

JAERI-M

9237

OWL-1 キュービクルにおける露点
計記録データの統計的解析と冷却水漏洩
早期検出への応用

1980年12月

尾熊 律雄・林 光二・北島 敏雄

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

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

OWL-1 キュービクルにおける露点計記録データの
統計的解析と冷却水漏洩早期検出への応用

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
尾熊 律雄・林 光二・北島 敏雄⁺

(1980年11月21日受理)

統計的解析手法を用いて、JMTRのOWL-1ループ・キュービクルに対する給排気露点記録データの解析をおこなった。

本報告の主たる目的は給排気露点間の動特性関係を実験的に明らかにし、これによって得られた情報をOWL-1ループの漏水監視システムに取入れた場合の有効性を評価することにある。

データ解析の結果次のことが明らかとなった。

- 給排気露点間の動特性は約10分の時定数を持つ速いモードと数時間程度の時定数を持つ遅いモードの2つの特性からなる。
- ループからの漏水が無い正常な条件下において、約2 cycle/hr以下の排気露点の変動は大半給気露点の変動によってもたらされたものである。

上記の解析結果にもとづき、OWL-1ループシステムに対するリークモニター開発の一試みとして簡単なデジタルフィルターを設計した。このリークモニターを応用し、JMTRの第43サイクル運転期間中、OWL-1ループにおいて異常漏水が発生した際にとられた露点記録データを解析した。その結果、本手法が異常漏水の早期検出にとって有効であることが示された。ここで用いたリークモニターに関する考え方は動力炉における異常漏水検出の問題にも適用できるものと思われる。

+ 大洗研究所材料試験炉部

Statistical Analysis of Dewpoint Data Record at OWL-1 Loop Cubicle
and its Application to Early Detection of Abnormal Water Leakage from
the Loop

Ritsuo OGUMA, Koji HAYASHI and Yoshio KITAJIMA⁺

Division of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 21, 1980)

A method of statistical analysis was applied to analyze the dewpoint data record of both supply and exhaust air for OWL-1 (Oarai Water Loop No.1) loop cubicle in JMTR (Japan Materials Testing Reactor).

The primary purpose of the present study is to determine experimentally the dynamic interrelationship between these two quantities and then to evaluate the effectiveness of incorporating the information thus derived on the dewpoint dynamics into a water leakage monitoring system for the OWL-1 loop.

Through the data analysis, it was shown that;

- The dynamics of dewpoint between the supply and exhaust air contain basically two mode characteristics; i. e. the fast mode with a time constant of about ten minutes and the slow one with that of about several hours.
- Under normal condition without any water leakage from the loop, variations of the exhaust dewpoint for frequencies below about 2 cycle/hour are mostly due to those of the supply dewpoint.

Based upon the results mentioned above, a simple filter including the dewpoint dynamics was designed in an attempt to develop an efficient leak monitor for the OWL-1 loop system. This filter was applied to

⁺ Division of JMTR, Oarai Research Establishment, JAERI

analyze the dewpoint data record during the time when the OWL-1 loop underwent an abnormal water leakage in the 43rd cycle of JMTR operation. The results of the analysis indicate potential usefulness of the present method for detection of abnormal water leakage at its early stage.

The basic idea for the leak monitor proposed here is considered to be applicable also to the problem of water leakage detection at power reactor plants in general.

KEYWORDS: Statistical Analysis, OWL-1 Loop Cubicle, Early Detection of Abnormal Water Leakage, Water Leakage Monitoring.

目 次

1. 序 論	1
2. OWL-1 キュービクルの構造と給排気露点の測定法	3
3. OWL-1 ループで起きた異常漏水の経過の概要	3
4. データ解析手法	4
5. キュービクルの給排気露点記録データの解析	7
6. デジタルフィルターを用いたリークモニターの設計	10
7. 結 論	11
謝 辞	13
参考文献	14

CONTENTS

1.	Introduction	1
2.	On the Arrangement of OWL-1 Loop in the Cubicle and Dewpoint Measurement of Supply and Exhaust Air	3
3.	Outline of the Course of Abnormal Water Leakage Having Occurred in the OWL-1 Loop	3
4.	Method of Data Analysis	4
5.	Analysis of Dewpoint Data Record for the Supply and Exhaust Air in the Cubicle	7
6.	Design of a Leak Monitor Using a Simple Digital Filter	10
7.	Conclusion.	11
	Acknowledgment	13
	References	14

1. 序 論

原子炉プラントはその寿命を終えるまでの長い供用期間を通じて、高い信頼性と安全性を保ち安定した動作を続けることを強く要求される。そのために、原子炉プラントには設計、機器の製作、据付や試験、そして運転の各段階を通じて多重かつ多面的な安全性に関する対策がほどこされている。しかしながら、今日までの原子炉プラントの事故、故障に関する統計をみると比較的軽微な異常やトラブルはある程度の頻度で発生しているのが現状である。そこで、もしこれらの異常に対してより軽微な段階で、あるいは異常の兆候が現われた段階で発見してその伝播と拡大を防ぎかつ適切な処置をすることができれば、原子炉プラントの安全性を向上させるうえで大きな意義がある。このような異常の早期検出とその原因の推定、異常の進展の予測、あるいは処置についての判断と決定などをシステムティックにおこなうための研究は「原子炉診断技術」開発として近年我国でも活発にとりくまれている。⁽¹⁾

さて、軽水炉における異常例をみると、^{(2)~(5)} 沸騰水型炉 (BWR) では一次冷却系統のリークやクラック、制御棒および駆動系統の異常、弁の異常などが、また加圧水型炉 (PWR) では上記に加えて蒸気発生器細管の異常、原子炉本体内の支持ピン、たわみピンの異常などが主なものとして挙げられる。そのうち冷却系統や配管からの漏洩およびクラック、弁やポンプの異常による漏洩など原子炉プラントからの蒸気や水の漏洩は異常発生全体の中で高い割合を占めている。この種の異常漏洩は原子炉定格出力運転中に発生している場合が多く通常、格納容器内の圧力、温度、ドレンサンプの水位あるいはダストモニターによる放射能濃度等の測定を通じて検出されるか、運転員の巡回点検によって発見されている場合が多く、検出されるまでにある程度の時間を要する。従って、原子炉運転中に異常漏水が起った場合、その早期検出と診断を可能にする手法の開発は原子炉診断技術開発の中でも極めて重要な課題の一つといえる。

JMTR (Japan Material Testing Reactor) において第43サイクル運転期間(昭和53年2月23日~3月16日)中に炉内照射用水ループ、OWL-1のキュービクル内で一次系配管から冷却水の異常漏洩が起こり、そのためこのサイクルの運転は中止された。漏水の原因は流量調節弁フランジ部の配管にクラックが生じたためである。この一次冷却水の異常漏洩は診断技術開発の観点からは極めて貴重な経験であり、その期間に測定された種々のデータを解析して漏水早期検出に関する手がかりを得ることができればその意義は大きい。また、そこで得られた知見あるいは検出法についてのアイデアは基本的には通常の原子力発電所における格納容器内の漏水検出の問題にも応用可能であると考えられる。

本報告書はOWL-1ループキュービクルの換気口にとりつけられている露点計による給排気湿度測定データを統計的手法を用いて解析し、露点計による異常漏水早期検出法について検討したものである。ここで用いられている露点計は塩化リシウム露点計で、これによって測られる給排気露点差はキュービクル内の湿度変化に関する情報を含んでいるはずである。従って、冷却水の異常漏洩があると露点差が大きくなり原理的には漏洩検出が可能である。しかし、このような露点差だけに着目した方法からは漏洩検出に関して余り質の良い情報は得られない。

その理由は給気露点の変動に対して排気露点はある程度遅れを持って応答し、しかもそれがキュービクルの構造、露点計の配置等を反映した複雑な特性をしているからである。従って、漏水の早期検出を可能にするためには給排気露点間の動特性を考慮した適切な情報処理を通じて異常漏水の検出感度ができるだけ高くなるようなソフトウェア上の工夫をすることが重要となる。

上記の観点に立って、本報では次の2つのステップで異常漏水早期検出法の検討をおこなっている。

(i) 給排気露点間の動特性を明らかにすると共に変量相互間の動特性的相関の強さを評価すること。

(ii) (i)で得た給排気露点間の動特性モデルを組込んだ漏水検出のためのアルゴリズムの開発。

(i)を実行するために、ここでは時系列解析手法を応用しJ M T R第43サイクル期間中の給排気露点記録データの解析をおこなった。その結果、給排気露点間の動特性的相関は異常漏水を検出するのに十分な程度に強いことが明らかにされ、またその動特性はこの運転サイクル期間を通じて余り変動しないことが示された。

次に上記解析結果に基づいて(ii)の漏水早期検出法に関する検討が加えられた。ここでは解析によって得た給排気露点間の動特性を考慮したデジタルフィルターを設計した。フィルタリングの目的は測定された排気露点から給気露点変動によってもたらされる動的な影響部分および漏水検出に障害になる雑音成分を取除くことにある。フィルターの出力は漏水の無い正常時にはゼロ点の付近での微小な不規則変動を示し、異常漏水が発生するとそれに対して敏感に正の応答を示すはずである。

設計されたデジタルフィルターが漏水検出に対して有効に働くことを確かめるために、このフィルターを用いて第43サイクル期間中に生じたO W L-1ループキュービクル内での一次系冷却水漏洩に関するデータ解析をおこなった。その結果、本デジタルフィルターによって推定された漏洩率の時間応答は漏水発見、その後のループ運転の停止措置に伴う漏水量変化、漏水停止確認等の時間的経過に関する当時の運転記録とよく一致しており、これによって本手法の有効性が確かめられた。さらに本解析結果によると、ここで用いたデジタルフィルターをリークモニターとして使用していたとすれば、実際に漏水が発見された時点よりも少くとも24時間以上前にこれを発見できたものと考えられる。

O W L-1ループにおけるその後の漏水対策に関しては、筆者の一人を始めとする照射2課の担当者によって今日まで種々の実験研究が積み重ねられ、その早期検出技術の開発がなされて来た。その結果、現在では漏水検出システムのひとつとしてキュービクル床ドレン水量計が設置されている。また、露点計出力信号を用いた漏水早期検出の可能性もそこでの技術開発の過程で早くから指摘されて来たことで、本報告書で提案したリークモニターはその具体化のひとつである。本リークモニターを今迄開発して来た漏水監視システムの中に組み込むことにより、より感度の高い漏洩検出が期待できると考えられる。

