

保守データを活用した研究用原子炉（JRR-3）の 保守管理方法の検討

JRR-3 Maintenance Program Utilizing Accumulated Maintenance Data

出雲 寛互 加藤 友章 木名瀬 政美 鳥居 義也 村山 洋二

Hironobu IZUMO, Tomoaki KATO, Masami KINASE
Yoshiya TORII and Yoji MURAYAMA

東海研究開発センター

原子力科学研究所

研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator

Nuclear Science Research Institute

Tokai Research and Development Center

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

保守データを活用した研究用原子炉(JRR-3)の保守管理方法の検討

日本原子力研究開発機構東海研究開発センター

原子力科学研究所研究炉加速器管理部

出雲 寛互、加藤 友章、木名瀬 政美、鳥居 義也、村山 洋二

(2007年4月25日受理)

JRR-3は、安全上重要な設備機器に対しては、主として予防保全である時間計画保全（定期的に保守を行う方法）を中心に保守管理を行い、安全上重要でない設備機器に対しては事後保全（故障後に保守を行う方法）を行うことにより、改造後約15年にわたり安全安定にJRR-3の運転を行ってきた。しかし、最近になって事後保全で管理していた設備の経年変化に起因していると考えられるトラブルにより原子炉の計画外停止の事例が増加してきた。一方、設備の保守対応に必要な資源（人・予算）の確保が年々厳しくなってきており。

このような状況を踏まえ、JRR-3では安全性・信頼性を確保しつつ、経済性を考慮した合理的な保守管理を実施するため、過去の保守データを有効活用し、状態基準保全（機器設備の状態に基づいて保守を行う方法）への移行を考慮した、適切な予防保全を行うための保守管理方法に対する検討を行った。

本報告書では、現状の保守方法の見直しについて示すとともに、今後のJRR-3の保守管理における方針を述べる。

JRR-3 Maintenance Program Utilizing Accumulated Maintenance Data

Hironobu IZUMO, Tomoaki KATO, Masami KINASE, Yoshiya TORII and Yoji MURAYAMA

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 25, 2007)

JRR-3(Japan Research Reactor No.3) has been operated for more than 15 years after the modification, without significant troubles by carrying out maintenance such as the preventive maintenance (mainly time-based maintenance) for the safety-grade equipments and the breakdown maintenance for the non-safety-grade equipments. Unscheduled shutdowns caused by aged non-safety-grade equipments have been increasing, and the resources such as budgets have been decreasing year by year.

In this situation, JRR-3 maintenance program was reviewed about safety, reliability and economic efficiency.

This report offers the policy of the maintenance review and the future direction of maintenance programs.

Keywords : Research Reactor, JRR-3, Aging, Maintenance, Time - Based Maintenance, Condition - Based Maintenance,

目 次

1.はじめに	1
2.保全方式の分類	2
3.従前の保守管理方法	3
4.最近のトラブルについて	5
5.保守管理の見直し方針	7
5.1.安全上重要な設備機器(安重機器)	7
5.2.安全上重要でない設備機器(非安重機器)	8
6.評価例	9
6.1.安重機器	9
6.2.非安重機器	11
7.今後の保守管理方法	12
7.1.安重機器の保守管理	12
7.2.非安重機器の保守管理	12
8.おわりに	12
9.今後の展望	13
謝辞	13
参考文献	13

Contents

1. Introduction	1
2. Classification of Maintenance Programs	2
3. Present Maintenance Program	3
4. Recent Troubles of JRR-3 Equipments	5
5. Reviewing Policy of Maintenance Program	7
5.1. Safety-grade Equipments	7
5.2. Non-safety-grade Equipments	8
6. Evaluation Example	9
6.1. Safety-grade Equipments	9
6.2. Non-safety-grade Equipments	11
7. JRR-3 Maintenance Program in Future	12
7.1. Safety-grade Equipments	12
7.2. Non-safety-grade Equipments	12
8. Conclusions	12
9. Future Direction	13
Acknowledgements	13
Reference	13

1. はじめに

JRR-3は我が国の原子力技術の開発と向上を目的として昭和34年に建設が開始され、昭和38年に初臨界を向かえた。その後、特性試験等を経て昭和41年から本格的な共用運転を行ってきたが、熱中性子束などが研究の進展に伴う利用要望に対応できなくなった。このため、利用拡大及び燃料低濃縮化を目的とした大規模改造工事を昭和60年から行い、熱出力20MW、軽水減速冷却、重水反射体を用いたプール型研究用原子炉として生まれ変わり、平成2年に臨界となった。本改造においては原子炉建家及び排気筒を除いて旧炉で使用した全ての設備機器を更新した。その後15年以上経過しているが大きなトラブル等もなく、安全安定に原子炉を稼動し、放射化分析、RI製造、中性子散乱実験等の研究に貢献している。

JRR-3原子炉施設の安全安定な運転を遂行できたことは、「保安活動」のソフト面と「保全」のハード面への対応を適切に実施してきたことが大きな要因である。平成16年に実施したJRR-3施設定期評価においても、適切な保安活動及び保全が行われてきたことは評価されている。

近年、国内の原子力発電所においては老朽化が懸念されており、設備機器に対する高経年化対策が注目されるようになってきている。国外においても米国の原子力発電所では、予防保全として状態基準保全を主軸にした保守を取り入れ、いわゆる「保全の適正化」を図ったことで設備維持管理のコスト削減、設備利用率向上などを実現し成功を収めている。

JRR-3においては、改造後15年以上経過した現在、高経年化対策を念頭において保守を考慮しなければならない時期にあるとともに、年々、予算及び人材の保全資源が削減されており、現状の保守をそのまま継続していくことは非常に厳しい状況にある。また、平成17年度初期から経年故障が原因と思われるトラブルが数件頻発した時期があった。

このようなことから、さらに保全資源に対して効率的であり、かつ設備機器の安全性及び信頼性を損なうことがない保全方法を検討している。ここでは、過去の保守データを活用することにより適切な予防保全（時間計画保全、状態基準保全）を行うための保守管理方法の検討について述べる。

2. 保全方式の分類

設備機器の「保全」は大きく分けると Fig 2-1 のように、「予防保全(PM: Preventive Maintenance)」と「事後保全(BM: Break down Maintenance)」とに分けることができる。

予防保全は設備機器の機能を維持する保全であり、「時間計画保全(TBM: Time Based preventive Maintenance)」と「状態基準保全(CBM: Condition Based preventive Maintenance)」に分かれる。時間計画保全とは、設備機器の部品等に対する試験、検査、取替、改造等を事前に計画した時期に実施する保全であり、時間計画保全はさらに予定時間間隔で行う「定期保全 (PM: Periodic Maintenance)」と予定の累積動作時間等に達した段階で行う「経時保全(AM: Age based Maintenance)」とに細分化することができる。状態基準保全は設備機器の状態を連続的・間欠的または定期的に把握し、その結果に応じて保全の内容と時期を決める保全方法である。¹⁾

事後保全は故障または機能不良の設備機器の機能的能力を修復するための事前に計画されていない保守作業である。

予防保全の時間計画保全の特徴としては、運転による消耗、劣化が懸念されるものに有効である。しかし、突発的な故障に対応することが困難であり、安全性を重視するほど寿命を多く残しての部品交換など維持コストの増加に繋がるおそれがある。

一方、状態基準保全の特徴としては、機器の寿命を残さず使用できることから、維持管理コストの削減に有効である。設備機器の異常を把握するためには、多くの経験と知識、並びに機器の状態を的確に把握するための計測機器等の初期コスト及びデータの蓄積が必要である。(Table 2-1 参照)

