

JAERI-M

6099

トカマク炉用蓄熱システムの試設計

1975年4月

迫 淳

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

トカマク炉用蓄熱システムの試設計

東海研究所核融合研究室

迫 淳

(1975年3月19日受理)

トカマク炉では周期的に炉停止，再起動を繰返すので冷却系には特別の配慮を要する。即ち，炉構造物の熱サイクル疲労を防ぐことと発電系への安定した熱量供給を同時に満足させる必要がある。この要求解決のために原子炉冷却系に原子炉バイパス系と蓄熱器を設置する方式を採用し，検討した。蓄熱器についてはパラメトリックな特性の検討と試設計を行なった。その結果，この問題は現実的な設計の範囲で解決できることが明らかになった。

Design Study of a Heat Reservoir System
for the Tokamak Reactor

Kiyoshi Sako

Thermonuclear Fusion Laboratory, Tokai, JAERI

(Received March 19, 1975)

A Tokamak fusion reactor is operated periodically, so special consideration is required in two aspects of the reactor cooling system. One is to minimize thermal cycle fatigue of the reactor structures and the other to stabilize heat supply to the electric power generating system.

For the purpose, a cooling system with heat reservoirs and reactor coolant bypass circuits was proposed. The heat reservoir was designed in trial and parametric study of the performance characteristics was carried out.

It was shown that the two problems in periodical operation of the reactor can be solved in reasonable design by the cooling system.

目 次

| | |
|--------------------------------|----|
| 1. まえがき | 1 |
| 2. 原子炉冷却系の概要 | 2 |
| 3. 蓄熱器の特性計算 | 4 |
| 3.1 計算方法 | 4 |
| 3.1.1 炉停止, 再起動時の炉出力と冷却体流量 | 4 |
| 3.1.2 計算式とメッシュ区分 | 4 |
| 3.1.3 計算に用いた熱定数 | 4 |
| 3.2 ヘリウムとステンレス鋼 (SUS 316) の物性値 | 5 |
| 3.3 蓄熱器の構造 | 5 |
| 3.4 蓄熱器の設計パラメータ | 5 |
| 3.5 計算結果 | 5 |
| 3.5.1 温度分布の時間的变化 | 55 |
| 3.5.2 各部の温度変化 | 5 |
| 3.5.3 炉停止後の経過時間と蓄熱管長さ重量 | 5 |
| 3.6 圧力損失, 送風動力の計算 | 5 |
| 4. 蓄熱器の試設計 | 18 |
| 4.1 設計要目 | 18 |
| 4.2 構造 | 18 |
| 4.3 問題点 | 18 |
| 5. 附録 | 21 |
| 5.1 トカマク炉の運転モードの例 | 21 |
| 5.2 特性計算における計算誤差等について | 22 |
| 5.3 Table 3.3 の数値の根拠 | 24 |
| 5.4 蓄熱器の特性改善方法 | 25 |
| 5.5 冷却体圧力の及ぼす効果 | 26 |
| 参考文献 | 27 |

1. ま え が き

トカマク型核融合炉では定常的な連続運転は不可能であり、周期的に炉停止、再起動を繰り返す運転方式をとる。従って、原子炉冷却体流量を一定にして運転をするならば炉構造の温度変化が激しく、熱疲労が厳しい。また、発電系へ向う流体温度も変化が激しく安定した発電を期待できない。そこでこの両者を満足せしめるために原子炉冷却体は炉出力に応じて流し、これによって炉構造の熱サイクルを最少にするとともに発電系へ安定した流量、温度の流体を供給するために原子炉バイパス系と蓄熱器を含む原子炉冷却系を構成することが必要である⁽¹⁾⁽⁴⁾。

炉停止時間は設計によって異なるが、現在最も詳しく検討されているのはウイスコンシン大学の設計⁽²⁾とプリンストン大学の設計⁽³⁾であり、それぞれ330秒と180秒をとっている。炉停止時間には、融合反応の円滑な停止、再起動のための真空排気、起動用電源準備、再起動の操作が行なわれる。

この停止時間を短くすると起動用電源系、マグネット、真空排気系に過酷な条件を課することになり、また長すぎると蓄熱システムを巨大化することになる。

従来の設計では上述後者についての考慮はほとんど払われず、主としてエネルギーバランス的な観点から出力運転との比率を問題にする議論が多かった。

我々の設計も漸次詳細化しようとしており、許容しうる炉停止時間の見とおしをもつことは重要である。

この報告は上述の観点から行なった炉停止時間との関連で蓄熱器の性能を明らかにするためのパラメトリックサーベイと蓄熱器の試設計に関するものである。なお、とりあえず選定した設計点は最適化したものではなく、イメージを明らかにするための一例に過ぎず、今後プラント全体のサーベイによって設計が決まるべきものである。

今回のサーベイにより、少なくともトカマク炉の運転モードに現実的に対応できることが明らかになった。

2. 原子炉冷却系の概要

ここで対象とする原子炉は2000MWtのトカマク型核融合炉⁽⁴⁾である。本報告に関連する設計要目をTable 2.1に示す。

Fig. 2.1に冷却系の基本的線図を示す。

定常出力運転時にはV-1全開、V-2全閉で冷却体は原子炉を冷却し、蓄熱器を加熱し、蒸気発生器に入り、再循環する。炉停止、再起動時に炉出力に応じた冷却体を原子炉側に流すようにV-1、V-2を調節する。一定出力を保持するためには蒸気発生器入口He温度の下降に伴ないHe流量を増加する必要があるが温度下降限度を小さく保つならば特に困難はなさそうである。

Fig. 2.2には少し詳しい冷却系統の線図を示す。

Table 2.1 原子炉および1次冷却系
主要設計要目(定常出力状態)

| | |
|---------------|--------------------------|
| 原子炉型式 | He冷却型トカマク炉 |
| 原子炉熱出力 | 2000MW |
| 原子炉入口/出口冷却体温度 | 400/700℃ |
| 冷却体 | ヘリウム |
| 冷却体圧力 | 20 kg/cm ² a* |
| 冷却体流量 | 1,269 kg/s, 4,568 ton/h |
| 冷却回路数/炉 | 12 |
| 冷却回路あたり流量 | 105.8 kg/s, 380.7 ton/h |
| 蓄熱器数/回路 | 1 |

* 漸定的に決めておく

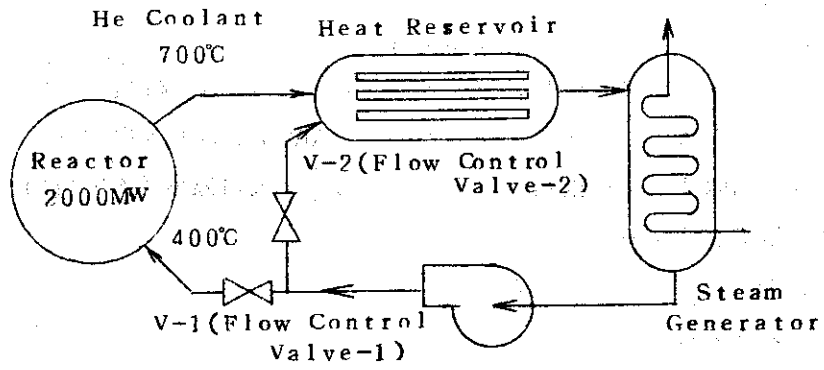


Fig.2.1 原子炉冷却系基本図

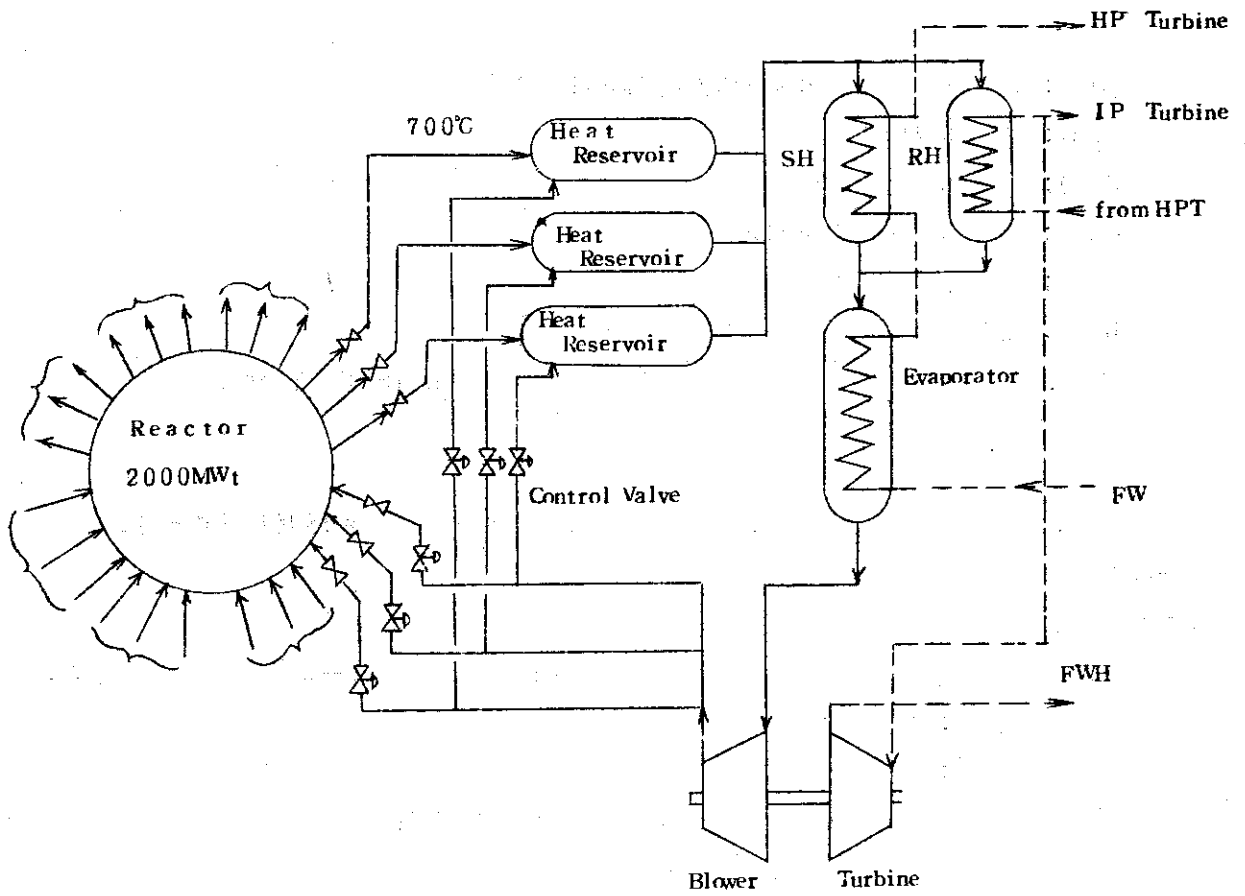


Fig.2.2 原子炉冷却系統図

3. 蓄熱器の特性計算

3.1 計算方法

3.1.1 炉停止，再起動時の炉出力と冷却体流量

実際には炉出力はゆるやかに停止し，僅かではあるが崩壊熱も存在し，再びゆるやかに再起動するが，計算の便宜上ステップ状に全出力(2000MW)からゼロ出力となり，その時点で蓄熱器に流入する冷却体は原子炉出口温度(700℃)から入口温度(400℃)に変化し，流量は変わらないものとして計算する。

Fig. 3.1にこの間の事情を説明している。

3.1.2 計算式とメッシュ区分

冷却体の流れ方向に0.05*秒毎にメッシュを区分し，計算機により繰返し計算する。即ち，Fig. 3.2に示す等価的CR回路とし， C_{1n} ， C_{2n} ， R_n は同一の値， E_{1n} の初期値は原子炉出口温度一定値(700℃)， E_{2n} は初段のみ0.05秒毎に原子炉入口温度(400℃)一定値をインプットし，次段以降はそれぞれ前段の計算値を0.05秒毎にインプットする。

各メッシュの各時間区分の温度変化 $\frac{dE(t)}{dt}$ は次式で表される。

$$-C_1 \frac{dE_1(t)}{dt} = C_2 \frac{dE_2(t)}{dt} = I(t) = (E_1(t) - E_2(t)) / R \quad (1)$$

