

ナトリウム冷却炉の  
検査・補修技術に関する検討  
(研究報告)

2002年12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](mailto: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)  
2002

## ナトリウム冷却炉の検査・補修技術に関する検討（研究報告）

木曾原 直之<sup>(\*)1</sup>、内田 昌人<sup>(\*)1</sup>、此村 守<sup>(\*)1</sup>、笠井 重夫<sup>(\*)5</sup>、  
惣万 芳人<sup>(\*)1</sup>、島川 佳郎<sup>(\*)5</sup>、堀 徹<sup>(\*)1</sup>、近澤 佳隆<sup>(\*)1</sup>、宮原 信哉<sup>(\*)2</sup>、  
浜田 広次<sup>(\*)2</sup>、荒 邦章<sup>(\*)3</sup>、林田 均<sup>(\*)3</sup>、吉田 英一<sup>(\*)4</sup>

### 要 旨

FBR の冷却材であるナトリウムは、伝熱性能や材料との共存性などの観点で様々な利点を有しているが、化学的に活性で水や空気と反応しやすいことや、光学的に不透明であることから Na 機器の検査が困難であるなど Na 固有の課題がある。この様な Na の欠点は実用化プラントにおいても、安全性や稼働率などの経済性に影響を及ぼす可能性があるため、これらの課題が顕在化しないように対策を講じておかなければならない。

したがって、蒸気発生器(SG)伝熱管破損による Na/水反応、Na 機器の検査・補修 (ISI&R) 及び配管・機器からの Na 漏えいの 3 つに着目し、実用化炉の観点で検討を行うワーキング・グループを発足させた。

SG 水リークについては、経済性（財産保護や稼働率）の観点で破損伝播に対する取り組み方針の考え方を整理した。この結果 SG が大型化していることから水リーク事故から破損領域を局限化し、SG 伝熱管を保護するための方策を採用した。予備的な解析の結果、リーク検出系などの水リーク対策設備を高度化することで大型 SG においても破損伝播を抑制できる見通しが得られた。今後は、詳細な破損伝播解析による評価や水リーク対策設備高度化方策の技術的実現性の検討を行う予定である。

ISI&R については、実用化炉の検査・補修の考え方について先行炉のそれと比較し、整理を行った。また、Na ドレンなしでの検査・補修の可能性についても検討し、開発要素が多いことが明らかになった。今後は実用化炉としての特徴を踏まえて検査・補修の考え方を検討し、その上で必要となる技術の達成方策を明らかにする。

Na 漏えいについては、1 次系及び 2 次系機器からの Na 漏えい事故に対する取り組み方針について考え方をまとめた。そして、稼働率低下防止の観点から Na 漏えい後の早期補修の具体的方法について 2 次系 Na 主配管を対象とし、2 重壁構造の特殊性を踏まえた検討を行い、課題を摘出した。今後は先行炉の配管補修も参考とし、漏えい箇所に応じたより詳細な補修方法を検討する必要がある。さらに ACS 伝熱管やポンプなどの機器からの漏えい、および 1 次系 Na 漏えい事故の対応など引き続いて検討をしていく。

\*1 FBR システム Gr  
\*4 新技術開発試験 Gr

\*2 熱化学安全試験 Gr  
\*5 元)FBR システム Gr

\*3 次世代機器研究 Gr

## The Report of Inspection and Repair Technology of Sodium Cooled Reactors

Naoyuki KISOHARA<sup>(\*)1</sup> Masato UCHITA<sup>(\*)1</sup> Mamoru KONOMURA<sup>(\*)1</sup> Shigeo KASAI<sup>(\*)5</sup>  
Yoshito SOMAN<sup>(\*)1</sup> Yoshiro SHIMAKAWA<sup>(\*)5</sup> Toru HORI<sup>(\*)1</sup> Yoshitaka TIKAZAWA<sup>(\*)1</sup>  
Shinya MIYAHARA<sup>(\*)2</sup> Hirotugu HAMADA<sup>(\*)2</sup> Kuniaki ARA<sup>(\*)3</sup> Hitoshi HAYASHIDA<sup>(\*)3</sup>  
Eiichi YOSHIDA<sup>(\*)4</sup>

### Abstract

Sodium is the most promising candidate of an FBR coolant because of its excellent properties such as high thermal conductivity. Whereas, sodium reacts with water/air and its opaqueness makes it difficult to inspect sodium components. These weaknesses of sodium affect not only plant safety but also plant availability (economy). To overcome these sodium weak points, the appropriate countermeasure must be adopted to commercialized FBR plants.

This report describes the working group activities for sodium/water reaction of steam generators (SG), in-service inspection for sodium components and sodium leak due to sodium components boundary failure. The prospect of each countermeasure is discussed in the viewpoint of the commercialized FBR plants.

#### i) Sodium/water reaction

The principle of the countermeasure for sodium/water reaction accidents was organized in the viewpoint of economy (the investment of SG and the plant availability). The countermeasures to restrain failure propagation were investigated for a large-sized SG. Preliminary analysis revealed the possibility of minimizing tubes failure propagation by improving the leak detection system and the blow down system. Detailed failure propagation analysis will be required and the early water leak detection system and rapid blow down system must be evaluated to realize its performance.

#### ii) In-service inspection (ISI&R)

The viewpoint of the commercialized plant's ISI&R was organized by comparing with the prototype reactor's ISI&R method. We also investigated short-term ISI&R methods without sodium draining to prevent the degrading of the plant availability, however, it is difficult to realize them with the present technology. Hereafter, the ISI&R of the commercialized plants must be defined by considering its characteristics.

#### iii) Sodium leak from the components

This report organized the basic countermeasure policy for primary and secondary sodium leak accidents. Double-wall structure of sodium piping was considered, and short-term repair methods were investigated for secondary sodium leak from the main piping. The application and issue of the repair methods were discussed for commercialized plants. More specific repair sequence must be developed for each sodium leak location by referring to other plants' repair experience. Furthermore, the repair methods of components such as a pump must be investigated.

---

\*1 FBR system engineering group

\*2) Thermo chemistry safety engineering group

\*3 Innovative component system research group

\*4) New technology development group

\*5 Former) FBR system designing group

## ナトリウム冷却炉の検査・補修技術に関する検討（目次）

1 緒言	1
2 SG 水リーク対策に関する検討	3
2.1 SG 水リーク対策への取り組み方針	3
(1) 安全性と経済性の考え方	3
(2) 経済性の観点での分類	3
2.2 評価手法	5
(1) SafetyMap	5
(2) 破損伝播抑制方策	5
(3) 評価フロー	5
(4) コスト評価モデル	6
2.3 対策設備の選定と水リーク解析	7
(1) 解析条件	7
(2) 解析結果	7
2.4 今後の方針	9
3 ISI&R に関する検討	31
3.1 ISI に対する設計構想	31
(1) 原子炉構造	31
(2) 1 次主冷却系	31
(3) 2 次主冷却系	31
3.2 炉内構造物の補修に対する設計構想	32
3.3 検査・補修計画	32
(1) ISI 計画	32
(2) 補修計画	32
3.4 現状の検査・補修技術の評価	33
3.5 ISI&R 検討のまとめ	33
4 Na 漏えい対策に関する検討	55
4.1 Na 漏えい対策への取組方針	55
(1) 安全性と経済性の考え方	55
(2) Na 漏えいに対する取組方針	55
4.2 漏えい対策構造（2 次系主配管）	57
4.3 早期補修の着眼点と方策	58
(1) 設備対策上の着眼点	58
(2) 補修方策	59
4.4 補修手順	60
4.5 Na 漏えい対策検討のまとめ	62
5 結言	102

## [図リスト]

図 1-1 Na の弱点（化学的活性）対策に関する取り組み	2
図 2. 1-1 実用化炉 SG の Na・水反応に対する安全性と経済性の取り組み	12
図 2. 2-1 Safety Map	14
図 2. 2-2 破損伝播抑制方策	15
図 2. 2-3 破損伝播抑制効果と実現性の関係	16
図 2. 2-4 SG/Na・水反応対策評価手順	17
図 2. 2-5 SG の Na/水反応を考慮したコスト評価モデル	18
図 2. 2-6 SG 水リークを考慮したコスト計算値	19
図 2. 3-1(1) Safety Map (リファレンス)	20
図 2. 3-1(2) " (水素計高度化：固定法 BG4%)	21
図 2. 3-1(3) " (水素計高度化：ROR 法 15ppb/10min)	22
図 2. 3-1(4) " (30 秒ブロー)	23
図 2. 3-1(5) " (耐ウェステージ伝熱管)	24
図 2. 3-1(6) " (厚肉伝熱管)	25
図 2. 3-1(7) " (6 loop)	26
図 2. 3-1(8) " (酸素計)	27
図 2. 3-1(9) " (組み合わせ)	28
図 2. 4-1 水リーク設備の効果的対策	29
図 2. 4-2 ウェステージによる伝熱管減肉量ヒストグラム	30
図 3-1 主要機器の ISI 計画	54
図 4. 1-1 実用化炉の Na 漏えいに対する安全性と経済性の取り組み	64
図 4. 1-2 Na 漏えいによる電力損失コスト	65
図 4. 2-1 2 次系 Na 配管構造概念図（大型炉）	66
図 4. 2-2 2 次系ホットレグ配管構造図（大型炉）	67
図 4. 2-3 2 次系ミドルレグ配管構造図（大型炉）	68
図 4. 2-4 2 次系コールドレグ配管構造図（大型炉）	69
図 4. 2-5 Na 大型炉 (1500MWe) 冷却系鳥瞰図(1)	70
図 4. 2-6 " (2)	71
図 4. 2-7 Na 大型炉 (1500MWe) 冷却系上面図	72
図 4. 2-8 Na 大型炉 (1500MWe) 冷却系正面図	73
図 4. 2-9 Na 大型炉 (1500MWe) 冷却系側面図	73
図 4. 2-10 Na 中型炉 (500MWe) 冷却系鳥瞰図(1)	74

図 4. 2-11	"	(2) . . . . .	74
図 4. 2-12	"	(3) . . . . .	75
図 4. 2-13	Na 中型炉 (500MWe) 冷却系上面図	. . . . .	76
図 4. 2-14	Na 中型炉 (500MWe) 冷却系側面図	. . . . .	77
図 4. 2-15	Na 中型炉 (500MWe) 冷却系正面図	. . . . .	77
図 4. 3-1	外管 Hot/Cold 方式	. . . . .	78
図 4. 3-2	間隙部区画構造の細分化 (例: 2 次系ミドルレグ配管)	. . . . .	79
図 4. 3-3	間隙部仕切壁の無溶接構造	. . . . .	80
図 4. 3-4	外管 Na バウンダリー概念図	. . . . .	81
図 4. 3-5	仕切壁外補修概念図	. . . . .	82
図 4. 3-6	外管部分補修	. . . . .	83
図 4. 3-7	バルーンを用いたシールバックレス補修	. . . . .	84
図 4. 3-8	閉止板を用いたシールバックレス補修	. . . . .	85
図 4. 3-9	配管部分応急補修 (要 R&D)	. . . . .	86
図 4. 3-10	Na 漏えい・燃焼抑制及び簡易的部分補修 (要 R&D)	. . . . .	87
図 4. 4-1~6	2 次系配管補修方法 (1) ~ (6)	. . . . .	88

## [表リスト]

表 2. 1-1	実用化炉 SG の Na・水反応における目標設定	. . . . .	11
表 2. 2-1	破損伝播抑制方策とその効果・実現性	. . . . .	13
表 3-1	ISI に対する設計思想 (もんじゅからの変更)	. . . . .	35
表 3-2	炉内構造物の補修に対する設計構想	. . . . .	36
表 3-3	ISI 計画 (1/2) (2/2)	. . . . .	37
表 3-4	補修計画	. . . . .	39
表 3-5	インプレース補修シナリオ (1/2), (2/2)	. . . . .	40
表 3-6	主要機器の ISI 計画及び技術的課題 (1/7) ~ (7/7)	. . . . .	44
表 3-7	主要機器のインプレース補修計画及び技術的課題	. . . . .	51
表 3-8	新規 R&D が必要な技術 (1/2) (2/2)	. . . . .	52
表 4. 1-1	実用化炉の Na 漏えい対策についての目標設定 (経済的な観点)	63	
表 4. 5-1	2 次系配管補修方策	. . . . .	101

## 1 緒言

ナトリウムは伝熱性能や材料との共存性などの観点で様々な利点を有するため、FBR の最も有力な冷却材となっているが、一方で化学的に活性であることや、光学的に不透明であることから目視を用いた検査などが困難となり、プラントの安全性や経済性に影響を及ぼす可能性がある。

FBR の冷却材としてナトリウムを選定するためには、その利点を最大限に活用できるようなプラント設計を行うとともに、欠点が顕在化しないような対策を講じることが必要になる。特に実用化プラントは、Na がプラントの安全性に及ぼす影響だけでなく稼働率などの経済性に及ぼす影響についても最小化しておかなければならぬ。

したがって、Na の化学的活性や光学的不透明性を考慮し Na 機器や配管の検査や補修について、実用化炉の観点から検討を行うため、ワーキング・グループを発足させた。W/G は SG 伝熱管破損に関する SG 水リーク分科会、配管からの Na 漏えい事故に関する Na 漏えい分科会、及び Na 中での ISI および補修に関する ISI&R 分科会の 3 つから構成された。

本報告書は平成 13 年年度後半～14 年度前半において、これらこの 3 つの分科会で検討を行った内容を取りまとめたものである。

実用化炉としての高度化

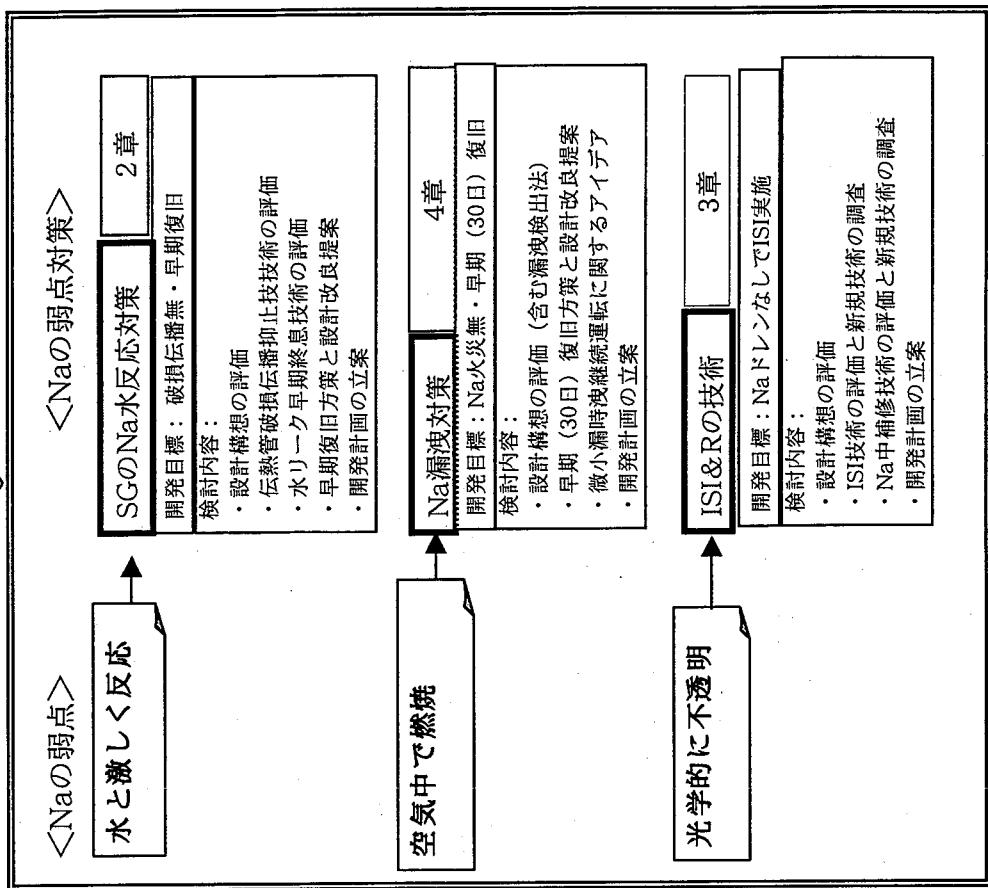
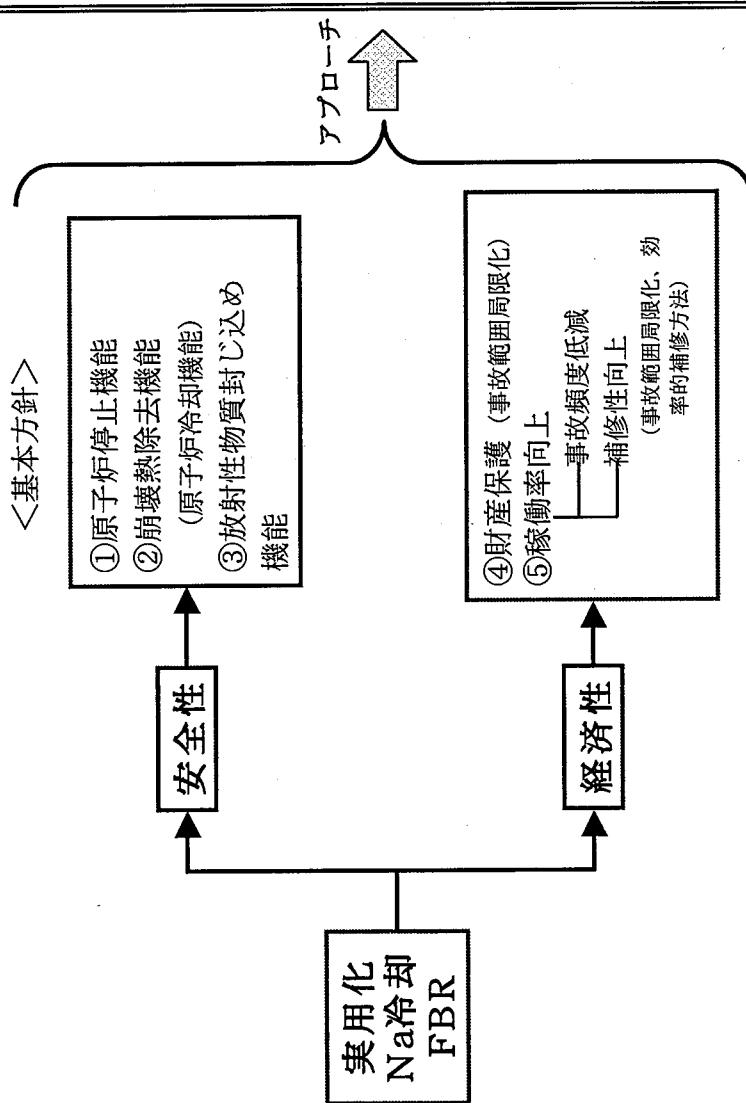


図1-1 Naの弱点（化学的活性性）対策に関する取り組み

## 2 SG 水リーク対策に関する検討

### 2.1 SG 水リーク対策への取り組み方針

#### (1) 安全性と経済性の考え方

図 2.1-1 に示すように SG 水リークに対する取り組みとしては、実用化炉であることから安全性だけでなく経済性の観点にも注力した検討が必要になる。

安全性について要求されることは、事故時において 1)原子炉を停止すること、2)原子炉が冷却され崩壊熱が除去できること、及び 3)放射性物質の放出を抑制することの 3 点を確保することである。これらのうち特に SG 水リーク事故に関しては『放射性物質放出抑制』のために、Na・水反応の圧力波伝播により 1 次冷却材バウンダリーである IHX 伝熱管の破損を防止することである。また、Na・水反応生成物である水素や水酸化ナトリウムなどを適切に処理し、その影響を受けないようにすることも必要である。

一方、経済性についての要求は、破損伝播領域を局限化することで、財産 (SG) を保護し、かつ補修期間の短縮により、稼働率の低下を防止することである。つまり、破損伝播を抑制することで、伝熱管多数破損による SG の交換に至る事象を避けるのはもちろんのこと、事故後のプラグすべき損傷伝熱管本数ができるだけ少なくし、効率的な補修方法により補修期間を短くすることが要求される。また、SG 製作の品質向上により水リーク事故の発生頻度を低減させることも稼働率向上には非常に重要となる。

この様に、実用化炉では安全性を確保した上で、経済性低下に及ぼす要因をできるだけ排除することも重要な検討項目となる。よって、本 W/G では安全性を確認した上で、経済性向上に主眼をおいた検討を行うこととする。

#### (2) 経済性の観点での分類

検討を進めるに先立って、上述の経済性に着目した破損伝播抑制の観点から目標として考えられる 4 つの分類 (グレード A~D) を表 2.1-1 に示す。

グレード A は Na/水反応が工学的に発生しない SG であり、その代表例として (2 次系設置型) 2 重管 SG が挙げられる。2 重管 SG の採用によりたとえ初期建設コストを高くしても、破損伝播による伝熱管破損やその補修に伴う経済的損失を避ける場合である。

グレード B は、最初の水リークの発生はやむなしとするものの、反応ジェットが隣接伝熱管に損傷を与える前に、水リーク事故を収束させるものである。

ここで言う「損傷を与える前」とは、隣接伝熱管が開口しないだけではなく、有意な減肉や材料的損傷により再使用不可能な状態に至る前のことを言い、したがって、プラグ補修は、最初の水リーク発生管1本で済ませることを目標とする。この目標は水リーク検出性能の向上や伝熱管の厚肉化等の方策により実現する可能性があると考えられる。このグレードBは現状の単管SGにおいて、破損伝播抑制の最も高いレベルを狙ったものである。なお、グレードA、Bとともに破損伝熱管は初期リーク発生管の1本であるため、その伝熱管のみのプラグ補修で良く、したがって、事故後、新規にSGを作成・交換することは想定しない。

次にグレードCはグレードBを目標設定することが不可能な場合、もしくは水リーク対策設備が物量などの点で非現実的なレベルになる場合、初期水リーク管とその近傍の数本程度の伝熱管の損傷は許容するものである。このグレードも破損伝播領域をできるだけ局限化しようとする考え方ではBと同じではあるが、事故後のSGの取り扱いは伝熱管のプラグ補修で済ませるか、補修せずにSGを交換するかの選択となる。これについては、事故後の破損伝播領域の大きさ、事故発生回数、SGの伝熱管余裕に依存し、損傷伝熱管がSGの伝熱管余裕を越えた時点でSG交換となる。

最後のグレードDは、水リークによる破損伝播局限化は目標とせず、多数の伝熱管の損傷を許容する。この場合1回の水リーク事故で破損伝播による多数本管破損のためSGは再使用不可能になるため交換を前提としている。したがって、この様な場合大型のSGを頻繁に交換するのはコスト的に不利であるため、複数の小型モジュールSG方式が考えられ、さらにSG交換期間を短縮するため、予備のSGを予め製作しておくことも想定される。

以上のように、SG水リーク対策への経済的な取り組みとしてA～Dの4つのグレードが考えられることを示したが、本W/Gでは、現状のSG(単管型)を大きく変えることなく、水リーク対策設備の最も高度な目標設定としてグレードBを当面、設定することとした。よって、今後この目標を達成するための具体的方策とその技術的見通しの検討を行う。コスト評価の具体的手法やグレードBの目標設定が不可能な場合のアプローチについては次節以降で述べる。

## 2.2 評価手法

### (1) Safety Map

図 2.2-1 に SG 水リークの SafetyMap 概念図を示す。SafetyMap は水リーク発生後の(1)事象収束までの時間と(2)伝熱管破損時間の関係を表したものである。前者(1)は水素計等による検出時間と水ブロー時間の和を示し、また後者(2)は隣接伝熱管がターゲットウェステージによって開口するまでの時間を言う。図 2.2-1 では前者(1)を破線で、後者(2)を実線で示した。

この Safety Map(例)の特性を持つ SG では水リーク事象終息時間が伝熱管破損時間を上回っているため、伝熱管が破損伝播する前に水リーク事象を終息することはできること、つまり、隣接伝熱管が開口する破損伝播を抑制できないことがわかる。したがって、本 W/G で目標としているグレード B (プラグ 1 本管補修) を達成するには、まずは Safety Map においてはこの両者の位置関係を逆転させること、つまり、(A)検出時間を早めることなどによって水リーク終息までの時間を短縮すること、及び(B)伝熱管に耐ウェステージ性を高めることなどにより伝熱管破損伝播までの時間を長くすることが必要になるのである。

### (2) 破損伝播抑制方策

(1)で述べた観点から、考えられうる具体的な破損伝播抑制方策（案）を摘出したものが図 2.2-2 である。また、ここで摘出された個々の方策に対し破損伝播抑制効果やその実現性について記載した表が表 2.2-1 であり、さらにこの表を効果と実現性の観点でわかりやすく図示したものが図 2.2-3 である。図 2.2-3 は横軸に破損伝播抑制効果、縦軸に技術的、経済的な観点での実現性を示してあるため、グラフでは右上の項目ほど良いことになる。また、この中にはアイディアレベルのものも含まれるため、項目を囲んでいる枠の形状により定量的な評価が可能な方策と、そうでないものを区別した。

### (3) 評価フロー

破損伝播抑制に関する目標をグレード B (水リーク後、プラグ補修すべき伝熱管は初期リーク管の 1 本に限定) に設定したこと、及び破損伝播抑制の具体的方策を摘出したことを踏まえ、今後の評価の手順を図 2.2-4 に示した。破損伝播抑制に対する有効性が高く、かつ SG 物量等、システムへの影響が少ない

方策から優先的に採用した破損伝播解析・評価を実施する。

STEP1 では、検出系の高度化や急速水プローダウンシステムの採用など、物量増加に影響の少ない方策の組み合わせである。次に STEP2 では、伝熱管の厚肉化を採用しており、ウェステージ抑制の点では有効ではあるが、SG の物量増加に直接影響する。また、厚肉化により伝熱面積が増加し、Na インベンチャーも増加するため、水素計による検出性の低下を考慮する必要が生じる。STEP3 は伝熱管材料の耐ウェステージ性を高める方策ではあるが、材料を変えることにより熱伝導率が低下し、SG 物量増加への影響や耐久性の課題がある上、これらを解析するのに必要なウェステージ率などの定量的データが得られないことにより、現時点では詳細な評価は困難である。最後の STEP4 では以上の方策を用いたとしても、グレード B (1 本プラグ補修) が不可能もしくは SG 物量大などの観点で適切でないと判断された場合、グレード A (2 次系設置型 2 重管 SG) はまた、グレード C ( $1 + \alpha$  本プラグ補修) を目標とすることになる。

これらの一連の手順においては、破損伝播解析だけでなく各破損伝播抑制方策の実現性の検討及び SG の製作コストや水リーク事故に伴うプラント停止による電力損失コストの評価が必要となる。

#### (4) コスト評価モデル

SG 水リークを考慮したコスト評価モデルの概要について述べる。このモデルは図 2.2-5 に示すように、SG を含むプラント建設に要する初期コストに、SG 水リークの破損伝播による SG の交換費用（新規 SG 製作費）及び SG の補修または交換期間の未発電による電力損失費をコストとして加算したものである。プラント寿命期間 40 年（プラント寿命は平成 15 年度から 60 年として設計しているが、本検討時では 40 年であったためこの値を用いて試算している。）に渡って評価するため、総コストは寿命中の水リーク発生回数、その時の破損伝播による SG の損傷程度（プラグ補修または SG 交換）及び補修期間に大きく依存する。

これを視覚的にわかりやすく図示したグラフが図 2.2-6 である。この 3 次元グラフは縦軸に図 2.2-5 の定義による総コスト、水平軸の横軸に伝熱管破損頻度、水平軸の縦軸に破損伝播による SG の交換割合を示したもので、この両者をパラメーターとしてサーベイした場合の総コストを算出したものである。当

然のことながら、両者の値が大きくなるほど電力損失費が大きくなるため総コストも高くなっている。なお、この図のパラメーター範囲は傾向を見るために任意に決定したものであって、実際に生じると予測される値とは異なる。

水リークを考慮したコスト評価においては、上述のようなコスト評価モデルを用いて、水リーク対策設備に要する費用とのバランスを考慮し検討を行う。

## 2.3 対策設備の選定と水リーク解析

### (1) 解析条件

破損伝播抑制方策を示した図 2.2-3 及び水リーク対策についての評価手順図 2.2-4 に基づいて、各方策についての有効性を確認するために以下の水リーク解析による Safety Map の作成を行い、リファレンス条件との比較を行った。解析対象はアドバンスト・ループ型 Na 炉(150 万 kWe)のヘリカルコイル型 SG であり、最初にリファレンス条件での結果を図 2.3-1(1)に示す。同図では水リーク事象終息時間が伝熱管破損時間を上回っていることから隣接伝熱管は開口し、破損伝播することが示されている。

次に破損伝播抑制方策として考えられる、以下の i)～vi)の方策を採用した場合の Safety Map を作成した。また、i)～v)の方策を組み合わせた場合についても評価した。なお、破損伝播抑制方策の効果を明確にするために、それぞれの Safety Map ではリファレンス条件（図 2.3-1(1)）を実線で、破損伝播抑制方策を破線で示した。

#### i) 水素計検出感度向上

（固定法 BG10%→BG4% 及び ROR 法 30ppb/10min→15ppb/10min）

#### ii) 急速水プローダウンシステム（60 秒ブロー→30 秒ブロー）

#### iii) 耐ウェステージ性伝熱管の採用（ウェステージ率 9Cr 鋼値の 0.8 倍）

#### iv) 伝熱管厚肉化（1.4 倍）

#### v) 冷却系ループ数増加（2 ループ→6 ループ）

#### vi) 酸素計による水リーク検出

### (2) 解析結果

図 2.3-1(2),(3)は水素計の検出設定値を下げた場合（高感度化）の Safety Map であり、破線が示すように水リーク事象収束の短縮が確認できる。しかし、検

出設定値を下げるためには水素バックグラウンドノイズ変動の影響や検出計そのものの感度についての検討が別途必要になる。特に固体電解質水素計の感度や SG 伝熱管を透過する水素の影響を十分に把握しておく必要がある。（固体電解質水素計の感度と伝熱管透過水素によるバックグラウンド水素濃度変動については Appendix A 参照のこと。）

水ブローダウン時間を短縮した場合の Safety Map が図 2.3-1(4)であり、これも有効な方策の一つである。しかし、急速水ブローシステムのための弁、およびブロー水を受けるタンクが大がかりな設備となり、製作性や建設コストへの影響を検討する必要がある。また、単に早く水をブローするだけでなく、ブロー方法の最適化により、伝熱管内の保有水による伝熱管の冷却を促し、破損までの時間を長くする方策もありうるため、この効果を考慮した検討も必要になる。

伝熱管の耐ウェステージ性（ウェステージ率）の影響を評価した Safety Map が図 2.3-1(5)である。Safety Map はリファレンスでは Mod.9Cr-1Mo 鋼伝熱管のウェステージ率を用いて計算しているが、同図の破線は 12Cr 鋼のウェステージ率（Cr 量からの推定値）を基に解析した結果である。伝熱管材料の耐ウェステージ性向上も伝熱管破損に至る時間余裕を大きくすることができ、破損伝播抑制の効果は大きい。これについては、今後、12Cr 鋼伝熱管のウェステージ率測定試験が実施される予定であり、試験結果から得られたウェステージ率により再度詳細な評価を行う。

伝熱管を厚肉化した場合の Safety Map が図 2.3-1(6)である。これもウェステージ率向上の場合と同様に破損伝播抑制効果は大きい。しかし、伝熱管の厚肉化は SG 重量増加、および Na インベントリー増加による水素の検出性低下が避けられず、これについても定量的に評価しておく必要がある。

冷却系ループ数増加の影響をみた Safety Map が図 2.3-1(7)である。冷却系ループ数を増加させることで 1 ループあたりの Na インベントリーが減少し、水素検出が早くなることを期待した方策であり、その有効性は確認できる。しかし、現在大型 Na 炉では 2 ループを採用しており、ループ数の増加はプラント建設コストや冷却系設計の見直しへの影響が大きいため、ここではその効果の確認に止めることとする。

検出系に酸素計を用いた場合の Safety Map が図 2.3-1(8)である。酸素計については水素計と比較すると、伝熱管透過水素によるバックグラウンド変動がな

いため、検出において有利と考えられているが、酸素検出センサー自体についての知見が十分でないため、ここでは参考程度として記載した。したがって、酸素計の検出設定値も水素計のそれと同等なレベルとして評価した。

最後に、水素計検出感度向上、伝熱管耐ウェステージ性向上、伝熱管厚肉および急速水ブローの組み合わせによる Safety Map を示したものが図 2.3-1(9)である。このグラフからわかるように微少リークから中リーク以上のすべての領域において事象収束時間が伝熱管破損時間を下回っており、ウェステージにより隣接伝熱管は開口しないことを示している。なお、Safety Map では、収束時間と伝熱管破損時間の関係に基づいて隣接伝熱管が開口するかしないかだけの判断であり、ウェステージによる伝熱管の減肉量やプラグ補修の必要性の有無については判断できない。したがって、ここで解析は複数の破損伝播抑制方策の組み合わせによりグレード B (1 本プラグ管) を達成する前段階の目安に過ぎず、その達成を断言したものではない。個々の伝熱管の減肉量の評価及び 1 本プラグ管の達成については、破損伝播解析コード LEAP による計算が必要になる。

#### 2.4 今後の方針

実用化炉における SG 水リーク対策について、目標とする選択肢 (グレード) の検討と設定を行い、それを実現するための複数の水リーク対策設備について、その効果を確認するために解析を含めた予備的な検討を行った。今後は、破損伝播抑制方策の SG 物量への影響や技術的実現性及びコスト評価を踏まえて、破損伝播抑制がどこまで可能か、またはグレード B が達成可能かどうかの検討を進めることとする。また、グレード B の代案としてグレード A (2 次系設置型 2 重管 SG) 及び C ( $1 + \alpha$  本プラグ管) が考えられるが、これらについても併せて評価していく。

本検討では、安全性ではなく、経済性を主眼としているため、必ずしも全ての規模の水リークを対象とした対策を講じる必要はなく、水リークは溶接箇所において微少～小リークから発生する頻度が高いという事実を踏まえ、これを対象とした水リーク対策設備を設けることで、実質的な効果を期待することが考えられる (図 2.4-1)。さらにこのことは、ウェステージによる伝熱管減肉量と本数の関係を示した破損伝播解析結果図 (図 2.4-2) が示すように少リーク (0.3g/sec) の場合、損傷を受けた伝熱管のうちその多くが減肉量 25% 以下で

あるため、この程度の伝熱管厚肉化を行えば、効果的な破損伝播抑制方策が期待できる。

この様に、経済性を追求する観点では、水リーク対策設備をどの規模の水リークを対象とするかと、その発生頻度を考慮し、実質的な効果を期待する観点で検討していくことも重要と考えられる。

表2.1-1 実用化炉SGのNa・水反応における目標設定

グレード	損傷伝熱管本数	SG交換の要否	備考	設計対応項目		R & D対応項目	
				水反応発生防止(予防保全)	事故拡大防止		
A (Na/水反応の発生しないSG)	1本	SG交換不要	リーケ後継続運転 ・リーケ後・プラント停止・補修			①新概念SG ・新概念2重管SG ・新概念3重管SG	①新概念SGに対応したリーケ検出システム ・リーケ管特定技術 ・伝熱管プラグ技術
B (破損は初期リーケ伝熱管のみ。反応ジエントは隣接伝熱管の健全性に影響を与えない。)	1本 (1次破損)	SG交換不要	ターゲットウェーステージは発生しない	①QA, QCの向上 ②伝熱管厚肉化 ③伝熱管材質変更	管東部隔壁化による破損伝播防止(伝熱管溶接部隔壁)	①ISI ②PSR方式 ・Na純化技術	①新型水リーケ検出システム1 ・固体電解質水素計 (BG水素濃度低減) ・音響計 ②新型リーケガス入出力法(Ne, He) ③新型水リーケ検出システム3 ・放射性同位体 ④急速水フローダウンシステムによる水リーケ流量低減 伝熱管セルフウェーステージデータの取得
C (破損は初期リーケ伝熱管とターゲットウェーステージを受けた近傍のみ)	(1+ $\alpha$ )本 $\alpha=$ ~数本程度 (2次破損)	SG交換不要	プラント寿命中のプラグ本数がプラグ裕度以内に収まる	①QA, QC ②伝熱管厚肉化 ③伝熱管材質変更	伝熱管入口オリフィス設置による水リーケ流量低減	①ISI [SG未交換] ①最適プラグ裕度の設定 ②Na純化技術 [SG交換] ①最適プラグ裕度の設定 ②モジュールSGの採用 ③予備SGの有無 ④ループ化 ⑤Na純化技術	①補修技術 ・リーケ管特定技術 ・伝熱管プラグ技術 ・Target Wastage管特定技術
D 多くの伝熱管が損傷を受ける	多数本	SG交換必要	SGの交換性を高めることで対応する		伝熱管入口オリフィス設置による水リーケ流量低減	①モジュールSGの採用 ②予備SGの有無 ③ループ化 ④Na純化技術	①補修技術

