	1.17	1.19	1.23

表 6-12 コンプレッサ入口温度を変化させた場合の主要計算結果 (ケース2b4)
Main calculational results in the variable parameter case of entrance i
temperature in compressor (case 2b4)

入口温度 (°C)	90	110	130	150	170
原子炉出力 (kWt)	89.9	95.7	103	111	121
前置冷却器出力 (kWt)	27.0	29.5	32.5	36.0	42.4
“ 入口温度 (°C)	384	407	430	452	475
サイクル熱効率 (%)	29.9	28.1	26.2	24.2	22.7
ラジエータ表面積 (㎡)	11.5	10.5	9.68	9.09	8.69
装置重量 (t)	1.11	1.13	1.16	1.19	1.22

表 6-13 装置重量計算結果の比較 (ケース2a)

Comparison of equipment weight (case 2a)

部 位	今回計算結果 (kg)		BRATO設計値 (kg)
	米 国 式	仏 国 式	
計算ケース	2a4-3	2a4' -3	—
原子炉	389	334	375
遮へい体	36.8	168	189
発電系	485	80.3 166	99 207
ラジエータ	232 (46.5 m ²)	216 (46.5 m ²)	623
熱輸送系	24.9	—	—
その他	—	825	826
合 計	1170	1790	2319

表 6 - 14 装置重量計算結果の比較 (ケース2b)

Comparison of equipment weight (case 2b)

部 位	今回計算結果 (kg)		ERATO設計値 (kg)
	米 国 式	仏 国 式	
計算ケース	2b4-3	2b4' -3	—
原子炉	577	323	440
遮へい体	27.4	163	172
発電系	482	71.9 149	65 155
ラジエータ	48.4 (10.5 m ²)	54.2 (10.5 m ²)	209
熱輸送系	22.9	—	—
その他	—	799	843
合 計	1160	1560	1884

表 6 - 15 地上炉のサンプル計算条件

Sample calculation condition for terrestrial reactor

項 目 名 称	値
プラントタイプ	地上炉
1 次冷却材の種類	(Na), Pb
原子炉出入口温度	650°C , 600°C 536°C , 486°C
1 次系熱伝達効率	0.93
1 次系ループ数	2
2 次系ループ数	4
He - Xe モル分率	0.36
IHX 2 次側出口温度 (タービン入口温度)	639°C , 589°C
コンプレッサ入口温度	40°C
タービン入口圧力	7.65 kg/cm ² a
コンプレッサ圧縮比	1.95
コンプレッサ段数	(1), 2
発電機効率	0.859
タービン断熱効率	0.888
コンプレッサ断熱効率	0.850
レキュパレータ温度効率	0.843
システム圧力損失率 (X _{P1})	0.37
システム圧力損失率 (X _{P3})	0.38
水側入口温度	30°C
水側流量	1.06 × 10 ⁶ kg/h
伝熱管内径	0.0202 m
伝熱管外径	0.0254 m
伝熱管ピッチ	0.035 m
バッフル板間隔	0.35 m
シェル内径	1.0 m , 1.1 m, 0.9 m
伝熱管本数	700 本 , 840, 560
水側汚れ係数	30000 kcal/ m ² · h · °C
伝熱管熱伝導率	22.8 kcal/ m ² · h · °C
伝熱面積補正係数	1.0

表 6-16 伝熱管本数を変化させた場合の主要計算結果

Main calculational results in the variable parameter case of heat transfer tube number

伝 熱 管 本 数	560	700(レファレンス)	840
原子炉出力 (MWt)	→	498	←
1次系流量(kg/hw/ル-フ)	→	6.15×10^6	←
前置冷却器出力 (MWt)	→	86.3	←
“ 入口温度 (°C)	→	202	←
“ 伝面 (m ²)	2490	2780	3060
“ 水側出口温度 (°C)	→	100	←
サイクル熱効率 (%)	→	25.1	←

表 6-17 コンプレッサ段数を変化させた場合の主要計算結果

Main calculational results in the variable parameter case of compressor stage number

コンプレッサ段数	1 (レファレンス)	2	2
原子炉出力 (MWt)	498	471	←
1次系流量(kg/hw/ル-フ)	6.15×10^6	5.82×10^6	←
前置冷却器出力 (MWt)	86.3	54.7	←
“ 入口温度 (°C)	202	152	←
“ 伝面 (m ²)	2780	2270	3590
“ 水側出口温度 (°C)	100	74.5	100
サイクル熱効率 (%)	25.1	26.6	←
水側流量 (kg/h)	1.06×10^6	1.06×10^6	0.67×10^6
伝熱管本数	700	700	560

表 6-18 1次系冷却材の種類を変えた場合の主要計算結果

Main calculational results for various primary coolants

1次系冷却材の種類	Na(レファレンス)	Pb
原子炉出力 (kWt)	498	←
1次系流量(kg/hw/ル-フ)	6.15×10^6	50.8×10^6
前置冷却器出力 (kWt)	86.3	←
“ 入口温度 (°C)	202	←
“ 伝面 (m ²)	2780	←
“ 水側出口温度 (°C)	100	←
サイクル熱効率 (%)	25.1	←

表 6-19 原子炉出入口温度を変化させた場合の主要計算結果

Main calculational results in the variable parameter case of reactor entrance temperature

原子炉出入口温度 (入口温度=出口温度-114)	650 (77°F)	600	600
原子炉出力 (MWt)	498	556	←
1次系流量 (kg/hw-ル-7)	6.15×10^6	6.86×10^6	←
前置冷却器出力 (MWt)	86.3	99.6	←
“ 入口温度 (°C)	202	195	←
“ 伝面 (m ²)	2780	3700	3110
“ 水側出口温度 (°C)	100	111	99.8
サイクル熱効率 (%)	25.1	22.5	←
水側流量 (kg/h)	1.06×10^6	1.06×10^6	1.23×10^6

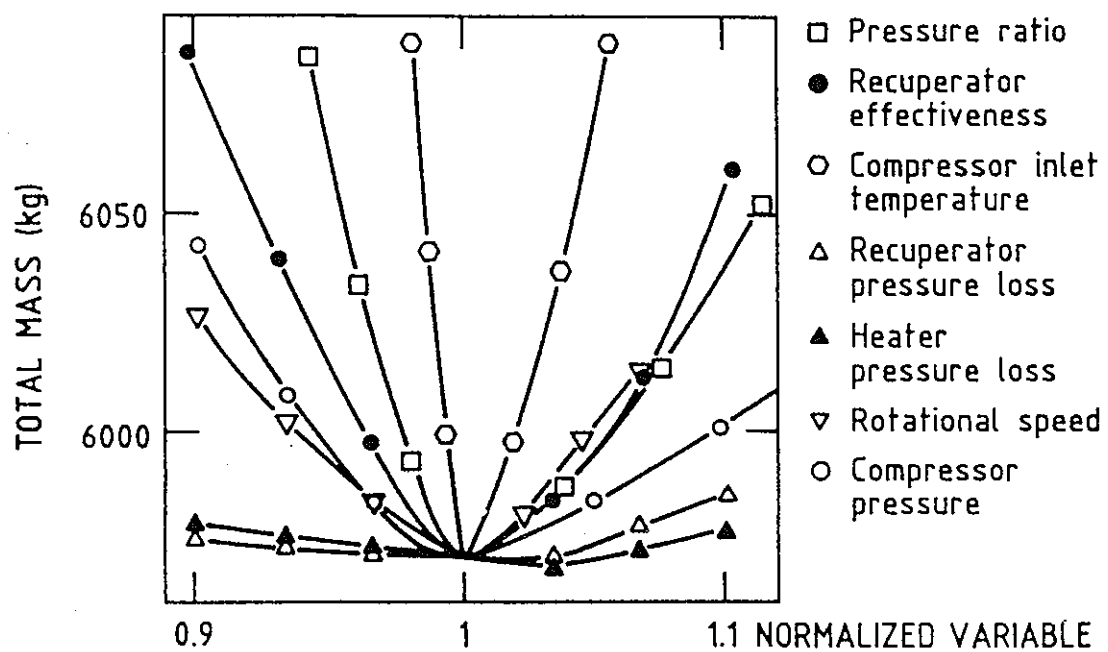


Fig.16. Sensitivity of the power system mass to the departure of some key parameters from their optimum value

図6-1 装置重量の主要パラメータに対する依存性 (ERATO設計)

CEA

CNES

7 まとめ

本解析コードの作成により、従来卓上計算機を使用して行っていた密閉ブレイトンサイクルの計算を、パソコンを使って効率的に行えるようになった。今後は従来余り計算出来なかった、密閉ブレイトンサイクルのHe-Xeガスの組成の影響をみるといったようなことを含めて、数多くのケースの解析を行う予定である。

更に将来的には、本解析コードの各種機器のモデルの詳細化を行うとともに、本解析コードをベースとして過渡解析コードの開発も行う予定である。

謝 辞

本解析コード作成に当たり、元動燃の佐藤稔氏より有益な技術的コメントを頂いたので、ここに謝意を表します。

本解析コードのプログラミングは、新型炉技術開発株式会社の吉岡直樹氏にお願いしたので、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 「高速炉ガスタービン発電概念検討」、大坪章他、動燃技報 No. 89, 1994 年。
- (TN) ← 2) 動燃報告書 PNC ZN9410 91-185、「6.5 km 級潜水調査船用動力源の概念設計」、大坪章他、1991年 5月。
- 3) 「ガスタービン設計」、浜島 操著、近代工学出版、東京、pp.1-77 (1975)。
- 4) "Selection of Power Plant Elements for Future Reactor Space Electric Power Systems," D. Buden, LA-7858, 1979.
- 5) 「伝熱工学資料」(改訂第 4 版)、日本機械学会、1991年。
- 6) "Overview of CNES-CEA Joint Programme on Space Nuclear Brayton Systems," Z.P. Tilliette, et. al., 5th ICENES, 1989.
- 7) "Energy Conversion for Megawatt Space Power Systems," R. Ewell, 18th IECEC, 1983.
- (TN) ← 8) 動燃報告書 PNC ZN9410 93-064、「深海無人基地用高速炉システムの概念検討」、大坪章他、1993年 2月。
- 9) 「機械工学便覧」(新版)、日本機械学会編、丸善、pp.4-77, (1993)。
- 10) 仏 C E A の Z.P. Tilliette 氏の原研での講演 OHP 用 View Graph
- 11) 「便覧 気体と液体の熱物理的性質」、エヌ・ベ・ワルガフチック、日ソ通信社、1974年
- 12) 「流体の熱物性値集」、日本機械学会、丸善、1991年。
- 13) 「蒸気表」、日本機械学会、1968年。

添付資料 A 米国の機器重量簡易評価式

(a) 原子炉 (ヒートパイプ冷却方式)

図 A-1¹⁾ に示す原子炉重量と原子炉熱出力及び最高温度との相関グラフをフィッティングして得られた次式を用いる。

$$W1 = W_0(T_{\max}) + \Delta W(Q)$$

$$= 610(\text{kg}) \times \frac{T_{\max}}{1500} + 125(\text{kg/MWt}) \times Q$$

T_{\max} : 最高温度 (K)

Q : 原子炉熱出力 (MWt)

$W1$: (kg)

(b) 放射線しゃへい体

図 A-2 に示す設計データを外挿し、しゃへい体の重量を算出する。外挿曲線を図 A-3 に示す。これより求めた外挿式は以下の通りである。

$$W2 = 660 \log Q + 680(\text{kg})$$

Q : 原子炉熱出力 (MWt)

$W2$: (kg)

(c) 発電システム

ガスタービン、圧縮機、発電機を含む発電システムの重量を予備系を含めて次式で与える。¹⁾

$$W3 = 400(\text{kg}) + 800(\text{kg/MWt}) \times Q$$

Q : 原子炉熱出力 (MWt)

$W3$: (kg)

(d) ラジエータ

伝熱面積 (m^2) は

$$A = \frac{Q \times 10^6}{\varepsilon \sigma T^4 - K1} \times 1.2 \text{ (余裕20\%)}$$

$$K1 = 311.08(\text{W/m}^2)$$

単位面積当りの重量は 5 kg/m^2 ¹⁾ として

$$W4 = 5.0 \times A(\text{kg})$$

(e) 熱輸送系

炉心からのヒートパイプ，熱交換器，冷却器，配管等を含む熱輸送系の重量は先行炉の設計経験を基に工学的判断により次式で与える。

$$W_5 = W_0 + \Delta W (Q)$$

$$= 100 \times Q_R + 105 \times (Q_E + Q_C)$$

Q_R : 炉心熱出力 (MWt)

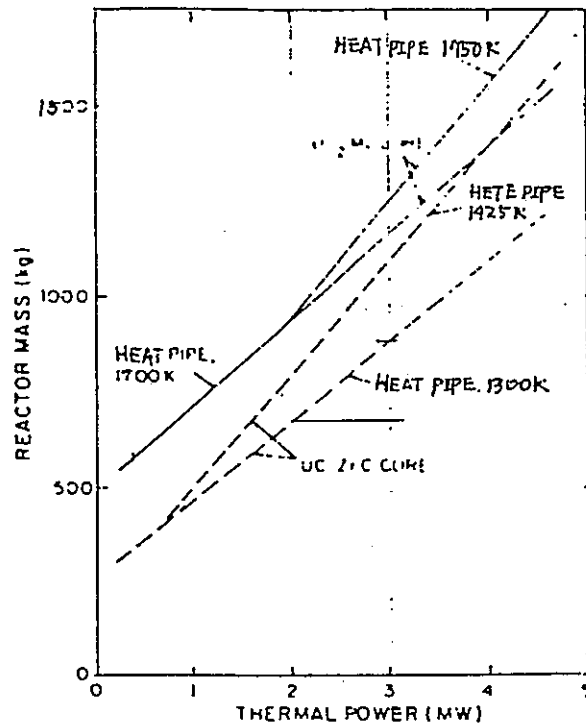
Q_E : 熱交換器の出力 (MWt)

Q_C : 冷却器の出力 (MWt)

本評価式をBRATOの宇宙炉に適用して求めた重量を設計値と比較して，表A - 1に示す。

表A - 1

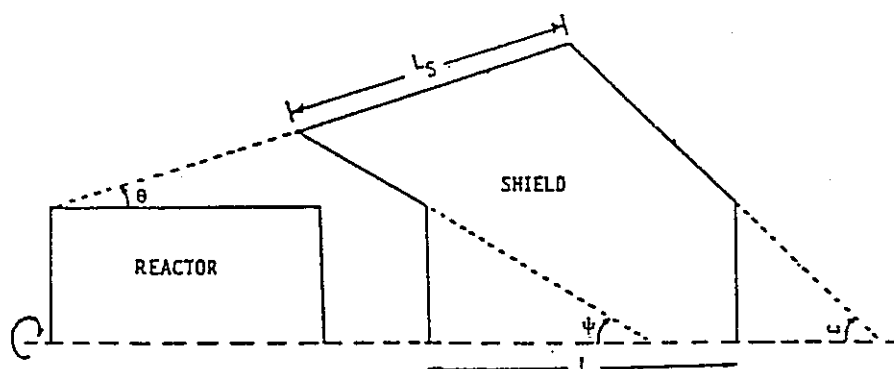
部 位	評価式 (kg)	設計値 (kg)
原子炉	398	375
遮へい体	72	189
発電系	496	99 207
ラジエータ	513 (102.7 m ²)	523
熱輸送系	34	—
その他	—	926
合 計	1513	2319



Weight vs thermal power
for UO_2 -40 vol% Mo and
UC-10 at.% ZrC reactors.
The weights include a 1-m
extension of heat pipes
outside the reactor.

