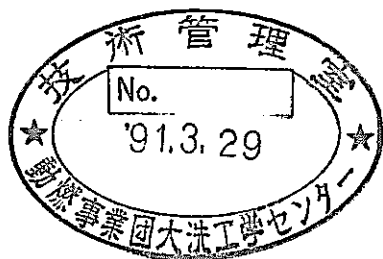


# 「常陽」MK - III 計画二重管蒸気発生器設置検討(II)

— リーク検出系の要求条件の摘出 —



区分変更	
変更後資料番号	PNC TN9410 90-194
決裁年月日	平成 13 年 7 月 31 日

1990年12月

動力炉・核燃料開発事業団

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大字村松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

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

こ

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



「常陽」MK-Ⅲ計画二重管蒸気発生器設置検討（Ⅱ）

－ リーク検出系の要求条件の抽出 －

磯崎 和則\*、沢田 誠\*\*  
舟田 敏雄\*、金城 勝哉\*

要 旨

「常陽」では、MK-Ⅲ計画の一環として、二重管SGを用いた2次系削除システム（中間系合理化システム）の検討を進めている。2次系削除システムを実現化させるためには、許認可上安全ロジックの構築が必要不可欠である。この安全ロジックの構築においては、「リーク検出系の条件」が重要な課題となる。

本作業では、安全ロジックを構築する上で重要となるリーク検出系の要求条件を抽出するため、リーク検出系の仕様検討を行い、これらを基にリーク検出系応答解析を行った。

この結果、伝熱管破損をDBE（貫通リークなし）、BDBE（微小リーク）と想定した条件下でのリーク検出系の構成、検出性能等が「常陽」の体系で以下のように定められた。

(1) リーク検出系の要求条件

① 内管リーク検出計 : Ne中湿分検出計

0.01mm径相当のリークを検出目標時間3時間以内に検出できるパラメータ範囲は、

(a) 検出設定値 : < 100Vppm (b) Neプレナム体積 : < 2 m<sup>3</sup>

(c) Ne循環流量 : 5~100Nm<sup>3</sup>/h

② 外管リーク検出計 : Na中Ne検出計

0.01mm径相当のリークを検出目標時間3時間以内に検出できるパラメータ範囲は、

(a) 検出設定値 : < 10Vppm (b) ナトリウムNa流量 : > 20l/min

(c) スパーチャ率 : > 0.4 (d) キャリアガス容積 : < 0.02 m<sup>3</sup>

③ 貫通小リーク検出計 : Na中水素計

水リーク率1g/sec以下のリークを破損伝播なしに検出できるパラメータ範囲は、

(a) 検出設定値 : < 30ppb (b) 検出時間 : < 30sec

\* 実験炉部 技術課

\*\* 動力炉技術開発部 開発計画室

④ 貫通中リーク検出計 : 音響計

水リーク率0.1 g/sec～1 kg/sec (破損孔0.1 mm～10mm) の中リーク以上を1本ギロチン破断相当のリーク量75kg以下に抑えることができるパラメータ範囲は、

(a) 検出感度 : <10g/sec (b) 検出遅れ時間 : <15sec

今後、リーク検出系に対する検討は、上記の「常陽」2次系削除システム・リーク検出系要求仕様条件を基に開発されるリーク検出計の仕様、性能及び特性を基に、リーク検出系応答解析モデルの詳細化等を行う必要がある。また、安全ロジックを構築する上で必要なもう一つの課題であるナトリウム-水反応生成物挙動解析コードの開発も必要と考えられる。

## 目 次

1. 緒言	1
2. 1次系系統仕様の設定	2
2.1 配管口径の検討	2
2.2 配管圧力損失の検討	3
2.3 ブースタ電磁ポンプ	5
2.4 新設SG建屋配置の検討	7
3. 二重管SGの検討	14
3.1 初期条件	14
3.2 構造概念の検討	15
3.3 伝熱管肉厚の検討	15
3.4 伝熱・流力の検討	15
3.5 二重伝熱管供用中検査（ISI）の検討	16
4. リーク検出系の検討	23
4.1 リーク想定条件の検討	23
4.2 片側リーク時の検出目標時間	23
4.3 リーク検出系の検討	25
5. リーク検出系応答解析	31
5.1 内管リーク検出系応答解析	31
5.2 外管リーク検出系応答解析	40
5.3 貫通リーク検出系応答解析	54
6. リーク検出系への要求条件	64
6.1 内管リーク検出計（Ne中湿分検出計）	64
6.2 外管リーク検出計（Na中Ne検出計）	64
6.3 貫通小リーク検出計（Na中水素検出計）	64
6.4 貫通中リーク検出計（音響計）	65
7. 結言	66
8. 参考文献	67

## 図 リ ス ト

図2.2.1	一次主冷却系配管内圧力損失及び機器・配管高低関係	4
図2.3.1	ブースタ電磁ポンプの出力特性	6
図2.4.1	新設SG建屋及び補助建屋配置計画(断面図, 平面図GL+9000)	8
図2.4.2	新設SG建屋及び補助建屋配置計画(平面図 GL + 5 0 0 0)	9
図2.4.3	新設SG建屋及び補助建屋配置計画(平面図 GL + 2 0 0)	10
図2.4.4	新設SG建屋及び補助建屋配置計画(平面図 GL - 7 0 0 0)	11
図2.4.5	新設SG建屋及び補助建屋配置計画(平面図 GL - 1 4 0 0 0)	12
図2.4.6	新設SG建屋及び補助建屋配置計画(平面図 GL - 2 1 0 0 0)	13
図3.2.1	70MWt二重管蒸気発生器の構造概念	17
図3.4.1	伝熱管長さのサーベイ計算結果	18
図3.4.2	Na圧力損失のサーベイ計算結果	19
図3.4.3	伝熱管ピッチをパラメータとしたサーベイ計算結果	20
図3.4.4	外シュラウド径をパラメータとしたサーベイ計算結果	21
図3.4.5	伝熱管軸方向の温度分布	22
図4.3.1	Ne中湿分検出計のシステム構成	28
図4.3.2	Na中Ne検出計のシステム構成	29
図4.3.3	Na中水素検出計のシステム構成	30
図5.1.1	内管リーク検出系応答解析モデル	33
図5.1.2	検出設定値の変化による内管リーク検出時間の変化	36
図5.1.3	ガスプレナム体積の変化による内管リーク検出時間の変化	37
図5.1.4	Ne循環流量の変化による内管リーク検出時間の変化	38
図5.1.5	内管リーク検出系応答解析の評価結果	39
図5.2.1	外管リーク検出系応答解析モデル	43
図5.2.2	リークガスの変化による外管リーク検出時間の変化	47
図5.2.3	検出設定値の変化による外管リーク検出時間の変化	48
図5.2.4	カバーガスへの放出割合の変化による外管リーク検出時間の変化	49
図5.2.5	サンプリングNa流量の変化による外管リーク検出時間の変化	50
図5.2.6	キャリアガス容積の変化による外管リーク検出時間の変化	51
図5.2.7	リークガス圧力の変化による外管リーク検出時間の変化	52
図5.2.8	外管リーク検出系応答解析の評価結果	53
図5.3.1	Na中水素計の応答解析モデル	57

図5.3.2	音響計の応答解析モデル .....	58
図5.3.3	水素計による水リーク検出時間と水リーク率の関係及び 伝熱管破損伝播特性 .....	59
図5.3.4	音響計による検出時間の違いによるリーク率変化 (初期リーク率5 g/sec) .....	60
図5.3.5	音響計による検出時間の違いによるリーク率変化 (初期リーク率90 g/sec) .....	61
図5.3.6	音響計による検出時間の違いによるリーク率変化 (初期リーク率1000 g/sec) .....	62
図5.3.7	音響計による検出時間の違いによるリーク率変化 (初期リーク孔と水リーク量の関係) .....	63

## 表 リ ス ト

表2.1.1	1次主冷却系配管仕様及び管内流速	3
表2.2.1	1次主冷却系配管内圧力損失	3
表5.1.1	内管リーク検出系応答解析ケース	3 4
表5.2.1	外管リーク検出系応答解析ケース	4 4



## 1. 緒 言

二重管SGを用いた2次系削除システムは、FBR建設コスト低減化を図るための有効な手段の一つに挙げられているが、2次系削除システムを実現化させるためには、許認可上安全ロジックの構築が必要不可欠であり、この中でも、特にリーク検出系の開発が重要な課題となる。

本検討は、昭和63年度に行われた「常陽」MK-Ⅲ計画二重管SG設置検討（Ⅰ）<sup>(1)</sup>を通して得られた成果を基に、最新のMK-Ⅲ冷却系改造仕様を反映させた二重管SG設置仕様の検討を行い、これら仕様を基に安全ロジックの構築上必要不可欠な、リーク検出系の構成、検出性能等、要求仕様条件の抽出を目的とする。

本書では、リーク検出系の仕様検討という観点から、以下の項目について報告する。

- (1) 最新MK-Ⅲ冷却系改造仕様に基づく、1次系系統仕様
- (2) 出力70MW二重管SG仕様
- (3) リーク検出系仕様
- (4) リーク検出系の応答解析結果

## 2. 1次系系統仕様の設定

二重管SGを設置した1次系系統仕様については、昭和63年度までに種々検討が進められてきたが、これらはいずれも出力100MWtにおける検討であった。「常陽」MK-Ⅲ計画では、出力140MWtにアップされることから、リーク検出系の検討を行う前に、リーク検出系の応答に影響する1次系系統仕様を再度設定し、リーク検出系応答解析の入力条件とする。

検討に当たっては、MK-Ⅲ冷却系仕様として以下の条件を用いた。

出力 : 140MWt (70MWt/ループ)

温度 : 原子炉出口500℃

原子炉入口350℃

流量 : 1318t/h (MK-Ⅱ流量時の122%)

### 2.1 配管口径の検討

MK-Ⅲにおける1次系系統流量は、MK-Ⅱの1.22倍になる。これにより、63年度検討の新設配管口径では、管内流速が最高で約6.0m/sになる。しかし、「もんじゅ」での1次系コールドレグ配管の管内流速6.1m/sからすれば、今回の流速でも設計対応は可能である。従って、1次系の配管口径は、従来同様下記の口径とする。なお、口径14Bとすると管内流速は、約4.9m/sとなる(前年並)。

(1) 新設格納容器内ホットレグ配管 (EMP~SG)

12B (外管16B)

(2) 新設格納容器内クロスオーバーレグ配管 (SG~IHX出口)

12B (外管16B)

表2.1.1 1次主冷却系配管仕様及び管内流速

項目	単位	CV内既設 ホットレグ (R/V~IHX)	CV内新設 ホットレグ (H/L~IHX)	新設CV内 ホットレグ (EMP~SG)	CV内既設 クロスオーバーレグ (IHX~ポンプ)	新設CV内 クロスオーバーレグ (SG ~M/L)
配管口径	B	20	20	12	18	12
外 径	mm	508.0	508.0	318.5	457.2	318.5
板 厚	mm	9.5	9.5	6.5	7.9	6.5
従来流速	m/s	1.93	1.93	4.96	2.29	4.78
流 速	m/s	2.34	2.34	6.00	2.76	5.75

参考 : 「もんじゅ」の1次系配管仕様及び管内流速

- (1) ホットレグ配管 : 32B(790.6mm) 3.38m/s
- (2) クロスオーバーレグ配管 : 32B(790.6mm) 3.38m/s
- (3) コールドレグ配管 : 24B(590.6mm) 6.05m/s

## 2.2 配管圧力損失の検討

2.1項で検討された配管口径をベースにした1次系配管(R/V~SG~ポンプ)圧力損失を算出した。この結果、配管内圧力損失合計は、流速の増加に伴い従来の1.2 kg/cm<sup>2</sup>より2.0 kg/cm<sup>2</sup>に増加した。

表2.2.1に1次系配管内圧力損失算出結果を示す。

表2.2.1 1次主冷却系配管内圧力損失

流 路	圧力損失(kg/cm <sup>2</sup> )	流 路	圧力損失(kg/cm <sup>2</sup> )
① ~ ②	0.027	⑧ ~ ⑨	0.015
② ~ ⑥	0.056	⑨ ~ ⑩	0.121
⑥ ~ ⑥'	0.712	⑩ ~ ⑪	0.642
⑥' ~ ⑦	0.114	⑪ ~ ⑫	0.260
⑦ ~ ⑧	二重管SG	⑫ ~ ⑬	0.039
		圧損合計①~⑬	1.986

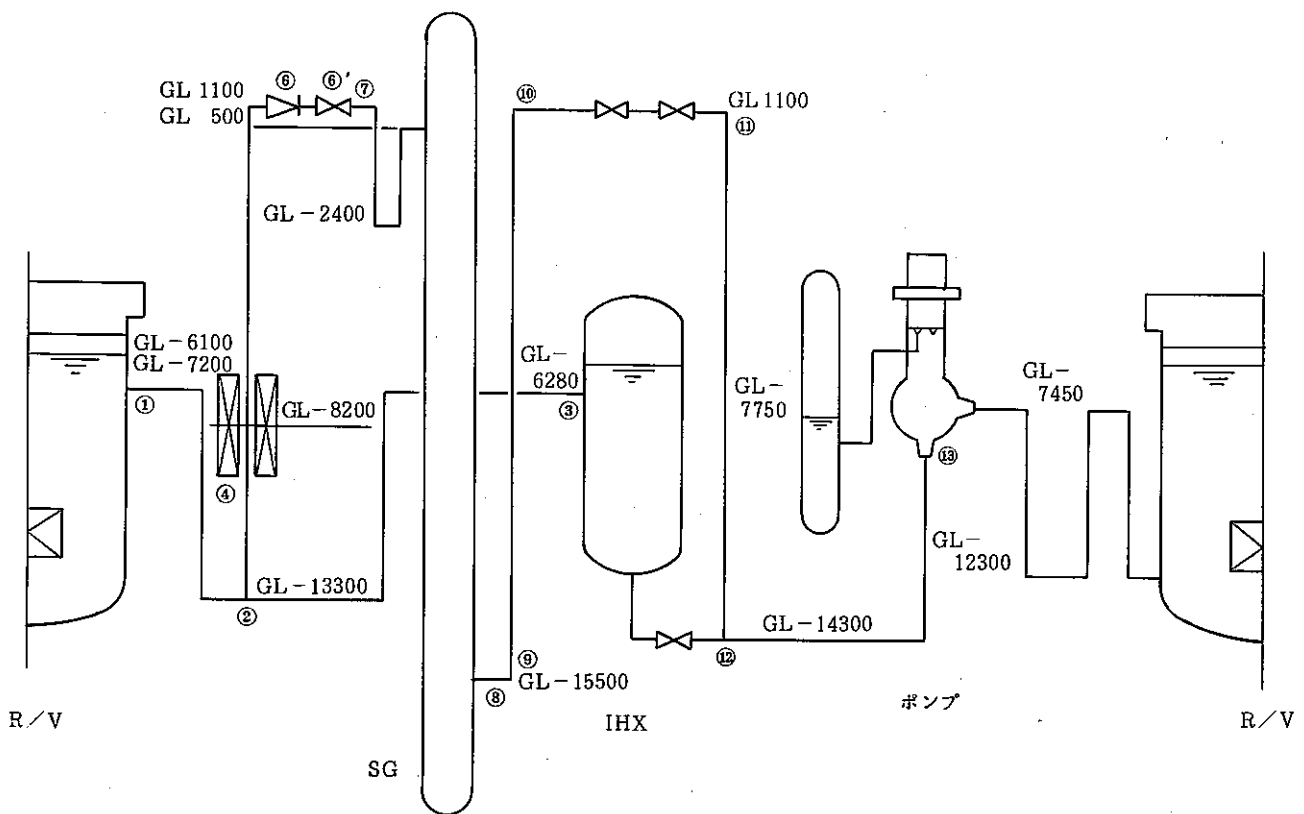
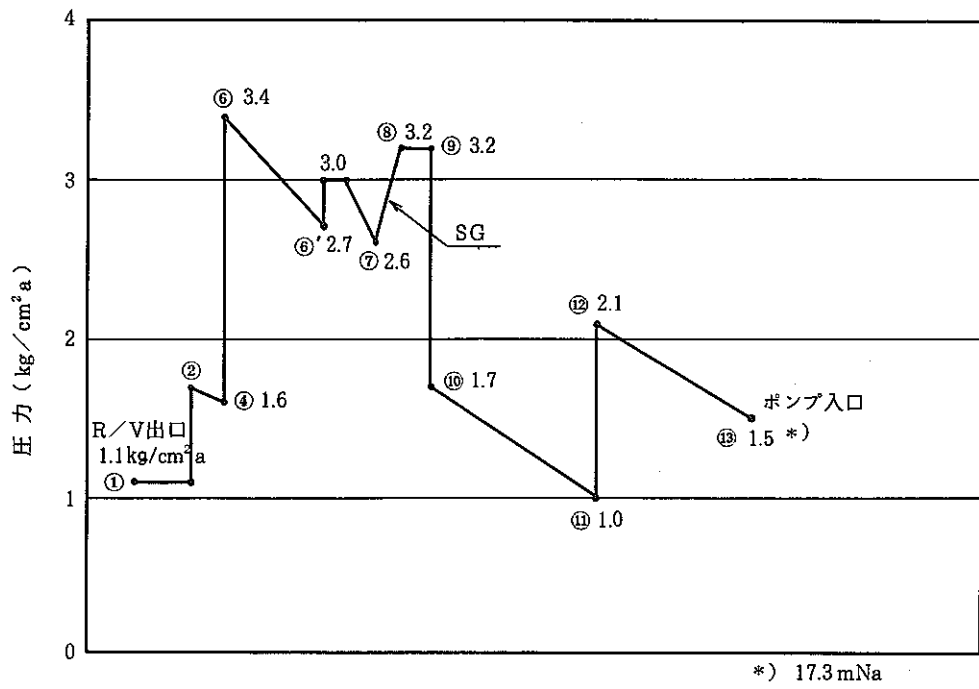


図 2.2.1 1次主冷却系配管内圧力損失及び機器・配管高低関係

### 2.3 ブースタ電磁ポンプ

ブースタ電磁ポンプは、コイルの巻き数等を増加することで、系統流量及び必要揚程の増大を吸収することが可能である。しかし、これにより電磁ポンプの寸法及び重量が増大することになるため、以下の条件を満足し、既設格納容器内の配置及び配管設計が可能か検討した。

配管内負圧防止	: 二重管SG出口配管正圧
1次系ポンプの $N_{PSH}$ 確保	: $> 15 \text{ mNa}$
配管圧力損失	: 表2.2.1による
配管・機器高低関係	: 図2.2.1による
二重管SGの圧力損失	: $0.8 \text{ kg/cm}^2$ (3.項“二重管SGの検討”による)
ブースタ電磁ポンプ揚程	: $3.1 \text{ kg/cm}^2$

二重管SG及び1次系内圧力バランス等の検討結果を反映し、ブースタ電磁ポンプの検討を行った結果、前年度の仕様で印加電圧を約980Vに上げることで対応可能である。図2.3.1にブースタ電磁ポンプの出力特性を示す。

以下に、検討結果を示す。

#### (1) 配管内負圧防止

二重管SG出口配管の圧力は、系統内で最も低い、その値は、 $1.0 \text{ kg/cm}^2$ 以上であり、十分正圧を確保することができる。

#### (2) 1次系ポンプの $N_{PSH}$ 確保

1次系ポンプの $N_{PSH}$  は、 $1.5 \text{ kg/cm}^2 = 17.3 \text{ mNa}$ であり、 $N_{PSH}$  確保条件である $> 15 \text{ mNa}$ を十分確保することができる。

#### (3) ブースタ電磁ポンプ揚程

ブースタ電磁ポンプの最大印加電圧は、1000Vであり、この時の最大揚程は、 $3.2 \text{ kg/cm}^2$ になる。3.項“二重管SGの検討”で得られた二重管SGの圧力損失の $0.8 \text{ kg/cm}^2$ を考慮すると、印加電圧は、約980V、定格揚程 $3.1 \text{ kg/cm}^2$ となる。

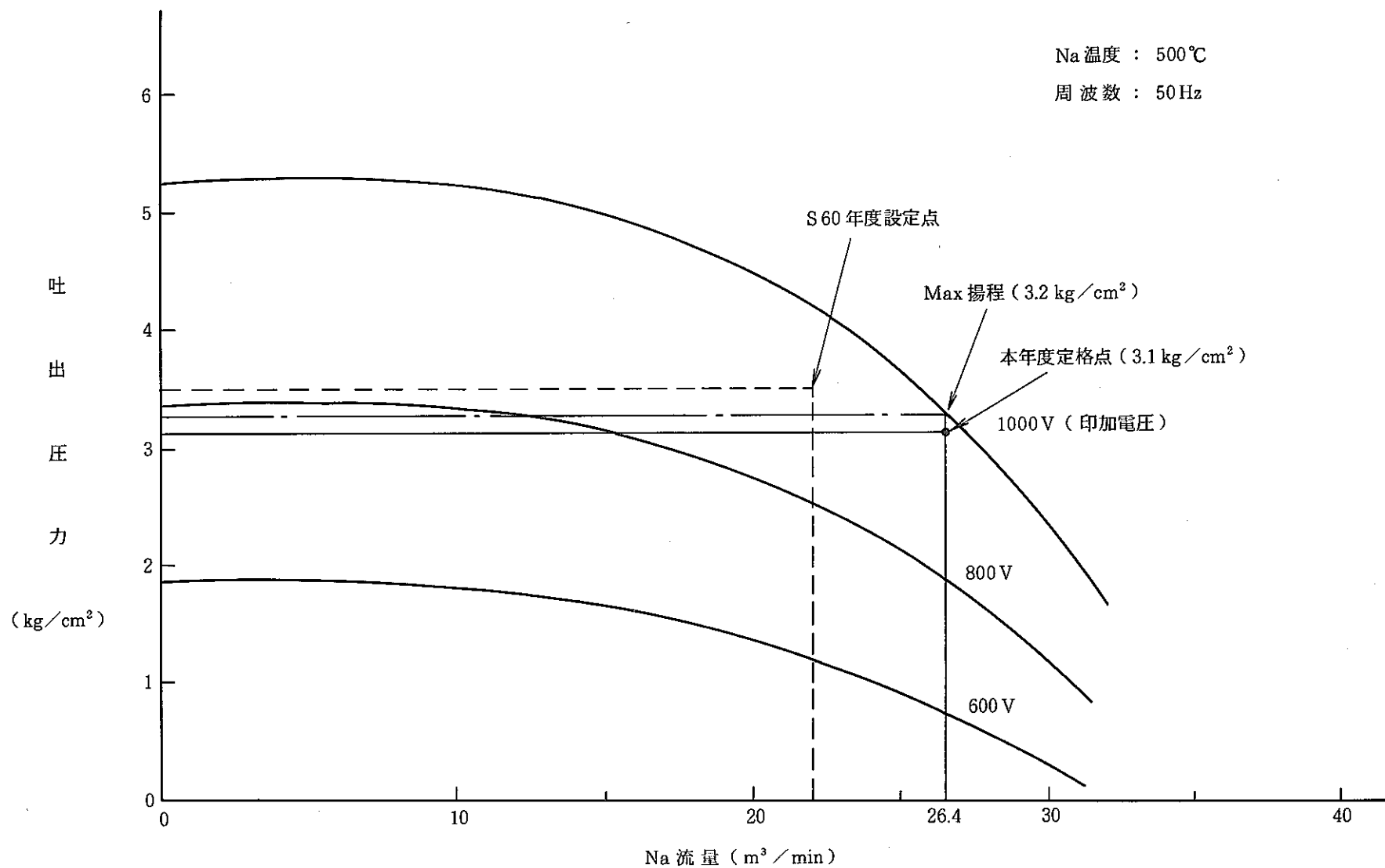


図 2.3.1 ブースタ電磁ポンプの出力特性

## 2.4 新設SG建屋配置の検討

MK-Ⅲにおいて、出力を140MWtにアップさせるため、二重管SGの寸法等が変更になる。よって、これらに対応したSG建屋の検討を行った。検討に当たっての初期条件は、前年度の設計結果を反映して、以下の条件とした。

型式	:	建屋一体型矩形鉄筋コンクリート格納容器
アニュラス	:	なし
ライナ	:	鋼板(断熱材なし)
ナトリウム漏洩処理設備	:	格納容器最下階に設置するキャッチパンに貯留
1次系配管引廻し	:	配管ベローズを用いた配管引廻し
二重管SG	:	3項“二重管SGの検討”による (径1.3m×高さ23m)
反応生成物収納容器	:	径2.5m×高さ5m
水素ガス分離器	:	径0.8m×高さ1.9m
リーク検出系設備	:	4項“リーク検出系の検討”による Ne中湿分検出計: 1.0m×2.0m×2.0m 3ユニット Na中Ne検出計: 1.0m×3.5m×2.5m 3ユニット Na中水素検出計: 1.0m×3.0m×2.5m 3ユニット