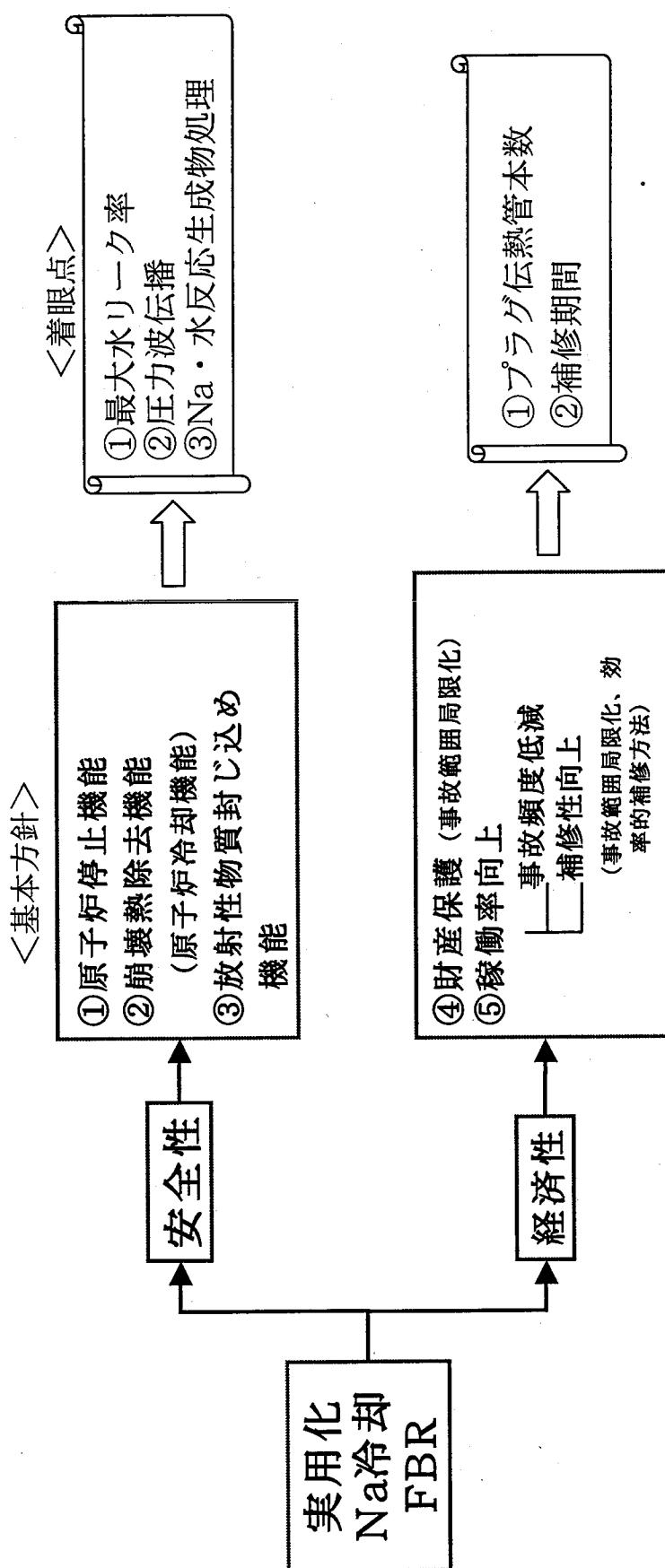


図2.1-1 実用化炉SGのNa・水反応に対する安全性と経済性の取り組み

## 表2.2-1 破損伝播抑制方策とその効果・実現性

分類	分類I	分類II	分類III	項目	対象	実現性（コスト含む）	総合評価
伝熱管部品 判定基準の合理化	伝熱管部品	伝熱管内面コーティング	伝熱管表面深さの最適化	中～大 箇所	レフアレンス解析では最終深さは耐内圧が少しでも割られたら破裂するとしているが、厚内化による伝熱管出力損失の最適値を設定することは可能。	本件は評価上での底面化に限するものであり、伝熱管内面と併せて食い込むため、評価結果が正確である。但し、物量削減による伝熱管の強度が弱くなるため、伝熱管内面の評価が必要。	○
	伝熱管内面コーティング	伝熱管内面コーティング	伝熱管内面熱管本数を大幅に減少させることは可能。	中～大 箇所	伝熱管接頭部から発生する反応ジェットが熱管壁へ届くのを前撃止するため有效。但し、Anti-wastage Deviceを越えて回り込んだ反応ジェットの影響については評価する必要あり。	○	△
	伝熱管内面コーティング	耐ウエスチーフ（インコネル）、ハステロイ等 伝熱管の採用	伝熱管表面が保護されたため、ターゲットウェースチージ低減に有効。	少～大 箇所	ターゲットウェースチージ低減に有効。効率の程度については別途調査、解析、解説が必要。	ヘリカル型：管-管密接部が伝熱管にて不規則に分布しており、隔熱材の実現は（不規則ではないが）困難。 直管型：伝熱管性能が低下する可能性あり（隔離接頭部のみコードイングする手もある）。また、コードイングの耐久性についても評価。	△
伝熱管内部に至るまでの時間余裕を大きくする セラフ&ターダゲットウエスチージ低減	セラフ&ターダゲットウエスチージ低減	耐ウエスチーフ及びセラフウエスチージ低減	伝熱管表面の精度が低減され、効率、解説が必要。	微小～大 箇所	ターゲットウェースチージ低減に有効。効率の程度については別途調査、解析、解説が必要。	伝熱管が底面が平面なためコストが低くなる。 伝熱管を押しだしながら巻く製作技術が必要。（過去に検討例あり）	△ (x)
	反応ジェット限	伝熱管オリフィス設置による水リーケ流限制	効果は期待できるが、定量化に難がある必要あり。	大	大リーケ時はプローブ時間が事象発生時間の支配的要素であるため有效。	オリフィス設置は水漏不安定回避の観点ではあるが、実績はあるため実施は可能。	△
	水リーケ流限	急速水プローダンシステム（現状0.6秒→3秒にする）	大リーケ時はプローブ時間が事象発生時間の支配的要素であるため有效。	大	既状のプローブシステム設計では配管管、弁などの制約によりプローブ時間は30秒にするのは困難。	現状のプローブシステム設計では配管管、弁などの制約によりプローブ時間は30秒にするのは困難。	△
	Na・水反応が房側の伝熱管に直接受けるSG	音響検出系の高度化	音響検出系の高度化	中～大 箇所	音響検出は初期段階では多くの幹管部が反応してしまい、伝熱管リーケ痕跡が発見できない。しかし、検出下限を少しだけ下げるため効果は大きい。	現在のリファレンスより検出下限値を下げたり、検出時間も短くする。但し、検出時間は10秒で限界であるため効果は大きい。	△ (a)
	水リーケ感知	冷却系多リーケ化	冷却系多リーケ化	微少	既状の伝播解析では、ループ数を増やす（loop）ことによる検出方向上の効果ある。	既状の伝播解析では、ループ数を増やす（loop）ことによる検出方向上の効果ある。	×
	BG水素濃度低減	BG水素濃度低減	BG水素濃度低減	微少	Cold Trapを1玉設置した場合、検出伝播解析では、固定法領域（0.04～0.18g/sec）において該伝播時間の水リーケによる水停止装置（Cold Trap）を必要とする。二回アラーム（警報時間70秒）による水リーケ痕跡は現状では見付かれない。	BG水素濃度低減下による伝熱管過水率は管下の影響について検討しておく必要あり。また、Cold Trapの負荷が増大し、その再生についてのコスト増となる可能性がある。	△
	水素燃焼	水素燃焼	水素燃焼	微少	水素燃焼による水リーケ痕跡は現状では見付かれない。	水素燃焼による水リーケ痕跡は現状では見付かれない。	△
	水素供給	水素供給	水素供給	微少	水素供給による水リーケ痕跡は現状では見付かれない。	水素供給による水リーケ痕跡は現状では見付かれない。	△
	リーケ感知を早める	リーケ感知を早める	リーケ感知を早める	小	既状の伝播解析では、SG下部にSC下部だけではなくSG上部にも設置し、検出時間も短くする。	SG下部にSC下部との組合せは有効であるが、詳細は評議が必要。但し、微少リーケ領域でナトリウム衝突による水素濃度の混合上昇の場合には効果はない。	△ (x)
	高SG	高SG	高SG	（同上）	既状の伝播解析では、SG下部にSC下部との組合せは有効。	既状のSGについては構造上に適用可能であるが、管束部でのナトリウムは構造的に不可もしくは困難。	△ (x)
Na・水反応が破損伝播抑制方策に局限されるSG	固体质管束部セクター化	固体质管束部セクター化	固体质管束部セクター化	微少	検出感度向上は検出時間の短縮に効果がある。	固体质管束部セクター化を可能と推定される。	○
	（固定法）	（固定法）	（固定法）	微少	運送負担時間10分がないため、該伝播解析では、初期リーケが約0.1g/sec以下において該伝播時間に事象吸収束が期待できる。	固定法SG設定位臵は全ての伝熱管が斜めであり、インターロックによる伝播抑制の可能性を有する。また、インターロックによる伝熱管水素計は全ての伝熱管を満足させるのは困難。ある伝播抑制についての適用可能性があり。	△
	新規水リード	新規水リード	新規水リード	微少	水系への不活性ガス混入法（水、蒸気系に不活性ガスなどを混入し、水リーケ時にナトリウム沫で検出）	水素系による水リーケ痕跡は現状では見付かれない。	△
	水系へのトレーサー混合システム	水系へのトレーサー混合システム	水系へのトレーサー混合システム	"	既状の伝播解析の結果、破損伝播前に非活性ガスが期待できない。（水素計とあまり変わらない）	放射性物質を水・蒸気系に混入させるため、要検討。	△
Na・水反応が破損伝播抑制方策に局限されるSG	管内ナトリウム、管外燃焼型SG	管内ナトリウム、管外燃焼型SG	管内ナトリウム、管外燃焼型SG	（同上）	2次液出しへの時間的裕度は通常のSGに比べ格段に大きくなるが、自己膨張が耐圧容器になり物質が大幅に増加する。	SCの漏洩が耐圧容器になり物質が大幅に増加する。	△
	2重PSG	2重PSG	2重PSG	"	2重構造によりナトリウム管または水・蒸気管被膜の段階で検出できることため、N₂水反応は検出しない。	SCのコスト高になる。実験はある。	○
	実現性	実現性	実現性		○：並挙で1本管強制物質がない、または物質増加の種類がない。 ○：技術的課題がない。 △：R&Dまたは詳細な検討が必要。	△：並挙的な評議を行った結果、有効性が確認されないもの。 ×：技術的見通しがない。 ×：コスト高となり実現性がない。	○

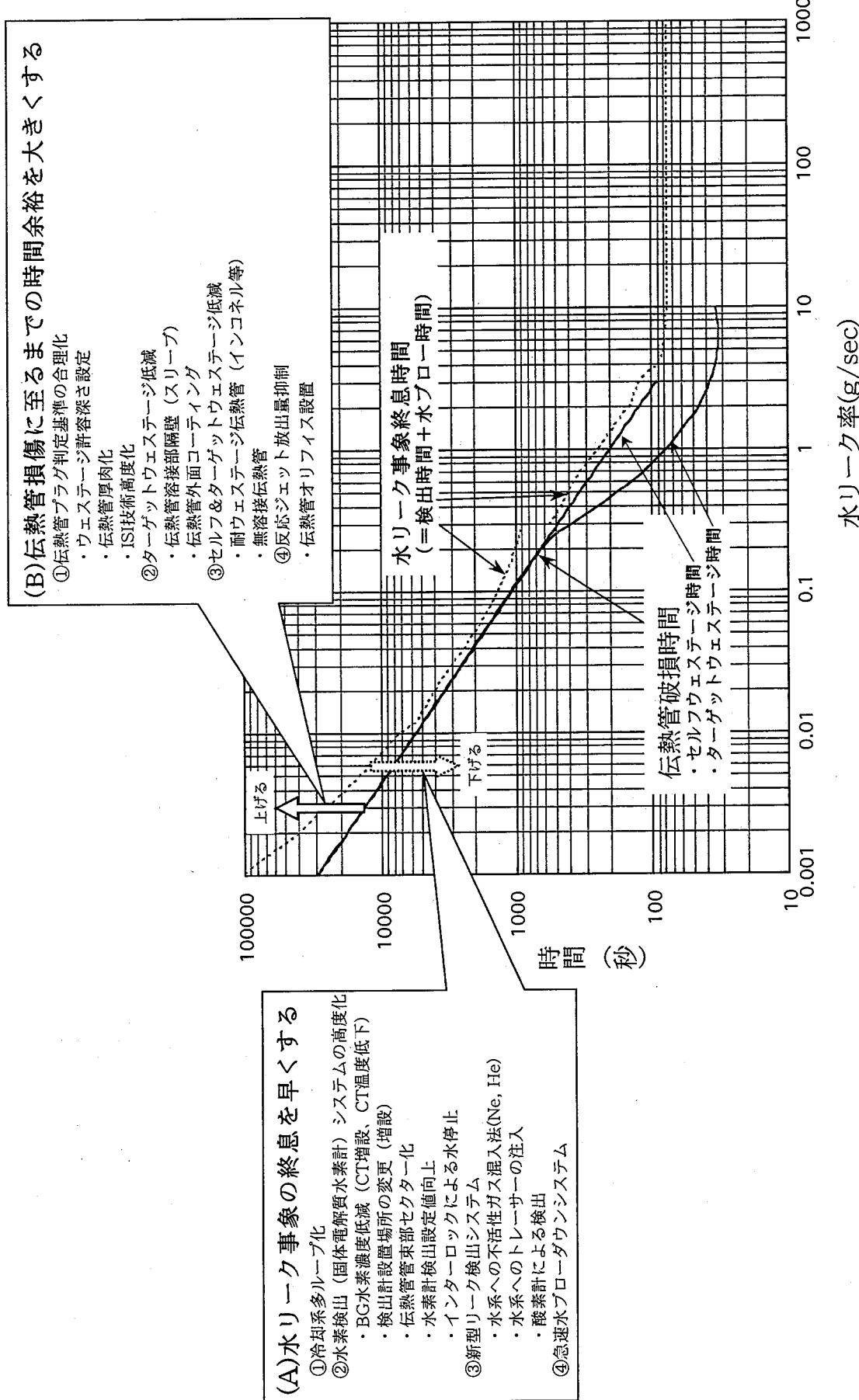


図2.2-1 Safety Map

(目標) 水リーケ後プラグすべき伝熱管を初期リーケ管1本に止める（1本管破損）

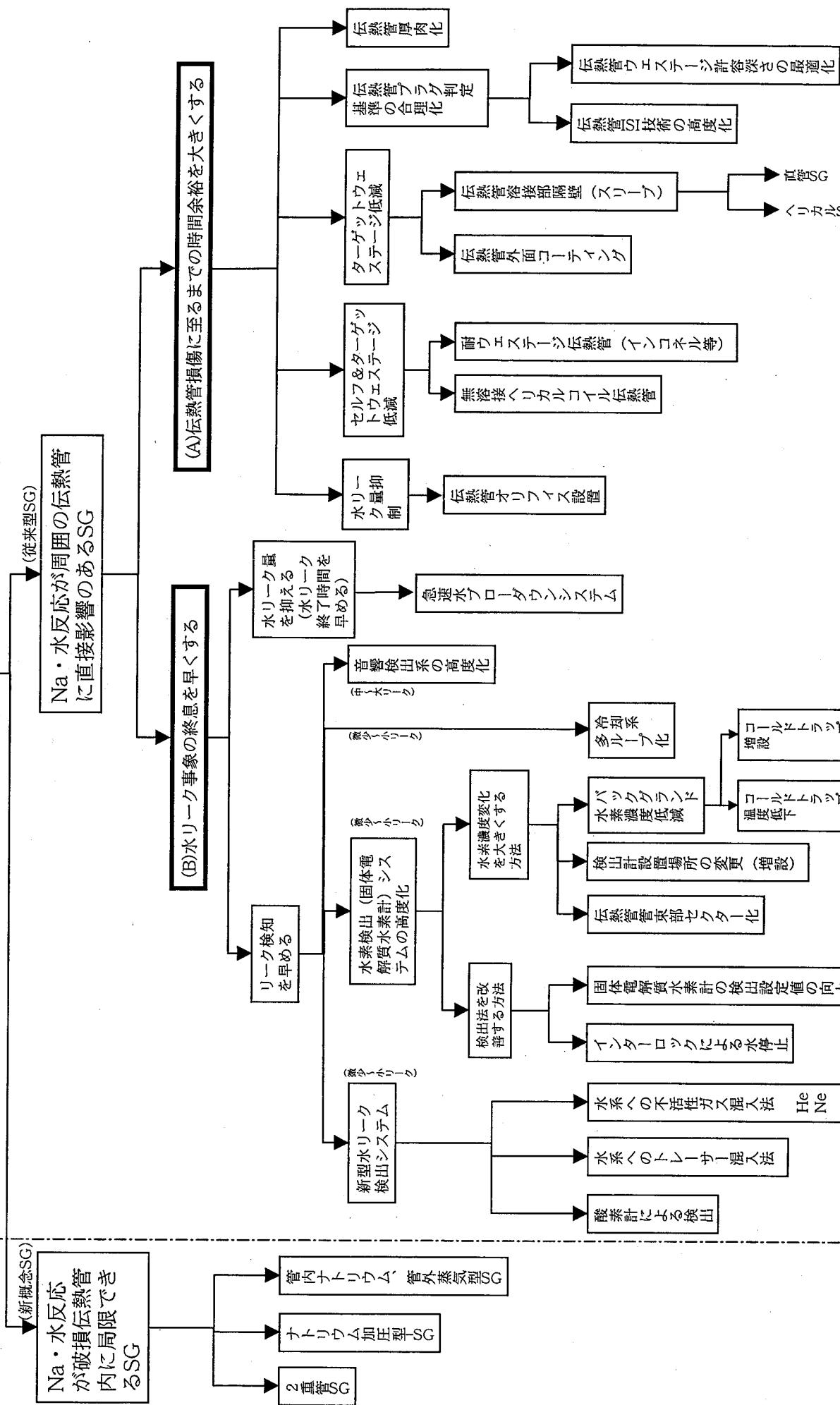


図2.2-2 破損伝播抑制方策

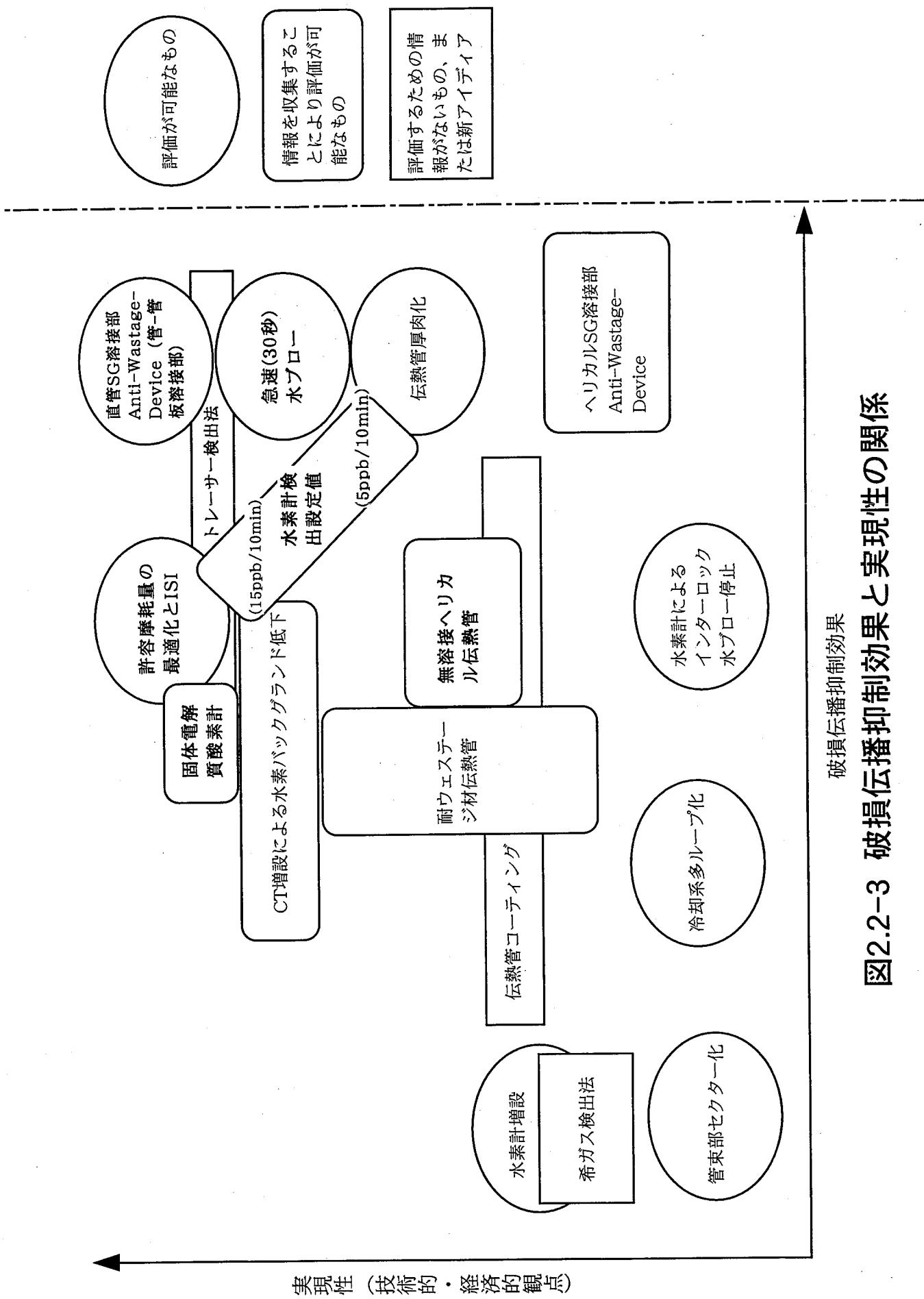


図2.2-3 破損伝播抑制効果と実現性の関係

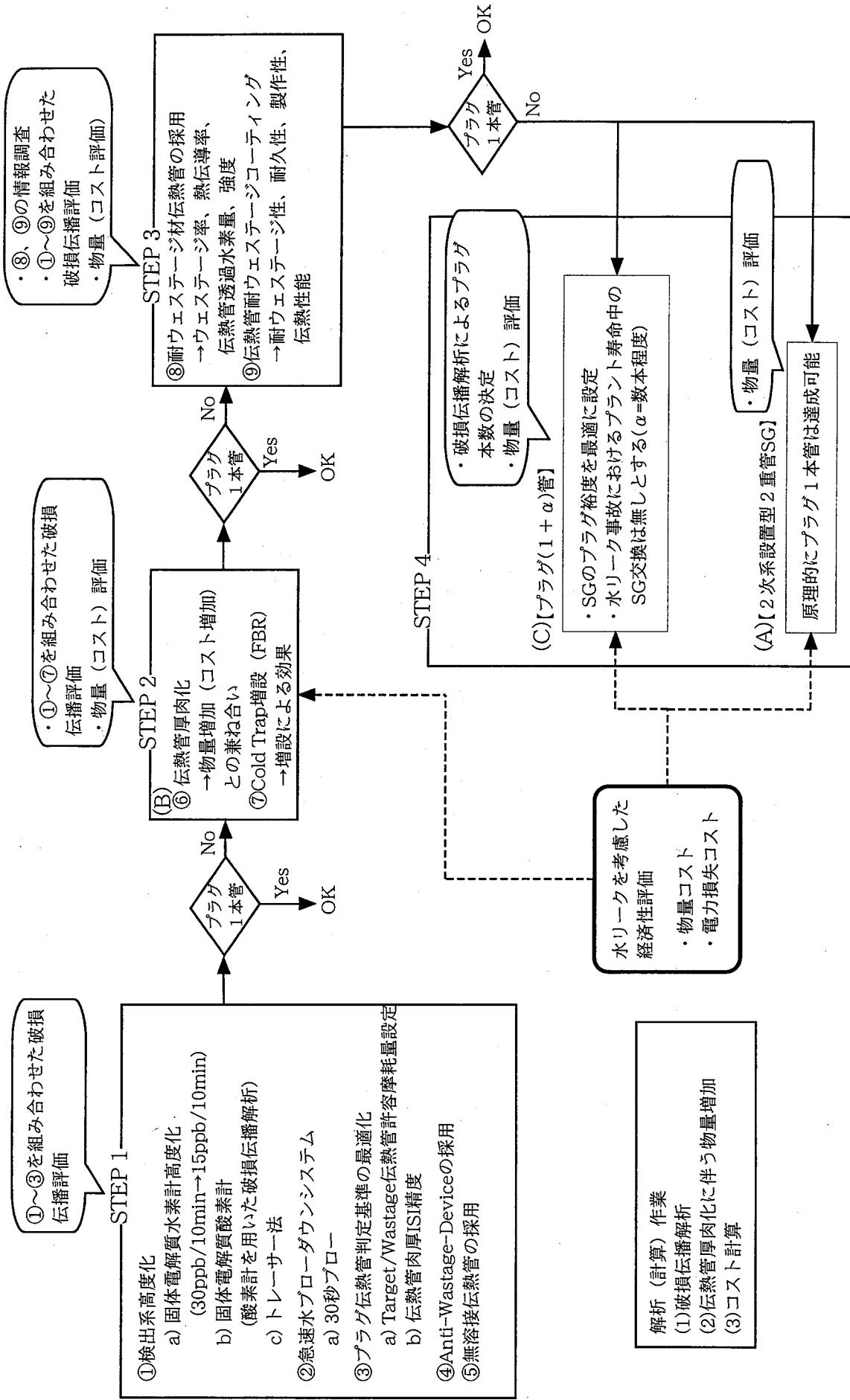


図2.2-4 SG/Na・水反応対策評価手順

機器の製作費及びSG水リークによるプラント停止を考慮した経済性 評価モデルを作成

総コスト=プラント建設コスト+SG交換コスト+電力損失コスト

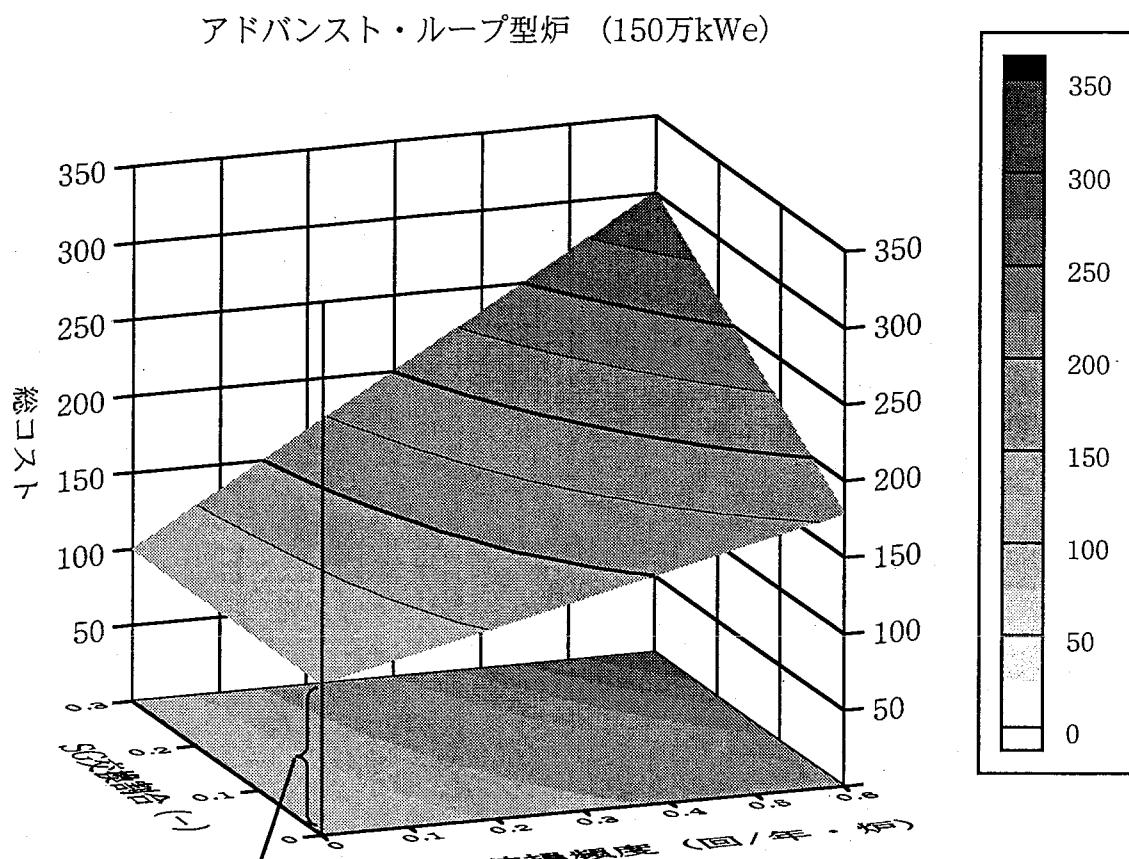
プラント建設コスト	プラント建設初期コスト (NSSS、建屋)
SG交換コスト	$\text{SGを交換する場合の新規SG製作コスト}$ $\text{SG 1基製作コスト} \times (\text{伝熱管破損頻度} \times 40\text{年}) \times \text{SG交換確率}$ <span style="margin-left: 100px;">(SG交換回数)</span>
電力損失コスト	$\text{伝熱管プラグ補修またはSG交換時の未発電分を損失コストとして計上}$ $300\text{日} \times (\text{伝熱管破損頻度} \times 40\text{年}) \times (1 - \text{SG交換率})$ <span style="margin-left: 100px;">(伝熱管プラグ補修回数)</span> $+ 300\text{日} \times (\text{伝熱管破損頻度} \times 40\text{年}) \times \text{SG交換率}$ <span style="margin-left: 100px;">(SG交換に至る水リーケ回数)</span>

300日：SG交換に要する日数

60日：伝熱管プラグ補修に要する日数

40年：プラント寿命（プラント寿命は平成15年度から60年として設計しているが、本検討時では40年であったためこの値を用いて試算している。）

図2.2-5 SGのNa/水反応を考慮したコスト評価モデル



原点では水リーク発生による電力損失やSG交換費がないため、初期プラント建設費を示している。  
プラント建設費は100とした。

総コスト：プラント建設コスト+SG交換コスト+電力損失コスト

伝熱管破損頻度：1 プラントにつき、1 年間で水リーク事象が発生する回数

SG交換割合：初期リークが発生した後、破損伝播によりSG交換に至る可能性。  
損傷伝熱管が余裕(通常全伝熱管数の10%)を越えた場合、交換とする。

図2.2-6 SG水リークを考慮したコスト計算値

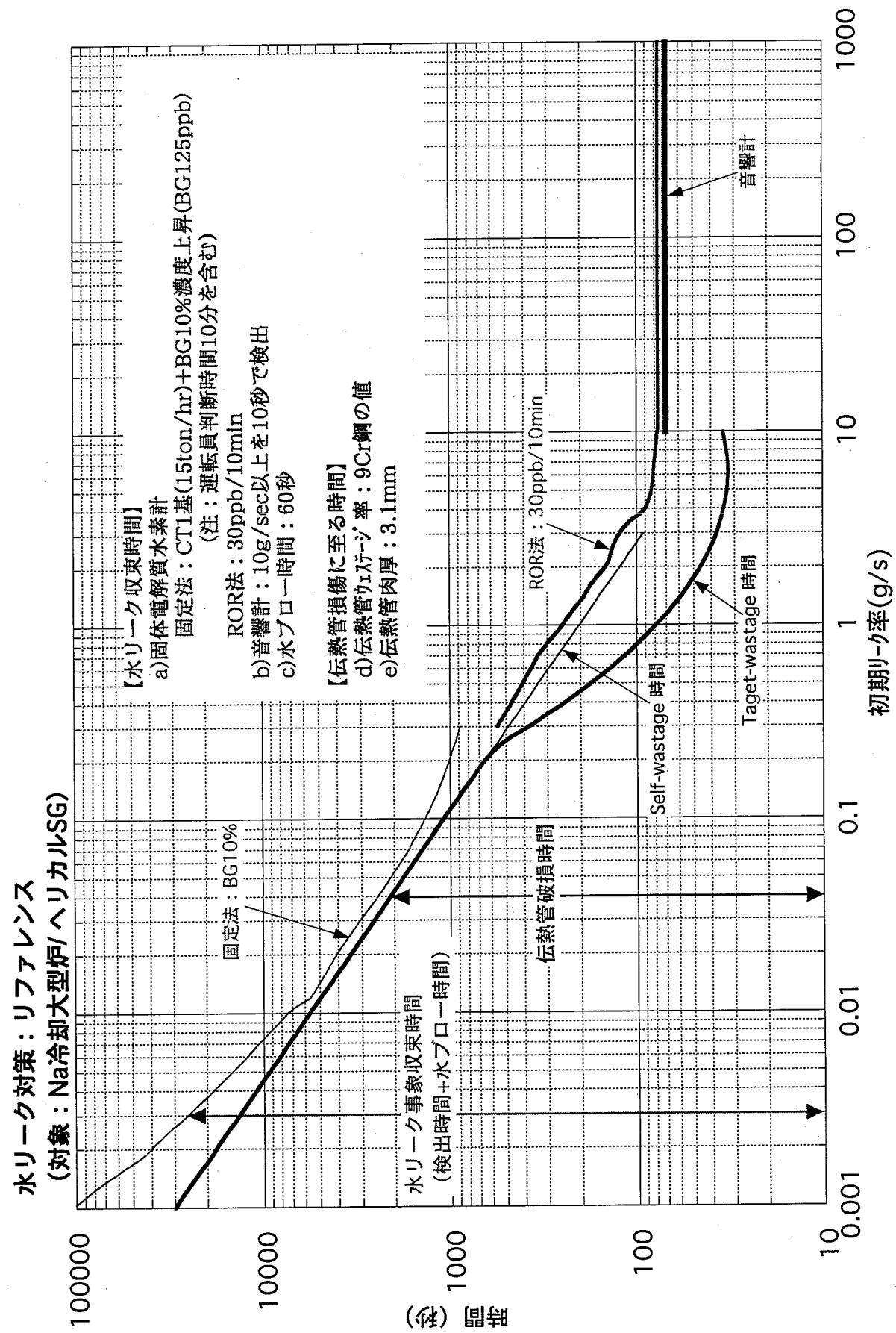


図2.3-1(1) Safety Map (リファレンス)

## CT増設によるBG低減（固定法BG4%）

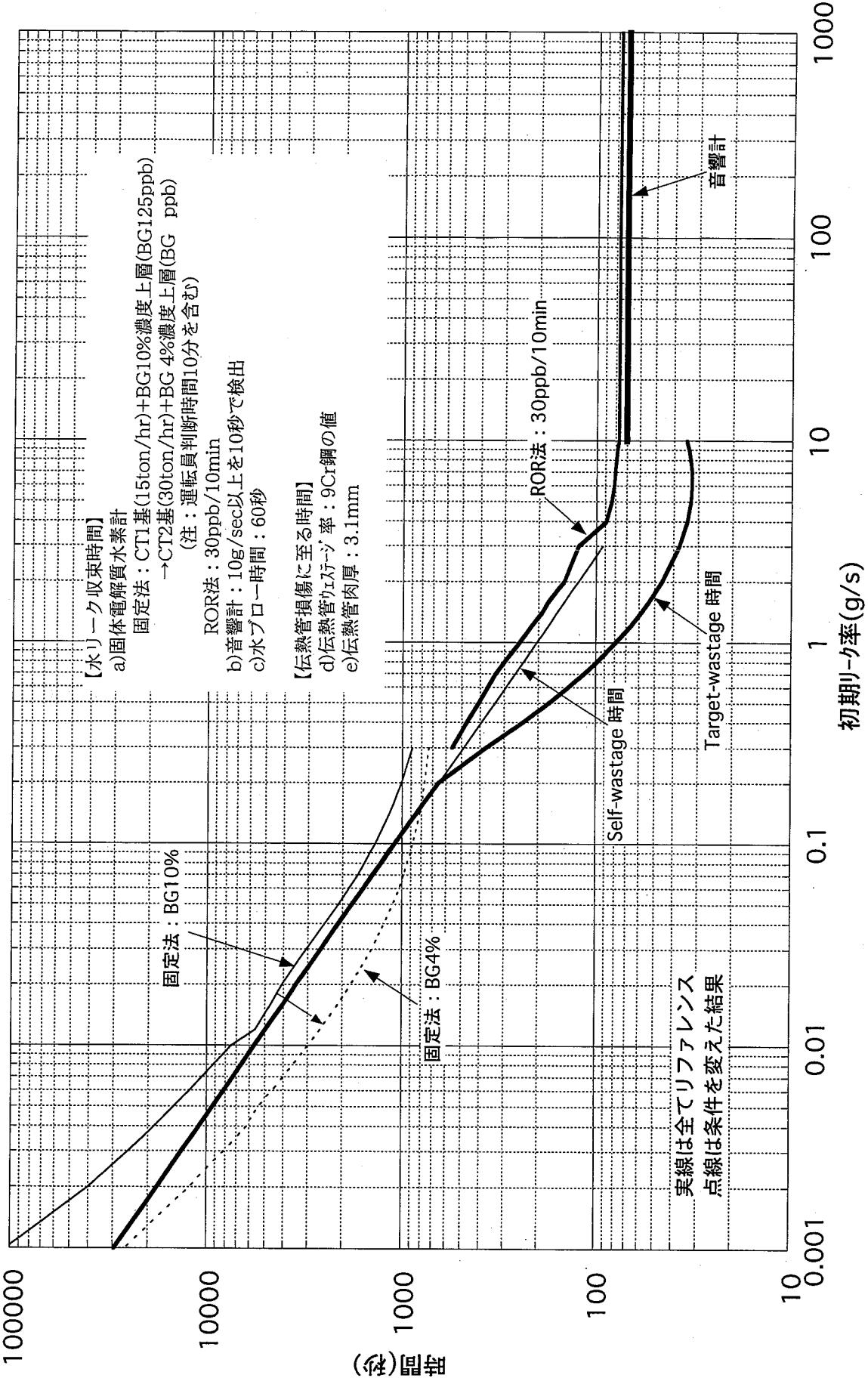


図2.3-1(2) Safety Map (水素計高密度化:固定法BG4%)

固体電解質水素計検出 {ROR法(30ppb/10min)→(15ppb/10min)}

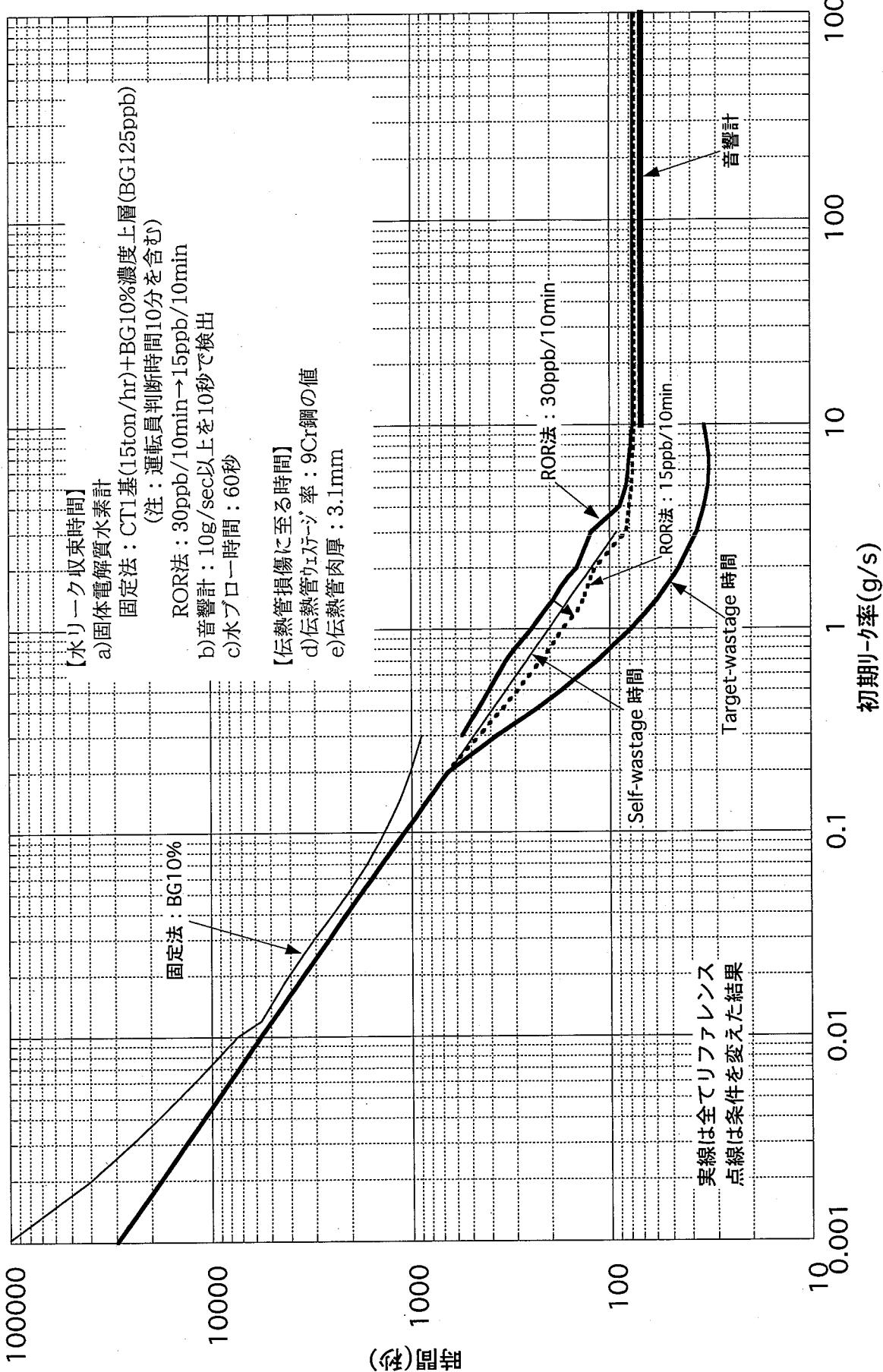


図2.3-1(3) Safety Map (水素計高度化 : ROR法15ppb/10min)

急速水プロロー (60秒→30秒)