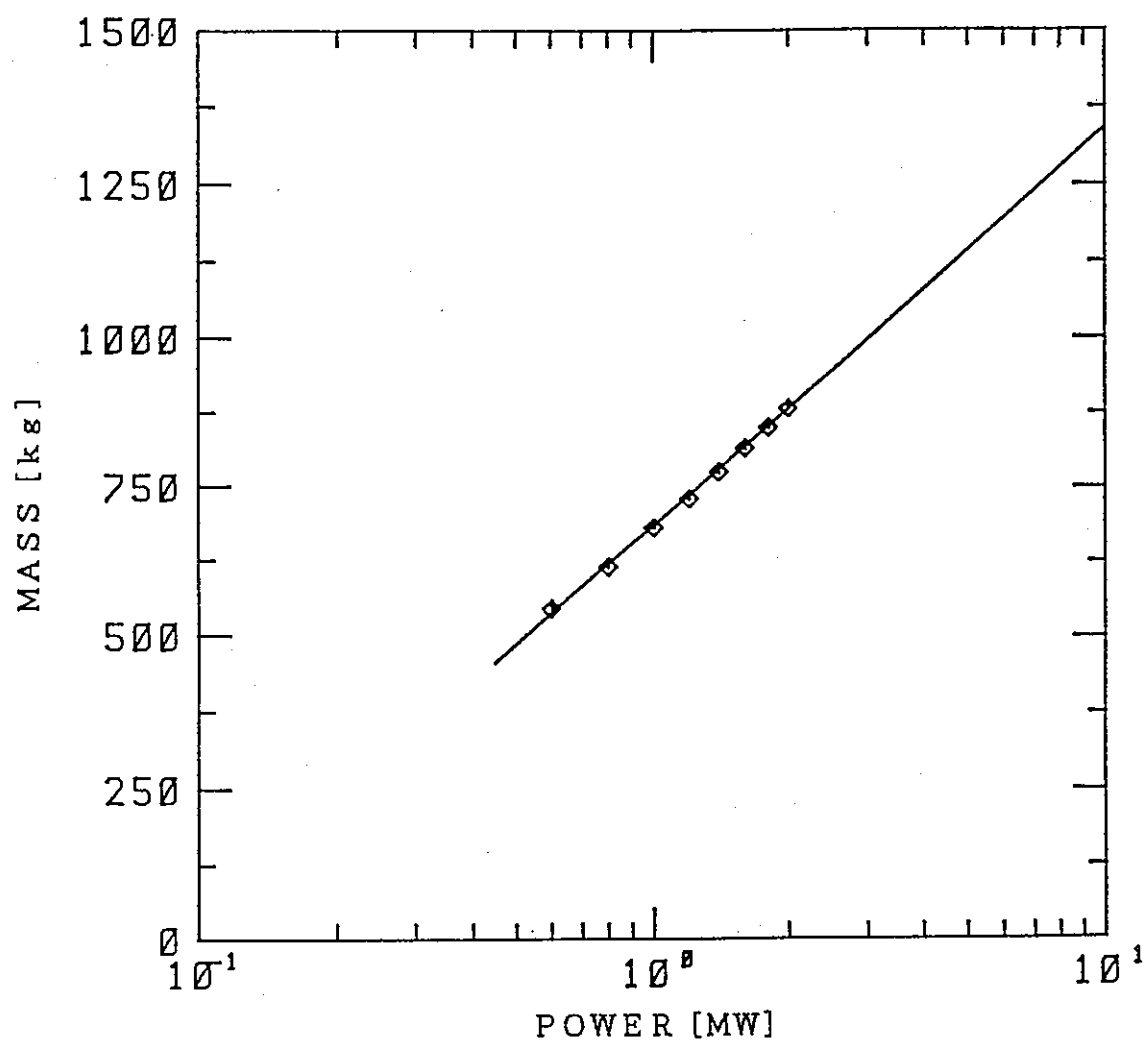
図A-1 原子炉重量と原子炉熱出力及び最高温度との相関⁴⁾

P MW	10^{12} nvt/ 10^6 rad			10^{13} nvt/ 10^7 rad		
	LiH + SS kg	W kg	Total kg	LiH + SS kg	W kg	Total kg
0.6	370	175	545	225	0	225
0.8	400	215	615	265	0	265
1.0	432	250	682	300	0	300
1.2	455	275	730	325	0	325
1.4	475	300	775	345	20	365
1.6	495	320	815	360	40	400
1.8	515	335	850	370	60	430
2.0	533	350	883	380	85	465



引用文献: R.G. Palmer, "Nuclear Reactor System Study for NASA/JPL." LA-9498-MS, 1982.

図A-2 シャーヘイ体重量データ



図A-3 炉心熱出力としゃへい体重量の関係

添付資料 B 流体の物性値

B.1 He-Xe 混合ガス^{11), 12)}(1) 比重量: γ

理想気体として考える。ガス定数は、次の通りXeのモル分率 (RXE)を考慮して計算する。
(誤差は、Xe単体の場合が最も大きく、 $\sim 1000^\circ\text{K}$, $50\text{kg}/\text{cm}^3\text{G}$ で約5%以内と考えられる。)

$$\text{He} : R_{\text{HE}} = 211.9 \quad (\text{m} \cdot \text{kg} / \text{kg} \cdot \text{K})$$

$$\text{Xe} : R_{\text{XE}} = 6.00 \quad (\quad \quad \quad)$$

$$\text{混合ガス} : R_{\text{mix}} = \frac{R_{\text{HE}} \cdot R_{\text{XE}}}{R_{\text{HE}} \text{RXE} + R_{\text{XE}} (1 - \text{RXE})} = \frac{211.9 \times 6}{211.9 \times \text{RXE} + 6 \times (1 - \text{RXE})}$$

混合ガスの比重量

$$\gamma = \frac{P}{R_{\text{mix}} T}$$

$\gamma : \text{kg} / \text{m}^3$
 $P : \text{kg} / \text{m}^2$
 $T : \text{K}$

(2) 定圧比熱: C_p

Heについては、 $0.01\text{Mpa} \sim 5\text{Mpa}$, $300 \sim 1000\text{K}$ の範囲で1%以下の変化。従って代表、 1Mpa , 500K の $5.19\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ とする。

Xeについては、 $1 \sim 50\text{bar}$, $300 \sim 1000\text{K}$ の範囲で約3倍異なる。従って、表B-1のデータを基に内外挿して求める。

混合ガスについては、Xe重量分率 (RWXE)を考慮して、次式で算出する。

$$C_p (\text{混合}) = 5.19 (1 - \text{RWXE}) + C_p (\text{Xe}) \times \text{RWXE} \quad (\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$\text{但し, } \text{RWXE} = \frac{R_{\text{mix}}}{R_{\text{Xe}}} \cdot \text{RXE} = \frac{R_{\text{mix}}}{6.00} \cdot \text{RXE}$$

(3) 熱伝導率: λ

表B-2を内外挿して求める。但し、圧力依存性については、データがないため、無視する。

尚、表中のHe気体濃度 (vol %) RHE は次式で示される。

$$\text{RHE} = 1 - \text{RXE}$$

(4) 粘性率: η

Heについては、圧力依存性は極く小さく、0.1%以下。従って、温度依存性のみを考える。(表B-3参照)

Xeについては、1 bar での温度依存データがある。圧力依存性については、データが少なく、しかも複雑である。ここでは、圧力依存性は無視する。これによる誤差は、50bar 程度の範囲で、約15%程度となることが考えられる。(表B-4 参照)

混合ガスについては、Xeモル分率を用いて、他と同様に計算する。

尚、動粘性係数 ν は、次式で示される。

$$\nu = 10^{-1} \frac{\eta}{\gamma}$$

$\eta : \text{Pa} \cdot \text{s}$
 $\gamma : \text{kg} / \text{m}^3$
 $\nu : \text{m}^2 / \text{s}$

(5) プラントル数 : Pr

次式により求める。

$$\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \eta}{\lambda}$$

$C_p : \text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$
 $\eta : \text{Pa} \cdot \text{s}$
 $\lambda : \text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$

B.2 1次冷却材⁵⁾

今回の計算では、原子炉熱出力と原子炉出／入口温度より流量を求める為に、定圧比熱を用いる。この比熱と流速換算するための比重量の代表値を定める。代表値としては、平均的な温度 400～500℃での値とする。

1次冷却材の種類	C_p (cal/g・℃)	γ (g/cm ³)
NaK (Na:0.56, K:0.44)	0.249 (at 500℃)	0.814 (at 400℃)
NaK (Na:0.22, K:0.78)	0.210 (at 400℃)	0.775 (at 400℃)
Na	0.3055 (at 400℃)	0.854 (at 400℃)
Hg	0.03256 (at 450℃)	12.881 (at 300℃)
L _i	1.0 (at 600℃)	0.490 (at 400℃)
P _b	0.037 (at 400℃)	10.51 (at 400℃)

B.3 水¹³⁾

水は地上炉用前置冷却器の2次側媒体として使用するものであり、温度は20～100℃、圧力は10kg/cm²・a以下で使われることが多い。ここでは平均的な値として、5kg/cm²・a、50℃の値とする。

PNC ZN9520 95 - 002

$$\gamma = 988 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 0.998 \text{ kcal/kg} \cdot \text{K}$$

$$\lambda = 0.553 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}$$

$$\nu = 5.507 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 3.53 \quad \text{---}$$

表B-1

キセノンの熱力学的性質: ρ (kg/m³), i (kJ/kg), s と c_p (kJ/kg·deg) (159)

p , bar	ρ	i	s	c_p	ρ	i	s	c_p
$T=290$ °K					$T=300$ K			
1	5,476	166,6	1,2871	0,1601	5,290	168,2	1,2925	0,1599
2	11,01	166,3	1,2426	0,1620	10,63	167,9	1,2480	0,1616
3	16,61	166,0	1,2162	0,1639	16,03	167,6	1,2217	0,1633
4	22,28	165,7	1,1973	0,1660	21,49	167,4	1,2029	0,1651
5	28,02	165,4	1,1825	0,1680	27,01	167,1	1,1881	0,1669
10	57,81	163,8	1,1349	0,1796	55,54	165,6	1,1409	0,1771
20	124,2	160,2	1,0825	0,2111	118,3	162,3	1,0895	0,2037
30	203,8	156,0	1,0462	0,2620	191,3	158,5	1,0548	0,2436
40	306,1	150,7	1,0142	0,3581	280,2	154,0	1,0254	0,3089
50	459,2	143,3	0,9793	0,6189	397,0	148,4	0,9966	0,4347
60	1526	108,3	0,8530	2,0774	576,5	140,5	0,9632	0,7753
70	1714	104,1	0,8366	0,9089	1040	124,0	0,9036	3,4863
80	1805	102,3	0,8285	0,7076	1518	111,3	0,8588	1,2124
90	1868	101,2	0,8227	0,6145	1658	108,2	0,8464	0,8188
100	1918	100,4	0,8181	0,5588	1744	106,5	0,8387	0,6740
150	2081	98,36	0,8025	0,4408	1971	102,9	0,8178	0,4640
200	2184	97,68	0,7921	0,3960	2096	101,7	0,8056	0,4034

つづき

p, bar	q	l	s	c_p	q	l	s	c_p
300	2325	97,80	0,7772	0,3558	2257	101,3	0,7892	0,3538
400	2426	98,79	0,7662	0,3367	2368	102,1	0,7774	0,3314
500	2505	100,2	0,7571	0,3256	2453	103,4	0,7680	0,3184
600	2572	101,9	0,7494	0,3184	2524	105,0	0,7600	0,3100
800	2680	105,8	0,7365	0,3100	2638	108,8	0,7468	0,2999
1000	2767	110,0	0,7258	0,3056	2730	113,0	0,7359	0,2942
$T=310^\circ\text{K}$					$T=320^\circ\text{K}$			
1	5,117	169,8	1,2978	0,1598	4,956	171,4	1,3028	0,1596
2	10,28	169,6	1,2533	0,1613	9,953	171,2	1,2584	0,1610
3	15,50	169,3	1,2271	0,1628	14,99	170,9	1,2322	0,1624
4	20,76	169,0	1,2083	0,1644	20,08	170,6	1,2135	0,1638
5	26,07	168,7	1,1936	0,1660	25,20	170,4	1,1988	0,1653
10	53,46	167,4	1,1466	0,1750	51,55	169,1	1,1522	0,1733
20	113,0	164,3	1,0960	0,1978	108,3	166,3	1,1022	0,1930
30	180,8	160,9	1,0625	0,2301	171,8	163,1	1,0696	0,2198
40	260,4	157,0	1,0350	0,2783	244,4	159,6	1,0434	0,2572
50	357,9	152,3	1,0094	0,3565	329,6	155,6	1,0200	0,3119
60	485,8	146,6	0,9832	0,5004	433,2	151,0	0,9972	0,3966
70	673,4	139,0	0,9529	0,8219	565,4	145,5	0,9736	0,5360
80	989,0	128,1	0,9140	1,5373	742,3	138,8	0,9479	0,7690
90	1332	118,6	0,8803	1,2855	975,3	131,1	0,9201	1,0489
100	1512	114,2	0,8641	0,8935	1214	124,2	0,8959	1,0497
150	1851	107,7	0,8335	0,4960	1719	112,8	0,8498	0,5347
200	2004	105,8	0,8190	0,4143	1908	110,0	0,8323	0,4276
300	2188	104,9	0,8008	0,3542	2118	108,4	0,8121	0,3562
400	2309	105,4	0,7882	0,3284	2250	108,7	0,7986	0,3271
500	2401	106,6	0,7783	0,3138	2350	109,7	0,7882	0,3108
600	2477	108,1	0,7700	0,3043	2430	111,1	0,7796	0,3004
800	2598	111,8	0,7564	0,2928	2557	114,7	0,7656	0,2877
1000	2693	115,9	0,7454	0,2860	2657	118,8	0,7543	0,2801
$T=330^\circ\text{K}$					$T=340^\circ\text{K}$			
1	4,804	173,0	1,3077	0,1595	4,661	174,6	1,3125	0,1594
2	9,664	172,8	1,2634	0,1607	9,354	174,4	1,2682	0,1605
3	14,52	172,5	1,2372	0,1620	14,08	174,2	1,2421	0,1617
4	19,44	172,3	1,2185	0,1633	18,84	173,9	1,2234	0,1629
5	24,39	172,0	1,2039	0,1646	23,64	173,7	1,2088	0,1653
10	49,79	170,8	1,1575	0,1718	48,15	172,5	1,1626	0,1705
20	104,0	168,2	1,1081	0,1891	100,2	170,0	1,1137	0,1859
30	163,9	165,3	1,0763	0,2118	156,9	167,4	1,0825	0,2053
40	230,9	162,1	1,0511	0,2419	219,4	164,5	1,0582	0,2302
50	307,3	158,6	1,0291	0,2829	289,2	161,3	1,0372	0,2624
60	396,3	154,7	1,0085	0,3403	368,0	157,9	1,0181	0,3046
70	502,3	150,2	0,9882	0,4223	458,2	154,1	0,9998	0,3601
80	631,3	145,2	0,9675	0,5388	562,6	150,0	0,9818	0,4321
90	788,5	139,5	0,9461	0,6882	683,3	145,5	0,9639	0,5205
100	969,2	133,7	0,9251	0,8194	820,0	140,8	0,9462	0,6140
150	1575	118,4	0,8669	0,5725	1427	124,2	0,8843	0,5927
200	1807	114,3	0,8457	0,4417	1704	118,8	0,8591	0,4542
300	2046	112,0	0,8231	0,3589	1974	115,6	0,8339	0,3619
400	2191	112,0	0,8087	0,3267	2132	115,2	0,8185	0,3269
500	2298	112,8	0,7978	0,3091	2246	115,9	0,8070	0,3080
600	2383	114,1	0,7888	0,2978	2337	117,1	0,7977	0,2960
800	2516	117,5	0,7745	0,2841	2476	120,4	0,7829	0,2815
1000	2620	121,5	0,7629	0,2759	2585	124,3	0,7712	0,2729
$T=350^\circ\text{K}$					$T=400^\circ\text{K}$			
1	4,526	176,2	1,3172	0,1593	3,956	184,2	1,3386	0,1590
2	9,082	176,0	1,2729	0,1603	7,929	184,0	1,2944	0,1597
3	13,66	175,8	1,2468	0,1614	11,92	183,8	1,2684	0,1604
4	18,28	175,6	1,2281	0,1625	15,92	183,6	1,2499	0,1612
5	22,93	175,3	1,2136	0,1636	19,95	183,5	1,2355	0,1619
10	46,63	174,2	1,1676	0,1694	40,33	182,6	1,1901	0,1658

