

分置

# Na 冷却型 FBR の大型蒸気発生器設計研究

— 水リークに対する取り組み —

(研究報告)

2004年10月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2004

## Na 冷却型 FBR の大型蒸気発生器設計研究 - 水リークに対する取り組み -

### (研究報告)

木曾原 直之\*<sup>1</sup> 堀 徹\*<sup>2</sup> 惣万 芳人\*<sup>1</sup> 此村 守 \*<sup>1</sup>

### 要旨

Na 冷却 FBR では蒸気発生器（以下、SG と言う）の伝熱管破損時には、2 次系の Na と水が直接接触し、発生水素や水・蒸気の圧力によって 2 次系ナトリウムの圧力が上昇する。この様な伝熱管破損時には Na/水反応影響緩和・収束システムによって、中間熱交換器の健全性は確保され炉心やプラントの安全性に影響を及ぼすことなく、水リーク事象を収束できる。

しかし、実用炉では安全性だけでなく、経済性や社会的受容性の高いプラントを検討しておく必要がある。すなわち、経済性の観点では水リーク時における SG の財産保護や稼働率低下への影響を小さくしなければならない。さらに原子力プラント内で Na/水反応のような化学反応の可能性できるだけ排除することによって、一般公衆の安心感を向上させることも重要である。そこで、Na・水反応の影響をできるだけ小さくすること及び技術的成立性を考慮して、(1) Na・水反応を排除できる可能性のある直管 2 重管型 SG（2 次系設置型）と、(2) 国内で開発実績があり単管（1 重管）ながら高い信頼性のある単管ヘリカルコイル型 SG の 2 つを候補として選定している。そして、Na・水反応の排除を重視する観点から、直管 2 重管 SG を第 1 候補とし、直管 2 重管 SG は開発課題が多いことを考慮して、単管ヘリカルコイル型 SG をバックアップとして位置づけている。

本報告書では両方の SG について、それぞれ内外管同時破損防止や水リーク時の影響緩和の方策及びそのシステム構成についての検討を行ったものである。

まず、直管 2 重管 SG については定検時の伝熱管の超音波検査(UT)によって内外管同時破損を防止する方策を検討した。この結果、2 重管の UT 基礎試験や伝熱管の破損解析によれば、内外管が同時貫通破損する前に欠陥を検知できる見通しのあることがわかった。ただし、UT によるき裂欠陥の検出性能や DNB き裂進展速度の詳細については要素試験や詳細解析が不可欠で、これらの結果を踏まえて 2 重管 SG における Na・水反応防止策について評価しなければならない。

一方、単管ヘリカルコイル型 SG については、検出計、水ブロー系などの水リーク対策設備を高度化することによって、水リーク時の破損伝播領域を極小化できることがわかった。なお、このためには伝熱管の厚肉化も行う必要もあり、これによって SG は更に大型化し、製作や輸送上の課題が生じる可能性がある。よって今後は検出計の開発状況や SG 製作性も考慮した上で、SG のサイズを最適化するなどの検討も実施しておく必要があると考えられる。

---

\*1) システム技術開発部 FBR システムグループ

\*2) 現 川崎重工業(株)

## Designing Study on large-sized Steam Generators of Sodium cooled FBR Measures to diminish the influence of water leak

Naoyuki KISOHARA\*<sup>1</sup>      Toru Hori\*<sup>2</sup>  
Yoshindo SOMAN\*<sup>1</sup>      Mamoru KONOMURA\*<sup>1</sup>

### Abstract

In case of heat transfer tubes failure in sodium heated Stream Generators (SG), the secondary sodium pressure rapidly increases due to the hydrogen generated by Na/water reaction. The Na/water reaction mitigation system terminates this phenomena immediately without any influence on the integrity of the sodium circuit. Therefore, the water leak has no effect on the reactor and plant safety.

However, not only safety but also economy and public acceptance are required for practical FBRs. As for economy, it is necessary to protect the investment of SGs and to avoid the decline of plant availability due to water leak. In addition, decreasing the possibility of Na/water reaction accidents is also taken into consideration in order to promote the public acceptance of FBRs.

For these purposes, a double wall straight tubes (DWT)-SG and a single wall helical coil tubes SG are selected as the candidates for the FBR's SG. The DWT-SG has the potential to exclude Na/water reaction by its dual boundaries between Na and water. Although the helical coil SG provides single wall tubes, this SG have proven to be developed in Japan and the high reliability can be attained by a lot of knowledge and experience of the SG test facility and the prototype reactor. In terms of the avoidance of Na/water reaction, the DWT-SG is the first candidate. However, there are many issues to be solved for the DWT-SG, the single wall helical coil tubes SG is regarded as the second candidate for an alternative.

This report describes the method to prevent or minimize Na/water reaction for both of the SGs.

The ultra sonic test (UT) method during the periodical plant inspection is applied to DWT-SG to prevent inner and outer tube simultaneous failure. The preliminary ISI test and failure analysis of the DWT indicate the potential of avoiding the penetrated failure of DWT. However, crack detection tests by UT and crack development analysis due to DNB are indispensable to confirm this methodology to exclude both of outer and inner tube penetrated failure.

Regarding the single wall helical coil type SG, Na/water reaction analysis code shows that the tube failure propagation in the SG bundle can be restrained by improving the Na/water reaction mitigation system. However this system requires a new type hydrogen sensor to detect earlier and thick heat transfer tubes not to be penetrated. Especially, providing thick tubes increase the amount of the heat transfer area and the weight of SG, then this might affect the manufacture and transportation of the SG. Then, the most suitable size of the SG should be surveyed by taking account of leak detection time and SG manufacture.

---

\*1 FBR System Design Group      System Engineering and Technology Division  
O-arai Engineering Center  
\*2 Kawasaki Heavy Industries. Ltd.

## Na 冷却型 FBR の大型蒸気発生器設計研究 - 水リークに対する取り組み - 目次

1. 緒言	1
2. 実用炉蒸気発生器への要求条件	2
2.1 取り組み方針	2
(1) 安全性	2
(2) 経済性	2
(3) 社会的受容性	3
2.2 SG 構造および水リーク対策設備の具体化	4
(1) 2重直管 SG	4
(2) 単管ヘリカルコイル型 SG	4
2.3 SG 形式の選定と開発課題	5
3. 2重管蒸気発生器の信頼性向上方策	12
3.1 信頼性向上の方針・考え方	12
(1) 2重伝熱管部	12
(2) 管-管板継手	13
(3) 管板	13
3.2 2重管 SG の信頼性向上の具体的方策	13
(1) 界面ギャップ部流動抵抗による水リーク率制限	14
(2) 外管 ISI 検出性能評価	15
(3) き裂の発生と進展	15
3.3 2重管 ISI によるき裂進展阻止の考え方	17
3.4 2重管 SG 大リーク解析	18
(1) 解析条件	18
(2) 解析結果	18
3.5 2重管 SG 設計基準水リーク (DBL) の設定	19
4. 単管ヘリカルコイル型蒸気発生器	39
4.1 水リーク対策設備の高度化	39
(1) 水リーク検出計	39
(2) 伝熱管	39
(3) 水ブローダウン系	40
4.2 性能評価結果	40
(1) 解析モデル	40
i) ウェステージ型破損	40
ii) 高温ラプチャー型破損	40
(2) 解析結果	41
i) ウェステージ型破損	41
ii) 高温ラプチャー型破損	42
5. 結言	60
謝辞	61
参考文献	62

## [図リスト]

図 2.1-1	SG 交換熱量の違いによる 2 次系システム構成	6
図 2.2-1	2 重管 SG (2 次系設置型) の構造と仕様 (密着 2 重管型)	7
図 2.2-2	単管ヘリカルコイル型 SG の構造と仕様	8
図 2.2-3	水リーク対策設備の高性能化	9
図 2.3-1	大型直管二重管型 SG の開発課題	10
図 2.3-2	実用炉 SG 設計の考え方	11
図 3.1-1	2 重管 SG の Na 境界と水境界	20
図 3.2-1	2 重管内外管同時破損時における水リーク率	23
図 3.2-2	2 重管内外管ギャップ幅の分布状況 (9Cr 鋼 2 重管)	24
図 3.2-3	高クロム鋼ウェステージ率と検出時間	25
図 3.2-4	同一 2 重管の区間内における内外同時破損発生確率	26
図 3.2-5	2 重伝熱管肉厚設定	27
図 3.2-6	2 重伝熱管の共通破損要因	28
図 3.2-7	DNB 温度解析モデル	29
図 3.2-8	DNB 温度振動解析結果	30
図 3.3-1	共通要因破損に対する (外管) ISI 検出性能の考え方	34
図 3.3-2	内圧によって不安定破壊する外管貫通き裂の大きさの限界	35
図 3.4-1	2 重管破断時水リーク率 (初期スパイク圧解析用)	36
図 3.4-2	2 重管破断時水リーク率 (準定常圧解析用)	36
図 3.4-3	準定常圧解析結果 (IHx)	37
図 4.1-1	固体電解質水素計	43
図 4.1-2	12Cr 系鋼伝熱管材料の耐ナトリウム/水反応特性 (試験結果)	43
図 4.1-3	伝熱管の厚肉化と検出時間遅れ	44
図 4.1-4	急速水ブローダウンシステム	45
図 4.2-1	ウェステージによる伝熱管破損形態	46
図 4.2-2	高温ラプチャーモデルによる伝熱管破損形態	47
図 4.2-3	伝熱管破損伝播抑制効果 (固体電解質水素計)	48
図 4.2-4	伝熱管破損伝播抑制効果 (急速ブローダウンシステム)	49
図 4.2-5	伝熱管破損伝播抑制効果 (伝熱管厚肉化)	50
図 4.2-6	伝熱管破損伝播抑制効果 (12Cr 鋼伝熱管)	51
図 4.2-7	高度化システムと従来型システムの最大水リーク率の比較	52
図 4.2-8	高度化システムと従来型システムの開口破損伝熱管破損本数の比較	53
図 4.2-9	高度化システムと従来型システムのプラグ伝熱管本数の比較	54
図 4.2-10	高度化システムと従来型システムの水リーク率推移	55
図 4.2-11	伝熱管破損状況図	56

図 4.2-12 高温ラプチャー解析結果（通常ブローダウンシステム）…………… 57  
 図 4.2-13 高温ラプチャー解析結果（3バルブ急速ブローダウンシステム）…………… 58

[表リスト]

表 3.1-1 2重管 SG の Na・水反応防止の考え方と方策…………… 21  
 表 3.1-2 リーク検出無し（ISI 2重管 SG）とリーク検出 2重管 SG…………… 22  
 表 3.2-1 UT 試験項目…………… 31  
 表 3.2-2 UT 試験結果…………… 31  
 表 3.2-3 き裂進展解析結果（流力振動）…………… 32  
 表 3.2-4 き裂進展解析結果（DNB 振動）…………… 33  
 表 3.4-1 2重管破断時圧力波伝播解析結果…………… 38  
 表 4.2-1 水リーク対策設備仕様…………… 59

## 1 緒言

Na 冷却 FBR では蒸気発生器（以下、SG という）の伝熱管破損時には、2 次系の Na と水が直接接触し高温の Na/水反応ジェットが発生する。そしてこの反応ジェットの浸食作用によって周囲の健全な伝熱管も損傷を受け SG 内部に置いて伝熱管の破損領域は拡大する。また Na・水反応によって発生する水素や水・蒸気の圧力によって 2 次系ナトリウムの圧力が上昇する。

このような伝熱管破損は、プラントの安全性に影響を与える可能性があることから、これまで様々な Na・水反応の試験・解析が実施され、その評価手法が整備されてきた。この結果、Na/水反応影響緩和・収束システムによって、中間熱交換器の健全性は確保され炉心やプラントの安全性に影響を及ぼすことなく、水リーク事象を収束できることが分かってきた。

しかし、実用炉ではプラントの安全性だけでなく、高い経済性や一般公衆に受け入れられやすいプラントを検討しておく必要がある。経済性の観点では水リークによる SG の財産保護や稼働率への影響を考慮する必要がある。さらに原子力プラント内で Na・水反応のような激しい化学反応の可能性をできるだけ排除することによって、一般公衆の安心感を向上させることも重要であると考えられる。

このように実用炉 SG の設計においては、安全性の確保だけでなく稼働率も含めた経済性や社会的受容性の観点にも着目することとした。そして、Na・水反応の影響緩和及び技術的成立性を考慮して、(1)直管 2 重管型 SG（2 次系設置）と(2)単管ヘリカルコイル SG の 2 つを候補とし、Na/水反応排除を重視することから直管 2 重管 SG を第 1 候補、単管ヘリカルコイル SG をその代替案としている。

そして、本報告書では両 SG の信頼性向上の考え方、システム構成及びその性能について検討・評価を行った。直管 2 重管 SG については、定期点検時の 2 重管検査 (In-Service Inspection) による内外管同時破損防止の考え方とその見通しについて、解析や基礎試験を踏まえて評価した。一方、単管ヘリカルコイル SG については検出計などの水リーク対策設備を高性能化することで、Na・水反応の影響を局限化する可能性について解析による検討を行った。



## 2 実用炉蒸気発生器への要求条件

### 2.1 取り組み方針

Na 加熱型 SG では、他の機器には無いナトリウム・水反応に特に着目し、原子力プラントとしての安全性、経済性及び社会的受容性（安心感）の観点でその対策を検討することとした。

安全性については、従来の FBR プラントと同様に、SG と原子炉容器の間に中間熱交換器(IHX)を設置し、万一の SG の伝熱管破損事故に対してもその影響が直接炉心に及ばないようにしている。そしてこのためには IHX の 1 次系バウンダリーの健全性がナトリウム・水反応による圧力波によって影響されないことが必要となる。さらに、直接的には炉心に影響はないものの、SG 本体胴や 2 次系配管などの 2 次系ナトリウムバウンダリーについても、圧力波により破損することの無いようにしなければならない。

一方、伝熱管破損時の SG の財産保護やプラント稼働率の低下防止、さらに社会的受容性向上のために、ナトリウム・水反応の影響を極限化して破損規模をできるだけ小さくしたり、Na/水反応の可能性を排除することによって、ナトリウムの化学的に活性な性質を顕在化させない SG にすることも必要になると考える。

以上の(1)安全性、(2)社会的受容性（安心感）および(3)経済性のそれぞれについて目標を達成するための基本的な方策について以下で述べる。

#### (1) 安全性

2 次ナトリウム系を設置しているため、SG 水リークは炉心安全には直接的には影響しない。そしてこのことを確実にするために、ナトリウム・水反応の圧力波が IHX における 1 次系バウンダリーを破損しないことを確認しておく必要がある。しかし、実際には IHX が圧力波により破損するのは、相当多数本の SG 伝熱管が同時にギロチン破断する場合であり、このような事象は工学的には考えられない。

したがって、通常この様な同時多数本ギロチン破損に対して十分な安全裕度を持ち、かつ現実的な事象として 1 本の伝熱管の破損から始まる水リークを初期事象として、リーク拡大を考慮してその後の影響評価を行うこととしている。初期事象としては、微少リークから大リークまでを対象とし、水リーク対策設備の性能と Na・水反応事象の進展を評価した上で、最大となる水リーク率を設計基準水リーク(Design Base Leak : DBL)として設定し、このための設備対応を行う。DBL は一般には 1 本または 4 本伝熱管ギロチン破断に相当する最大水リーク率であるが、この値を越えたからと言って直ちに IHX が破損するわけではない。

この考え方は原型炉のそれと同等であり、実用炉 SG の DBL の設定についても今後詳細な解析や検出計の性能を踏まえ決定していく予定である。

#### (2) 経済性

経済性については、SG 製作コスト（プラント建設コスト）と SG 運転コスト（稼働

率)に着目する。

一般に、熱交換機器の製作コストはその単基出力を増大させることで大型化によるスケールメリットを生かしてコストダウンすることが可能である。ところが SG は Na・水反応の発生という他の機器にはない特殊性から、大型化に関して制約を受ける。すなわち大型化するほど SG 内部の Na インベントリーが増加しリーク検出が遅くなることによって、水リーク時の破損抑制の観点から不利になると考えられる。したがって、図 2.1-1 の (a) に示すように 1 基あたりの交換熱量を小さくしたモジュール型 SG が水リーク検出の観点から好ましい。ただし、SG の基数は増えるためスケールデメリットによってトータルの SG 製作費やプラント建設費は高くなる。一方、同図 (b) に示すように大型 SG を採用した場合には、建設費は安くなるものの、伝熱管破損が発生すればリーク検出が遅れることによって SG 内の破損領域は拡大する傾向になる。さらに SG を交換することになった場合、新規 SG 製作費や交換に伴うプラントの長期停止によって稼働率は低下する。

そこで、実用炉の SG 設計ではこの様な大型化のデメリットを解消して図 2.1-1 (b) に示されるような大型 SG を採用するために、①Na・水反応を実質的に排除する方策や、②リーク検出を早くする工夫等によって水リーク時の影響をできるだけ小さくする方策をとることとした。

Na・水反応を実質的に排除する方策については、ナトリウム・水の境界を 2 重壁構造とし、万一のナトリウム側境界、または水・蒸気側境界のどちらかの破損に対しても、もう片側境界の存在によりナトリウム・水反応は発生しないようにするものである。

一方、水リーク時の影響をできるだけ小さくする方策については、検出計や水ブローダウン系などの水リーク対策設備を高度化することによって、万一の Na・水反応時においても伝熱管の破損領域を局限化できる SG を構築することを目標とする。

このような方策によって SG の大型化が可能になるとともに、SG 財産保護や補修性向上により稼働率への影響を最小化することができると考えられる。

### (3) 社会的受容性

社会的受容性の向上とは、原子力プラントにおいてナトリウム・水反応の様な化学的に活性な反応が生じる可能性を有することに対して、一般公衆が漠然と抱く不安感を払拭させることや、Na・水反応を未然に防止することによって社会的な影響を防止しようとするものである。これは単に技術的な観点で原子力プラントとしての安全性を確保するだけでなく、ナトリウム・水反応の影響を小さくすることによって社会に受け入れられ易い FBR プラントを目指すことを目的としている。

この課題に対する対応についても上記(2)の経済性のところで述べた内容と同じように Na/水境界を 2 重壁構造にすることによって Na・水反応を実質的に排除できる構造としたり、または水リーク時の影響を限定する SG を構築することとした。

## 2.2 SG 構造および水リーク対策設備の具体化

ナトリウム・水境界を2重壁構造とする方策については、伝熱管を2重管とする。2重伝熱管の形状は直管方式とヘリカルコイル方式が考えられる。ヘリカルコイル型では伝熱管長を100m程度にまで長くする必要があり、このため管・管溶接が不可欠になるが、2重管同士の接合は技術的に困難である。一方、2重管の直管型では過去に米国 EBR-II や試験施設(70MWt, 1MWt)での製作、運転実績があることから実用炉の本 SG でも直管方式を採用する(直管2重管 SG)。

一方、水リーク時の影響を限定する SG については、単管ではあるが国内において開発実績があり高い信頼性を確保しやすいヘリカルコイル型 SG を対象として検討することとした。

両 SG の構造及び仕様をそれぞれ図 2.2-1、図 2.2-2 に示す。また、以下に2重管 SG でのナトリウム・水反応を排除するための方策および単管ヘリカルコイル SG におけるナトリウム・水反応局限化対策の概要について述べる。

### (1) 2重直管 SG

2重管 SG の伝熱管は内管と外管から構成される直管型の2重管である。管板は水側との境界を形成する水・蒸気管板、およびナトリウム側との境界を形成するナトリウム管板の2枚管板構造になっている。

ナトリウム・水反応が実質的に排除可能な SG とするには、ナトリウム・水境界を2重壁構造にして且つ、水側バウンダリーとナトリウム側バウンダリーが同時に破損しないようにする必要がある。この為には定検時における内外管 ISI(In-Service Inspection: 共用期間中検査)や運転時における水・蒸気バウンダリーまたは Na バウンダリー破損時のリーク検出によりその健全性を確認することとする。

定検時に実施する ISI は2重管の内側からプローブを挿入し、内管と外管の減肉やき裂を検査するが、これらの欠陥が2重管の健全性に影響を及ぼす前に検出できるかどうかかが重要となる。定検時の ISI によって2重管の破損を検知できる見通しや、ISI による同時破損防止の考え方については、3.2(3)節で述べる。

リーク検出については、水・蒸気バウンダリーの破損は He ガス空間の湿分濃度上昇で、またナトリウムバウンダリーの破損は Na 中のヘリウムガス濃度上昇や He ガス空間の圧力変化などによって検知する。

### (2) 単管ヘリカルコイル型 SG

Na・水反応の影響を局限化するために単管ヘリカルコイル型 SG に適用する水リーク対策設備の概要を図 2.2-3 示す。このシステムは水リーク検出系、SG 保有水ブローダウン系及び耐 Na・水反応伝熱管の3つから構成され、早期検出やブローダウン時間の短縮などによって破損伝播を抑制する。すなわち隣接管の開口破損(2次破損)を防止することによって、ナトリウム・水反応の影響範囲を局限化し、SG の補修が容易になるようにしている。

### 2.3 SG形式の選定と開発課題

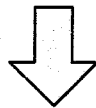
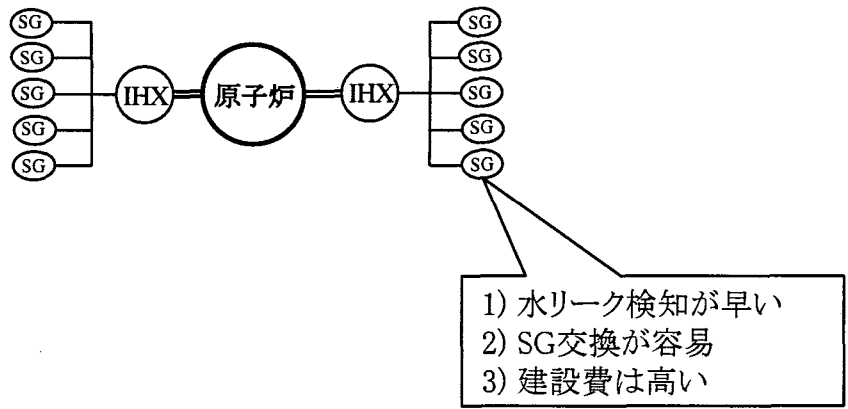
実用化炉のSGの候補概念として2重管SGおよび水リーク対策設備を高度化した単管ヘリカルコイル型SGの2つを提案した。そしてここではナトリウム・水反応を実質的に排除が可能な2重管SGを第1候補として検討を進めることとする。安全性の観点では、単管SGでも十分な見通しが得られるが、2重管SGはナトリウム・反応を除外できることにより社会的受容性の観点で有利になると考えられるからである。また2重管SGの製作コストは単管SGのそれに比べ高くなるが、水リークを排除しているために、稼働率への影響も非常に小さくなり総合的に評価した場合、経済性でも有利と考えられる。

単管ヘリカルコイル型SGについては第2候補として位置づけている。これは2重直管SGは、図2.3-1に示すように製作性、検査・補修性及び構造・流動に関する開発課題は多く、その開発リスクを低減させるために国内実績があり単管としては高い信頼性を確保できるヘリカルコイル型SGを候補とするものである。

図2.3-2に2重直管SGと単管ヘリカルコイルSGの比較を示す。同図の上には実用炉SGの設計において、安全性と社会的受容性、経済性、開発リスク（技術的実現性）に着目することを示している。さらに単管ヘリカルコイルSGと2重管SGそれぞれの場合の水リークに対する取り組みを図中央部に示す。同図の下の表にそれぞれの要求条件に対する2重管SGと単管ヘリカルコイルSGの特徴を記載する。2重管SGではNa/水反応の防止により社会的受容性の向上や稼働率の低下を防止することができるが、開発リスクやSG製作費では不利となる。一方、単管ヘリカルコイルSGではこれまでの開発実績を生かすことができるが、単管のためNa/水反応の発生を必ずしも排除できず、このため2重管SGと比較すれば社会的受容性や稼働率が低下する可能性がある。

