

JAERI-Tech

JP0150712

2001-039



# 船用原子炉（MRX、DRX）蒸気発生器 伝熱管の簡易流力振動評価

2001年6月

斎藤 和男\*・石田 紀久

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 沢城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 沢城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

---

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

船舶用原子炉（M R X、D R X）蒸気発生器伝熱管の簡易流力振動評価

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部  
斎藤 和男<sup>\*</sup>・石田 紀久

(2001年4月2日受理)

大型船舶用原子炉M R X 及び深海科学調査船用原子炉D R Xにおいては、蒸気発生器を原子炉容器に内装する一体型構造を採用している。蒸気発生器はヘリカルコイル貫流型であり、多数のコイル（伝熱管）が、炉心を内包する原子炉容器内筒を取り巻くようにアニュラー空間内に設置されている。この伝熱管の管外流及び管内流により発生すると予想される流力振動を簡易計算により評価し、支持点ピッチの妥当性を検討した。

---

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

\* 石川島播磨重工業株式会社

Simple Evaluations of Fluid-induced Vibrations for Steam Generator  
Tube Arrays in Advanced Marine Reactors (MRX, DRX)

Kazuo SAITO\* and Toshihisa ISHIDA

Department of Nuclear Energy System  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 2, 2001)

Advanced Marine Reactor (MRX) and Deep Sea Research Reactor (DRX) are the integral-type PWR, and the steam generators are installed in the reactor vessels. Steam generators are of the once-through, helical-coil tube types. Heat transfer tubes surround inner shroud in annular space of the reactor vessel.

Flow-induced vibrations are calculated by simple methods, and the arrangement of tube support structures are evaluated.

Keywords:Fluid-induced Vibration, Steam Generator Tube Arrays, Helical Coil,  
Karman-vortex Induced Vibration, Fluidelastic Vibration, Turbulence Flow Vibration

---

\*Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 蒸気発生器の構造 .....	1
2.1 MRX蒸気発生器の構造 .....	1
2.2 DRX蒸気発生器の構造 .....	2
3. 管外流による振動 .....	2
3.1 考慮する流力振動 .....	2
3.2 伝熱管固有振動数 .....	2
3.3 カルマン渦による振動 .....	3
3.4 亂れた流れによる不規則振動 .....	5
3.5 流力弾性振動 .....	5
4. 管内流による流力振動 .....	7
5. 結論 .....	8
謝 辞 .....	9
参考文献 .....	9

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Structures of Steam Generators .....	1
2.1 Structure of MRX Steam Generator .....	1
2.2 Structure of DRX Steam Generator .....	2
3. Vibrations Caused by Outer Flow of Tubes .....	2
3.1 Considered Vibrations .....	2
3.2 Characteristic Frequencies of Tubes .....	2
3.3 Vibration due to Karman Vortex Shedding .....	3
3.4 Vibration due to Turbulent Flow .....	5
3.5 Vibration due to Fluidelasticity .....	5
4. Vibration Caused by Inner Flow of Tubes .....	7
5. Conclusions .....	8
Acknowledgment .....	9
References .....	9

This is a blank page.

## 1. はじめに

日本原子力研究所、船用炉設計研究室においては、大型船舶用原子炉（M R X）及び深海科学調査船用原子炉（D R X）の設計研究を実施した<sup>1) , 2)</sup>。これらの原子炉は加圧水型の一体型炉であり、炉心で発生した熱は一次系冷却材により蒸気発生器に運ばれ、そこで二次系蒸気を発生してタービンを駆動する。蒸気発生器は加圧器などとともに、原子炉容器の内部に設置されている。蒸気発生器は容器内の流路の仕切である内筒と、原子炉容器内壁の間のアニュラー空間の、炉心上方位置に固定されている。型式はヘリカルコイル貫流型であり、多数のヘリカルコイル（伝熱管）が内筒を取り巻く螺旋状に配置されている。一次冷却水は内筒の内側にある炉心で加熱されて内筒内側を上昇、内筒上部の流路口を通ってアニュラ一部に流出し、ここを下降して蒸気発生器に至る。二次系流体は給水ノズルより伝熱管に供給され、一次冷却水との熱交換により蒸気を発生、蒸気ノズルより原子炉容器を出てタービンに導かれる。

このため、蒸気発生器伝熱管には管外を流れる一次冷却水及び管内を流れる二次冷却水の双方による流力振動を受ける可能性がある。そこで予想される流力振動を、関連パラメータを一部変化させて計算評価し、伝熱管の支持点数の妥当性を検討した。計算評価には既往の文献等による簡便な計算式を用いた。

## 2. 蒸気発生器の構造

### 2. 1 M R X 蒸気発生器の構造

M R X原子炉構造をFig. 1に、蒸気発生器構造をFig. 2～Fig. 5に示す。蒸気発生器は合計388本のヘリカルコイル伝熱管の集合体であり、管外を一次冷却水が直交流として流れる。給水は原子炉容器上部の給水ノズルから入り、管板で分配されてダウンカマー管内を下降、伝熱管下側から流入後、ヘリカルコイルの螺旋に沿って上昇する。Fig. 5に拡大図を示すように伝熱管は正方配置であり、容器半径方向に25層の伝熱管がある。最内層の12本と最外層の18本での伝熱管ピッチは同じであり、且つ高さもほぼ同じである。これは螺旋の巻き数を調整したものであり、伝熱管長さをほぼ同じとしてある。伝熱管支持構造をFig. 3及びFig. 5に示す。Fig. 5に示す支持方法は多孔板方式であり、図示のように楔により伝熱管を拘束するものである。この多孔板は円周方向90°ピッチで4枚設置されている（Fig. 3参照）。これとは別にラダー方式による支持板が4枚、多孔板と交互に90°ピッチで配置されている。従って合計8枚の支持板で支持・固定されている。ラダー方式ではボルトの締込みにより伝熱管を支持・固定する。どちらの方式も伝熱管の拘束効果としては同等であるため、以下においては両者を区別せずにM R Xの伝熱管支持点数は8として扱う。

ダウンカマー管は管外流とは平行流となるために、有意な流力振動は生じにくいと考えられ、検討から除外する。

運転条件及び伝熱管仕様をTable. 1に示す。

## 2. 2 DRX蒸気発生器の構造

D R X原子炉構造をFig. 6に、蒸気発生器構造をFig. 7, Fig. 8に示す。3層構造であり各層に2本、合計6本の伝熱管から成る。流れ方向の伝熱管ピッチが25mm～28.5mmと層毎に異なるため正確な千鳥配置ではないが、ここでは第2層の流れ方向ピッチ26.5mmの千鳥配置として検討する。ここでもダウンカマ管の振動は検討から除外する。

運転条件及び伝熱管仕様をTable. 1に示す。

### 3. 管外流による振動

### 3. 1 考慮する流力振動

伝熱管の管外流による流力振動としては、以下があげられる。

- (a) カルマン渦による振動
  - (b) 亂れた流れによる不規則振動
  - (c) 流力弾性振動
  - (d) 音響振動

上記のうち(d)は管外流体が気体のときに問題となる振動であるため、検討の対象外とする。従ってここでは(a)カルマン渦による振動、(b)乱れた流れによる不規則振動及び(c)流力弹性振動について検討する。以下の数式において説明のない記号はTable. 1による。

### 3. 2 伝熱管固有振動数

伝熱管固有振動数の算出は、固有振動数が低くなりカルマン渦放出振動数により近くなる最外層の伝熱管について算出する。また、MR Xについては円周方向支持点数をパラメータとして設計の妥当性を検討する。DR Xでは下記係数Cを得るために支持点数2点についても算出する。

リング状の伝熱管が円周方向に2点で支持されている（180° ピッチ）場合の伝熱管直交方向、すなわち流れ方向振動の固有振動数は下式で概算できる<sup>3)</sup>。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R^2} F\left(\alpha, \frac{EI}{GJ}\right) \sqrt{\frac{1000EI}{w}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

- F : 欠けたリングに直角な振動の係数でFig. 9による。 (-)
- $\alpha$  : 支持点間角度 (Fig. 9参照、°)
- I : 断面2次モーメント ( $\text{mm}^4$ ),  $I = (\pi/64)(d_o^4 - d_i^4)$ ,  $d_i = d_o - 2t$
- G : 横弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $G = E/(2*(1+\nu))$
- J : 断面2次極モーメント ( $\text{mm}^4$ ),  $J = 2*I$
- w : 単位長さ当たり重量 ( $\text{kg/mm}$ ),  $w = w_m + w_1$

一方、支持点数が2点を超える場合、直交方向の固有振動数を求める一般式はない。そこで、支持点数が2点を超える場合には下式(2)に示すように、端部固定の棒の曲げ振動の算式に係数Cを乗じて算出する。

$$f_2 = C \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{1000EI}{w}} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここにCは、2点支持に対して(2)式においてC=1として求めた $f_2$ と、(1)式による $f_1$ の比として得る。その他の変数は、