p_r	ρ	l	s	c_p	ρ	l	s	c_p
20	96,62	171,9	1,1191	0,1831	82,45	180,8	1,1430	0,1743
30	150,6	169,4	1,0884	0,2000	126,5	178,9	1,1141	0,1839
40	209,4	166,7	1,0647	0,2210	172,7	177,0	1,0924	0,1948
50	273,8	163,9	1,0446	0,2472	221,1	175,1	1,0747	0,2071
60	345,1	160,8	1,0265	0,2799	271,9	173,0	1,0594	0,2207
70	424,6	157,5	1,0096	0,3206	325,2	171,0	1,0458	0,2358
80	513,7	154,0	0,9934	0,3705	381,2	168,8	1,0334	0,2522
90	613,4	150,2	0,9776	0,4294	439,6	166,6	1,0219	0,2698
100	723,8	146,3	0,9622	0,4935	500,6	164,4	1,0111	0,2883
150	1283	130,1	0,9015	0,5812	830,4	153,8	0,9652	0,3747
200	1589	123,4	0,8724	0,4624	1141	145,6	0,9319	0,4020
300	1902	119,2	0,8444	0,3646	1550	137,5	0,8933	0,3596
400	2073	118,5	0,8280	0,3272	1785	134,8	0,8717	0,3244
500	2195	119,0	0,8159	0,3073	1945	134,3	0,8569	0,3034
600	2290	120,0	0,8063	0,2947	2065	134,7	0,8455	0,2899
800	2437	123,2	0,7911	0,2796	2244	137,0	0,8281	0,2738
1000	2749	127,0	0,7790	0,2707	2376	140,4	0,8149	0,2646
T=450 °K								
1	3,514	192,1	1,3573	0,1588	3,161	200,0	1,3741	0,1587
2	7,038	192,0	1,3132	0,1593	6,329	199,9	1,3300	0,1591
3	10,57	191,8	1,2873	0,1599	9,503	199,8	1,3042	0,1595
4	14,12	191,7	1,2689	0,1604	12,68	199,7	1,2858	0,1599
5	17,67	191,5	1,2445	0,1609	15,87	199,6	1,2715	0,1603
10	35,60	190,8	1,2095	0,1637	31,89	199,0	1,2267	0,1624
20	72,21	189,4	1,1633	0,1700	64,38	197,8	1,1810	0,1667
30	109,9	187,9	1,1353	0,1759	97,47	196,6	1,1536	0,1713
40	148,6	186,4	1,1147	0,1828	131,2	195,4	1,1335	0,1761
50	188,5	185,0	1,0981	0,1902	165,4	194,4	1,1176	0,1811
60	229,4	183,4	1,0840	0,1980	200,2	193,0	1,1042	0,1863
70	271,4	181,9	1,0717	0,2062	235,6	191,8	1,0926	0,1917
80	314,5	180,4	1,0607	0,2148	271,4	190,6	1,0823	0,1972
90	358,6	178,8	1,0507	0,2238	307,7	189,4	1,0730	0,2027
100	403,6	177,3	1,0414	0,2330	344,4	188,2	1,0645	0,2084
150	638,8	169,8	1,0030	0,2785	532,2	182,5	1,0299	0,2365
200	874,2	163,2	0,9737	0,3115	720,2	177,4	1,0036	0,2602
300	1263	154,6	0,9338	0,3230	1058	169,8	0,9657	0,2833
400	1528	150,7	0,9092	0,3076	1320	165,5	0,9404	0,2834
500	1715	149,2	0,8922	0,2928	1518	163,4	0,9222	0,2768
600	1857	149,0	0,8793	0,2817	1671	162,8	0,9084	0,2698
800	2064	150,5	0,8601	0,2673	1899	163,7	0,8878	0,2589
1000	2215	153,4	0,8485	0,2589	2066	166,2	0,8727	0,2519
T=500 °K								
1	2,633	215,9	1,4028	0,1586	2,257	213,8	1,4272	0,1585
2	5,268	215,8	1,3588	0,1588	4,513	231,7	1,3832	0,1587
3	7,906	215,7	1,3330	0,1591	6,771	231,6	1,3575	0,1588
4	10,55	215,6	1,3147	0,1594	9,029	231,6	1,3392	0,1590
5	13,19	215,6	1,3005	0,1596	11,29	231,5	1,3249	0,1592
10	26,43	215,1	1,2560	0,1609	22,59	231,2	1,2807	0,1601
20	53,08	214,3	1,2110	0,1636	45,24	230,6	1,2360	0,1620
30	79,92	213,4	1,1842	0,1664	67,94	230,0	1,2095	0,1638
40	106,9	212,6	1,1648	0,1692	90,68	229,4	1,1905	0,1657
50	134,1	211,8	1,1496	0,1720	113,4	228,8	1,1756	0,1675
60	161,5	211,0	1,1369	0,1748	136,2	228,2	1,1633	0,1694
70	188,9	210,2	1,1260	0,1777	159,0	227,6	1,1528	0,1712
80	216,5	209,4	1,1164	0,1806	181,8	227,0	1,1436	0,1731
90	244,2	208,6	1,1079	0,1835	204,5	226,5	1,1354	0,1749
100	271,9	207,8	1,1001	0,1864	227,3	225,9	1,1279	0,1767
150	411,0	204,1	1,0692	0,2007	340,2	223,3	1,0987	0,1855
200	548,4	200,7	1,0460	0,2135	451,0	221,0	1,0772	0,1936
300	807,1	195,2	1,0121	0,2323	661,8	217,1	1,0457	0,2068
400	1032	191,6	0,9879	0,2414	852,6	214,3	1,0229	0,2154
500	1220	189,4	0,9696	0,2441	1021	212,6	1,0051	0,2202
T=600 °K								
1	2,633	215,9	1,4028	0,1586	2,257	213,8	1,4272	0,1585
2	5,268	215,8	1,3588	0,1588	4,513	231,7	1,3832	0,1587
3	7,906	215,7	1,3330	0,1591	6,771	231,6	1,3575	0,1588
4	10,55	215,6	1,3147	0,1594	9,029	231,6	1,3392	0,1590
5	13,19	215,6	1,3005	0,1596	11,29	231,5	1,3249	0,1592
10	26,43	215,1	1,2560	0,1609	22,59	231,2	1,2807	0,1601
20	53,08	214,3	1,2110	0,1636	45,24	230,6	1,2360	0,1620
30	79,92	213,4	1,1842	0,1664	67,94	230,0	1,2095	0,1638
40	106,9	212,6	1,1648	0,1692	90,68	229,4	1,1905	0,1657
50	134,1	211,8	1,1496	0,1720	113,4	228,8	1,1756	0,1675
60	161,5	211,0	1,1369	0,1748	136,2	228,2	1,1633	0,1694
70	188,9	210,2	1,1260	0,1777	159,0	227,6	1,1528	0,1712
80	216,5	209,4	1,1164	0,1806	181,8	227,0	1,1436	0,1731
90	244,2	208,6	1,1079	0,1835	204,5	226,5	1,1354	0,1749
100	271,9	207,8	1,1001	0,1864	227,3	225,9	1,1279	0,1767
150	411,0	204,1	1,0692	0,2007	340,2	223,3	1,0987	0,1855
200	548,4	200,7	1,0460	0,2135	451,0	221,0	1,0772	0,1936
300	807,1	195,2	1,0121	0,2323	661,8	217,1	1,0457	0,2068
400	1032	191,6	0,9879	0,2414	852,6	214,3	1,0229	0,2154
500	1220	189,4	0,9696	0,2441	1021	212,6	1,0051	0,2202
T=700 °K								
1	2,633	215,9	1,4028	0,1586	2,257	213,8	1,4272	0,1585
2	5,268	215,8	1,3588	0,1588	4,513	231,7	1,3832	0,1587
3	7,906	215,7	1,3330	0,1591	6,771	231,6	1,3575	0,1588
4	10,55	215,6	1,3147	0,1594	9,029	231,6	1,3392	0,1590
5	13,19	215,6	1,3005	0,1596	11,29	231,5	1,3249	0,1592
10	26,43	215,1	1,2560	0,1609	22,59	231,2	1,2807	0,1601
20	53,08	214,3	1,2110	0,1636	45,24	230,6	1,2360	0,1620
30	79,92	213,4	1,1842	0,1664	67,94	230,0	1,2095	0,1638
40	106,9	212,6	1,1648	0,1692	90,68	229,4	1,1905	0,1657
50	134,1	211,8	1,1496	0,1720	113,4	228,8	1,1756	0,1675
60	161,5	211,0	1,1369	0,1748	136,2	228,2	1,1633	0,1694
70	188,9	210,2	1,1260	0,1777	159,0	227,6	1,1528	0,1712
80	216,5	209,4	1,1164	0,1806	181,8	227,0	1,1436	0,1731
90	244,2	208,6	1,1079	0,1835	204,5	226,5	1,1354	0,1749
100	271,9	207,8	1,1001	0,1864	227,3	225,9	1,1279	0,1767
150	411,0	204,1	1,0692	0,2007	340,2	223,3	1,0987	0,1855
200	548,4	200,7	1,0460	0,2135	451,0	221,0	1,0772	0,1936
300	807,1	195,2	1,0121	0,2323	661,8	217,1	1,0457	0,2068
400	1032	191,6	0,9879	0,2414	852,6	214,3	1,0229	0,2154
500	1220	189,4	0,9696	0,2441	1021	212,6	1,0051	0,2202

つづき

p, bar	ρ	l	s	c_p	ρ	l	s	c_p
600	1378	188,4	0,9551	0,2438	1168	211,7	0,9909	0,2226
800	1623	188,7	0,9333	0,2402	1410	211,8	0,9689	0,2234
1000	1808	190,6	0,9171	0,2363	1600	213,5	0,9524	0,2223
$T=800^\circ\text{K}$					$T=900^\circ\text{K}$			
1	1,974	247,6	1,4484	0,1584	1,754	263,4	1,4672	0,1584
2	3,948	247,6	1,4044	0,1586	3,509	263,4	1,4232	0,1585
3	5,922	247,5	1,3787	0,1587	5,262	263,4	1,3975	0,1586
4	7,896	247,4	1,3604	0,1588	7,016	263,3	1,3792	0,1587
5	9,870	247,4	1,3462	0,1590	8,769	263,3	1,3651	0,1588
10	19,74	247,2	1,3020	0,1596	17,53	263,1	1,3209	0,1593
20	39,47	246,7	1,2576	0,1610	35,02	262,8	1,2766	0,1604
30	59,19	246,2	1,2313	0,1623	52,47	262,4	1,2505	0,1614
40	78,88	245,8	1,2125	0,1636	69,88	262,1	1,2318	0,1624
50	98,55	245,4	1,1978	0,1650	87,24	261,8	1,2173	0,1633
60	118,2	244,9	1,1857	0,1663	104,5	261,5	1,2053	0,1643
70	137,8	244,5	1,1754	0,1676	121,8	261,2	1,1951	0,1653
80	157,3	244,1	1,1664	0,1689	139,0	260,8	1,1863	0,1662
90	176,8	243,7	1,1584	0,1701	156,1	260,6	1,1784	0,1672
100	196,2	243,3	1,1512	0,1714	173,2	260,3	1,1713	0,1681
150	292,4	241,4	1,1229	0,1775	257,4	258,9	1,1437	0,1726
200	386,4	239,7	1,1023	0,1831	339,5	257,7	1,1236	0,1768
300	565,8	237,0	1,0724	0,1926	496,7	255,8	1,0946	0,1840
400	731,1	235,0	1,0505	0,1997	643,0	254,4	1,0736	0,1896
500	881,1	233,8	1,0335	0,2044	777,7	253,6	1,0570	0,1938
600	1016	233,2	1,0195	0,2074	900,9	253,4	1,0435	0,1968
800	1245	233,5	0,9978	0,2103	1116	254,0	1,0221	0,2003
1000	1432	235,2	0,9813	0,2108	1296	255,8	1,0057	0,2018
$T=1000^\circ\text{K}$					$T=1100^\circ\text{K}$			
1	1,579	279,3	1,4840	0,1584	1,435	295,1	1,4993	0,1584
2	3,157	279,2	1,4401	0,1585	2,870	295,1	1,4552	0,1584
3	4,735	279,2	1,4143	0,1586	4,305	295,1	1,4295	0,1585
4	6,313	279,2	1,3961	0,1586	5,738	295,1	1,4113	0,1586
5	7,890	279,2	1,3819	0,1587	7,172	285,0	1,3971	0,1586
10	15,77	279,0	1,3379	0,1591	14,33	294,9	1,3531	0,1590
20	31,49	278,8	1,2936	0,1599	28,61	294,8	1,3089	0,1596
30	47,16	278,5	1,2676	0,1607	42,83	294,6	1,2830	0,1602
40	62,77	278,3	1,2490	0,1615	57,00	294,4	1,2645	0,1608
50	78,32	278,0	1,2346	0,1622	71,10	294,2	1,2501	0,1615
60	93,82	277,8	1,2227	0,1630	85,15	294,1	1,2383	0,1621
70	109,2	277,6	1,2126	0,1638	99,14	293,9	1,2282	0,1627
80	124,6	277,4	1,2038	0,1645	113,1	293,8	1,2195	0,1633
90	139,9	277,2	1,1960	0,1652	126,9	293,6	1,2118	0,1638
100	155,2	277,0	1,1890	0,1660	140,7	293,5	1,2049	0,1644
150	230,4	276,0	1,1618	0,1694	208,8	292,8	1,1779	0,1672
200	303,6	275,2	1,1422	0,1726	275,1	292,3	1,1586	0,1698
300	444,0	273,9	1,1138	0,1783	402,3	291,5	1,1307	0,1743
400	575,6	273,0	1,0933	0,1829	522,1	291,1	1,1106	0,1781
500	698,0	272,6	1,0772	0,1865	634,3	291,0	1,0948	0,1812
600	811,2	272,6	1,0639	0,1892	739,0	291,3	1,0818	0,1836
800	1012	273,6	1,0429	0,1928	927,5	292,6	1,0611	0,1870
1000	1185	275,6	1,0267	0,1947	1091	294,8	1,0451	0,1891
$T=1200^\circ\text{K}$					$T=1300^\circ\text{K}$			
1	1,316	311,0	1,5129	0,1584	1,214	326,8	1,5255	0,1584
2	2,631	311,0	1,4690	0,1584	2,428	326,8	1,4816	0,1584
3	3,946	311,0	1,4433	0,1585	3,642	326,8	1,4559	0,1584
4	5,260	311,0	1,4251	0,1585	4,855	326,8	1,4376	0,1585
5	6,573	311,0	1,4109	0,1586	6,068	326,8	1,4235	0,1585
10	13,13	310,8	1,3669	0,1588	12,12	326,7	1,3795	0,1588
20	26,21	310,7	1,3228	0,1594	24,19	326,6	1,3354	0,1592
30	39,24	310,6	1,2969	0,1599	36,21	326,6	1,3096	0,1596
40	52,21	310,5	1,2784	0,1604	48,18	326,5	1,2911	0,1600