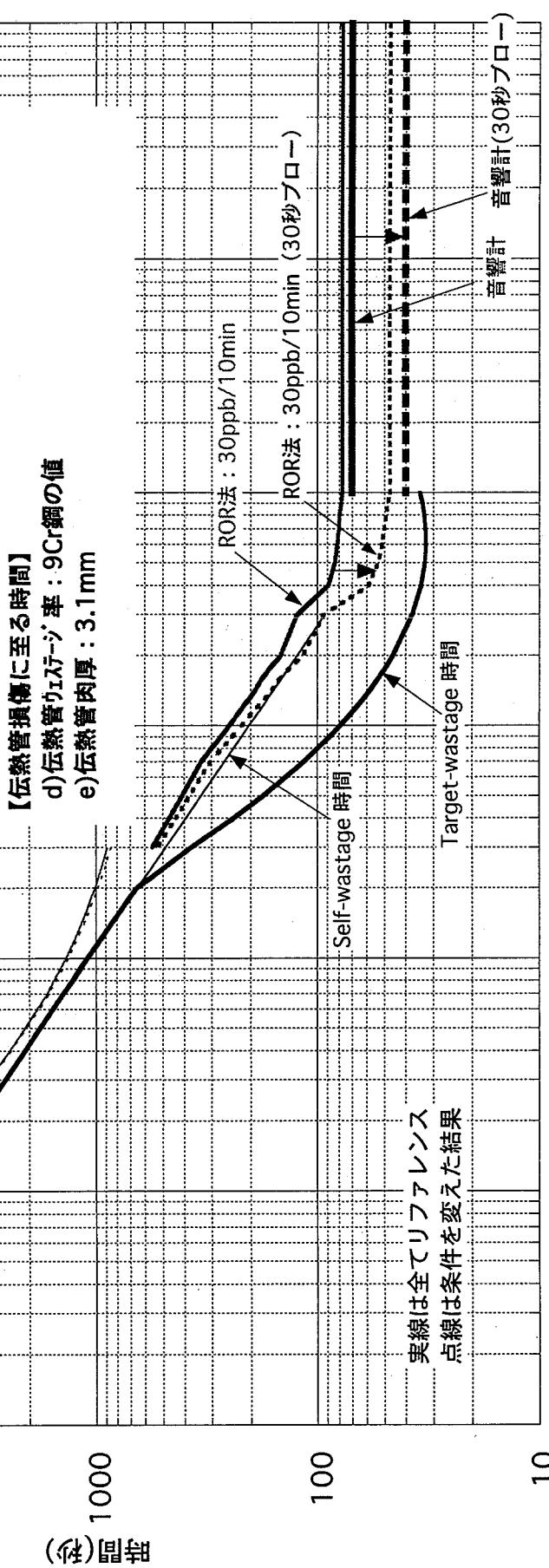
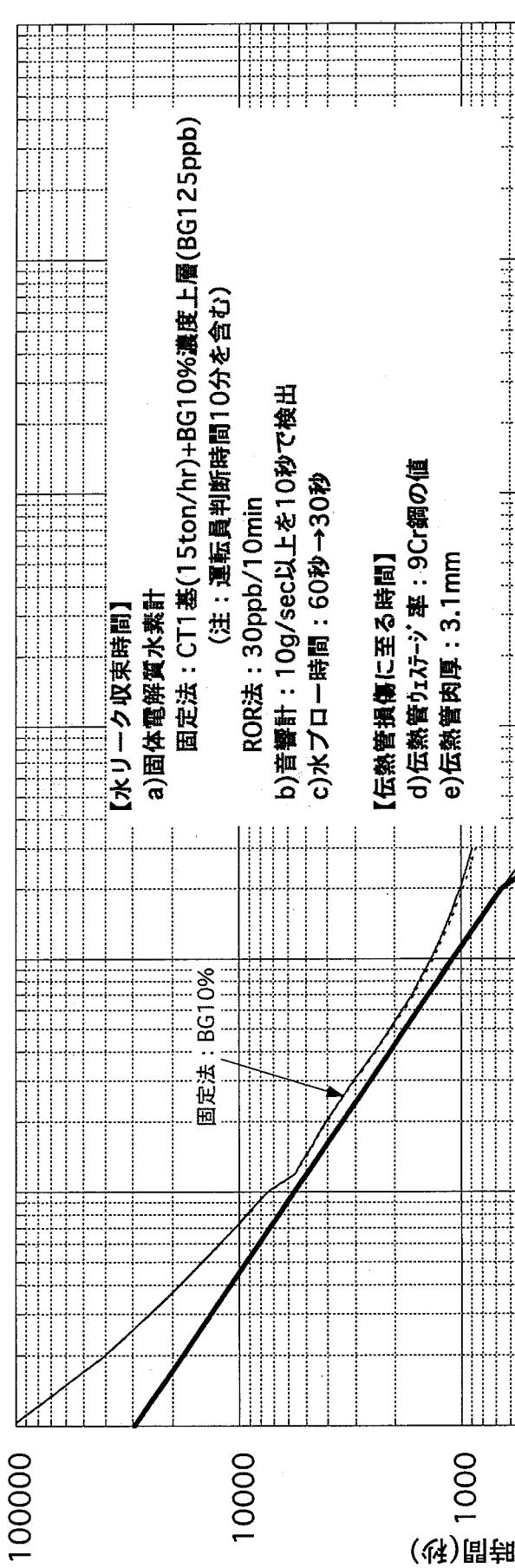


図2.3-1(4) Safety Map (30秒ブロー)

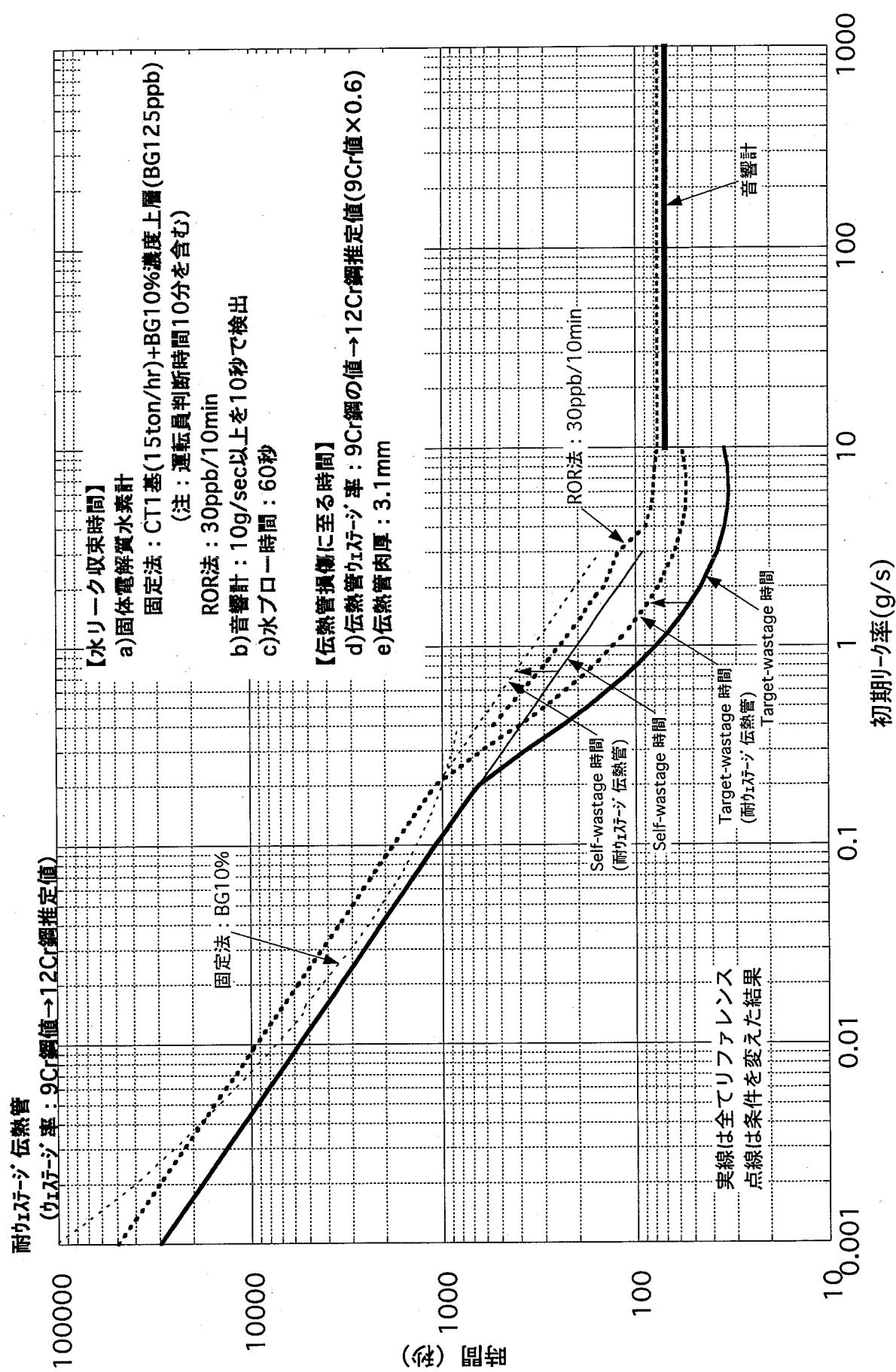


図2.3-1(5) Safety Map (耐ウエスティージ伝熱管)

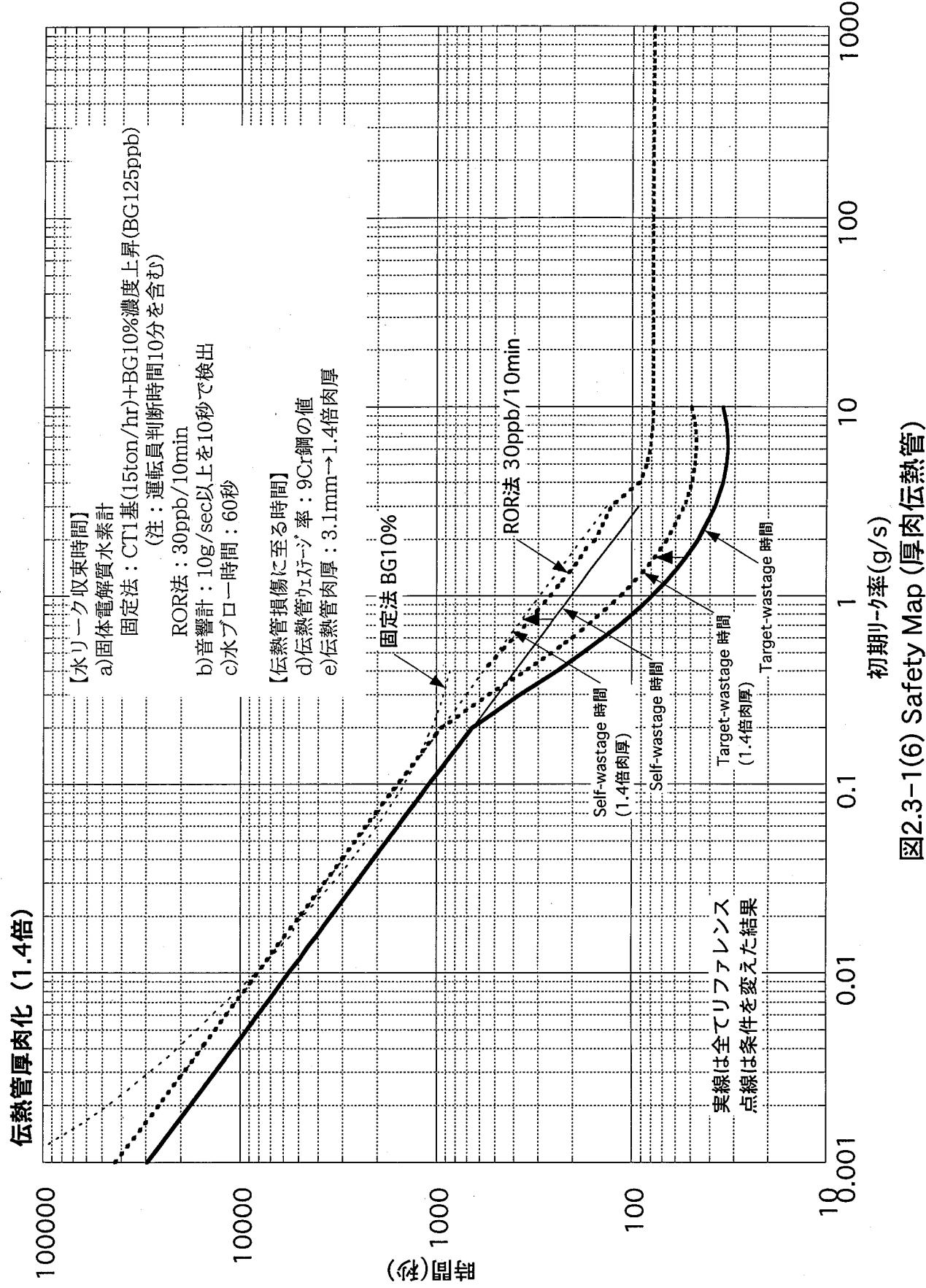


図2.3-1(6) Safety Map (厚肉伝熱管)

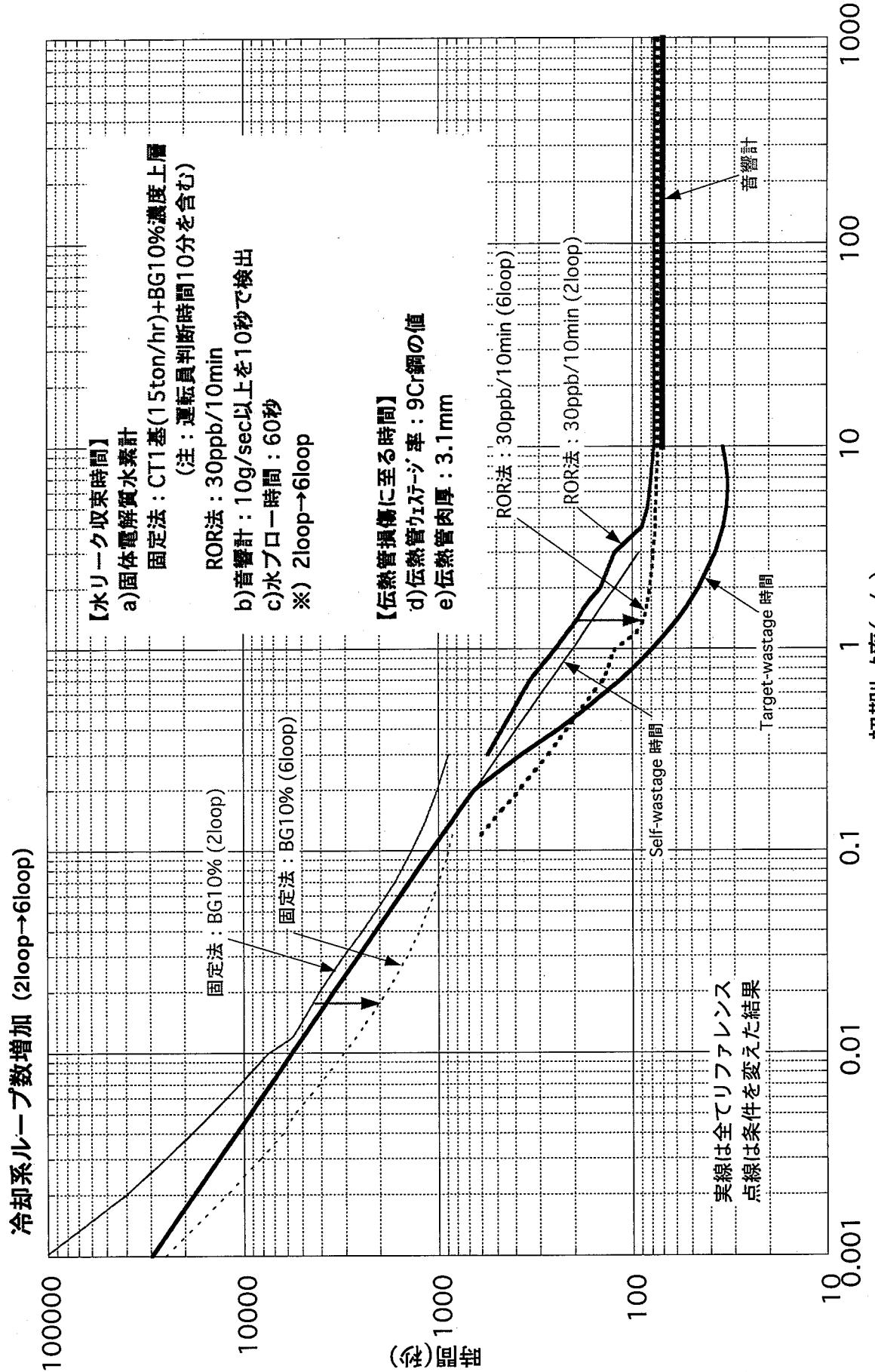


図2.3-1(7) Safety Map (6loop)

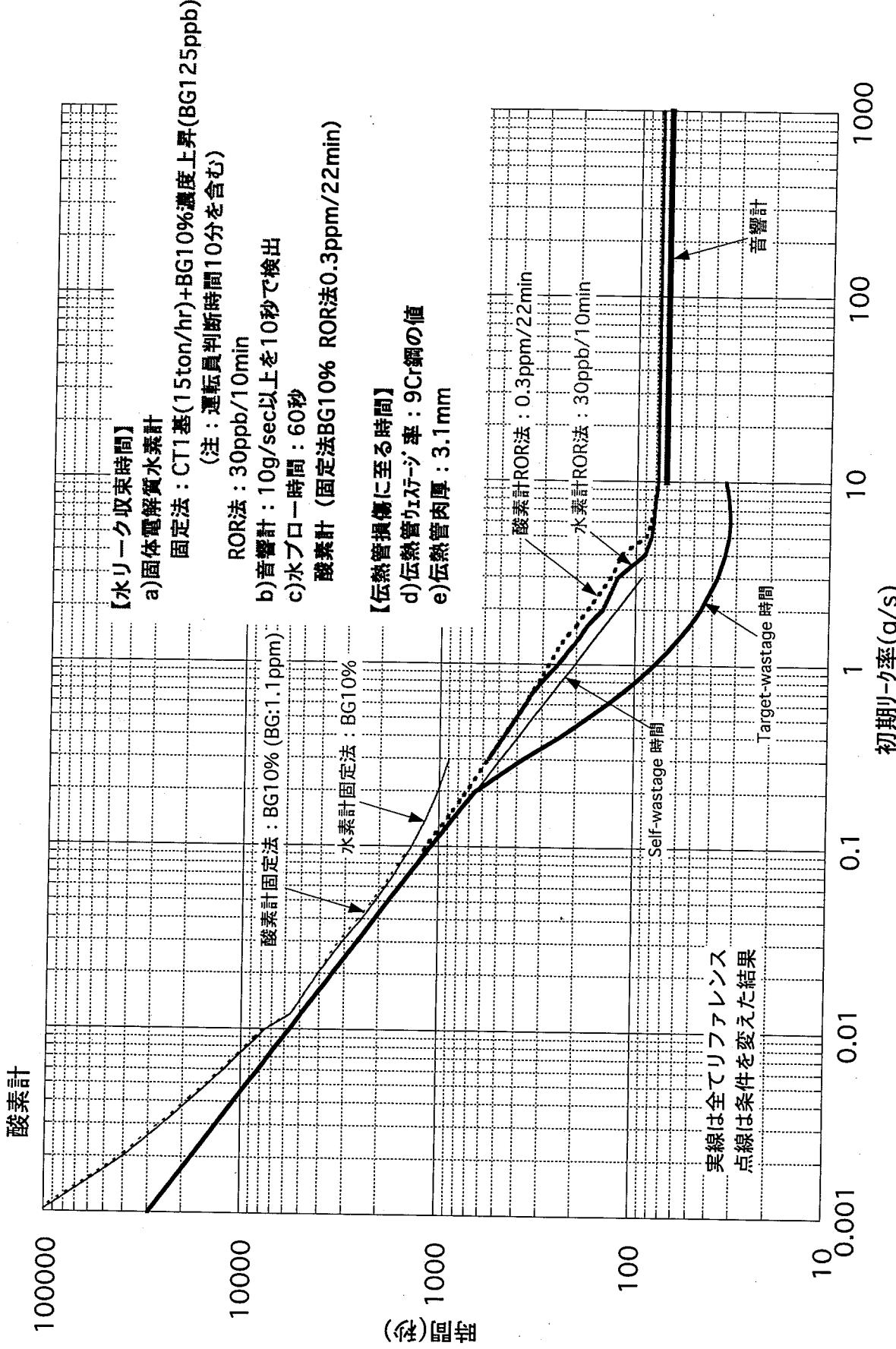


図2.3-1(8) Safety Map (酸素計)

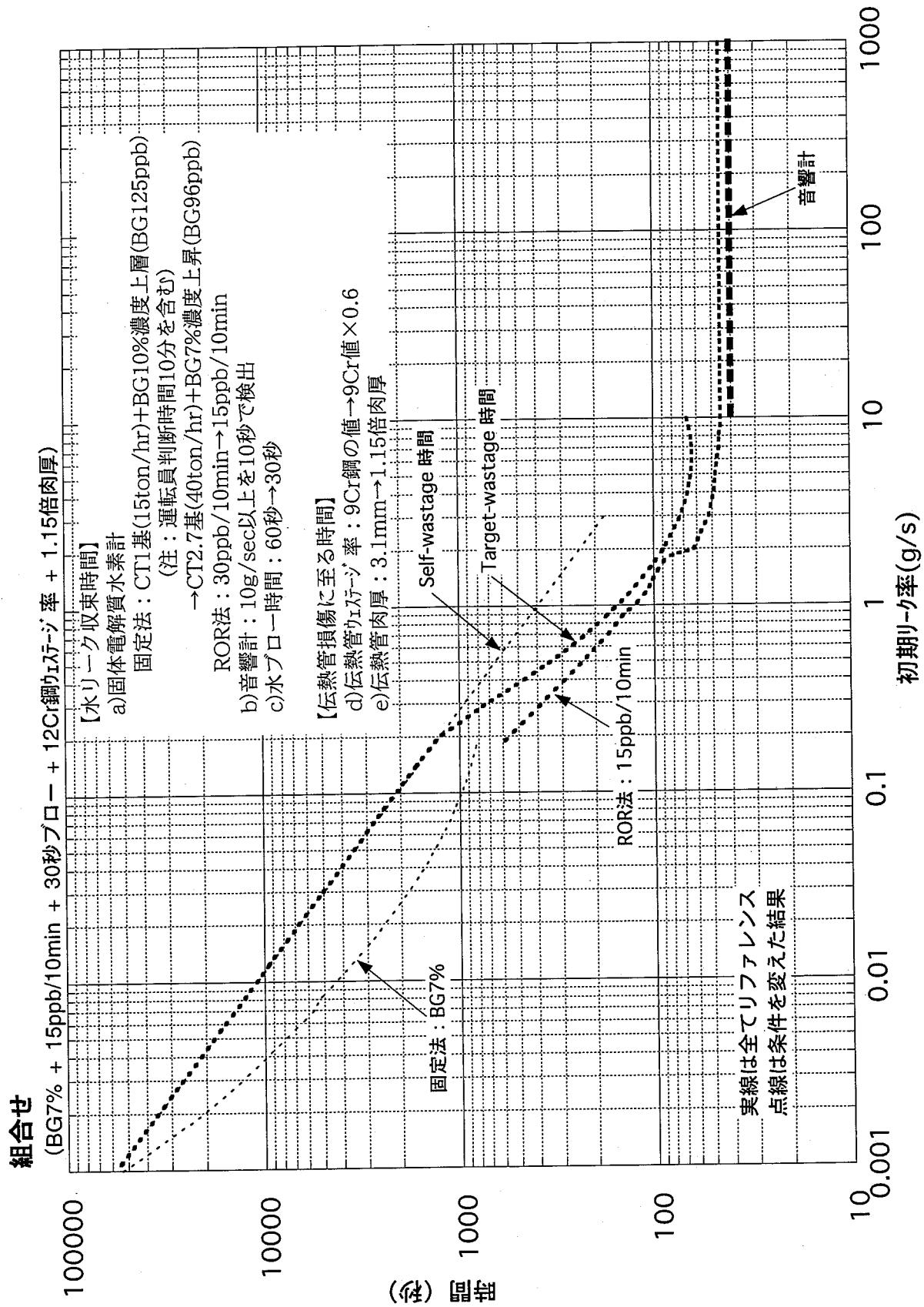


図2.3-1(9) Safety Map (組み合わせ)

実質的稼働率向上

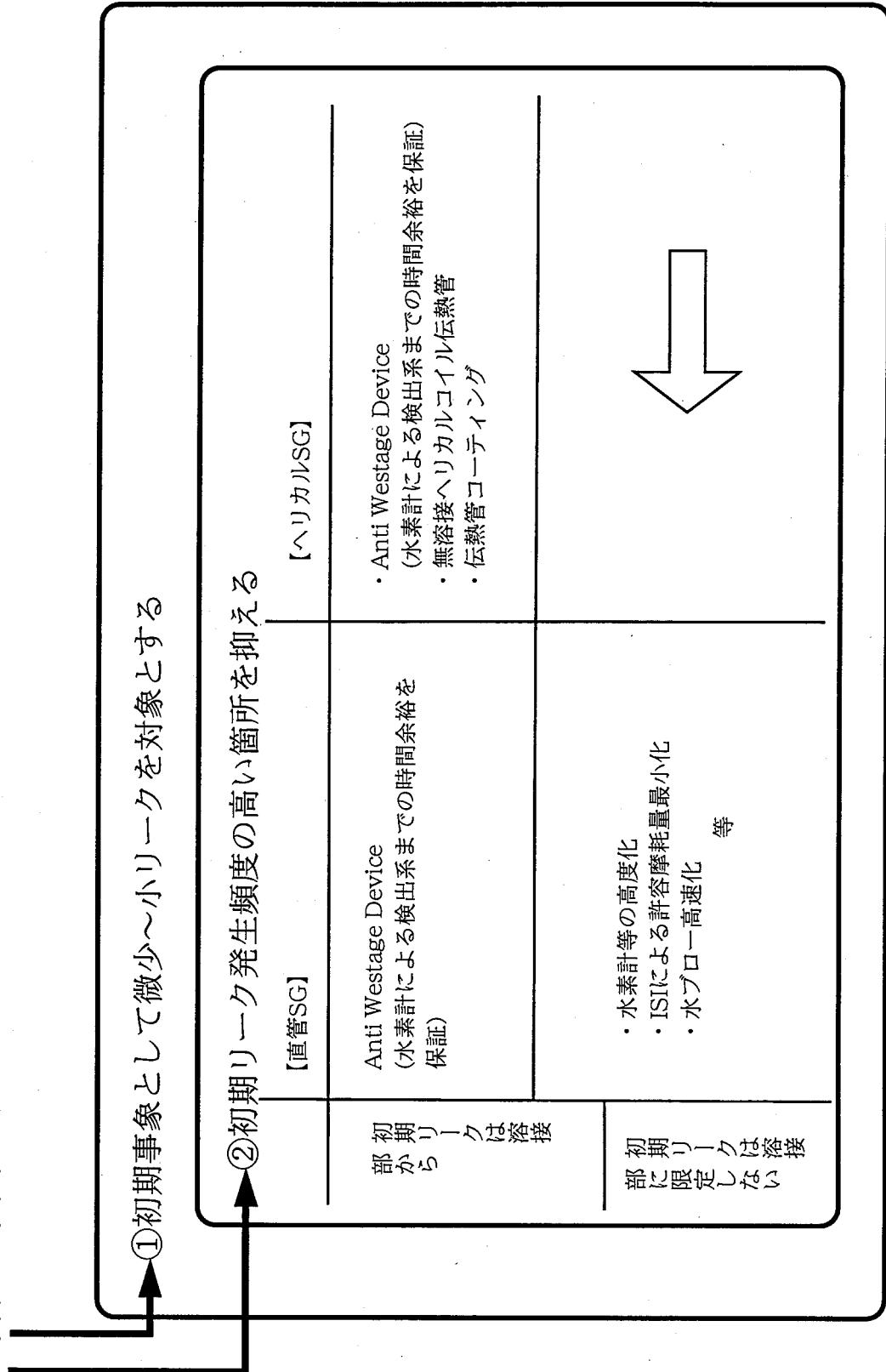


図2.4-1 水リーク設備の効果的対策

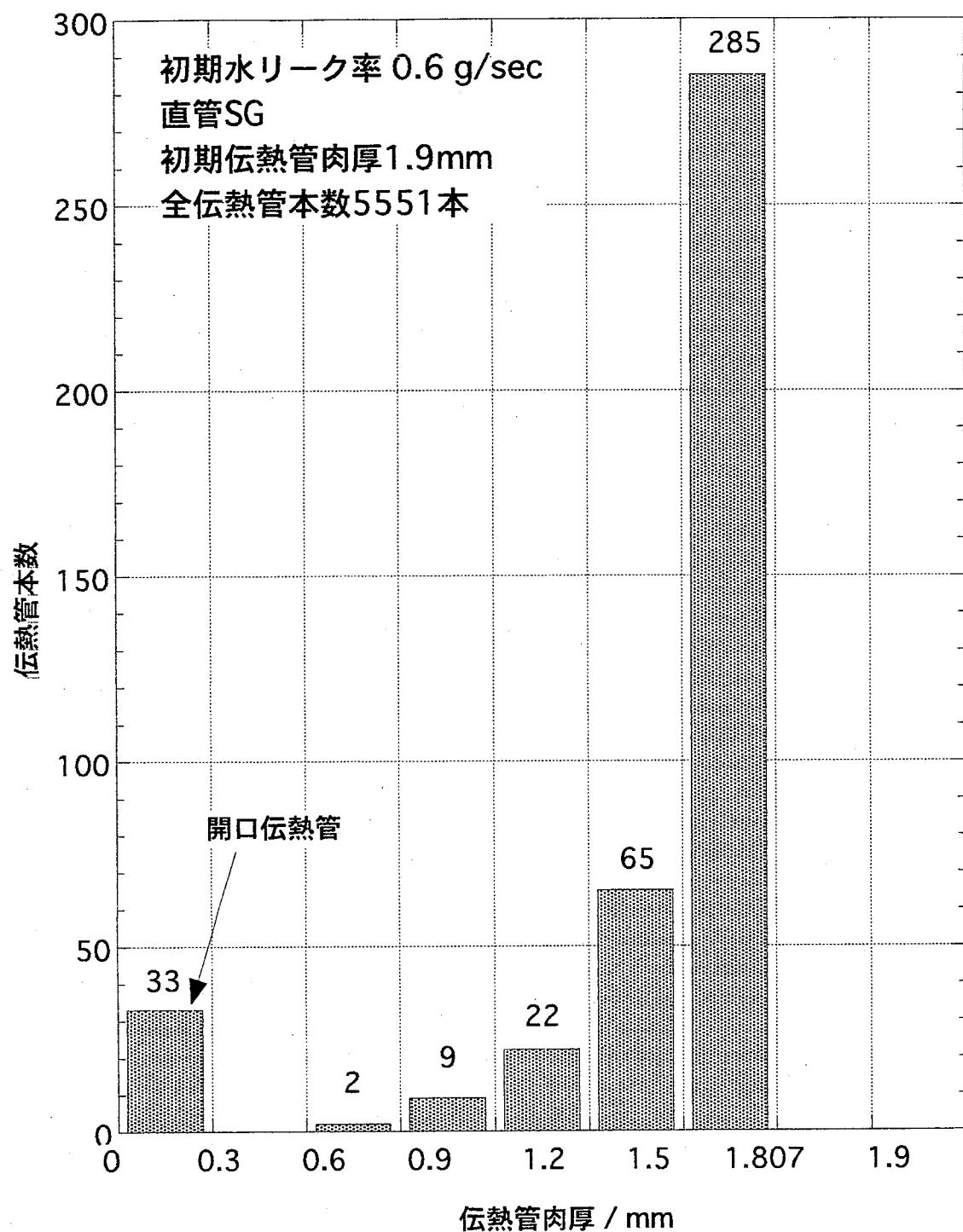


図2.4-2 ウェステージによる伝熱管減肉量ヒストグラム

### 3 ISI&R に関する検討

実用化戦略調査研究におけるNa炉のプラント概念検討では、経済性の観点から物量削減のために主要機器及び容器のコンパクト化を図ってきた。このため、運転信頼性を確保するための検査・補修技術に対して、これまで以上の性能要求が課せられる方向にある。

これらの状況を踏まえ、先行炉からの設計変更を考慮した実用炉向けの検査・補修に対する設計構想を検討するとともに、実証炉をベースとした暫定的な検査要求を満たすための既存の検査・補修技術における課題を調査した。

なお、実用炉では、炉内構造物への検査要求が強くなること、及び運転信頼性の向上が求められることが想定されることから、ここでは、Naドレーンなしでの検査・補修技術の可能性を追求し検討することとした。

#### 3.1 ISIに対する設計構想

実用炉 ISIに対する設計構想について、もんじゅ ISIの考え方を参考にして検討を行った。

主な検討結果は以下のとおりである。詳細は表3-1に示す。

##### (1)原子炉構造

もんじゅとの設計の違いは、原子炉容器のコンパクト化、炉内配管の採用及びガス巻き防止等炉内流動制御構造の拡大等が上げられ、実用炉では炉内構造物への検査要求が高まる方向にある。

このため、原子炉構造に対するISIは、もんじゅと同様に設計裕度で担保することを前提とした上で、予防保全の観点から自主検査として、炉心支持構造物（コーンサポート、炉心槽）および流路パス形成部位（コーンサポート、スライドジョイント、ディッププレート）の肉眼検査を実施することとする。

##### (2)1次主冷却系

主な設計の違いは、冷却材バウンダリの極限化、IHX/ポンプ合体機器採用、主配管の完全2重化が上げられる。

主配管（冷却材バウンダリ）のISIは、もんじゅと同様に運転中の連続監視と停止時の肉眼検査(VM-2)を実施することとする。もんじゅでは、代表箇所について、高温構造設計基準体系強度評価モニタとしての体積検査を実施する計画であるが、実用炉では、先行炉の実績を踏まえ検討することとする。

外管（放射性Naの燃焼抑制）のISIは、停止時に肉眼検査(VM-3)を実施する。

##### (3)2次主冷却系

主な設計の違いは、Naバウンダリの極限化、主配管の完全2重化が上げられる。

主配管（非放射性N aの保持）の ISI は、運転中の連続監視のみとし、もんじゅで計画している停止時の肉眼検査については、2重化により燃焼を抑制されることから実施しない。高温構造設計基準体系強度評価モニタとしての体積検査については、1次主冷却系と同様に、先行炉の実績を踏まえ検討することとする。

外管（格納施設内の非放射性N aの燃焼抑制）の ISI は、停止時に肉眼検査（VTM-3）を実施する。

### 3.2 炉内構造物の補修に対する設計構想

炉内構造物の補修に対する開発目標としては、商用炉として経済性の観点（発電損失リスク低減）から、炉内構造物の万が一の異常に対して、その影響を極限することを目指す（短時間の原子炉停止により復旧できる方策を講じる）。そのため、異常を軽微な状態で早期検知して異常個所の特定を速やかに行い、N a ドレーンなし、炉心退避なしで早期修復を可能とする。具体的な対応については、表3-2に示す。

### 3.3 検査・補修計画

#### (1) ISI 計画

3.1 項で検討した ISI 計画に基づき、実証炉の安全上重要度分類等を参考にしながら、各機器の ISI 計画を表3-3のとおり設定した。検査対象を図3-1に示す。

#### (2) 補修計画

補修計画については、過去のトラブル事例、機器の特性（動的機器／静的機器）から想定される故障の発生頻度と経済性を考慮した以下の分類にて策定した。（通常の保守点検と同様には対応できない補修について）

- A. 過去の経験等から損傷発生を考えていた方が良い機器（1次主循環ポンプ、1次C/T、C RD上部案内管、燃料交換機、2次主循環ポンプなど）については、補修及び交換が容易な設計とする。また、プラント運開時点での補修に必要な補修設備を設ける。
- B. 過去の経験等から損傷発生の可能性は低い機器のうち、万一の損傷発生時に搬出補修を想定する機器（SG、DHXなど）については、引抜き、搬出補修の可能な設計として搬出ルート及び補修エリアを確保する。補修設備は、仮設対応とする。
- C. 過去の経験等から損傷発生の可能性は低い機器のうち、万一の損傷発生時に搬出補修を想定しない機器については、遠隔インプレース補修のできる設計とする。

なお、詳細については、表3-4に示す。

また、代表的な炉内構造物の補修方法についてのシナリオを表3-5のとおり策定した。

### 3.4 現状の検査・補修技術の評価

3.3項で設定した検査・補修計画に対して、Naドレーンなしを前提とした各検査・補修環境を想定した上で、既存の検査・補修技術の評価を行った。技術評価については、各部位別に課題・仕様を整理した上で、技術開発の難易度をA：新たな技術を開発、B：既存をベースに高度化で対応、C：既存で適用化、の分類でランク付けした。また、設計への考慮事項を特記した。主要機器のISI計画に対する技術的課題等を表3-6に、主要機器の補修計画に対する技術的課題等を表3-7にそれぞれまとめた。

各部位の検査技術の難易度を系統別にまとめた結果は、図3-2に示すとおりとなり、ナトリウム中の炉内構造物検査、IHX伝熱管検査等に開発要素が高いことがわかる。

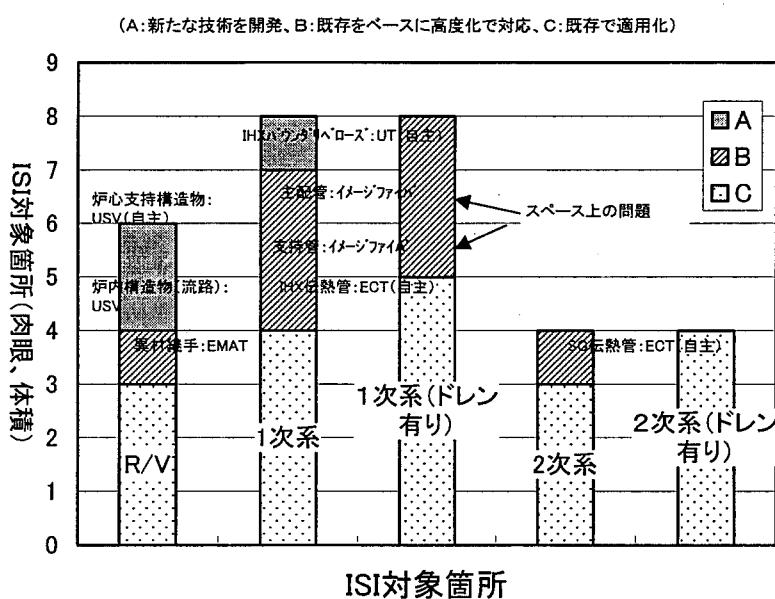


図3-2 ISI対象箇所別の技術評価

さらに、現状の検査・補修技術の課題の整理結果を踏まえ、その中から、今後の技術開発が必要な項目を摘出した。摘出結果を表3-8に示す。

### 3.5 ISI&R検討のまとめ

先行炉の検査・補修の考え方を参考にしながら、実用化戦略調査研究で検討したナトリウム炉プラント概念に対する検査・補修の設計構想を整理するとともに、運転信頼性向上の観点からNaドレーンなしでの検査・補修を前提とした上での既存の検査・補修技術の調査を行い、その課題を摘出した。

その結果、従来から懸案とされているナトリウム中での検査・補修技術についての開発要求が高いことがわかった。プラントの運転信頼性向上を追及する上では、これらの技術を確立することが求められる。

ただし、今回の検討では、先行炉の検査・補修方針を基本とし、実用炉の検査・補修計画を設定しており、必ずしも合理的なものとはなっていない。例えば、炉内構造物に対する検査について、その検査必要性に対する根拠は明確ではない。

そのため、今後は、検査の合理化を検討する一方、検査手法が達成困難とされる部位に対して、その検査の考え方を整理するとともに、必要となる検査・補修技術の達成方策を明かにし、その実用化見通しを立てる必要がある。