検討の結果、新設建屋配置は、図2.4.1～図2.4.6に示す通りとなった。

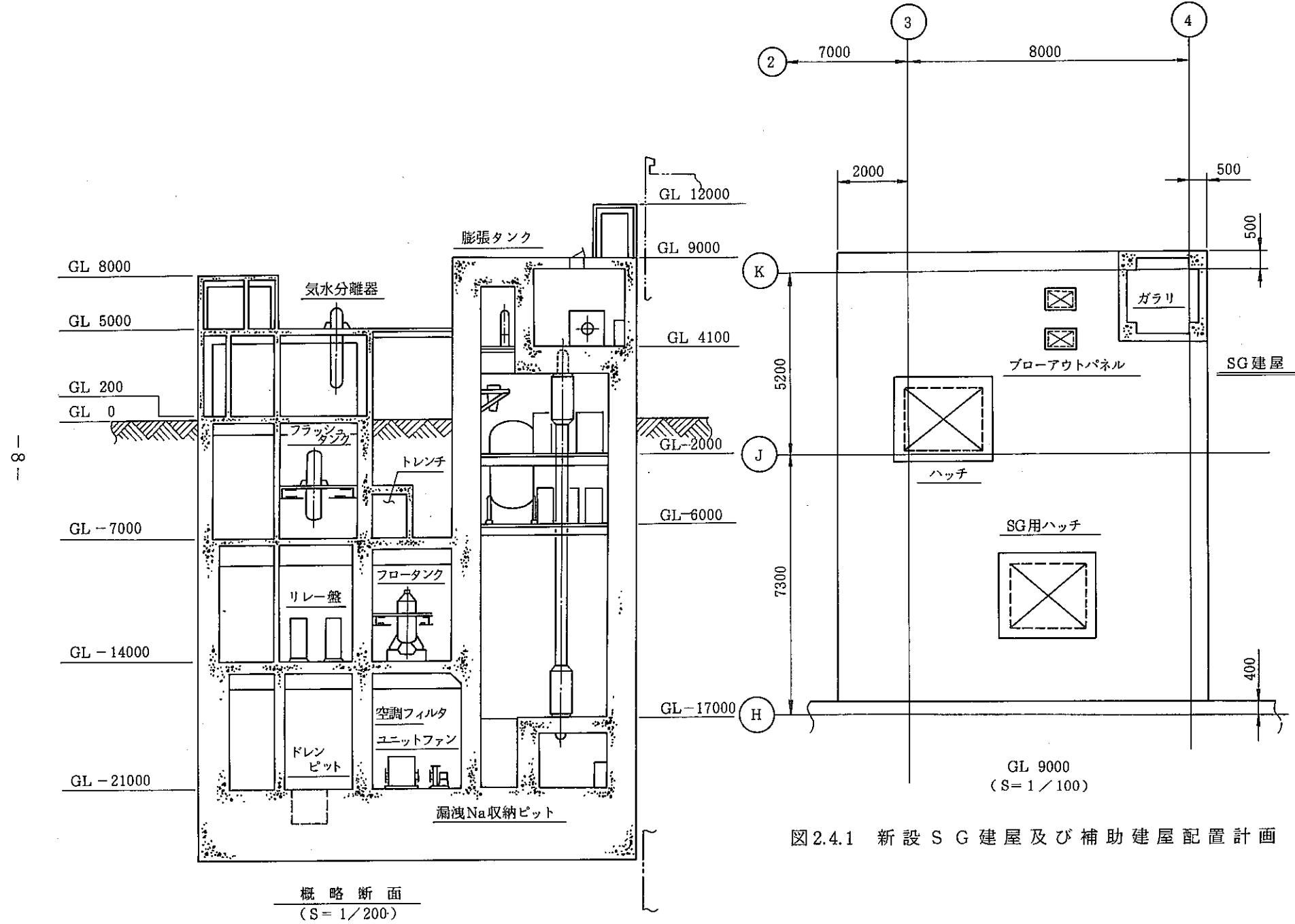


図2.4.1 新設SG建屋及び補助建屋配置計画

概略断面  
(S = 1/200)



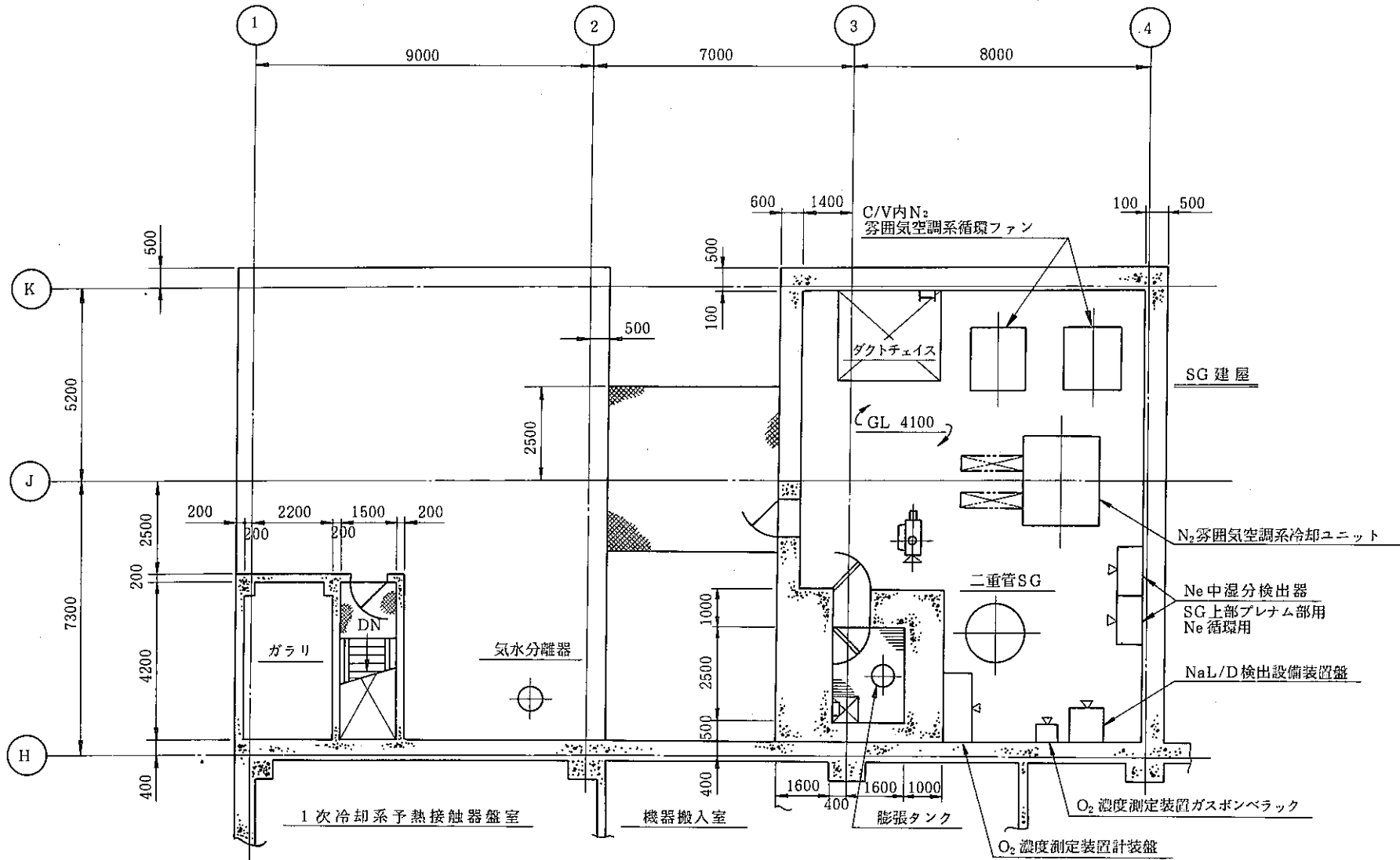


図2.4.2 新設SG建屋及び補助建屋配置計画 GL+5000

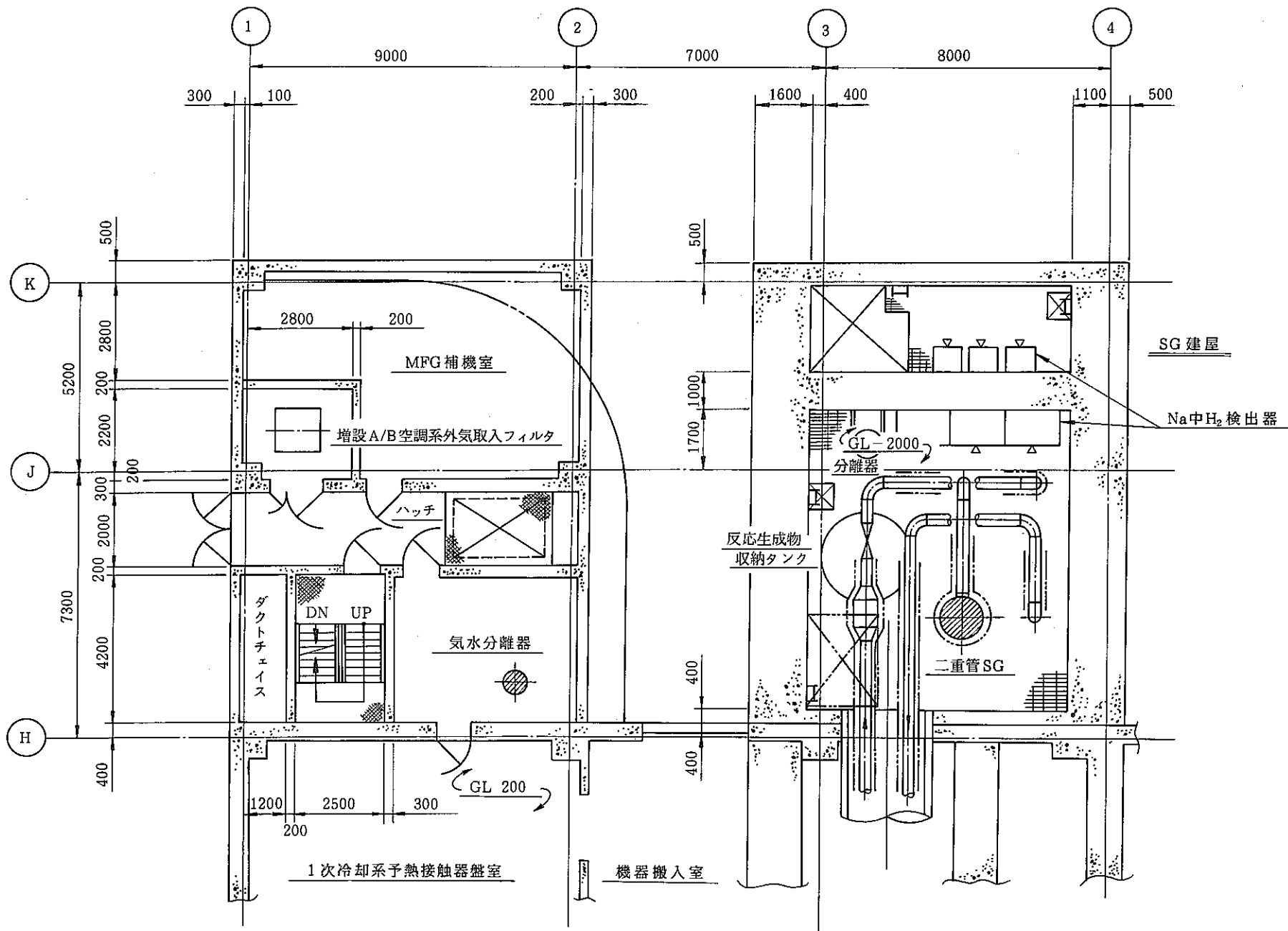


図2.4.3 新設SG建屋及び補助建屋配置計画

GL+200

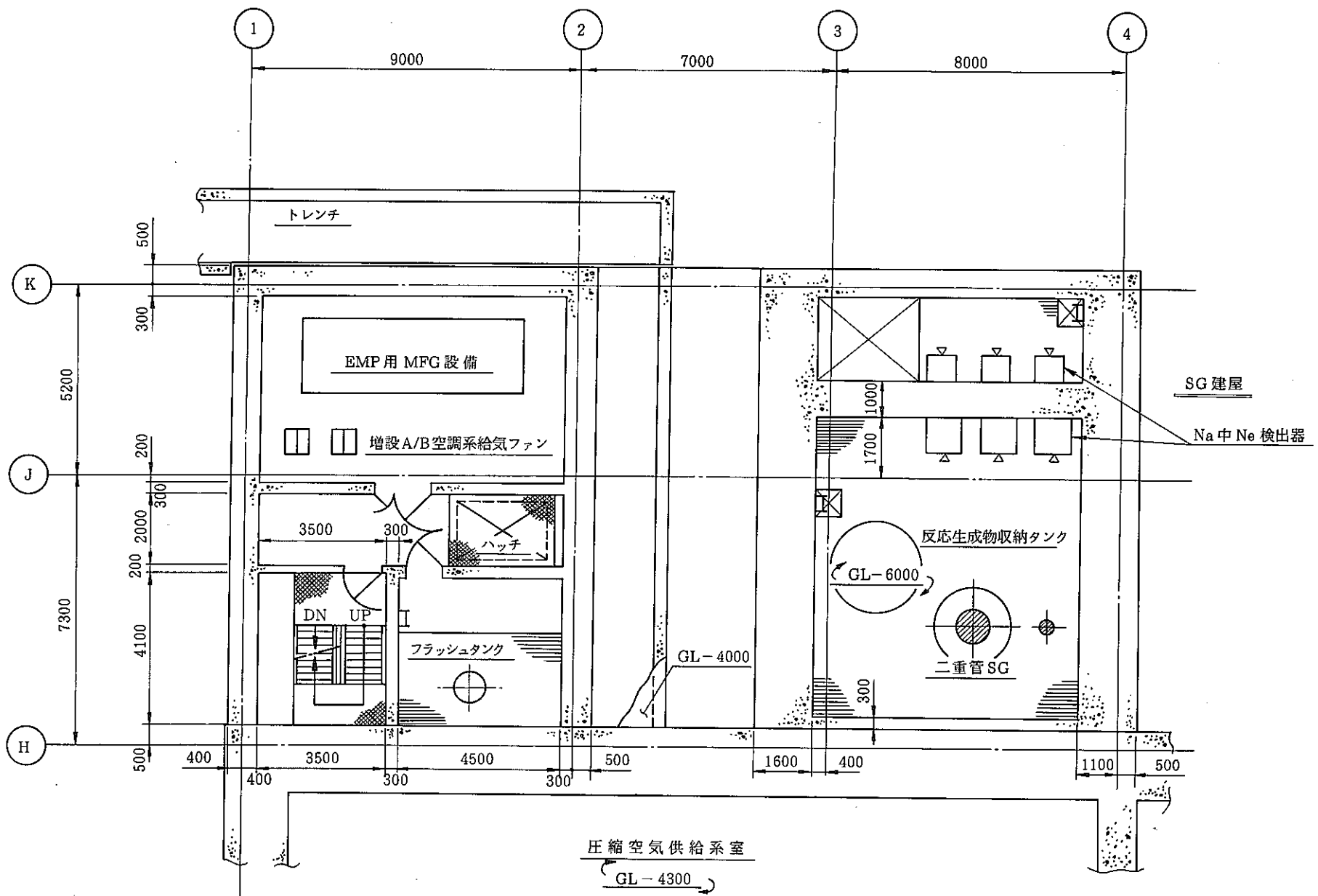


図2.4.4 新設SG建屋及び補助建屋配置計画

GL-7000

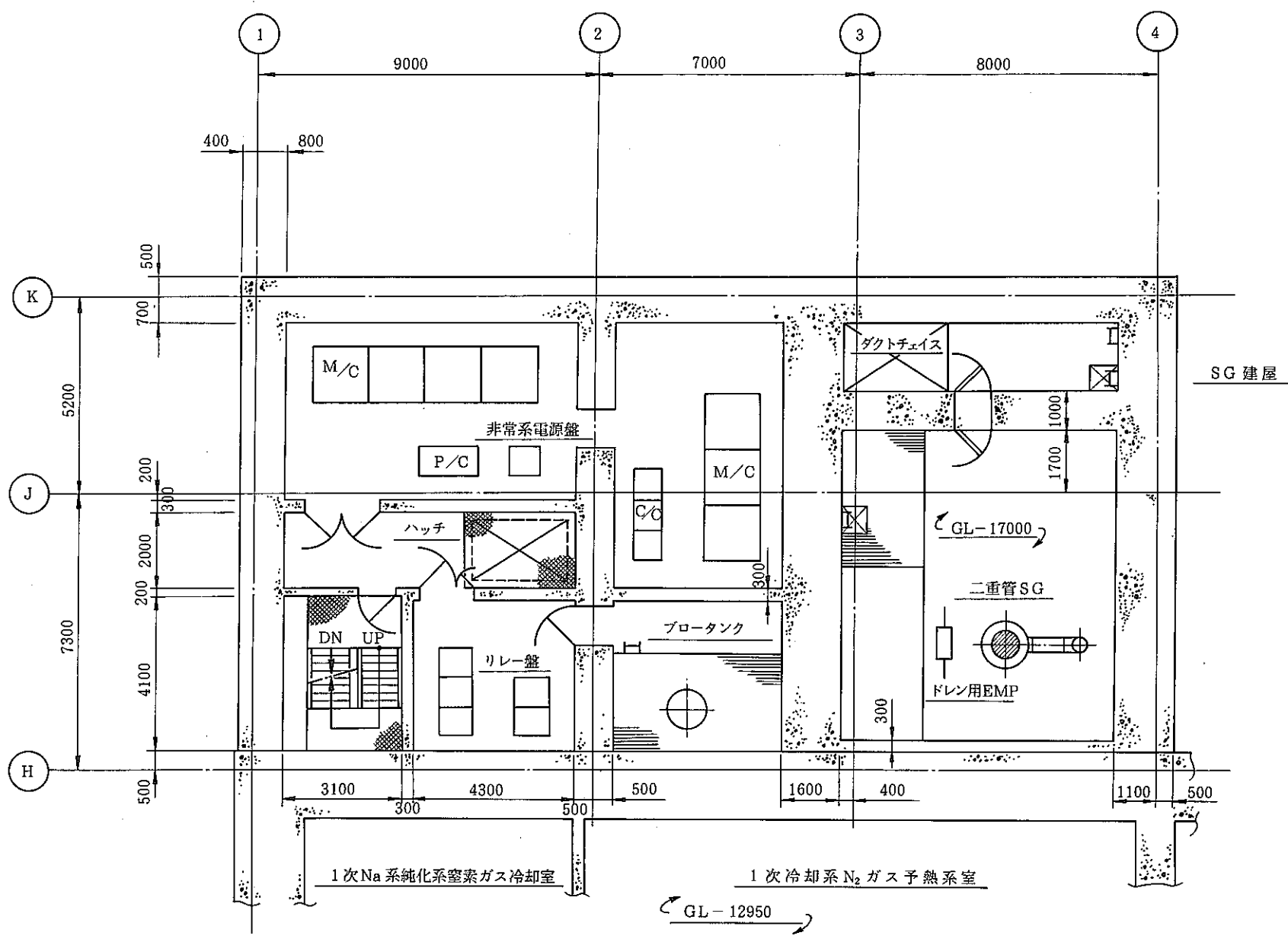


図2.4.5 新設SG建屋及び補助建屋配置計画

GL-14000

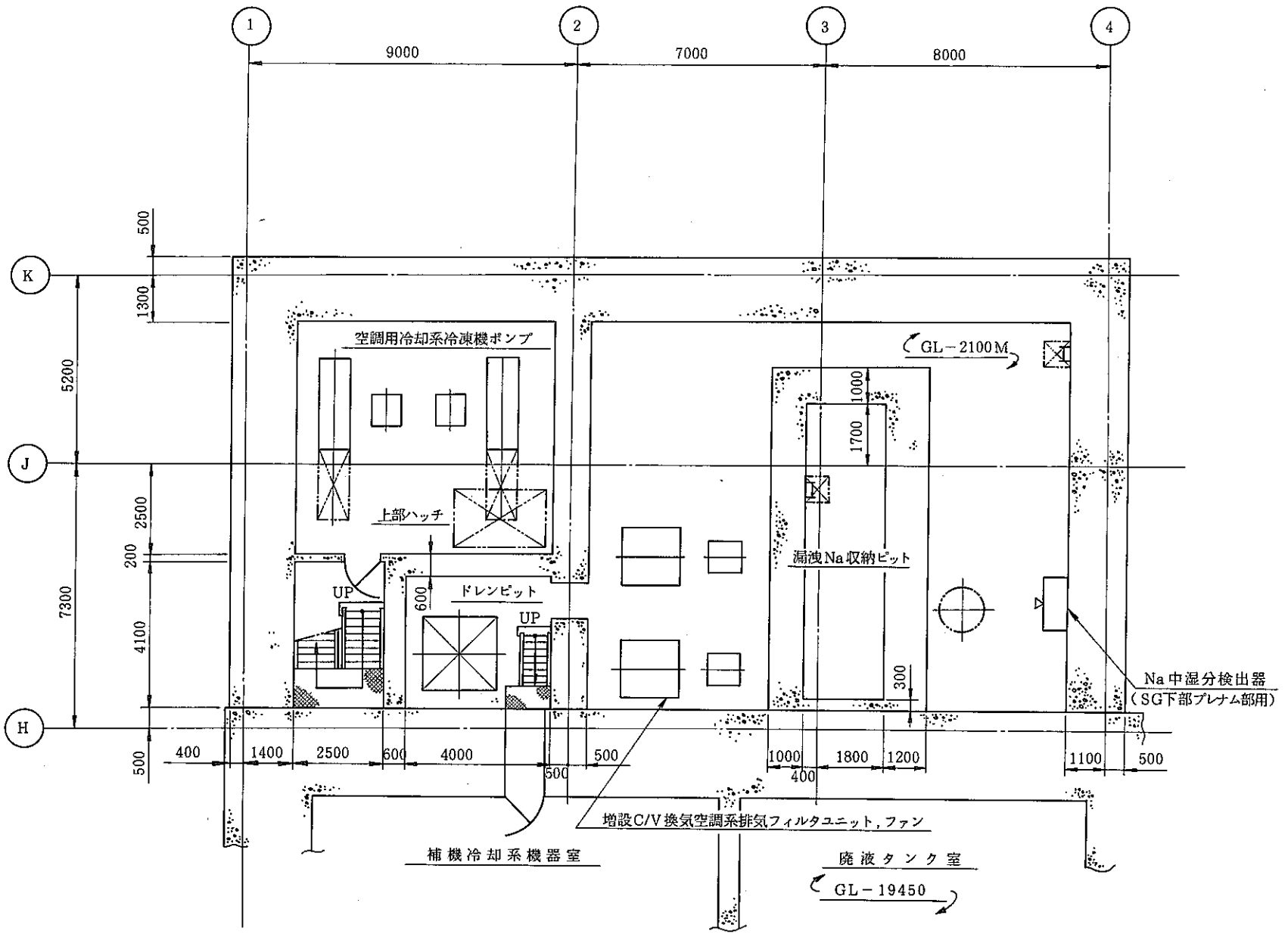


図2.4.6 新設SG建屋及び補助建屋配置計画

GL-21000

### 3. 二重管SGの検討

MK-Ⅲ 140 MWtに対応した70 MWtの熱交換容量を有する二重管SGの仕様検討を行った。検討した項目を以下に示す。

- (1) 構造概念の検討
- (2) 伝熱管肉厚の検討
- (3) 伝熱・流力の検討
- (4) 二重伝熱管供用中検査（ISI）の検討

#### 3.1 初期条件

検討に当たっては、初期条件として以下の条件を設定した。

型式	:	一体貫流無液面式2重直管型
伝熱管型式	:	密着2重管（リーク検出溝あり）
胴側流況	:	ジグザグ流
交換熱量	:	70 MWt
定格温度	:	ナトリウム側 入口／出口 500℃／350℃ 水・蒸気側 入口／出口 240℃／487℃
定格蒸気圧力	:	13.2 kg/cm <sup>2</sup>
定格流量	:	ナトリウム側 13.18 ×10 <sup>5</sup> kg/h 水・蒸気側 1.115 ×10 <sup>5</sup> kg/h
設計温度	:	ナトリウム側／水・蒸気側 520℃／510℃
設計圧力	:	ナトリウム側 5 kg/cm <sup>2</sup> 水・蒸気側 内管／外管 14.2 kg/cm <sup>2</sup> ／3.0 kg/cm <sup>2</sup>
機器種別	:	第1種機器（伝熱管内管及び水・蒸気室は第3種機器）
耐震クラス	:	As
伝熱管材質	:	Mod. 9Cr-1Mo鋼
設備寿命	:	30年
機能条件	:	許容圧力損失 1次側 0.9 kg/cm <sup>2</sup> 以下
安全設計機能	:	SG内で1次系ナトリウムと接する構造材は、原子炉冷却材バウンダリの機能を有する。 SG内で給水室及び蒸気室は、格納容器バウンダリの機能を有する。

### 3.2 構造概念の検討

70 MWtの熱交換容量を有する二重管SGは、外径1.3m、高さ2.2mの外寸法となる。伝熱管は、密着二重管で外管が19.0mm、内管15.2mm、ピッチ36mmであり、本数は385本を有している。なお、二重管の密着部には、内/外管リーク検出用のHe循環溝（径0.3mm、4ヶ所）を有している。