(記号)

$I(t)$: 蓄熱器から冷却体への熱流量(kcal/s)

$E_1(t)$: 蓄熱器温度(℃)

$E_2(t)$: 冷却体温度(℃)

C_1 : 蓄熱器熱容量(kcal/℃)

C_2 : 冷却体熱容量(kcal/℃)

R : 蓄熱器と冷却体間の熱抵抗(sec℃/kcal)

参考までに近似解は今の場合 $C_1 \gg C_2$ であるので $E_1(t) = E_{10}$ とおけば次式で求まる。

$$E_2(t) - E_{20} = (E_{10} - E_{20}) \left(1 - e^{-\frac{t}{C_2 R}}\right) \quad (2)$$

但し， E_{10} は蓄熱器初期温度， E_{20} は冷却体初期温度。これを繰返し計算する。

今回の(1)式を直接計算機で計算した。

3.1.3 計算に用いた熱常数

3.2項のように温度で可成り変化するが，計算の単純化のために一定値を用いた。即ち，

ヘリウム : 20気圧，550℃の値

ステンレス鋼 : 600℃の値

但し，定常出力運転時の圧損計算，ブロー動力計算には当然のことながらヘリウムの物性値として700℃の値を用いた。

* Cについては，0.1秒毎，以下同。

3.2 ヘリウムとステンレス鋼の物性値

Table 3.1, 3.2 に示す。

3.3 蓄熱器の構造

伝熱面積を大きくするためにフィン付ロッド群も考えられるが、ここでは単純、堅牢な構造とするために管内をHeが流れる管群を圧力容器に収容する方式とした。管数の増加はコストの増大をもたらすと考えられるので太目の管を採用した。

Fig. 3.3 に計算に用いた蓄熱管の実寸大断面図を示す。

3.4 蓄熱器のパラメータ

計算に用いた蓄熱器のパラメータをTable 3.3 に示す。蓄熱管全長20mとし、これを8分割して2.5m(50m/sで0.05秒, Cについてのみ25m/sであるので0.1秒)を1ブロックとした。

3.5 計算結果

Table 3.4 ~ 3.7 に計算結果を示す。以下これに基づき検討する。A~DはTable 3.3のA~Dに対応する。

3.5.1 温度分布の時間的变化

Fig. 3.4 ~ 3.6 に流れ方向の温度分布を経過時間をパラメータとして示す。なお、Dは単に熱容量が2倍になったので時間が2倍となるのみであるので示さない。(Aの1min → 2min, 2min → 4minに相当する)。

3.5.2 各部の温度変化

Fig. 3.7 にAに対する各部の温度変化を示す。入口(0m)ではTubeの温度変化が大きく、こちら側に管板を置くことが良くないのがわかる。

Fig. 3.8 にはA, B, Cの20mの位置のヘリウムの温度変化を示す。

3.5.3 炉停止後の経過時間と蓄熱器長さ、重量

Fig. 3.9 に温度降下をパラメータとして炉停止後の経過時間と蓄熱器の長さ、重量の関係を示す。

3.6 圧力損失、送風動力の計算

蓄熱器を設置することによって生じる定常出力運転時の送風動力は過大であってはならない。これは蓄熱器設計の1つの重要なファクターとなる。以下A, B, Cについて試算する。物性値は700℃の値。

$$\text{圧力損失 } \Delta P = \frac{\lambda \rho U^2 L}{2 g d e}$$

$$\text{ヘッド } H = \Delta P / \rho = \frac{\lambda U^2 L}{2 g d e}$$

$$\text{摩擦損失 } \lambda \dots \dots \mu - \text{ディ線図より}$$

$$\text{送風動力 } P = \frac{gWH}{\eta}$$

1. 標準型の場合 (A)

$$\text{流速 } U = 50 \times \frac{\rho_{550}}{\rho_{700}} = 50 \times \frac{1.142}{0.966} = 59.1 \text{ (m/s)}$$

$$\text{Re} = \frac{deU}{\nu} = \frac{0.04 \times 59.1}{0.434 \times 10^{-4}} = 5.45 \times 10^4$$

$$\lambda = 0.02 \quad (e/D = 0.001 \text{ として})$$

$$H/L = \frac{0.02 \times 59.1^2}{2 \times 98 \times 0.04} = 89.1 \text{ (m/m)}$$

$$\Delta P/L = 89.1 / 0.966 = 92.2 \text{ (kg/m}^2\text{/m)}$$

$$\Delta P(20\text{m}) = 0.184 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$P(20\text{m}) = \frac{98 \times 1269 \times 89.1 \times 20 \times 10^{-6}}{0.75} = 2.96 \text{ (MW)}$$

(Total 12 Loops)

2. 熱貫流率 2 倍の場合 (B)

5.4項に示す如く、約 2 倍になる。但し、長さを短縮できるのでその分だけは助かる。

3. 流速 1/2 の場合 (C)

Re は、 2.73×10^4 で λ は 0.027

従って ΔP , P 共 $\frac{0.027}{0.02} \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 0.3375$ 倍となる。

$$\Delta P = 0.062 \text{ kg/cm}^2 \text{ (20m)}$$

$$P = 10 \text{ MW} \text{ (20m)}$$

さらに長さを短縮できるので、A の約 1/4 にできる。

Table 3.1 He の物性値⁽⁵⁾(20 kg/cm² a)

| 温度(℃) | 比熱, C _p (cal/g℃) | 密度, ρ (g/cc) | 動粘性係数, ν (cm ² /s) | 熱伝導率, k (cal/cm s ℃) | プラントル数, Pr |
|-------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------|
| 400 | 1.252 | $\times 10^{-3}$ 1.395 | 0.2372 | $\times 10^{-4}$ 0.6017 | 0.6886 |
| 500 | 1.254 | 1.215 | 0.2977 | 0.6582 | 0.6893 |
| 550 | 1.255 | 1.142 | 0.3300 | 0.6854 | 0.6898 |
| 600 | 1.256 | 1.077 | 0.3635 | 0.7118 | 0.6904 |
| 700 | 1.258 | 0.966 | 0.4343 | 0.7625 | 0.6921 |

(550℃)

| 圧力 (kg/cm ² a) | 比熱 C _p | 密度 ρ | 動粘性係数 ν | 熱伝導率 k | プラントル数 Pr |
|------------------------------|----------------------|----------------------------|------------|----------------------------|--------------|
| 10 | 1.255 | $\times 10^{-3}$ 0.5717 | 0.6590 | $\times 10^{-4}$ 0.6853 | 0.6899 |
| 20 | 1.255 | 1.142 | 0.3300 | 0.6854 | 0.6898 |
| 40 | 1.255 | 2.276 | 0.1655 | 0.6856 | 0.6896 |
| 60 | 1.255 | 3.403 | 0.1107 | 0.6859 | 0.6893 |

Table 3.2 SUS316 の物性値⁽⁵⁾

| 温度 (℃) | 比熱, C _p (cal/g ℃) | 密度, ρ (g/cc) | 熱伝導率, k (cal/cm s ℃) |
|-----------|---------------------------------|-----------------|-------------------------|
| 20 | 0.1054 | 7.974 | 0.03145 |
| 400 | 0.1274 | 7.810 | 0.04383 |
| 500 | 0.1327 | 7.763 | 0.04709 |
| 600 | 0.1377 | 7.716 | 0.05035 |
| 700 | 0.1426 | 7.666 | 0.05360 |

Table 3.3 蓄熱器のパラメータ

| | A | B* | C | D |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| He 流量 (kg/s) | 105.8 | 105.8 | 105.8 | 105.8 |
| He 圧力 (kg/cm ² a) | 20 | 20 | 20 | 20 |
| He 流速 (m/s) | 50 | 50 | 25 | 50 |
| 管内径 (cm) | 4 | - | 4 | 4 |
| 管外径 (cm) | 6 | - | 6 | 7.48 |
| 管数 | 1474 | - | 2948 | 1474 |
| 熱伝達率 (kcal/m ² s °C) | 0.209 | - | 0.120 | 0.209 |
| 単位長伝熱面積 (m ² /m) | 185.2 | - | 370.4 | 185.2 |
| 熱貫流率/ブロック (kcal/s °C) | 96.8 | 193.6 | 111.1 | 96.8 |
| 単位長管総重量 (ton/m) | 18.5 | 18.5 | 37.0 | 37.0 |
| 熱容量/ブロック (kcal/°C) | 6480 | 6480 | 12360 | 12960 |
| 冷却体熱容量/ブロック (kcal/°C) | 6.64 | 6.64 | 13.27 | 6.64 |