表B-2 二元混合気の熱伝導率

熱伝導率 λ (10^{-4} W/m·deg) は $p=1$ atm での値を示す (気体濃度—vol%)

He—Xe [300]

x, C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	51	90,2	136	191	257	338	441	576	758	1020	1430
50	59,9	105	158	221	296	413	508	661	868	1163	1605
100	68,5	120	179	250	336	441	573	744	975	1303	1791
150	77,0	134	200	279	374	491	637	826	1078	1430	1919
200	85,5	148	221	308	412	540	700	905	1186	1558	2128
250	93,8	163	242	337	450	588	762	984	1279	1686	2291
300	102,0	176	262	364	486	634	820	1058	1372	1814	2454
350	110,2	190	283	392	522	682	860	1132	1465	1931	2605
400	119	204	302	419	557	729	937	1210	1558	2047	2756
450	127	216	321	445	592	772	996	1279	1651	2153	2896
500	135	230	341	471	627	816	1051	1349	1744	2279	3047

表B-4

 $p=1$ bar での気体キセノンの粘度 η ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$) [49]

$T, ^\circ\text{K}$	$\eta \cdot 10^7$	$T, ^\circ\text{K}$	$\eta \cdot 10^7$	$T, ^\circ\text{K}$	$\eta \cdot 10^7$	$T, ^\circ\text{K}$	$\eta \cdot 10^7$	$T, ^\circ\text{K}$	$\eta \cdot 10^7$
293,2	228	500	375	800	547	1100	693	1400	824
300	233	600	436	900	598	1200	738	1500	865
400	308	700	493	1000	646	1300	782	1600	905

種々の温度と圧力下での気体キセノンの粘度 $\eta \cdot 10^7$ ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$) [367]

p, bar	100	200	300	400	500	600	700	800
$t, ^\circ\text{C}$								
50	543	978	1276	1472	1680	1868	2048	2192
100	388	680	941	1136	1315	1488	1643	1800
150	388	544	739	923	1087	1235	1367	1479
200	409	528	668	792	925	1052	1168	1272

表B-3

ヘリウム (He) の粘性係数

Viscosity of Helium-4 (He)

 $\eta \text{ } \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$

圧力 P MPa	温 度 T K												
	273.15	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	550
0.01	18.69	19.93	20.83	21.71	22.58	23.44	24.29	25.12	25.95	26.76	27.57	28.36	30.31
0.1	18.69	19.93	20.83	21.71	22.58	23.44	24.29	25.12	25.95	26.76	27.57	28.36	30.31
0.5	18.69	19.93	20.83	21.71	22.58	23.44	24.29	25.12	25.95	26.76	27.57	28.36	30.31
1	18.69	19.93	20.83	21.71	22.59	23.44	24.29	25.12	25.95	26.76	27.57	28.36	30.31
2	18.69	19.93	20.83	21.72	22.59	23.45	24.29	25.13	25.95	26.76	27.57	28.36	30.31
3	18.70	19.93	20.83	21.72	22.59	23.45	24.29	25.13	25.95	26.76	27.57	28.36	30.31
4	18.70	19.94	20.84	21.72	22.59	23.45	24.30	25.13	25.95	26.77	27.57	28.36	30.31
5	18.71	19.94	20.84	21.73	22.60	23.45	24.30	25.13	25.96	26.77	27.57	28.37	30.32
10	18.76	19.99	20.88	21.76	22.63	23.48	24.33	25.16	25.98	26.79	27.59	28.38	30.33
12.5	18.80	20.02	20.91	21.79	22.65	23.50	24.35	25.18	25.99	26.80	27.61	28.40	30.34
15	18.85	20.06	20.95	21.82	22.68	23.53	24.37	25.20	26.01	26.82	27.62	28.41	30.35
17.5	18.90	20.11	20.99	21.86	22.71	23.56	24.40	25.22	26.04	26.84	27.64	28.43	30.37
20	18.96	20.16	21.03	21.90	22.75	23.59	24.43	25.25	26.06	26.87	27.66	28.45	30.39
25	19.10	20.27	21.14	21.99	22.83	23.67	24.50	25.31	26.12	26.92	27.71	28.50	30.43
30	19.25	20.40	21.25	22.10	22.93	23.76	24.58	25.39	26.19	26.99	27.77	28.55	30.47
35	19.42	20.55	21.39	22.22	23.04	23.86	24.67	25.47	26.27	27.06	27.84	28.62	30.53
40	19.61	20.71	21.53	22.35	23.16	23.97	24.77	25.57	26.36	27.14	27.92	28.69	30.59
45	19.81	20.89	21.69	22.50	23.30	24.09	24.89	25.67	26.45	27.23	28.00	28.77	30.65
50	20.02	21.07	21.86	22.65	23.44	24.22	25.01	25.78	26.56	27.33	28.09	28.85	30.73

圧力 P MPa	温度 T K												
	600	650	700	750	800	850	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
0.01	32.21	34.07	35.89	37.68	39.43	41.15	42.85	46.16	49.38	52.52	55.59	58.60	61.55
0.1	32.21	34.07	35.89	37.68	39.43	41.15	42.85						
0.5	32.21	34.07	35.89	37.68	39.43	41.15	42.85						
1	32.21	34.07	35.89	37.68	39.43	41.15	42.85						
2	32.21	34.07	35.89	37.68	39.43	41.15	42.85						
3	32.21	34.07	35.89	37.68	39.43	41.15	42.85						
4	32.22	34.07	35.89	37.68	39.43	41.15	42.85						
5	32.22	34.08	35.90	37.68	39.43	41.15	42.85						
10	32.23	34.09	35.90	37.69	39.44	41.16	42.85						
12.5	32.24	34.09	35.91	37.69	39.44	41.16	42.86						
15	32.25	34.10	35.92	37.70	39.45	41.17	42.86						
17.5	32.26	34.11	35.93	37.71	39.46	41.18	42.87						
20	32.28	34.13	35.94	37.72	39.47	41.18	42.87						
25	32.31	34.16	35.97	37.74	39.49	41.20	42.89						
30	32.35	34.19	36.00	37.77	39.51	41.22	42.91						
35	32.40	34.23	36.03	37.80	39.54	41.25	42.93						
40	32.45	34.28	36.07	37.83	39.57	41.28	42.96						
45	32.51	34.33	36.11	37.87	39.60	41.31	42.98						
50	32.57	34.38	36.16	37.91	39.64	41.34	43.02						

宇宙・地上・深海

高速炉ガスタービン発電システム

定常解析コード“STEDFAST”

プログラム設計書

1. 概 要

本資料は、深海、宇宙及び地上コジェネレーション用の動力源として用いるガスタービン発電方式高速炉システムにおいて、システムパラメータの最適値を得るための定常解析コードの設計書である。主として、

- ・コード全体の処理フロー
- ・各モジュールの機能、入出力変数、処理内容

である。

2. コード全体の処理

本コード全体のフローを図1に示す。特徴としては、以下の点があげられる。

- ①入出力データは各々ファイルから読み込み、書き出しを行う。
- ②特性計算は機器ごとにサブルーチン化している。
- ③メインルーチンでは、それらのサブルーチン及びデータ入出力をコントロールしている。

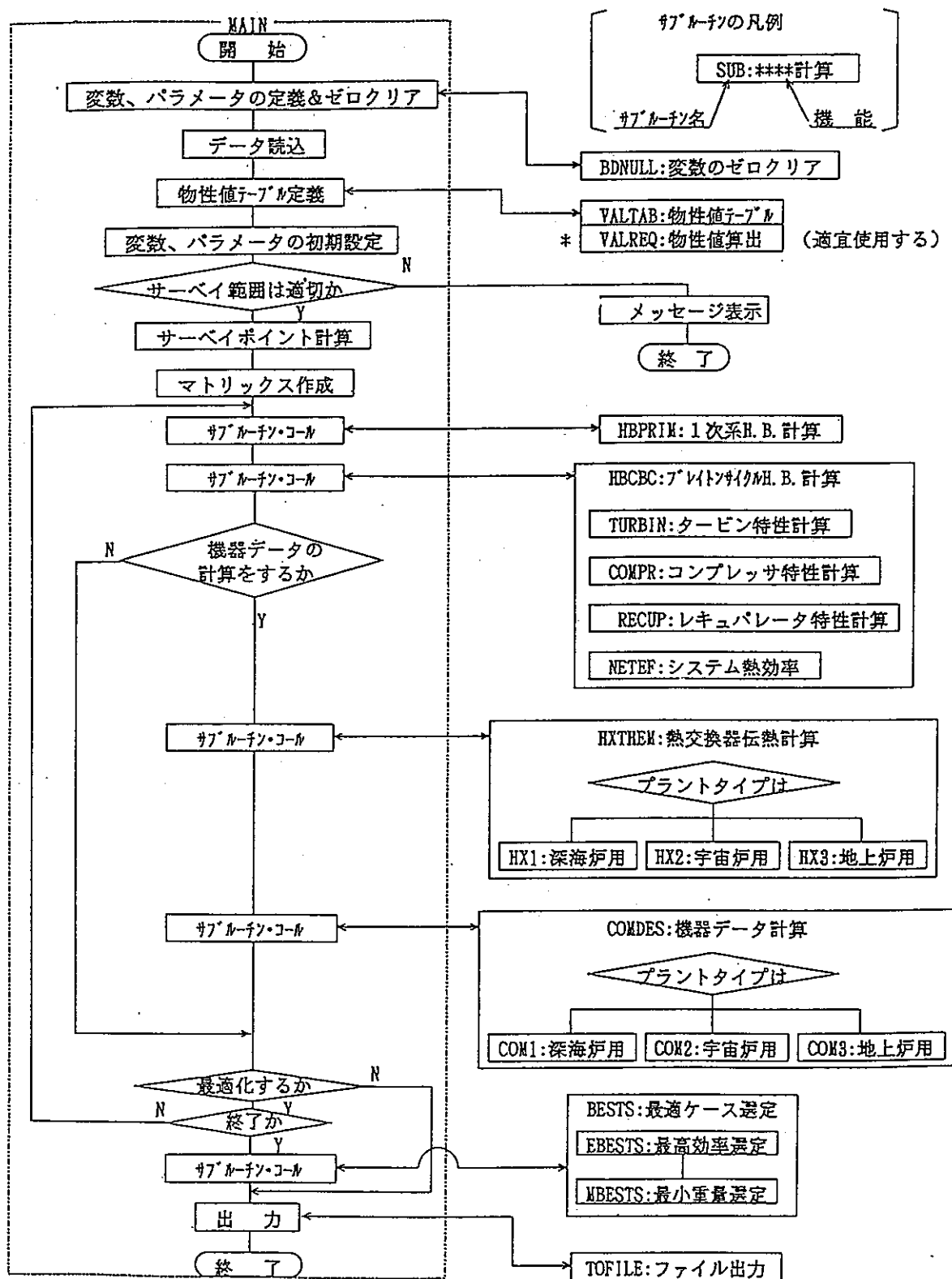


図1. プログラム・フローチャート

3. 各モジュールにおける機能、及び入出力と処理の関係

以下に各モジュールの機能、及び入出力と処理の関係についてまとめた。各モジュールの機能説明では、

3-N-N. 処理又は機器名称 : サブルーチン名

- (1) 機能
- (2) 入力変数
- (3) 処理内容、処理式
- (4) 出力変数

として記述している。尚、変数の配列はメインルーチンで代表し表記している。

3-1. メインルーチン

(1) 機能

変数・パラメータの定義と初期設定、データの入出力、及びコードをコントロールする。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
タイトル	TITLE	-	TITLE	CHARACTER*72	
計算のタイプ	CLCTYP	-	ICAL	INTEGER	
最適化計算の要否	BEST	-	CBEST	CHARACTER*3	
サベイパラメータ指定	PAR	-	IPAR	INTEGER	
パラメータサベイ点数	NPAR	-	NPAR	INTEGER	
パラメータサベイ範囲	PARMAX	-	PARMAX	REAL	
	PARMIN	-	PARMIN	REAL	
プラントタイプ	PLNT	-	IPLANT	INTEGER	
1次冷却材の種類	CLT1	-	ICLT1	INTEGER	
機器重量評価式	EEXP	-	IEEXP	INTEGER	米式か仏式か
原子炉熱出力*	Q _{RV}	[MWt]	Q _{RV} (NPAR)	REAL	*何れか一方が
電気出力*	Q _{EL}	[MWe]	Q _{EL} (NPAR)	REAL	与えられる
原子炉入口温度	T _{RV1}	[°C]	TRV1(NPAR)	REAL	
原子炉出口温度	T _{RV2}	[°C]	TRV2(NPAR)	REAL	
1次系熱伝達効率	η_1	-	EFF1(NPAR)	REAL	
1次系ループ数	N _{LOOP1}	[ループ]	NLOOP1(NPAR)	INTEGER	
2次系ループ数	N _{LOOP2}	[ループ]	NLOOP2(NPAR)	INTEGER	
He-Xeモル分率	R _{XE}	-	RXE(NPAR)	REAL	
IHX出口温度	T _{IHX2} (=T _{T1})	[°C]	TIHX2(NPAR)	REAL	同一
タービン入口温度	T _{T1} (=T _{IHX2})	[°C]	TTRB1(NPAR)	REAL	同一
コンプレッサ入口温度	T _{C1}	[°C]	TCMP1(NPAR)	REAL	
タービン入口圧力	P _{T1}	[kg/cm ² a]	PTRB1(NPAR)	REAL	
コンプレッサ圧縮比*	π_c	-	PAICMP(NPAR)	REAL	*何れか一方が
タービン膨張比*	π_T	-	PAITRB(NPAR)	REAL	与えられる
コンプレッサ段数	N _{STP}	[段]	NSTP(NPAR)	INTEGER	