3. 従前の保守管理方法

JRR-3 は 26 日間継続運転を 1 サイクルとして、基本的に年間 7 サイクルの原子炉運転を行っている。(Fig 3-1 参照) サイクル中は毎日 3 回の日常点検を行い設備機器の保全に努めている。また、7 サイクル運転後に約 4 ヶ月間の施設定期自主検査期間を設け、この期間に法令に基づいて定期検査を受検するとともに、独自の自主点検作業も併せて行い JRR-3 設備機器の保守を重点的に実施している。さらに、各サイクル間には 1 週間の次サイクルへ向けての準備期間があり、この期間を利用して燃料交換及び比較的簡単に行える保守点検等を実施している。

JRR-3 における設備機器の保全は、設備機器の安全上の重要性に見合った効率的な保全方法を行う観点から大きく 2 つに分けられる。1 つは安全上重要な設備機器（以下、安重機器という。）に対するものである。ここでいう安重機器は、「発電用軽水型原子炉施設の安全上機能の重要度分類に関する審査指針」²⁾における異常発生防止系(PS)及び異常影響緩和系(MS)のクラス 1、2 及び 3 の一部に相当するものである。もう 1 つは安重機器以外の全てに対する保全であり、原子炉運転に直接的に関係しない設備機器（安全上重要でない設備機器（以下、非安重機器という。））の保全である。

これらの例として、JRR-3 の安重機器には原子炉本体、1 次冷却系、工学的安全施設、2 次冷却系ポンプ等の機器があり、非安重機器としては、原子炉プール溢流系、2 次冷却系送風機、気体廃棄設備等の機器がある。Table 3-1 に JRR-3 の設備機器の一例を示す。これまで JRR-3 設備機器に対する保全方式は、Table 3-1 のように安重機器については主に予防保全の時間計画保全で、非安重機器については主に事後保全で対応していた。

例えば、安重機器の 1 次冷却系ポンプでは、時間計画保全として全分解点検または簡易分解点検を 1 年に 1 回実施し、その際、メカニカルシール、ベアリング、シートパッキン、O リング等の部品交換を実施している。さらに、シャフト PT 検査、寸法検査など必要な検査も併せて実施している。熱交換器は平成 10 年、12 年にそれぞれ No.2、No.1 熱交換器の開放分解点検を行い、渦電流探傷検査及び浸透探傷検査を実施することにより細管、胴管に異常のないことを確認している。また、非安重機器である炉室給排気設備の炉室送風機では、これまで数回の簡易保守を行っているものの、基本的には異常または故障が検知されてから保守を実施していた。

なお、JRR-3 では運転時間に対し劣化傾向が顕著に現れる特長を有している設備に対しては、状態基準保全を適用している。炉心構造物のベリリウム反射体の寸法測定、原子炉プール水浄化系の樹脂筒の樹脂交換作業等がそれにあたる。JRR-3 では、コンパクトな炉心を形成し高い中性子束を得るよう金属ベリリウム反射体を用いているが、高速中性子により反射体がスエリングを起こすため、定期的にその変形量を測定し、変形量が規定値に達する前の最適な反射体更新時期を評価している。(Fig 3-2) また、JRR-3 では、原子炉プール水を最適な条件（保安規定上は 5 μ S/cm 以下）に保つために、2 系統ある原子炉プール水浄化系のうち 1 系統を常時運転し、プ

ル水を非再生型イオン交換樹脂に通して浄化している。Fig 3-3 は原子炉プール浄化系における樹脂筒入口における電気伝導度をグラフ化し、イオン交換樹脂の劣化傾向について示したものである。樹脂の劣化スピードは $0.4\sim0.5 \mu\text{S}/\text{cm}$ から急激に早くなる傾向があるため、毎日、イオン交換樹脂の劣化状態を監視しながら樹脂交換時期を決定している。

4. 最近のトラブルについて

上で述べたように、JRR-3におけるこれまでの保全は、一部例外はあるものの、主に「時間計画保全」と「事後保全」を中心に管理していた。このような保守の下、大規模改造後 15 年以上に亘り原子炉を順調に運転してきた。しかし、最近になって主として事後保全により管理していた設備機器の経年化に起因していると思われる機械的トラブルが目立ちはじめ、原子炉安全運転に直接的に影響はないものの、運転を行っていく上での管理値等に間接的な影響を与える可能性があるという判断から原子炉計画外停止する事例が増加した。(Fig 4-1 参照) 平成 17 年度には炉室給気系送風機の異常と冷中性子源装置ヘリウム圧縮機油漏えいの 2 件があり、どちらも非安重機器によるものであった。

このうち、気体廃棄施設である炉室給気系送風機の異常について概要を述べる。Fig 4-2 に送風機の系統図、Fig 4-3 に構造図を示す。原子炉建家換気空調設備は、温度及び湿度を適切に調整した空気を原子炉建家に供給する設備であり、空気調和器と送風機で構成されている。また炉室給気系は、気体廃棄設備として排風機と連動して運転され、炉室内を負圧に保つ働きを持っている。炉室給気系は 2 台の送風機を有しており、通常は 2 台の送風機を運転している。原子炉停止中の夜間及び休日等には結露対策を目的として 1 台の送風機の運転により給気している。

R3-17-02 サイクル（平成 17 年 5 月 9 日～6 月 3 日までの予定）中の平成 17 年 5 月 10 日 15 時 50 分頃に原子炉建家換気空調設備炉室給気系送風機 I, II の内送風機 I に異音が確認されたので、当該送風機を点検調査のため停止した。ベルトの調整を行ったが、異音が改善されず、当該送風機の運転継続は困難と判断した。当該機を点検のため停止する場合は、送風機 1 台による空調管理となるため、炉室内の負圧は維持されるが放射能濃度が若干上昇する可能性があった。さらに点検の程度によっては送風機 II も停止する必要があり、炉室内の給気を完全に停止する必要も考えられることから、同日 17 時 20 分に原子炉を計画外停止した。

送風機の詳細な分解点検調査の結果、本異音の原因として以下の点が明らかとなった。

- ア) シャフトの両側に設置しているベアリング部から異音が発生していることが確認された。
- イ) シャフトとベアリングのはめ合い分が磨耗していること（磨耗量：最大約 0.1mm（シャフト、直径））及びベアリングの損傷が確認された。
- ウ) 送風機の回転部分（シャフトとファンホイール）のバランスが崩れていることが確認された。

以上の結果として、シャフトの摩耗及びファンホイールのバランスの崩れによりボールベアリングに振動が加わり、ボールベアリングに異常が生じたことが原因によるものと判断した。このシャフトの摩耗は、ボールベアリング交換の際に生じる微小な寸法変化が、その後の運転に伴い拡大し生じたものと推察される。また、ファンホイールのバランスの崩れは、バランスクリップ

の脱落により生じたものであった。

なお、本設備に対する保全方式は非安重機器であるため、事後保全であったが、日常点検として異音の有無を確認していた。これまで2回点検中に異音が確認されており、その異音が認められてから原子炉停止期間中にペアリング交換等を行っていた。また、本設備については約1年に1回振動測定を実施していたが、振動データが判定基準範囲内にあれば問題なしとして、時系列評価などの長期的視点から過去の保守データの有効利用は行っていなかった。

結局、このトラブルにより原子炉を計画外停止した後、部品交換等の保守活動を実施し、約3週間と長期に亘って原子炉を停止した。本件において長期停止を必要とした理由は、事後保全での対応のため、予防保全に比して大規模な交換・調整を行う必要が生じてしまったことが挙げられる。また、規制当局への対応活動の量、内容共に安重機器がトラブルを起こした場合とそれほど変わらない。結果、原子炉は長期にわたり停止を余儀なくされ、結局、設備利用率も減少してしまう。