* 熱貫流率を増大せしめる方法により数値が異なる部分を(-)とした。附録を参照。

Table 3.4 計算結果 (A)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 10 | 1 0.66985E 03 2 0.53951E 03 | 1 0.68482E 03 2 0.61454E 03 | 1 0.69216E 03 2 0.65467E 03 | 1 0.69601E 03 2 0.67604E 03 | 1 0.69797E 03 2 0.68738E 03 | 1 0.69897E 03 2 0.69337E 03 | 1 0.69948E 03 2 0.69653E 03 | 1 0.69973E 03 2 0.69819E 03 |
| 20 | 1 0.64272E 03 2 0.52549E 03 | 1 0.66930E 03 2 0.59984E 03 | 1 0.68360E 03 2 0.64315E 03 | 1 0.69126E 03 2 0.66802E 03 | 1 0.69536E 03 2 0.68216E 03 | 1 0.69754E 03 2 0.69011E 03 | 1 0.69870E 03 2 0.69455E 03 | 1 0.69931E 03 2 0.69701E 03 |
| 30 | 1 0.61832E 03 2 0.51288E 03 | 1 0.65419E 03 2 0.58594E 03 | 1 0.67446E 03 2 0.63170E 03 | 1 0.68584E 03 2 0.65969E 03 | 1 0.69218E 03 2 0.67649E 03 | 1 0.69570E 03 2 0.68842E 03 | 1 0.69765E 03 2 0.69223E 03 | 1 0.69872E 03 2 0.69558E 03 |
| 40 | 1 0.59638E 03 2 0.50153E 03 | 1 0.63939E 03 2 0.57281E 03 | 1 0.66488E 03 2 0.62041E 03 | 1 0.67982E 03 2 0.65112E 03 | 1 0.68848E 03 2 0.67044E 03 | 1 0.69347E 03 2 0.68234E 03 | 1 0.69631E 03 2 0.68957E 03 | 1 0.69793E 03 2 0.69389E 03 |
| 50 | 1 0.57664E 03 2 0.49132E 03 | 1 0.62500E 03 2 0.56044E 03 | 1 0.65498E 03 2 0.60932E 03 | 1 0.67327E 03 2 0.64238E 03 | 1 0.68428E 03 2 0.66404E 03 | 1 0.69082E 03 2 0.67789E 03 | 1 0.69468E 03 2 0.68657E 03 | 1 0.69694E 03 2 0.69193E 03 |
| 60 | 1 0.55888E 03 2 0.48215E 03 | 1 0.61109E 03 2 0.54881E 03 | 1 0.64488E 03 2 0.59848E 03 | 1 0.66629E 03 2 0.63354E 03 | 1 0.67961E 03 2 0.65736E 03 | 1 0.68779E 03 2 0.67309E 03 | 1 0.69275E 03 2 0.68326E 03 | 1 0.69573E 03 2 0.68971E 03 |
| 70 | 1 0.54291E 03 2 0.47389E 03 | 1 0.59769E 03 2 0.53790E 03 | 1 0.63466E 03 2 0.58792E 03 | 1 0.65892E 03 2 0.62483E 03 | 1 0.67452E 03 2 0.65043E 03 | 1 0.68438E 03 2 0.66798E 03 | 1 0.69052E 03 2 0.67963E 03 | 1 0.69429E 03 2 0.68721E 03 |
| 80 | 1 0.52855E 03 2 0.46646E 03 | 1 0.58486E 03 2 0.52768E 03 | 1 0.62440E 03 2 0.57768E 03 | 1 0.65126E 03 2 0.61572E 03 | 1 0.66905E 03 2 0.64329E 03 | 1 0.68060E 03 2 0.66258E 03 | 1 0.68798E 03 2 0.67571E 03 | 1 0.69262E 03 2 0.68445E 03 |
| 90 | 1 0.51563E 03 2 0.45978E 03 | 1 0.57261E 03 2 0.51812E 03 | 1 0.61418E 03 2 0.56778E 03 | 1 0.64335E 03 2 0.60685E 03 | 1 0.66323E 03 2 0.63600E 03 | 1 0.67648E 03 2 0.65693E 03 | 1 0.68515E 03 2 0.67151E 03 | 1 0.69071E 03 2 0.68144E 03 |
| 100 | 1 0.50400E 03 2 0.45377E 03 | 1 0.56096E 03 2 0.50919E 03 | 1 0.60406E 03 2 0.55824E 03 | 1 0.63526E 03 2 0.59806E 03 | 1 0.65712E 03 2 0.62859E 03 | 1 0.67203E 03 2 0.65105E 03 | 1 0.68200E 03 2 0.66705E 03 | 1 0.68855E 03 2 0.67817E 03 |
| 110 | 1 0.49355E 03 2 0.44837E 03 | 1 0.54990E 03 2 0.50086E 03 | 1 0.59409E 03 2 0.54906E 03 | 1 0.62705E 03 2 0.58938E 03 | 1 0.65073E 03 2 0.62110E 03 | 1 0.66728E 03 2 0.64498E 03 | 1 0.67858E 03 2 0.66235E 03 | 1 0.68615E 03 2 0.67465E 03 |
| 120 | 1 0.48415E 03 2 0.44351E 03 | 1 0.53944E 03 2 0.49311E 03 | 1 0.58432E 03 2 0.54026E 03 | 1 0.61875E 03 2 0.58084E 03 | 1 0.64413E 03 2 0.61356E 03 | 1 0.66225E 03 2 0.63873E 03 | 1 0.67488E 03 2 0.65742E 03 | 1 0.68351E 03 2 0.67091E 03 |
| 130 | 1 0.47569E 03 2 0.43913E 03 | 1 0.52927E 03 2 0.48589E 03 | 1 0.57478E 03 2 0.53185E 03 | 1 0.61043E 03 2 0.57247E 03 | 1 0.63733E 03 2 0.60601E 03 | 1 0.65697E 03 2 0.63235E 03 | 1 0.67092E 03 2 0.65229E 03 | 1 0.68062E 03 2 0.66694E 03 |
| 140 | 1 0.46808E 03 2 0.43520E 03 | 1 0.52028E 03 2 0.47918E 03 | 1 0.56549E 03 2 0.52381E 03 | 1 0.60211E 03 2 0.56429E 03 | 1 0.63039E 03 2 0.59847E 03 | 1 0.65146E 03 2 0.62586E 03 | 1 0.66671E 03 2 0.64698E 03 | 1 0.67750E 03 2 0.66276E 03 |
| 150 | 1 0.46124E 03 2 0.43166E 03 | 1 0.51154E 03 2 0.47296E 03 | 1 0.55649E 03 2 0.51615E 03 | 1 0.59385E 03 2 0.55632E 03 | 1 0.62334E 03 2 0.59097E 03 | 1 0.64575E 03 2 0.61929E 03 | 1 0.66227E 03 2 0.64151E 03 | 1 0.67416E 03 2 0.65839E 03 |
| 160 | 1 0.45508E 03 2 0.42848E 03 | 1 0.50334E 03 2 0.46719E 03 | 1 0.54780E 03 2 0.50886E 03 | 1 0.58566E 03 2 0.54857E 03 | 1 0.61620E 03 2 0.58353E 03 | 1 0.63986E 03 2 0.61265E 03 | 1 0.65761E 03 2 0.63590E 03 | 1 0.67059E 03 2 0.65383E 03 |
| 170 | 1 0.44955E 03 2 0.42562E 03 | 1 0.49567E 03 2 0.46184E 03 | 1 0.53942E 03 2 0.50195E 03 | 1 0.57758E 03 2 0.54105E 03 | 1 0.60901E 03 2 0.57619E 03 | 1 0.63382E 03 2 0.60598E 03 | 1 0.65275E 03 2 0.63016E 03 | 1 0.66641E 03 2 0.64911E 03 |
| 180 | 1 0.44457E 03 2 0.42304E 03 | 1 0.48849E 03 2 0.45688E 03 | 1 0.53136E 03 2 0.49539E 03 | 1 0.56964E 03 2 0.53378E 03 | 1 0.60181E 03 2 0.56895E 03 | 1 0.62765E 03 2 0.59930E 03 | 1 0.64770E 03 2 0.62433E 03 | 1 0.66282E 03 2 0.64423E 03 |

Table 3.5 計算結果 (B)

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 10 | 1 | 0.65639E 03 | 0.68726E 03 | 0.69633E 03 | 0.69895E 03 | 0.69970E 03 | 0.69992E 03 | 0.69998E 03 | 0.70000E 03 |
| | 2 | 0.59660E 03 | 0.66512E 03 | 0.68928E 03 | 0.69670E 03 | 0.69900E 03 | 0.69970E 03 | 0.69991E 03 | 0.69998E 03 |
| 20 | 1 | 0.61912E 03 | 0.67189E 03 | 0.69056E 03 | 0.69691E 03 | 0.69901E 03 | 0.69969E 03 | 0.69991E 03 | 0.69997E 03 |
| | 2 | 0.56802E 03 | 0.64766E 03 | 0.68056E 03 | 0.69310E 03 | 0.69763E 03 | 0.69921E 03 | 0.69974E 03 | 0.69992E 03 |
| 30 | 1 | 0.58727E 03 | 0.65491E 03 | 0.68292E 03 | 0.69379E 03 | 0.69781E 03 | 0.69925E 03 | 0.69975E 03 | 0.69992E 03 |
| | 2 | 0.54360E 03 | 0.62895E 03 | 0.67034E 03 | 0.68832E 03 | 0.69560E 03 | 0.69840E 03 | 0.69943E 03 | 0.69981E 03 |
| 40 | 1 | 0.56005E 03 | 0.63713E 03 | 0.67369E 03 | 0.68954E 03 | 0.69600E 03 | 0.69852E 03 | 0.69947E 03 | 0.69981E 03 |
| | 2 | 0.52272E 03 | 0.61045E 03 | 0.65894E 03 | 0.68290E 03 | 0.69283E 03 | 0.69719E 03 | 0.69894E 03 | 0.69961E 03 |
| 50 | 1 | 0.53678E 03 | 0.61912E 03 | 0.66314E 03 | 0.68418E 03 | 0.69351E 03 | 0.69744E 03 | 0.69902E 03 | 0.69964E 03 |
| | 2 | 0.50488E 03 | 0.59248E 03 | 0.64666E 03 | 0.67593E 03 | 0.68930E 03 | 0.69554E 03 | 0.69821E 03 | 0.69930E 03 |
| 60 | 1 | 0.51690E 03 | 0.60135E 03 | 0.65157E 03 | 0.67777E 03 | 0.69030E 03 | 0.69594E 03 | 0.69836E 03 | 0.69936E 03 |
| | 2 | 0.48964E 03 | 0.57529E 03 | 0.63378E 03 | 0.66721E 03 | 0.68499E 03 | 0.69339E 03 | 0.69720E 03 | 0.69885E 03 |
| 70 | 1 | 0.49991E 03 | 0.58411E 03 | 0.63925E 03 | 0.67038E 03 | 0.68634E 03 | 0.69398E 03 | 0.69744E 03 | 0.69895E 03 |
| | 2 | 0.47661E 03 | 0.55904E 03 | 0.62054E 03 | 0.65876E 03 | 0.67991E 03 | 0.69070E 03 | 0.69587E 03 | 0.69823E 03 |
| 80 | 1 | 0.48538E 03 | 0.56763E 03 | 0.62644E 03 | 0.66214E 03 | 0.68163E 03 | 0.69151E 03 | 0.69623E 03 | 0.69836E 03 |
| | 2 | 0.46547E 03 | 0.54380E 03 | 0.60717E 03 | 0.64932E 03 | 0.67410E 03 | 0.68745E 03 | 0.69418E 03 | 0.69740E 03 |
| 90 | 1 | 0.47297E 03 | 0.55204E 03 | 0.61335E 03 | 0.65314E 03 | 0.67619E 03 | 0.68850E 03 | 0.69467E 03 | 0.69762E 03 |
| | 2 | 0.45595E 03 | 0.52963E 03 | 0.59383E 03 | 0.63931E 03 | 0.66759E 03 | 0.68362E 03 | 0.69209E 03 | 0.69633E 03 |
| 100 | 1 | 0.46237E 03 | 0.53745E 03 | 0.60019E 03 | 0.64353E 03 | 0.67005E 03 | 0.68493E 03 | 0.69274E 03 | 0.69663E 03 |
| | 2 | 0.44782E 03 | 0.51655E 03 | 0.58068E 03 | 0.62888E 03 | 0.66045E 03 | 0.67922E 03 | 0.68959E 03 | 0.69499E 03 |
| 110 | 1 | 0.45330E 03 | 0.52389E 03 | 0.58712E 03 | 0.63343E 03 | 0.66327E 03 | 0.68080E 03 | 0.69041E 03 | 0.69539E 03 |
| | 2 | 0.44087E 03 | 0.50453E 03 | 0.56786E 03 | 0.61814E 03 | 0.65274E 03 | 0.67426E 03 | 0.68664E 03 | 0.69335E 03 |
| 120 | 1 | 0.44555E 03 | 0.51136E 03 | 0.57428E 03 | 0.62296E 03 | 0.65589E 03 | 0.67611E 03 | 0.68766E 03 | 0.69387E 03 |
| | 2 | 0.43493E 03 | 0.49324E 03 | 0.55545E 03 | 0.60722E 03 | 0.64454E 03 | 0.66875E 03 | 0.68325E 03 | 0.69140E 03 |
| 130 | 1 | 0.43893E 03 | 0.49986E 03 | 0.56178E 03 | 0.61225E 03 | 0.64799E 03 | 0.67088E 03 | 0.68447E 03 | 0.69205E 03 |
| | 2 | 0.42985E 03 | 0.48354E 03 | 0.54353E 03 | 0.59622E 03 | 0.63592E 03 | 0.66273E 03 | 0.67940E 03 | 0.68910E 03 |
| 140 | 1 | 0.43327E 03 | 0.48935E 03 | 0.54971E 03 | 0.60140E 03 | 0.63964E 03 | 0.66513E 03 | 0.68082E 03 | 0.68989E 03 |
| | 2 | 0.42551E 03 | 0.47446E 03 | 0.53217E 03 | 0.58526E 03 | 0.62696E 03 | 0.65623E 03 | 0.67509E 03 | 0.68644E 03 |
| 150 | 1 | 0.42844E 03 | 0.47979E 03 | 0.53815E 03 | 0.59052E 03 | 0.63092E 03 | 0.65890E 03 | 0.67674E 03 | 0.68739E 03 |
| | 2 | 0.42180E 03 | 0.46627E 03 | 0.52139E 03 | 0.57440E 03 | 0.61774E 03 | 0.64930E 03 | 0.67034E 03 | 0.68341E 03 |
| 160 | 1 | 0.42430E 03 | 0.47112E 03 | 0.52714E 03 | 0.57970E 03 | 0.62191E 03 | 0.65221E 03 | 0.67220E 03 | 0.68453E 03 |
| | 2 | 0.41864E 03 | 0.45888E 03 | 0.51122E 03 | 0.56375E 03 | 0.60834E 03 | 0.64198E 03 | 0.66516E 03 | 0.68001E 03 |
| 170 | 1 | 0.42077E 03 | 0.46328E 03 | 0.51671E 03 | 0.56903E 03 | 0.61267E 03 | 0.64512E 03 | 0.66724E 03 | 0.68130E 03 |
| | 2 | 0.41593E 03 | 0.45224E 03 | 0.50167E 03 | 0.55332E 03 | 0.59883E 03 | 0.63433E 03 | 0.65956E 03 | 0.67623E 03 |
| 180 | 1 | 0.41775E 03 | 0.45622E 03 | 0.50688E 03 | 0.55856E 03 | 0.60328E 03 | 0.63768E 03 | 0.66187E 03 | 0.67770E 03 |
| | 2 | 0.41361E 03 | 0.44628E 03 | 0.49275E 03 | 0.54321E 03 | 0.58927E 03 | 0.62639E 03 | 0.65359E 03 | 0.67207E 03 |