表 3-1 ISIに対する設計構想（もんじゅからの変更）

もんじゅとの設計の違い	ISI上の違い		備考 (課題等)
	もんじゅ	実用炉	
原子炉構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉容器ノズルレス</li> <li>・炉内配管の採用</li> <li>・ガス卷防護等炉内流動制御構造の拡大</li> <li>・(60年寿命)</li> <li>・出口温度計装の合理化</li> <li>・液位測御（なりゆき変動）</li> <li>・炉壁保護</li> <li>・異材縫手</li> <li>・受け皿</li> <li>・R/V支持方式（ルーフデッキ採用）</li> </ul>	<p>軽水炉では炉内構造物は大部分が取出し可能でありそれ以外も水中カメラで肉眼検査が容易であるのに対し FBR では、これらの検査が極めて困難である。ASME では VIM-3 を課しているが、もんじゅでは、以下の設計対応を取ることにより ISI を不要としている。</p> <p>炉内構造物に対する ISI 上考慮すべき項目は、1)大きな反応度挿入を行なうよう炉心支持構造物の破損、2)炉心の冷却形状あるいは冷却材流路バスを損なうよう炉心支材の破損である。</p> <p>これらに対しては、1 次応力および疲労損傷が十分小さくなるよう設計すること、また、燃料集合体の検査等による厳格な品質管理を実施することにより、供用中の健全性を担保（ISI を不要）としている。</p> <p>参考</p> <p>支持機能に係る異常の間接的検知として以下のことを実施している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・プロセス量の測定（中性子束モニタ、S/A 出口温度、流量）</li> <li>・変位、傾き等（USV による変位測定、変位計による変位測定、FHM による間隙測定、CRD スカラム時間の測定）</li> </ul>	<p>R/V ノズルレスにより、R/V の検査が堅減できる一方、炉内配管（及びジヨウイク）及びガス卷防護等炉内流動制御構造の拡大に伴い、炉内構造物への検査要求が顕在化してきている。そこで、Na 中可視化技術の高度化を図り、以下の検査を行う。</p> <p>(1) 炉内構造物に対する ISI 上考慮すべき項目は、1) 大きな反応度挿入を行なう炉心支持構造物の破損、2) 炉心の冷却形状あるいは冷却材流路バスを損なうよう炉心支材の破損である。</p> <p>1) に対しては、もんじゅと同様の考え方を取った上で、コーンサポート、炉心槽の肉眼検査（自主）を実施する。</p> <p>2) に対しては、①炉心入口高圧フレナムの破損、②炉内配管の破損を考慮する必要がある。①については、(1)と同様な考え方を取る。②については、外管（支管）を有し、その肉眼検査を実施する。</p> <p>また、冷却材流路を形成するコーンサポート、スライドジョイント、ディップブレートについては、肉眼検査（自主）を実施することとする。</p> <p>(2) 浮位なりゆき変動採用に伴う ISI については、設計裕度内であり、これによるもんじゅとの変更はない。</p> <p>(3) 異材縫手採用に伴う ISI については、体積検査を実施する。</p> <p>(4) 受け皿については通常特種機械的に機能していないため ISI は実施しない。ただし、ISI が要求された場合対応できるようにしておく。</p>
1 次主冷却系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・冷却材バウンダリの極限化（配管支持構造物の削除、補機冷却系およびメンテ冷系の小口径配管採用）</li> <li>・IHX ポンプ合体機器採用</li> <li>・主配管の完全 2 重化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・運転中の Na 漏洩検出器による Na 漏洩の連続監視を基本とし、停止中に漏洩痕跡の有無等の確認（VTM-2）を行う。</li> <li>・さらに、高温構造設計基準体系の強度評価モニタとして、代表箇所の体積検査を実施する。</li> </ul>	<p>・材料の 1.2 Cr への変更に伴い、高温構造設計基準体系強度評価モニタとしての体積検査の有無の検討が必要である。</p>
2 次主冷却系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Na バウンダリの極限化</li> <li>・主配管の完全 2 重化（N2 ガス）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・運転中の Na 漏洩検出器による Na 漏洩の連続監視を行う。停止中に漏洩痕跡の有無等の確認（VTM-2）を行う。</li> <li>・さらに、高温構造設計基準体系の強度評価モニタとして、代表箇所の体積検査を実施する。</li> </ul>	<p>・運転中の Na 漏洩検出器による Na 漏洩の連続監視を行う。停止中の肉眼検査については、2 重化で燃焼を抑制できため、実施しない。</p> <p>・高温構造設計基準体系強度評価モニタとしての体積検査についても実施しない。(もんじゅでの妥当性確認をしていることを前提)</p> <p>・ガードバイパスは、停止中に異常の有無を目標による確認（VTM-3）を行う。</p> <p>(CV 内は、計画に入れるが、CV 外は自主とする。)</p> <p>・SG 伝熱管についての前用炉であることを鑑み、SG 復旧の容易性を追求し ISI の高度化を図る。</p>
崩壊熱除去系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・DHX の採用</li> <li>・A/C、配管の 2 重化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・A/C、配管の ISI は、2 次系主配管と同じ考え方</li> </ul>	<p>・DHX の ISI は液波監視</p> <p>・もんじゅと同じ</p>

表 3-2 炉内構造物の補修に対する設計構想

<p>炉内構造物の補修に対する開発目標</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>商用炉として経済性の観点（発電損失リスク低減）から、炉内構造物の万が一の異常に対して、その影響を局限する。（短時間の原子炉停止により復旧できる方策を講じる。）</li> <li>そのため、異常を軽微な状態で早期検知して異常箇所特定を速やかに行い、Na ドレンなし、炉心退避無で早期修復を可能とする。</li> </ul>	<table border="1"> <tbody> <tr> <td data-bbox="493 183 636 2029"> <p><b>異常の検知</b></p> </td><td data-bbox="636 183 890 2029"> <p>炉心支持機能の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ISI（自主）による予防保全（コーンサポート、炉心槽；VTM-3）</li> <li>材料監視（～60年寿命対応）</li> <li>FHMによる変位の間接測定（燃料交換時における燃料位置の確認）</li> </ul> </td><td data-bbox="890 183 1017 2029"> <p>制御棒挿入性の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>定検におけるスクラム試験による確認</li> </ul> </td><td data-bbox="1017 183 1144 2029"> <p>冷却材流路の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ISI（自主）による予防保全（コーンサポート、スライドジョイント、ディッププレート；VTM-3）</li> <li>（燃料集合体出口 T/C を設置した場合；運転中の炉心代表集合体出口温度により監視も可能となる）</li> </ul> </td><td data-bbox="1144 183 1271 2029"> <p>早期異常箇所の特定</p> </td><td data-bbox="1271 183 1399 2029"> <p>炉心支持機能の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>USVによる目視</li> <li>超音波検出器による損傷の詳細確認 ナトリウムドレン不要</li> </ul> </td><td data-bbox="1399 183 1472 2029"> <p>制御棒挿入性の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>USVによる目視</li> <li>超音波検出器による損傷の詳細確認 ナトリウムドレン不要</li> </ul> </td><td data-bbox="890 183 1017 2029"> <p>冷却材流路の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>USVによる目視</li> <li>超音波検出器による損傷の詳細確認 ナトリウムドレン不要</li> </ul> </td><td data-bbox="1017 183 1144 2029"> <p>早期復旧</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ナトリウム中補修ロボット</li> </ul> </td><td data-bbox="1144 183 1472 2029"> <p>&lt;経済性&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ナトリウムドレン不要（最小炉心退避）</li> </ul> </td></tr> </tbody> </table>	<p><b>異常の検知</b></p>	<p>炉心支持機能の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ISI（自主）による予防保全（コーンサポート、炉心槽；VTM-3）</li> <li>材料監視（～60年寿命対応）</li> <li>FHMによる変位の間接測定（燃料交換時における燃料位置の確認）</li> </ul>	<p>制御棒挿入性の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>定検におけるスクラム試験による確認</li> </ul>	<p>冷却材流路の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ISI（自主）による予防保全（コーンサポート、スライドジョイント、ディッププレート；VTM-3）</li> <li>（燃料集合体出口 T/C を設置した場合；運転中の炉心代表集合体出口温度により監視も可能となる）</li> </ul>	<p>早期異常箇所の特定</p>	<p>炉心支持機能の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>USVによる目視</li> <li>超音波検出器による損傷の詳細確認 ナトリウムドレン不要</li> </ul>	<p>制御棒挿入性の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>USVによる目視</li> <li>超音波検出器による損傷の詳細確認 ナトリウムドレン不要</li> </ul>	<p>冷却材流路の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>USVによる目視</li> <li>超音波検出器による損傷の詳細確認 ナトリウムドレン不要</li> </ul>	<p>早期復旧</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ナトリウム中補修ロボット</li> </ul>	<p>&lt;経済性&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ナトリウムドレン不要（最小炉心退避）</li> </ul>
<p><b>異常の検知</b></p>	<p>炉心支持機能の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ISI（自主）による予防保全（コーンサポート、炉心槽；VTM-3）</li> <li>材料監視（～60年寿命対応）</li> <li>FHMによる変位の間接測定（燃料交換時における燃料位置の確認）</li> </ul>	<p>制御棒挿入性の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>定検におけるスクラム試験による確認</li> </ul>	<p>冷却材流路の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ISI（自主）による予防保全（コーンサポート、スライドジョイント、ディッププレート；VTM-3）</li> <li>（燃料集合体出口 T/C を設置した場合；運転中の炉心代表集合体出口温度により監視も可能となる）</li> </ul>	<p>早期異常箇所の特定</p>	<p>炉心支持機能の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>USVによる目視</li> <li>超音波検出器による損傷の詳細確認 ナトリウムドレン不要</li> </ul>	<p>制御棒挿入性の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>USVによる目視</li> <li>超音波検出器による損傷の詳細確認 ナトリウムドレン不要</li> </ul>	<p>冷却材流路の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>USVによる目視</li> <li>超音波検出器による損傷の詳細確認 ナトリウムドレン不要</li> </ul>	<p>早期復旧</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ナトリウム中補修ロボット</li> </ul>	<p>&lt;経済性&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ナトリウムドレン不要（最小炉心退避）</li> </ul>		

表3-3 ISI計画(1/2)

	機器	対象部位	安全上の要求機能	安全上重要度分類	程度	検査方法	備考
原子炉構造部	胴体溶接部 (Na <sup>+</sup> /カドリ)	原子炉冷却材バウダリの形成	PS-1	CN	Na漏えい検出器	CM : 連続漏洩監視	
	胴体溶接部 か'-ガ'ルカ'ウダリ	か'-ガ'ルカ'ウダリの形成	PS-2	CN	イメージフレイム	(VTM: 肉眼試験) (VTM-1: 表面欠陥や表面状態を把握したもの) (VTM-2: 漏洩の程度を要求したもの) (VTM-3: 漏洩の痕跡を把握したもの)	
	胴体異材縫手部	原子炉冷却材バウダリの形成	PS-1	V0	E.M.A.T.	運転中を通じて放射性が'-ガ'ルの漏洩の有無を連続監視。	
ガードベッセル	原子炉溶接部	原子炉冷却材バウダリの形成	MS-1	VTM-3	イメージフレイム	原子炉冷却材バウダリ容器の健全性の確認。	
炉心支持構造物	炉心構、コーンサポート	炉心形状(位置)の維持	PS-1	VTM-3 (自主)	USV	Na漏洩事故時に、漏洩Naを保持する部位に対し、異常、欠陥(変形、クラック等)の有無を確認。	
	炉内構造物(流路) スライドシート、ディレクターブレット、回転アシ'UIS合 ルーフデッキ	原子炉冷却材流路の形成 か'-ガ'ルカ'ウダリの形成 支持構造機能の維持	PS-1 PS-2 PS-2	VTM-3 (自主)	放射線モニタ	原子炉停止中に代表的な部位に対して異常の有無を確認。	
1次系配管	主配管溶接部	加'-ガ'ルカ'ウダリの形成	PS-1	CN	放射線モニタ	原子炉停止中に代表的な部位に対して異常の有無を確認。	
	支持管	原子炉冷却材バウダリの形成、 か'-ガ'ルカ'ウダリの形成	PS-1	VTM-2	イメージフレイム	運転中を通じて放射性が'-ガ'ルの漏洩の有無を連続監視。	
外管	溶接部 (Na <sup>+</sup> /カドリ)	原子炉冷却材被覆の確保	MS-1	VTM-3	イメージフレイム	原子炉運転中に行うNa漏洩検出器によるNa漏洩の連続監視。	
IHX/ボンブ	溶接部 (か'-ガ'ルカ'ウダリ)	原子炉冷却材バウダリの形成	PS-1	CN	Na漏えい検出器	VO: 体積検査	
	溶接部 (か'-ガ'ルカ'ウダリ)	か'-ガ'ルカ'ウダリの形成	PS-2	CN	放射線モニタ	原子炉停止中に代表的な部位に対して異常の有無を確認。	
	支持構造物	支持構造機能の維持	PS-3	VTM-3	イメージフレイム	原子炉停止中に代表的な部位に対して異常の有無を確認。	
1.2次バウダリ構造	伝熱管バウダリハローズ	原子炉冷却材バウダリの形成	PS-1	V0(自主)	E.C.T., U.T	安全上重要度分類: 実証炉ベース	
1次側ガ'ルベ'ゼル	胴溶接部	原子炉冷却材被覆の確保	MS-1	VTM-3	イメージフレイム	原子炉停止中に行う異常、欠陥(変形、クラック等)の有無の確認。	
2次側ガ'ルベ'ゼル	胴溶接部 (塞栓が'-ガ'ルカ'ウダリ)	Na漏えいによる燃焼の抑制	MS-2	VTM-3	イメージフレイム	原子炉停止中に行う異常、欠陥(変形、クラック等)の有無の確認。	
1次Arガス系	1次Arガス系	加'-ガ'ルカ'ウダリの形成 支持構造物	PS-2 PS-3	CN	放射線モニタ	寿命中1~2回、健全性の確認を行う。	
2次主冷却系	配管	原子炉停止後の除燃機能、非放射性Naの保持	PS-2 PS-3	VTM-3	イメージフレイム	Na漏洩事故時に、漏洩Naを保持する部位に対し、異常、欠陥(変形、クラック等)の有無を確認。	
	支持装置	支持構造機能の維持	PS-3	VTM-4	イメージフレイム	運転中を通じて放射性が'-ガ'ルの漏洩の有無を連続監視。	
外管(CV内)	溶接部 (塞栓が'-ガ'ルカ'ウダリ)	Na漏えいによる燃焼の抑制	MS-2	VTM-3	目視	原子炉停止中に行う異常、欠陥(変形、クラック等)の有無の確認。	
蒸気発生器	伝熱管	原子炉停止後の除燃機能、Naと水の導通性	PS-2	CN	水漏えい検出器	SG伝熱管の健全性を確認。	
	脇	原子炉停止後の除燃機能	PS-2	CN	Na漏えい検出器	伝熱管の健全性を確認。	
						2次冷却材バウダリの漏洩の有無を確認。	

表3-3 ISI計画(2/2)

崩壊熱除 去系	主循環ポンプ 脇	原子炉停止後の除熱機能、非放 射性Naの保持	MS-3	CM	Na漏えい検出器	2次冷却材が「カグダリ」の漏洩の有無を確認。
		支持構造物 支持構造機能の維持	MS-3	VTM-4	イメージファイン	原子炉停止中に行う異常、欠陥(変形、クラック等)の有 無の確認。
	Na'カグダリ 支持構造物	原子炉停止後の除熱機能、原子 炉冷却材が「カグダリ」の形成	MS-2	CM	Na漏えい検出器	原子炉停止中に行う異常、欠陥(変形、クラック等)の有 無の確認。
		支持構造機能の維持	MS-3	VTM-3	イメージファイン	原子炉停止中に行う異常、欠陥(変形、クラック等)の有 無の確認。
	外管(CV内) 接続部 (壁素ガス「カグダリ」)	Na漏えいによる燃焼の抑制	MS-2	VTM-3	目視	原子炉停止中に行う異常の有無の確認。
		原子炉停止後の除熱機能、Na 漏えいによる燃焼の抑制	MS-2	CM	Na漏えい検出器	原子炉停止中に行う異常、「カグダリ」の漏洩の有無を確認。
	IRACS 支持構造物	支持構造機能の維持	MS-3	VTM-3	イメージファイン	原子炉停止中に行う異常、欠陥(変形、クラック等)の有 無の確認。
		加'ガ'ガ'カ'ガ'カ'ガ'の形成	PS-2	CM	放射線モニタ	運転中を通じて放射性ガスの漏洩の有無を連続監視。
	燃料取扱 設備	加'ガ'ガ'カ'ガ'カ'ガ'の形成				

表 3-4 補修計画

分類	対応方針	対象機器	不具合時例
過去の経験等から損傷発生を考えておいた方がよい機器 ・動的機器 ・交換の可能性がある静的機器	○補修容易な設計、交換容易な設計 ○プラント運開時点で以下の補修設備を準備、補修設備は共用化を図る。 ・搬出入キャスク ・機器洗浄設備 ・アクセス孔 ・搬出入ルート(ハッチ、クレーン等) ・補修スペース	・1次主循環ポンプ ・1次C/T ・CRD上部案内管 ・2次主循環ポンプ ・2次C/T ・燃料交換機(アーム折り畳み不良時等)	海外炉で、ポンプの故障、CRDベローズ破損等事例有。また、1次系への空気混入による1次C/T閉塞事例有。
万一の損傷発生時に搬出補修を想定する機器	○引抜き、搬出補修が可能な設計 ○プラント運開時点での準備 ・搬出入ルート(ハッチ、クレーン吊り代等、但し、ハッチは故障時に建屋切り欠きでも可) ・補修スペース	・SG胴 ・DHX ・炉内構造物	考慮すべき事象なし。
過去の経験から損傷発生の可能性が低い機器	○故障発生時に以下の仮設備を準備 ・補修設備(搬出入キャスク、洗浄設備) ・1次Naドレン配管設備	・回転プラグ ・原子炉容器 ・ルーフデッキ ・ガードベッセル ・炉心支持構造 ・1次主配管 ・IHX胴 ・SG伝熱管	海外炉でSGの故障事例有。

表 3-5 インプレース補修シナリオ

## (1) コーンサポート(ナトリウムドレンなし)

(1/2)

ステップ	実施内容	要求条件
1	<b>ISI 検査</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 炉上部ピット蓋を回転させ、小ハッチをメンテナンス上部に移動する。</li> <li>b. プラグ取扱器にて、メンテナンスホール用プラグを取り出し、アクセスを可能とする。(中間プレナム上部隔壁のプラグを取り出す)</li> <li>c. 検査装置本体をハッチ上部に着座させる。</li> </ul>	天井クレーン プラグ取扱器、ピット・デッキ間の中継装置
2	<b>コーンサポート変形箇所の検出</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 多関節マニフレータ USV 検査装置により変形箇所を検出し、その位置を同定する。</li> </ul>	多関節マニフレータ USV 検査装置 中間プレナム上部隔壁を開放(そうでなければ蓋を取る作業をステップ 1 で行う。)
3	<b>変形箇所 Na の除去</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. ポッドチャンバを用いた検査装置を変形箇所に取り付ける。</li> <li>b. チャンバ内を Na から Ar ガスへ置換する。(シッピングチューブ等にて Na を吸い出す。)</li> <li>c. 高温ガス(Ar)プロー装置にて残存Naを除去する。</li> </ul>	Ar ガスプロー装置 プロー装置 排ガス処理装置
4	<b>変形箇所の詳細チェック</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 超音波検出器により変形箇所の詳細チェックを行う。</li> </ul>	クラックの形状(巾、クラックの入り方)把握
5	<b>変形の原因究明</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 变形の原因究明を行う。</li> </ul>	
6	<b>補修方法の決定</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. インプレース補修を行うか決定する。</li> </ul>	
7	<b>インプレース補修の準備</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. マニフレータに切削装置をセットする。</li> <li>b. ポッドチャンバ内のガス圧を若干高めとし、切削、溶接中に Na の浸入がないようにする。</li> </ul>	ガス圧制御
8	<b>インプレース補修</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 切削装置により規定の深さまで削りクラックを除去する。</li> </ul>	切削深さの制御 切削機の小型化

	b.マニプレータに溶接装置をセットし溶接を行う。	溶接機の開発 溶接機の設置精度 溶接中の温度を低くする。 溶接機まわり： 60℃程度 溶接部：100℃程度 残存 Na の影響
9	<p><b>補修後検査</b></p> <p>a.通常は非破壊試験としては放射線透過試験（RT）が要求されているが、炉心に近く放射線が強いことからその場合には代替試験を行うものとする。耐圧試験については炉内に燃料があることから、1.1倍の耐圧試験となる。（最終的には規制側との協議による）</p> <p>b. RT の代替としては、施行後、浸透探傷試験（PT）及び超音波探傷試験（UT）を実施する。</p>	UT、 PT ができること。
10	<p><b>確認及び後片付け</b></p> <p>a.検査装置を撤去する。</p>	

## (2) ディッププレート(Nsl-1400)(ナトリウムドレン)

(2/2)

ステップ <sup>°</sup>	実施内容	要求条件
1	<b>ISI 検査</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 炉上部ピット蓋を回転させ、小ハッチをメンテナンス上部に移動する。</li> <li>b. プラグ取扱器にて、メンテナンスホール用プラグを取り出し、アクセスを可能とする。</li> <li>c. 検査装置本体をハッチ上部に着座させる。</li> </ul>	天井クレーン プラグ取扱器、ピット・ デッキ間の中継装置
2	<b>変形箇所の検出</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 多関節マニピュレータ USV 検査装置により変形箇所を検出し、その位置を同定する。</li> </ul>	多関節マニピュレータ USV 検査装置
3	<b>1次系 Na ドレン</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. IHX/ポンプ合体機器中の Na を1次系ダンプタンクにドレンして、炉内の液位を下げる。</li> </ul>	
4	<b>ディッププレート変形箇所 Na の除去</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. マニピュレータで作業場が見えるカメラを設置する。</li> <li>b. マニピュレータに高温ガス(Ar)ブロー装置にて残存Naを除去する。</li> </ul>	ブロー装置 排ガス処理装置
5	<b>変形箇所の詳細チェック</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 超音波検出器により箇所の詳細チェックを行う。</li> </ul>	クラックの形状(巾、 クラックの入り方)把握
6	<b>変形の原因究明</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 变形の原因究明を行う。</li> </ul>	
7	<b>補修方法の決定</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. インプレース補修を行うか決定する。</li> </ul>	
8	<b>インプレース補修の準備</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. マニピュレータに切削装置をセットする。</li> </ul>	
9	<b>インプレース補修</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 切削装置により規定の深さまで削りクラックを除去する。</li> <li>b. マニピュレータに溶接装置をセットし溶接を行う。</li> </ul>	切削深さの制御 切削機の小型化 溶接機の開発 溶接機の設置精度 溶接中の温度を低くする。 溶接機まわり： 60°C程度 溶接部：100°C程度 残存Naの影響

10	<p><b>補修後検査</b></p> <p>a.通常は非破壊試験としては RT が要求されているが、炉心に近く放射線が強いことからその場合には代替試験を行うものとする。耐圧試験については炉内に燃料があることから、1.1 倍の耐圧試験となる。(最終的には規制側との協議による)</p> <p>b. RT の代替としては、施行後 Final PT 及び UT を実施する。</p>	UT、PT ができること。
11	<p><b>確認及び後片付け</b></p> <p>a.検査装置を撤去する。</p> <p>b.1 次系ダンプタンク中の Na を 1 次系ループに充填する。</p>	

## ※原子炉容器内 Na のドレン性について

- 原子炉容器内 Na を 1 次系ダンプタンクにドレンした場合の液位変化分を計算すると、約 2. 2 m 液位高さに相当する。ただし、炉内構造物は考慮していない。
- ・ 1 次系ダンプタンクの容量 : 1 6 5 m<sup>3</sup> (IHX/ポンプ合体機器内Na 容量)
  - ・ 原子炉容器直径 : 9. 6 m

従って、原子炉容器内の Na 液位から 2. 2 m 下までは、Na をドレンして補修を行うこととする。

表 3-6 主要機器の ISI 計画及び技術的課題(1/7)

ISI 計画										
＜検査環境＞T：温度、N：ナトリウム、R：放射能、S：空間の厳しい箇所 *：ナトリウムドレンする場合										
検査対象	安全上の要求機能	程度	検査方法	検査環境	設計と検査環境の関係	R&D 要否	要求	方式	仕様/課題	設計への反映/課題
原子炉構造	胴体溶接部 (かくたいゆうせつぶ ト)、原子炉冷却材 (わくねりょうくざい) の形成	連続監視 ナトリウム滲 えいの検出 器	T, N, R	II	C	微少滲出 小滲出以上 中、大滲出	ガスサンプリング方式 (RID, STD, DPD) レーザ法(LLD) 接触式 誘導式波位計 イメージファイバ	もんじゅ実績 100g/h-24h 以内検出 目標 100g/h 以下一検出器位置で即時 検出 (現在開発中)	サンプリング位置・容積、接触式設置位置、 液位計設置位置等に設計で対応	
原子炉構造	原子炉冷却材 (わくねりょうくざい) の形成	肉眼試験 イメージファイ バ	T, R, S	II	C	V T M 2	検査機 イメージファイバ	もんじゅ実績 耐熱 250°C 度 0.8mm もんじゅ実績 耐熱 240°C ガードベゼ ル間隔 300mm	要求解像 度 0.8mm 遠隔操作の検査機挿入及び走行ハーネス確保 に設計対応	
原子炉構造	原子炉冷却材 (わくねりょうくざい) の形成	連続監視 放射線モニ タ	-	I	C	-	-	-	-	
原子炉構造	原子炉冷却材 (わくねりょうくざい) の形成	EMAT	T, R, S	II	B	内面欠陥 Xt	EMAT 走行台車	異物の検出は感度向上必要 もんじゅ 耐熱 240°C 胴体溶接部記述と同じ	遠隔操作の検査機挿入及び走行ハーネス確保 に設計対応 (現設計では容器とバッカ間の隙間 : 150mm)	
原子炉構造	原子炉冷却材 (わくねりょうくざい) の形成	体積試験 (自主)	USV	T, N, R, S	II	A	V T M 3	垂直型 USV Na 中駆動機構	垂直型 USV Na 中駆動機構 Na 中駆動機構を新たに開発する必要あり	
炉心槽、 ジョギート	炉心形状 (位置) の維持	肉眼試験 (自主)	USV					垂直型 USV Na 中駆動機構	垂直型 USV Na 中駆動機構 Na 中駆動機構を新たに開発する必要あり	
コーンサホート、 スラスト・ジョイント、 ディップブレット	原子炉冷却材流 路の形成	肉眼試験 (自主)	USV	T, N, R, S	III	A	V T M 3	炉心槽、コーンサポートの記述と同じ	アクセスするために、中間プレナム上部隔壁 を開放、もしくは検査用ホール (蓋付き) を 設ける必要がある。	
炉心槽、 支持構造機能の 維持	支持構造機能の 維持	肉眼試験 イメージファイ バ	T, R	II	C	V T M 3	イメージファイ バ	原子炉構造胴体溶接部(かくねりょうく ざい)	原子炉構造胴体溶接部(かくねりょうく ざい)の記述と同じ	
炉心槽、 バーナウ ダリ	加バーナウ ダリの形成	連続監視 放射線モニ タ	-	I	C	-	-	-	-	

表3-6 主要機器の ISI 計画及び技術的課題(2/7)

検査対象	安全上の要求機能	ISI 計画				ISI 技術的課題(既存の検査技術の評価及び課題)			
		程度	検査方法	検査環境	設計と の関係	R&D 要否	要求	方式	仕様/課題
ガードベゼル (頭部溶接部)	原子炉冷却材波 位の確保	肉眼試験 クリアランス測定	(イージ'フ)	II	C	V TM 3	(イージ'フ)	検査機	I : 設計対応との関係低 A : 新たな技術を開発 B : 既存をベースに高度化 C : 既存で適用化
1 次系 配管	主配管 溶 接部	ナリム編 えい板出 器	連続監視	T, R, S	II	C	微少漏洩 小漏洩以上	ガソアリック方式 (RID, SID, OPD) レーザ法 (LLD) 保溫材組込接触式 接觸式	原子炉構造鋼体溶接部(トリム'ウンド'リ) の記述と同じ もんじゅ実績 原子炉胴体検査と合わせてがードベオ間アラス測定実施
	原子炉冷却材バ リダリの形成	肉眼試験 バ	肉眼試験 バ	T, R, S/S*	II	B (B*)	V TM 2	検査機	原子炉構造鋼体溶接部(トリム'ウンド'リ) の記述と同じ もんじゅでは一部で体積検査(UT)を実施
支持管	原子炉冷却材バ リダリの形成、 バーカ'ル'ウンド'リ の形成	肉眼試験 バ		T, R, S	II	B (B*)	V TM 2	検査機	原子炉構造鋼体溶接部(トリム'ウンド'リ) の記述と同じ もんじゅでは一部で体積検査(UT)を実施

表 3-6 主要機器の ISI 計画及び技術的課題(3/7)

ISI 計画							ISI 技術的評価(既存の検査技術の評価及び課題)						
検査対象	安全上の要求機能	程度	検査方法	検査環境	設計と R&D の関係	R&D 要否	要求	方式	仕様/課題	設計への反映/課題			
										A : 新たな技術を開発	B : 既存をベースに高度化	C : 既存で適用化	
外部 溶接 いい箇所 *	原子炉冷却材液 位の確保	肉眼試験 クリアランス測定	(イマージ アバ)	T, R, S / S*	II (C*)	VTM 3	(イマージ アバ)	原子炉構造胴体溶接部(けトリム)ハ'ウダ'リ の記述と同じ	原子炉構造胴体溶接部(けトリム)ハ'ウダ'リ の記述と同じ	遠隔操作の検査機設置及び走行スバ'-A確保に 設計対応	—	—	
胴体溶接部 (けトリム)ハ'ウ ダ'リ	原子炉冷却材ハ' ウダ'リの形成	連続監視 ナトリウム漏 えい検出 器	T, R, S	II C	微少漏洩 中、大漏洩	ガスサンプリング方式 (RID, SID, DPD) レーザ法(LLD) 接触式 誘導式波立計	原子炉構造胴体溶接部(けトリム)ハ'ウダ'リ の記述と同じ	原子炉構造胴体溶接部(けトリム)ハ'ウダ'リ の記述と同じ	—	—	—	—	
胴体溶接 部、ヘロス (ハ'ガ'ス)ハ' ウダ'リ	原子炉冷却材ハ' ウダ'リの形成	肉眼試験 放射監視 タ	T, R, S / S*	II (C*)	VTM 2	イメージアバ 挿入機	温度、放射線が低ければ高性能(高解 像度)	イメージアバ	イメージアバ	挿入走査スバ'-A確保に設計対応	—	—	
胴体支持構 造物	支持構造機能の 維持	肉眼試験 タ	T, R, S	II C	VTM 3	イメージアバ 挿入機	—	—	—	—	—	—	
伝熱管 ハウジング	原子炉冷却材ハ' ウダ'リの形成	体積検査 (自主)	E C T S*	T, N, R, S / S*	III A (B*)	内面欠陥 Xt	E C T	イメージアバ	原子炉構造胴体溶接部(けトリム)ハ'ウダ'リ の記述と同じ	もんじゅ用開発済 (トリム)ドレしない場合は、高温用の ECT (現在開発中)が必要	検査機挿入走査スバ'-A確保に設計対応	—	
1次系側 カートドベ'セル (隔壁溶接部)	原子炉冷却材液 位の確保	肉眼試験 タ	T, S	II C	VTM 3	イメージアバ 挿入機	カドムドレししない場合は、高温用の UT が必要	カドムドレししない場合は、高温用の UT が必要	原子炉構造胴体溶接部(けトリム)ハ'ウダ'リ の記述と同じ	検査機挿入走査スバ'-A確保に設計対応	—	—	
2次系側 カートドベ'セル (隔壁溶接部)	Na 漏えいによる 燃焼抑制	肉眼試験 タ	T, S	II C	VTM 3	イメージアバ 挿入機	原子炉構造胴体溶接部(けトリム)ハ'ウダ'リ の記述と同じ	原子炉構造胴体溶接部(けトリム)ハ'ウダ'リ の記述と同じ	—	—	—	—	
S G 伝熱管	原子炉停止後の 除熱機能、Na と 連続監視	水漏えい 検出器	—	II C	—	—	水素計	—	—	—	—	—	—
設置位置に設計対応													

表3-6 主要機器のISI計画及び技術的課題(4/7)

		ISI計画										ISI技術の評価(既存の検査技術の評価及び課題)	
検査対象	安全上の要求機能	検査環境		検査方法		検査結果とR&Dの関係		R&D要否	要求	方式	仕様/課題	設計への反映/課題	
		水の障壁	体積検査 (自主)	ECT	T,S/S*	I	B (C*)						
胴	原子炉停止後の除熱機能	連続監視	ナトリウム漏えい検出器	T,S	II	C	微少漏洩	ECT	もんじゅ用開発済	—	—	—	
配管	原子炉停止後の除熱機能、非放射性Naの保持	連続監視	ナトリウム漏えい検出器	T,S	II	C	小漏洩以上	ガ・スサン・リグ・方式 (RID, SID, DPD) レーザ法(LLD)	かがいドレしない場合は、高温用のECT (現在開発中)が必要	原子炉構造鋼体溶接部(けトリウムカダリ) の記述と同じ	—	—	
2次系配管	支持構造機能の維持	内眼試験	イ・ジ・フ・ア ル	S	II	C	微少漏洩	ガ・スサン・リグ・方式 (RID, SID, DPD) レーザ法(LLD)	原子炉構造鋼体溶接部(けトリウムカダリ) の記述と同じ	—	—	—	
	外管(CV内)Na漏えいによる燃焼抑制	肉眼試験	イ・ジ・フ・ア ル	S	II	C	小漏洩以上	接触式 イ・ジ・フ・ア ル	高性能(高解像度)	—	—	—	
胴	原子炉停止後の除熱機能、非放射性Naの保持	連続監視	ナトリウム漏えい検出器	T,S	II	C	微少漏洩	挿入機 イ・ジ・フ・ア ル	高性能(高解像度)	—	—	—	
2次系主循環ポンプ	支持構造機能の維持	内眼試験	イ・ジ・フ・ア ル	S	II	C	VTM 3	挿入機 イ・ジ・フ・ア ル	高性能(高解像度)	—	—	—	
	DHX(ナトリウムバッファ)	原子炉停止後の除熱機能、原子炉冷却材バッファの形成	連続監視	—	II	C	VTM 3	ガ・スサン・リグ・方式 (RID, SID, DPD) レーザ法(LLD)	原子炉構造鋼体溶接部(けトリウムカダリ) の記述と同じ	—	—	—	
DRAC S		液位監視	—	II	C	漏洩監視	誘導式液位計	—	—	—	—	—	

表 3-6 主要機器の ISI 計画及び技術的課題(5/7)

ISI 計画							ISI 技術的評価 (既存の検査技術の評価及び課題)			
検査対象	安全上の要求機能	程度	検査方法	検査環境	設計と R&D の関係	R&D 要否	要求	方式	仕様/課題	設計への反映/課題
									A : 新たな技術を開発	
<検査環境> T : 温度、N : ナトリウム、R : 放射能、S : 空間の厳しい箇所 * : ナトリウムドレンする場合										
N/C(ナトリウムドレン)	原子炉停止後の除熱機能、Na 漏えいによる燃焼抑制	通常監視	ナトリウム漏えい検出器	-	II	C	微少漏洩	ガスサンプリング方式 (RID, SID, DPD) レーザ法(LLD)	原子炉構造胴体溶接部(けつかくほり)	I : 設計対応との関係低 II : 設計対応との関係高 III : 設計対応が重要な項目
2 次系配管(ナトリウムドレン)	原子炉停止後の除熱機能、Na 漏えいによる燃焼抑制	通常監視	ナトリウム漏えい検出器	-	II	C	微少漏洩	ガスサンプリング方式 (RID, SID, DPD) レーザ法(LLD)	原子炉構造胴体溶接部(けつかくほり)	系統の膨張タンクの液位測定
支持構造物維持	支持構造機能の維持	肉眼試験	イメージファイバ	S	II	C	VTM 3	イメージファイバ挿入機	高性能(高解像度)	-
外管	Na 漏えいによる燃焼抑制	肉眼試験	イメージファイバ	S	II	C	VTM 3	イメージファイバ挿入機	高性能(高解像度)	-
DHX(ナトリウムドレン)	原子炉停止後の除熱機能、Na 漏えいによる燃焼抑制	液位監視	-	-	II	C	漏洩監視	誘導式液位計	系統の膨張タンクの液位測定	-
N/C(ナトリウムドレン)	原子炉停止後の除熱機能、Na 漏えいによる燃焼抑制	通常監視	ナトリウム漏えい検出器	-	II	C	微少漏洩	ガスサンプリング方式 (RID, SID, DPD) レーザ法(LLD)	原子炉構造胴体溶接部(けつかくほり)	I : 設計対応との関係低 II : 設計対応との関係高 III : 設計対応が重要な項目
2 次系配管(ナトリウムドレン)	原子炉停止後の除熱機能、Na 漏えいによる燃焼抑制	通常監視	ナトリウム漏えい検出器	-	II	C	微少漏洩	ガスサンプリング方式 (RID, SID, DPD) レーザ法(LLD)	原子炉構造胴体溶接部(けつかくほり)	系統の膨張タンクの液位測定

表 3-6 主要機器の ISI 計画及び技術的課題(6/7)

		ISI 計画						ISI 技術の評価(既存の検査技術の評価及び課題)							
<検査環境> T : 溫度、N : ナトリウム、R : 放射能、S : 空間の厳しい箇所 * : ナトリウムドレンする場合								I : 設計対応との関係低 II : 設計対応との関係調整要 III : 設計対応が重要な項目 A : 新たな技術を開発 B : 既存をベースに高度化で対応 C : 既存で適用化							
検査対象	安全上の要求機能	程度	検査方法	検査環境	設計との関係	R&D 要否	要求	方式	仕様/課題	設計への反映/課題					
支持構造物 維持	支持構造機能の 維持	肉眼試験 ノ	イメージライ ス	放射線モニ タ	V TM 3	イメージライ ス	挿入機	高性能 (高解像度)	—						
1 次 Ar ガス系	ガスの形成 ガスの形成	ガスのガスの ガスの形成	連続監視 タ	—	1	C	—	—	—						
支持構造物 維持	支持構造機能の 維持	肉眼試験 ノ	目視	—	1	C	—	—	—						

表 3-6 主要機器の ISI 計画及び技術的課題(7/7)

