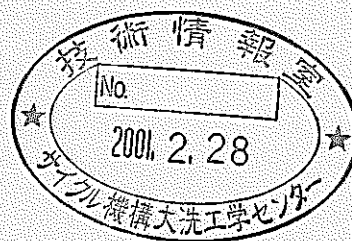


Na冷却炉の2次系簡素化概念の検討
(研究報告)

2000年6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

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)
2000

Na 冷却炉の 2 次系簡素化概念の検討

(研究報告)

早船 浩樹*、島川 佳郎*、石川 浩康*、
久保田 健一*、小林 順*、笠井 重夫*

要 旨

本検討では、経済性向上と安全性向上が同時に実現可能なアイデアを創出し、実用化戦略調査研究フェーズ I の「有望な候補概念の抽出」に供するために、種々の 2 次系簡素化概念を幅広く検討し、それらの概念について技術的成立性、経済性、安全性を評価した。

概念検討では、以下の方針に基づいて 2 次系簡素化概念を検討した。

- (1) Na-水反応の反応影響を大幅に緩和することにより 2 次系を簡素化する。
- (2) 新型 SG の採用によって Na-水反応を排除する。
- (3) 水以外の作動流体を用いる発電システムにより Na-水反応を排除する。

検討の結果、12 種類の 2 次系簡素化実用化候補概念と、3 種類の革新的発電システムを抽出した。

これらの候補概念について、評価を行った結果、以下の見通しを得た。

- (1) Pb-Bi 熱媒体ヘリカルコイル分離配置自然循環型 SG 又は固体銅熱媒体型 SG 概念を採用することにより、Na-水反応を排除することが可能である。
- (2) 新型 SG による建設コスト低減効果は 0～5%程度と予測される。実用化のためにはさらなるコスト低減のアイデアが必要である。
- (3) 新型 SG は機器の単体重量が大きくなり、輸送及び現地での設置工事の重量制限が機器容量の制限となる可能性がある。

これらの評価結果は、H12 年度に実施される 2 次系簡素化概念の検討成果と併せて比較検討され、有望な候補概念が抽出される予定である。

*システム技術開発部 FBR システムグループ

WBS 番号：I-1-A-①

本研究は、実用化戦略調査研究の一環として実施したものである。

Conceptual Design Study on Simplified and Safer Cooling Systems for Sodium Cooled FBRs

Hiroki HAYAFUNE*, Yoshio SHIMAKAWA*,
Hiroyasu ISHIKAWA*, Kenichi KUBOTA*,
Jun KOBAYASHI*, and Shigeo KASAI*

Abstract

The objective of this study is to create the FBR plant concepts increasing economy and safety for the Phase-I "Feasibility Studies on Commercialized Fast Reactor System". In this study, various concepts of simplified 2ry cooling system for sodium cooled FBRs are considered and evaluated from the view points of technological feasibility, economy, and safety.

The concepts in the study are considered on the basis of the following points of view.

1. To simplify 2ry cooling system by moderating and localizing the sodium-water reaction in the steam generator of the FBRs.
2. To simplify 2ry cooling system by eliminating the sodium-water reaction using integrated IHX-SG unit
3. To simplify 2ry cooling system by eliminating the sodium-water reaction using a power generating system other than the steam generator.

As the result of the study, 12 concepts and 3 innovative concepts are proposed.

The evaluation study for those concepts shows the following technical prospects.

1. 2 concepts of integrated IHX-SG unit can eliminate the sodium-water reaction
 - Separated IHX and SG tubes unit using Lead-Bismuth as the heat transfer medium
 - Integrated IHX-SG unit using copper as the heat transfer medium
2. Cost reduction effect by simplified 2ry cooling system using integrated IHX-SG unit is estimated 0 to 5 %.
3. All of the integrated IHX-SG unit concepts have more weight and larger size than conventional steam generator unit. The weight of the unit during transporting and lifting would limit capacity of heat transfer system.

These evaluation results will be compared with the results in JFY 2000 and used for the Phase-II study.

*Systems and Technology Development Division, FBR system design group

目次

	ページ
要旨	i
Abstract	ii
目次	iii
表リスト	iv
図リスト	v
1. 緒言	1
2. 検討の進め方	2
3. 検討内容	5
3.1 Na水反応影響の大幅緩和による安全裕度拡大	5
3.1.1 ループ型炉（1次系高压化）	5
3.1.2 反応生成物分離機構を付加した2重管SG	25
3.2 不活性中間熱媒体によるNa-水反応排除	33
3.2.1 Pb-Bi熱媒体プール型SG概念	38
3.2.2 Pb-Bi熱媒体チューブ型SG概念	51
3.2.3 固体中間熱媒体SG概念	67
3.2.4 Pb-Bi熱媒体水直接注入型SG概念	86
3.3 革新的な発電方式によるNa-水反応排除	92
3.3.1 炭酸ガスタービン発電	92
3.3.2 液体金属MHD発電	107
3.3.3 熱電素子直接発電	112
3.4 組網線式2重管SGによる2次系削除のループ型大型炉 （2ループ）への適用	115
4. 総合評価	125
4.1 技術的成立性確認のために早期に実施すべきR&D課題の抽出	125
4.2 経済性評価	131
4.3 安全性評価	133
5. 結言	147
参考文献	148

表リスト

		ページ
表 3.1.1-1	ループ型炉（1次系高圧化）の基本仕様	13
表 3.1.1-2	ループ型炉（1次系高圧化）の設計要求事項への適合性	14
表 3.2-1	各種中間熱媒体候補材料の物性	37
表 3.2.1-1	Pb-Bi 中間熱媒体プール型熱交換器の各概念の概略仕様	45
表 3.2.2-1	チューブ型 Pb-Bi 熱媒体 S G の基本仕様（直管型）	61
表 3.2.2-2	Pb-Bi 熱媒体チューブ型 S G（U字管型）を用いた プラントの基本仕様	62
表 3.2.2-3	Pb-Bi 熱媒体チューブ型 S G（U字管）付き プラントの設計要求に対する適合性	63
表 3.2.3(i)-1	Summary of some possible copper bonded SG designs that satisfy the required plant conditions	74
表 3.2.3(i)-2	Process steps for manufacture by powder HIP	75
表 3.2.3(i)-3	Process steps for manufacture by solid HIP	76
表 3.2.3(i)-4	Comparison of the alternative manufacturing methods	77
表 3.2.3(i)-5	Summary of copper bonded SGU design masses and relative costs	78
表 3.2.4-1	Pb-Bi 熱媒体直接注水型 S G のサイジングの例	90
表 3.3.1-1	炭酸ガスタービン発電システムの基本仕様	99
表 3.3.1-2	炭酸ガスタービン発電システムの液相圧縮の有無による 概略物量比較	100
表 3.4-1	ループ型炉（2次系削除）の基本仕様	120
表 4-1	2次系簡素化概念比較表	129

図リスト

		ページ
図 2-1	2次系簡素化概念の候補と検討の進め方	4
図 3.1.1-1	ループ型炉（1次系高圧化）のプラント概念	16
図 3.1.1-2	ループ型炉（1次系高圧化）の炉心主要目	17
図 3.1.1-3	ループ型炉（1次系高圧化）の原子炉構造	18
図 3.1.1-4	ループ型炉（1次系高圧化）の原子炉建屋配置（立面）	19
図 3.1.1-5	ループ型炉（1次系高圧化）の原子炉建屋配置（平面）	20
図 3.1.1-6	ループ型炉（1次系高圧化）の高圧化対策	21
図 3.1.1-7	ループ型炉（1次系高圧化）におけるNa水反応概念	22
図 3.1.1-8	SG伝熱管破損時の事象進展とそれに対する対策設備	23
図 3.1.1-9	ループ型炉（1次系高圧化）のNa水反応対策設備概念	24
図 3.1.2-1	反応生成物分離機構付2重管SG2次系削除 システム概念	29
図 3.1.2-2	反応生成物分離機構の例	30
図 3.1.2-3	水素ガス気泡径と静止Na中上昇速度の関係	31
図 3.1.2-4	固体反応生成物径と限界浮き上がりNa流速の関係	31
図 3.1.2-5	原子炉容器下部プレナムに反応生成物分離機能を付加 した2重管SGによる2次系削除タンク型炉概念の例	32
図 3.2.1-1	プールヘリカルコイル近接配置 局所対流型 概念図	46
図 3.2.1-2	プール直管近接配置 局所対流型 概念図	47
図 3.2.1-3	プール直管ヘリカルコイル近接配置 局所対流型 概念図	48
図 3.2.1-4	プールヘリカルコイル分離配置 自然対流型 概念図	49
図 3.2.1-5	プールヘリカルコイル近接配置 強制攪拌型 概念図	50
図 3.2.2-1	チューブ型Pb-Bi熱媒体SG概念図（直管型）	64
図 3.2.2-2	Pb-Bi熱媒体チューブ型SG（U字型）	65
図 3.2.2-3	Pb-Bi熱媒体チューブ型SG（U字型）を用いた プラントの概念	66
図 3.2.3(i)-1	Alternative tube layouts for copper bonded steam generator	79
図 3.2.3(i)-2	Design incorporating a combination of straight sodium tubes and coiled steam tubes	80
図 3.2.3(i)-3	Typical Conceptual Design of Copper Bond SG Unit	81
図 3.2.3(ii)-1	銅熱媒体（Pb-Bi ボンド）SG 伝熱部断面	84
図 3.2.3(ii)-2	銅熱媒体（Pb-Bi ボンド）SG 熱交換器概念	85
図 3.2.4-1	Pb-Bi熱媒体水直接注入型SG概念	91
図 3.2.4-2	Pb-Bi熱媒体水直接注入型SG（240MWt）概念図	91
図 3.3.1-1	ブレイトンサイクルの系統構成及びT-S線図	101

		ページ
図 3.3.1-2	炭酸ガスタービン発電システムの全体系統図	102
図 3.3.1-3	炭酸ガスタービンのヒートマスバランス	103
図 3.3.1-4	Na-炭酸ガス反応に係わる基礎試験結果 (SNR-300 での試験)	104
図 3.3.1-5	一段再生サイクルの基本構成	105
図 3.3.1-6	一段再生サイクルの熱効率	105
図 3.3.1-7	二段再生サイクルの基本構成	106
図 3.3.1-8	二段再生サイクルの熱効率	106
図 3.3.2-1	液体金属二相流自然循環MHD発電システムの概念図	111
図 3.3.3-1	熱電発電の原理	114
図 3.3.3-2	熱電発電器の例	114
図 3.3.3-3	熱電発電システムの例	114
図 3.4-1	ループ型炉 (2次系削除) のプラント概念	121
図 3.4-2	ループ型炉 (2次系削除) のSG構造概念	122
図 3.4-3	ループ型炉 (2次系削除) の原子炉建屋配置 (立面)	123
図 3.4-4	ループ型炉 (2次系削除) の原子炉建屋配置 (平面)	124
図 4.2-1	新型SG概念の伝熱性能/物量比較	132
図 4.3-1	SG伝熱管破損からNa水反応に至る一般的な事象推移	143
図 4.3-2	Na水反応のレベルを「同時大リーク」に制限する ための要件	144
図 4.3-3	Na水反応のレベルを「同時小リーク」に制限する ための要件	145
図 4.3-4	Na水反応のレベルを「片側リーク」に制限する ための要件	146

1. 緒言

高速炉実用化戦略調査研究では、実用FBRの候補概念の一つとして、Na冷却大型炉及びNa冷却中型モジュール炉のプラント概念検討が進められている。これらのNa冷却炉の更なる経済性向上方策の一つとして、Na冷却炉特有のシステムである2次主冷却系を簡素化することが検討課題として挙げられた。この2次系簡素化の概念としては、我が国では2重管SGによる2次系削除の概念がFBRの経済性向上方策として選定され、検討が加えられてきた。

2重管SGによる2次系簡素化については、建設コストに代表される経済性に関しては、その効果が見通されている。一方、安全性に関しては、安全論理としては成立する見通しが有るものの、2重管SGによる冷却システムは小規模なNa-水反応が発生し少量の反応生成物が1次系に混入することを設計基準事象（Design Basis Event ;DBE）として想定せざるを得ない。

それに対して、実用化FBRでは更なる安全性の向上を目標の一つとしており、2次系簡素化概念の検討では、Na-水反応を十分に低い可能性（排除）又は反応の影響を大幅に緩和することによってNa-水反応が安全性に影響しないこと、とすることが求められていると考える。

そこで、Na-水反応を排除すること又は反応影響を大幅に緩和する、という目標を達成するために、以下の3つの方針を持って2次系簡素化概念の検討を行うこととした。

Na-水反応の影響（圧力、反応生成物の炉心流入等）を大幅に緩和することによって安全性を向上させる

Na-水反応が発生する可能性を低くする

水以外の作動流体を用いる革新的発電システムをFBRに導入する

これらの方針を具現化した2次系簡素化概念を検討するにあたっては、既往研究例、新たな概念・アイデアの創出、等を可能な限り広い範囲に渡って行い、安全性と経済性が両立した概念の創出を図る。

2. 検討の進め方

2次系簡素化概念の検討は、高速炉実用化戦略調査研究 Phase-I (1999～2000年度)の中で、有望な候補概念を抽出し、その技術的成立性、経済性、安全性等の諸特性を Phase-II (2001～2005年度)で試験を含めた R&D によって見極め、2005年の候補概念選定に供するスケジュールで検討を進めている。そこで、2次系簡素化概念の検討は Phase-I の「有望な候補概念の抽出」に向けて以下の検討を行うこととした。

1999年度の検討：

- ・ 既往検討例のサーベイ
- ・ 新たな概念の創出
- ・ 概念の概略評価

2000年度の検討：

- ・ 新たな概念の創出（継続）及び概念検討
- ・ 2次系簡素化に対する要求事項の整理
- ・ 有望概念の抽出

1999年度の2次系簡素化の概念検討では、既往検討例のサーベイと新たな概念の創出を重点的に実施した。新たな概念の創出においては、幅広くアイデアを収集し、部分的なアイデアでも活用する目的から、概念検討開始前に選定は行わず、種々の概念を全て検討する方針で臨んだ。その結果、検討対象とした概念は以下のとおり。

(1)Na-水反応影響の大幅緩和による2次系簡素化

- ① 1次系高圧化による2次系削除
- ② 反応生成物分離機構付き2重管SG

(2)Na-水反応緩和/排除を指向した新型SGの採用による2次系簡素化

ここでは、中間熱媒体種類/中間熱媒体配置方式(固体媒体の場合は製作方法)/伝熱管配置方式(固体媒体の場合はボンド材の有無)/Na・水伝熱管形式/伝熱方式、の順で標記

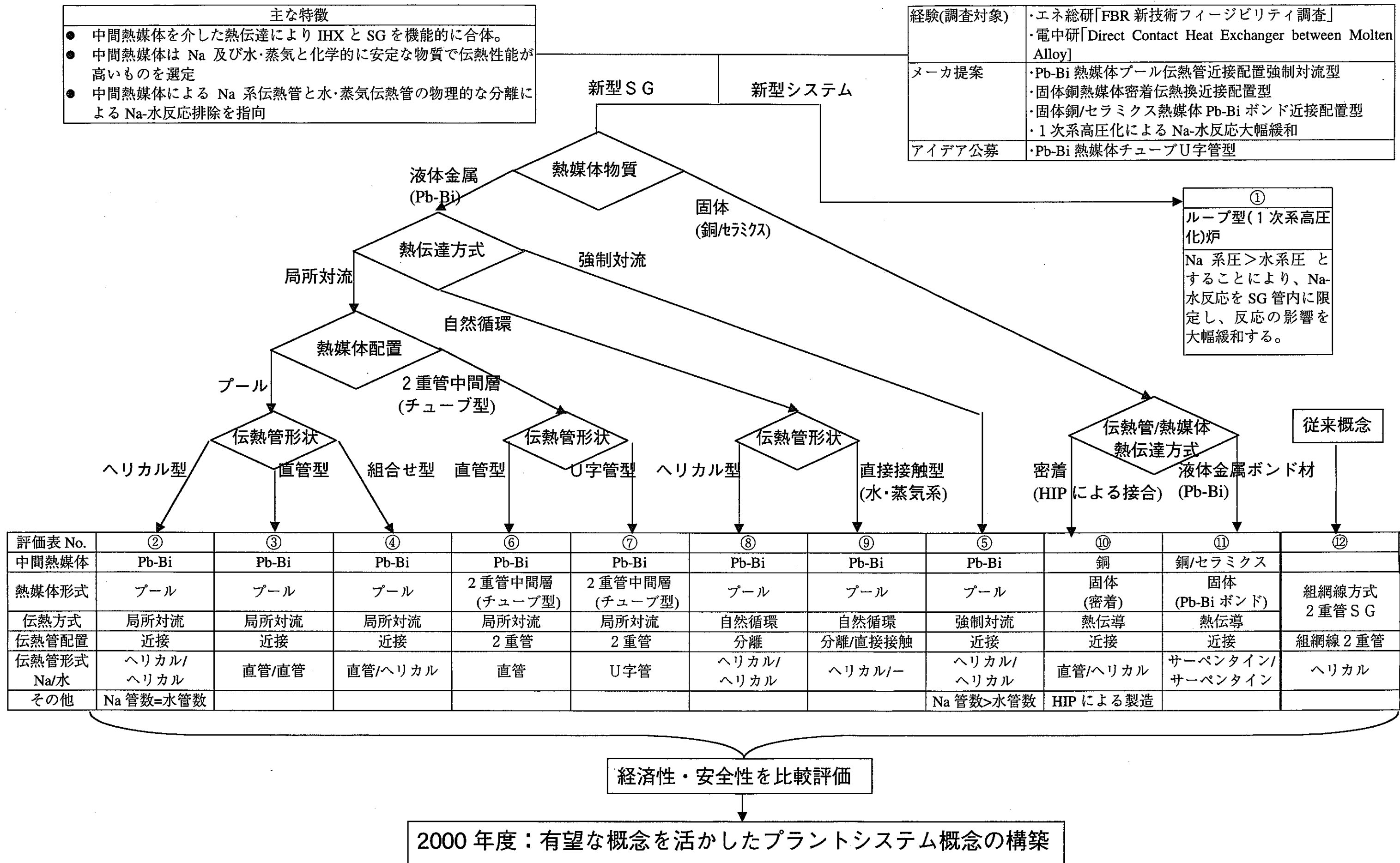
- ② Pb-Bi/プール/近接配置/ヘリカルコイル/局所自然対流熱伝達
- ③ Pb-Bi/プール/近接配置/直管/局所自然対流熱伝達
- ④ Pb-Bi/プール/近接配置/直管ヘリカルコイル組合せ/局所自然対流熱伝達
- ⑤ Pb-Bi/プール/近接配置/ヘリカルコイル/強制対流熱伝達
- ⑥ Pb-Bi/チューブ/近接配置/直管/熱伝導
- ⑦ Pb-Bi/チューブ/近接配置/U字管/熱伝導
- ⑧ Pb-Bi/プール/分離配置/ヘリカルコイル/自然循環熱伝達
- ⑨ Pb-Bi/プール/分離配置/直管・直接注水/自然循環熱伝達
- ⑩ 固体銅/HIP製造/密着(ボンド材無し)/直管・ヘリカルコイル組合せ/熱伝導
- ⑪ 固体銅/鋳物+機械加工/Na管Naボンド/直管/熱伝導
- ⑫ 組網線方式2重管SG

(3)革新的発電方式による2次系削除

- ・液体金属2相流自然循環MHD発電システム
- ・炭酸ガスタービン発電システム
- ・熱電素子による直接発電システム

上記の概念の内、革新的発電方式を除く概念（概念①～⑫）を類型化すると、図2-1のとおりとなる。

図 2-1 2次系簡素化概念の候補と検討の進め方



3. 検討内容

3.1 Na 水反応影響の大幅緩和による安全裕度拡大

3.1.1 ループ型炉（1次系高圧化）

(1) 基本概念

本プラントは、1次冷却系を水・蒸気系よりも高圧とすることにより、SG伝熱管破損時のNa水反応を伝熱管内（水側）に限定し、2次系削除を可能としたループ型プラントである。

本プラントでは1次系圧力を6MPa、主蒸気圧力を5MPaとしており、SG伝熱管破損時のNa水反応は基本的には伝熱管内で発生する。そのためウエステージ等による隣接伝熱管の破損伝播が発生せず、DBEとして考慮すべき破損規模は伝熱管1本以下に留まる。反応生成物の1次系（炉心）への混入も生じ難くなるので、2次系削除の安全シナリオ構築が容易になる。（その一方、本プラントでは、Na水反応生成物のタービンへの移行による腐食の問題、1次系放射化Naによるタービン系汚染の問題がある。）また、他の2次系簡素化概念と異なり伝熱管を単管とすることができるので、伝熱特性が劣化することがなく、SG本体をコンパクトに設計できる。それにより、経済性に優れた2次系削除システムの構築が可能となる。

本プラントでは、1次系圧力が6MPaと高くなっているが、1次系温度の低温化（原子炉出口温度500℃以下）、12Cr系鋼の採用等により原子炉冷却材バウンダリの肉厚を極端に厚くする必要はなく、炉容器肉厚は80mm程度に抑えられる見通しである。また、蒸気圧力が5MPaと低くなっているが、スーパーゴミ発電と同程度の蒸気条件であり、発電効率38%が可能な見通しである。なお、現時点におけるタービン設備の限界（タービン入口ガバナー弁の制御限界等）から、プラント出力は130万kWeとしている。

本プラントで採用している2次系削除以外の主なコストダウン方策を以下にまとめる。

- (i) ダクトレス炉心の採用等により炉心径を縮小し、更に、側部流出入方式の配管の採用により炉容器径を現有工場設備での製造が可能なφ6m台に抑える。
高圧化対策として炉容器の上部を鏡板構造とし、それに合わせてUIS引き抜きによる燃料交換方式を採用する。
- (ii) 炉心の低圧損化、炉容器及び冷却系機器への12Cr系鋼の採用、新構造設計基準の採用、原子炉建屋への水平免震の採用等により、機器のコンパクト化、配管短縮化を図る。
- (iii) 冷却系ループ数を削減して3ループ構成とする。
- (iv) 使用済燃料を炉心から直接取り出し、高発熱燃料を水プールで貯蔵する簡素化燃料取扱設備を採用し、EVST及びその冷却系を削除する。
- (v) ツインプラント化により、設備の共用化、設備容量の削減を図る。

(2) 基本仕様

本プラントの基本仕様を表 3. 1. 1-1 に、プラント概念図を図 3. 1. 1-1 に示す。

本プラントは、熱出力 3420MWt、電気出力 1300MWe のループ型プラントである。本プラントの蒸気温度は 400℃であるため、原子炉出口冷却材温度を 450～500℃の範囲で設定できるが、ここでは SG の伝面を小さくすることを優先して高めの温度 (500℃) としている (逆に、原子炉出口冷却材温度を低めに設定し、燃料や原子炉冷却材バウンダリ材の設計負荷を下げる選択もあり得る)。

本プラントの炉心の主要目を図 3. 1. 1-2 に示す。Pu-U 混合酸化物 (MOX) 燃料を用い、ダクトレス炉心の採用及び高性能遮蔽体の採用により炉心のコンパクト化を図っている。運転サイクル約 16 ヶ月、4 バッチ方式において取出平均燃焼度約 15 万 MWd/t、増殖比約 1.15 を達成している。

原子炉構造は、図 3. 1. 1-3 に示すように、サイドエントリー方式の配管の採用、炉上部の簡素化 (UIS の引き抜き後に炉上部に回転プラグと燃料交換機を据え付ける燃料交換方式の採用等) によりコンパクト化を図っている。また、冷却系に関しては、1 次冷却系を水・蒸気系よりも高圧とすることにより SG 伝熱管破損時の Na 水反応を伝熱管内 (水側) に限定し、2 次系を削除している。

原子炉停止系は独立 2 系統とし、更に、受動的炉停止機構である SASS を採用することにより炉停止に関する高い信頼性を確保している。また、崩壊熱除去に関して十分高い信頼性を確保できるよう、3 系統の PRACS を設置している。

本プラントの原子炉建屋配置を図 3. 1. 1-4 及び図 3. 1. 1-5 に示す。原子炉建屋と補助建屋は基礎一体とし、2 次元 (水平) 免震を採用している。主冷却系のコンパクト化 (2 次系削除) 等により、1 プラント当たりの建屋容積を 11.0 万 m³ に抑えている。

(3) 設計要求に対する適合性

表 3. 1. 1-2 (1/2) ～ (2/2) に、設計要求事項に対する本プラントの設計の考え方と達成の見通しをまとめた。

(4) 評価

本プラントの経済性、構造健全性、安全性、製作建設性及び運転保守補修性に関する中間評価結果を以下まとめる。

(i) 経済性評価

(a) 原子炉及び冷却系の物量

原子炉構造及び 1 次冷却系の物量は下記のとおりであり、合計物量は約 2066t である。2 次系がなく SG 本体もコンパクトなので、ループ型炉 (1 次系機器合体・ループ数削減：出力 150 万 kWe) の約 2600t と比較してもかなりコンパクトである (ただし、本プラントではダクトレス炉心を採用し、また、原子炉構造まで 12Cr 系鋼を採用しており、それらが原子炉構造及び冷却系のコンパクト化に大きく寄与している点に留意しておく必要がある)。

① 原子炉構造 : 約 855t
(炉心構成要素を除く)

② 1次冷却系 : 約 1211t

なお、主要な機器の寸法は、下記のとおりである。

① 原子炉容器 : $\phi 6.8\text{m} \times 22\text{mH}$
(現有工場設備での製造が可能な $\phi 6\text{m}$ 台に抑制)

② 蒸気発生器 : $\phi 4.6\text{m} \times 15\text{mH}$

③ 1次ポンプ : $\phi 2.2\text{m} \times 9\text{mH}$

(b) 建屋容積

原子炉建屋の容積は約 11.0 万 m^3 /プラントであり、単管 SG を用いた 2 次系削除の物量低減効果が確認された。

(c) 建設工期

未検討であるが、建屋容積低減等により、建設工期を 46 ヶ月程度に短縮することが可能な見通しである。

(d) 所内負荷率

未検討であるが、2 次ポンプの削除、機械式 1 次ポンプの採用、炉心の低圧損化による 1 次ポンプ揚程の減少、E V S T 削除・建屋容積低減による H V A C 低減等により所内負荷率を 5 % 以下に抑えられる見通し。

(e) プラント稼働率

2 次系削除によりポンプの台数が削減できるので、定検期間を短縮できる可能性があるが、詳細は未検討である。定検期間をループ型炉 (1 次系機器合体・ループ数削減) と同じ約 45 日程度とすると、プラント運転サイクルは 16 ヶ月であることから、プラント稼働率は約 91 % となる。

(f) 建設単価

以上の結果より、プラント建設費をメーカー試算値である 20 万円/kWe 以内に収めるポテンシャルを有していると考えられる。

(ii) 構造健全性評価 (含む耐震性)

本プラントの構造設計の特徴は以下のとおりである。

(a) 建屋水平免震の採用

3次元免震は長期の開発期間を要すると予想され、コスト増の要因にもなることから、本プラントでは原子炉建屋に水平 (2次元) 免震を採用している。今後、主として炉心健全性への影響 (制御棒の挿入性と投入反応度の制限) に着目して、水平免震の十分性を確認して行く必要がある。

(b) 新材料、新基準の採用

原子炉容器、炉内構造物、SG、1次主配管等の材料として高強度、高熱伝導率、低熱膨張率の 12Cr 系鋼を採用している。これにより、機器の薄肉・コンパクト化、配管短縮化を図り、主要機器の物量を削減する。

なお、現時点では 12Cr 系鋼の許容応力を暫定して構造設計を行っているが、

今後に向けて、構造設計基準の高度化検討を進め、従来基準（BDS、DDS）の有する過度の保守性を排除し、合理的なプラント設計を可能とする新たな基準（新構造設計基準）を整備して行く必要がある。

(c) 高圧化対策

通常運転中、1次系に6MPaの高圧負荷がかかるため、耐圧性、シール性に配慮した設計とする必要がある。

原子炉容器の耐圧性に関しては、12Cr系鋼の採用、炉壁冷却の採用等により、現実的板厚（80mm程度）の範囲で成立性が確保できる見通しである。炉容器以外の機器の構造健全性についても、今後、主要箇所の構造健全性を確認して行く必要がある。

また、シール性に関しては、図3.1.1-6に示すように、1次ポンプの軸シール構造に石油化学の分野で実績のあるドライガスシールを採用すること、原子炉容器蓋のシール構造にArガス注入式二重Oリング構造を採用すること、CRDMのベローズ構造の内外圧力差を制御する圧力制御方式を採用することにより、成立性が確保できる見通しである。

(iii) 安全性評価

(a) 原子炉停止系

独立2系統の原子炉停止系（主系及び後備系）を設置するとともに、SASSを設置することとしており、炉停止に関して十分に高い信頼性を確保できる見通しである。なお、本プラントでは1次系を高圧化しており、Na沸点が約1530℃と高くなっているため、SASSの作動温度に余裕があり、SASS作動の信頼性の向上が期待できる。

(b) 崩壊熱除去系

本プラントでは炉容器をコンパクト化するため炉容器内に極力機器を持ち込まない設計を指向しており、崩壊熱除去系としてPRACSを採用し、その熱交換器をSGのヘリカル部上方に設置することとしている。

崩壊熱除去系の構成及び除熱容量はPRACS×3系統[100%×3(FC)、100%/3×3(NC)]としており、崩壊熱除去に関して十分に高い信頼性を確保できる見通しであるが、今後、炉心損傷発生頻度に関する設計要求（ $\leq 10^{-6}/\text{ry}$ ）をクリアしていることを確認して行く必要がある。

(c) 格納系

鋼製ライナコンクリート格納施設であり、事故時の放射性物質閉じこめ性は実証炉並みである。

(d) 再臨界回避方策

1次系を高圧化しているためNaの沸点がスチールの融点よりも高いこと、ダクトレス炉心を採用していることにより、通常のNa冷却炉とは異なる下記のような事象進展が予想される。

1次系を高圧化することで通常のNa冷却炉に比べて有利となった点を活

用することにより起因過程及び遷移過程における大規模な機械的エネルギーの放出を回避できる可能性もあるが、現状では事象進展の予測に不確かさが大きく、今後さらなる検討が必要である。

① 起因過程

通常の Na 冷却炉と異なる点は、Na の沸点が高いため Na 沸騰よりも被覆管の破損・熔融が先行して生じることである。

被覆管が破損（炉心上端付近で破損）すると、被覆管内外圧力差によりプレナムガス圧の低い新燃料では下方に、プレナムガス圧の高い燃焼の進んだ燃料では上方にペレットが移動し、その結果、燃料分散による負の反応度が投入される。一方、被覆管が破損すると冷却材中へのプレナムガス放出による正の反応度が挿入され、また、被覆管が熔融すると被覆管の移動による正の反応度が挿入される。起因過程における事象推移は、これらの正及び負の反応度の競合により支配されると考えられる。

本プラントでは Na 沸騰による正のボイド反応度挿入が基本的には問題とならないので、通常の Na 冷却炉におけるボイド反応度制限（5～6 \$）を緩和できる可能性がある（本プラントのボイド反応度は9 \$程度）。

② 遷移過程

通常の Na 冷却炉と異なる点は、Na の沸点が高いため冷却材の蒸気流が生じないこと、ダクトレス炉心を採用しており全炉心規模の熔融燃料プールが形成されやすいことである。

冷却材の蒸気流が生じないと、熔融スチールは下方に移動し、炉心上部では熔融スチールの再固化による閉塞が生じないと考えられる。炉心上部に閉塞のない状態では、熔融燃料プールのスロッシングが生じたとしても大きな正の反応度挿入に至らず、遷移過程での再臨界を回避できる可能性がある。

③ 事故後崩壊熱除去

炉心下部はスチールにより閉塞し、燃料がその上にラブル又はデブリベッドとなって堆積した状態となると考えられる。また、炉上部プレナムから下部が閉塞した炉心に流入・流出する冷却経路が形成されると考えられる。

(e) Na 水反応対策

本プラントでは1次系が水・蒸気系よりも高圧であり、SG伝熱管破損時のNa水反応は基本的には伝熱管内で発生する（図3.1.1-7参照）ので、ウエステージによる隣接伝熱管の破損伝播が発生せず、DBEとして考慮すべき破損規模は伝熱管1本以下に留まり、反応生成物の1次系（炉心）への混入も生じ難くなる。

現状、SG伝熱管の小リーク時及び大リーク時の事象進展とそれに対する対策設備が以下のように検討されているが（図3.1.1-8、図3.1.1-9参照）、

今後詳細な検討が必要である。

① 小リーク時

Naが伝熱管内にリーク・インするので、隣接伝熱管がウエステージされることはないが、反応生成物が蒸気系に移行するとともに、リーク孔と反対側の伝熱管内面がウエステージされる恐れがある。

この場合、放射線検出器（RM）によりリーク検出を行い、水・蒸気系の隔離弁を閉じて格納容器を隔離し、放射化Naの外部への流出を抑制するとともに、事故ループのSG保有水ブロー、1次系カバーガスの減圧等を行い、事象終息させる。簡易評価によると、反対側の伝熱管内面が貫通するまでに約100秒の時間を要するのに対し、リーク開始から停止までの時間は約80秒であり、事象終息までにリーク孔と反対側の伝熱管内面が貫通に至ることはなく、リーク規模は拡大しない見通しである。

② 大リーク時

伝熱管1本のギロチン破断（1DEG）を想定すると、破断点の上流側の水・蒸気が流体慣性により1次系に流出し、Na水反応が生じる。その後、高圧のNaが伝熱管内に侵入するので、給水ヘッダ部でNa水反応が生じ、その発生圧力により伝熱管から1次系に水が流出する（図3.1.1-7参照）。1DEG時には、このような間欠的な1次系への水の流出が事象終息に至るまで続くものと考えられ、水・蒸気側への反応生成物の移行のみならず、炉心部への反応生成物の移行が問題となる。

この場合、音響計によりリーク検出を行い、それ以降は小リーク時と同様の手順で事象終息させる。簡易評価によると、水・蒸気側に移行する反応生成物は約2tに達するが、その殆どが蒸気系及びブロー系に留まる見通しである。また、1次系に移行する反応生成物の総量は約40kgであり、その一部が炉心に達するが、間欠的な流入となるため、大きなボイド反応度の挿入や燃料集合体の閉塞は生じない見通しである。

(f) その他

1次系のNaバウンダリを高圧に耐えるガードベッセル及び外管で格納し、内部を窒素雰囲気としており、Na漏えい対策は実証炉並みである。

(iv) 製作建設性

以下のとおり、製作性に関しては大きな課題はない見通しである。

(a) 炉容器

炉容器径はφ6.8mであり、鍛造材の適用が可能で、工場での一体焼鈍が可能な範囲と見られる炉容器径に抑えているので、製作性に関して大きな課題はない見通しである。

(b) 蒸気発生器

APWRのSG以下のサイズ・重量に収まっており、もんじゅのSGの製作実績から見て、製作性に関して大きな課題はない見通しである。

なお、検査性、据付性及び現地試験性については、特に困難な課題はないと考えられるが、今後詳細検討が必要である。

(v) 運転保守補修性

運転性に関しては、通常運転時において、1次系圧力を常に水・蒸気系圧力よりも高く維持しておく必要があるため、1次系（カバーガス）圧力制御、SGのNa側と水・蒸気側との差圧制御について検討する必要がある。

保守補修性に関しては、今後、1次系高圧化に伴って派生するISI、保守補修上の問題点を摘出し、検討して行く必要がある。保守補修性に関する現状の検討状況は以下のとおり。

(a) 原子炉構造

炉容器の配管はサイドエントリー方式であり、低所引廻し配管（原子炉容器入口部分の低所）を補修するためにはNaドレン及び炉心待避が必要。なお、炉心支持構造物の全引き抜きが可能。

(b) 1次ポンプ

上部への引き抜きが可能である。

(c) SG伝熱管

上部の管板からアクセスし、インプレースで検査・補修が可能である。

(vi) 開発課題

本プラントの成立に向けての主要な開発課題は、以下のとおりである。

(a) 新技術、新概念についての課題

① 高圧化対策評価研究

1次系高圧化のためのシール構造、CRDM構造等の開発。

② 伝熱管内Na水反応の評価研究

伝熱管内Na水反応挙動の解明及び評価手法の開発。

③ UIS引き抜きによる燃料交換方式の確証

(b) 概念の成立性を左右する重要な課題

① ダクトレス炉心採用に関わる技術開発

燃料集合体構造の開発、燃料集合体の熱流力特性評価手法の確立等。

② 高燃焼度燃料用被覆管材の開発

15万MWd/tの高燃焼度を可能とする燃料被覆管材料の開発。

③ 高性能遮蔽体の開発

ZrHを用いた高性能遮蔽体の開発。

④ 新構造設計基準開発に向けてのR&D

実用炉用構造設計用の新基準の開発。なお、原子炉出口冷却材温度が比較的低い（500℃以下）ので、目標レベルは低くできる。

⑤ 12Cr系鋼の実用化研究

熱処理条件や添加元素の検討を行い、実用炉の使用温度条件、環境条件等に適合した12Cr系鋼を開発するとともに、高温強度データを取得して材

料強度基準を策定する。また、LBBの適用性について評価。なお、炉容器及び原子炉構造にも適用するため、材料照射特性も把握する必要がある。

⑥ 耐震性の確認

炉心健全性への影響の観点から2次元（水平）免震の十分性を検討し、必要と判断された場合は、上下免震装置を開発。

⑦ 再臨界回避方策の有効性確認

再臨界回避方策の検討及びその有効性の確認、及び炉容器内でのデブリベッド安定冷却保持の可能性の確認。

⑧ EVST削除のための要素技術開発

燃料取扱時及び燃料洗浄時の燃料健全性評価試験（高発熱燃料集合体の除熱試験）等。

表 3.1.1-1 ループ型炉（1次系高圧化）の基本仕様

No	項目	基本仕様
1	原子炉型式	ナトリウム冷却ループ型炉（2次系削除）
2	電気出力（発電端）	1300MWe
3	熱出力	3420MWt
4	ループ数	3ループ
5	1次系Na温度	500℃/350℃
6	2次系Na温度	—
7	1次系流量	2.15×10 ⁴ t/h/ループ
8	2次系流量	—
9	主蒸気温度/圧力	400℃/5MPa（1次系圧力6MPa）
10	給水温度/流量	220℃/5.82×10 ³ t/h
11	タービン発電機	発電効率38%
12	プラント稼働率	約91%
13	炉心・燃料	ダクトレス炉心、混合酸化物燃料
14	遮蔽体外接円径	炉心槽径：5800mm
15	燃焼度	約15万MWd/t（取出平均）
16	増殖比	約1.15
17	原子炉停止系	主炉停止系+後備炉停止系（制御棒19本）
18	炉心安全性	①受動的炉停止方策：SASS設置 ②再臨界回避方策：Na沸点が高く、冷却材沸点が制約とならないこと等、通常のNa炉よりも有利な点を活用（検討中）
19	炉心支持方式	側部支持方式
20	炉壁保護構造	PWR方式による炉壁冷却
21	炉心上部機構	コラム型UIS（引抜方式）
22	1次系配管方式	側部流出入方式
23	中間熱交換器	—
24	1次主循環ポンプ	機械式ポンプ
25	蒸気発生器	一体貫流ヘリカルコイル有液面型
26	2次主循環ポンプ	—
27	崩壊熱除去方式	PRACS3系統（蒸気発生器内蔵）
28	Na漏えい対策	容器：ガードベッセル、配管：エンクロージャ
29	原子炉格納施設	鋼製ライナコンクリート格納施設
30	プラント運転サイクル	約16ヶ月、4バッチ方式
31	①燃料減衰待貯蔵	水プール貯蔵（IVS及びEVSTでの減衰なし）
32	②炉内燃料交換	UIS引抜後、炉上部に単回転プラグ+燃料交換機を据付
33	③炉内/外燃料移送	—
34	免震	2次元（水平）免震
35	プラント寿命	40年
36	原子炉建屋	原子炉建屋容積約11.0万m ³ /プラント（ツインプラント）

表3.1.1-2(1/2) ループ型炉（1次系高压化）の設計要求事項への適合性

分類	設計要求事項（注）	設計の考え方と達成の見通し
前提条件	一炉心燃料及び冷却材の検討対象	・MOX燃料+N a冷却
	一原子炉出力レベルの選定	・130万kWe
	一機器・構造設計	・12Cr鋼の許容応力を暫定して設計。
	●設計成立の見通し	・6MPaの高圧負荷に耐える炉容器の板厚を設定（12Cr系鋼を採用、約80mm）。ポンプ軸等のシール構造を検討。その他の機器についても、今後、構造健全性の確認を行う必要がある。
	●新基準採用の要否、及び新基準に向けての開発課題・解決方策	・新基準成立のための開発課題と解決方策をR&D計画として立案する。
	一耐震・免震設計	・建屋水平免震を採用。ただし、地震入力が厳しく炉心部の健全性が確保できない場合は、機器上下免震または建屋3次元免震を採用する。
	●耐震重要度分類	・耐震性の検討対象とする1次系の主要機器の耐震重要度を設定する。
	一設計成立の見通し	・厚肉化により、炉容器及びSGについては耐震性が見通しがあるが、今後詳細検討が必要。
	●国内立地点の平均的地震動及び岩盤条件	・実証炉の設計研究で設定した国内立地点の平均及び最大地震動を入力条件としている。
	◎国内立地点の最大地震動条件	
	●使用済み燃料貯蔵プール設備：4炉心分	・4炉心分を考慮して設備設計・配置設計を行う。
一プラント寿命		
●40年（リファレンス）	・設計寿命は40年とする。	
◎60年程度の寿命延長追求	・寿命延長要求については、40年経過した段階で実荷重に基づく再評価を行い対応する。	
経済性	●発電単価：5円/kWh程度 （耐用年数で減価償却）	・建設費目標、燃焼度、連続運転期間等の指標を満足させることにより目標達成を目指す。
	●建設費：20万円/kWe以下	・大出力化、1次系高压化による2次系削除、ループ数削減、ツインプラント化等により目標達成の見通し。
	◎燃焼度：15万Mwd/t程度	・高中性子照射量及び高温に耐える被覆管材の開発を前提とすれば達成可能な見通し。
	◎連続運転期間：12～24ヶ月	・連続運転期間16ヶ月×4バッチで上記の燃焼度を達成。
	◎適正な炉心出口温度	・蒸気温度400℃であり、原子炉出口冷却材温度を450～500℃の範囲で設定できる。現状、SG伝面を小さくすることを優先して高めの温度（500℃）としているが、逆に原子炉出口冷却材温度を低め（450℃～470℃）とし、燃料や原子炉冷却材バウンダリ材の設計負荷を下げる選択もあり得る。
	◎稼働率：90%程度	・定検工程は45日（概略検討による）、連続運転期間は16ヶ月であり、稼働率91%以上を達成できる見通し。
	◎建設工期：50ヶ月以内	・未検討であるが、建屋容積低減等により建設工期を46ヶ月程度に短縮することが可能な見通し。
	資源の有効利用	一増殖比
●低増殖から高増殖までの柔軟な対応可能性		・燃焼度約15万Mwd/tの場合、増殖比は1.15。
◎増殖比1.2程度（高増殖）		
●低除染燃料装荷時の影響検討	・未検討。	
一TRU燃焼		
●TRU燃料の経済的燃焼可能範囲の明示	・制御棒価値低下、ドブプラ反応度低下、ボイド反応度増加、許容線出力低下等の炉心特性へのインパクトがある。	
●より多くのMA核種を混入する場合の設計変更点・経済的負担の明示	・また、線源、発熱量の増大に伴って燃料取扱設備の対応が必要となる。	

（注）●：設計要求事項（詳細設計終了時点での必須項目）

◎：設計要求事項（詳細設計終了時点での目標項目）

表3.1.1-2(2/2) ループ型炉（1次系高压化）の設計要求事項への適合性

分類	設計要求事項（注）	設計の考え方と達成の見通し
資源の有効利用（続き）	●Pu専焼炉としてのPu燃焼効率の範囲	・未検討。
環境負荷低減	●放射性廃棄物発生量低減、管理及び処理・処分のし易さへの配慮	・FBRプラントの特長を活かした廃棄物量低減策を検討し、軽水炉並みのドラム缶100本/年を狙う。詳細は未検討。
	●廃止措置のし易さと廃棄物発生量低減への配慮	・炉容器室内に、高β、γ線が発生する元素を含む材料を使用しないように管理することで解体性を確保する。ループ型炉は、照射機器が少なく有利である。
	●FPの核変換による放射能低減に関する検討	・ブランケット領域に装荷し、消滅することにより、放射性廃棄物による環境負荷を低減するポテンシャルがある。
	●TRU燃料の経済的燃焼可能範囲の明示	・未検討。
	●より多くのMA核種を混入する場合の設計変更点・経済的負担の明示	・（前出）
核拡散抵抗性	●核物質防護及び保障措置の対応を考慮した燃料取扱設備設計	・最新の軽水炉の動向を調査して対応を検討する。
	●低除染燃料等の適用可能性	・未検討。
	●ブランケットでの純粋Pu生成に対する対策	・径方向ブランケットは再処理せず、乾式熱処理により脱被覆し、炉心に再装荷することにより純粋Puを抽出しないサイクルシステムが可能となる。
安全性	●軽水炉、もんじゅの指針、基準等への適合	・基本的には既往の基準を前提とした合理化を図っている。なお、1次系高压化に伴い、Na漏えい対策、Na水反応対策に特段の配慮が必要となる。
	一実用化時代に要請される安全要求への適合 ●受動的炉停止能力	・SASSの設置で対応する。なお、1次系高压化によりNa沸点が高く、SASS作動の信頼性向上が期待できる。
	●自然循環による崩壊熱除去能力（全交流電源喪失）	・自然循環時のPRACSの除熱能力を評価し、自然循環による崩壊熱除去が可能であることを示す。（今後、詳細検討の要あり）
	●再臨界回避能力	・1次系高压化により、通常のNa炉と異なるCDA事象推移が予想される。通常のNa炉に比べ有利な点を活用できれば大規模な機械的エネルギーの放出を回避できる可能性もあるが、現状では事象進展の予測に不確かさが大きく、今後さらなる検討が必要である。
	●炉心損傷発生頻度 $10^{-6}/\text{ry}$ 未満となる見通し	・炉停止系：独立2系統（主系、後備系）+SASS ・崩壊熱除去系：PRACS3系統（自然循環所熱が可能） ・以上により、炉停止及び崩壊熱除去に関して十分に高い信頼性を確保し、目標を達成する。詳細は今後検討。
運転・保守・補修性	●軽水炉と同等の運転・保守・補修性とするための考え方	・炉容器配管は炉心待避を行うことなく引き抜き補修が可能。また、1次ポンプの引抜き補修、IHX及びSGのインプレースでの伝熱管補修が可能。 ・実証炉並みのISI、保守補修が可能となる見通しであるが詳細は次年度以降検討する。
	●補修区分の検討	・軽水炉と同様の主要機器補修区分を検討する。
	●アクセスルート・スペースの確保	・軽水炉並みのメンテナンススペース確保を目指し、合理的な配置計画を行う。
	●生体遮蔽の設計	・軽水炉並みの被曝量を抑えることを目指した生体遮蔽の設計を行う。
	●保守作業量の低減、作業員被曝量の低減等	・軽水炉で行われている線源強度の低減、保守作業の自動化やロボット化の開発実績を導入し、最新軽水炉並みの定検時被曝線量（0.5人Sv）の達成を目指す。

（注）●：設計要求事項（詳細設計終了時点での必須項目）

○：設計要求事項（詳細設計終了時点での目標項目）

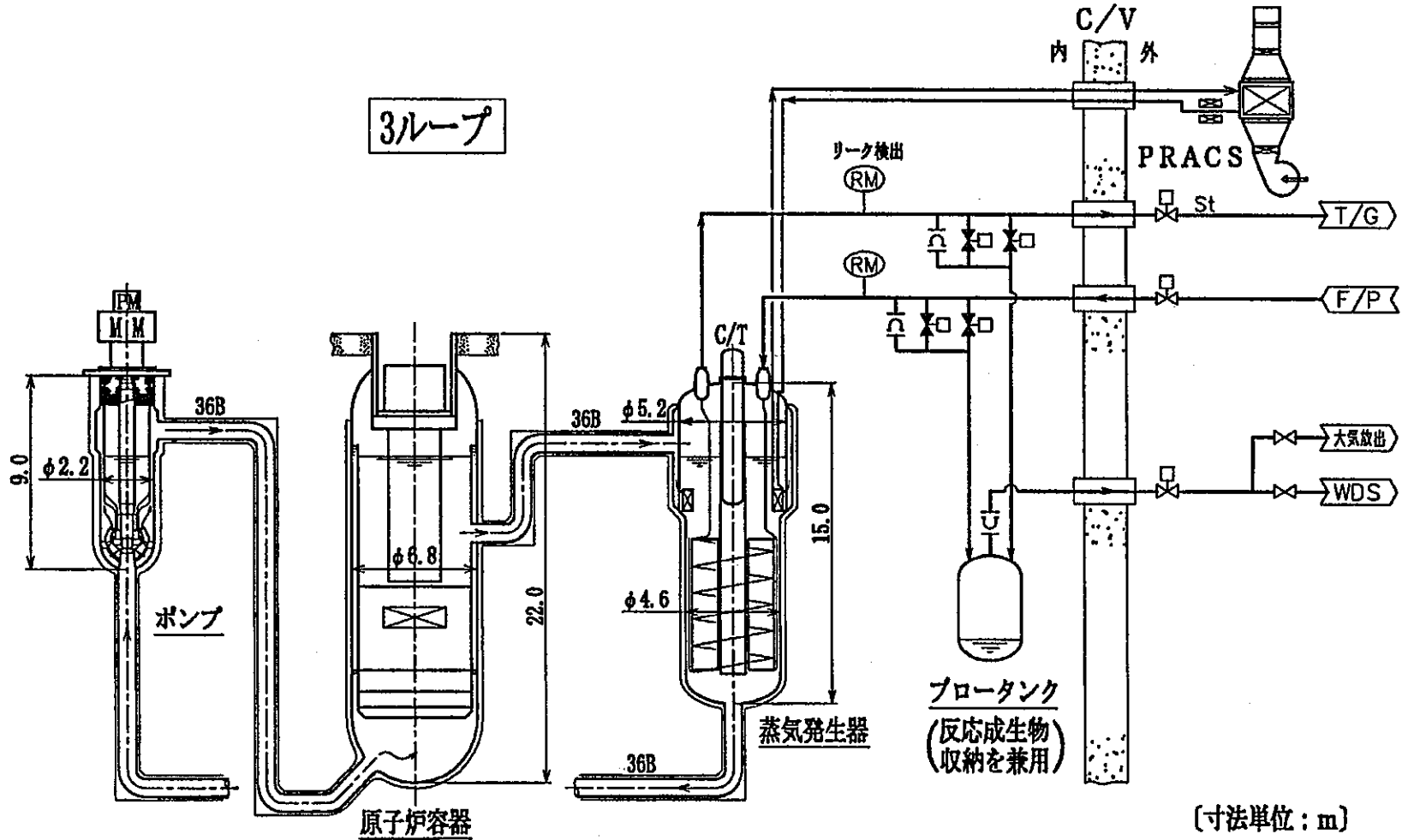
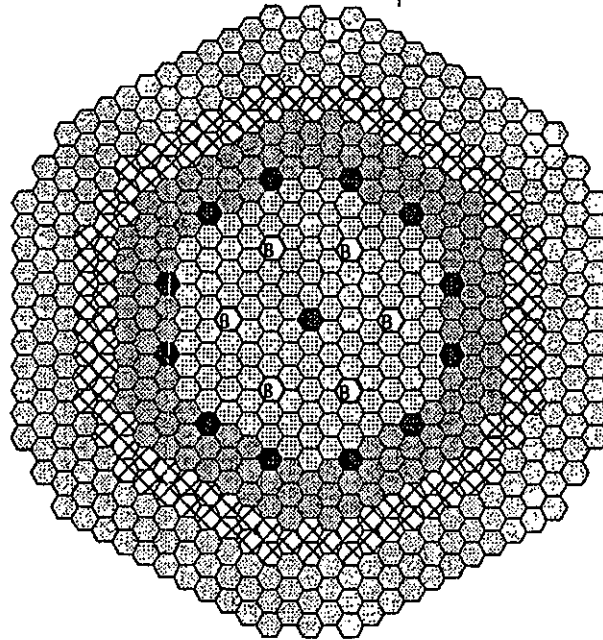