Table 3.6 計算結果 (C)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 20 | 1 0.66712E 03 | 0.68468E 03 | 0.69287E 03 | 0.69669E 03 | 0.69846E 03 | 0.69929E 03 | 0.69967E 03 | 0.69985E 03 |
| | 2 0.55134E 03 | 0.62689E 03 | 0.66427E 03 | 0.68264E 03 | 0.69161E 03 | 0.69596E 03 | 0.69806E 03 | 0.69907E 03 |
| 40 | 1 0.63784E 03 | 0.66912E 03 | 0.68474E 03 | 0.69249E 03 | 0.69632E 03 | 0.69820E 03 | 0.69912E 03 | 0.69957E 03 |
| | 2 0.53475E 03 | 0.61088E 03 | 0.65273E 03 | 0.67525E 03 | 0.68719E 03 | 0.69343E 03 | 0.69665E 03 | 0.69831E 03 |
| 60 | 1 0.61177E 03 | 0.65355E 03 | 0.67578E 03 | 0.68747E 03 | 0.69357E 03 | 0.69672E 03 | 0.69833E 03 | 0.69916E 03 |
| | 2 0.51998E 03 | 0.59566E 03 | 0.64165E 03 | 0.66735E 03 | 0.68221E 03 | 0.69043E 03 | 0.69491E 03 | 0.69731E 03 |
| 80 | 1 0.58856E 03 | 0.63816E 03 | 0.66618E 03 | 0.68173E 03 | 0.69023E 03 | 0.69462E 03 | 0.69726E 03 | 0.69857E 03 |
| | 2 0.50683E 03 | 0.58124E 03 | 0.62936E 03 | 0.65903E 03 | 0.67671E 03 | 0.68697E 03 | 0.69281E 03 | 0.69606E 03 |
| 100 | 1 0.56790E 03 | 0.62309E 03 | 0.65610E 03 | 0.67534E 03 | 0.68633E 03 | 0.69250E 03 | 0.69593E 03 | 0.69781E 03 |
| | 2 0.49512E 03 | 0.56763E 03 | 0.61775E 03 | 0.65038E 03 | 0.67075E 03 | 0.68307E 03 | 0.69036E 03 | 0.69458E 03 |
| 120 | 1 0.54949E 03 | 0.60847E 03 | 0.64567E 03 | 0.66838E 03 | 0.68189E 03 | 0.68976E 03 | 0.69428E 03 | 0.69683E 03 |
| | 2 0.48470E 03 | 0.55482E 03 | 0.60630E 03 | 0.64147E 03 | 0.66437E 03 | 0.67876E 03 | 0.68752E 03 | 0.69281E 03 |
| 140 | 1 0.53311E 03 | 0.59437E 03 | 0.63503E 03 | 0.66094E 03 | 0.67695E 03 | 0.68660E 03 | 0.69232E 03 | 0.69564E 03 |
| | 2 0.47541E 03 | 0.54281E 03 | 0.59506E 03 | 0.62359E 03 | 0.65763E 03 | 0.67405E 03 | 0.68440E 03 | 0.69077E 03 |
| 160 | 1 0.51852E 03 | 0.58086E 03 | 0.62429E 03 | 0.65310E 03 | 0.67155E 03 | 0.68303E 03 | 0.69003E 03 | 0.69421E 03 |
| | 2 0.46715E 03 | 0.53158E 03 | 0.58410E 03 | 0.62320E 03 | 0.65059E 03 | 0.66897E 03 | 0.68090E 03 | 0.68845E 03 |
| 180 | 1 0.50553E 03 | 0.56798E 03 | 0.61355E 03 | 0.64494E 03 | 0.66573E 03 | 0.67907E 03 | 0.68742E 03 | 0.69254E 03 |
| | 2 0.45979E 03 | 0.52108E 03 | 0.57346E 03 | 0.61396E 03 | 0.64329E 03 | 0.66356E 03 | 0.67708E 03 | 0.68584E 03 |
| 200 | 1 0.49396E 03 | 0.55574E 03 | 0.60264E 03 | 0.63652E 03 | 0.65953E 03 | 0.67475E 03 | 0.68449E 03 | 0.69062E 03 |
| | 2 0.45324E 03 | 0.51131E 03 | 0.56317E 03 | 0.60473E 03 | 0.63576E 03 | 0.65785E 03 | 0.67294E 03 | 0.68295E 03 |
| 220 | 1 0.48366E 03 | 0.54417E 03 | 0.59229E 03 | 0.62792E 03 | 0.65301E 03 | 0.67003E 03 | 0.68123E 03 | 0.68843E 03 |
| | 2 0.44740E 03 | 0.50223E 03 | 0.55326E 03 | 0.59556E 03 | 0.62811E 03 | 0.65186E 03 | 0.66850E 03 | 0.67979E 03 |
| 240 | 1 0.47449E 03 | 0.53327E 03 | 0.58194E 03 | 0.61920E 03 | 0.64620E 03 | 0.66500E 03 | 0.67766E 03 | 0.68598E 03 |
| | 2 0.44220E 03 | 0.49380E 03 | 0.54374E 03 | 0.58649E 03 | 0.62032E 03 | 0.64563E 03 | 0.66378E 03 | 0.67636E 03 |

Table 3.7 計算結果 (D)

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 10 | 1 | 0.68452E 03 | 0.69231E 03 | 0.69618E 03 | 0.69811E 03 | 0.69906E 03 | 0.69953E 03 | 0.69977E 03 | 0.69988E 03 |
| | 2 | 0.54709E 03 | 0.62216E 03 | 0.66043E 03 | 0.67991E 03 | 0.68981E 03 | 0.69484E 03 | 0.69739E 03 | 0.69868E 03 |
| 20 | 1 | 0.66984E 03 | 0.68462E 03 | 0.69216E 03 | 0.69601E 03 | 0.69797E 03 | 0.69897E 03 | 0.69948E 03 | 0.69973E 03 |
| | 2 | 0.53950E 03 | 0.61452E 03 | 0.65466E 03 | 0.67604E 03 | 0.68738E 03 | 0.69337E 03 | 0.69653E 03 | 0.69818E 03 |
| 30 | 1 | 0.65592E 03 | 0.67694E 03 | 0.68796E 03 | 0.69373E 03 | 0.69674E 03 | 0.69830E 03 | 0.69912E 03 | 0.69954E 03 |
| | 2 | 0.53230E 03 | 0.60708E 03 | 0.64889E 03 | 0.67207E 03 | 0.68482E 03 | 0.69179E 03 | 0.69558E 03 | 0.69763E 03 |
| 40 | 1 | 0.64272E 03 | 0.66930E 03 | 0.68360E 03 | 0.69126E 03 | 0.69536E 03 | 0.69754E 03 | 0.69870E 03 | 0.69931E 03 |
| | 2 | 0.52548E 03 | 0.59983E 03 | 0.64313E 03 | 0.66802E 03 | 0.68215E 03 | 0.69011E 03 | 0.69455E 03 | 0.69701E 03 |
| 50 | 1 | 0.63020E 03 | 0.66171E 03 | 0.67909E 03 | 0.68863E 03 | 0.69384E 03 | 0.69667E 03 | 0.69821E 03 | 0.69904E 03 |
| | 2 | 0.51900E 03 | 0.59278E 03 | 0.63740E 03 | 0.66388E 03 | 0.67937E 03 | 0.68831E 03 | 0.69348E 03 | 0.69633E 03 |
| 60 | 1 | 0.61932E 03 | 0.65419E 03 | 0.67446E 03 | 0.68584E 03 | 0.69218E 03 | 0.69570E 03 | 0.69765E 03 | 0.69872E 03 |
| | 2 | 0.51286E 03 | 0.58592E 03 | 0.63169E 03 | 0.65968E 03 | 0.67648E 03 | 0.68642E 03 | 0.69222E 03 | 0.69558E 03 |
| 70 | 1 | 0.60706E 03 | 0.64674E 03 | 0.66972E 03 | 0.68290E 03 | 0.69040E 03 | 0.69464E 03 | 0.69702E 03 | 0.69835E 03 |
| | 2 | 0.50704E 03 | 0.57926E 03 | 0.62602E 03 | 0.65542E 03 | 0.67350E 03 | 0.68443E 03 | 0.69094E 03 | 0.69477E 03 |
| 80 | 1 | 0.59637E 03 | 0.63939E 03 | 0.66488E 03 | 0.67981E 03 | 0.68848E 03 | 0.69346E 03 | 0.69631E 03 | 0.69733E 03 |
| | 2 | 0.50152E 03 | 0.57279E 03 | 0.62040E 03 | 0.65111E 03 | 0.67043E 03 | 0.68234E 03 | 0.68958E 03 | 0.69389E 03 |
| 90 | 1 | 0.58624E 03 | 0.63214E 03 | 0.65996E 03 | 0.67660E 03 | 0.68644E 03 | 0.69219E 03 | 0.69554E 03 | 0.69746E 03 |
| | 2 | 0.49628E 03 | 0.56651E 03 | 0.61482E 03 | 0.64676E 03 | 0.66727E 03 | 0.68016E 03 | 0.68811E 03 | 0.69294E 03 |
| 100 | 1 | 0.57663E 03 | 0.62500E 03 | 0.65498E 03 | 0.67327E 03 | 0.68426E 03 | 0.69082E 03 | 0.69458E 03 | 0.69694E 03 |
| | 2 | 0.49131E 03 | 0.56042E 03 | 0.60931E 03 | 0.64237E 03 | 0.66404E 03 | 0.67788E 03 | 0.68657E 03 | 0.69195E 03 |
| 110 | 1 | 0.56752E 03 | 0.61798E 03 | 0.64995E 03 | 0.66983E 03 | 0.68200E 03 | 0.68936E 03 | 0.69375E 03 | 0.69636E 03 |
| | 2 | 0.48660E 03 | 0.55452E 03 | 0.60385E 03 | 0.63796E 03 | 0.66073E 03 | 0.67553E 03 | 0.68495E 03 | 0.69085E 03 |
| 120 | 1 | 0.55888E 03 | 0.61108E 03 | 0.64488E 03 | 0.66628E 03 | 0.67961E 03 | 0.68779E 03 | 0.69275E 03 | 0.69573E 03 |
| | 2 | 0.48213E 03 | 0.54880E 03 | 0.59847E 03 | 0.63352E 03 | 0.65735E 03 | 0.67309E 03 | 0.68325E 03 | 0.68970E 03 |
| 130 | 1 | 0.55068E 03 | 0.60432E 03 | 0.63977E 03 | 0.66265E 03 | 0.67712E 03 | 0.68613E 03 | 0.69167E 03 | 0.69504E 03 |
| | 2 | 0.47789E 03 | 0.54325E 03 | 0.59315E 03 | 0.62908E 03 | 0.65391E 03 | 0.67057E 03 | 0.68148E 03 | 0.68849E 03 |
| 140 | 1 | 0.54290E 03 | 0.59769E 03 | 0.63465E 03 | 0.65892E 03 | 0.67452E 03 | 0.68438E 03 | 0.69051E 03 | 0.69429E 03 |
| | 2 | 0.47388E 03 | 0.53788E 03 | 0.58791E 03 | 0.62462E 03 | 0.65042E 03 | 0.66797E 03 | 0.67963E 03 | 0.68721E 03 |
| 150 | 1 | 0.53553E 03 | 0.59120E 03 | 0.62952E 03 | 0.65512E 03 | 0.67183E 03 | 0.68253E 03 | 0.68926E 03 | 0.69348E 03 |
| | 2 | 0.47006E 03 | 0.53269E 03 | 0.58275E 03 | 0.62016E 03 | 0.64687E 03 | 0.66531E 03 | 0.67770E 03 | 0.68586E 03 |
| 160 | 1 | 0.52854E 03 | 0.58486E 03 | 0.62440E 03 | 0.65126E 03 | 0.66905E 03 | 0.68060E 03 | 0.68797E 03 | 0.69262E 03 |
| | 2 | 0.46645E 03 | 0.52766E 03 | 0.57767E 03 | 0.61571E 03 | 0.64328E 03 | 0.66257E 03 | 0.67570E 03 | 0.68445E 03 |
| 170 | 1 | 0.52191E 03 | 0.57866E 03 | 0.61926E 03 | 0.64733E 03 | 0.66618E 03 | 0.67858E 03 | 0.68659E 03 | 0.69169E 03 |
| | 2 | 0.46302E 03 | 0.52280E 03 | 0.57268E 03 | 0.61127E 03 | 0.63966E 03 | 0.65976E 03 | 0.67364E 03 | 0.68297E 03 |
| 180 | 1 | 0.51562E 03 | 0.57261E 03 | 0.61418E 03 | 0.64335E 03 | 0.66323E 03 | 0.67646E 03 | 0.68513E 03 | 0.69070E 03 |
| | 2 | 0.45977E 03 | 0.51810E 03 | 0.56777E 03 | 0.60684E 03 | 0.63599E 03 | 0.65692E 03 | 0.67150E 03 | 0.68143E 03 |