ISI 計画										ISI 技術的評価 (既存の検査技術の評価及び課題)			
<検査環境> T : 温度、N : ナトリウム、R : 放射能、S : 空間の厳しい箇所 * : ナトリウムドレンする場合										I : 設計対応との関係低 A : 新たな技術を開発 B : 既存をベースに高度化で対応 (高度化要) II : 設計対応が重要な項目 C : 既存で適用化			
検査対象	安全上の要求機能	程度	検査方法	検査環境	設計との関係	R&D 要否	要求	方式	仕様/課題	設計への反映/課題			
胴体溶接部 (ナトリウムバッジ) 今後、強化すべき ISI	原子炉冷却材バッジリの形成	体積試験	EMAT	T, R, S	II	B	内面欠陥 X-t	EMAT	走行台車	異材の検出は感度向上必要 耐熱 240°C 胴体溶接部記述と同じ	もんじゅ 遠隔操作の検査機構入り及び走行ハーネス確保に 設計対応 (現設計では容器とバッジ間の隙間 : 150mm)		
デバイアブレート、制御棒案内管、熱遮へい板 (原子炉構造)	原子炉冷却材流路の形成、原子炉の緊急停止	体積試験	UT	T, N, R, S	III	A	基準設定必要	炉内 UT		炉内遠隔 UT 技術を新たに開発する必要あり	Na 中駆動機構	Na 中駆動機構のセンサ走査ハーネス確保に設計対応	
デバイアブレートのキャップ	原子炉冷却材流路の形成	肉眼試験	USV	T, N, R, S	III	A	VTM 3	垂直型 USV		炉心槽頂部、コーンボートの記述と同じ	Na 中駆動機構	Na 中駆動機構のセンサ走査ハーネス確保に設計対応	
炉内配管	原子炉冷却材流路の形成	体積試験	UT	T, N, R, S	III	A	X-t (基準設定必要)	Na 中駆動機構	炉内 UT	炉内遠隔 UT 技術を新たに開発する必要あり	Na 中駆動機構	炉内遠隔 UT 技術を新たに開発するために、中間フレーム上部隔壁を開放、もしくは検査用ホール（蓋取り付け）または、炉内配管に検査用ホール（蓋付き）を設ける。	
炉心槽頂部、コーンボート(ボルトを含む)	炉心形状(位置)の維持	体積試験	UT	T, N, R, S	III	A	基準設定必要	Na 中駆動機構	炉内 UT	炉内遠隔 UT 技術を新たに開発する必要あり	Na 中駆動機構	炉内遠隔 UT 技術を新たに開発する必要あり	
炉心支持板、J774-M	炉心形状(位置)の維持	肉眼試験	USV	T, N, R, S	III	A	VTM 3	垂直型 USV	Na 中駆動機構	炉心槽頂部、コーンボートの記述と同じ	Na 中駆動機構のセンサ走査ハーネス確保に設計対応	(通常は、炉上部の異常を確認する。異常が見られた場合、燃料集合体を数体取り出し検査を行う。)	

表 3-7 主要機器のインプレース補修計画及び技術的課題

補修計画		補修技術の評価(既存の補修技術の評価及び課題)						
対象機器	補修手段	設計とR&D費否			項目	方式	仕様/課題	設計への反映/課題
		設計との関係	R&D費否	項目				
原子炉構造	回転プラグ(UIS含む) ディアブレーツ	ナトリウムドレン	III	A	溶接・検査 駆動機	炉内溶接検査技術 炉内マニピュレータ	原子炉容器の記述と同じ	炉内アクセスベースを設計で対応
	原子炉容器	液位-2200以上:ドレン 液位-2200以下:ドレンなし	III	A	溶接・検査 駆動機	炉内溶接検査技術 炉内マニピュレータ	新たに開発する必要がある	同上
	炉内配管、スライドショット、受け皿	液位-2200以上:ドレン 液位-2200以下:ドレンなし	III	A	溶接・検査 駆動機	炉内溶接検査技術 炉内マニピュレータ	原子炉容器の記述と同じ	中間ブレナム上部の隔壁を開放もしくは検査用ホール(蓋付き)を設ける必要がある。 または、炉内配管に検査用ホール(蓋付き)を設ける。
	熱遮へい板、炉心槽、コーン ボルト	ナトリウムドレンなし	III	A	溶接・検査 駆動機	炉内溶接検査技術 炉内マニピュレータ	原子炉容器の記述と同じ	炉内アクセスベースを設計で対応
	炉心支持板 J774-7	ナトリウムドレンなし、 (最小炉心退避)	III	A	溶接・検査 駆動機	炉内溶接検査技術 炉内マニピュレータ	原子炉容器の記述と同じ	既に7体の燃料集合体を引き抜いて、検査・補修が可能な燃料交換装置の開発
	1次系配管	主配管 支持管	I	C	溶接・検査 切断・溶接・検査	既存の配管補修技術で適用	既存の配管補修技術で適用	
IHX/ポンプ合体機器	胴体 ポンプ引抜		I	C	溶接・検査 切断・溶接・検査	既存の構造物補修技術で適用	既存の構造物補修技術で適用	
	ポンプ引抜		III	A	溶接・検査 駆動機	遠隔溶接検査技術 容器内マニピュレータ	原子炉容器の記述と同じ	容器内及び容器外アクセスベースを設計で対応
	ポンプ引抜 (1次・2次ガバーナ構造)		III	A	溶接・検査 駆動機	遠隔溶接検査技術 炉盤部溶接口ボット	原子炉容器の記述と同じ	IHX本体が引き抜けないため、アクセスベースの確保が困難。
IHX伝熱管	ポンプ引抜	I	C	管止栓		既存の止栓技術で適用	止栓を設計で対応	

表3-8 新規R&amp;Dが必要な技術(1/2)

I S I 技術			
項目	適用	研究項目	設計反映
高解像度 U S V	炉内構造物（炉心槽頂部、コーンサホート、ディッシュフーレートのキヤッフ、炉心支持板、コアフォーム、スライド・シヨイント、コアキャッチャ）	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内構造物目視検査シナリオ及び暫定基準作成</li> <li>高感度 USV 用センサ開発（高感度、高温）</li> <li>3 次元遠距離視野高解像度技術開発（センサ走査法、信号処理法）</li> </ul>	検査駆動機器、Na 中取り付け及びセンサ走査へ。一式等保確
Na 中 U T	炉内構造物（ティッシュフーレート、制御棒案内管、熱遮へい板、炉内配管、炉心槽頂部、コーンサホート）	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内構造物体積検査シナリオ及び暫定基準作成</li> <li>高温用 UT センサ開発（Na、高温、高感度）</li> <li>高分解能技術開発（センサ走査法、信号処理法）</li> </ul>	
2重配管内 検査口ボット	1次系配管（主配管、支持管、外管）	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐環境部品開発（高温、放射線）</li> <li>遠隔検査用口ボット技術開発</li> <li>狭隘部用小型化技術開発（2重管内用等）</li> </ul>	
Na 中検査口 ボット	高性能 USV 及び Na 中 UT の適用箇所	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐環境部品開発（Na、高温、放射線）</li> <li>遠隔検査用口ボット技術開発（Na 中多関節マニフレータ等）</li> <li>炉心下部検査手法開発（検査用集合体口ボット等）</li> </ul>	

表3-8 新規R&amp;Dが必要な技術(2/2)

炉内補修技術			
項目	適用	研究項目	設計反映
溶接	炉内構造物(回転フック、ティップアーレット、制御棒案内管、熱遮へい板、炉内配管、炉心槽頂部、コーンサホート、炉心支持板、コアフォーム、スライド・ショイント、コアキャッチ等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐環境機器開発(Na、高温、放射線)</li> <li>・溶接部Na排除技術開発(遠隔、高温、放電線)</li> <li>・炉内溶接技術開発(遠隔、高温、センサの取り付け及び溶接機、センサ走査入力等確保)</li> </ul>	
検査		<ul style="list-style-type: none"> <li>・炉内溶接検査シナリオ及び暫定基準作成</li> <li>・高温用UTセンサ開発(Na、高温、高感度)</li> <li>・高温用光学センサ開発(Na、高温、高感度)</li> <li>・PT検査部Na排除技術開発</li> <li>・高分解能技術開発(センサ走査法、信号処理法)</li> <li>・補修シナリオ作成</li> </ul> <p>(課題の摘出は炉内溶接で代表させた)</p>	
切削・切断、曲げ加工、ボルト操作等		<ul style="list-style-type: none"> <li>・遠隔PT操作技術開発(塗布、拭き取り等)</li> </ul>	
Na中補修口ボット		他は、ISI技術のNa中検査口ボットと同様	

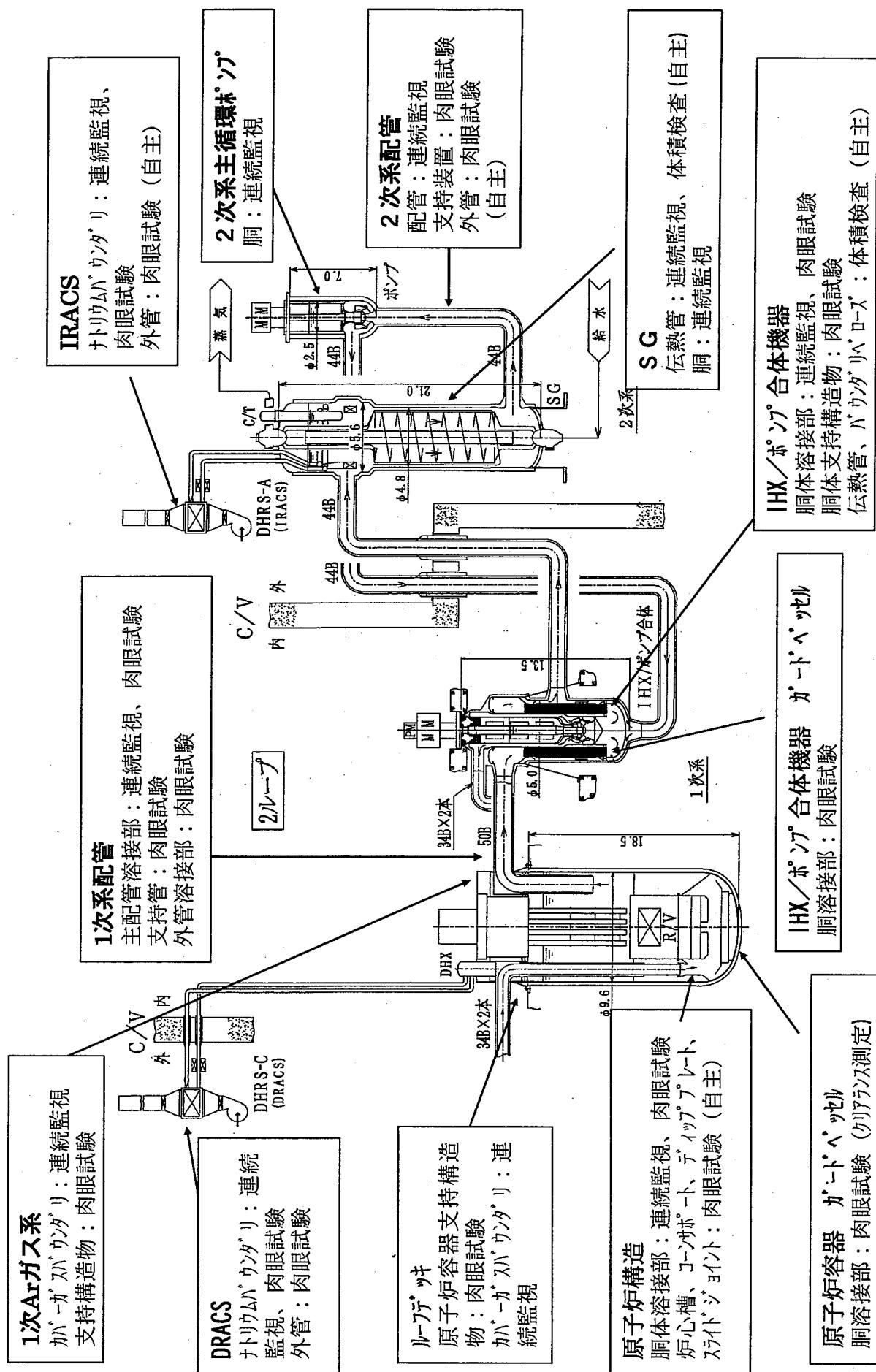


図 3-1 主要機器のISI計画

## 4 Na漏えい対策に関する検討

### 4.1 Na漏えい対策への取組方針

#### (1) 安全性と経済性の考え方

図4.1-1に示すようにNa漏えいに対する取り組みとしては、実用化炉であることから、安全性だけでなく経済性の観点にも注力した検討が必要になる。

安全性についての要求は、一般には事故時において1)原子炉を停止すること、2)原子炉の冷却が適切に行われ崩壊熱が除去できること、及び3)放射性物質の放出を防止・抑制することの3点である。そしてこれらのうちNa漏えい事故に直接関することは、冷却材喪失や崩壊熱除去機能喪失による原子炉冷却機能への影響と1次Na漏えいによる放射性物質放出抑制機能への影響である。

一方、経済性についての要求は、Na漏えい後の清掃・補修に伴う稼働率の低下や漏えいNaによる機器の損傷を防止することである。このためには漏えいNaの影響範囲を限定し速やかな補修を行うとともに、Na漏えい事故の発生頻度を低くすることが重要である。

この様に、実用化炉ではNa漏えい事故の安全性を確保した上で、経済性低下の防止を図ることが重要となる。ここでは、Na漏えい対策について、経済性の観点から、稼働率低下防止に主眼をおいた検討を行うこととする。

#### (2) Na漏えいに対する取組方針

Na漏えいによる稼働率低下防止のためには、

##### 1) Na漏えいが発生しにくい構造とすること

- ・Naバウンダリー溶接部や構造不連続部を少なくすること
- ・Naバウンダリー面積を小さくすること

##### 2) Na漏えい後の補修性向上を図ること

- ・漏えいNaのエアロゾルなど影響範囲を限定できる構造とすること
- ・補修が容易な構造とすること

が重要である。ただし、これら2つの条件を同時に満足させることは困難である場合が多く、また対策を講じることによって大幅なプラント建設費増加につながる可能性もある。このことは例えば、Na主配管の2重管構造の内外管間隙部の区画化において、その区画範囲を小さくするほどNa漏えい時の影響範囲も小さくなり清掃や補修は容易にはなるが、区画壁設置のために溶接構造が必要になりNa漏えい発生に要因の増加になる。さらに区画毎の漏えい検出設備が必要になるなどコスト増加につながる。

したがって、上記1),2)を確保する上で下記の3),4)にも注意を払うものとする。

- 3) 上記 2)を達成するために 1)に有意な影響を与えないこと  
(補修性の向上を図った構造のために、漏えいが発生しやすい構造となるないように注意すること)
- 4) 補修性向上方策が過度なコスト増加にならないこと

次に、1)の漏えい発生頻度の低い構造とする方策と 2)の補修性向上の定量的な関係についての検討を行った。図 4.1-2 は Na 漏えいの発生頻度と補修のためのプラント停止期間が電力損失コスト及ぼす大きさを示している。補修に伴う人件費や機器交換費等は電力コストに比べて小さいためここでは考慮していない。グラフ中のパーセンテージの値はプラント建設費を 100%とした場合のプラント停止に伴う未発電分の電力損失コストを示している。例えば、図中に示す様に 10 年に 1 回の頻度で Na 漏えいが発生し (プラント寿命中 6 回)、1 回あたりの補修期間 (プラント停止日数) が 30 日の場合、電力損失コストがプラント建設費の 10%に達することを示している。同一線上の Na 漏えい頻度とプラント停止日数のすべての組み合わせの電力損失コストは同じである。このことは、比較的漏えいが発生しやすいと考えられる箇所については補修期間を短くすることで損失コストを最小化し、一方で漏えいによる補修が困難でありプラント停止期間が長期化する場合には、漏えいが発生しにくい構造を採用することに重点をおくことによって損失を小さくする方策が望ましいことがわかる。

以上の観点で漏えい箇所が 1 次 Na か 2 次 Na か、また配管か機器かによって、上記 1), 2)の重み付けを考慮した検討を行うこととする。例えば、1 次配管のように万一の 1 次 Na 漏えい時にはその補修が容易でなく、かつバウンダリー面積が他に比べ小さく漏えい発生頻度を低くすることが期待できる箇所については、補修性を向上させることよりも、漏えいが発生しにくい構造にすることに重点を置く。この様に Na バウンダリー各所の特徴を踏まえて、Na 漏えい後の補修性について下記 a)~d)の分類を行った。

- a) 補修しない (プラント放棄)
- b) 時間を要しても補修する(1 ~ 数年)
- c) 現実的な期間内で補修する (数ヶ月程度)
- d) 稼働率に大きな影響を与えない短期間で補修する(30~60 日程度)

Na バウンダリー各部について以上の補修性 (補修期間) と漏えい頻度の関係に基づいて考え方を整理した結果を表 4.1-1 に示す。まず、1 次系機器、2 次系機器に大きく 2 つに分類し、次に各機器及び配管に着目した。

原子炉容器や 1 次系配管などの 1 次系機器については漏えい発生後の補修が不可能もしくは非常に困難になることから、補修性の向上を目指すことに重点

を置くのではなく、漏えい発生頻度を低減させる構造に重点を置くこととする。万一の1次Na漏えいに対してはプラント放棄もしくは長期にわたる補修を想定する。なお、補修を選択する場合には、補修が長期に及ぶと考えられるが具体的な補修方法は考えておく必要がある。

SGや2次系配管などの2次系機器については、1次系Na漏えいに比べれば補修が容易であることと、2次Naバウンダリ一面積は1次Naのそれに比較して大きく、漏えい発生頻度も高くなることが予測される。SGやポンプなどの機器の胴体部からのNa漏えいについては、現状の技術では現場での補修は不可能であるため、機器の搬出・交換となる。したがって、新たな機器の製作や据付などのため数年程度のプラント停止が想定され、構造不連続部や計測のための枝管を極力排除し、発生頻度を低減させることに重点を置くことが望ましい。2次系配管については既に枝管は極力排除してあるため、漏えいの発生の可能性は低いと考えられる。しかし、配管の引き回しにより各所に溶接部が存在し、1次系配管に比べれば全長も長くなっているため、ある程度の漏えい発生を想定し、早期補修方法を検討しておくこととする。特に予備の配管を予め準備しておくことで早期補修の可能性は期待できる。一方、ACS伝熱管は本数も多く漏えい発生頻度が最も高くなることが予想されることから、具体的な早期補修方法を検討しておくことが重要である。

ここではNa漏えい対策とその補修方法について、2重壁構造の特殊性を考慮した検討の取り掛かりとして、2次系Na主配管を対象とする。

#### 4.2 漏えい対策構造（2次系主配管）

4.2節では大型炉（1500MWe）と中型炉（500MWe）の2次系配管の構造図（概念図）と配管レイアウトについて説明する。

図4.2-1に大型炉の2次系配管の全体図を、図4.2-2、図4.2-3及び図4.2-4にそれぞれホットレグ、ミドルレグ及びコールドレグの構造図を示す。同図に示されているように配管及び機器は全て2重壁構造となっており、配管の2重壁構造の間隙部にはNa漏えいの影響範囲限定のための仕切壁が各所に設置されている。

大型炉の2次系配管のレイアウト及び隔壁や床との位置関係を図4.2-5及び図4.2-6に示す（鳥瞰図）。また上面図、正面図及び側面図をそれぞれ図4.2-7、図4.2-8、図4.2-9に示す。

一方、中型炉についても同様に冷却系鳥瞰図を図4.2-10～図4.2-12に、冷却系の上面図、側面図及び正面図をそれぞれ図4.2-13～図4.2-15に示す。

この図から配管の補修・交換の際には隔壁や床の存在やスペースを考慮して、補修や交換の手順を検討しなければならない。より詳細には、漏えい箇所に応じた個別の補修手順を検討する必要があると考えられる。

### 4.3 早期補修の着眼点と方策

ここでは、2次系配管補修を検討する上で必要となる補修のための設備対策の着眼点及び補修シーケンスにおける要素技術について述べる。

#### (1) 設備対策上の着眼点

##### 1) 補修スペースの確保

4.2 節に示すように配管及び機器の周りには隔壁や床が存在し、配管を交換する際の搬出・搬入スペースが必要になり、その具体的経路についても検討しておく必要がある。さらに、配管切断・溶接のためのクレーン設置やシールバックスペースも必要であり、作業性の確保や作業員の安全性にも関係する。このため、機器の配置（スペース）と補修性のバランスについて再検討する必要がある。

##### 2) 外管ホット方式/コールド方式

配管断面の概念図を図 4.3-1 に示す。外管ホット方式/コールド方式にはそれぞれ一長一短があり、ホット方式では内外管の熱膨張差が小さいためベローズの数は少なくて済むが高温仕様のベローズが必要になる。内管のパイプホイップの際の外管の高温強度の確保も考慮しなければならない。一方、コールド方式は低温仕様のベローズでよいが、内外管の熱膨張差が大きいためベローズの数は増え、ヒーター内装のため外管貫通部も多くなる。さらに、保温材も内装するため Na 漏えい時には保温材に Na が進入し清掃に時間を要する。このため、これらを考慮しつつ具体的な補修方法と合わせて選択する必要がある。

##### 3) 仕切壁構造

仕切壁は Na 漏えい時に内外管の間で Na 及びそのエアロゾルが拡散し補修の妨げになることを防止するためのものである。図 4.3-2 に示すように仕切壁を増やすほど漏えい時の補修性は仕切壁の範囲内に限定されるため、清掃は容易にはなるが、区画毎の漏えい検知系や予熱が必要になりシステムは複雑化する。また、図 4.3-3（上）に示すように仕切壁には一般に Z ジャンクションを採用するため新たな溶接部が発生し、漏えいの要因を増加させることになる。これを避けるため同図（下）のように溶接部を有しない仕切壁も考えられるが、現状では具体的な施工方策はない。

エルボー部など溶接部の密集しているところなど漏えい発生の可能性の高い箇所では区画化を小さくし、ストレート管のように溶接部の存在しないところでは、区画壁間隔を大きくするなど、場所に応じた施工方法が必要になると考えられる。

#### 4) Na バウンダリーの設定

これは Na バウンダリーを外管に設定することによって内管漏えいにおいても検知のみでプラントを停止することなく運転を続行し、直近の定期点検期間中に補修することで、稼働率への影響の最小化を試みようとするものである。

図 4.3-4 (左) は現状設計の Na 配管概念図を示しており、内管漏えい後速やかにプラントを停止し補修を行う。外管は漏えい Na を一時的に保持し影響範囲を限定するためのものであり、バウンダリーとしての機能は有しない。一方、同図中央及び右図は外管を Na バウンダリーに設定した例である。内管漏えい後も外管内に Na を保持したまま運転は継続する。次回の定期点検までの間の外管バウンダリーが破損した場合を想定して、床ライナーや外管の外側にエンクロージャーが必要になる。

#### 5) 漏えい Na の除去

内外管の隙間部に漏えいした Na の除去は補修性、補修後のバックグラウンド低減及び材料腐食の観点で重要である。隙間部の漏えい Na ドレン後の Ar ガス洗浄も提案されたが、実際には外管を撤去して手作業による拭き取り作業が必要になる。また、わずかにでも Na が残っているとバックグラウンドのため復旧後の漏えい検知が困難になったり、配管腐食の問題も発生するなど、漏えい Na の具体的除去方法については十分に検討しておく必要がある。

以上、主な漏えい対策設備上の着眼点や具体的設備案について説明したが、この他にも補修性向上のための方策や着目すべき項目があり、これらを表 4.3-1 にまとめる。

#### (2) 補修方策

2 重壁構造を有する 2 次系 Na 主配管の具体的な交換補修方法についての検討を行う。着目点としては、内外管隙間部の漏えい Na の除去方法及び配管交換時の 2 次系内への空気進入防止などであり、これらは実際の現場作業において重要である。

図 4.3-5 及び図 4.3-6 は隙間部の漏えい Na の除去方法と漏えい配管の撤去について記載したものである。

一般には隙間部の漏えい Na をドレンし、その後外管を切り出しウェス等での清掃作業となる(図 4.3-5 右)。漏えい Na の清掃作業を簡略化するために、区画壁構造を利用して区画壁外での内外管同時摘出が考えられるが(図 4.3-5 左)、摘出する配管の長さや作業スペースを考慮しておかなければならない。

隙間部の漏えい Na の除去は外管を撤去せずに Ar ガス洗浄のみで清掃できれば作業効率は向上するが、実際には Ar ガスのみでの洗浄は不可能と考えられ

る（図 4.3-6 左）。漏えい Na のドレン後、区画壁内の外管を全て現場で撤去し、作業員がウェスで清掃した後、漏えい箇所の配管（内管）を交換することが、現時点では最も現実的と考えられる（図 4.3-6 右）。漏えい Na の除去作業は、補修作業へ直接的に影響するだけでなく、復旧後の残存 Na による材料腐食やバックグランドへの影響なども考えられ重要な課題である。

図 4.3-7、図 4.3-8 は配管交換時にシールバック施工を省略し、バルーンや閉止板による方策について記載したものである。空気混入を最小限にするためには、配管切断部分を全てシールバック等で覆い作業をすることが望ましいが、シールバックの施工や Ar ガス中での切断、溶接作業となり作業効率が低下し非常に時間を要する。同図に示されている手順はフェルミ炉やフェニックス炉で実際に用いられた手法であり、作業効率を高め多少の空気混入はやむなしとした手順である。JNC の大型炉の場合は 2 次系主配管の口径が大きく(44B)、図に示されているバルーン方式などでは大気開放時の空気混入量が多くなることが予想され、また、系内不活性ガスの不意な流出による酸欠事故の可能性も否定できない。さらに、大口径配管ではバルーンや閉止板では内圧に対して十分な耐圧性能を有することも困難であり、より強固な内挿閉止円盤であることが望ましいとされている。なお、内挿閉止円盤の設置にはその重量のためクレーンが必要となる。

シールバックレス補修については作業員の技量によるところも大きいと考えられ、実際の採用においては要検討事項である。

図 4.3-9 及び図 4.3-10 は配管の補修に関する将来技術のイメージを示したものである。現状では漏えい配管を切り出して新規の配管と交換することになっているが、事故直後は局所的な暫定補修で済ませ、次期定期検時に本補修を行うことができれば、稼働率への影響を少なくすることができる。

#### 4.4 補修手順

4.4 節では 4.3 節で述べた補修の要素技術に基づいて、具体的な補修シーケンス及び工程についての検討を試みた。図 4.4-1～図 4.4-6 に各シーケンスとその工程を示す。図 4.4-1 は「常陽」の改造工事における Na 配管交換を 2 重配管の補修に適用した方法であり、作業時間要するが、系統への空気混入や酸欠事故の可能性のない確実な手法である。本検討ではこれをリファレンスとして設定し、図 4.4-2～図 4.4-6 はこのリファレンスに対して補修期間を短くするために、見直しを行ったものである。補修期間短縮のための着眼点は下記の 3 点である。

- (a) シールバックの設置を簡素化（図 4.4-2～図 4.4-4）
  - シールバックの設置や撤去に伴う時間損失及びシールバック内での作業による作業効率低下を防止する。

## (b) 漏えい Na の処置（清掃）を省略または簡素化（図 4.4-2、図 4.4-5）

- 2重配管間隙部への漏えい Na の除去に伴う時間損失を防止する。

## (c) 狹いスペースでの補修性向上（図 4.4-6）

- 長尺配管の現場での取り扱いや搬出、搬入が困難であるため、短尺管により配管交換を行う。（配管の切り出し部位を短くする。）

以下に図 4.4-1～図 4.4-6 の補修シーケンスについて説明する。

レフアレンスの図 4.4-1 は間隙部の Na をドレンし外管切除後、シールバックと内挿閉止板を用いて配管の切断・溶接を行うオーソドックスな手法である。2 回のシールバックの設置・撤去やシールバック内での配管切断・溶接作業に多くの時間や手順を要するが、系統への空気混入や系統からの不意な Ar ガス放出のない補修方法である。

図 4.4-2 は閉止板を用いることでシールバックの設置を排除した補修と間隙部の Na 除去を省略した補修方法の組み合わせ例である。作業量は減らすことはできるが、閉止版が外れないようにするため系内外圧の調整が難しく、万一閉止板が外れた際には大量の不活性ガスの噴出により酸欠事故の可能性がある。特に大口径配管の場合には閉止板による密閉は内圧のため困難と考えられる。

図 4.4-3 はバルーン挿入により配管交換を行ったものであり、2 回のシールバックの設置・取り外しを行う図 4.4-1 に比べ作業量が激減している。しかし、配管撤去時にバルーンが外れないようにするための系内外圧の調整が難しく、万一バルーンが外れた際には大量の不活性ガスの噴出により酸欠事故の可能性がある。図 4.4-2 の閉止板採用の場合と同様に大口径の配管では困難となる。

図 4.4-4 は、既設の外管をシールバックの代用とする方法である。漏えい箇所近傍の外管部を開口してアクセス用仮設フランジを設置し、このフランジを通して内管を切り出す。次に内管にバルーンや内挿仕切板を設置して系内を大気から隔離した後、外管を撤去し新配管を溶接する。アクセス用フランジを介しての内管切除となるため、作業性についての検討が必要である。

図 4.4-5 は区画壁外で内外管を同時に摘出する手法であり、漏えい Na の除去・清掃を省略したものである。作業の迅速化は期待できるものの、区画化を非常に小さくする必要があり、区画毎の漏えい検知設備やヒーター設置など配管構造が複雑になり新たな課題が生じる。

図 4.4-6 は配管の切り出し部を数十 cm 程度に限定することで、シールバックの設置箇所を 1 箇所にして作業の効率を高めた手法である。作業スペースの少ない場所での現実的な補修方法である。

#### 4.5 Na漏えい対策検討のまとめ

4.3節、4.4節にアイディアレベルのものも含め、2重壁構造を有する配管の早期補修のために様々な補修方策やシーケンスについての検討を行った。これらのまとめを表4.5-1に示す。

補修期間を短縮するためにバルーンを用いたシールバックレス方式などの検討も試みたが、大口径配管であるために隔離が難しく、万一のガス噴出による安全性（酸欠事故）の問題も指摘されている。また、補修性向上のために区画間隔を短くすれば、区画毎の予熱ラインや漏えい検出器が必要になるなど、別の課題が生じる。さらに、配管補修には配管の搬出・搬入や切断機・溶接機・クレーン設置や作業スペースが必要なり、これについても考慮しておかなければならぬ。漏えいNaの清掃については、現場作業員による手作業での拭き取りが必要と考えられる。

この様に、早期補修方策（案）についてはそれぞれの課題があり、本W/Gの検討では推奨される補修方法の選定までは至っていない。しかし、設計の段階でNa漏えいに対して十分な対策、補修方法を考えておけば、漏えい後の復旧を早期に行えることも事実である。今後、「常陽」や「もんじゅ」のNa配管交換工事の実績を踏まえつつ、漏えい箇所に応じたより具体的な補修手順を考えておく必要がある。

表4.1-1 実用化炉のNa漏えい対策についての目標設定（経済的な観点）

区分	対象機器	Na漏えいに対する目標設定	補修に対する目標設定	補修方法
一次系機器	I      • 原子炉容器	①漏えい発生低減	(a) プラント放棄 or (b) 長期補修（数年以上）	炉容器交換
	II      • 1次系配管 • 合体機器の1次 Naバウンダリーパン	①漏えい発生低減	(a) プラント放棄 or (b) 長期補修（数年以上）	機器・配管 交換
	III     • IHX伝熱管 (2次Naが1次Na に混入)	①漏えい発生低減 ②補修性向上 ③低コスト漏えい対策	(d) 早期補修（30日）	伝熱管 プラグ
	IV      • 2次系機器 (SG、2次ポンプ)	①漏えい発生低減	(b) 長期補修（数年以下） (製作2年、据え付け1年)	機器交換
	V       • 2次系配管	格内 格外	①漏えい発生低減 ②補修性向上 ③低コスト漏えい対策	配管交換
	VI      • ACS伝熱管	①漏えい発生低減 ②補修性向上 ③低コスト漏えい対策	(d) 早期補修（30日）	伝熱管交換

・表中の補修期間は、Na漏えいの原因究明、補修許認可及びプラントの停止・起動の期間は含まない、純粋に技術的な観点での補修期間とする。

・2次系配管の補修については、予備の配管が既に用意されているものと想定する。

・機器の補修期間は、製作・据え付け期間を含む。

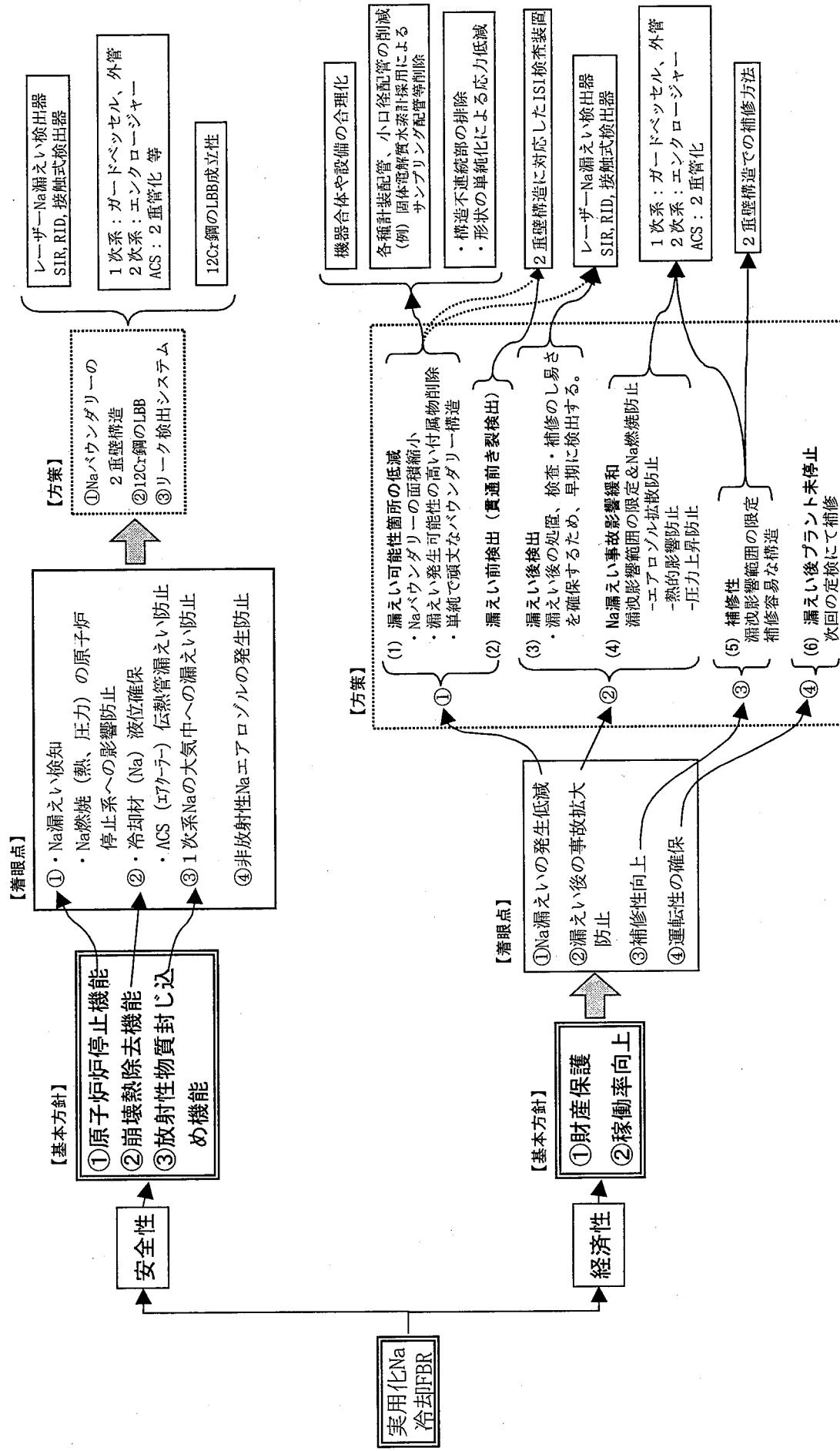
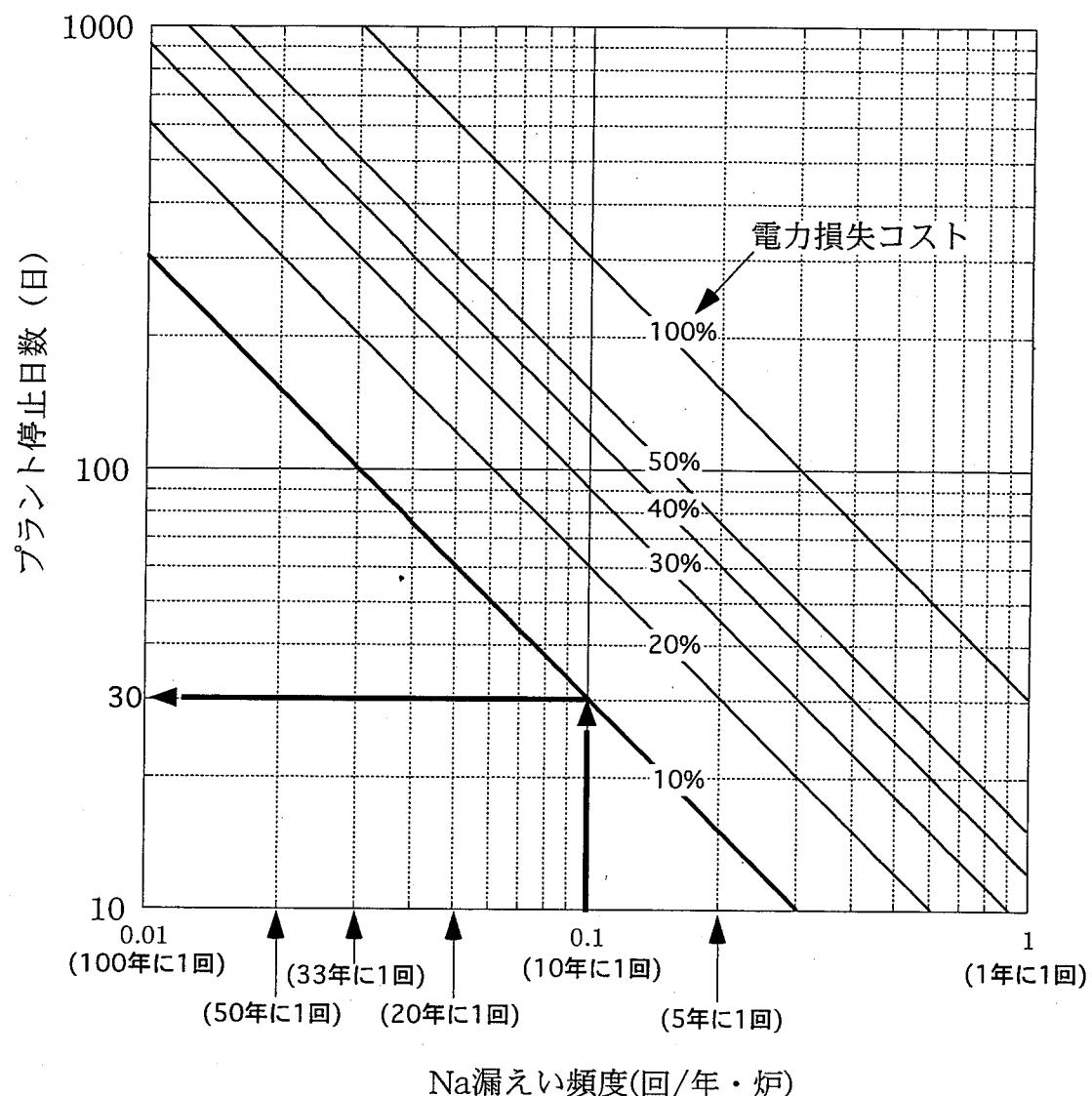