$\lambda$  : 支持部条件による振動数係数であり、参考文献<sup>3)</sup>, p. A3-52, 表19より、固定一固定条件においては  $\lambda = 4.730$  (-)。固定とするのはFig. 5に示すように、支持方法はほぼ回転も拘束していることによる。DRXも同様と仮定した。

L : 支持点間の伝熱管長 ( $\text{mm}$ )

Table. 2に計算結果を示す。

### 3. 3 カルマン渦による振動

#### (1) 概要

流れに直交して置かれている単独円筒では、その後流に渦が交互に放出され、いわゆるカルマン渦列を形成する。この渦の放出により円筒は交播的な変動流体力を受けることになり、円筒の固有振動数と渦放出振動数が一致すると円筒は共振を起こし、大きく振動することになる。従つて一般にはこの両者の振動数が十分離れていることが必要となる。そのため、流速から渦放出振動数を得て、伝熱管の固有振動数と比較する。

#### (2) 渦放出振動数

##### 1) 管外流路断面積

##### 正方配置 (MRX)

$$A = \frac{\pi}{4}(D_o^2 - D_i^2) - \pi d_o \sum_{k=1}^n d_k - A_{spt}$$

## 千鳥配置 (D R X)

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_1^2) - \pi d_o \sum_{k=0}^m d_{2k+1} - A_{spt}$$

ここに、

$A$  : 流路断面積( $\text{mm}^2$ )

$d_k$  : 各層のヘリカルコイル中心径( $\text{mm}$ ),  $d_k = 2R_k$ ,  $k=1$ :最内層,  $k=n$ :最外層

$n$  : 層数

$A_{spt}$  : 支持装置の流路投影面積( $\text{mm}^2$ )

$d_{2k+1}$  : 奇数番目ヘリカルコイル中心径,  $d_{2k+1} = 2R_k$ ,

$k=0$ :奇数層の最内層,  $k=m$ :奇数層的最大層数

2) 一次冷却水流速 :  $V(\text{m/s})$

$$V = \frac{Q_1}{A \times 10^{-6}} \times \frac{1}{3600}$$

3) カルマン渦放出振動数

$$f_K = S_t \times \frac{V}{d_o/1000}$$

ここに、

$f_K$  : カルマン渦放出振動数(Hz)

$S_t$  : ストローハル数(−)

蒸気発生器管束のように、一定間隔で配置された伝熱管に直交流が流れる場合のカルマン渦列はChenによって実験され、次のようなストローハル数の関係を得ている<sup>4)</sup>。

正方配置 :

$$S_t = 0.1 \times \ln[A_a(XL - 1.0) + 1.0]$$

千鳥配置 :

$$S_t = 1.15 \times [0.2 - (0.2 + B)e^{XM \cdot X} + B \times e^{(2.0X - X^2)}]$$

ここに、

$$A_a = 7.596X^3 - 25.26X^2 + 45.61X - 14.387$$

$$X = 1.0 / |XL - 1.0| \cdots \text{正方配置}$$

$$= XT - 1.0 \cdots \text{千鳥配置}$$

$$XL = L_r/d_o$$

$$XT = T/d_o$$

$L_r$  : 流れ方向ピッチ、Fig. 10 (mm)

$T$  : 流れ直角方向ピッチ、Fig. 10 (mm)

$$B = \frac{S_{MAX} - 0.2 + 0.2e^{XM}}{2.718 - e^{XM}}$$

$$S_{MAX} = 0.88e^{(0.3314XL - 0.0665XL^2)} + 0.17$$

$$XM = -0.36e^{2.04/XL}$$

計算結果をTable.3に示す。MRX蒸気発生器伝熱管のカルマン渦放出振動数は22.9(Hz)、DRXでは4.3(Hz)である。DRXにおいて低い要因は一次冷却材を自然循環させているために流速が低い事による。

Fig.11にMRXの支持点数と固有振動数、カルマン渦放出振動数の関係を示す。

Table.2より、MRXにおいては支持点数を8、すなわち45°ピッチの支持とすれば伝熱管固有振動数 $f_2$ は53.7(Hz)となり、カルマン渦放出振動数 $f_K=22.9$ (Hz)から2倍以上離すことが出来る。またDRXでは4点支持において $f_2=184.5$ (Hz)であり、 $f_K=4.3$ (Hz)とは遙かに離れている。従って何れの伝熱管も現計画の支持点ピッチにより、カルマン渦による流力振動は回避できると評価される。

### 3. 4 亂れた流れによる不規則振動

流れの乱れによる不規則振動は乱流によって生じるが、ここではその有意な振動数が固有振動数と十分離れていれば振動は生じないものとする。

不規則振動の有意な振動数は参考文献<sup>5)</sup>による下式から得られる。

$$f_{tb} = \frac{1000 \times V \times d_o}{L_T \times T} \left[ 3.05 \left( 1 - \frac{d_o}{T} \right)^2 + 0.28 \right]$$

ここに、

$f_{tb}$ ：不規則振動の有意な振動数(Hz)

$V$ ：流速(Table.3, m/s)

他の記号はTable.1に示す。

計算結果をTable.4に示す。流れの乱れによる不規則振動の有意振動数 $f_{tb}$ に較べて固有振動数 $f_2$ は3倍以上離れており、有意な振動は生じないといえる。

### 3. 5 流力弹性振動

#### (1) 概要

流力弹性振動は、流速がある限界値以下であれば振動に対する減衰力として作用する流力弹性が、限界値を超えた場合には負の減衰となって振動を助長するように作用するもので、大振幅の振動となる可能性がある。限界流速は無次元値として、ダンピングパラメータと実験により定める定数を用いて求めるものであるが、ヘリカルコイルのような曲管群に適用できる式は見あたらないため、ここでは直管群に対する評価式を用いる。

## (2) 限界無次元流速

限界無次元流速には、ダンピングパラメータを考慮した、次のConnorsの式を用いる<sup>6)</sup>。

$$u_c = C \{ m \delta_1 / (\rho d_o^2) \}^{0.5} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここに、

$u_c$  : (流力弹性振動の) 限界無次元流速 (-)

C : 定数

m : 伝熱管の単位長さ重量 (kg/m, Table. 1 ( $w_u + w_l$ )  $\times 10^3$ )

$\rho$  : 一次冷却水の平均温度における密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$d_o$  : 伝熱管外径 (m)

$\delta_1$  : 静止した流体中の伝熱管の対数減衰率 (-)

上式の{}内がダンピングパラメータである。ここに対数減衰率  $\delta_1$  は打振試験により得られる値である。ここでは口径  $\phi 18.0 \times 1.5$  mm、支持点数8、ヘリカルコイル半径はMRXと同等、材質もMRXのインコロイ800と同等の伝熱管について得られた、 $\delta_1 = 0.04$ を全ての支持点数の計算に使用する。

Connorsは実験結果を上式で整理して、定数C=9.1とした無次元流速が流力弹性振動の発生限界であり、それ以下では振動を生じない安定域とした。

## (3) 評価

管外流体の無次元流速  $u_n$  は次式で表される。

$$u_n = V / (f_2 d_o)$$

ここに、

V : 一次冷却水流速 (m/s, Table. 3)

$f_2$  : 伝熱管固有振動数 (Hz, Table. 2, 支持点数で異なる)

(3)式による振動発生限界の  $u_c$  及び  $u_n$  の評価結果をFig. 12にダンピングパラメータとの関係として示す。図より、MRX、DRXとも支持点数が現設計値の4点及び8点で安定域であり、流力

弾性振動は生じないといえる。但し、対数減衰率についてはモックアップ等により確認する必要がある。

#### 4. 管内流による流力振動

##### (1) 概要

熱交換器伝熱管のような曲り管（ヘリカルコイル）では、管内の流れにより自励振動が励起される場合がある。これは管が管内流れの圧力、流速の影響を受け、見かけの剛性が低下して発生する不安定現象として説明されている。

ここでは、そのような現象が発生した場合に主要な振動となる伝熱管面外振動について、設計条件から無次元流速を求め、これが不安定振動を生じる限界無次元流速以下であれば不安定振動は発生しないとする。

##### (2) 評価

###### 1) 無次元流速

曲り管の面外振動に対する無次元流速は次式で表される<sup>8)</sup>。

$$V_N = \sqrt{\frac{w_f}{1000EI}} \times V_I R$$

ここに、

$V_N$  : 無次元流速( - )

$w_f$  : 管内流体単位長さ重量(kg/mm)、Table.1の $w_1$ または $w_g$ 。

$I$  : 断面2次モーメント( $\text{mm}^4$ )、Table.2

$V_I$  : 管内流速(mm/s),

$$V_I = Q_2 * 10^9 / [3600 * m * (\pi/4) d_I^2],$$

$Q_2$  : 管内流量( $\text{m}^3/\text{h}$ )でTable.1の $Q_{21}$ または $Q_{2g}$ 。

$m$  : 伝熱管本数,  $m=388(\text{MRX})$ 、 $m=6(\text{DRX})$

$$d_I = d_O - 2t$$

###### 2) 限界無次元流速

限界無次元流速 $V_C$ は伝熱管の規格化挟み角 $K$ 、両支持点の拘束条件及び注目する振動モードにより定められる。ここで、

$$K = \alpha / (2\pi)$$

$\alpha$  : Table.2に示す支持点間挟み角(但し、ラジアン)