今後、高経年化が進んでいく研究炉において、現状の設備利用率を維持していくには、設備機器のトラブルを未然に防ぐ保全を行っていくことが何より必要となってきている。しかしながら、保全活動への資源の確保が年々厳しくなってきており、現状の保全を単にそのまま継続実施したのでは、設備利用率及び設備維持管理コストの観点から今後相当のリスクを負うことになるため、JRR-3における現状の保守管理方法を見直す必要がある。

5. 保守管理の見直し方針

設備機器の種類にもよるが、改造後 15 年間に基本的には毎年 1 回の定期自主検査及びそれ以外の簡易保守を適時実施してきた。これらの保守時に取得したデータは、前検査との単純比較のような短いスパンで活用されていたものの、長期的な視野を持って活用してはいなかつたのが現実である。JRR-3 では安重機器と非安重機器に分けて見直しを行ったが、どちらの見直しにおいても、JRR-3 の財産と言うべき、過去に蓄積してきた保守データを長期的な視点から見ることにより、今後の保守管理に有効活用することとした。このように長期的にデータを見ることにより、経時的な変化を観察することができると同時に、トラブルが発生しそうな（故障発生のリスクが高い）設備機器が明らかになる可能性がある。

5.1. 安全上重要な設備機器（安重機器）

安重機器に対しては主として時間計画保全により対応してきた。現状の保守及び交換期間は、主に設置当初にメーカーの推奨保全時期を基に設定されており、資源（予算・人）の有効利用を図るという観点から定められたものではないものが殆どであろう。Table 3-1 に主要な安重機器の現状における保守内容等を示す。比較的大きな設備機器で予備機がなく、かつ設備停止に伴い直ちに原子炉停止に至る可能性のある大型のポンプや弁等については、短期間の分解点検等を実施し設備機器の維持管理を行ってきた。また、安重機器にかかる定期的な保守作業、例えば熱交換器の性能を維持するための洗浄作業においても時間計画保全を行い、JRR-3 設備機器の状態を維持してきた。

しかし、設備機器の状態は、その設置環境、累積稼動時間のパラメータにより、たとえ同じ設備機器であっても異なるのが常である。JRR-3 原子炉施設においては、徹底した施設の空調管理、水質管理等を連続して行っている上に、年間約 4 ヶ月間は施設定期自主検査期間中のため年間の稼動時間も 200 日程度である。このようなことから、メーカーの推奨保全時期を設定している安重機器について、今一度、適正化〔過剰な保全の可能性がないか〕という観点から、以下のような方針の下、保全時期、頻度等について見直すこととした。

- (1) これまでと同等の安全性、信頼性を確保すること。
- (2) 過去の保守データを活用する。
- (3) 過去の保守データから保全推奨時期が判断可能なものについては、時間計画保全の最適化（保全間隔の延長、短縮）を行う。
- (4) 時間計画保全から状態監視保全の移行の可能性を検討する。
- (5) 過去の保守データから保全推奨時期の判断が困難で、かつ状態基準保全の移行の可能性のない保守については、現状の時間計画保全を継続する。

5.2. 安全上重要でない設備機器（非安重機器）

主として事後保全で管理してきた非安重機器は現状のままの保全を実施すると仮定すると、部品レベルでの高経年化が進み機器全体の異常徵候を把握することができないので、今後トラブルが増加していくものと予想される。また、その多重トラブル等が発生すれば、設備機器の故障後の分解点検、設備更新などには膨大な資源が必要となることは明らかであり、故障した設備機器によっては原子炉設備利用率がかなり減少する可能性がある。このようなことに対応していくために、予防保全化〔状態基準保全を取り入れる〕という観点で、以下のよき方針の下、非安重機器の保守の方法を見直すこととした。

- (1) これまでと同等の安全性、信頼性を確保すること。
- (2) 過去の保守データを活用する。
- (3) 状態基準保全の移行を検討する上では、本保守を実行するに重要である性能監視指標を設定する。
- (4) 性能監視指標の設定においては、過去の保守データを活用する。

ここで、性能監視指標(PI: Performance Observed Indicator)とは、状態監視項目(Performance Observed Information: 何を監視するのか)及び状態監視基準(Performance Observed Criteria: どういう観点で監視するのか)とから成り、状態基準保全の実施においては、これらの設定が必要不可欠である。

JRR-3において、状態監視項目の設定には、Fig 5-1のようなフォルトツリーを活用する。設備機器の構造機能、性能機能上に要求されているものは何かということから、それに対してどのような故障事象があるのかを検討し、構造上及び性能上において監視すべき項目を特定する。また、状態監視基準については、蓄積している過去の保守データを活用してこれを設定するものとする。

6. 評価例

安重機器と非安重機器に対し、日常点検、自主点検、定期自主検査、定期検査などにおいて現状蓄積している過去のデータの中から、時間計画保全または状態基準保全に有効な情報と思われる運転性能データ（主に設備機器の総合的な能力が分かるものであり、温度、揚程、電気伝導度、熱還流率などがこれにあたる。）及び状態性能データ（主に部品レベルでの状態が推測可能なものであり、振動、寸法、絶縁抵抗などがこれにあたる。）を抽出し設備機器毎に長期的な視点を持ってグラフ化した。グラフ化においては、過去に保守を行った時期をグラフ上にマークし、データの値と保守タイミングが分かるようにプロットした。

プロットしたデータから、運転性能または状態性能の低下が明確に判断できるものについては、性能低下率を読み取り、その情報を基に時間計画保全時期の延長の可能性を検討し、さらに設備機器の状態監視すべき周期（以下、状態監視時期という。）の設定材料としても活用した。また、トラブル経験の有無は、時間計画保全の延長または短縮の重要な判定材料とした。

6.1. 安重機器

安重機器に関する時間計画保全の見直しにおける時間計画保全の最適化の一例として「2次冷却材ポンプの分解点検」を挙げる。

JRR-3 の 2 次冷却材ポンプは、メーカーの推奨保守間隔を参考にして 1 年に 1 回定期に分解点検を行っている。この分解点検時には、主に部品の損傷状態及び腐食状態の確認、センタリングの確認、ケーシングーインペラ間のギャップ確認、浸透探傷試験等を行い、ポンプの状態性能の健全性を確認している。

これらの確認測定のデータを整理し、本ポンプの分解点検間隔の妥当性を評価した。各評価項目及び結果概要は以下に示すとおりである。

- ① トラブル経験： 本ポンプのトラブル経験は無い。
- ② 部品状態： 部品(ケーシング、シャフトスリーブ、カップリングキー、ベアリングブランケット、インペラーナット等)の損傷状態については、シャフトのキー溝付近に数点の傷が平成 12 年度以降同様の場所に確認されているが、傷長さ、個数に大きな変化は認められていないので進展のスピードは遅い。また、部品の腐食状態は確認されていないことから、1 年間の保守間隔は十分と考えられる。
- ③ 寸法測定： 分解点検前後におけるカップリング部センタリング測定を実施している。その結果を Fig 6-1 に示す。カップリング偏芯度（周）、偏角度（面）のメーカー推奨値は 0.05mm であるが、1 年間でその約 3 倍の偏芯が認められている。面間距離については、1 年間の運転後もメーカーの推奨値内にあり問題はない。
- ④ その他の検査： 浸透探傷検査の結果は良好であり、1 年間の保守間隔は妥当と考えられる。