発電機効率	η_G	-	EFFGEN(NPAR)	REAL	
タービン断熱効率	η_T	-	EFFTRB(NPAR)	REAL	
コジェネレーション断熱効率	η_C	-	EFFCMP(NPAR)	REAL	
レコパレーション温度効率	η_X	-	EFFREC(NPAR)	REAL	
システム圧力損失率 1	χ_{P1}	-	XP1(NPAR)	REAL	図 2 参照
システム圧力損失率 2	χ_{P2}	-	XP2(NPAR)	REAL	図 2 参照
システム圧力損失率 3	χ_{P3}	-	XP3(NPAR)	REAL	図 2 参照
レコパレーション圧力損失率	χ_{PI}	-	XP1(NPAR)	REAL	
比熱比	κ	-	XKAPPA	REAL	1.66
・ 深海炉用のみ					
機器重量評価式	EEXP	-	IEEXP	INTEGER	米式か仏式か
深海炉材料	MTRAL	-	IMATER	INTEGER	
設計深度	L	[m]	DEEP	INTEGER	
遮蔽体比重量	γ_{sh}	[kg/m ³]	GAMSHD	REAL	
海水温度	t	[°C]	TWATR	REAL	
ガス流路高さ	H	[m]	HGAS	REAL	
ガス平均流速	v_{av}	[m/s]	VAVGAS	REAL	
耐圧殻厚さ	t_{sh}	[mm]	THSHEL	REAL	伝熱計算用
耐圧殻熱伝導率	λ_{sh}	[kcal/mh°C]	RHSHEL	REAL	
海水側熱伝導率	α_o	[kcal/m ² h°C]	RHWATR	REAL	
フィンによる 熱伝達率向上係数	K_{fin}	-	XKFIN	REAL	
・ 宇宙炉用のみ					
機器重量評価式	EEXP	-	IEEXP	INTEGER	米式か仏式か
ラジエタ表面の 輻射率	ε	-	RRAD	REAL	0.9
ステファン・ボルツマン定数	σ	[W/m ² K ⁴]	STFANB	REAL	5.67E-8
ラジエタ 1 次 / 2 次側 平均温度差	ΔT	[°C]	TMARGN	REAL	
・ 地上炉用のみ					
水側入口温度	t_i	[°C]	TWATRI(NPAR)	REAL	
水側流量	w	[kg/h]	WWATR(NPAR)	REAL	
伝熱管内径	d_i	[m]	DIN	REAL	
伝熱管外径	d_o	[m]	DOUT	REAL	
伝熱管ピッチ	S_T, S_L	[m]	PST, PSL	REAL	
バフフル板間隔	L_B	[m]	BAFLEN	REAL	
シェル内径	d_s	[m]	DSHELL	REAL	
伝熱管本数	N	[本]	NPIPE	INTEGER	
水側汚れ係数	γ_{fi}	[kcal/mh°C]	CWATER	REAL	
伝熱管熱伝導率	λ_T	[kcal/mh°C]	RHPIPE	REAL	
伝熱面積補正係数	K_A	-	CADJ	REAL	

NPAR個の配列

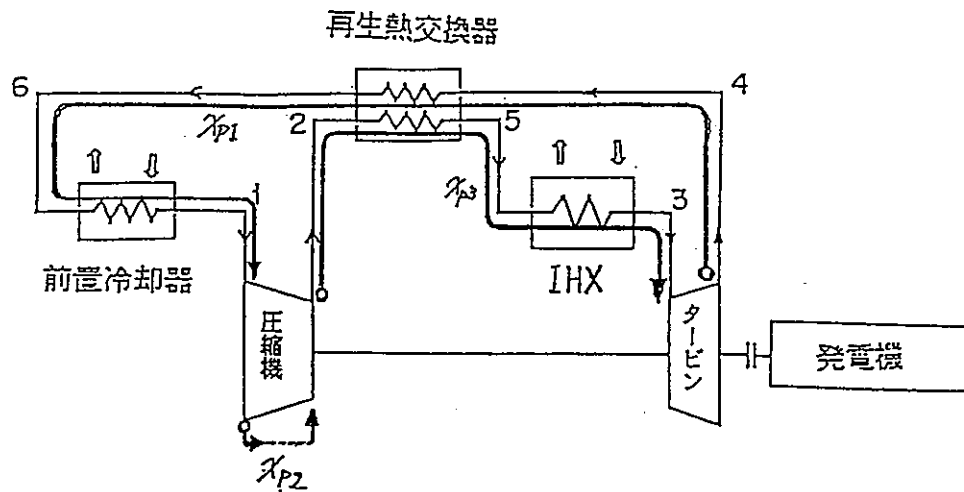


図2. システム各部の圧損率

(3) 処理内容

- ・変数、パラメータの定義と初期設定
- ・入力データをファイルから読み込む
- ・サブルーチン・コール等コードをコントロールする
- ・出力データをファイルに出力

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
タイトル	T I T L E	-	TITLE	CHARACTER*72	
原子炉熱出力	\dot{Q}_{RV}	[MWt]	QRV(NPAR)	REAL	COMMON変数
原子炉入口温度	T_{RV1}	[°C]	TRV1(NPAR)	REAL	COMMON変数
原子炉出口温度	T_{RV2}	[°C]	TRV2(NPAR)	REAL	COMMON変数
1次冷却材流量	W_1	[kg/h]	W1(NPAR)	REAL	COMMON変数
1次系熱伝達効率	η_1	-	EFF1(NPAR)	REAL	COMMON変数
He-Xeモル分率	R X E	-	RXE(NPAR)	REAL	COMMON変数
作動流体流量	W_2	[kg/h]	W2(NPAR)	REAL	COMMON変数
IHX熱出力	\dot{Q}_{IHx}	[MWt]	QIHx(NPAR)	REAL	COMMON変数
IHX入口温度	T_{IHx1}	[°C]	TIHx1(NPAR)	REAL	COMMON変数
IHX出口温度	T_{IHx2}	[°C]	TIHx2(NPAR)	REAL	COMMON変数
タービン入口温度	T_{T1}	[°C]	TTRB1(NPAR)	REAL	COMMON変数
タービン出口温度	T_{T2}	[°C]	TTRB2(NPAR)	REAL	COMMON変数
タービン入口圧力	P_{T1}	[kg/cm ² a]	PTRB1(NPAR)	REAL	COMMON変数
タービン出口圧力	P_{T2}	[kg/cm ² a]	PTRB2(NPAR)	REAL	COMMON変数
タービン断熱効率	η_T	-	EFFTRB(NPAR)	REAL	COMMON変数
コソブレッサ入口温度	T_{C1}	[°C]	TCMP1(NPAR)	REAL	COMMON変数

コソフ・レ・サ 出口温度	T _{c2}	[°C]	TCMP2(NPAR)	REAL	COMMON変数
コソフ・レ・サ 入口圧力	P _{c1}	[kg/cm ² a]	PCMP1(NPAR)	REAL	COMMON変数
コソフ・レ・サ 出口圧力	P _{c2}	[kg/cm ² a]	PCMP2(NPAR)	REAL	COMMON変数
コソフ・レ・サ断熱効率	η_c	-	EFFCMP(NPAR)	REAL	COMMON変数
レキユハ・レ・サ熱出力	Q _{REC}	[MWt]	QREC(NPAR)	REAL	COMMON変数
レキユハ・レ・サ 低圧側入口温度	t ₁	[°C]	TRECL1(NPAR)	REAL	COMMON変数
レキユハ・レ・サ 低圧側出口温度	t ₂	[°C]	TRECL2(NPAR)	REAL	COMMON変数
レキユハ・レ・サ 高圧側入口温度	T ₁	[°C]	TRECH1(NPAR)	REAL	COMMON変数
レキユハ・レ・サ 高圧側出口温度	T ₂	[°C]	TRECH2(NPAR)	REAL	COMMON変数
前置冷却器熱出力	Q _{PRC}	[MWt]	QPRE(NPAR)	REAL	COMMON変数
前置冷却器 入口温度	T _{PRC1}	[°C]	TPRE1(NPAR)	REAL	COMMON変数
前置冷却器 出口温度	T _{PRC2}	[°C]	TPRE2(NPAR)	REAL	COMMON変数
前置冷却器 伝熱面積	A	[m ²]	APRE(NPAR)	REAL	COMMON変数
サイクル熱効率	η_{CYC}	-	EFFCYC(NPAR)	REAL	COMMON変数
システム熱効率	η_{net}	[%]	EFFSYS(NPAR)	REAL	COMMON変数
機器重量データ					
原子炉	M _{RV}	[kg]	EMRV(NPAR)	REAL	COMMON変数
遮蔽体	M _{SHLD}	[kg]	EMSHIL(NPAR)	REAL	COMMON変数
1次系	M ₁	[kg]	EM1JI(NPAR)	REAL	COMMON変数
発電系	M ₂	[kg]	EM2JI(NPAR)	REAL	COMMON変数
ラジエタ	M _{RAD}	[kg]	EMRAD(NPAR)	REAL	COMMON変数
熱輸送系	M _{THERM}	[kg]	EMTHE(NPAR)	REAL	COMMON変数
その他	M _{OTH}	[kg]	EMOTH(NPAR)	REAL	COMMON変数
合計	M _{TOT}	[kg]	EMTOT(NPAR)	REAL	COMMON変数
機器設計データ	以下、深海炉のみ出力				
TAC径	TACD	[mm]	TACD(NPAR)	REAL	COMMON変数
TAC長さ	TACL	[mm]	TACL(NPAR)	REAL	COMMON変数
耐圧殻寸法	a	[mm]	DSHEL(NPAR)	REAL	COMMON変数
耐圧殻板厚	t	[mm]	TESH(NPAR)	REAL	COMMON変数
必要伝熱面積	A _{sh}	[m ²]	ASHELL(NPAR)	REAL	COMMON変数
設計伝熱面積	A _{SHELL}	[m ²]	ASHELL(NPAR)	REAL	COMMON変数

NPAR個の配列

3-2. 1次系ヒートバランス計算 : HBPRIM

(1) 機能

原子炉を含めた1次系について、原子炉熱出力と原子炉出入口温度から1次冷却材流量を求める。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
1次側ループ数	N _{LOOP1}	[本]	NLOOP1	INTEREG	
1次冷却材種類	CLT1	-	ICLT1	INTEGER	C _{P1} が決まる
原子炉熱出力	Q _{RV}	[MWt]	QRV	REAL	
原子炉入口温度	T _{RV1}	[℃]	TRV1	REAL	
原子炉出口温度	T _{RV2}	[℃]	TRV2	REAL	

(3) 処理式

$$W_1[\text{kg/h}] = \{Q_{RV} [\text{MWt}] \times 10^6 / 1.163\} / \{(T_{RV2} - T_{RV1}) [^\circ\text{C}] \cdot C_{P1} [\text{cal/g}^\circ\text{C}] \cdot N_{LOOP1}\}$$

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
1次冷却材流量	W ₁	[kg/h]	W1	REAL	

3-3. 密閉ブレイトンサイクル・ヒートバランス計算 : H B C B C

それぞれの機器ごとのサブルーチンを順次コールし、特性計算を行う。

3-3-1. タービン : TURBIN

(1) 機能

与えられた入力変数からタービンの特性計算を行い、

- ・タービンエネルギー
- ・タービン出口温度
- ・タービン出口圧力

を求める。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
タービン断熱効率	η_T	-	EFFTRB	REAL	
比熱	C_{P2}	[J/kg $^{\circ}$ K]	CP2	REAL	RXEで異なる
タービン入口温度	T_{T1}	[$^{\circ}$ C]	TTRB1	REAL	
タービン膨張比	π_T	-	PITRB	REAL	
比熱比	κ	-	XKAPPA	REAL	1.66
タービン入口圧力	P_{T1}	[kg/cm 2 a]	PTRB1	REAL	

(3) 処理式

$$\Delta h_T [\text{J/kg}] = \eta_T \cdot C_{P2} [\text{J/kg}^{\circ}\text{K}] \cdot (T_{T1} [^{\circ}\text{C}] + 273.15) \cdot \{1 - \pi_T^{-(\kappa-1)/\kappa}\}$$

$$T_{T2} [^{\circ}\text{C}] = T_{T1} [^{\circ}\text{C}] - (\Delta h_T [\text{J/kg}] / C_{P2} [\text{J/kg}^{\circ}\text{K}])$$

$$P_{T2} [\text{kg/cm}^2\text{a}] = P_{T1} [\text{kg/cm}^2\text{a}] / \pi_T$$

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
タービンエネルギー	Δh_T	[J/kg]	ETRB	REAL	チェック用
タービン出口温度	T_{T2}	[$^{\circ}$ C]	TTRB2	REAL	
タービン出口圧力	P_{T2}	[kg/cm 2 a]	PTRB2	REAL	

3-3-2. コンプレッサ : COMP R

(1) 機能

与えられた入力変数からコンプレッサの特性計算を行い、

- ・コンプレッサエネルギー
- ・コンプレッサ出口温度
- ・コンプレッサ入口圧力
- ・コンプレッサ出口圧力

を求める。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
コンプレッサ断熱効率	η_c	-	EFFCMP	REAL	
比熱	C_{P2}	[J/kg·K]	CP2	REAL	RXEで異なる
コンプレッサ入口温度	T_{c1}	[°C]	TCMP1	REAL	
タービン出口圧力	P_{T2}	[kg/cm ² a]	PTRB2	REAL	TURBINより
コンプレッサ圧縮比	π_c	-	PICMP	REAL	
比熱比	κ	-	XKAPPA	REAL	1.66
システム圧損率	χ_{P1}, χ_{P2}	-	XP1	REAL	

(3) 処理式

$$P_{c1}[\text{kg/cm}^2\text{a}] = (1 - \chi_{P1}) \cdot P_{T2}[\text{kg/cm}^2\text{a}]$$

(a) $N_{STP} = 1$ の場合

$$P_{c2}[\text{kg/cm}^2\text{a}] = P_{c1}[\text{kg/cm}^2\text{a}] \cdot \pi_c$$

$$\Delta h_c [\text{J/kg}] = C_{P2}[\text{J/kg·K}] \cdot (T_{c1}[\text{°C}] + 273.15) \cdot \{ \pi_c^{(\kappa-1)/\kappa} - 1 \} / \eta_c$$

$$T_{c2}[\text{°C}] = T_{c1}[\text{°C}] + (\Delta h_c [\text{J/kg}] / C_{P2}[\text{J/kg·K}] - 273.15)$$

(b) $N_{STP} \geq 2$ の場合 $N_{STP}-1$

$$P_{c2}'[\text{kg/cm}^2\text{a}] = \prod_{j=1}^{N_{STP}} ((1 - \chi_{P2}') \cdot P_{c1}'[\text{kg/cm}^2\text{a}] \cdot \pi_c')$$