支持点の拘束条件は、M R XについてはFig. 5から固定ー固定とし、D R Xも同様と仮定する。注目する振動モードは1次モードとする。

Fig. 13に参考文献<sup>7)</sup>による、限界無次元流速 $V_c$ と規格化挾み角Kの関係を示す。本図の1次モード、"SYMMETRIC"の曲線より得た限界無次元流速 $V_c$ を、他の結果とともにTable. 5に示す。M R Xの規格化挾み角K=0.125に対する $V_c$ は安全側に図の上限値である7とした。同表よりM R X、D R X各々の管内流体が水、蒸気どちらの場合についても、無次元流速 $V_N$ は限界無次元流速 $V_c$ を大幅に下まわっており、従って管内流による不安定振動は生じないと見える。

## 5. 結論

以上の検討結果により、M R X及びD R Xの蒸気発生器伝熱管は、管外流によるカルマン渦励起振動、乱れた流れによる不規則振動、流力弹性振動及び管内流による不安定振動の各々について、それらの発生する恐れのないことが明らかとなった。このことはM R X蒸気発生器伝熱管の支持点数(8)及びD R X蒸気発生器伝熱管の支持点数(4)についても、各々が妥当であることを示している。但し、流力弹性振動に関連して使用した伝熱管の対数減衰率について、モックアップ等により確認する必要がある。

### 謝　　辞

本研究に際して、有益な助言をいただいた、星薦雄元原子力船研究開発室長に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 原子力船研究開発室、「改良船用炉MRXの工学設計」, JAERI-Tech 97-045(1997)
- 2) 日本原子力研究所、「原子力船研究開発の現状」, 3.2.2深海船用原子炉(DRX)の設計研究(1995)
- 3) 日本機械学会、「機械工学便覧」, A3編, 第7章, 7.3.6リングの振動(1987)
- 4) Chen, Y.N., 「Flow-Induced Vibration and Noise in Tube-Bank Heat Exchanger due to Von Karman Streets」, Trans. of the ASME, Ser. B: J. of Eng. for Industry, 90, 134-146(1968)
- 5) Owen, P.R., 「Buffeting Excitation of Boiler Tube Vibration」, J. of Mech. Sci., 7, 431-439(1965)
- 6) 稲垣 嘉之,「ヘリカルコイル型熱交換器における伝熱管群の流体励起振動挙動と流動伝熱特性に関する研究」, JAERI-Research 97-069, (1997)
- 7) Chen, S.S., 「Out-of-Plane Vibration and Stability of Curved Tubes Conveying Fluid」, Trans. of the ASME, Ser. E: J. of Appl. Mech., 362-368(June 1973)

Table.1 M R X、D R X蒸気発生器仕様

	項目	記号(単位)	M R X	D R X
一次 冷却水	運転温度 蒸気発生器入口 “ 出口	T <sub>11</sub> (°C) T <sub>10</sub> (°C)	297.5 282.1	298.0 281.8
	運転圧力	P <sub>1</sub> (MPa)	11.87	8.35
	運転流量	Q <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /h)	5812	41.8 (*1)
二次 冷却水	運転温度 給水温度 蒸気温度	T <sub>21</sub> (°C) T <sub>20</sub> (°C)	185 289	62.0 242.4
	運転圧力	P <sub>2</sub> (MPa)	4.02	3.0
	流量 給水 蒸気	Q <sub>21</sub> (m <sup>3</sup> /h) Q <sub>2g</sub> (m <sup>3</sup> /h)	190.4 (*2) 9530 (*2)	1.07 (*3) 72.31 (*3)
伝熱管 (ヘリカルコイル)	外径	d <sub>o</sub> (mm)	19.0	19.0
	肉厚	t (mm)	2.1	1.5
	本数	—	388	6
	配列 層数×各層本数	— n ×	正方配列 25層×最内層12本 ～最外層18本	千鳥配列 3層×2本
	ヘリカルコイル半径 最内層 最外層 中間層	R (mm) R (mm) R <sub>k</sub> (mm)	1063 1663 25mmピッチで増加	362.5 412.5 387.5
	配列ピッチ 流れ方向(容器軸方向)	L <sub>T</sub> (mm)	25	(*7) 最内層:25～ 最外層:28.5
	流れ直交方向(半径方向)	T (mm)	25	50
	螺旋ピッチ	— (mm)	最内層:325 最外層:450	最内層:49.9 最外層:56.8
	材質	—	インコロイ800	インコロイ800
	縦弾性係数 (*4)	E (N/mm <sup>2</sup> )	2.020x10 <sup>5</sup>	2.020x10 <sup>5</sup>
	ボアソン比	ν (-)	0.3	0.3
	単位長さ当たり重量 伝熱管 管内流体 水 蒸気	w <sub>m</sub> (kg/mm) w <sub>1</sub> (kg/mm) w <sub>g</sub> (kg/mm)	8.864x10 <sup>-4</sup> 1.520x10 <sup>-4</sup> 3.036x10 <sup>-6</sup>	(*5) (*6) 6.556x10 <sup>-4</sup> 1.977x10 <sup>-4</sup> 2.925x10 <sup>-6</sup>
	支持点ピッチ (円周方向)	— (°)	45	90
アニュラ-空間 (Fig.1, 6 参照)	内径	D <sub>I</sub> (mm)	2080 内筒の外径	700 内筒の外径
	外径	D <sub>o</sub> (mm)	3366 タ'ウング筒内径	850 ラ'け外の内径

\*1 : 参考文献<sup>2)</sup> 第3.2.7表、30.6(t/h)とT<sub>11</sub>、T<sub>10</sub>の平均比容積0.00136708(m<sup>3</sup>/kg)より。

- \*2 : 参考文献<sup>1)</sup> Fig.11.1.1、168.2(t/h)と185(℃)×4.02(MPa)圧縮水比容積0.0011319(m<sup>3</sup>/kg)、及び289(℃)×4.02(MPa)過熱蒸気比容積0.05666(m<sup>3</sup>/kg)より。
- \*3 : 参考文献<sup>2)</sup> 第3.2.7表、1.052(t/h)と62(℃)×3.0(MPa)圧縮水比容積0.0010169(m<sup>3</sup>/kg)及び242.4(℃)×3.0(MPa)過熱蒸気比容積0.06874(m<sup>3</sup>/kg)より。
- \*4 : 通商産業省告示第501号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」(1980),別表第11,高ニッケル合金の300℃の値を単位換算。  
(インコロイ800はJIS G4904「熱交換器用継目無ニッケルクロム鉄合金管」のNCF800TBとした)
- \*5 : インコロイ800比重量7950(kg/m<sup>3</sup>)と\*2に示す比容積より。
- \*6 : インコロイ800比重量7950(kg/m<sup>3</sup>)と\*3に示す比容積より。
- \*7 : 変形配置であるが千鳥配置とみなす。

Table.2 伝熱管固有振動数

記号	支持点数	M R X				D R X	
		2	4	6	8	2	4
$\alpha$ :挟み角	°	180	90	60	45	180	90
I:断面2次モーメント	mm <sup>4</sup>		4042			3180	
G	N/mm <sup>2</sup>			0.7769*10 <sup>5</sup>			
J	mm <sup>4</sup>		8084			6360	
EI/GJ	—	1.30	—	—	—	1.30	—
F:図108の係数	—	1.8	—	—	—	1.8	—
w	kg/mm		1.038*10 <sup>-3</sup>			8.533*10 <sup>-4</sup>	
f <sub>1</sub>	Hz	2.91	—	—	—	46.2	—
L	mm	5224.5	2612.2	1741.5	1306.1	1295.9	648.0
C:係数	—	0.918	C使用	左同	左同	0.793	C使用
f <sub>2</sub> :固有振動数	Hz	3.2(C=1)	13.4	30.2	53.7	58.2(C=1)	184.5

Table.3 M R X/D R Xの流速、ストローハル数、カルマン渦放出振動数

記号	単位	M R X (正方)	D R X (千鳥)
$\pi/4*(D_O^2-D_1^2)$	mm <sup>2</sup>	5.501*10 <sup>6</sup>	1.826*10 <sup>5</sup>
$\sum d_K, \sum d_{2K+1}$	mm	6.815*10 <sup>4</sup>	1550
$\pi d_O * \sum$	mm <sup>2</sup>	4.068*10 <sup>6</sup>	0.925*10 <sup>5</sup>
A <sub>SPT</sub>	mm <sup>2</sup>	0.103*10 <sup>6</sup>	—(詳細未定)
A:流路断面積	mm <sup>2</sup>	1.33*10 <sup>6</sup>	9.01*10 <sup>4</sup>
V:一次冷却水流速	m/s	1.21	0.129
XL	—	1.316	1.395(第2層L <sub>T</sub> )
XT	—	1.316	2.632
X	—	3.165	1.632
A <sub>a</sub>	—	117.71	—
XM	—	—	-1.554
SMAX	—	—	1.398
B	—	—	0.495
S <sub>t</sub> :ストローハル数	—	0.36	0.63
f <sub>K</sub> :カルマン渦振動数	Hz	22.9	4.3