以上①～④の結果から、時間計画保全の保守間隔に関して評価を行った。

③のカップリング部センタリング測定の偏芯度（周）、偏角度（面）において、メーカーの推奨値（0.05mm）を超える最大変形量を1年で認めている。特に平成13年から平成14年にかけては顕著である。しかしながら、平成14年定期自主検査前における2次冷却材ポンプ運転中の日常点検で異音、振動は確認されていないこと及び①②④の結果から、現状における本ポンプの分解点検保守間隔である1年は妥当であり、保守間隔の延長の可能性はない」と判断した。

次に、安重機器に関する時間計画保全の見直しにおける状態基準保全への移行の一例として、「熱交換器洗浄作業」を挙げる。

JRR・3の熱交換器は胴側を1次冷却水、細管側を2次冷却水が流れている。2次冷却水の流れる細管側にスケール等が付着し除熱性能が低下する。このため分解点検と洗浄保守の2つの保守を実施し、除熱機能の回復を行っている。熱交換器の分解点検は過去に1度実施している。洗浄保守は熱貫流率を一定以上に保つための作業であり、スポンジボールを細管に流し、スケール等の付着物を剥離する方法である。これは1年に3回（2～3サイクルに1回）時間計画保全の一環として実施してきた。Fig 6-2に熱交換器洗浄作業と熱貫流率との関係を示す。平成15年度から平成16年度サイクル中の保守の中で、JRR・3では熱貫流率が良いにも係らず、洗浄作業を実施したことが明らかで、洗浄作業を行っても熱貫流率の上昇が確認できていない。

のことから、今まで行っていた保守は過剰保全の可能性が高いものと評価した。また、時間計画保全で実施していた本保守を、状態基準保全へ移行する、つまり熱貫流率の状態を一定間隔（運転サイクル）で監視し、熱貫流率がある一定レベルの状態監視基準（約1900W/m²・K）まで低下した段階で本保守の実行を計画するのが最も効果的な方法であると評価した。

6.2. 非安重機器

非安重機器に対する事後保全の見直しの例として、最近のトラブル事例において説明した平成 17 年に軸受け部の振動増大トラブルを起こした炉室送風機（回転機器）を挙げる。本機器は、定期的な保守（分解点検等）を定めて行っている機器ではないが、自動的に軸受部振動データを年 1 回収集していた。これを時系列で整理すると Fig 6-3 のようになるが、平成 14 年までは安定した振動を示していることがわかる。しかし、平成 14 以降、振動は前年にに対して増大し、トラブルが起る約 1 年半前の平成 16 年には、異音発生に伴いベアリング交換をしているものの、平成 13 年以前の安定した振動（約 $50 \mu\text{m}$ ）には戻っていない。仮に平成 14 年以降、年々増大する振動をベアリング損耗のみの原因ではなく、他の予兆を示唆するものと考え、平成 16 年のベアリング交換時にシャフト等の部品レベルの寸法測定等を実施していれば、軸受け部のトラブル予兆を発見できた可能性があった。

このことから、本機器については、状態監視項目として、ベアリング及びシャフトの異常徵候を早期に、しかも経済的に知り得る手段として聴音診断及び振動測定を行う。また、その間隔は今まで年 1 回の振動測定を実施していたことから、半年に 1 回行うこととした。また、分解点検を実施した場合はシャフトの寸法測定を行うこととした。また、状態監視基準として、グラフを参考に振動 $60 \mu\text{m}$ までを安定領域とし、この値を超えた場合には監視強化を行うこととした。

このような事例があることから、他の設備機器についても有効な状態管理基準を明確にできる可能性があり、年間稼動率が高く原子炉の運転に必要な設備機器について、現在までに蓄積したデータの種類（振動、寸法等）及び収集周期を整理し、データの解析を行う。

7. 今後の保守管理方法

7.1. 安重機器の保守管理

安重機器の分解点検及び部品交換時期においては、過剰保全の可能性があるため、分解点検等の時間計画保全の最適化を継続して進めていく。また、原子炉停止時の保守エリアにおける被ばく線量が低いことなど設備機器にアクセスし易い研究炉の特徴を活かして状態基準保全の適用が可能か今後も検討を行っていく。時間計画保全の最適化を行うためには、データ取得が最も重要であり、定期自主検査等のオーバーホール期間を利用して、積極的に手入れ前後（分解前後）の寸法測定、振動測定等データを取得するよう努めていく。このデータ取得により、その後の部品さらには設備機器全体の劣化進行度等が明らかになり、安重機器の保守間隔の適正化が可能であると考える。劣化進行度を一定時間間隔で確認することにより、部品レベルで健全性を把握することが可能になり、安重機器に対する保守の効率化、客観性が高まることが期待できる。

7.2. 非安重機器の保守管理

非安重機器の保守管理においては、状態基準保全への移行を積極的に行うこととする。

現状、非安重機器は事後保全であるため、現状保守以外にも必要な保守が存在する可能性がある。したがって、まずは Fig 5-1 に示すようなフォルトツリーを作成することにより、設備機器の構造性能上要求されている状態監視項目を挙げ、現状の保守項目と比較することにより、不足している項目を考察する。このようにして得た保守項目において状態基準保全が適用可能か検討し、過去の保守データが存在する場合は、それを活用して状態監視基準を設定する。

状態基準保全の移行においては、資源の初期投資が嵩むおそれがあるため、それを抑えるとともに、安全性、信頼性を損なうことのない有効的な保守を検討することとする。

また、安重機器同様、保守時においては分解前のデータ取得を積極的に実施する。

8. おわりに

JRR-3 は改造後 15 年を経過して 50000MWD の運転を達成したが、設備機器の経年化に対する配慮を行わなければならない時期に来ている。今後、「保全」という分野が原子炉の安全管理上、重要な分野になっていくと思われるが、今まで以上に保守管理資源の確保は厳しい状況になるものと予想される。したがって、この時期に安重機器、非安重機器の現状保全の見直しを行うことは非常に重要であり、意義のあるものである。

本報告のように蓄積してきた保守管理データを適切に活用することにより、今後の保守管理資源の効率的・有効的な利用が期待できると考える。さらには、過剰な保守管理活動の削減にも有用であり、保守管理活動の客観性及び説明性の向上も図れるものと考えている。

9. 今後の展望

米国では、リスク情報を活用して故障、損傷リスクの高い設備、部分に重点をおいて保全を行うリスクベースメンテナンスが確立²⁾されつつあり、最近になり国内においても設備機器の保全方法を重要度の観点から合理的に選定する手法として、「重点指向型保全」が注目³⁾されている。今までJRR-3にて蓄積してきた保守データや経験を活用し、さらに今回保全方法の最適化を行うことで、更なる多くのデータが蓄積され、各設備機器に対してどのようなトラブルが起こり得るかというリスク情報を定量的に推測することが可能になると思われる。JRR-3においても近い将来、重点指向型保全の取入れを行うことで、現状の安全性信頼性を確保しつつ、更なる資源の有効利用が期待できると考えているところである。

謝辞

本報告書作成にあたり、JRR-3管理課内外の方々から、様々なご協力をいただきました。桜井文雄原子力科学研究所副所長（前、研究炉加速器管理部部長）、山下清信研究炉加速器管理部長には、保全という今後重要であろう分野へのアプローチ方法について貴重なアドバイスをいただきました。また、その他の多くの方々からも多大なご支援をいただきました。ここに皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 大橋秀雄、他，“新版 ポンプ その設備計画・運転・保守”，日本機会学会編
- 2) 原子力安全委員会決定“発電用軽水炉原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針”，平成2年8月30日
- 3) 平野光将，“軽水炉の確率論的安全評価(PSA)入門”，日本原子力学会誌 Vol.48,No.3(2006)
- 4) 乙葉啓一，“原子力発電所の保守・点検”，日本原子力学会誌 Vol.44,No.4(2002)