図4.1-1 実用化炉のNa漏えいに対する安全性と経済性の取り組み



#### 計算条件

- ・大型Na冷却炉
- ・冷却系2ループ
- ・プラント寿命：60年
- ・漏えい時プラント全停止

注) 大型炉の建設コストを100%とする。

図4.1-2 Na漏えいによる電力損失コスト

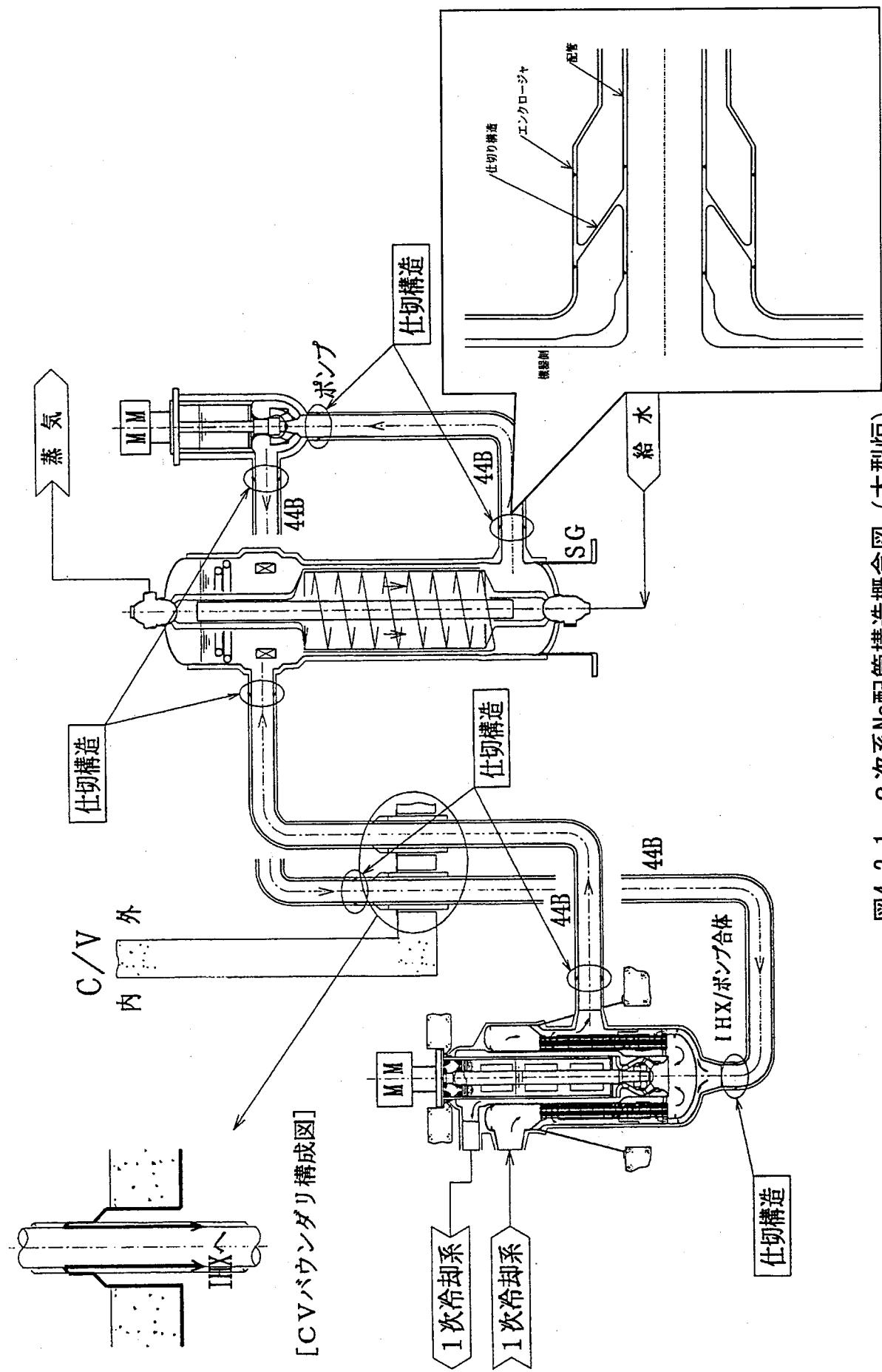


図4.2-1 2次系Na配管構造概念図（大型炉）

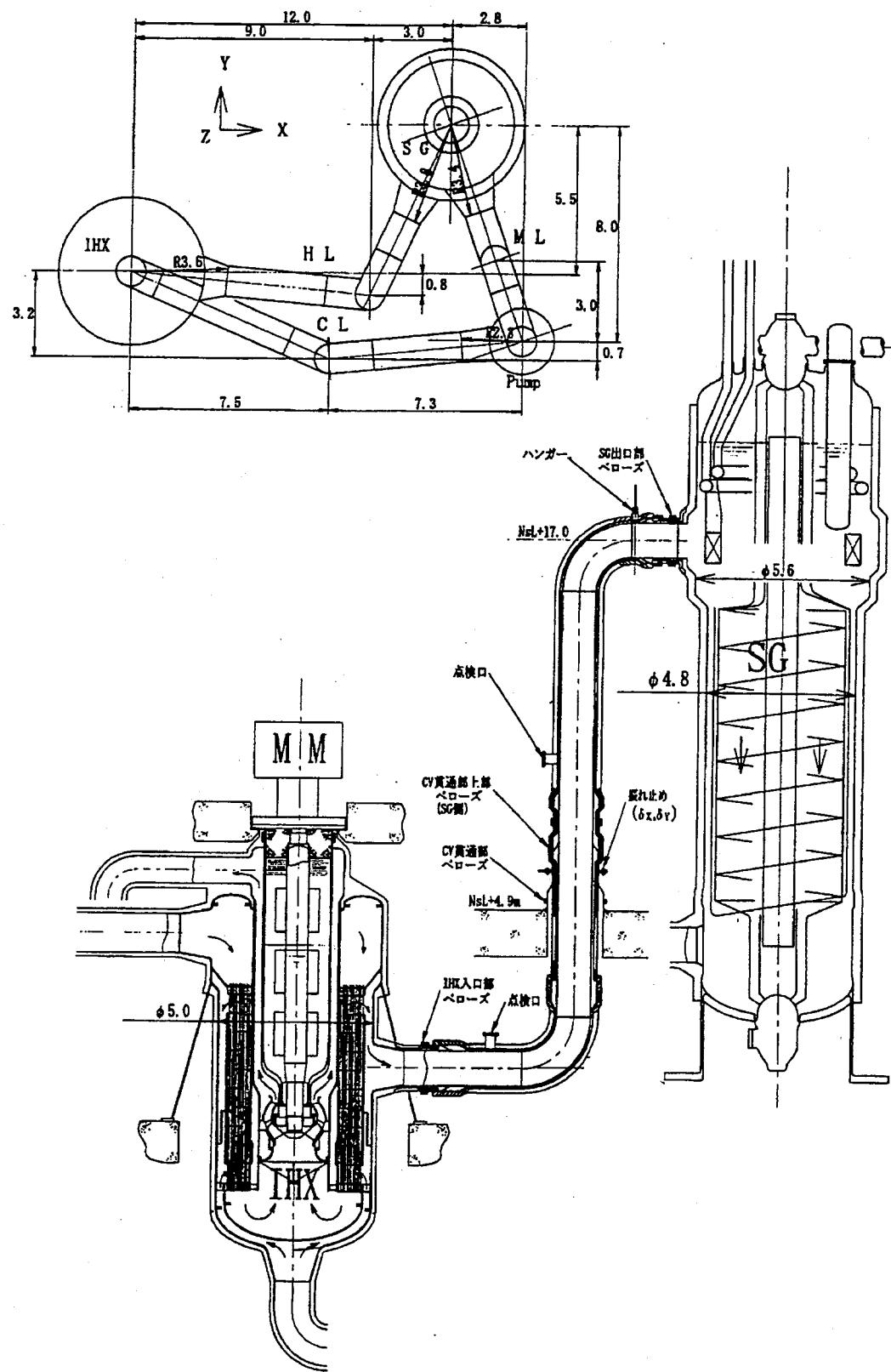


図4.2-2 2次系ホットレグ配管構造図（大型炉）

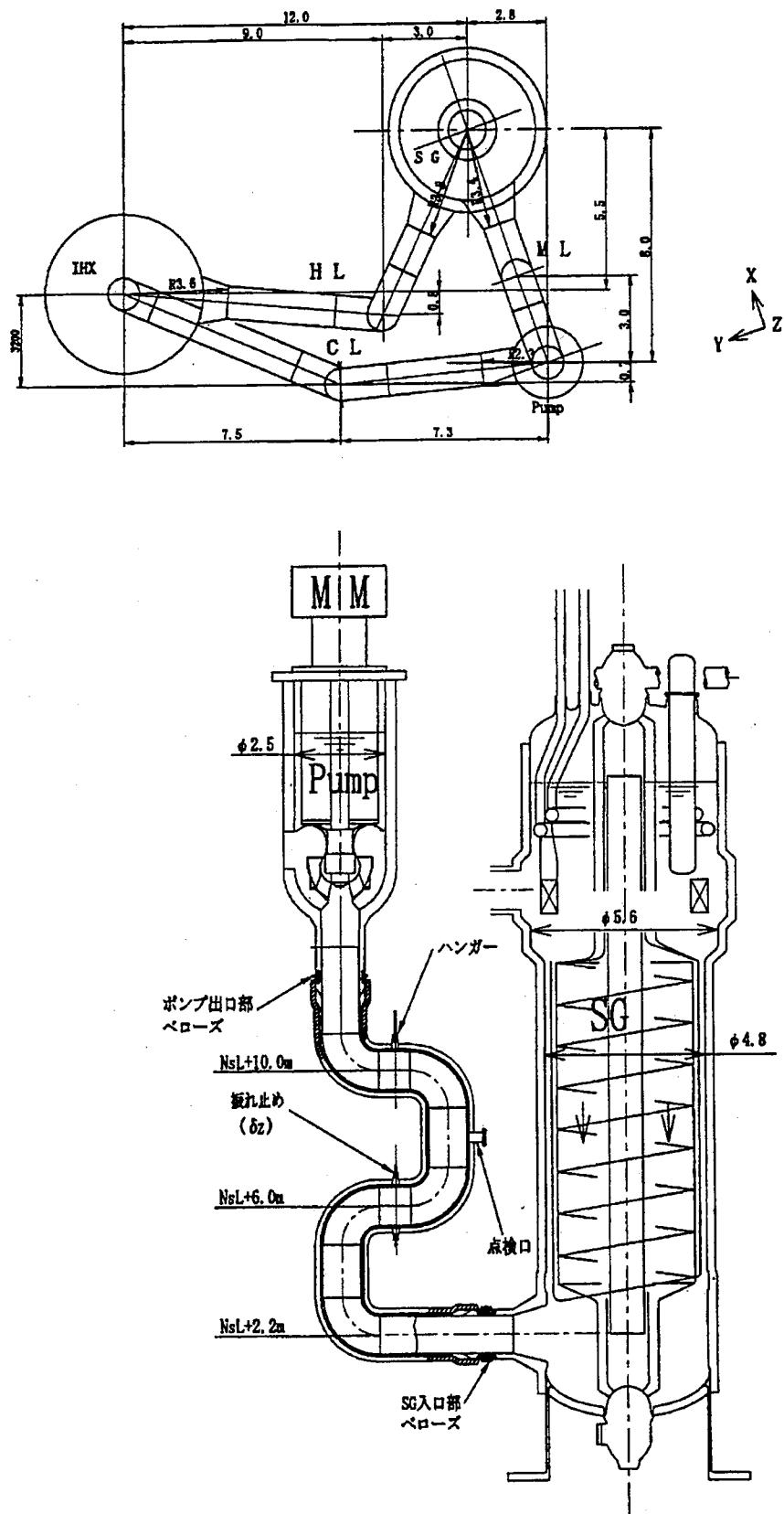


図4.2-3 2次系ミドルレグ配管構造図（大型炉）

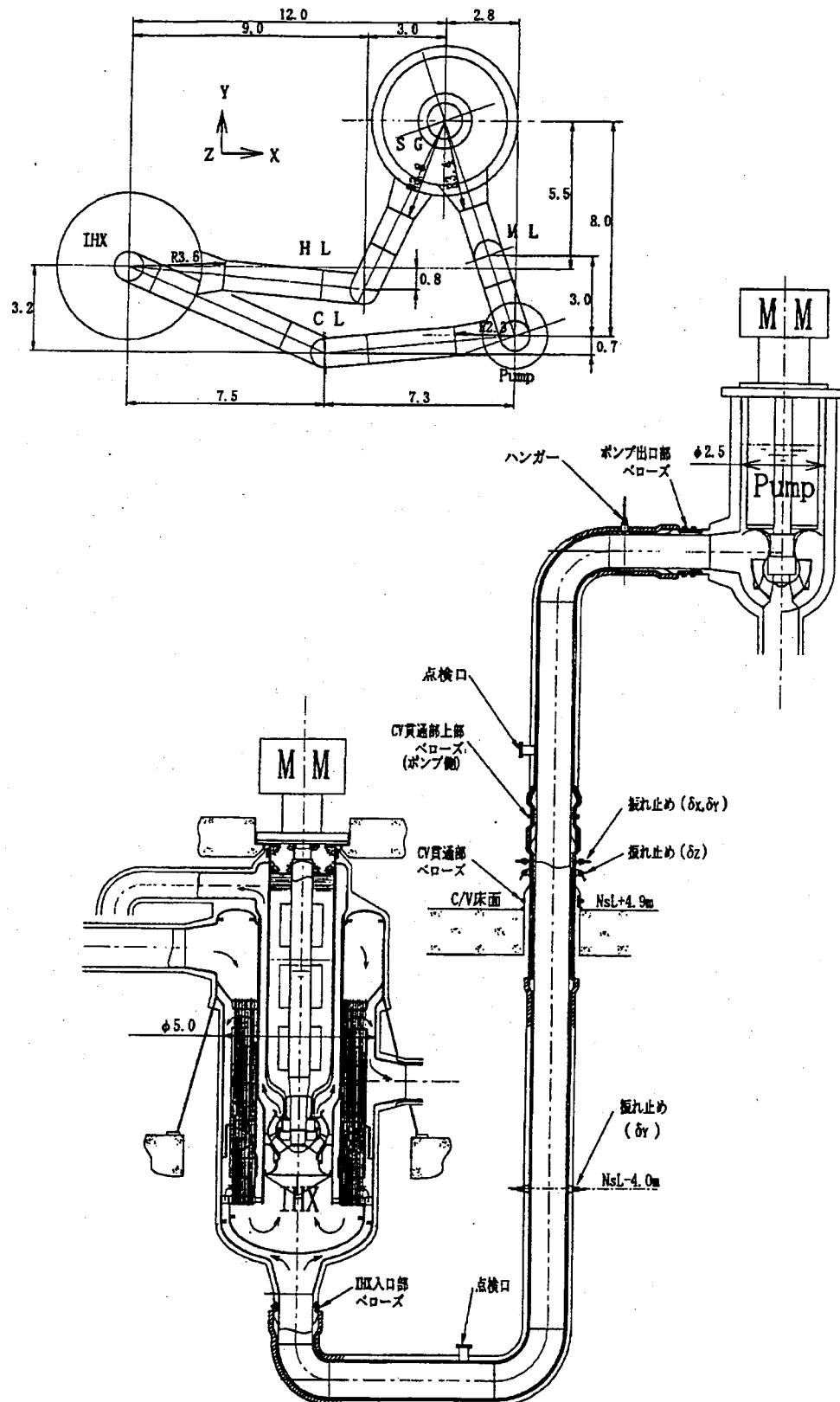


図4.2-4 2次系コールドレグ配管構造図（大型炉）

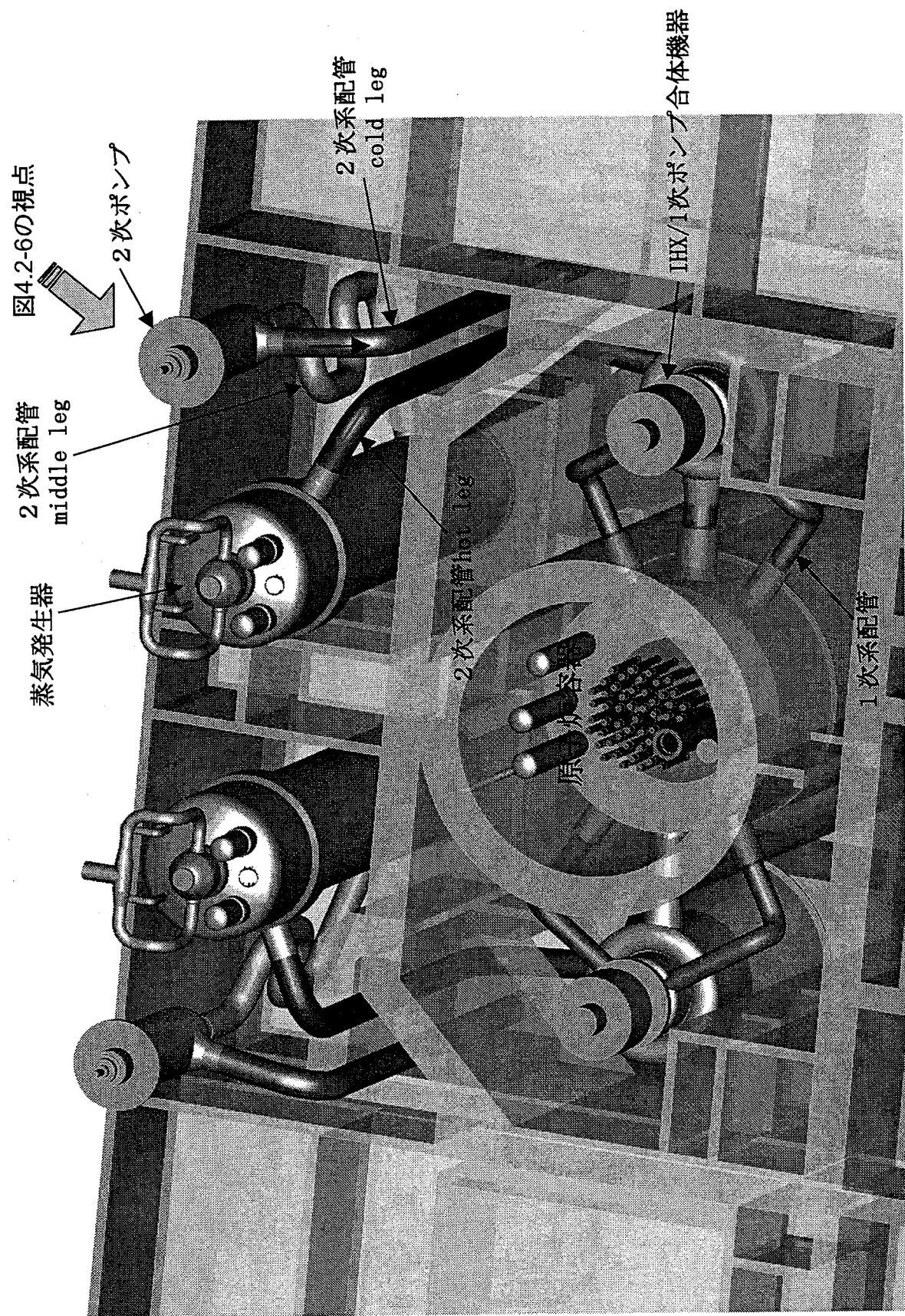


図4.2-5 Na大型炉(1500MW<sub>e</sub>)冷却系鳥瞰図(1)

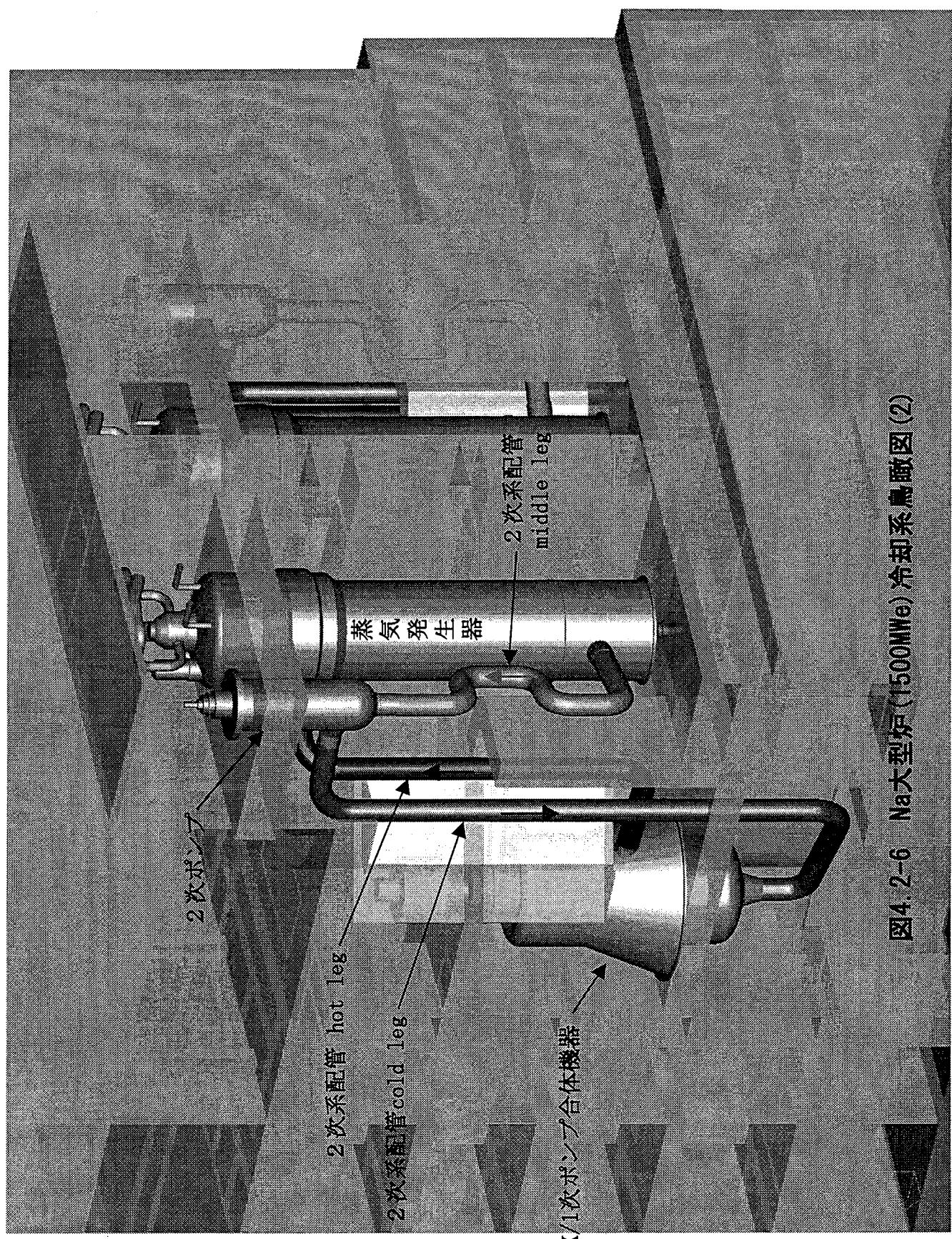


図4.2-6 Na大型炉(1500MW<sub>e</sub>)冷却系構造図(2)

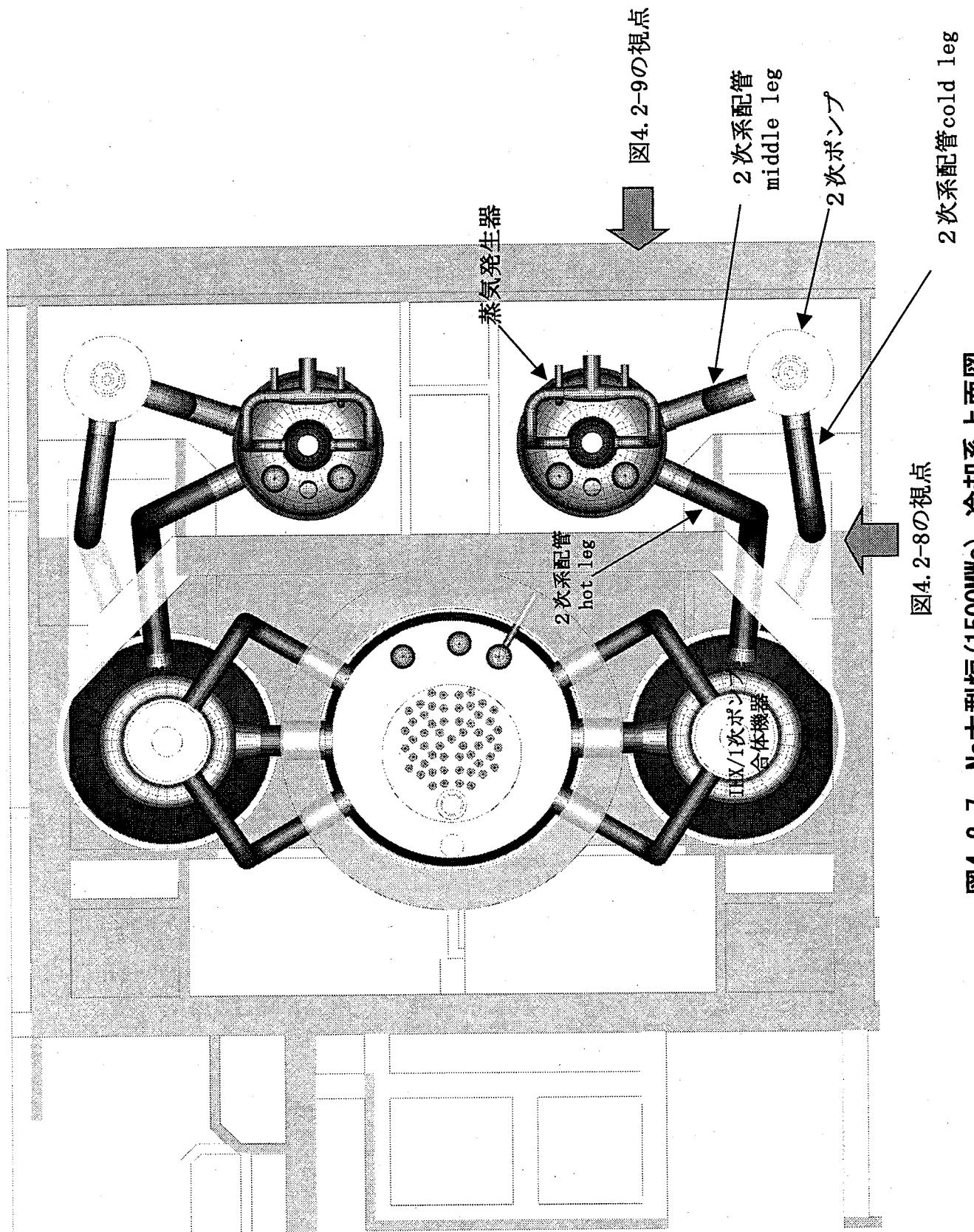


図4. 2-7 Na大型炉(1500MWe) 冷却系上面図

2次系配管 cold leg

図4. 2-8の視点

2次系配管 cold leg

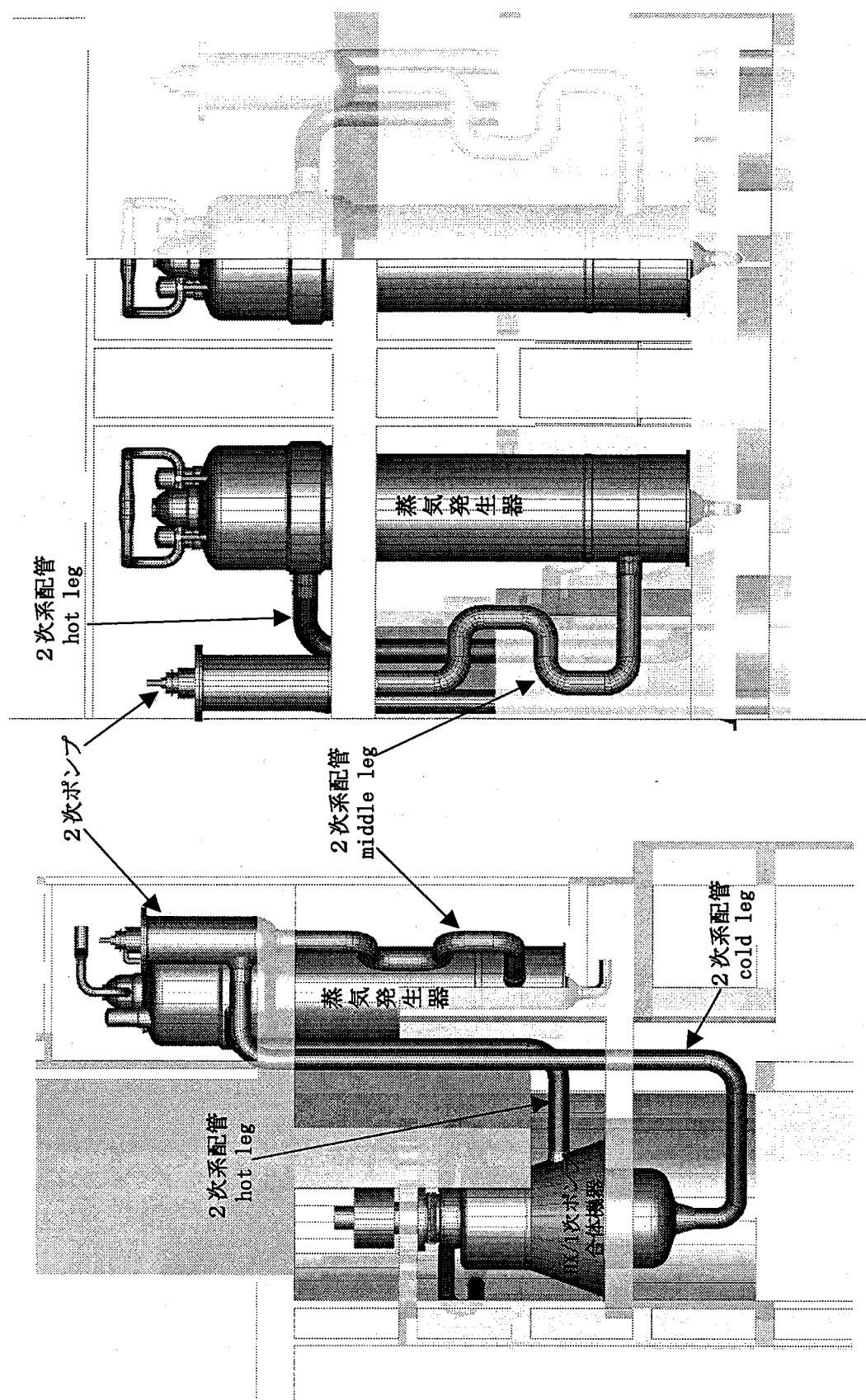


図4.2-8 Na大型炉(1500MWe) 冷却系正面図  
図4.2-9 Na大型炉(1500MWe) 冷却系側面図

図4.2-11 Na中型炉(500MWe)冷却系鳥瞰図(2)

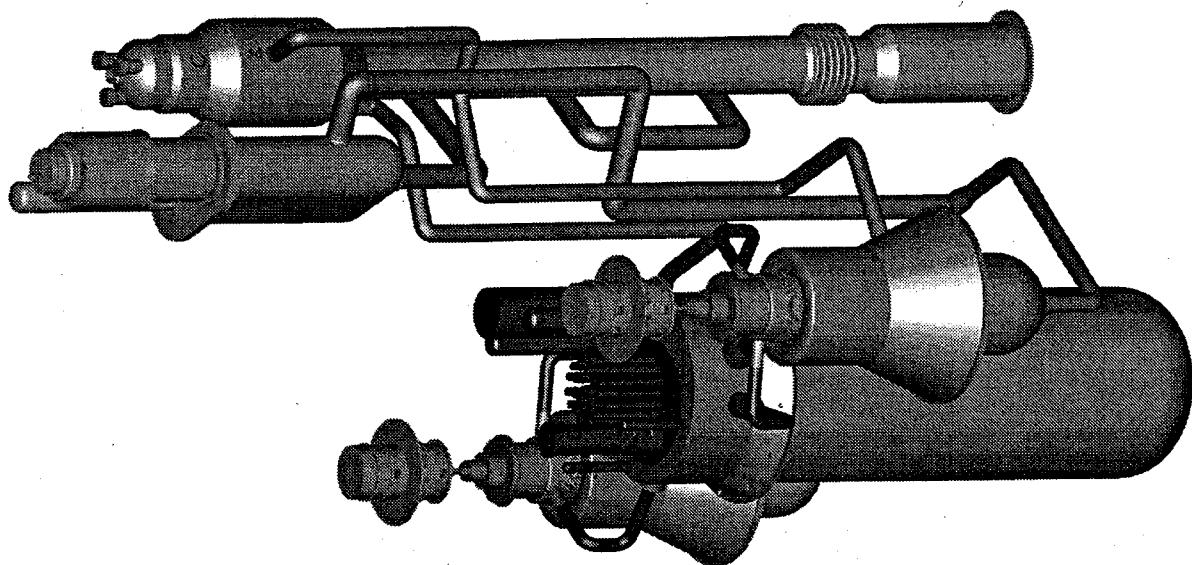
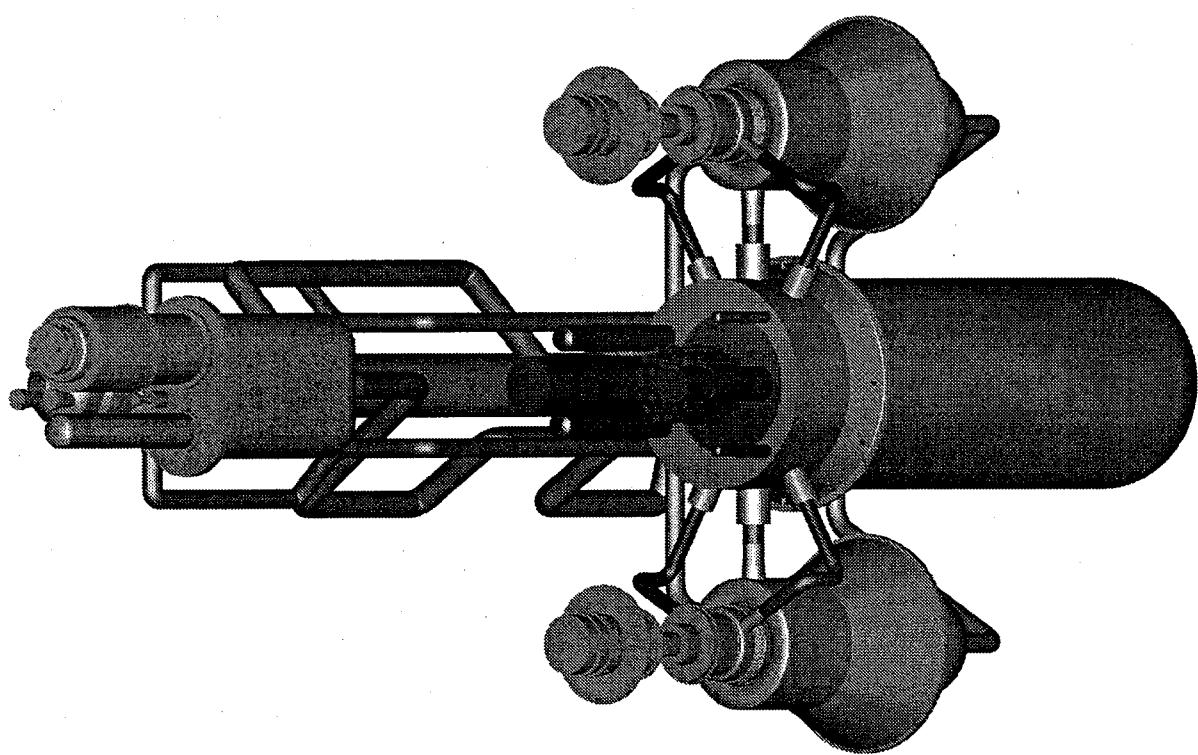
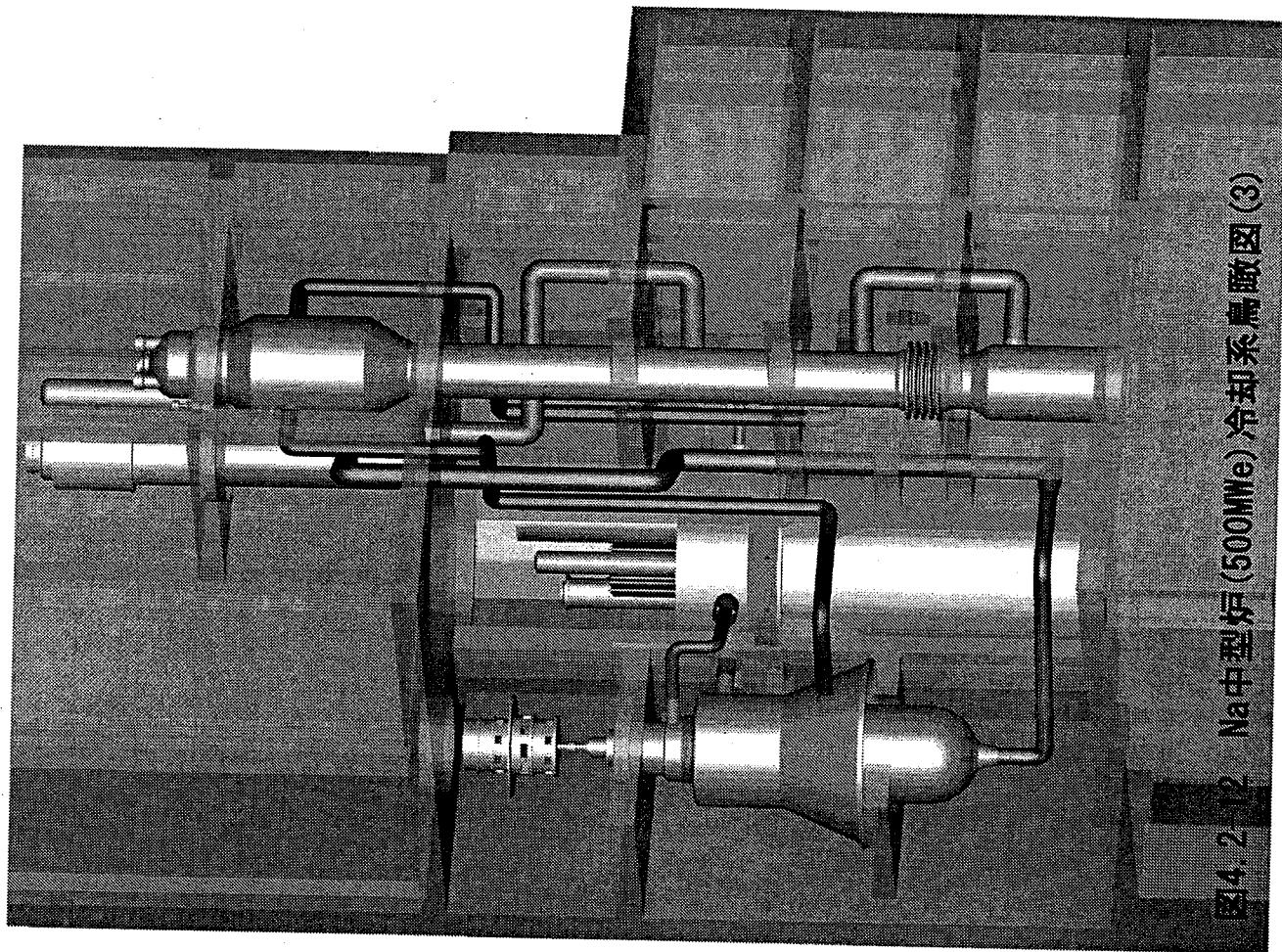
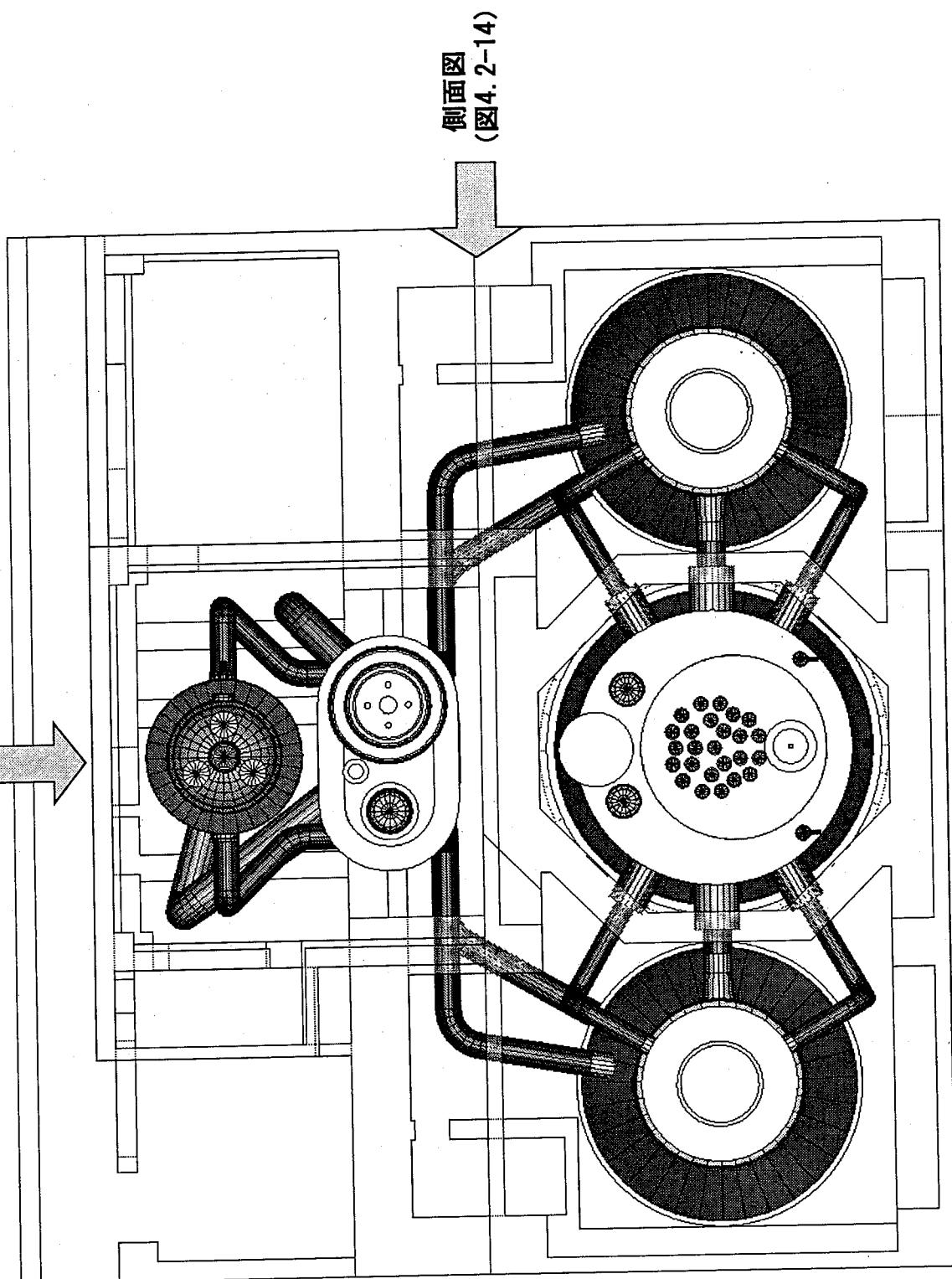


図4.2-10 Na中型炉(500MWe)冷却系鳥瞰図(1)





正面図 (図4.2-15)



側面図  
(図4.2-14)

図4.2-13 Na中型炉(500MWe)冷却系上面図

図4.2-14 Na中型炉(500MWe)冷却系側面図

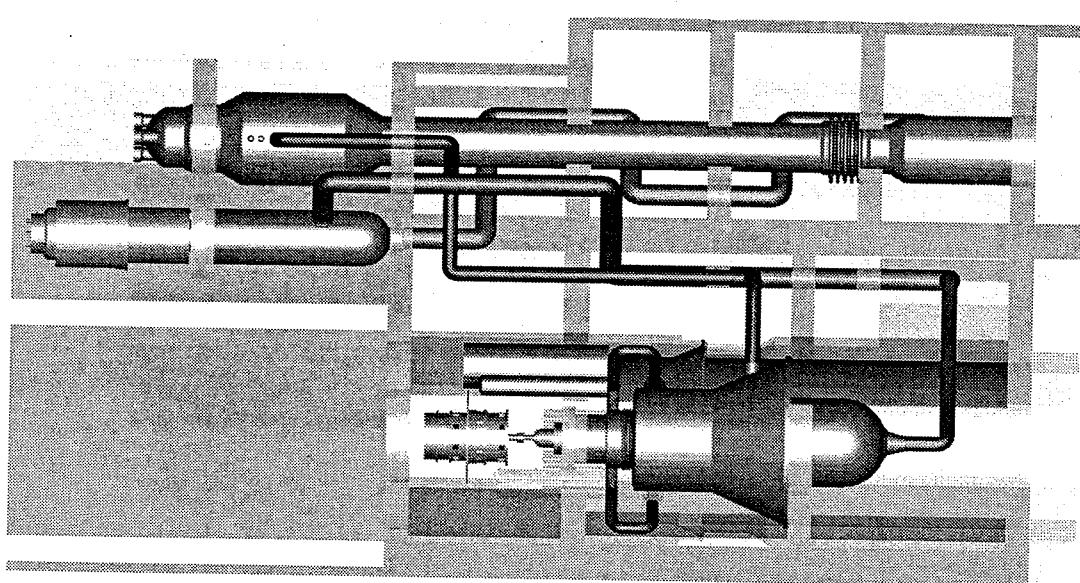
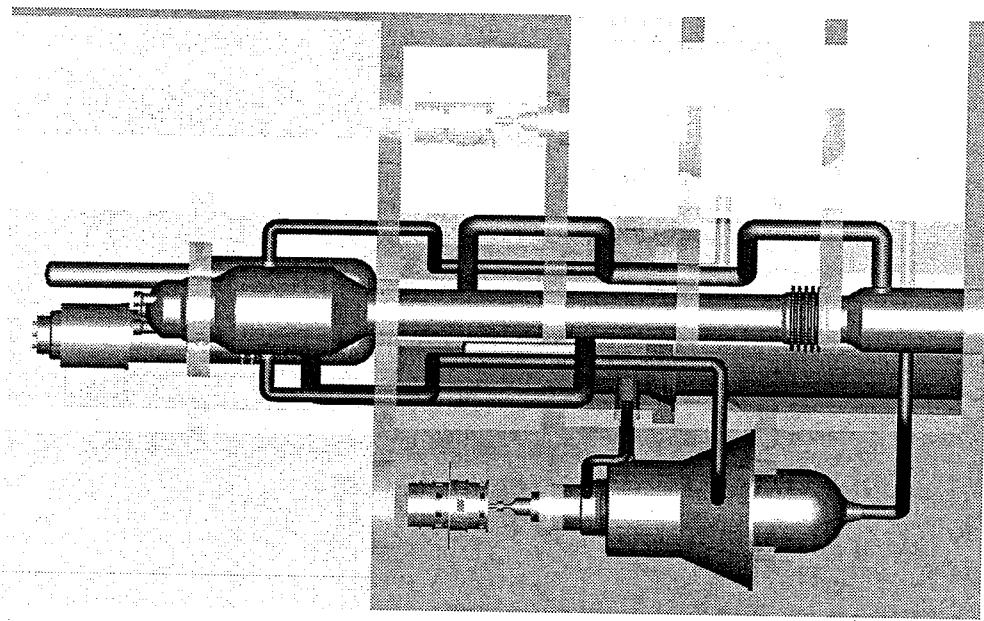


図4.2-15 Na中型炉(500MWe)冷却系正面図



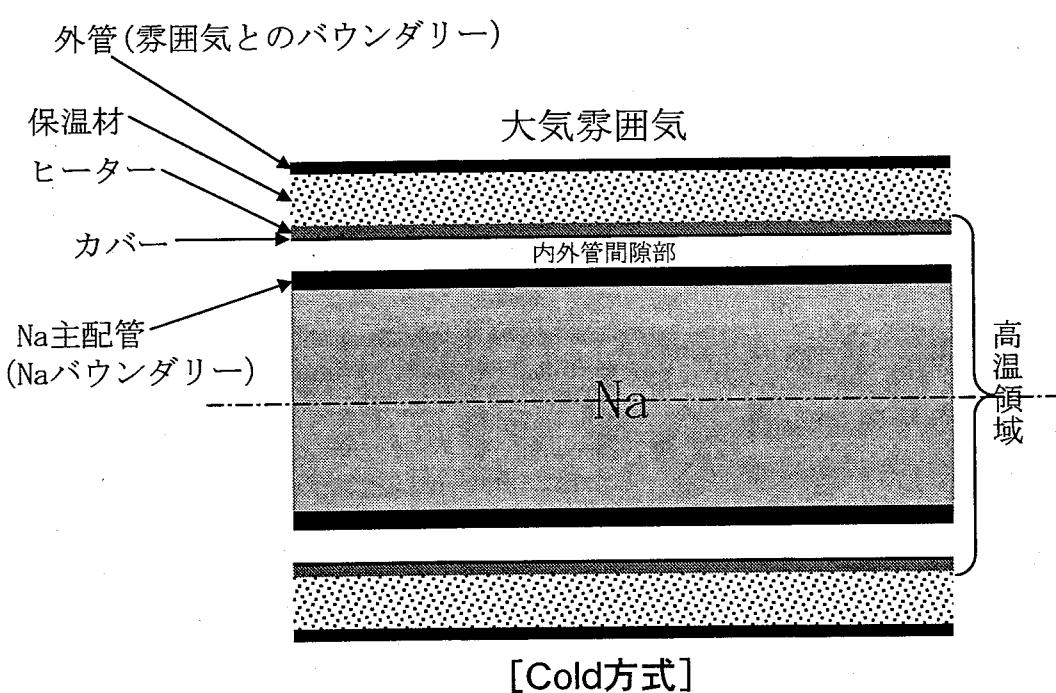
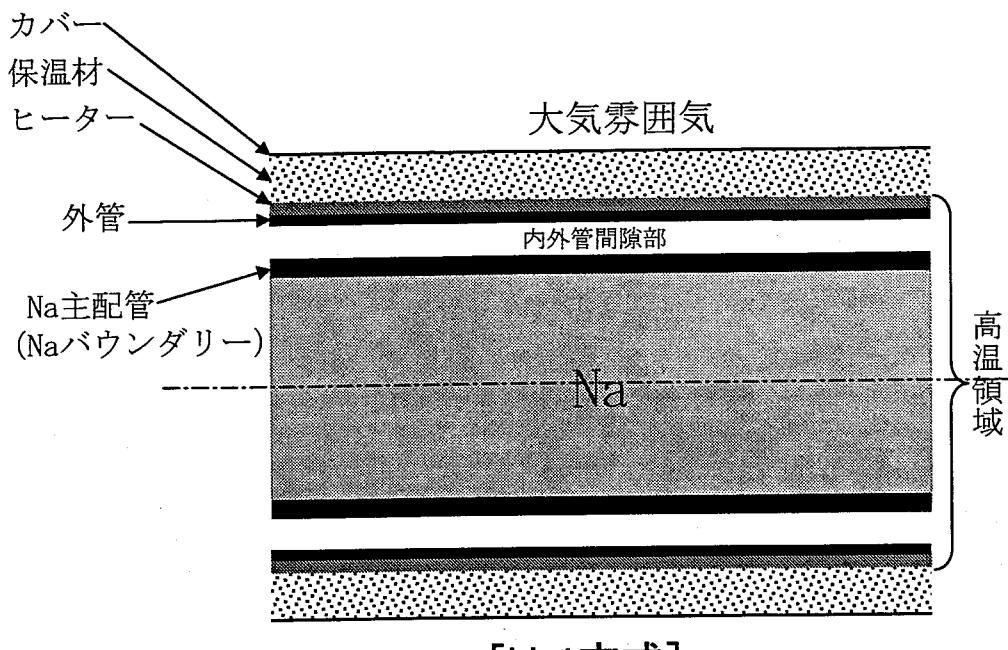


図4.3-1 外管Hot/Cold方式

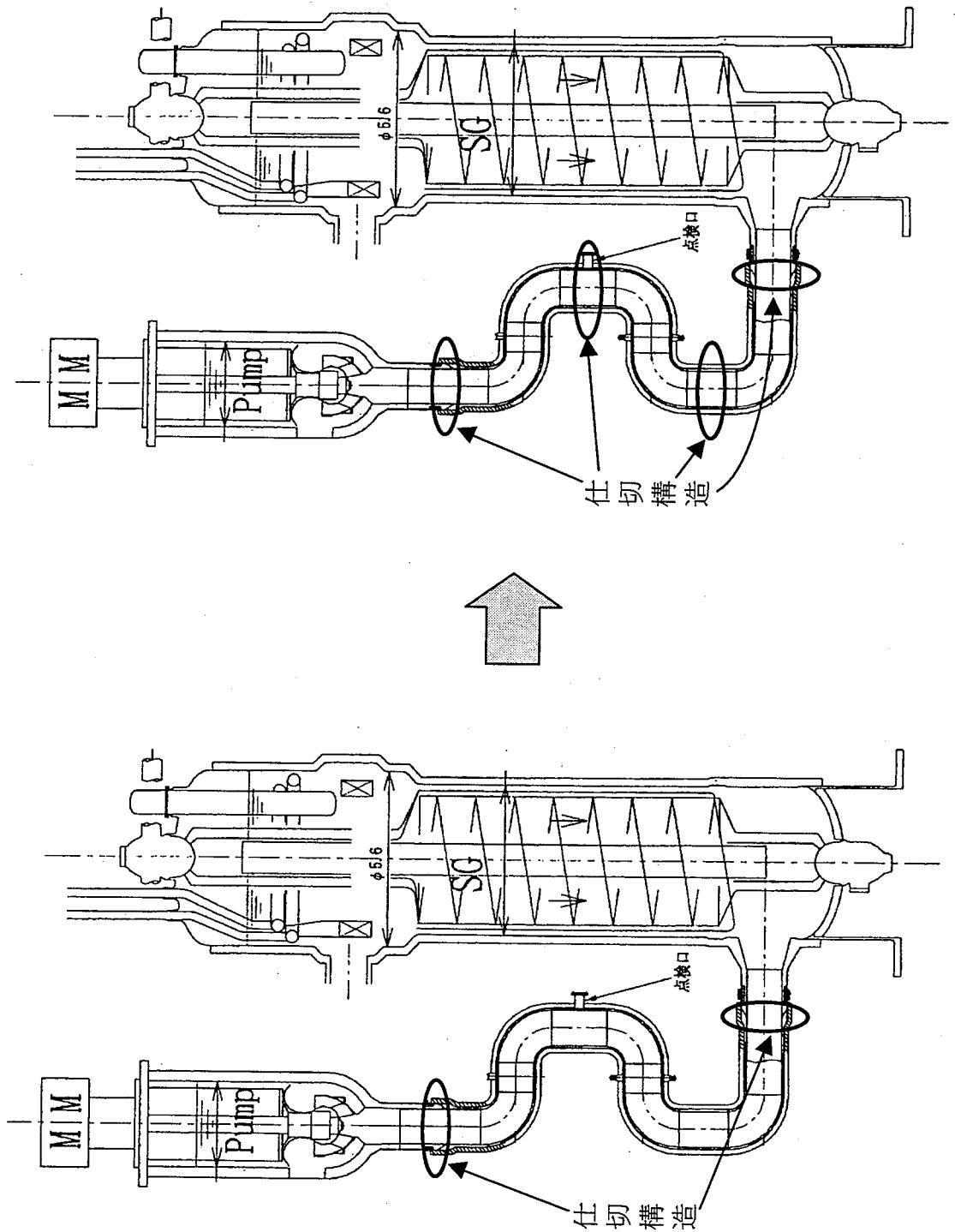


図4.3-2 間隙部区画構造の細分化（例：2次系ミドルレグ配管）

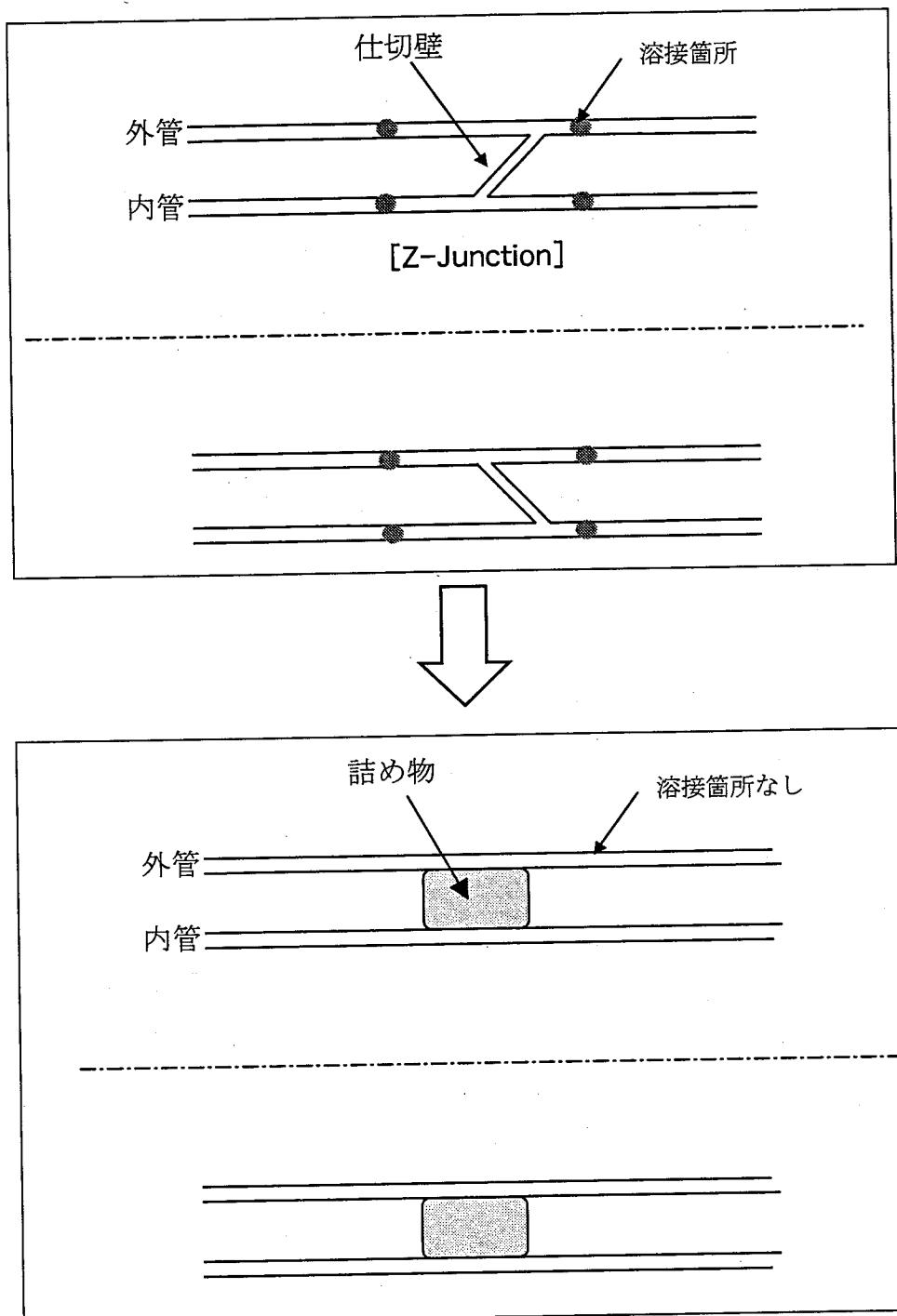


図4.3-3 間隙部仕切壁の無溶接構造

冷却材 バウンダリー	内管 (2重壁構造)	外管 (2重壁構造)	外管 (3重壁構造)
漏えい後 処置	速やかにプラントを停止し、Naをドレンすると共に補修作業にとりかかる。	内管漏えい後は、それを検知するのみで、プラントは継続運転し、次期定期検査期間中に補修。外管がNaバウンダリーノルムのため床ライナーが必要になる。	内管漏えい後は、それを検知するのみで、プラントは継続運転し、次期定期検査期間中に補修。エンクロージャーにより、床ライナーは不用。
備考	2重壁構造はNaバウンダリーハーフ漏えい時の影響拡大防止・補修性向上のため。	外管は稼働率向上 (漏えい後継続運転) のため、Naバウンダリーハーフ漏えい後の事故拡大防止・補修性向上のため。	外管は稼働率向上のため、エンクロージャーはNaバウンダリーハーフ漏えい後の事故拡大防止・補修性向上のためである。

図 4.3-4 外管Naバウンダリー概念図

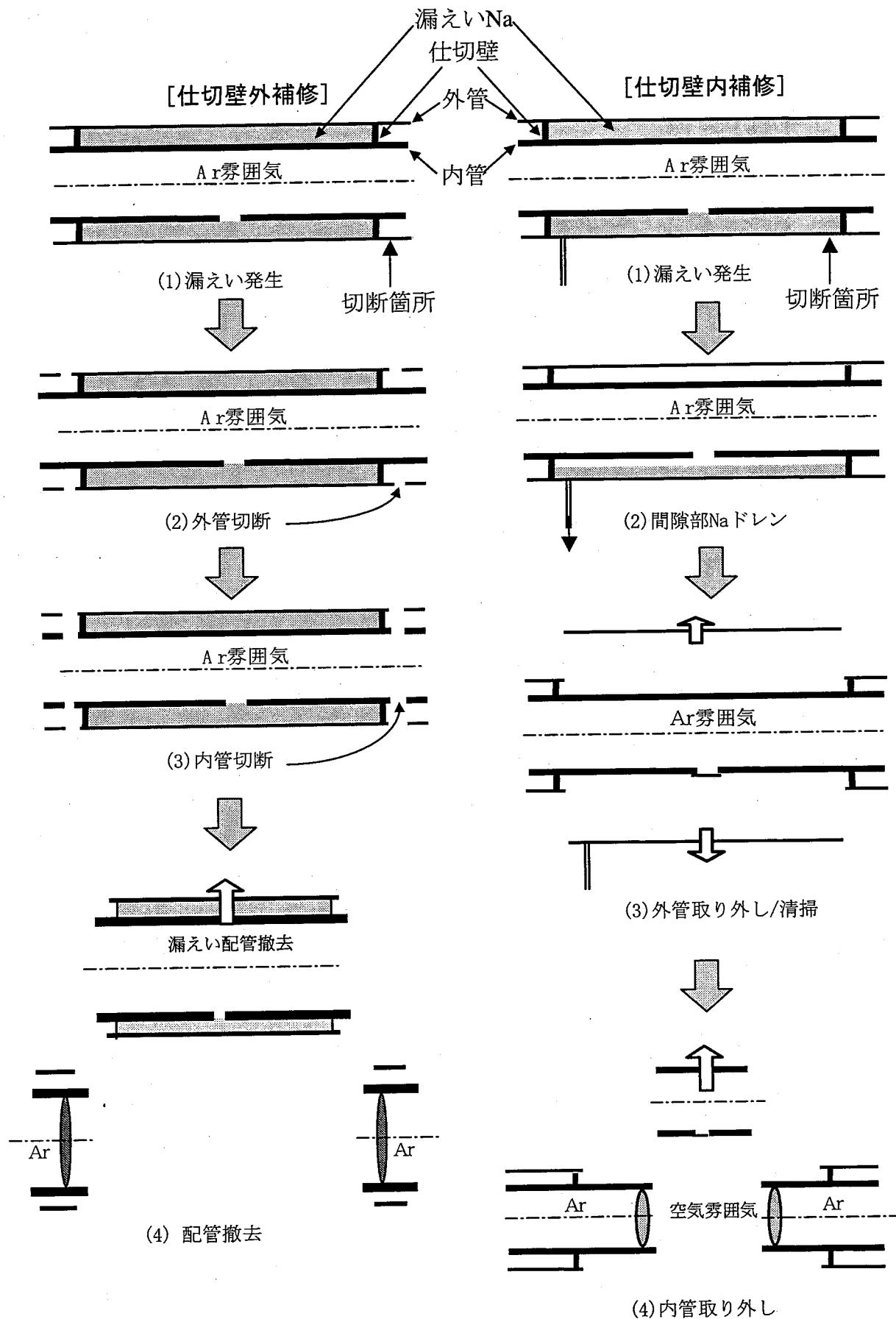


図4.3-5 仕切壁外補修概念図

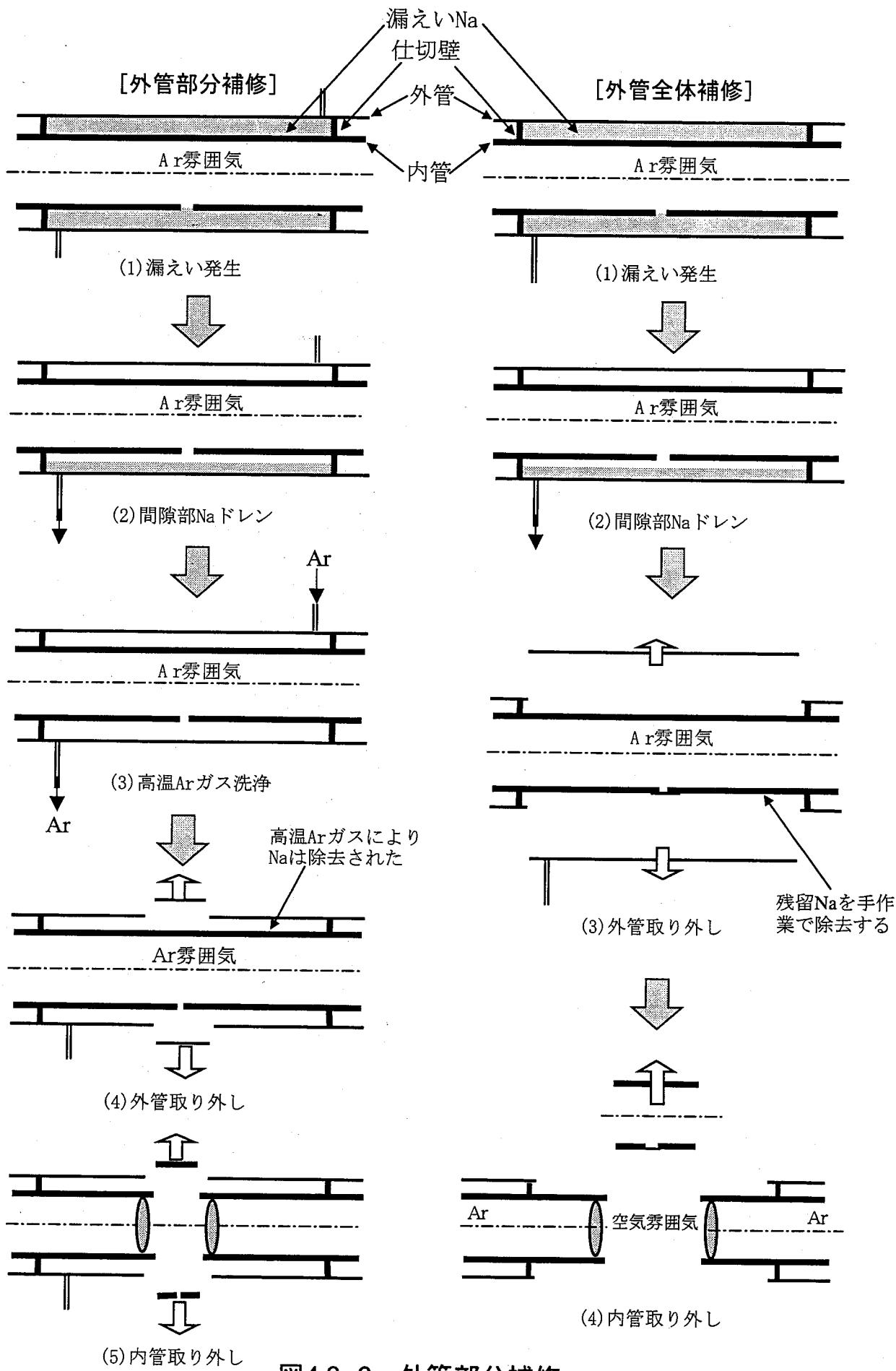


図4.3-6 外管部分補修

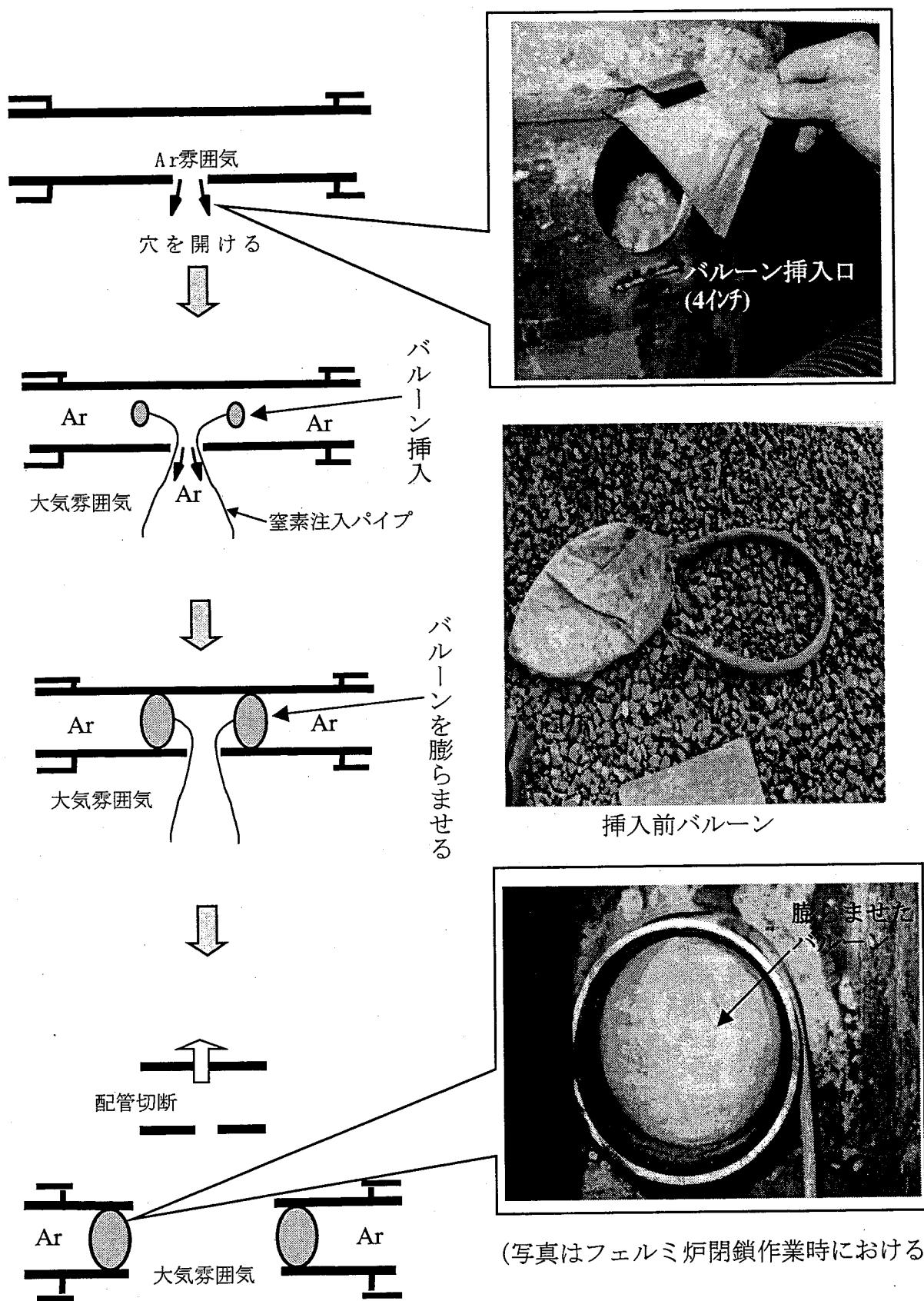


図4.3-7 バルーンを用いたシールバックレス補修

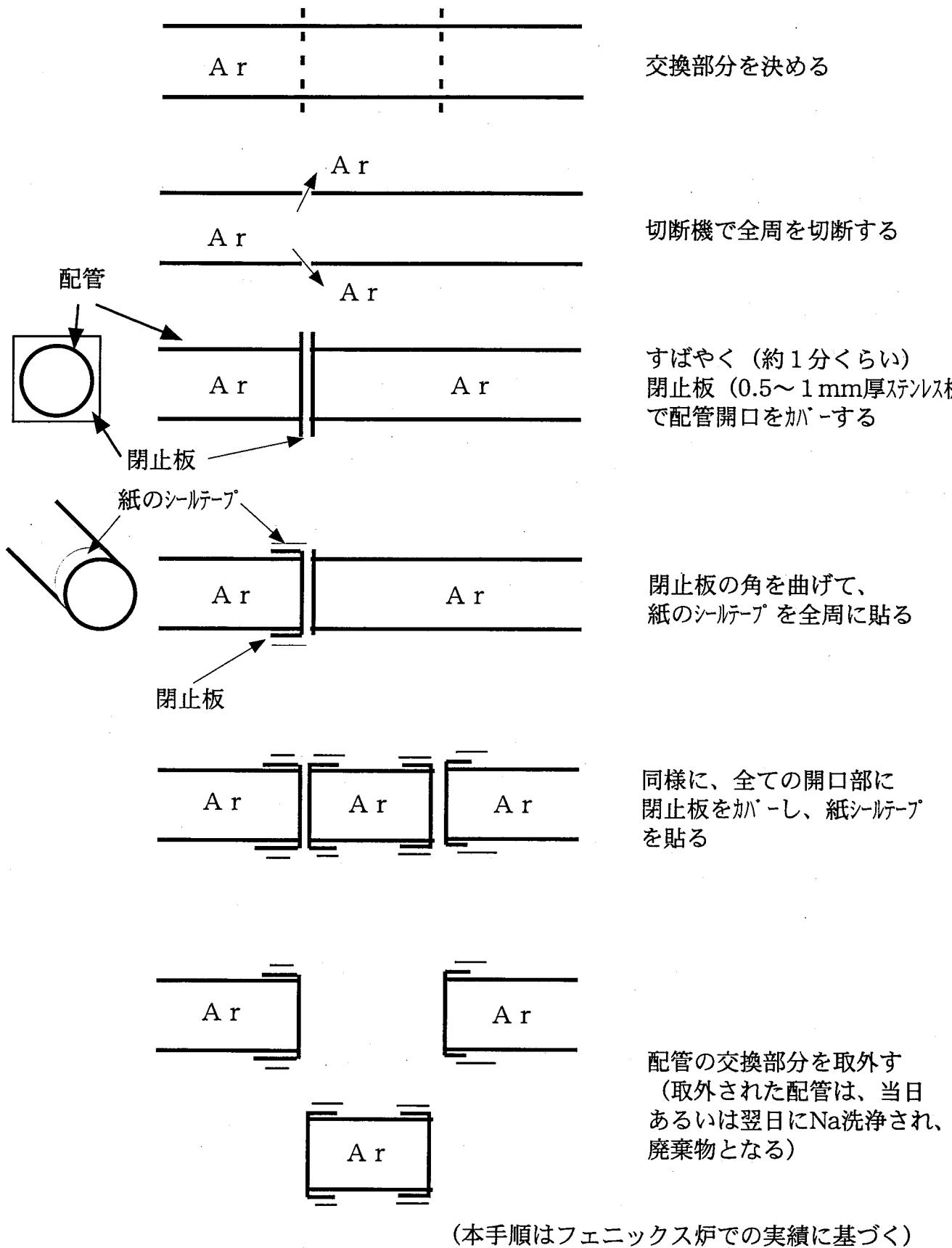


図4.3-8 閉止板を用いたシールバックレス補修

◎問題なく、以下の対応が図られることが前提条件

- ・漏えい後も運転継続を許容できるロジック構築（特に、許認可・安全審査等や原因究明の対応・反映）
- ・類似構造部位への波及効果の措置
- ・設計対応など

【構想】

二次主冷却系配管からのナトリウム漏えい後も、簡便・確実な応急措置を施すことによって、次期定期点検の補修時までプラント運転を継続する。

- ・主冷却系配管の切断を伴わない応急措置
- ・漏えい当該ループのナトリウムドレンを伴わない応急措置

【効果】

- ・稼働率の向上による経済効果（微少ナトリウム漏えい時における長時間炉停止の排除）
- ・漏えい孔の拡大防止による影響範囲の限定

【技術的課題】

○漏えい当該ループの停止有無（ドレン/降温）によって技術的課題も大きく異なる。

①漏えい当該ループの停止（ドレン/降温）を許容する・・・作業期間10日以内を目標

- ・溶接技術は、現状レベルでほぼ対応可
- ・補修溶接部の健全性評価のR&D

例えは、漏えい開口亀裂の進展性評価、残留アルカリ物質による隙間腐食評価など

②漏えい当該ループの停止（ドレン/降温）を許容しない・・・ドレン許容条件で技術確立した後に展開する

- ・漏えいNaの抑制・防止技術（例えは、外加圧、部分強制冷却、バイパス経路など？）のR&D
- ・漏えい開口亀裂の溶接技術（例えは、非接触によるレーザー密封溶接、溶接条件の環境設定技術など）のR&D

・補修部位の健全性評価R&D

③共通的課題

- ・運転中の遠隔モニタリング技術
- ・溶接等以外の付属機器類の復旧技術の簡素化・期間短縮化

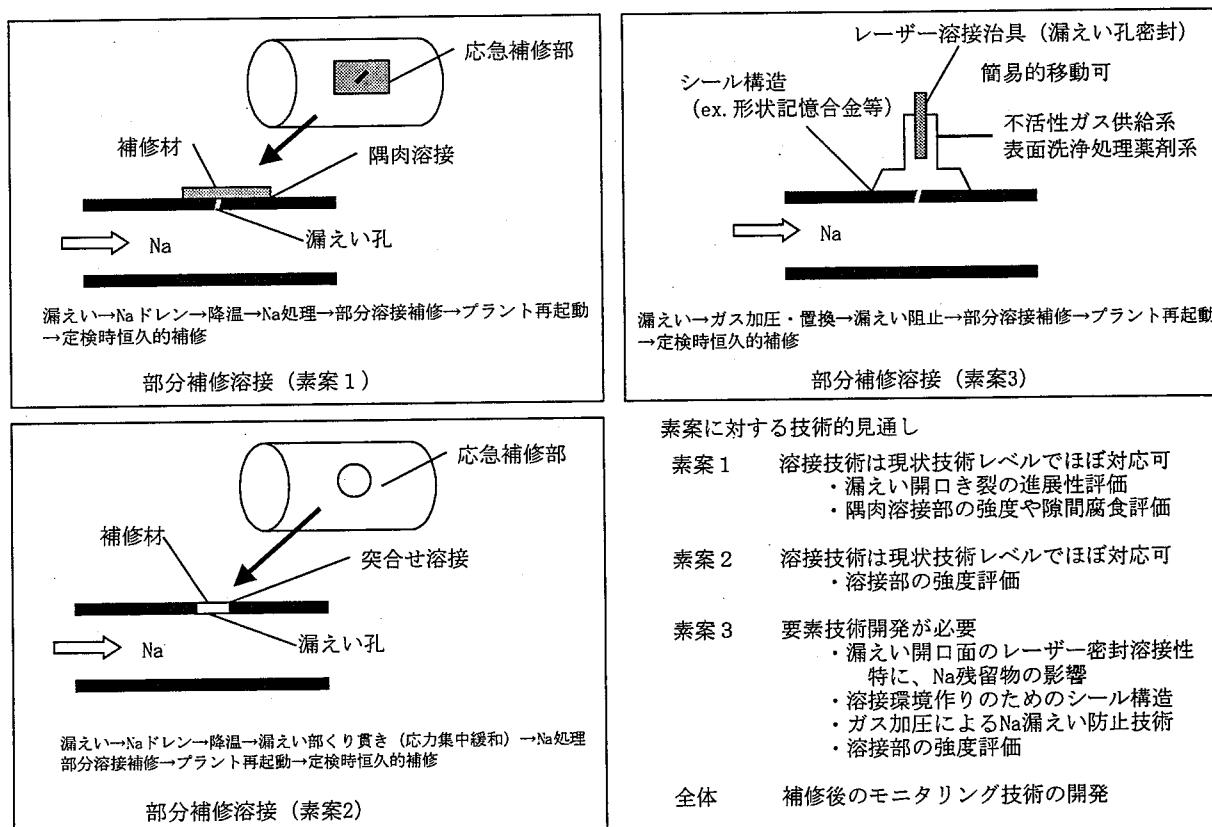


図4.3-9 配管部分応急補修(要R&D)

