

「常陽」MK-Ⅲ冷却系機器の設計・製作

—主冷却機—

(技術報告)

2004年4月

核燃料サイクル開発機構

大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu , Tokai-mura , Naka-gun , Ibaraki 319-1184 ,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2004

「常陽」MK-Ⅲ冷却系機器の設計・製作

－ 主冷却機 －

(技術報告)

川原 啓孝^{*1}、磯崎 和則^{*2}、冨田 直樹^{*3}

要 旨

高速実験炉「常陽」MK-Ⅲ計画は、①炉心の高速中性子束を高める、②照射運転時間を増やす、③照射技術を向上させることで照射能力を飛躍的に高めることを目的としているが、炉心の中性子束を高めることで熱出力がMK-Ⅱの100MWtから140MWtに増大する。

熱出力の増大に伴う冷却系除熱能力の向上に対応した冷却系のプラントコンセプトは、1991年までに決定され、これに基づき主中間熱交換器及び主冷却機をはじめとした冷却系機器の設計・製作が進められた。また、設計・製作した冷却系機器の交換は、2000年10月30日から2001年9月21日の約11ヶ月という長期間にわたって行ない、無事交換工事を完了することができた。その後、総合機能試験を経て、2003年7月2日にMK-Ⅲ炉心での初臨界を達成し、原子炉出力を約20%、50%、75%、90%及び100%(140MWt)と段階的に上昇させて、炉心の核熱特性、交換した冷却系機器の性能を確認するための性能試験を行い、同年11月27日に使用前検査に合格した。

MK-Ⅲ主冷却機は、改造範囲を極力少なくする観点から既設設備の配置を変更しないとの条件の中で、主冷却機の必要除熱量(35MWt/基)を確保した。MK-Ⅲ用主冷却機の設計では、主に以下の問題点に対する検討を行うと共に、伝熱・流動特性、圧力損失、流力振動等について評価した。

- (1) 適切な除熱性能余裕の確保
- (2) 伝熱面積増加に伴う建物側への据付荷重増加対策
- (3) 空気側圧力損失の増加対策(主送風機の最適化)
- (4) 旧主冷却機の保守経験を踏まえたメンテナンス性向上

本設計検討を踏まえて、機器製作、据付、総合機能試験及び性能試験を行った結果、140MWt時の主送風機インレットベーン開度は約35%(外気温度は約20℃)であり、評価の結果、伝熱面積余裕は約9%であることが確認できた。

本報告書は、MK-Ⅲ用主冷却機の設計・製作にあたっての特徴、設計に対する考え方、各種設計データをまとめたものである。

*1: 実験炉部原子炉第二課(現在 技術課)

*2: 実験炉部原子炉第二課

*3: 実験炉部原子炉第二課(現在 東京事務所)

Design and Manufacture of JOYO MK-III Heat Transport System Components
– Main Dump Heat Exchangers –
(Technical Report)

Hiroataka Kawahara^{*1}, Kazunori Isozaki^{*2}, Naoki Tomita^{*3}

Abstract

The MK-III project has three major purposes such: increasing high neutron flux, improvement of plant availability factor and upgrading in irradiation techniques. The reactor thermal power was increased from 100MWt to 140MWt along with the increase of fast neutron flux.

The plant concept of the cooling system to increase the heat removal capability was decided in 1991. The main components in the cooling system such as intermediate heat exchangers (IHXs) and dump heat exchangers (DHXs) were designed and manufactured based on the plant concept of the cooling system. These component replacements were safely carried out from October 30, 2000 to September 21, 2001. System function tests of the cooling system, the performance tests, were carried out from June 2003 as the last phase of the MK-III modification work. During the performance tests, the reactor power was raised step by step, while confirming the nuclear and thermal characteristics of the MK-III core and the heat removal capability of IHXs and DHXs. After the performance tests, the MK-III license was granted by the government in November 2003.

The new DHX for MK-III with 35MWt heat exchange rate was installed in the same location where the old one was installed, so the MK-III DHX was designed with almost the same geometry as the old one. The design was carefully reviewed for thermal hydraulics, pressure loss, flow induced vibration etc. During the design of the MK-III DHX, the following problems were evaluated.

- (1) Securing the appropriate heat removal capability margin.
- (2) Measures to increase the installed load associated with increase of the heat transfer area.
- (3) Measures to increase the air side pressure loss (Design optimization of the main air blower).
- (4) Improvement of the maintenance performance based on the maintenance experience of the old DHX.

After the design study and modification work of the MK-III DHX, the system function and the performance tests were carried out. As a result of these tests, it was confirmed that the performance of the MK-III DHX satisfied the design.

This report describes the specific characteristics in the design and manufacturing, the design data and principles of the design for the MK-III DHX.

*1 : Maintenance Engineering Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center
(At present, Reactor Technology Section)

*2 : Maintenance Engineering Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center

*3 : Maintenance Engineering Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center
(At present, Tokyo Office)

目 次

1. はじめに	1
2. MK-Ⅲ用主冷却機的设计ポイント	2
2.1 MK-Ⅲの除熱能力向上に伴う対策	2
2.2 メンテナンス性の向上	3
3. MK-Ⅲ用主冷却機の概要	4
3.1 構造	4
3.2 設計仕様	13
4. 構造設計・耐震設計の考え方	17
4.1 機器設計フローの検討	17
4.2 熱過渡設計	19
4.3 耐震設計	20
5. 伝熱・流動計算	28
5.1 MK-Ⅲ運転条件	28
5.2 伝熱量の計算	28
5.3 圧力損失計算	30
5.4 流力振動計算	31
6. 考 察	38
7. おわりに	40
8. 謝 辞	41
9. 参考文献	42
添付資料 1 主送風機ブレーキの成立性確認試験	103
添付資料 2 主冷却器出入口ダンパの機能確認試験	111

表リスト

表 3.1-1	MK-Ⅲ用主冷却機の設計仕様	44～45
表 3.1-2	MK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の仕様比較	46～47
表 3.1-3	MK-Ⅲ用主送風機設備と旧主送風機設備の仕様比較	48～50
表 4.2-1	MK-Ⅲ用主冷却機の設計に用いた熱過渡事象及び想定回数	51
表 4.2-2	強度評価結果（BDS 評価対象部位）	52
表 4.2-3	強度評価結果（研究炉の技術基準評価対象部位）	53
表 4.2-4	容器としての強度評価結果（BDS 評価対象部位）	54
表 4.2-5	容器としての強度評価結果（研究炉の技術基準評価対象部位）	55
表 4.3-1	MK-Ⅲ用主冷却機の耐震解析用幾何学的形状データ	56
表 4.3-2	主冷却機各部のばね定数設定結果	57
表 4.3-3	伸縮継手（主送風機用及び出入口ダクト用）のばね定数設定結果	58
表 4.3-4	主冷却機の耐震強度評価結果	59
表 4.3-5	主送風機の耐震計算における計算諸元	60
表 4.3-6	主送風機の耐震強度評価結果	61
表 4.3-7	建物の必要保有水平耐力と保有水平耐力	62
表 5.3-1	MK-Ⅲ用主冷却機（2次冷却材側）圧力損失の計算結果	63
表 5.3-2	MK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の2次冷却材側圧力損失の比較	64
表 5.3-3	MK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の空気側圧力損失の比較	64
添付表 1-1	主送風機ブレーキの成立性確認試験結果 (制動時間及びドラム表面温度)	109

図リスト

図 1-1	MK-Ⅲ冷却系改造の概要と範囲	65
図 3-1	MK-Ⅲ用主冷却機の鳥瞰図	66
図 3-2	MK-Ⅲ用主冷却機の構造	67
図 3-3	MK-Ⅲ用主冷却器の構造	68
図 3.1-1	MK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の構造比較	69
図 3.1-2	MK-Ⅲ用主冷却器伝熱管の構造	70
図 3.1-3	MK-Ⅲ用主冷却器の検査用フィン無し部	71
図 3.1-4	MK-Ⅲ用主冷却器伝熱管のバイパスフロー防止策	72
図 3.1-5	MK-Ⅲ用主冷却器ドレン管の敷設図	73
図 3.1-6	MK-Ⅲ用主送風機の構造	74
図 3.1-7	MK-Ⅲ用主送風機の構造及びインレットベーンの構造	75
図 3.1-8	主送風機の軸受交換手順の概念	76
図 3.1-9	主送風機起動時の冷却系温度解析結果 (原子炉熱出力 20MWt・始動補償器を用いた場合)	78
図 3.1-10	主送風機起動時の冷却系温度解析結果 (原子炉熱出力 20MWt・直入れ起動の場合)	79
図 3.1-11	主送風機インレットベーンのメンテナンス性向上策	80
図 3.1-12	主送風機ブレーキの電磁コイル部構造比較	81
図 3.1-13	MK-Ⅲ用主冷却器入口・出口ダンパの構造	82
図 3.1-14	MK-Ⅲ用ダンパのシール性向上策	83
図 3.1-15	MK-Ⅲ用主冷却機の内部監視用窓の構造・配置図	84
図 3.2-1	MK-Ⅲ用主冷却機の機器区分	85
図 4.1-1	「常陽」ナトリウム機器の設計手順フロー (第3種管)	86
図 4.2-1	過渡時の機器インターロック (MK-ⅡとMK-Ⅲとの比較)	87
図 4.2-2	主冷却器入口配管の解析モデル及び評価部位	88
図 4.2-3	主冷却器伝熱管の解析モデル及び評価部位	89
図 4.2-4	主冷却器ドレン管の解析モデル及び評価部位	90
図 4.2-5	主冷却器出口配管の解析モデル及び評価部位	91
図 4.2-6	MK-Ⅲ用主冷却器の熱過渡解析対象部位	92
図 4.3-1	MK-Ⅲ用主冷却機の耐震解析モデル	93
図 4.3-2	主冷却器の据付架台 (既設部) 及び主冷却器下部フレームの解析モデル	94

図 4.3-3	入口ダクト支持部のばね定数算出方法	95
図 4.3-4	入口ダクト支持部の解析モデル	96
図 4.3-5	MK-Ⅲ用主冷却機の固有値解析結果	97
図 4.3-6	MK-Ⅲ用主送風機の耐震計算モデル	98
図 5.2-1	旧主冷却機及びMK-Ⅲ主冷却機におけるサポート部の 伝熱無効部の取扱について	99
図 5.2-2	3パス直交流熱交換器（両流体とも混合せず）の温度差補正係数	100
図 5.3-1	MK-Ⅲ 2次冷却系系統圧力損失	101
図 5.3-2	MK-Ⅲ用主送風機の予想性能	102
添付図 1-1	主送風機ブレーキ成立性確認試験における ブレーキドラム及びライニングの状態	110
添付図 2-1	供試体ダンパの構造図（1/2 セクター構造）	115
添付図 2-2	供試体ダンパの外観（写真）	116
添付図 2-3	ダンパ試験装置概略構成図	117
添付図 2-4	ダンパ全閉時の漏えい空気特性（常温試験）	118
添付図 2-5	ダンパ全閉時の漏えい空気特性（高温試験（200℃））	119
添付図 2-6	ダンパの圧力損失係数	120
添付図 2-7	ダンパのヒステリシス特性	121

1. はじめに

高速実験炉「常陽」MK-Ⅲ計画は、①炉心の高速中性子束を高める、②照射運転時間を増やす、③照射技術を向上させることで照射能力を飛躍的に高めることを目的としているが、炉心の中性子束を高めることで熱出力がMK-Ⅱの100MWtから140MWtに増大する。

熱出力の増大に伴う冷却系除熱能力の向上に対応した冷却系のプラントコンセプト^{(1),(2)}は、1991年までに決定され、これに基づき冷却系機器の設計・製作が進められてきた。また、設計・製作した冷却系機器の交換は、2000年10月30日から2001年9月21日の約11ヶ月という長期間にわたって行ない、無事交換工事を完了することができた。その後、総合機能試験を経て、2003年7月2日にMK-Ⅲ炉心での初臨界を達成し、原子炉出力を約20%、50%、75%、90%及び100%（140MWt）と段階的に上昇させて、炉心の核熱特性、交換した冷却系機器の性能を確認するための性能試験を行い、同年11月27日に使用前検査に合格した。冷却系改造の主な項目は以下のとおりである。

- (1) 主中間熱交換器の交換
- (2) 主冷却機（主冷却器及び主送風機設備）の交換
- (3) 1次主循環ポンプ駆動用電動機及び1次冷却材流量調節設備の交換
- (4) 2次主循環ポンプ駆動用電動機及び2次冷却材流量調節設備の交換
- (5) 上記に係る計装制御設備の改造

図1-1にMK-Ⅲ冷却系改造の概要と範囲を示す。

MK-Ⅲでは、原子炉出入口ナトリウム温度差（ ΔT_1 ）をMK-Ⅱの130℃から150℃、主冷却器出入口ナトリウム温度差（ ΔT_2 ）をMK-Ⅱの130℃から170℃に変更すること、及び1次冷却系流量をMK-Ⅱの122%（1,335t/h/ループ）、2次冷却系流量をMK-Ⅱの107%（1,186t/h/ループ）とすることで除熱能力を確保する冷却系機器の設計を行った。なお、構造健全性に大きな影響を与える高温側の原子炉出口ナトリウム温度は500℃、主冷却器入口ナトリウム温度は470℃のままとして、低温側の原子炉入口ナトリウム温度を370℃から350℃、主冷却器出口ナトリウム温度を340℃から300℃に変更した。

主冷却機は、基本設計を行った結果、伝熱面積増加対策及び風量増加対策を図ることで、1基あたり35MWt、4基で140MWtの除熱能力を確保することとした。

本報告書は、MK-Ⅲ用主冷却機の設計・製作にあたっての特徴、設計に対する考え方、各種設計データをまとめたものである。

2. MK-III用主冷却機的设计ポイント

MK-III用主冷却機は、伝熱面積増加対策及び風量増加対策を図ることで、1基あたり35MWt、4基で140MWtの除熱性能を確保することとした。また、必要な性能を確保すると共に、旧主冷却機の保守経験を踏まえたメンテナンス性及び温態待機時における出入口ダンパの締切り性を向上する必要があった。なお、これらの対策は、改造が困難な建家側を一切変更せず、既設基礎部を流用することを前提とし改造範囲を最小限とした。この基本方針にしたがって設計を行うにあたり、以下のポイントを考慮する必要があった。

2.1 MK-IIIの除熱能力向上に伴う対策

MK-III用主冷却機は、除熱能力確保のため、主冷却器出入口冷却材温度差(ΔT)をMK-IIの130℃から170℃に、2次系流量をMK-IIの100%(1,086t/h/ℓ- $^{\circ}$)から107%(1,186t/h/ℓ- $^{\circ}$)に、主送風機の空気風量を約5%増加させた7700m³/minとすることを基本とした。この条件に対し、以下の対策を行うことが大きなポイントとなった。

(1) 適切な除熱性能余裕の確保

旧主冷却機における外気温の設計条件は30℃となっていたが、実際には夏季に35℃程度となっていたことから除熱能力が不足していた。このため、MK-IIIでは、入口空気温度の設計条件を旧主冷却機の30℃から40℃に上げることとした。また、伝熱管は、空気のバイパスフローを抑制するなど、可能な限り熱効率のよい構造とし、適切な除熱性能余裕を確保する必要があった。

(2) 空気側圧力損失の増加対策（主送風機の最適化）

伝熱管へ冷却空気を送り込む主送風機は、伝熱管のΣ型への変更に伴う圧力損失増加に対応して、電動機出力を増加する必要がある。これに伴い、主送風機起動時の電圧低下が旧主送風機よりも増加すること、及び起動時に必要とされる時間（回転数が0~100%になるまでの時間）が長時間化することによる主冷却器出口ナトリウム温度の上昇が懸念され、この対策が必要となった。更に、主送風機トリップ時は、過渡事象における熱過渡緩和のため、ブレーキ作動により13.6秒以内に完全に停止させることが条件とされた。

(3) 伝熱面積増加に伴う建物側への据付荷重増加対策

主冷却器は、伝熱管をU型からΣ型に変更したことにより伝熱面積を増加できるが、その一方で伝熱管の据付高さが増加すると共に、伝熱管の自重及び内包するナトリウムが約2倍

に増加する。これにより、建物側への据付荷重が旧主冷却器よりも増加する。このため、主冷却機の設計を行うにあたっては、主冷却機を構成するダンパ・ダクト類の配置、支持方法等を見直して荷重分散させ、建物側への影響を最小限にする必要があった。

2.2 メンテナンス性の向上

MK-Ⅲ用主冷却機は、旧主冷却機に対して伝熱管の形状を変更するなどの構造変更を行うことから、この構造変更を行っても健全性維持が行えるようにメンテナンス性を考慮した設計を行う必要がある。また、旧主冷却機でのメンテナンス経験を可能な限り反映させた構造とする必要がある。これらを踏まえて以下の対策を行い、メンテナンス性に配慮した設計とすることが大きなポイントとなった。

(1) 伝熱管の検査性向上

伝熱管は、フィンを螺旋状に巻き付けたフィンチューブ構造であるため、管自体（フィンの無い部分）の板厚を直接精度よく測定するのは困難であった。このため、伝熱管の検査性を向上させることが必要とされた。

(2) 各部点検のためのアクセス性確保

伝熱管の点検及び清掃を行うため、伝熱管形状を Σ 型に変更した場合でも、伝熱管各部へのアクセスが可能とする。また、高所を含めた主冷却機各部への点検の際へのアクセスが可能となるように点検架台等を適切に設置する。

(3) その他

- ① 主冷却機各部の構造は、耐熱、耐塵、耐塩害に配慮した設計とする。
- ② 主冷却機用電動機、ブレーキ、予熱ヒータ等の電気品について、主に絶縁信頼性向上に配慮した設計とする。
- ③ 伝熱管監視のための点検窓を適切に配置する。
- ④ 主送風機分解点検等の作業性改善に配慮した設計とする。

3. MK-III用主冷却機の概要

「常陽」の主冷却機は、図 1-1 に示すように 2 次冷却系の最終段に位置する空冷式の機器であり、主中間熱交換器を介して 2 次冷却系に伝達された熱を大気中に放散することにより除熱するものである。また、原子炉スクラム時には、自然循環力により炉心からの崩壊熱を除去する機能を有している。主冷却機は、2 次冷却系 1 ループにつき 2 基を並列に接続し、2 ループで 4 基設置している。

図 3-1 に MK-III 用主冷却機の鳥瞰図を示す。図 3-2 に主冷却機の構造を示す。また、図 3-3 に MK-III 用主冷却器の構造を示す。

3.1 構造

3.1.1 概要

主冷却機は多数本のフィン付伝熱管を水平に配列した「主冷却器」と、この管束部に空気を送り込む「主送風機設備」から構成される。2 ループ分の合計 4 基の主冷却機は、主冷却機建物の両側に 2 基ずつ配置され、空気は建物側面より取入れ、主送風機、主冷却器を通りダクトを通して屋外に排出される。

表 3.1-1 に MK-III 用主冷却機的设计仕様を示す。

主冷却器は、図 3-3 に示したようなフィン付空冷多管式の冷却器である。主中間熱交換器から出た高温の 2 次冷却材は、主冷却器上部の入口集合管に流入した後、入口集合管から各伝熱管に分配される。伝熱管の内部を流れる 2 次冷却材は、主送風機から送られる空気により冷却されながら出口集合管に流入し、2 次主冷却系配管に戻る。

主送風機設備は主送風機のほか、インレットベーン、出入口ダンパ、ダクト類から構成される。主送風機はインレットベーンと入口ダンパにより、冷却材温度制御系から制御信号を受けて、風量を調節する機能を有している。

3.1.2 型式の選定

MK-III に適合した主冷却機とするためには、伝熱面積の増加が必要である。そこで、伝熱管の形状を従来の U 型のまま大型化するか、それとも Σ 型を採用するか検討した。

その結果、U 型では熱過渡時のコールドショックによって伝熱管の曲がり部に大きな応力が発生すると推定されること、空気側の伝熱性能がクリティカルとなり、主冷却機の対数平均温度差が小さくなることから主送風機が大型化となる。また、改造工事へのインパ

クト、特に主送風機が大型化することによって生じる建家側の大幅な改造の実現性は不可能であると考えられたため、主冷却機の伝熱管配置はこのような制約の小さいΣ型を採用することとした。主冷却機は、このΣ型の伝熱管構造を基本とし、主送風機等の空気側設備を備えたフィン付空冷多管式の空気冷却機とした。なお、Σ型は「常陽」の補助系、もんじゅの補助系及びメンテナンス冷却系等の空気冷却器として使用されている。

3.1.3 MK-Ⅲ用主冷却機の特徴

図 3.1-1 にMK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の構造比較を示す。表 3.1-2 にMK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の仕様比較を示す。

MK-Ⅲ用主冷却機の特徴としては、以下の点がある。

(1) 主冷却機全体

① 主冷却機の荷重分散化（出入口ダンパ位置変更）

主冷却器は、伝熱管をΣ型に変更したことで重量が増加し、主冷却機を支持する主冷却機建物 2F の床荷重制限に対し厳しくなった。このため、旧主冷却機のように主冷却器に入口ダンパ及び出口ダンパを抱かせる構造とせず、入口ダンパ及び出口ダンパは別の方法で支持させるように変更した。すなわち、入口ダンパは下方に移動し入口ダクトを通じて建物 1F に支持させ、出口ダンパは上方に移動し RF (2F 天井) に支持させた。また、建物基礎への重量軽減化の観点から、入口ダンパ及び出口ダンパとも形状を旧構造よりも小さくし、軽量化を図った。

② 主冷却機と 2 次系配管との取合い位置

伝熱管のΣ型への変更により、2 次系入口配管との取合いレベルを高くする必要があった。この入口側取合いレベルは、旧入口配管に設けられていた 8B 配管の分岐前垂直部を削除することで吸収させた。これにより、伝熱管の各パス間の間隔は 700mm 程度となり、定期点検時にアクセス可能な範囲となった。また、2 次主冷却系出口配管は、主冷却器の据付基礎レベルを変更しないことから、旧出口配管と同じ取合構造とした。

(2) 主冷却器

① 伝熱管の構造

図 3.1-2 に伝熱管の構造を示す。伝熱管の基本仕様（材質、外径、厚さ、フィン寸法、フィンピッチ）は、旧伝熱管の 20 年以上に渡り健全であった使用実績を踏まえて、旧仕様をそのまま踏襲した。また、伝熱管内のナトリウムをドレンできるように従来

と同じ 1/100mm の勾配を設けた。

伝熱管は、伝熱管のフィン無し部に支持金具を取付け、その支持金具を介して本体枠組のサポートに支持する構造とした。伝熱管の熱膨張時は支持金具の外表面をしゅう動面として、伝熱管軸方向にスライドできるような構造とした（ドレン管も同様）。

② 主冷却器内部へのアクセス性

定期点検時には、伝熱管の点検・清掃等の際に主冷却器内部に立ち入ることが必要となるが、MK-ⅢはΣ型伝熱管となり、伝熱管各段の間への立ち入りが旧式と比べて困難となる。このため、点検扉を4箇所分散配置し、各箇所は3段の取外し可能な扉を設けた。これにより、伝熱管各段の間の出入りを可能とするともに、主冷却器内立ち入り後の移動を極力少なくした。また、集合管及び連絡管部点検のため、ケーシングの一部をパッケージ式とし、保温材と共に取外せる構造とした。

③ 伝熱管の検査性向上

定期点検では、伝熱管の健全性を確認するため、伝熱管の厚み測定を行う。フィン付部の厚み測定は、フィンが邪魔となり超音波厚み計で裸管部を直接測ることができないため、従来はX線写真撮影から撮影したフィルム像から厚みを評価する方法を採用していた。しかし、この方法はフィルムをフィンの外側に置いて撮影するため、写し出される裸管の厚みが拡大されることから、X線の線源、被測定部及びフィルムの位置関係から厚みを補正して評価する必要があった。このため、MK-Ⅲでは、伝熱管厚み測定のためのフィン無し部（10箇所/基）を設けた。これにより、超音波厚み計による測定が可能となった。

図 3.1—3 にフィン無し部の位置を示す。フィン無し部の位置は、旧伝熱管の厚み評価の経験から、伝熱管配列の中で空気入口側に最も近い側（伝熱管の最下段部）が減肉に対して厳しいため、この位置に設けた。また、空気出口側（伝熱管の最上段部）にも設け、減肉の比較ができるようにした。各段のフィン無し部は、減肉に対する分布を把握することをねらって、段の中心と4分割した各中心の計5点（旧主冷却器における測定点も同様）とした。なお、フィン無し部は、除熱性能の余裕確保の観点から、伝熱計算上無効部分として扱うこととした。

④ 伝熱管部のバイパスフロー防止策

図 3.1—4 に伝熱管部のバイパスフロー防止策を示す。伝熱管と本体枠組側面のケーシングとの隙間からの冷却空気の無効流を抑制するために、伝熱管の各段の位置の本

体枠組にバイパスフロー防止板を設けた。また、伝熱管フィン付き部に有効に冷却空気が流れるようにするため、出入口集合管と連絡管部（集合管の反対側）の両面側にシール板を設けた。

⑤ 主冷却器の予熱ヒータによる昇温性能

原子炉停止中における伝熱管の予熱のため、旧主冷却器と同様に伝熱管の直下の位置に内装ヒータを設けた。MK-Ⅲでは、据付基礎部への重量負荷を極力低減させるため、既設と同じヒータ容量とすることを前提とし予熱性能を評価した。この結果、ダンパの締切り性能向上（詳細は後述する）と相まって、外気温度0℃としても30時間程度で200℃以上まで昇温できる見通しを得た。また、内装ヒータは、絶縁不良等により取替の必要が生じた場合を考慮し、ヒータ1本ごとにユニットから外部へ引き抜ける構造とした。また、ヒータ端子部はセラミックの絶縁材を採用した。

⑥ 主冷却器ドレン管の構造

主冷却器の出入口集合管は、伝熱管との取合い部が真横になっているため、冷却系ナトリウムドレン時は入口集合管の下部にナトリウムが残留し、ナトリウム充填時は出口集合管の上部にガス溜まりができる。これを防止するため入口集合管下部と出口集合管上部を連結する「ドレン管」を設けている。図3.1-5にドレン管の敷設図を示す。旧主冷却器についても同じ目的でドレン管が設けられているが、入口集合管から空気流路経由せずそのまま出口集合管に連結されているため、MK-Ⅲも同一構造とすると原子炉運転中において高温のナトリウムが低温の出口集合管に流れ込み、出口集合管の接続部に過大な熱応力発生することが懸念された。そこで、図3.1-5示すようにドレン管を空気流路内に引き回し、空気流路と熱交換させることにより出口集合管との合流部温度差を低減させた構造とした。ドレン管は、空気流路側に引き回すと共に、空気の流れによる流力振動防止のため適切な位置にサポートを設けた。ドレン管の基本的な仕様（材質、寸法（外径、板厚）は旧主冷却器の実績を考慮し、旧主冷却器と同一とした。

ドレン管内の流量は、定格運転時の出入口集合管間の差圧から、約0.2ton/h（流速：1.24m/sec）となる。この流量と空気側温度・風量から、原子炉運転時のドレン管と出口集合管との合流部ナトリウム温度を算出した結果、設計目標の約360℃（約60℃の温度差）となり、旧主冷却器ドレン管時の温度差（約130℃）に対して十分小さい値とした。

また、ドレン管の配管勾配は、伝熱管と同じ 1/100mm とした。

⑦ 主冷却器の本体枠組（ケーシング・フレーム等）の構造

本体枠組のフレーム材は耐震強度部材であるため、耐 SCC（応力腐食割れ）の観点から伝熱管と同じ 2 1/4Cr-Mo 鋼を採用した。また、本体枠組廻りを構成するケーシングは、耐震強度部材でないため、耐塩害を重視し、ステンレス製とした。

また、出入口集合管部及び連絡管部廻りからナトリウムが漏えいした場合に備えて、旧主冷却器と同様に、出口集合管及び連結管の直下の位置にナトリウム受皿及び受皿内に接触式ナトリウム漏えい検出器を設けた。

(3) 主送風機設備

表 3.1-3 に MK-III 用主送風機設備と旧主送風機設備の仕様比較を示す。

① 主送風機

(a) 主送風機の構造等

図 3.1-6 に MK-III 用主送風機の構造を示す。図 3.1-7 に主送風機及びインレットバーンの構造を示す。

主送風機は、伝熱管の Σ 型への変更に伴い空気側圧損が増加するため、吐出圧力（全圧）を旧主送風機の約 2 倍となる 4.46kPa(455mmAq)とし、除熱能力に必要な風量 (7700m³/min・at40℃) を確保することとした。これに対応し、ファンの全圧効率を旧主送風機と同じ 80%とした場合、MK-III の風量・全圧条件に対して軸動力が約 705kW となった。一方、電動機は、電源供給設備側へのインパクト、起動時間を最小限とすること、及び設置スペースの制限から設計上 710kW が限度であり、軸動力 700kW に対する余裕が 1%以下となった。このため、主送風機の回転数を旧主送風機の 585rpm から 735rpm に増加すると共に、ファンの翼形状の見直しを行い、ファン全圧効率を 85%まで増加させた。この結果、軸動力を 663kW まで低減し、電動機出力 710kW（旧主送風機は 400kW）に対する出力余裕を約 7%まで確保することができた。

その他、回転機器である主送風機は、定期的な軸受交換を行う必要があり、その際は、上部ケーシング及びロータを完全に取外して仮置きスペースまで移動させるなどの大掛かりな作業となっていた。このため、MK-III 用主送風機は、図 3.1-8 に示すようにケーシング及びロータを移動させずに軸受交換ができるように、軸受台及び軸受箱を改良し、作業時間の短縮化を図った。また、塩害対策として、ケーシングの材

料にステンレス鋼を採用した。

(b) 主送風機の起動方法

MK-Ⅲ用主送風機は、既設よりも電動機出力が約 1.8 倍となり、起動時間が長くなる。このため、ラッシュ電流による影響及び起動中の系統ナトリウム温度変化について検討することが必要となった。

主送風機起動時は、MK-Ⅱにおいても電圧降下が約 10%程度ある。MK-Ⅲでは電動機負荷がさらに増大するため、旧主送風機と同様の起動方法（2 台同時、直入れ起動）では、さらに電圧降下が大きくなり、他設備へ影響を与える可能性がある。このことから、電圧降下を抑制する手法として次のケースを検討した。

イ) 始動補償器を用いて電圧降下を抑えて 2 台同時起動する場合

ロ) 主送風機を 1 台ごとに順次単独起動（各々直入れ起動）する場合

上記イ)の場合は、MK-Ⅱと同じ起動方法（2 台同時起動）となるが、起動時間が長くなる。また、始動補償器の設置等の設備対応が必要となる。ロ)の場合は、イ)よりも起動時間を短くできるが 1 台ごとに起動していくことが必要となる。

一方、主送風機の起動特性によって、起動時にナトリウム温度変化が生じる。1 次系の温度上昇については、原子炉入口ナトリウム温度は+10℃で警報、+15℃で原子炉保護系作動（原子炉スクラム）となるため、電圧降下を抑制する手段を検討する場合、ナトリウム温度変化が大きな判断材料となる。この観点から、主送風機起動時の冷却系温度解析を行った。この解析は、空気系を詳細にモデル化できるプログラムである熱交換器システムの汎用動特性シミュレータ“HEDDY”を用いた。図 3.1-9 に始動補償器を用いて起動した場合の解析結果を示す。図 3.1-10 に直入れ起動した場合の解析結果を示す。両解析結果とも原子炉出力 20MWt、主冷却器入口空気温度を 40℃（設計温度）とした場合の結果を示す。

この結果、直入れ起動の場合は起動時間が短いため、温度上昇は始動補償器を用いた場合の 15℃に対し、約 10℃と小さくなっている。更に、直入れで 1 台ごとに起動した場合は、主冷却器出口配管合流部（各ループの 2 基の主冷却器の出口合流部）において温度上昇が半分低減されるため、ナトリウム温度変化幅を低減する方向となる。一方、始動補償器を用いた場合は、2 台同時起動とすると主冷却器出口配管合流部で温度上昇が緩和されることなく 1 次系側へ伝達されることから、原子炉入口ナトリウム温度上昇が 10℃を超える可能性があることがわかった。

以上から、主送風機の起動方法は、起動時の電圧降下の抑制及びナトリウム温度変化の低減を満足させるため、1台ごとに順次単独起動（各々直入れ起動）とすることとした。

② 主送風機インレットベーン

MK-Ⅲ用主冷却機は、旧主冷却機と同様にインレットベーン及び入口ダンパで風量調節することにより、主冷却器出口 Na 温度を制御するシステムとなっている。このうち、インレットベーンは、原子炉運転中において風量調節範囲の90%を占めていることから、その作動性に高い信頼性が要求される。このため、MK-Ⅲ風量条件に対する駆動力伝達系の強度を十分に確保すると共に、MK-Ⅱのメンテナンス経験を反映し、信頼性を向上すべく検討を行った。

ベーン・コントロールリングは、メンテナンス時の交換を考慮し2分割とし、コントロールリング表面には、耐塩害を考慮しクロムメッキ処理を施した。センターボスは、その表面の腐食がベーンの作動性に大きく影響を与えるため、図 3.1-11 に示すように表面全体をデフリック処理（二硫化モリブデンの焼付処理）し、防錆と潤滑効果を図った。また、しゅう動部にスラストワッシャを設け、デフリック処理が剥がれないように工夫した。

③ 主送風機用電動機

MK-Ⅲ用電動機は、出力が400kWから710kWに増大するため、極力コンパクトに設計し、建物を改造せず既存の据付スペースの範囲内に収める必要があった。これに対し、保守性の観点から耐塩害、耐塵埃を重視し、電動機の保護形式を全閉外扇形、又は全閉内冷形（クーラユニット内装）にすると大型化となり、建家改造を施さない限り据付スペースに収めることはできない。よって、旧電動機と同型のスペースヒータ付き開放防滴保護形を選定した。なお、MK-Ⅲ用電動機は、固定子巻線の絶縁強化のため、エポキシレジン全含有とし、信頼性の向上を図った。

また、軸受形式は、旧電動機よりも起動時間が長くなることから非接触形である自冷式の「すべり軸受」では必要な油膜厚みの形成ができないため、接触形であるグリース潤滑式の「ころがり軸受」を採用した。

④ 主送風機用ブレーキ

主送風機ブレーキの型式選定にあたっては、主送風機側及び駆動モータ側との取合い、電気・計装設備との取合い、ブレーキ据付スペース、既設基礎の位置の流用など

の条件から、基本的に旧ブレーキと同形式のドラム型スプリング制動（電磁石消磁で制動）方式を採用することとした。但し、ブレーキの設計条件としては、熱過渡条件から要求される制動時間（13.6 秒以内）を満足するだけでなく、ブレーキ作動時にしゅう動部となるドラム及びライニングが健全である必要がある。そこで、旧ブレーキと同一仕様のドラム及びライニングを選定した場合について検討した結果、ブレーキドラムの表面温度上昇によるクラックの発生とブレーキライニングの焼付き（カーボン生成）により制動時間が増加し、設計条件の 13.6 秒以内に停止できないことが懸念された。このため、ブレーキドラムとブレーキライニングの材質の見直しを行うと共に、成立性確認試験（添付資料 1 参照）を行い、MK-Ⅲ条件に適合した主送風機ブレーキとして問題なく使用できる見通しを得た。

このほか、電磁コイルについて、図 3.1—12 に示すように絶縁構造を改善すると共に、絶縁種別を B 種から F 種にランクを上げるなど、絶縁信頼性を向上させた。

⑤ 入口・出口ダンパ

図 3.1—13 の入口・出口ダンパの構造図に示すとおり、ダンパの型式は旧ダンパと同じ角型平行翼式とした。

入口ダンパは、旧入口ダンパのように主冷却器の直下に配置した場合、伝熱管予熱時の輻射の影響を受けやすく、そのために熱延び差による熱変形が生じ、ダンパのシール性低下が懸念されたが、MK-Ⅲでは、3.1.3 (1) ①項で述べた荷重分散化（出入口ダンパ位置変更）によって、主送風機側へ配置変更したことから、シール性に対する影響を低減できた。しかしながら、主冷却器内ナトリウムを予熱保持する空間スペース（入口ダンパ～出口ダンパ間）が増加したため、シール性を向上させると共に、予熱保持が可能であることを評価することが必要となった。よって、図 3.1—14 に示すシール性改善を行うと共に、MK-Ⅲ用ダンパを模擬した試験（添付資料 2 参照）を行い、ダンパの締切り性に問題ないこと確認した。

ダンパの材料は、出口ダンパの最高使用温度（3.2.4 項参照）が 420℃になったことから、設計基準において許容値が 420℃まで網羅されている SB410(ボイラ及び压力容器用炭素鋼鋼板)を採用した。SB410 は、「常陽」2 次系オーバフロータンク及びダンパタンクのナトリウム接液部に使用されており十分な実績がある。なお、入口ダンパは、最高使用温度 350℃であるが、出口ダンパと同様の構造であることから、同一材料の SB410 とした。

⑥ 入口・出口ダクト及び伸縮継手

(a) 入口・出口ダクト

入口・出口ダクトは、基本的に旧ダクトと同様の角形鋼板製ダクトであり、耐震性の観点から、鋼板外面に多数の補強材を設けた構造となっている。また、MK-Ⅲ用は、ダクト出入口の開口部の変形防止のため、補強棒を新たに追加している。なお、入口ダクト（主冷却器の空気入口側）は、外気の影響を受けやすいため、耐塩害を考慮してステンレス鋼板製とし、出口ダクトは、原子炉運転中も高温となることから耐SCCを考慮して出口ダンパと同じSB410製とした。

(b) 伸縮継手

主冷却機の熱膨張及び地震時相対変位を吸収するため、旧主冷却機と同様に主冷却器の空気入口側・出口側に伸縮継手を設けた。また、MK-Ⅲでは、先に述べたように荷重分散化のため、入口ダンパを主送風機側に配置変更したことから、主冷却器と入口ダンパ間の距離が長くなった（この間は入口ダクトが入っている）。このため、原子炉停止中の予熱時における入口ダクトの熱膨張量が旧主冷却機よりも大きくなったことから、この熱膨張量が主送風機へ影響しないように、主送風機吐出側にも伸縮継手を追加した。なお、主送風機吐出側伸縮継手は、主送風機運転による振動を吸収する役割も兼ねている。

伸縮継手は、バネ剛性を有する薄板構造であり、耐塩害、耐SCC、耐熱を考慮し、材料にSUS316Lを採用した。伸縮継手のメタルベローズは、旧主冷却機で使用したV型ベローズから、伸縮が良好なU型ベローズに変更した。これは、ベローズの疲労評価では、ベローズ山部の曲率が大きいU型ベローズの方が有利なためである。

(4) その他、計装品類等

① 内部監視窓の設置

入口・出口ダクトの両側に内部監視窓を設け、窓の外に監視カメラを設けた。これにより、伝熱管の上方側と下方側から内部の監視が行えるようにした。図3.1-15に内部監視用窓の構造・配置図を示す。

② 入口空気温度計の設置

主冷却器の空気入口側の温度監視を可能とするため、入口ダクト部に空気温度計を追加した。

③ 点検架台の設置

主送風機の周りには、軸受部の振動測定、電動機へのグリスアップ、ベーン分解点検等において、各部へアクセスできるようにするため、点検架台を設置した。また、高所の出口ダンパ周辺には、出口ダンパ及びダンパ駆動装置の点検時のアクセス、ダクト内立入時に使用するマンホールへのアクセスのほか、内部点検用監視窓、空気冷却器用煙式漏えい検出器へのアクセスのため、点検架台を設置した。