給水管板の内管孔には、水側不安定性防止及び水リーク量の抑制のため、オリフィスを設置、胴側流況は、伝熱性能の向上及び伝熱管座屈対策のため、ジグザグ流を採用している。

1次側流路は、ブースタ電磁ポンプの吐出圧及び負圧制限があるため、低圧力損失（0.8 kg/cm<sup>2</sup>）としている。

図3.2.1に70 MWt二重管蒸気発生器の構造概念を示す。

### 3.3 伝熱管肉厚の検討

外管・内管の肉厚計算は、それぞれ告示501号<sup>(2)</sup>の第1種容器、第3種容器の規格計算式を用いた。

ナトリウム側腐食代の計算は、“高速原型炉高温構造設計指針”<sup>(3)</sup>の液体ナトリウム接液面のくされ代計算式を用いた。また、水側腐食代の計算は、電中研調査報告の“ボイラ過熱器管及び再熱器管の内面スケールはく離と減肉に関する対策と問題点”<sup>(4)</sup><sup>(5)</sup>等における計算式を用いた。

伝熱管肉厚計算の結果を以下に示す。

外管	必要肉厚	1.393 mm	<	採用値	1.9 mm
内管	必要肉厚	1.260 mm	<	採用値	1.5 mm

### 3.4 伝熱・流力の検討

伝熱・流力の検討を行うに当たって、伝熱管ピッチを34mm～38mm、外シュラウド径を0.6m～0.8mの間で広範囲にサーベイすることとした。

サーベイ計算の結果、最も適当なSG仕様は、伝熱管ピッチ36mm、外シュラウド径0.7mである。ナトリウム圧力損失制限0.9 kg/cm<sup>2</sup>以下を満足する外シュラウド径は、各ピッチとも0.7m以上であり、管束部が小型となるピッチは、36mmである。

図3.4.1～図3.4.5にサーベイ計算結果を示す。

### 3.5 二重伝熱管供用中検査（ISI）の検討

二重伝熱管は、原子炉バウンダリを構成することになり、設置に際しては種々の供用中検査が要求される。従って、各指針等を調査し、必要となる供用中検査の抽出を行った。

供用中検査の抽出の結果は、以下の通りである。

内管	連続監視	Ne 湿分計（Ne 中圧力計）
	体積検査	UT、ECT
外観	連続監視	Na 中Ne 検出計（Ne 中圧力計）
	体積検査	UT、ECT



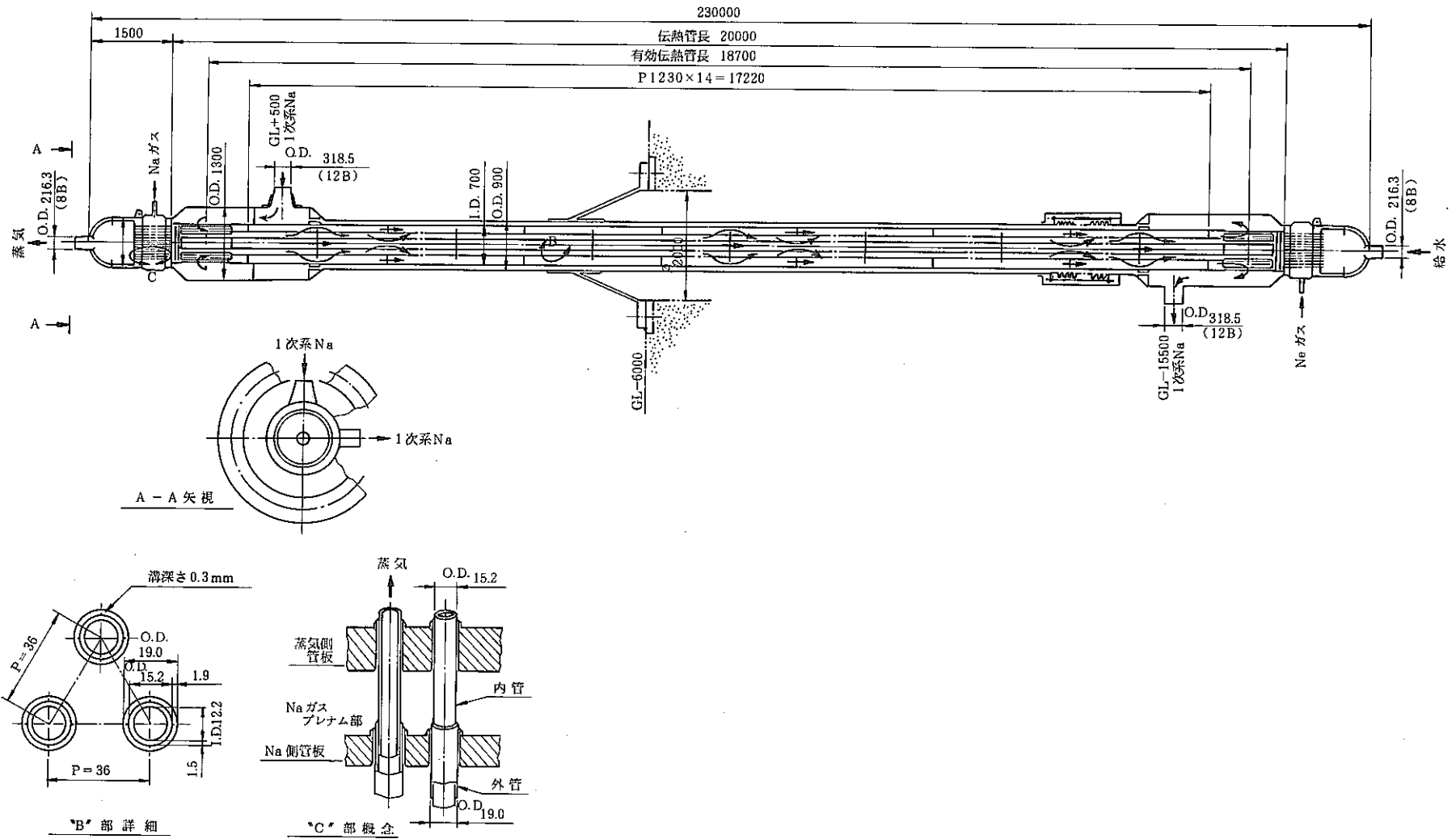


図3.2.1 70 MWt 二重管蒸気発生器の構造概念

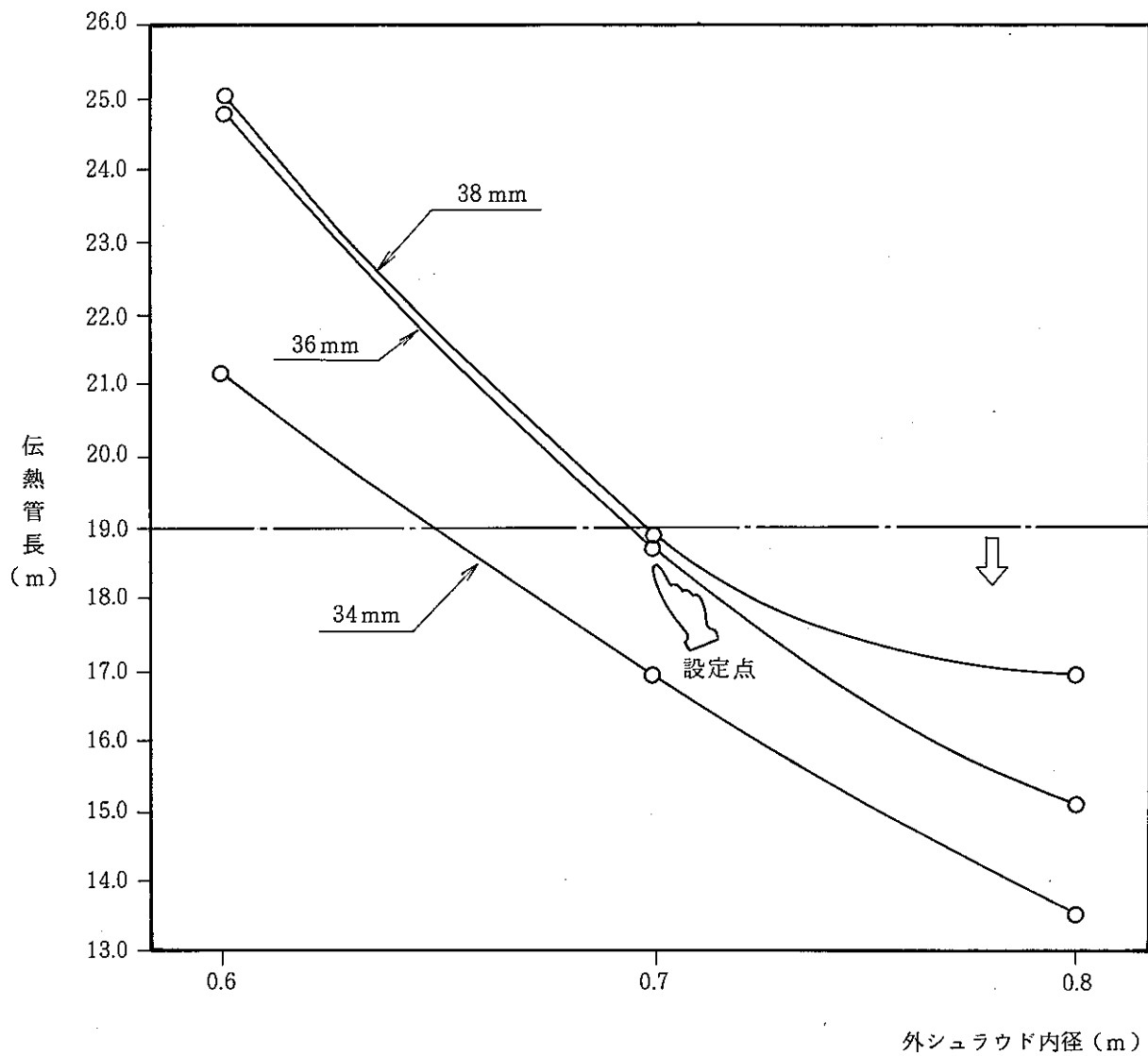


図3.4.1 伝熱管長さのサーベイ計算結果

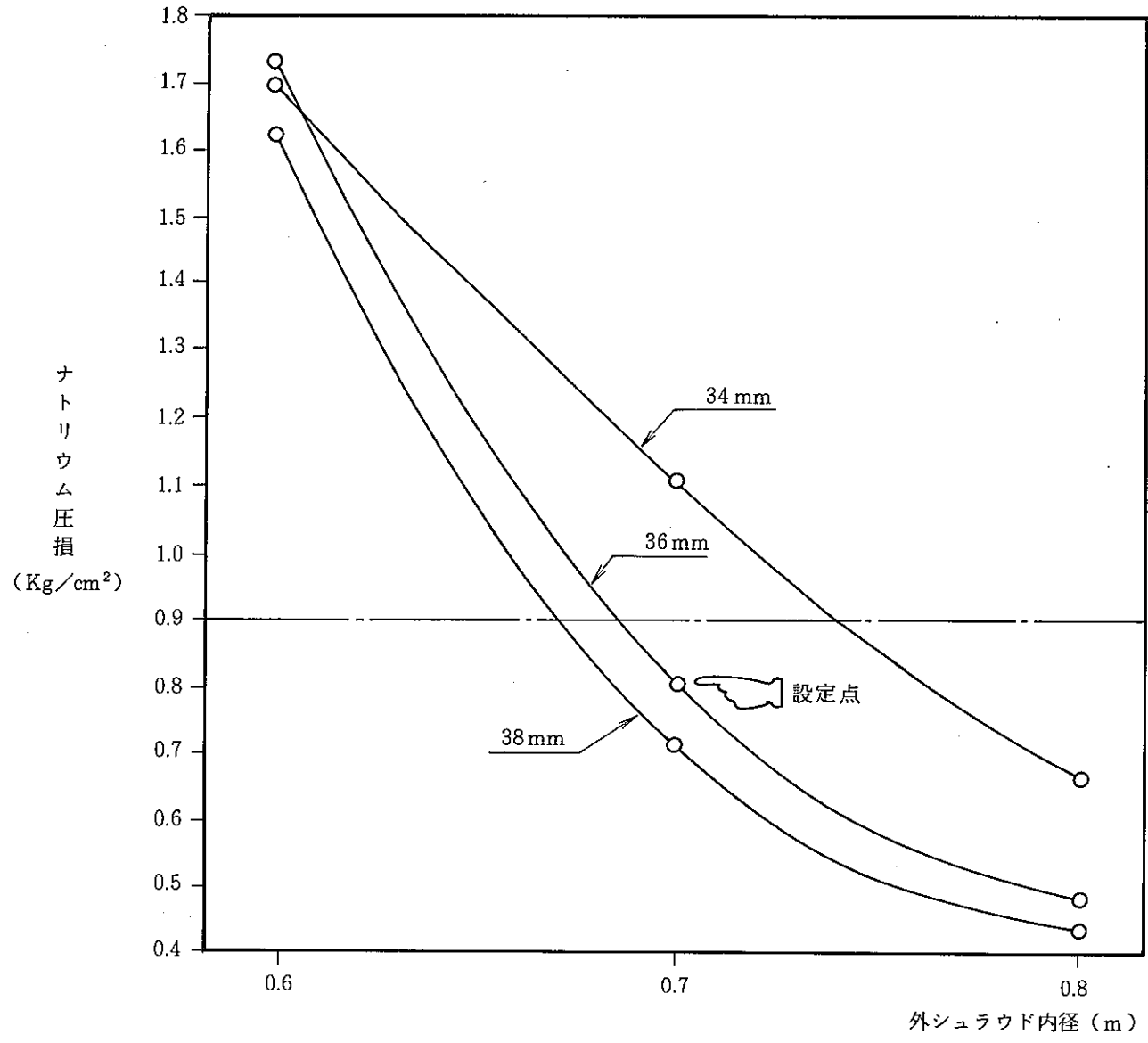


図3.4.2 Na 圧力損失のサーベイ計算結果

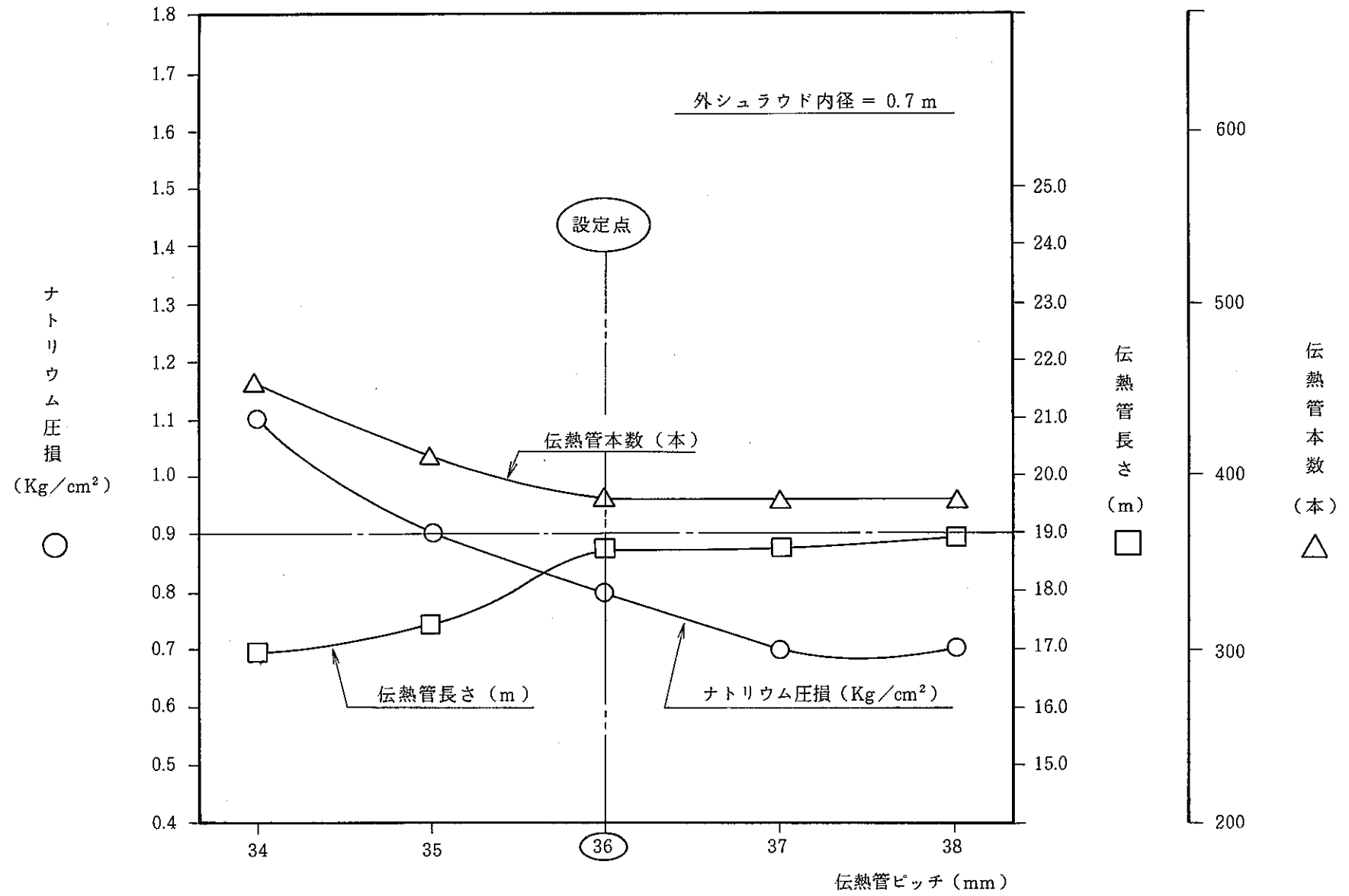


図3.4.3 伝熱管ピッチをパラメータとした計算結果

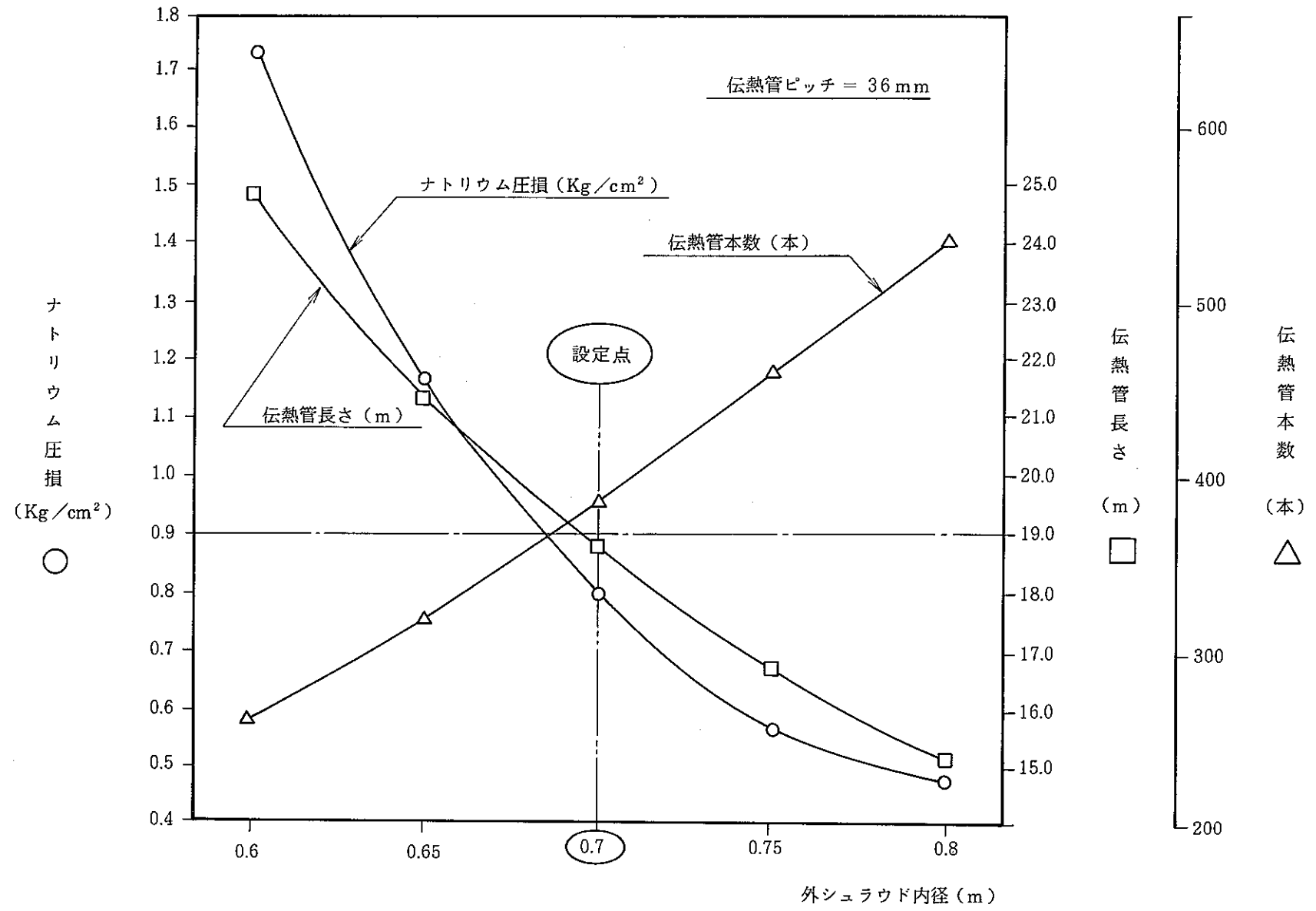


図3.4.4 外シュラウド径をパラメータとした計算結果

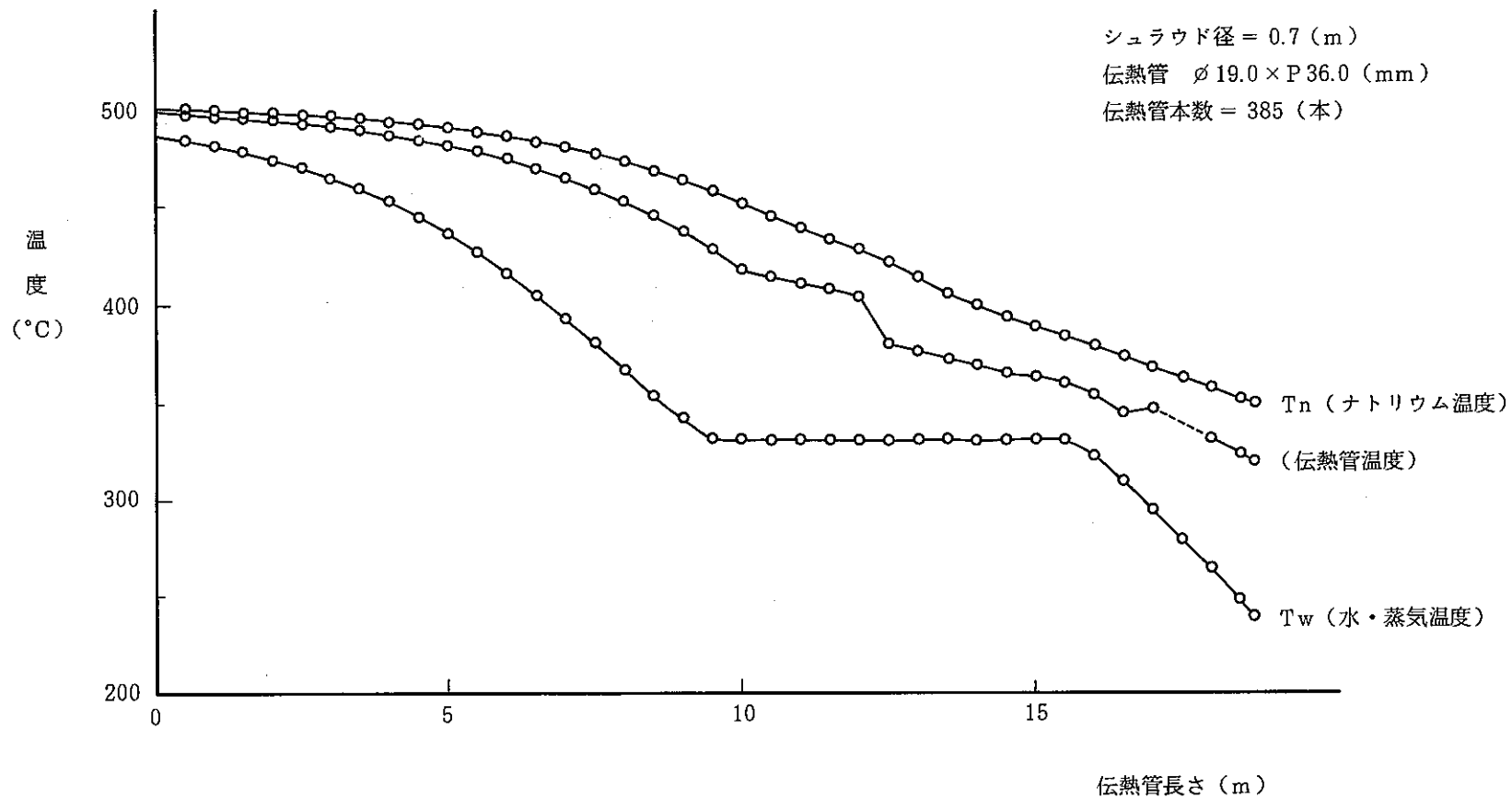


図3.4.5 伝熱管軸方向の温度分布

## 4. リーク検出系の検討

リーク検出系の検討は、2項“一次系系統仕様の検討”及び3項“二重管SGの検討”結果を基に、以下の項目について行った。

- (1) リーク想定条件の検討
- (2) 片側リーク時の検出目標時間
- (3) リーク検出系の検討
- (4) 安全ロジックの検討

### 4.1 リーク想定条件の検討

二重伝熱管のリーク想定条件は、以下の通りした。

#### (1) DBE

DBEでは、内管または外管にクラックが発生する片側リークのみとし、貫通リークは、発生しないものとした。

- ① リーク孔は、0.01mm未満
- ② リーク孔は、0.01mm以上

#### (2) BDBE

BDBEでは、貫通リークとした。

- ① 貫通リーク（微小リーク）
- ② 1本ギロチン破断

### 4.2 片側リーク時の検出目標時間

従来、伝熱管各部における破損確率は、直管型二重管SGを有する唯一の原子炉であるEBR-IIの運転実績に基づき求められていた。この場合、ナトリウム-水反応発生確率を $10^{-7}$ /炉・年以下に抑えるための検出時間は、約40時間であった。