Table.4 M R X/D R Xの流れの乱れによる不規則振動

	M R X	D R X
不規則振動有意振動数 $f_{t_b}$ (Hz)	16.8	2.8
固有振動数 $f_2$ (Hz)	53.7	184.5

Table.5 M R X/D R Xの管内流の無次元流速、限界無次元流速

	単位	M R X		D R X	
		水	蒸気	水	蒸気
$w_f$	kg/mm	$1.520*10^{-4}$	$3.036*10^{-6}$	$1.977*10^{-4}$	$2.925*10^{-6}$
$V_1$ :管内流速	mm/s	792	$39.7*10^3$	246	$16.7*10^3$
$V_N$ :無次元流速	—	0.011	0.081	0.002	0.129
	—	0.018	0.127	0.002	0.147
K:規格化挾み角	—	0.125		0.25	
$V_c$ :限界無次元流速	—	>7		3.5	

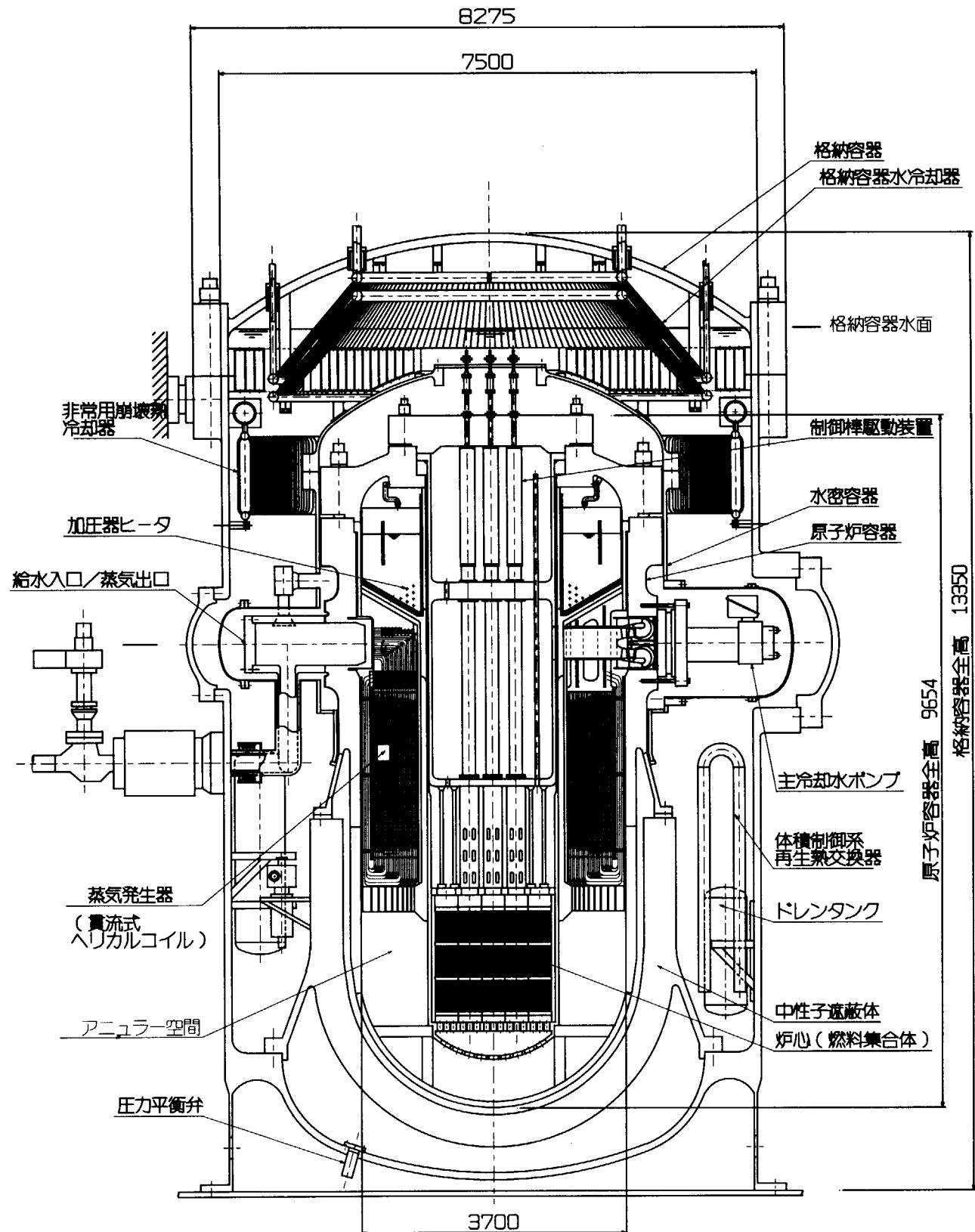


Fig. 1 MRX全体構造図

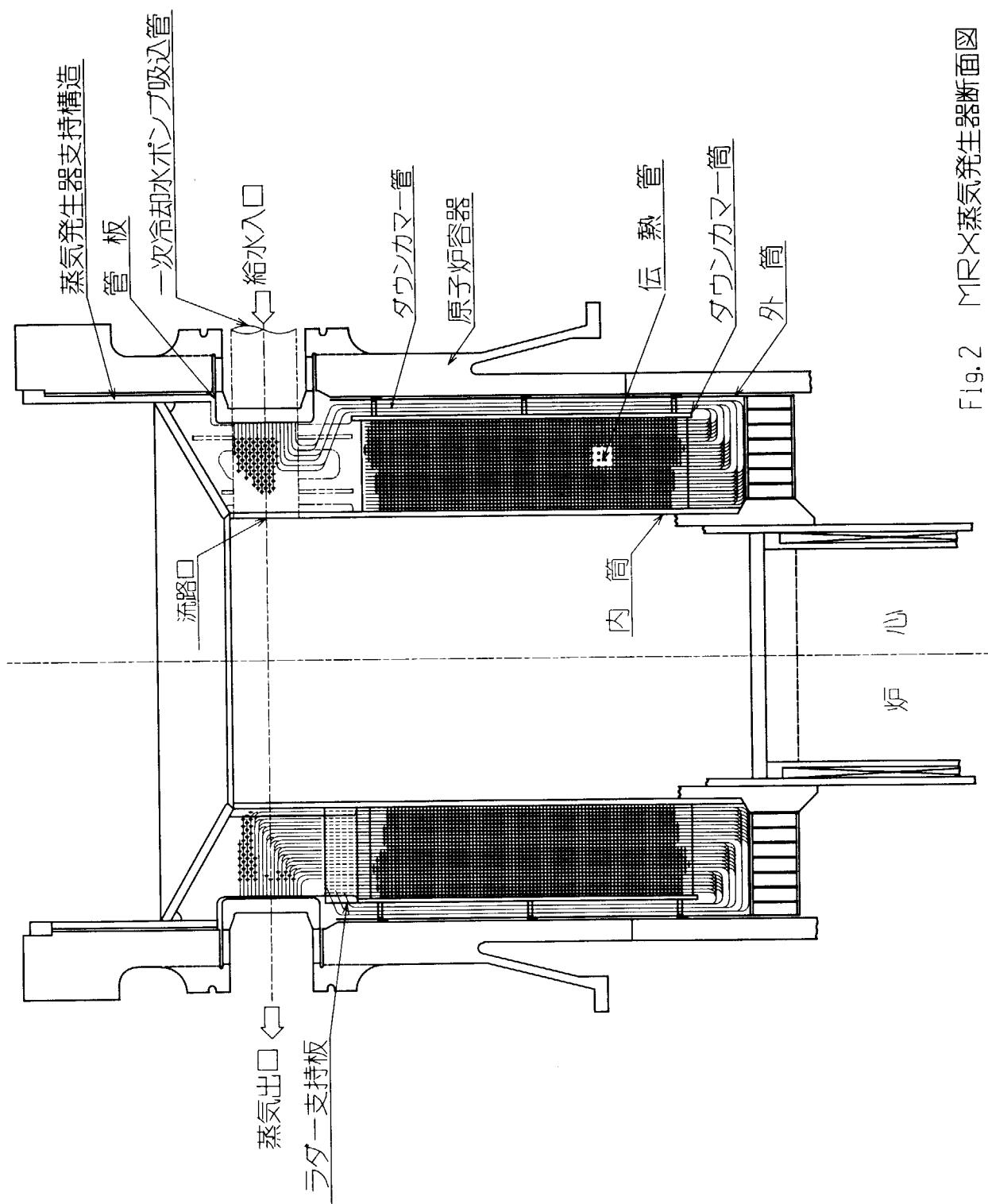


Fig. 2 MRX蒸気発生器断面図