3.2 設計仕様

MK-Ⅲ用主冷却機の設計仕様の設定根拠は、次のとおりである。

3.2.1 機器種別

「常陽」の設置当初においては、日本初の液体金属冷却型高速増殖炉である原子炉の特殊性から、法令、府令等が整備されていなかった点が多く、機器種別は、1970年当時の旧通産省告示 501号、ASME CODE Section III(1971)や「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針に基づき定めていた。そのため、現在用いられている機器種別と若干異なる区分を既設設備では使用しているのが「常陽」の現状である。

今回交換したMK-Ⅲ用主冷却機については、現在の区分に合わせたものにすることを考え、「試験研究の用に供する原子炉等の溶接に関する技術基準に関する総理府令」（総理府令第 74号）に規定記載されている区分で分類した⁽³⁾。（なお、この方法は機器区分の管理が複雑となることや他の部分へのバックフィットを避けるため機器一体で全て交換する場合にのみ適用すべきであると考えている。現に、主冷却機の場合も、既設2次系配管の一部交換（主冷却機の接続部分）となることから、その交換対象の2次系配管は旧機器区分のまま申請した。ただし、設計評価については、現在の基準を使用し実施した。）

原則的な機器種別の選択方法は、次のとおりである。

- (1) MK-Ⅲでは、原子炉スクラム後の崩壊熱除去をいずれも2次冷却材の自然循環により行う。よって、2次冷却材と接液する配管（伝熱管、入口・出口集合管及びドレン管）は、崩壊熱除去の観点から原子炉を安全に停止するために必要な設備であると考え、第3種管とした。なお、旧主冷却器は、第3種容器として設計されているが、MK-Ⅲでは現在の区分に従い分類するとの考え方から、次の理由により第3種管として区分した。

発電炉用の構造等の技術基準である通産省告示 501号の解説によると、管と容器との区分の解釈については、原子力溶接連絡会の「原子力発電所に係る管と容器の区分」

を参照することとなっている。よって、原子力溶接連絡会の「原子力発電所に係る管と容器の区分」に従い次のように解釈した。

「容器」の基本的な考え方は、「「容器」とは機能上、滞留又は貯蔵の目的で計画されるもの」となっており、主冷却器は明らかにこれに該当しない。また、容器の区分の具体例には、主冷却器のような空気冷却器構造のものはなく、主冷却器の集合管にあたる「分岐管，集合管」が「管」として区分するよう示されている。以上から、集合管及び伝熱管及びドレン管について「管」として区分した。

- (2) 上記(1)の第3種管を直接支持する構造物（伝熱管支持金具、伝熱管支持板、入口・出口集合管支持脚、ドレン管支持金具及びUボルト）は、第3種支持構造物とした。その根拠は次のとおりである。

通産省告示 501号では、機器の耐圧部に直接溶接によって取付けられており、その使用条件の影響を直接受ける部分で支持構造物に発生した欠陥が耐圧部にまで進展する恐れのある範囲のみに対して構造の規格を規定している。一方、原子力発電所耐震設計技術指針⁽⁴⁾（以下、JEAG4601¹⁹⁸⁷という）においては、通産省告示 501号の範囲に加えて、支持される設備の地震荷重を直接的に受ける範囲が直接支持構造物と定義されている。したがって、伝熱管及びドレン管支持金具は、直接溶接により取付けられていないが、JEAG4601¹⁹⁸⁷の直接支持構造物の定義により第3種支持構造物に分類した。

- (3) その他の支持構造物

伝熱管サポート、本体枠組及び取付ボルトは、伝熱管及び入口・出口集合管の自重や地震荷重を間接的に支持し、かつ JEAG4601¹⁹⁸⁷の直接支持構造物に該当しない部品と考え、その他の支持構造物とした。

図 3.2-1 に MK-Ⅲ用主冷却機の機器区分を示す。

3.2.2 耐震クラス

機器区分と同様に耐震クラスの区分も「常陽」設計当時の基準を使用しているため、一体交換する部分について耐震クラスを見直した。

耐震クラスは、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（1981年7月）に基づき、以下のように選定した。なお、機器区分と同様に、管理が複雑となることや他の部分へのバックフィットを避けるため、機器一体で全て交換する場合にのみ適用すべきであると考えている。主冷却機のうち主送風機設備については、出口ダクトの屋外部分を残した部分交換となることから、旧機器区分のまま申請した。ただし、設計評価については、現在

の基準を使用し、実施することとした。

(1) 主冷却器

主冷却器は、第3種管に選定した伝熱管等を有することから崩壊熱除去施設と考え、Asクラスとする。

(2) 主送風機設備

① 主送風機及び主送風機用伸縮継手

主送風機は、原子炉停止時に停止する機器であり、主送風機の強制通風によって崩壊熱除去に寄与するものではない。また、主冷却器伝熱管までの空気流路を形成するが、低温側（空気入口側）であり、自然循環力の発生に寄与しないことからCクラスとする。但し、破損により空気流路を防いだ場合、自然循環が阻害されてAsクラスの設備の機能に影響を及ぼす恐れが考えられることから、その影響がないことの評価を行うこととした。

② 入口・出口ダンパ、入口・出口ダクト、入口・伸縮継手

主送風機設備のうち、入口ダンパから出口ダクトまでの空気流路を形成する設備は、出口ダクトの屋外部分を残した部分交換となることから、旧機器区分のAクラスとした。但し、自然循環力の発生に寄与するものであることから、主冷却器と同様にAsクラスとして評価することとした。

3.2.3 最高使用圧力

(1) 主冷却器

主冷却器の最高使用圧力については、「2次主循環ポンプ運転時における主冷却器入口圧力（ポンプ吐出圧から系統圧損を除いた値）」と「液柱差」と「カバーガスの安全弁吹出圧力0.098MPa（1.0kg/cm²）」の合計に余裕を加えた0.294MPa（3.0kg/cm）を内圧とし、外圧は、系統真空引き時にかかる圧力を考えて、0.098MPa（1.0kg/cm²）とした。

(2) 主送風機設備

空気流路を形成するダンパ・ダクト・伸縮継手の最高使用圧力は、主送風機をインレットベーン締切で運転した状態（最も差圧が大きくなる状態）における差圧5.39kPa（550mmAq）に10%余裕を加えた5.98kPa（610mmAq）とした。

3.2.4 最高使用温度

(1) 主冷却器

主冷却器の最高使用温度については、熱過渡発生時の金属温度の最高値以上に定める

ことを考えて検討した結果、全て既設と同じ条件となった。したがって、内圧負荷時 520℃、外圧負荷時 250℃と設定した。

(2) 主送風機設備

主送風機設備のうち主冷却器出口側は、熱過渡発生時の空気温度の最高値以上に定めることを考えて検討した。また、主冷却器入口側は、原子炉起動時（出入口ダンパ全閉時）における主冷却器からの輻射熱を考慮して検討した。以上の結果、次の値を設定した。

- ① 主送風機用伸縮継手：250℃
- ② 入口ダンパ、入口ダクト及び入口ダクト用伸縮継手：350℃
- ③ 出口ダンパ、出口ダクト及び出口ダクト用伸縮継手：420℃

4. 構造設計・耐震設計の考え方

本章では、MK-Ⅲ用主冷却機の構造設計・耐震設計について示した。なお、主冷却機の設計は、MK-Ⅲ用主中間熱交換器のうちの第3種機器の設計方法と同一の方法としている⁵⁾。

4.1 機器設計フローの検討

主冷却機のうち2次冷却材と接液する配管（伝熱管、入口・出口集合管及びドレン管）は、第3種管として設計するが、「常陽」が①高速炉であること、②実験炉であること、から関連する規格基準が多種あるため、どの基準をどの様に適用するかが明確になっていなかった。そこで、設計開始時において、製作する機器の適用基準を明確にする必要があった。

4.1.1 課題点

主冷却機の設計の際に課題となった点は、以下の4点である。

- (1) ナトリウム冷却型高速増殖炉発電所の原子炉施設に関する構造等の技術基準を準用しない。

「常陽」は研究炉であり、発電炉でないことを理由にこれまで「もんじゅ」の基準を適用してこなかったことに加え、現状の設備が「もんじゅ」の他の基準（耐震等）に適合しない部分もあるため、準用しないものとしている。

- (2) 最高使用温度が研究炉の技術基準に記載されている材料の使用範囲を超える。

発電炉用の構造等の技術基準である通産省告示 501 号に対応する研究炉の基準として、「試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準」（科技厅内規、以下、「研究炉の技術基準」という。）がある。この研究炉の技術基準に記載されている（通産省告示 501 号の第1種機器設計用材料とほぼ同じである）強度基準表（別表2）は、オーステナイト系材料で常温～425℃、フェライト系材料で常温～375℃までの範囲であるのに対し、「常陽」の通常運転時の1次系、2次系ホットレグ温度はそれぞれ、500℃、470℃である。

- (3) 配管の耐震クラスが切断部で異なってしまう。

現在の法令による機器区分では、主冷却器：As クラス、2次系配管：As クラスとなるが、「常陽」の既設設備においては2次系配管（格納容器外）：A クラスで設計されており、格納容器外に設置されている主冷却器の接続用配管の耐震クラスをAsとすると既設配管との不整合を生じる。

4.1.2 設計方針

これらの課題に対して、関係法令を検討した結果、次のように対応することとした。

- (1) 第3種機器以下の設計には、研究炉の技術基準を適用する。

根拠：現在まで適用している基準を使用する。

- (2) 第1種機器の設計には、通産省告示 501号を準用する。

根拠：研究炉用の技術基準は、通産省告示 501号をベースとしており、告示 501号には第1種機器の設計が記載されている。

- (3) 使用中の金属温度が通産省告示 501号別表2の温度範囲を超える部分（オーステナイト系：425℃、フェライト系：375℃）の設計においては高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針^{(6),(7)}（以下、BDSという）を準用する。

根拠：「常陽」においては、ナトリウム接液部の設計に関して「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針（1972年3月、以下『常陽』指針という）を使用していた。BDSは、この「常陽」指針を改良し、新たな知見を加え精度を向上させたものであり、「もんじゅ」における第1種機器の高温部の設計に用いられている基準である。また、『常陽』指針の中で「常陽」の運転段階において関連研究の成果を反映できることが記述されていることから、新規機器設計については準用することができると考えた。

- (4) 第3種機器で下記の(a)～(c)を同時に満たす、または(d)を満たす部分については、解析による設計を実施する。また、そのうち使用中の金属温度が通産省告示 501号別表2の範囲を超える部分については、BDSを準用する。

- (a) 定格出力運転時にナトリウムに接液する。
- (b) 定格出力運転時の金属温度が通産省告示 501号別表2の範囲を超える。
- (c) 熱応力の繰返し回数が著しい。
- (d) 2次冷却系の主流路を構成する大型機器。

根拠：第3種機器においてBDSを準用する条件を検討したところ、「もんじゅ」設計基準においても、上記と同じ規定をしているため、これを準用した。

- (5) 第3種機器設計に1/4許容応力体系を導入する。BDSにおいても、この考え方を継承し、許容応力に1/4体系を用いることとした。なお、ナトリウム冷却型高速増殖炉発電所の原子炉施設に関する構造等の技術基準においても、第3種機器にBDSを準用する際には同じ手法を取っている。

根拠：研究炉の技術基準は、通産省告示 501号と比較して第3種機器における解析による設計許容応力強さを引張強さの1/3の値(1/3体系)から1/4の値(1/4体系)に変更してもよいと規定している。これは、強度を小さく見積ること、第3種機器に使用する材料の検査を第1種機器並みから第3種機器並みに緩和することを目的としている。

- (6) 新規一体交換分の機器については、現在の基準における機器区分、耐震クラスに合った形に変更しても良いが、部分交換(配管等)については従来区分とする。ただし、部分交換部についても現在の基準に合っていることを確認する。

根拠：既設機器に対し、現在の基準を適用(バックフィット)することは、他の原子炉施設への影響も考えると好ましくない。ただし、既設側が現在の基準でも満足していることを確認することとした。

図4.1-1に「常陽」ナトリウム機器の設計手順フロー(第3種管)を示す。MK-Ⅲ用主冷却機の設計は、この設計手順フローにしたがって行った。

4.2 熱過渡設計

高速炉において設計上重要なポイントは、高温、クリープ、熱応力である。これらの設計に必要なものは熱過渡条件である。「常陽」では、MK-Ⅲ炉心における運転条件の設定の際に想定事象、温度変化等のプラント熱過渡条件を見直しているため、機器設計の面においても新たに熱過渡条件を設定する必要性が生じた。

4.2.1 熱過渡事象及び想定回数

表4.2-1にMK-Ⅲ用主冷却機の設計に用いた熱過渡事象及び想定回数を示す。

MK-Ⅲ用主冷却機の熱過渡事象及び想定回数は、MK-Ⅲプラントのために設定した熱過渡条件^⑧に基づいている。

4.2.2 MK-Ⅲプラント運転時間

設計に用いるMK-Ⅲプラント運転時間は、「常陽」の設置当時に設定した機器、配管等の使用時間(131,500時間)から、MK-I~MK-II~移行炉心までの運転時間(約57,000時間)を差し引いたもの(約75,000時間と想定(実績+想定))に余裕を見込んで、80,000時間とした。

4.2.3 通常停止時の熱過渡について

MK-Ⅲプラントにおいては、冷却系機器の熱過渡を緩和させることを目的として、原

原子炉スクラム時における冷却系機器動作を変更し、これに伴い「制御棒一斉挿入」を削除し、「原子炉スクラム」に統一した。図 4.2-1 に過渡時の機器インターロック（MK-II と MK-III との比較）を示す。一方、通常停止する場合においては、30MW から制御棒 2 本同時手動挿入することで停止させる条件を設計に考慮したことから、この状態が最も厳しい温度変化条件となった。

4.2.4 ナトリウムドレン時の熱過渡について

主冷却機の設計においては、ナトリウムドレンの際の熱過渡を考慮していない。これは、主冷却機に発生する熱応力が異常な過渡変化時や事故時等の熱過渡に支配され、充填及びドレン時においてはほとんど無視できるためである。

4.2.5 評価部位

図 4.2-2～図 4.2-5 に主冷却器各部の評価部位を示す。

また、主冷却器各部のうち、構造上の不連続部等により応力的に厳しい箇所については、容器の設計方法による応力解析、評価を行っている。

図 4.2-6 に主冷却器の熱過渡解析対象部位を示す。熱過渡解析対象部位は、ナトリウム入口伝熱管（フィン付根）、ナトリウム入口集合管スタブ、ナトリウム入口集合管支持ラグ、ナトリウム出口伝熱管（フィン付根）、ナトリウム出口集合管スタブ及びナトリウム出口集合管ドレン管付根の合計 6 箇所である。

4.2.6 評価結果

(1) 管としての評価結果

表 4.2-2 に強度評価結果（BDS 評価対象部位）を示す。表 4.2-3 に強度評価結果（研究炉の技術基準評価対象部位）を示す。

(2) 容器としての評価結果

表 4.2-4 に容器としての強度評価結果（BDS 評価対象部位）を示す。表 4.2-5 に容器としての強度評価結果（研究炉の技術基準評価対象部位）を示す。

4.3 耐震設計

主冷却機は、出口ダクトの屋外部を除いてほぼ主要部全体を交換することから、耐震設計に使用する指針・基準は現行のものを用いている。以下に主冷却機の耐震設計の考え方を述べる。

4.3.1 主冷却機の耐震設計方針

主冷却機は、伝熱管、集合管及びドレン管の配管系と、ダンパ・ダクト類の空気系で構成されており、地震時応答解析にあたっては、そのモデルの構成、取合条件を整理する必要があった。よって、主冷却機の耐震設計方針として以下のように整理した。

(1) 主冷却機全体モデルによる解析

空気流路を形成する主冷却機全体（主冷却器本体枠組、ダンパ、ダクト類及び既設出口ダクト（交換対象外）を一体化した多質点モデルに置換し、 S_1 、 S_2 地震動を用いた動的解析、及び静的解析を行い、地震力の大きい方を地震荷重として使用する。なお、主送風機は、補強リブ等で強固に組み立てられていることから、剛構造として考え、本モデルには含めないで、主送風機単体として評価した。

(2) 主冷却器の解析

主冷却器のうち集合管は、集合管に接続される2次主冷却系配管と一体化した梁モデルに置換し、 S_1 、 S_2 地震動を用いた動的解析、及び静的解析を行い、地震力の大きい方を地震荷重として使用する。また、伝熱管及びドレン管は、管1本を梁モデルに置換し、同様に解析、評価を行う。集合管を2次主冷却系配管側と組合せたのは、集合管が主冷却器本体枠組に支持される構造となっているため、集合管支持部を配管系の端部として考えたためである。

主冷却器の空気流路を形成する本体枠組は、上記(1)に示す主冷却機全体モデルの一部として解析する。

なお、集合管、伝熱管及びドレン管の解析には、上記(1)の主冷却機全体モデルの解析結果から求めた地震時変位を、各々のモデルの端部（集合管はその中心、伝熱管は集合管との取合点）に加える。

(3) 主送風機の耐震強度計算

主送風機は、ケーシング及び軸受部をそれぞれ1質点系モデルとして考えて固有振動数を求め、剛構造（固有振動数が20Hz以上）の有無を判定する。その結果に応じて、静的震度を用いた評価又は解析による評価を行う。

4.3.2 地震力の算定方法

(1) 動的地震力

「常陽」では、MK-Ⅲ改造に伴い、現行の耐震関連諸指針に基づき、建物、機器・配管系の耐震性再評価^{(9),(10)}を行うと共に、機器・配管系設計用床応答曲線を作成した。

動的解析では、この設計用床応答曲線を用いて動的地震力を求める。

(2) 静的地震力

「常陽」の特色として、動的地震力よりも静的地震力が大きくなることが挙げられる。これは、「常陽」が岩盤に設置されていないこと（第四紀層の良く締った砂礫層に設置）による岩盤～建物基礎底面間における地震動の地盤内減衰、及び建物と地盤との相互作用の影響を考慮する地盤ばねに振動数依存性を考慮した複素ばねを採用していることが影響しているものと考えられる。

静的地震力の算定は、発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針及び JEAG4601¹⁹⁸⁷ に記載されている以下の式から行っている。（カッコ内は、JEAG4601 の 1991 年追補版⁽¹⁾の式）

（主冷却機が据え付けられる主冷却機建物の地上部分）

$$Q_I = n \cdot Z \cdot C_I \cdot W_I \quad (Q_I = C_I \cdot W_I)$$

$$C_I = R_t' \cdot A_i \cdot C_0 \quad (C_I = n \cdot Z \cdot R_t' \cdot A_i \cdot C_0)$$

$$Q_V = C_V \cdot W_I$$

$$C_V = 0.3$$

ここで、

Q_I : 水平地震力

n : 重要度に応じた係数 (A クラス 3.0、B クラス 1.5、C クラス 1.0)

Z : 地震地域係数

C_I : せん断力係数

W_I : 当該部分が支える重量

R_t' : 振動特性係数

$$R_t' = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot R_t$$

β_1 : 硬質地盤における入力 of 補正係数

β_2 : 動的相互作用による応答の補正係数

R_t : 1981 年安全審査指針に規定されている振動特性係数

A_i : せん断係数の高さ方向の分布係数

C_0 : 標準せん断力係数 (=0.2)

Q_V : 鉛直地震力

C_V : 鉛直震度

4.3.3 主冷却機全体モデルによる解析

主冷却機の動的解析に用いる床応答曲線は、主冷却機が設置されている各フロアを包絡している主冷却機建物 GL+12.5m における 1%減衰を考慮したものを使用している。

図 4.3-1 に MK-Ⅲ用主冷却機の解析モデルを示す。表 4.3-1 に MK-Ⅲ用主冷却機の解析用幾何学的形状データを示す。

動的解析では、主冷却機建物 GL+12.5m に床応答曲線を入力し、応答を求めている。ここで、解析モデルは次のように条件化している。

- (1) 主冷却機の各構成機器を等価な多質点系としたバネマスモデルとする。
- (2) モデル化にあたっては、主送風機を剛構造と考え、固定端（主送風機）と主送風機用伸縮継手を取り合うものとする。
- (3) 解析プログラムは、汎用構造解析プログラム“SAP”を使用する。
- (4) 各部のばね定数の設定方法（改造範囲のみ）は以下のとおりである。表 4.3-2 に各部のばね定数を示す。表 4.3-3 に伸縮継手（主送風機用及び出入口ダクト用）のばね定数を示す。

① 耐震架構（質点番号 24）

耐震架構（質点番号 24）の Y 方向のばね定数は、質点番号 24 の Y 方向を固定とした主冷却機の耐震応答解析を行い、得られた反力 $1.3 \times 10^4 \text{kg}$ と耐震架構の構造上のギャップ 2mm を考慮した値としている。

② 主冷却器支持部（質点番号 28）

主冷却器支持部（質点番号 28）のばね定数設定は、主冷却器の据付架台（既設部）及び主冷却器下部フレームをシェルモデル化し、解析を行うことで求めている。

(a) 解析モデル及び解析コード

図 4.3-2 に主冷却器の据付架台（既設部）及び主冷却器下部フレームの解析モデルを示す。解析は、構造解析コード“NASTRAN”のシェル要素を用いて行っている。

(b) 解析荷重条件及び境界条件

主冷却器据付架台の基礎ボルト部を拘束し、解析モデルの上面の 6 成分（X、Y、Z、 θX 、 θY 、 θZ ）に一定の荷重をそれぞれ負荷している。

(c) ばね定数の算定方法

解析より得られた変位及び回転角と荷重との関係から、図 4.3-3 に示す式からば

ね定数を設定している。

③ 入口ダクト支持部（質点番号 33）

入口ダクト支持部（質点番号 33）のばね定数設定は、入口ダクト支持部をシェルでモデル化し、解析を行うことで求めている。

(a) 解析モデル及び解析コード

図 4.3-4 に入口ダクト支持部の解析モデルを示す。解析は、構造解析コード“NASTRAN”のシェル要素を用いて行っている。

(b) 解析荷重条件及び境界条件

入口ダクトの基礎ボルト部を拘束し、解析モデルの上面の 6 成分（X、Y、Z、 θX 、 θY 、 θZ ）に一定の荷重をそれぞれ負荷している。

(c) ばね定数の算定方法

解析より得られた変位及び回転角と荷重との関係及び入口ダクトの部材剛性、入口ダクト形状による変形剛性を考慮して、ばね定数を設定している。

④ 伸縮継手（主送風機用及び出入口ダクト用）

伸縮継手（主送風機用及び出入口ダクト用）のばね定数設定は、角型ペローズのばね定数の設定に用いられている Standard of EJMA の式を用いて求めている。

MK-Ⅲ用主冷却機の固有振動数は、1 次モードが 4.7Hz、2 次モードが 9.7Hz である。

図 4.3-5 に MK-Ⅲ用主冷却機の固有値解析結果を示す。表 4.3-4 に MK-Ⅲ用主冷却機の耐震強度評価結果（各部の据付ボルトの評価結果）を示す。

4.3.4 主冷却器の解析

(1) 主冷却器集合管の解析

動的解析に用いる床応答曲線は、集合管を含む 2 次主冷却系配管が設置されている各フロアを包絡している主冷却機建物 GL+12.5m における 2.5%減衰を考慮したものを使用している。

図 4.2-2 に入口集合管を含む 2 次主冷却系配管の解析モデルを示す。図 4.2-5 に出口集合管を含む 2 次主冷却系配管の解析モデルを示す。解析プログラムは、汎用構造解析プログラム“SAP”を使用する。

(2) 伝熱管及びドレン管の解析

動的解析に用いる床応答曲線は、主冷却器据付床から地震力が伝達されるため、主冷却機建物 GL+4.5m における 2.0%減衰を考慮したものを使用している。

図 4.2-3 に伝熱管の解析モデルを示す。図 4.2-4 にドレン管の解析モデルを示す。解析プログラムは、汎用構造解析プログラム“SAP”を使用する。

地震時の強度評価結果は、表 4.2-2、表 4.2-4 に示した S_n^* の部分、表 4.2-3 に示した S1、S2 の部分、及び表 4.2-5 に示した IIIAS、IVAS の部分である。

4.3.5 主送風機の計算

図 4.3-6 に主送風機の計算モデルを示す。主送風機は、2つの軸受にて軸を支持する構造であり、スラスト荷重を固定側の軸受にて受けている。したがって、軸受部のモデル化にあたっては、軸方向荷重を考え、軸の重量を適切に評価できるようにする。軸受及びケーシングの重量は、各々の重心に集中しているものとする。また、主送風機の吐出口には入口ダクトからの熱膨張吸収のため伸縮継手が設けられているため、ケーシングの耐震計算においては、伸縮継手の重量をケーシングに加算すると共に、入口ダクト側からの反力を考慮する。

(1) 計算諸元

表 4.3-5 に主送風機の耐震計算における計算諸元を示す。計算に用いた各データの算出根拠は以下のとおりである。

① 主送風機の回転によって生ずる転倒モーメント

据付ボルトに生ずる引張力として、主送風機の回転によって生ずる転倒モーメントを考慮した。主送風機の回転によって生ずる転倒モーメント M_{pF} は、以下のよう求めた。

主送風機の回転によって生ずる転倒モーメントは、主送風機の回転及びブレーキ作動によって生ずるモーメントを求め、これを軸直角方向（X-X方向）のみ作用するものとして考える。

主送風機の回転によって生ずる転倒モーメント M_{pF} は、回転することにより発生するトルク値を表す下記の式により求める。

$$M_{pF} = 974 \cdot \frac{1000P}{N}$$

P : 軸動力 (= 705 kW (設計余裕含む))

N : 回転数 (= 735 rpm)

$$= 9.4 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{mm}$$

また、ブレーキ作動によって生ずるモーメント M_{PB} は、下記の式により求める。

$$M_{PB} = \frac{GD^2 \cdot N}{375t}$$

GD^2 : はずみ車効果 (ファンとモータの合計= $8.0 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$)

ファンの $GD^2 = 7.8 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

モータの $GD^2 = 2.0 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

t : ブレーキによる制動時間 (= 8.0 sec (設計目標値))

これに設計余裕として 10% 考慮し、

$$= 1.96 \times 10^6 \times 1.1 = 2.16 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

以上から、 $M_{PB} > M_{PF}$ のため、モータ側軸受への転倒モーメントは、 M_{PB} を用いる。なお、反モータ側軸受は、自由端であるため、 M_{PF} を用いる。

② 送風機の回転振動による震度

据付ボルトに生ずる引張力及びせん断力として、送風機の回転による軸受部へ与える震度を考慮した。震度 C_p は、軸受の軸直角方向 (X-X 方向) のみ作用するものとし、次の式で求めた。

$$C_p = \frac{a \cdot 10^{-4} \cdot (2 \pi f)^2}{980}$$

a : 片振幅 ($510/2 = 255 \mu\text{m}$ (振動速度が最も厳しい 20mm/s の場合の値))

f : 振動数 (= $735 \text{ rpm}/60 = 12.25$)

$$= 0.154$$

③ 入口ダクト側からの反力及び反力により発生するモーメント

主送風機吐出口には、入口ダクトからの熱膨張を吸収する目的で伸縮継手が設けられており、その熱膨張による反力及び反力により生じるモーメントを計算条件として考慮した。なお、主送風機の構造上、この反力はケーシングのみに働くものとする。入口ダクト側からの反力 (軸力) B 及び反力により発生するモーメント B_P は以下のとおりである。なお、 B_P は主送風機の反伸縮継手側のボルトを転倒支点と考えて求めた。

$$B = 1700 \text{ kg}$$

$$B_P = 2.7 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

(2) 計算結果

表 4.3-6 に MK-Ⅲ 用主送風機の耐震強度評価結果を示す。表 4.3-6 に示すように、固有振動数が 20Hz 以上であることから剛構造であると判断し、静的震度を用いた評価を行った。

4.3.6 機器保持建物の健全性

機器の耐震クラスを A から As に変更したことで、機器自体の耐震性は向上する。しかし、それを保持する建物は変更しないことから、建物が As クラスの機器を保持できる機能を有することを確認するため、建物の健全性再評価を行った。本評価は、発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針により、建物の保有水平耐力が必要水平耐力に対して妥当な安全余裕を有していることを確認する方法を用いて行った。

ここで、妥当な安全余裕としては As クラスの機器を保持することから、3 倍以上を目安とした。

表 4.3-7 に建物の必要保有水平耐力と保有水平耐力を示す。

5. 伝熱・流動計算

MK-Ⅲ用主冷却機は、35MWt ($3.01 \times 10^7 \text{kcal/h}$) / 基以上の除熱性能が必要となる。本章では、MK-Ⅲ条件に対する主冷却機の除熱性能を評価した結果、及び2次主循環ポンプの容量確認・主送風機の設計仕様決定化の観点から2次冷却系側・主冷却機空気側の予想圧力損失を評価した結果を示した。

5.1 MK-Ⅲ運転条件

表 3.1-2 のMK-Ⅲ用主冷却機及び旧主冷却機の仕様比較に、ナトリウム側・空気側の流量及び温度条件を示す。

5.2 伝熱量の計算

主冷却機の交換熱量の確認は、35MWt の熱量を伝達するために必要な伝熱面積 A' と機器の伝熱面積 A との比較で行う。

5.2.1 有効伝熱面積の計算

有効伝熱面積は、次の項目を条件として求めた。なお、MK-Ⅲでは、既設における除熱性能余裕不足の経験を踏まえて、③、④に示すように余裕確保に配慮した。

- ① 管外周表面積を基準とする。
- ② 空気流路内のフィン付伝熱管部から、伝熱無効部長さを除いたものを有効伝熱長さとする。
- ③ 伝熱管サポート部により影となる部分は、伝熱無効部とする。ここで、伝熱管無効部長さは、サポート 1 ヶ所あたり 75mm (サポートは伝熱管 1 本あたり 14 ヶ所) とする。図 5.2-1 に既設設計及びMK-Ⅲ設計におけるサポート部の伝熱無効部について示す。図 5.2-1 に示すように、既設設計では、当て板部分のみを無効部分としている。
- ④ 伝熱管検査のためのフィン無し部 (3.1.3 項参照) は伝熱無効部とする。ここで、フィン無し部は、1 ヶ所あたり 100mm、伝熱管 1 パスあたり 14 ヶ所として考慮した。なお、検査用フィン無し部は、最終的に 3.1.3 項に示すように計 10 ヶ所 (無効部として考慮した範囲内) 設けている。
- ⑤ 伝熱管等の寸法はノミナル値とする。

有効伝熱面積 A は、以下の式で求められる。

$$A = n \cdot A_o \cdot L \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

n : 伝熱管本数 (= 80 本)

A_o : 管 1m あたりの管外周表面積 (A_r + A_f = 1.62m²/m)

A_r = 管 1m あたりのフィン無し部表面積
 (π D_r (1 - 2 n_f · t_f) = 0.0919m²/m)

A_f = 管 1m あたりのフィン表面積

$$\left(2 \cdot \frac{\pi}{4} (D_f^2 - D_r^2) \cdot n_f + 2 \pi D_f \cdot t_f \cdot n_f = 1.53 \text{ m}^2/\text{m} \right)$$

D_r : フィン根元径 (管外径) (= 42.7mm)

n_f : 管 1m あたりのフィン数 (= 197 枚)

t_f : フィンの厚みの半分 (= 0.8mm)

D_f : フィン外径 (= 80.7mm)

L : 有効伝熱長さ (= 18.5m)

各値を式に代入して、A=2400m²となる。

5.2.2 必要伝熱面積の計算と伝熱量の評価

必要伝熱面積 A' は、熱交換器設計ハンドブック⁽¹²⁾等を参考とし、以下のよう求める。

$$A' = Q / (U \cdot \Delta T) \quad \dots \dots \dots (5.2)$$

Q : 交換熱量 (= 3.01 × 10⁷ kcal/h)

U : 総括伝熱係数 (W/m²/K)

Δ T : 対数平均温度差 (℃)

ここで、総括伝熱係数 U は、次の式で表せる。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + r_o + r_f + R_t + r_i \frac{A_o}{A_i} + \frac{1}{h_i} \cdot \frac{A_o}{A_i} \quad \dots \dots \dots (5.3)$$

h_o : 空気側熱伝達率 (= 116 W/m²/K)

r_o : 管外側汚れ係数 (= 3.44 × 10⁻⁴ m² · K/W)

r_f : フィン抵抗 (= 4.11 × 10⁻³ m² · K/W)

R_t : 伝熱管板厚熱抵抗 (= 7.89 × 10⁻⁴ m² · K/W)

r_i : 管内側汚れ係数 ($=0 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)

A_i : 管 1m あたりの管内周表面積 ($= 0.120 \text{ m}^2/\text{m}$)

(A_i は、管板厚について公差を考慮した平均値 2.2mm を用いて求めた)

h_i : 2次冷却材側熱伝達率 ($= 2.02 \times 10^4 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$)

よって、 $U=68.9 \text{ (W}/\text{m}^2/\text{K})$ となる。なお、空気側熱伝達率は、MK-ⅢではMK-Ⅱにおける試験及び運転データに基づき、Jameson の式 $\times 0.86$ を用いて算出した。

また、対数平均温度差 ΔT を次の式で求める。なお、温度差補正係数 F_t は、熱交換器設計ハンドブックに示されている図(図 5.2-2 参照)から求めた。図 5.2-2 の温度差補正係数は、主冷却機のような空冷式熱交換器において、管側パス数 3 以上について近似的に適用できるものとして使用されている。

$$\Delta T = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln(\Delta t_1 / \Delta t_2)} \cdot F_t \quad \dots \dots \dots (5.4)$$

$$= 220^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_1 = t_{i \text{ in}} - t_{o \text{ out}} = 193^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{i \text{ out}} - t_{o \text{ in}} = 260^\circ\text{C}$$

$t_{i \text{ in}}$: 2次冷却材入口温度 ($= 743.15\text{K}$)

$t_{i \text{ out}}$: 2次冷却材出口温度 ($=573.15\text{K}$)

$t_{o \text{ in}}$: 空気入口温度 ($= 313.15\text{K}$)

$t_{o \text{ out}}$: 空気出口温度 ($= 550.15\text{K}$)

F_t : 温度差補正係数 ($= 0.98$)

よって、 $\Delta T=220 \text{ (}^\circ\text{C)}$ となる。

総括伝熱係数 U と対数平均温度差 ΔT から、35MWt の熱交換を行うのに必要な伝熱面積 A' は、2310m²となる。

したがって、必要伝熱面積 A' よりも有効伝熱面積 A が大きいことから、主冷却機が、35MWt 以上の除熱能力を有することが確認できた。なお、計算上の裕度は、約 3.9%である。

5.3 圧力損失計算

MK-Ⅲ 2次主冷却系流量は、MK-Ⅱの 1.07 倍である 1348m³/h となる。圧力損失は、流量のほぼ 2 乗に比例することから、2次主冷却系の圧力損失は約 1.15 倍に増加する。また、

MK-Ⅲ用主冷却機は、伝熱管をU型からΣ型に変更するため、伝熱管の長さの延長により圧力損失が増加する。これに対し、2次主循環ポンプは、MK-Ⅲにおける運転継続性の観点から、NPSH（有効吸込みヘッド）を確保する必要があるため、2次冷却材側の圧力損失を計算し、ポンプ容量が問題ない範囲であることの評価を行った。また、主冷却機の空気側について圧力損失を計算し、主送風機の設計仕様に反映させた。

5.3.1 2次冷却材側圧力損失

2次冷却材側圧力損失は、以下の部分に分割して計算した。

表 5.3-1 にMK-Ⅲ用主冷却機（2次冷却材側）圧力損失の計算結果を示す。表 5.3-2 にMK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の2次冷却材側圧力損失の比較を示す。計算結果により、主冷却機の2次冷却材側圧力損失は、約 **4mNa** であることが予想される。

また、主冷却系流量増加に伴う2次配管系及び主中間熱交換器の圧力損失増加分を考慮すると図 5.3-1 に示すとおり **36.9mNa** となる（MK-Ⅲでは主中間熱交換器を交換するが、主中間熱交換器2次冷却材側はMK-Ⅱとほぼ同等と予想されている）。この結果、2次主循環ポンプのMK-Ⅲ定格回転数 **1060rpm** におけるポンプ容量で問題ないことを確認した。

5.3.2 空気側圧力損失

空気側圧力損失は、以下の部分に分割して計算した。

表 5.3-3 にMK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の空気側圧力損失の比較を示す。計算結果により、空気側圧力損失は、**402mmAq** であることが予想される。

この結果を受けて、主送風機は、圧力損失計算結果に余裕を見込んで、ファン静圧を **432mmAq**（回転数 **735rpm**）とし、設計風量 **7700m³/min** を確保する設計仕様とした。図 5.3-2 にMK-Ⅲ主送風機の予想性能を示す。

5.4 流力振動計算

主冷却器の伝熱管群やドレン管の内外には2次冷却材及び空気が流れるため、流れの乱れに起因する振動が発生し、この振動がある領域を超えると伝熱管等の破損につながる可能性がある。

MK-Ⅲにおける2次主冷却系の定格流量は、MK-Ⅱの約 **1.07** 倍に増加するため、流力振動上もMK-Ⅱより厳しくなる。また、主冷却機空気側についても約 **1.04%** に増加する。したがって、MK-Ⅲ用主冷却機の設計を行うにあたっては、定格流量条件において伝熱管及

びドレン管が流力振動に対して問題ないことを評価しておく必要があった。

5.4.1 伝熱管

伝熱管は、管外部の空気の流れに直交することから、空気の渦による流力振動と、その構造から定まる限界空気流速以上で生じる流力弾性振動が考えられる。また、伝熱管内を流れるナトリウムによる不安定振動が考えられる。よって、これらの流力振動に対する評価を実施した。

(1) 渦による流力振動の評価

① 固有振動数

伝熱管は、伝熱管 1 本あたり 14 カ所のサポート点があり、その両端部が集合管に溶接された構造となっている。したがって、固有振動数は、(a)集合管付根（固定）－サポート支持、(b)サポート同士の両支持の 2 種類について求める。

伝熱管の固有振動数は、以下の式で求めることができる。

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \left[\frac{E \cdot I \cdot g}{\gamma A} \right]$$

λ^2 : 境界条件による振動係数 ((a)=(1.25 π)²=15.42、(b)= π^2 =9.87)

L : 支持点間隔 ((a)=2.196m、(b)=1.175m)

E : 縦弾性係数 ((a)、(b)=1.856 $\times 10^{10}$ kg/m²)

I : 断面 2 次モーメント ((a)、(b)=5.756 $\times 10^8$ m⁴)

g : 重力加速度 ((a)、(b)=9.81m/sec²)

γA : 単位長さ当たりの等価重量 ((a)、(b)=12.3kg/m)

(a)集合管付根－サポート支持部、(b)はサポート同士の支持部の値を示す。

各部の固有振動数は、次の値となる。

(a)集合管付根－サポート支持部の伝熱管 f=14.9Hz

(b)サポート同士の支持部の伝熱管 f=33.2Hz

② 渦による励振振動数

渦による励振振動は、以下に示す式で求めることができる。ここで、ストローハル数は、伝熱管の構造等に対する渦放出周波数を表す定数であり、Y.N.Chen⁽¹³⁾の文献に示す管群配列のデータから求めた値を用いている。なお、MK-Ⅲ用主冷却機の伝熱管群の構造を模擬した空気流動試験^{(14) (15) (16)}を行った結果、本評価で用いた文献ベースのストローハル数と試験結果がほぼ一致することを確認している。

$$f_s = \frac{St \cdot V}{D}$$

St : ストローハル数 (=0.13)

V : 平均空気流速 (=29.6m/sec)

D : 伝熱管外径 (=0.0427m)