(但し、 P_{c1}' は $j-1$ 段の P_{c2} とする。)

$$P_{c2}[\text{kg/cm}^2\text{a}] = P_{c2}'[\text{kg/cm}^2\text{a}] \cdot \pi_c'$$

$$\Delta h_c [\text{J/kg}] = \sum_{j=1}^{N_{STP}} (C_{P2}[\text{J/kg·K}] \cdot (T_{c1}[\text{°C}] + 273.15) \cdot \{ \pi_c'^{(\kappa-1)/\kappa} - 1 \} / \eta_c)$$

$$T_{c2}[\text{°C}] = T_{c1}[\text{°C}] + (\Delta h_c [\text{J/kg}] / C_{P2}[\text{J/kg·K}] - 273.15)$$

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
コンプレッサエネルギー	Δh_c	[J/kg]	ECMP	REAL	チェック用
コンプレッサ出口温度	T_{c2}	[°C]	TCMP2	REAL	
コンプレッサ出口圧力	P_{c2}	[kg/cm ² a]	PCMP2	REAL	
コンプレッサ入口圧力	P_{c1}	[kg/cm ² a]	PCMP1	REAL	

3-3-3. レキュパレータ : RECUP

(1) 機能

与えられた入力変数からレキュパレータの特性計算を行い、高温側、低温側それぞれについて出口温度、及び出口圧力を求める。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
レキュパレータ温度効率	η_X	-	EFFREC	REAL	
タービン出口温度	T_{T2}	[°C]	TTRB2	REAL	TURBINより
コンプレッサ出口温度	T_{C2}	[°C]	TCMP2	REAL	COMPRより
圧力損失率	χ_{P1}	-	XP1	REAL	
コンプレッサ入口圧力	P_{C1}	[kg/cm ² a]	PCMP1	REAL	COMPRより
コンプレッサ出口圧力	P_{C2}	[kg/cm ² a]	PCMP2	REAL	COMPRより

(3) 処理式

$$T_2 [^{\circ}\text{C}] = T_{T2} [^{\circ}\text{C}] - \eta_X (T_{T2} [^{\circ}\text{C}] - T_{C2} [^{\circ}\text{C}])$$

$$t_2 [^{\circ}\text{C}] = T_{C2} [^{\circ}\text{C}] + \eta_X (T_{T2} [^{\circ}\text{C}] - T_{C2} [^{\circ}\text{C}])$$

$$P_2 [\text{kg/cm}^2\text{a}] = P_{C1} [\text{kg/cm}^2\text{a}]$$

$$p_2 [\text{kg/cm}^2\text{a}] = P_{C2} [\text{kg/cm}^2\text{a}]$$

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
レキュパレータ高温側 出口温度	T_2	[°C]	TRECH2	REAL	
レキュパレータ低温側 出口温度	t_2	[°C]	TRECL2	REAL	
レキュパレータ高温側 出口圧力	P_2	[kg/cm ² a]	PRECH2	REAL	
レキュパレータ低温側 出口圧力	p_2	[kg/cm ² a]	PRECL2	REAL	

3-3-4. システム熱効率 : NETEF

(1) 機能

与えられた入力変数から、密閉ブレイトンサイクルの正味熱効率、及び作動流体流量、IHX熱出力を算出する。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
発電機効率	η_G	-	EFFGEN	REAL	
タービンエンタルピー	Δh_T	[J/kg]	ETRB	REAL	TURBINより
コンプレッサエンタルピー	Δh_c	[J/kg]	ECMP	REAL	COMPRより
1次側ループ数	NLOOP1	[本]	NLOOP1	INTEGER	
2次側ループ数	NLOOP2	[本]	NLOOP2	INTEGER	
比熱	Cp2	[J/kg·K]	CP	REAL	RXEで異なる
IHX入口温度	T _{IHX1}	[°C]	TIHX1	REAL	RECUPより(=t ₂)
IHX出口温度	T _{IHX2}	[°C]	TIHX2	REAL	
1次系熱伝達率	η_1	-	EFF1	REAL	
電気出力(*)	Q _{EL}	[MWe]	QEL	REAL	(*)何れか一方が
原子炉熱出力(*)	Q _{RV}	[MWt]	QRV	REAL	与えられる
レキダレータ高温側 出口温度	T ₂	[°C]	TRECH2	REAL	RECUPより
コンプレッサ入口温度	T _{c1}	[°C]	TCMP1	REAL	COMPRより
コンプレッサ出口温度	T _{c2}	[°C]	TCMP2	REAL	COMPRより
レキダレータ低温側 出口温度	t ₂	[°C]	TRECL2	REAL	RECUPより

(3) 処理式

(a) 発電端出力所与の場合

$$Q_{ELU}[\text{J/kg}] = \eta_G (\Delta h_T[\text{J/kg}] - \Delta h_c[\text{J/kg}])$$

$$Q_{EL}'[\text{J/s}] = Q_{EL}[\text{MWe}] \times 10^6$$

$$W_2[\text{kg/h}] = \{Q_{EL}'[\text{J/s}] / (Q_{ELU}[\text{J/kg}] \cdot N_{LOOP2})\} \times 3600$$

$$Q_{IHX}[\text{J/s}] = \{(N_{LOOP2} / N_{LOOP1}) \cdot W_2[\text{kg/h}] \cdot C_{p2}[\text{J/kg} \cdot \text{K}] \cdot (T_{IHX2} - T_{IHX1})[^\circ\text{C}]\} / 3600$$

$$Q_{IHX}[\text{MWt}] = Q_{IHX}[\text{J/s}] / 10^6$$

$$Q_{RV}[\text{MWt}] = (Q_{IHX}[\text{J/s}] \cdot N_{LOOP1} / \eta_1) / 10^6$$

$$\eta_{net}[\%] = (Q_{EL}'[\text{J/s}] / Q_{RV}[\text{MWt}] \times 10^6) \times 100$$

$$= (Q_{EL}[\text{MWe}] / Q_{RV}[\text{MWt}]) \times 100$$

$$\eta_{cyc} = (\Delta h_T[\text{J/kg}] - \Delta h_c[\text{J/kg}]) / \{C_{p2}[\text{J/kg} \cdot \text{K}] \cdot (T_{IHX2} - T_{IHX1})[^\circ\text{C}]\}$$

(b) 原子炉熱出力所与の場合

$$Q_{IHX}[\text{MWt}] = \eta_1 \cdot Q_{RV}[\text{MWt}] / N_{LOOP1}$$

$$Q_{ELU}[\text{J/kg}] = \eta_G (\Delta h_T[\text{J/kg}] - \Delta h_c[\text{J/kg}])$$

$$W_2[\text{kg/h}] = \{Q_{IHX}[\text{MWt}] \cdot N_{LOOP1} / C_{p2}[\text{J/kg} \cdot \text{K}] \cdot (T_{IHX2} - T_{IHX1})[^\circ\text{C}] \cdot N_{LOOP2}\} \times 3600$$

$$Q_{EL}[\text{MWe}] = (N_{LOOP2} \cdot W_2[\text{kg/h}] \cdot Q_{ELU}[\text{J/kg}]) / 3600 \times 10^6$$

$$\eta_{net}[\%] = (Q_{EL}[\text{MWe}] / Q_{RV}[\text{MWt}]) \times 100$$

$$\eta_{cyc} = (\Delta h_T[\text{J/kg}] - \Delta h_c[\text{J/kg}]) / \{C_{p2}[\text{J/kg} \cdot \text{K}] \cdot (T_{IHX2} - T_{IHX1})[^\circ\text{C}]\}$$

(C) 熱交換機容量

$$Q_{PRC}[\text{MWt}] = W_2[\text{kg/h}] \cdot C_{P2}[\text{J/kg}\cdot\text{K}] \cdot (T_{C1} - T_2)[^\circ\text{C}] / 3600 \times 10^6$$

$$Q_{REC}[\text{MWt}] = W_2[\text{kg/h}] \cdot C_{P2}[\text{J/kg}\cdot\text{K}] \cdot (T_2 - T_1)[^\circ\text{C}] / 3600 \times 10^6$$

$$= W_2[\text{kg/h}] \cdot C_{P2}[\text{J/kg}\cdot\text{K}] \cdot (t_2 - t_1)[^\circ\text{C}] / 3600 \times 10^6$$

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
IHX熱出力	Q_{IHx}	[MWt]	QIHx	REAL	
単位流量当たり 発電量	Q_{ELU}	[J/kg]	QELU	REAL	チェック用
作動流体流量	W_2	[kg/h]	W2	REAL	
原子炉熱出力(*)	Q_{RY}	[MWt]	QRY	REAL	(*)何れか一方を
電気出力(*)	Q_{EL}	[MWe]	QEL	REAL	出力する
システム熱効率	η_{net}	[%]	EFFSYS	REAL	
前置冷却器容量	Q_{PRC}	[MWt]	QPRC	REAL	
レクタプレート容量	Q_{REC}	[MWt]	QREC	REAL	

3-4. 熱交換器伝熱計算 : HXTHM

密閉ブレイトンサイクルの中の前置冷却器について、熱交換器の伝熱面積を算出する。前置冷却器は、以下のような3タイプについて考えるため、このルーチンは、入力変数"PLANT"により目的のルーチンに制御を移す。

3-4-1. 深海炉用 : HX1

(1) 機能

与えられた各値をもとに、深海炉用前置冷却器の熱交換器伝熱面積を求める。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
交換熱量	Q	[MW]	QXCHNG	REAL	Q _{PRC} の値
混合ガス入口温度	T ₁	[°C]	TGAS1	REAL	TRECH2の値
混合ガス出口温度	T ₂	[°C]	TGAS2	REAL	T _{C1} の値
混合ガス圧力	P	[kg/cm ² a]	PGAS	REAL	P _{C1} の値
混合ガス流量	W	[kg/h]	WGAS	REAL	W ₂ の値
海水温度	t	[°C]	TWATR	REAL	
ガス流路高さ	H	[m]	HGAS	REAL	
ガス平均流速	v _{av}	[m/s]	VAVGAS	REAL	
耐圧殻厚さ	t _{sh}	[m]	THSHEL	REAL	
耐圧殻熱伝導率	λ _{sh}	[kcal/mh°C]	RHSHEL	REAL	
海水側熱伝導率	α _o	[kcal/m ² h°C]	RHWATR	REAL	
モル分率	RXE	-	RXE	REAL	
フィンによる 熱伝達率向上係数	K _{fin}	-	XKFIN	REAL	

(3) 処理式

$$R_{mix}[\text{mkg/kg}\cdot\text{K}] = 211.9 \times 6 / \{211.9 \cdot RXE + 6.00(1 - RXE)\}$$

$$P[\text{kg/m}^2] = P[\text{kg/cm}^2\text{a}] \times 1002$$

$$\gamma[\text{kg/m}^3] = P[\text{kg/m}^2] / [R_{mix}[\text{mkg/kg}\cdot\text{K}] \cdot \{(T_1 + 273.15 + T_2 + 273.15) / 2\}] [\cdot\text{K}]$$

$$W_v[\text{m}^3/\text{h}] = W[\text{kg/h}] / \gamma[\text{kg/m}^3]$$

$$WID[\text{m}] = W_v[\text{m}^3/\text{h}] / (v_{av}[\text{m/s}] \cdot H[\text{m}])$$

$$Di[\text{m}] = 4 \cdot WID[\text{m}] \cdot H[\text{m}] / \{2 \cdot (WID[\text{m}] + H[\text{m}])\}$$

$$\nu[\text{m}^2/\text{s}] = 10^{-1} \cdot \eta[\text{Pa}\cdot\text{s}] / \gamma[\text{kg/m}^3]$$

$$Re = v_{av}[\text{m/s}] \cdot Di[\text{m}] / \nu[\text{m}^2/\text{s}]$$

$$Pr = C_{p2}[\text{J/kg}\cdot\text{K}] \cdot \eta[\text{Pa}\cdot\text{s}] / \lambda[\text{W/m}\cdot\text{K}]$$

$$Nu = 0.019 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.5}$$

$$\alpha_i'[\text{W/m}^2\cdot\text{K}] = Nu \cdot \lambda[\text{W/m}\cdot\text{K}] / Di[\text{m}]$$

$$\alpha_i''[\text{W/m}^2\cdot\text{K}] = K_{fin} \cdot \alpha_i'[\text{W/m}^2\cdot\text{K}]$$

$$\alpha_i[\text{kcal/m}^2\text{h}\cdot\text{°C}] = \alpha_i''[\text{W/m}^2\cdot\text{K}] / 1.163$$

$$1/K_o = 1/\alpha_i[\text{kcal/m}^2\text{h}\cdot\text{°C}] + t_{sh}[\text{m}] / \lambda_{sh}[\text{kcal/mh}\cdot\text{°C}] + 1/\alpha_o[\text{kcal/m}^2\text{h}\cdot\text{°C}]$$

$$\Delta t_{1s}[\text{°C}] = \{(T_1 - t) - (T_2 - t)\} / \ln \{(T_1 - t) / (T_2 - t)\}$$

$$Q'[\text{kcal/h}] = Q[\text{MW}] \cdot 10^6 / 1.163$$

$$A_{sh}'[\text{m}^2] = Q'[\text{kcal/h}] / \Delta t_{1a}[\text{°C}] \cdot K_o[\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}]$$

$$A_{sh}[\text{m}^2] = A_{sh}'[\text{m}^2] \times 1.2$$

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
混合ガス密度	γ	[kg/m ³]	DGAS	REAL	チェック用
体積流量	W _v	[m ³ /h]	WVOL	REAL	チェック用
流路幅	W I D	[m]	WIDE	REAL	チェック用
流路等価直径	D _i	[m]	DIAMET	REAL	チェック用
レイノルズ数	R e	-	REINOL	REAL	チェック用
ヌルゼト数	N u	-	XNLSET	REAL	チェック用
ガス側熱伝達率	α_i	[kcal/m ² h [°] C]	RHGAS	REAL	チェック用
熱貫流率	K o	[kcal/m ² h [°] C]	RHPASS	REAL	チェック用
耐圧殻板厚	t _{sh}	[m]	THSHEL	REAL	
平均温度差	Δt_{1a}	[°C]	TDELT	REAL	チェック用
必要伝熱面積	A _{sh}	[m ²]	ASHELL	REAL	

3-4-2. 宇宙炉用 : HX2

(1) 機能

与えられた各値をもとに、宇宙炉用前置冷却器の熱交換器伝熱面積を求める。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
交換熱量	Q	[kW]	QXCHNG	REAL	Q _{PRC} の値
ラジエタ入口 混合ガス温度	T ₁	[℃]	TGAS1	REAL	TRECH2の値
ラジエタ出口 混合ガス温度	T ₂	[℃]	TGAS2	REAL	T _{ci} の値
ラジエタ表面の 輻射率	ε	-	RRAD	REAL	0.9
ステファン・ボルツマン定数	σ	[W/m ² K ⁴]	STFANB	REAL	5.67E-8
ラジエタ1次/2次 側平均温度差	ΔT	[℃]	TMARGN	REAL	