## 【構想】

- ・二次主冷却系機器・配管の微小き裂・損傷箇所を簡便な応急措置することによって、次期定期点検の補修時までプラント運転を継続する。
- ・二次主冷却系機器・配管からの微少ナトリウム漏えいやナトリウム燃焼火災を排除することによって、影響範囲の限定やプラントの早期再開を行う。また、燃焼に伴う構造材料等の腐食を緩和・抑制し、漏えい安全対策設備を簡素化する。

## 【効果】

- ・稼働率の向上による経済効果（微少ナトリウム漏えい時における長時間炉停止の排除）
- ・漏えい拡大防止による影響範囲の限定、機器類の損傷低減による経済効果、財産保護効果

## 【技術的アイデアとその課題】

アイデア1：き裂修復手法（材料）の適用

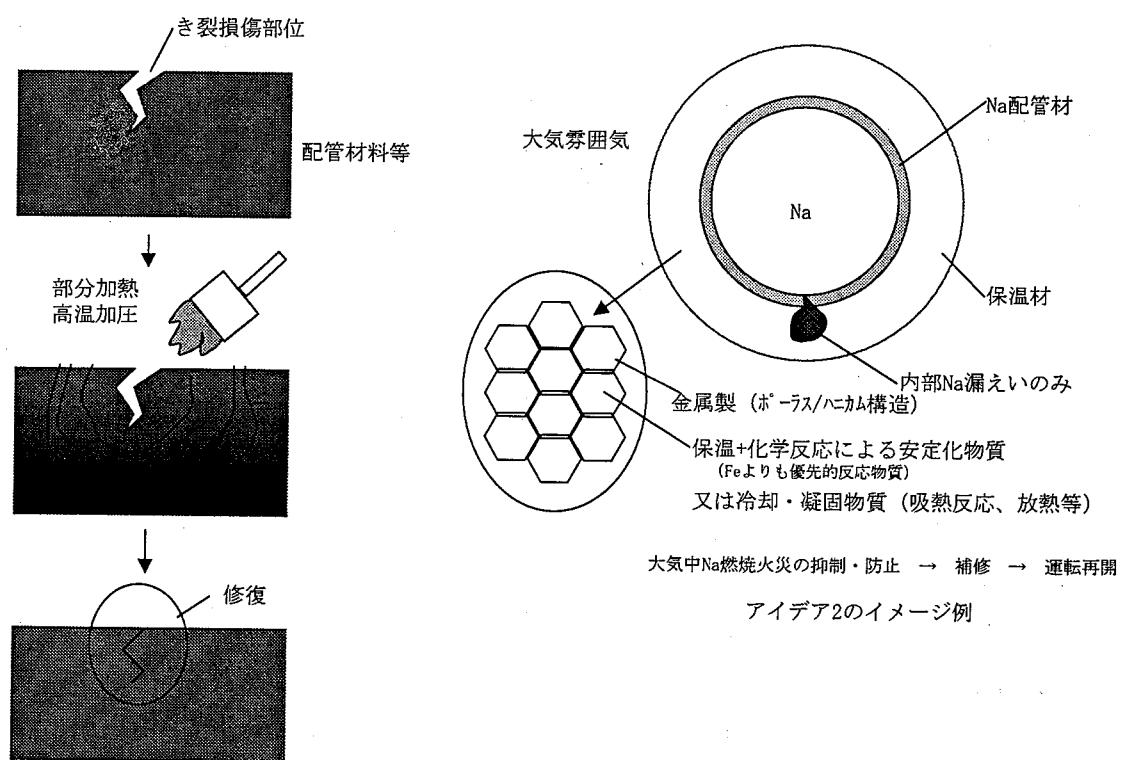
- 許容できないき裂が発見された場合、そのき裂又は損傷部位を、部分的な材料の熱処理（高温加熱）や高温加圧処理（拡散接合）などによって、元の健全な組織状態に復元させ、き裂・損傷部位を補修する技術
- または上記の措置によってき裂や損傷の進展速度を遅らせる（停滞させる）技術
- （当面の課題）
  - ・組織復元やき裂修復後の材料特性変化や材料設計に関する要素技術開発（可能性も含めて）
  - ・修復後の高温強度、組織安定性の要素技術開発

アイデア2：Na漏えい火災抑制型保温材の適用

- 漏えいNaが大気にさらされる前に機器・配管外壁の保温材と化学的に反応させて、安定な化学物質に変え、著しい燃焼現象を引き起さない技術
- 漏えいNaを大気にさらされることなく、保温材の中に吸収、凝固させる（紙おむつのようなもの）技術。また、吸収程度によって、保温材の表面が変色し、漏えい状態や場所が特定できる技術
- メタル製ハニカム構造保温材？の開発
- （当面の課題）
  - ・高温Naを化学的に安定化させる反応物質の探索（Na不活性化）
  - ・高温Naを物理的に吸収・凝固させる物質の探索（冷却化、自己密閉化）
  - ・上記物質による保温材の設計・開発と効果評価

アイデア3：非破壊的なモニタリング技術（早期発見、漏えい未然防止）・・・R&amp;D進行中（公募型研究など）

アイデア4：遠隔ロボットによる補修技術



簡単的な一時修復 → 運転継続 → 次期定期点検時に恒久補修

アイデア1のイメージ例

図4.3-10 Na漏えい・燃焼抑制及び簡易的部分補修（要R&amp;D）

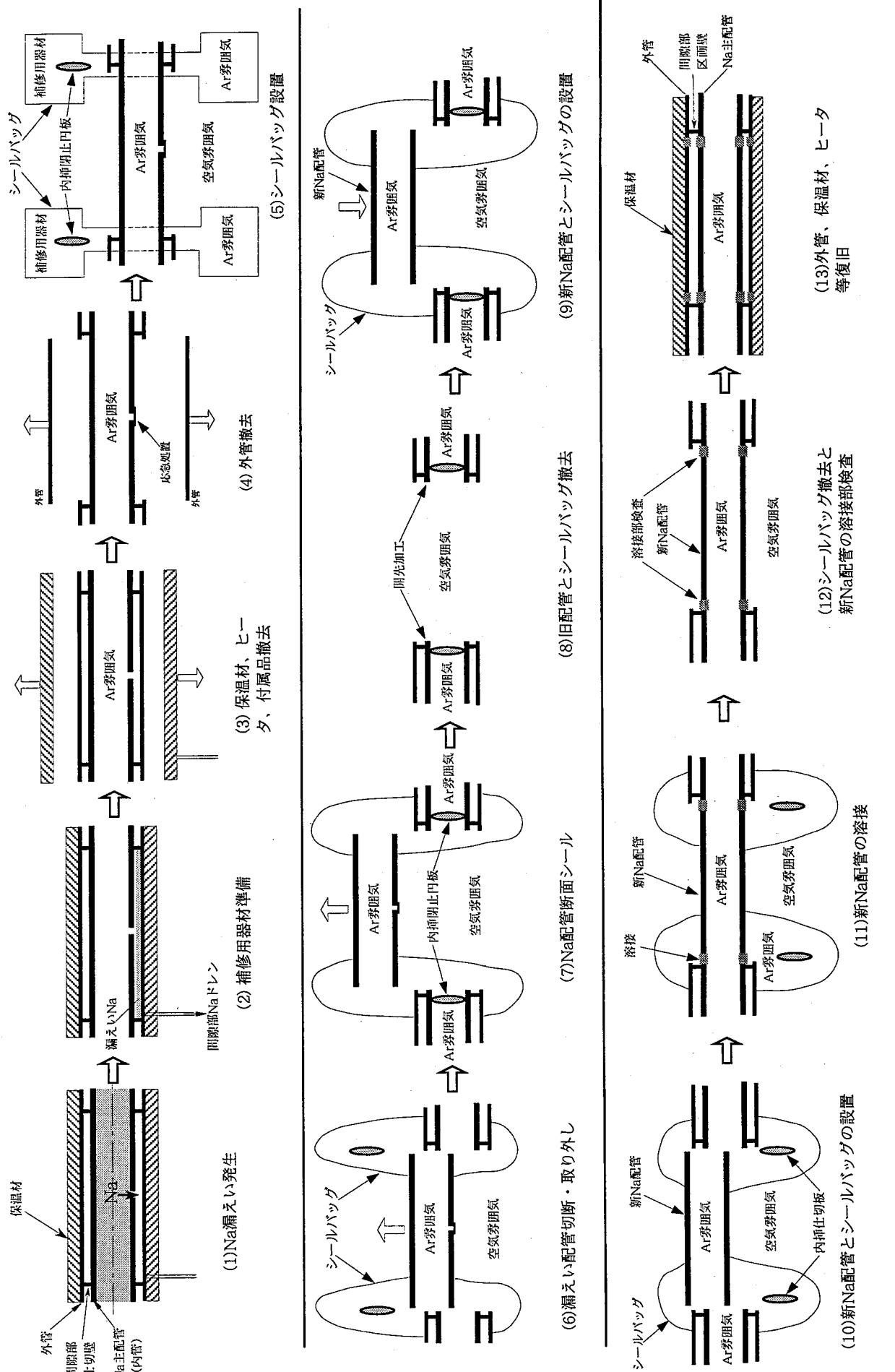


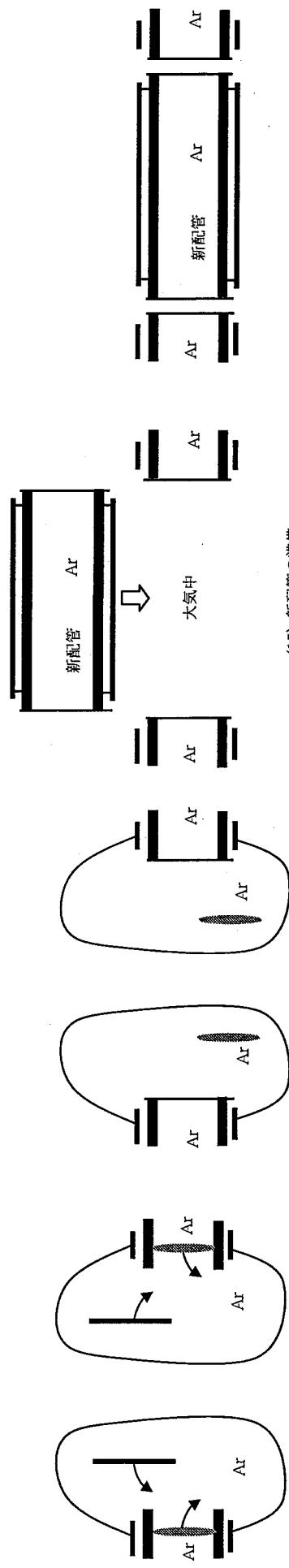
図4.4-1(1/2) 2次系配管補修方法(1)

(1) Na漏えい発生													
(2) 補修用機材準備	5日												
(3) 保溫材・ヒータ ー・付属品撤去		4日											
(4) 外管撤去			2日										
(5) シールバック設 置				1日									
(6) 漏えい配管切 断・取り外し					2日								
(7) Na配管断面シー ル						1日							
(8) 旧配管とシール バック撤去							2日						
(9) 新Na配管とシー ルバックの設置								2日					
(10) 新Na配管ヒシー ルバックの設置									1日				
(11) 新Na配管の接 続										2日			
(12) シールバック撤 去と新Na配管の接 続											3日		
(13) 外管、保溫材、 ヒーター等復旧												5日	
Total	31日												

- ・3交代補修を想定
- ・新配管はスペアがあるものとする

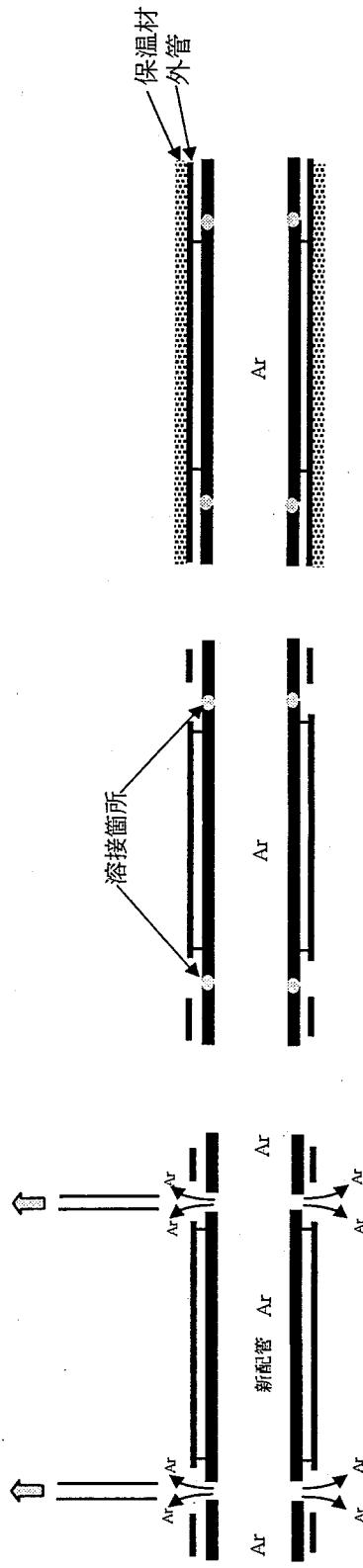
図4.4-1 (2/2) 補修方法(1)の工程





(16) 新配管の設置

(新配管は外管などは既にしている)



(新配管、保温材等の設置

(19) 外管、保温材等の設置

図4.4-2 (2/3) 2次系配管補修方法(2)

・新配管はスペアがあるものとす

図4.4-2 (3/3) 補修方法(2)の工程

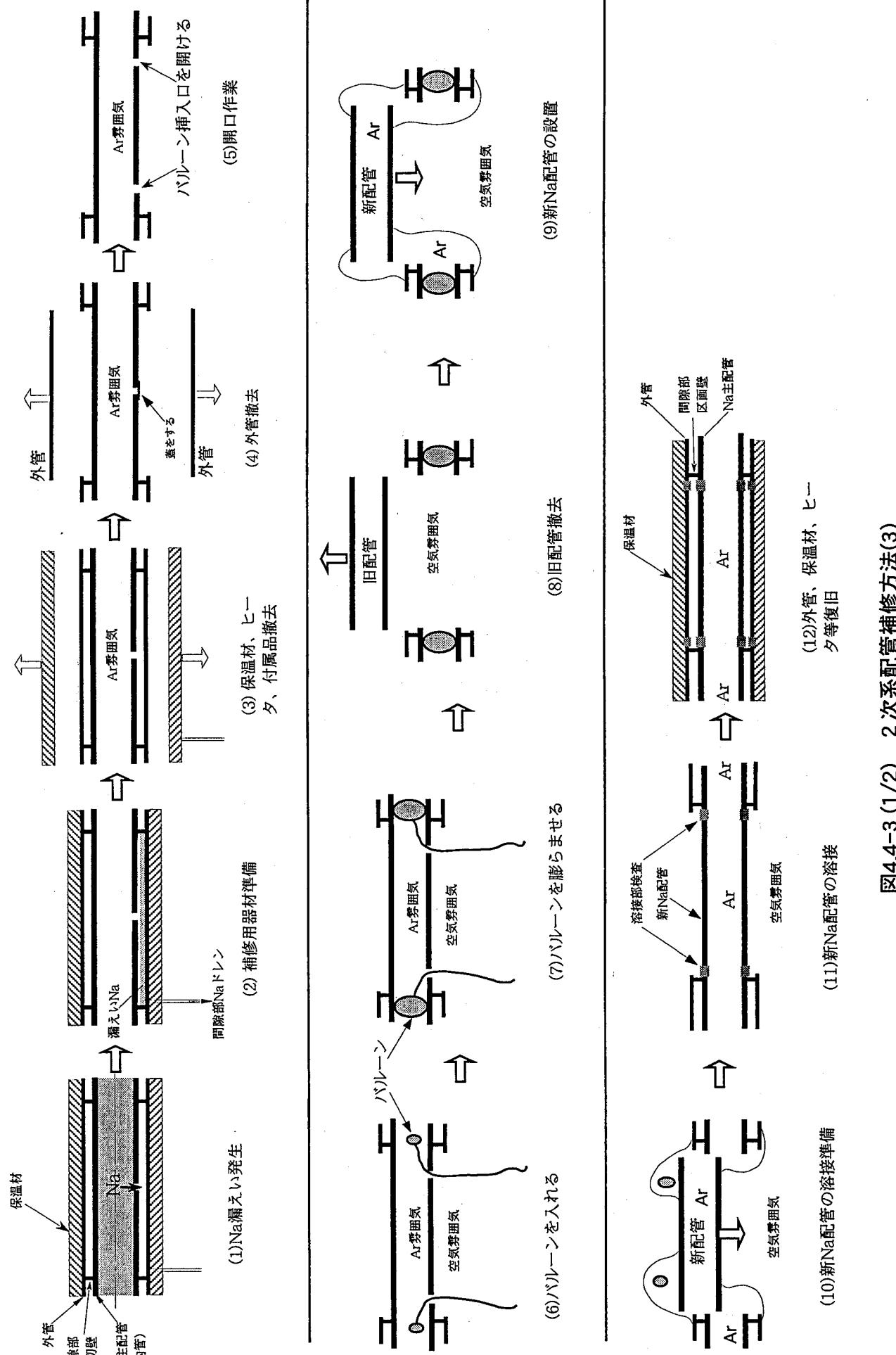
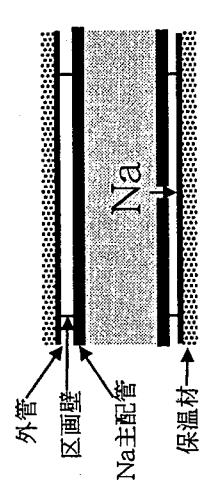


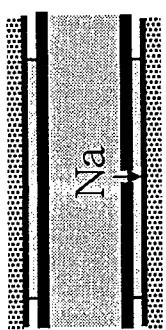
図4.4-3 (1/2) 2次系配管補修方法(3)

- ・新配管はスペア一があるものとする

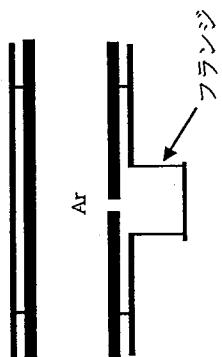
図4.4-3 (2/2) 補修方法(3)の工程



(1) Na漏えい発生

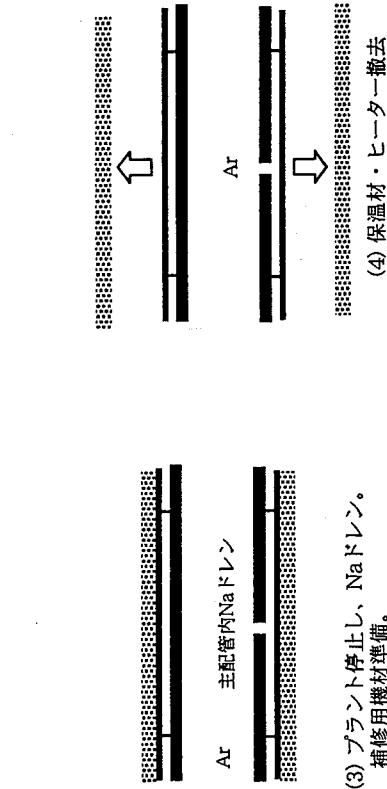
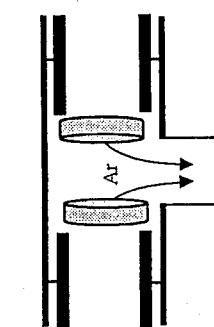


(2) 間隙部にNaが漏えいする

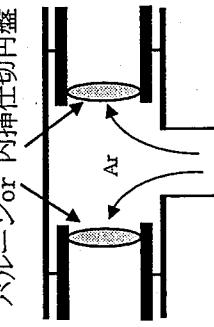


(5) フランジを付ける

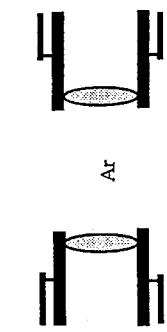
(6) フランジ部から内管を  
切断、撤出する  
(※切断時にシールルバッカ  
を必要としない。)



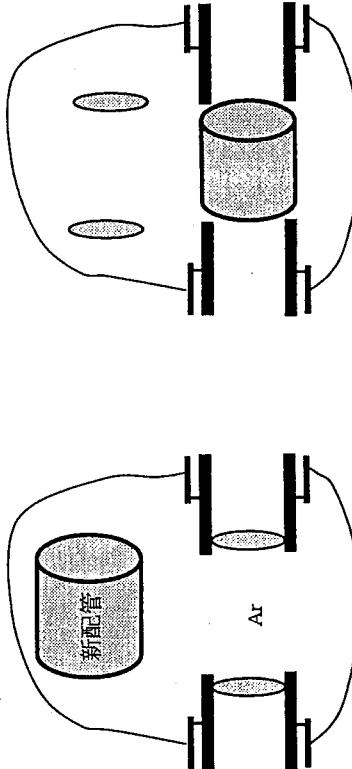
(3) プラント停止し、Naドレン。  
補修用機材準備。



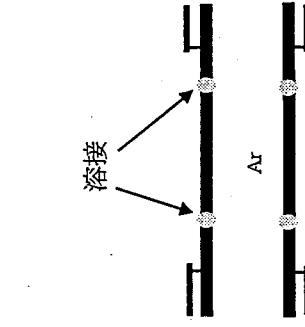
(4) 保溫材・ヒーター撤去



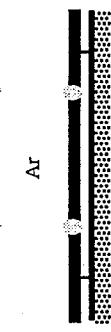
(8) 外管切断、清掃、溶接部  
開先加工



(10) 新配管の溶接準備



(11) 新配管の溶接



(12) 外管、保温材設置

図4.4-4(1/2) 2次系配管補修方法(4)

(1) Na漏えい発生												
(2) 間隙部にNaが漏え いする。												
(3) プラント停止。Na ドレン。	5日											
(4) 保温材・ヒーター 撤去		4日										
(5) フランジを付ける			2日									
(6) フランジ部から内 管を切断、摘出する				2日								
(7) フランジ部からバ ルーンor内挿仕切円盤 を挿入設置					1日							
(8) 外管切断、清掃、 溶接部開先加工						3日						
(9) 新配管の準備、 シールバック設置							3日					
(10) 新配管の溶接準 備								0.1日				
(11) 新配管溶接									2日			
(12) 外管、保温材、 ヒーター設置										3日		
Total 25.1日												

- ・3交代補修を想定
- ・新配管はスペアがあるものとする

図4.4-4 (2/2) 補修方法(4)の工程

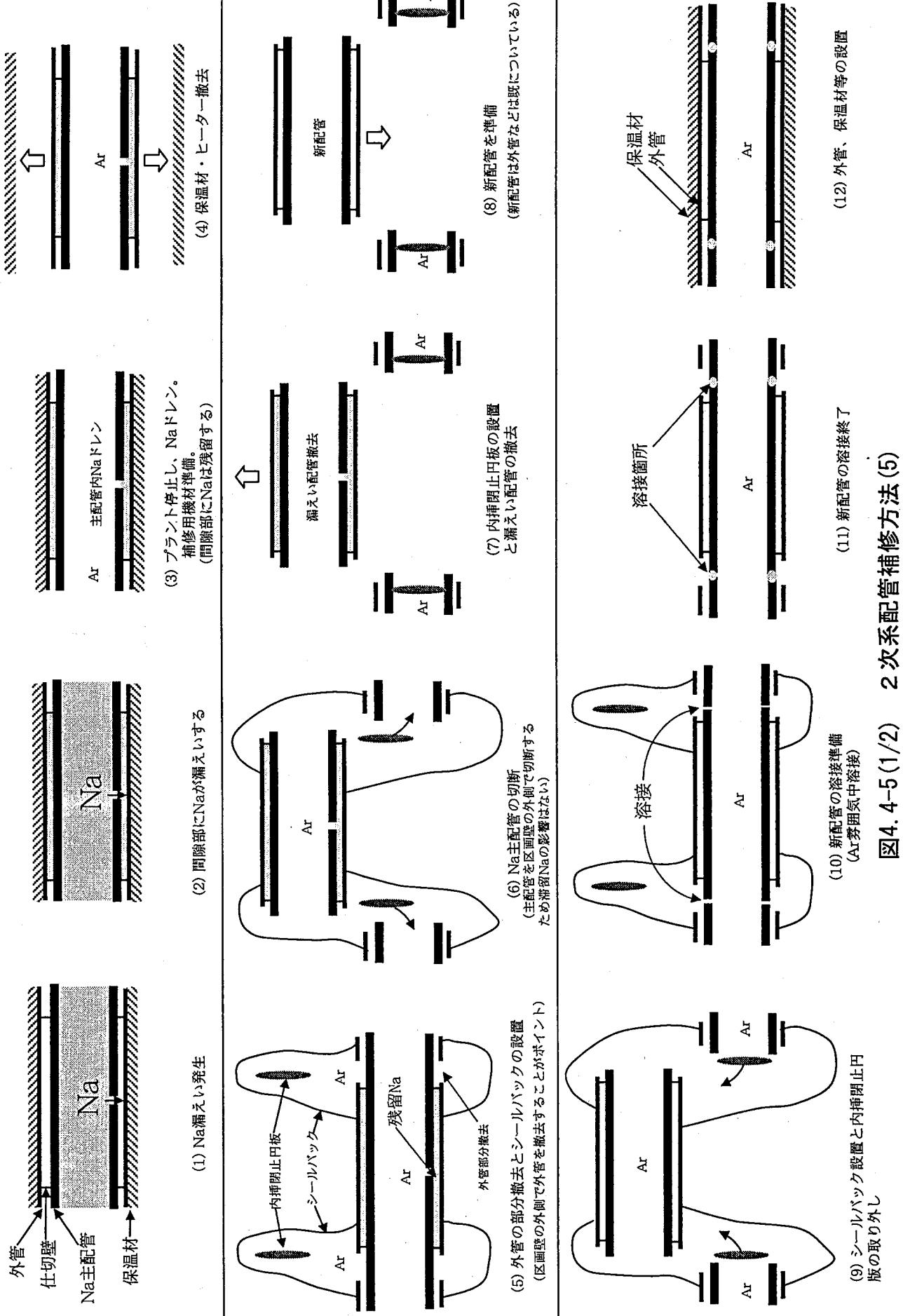


図4.4-5(1/2) 2次系配管補修方法(5)

(1) Na漏えい発生														
(2) 間隙部にNaが漏えいする														
(3) プラント停止。Naドレン。補修用機材準備。	5日													
(4) 保温材・ヒーター撤去		4日												
(5) 外管の部分撤去とシールバックの設置			1.5日											
(6) Na主配管の切断				3日										
(7) 内挿閉止板の設置と漏えい配管の撤去					2日									
(8) 新配管の準備						2日								
(9) シールバック設置と内挿閉止板の取り外し							1日							
(10) 新配管の溶接								2日						
(11) 新配管溶接終了									1日					
(12) 外管、保温材等の設置										5日				
											Total 26.5日			

- 3交代補修を想定
- 新配管はスペアがあるものとする

図4.4-5 (2/2) 補修方法(5)の工程

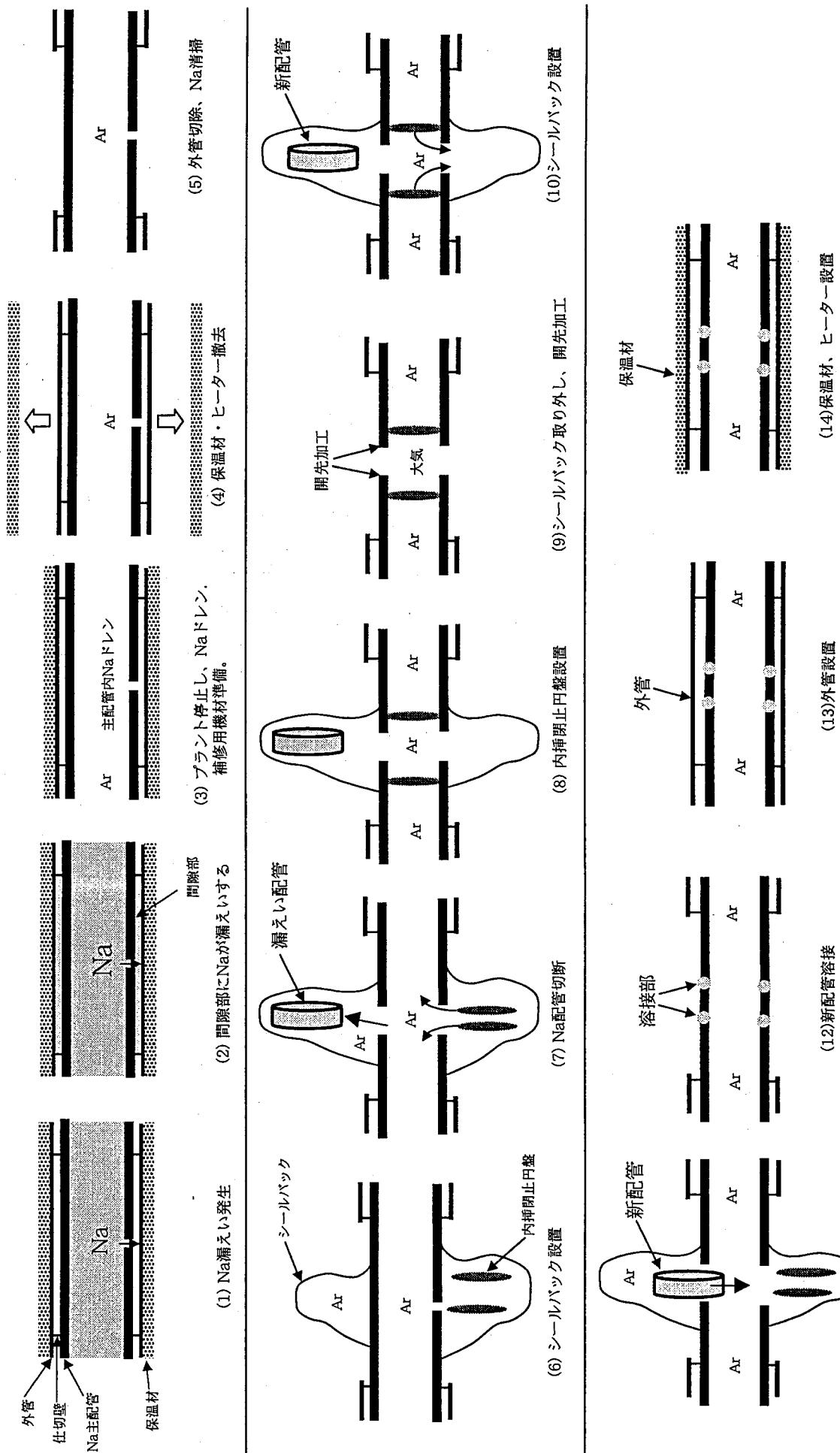


図4.4-6(1/2) 2次系配管補修方法(6)

(1) Na漏えい発生																	
(2) 間隙部にNaが漏えいする																	
(3) プラント停止。Naドレン。補修用機材準備。			5日														
(4) 保溫材・ヒーター撤去				4日													
(5) 外管切除、Na清掃					3日												
(6) シールバック設置						1日											
(7) Na配管切断							1日										
(8) 内挿閉止板設置								1日									
(9) シールバック取り外し、開先加工									1日								
(10) シールバック設置										1日							
(11) 新配管溶接準備											2日						
(12) 新配管溶接												2日					
(13) 外管設置													2日				
(14) 保溫材、ヒーター設置														3日			
Total	26日																

- 3交代補修を想定
- 新配管はスペアがあるものとする

図4.4-6 (2/2) 補修方法(6)の工程

表4.5-1 2次系配管補修方策

個別項目	説明図	内容	利点	欠点	実績	補修方法 (1) 図 4.4-1	補修方法 (2) 図 4.4-2	補修方法 (3) 図 4.4-3	補修方法 (4) 図 4.4-4	補修方法 (5) 図 4.4-5	補修方法 (6) 図 4.4-6
(1) 外管Hot方式	図4.3-1	保溫材を外管の外側に巻く方式。外管が内管と筒と外管の間に伝熱材を設置し、外管を常温にしたい時も補修が容易。なお、内管への補修も少ないと工事費も少い。	・内外管間隙部に保溫材がないため、Na漏え時に漏えいNaが危険部全域に流れ出さず専用器具を設置するため、補修が容易となる。	・外管ヘロースが常温になるため強度が低下する。 ・重量がコールド式に比べ重くなる。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(2) 内外管間隙部の区画細分化	図4.3-2	補修性向上のため、内外管の間隙部に一定距離ごとに設けた仕切壁の数を多くする。(実際にこれは、溶接部の多い箇所は区画の細分化を行い、ストレート管のように溶接部の無い箇所は区画の細分を行わないなど、場所に応じた施工となる。)	・漏えいNaが危険部全域に流れ出さず専用器具を設置するため、補修が容易となる。	・区画毎に漏えい検出器や余熱ヒーターの設置が必要になり點検が複雑になる。 ・区画壁を設置によって重量が増加する。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(3) 配管規格化		配管口径、エルボーを同一規格にする。	・予備配管を用意する場合など、通用範囲が広い。	・配管規格を標準化する場合など、規格化されているため、通用範囲が広い。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
配管設計に関するもの											
(4) 配管予熱方式		ガス予熱方式とヒーター予熱方式がある。	・配管の交換のために必須。	・間際部の区画壁のため、ガス余熱方式は困難がある。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(5) アクセスベース＆作業ベース		配管交換のためのアクセスベース＆作業アースを確保する。	・外管をNaバウンダーにする事により、内管漏えい後も運転を継続し、次期定期検査中に配管を止められる。	・内管漏えいによるプラント稼働率低下を防ぐ最も効果的な方法。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(6) 外管Naバウンダー化	図4.3-4	区画壁の溶接構造を有するVジョイント構造を止め、溶接構造を有しない別の構造物を配置する。	・溶接構造を有しないため、配管の信頼性が向上する。	・外管Naバウンダー化のための配管構造が複雑になる。 ・漏えい後も運転を許容できるロジック構成が必要。(許認可、安全評定や原因究明等の課題)	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(7) 区画壁の溶接構造既存	図4.3-3	外管をVジョイントにする事により、内管漏えい後も運転を継続し、次期定期検査中に配管を止められる。	・溶接構造を有しないため、配管の信頼性が向上する。	・内管漏えいによる配管閉鎖などならぬため、漏えいNaが備かではあるが、隣接区画に移行する可能性がある。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(8) 外管リーキジャケット化構想		外管を漏えいNaは、カートリッジ式の様に簡易道どし、交換性を高める。	・外管の交換が容易になり、補修期間短縮に貢献できる。	・内管漏えい時のパイプオフ対策や漏えいの気密など、安全面での課題が発生する。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(9) 開止板を用いたシールバックレス補修	図4.3-8	配管を切断する際に、シールバックを設置せず刃入を最小限にする。	・シールバックを設置する手間が省け、補修期間の短縮が可能となる。	・大口径配管の場合、開止板orバルーンによる密閉は配管内正側にため困難もしくは不可能。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(10) バルーンを用いたシールバックレス補修(簡素化)	図4.3-7	シールバックを設置せずバルーンを挿入し、膨らませる。	・シールバックを設置する手間が省け、補修期間の短縮が可能となる。	・配管内正側に多少の空気が混入するため、補修後のNa純化に時間が必要。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(11) 外管を利用したシールバックレス補修	図4.4-6	漏えい箇所の外管にフランジを設置し、ここから内管にアクセスして内管を切断、掏出する。	・シールバックを設置する手間が省け、補修期間の短縮が可能となる。 ・Naが液化しないため、滑掃が容易になる。	・漏えい箇所を介して配管閉鎖機が必要になる。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
補修方法に関するもの											
(12) 間隙部漏えいNaのArガス洗浄(簡素化)	図4.3-6	間隙部漏えいNaを高圧Arガスのみで洗浄する。 (注:漏えいNaの跡がNa洗浄後、補修後のBG底減及び材料腐食の観点から重要である。)	・作業性や時間において有利。	・すべてのNaを除去することができず、補修後、バックグラウンドNaにより漏えい見知が困難もしくは不可能。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(13) 漏えいNa洗浄法	図4.3-5	区画壁の外側で、漏えい配管を切り出し、Na洗浄作業は行われない。	・Na洗浄作業を実施しないため、補修時間が短縮できる。	・区画壁を小さくする必要があり、区画壁増加による課題が生じる。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(14) 配管の部分交換	図4.4-5	漏えいの近傍の配管を切り出し、交換する。	・比較的狭いスペースでの作業が可能。	・配管を新規に作る必要が無く、補修期間が短くなる。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(15) 予備配管の準備		予め予備配管をプラント内に容易しておくる。	・比較的狭いスペースでの作業が可能。	・配管の規格化とセットで行うことが望ましく、その場合、規格化による課題が生じる。	○ ○ ○ ○ ○ ○						
R & D											
(16) 配管漏えい箇所の部分急補修	図4.3-9	Na配管の切断を行わずに、局部的な応急補修を実行、速やかにプラントを再起動する。次期点検時に本補修を行う。	・短期間の応急補修のため、残脂点検影響が少ない。	・漏えい後も、運転を許容できるロジック構成が必要。(許認可、安全評定や原因究明等)	○ ○ ○ ○ ○ ○						
(17) Na火災抑制型保溫材	図4.3-10	漏えいNaと配管を取り巻いている特殊保溫材により安定化物質となり、Na漏えいは収束する。	・漏えい後も運転を許容できる口	・漏えいNaの影響範囲限定の可能性もあり、漏えい対策設備の簡素化が可能。	○ ○ ○ ○ ○ ○						

## 5 結言

Na の欠点である化学的活性及び光学的不透明性が、実用化プラントにおいて有意な影響を与えないようするため、SG 水リーク（Na/水反応）、Na 環境下での ISI&Repair および Na 漏えい燃焼について下記の検討を行った。

SG 水リーク対策については、財産保護のために伝熱管破損伝播領域を局限化することを目標とし、どの程度まで局限化すべきか暫定的な目標設定を行った。そして、予備的な解析によりその目標が達成できるかどうかの見通しについて検討した。この結果、水リーク対策設備の高度化により伝熱管の破損伝播範囲をある程度限定できる見通しは得られた。今後は、目標設定の妥当性や水リーク対策設備の高度化の技術的な見通しについて、詳細な解析を含め別途検討が必要である。さらに、この評価と合わせて水リークの発生頻度を明確化させることによってより効果的な対策を行う。

ISI&R については、検査・補修技術の設計思想を明らかにするとともに、Na ドレンなしでの検査・補修の可能性についても検討した。ドレンなしでの検査・補修については現状の技術では開発要素が多く、新たな R&D が必要であることがわかった。今回は先行炉の検査・補修技術を基本とした検討を行ってきたが、今後は実用化炉としての検査の考え方を整理し、その上で必要となる検査・補修技術の達成方策を明らかにし、実用化炉への適用性の見通しを立てる必要がある。

Na 漏えいについては、1 次系及び 2 次系 Na の各部位での漏えい事故に対する取組方針について考え方を整理した。本 W/G では特に 2 次系 Na 主配管を対象とし、2 重壁構造の特殊性を考慮して早期補修の観点から様々な具体的補修方法についての検討を行った。そして、それぞれの補修方法には固有の課題が存在し、また作業スペースの確保の必要もあり、実用化炉での Na 漏えい補修は設計の段階で十分な対策、補修方法を検討し、方法論を確立しておくことが重要であることが明らかになった。今後は、常陽やもんじゅでの配管補修経験も参考とし、補修箇所に応じたより詳細な補修方法を検討することが必要である。さらに今回の検討では 2 次系主配管を対象としたが、ACS 伝熱管、SG 及びポンプなどの機器からの漏えい、さらに 1 次系 Na 漏えい事故の対策など今後とも引き続いて検討していくかなければならない。