渦による励振振動 $f = 90.3 \text{ Hz}$ となる。

③ 評価

ASME を参考すれば以下に示す換算減衰係数 C_n が 64 を越えれば、揚力及び抗力方向のロックインを抑制する領域となる。

$$C_n = \frac{2 \cdot \delta \cdot Mn}{\rho \cdot D^2 \cdot \int_{Le} \phi_n^2(x) dx}$$

$$Mn = \int^L \gamma_A(x) \phi_n^2(x) dx$$

Mn : n 次振動モードに対する一般化質量

Le : 流体力を受ける部分の長さ

δ : 対数減衰率 ($= 2\pi h / (1-h^2)^{1/2} = 6.28 \times 10^{-2}$)

h : 減衰定数 (= 0.01)

ρ : 流体の密度 (= 0.8176kg/m³)

ϕ_n : n 次振動モード形状関数

ここで、伝熱管支持部全体が一樣な流れを受けるものとして、

$$\frac{\int^L \gamma_A(x) \phi_n^2(x) dx}{\int_{Le} \phi_n^2(x) dx} = \int^L \gamma_A(x) dx$$

と考え、換算減衰係数 C_n を次の式で求める。

$$C_n = \frac{2 \cdot \delta \cdot \gamma_A}{\rho \cdot D^2}$$

よって、換算減衰係数は $C_n = 1037$ となる。

この結果、換算減衰係数 C_n が揚力及び抗力方向のロックインを十分に抑制する領域 ($C_n > 64$) であり、かつ、伝熱管の固有振動数 f と渦による励振振動 f_s は離れていることから、問題ないものと判断できる。

(2) 流力弾性振動の評価

伝熱管の外側を流れる空気流速が、以下に示す限界空気流速 V_c 以下であれば流力弾性振動による影響はない。固有振動数 f は、安全側に小さい方の、集管付根—サポート支持部の伝熱管の値 ($f=14.9\text{Hz}$) を用いる。

$$V_c = f \cdot D \cdot K \left[\frac{\gamma_A \cdot \delta}{\rho \cdot D^2} \right]^{1/2}$$

K : 限界速度係数 (=7)

限界空気流速は $V_c=101.0\text{m/sec}$ となる。この結果、定格運転における平均空気流速 (29.6m/sec) は、流力弾性振動が発生する限界空気流速よりも小さいことから、問題ないものと判断できる。

ここで、限界速度係数 K は、S.S.Chen⁽¹⁷⁾の文献に基づき算出した値の7を用いている。なお、二列管群体系である主冷却器伝熱管については、管群と管群との間が約70cm離れた体系であり、S.S.Chenの密な三角配列管群体系と異なること、MK-IIより管群を流れる空気流速が約5%速くなることを考慮して、先に述べたストローハル数と同様に空気流動試験を行った。その結果、S.S.Chenの密な三角配列管群体系に基づき算出した限界速度係数7に対して、二列管群体系である主冷却器伝熱管の限界速度係数は6.8、限界空気流速は約96m/secとなり、ほぼ一致することを確認している。

(3) 管内流による不安定振動の評価

① 無次元流速

無次元流速は、機械工学便覧より以下の式で求めることができる。

$$u = U \cdot L \left[\frac{mf}{E \cdot I} \right]^{1/2}$$

U : 平均流速 (=2.04m/sec)

L : 管の長さ (最大支持間隔=2.196)

mf : 管の単位長さ当たりの流体質量 (=0.103kg/m)

E : 縦弾性係数 (=1.856×10¹⁰kg/m²)

I : 断面2次モーメント (=5.756×10⁻⁸m⁴)

無次元流速は、次の値となる。

$$u = 0.04$$

② 評価

機械工学便覧より、 $u < \pi/2$ (≈ 1.57) であれば励起される振動の影響を受けないことが確認されており、問題ない。

5.4.2 ドレン配管

ドレン管を空気流路内に引き回し、空気流路と熱交換させることにより出口集合管との合流部の温度差を低減させた構造となっている。これにより、空気の流れと直交するため、この部分における流力振動評価が考えられる。また、ドレン管内を流れるナトリウムによる不安定振動が考えられる。よって、これらの流力振動に対する評価を実施した。

(1) 渦による流力振動の評価

① 固有振動数

ドレン管は、空気流路内をサポートで支持されている。したがって、固有振動数は、両ピン支持の構造として、(a)最大支持間隔部及び(b)最小支持間隔部の値を求める。

ドレン管の固有振動数は、以下の式で求めることができる。

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \left[\frac{E \cdot I \cdot g}{\gamma_A} \right]$$

λ^2 : 境界条件による振動係数 ((a)、(b)) $=\pi^2=9.87$

L : 支持点間隔 ((a)) $=0.37\text{m}$ 、(b)) $=0.28\text{m}$

E : 縦弾性係数 ((a)、(b)) $=1.856 \times 10^{10}\text{kg/m}^2$

I : 断面 2 次モーメント ((a)、(b)) $=1.599 \times 10^{-9}\text{m}^4$

g : 重力加速度 ((a)、(b)) $=9.81\text{m/sec}^2$

γ_A : 単位長さ当たりの等価重量 ((a)、(b)) $=0.841\text{kg/m}$

(a)は最大支持間隔部、(b)は最小支持間隔部の値を示す。

各部の固有振動数は、次の値となる。

(a)最大支持間隔部のドレン管 $f=213\text{Hz}$

(b)最小支持間隔部のドレン管 $f=373\text{Hz}$

② 渦による励振振動数

渦による励振振動は、以下に示す式で求めることができる。ここで、ストローハル数は、機械工学便覧に示されている円柱の実験結果の値を用いている。

$$f_s = \frac{St \cdot V}{D}$$

St : ストロークハル数 (=0.21)

V : 平均空気流速 (=8.77m/sec)

D : ドレン管外径 (=0.0138m)

渦による励振振動 $f=134$ Hz となる。

③ 評価

ASME を参考すれば以下に示す換算減衰係数 C_n が 64 を越えれば、揚力及び抗力方向のロックインを抑制する領域となる。 C_n は、伝熱管と同様に次の式で求める。

$$C_n = \frac{2 \cdot \delta \cdot \gamma_A}{\rho \cdot D^2}$$

δ : 対数減衰率 ($= 2\pi h / (1-h^2)^{1/2} = 6.28 \times 10^{-2}$)

h : 減衰定数 (= 0.01)

ρ : 流体の密度 (= 0.9494kg/m³)

換算減衰係数は $C_n=585$ となる。

この結果、換算減衰係数 C_n が揚力及び抗力方向のロックインを十分に抑制する領域 ($C_n > 64$) であり、かつ、伝熱管の固有振動数 f と渦による励振振動 f_s は離れていることから、問題ないものと判断できる。

(2) 管内流による不安定振動の評価

① 無次元流速

無次元流速は、機械工学便覧より以下の式で求めることができる。

$$u = U \cdot L \left[\frac{mf}{E \cdot I} \right]^{1/2}$$

U : 平均流速 (= 1.24m/sec)

L : 管の長さ (最大支持間隔=0.37m)

mf : 管の単位長さ当たりの流体質量 (=0.0042 kg/m)

E : 縦弾性係数 (=1.856 × 10¹⁰kg/m²)

I : 断面 2 次モーメント (=1.599 × 10⁻⁹m⁴)

g : 重力加速度 (=9.81m/sec²)

無次元流速は、次の値となる。

$$u = 0.005$$

② 評価

機械工学便覧より、 $u < \pi/2$ ($\doteq 1.57$) であれば励起される振動の影響を受けないことが確認されており、問題ない。

6. 考 察

MK-Ⅲ主冷却機は、改造範囲を極力少なくする観点から既設設備の配置を変更しないとの条件の中で、主冷却機の必要除熱量（35MWt/基）を確保するように設計を行った。その後、総合機能試験の結果、主に以下のことが確認できた。

- ① 主送風機の空気風量は、インレットベーン開度 50%で設計定格風量 7700m³/min 以上となった。
- ② ブレーキ作動により、主送風機を 9 秒以内（設計は 13.6 秒以内）で停止できた。
- ③ 常温から 200℃までの主冷却器昇温試験の結果、約 11 時間で温度制御範囲（200℃±20℃）に到達できることを確認した。

また、性能試験では、主に以下のことが確認できた。

- ① 定格熱出力時の主送風機インレットベーン開度は約 35%（外気温度は約 20℃）であり、評価の結果、伝熱面積余裕は約 9%であった。
- ② 主送風機起動は、原子炉熱出力 18MWt で特に問題なく（起動時のナトリウム温度変化がプラントに影響することなく）行えることを確認した。

このように総合機能試験、性能試験において、所定の性能を満足し、除熱性能余裕を適度に確保していることを確認できた要因は、設計時において以下のように配慮したためであると考えられる。なお、主冷却機に係る総合機能試験、性能試験結果の詳細は、別途発行を予定している技術報告書を参照されたい。

- (1) MK-Ⅲ用主冷却機の空気側熱伝達率の算出について、MK-Ⅱにおける試験及び運転データに基づき、Jameson の式×0.86 を用いて適正化を図った。また、MK-Ⅲでは入口空気温度の設計条件を旧主冷却機の 30℃から 40℃に上げた。更に、空気側圧力損失の計算結果 402mmAq に対し、余裕を見込んでファン静圧を 432mmAq（回転数 735rpm）とした。以上から、主冷却器の除熱性能、主送風機の性能に適度な余裕を見込むことができた。
- (2) 本設計において、主送風機起動時の電圧降下の抑制及びナトリウム温度変化の低減の両面を満足させるため、1 台ごとに順次単独起動（各々直入れ起動）することとした。この結果、主送風機電動機出力がMK-Ⅱの約 1.8 倍で、起動時間も長くなったにも係らず、プラントに影響なく起動できた。
- (3) 主送風機ブレーキについては、ブレーキドラムとブレーキライニングの材質の見直しを行うと共に成立性確認試験を行い、MK-Ⅲ条件に適合した主送風機ブレーキとして問題なく使用できる見通しを得た。なお、ブレーキ作動時間が設計値の 13.6 秒以内から 9 秒以内（MK-

IIでは10sec)に縮めたことにより、原子炉スクラム直後の主冷却器出口ナトリウム温度の低下量を少なくすることができた。

- (4) ダンパのシール性改善を行うと共に、MK-III用ダンパを模擬した試験を行い、ダンパの縮切り性に問題ないことを確認した。この結果、設計予想（外気温度0℃から200℃まで30時間程度）よりも短時間の約11時間で主冷却器を昇温することができた。

7. おわりに

高速実験炉「常陽」では、1987年（昭和62年）から照射能力の高度化に向けたプロジェクト（MK-Ⅲ）を進めてきた。MK-Ⅲ冷却系改造工事における主要な交換機器の1つであるMK-Ⅲ用主冷却機的设计・製作については、1995年に詳細設計を開始し、2000年3月にすべての製作機器の製作及び大洗工学センターへの機器輸送を完了することができた。また、機器の交換を行う冷却系改造工事を2000年10月30日から2001年9月21日の約11ヶ月にわたって行ない、無事交換工事を完了することができた。その後、総合機能試験を経て、2003年7月2日にMK-Ⅲ炉心での初臨界を達成し、原子炉出力を約20%、50%、75%、90%及び100%（140MWt）と段階的に上昇させて、炉心の核熱特性、交換した冷却系機器の性能を確認するための性能試験を行い、同年11月27日に使用前検査に合格した。

MK-Ⅲ主冷却機は、改造範囲を極力少なくする観点から既設設備の配置を変更しないとの条件の中で、主冷却機の必要除熱量（35MWt/基）を確保した。MK-Ⅲ用主冷却機的设计では、主に以下の問題点に対する検討を行うと共に、伝熱・流動特性、圧力損失、流力振動等について評価した。

- (1) 適切な除熱性能余裕の確保
- (2) 伝熱面積増加に伴う建物側への据付荷重増加対策
- (3) 空気側圧力損失の増加対策（主送風機の最適化）
- (4) 旧主冷却機の保守経験を踏まえたメンテナンス性向上

本設計検討を踏まえて、機器製作、据付、総合機能試験及び性能試験を行った結果、定格熱出力時の主送風機インレットベーン開度は約35%（外気温度は約20℃）であり、評価の結果、伝熱面積余裕は約9%であることが確認できた。

8. 謝 辞

本設計製作に係る技術報告書をまとめるにあたり、検査開発株式会社の植田宗嗣氏に図面作成等多大なるご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

9. 参考文献

- (1) 富田直樹、他 : 「常陽」MK-Ⅲ冷却系改造のシステム設計 MK-Ⅲに対応した冷却系のプラントコンセプト、PNC ZN9410 91-301 (1991年9月)
- (2) 富田直樹、他 : 「常陽」MK-Ⅲ計画における冷却系の検討」、日本原子力学会秋の大会 E39 (1992年10月)
- (3) 近藤等士、他 : 「常陽」MK-Ⅲ冷却系改造に係わる設計条件の整備 機器区分、耐震クラス及び重要度分類について、PNC ZN9410 92-211 (1992年7月)
- (4) 電気技術基準調査委員会編, 電気技術指針原子力編 : 原子力発電所耐震設計技術指針、JEAG4601-1987、(社)日本電気協会 (1987年)
- (5) 近藤等士、他 : 「常陽」MK-Ⅲ冷却系機器の設計・製作 —主中間熱交換器—、JNC TN9410 2003-004 (2003年6月)
- (6) 動力炉・核燃料開発事業団 : 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針、PNC ZN241 84-08 (昭和59年9月)
- (7) 動力炉・核燃料開発事業団 : 解説 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針、PNC ZN241 84-14 (昭和59年12月)
- (8) 磯崎和則、他 : 「常陽」MK-Ⅲ冷却系改造に係わる設計条件の整備 —機器・配管構造設計用熱過渡条件の策定(最終版)—、PNC TN9410 2001-016 (2001年7月)
- (9) 磯崎和則、他 : 「常陽」MK-Ⅲ冷却系改造に係わる設計条件の整備 —耐震設計条件の整備—、PNC ZN9410 92-118 (1992年5月)
- (10) 磯崎和則、他 : 高速実験炉「常陽」建物、機器・配管系の耐震性再評価、PNC TN9410 97-069 (1997年7月)
- (11) 電気技術基準調査委員会編, 電気技術指針原子力編 : 原子力発電所耐震設計技術指針 追補版、JEAG4601-1987、(社)日本電気協会 (1991年)
- (12) 尾花英朗 : 熱交換器設計ハンドブック、工学図書株式会社 (1980年6月)
- (13) Y.N.Chen : Fluctuating Lift Forces of the Karman Vortex Streets on Single Circular Cylinders and Tube Bundles Part3-Lifts Forces in Tube Bundles, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, May,1972
- (14) 磯崎和則、他 : 「常陽」MK-Ⅲ主冷却器伝熱管群の空気流動試験、PNC TN9410 97-070 (1997年7月)

- (15) S.S.Chen : Guidelines for the Instability Flow Velocity of Tube Arrays in Cross Flow, 1984
- (16) 廣田和生、中村友道、菊池裕彦、他 : “フィン付き管群の流力弾性振動及び渦振動”, 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2001 CD-ROM 論文集, 621, (2001)
- (17) K.Hirota, T.Nakamura, H.Kikuchi, et al., “FLUIDELASTIC AND VORTEX INDUCED VIBRATION OF FINNED TUBE ARRAY”, ASME, IMECE2002, 32793 (2002)

表 3.1-1 (1/2) MK-III用主冷却機的设计仕様

型 式	フィン付空冷多管式	
機器区分 (主冷却器)	入口・出口集合管	第3種管
	伝熱管	第3種管
	ドレン管	第3種管
耐震クラス	主冷却器	As
	主送風機	C* ¹
	主送風機用伸縮継手	
	入口・出口ダンパ	A* ²
	入口・出口ダクト	
	入口・出口ダクト用伸縮継手	
最高使用温度 (主冷却器)	520℃ (外圧負荷時 250℃)	
最高使用圧力 (主冷却器)	0.294MPa (3.0kg/cm ²) (内圧) 0.098MPa (1.0kg/cm ²) (外圧)	
交換熱量	35MW (3.01×10 ⁷ kcal/h)	

*1：破損によって As クラスの主冷却器等に波及的影響を与えないように評価する。

*2：交換範囲は As クラスとして設計する。

表 3.1-1 (2/2) MK-Ⅲ用主冷却機的设计仕様

主冷却器	伝熱面積		m ²	2400	
	主要寸法	本体長さ	mm	6170	
		本体幅	mm	4005	
		本体高さ	mm	2970	
		入口・出口集合管外径	mm	φ 318.5	
		入口・出口集合管厚さ	mm	10.3	
		伝熱管外径	mm	φ 42.7	
		伝熱管厚さ	mm	2.0	
		伝熱管フィン付外径	mm	φ 80.7	
		伝熱管フィン厚さ	mm	1.6	
		伝熱管フィンピッチ	mm	5.08	
		ドレン管外径	mm	φ 13.8	
	ドレン管厚さ	mm	3.0		
	主要材料	入口・出口集合管		STPA24 、 SFVAF22B	
		伝熱管		STBA24	
伝熱管フィン		SPCC			
ドレン管		STPA24			
主送風機電動機出力			kW	710	
基数			基	4	

表 3.1-2 (1/2) MK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の仕様比較

項目	旧主冷却機	MK-Ⅲ用主冷却機
機器種別	第3種容器 (主冷却器)	第3種管 (主冷却器のNa接液部)
耐震クラス	A (主冷却器)	As (主冷却器)
定格伝熱量	25MWt	35MWt
ナトリウム側流量	543 t/h	593 t/h
空気側流量	7,380 m ³ /min	7,700 m ³ /min
ナトリウム側温度 (入口/出口)	470℃/340℃	470℃/300℃
空気側温度 (入口/出口)	30℃/209℃	40℃/277℃
伝熱面積	1225 m ²	2400 m ²
伝熱管形状/パス数	U型 / 2パス	Σ型 / 4パス
伝熱管外径	42.7 mm	←
伝熱管厚さ	2.0mm	←
フィン部寸法 (外径)	80.7 mm	←
フィン部寸法 (厚さ)	1.6mm	←

表 3.1-2 (2/2) MK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の仕様比較

項 目	旧主冷却機	MK-Ⅲ用主冷却機
フィン部寸法 (ピッチ)	5.08mm	←
伝熱管本数	80 本	←
伝熱管材料	STBA24	←
フィン材料	SPCC	←
主冷却器重量	18ton	35ton
主送風機電動機出力	400kW	710kW
主送風機回転数	585rpm	735rpm
主送風機ブレーキ制動時間	10 秒以内	13.6 秒以内

表 3.1-3 (1/3) MK-Ⅲ用主送風機設備と旧主送風機設備の仕様比較

機器名	項目	旧主送風機設備	MK-Ⅲ用主送風機設備
主送風機	型式	両吸込ベーン付 両支持直結式	←
	吐出圧力 (全圧)	2.26kPa (230mmAq)	4.46kPa (455mmAq)
	吐出圧力 (静圧)	1.96kPa (200mmAq)	4.24kPa (432mmAq)
	はずみ車効果 (GD ²)	7880 ・送風機：7500kgf・m ² ・電動機：250 kgf・m ² ・ブレードラム：130 kgf・m ²	8130 ・送風機：7800kgf・m ² ・電動機：200 kgf・m ² ・ブレードラム：130 kgf・m ²
	回転数	585rpm	735rpm
主送風機用電動機	型式	横置カゴ型誘導電動機	←
	電動機出力	400kW	710kW
	保護形式	防滴保護式	←
	絶縁種別	B種	F種
	定格電流	96A	180A
	始動電流	500A	800A
	軸受形式	すべり軸受	ころがり軸受
	スペースヒータ 容量	1.2kW	←

表 3.1-3 (2/3) MK-III用主送風機設備と旧主送風機設備の仕様比較

機器名	項目	旧主送風機設備	MK-III用主送風機設備
主送風機用 ブレーキ	型式	防滴形直流電磁ブレーキ	←
	制動時間	10 秒以内	13.6 秒以内
	制動方式	ドラム型スプリング制動 (電磁石消磁) 方式	←
	絶縁種別	B 種	F 種
	ブレーキドラム 材質	球状黒鉛鋳鉄 (FCD400)	球状黒鉛鋳鉄 (FCD500)
	ライニング材質	レジンモールド系 (T#6040W)	ウーブン系 (T#6008)
	コイル抵抗	1.23Ω	1.83Ω
	電流	強制励磁時；89.4A 保持励磁時；26.0A	強制励磁時；60.0A 保持励磁時；10.9A
	制動トルク	1200kgf・m	←
入口・出口ダンパ	型式	角型平行翼式	←
	主要材質(羽根、ケーシング)	SS400	SB410
	羽根枚数	4 枚	←
	軸貫通部	グラントパッキン(石綿) で軸受とシールを併用	軸受：メタル軸受(テハメタル) シール材：グラントパッキン(膨張黒鉛)

表 3.1-3 (3/3) MK-Ⅲ用主送風機設備と旧主送風機設備の仕様比較

機器名	項目	旧主送風機設備	MK-Ⅲ用主送風機設備
入口ダクト	型式	角形鋼板製ダクト	←
	主要材質	SS400	SUS304
出口ダクト	型式	角形鋼板製ダクト	←
	主要材質	SS400	SB410
主送風機用 伸縮継手	型式	なし	メタルベローズ式
	ベローズ材質		SUS316L
	ベローズ形状		U型ベローズ
出入口ダクト用 伸縮継手	型式	メタルベローズ式	←
	ベローズ材質	SPCC	SUS316L
	ベローズ形状	V型ベローズ	U型ベローズ

表 4.2-1 MK-III用主冷却機の設計に用いた熱過渡事象及び想定回数

運転状態	熱過渡事象	回数	代表事象 *1	回数
I	起 動	408	起 動	408
	通 常 停 止	184	通 常 停 止	184
II	外部電源喪失	*2 108	外部電源喪失	108
	1次冷却系主循環ポンプトリップ			
	1次冷却材流量減少			
	1次冷却材流量増大			
	手動スクラム	*3 90	手動スクラム	90
	中性子束高			
	2次冷却系主循環ポンプトリップ			
	2次冷却材流量減少			
	2次冷却材流量増大			
	主冷却機空気流量増大			
主冷却機空気流量減少				
III	1次冷却系主循環ポンプ軸固着	10	1次冷却系主循環ポンプ軸固着	10
	1ループ1・2次系同時ポンプトリップ	3	外部電源喪失	3
	2次冷却系主循環ポンプ軸固着	10	手動スクラム	12
	主送風機軸固着	2		
IV	2次冷却材漏洩	1	2次冷却材漏洩	1

*1 : 最も厳しい事象を代表事象として定め、代表事象の熱過渡を解析に用いる。

*2 : MK-IIIインタロックでは、1次主ポンプの異常が原因で原子炉がスクラムした際には、1次主ポンプがポニーモータ運転、2次主ポンプが停止、主送風機も停止状態となることから、該当する全ての事象における冷却系機器の状況が電源喪失事象と同じになる。

*3 : MK-IIIインタロックでは、1次主ポンプの異常以外の現象で原子炉がスクラムした際には1次主ポンプがランバック運転、2次主ポンプが停止、主送風機も停止状態となることから、該当する全ての事象における冷却系機器の状況が手動スクラムと同じになる。

表4.2-2 強度評価結果 (BDS評価対象部位)

単位: kg/mm²

評価点		1次応力の制限	ひずみの制限										クリープ 疲労損傷の制限		
			1次+2次応力の制限					Saの制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態Vに関する制限				
			Sn* (3SmH)	Sn (3Sm)	Sn (2.5(3Sm))	Sn' (3Sm)	Se (3Sm)	P'+Q' (Sa)	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF}$ (0.01)	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF} + \epsilon_{bEF}$ (0.02)	Sn* (2.5(3SmH))	領域(E, S1、S2、P)	Df	Dc	Df+Dc (D)
入口集合管	1	合格	25.8 (35.0)	23.1 (24.4)	— —	— —	— —	12.8 (19.1)	— —	— —	28.7 (87.7)	S2	0.01	0.30	0.31 (0.60)
	3	合格	2.6 (35.5)	5.3 (24.7)	— —	— —	— —	4.4 (19.4)	— —	— —	2.8 (88.9)	E	0.01	0.30	0.31 (0.60)
伝熱管	2	合格	5.5 (33.5)	7.5 (23.3)	— —	— —	— —	6.8 (18.2)	— —	— —	5.5 (83.7)	E	0.01	0.30	0.31 (0.60)
	6	合格	5.6 (33.5)	11.5 (23.3)	— —	— —	— —	10.8 (18.2)	— —	— —	5.6 (83.7)	E	0.01	0.30	0.31 (0.60)
ドレン管	5	合格	2.6 (34.7)	12.9 (24.5)	— —	— —	— —	12.2 (18.9)	— —	— —	2.7 (86.9)	E	0.01	0.30	0.31 (0.60)

カッコ内は、許容値又は判定値

表4.2-3 強度評価結果（研究炉の技術基準評価対象部位）

単位: kg/mm²

評価部位	許容応力 状態	1次応力評価				1次+2次応力評価					疲労評価	
		1次応力 (P _L +P _b) (P _L +P _b)S1 (P _L +P _b)S2	許容応力 1.5S 2.25S 3.0S	振り応力 St(S1) St(S2)	許容応力 0.55S 0.73S	1次+ 2次応力 Sn	地震による 1次+2次 応力 S _S (S1) S _S (S2)	熱膨張 応力 Se	熱を除いた 1次+2次 応力 Sc	許容応力 3.0Sm 3.0Sm 3.0Sm	疲れ累積 係数 U U+US1 U+US2	
出口集合管	3	I _A , II _A	0.9	9.8	—	—	1.5	—	—	—	37.8	0.0004
		III _A S	1.3	14.7	0.6	3.5	—	1.1	—	—	37.8	0.0005
		IV _A S	1.3	19.6	0.6	4.7	—	1.1	—	—	37.8	0.0005
	4	I _A , II _A	2.7	9.8	—	—	2.7	—	—	—	37.8	0.0004
		III _A S	4.5	14.7	0.1	3.5	—	6.6	—	—	37.8	0.0005
		IV _A S	4.5	19.6	0.1	4.7	—	6.6	—	—	37.8	0.0005

表4.2-4 容器としての強度評価結果 (BDS評価対象部位)

単位: kg/mm²

評価部位	1次応力の制限	ひずみの制限									クリープ 疲労損傷の制限		
		1次+2次応力の制限				Saの制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態Vに関する制限				
		S_n^* (3SmH)	$\frac{S_n}{(3Sm)}$	$\frac{S_n}{(2.5(3Sm))}$	$\frac{S_n'}{(3Sm)}$	P'+Q' (Sa)	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF}$ (0.01)	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF} + \epsilon_{bEF}$ (0.02)	S_n^* (2.5(3SmH))	領域 (E, S1, S2, P)	Df	Dc	Df+Dc (D)
ナトリウム入口伝熱管 (フィン付根)	合格	4.7 (33.7)	18.8 (22.4)	— —	— —	— —	0.0018 (0.010)	0.0025 (0.020)	5.7 (84.2)	E	0.00	0.47	0.47 (0.69)
ナトリウム入口集合管スタブ	合格	3.0 (37.8)	4.6 (24.7)	— —	— —	— —	0.0004 (0.010)	0.0006 (0.020)	3.1 (94.6)	E	0.00	0.30	0.31 (0.60)
ナトリウム入口集合管支持ラグ	合格	38.1 (40.1)	24.5 (26.3)	— —	— —	— —	0.0003 (0.010)	0.0004 (0.020)	38.1 (100.4)	S2	0.02	0.30	0.33 (0.60)
ナトリウム入口集合管 (ドレン管付根)	合格	2.9 (39.0)	6.7 (25.5)	— —	— —	— —	0.0003 (0.010)	0.0006 (0.020)	4.9 (97.5)	E	0.00	0.30	0.31 (0.60)

カッコ内は、許容値又は判定値

表4.2-5 容器としての強度評価結果（研究炉の技術基準評価対象部位）

単位: kg/mm²

評価部位		1次応力の制限		1次+2次応力の制限				累積疲労損傷 の制限	
		(I _A) (II _A) III _A IV _A T _A	III _{AS} IV _{AS}	I _A , II _A		III _{AS}	IV _{AS}		
				Sn (3Sm)	Sn' (3Sm)	Sn (3Sm)	Sn (3Sm)		
2	ナトリウム出口伝熱管 (フィン付根)	合格	合格	17.8 (37.7)	— —	4.5 (37.7)	4.5 (37.7)	0.006 (1.0)	0.007 (1.0)
4	ナトリウム出口集合管 スタブ	合格	合格	7.2 (48.4)	— —	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	0.001 (1.0)	0.001 (1.0)
5	ナトリウム出口集合管 (ドレン管付根)	合格	合格	15.5 (48.3)	— —	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.002 (1.0)	0.002 (1.0)

カッコ内は、許容値又は判定値

表4.3-1 MK-Ⅲ用主冷却機の耐震解析用幾何学的形状データ

対象部位	質点番号	重量 ($\times 10^4$ kg)	部材長 (mm)	断面積 ($\times 10^4$ mm ²)	断面2次モーメント($\times 10^8$ mm ⁴)		せん断有効断面積($\times 10^4$ mm ²)		ねじり定数 ($\times 10^3$ mm ⁴)	弾性係数		材料	備考
					*1	*2	*1	*2		($\times 10^4$ kg/mm ²)	温度(°C)		
既設出口ダクト	1	0.71										SS410	
	2	1.42	1912.5	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350		
	3	1.51	1912.5	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350		
	4	1.59	2000.0	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350		
	5	1.73	2000.0	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350		
	6	1.87	1137.5	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350		
	7	0.75	1137.5	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350		
	8	1.96	200.0	14.10	2.14	2.14	7.05	7.05	2.75	1.77	350		
	9	3.08	1282.5	14.10	2.14	2.14	7.05	7.05	2.75	1.77	350		
	10		1282.5	14.10	2.14	2.14	7.05	7.05	2.75	1.77	350		既設ダクト支持部
既設伸縮継手	7	0.75	1500.0	1.41×10^8	6.00×10^{10}	1.00×10^{11}	30.0	1.00×10^8	2.80×10^8	1.77	350	SS410	
	11	0.25	988.0	14.10	2.14	2.14	7.05	7.05	2.75	1.77	350		
既設出口ダクト	12	0.76	182.0									SS410	
	13	0.82	935.0	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350		
既設伸縮継手	14	0.80	935.0	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350	SS410	
	15	0.82	192.0										
既設出口ダクト	16	0.98	999.0	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350	SS410	
	17	0.92	999.0	1.20×10^7	2.50×10^8	9.00×10^8	1.30×10^7	6.50×10^7	3.70×10^8	1.77	350		
	18	1.02	1012.5	1.10×10^7	2.50×10^8	9.00×10^8	1.30×10^7	8.00×10^7	1.50×10^{11}	1.77	350		
	19	1.88	1012.5	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350		
出口ダンパ	20	0.00	1358.5	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350	SS410	既設ダクト支持部
	21	1.83	1358.5	6.54	1.01	1.01	3.27	3.27	1.23	1.77	350		
出口ダクト	22	3.94	700.0	10.83	1.83	1.83	5.42	5.42	2.47	1.89	420	SB410	
	23	4.15	1558.0	7.54	1.40	1.78	3.76	3.26	1.95	1.89	420		
出口ダクト用伸縮継手	24	1.44	830.0	7.54	1.40	1.78	3.76	3.26	1.95	1.89	420	SUS316L	
	25	1.39	600.0										
主冷却器	26	13.09	1485.0	10.00	3.31	3.06	5.46	3.28	2.60	1.82	500	SUS304	主冷却器支持部
	27	33.00	1485.0	10.00	3.31	3.06	5.46	3.28	2.80	1.82	500		
入口ダクト用伸縮継手	28	0.00	400.0									SUS316L	
	29	2.45	1175.0	11.92	2.21	3.73	6.64	5.51	2.85	1.76	350.0		SUS304
入口ダクト	30	2.08	1175.0	11.92	2.21	3.73	6.64	5.51	2.85	1.76	350.0		
	31	1.56	702.5	11.92	2.21	3.73	6.64	5.51	2.85	1.76	350.0		
	32	1.56	702.5	11.92	2.21	3.73	6.64	5.51	2.85	1.76	350.0		
	33	0.00											
入口ダンパ	31	1.56	847.5	8.11	1.01	1.81	5.00	3.28	1.22	1.76	350	SB410	
	34	0.00	847.6	8.11	1.01	1.81	5.00	3.28	1.22	1.76	350		
	35	1.04	900.0	8.11	1.01	1.81	5.00	3.28	1.22	1.76	350		
	36	3.70	700.0	9.21	1.03	0.97	4.50	4.88	1.49	1.76	350		
主送風機用伸縮継手	37	4.50	950.0									SUS316L	主送風機固定端
	38	0.00											
合計		98.30											

*1: 図4.3-11におけるX方向

*2: 図4.3-11におけるY方向(質点番号:1~10, 18~33)、又はZ方向(質点番号:7~18, 31~38)

表 4.3—2 主冷却機各部のばね定数設定結果

質点番号 (該当部位)	並進ばね (kg/mm)			回転ばね (kg·mm/rad)		
	K _x	K _y	K _z	K _{θx}	K _{θy}	K _{θz}
10 (既設出口ダクト支持部)	1.0×10^{10}	1.0×10^{10}	2.9×10^5	5.9×10^{11}	5.9×10^{11}	1.0×10^{15}
20 (既設出口ダクト支持部)	1.0×10^{10}	1.0×10^{10}	2.0×10^4	5.4×10^{10}	5.3×10^{10}	1.9×10^{12}
24 (耐震架構)		6.5×10^3				
28 (主冷却器支持部)	8.3×10^5	8.4×10^5	1.0×10^5	2.8×10^{11}	4.5×10^{11}	5.0×10^{12}
33 (入口ダクト支持部)	1.4×10^3	1.0×10^{10}	1.9×10^4	2.3×10^{10}	1.0×10^{11}	2.7×10^{10}

表 4.3-3 伸縮継手（主送風機用及び出入口ダクト用）のばね定数設定結果

質点番号（該当部位）	並進ばね（kg/mm）		
	Kx	Ky	Kz
12（既設伸縮継手）	7.0×10 ⁵	1.0×10 ²	7.0×10 ⁵
13（既設伸縮継手）			
15（既設伸縮継手）	7.0×10 ⁵	1.0×10 ²	7.0×10 ⁵
16（既設伸縮継手）			
25（出口ダクト用伸縮継手）	6.0×10 ³	4.0×10 ³	2.0×10 ¹
26（出口ダクト用伸縮継手）			
28（入口ダクト用伸縮継手）	1.0×10 ⁵	1.0×10 ⁵	2.0×10 ²
29（入口ダクト用伸縮継手）			
37（主送風機用伸縮継手）	8.0×10 ²	5.0×10 ¹	7.0×10 ²
38（主送風機用伸縮継手）			

表 4.3-4 主冷却機の耐震強度評価結果

単位(kg/mm²)

部材	材料	応力	算出応力		許容応力	
			許容応力状態 Ⅲ _A S	許容応力状態 Ⅳ _A S	許容応力状態 Ⅲ _A S	許容応力状態 Ⅳ _A S
入口ダクト 据付ボルト	SS400	引張	0.0	1.5	16.4	20.8
		せん断	5.0	5.0	13.3	16.0
主冷却器 据付ボルト	S45C	引張	1.0	1.1	11.6	14.0
		せん断	3.0	3.0	9.0	10.7
既設出口ダクト (貫通部) 据付ボルト	SS400	引張	1.1	1.8	11.7	14.0
		せん断	1.0	1.4	9.0	10.7
既設出口ダクト (鉛直部) 据付ボルト	SS400	引張	1.6	2.7	11.7	14.0
		せん断	0.4	0.6	9.0	10.7

表4.3-5 主送風機の耐震計算における計算諸元

部材	転倒方向	機器重量 W (kg)	据付面から 重心までの 距離 h (mm)	重心位置と据付面の 距離		ボルトの 軸断面積 Ab (mm ²)	ボルトの 本数 n (-)	引張力を 受ける ボルトの 本数 nf (-)	材料の強さ F (kg/mm ²)	縦弾性係数 E (kg/mm ²)	せん断弾性 係数 G (kg/mm ²)	断面2次モーメント I (mm ⁴)	有効せん断 断面積 Ae (mm ²)	送風機の回転 によって生ずる 転倒モーメント Mp (kg・mm)	送風機の 振動による 震度 Cp (-)	入口が外側 からの反力 B (kg)	入口が外側 からの反力 により生ずる モーメント Bp (kg・mm)
				l ₁ (mm)	l ₂ (mm)												
ケーシング 据付ボルト	X-X	9700	3250	1590	1790	7.06×10 ² (M30)	12	10	28.7	1.97×10 ⁴	7.57×10 ³	1.19×10 ¹¹	4.2×10 ⁴	-	-	1700	2.70×10 ⁷
	Y-Y			1175	1175	7.06×10 ² (M30)	12	8				5.47×10 ¹⁰	2.8×10 ⁴	-	-	-	-
軸受 (モータ側) 据付ボルト	X-X	4000	1250	700	700	7.06×10 ² (M30)	4	2	28.7	1.97×10 ⁴	7.57×10 ³	1.54×10 ¹⁰	5.52×10 ⁴	2.16×10 ⁶	0.154	-	-
	Y-Y			75	425	7.06×10 ² (M30)	4	2				1.16×10 ⁹		-	-	-	-
軸受 (反モータ側) 据付ボルト	X-X	3800	1250	700	700	7.06×10 ² (M30)	4	2	28.7	1.97×10 ⁴	7.57×10 ³	1.54×10 ¹⁰	5.52×10 ⁴	9.4×10 ⁵	0.154	-	-
	Y-Y			75	425	7.06×10 ² (M30)	4	2				1.16×10 ⁹		-	-	-	-

表 4.3-6 主送風機の耐震強度評価結果

(1) 固有周期及び固有振動数計算結果

部材	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)
ケーシング	0.032	31.2
軸受部 (モータ側)	0.023	43.4
軸受部 (反モータ側)	0.022	45.4

(2) ボルトの応力評価結果

単位(kg/mm²)

部材	材料	応力	算出応力	許容応力
ケーシング 据付ボルト (X-X)	SS400	引張	2.9	21.5
		せん断	0.7	16.5
ケーシング 据付ボルト (Y-Y)	S45C	引張	0.7	21.5
		せん断	0.5	16.5
軸受 (モータ側) 据付ボルト (X-X)	SS400	引張	3.5	21.5
		せん断	0.8	16.5
軸受 (モータ側) 据付ボルト (Y-Y)	SS400	引張	4.6	21.5
		せん断	0.6	16.5
軸受 (反モータ側) 据付ボルト (X-X)	SS400	引張	2.2	21.5
		せん断	0.7	16.5
軸受 (反モータ側) 据付ボルト (Y-Y)	SS400	引張	4.4	21.5
		せん断	0.5	16.5

注：主送風機の耐震強度計算は、Asクラスの静的震度を用いているため、許容応力状態IV_ASとして計算している。

表4.3-7 建物の必要保有水平耐力と保有水平耐力

単位：ton

建物		保有水平耐力 Q_u	必要保有水平耐力 Q_{un}	Q_u/Q_{un}
主冷却機建物	4F	4,700	544	8.64
	2F	20,300	3,670	5.53
	1F	27,000	4,430	6.09
	BM1F	47,100	6,330	7.44
	BM2F	58,200	8,050	7.23