(3) 処理式

$$T[℃] = (T_1[℃] + T_2[℃]) / 2 - \Delta T[℃]$$

$$K1 = \alpha_s F_s G_s + \alpha_r F_r A_p G_s + \alpha_e F_e E_e$$

$$= 0.21 \times 1.0 \times 1371 + 0.21 \times 0.015 \times 0.30 \times 1371 + 0.30 \times 0.30 \times 243$$

$$= 311.08 [W/m^2]$$

$$A[m^2] = Q[kW] \times 10^3 / (\varepsilon \cdot \sigma [W/m^2 K^4] \cdot (T[℃] + 273.15)^4 - K1 [W/m^2]) \times 1.2$$

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
ラジエタ運転温度	T	[℃]	TDRIVE	REAL	チェック用
ラジエタ面積	A	[m ²]	ARAGET	REAL	

3-4-3. 地上炉用 : HX3

(1) 機能

与えられた各値をもとに、地上炉用前置冷却器の熱交換器伝熱面積を求める。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
交換熱量	Q	[MW]	QXCHNG	REAL	Q _{PRC} の値
混合ガス入口温度	T ₁	[°C]	TGAS1	REAL	TRECH2の値
混合ガス出口温度	T ₂	[°C]	TGAS2	REAL	T _{C1} の値
混合ガス圧力	P	[kg/cm ² a]	PGAS	REAL	P _{C1} の値
混合ガス流量	W	[kg/h]	WGAS	REAL	W ₂ の値
水側入口温度	t ₁	[°C]	TWATR1	REAL	
水側流量	w	[kg/h]	WWATER	REAL	
伝熱管内径	d _i	[m]	DIN	REAL	
伝熱管外径	d _o	[m]	DOUT	REAL	
伝熱管ピッチ	S _T , S _L	[m]	PST, PSL	REAL	
バフフル板間隔	L _B	[m]	BAFLEN	REAL	
シェル内径	d _s	[m]	DSHELL	REAL	
伝熱管本数	N	[本]	NPIPE	INTEGER	
水側汚れ係数	γ _{fi}	[kcal/mh°C]	CWATER	REAL	
伝熱管熱伝導率	λ _T	[kcal/mh°C]	RHPIPE	REAL	
伝熱面積補正係数	K _A	-	CADJ	REAL	

◇水の物性値(5[kg/cm²a], 50[°C])

$$\gamma_v[\text{kg/m}^3]=988$$

$$C_{Pv}[\text{kcal/kg}\cdot\text{K}]=0.998$$

$$\lambda_v[\text{kcal/mh}\cdot\text{K}]=0.553$$

$$\nu_v[\text{m}^2/\text{s}]=5.507\text{E}-7$$

$$Pr_v=3.53$$

(3) 処理式

$$A_{\text{tube}}[\text{m}^2]=N \cdot \pi d_i[\text{m}]^2 / 4$$

$$v[\text{m/s}]=w[\text{kg/h}] / (A_{\text{tube}}[\text{m}^2] \cdot \gamma_v[\text{kg/m}^3] \cdot 3600)$$

$$Re_v=v[\text{m/s}] \cdot d_i[\text{m}] / \nu_v[\text{m}^2/\text{s}]$$

$$\alpha_i[\text{kcal/m}^2\text{h}\cdot\text{°C}]=(\lambda_v[\text{kcal/mh}\cdot\text{K}] / d_i[\text{m}]) \cdot 0.023 \cdot Re_v^{0.8} \cdot Pr_v^{1/3}$$

$$\sin\beta=S_T[\text{m}] / S_L[\text{m}]$$

$$\varepsilon=(S_T[\text{m}] \cdot S_L[\text{m}] \cdot \sin\beta - \pi d_o[\text{m}]^2 / 4) / S_T[\text{m}] \cdot S_L[\text{m}] \cdot \sin\beta$$

$$Ac[\text{m}^2]=d_s[\text{m}] \cdot L_B[\text{m}] \cdot \varepsilon$$

$$R[\text{mkg/kg}\cdot\text{K}]=\frac{211.9 \times 6}{211.9 \times R_{XE} + 6 \times (1 - R_{XE})}$$

$$P[\text{kg/m}^2]=P[\text{kg/cm}^2\text{a}] \times 100^2$$

$$\gamma_c[\text{kg/m}^3]=P[\text{kg/m}^2] / R[\text{mkg/kg}\cdot\text{K}] \cdot \{(T_1+273.15 + T_2+273.15) / 2\}[\text{°K}]$$

$$\nu_c[\text{m}^2/\text{s}]=10^{-1} \cdot \eta[\text{Pa}\cdot\text{s}] / \gamma_c[\text{kg/m}^3]$$

$$V[\text{m/s}]=W[\text{kg/h}] / (Ac[\text{m}^2] \cdot \gamma_c[\text{kg/m}^3] \cdot 3600)$$

$$Re_G = V[m/s] \cdot d_o[m] / \nu_G[m^2/s]$$

$$Pr_G = C_{p2}[J/kg \cdot K] \cdot \eta[Pa \cdot s] / \lambda[W/m \cdot K]$$

$$\alpha_o'[W/m^2 \cdot K] = (\lambda[W/m \cdot K] / d_o[m]) \cdot 0.3 \cdot Re_G^{0.65} \cdot Pr_G^{0.36}$$

$$\alpha_o[kcal/m^2h \cdot ^\circ C] = \alpha_o'[W/m^2 \cdot K] / 1.163$$

$$(1/Ko) = (d_o[m] / d_i[m] \cdot \alpha_i[kcal/m^2h \cdot ^\circ C]) + (d_o[m] / (d_i[m] \cdot \gamma_{fi}[kcal/mh \cdot ^\circ C])) + ((d_o[m] / 2 \cdot \lambda_T[kcal/m^2h \cdot ^\circ C]) \cdot \ln(d_o[m] / d_i[m])) + (1 / \alpha_o[kcal/m^2h \cdot ^\circ C])$$

$$\frac{1}{Ko} = \frac{d_o[m]}{d_i[m] \cdot \alpha_i[kcal/m^2h \cdot ^\circ C]} + \frac{d_o[m]}{d_i[m] \cdot \gamma_{fi}[kcal/mh \cdot ^\circ C]} + \frac{d_o[m]}{2 \lambda_T[kcal/mh \cdot ^\circ C]} \cdot \ln \frac{d_o[m]}{d_i[m]} + \frac{1}{\alpha_o[kcal/m^2h \cdot ^\circ C]}$$

$$\Delta t_{ln}[^\circ C] = ((T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)) / \ln((T_1 - t_2) - (T_2 - t_1))$$

$$Q'[kcal/h] = Q[MW] \cdot 10^6 / 1.163$$

$$A[m^2] = 1.2 \times Q'[kcal/h] / (\Delta t_{ln}[^\circ C] \cdot Ko[kcal/m^2h \cdot ^\circ C] \cdot K_A)$$

$$L[m] = A[m^2] / (\pi \cdot d_o[m] \cdot N)$$

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
水側					
流路面積	A _{tube}	[m ²]	AWATR	REAL	チェック用
流速	v	[m/s]	VWATR	REAL	チェック用
レイノルズ数	Re _v	-	REWATR	REAL	チェック用
熱伝導率	α _i	[kcal/m ² h [°] C]	RHWATR	REAL	チェック用
ガス側					
輻射率	ε	-	RRADG	REAL	チェック用
流路面積	A _g	[m ²]	AGAS	REAL	チェック用
流速	V	[m/s]	VGAS	REAL	チェック用
レイノルズ数	Re _g	-	REGAS	REAL	チェック用
熱伝導率	α _o	[kcal/m ² h [°] C]	RHGAS	REAL	チェック用
熱貫流率	Ko	[kcal/m ² h [°] C]	RHPASS	REAL	チェック用
平均温度差	Δt _{ln}	[°C]	TMARGN	REAL	チェック用
伝熱面積	A	[m ²]	ACOLR	REAL	
伝熱管長さ	L	[m]	PIPELN	REAL	チェック用

3-5. 機器データ計算 : COMDES

3-5-1. 深海炉用 : COM1

(1) 機能

与えられた入力変数から、各機器の重量データを算出する。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
原子炉熱出力	Q _{RV}	[MWt]	Q _{RV}	REAL	NETEFより
電気出力	Q _{EL}	[MWe]	Q _{EL}	REAL	
2次系ループ数	N _{LOOP2}	[ループ]	N _{LOOP2}	INTEGER	
原子炉最高温度	T _{max}	[K]	TRVMAX	REAL	T _{RV2} に等しい
IHX熱出力	Q _{IHX}	[MWt]	Q _{IHX}	REAL	NETEFより
前置冷却器熱出力	Q _{PRC}	[MWt]	Q _{PRC}	REAL	NETEFより
混合ガス入口温度	T ₁	[°C]	TGAS1	REAL	TRECH2の値
混合ガス出口温度	T ₂	[°C]	TGAS2	REAL	TCMP1の値
機器重量評価式	EEXP	-	IEEXP	INTEGER	米か仏か
深海炉材料	MTRAL	-	IMATER	INTEGER	
設計深度	L	[m]	DEEP	REAL	
遮蔽体比重量	γ _{sh}	[kg/m ³]	GAMSHD	REAL	

(3) 処理式

$$\begin{aligned}
 Q[\text{kWe}] &= Q_{EL}[\text{MWe}] \times 10^3 / N_{\text{LOOP2}} \\
 TACD[\text{mm}] &= -51.7 + 177 \cdot Q^{1/2} \\
 TACL[\text{mm}] &= -44.2 + 303 \cdot Q^{1/2} \\
 z &= 1.5 \times TACL[\text{mm}] \\
 a[\text{mm}] &= 2.13 \times z \\
 V_{\text{SHELL}}[\text{m}^3] &= (4\pi/3)(a/2 \times 1000)^3 \\
 &\cdot Q_{EL} \leq 4.0[\text{kWe}] \text{の場合} \\
 V_{RV}[\text{m}^3] &= \pi \times 0.28^2 \times 0.85 / 4 \\
 &\cdot Q_{EL} > 4.0[\text{kWe}] \text{の場合} \\
 RVD[\text{mm}] &= 0.472 \cdot Q + 261.1 \\
 RVL[\text{mm}] &= 1.528 \cdot Q + 788.9 \\
 V_{RV}[\text{m}^3] &= \pi \times RVD^2 \times RVL / (4 \times 10^9) \\
 V_{\text{SHLD}}[\text{m}^3] &= (2/3) \cdot V_{\text{SHELL}}[\text{m}^3] - V_{RV}[\text{m}^3]
 \end{aligned}$$

(a) 米国式

$$\begin{aligned}
 M_{RV}[\text{kg}] &= 610 \times (T_{\text{max}} / 1500) + 125[\text{kg/MWt}] \times Q_{RV}[\text{MWt}] \\
 M_{\text{SHLD}}[\text{kg}] &= V_{\text{SHLD}}[\text{m}^3] \times r \quad (r = 1.84[\text{kg/m}^3]) \\
 M_2[\text{kg}] &= 400 + 800[\text{kg/MWt}] \times Q_{RV}[\text{MWt}] \\
 \text{i) } 10\% \text{ Ni 鋼の場合} \\
 t &= 75 \times (L / 6500)^{1/2} \times (a / 3000) \\
 A_{\text{SHELL}}[\text{m}^2] &= 2 \times (\pi/4)(a / (2 \times 1000))^2 \\
 M_{\text{RAD}}[\text{kg}] &= A_{\text{SHELL}}[\text{m}^2] \times (t / 1000) \times r \quad (r = 7900[\text{kg/m}^3])
 \end{aligned}$$

ii)チタン合金の場合

$$t = 75 \times (L / 6500)^{1/2} \times (a / 2000)$$

$$A_{\text{SHELL}}[\text{m}^2] = 2 \times (\pi / 4) (a / (2 \times 1000))^2$$

$$M_{\text{RAD}}[\text{kg}] = A_{\text{SHELL}}[\text{m}^2] \times (t / 1000) \times r \quad (r = 4400 [\text{kg}/\text{m}^3])$$

$$A_{\text{sh}}[\text{m}^2] \leq 0.7 \cdot A_{\text{SHELL}}[\text{m}^2] \text{を確認}$$

$$M_{\text{THERM}}[\text{kg}] = 100 \times Q_{\text{RV}}[\text{MWt}] + 105 \times (Q_{\text{HX}}[\text{MWt}] + Q_{\text{PRC}}[\text{MWt}])$$

$$M_{\text{TOT}}[\text{kg}] = M_{\text{RV}} + M_{\text{SHLD}} + M_2 + M_{\text{RAD}} + M_{\text{THERM}}$$

(b)仏国式

$$M_{\text{RV}}[\text{kg}] = 375 \times Q_{\text{RV}}[\text{kWt}] / 119$$

$$M_{\text{SHLD}}[\text{kg}] = V_{\text{SHLD}}[\text{m}^3] \times r \quad (r = 1.84 [\text{kg}/\text{m}^3])$$

$$M_1[\text{kg}] = 90 \times Q_{\text{HX}}[\text{kWt}] / 110.5$$

$$M_2[\text{kg}] = 186 \times Q_{\text{HX}}[\text{kWt}] / 110.5$$

i)10%Ni鋼の場合

$$t = 75 \times (L / 6500)^{1/2} \times (a / 3000)$$

$$A_{\text{SHELL}}[\text{m}^2] = 2 \times (\pi / 4) (a / (2 \times 1000))^2$$

$$M_{\text{RAD}}[\text{kg}] = A_{\text{SHELL}}[\text{m}^2] \times (t / 1000) \times r \quad (r = 7900 [\text{kg}/\text{m}^3])$$

ii)チタン合金の場合

$$t = 75 \times (L / 6500)^{1/2} \times (a / 2000)$$

$$A_{\text{SHELL}}[\text{m}^2] = 2 \times (\pi / 4) (a / (2 \times 1000))^2$$

$$M_{\text{RAD}}[\text{kg}] = A_{\text{SHELL}}[\text{m}^2] \times (t / 1000) \times r \quad (r = 4400 [\text{kg}/\text{m}^3])$$

$$A_{\text{sh}}[\text{m}^2] \leq 0.7 \cdot A_{\text{SHELL}}[\text{m}^2] \text{を確認}$$

$$M_{\text{OTH}}[\text{kg}] = 926 \times Q_{\text{RV}}[\text{kWt}] / 119$$

$$M_{\text{TOT}}[\text{kg}] = M_{\text{RV}} + M_{\text{SHLD}} + M_1 + M_2 + M_{\text{RAD}} + M_{\text{OTH}}$$

(4) 出力変数

(a)米国式

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
TAC径	TACD	[mm]	TACD	REAL	
TAC長さ	TACL	[mm]	TACL	REAL	
耐圧殻寸法	a	[mm]	DSHEL	REAL	
耐圧殻厚さ	t	[mm]	THSH	REAL	
原子炉	M _{RV}	[kg]	EMRV	REAL	
遮蔽体	M _{SHLD}	[kg]	EMSHIL	REAL	
発電系	M ₂	[kg]	EM2JI	REAL	
ラジエタ	M _{RAD}	[kg]	EMRAD	REAL	
熱輸送系	M _{THERM}	[kg]	EMTHE	REAL	
設置重量	M _{TOT}	[kg]	EMTOT	REAL	