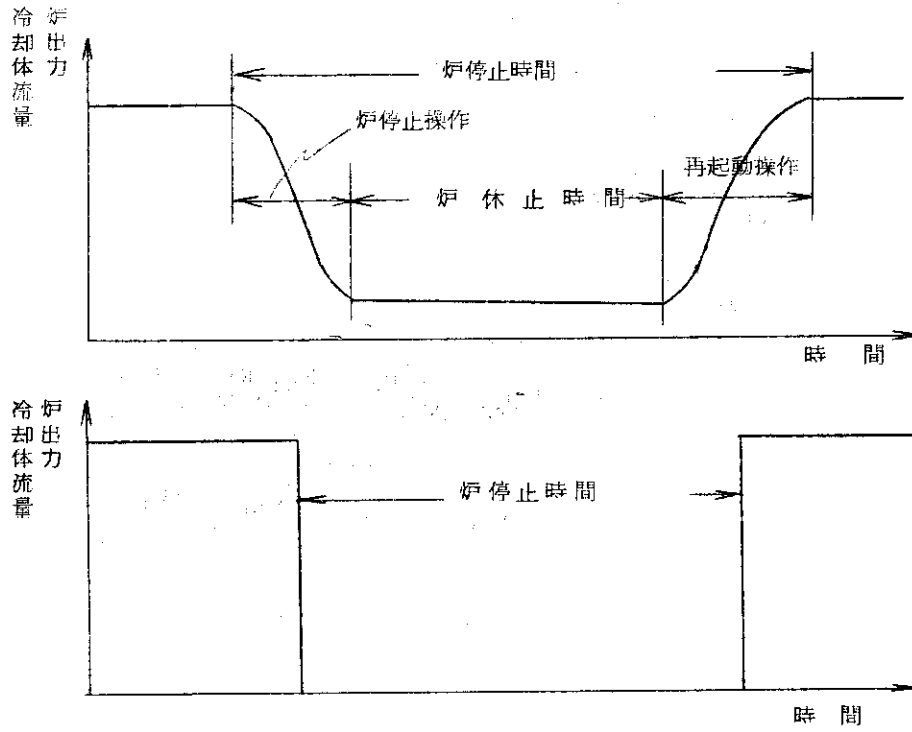


Fig. 3.1 予想される運転モード (上図) と計算に用いたステップ状運転モード (下図)

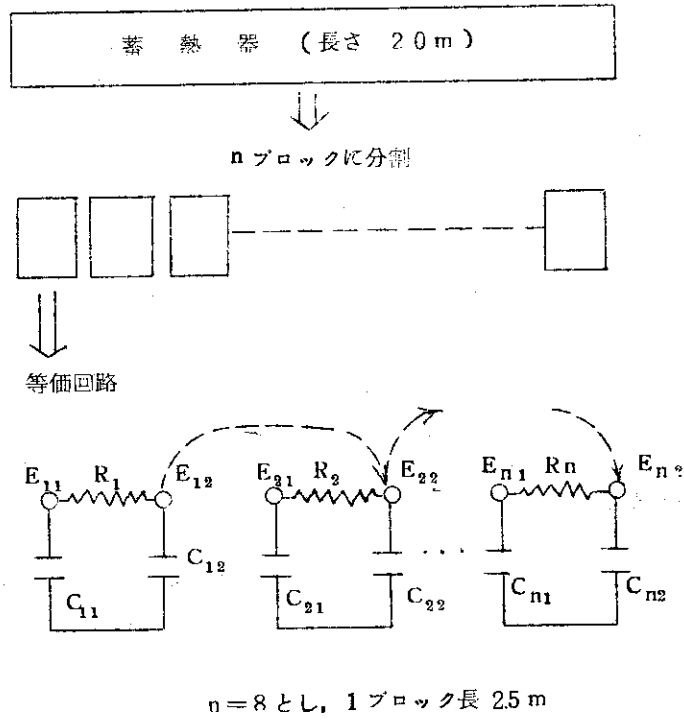


Fig.3.2 計算用等価回路

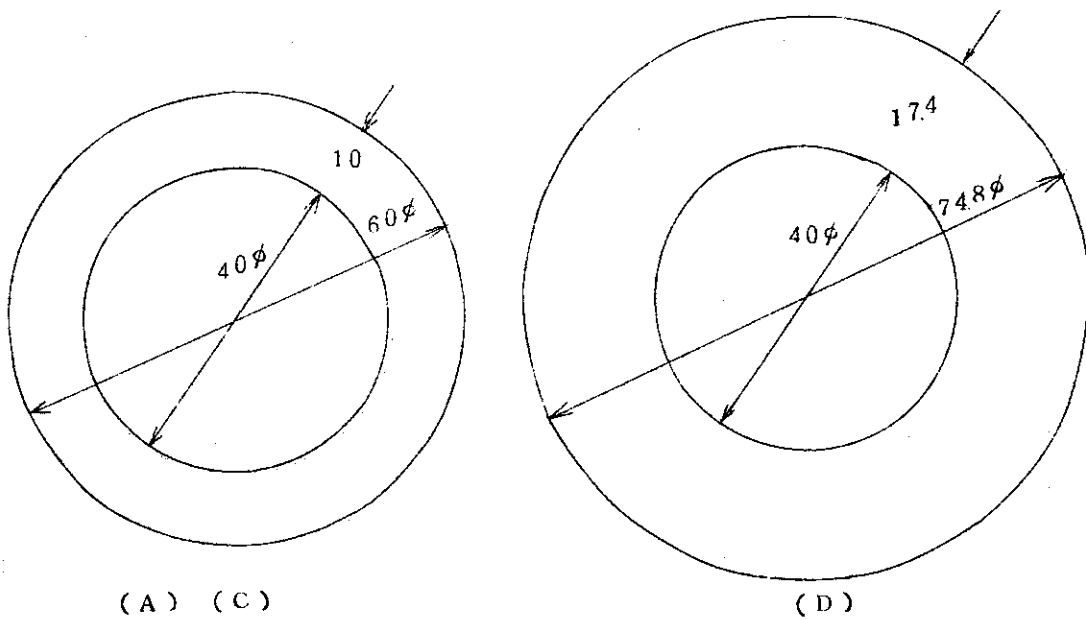


Fig.3.3 蓄熱管断面 (実物大)

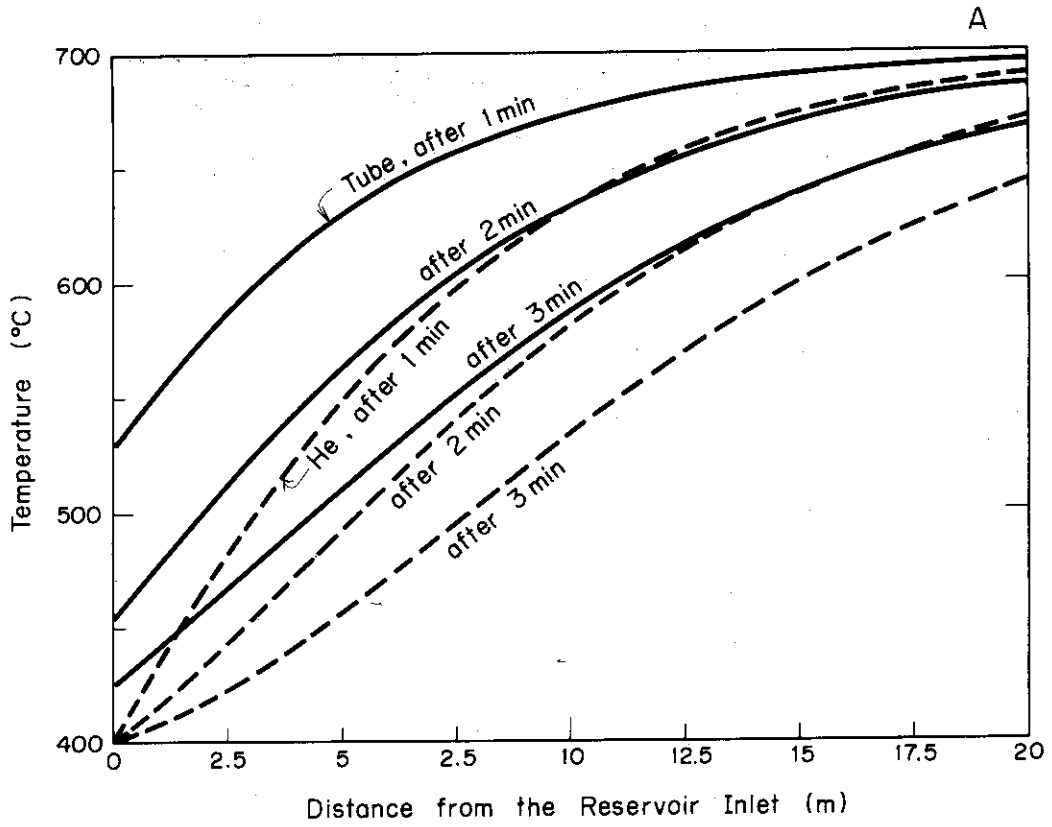


Fig. 3.4 蓄熱管とヘリウムの流れ方向温度分布 (A)

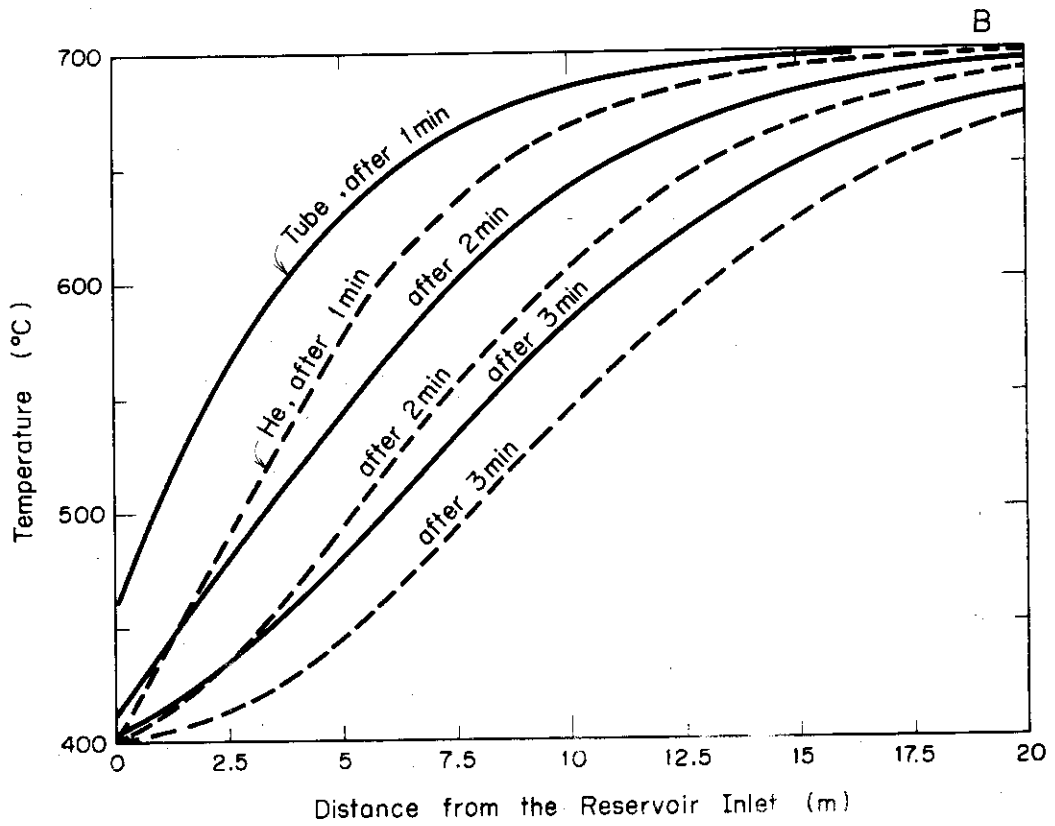


Fig. 3.5 蓄熱管とヘリウムの流れ方向温度分布 (B)