しかし、EBR-IIのみの運転実績ではサンプル数が少ない。従って、ここではこのデータのうち、最も破損確率の高い内管溶接部の破損確率( $2 \times 10^{-9}$ /年)を全て(内管溶接部、外管溶接部、内管母材、外管母材)に適用して、伝熱管1ユニット毎の破損確率及びナトリウム-水反応発生確率 $10^{-7}$ 炉/年以下に抑えるための検出目標時間を求めることとした。

検出目標時間の算出結果を以下に示す。

- (1) 伝熱管1本当たりの破損確率
  - ① 内管1本当たりの破損確率 $\lambda_{in}$

内管1本当たりの破損確率は、上部、下部溶接部と母材の破損確率から以下の式より求めた。

$$\lambda_{in} = 2\lambda_1 + \lambda_3 = 6 \times 10^{-9} / \text{年}$$

$\lambda_1$  : 内管溶接部破損確率

$\lambda_3$  : 内管母材破損確率

② 外管1本当たりの破損確率  $\lambda_{out}$

外管1本当たりの破損確率は、内管同様以下の式より求めた。

$$\lambda_{out} = 2\lambda_2 + \lambda_4 = 6 \times 10^{-9} / \text{年}$$

$\lambda_2$  : 外管溶接部破損確率

$\lambda_4$  : 外管母材破損確率

(2) 伝熱管ユニット当たりの破損確率

① 内管ユニット当たりの破損確率  $P_{in}$

内管ユニット当たりの破損確率は、以下の式より求めた。

$$P_{in} = 1 - \exp(-\lambda_{in} \times L \times N) = 0.385$$

$L$  : 設計寿命 30年 (30×365d×24h×0.8)

$N$  : 伝熱管本数 (385本)

② 外管ユニット当たりの破損確率  $P_{out}$

内管ユニット当たりの破損確率は、以下の式より求めた。

$$P_{out} = 1 - \exp(-\lambda_{out} \times L \times N) = 0.385$$

$L$  : 設計寿命 30年 (30×365d×24h×0.8)

$N$  : 伝熱管本数 (385本)

(3) ナトリウム-水反応発生確率  $P$

ナトリウム-水反応は、内管及び外管とも破損した場合に発生することから、1炉年当たりの発生確率は、以下の式より求めた。

$$P = 1 - (1 - P_1 \times P_2)^{1/T} = \frac{P_1 \times P_2}{T} \quad (1/\text{炉} \cdot \text{年})$$

(4) 破損検出目標時間

ナトリウム-水反応発生確率  $P$  から、ナトリウム-水反応発生確率を  $10^{-7}$  / 炉・年以下に抑えるためには、破損検出目標時間を以下の式より求めた値以内にしなければならない。従って、3時間以内にリークを検出し、水-蒸気系ブローを完了すれば、ナトリウム-水反応発生は、未然に防止することができる。

$$10^{-7} = \frac{0.385 \times [1 - \exp(-6 \times 10^{-9} \times t \times 385)]}{30}$$

$$t = 3.37 \text{時間}$$



### 4.3 リーク検出系の検討

リーク検出系を検討するに当たっては、以下の考え方にに基づき検討した。

片側リークは、もう一方のリークに至る前に検出し、原子炉をスクラムさせ貫通リークを防止する。片側リーク検出目標時間は、ナトリウム-水反応発生確率の評価より  $10^{-7}$  / 炉・年以下の検出時間とすべきであることから、3.0時間以内となる。

貫通リークは、BDBEであり、設備は過剰にならない程度にすることが可能である。しかし、「常陽」においては、二重管SGを設置する最初のプラントとなることから、許認可性を考え、設備としてDBE相当の対応を図る。微小リークの検出時間は、ウェステージによる隣接管破損伝播が起こる前に検出できる時間とする。また、中リーク以上については、短時間で検出しても、水-蒸気系のブロー時間内にウェステージによる隣接管破損が生じることから、リーク量が1本ギロチン破断時のリーク量以下に防止する設備対応を図る。

リーク検出系の検討結果を以下に示す。

前年度の検討では、内管リーク検出計としてHe中湿分検出計、外管リーク検出計にNa中He検出計を計画していたが、「常陽」では、制御棒がベント型であることから、ボロン(B)の(n,  $\alpha$ )反応によって、1次系内にヘリウム( $^4\text{He}$ )が大量に発生するため、バックグラウンドが高く検出ガスとして使用することができないことから、他のガスによる方法を今回は検討した。この結果、検出ガスとして、リーク検出時間、リークガスの構造材に与える影響、ガス購入価格等から、ネオン(Ne)が最も適していた。よって、検出ガスとして、Neを用いたリーク検出計を中心に検討を行った。

#### (1) 内管リーク検出計 : Ne中湿分検出計

二重管の内管が破損した場合、内外管内を流れる検出ガス(Neガス)内に水-蒸気が混入する。よって、Neガス中に混入した湿分の濃度変化をNe中湿分検出計により検出する。

Ne中湿分検出計は、酸化アルミ被膜センサを用いた湿分計を用いること、及び安全保護系として使用することになるため、信頼性等を高める必要がある。よって、以下の条件を満足する必要がある。

- ① 湿分検出精度 : 100Vppm以下
- ② 湿分検出時間 : 数十秒以内
- ③ Neガス循環流量 : 5~100Nm<sup>3</sup>/h
- ④ センサ部温度 : 30℃

作動温度が60℃以下(最適温度30℃程度)であるため、Neガスを冷却する必要がある。

⑤ センサ部圧力 : 5ata

Neガス圧力が変動すると検出精度（露点温度の誤差）が低下するため、一定圧力に維持する必要がある。

上記の仕様を満足する湿分計としては、日本パラメトリクス（株）の水分検出器：AII2L型であった。

図4.3.1にNe中湿分検出計のシステム構成を示す。

(2) 外管リーク検出計 : Na中Ne検出計

二重管の外管が破損した場合、内外管内の検出ガス（Neガス）がナトリウム中に流出する。ナトリウム中に流出したNeガスは、SG出口配管より分岐して設置されるNa中Ne検出計のスパージャタンクでキャリアガス（Heガス）を用いて分離し、Heガス中のNeガスをガスクロマトグラフと質量分析計を結合したNe検出計によって検出する。

Na中Ne検出計は、安全保護系として使用されるため、信頼性を高める必要がある。よって、以下の条件を満足する必要がある。

- ① Ne検出精度 : 10Vppm以下
- ② Ne検出時間 : 数分以内
- ③ スパージャ率 : 0.4以上（Na中からのNeガス分離率）
- ④ スパージャタンクガス容積 : 0.02m<sup>3</sup>以下

上記の仕様を満足するガスクロマトグラフ質量分析計としては、（株）島津製作所のガスクロマトグラフ質量分析計：GCMS-QP300型であった。

図4.3.2にNa中Ne検出計のシステム構成を示す。

(3) 貫通小リーク検出計 : Na中水素検出計

二重管の内外管が破損した場合、ナトリウム-水反応が生じ、反応生成物が発生する。反応生成物量は、内外管破損孔の大きさに依存することになるが、ここでは、貫通小リークの場合の検出計について検討する。

内外管破損の場合、その圧力バランス上ナトリウム-水反応生成物（H<sub>2</sub>）は、ナトリウム中に混入する。ナトリウム中に混入した水素ガスは、前年度から検討しているNi拡散膜-イオンポンプ型Na中水素検出計で検出する。

Na中水素検出計は、安全保護系として使用されるため、信頼性を高める必要がある。よって、以下の条件を満足する必要がある。

- ① H<sub>2</sub>検出精度 : 10ppb
- ② H<sub>2</sub>検出時間 : 30秒以内

図4.3.3にNa中水素検出計のシステム構成を示す。

## (4) 貫通中リーク検出計 : 音響計

二重管の内外管が破損した場合の中リーク以上については、短時間で検出しても水-蒸気系のブロー時間中に、ウェステージにより隣接管が破損してしまうことから、Totalのリーク量が、1本管ギロチン破断時のリーク量以下となる音響計を検討する必要がある。

音響計の検出方法は、水リーク音の低周波音（数十kHz以下）を検出する低周波型と高周波音を検出する高周波型とに分類できる。低周波数の領域では、リーク音は高いが、バックグラウンドノイズも高いため、S/N比は悪い。高周波数の領域では、リーク音は低いが、バックグラウンドノイズも低いため、結果的にS/N比が良い。しかし、アメリカの開発実績、直管型SGを対象としたリーク検出性能試験でリーク率4.5g/sを20秒以内で検出できるという実績から判断すると、両方式とも検出要求条件を満足することが可能と思われるが、動燃で開発している低周波型音響計を検出計の基本とする。

低周波型音響計は、加速度検出器をS/G胴部にスパイラル状に設置し、複数の検出器からの信号を直接または平均化処理後、設定値と比較して水リークを判定する。水リーク位置の同定は、SG内部のリーク点を取りまく検出器位置までの遅れ時間を計算して、実データと比較判定する三角法での同定が検出性能上良い方法である。なお、音響計の設置個数は、音波の減衰から決定すべきものであるが、実機での減衰特性を把握するのは困難であるため、「常陽」二重管SGと同等のCRBRPプロトタイプSGでの設置個数実績から推定すると、以下の通りとなる。

設置総数	: 150個 (CRBRP: 135個)
周方向個数	: 6個 (CRBRP: 検出間距離 約510mm)
軸方向個数	: 24個 (CRBRP: 検出間距離 約840mm)

音響計は、安全保護系として使用されるため、信頼性を高める必要がある。よって、以下の条件を満足する必要がある。

- ① 検出可能リーク率 : 10g/s 以下
- ② 検出時間 : 15秒以下

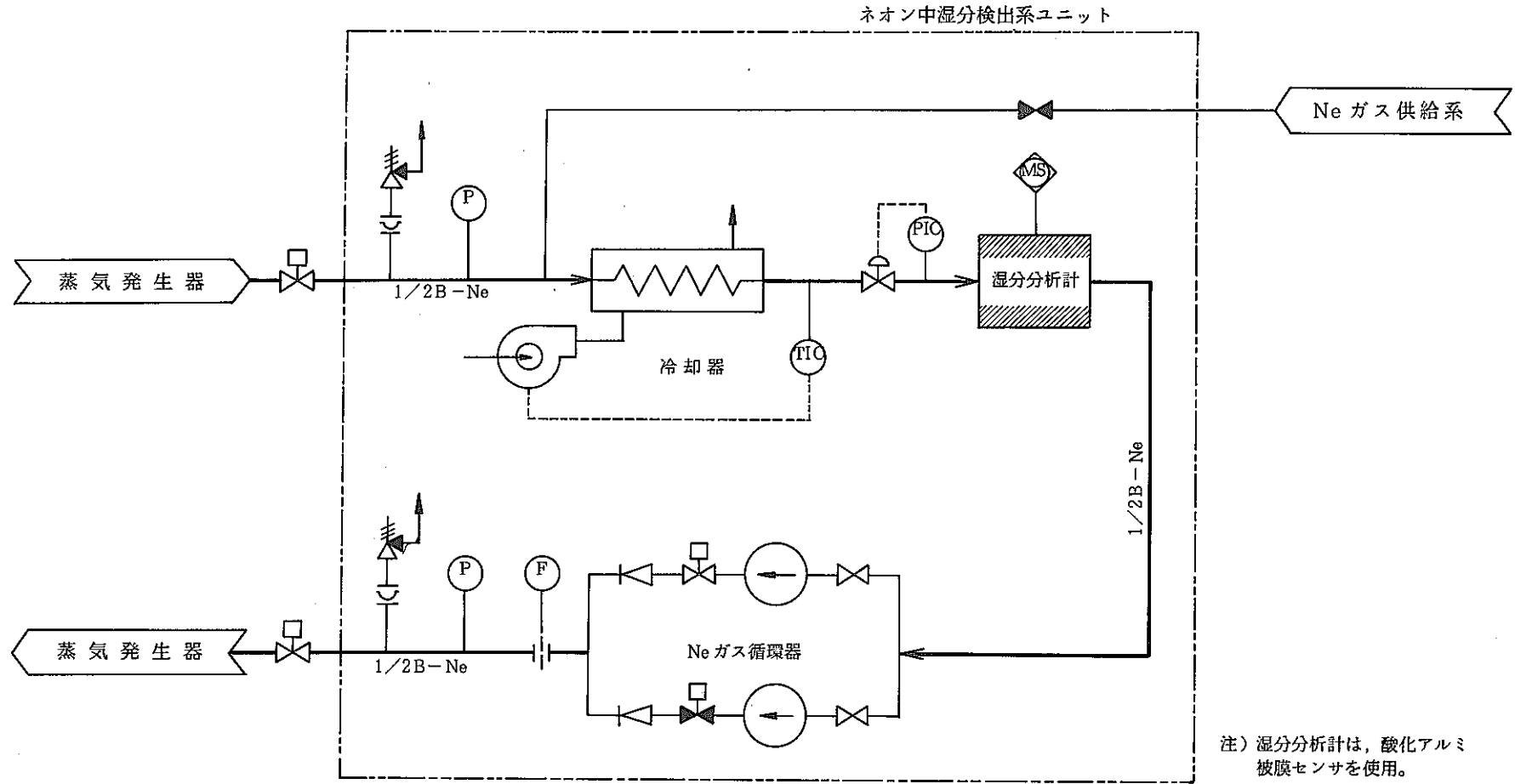


図4.3.1 Ne 中湿分検出計のシステム構成

ナトリウム中ネオン検出系ユニット

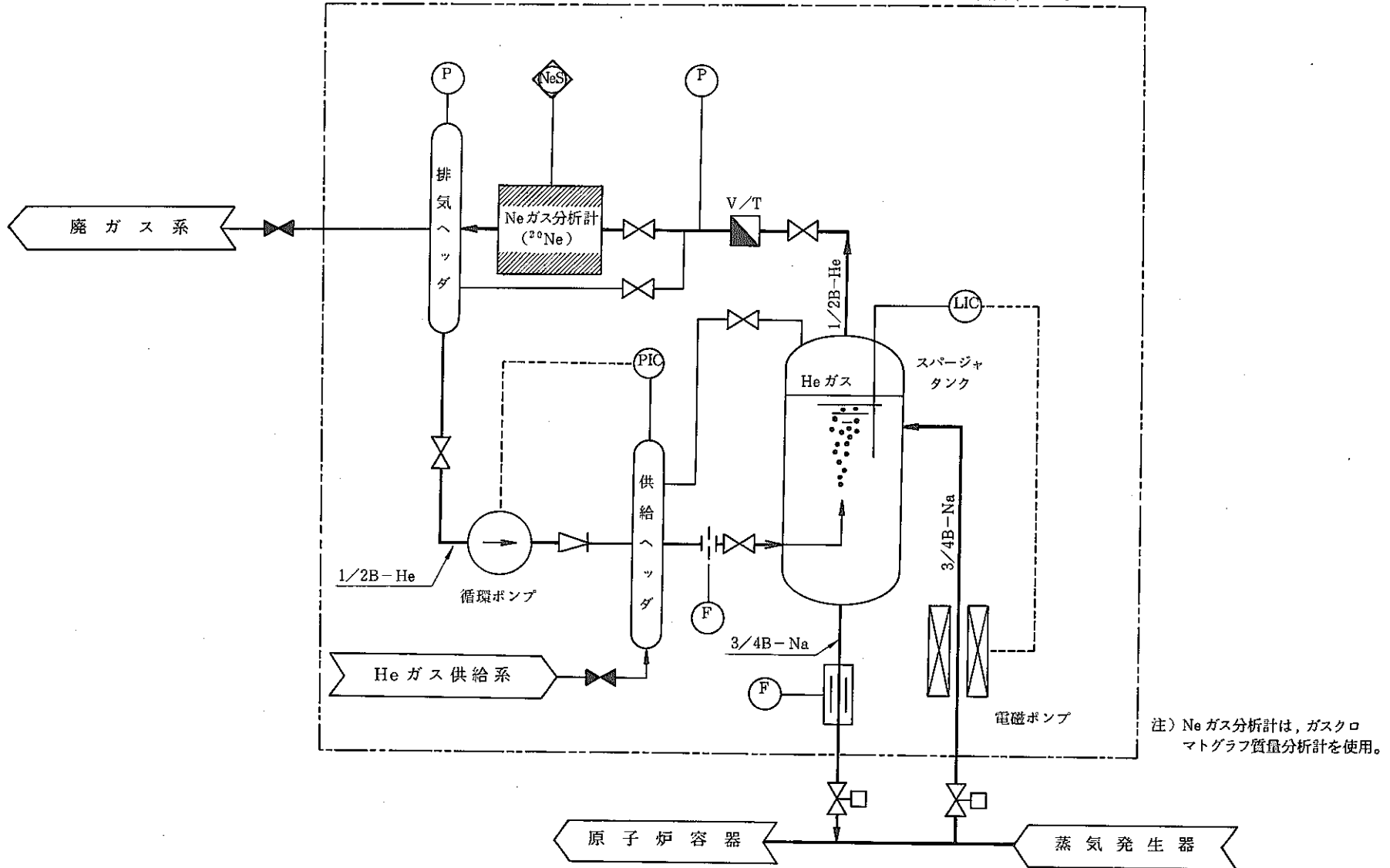


図4.3.2 Na中Ne検出計のシステム構成

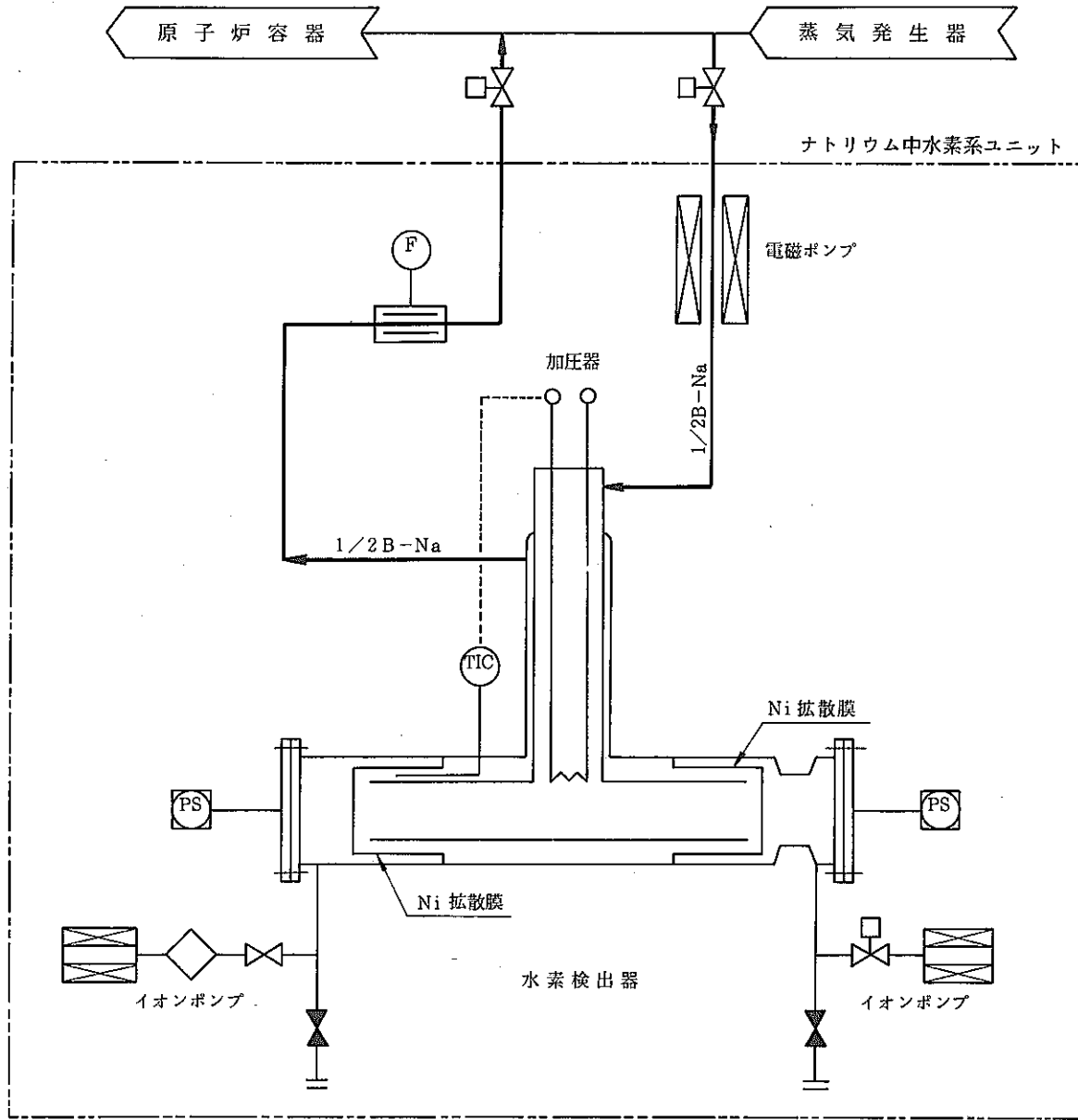


図4.3.3 Na 中水素検出計のシステム構成

## 5. リーク検出系応答解析

リーク検出系応答解析は、4.項までの検討結果を踏まえ、リーク検出系応答時間に影響するリーク孔径、検出設定値等をパラメータとして解析を行い、「常陽」2次系削除システムの安全ロジックを構築する上で必要となるリーク検出系の要求仕様条件を決定した。解析は、以下の項目について行った。

- (1) 内管リーク検出系応答解析
- (2) 外管リーク検出系応答解析
- (3) 貫通リーク検出系応答解析

### 5.1 内管リーク検出系応答解析

#### (1) 解析モデル

4.3(1)項で示したNe中湿分検出計を設置することで解析を実施する。解析モデルを図5.1.1に示す。

リーク孔は、応答時間が最も保守的となる位置にするため、リークした蒸気が上下いずれのガスプレナムに対しても、漏出しにくい伝熱管軸方向中心とし、かつ、二重管の密着部に設けられたリーク検出溝の溝間中心でリークが生じるものとした。

二重管の密着部にリークした蒸気は、密着部に設けられた溝部を通過して、上下のガスプレナムに達し、ここで蒸気はNeガスと完全混合し、Neガスとともに検出系内の冷却器及び減圧弁を通過して湿分計に到達し、リーク検出されるものとした。

内管リーク検出系のうち、応答時間に影響するリーク孔、ガスプレナム体積、検出設定値及びNeガス循環流量をパラメータとして、解析を行った。パラメータ範囲は、以下の通りである。

表5.1.1に内管リーク検出系応答解析ケースを示す。

① リーク孔	: 0.001mm ~ 1.0mm
② ガスプレナム体積	: 0.1m <sup>3</sup> ~ 2.0m <sup>3</sup> (0.92Nm <sup>3</sup> ~ 18.4Nm <sup>3</sup> )
③ 検出設定値	: 1.0 ~ 300Vppm
④ Neガス循環流量	: 1.0 ~ 100Nm <sup>3</sup> /h

## (2) 解析条件

① リーク率 :  $W_L$ 

$$W_L^2 = A_L^2 \cdot g \cdot \kappa \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right) \frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} \cdot P_{WL} \cdot \gamma_{WL}$$

 $g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>) $\gamma_{WL}$  : リーク点比重量 (kg/m<sup>3</sup>) $A_L$  : リーク孔断面積 (m<sup>2</sup>) $\kappa$  : 比熱比 (-)

② リーク孔～溝間の流れ

$$P_M - P_G = \frac{12 \nu \ell W_L}{h^3 b g}$$

 $P_M$  : リーク部圧力 (kg/m<sup>2</sup>) $P_G$  : 溝部圧力 (kg/m<sup>2</sup>) $\nu$  : 動粘性係数 (m<sup>2</sup>/s) $h$  : 隙間巾 (=  $2 \times 10^{-6}$ ) (m) $b$  : 隙間流れ巾 (m) $\ell$  : 流れ方向長さ (m)尚、 $\ell/b$ は他の研究による実験式を参考に1.765とする。

③ 溝～プレナム間の流れ

$$P_G - P_P = \frac{64 \cdot \ell_{GTP} \cdot W_L^2}{R_o \cdot D_o \cdot 2 \cdot \gamma \cdot A_{GTP}^2}$$

 $P_P$  : プレナム部圧力 (kg/m<sup>2</sup>) $R_o$  : レイノルズ数 (-) $D_o$  : 溝直径 (m) $\ell_{GTP}$  : リーク孔最寄溝位置～ガスプレナム間距離 (m) $A_{GTP}$  : 溝部流路面積 (m<sup>2</sup>)④ プレナム中の湿分濃度上昇に必要な時間 :  $t$ 

$$t = \frac{V}{W} (1 - \chi) \ln \left\{ \frac{W}{Q} (1 - \chi) C_o - 1 \right\}$$

 $V$  : ガスプレナム体積 (m<sup>3</sup>) $W$  : 検出ガス流量 (m<sup>3</sup>/s) $Q$  : リーク流量 (m<sup>3</sup>/s) $C_o$  : プレナム中蒸気濃度 (Vppm) $\chi$  : 戻り蒸気かわき割合 (-)



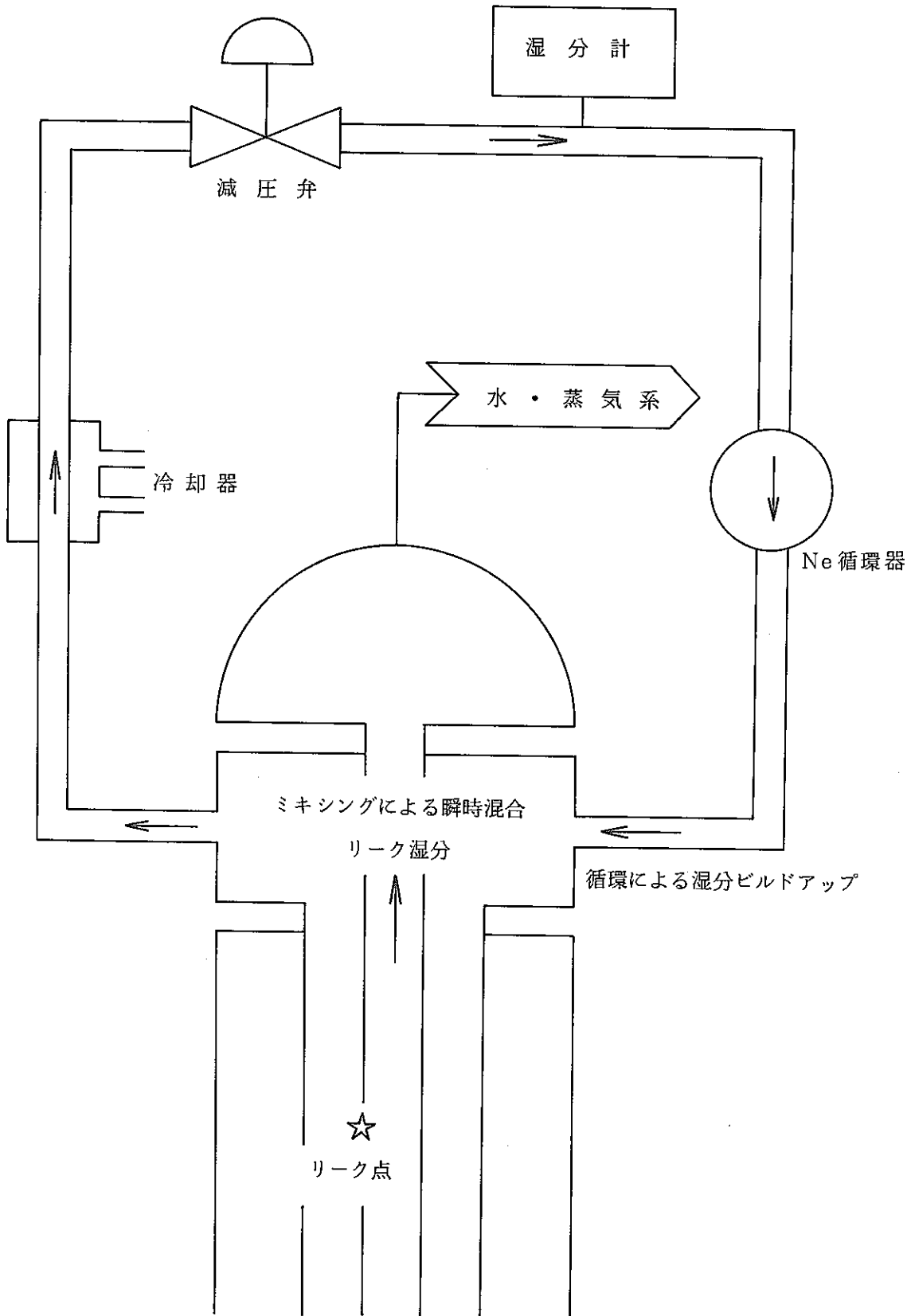


図5.1.1 内管リーク検出系応答解析モデル

表5.1.1 内管リーク検出系応答解析ケース

項 目	ケ-1	ケ-2	ケ-3	ケ-4	ケ-5	ケ-6	ケ-7	ケ-8	ケ-9	ケ-10	ケ-11	ケ-12	ケ-13
ガスプレナム体積	0.2	0.1	0.5	1.0	2.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
検出設定値 (Vppm)	10	10	10	10	10	1	50	100	300	10	10	10	10
検出循環流量(Nm <sup>3</sup> /h)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	10	50	100
備 考	推奨 仕様	ガスプレナム体積の変化				検出設定値の変化				検出環境流量の変化			

## (3) 解析結果

## ① 検出設定値の変化による内管リーク検出時間の変化

図5.1.2に検出設定値の変化による内管リーク検出時間の変化を示す。

解析の結果、検出設定値が大きくなるのに比例して、検出に要する時間も増加する。よって、検出設定値を抑えることで、リーク検出時間を短くすることができる。なお、同検出値においてリーク孔が0.02mm以上では、応答時間はほとんど変化しない。これは、蒸気の流動に対してリーク孔の抵抗以外の伝熱管接合部の流動抵抗に支配されるためである。

## ② ガスプレナム体積の変化による内管リーク検出時間の変化

図5.1.3にガスプレナム体積の変化による内管リーク検出時間の変化を示す。

解析の結果、ガスプレナム体積が大きくなるのに比例して、検出に要する時間も増加する。よって、ガスプレナム体積を抑えることで、リーク検出時間を短くすることができる。なお、同ガスプレナム体積においてリーク孔が0.02mm以上では、①項と同様の理由から応答時間はほとんど変化しない。

## ③ Ne循環流量の変化による内管リーク検出時間の変化

図5.1.4にNe循環流量の変化による内管リーク検出時間の変化を示す。

解析の結果、検出設定値及びガスプレナム体積に比べ、検出時間に大きく影響しないが、Ne循環流量が増加するにつれて、検出に要する時間は短くなる。しかし、循環流量5~10Nm<sup>3</sup>/h以上に達すると検出時間の短縮に寄与しなくなる。

## ④ 解析結果の全体評価

全体評価を行うに当たって、4項で示したようにリーク孔は、0.01mm、リーク検出時間は、3時間以内を条件として全体評価を行った。

図5.1.5に内管リーク検出系応答解析の評価を示す。これは、リーク孔0.01mmに着目して、検出時間の積算を行ったものである。

図より、検出設定値及びガスプレナム体積が、検出時間に大きく影響することがわかる。なお、その時間は、ガスプレナム中の湿分濃度上昇に必要な時間(T3)に支配されている。

これらの結果より、検出目標時間3時間以内を満足する各パラメータの範囲は、以下の通りであった。

- |              |   |
|--------------|---|
| (a) 検出設定値    | : <100Vppm                                |
| (b) ガスプレナム体積 | : <2 m <sup>3</sup> (約20Nm <sup>3</sup> ) |
| (c) Neガス循環流量 | : 5 ~ 100Nm <sup>3</sup> /h               |

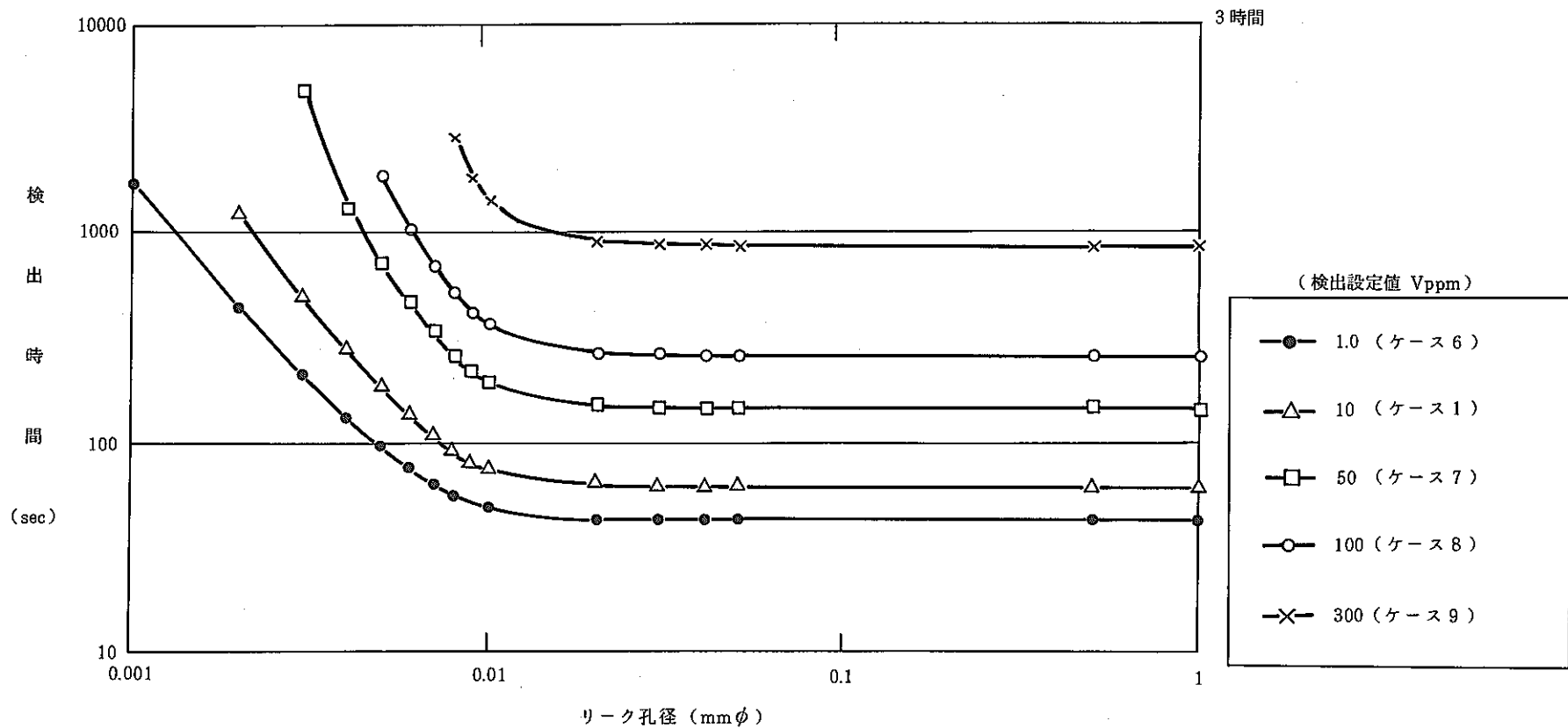


図 5.1.2 検出設定値の変化による内管リーク検出時間の変化

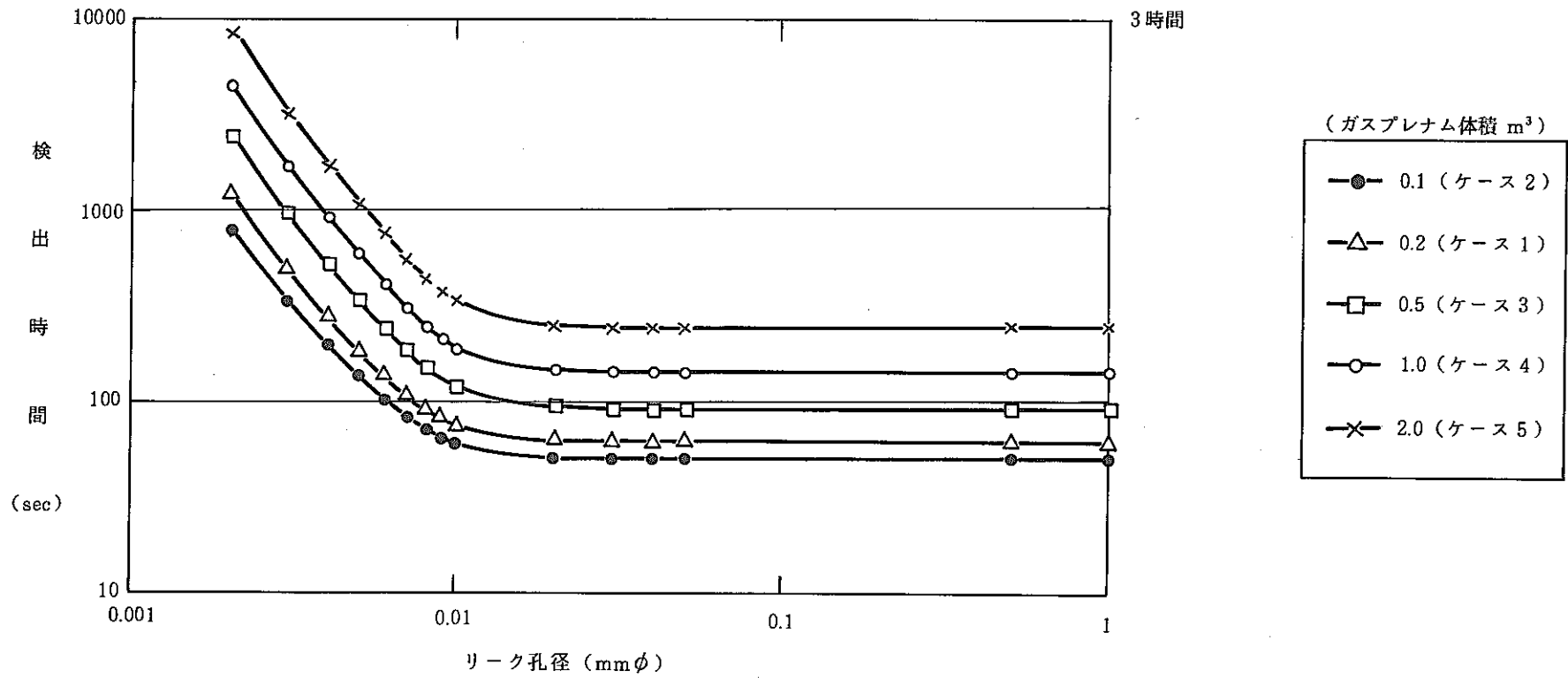


図 5.1.3 ガスプレナム体積の変化による内管リーク検出時間の変化

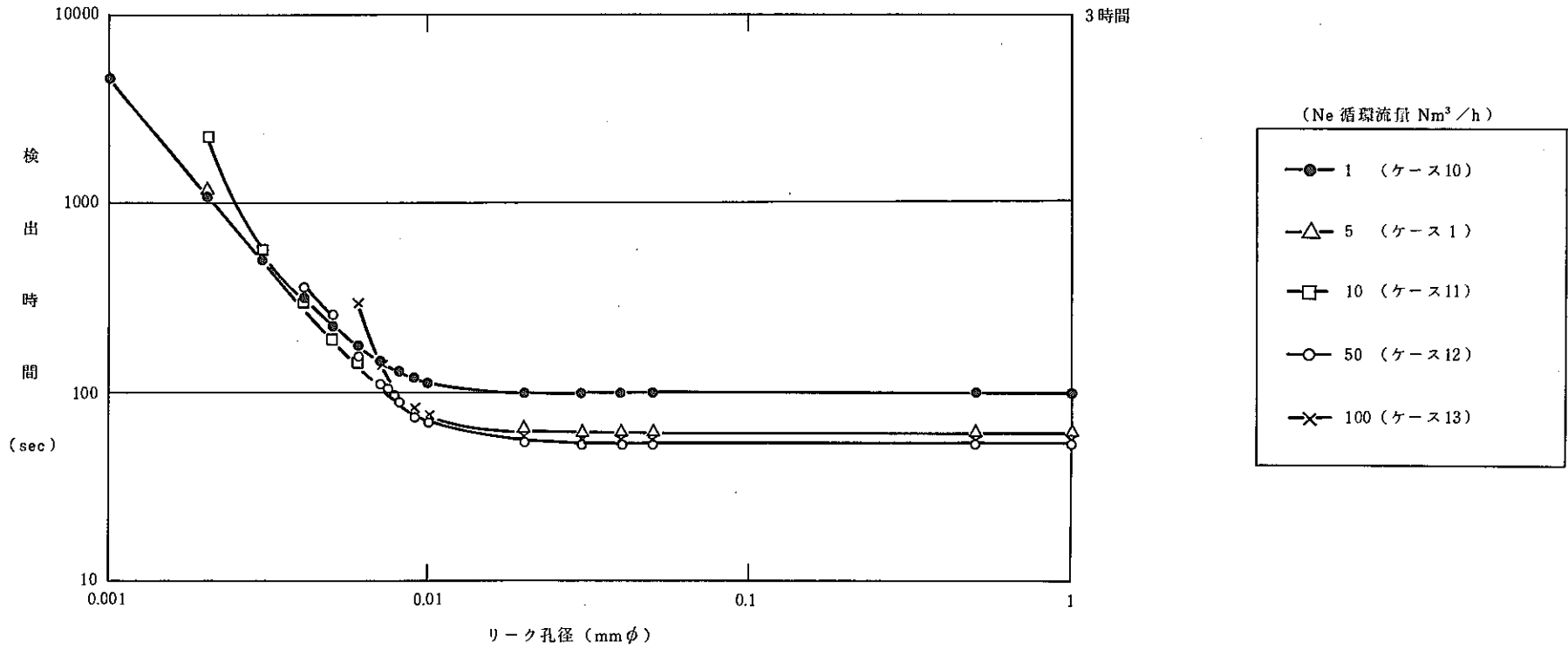


図 5.1.4 Ne 循環流量の変化による内管リーク検出時間の変化

Total 検出時間 ( )

単位: sec

リーク孔径 0.01 mm $\phi$

- T 1 : 内管リーク孔~ガスペナム部移行時間
- T 2 : 検出配管移行遅れ時間
- T 3 : ガスペナム中の湿分濃度上昇に必要な時間
- T 4 : 検出器における検出遅れ時間

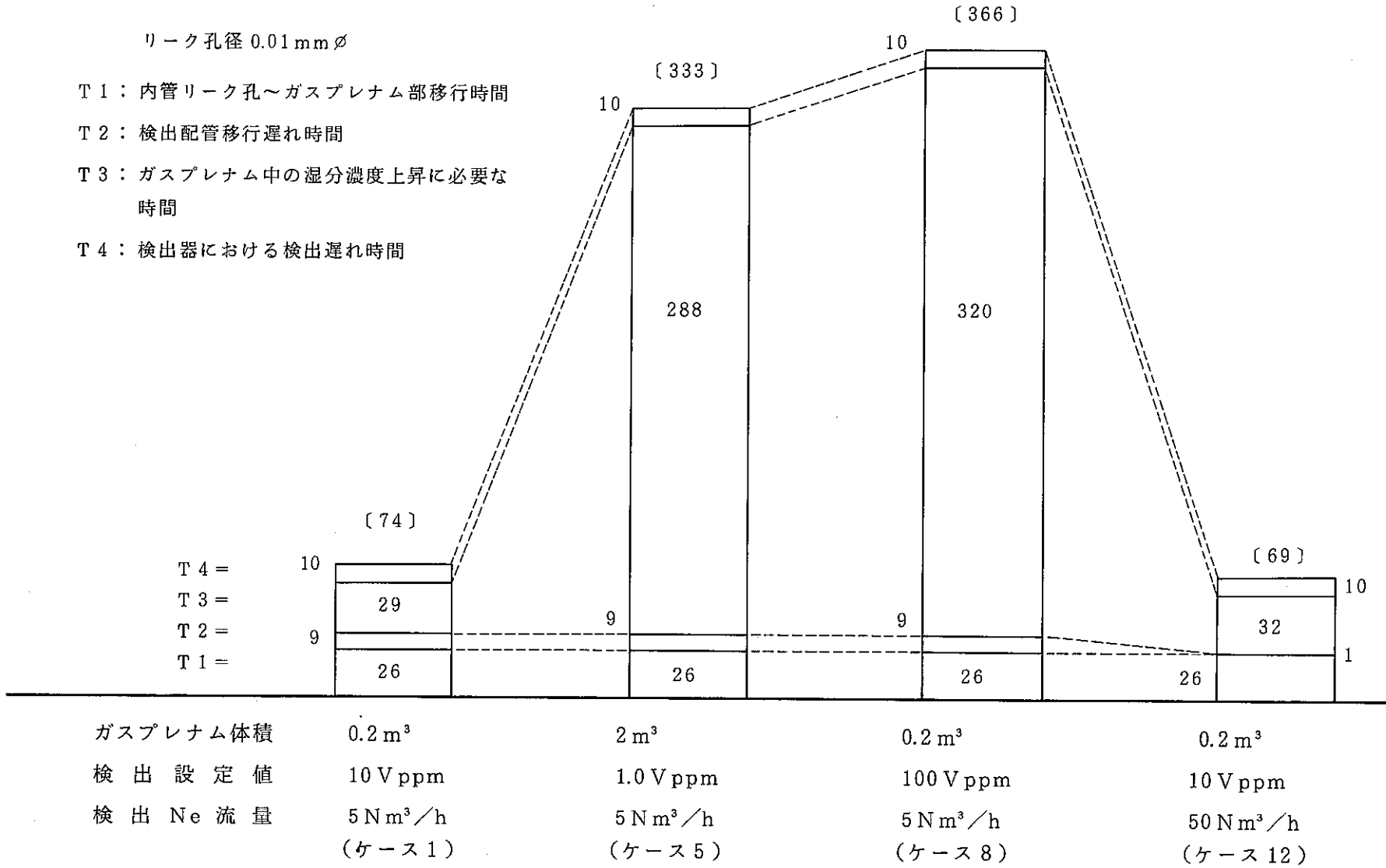


図 5.1.5 内管リーク検出系応答解析の評価結果

## 5.2 外管リーク検出系応答解析

### (1) 解析モデル

4.3(2)項で示したNa中Ne検出計を設置することで解析を実施する。図5.2.1外管リーク検出系応答解析モデルを示す。

リーク孔は、内管同様Neガスがナトリウム中に漏出しにくい伝熱管軸方向中心とし、かつ、溝間中心で生じるものとした。

リークが生じるとガスプレナム及び溝間内のNeガスは、溝部を通過してリーク点近傍に達した後、内外管接合部を通過してリーク点に達する。ナトリウム中に漏出したNeガスは、速やかにナトリウム中に溶解し、主配管の流れとともにループ内に分散する。分散したNeガスは、コールドレグ配管から分岐されて設置されるNa中Ne検出系に流入する。

Na中Ne検出系は、HeをカバーガスとするスパージャタンクとHe循環系より構成され、スパージャタンクに流入したNeを含んだナトリウムは、He循環系でバブリングされ、HeカバーガスへのNeの放出を促進する。Heカバーガスへ放出されたNeは、He循環系の流れとともにNe検出計に導かれ設定値以上のNe濃度時に検出されるものとした。

外管リーク検出系のうち、応答時間に影響するリーク孔、検出設定値、炉容器カバーガスへのリークガス放出割合、サンプリングNa流量、キャリアガス(Heガス)容積及びリークガス圧力をパラメータとして、解析を行った。パラメータ範囲は、以下の通りである。

表5.2.1に外管リーク検出系応答解析ケースを示す。

① リーク孔	:	0.001mm ~ 1.0mm
② リークガス	:	Ne及びHeで解析
③ 検出設定値	:	10 ~ 100Vppm
④ 炉容器カバーガスへのリークガス放出割合	:	0.2 ~ 0.5
⑤ サンプリング流量	:	20 ~ 100l/min (スパージャ率: 0.3 ~ 0.5)
⑥ キャリアガス容積	:	0.02 ~ 1.0m <sup>3</sup>
⑦ リークガス圧力	:	20 ~ 40kg/cm <sup>2</sup>



## (2) 解析条件

① リーク率 :  $W_L$ 

$$W_L^2 = A_L^2 \cdot g \cdot \kappa \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right) \frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} \cdot P_{WL} \cdot \gamma_{WL}$$

 $g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>) $\gamma_{WL}$  : リーク点比重量 (kg/m<sup>3</sup>) $A_L$  : リーク孔断面積 (m<sup>2</sup>) $\kappa$  : 比熱比 (-)

② リーク孔～溝間の流れ

$$P_M - P_G = \frac{12\nu \ell W_L}{h^3 b g}$$

 $P_M$  : リーク部圧力 (kg/m<sup>2</sup>) $P_G$  : 溝部圧力 (kg/m<sup>2</sup>) $\nu$  : 動粘性係数 (m<sup>2</sup>/s) $h$  : 隙間巾 (=  $2 \times 10^{-6}$ ) (m) $b$  : 隙間流れ巾 (m) $\ell$  : 流れ方向長さ (m)尚、 $\ell/b$ は他の研究による実験式より外挿し、2.0とする。

③ 溝～プレナム間の流れ

$$P_G - P_P = \frac{64 \cdot \ell_{GTP} \cdot W_L^2}{R_0 \cdot D_0 \cdot 2z \cdot \gamma \cdot A_{GTP}^2}$$

 $P_P$  : プレナム部圧力 (kg/m<sup>2</sup>) $R_0$  : レイノルズ数 (-) $D_0$  : 溝直径 (m) $\ell_{GTP}$  : リーク孔最寄溝位置～ガスプレナム間距離 (m) $A_{GTP}$  : 溝部流路面積 (m<sup>2</sup>)

④ サンプリング検出設定濃度に達するまでの時間 :  $t$

$$t = \frac{W_s \cdot f_s \cdot \frac{a}{b} \left\{ t + \frac{1}{b} \exp(-b \cdot t) - \frac{1}{b} \right\} \cdot R_{NE}}{M_{HE} \cdot R_{HE}} - C_{HED}$$

$$a = \frac{\phi - W_L}{V_{Na}}$$

$$b = f_{CG} \cdot \frac{WR}{V_{Na}} + f_s \cdot \frac{WS}{V_{Na}}$$

$$C_{HED} = \frac{M_{NE} \cdot R_{NE}}{M_{HE} \cdot R_{HE}}$$

$W_s$  : サンプリング流量 (kg/s)

$f_s$  : スパーチャ率

$\phi$  : Na中Neの融解割合 (= 1)

$W_L$  : リーク率 (kg/s)

$V_{Na}$  : 1次系Naインベントリ (=約125t) (kg)

$f_{CG}$  : R/VカバーガスへのNeガス放出割合 (-)

$WR$  : 炉心流量 (=732) (kg/s)

$M_{NE}$  : サンプリング中ネオンガス質量 (kg)

$R_{NE}$  : ネオンガス定数 (-)

$M_{HE}$  : サンプリング中ヘリウムガス質量 (kg)

$R_{HE}$  : ヘリウムガス定数 (-)

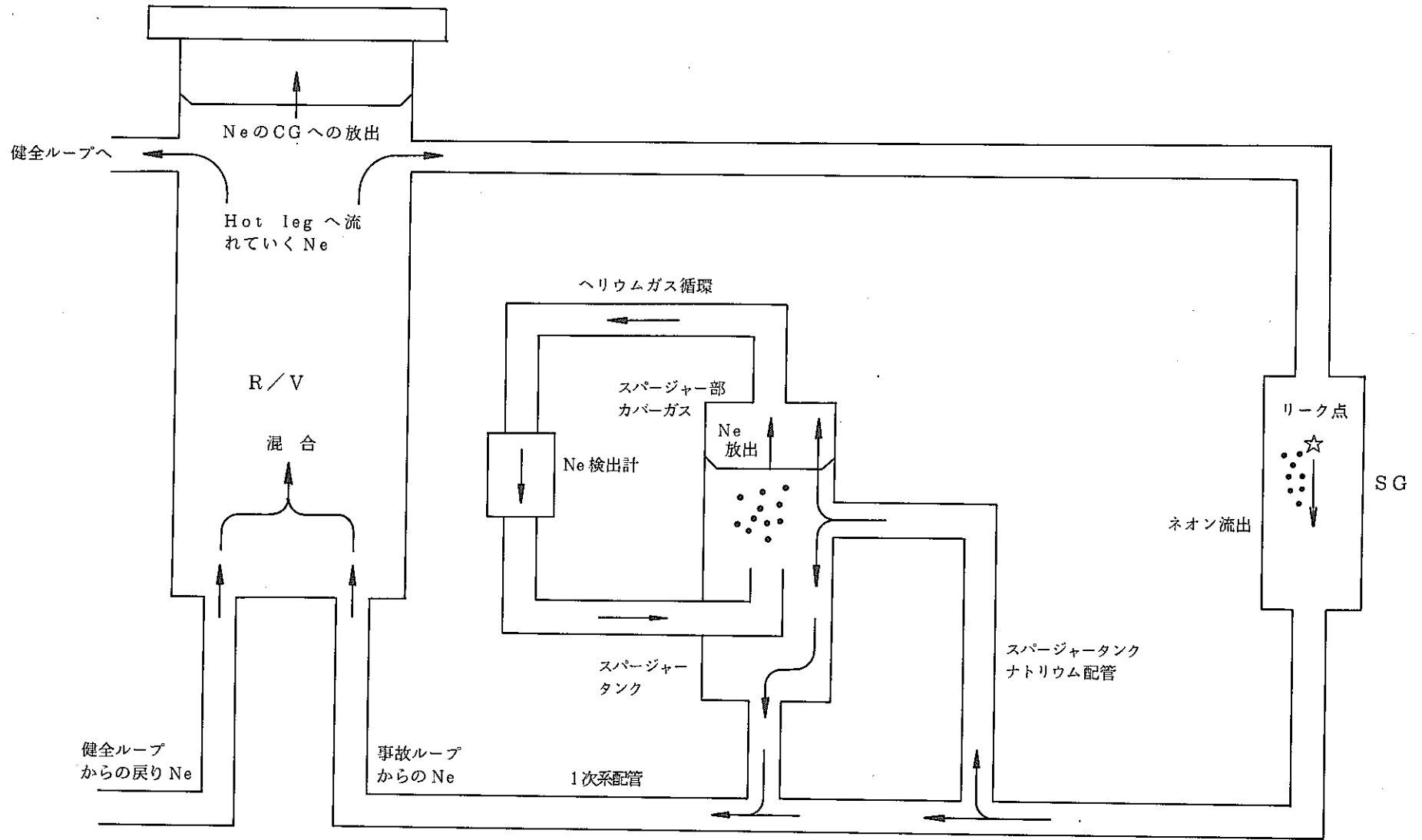


図5.2.1 外管リーク検出系応答解析モデル

表5.2.1 外管リーク検出系応答解析ケース

項目	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8	ケース9	ケース10	ケース11
検出設定値	10	10	50	100	10	10	10	10	10	10	10
R/Vカバーガスへのリークガス放出割合	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
スパージャ率 / サンプリング流量 (ℓ/min)	0.42 / 50	0.42 / 50	0.42 / 50	0.42 / 50	0.42 / 50	0.5 / 20	0.3 / 100	0.42 / 50	0.42 / 50	0.42 / 50	0.42 / 50
リークガス / キャリアガス	ネオン / ヘリウム	ヘリウム / アルゴン	ネオン / ヘリウム	ネオン / ヘリウム	ネオン / ヘリウム	ネオン / ヘリウム	ネオン / ヘリウム	ネオン / ヘリウム	ネオン / ヘリウム	ネオン / ヘリウム	ネオン / ヘリウム
キャリアガス容積	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.1	0.02	0.02
キャリアガス圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	20	20	20	20	20	20	20	20	20	30	40
備考	推奨仕様	リーク ガスの 変化	検出設定値の変化		放出割合 の変化	サンプリング流量の 変化		キャリアガス容積の 変化		リークガス圧力の 変化	

## (3) 解析結果

## ① リークガスの変化による外管リーク検出時間の変化

図5.2.2にリークガスの変化による外管リーク検出時間の変化を示す。

解析の結果、検出に要する時間はHeガスの方が短く、リークガスとしてはNeよりHeの方が適している。

検出時間の比は、He1に対してNeが約3である。なお、リーク孔0.02mm以上の検出時間比は、約5になる。これは、二重管密着部におけるNeの流動評価式を見直しする必要があることを示している。

## ② 検出設定値の変化による外管リーク検出時間の変化

図5.2.3に検出設定値の変化による外管リーク検出時間の変化を示す。

解析の結果、検出設定値が大きくなるのに比例して、検出に要する時間も増加する。よって、検出設定値を抑えることで、リーク検出時間を短くすることができる。なお、同検出値においてリーク孔が0.008mm以上では、応答時間はほとんど変化しない。これは、Neの流動に対してリーク孔の抵抗以外の伝熱管接合部の流動抵抗が支配されるためである。

## ③ カバーガスへのリークガス放出割合の変化による外管リーク検出時間の変化

図5.2.4にカバーガスへのリークガス放出割合の変化による外管リーク検出時間の変化を示す。

解析の結果、カバーガスへの放出割合が大きくなるのに比例して、検出に要する時間も増加する。但し、「常陽」カバーガスへの放出割合を変化させることは不可能に近い。

今回の解析では、スパージャタンクでの放出割合も見込んだ解析を行い、リーク時間を保守的な値となる計算をしている。なお、「常陽」における燃料ピンから放出されたタグガスのカバーガス雰囲気での回収率は、約1%程度であり、この値を放出割合に当てはめると、検出時間はケース1の約1/50になるとと思われる。

## ④ サンプリングNa流量の変化による外管リーク検出時間の変化

図5.2.5にサンプリングNa流量の変化による外管リーク検出時間の変化を示す。

解析の結果、サンプリングNa流量が大きくなるのに比例して、検出に要する時間を短くすることができる。また、Na流量を増加させ、かつ、スパージャ率の大きくすることができれば検出時間をより短くすることができる。しかし、スパージャ率は、サンプリングNa流量の変動に伴って変動する値である。

## ⑤ キャリアガス容積の変化による外管リーク検出時間の変化

図5.2.6にキャリアガス容積の変化による外管リーク検出時間の変化を示す。

解析の結果、キャリアガス容積が大きくなるのに比例して、検出に要する時間も

増加する。よって、キャリアガス容積を抑えることで、リーク検出時間を短くすることができる。なお、同キャリアガス容積においてリーク孔が0.008mm以上では、①項と同様の理由から応答時間はほとんど変化しない。

⑥ リークガス圧力の変化による外管リーク検出時間の変化

図5.2.7にリークガス圧力の変化による外管リーク検出時間の変化を示す。

解析の結果、リークガス圧力が大きくなるのに比例して、検出に要する時間を短くすることができる。しかし、あまり圧力を高くすると、内管リークの検出時間遅れにつながることから、圧力設定にあたっては、十分な検討が必要となる。

⑦ 解析結果の全体評価

全体評価を行うにあたっては、内管リーク検出系応答解析全体評価同様、リーク孔は、0.01mm、リーク検出時間は、3時間以内を条件として全体評価を行った。

図5.2.8に外管リーク検出系応答解析の評価を示す。

図より、サンプリングNa流量及びキャリアガス容積が、検出時間に大きく影響することがわかる。また、リークガス及び炉容器カバーガスへのリークガス放出割合の影響については、図5.2.2、図5.2.4より、リークガスは分子量の小さいもの程よく、リークガス放出割合についても小さいものが検出時間を短くすることができる。

これらの結果より、検出目標時間3時間以内を満足する各パラメータの範囲は、以下の通りであった。

- |                    |                        |
|--------------------|------------------------|
| (a) 検出設定値          | : <10vppm              |
| (b) サンプリングNa流量     | : >20l/min             |
| (c) スパーチャ率         | : >0.4                 |
| (d) キャリアガス容積       | : <0.02m <sup>3</sup>  |
| (e) リークガス          | : Neガス(バックグラウンドの問題から)  |
| (f) 炉容器カバーガスへの放出割合 | : 0.5                  |
| (g) リークガス圧力        | : 20kg/cm <sup>2</sup> |

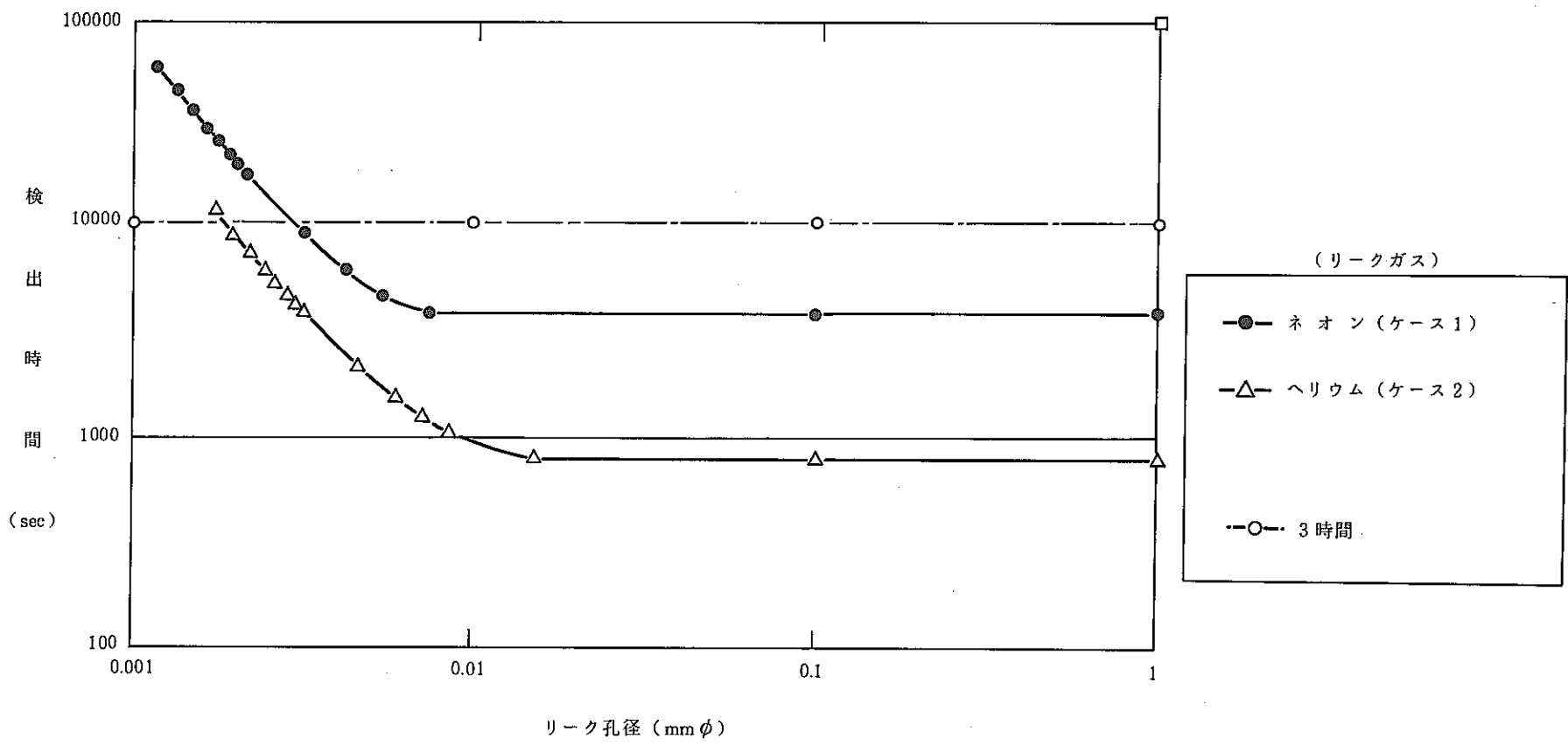


図 5.2.2 リークガスの変化による外管リーク検出時間の変化

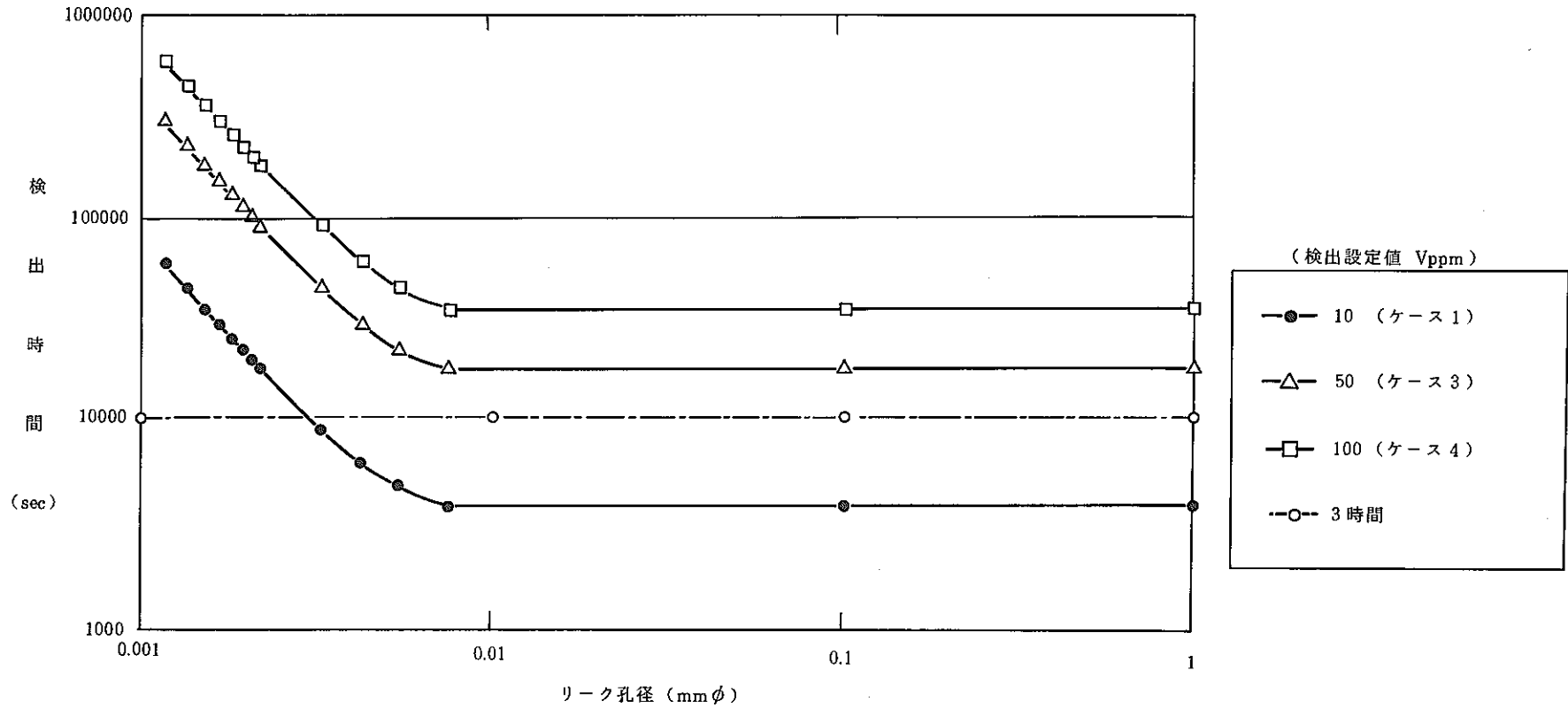


図 5.2.3 検出設定値の変化による外管リーク検出時間の変化



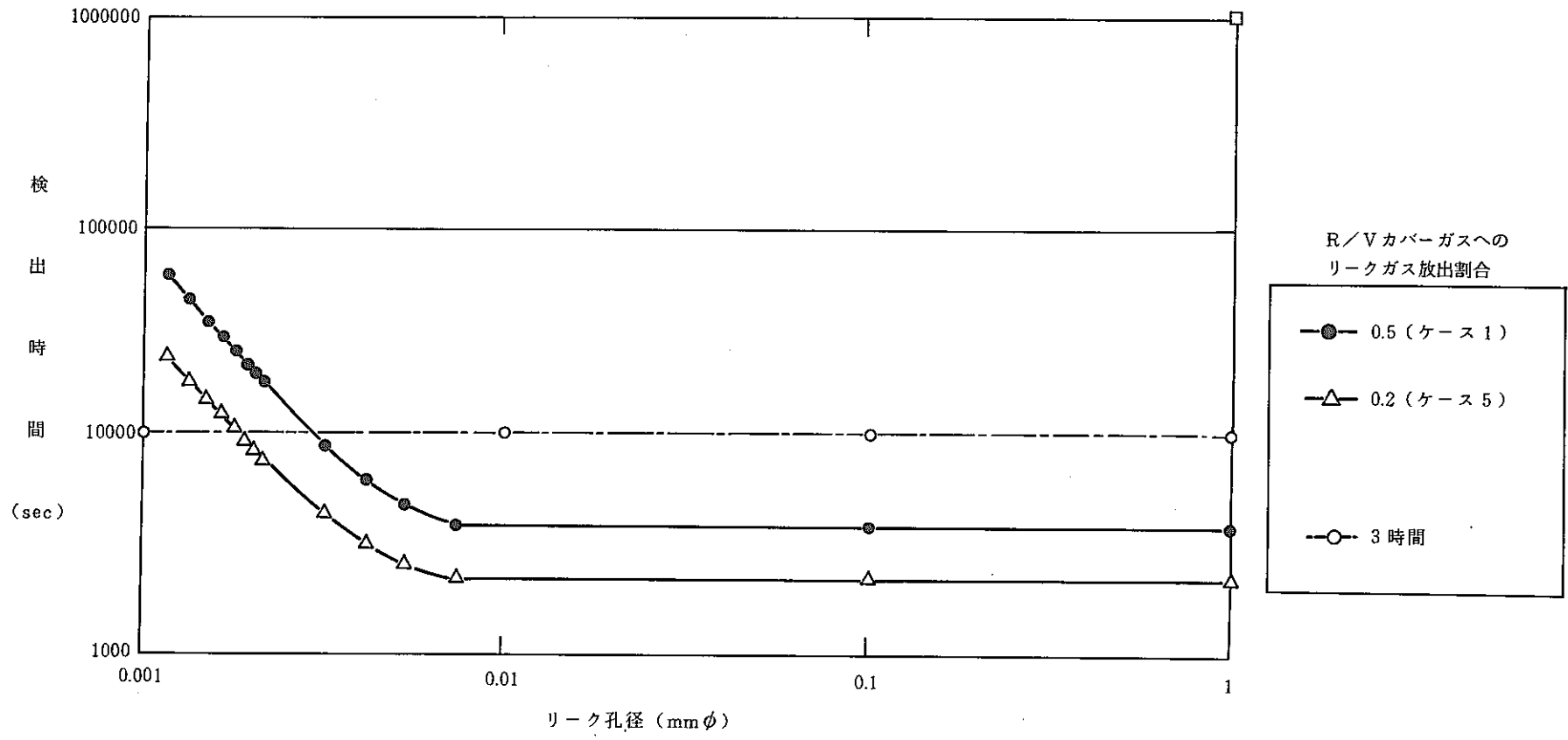


図 5.2.4 カバーガスへの放出割合の変化による外管リーク検出時間の変化

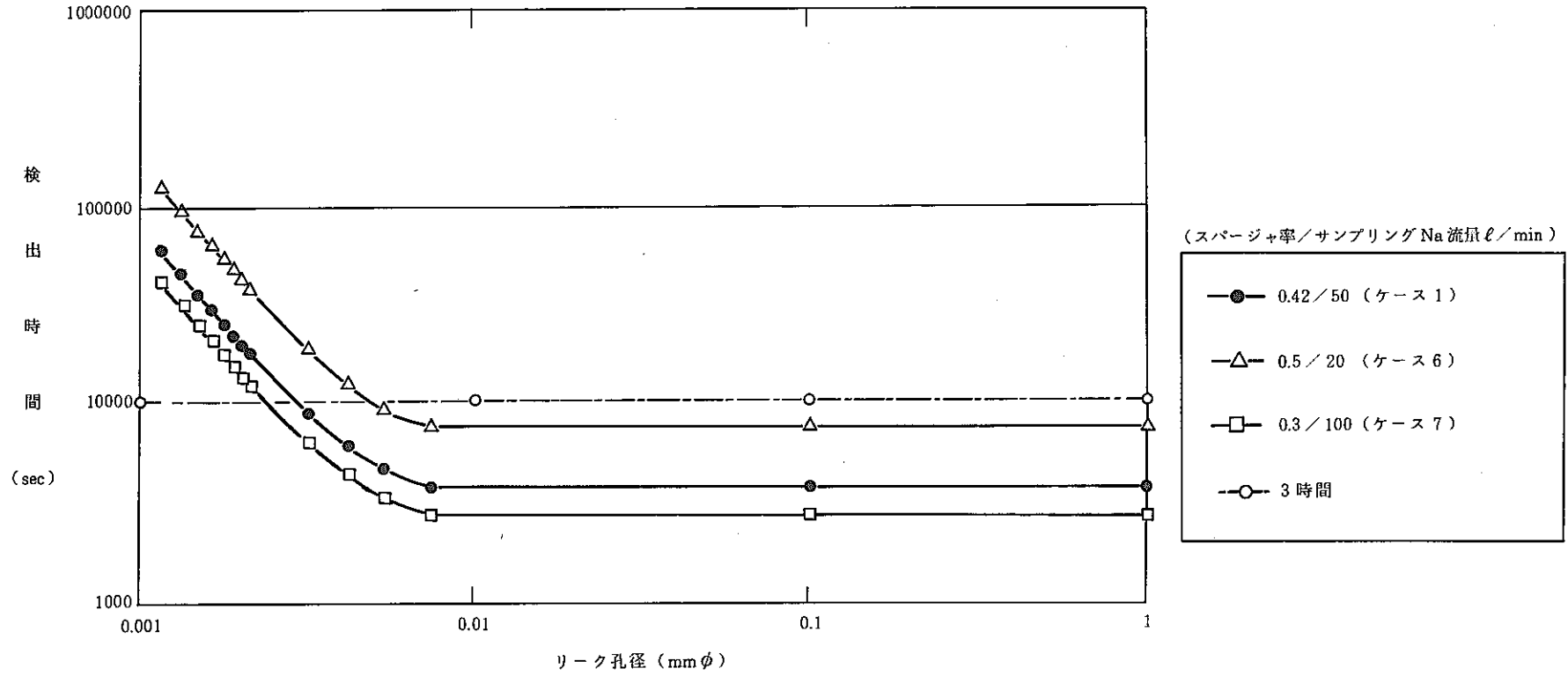


図 5.2.5 サンプリング Na 流量の変化による外管リーク検出時間の変化

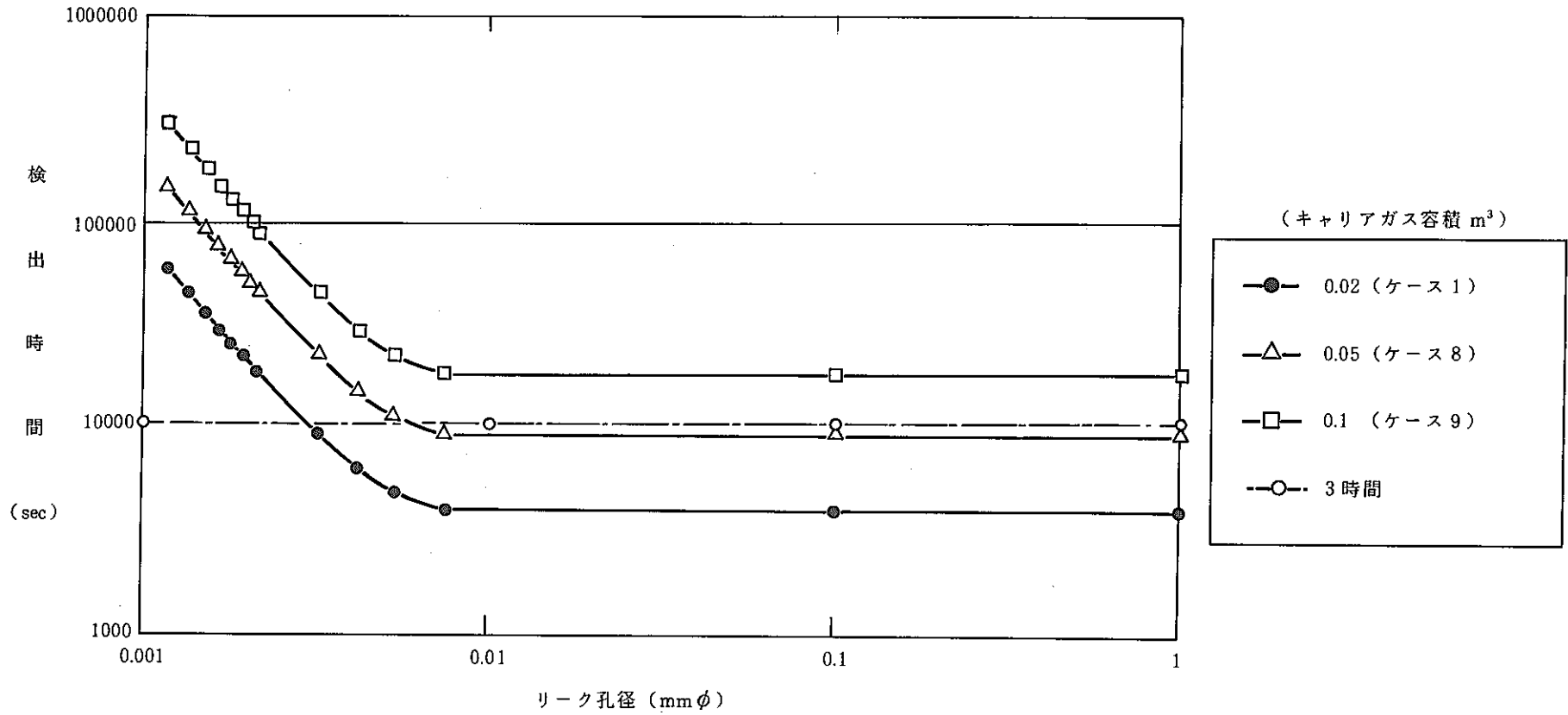


図 5.2.6 キャリアガス容積の変化による外管リーク検出時間の変化

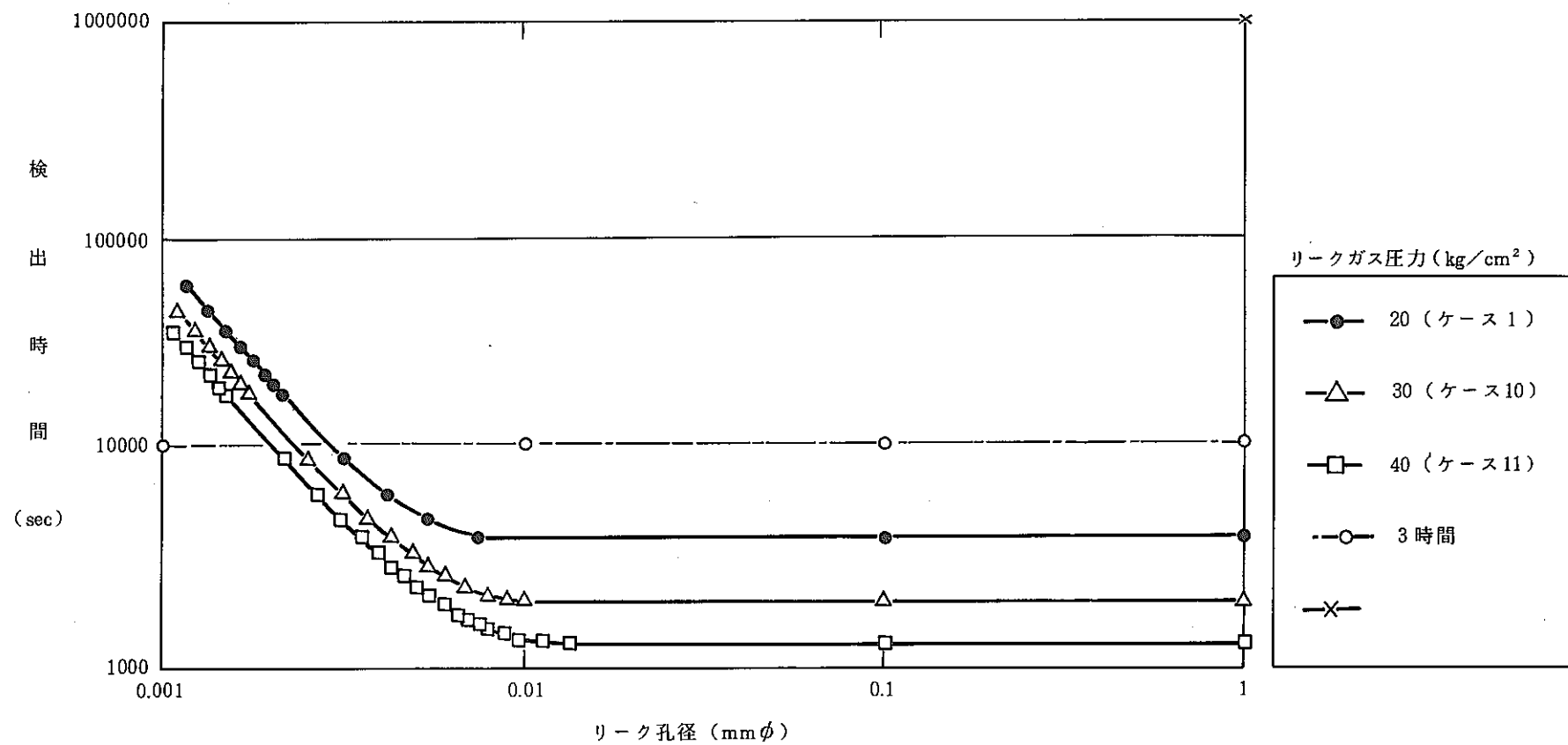


図 5.2.7 リークガス圧力の変化による外管リーク検出時間の変化

リーク孔径 0.01 mm $\phi$

Total 検出時間 [ ]

T1 : サンプル検出設定濃度に達するまでの時間

T2 : 検出器における検出遅れ時間

単位 : sec

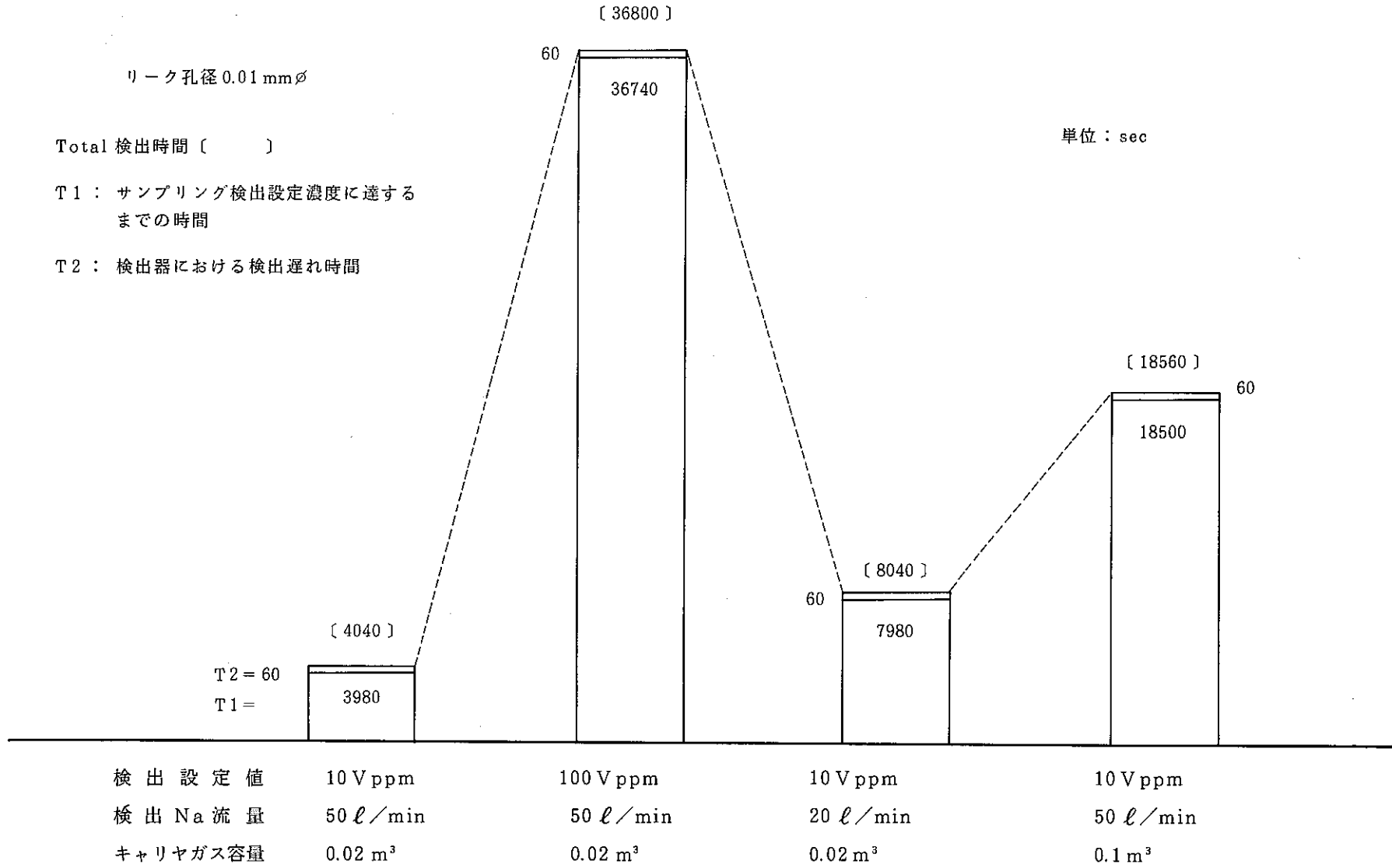


図5.2.8 外管リーク検出系応答解析の評価結果

### 5.3 貫通リーク検出系応答解析

#### (1) 解析モデル

検出系は、4.3(3)、(4)項で示したように、小リークに対してはNa中水素計、中リークに対しては音響計を設置することで解析を実施する。図5.3.1にNa中水素計の応答解析モデル、図5.3.2に音響計の応答解析モデルを示す。

##### ① Na中水素計の応答解析モデル

中リーク孔は、水素計に対して最も距離のあるSG上部で生じるものとした。

ナトリウム-水反応によって生じた水素は、主配管の流れとともにループ内に分散する。分散した水素は、ループのコールドレグ配管から分岐したSGNa配管出口部に設置したNa中水素計に流入し、設定値以上の水素濃度時に検出されるものとした。

Na中水素計のうち、応答時間に影響する水リーク率及び検出設定値をパラメータとして、解析を行った。パラメータ範囲は、以下の通りである。

- (a) 水リーク率 :  $10^{-3}$ ~10g/sec
- (b) 検出設定値 : 10ppb, 15ppb, 30ppb

##### ② 音響計の応答解析モデル

大リーク孔は、隣接する伝熱管に最も近い位置で生じるものとし、ターゲットウェステージによる破損伝播が最も早く起こる状況を想定とした。なお、リーク後は速やかに水・蒸気系のブローが開始されるものとした。

音響計のうち、応答時間に影響する検出設定値をパラメータとして、解析を行った。パラメータ範囲は、以下の通りである。

- (a) 検出設定値 : 10ppb, 15ppb, 30ppb

#### (2) 解析条件

##### ① Na中水素計の解析条件

- (a) Na中水素計検出時間は、30秒とした。
- (b) Na中水素溶解割合は、0.75とした。
- (c) 検出時間は、水リーク率、水素透過率及びコールドトラップ効果を考慮した1点近似解析解より求める。
- (d) セルフウェステージについては、考慮しなかった。

##### ② 音響計の解析条件

- (a) 伝熱管の配列は、図5.3.2の通りとした。
- (b) ターゲットウェステージ評価式は、リーク率10g/secまではMod. 9Cr-Mo鋼に対するものを使用した。また、10g/sec以上は、21/4Cr-Mo鋼に対するものを使用した。

- (c) 破損伝播は、伝熱管公称値から腐食代及び磨耗代を差し引いた肉厚の80%がウェステージされた場合に生じるものとした。
- (d) 検出感度は、10g/secとした。
- (e) ブロー時間は、30秒とした。

### (3) 解析結果

#### ① Na中水素計の応答解析結果

図5.3.3に水素計による水リーク検出時間と水リーク率の関係及び伝熱管破損伝播特性を示す。

解析の結果、検出設定値が大きくなるのに比例して、検出に要する時間も増加する。これに対して、水リーク率が大きくなると、これに比例して検出に要する時間は短縮される。なお、水リーク率が1 g/sec以上の場合は、水素計にとって水リーク率が十分大きいため、検出設定値10~30ppbの間で検出時間に変化がない。

検出設定値10~30ppbの間では、リーク率1 g/secに相当する規模まで破損伝播が生じる前に検出できる。但し、検出後の水・蒸気系ブロー時間及びセルフウェステージの考慮をしていないため、これらを考慮すると水素計は、0.1g/sec程度以下で検出することが有効である。

#### ② 音響計の応答解析結果

図5.3.4に初期リーク率5g/sec時のトータルリーク率を示す。また、図5.3.5に初期リーク率90g/sec時のトータルリーク率を示す。

初期リーク率5g/secの解析の結果、リーク率が音響計の検出感度10g/sec以下であるため、リークは検出されずそのまま進行し、リーク発生後約30秒後にターゲットウェステージによる隣接伝熱管破損に至る。この結果、トータルリーク率は、約100g/secにはね上がり、音響計検出感度以上となる。その後、各検出時間の遅れをもって、水・蒸気系ブローが開始され、約70~80秒でリークが終了する。リーク量は、トータル2~3 kgとなる。

初期リーク率90g/secの解析の結果、リーク率が音響計の検出感度10g/secを上回るため、リーク発生とともにリーク検出が始まる。よって、リーク検出遅れ時間後、水・蒸気系ブローが開始される。しかし、リーク率が大きいため水・蒸気系ブロー中に隣接伝熱管破損が生じ、リーク率は増大する。この間もブローは継続され、リーク発生後40~50秒でリークは終了する。リーク量は、検出時間10秒で約12kg、検出時間20秒で約32kgである。

図5.3.6に参考までに、初期リーク率1000g/sec時のトータルリーク率を示す。推移は、初期リーク率90g/sec時の場合と同様であるが、トータルリーク量は、約86kgと極めて大きくなる。

## ③ 解析結果の全体評価

図5.3.7に初期リーク孔と水リーク量の関係を示す。なお、リーク率は下式よりリーク孔に換算した。

$$L_R = \frac{\pi}{4} D^2 \phi \sqrt{g \cdot \kappa \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}} \frac{P}{v}}$$

$L_R$  : リーク率 (kg/s)

$D$  : リーク孔径 (m)

$\phi$  : 流出係数 (= 1)

$P$  : 圧力 (=  $133 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$ )

$v$  : 比容積 (=  $0.025 \text{ m}^3/\text{kg}$ )

$\kappa$  : 断熱指数 (= 1.285)

リーク孔が0.1mm程度までの微小なリークにおいては、系内に10g程度の水が流入すれば、その時点で水素計で検出できる。

リーク孔が0.3mm程度以上になると、伝熱管破損伝播の問題が生じ、検出時間の遅い水素計では対応できず、音響計に依存することになる。

音響計の検出時間は、トータルリーク量に大きく影響し、この時間が10秒から20秒に増加しただけで、初期リーク率90g/secの場合、トータルリーク量が約12kgから約32kgと約3倍に増加する。また、検出時間が20秒で1kg/sec程度の大きなリークを想定すると、1本ギロチン破断相当のリーク量75kgを超過してしまう。よって、音響計の検出時間は、15秒以内にする必要がある。



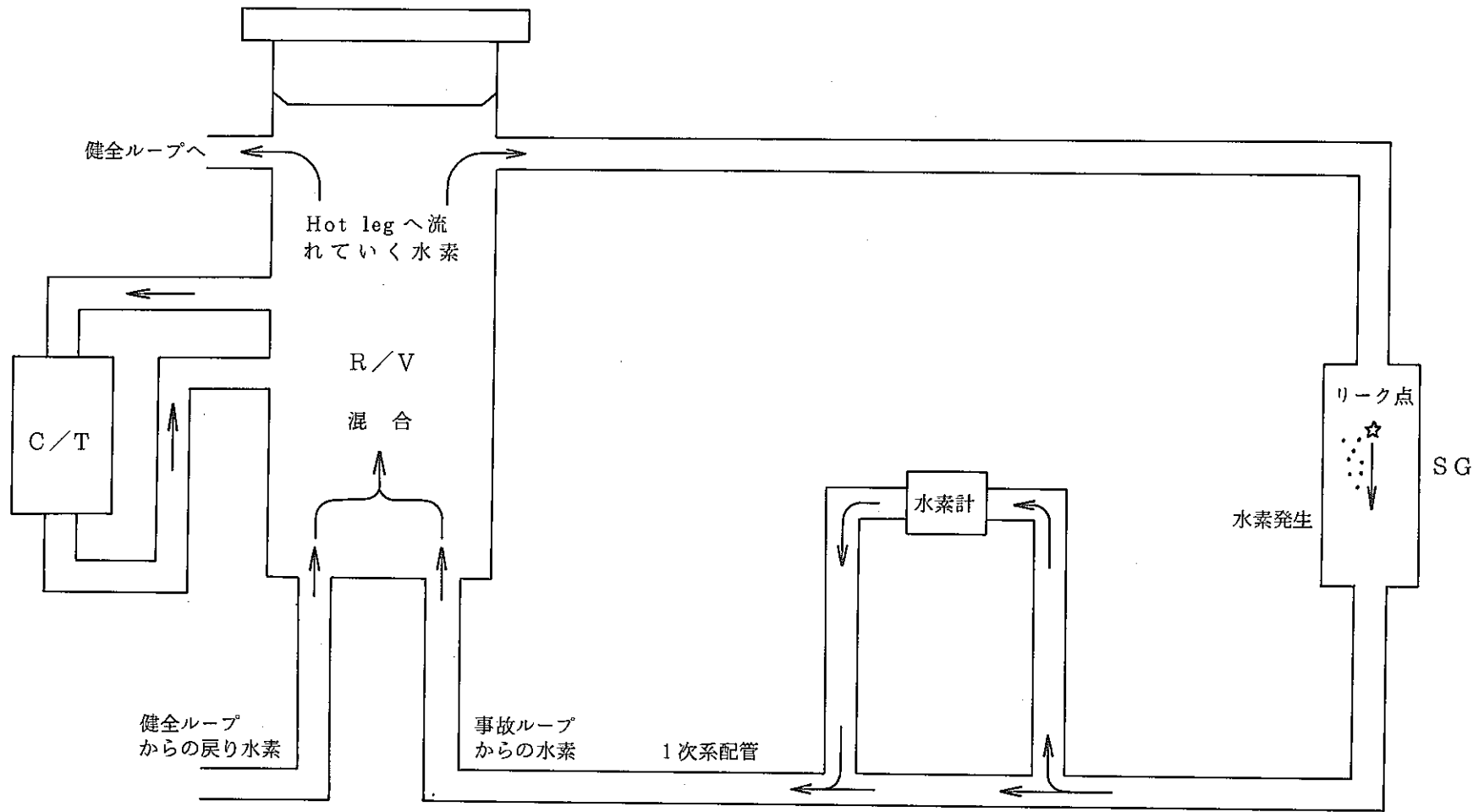


図5.3.1 Na 中水素計の応答解析モデル

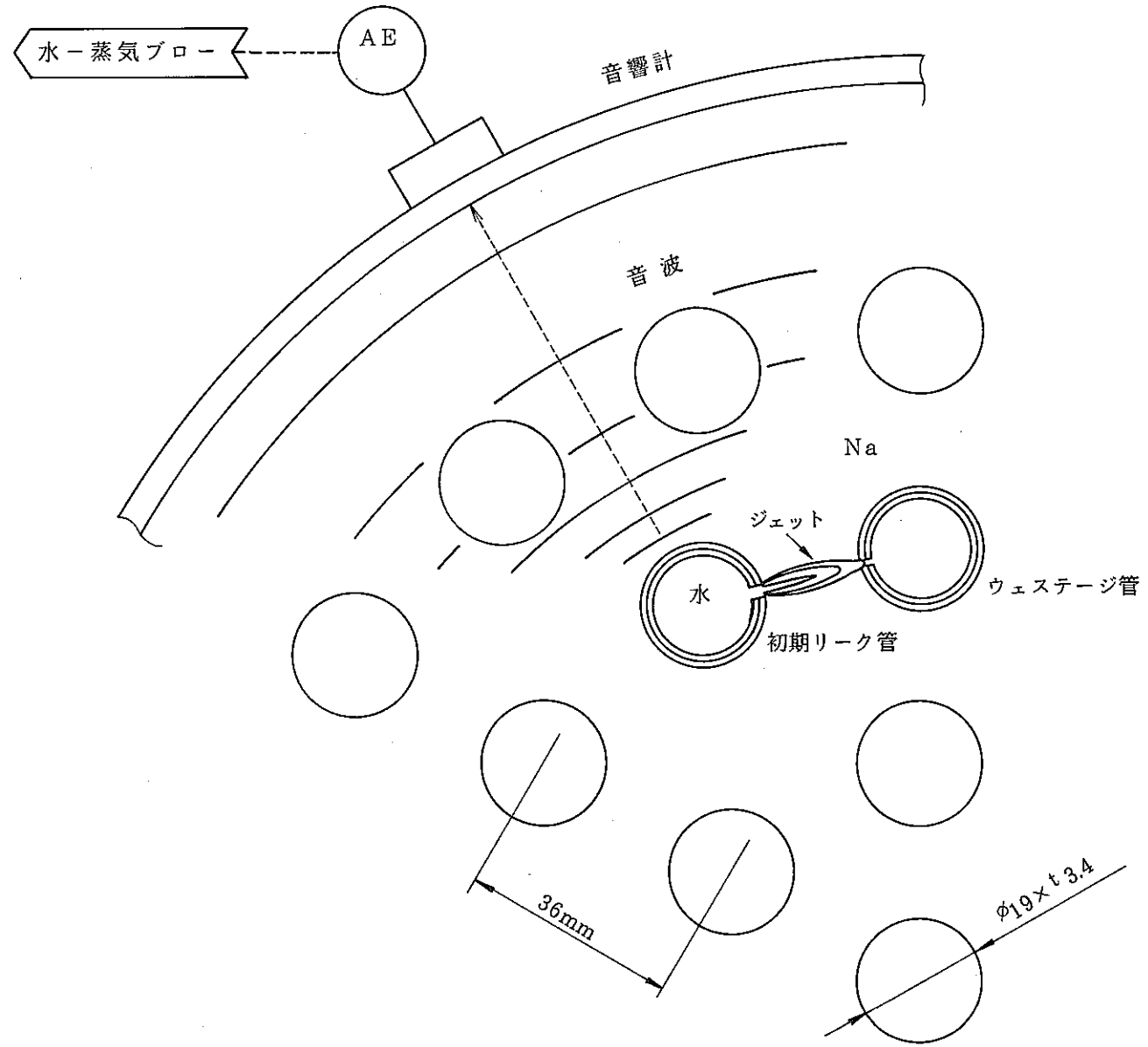


図5.3.2 音響計の応答解析モデル

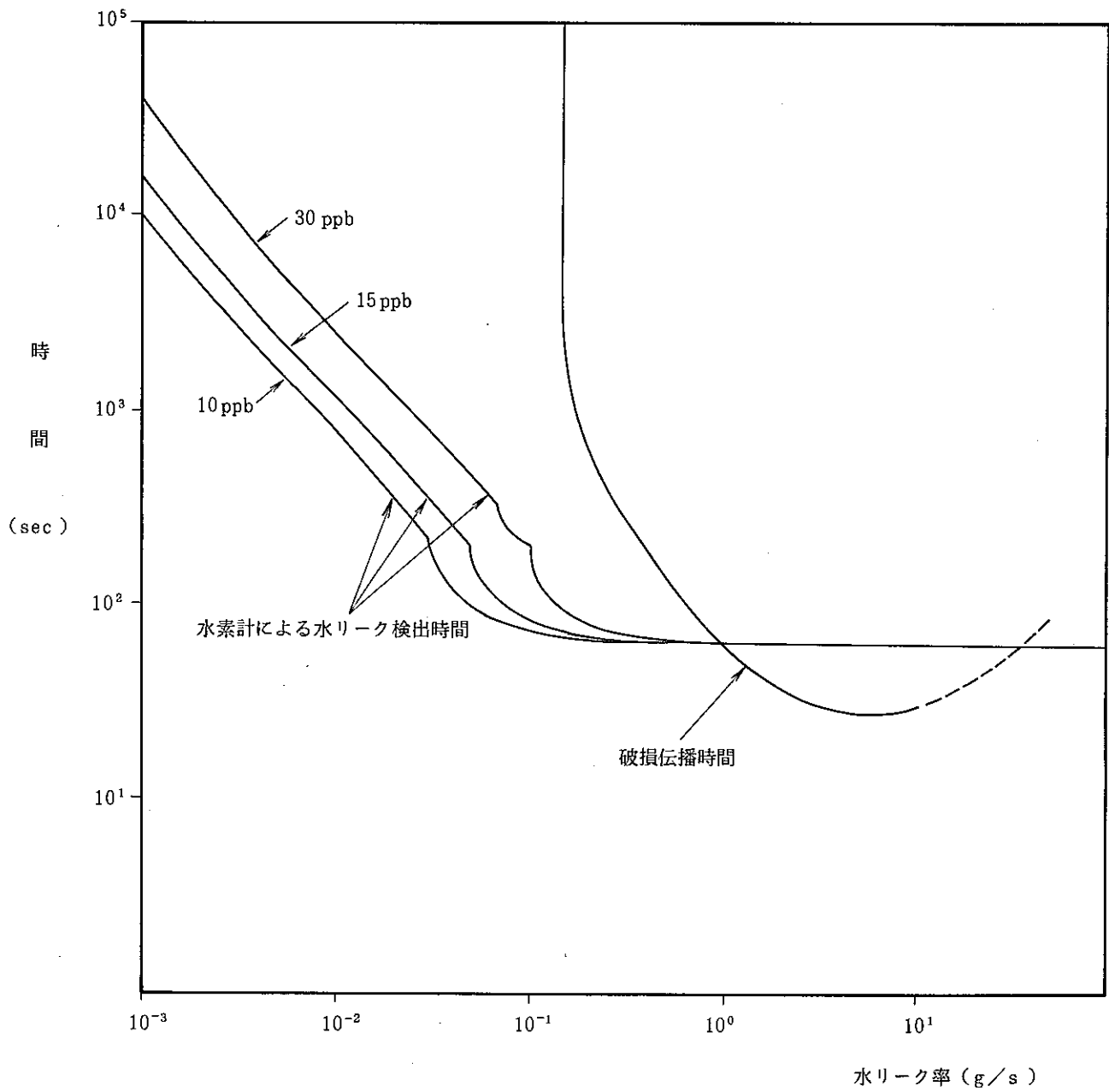


図 5.3.3 水素計による水リーク検出時間と水リーク率の関係及び伝熱管破損伝播特性

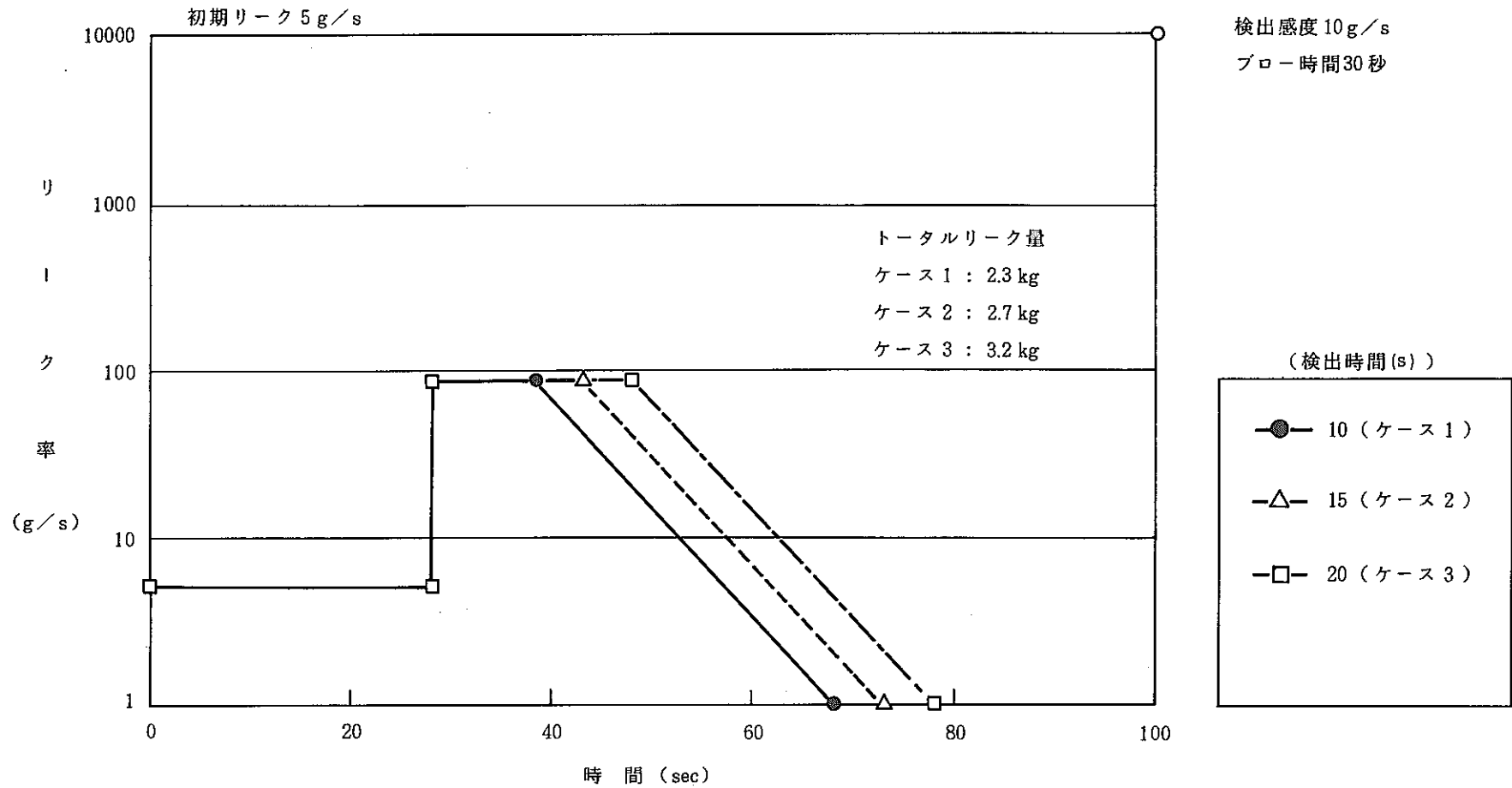


図 5.3.4 音響計による検出時間の違いによるリーク率変化 (初期リーク率 5 g/s)

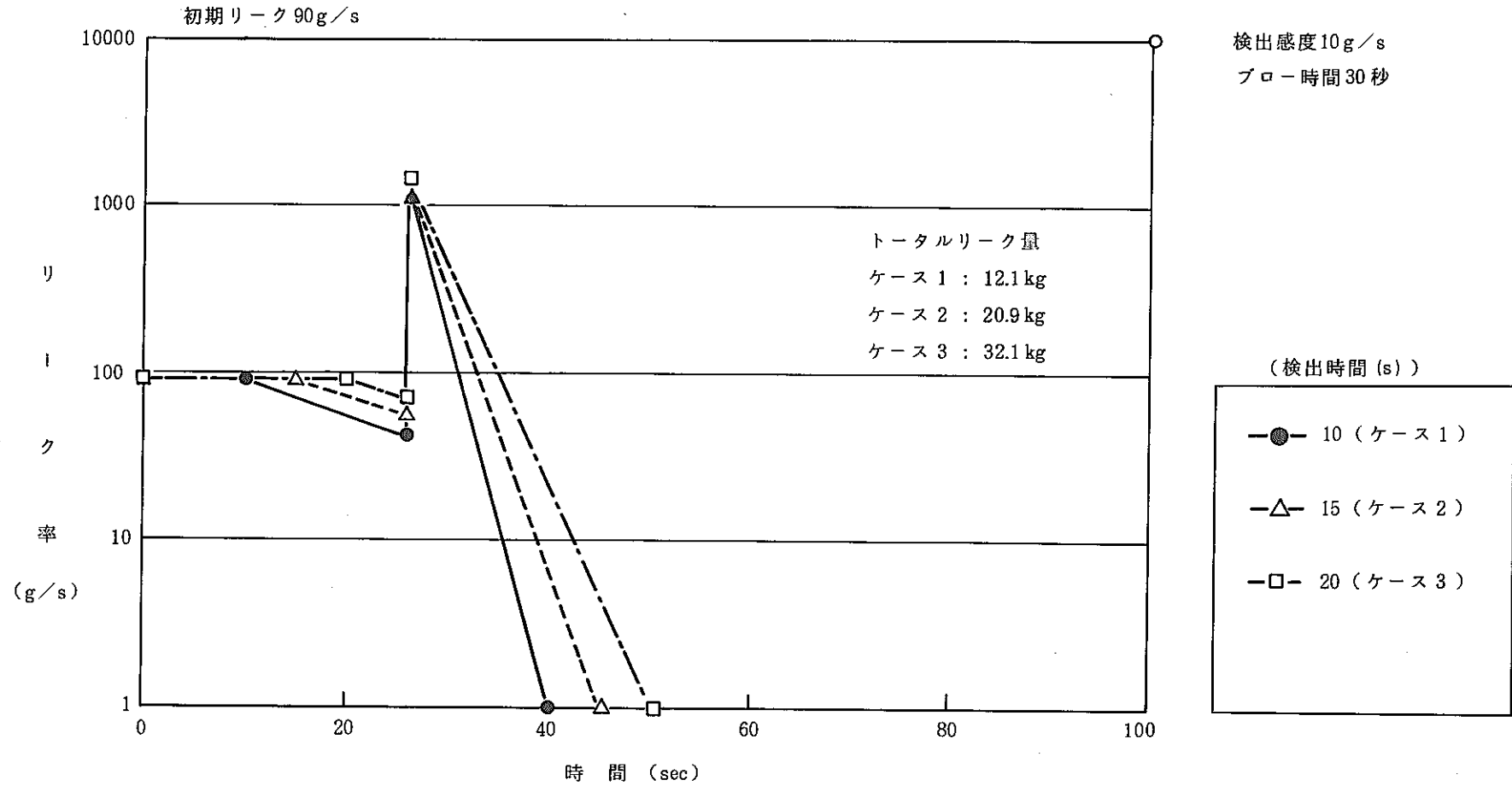


図 5.3.5 音響計による検出時間の違いによるリーク率変化 (初期リーク率 90 g/s)

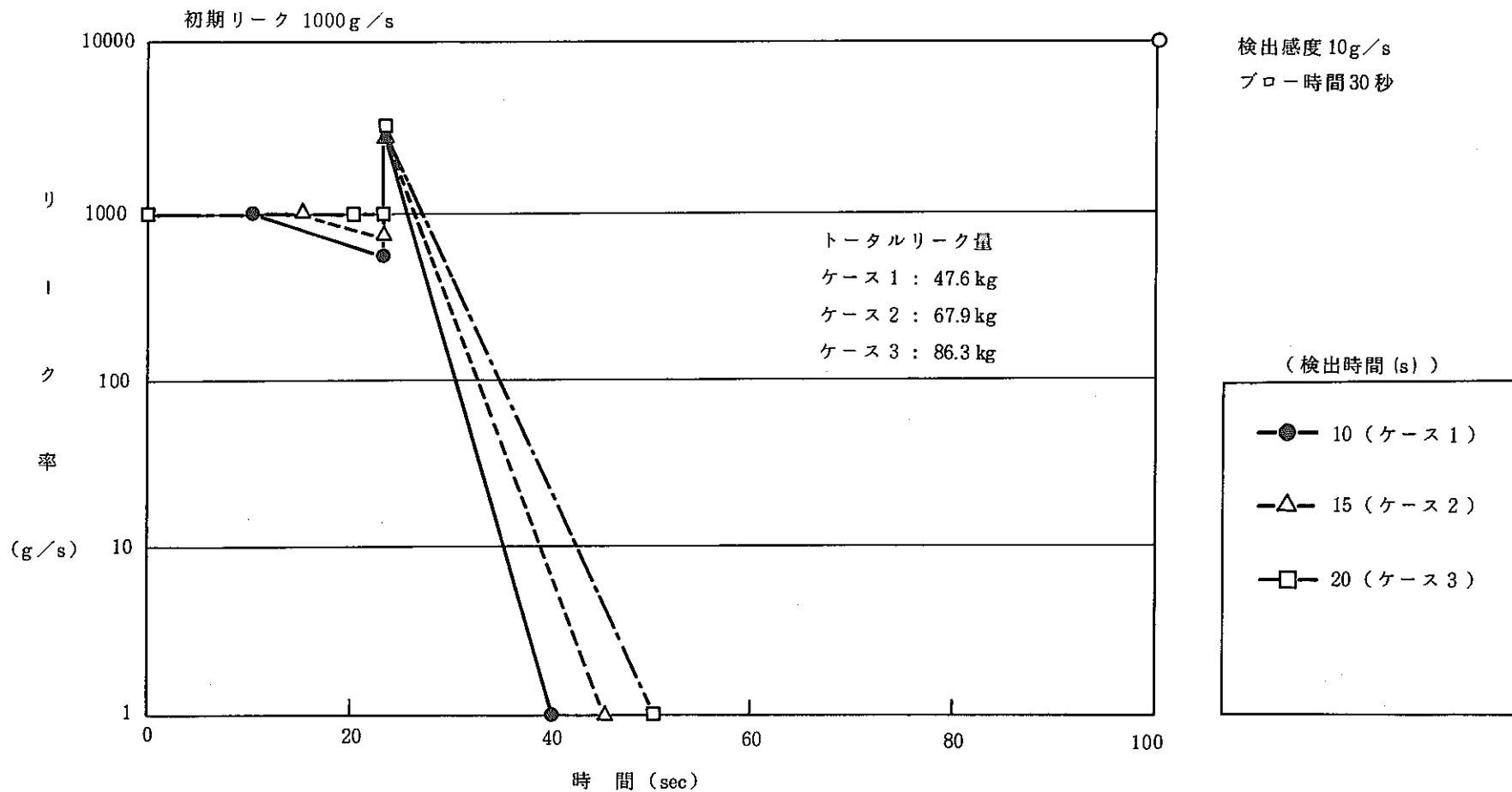


図 5.3.6 音響計による検出時間の違いによるリーク率変化 (初期リーク率 1000 g/s)

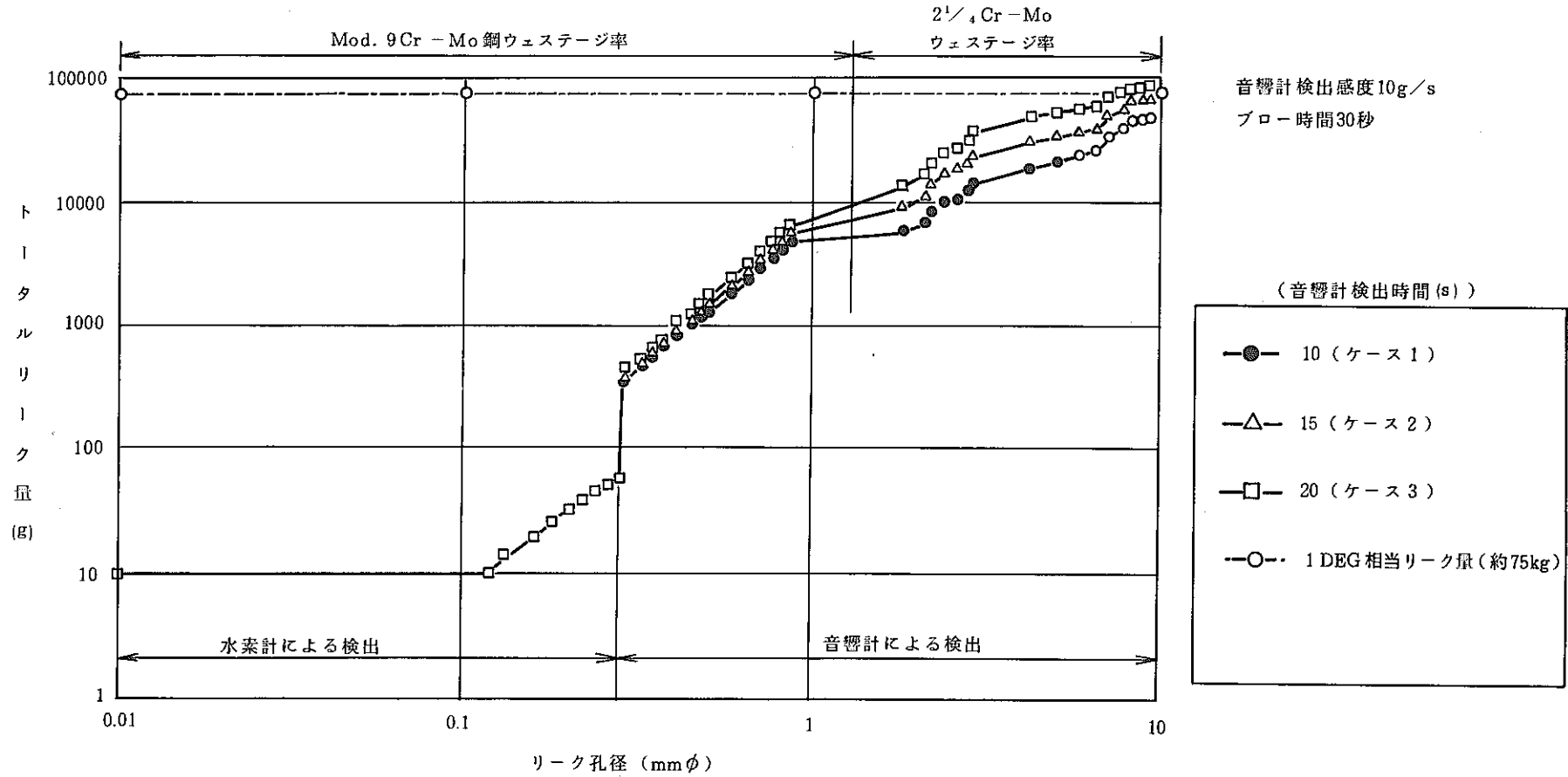


図 5.3.7 初期リーク孔と水リーク量の関係

## 6. リーク検出系への要求条件

### 6.1 内管リーク検出計 (Ne 中湿分検出計)

0.01mm径相当のリークを検出目標時間3時間以内に検出できる検出計パラメータ範囲は、下記の仕様の通りであり、これをNe中湿分検出計の要求条件とする。なお、カッコ内は、0.01mm径相当のリークを2~3minで検出できる仕様である。

検出設定値	: < 100 Vppm (10 Vppm)
Neプレナム体積	: < 2 m <sup>3</sup> (0.2 m <sup>3</sup> )
Ne循環流量	: 5~100 Nm <sup>3</sup> /h (5 Nm <sup>3</sup> /h)

### 6.2 外管リーク検出計 (Na 中Ne 検出計)

0.01mm径相当のリークを検出目標時間3時間以内に検出できる検出計パラメータ範囲は、下記の仕様の通りであり、これをNa中Ne検出計の要求条件とする。なお、カッコ内は、0.01mm径相当のリークを約1Hrで検出できる仕様である。

検出設定値	: < 10 Vppm (10 Vppm)
サンプリングNa流量	: > 20 l/min (50 l/min)
スパーチャ率	: > 0.4 (0.42)
キャリアガス容積	: < 0.02 m <sup>3</sup> (0.02 m <sup>3</sup> )

### 6.3 貫通小リーク検出計 (Na 中水素検出計)

水リーク率0.1g/sec以下の小リークを隣接する伝熱管に破損伝播が生じないうちに検出できる検出計パラメータ範囲は、下記の通りであり、これをNa中水素検出計の要求条件とする。なお、カッコ内は、水リーク率0.1g/sec以下のリークを約70秒で破損伝播なしに検出できる仕様である。

検出設定値	: < 30 ppb (10 ppb)
検出時間	: < 30 sec (70 sec (検出遅れ時間30 sec))



#### 6.4 貫通中リーク検出計（音響計）

水リーク率 0.1 g/sec～1 kg/sec（破損孔 0.1～1.0 mm）の中リーク以上を1本ギロチン破断相当のリーク量75 kg以下に抑えることができる検出計パラメータ範囲は、下記の通りであり、これを音響計の要求条件とする。なお、カッコ内は、最大トータルリーク量を約50 kg程度に抑えることができる仕様である。

検出感度 : < 10 g/sec（10 g/sec）

検出遅れ時間 : < 15 sec（10 sec）

## 7. 結 言

「常陽」MK-Ⅲ計画の一環として計画されている二重管SGを用いた2次系削除システムを実現化させるためには、その許認可上安全ロジックの構築が必要不可欠である。この中でも、特にリーク検出系の開発が重要な課題となる。よって、本検討では、最新のMK-Ⅲ冷却系改造仕様を基に安全ロジックの構築上必要不可欠な、リーク検出系の構成、検出性能等、検出系の要求条件の抽出を行った。

### (1) 1次系設備の検討

熱出力アップによる1次系の見直しを行った結果、前年度検討した1次系配管口径(12B)、ブースタ電磁ポンプ仕様で対応することとする。

### (2) 二重管SGの検討

熱出力アップに伴う70MWt二重管SGの仕様を伝熱管：径19mm、ピッチ36mm、本数385本、本体寸法：外径1.3m、高さ23mに設定した。

### (3) リーク検出系の検討及び応答解析

各リーク検出計の検出目標時間等に対する検出計の要求条件の抽出を行った。

今後の「常陽」リーク検出系に対する課題として、上記の「常陽」2次系削除システム・リーク検出系要求仕様条件を基に開発されるリーク検出計の仕様、性能及び特性を基に、リーク検出計応答解析モデルの詳細化等がある。また、安全ロジックを構築する上で必要なもう一つの課題であるナトリウム-水反応生成物挙動解析コードの開発も必要と考えられる。

## 8. 参考文献

- (1) 沢田 誠他 : 「常陽」MK-Ⅲ計画二重管SG設置検討(Ⅰ)  
- 中間系合理化システムの実証 -  
PNC I9440 89-006 1989年5月
- (2) 電力新報社 : 解説 原子力設備の技術基準  
通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課編  
昭和58年7月
- (3) 高速原型炉高温構造設計指針 PNC N241 84-08 昭和59年9月
- (4) 薄田 等 : 日本金属学会講演概要 昭和46年 Ⅱ-200
- (5) 電中研 : ボイラ過熱器管及び再熱器管の内面スケールはく離と減肉に関する対策と問題点  
電中研調査報告 276001 昭和51年6月