(b)仏国式

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
TAC径	TACD	[mm]	TACD	REAL	
TAC長さ	TACL	[mm]	TACL	REAL	
耐圧殻寸法	a	[mm]	DSHEL	REAL	
耐圧殻厚さ	t	[mm]	THSH	REAL	
原子炉	M _{RV}	[kg]	EMRV	REAL	
遮蔽体	M _{SHLD}	[kg]	EMSHIL	REAL	
1次系	M ₁	[kg]	EM1JI	REAL	
発電系	M ₂	[kg]	EM2JI	REAL	
ラジエタ	M _{RAD}	[kg]	EMRAD	REAL	
その他	M _{OTH}	[kg]	EMOTH	REAL	
設置重量	M _{TOT}	[kg]	EMTOT	REAL	

3-5-2. 宇宙炉用 : COM2

(1) 機能

与えられた入力変数から、各機器の重量データを算出する。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
原子炉熱出力	Q _{RV}	[MWt]	Q _{RV}	REAL	NETEFより
IHX熱出力	Q _{IHX}	[MWt]	Q _{IHX}	REAL	NETEFより
前置冷却器熱出力	Q _{PRE}	[MWt]	Q _{PRE}	REAL	NETEFより
原子炉最高温度	T _{max}	[K]	TRVMAX	REAL	T _{RV2} に等しい
混合ガス入口温度	T ₁	[℃]	TGAS1	REAL	TRECH2の値
混合ガス出口温度	T ₂	[℃]	TGAS2	REAL	TCMP1の値
機器重量評価式	EEXP	-	IEEXP	INTEGER	米か仏か
ラジエタ表面の 輻射率	ε	-	RRAD	REAL	0.9
ステファン・ボルツマン定数	σ	[W/m ² K ⁴]	STFANB	REAL	5.67E-8

(3) 処理式

(a)米国式

$$M_{RV}[\text{kg}] = 610 \times T_{\max} / 1500 + 125 [\text{kg/MWt}] \times Q_{RV}[\text{MWt}]$$

$$M_{SHLD}[\text{kg}] = 660 \cdot \log Q_{RV}[\text{MWt}] + 680$$

$$M_{GENE}[\text{kg}] = 400 + 800 [\text{kg/MWt}] \times Q_{RV}[\text{MWt}]$$

$$A[\text{m}^2] = Q_{PRE}[\text{MWt}] \times 10^6 / (\varepsilon \cdot \sigma [\text{W/m}^2\text{K}^4] \cdot T[\text{K}]^4 - K1 [\text{W/m}^2]) \times 1.2, K1 = 311.08$$

$$M_{RAD}[\text{kg}] = 5.0 \times A[\text{m}^2]$$

$$M_{THERM}[\text{kg}] = 100 \times Q_{RV}[\text{MWt}] + 105 \times (Q_{IHX}[\text{MWt}] + Q_{PRE}[\text{MWt}])$$

$$M_{TOT}[\text{kg}] = M_{RV} + M_{SHLD} + M_{GENE} + M_{RAD} + M_{THERM}$$

(b)仏国式

$$M_{RV}[\text{kg}] = 375 \times Q_{RV}[\text{kWt}] / 119$$

$$M_{SHLD}[\text{kg}] = 189 \times Q_{RV}[\text{kWt}] / 119$$

$$M_1[\text{kg}] = 90 \times Q_{IHX}[\text{kWt}] / 110.5$$

$$M_2[\text{kg}] = 186 \times Q_{IHX}[\text{kWt}] / 110.5$$

$$T[^\circ\text{C}] = (T_1[^\circ\text{C}] + T_2[^\circ\text{C}]) / 2$$

$$M_{RAD}[\text{kg}] = (523 \times Q_{PRE}[\text{kWt}] / 88) \times (402.5 / T[^\circ\text{C}])^4$$

$$M_{OTH}[\text{kg}] = 926 \times Q_{RV}[\text{kWt}] / 119$$

$$M_{TOT}[\text{kg}] = M_{RV} + M_{SHLD} + M_1 + M_2 + M_{RAD} + M_{OTH}$$

(4) 出力変数

(a)米国式

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
原子炉	M _{RV}	[kg]	EMRV	REAL	
遮蔽体	M _{SHLD}	[kg]	EMSHIL	REAL	
発電系	M _{GENE}	[kg]	EM2JI	REAL	
ラジエタ	M _{RAD}	[kg]	EMRAD	REAL	
熱輸送系	M _{THERM}	[kg]	EMTHE	REAL	
設置重量	M _{TOT}	[kg]	EMTOT	REAL	

(b)仏国式

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
原子炉	M _{RV}	[kg]	EMRV	REAL	
遮蔽体	M _{SHLD}	[kg]	EMSHIL	REAL	
1次系	M ₁	[kg]	EM1JI	REAL	
発電系	M ₂	[kg]	EM2JI	REAL	
ラジエタ	M _{RAD}	[kg]	EMRAD	REAL	
その他	M _{OTH}	[kg]	EMOTH	REAL	
設置重量	M _{TOT}	[kg]	EMTOT	REAL	

3-6. 最適化計算 : BESTS

3-6-1. システム熱効率 : EBESTS

(1) 機能

各ケースのシステム熱効率のうち、最も高効率のものを選択する。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
システム熱効率(1)	η_{net1}	[%]	EFFSYS(1)	REAL	NETEFより
システム熱効率(2)	η_{net2}	[%]	EFFSYS(2)	REAL	NETEFより
システム熱効率(3)	η_{net3}	[%]	EFFSYS(3)	REAL	NETEFより
システム熱効率(4)	η_{net4}	[%]	EFFSYS(4)	REAL	NETEFより
システム熱効率(5)	η_{net5}	[%]	EFFSYS(5)	REAL	NETEFより

(3) 処理式

$$\eta_{SYSBEST} = \max \{ \eta_{net1}, \eta_{net2}, \eta_{net3}, \eta_{net4}, \eta_{net5} \}$$

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
最大システム熱効率	$\eta_{SYSBEST}$	-	EFFSYSB	REAL	

3-6-2. 装置重量 : MBESTS

(1) 機能

各ケースの設置重量のうち、最も重量の軽いものを選択する。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
設置重量(1)	M_{TOT1}	[kg]	EMTOT(1)	REAL	COMDESより
設置重量(2)	M_{TOT2}	[kg]	EMTOT(2)	REAL	COMDESより
設置重量(3)	M_{TOT3}	[kg]	EMTOT(3)	REAL	COMDESより
設置重量(4)	M_{TOT4}	[kg]	EMTOT(4)	REAL	COMDESより
設置重量(5)	M_{TOT5}	[kg]	EMTOT(5)	REAL	COMDESより

(3) 処理式

$$M_{BEST} = \min \{ M_{TOT1}, M_{TOT2}, M_{TOT3}, M_{TOT4}, M_{TOT5} \}$$

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
最小設置重量	M_{BEST}	[kg]	EMBEST	REAL	

3-7. その他

3-7-1. ゼロ・クリア : BDNULL

(1) 機能

各変数にゼロを設定したブロックデータでゼロ・クリアする。

3-7-2. 物性値テーブル : VALTAB

(1) 機能

HeとXeの比熱、熱伝導率、粘性係数の値をテーブルとして持つブロックデータである。

3-7-3. 物性値を求める : VALREQ

(1) 機能

HeとXeの比熱、熱伝導率、粘性係数の値を内挿により求める。

(2) 入力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
物性値の種類	-	-	TP	CHARACTER	C _{P2} , λ, ηの区別
圧力	-	[kg/cm ² a]	PRS	REAL	比熱の場合
Heの分率	-	[%]	PRS	REAL	熱伝導率の場合
温度	-	[K]	TMP	REAL	

(3) 処理

入力条件により、内挿によって算出。

(4) 出力変数

項目名称	記号	単位	変数名	型	備考
物性値	C _{P2}	[J/kg・K]	RET	REAL	何れか1つを返す
	λ	[W/m・K]			
	η	[Pa・s]			

3-7-4. 結果のファイルへの出力 : TOFILE

(1) 機能

解析結果を、ファイルに" OUTDATA" というファイル名で出力する。

4. 入出力形式

4-1. 入力形式

"3-1. (2)"であげた各変数を、フォーマットを定めてファイルから読み込むものとする。
データのフォーマット及び意味を、表1に示す。

4-2. 出力形式

以下の様なフォーマットに従って出力する。尚、このバージョンでは日本語に対応しておらず、すべての表示は英数字である。

出力イメージ

```
=====
T I T L E      : TITLE
SURVEY PARAMETER : IPAR
SURVEY POINTS   : NPAR              SURVEY LIMITS : PARMAX~PARMIN
PLANT TYPE      : IPLANT
=====
<<<<< INPUT DATA >>>>>=====
Calculate Type:ICAL          Do Best:CBEST          PriCooler Material:ICLT1
WeightValuationExp:IEEXP    DeepSeaReactorMaterial:IMATER
ReactorPower[MW]:QRV        Inlet Temp['C]:TRV1
                             **
                             **
                             **
                             **
SystemP.Loss1:XP1           SystemP.Loss2:XP2           SystemP.Loss3:XP3
=====
<<<<< OUTPUT DATA >>>>>=====
(SURVEY PARAMETER) |
ex) Turbine Inlet T['C] | 500 | 600 | 700 | 800 | 900
-----|-----|-----|-----|-----|-----|
Reactor Power [MW] | | | | |
Inlet T ['C] | | | | |
Outlet T ['C] | | | | |
Flow [kg/h] | | | | |
Primary Thermaltrans Eff | | | | |
* | | | | |
* | | | | |
* | | | | |
* | | | | |
Cycle Thermal Eff | | | | |
System Thermal Eff | | | | |
Component Mass Data | | | | |
Reactor [kg] | | | | |
* [kg] | | | | |
* [kg] | | | | |
* [kg] | | | | |
Total [kg] | | | | |
```

表1. 入力データリスト

項目名称	変数名	単位	FORMAT	備考
タイトル	TITLE	---	A*72	
計算のタイプ	ICAL	---	I1	1=機器データ計算をする 2=機器データ計算をしない
最適化計算の要否	CBEST	---	A*3	YES=最適化計算をする NO=最適化計算をしない
サージパラメータ指定	IPAR	---	I2	1=PTRB1 ; タービン入口圧力 2=PICMP ; コンプレッサ圧縮比 3=PITRB ; タービン膨張比 4=NSTP ; コンプレッサ段数 5=TIHX2 ; IHX出口温度 6=TTRB1 ; タービン入口温度 7=TCMP1 ; コンプレッサ入口温度 8=EFFTRB ; タービン断熱効率 9=EFFCMP ; コンプレッサ断熱効率 10=EFFREC ; レキハート温度効率 11=XP1 ; システム圧損率 12=XP2 ; システム圧損率 13=XP3 ; システム圧損率 14=RXE ; Xeモル分率
パラメータサージ点数	NPAR	---	I1	1～5を指定
パラメータサージ範囲1	PARMAX	---	F7.2	最大値
パラメータサージ範囲2	PARMIN	---	F7.2	最小値
プラントタイプ	IPLANT	---	I1	1=深海炉 2=宇宙炉 3=地上炉(コージェネレーション炉)
1次冷却材の種類	ICLT1	---	I1	1=NaK(Na:0.56, K:0.44) 2=NaK(Na:0.22, K:0.78) 3=Na 4=Hg 5=Li 6=Pb
機器重量評価式	IEEXP	---	I1	1=米国式, 2=仏国式
原子炉熱出力	QRV(NPAR)	[MWt]	E9.2	
電気出力	QEL(NPAR)	[MWe]	E9.2	
原子炉入口温度	TRV1(NPAR)	[°C]	F7.2	
原子炉出口温度	TRV2(NPAR)	[°C]	F7.2	
1次系熱伝達効率	EFF1(NPAR)	---	F5.2	
1次系ループ数	NLOOP1(NPAR)	[ループ]	I1	
2次系ループ数	NLOOP2(NPAR)	[ループ]	I1	
He-Xeモル分率	RXE(NPAR)	---	F5.3	
IHX出口温度	TIHX2(NPAR)	[°C]	F7.2	同一
タービン入口温度	TTRB1(NPAR)	[°C]	F7.2	同一
コンプレッサ入口温度	TCMP1(NPAR)	[°C]	F7.2	

タービン入口圧力	PTRB1(NPAR)	[kg/cm ² a]	F7.2	
コップレッサ圧縮比	PAICMP(NPAR)	---	F5.3	
タービン膨張比	PAITRB(NPAR)	---	F5.3	
コンプレッサ段数	NSTP(NPAR)	[段]	I1	
発電機効率	EFFGEN(NPAR)	---	F6.4	
タービン断熱効率	EFFTRB(NPAR)	---	F6.4	
コップレッサ断熱効率	EFFCMP(NPAR)	---	F6.4	
レキハレタ温度効率	EFFREC(NPAR)	---	F6.4	
システム圧力損失率 1	XP1(NPAR)	---	F5.3	
システム圧力損失率 2	XP2(NPAR)	---	F5.3	
システム圧力損失率 3	XP3(NPAR)	---	F5.3	
レキハレタ圧力損失率	XP1(NPAR)	---	F5.3	
比熱比	XKAPPA	---	F5.2	1.66
・ 深海炉用のみ				
深海炉材料	IMATER	---	I1	1=10%Ni鋼, 2=チタン合金
設計深度	DEEP	[m]	F7.2	
遮蔽体比重量	GAMSHD	[kg/m ³]	F7.2	B _e : 1.84×10^3 , L _i H: 0.77×10^3
海水温度	TWATR	[°C]	F5.2	
ガス流路高さ	HGAS	[m]	F5.3	
ガス平均流速	VAVGAS	[m/s]	F7.2	
耐圧殻厚さ	THSHEL	[m]	F7.3	放射線専用
耐圧殻熱伝導率	RHSHEL	[kcal/mh°C]	F7.4	
海水側熱伝導率	RHWATR	[kcal/m ² h°C]	F7.2	
フィンによる 熱伝達率向上係数	XKFIN	---	F5.2	
・ 宇宙炉用のみ				
ラジエタ表面の 輻射率	RRAD	---	F5.2	0.9
ステファン・ボルツマン定数	STFANB	[W/m ² K ⁴]	E7.2	5.67E-8
ラジエタ 1 次 / 2 次 側 平均温度差	TMARGN	[°C]	F7.2	
・ 地上炉用のみ				
水側入口温度	TWATRI(NPAR)	[°C]	F7.3	
水側流量	WWATR(NPAR)	[kg/h]	F7.3	
伝熱管内径	DIN	[m]	F7.3	
伝熱管外径	DOUT	[m]	F7.3	
伝熱管ピッチ	PST, PSL	[m]	F7.3	
バフフル板間隔	BAFLEN	[m]	F7.3	
シェル内径	DSHELL	[m]	F7.3	
伝熱管本数	NPIPE	[本]	I4	
水側汚れ係数	CWATER	[kcal/mh°C]	F7.3	
伝熱管熱伝導率	RHPIPE	[kcal/mh°C]	F7.3	
伝熱面積補正係数	CADJ	---	F7.3	

NPAR個の配列