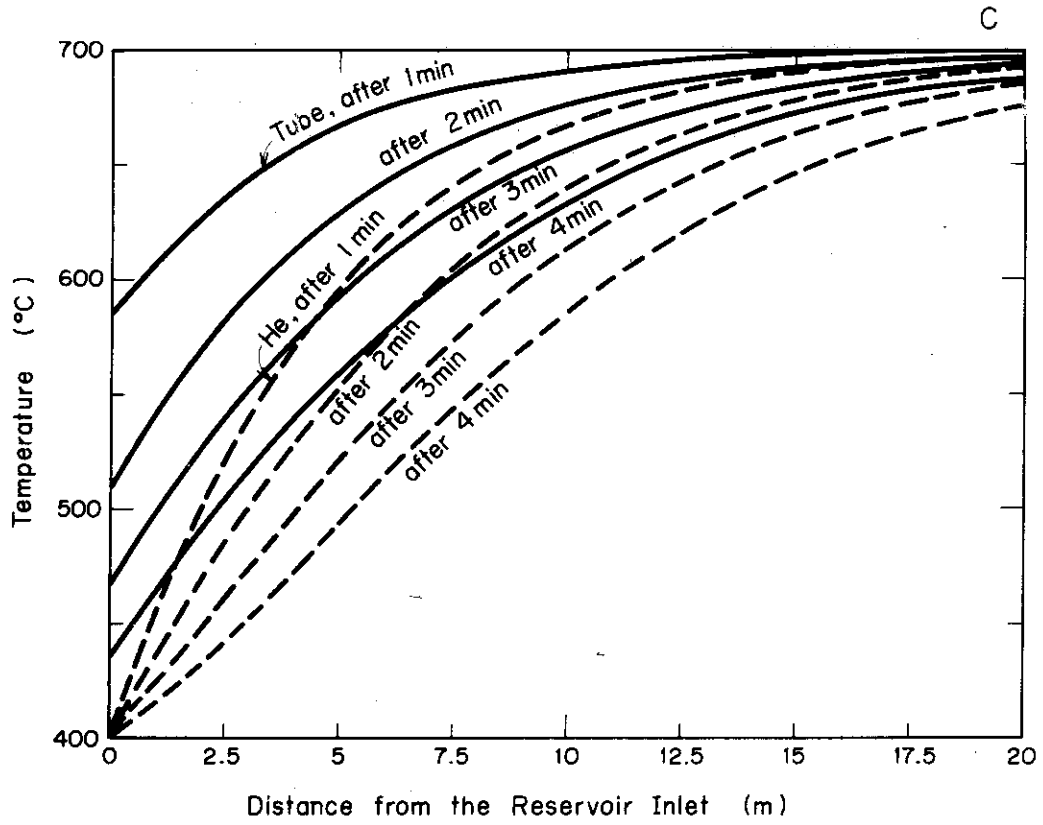


Fig. 3.6 蓄熱管とヘリウムの流れ方向温度分布 (C)

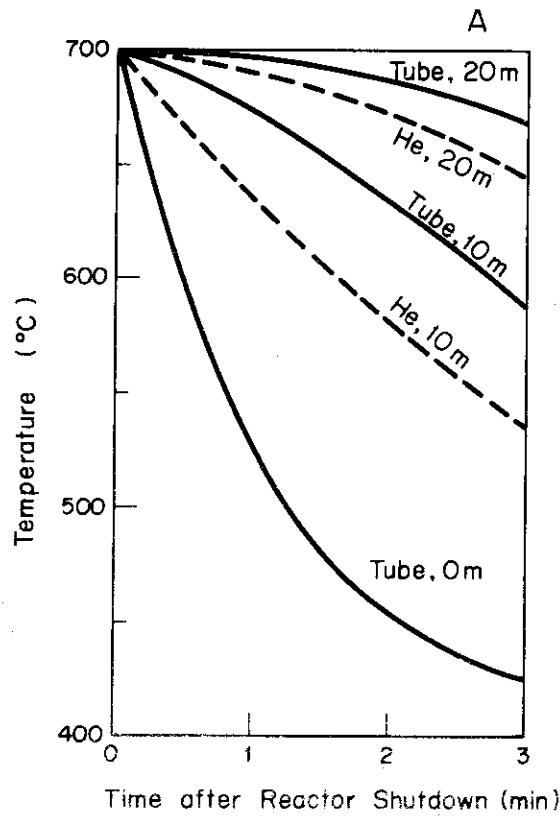


Fig. 3.7 流れ方向各部の管とヘリウムの温度変化 (A)

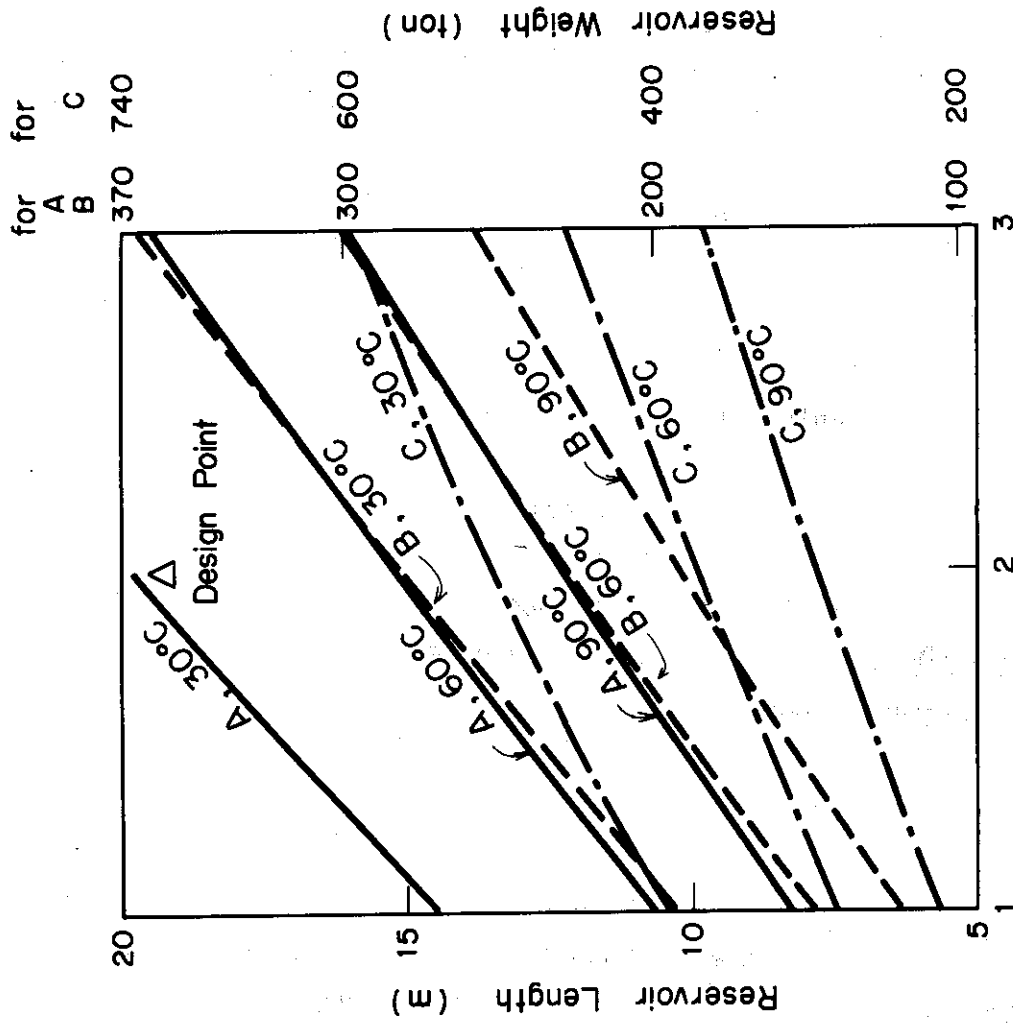


Fig. 3.9 炉停止後の経過時間と蓄熱管長さ、重量、ヘリウム出口温度の関係 (A, B, C)

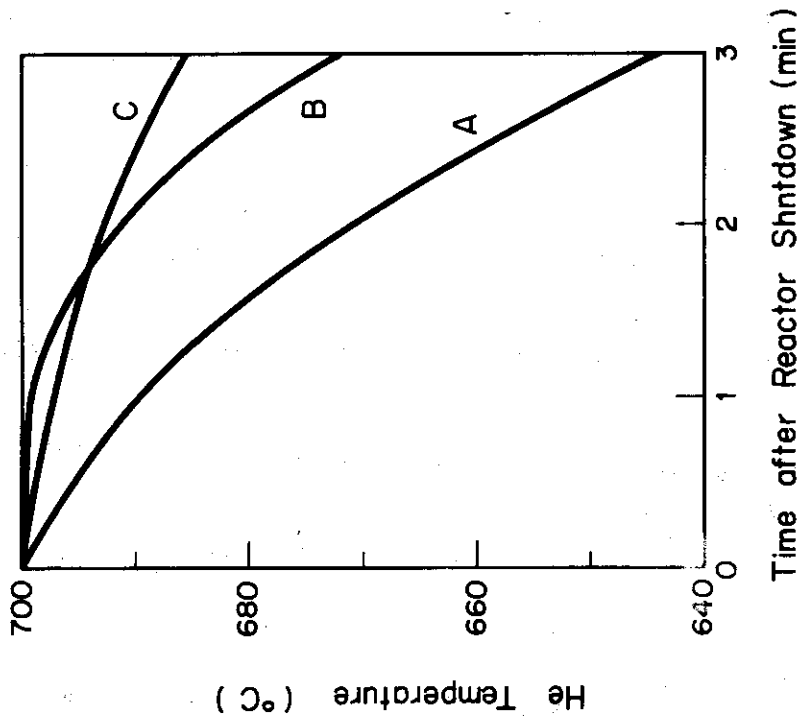


Fig. 3.8 流れの方向 20 m の部分のヘリウムの温度変化 (A, B, C)

4. 蓄熱器の試設計

Fig. 3.9 に示す点を設計点として選んだ。

4.1 設計要目

Table 4.1 に示す。

Table 4.1 蓄熱器設計要目

| | |
|-----------------|------------------------------------|
| He 圧力 | 20 kg/cm ² a |
| He 入口温度 | 400℃ |
| He 流量 | 105.8 kg/s |
| He 出口温度下限 | 670℃ (30℃ 降下) |
| He 出口温度下限に達する時間 | 2 min |
| He 流速 | 50 m/s |
| 蓄熱管内 / 外径 | 40 / 60 mmφ |
| 蓄熱管数 | 1474 本 |
| 蓄熱管長, 重量 | 20 m, 370 ton |
| 圧力容器直径, 肉厚, 重量 | 3 mφ, 60 mm ^t , 130 ton |
| 蓄熱器重量 | 500 ton (12 基で 6000 ton) |
| 蓄熱管部圧損 | 0.2 kg/cm ² |
| 送風動力 (12 基) | 30 MW (蓄熱管部以外は含まない) |

4.2 構造

Fig. 4.1 に構造を示す。蓄熱管は直径 3 m, 長さ約 30 m の圧力容器に収容される。

蓄熱管の一端は管板に溶接され, 他端はフリーになって, その部分から He が入る。こうすることによって管板部には過大な熱衝撃, 熱サイクルがかからないように配慮している (Fig. 3.7 参照)。