図 3.1.1-1 ループ型炉 (1次系高圧化) のプラント概念

図 3.1.1-2 ループ型炉（1次系高圧化）の炉心主要目

大型ループ型プラント「PSR」炉心の主要目

項目	PSR炉心
原子炉熱出力 (MW)	3420
運転サイクル長さ (EFPM)	約 16
燃料交換バッチ (core/RB)	4/4
炉心高さ (cm)	180
炉心等価直径 (cm)	306
軸ブランケット厚 (上/下) (cm)	35/35
燃料形式	ダブ型 (MOX)
炉心材料	FMS
燃料ピン外径 (mm)	8.5
被覆管肉厚 (mm)	0.6
集合体当たり燃料ピン本数 (本)	265
集合体配列ピッチ (mm)	180.0
Pu 富化度 (内側/外側) (wt%)	15.3 / 19.3
燃焼反応度損失 ($\% \Delta k/kk'$)	2.9
最大線出力 (W/cm)	480
ピーク高速中性子束 ($\times 10^{16}n/cm^2s$)	3.4
ピーク高速フルエンス ($\times 10^{23}n/cm^2$)	5.7
炉心取出平均燃焼度 (GWd/t)	153
全炉心 Na ボイド反応度 ($\% \Delta k/kk'$)	3.3
増殖比	1.15



- ① 内側炉心燃料：120体
- ② 外側炉心燃料：126体
- ③ 半径方向ブランケット：114体
- ④ 中性子しゃへい体：234体
- ⑤ 主炉停止棒：13体
- ⑥ 後備炉停止棒：6体

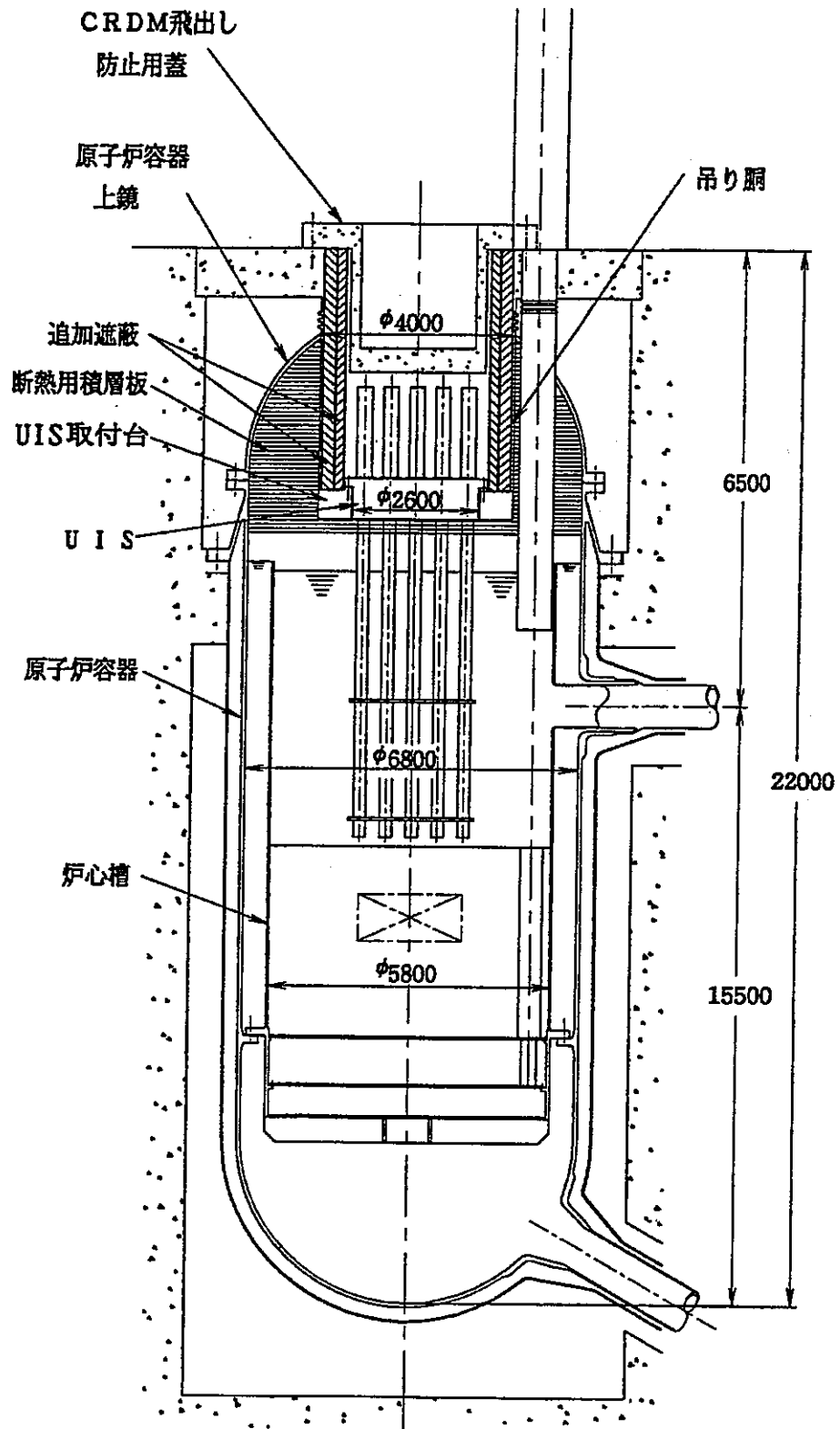


図 3.1.1-3 ループ型炉（1次系高圧化）の原子炉構造

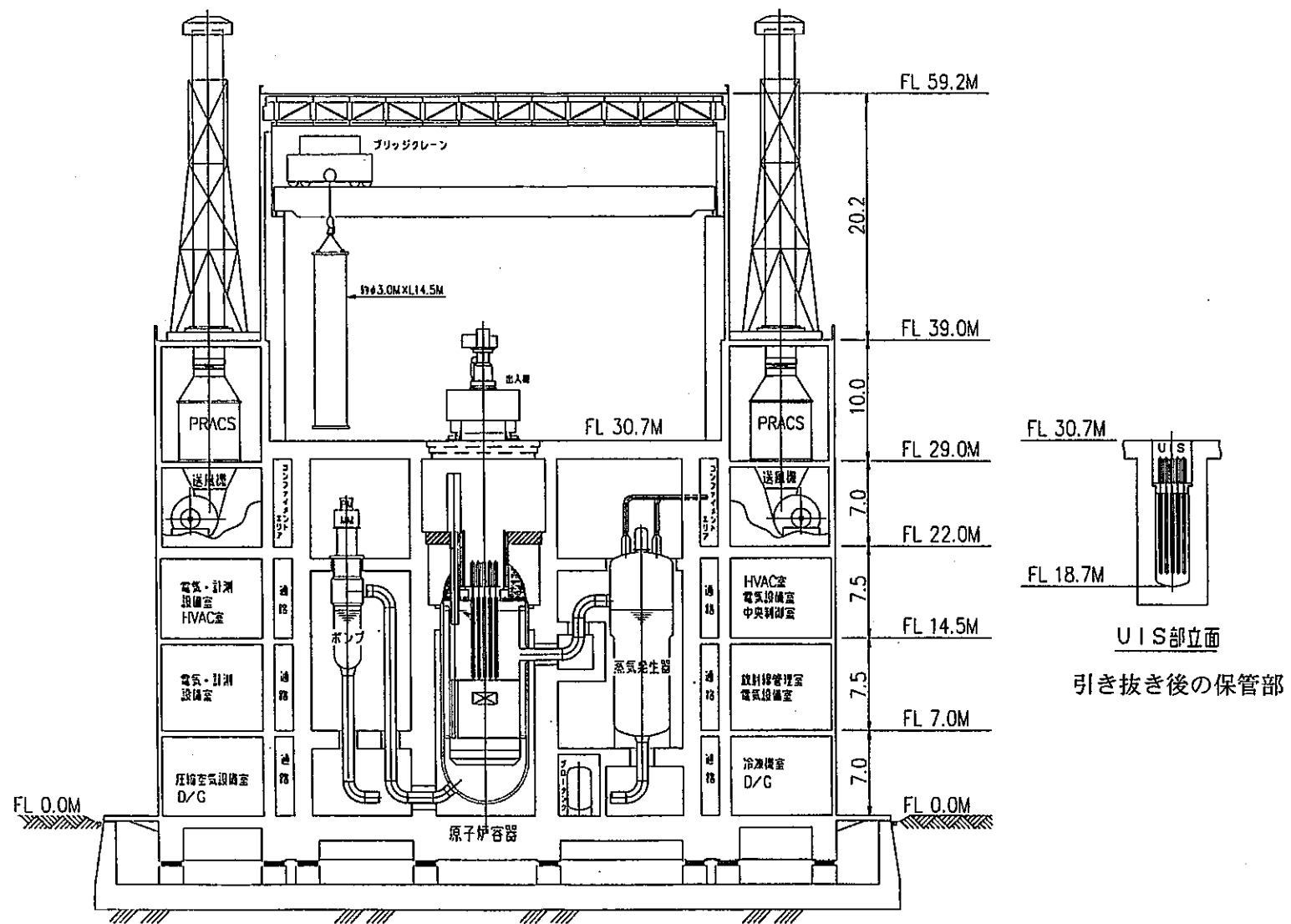


図 3. 1. 1-4 ループ型炉（1次系高压化）の原子炉建屋配置（立面）

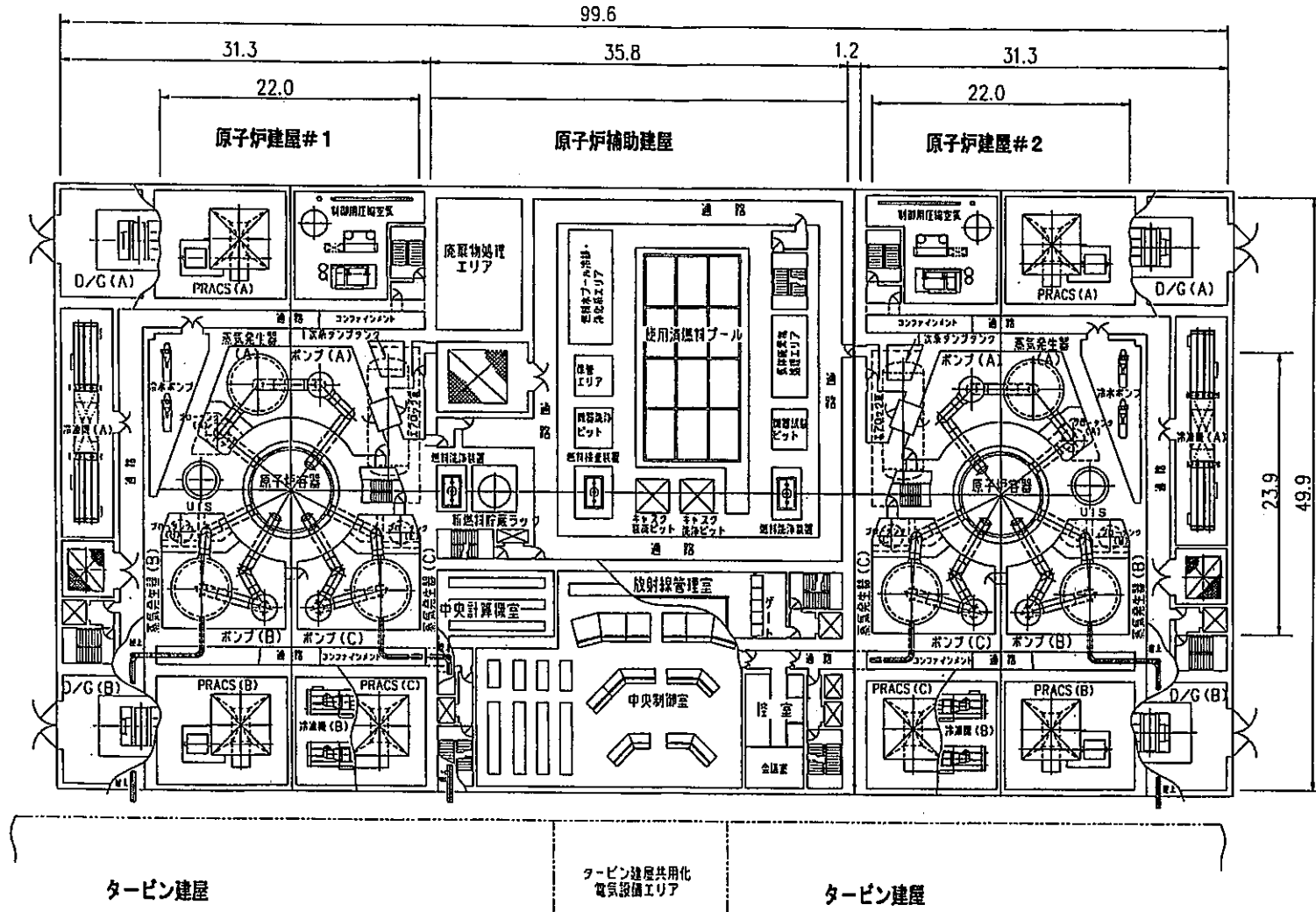
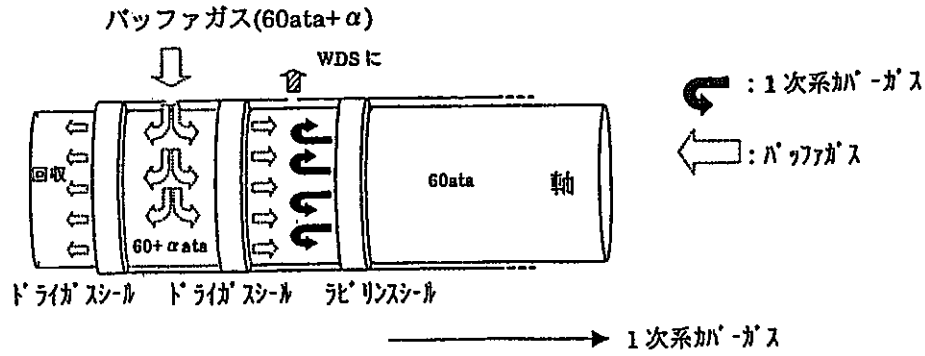
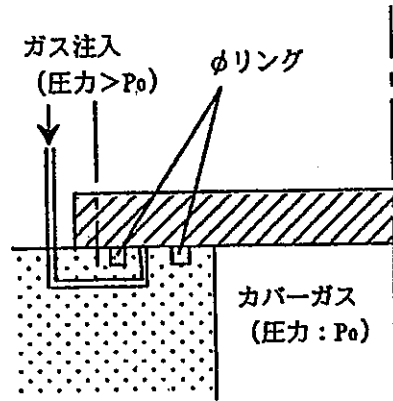


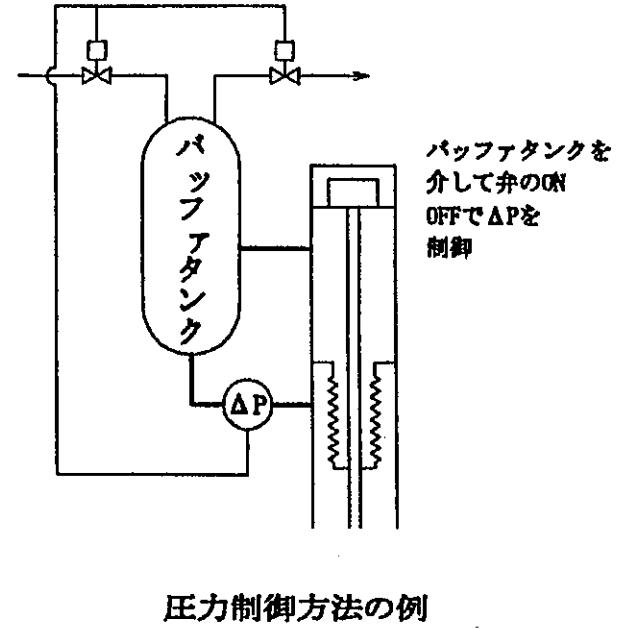
図 3.1.1-5 ループ型炉（1次系高圧化）の原子炉建屋配置（平面）



ドライガスシール構造の概念



Ar ガス注入式二重Oリング構造の概念



CRDMベローズ構造の内外圧力差制御の概念

図 3.1.1-6 ループ型炉 (1次系高压化) の高压化対策

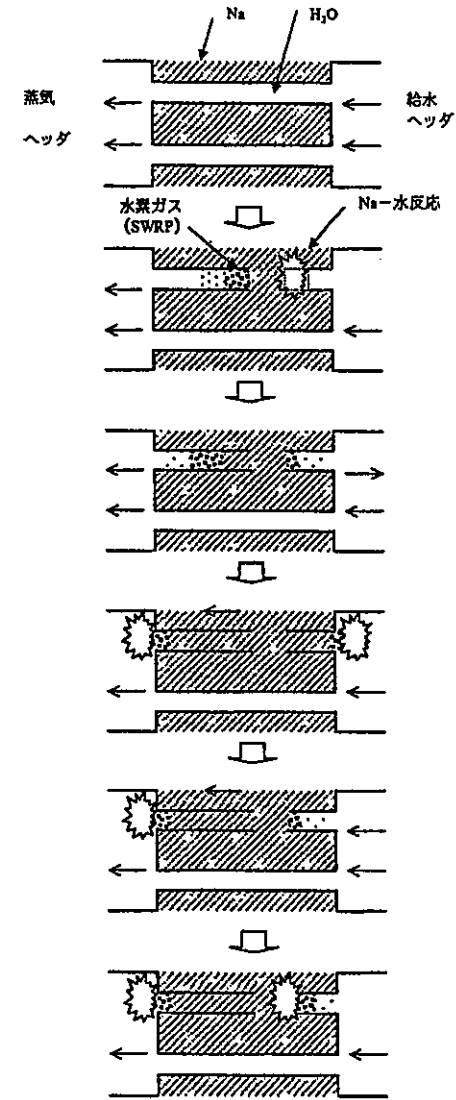
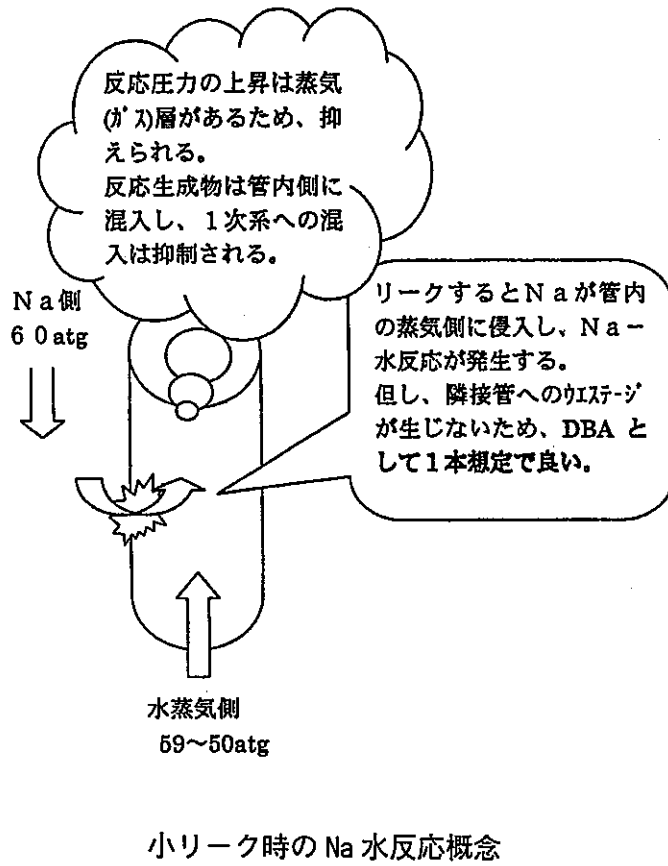


図 3.1.1-7 ループ型炉（1次系高圧化）における Na 水反応概念

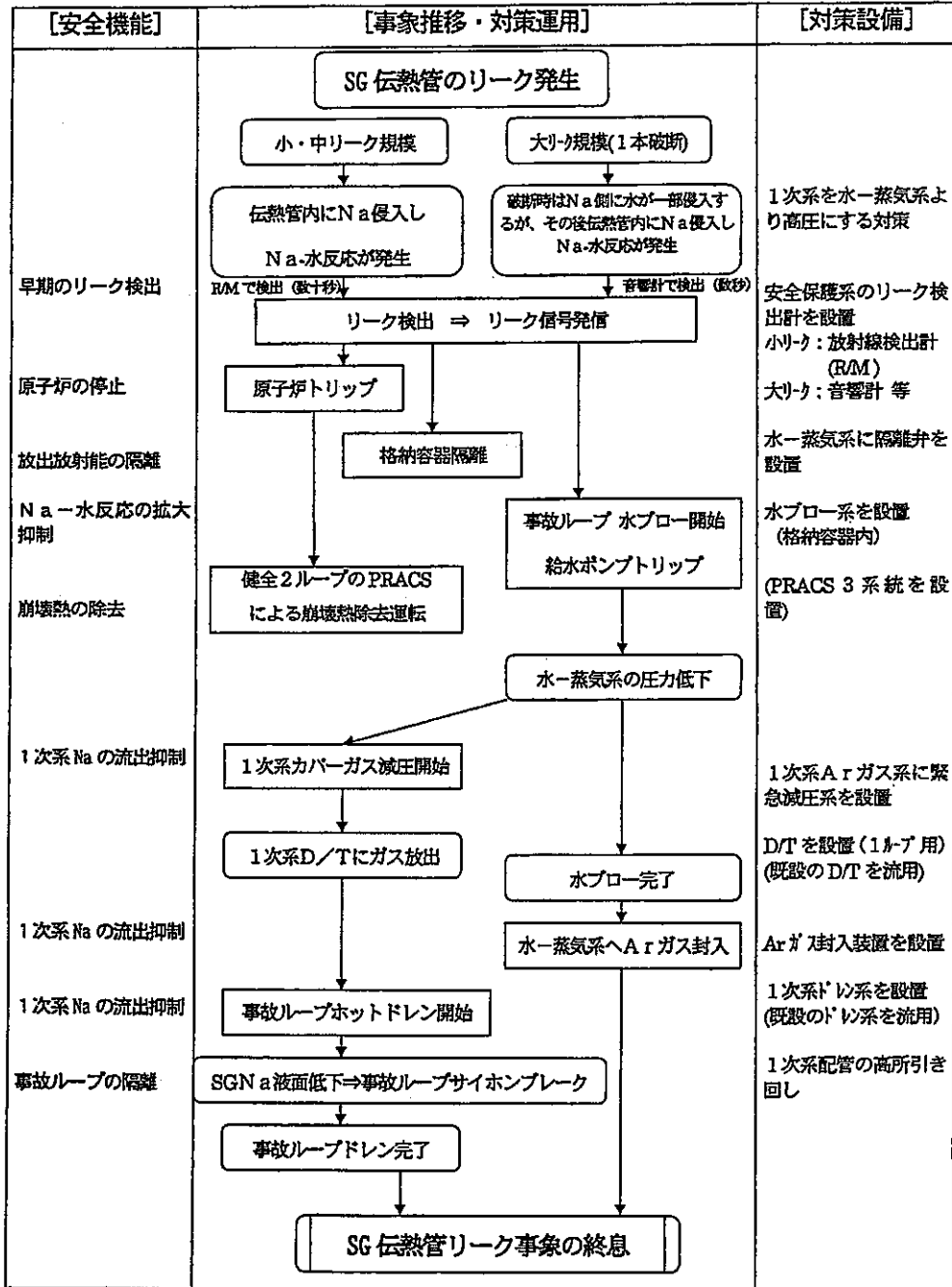


図 3.1.1-8 SG 伝熱管破損時の事象進展とそれに対する対策設備

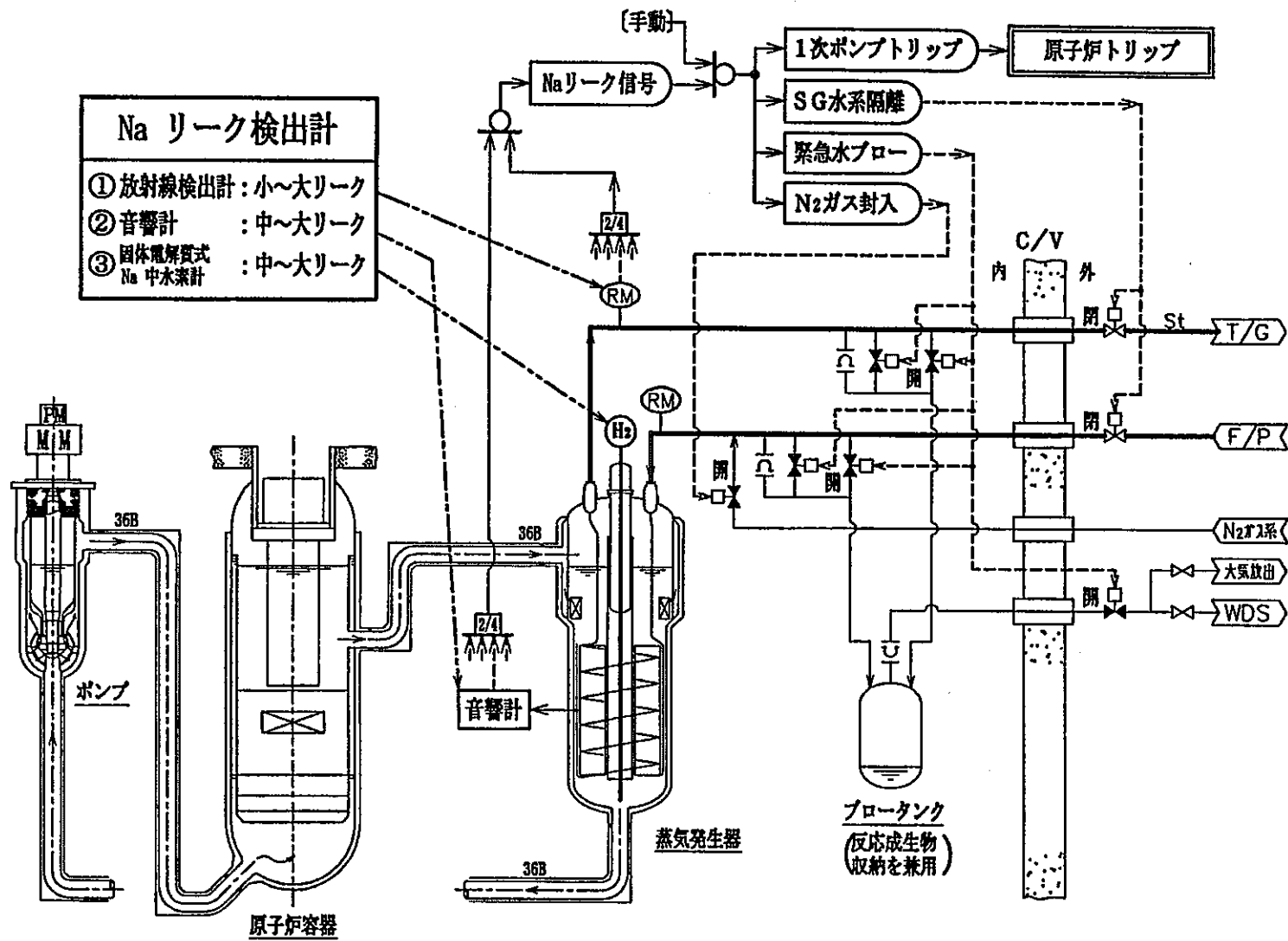


図 3.1.1-9 ループ型炉 (1次系高圧化) の Na 水反応対策設備概念

3.1.2 反応生成物分離機構を付加した2重管SG

(1)基本概念

2重管SGを用いた2次系削除概念は、各種2重管の試験を含むR&Dが行われてきており、組網線方式の2重管SGがリーク監視等の面で最も優れた概念であることが確認されている。組網線方式2重管SGそのものに関しては、今後一定期間の研究開発を積み重ねれば技術的に完成するとの見通しが得られている。しかしながら、2重管SGによる2次系削除システムでは、設計基準外事象とする2重管の貫通水リークの際に炉心への反応生成物流入が想定され、事象が拡大する可能性を有することから、その発生頻度は十分に小さいが、安全裕度が十分に大きいとは考えられない。そこで、貫通リークに対する設備対応をした冷却システムを検討し、安全裕度を向上させた2重管SG方式の2次系削除システムを考案することとした。

本検討においては、SGユニットは従来からの検討実績が十分にあり、実現性も高い組み網線式の密着2重管SGを用いることとし、貫通リークに対応した設備を付加することによって安全裕度を拡大する方策について検討した。貫通リーク発生時に最もリスクが大きく、排除しなければならない事象は、SGで発生したNa-水反応による気体（水素ガス等）及び固体（ナトリウム酸化物等）の反応生成物が冷却材流れと一緒に炉心に流入し、気泡通過事故及び局所閉塞事故に拡大することである。それらの事故を防止するためには、冷却材流れから気体及び固体の反応生成物を除去し、たとえ貫通リークが発生しても反応生成物の炉心流入を防止する機構が付加されていれば、貫通リークに対するリスクは小さくすることができる。その方策について検討した。

SGにおけるNa-水反応発生時の冷却材流れは、気体（水素ガス等）、固体（ナトリウム酸化物等）及び液体（冷却材）が混合した固気液3相流と考えられる。反応生成物の炉心流入を防止するための機構としては、固気液3相流から固体及び気体を分離する機構が求められる。一般産業における固気液3相流を分離する技術については、石油化学工業での例がある。それらの技術例では、液相の流速を十分に低下させ、下降流中で気泡を浮昇させ自由液面を介して除去、及び上昇流中で固体成分を沈降させ沈殿によって除去することによって分離している。同様の機能をFBR冷却系にも適用することを検討する。

2重管SGを用いた2次系削除冷却システムの中で、前述の固気液3相流分離機構を形成するためには、冷却系の中でSGと原子炉容器の間に流速を十分に低下させることが可能な断面積の大きな流路を設けることで実現できる。断面積の大きな流路を配管で実現するのは困難であり、SGと原子炉容器の間にタンク類を設置し配管で結ぶこととなる。また、冷却システムの中でSGと原子炉容器の間には通常、主循環ポンプが配置される。これらのことを総合すると、冷却系設計においては、

主循環ポンプを比較的断面積の大きなタンク内に設置することにより固気液3相流分離機構を構成することが物量面・設置面積の面で効率のよい設計になると考えられる。

これらの考え方を実現した冷却系概念図を図 3.1.2-1 に、反応生成物分離機構概念を図 3.1.2-2 に示す。反応生成物分離機構は SG と原子炉容器の間に設置される主循環ポンプのタンクとして機能する。タンクは自由液面を持ち、さらに、タンク内を2つに仕切ることにより上昇流の流路と下降流の流路を構成する。上昇流部分で固体反応生成物の沈殿分離を、下降流部分で気体反応生成物の自由液面への浮昇分離を行う。これらの分離機構により、SG での Na-水反応により生成する気体及び固体反応生成物を、冷却材流から気泡通過事故や炉心閉塞事故へ拡大するリスクが十分低くなる範囲まで冷却材から分離し、SG での Na-水反応に対する安全裕度を向上させる。

(2)検討状況

本概念はアイデアの段階であり、概念構築のための具体的な設計研究は実施していない。今年度の検討としては、技術的な可能性を探索し、設計研究を実施して概念構築する価値があるか否かについて調査する。

(3)設計要求に対する適合性

本概念は、未だプラント概念として纏まったものではない。そのため、設計要求に対する適合性を評価できる段階にない。

(4)中間評価結果

詳細構造等については未検討である。また、本概念は組網線式2重管SGを基に、Na-水反応生成物の炉心流入を緩和・抑制する分離機構を付加した概念である。ここでは検討に先だって、経済性の傾向について粗く評価し、ポテンシャルを評価することとする。

経済性の傾向を評価するにあたり、経済性に最も影響を与える機器のサイズを推定することとした。以下に検討内容を記す。

①機器概念

本概念での固気液分離器の考え方としては、化学プラントでの例から考え、以下の概念を適用することが出発点となる。

- ・混相流の下降流速度を十分に低下させ、気泡を上昇分離する
- ・混相流の上昇速度を十分に低下させ、固体粒子を沈降分離する

これらの概念を組み合わせ、比較的大径のタンク内を混相流を上昇及び下降させ、冷却材中の水素気泡と Na 酸化物/NaOH を分離する概念である。

経済性の傾向を把握するために、気体反応生成物及び固体反応生成物について

それぞれ反応生成物分離タンクのサイズを推定する。

②気体反応生成物分離

下降流中で水素気泡を上昇分離させる場合に、冷却材下降流速をどの程度まで低下させれば分離性能を得られるかについて検討し、気液2相流分離装置のサイズを予備的に検討する。

図 3.1.2-3 に水素ガス気泡径と静止 Na 中上昇速度の関係を示す。図より分離性能として $\phi 1\text{mm}$ 以上の径の気泡除去が必要な場合には、Na 流速は 0.25m/s 以下に設定する必要がある。この制限流速は除去気泡径を 50mm としても同じである。流速を 0.25m/s とする場合のタンク内径は、以下のとおりである。

- ・ 150 万 kWe2 ループ (旭) : $\phi 8.4\text{m}$
- ・ 150 万 kWe4 ループ (旭/2) : $\phi 6\text{m}$

③固体反応生成物分離

上昇流中で $\text{Na}_2\text{O}/\text{NaOH}$ 等の固体反応生成物を沈降させる場合に、冷却材上昇流速をどの程度まで低下させれば分離性能を得られるかについて検討し、固液2相流分離装置のサイズを予備的に検討する。

図 3.1.2-4 に固体反応生成物径と限界浮き上がり Na 流速の関係を示す。図より $\phi 1\text{mm}$ までの固体除去が必要な場合には、Na 流速は 0.1m/s 以下に設定する必要がある。流速を 0.1m/s とする場合のタンク内径は、以下のとおりである。

- ・ 150 万 kWe2 ループ (旭) : $\phi 13.4\text{m}$
- ・ 150 万 kWe4 ループ (旭/2) : $\phi 9.5\text{m}$
- ・ 150 万 kWe4 ループで2重容器で固気液分離する場合 : $\phi 11.2\text{m}$

④反応生成物分離タンク径

②及び③項の検討より、必要反応生成物除去性能については未検討ではあるが、気体については $\phi 1\text{mm} \sim \phi 50\text{mm}$ の必要除去性能に対応していること、固体については比較的小径の固体を除去する性能が炉心閉塞防止の観点から求められること、から必要条件としては大きくはずれるものではないと考えられる。この結果、電気出力で 40 万 kWe 程度の SG に付加すべき反応生成物分離タンクは固体及び気体分離槽を一体化した2重タンクの場合で $\phi 11.2\text{m}$ となる。

⑤経済性概略評価

$\phi 11.2\text{m}$ のタンク径は 150 万 kWe クラスのループ型炉の原子炉容器径をも上回るものであり、150 万 kWe 4 ループプラントを想定すると4つの大径タンクが原子炉容器近傍に設置されることになる。タンク内には構造物をほとんど含まない単純形状ではあるが、タンクの物量及びその設置スペースは経済性目標を達成できるものでないことは容易に推定できる。

⑥その他の概念検討

反応生成物分離のための独立したタンクを設置する場合には建設コスト上昇への影響が大きい、1次冷却系内で大容量のタンク構造である原子炉容器にその機能を付加すれば、建設コストへの影響は最小限に抑えることが可能である。

原子炉容器の下部プレナムに反応生成物分離の機能を持たせた概念の例として、図 3.1.2-5 を示す。図 3.1.2-5 に示す概念は、SG 上部と下部プレナム（低温プレナム）に気体反応生成物分離のために自由液面を設けることと、固体反応生成物を SG 胴下部および下部プレナム内に沈降させることを目指した概念である。Na-水反応に対する安全を強化した 2 重管 SG を用いた 2 次系削除は、経済性を考慮すると、原子炉容器に反応生成物分離機能を付加した概念でしか成立しないと予測できる。ただし、原子炉容器内での反応生成物分離機能の成立性に関しては十分な検討が必要となる。

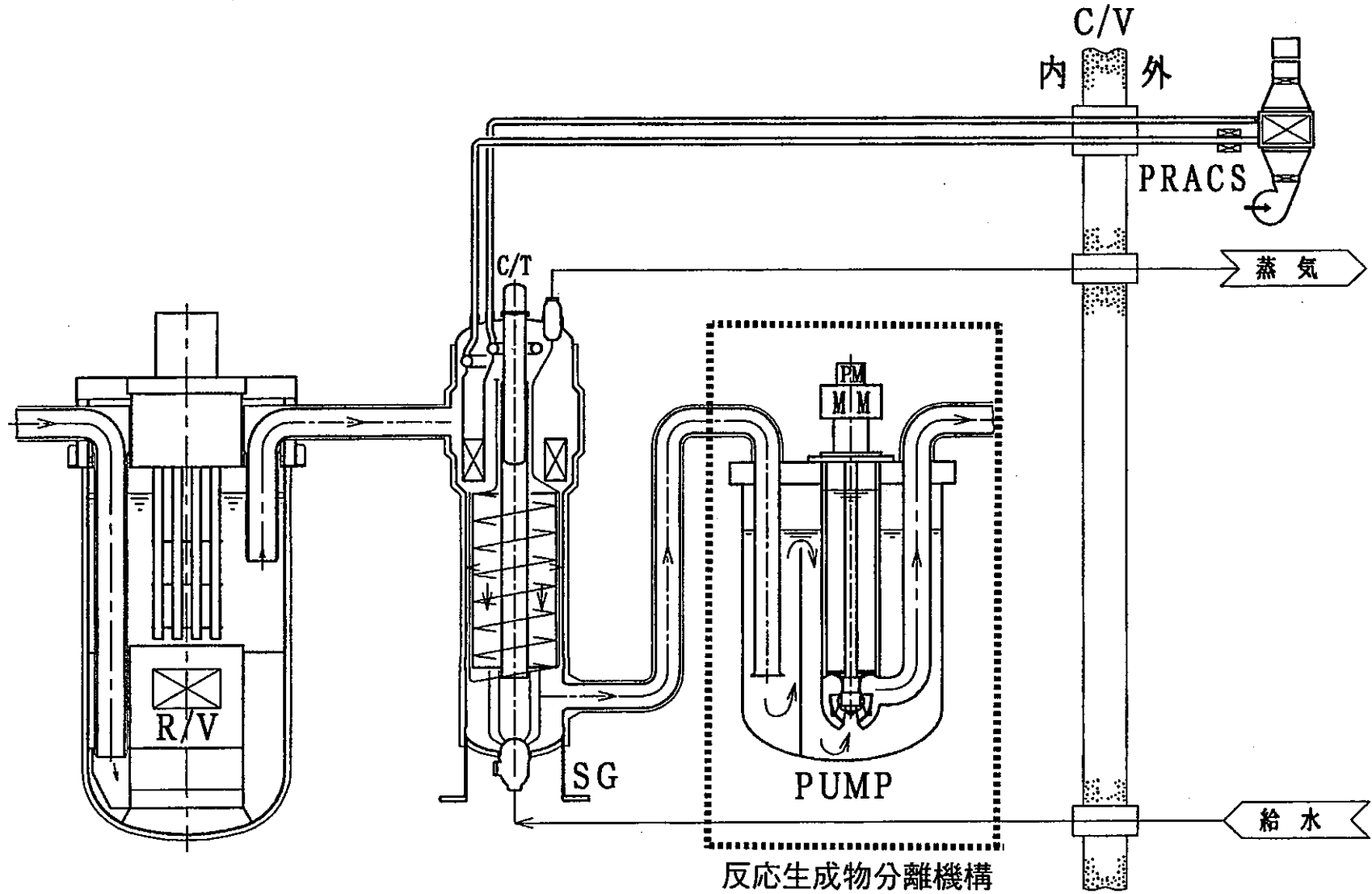


図 3.1.2-1 反応生成物分離機構付 2 重管 SG 2 次系削除システム概念

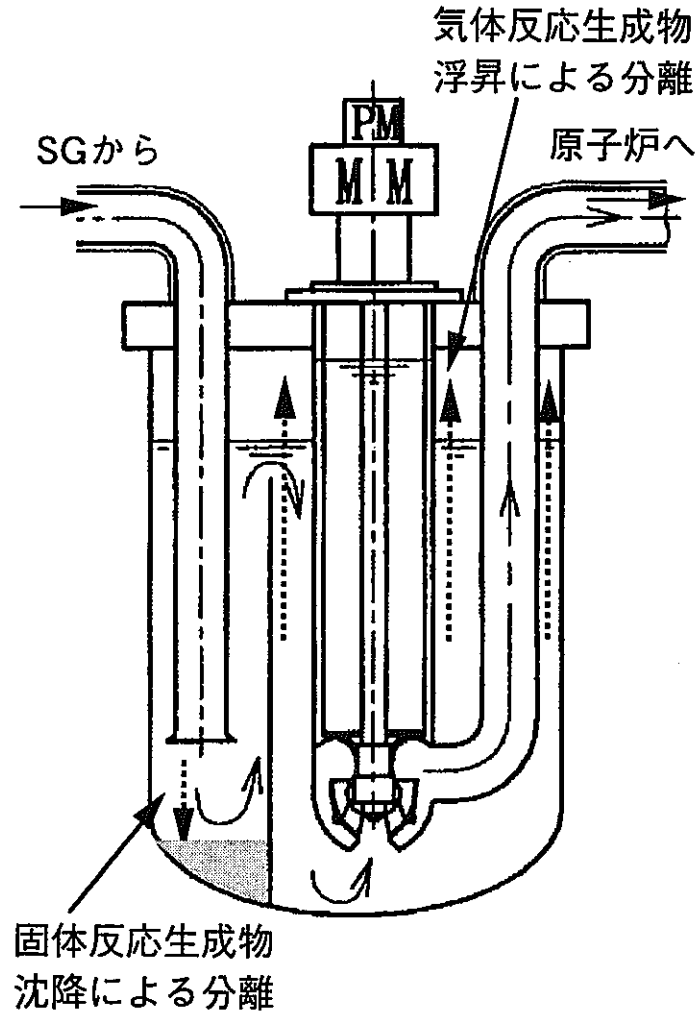


図 3.1.2-2 反応生成物分離機構の例

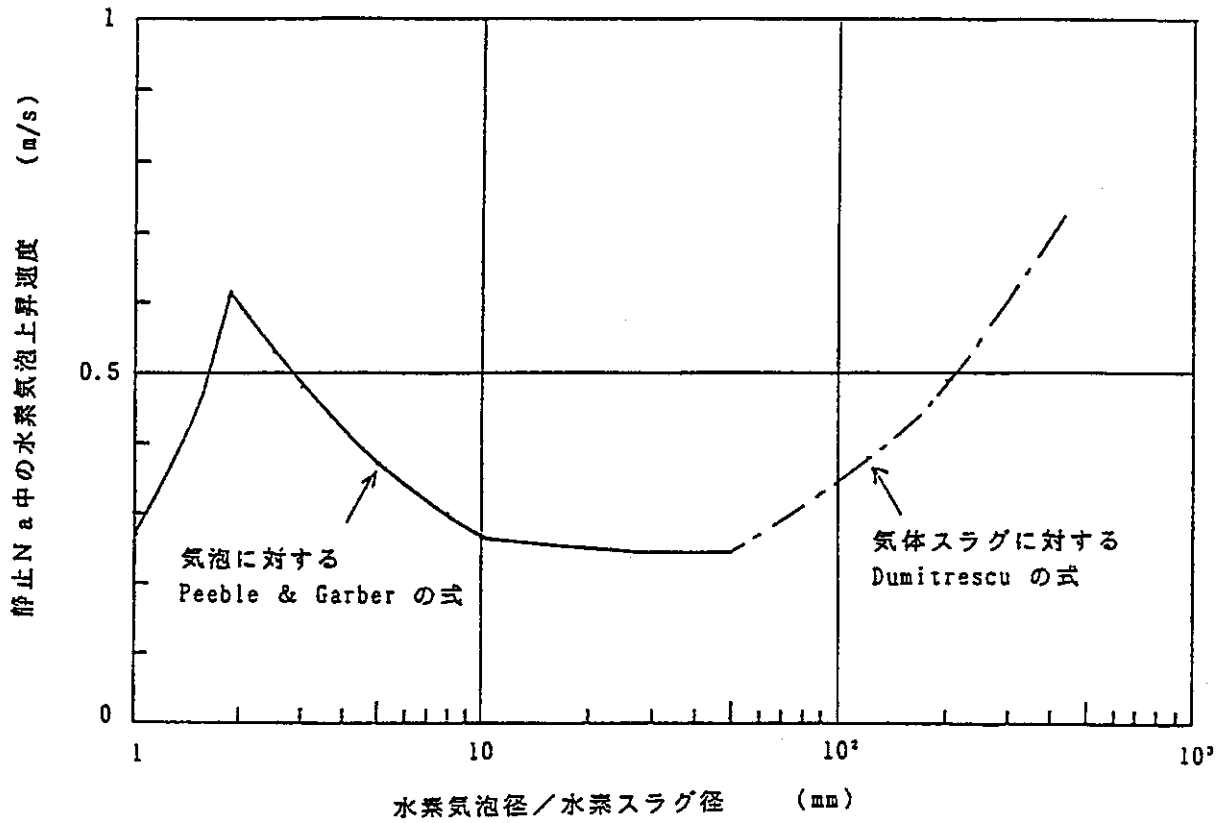


図 3.1.2-3 水素ガス気泡径と静止 Na 中上昇速度の関係 (Na 温度 455°C, 圧力 2~4atg)

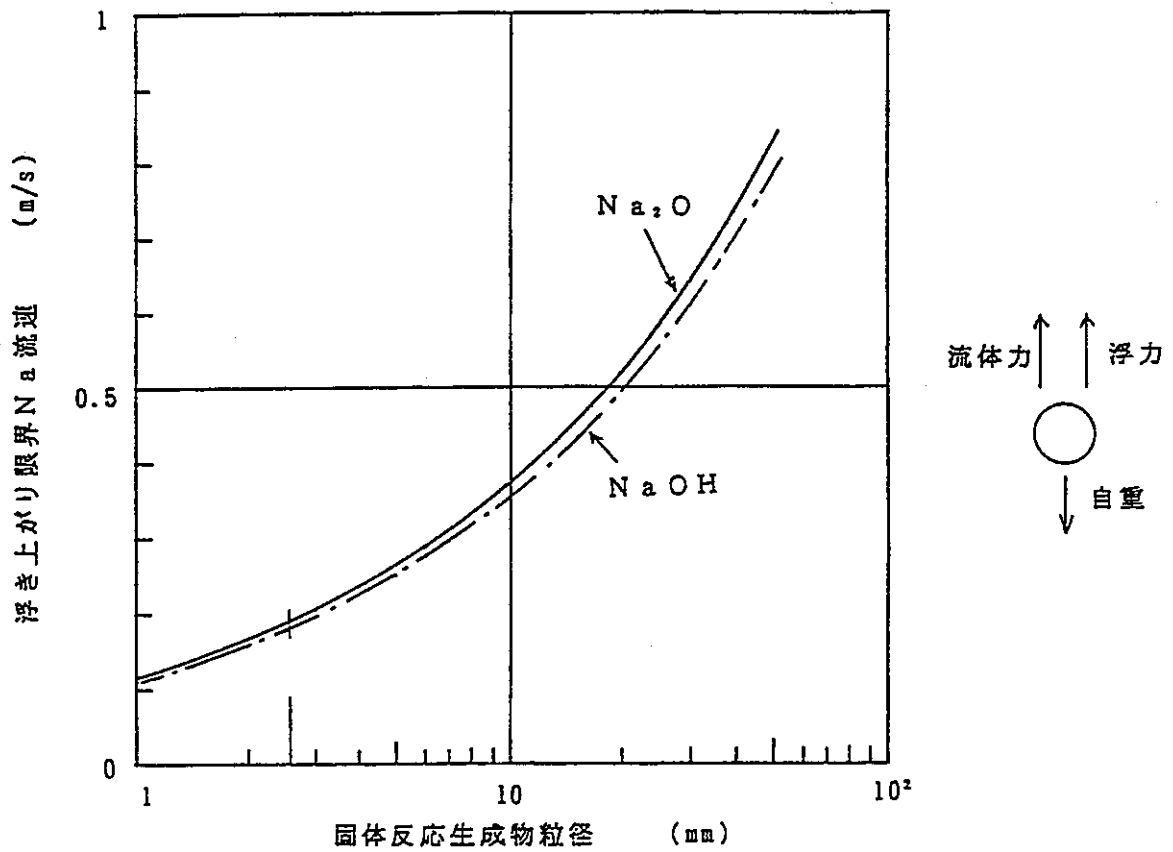


図 3.1.2-4 固体反応生成物径と限界浮き上がり Na 流速の関係 (Na 温度 455°C)

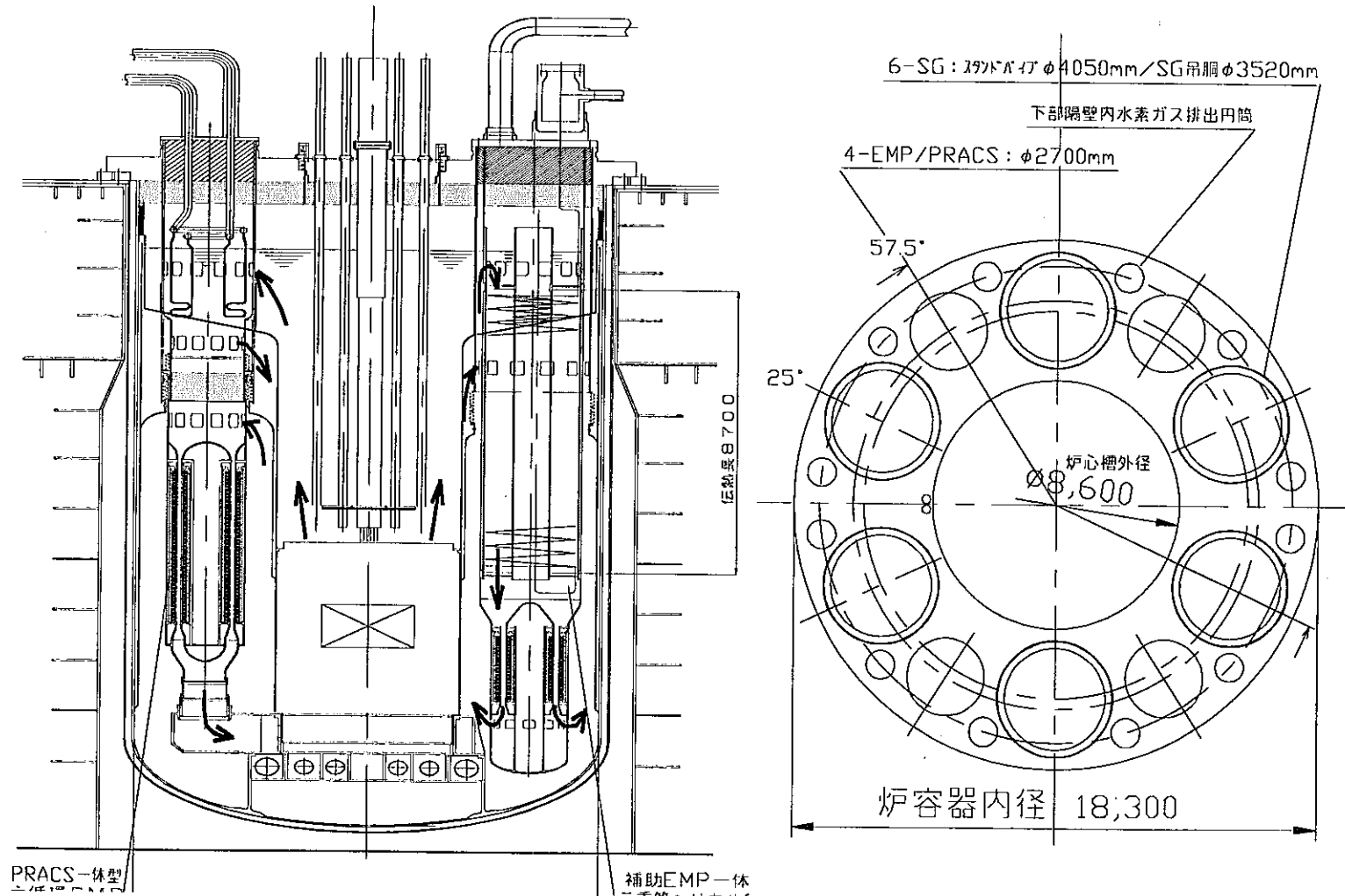


図 3.1.2-5 原子炉容器下部プレナムに反応生成物分離機能を付加した
2重管SGによる2次系削除タンク型炉概念の例

3.2 不活性中間熱媒体による Na-水反応排除

2次系簡素化概念の中で、金属 Na 及び水・水蒸気と活性な化学反応を生じることがない物質を、中間伝熱媒体として1次 Na 系と水・蒸気系の間に介在させることによって、Na と水が反応する可能性を極力小さくし、設計基準事象として Na-水反応を排除する可能性を有する概念について検討する。

(1) 中間伝熱媒体の選定

まず中間伝熱媒体の選定にあたって、中間伝熱媒体に求められる性状としては以下のように考えた。

①Na、水・水蒸気、及び空気と活性な化学反応を起こさない

1次冷却材である Na 及び発電系の作動流体である水及び水蒸気と活性な反応を生じないことは、伝熱壁が破損した場合でも破損部位の拡大及び炉心等の他の設備への影響を拡大を防止するために必要な性状であると考えた。また、空気との反応性に関しては、中間熱媒体の漏洩等に対する火災等のリスクを減少させるための性状である。

②構造材料との良好な共存性

構造材料として想定される金属材料（ステンレス鋼、クロム・モリブデン鋼）との共存性が良いこと。ただし、実用化の前には長時間かつ実使用条件での共存性試験が必要となる。現段階では共存性が悪いことが明らかなもの以外は排除しない。

③100℃～600℃の範囲での化学的、物理的性質

実機での仕様温度条件範囲で、変質、相変化等の化学的・物理的変化が起らず、安定な物質であること。

④耐放射線性

特に1次 Na 系からの γ 線に対して十分な耐性をもつこと。

⑤熱伝導率が高いこと

熱伝導が熱輸送の主体となることから、熱伝導率が高いことが求められる。

これらの条件を踏まえて、各種の中間熱媒体候補材の物性を表 3.2-1 のとおり整理した。この結果から、中間熱媒体の候補としては、以下の材料が適切であると判断した。

液体金属：鉛-ビスマス

固体：銅、ベリリウム（金属）

グラファイト、SiC 系ニューセラミクス（非金属）

(2) 既往研究について

中間熱媒体を用いる熱交換器（蒸気発生器）の概念については、エネルギー総合工学研究所における検討^[1]、実用化戦略調査研究予備調査^[2]、電中研における検討^[3]、

齊藤等による IHX-SG Combined System^[4]、がある。さらに、鉛ビスマス中間熱媒体に用いる熱交換器の材料特性については、実用化戦略調査研究予備調査^[2]の中で実施した、重金属冷却炉の検討成果が参考となる。これらの既往研究から、中間熱媒体を用いる熱交換器に関して以下のとおり整理できる。

①鉛ビスマスを中間熱媒体とする熱交換器（蒸気発生器）概念について

(a) 熱交換器概念

中間熱媒体の配置方式（鉛ビスマスプールの中に伝熱管を浸漬する方法：プール型、2重伝熱管の中間層に滞留させる方法：チューブ型）、プール型の場合 Na 系の伝熱管群と水/蒸気系伝熱管群の配置方式（近接配置、分離配置、水直接注入）、更に鉛ビスマスの循環方式（強制循環、自然循環、局所自然対流）、により熱交換器形式が整理できる。それぞれの形式について検討結果概要と併せて、以下のとおり纏める。

・「プール型/伝熱管分離設置/中間熱媒体強制循環」

伝熱管の分離設置により、Na-水反応を排除できる可能性がある。更に、中間熱媒体の強制循環により熱伝達効率は比較的高くなる。しかし、Pb-Bi ポンプが開発要素となる。Pb-Bi ポンプの開発では、ポンプインペラや機器表面での流速と酸化皮膜による防食のバランスが大きな課題となると予測でき、開発課題としては大きい。

・「プール型/伝熱管分離設置/中間熱媒体自然循環」

伝熱管の分離設置により、Na-水反応を排除できる可能性がある。しかし、強制循環に比較して、伝熱管の必要伝熱面積が大きくなり、物量が大きくなる。伝熱管群間にレベル差を設け、自然対流力を大きくした概念についても検討すべき。

・「プール型/近接配置/局所自然対流」

Na 系伝熱管と水・蒸気系伝熱管を極めて近接させて設置することにより、熱伝導+局所対流の熱輸送効果が大きく、伝熱面積を分離設置方式よりも小さくできる可能性が明らかとなっている。本概念の具体化を図り、評価する必要がある。

・「チューブ型/局所自然対流」

プール型概念に比較して、伝熱効率は高く、熱交換器の物量を小さくすることが可能な概念である。ただし、2重伝熱管の同時破損による Na-水反応の可能性・発生確率等について十分な吟味が必要である。

・「プール型/水直接注入」

水と Pb-Bi の反応性が低いことを利用して、直接接触による熱交換を目指した概念である。水・蒸気系の伝熱管が不要である利点により、製作コスト低減が期待できる。

(b) Pb-Bi と構造材の共存性について

重金属冷却炉の検討で得られた知見では、クロム鋼系は Pb-Bi と良好な共存性

が指摘されている。実用化のためには、今後試験研究を含む材料開発及び防食技術を開発する必要があるが、Na 大型炉で採用が検討されている高クロム鋼についても適用の可能性は有すると評価できる。

(c) Pb-Bi と Na 及び水・蒸気との反応性について

Pb-Bi を中間熱媒体とする熱交換器では、Pb-Bi の高比重（約 10.5）によるヘッド圧の上昇により、Na 系伝熱管破損時には 1 次 Na 中に Pb-Bi が侵入する。また、水・蒸気系伝熱管破損時には高圧の蒸気系の影響で、水又は水蒸気が Pb-Bi 中に漏洩する。Pb-Bi と Na 及び水・蒸気は活性な化学反応は生じないことがわかっており、1 次系 Na 及び水・蒸気との活性な反応を防止するというコンセプトは成立見通しが有ると評価できる。

② 固体熱媒体熱交換器について

英国 NNC 社では、粉末冶金（HIP）法により固体の銅の内部に 2 種の伝熱管を設置し、固体銅の熱伝導を利用して熱交換する機器の概念を開発した。FBR の蒸気発生器として本概念が適用可能であれば、Na-水反応を排除した 2 次系削除概念となる可能性がある。

さらに、銅以外の固体熱媒体についても、熱交換器概念を具体化して、性能・成立性を評価する必要がある。

概念検討の方向性

項及び 項の検討から、中間熱媒体を介して 1 次 Na 系と水・蒸気系の熱交換を行う SG 概念について、以下の方向性をもって概念検討を実施することとした。

① 中間伝熱媒体

中間伝熱媒体の選定としては、以下の材料を検討対象とする。

液体金属：鉛-ビスマス

固体：銅、ベリリウム（金属）

グラファイト、SiC 系ニューセラミクス（非金属）

鉛-ビスマスについては、既往研究からも成立性が高いと判断できるため、鉛-ビスマス中間熱媒体を用いる熱交換器概念を中心的に検討する。その他の中間伝熱媒体に関しては、材料の成立性等も含めて検討する必要がある。

② Pb-Bi 中間熱媒体熱交換器の概念について

既往研究から、Pb-Bi 熱媒体を強制循環させる概念に関しては、組網線式 2 重管 SG に比較して経済性が劣る可能性が高いことと、Pb-Bi ポンプの開発課題が大きいことから、自然対流を指向する。更に、近年の検討から、Na 系伝熱管と水・蒸気系伝熱管を近接して配置することによって、熱伝導と局所滞留による熱伝達を利用し、熱伝達効率が向上することが明らかとなっている。よって、伝熱管の近接配置概念を指向する。

また、電力中央研究所で概念検討が行われた、Na 伝熱管を下部に設置した Pb-Bi プールに直接水を注入し蒸気を発生させる S G 概念についても評価を加える。

③固体熱媒体熱交換器の概念について

英国 NNC 社開発の HIP 法による固体銅熱媒体熱交換器概念について、FBR への適用性を検討するための設計研究を実施し、評価を加える。また、それ以外の固体熱媒体の熱交換器についても検討する。

表 3.2-1 各種中間熱媒体候補材料の物性

分類	媒体	密度 [kg/m ³ at500℃]	熱伝導度 [W/mK at500℃]	線膨張係数 [×10 ⁻⁶ /K]	融点 [℃]	その他	総合評価
ガス	ヘリウム	0.6 (at 1MPa)	0.25 (at 1MPa)			伝熱面積が肥大化する。	×
	アルゴン	6.0 (at 1MPa)	0.04 (at 1MPa)				×
	窒素	4.2 (at 1MPa)	0.054(at 1MPa)				×
液体金属	鉛-ビスマス	10500	15		124	Sn, Ga 等もあるが、構造 材腐食性大	○
	NaK (参考)	750	29		-11		
	ナトリウム(参考)	830	66		98		
固体金属	ベリリウム	1800	107	19	1277		○
	アルミニウム	2600	220	34	660	融点が低い	×
	銅	8680	370	20	1080	合金もほぼ同等	○
固体非金属	グラファイト	2270	100 180 (非等方性有)	2 4 (非等方性有)	3650 (昇華点)		○
固体複合金属	銅複合合金 (Cu-CuO ₂)		100 220 (組成比による)	7 13 (組成比による)		新素材で現状では評価で きない	
セラミクス	ベリリア	2920	70	7.5		熱伝導度がやや低い	×
	SiC 系ニューセラミクス		270 (at 室温 温度依存性大)	3.7			○

3.2.1 Pb-Bi 熱媒体プール型 S G 概念

(1) 基本概念

熱媒体プール型 S G は以下のコンセプトで考案された熱交換・蒸気発生器である。

- ・ Pb-Bi 熱媒体プール型熱交換器は、Pb-Bi プール中に 1 次 Na 系及び水・蒸気系の伝熱管を浸漬し、熱媒体を介して Na から水・蒸気に熱を伝える。
- ・ 2 次系の作動流体を水・蒸気及び Na と化学的な反応を生じにくい中間伝熱媒体とすることによって、水・蒸気伝熱管破損による Na-水反応を排除する。中間伝熱媒体の材料については、化学的特性、物理的特性、及び伝熱性能の面から検討の結果 Pb-Bi が最も適している。
- ・ 経済性を向上させる目的で 2 次系を簡素化する。2 次系の構成は中間伝熱媒体のプール中に 1 次系 (Na 系) 及び水・蒸気系の伝熱管を浸漬するだけでポンプ等の動的機器や配管は無い。

1 次スクリーニングを目的として種々の概念について幅広く検討を行うため、これらのコンセプトを実現するという視点から、以下の方針により機器構成を検討した。

- ・ 東工大・斉藤らの研究^[4]により、プール型の熱交換器において、1 次 Na 系と水・蒸気系の伝熱管を近接させて設置 (以下、近接配置型と称する) することにより、局所の自然対流が発達した熱伝達条件となり、熱伝導に比較して熱伝達率が向上することが明らかとなった。よって、伝熱管近接配置型について概念を検討する。
- ・ (財) エネルギー総合工学研究所が実施した FBR 新技術フィージビリティ調査^[9]においても、同様の概念を検討中である。それらの情報も入手し、評価を加える。
- ・ 既往研究でも検討された、1 次 Na 系と水・蒸気系伝熱管を分離して容器内に配置し、伝熱管群間の Pb-Bi の自然循環を利用して熱伝達する概念 (以下、分離配置型と称する) は、Na 伝熱管と水伝熱管が隔壁により物理的に分離されており、安全性及び安心感の面で魅力がある。そこで、分離配置型については、伝熱中心差の拡大による自然循環熱伝達能力の向上等、経済性を向上させる概念を検討する。
- ・ ヘリカルコイル型、直管型、等の伝熱管形状については、種々の形状及び組合せを検討し、その性能、経済性を比較する。
- ・ 1 次 Na 系の伝熱管にヘリカルコイル型を採用する場合には、圧力損失がシステム設計上制限条件となるが、本検討では概念の成立性を判断する観点で、1 次 Na の熱交換器内での圧力損失を $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下に暫定する。ただし、暫定値の $2\text{kg}/\text{cm}^2$ は IHX の圧力損失が通常 $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度であることを勘案すると、非常に大きな値であることは特記する。
- ・ 局所対流による熱伝達以外にも、熱伝導による熱伝達を活用する方策についても検討する。熱伝導を活用するためには、温度境界層を破壊して中間熱媒体の温度を均一化することが有効である。その考えの元、Pb-Bi 熱媒体層を強制攪

拌し、熱伝導による熱伝達を強化する方法についても検討する。
この知見を踏まえて、具体的な機器概念を検討した。検討結果を次項に示す。

基本概念

検討対象とした Pb-Bi 中間伝熱媒体プール型熱交換器の各概念を以下に示す。表 3.2.1-1 に各概念の概略仕様を纏める。

概念① ヘリカルコイル近接配置、局所対流型

Na 系伝熱管、水・蒸気伝熱管ともにヘリカルコイル型とし、各伝熱管をそれぞれ交互に近接配置し Pb-Bi プール中に浸漬した概念である。熱伝達は隣接する Na 及び水伝熱管間での局所対流を主体とする。本案の概念図を図 3.2.1-1 に示す。

概念② 直管近接配置、局所対流型^[5]

Na 系伝熱管、水・蒸気伝熱管ともに直管型とし、各伝熱管をそれぞれ交互に近接配置し Pb-Bi プール中に浸漬した概念である。水・蒸気ヘッダは上下に配置するが、Na ヘッダは 4 分割して、上部及び下部の外周部に配置している。熱伝達は隣接する Na 及び水伝熱管間での局所対流を主体とする。本案の概念図を図 3.2.1-2 に示す。

概念③ Na 系直管・水蒸気系ヘリカルコイル（組合せ）近接配置、局所対流型^[5]

Na 伝熱管は直管型、水・蒸気伝熱管はヘリカルコイル型とし、直管の Na 伝熱管をヘリカルコイルの円周状の間隙に周状配置した概念である。熱伝達は隣接する Na 及び水伝熱管間での局所対流を主体とする。本案の概念図を図 3.2.1-3 に示す。

概念④ ヘリカルコイル分離配置、自然循環型

Na 系と水・蒸気系ヘリカル伝熱管を隔壁で隔てて分離設置する概念である。熱伝達は中間伝熱媒体を Na 伝熱管群と水・蒸気伝熱管群間の自然対流を主体とする。既往研究においては、水・蒸気伝熱管群と Na 伝熱管群をシェルで仕切った上、内外に配置する概念であったが、本案においては Pb-Bi の自然循環力強化のために内外で仕切った上に、上下に高低差をつけて伝熱管群を配置した。本案の概念図を図 3.2.1-4 に示す。

概念⑤ ヘリカルコイル近接配置、強制攪拌型

Na 系伝熱管、水・蒸気伝熱管ともにヘリカルコイル型とし、各伝熱管をそれぞれ交互に近接配置し Pb-Bi プール中に浸漬した概念である。熱伝達は熱媒体中の熱伝導を主体とする。熱伝導を強化するために、熱媒体を強制攪拌することにより、伝熱管近傍の温度境界層を破壊し、熱媒体の温度を均一化する。また、Na 流速を更に低下させるための工夫として、本概念では Na 管のヘリカルコイルの巻き上げ角度を水管よりも急角度とすることによって、Na 管の本数を増加させて流路面積を増大させている。本案の概念図を図 3.2.1-5 に示す。

評価

本項で検討対象とした概念は熱交換器の概念であり、プラント全体での評価に関しては未着手である。そこで、本概念の特徴である、新型熱交換器の技術的成立性の検討、2次系簡素化の効果（物量評価）とNa-水反応に対する安全性に絞って評価を実施する。

(i) 技術的成立性の考察

(ア) 伝熱面積及び流路面積設定

本項で検討した熱交換器概念は、1次Naからの熱を水・蒸気系に伝える機能を具体化したものである。Naを伝熱媒体として水と比較すると、伝熱性能は高いが比熱が小さいために熱輸送力は劣るため、冷却材の体積流量を比較すると、Naは水の10倍程度となる。その結果、Na系の伝熱管は圧力損失が過大とならないために流路面積は必要であるが、伝熱面積はそれほど必要では無いという条件となる。流路面積と伝熱面積の設定自由度という観点でNa系の伝熱管形状を検討すると、直管型は本数の設定自由度が大きいいため理想的な設計が行いやすく、ヘリカルコイル型は自由度が少ないことになる。

一方、水・蒸気系伝熱管に関しては、2相流の不安定領域を回避するためにある程度の圧力損失が必要である。圧力損失の観点で水・蒸気系の伝熱管形状を検討すると、ヘリカルコイル型は管の長さや管径について設計の自由度が大きいものに対して、直管型は管長に長さ方向の制約があるので、管径を細くする必要があり設計の自由度は低くなる。

これらの検討を踏まえて各概念を比較すると以下のとおりとなる。

概念①：

Na系、水系ともにヘリカルコイル型で、管本数も同数にした概念である。水・蒸気系の伝熱管設定はヘリカルコイル型のため、ほぼ理想的なものになる。一方、Na側の圧力損失を目標値以下に抑制するために、Na系伝熱管の管径が増大（ $\phi 54\text{mm}$ ）するため、Na側の伝熱面積が必要以上に大きくなり、無駄な面積が生じていると推測できる。

概念②：

Na系、水系ともに直管型で、管本数も同数にした概念である。水・蒸気系伝熱管は圧力損失を確保するために、細径（ $\phi 15.4\text{mm}$ ）かつ長尺（約30m）となり、物量の観点では理想的なものとならない。さらに、Na系の伝熱管長も水・蒸気系に合わせるために長尺化し、圧力損失の増大を招くことになり、理想的な設定とならない。

概念③：

Na系、水・蒸気系とも理想的な流路面積及び伝熱面積バランスを取りやすい形状であると推定できる。

概念④：

Na系伝熱管が概念①と同様にヘリカルコイル型であるため、Na圧力損失低減が設計の要点になるが、管群が分離されており管本数を水系と独立して設定できるため、設計の自由度は高い。表3.2.1-1に示す仕様は概念検討のための暫定値と考えられ、Na圧損及び伝熱面積の観点でより良好な組合せがあると考えられる。また、本検討においては、Na系伝熱管をヘリカルコイル型で設定しているが、管板設計、配管取り出し等が可能であればNa系伝熱管を直管型とした概念も考慮すべきである。

概念⑤：

概念①と同様にNa系、水系ともにヘリカルコイル型とした概念であるが、Na系伝熱管の巻き上げ角度を水系よりも急傾斜とすることによって、Na系伝熱管本数を水系よりも多くしている。この工夫により、Naの圧力損失は概念①よりも低下していると考えられる。Na系、水系ともにヘリカルコイル型伝熱管とする場合には、採用すべき工夫であると評価できる。

(イ) 製作性に関する検討

本項で検討した概念は、2種類の伝熱管が一つの容器に収容される概念であり、伝熱管の容器内の引き回しが複雑になることが予想できる。伝熱管引き回しに関する製作性の観点から各概念について検討する。

概念①：

機器容量に対する伝熱管本数は、従来のSGと同一であり、ヘッダが2種類となることを除けば、管寄せのスペースは従来の2次系SGと同等である。伝熱管製作性の観点からは問題は少ない。

概念②：

合計9000本以上の伝熱管が上下でそれぞれのヘッダに接続される。さらに、Na系伝熱管は容器外周部に設けた分割ヘッダに向け、水系の伝熱管を回避しながら90度曲げた上、接続される。直管型は容器径が比較的細くなることが特徴であり、管寄せのスペースも限られることから、伝熱管の取り回しが複雑となり、製作性は概念①に比較して悪化すると考えられる。

また、伝熱管長は30m程度を想定しており、国内の現状の生産設備で製造可能な範囲（20m）を超えており、製作のためには投資が必要となる。

概念③：

合計7000本程度の伝熱管が上下でそれぞれのヘッダに接続される。概念②よりは伝熱管本数は少なく、管寄せスペースも広がるが、製作性は同等であると考えられる。

概念④：

Na系のヘッダが入口ヘッダ、出口ヘッダともPb-Biプール中になり、かつPb-Biの自然循環流路近傍であるため十分なスペースが与えられない。その面で、Naヘッダの形状については更なる検討が必要であると考えられる。

概念⑤：

概念①に比較してNa系伝熱管の本数が増加する（2～3倍程度）が、製作性に影響を与える増加にはならないと考えられる。

(ウ) 保守・補修性

熱交換器の保守・補修性に係わる要件等しては以下の項目が挙げられる。

- ・伝熱管のプラグ性
- ・伝熱管の引き抜き性
- ・配管類へのアクセス性

これらの観点から、各概念の保守・補修性を評価する。

概念① ③、及び⑤：

これら4つの概念は全て共通で、ヘッダが上下に配置され管束引き抜きが不可能、伝熱管プラグ作業も本体下部での作業が必要、下部にNaの出口配管がありアクセス性が悪い、という評価となり、保守・補修性は悪い。

概念④：

5つの概念の中では唯一、配管が全て上部からアクセスしており、伝熱管の引き抜き性があり、配管類へのアクセス性も良好である。伝熱管プラグ性については、水系伝熱管のプラグは容易であるが、Na系はアクセスが困難でプラグ作業に高度な遠隔作業が要求される。

(ii) 経済性評価

プラント全体概念については未検討であるため、建設コストを構成する各要素についてそれぞれ評価する。

(ア) 鋼材物量

まず、評価の条件としては、概念① ④については、伝熱管材料として9Cr系鋼を想定して概念検討が行われている。実用化戦略調査研究の中で、12Cr系鋼の伝熱管への採用は織り込まれているため、本検討においても12Cr系鋼を採用した場合の物量について試算した。試算結果を交換熱量当たりの鋼材物量とともに表3.2.1-1の最下欄に示す。

本項で検討した5概念の中で、最も物量が少ない概念は概念③であり、伝熱管構成の自由度が高く、伝熱面積設定が適切であることを裏付ける結果となっている。概念③の交換熱量当たりの物量は0.47t/MWtであり、従来型の単管SGと比較すると、実用化戦略調査研究のNa大型炉の候補概念として検討中の2ループ型炉のSGは0.23t/MWtであり、物量としては2倍となった。

概念①、②、及び④に関しては概念③よりやや多い物量となっているが、これは伝熱管構成の自由度の低さから、無駄伝面が発生したり、経済効率の高い伝熱管径が選択できないことによると考えられる。

概念⑤に関しては、同様の伝熱管構成を持つ概念①と比較して交換熱量当た

りの物量は約 1.1 倍となっているが、これは交換熱容量を 600MW に設定したからである。交換熱容量を 1000MWt と設定すれば約 600t と評価されていることから、物量としては概念①と同等であると考えられる。

(イ) 大容量化の可能性

大容量化によるスケールメリットを活用することは、経済性向上の効果が大きい。そこで、本項で検討した概念の大容量化の技術的な可能性について検討する。

熱交換器設計の際に、大容量化を制限する因子としては次のものがある。

- ・管板径。特に高圧条件となる蒸気管板は大径化が困難であり、球形管板等を利用して $\phi 2.5\text{m}$ 程度に制限される。
- ・機器重量。通常、輸送、つり上げ、据付を現状の技術で実現するためには、500t 程度の重量が制限となる。
- ・容器径。信頼性の高いリング鍛造品で容器胴を構成する場合、我が国の製造設備では $\phi 9.5\text{m}$ 程度が制限となる。

管板径に関しては、別途 Na 大型炉で検討している直管 S G で、1900MWt の交換熱量で $\phi 2.5\text{m}$ の球形管板が成立の見通しが得られていることから、本項で検討した概念では管板径が大容量化の制限となる概念は無いと考える。

機器重量に関しては、1000MWt の交換熱量で既に 500t 前後の重量となっており、現状の工事技術を考慮する限り、今以上の大容量化は困難である。一方で、現在、最新の工事機械では、1000t クラスのつり上げ荷重を持つクローラクレーンが存在する。機器重量を 1000t と制限すれば、2000MWt クラス（現検討の 2 倍）の機器は成立性を有する。

容器径については、Na 系、水系両方の伝熱管をヘリカルコイル型とする概念（概念①、④及び⑤）が比較的大径となり、両方を直管とする概念（概念②）が細径、ヘリカルコイルと直管の組合せ型がその中間という傾向である。検討結果の中で最も太径となったのは概念④（ $\phi 7.9\text{m}$ ）であるが、この概念に関しては伝熱管分離設置型であり伝熱管構成の自由度が高いことから、制限以内の径で倍程度の大容量化は可能と考えられる。また、次に太径である概念①（ $\phi 7\text{m}$ ）は、2 倍程度の大容量化は制限範囲で達成できると考えられる。以上により容器径は本概念の 2 倍程度の大容量化の制限とならないと評価できる。

(iii) 安全性検討

総合的な安全性評価は 4 章に譲り、ここでは、伝熱管破損時の挙動を分析し、Na-水反応発生に至るパス及びその可能性について検討する。

(7) 水伝熱管破損

何らかの原因で水・蒸気系の伝熱管が破損した場合には、高圧の水・蒸気が Pb-Bi の中間伝熱媒体中に噴出することになる。Pb-Bi と水・蒸気との反応は吸

熱反応であり、活性な反応を生じることなく水蒸気は自由液面に上昇し、ラプチャーディスク等の圧力緩和措置により、蒸気をリリース可能と考えられる。伝熱管の単独破損の場合には、以上の現象のみが起こる。水伝熱管の破損と同時に以下の現象が生じた場合に、Na-水反応が生じると考えられる。

- ・原因を異にする Na 管の破損が水・蒸気の噴出範囲の伝熱管で偶然起こる。
- ・水管のパイプホイップによる物理的な接触により、隣接する Na 管が従属破損する。
- ・水管破損に付随する Pb-Bi 層の圧力上昇により Na 管が従属破損する。

これらの水管・Na 管の同時破損は、伝熱管の信頼性向上、及びパイプサポート、Na 管の肉厚設定等の設計対応によって十分に低い確率とすることが可能と考えられる。

(イ) Na 管破損

何らかの原因で Na 系の伝熱管が破損した場合には、ヘッド圧の差により中間熱媒体である Pb-Bi が Na 管内に侵入する。Pb-Bi と Na の反応は発熱反応ではあるが、爆発的な反応は生じない。Na 管内の反応であり、従属破損として隣接の水管に影響が及ぶ可能性は十分に低いと考えられる。また、Na 中に侵入した Pb-Bi はその密度差から低位置に滞留し、化学反応を生じるのは一部であるとの知見もある。現象については、試験を含む R&D により十分に確認する必要があるが、Na 管破損を起因とする Na-水反応は生じないと考えられる。

(ウ) Na 管・水管の同時破損

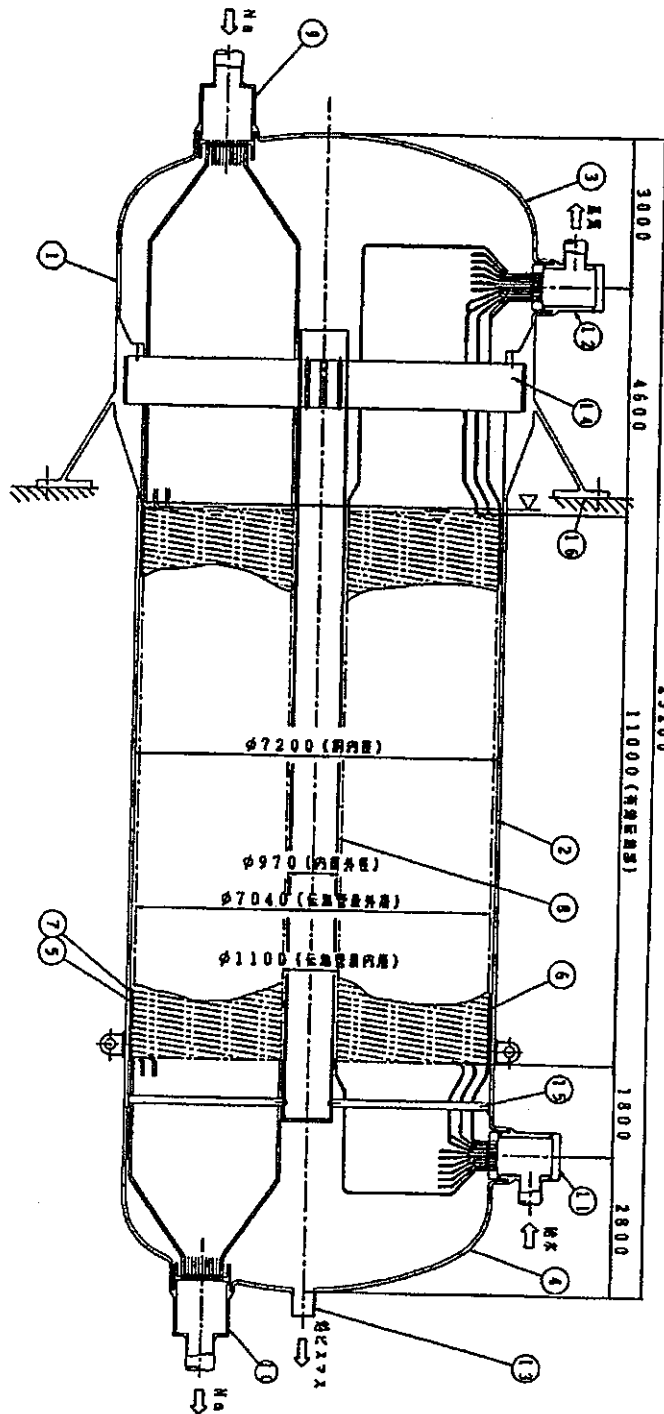
何らかの原因で Na 管及び水・蒸気管が同時に破損した場合、まず、蒸気の噴出範囲外の Na 管が同時破損した場合は Na-水反応は発生しない。蒸気の噴出範囲内の Na 管が同時破損した場合には、Na 管内で Na-水反応が発生するが、管内反応であり反応する Na 量が限られることから、限定的な反応、かつ低圧の Na 配管内反応のため高温ラプチャーも生じない。よって、ウエステージや高温ラプチャー等の破損範囲を拡大する挙動は生じないと評価できる。

表 3.2.1-1 Pb-Bi 中間熱媒体プール型熱交換器の各概念の概略仕様

		単位	①ヘリカルコイル 近接設置	②直管近接設置	③Na系直管・水蒸 気系ヘリカルコ イル近接設置	④ヘリカルコイル 分離設置	⑤ヘリカルコイル 近接設置, 攪拌型
共通仕様	交換熱量	MWt	1000				600
	Na 入出口温度	℃	550/395				550/395
	蒸気条件	kg/cm ² ℃	175/497				154/485
	給水温度	℃	240				240
	Na 圧損	kg/cm ²	2 以下 (目安)				流速 3m/s
	伝熱管材料		9Cr 系鋼				12Cr 系鋼
Na 伝熱管仕様	形状		ヘリカルコイル	直管	直管	ヘリカルコイル	ヘリカルコイル
	外径/肉厚	mm	54.0/2.6	25.4/2.0	19.0/1.6	54.0/2.6	38.1/1.2
	本数	本	730	4843	7710	633	
	伝熱面積	m ²	9040	7730	6440	5600	4200
水・蒸気伝熱管仕様	形状		ヘリカルコイル	直管	ヘリカルコイル	ヘリカルコイル	ヘリカルコイル
	外径/肉厚	mm	31.8/3.9	15.9/2.3	31.8/3.9	31.8/3.9	25.4/2.9
	本数	本	730	4843	527	616	
	伝熱面積	m ²	5330	4840	4890	5660	4600
全体仕様	伝熱面積合計	m ²	14370	12570	11330	11260	8800
	全体形状	m	φ 7.2×h23.2	φ 4.2×h33.5	φ 5.7×h25	φ 7.9×h28.8	φ 6.8×h18
	鋼材物量	ton	860	800	720	860	400
	Pb-Bi インベントリ	ton	3800	2800	3500	(流量)37t/sec	
鋼材重量 (合理化後)	ton	590	520	470	590		
	t/Mw	0.59	0.52	0.47	0.59	0.66	

※

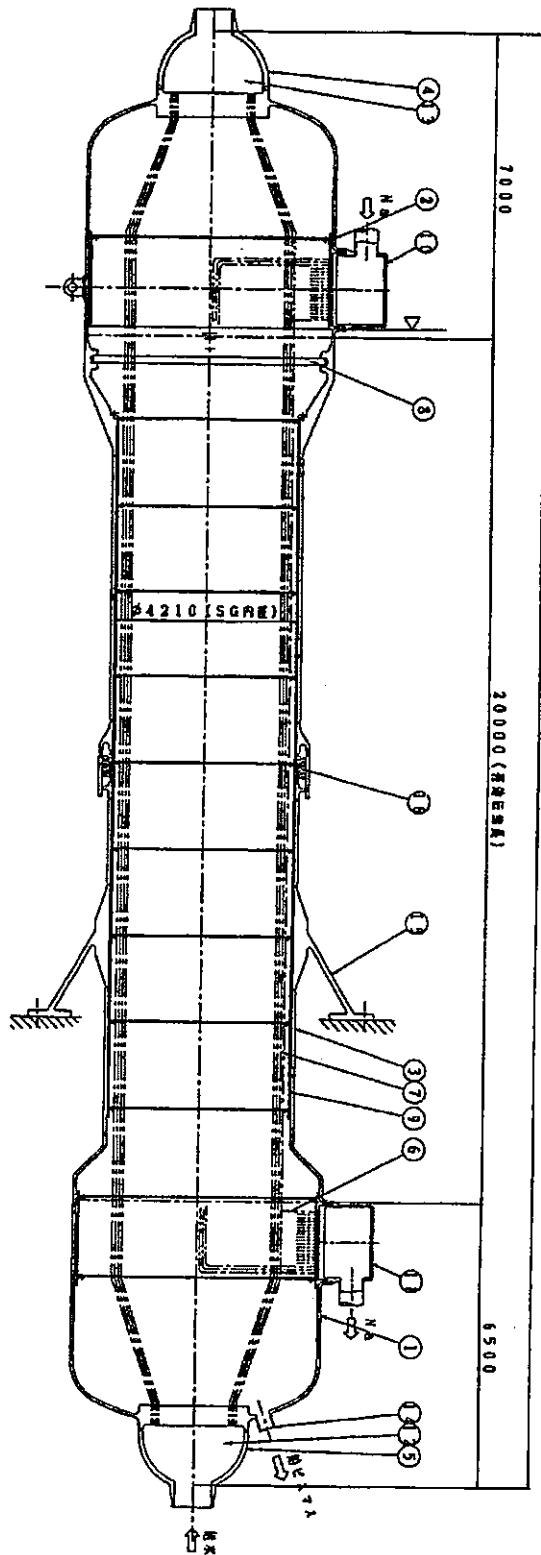
※① ④のデータ 出典:「平成 11 年度 FBR 新技術フェージビリティ調査 一体型 IHX-SG 概念技術及び燃取システム除熱技術に関する調査研究 報告書」エネルギー総合工学研究所



各部名称

①	上部胴
②	下部胴
③	上部鏡板
④	下部鏡板
⑤	伝熱管(Na側)
⑥	伝熱管(水・蒸気側)
⑦	伝熱管支持構造物
⑧	内筒
⑨	Na入口ヘッダ
⑩	Na出口ヘッダ
⑪	給水入口ヘッダ
⑫	蒸気出口ヘッダ
⑬	鉛ビスマスノズル
⑭	上部伝熱管支持構造物
⑮	下部伝熱管支持構造物
⑯	支持スカート

図 3.2.1-1 プール ヘリカルコイル近接配置 局所対流型 概念図

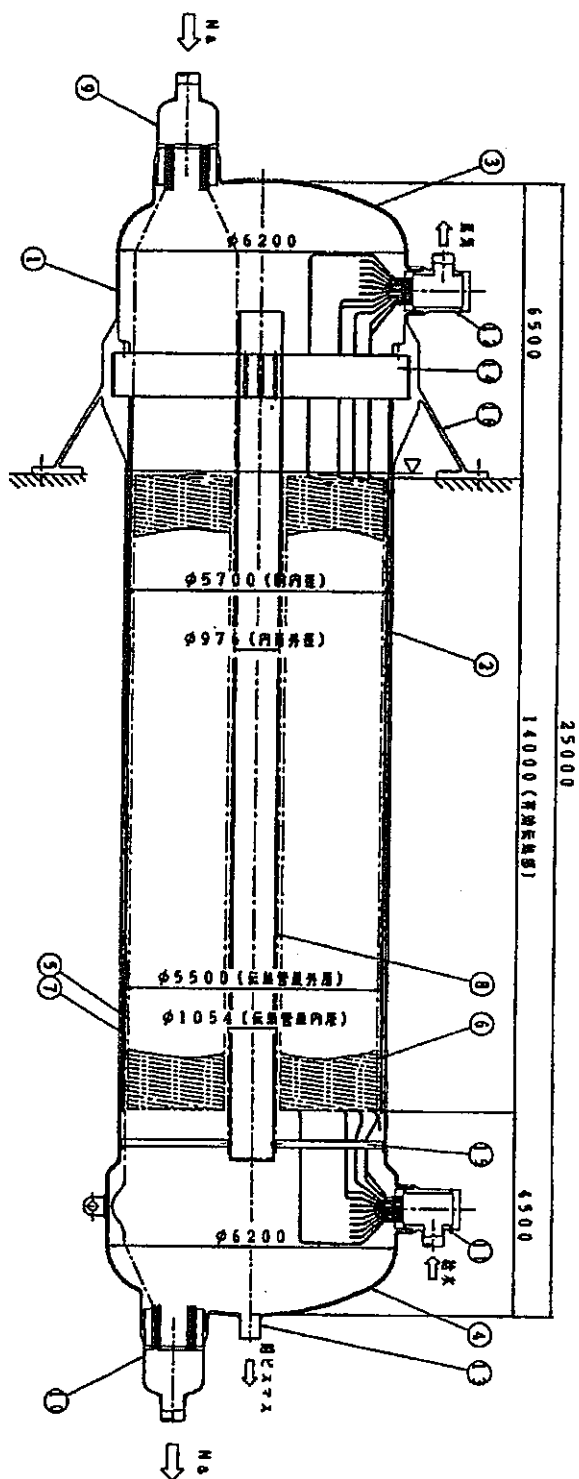


各部名称

①	下部胴
②	上部胴
③	中央部胴
④	蒸気出口鏡板
⑤	給水入口鏡板
⑥	伝熱管(Na側)
⑦	伝熱管(水・蒸気側)
⑧	伝熱管支持装置
⑨	シュラウド
⑩	Na入口ヘッダ
⑪	Na出口ヘッダ
⑫	給水入口プレナム
⑬	蒸気出口プレナム
⑭	鉛ビスマスノズル
⑮	支持スカート
⑯	シェルペローズ

図 3.2.1-2 プール 直管近接配置 局所対流 型 概念図

出典：「平成 11 年度 FBR 新技術フェージビリティ調査 一体型 IHX-SG 概念技術及び燃取システム除熱技術に関する調査研究 報告書」エネルギー総合工学研究所



各部名称

①	上部胴
②	下部胴
③	上部鏡板
④	下部鏡板
⑤	伝熱管(Na側)
⑥	伝熱管(水・蒸気側)
⑦	シュラウド
⑧	内筒
⑨	Na入口ヘッド
⑩	Na出口ヘッド
⑪	給水入口ヘッド
⑫	蒸気出口ヘッド
⑬	鉛ビスマスノズル
⑭	上部伝熱管支持構造物
⑮	下部伝熱管支持構造物
⑯	支持スカート

図 3.2.1-3 プール 直管ヘリカルコイル近接配置 局所対流 型 概念図
 出典：「平成 11 年度 FBR 新技術フェージビリティ調査 一体型 IHX-SG
 概念技術及び燃取システム除熱技術に関する調査研究 報告書」
 エネルギー総合工学研究所

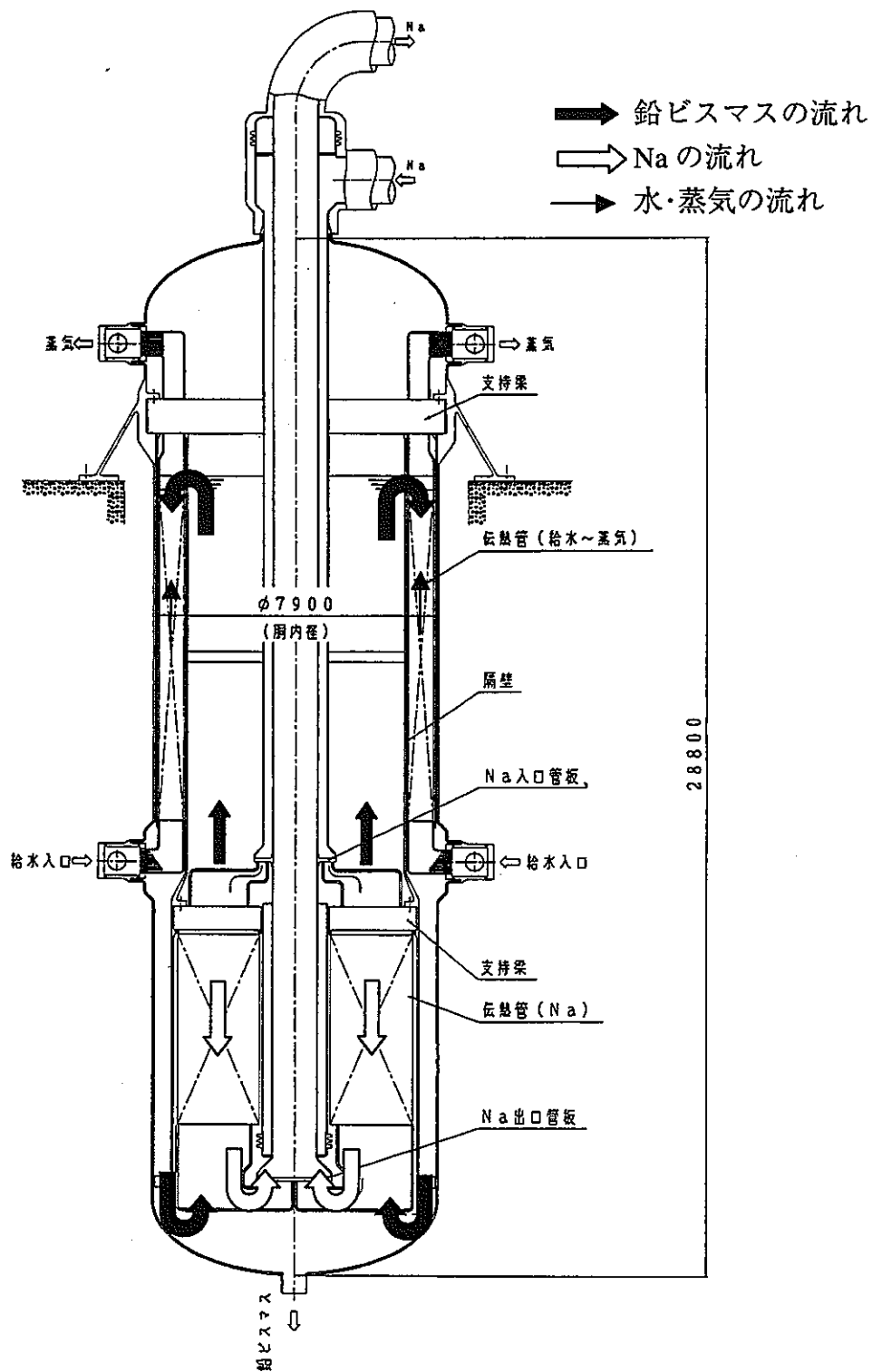


図 3.2.1-4 プール ヘリカルコイル分離配置 自然対流 型 概念図

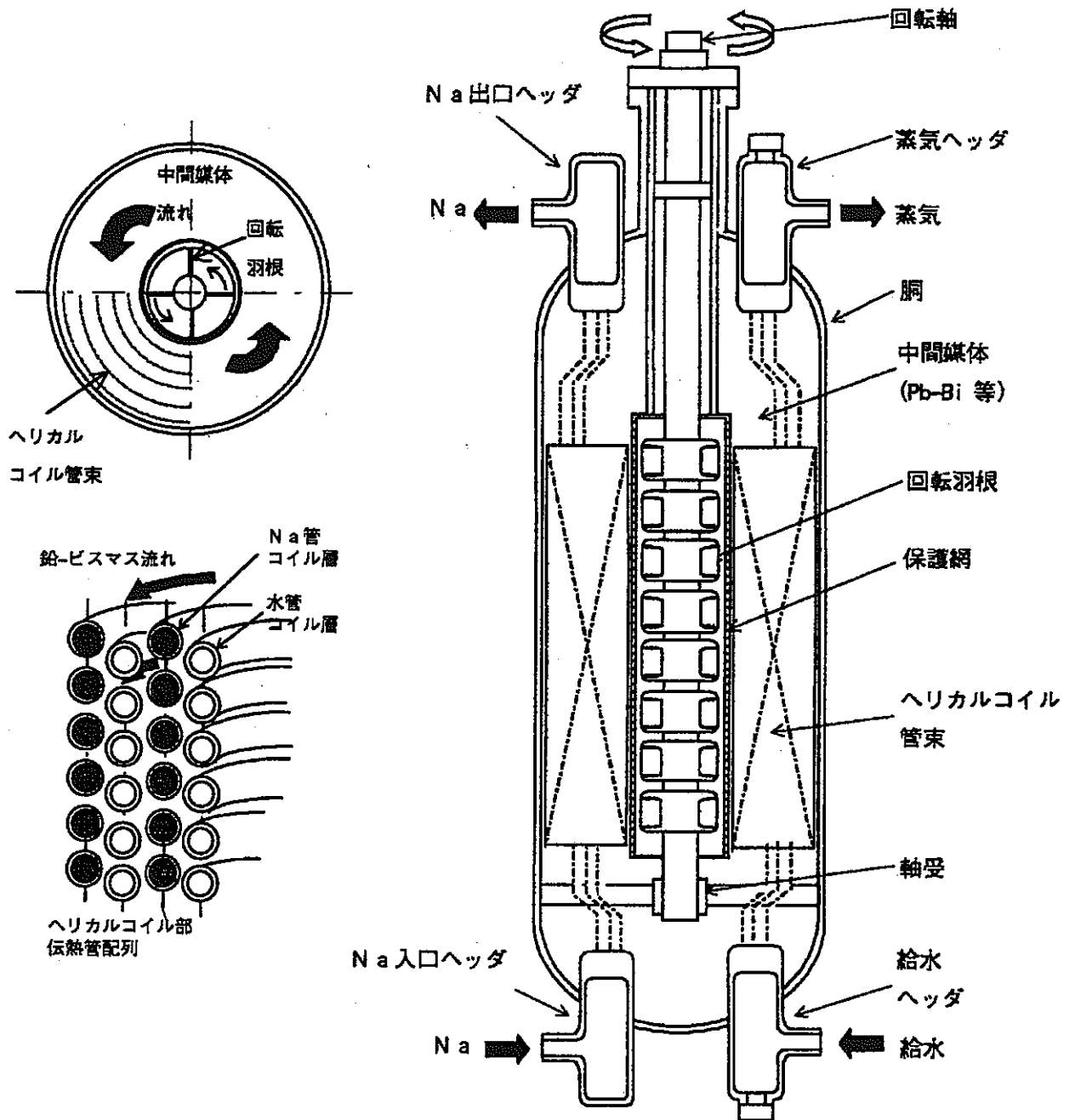


図 3.2.1-5 プール ヘリカルコイル近接配置 強制攪拌型 概念図

3.2.2 Pb-Bi熱媒体チューブ型SG概念

(1) 直管型

(i) 基本概念

ナトリウム(Na)と水の反応の可能性をできるだけ回避し、安全性の向上を目指した概念の一つとして、同心で2重に配置するNa側伝熱管(外側配置)と水蒸気側伝熱管(内側配置)との間のアニュラス空間に、2次Na系に代わる中間熱媒体として鉛(Pb)-ビスマス(Bi)合金を充填し、この中間熱媒体の熱伝導と局所自然対流による熱伝達で伝熱性能を高めて、構造簡素化を図る中間熱交換器(IHX)と蒸気発生器(SG)の一体化概念:Pb-Bi熱媒体チューブ型SG概念がある。本概念は、2次Na系(2次系配管およびポンプ)を不要に出来ることから、経済性にも優れ且つコンパクトな熱交換・蒸気発生器を期待でき、物量を削減出来る可能性もある。したがって、Pb-Bi熱媒体チューブ型SG構造概念は、Na-水反応の蓋然性を大幅に低減することによるプラントの安全性向上と熱交換器簡素化によるプラントコスト削減の両立を図れる可能性があると言える。

この候補概念として直管型と後述するU字管型があるが、ここでは直管型のチューブ型Pb-Bi熱媒体SG概念の構造を図3.2.2-1に示す。この概念ではNa側の流れは胴側、水蒸気側の流れは伝熱管内であり、Naによる水蒸気側の加熱を行う一般的な直管型SGと同じである。しかし、Pb-Biを2重に配置した伝熱管アニュラスにPb-Biを充填する概念としていること及びPb-Biの純化のための循環性を確保する必要があることから、管板はNa側と水側それぞれに2箇所あり合計4個の管板とした。上部の蒸気側管板とNa入口側管板の間はPb-Biの液面とそのカバーガス空間があり、蒸気側の伝熱管が貫通配置されている。一方、下部のNa出口側管板と給水管板の間にはPb-Biを充填しており、水側伝熱管を貫通配置している。

伝熱管や容器胴などの温度分布の違いによる熱膨張差については以下の工夫をしている。すなわち、Na側伝熱管と容器胴の熱膨張差については容器胴に設けたベローズにより吸収し、水蒸気側伝熱管と容器胴の熱膨張差(容器胴のベローズの変形を含む)は伝熱管に設けたサイン状に曲げた部分の変形で吸収する。中間熱媒体であるPb-Biの温度変化に伴う熱膨張収縮と容器・伝熱管の熱膨張収縮による容積変動による熱膨張差を、上部の2つのNa入口側管板と蒸気側管板とに囲まれた空間にあるカバーガスで吸収する構造概念とした。

また、Pb-Biの純度管理のため、必要に応じてPb-Biを上側の入口Na管板にあるPb-Biと下側のNa出口側管板と給水管板の間にあるPb-Biを外部より駆動循環して、純化できる系統を検討している。

本概念は、以下に述べる理由からNa-水反応の蓋然性をできるだけ回避できる概念と言える。すなわち、水蒸気側伝熱管破損(微少リーク)時には、Pb-Bi層へリークした水蒸気は上部カバーガス(不活性)空間に至るが、カバーガスの圧力上昇もしくは湿分上昇を検出することによりリーク検出しやすい。このためカバーガスの湿度は高くならず、且つ差圧が小さいことから、カバーガス中の湿分がNa伝熱管内(カバーガス空間にはNa伝熱管が無いがPb-Bi液位が下がった場合を想定)に入っても激しいものとはならないと考えられる。また、Pb-Bi中のNa伝熱管破損時にはPb-BiがNa伝熱管中にリークするが、Pb-Bi

の液位もしくはカバーガス圧力の監視等のリーク検出により比較的早期に検出可能と考える。ただし、NaとPb-Biの化合物の形態によっては炉心の冷却性に影響を与える可能性がある。したがって、Na側のリークについては更なる検討が必要である。

(ii) 基本仕様

本概念の検討では、物量等の把握を実施していないが、現状での仕様を表3.2.2-1に示す。伝熱管を2重に配置するため構造が大きくなること、および管板径の大きさが構造健全性の成立性に影響することから、系統は4ループとし、SG1基当たりの交換熱量は950MWtとした。2つの伝熱管の間のアナユラスの幅が狭くても局所自然循環による伝熱促進が可能と仮定して設定したアナユラス間隙に基づきサイジングを行っている。水蒸気側、Na側のそれぞれの伝熱面積 $9190\text{m}^2/7340\text{m}^2$ 、伝熱管本数は4819本/4819本、有効伝熱高さ19.1m/19.1mである。なお、現在のところ伝熱管組合せに関する最適化や最適な伝熱式の適用は行っていないが、たとえ最適化（市販伝熱管仕様（肉厚）と必要肉厚の条件の基でのもの）したとしても次の理由により伝熱面積が大幅には削減されることはないと考える。すなわち、2重の伝熱管の間にPb-Biの熱伝導と局所自然対流による熱伝達の向上による伝熱性能の向上を期待しており、この効果の適用範囲を外れる可能性のあるPb-Bi層厚さを0.5mm程度にしているため、局所自然対流の効果を大きめに見積もっている可能性もある。また、伝熱管口径の組合せの最適化をしても相殺される可能性があり、大きな伝熱面積の削減は期待できない可能性がある。ただし、U字管のような設計手法を適用（伝熱管の小口径化と両伝熱管肉厚の最小化）することにより、U字管型概念と同等の伝熱面積にすることは可能である。

管板部、カバーガス空間の等の設計は未検討であるが、伝熱管有効長さに基づくSG構造全体の高さ方向寸法は30m程度になると想定した。

(iii) 設計要求に対する適合性

本概念の検討は、未だプラント概念として纏まったものではない。そのため、設計要求に対する適合性を評価できる段階にない。

(iv) 中間評価結果

(a) 経済性

① 冷却系の物量

最適化していないが、本SGの物量試算値は約2800ton/プラント（構造材は約2000ton）である。後述のU字管型と比較して下降する伝熱管部（ダウンカマー部）が無いことから、仮に最適化を行えば、本SGの物量はU字管型小さくなる可能性はある。

② 建屋容積、固体廃棄物貯蔵庫、所内負荷率、建設工期 未検討である。

(b) 構造健全性

① 構造設計の特徴

Na側・水蒸気側のそれぞれの伝熱管には管板が上下にあり、最上部・最下部にはそれぞれ蒸気・給水側の管板を、その間にNa側管板をそれぞれ上下に設置する。下部の給水管板とNa出口側管板の間の容器胴側（水側伝熱管貫通の外側）はPb-Biを満しており、一方、上部の蒸気管板とNa入口管板の間の胴側（蒸気側伝熱管貫通の外側）はPb-Bi液面を有するカバーガス空間として、Pb-Bi純化のために循環可能な系統構成を想定している。

伝熱管及び容器胴のそれぞれの熱膨張差は、容器胴のベローズと水蒸気側伝熱管の曲がり部（給水管板とNa出口管板とに囲まれた空間に配置）の変形で吸収する概念である。

② 主要機器の構造健全性

現在のところ構造健全性確保のための設計検討は行っていないが、次のことは言える。

すなわち、伝熱管・容器胴の熱膨張差はベローズや伝熱管の曲がり変形で吸収するため、これらの部位での構造健全性は確保できると考える。しかし、管板については熱過渡時の温度分布や管板に作用する圧力差により、管板直径が2.8mという条件では大きなひずみが発生する可能性があることから、成立のためには伝熱管の小口径化による管板口径の小径化および管板形状の最適化が必要と考える。

なお、構造健全性を確保するためにPb-Biによる構造材の腐食を防止する必要があると考えられることから、純化基準と純化方法を明らかにし、純化系統の設計へ反映する必要がある。

(c) 安全性

本概念に関しては、伝熱管破損時のリーク挙動に関する実証は行っていないものの、定性的にはSG内において急激なNa-水反応を回避することは可能と考える。すなわち、水もしくは水蒸気がPb-Bi層に漏えいした場合は、相互反応がなく、水蒸気となってカバーガス空間に放出されると考えられ、カバーガス中の湿度もしくは圧力の上昇で検出できると考えられる。また、カバーガス圧力が設計圧力にまで達する前にリーク検出が可能と考えられる。なお、水蒸気のPb-Bi層へのリーク後、仮に検出下限未満において、さらにNa側伝熱管が破損し、湿分を含むPb-Bi層のカバーガスがNa中へリークしたとしても、その湿度は十分に低い状態の時点であり、安全性に影響を及ぼすような激しいNa-水反応は生じないと考える。

しかし、確率は十分に小さいと予測されるものの、仮に同心円の2重伝熱管同士が極近傍の位置で破損（極端なケースは2重管の同時ギロチン破損）した場合には、通常のSG事故同様に安全性に影響のある激しいNa-水反応が生じる可能性がある。このため、各冷却材（水・水蒸気/Pb-Bi/Na）のリーク現象、リーク検出の有効性、および同時破損のメカニズムと発生頻度などを明確にし、安全性に影響のあるような規模のNa-水反応の発生する蓋然性が十分低いことを明らかにすることが必要である。

なお、Na側伝熱管破損時のPb-Biの1次系Na混入に関し、混入量の少ない漏えい初期の時点での炉心核特性に与える影響はほぼ無いと推定するが、

炉心核特性への影響の度合い、Na-Pb-Bi合金の物性、長時間後の影響として考えられる材料腐食への影響の度合い、および漏えいPb-Biの回収手法の確認作業や検討等は今後も継続が必要と考える。

(d) 製作建設性

本概念のSGの製作性は、管板の健全性確保が前提ではあるが、Na側伝熱管が直管であり、水蒸気側伝熱管の片側が直管であるため、球形管板を想定したU字管型SGにおける両端部の曲げ加工（伝熱管によって曲率の異なる曲げ加工）が必要な伝熱管とは異なることから、より製作性および組立性は優れているといえる。伝熱管の曲げ加工もすべての伝熱管が同一の曲げ加工であり、加工性の点も優れている。

伝熱管のサインカーブ部の加工は、緩やかな曲げであり、製作時の検査性は伝熱管内部への検査用機器の挿入により可能と考える。

据付性に関しては、本概念のSGは据付後にPb-Biを充填する方式を想定していることから、据付時の1基あたり重量を約500tonに抑えられ、1000ton級のクレーンで対応できると考える。

現地試験性に関しては未検討である。

(e) 運転、保守・補修性

① 運転の容易性

未検討ではあるが、2次Na系統を持たないので運転性は向上すると考えられる。

② 漏えい検出

水蒸気側伝熱管破損によるPb-Bi層への水蒸気のリークの検出は、Pb-Bi層カバーガス中の湿度もしくは圧力の上昇、音響リーク検出、Pb-Bi層中の水分濃度等の上昇をモニタリングすることで対応する。Na側伝熱管破損による1次Na系中へのPb-Biのリーク検出は、Pb-Bi層カバーガス圧力の低下、Pb-Bi液位低下やNa中のPb-Bi濃度上昇をモニタリングすることで対応可能と考える。現在のところ、これらの検出技術に関する詳細な検討は行っていないため、詳細検討および確証や評価等の必要がある。

③ 漏えい検出後の対応

水蒸気リーク検出後の破損伝熱管の同定は、各冷却材のドレン後に管板からアクセスすることにより可能と想定している。Na側伝熱管破損の場合は、容器胴（Na）側をガス加圧し、Na側管板でのリークガス濃度分布の検出により同定することを検討中である。

破損伝熱管の施栓は、水蒸気側伝熱管破損の場合は給水側管板部と蒸気側管板部での施栓、Na側伝熱管破損時は当該Na側伝熱管と同心の水蒸気側伝熱管を拡管してNa側伝熱管を施栓することで対応可能であると考えられるが、詳細な検討および確証が必要であると考えられる。

なお、本概念のSGでは管束の引抜は不可能であるが、管束引抜の必要性そのものがないと考える。

(v) 開発課題

現在のところ概念検討を継続中であり、課題を抽出中であるが、これまでの検討から本概念特有の開発課題として考えたものを以下に示す。

- ① アニュラス部のPb-Bi熱媒体の熱伝達特性の把握（水側・Na側伝熱管形状組合せの最適化、外管による内管の支持構造の最適化を含む）
- ② Pb-Bi層中の水分検出およびNa中のPb-Biの検出に関する研究開発
- ③ 漏えい検出特性やNa-水反応に至る現象等の安全性を考慮したNa側伝熱管肉厚設定ロジックの構築
- ④ 熱過渡時の管板の構造健全性の確保と管板の構造最適化
- ⑤ 本SG概念の事故時の熱媒体の熱過渡・除熱性への影響把握
- ⑥ リーク検出方法の検討と検出性評価
- ⑦ 水蒸気側リーク時の破損伝熱管同定手法・破損伝熱管施栓方法の確認および施栓による影響の評価（伝熱性能および構造健全性への影響評価を含む）
- ⑧ Na側リーク時の破損伝熱管同定手法の検討と破損伝熱管施栓方法の検討（伝熱性能および構造健全性への影響評価を含む）
- ⑨ Na伝熱管破損時のPb-Biの1次系Na中への混入による炉心核特性への影響評価
- ⑩ Na伝熱管破損時のPb-Biの1次系Na中への流入による炉心冷却性や材料健全性への影響の度合いの確認
- ⑪ 1次系NaへPb-Biが漏えいした場合の回収技術の開発
- ⑫ 重量物となるSG構造の健全性（支持構造など）

(2) U字管型

(i) 基本概念

U字管型のPb-Bi熱媒体チューブ型SGの着眼点及び基本概念も直管型と同様であり、1次Na系と水-蒸気系との間に、Na及び水に対しほとんど反応しない中間媒体である(Pb-Bi)を用いる新型蒸気発生器を用いることにより、原子炉蒸気供給系(NSSS)、すなわちプラントとしての物量の低減およびコンパクト化を図るものである。

U字管型SGは、直管型と同様に2重管構造であり、内管（内部：水-蒸気）と外管（外部：Na）との間に0.5～1.0mm程度の隙間を設け、中間媒体であるPb-Biを充填する。U字管型SGにおいてもPb-Bi系は熱伝導のみで熱を移行させるため、循環用の駆動ポンプを必要とはしない。伝熱管長はヘリカルコイル状よりも短くなるものの、Pb-Bi層が薄く、しかもNa系と水-蒸気系の温度差も大きいため、単位面積当たりの伝熱量は多く、熱交換量は従来（2次系有プラント）と同等となる。なお、U字管型SGの接続する原子炉及び1次系の構造システム等に、大型Na・1次系機器合体・ループ数削減・ループ型炉と同等のものを採用することにより、開発課題を共通とすることが出来る。

(ii) 基本仕様

基本仕様を表3.2.2-2に、SGの概念図を図3.3.3-2に、プラントの基本概念図を図3.3.3-3に示す。

SGの主要諸元は、熱交換容量915MW/基、Na出入口温度395/550℃、流量が約16780t/h、蒸気出口温度488℃・圧力16MPa、SG給水入口温度233℃・給水流量が約1460t/hである。伝熱管は、材料が12Cr系鋼、外管外径27.2mm・肉厚/1.53mm、Pb-Bi層厚さ1mm、内管外径22.2mm・肉厚1.89mmである。SG 1基あたりの本数は2090本で伝熱面積が約3900m²、有効伝熱高さが約22mである。

プラントへの適用例として大型Na・1次系機器合体・ループ数削減・ループ型炉（2ループ型）と組み合わせたものを図3.3.3-3に示したが、同ループ型炉とはSGを4基配置する4ループ型である点と崩壊熱除去系として各ループにPRACSを設置する点異なる。

(iii) 設計要求に対する適合性

Pb-Bi熱媒体チューブ型SG（U字管型）付きプラントの設計要求に対する適合性を表3.2.2-3に示す。

(iv) 中間評価結果

(a) 経済性

Pb-Bi熱媒体チューブ型SG（U字管型）を用いたプラントの合計物量は、同出力規模の2次Na冷却系（2ループ）を有する「1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉」の物量より若干重くなっているものの、その建設費はNa-水反応の回避を指向する「Pb-Bi熱媒体チューブ型SG（U字管型）」を採用することにより2次Na冷却系削減、およびプラントのコンパクト化を行ってプラント物量ベースで目標単価である20万円/kWeを達成できるポテンシャルを有している。経済性に関する主なデータは以下のとおり。

① 原子炉構造及び冷却系機器の物量

a. 重量：原子炉系；830t（原子炉容器；180t、炉上部構造物350t、炉内構造物；190t、ガードベッセル110t）、1次系配管；170t、1次系ポンプ；150t、SG；410t/基（内側伝熱管；141t、外側伝熱管67t、容器等；153t、ガードベッセル；49t）×4基
合計；約2790t

b. 原子炉炉容器寸法：^D9.8m×^H17m（^t35mm）

c. 蒸気発生器：^D3.0m（Na流入部は^D4.2m）×^H28.0m

② 原子炉建屋の容積：約12万m³（ツインプラント）

③ 所内負荷率：機械式ポンプの採用で5%以下（目標）

④ 建設工程：46ヶ月を目標

⑤ 燃焼度：取り出し平均で150GWd/t

⑥ 連続運転期間：約16ヶ月（4バッチ方式）

⑦ 炉心出口温度：550℃

⑧ プラントの稼働率：目標である90%程度

(b) 構造健全性（含耐震性）

機器・構造の設計成立については、今後に熱過渡解析および構造解析評価を行う必要があるが、現時点で困難と考えられる要因はないと考えられる。

新基準採用の要否については、1次系配管およびSG伝熱管に12Cr系鋼を採用することから、12Cr系鋼の材料強度基準の開発が必要になる。

耐震・免震設計の中の耐震重要度分類については、現行基準に対応した重要度分類を行う。耐震（免震）は、現時点では大型ループ型炉（1次系機器合体・ループ数削減）と同様に建屋水平免震を採用。

① 熱応力の緩和方策

熱応力の緩和方策として原子炉構造は、上部プレナムの内面にサーマルライナを設置。これにより速い温度変化の緩和とストラによる軸方向温度分布の緩和を図る。

② 耐震（免震）設計の考え方

耐震（免震）は、現時点では建屋水平免震を採用。上下免震は、炉心の健全性（飛び上がり、反応度投入）確保のために必要となった時点で採用を再検討する。現時点での見通しは、直下地震がM6.8であれば上下免震が不要で、M7.1であれば必要になる。

③ 主要機器の構造健全性

原子炉容器は液面部の耐熱性の検討結果から課題を抽出し、検討を継続する。

1次冷却系の短縮配管は12Cr鋼を採用すれば成立性がある。

SG管板は12Cr鋼及び球形管板を採用すれば成立性がある。二重伝熱管は、内・外管接触部のヒートスポットの影響に関する課題を抽出し、検討を継続する。

(c) 安全性

SG 伝熱管破損事故に関して、内・外管同時破断を設計基準外事象（BDBE）とするシナリオが成立するのであれば、Na-水反応を排除可能なSGとしての期待は大きい。ただし、DBDE とは言え、内・外管同時破断時の気泡（水素等）の炉心通過時の事象評価は必要となると考える。今後、本プラントに搭載される炉心についての詳細な評価を行わなければ、成立性を明言できはしない。

① SG伝熱管破損事象

従来の密着型および組網線挿入型の2重伝熱管とは異なり、Na

側および水・蒸気側伝熱管を独立させることにより内外同時破損の発生確率を大幅に低減させ、同事象を設計上考慮しない（BDBEとする）ようにすることを狙っている。ただし、同時破損モードの確認（共通要因の定量評価および独立要因の排除）が必要と考えられる。

Na側伝熱管（外管）破損では、圧力との関係からPb-Biが1次Na冷却材中へ漏出すると想定されるが、この場合、SG容器高さ対胴径の比が大きいことからPb-Bi液位低下検知による検出可能の見通しが得られている。水・蒸気側伝熱管（内管）破損では、Pb-Bi層中に水・蒸気が噴出し、浮力によってPb-Biカバーガス中へ浮上すると想定されることから、湿分または圧力上昇を検出することで安全性を確保出来る見通しが得られている。

ただし、1次冷却材中へ流入したPb-BiとNaとの3元合金の性状（融点等）が明確になっておらず、流路閉塞対策および核的影響の把握が必須になると考えられる。また、Pb-BiとNaの化合物、Pb-Bi中に残留した（溶け込んだ）水蒸気もしくは酸素の影響による伝熱管腐食の影響も調査・確認しなければならない。

② 崩壊熱除去系

PRACSをSGの基数に合わせ4系統設置。崩壊熱除去に関して実証炉と同程度の信頼性を確保出来る可能性がある。ただし、サイフォンブレイクに関する懸念は残されており、更なる検討が必要と考える。

③ 格納施設

鋼製ライナ（非常用ガス処理系付き）付きコンクリート。水・蒸気ヘッダ、同配管、隔離弁で構成し、C/V内の水・蒸気配管を2重管化することにより配管破断によるC/V内圧上昇を避けられる可能性がある。

④ その他

炉停止系、Na漏えい対策、CDA時の再臨界回避方策などの安全性は1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉と同等の設計とする。

(d) 製作・建設性

原子炉炉容器は径を ϕ 9m台に抑えており、鍛造製作範囲に十分収まることから、製作性に関して大きな課題ないと考えられる。

蒸気発生器はU字管型伝熱管の採用により長尺化するが、特に大きな問題はないと考えられる。SG容器胴径及び重量はAPWRのSG以下の見込みで特別な課題はないと考えられる。伝熱管はU字型なので、製作は直管よりは難しくなるもののヘリカル型よりは容易となる。

機械式ポンプは大容量化するが、1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉（2ループ）よりは小さく、PWRの循環水ポンプの実績から見て大きな課題はないと考えられる。但し、Naポンプとしては実績のない容量であるため、R&Dによる確認が必要。

1次系配管は34Bであり、十分製作可能な範囲である。その他の製作性、検査性、据付性、現地試験性に関しては今後の検討を必要とする。

(e) 運転・保守・補修性

運転の容易性については、詳細が決まっておらず、今後の検討を必要とするが、蒸気発生器の保守補修性に関しては検討が進んでいることから、実現性と課題が明らかになりつつあり、さらなる改善を行うための検討を行っていく必要がある。

① 運転の容易性

原子炉の運転に関しては旭と同等となるが、基本的には2次Na冷却系がない分だけ容易になると考えられる。また、中間媒体Pb-Bi層は強制循環させないので運転性に直接影響を及ぼさない。

② 保守・補修性

SG以外の保守・補修性は、1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉と同等の設計と考えられる。SGの保守・補修性については、以下に述べるとおり。

a. 冷却系機器

SGの水・蒸気側伝熱管についてはインプレースで検査、施栓ができる可能性があり、同施栓の余裕は数十本である可能性がある。Na側管の検査については検査機器の開発が必要であり、補修についてはNa及びPb-Biをドレン後、水・蒸気側伝熱管の拡管によりプラグする。また、検査技術の開発は必要と考えられる。

他の冷却材バウンダリ（原子炉容器、配管、バウンダリベローズなど）での検出性はナトリウム炉と同等。

b. カバーガスバウンダリの検査性はNa炉のSGと同等。

c. 機械式ポンプおよび電磁ポンプの検査性、炉心支持構造物の検査性もNa炉のものと同様。

(v) 炉型特有の開発課題

炉心性能は1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉と同等であり、燃焼度、運転継続期間、増殖比等に関する設計要求を満足出来る見通しが得られている。

構造健全性・製作性に関する開発課題としては、新構造設計基準開発に向

けてのR&D、適用可能な12Cr系鋼の選定・開発（Pb-Biとの適合性も考慮する必要有り）、2次元（水平）免震の十分性の確認、SG伝熱管のPb-Bi間隙部の挙動・接触・摺動磨耗及び温度変動の伝熱管構造健全性への影響評価と対応などが挙げられる。

運転性、保守・補修性に関する開発課題は、Na側管のISI技術、およびPb-Biの取り扱い技術（純度管理を含む）などが挙げられる。

安全性に関しては、SG伝熱管破損事象についての検討継続を要する。開発課題としては、内管（水・蒸気側伝熱管）と外管（Na側管）同時破損排除のロジック構築（BDBE化）、Na-Pb-Biの3元合金の冷却材中での物理特性（融点・流動性等）、化学特性（腐食等）、および核特性影響の把握、炉心気泡通過事象の緩和或いは排除方策の構築などが挙げられる。

表 3.2.2-1 チューブ型 Pb-Bi 熱媒体 SG の基本仕様 (直管型)

No	項 目	基本仕様
1	型 式	チューブ型 Pb-Bi 熱媒体 SG (直管型)
2	交換熱量	950 MWt
3	Na 運転温度	入口 : 550°C、出口 : 395°C
4	Na 流量	1.742×10^7 kg/h
5	Na 側圧力損失	- MPa
6	蒸気温度	497°C
7	蒸気圧力	16.3 MPa
8	給水温度	240°C
9	中間熱媒体	Pb-Bi
10	有効伝熱面積	Na 側 : 9190 m ² 、水 - 蒸気側 : 7340 m ²
11	Na 伝熱管	$\phi 31.8\text{mm} \times t 2.9\text{mm}$
12	水 - 蒸気伝熱管	$\phi 25.4\text{mm} \times t 2.3\text{mm}$
13	伝熱管本数	4819 本
14	伝熱管有効高さ	19.1m
15	SG 胴内径	約 3m
16	SG 全高	30 m 程度

表3.2.2-2 Pb-Bi熱媒体チューブ型SG(U字管型)を用いたプラントの
基本仕様

No.	項目	基本仕様
1	原子炉型式	ナトリウム冷却ループ型炉・Pb-Bi中間媒体SG付き
2	電気出力(発電端)	1500 MWe
3	熱出力	3570 MWt
4	ループ数	4ループ
5	1次系Na温度	550℃/395℃
6	2次系Na温度	—
7	1次系流量	1.64×10 ⁴ t/h/ループ
8	主蒸気温度/圧力	485℃/約15MPa
9	給水温度/流量	233℃/1.46×10 ³ t/h
10	プラント熱効率	約41%
11	プラント稼働率	90%以上
12	炉心・燃料	非均質炉心(回字型炉心)、混合酸化物燃料
13	遮へい体外接円径	炉心槽径:約6300 mm
14	燃焼度	15万MWD/t(取出平均)
15	増殖比	約1.1
16	原子炉停止系	主炉停止系+後備炉停止系(制御棒44本)
17	炉心安全性	SASS設置、軸方向ブランケット一部削除
18	炉心支持方式	下置き方式
19	炉壁保護構造	保護ライナ構造
20	炉心上部機構	コラム型UIS
21	1次系配管方式	上部流出入方式
22	1次主循環ポンプ	機械式ポンプ
23	蒸気発生器	鉛ビスマス中間媒体一体型(U字管型) ・内管(水-蒸気側):φ23mm, t1.4mm ・外管(Na側):φ28.2mm, t1.6mm
24	崩壊熱除去方式	PRACS 4系統
25	Na漏えい対策	容器:ガードベッセル、配管:エンクロージャ
26	原子炉格納施設	鋼製ライナコンクリート格納施設
27	プラント運転サイクル	プラント運転サイクル約16ヶ月、4バッチ方式
28	①燃料減衰待貯蔵	水プール貯蔵(IVSおよびEVSTでの減衰なし)
29	②炉内燃料交換	単回転プラグ+コラム型UIS+パンタグラフ式燃料交換機
30	③炉内/外燃料移送	炉内中継装置+台車式燃料出入機
31	免震	2次元(水平)免震
32	プラント寿命	40年
33	原子炉建屋	原子炉建屋容積約14万m ³

表3.2.2-3 Pb-Bi熱媒体チューブ型SG(U字管)付きプラントの設計要求に対する適合性

分類	設計要求事項 (注1)	見通し及び検討方針
前提条件	-炉心燃料及び冷却材の検討対象	MOX燃料/Na冷却 (Pb-Bi中間熱媒体SG)
	-原子炉出力レベルの選定	1500MWe (1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉と同等)
	-機器・構造設計	
	●設計成立の見通し	不活性中間媒体(Pb-Bi)SGに関して熱過渡解析および構造解析評価を行う必要があるが、現時点において困難と考えられる要因はない。
	●新基準採用の要否、及び新基準に向けての開発課題・解決策	1次系配管およびSG伝熱管に12Cr系鋼を採用することから、12Cr系鋼の材料強度基準の開発が必要。
	-耐震・免震設計	
	●耐震重要度分類	現行基準に対応した重要度分類。
	-設計成立の見通し	
	●国内立地点の平均的地震動及び岩盤条件	1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉と同等の条件とする。
	◎国内立地点の最大地震動条件	同上
	●使用済み燃料貯蔵プール設備：4炉心分	未検討
	-プラント寿命	
	●40年 (リファレンス)	1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉と同等の条件とする。
	◎60年程度の寿命延長追求	同上
経済性	●発電単価：5円/kWh程度 (耐用年数で減価償却)	未検討
	●建設費：20万円/kWe以下	20万円/kWe以下を達成できるポテンシャルを有する。
	◎燃焼度：15万Mwd/t程度	1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉と同等の設計とする。
	◎連続運転期間：12~24ヶ月	約16ヶ月 (4バッチ方式)
	◎適正な炉心出口温度	炉心出口温度550℃
	◎稼働率：90%程度	90%程度確保。
	◎建設工期：50ヶ月以内	46ヶ月以内を目標。
資源の有効利	-増殖比	
	●低増殖から高増殖までの柔軟な対応可能性	1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉と同等の設計とする。
	◎増殖比1.2程度 (高増殖)	同上
	●低除染燃料装荷時の影響検討	同上
	-TRU燃焼	
	●TRU燃料の経済的燃焼可能範囲の明示	同上
	●より多くのMA核種を混入する場合の設計変更点・経済的負担の明示	同上
環境負荷低減	●Pu専焼炉としてのPu燃焼効率の範囲	同上
	●放射性廃棄物発生量低減、管理及び処理・処分へのし易さへの配慮	SG伝熱管の外管外側が1次Na系となることから、必ずしも物量低減には寄与していない。1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉HX伝熱管物量との比較が必要
	●廃止措置のし易さと廃棄物発生量低減への配慮	未検討
	●FPの核変換による放射能低減に関する検討	1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉と同等の設計とする。
	●TRU燃料の経済的燃焼可能範囲の明示	同上
核拡散抵抗性	●より多くのMA核種を混入する場合の設計変更点・経済的負担の明示	同上
	●核物質防護及び保障措置の対応を考慮した燃料取扱設備設計	同上
	●低除染燃料等の適用可能性	同上
	●ブランケットでの純粋Pu生成に対する対策	同上
安全性	●軽水炉、もんじゅの指針、基準等への適合	SG以外に関しては適合を考慮。SGに関しては新基準が必要。
	-実用化時代に要請される安全要求への適合	
	●受動的炉停止能力	1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉と同等の設計とする。
	●自然循環による崩壊熱除去能力 (全交流電源喪)	PRACS：4ループで自然循環除熱可能な容量を設定。
●再臨界回避能力	1次系機器合体・ループ数削減ループ型炉と同等の設計とする。	
運転・保守・補修性	●炉心損傷発生頻度 10^{-6} /ry未満となる見通し	同上
	●軽水炉と同等の運転・保守・補修性とするための考え方	
	●補修区分の検討	万が一の炉心支持板の取り出しが可能としている。
	●アクセスルート・スペースの確保	建屋内の機器アクセススペースを考慮。
	●生体遮蔽の設計	生体遮へい設置スペースを考慮。
●保守作業量の低減、作業員被曝量の低減等	電磁ポンプは静的機器であり、補修頻度は少ない。	

(注1) ●：設計要求事項 (詳細設計終了時点での必須項目) ◎：設計要求事項 (詳細設計終了時点での目標項目)

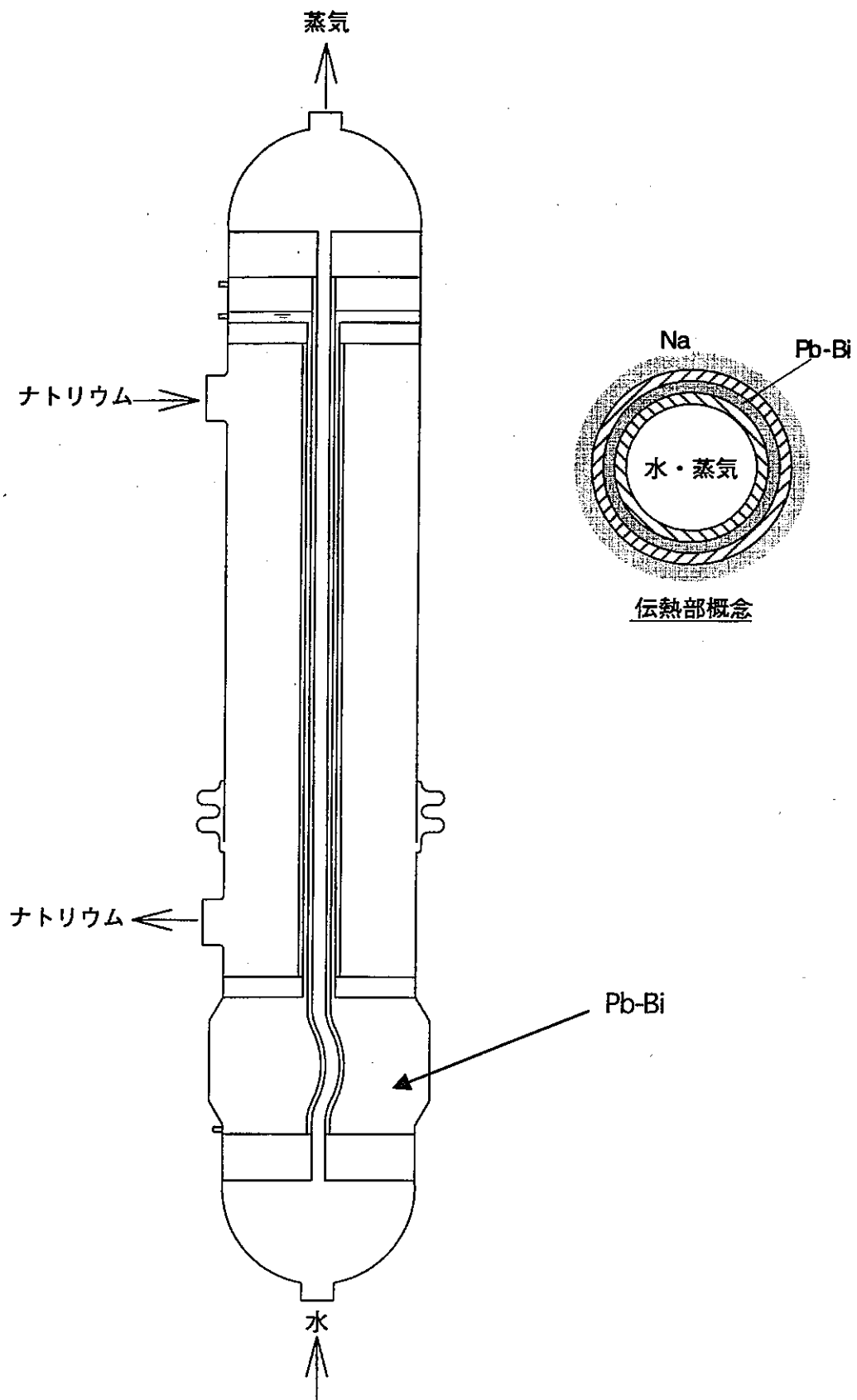


図 3.2.2-1 チューブ型 Pb-Bi 熱媒体 SG 概念図 (直管型)

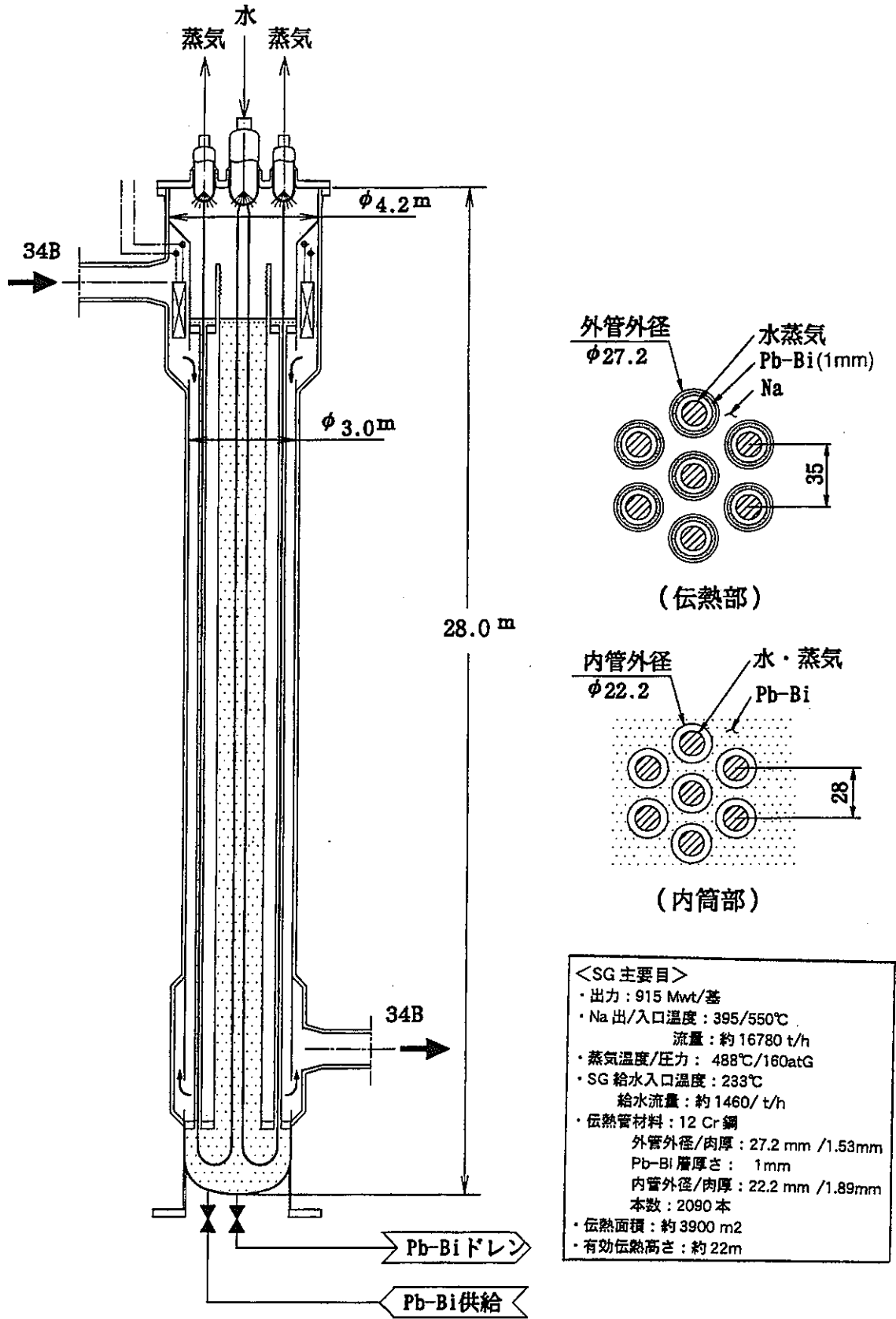


図 3.2.2-2 Pb-Bi熱媒体チューブ型 SG (U字型)

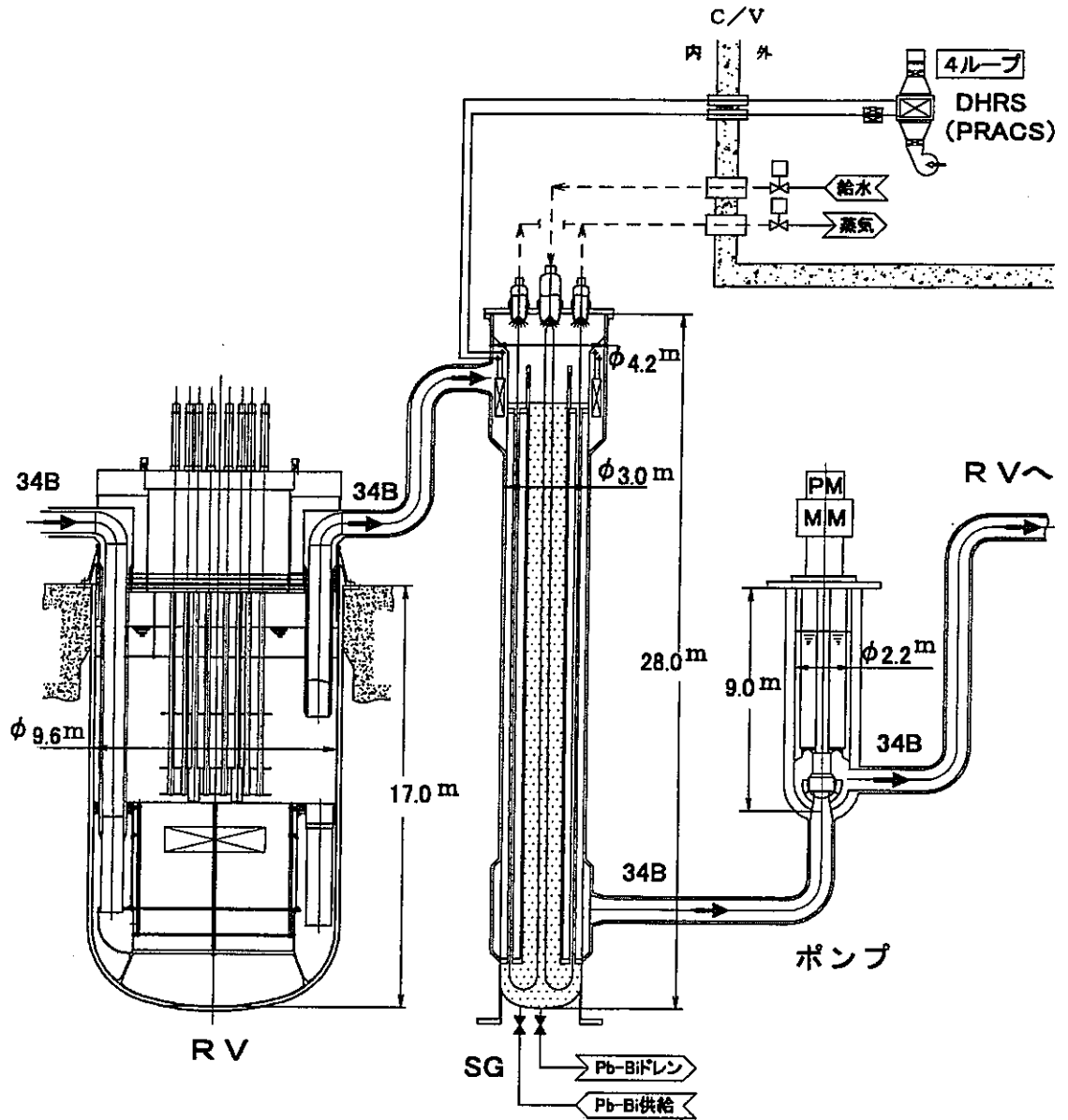


図3.2.2-3 Pb-Bi熱媒体チューブ型SG (U字型) を用いたプラントの概念

3.2.3 固体中間熱媒体 SG 概念

(i) 固体銅熱媒体 SG

基本概念

ナトリウムと水の反応の可能性を排除し、安全性の向上を目指した概念の一つとして、2次ナトリウムに代わる中間熱媒体として熱伝導率の高い固体銅を使用する概念がある。この概念は Na 側伝熱管と水蒸気側伝熱管を並列で近接配置し、これらの伝熱管の間に固体銅を充填し伝熱管と密着させたものである。Na と水蒸気の間には Na 側伝熱管壁、銅、水蒸気側伝熱管壁の3重の障壁があり、Na・水反応を排除できる安全性の高い概念である。HIP (Hot Isostatic Pressure technique) により Na・水蒸気側伝熱管の間に砂状又は機械加工した銅を高温高圧下で固体化し伝熱管に密着させる方法で製造する。本概念は、伝熱管と銅との接触熱抵抗を低減させる SG 概念であり、銅の熱伝導の良さによる伝熱特性の良さと IHX と SG を一体とすることから、2次系有りの概念よりも物量を削減できる可能性がある。

Na と水蒸気の伝熱管型式概念としては、直管型、サーペントイン型 (以下、S 字型という)、ヘリカルコイル型があり、Na 側及び水蒸気側についてそれぞれ伝熱流動特性を考慮した適切な伝熱管型式の組合せがある。熱輸送性、伝熱特性、幾何学的配置性及び製作性の観点から、現時点では水蒸気側を S 字型とし、Na 側を直管型とし、Na 側・水蒸気側の伝熱管をそれぞれ平面状に配置したパネルを交互に重ね合わせた概念が有力である。その伝熱部構造概念 (Na 側と水蒸気側それぞれの1パネル分の伝熱管配置概念) のイメージを図 3.2.3(i)-1 に示す。Na 側の直管型伝熱管をパネル状にしたもの及び水蒸気側の S 字型伝熱管をパネル状にしたものを交互に重ねる (同図では Na 側と水蒸気側のそれぞれ伝熱管1パネルのイメージを示したもの) ことによって、所定の交換熱量を有する IHX・SG 一体型の熱交換器 (固体熱媒体 SG) とする。

基本仕様

本概念は、H11 年度の実用化戦略調査研究で新規に検討を開始した概念であり、ここで提案する概念も暫定的なものである。そこで、今後の検討に資する目的で、熱交換器概念の説明だけでなく、検討内容も併せてここに記す。

背景

固体銅と伝熱管を HIP により密着させ熱交換する機器の概念は、英国 NNC 社が検討した FBR 概念である Simplified Fast Reactor System (SFR) の蒸気発生器として提案された概念である。SFR の特徴は以下のとおり。

- ・ 固体銅熱媒体 SG による 2 次系削除ループ型炉 (→ SG 建屋の削除)
- ・ 比較的低温のシステム (400℃以下) とし、飽和蒸気サイクルとする。
- ・ 機器は独立区画に収められ、窒素雰囲気とする。
- ・ 燃料交換と ISI のために炉上部を開放できる構造とする。

SFR で検討された固体銅熱媒体 SG は上記のとおり、400℃以下の LMFBR としては比較的低温の条件で検討された概念である。

検討目的

本検討では、経済性を追求した大型炉へ適用した固体銅熱媒体 SG の概念を検討し、経済性

の見通しを得るとともに、課題を抽出する。検討の条件としては、以下の通りとした。

- ・炉心熱出力 3800MW で2ないし3ループの冷却系（大型炉でループ数削減）
- ・原子炉出入口温度 395/550℃（高温高効率の追求）
- ・給水温度 240℃
- ・蒸気条件 497℃/175kg/cm²G（高効率タービンの採用）
- ・Na 側圧力損失 0.15 又は 2bar（IHX と S G の Na 側圧力損失から暫定）

材料の選定

Na 側伝熱管材料としては、IHX の伝熱管として実績があり、かつボンド材である銅と熱膨張係数が近い 316 ステンレス鋼とした。水・蒸気系伝熱管材料としては、スーパーフェニックス炉の S G 伝熱管材として実績があり、かつボンド材である銅と熱膨張係数が近い Incoloy 800 (46%Fe, 33%Ni, 21%Cr)とした。

ボンド材には、熱伝導性能が純銅と同等に良好で、高温強度が純銅より優れ、かつ HIP プロセスに適用可能な材料である酸化物 (Al₂O₃) 分散強化型の銅 (ODS-Cu) とした。ODS-Cu の物性としては、ASME VIII で入手可能な UNS-C11000 のものを用いた。

ただし、銅とステンレス、及び銅と Incoloy 800 合金の組合せで HIP プロセスによる結合を行った場合、予備的な解析で 525℃で 30 万時間以上の条件で、Fe 原子と Cr 原子の銅中への顕著な拡散が発生し、伝熱管の脆化が生じることが分かった。実験等により効果を確認する必要があるが、Fe と Cr の Cu 中への拡散を防止するために中間に純 Ni 層を設けるアイデアもある。伝熱管の寿命評価と原子拡散防止対策については今後の課題である。

熱交換器仕様の選定

検討の対象とした伝熱管構成は以下の 4 ケースとした。

- ①Na 伝熱管、水・蒸気伝熱管とも直管型のケース (Straight tube design)
- ②Na 伝熱管、水・蒸気伝熱管ともサペンティン型のケース (Serpentine tube design)
- ③Na 伝熱管は直管、水・蒸気伝熱管はサペンティン又はコイル型の組合せケース
(Combined straight and serpentine/coiled tubes)
- ④組合せケースで現状最大の HIP 加工設備 (L=3.3m) に対応させたケース
(Combined straight and serpentine/coiled tubes that fit in current HIPing facilities)

伝熱管構成の概念図を図 3.2.3(i)-1 に示す。また、直管とコイル管の組合せの場合の S G モジュール構成を図 3.2.3(i)-2 に示す。

それぞれのケースに対して、Na 側の圧力損失を以下の 2 ケース想定した。

- ・ 0.15bar：代表的なタンク型 LMFBR の IHX の 1 次側圧力損失
- ・ 2bar：代表的な S G の Na 側圧力損失

また、3800MWt の出力に対して、ループ構成を 2 及び 3 ループとした場合について検討した。以上の合計 16 ケースに対して、NNC 社所有の SG 熱流動解析コード ESTLEN を用いて解析を行い、伝熱管の仕様を選定した。選定の考え方は以下の通りである。また、仕様設定の結果を表 3.2.3(i)-1 に纏める。

(7) 水・蒸気伝熱管

ISI 性を確保すること及び伝熱管閉塞防止の観点から、経験的に内径 12mm が必要とされる。

また、9Cr1Mo 鋼の腐食等の経験から肉厚は 2.2mm を暫定した。2 相流の安定性の条件から、管長は 32m とした。

(i) Na 伝熱管

Na 伝熱管の管長は、①及び②のケースでは管長を水・蒸気系と同寸とし、ケース③では熱伝達バランスを解析し、物量の上で適切な Na 管本数として水・蒸気伝熱管の 1.3 倍とし、その結果ケース③の Na 伝熱管は 12.2m となった。ケース④では HIP 設備の最大長(3.3m)を考慮して 3.2m とした。それぞれの管長で、圧力損失条件を満足する管径と管本数を求めた。

(ii) 水・蒸気伝熱管と Na 伝熱管の距離

可能な限り接近させ、銅のインベントリを減少させるため、暫定で 3mm とした。この値については、銅層のバリ効果を実験的に検証した後に、更に減少させることが可能であると考えられる。

(iii) Cost Factor

表 3.2.3(i)-1 中に記載してある Cost Factor は伝熱管物量のみでの比であり、製作工数は考慮されていない。

表 3.2.3(i)-1 より、ケース①及び②では Na 側の伝熱管が圧力損失 2bar のとき $\phi 38.8$ 、0.15bar の場合では $\phi 76.5\text{mm}$ で、極端に太径化するため、熱交換器の外径が大きくなる可能性が高い。また、ケース④の HIP 加工設備を考慮したケースでは、Na 伝熱管本数が多すぎるため、本概念を実現するためには、現状の HIP 加工設備を大きく上回る長尺物に対応した HIP 加工設備を新設する必要があることが分かった。

これらの結果から、ケース③が熱交換器としてバランスのとれた構成であることが分かった。

構造概念の検討

前項で検討したケース③の伝熱管仕様をもつ熱交換器概念を具体化した。典型的な熱交換器概念を図 3.2.3(i)-3 に示す。構造概念検討の際に考慮した事項は以下の通りである。

- ・ HIP で形成した伝熱管モジュールをサポート構造で結合する。
- ・ 伝熱管とヘッダは溶接で接合する。
- ・ 銅ボンド材がバウンダリ機能も持つため、ベッセルは設けない。
- ・ 銅ボンド材から外の伝熱管における漏洩を考慮し、下部にトレイ構造を設ける。

本概念の構造上の課題を検討した結果、以下の事項が抽出された。

- ・ 銅ボンド材より外の伝熱管からの Na 漏洩では、伝熱管径が小さく漏洩量は少ないこと、窒素雰囲気中での漏洩であり火災の可能性はないこと、から漏洩事象拡大の可能性は小さいが、その挙動については確認の必要がある。その結果によってはベッセルの設置が必要となる可能性もある。
- ・ 銅ボンド材より外の伝熱管からの水・蒸気漏洩では、Na 管の近傍での漏洩となるため、挙動を確認する必要がある。その結果によっては、Na 伝熱管の隔離性の高い引き回しが必要となる可能性もある。

構造解析

前項で設定した概念について、その構造健全性を予備的に評価するために、2次元の構造解析を実施した。解析対象としたのは、一組の Na 伝熱管、水・蒸気伝熱管、及び銅ボンド材で、

一定温度及び温度分布が生じた場合の解析を実施した。

(7) 一定温度場の応力解析

Na 伝熱管は 316 ステンレス鋼、水・蒸気伝熱管は Incoloy 800、ボンド材は ODS-Cu であり、熱膨張率は近いものを選定してはいるものの、異なる。熱膨張率差の影響で生じる応力を求めるための解析を実施した。

各温度における 3 種の部材に生じる最大応力を、各温度での材料の許容応力 ($3 \cdot S_m$) と比較した結果、約 470℃でボンド材の銅で許容応力を上回る応力が発生することがわかった。これは、解析結果の分析より、水・蒸気伝熱管と銅の熱膨張率差が大きいことが原因とわかった。

そこで、水・蒸気伝熱管の高温部分を熱膨張率が銅により近い、316 ステンレス鋼に変更した場合を想定し、解析を試みた。316 ステンレス鋼は Incoloy 800 と比較して耐食性が劣るものの、水・蒸気伝熱管の Dry 部分（スーパヒート部分）に使用することは問題ないと考えられる。このケースでは、銅の許容応力を超える温度が 530℃まで上昇したものの、設計目標である 550℃には達しない。

高温化の可能性を探るために、高温部分の銅ボンド材を 316 ステンレス材に変更した場合を想定し、解析を試みた。316 ステンレス材は銅に比較して熱伝導率が劣り、伝熱面積の増大が予想されるが、スーパヒート領域での熱伝達量は沸騰領域以下に比較して少ないため、許容できないほど大きな伝熱面積の増大につながらないと予想する。解析結果から、銅の許容応力に達する温度が約 550℃まで改善された。

(4) 許容温度差の解析

前項と同様の解析手法を用いて、温度分布を与えた場合の応力解析を実施し、各部材における、Na 伝熱管内面と水・蒸気伝熱管内面の温度差の許容値を算出した。解析ケースは(7)項で実施した、設計基準ケース、高温部水・蒸気伝熱管を 316 ステンレス鋼にしたケース、高温部水・蒸気伝熱管とボンド材をともに 316 ステンレス鋼にしたケース、の 3 ケースである。

解析結果より、いずれのケースにおいても、許容温度差が最も小さいのは銅ボンド材の部位であることがわかる。また、高温部水・蒸気伝熱管とボンド材をともに 316 ステンレス鋼にしたケースにおいても、550℃近傍では温度差がほとんど許容されないことになり、高温部分でほとんど設計余裕が無いことが明らかとなった。

これらの解析結果から、以下の知見が得られた。

- ・基準構造とした均一材料によるボンド材の場合は、高温強度で純銅を上回る ODS-Cu 材をボンド材にした場合でも、許容応力が低下するため、550℃の原子炉出口温度は構造設計上成立しない。ボンド材の構造を成立させるためには、高温部分のボンド材に強度の高い材料を使うなどの工夫が必要である。
- ・伝熱管及びボンド材部分の温度分布も構造健全性に影響を与える。
- ・伝熱部の構造を詳細化するためには、3 次元的な温度分布も考慮した、詳細な解析評価が必要である。

製造方法の検討

本熱交換器概念は HIP (Hot Isostatic Pressure technique) による製作を想定して検討されている。HIP には次に示す 4 つの方法がある。

- ・ Powder HIP (表 3.2.3(i)-2 に本概念を製作する場合の手順を示す。)
- ・ Solid HIP (表 3.2.3(i)-3 に本概念を製作する場合の手順を示す。)
- ・ Cast and HIP
- ・ Machine and HIP

これら 4 つの HIP について、メリット・デメリットを比較して表 3.2.3(i)-4 に示す。この比較検討により、Solid HIP が製作精度が高いこと、伝熱管へのインパクトが少ないこと、から本概念を製作するには最も適した方法であると考えられる。

製造設備については、世界に存在する HIP 加工設備をサーベイしたところ、スウェーデンにある HIP 設備が最も大きく、 $\phi 1.3 \times 3.2\text{m}$ であることがわかった。本概念では SG モジュールは 10 12m の長さを持つことから、HIP 設備については新設が必要である。HIP については、現在発展中の加工方法であり、近未来的には長尺物を加工可能な設備もできる可能性はある。

物量評価

本概念で最も適切な概念であると判断した、直管型 Na 伝熱管、コイル型水・蒸気伝熱管タイプの物量を表 3.2.3(i)-5 に示す。表中に示す、銅及び Incoloy 800 の 316 ステンレス鋼換算の物量に関しては、NNC 社が評価したものである。

設計要求に対する適合性

本概念の検討は NNC において概念を検討している途上であり、未だプラント概念として纏まったものではない。そのため、設計要求に対する適合性を評価できる段階にない。

中間評価結果

検討の現状は熱交換部の構造概念とその伝熱面積のみの結果が出てきている段階であり、以下に検討の途中結果を示す。

① 経済性

- ・ 原子炉及び冷却系の物量

最も物量が少なくなる、Na 側圧損 2bar、交換熱量 1900MWt の条件で熱媒体である銅の重量を含めても、ユニット当たりの物量は 812t である。

- ・ 建屋容積、固体廃棄物貯蔵庫、所内負荷率、建設工期
未検討である。
- ・ プラント稼働率、プラント建設費
未検討である。

② 構造健全性

- ・ 構造設計の特徴

Na 側伝熱管と水側伝熱管を並行に配置し、両伝熱管の間を固体銅で埋めた IHX・SG 一体化概念の SG 構造であり、Na と水との間に 2 つの伝熱管壁と固体銅の合計 3 つの障壁を有する Na-水反応を排除した概念である。

熱伝達性が良いが熱輸送性が劣る Na 側伝熱管は口径の大きい直管型とし、水蒸気側は S

字型で口径が小さく長い伝熱管とした。それぞれの銅と一体化した伝熱管をパネル状に配置したものを交互に積み上げて、所定の交換熱量を確保する SG 概念である。

なお、管板への伝熱管の引き回し配置や管板・容器胴の設計は未検討である。

・主要機器の構造健全性

構造健全性については、伝熱部における伝熱管と銅との熱膨張差による発生熱応力については当たり計算を実施し、概念の成立性の見通しはあるとしている。しかし、管板概念や管板への伝熱管引き回し概念は未検討であるため、概念を決めた上で伝熱部と管板部までの伝熱管引き回し部の伝熱管健全性や管板健全性について確認する必要がある。

また、プラント起動停止の繰り返しによる熱膨張収縮の繰り返しにより、熱膨張率の異なる固体銅と伝熱管についてはその密着部に隙間が発生するなどの経年変化による伝熱性能の低下の有無を確認する必要がある。

③ 安全性

・安全設計の特徴

熱交換部において Na-水反応を防ぐ 3 重の障壁を有する SG 概念である。しかし、熱交換部以外の設計は未検討であるため、この熱交換部以外でも 3 重障壁に相当する安全性を有する SG 構造概念とする設計検討が必要である。

なお、SG 容器の内側及び外での Na 漏えい時の対策を考慮した概念設計は未検討である。

・Na-水反応に対する安全性

4 章総合評価で詳細に検討する

④ 製作建設性

・製作性

伝熱部については基本的に製造可能であるが、SG 全体構造としての製作性、検査性は未検討である。

据付性については本概念の SG 1 基あたり約 800ton 程度であり、1000ton クレーンで対応できそうである。

現地試験性については未検討である。

⑤ 運転保守性

・運転の容易性

未検討であるが 2 次 Na 系統が無いので、運転性は向上すると考えられる。

・ISI

未検討である。

・漏洩検出性等

漏えい検出、漏えい位置の同定と補修性については、未検討である。なお、伝熱管は外表面が銅に密着しているため、伝熱管破損時のリーク現象がどうなるかを把握したうえで漏洩検出性の検討をする必要がある。

固体銅熱媒体 SG 特有の開発課題

検討中であるが、以下に本 SG 概念特有と考えられる開発課題を箇条書きにて示す。

- ・固体銅熱媒体の Na 側直管・水蒸気側 S 字管の組合せ構造における伝熱特性の把握
- ・Na 側直管・水蒸気側 S 字管の伝熱管の口径の組合せと伝熱管引き回し形状の最適化 (Na・水

蒸気側の伝熱管組合せ配置概念の最適化)

- ・伝熱管端部の引き回し部の伝熱性に与える影響把握とこれを含む熱交換器設計手法の確立
- ・熱過渡時の SG 伝熱部及び管板の構造健全性見直し確認
- ・事故時の本 SG 概念の熱過渡・除熱性への影響把握（銅の熱容量の影響など）
- ・水蒸気側 S 字型の Incoloy800 材伝熱管のエロージョン無しの確認
- ・固体銅熱媒体の最小必要厚さ設定ロジックの明確化
- ・固体銅と伝熱管の密着性と伝熱性能の経年変化の把握
- ・下記項目を考慮した粉体銅の HIP による固体銅への成形と製作方法の確立
 - 中空伝熱管への HIP 適用影響の把握（材料への熱と非等方の圧力の影響）
 - 上下の管板への伝熱管引き回し構造部の明確化と複雑構造への HIP 適用による製作性の確認
 - HIP による粉体銅の固体化作業での複雑伝熱管形状適用時の固体銅内空孔発生の回避及び伝熱管への密着性確保の確立
 - 伝熱管と固体銅の密着性及び固体銅内空孔の確認手法の確立
- ・複雑・大構造物の製作性の検討と製作試験による製作性確認（製造限界の明確化を含む）
- ・水蒸気側リーク時の現象とその影響の把握及びリーク検出に対するロジックの作成
- ・Na 側リーク時の現象とその影響の把握及びリーク検出に対するロジックの作成（Na-水反応の排除ロジックの確立を含む）
- ・リーク伝熱管同定手法の確立
- ・大重量構造物の健全性（支持構造など）

表 3.2.3(i)-1 Summary of some possible copper bonded SG designs that satisfy the required plant conditions

Parameter	①Straight tube design		②Serpentine tube design		③Combined straight and serpentine/coiled tubes		④Combined straight and serpentine/coiled tubes that fit in current HIPing facilities	
	2 units	3 units	2 units	3 units	2 units	3 units	2 units	3 units
0.15 bar design	2 units	3 units	2 units	3 units	2 units	3 units	2 units	3 units
Na tube outside dia (mm)	76.5	76.5	76.5	76.5	36.2	36.2	15.4	15.4
No. of Na tubes per unit	1171	781	1171	781	6058	4039	50206	33471
Length of Na tubes (m)	32	32	32	32	12.2	12.2	3.2	3.2
Steam tube outside dia (mm)	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4
No. of steam tubes per unit	4799	3199	4799	3199	4660	3107	4750	3167
Length of steam tubes (m)	32	32	32	32	32	32	32	32
Tube bundle length (m)	32	32	20	20	12.2	12.2	3.2	3.2
Tube bundle CSA (m ²)	9.3	6.3	21.5	14.7	13.9	9.3	34.8	23.2
Cost factor	1.0	1.0	1.0	1.0	0.74	0.74	0.61	0.61
2.0 bar design	2 units	3 units	2 units	3 units	2 units	3 units	2 units	3 units
Na tube outside dia (mm)	38.8	38.8	38.8	38.8	27.8	27.8	10.0	10.0
No. of Na tubes per unit	2096	1397	2096	1397	4535	3023	74013	49342
Length of Na tubes (m)	32	32	32	32	20.2	20.2	3.2	3.2
Steam tube outside dia (mm)	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4
No. of steam tubes per unit	4516	3011	4516	3011	4535	3023	4977	3318
Length of steam tubes (m)	32	32	32	32	32	32	32	32
Tube bundle length (m)	32	32	20	20	20.2	20.2	3.2	3.2
Tube bundle CSA (m ²)	5.4	3.6	10.02	8.02	7.0	4.7	31.3	20.9

表 3.2.3(i)-2 Process steps for manufacture by powder HIP

Step number	Simplified process steps for manufacture by powder HIP
1	Copper powder production and certification of powder
2	Fabrication of internal tube arrangement by conventional techniques. The positioning of the tubes can be maintained by the use of copper spacers that will form part of the 'parent' body after HIPing
3	Inspection and helium leak test of internal tube arrangement
4	Fabrication of can
5	Insert tube arrangement into can, seal around tubes protruding from the can and leak test (the tube bores are exposed to the HIP pressures to prevent collapse)
6	Powder filling, evacuation and final sealing of can
7	HIP cycle
8	Heat treatment as required
9	Pickle off can (if necessary)
10	Machine outer dimensions as necessary
11	Visual and ultrasonic inspection etc.
12	Mechanical testing as required
13	Pressure, flow and leak testing
14	Connection of tubes to SG tubeplates
15	Final test and inspection of completed SG unit

表 3.2.3(i)-3 Process steps for manufacture by solid HIP

Step number	Simplified process steps for manufacture by solid HIP.
1	Forming of copper plates and milling of grooves for sodium tubes and steam/water tube
2	Lay sodium tubes into the grooves on the copper plates and clamp together sub-assemblies of copper plates and sodium tubes (with the ends of the tubes protruding)
3	Wrap the steam/water tube around the subassembly produced in step 2 into pre-formed grooves on the external profile
4	Clamp on additional pre-machined copper plates to form a module
5	Seal around the joints in the external profile by welding/brazing leaving a connection to draw a vacuum (the tube bores are exposed to HIP pressure to prevent collapse)
6	Evacuate and final seal
7	HIP cycle of module
8	Heat treatment as required
9	Visual and ultrasonic inspection etc.
10	Mechanical testing as required
11	Pressure, flow and leak testing
12	Joining together of pre-tested and inspected modules to form SG unit
13	Connection of tubes to tube plates
14	Final test and inspection of complete SG unit

表 3.2.3(i)-4 Comparison of the alternative manufacturing methods

Method	Advantages	Disadvantages
Powder HIP	<ul style="list-style-type: none"> • Flexible to accept different internal tube arrangements • No machining required except final finished form machining • Little material wastage 	<ul style="list-style-type: none"> • Shrinkage during densification of powder makes it more difficult to control dimensional tolerances • Requirement for canning of powder • Difficult to guarantee uniform packing density of powder on large components with an intricate internal structure
Solid HIP	<ul style="list-style-type: none"> • Easier to control dimensional tolerances • No canning required (sealing of joints only) 	<ul style="list-style-type: none"> • Extensive machining • Less flexibility with tube arrangements
Cast and HIP	<ul style="list-style-type: none"> • Flexible to accept different internal tube arrangements • No machining required except final finished form machining • Little material wastage • Less shrinkage than with powder 	<ul style="list-style-type: none"> • Non-copper struts or spacers required to maintain tube positioning during casting • Impact of casting on tube integrity uncertain
Machine and HIP		<ul style="list-style-type: none"> • Only suitable for straight tube SG

表 3.2.3(i)-5 Summary of copper bonded SGU design masses and relative costs

Number of units	Sodium side pressure drop (bar)	Mass of copper per unit (Tonne)	Mass of Inconel 800 per unit (Tonne)	Mass of 316 SS per unit (Tonne)	316 SS cost equivalent mass of copper (Tonne)	316 SS cost equivalent mass of Inconel 800 (Tonne)	Total 316 SS cost equivalent mass per unit (Tonne)
2 Loops	0.15	610	129	154	1018	215	1387
	2.0	543	126	143	907	210	1260
3 Loops	0.15	407	86	102	680	144	926
	2.0	362	84	95	605	140	840
Total 3800 MWth (2 Loops)	0.15	1220	258	307	2037	430	2774
	2.0	1085	251	287	1812	419	2518
Total mass for 3800 MWth (Tonne) (2 Loops)	0.15	1785		Total 316 SS cost equivalent mass for 3800 MWth (Tonne)		2774	
	2.0	1623				2518	

3.2.3(i)-1 Alternative tube layouts for copper bonded steam generator

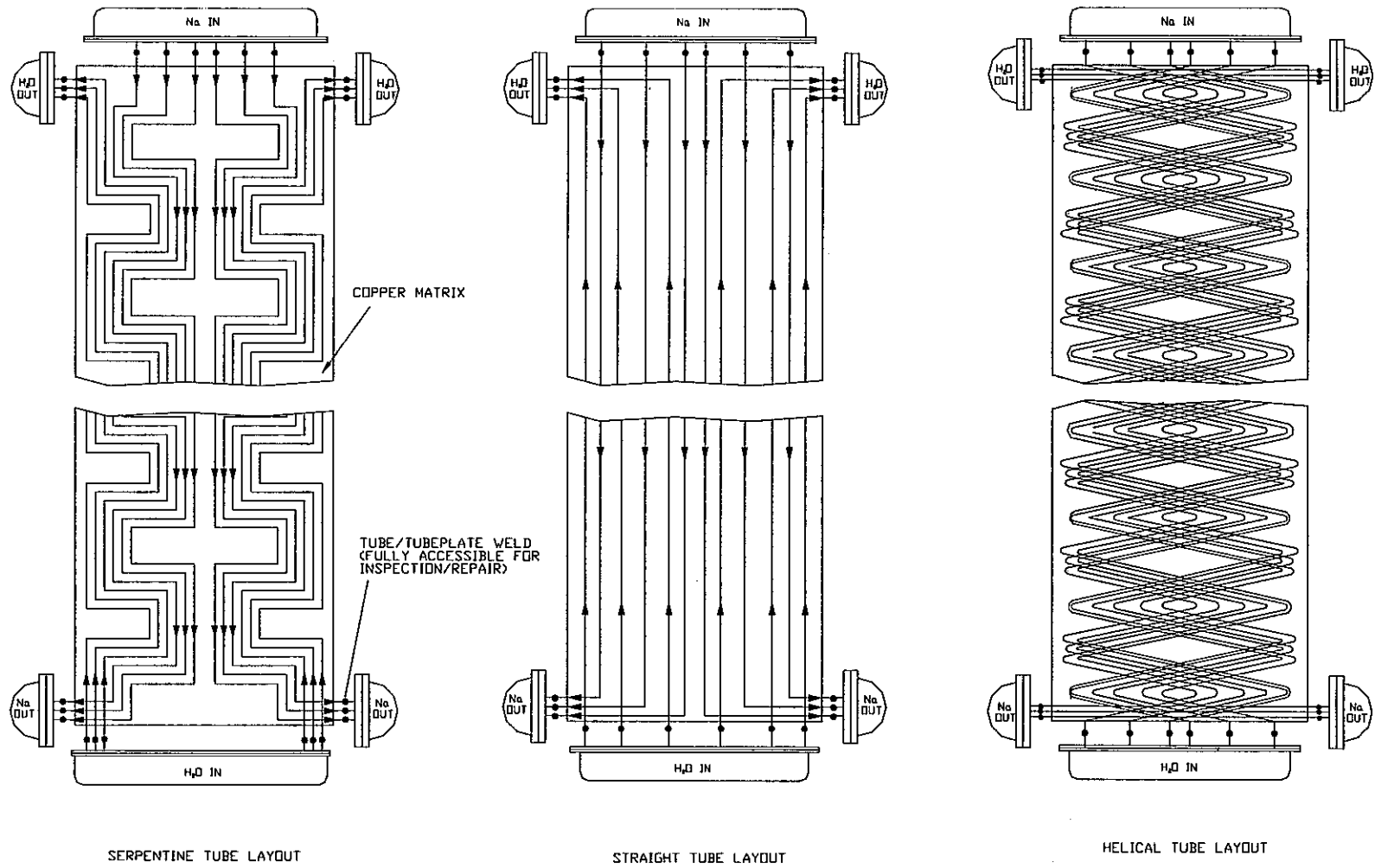


图 3.2.3(i)-2 Design incorporating a combination of straight sodium tubes and coiled steam tubes

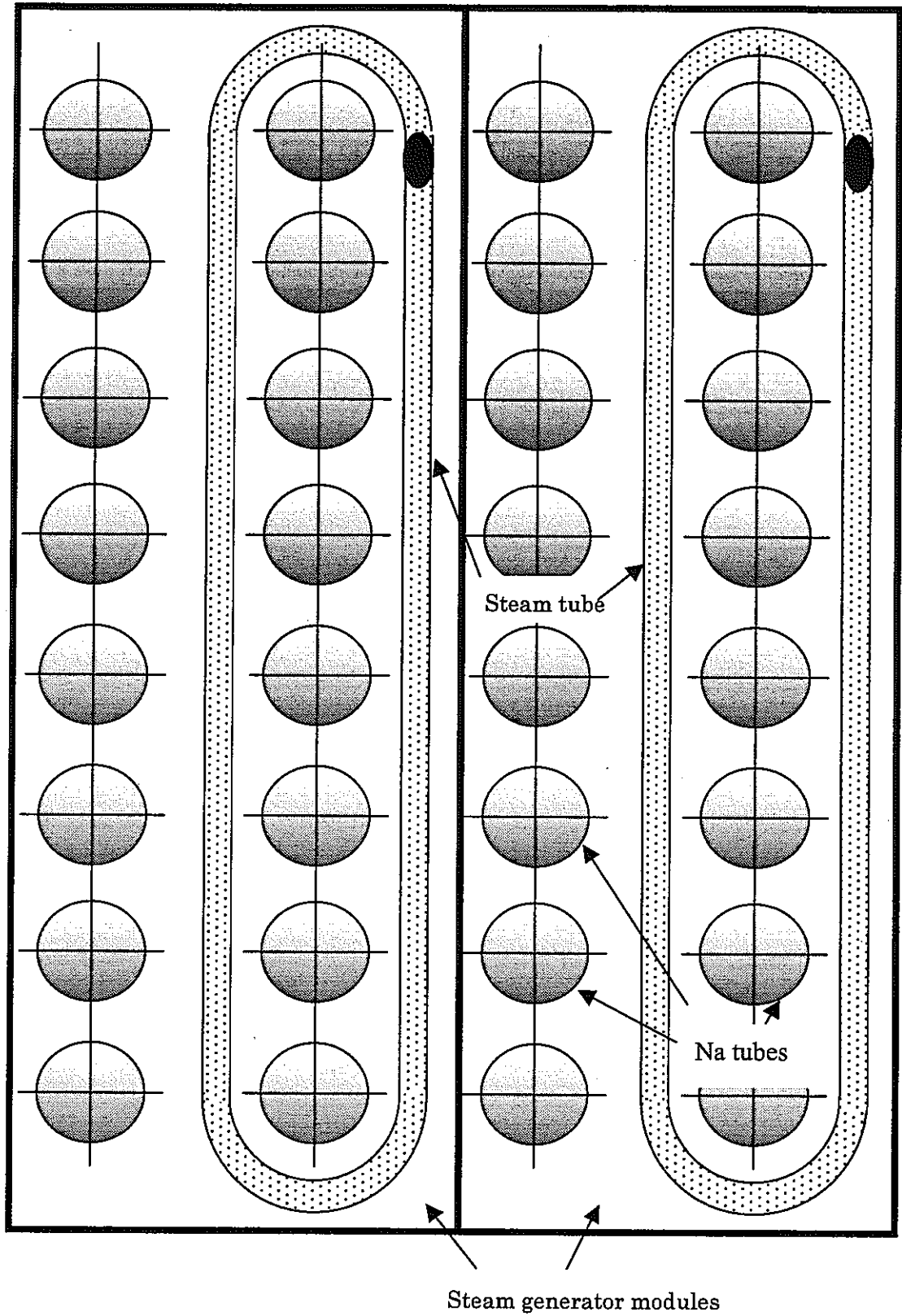
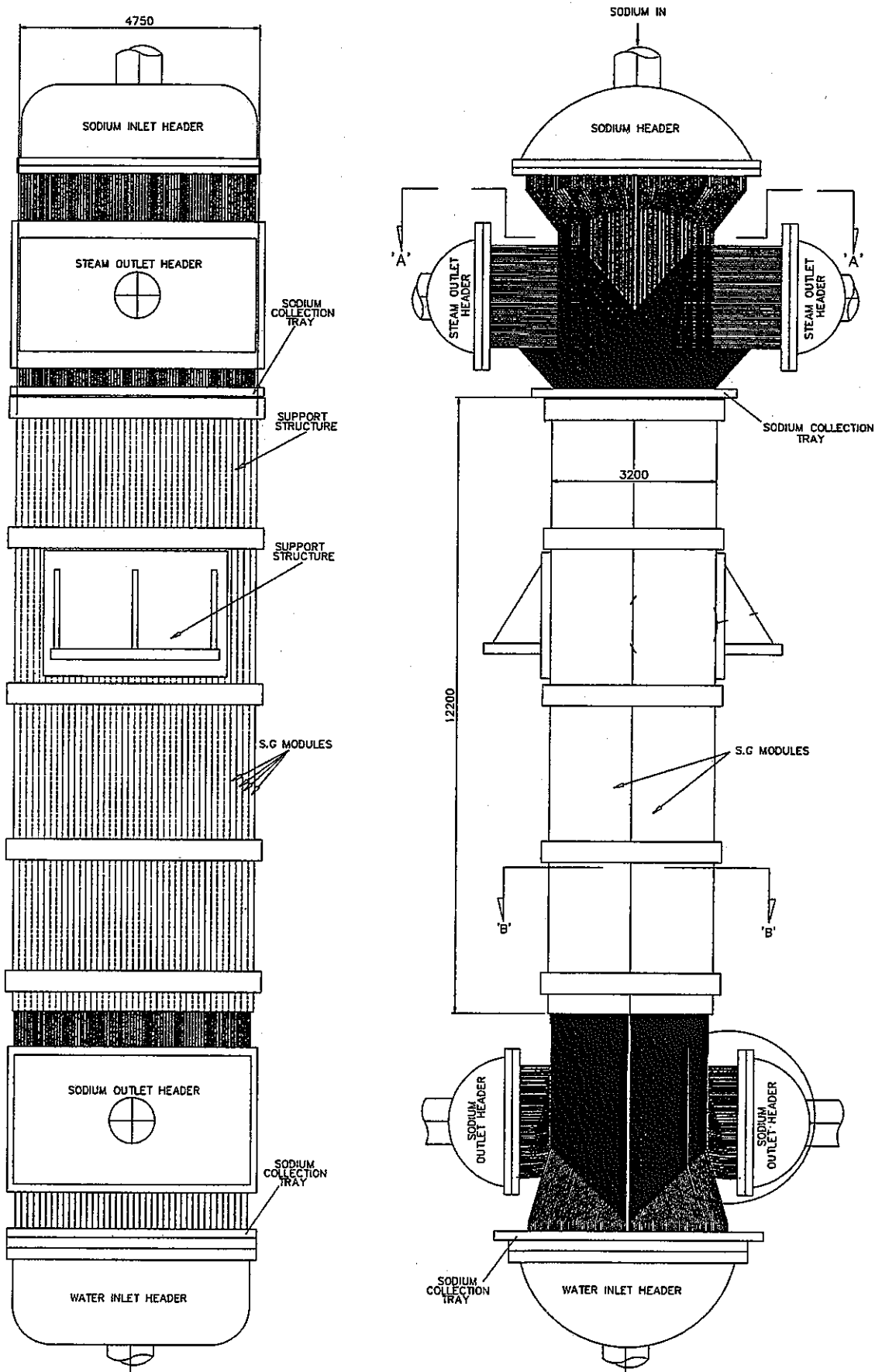


图 3.2.3(i)-3 Typical Conceptual Design of Copper Bond SG Unit



(ii) 銅熱媒体 S G (Pb-Bi ボンド)

(1) 基本概念

本概念は、(i)項で検討した概念同様に、Na 伝熱管と水・蒸気伝熱管の間に固体の銅を配置し、銅内の熱伝導により Na から水に熱伝達を行う概念である。本概念では、固体銅熱媒体と伝熱管の間にギャップを設け、熱膨張差による応力の発生等機械的な影響を無くすることと、ギャップによる熱伝達効率低下を減少させるために、ギャップ内に Pb-Bi 等のボンド材を満たすことが特徴である。

伝熱部の断面図を図 3.2.3(ii)-1 に、熱交換器の配置を図 3.2.3(ii)-2 に示す。伝熱部の構造は、Na 伝熱管と水・蒸気伝熱管がそれぞれ平面内にサーペンタイン型に配置され、交互に並ぶ。交互に並ぶ各伝熱管層の間には伝熱管部にグループが施された板状の銅が配置される。伝熱管と銅ブロックのグループの間には約 1mm (暫定値) のギャップが存在し、伝熱管及び銅の熱膨張差を吸収する。

この機器構造により、以下の機能を実現することが本概念のコンセプトである。

- ・熱媒体である固体銅の良好な熱伝導性を利用して、熱伝達効率の高い S G とする。
- ・Na 伝熱管と水伝熱管の間に固体銅ブロックを配置することで、Na と水・蒸気伝熱管が同時に破損した場合でも、銅ブロックが Na と水の接触に対するバリアとして機能し、Na-水反応を防止する。
- ・固体銅ブロックと伝熱管の間にギャップを設けることによって、伝熱管の熱膨張をフリーとする。これにより、伝熱管と銅ブロックの間の熱膨張差に起因し、高温強度が相対的に低い銅ブロックに過度の応力が発生することを防止する。結果として、運転温度の高温化を可能とする。

(2) 検討状況

本概念はアイデアの段階であり、概念構築のための具体的な設計研究は実施していない。今年度の検討としては、技術的な可能性を探索し、設計研究を実施して概念構築する価値があるか否かについて調査する。

(3) 設計要求に対する適合性

本概念は、未だプラント概念として纏まったものではない。そのため、設計要求に対する適合性を評価できる段階にない。

(4) 中間評価結果

詳細構造等については未検討である。また、本概念は組網線式 2 重管 S G を基に、Na-水反応生成物の炉心流入を緩和・抑制する分離機構を付加した概念である。ここでは検討に先だて、(i)項の S G 概念と比較して、性能及び経済性の傾向について

て荒く評価し、ポテンシャルを評価することとする。

①機器概念の比較

本概念は(i)項の概念と比較して、以下のメリットとデメリットを持つと評価できる。

メリット：

- ・(i)の概念では、固体銅層に発生する応力が470℃で許容応力に達し、それ以上の高温化のためには、高温部の材料変更等の設計対応が必要である。それに対して本概念では、伝熱管と銅ブロックが非接触であるため、熱膨張差に起因する応力発生は無く、高温化が容易である。
- ・Na大型タンク型炉(COSMIC)概念と比較すると、2次主冷却系の伝熱面積(IHX伝熱面積とSG伝熱面積)より伝面は少ない。
- ・機械加工だけで製作するため、工程が単純で容易である。(HIPプロセスが無い)

デメリット：

- ・伝熱管形状が組立性に依存するため、平板状となる。そのため、熱伝達効率の良い形状(例えば、Na側：直管、水・蒸気側：ヘリカルコイル)が取れない。
- ・ボンド材を介した熱伝達となるため、熱伝達効率が若干下がる。
- ・上記2点の理由から機器が大型化し、重量の観点で大容量化が困難となる可能性がある。
- ・ボンド材(Pb-Biを想定)に対応した腐食防止装置等が必要となる。
- ・ボンド材を保持するための外胴が必要となる。

②経済性の比較

前項の検討を踏まえて、(i)の概念と経済性について比較検討すると、以下のとおり概略評価できる。

- ・物量は増大し建設コストの面では劣ると推定できる。
- ・機器重量が大きくなり、輸送・据付性の観点から機器容量が制限され、大型炉への適用が困難となる可能性がある。
- ・運転温度の高温化は容易で、プラント熱効率は高いと推定できる。
- ・ボンド材に対する腐食防止技術を除いては、現状技術及び製作設備で製造可能と推定できる。

総合的な評価に関しては、概念をより具体化した上で判断する必要がある。

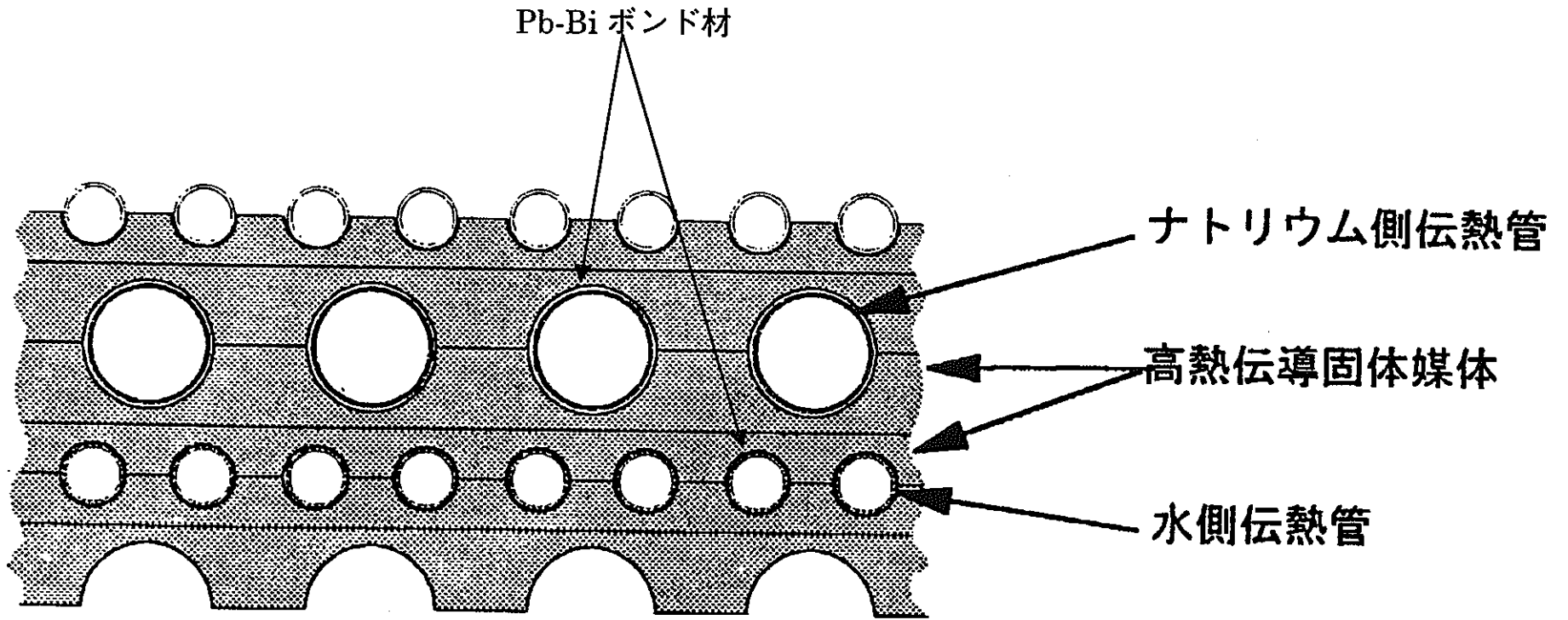


図 3.2.3 (ii)-1 銅熱媒体(Pb-Bi ボンド)S G 伝熱部断面

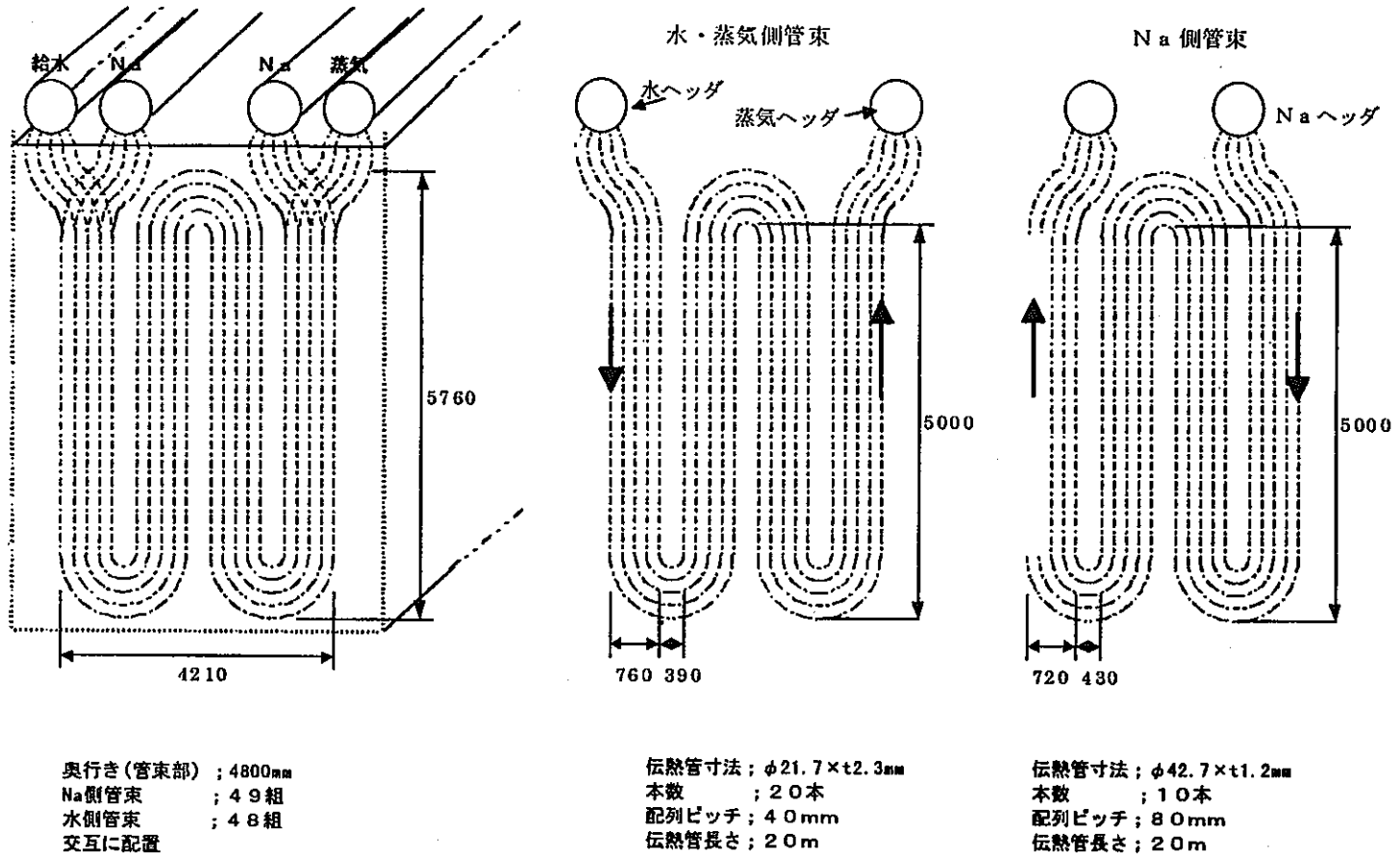


図 3.2.3 (ii)-2 銅熱媒体(Pb-Bi ボンド) S G 熱交換器概念

3.2.4 Pb-Bi 熱媒体水直接注入型 SG 概念

(1) 基本概念

直接接触伝熱の良好な伝熱特性に着目して熔融金属と水の直接接触伝熱型蒸気発生器 (SG) を用い、IHX と合体し熔融金属の自然循環力を活用する。この SG を従来の IHX、2 次冷却系設備 (ポンプ、配管等) 及び SG と置き換えることで建設費低減を図る。尚、熔融金属を Na と水に不活性な Pb-Bi を用いることで Na-水反応を排除して Na-水反応設備も不要とする。

図 3.2.4-1 にこの SG の概念を示す。炉心により加熱された一次冷却ナトリウムで中間熱媒体である熔融金属 (Pb-Bi) を加熱して、この高温の熔融金属 (Pb-Bi) と水との直接接触熱伝達により、水を蒸発させるものである。この概念では、一次ナトリウムと熔融金属 (Pb-Bi) の熱交換部分は従来のナトリウム冷却炉の中間熱交換器 (IHX) に相当し、蒸気発生部分は直接接触伝熱型のため伝熱管を削除し、機能的には IHX と SG の合体機器とみなせる。中間熱媒体である熔融金属 (Pb-Bi) はナトリウム伝熱管部で加熱し上昇し、給水管より注水される水を接触熱伝達により加熱し、オーバーフローして容器外側に向かい、容器内面を下降し再びナトリウム伝熱管加熱部に至る。この循環力は上昇部と下降部の温度差及び見かけの密度さにより生じる。

本概念は、電力中央研究所において、SG 単体として概念検討^[3]を行っている。概念検討の中で、水蒸気爆発に関する基礎試験、Pb-Bi の酸化物生成に関する基礎試験、構造材と Pb-Bi の共存性に関する基礎試験、熔融金属と水との直接接触熱伝達に関する基礎試験等を行い設計データを取得している^[3]。

(2) 基本仕様

概念検討^[3]としては、交換熱量と運転圧力が夫々 530MWt と 10MPa、240MWt と 10MPa 及び 240MWt と 7Mpa について実施している。それぞれのサイジング結果を表 3.2.4 -1 に示す。図 3.2.4-2 に、240MWt (もんじゅ SG 相当) の検討例を示す。

(3) 設計要求に対する適合性

本概念は、未だプラント概念として纏まったものではない。そのため、設計要求に対する適合性を評価できる段階にない。

(4) 評価

電力中央研究所の Pb-Bi 熱媒体水直接注入型 SG の概念検討^[3]に基づいて評価する。

(i) 経済性

(a) 原子炉及び冷却系の物量

電力中央研究所の検討^[3]で行った Pb-Bi 熱媒体直接注水型 SG の物量の推定を表 3.2.4-1 に示す。交換熱量 530MWt、運転圧力 10MPa のサイジングの SG は直径約 5.8m、高さ (熔融液位) 約 15m、総重量 4100t (ミストセパレータ含まず) とされている^[3]。鋼材重量は総重量から Pb-Bi 熱

媒体重量を差し引き約 1000t と推定される。この鋼材重量は同等の交換熱量である実証炉研究 (Phase2) の SG の約 1.6 倍であるが、更にミストセパレータ及び総重量 4100t の SG のサポート構造が必要でありその物量が付加される事を考慮する必要がある。

- (b) 建屋容積、所内負荷率、建設工期、プラント稼働率
プラント設計を実施していないため、未検討。
- (c) プラント建設費

この SG はミストセパレータ及びサポートを考慮すると同程度の熱交換量である実証炉 SG の 2 倍程度の物量となると推定される。この SG を実証炉プラントの IHX 及び 2 次系と置き換えた 2 次系簡素化プラントを想定すると、物量がコストに比例するものと仮定すれば熱出力当たりのプラントコストは実証炉プラントとコストをやや下回る可能性がある。しかし、蒸気条件 (380℃/10MPa) が実証炉蒸気条件 (495℃/16.9MPa) に比べが悪いことから発電効率に劣り、単位発電当たりの建設単価は実証炉を超えるものと推定される。ところで、実用化戦略調査研究の目標を達成する為には実証炉より更にコストダウンが必要である。この SG を採用してループ数削減や大型化によるスケールメリットを追求する経済性向上のアプローチは総重量の観点から制限され大型炉への適用は困難と推定される。一方、モジュール化などによる経済性向上のアプローチに適した中型炉へのこの SG の適用は大型化の制限が緩和されることから検討の余地があるものと思われる。

(ii) 構造健全性

(a) 構造設計の特徴

電力中央研究所の検討概念^[3]は、Pb-Bi 熱媒体を満たした容器の下部で一次 Na 伝熱管と Pb-Bi 熱媒体とで熱交換をするシェル・アンド・チューブ型熱交換器を構成し、一次 Na 伝熱管の上方で加熱された Pb-Bi 熱媒体中に給水注入ノズルを設けている。Pb-Bi 熱媒体は自然循環力でシェル・アンド・チューブ型熱交換器部を上昇し、一次 Na 伝熱管上方で注入給水と直接接触熱伝達により蒸気を発生させ容器壁面のダウンカマを下降する。容器は蒸気圧力に耐える必要があり高圧容器となる。前述の交換熱量 530MWt、運転圧力 10MPa の構造では、蒸気圧力と Pb-Bi の水頭圧を考慮すると運転圧は約 11.5MPa と高圧となり、容器肉厚は約 290mm とされている^[3]。

(b) 主要機器の構造健全性

大容量の Pb-Bi を内包する重量構造であるため耐震支持構造設計の成立性が懸念されるが、免震の採用などの工夫等で解決できる。厚肉の容器の為、液面近傍の熱応力が厳しいと推定され、熱応力緩和対策が必要となる可能性がある。いずれも物量増加 (経済性) をもたらす。

一方、荷重条件として水蒸気爆発が懸念されるが、電力中央研究所の検

討^[3]によれば、3MPa 以上での爆発の可能性はなく、10MPa の概念であればその荷重は考慮する必要はない。また、Na 水反応もその排除をねらった概念であり考慮する必要はない。

(iii) 安全性

(a) 安全設計の特徴

Pb-Bi 中間媒体中で下部に Na 伝熱管、上部に注水部をおき一定の距離を保ち注入された水は蒸気となり密度差により上昇 (Na 伝熱管と反対側) し上方に移動することで Na 伝熱管と水とを隔離している。つまり、Na と水の間には、Na 伝熱管、Pb-Bi 中間媒体、水 (蒸気) の浮力 (Na 伝熱管から遠のく特性) が介在し Na 水反応を排除している。

(b) Na 水反応の排除性

Na 伝熱管が破損した場合、Pb-Bi 中間媒体側が圧力が高い為、Pb-Bi が Na 伝熱管側に漏れる。これによる、Pb-Bi 中間媒体の液低下に伴う逆流による注水の Na 伝熱管への巻き込みの可能性は、設計により十分排除できるものと思われる。前述の電力中央研究所の検討概念^[3]でも、伝熱管の圧損により、Pb-Bi の液低下は抑制されそのスピードは高々 2mm/s で気泡の上昇速度 200~300mm/s に比べ無視できるとしている^[3]。一方、仮に、Na が Pb-Bi 中間媒体側に移行し Na 水反応を想定してもそれによる圧力上昇は高压容器である為問題とならないと推定される。電力中央研究所の概念による検討^[3]では保守的な条件で Na が Pb-Bi 中間媒体側に移行することを推定しても、それによる Na 水反応による水素発生による圧力は 0.6MPa 程度と評価しており容器は 15MPa の設計圧力以上であるので機器設計上問題とならないとしている^[3]。

(c) Na 伝熱管の破損時の炉心への影響

前述のように、Na 伝熱管が破損すると一次系に Pb-Bi 中間媒体が流入する。Pb-Bi と Na は金属間化合物を生成するが、これが炉心に入ると流路閉塞の可能性はある。しかし、金属間化合物の融点は一次系 Na のインベントリが大きく、Pb-Bi の割合を小さくすればそんなに高融点とはならないと考えられるが、Pb-Bi-Na の金属間化合物に関する知見が乏しい為データを取り評価する必要がある。

(iv) 製作建設性

(a) 製作性

製作性、検査性は未検討である。

(b) 据付性

電力中央研究所の検討概念^[3] (530MWt、運転圧力 10MPa、直径約 5.8m、高さ (熔融液位) 約 15m、鋼材重量 1000t) では 1000ton クレーンで対応できるが、検討を要す。

現地試験性については未検討である。

(v) 運転保守性

(a) 運転の容易性

未検討であるが2次 Na 系統が無いので、運転性は向上すると考えられる。

(b) ISI

未検討である。

(c) 漏洩検出性等

Na 伝熱管の漏えい検出は Pb-Bi 中間媒体の計測が考えられるが漏えい位置の同定と補修性も含め今後検討を要す。

(iv) Pb-Bi 熱媒体直接注水型蒸気発生器 (SG) 特有の開発課題

検討中であるが、以下に本 SG 概念特有と考えられる開発課題を箇条書きにて示す。

① ナトリウム伝熱管破損時の安全性

熔融金属 (Pb-Bi) 側が高圧のため、熔融金属 (Pb-Bi)、水側へは Na は侵入せず、熔融金属 (Pb-Bi) が Na 側に侵入する。そのため、Na-水反応排除の確認と熔融金属 (Pb-Bi) の炉心への影響の有無の確認が必要である。

② 蒸気爆発に係わる安全性

高温の熔融金属と水が直接接触する際に蒸気爆発現象が生じないことの確認が必要である。

③ 熔融金属 (Pb-Bi) 酸化物の生成抑制

熔融金属 (Pb-Bi) 中に注入される水と鉛及びビスマスの反応により酸化鉛及び酸化ビスマスが生じるが、その挙動の把握とコントロールに関する研究が必要である。

④ 熔融金属 (Pb-Bi) と構造材との共存性

熔融金属 (Pb-Bi) と構造材との共存性に関するデータ取得と材料選定に関する研究が必要である。

⑤ 熔融金属 (Pb-Bi) と水との直接接触熱伝達特性

圧力及び温度等想定される使用条件での直接接触熱伝達に関するデータ (体積熱通過率等) 等設計に必要なデータを取得が必要である。

⑥ リーク伝熱管同定手法の確立

財産保護或は安全性の観点から伝熱管のリーク検出とリーク伝熱管の同定技術の開発が必要である。

⑦ 大重量構造物の健全性 (支持構造など)

熔融金属 (Pb-Bi) を内包する高重量容器の支持及び耐震 (免震) 設計の研究が必要である。

表 3.2.4-1 Pb-Bi 熱媒体直接注水型 SG のサイジングの例

	ケース1	ケース2	ケース3
交換熱量	530 MW	240 MW	同左
ナトリウム入口温度	550℃	同左	同左
ナトリウム出口温度	395℃	同左	同左
蒸気発生部への熔融金属入口温度	430℃	同左	同左
蒸気発生部への熔融金属出口温度	385℃	同左	290℃
蒸気温度	380℃	同左	285℃
蒸気圧力	10 MPa	同左	7 MPa
伝熱管材質	Mod.9Cr-1Mo鋼	同左	同左
伝熱管外径	31.8 mm	同左	同左
ナトリウムとの熱交換部高さ	約6.6 m	約6.6 m	約3 m
蒸気発生部高さ	約3 m	約3 m	約1.5 m
熔融金属液面までの高さ	約1.5 m	約1.4 m	約9 m
SG胴内径	約5.8 m	約4 m	約3.5 m
SG胴肉厚	約290 mm	約200 mm	約120 mm
重量	4100 t	1800 t	870 t

出典：木下、他「FBR 用直接接触伝熱型 SG の成立性評価」 電力中央研究所
報告 総合報告：T49（平成9年6月）

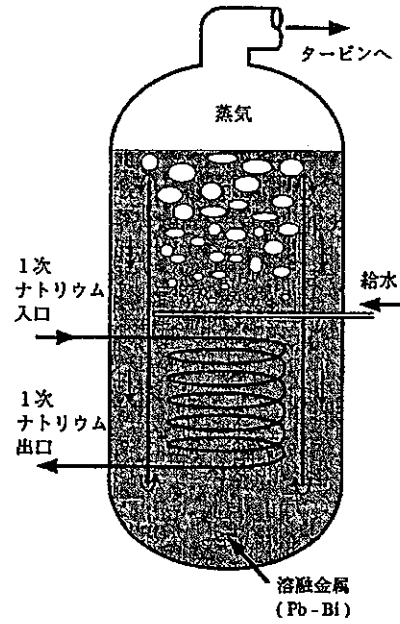


図 3.2.4-1 Pb-Bi 熱媒体水直接注入型 SG 概念

出典：木下、他、「FBR 用直接接触伝熱型 SG の成立性評価」、
電力中央研究所報告、総合報告：T 4 9（平成 9 年 6
月）

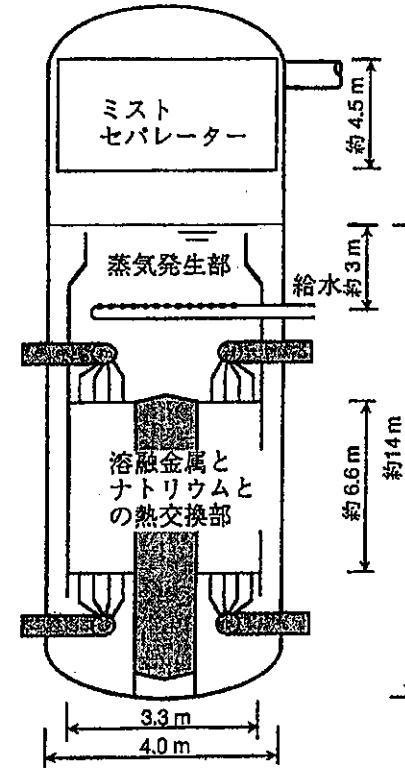


図 3.2.4-2 Pb-Bi 熱媒体水直接注入型 SG(240MWt)概念図

出典：木下、他、「FBR 用直接接触伝熱型 SG の成立性評価」、電力中央研
究所報告、総合報告：T 4 9（平成 9 年 6 月）

3.3 革新的な発電方式による Na-水反応排除

3.3.1 炭酸ガスタービン発電

(1) 基本概念^[6,7]

Na 冷却高速増殖炉のタービン作動媒体を水蒸気ではなく炭酸ガス (CO₂) とすることで、同じ原子炉出口温度条件のもとでは水蒸気タービンに比べて熱効率は減少するが、2 次 Na 冷却系を簡素化できることによるプラント全体物量の削減効果により、結果として単位出力当たりの建設費が削減されるという合理化方策の考え方があ

る。再生サイクルを採用したガスタービンによるブレイトンサイクルの一般的な系統構成及び T-S 線図を図 3.3.1-1 に示す。この場合はサイクル全体を通して単相状態 (気相) のため、システムは比較的単純な構成となるが作動流体の加熱及び放熱は等圧条件で行うことから相変化を伴うランキンサイクルに比べて理論的な熱効率は相対的に低くなる。

この点を改善するため再生段数の増加や再熱過程の採用、液相圧縮 (凝縮器での液化とポンプによる圧縮) の採用等による熱効率向上策が検討されている^[7]が、熱効率の向上とともにシステムが複雑化するため実質的に全体としての経済性が向上するか否かについては具体的な熱的条件を踏まえた検討が必要である。

このように炭酸ガスタービン発電システムは現時点では未開発であり、いくつかの概念設計が試行されている段階であるが、CO₂ の Na との反応性は水に比べて激しくなく、反応生成物の処理対策もより簡素化できる可能性を有することから、本検討では Na-炭酸ガス反応の安全上の留意点を踏まえ、経済性向上ポテンシャルを探ることを目的とする。

(2) 既往研究

1 次系冷却材に液体金属を用い、発電システムとしてブレイトンサイクルのガスタービンを組合せる方式としては 1960 年代に米国 NASA で開発された宇宙用原子炉がある。この場合には、液体金属には 1 次系の高温化に有効な NaK 又は Li を、作動ガスとしては不活性の He、Ar、Kr 又はこれらの混合ガス (He+Xe) が考えられた。なお、作動ガスはさらに 3 次系の NaK で冷却され、熱は放熱器から宇宙空間に熱輻射により放出される。^[8]

冷却材としてガスを選定する場合に重要となる単位熱量当たりのポンプ所要動力は、主要なガスについて少ない方から並べると低温 (大気圧) では H₂、He、CO₂、N₂、空気であるが、300℃程度 (大気圧) では CO₂ と He の順序が逆転する。これは炭酸ガスのような 3 原子気体では温度の上昇とともに比熱が増加するが、1 原子気体の He では変化がないことによる。(したがって炭酸ガス炉より He ガス炉の方が運転圧力は一般的に高く設定されている。なお、さらに高温になると CO₂ はステンレス鋼と反応することが

分かっている。^[9]

また、前述の液相圧縮サイクルの採用による熱効率向上には CO_2 が適するとの検討結果^[7]もある。

したがって、これ以外の各種因子も含めて総合的に判断すると、今回のように1次系冷却材温度として 550°C 程度を想定する場合には、作動ガスとしてはマグノックス炉やAGRで実績のある CO_2 が適していると考えられる。^[10]

なお、マグノックス炉やAGRで実際に採用しているのは炭酸ガスタービンではなく水蒸気タービンであり、この温度条件においては必ずしも炭酸ガスタービンの本来の特質が十分活かせる温度領域ではないため、水蒸気タービンと比べると熱効率が低下することが予想される^[7]が、Na 冷却のFBRではそれ以上に2次系が簡素化されプラント全体としても合理化される可能性を探ることとする。^[6]

(3) 検討状況

(i) 検討対象及び条件の設定

炭酸ガスタービン発電による経済性向上効果の可能性を概略評価する目的においては、2次Na系及び水蒸気系から構成される通常の場合のシステム構成及び物量が明確になっているプラント概念との比較が望ましい。また、ガスタービン発電機の実用最大出力規模は単機で数100MWe程度であることも考え合わせて、今回の検討対象は現時点で物量データが整っているFBR実証炉フェーズ1(1,600MWt、3ループ；以下「実証炉」と略す。)と同程度とし、この1次系3ループに炭酸ガスタービンを設置した場合を想定して検討することとした。

(ii) 炭酸ガスタービン発電システム基本仕様の暫定

基本仕様(暫定)を表3.3.1-1に、また全体系統図及びヒートマスバランスを図3.3.1-2及び3に示す。

プラント基本仕様のうち、1次系Na温度(中間熱交換器出口/入口Na温度)は実証炉や本研究でのNa冷却大型炉と同様の $550^\circ\text{C}/395^\circ\text{C}$ とし、炭酸ガス最高温度、圧力比、再生熱交換器温度効率、系統圧力損失はパラメータとして中間熱交換器の大きさや熱効率が最適化されるように設定することとした。なお、タービン効率(92%)と圧縮機効率(90%)は現状技術レベルでの最高値を仮定した。

検討の結果、次の定性的な傾向があることが分かった。

- a. 炭酸ガス最高温度が高いほど系統熱効率(中間熱交換器での交換熱量に対する発電量の割合)は上昇する。
- b. 比出力(単位時間当たりの質量流量に対する発電量)は、タービンの膨

張比 (= 圧力比) が大きいほど、また熱交換器での圧力損失比が小さいほど大きくなる。

- c. タービン入口温度を一定とした場合、再生熱交換器の温度効率 (タービン出口と高圧圧縮機出口の炭酸ガス間の熱交換の効率) が高いほど系統の熱効率ピークは低い圧力比で達成される。
- d. 系統熱効率は、再生サイクル (再生熱交換器効率は最高値の 95% を仮定) の採用、タービン及び圧縮機効率の向上 (現状技術の最高値を仮定) により 30% 程度は実現できる。

次に中間熱交換器の仕様設定であるが、2 次冷却系のない炭酸ガスタービン発電システムにおいては、中間熱交換器は原子炉施設とタービン施設の接点に位置し、そのサイジングによりプラント全体の経済性が左右される重要な機器である。この点については、次の傾向があることが分かった。

- e. 再生熱交換器温度効率一定の条件では、圧力比の増加により中間熱交換器入口 (再生熱交換器出口) 温度が低くなり、中間熱交換器での対数平均温度差を大きくとることができ、熱交換器 (の伝熱面積) をより小さくすることが可能となる。
- f. 中間熱交換器出口温度の高温化は熱効率の向上には寄与するが、同時に対数平均温度差は低下する。
- g. 系統圧力及び流速の増加とともに炭酸ガスの熱伝達係数は増加し、圧力と流速の積とほぼ比例関係にあるが、同時に圧力損失も増加する。

(4) 中間評価

(i) 検討のポイント

炭酸ガスタービン発電システムの FBR への適合性を検討するポイントは次の 3 点である。

- ① 水蒸気タービンと比べて炭酸ガスタービンの発電システムとしての性能はどの程度発揮されるか。(経済性向上効果)
- ② 炭酸ガス系の採用により Na-水反応排除方策はどの程度簡素化が可能となるか。(Na-水反応排除効果)
- ③ ①のプレイトンサイクルに比べて、系統の高圧化を前提とした液相圧縮を取り入れたランキンサイクルの場合にはどの程度の熱効率向上が見込めるか。

(ii) 経済性向上 (物量削減) 効果

炭酸ガスタービン発電システムによる経済性向上効果のめやすは、プラントの熱効率である。すなわち、軽水炉との比較において水蒸気タービン

の場合にはFBRの熱効率は40%以上で、軽水炉の熱効率(約33-34%)より2割程度高効率とすることが可能なため、原子炉及び冷却系のコストが軽水炉より高くても、建設単価では軽水炉と同程度にできる可能性はある。そして、炭酸ガスタービンを採用する場合にも、2次Na系が不要となるため少なくとも熱効率が軽水炉以上であれば原子炉及び1次系(Na冷却)が軽水炉より高くても全体の建設単価では軽水炉と同程度とする可能性はあるが、熱効率が軽水炉より低い場合には原子炉及び1次系を軽水炉より低いコストとすることが必要となるため、事実上は全体コストでの競合は困難となる。ただし、ここでは水蒸気タービンと炭酸ガスタービンのコストを同じ出力規模では同程度と仮定したが、実際には水蒸気タービンは1,000MWe以上でも単基で製造可能であるが、現状ではガスタービンでは困難と考えられるので保守側の仮定とはいえない。

この観点に立って、炭酸ガスタービン発電システムの検討結果を見ると、単相のブレイトンサイクルでの熱効率は30%程度であり、2次系(実証炉でのコスト割合は14%)のコストがゼロとしても40%から30%に熱効率が低下すると建設単価は

$$(100-14) \times 40 / 30 = 115\%$$

となり、15%程度コストアップとなる。仮に炭酸ガスタービン(3基)のコストが水蒸気タービン(1基)の半分としても、実証炉では水蒸気タービンのコスト割合は約13%であるため、

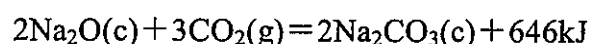
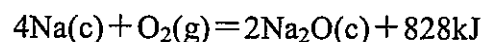
$$(100-14-13/2) \times 40 / 30 = 106\%$$

となってこれでもコストアップとなる。

上記の概略計算は中間熱交換器の大きさが同じと仮定しているが、実際には炭酸ガスの採用でより大きくなる(「(iv)液相圧縮サイクルの熱効率向上効果」参照)ためそれを考慮すればさらに条件は悪化することとなる。逆算すると、軽水炉の熱効率を上回る35%程度以上の熱効率が得られなければ経済性の向上は見込めないことが分かる。

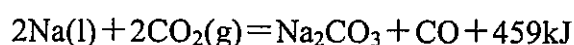
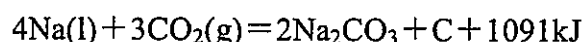
(iii) Na-水反応排除効果

炭酸ガスは水ほどではないがNaと接触すると反応する。酸素がなければ1000℃以上でないと反応は進まないが、酸素が介在すればさらに激しい反応となる。酸素があると



により炭酸ナトリウムが生じ、流路閉塞を引き起こす恐れがある。

さらに、SNR-300に関連した基礎試験結果[6]によれば、



の反応で発熱するが温度と圧力に依存するとともに、水素や腐食性の化合物は生成しないとされ、この観点からは本検討条件の 395-550℃程度では炭酸ガス圧力は 25kg/cm²g(約 2.5MPa)以下に設定するのが望ましいという結果が得られる。

しかし、実際には熱効率の観点から炭酸ガス系統圧力は 5MPa (次項に示す液相圧縮サイクルの場合はさらに高圧) で運転する必要があるため、炭酸ガス及び反応生成物 (Na₂CO₃) が 1 次系に侵入することになり、次の対応が必要となる。

- ・ 1 次系設計圧力 (2-3kg/cm²g) を超えないようにする。
- ・ 1 次系配管のサイホンブレイクや炉心気泡通過が生じないようにする。
- ・ Na-炭酸ガス反応生成物による炉心閉塞が生じないようにする。

また、炭酸ガスの流入が収まった後、反対に Na がタービン系に流出しないようにする必要もある。この中で最も厳しい条件は最初の項目であり、Na 系と炭酸ガス系の間に中間系を設けない条件においては、1 次系に圧力逃がし装置を設置する必要が生じ、冷却材を Na とした場合に比べてあまり改善されない状況となる。

(iv) 液相圧縮サイクルの熱効率向上効果

液相圧縮サイクルの採用による熱効率向上の可能性について、参考文献⁽⁷⁾の考え方に基づいて概略評価を行った。

液相圧縮サイクルの基本構成は、図 3.3.1-5 (一段再生サイクル) に示すように外部冷却源による凝縮とポンプによる圧縮で熱効率をブレイトンサイクルより向上させたランキンサイクルであり、図 3.3.1-7 (二段再生サイクル) では、タービン通過流量のうち一部が圧縮機を經由して高温側の再生熱交換器で合流するサイクルである。後者は、一段再生での高圧及び低圧側の流体の比熱差が大きく再生熱交換器中の平均温度差が拡大することにより熱効率低下の原因となるため、流量分流によって非可逆損失を減少し熱効率を改善することを意図している。

検討条件は、(3)(ii)の内容を参考に次の通りとした。

- ・ 炭酸ガス温度：中間熱交換器出口温度 525℃
ポンプ入口温度 13℃ (5MPa での凝縮温度)
- ・ 炭酸ガス圧力：高圧側 7.5~30MPa(パラメータ)
低圧側 5MPa*(炭酸ガスを凝縮するための条件)
- ・ その他 タービン効率：92%
ポンプ及び圧縮機効率：90%
再生熱交換器冷端末温度差：15℃*
(二段再生サイクルの上流側熱交換器では 30℃*)
圧力損失：考慮しない

(*; 参考文献^[7]より設定)

次式により算出した熱効率を図 3.3.1-6 及び 8 に示す。比エンタルピ i の添字は、図 3.3.1-5 及び 7 に記入された番号に対応する。

・一段再生サイクル

$$\eta = 1 - (i_5 - i_1) / (i_3 - i_6)$$

・二段再生サイクル：

$$\eta = 1 - \alpha \times (i_5 - i_1) / (i_3 - i_6)$$

$$\alpha = (i_7 - i_5 + i_4 - i_6) / (i_7 - i_2) ; \text{流量分流比}$$

一段再生サイクル (図 3.3.1-6) では、ブレイトンサイクルの場合の炭酸ガス圧力条件 (5MPa) では熱効率は低いが、圧力の上昇とともに熱効率が增加し、12.5MPa で 30%、16MPa で 35% を越え、約 20MPa で Na 冷却高速炉の熱効率 (40%) に到達する。

二段再生サイクル (図 3.3.1-8) では、熱効率向上の効果はさらに著しく、約 10MPa で熱効率 40% に到達する。

しかし、上記に見るように系統圧力は 10-20MPa 程度まで高くする必要があり、前項の「Na-水反応排除効果」に記した課題に関してはより厳しい条件となる。

また、経済性向上 (物量削減) 効果の観点から中間熱交換器及び再生熱交換器の物量を液相圧縮しないブレイトンサイクルの場合と概略比較した結果は、次の通りであった。

まず中間熱交換器 (IHX) では、対数平均温度差や高圧化に伴う伝熱特性の向上により、伝熱面積を半分以下に削減できることから IHX の物量 (IHX 本体及び IHX 容器) としても約 35% 程度削減可能となる。次に、再生熱交換器では高圧化による伝熱特性の向上により伝熱面積を半分程度に削減できるが、高圧化のために収納容器の板厚増加によりある程度相殺され、二段再生の場合の再生熱交換器の合計物量は、液相圧縮しない場合の再生熱交換器 1 基の物量と同程度になる。

なお、タービン及び圧縮機は、高圧化で体積流量を削減できるため本体はコンパクト化できるがケーシングは厚肉化するので全体としては同程度と考えられる。

したがって、系統全体としての物量差は中間熱交換器の物量差にほぼ等しいという結果となり、表 3.3.1-2 に示すように系統全体の約 20% に相当する合理化効果があることが分かった。

しかし、たとえ液相圧縮を考慮しても Na-Na 中間熱交換器の物量 (表 3.3.1-2 注記参照) に比べれば Na-炭酸ガス中間熱交換器の物量はまだ 2

倍程度（液相圧縮を考慮しない場合は約 3 倍）あり、高圧化による炭酸ガス-Na 反応の条件悪化を考え合わせると、熱効率 40%を達成可能であることと 2 次系が削除可能としても、系統全体としての物量合理化を達成することは容易ではないと考えられる。(3)(ii)と同様の実証炉ベースの概算では、1 次系のコスト割合約 11%のうち IHX は 6 割を占めるのでプラント全体の中では約 7%となり、液相圧縮を考慮する場合でもこの IHX が 2 倍の 14%になると考えれば、増加分 7%は削除される 2 次系のコスト割合の半分程度を相殺することになる。実際には IHX の寸法増大による建屋等の関連設備のコスト増加も考慮する必要があり、相殺される割合はさらに大きくなると考えられる。）

(iv) まとめ

炭酸ガスタービン発電システムの FBR プラントへの適合性について、経済性向上（物量削減）効果と Na-水反応排除効果の観点から概略評価した結果では、今回の検討条件として設定した 1 次系温度（550℃）の領域においては、炭酸ガスの作動媒体としての優位性（熱効率）が十分発揮できず、またこの状況を改善するためにさらに高圧条件を課す場合には Na-水反応排除の面からもより厳しくなるため、当初の目標である 2 次系削除による経済性と安全性の向上の達成は困難と考えられる。

表 3.3.1-1 炭酸ガスタービン発電システムの基本仕様

(* : FBR 実証炉条件を参考に設定)

No.	項目	暫定仕様
1	原子炉型式	Na 冷却炭酸ガスタービン発電プラント
2	サイクル方式	1 段再生液相圧縮サイクル
3	電気出力(発電端)	212MWe×3
4	熱出力	1,950MWe
5	ループ数	3
6	1 次系温度*	550℃ / 395℃
7	流量*	1.192×10 ⁷ kg/h
8	炭酸ガス温度	525℃ / 341℃ (IHX 出口 / 入口)
9	圧力	4.77MPa
10	流量	1.124×10 ⁷ kg/h
11	圧力比(膨張比)	5
12	中間熱交換器型式	縦型 shell & Tube (直管) 式
13	交換熱量	650MWt / 基
14	胴内径 / 高さ	φ 3.9m (実証炉 ; 2.5m) / 16.3m
15	伝熱面積	約 10,000m ² (実証炉 ; 1,740m ²)
16	伝熱管長	有効長さ 10.52m (実証炉 ; 5.9m)
17	管束部外径	φ 約 3.2m
18	圧力損失割合	4%
19	ガスタービン型式	軸流背圧式
20	膨張比	5.0021
21	段数	3
22	熱落差	195.84
23	全圧	4.56MPa / 0.91MPa (入口 / 出口)
24	全温	798K / 625K (入口 / 出口)
25	翼長	201mm / 532mm (入口 / 出口)
26	熱効率	32.62%
27	回転数	3,000r.p.m.
28	流量	3,120kg/sec
29	第一圧縮機圧縮比	2.412
30	段数	5
31	第二圧縮機圧縮比	2.413
32	段数	5

表 3.3.1-2 炭酸ガスタービン発電システムの
液相圧縮の有無による概略物量比較

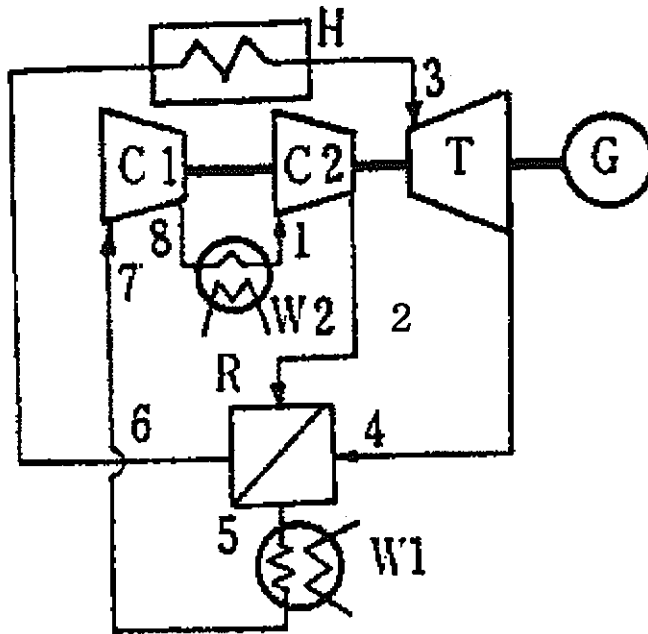
単位：ton

機器名		液相圧縮する場合	液相圧縮しない場合
ガスタービン及び圧縮機		170	170
中間熱交換器 *1,2	本体	200	390
	収納容器	420	580
再生熱交換器		1,200	1,160
冷却器（凝縮器）		240	300
中間冷却器（圧縮機間に設置）		—	210
合計物量		2,230	2,810
備考		図 3.3.1-7 参照	図 3.3.1-1 参照

*1；交換熱量：650MWt

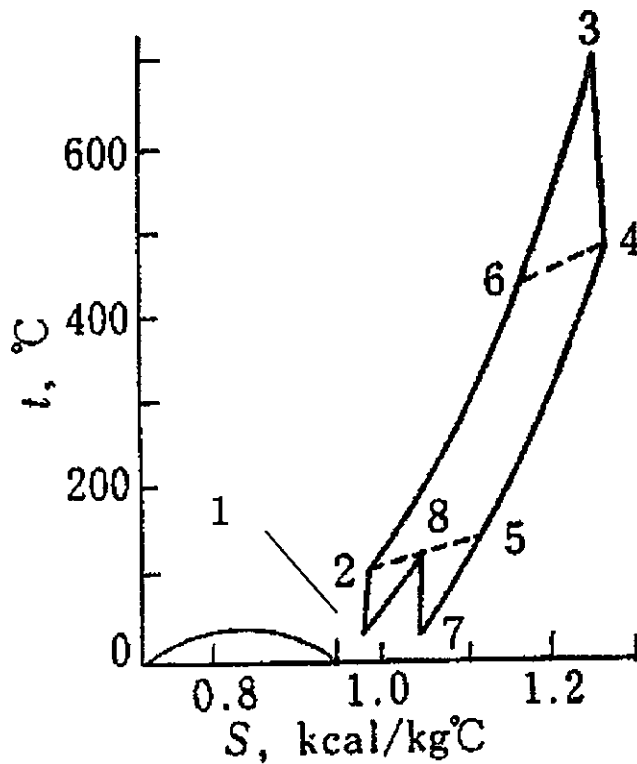
{	Na 温度：550℃ / 395℃
	Na 流量： 1.192×10^7 kg/h
	炭酸ガス温度：290℃ / 525℃
	炭酸ガス流量： 8.071×10^6 kg/h
	炭酸ガス圧力：20MPa

*2；FBR 実証炉（フェーズ 1 設計）の中間熱交換器重量；
約 340ton / 基



記号の説明

H : 加熱器
 T : タービン
 C : 圧縮機
 R : 再生熱交換器
 W : 冷却器
 G : 発電機



サイクル

1 → 2 : 圧縮
 2 → 6 : R で吸熱
 6 → 3 : H で加熱
 3 → 4 : 膨張
 4 → 5 : 熱交換
 5 → 7 : 冷却
 7 → 8 : 圧縮
 8 → 1 : 冷却

(a)ガスタービンサイクル
 (A)サイクル

図 3.3.1-1 ブレイトンサイクルの系統構成及び T-S 線図

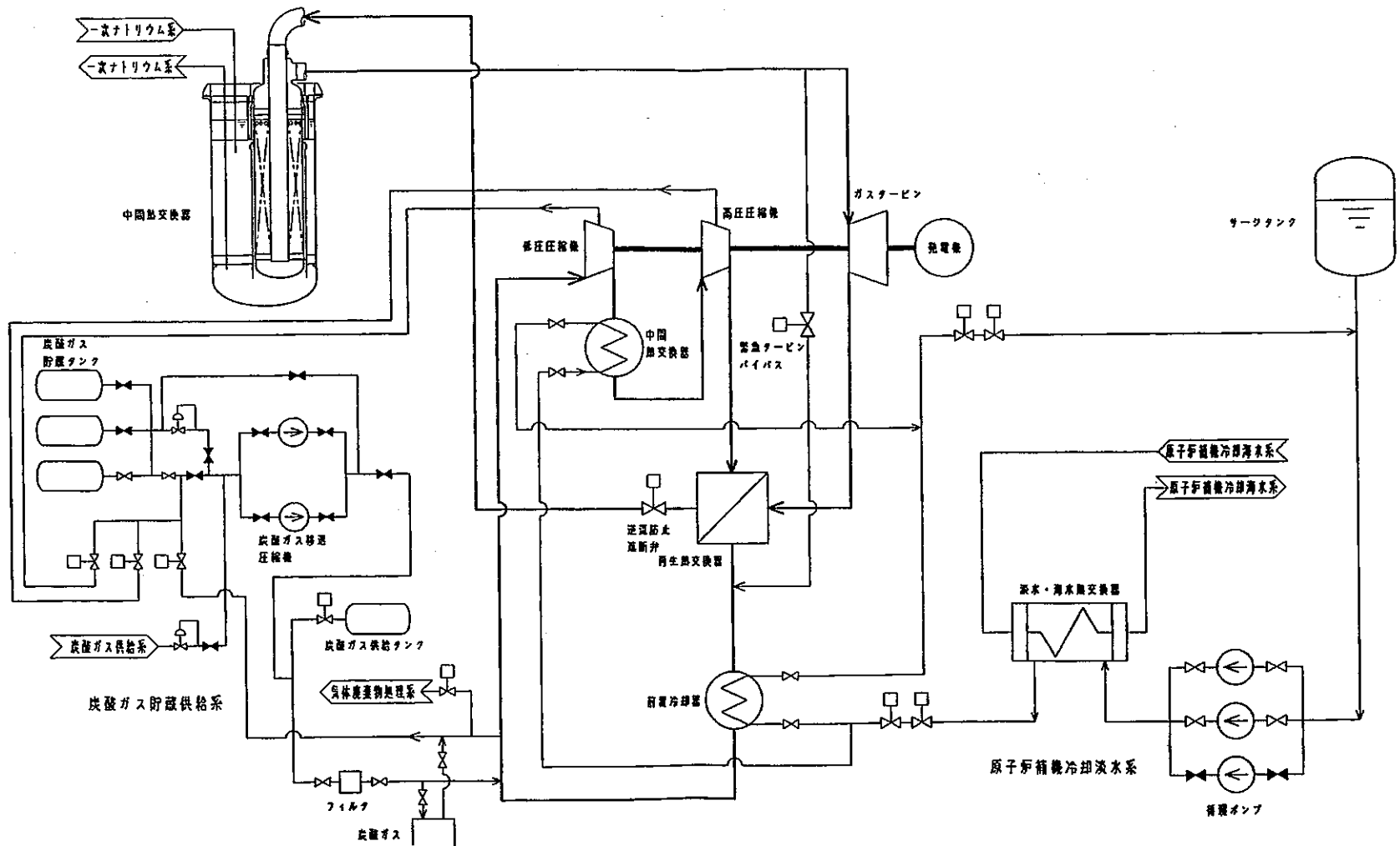


図 3.3.1-2 炭酸ガスタービン発電システムの全体系統図

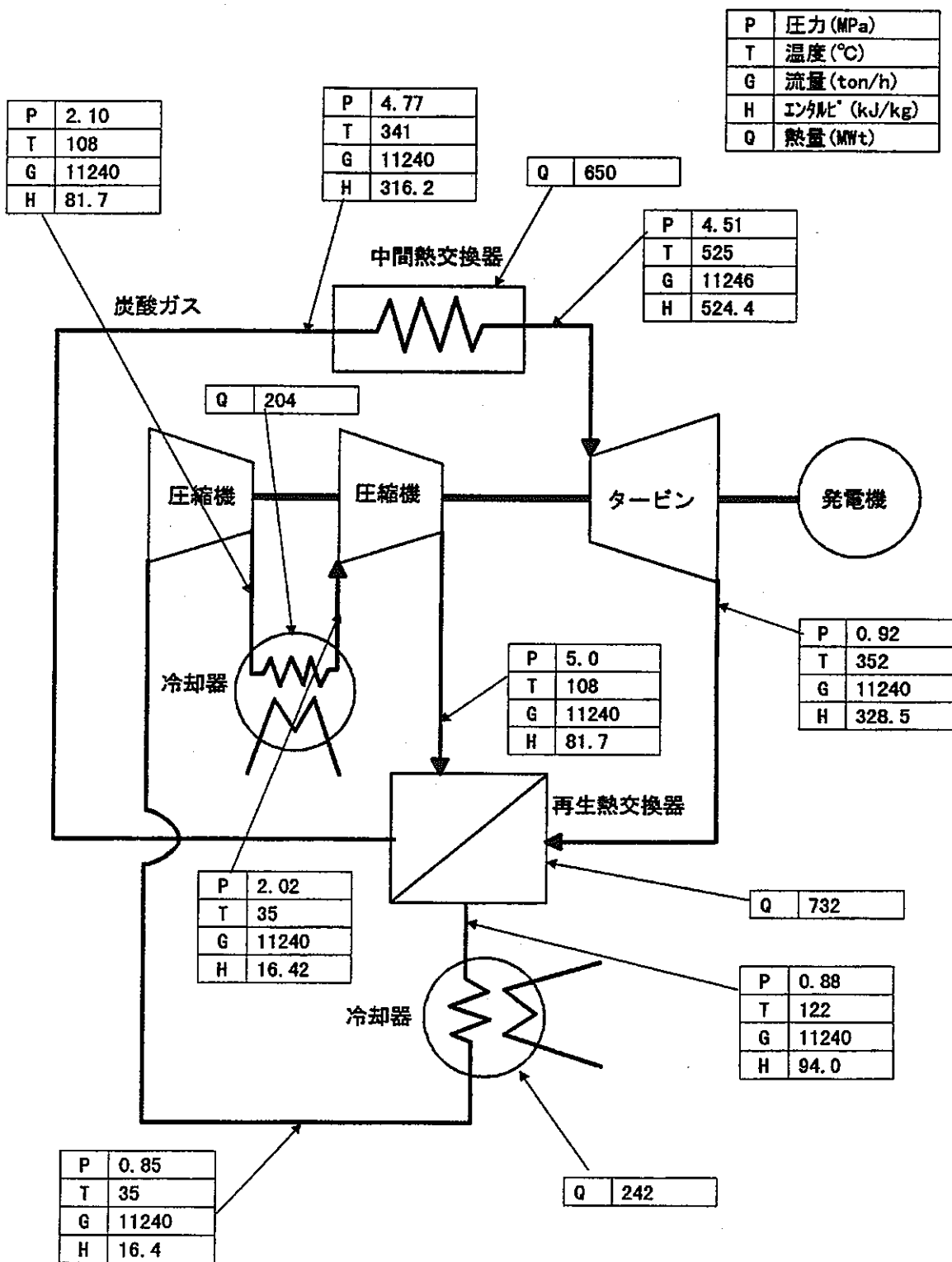


図 3.3.1-3 炭酸ガスタービンのヒートマスバランス

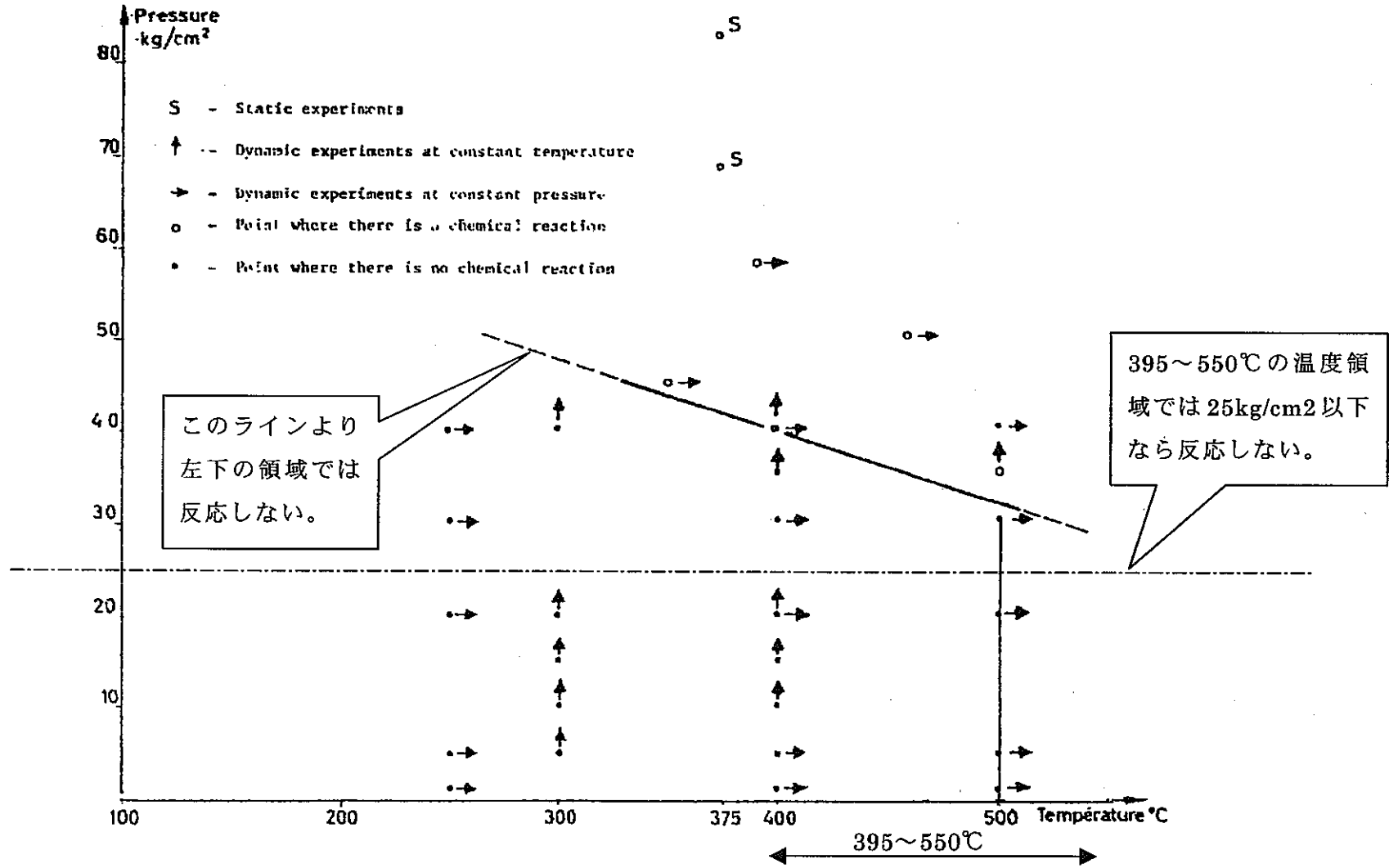


図 3.3.1-4 Na-炭酸ガス反応に係わる基礎試験結果(SNR-300での試験)

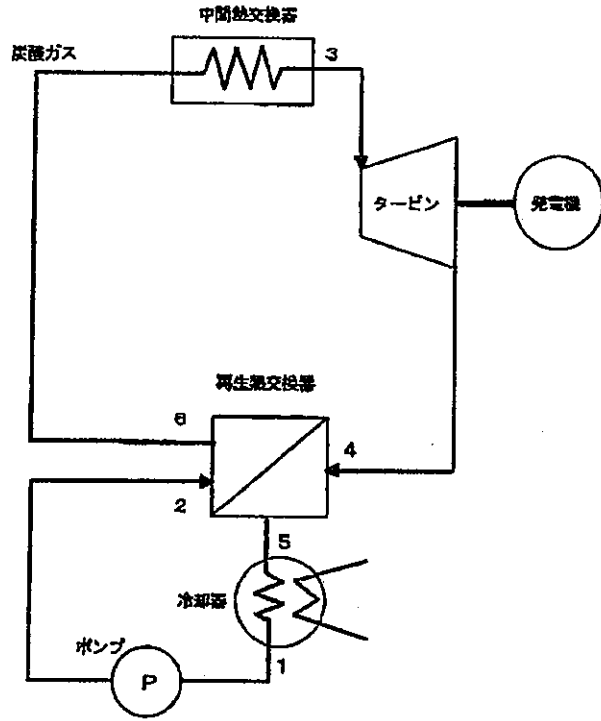


図 3.3.1-5 一段再生サイクルの基本構成

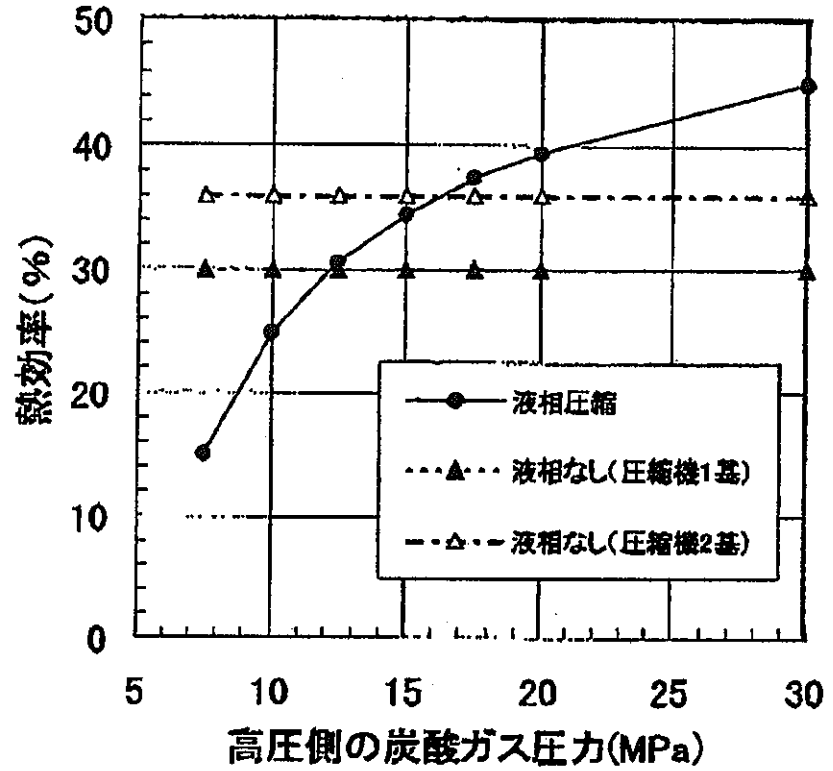


図 3.3.1-6 一段再生サイクルの熱効率

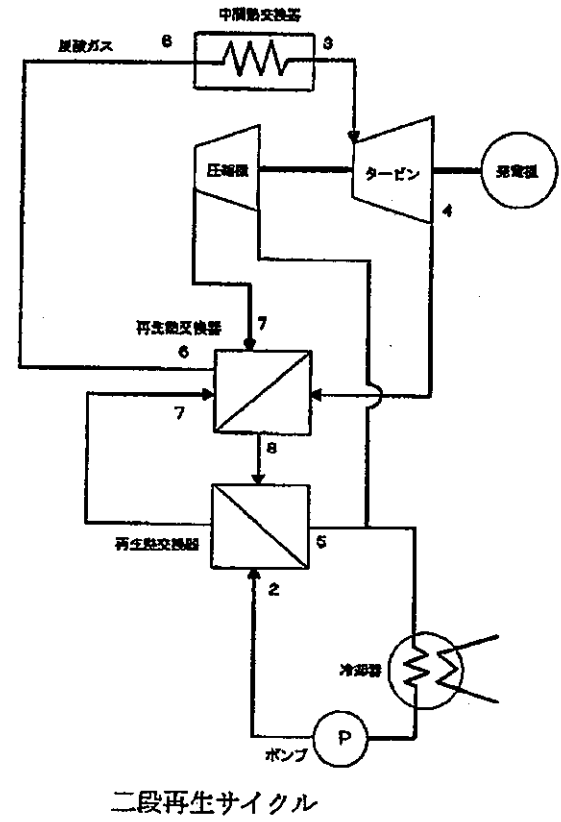


図 3.3.1-7 二段再生サイクルの基本構成

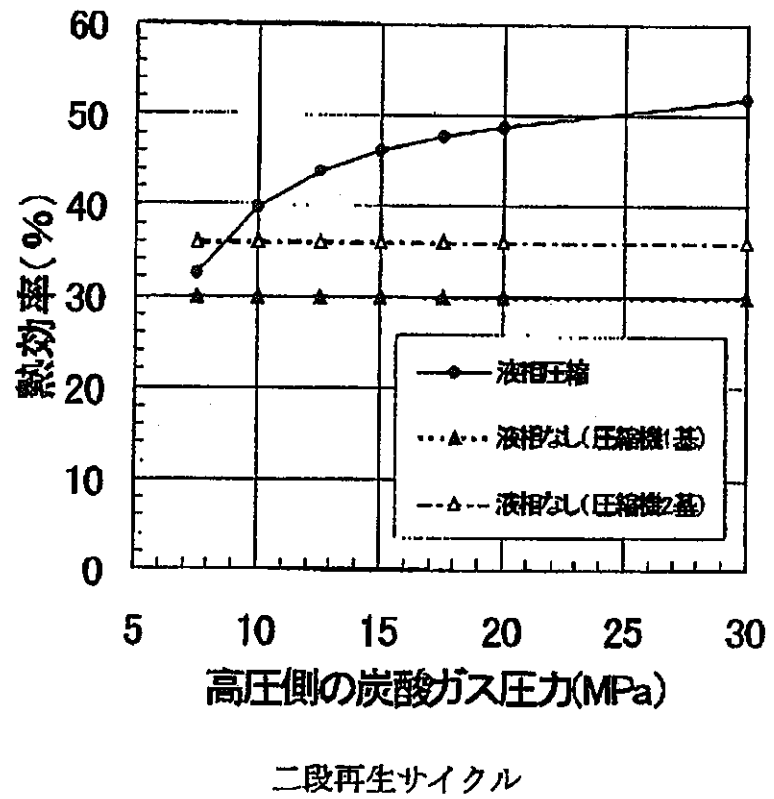


図 3.3.1-8 二段再生サイクルの熱効率

3.3.2 液体金属 MHD 発電

(1)背景と目的

小型 FBR (Na 冷却及び重金属冷却) に適用できる液体金属 MHD 発電システムの実現可能性に関する見通しを得る目的で、平成 11 年度の革新的技術アイデア公募に基づく研究である「二相流自然循環型液体金属 MHD 発電システムに関する研究」を東京工業大学原子炉工学研究所において実施している。

将来の高速炉の実用化のためには、新型軽水炉に比べより経済性に優れ、また高い安全性を有している高速炉を開発する必要がある。本発電システムは、巨大で複雑な現在の高速炉システムを可能な限り簡素化・単純化することによって経済性の向上を図ると同時に、自然循環力などを利用した受動的な安全機能をより多く取り入れることにより、固有の安全性をより高めた自立性の高い高速炉システムの構築をねらいとした概念である。

(2)既往研究

MHD 発電の原理は現在から 100 年以上も前に発見されていたが、動力源としての開発ができなかった理由の一つとして作動流体の加速に問題があったとされている。作動流体を加速させるには、ガスや蒸気と液体金属の二相流の状態、ガスや蒸気を膨張させることによって液体金属に運動エネルギーを与えるが、研究初期に提案された单相流 MHD 発電方式では、発電器前段で高速の二相流からガスを分離するか蒸気を凝縮させる必要があり、この過程において大きなエネルギー損失は免れないことが次第に明らかとなった。

その後の研究で、発電器前段での单相化をあきらめ、液体金属二相流を直接発電器内へ導入する二相流 MHD 発電方式が提案されたが、液体金属二相流のボイド率増加による実効的な電気伝導率の低下、発電器内での気液スリップ比 (速度比) 等の問題がある。

これらの問題に対しイスラエル・ベングリオン大学では自然循環力を利用した OMACON と呼ばれる MHD 発電方式を用い実験研究を行ってきた^[11]。この方式は

- ・液体金属单相流 MHD 発電器が使用可能である。
- ・主循環ポンプが不要のためシステムが非常に簡素となり、起動、停止も簡単になる。
- ・低流速の水平型気液分離器の採用により高い分離効率が期待できる。

などの利点を有している。この方式は気液分離の問題が比較的容易に解決でき、構造が単純で可動部がないなどの理由で信頼性に優れていると考えられる。しかし、その成立性評価のためには、二相流による循環力、除熱能力、エネルギー変換特性の評価が重要であり、特に高密度液体金属の気液二相流の自然循環特性は知られていないことが多い。

(3)サイクルの概要

液体金属 MHD (Liquid Metal MagnetHydroDynamic Electrical Power Generation) 発電とは液体金属 (導電性作動流体) と沸点の比較的低い液体又は不活性気体 (熱力学的作動流体) を組み合わせて用いる発電方式をいう。

沸点の比較的低い液体はランキンサイクルに準じて作動し、不活性気体はブレイトン

ないしエリクソンサイクルに準じて作動するが、液体金属の熱容量が蒸気又は気体の熱容量に比べて非常に大きいため、二相流部での膨張は再熱効果を受け、サイクルの熱効率を上げることになる。

液体金属 MHD 発電システムには多くの形が提案されているが、本検討で提案されている液体金属自然循環 MHD 発電は、以下に述べるように気泡ポンプの原理で熱エネルギーを液体金属の位置エネルギーに変換した後、液体金属の運動エネルギーに変える方式のものである。

本発電方式の原理図を図 3.3.2-1 に示す。主熱交換器で加熱（蒸発）した熱力学的作動流体（ガスあるいは蒸気）は、混合部で同一温度・圧力の高密度の液体金属と混合され、二相流上昇部で周りの高温の液体金属から熱をもらいつつ膨張し、重力に逆らって液体金属を上方に加速し、熱エネルギーを運動エネルギーと位置エネルギーに変換する。その後、気相は気・液分離器で分離され、再生熱交換器を通過して冷却器（凝縮器）で除熱され、ポンプ、再生熱交換器を経て、再び熱源に戻る。一方液体金属は気・液分離器で気相と分離された後、单相流下降部を落下し、MHD 発電機を経て、熱源さらに混合部へと循環する。

本発電方式では、单相 MHD 発電機を採用することにより安定した発電特性を持たせることができ、また水平の気・液分離器によりエネルギー損失を低く押さえることが可能であるため、エネルギー変換効率を高くすることができる。また、安全性の面では、2次系ポンプが不要であることから受動的安全性が向上するとともに、作動流体を選択することにより Na-水反応を排除することが可能である。さらに経済性の面では、自然循環力を利用しているためポンプが不要であり、2次系が不要となるためシステムの簡素化を図ることができる。

(4) サイクル解析結果

本発電システムの高速度炉の適用性を評価するため、高速炉条件下で、凝縮性熱力学作動流体（水）及び非凝縮性熱力学作動流体（アルゴンガス）を用いた場合のサイクル解析が実施された。本システムの主要なパラメータ（ボイド率、気液スリップ比、各コンポーネントの効率等）がサイクルの基本特性に及ぼす影響について解析を行った結果、以下の結論が得られている。

- ①非凝縮性熱力学作動流体を用いた場合、ポンプの圧縮段数を増加させることにより、本サイクルがエリクソンサイクルに近くなり、高い効率が期待できる可能性がある。しかし、凝縮系の場合、作動温度と圧力に制限があり、エリクソン型サイクルを構成することは困難になり、サイクル効率が低下する傾向がある。
- ②本システムのサイクル効率は、二相流上昇部における気相の膨張過程の等温膨張からのずれに大きく影響を受ける。従って、二相流上昇部のボイド率が高くなると、伴送する液層の熱容量が低下し、等温膨張からのずれが大きくなりサイクル効率は低下する。
- ③二相流上昇部の気液スリップ比が増加すると、気相から液層へのエネルギー変換損失が増加し、サイクル効率は低下する。この効率の低下は、非凝縮系の方が凝縮系に比較して大きい。

- ④MHD 発電機の効率は、凝縮系・非凝縮系ともにサイクル効率に大きく影響を及ぼす。また、二相流上昇部でのボイド率や気液スリップ比が増加すると、気液分離器効率のサイクル効率への影響が非凝縮系・凝縮系ともに大きくなる。凝縮系では、ポンプ動力は非常に小さいため、ポンプ効率の影響はほとんどないが、非凝縮系ではポンプ効率のサイクル効率への影響は大きい。再生熱交換器の効率のサイクル効率への影響は、熱交換量が、熱源での入熱に比べて小さいので、その影響は小さい。
- ⑤二相流上昇部のボイド率が増加すると、二相流単位質量あたりの熱源での入熱量及び発電機出力は増加し、ポンプ動力の小さい凝縮系では正味電気出力は増加する。しかし、非凝縮系ではポンプ動力の増加が大きいため、あるボイド率で、正味電気出力は最高値を持ち、それ以上では低下する。

(5)評価結果

現状では、高速炉条件に適した複数の作動流体の組み合わせを選定し、原子炉からの除熱能力や熱力学的サイクル効率の評価を行っている段階であり、設計要求に対する適合性は未検討である。

経済性評価

二相流上昇部において液体金属中に混合された気相は、膨張する際に周りの高温の液体金属から常に熱が供給されるためほぼ等温で膨張する。また、膨張後に再生熱交換を行うことによりエリクソンサイクル（等温—等圧サイクル）に近い熱力学的サイクルとなり、高いサイクル効率を得られる可能性がある。

また、本発電方式は従来の液体金属二相流 MHD 発電方式と異なり、MHD 発電機に单相の液体金属を流すことにより安定した発電特性となる可能性が高い。さらに、比較的低速条件下で水平の気・液分離器を使用することにより、気・液分離器でのエネルギー損失を小さく抑えられる可能性があり、サイクル効率の向上が期待できる。

その他にも、主循環ポンプ、タービン発電機の排除によってシステムが簡素化され、高い経済性を有するプラントにできる可能性がある。

構造健全性評価（含む耐震性）

液体金属下降部の高さ（長さ）は、液体金属の MHD 発電機への必要な流入速度の関係で、発電規模によっては構造健全性に影響を与える可能性があるが、これに対して比較的短い下降部を持つ MHD 発電機を横に数段並べて直列に接続するなどの対策が考えられる。また、耐震性については地下にプラントを建設して対応するなどの案が考えられており、本概念は比較的動作原理が単純なため、構造健全性の確保についても柔軟な設計が可能であると考えられる。

安全性評価

選定される気体によっては完全にナトリウム—水反応を排除することが可能であり、液体金属に鉛ビスマスを採用すれば Na 火災も排除することができる。

製作建設性

動的機器が少なく、動作原理も単純なため、製作建設性に優れる可能性が高い。

運転保守補修性

動的機器は気相系循環ポンプのみであり、保守補修性に優れると考えられる。

(6)今後の開発課題

今後の検討課題としては基礎的な実験を実施し、高密度液体金属二相流における気・液間スリップ比等自然循環特性に関する基礎データの取得及び実機への適応性（成立性）評価を実施する必要がある。

実機プラントへの適応性評価を行うためには、前述のように高密度液体金属二相流の自然循環特性（MHD 負荷の影響等）やサイクル効率等エネルギー輸送・変換特性評価が不可欠である。しかし、低温側の温度条件は液体金属の固化点以上であること、本発電方式固有の高温側の温度条件は基本的にはないことから熱源を選ばず、実機プラントへの適応性は高い可能性がある。

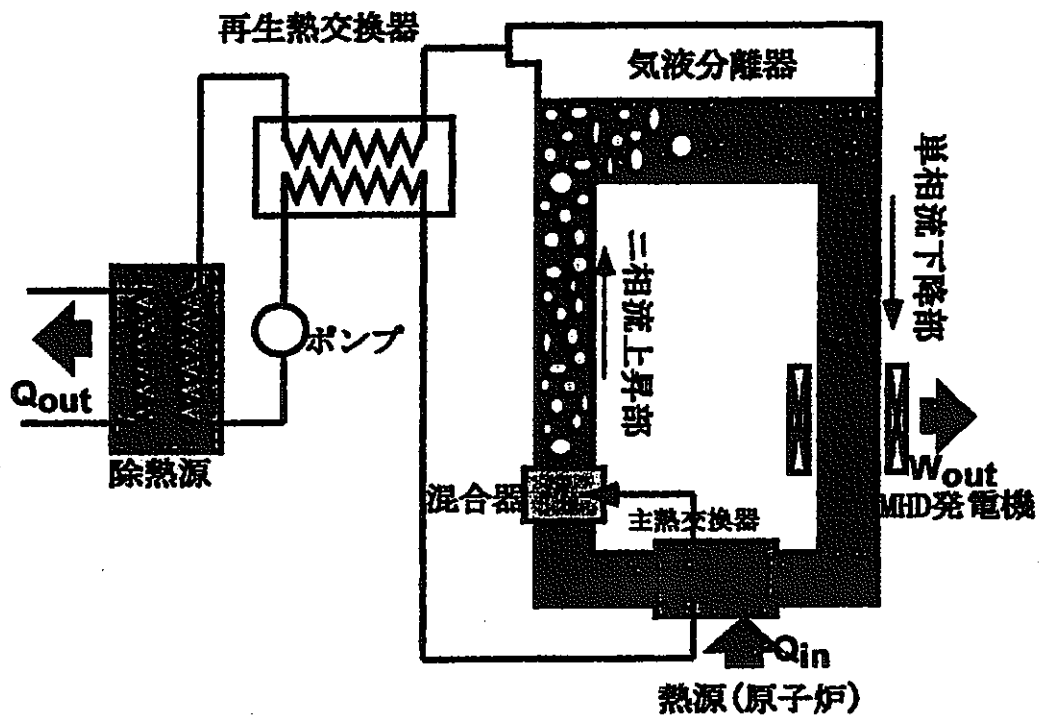


図 3.3.2-1 液体金属二相流自然循環 MHD 発電システムの概念図

3.3.3 熱電素子直接発電

(1) 基本概念

熱電発電の原理を図 3.3.3-1 に示す。熱電材料（多くは半導体）を熱的に並列、電氣的に直列に接続し、接合部間に温度差（熱流）を与えると熱起電力が発生し、熱エネルギーを電気エネルギーに直接変換できる。

熱電発電システムの効率は素子の ZT 値で決まり、ZT が大きいほど効率が向上する。Z は性能指数で、素子の物性（熱伝導率と電気伝導率）で決まる。一方、T は素子平均温度で、システムの運転温度で決まる。システムの効率を向上させるためには、電気伝導率が大きく、熱伝導率が小さいという矛盾した物性を持つ材料を開発する必要があるが、結晶構造の工夫、ドーピングの最適化、材料の複合化等により、さらなる材料の高性能化が期待できると考えられている。なお、現状得られる熱電材料では、ZT=1 程度が上限でありシステムの効率は 5% 程度に留まっている。

熱電発電システムとしては、図 3.3.3-2 及び図 3.3.3-3 に示すように、多数の熱電素子モジュールを板状に並べてプレート型の熱交換器とし、それを炉容器内に配置して 1 次冷却材から 2 次冷却材に熱を伝える過程で発電を行うといった方式が考えられている。本方式では、水を一切使用しない発電が可能であるため、Na 水反応の発生を完全排除することが可能となる。また、システムの大幅な簡素化による経済性向上も期待できる。ただし、現状では、前述のようなシステムの効率の低さが本方式のネックになっている。

小型 FBR (Na 冷却及び重金属冷却) に適用できるシステム効率を高めた (~30%) 熱電発電システムの実現可能性に関する見通しを得る目的で、平成 11 年度、アイデア公募に基づく研究「高速炉用直接エネルギー変換システムに関する研究」を、米国ローレンス・リバモア国立研究所 (LLNL) において実施している。本研究の実施内容は以下の通りであり、本研究の成果に基づいて、今後本概念の有用性を評価して行く計画である。

(i) 熱電材料の選定

高い ZT 値を有し、高効率の熱電エネルギー変換を可能とするポテンシャルを持つ熱電材料を選定する。LLNL の計算材料科学に関するノウハウ等を活用する。

(ii) 直接エネルギー変換システムの開発

高効率直接エネルギー変換を可能とするポテンシャルを持つ熱電発電システムを開発する。異なる変換システムや様々な材料をカスケードに結合することにより、効率向上を狙う。原子炉出口冷却材温度 700°C 程度の重金属冷却炉を前提に、エネルギー変換システムの効率 30% を目標とする。また、原子炉出口冷却材温度 500°C の Na 冷却炉に適用した場合の評価も行う。

(2) 設計要求に対する適合性

現状は、高効率の熱電発電システム実現の可能性について概念サーベイを行う

ている段階であり、設計要求に対する適合性は未検討である。

(3) 評価

中間評価を行うための判断材料が揃っていないが、現状考えられる問題点等をまとめておく。

(i) 経済性評価

熱電素子直接発電では蒸気発生器、タービン等の設備が不要であり、また、2次系も不要であるため、原子炉及び冷却系を極めてコンパクトにできる。熱出力 125MWt の小型 Na 冷却炉で素子面積 (熱交換器面積) 580m²、炉容器径 2.5m との既往研究例もあり、経済性向上ポテンシャルはかなり高いと考えられる。ただし、これら試算は、Z T 値を現状の約 1 から約 10 にまで向上させ、高発電効率 (30%程度) を実現できることが前提である。

(ii) 構造健全性評価 (含む耐震性)

熱電素子 (半導体) に温度勾配を与えたときに生じる熱起電力を利用する発電方式であり、素子の熱応力に留意する必要がある。

(iii) 安全性評価

基本的に水を使用しない発電が可能であるため、Na 水反応を完全に排除することができる。なお、鉛ビスマス冷却材を使用する場合は Na 火災も排除できる。

(iv) 製作建設性

熱電素子を用いた熱交換器の製作性について検討が必要と考える。

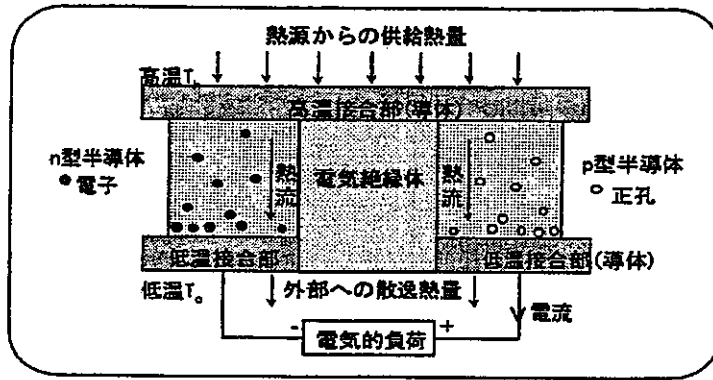
(v) 運転保守補修性

主冷却系には 1 次ポンプ以外の動的機器が存在しないので、従来の発電方式に比べて保守補修性に優れると考えられる。

(vi) 炉型特有の開発課題

(a) 現状では 10%に満たない発電効率を 30%程度まで高めるため、高い Z T 値を持つ熱電材料の開発、効率の高い熱電発電器の開発が必須であり、この点にすべてがかかっていると言える。

(b) LLNLにおける研究では、原子炉出口冷却材温度 1000K の鉛ビスマス冷却小型高速炉が存在し得るものと仮定しているが、高効率 (~30%) を実現するためにこのような高い温度が必須であるならば、このような高温の原子炉システムを実現すること自体が大きな課題となる。



■p型とn型の熱電半導体を熱的に並列、電気的に直列に接続し、接合部間に温度差を与えると熱起電力が発生する。
→熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換

本頁の図の出典：

いずれも、

「IEA-C9821 平成10年度
高速増殖炉利用システム
開発調査報告書（FBR新
技術フィージビリティ調
査）」平成11年3月 財団
法人エネルギー総合工学
研究所

図 3.3.3-1 熱電発電の原理

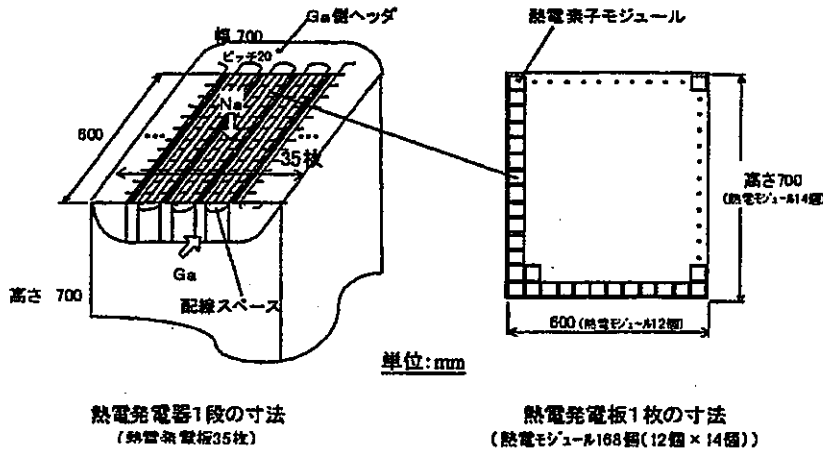


図 3.3.3-2 熱電発電器の例

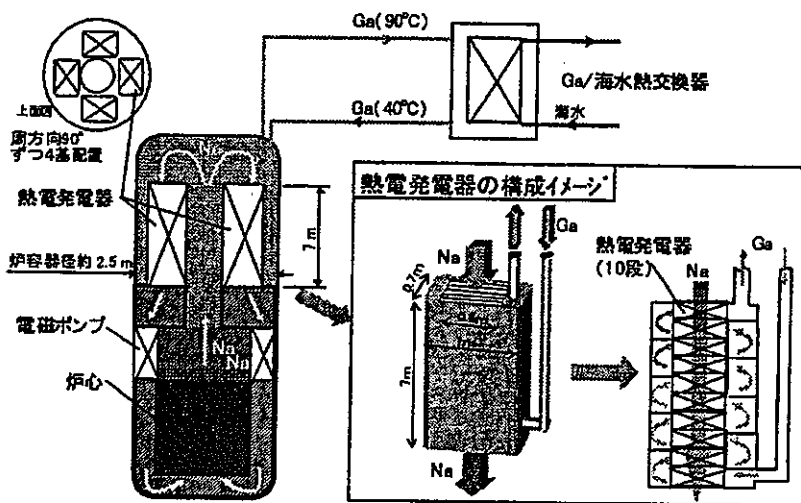


図 3.3.3-3 熱電発電システムの例

3.4 組網線式2重管SGによる2次系削除のループ型大型炉（2ループ）への適用

(1) 基本概念

組網線式2重管SGは、SG伝熱管を2重管化（間隙部にHeガスを満たす）した概念であり、伝熱管の貫通リーク及びそれによるNa水反応を生じ難くすることが可能となる。そのため、本概念を適用し、2次系を削除して経済性を向上させたプラント概念、あるいはNa水反応の排除を目指したプラント概念の研究が従来から進められてきた。

2重管SGを採用した2次系削除プラントでは、SGの伝熱性能が単管SGに比べて劣化するためSGの物量が増加すること、及びSGそのものの製作コストが高くなる（現状、2重管伝熱管の単価は単管の約10倍）ことから、Na水反応対策設備をできるだけ簡素化できる安全ロジックを構築できないと、2次系削除プラントとしての経済性効果を引き出すことができない。

そのため、SGの伝熱管破損想定に関して、下記のような安全シナリオの構築が必須であると考えられる。

[貫通リークをDBEとして想定しない安全シナリオ]

DBE : SG伝熱管の片側リーク

BDBE : SG伝熱管の貫通小リーク

(伝熱管のギロチン破損を想定すると、放出系等の対策設備なしでは炉心安全の成立見通しが無い)

上記のような安全シナリオを構築するためには、次の4つの条件をクリアすることが必要となる（「(3) (iii) 安全性評価」において詳述）。

[条件I] : 共通の要因による内外管同時破損の排除

[条件II] : 片側管の破損による他方管の従属破損の排除

[条件III] : 独立破損の重畳による内外管同時破損の排除

[条件IV] : 貫通小リークが発生した場合の炉心安全性の確保

本節では、これら4つの条件がクリアされることを前提に、2重管SGを大型炉に適用した場合のプラント概念を検討し、その経済性効果を明らかにするとともに、その際の開発課題及び課題解決の見通しを検討する。

プラント概念検討に当たっての基本的な構想は以下のとおりとする。

- (i) ループ型炉（1次系機器合体・ループ数削減）の設計をベースとして、これに2重管SGを適用し、2次系を削除する。
- (ii) NSSS物量を約2500tに抑えることを目標とする（ベースプラントのNSSS物量が約2600tであり、これを下回らないと、2次系を削除する意味がないため）。
- (iii) プラントの基本仕様は、ベースプラントと同様とする（ヒートバランス、冷

却系ループ数、崩壊熱除去系の構成等)。

(iv) 物量合理化を合理的なものとするため、SG伝熱管の破損想定を「DBE：片側リーク、BDBE：貫通小リーク」とする。

(2) 基本仕様

本プラントの基本仕様を表 3.4-1 に、プラント概念図を図 3.4-1 に示す。

本プラントは、熱出力 3570MWt、電気出力 1500MWe のループ型プラント(2ループ)であり、ベースプラントと同様、1次系温度条件は 550/395℃、蒸気条件は 495℃/16.6MPa、発電効率は 42%である。

炉心及び原子炉構造はベースプラントと同じであるが、SGは図 3.4-2 に示すように2重管式ヘリカルコイル型とし、さらに1次ポンプ(機械式)との合体機器として系統の簡素化を図っている。また、崩壊熱除去系は、ベースプラントと類似のPRACS 2系統+DRACS 1系統としているが、PRACSコイルをSGの管束上部に設置する設計としている。

なお、2重管SGを適用した冷却系概念の検討に当たっては、次の3ケースについて検討し、比較評価を行っている。

[ケースA] :ヘリカルコイル管SG+1次ポンプ合体

[ケースB] :ヘリカルコイル管SG+1次ポンプ分離

[ケースC] :直管SG+1次ポンプ分離

比較評価結果は下記のとおりであり、ここでは、ケースAの「ヘリカルコイル管SG+1次ポンプ合体」を最も適切な概念として選定している。

(i) ケースB

NSSS物量はケースAと同程度であるものの、配置スペースの拡大により格納容器体積が約10%増加する。また、下部引き廻しとなるミドルレグ配管の補修が難しい(アクセス性が悪いため)。

(ii) ケースC

NSSS物量はケースAよりも約10%削減できるものの、SGの高さの増加及び配置スペースの拡大により格納容器体積が約10%増加する。また、ケースBと同様、下部引き廻しとなるミドルレグ配管の補修が困難であり、更に、給水管板(下部に位置する)へのアクセスが困難であることから、遠隔操作によるSG伝熱管の検査・補修が必要となる。

本プラントの原子炉建屋配置を図 3.4-3 及び図 3.4-4 に示す。ベースプラントと同様、原子炉建屋と補助建屋を基礎一体とし、2次元(水平)免震を採用している。なお、1プラント当たりの建屋容積は、ベースプラントよりやや小さい約 11.15 万 m³/プラントに抑えている。

(3) 設計要求に対する適合性

詳細は未検討であるが、「ループ型炉(1次系機器合体・ループ数削減)」をベースとした設計であり、設計要求に対する適合性についても、これに準じた達成度が期待できる。

(4) 評価

本プラントの経済性、構造健全性、安全性、製作建設性及び運転保守補修性に関する中間評価結果（主に、ベースプラントと異なる点）を以下まとめる。

(i) 経済性評価

(a) 原子炉及び冷却系の物量

NSSSの物量は下記のとおりであり、合計物量は約2390tである。2次系削除による物量削減効果はかなり大きく、ベースプラントの約2600tと比較して約10%の物量削減となっている。

① 原子炉構造 : 約870t (炉心構成要素を除く)

② 1次冷却系 : 約1520t

なお、主要な機器の寸法は、下記のとおりである。

① 原子炉容器 : $\phi 9.6\text{m} \times 17\text{mH}$

② 蒸気発生器 : $\phi 5.8\text{m} \times 16\text{mH}$ (1次ポンプ合体)

(b) 建屋容積

原子炉建屋の容積は約11.15万 m^3 /プラントであり、ベースプラントの約11.5万 m^3 /プラントと比較して約3%減少している。一方、格納容器容積は約1.73万 m^3 であり、ベースプラントと比較して約30%増加している。

(c) 建設工期

NSSS物量削減等により、ベースプラントの建設工期(46ヶ月程度)と同等以下とすることが可能と考えられる。

(d) 所内負荷率

2次系削除等により、ベースプラントの所内負荷率(約4.6%)と同等以下とすることが可能と考えられる。

(e) プラント稼働率

2次系削除等により、定検期間をベースプラント(約45日)と同等以下とすることが可能と考えられる。プラント運転サイクルは16ヶ月であり、プラント稼働率は約91%となる見通しである。

(f) 建設単価

以上の結果より、プラント建設費をベースプラント(20万円/kWe以内:メーカ試算値)から更に1万円/kWe程度低減することが可能と考えられる。ただし、これは、現状では単管の10倍に達する2重管の素材コストが、単管の1.2倍程度まで低減されると仮定した場合の予測値である。

(ii) 構造健全性評価(含む耐震性)

(a) SG伝熱管の摩耗量の抑制

1次ポンプとSGの合体に伴い、合体した機械式ポンプの振動によるSG伝熱管の摩耗が懸念される。ベースプラントでも、IHX・1次ポンプ合体機器におけるIHX伝熱管の摩耗という同様の問題があり、評価手法を開発中であるが、その成果を反映してSG伝熱管摩耗量を評価し、問題ないこと

を確認する必要がある。なお、SG伝熱管はIHX伝熱管より口径・肉厚とも大きいので、振動に対しては剛であり、成立の見通しはあると考えられる。

(b) インペラミサイル対策

1次ポンプのインペラミサイルが発生した場合、SG伝熱管の大規模破損に至る可能性を排除する設備対策が必要である。現状、給水管板を上部位置に設置する対策が取られている。

(iii) 安全性評価

「(1) 基本概念」で述べたように、本節では、次の4つの条件がクリアされ、DBEとしては片側リークのみ、BDBEとしても貫通小リークのみを考慮すればよい安全シナリオが構築できることを前提にプラント概念の構築を行っている。

[条件Ⅰ]：共通の要因による内外管同時破損の排除

[条件Ⅱ]：片側管の破損による他方管の従属破損の排除

[条件Ⅲ]：独立破損の重畳による内外管同時破損の排除

[条件Ⅳ]：貫通小リークが発生した場合の炉心安全性の確保

これらの条件をクリアするための方策及び必要な開発課題について、ここにまとめておく。

(a) [条件Ⅰ]：共通の要因による内外管同時破損の排除

外的荷重（地震、流力振動、内圧、熱荷重等）による同時破損に対しては、構造設計上の工夫により排除可能と考えられる。一方、製作エラーによる同時破損に対しては、内外管の製作工程を分離するといった方策が考えられるが、実際には困難が予想される。

現状予想されるこれらの破損要因の他に、共通破損要因となり得るものがないかどうか、十分に検討する必要がある。

(b) [条件Ⅱ]：片側管の破損による他方管の従属破損の排除

内管破損時の外管の従属破損は、給水・蒸気圧力荷重による外管の破損を回避できる十分な外管肉厚を確保することで対応できる。また、外管破損時の内管の従属破損は、1次Naの圧力や熱荷重による内管の破損を回避できる十分な内管肉厚を確保することで対応できる。

外管及び内管の肉厚確保を担保するために、ISIによる減肉量の検査が重要となる。

(c) [条件Ⅲ]：独立破損の重畳による内外管同時破損の排除

独立破損の重畳による貫通リークの発生確率を $10^{-7}/ry$ のレベルまで低減する必要がある。片側管のリークが発生した際に他方管のリークが重畳して貫通リークに至ることを排除するためには、他方管のリークが生じる以前にリークを速やかに検出し、プラントを停止する必要がある。貫通リークの発生確率を $10^{-7}/ry$ のレベルに抑えるためには、リーク検出時間を下記の程度とする必要がある。

① 同一の管での貫通リーク：3時間程度以内

② 異なる管での貫通リーク：数十秒程度以内

上記のように、特に、異なる管での貫通リークの発生確率を低減するためには、極めて高性能のリーク検出器が求められることが分かる。

(d) [条件IV]：貫通小リークが発生した場合の炉心安全性の確保

貫通リークが生じても、その規模を小リーク程度に抑えることができれば反応生成物の炉心への流入量も少なく、炉心安全の確保は可能と考えられる。炉心への反応生成物の移行挙動、炉心での反応生成物挙動を評価するコードの開発及びその検証が必要となる。

(iv) 製作建設性

SG・1次ポンプ合体機器が大型化するが、APWRのSGを多少大型化する程度であるため、大きな課題はない見通しである。

(v) 運転保守補修性

保守補修性に関しては、給水管板及び蒸気管板から、SG伝熱管への上部からのアクセスが可能なので、インプレースでのSG伝熱管のISI、プラグ補修が可能である。

また、1次ポンプは上部への引き抜きが可能である。

(vi) まとめ

ループ型炉（1次系機器合体・ループ数削減）に2重管SGを適用し、2次系を削除した場合の経済効果について検討した。2次系削除による物量削減効果は大きく、NSSS物量を約10%削減することができ、建設単価を1万円/kWe程度低減できる見通しである。

ただし、本検討では、現状では単管の10倍に達する2重管の素材コストが単管の1.2倍程度まで低減されことを仮定している点に留意すべきである。また、DBEとして片側リーク、BDBEとして貫通小リークを考慮すればよい安全シナリオを前提としている点にも留意すべきである。

表 3.4-1 ループ型炉（2次系削除）の基本仕様

No	項目	基本仕様
1	原子炉型式	ナトリウム冷却ループ型炉（2次系削除）
2	電気出力（発電端）	1500MWe
3	熱出力	3570MWt
4	ループ数	2ループ
5	1次系Na温度	550℃/395℃
6	2次系Na温度	—
7	1次系流量	3.27×10 ⁴ t/h/ループ
8	2次系流量	—
9	主蒸気温度/圧力	495℃/16.6MPa
10	給水温度/流量	240℃/2.90×10 ³ t/h
11	タービン発電機	発電効率42%以上
12	プラント稼働率	91%以上（プラント運転サイクル16ヶ月の場合）
13	炉心・燃料	非均質炉心（回字型炉心）、混合酸化物燃料
14	遮蔽体外接円径	炉心槽内径：約6500mm
15	燃焼度	約15万Mwd/t（取出平均）
16	増殖比	約1.09（燃焼度約11万Mwd/tの場合、約1.15）
17	原子炉停止系	主炉停止系+後備炉停止系（制御棒44本）
18	炉心安全性	①受動的炉停止方策：SASS設置、②再臨界回避方策：ボイド反応度を5～6\$に制限+軸方向ブランケット一部削除
19	炉心支持方式	下部支持方式
20	炉壁保護構造	炉壁冷却なし
21	炉心上部機構	コラム型UIS
22	1次系配管方式	上部流出入方式
23	中間熱交換器	—
24	1次主循環ポンプ	機械式ポンプ
25	蒸気発生器	一体貫流2重管ヘリカルコイル有液面型 （1次ポンプ合体）
26	2次主循環ポンプ	—
27	崩壊熱除去方式	PRACS2系統+DRACS1系統
28	Na漏えい対策	容器：ガードベッセル、配管：エンクロージャ
29	原子炉格納施設	鋼製ライナコンクリート格納施設
30	プラント運転サイクル	約16ヶ月、4バッチ方式
31	①燃料減衰待貯蔵	水プール貯蔵（IVS及びEVSTでの減衰なし）
32	②炉内燃料交換	単回転プラグ+コラム型UIS+パンタグラフ式燃料交換機
33	③炉内/外燃料移送	炉内中継装置+燃料出入機（台車式）
34	免震	2次元（水平）免震
35	プラント寿命	40年
36	原子炉建屋	原子炉建屋容積約11.15万m ³ /プラント（ツインプラント）

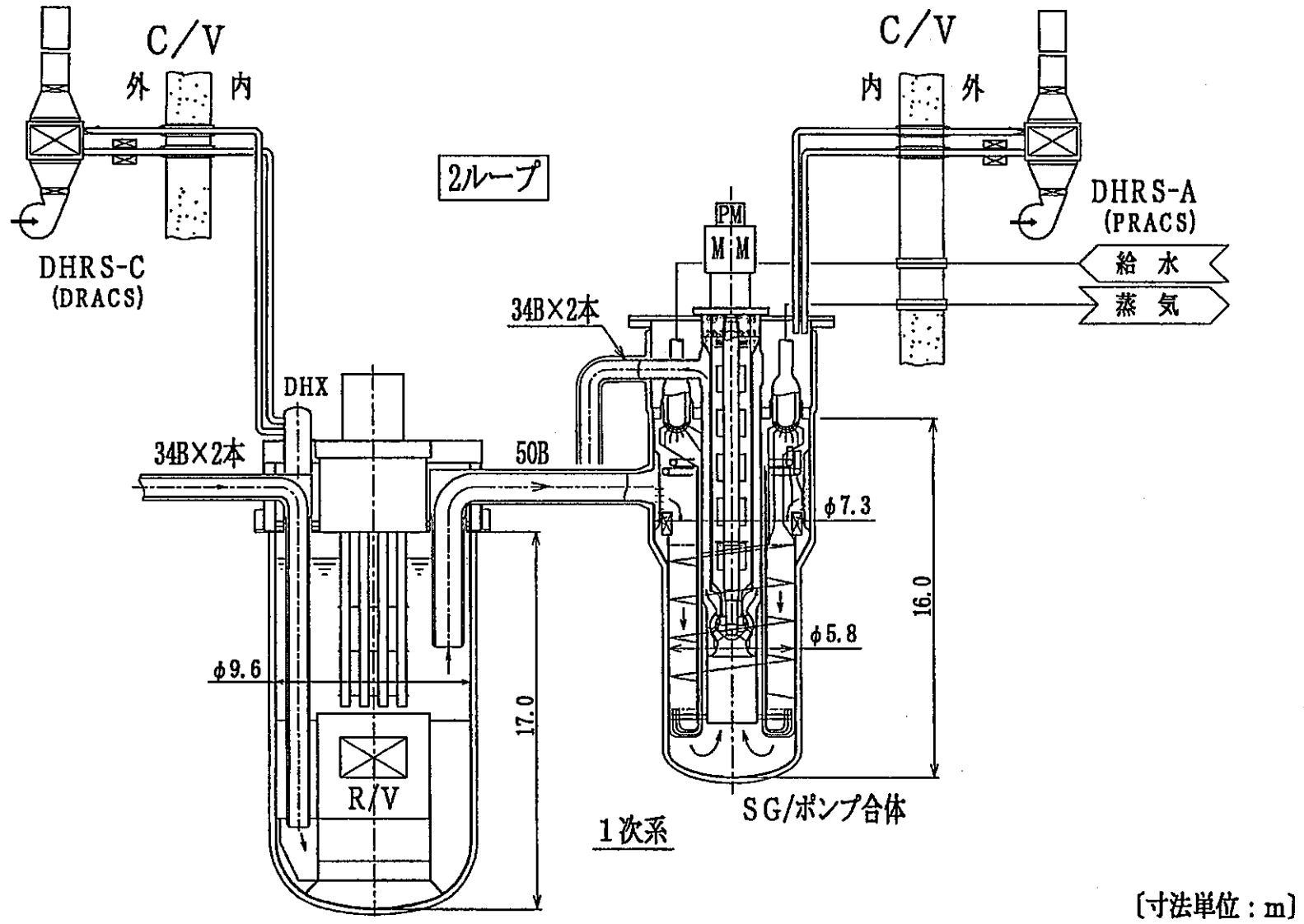
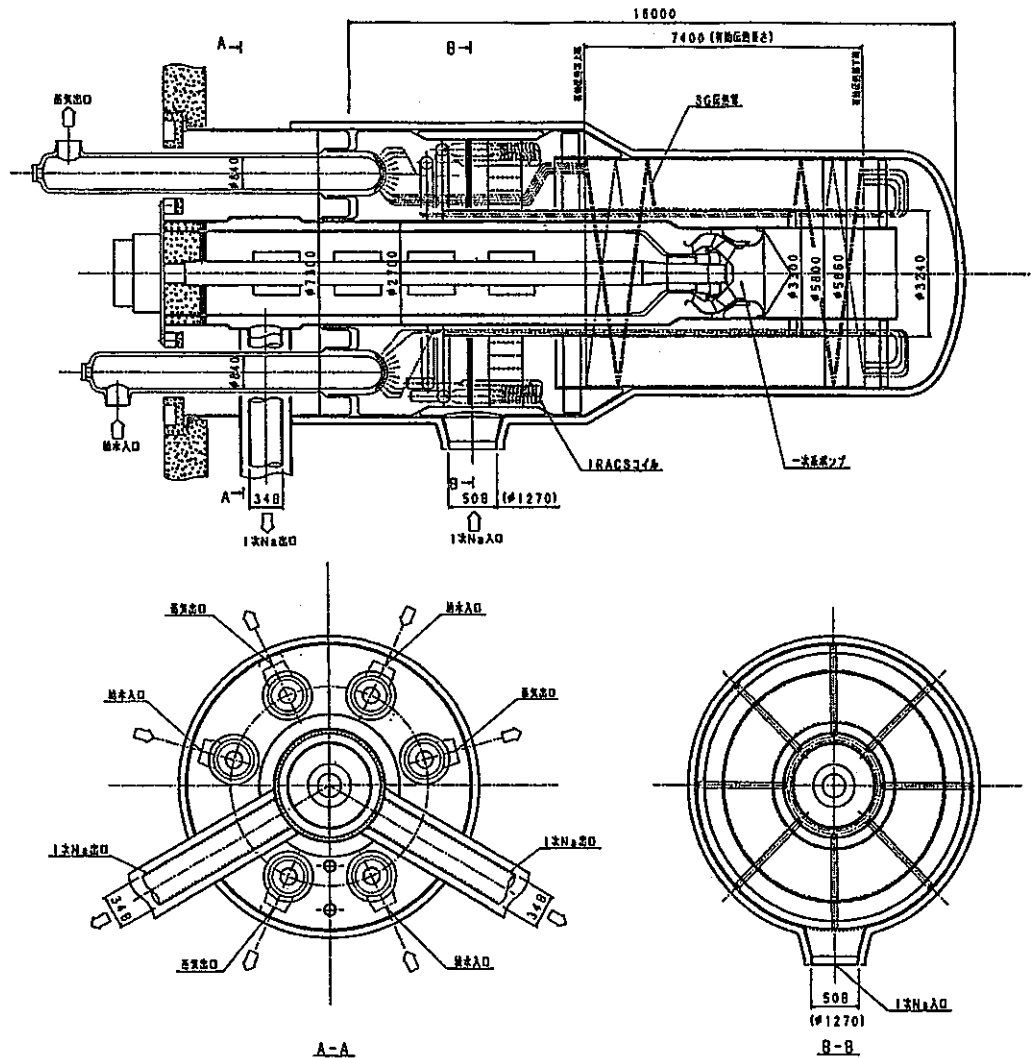


図 3.4-1 ループ型炉（2次系削除）のプラント概念



ポンプ仕様

1次系ポンプ形式	単段片磁込型(下吸込)
基座	2基
定積流量	836m ³ /min
定積運転温度	395℃
定積揚程	76mH ₂ O
定積回転数	555rpm
NPSH _{av}	25mH ₂ O
環込比速度	1250
ポンプ軸動力	9300kw
材質	12Cr鋼
重量	55ton

SG仕様

SG型式 縦置螺旋面ヘリカルコイル型			
管内流体	水・蒸気		
管外流体	ナトリウム		
巻数	2巻		
交換熱量	1785MWt		
伝熱面積	5520m ²		
伝熱管	外径	31.8mm	
	内径	外管	2.2mm
		隙隙層	0.4mm
		内管	1.6mm
		合計	4.2mm (±10%, -%)
	有効伝熱管平均長さ	65m	
本数	861本		
管ピッチ(軸/径)	50mm/50mm		
定積流量	水・蒸気側	2.90×10 ⁶ kg/hr	
	ナトリウム側	3.27×10 ⁶ kg/hr	
	給水入口	240℃	
	蒸気出口	497℃ (16.5MPa)	
定積温度	ナトリウム入口	550℃	
	ナトリウム出口	395℃	
材質	12Cr鋼		
重量	650ton		

図 3.4-2 ループ型炉(2次系削除)のSG構造概念

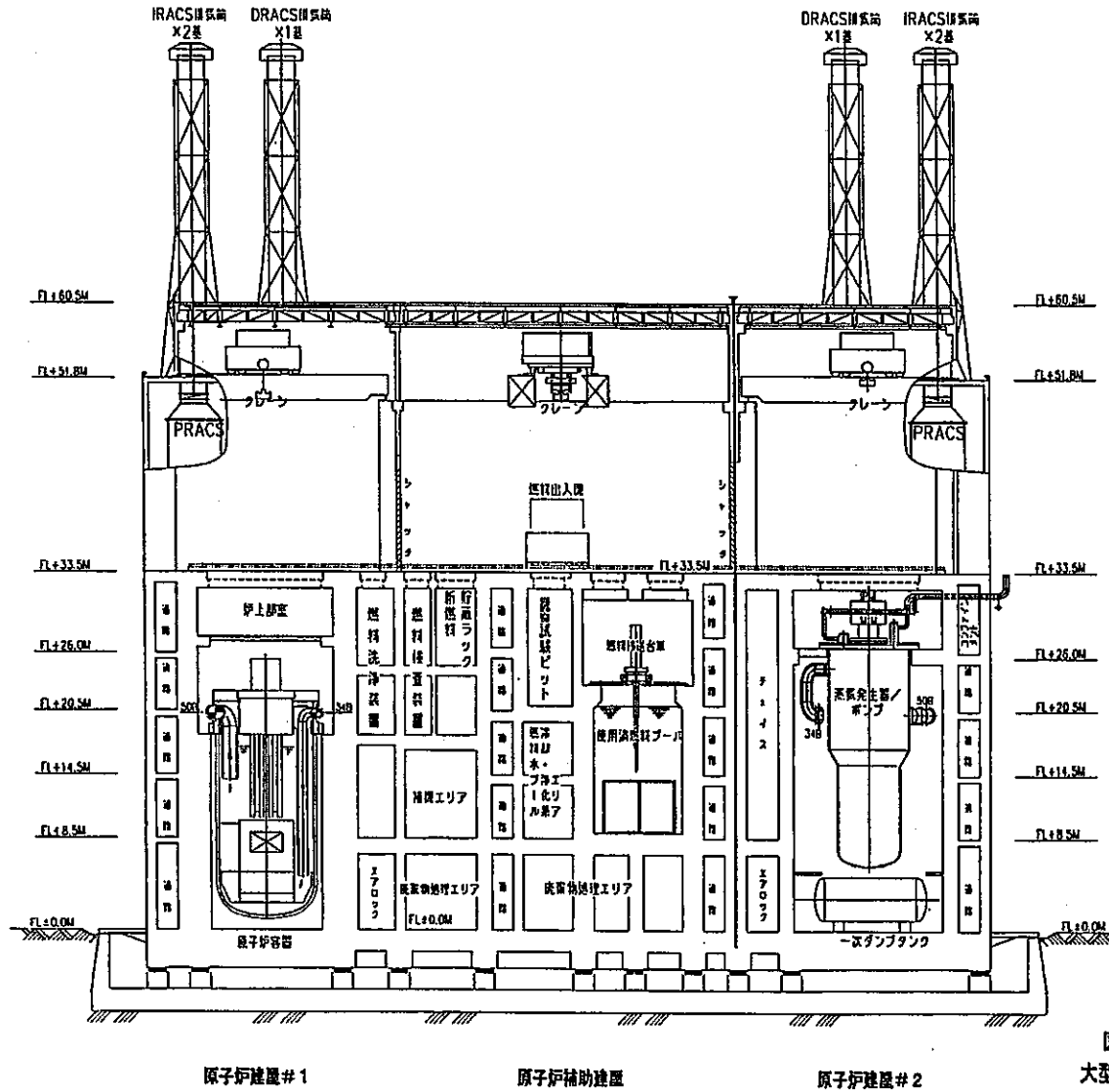


図 5.3
大型Naフ

図 3.4-3 ループ型炉（2次系削除）の原子炉建屋配置（立面）

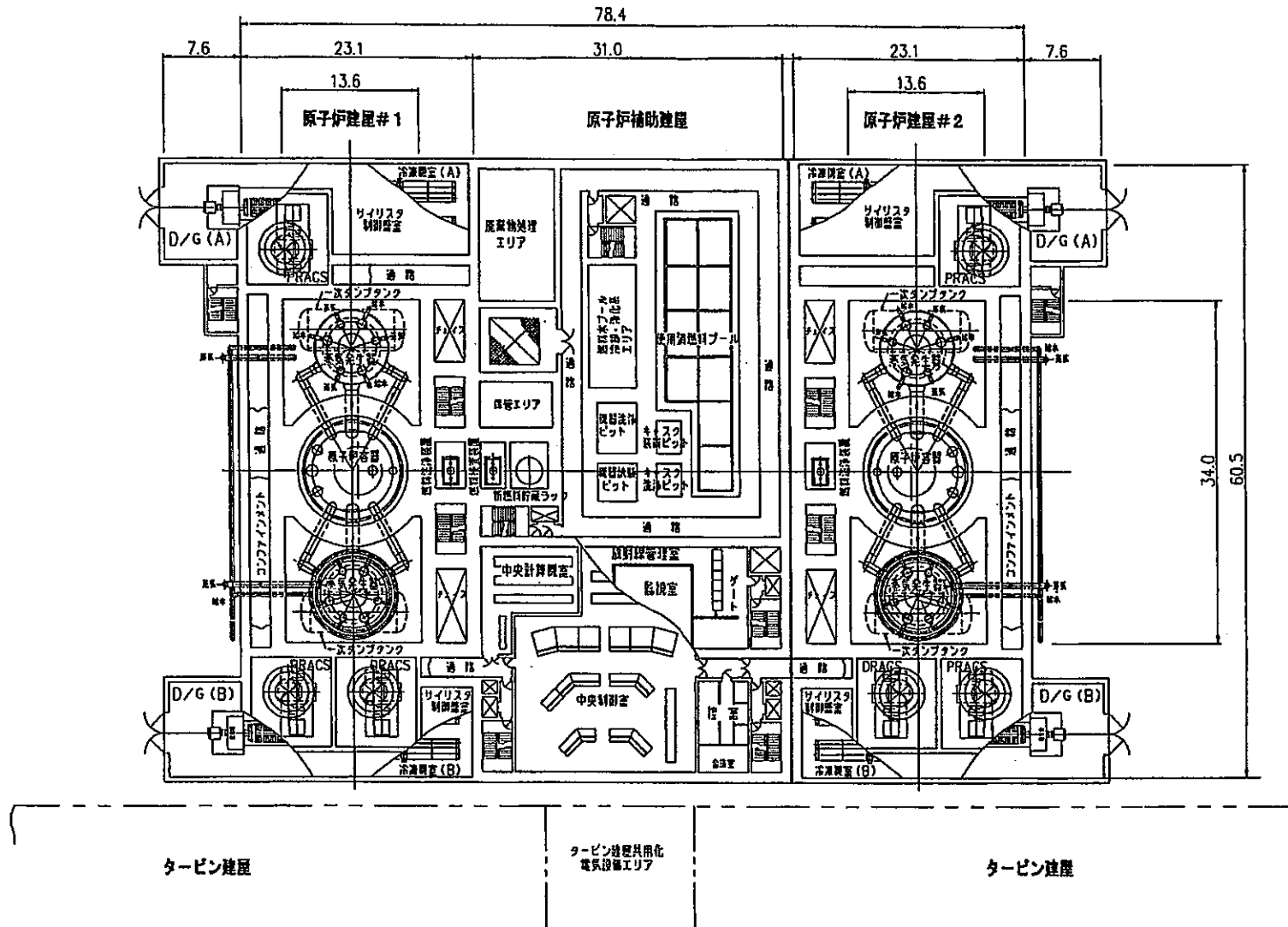


図 3.4-4 ループ型炉（2次系削除）の原子炉建屋配置（平面）

4. 総合評価

本検討では、従来の概念にとらわれることなく幅広く概念の検討を行う、という実用化戦略調査研究の主旨にのっとり、数多くの2次系簡素化アイデアについて予備的な概念検討を実施した。そして、これらの2次系簡素化概念について、実用化戦略調査研究のPhase-Iの中で絞込を実施して、Phase-II以降の開発に繋げてゆく必要がある。Phase-Iでの概念絞込を行うためには、より詳細な経済性評価、課題解決の見通し、及び開発計画を纏めることが重要である。H12年度の検討でこれらの評価を完結するためには、プラント概念を構築した際に経済性目標達成の可能性が高い概念、及び安全性向上の効果が大きい概念をこれまでの検討結果に基づいて絞り込んだ上で、検討を行う必要がある。そこで、今後の検討に供する概念を選定することを目的に、本章では3章で検討・評価した2次系簡素化概念について、相互比較による評価を行う。

比較・評価の対象とする概念は、3章で検討及び評価を行った概念の中で、実現性、システム簡素化に対する効果、及び経済性向上の効果が程度見通せるという観点から12の概念を選定した。3章の各節における概念の評価結果の中で選定された12の概念に対する、経済性に係わる評価である物量算定結果、安全性に係わる評価であるNa-水反応に係わる評価、及び開発課題を取りまとめて表4-1に示す。

尚、本章では各概念を簡便に区別するために、マル付き数字(①～⑫)で識別している。①～⑫と各概念との対応については、表4-1中に示す。

4.1 技術的成立性確認のために早期に実施すべきR&D課題の抽出

本報告書で検討した2次系簡素化の概念は、その実現のための技術的課題が第3章で抽出された。しかしながら、その技術的成立性については、設計検討だけでは判断することができず、それを確認するためには実験を含むR&Dが必要である。そこで、各概念について、多くの開発課題の中から、それぞれの概念の成立性を決定する技術因子、即ち研究開発において早期にデータを取得すべき項目を抽出する。

なお、これらの項目については、実用化戦略調査研究のPhase-IIの中でデータを取得し、実用化候補概念の判断材料とすることが望まれる。

概念①：

○1次Na系高圧条件下の伝熱管内Na-水反応挙動

本概念の2次系削除のための安全論理は、SG伝熱管破損時のNa-水反応が、管内(水・蒸気側)での反応となり、破損範囲の拡大や反応生成物の炉心への移行が起こりにくいことにある。この効果をシステム設計に反映するためには、以下の項目についての実験的知見が必要である。

- ・適切なNaと水系の圧力設定
- ・Na-水反応の管内での進展と、破損伝熱管の欠損挙動
- ・反応生成物の1次Na系への混入量
- ・反応生成物のタービン系への移行量と主蒸気隔離弁に必要な性能

- ・タービン系に移行した反応生成物の影響

これらの知見については、実伝熱管規模の Na 試験 (Na-水反応試験) が必要であるが、Na 系を加圧した試験となるため、試験装置を作成するにあたって新たな R&D 課題が存在すると予測できる。

概念②～⑤：

○伝熱性能の把握

本概念は Pb-Bi 伝熱媒体の局所的な対流により、Na 伝熱管から水・蒸気伝熱管に熱が輸送される現象を用いた熱交換器である。しかしながら現状では、この熱輸送能力の評価には、限定された小規模な試験結果を用いて交換熱量の評価を行っており、より実機体系に近い系で、精度の高い実験を実施し、評価式を作成する必要がある。

○Pb-Bi 冷却材による伝熱管、構造材料の腐食、及び防食技術

Pb-Bi 冷却材を内包する機器を設計するにあたっては主要な課題であり、鉛-ビスマスを冷却材とする重金属冷却炉の開発課題と同様である。重金属冷却炉と異なる点は、Pb-Bi が循環の無い環境で使用されることである。

○偶発的な Na・水伝熱管同時破損時の Na-水反応挙動

偶発的な Na・水伝熱管同時破損が発生した場合の Na-水反応挙動を確認し、安全上影響が少なさを、想定する必要が無いことであるか、を確認する。

○伝熱管の従属破損防止技術

1 本の伝熱管が偶発的に破損した場合に、その破損を原因として他の伝熱管が従属破損しないことが本概念の安全ロジックの要点である。よって、伝熱管ホィップや圧力荷重等で他の伝熱管が破損しないための設計条件を明らかとする必要がある。

○1 次 Na 系への Pb-Bi 混入時の影響

Na 系伝熱管が破損した場合、設計によっては中間伝熱媒体の Pb-Bi が 1 次 Na 系に混入する。その際の影響について以下の知見が必要である。

- ・ 3 元合金形成挙動
- ・ Na 中での Pb-Bi 沈降挙動、分離方法
- ・ 混入量制限条件

○伝熱管破損検出の方法

中間伝熱媒体と 1 次冷却材が異種金属であり、無制限な中間伝熱媒体の Na 系混入は許されないと考えられる。そこで、Na 系伝熱管の破損検出技術及び ISI 技術が必要である。これらの技術については、早期に開発が必要である。

○熱交換容量限界の確認

交換熱容量を制限する条件を明らかとし、その限界値を把握する必要がある。

概念⑥～⑦：

○伝熱管破損モードの確認

2重伝熱管の破損挙動について試験し、貫通破損発生条件、貫通までの時間的余裕についてデータが必要である。

○伝熱管破損拡大挙動の有無の確認

貫通破損発生時に、隣接する伝熱管へ破損拡大する現象の有無について、実験的に確認する必要がある。

○同一管でない内外管同時破損時の挙動について

同一管でない内外管が同時破損した場合の、Pb-Bi層での水蒸気の回りこみ現象について、挙動を確認する必要がある。

○熱交換容量限界の確認

交換熱容量を制限する条件を明らかとし、その限界値を把握する必要がある。

概念⑧～⑨：

○Pb-Bi冷却材による伝熱管、構造材料の腐食、及び防食技術

Pb-Bi冷却材を内包する機器を設計するにあたっては主要な課題であり、鉛-ビスマス冷却材とする重金属冷却炉の開発課題と同様である。重金属冷却炉と異なる点は、Pb-Biが循環の無い環境で使用されることである。

○1次Na系へのPb-Bi混入時の影響

Na系伝熱管が破損した場合、設計によっては中間伝熱媒体のPb-Biが1次Na系に混入する。その際の影響について以下の知見が必要である。

- ・ 3元合金形成挙動
- ・ Na中でのPb-Bi沈降挙動、分離方法
- ・ 混入量制限条件

○伝熱管破損検出の方法

中間伝熱媒体と1次冷却材が異種金属であり、無制限な中間伝熱媒体のNa系混入は許されないと考えられる。そこで、Na系伝熱管の破損検出技術及びISI技術が必要である。これらの技術については、早期に開発が必要である。

概念⑩～⑪：

○固体伝熱媒体層のNa-水反応に対するバリア効果の確認

本概念は伝熱管破損時に、固体伝熱媒体層が従属破損を防ぎ、また、偶発的な同時破損が発生した場合にもNaと水が接触することを固体熱媒体層が防止することが安全ロジックの要点である。このバリア効果について、固体伝熱媒体層の強度、伝熱管の分離性等を試験することによって確認する。

○伝熱管破損検出及びISI方法

伝熱管破損の検出方法について、見通しを得る必要がある。

○製作方法及びコストの見直し

経済性を見通しを得るために、製作方法及びコストについて詳細に見積もる

必要がある。

概念⑫：本概念については、既存の R&D 計画がそのまま適用可能。

表4-1 2次系簡素化 概念比較表 (その1)

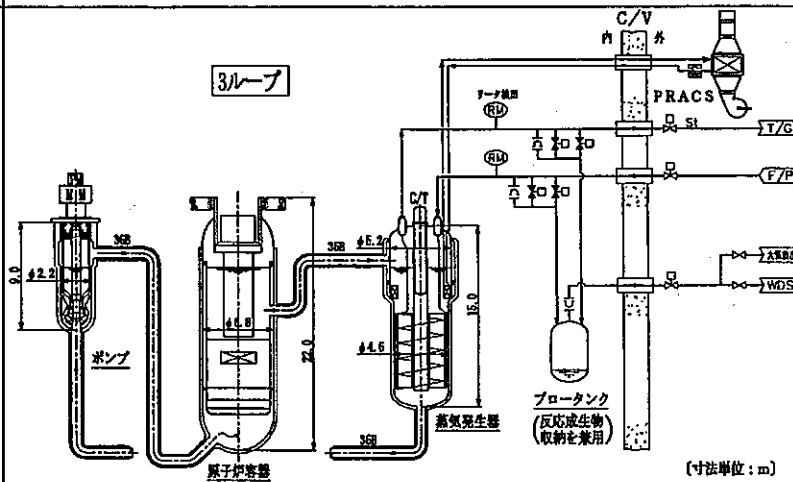
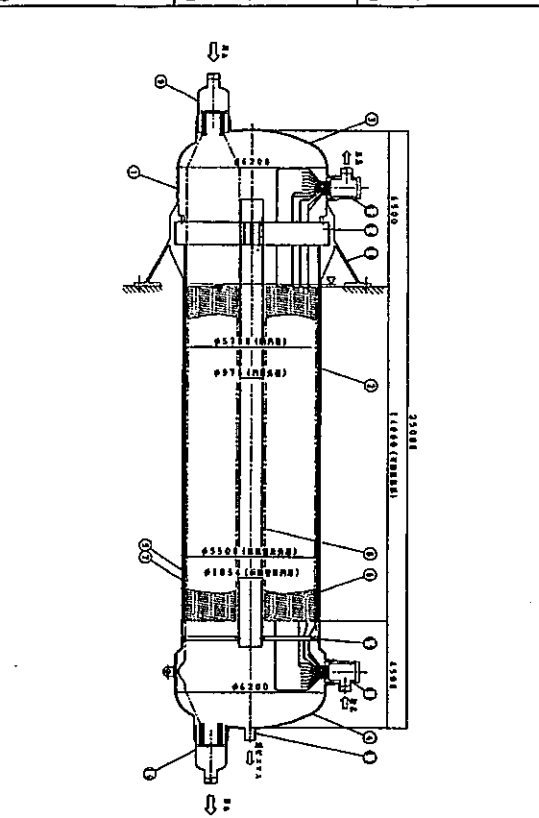
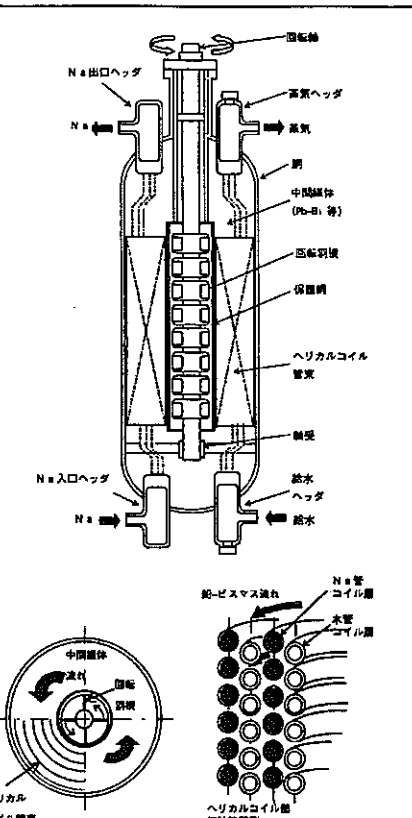
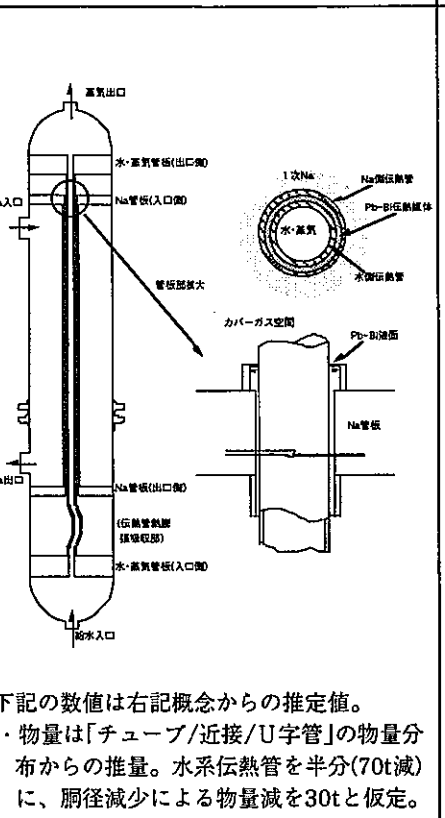
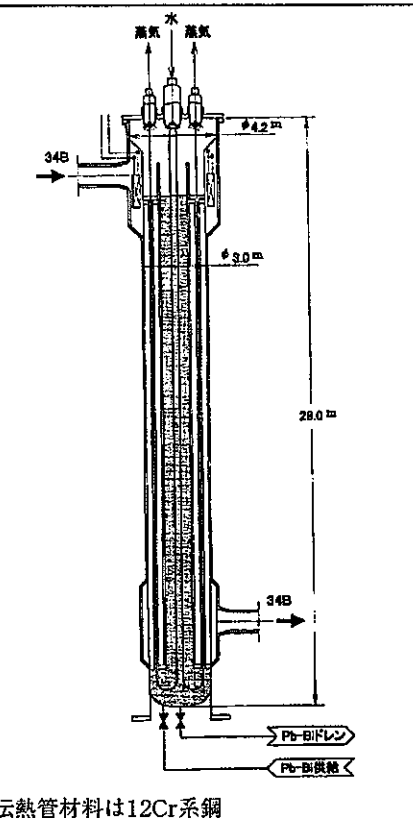
伝熱管配置形式 熱伝達方式	① 1次系高圧化による2次系削除 ループ型炉 (1次系高圧化)			プールの型/近接配置 局所対流熱伝達			⑤ プールの型/近接配置/ヘリカルコイル 強制対流熱伝達	⑥ チューブ型/近接配置/直管 Pb-Bi内熱伝導	⑦ チューブ型/近接配置/U字管 Pb-Bi内熱伝導																																
	② ヘリカルコイル			③ 直管	④ 組合せ																																				
概念図	 <p>3ループ</p> <p>主要なコンセプト: ・1次Na系を6MPa程度、水・蒸気系を5MPa程度にしてNa側より低圧にする。その結果、伝熱管破損時のNa-水反応を管内反応とし、反応生成物の炉心流入の極小化、破損伝播の防止を図る。 ・単管SGで2次系削除を実現し、大幅に物量削減する。</p> <p>1次系高圧化の波及効果: ・被覆管の応力緩和により、炉心設計ウィンドウが拡大する。→炉心コンパクト化 ・1次系温度低下(500/350℃)により、被覆管の設計条件緩和。</p> <p>主要諸元: ・電気/熱出力 1300MWe/3420MWt ・原子炉出入口温度 500/350℃ (6MPa) ・蒸気条件 400℃/5MPa ・ループ数 3ループ ・タービン効率 38% (ゴミ発電と同等の条件)</p>			 <p>Na系伝熱管直管-水蒸気系ヘリカルコイル組合せ型 概念</p>			 <p>伝熱管材料は12Cr系鋼</p>	 <p>下記の数値は右記概念からの推定値。 ・物量は「チューブ/近接/U字管」の物量分布からの推量。水系伝熱管を半分(70t減)に、胴径減少による物量減を30tと仮定。</p>	 <p>伝熱管材料は12Cr系鋼 ・物量410tの内訳: Na管67+水管141+容器153+GV49</p>																																
出力・蒸気条件 MWt/kg/cm ² /℃	経済性の予備評価として、Na大型ループ型炉と物量を比較する。			1000/175/497	1000/175/497	1000/175/497	1000/154/485	(915/160atG/488)	915/160atG/488																																
伝熱面積 m ²	<table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>1次系高圧化</th> <th>2次系あり</th> <th>2次系削除型</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>原子炉構造</td> <td>855 ton</td> <td>870</td> <td>870</td> </tr> <tr> <td>1次冷却系</td> <td>1211 ton</td> <td>690</td> <td>1520</td> </tr> <tr> <td>2次冷却系</td> <td>0 ton</td> <td>1040</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>NSSS 合計</td> <td>2066</td> <td>2600</td> <td>2390</td> </tr> <tr> <td>NSSS 物量/出力</td> <td>1.59 t/MWe</td> <td>1.73</td> <td>1.59</td> </tr> <tr> <td>原子炉建屋容積</td> <td>11万 m³</td> <td>11.5</td> <td>11.5</td> </tr> <tr> <td>建屋容積/出力</td> <td>84.6 m³/MWe</td> <td>76.7</td> <td>76.7</td> </tr> </tbody> </table>			項目	1次系高圧化	2次系あり	2次系削除型	原子炉構造	855 ton	870	870	1次冷却系	1211 ton	690	1520	2次冷却系	0 ton	1040	0	NSSS 合計	2066	2600	2390	NSSS 物量/出力	1.59 t/MWe	1.73	1.59	原子炉建屋容積	11万 m ³	11.5	11.5	建屋容積/出力	84.6 m ³ /MWe	76.7	76.7	4750/4800	6930/4340	5780/4160	6738/7354	(3900/2700)	3900/2700
項目	1次系高圧化	2次系あり	2次系削除型																																						
原子炉構造	855 ton	870	870																																						
1次冷却系	1211 ton	690	1520																																						
2次冷却系	0 ton	1040	0																																						
NSSS 合計	2066	2600	2390																																						
NSSS 物量/出力	1.59 t/MWe	1.73	1.59																																						
原子炉建屋容積	11万 m ³	11.5	11.5																																						
建屋容積/出力	84.6 m ³ /MWe	76.7	76.7																																						
Na側/水・蒸気側				7.67	6.93	5.78	6.74		4.26																																
Na伝面/出力 m ² /MWt				3600	2500	3300	?	(400前後)	510																																
中間層インベントリ t				590/φ7.0×h23.0	520/φ4.0×h33.0	470/φ5.4×h25.0	520/φ8.2×h18.0	(300t前後)	410/φ3.0×h28																																
構材重量 t/サイズ m				0.59	0.52	0.47	0.52	(0.33前後)	0.45																																
構材重量/出力 t/MWt																																									
経済性評価	・2次系簡素化概念の中では最小の物量となり、経済性向上効果は大きい。 ・ただし、1次Na系高圧化に際して、開発要素はある。			・直管-ヘリカルコイル組合せ型の場合、物量は単管SGの2倍程度であり、システム全体で4%程度のコスト低減が期待できる。			・物量が単管SGの2.3倍程度であり、合理化努力によってNa2次系システムと同等又は若干低いコストとなる可能性は有る。	・物量は単管SGの1.5倍程度であり、システム全体で5~8%程度のコスト低減が期待できる。	・物量は単管SGの2倍程度であり、システム全体で4%程度のコスト低減が期待できる。																																
安全性評価 (Na-水反応排除の可能性検討)	・本概念の場合、SG伝熱管破損は設計基準内の事象として扱い、小規模なNa-水反応を含めて安全ロジックを構築する。						・共通要因による同時破損(地震、流体振動、内圧、熱荷重、腐食、製作エラー等による)を排除するための設計方策の検討。 ・従属破損による同時破損(片側破損時の圧力荷重、伝熱管ホイップ等による)を排除するための設計方策の検討。 ・独立破損の重畳による同時破損を排除するための設計方策(破損検出の高信頼度化等)の検討。																																		
安全性評価 (同時破損時の影響検討)	・SGの伝熱管が破損すると、その圧力差により1次Naが伝熱管内に侵入し、管内でNa-水反応が起こる。ただし、Na管内での反応であり、ウエステージ等による破損規模拡大の可能性は小さい。 ・その際、少量の反応生成物が炉心及びタービン側へ移行する可能性がある。			・近接した水管とNa管で同時にリークが発生すると、蒸気がPb-BiとともにNa管中に移行する可能性があり、その場合、Na-水反応が発生する。ただし、Na管内での反応であり、ウエステージ等による破損規模拡大の可能性は小さい。 ・近接管でない場合は、蒸気は中間層のCG空間に放出され、Na-水反応は生じない。 ・反応生成物(ガス、固形物)の炉心への流入の可能性はある。			・水管及びNa管の破損モードの解明。 ・Na管破損検出のためのNa中Pb-Bi濃度計。 ・Na-Pb-Bi三元合金生成の可能性検討。 ・Pb-Bi中の動的機器(軸受け等)			・水管及びNa管の破損モードの解明。 ・Na管破損検出のためのNa中Pb-Bi濃度計。(Pb-Bi液位変化による検出の可能性あり) ・Na-Pb-Bi三元合金生成の可能性検討。																															
開発要素	・1次Na系高圧化に対応したシール構造、CRDM構造等。 ・伝熱管内Na-水反応の挙動評価 ・UIS引き抜き方式の燃料交換システム			・伝熱相関式の確立 ・水管及びNa管の破損モードの解明。 ・Na管破損検出のためのNa中Pb-Bi濃度計。 ・Na-Pb-Bi三元合金生成の可能性検討。																																					
その他	・1次Naが高圧であることを活かした炉心概念の最適化も今後の課題である。			・概念②~④は開発課題は同等と考えられ、経済的メリットが大きい④が適している。ただし、管寄せ部の製作性が課題。			・現状では強制攪拌条件での伝熱評価精度が不十分。 ・Na側流速は3~4m/s。Na伝熱間本数を増加させるためNa巻上角度>水巻上角度。			・水・蒸気系をヘッダ式とすることによって大容量化の可能性は有る。	・大容量化(2ループ化)は可能																														

表4-1 2次系簡素化 概念比較表 (その2)

伝熱管配置形式 熱伝達方式	⑧ プール型/分離配置/ヘリカルコイル 自然対流熱伝達	⑨ プール型/直接注水 自然対流熱伝達	⑩ 固体銅媒体/直管,S字管orヘリカル管 固体Cu内熱伝導	⑪ 固体銅媒体/直管(Na管はNaボンド) 固体Cu内熱伝導	⑫ 組網線方式2重管SG	(参考) 単管ヘリカルSG (旭プラント)
概念図						
出力・蒸気条件 MWt/kg/cm ² /°C	1000/175/497	530/102/380	1900/175/497	(検討中)	1785/169/495	1785/169/495
伝熱面積 m ² Na側/水・蒸気側	7670/4520		6734/5471	(検討中)	5520	7680
Na伝面/出力 m ² /MWt	7.67		3.54	(検討中)	3.09	4.30
中間層インベントリ t	3600	3100	543 (酸化物分散強化銅; 暫定材)	(検討中)	-	-
構材重量t/サイズm	590/φ7.9×h28.8	1000(ミストセパレータ含まず)/φ5.8×h約20	269/2.4(胴部1辺)×h約30	(検討中)	585/φ4.5×h16	405/φ4.85×h21
構材重量/出力 t/MWt	0.59	1.89 (注: 蒸気条件を考慮すると更に悪化)	0.43 (構造材料+中間層)	(検討中)	0.33	0.23
経済性評価	・物量が単管SGの2.6倍程度であり、合理化努力によってNa2次システムと同等のコストとなる可能性は有る。	・物量が非常に大きく、経済性目標達成の可能性は低い。	・物量は単管SGの2倍以下で、製造コストが単管SG並であればコスト低減効果有り。 ・長尺構造のHIP法製造コストは不明。 ・高温化が困難(500°C以下)	・伝熱性能は⑨と同様に高いと推定。 ・製造コスト低減を考慮し、固体銅は鋳物。 ・Na管は固体銅との間にNa(ボンド)材を封入。 ・水管と固体銅間はスライト可能。 ・パッキルのため小容量でも経済性高い。	・物量は単管SGの1.5倍程度であり、プラント全体で5~8%程度のコスト低減が期待できる。	
安全性評価 (Na-水反応排除の可能性検討)	・水管とNa管が明確に分離(距離+バウンダリ)されており、Na-水反応の排除が明確。	・水蒸気はNa管近傍までは流れないため、原理的にNa-水反応排除は明確。	・固体銅層の水管及びNa管破損時のバリア効果について確認の必要がある。固体銅層にバリア効果があれば、Na-水反応排除は可能。	・中間固体層の水管及びNa管破損時のバリア効果があればNa-水反応排除可。特に、伝熱管破損時の媒体-伝熱管間隙での蒸気/ボンド材挙動を確認要。	・共通原因同時破損、従属破損の排除、及び検出系による破損検出+炉停止により貫通破損を想定外とする。	
安全性評価 (同時破損時の影響検討)	・水管及びNa管が同時破損してもNa-水反応は発生しない。 ・Na管が破損すると、Na中にPb-Biが移行する。	・水管及びNa管が同時破損してもNa-水反応は発生しない。 ・Pb-Bi圧力が高いので、Na管が破損すると、Na中にPb-Biが大量に移行する。	・隣接管で同時リークが発生しても、中間固体層のバリアによるNa-水反応防止/緩和が期待できる。また、バリア効果が失われても、Na管内反応であり、ウエステージ等による破損規模拡大の可能性は小さい。	・大貫通リークが発生した場合には、ウエステージによる破損拡大、炉心への多量の反応生成物の流入が起こる。		
開発要素	・Na管破損検出のためのNa中Pb-Bi濃度計。 ・Na-Pb-Bi三元合金生成の可能性検討。		・中間固体層のリークに対するバリア効果の確認 ・中間固体層の製造方法(粉末冶金法等)の確立。 ・水管及びNa管の破損検出法の検討。 ・中間固体層中での水・蒸気及びNaの移行挙動及び水及びNaの漏洩時の健全性確認。	・2重管の内外間分離の考え方構築 ・ISI体積検査法の開発 ・リーク検出器の開発 ・反応生成物の炉心移行評価方法の開発 等		
その他	・機器サイズが通常の製造設備での限界に近く、2倍程度の大容量化は困難。		・2次システムより優れた熱伝達効率を持つ ・Cuの伝熱管材料中への拡散による脆化現象について確認する必要がある。	・概念成立性確認要 ・小容量多数基化と崩壊熱除去機能の付加が検討課題。	・反応生成物分離等のNa-水反応影響緩和を設備対応すると、経済性メリットが失われる。 ・安全論理構築のためのR&D課題が大きい。	

4.2 経済性評価

(1) 概念①について

概念①に関してはループ型の NSSS 全体概念であり、物量を Na 大型ループ炉（「旭」）と比較することが適切である。表 4-1 中の「旭」及び「旭（2次系削除）」と比較すると、物量は「旭」と比較して8%程度少なく、経済性向上の可能性を有すると評価できる。

(2) 新型SG概念（②～⑫）について

今年度の新型SG概念の検討は熱交換器単体の概念検討であり、プラントシステム全体での評価ができない。そこで、設計研究例から建設コストを下記の方法で推定した。

「建設コスト推定方法」

実証炉設計等、2次系を有する従来型のFBRシステムでは、建設コストの内、2次系機器（IHX、2次系配管、補助系、及び建屋）の占める割合は約12%である。過去の2重管SGを用いた2次系削除プラントの設計研究例から、SGのコストが2次系用SG（単管SG）の1.6倍となったとき、建設コストが従来システムに比較して約92%となる。新型SGの場合、Na以外の熱媒体を用いることから若干のコストアップ要因が存在すると推測できることから、SGコストが単管SGの1.6倍の場合、建設コストの低減率が5～8%、2倍の場合0～5%程度と推定する。さらに、熱交換器の製作コスト及び中間伝熱媒体のコストについては未検討であるため、構造材料の物量で評価を加える。

各概念の単位熱交換容量あたりのNa側伝熱面積を図4.2-1に比較する。図4.2-1より、伝熱性能とSGの物量は相関を持ち、伝熱面積が少ない、即ち伝熱性能の高い概念ほど物量も少ないことがわかる。さらに、上記コスト推定方法により、建設コスト低減率5～8%程度となる可能性を有すると推定できる概念としては、概念⑥、⑩、及び⑫、コスト低減率0～5%程度の可能性を有すると推定できる概念としては、概念④、⑦と考えられる。概念⑨については、2次系を有する冷却システムのコストを下回る可能性は無いと考えられるが、その他の概念については今後の合理化努力によって同等の経済性となる可能性はあると考えられる。

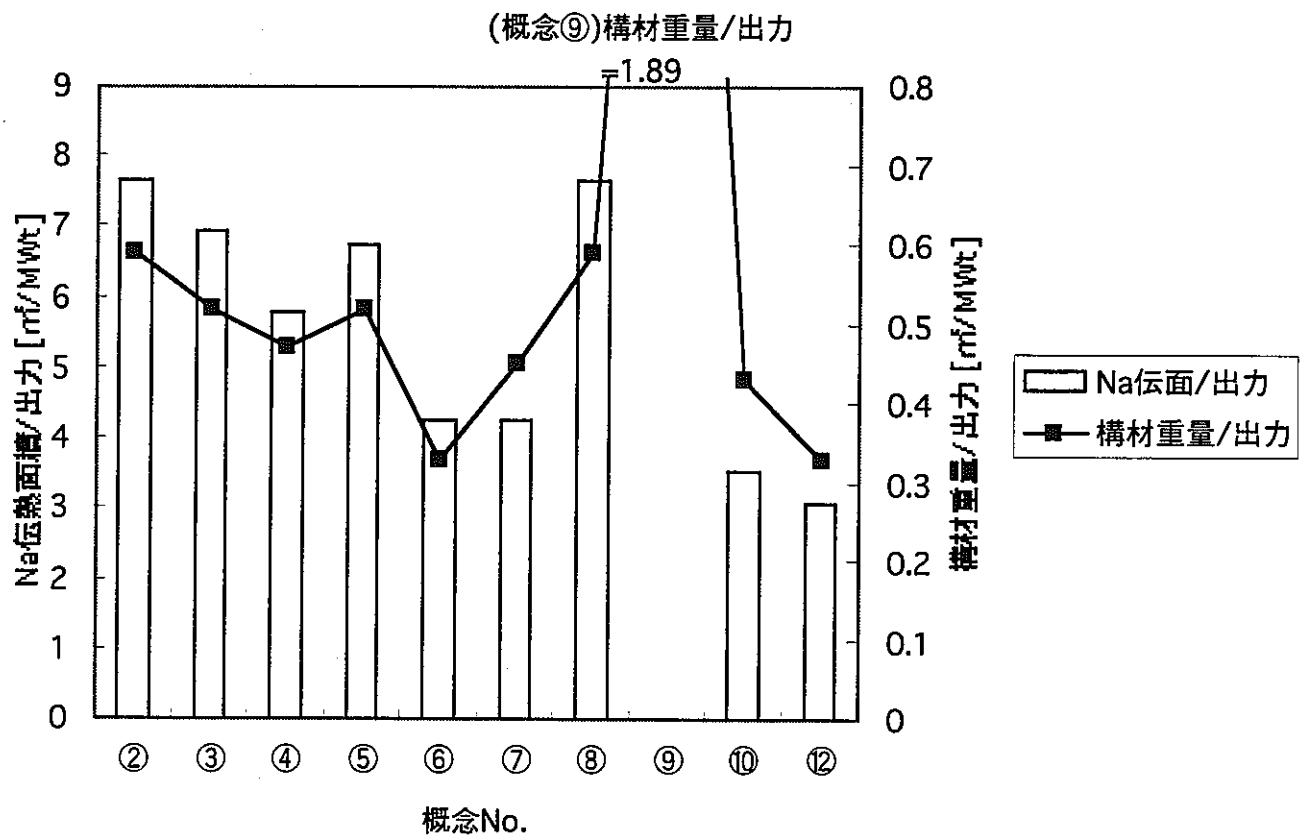


図 4.2-1 新型 SG 概念の伝熱性能/物量比較

4.3 安全性評価

本節では、安全性の比較評価が可能な中間伝熱媒体を用いた新型 SG 概念（[概念②]～[概念⑪]）及び従来からの 2 次系簡素化概念である 2 重管 SG [概念⑫] の安全性について検討し、各 SG 概念において Na 水反応を排除するための要件と、それに向けての開発課題を整理する。

(1) 検討方法

(i) 事象推移の検討

SG 伝熱管の破損から Na 水反応の発生に至る一般的な事象推移を検討し、

A. Na 管と水管の同時破損（同時大リーク）

→ 大規模な Na 水反応発生

B. Na 管と水管の同時破損（同時小リーク）

→ 小規模な Na 水反応発生

C. Na 管、水管どちらか一方のみ破損（片側リーク）

→ Na 水反応発生せず

という結果に至る道筋について分析する。

(ii) Na 水反応のレベルを制限するための要件の整理

上記 (i) の事象推移の検討を踏まえ、Na 水反応を A～C のレベルに留めるために求められる一般的な要件を明らかにする。

(iii) 各 SG 概念における事故影響の検討

[概念②]～[概念⑫] の各 SG 概念において、A～C のレベルの Na 水反応が生じた場合の事故影響を検討する。SG の設計（Na 管と水管の配置、近接の度合い、中間媒体の種類等）により事故影響の厳しさはそれぞれ異なるが、その結果を睨んで、DBE 及び BDBE としての Na 水反応をどのレベル（防護レベル）に抑えるべきかを検討する。

(vi) 各 SG 概念における開発課題の検討

上記 (ii) の検討を踏まえ、各 SG 概念において上記 (iii) で検討した防護レベルを達成するための要件（開発課題）を整理する。

(2) 事象推移の検討

Na 管と水管が独立した SG において、Na 管と水管の同時破損に至る破損形態としては、次の 3 つを考える必要がある。

I. 共通要因による内外管同時破損

地震、流体振動、内圧、熱荷重、腐食、製作エラー等の共通要因により、Na 管と水管が同時に破損する破損形態。

II. 片側管の破損による他方管の従属破損

Na 管または水管のどちらか一方が破損したとき、その際に生じる熱的・機械的影響（給水・蒸気の圧力荷重、伝熱管パイプホイップ）等により他方の管が従属的に破損する破損形態。

III. 独立破損の重畳による内外管同時破損

Na 管または水管のどちらか一方が破損した状態で運転が継続されているとき、それとは独立の原因で生じた他方の管の破損が重畳する破損形態。また、Na 管及び水管の破損規模としては、それが大規模（例：ギロチン破断）であるか小規模（例：ピンホール）であるかにより、発生する Na 水反応の規模が変わってくるので、下記のように分けて考える必要がある。

- I. Na 管と水管の破損が大規模
→ 大規模な Na 水反応発生の可能性
- II. Na 管と水管の破損が小規模
→ 小規模な Na 水反応発生の可能性
- III. 一方の管の破損は大規模であるが、他方の管の破損が小規模
→ 小規模な Na 水反応発生の可能性

なお、S G 内で同時破損している伝熱管同士が近接しているか離れているかによっても、発生する Na 水反応の規模が変わってくると考えられるが、ここでは Na 水反応の規模は Na 管と水管の破損規模のみにより決まるものとし、破損伝熱管同士の位置関係の影響については考慮しないものとした。

これらを踏まえて、S G 伝熱管の破損から Na 水反応の発生に至る一般的な事象推移を検討した。図 4.3-1 にその結果を示す。

同図に示すように、起因事象として Na 管と水管の同時破損（共通要因による）及びどちらかの管の片側破損を考え、更にそれらの破損規模として、大規模な場合及び小規模な場合の両方を考えている。

片側破損の場合、他方の管における従属破損あるいは他方の管における独立破損の重畳が生じると同時破損に至る。その際、Na 水反応の規模がどの程度になるかは、起因事象として想定した片側破損の規模、従属破損の破損規模抑制対策の信頼性及び独立破損の破損規模により決まる。また、同時破損の場合、Na 水反応による伝熱管破損本数の増加（高温ラプチャ等による）があると、破損規模及び Na 水反応の規模が拡大する。

(3) Na 水反応のレベルを制限するための要件の整理

ここでは、Na 水反応を、下記の各レベルで終息させるための要件を検討する。

- レベル A：同時大リーク → 大規模な Na 水反応発生
- レベル B：同時小リーク → 小規模な Na 水反応発生
- レベル C：片側リーク → Na 水反応発生せず

図 4.3-2～図 4.3-4 に検討結果を示す。これらの図は基本的には同じものであるが、図中、A～C のレベルに Na 水反応を制限するための要件、及びそれに関連する道筋を太線で示している。

Na 水反応のレベルを制限するための要件は以下のように整理できる。

(i) 目標レベルを A とする要件（図 4.3-2）

・ Na 水反応による伝熱管破損本数の増加（高温ラプチャ等による）の可能性を低減すること。

(ii) 目標レベルをBとする要件 (図 4.3-3)

- ・ 起因事象としての大規模同時破損の発生頻度を低減すること。
- ・ 片側管の破損による他方管の従属破損が生じる場合、その破損規模を小規模に留めること。
- ・ 片側管の破損時に他方管の独立破損が重畳する場合、その破損規模を小規模に留めること。
- ・ Na 水反応による伝熱管破損口径の拡大 (高温ラプチャ等による) の可能性を低減すること。

(iii) 目標レベルをCとする要件 (図 4.3-4)

- ・ 起因事象としての大規模同時破損及び小規模同時破損の発生頻度を低減すること。
- ・ 片側管の破損による他方管の従属破損を防止するための防止対策の信頼性を高くすること。
- ・ 片側管の破損時に他方管の独立破損が重畳する確率を低減すること。

(4) 各SG概念における事故影響の検討

[概念②] ~ [概念⑫] の各SG概念において、A~CのレベルのNa水反応が生じた場合の事故影響を検討する。また、その結果から、DBE及びBDBEとしてのNa水反応をどのレベル (防護レベル) に抑えるべきかを検討する。

(i) プール型/近接配置 ([概念②] ~ [概念⑤])

(a) SG概念

これらの概念は、中間熱媒体 (Pb-Bi) のプールの中にNa管と水管を近接して配置し、Pb-Bi の局所的な自然対流 ([概念⑤] は強制対流) によりNa側から水・蒸気側に熱を伝えるものである。

(b) 事故影響の検討

① 同時リーク

近接したNa管と水管で同時にリークが発生すると、水管から漏洩した水・蒸気がPb-BiとともにNa管中 (1次系) に移行する可能性があり、その際、Na水反応が発生する。この場合、Na水反応生成物 (ガス、固形物) が炉心に流入する可能性がある。なお、Na管中での反応であるため、ウエステージ等による破損規模拡大の可能性は小さい。また、Pb-BiがNa中に混入すると、Na-Pb-Bi 3元合金が生成し炉心に流入する可能性もある。こ

これらの反応生成物の炉心への流入量は、Na 管及び水管の破損規模に応じて増加すると考えられる。

一方、近接していないNa管と水管での同時リークの場合は、蒸気がPb-Bi層のカバーガス空間に放出されるので、Na水反応は生じない。ただし、この場合でもPb-BiのNa中への混入、Na-Pb-Bi3元合金の炉心への流入の可能性はある。

② 片側リーク

Na管破損時にはPb-BiのNa中への混入及びNa-Pb-Bi3元合金の炉心への流入の可能性はある。一方、水管破損時には蒸気がPb-Bi層のカバーガス空間に放出される。いずれの場合もNa水反応は生じない。

(c) 防護レベルの検討

これらのSG概念の物量は単管SGの2～3倍に達しており、従来型の2次系のあるプラントよりも建設コストを低くすることができるかどうかは微妙な所である。したがって、Na水反応の可能性を残し、大がかりなNa水反応対策設備が必要になった場合、2次系削除の経済効果を引き出すことが極めて困難となる。

したがって、これらのSG概念については、目標とする防護レベルを以下のように設定すべきである。

DBE : レベルC (片側リーク)
BDBE : レベルB (同時小リーク)

(ii) チューブ型/近接配置 ([概念⑥] ~ [概念⑦])

(a) SG概念

これらの概念は、Na管と水管を2重管構造としてその間に中間熱媒体(Pb-Bi)を充填し、Pb-Biの熱伝導によりNa側から水・蒸気側に熱を伝えるものである。

(b) 事故影響の検討

① 同時リーク

同一のNa管と水管で同時にリークが発生すると、Pb-Bi層による緩和効果は期待できず、水・蒸気がPb-BiとともにNa中(1次系)に移行し、Na水反応が発生する。この際、ウエステージによる破損規模拡大の可能性はある(高温ラプチャの発生も否定できない)。また、Na水反応生成物(ガス、固形物)が炉心に流入する可能性、Na-Pb-Bi3元合金が生成して炉心に流入する可能性がある。これらの反応生成物の炉心への流入量は、Na管及び水管の破損規模に応じて増加すると考えられる。

一方、同一管でないNa管と水管での同時リークの場合は、蒸気がPb-Bi層のカバーガス空間に放出されるので、Na水反応は生じない。ただし、こ

の場合でも Pb-Bi の Na 中への混入、Na-Pb-Bi 3 元合金の炉心への流入の可能性はある。

② 片側リーク

Na 管破損時には Pb-Bi の Na 中への混入及び Na-Pb-Bi 3 元合金の炉心への流入の可能性はある。一方、水管破損時には蒸気が Pb-Bi 層のカバーガス空間に放出される。いずれの場合も Na 水反応は生じない。

(c) 防護レベルの検討

これらの SG 概念の物量は「プール型／近接配置」に比べると小さく、単管 SG の 1.5～2 倍程度である。そのため、従来型の 2 次系のあるプラントよりも建設コストを 4～8 % 程度低くすることができる見通しであるが、Na 水反応の可能性を残し、大がかりな Na 水反応対策設備が必要になった場合、建設コスト低減効果が引き出せなくなる可能性がある。

したがって、これらの SG 概念についても、「プール型／近接配置」と同様、目標とする防護レベルを以下のように設定すべきである。

DBE	：レベル C (片側リーク)
BDBE	：レベル B (同時小リーク)

(iii) プール型／分離配置 ([概念⑧])

(a) SG 概念

本概念は、中間熱媒体 (Pb-Bi) のプールの下部に Na 管のコイル、上部に水管のコイルをそれぞれ分離配置し、コイル間の Pb-Bi の自然対流により Na 側から水・蒸気側に熱を伝えるものである。

(b) 事故影響の検討

① 同時リーク

Na 管と水管で同時にリークが発生すると、Pb-Bi が Na 中 (1 次系) へ移行し、蒸気が Pb-Bi 層のカバーガス空間へ放出されるが、Na 管と水管が距離と仕切構造により明確に分離されているため、Na 水反応は発生しない。なお、Na-Pb-Bi 3 元合金が生成して炉心に流入する可能性がある。

② 片側リーク

Na 管破損時には Pb-Bi の Na 中への混入及び Na-Pb-Bi 3 元合金の炉心への流入の可能性はある。一方、水管破損時には蒸気が Pb-Bi 層のカバーガス空間に放出される。当然、いずれの場合も Na 水反応は生じない。

(c) 防護レベルの検討

本概念では、大規模な同時リークを想定しても、Na 水反応は生じないものと考えられる。したがって、目標とする防護レベルを以下のように設定できる。

DBE	：レベル A (同時大リーク)
BDBE	：レベル A (同時大リーク)

(iv) プール型／直接注入 ([概念⑨])

(a) SG概念

本概念では、中間熱媒体 (Pb-Bi) のプールの下部に Na 管のコイルを置き、上部の Pb-Bi 中に水を直接注入して蒸気を発生させる。Pb-Bi プールの自然対流により Na 側から水・蒸気側に熱を伝える。

(b) 事故影響の検討

水管が存在しないので、Na 管が破損する場合の影響のみ考えればよい。Na 管が破損すると、Pb-Bi が Na 中 (1次系) へ移行するが、水・蒸気は Na 管近傍まで流れてこないため、Na 水反応は発生しない。この際、Pb-Bi プール全体が加圧されているので、大量の Pb-Bi が Na 中に移行する恐れがある。

(c) 防護レベルの検討

本概念では、大規模な同時リークを想定しても、Na 水反応は生じないものと考えられる。したがって、「プール型／分離配置」と同様に、目標とする防護レベルを以下のように設定できる。

DBE	: レベル A (同時大リーク)
BDBE	: レベル A (同時大リーク)

(v) 固体媒体 ([概念⑩] ~ [概念⑪])

(a) SG概念

これらの概念は、Na 管と水管を近接配置して、その間を熱伝導率の高い固体媒体 (銅、セラミクス等) で充填し、固体媒体の熱伝導により Na 側から水・蒸気側に熱を伝える。

(b) 事故影響の検討

隣接管で同時リークが発生しても、固体媒体のバリア効果による Na 水反応の防止・緩和が期待できる。仮にバリア効果が失われても、Na 管中での Na 水反応であり、ウエステージ等による破損規模拡大の可能性は小さい。Na 管及び水管の破損時に、固体媒体がバリア効果をどこまで維持できるかが重要なポイントになる。

(c) 防護レベルの検討

本概念では、大規模な同時リークを想定しても、固体媒体のバリア効果が維持される限り、Na 水反応は生じないものと考えられる。したがって、目標とする防護レベルを以下のように設定するべきである。

DBE	: レベル A (同時大リーク)
BDBE	: レベル A (同時大リーク)

(vi) 組網線方式2重管SG ([概念⑫])

(a) SG概念

本概念は、Na管と水管を密着2重管構造としてその間隙部にHeガスを満たしたもので、2次系を削除して経済性を向上させたプラント概念、Na水反応の排除できるプラント概念を目指して、従来より検討されてきたものである。

(b) 事故影響の検討

① 同時リーク

同一のNa管と水管で同時にリークが発生すると、水・蒸気がNa中に移行し、Na水反応が発生する。この際、ウエステージによる破損規模拡大の可能性はある(高温ラプチャの発生も否定できない)。また、Na水反応生成物(ガス、固形物)が炉心に流入する可能性がある。反応生成物の炉心への流入量は、Na管及び水管の破損規模に応じて増加すると考えられる。

一方、同一管でないNa管と水管での同時リークの場合も、Heプレナムを経由して蒸気がNa中に移行するので、Na水反応が生じる可能性が高い。

② 片側リーク

Na管破損時にはNa中にHeガスが流出し、水管破損時にはHeプレナム中に蒸気が流入する。いずれの場合もNa水反応は生じない。

(c) 防護レベルの検討

本概念は、SGの物量を単体SGの1.5倍程度に抑え、従来型の2次系のあるプラントよりも建設コストを4~8%程度低くすることができる見通しである。しかし、Na水反応の可能性を残し、大がかりなNa水反応対策設備が必要になった場合、建設コスト低減効果が引き出せなくなる可能性がある。

したがって、「チューブ型/近接配置」と同じく、目標とする防護レベルを以下のように設定すべきである。

DBE : レベルC (片側リーク)
BDBE : レベルB (同時小リーク)

(5) 各SG概念における開発課題の検討

以上の検討を踏まえ、各SG概念において上記(4)で検討した防護レベルを達成するための要件(開発課題)を整理する。

(i) [概念②] ~ [概念⑦] 及び [概念⑫]

これらの概念は、目標とすべき防護レベルを

DBE : レベルC (片側リーク)
BDBE : レベルB (同時小リーク)

とすべき点で共通している。これらを達成するための要件は、上記(3)で述

べたとおりであり、以下のような条件をクリアする必要がある。

(a) DBE：レベルC（片側リーク）とするための要件

① 共通要因による内外管同時破損の発生確率の低減

地震、流体振動、内圧、熱荷重、腐食、製作エラー等の共通要因により、Na管と水管が同時に破損に至る発生確率を低減する。外的荷重による同時破損に対しては構造設計上の工夫が求められ、製作エラーによる同時破損に対しては、内外管の製作工程の分離といった対応が求められる。

② 片側管破損による他方管従属破損の防止対策の信頼性向上

片側管破損時に発生する圧力や熱荷重による他方管の破損を回避できるよう、十分な伝熱管肉厚を確保することが求められる。伝熱管肉厚の確保を担保するため、ISIによる減肉量の検査が重要となる。また、伝熱管パイプホイップによる従属破損が生じないように、伝熱管支持構造を工夫することが求められる。

③ 独立破損の重畳による内外管同時破損の防止対策の信頼性向上

片側管のリークが発生した際に他方管のリークが重畳して貫通リークに至る確率を十分低く（ $10^{-7}/\text{ry}$ のレベル）抑えるためには、他方管のリークが生じる以前にリークを速やかに検出し、プラントを停止する必要がある。そのためには、リーク検出時間を十分短くできる高性能なリーク検出器が求められる。

(b) BDBE：レベルB（同時小リーク）とするための要件

① 共通要因による内外管同時破損の発生確率の低減

特に、大規模な内外管同時破損に至る発生確率の低減が求められるが、上記（a）の①に記載の要件に包絡される。

② 他方管従属破損時の破損規模拡大防止対策の信頼性向上

特に、大規模な従属破損に至る発生確率の低減が求められるが、上記（a）の②に記載の要件に包絡される。

③ 独立破損の重畳による内外管同時破損時の破損規模抑制

特に、大規模破損とならないような抑制方策が求められるが、上記（a）の③に記載の要件に包絡される。

④ Na水反応による伝熱管破損口径拡大の可能性低減

ウエステージ、高温ラブチャ等により、同時小リークが同時大リークに拡大することを防止する必要がある。小規模なNa水反応を短時間で検知できるリーク検出器（水素計、音響計等）や、Na水反応を速やかに終息させるための設備（水ブロー系等）が求められる。

(c) 開発課題

以上の要件をクリアするために必要となる主な開発課題を、以下、各SG概念ごとにまとめる。

① プール型／近接配置／自然循環（〔概念②〕～〔概念④〕）

- a. Na 管、水管の同時破損に至る要因の分析（外的荷重、製作エラー）以外の要因）。
- b. 伝熱管破損モードの解明（特に、同時破損時の Na、Pb-Bi 及び水・蒸気の混合・流動状況等の把握）。
- c. 伝熱管の I S I 手法の開発。
- d. 伝熱管支持構造の検討（パイプホイップ防止方策）。
- e. Na 管破損検出法（Na 中 Pb-Bi 濃度計等）及び水管破損検出法（Pb-Bi 中湿分計等）の開発。
- f. Na 水反応検出法（水素計、音響計等）及び Na 水反应对策設備（水ブロー計等）の開発。
- g. Na-Pb-Bi 3 元合金生成の可能性検討（Na 中に流入した Pb-Bi は、その比重差により速やかに沈下するとの知見があり、多量の 3 元合金生成が生じ難い可能性もある）。
- h. 少量の反応生成物の炉心への移行挙動、炉心での反応生成物挙動の評価手法の開発・検証。

② プール型／近接配置／強制循環（〔概念⑤〕）

上記①と同じであるが、下記の項目が追加される。

- a. Pb-Bi 中の動的機器（攪拌機軸受け等）の健全性確認。

③ チューブ型／近接配置（〔概念⑥〕～〔概念⑦〕）

上記①と同じである。なお、Na 管破損検出法としては、Pb-Bi の液位変化による検出の可能性もある。

④ 組網線方式 2 重管 S G（〔概念⑫〕）

上記①と類似であるが、Pb-Bi を使用していないので、b. 及び g. に当たる項目はない。

(ii) 〔概念⑧〕～〔概念⑪〕

これらの概念は、目標とすべき防護レベルを

DBE : レベル A (同時大リーク)
 BDBE : レベル A (同時大リーク)

とすべき点で共通している。これらを達成するための要件は、上記（3）で述べたとおりであり、以下のような条件をクリアする必要がある。

(a) DBE : レベル A (同時大リーク) とするための要件

① Na 水反応による伝熱管破損本数増加の可能性低減

Na 水反応が生じ得る場合には、ウエステージ、高温ラプチャ等により伝熱管破損本数が無制限に拡大することを防止する必要がある。Na 水反応を短時間で検知できるリーク検出器（水素計、音響計等）や、Na 水反応を速やかに終息させるための設備（水ブロー系等）が求められる。

(b) BDBE：レベルA（同時大リーク）とするための要件
上記（a）と同じである。

(c) 開発課題

以上の要件をクリアするために必要となる主な開発課題を、以下、各SG概念ごとにまとめる。

① プール型／分離配置（[概念⑧]）及びプール型／直接注水（[概念⑧]）

これらの概念では、構造上Na水反応は生じ得ないと考えられるので、上記の（a）及び（b）に関わる具体的な開発課題はない。ただし、Pb-Biの使用に関連した下記の開発課題がある。

- a. Na管破損検出法（Na中Pb-Bi濃度計等）の開発。
- b. Na-Pb-Bi 3元合金生成の可能性検討。
- c. 反応生成物（3元合金）の炉心への移行挙動、炉心での反応生成物挙動の評価手法の開発・検証。

② 固体媒体（[概念⑩]～[概念⑪]）

これらの概念でも、固体媒体のバリア効果が維持される限り、Na水反応は生じ得ないと考えられるので、上記の（a）及び（b）に関わる具体的な開発課題はない。ただし、固体媒体に関連した下記の開発課題がある。

- a. 固体媒体の製造方法（粉末冶金法等）の確立。
- b. Na管及び水管破損時の固体媒体の健全性確認。関連して、Na管及び水管の破損検出法の検討。
- c. 固体媒体中でのNa及び水・蒸気の移行挙動の把握。

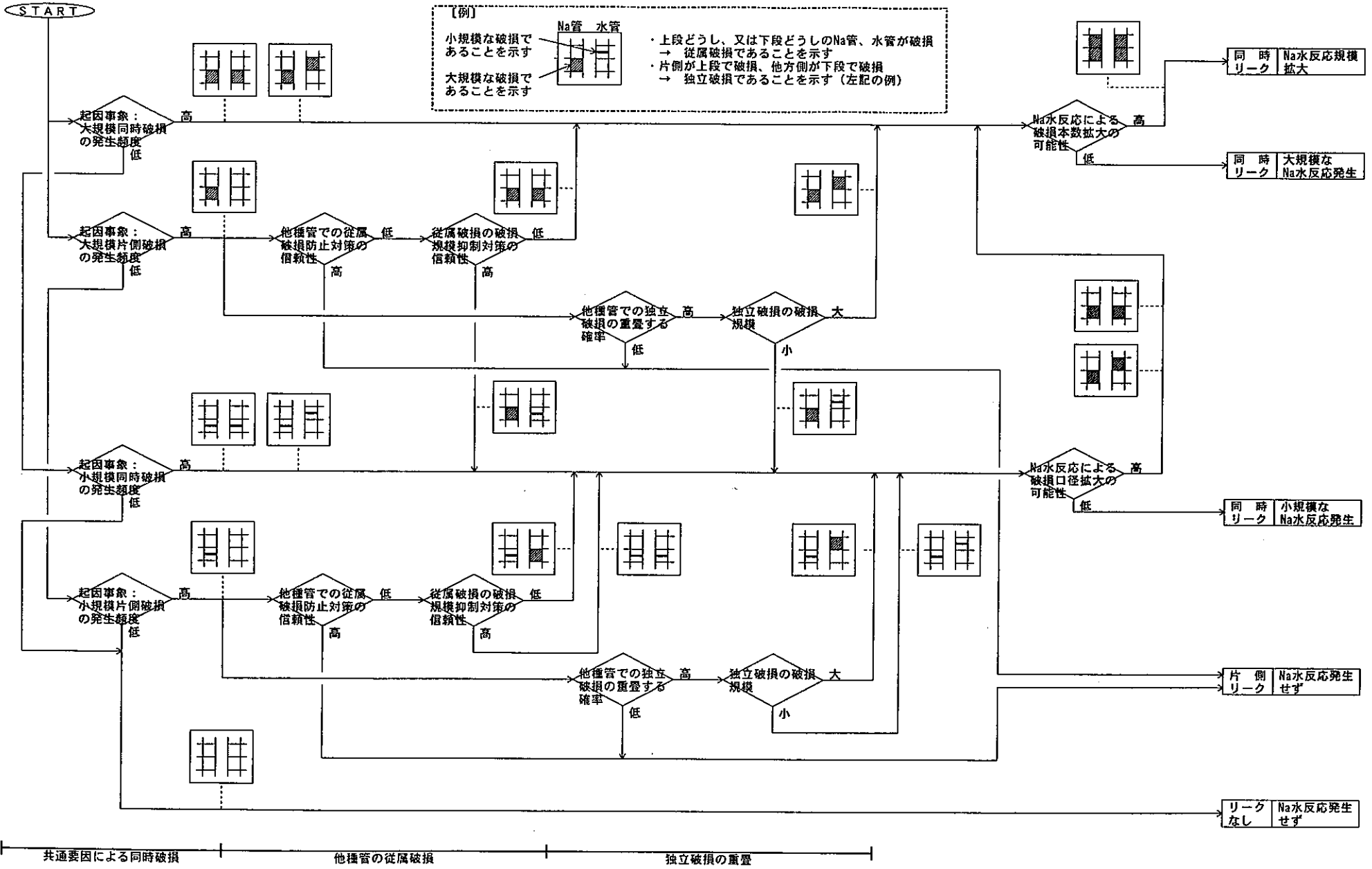


図4.3-1 SG伝熱管破損からNa水反応に至る一般的な事象推移

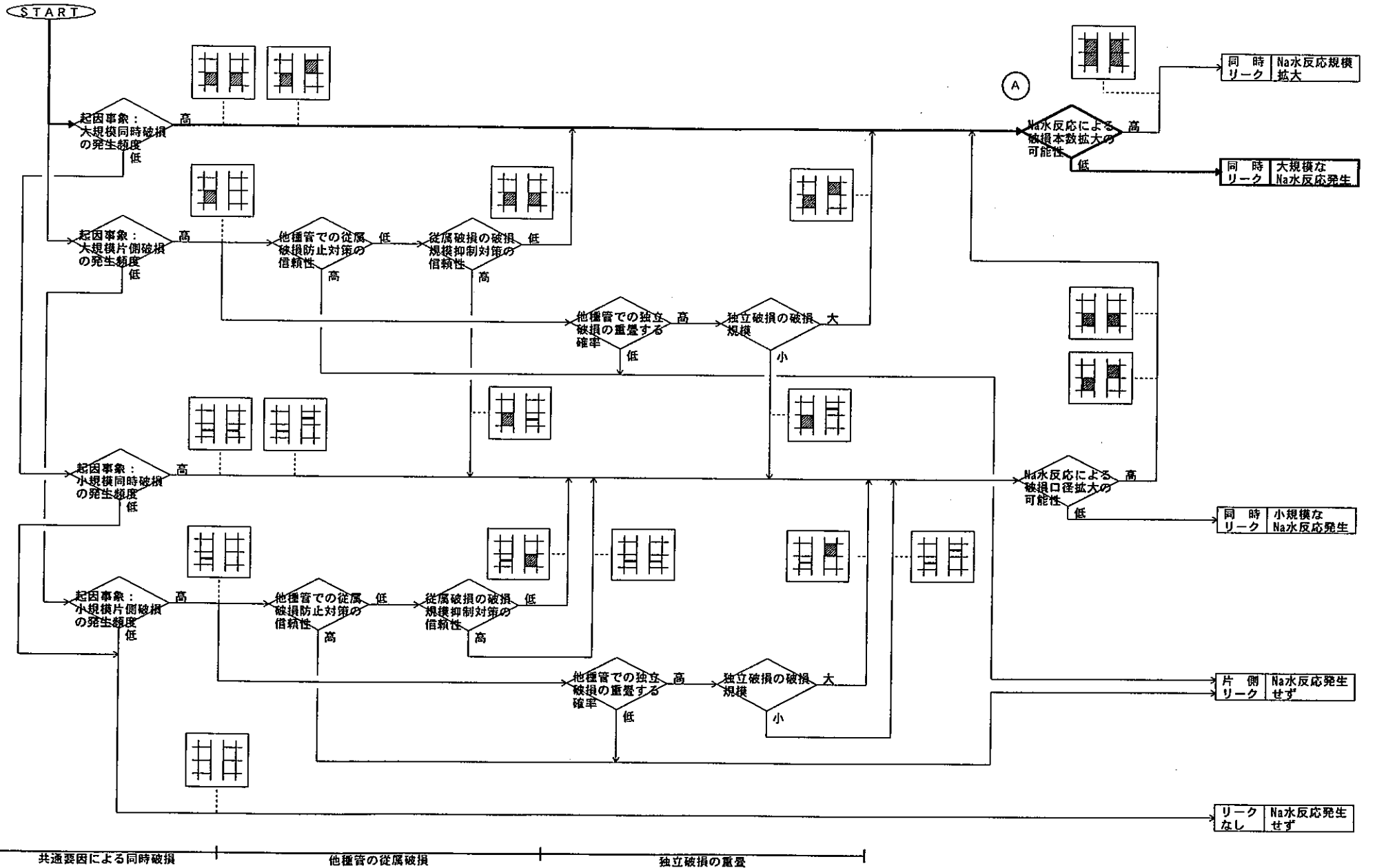


図4.3-2 Na水反応のレベルを「同時大リーク」に制限するための要件

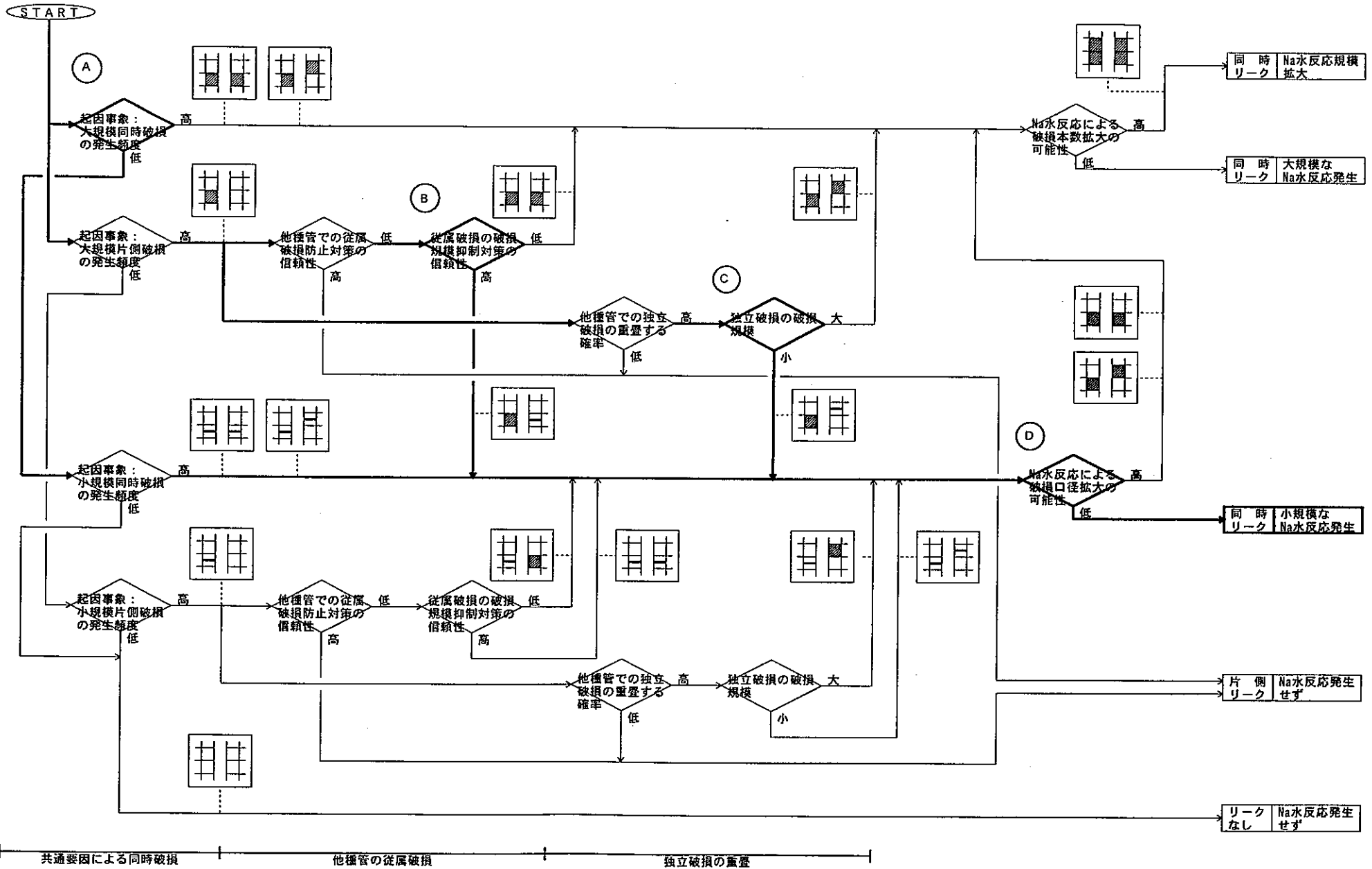


図4.3-3 Na水反応のレベルを「同時小リーク」に制限するための要件

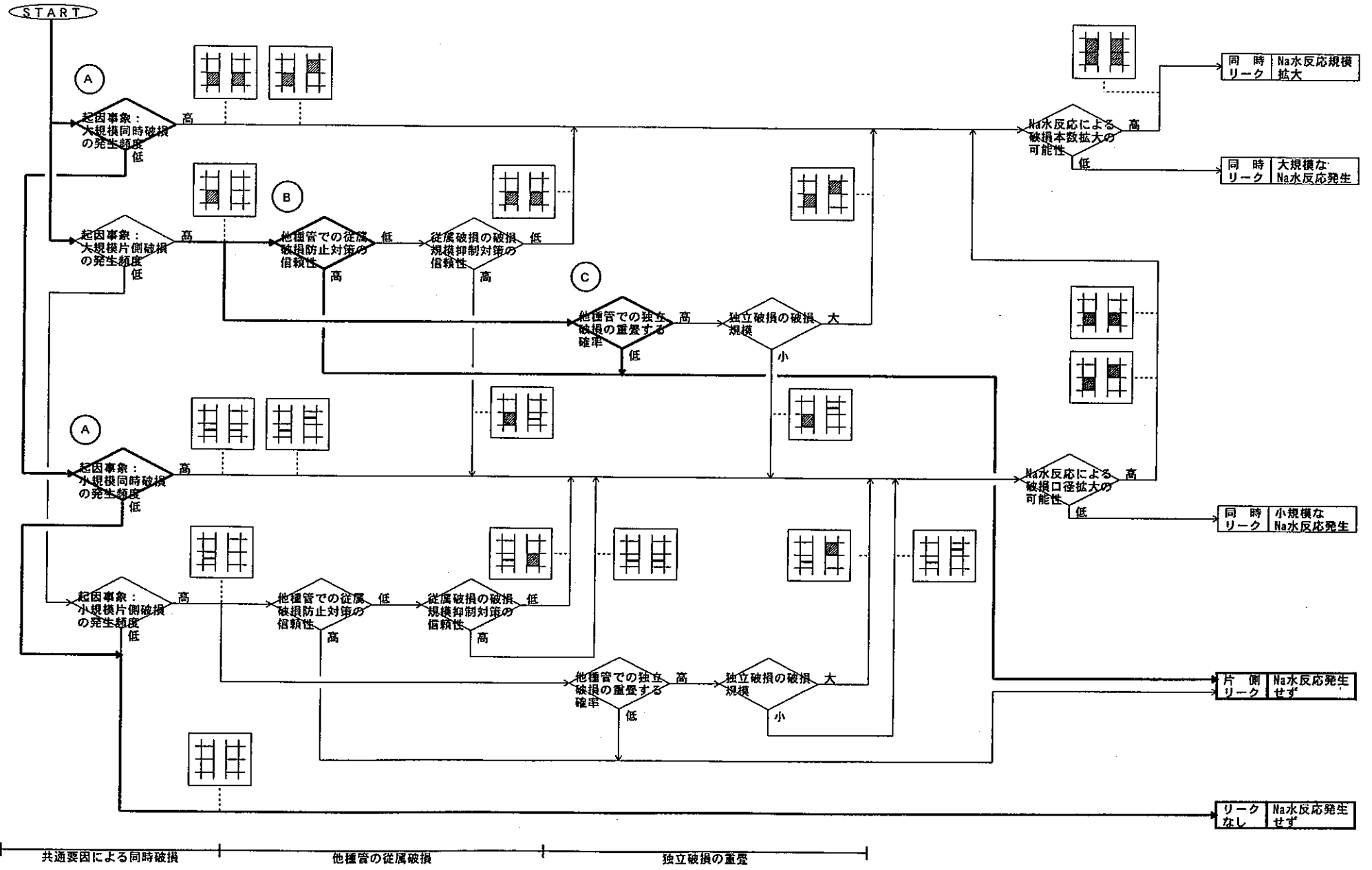


図4.3-4 Na水反応のレベルを「片側リーク」に制限するための要件

5. 結言

種々の2次系簡素化のアイデアを15種類摘出し、冷却系概念を検討し、その経済性、安全性を概略評価した。これらの結果は、H12年度の概念検討と併せて、実用化戦略調査研究 Phase-I の有望な候補概念の抽出に利用される。

参考文献

- [1]:「平成 10 年度 FBR 新技術フィージビリティ調査 一体型 IHX-SG 概念技術及び燃取システム除熱技術に関する調査研究 報告書」エネルギー総合工学研究所、1999
- [2]:早船、他、「実用化戦略調査研究(FBR プラント) 平成 10 年度予備調査結果要約の取りまとめ」、JNC TN9420 99-004、1999 年 6 月
- [3]:木下、他、「FBR 用直接接触伝熱型 SG の成立性評価」、電力中央研究所報告、総合報告:T 4 9 (平成 9 年 6 月)
- [4]:M.Saito et al., "A Study on Advanced Concepts of IHX-SG Combined System for Loop-type LMFBRs", ICONE-5, Nice, France, 1997
- [5]:「平成 11 年度 FBR 新技術フィージビリティ調査 一体型 IHX-SG 概念技術及び燃取システム除熱技術に関する調査研究 報告書」エネルギー総合工学研究所、2000
- [6]:Van Dievoet, J.P., The Sodium/CO₂ Fast Breeder reactor Concept, 1968
- [7]:赤川浩爾、藤井照重, 二酸化炭素による動力プラント, 機械の研究第 31 巻第 1 号 p.181, 1979
- [8]:岡本芳三、藤城俊夫、秋野詔夫, 宇宙用原子動力プラント(1-3), 原子力工業第 18 巻第 9-11 号, 1972
- [9]:El-Wakil, M.M., 西原英晃訳, 原子力エネルギー変換, 第 7 章ガス冷却型原子炉, 同文書院, 1977
- [10]:岡本芳三, 原子炉工学講座 5 = 熱工学・構造設計, 第 X I 編第 4 章ガス冷却原子炉の熱工学, 培風館, 1972
- [11]:A. BARAK, L. BLUMENAU, H. BRANOVER, A. EL-BOHER, E. GREENSPAN, Y. SAPIR, E. SPERO, S. SUKORIANSKY "Improvement Possibilities in Liquid-Metal Reactors using Liquid-Metal MHD Energy Conversion" Nuclear Technology Vol.89 1990