2. OWL-1キュービクルの構造と給排気露点の測定法

JMTRのOWL-1(Oarai Water Loop)ループにおいて、原子炉炉心を通る炉内管への給水、冷却水の熱交換、ループの加圧、あるいは照射試験に必要な運転条件を実現するための種々の装置を収納している部屋をキュービクル(Cubicle)と呼んでいる。Fig. 1はOWL-1ループのうちキュービクル内に納められている部分の構成を示している。

キュービクルの容積は、約 115 m^3 で厚いコンクリート壁で囲まれている。また部屋は気密性を保ち換気をおこなっている。換気による空気の流れはFig. 2に示す通りで、機械室に取込まれた空気は原子炉格納容器一階に入り地下一階に設置されているループキュービクルを通過して排気系のファンによってスタックに送られている。また空気は機械室の空調機によって制御され、格納容器内の温度と湿度が常に一定範囲内におさまるようになっていく。Fig. 3はキュービクルまわりの換気の経路と給排気露点計のとりつけ位置を示している。ループ運転中は温度が高くなるためキュービクル内にも扇風機とクーラーが設置されている。露点計は感湿部に塩化リチウムを用いたDewcel露点計⁽⁶⁾で露点測定範囲は $-10\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ である。露点計はキュービクル給気弁付近と排気系配管の2ヶ所に設置し、キュービクル給排気露点を測定している。露点計出力は10秒間隔で常時サンプリングされ打点式記録計に記録される。

3. OWL-1ループで起きた異常漏水の経過の概要

本章では、異常漏水に関する経過を以下に簡単に述べる。尚、ここでの説明は後の章で関係すると思われる範囲に限り、より詳細な記述は別の報告書にゆずる。⁽⁷⁾

JMTR第43サイクル後半の運転は昭和53年3月13日午前9時10分に開始され、午後4時48分には炉出力は 40 MWt に到達した。午後6時頃、定時点検の作業中OWL-1キュービクル内においてOWL-1の配管系から漏水のあることが工業用テレビジョンにより発見された。またキュービクル内ローカルガスダストモニターにより、FP量が定常時より多いことが検出されたためOWL-1一次系からの漏水と判断された。原子炉を停止して後おこなわれたキュービクル内点検作業により、OWL-1一次冷却系No.1冷却器バイパス弁V-Jのフランジ部配管(Fig. 1参照)からの漏水によるものであることが確認された。午後11時よりOWL-1のクールダウンがおこなわれた。その結果、3月14日午前2時50分、圧力および温度降下により漏水は観測されなくなった。以上の漏水に関する経過を含むOWL-1運転経過とキュービクル給排気露点差測定データ、OWL-1主冷却器出口温度、および原子炉出力の履歴をFig. 4にまとめて示す。

4. データ解析手法

4.1 キュービクル給排気露点間の動特性の評価法

キュービクル排気露点に影響を与える物理的要因としては給気露点変動が主要なものと考えられるが、その他にもキュービクル内での水分の露結、漏水、ループ運転条件の変化に伴う温度変化など給気露点変動と独立に排気露点に作用する因子が種々考えられる。これらを一般的な形で表わすと排気露点の時間的变化は次式によって考えられる。

$$T_o(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) T_i(t-\tau) d\tau + \sum_{m=1}^r \int_0^{\infty} h_m(\eta) U_m(t-\eta) d\eta + W(t), \quad (1)$$

ここで、

$T_o(t)$; 排気露点温度、

$T_i(t)$; 給気露点温度、

$g(t)$; 給気露点に対する排気露点のインパルス応答関数

$U_m(t)$; 排気露点に影響をおよぼすもので給気露点と独立な変動をする量、一次冷却水漏洩もこの中に含まれる。

$h_m(t)$; 外乱源 $U_m(t)$ から排気露点へのインパルス応答関数

$W(t)$; $T_o(t)$, $T_i(t)$, $U_m(t)$ に独立な不規則変動成分

をそれぞれ表わす。(1)式をブロック図で表わすと Fig. 5 のようになる。

(1)式をフーリエ変換して各変量のパワースペクトル密度関数を用いて表わすと、周波数 f の関数として次式が成立する。

$$\begin{aligned} P_o(f) &= |G(f)|^2 P_i(f) + \sum_{m=1}^r |H_m(f)|^2 P_m(f) + P_w(f) \\ &= |G(f)|^2 P_i(f) + P_v(f), \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $P_v(f) \triangleq \sum_{m=1}^r |H_m(f)|^2 P_m(f) + P_w(f)$ で

$P_o(f)$; 排気露点信号のパワースペクトル、

$P_i(f)$; 給気露点信号のパワースペクトル、

$P(f)$; 給排気露点間の周波数応答関数、

$P_v(f)$; 給気露点以外の变量による排気露点への影響分のパワースペクトル、

をそれぞれ表わす。そこで、給排気露点に関する測定データをもとにそれぞれのパワースペクトルおよび周波数応答関数を実験的に決定できれば、給気露点から見た排気露点への影響度を次式によって評価することができる。

$$\gamma(f) = \frac{\hat{P}_o(f)}{P_o(f)} = \frac{|G(f)|^2 P_i(f)}{P_o(f)} = 1 - \frac{P_v(f)}{P_o(f)}, \quad (3)$$

ここで $\hat{P}_o(f) \triangleq |G(f)|^2 P_i(f)$ で給気露点をもとにして推定した場合の排気露点のパワースペクトルである。 $\gamma(f)$ をここでは信号寄与率と呼ぶことにする。いま、給気露点以外の変量による排気露点への影響があればそれだけ $\gamma(f)$ は 1 より小さくなる。キュービクルにおいて異常漏水があった場合これは $P_v(f)$ が大きくなるように作用するので $\gamma(f)$ は逆に小さくなる。従って、感度の高い漏水検出を可能にするためには漏水のない正常時においては幅広い周波数領域にわたって $\gamma(f)$ は 1 に近いことが望ましい。

以上のことから、露点計記録データの解析にあたっては、まず最初に漏水のない正常時のデータに対して

- (i) 給排気露点間の伝達特性 $g(f)$ または $G(f)$
- (ii) 排気露点変動への給気露点の影響の程度, $\gamma(f)$

の 2 点を評価しておく必要のあることがわかる。

4.2 露点記録データの統計的解析法

測定されたサンプルサイズ N の露点記録データ $\{T_o(k), T_i(k); k = 1, 2, \dots, N\}$ に対して次式の動特性モデルをフィッティングさせることを考える。

$$T_o(k) = \sum_{m=1}^M a(m) T_o(k-m) + \sum_{m=1}^M b(m) T_i(k-m) + e(k), \quad (4)$$

ここで $\{a(m), b(m); m = 1, 2, \dots, M\}$ はモデルの係数, M はその次数で $e(k)$ はモデルフィッティングにのらない不規則変動成分を表わす。

(4) 式の両辺に $T_i(k-\ell)$ をかけて $k = 1, 2, \dots, N$ について平均化操作をほどこすと

$$R_{oi}(\ell) - \sum_{m=1}^M a(m) R_{oi}(\ell-m) = \sum_{m=1}^M b(m) R_i(\ell-m), \quad (5)$$

ただし,

$$R_{oi}(\ell) = \frac{1}{N-\ell} \sum_{k=1}^{N-\ell} T_o(k) T_i(k-\ell), \quad (6)$$

$$R_i(\ell) = \frac{1}{N-\ell} \sum_{k=1}^{N-\ell} T_i(k) T_i(k-\ell), \quad (7)$$

とする。次に

$$\begin{cases} g(1) = b(1) \\ g(s) = \sum_{n=1}^{s-1} a(n) g(s-n) + b(s) \end{cases} \quad (8)$$

ただし、 $s, n > M$ に対しては $a(n) = 0, b(s) = 0,$

が成立するような系列 $\{g(s); s = 1, 2, \dots\}$ をとるとこれはキュービクル給排気露点間のインパルス応答の重み系列を表わす。

(5)式をフーリエ変換して周波数領域で表現すると

$$P_{o_i}(f) = a(f)^{-1} b(f) \quad P_i(f) = G(f) P_i(f), \quad (9)$$

$$G(f) \triangleq a(f)^{-1} b(f), \quad (10)$$

で、 $G(f)$ は給排気露点間の周波数応答関数を表わす。ここで、 $a(f), b(f)$ は次式を満たすものとする。

$$\begin{cases} a(f) = 1 - \sum_{m=1}^M a(m) \exp(-i 2\pi f m), \\ b(f) = \sum_{m=1}^M b(m) \exp(-i 2\pi f m), \end{cases} \quad (11)$$

(4)式の両辺を2乗して $k = 1, 2, \dots, N$ について平均化操作をほどこすと

$$\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M a(m) R_o(\ell+n-m) a(n) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M b(m) R_i(\ell+n-m) b(n) + R_e(\ell), \quad (12)$$

ただし、 $a(0) = -1$ で

$$R_o(\ell) = \frac{1}{N-\ell} \sum_{k=1}^{N-\ell} T_o(k) T_o(k-\ell) \quad (13)$$

$$R_e(\ell) = \frac{1}{N-\ell} \sum_{k=1}^{N-\ell} e(k) e(k-\ell) \quad (14)$$

(12)式をフーリエ変換し(11)の関係を用いて表わすと

$$|a(f)|^2 P_o(f) = |b(f)|^2 P_i(f) + P_e(f) \quad (15)$$

ただし $P_e(f)$ は $e(k)$ のパワースペクトルである。

(3), (9), (15)式より次式を得る。

$$\gamma(f) = \frac{|G(f)|^2 P_i(f)}{P_o(f)} = 1 - \frac{P_e(f)}{|a(f)|^2 P_o(f)} \quad (16)$$