表5.3-1 MK-Ⅲ用主冷却機（2次冷却材側）圧力損失の計算結果

No.	圧力損失計算箇所	記号	計算式	出典	温度(℃)	ζ (-)	管摩擦 係数 λ (-)	直管部 長さL (m)	管内径 d (m)	流速V (m/sec)	重力 加速度g (m/sec ²)	ξ (-)	計算結果 (mmNa)	圧力損失 (mmNa)	
(1)	入口集合管	入口集合管短管部(管摩擦損失)	$\lambda \cdot (L/d) \cdot (1/2g) \cdot V^2$	機械工学便覧A5 流体工学	470	-	0.0148	0.245	0.1999	3.13	9.81	-	9.06	9.1	
(2)		入口集合管拡大部(流路変化による損失(急拡大))	$\zeta \cdot V^2 / 2g$		470	0.600	-	-	-	3.13	9.81	-	299.60	299.6	1207.5
(3)		入口集合管曲り部(曲り損失)	$\zeta \cdot V^2 / 2g$		470	1.800	-	-	-	3.13	9.81	-	898.80	898.8	
(4)	伝熱管	伝熱管入口部(流路変化による損失(急縮小))	$\zeta \cdot V^2 / 2g$		470	0.591	-	-	-	2.13	9.81	-	136.66	136.7	2489.3
(5)		伝熱管直管部(管摩擦損失)	$\lambda \cdot (L/d) \cdot (1/2g) \cdot V^2$		385	-	0.0155	21.6	0.0383	2.04	9.81	-	1854.16	1854.2	
(6)		伝熱管エルボ部(曲り損失)	$\zeta \cdot V^2 / 2g$		385	0.225	-	-	-	2.04	9.81	-	47.72	×6 286.3	
(7)		伝熱管出口部(流路変化による損失(急拡大))	$\zeta \cdot V^2 / 2g$		385	1.000	-	-	-	2.04	9.81	-	212.11	212.1	
(8)	出口集合管	出口集合管曲り部(曲り損失)	$\zeta \cdot V^2 / 2g$		300	1.850	-	-	-	1.34	9.81	-	169.31	169.3	316.2
(9)		出口集合管縮小部(流路変化による損失(急縮小))	$\zeta \cdot V^2 / 2g$		300	0.240	-	-	-	1.34	9.81	-	21.96	22.0	
(10)		出口集合管ジョイント部(流路変化による損失(緩やかに縮小))	$\zeta \cdot V^2 / 2g$		300	0.265	-	-	-	2.98	9.81	-	119.94	119.9	
(11)		出口集合管短管部(管摩擦損失)	$\lambda \cdot (L/d) \cdot (1/2g) \cdot V^2$		300	-	0.0148	0.148	0.1999	2.98	9.81	-	4.99	5.0	
合 計													4013.0		

表5.3-2 MK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の2次冷却材側圧力損失の比較

MK-Ⅲ用主冷却機		旧主冷却機	
圧力損失計算箇所	(mmNa)	圧力損失計算箇所	(mmNa)
入口集合管	1207.5	入口集合管	758.4
伝熱管	2489.3	伝熱管	789.0
出口集合管	316.2	出口集合管	758.4
合計	4013	合計	2306
主冷却機入口温度：470℃、主冷却機出口温度：300℃、計算は各箇所代表温度使用		主冷却機入口温度：470℃、主冷却機出口温度：340℃、計算は各箇所代表温度使用	
流量：593×103kg/h/基 (674m ³ /h/基)		流量：542.8×103kg/h/基 (630m ³ /h/基)	

表5.3-3 MK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の空気側圧力損失の比較

MK-Ⅲ用主冷却機		旧主冷却機	
圧力損失計算箇所	(mmAq)	圧力損失計算箇所	(mmAq)
空気取入れガラリ部	24.2	前面風速（ダクト内における伝熱管がない部分の風速）と管外圧力損失との関係図から求めた値	130
入口ダンパ・ダクト類	22.9		
主冷却器	312.0		
出口ダンパ・ダクト類	42.6		
合計	402		
空気入口温度：40℃、空気出口温度：277℃、計算は各箇所代表温度使用		空気入口温度：30℃、空気出口温度：208.8℃、計算は各箇所代表温度使用	
空気流量：7700m ³ /min/基		空気流量：7380m ³ /min/基	

MK-II炉心とMK-III炉心の基本仕様

項目	MK-II	MK-III
原子炉定格熱出力	100 MWt	140
最大高速中性子束	$3.2 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$	4.0×10^{15}
1次系冷却材流量(1ルーフ当り)	1086 t/h	1335
2次系冷却材流量(1ルーフ当り)	1086	1186
原子炉出入口冷却材温度	370/500 °C	350/500

炉心の高中性子束化

- 中性子束約1.3倍(照射時間の短縮)
- 照射場の拡大
- 1、2次冷却系除熱能力の向上

照射運転時間の増大

- 定期検査期間の短縮
- 燃料交換時間の短縮

照射技術の高度化

- 材料照射精度の向上
- 燃料燃費照射能力の向上
- 計測検出照射の向上
- 中間検査、再装荷技術の向上

MK-IIIの目的

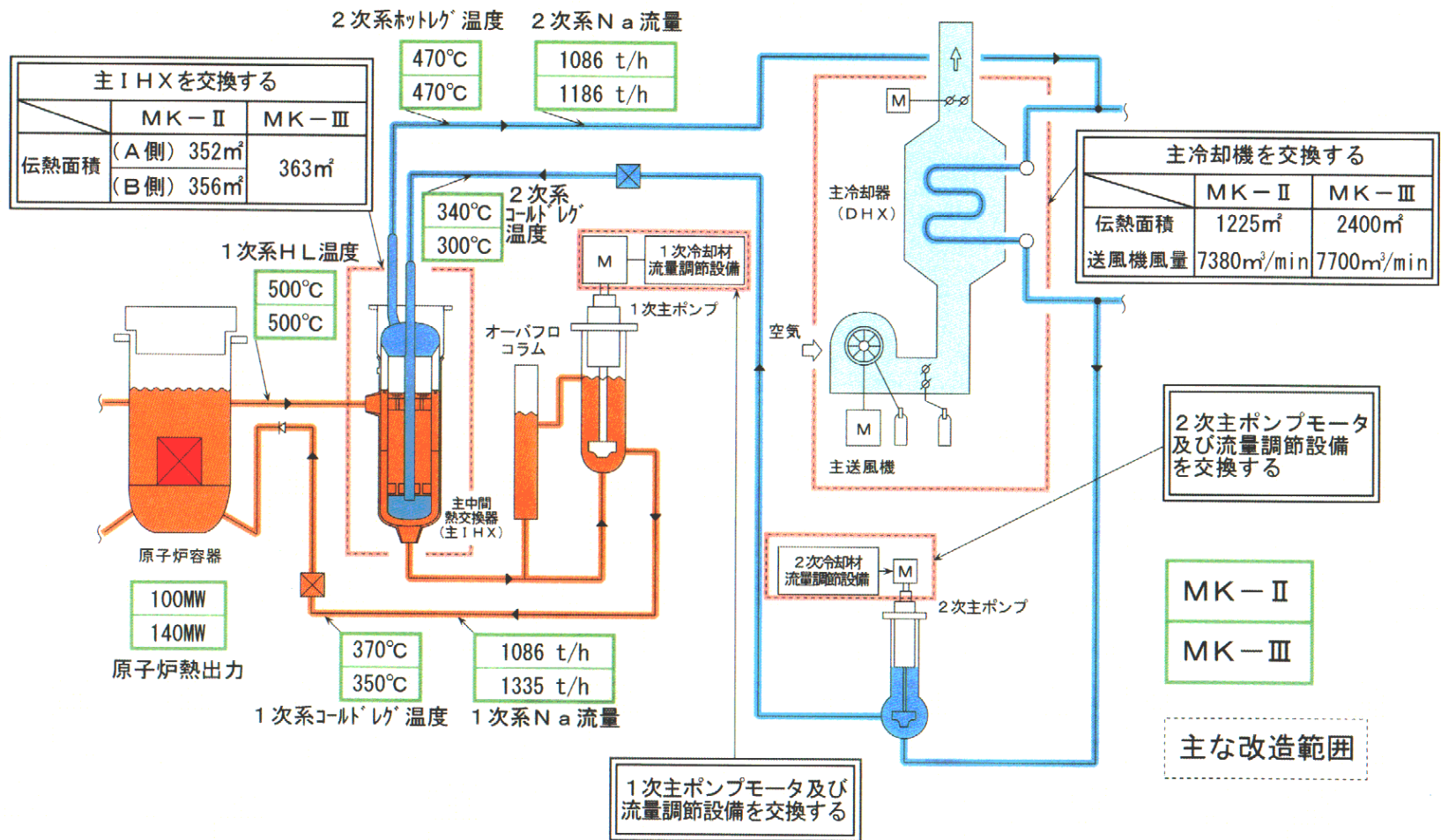


図1-1 MK-III冷却系改造の概要と範囲

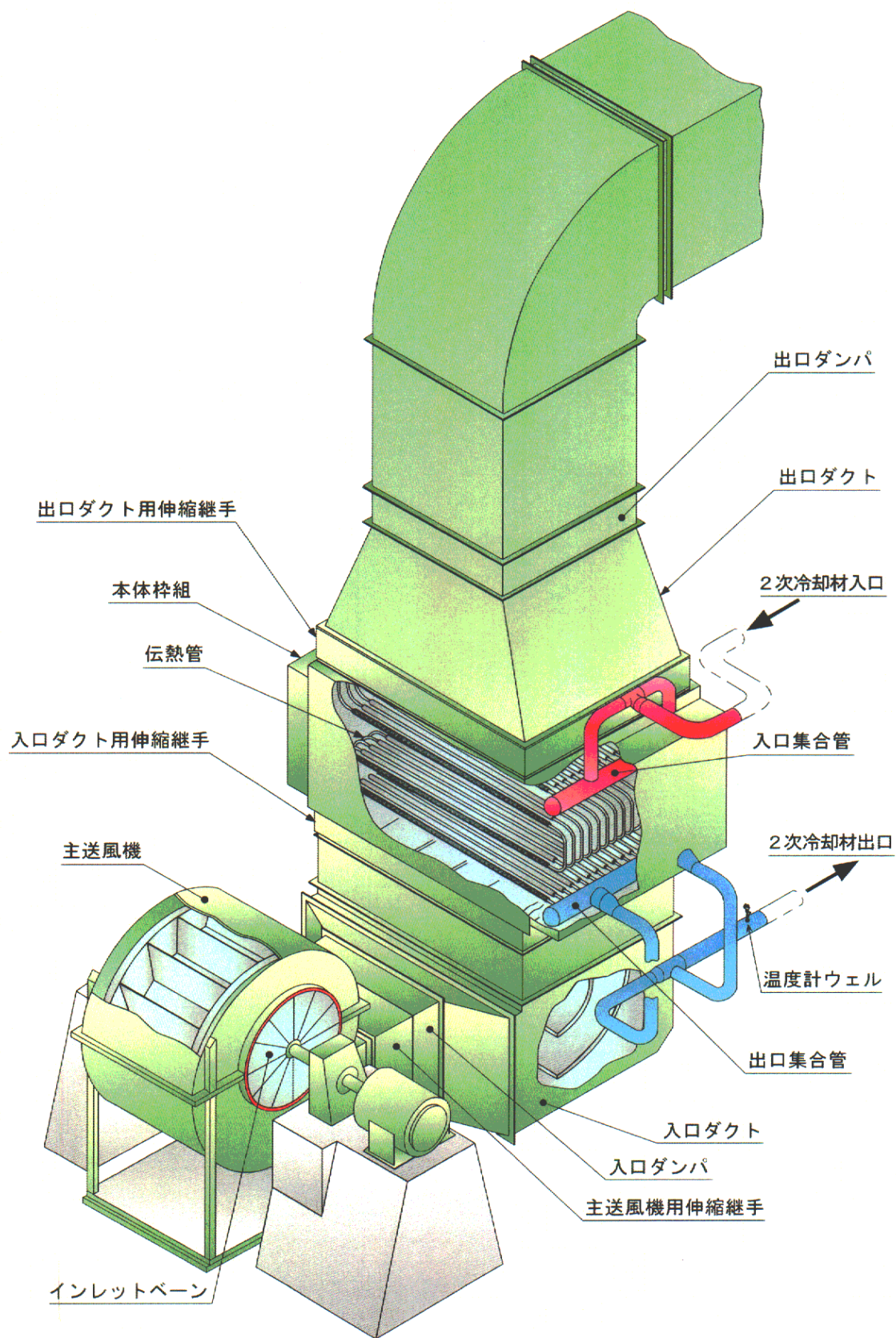


図3-1 MK-III用主冷却機の鳥瞰図

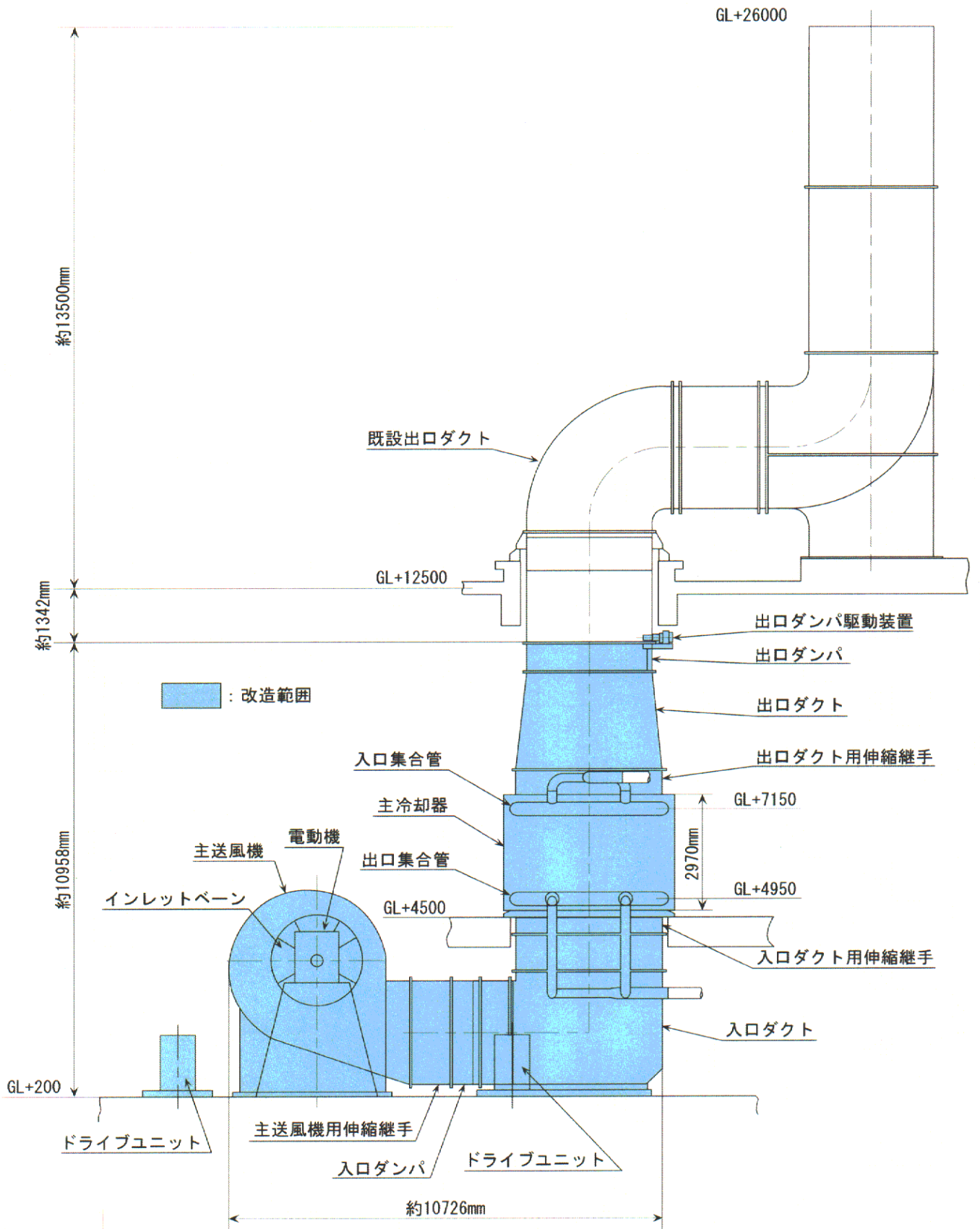


図 3-2 MK-III 用主冷却機の構造

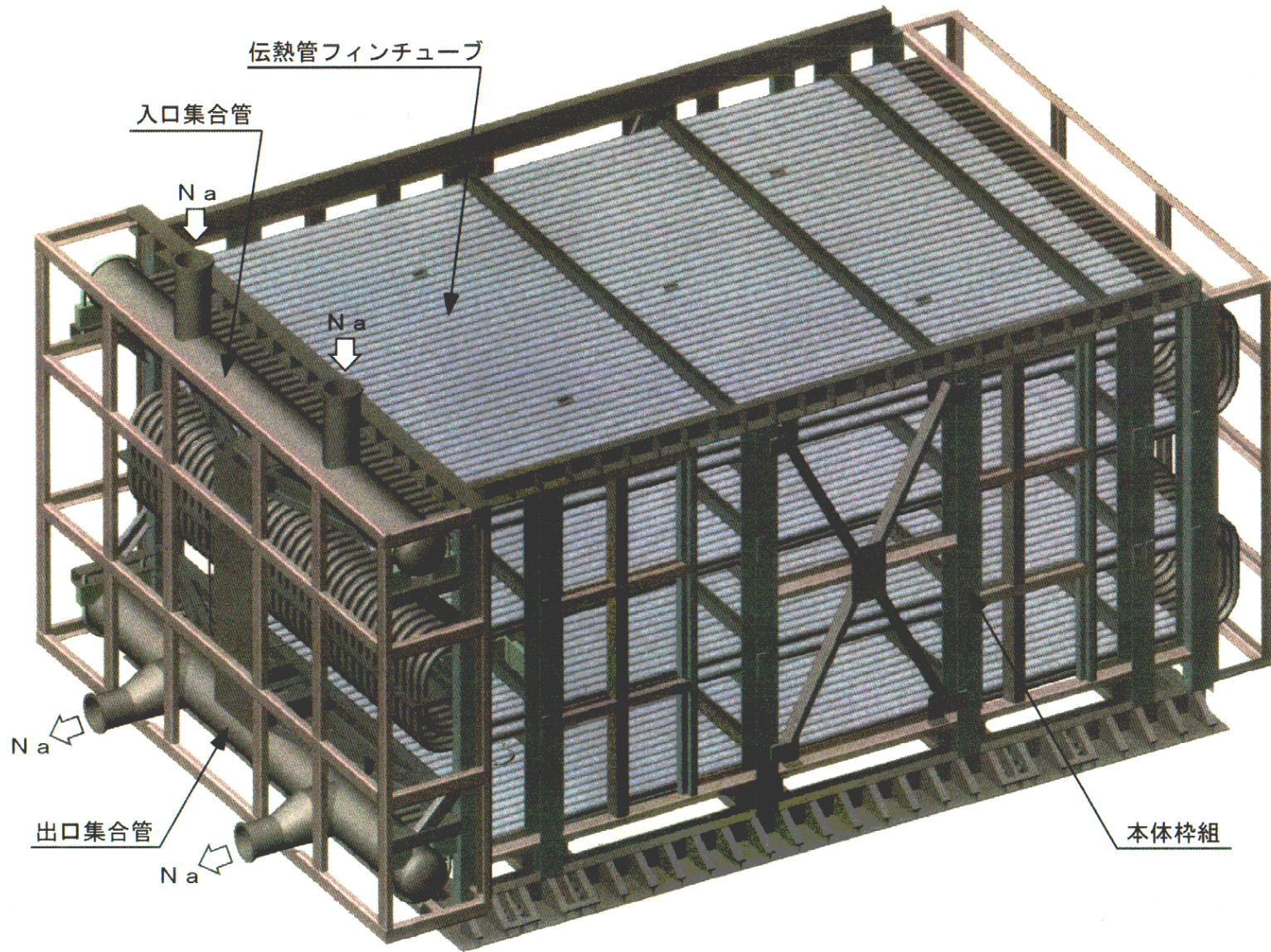


図 3-3 MK-III 用主冷却器の構造

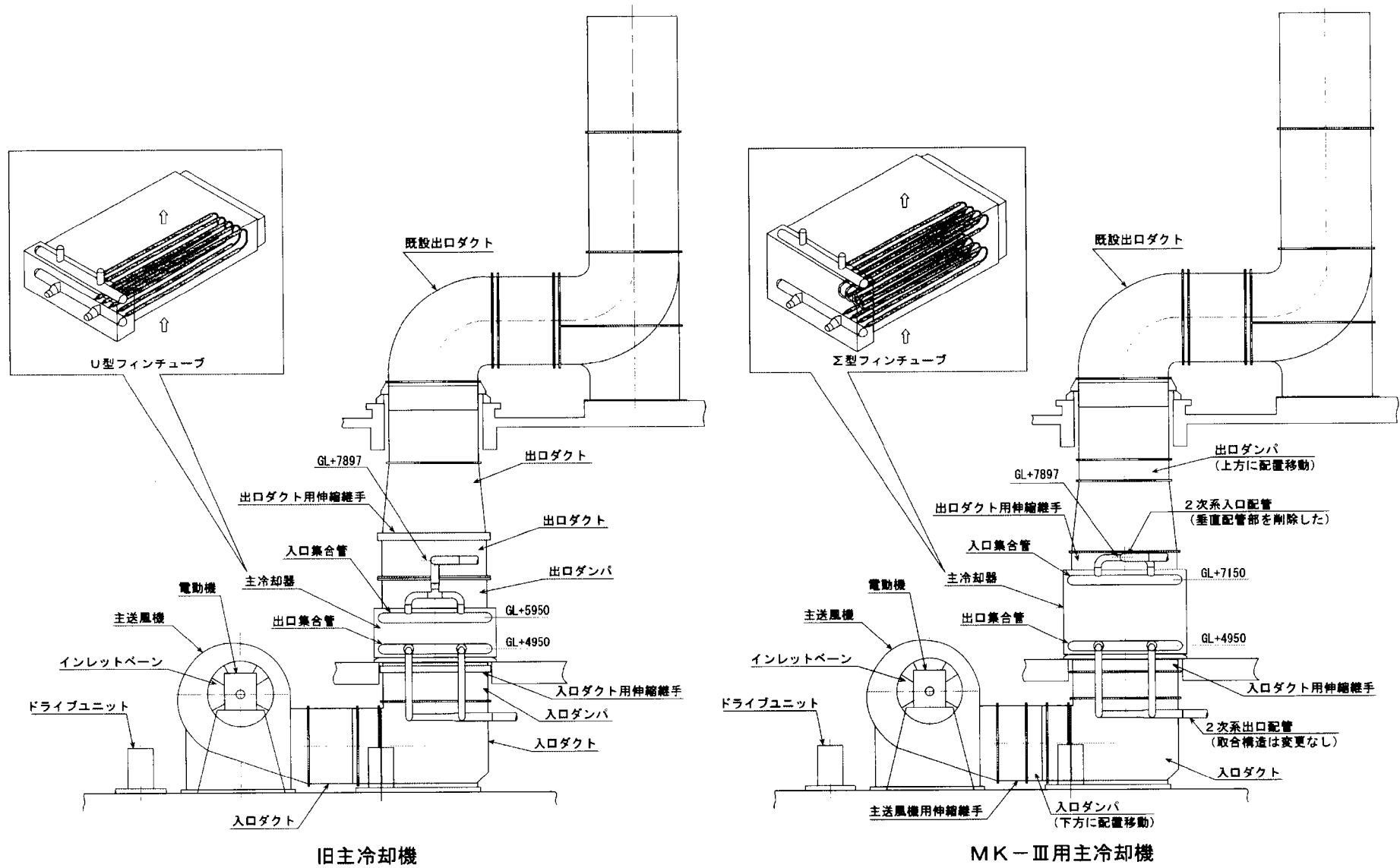
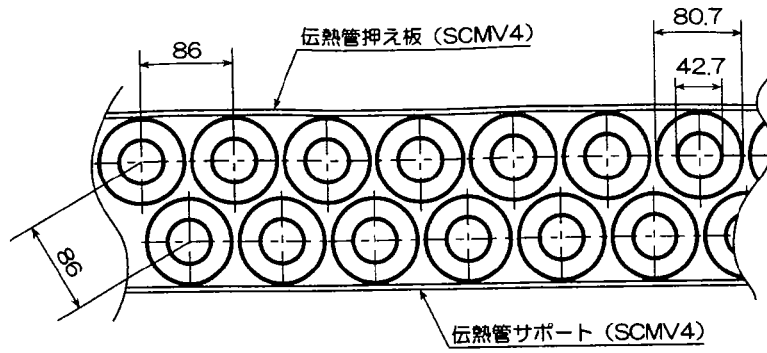
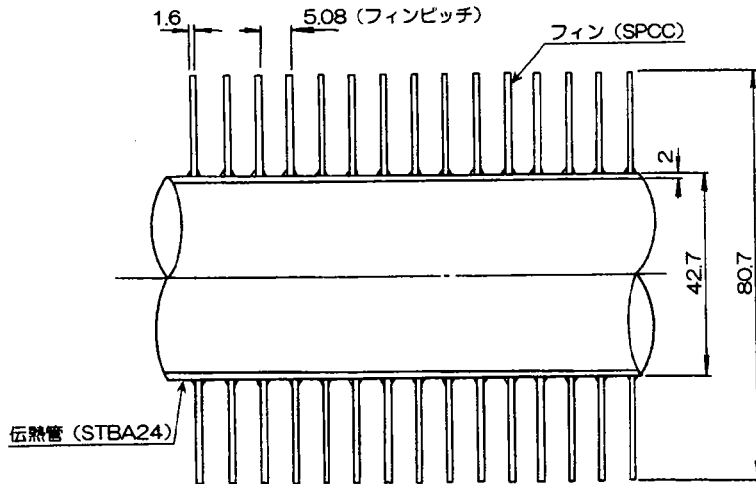


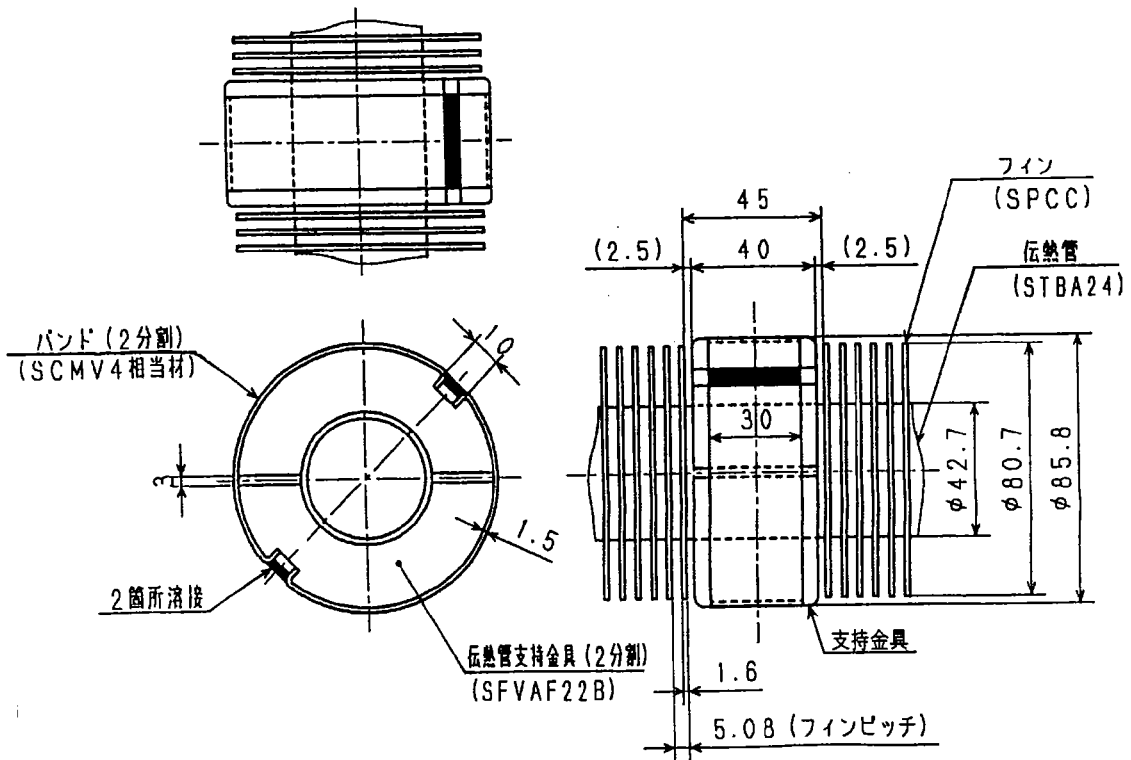
図 3.1-1 MK-Ⅲ用主冷却機と旧主冷却機の構造比較



伝熱管の配列



伝熱管の形状



伝熱管サポート構造

図 3.1-2 MK-Ⅲ用主冷却器伝熱管の構造

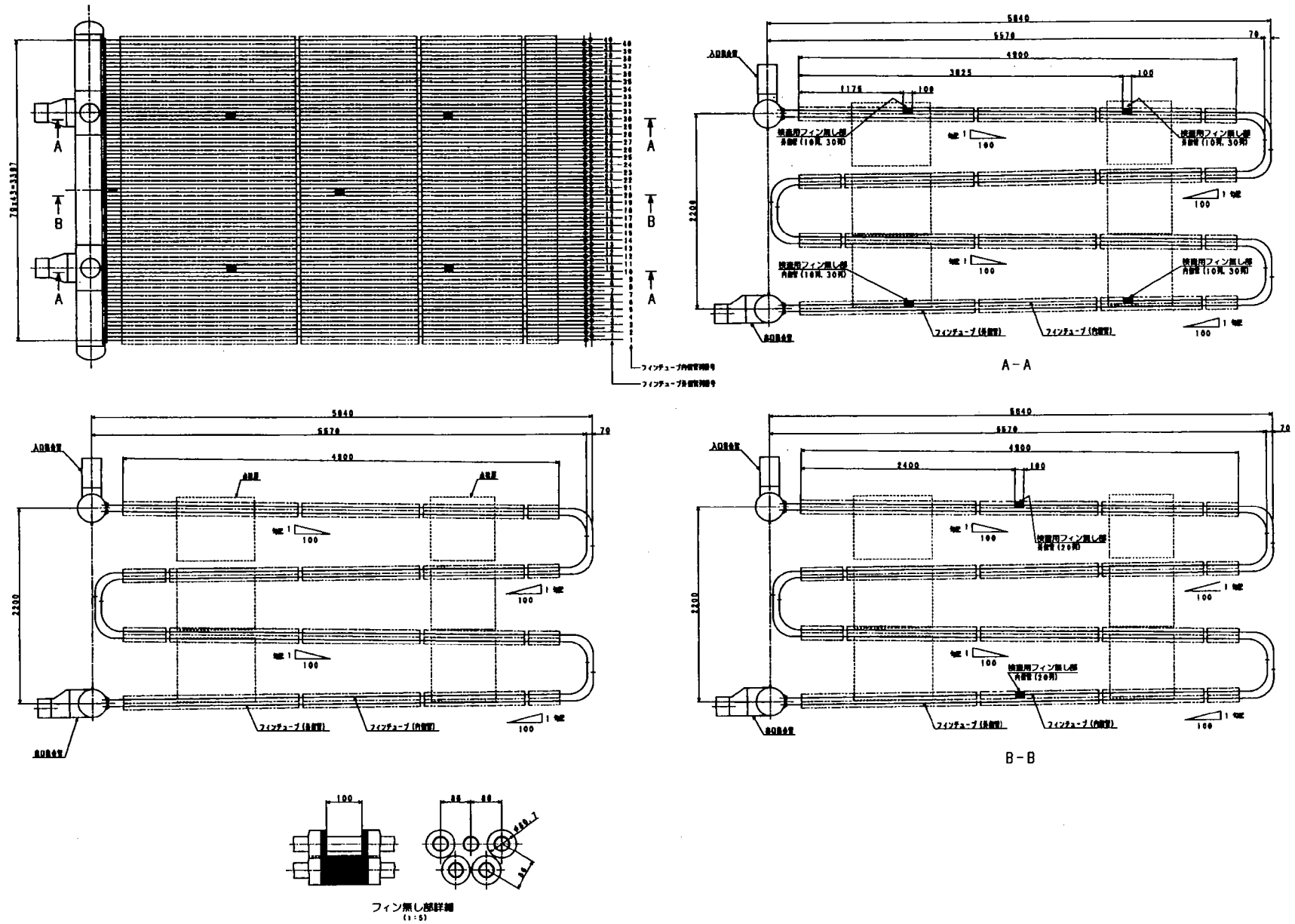
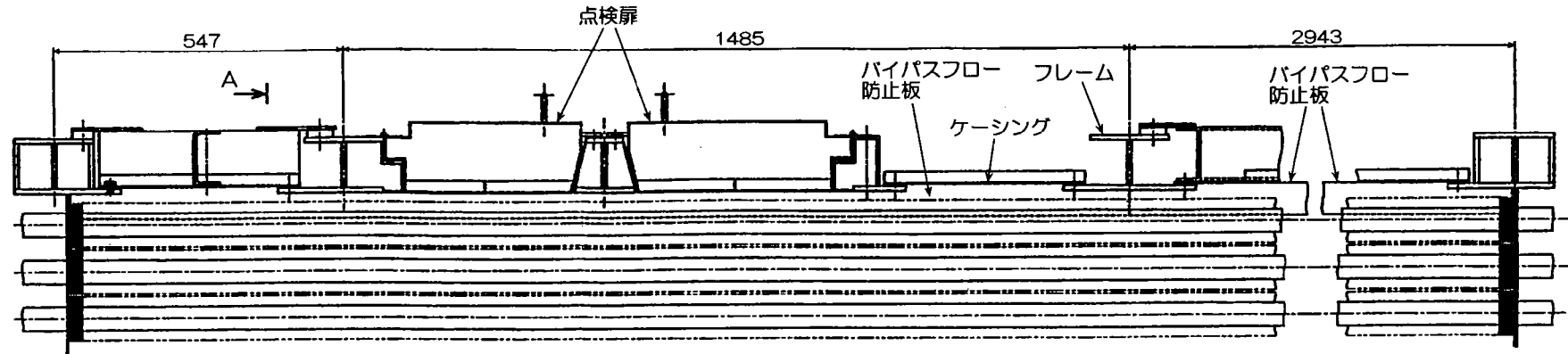
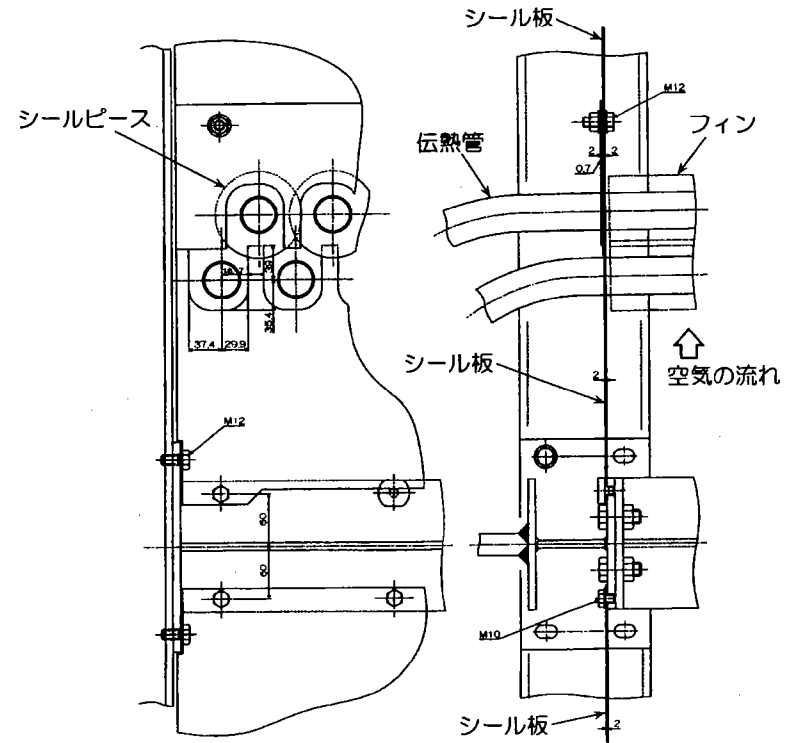
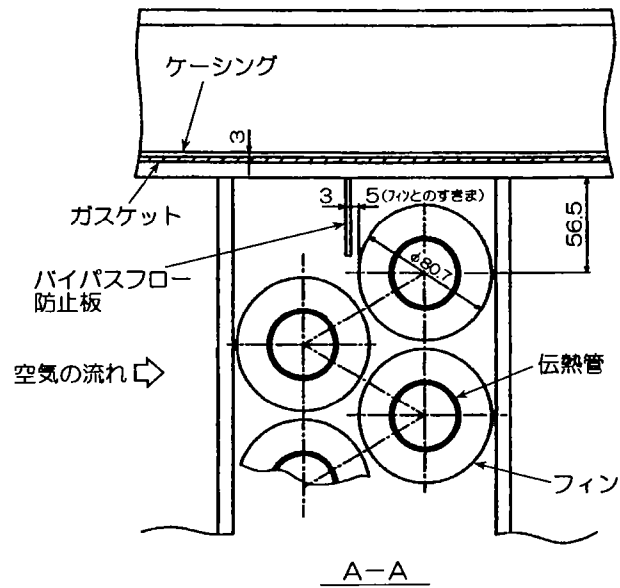


図 3.1-3 MK-III用主冷却器の検査用フィン無し部



A →

バイパスフロー防止板詳細 (最上段伝熱管)