He は定常出力運転時は圧力容器鏡中央のダクトから入り, 炉停止時はバイパス流がその附近の 2 本のダクトから入る。案内翼は整流用として配置される。

蓄熱器は堅型, 横置型いずれも選択できるが, 横置型が好ましいと思われる。

4.3 問題点

この試設計では冒頭に述べた如く最適化は行っていない。また, 設計の前提条件についても適当に選んでいるので今後のつめを要する。

- (1) 温度降下制限 30℃ の妥当性

この値を大きく取りうれば蓄熱器はコンパクトにできる。プラントシステム全体の特性解析が必要である。

(2) 炉停止時間2分の妥当性

これについてはプラズマ側の設計との関連でつめる必要がある。(まえがきの項参照)。

(3) 送風動力30MWの妥当性

流速を落せば確実にこの値を小さくできる。この場合蓄熱器は少し大きくなる。総合的な経済評価によって決まるべきものである。

(4) 試設計の構造の妥当性

管群を圧力容器内に配置し、管板を下流側にもってくることは妥当であるが、試設計の構造は細長すぎないか。12基配置することでこのようになっているが、6基、4基とすれば長さは殆んど変わらず、圧力容器直径がそれぞれ約4m、5mとなる。

逆に24基とし、2基を直列に配置することも考えられるがこの場合は初段の管板部の温度変化に注意を要する(Fig. 3.7の10mの位置)。このような問題についても検討する必要がある。

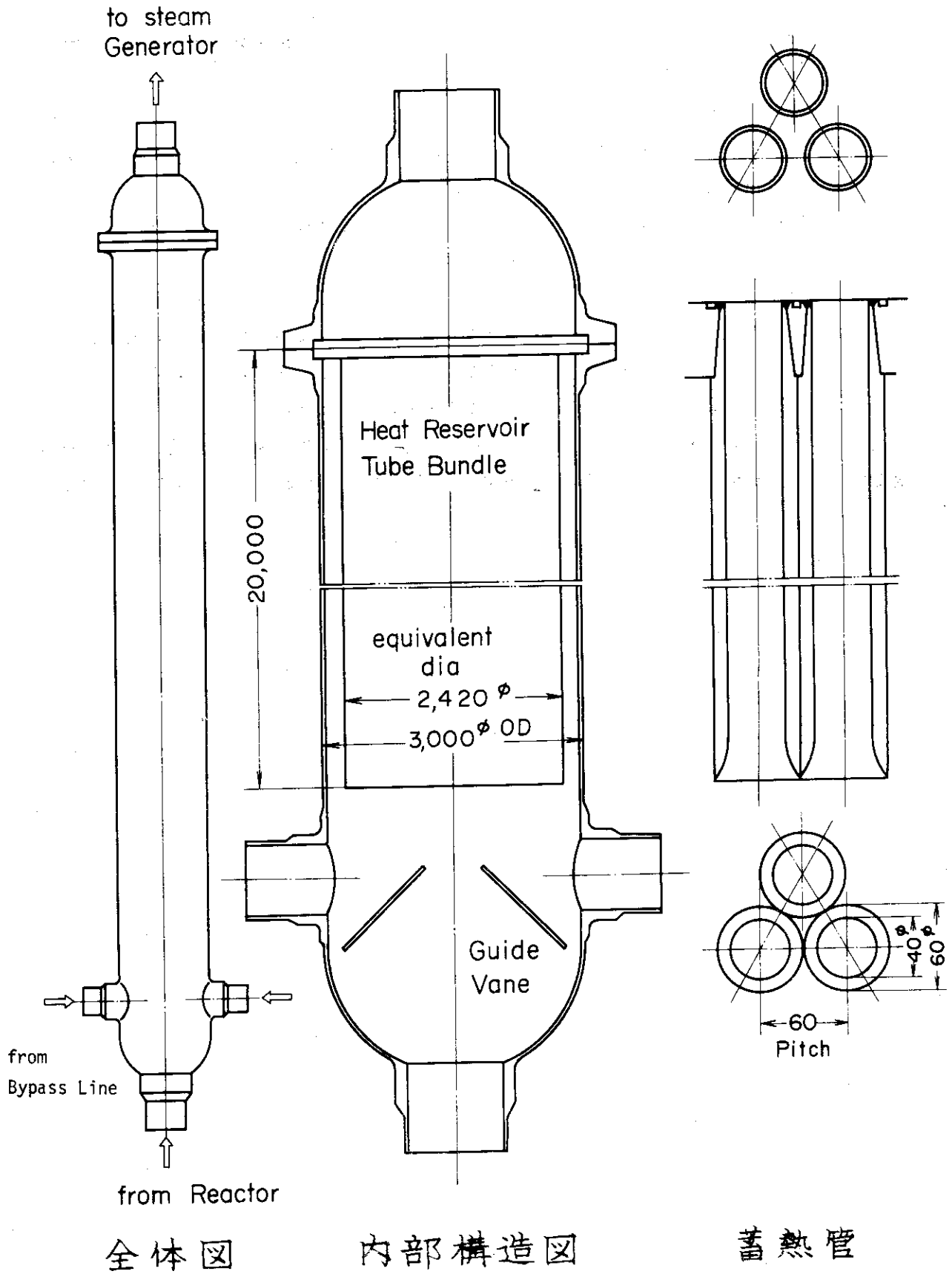


Fig. 4.1 蓄熱器構造図

5. 附 録

5.1 トカマク炉の運転モードの例

Table 5.1 に Wisconsin 大学の設計例⁽²⁾ を示し, Fig. 5.1 に Princeton 大学の設計例⁽³⁾ を示す。

Table 5.1 Wisconsin 大学の設計例

| Burn Cycle for UWMAK-II | | | | | | |
|-------------------------|--|-----------|-------------------------|---------------|-------------------------|-------------|
| Current Rise Time | Heating for Ignition & to Thermally Stable Operating Point | Burn Time | Plasma Current Turn Off | Purge Chamber | Reset Transformer Coils | Total Cycle |
| 10 s | 20 s | 5400 s | 100 s | 50 s | 150 s | 5730 s |

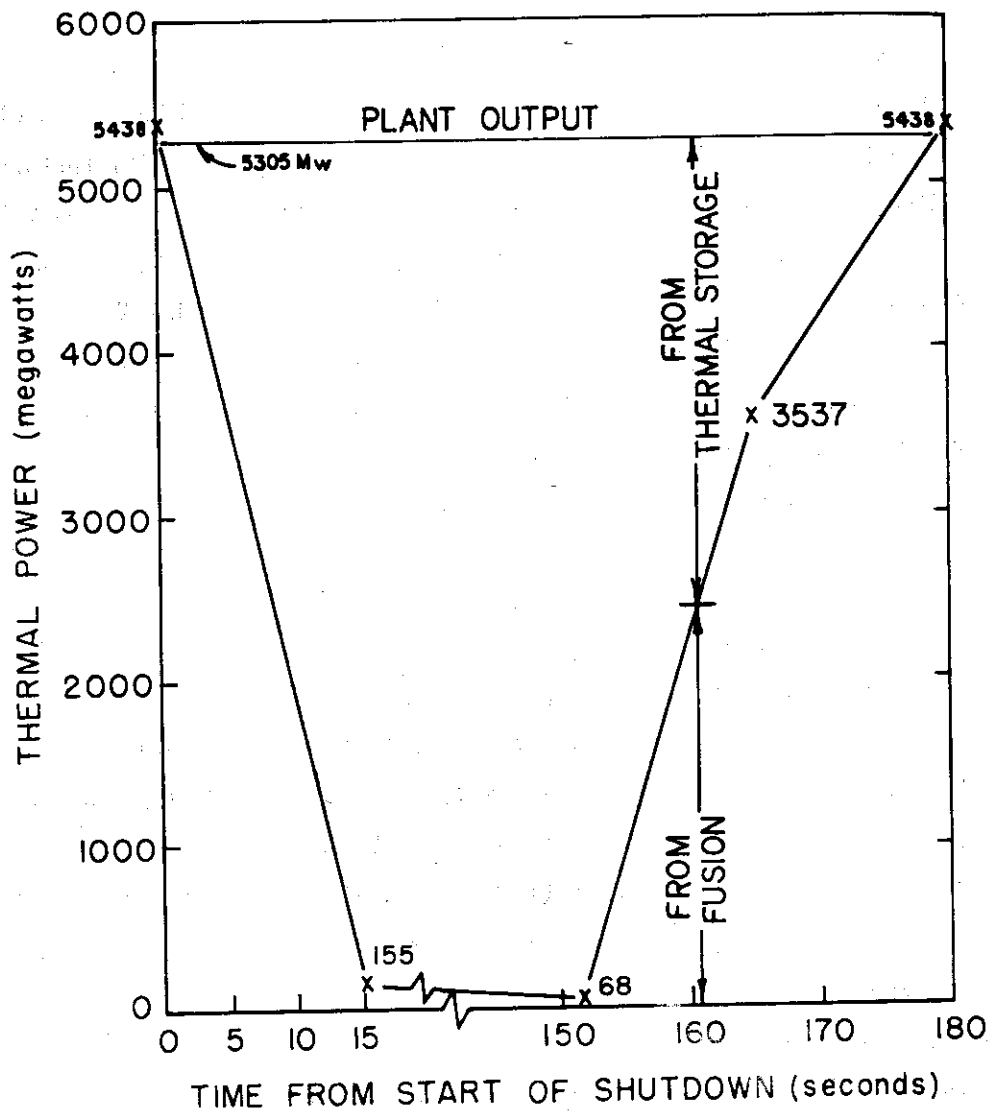


Fig. 5.1 Princeton 大学の設計例

5.2 特性計算における計算誤差等について

今回のパラメトリックサーベイには充分と思われるが今後検討すべき問題をリストアップし概略の検討をしてみる。

近似した項目のリストアップ

以下の項目を近似した。

- (1) メッシュの区分 2.5 m毎にした。20 mで8ブロック。
- (2) 熱定数として一定値を用いた。
ヘリウム 550℃, 管材料(SUS316)600℃。
- (3) 炉停止, 再起動時の出力, 流量変化をステップ状とした。
- (4) 蒸気発生器入口温度が変化しても蓄熱器入口温度, 流量を一定とした。
- (5) 管, Heをそれぞれ1点近似とした。
- (6) 熱伝達率を一定とし, 入口効果など考慮しなかった。

各項目の概略検討

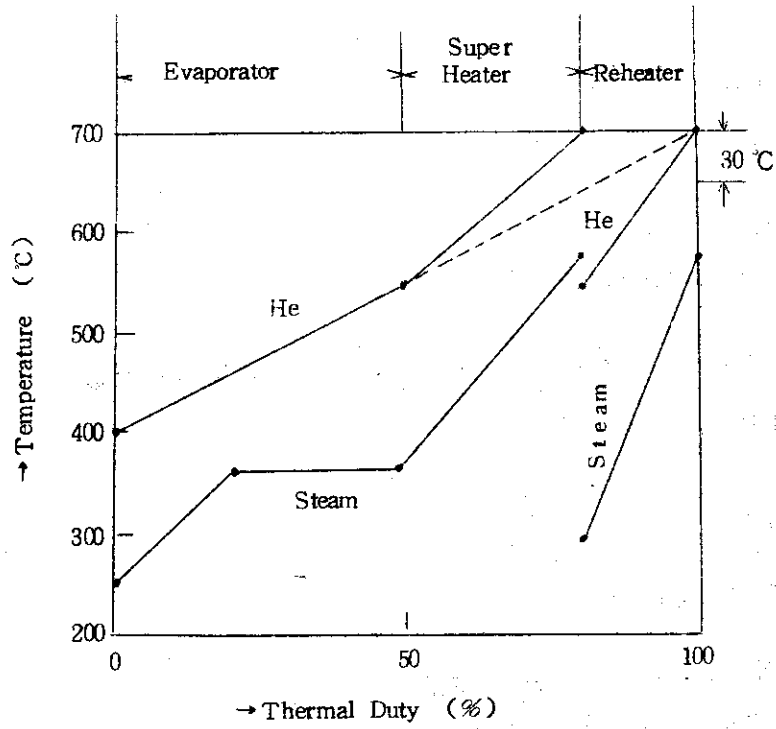
- (1) 長さを20 mとするなら8ブロックとれるので良さそうである。Fig. 3.4 (A)はFig. 3.5 (B)の2倍の分割に相当するが大差はない。(Aの20 m2分がB10 m1分に相当)。
- (2) 例えば Fig. 3.4 (A)に見る如く2分程度を問題にする今の場合には妥当のようである。これは特に困難ではないので熱定数を温度依存として再計算する予定である。
ヘリウムの温度550℃を基準としているが400℃では密度は1.22倍, 700℃では0.846倍でありこの分だけ流速が変化する。即ち, 50 m/sの標準に対し, 400℃では40.9 m/s, 700℃では59.1 m (圧力変化考慮せず)。0.05秒間に進む距離は2.05 mと2.96 m。
熱伝達率は400℃では550℃の0.90倍, 700℃では1.11倍。
- (3) これは厳しい側(安全側)である。プラント動特性まで含める時点で詳しくすれば良いと思われる。
- (4) これは下図(1)の如くHe温度が下れば当然のことながら流量を増さなければ出口温度を一定に出来ない(30℃降下したときには10%増せば同一温度にできる)。流量一定なら大略入口温度の下った分だけ出口温度が下る。これは蒸気サイクル側の設計と関連する。また, 図(2)の如く送風機の特性もあるので厳密にはプラント全体の特性と関連する。
然し, これらの問題はパラメトリックサーベイに特に重要という訳ではない。
- (5) 管を1点近似としたことは管内の熱抵抗が小さく, Heとの間の熱抵抗の $1/6$ 程度*であることからほとんど問題とならない。He側は管長に比べて管径が小さいので特に分割する必要はない。