従って $\gamma(f)$ は $P_e(f)$ が大きい、 $|a(f)|^2 P_o(f)$ が小さい時小さな値をとる傾向を持つ。

そこで問題は(4)式の $\{a(m), b(m); m = 1, 2, \dots, M\}$ を実データに対するモデルフィッティングによって求めることであるが、ここでは(4)式による予測誤差成分 $e(k)$ の分散が最小となるような $\{a(m), b(m); m = 1, 2, \dots, M\}$ を採用することにする。その解は $a(m), b(m)$ に関する次の連立一次方程式を満たす。

$$R_o(\ell) = \sum_{n=1}^M a(n) R_o(\ell-n) + \sum_{n=1}^M b(n) R_{o_i}(\ell-n), \quad (\ell = 1, 2, \dots, M) \quad (17)$$

従って相関関数 $R_o(\ell)$, $R_{oi}(\ell)$ が与えられると(17)式の $\ell = 1, 2, \dots, M$ についての連立方程式を解くことによって $\{ a(m), b(m) \}$ を決定することができる。

ここで次数 M の決定であるが与えられた M に対し(17)式を解いて得られる $\{ a(m), b(m) \}$ を別の新しい同一構造のデータに適用した時の one step prediction の 2 乗平均値を Final Prediction Error (略して $FPE(M)$) と定義して $FPE(M)$ が最小になる M を採用する。この評価関数は次式で与えられる。

$$FPE(M) = \left(1 + \frac{M+1}{N}\right) \left(1 - \frac{M-1}{N}\right)^{-1} \sigma^2, \quad (18)$$

$$\sigma^2 = R_o(0) - \sum_{m=1}^M a(m) R_o(m) - \sum_{m=1}^M b(m) R_{oi}(m) \quad (19)$$

与えられた一組の測定データ $\{ T_o(k), T_i(k); k = 1, 2, \dots, N \}$ に対する(4)式のモデルフィッティングは次の手順でおこなわれる。

- (i) (5), (13) 式より相関関数 $R_o(\ell)$, $R_{oi}(\ell)$ を計算する。
- (ii) (i) の結果を用いて(17)式の連立方程式を解く。
- (iii) (18), (19) 式によりモデル次数 M についての評価関数の値を計算する。
- (iv) (ii) および(iii) を $M = 1, 2, \dots, L$ と順次変えて計算し、その中で $FPE(M)$ を最小にする M とその時の係数 $\{ a(m), b(m); m = 1, 2, \dots, M \}$ を最適フィッティングモデルとして採用する。

データ解析手法のさらに詳細な説明は文献(8)にゆずる。

5. キュービクルの給排気露点記録データの解析

データ解析に当っては Table 1 に示された 3 つのデータセット (ケース 1 ~ ケース 3) を用意した。そのうち最初の 2 ケースはループ運転前後の点検によって異常漏水のなかったことが確かめられている区間から独立にとられたもので、後述するように、この 2 つのデータセットの解析を通じて正常時の給排気露点間の動特性がある程度の長期間にわたって変動しないかどうかを確認する。一方ケース 3 は異常漏水があった区間を含むようにデータをとっている。Fig. 6 はキュービクル給排気露点の測定記録の一部を示している。図中給気露点が正弦波状の変動をしている部分は空調機による炉室温度および湿度制御のために生じたもので、その応答として排気露点にも正弦波状の変動が見られる。また排気露点記録の中で比較的小さく規則的に変動し給気露点と独立な成分はキュービクル内のクーラーの作動によって生じたものと考えられる。

スペクトル解析

Fig. 7 は上記データセットのうちケース 1 のデータを用いて計算した給排気露点それぞれのパワースペクトル密度 (PSD) である。給気露点の PSD には約 1.86, 3.72, および 5.58 cycle/hour (以後 c/h と記す) 付近に鋭いスペクトルピークが見られるが、これは空調機の作動周期とその高調波に対応している。排気露点の PSD にも約 1.86, 3.72,

4.04 c/h にスペクトルピークが存在する。そのうち前の2つのピークは炉室空調機作動に伴うもので給気露点変動に対する応答として現われたピークである。4.04 c/h のピークはキュービクル内のクーラーの作動によって生じたものと考えられる。

給排気露点間の動特性モデルの同定結果

漏水のない正常時のデータ(ケース1, ケース2)に対して, [4-2]章で述べたモデルフィッティングの手順に従ってモデルを同定した。Table 2 には各ケースの同定結果を示している。モデル次数, ノイズ $e(k)$ の分散値とも比較的一致した結果が得られている。

次に, 得られたモデルの係数を(8)式に代入しインパルス応答関数を推定する。Fig. 8 ではケース1の場合について得られた結果をステップ応答に変換して示している。この図から, 給気露点変動に対する排気露点の応答は約10分の短い時定数と数時間程度の時定数の2つのモードの応答からなることがわかる。また, Fig. 9 では同定されたモデルの係数を(10)および(11)式に代入して求めた周波数応答関数を示している。モデル同定結果の一致の程度を評価するために, 同図中にはそれぞれのケースで得られた周波数応答をプロットした。モデルの一致度は0.04~3.0 c/h にわたって比較的良いことがわかる。このことはキュービクル給排気露点間の動特性はJ M T R 第43サイクル期間中はほぼ不変であると解釈することができる。周波数応答のパターンについて見ると, 0.1 c/h 以上の周波数領域ではほぼ一次遅れの形をしていてその折点周波数は約1.08 c/h 付近にある。従って排気露点の応答の時定数は

$$T = 1 / 2 \pi f \sim 0.147 \text{ hr} \quad (\sim 8.8 \text{ min})$$

となりステップ応答で評価した結果とだいたい一致している。この時定数は物理的にはキュービクル内の空気が入れ変わるのに要する時間と対応していると考えられる。

事実,

$$\begin{aligned} \text{キュービクル空気容積} & \quad V \doteq 115 \text{ m}^3 \\ \text{給排気流量} & \quad W \doteq 760 \text{ m}^3 / \text{hr} \end{aligned}$$

を用いると

$$\tau = \frac{V}{W} = 0.151 \text{ hr} \quad (\sim 9.1 \text{ min})$$

となり上記周波数応答から推定した時定数とほぼ一致する。

次に低い周波数領域について見ると, 0.1 c/h から下がるにつれてゲインが高くなっていく。これは前述したステップ応答における遅いモードの特性に対応したものである。

フィッティングモデルの妥当性の評価

同定されたモデルが露点記録データに対してどの程度精度良くフィッティングされているかチェックする必要がある。ここでは2つのデータセット(ケース1とケース2)のうちいずれか一方に対してフィッティングしたモデルを他方のデータセットにあてはめて給気露点記録データに対する排気露点の応答出力を推定し, 実測された出力と比較した。このようなチェックをここでは2つのデータセット相互間でおこなった。Fig. 10 にはそれらの結果の中から典型的なパターン2例を示している。

Fig. 10-a についてみると, モデルの出力(推定値)は排気露点データの時間的変化に対

して平均値的によく追従していることがわかる。ここで推定誤差として現われている周期性を持った変動はキュービクル内のクーラーの作動によって引起された露点変動分である。

Fig. 10-bではモデルによる排気露点推定値が実測値よりやや高目にて居る場所のあることがわかる。この事は Fig. 5 で示した $U_m(t)$ 、(排気露点に影響をおよぼし、給気露点と独立な変動をする量)のうち露点を下げるような効果を持つものが作用していることを示している。過去のOWL-1ループの運転経験によると、そのうちキュービクル内で局所的に起る水蒸気の露結による効果が最も大きいと考えられる。則ち、キュービクル内で露結がおこると排気露点さが下がりここで見られるような予測誤差となって現われる。

上記のような現象の見られる典型的なケースとしては天候の変化による外気の影響がある。特に外気の湿度が上るとその影響で給気露点も高くなり、キュービクル内での露結水は一層増え予測誤差も大きくなる傾向がある。

2つのデータセットについてデータの全区間にわたって同様のチェックをおこなったが全体を通じて上記と同じ結果を得た。ここで注意すべきことは上記の予測誤差の傾向はモデルフィッティングに用いたデータセットの癖にある程度依存するという点である。即ち、露結が頻繁に起るような状況下でサンプルしたデータセットに対してフィッティングしたモデルを露結のない場合のデータセットにあてはめると排気露点の予測値は実測値より低くなる傾向を持つ。また、その逆の場合には実測値より高くなる傾向を持つ。このようなモデル推定誤差はキュービクル内での水蒸気の露結による効果を補正することによりさらに小さくなるものと思われる。

排気露点変動への給気露点の影響度の評価

前節では同定されたモデルを実測データにあてはめてみることによってその妥当性を評価した。モデルの妥当性を別の角度から評価するために、ここでは〔4〕章で述べた信号寄与率計算をおこなった。これによって我々は給気露点変動が排気露点におよぼす動特性的な影響の程度を知ることができる。Fig. 11 にはその結果が示されている。図から明らかなように約 2 c/h 以下の広い周波数領域で排気露点の変動の大半は給気露点の作用によって引起されたものであることがわかる。ここで高周波領域で信号寄与率が下がるのは(10)式における右辺の分母の値が相対的に小さくなったためと考えられる。また、低周波領域でカーブが0.8程度より高くないのは、前節で述べた水蒸気の露結による効果、給排気露点間の動特性の非線型性、測定されたデータの非正常性と観測雑音によるものと思われる。

以上の信号寄与率の解析結果と給排気露点間の動特性モデル同定結果より、OWL-1キュービクルにおいてもしある時点で一次冷却水の異常漏洩が突然発生したとすれば、(4)式による排気露点予測値と実測値の残差系列の中で 2 c/h 以下の変動成分には検出可能な程度に現われることが期待できる。言いかえると30分程度の誤差範囲内で異常漏水は検知できる可能性がある。

異常漏水を含む区間のデータ解析

キュービクルにおいて異常漏水があった場合給気露点変動に対する排気露点の応答が正常時と比してどのようにずれるか、その傾向を調べるために正常時のデータに対してフィッティングしたモデルを異常時のデータ(ケース3)にあてはめて出力の排気露点を予測した。Fig. 12はOWL-1ループの運転開始(3月12日、14時)約7時間前から排気露点の予測を