シール板詳細

図 3.1-4 MK-Ⅲ用主冷却器伝熱管のバイパスフロー防止策

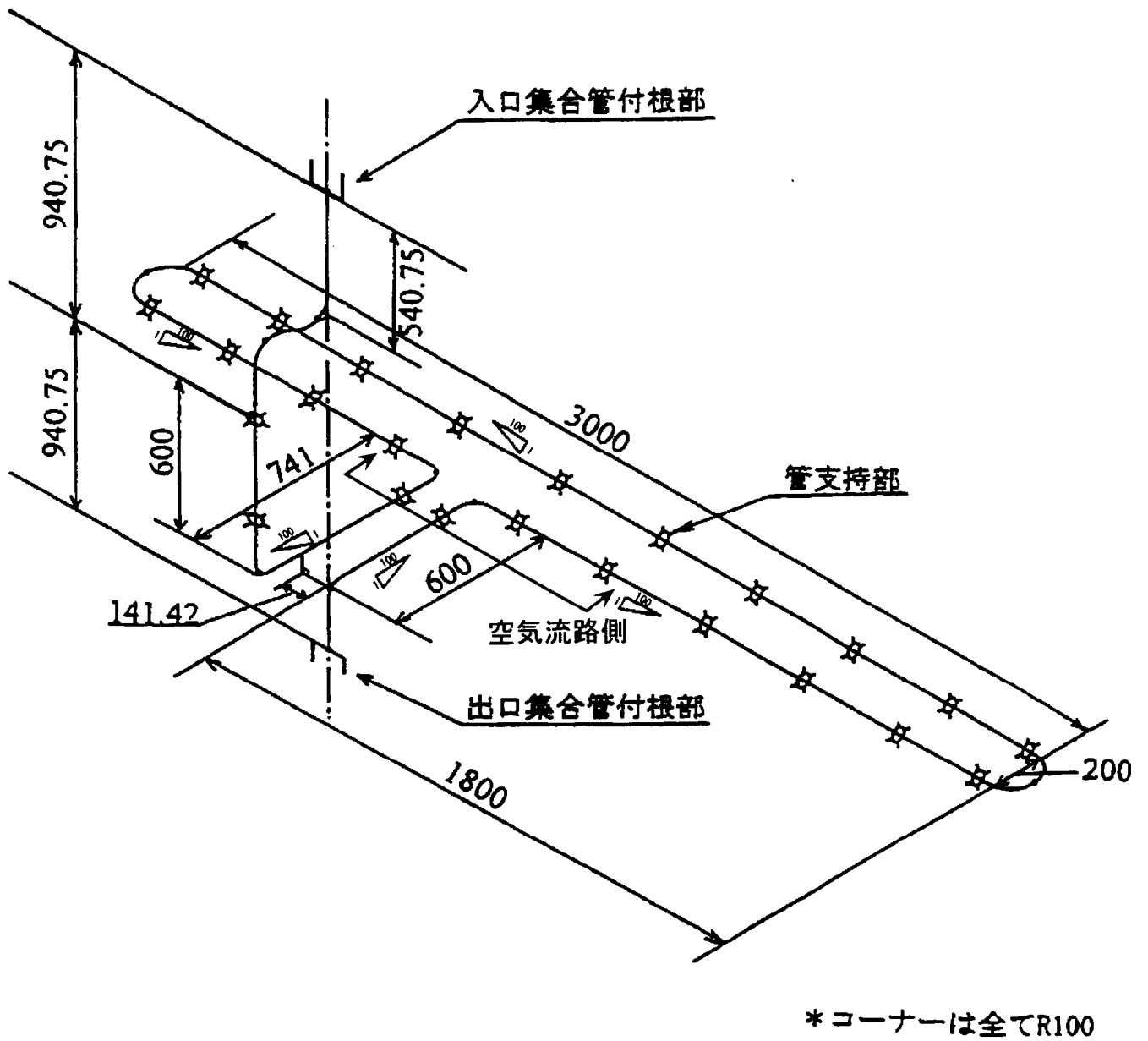


図 3.1-5 MK-III用主冷却器ドレン管の敷設図

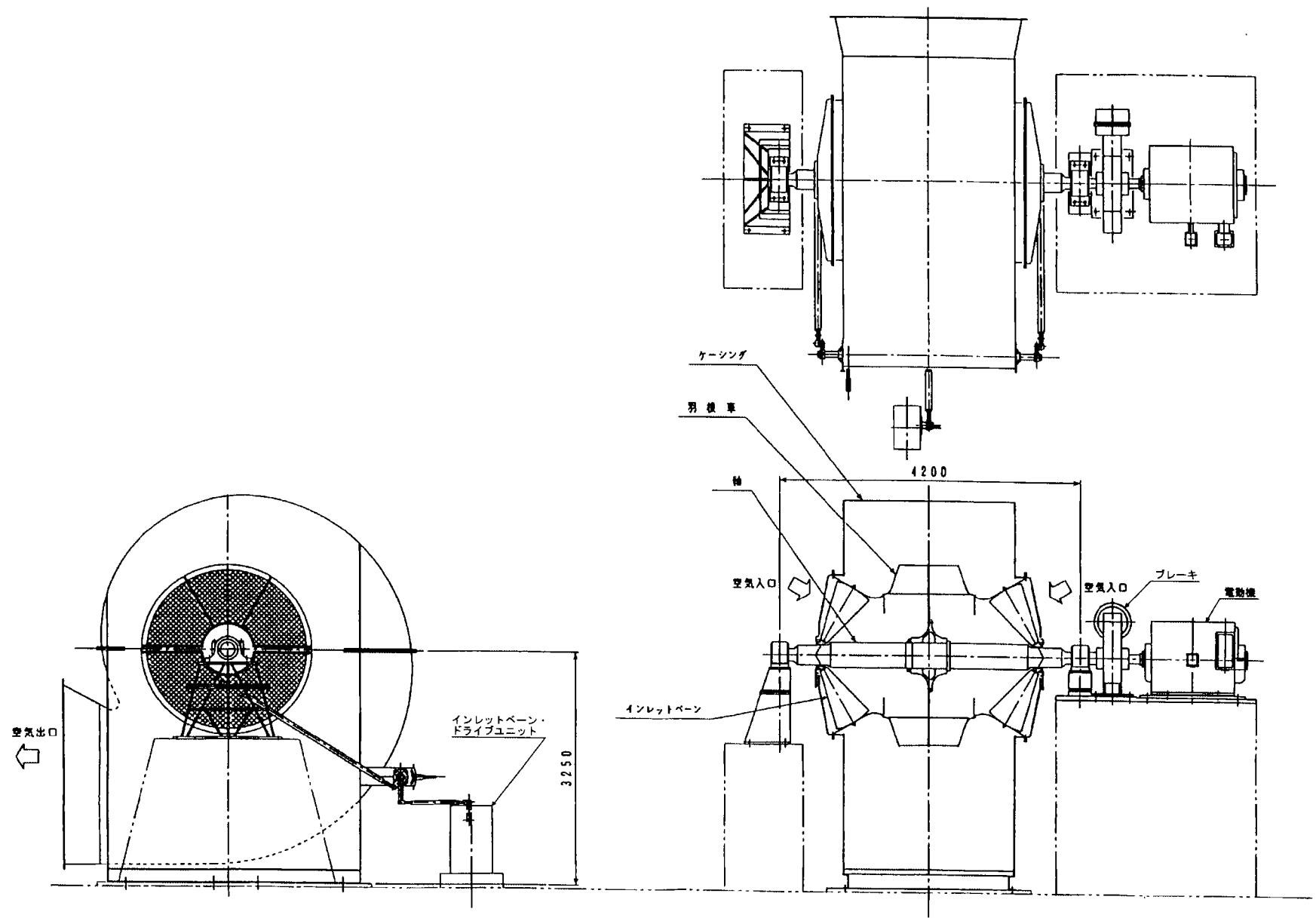


図 3.1-6 MK-III 用主送風機の構造

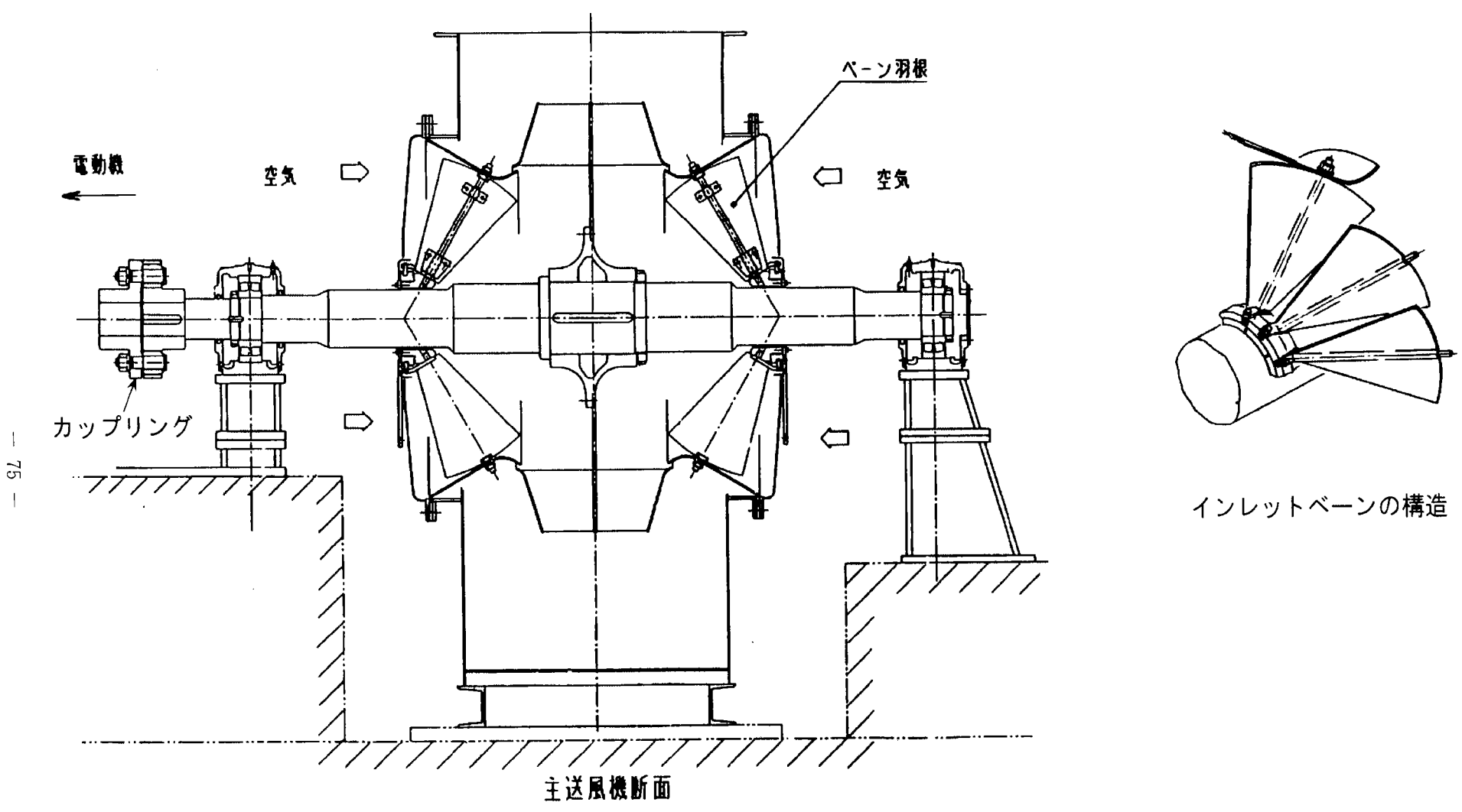


図 3.1-7 MK-III用主送風機の構造及びインレットベーンの構造

1. 軸受台の構造について（2分割方式採用）

旧主送風機の軸受交換時は、ケーシングを分解の上、ロータ1式を取出して交換を行っていたが、軸受台を2分割にすることにより、作業時間の短縮化を図った。

2. 軸受交換の手順について

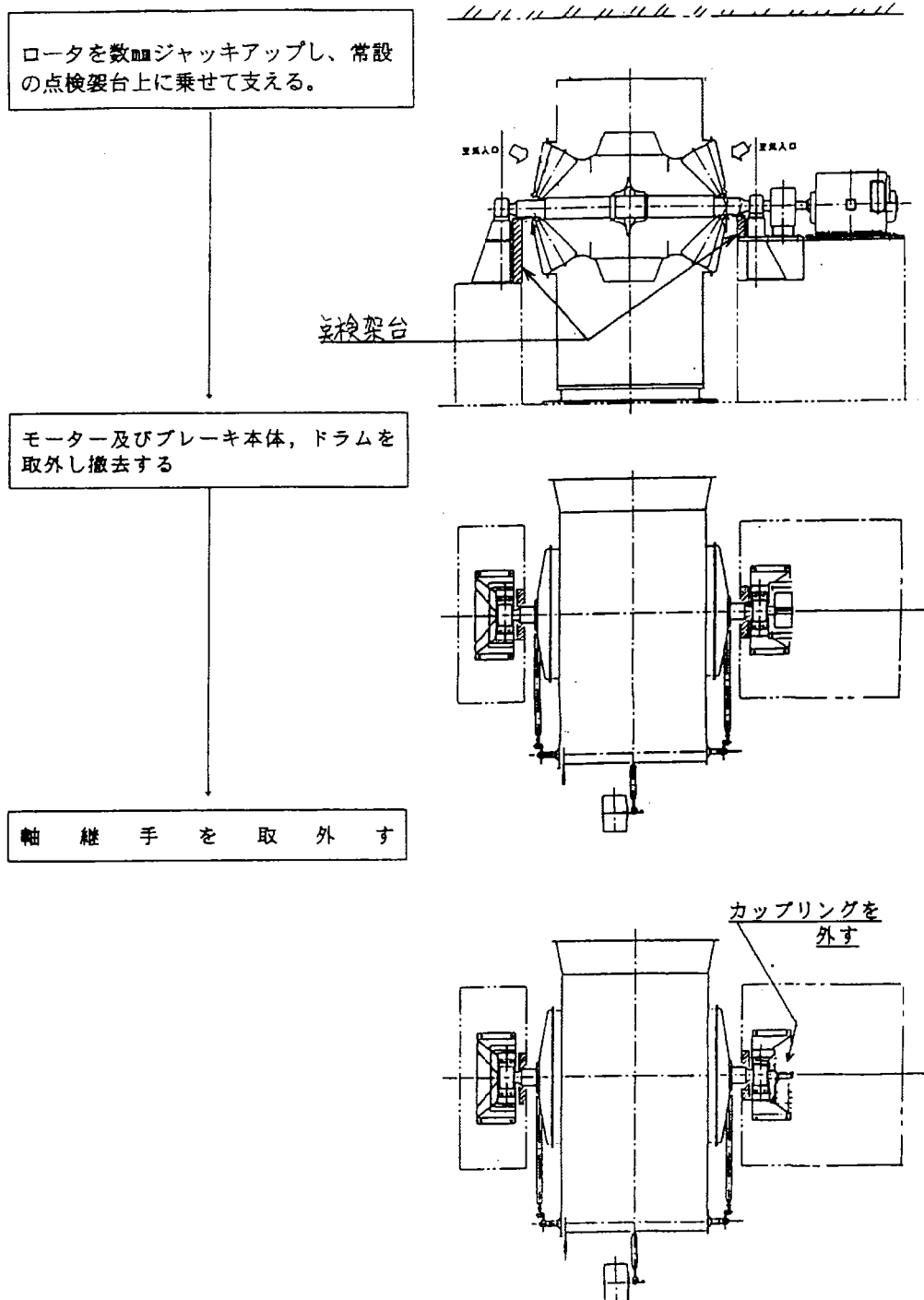


図 3.1-8 (1/2) 主送風機の軸受交換手順の概念

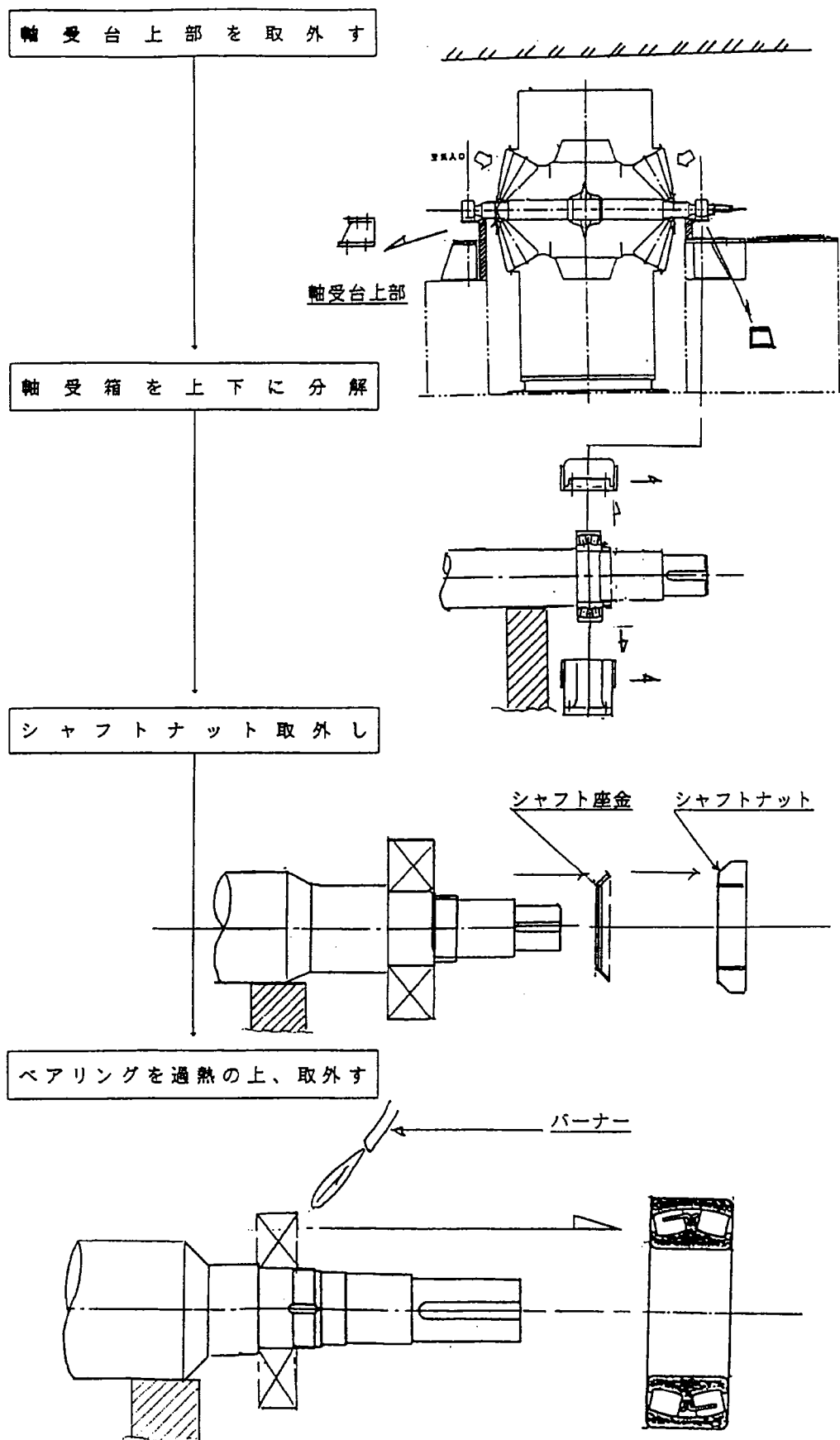


図 3.1-8 (2/2) 主送風機の軸受交換手順の概念

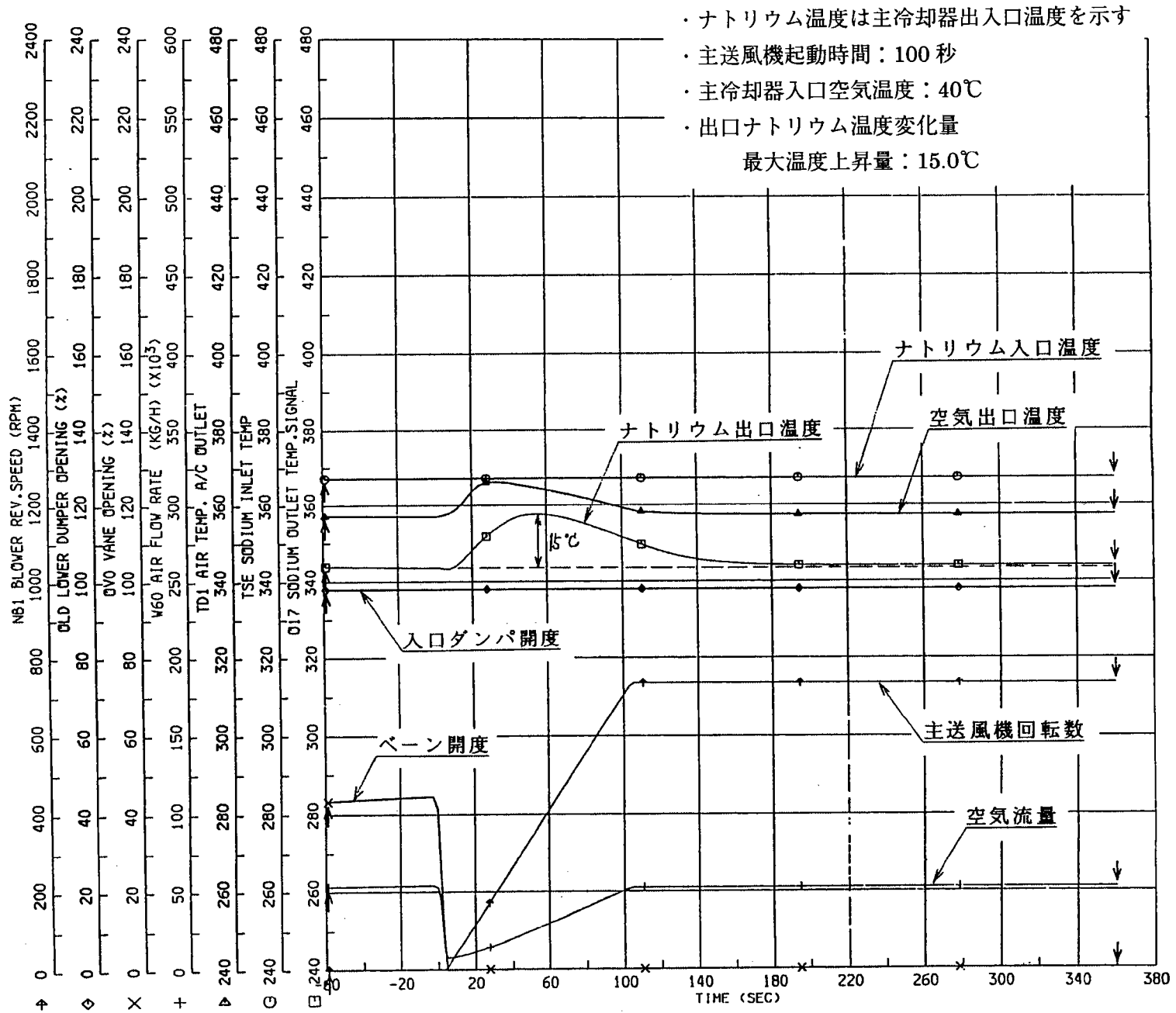
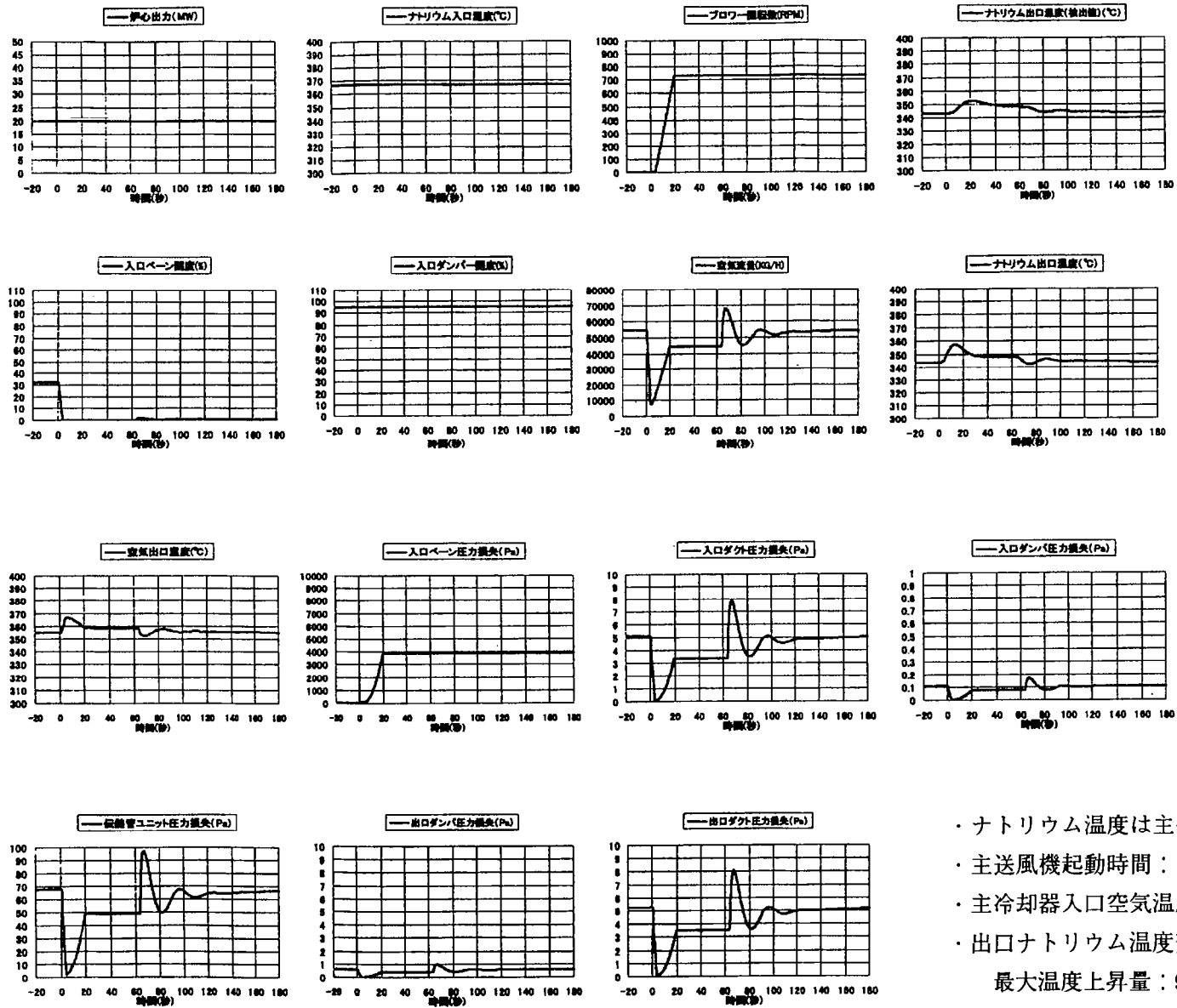


図 3.1-9 主送風機起動時の冷却系温度解析結果
(原子炉熱出力 20MWt・始動補償器を用いた場合)



- ・ ナトリウム温度は主冷却器出入口温度を示す。
- ・ 主送風機起動時間：16 秒
- ・ 主冷却器入口空気温度：40℃
- ・ 出口ナトリウム温度変化量（検出値）
最大温度上昇量：9.85℃

図 3.1-10 主送風機起動時の冷却系温度解析結果
(原子炉熱出力 20MWt・直入れ起動の場合)

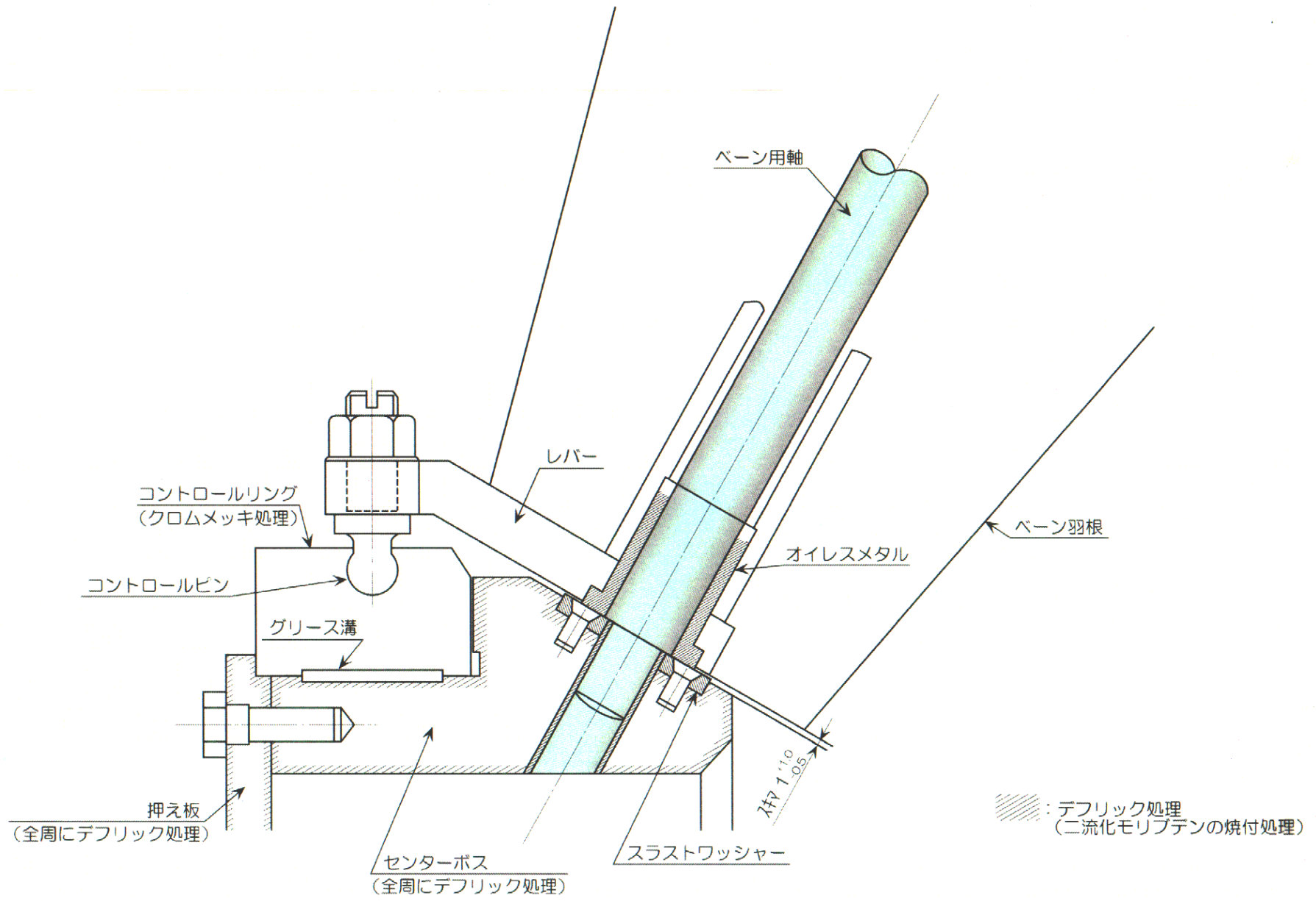
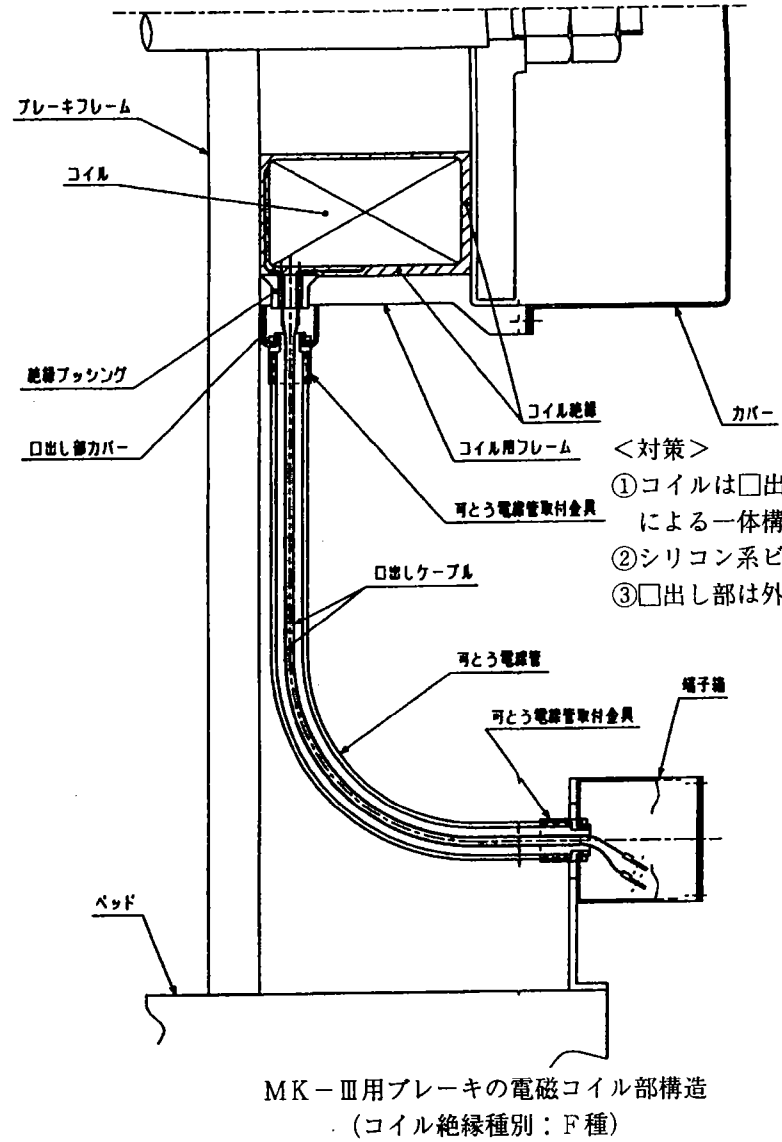
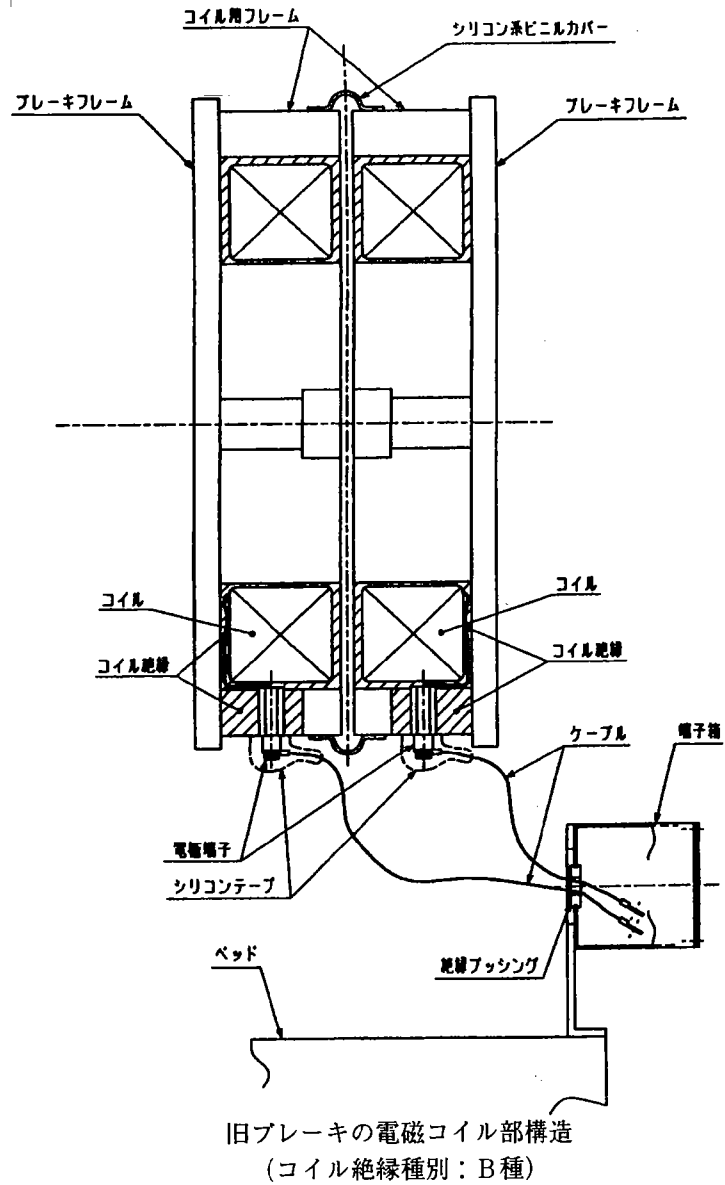


図 3.1-11 主送風機インレットベーンのメンテナンス性向上策



<対策>

- ①コイルは□出しケーブルを含め真空含浸による一体構造
- ②シリコン系ビニールカバーを不要とした
- ③□出し部は外気との絶縁をより強固とした

図 3.1-12 主送風機ブレーキの電磁コイル部構造比較

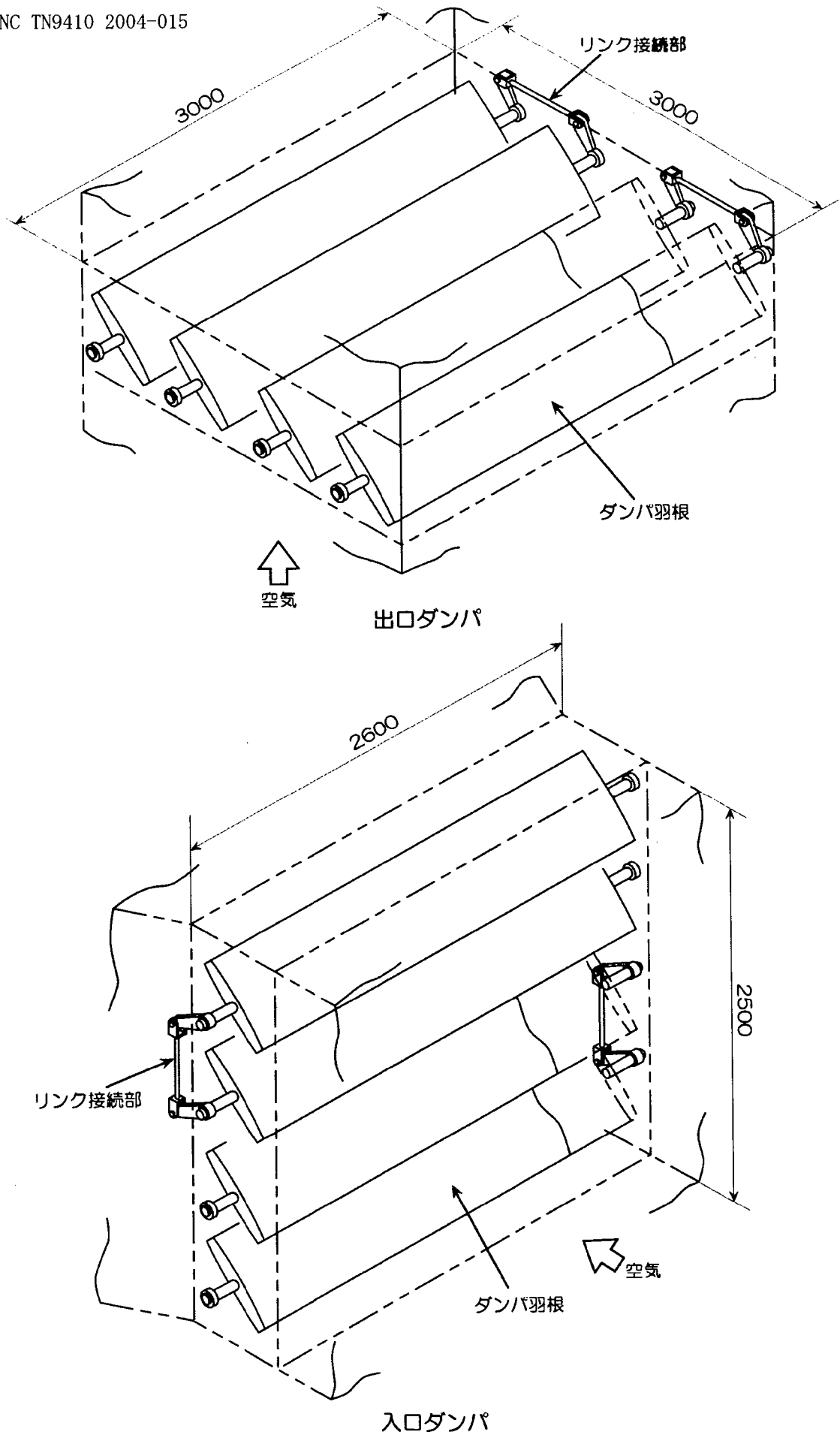


図 3.1-13 MK-III用主冷却器入口・出口ダンパの構造

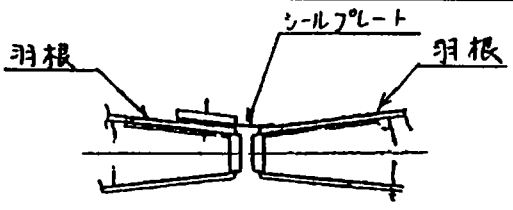
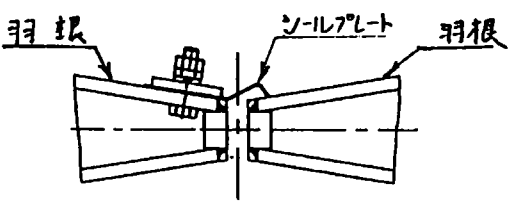
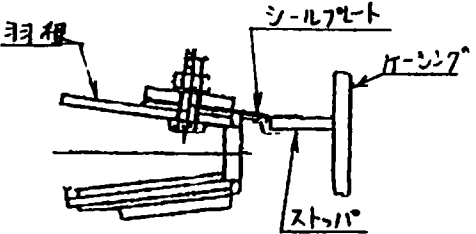
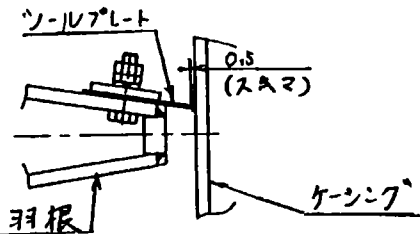
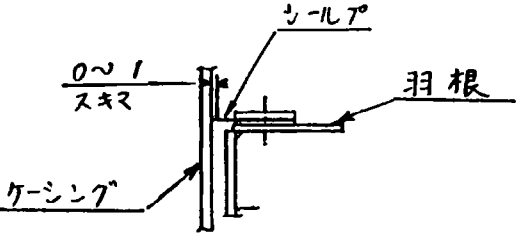
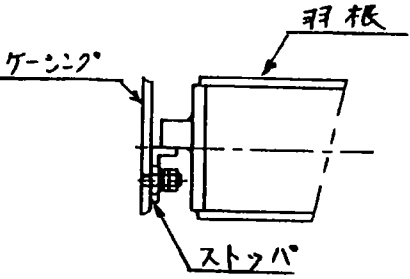
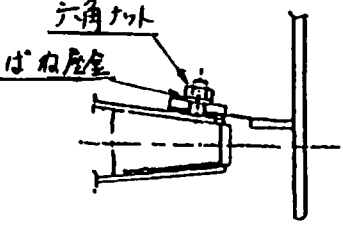
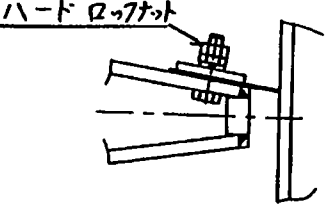
仕様項目	内容		設定根拠
	MK-II	MK-III	
シール	 <p>シールプレート 羽根</p>	 <p>シールプレート 羽根</p>	<ul style="list-style-type: none"> シールプレートの羽根への接触は面接触よりも線接触の方が調整が容易であり、シールも確実であるため線接触としての字に字にした。
ケーシングと羽根間	 <p>シールプレート ケーシング ストップパ 羽根</p>	 <p>シールプレート 0.5 (スミマ) ケーシング 羽根</p>	<ul style="list-style-type: none"> MK-IIはケーシングに溶接されたストップパでシールしていたが、MK-IIIでは羽根表裏の温度差により、羽根に反りが生じてリークするのを防止するため、ストップパを無くしケーシングとシールプレートのスキマを管理してリーク量を制限するようにした（ケーシングの剛性向上）
軸端	 <p>シールプレート 0~1 スキマ ケーシング 羽根</p>	 <p>ケーシング ストップパ 羽根</p>	<ul style="list-style-type: none"> MK-IIはケーシングと羽根内を0~1mmにしてリーク量制限をしているが、ケーシングと羽根に温度差が生じた場合羽根全長の伸びが影響するため、シールプレートがケーシングに干渉する恐れがあった。 MK-IIIでは調整可能なストップパでリークを制限するようにした。
取付ボルト用ナット	 <p>六角ナット ばね座金</p>	 <p>ハードロックナット</p>	<ul style="list-style-type: none"> MK-IIはばね座金と六角ナットで止めていたが脱落の恐れがあった。 MK-IIIは、廻り止めが確実でシールプレートの調整容易なハードロックナットを使用した。

図 3.1-14 MK-III用ダンパのシール性向上策

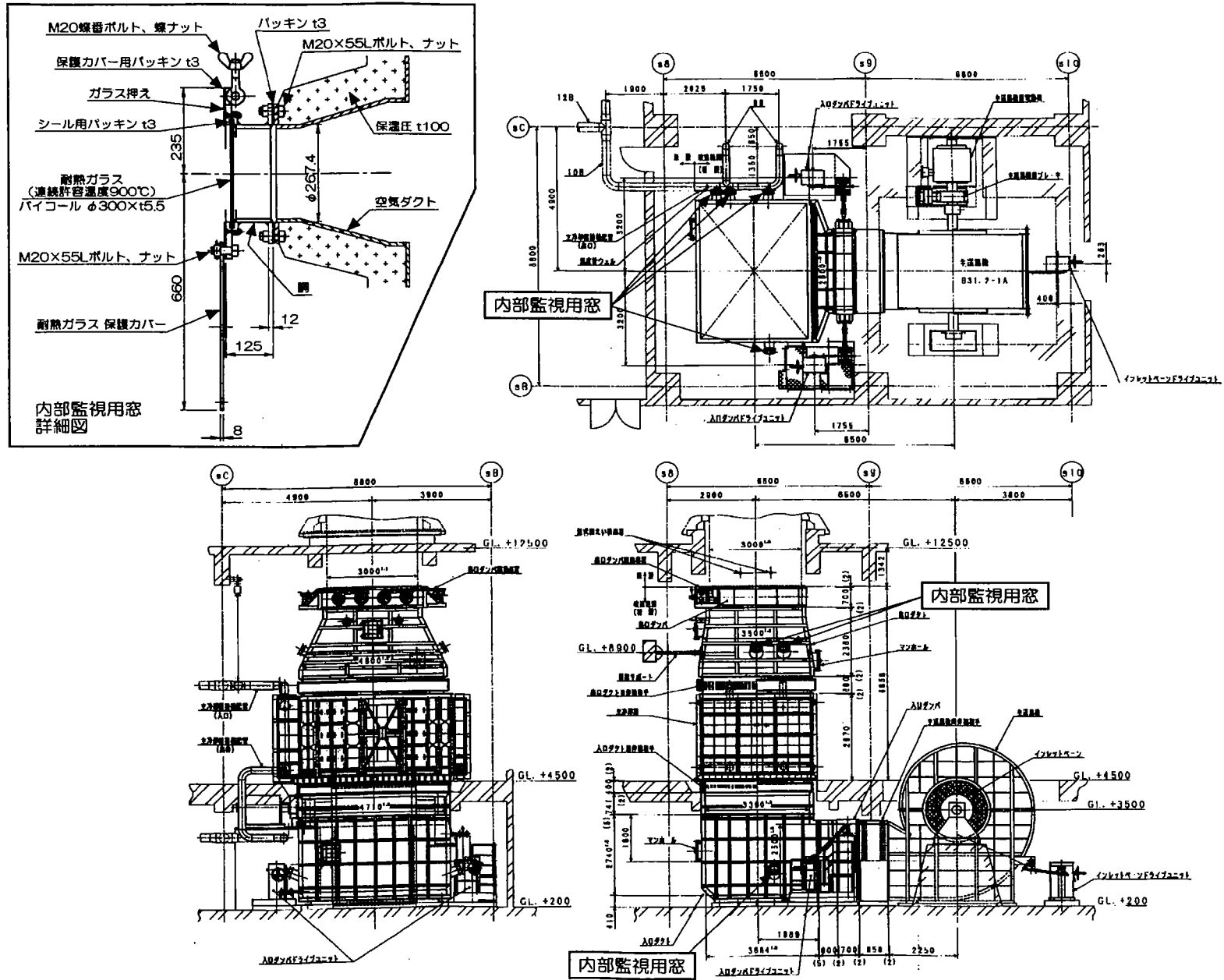


図 3.1-15 MK-III用主冷却機の内部監視用窓の構造・配置図

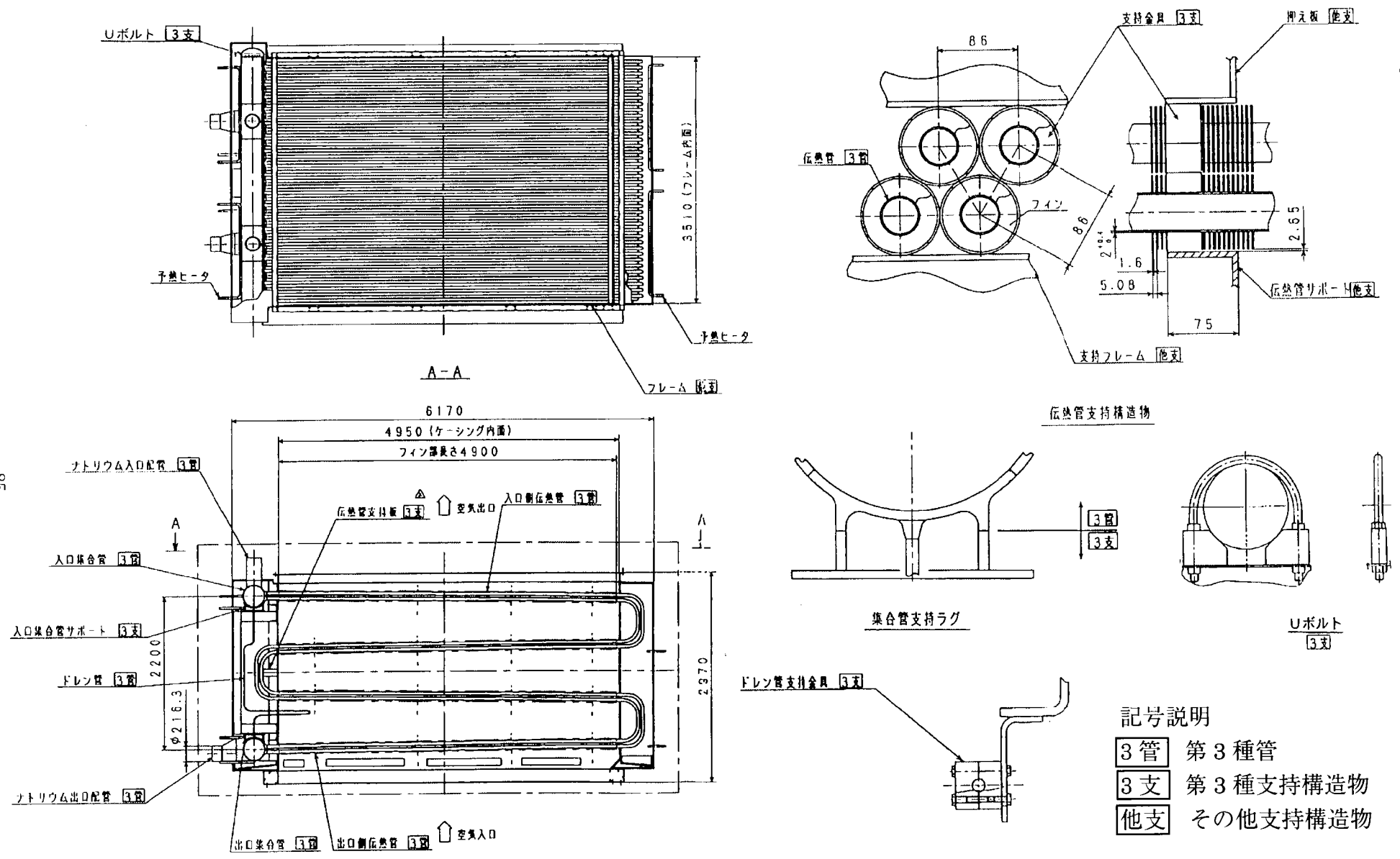


図 3.2-1 MK-III用主冷却機の機器区分

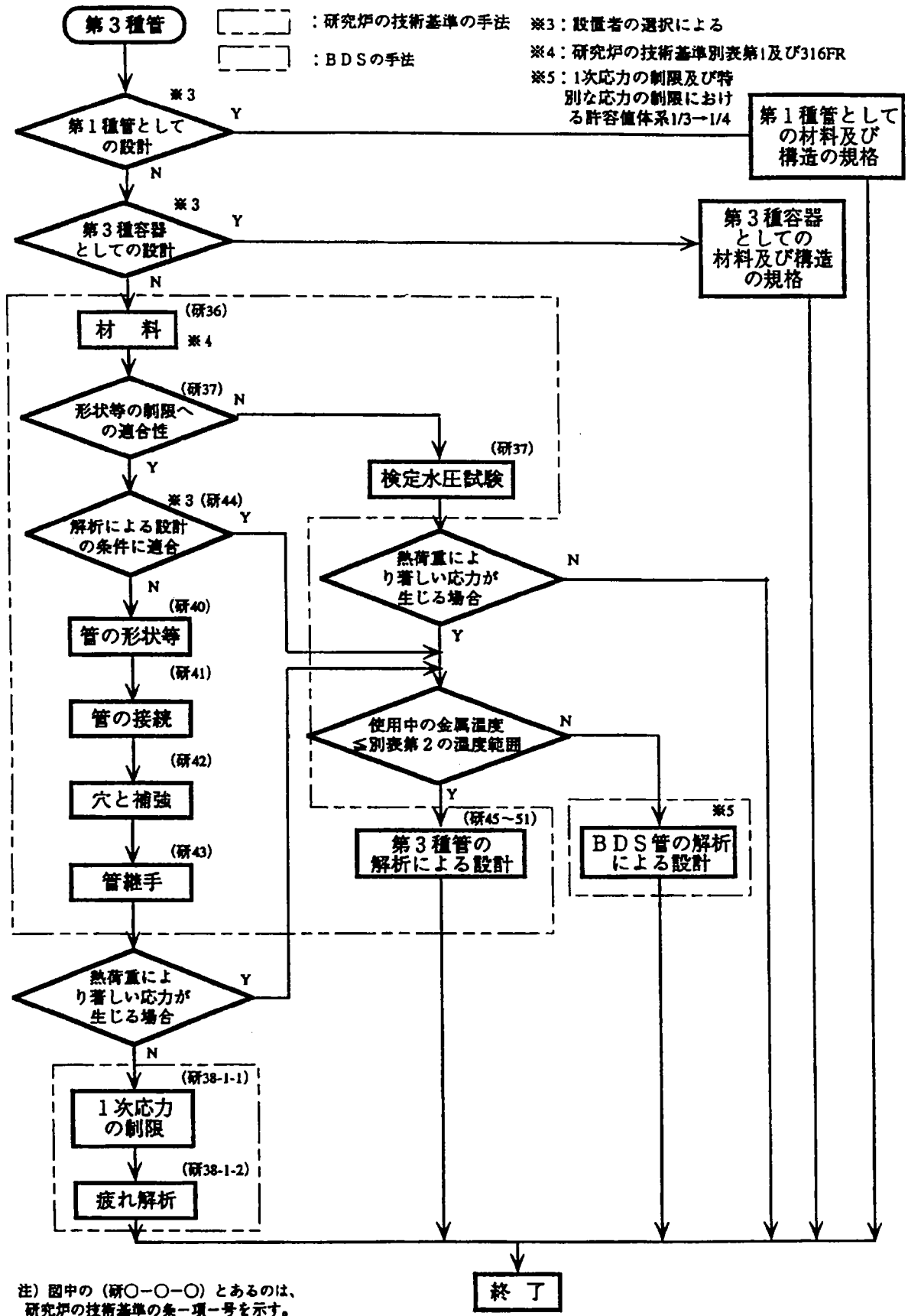


図 4.1-1 「常陽」 ナトリウム機器の設計手順フロー (第3種管)

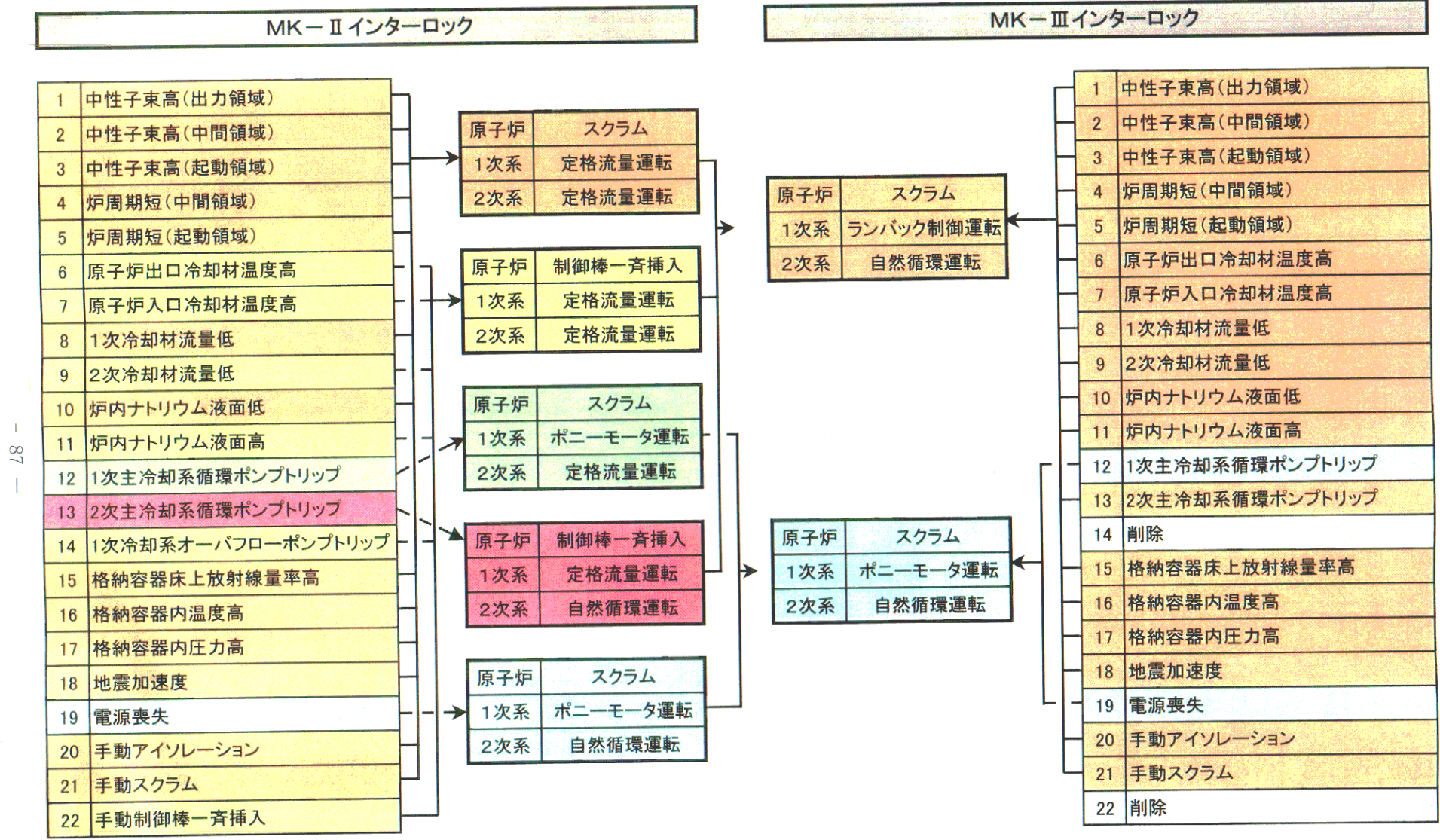


図4.2-1 過渡時の機器インターロック(MK-IIとMK-IIIとの比較)

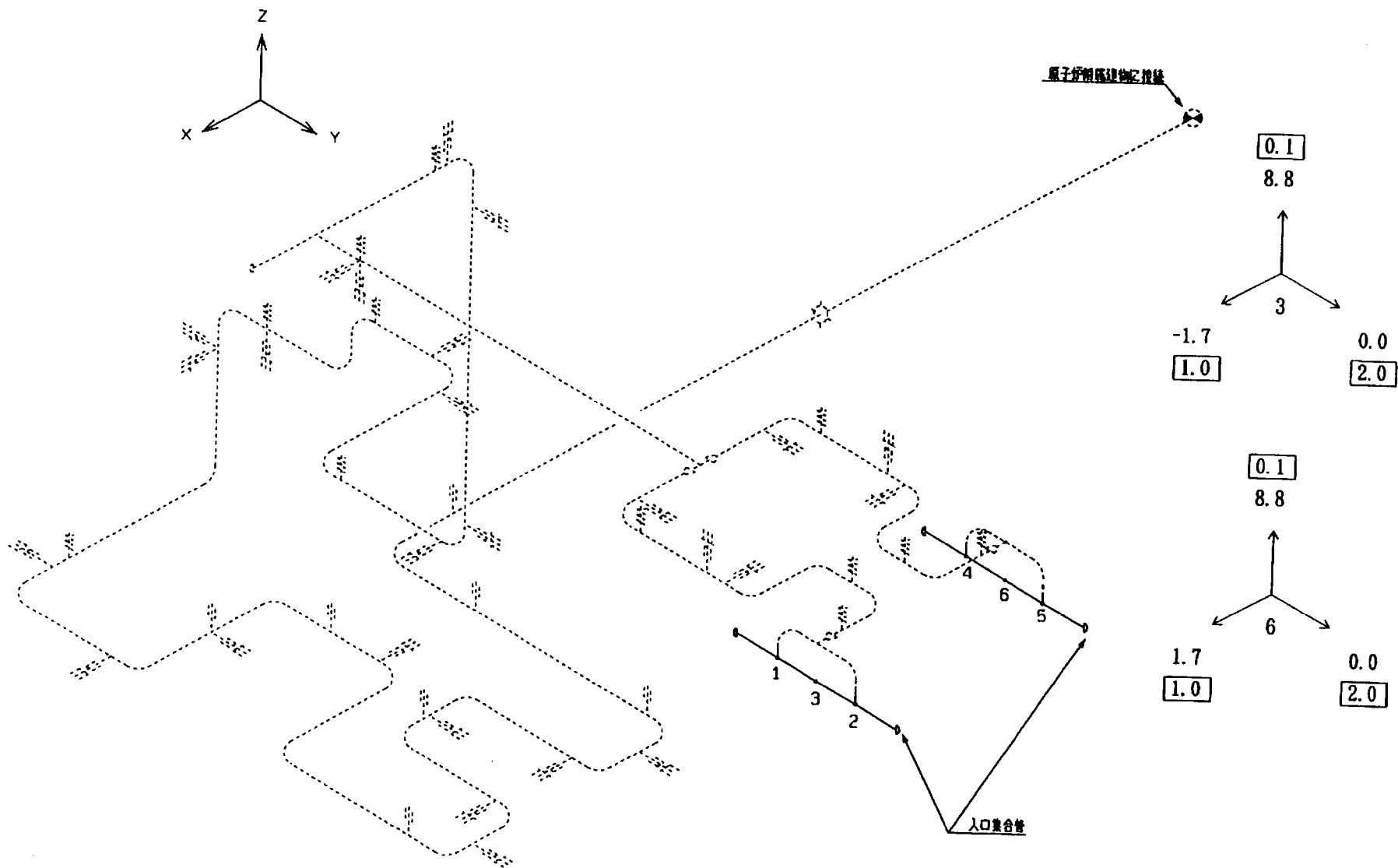


図 4.2-2 主冷却器入口配管の解析モデル及び評価部位

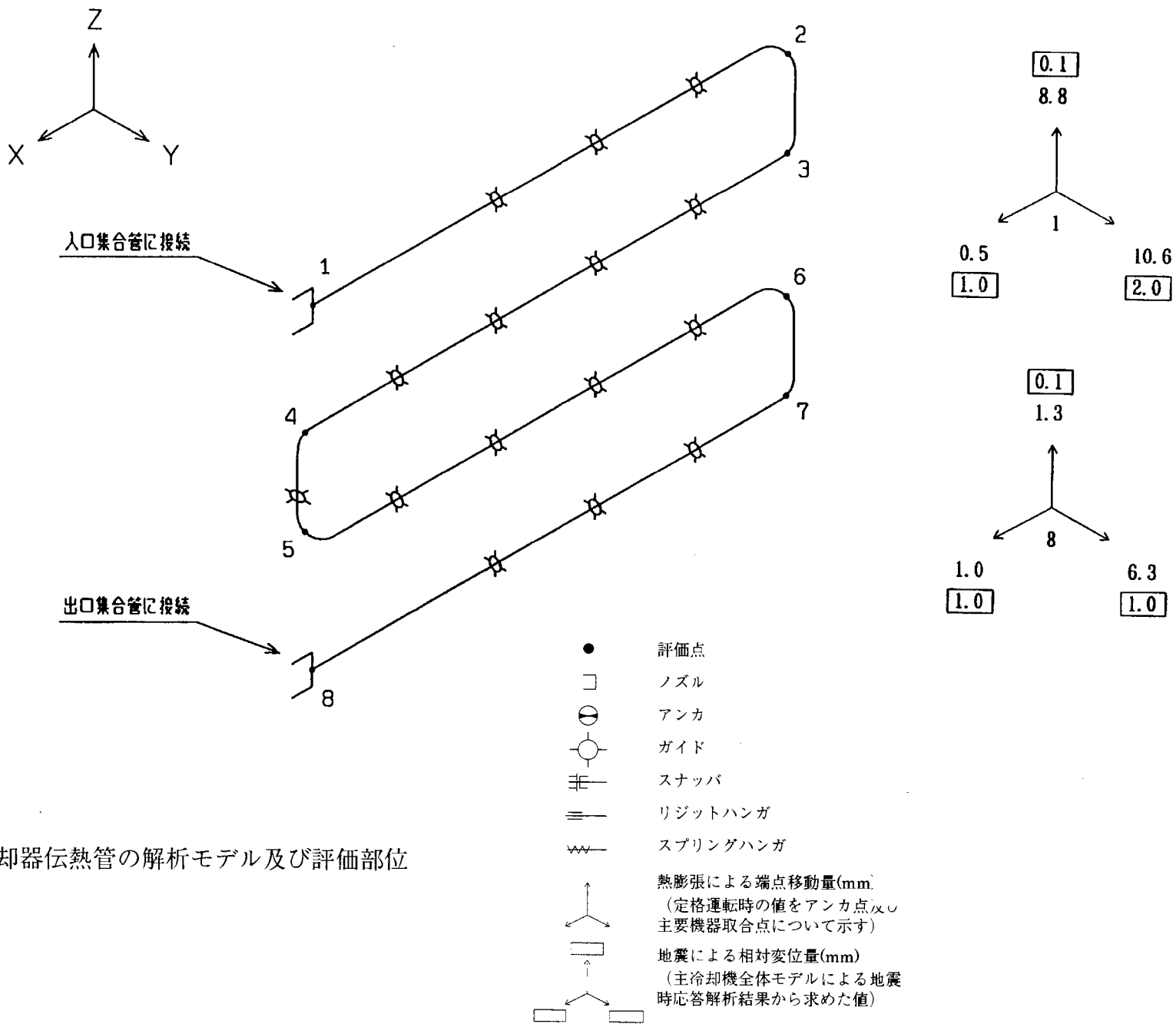


図 4.2—3 主冷却器伝熱管の解析モデル及び評価部位

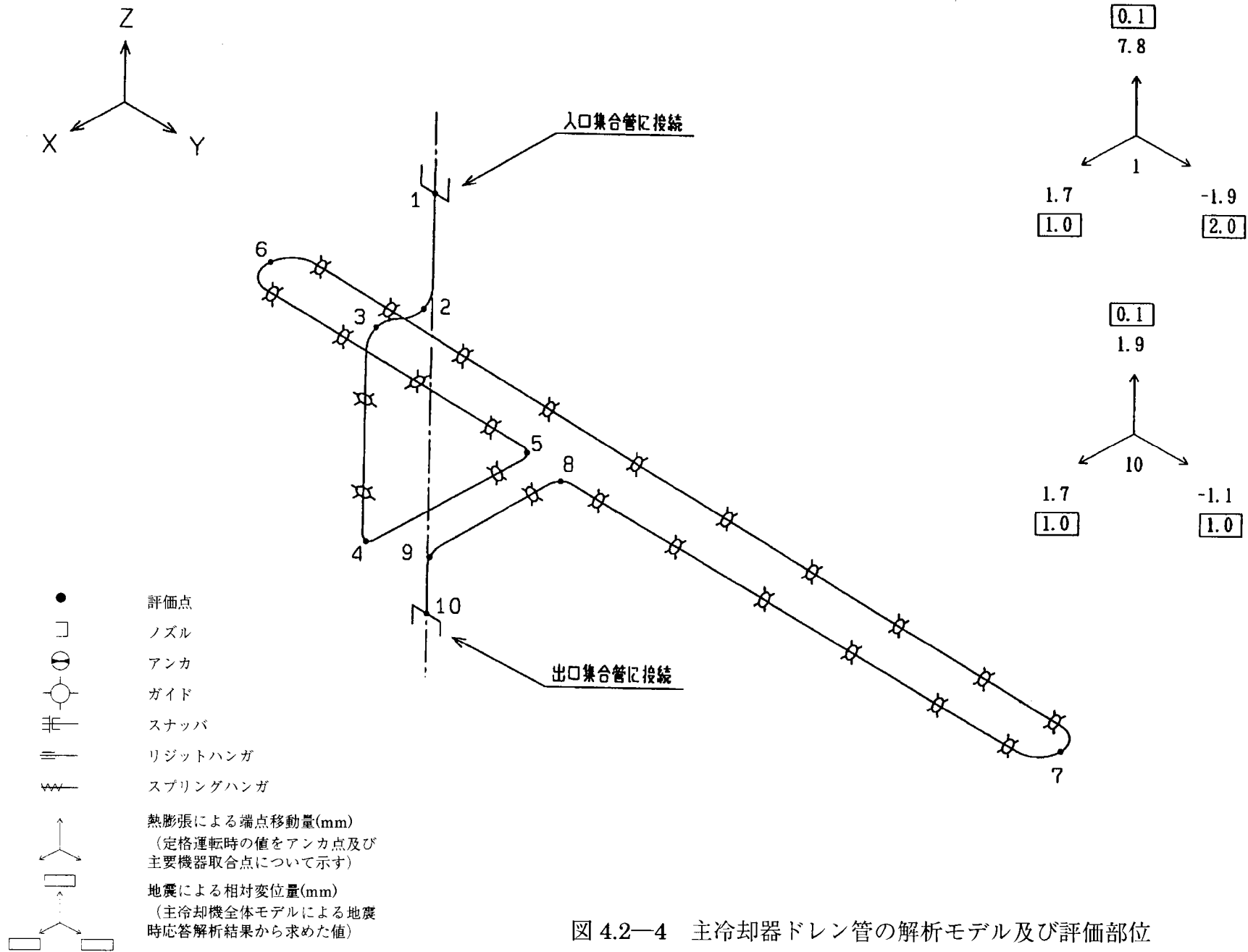


図 4.2-4 主冷却器ドレン管の解析モデル及び評価部位

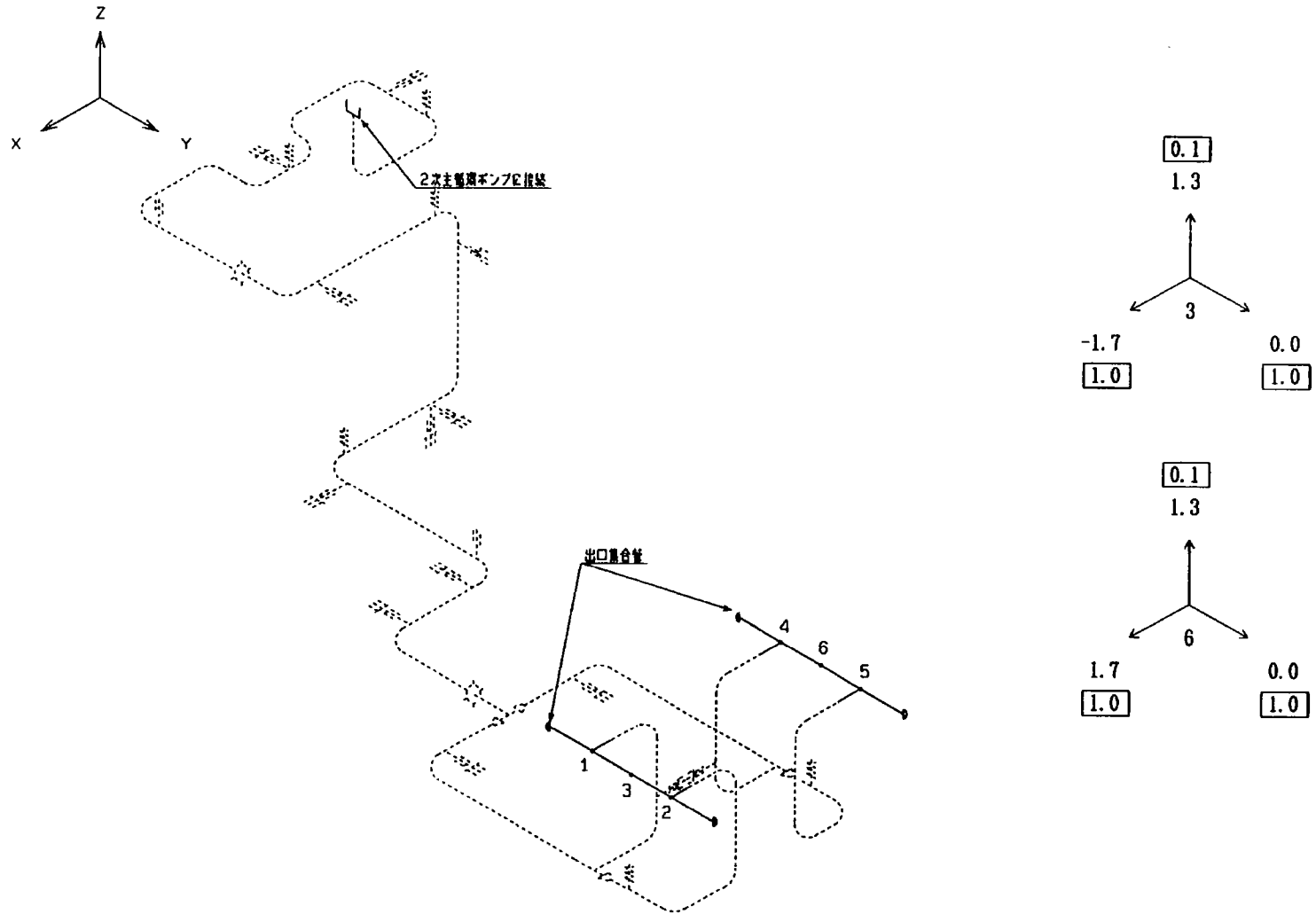
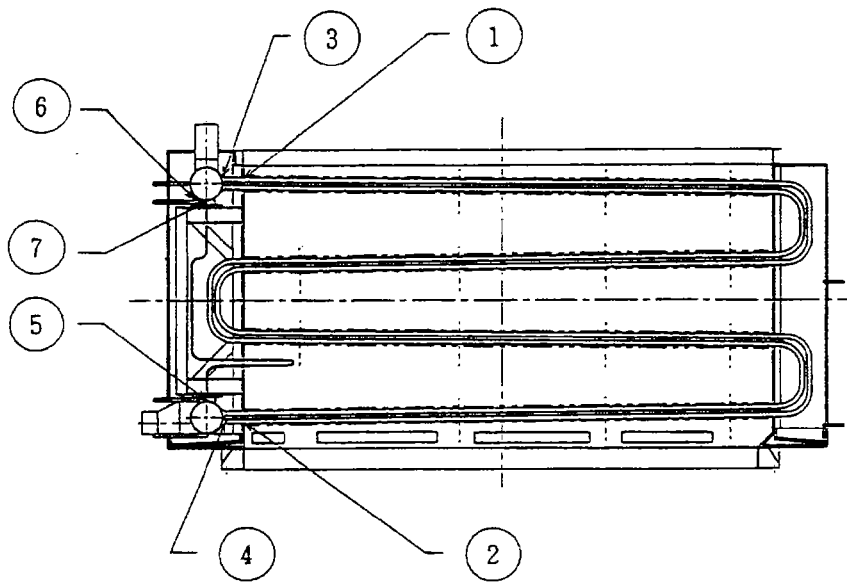
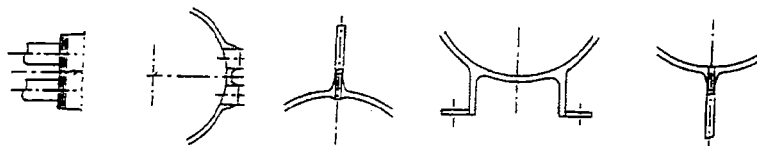


図 4.2—5 主冷却器出口配管の解析モデル及び評価部位



①②詳細 ③④詳細 ⑤ 詳細 ⑥詳細 ⑦詳細



解析部位

①	ナトリウム入口伝熱管（フィン付根）
②	ナトリウム出口伝熱管（フィン付根）
③	ナトリウム入口集合管スタブ
④	ナトリウム出口集合管スタブ
⑤	ナトリウム出口集合管（ドレン管付根）
⑥	ナトリウム入口集合管支持ラグ
⑦	ナトリウム入口集合管（ドレン管付根）