Table 2-1 保全の特徴

保全方式	予防保全		事後保全
	時間計画保全	状態基準保全	
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・一定の期間に消耗劣化する設備機器に有効。 ・分解点検等の保守計画を立案することが容易。 	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的短い期間について機器の現状を把握可能。 ・機器寿命を最大限に活かすことが可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・分解点検等の必要がなく、短期間内での設備投資が小。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・機器寿命を最大限に活かすことが不可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・監視機器を必要とする場合は、初期投資が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・設備が機能不全になるため、再設置の費用が膨大。

Table 3-1 JRR-3 の設備機器に関する保全方法と重要度分類（一例）

設備機器		代表材料等	過去の保守時期と保守概要	主な保全方法	重要度分類 PS:異常の発生防止系 MS:異常の影響緩和系
炉心構造物	重水タンク	A5052	水質管理（連続）、外観検査（毎年）、サーベランス試験（H6, H10）	時間計画保全	PS-1
	ベリリウム反射体	金属ベリリウム	水質管理（連続）、外観検査（毎年）、寸法測定（毎年）、交換（H14）	状態基準保全	PS-1
1次冷却系設備	主ポンプ	SCS13	水質管理（連続）、全分解（1回/3年）、簡易分解点検（毎年）、寸法検査（毎年）、外観検査（毎年）	時間計画保全	PS-2
	熱交換器	SUS304	水質管理（連続）、熱交洗净（3回/年）、外観検査、漏洩検査（毎年）、開放点検（ET, PT 検査：H10, 11）	時間計画保全	PS-2
2次冷却系設備	ポンプ	FC25	水質管理（連続）、外観検査、分解点検（毎年）、作動検査（適時）	時間計画保全	PS-3
	送風機	FC25	外観検査、作動検査（毎年）、分解点検（適時）	事後保全	—
重水冷却系設備	重水ポンプ	SCS13	分解点検（H7, H15）、作動検査（毎年）、外観検査（毎年）	時間計画保全	PS-2
	重水熱交換器	SUS304	水質管理（連続）、洗净（3回/年）、漏洩検査（適時）、開放点検（ET, PT 検査：H13）、外観検査（毎年）	時間計画保全	PS-2
原子炉ブル溢流系	溢流タンク	SUS304	水質管理（連続）、外観検査（毎年）、漏洩検査（適時）	事後保全	PS-3

設備機器		代表材料等	過去の保守時期と保守概要	主な保全方法	重要度分類 PS:異常の発生防止系 MS:異常の影響緩和系
原子炉プール溢流系	溢流ポンプ	SCS13	分解点検 (H3, H10, H15) 水質管理、外観検査、作動検査（毎年）	時間計画保全	PS-3
原子炉プール水浄化系	イオン交換樹脂塔	樹脂、SUS304	水質管理、樹脂交換（適時）、外観検査（毎年）	事後保全、状態基準保全	PS-3
工学的安全施設	サイフォンブレーキ弁	SCS13A	水質管理（連続）、外観検査、作動検査（毎年）、分解点検（H9, H12）	時間計画保全	MS-1
崩壊熱除去設備	自然循環弁	SCS14	水質管理、外観検査、作動検査（毎年）	事後保全	MS-3
計測制御系統施設	中性子計装設備	比例計数管、補償型電離箱	空調管理、校正（毎年）、交換（H8、H15）	時間計画保全	MS-1, PS-3
制御設備	中性子吸收体	ハフニウム	水質管理（連続）、外観検査（毎年）、交換（H9）	時間計画保全	PS-1, MS-1
	制御棒駆動機構	SUS304	空調管理（連続）、外観検査、作動検査（毎年）、分解点検（R1：毎年、その他：1回/5年）、交換（適時）	時間計画保全	PS-1, MS-1
電気設備	非常用発電機	一軸式ガスタービン	空調管理（連続）、外観検査、作動検査、絶縁測定（毎年）、部品交換（H7, H15）	時間計画保全	MS-1
	無停電電源設備	アルカリ電池	空調管理（連続）、外観検査、作動検査、絶縁測定（毎年）、容量確認、部品交換（H9, H15）	時間計画保全	MS-1
気体廃棄設備	炉室系給気	SPCC	外観、作動検査、振動、温度測定（適時）、ベアリング交換（適時）	事後保全	—
圧空設備	共用系	SPCC	外観、作動検査、振動、温度測定（適時）	事後保全	—