おこなった時の結果である。ループの昇温を開始して約1時間経った頃からモデルによる排気露点予測値が実測値より下にずれて来ていることがわかる。このことは異常漏水がループ昇温開始後まもなく発生したことを示唆している。また排気露点変動の予測値と実測値との間のずれの傾向から漏水が急激に発生したものでなくOWL-1ループの昇温に伴なって徐々にその量を拡大して行ったものと解釈できる。

6. デジタルフィルターを用いたリークモニター的设计

フィルターのアルゴリズム

〔5〕章における露点計記録データの解析の結果、給気露点からの影響として現われている量を排気露点実測値から取除きこれを監視することにより一次冷却水漏洩の早期検出が可能であるという見通しを得た。本章では、その結果に基づいて簡単なリークモニターを設計した。モニターの基本的構成は同定された給排気露点間の動特性モデル(4)式と人為的に導入された簡単な漏水動特性モデルよりなる。前者は排気露点の実測値より給気露点からの影響分を取除くためのもので後者はキュービクル内で引起される漏水以外の露点変動要因を取除くためのものである。

まずキュービクルの露点変動のモデルを次式で与える。

$$\begin{cases} T_o(k) = \sum_{m=1}^M a(m) T_o(k-m) + \sum_{m=1}^M b(m) T_i(k-m) + L(k-1) + W_1(k) \\ L(k) = C \cdot L(k-1) + W_2(k) \\ Z(k) = T(k) + V(k) \end{cases} \quad (20)$$

ただし、

$L(k)$; 1次系からの蒸気の漏れ率

$Z(k)$; 排気露点の測定値

$W(k)$; 給気露点、一次系からの漏水以外に排気露点に影響する項

$W_2(k)$; 一次系からの漏水に対する駆動源

C ; 漏水の特性を決めるパラメータ

これに対する各状態量の推定値は次のアルゴリズムに給気露点データを代入して求められる。

$$\begin{cases} \tilde{T}_o(k) = \sum_{m=1}^M a(m) \hat{T}_o(k-m) + \sum_{m=1}^M b(m) \hat{T}_i(k-m) + L(k-1) \\ \hat{T}_o(k) = \tilde{T}_o(k) + \alpha_1 \{ Z(k) - \tilde{T}_o(k) \} \\ L(k) = C \cdot L(k-1) + \alpha_2 \{ Z(k) - \tilde{T}_o(k) \} \end{cases} \quad (21)$$

ここで α_1, α_2 は $W_1(k)$, $W_2(k)$, $V(k)$ の大きさを考慮して決められるチューニングパラメータである。また漏水の特性を決める係数 C も実データに対するケーススタディによって求められる。

リークモニターによる異常漏水を含む区間のデータ解析

④式の計算アルゴリズムに対し正常時の給排気露点データの解析によって求めたモデル $\{a(m), b(m); m=1, 2, \dots, M\}$ といくつかのケーススタディによって決定したチューニングパラメータ, α_1, α_2, C をもとにして異常漏水が起った区間を含むデータ(ケース3)を解析した。Fig. 13にはリークモニターによる冷却水漏洩率の推定結果を示している。また同図には原子炉およびOWL-1ループの運転経過とリークモニターによって推定された事項が併記されている。この図面から次の点を指摘することができる。

- (i) 一次冷却水の漏洩は3月12日14時にOWL-1ループの昇温を開始して約1時間後から顕著になったと推定される。
- (ii) ループ運転条件がPモード定常に達すると漏洩率推定値もほぼ定常に落ち着いている。
- (iii) 3月13日14時から20時にかけて漏水量は再び徐々に増加したと推定される。
- (iv) OWL-1降温降圧開始とほぼ同期してリークモニターによる漏洩率推定値も減少し始めている。
- (v) ループからの漏水停止の確認時刻(3月14日2時50分)とリークモニターによる漏水停止推定時刻にはそれぞれほど大きなずれはない。

このうち(ii)~(v)はループ運転経過から確認されている事項(図中記入)ともよく対応しており、リークモニターによる推定結果の妥当性を裏付けている。

以上の結果をもとに一次冷却水漏洩の経過を評価すると、本リークモニターによる漏水監視をおこなっていたとすれば次の2つの事が可能であったと考えられる。

- (i) ループ一次系からの漏水開始時刻の推定

上記解析結果によると漏水はOWL-1昇温後まもなく開始し約1時間後には顕著になったと推定される。

- (ii) 異常漏洩の検知

もし本リークモニターの出力に適当なレベルでアラームを設定していたとすれば、この異常漏水はループ運転中Pモード定常に達する時点の前後で明らかに検知できたと考えられる。即ち、漏水が実際に発見された時刻よりも少くとも24時間以上前にこれを発見しループの運転を停止することができたと判断される。

尚、ここでの一次冷却水漏洩率の推定に当ってはその値を較正してはいないので実際の漏洩量の評価は本解析結果からだけでは不可能である。これを可能とするためには人為的にキュービクル内で漏水を起し模擬実験をおこなうことが必要となる。また露結水の効果はここでは全く考慮していないので推定結果に多少の誤差が生ずることは避けられないが、結果の妥当性を失うほどのものではないと考えられる。

7. 結 論

統計的解析手法を応用し、J M T R第43サイクル運転期間中のOWL-1ループキュービクルの給排気露点記録データを解析した。その結果、キュービクル内で一次系からの漏水がな

い正常な場合の給排気露点間の動特性に関して、

- (i) 給気露点変動に対する排気露点の応答は約10分の時定数を持つ速いモードと、数時間程度の時定数を持つ遅いモードの2つの特性からなりたっている。
- (ii) 約2c/h以下の周波数領域での排気露点の変動は大半給気露点からの寄与によるものである。
- (iii) 給排気露点間の動特性は一次系からの異常漏水がない限り比較的安定していて特性が途中から変化することはない。

等が明らかとなった。これらの結果より、正常時のデータに対してフィッティングしたモデルを用いて排気露点予測誤差を監視すれば、異常漏水があった場合これを30分程度の誤差範囲内で検知できるという見通しを得た。

また上記の解析結果に基づいて簡単なリークモニターを設計し、これを用いて異常漏洩のあった区間のデータの解析をおこなった。その結果、

- (iv) リークモニターによって推定された漏水の経過はOWL-1ループの運転記録に記された事項とよく対応しており推定結果はほぼ妥当なものである。
- (v) ループ一次系からの漏水はOWL-1昇温開始後まもなく始まり1時間後には顕著になったと推定される。

等の結論を得た。

本報告書で提案したリークモニターを用いていたとすればここで扱ったJMTB第43サイクル期間中の異常漏水に対しては、これが実際発見された時点よりも少くとも24時間以上前に検知できたと判断される。この事からも明らかなように本リークモニターは後述するよういくつかの点について更に改良することが必要であるが、現状でも十分に実用に供することができるものと考えられる。

本リークモニターに基づく異常漏水早期検出の信頼性を高めるためには今後さらにいくつかの問題について検討すべき点が残されている。そのうち主な項目を以下に示す。

- (i) 露結水によってもたらされる露点変化分の補正

露結水の量は現在ではキュービクルに設置されているドレン水量計を用いて測定することができる。この測定値をもとにリークモニタの出力を補正することにより、より精度の高い漏水監視が可能となると考えられる。

- (ii) OWL-1ループからの放熱による影響

ループ冷却水の温度はOWL-1の運転条件に応じて常温から30°C近くまで幅広く変動する。そのため冷却水温度が高い時はループ配管からの放熱によってもたらされる露点変動分を補正することが必要となる。これに対しては今後給排気露点と同時にループ冷却水温度を長期間にわたって測定し、本報で用いた手法を応用して解析しその効果を定量的に評価することが必要である。

- (iii) リークモニターによる漏洩率の推定

リークモニターによって漏洩率を定量的に評価できるようにするために、キュービクル内での漏洩模擬実験をおこない漏洩率とリークモニター出力の間の対応関係を明らかにする事が必要である。

ここで、本報で扱った露点計を用いた漏洩検出法はキュービクル内の湿度変化に関する情報をもとに異常漏洩を検知するのであるから、ループからの漏水は水蒸気の形でなされることを前提としている。従って、OWL-1ループの漏水監視にあたっては本報で提案したリークモニターとキュービクル床ドレン水量計を結合した漏水監視システムが望ましいと考えられる。

現在、原子炉プラントにおける冷却水漏洩の早期検出を目指してアコースティック・エミッション法(AE法)をはじめとするハードウェアの開発がいくつかおこなわれているが、⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾センサーから得られる信号を適切に処理しその中から漏洩検出に有効な情報を最大限に引出す、いわゆるソフトウェアの開発はほとんど試みられていない。この点において本報で提案したデジタルフィルターを応用した漏洩検出法の開発の意義は大きいと考えられる。また、ここで応用された手法は漏洩検出の問題に留まらず種々のセンサーから得られる出力信号をもとにある種の情報を引出そうとする時容易に適用できる方法であり、今後他の分野への応用も期待できる。

謝 辞

本研究の遂行に関し深い理解を示し露点計記録データの提供を快く承諾して下さった材料試験炉部、照射2課伊丹課長に深甚の謝意を表します。また、同課松原氏からは多くの討論を通じて有益な助言と御教示を賜わった。さらに同氏からはOWL-1ループ漏洩検出の問題にとりくむに当って種々の貴重な示唆を受け、露点記録データの解析に関する本研究のきっかけを得たことをここに記し氏に対して深く感謝いたします。

本報告書の作成に際して、激励と有益な助言を下された原子炉工学部原子炉制御研究室篠原室長に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 黒田, 他; 原子炉診断技術の現状, 日本原子力学会誌, Vol. 15, No.12, pp792 ~ 808, (1973)
- 2) 鍋田; BWRの異常事象—原子力発電所の異常運転(3)—, 原子力工業, 第25巻6号 pp52~56, (1979)
- 3) 黒須, 鶴賀; PWRの異常事象—原子力発電所の異常運転(4)—, 原子力工業, 第25巻8号 pp42~48, (1979)
- 4) 川崎; 原子炉冷却系配管のクラックと漏洩—原子力発電所の異常運転(8)—, 原子力工業, 第26巻2号, pp62~67, (1980)
- 5) 小林; わが国原子力発電所の事故・故障の分析, 原子力工業, 第26巻8号, pp24~32, (1980)
- 6) 内藤; “工業計測ハンドブック” pp291~300, 朝倉書店, (1976)
- 7) J M T R 照射施設の運転報告書(J M T R 第43サイクル), (1979), 材料試験炉部 照射2課
- 8) 赤池, 中川; “ダイナミックシステムの統計的解析と制御”, サイエンス社(1972)
- 9) R . J . Smith, et.al.; Acoustic Monitoring for Leak Detection in Pressurized Water Reactors, “Acoustic Emission Monitoring of Pressurized Systems”, S T P 697, pp177-204
- 10) W . F . Hartman, J . W. McElrory ; Acoustic Emission Surveillance of Boiling Water Reactor Piping Nozzles and Valves, “Acoustic Emission Monitoring of Pressurized Systems”, S T P 697, pp205-218

Table 1 Condition of the data acquired

Case No.	Case 1	Case 2	Case 3
Number of variables	2	2	2
Data sample size	1 5 3 6	1 5 0 0	1 4 6 4
Sampling interval	3.75(min)	3.75	3.75
Sampling start time	May 3rd 0:00	May 8th 14:00	May 12th 7:00
On water leakage	without	without	with

Table 2 Comparison of identified dewpoint dynamics models for case 1 and case 2

Case No.	Case 1	Case 2
Model order	1 9	2 1
Min FPE (M)	2.25×10^{-6}	3.84×10^{-6}
Noise variance for $e(k)$	3.07×10^{-3}	2.82×10^{-3}

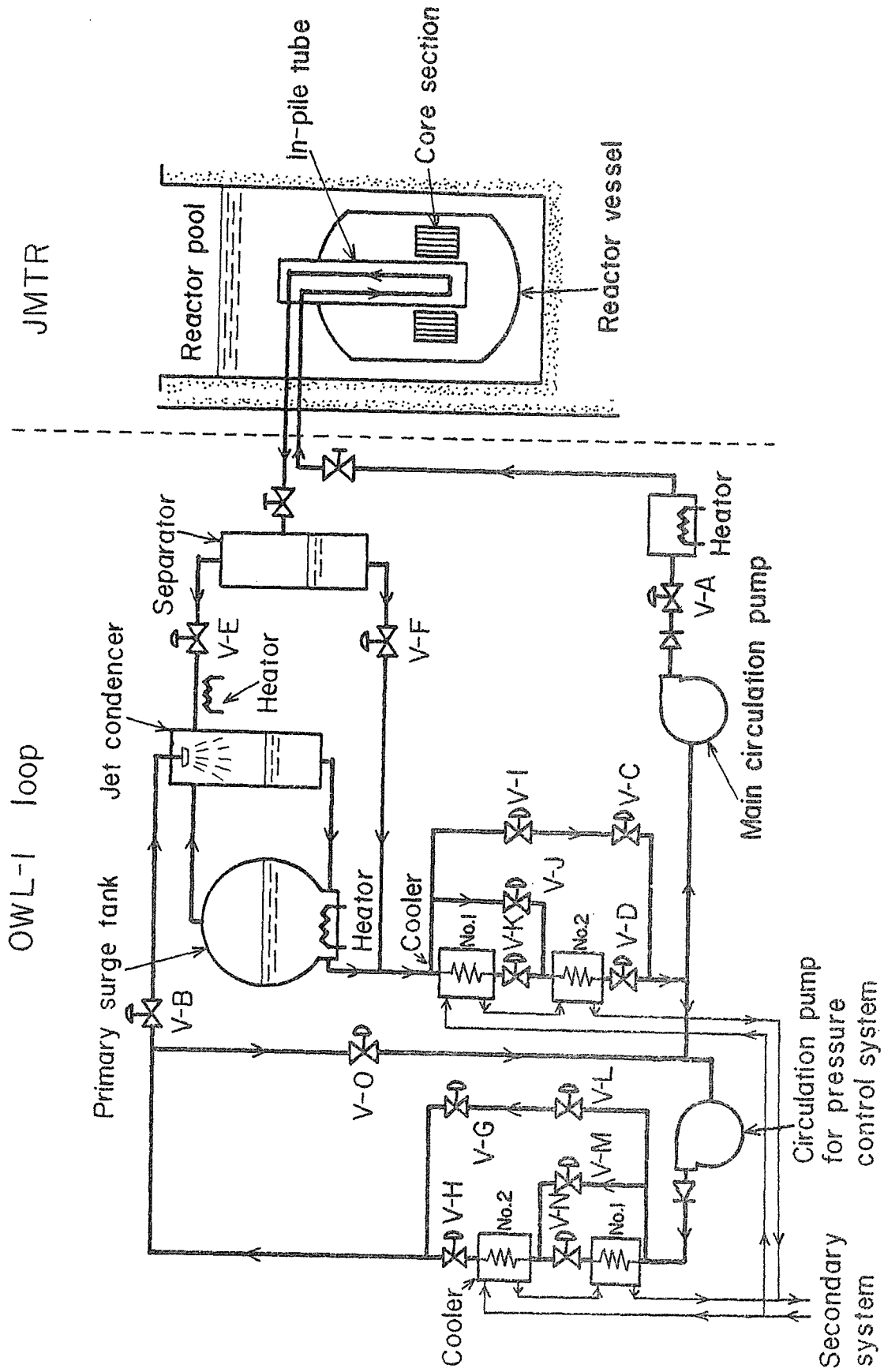


Fig. 1 Flow sheet of OWL-1 Loop.

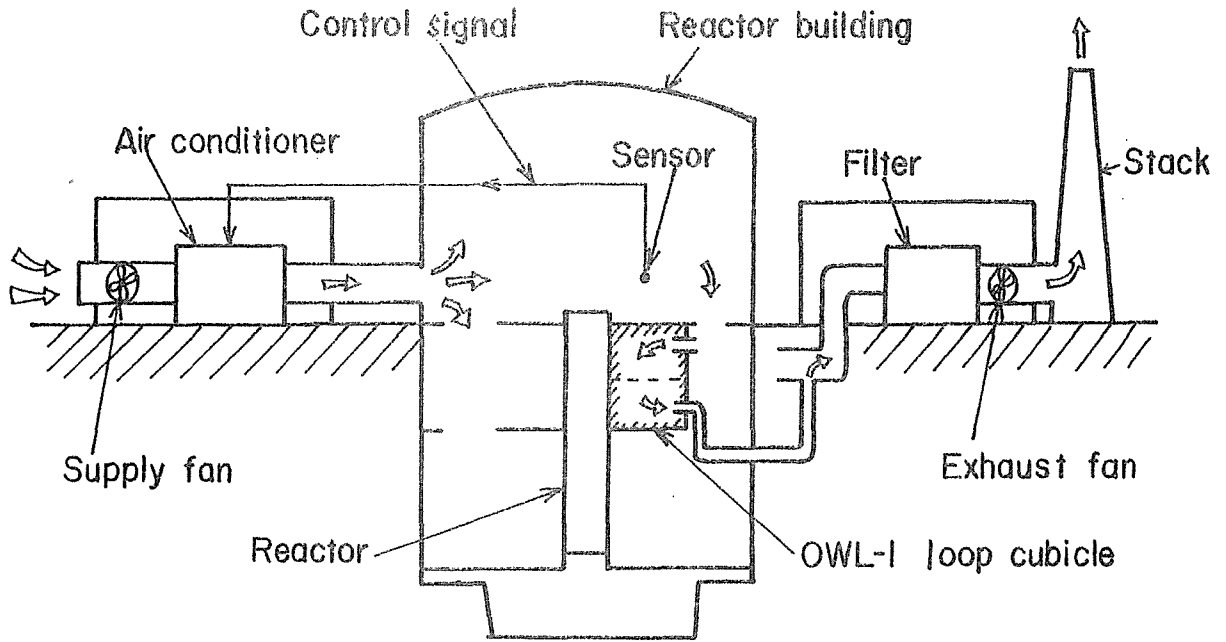


Fig.2 Air-flow paths in the reactor building ventilation system.

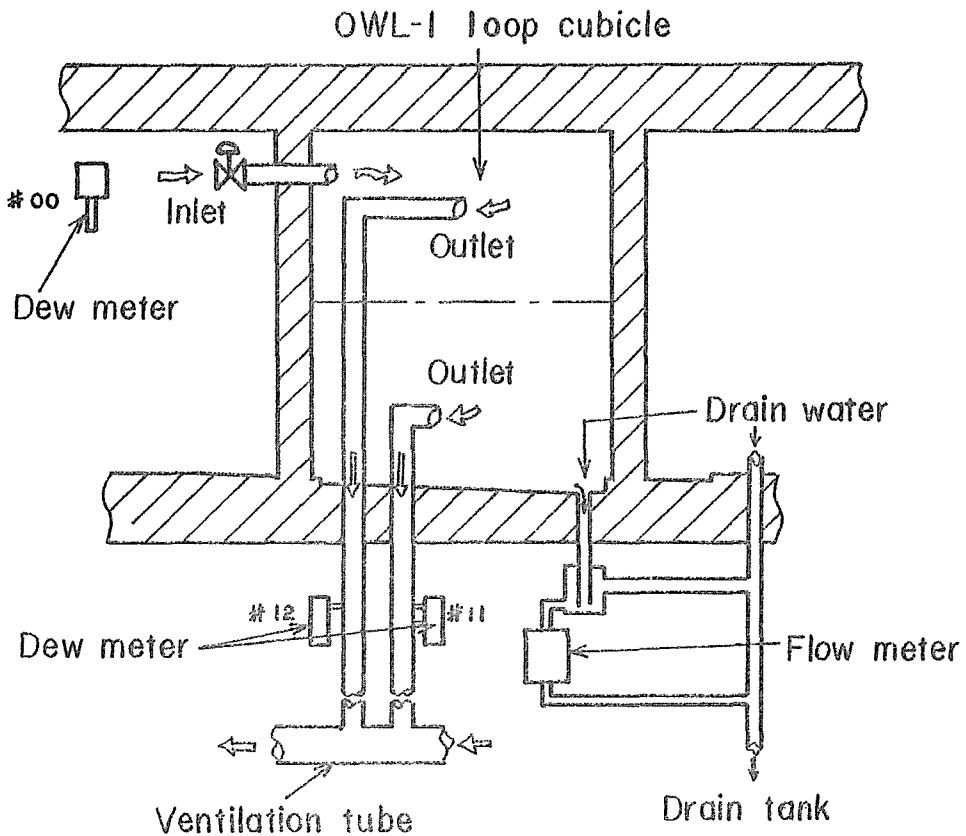


Fig.3 Diagram showing air-flow paths for the cubicle ventilation and location of dew meters.

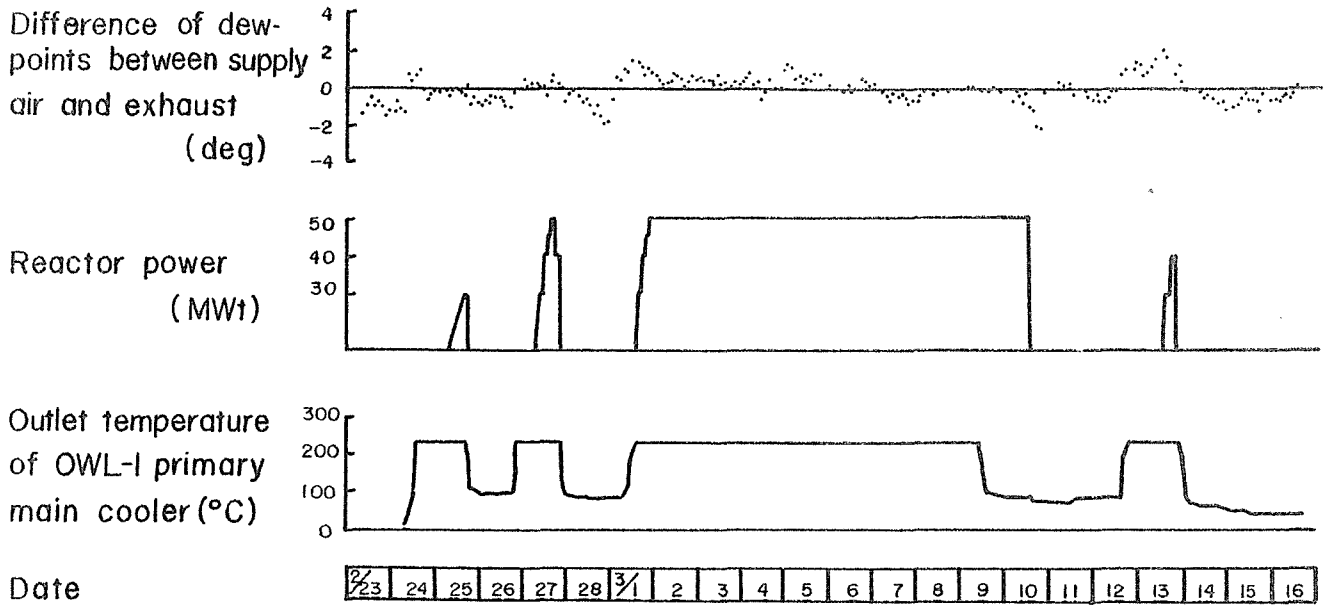


Fig.4 Operational record of JMTR and OWL-1 loop during the 43rd cycle operation.

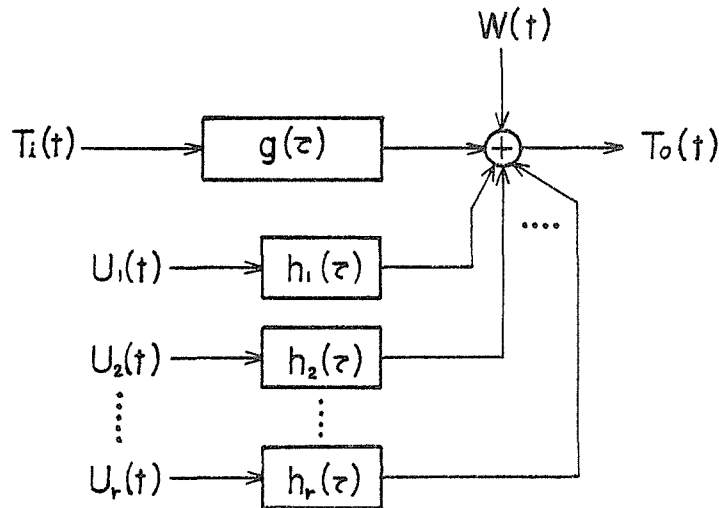


Fig.5 Blockdiagram of dewpoint dynamics in the OWL-1 loop cubicle. $T_i(t)$ and $T_o(t)$ indicate dewpoints of supply air and exhaust, respectively. $U_m(t)$ ($m=1, 2, \dots, r$), quantities affecting the exhaust dewpoint other than that of the supply air. $g(t)$ and $h_m(t)$ represent dynamic characteristics between variables respectively concerned. $W(t)$ is an independent random disturbance to the exhaust dewpoint.

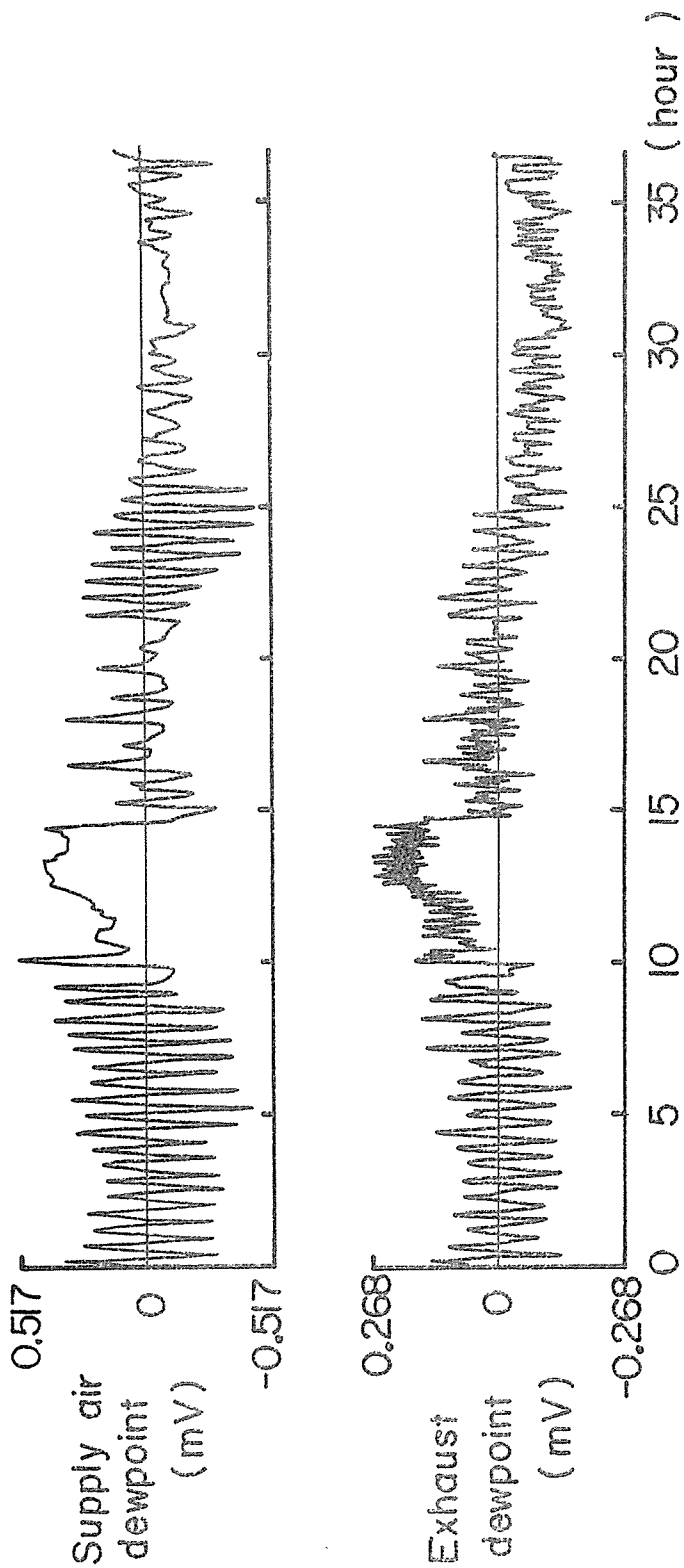


Fig.6 An example of dewpoint measurement data.

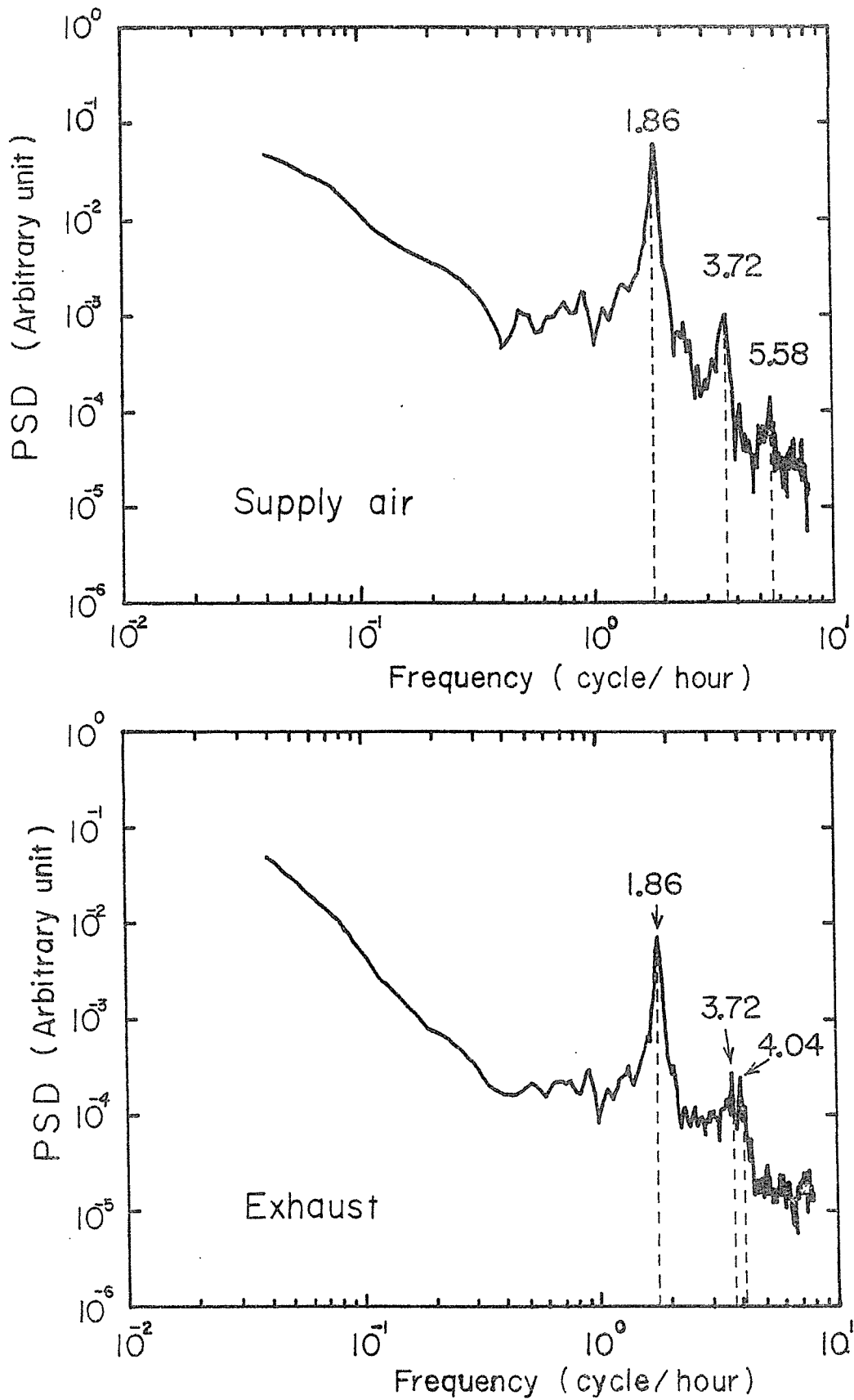


Fig.7 Power spectral densities of dewpoint signals for the supply air and exhaust.

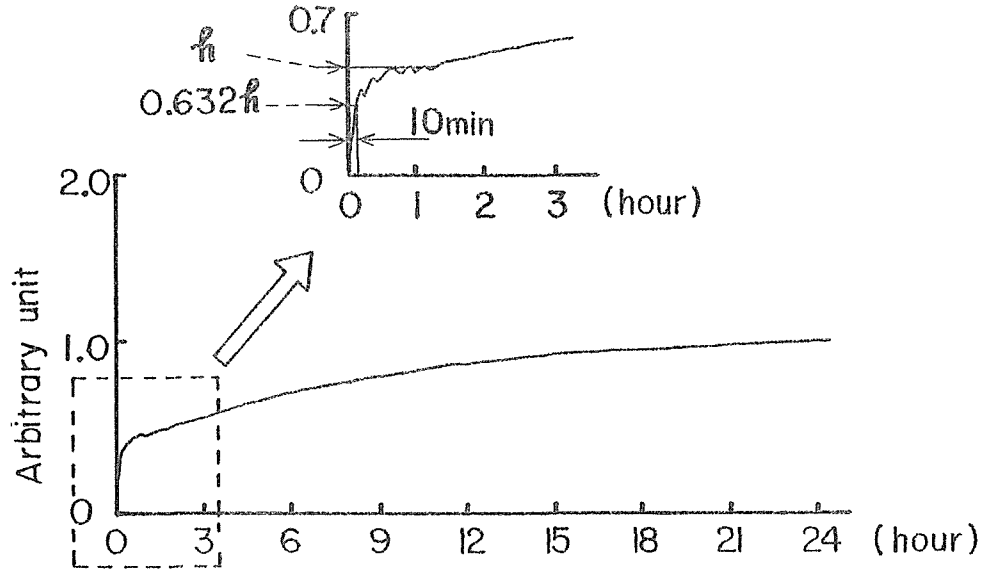


Fig.8 Step response of the exhaust dewpoint to a step input of the supply dewpoint based on the identified model (Case 1).

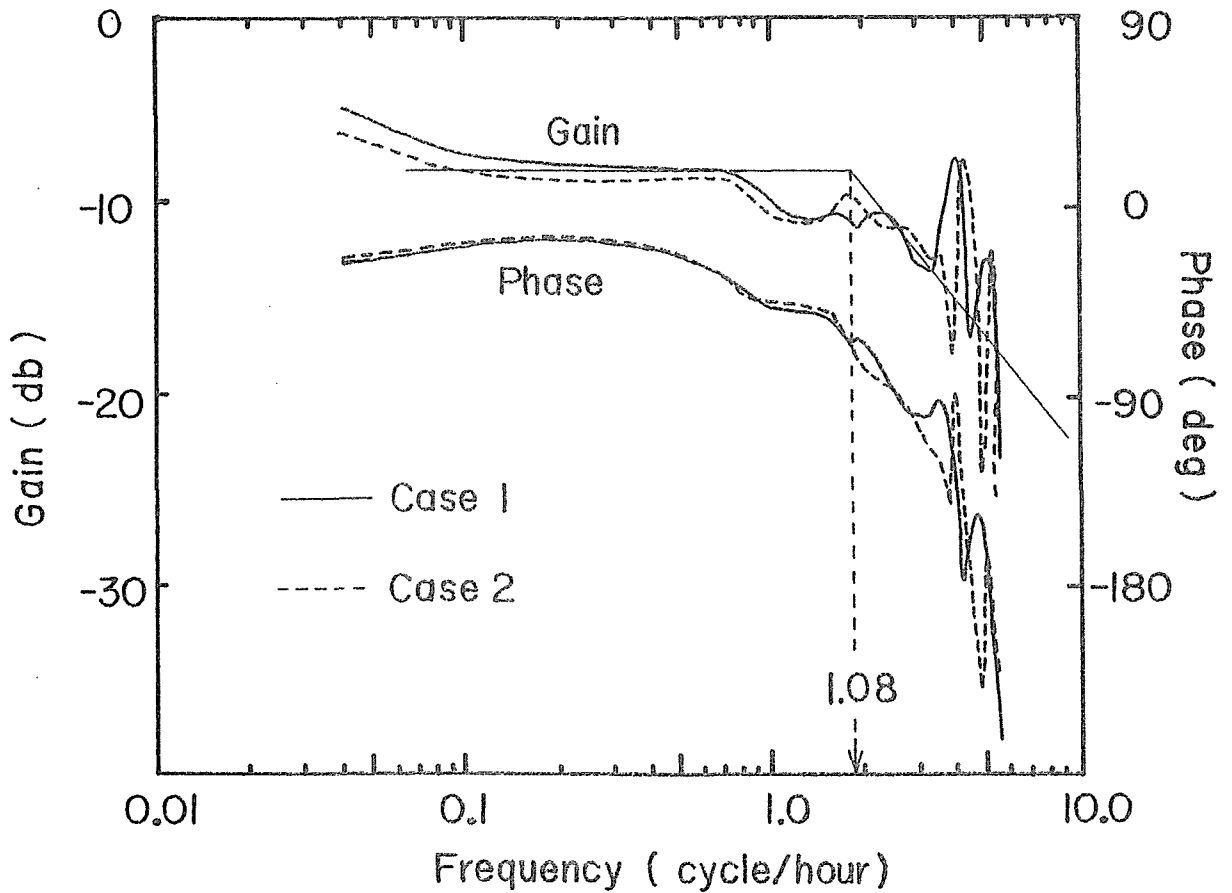


Fig.9 Frequency response of the exhaust dewpoint to variations of the supply dewpoint based on the identified models (Case 1 and Case 2).

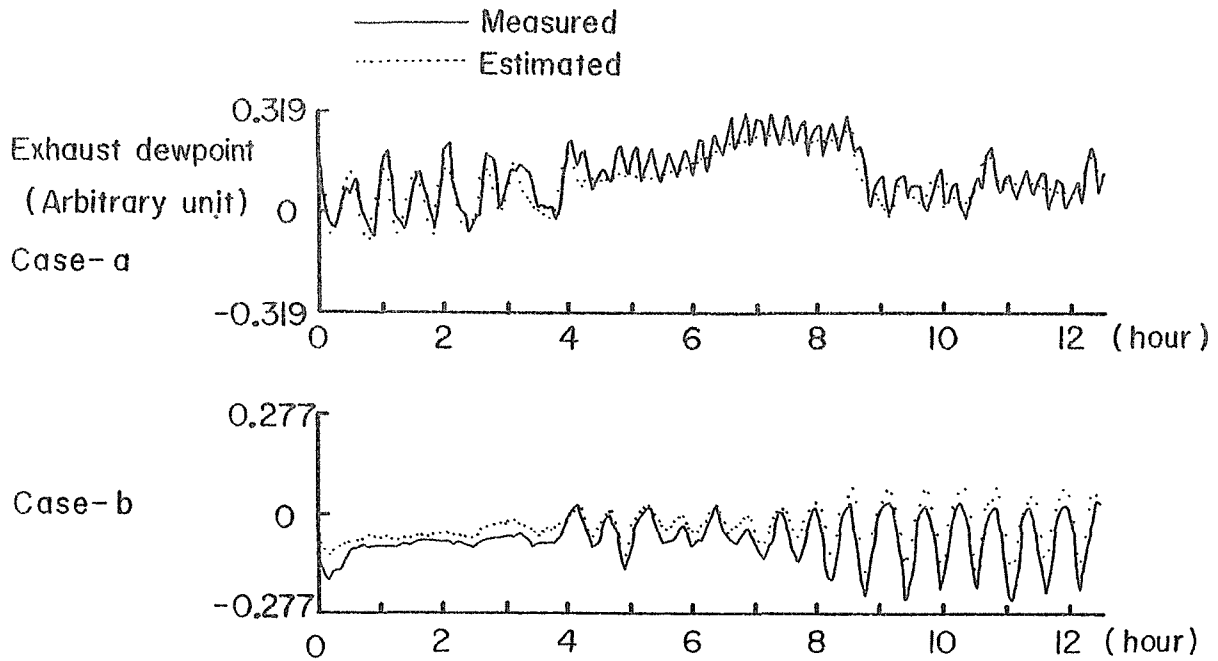


Fig.10 Typical example of the exhaust dewpoint estimation based on an identified dewpoint dynamics model. In the Case-(a), estimates follow quite well the raw measurement data in a sense of mean value. Case-(b) indicates that the estimates are slightly higher than the measurement values.

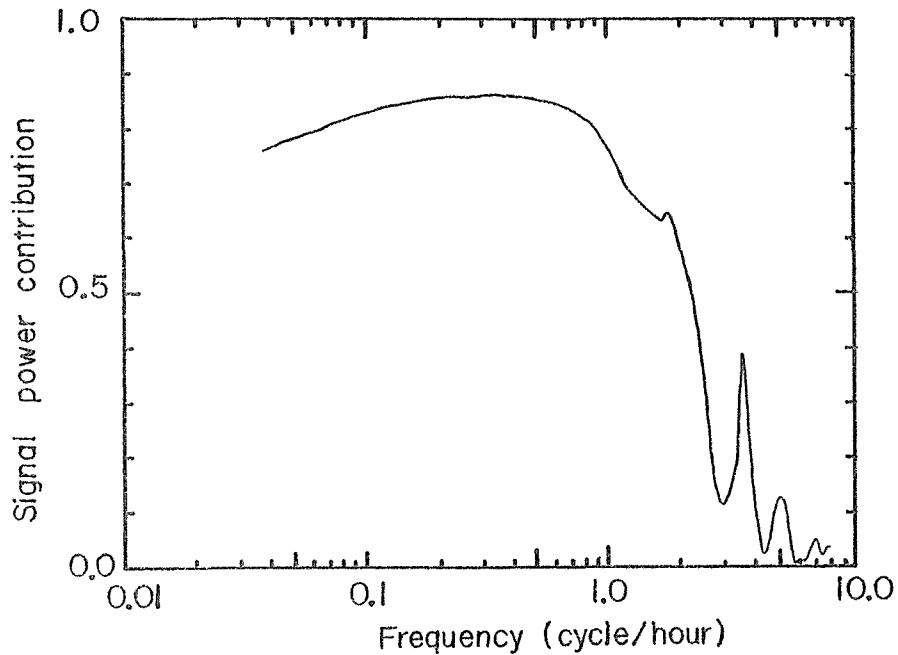


Fig.11 Evaluation of signal power contribution ratio based on an identified dewpoint dynamics model.

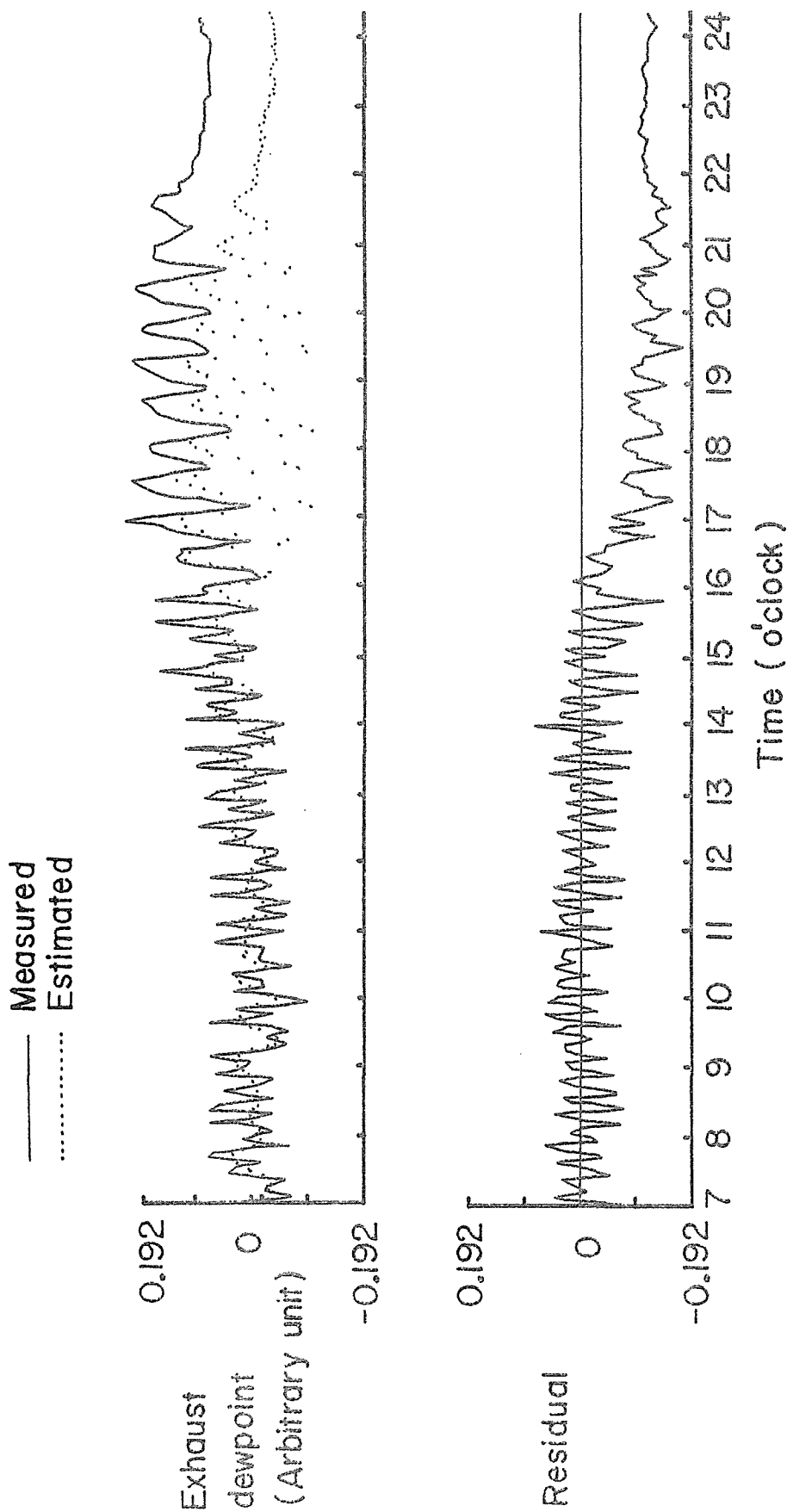


Fig.12 Comparison of the measured and the estimated exhaust dewpoints for the period in which the abnormal water leakage occurred.

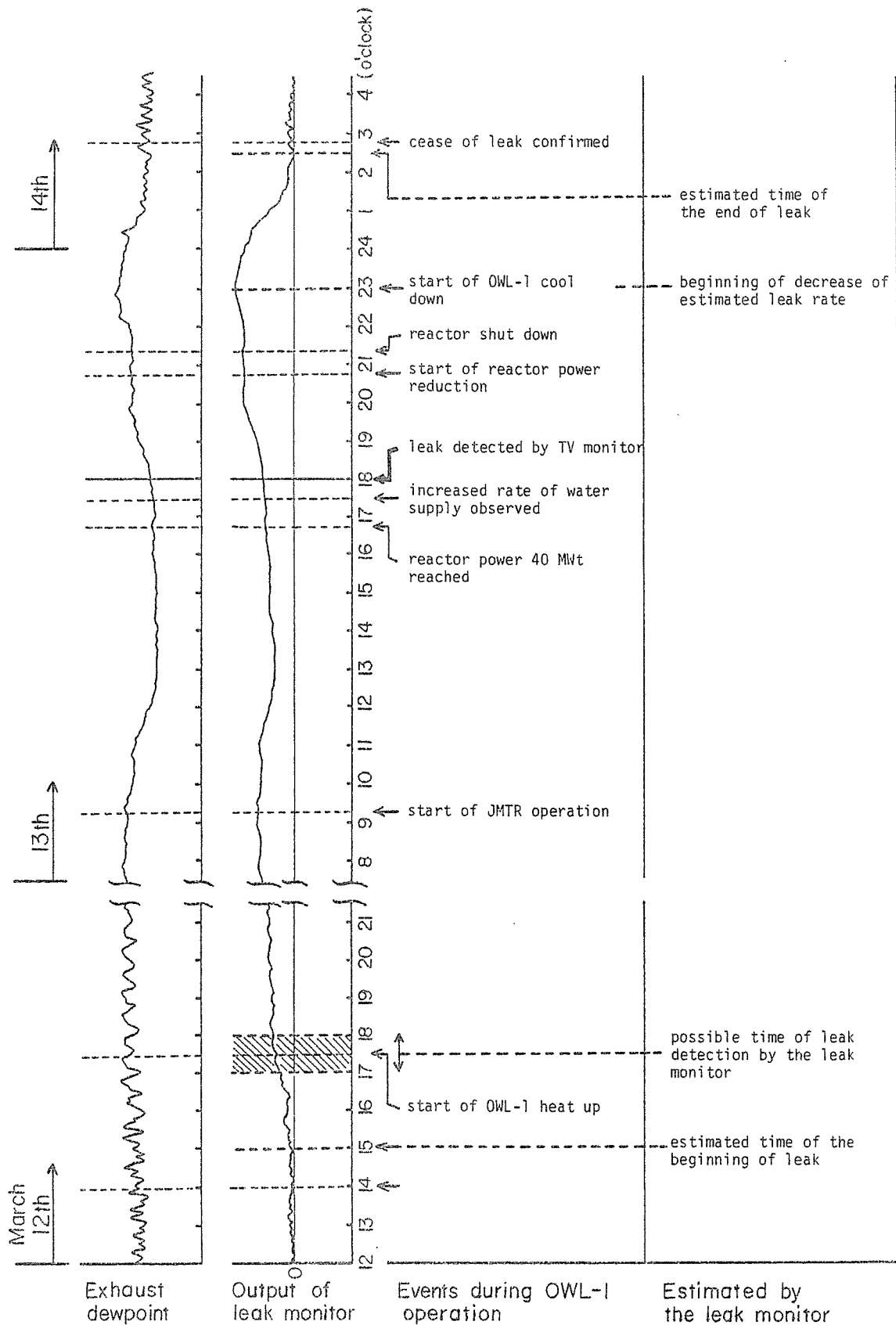


Fig.13 Time history of the events before and after the detection of abnormal water leakage.