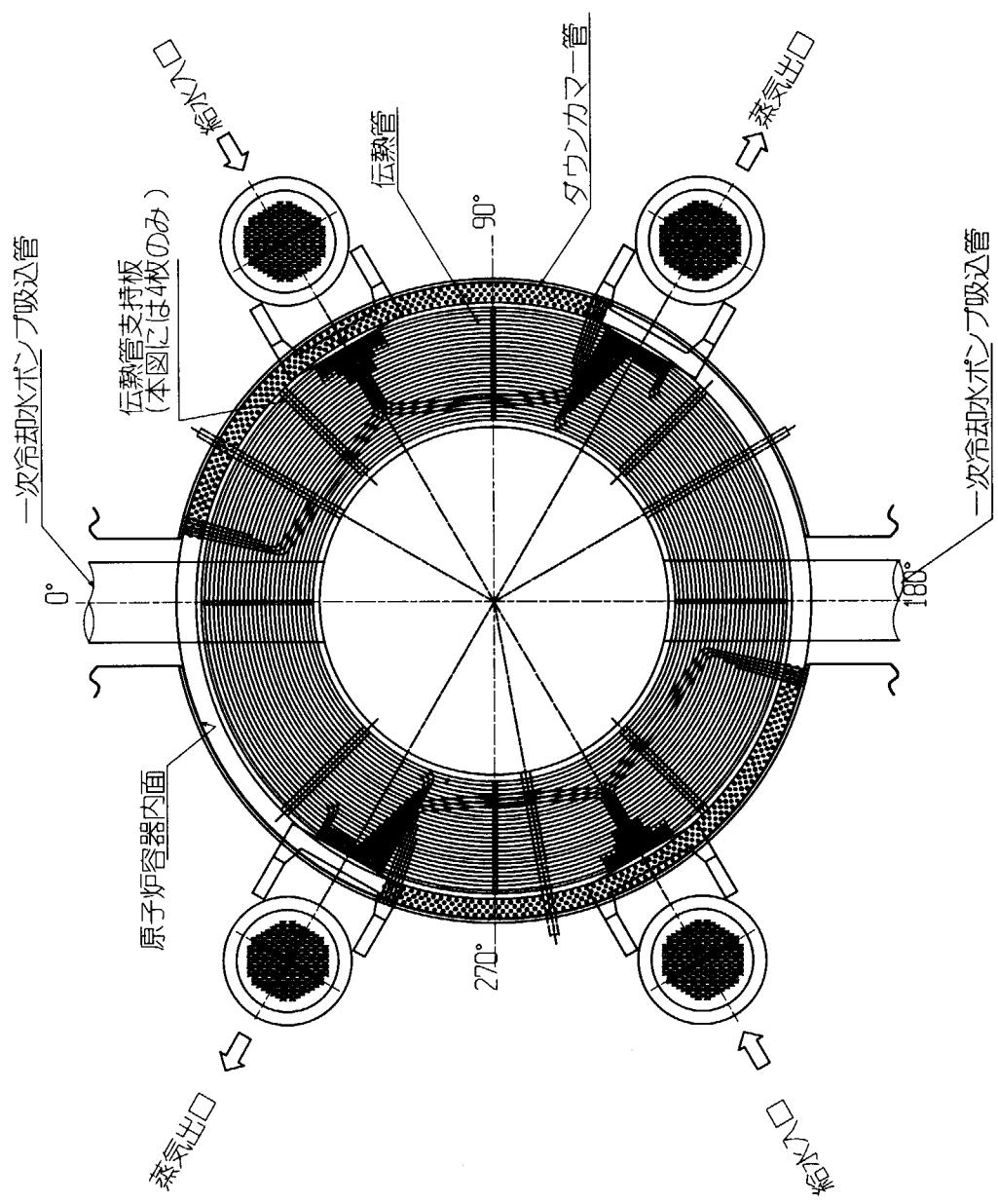


Fig. 3 MIRX蒸気発生器平面図

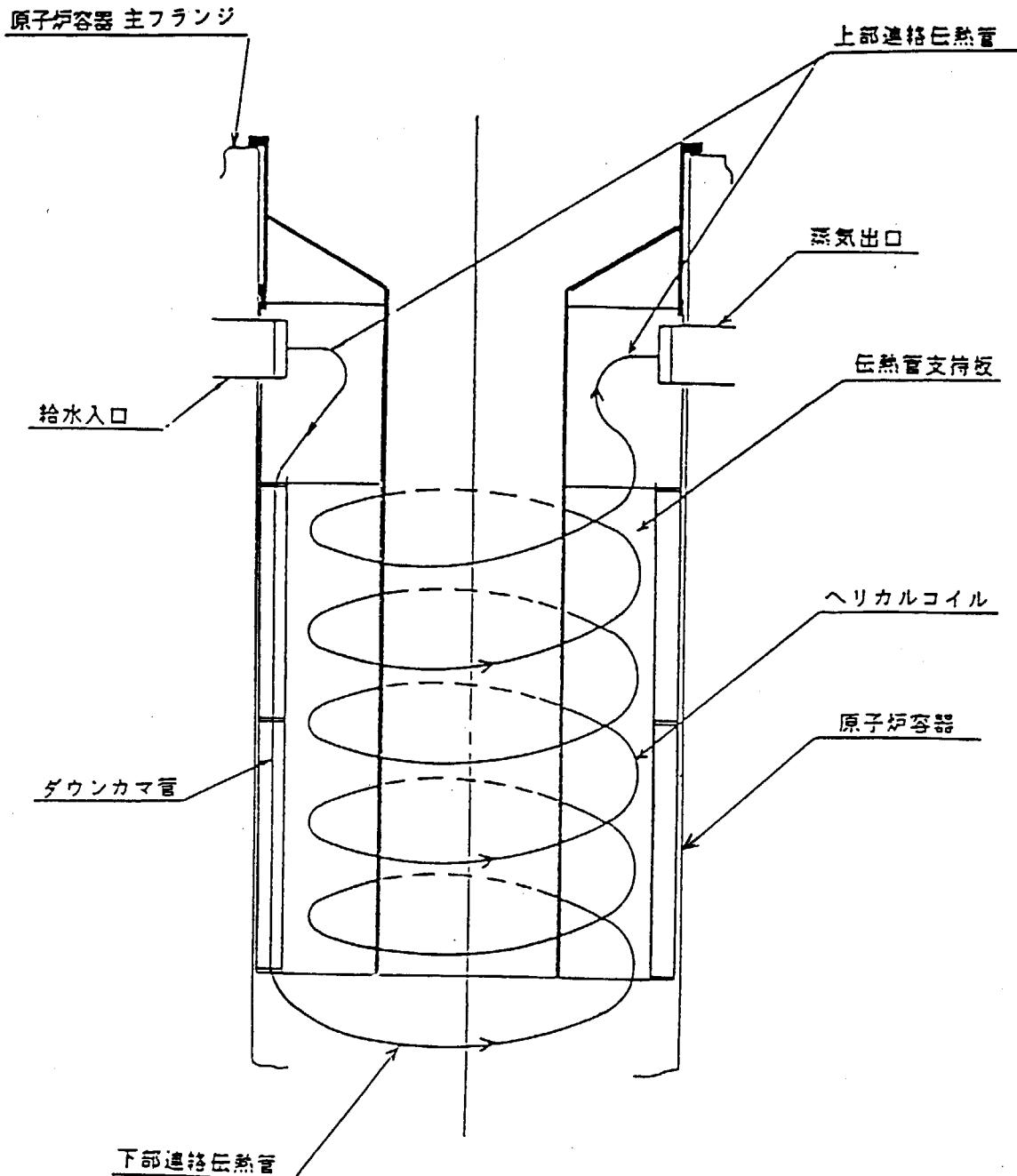


Fig. 4 MRX 蒸気発生器模式図

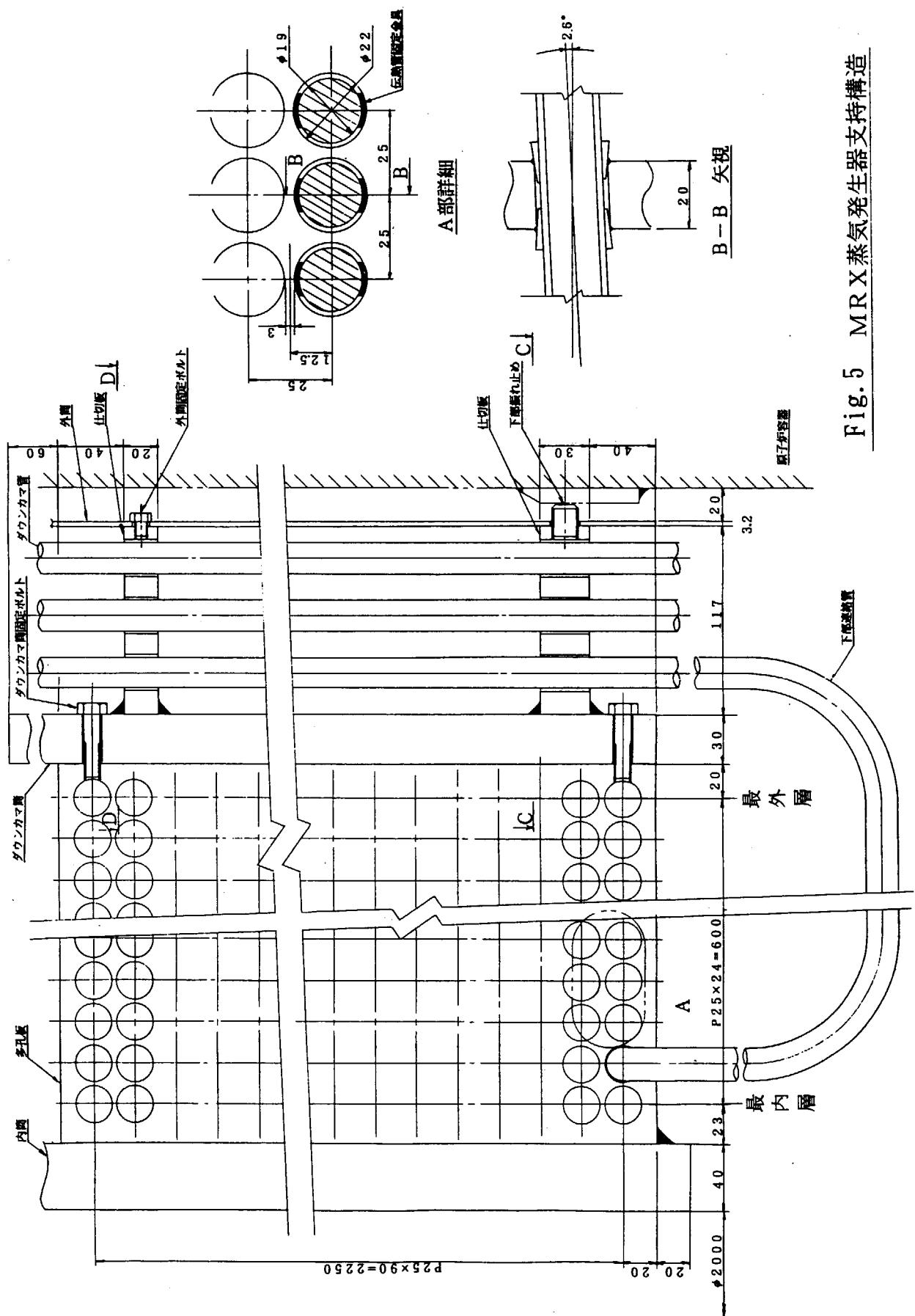


Fig. 5 MRX 蒸気発生器支持構造

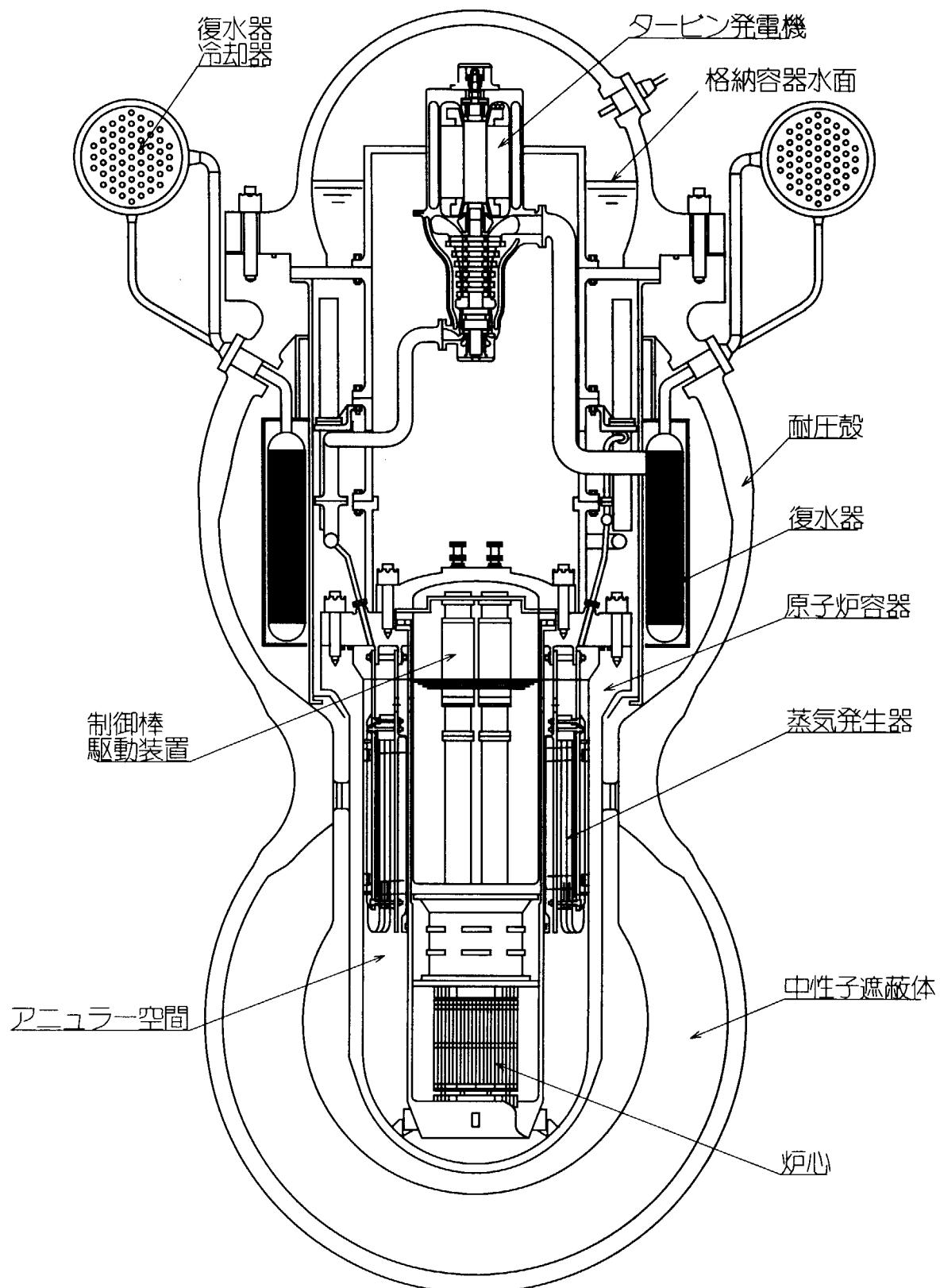


Fig. 6 DRX全体構造図

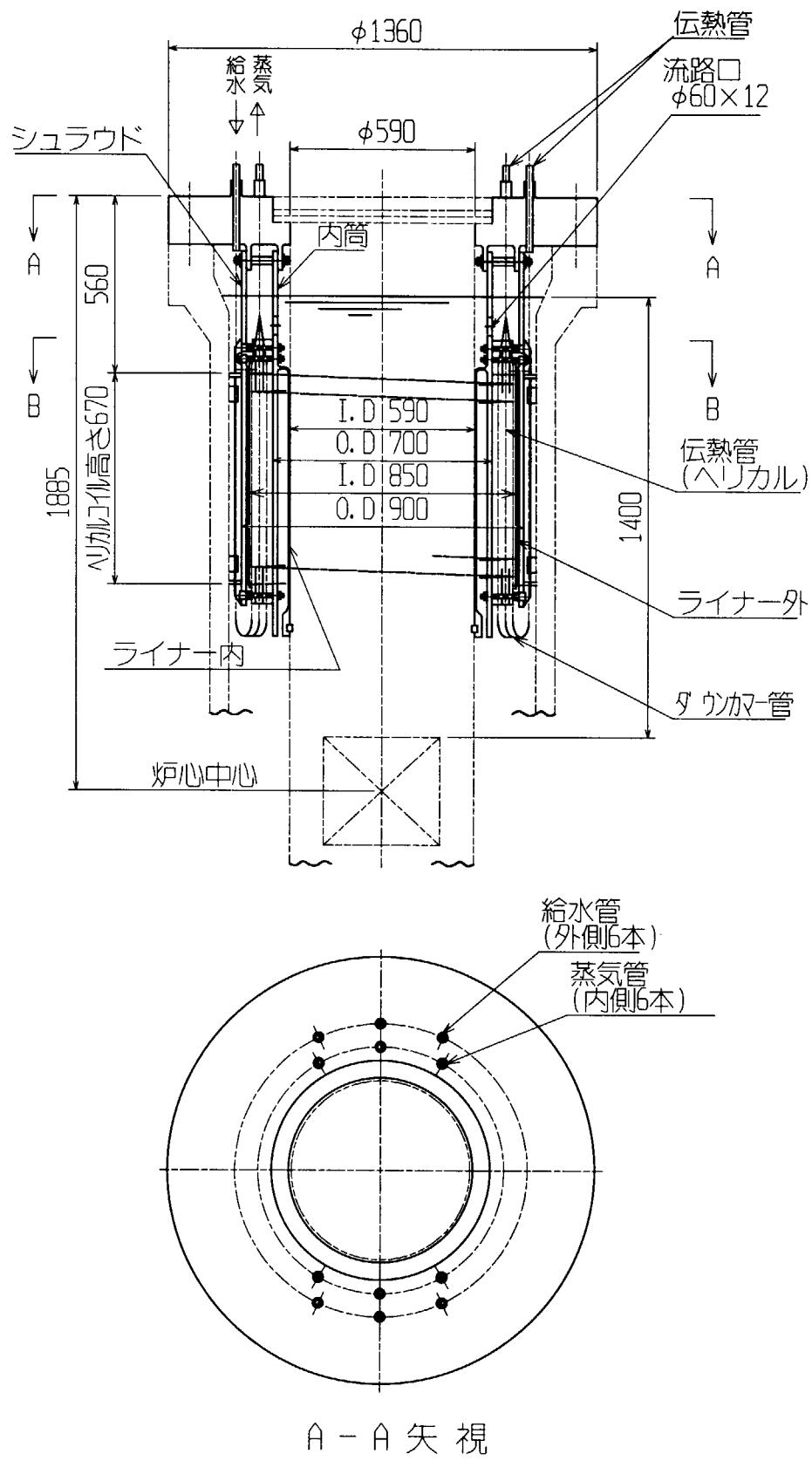