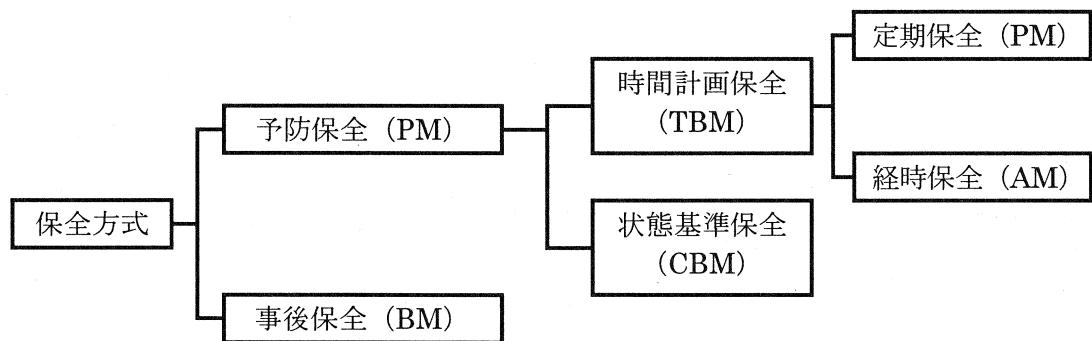


Fig 2-1 保全方式の分類

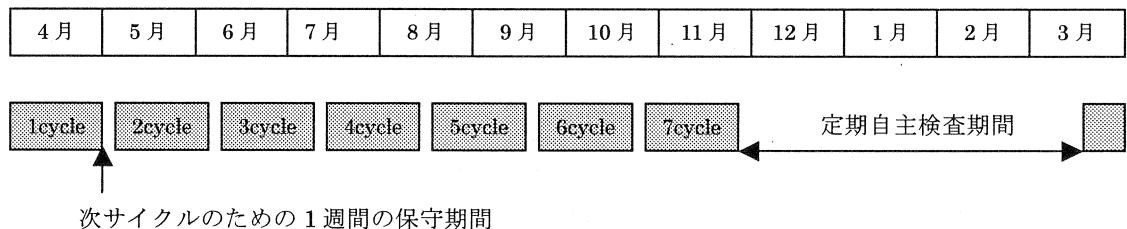


Fig 3-1 JRR-3における年間運転パターンのイメージ

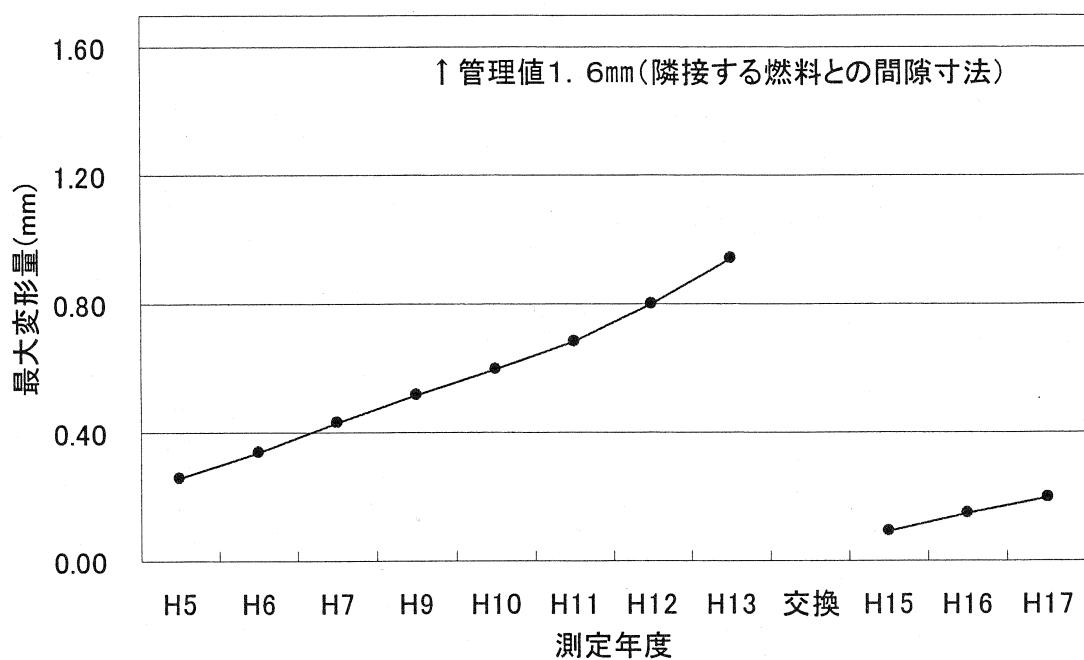


Fig 3-2 ベリリウム反射体変形量測定結果

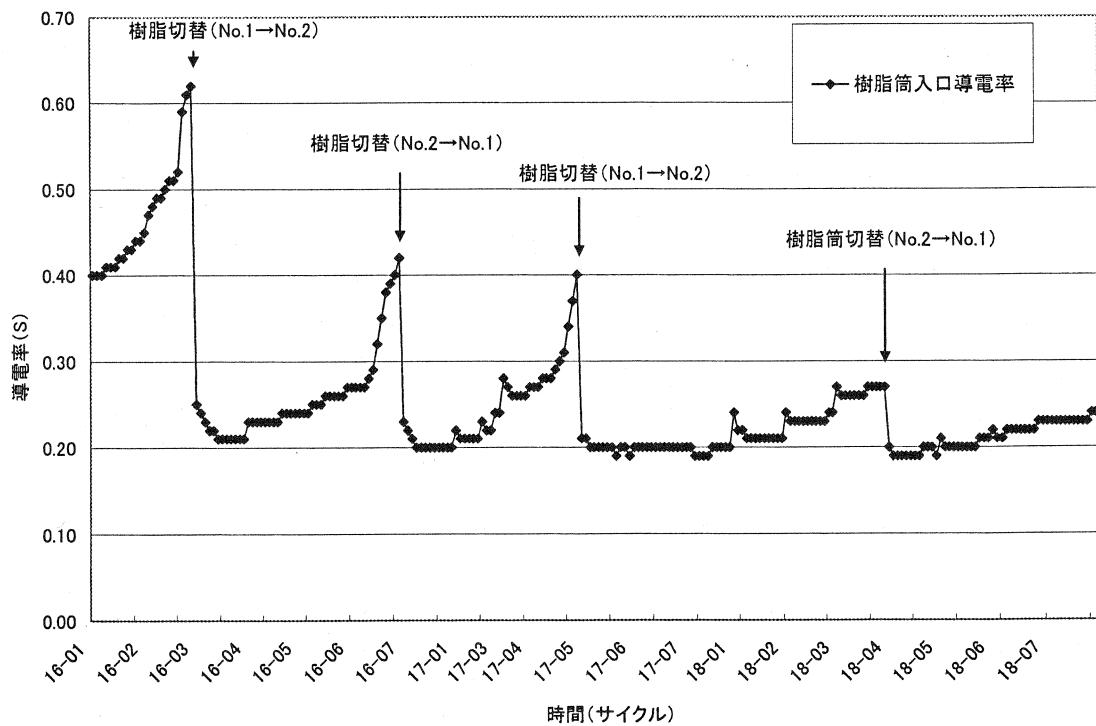


Fig 3-3 JRR-3 原子炉プール浄化系樹脂の伝導率変化（劣化傾向）

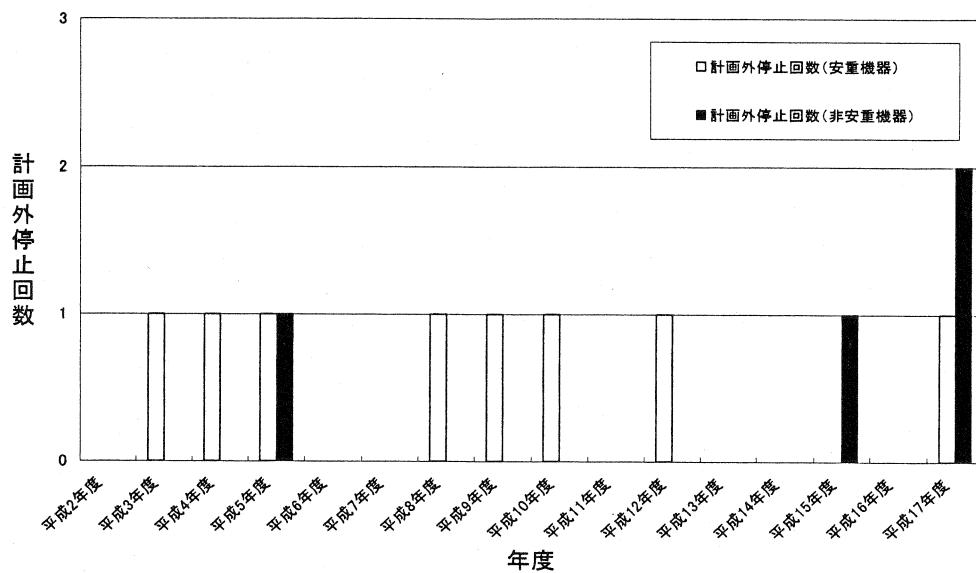


Fig 4-1 JRR-3 における最近の計画外停止回数