この様に全ての要求条件を同時に満たすことは困難であり、また現時点では不確定な要素もあることから、単管ヘリカルコイルSGをバックアップとして残している。

(a) 小型モジュールSG(10基)



(b) 大型ユニット方SG (2基)

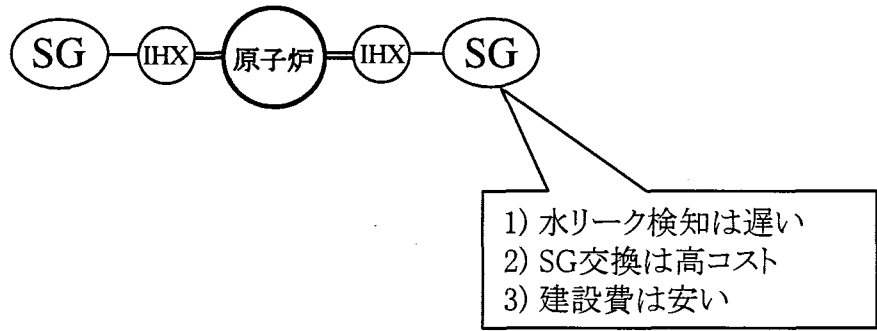


図2.1-1 SG交換熱量の違いによる2次系システム構成



主要設計値

項目	内 容	
SG型式	縦置有液面ヘリカルコイル型 一体貫流型	
管内流体	IRACS及ヒコールドトラップ内蔵	
管外流体	水・蒸気	
交換熱量	ナトリウム	
伝熱面積	1785 MWt 8290 m <sup>2</sup>	
伝熱管	外径	31.8 mm
	肉厚	3.3 mm(+10%, 0%)
	有効伝熱部長さ	102.7m (平均)
	本数	808 本
	管ピッチ 軸方向	50 mm
	管ピッチ 径方向	50 mm
定格流量	コイル層数	41層
	管束高さ	10.6m
	コイル巻径	最内層 1.0 m 最外層 5.0 m
	水・蒸気側	2.90×10 <sup>8</sup> k g/hr ナトリウム側 2.73×10 <sup>8</sup> k g/hr
定格温度	給水入口	240℃
	蒸気出口	497℃
	ナトリウム入口	520℃
	ナトリウム出口	335℃
圧力	蒸気圧力	17.3 MPa
	ナトリウム側	19.6 MPa
圧力損失	蒸気側	1.95 MPa
材質	12Cr鋼	
重量	455 ton	
設計寿命	60年 (稼働率92%)	
建 物	建物水平2次元免震方式	

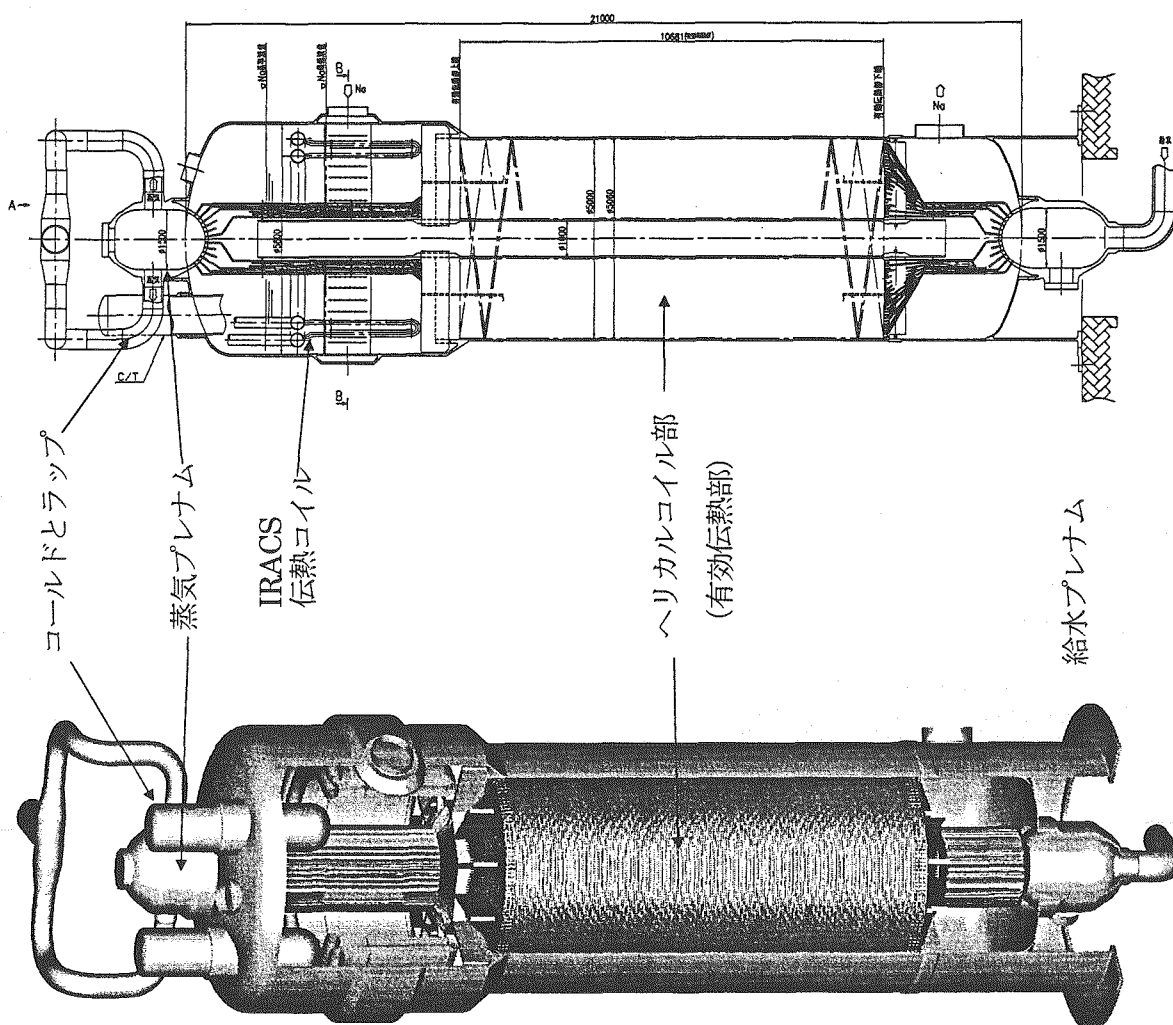


図 2.2-2 単管ヘリカルコイル型SGの構造と仕様

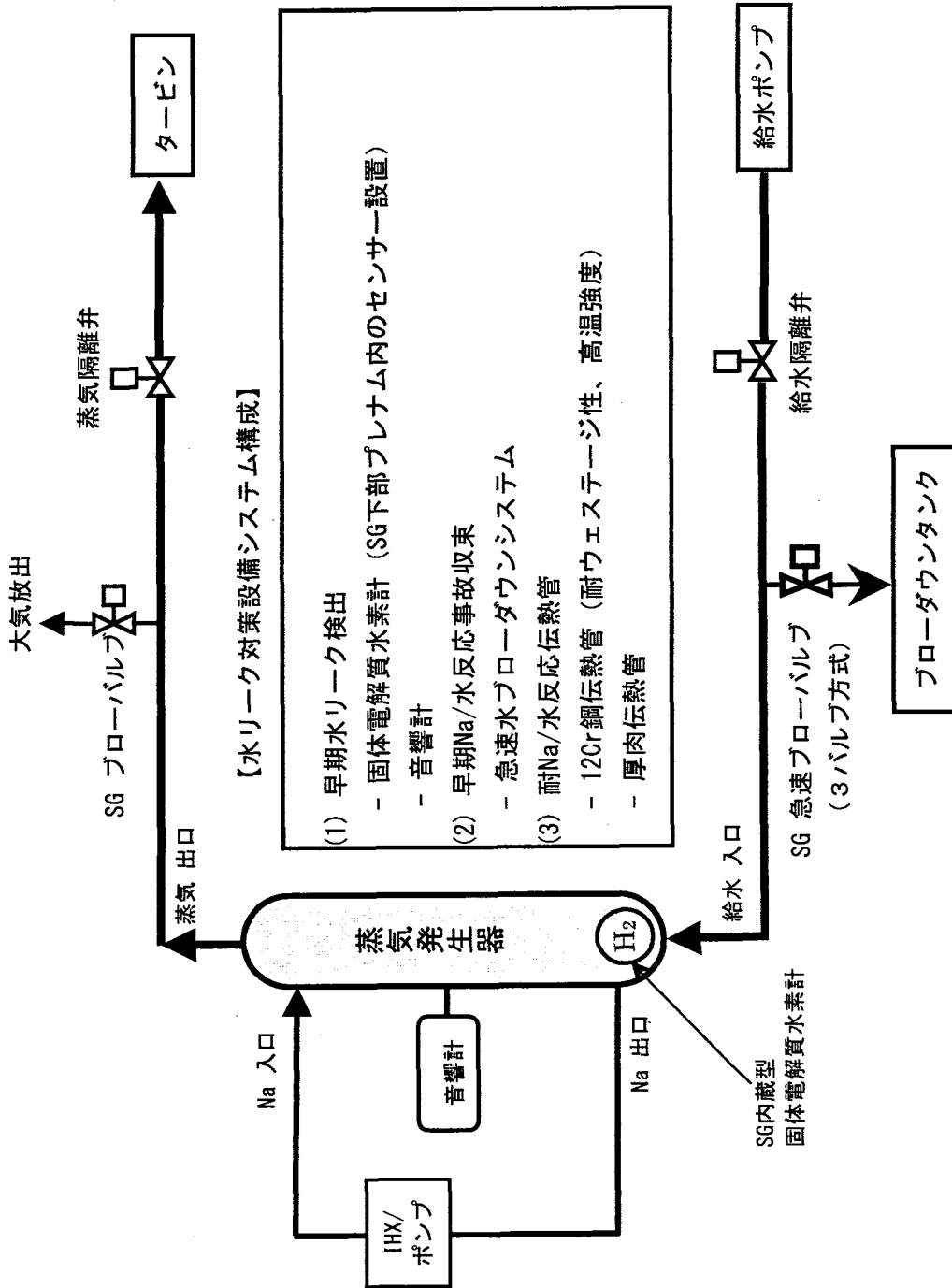


図 2.2-3 水リーク対策設備の高性能化



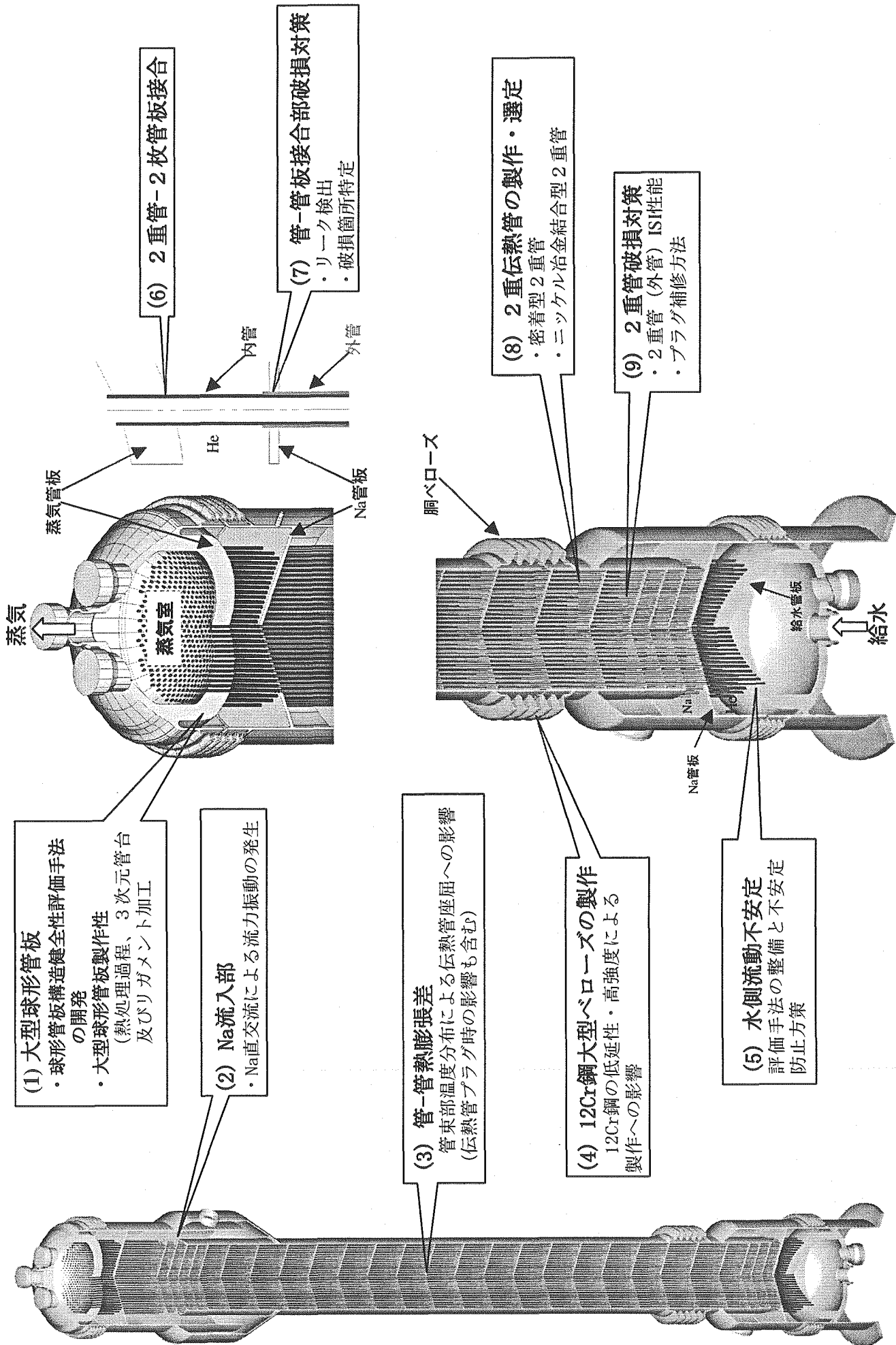


図2.3-1 大型直管二重管型SGの開発課題



### 3 2重管蒸気発生器の信頼性向上方策

#### 3.1 信頼性向上の方針・考え方

ここでは2重管 SG の Na 側境界・水側境界の同時破損回避による Na/水反応防止の考え方及びその方策、課題について述べる。2重管 SG の Na/水境界は図 3.1-1 に示すように次の3カ所に分類して考えることとする。

- (1) 2重伝熱管部 (水側境界：内管、 Na 側境界：外管)
- (2) 管-管板継ぎ手  
(水側境界：水・蒸気管板-内管継手、 Na 側境界：Na 管板-外管継手)
- (3) 管板 (水側境界：水・蒸気管板、 Na 側境界：Na 管板)

表 3.1-1 はそれぞれの部位における破損防止の考え方を示しており、これを以下で説明する。

##### (1) 2重伝熱管部

2重伝熱管部の破損については、内管と外管が機械的に密着していることから内外管が同時破損に至る過程として以下の3つが考えられる。

##### i) 共通要因破損

：同じ要因によって内管と外管が同一位置で貫通破損する場合

##### ii) 従属破損

：片側 (内管または外管) が先に破損し、それが原因となってもう片側 (外管または内管) が破損する場合

##### iii) 内管・外管破損の独立事象の重ね合わせ

：内管と外管が異なる要因によってそれぞれ独立に破損するが、時間的に重なることによって内外管同時破損となる場合

i) の共通要因破損で評価上重要になるものは、DNB 温度振動、流力振動によるき裂及びフレットイング摩耗による減肉である。き裂の起点となる初期欠陥は製造時の使用前検査 (PSI : Pre-Service Inspection) で除外し、また流力振動を抑制する設計によって、き裂や摩耗の進展を可能な限り阻止する。万一、PSI で検知できない微少な初期き裂が存在しても、そのき裂進行が伝熱管の健全性に影響を及ぼす前に定期点検時の ISI によって欠陥を検知し、内外管が同時貫通破損することを防止する。

ii) の従属破損については、片側 (内管または外管) から発生した損傷が内外管界面部を通過してもう片側へ進展する現象や、外管が減肉している状態で内管破損が発生し蒸気圧によって外管が破損して貫通破損に至るケースなどが考えられる。前者に対しては二重管の構造的分離によるき裂の界面部での進展阻止、後者については定検時の内外管 ISI により減肉などの伝熱管の異常を予め検知することで防止する。

iii) の独立破損の重ね合わせ防止に対しては、内外管同時破損位置が 10 数 cm 以上離れていれば、界面部の圧力損失によって Na 中への水リーク率は制限され急速なウエ

ステージや破損伝播は発生しないため、この様なケースでの微少水リークの発生は DBA として許容することとしている。なお、この場合の水リークは Na 中水素計で検出する。

内外管の破損位置が近接している場合は水リーク率は大きくなるが、近接して内外管が異なる要因で同時破損する可能性は非常に低く、確率論的に除外可能と考えている。

以上の様に、2重伝熱管部の内外管同時破損防止については、従属破損や共通要因破損に対しては定検時の内外管 ISI、内外管同時独立破損に対しては界面の流動抵抗による水リーク率を制限した方策としている。表 3.1-2 に示すように、過去の2次系削除の2重管 SG の検討では運転中における片側破損リーク検知を行うこととしていたため、溝付き密着型二重管や組編み線入り二重管を検討してきたが、今回は外管 ISI 性能の向上と内外管破損時の水リーク率を抑制する観点から、溝のない密着型二重管としている。

## (2) 管-管板継手

管-管板継手については、固着力確保の観点から拡管部のリラクセーション評価を行い熱過渡時も含めたプラント寿命中の構造健全性を確保しておくことが不可欠である。その上で、万一の水・蒸気管板-内管継手破損に対してはガスプレナム空間の湿分検出計、圧力計及び Na 管板-外管継手の破損に対しては圧力計、Na 中 He ガス検出計による連続漏洩監視システムにより破損を検知し事象を終息する。

## (3) 管板

管板については構造健全性上、最もクリティカルとなるのは熱過渡時のリガメント部（管板の伝熱管挿入開口部）である。球形管板の構造健全性評価手法を確立するとともにその信頼性を確保できる設計を行うことが必要となる。そして、万一の管板破損時には、管-管板継手の場合と同様に、ガスプレナム空間の湿分検出計、圧力計及び Na 中の He ガス検出計による連続漏洩監視システムにより検出する。

## 3.2 2重管SGの信頼性向上の具体的方策

本2重管SGでは2重管部については内外管界面部の圧力損失による水リーク率制限と、定検時の内外管 ISI 性能が重要であるため、特にこれらについて評価し見通しを得ることとする。

着眼点としては、

- (1) 水リーク制限ができる界面ギャップ幅を保持できると  
(→独立破損の重ね合わせ破損対応)
- (2) 内管内側からの UT により外管・内管の ISI ができること  
(→共通要因破損、従属破損対応)

- (3) DNB や流力振動によるき裂・摩耗が発生しないこと、または発生した場合には伝熱管の健全性に影響が出る前に定検時の ISI によって検知できること  
(→共通要因破損、従属破損対応)

の3点である。以下にそれぞれについての成立性を解析または要素試験により評価した。

#### (1) 界面ギャップ部流動抵抗による水リーク率制限

ここでは同一2重管において軸方向に異なる位置で独立に内外管が同時破損した場合、ギャップ幅の圧損抵抗によって水リーク率が0.1g/sec以下であることを確認する。

図3.2-1のグラフは内外管破損区間Lと水リーク率の関係をギャップ幅hを変えて示したものである。同グラフはヘリウムガスを用いた2重管ギャップ部の通気特性試験からギャップ部の流動抵抗係数を求め、これに基づいて水リーク率を計算したものである。ギャップ幅hが大きいほど流動抵抗が小さくなるため水リーク率は大きくなり、また破損区間Lが長いと流動抵抗の増加により水リーク率は小さくなることを示している。

一方、図3.2-2は過去に実施した9Cr鋼の2重伝熱管の試作実績に基づくギャップ幅の測定結果を示したものである。ギャップ幅は一部のデータを除き多くは3μm以下に分布しているため図3.2-1の3μmカーブに着目して、内外管破損区間が10数cm程度離れていれば水リーク率を0.1g/sec以下に制限できると考えられる。

次に、水リーク率が0.1g/secの場合の2重伝熱管の破損時間と検出時間の関係を検討する。図3.2-3(上)に水リーク率と伝熱管のウェステージ率の関係(実験結果)を示す。0.1g/secの水リーク率の場合の12Cr鋼のウェステージ率はその実験データを0.1g/secまで外挿し $0.8 \times 10^{-3}$  (mm/sec)と仮定すると、2重管(内外管)の肉厚が貫通破損するまで2700秒程度かかることが予想される。一方、同図(下)には水リーク率と水素計による検出時間の関係(計算結果)を示すが、0.1g/secの水リーク率の場合の検出時間は約2000秒であり、貫通破損時間と検出時間の大小関係から隣接管が貫通破損する前に検出可能である。さらに、このウェステージ率はNaが停留している条件下での時間であるため、実際にはNaが流動していること考慮すれば、0.1g/secの水リークは隣接管への影響はより少ないと考えられる。また水リークパスは図3.2-1の右側に示すようにギャップ部を経由し流路が長いいため、同図右側に示されている単管で発生した水リークの様に欠陥孔が短時間で自己拡大することはない。以上のことから異なる位置での内外管同時破損によって生じた0.1g/sec以下の水リークについては破損伝播する可能性はほとんど無く、徐々にNa中の水素濃度が上昇する緩慢なNa・水反応であり、設計として許容する考え方をとっている。

なお、図3.2-1によると内外管の破損箇所が近接した場合、界面部の流路長さが短くなるため水リーク率は0.1g/secを越える。これについては独立事象として内外管が

近接して破損する可能性は非常に小さく、発生頻度の観点で DBL の範囲から排除できるものとみなしている。図 3.2-4 は独立要因によって同一 2 重管のある区間内で内外管同時破損が発生する確率をその区間長さをパラメータとして示したものである。例えば横軸の内外管破損区間が 1m であれば、内管と外管が独立要因で 1 m 以内の近接した距離で破損する確率を示している。このグラフは、過去の伝熱管事例に基づく伝熱管母材の破損発生確率  $1.16 \times 10^{-9}$  (回/m<sup>2</sup>hr)<sup>3)</sup>、プラント寿命(60 年)および SG 伝熱面積 10734(m<sup>2</sup>)を用いて計算によって求めたものである。このグラフによれば 2 重管区間が 10 数 cm 以内で同時に内外管破損が発生する確率は SG 1 基あたりの  $10^{-6}$  ~  $10^{-7}$  (回/年・基) 程度と十分に低く、事実上無視して良いことがわかる。

## (2) 外管 ISI 検出性能評価

従属破損や共通要因破損防止のために定期点検時の ISI が必須になるが、UT 検査プローブは内管内側に挿入して検査を行うため、外管が内外管ギャップ面を介しての検査となり、外管の検出性能がクリティカルになる。したがって、外管外表面に模擬欠陥を設け UT による検出性能の基礎試験を行いその見通しを検討した。

なお外管については、ギャップ面の存在により内管と比較して ISI の検査性能が低下することが考えられるため、図 3.2-5 に示すように外管には予め ISI 検査代として外管肉厚の 20%を新たに付加した設計としている。これによって仮に 20%肉厚以下の欠陥が検出できなくても、2 重管 (外管) の健全性に影響がないようにしている。

外管 ISI の試験条件とその結果をそれぞれ表 3.2-1、表 3.2-2 に示す。模擬欠陥としては周方向、軸方向の角溝及びピンホールである。欠陥深さは外管肉厚の 10%, 20%, 50%として、ギャップ幅 (面圧) の異なる 3 つの 2 重管試験体で UT の SN 比の測定を行った。この結果、ギャップ幅が 1 μm 程度であれば外管肉厚 10%程度の欠陥を検出することができるが、7~8 μm 程度までギャップ幅が開くと欠陥検出が困難であることが分かった。なお、表 3.2-2 の面圧小 (ギャップ幅: 7~8 μm) のケースについては意図的に加工度を下げたため、実際の 2 重管の製造とはかなり異なる条件で製作されたものと考えられる。また、過去の 2 重管の試作実績によると 2 重管製造時の加工度を高めても界面部のギャップ幅を狭くしたり面圧を増加させることはできず、ある範囲内においてばらつくことがわかっている。すなわち通常の加工度での製作であれば、図 3.2-2 に示すように 1~3 ミクロン程度のギャップ幅で、一定の面圧が確保されて超音波がギャップ面を通過していくと考えられる。

なお、本基礎試験の模擬欠陥は角溝やピンホールであり、DNB や流力振動による疲労き裂ではないため、これらの欠陥の検出性については別途試験による確認が必要である。

## (3) き裂の発生と進展

2 重直管 SG の内外管同時破損防止のために特に着目すべき伝熱管の共通破損要因は、図 3.2-6 に示すように、i) 管束上部 (Na 入口直交部) の流力振動によるフレッ

ディング摩耗、ii) 管束上部の流力振動によるき裂、及び iii) DNB 温度振動によるき裂、の3つと考えられる。流力振動によるき裂と DNB によるき裂については解析的な評価を行ったので、以下に評価結果を示す。流力振動によるフレットング摩耗については、現時点では評価を行っていないが、同等の課題がポンプ/IHX 組込み機器の伝熱管にも存在しており、流速の観点から IHX の方が厳しい条件となっているため、こちらの評価結果を SG の方へ反映する予定である。

#### i) 流力振動によるき裂進展

表 3.2-3 は、初期のき裂深さ（内管または外管肉厚に対する相対深さ）とき裂が流力振動によって内管または外管を貫通するまでの時間を示した解析結果である。解析パラメータは初期き裂深さ及び伝熱管支持板の有無である。この解析結果からわかるように初期欠陥が肉厚 20%でもき裂貫通時間は、内管では約 30 年、外管は約 20 年であるため、定期点検時の ISI によって貫通前に十分に検知可能である。但し、伝熱管支持板が欠落すると約 20～40 日で片側管の貫通破損に至るため貫通前にき裂を検出することはできない。支持板についてはタイロッドにカラーを付けるなど脱落しない構造とはなっているが、定検時に渦電流探傷検査 (ECT) によって支持板が正しい位置に存在していることを確認することで、流力振動による貫通き裂防止を図ることとなる。

なお、表中には記載されていないが、初期き裂が存在しない場合には、流力振動によってき裂は発生・進展しない。

同表には 10%肉厚き裂から 20%肉厚き裂に至る時間も示しているが、この時間は 1 運転サイクル期間よりも長い。したがって ISI によって肉厚 10%以上のき裂を検出できれば、そのき裂進展速度を考慮して定検時 ISI において肉厚の 20%き裂に達する前に検出できることになり、80%肉厚分の健全性は常に保たれることが分かる。このことは外管に対しては、図 3.2-5 に示すように予め 20%肉厚分を追加しているため、き裂が進展しても耐内圧代、摩耗代と Na 腐食代の必要肉厚はすべて確保されることを意味している。

#### ii) DNB 温度振動によるき裂進展

DNB 温度振動は図 3.2-7 の上に示すように内管内側で核沸騰領域と膜沸騰領域の遷移領域において温度が両領域の熱伝達率の違いによって局所的に振動している現象である。ここでは保守的なモデルとして同図の下(a)または(b)に示すように、水・蒸気側の熱伝達率をある境界を境にして核沸騰と膜沸騰を 1 秒間隔 (DNB 振動周期の代表例) で変化させて、径方向のヒートフラックスを計算し内外管の温度分布計算を行った。この時の温度応答結果を図 3.2-8 に示す。

DNB による応力は核沸騰と膜沸騰の軸方向温度差による応力と半径方向の温度差による応力が重ね合わさって生じる。DNB 点での軸方向温度差による応力値は、図 3.2-7(a)に示すように DNB 点で急激な温度差が生じるモデルとしているが、

実際には同図(b)に示すように伝熱管の軸方向の熱伝導により温度勾配が緩和されていると考えられる。軸方向に 5-10mm の範囲で温度勾配が生じれば応力は 50%-20%に減少する。DNB 点を境にして軸方向の温度勾配が生じないものと仮定すると過度に保守的であるため、解析では温度勾配の影響を考慮し軸方向温度差応力もパラメータとした。

DNB 温度振動によるき裂進展解析結果を表 3.2-4 に示す。最も保守的な条件となる軸方向温度差の応力を 100%とした場合（軸方向の温度勾配が生じないと仮定したケース）では、初期欠陥がある場合には内管の場合には 0.5 年程度で貫通破損するため、定検時の ISI で貫通破損前に検知することはできない。一方、外管の場合は DNB の影響は内管よりも小さくなるため貫通き裂に達する時間は 1 サイクル運転（18 ヶ月）を越えている。現実的な評価として軸方向温度勾配を考慮した 10%、50%応力の場合にはき裂の貫通時間は 1 運転サイクルを超えるために定検時の ISI により貫通する前にき裂を検知できる可能性がある。

なお、表中には記載されていないが、流力振動の場合と同様に DNB 点においても初期欠陥が存在しない場合にはき裂は発生・進展しないことが解析的にわかっている。

### 3.3 2重管 ISI によるき裂進展阻止の考え方

外管 ISI の検出性能やき裂の進展速度が現時点では不確定な部分もあるためここでは 2つのケース (I, II) を想定して ISI によるき裂検出の考えを検討することとした。これを図 3.3-1 に示す。(I)は外管 ISI の検出性能が高く且つき裂進展が 1 運転サイクルよりも十分に長い場合を想定したケースであり、(II)は ISI 性能が低い場合やき裂進展速度が比較的早い場合についてのケースを示したものである。

(I)はアプライオリに内管が存在しないものと仮定し、その場合において外管の必要肉厚すべて（耐内圧代、Na 側腐食代、摩耗代）は常に確保されることを想定している場合である。この考え方は、i)20%肉厚を外管に付加していること、ii) ISI 基礎試験で肉厚 10%以上の欠陥であれば検出できていること、iii) 解析ではき裂が 10%肉厚から 20%肉厚まで進展する時間はプラントの 1 運転サイクル期間を越える可能性が示されていること、から期待されるものである。

(II)については、外管の貫通破損の段階で検出することとしており、この場合には内管の存在に期待することで貫通水リークを防止するものである。一般に共通要因破損の場合は、同じ位置で内外管にき裂が発生することを想定するが流力振動、DNB 温度振動ともに初期き裂が存在しなければき裂が発生しないため、内外管の 10 数 cm 以内に初期き裂が偶然に存在する可能性は図 3.2-4 に示すように  $10^{-6}$ ~ $10^{-7}$  (回/年・基)程度と非常に小さく、確率論的に排除可能とみなす。よってここでは外管き裂と異なる位置で内管貫通き裂が既に存在し、界面部（外管内面）に蒸気側の圧力が加わっているものとして評価する。

この場合には内圧によって貫通き裂のある外管が不安定破壊しないことが必要とな



る。構造 Gr による解析の結果、図 3.3-2 に示すように周方向（貫通）き裂であればき裂角度  $297.7^\circ$ 、き裂開口幅  $1.35\text{mm}$  以下、軸方向（貫通）き裂であればき裂長さ  $55\text{mm}$ 、開口幅  $60\mu\text{m}$  以下であれば不安定破壊が発生しない。よってき裂が進展してもその大きさがこの値以下になること、及び ISI によりこの大きさの貫通き裂が検出できることが要求される。なお、不安定破壊が発生しなければ界面部の圧力損失により Na 中への水リーク率は十分に制限され、隣接管に影響を及ぼすようなウェステージは生じない。

上記の(I)、(II)のどちらにするかについては、平成 16 年度の予定している外管き裂の UT による検出試験、詳細な DNB き裂進展解析等によって決定するものとする。

なお、ISI によるき裂検出が困難である場合には、ISI のみに依存しない別の考え方・対策が必要になる。

### 3.4 2重管 SG 大リーク解析

ここではプラントの安全性の観点で、設計基準外事象として2重伝熱管1本完全破断時の水リークによる2次系内圧力波伝播解析を行い、2次系機器の健全性が確保されることを確認する。

解析では伝熱管破断時における水リーク率を求め、これに基づいて2次系内(SG, IHX, ポンプ、配管)の初期スパイク圧、準定常圧を計算する。そしてここで得られた2次系各所の最大圧力に基づいて機器の構造健全性を評価する。

#### (1) 解析条件

伝熱管完全破断のような大リーク時には、ラプチャーディスク(R/D)が開放し、R/D 破裂信号等により水ブローが開始するとともに、SG 水系は給水・タービン系から隔離され減圧する。しかし、ここでは保守的な評価を行うため SG 内部の水側減圧は無視し、水リークが継続するものとして解析する。さらに伝熱管破断箇所は水リーク率が大きくなる水単相域、すなわち管束部下部としている。

なお、直管2重管 SG は水側流動不安定の観点から、伝熱管入口にオリフィスを設置する場合としない場合の2つのオプションが設定されているため、両方のケースについて評価する。

#### (2) 解析結果

水リーク率解析結果を図 3.4-1、図 3.4-2 に示す。前者は初期スパイク解析用の水リーク率であり、後者は準定常圧解析用の水リーク率である。オリフィスがない場合は伝熱管破断後約 0.3 秒でほぼ定常状態となり、その時の水リーク率は約  $7\text{kg/sec}$  である。一方、オリフィスがある場合には破断初期の 10-20 ミリ秒までの変化はオリフィスがない場合とあまり変わらないが、それ以降はオリフィスの効果により水リーク率は制限され約 0.3 秒後には約  $2.4\text{kg/sec}$  程度まで減衰する。

次に一例として IHX の準定常圧解析結果を図 3.4-3 に示す。オリフィスが無い場合

には伝熱管破断とともに IHX の圧力は上昇し、約 1.3 秒で SG の R/D が開放し放出が開始するが、その後も圧力は上昇し続ける。そして 34 秒後サイクロンセパレーター (C/S) の R/D が破裂すると圧力は徐々に降下する。オリフィスがある場合には無い場合と比較して、水リーク率が約 1/3 に低減しているため、圧力上昇は緩慢であり約 3.6 秒後に SG の R/D が開放する。その後圧力は一時的に降下しするが放出系が Na で充填されるとともに、再び圧力は上昇する。しかし、結局は水リーク率は低いために解析した 50 秒では C/S の R/D は破裂しない。

初期スパイク圧及び準定常圧の解析によって得られた 2 次系機器各部の発生圧力と許容圧力を比較した結果が表 3.2-5 である。この表に示される通り IHX を含む全ての部位において、発生圧力はそれぞれの許容圧力に対して十分に小さく 1 次/2 次ナトリウムバウンダリーが破損することはない。

なお、オリフィスがない場合には、ある場合と比較して水リーク率は約 3 倍になるが、ナトリウムバウンダリー健全性確保の観点では、オリフィスが設置されていなくても特に問題とはならないこともわかった。

### 3.5 2 重管 SG 設計基準水リーク (DBL) の設定

Na/水反応時のプラント安全の観点から伝熱管が破損したときの想定すべき最大となる水リーク率を設計基準水リーク (Design Base Leak: DBL) として設定している。これはいかなる規模の初期水リークを想定しても水リーク対策設備によって DBL 以上の規模の水リークは発生しないように SG を設計したものであり、通常 DBL はナトリウムバウンダリーの破損に対して十分な裕度を持たせている。例えば原型炉 SG の DBL は 3 本伝熱管ギロチン破断 (3DEG) であり、ナトリウムバウンダリーが破損する数十本の伝熱管破断に対してかなりの余裕がある。

そこで本 2 重管 SG の DBL をどう設定すべきか検討する必要がある。3.1 節、3.2 節で述べたように内外管の共通要因破損及び従属破損を排除し、独立破損の重ね合わせ事象に対してはギャップ部の流動抵抗で水リーク率を制限できれば、2 重管 SG の DBL を 0.1g/sec とすることが可能である。これは 2 重壁構造により単管 SG よりも Na・水反応防止のポテンシャルが高いことから DBL を小さく設定し、水リーク対策設備の合理化を図ろうとするものである。

一方、共通要因破損が排除できない場合は、0.1g/sec の水リーク率を DBL とすることはできず、経済性や社会的受容性の観点での目標値とすることが考えられる。DBL については例えば原型炉と同等の 3 本伝熱管ギロチン破断 (3DEG) 相当とし、それに対応する水リーク対策設備、すなわち微小～大リークまでの検出計、放出系及びブローダウン系を装備することになる。

今後は 2 重管 SG の各破損要因を排除できる可能性を検討し、水リーク対策設備の合理化がもたらすメリットも考慮して、DBL を設定していく必要がある。

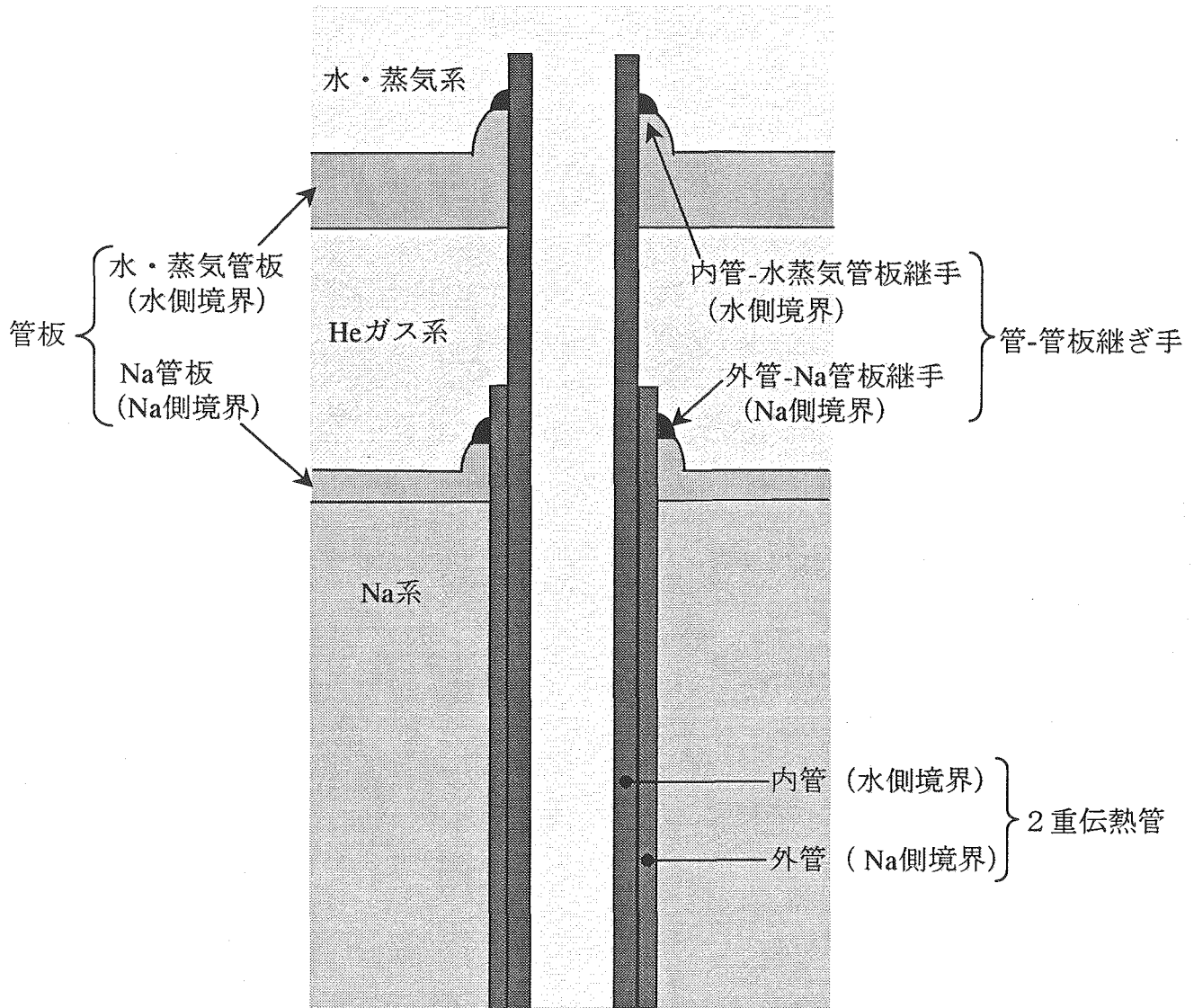
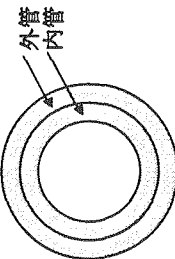
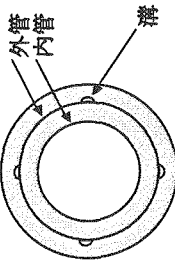
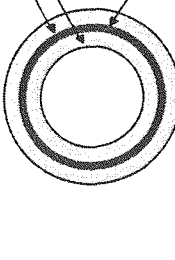


図3.1-1 2重管SGのNa境界と水境界

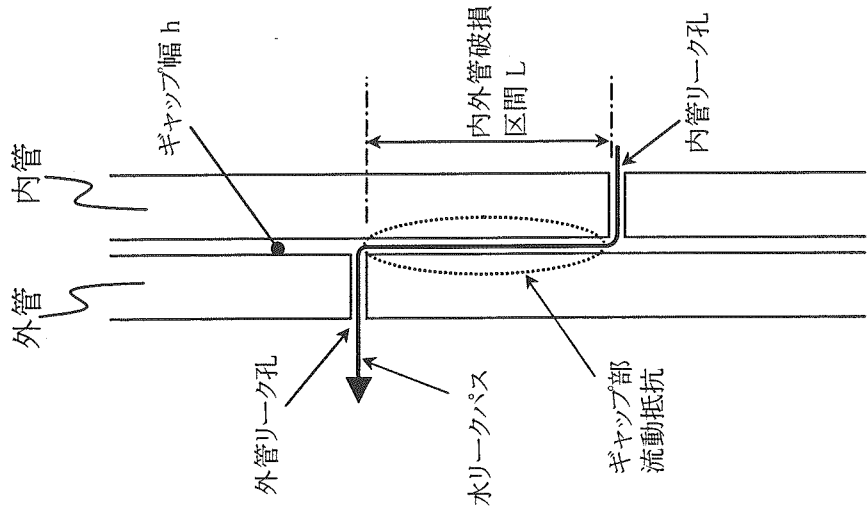
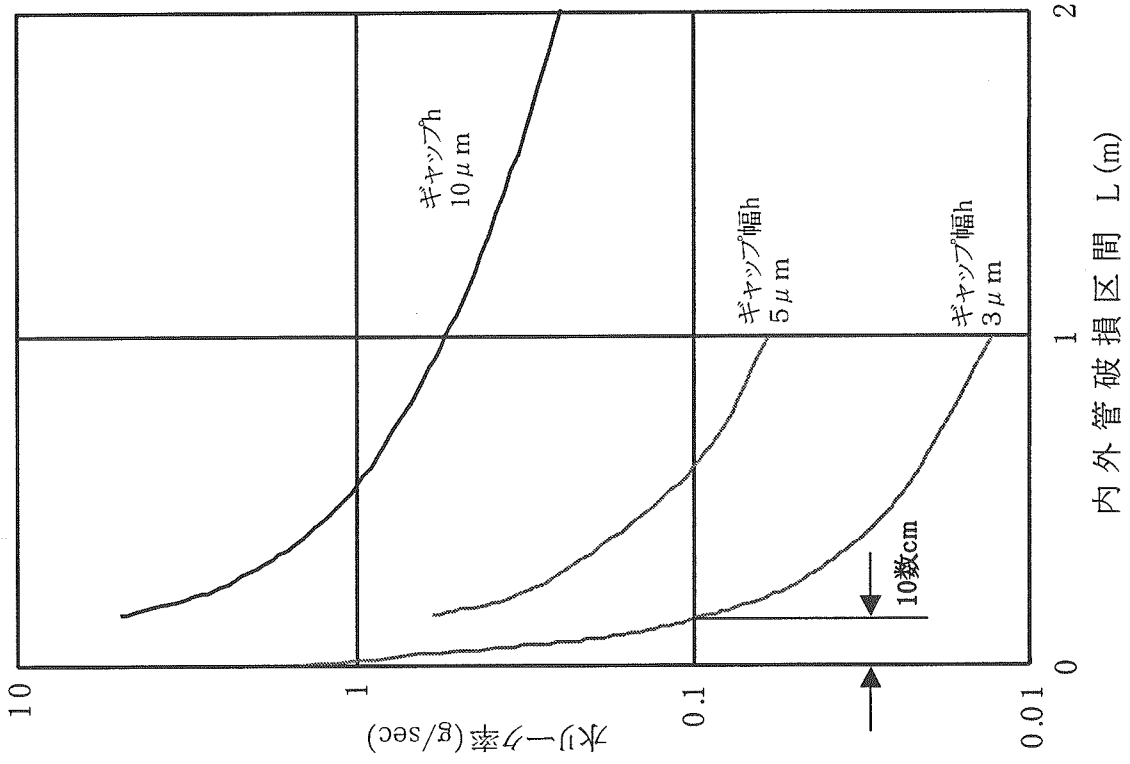
表3.1-1 2重管SGGのNa・水反応防止の考え方と方策

<p>管-管板 継手</p>		<p>[方策] (水側/Na側) 管-管板継手リーク検出システム プラント運転中の管-管板継手リーク監視システム(Heガス系の湿分計、圧力計など)によりリーク後直ちに検出されるため、両方(水側/Na側)の管-管板継手が同時に破損することはない。万一、両方の管-管板継手が同時に破損しても、ガスプレナムの存在により0.1g/sec以上の水リーク率を超えることはない。</p>
<p>管板</p>		<p>[方策] 2重管の内外管間隙部流動抵抗+Na中水リーク検出計(水素計) 内外管間隙部圧力損失を利用することで内外管同時貫通リーク時においても0.1(g/sec)の水リーク率を越えない。なお、この場合の水リークはNa中水素計によって検出される。</p>
<p>2重伝熱 管部</p>		<p>(1) 異なる2重管の内管と外管の破損 内外管間隙部(数ミクロン)での流動抵抗によりガスプレナムを介しての水リーク率は0.1g/sec以下になる。また、ガスプレナムを通過するためリーク検出システムにより検知される。</p> <p>(2) 同一2重管の内管と外管の破損 2-1) 内管破損と外管破損位置が近接していない(5cm以上)場合 内外管間隙部の流動抵抗により水リーク率は制限され0.1g/s以下になる。単管の水リークとは異なるため、短時間で自己拡大することなくNa中水素計で検出される。</p> <p>2-2) 内管破損と外管破損位置が近接している(5cm以下)場合 水リーク率は0.1g/secを越えるため、隣接管への損傷が発生する。しかし、同一2重管において数cm以内で内外管が同時に破損する確率はきわめて小さい(10e-7回/炉・年)。</p>
<p>従属破損  共通要因破損</p>		<p>[方策] 定検時の内外管ISI (ISI性能の観点から外管ISIがクリティカルになる) 例えば外管破損について考えると、アプリアオリに内管が破損した場合においても、1運転サイクル期間(18ヶ月)は水側内圧に耐えられるだけの外管の健全性が常に確保されている。外管の健全性は定検時の2重管ISIによって担保される。</p> <p>設計対応破損モード (1) 伝熱管フレッシング摩耗(支持板のところ) - 定検時のISIで肉厚を確認 (2) 流力振動 - 定検時のISIで伝熱管支持板の存在を確認 (3) DNB温度振動 - 定検時の亀裂をISIで確認または貫通リークを水リーク検出計で検知する。</p>

表3.1-2 リーク検出無し(ISI2重管SG)とリーク検出2重管SG

	今回の方式 密着2重管(溝無し) + ISI	従来方式(1) 密着2重管(溝有り)+リーク検出	従来方式(2) 組網線2重管 + リーク検出
			
Na/水反応防止の取り組み	<p>・定検時に内外管を超音波検査することによって、内外管同時破損を除外。SG運転中の片側リーク連続監視はできないが、異なる位置で内外管同時破損が発生した場合でも、間隙部の流動抵抗によりNa中への水リーク率は十分に制限され(0.1g/sec以下)、事実上影響はない。なお、この場合は水素計で検知する。</p>	<p>内管または外管どちらかが破損した段階でリーク検出し、SGを停止することにより、Na/水反応を除外。</p>	
安全性・安心感の考え方	<p>・片側破損及び内外管同時破損による微小水リーク(0.1g/sec以下)はDBAとして許容する。 ・内外管同時破損による小水リーク(0.1g/sec以上)はBDBAとする。</p>	<p>・内外管リークの早期検知により、確率論的(10<sup>-7</sup>回/炉年)にNa/水反応排除を主張。</p>	
開発課題	<p>・ISIによる外管の検査性 ・長期運転に伴う内外管面圧(ギャップ幅)の確保</p>	<p>・ギャップ部破損時ではリーク検出が困難になる場合がある。 ・溝がき裂発生起因になる可能性あり。</p>	<p>・組網線の存在により外管ISI性能が密着方式に比べ劣る。</p>
総合評価	<p>・内外管間隙幅の確保や2重管(外管)ISIへの要求が増大するが解決の見通しはある。密着2重管の間隙部圧損による水リーク率制限により隣接管破損を防止できる可能性を有している。</p>	<p>・外管ISIの長所を有するが、片側リーク検出を要求する限り、閉塞などの問題を解決できない。</p>	<p>・組網線のためリーク検出特性は向上するものの、酸化スケールによる欠陥部のき裂閉塞の問題は解決できない。また外管ISI性も不利となる。</p>

計算条件:  
 1. 内管リーク圧力: 17.64MPa  
 2. 内管リーク温度: 240°C  
 3. 内外管の流動は加圧水と二相流  
 4. ギャップの流動は微小隙間流動の  
 下記式(h: ギャップ)  
 $G = \pi dh^3 \Delta P \rho / (12 \mu L)$



内外管同時破損概念図(2重管)

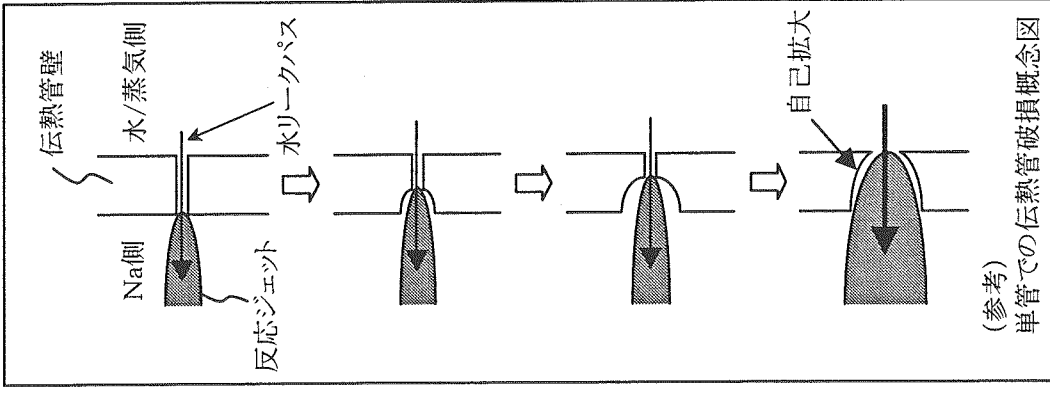


図3.2-1 2重管内外管同時破損時における水リーク率



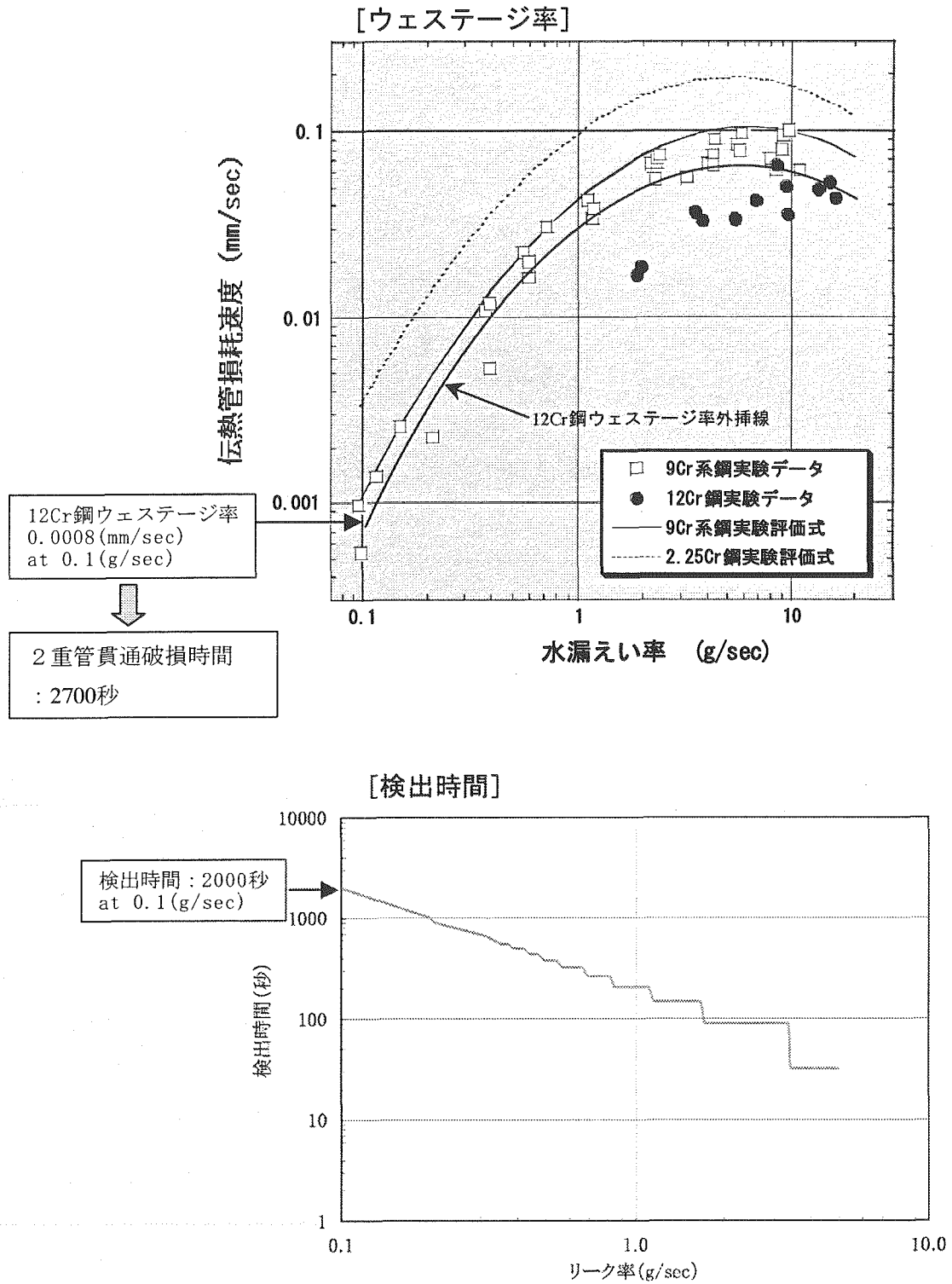


図3. 2-3 高クロム鋼ウェステージ率と検出時間



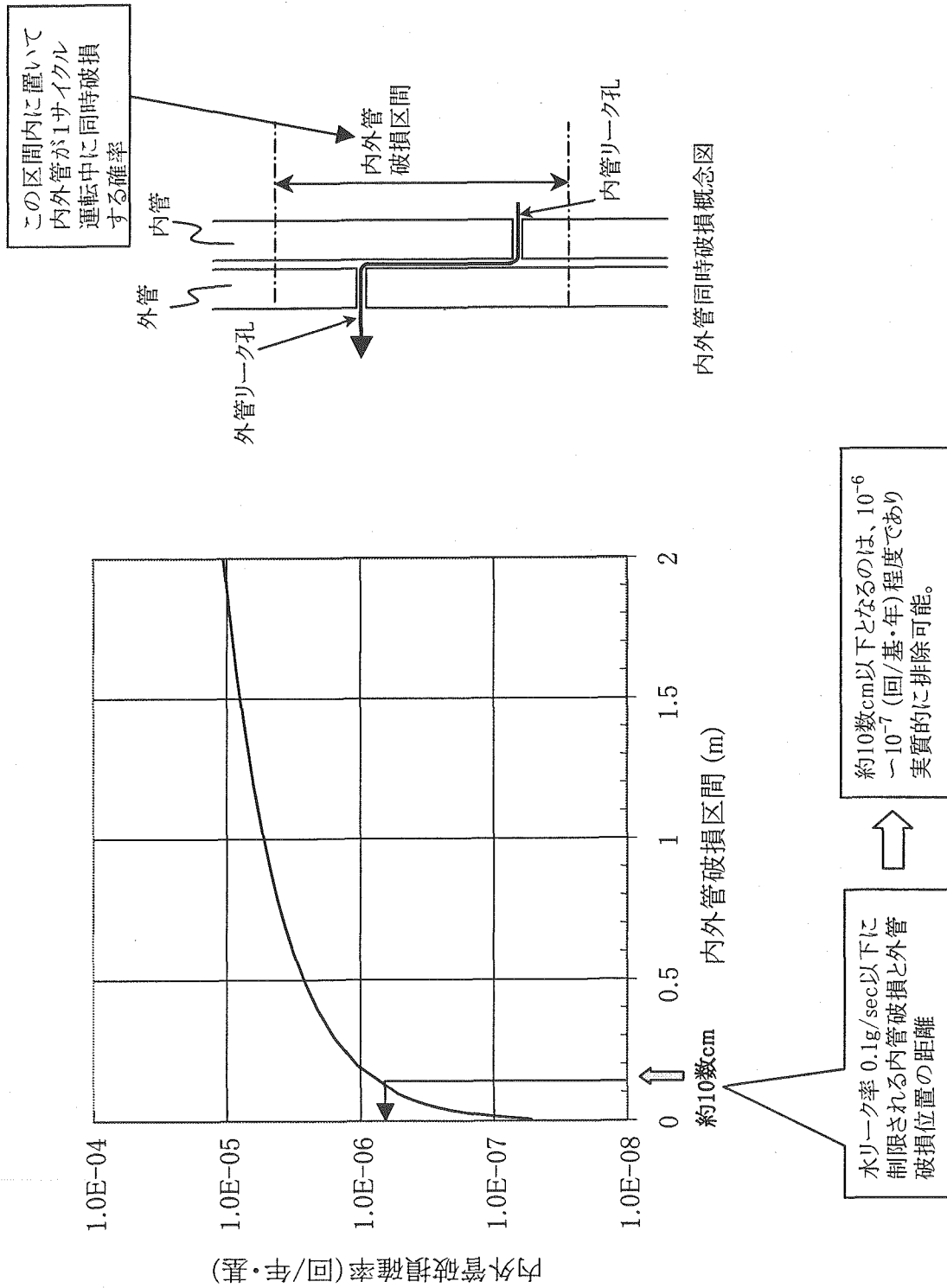


図3.2-4 同一2重管の区間における内外同時破損発生確率

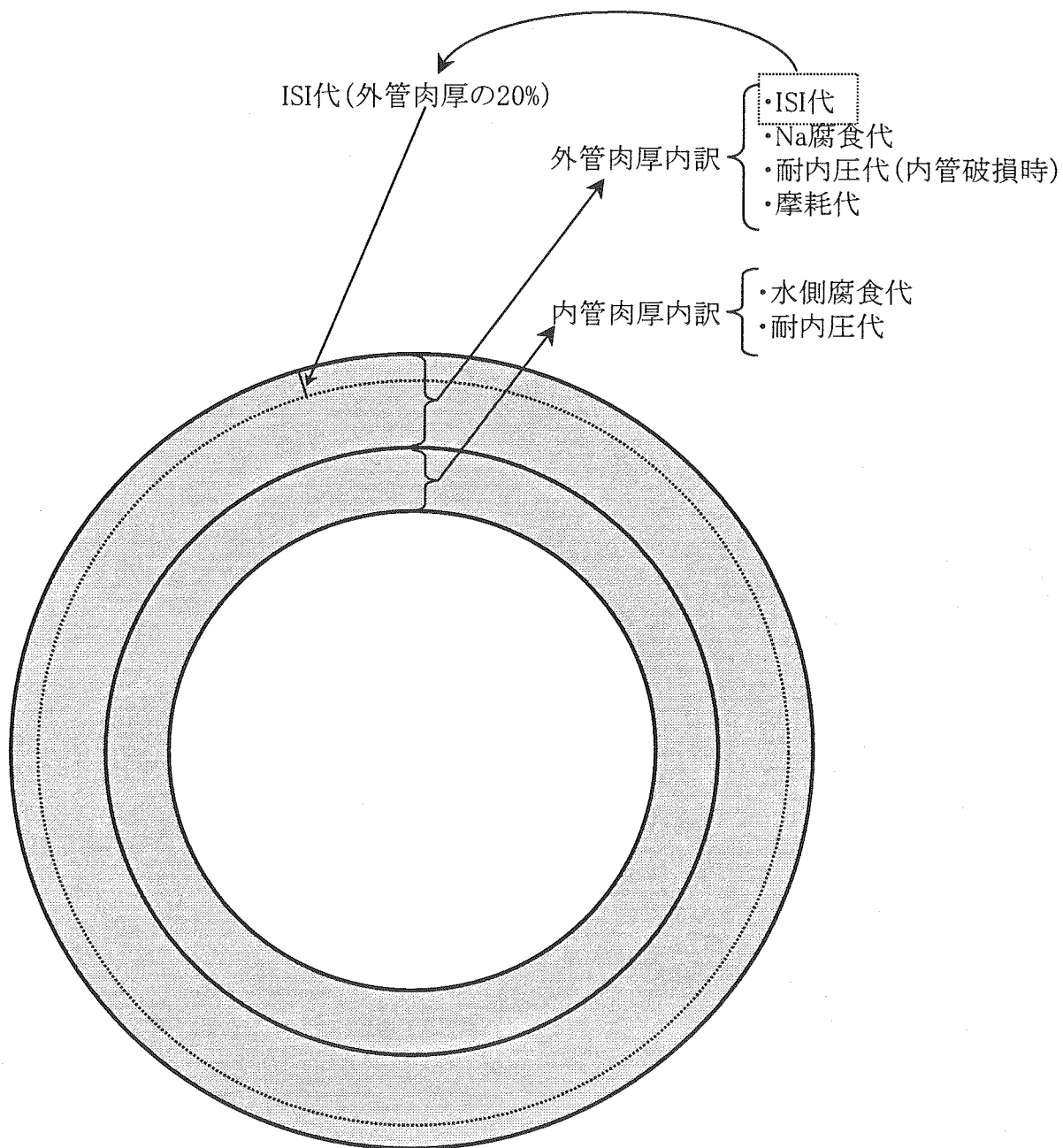


図3.2-5 2重伝熱管肉厚設定

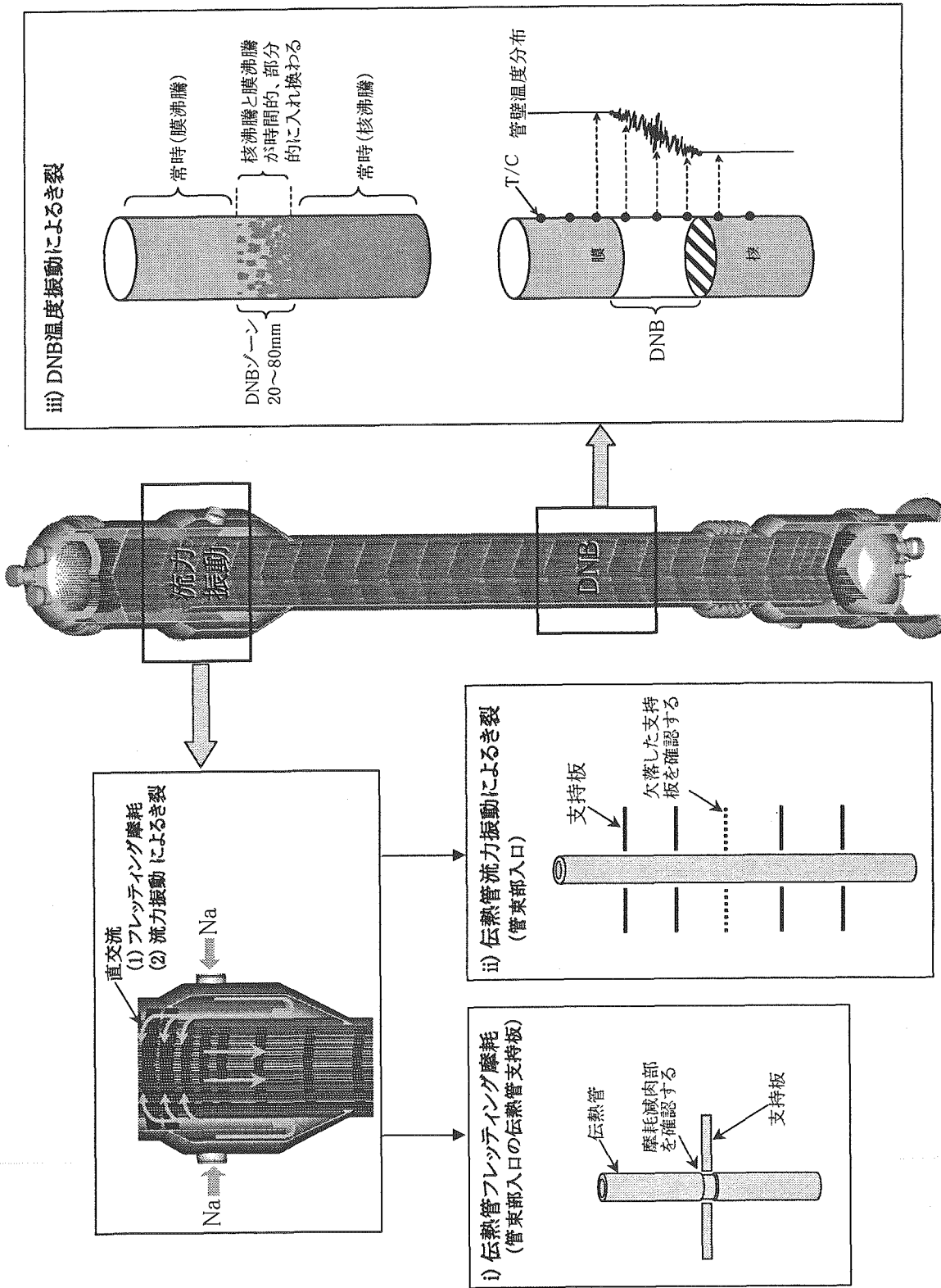
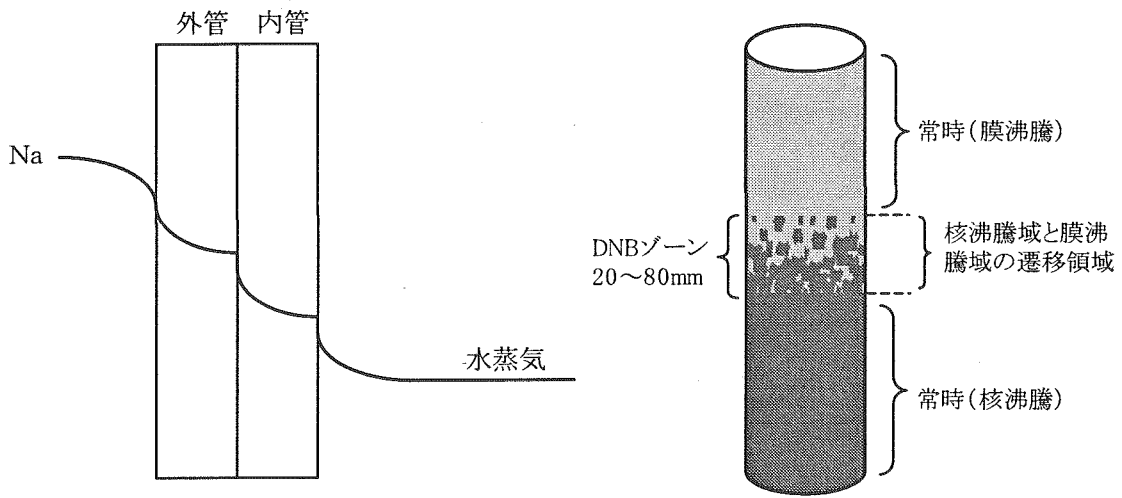
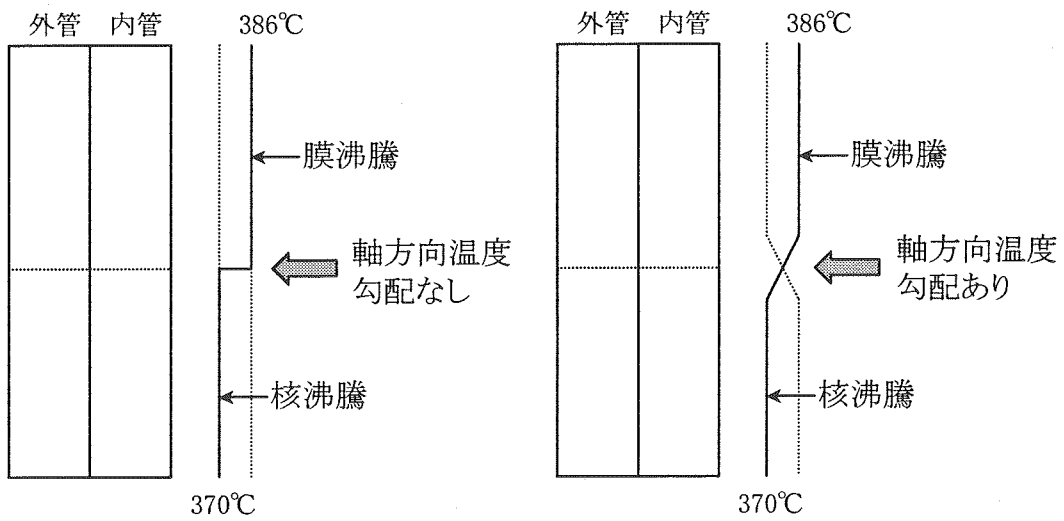


図3.2-6 2重伝熱管の共通破壊要因



DNBのモデル化



(a) 軸方向温度勾配を考慮しない場合

(b) 軸方向温度勾配を考慮した場合

図3.2-7 DNB温度解析モデル

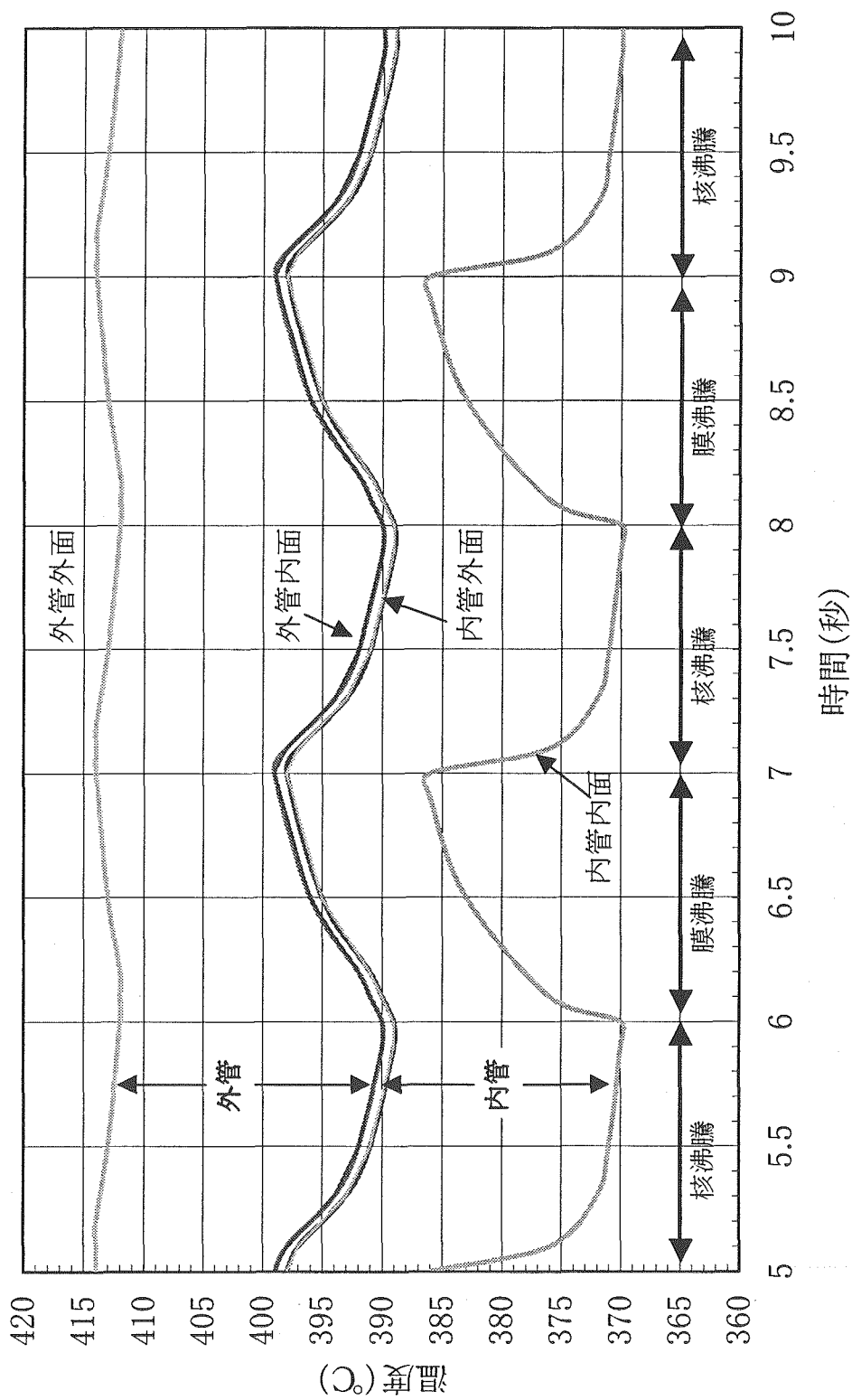


图3.2-8 DNB温度振动解析结果

表3.2-1 UT試験項目

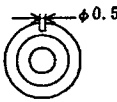
欠陥の種類	探傷方向	欠陥深さ	
軸方向 (10mm × 0.5mm)	周方向	50%t	
		20%t	
		10%t	
周方向 (10mm × 0.5mm)	軸方向	50%t	
		20%t	
		10%t	
ピンホール (φ0.5mm)	軸方向	50%t	
	周方向	20%t	
		10%t	

表3.2-2 UT試験結果

欠陥の種類	欠陥深さ	探傷方向	検出性能(SN比)		
			面圧大 (隙間 1.0 μm)	面圧中 (隙間 0.7 μm)	面圧小 (隙間 7.6 μm)
軸方向 (10mm × 0.5mm)	50%t	周方向	16.0~26.7	16.0~20.0	5.7~16.0
	20%t		16.8~29.3	18.2~18.5	5.3~13.2
	10%t		11.4~19.0	7.0~12.2	4.3~14.6
周方向 (10mm × 0.5mm)	50%t	軸方向	4.5~26.7	14.7~26.7	×
	20%t		8.3~18.3	5.3~16.0	× ~6.2
	10%t		2.0~19.3	2.0~12.7	×
ピンホール (φ0.5mm)	50%t	軸方向	4.3~12.8	3.9~8.2	× ~3.2
	20%t		5.3~9.7	4.4~6.4	× ~2.3
	10%t		4.7~6.7	2.8~4.8	×

表3.2-3 き裂進展解析結果（流力振動）

部位	初期き裂深さ	支持板条件	定常応力 N/mm <sup>2</sup>	繰返し膜応力 N/mm <sup>2</sup>	き裂貫通 時間(年)	10%→20% き裂進展時間(年)
内管	20%肉厚	支持板健全	108.4	±1.9	32.6	13.2
	10%肉厚				45.8	
外管	20%肉厚		10.2	±2.2	20.6	7.8
	10%肉厚				28.4	
内管	10%肉厚	支持板1枚欠落	108.4	±14.3	39.3日	—
外管	10%肉厚		10.2	±16.7	23.7日	—

表3.2-4 き裂進展解析結果(DNB振動)

部位	初期き裂	繰返し曲げ応力 N/mm <sup>2</sup>	繰返し膜応力 (軸方向温度差応力) N/mm <sup>2</sup>	き裂貫通 時間(年)	10%→20% き裂進展時間(年)
内管	20%肉厚	-18.7 ⇔ -30.1	±1.81(10%)	28.3	-
			±9.05(50%)	2.1	
			±18.1(100%)	0.42	
	10%肉厚	-18.7 ⇔ -30.1	±1.81(10%)	34.9	6.6
			±9.05(50%)	2.8	0.7
			±18.1(100%)	0.56	0.14
外管	20%肉厚	-26.7 ⇔ -36.9	±1.0(10%)	58.5	-
			±5.0(50%)	7.2	
			±10.0(100%)	1.7	
	10%肉厚	-26.7 ⇔ -36.9	±1.0(10%)	70.8	12.3
			±5.0(50%)	9.4	2.2
			±10.0(100%)	2.3	0.6



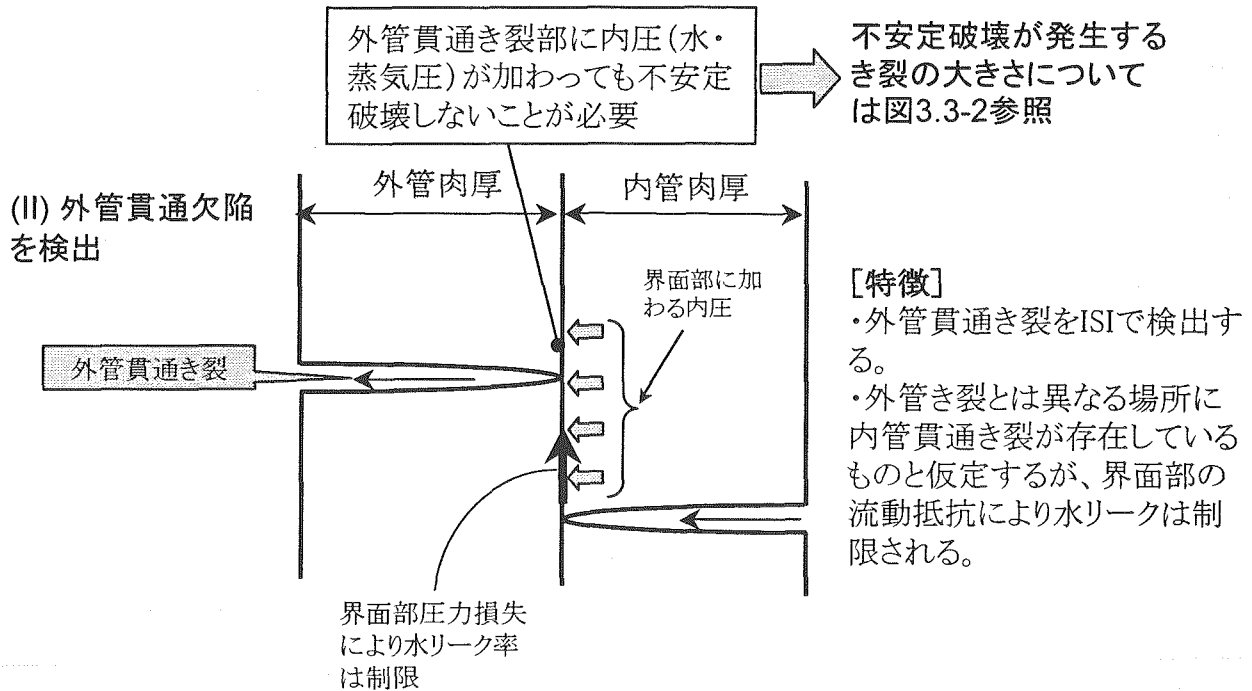
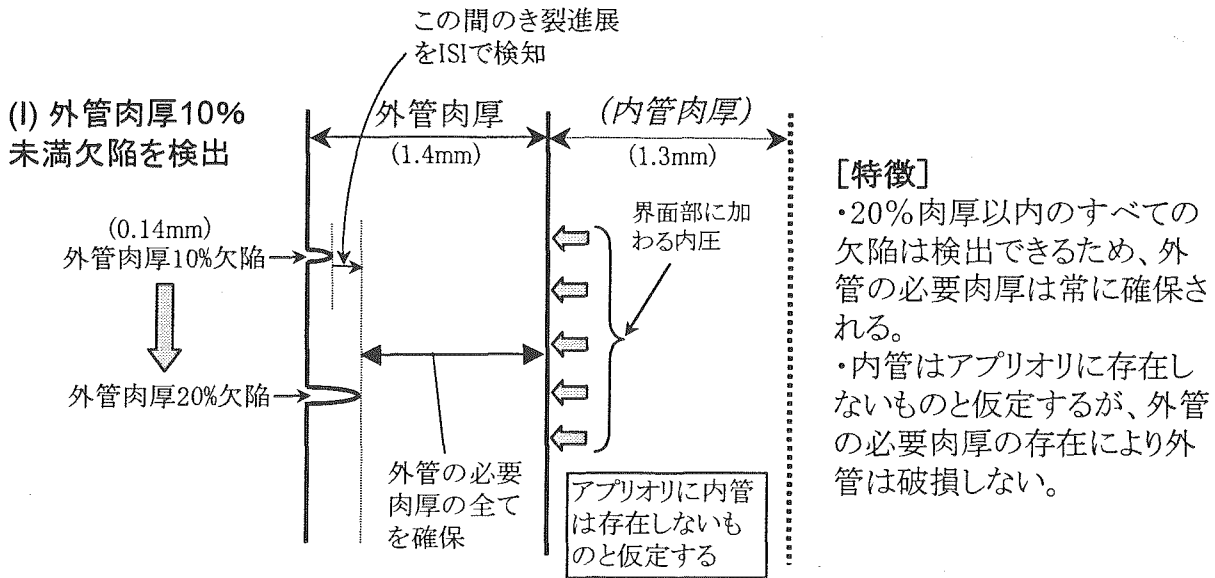


図3.3-1 共通要因破損に対する(外管)ISI検出性能の考え方

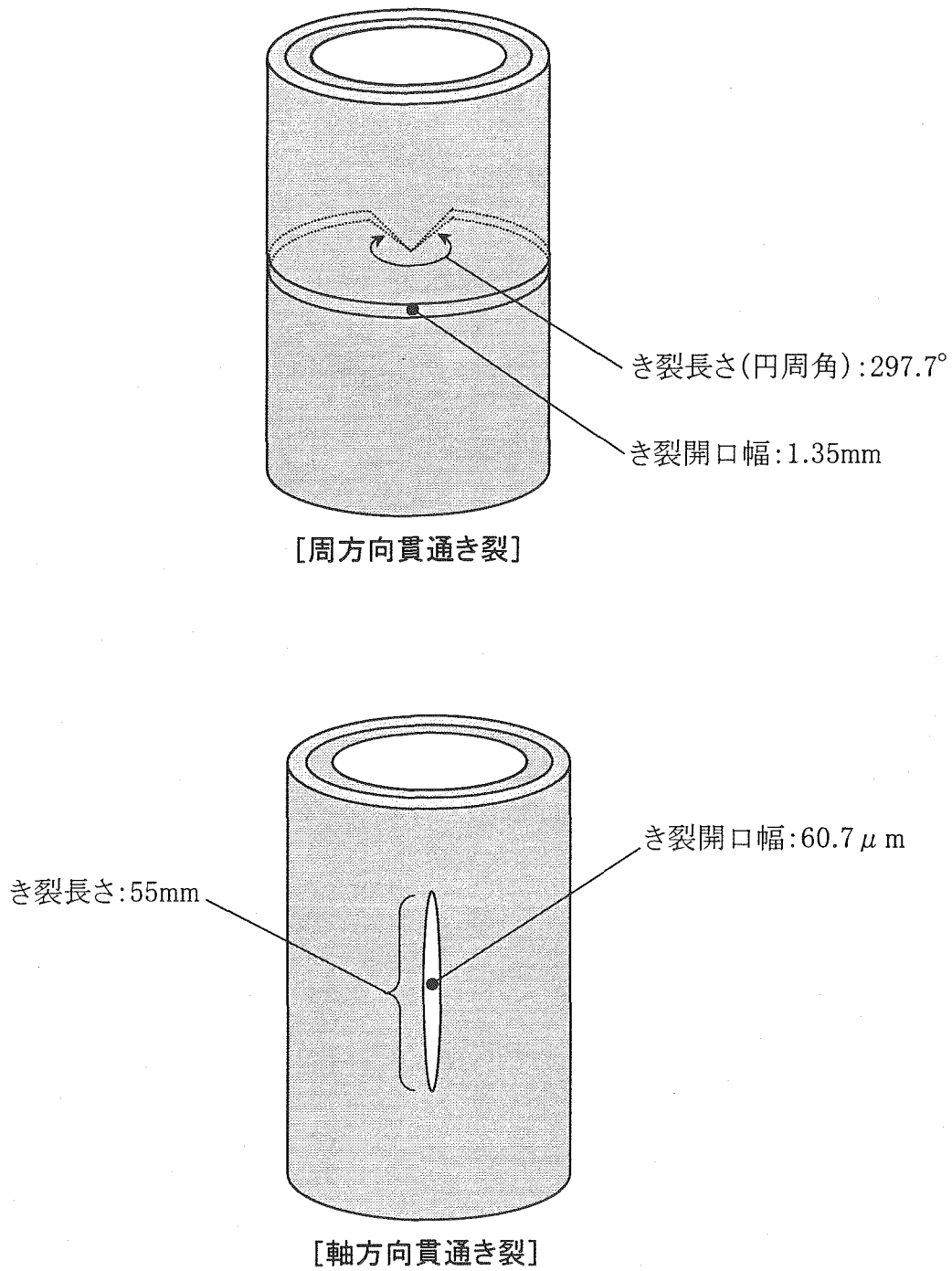


図3.3-2 内圧によって不安定破壊する外管貫通き裂の大きさの限界

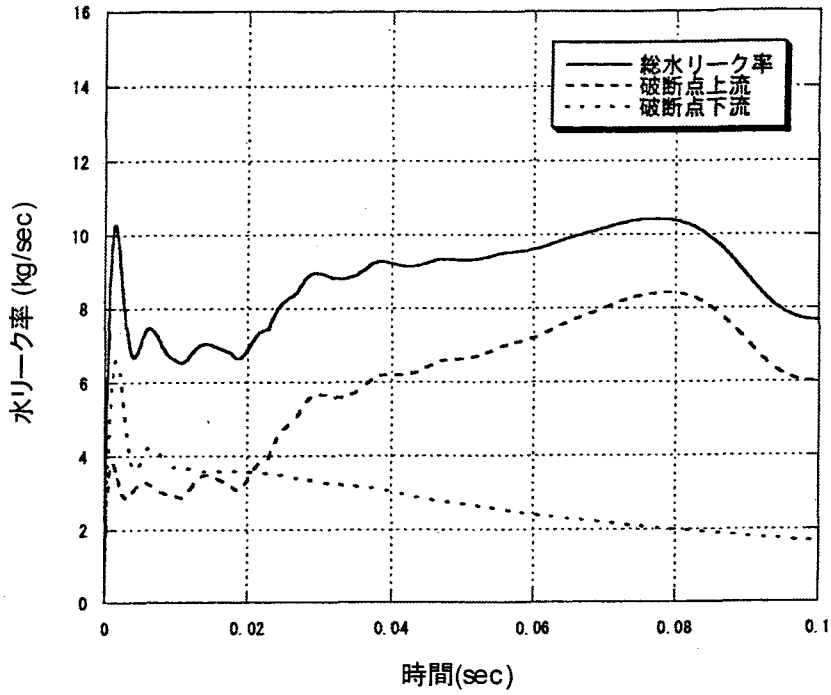


図3.4-1 2重管破断時水リーク率(初期スパイク圧解析用)

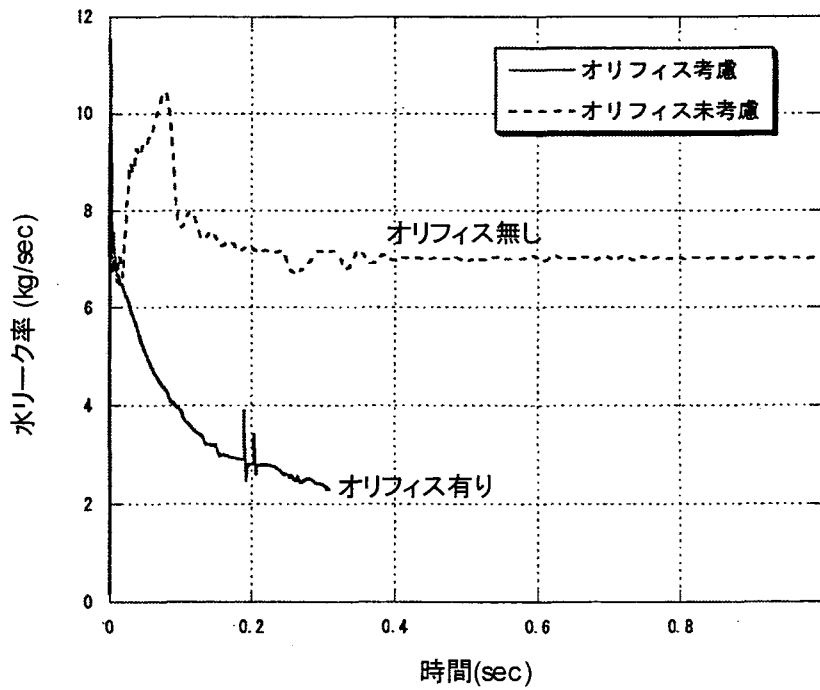


図3.4-2 2重管破断時水リーク率(準定常圧解析用)

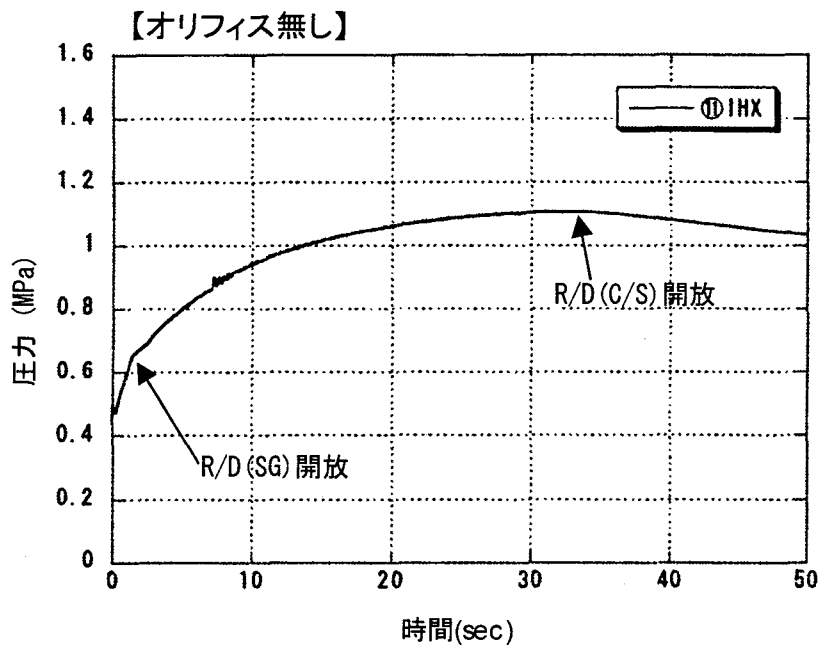
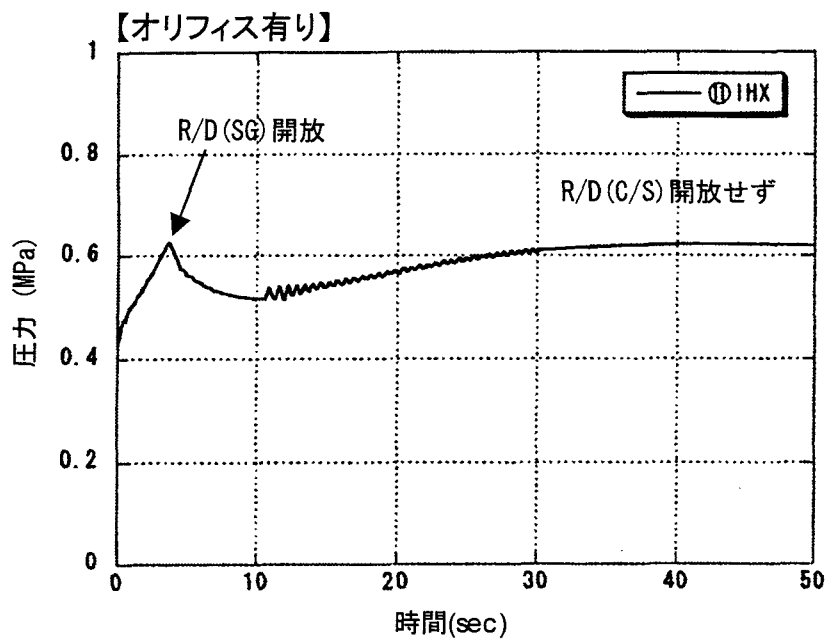


図3.4-3 準定常圧解析結果(IHX)

表3.4-1 2重管破断時圧力波伝播解析結果

2次主冷却系部位	許容圧力 (MPa)	初期スパイク圧 ピーク値 注1) (MPa)	準定常圧 (オリアイス無) ピーク値 (MPa)	準定常圧 (オリアイス有) ピーク値 (MPa)
IHX下部プレナム	(外圧) 4.0	1.47	1.11	0.62
IHXバウンダリベローズ	(外圧) 2.5			
IHX伝熱管	(外圧) 12.0	1.54	1.07	0.58
SG胴部	5.0	2.14	1.1	0.63
ミドルレグ (44B)	9.6	2.06	1.14	0.66
コールドレグ (32B)	13.2	1.89	1.17	0.68
ホットレグ (32B)	11.1	1.75	1.00	0.51

注1) 初期スパイク圧ピーク値についてはポンプ吐出圧を考慮した値

## 4 単管ヘリカルコイル型蒸気発生器

ここでは単管ヘリカルコイル SG において水リーク発生時の伝熱管破損を局限化することを目標とした検討を行う。評価上のポイントは安全性の観点で高温ラブチャー型破損が発生しないこと、SG 財産保護や補修性の観点でプラグすべき伝熱管本数や最大水リーク率をできるだけ少なくすることである。この目標を達成するために水リーク検出計やブローダウン系の高度化を行い、伝熱管の破損状況を解析的に評価した。また、今後検討すべき課題の抽出を行った。

### 4.1 水リーク対策設備の高度化

水リーク対策設備は図 2.2-3 に示すように、水リーク検出計、ブローダウン系、耐水リーク伝熱管から構成されている。ここではそれぞれの構成要素について下記に記載するような高性能化を図り、これらを組み合わせた場合の Na/水反応の抑制効果について評価した。表 4.2-1 にはこの水リーク対策設備の主な仕様を示す。

#### (1) 水リーク検出計

検出計については、応答時間の早い固体電解質水素計と音響計を用いる。固体電解質水素計は微少～中リークを対象とした検出計で、その検出原理は図 4.1-1 に示すように、水リークによって発生した Na 中の水素イオンとセンサー内部の水素ガスの間で発生する起電力を測定することによって行う。同水素計は現在開発中であるが、センサーは小型で Na 中に設置できるため応答時間が早い特長がある。解析ではヘリカルコイル SG の下部ナトリウムプレナム内に設置したものと仮定して評価した。なお、従来型の Ni 膜式水素計は真空チャンバーを有するため大型となり、また Na 主配管からのサンプリング配管が必要になるため、ここでの検出遅れが生じる。

音響計については、基礎試験により 10g/sec の水リークを数秒程度で検出できることが確認されているが、大型 SG への外挿性については未検討のため、ここでは保守的に 500g/sec 以上の水リーク率を対象とし、検出時間は 10 秒とした。

#### (2) 伝熱管

SG 伝熱管についてはその高い熱伝導率から 12Cr 系鋼が候補となっている。そこで、Na・水反応の耐性の観点からこの材料の特長を他の伝熱管材料と比較した。これを図 4.1-2 に示す。同図上は Na/水反応ジェットによる伝熱管の単位時間当たりの損耗量（ウェステージ率）を示したものであり、この値が低いほど損耗されにくいことを示す。12Cr 鋼のウェステージ率は 9Cr 鋼のそれに比較して 20%程度低く Na・水反応ジェットに対して損耗が少ないことを示している<sup>2)</sup>。図 4.1-2 の下のグラフは高温での引っ張り強度を示したものであり、9Cr 鋼のそれと比較して高温ラブチャー型破損に対しても破損に至るまで時間的余裕の大きいことがわかる。

また、伝熱管の破損防止のために肉厚を厚くする方法がある。但し、厚肉化すると

伝熱管の熱通過率が低下するため図 4.1-3 に示すように必要伝熱面積が大きくなる。このため、厚肉による破損伝播抑制効果と物量増加のメリット、デメリットを考慮した検討が必要になる。

### (3) 水ブローダウン系

水ブローダウン系のシステム構成概要を図 4.1-4 に示す。水リークによる Na・水反応を早期に終息させるには SG 内部の保有水をできるだけ速く放出することが望ましい。このためにはサイズの大きい放出バルブ及び放出配管を設置すれば早期放出は可能ではあるが、この放出水を受けるブローダウンタンクに高い圧力が瞬時に加わるため強度的な課題が生じる。そこでブローダウンタンクへの放出弁はサイズの異なる 3 種類の開放弁を並列に設置し、SG 内保有水の減圧進捗状況に応じて口径の小さいバルブから大きいバルブを順次開放することでブロータンクに過大な圧力が生じないようにしつつ、放出時間を短縮する。すなわち、ブロー初期の SG 保有水の圧力の高い状態では小口径バルブにより流量を制限してブロータンクが破損しないようにし放出し、SG 内部が減圧するに伴い他のバルブも開放し、放出量が低下しないようにする。

図 4.1-3 右側に 1 バルブによる通常の水ブローダウン系と 3 バルブを採用した急速ブローダウン系の減圧曲線（解析結果）を比較して示す。後者の方が早期に SG 内の保有水を放出できることがわかる。

## 4.2 性能評価結果

### (1) 解析モデル

4.1 節で述べた水リーク対策設備を対象としてウェステージ型破損及び高温ラブチャラー型破損それぞれについて解析的な評価を行った。

#### i) ウェステージ型破損

ウェステージ型破損の解析モデルの概要を図 4.2-1 に示す。任意の方向に放出した反応ジェットにより、ジェットの領域内に存在する伝熱管が図 4.1-2 に示すウェステージ率に基づいて時間とともに減肉していくものとする。所定の肉厚よりも薄くなった伝熱管はその内圧により水リーク（2次破損）が発生し別の伝熱管を損傷させるモデルとしている。なお、水リーク事故後の破損形態は図 4.2-1 の下図(a)-(c)のように 3 つに分類される。(a)のように開口破損した伝熱管や、(b)のように開口破損していなくても伝熱管の健全性のための必要肉厚が確保されていない伝熱管についてはプラグが必要となる。しかし、(c)に示すようにウェステージによる減肉量が僅かであり、必要肉厚を越えていない場合にはプラグしないものとして評価した。

#### ii) 高温ラブチャラー型破損

高温ラブチャラー型破損の解析モデルの概要を図 4.2-2 に示す。Na・水反応による伝熱管の周囲温度を実験結果に基づき保守的に 1180℃と仮定し、反応領域から伝熱管側

への熱伝達、伝熱管の熱伝導及び水側の冷却効果を考慮して伝熱管の温度を求める。水側熱伝達率については入熱による水の相変化も考慮する。そしてこの温度における伝熱管材料の強度と水側内圧から延性破損及びクリープ破損発生の有無を評価する。

延性破損に対しては薄肉円筒モデルを用い、内圧による管壁応力が伝熱管温度から求められる高温引っ張り強さを越えた時点で破損するものとしている。クリープ破損に対してはクリープ損傷式から得られるその時点の応力・温度における破断時間  $t_R(\text{sec})$  とその応力・温度の作用時間  $\Delta \tau(\text{sec})$  の比 ( $\Delta \tau/t_R$ ) の総和 (累積損傷和) が 1 を越えた時点で破損するものとしている。

高温ラプチャー型破損はこれまでの要素試験から水リーク率が 500g/sec 程度以上で発生するため、ここでは音響計によって 10 秒で検出されるものとして解析している。また保守的な評価を行うため高温強度については 9Cr 鋼の物性値を用い、音響計で検出される前での 10 秒間はウェステージによって減肉された状態を仮定している。

なお、水ブローダウンについては、通常の 1 バルブ方式と 3 つのバルブを順次開放する急速ブローダウンの両者を比較することとした。

## (2) 解析結果

### i) ウェステージ型破損

初期水リーク率を解析パラメータとして、事象が収束するまでの間の最大水リーク率、プラグ伝熱管本数及び開口破損伝熱管本数に着目した。プラグ伝熱管本数は図 4.2-1 の (a) 及び (b) の破損状態の伝熱管を、また開口伝熱管本数は同図 (a) の破損状態の伝熱管の本数を示す。

最大水リーク率については Na・水反応生成物の量の目安となるものであり事故後の Na クリーナップの観点で重要である。プラグ本数は SG の補修性の観点で、また開口伝熱管本数は 2 次破損を防止し、破損領域を限定するために着目するものである。

前節で述べた水リーク対策設備の高度化に対する個々の方策を組み合わせることによって、飛躍的に性能を向上させることができると考えられるが、最初にそれぞれの方策を個別に採用した場合の効果についての検討を行うこととした。図 4.2-3～図 4.2-6 は順に、固体電解質水素計、急速水ブローダウン系、厚肉伝熱管及び 12Cr 鋼伝熱管を採用した場合の効果を従来型の水リーク対策設備と比較したものである。いずれの方策についても、程度の差や効果のある水リーク領域は異なるものの Na・水反応事象の影響を小さくすることが確認できる。

なお、図 4.2-5 に示す伝熱管の厚肉化については、破損伝播抑制効果と過度な SG 物量増加を防ぐ観点からリファレンスの 3.3mm 肉厚に対して 0.3mm 厚肉化した 3.6mm 肉厚を採用することとした。

次に以上の方策を全て組み合わせた場合の効果について解析を行い、この結果を図 4.2-7～図 4.2-9 に示す。図 4.2-7 の最大水リーク率については初期水リーク率 0.1g/sec を除いて水リーク率は増加すること無く事象は収束している。図 4.2-8 は開口破損した伝熱管本数を示しているが、高度化システムにより 2 次破損は防止されていること



が分かる。図 4.2-9 は事故後の補修においてプラグすべき伝熱管本数を示したグラフであるが、大幅に減らすことができ、特に比較的発生頻度が高いと考えられる 10g/sec 以下の水リーク率に対しては、数本以下と十分に抑制されていることがわかる。

一例として初期水リーク率が 10g/sec の場合の事象推移を従来型と高度化水リーク対策設備において比較した結果を図 4.2-10 に示す。両者とも水リーク発生後約 30 秒で検出されブローダウンが開始している。高度化水リーク対策設備（右図）は SG 内部の保有水が早期に減圧されるため水リーク率も短時間で減少し、2次破損は発生していない。ところが従来型水リーク対策設備（左図）では初期リークが発生した伝熱管からの水リークは 100 秒を越えてもまだ継続しており、さらにブローダウン中に2次破損が2カ所発生し、最大水リーク率も約 200g/sec に達している。これらの最終的な伝熱管の破損状況を示したものが図 4.2-11 である。実線枠内が開口破損した伝熱管、破線枠内が開口破損には至らなかったものの、ウェステージによる減肉量が大いいためプラグする必要のある伝熱管を示している。従来型と高度化水リーク対策設備による破損状況を比較すると後者の方が Na/水反応による破損領域がかなり局限化されていることがわかる。

以上の解析結果から、固体電解質水素計や急速水ブローダウンシステム等の組み合わせにより大型 SG においても水リーク時の影響を局限化できる可能性のあることが分かった。

## ii) 高温ラプチャー型破損

図 4.2-12 と図 4.2-13 にそれぞれ1バルブによる通常ブロー（100秒ブロー）と3急速ブロー（30秒ブロー）の高温ラプチャー解析結果を示す。グラフでは10秒で水リークによる高温領域が伝熱管周囲に発生し、10秒後の0秒で検出しブローが開始していることを示している。

延性破損に対しては、高温領域の形成とともに伝熱管温度が急速に上昇しこれに伴って伝熱管強度も低下していく様子が分かる。一方で水ブローによって伝熱管の内圧も0秒以降減圧している。そして内圧による相当応力は伝熱管強さを越えることはなく、両者ともに高温ラプチャーが発生していないことが分かる。

累積損傷和に着目すると両方とも約 0.3 以下であり、1に達することはなくクリープ破損による高温ラプチャーは発生していない。急速ブローと比較して通常ブローの累積損傷和がそれほど大きくならないのは、ブロー開始後10数秒で水側圧力が4MPa程度まで降下すること及びブロー時の管内流量が大きく伝熱管の冷却効果によりその温度上昇が緩和されるからである。

以上の解析結果から音響計によって10秒以下で検出が行われれば通常ブロー及び急速ブローともに高温ラプチャーは防止できることが分かった。

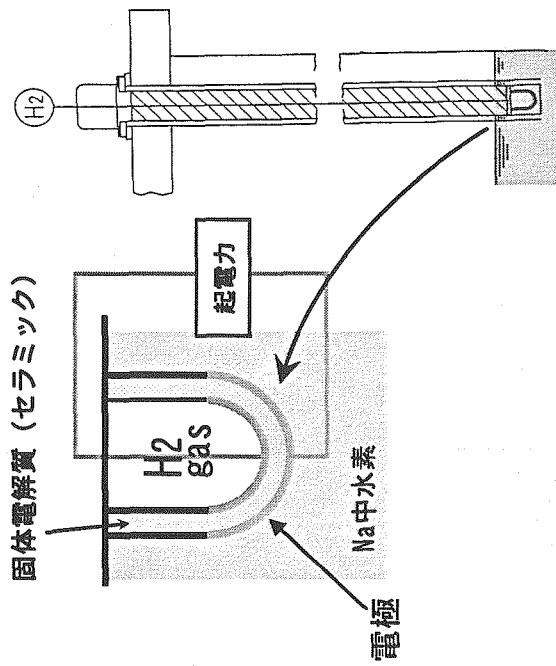
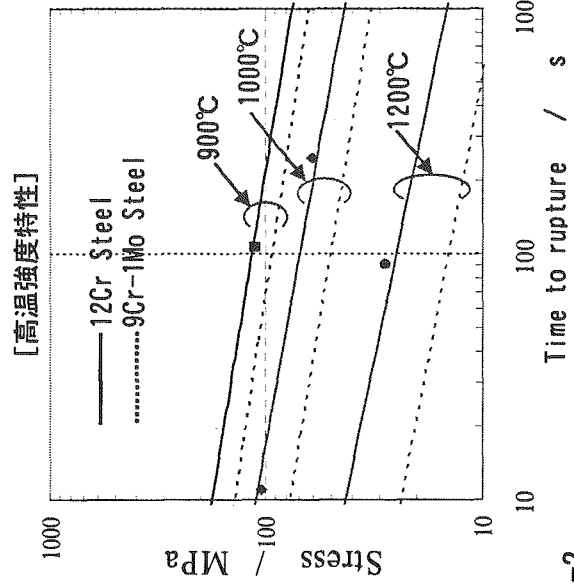
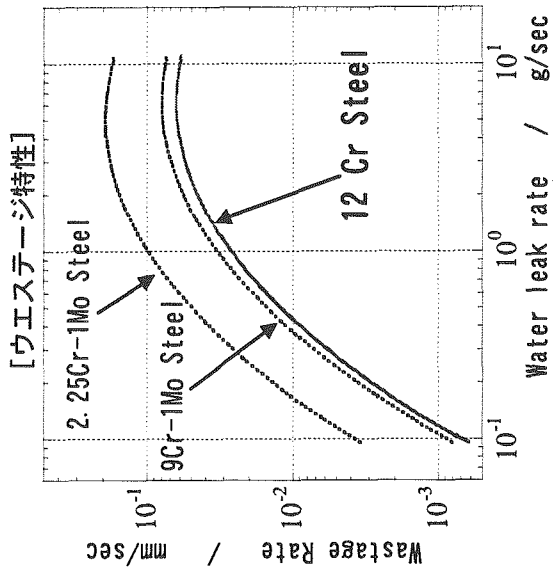


図 4.1-1 固体電解質水素計

図 4.1-2  
12Cr系鋼伝熱管材料の耐ナトリウム/水反応特性 (試験結果)

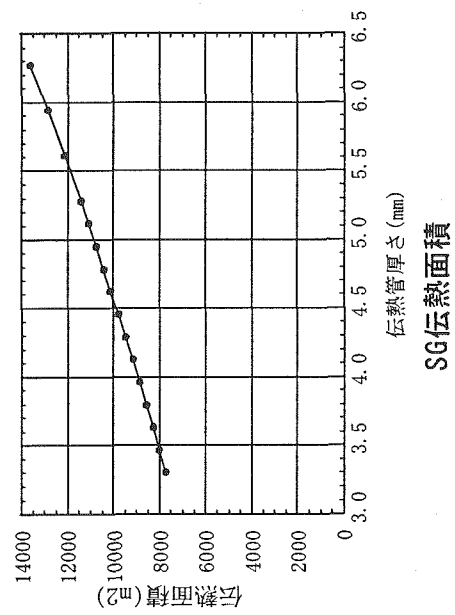
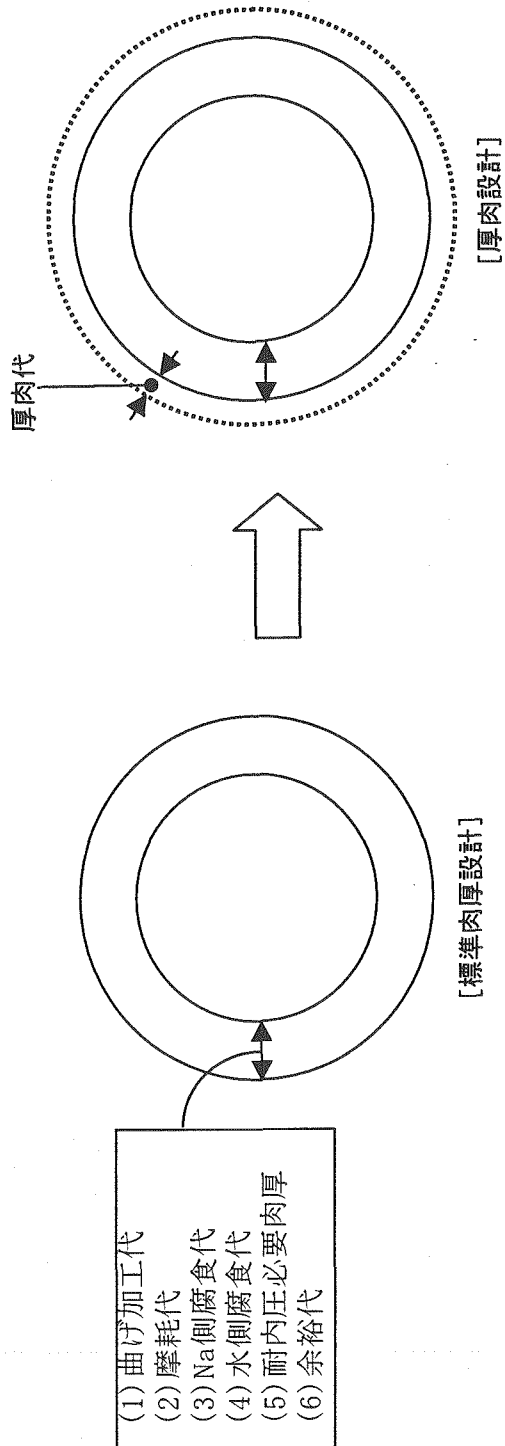


図4.1-3 伝熱管の厚肉化と検出時間遅れ

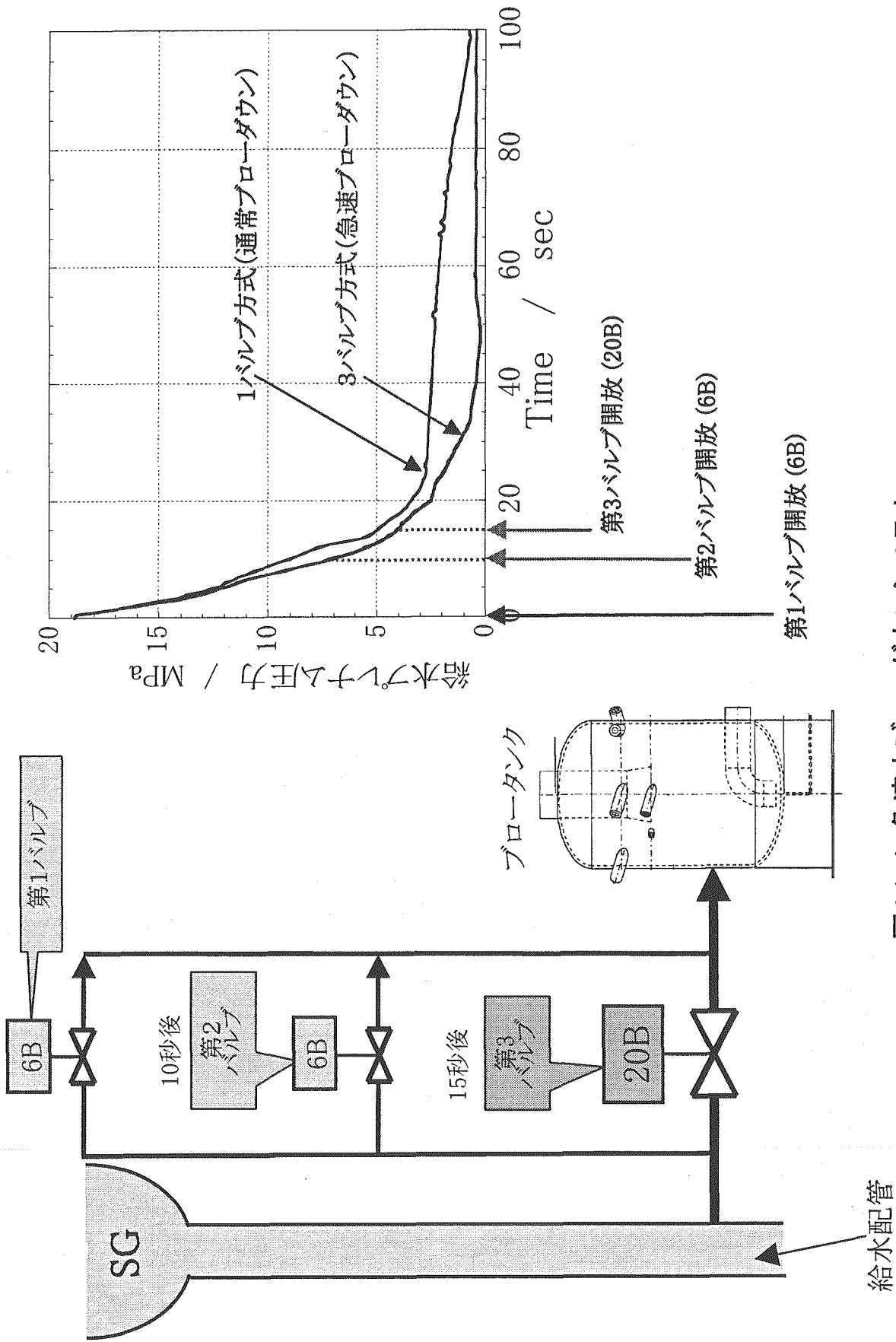


図4.1-4 急速水ブローダウンシステム

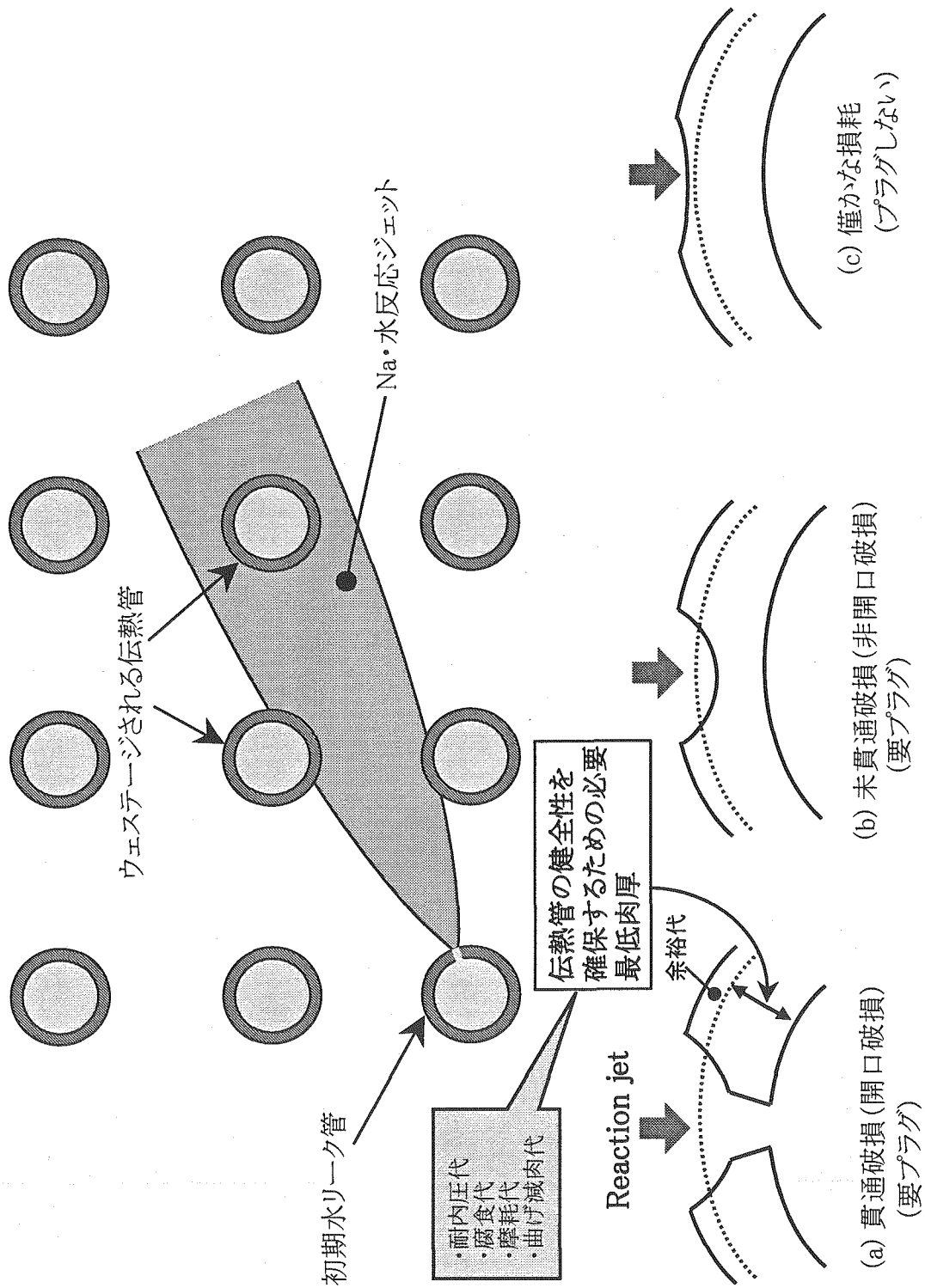


図4.2-1 ウエスティングによる伝熱管破損形態

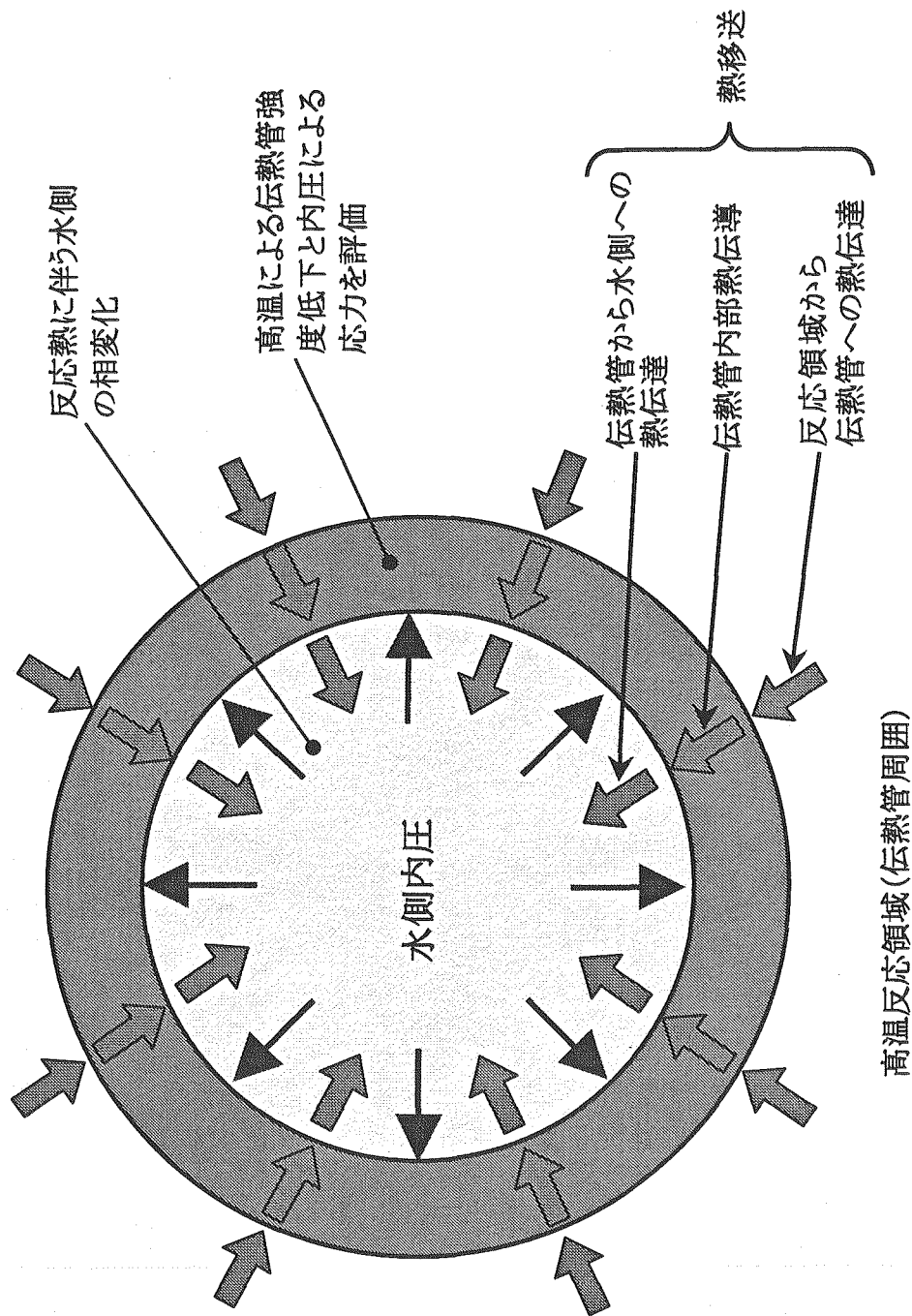


図4.2-2 高温ラプチャモデルによる伝熱管破損形態

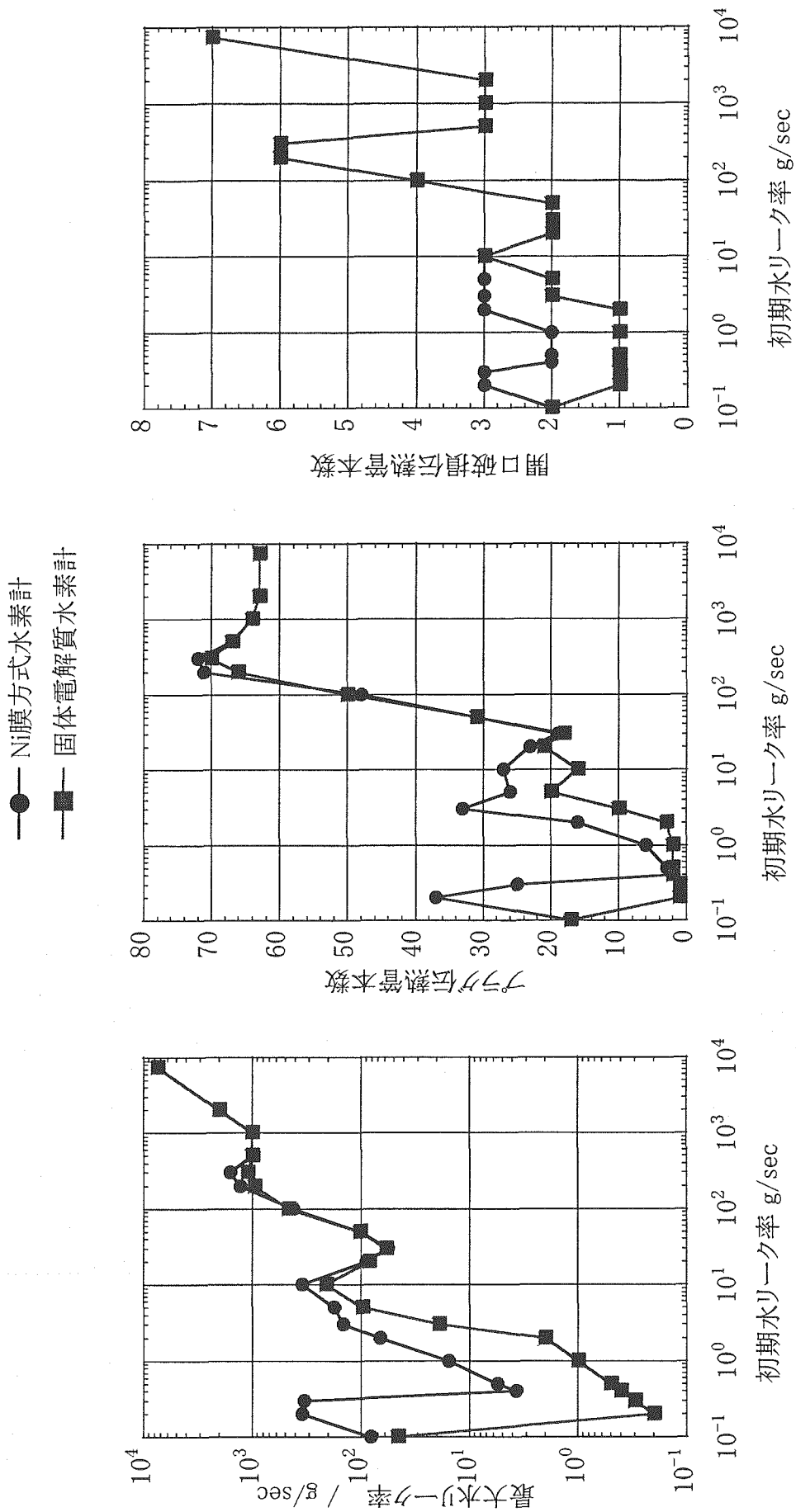


図4.2-3 伝熱管破壊伝播抑制効果(固体電解質水素計)

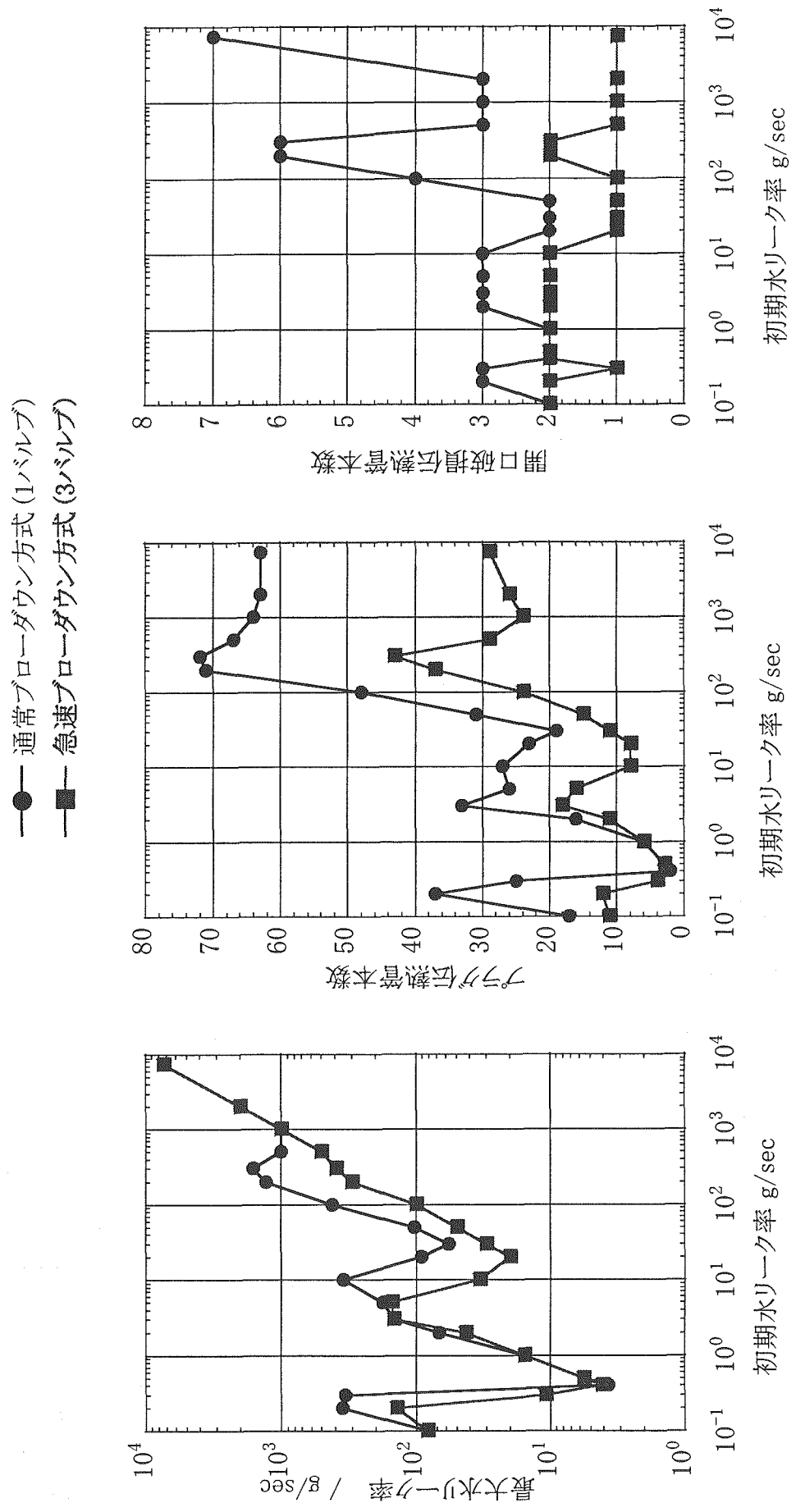


図4.2-4 伝熱管破損伝播抑制効果(急速ブローダウンシステム)



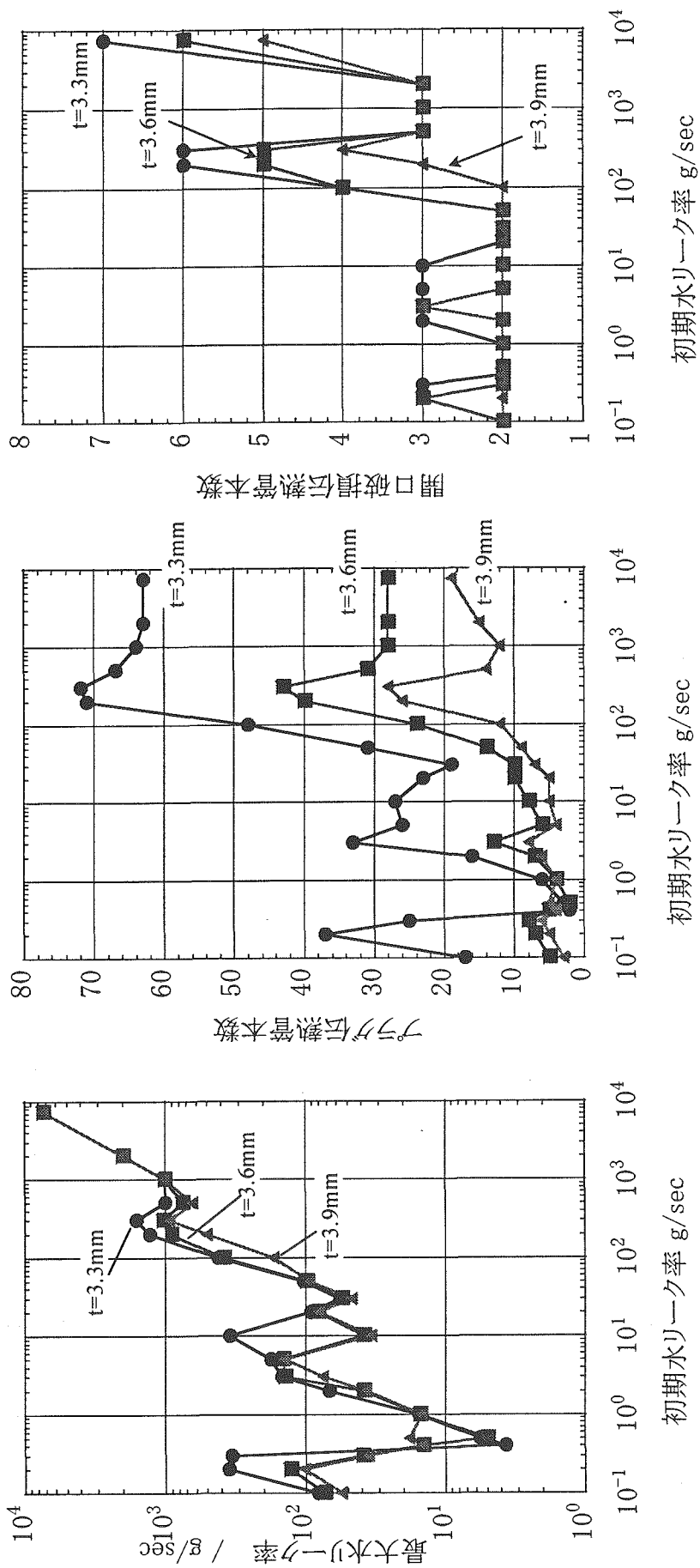


図4.2-5 伝熱管破損伝播抑制効果(伝熱管厚肉化)

● 9Cr Steel  
 ■ 12Cr Steel

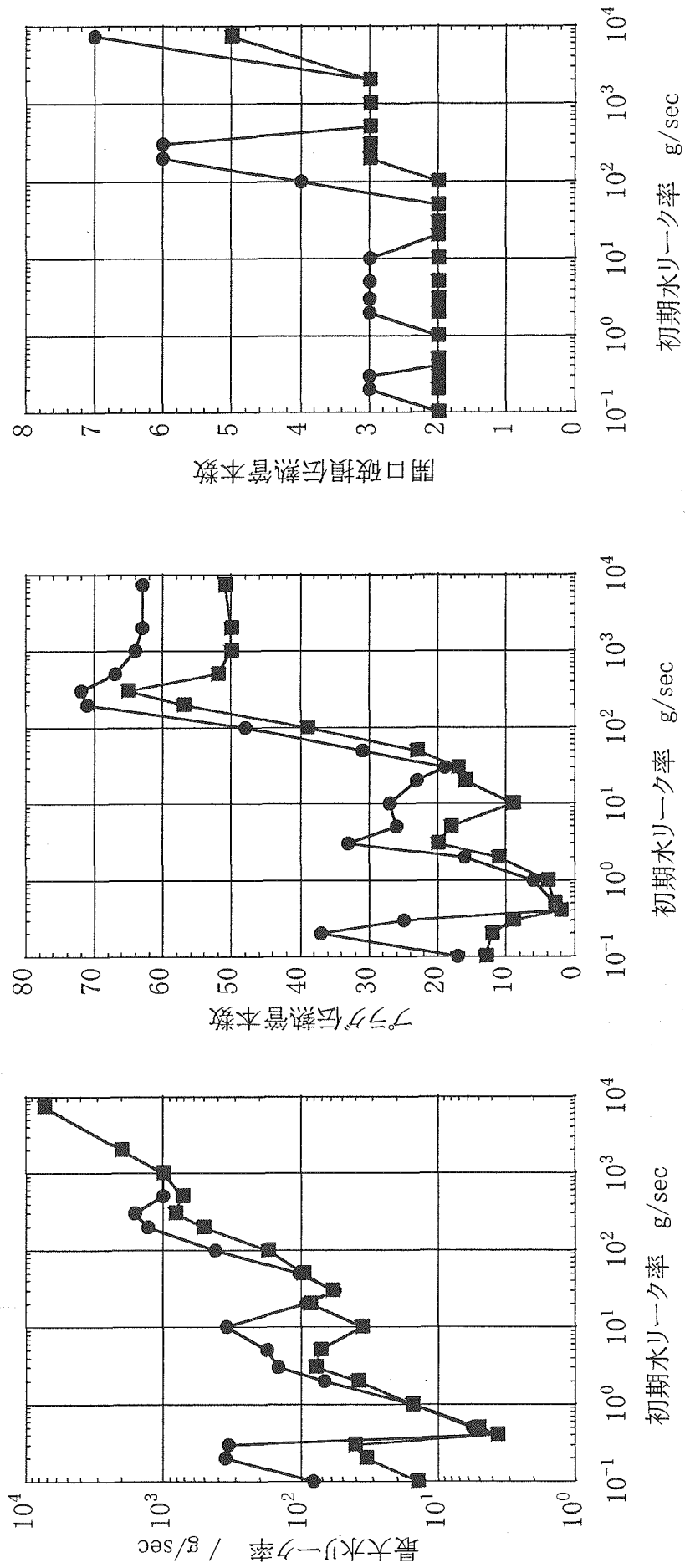


図4.2-6 伝熱管破損伝播抑制効果(12Cr鋼伝熱管)

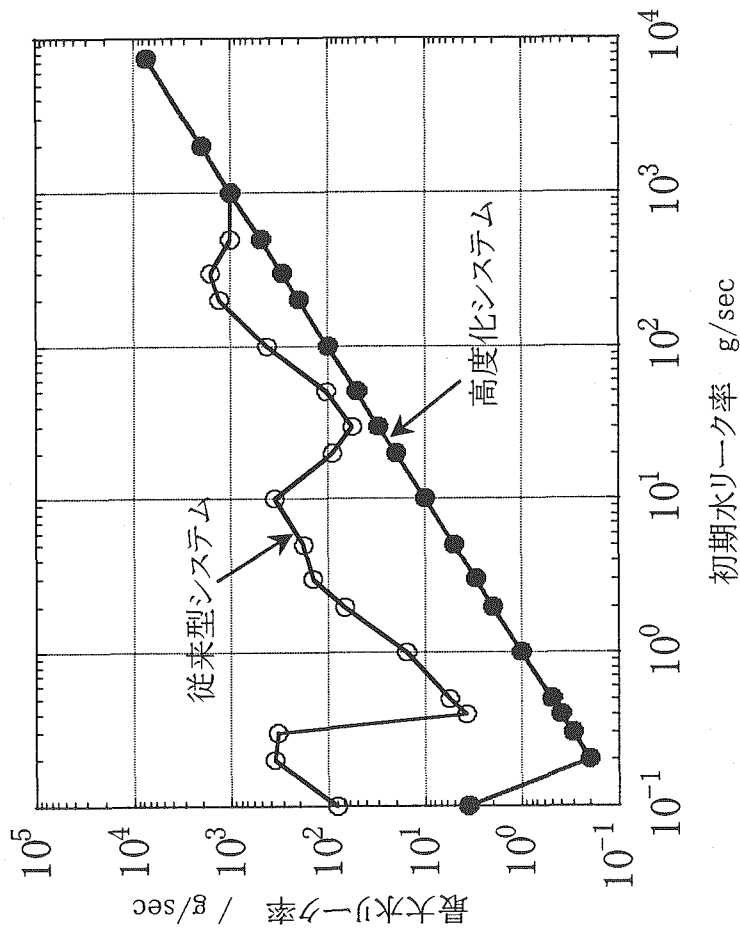


図4.2-7 高度化システムと従来型システムの最大水リーク率の比較

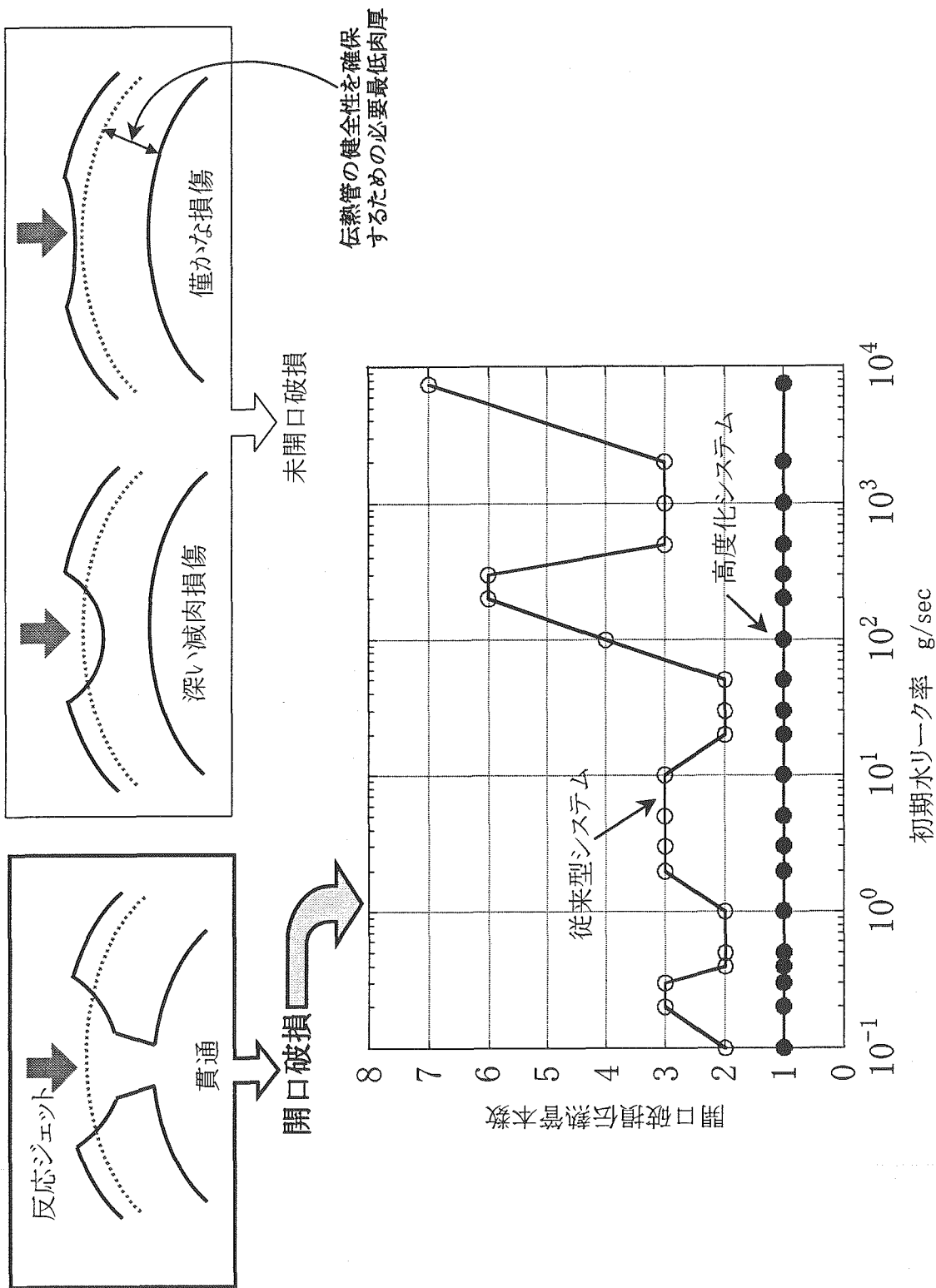


図4.2-8 高度化システムと従来型システムの開口破損伝熱管破損本数の比較

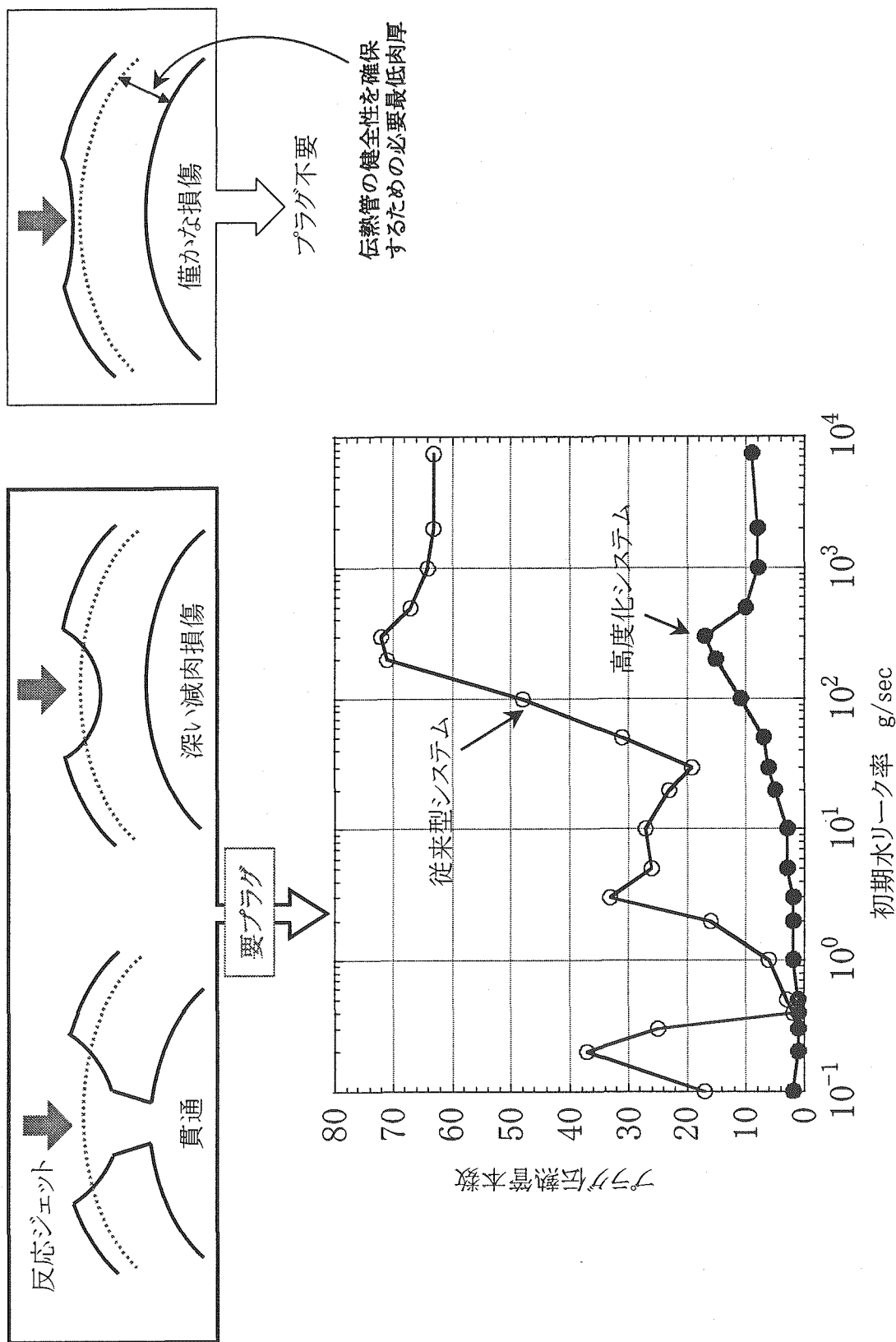


図4.2-9 高度化システムと従来型システムのプラグ伝熱管本数の比較

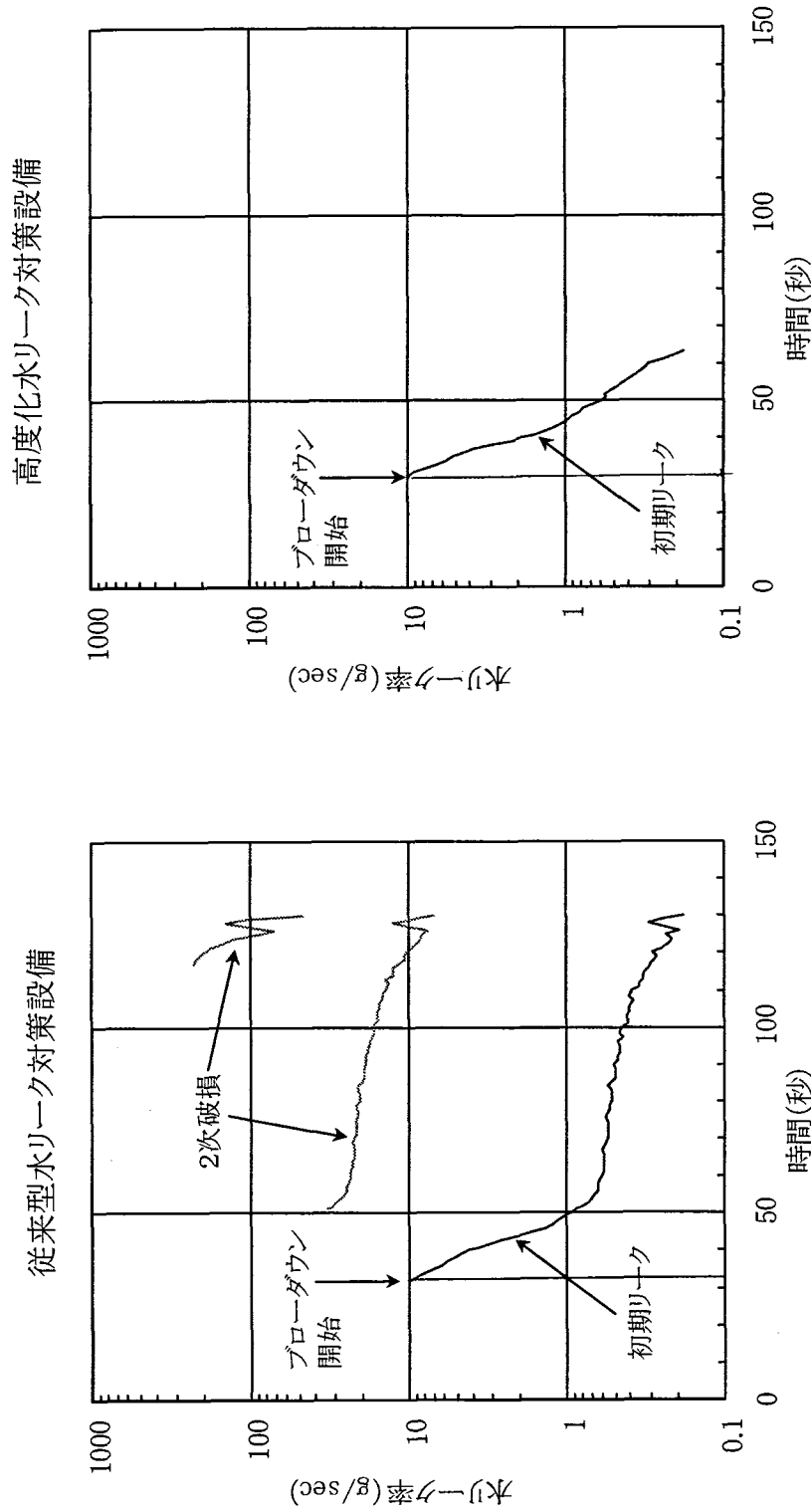
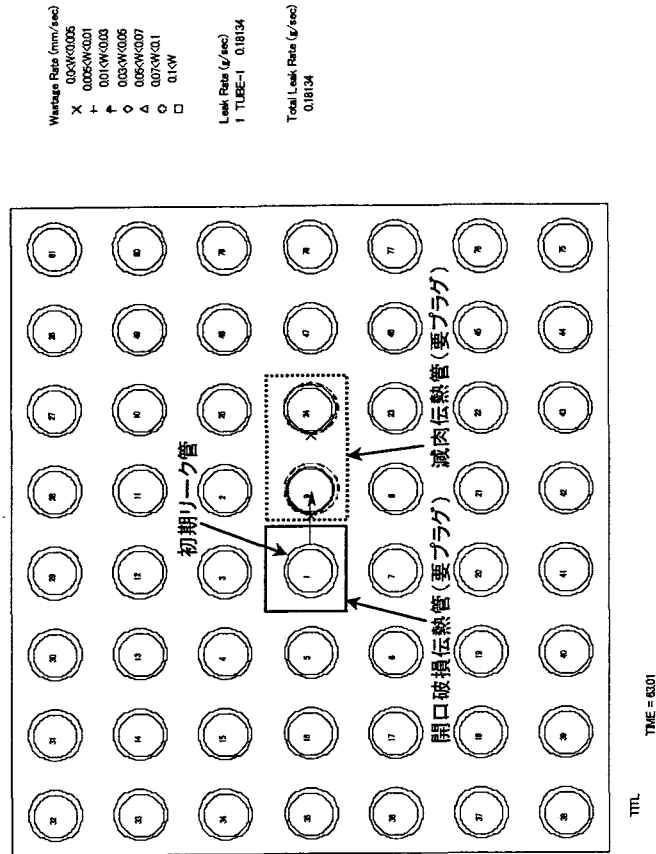


図4.2-10 高度化システムと従来型システムの水リーク率推移

[高度化水リーク対策設備]



[従来型水リーク対策設備]

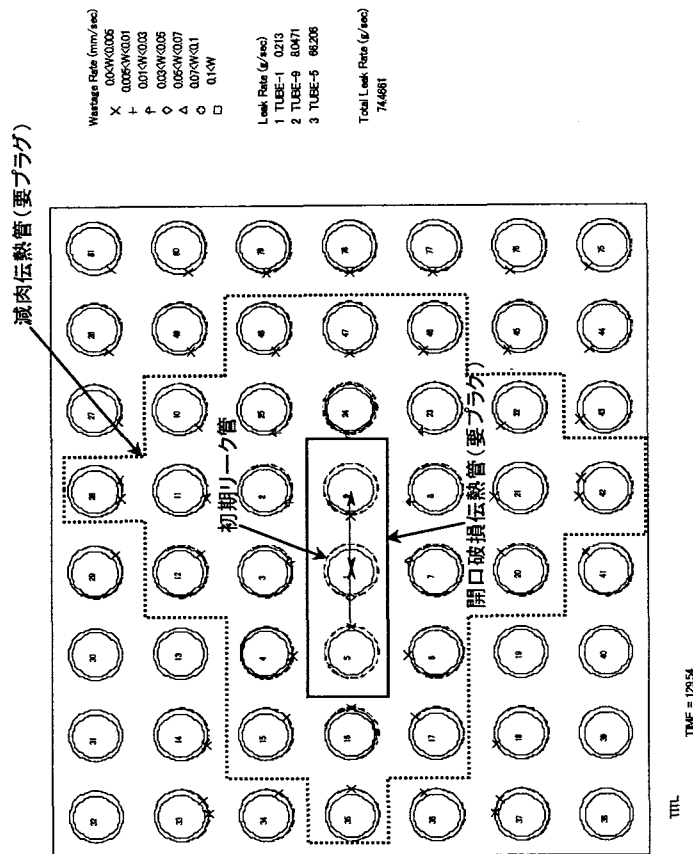


図4.2-11 伝熱管破損状況図

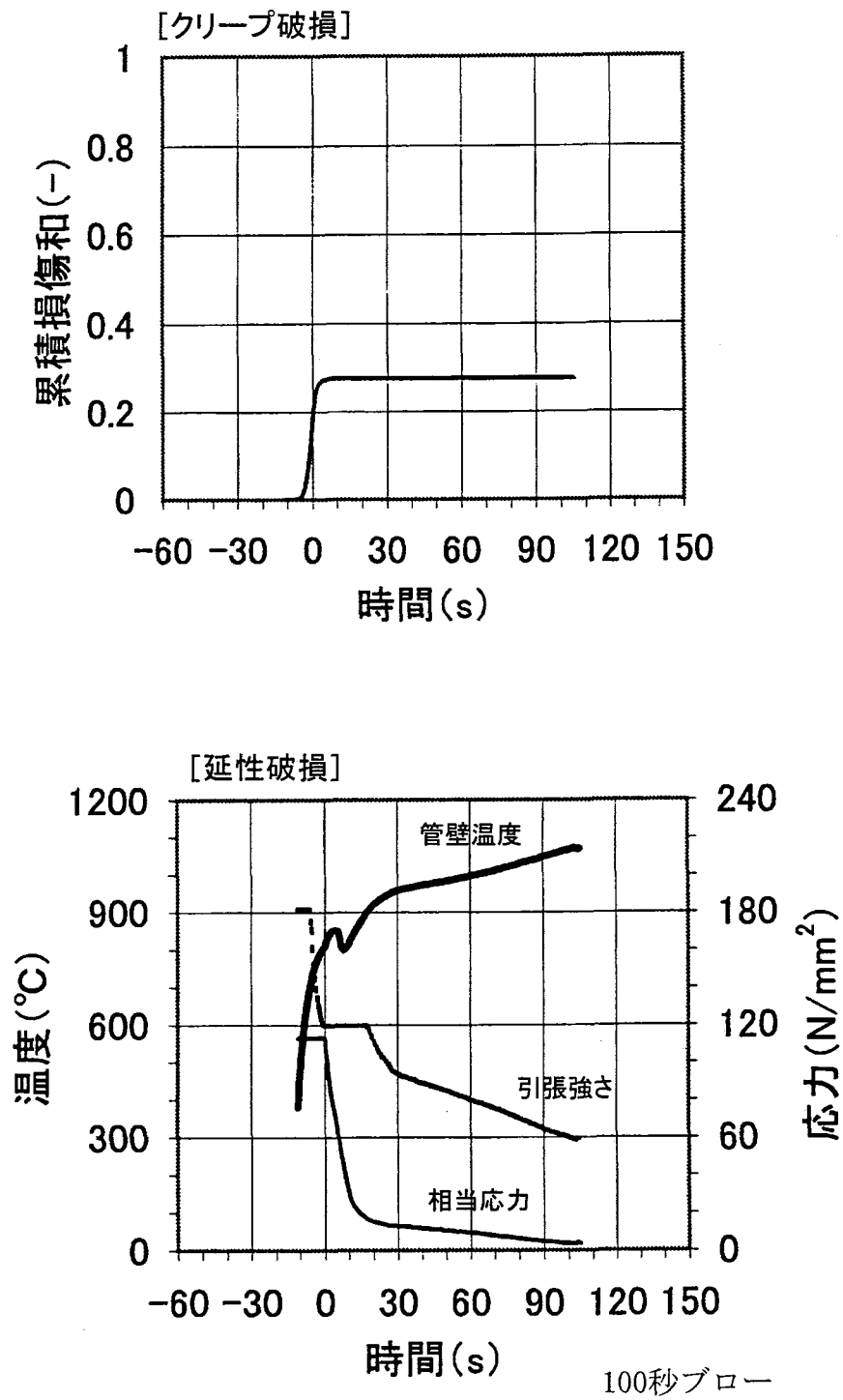


図4.2-12 高温ラプチャー解析結果  
(通常ブローダウンシステム)



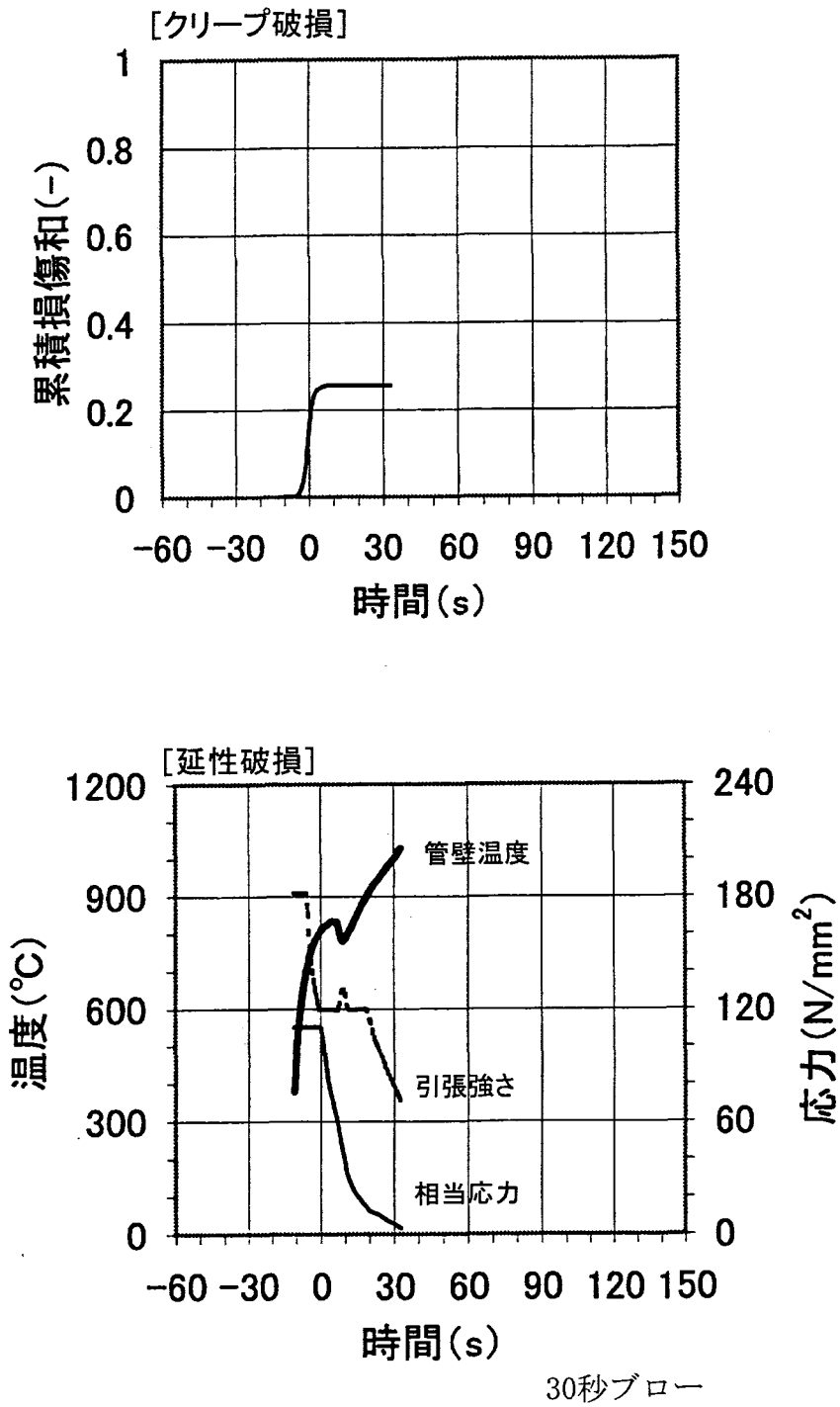


図4.2-13 高温ラプチャー解析結果  
(3バルブ急速ブローダウンシステム)

表4.2-1 水リーク対策設備仕様

	従来型システム	高度化システム
水リーク検出系	Ni膜式水素計 30ppb/10min (濃度上昇率) (サンプリング配管での遅れ時間)	固体電解質水素計 30ppb/10min (濃度上昇率)
水ブローダウン系	1バルブ・ブロー (100秒ブロー) (通常ブローダウン)	3バルブ・ブロー (30秒ブロー) (急速ブローダウン)
伝熱管	9Cr鋼 3.3mmt	12Cr鋼 (0.8×9Cr鋼ウェステージ率) 3.6mmt

## 5 結言

ナトリウム冷却FBRのSGの第1候補である直管2重管型SG及び第2候補である単管ヘリカルコイル型SGについて、それぞれ内外管同時破損を防止する方策及びNa/水反応の影響範囲を局限化する水リーク対策設備の検討・評価を行った。

直管2重管SGについては、定検時の2重管の超音波検査(UT)性能や内外管の密着度による水リーク率制限などによってNa・水反応を防止することを検討した。ISI基礎試験、欠陥進展解析及び過去の試験データによれば、本2重管SGでNa/水反応防止を否定する要因は見あたらなかった。但し、UTによる2重管き裂検出性能やき裂進展速度の詳細については現時点では不明確な部分もあり、今後の要素試験や詳細解析の結果を踏まえて、内外管同時破損防止方策の妥当性について再評価する予定である。

一方、単管ヘリカルコイル型SGについては、SGが大型化しておりリーク検出の遅れによって破損伝播が懸念されていたが、検出系、水ブロー系などの水リーク対策設備を高度化することによって、破損伝播領域を十分に極小化できることがわかった。そして、このためには固体電解質水素計や音響計の様な応答の早い検出計が必須となる。またある程度伝熱管の厚肉化を行う必要もあり、このためSGは更に大型化し、製作や輸送上の課題が生じる可能性がある。今後は検出計の開発状況やSG製作性も考慮した上で、SGのサイズの妥当性も検討しておく必要があると考えられる。

## 謝辞

2重伝熱管の UT による検査性や不安定破壊に関する検討については、それぞれ次世代機器研究 Gr 荒邦章グループリーダー、構造信頼性研究 Gr の笠原直人グループリーダーによるご協力を頂いた。また、単管ヘリカルコイル SG におけるウェステージ解析については NESI (株) 井川健一氏にご協力いただいた。

よってこの場を借りて感謝の意を表す。

**参考文献**

- 1) 島川佳朗 他, "Na 冷却大型炉設計研究" JNC TY9400 2002-007 (2002)
- 2) 下山一仁 "12Cr 鋼伝熱管材の耐ウェステージ特性" ・小リーク・ナトリウム・水反応試験・ JNC TN9410 2004-009
- 3) 近澤佳隆 他, "安全系局限化に関する検討：設備共用化によるプラント安全性、運用への影響評価 JNC TN9400 2002-068