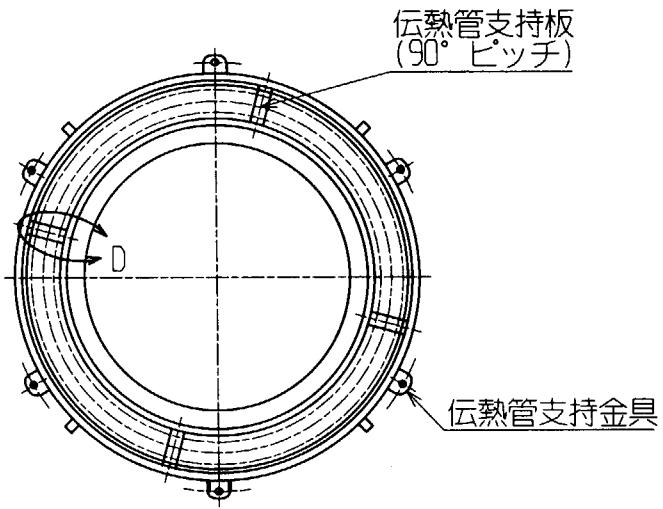
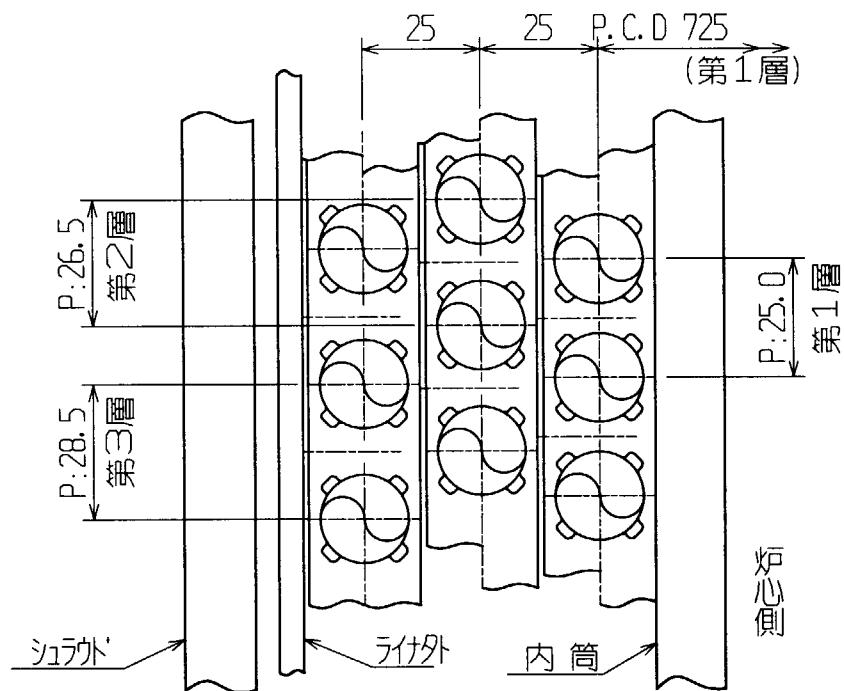


Fig. 7 DRX蒸気発生器



B - B 矢 視



D 部 詳 細  
伝熱管支持板

Fig. 8 DR×蒸気発生器

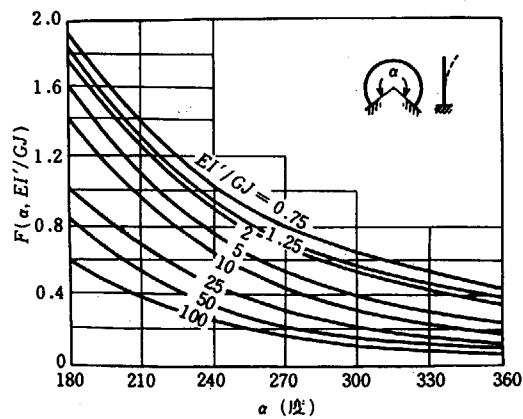
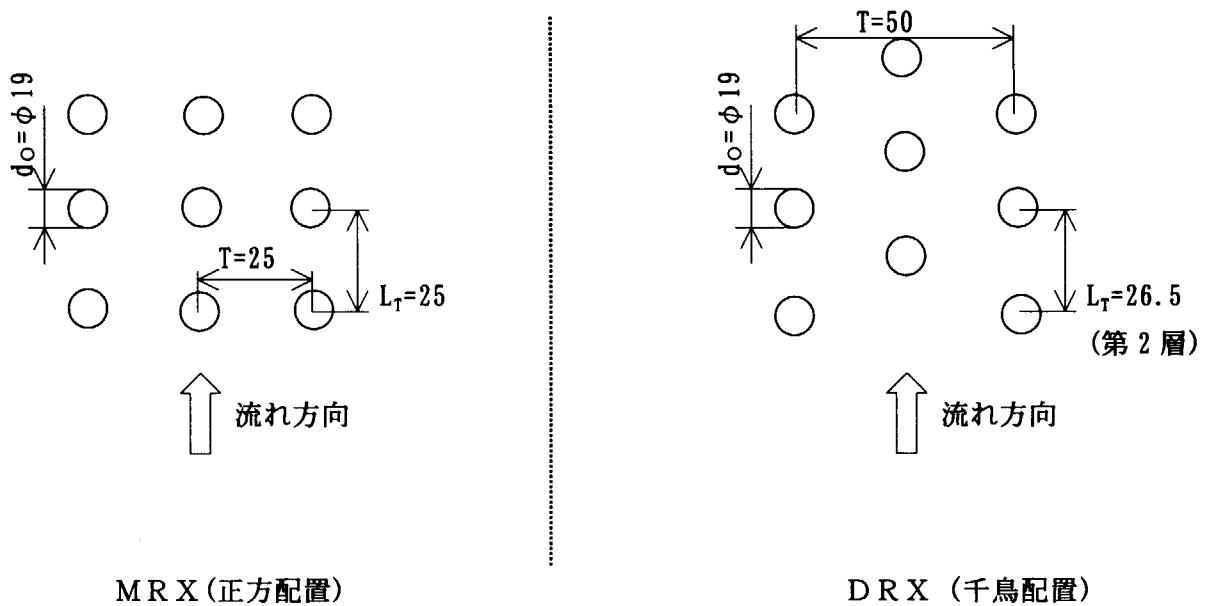
Fig. 9 欠けたリングの面に直角な振動における  $F(\alpha, EI'/GJ)$ <sup>5)</sup>