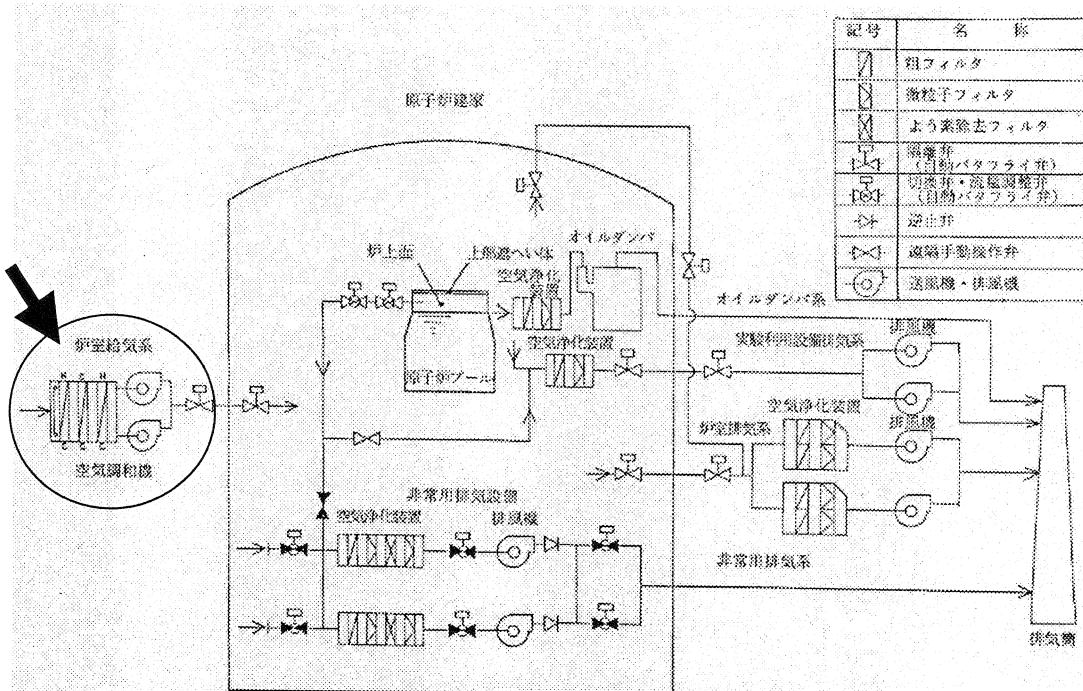


Fig 4-2 炉室給気系送風機の系統図

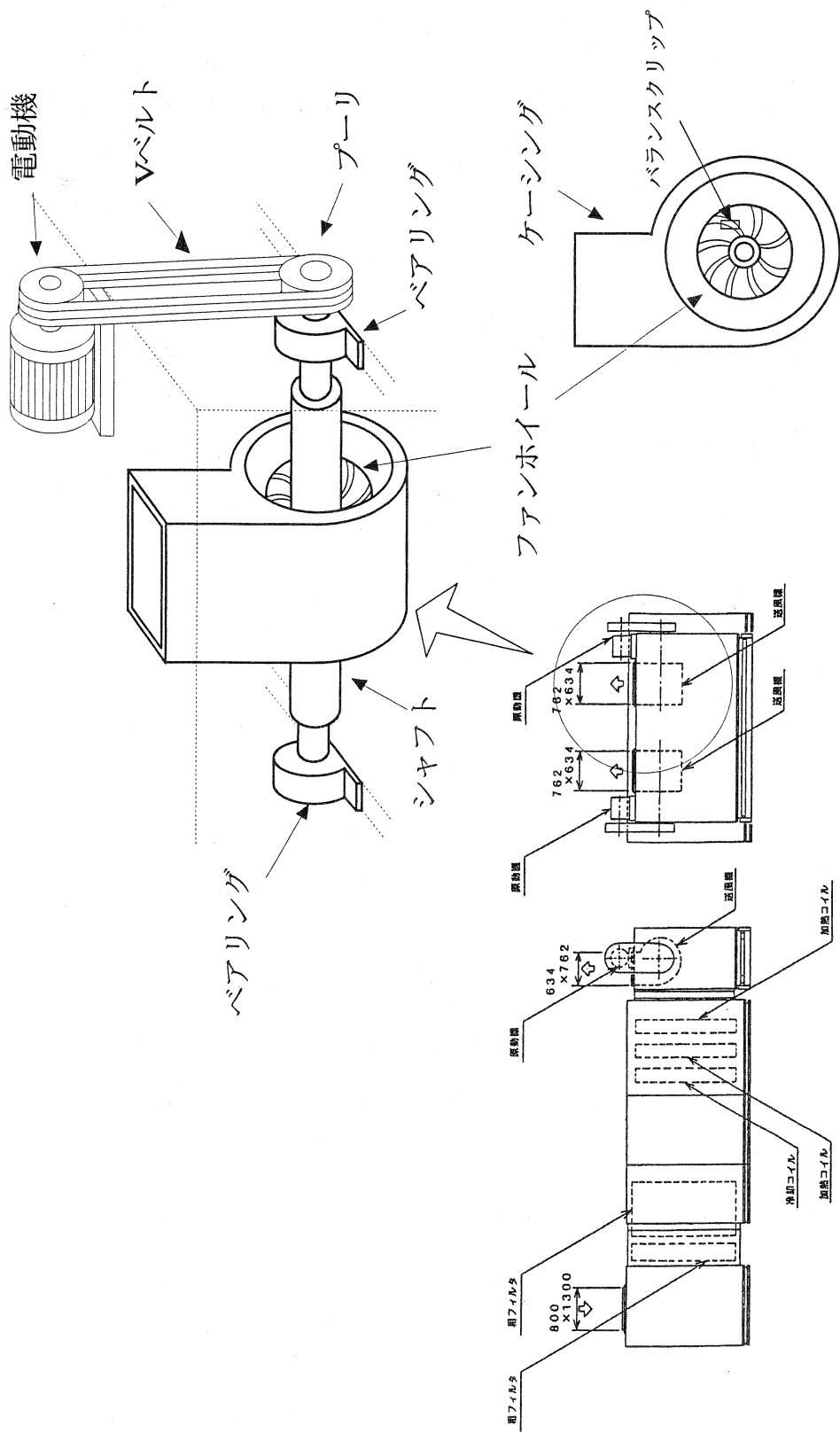


Fig 4-3 炉室給気系送風機の構造図

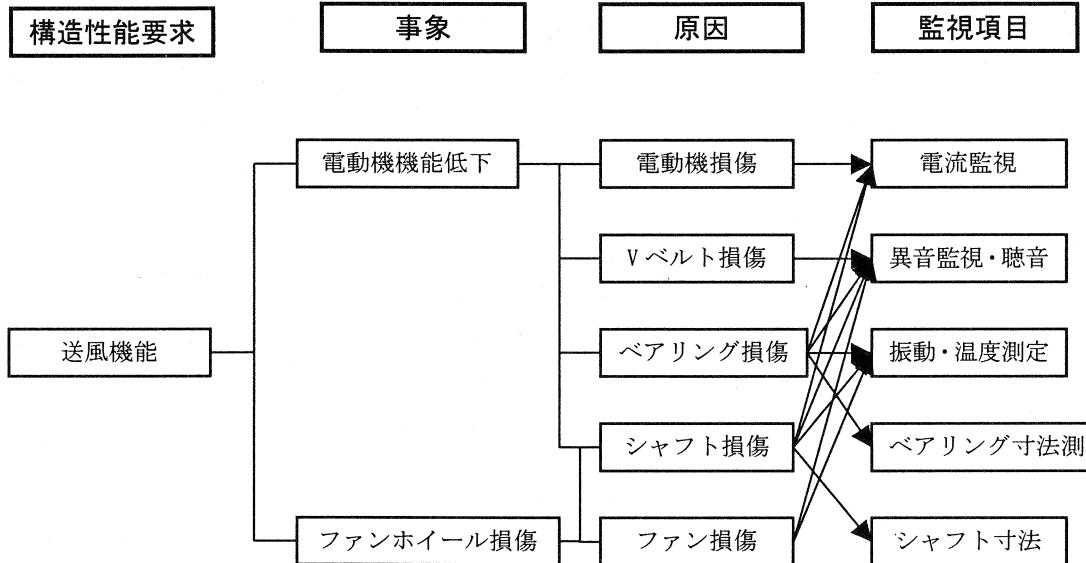


Fig 5-1 フォルトツリーの例（送風機）

Fig 5-1 の説明

炉室送風機の構造性能上の要求事項としては、送風機能が健全である必要がある。この送風機能の機能低下の原因としては、電動機の機能低下とファンホイール損傷の2つの事象が考えられる。電動機機能低下事象については、電動機の損傷、Vベルト損傷、ベアリング損傷、シャフト損傷が原因として挙げられる。また、ファンホイール損傷事象の原因としては、シャフト損傷、ファン損傷が挙げられる。