図 4.2—6 MK—Ⅲ用主冷却器の熱過渡解析対象部位

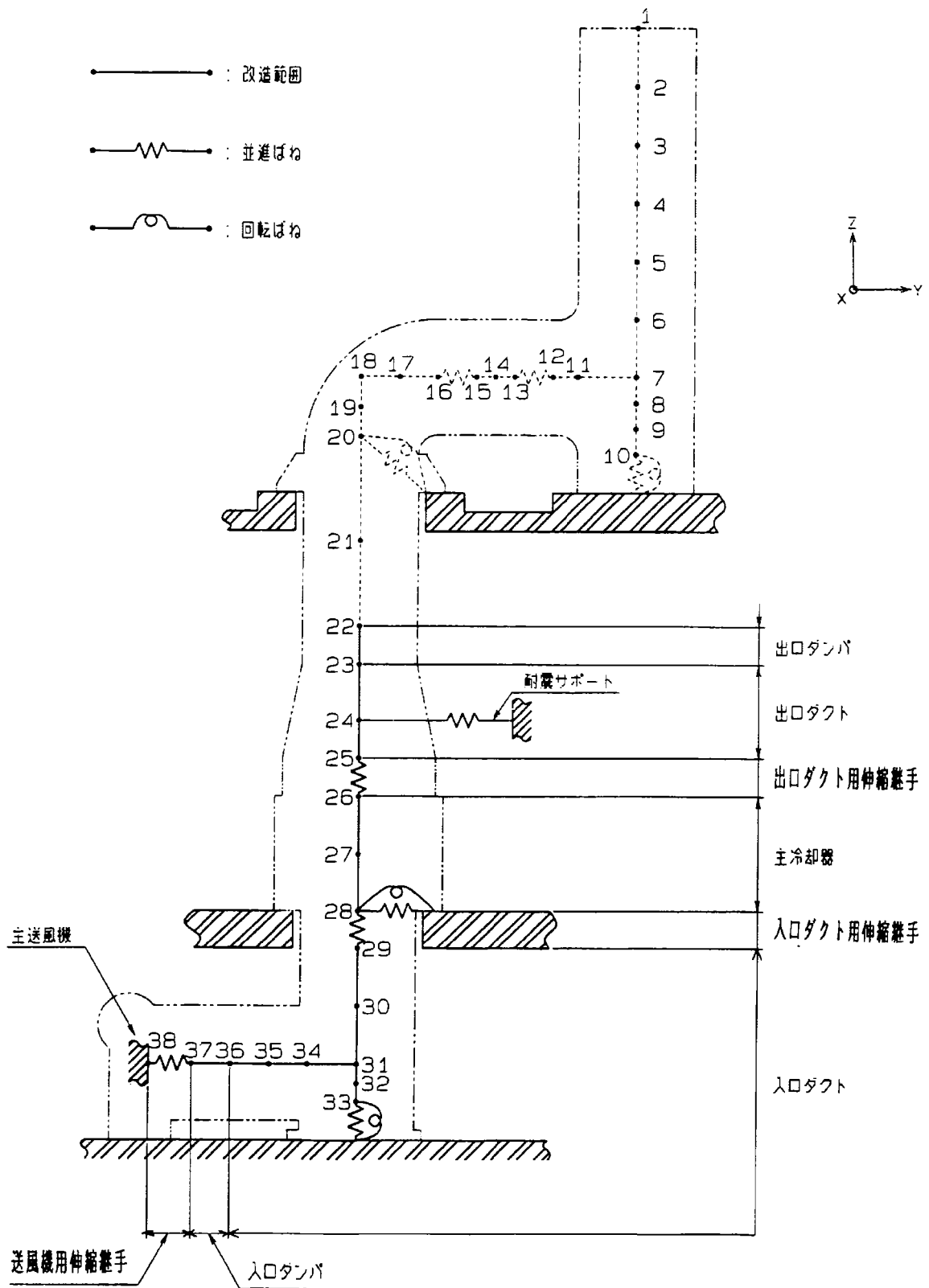


図 4.3-1 MK-Ⅲ用主冷却機の耐震解析モデル

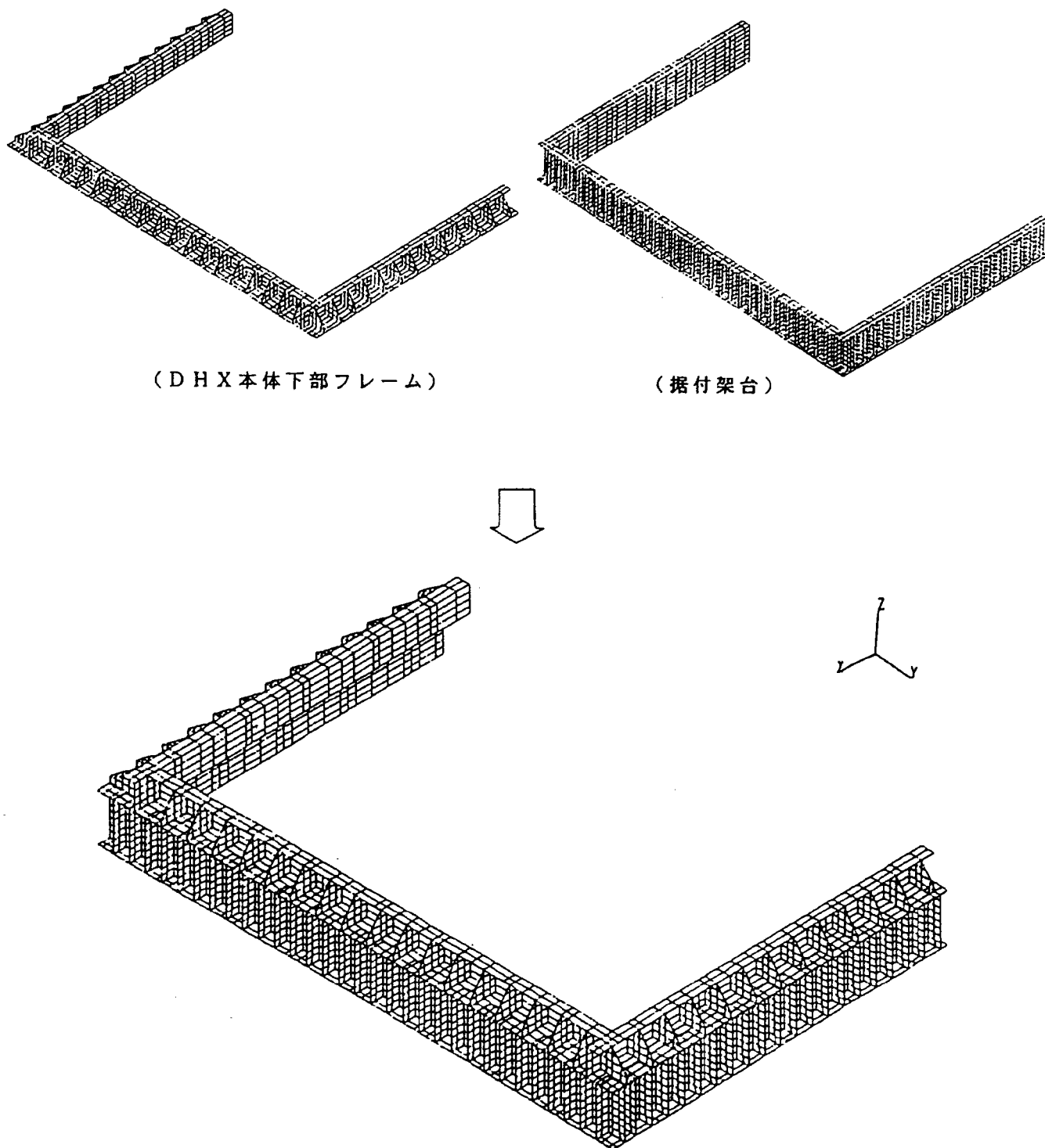
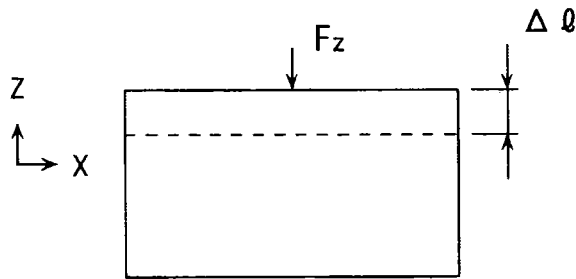


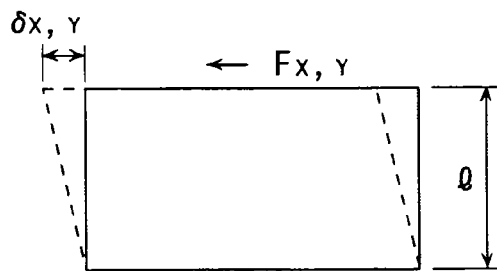
図 4.3-2 主冷却器の据付架台（既設部）及び主冷却器下部フレームの解析モデル

(1) 並進ばね定数 ; K_z



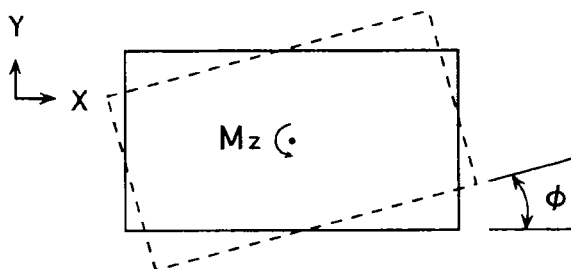
$$K_z = \frac{F_z}{\Delta \phi}$$

(2) 並進ばね定数 ; K_x, K_y



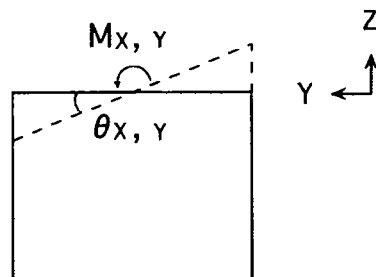
$$K_{x,y} = \frac{F_{x,y}}{\delta_{x,y}}$$

(3) 回転ばね定数 ; K_{θ_z}



$$K_{\theta_z} = \frac{M_z}{\phi}$$

(4) 回転ばね定数 ; $K_{\theta_x}, K_{\theta_y}$



$$K_{\theta_{x,y}} = \frac{M_{x,y}}{\theta_{x,y}}$$

図 4.3-3 入口ダクト支持部のばね定数算出方法

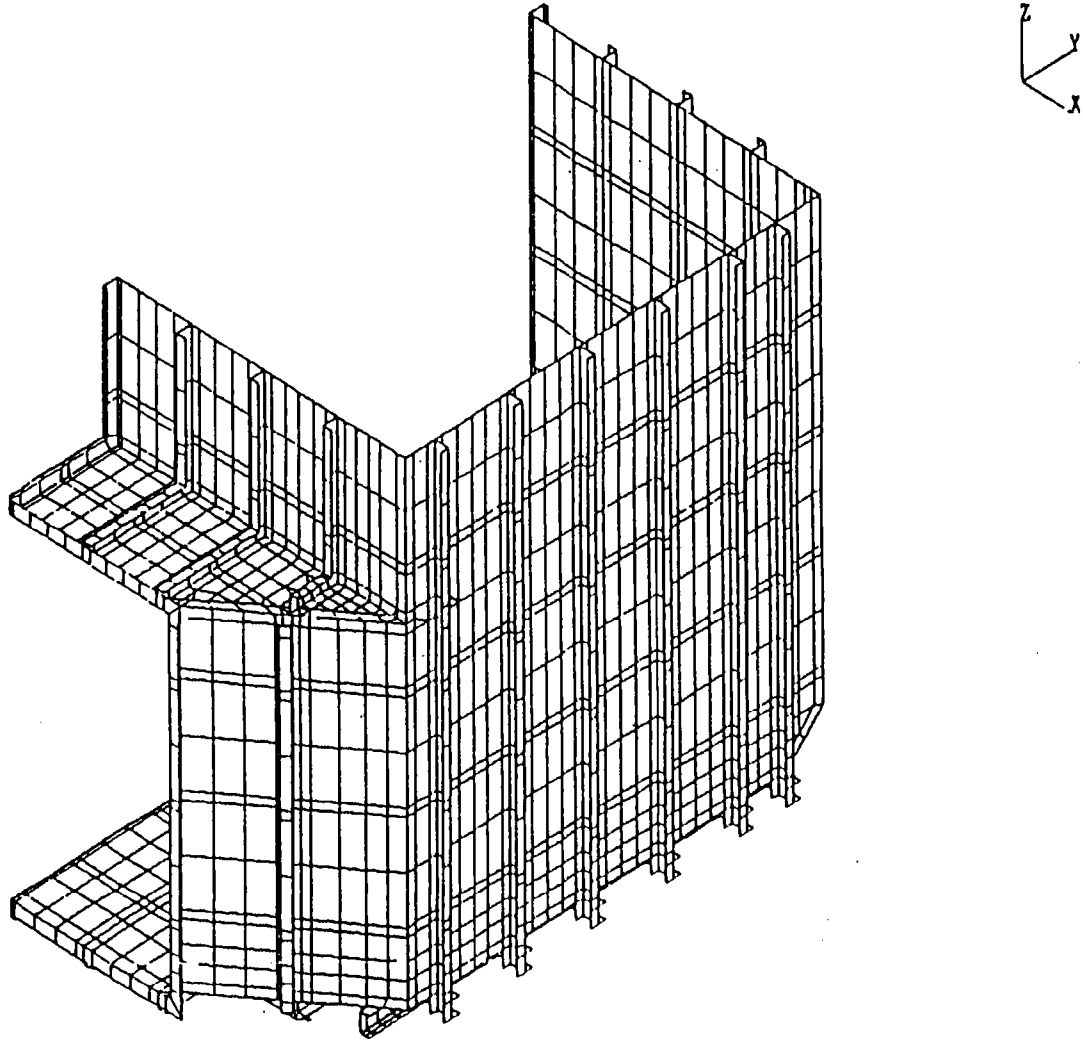


図 4.3-4 入口ダクト支持部の解析モデル

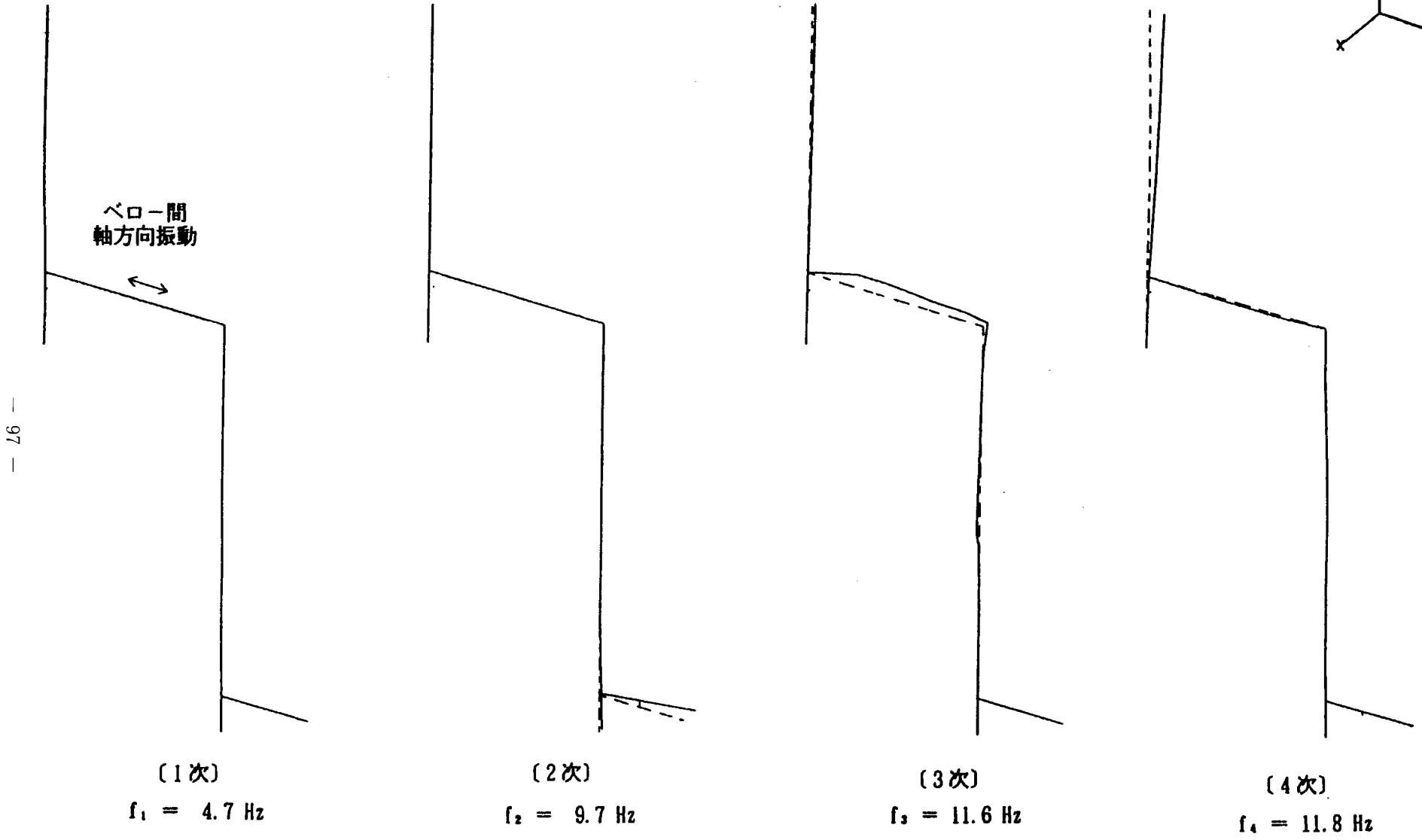
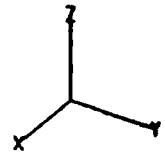


図 4.3—5 MK—Ⅲ用主冷却機の固有値解析結果

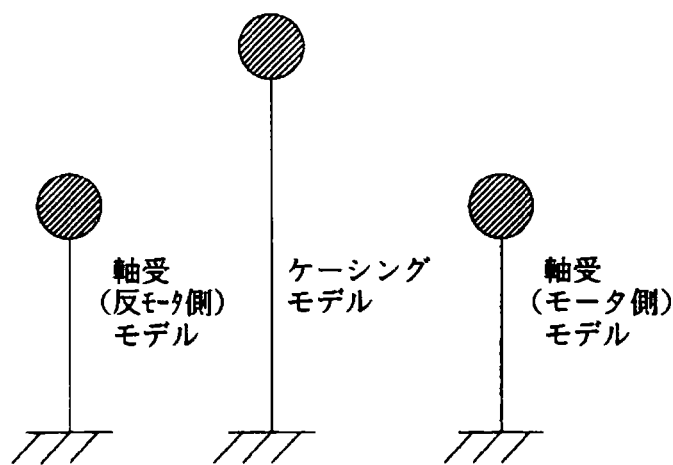
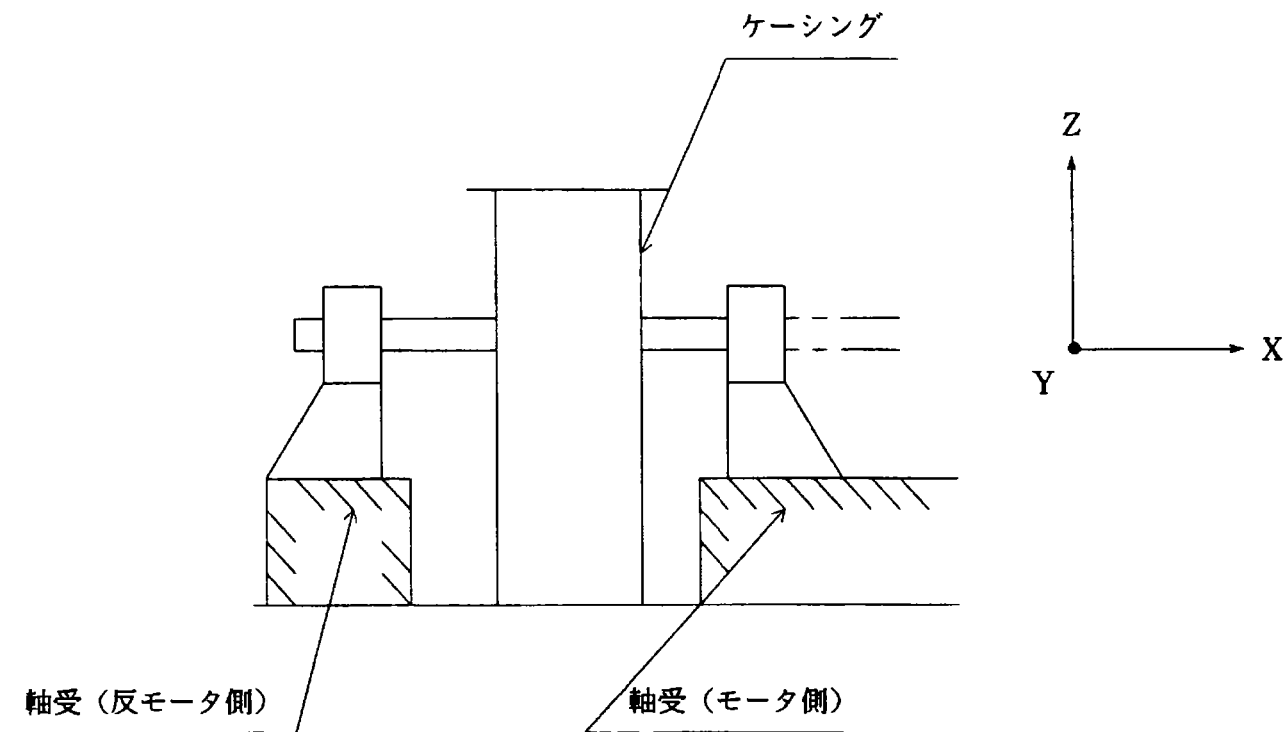


図 4.3-6 MK-III用主送風機の耐震計算モデル

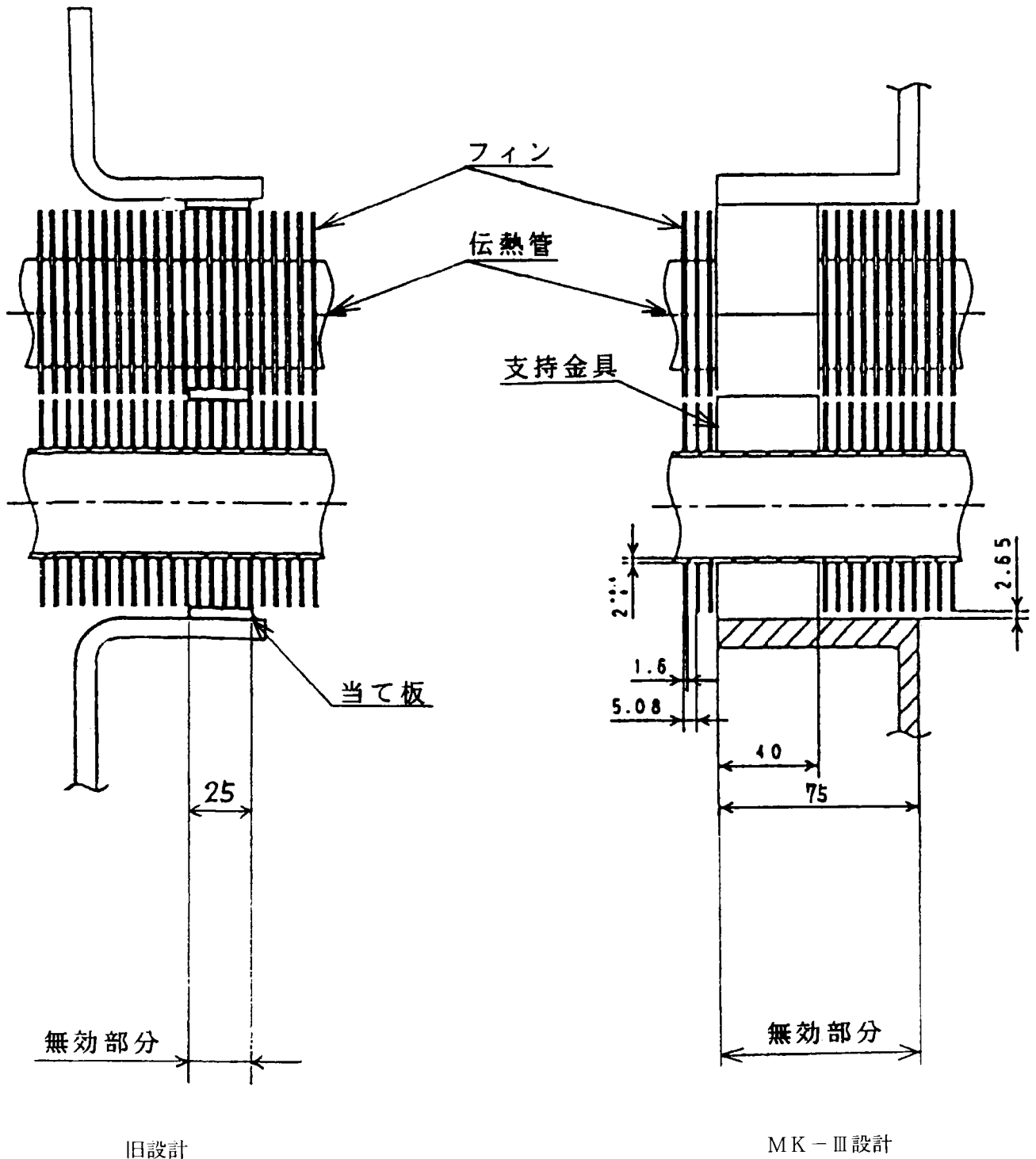


図 5.2-1 旧主冷却機及びMK-III主冷却機におけるサポート部の伝熱無効部の取扱について

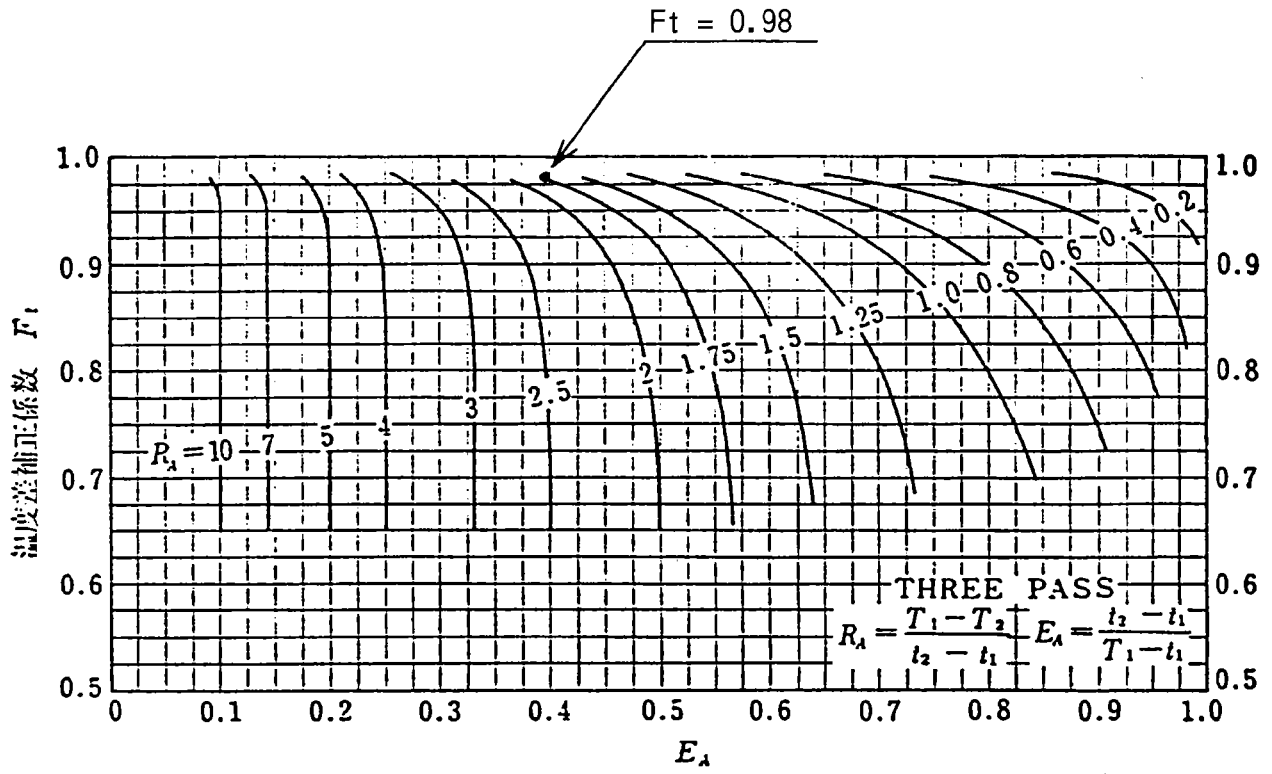
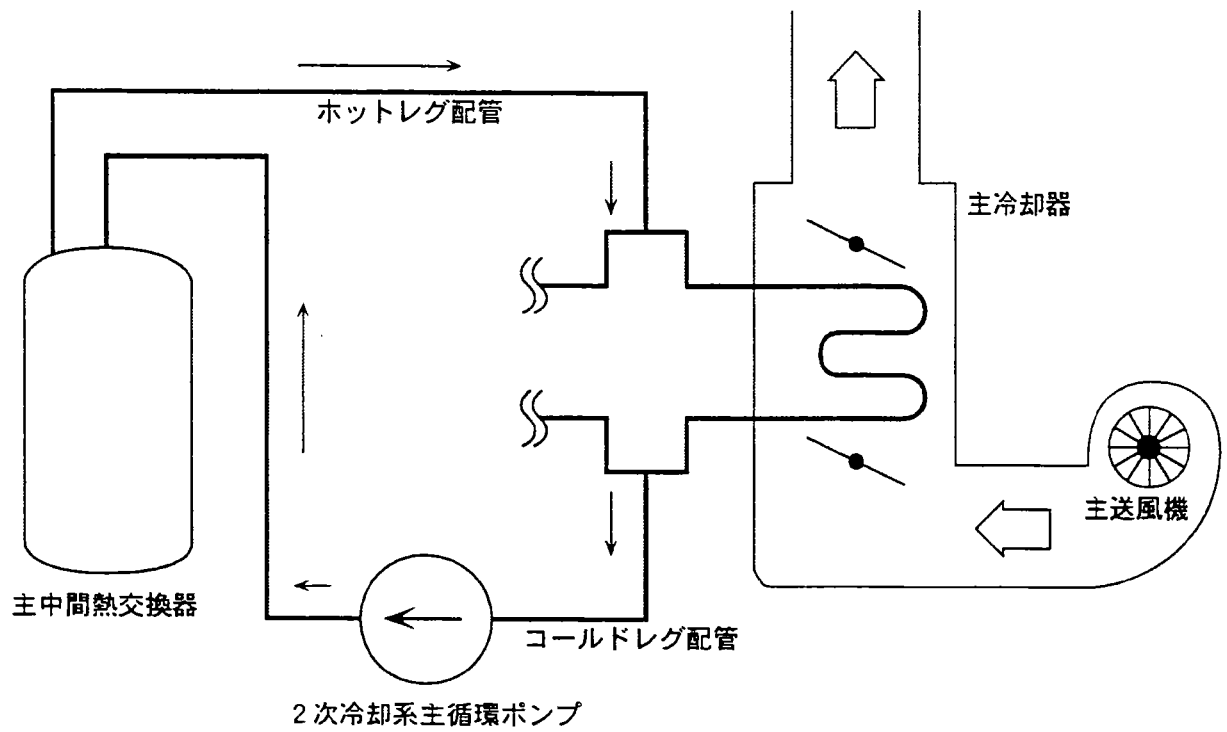


図 5.2-2 3 パス直交流熱交換器（両流体とも混合せず）の温度差補正係数



No	項目	圧力損失 (mNa)
1	ホットレグ配管	16.2
2	主冷却器	4.0
3	コールドレグ配管	14.4
4	主中間熱交換器	2.3
合計		36.9

図 5.3—1 MK—Ⅲ 2次冷却系系統圧力損失

風量	7700.0 m ³ /min
静圧	0.0 mmAq
吸吐出	432.0 mmAq
ファン静圧	432.0 mmAq
回転数	735.0 rpm
ハス温度	40.0 °C
ハス重量	1.1290 kg/m ³
E-ク-出力	710.0 kW

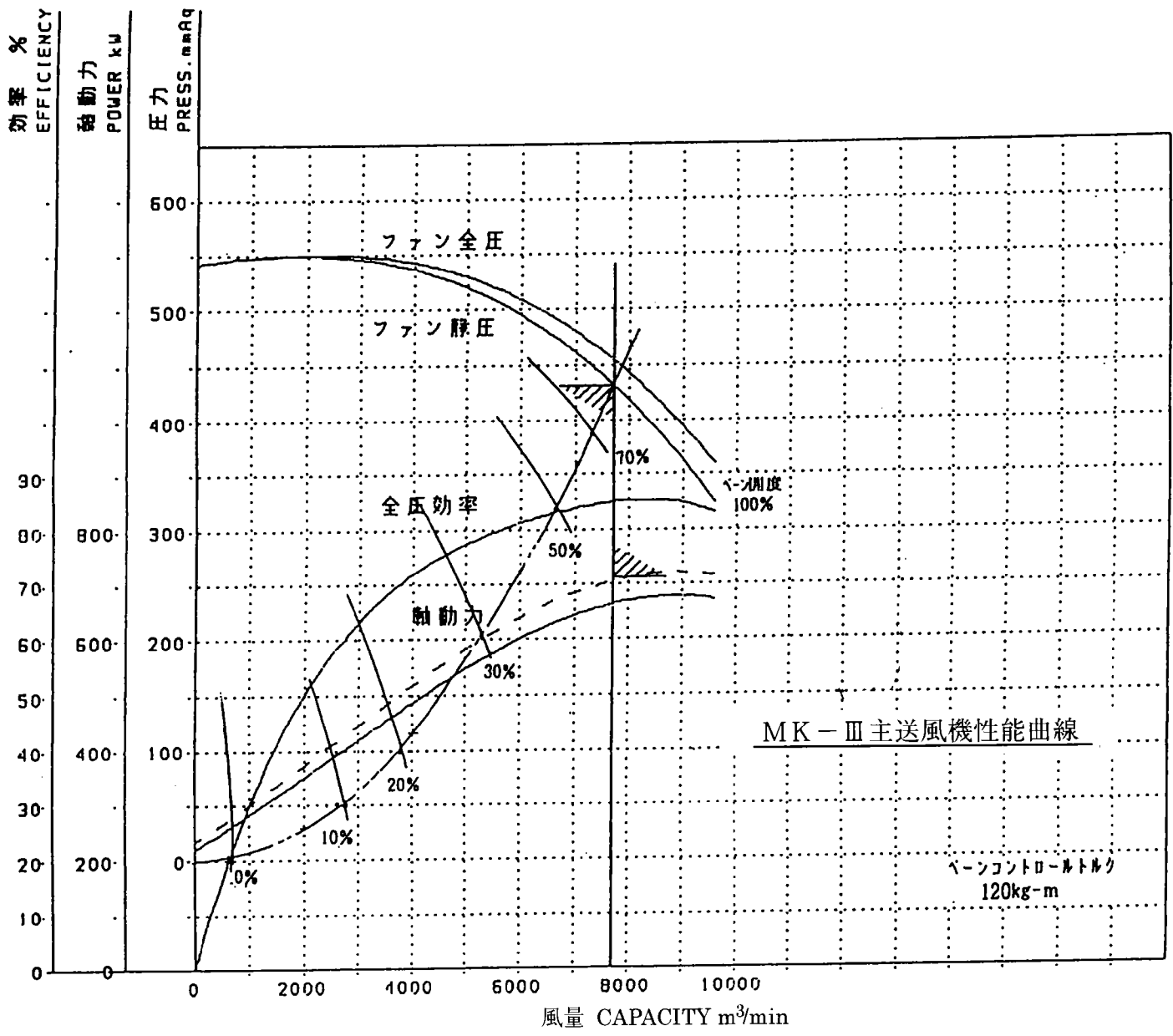


図 5.3-2 MK-III用主送風機の予想性能

添付資料 1

主送風機ブレーキの成立性確認試験

1. 試験の目的

MK-Ⅲ用主送風機ブレーキの型式選定にあたり、旧ブレーキと同様の仕様とした場合、ブレーキドラムの表面温度上昇によるクラックの発生とブレーキライニングの焼付き（カーボン生成）により制動時間が増加し、設計条件の13.6秒以内に停止できないことが懸念された。このため、ブレーキドラムとブレーキライニングの材質の見直しを行うと共に、成立性確認試験を行った。

2. MK-Ⅲ用主送風機ブレーキの仕様検討

(1) 旧ブレーキと同一仕様とした場合の問題点

型式選定にあたっては、主送風機側及び駆動モータ側との取合い、電気・計装設備との取合い、ブレーキ据付スペース、既設基礎の位置の流用などの条件から、基本的に既設と同じドラム側電磁ブレーキとした。但し、ブレーキの設計条件としては、熱過渡条件から要求される制動時間（13.6秒以内）を満足するだけではなく、ブレーキ作動時にしゅう動部となるドラム及びライニングが健全である必要がある。そこで、旧ブレーキと同一仕様のドラム及びライニングを選定した場合について検討した結果、以下に示すとおり成立しないことがわかった。

ドラム材質を旧ブレーキと同じ材質（球状黒鉛鋳鉄品「FCD400(JIS G 5502)」）とした場合、温度上昇許容値は160℃であり、これに対しドラムの温度上昇値を計算した結果、244℃となり許容値を上回る。この温度上昇によるドラムの熱応力は74kg/mm²となり、許容値（59kg/mm²以下）を超えてドラム表面にクラックを生じる可能性がある。また、ドラム表面温度が高くなるとドラムとライニング間でフェード現象（摩擦係数の低下）が生じ、ライニングの焼付きに至る。このため、ドラム表面温度が244℃まで上昇すると、ブレーキライニングの結合材であるレジン（有機質）が焼けてカーボンを生成（焼付き現象）し、ドラムとブレーキライニング間の摩擦係数低下をきたし、制動時間が3倍以上（設計条件13.6秒に対し40秒以上）となる可能性がある。

(2) ブレーキドラム及びライニングの材質変更

上記(1)の問題に対し、ブレーキドラム及びライニングの材質変更について検討した結果、以下の結論を得た。

① ブレーキドラム材質の変更

ドラム材質を球状黒鉛鋳鉄品の「FCD400(JIS G 5502)」から「FCD500(JIS G 5502)」に変更する。FCD500の熱応力の許容値は 75kg/mm^2 であり、熱応力計算値を上回るが十分な余裕がない。

② ブレーキライニング材質の変更

ブレーキライニングを形成するには、基本的に次の3種類の材料が必要となる。

- ・ アスベスト(石綿)：ブレーキライニングの基本材料になるものであり、耐熱温度は 400°C (400°C を超えると組織結合がなくなる)
- ・ レジン(有機質)：アスベストの結合材として不可欠な材料であり、耐熱温度は 250°C
- ・ 充填材：磨耗特性、耐熱性向上のため、硫酸バリウム、炭酸カルシウム等を充填(混合)する。

旧ブレーキのライニング材質は、「レジンモールド系」の材質であり、上記3種の材料を混合加熱成形しており、耐熱温度はレジンで支配されるため、 250°C となっている。この場合、温度上昇が 244°C とすると、周囲温度 40°C の場合 284°C となり耐熱温度を超える。

これに対し、石綿糸を製織したものにレジン含有させた「ウーブン系」の材質がある。これは、耐熱温度は 250°C と変わらないが、材質が柔らかいため、ブレーキ作動時に生成したカーボンを磨耗消滅させて焼付き防止効果を得るという特性を有している。但し、その反面磨耗率は高くなることが考えられる。なお、このウーブン系の材質のものは十分な実績がない。

以上から、ドラム材質を球状黒鉛鋳鉄品「FCD500(JIS G 5502)」、ブレーキライニングをウーブン系の材質とした場合の成立性を確認するための試験を行い、その結果を踏まえて最終的に仕様を確定することとした。

3. 試験条件及び試験モデル

試験モデルは実機の小型モデルとし、以下の試験条件を設定して実機と等価とした。

- ① ライニング面圧及びドラム周速度が実機と同じとなるように、試験モデルのブレーキトルク、回転数を設定する。

<実機>

- ・ トルク： $1200\text{kg}\cdot\text{m}$ → ライニング面圧： 3.18kg/cm^2
- ・ ドラム回転数 735rpm → ドラム周速度： 29.3m/sec

<試験モデル>

- ・ライニング面圧：3.18kg/cm² → トルク：72.7kg・m
- ・ドラム周速度：29.3m/sec → ドラム回転数 1697rpm

② 実機と同じ制動時間（旧ブレーキでの実績：9.7 秒）になるように、試験モデルのはずみ車効果（GD²）を設定する。

$$GD^2 = 375 \cdot T \cdot t / N$$

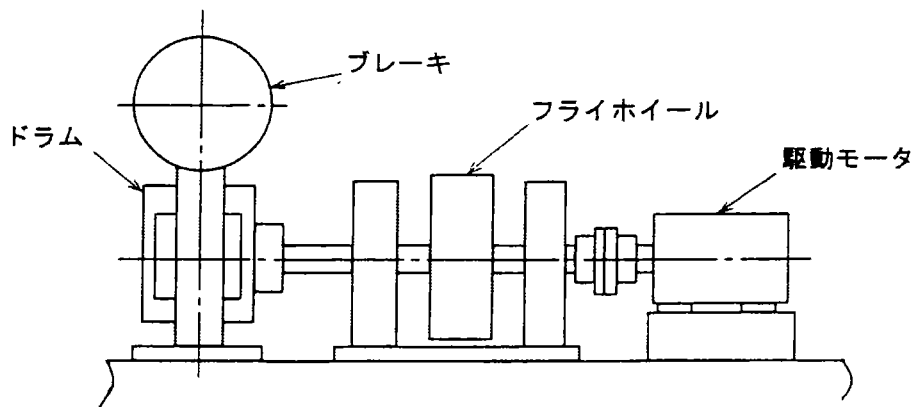
T：ブレーキトルク（=試験モデルのトルク：72.7kg・m）

t：停止時間（=9.7sec）

N：回転数（試験モデル回転数=1697rpm）

$$= 155.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

③ 試験モデルの構成は下図のとおり。



4. 試験方法

(1) 試験要領

駆動モータで所要回転数まで上昇させた後、駆動モータの電源を「切」とし、ブレーキを制動させる。

(2) ブレーキ制動試験回数

試験回数は、実機予想使用回数 300 回（点検のための使用回数を含む）に余裕を見込んで 600 回とする。

(3) 試験項目

試験時の確認項目は以下のとおりとする。

① 制動時間の計測

- ② ドラム表面のクラックの有無の確認 (PT)
- ③ ドラム磨耗量の計測
- ④ ドラム表面温度の計測 (停止直後)
- ⑤ ライニング焼付きの有無の確認 (目視)
- ⑥ ライニング磨耗量の計測
- ⑦ ブレーキ動作後のバネ長の計測

(4) 判定基準

- ① 制動時間：13.6 秒 (MK-Ⅲ設計条件)
- ② ドラム表面のクラックの有無の確認 (PT)：欠陥指示模様が無いこと
- ③ ドラム磨耗量：1.5mm 以下
- ④ ドラム表面温度 (停止直後)：クラックが発生しない限り問題ないため、参考値とする
- ⑤ ライニング焼付：表面が著しく炭化した時点を限界とする
- ⑥ ライニング磨耗量：13mm (ライニング交換の限界磨耗量) 以下
- ⑦ ブレーキ動作後のバネ長：参考値とする

5. 試験結果

添付表 1-1 に試験結果 (制動時間及びドラム表面温度) を示す。添付図 1-1 に試験時のブレーキドラム及びライニングの状態を示す。

(1) 制動時間

制動時間は、500 回 (実機予想使用回数は 300 回) まで、13.6 秒以下を満足し、問題ないことが確認できた。

(2) ブレーキドラム

試験の結果、600 回の作動において、クラック発生のないことが確認できた。また、磨耗量は判定基準の 1.5mm 以下に対し、最大 0.05mm であり十分小さいことが確認できた。ドラム表面温度は、最大で 154℃程度であった。

(3) ブレーキライニング

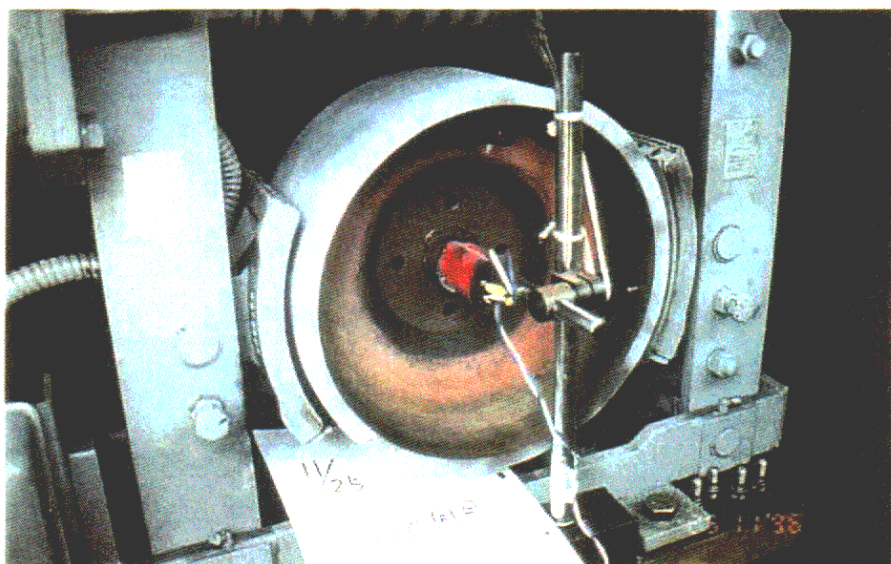
試験の結果、ライニングの内面に炭化現象が見られないことが確認できた。また、ライニング磨耗量は 5.17mm であり、ライニング交換の限界磨耗量(13mm)を十分下回っており、問題ないことが確認できた。

6. まとめ

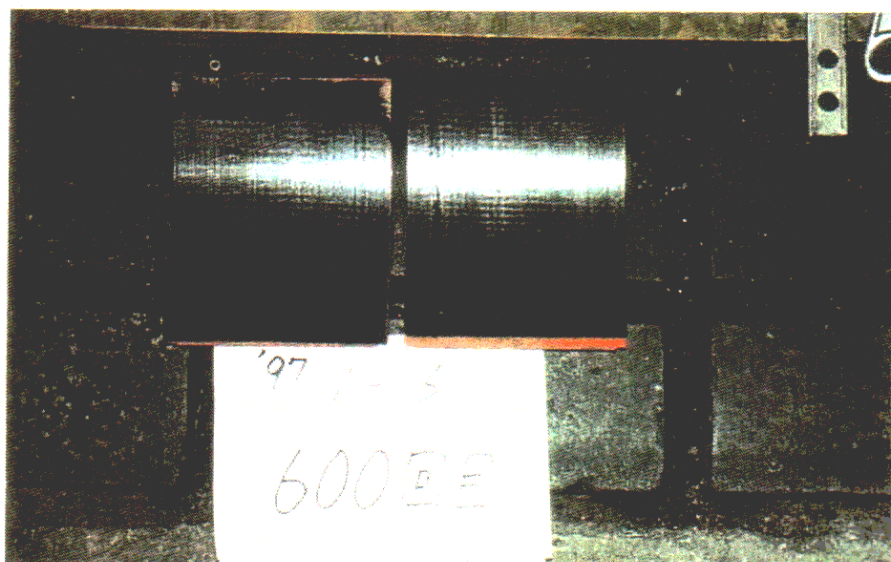
ブレーキドラム及びブレーキライニングの材質を変更した試験モデルを用いて、ブレーキ成立性確認試験を行った（試験回数 600 回）。その結果、ブレーキドラム及びブレーキライニングとも健全であり、ドラム表面温度が十分低いこと、ライニング面に焼付き現象が無く、磨耗量も小さいことから判断して、MK-Ⅲ条件に適合した主送風機ブレーキとして問題なく使用できる見通しを得た。

添付表 1 - 1 主送風機ブレーキの成立性確認試験結果（制動時間及びドラム表面温度）

制動回数	制動開始時 回転数(rpm)	ブレーキ制動後 のバネ長(mm)	制動時間 (秒)	制動後のドラム表面温度 (°C)			
				制動前	反モータ側	中央	モータ側
1	1700	174	7.3	37	106	67	105
2	1695	174	7.7	50	71	115	81
12	1651	174	8.7	33	94	76	99
20	1691	174	8.45	40	96	89	93
41	1688	174	8.5	30	70	90	53
66	1708	174	8.7	31	78	75	93
71	1696	176	7.6	27	104	68	102
101	1696	176	7.58	30	82	72	72
104	1696	186	9.55	37	114	82	77
146	1696	186	9.5	27	58	79	73
201	1696	186	9.1	28	72	93	57
252	1696	190	9.0	28	112	52	112
276	1696	193	10.65	21	68	87	26
300	1696	190	11.06	22	82	88	47
352	1696	191.5	9.7	23	101	59	106
355	1696	191.5	9.4	21	88	69	94
400	1696	192	10.13	12	94	43	119
450	1696	192	9.94	14	83	154	40
475	1696	189.5	11.3	12	51	63	54
477	1696	199.5	13.0	17	86	50	118
500	1696	202	13.16	13	54	85	67
550	1696	202	14.8	13	68	85	62
600	1696	202.5	13.6	10	70	84	21



ブレーキドラムのPT (欠陥指示模様無く良好)



ブレーキライニング内面の外観 (炭化現象無く良好)

添付図 1-1 主送風機ブレーキ成立性確認試験におけるブレーキドラム及びライニングの状態

添付資料 2

主冷却器出入口ダンパの機能確認試験

1. 試験の目的

原子炉停止中は、主冷却器内のナトリウムを凍結させないため、出入口ダンパを全閉として空気の流れを遮断すると共に、予熱ヒータにより予熱保持している。MK-Ⅲ用出入口ダンパは、主冷却器の据付床荷重を低減するため、ケーシング寸法を小さくすると共に、設置位置を変更している。このため、原子炉停止中の予熱保持において、主冷却器内ナトリウムを予熱保持する空間スペース（入口ダンパ～出口ダンパ間）が増加したため、予熱保持が可能であることを確認することが必要となった。よって、MK-Ⅲ用ダンパを模擬した試験を行い、ダンパの締切り性を確認すると共に、その他のダンパの機能について確認することとした。

2. 試験の方法

MK-Ⅲ用ダンパを模擬した供試体（試験モデル）を製作し、ダンパ羽根が全閉状態における空気漏えい量を測定する。試験モデルは、シール構造を実機と同じとした 1/2 セクター構造とする。また、主送風機定格風量に対する漏えい量、抵抗係数特性、ヒステリシス特性についても確認する。下表に試験項目を示す。

試験項目	常温（原子炉運転中の入口ダンパの条件）	高温（予熱時：200℃）
漏えい空気量特性	主送風機起動条件である差圧（締切り時圧力）5390Pa(550mmAq)時の漏えい空気量（空気温度40℃）が定格風量の2%（設計値：2.57m ³ /s）以下であることを確認する。	主冷却器予熱条件である差圧（ドラフト力）100Pa時の漏えい空気量が0.2m ³ /s以下であることを確認する。
抵抗係数特性	ダンパの抵抗係数特性を求め、文献データと比較する。	試験なし
ヒステリシス特性	ダンパ単体のヒステリシスが2%以下であることを確認する（ダンパ駆動系全体のヒステリシスの設計値は4.5%であるため、ダンパ単体のヒステリシスはドライブユニット側を差し引いて2%とした）。	試験なし

3. 試験装置

(1) 供試体ダンパ

添付図 2—1 供試体ダンパの構造図を示す。下表に実機及び供試体の主要目を示す。

主要目	単位	実機	供試体ダンパ
羽根枚数	—	4	2
羽根寸法	mm	608 × 2980	同左
ケーシング寸法	mm	3018 × 3000	1532 × 3000
圧力条件	Pa(mmAq)	5980 (610)	同左
温度条件	℃	—15 ~ 420	20、250

供試体ダンパの漏えい空気特性は、シール部の構造に依存するため、シール部構造は実機と同構造とする。添付図 2—2 に供試体ダンパの外観（写真）を示す。供試体ダンパには、羽根温度を測定するための熱電対を設置する（添付図 2—2 参照）。

(2) 試験装置

添付図 2—3 に試験装置概略構成図を示す。試験装置の空気側は、空気源の能力上、大容量空気源（13kg/s、5 気圧）と小容量空気源（1kg/s、800mmAq）の 2 台を設置する。それぞれの出口には流量測定用のオリフィス、整流板等が設置され、これらを経て、供試体ダンパが設置される。小容量空気源の出口には、250℃まで加熱可能なヒータを設置する。

4. 試験結果

(1) 漏えい空気量特性

ダンパ羽根全閉状態でダンパ羽根前後に所定の差圧を加え、漏れ空気量をオリフィスで測定した。差圧は、ダンパ回転軸中心より 800mm 上流で周方向 4 点（角ダクトの各面あたり 1 点）の平均圧を測定して求めた。なお、供試体ダンパは、実機に対して完全な縮小モデルではなく、羽根枚数を単に 1/2 にしたにすぎないため、実機漏れ空気量は単純に 2 倍しても求まらない。即ち、

- ① 軸端側隙間は実機の 1/2
- ② 軸と平行のケーシングの両側隙間は実機と同じ
- ③ 中央部隙間（ダンパ羽根同士が接する隙間）は実機の 1/3

となる。よって、漏えい空気量は、各部隙間の漏えい空気量を求めて縮尺比を乗じ、それを合計した値を用いて換算することとした。計算の結果、実機漏れ空気量は供試体の 1.619 倍

となる。よって、この値を用いて換算し、実機の漏れ空気量を求めた。

添付図 2—4 に常温時漏えい空気特性（実機換算）を示す。添付図 2—5 に高温時漏えい空気特性（実機換算）を示す。主な試験結果を下表のとおりであり、いずれも設計値を満足することが確認できた。このことから、ダンパのシール構造が有効に機能しているものと考えられる。

項目	漏えい空気量（実機換算値）	漏えい空気量（設計値）
常温時	1.7m ³ /s	2.57m ³ /s
高温時	0.19m ³ /s	0.2m ³ /s

(2) ダンパ抵抗係数

添付図 2—6 にダンパの抵抗係数特性を示す。このデータは据付後の総合機能試験などに用いるものとする。

(3) ヒステリシス特性

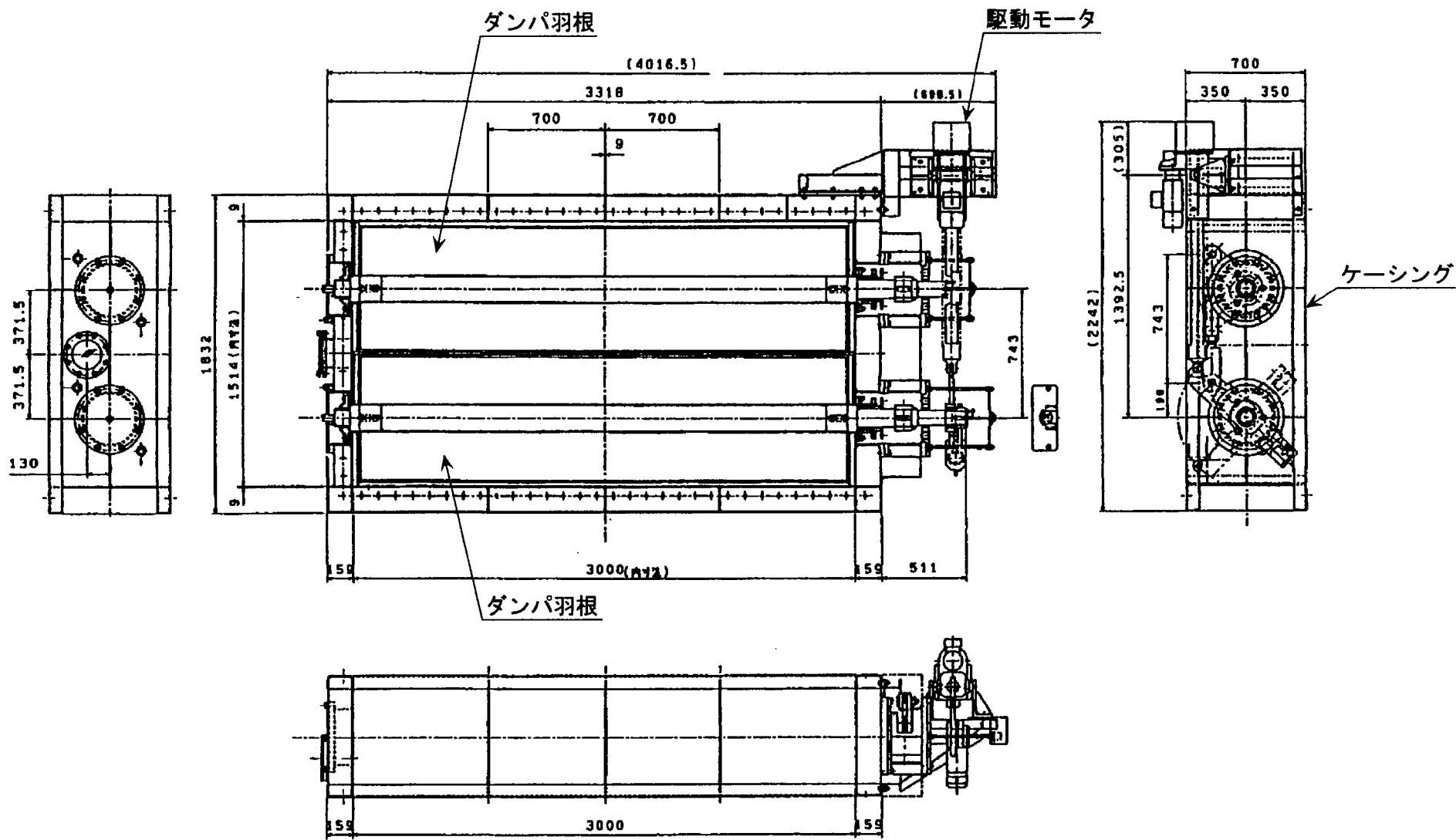
添付図 2—7 にダンパのヒステリシス特性を示す。試験の結果、ダンパ単体のヒステリシスは約 1% となり、設計目標値の 2% 以下を十分満足することを確認した。

5. 原子炉停止中の予熱保持について

本試験結果から、ダンパのシール性（漏えい空気量）を 0.2m³/s (at 100Pa) とし、これを放熱として考慮した主冷却器予熱性能計算を行った結果、30 時間以内で 200℃まで昇温できる見通しを得た。

6. まとめ

実機ダンパの 1/2 セクターモデルを製作し、試験によりダンパの機能確認を行った。その結果、漏えい空気特性、抵抗係数特性、ヒステリシス特性に関して有効なデータが得られ、設計の妥当性を確認することができた。



添付図 2-1 供試体ダンパの構造図 (1/2 セクター構造)

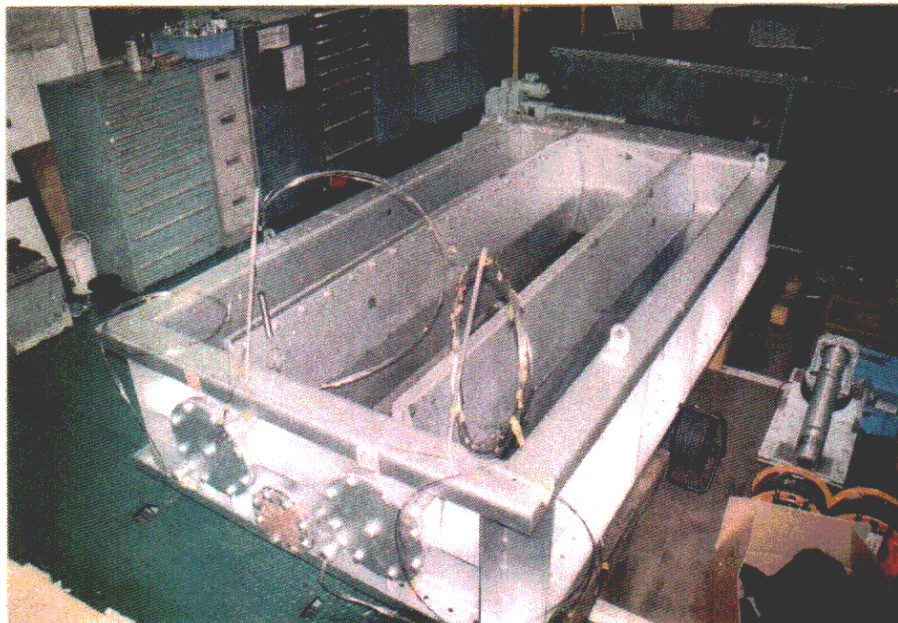


写真1 ダンパ外観

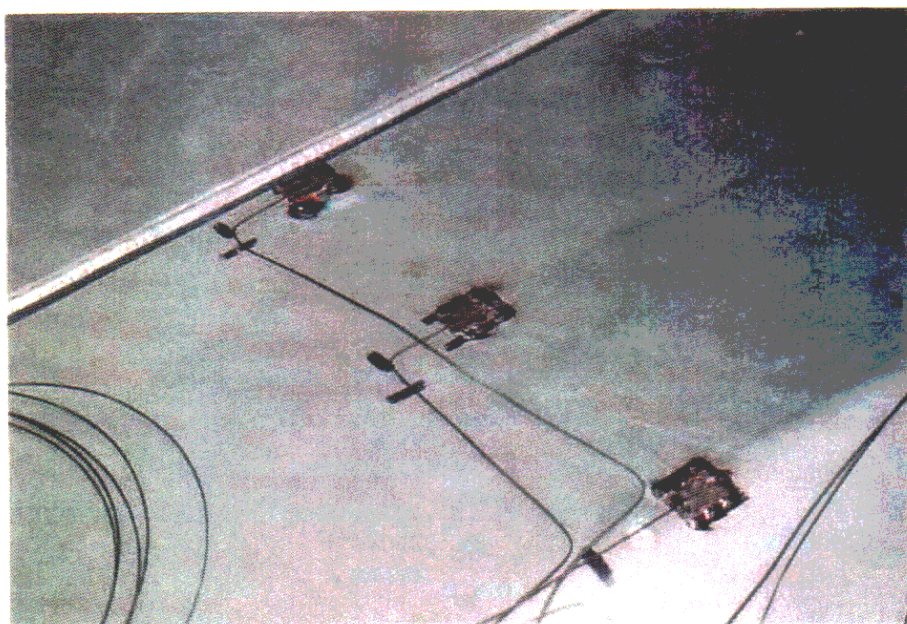
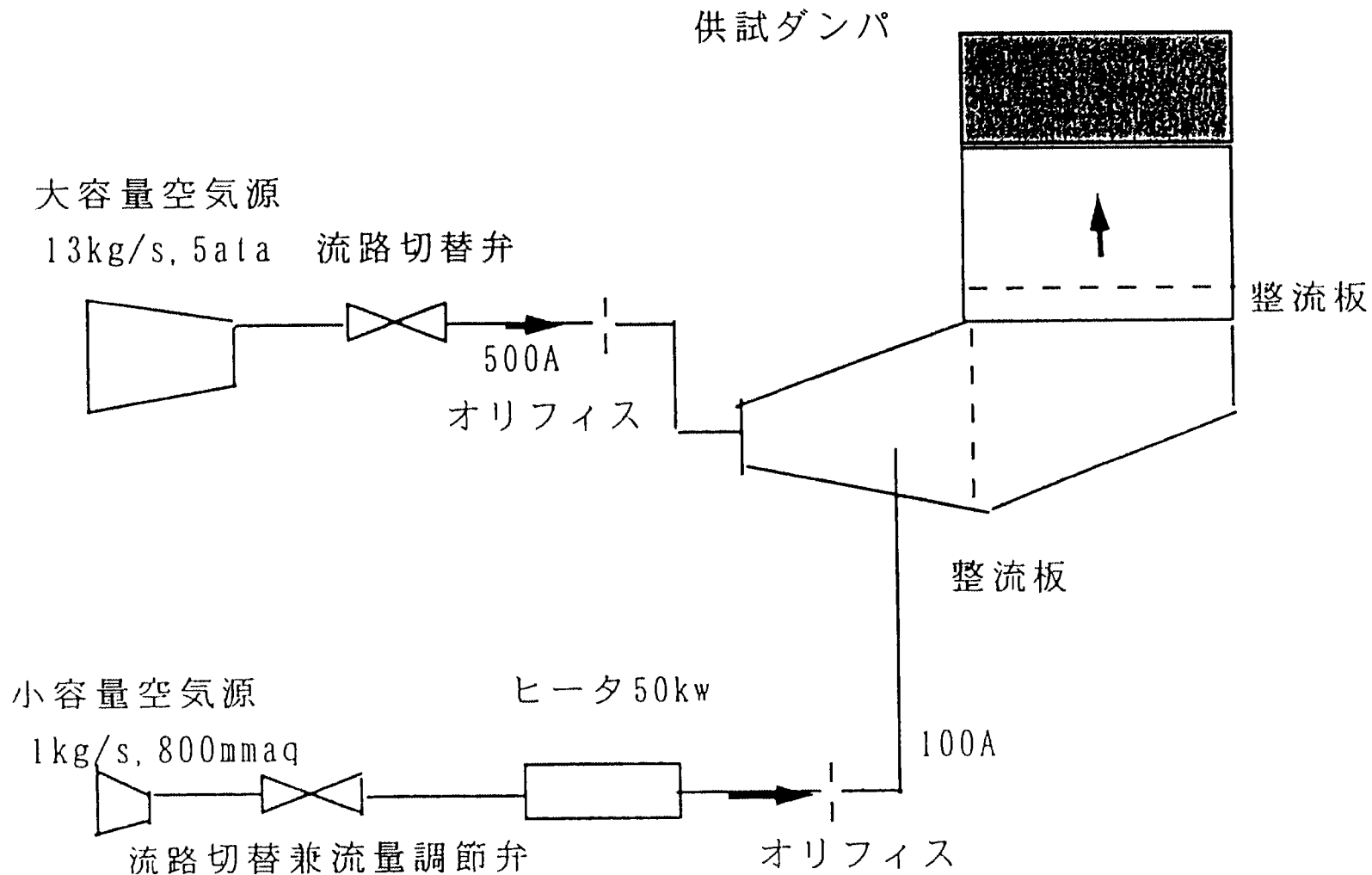
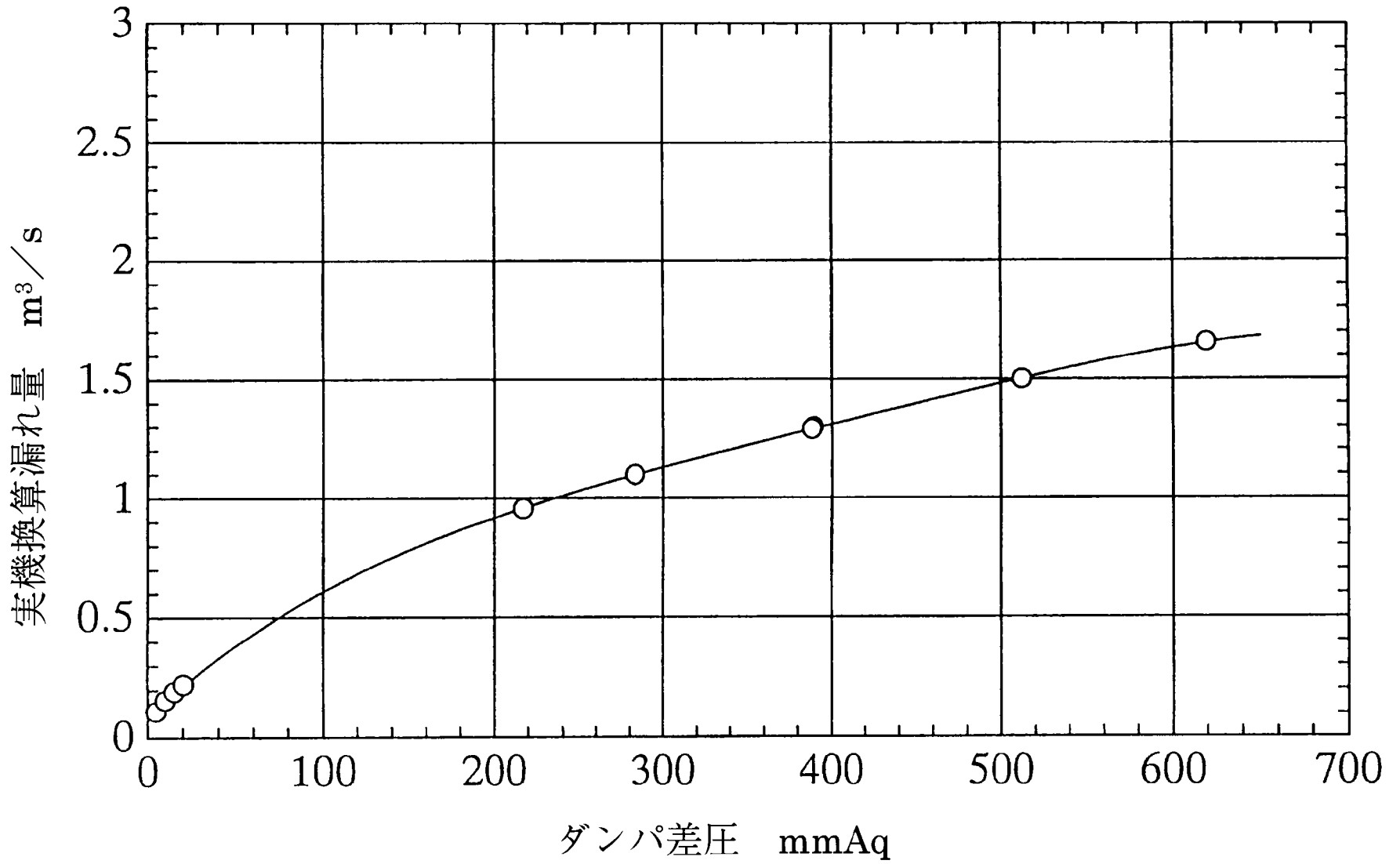


写真2 ダンパへの熱電対取り付け状況

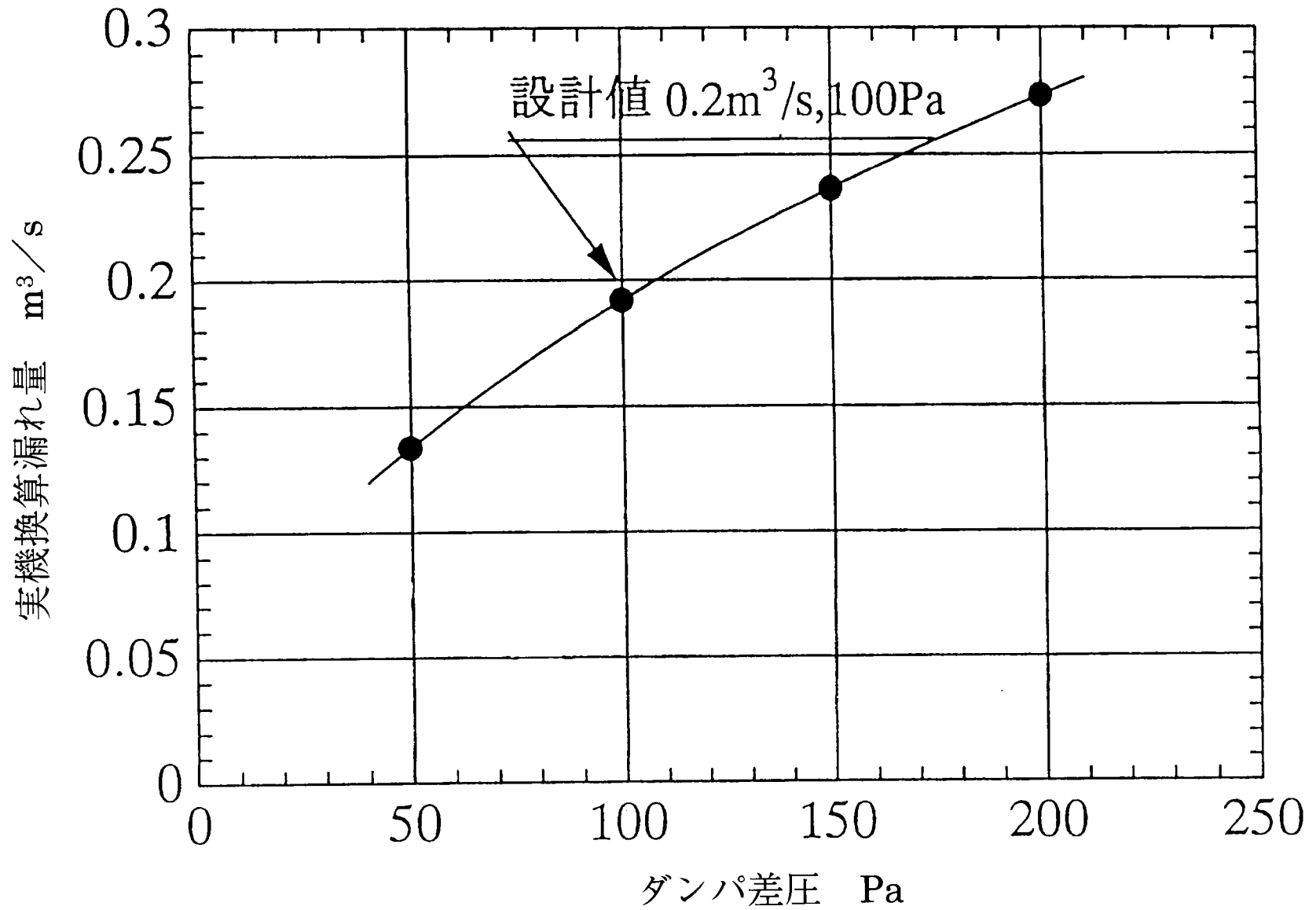
添付図2-2 供試体ダンパの外観（写真）



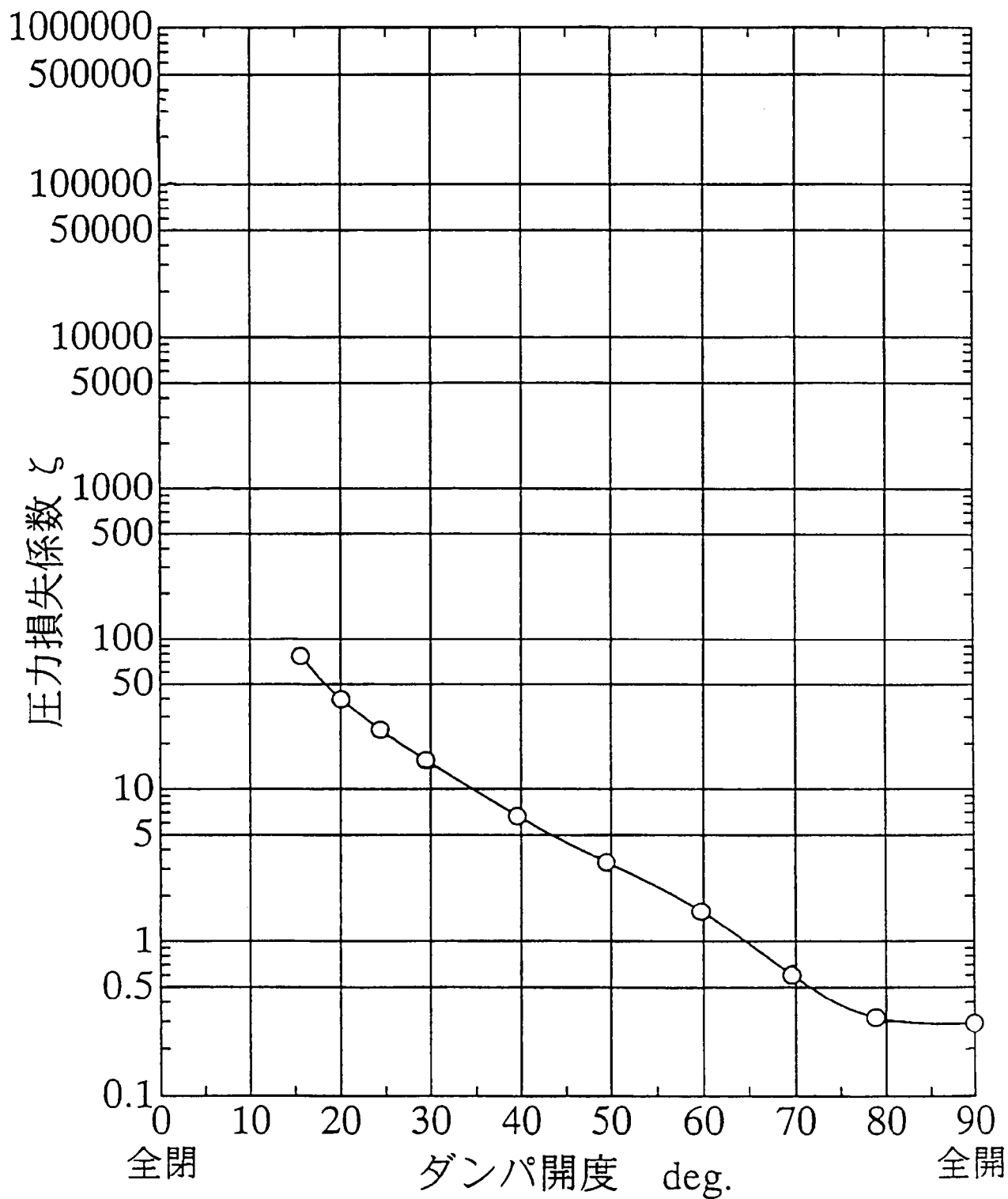
添付図 2-3 ダンパ試験装置概略構成図



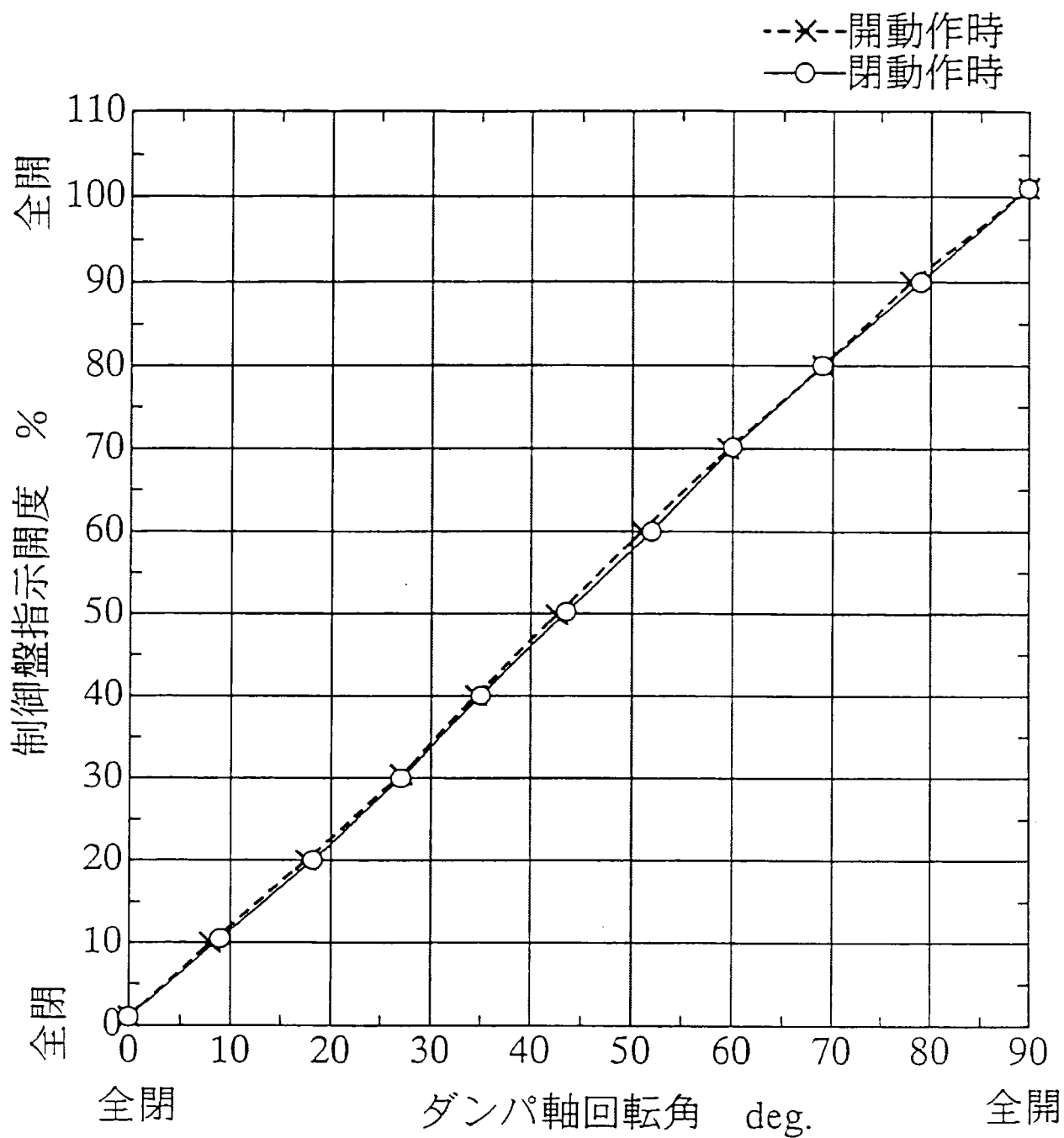
添付図 2-4 ダンパ全閉時の漏えい空気特性 (常温試験)



添付図 2-5 ダンパ全閉時の漏えい空気特性 (高温試験 (200°C))



添付図 2-6 ダンパの圧力損失係数



添付図 2-7 ダンパのヒステリシス特性