Fig. 10 伝熱管配置

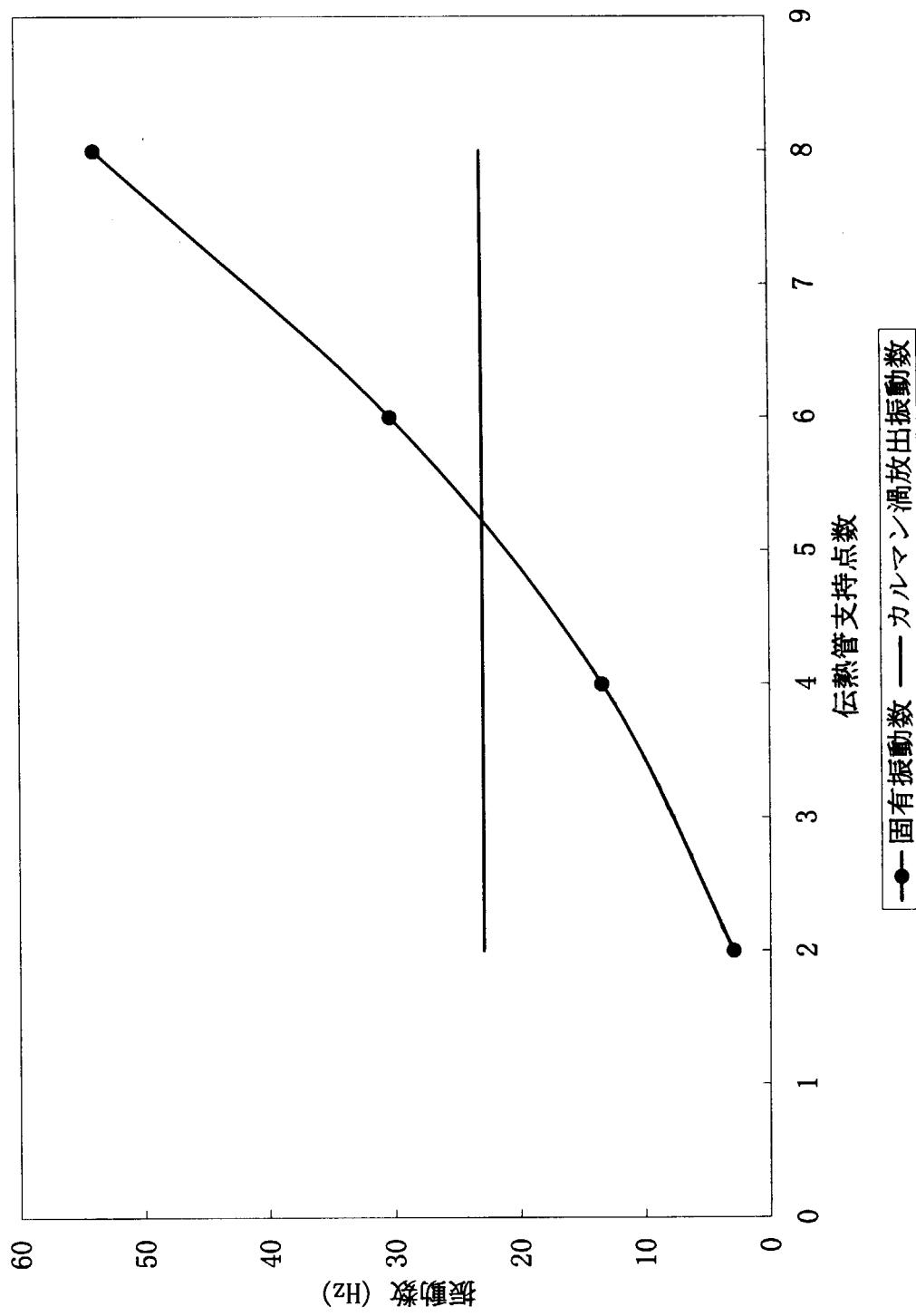


Fig. 11 MRX伝熱管支持点数と固有振動数

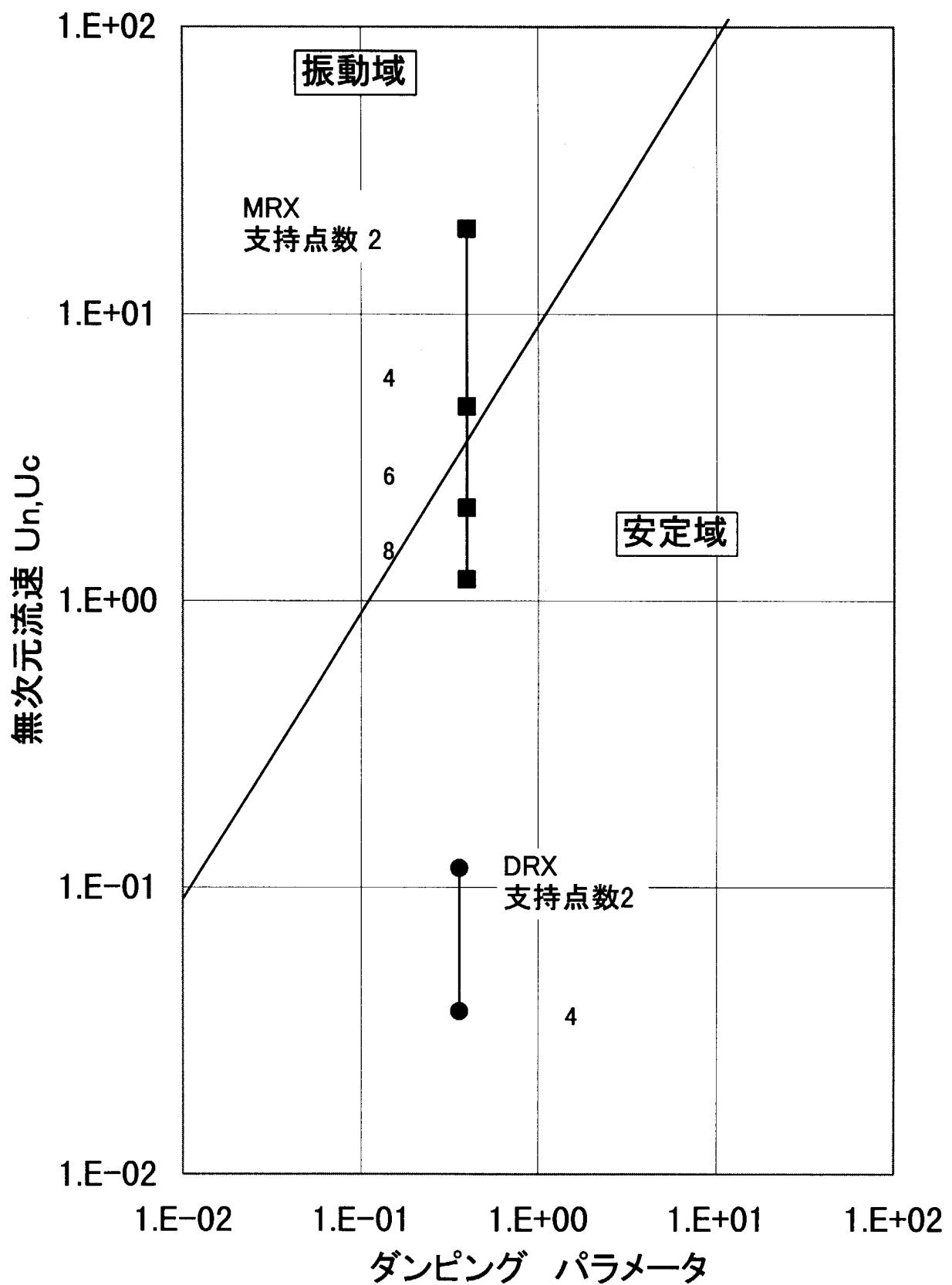


Fig.12 流力弹性振動の評価

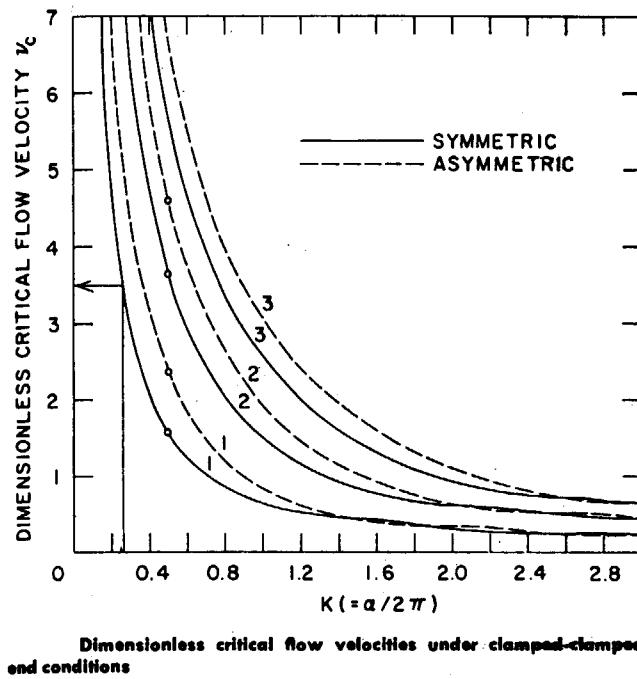


Fig. 13 限界無次元流速 $V_c$ と規格化挟み角の関係<sup>7)</sup>

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N( $=10^5$ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa( $=10$ bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J( $=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{-18}$	= 4.184 J(熱化学)	
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{-19}$	= 4.1855 J(15°C)	
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{-25}$	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{-19}$	仕事率 1 PS(仏馬力)	
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{-18}$	= 735.499 W	
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1		

放射能	Bq	Ci
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$
	$3.7 \times 10^{10}$	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

