

原型炉蒸気発生器における小規模漏洩の検出

Detection of Small Leaks in Proto-type FBR
Steam Generators

April 5, 1971

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

O-ARAI ENGINEERING CENTER

POWER REACTOR & NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CORPORATION

複製あるいは入手については、下記にお問合わせ下さい。

東京都港区赤坂 1-9-13 (〒107)

動力炉・核燃料開発事業団

計画管理部技術情報室

または、茨城県大洗町成田町 (〒311-13)

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター 総務課

Enquiries about this document should be addressed to;

Technical Information Service,

Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation,

1-9-13, Akasaka, Minato, Tokyo, Post NO. 107, Japan

or to ; O-arai Engineering Center,

Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation,

Narita, O-arai, Ibaraki, Post No. 311-13, Japan

訂正表

1	下から10行目	連続的	→	連続的
7	上から5行目	4.5×10^4	→	4.5×10^4
8	上から11行目	10×10^4	→	10×10^4
14	上から14行目	[55000] [500] II	→	[55000] [500] I
15	下から15行目	商標(商)	→	商標(商)
24	上一行目	第15行目(商)	→	第15行目
25	上から1行目	NO-水豆天(商) 合流(商)		
		NO-水豆天(商) 合流(商)		

原型炉蒸気発生器における小規模漏洩の検出

池 本 一 郎^{*}

要 旨

Na 加熱蒸気発生器における小規模水リーク事故によって隣接伝熱管が損耗し大リーク事故が生じる加能性がある。そのため原型炉級の Na 加熱蒸気発生器の小規模水リーク事故の検出方法の調査と、その検出器に要求される性能を計算した。

現在小規模水リークの検出に最も有望な方法は質量分析器を用いたニッケル膜拡散型 Na 中水素検出器である。原型炉級蒸気発生器に使用する場合 0.1 ppm H₂ 以上の感度を必要とするが、拡散膜部分を流れる Na 温度を一定高温に保ち、Na 中の水素のバックグラウンド濃度を低く保てば要求される感度を達成することはさほど困難ではない。

しかし、検出計位置までの水素の輸送時間おくれのため、ジェット型リークが発生した場合リーク率によっては水素検出計だけでは隣接伝熱管への破損伝播を防止できない場合もあり、音響式などの即答性のリーク検出計の開発が必要となる。

昭和 46 年 4 月

ナトリウム技術部高速炉安全性試験室

池 本 一 郎

※大洗工学センターナトリウム技術部高速炉安全性試験室

Oh - 2	
Oh - 3	

Detection of Small Leaks in Proto-type FBR Steam Generators

Ichiro Ikemoto*

Abstract

In the operation of sodium-heated steam generators, small or pin-hole leaks, which might cause large scale sodium-water reactions due to the "wastage" of adjacent tubes, should be quickly detected and the steam generator should be rapidly isolated. So the detection methods of small water leak are reviewed, and the required specification of the detector is calculated in the case of proto-type LMFBR ('MONJU') steam generators.

In the present time, most feasible method of detection of small leaks is the in-sodium nickel membrane diffusion type hydrogen detector with mass spectrometer. The sensitivity of the hydrogen detector should be less than 0.1 ppm H_2 in the case of the proto-type LMFBR steam generator, and it is easily achieved if sodium temperature at the nickel membrane is constantly high (more than 450°C) and initial concentration of hydrogen in sodium is sufficiently low (less than 1 ppm). Because of the hydrogen transport time to the detector it is difficult, however, to prevent the propagations of the tube failure if the jet-type leaks occurred at some leak rates,

and so the development of the fast-response leak detectors, such as acoustic detector, is required.

* Fast Reactor Safety Laboratory, Sodium-Technology Department,
O-arai Engineering Center

C h - 2	
C h - 3	

目 次

1	ま え が き	1
2	小リーク検出器の種類	1
2-1	カパーガス中検出器	1
2-2	Na 中検出器	2
2-3	そ の 他	2
3	ニッケル膜拡散型 Na 中検出器	3
3-1	検出器の型	3
3-2	検出器の感度	4
3-2-1	拡散膜の材料	4
3-2-2	拡散膜の厚さ	5
3-2-3	拡散膜の温度	5
3-2-4	水素のバックグラウンド濃度	5
3-2-5	拡散膜の形状	6
3-2-6	Na 流速の影響	6
4	水素検出器に要求される仕様	6
4-1	フローシート	6
4-2	SG, RHの仕様	6
4-3	Na-水反応式	8
4-4	損耗による伝熱管の破損	8
4-5	リーク率と損耗率の関係	10
4-6	リーク検出および防護系作動に要する時間	13
4-7	T_D の計算	14
4-8	計算結果	15
4-9	考 察	15
5	あ と が き	24

1. ま え が き

Na加熱蒸気発生器（以下SG）、再熱器（以下RH）での小リーク検出の重要性が注目をあびるようになったのは、エンリコ・フェルミ炉で小リークによって隣接管が損耗（wastage）して伝熱管の破損が伝播することが認められてからである。APDAのRig 10, 43における実験では、ジェット型リークの場合、リーク率によっては数十秒で隣接管が破損することが認められている。⁽¹⁾

Na冷却高速炉のSG, RHにおいては、数千ヶ所の溶接部や数千㎡におよぶ伝熱面積を考えると、その使用期間（たとえば30年）を通じて、リークの発生を完全に阻止することは困難である。したがって、破損の伝播によるSG, RHの大規模な破損修理や、原子力発電プラントを一日停止することによって数千万円の損害をうけることなどを考えると、安全性、経済性の面から、小リークの早期検出、SG, RHの迅速なしゃ断が必要とされる。

小リークを検出する場合いろいろの方法が考えられるが、現在のところその信頼性、感度、応答時間などにより、Na中の不純物（水素、酸素）によって検出する方法が妥当と思われる。Na中の水素検出と酸素検出の両方が考えられているが、Naは、普通の場合、プラントに存在する種々の不純物源（配管の酸化物や空気のもれ込み）によって、酸素で汚染されることを考えると、Naへの水のリークは、水素の検出によって行なう方が信頼性、感度の点で、よりすぐれていると思われる。

2. 小リーク検出器の種類

小リーク検出器として考えられるものには、大別してカバーガス中検出器とNa中検出器がある。

2-1 カバーガス中検出器

(I) カバーガスクロマトグラフ

装置自身は簡単で、経験もあり高感度であるが、短所として応答時間が長く、速続的な測定ができない。最大の欠点としては、特に小リークのように、カバーガス中に少量の水素ガスが蓄積していく場合、カバーガス空間の低温部（ $\sim 300^{\circ}\text{C}$ 以下）に蒸着しているNaによって水素ガスがNaHの形で大量にトラップされて、検出器に水素ガスが達しない。このことはフランスの実験⁽²⁾やAPDAの実験⁽³⁾で確認されており、カバーガス中の水素の検出は困難で実用的でないことを指摘している。APDAの実験では、最も水素ガスがNaにトラップされる部分は、サンプリングラインの配管およびベーパートラップであった。

(II) 熱伝導セル

上記の理由で実用的でない。

(iii) 拡散型水素計

同 様

(iv) 圧力検出器

カバーガス空間で水素ガスがトラップされるという同様の欠点はあるが、かなり大きなリークで、大量の水素が発生する場合は、応答時間が短いため有効な検出器となる。

2-2 Na 中検出器

(i) Rhometer

主として酸素に感じると思われるが、他の不純物（水素，炭素，チッ素ガス）などが指示に影響を与える加能性があるし、特に温度依存が非常に大きく温度補償が必要である。

(ii) フラッキング計

感度があまりよくない。大きな欠点として応答時間が長い（数分～数十分）ことがあげられる。

(iii) バブル計

SG出口にバブル計を取付けた結果では、長いdelay timeがあることが報告されている。(4) これはNaが水素で飽和した後はじめてバブルの発生があると考えられるためである。

(iv) 酸素計

UNCでかなり高感度のものが開発されているが、各酸素計ごとに非常に差があり、信頼性もあまりない。(5)

(v) Hydrogen Activity Meter

開発中であり性能は不明

(vi) 拡散型水素計

現在のところ小リーク検出に対して最も信頼性にすぐれ、感度が高く作りやすいと思われる。適当な水素のバックグラウンド濃度のもとでは、数ppbの感度をもっと報告されている。(2)(6)

2-3 その他

(i) 音響式検出器

これから開発されるべき検出器で、もしこれが信頼性あるものとわかれば、応答時間がほとんどゼロであるため、リークの検出に大きな武器となるであろう。APDA⁽⁷⁾、日立⁽⁸⁾の実験では、数kHzのところNa-水反応固有の周波数帯があることを見出している。

(ii) サンプリング分析

これは、分析に時間がかかり、失敗をもたらす潜在的な原因（サンプリングの困難さ）が多く、連続的な測定ができないため不適。

以上のように、現在のところ、小リーク検出器として最も信頼性が高く、高感度で、応答

時間が短かく、実用化が可能なものは、Na 中水素検出器であろう。

以下にこの型の水素検出器を検討する。

3. ニッケル膜拡散型 Na 中水素検出器

3-1 検出器の型

拡散型検出器の型を大きく分類すると、次の4つに分類される。

(i) 真空度低下検出型

これはニッケル薄膜を通して拡散した水素による真空度の低下を検出する方法で、1962年に AI でこの型の検出器による実験が行なわれた。⁽⁹⁾ 真空度の低下を測定する方法として、(1) thermocouple gauge (2) ピラニゲージ (3) 熱伝導セル を検討したがピラニゲージが最も高感度のため使用された。しかし、この方法では連続測定が非常に困難で、感度が悪い。ソ連の実験⁽¹⁰⁾では、他のガス(空気など)のもれこみによる誤信号の可能性があることが指摘された。

APDA でもこの型の実験がされたが⁽¹⁾、感度が悪く、うまく作動しないと報告されている。

CEN の実験⁽²⁾でも、感度が非常に悪いことが示された。このように、この型の検出法は感度が悪く、連続測定に不向きである。

(ii) アルゴンガス中拡散型

ORNL で開発されたシステムは、配管をそのまま拡散膜に用い(1" O.D. Croloy 9M と $\frac{3}{8}$ " O.D. 316s)、キャリアガスにアルゴン、検出部に熱伝導セルを用いたものであるが、アルゴンの純化が困難で(7~10 ppmH₂ を含む)高感度は望めない。

(iii) 触媒により酸化する方法

APDA の実験では⁽⁶⁾、ニッケルとパラジウムをメッキしたり、バイメタリックに引抜加工して、Na 側に共存性のよいニッケル、ガス側に触媒となるパラジウム、キャリアガスとして8% O₂ を含むアルゴンガスを用いて、ガス側の水素ガスの背圧をコントロールしている。この方法では Na 中の水素のバックグラウンドが非常に小さいならば、数 ppb の感度が期待できるとしているが、長期間の安定を欠くことや、キャリアガス中の H₂ 不純物によるパラジウムのゼイ化などに問題があるとしている。

(iv) 質量分析型

CEN の実験では⁽²⁾、0.2 mm 厚さの Ni 膜を用いて数 ppb の感度と、非常に早い応答時間を得ている。他にも、水素のみに選択的に感じ、アルゴンガス系やガス純化系が必要でないという利点をもつため、この検出法が主流となると思われる。

以上のように、水素計としては、質量分析器による検出が最も簡単で高感度、高信頼性が期待できる。

3-2 検出器の感度

水素計の感度を支配する要素は次にのべるようなものである。

3-2-1 拡散膜の材料

A I で、拡散膜材料として次の基準

- (i) 水素の拡散抵抗が小さいこと
- (ii) Na との共存性がよいこと
- (iii) 強度があること

に照らして、パラジウム、ニッケル、鉄の3種を検討した。⁽⁹⁾パラジウムはきわめて水素の透過性がよく⁽¹¹⁾高感度が予想されるが、Na との共存性に問題があるため除かれた。ニッケルは強度もあり、水素の拡散抵抗が小さく、Na との共存性がよいことで選ばれた。

APDAでは、Na側にうすいニッケル(0.003"厚さ)とガス側にパラジウム(0.012"厚さ)をバイメタリックに引抜加工して、きわめて透過性のよい拡散膜を作成している。⁽⁶⁾

日本(原研)では、ニッケルでは強度的に不安定であるとして316L SUS をベローズ状にして(0.015mm厚さ)強度と感度を得ようとしている。⁽⁴⁾

以上のことから、水素ガスによるゼイ化(低温でおこる。)の心配さえなければ、ニッケル-パラジウムのチューブが拡散抵抗を小さくできて有利であろう。しかし強度的にさほど問題がないならばニッケルチューブで十分である。(Table 1 参照)

Table 1 Comparison of Diffusion-type Hydrogen Detector

	Material	Thickness (mm)	Diameter (mm)	Length (mm)	Temperature (°C)	
A I (1)	Ni	0.254	51		~370	*
A I (2)	Ni	0.254	12.7	152	~370	**
C E N	Ni	0.20	4	~300	250-400	
APDA (1)	Ni	0.254	12.7	~3900	~480	***
APDA (2)	Pa Ni	0.254 0.050	7.4	3000		#
APDA (3)	Ni Pa	0.254 0.005	7.4	3000	370-540	##
APDA (4)	Ni Pa	0.076 0.305	7.4	3000	370-540	###
JAERI	SUS 316L	0.015			700	

- * Diaphragm type
- ** Annulus (Ni inner tube, SUS outer tube)
- *** Annulus with Pirane gauge
- # Ni plating on Pa tube
- ## Pa plating on Ni tube
- ### Codrawn Ni and Pa to form a bimetallic tube

3-2-2 拡散膜の厚さ

拡散膜の厚さは大きすぎると感度が悪くなり、小さすぎると強度が不安である。膜厚を変えて実験した結果はないため、各実験の拡散膜の仕様を Table 1 に示す。Table によると Ni チューブの場合厚さ 0.2 ~ 0.25 mm で直径は 4 ~ 8 mm ぐらいが多い。

3-2-3 拡散膜の温度 (Na の温度)

拡散膜の温度は感度に大きく影響する。拡散膜を通しての水素の拡散量は次式で与えられる。⁽¹²⁾

$$\phi = \frac{K \Delta P^{1/2}}{X} \cdot A \cdot e^{-Q/RT}$$

ここに ϕ : 水素の flux

K : 透過係数

ΔP : 膜をはさんでの水素分圧の差

X : 膜厚さ

Q : 活性化エネルギー

R : ガス定数

T : 絶対温度

A : 拡散面積

温度の影響をみるために、いま 480°C のときの水素 Flux と 485°C の水素 flux を比べてみると

Q = 13,400 cal/mole を入れて

$$\frac{\phi_{485}}{\phi_{480}} = 1.06$$

となり、5°C の温度の変化で 6% の flux の変化となる。APDA の実験結果をみても⁽⁶⁾ 5°C の温度のゆらぎで 8% ぐらいの flux の変化となっている。このことは、水素計で連続的な水素の検出をするとき、大きな問題となってくる。すなわち、Na 中の水素濃度変化による flux の変化か温度変化による flux の変化かの区別がつかないためである。従って、Na の温度を一定に保つことが重要となる。

そのほか、CEN の実験でも⁽²⁾ 400°C と 250°C では flux が 10 : 1 ぐらいになると報告されている。

3-2-4 水素のバックグラウンド濃度

水素のバックグラウンド濃度は感度に非常に大きく影響し、感度はバックグラウンド濃度の約 1/10 だとされている。従って、0.1 ppm H₂ の感度を得ようとすればバックグラウンド濃度を 1 ppm H₂ におさえなくてはならない。エンリコ・フェルミ炉・運転経験では、一次ナトリウムの水素濃度は 1 ± 0.4 ppm であったと報告されている。これを考えると 1 ppm 以下に保つことは、さほど困難なことではないと思われる。

CEN の実験では⁽²⁾、水素のバックグラウンド濃度は、SG の水側の腐蝕によってできた H₂ が伝熱管を通して拡散する結果であるとしている。これによると、2 1/4 Cr-1Mo 伝熱管では最初のうちは (マグネタイト層ができるまで)、水素の拡散量は非常に大きく、

マグネタイト層ができてしまうと、約 $10^{-8} \text{ mg H}_2/\text{h} \cdot \text{d m}^2$ (28 mm O.D. 2.6 mm 厚さの伝熱管で水温 300°C) でほぼ一定となる。これをふつうの SG について計算してみると、伝熱面積を約 $3,000 \text{ m}^2$ として水のリーク率に換算して約 $2 \times 10^{-7} \text{ lb/sec}$ ぐらいのものとなる。

3-2-5 拡散膜形状

AI の実験では⁽⁹⁾、チューブ型の方がダイアフラム型よりすぐれ、拡散膜を流れと平行におく方が垂直におくより感度がよいと報告している。

3-2-6 Na 流速の影響

AI の実験では⁽⁹⁾、 $3 \sim 32 \text{ ft/sec}$ の範囲では、流速が大きくなるほど、水素の拡散量が減少している。

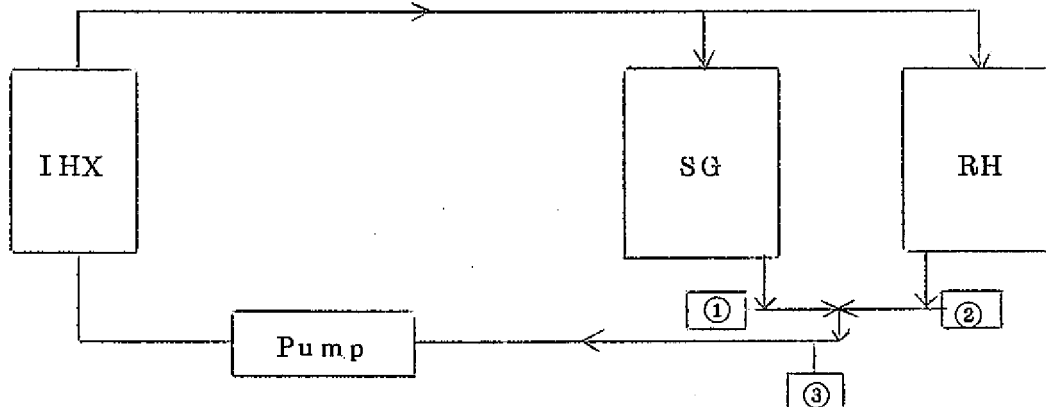
ソ連の実験では 2 m/s までの流速では、影響がないとし⁽¹³⁾、CEN の実験でも、レイノルズ数が $1,000 \sim 7,000$ の間では影響がなく⁽²⁾、APDA の実験でも約 $1 \text{ m/sec} \sim 3 \text{ m/sec}$ の範囲では流速の影響がみられないと報告されている。

以上のことを考え合せてみると、Na 中型水素計では、拡散膜部分を通過する Na の温度を高温 (450°C 以上) で一定に保つことと、Na 中の水素のバックグラウンド濃度を低くおさえることがその感度、積度を高めるのに重要であることが判る。

4. 水素検出器に要求される性能

原型炉級のユニット型 SG, RH に Na 中水素検出器を装置した場合に要求される水素検出器の性能を、水のリーク率、出力レベル、リーク場所などをパラメータとして、APDA の計算法⁽¹⁴⁾に従って計算した結果を以下に示す。

4-1 フローシート



二次系のフローシートは上図のようになっており水素検出器を SG の出口 (①)、RH の出口 (②)、合流点 (③) においた場合について計算した。

4-2 SG, RH の仕様

Table 2 に SG, RH の設計条件を示す⁽¹⁵⁾。SG-I 領域は予熱域、沸とう域に相当し、SG-II の領域はスーパーヒータに相当する。

Table 3 に Na のインベントリを SG, RH, 共通の系について示す。なお Na の流れのない (Stagnant) 部分は除いてある⁽¹⁵⁾。

Table 4 に Power Level が変化した時の 2 次系の Na 流量の変化を示す⁽¹⁵⁾。

Table 2
Specifications of Steam Generator and Reheater

	SG - I*	SG - II*	Reheater
Sodium flow rate(kg/h) (lb/h)	2.88x10 ⁶ 6.35x10 ⁶		0.85x10 ⁶ 1.87x10 ⁶
Sodium max. temp.(C) (°F)	480 900	513 1000	513 1000
Max. pressure (kg/cm ²) (psi)	192 2730	173 2460	35 500
Tube Material	2.25Cr-1Mo		2.25Cr-1Mo
Tube thickness(mm) (mil)	4.0 157	6.5 256	2.9 114
Tube diameter (mm) (inch)	27.2 1.07	27.2 1.07	38.1 1.5

* Evaporator

** Superheater

Table 3
Sodium Inventory

	SG	RH	Common System	
Inlet piping (m ³)	12.15	0.87	Pump	1.10
SG or RH (m ³)	32.00	30.00	IHX-SG,RH	13.27
Outlet piping (m ³)	4.01	1.50	Tee-Pump	11.44
			Pump-IHX	13.50
			IHX	16.00
Total (m ³)	48.16	32.37		55.31
(lb)	89902	60426		103249

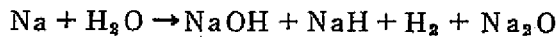
(Sodium Temp.= 440 °C 846.6kg/m³)

Table 4
Sodium Flow Rate - Power Level

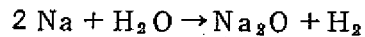
	100 %	75 %	50 %	30 %
S G (kg/h)	2.86x10 ⁶	2.04x10 ⁶	1.28x10 ⁶	0.75x10 ⁶
(lb/h)	6.35x10 ⁶	4.50x10 ⁶	2.82x10 ⁶	1.65x10 ⁶
R H (kg/h)	8.36x10 ⁵	7.38x10 ⁵	5.66x10 ⁵	3.62x10 ⁶
(lb/h)	1.87x10 ⁶	1.63x10 ⁶	1.25x10 ⁶	0.80x10 ⁶

4-3 反応式

一般的にいてNaと水の反応式は次のように表わされる。



しかし、小リークの場合は、高温Na中に少量の水が漏洩するため、水素はすべてガスとなってNa中にとけ込むと仮定した。(Fig. 1⁽³⁾参照)よって、Na-水反応式としては、次式を採用した。



一般的にいて、600°F以上の小リークによる反応では、この反応式が支配的であると考えられている。

APPAの実験によると⁽³⁾ Na中への水素ガスの溶解度は

$$\log \text{PPN} = -\frac{3180}{T(^{\circ}\text{K})} + 6.52$$

となり、 $T = 700^{\circ}\text{K}$ (427°C)ではNa中への水素ガスの溶解度は約100 ppmとなる。

従って、Na-水反応で生成された水素ガスは、まずガスの形でNa中に溶けこみ、その溶解度が飽和すると、NaHやNaOHの形で溶けこむと考える。

4-4 損耗による伝熱管の破損

(1) 伝熱管内圧に対して耐える伝熱管厚さ (Code Wall Thickness) は次の式によって計算される。

$$t_c = \frac{P \cdot d}{2S} \quad (1)$$

ここに t_c : Code Wall Thickness (インチ)

P : 内 圧 (psi)

d : 伝熱管直径 (インチ)

S : 許容応力 (最大引張強さ/安全係数) (psi)

この許容応力を温度の函数として示すと、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ では Table 5 となる。⁽¹⁴⁾

Table 5
Temperature - Allowable Stress (2.25Cr-1Mo)

T (°F)	S (psi)
800	15000
900	13000
1000	8000
1100	4000

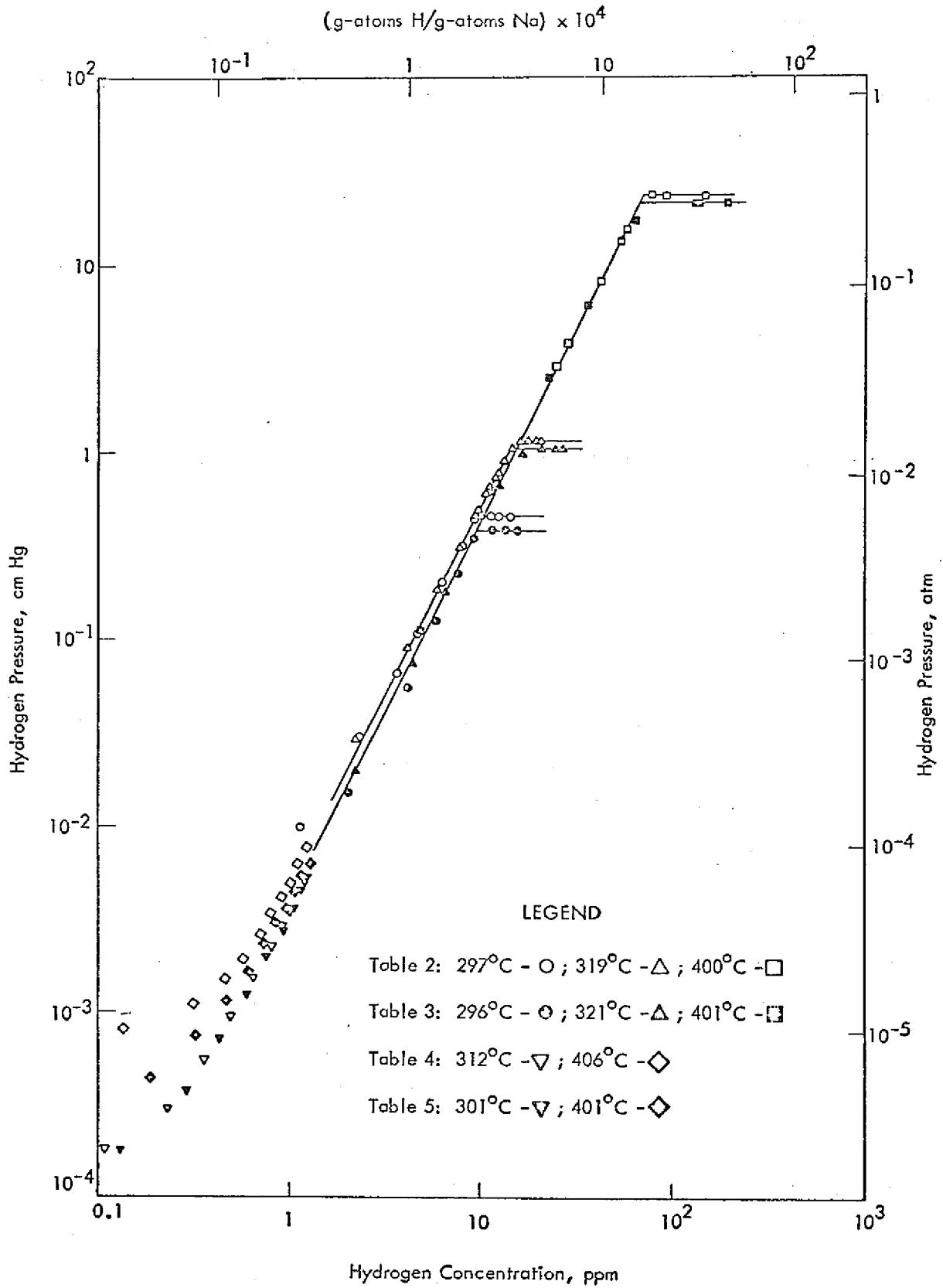


FIG. 1 HYDROGEN SOLUBILITY IN LIQUID SODIUM

(ii) 実際に伝熱管が破断する厚さを予想することは非常に困難である。APDAのRig 10での損耗の実験で内圧2650 psi 温度~600°Fの時、0.020インチで伝熱管が破断した。これを異なる実験条件(温度, 圧力)に単純な比例計算で適用して,

$$t_{\text{mim}} = 0.020 \left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{S_0}{S} \right) \quad (2)$$

ここに t_{mim} 伝熱管が破断しない最小の厚さ(インチ)

$$P_0 : 2650 \text{ psi} \quad S_0 = 15000 \text{ psi}$$

より求めることにした。

(iii) 損耗の程度

小リークによって伝熱管が損耗し、始めの厚さ(t_i)から徐々にうすくなっていく場合そのDamageの程度を次の3つに分類する。

- ・ Light Damage : (1)式で計算される厚さ以上の厚さがある場合、すなわち損耗量が $t_i - t_c$ 以下の場合で伝熱管の修理は不要
- ・ Severe Damage : (1)式で計算される厚さ以上に損耗が進み、(2)式で計算される厚さまでは損耗していない状態。伝熱管の破断は起っていないが、修理が必要。
- ・ Tube Failure : (2)式で計算される厚さ以上に損耗が進んだ状態で、この時は隣接管の破損が起っていると考えられる。

この規準に従って、原型炉級のSG, RHについて各Damageに対する損耗量を計算するとTable 6のようになる。このTable 6をみると、SG-Iの方が条件がかなりシビアであるため、SG-IIの方は考えなくてもよいと考えられる。

Table 6
Damage - Wastage

	SG - I (mil)	SG - II (mil)	RH (mil)
Light Damage	< 45	< 91	< 67
Severe Damage	45 ~ 134	91 ~ 221	67 ~ 107
Tube Failure	> 134	> 221	> 107

4-5 リーク率と損耗率の関係

リーク率と損耗率の関係はNaが静止しているか、流動しているかによって大きく変化する。Fig 2に静止Naの場合に各国で得られた関係を示す。⁽¹⁾ Fig. 3に流動Naの場合にAPDAのをとって次のようなリーク率と損耗率の関係を近似した。

(i) 静止Naの場合 (Fig. 2中に破線で示す。)

LR > 10⁻² lb/sec では

$$[WR] = 157 [LR]^{0.845}$$

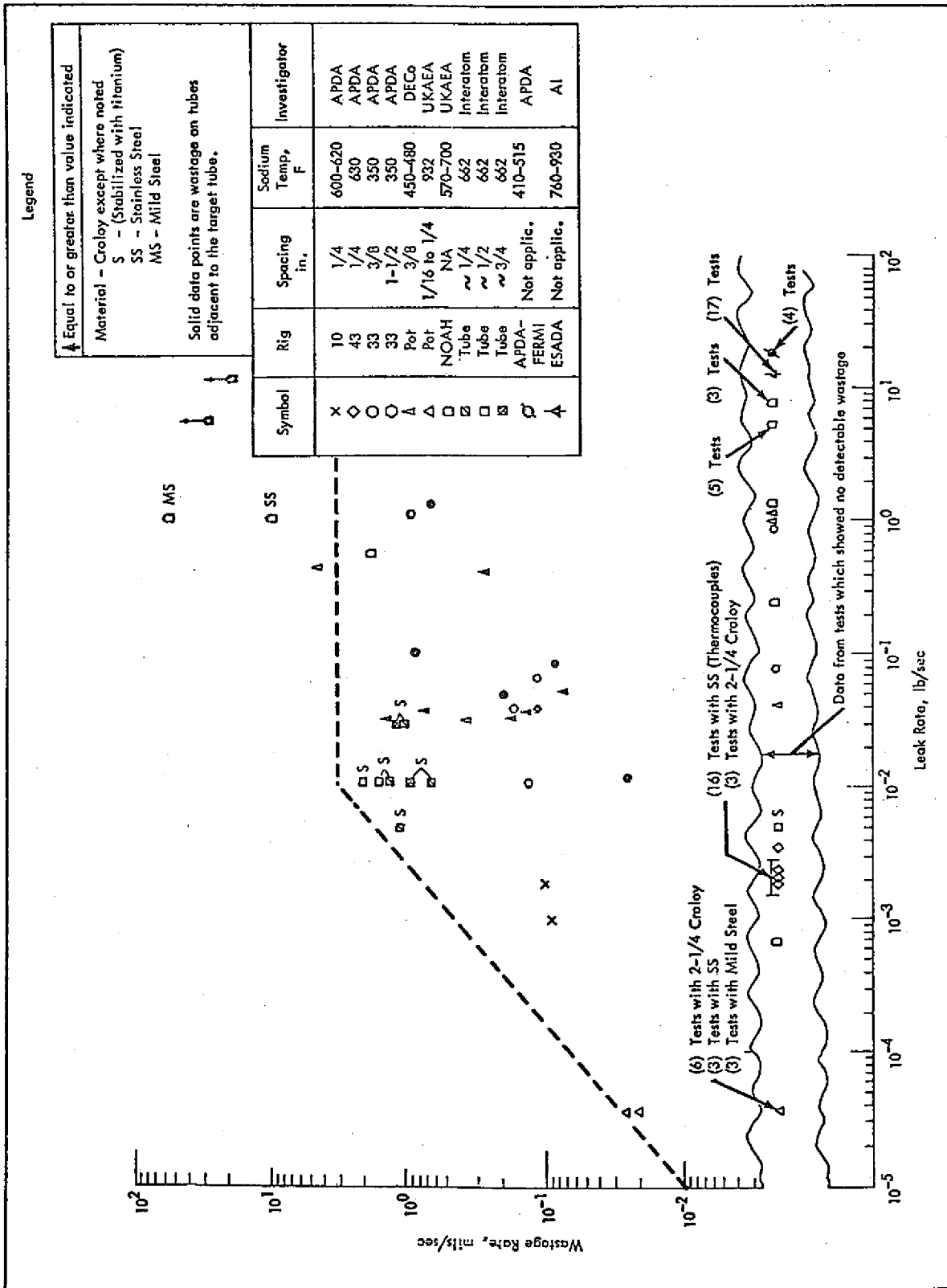


FIG. 2 MATERIAL WASTAGE RATES OBTAINED IN STAGNANT SODIUM SYSTEMS

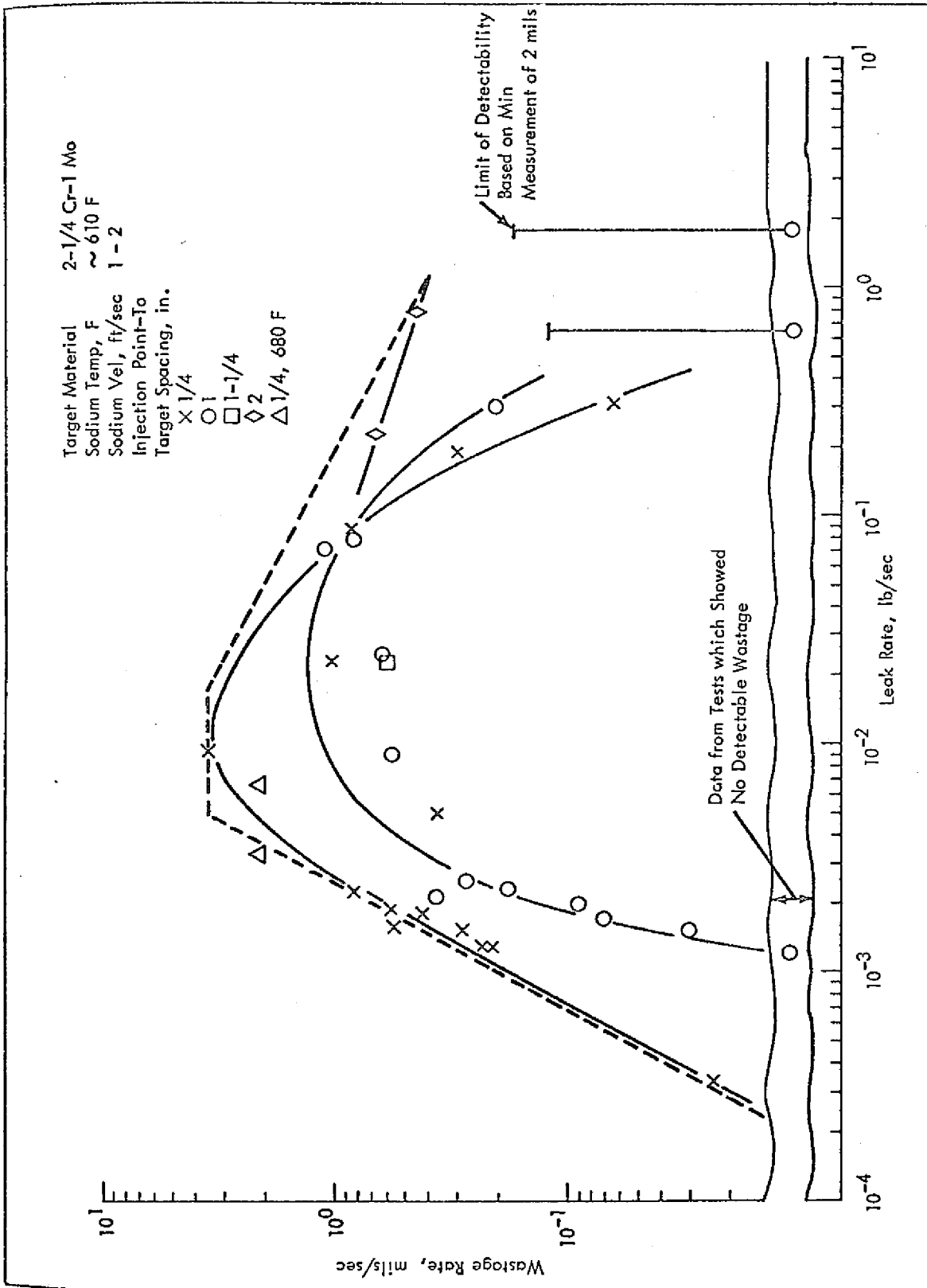


FIG. 3 EFFECT OF LEAK RATE AND SPACING ON TARGET TUBE WASTAGE RATES

$$LR > 10^{-2} \text{ lb/sec}$$

$$[WR] = 3.2$$

(ii) 流動 Na の場合 (Fig. 3 中に破線で示す)

◦ $LR \leq 5 \times 10^{-3} \text{ lb/sec}$ のとき

$$[WR] = 42525 \times [LR]$$

◦ $5 \times 10^{-3} < LR \leq 1.5 \times 10^{-2} \text{ lb/sec}$ のとき

$$[WR] = 3.2$$

◦ $LR > 1.5 \times 10^{-2} \text{ lb/sec}$

$$[WR] = 0.4 \times [LR]^{-0.495}$$

ここに

WR : 損耗率 mils/sec

LR : リーク率 lb/sec

実際の SG, RH の場合, Na は静止に近い部分もあり, 流速のかなり速い部分もあるため, リーク率と損耗率の関係はこの 2 つの近似式の両方を用いた。

4-6 リーク検出および防護系作動に要する時間

(i) 小リーク発生からリークを検出し, 防護系が作動して Na-水反応を停止させ, 損耗を終了させるのに必要な時間は次のような時間の和となる。

- ① T_T : 小リークが発生した場所からリーク検出器まで反応生成物 (水素) が輸送される時間
- ② T_D : 反応生成物 (水素) 濃度が, Na の循環とともに蓄積して, 検出できるレベルまで増加するに要する時間
- ③ T_R : 検出器の応答時間
- ④ T_P : 検出器のアウトプットをオペレータが判断して, 防護系の作動にふみきるまでの時間
- ⑤ T_S : SG または RH のしゃ断に要する時間

従って, 小リークの発生から SG, RH をしゃ断し反応を停止するまでの時間 T_0 は

$$T_0 = T_T + T_D + T_R + T_P + T_S$$

となる。

(ii) 各時間の評価

① T_T の評価

SG-II 領域は考えないとすると, 参考としている SG, RH においては, T_T は Table 7 に示すようになる。

不等号がついているのは, リークが SG-I 領域の最上流で発生した時, 最大の値をとるという意味である。

② T_D の評価

後述の計算を参照

③ T_R の評価

APDAの水素計では10~15 secとみられている。⁽¹⁴⁾ CENの実験ではもっと小さいと思われる。⁽²⁾ ここでは一応15 secを採用した。

④ T_P の評価

ある程度以上の水素濃度になると自動的にしゃ断系が働くようにしておけばこの時間はゼロ

⑤ T_S の評価

計算には、20, 40, 60 secの3通りの値を用いた。

Table 7
Evaluation of Transport Time ; T_T - power Level

	100 %	75 %	50 %	35 %
S G (sec)	≤ 334	≤ 48	≤ 76	≤ 130
R H (sec)	≤ 108	≤ 122	≤ 160	≤ 249

4-7 T_D の計算

T_D は、パワーレベル、リーク率、水素のバックグラウンド濃度（水素計の感度）、リーク位置（SG or RH）によって異なるため、これらをパラメータとして

- 小リーク発生から SG, RH のしゃ断までに要する時間
- その時の損耗量
- Damage の程度

を求めた。（Appendix 参照）

パラメータの範囲は

① リーク率

$10^{-4} \text{ lb/sec} \sim 1 \text{ lb/sec}$

② 水素計の感度

水素のバックグラウンド濃度の $1/10$ とし、バックグラウンド濃度を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ppm（感度は 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 ppm）とした。

③ パワーレベル

100%, 15%, 50%, 30%

④ リーク位置

SG-I 領域と RH の Na 側最上流。

4-8 計算結果

計算の結果、感度、パワーレベル、リーク位置をパラメータとして、系のシャ断時間が20秒のときのリーク率と、リーク発生からNa-水反応停止までの時間の関係を示したものがFig 4~11である。

(I) パワーレベルの影響

パワーレベルが減少すると、検出できるリーク率の範囲が小さくなる。これは、パワーレベルの減少とともに、Na流量が減少して、リーク発生位置から検出器まで到達する時間 T_T が大きくなるためである。従って、高出力（高流量）で運転する方がリークを早期に検出しやすい。

(II) 感度は、リーク率の小さいところで大きく影響するためNa中の水素0.1ppm以上の感度が是非とも要求される。

(III) SG, RHのシャ断時間の影響

リーク率が小さいところではほとんど影響がないが、損耗率が大きくなるとシャ断に要する時間内に損耗が大分進む。

(IV) 計算の結果をみると、Tube Tailureの前にリークを検出してSG, RHをシャ断するためには、水素計のみでは困難であり、損耗率が小さい場合（リーク率が小さいとき）は水素計、中間のリーク率は応答時間の早いもの（たとえば音響式検出計）がのぞまれる。もっと大きなリーク率では圧力計で検出できると思われる。

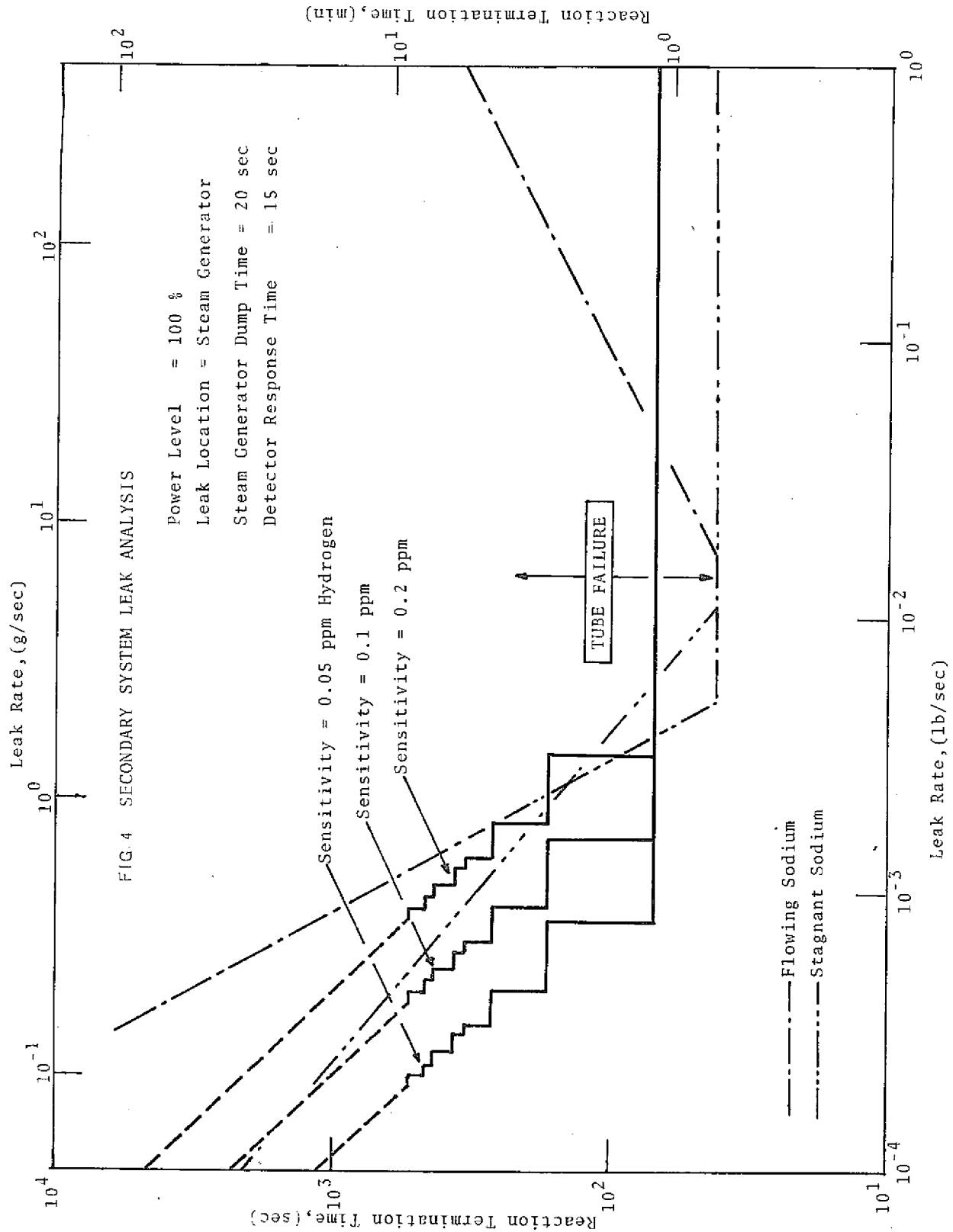
4-9 考察

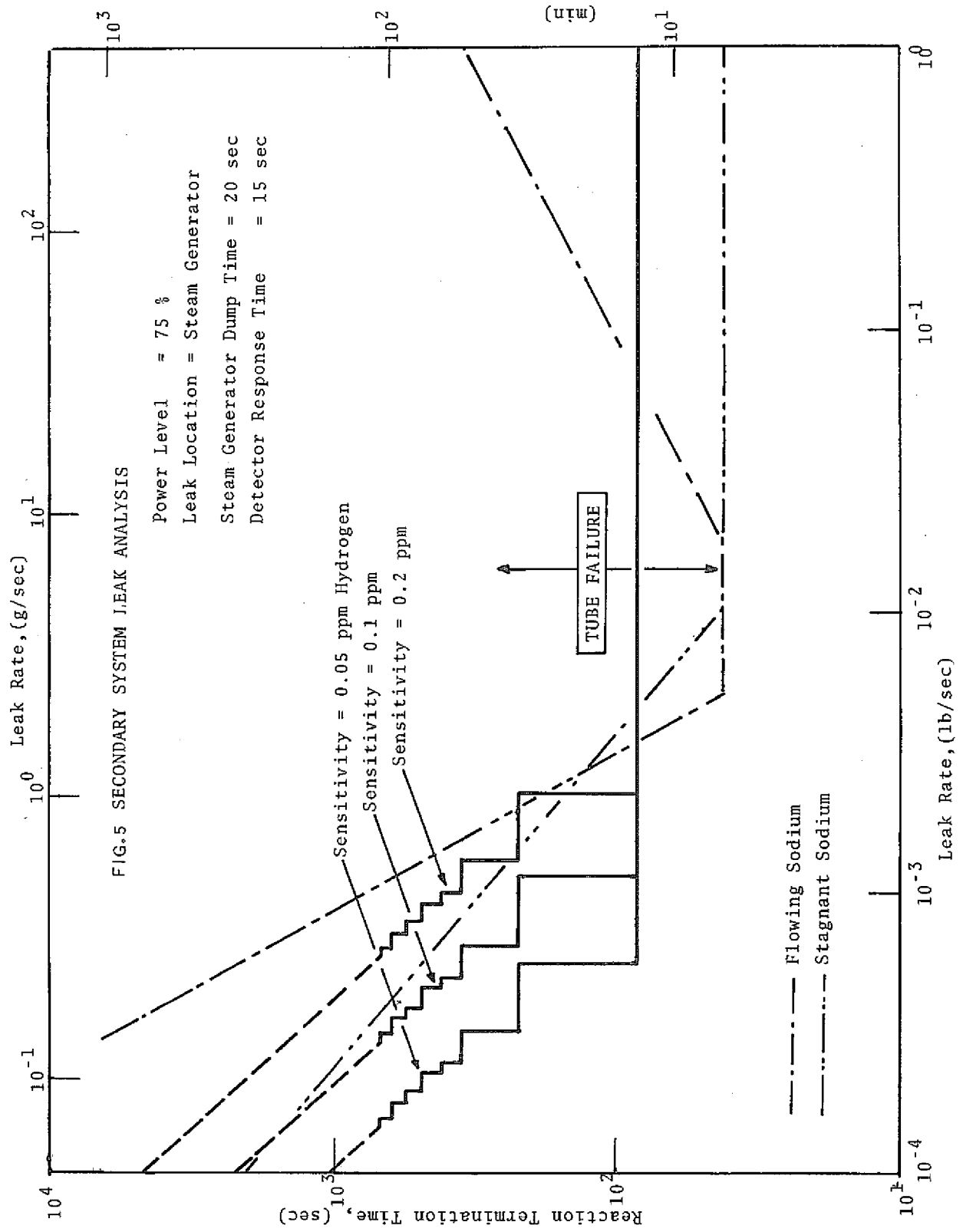
(I) 水素計で小リークを検出する場合、ジェット型リークによる損耗率を用いると隣熱伝導管の破損前に系をシャ断することが不可能な水リーク率の範囲が存在し、水素計が万能であるとは言えない。水素計が非常に有効なのは $\sim 5 \times 10^{-8}$ lb/sec以下の微小リークであり、それ以上のリーク率の場合は損耗率が大きくなってリーク場所から検出器へ達するまでの時間（Table 7参照）と検出器の応答時間（ ~ 15 秒）の間に損耗が大きく進むため応答時間が早い検出器（感度、信頼度の問題が解決すれば酸素計やRhometerなど）とか音響式検出器が適すると思われる。特に音響式検出器は上記の2つの時間がほとんどゼロに近いので、損耗率の大きなリーク率の場合、非常に有効だと思われる。

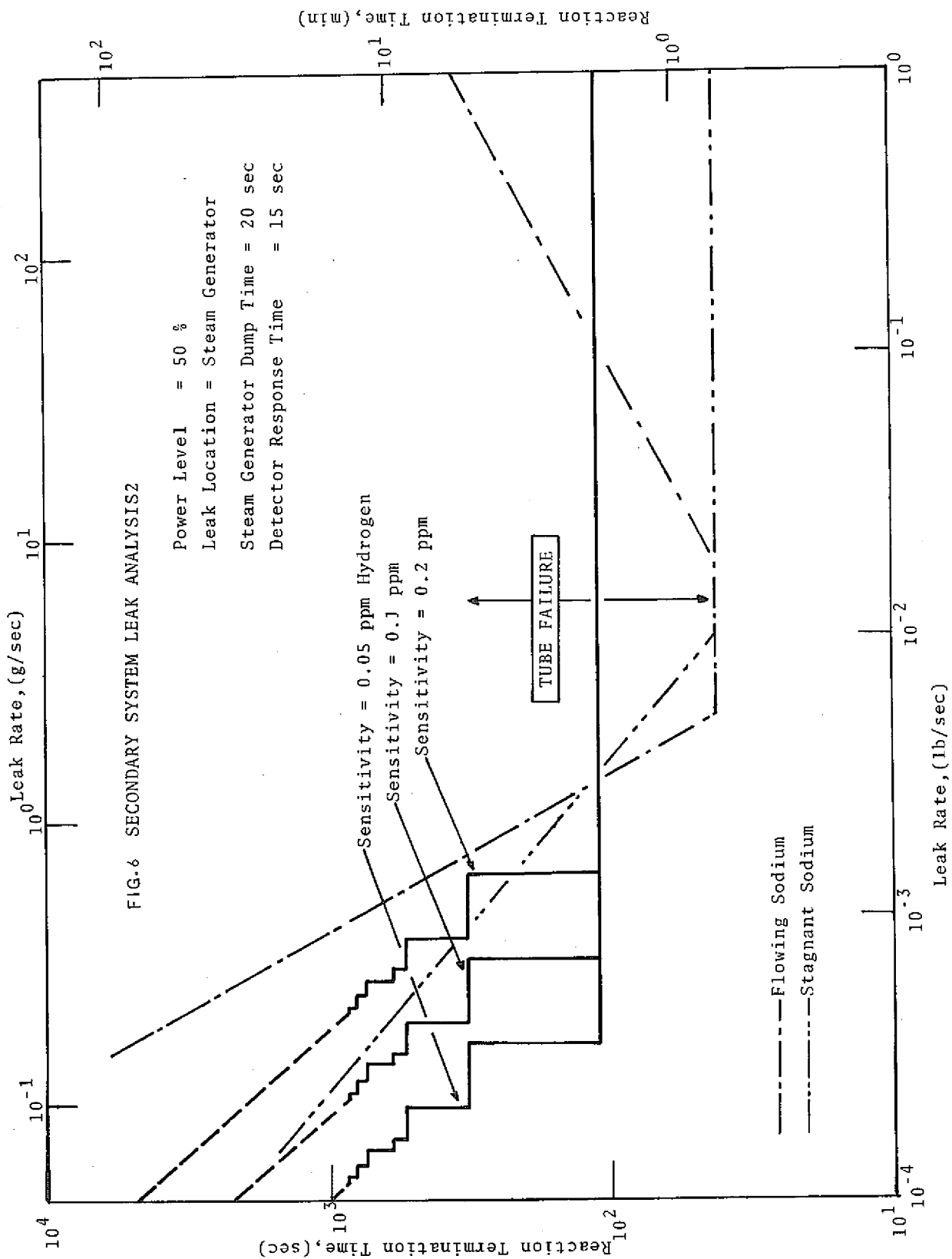
さらにリーク率が大きくなると圧力検知器で検出できると思われる。

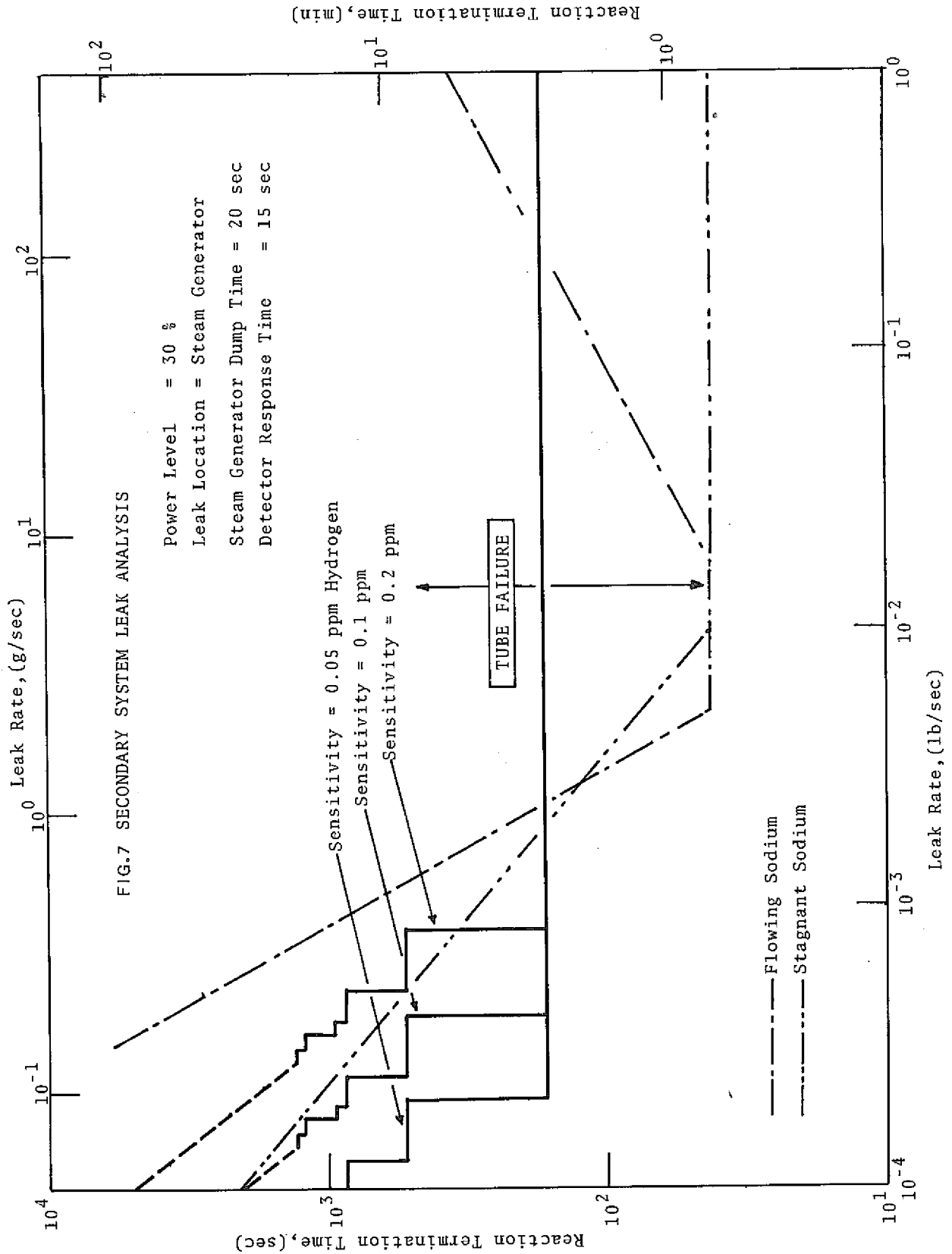
(ii) 水素計を原型炉級のSG, RHにとりつける場合、感度として0.1ppmの感度は必要であり、現在の水素計の技術でこの感度は十分期待できる。

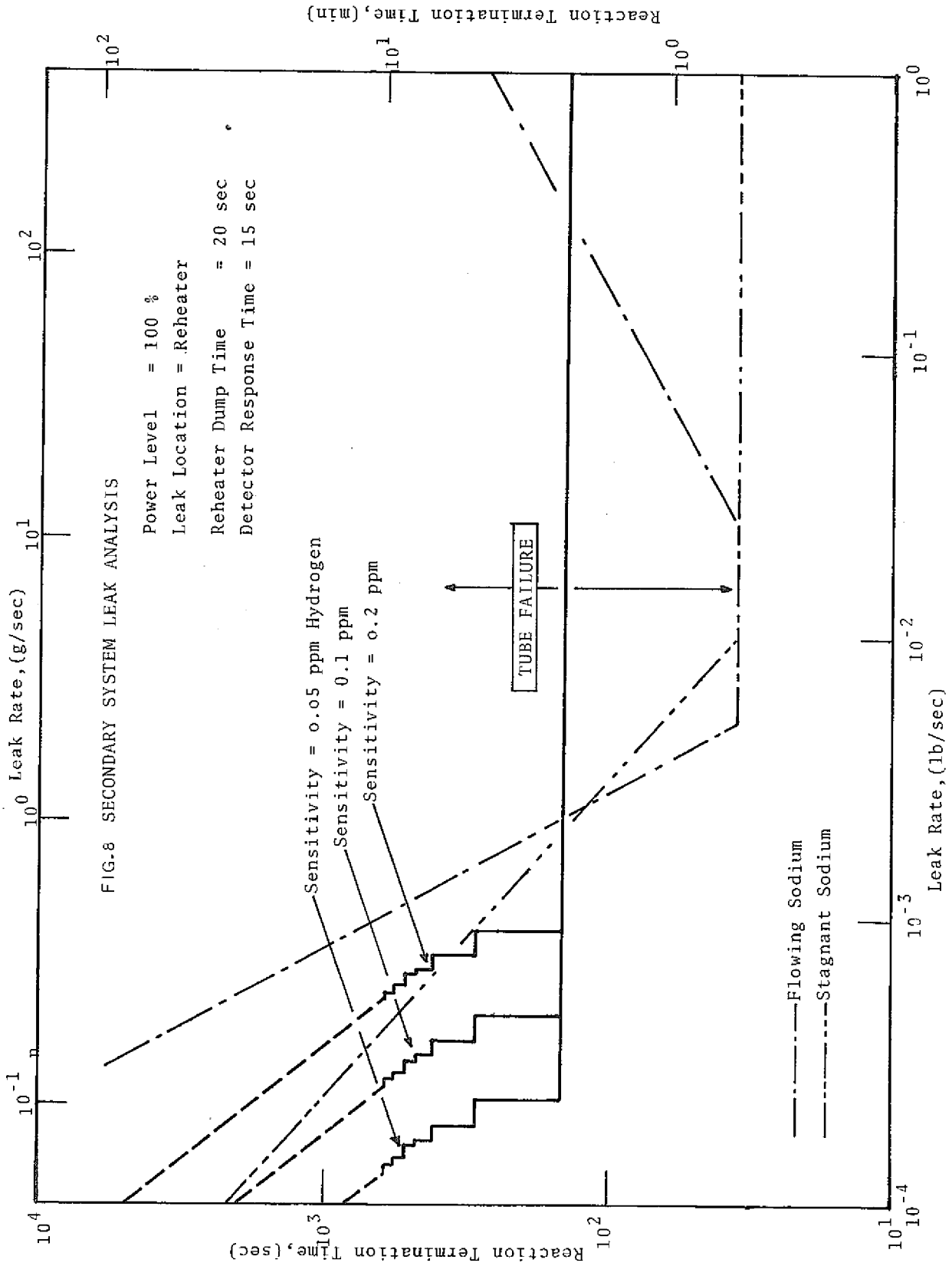
(ii) SG, RHにおける実際のリークの場合、最も典型的なリークはピンホールリークのような微小リークで、それが除々に発達すると考えられる。ピンホールリークが発達してジェット型リークになるには、かなりの時間がかかるので、そのピンホールリークをなるべく早く、確実に検出するためには水素計が最も適していると思われる。

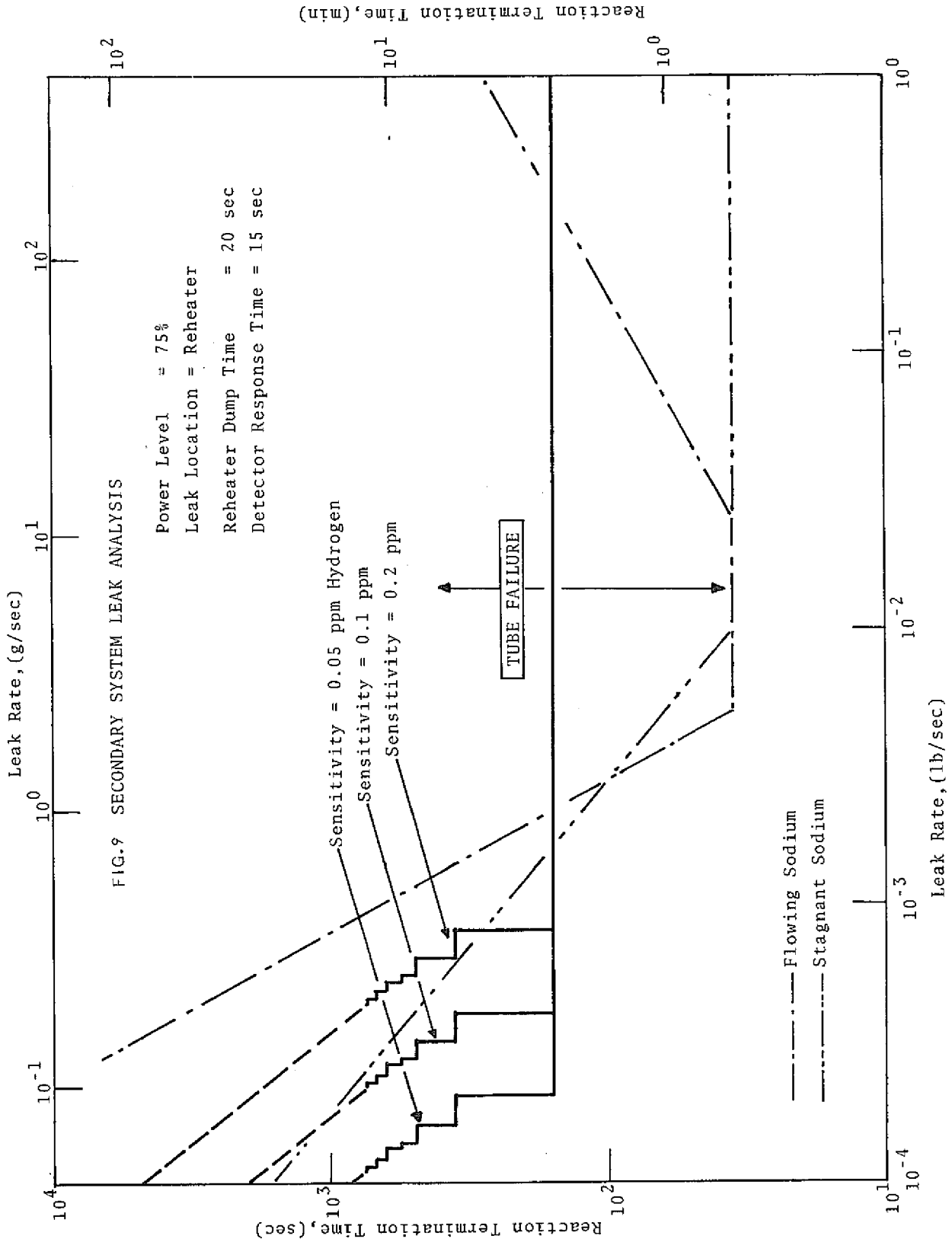


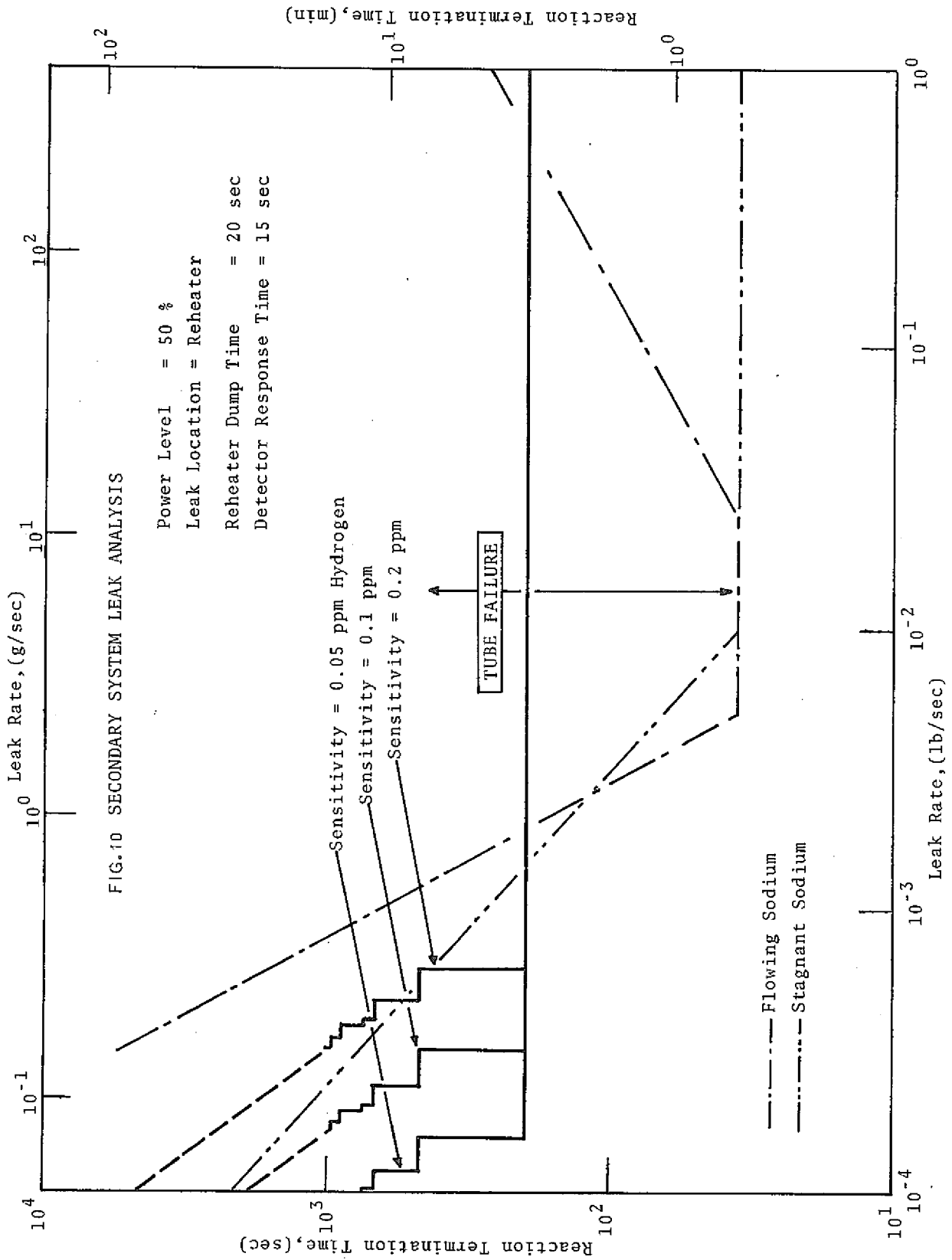


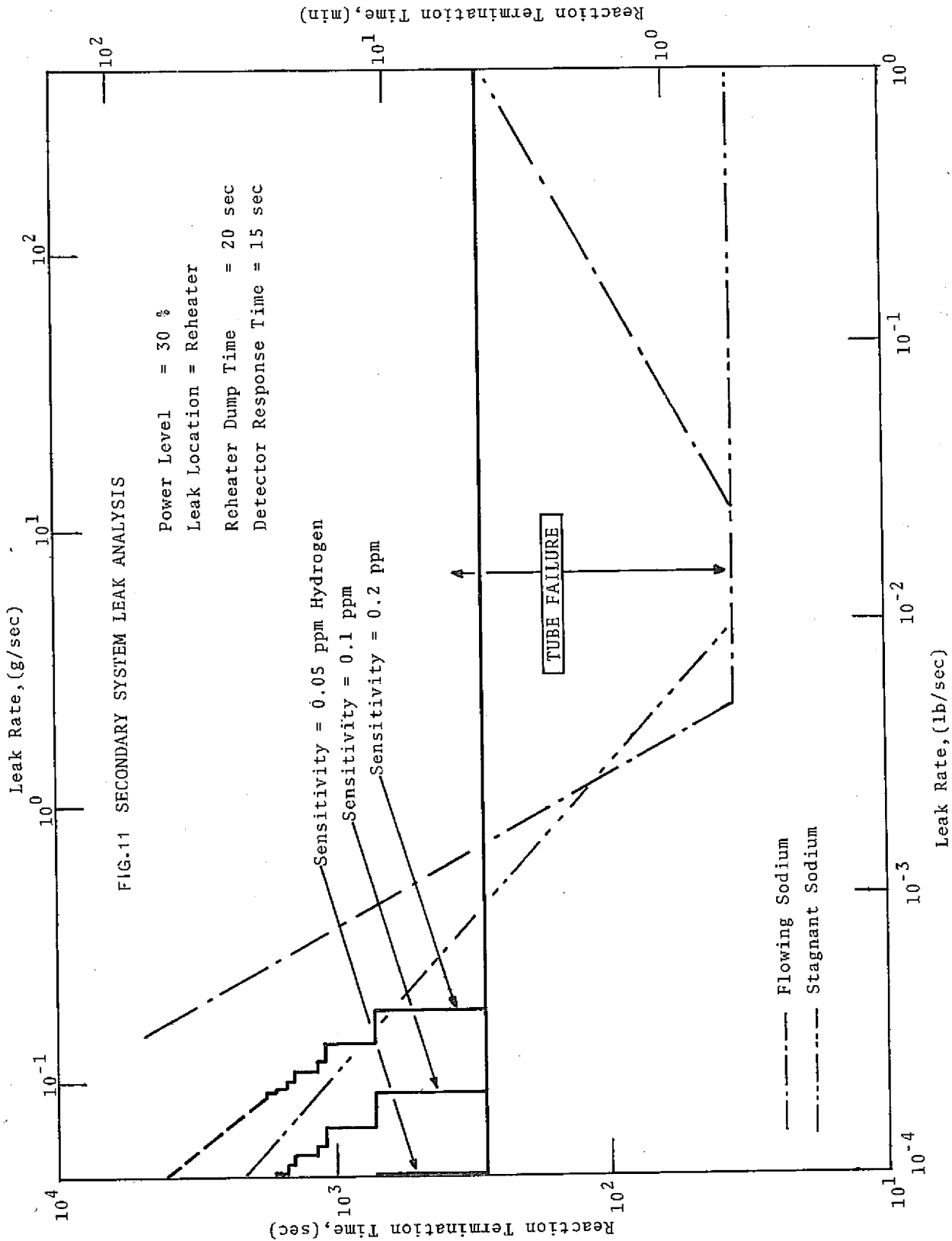












(iv) 損耗の研究においては、特に微小リーク ($< 10^{-3} \text{ lb/sec}$) の場合と、蒸気による損耗のデータの不足しているため、これらのデータの集積が待たれる。

5 あとがき

Na 加熱蒸気発生器における小規模水リーク事故の検出法の調査とその検出器に要求される性能を計算した。

以上の結果をまとめると、

- (1) カバーガス中の水素ガス検出は、カバーガス低温部またはサンプリングラインで水素ガスがトラップされて、小リーク検出には実用的でない。
- (2) 小リーク検出に現在のところ最も有望なものは、質量分析型のニッケル膜拡散型 Na 中水素検出器である。
- (3) Na 中水素検出器を原型炉級蒸気発生器に使用する場合 0.1 ppm H_2 以上の感度を必要とする。
- (4) Na 中水素検出器を実際に使用する場合、特に注意を払うべきものは、拡散膜の部分を流れる Na 温度を一定に、しかもできるだけ高温に保つこと、Na 中の水素のバックグラウンド濃度をできるだけ低くすることである。
- (5) 原型炉級蒸気発生器にジェット型リークが発生した場合、リーク率によっては水素検出計だけで隣接伝熱管への破損の伝播を防ぐことは困難である。そのため音響式リーク検出計、その他の即答性の検出計の開発が望まれる。

参 考 文 献

- (1) H.V.Chamberlain, et.al., "Studies of Materisl Wastage Resulting from Reactions of Water on Sodium", APDA-254.(1970)
- (2) A.Brachet et .al., "Detection of Small Leaks by Hydrogen Measurement in a Sodium-Heated Steam Generator" IAEA Meeting on Sodium-Water Reaction, papar (1968)
- (3) S.A.Meacham et.al., "The Solbility of Hydrogen in Sodium", APDA-241 (1970)
- (4) 古川和男, 堀雅夫 " I A E A Na-水反応専門 会議報告書 ", 動燃事業団 (1969)
- (5) J.E.Meyers, RA.Hunter et.al., "Experience withUNC Oxigen Meters in APDA Sodium Tecknology Loop ", APDA-245 (1969)
- (6) J.H.Coelman and E.F."Hill Feasibility Study of In-Line Detector for Hydrogen in Sodium " APDA-222 (1968)
- (7) S.Barkhoudarian and C.C.Scott "Preliminary Study of Feasibility of Acoustic Detetion of Small Sodium-Water Reaction in LMFBR Steam Generators ", APDA-256 (1970)
- (8) 採間直樹ほか " 機会学会, Na水反応, 安全性調査研究, 分析会配布資料
- (9) H,Strahl "A Device for Continuous Dtection of Hydrogen in Sodium ", NAA-SR-6866 (1962)
- (10) 品川清訳 " Na加熱蒸気発生器の漏洩検出に関する諸問題 ", IAEA シンポジウム論文 (1970)
- (11) たとえば " 化学大辞典 ", 共立出版社
- (12) R.W.Webb "Hydrogen Premation through Metals " NAA-SR-TDR-9844, Atomics International (1964)
- (13) V.I.Subbotin et.al., "The Monitoring of the Oxigen and Hydrogen Content of Sodium ", SM-85/49
- (14) J.A.Ford, H.V.Chamberlain, et.al., "Criteria for Detection of Small Sodium-Water Reactions in LMFBR Steam Generators in LMFBR Steam Generators ", APDA-255(1970)
- (15) 動燃事業団 " 「もんじゆ」蒸気発生器設計資料 ", (1970)

APPENDIX 計算コード(SWAC)の概要

TDの計算を行なう計算コードはAPDA-255に報告されている計算コードを少し変えたもので、原型炉級のユニット型SG, RHを対象としている。

以下に計算コードのリストと、計算結果の例を示す。

Nomenclature

X,XW	= Dummy variables used to change the initial input values for the second or successive cases
IN	= Location parameter indicating which variables is to be changed
PC	= Reactor power level, %
F1	= Flow through the steam generator, lb/hr
F2	= Flow through the reheater, lb/hr
F3	= F1 + F2
ALR	= Water leak rate, lb/sec
CO	= Initial hydrogen concentration, ppm
ALOC	= Location parameter indicating the location of the leak (1 for a leak in the steam generator and 2 for a leak in the reheater)
ATF	= The maximum number of seconds which will be computed. The DIMENSION statement limits this number to 5000. If a larger number is desired, the dimension of C3 must be changed accordingly, sec
C1	= Hydrogen concentration at point 1, ppm
C2	= Hydrogen concentration at point 2, ppm
C3	= Hydrogen concentration at point 3, ppm
V1	= Sodium inventory without stagnant in SG, lb
V2	= Sodium inventory without stagnant in RH, lb
V3	= Sodium inventory without stagnant in common system, lb
BL	= Detectable hydrogen concentration (1.1 x CO), ppm
PHIX	= Steam generator cycle time, sec
ISG	= reheat cycle time, sec
IRH	= reheat cycle time, sec
DCI	= Hydrogen concentration change as the sodium flows through the steam generator, ppm
DC2	= Hydrogen concentration change as the sodium flows through the reheater, ppm
C4	= Dummy variable to check for change in calculated values
ST	= sensitivity, ppm
LT	= Transport time from detector (1),(2) to detector (3)
TRT1	= Transport time from leak to detector in SG, sec
TRT2	= Transport time from leak to detector in RH, sec
IPR1,2,3	= Dummy variables
DJT1,2,3	= Time to reach detectable concentration, sec
TT1,2,3	= Reaction termination time, sec
WS1,2,3	= Wastage, mils
WR	= Wastage rate, mils/sec
AS	= Steam generator dump time, sec
AW	= Reheater dump time, sec

```

C   DISTRIBUTION OF REACTION PRODUCTS WITH TIME
    DIMENSION X(7),IN(6),XW(6),C3(5000),AS(6),TT1(6),TT2(6),TT3(6),WS1
1(6),WS2(6),WS3(6),AW(6)
    EQUIVALENCE (X(1),PC),(X(2),F1),(X(3),F2),(X(4),ALR),(X(5),CO),(X(
16),ALOC),(X(7),ATF)
    READ(5,10) X
10  FORMAT(6E12.4)
15  READ(5,20) (IN(I),XW(I),I=1,6)
20  FORMAT(6(I3,E10.2))
    DO 30 I=1,6
      IF(IN(I))99,45,40
40  J=IN(I)
30  X(J)=XW(I)
    GO TO 15
45  C1=CO
    C2=CO
    F3=F1+F2
    V1=89902.0
    V2=60426.0
    V3=103249.0
    LOC=ALOC
    ITF=ATF
    PHIX=V3*3600.0/F3
    ISG=V1*3600.0/F1+PHIX
    IRH=V2*3600.0/F2+PHIX
    ST=0.1*CO
    GO TO (50,60),LOC
50  DC1=(ALR*3.6E9)/(F1*9.0)
    DC2=0.0
    GO TO 80
60  DC2=(ALR*3.6E9)/(F2*9.0)
    DC1=0.0
80  WRITE(6,85) ALR,LOC,F1,F2,CO,PC,ST
85  FORMAT(13I1)SECONDARY SYSTEM LEAK ANALYSIS//13H LEAK RATE = E9.3, 1
19H LBS/SEC IN BRANCH I1,12H (1=SG,2=RH),/24H SYSTEM FLOW RATES- SG
2= E9.3, 5H, RH= E9.3,/23H INITIAL CONCENTRATION= F5.3,18H PPM, POW
3ER LEVEL= F4.0,/15H SENSITIVITY = F5.3,4H PPM,    ///43H TIME
4  STEAM GEN REHEATER MIXED )
    IF(100.0-PC) 600,600,610
600 LT=5
    TRT1=14.0
    TRT2=108.0
    GO TO 3000
610 IF(75.0-PC) 620,620,630
620 LT=6
    TRT1=57.0
    TRT2=122.0
    GO TO 3000
630 IF(50.0-PC) 640,640,650
640 LT=9
    TRT1=92.0
    TRT2=160.0
    GO TO 3000
650 IF(30.0-PC) 660,660,15
660 LT=14
    TRT1=156.0
    TRT2=249.0
3000 IPR1=0

```

```

IPRI2=0
IPRI3=0
DJT1=ATF
DJT2=ATF
DJT3=ATF
LLT=1
BL=1.1*CO
DO 70 IT=1, ITF
C3(IT)=(C1*F1+C2*F2)/F3
JT=IT-1
IS=IT-LT
IF(IS) 4000,4000,5000
4000 IS=IT-1
5000 IX=JT-ISG
IF(IX) 90,90,100
90 C1=CO+DC1
GO TO 110
100 C1=C3(IX)+DC1
110 IX=JT-IRH
IF(IX) 120,120,130
120 C2=CO+DC2
GO TO 141
130 C2=C3(IX)+DC2
141 IF(JT-LLT) 140,700,140
700 WRITE(6,710)JT,C1,C2,C3(IS+1)
710 FORMAT(3X,I4,2X,3F12.5)
LLT=1
GO TO 3
140 C4=(C1*F1+C2*F2)/F3
IF(C4-C3(IT)) 170,70,170
170 WRITE(6,95) JT,C1,C2,C3(IS+1)
95 FORMAT(3X,I4,2X,3F12.5)
LLT=JT+LT
IF(IPRI1.EQ.1) GO TO 1
IF(C1-BL) 1,2,2
2 WRITE(6,200)
200 FORMAT(1H0,10X,10HDETECTABLE)
DJT1=FLOAT(JT)
IPRI1=1
1 IF(IPRI2.EQ.1) GO TO 3
IF(C2-BL) 3,4,4
4 WRITE(6,300)
DJT2=FLOAT(JT)
300 FORMAT(1H0,22X,10HDETECTABLE)
IPRI2=1
3 IF(IPRI3.EQ.1) GO TO 69
IF(C3(IS+1)-BL) 70,6,6
6 WRITE(6,400)
DJT3=FLOAT(JT)
400 FORMAT(1H0,34X,10HDETECTABLE)
IPRI3=1
69 IF(IPRI1.EQ.1.AND.IPRI2.EQ.1.AND.IPRI3.EQ.1) GO TO 1200
70 CONTINUE
IF(DJT1-ATF) 1000,2000,2000
2000 WRITE(6,2001)
2001 FORMAT(1H0,46HSG DETECTION IS IMPOSSIBLE , TUBE FAILURE)
1000 IF(DJT2-ATF) 1001,1002,1002
1002 WRITE(6,1100)

```

```

1100 FORMAT(1H0,46HRH DETECTION IS IMPOSSIBLE , TUBE FAILURE)
1001 IF(DJT3-ATF) 1200,1300,1300
1300 WRITE(6,1400)
1400 FORMAT(1H0,46HMIXED DETECTION IS IMPOSSIBLE , TUBE FAILURE)
      IF(DJT1.EQ.ATF.AND.DJT2.EQ.ATF.AND.DJT3.EQ.ATF) GO TO 15
1200 IF(5.0E-03-ALR) 6000,6100,6100
6100 WR=42525.0*ALR**1.804
      GO TO 1800
6000 IF(1.5E-02-ALR)6001,6002,6002
6002 WR=3.2
      GO TO 1800
6001 WR=0.4*ALR**(-0.495)
1800 GO TO (500,800),LOC
500 WRITE(6,501)
501 FORMAT(1H0,3X,25HLEAK IN STEAM GENERATOR)
      DO 71 JS=1,3
      AS(1)=20.0
      WRITE(6,502) AS(JS)
502 FORMAT(1H0,4X,40HREACTION TERMINATION TIME (SG DUMP TIME=F4.0,5H S
1EC))
      TT1(JS)=TRT1+15.0+AS(JS)+DJT1
      TT2(JS)=TRT1+15.0+AS(JS)+DJT2
      TT3(JS)=TRT1+15.0+AS(JS)+DJT3
      WS1(JS)=WR*TT1(JS)
      WS2(JS)=WR*TT2(JS)
      WS3(JS)=WR*TT3(JS)
      WRITE(6,503) TT1(JS),TT2(JS),TT3(JS)
503 FORMAT(1H ,8X,3F12.0)
      WRITE(6,504)
504 FORMAT(1H0,4X,26HAMOUNT OF WASTAGE, MILS)
      WRITE(6,505) WS1(JS),WS2(JS),WS3(JS)
505 FORMAT(1H ,8X,3F12.0)
      IF(WS1(JS)-45.0) 506,506,507
506 WRITE(6,508)
508 FORMAT(1H0,4X,30HS.G. DETECTION = LIGHT DAMAGE)
      GO TO 511
507 IF(WS1(JS)-134.0) 509,509,510
509 WRITE(6,512)
512 FORMAT(1H0,4X,31HS.G. DETECTION = SEVERE DAMAGE)
      GO TO 511
510 WRITE(6,513)
513 FORMAT(1H0,4X,30HS.G. DETECTION = TUBE FAILURE)
511 IF(WS2(JS)-45.0) 514,514,515
514 WRITE(6,516)
516 FORMAT(1H ,4X,30HR.H. DETECTION = LIGHT DAMAGE)
      GO TO 519
515 IF(WS2(JS)-134.0) 517,517,518
517 WRITE(6,520)
520 FORMAT(1H ,4X,31HR.H. DETECTION = SEVERE DAMAGE)
      GO TO 519
518 WRITE(6,521)
521 FORMAT(1H ,4X,30HR.H. DETECTION = TUBE FAILURE)
519 IF(WS3(JS)-45.0) 522,522,523
522 WRITE(6,524)
524 FORMAT(1H ,4X,30HMIXED DETECTION = LIGHT DAMAGE)
      GO TO 74
523 IF(WS3(JS)-134.0) 525,525,526
525 WRITE(6,527)

```

```

527 FORMAT(1H , 4X, 31HMIXED DETECTION = SEVERE DAMAGE)
GO TO 74
526 WRITE(6, 528)
528 FORMAT(1H , 4X, 30HMIXED DETECTION = TUBE FAILURE)
74 AS(JS+1)=AS(JS)+20.0
71 CONTINUE
GO TO 15
800 WRITE(6, 801)
801 FORMAT(1H0, 3X, 18HLEAK IN REHEATER)
DO 72 JW=1, 3
AW(1)=20.0
WRITE(6, 802) AW(JW)
802 FORMAT(1H0, 4X, 40HREACTION TERMINATION TIME (RH DUMP TIME=F4.0, 5H S
1EC))
TT1(JW)=TRT2+15.0+AW(JW)+DJT1
TT2(JW)=TRT2+15.0+AW(JW)+DJT2
TT3(JW)=TRT2+15.0+AW(JW)+DJT3
WS1(JW)=WR*TT1(JW)
WS2(JW)=WR*TT2(JW)
WS3(JW)=WR*TT3(JW)
WRITE(6, 803) TT1(JW), TT2(JW), TT3(JW)
803 FORMAT(1H , 8X, 3F12.0)
WRITE(6, 804)
804 FORMAT(1H0, 4X, 26HAMOUNT OF WASTAGE, MILS)
WRITE(6, 805) WS1(JW), WS2(JW), WS3(JW)
805 FORMAT(1H , 8X, 3F12.0)
IF(WS1(JW)-67.0) 806, 806, 807
806 WRITE(6, 808)
808 FORMAT(1H0, 4X, 30HS.G. DETECTION = LIGHT DAMAGE)
GO TO 811
807 IF(WS1(JW)-107.0) 809, 809, 810
809 WRITE(6, 812)
812 FORMAT(1H0, 4X, 31HS.G. DETECTION = SEVERE DAMAGE)
GO TO 811
810 WRITE(6, 813)
813 FORMAT(1H0, 4X, 30HS.G. DETECTION = TUBE FAILURE)
811 IF(WS2(JW)-67.0) 814, 814, 815
814 WRITE(6, 816)
816 FORMAT(1H , 4X, 30HR.H. DETECTION = LIGHT DAMAGE)
GO TO 819
815 IF(WS2(JW)-107.0) 817, 817, 818
817 WRITE(6, 820)
820 FORMAT(1H , 4X, 31HR.H. DETECTION = SEVERE DAMAGE)
GO TO 819
818 WRITE(6, 821)
821 FORMAT(1H , 4X, 30HR.H. DETECTION = TUBE FAILURE)
819 IF(WS3(JW)-67.0) 822, 822, 823
822 WRITE(6, 824)
824 FORMAT(1H , 4X, 30HMIXED DETECTION = LIGHT DAMAGE)
GO TO 73
823 IF(WS3(JW)-107.0) 825, 825, 826
825 WRITE(6, 827)
827 FORMAT(1H , 4X, 31HMIXED DETECTION = SEVERE DAMAGE)
GO TO 73
826 WRITE(6, 828)
828 FORMAT(1H , 4X, 30HMIXED DETECTION = TUBE FAILURE)
73 AW(JW+1)=AW(JW)+20.0
72 CONTINUE

```

SECONDARY SYSTEM LEAK ANALYSIS

LEAK RATE = 0.500E-03 LBS/SEC IN BRANCH 1 (1=SG, 2=RH)
 SYSTEM FLOW RATES- SG= 0.635E 07, RH=0.187E 07
 INITIAL CONCENTRATION=1.000 PPM, POWER LEVEL=100.
 SENSITIVITY = 0.100 PPM

TIME	STEAM GEN	REHEATER	MIXED
0	1.03150	1.00000	1.00000
5	1.03150	1.00000	1.02433
98	1.05582	1.00000	1.02433
103	1.05582	1.00000	1.04312
163	1.05582	1.02433	1.04312
168	1.05582	1.02433	1.04866
196	1.07462	1.02433	1.04866
201	1.07462	1.02433	1.06318
261	1.08015	1.04312	1.06318
266	1.08015	1.04312	1.07173
294	1.09467	1.04312	1.07173
299	1.09467	1.04312	1.08295
326	1.09467	1.04866	1.08295
331	1.09467	1.04866	1.08420
359	1.10322	1.06318	1.08420
DETECTABLE			
364	1.10322	1.06318	1.09411
392	1.11444	1.06318	1.09411
397	1.11444	1.06318	1.10278
DETECTABLE			
424	1.11570	1.07173	1.10278
429	1.11570	1.07173	1.10570
457	1.12561	1.08295	1.10570
462	1.12561	1.08295	1.11590
489	1.12561	1.08420	1.11590
490	1.13427	1.08420	1.11590
495	1.13427	1.08420	1.12288
522	1.13719	1.09411	1.12288
527	1.13719	1.09411	1.12739
555	1.14740	1.10278	1.12739
DETECTABLE			
560	1.14740	1.10278	1.13725
587	1.14768	1.10570	1.13725
588	1.15438	1.10570	1.13725
593	1.15438	1.10570	1.14330
620	1.15889	1.11590	1.14330
625	1.15889	1.11590	1.14911
652	1.15889	1.11619	1.14911
653	1.16874	1.12288	1.14911
658	1.16874	1.12288	1.15831
685	1.16963	1.12739	1.15831
686	1.17480	1.12739	1.15831
691	1.17480	1.12739	1.16401
718	1.18060	1.13725	1.16401
723	1.18060	1.13725	1.17074
750	1.18067	1.13813	1.17074
751	1.18980	1.14330	1.17074
756	1.18980	1.14330	1.17922
783	1.19151	1.14911	1.17922
784	1.19551	1.14911	1.17922
789	1.19551	1.14911	1.18495

815	1.19551	1.14917	1.18495
816	1.20223	1.15831	1.18495
821	1.20223	1.15831	1.19224
848	1.20248	1.16002	1.19224
849	1.21072	1.16401	1.19224
854	1.21072	1.16401	1.20009
881	1.21336	1.17074	1.20009
882	1.21645	1.17074	1.20009
887	1.21645	1.17074	1.20605
913	1.21646	1.17099	1.20605
914	1.22373	1.17922	1.20605
919	1.22373	1.17922	1.21361
946	1.22432	1.18186	1.21361
947	1.23159	1.18495	1.21361
952	1.23159	1.18495	1.22098
978	1.23159	1.18497	1.22098
979	1.23516	1.19224	1.22098
980	1.23754	1.19224	1.22098
985	1.23754	1.19224	1.22724

LEAK IN STEAM GENERATOR

REACTION TERMINATION TIME (SG DUMP TIME= 20. SEC)
408. 604. 446.

AMOUNT OF WASTAGE, MILS
104. 154. 114.

S.G. DETECTION = SEVERE DAMAGE
R.H. DETECTION = TUBE FAILURE
MIXED DETECTION = SEVERE DAMAGE

REACTION TERMINATION TIME (SG DUMP TIME= 40. SEC)
428. 624. 466.

AMOUNT OF WASTAGE, MILS
109. 159. 119.

S.G. DETECTION = SEVERE DAMAGE
R.H. DETECTION = TUBE FAILURE
MIXED DETECTION = SEVERE DAMAGE

REACTION TERMINATION TIME (SG DUMP TIME= 60. SEC)
448. 644. 486.

AMOUNT OF WASTAGE, MILS
114. 164. 124.

S.G. DETECTION = SEVERE DAMAGE
R.H. DETECTION = TUBE FAILURE
MIXED DETECTION = SEVERE DAMAGE