*単位長での比較(CGS)

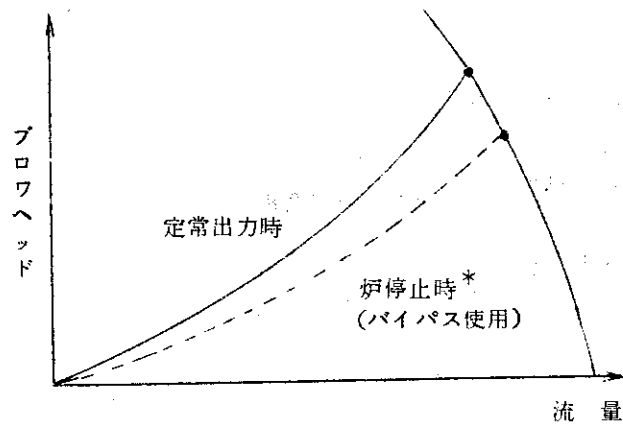
$$\text{Heへの熱管流率 (管表面} \rightarrow \text{He)} = 0.26 \text{ cal/s}^\circ\text{C}$$

$$\text{SUS管内熱貫流率 (管壁中央} \rightarrow \text{内面)} = 1.4 \text{ cal/s}^\circ\text{C}$$

- (6) 管長に比べて管径が小さいので入口効果も特に大きな問題とはならない。



図(1) 蒸気発生器温度熱量線図



図(2) グロワ特性

*バイパスラインの圧力損失を炉内と同一にすれば実線と重なるがこの方が有利であろう。

5.3 Table 3.3 の数値の根拠

A に対する計算

- (1) 流量
- W
- (105.8 kg/s)

$$WC_p \Delta T = \left(\frac{Q}{J} \right) / N$$

$$W = \frac{2000,000/12}{4.186 \times 0.1255 \times 300} = 105.8$$

但し, C_p 比熱, ΔT 炉出入口温度差, $\left(\frac{Q}{J} \right)$ 炉出力, N ループ数

- (2) 管数
- n
- (1474本)

$$A_c U n \rho = W$$

$$n = \frac{105.8}{\frac{\pi}{4} \times 0.04^2 \times 50 \times 1.142} = 1.474$$

但し, A_c 流路断面積, U 流速, ρ 比重量

- (3) 熱伝達率
- h
- (0.209 kcal/m
- ²
- s°C*)

$$h = \frac{k N_u}{d_e}$$

$$N_u = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$Re = \frac{d_e U}{\nu}$$

$$Re = \frac{0.04 \times 50}{0.330 \times 10^{-4}} = 6060.6$$

$$N_u = 0.023 \times 6060.6^{0.8} \times 0.690^{0.4} = 132.8$$

$$h = \frac{0.685 \times 10^{-3} \times 132.8}{4} = 0.0227 \text{ cal/cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}$$

$$= 0.227 \text{ kcal/cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}^*$$

(*0.227 が正しい。後で誤りが発見されたので修正できず, 本報告の計算は 0.209 を用いている。8%低い値を用いたことに相当する)。

- (4) 単位長伝熱面積
- A_h
- (185.2 m
- ²
-)

$$A_h = \pi d n$$

$$= \pi \times 0.04 \times 1474 = 185.2 \text{ m}^2$$

- (5) 単位ブロックあたり熱貫流率
- $h A_h L$
- (96.8 kcal/s°C)

$$h A_h L = 0.209 \times 185.2 \times 2.5 = 96.8$$

- (6) 単位長管総重量
- M
- (18.5 ton/m)

$$M = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) \cdot n \cdot \rho$$

$$= \frac{\pi}{4} (6^2 - 4^2) 1474 \times 7.97 \times 10^{-4} = 18.46$$

(7) 単位ブロック当り管熱容量 MCL (6.480 kcal/°C)

$$MCL = 18.5 \times 10^3 \times 0.14 \times 2.5 = 6.475$$

(8) 単位ブロック当り He 熱容量 $M_c C_p L$ (6.64 kcal/°C)

$$M_c = W/U$$

$$M_c C_p L = (105.8/50) \times 1.255 \times 2.5 = 6.64$$

B に対し A と異なる部分

熱管流率を 2 倍にするほか A と同じ。表中(→)とした部分は設計により変る部分。

C に対し A と異なる部分

(2) 管本数 A の 2 倍 = 2948

(3) 熱伝達率

$$h \propto Nu \propto Re^{0.8} \text{ より}$$

$$h = \left(\frac{1}{2}\right)^{0.8} h_A = 0.574 h_A = 0.120$$

(4) 単位長表面積 A の 2 倍 = 370.4

(5) 単位ブロック当り熱貫流率

$$h A_h L = 1.148 (h A_h L)_A = 111.1$$

(6) 単位長管総重量 A の 2 倍 = 37.0

(7) 単位ブロック当り管熱容量 A の 2 倍 = 12.960

(8) 単位ブロック当り He 熱容量 A の 2 倍 = 13.27

5.4 蓄熱器の特性改善方法

蓄熱器の特性は次の 2 つの方法で改善される。

- (1) 管の熱容量を増加する。
- (2) 管内面から He への熱伝達を良くする。

以下この 2 項目について検討する。

熱容量の増加

これには次の 2 つの方法がある。

- a. 管の外径を増して熱容量を増加する。(A に対する D に相当)
 - b. 管の数量を増して熱容量を増加する。(A に対する C に相当)
- a の場合には他の特性は変わらず、熱容量の増加した割合だけ時間を延長できる。
b の場合には圧損を減らす効果もある。

熱伝達の改善

次の 3 方法が考えられる。(A に対する B に相当)

- a. 管内面を粗面 (フィン付の場合を含む) とする。
- b. 流れを攪拌するための案内板を置く。例えば細長い平板をよじったようなものを入れる。

c. 管を細くして数を増す。

試算（前項 c に対応）

Ah（伝熱面積と熱伝達率の積）を F 倍にするために必要な寸法，数量，圧損について計算する。

（計算式）

流速一定の条件により

$$d^2 n = d_0^2 n_0$$

熱貫流率は

$$Ah = FA_0 h_0$$

伝熱面積比は

$$A/A_0 = dn/d_0 n_0$$

熱伝達率比は

$$h/h_0 = (d/d_0)^{-0.2}$$

$$\therefore Ah/A_0 h_0 = F = (d/d_0)^{0.8} (n/n_0)$$

管内径比

$$d/d_0 = F^{1.2}$$

管数量比

$$n/n_0 = F^{-0.6}$$

圧力損失比

$$\Delta P/\Delta P_0 = (d/d_0)^{-1.2} = F$$

今 $d_0 = 4 \text{ cm}$ ， $n_0 = 1474 \text{ 本}$ ， $F = 2$ とするならば

$$d = 1.78 F^{1.2} d_0 = 2.25 \text{ (cm)}$$

$$n = 3.175 n_0 = 4680 \text{ (本)}$$

$$\Delta P = 2 \Delta P_0 = 0.37 \text{ (kg/cm}^2\text{/20m)}$$

5.5 冷却体圧力の及ぼす効果

ここでは He 圧力 $20 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ として検討しているが炉の設計により圧力は変るものであるからこれの効果をチェックしておく。

構造をそのままとして流速を圧力に応じて変える場合（流速は圧力に反比例）について検討する。

(1) 圧力損失，送風動力

圧力損失は圧力に反比例し，送風動力は圧力の自乗に反比例する。

(2) 蓄熱器特性

単位ブロックを圧力に反比例した長さとして，

a. 熱伝達率は変らないのでブロック当りの熱貫流率は圧力に反比例する。

b. ブロックあたりの管の熱容量は圧力に反比例する。

c. ブロックあたりの冷却体の熱容量は変らない。これらをまとめると次表のようになる。

| | 標準 | $\frac{1}{2}$ 倍の圧力 | 2倍の圧力 |
|--------|-------|--------------------|------------------|
| ブロック長さ | L | 2L | $\frac{1}{2}$ L |
| 管熱容量 | C_1 | $2C_1$ | $\frac{1}{2}C_1$ |
| He熱容量 | C_2 | C_2 | C_2 |
| 熱抵抗 | R | $\frac{1}{2}R$ | 2R |

この表から特性は推定できる。

10 kg/cm²a ($\frac{1}{2}$ 倍の圧力) の場合には標準型 (A) の構造の場合の特性は、熱貫流率を2倍にとったBの計算結果でわかる。即ち、Fig. 3.5 (B) において長さを半分に、時間を2倍に読みかえることに等しい。Fig. 3.4 (A) と同じ特性である。

然し、重要なことは送風動力が4倍になるということである。逆の場合 (圧力40 kg/cm²a) には送風動力を $\frac{1}{4}$ にできる。

このことは圧力に応じた最適設計のあることを示している。

参考文献

- (1) 迫, 原子力学会昭和49年秋の分科会炉物理・炉工学, E40
- (2) R.W.Conn, et al., IAEA-CN-33/G1-2, Major Design Feature of the Conceptual D-T Tokamak Power Reactor, UWMAK-II (1974)
- (3) R.G.Mills (editor), MATT-1050, A Fusion Power Plant (1974)
- (4) K.Sako, et al., IAEA-CN-33/G1-5, Design Study of a Tokamak Reactor (1974)
- (5) 梶山武義, JAERI-memo 3751, 高速炉設計定数-II (1969)

| | 標準 | $\frac{1}{2}$ 倍の圧力 | 2倍の圧力 |
|--------|-------|--------------------|------------------|
| ブロック長さ | L | 2L | $\frac{1}{2}$ L |
| 管熱容量 | C_1 | $2C_1$ | $\frac{1}{2}C_1$ |
| He 熱容量 | C_2 | C_2 | C_2 |
| 熱抵抗 | R | $\frac{1}{2}R$ | 2R |

この表から特性は推定できる。

10 kg/cnf a ($\frac{1}{2}$ 倍の圧力) の場合には標準型 (A) の構造の場合の特性は、熱貫流率を2倍にとったBの計算結果でわかる。即ち、Fig. 3.5 (B) において長さを半分に、時間を2倍に読みかえることに等しい。Fig. 3.4 (A) と同じ特性である。

然し、重要なことは送風動力が4倍になるということである。逆の場合 (圧力40 kg/cnf a) には送風動力を $\frac{1}{4}$ にできる。

このことは圧力に応じた最適設計のあることを示している。

参考文献

- (1) 迫, 原子力学会昭和49年秋の分科会炉物理・炉工学, E40
- (2) R.W. Conn, et al., IAEA-CN-33/G1-2, Major Design Feature of the Conceptual D-T Tokamak Power Reactor, UWMAK-II (1974)
- (3) R.G. Mills (editor), MATT-1050, A Fusion Power Plant (1974)
- (4) K. Sako, et al., IAEA-CN-33/G1-5, Design Study of a Tokamak Reactor (1974)
- (5) 梶山武義, JAERI-memo 3751, 高速炉設計定数-II (1969)