これらの損傷を未然に防止又は早期に検知するには、電流監視、異音監視、聴音による診断、振動測定、温度測定、ベアリング寸法測定、シャフト寸法測定を行うことが有効である。この測定、監視事項を監視項目と位置づけている。

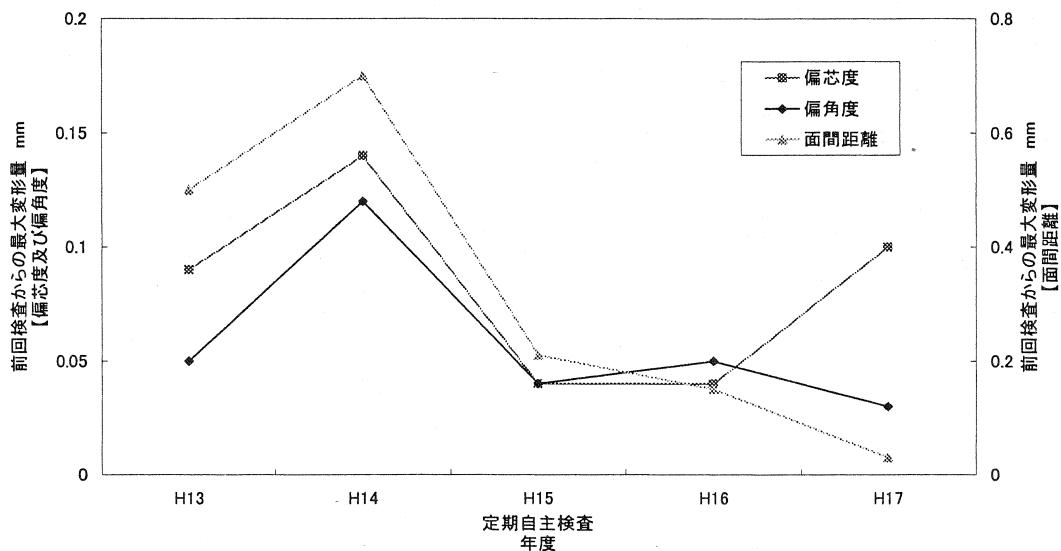


Fig 6-1 2次冷却系ポンプカップリング部センタリング測定結果

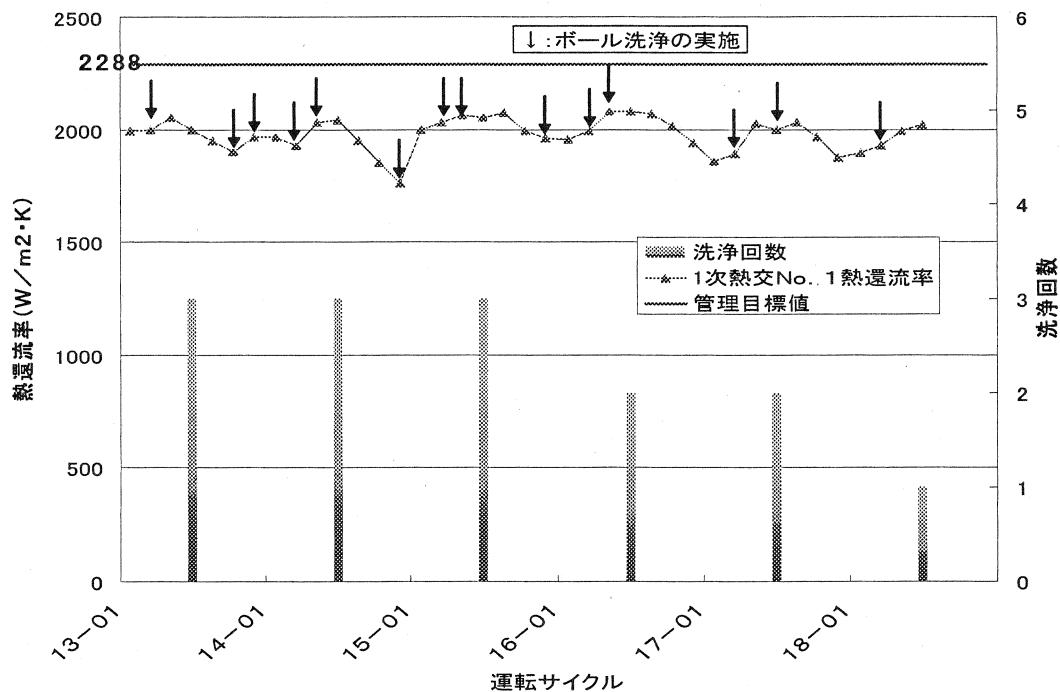


Fig 6-2 热交換器洗浄保守と热貫流率の関係

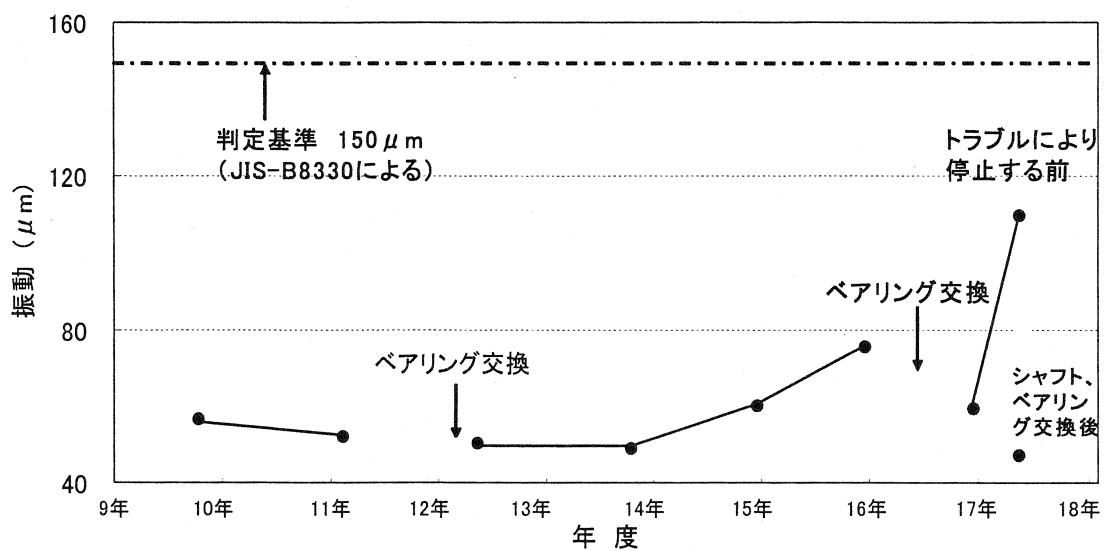


Fig 6-3 炉室給気系送風機振動測定結果

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
圧力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
電気容量	フアラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	シemens	S	V/A
磁束密度	テスラ	T	A/V
インダクタンス	ヘンリイ	H	$V \cdot s$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	Wb/m^2
光束度	ルーメン	lm	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ	ベクレル	Bq	Wb/A
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	グレイ	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
	シーベルト	Sv	J/kg
			$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用的する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	力ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタルピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エンタルピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎スチラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎スチラジアン	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{-24}	ヨクタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{-21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{-18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{-15}	ペクタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーピー	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里每時=(1852/3600)m/s
アード	ル	$1 a=1 dm^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストーカス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホルト	ph	$1 ph=10^1 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位		$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^2 \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
トル	Torr	$1 Torr=(101325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm=101325 Pa$
カリ	cal	
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$


古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています