

# 「常陽」MK-Ⅲ計画二重管SG設置検討(I)

中間系合理化システムの実証



区分変更	
変更後資料番号	<del>PNC</del> TN9440 89-007
決裁年月日	平成 13年 7月 31日

1989年5月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	I9440 89-006
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

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

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

で  
し、



# 「常陽」MK-Ⅲ計画二重管SG設置検討(I)

中間系合理化システムの実証

沢田 誠\* 河津滋郎\* 磯崎和則\*  
前田清彦\* 鹿志村洋一\*\* 富田直樹\*\*

## 要 旨

「常陽」ではMK-Ⅲ計画の一環として、二重管SGを用いた中間系合理化システムの許認可性に対する検討を進めており、具体的には、50MWSG1基を1次系Bループ側に、「IHXを有する方式」と「IHXを有しない方式」との2通りの設置案について検討を行ってきた。

本検討より、Na-水反応生成物収納設備を付帯すれば、伝熱管1本破断によるNa-水反応事故を想定しても、両方式とも十分安全性を有したプラントシステムを達成できるとの見通しを得た。

また、上記1次系設置方式の他、2次系設置方式についても併せて検討を行い、概念的なプラントシステム構成を得た。

今後は、1次系設置方式案に対する検討を、以下の点について進める予定である。

- 1) Na-水反応事故をBDBEとするためのリーク検出条件等の整備、及びBDBEとした場合のシステムの見直し
- 2) 最適設置方式の選択
- 3) MK-Ⅲ出力に対応したシステムの見直し(70MWSG設置)
- 4) 「常陽」設置に係る必要R&D計画の策定  
(MK-ⅢサブW/G「中間系合理化検討チーム」にて検討)

---

\* 実験炉部技術課

\*\* // 原子炉第2課

## 目 次

### 第 I 章 序 章

1. 設置検討の目的	.....	2
2. 検討の概要	.....	3

### 第 II 章 1 次系設置方式（IHXを有する方式）

1. 系統設備設計	.....	5
1.1 1次主冷却系設備	.....	5
1.2 Na-水反応生成物収納設備	.....	6
1.3 水/蒸気系設備	.....	6
1.4 格納施設系設備	.....	7
2. 配置設計	.....	8
2.1 建物配置計画	.....	8
2.2 既設C/V内配置計画	.....	8
3. 運転制御設計	.....	9
3.1 運転サイクルモード	.....	9
3.2 通常起動・停止時運転計画	.....	9
3.3 異常・事故時の運転制御計画	.....	9
4. 安全性評価	.....	11
4.1 Na-水反応事故評価	.....	11
4.2 蒸気管破断事故評価	.....	13
5. 検討結果のまとめ	.....	14

### 第 III 章 1 次系設置方式（IHXを有しない方式）

1. 系統設備設計	.....	45
1.1 1次主冷却系統設備	.....	45
1.2 2次主冷却系統設備	.....	45
1.3 Na-水反応生成物収納設備	.....	46
1.4 格納施設系設備	.....	46

2. 配置設計 .....	47
3. 運転制御設計 .....	48
3.1 通常起動・停止時運転計画 .....	48
3.2 異常・事故時の運転計画 .....	48
4. 安全性評価 .....	50
4.1 Na-水反応事故評価 .....	50
4.2 蒸気管破断事故評価 .....	51
5. 検討結果のまとめ .....	52

## 第Ⅳ章 2次系設置方式(150MWSG設置)

1. 概 要 .....	71
2. 安全ロジック検討 .....	72

## 第Ⅴ章 今後の作業方針

### 付 録

付録Ⅱ-A：主冷却系締切弁の許認可性への影響検討( IHX有方式) .....	80
付録Ⅱ-B：格納施設の概念選定( IHX有方式) .....	82
付録Ⅲ-A：合体モジュール装置の検討( IHX無方式) .....	85

第I章 序 章

## 1. 設置検討の目的

二重管SGを用いた中間系削除システムは、FBR建設コストの低減化を図るための有効な手段の一つに挙げられているが、この新システム概念を実現化するためには、予め、その許認可性の見通しを得ておくことが肝要である。

本設置検討は、上述の考え方にに基づき、将来炉に採用されると考えられている一体貫流直管型二重管SGを用いた中間系合理化システムの検討を通して、「常陽」に設置するとした場合の技術的成立性及び許認可性の見通しを得ることを目的として実施された。

## 2. 検討の概要

「常陽」への二重管SG設置検討は昭和61年度から開始され、小型SG(<5MW)設置を含む5ケースについて予備検討を行った。その後、昭和62年度では、上記5ケースの設置方式案から、1次系設置方式(片ループ50MWSG設置)の2案(IHXを有する方式、IHXを有しない方式)と2次系設置方式1案(2次系2ループ合流方式、150MWSG設置)の3案に絞ってシステムの概念検討を行った。

本書<sup>(注)</sup>では、「中間系合理化システムの実証」という観点から、特に1次系設置方式の2案に着目し、次の項目に対する検討内容について報告する。

- 1) 系統設備設計
- 2) 配置設計
- 3) 運転制御設計
- 4) 安全性評価(Na-水反応事故評価、蒸気管破断事故評価)

また、2次系設置方式は、1次系設置方式が技術的に困難であるとの見通しが得られた場合に備えて検討を行った。

(注) 本書は、以下の報告書を基に作成したものである。

- ・PNC SJ2214 88-003 「常陽」二重管SG設置に係る設計検討(IHXを有する場合)、1988年5月、三菱原子力工業㈱
- ・PNC SJ2214 88-002 「常陽」二重管SG設置に係るプラントシステム概念設計、1988年6月、三菱原子力工業㈱
- ・PNC SJ2164 88-001 「常陽」二重管SG設置に係る設備設計(IHXを有しない場合)、1988年4月、㈱東芝
- ・「常陽」2次系への二重管設置に係る予備検討、昭和63年5月、㈱日立製作所



## 第Ⅱ章 1次系設置方式( IHXを有する方式)

## 1. 系統設備設計

### 1.1 1次主冷却系設備

#### (1) 設備設計

既設設備を含めた改造部総合系統図を、図Ⅱ.1-1に示す。

二重管SGは、1次系Bループ側にIHXをバイパスする形で設置され、新設のバイパスラインには、SGの他、電磁ポンプ、隔離弁、及び逆止弁等が設置される。これら主配管ラインの機器・配管類は、Na漏洩対策のため、既設と同様に冷却材バウンダリー一部を二重構造としている。設備の特徴を要約して、以下に示す。

- (i) 原子炉トリップ時、又はSG除熱が不可能となった場合には、既設のIHX及びDHXにて崩壊熱を除去するよう流路を切替える。切り替えは、IHX出口部及び新設ブースタ電磁ポンプ出口部に設けた切替弁と止弁にて行う。
- (ii) SGの出力運転時は、小流量をIHXに流し(1%程度)、2次系は100%流量で待機する。
- (iii) SG上流側のホットレグラインには、ブースタ電磁ポンプが設けられ、新設機器配管類での圧損を補い、主ポンプ入口部でのNPSHの確保及び配管負圧の防止を図っている。
- (iv) SGでのNa-水反応事故に備えて、Na-水反応生成物の炉心への流入を防止するため、SGの入口に締切弁と逆止弁を、また、SG出口に締切弁を2個直列に設置している。

#### (2) 主要機器設計

##### ① 蒸気発生器(SG)

二重管SGは、将来炉で採用される見込みである一体貫流直管型(無液面)のSGであり、本検討では50MW容量についての検討を行った。本検討に用いたSGの機器仕様を表Ⅱ.1-1に、また、概念図を図Ⅱ.1-2に示す。

##### ② ブースタ電磁ポンプ

新設部分を中心とした1次主冷却系圧力分布を、図Ⅱ.1-3に示す。電磁ポンプは、定格流量が約 $22\text{ m}^3/\text{min}$ ( $1088.6\text{ t/h}$ )、接続配管口径が $20^{\text{B}}$ という大型電磁ポンプが要求されることから、ALIP(Annular Linear Induction Pump)型の誘導型電磁ポンプを採用することとした。図Ⅱ.1-4に、電磁ポンプのQ-H特性を図示する。なお、電源喪失時の電磁ポンプのコストダウンは瞬時であるため、極めて短時間ではあるが、主ポンプがキャビテーションを生じる可能性がある。従って、このキャビテーション防止用に、電磁ポンプ専用電源としてMGセットを設けている。

##### ③ 締切弁

SG入口部のホット配管の締切弁をA弁、SG出口部のコールド配管の締切弁をB弁、及びIHX出口部の締切弁をC弁と称する。(図Ⅱ.1-1参照)これらの弁の機能条件は、次

の通りである。

A, B弁(電動弁)……………SG伝熱管破損事故時, Na-水反応の炉心等への影響を極力抑制するため, 事故時, 速やかに閉鎖し事故SGを隔離する。また, 種々の原因によるプラント停止時, IHXにて崩壊熱除去運転を行うが, IHX側への流量を確保するため, C弁を全開すると共に, 本弁を全閉としSG側へのバイパス流を閉止する。なお, 弁開閉時間は10秒以内とする。

C弁(空気弁)……………種々の原因によるプラント停止時には, 本弁を全開としてIHXへの流路を確保すると共に, A, B弁を閉鎖することにより, IHXへの流量を確保し, IHXを用いた崩壊熱除去運転を行う。弁開時間は, A, B弁の閉鎖時間に応じそれより若干速くする必要がある。

なお, 主系統に締切弁を設置するという問題に対しては, プラントの安全性, 及び許認可性に及ぼす影響についての検討を付録II-Aに示している。

## 1.2 Na-水反応生成物収納設備

系統図については, 図II.1-1参照のこと。Na-水反応生成物は, 反応生成物収納容器, 分離器, 既設ダンプタンクとの均圧配管及びラプチャディスク(R/D)等から構成される。放出系配管は, 主配管のSG出入口部より分岐して取り出され, 合流後反応生成物収納容器(新設部ドレンタンク兼用)に連結される。Na-水反応が発生すると, Na及び水素ガスを含む反応生成物は, R/Dを介して収納容器に放出される。収納容器では, Na及び液・固体状反応生成物の大部分を収納される。水素ガスとミスト状となった一部Na等は分離器に到り, ここでミストは捕集される。分離器を通過した水素ガスは, 均圧配管を通して既設ダンプタンクに到達する。既設ダンプタンクは, 通常運転時にはほぼ空の状態にあり, この大きなガス空間容積を利用することによって, Na-水反応が生じた場合にも, 原子炉容器カバーガス部分の圧力が $1\text{ kg/cm}^2\text{G}$ を越えないよう設計されている。

## 1.3 水/蒸気系設備

水/蒸気系の系統概念図を図II.1-5に, また, 系統仕様を表II.1-2に示す。主な系統構成の特徴は, 以下の通りである。

### ① 給水系

- (i) 脱気器, 給水ポンプ, 高圧給水加熱器, 等から構成する。
- (ii) 高圧給水加熱器, 脱気器の加熱用蒸気は減温器より供給する。
- (iii) 起動時における加熱用蒸気は, 補助ボイラより供給する。

② SG廻り水-蒸気系

- (i) SG隔離弁, 水-蒸気ブロー弁等より構成する。
- (ii) SG隔離弁は, C/Vバウンダリおよび水リーク時等のSG隔離機能を有する。

③ 蒸気系

- (i) 気水分離器, 第1減圧弁, 減温器, 第2減圧弁より構成する。
- (ii) 第1減圧弁, 減温器では高圧給水加熱器の加熱用蒸気として約60 atg 350℃の条件を確保するため減圧(132→60 atg), 減温(430→350℃)する。
- (iii) 第2減圧弁では, 空冷式復水器の設計圧力を下げるため, 10 atgまで減圧(60→10 atg)する。
- (iv) 減温器用のスプレー水は給水ポンプ出口水を用いる。

④ 復水系

- (i) 空冷式復水器, 復水タンク, 復水ポンプ, サブクーラ等より構成する。
- (ii) 復水器は, 乾式の復水器を前提としているため, 空冷式復水器を採用している。これにより, 湿式復水器で必要となる冷却水系(ポンプ, 冷却塔など)が削除されると共に, 夏海湖から取水量を大幅に制限できる。

1.4 格納施設系設備

本検討では, 5ケースの配管種別, 格納容器(以下, C/Vと略す)型式について検討を行い主に許認可性の観点から「常陽」と同仕様のケースを選定した。以下に選定ケースの概念仕様を示す。なお, 選定にあたって行った検討内容については, 付録Ⅱ-Bを参照のこと。

(選定ケース)

- 配管種別: 「常陽」並二重管(プラント停止までは外管にて, 漏洩Na保持, メンテナンス時には外管の漏洩も考える。)
- 格納施設: 耐圧鋼製格納容器
  - ( 最高使用圧力: 内圧 1.0 kg/cm<sup>2</sup>G
  - ( 最高使用温度: 150℃
- 漏洩Na対策: Naライナー
- 雰囲気 : 空気

## 2. 配置設計

### 2.1 建物配置計画

図Ⅱ.2-1に本改造計画に係るプロットプラン(建物配置図)を示す。

新設するSG建物及び増設補助建物は、原子炉付属建物の西側に配置され、SG建物と増設補助建物は同一のベースマツトを有し且つ、原子炉付属建物と一体構造である。

また、SG建物及び増設補助建物は各々、既設格納容器からの機器搬出入路と付属建物からの機器搬出入路の間に位置し、既設設備の搬出入は確保されている。SG建物は二重管SG、分岐1次系配管、反応生成物収納タンク等1次系を内包した格納容器とその外側の外部遮へい壁により構成され、直径約12m、高さ約4.9mの耐圧鋼製格納容器で、増設補助建物は約15m×12m×30m<sup>H</sup>の鉄筋コンクリート建物である。

給水、復水建物はメンテナンス建物の南側に配置され、給水ポンプ、脱気器等の給水復水設備が設置される。復水器は給水、復水建物の屋上に設置し、且つ建物周辺に補助ボイラ設備、補給水タンクが設置される。

### 2.2 既設C/V内配置計画

既設C/V、既設付属建物及び新設SG建物を含めた全体配置計画図を、図Ⅱ.2-2～図Ⅱ.2-4(1F～BM2F)に示す。既設C/V内改造は、既設1次系配管からの分岐及びその分岐配管引廻し、電磁ポンプの設置が主となる。既設配管からの分岐は、ホットレグ配管はIHX入口の水平管立上がるエルボ部をティーズにして、また、コールドレグ配管は1次主ポンプ入口水平管部からそれぞれ分岐される。分岐点の詳細を、図Ⅱ.2-5に図示する。

分岐後は、ホット・コールド配管ともR-203室の機器搬出入路(茶筒)を介してオペフロ上まで立上げられ、そこから非常用エアロックスペースを利用・改造した貫通スリーブを通して新設SG建物に達する。これら配管に引廻しにあたっては、配管用ベローズ継手を導入し、配管短縮化を図っている。また、電磁ポンプは茶筒スペースの立上がり配管部に設置されるが、重量機器のため、BM1Fの床下面に支持ビームを取付け、それから吊り下げる計画としている。

なお、以上の配管配置計画に対して、設計用模擬地震動( $S_1$ ,  $S_2$ )を用いて耐震性評価を概略的に行った結果、構造強度上成立する見通しを得た。

### 3. 運転制御設計

#### 3.1 運転サイクルモード

SG設置を考慮して設定した運転サイクルブロック図を、図Ⅱ.3-1に示す。従来からの主要な変更点は、次の通りである。

- (i) 補助ボイラを用いたSG起動のために、SG起動状態を新たに設ける。なお、通常起動、停止時SG系からDHXへの切換えは本状態にて行う。
- (ii) 状態移行の煩雑さを避けるため、燃料交換状態へはSG起動状態(200℃)から移行する。(従来は、温態待機状態(250℃)から移行)。
- (iii) 原子炉スクラムに伴う状態移行の落ち着き先は、温態待機状態とする。(従来は、高温待機状態(370℃))。

#### 3.2 通常起動・停止時運転計画

従来の運転スキーム上の特徴は、起動・停止時とも1次系、2次系Na流量が100%一定で、且つ原子炉入口Na温度が370℃一定という条件にあった。しかしながら、SGを設置した場合、上記運転条件では、部分負荷時SGから蒸気を取り出そうとするとSGが不安定になることが考えられる。このことを避けるためには、上記条件を変更する必要がある。

従来の条件を可能な限り変えないという方針により、本方式では、冷却流量は従来と同じ100%一定流量とし、原子炉入口Na温度のみを変化させる方法を採用した。この場合の起動・停止時の運転スキーム図を、Ⅱ.3-2及び図Ⅱ.3-3に示す。この方法は、出力に応じSG給水流量を変化させることにより可能な見通しである。また、この場合、Aループ側はDHX出口温度を制御して原子炉入口Na温度を、Bループと同様に变化させるよう運転される。定格時のヒートバランスを、図Ⅱ.3-4に示す。

なお、定格運転時におけるBループ2次系は、100%強制循環待機が妥当か、もしくは、自然循環待機が妥当かという点について比較評価した結果、100%強制循環方式の方が、温度制御が容易で、且つ、熱過渡、ループ間アンバランス等問題が少ないことを確認した。

#### 3.3 異常・事故時の運転制御計画

本改造により新たに追加となる原子炉スクラム信号は、SG伝熱管破損事故に関するものでSG大リーク信号である。これは、放出系ラプチャディスクの破裂を検知することによって発せられる。他の異常・事故については、従来のスクラム信号でカバーできるか否か安全評価による確認が必要である。

また、Na中水素検出系、He中湿分検出系等からのSG小リーク信号ではSG隔離信号が発信され、水/蒸気系のブローダウンと共にSG出入口隔離弁が閉鎖され、更には1次系Na流量

低で原子炉はスクラムとなる。

異常・事故事象の代表として、手動スクラム、一般系電源喪失、及びSG伝熱管破損の各事象に対するシーケンスブロック図を、それぞれ図Ⅱ.3-5～図Ⅱ.3-7に図示する。

なお、本設置方式特有の問題であるSGとIHX(B)の切換運転については、その切換タイミングをプラント動特性解析コード「MIMIR-SG」を用いて評価した結果、次の切換えが熱過渡対策上最も適切であるとの見通しを得た。

- (a) 手動スクラム …………… 50～100秒
- (b) 外部電源喪失 …………… 0～50秒

## 4. 安全性評価

プラントシステムの成立性を評価するという観点から、1)Na-水反応事故と、2)蒸気管破断事故の2つの事象について安全性を評価した。

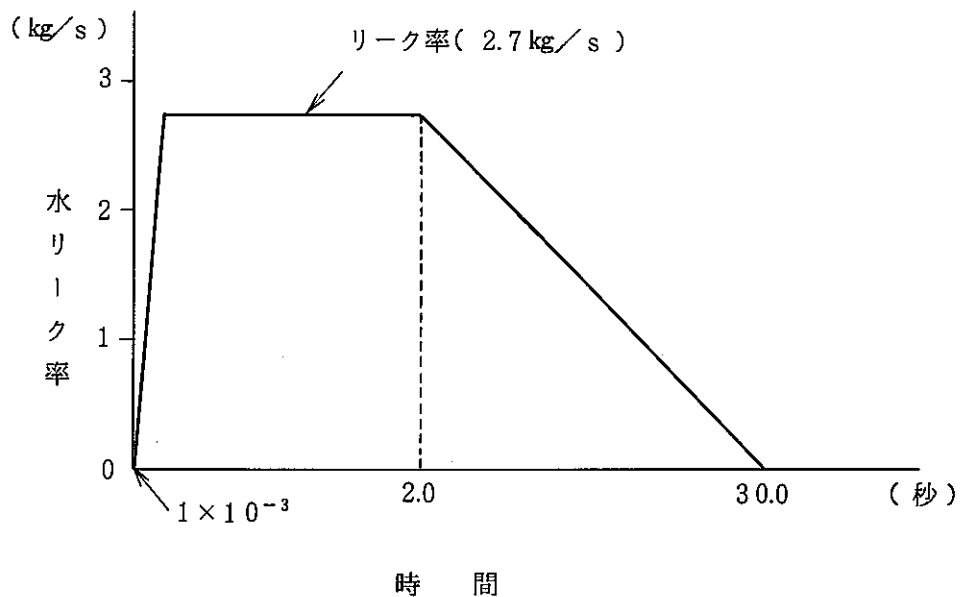
### 4.1 Na-水反応事故評価

SG伝熱管の破損については、その破損程度をどの程度考慮すれば良いか、今後の重要な課題であるが、本検討では、現在設計上最も厳しいと考えられている1本ギロチン破断が生じたとしても、プラントシステムは成立するという見通しを得ておく必要があるとの観点から、1本管破断事故に対するプラントの安全性、すなわち準定常圧力と炉心への反応生成物移行量とについて評価を行った。

#### (1) 解析条件及び解析モデル

##### ① 水リーク率

破断点における各リーク率は、定常リーク率解析プログラムより求め、水系ブロー開始から終了までリーク率は線形に減少するものとした。また、オリフィス効果は無視した。次図に水リーク率条件を示す。



水リーク率条件

##### ② 水系ブロー

水系ブローは伝熱管破断後2秒で開始され、30秒で終了するものとした。

##### ③ ラプチャディスク

ラプチャディスクは、伝熱管破断と同時に、破断するものとした。



④ SG隔離弁

本検討では、SG隔離弁の単一故障を想定して、次の2ケースについて解析を行った。

ケース	SG隔離弁
ケース1	開保持
ケース2	10秒で閉

⑤ 解析モデル

解析モデルを図Ⅱ.4-1に示す。解析時間は、各ケースとも10秒とした。

(2) 解析結果

① 準定常圧力評価

準定常圧力に関する解析結果を、図Ⅱ.4-2～図Ⅱ.4-4に示す。

図Ⅱ.4-4に示すように、Na-水反応初期にスパイク圧のピークが発生するが、その後、1秒程度で両ケースとも数kg/cm<sup>2</sup>以下の圧力まで下がる。反応生成物収納容器圧力は図Ⅱ.4-3のように10秒後で約1.5kg/cm<sup>2</sup>aである。(ただし、ドレンタンク容量を含む平均圧力)既設のダンプタンク圧力については、水リークが終息する30秒後程度で評価する必要があるが、本解析結果から2kg/cm<sup>2</sup>a程度におさまると考えられる。

以上、事故による準定常圧力は設計圧力以下に抑えられる見込みであり、構造強度上は問題にならない見通しが得られた。

なお、SG隔離弁の単一故障による影響については、隔離弁が完全閉となるのに10秒を要するため、両ケースで大きな差は見られなかった。

② 反応生成物移行量

反応生成物移行量に関する解析結果を、図Ⅱ.4-5～図Ⅱ.4-7に示す。

同図より明らかなように、SGを除く1次Na主冷却系、原子炉容器各部の反応生成物量はわずかであり、炉心部の10秒後における反応生成物量は以下の通りである。

	ケース1	ケース2
原子炉入口プレナム	8.1(g) ( 3.6 ( ppm ) )	5.5(g) ( 2.4 ( ppm ) )
炉心部	2.1(g) ( 1.2 ( ppm ) )	1.5(g) ( 0.9 ( ppm ) )

以上、1次系不純物濃度設計ベース10ppmを下廻っており、輸送遅れによる濃度上昇を考慮しても設計ベース程度の濃度におさまる見通しを得た。

弁の開、閉による比較は、開の方がやや反応生成物移行量が多いが、いずれのケースも許容範囲に入ると考えられる。

## 4.2 蒸気管破断事故評価

SGは、格納施設内に設置されるため、SG廻りの水/蒸気配管が破断した場合にも、格納バウンダリの健全性が保たれる設計としておくことが必要である。

本検討では、格内バウンダリ内の出口主蒸気管(6B)が瞬時ギロチン破断した場合を想定して解析を行った。図Ⅱ.4-8に事故概念図を示す。

### (1) 解析条件及び解析モデル

#### ① 解析条件

主要な解析条件を、以下に示す。なお、流出蒸気質量、C/V内雰囲気体積については、パラメータサーベイを行った。

加熱蒸気 …………… 487℃, 133 ata (流出蒸気エンタルピーは、本来流出と共に減少するが、本解析では安全側に初期値一定とした。)

空気の定常比熱 …… 714 J/kg・℃

流出蒸気質量 …………… 100, 500, 1000(kg)

雰囲気体積 …………… 50, 100, 200, 500, 1000 cm<sup>3</sup> )

#### ② 解析モデル

解析モデルを、図Ⅱ.4-9に図示する。評価を安全側に行うため、計算では次の仮定を設定した。

- (i) 事故後の定常状態での値を、雰囲気圧力・温度の最高値の日安とする。すなわち、評価は定常計算である。
- (ii) 壁、外気との熱の出入りはない。すなわち、断熱変化する。
- (iii) (ii)に関連して、蒸気の壁面での凝縮は考えない。

### (2) 解析結果

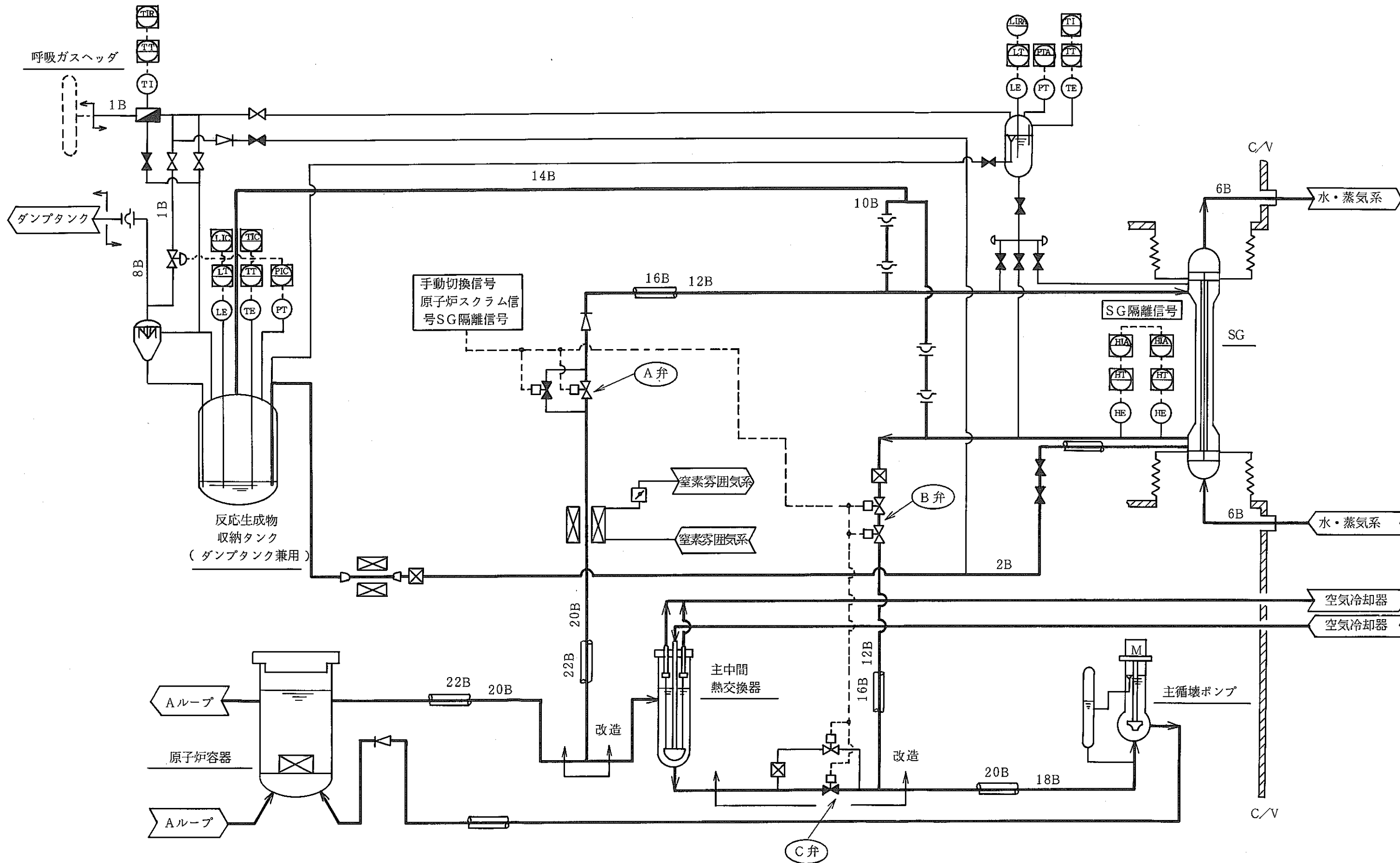
格納容器内雰囲気圧力定常値と雰囲気体積との関係を、放出蒸気量をパラメータとして、図Ⅱ.4-10に示す。

図から分るように、最高圧力(定常値)は体積にほぼ反比例し、放出蒸気量が増加すると、当然のことながら圧力は増加する。別途行ったブローダウン解析結果によると、主蒸気管破断事故時に、C/V内に放出される加熱蒸気量は500kgを下廻っており、また、配置等の検討により、雰囲気自由体積は1,000m<sup>3</sup>以上は確保できる見通しであるので、本評価の保守性を考慮に入れると、主蒸気管破断時の格納容器内圧最高値は約1.0 kg/cm<sup>2</sup> g程度であると考えられる。この圧力上昇は、C/Vの設計内圧に匹敵するものであり、構造強度上問題のない圧力上昇であるとの見通しを得た。

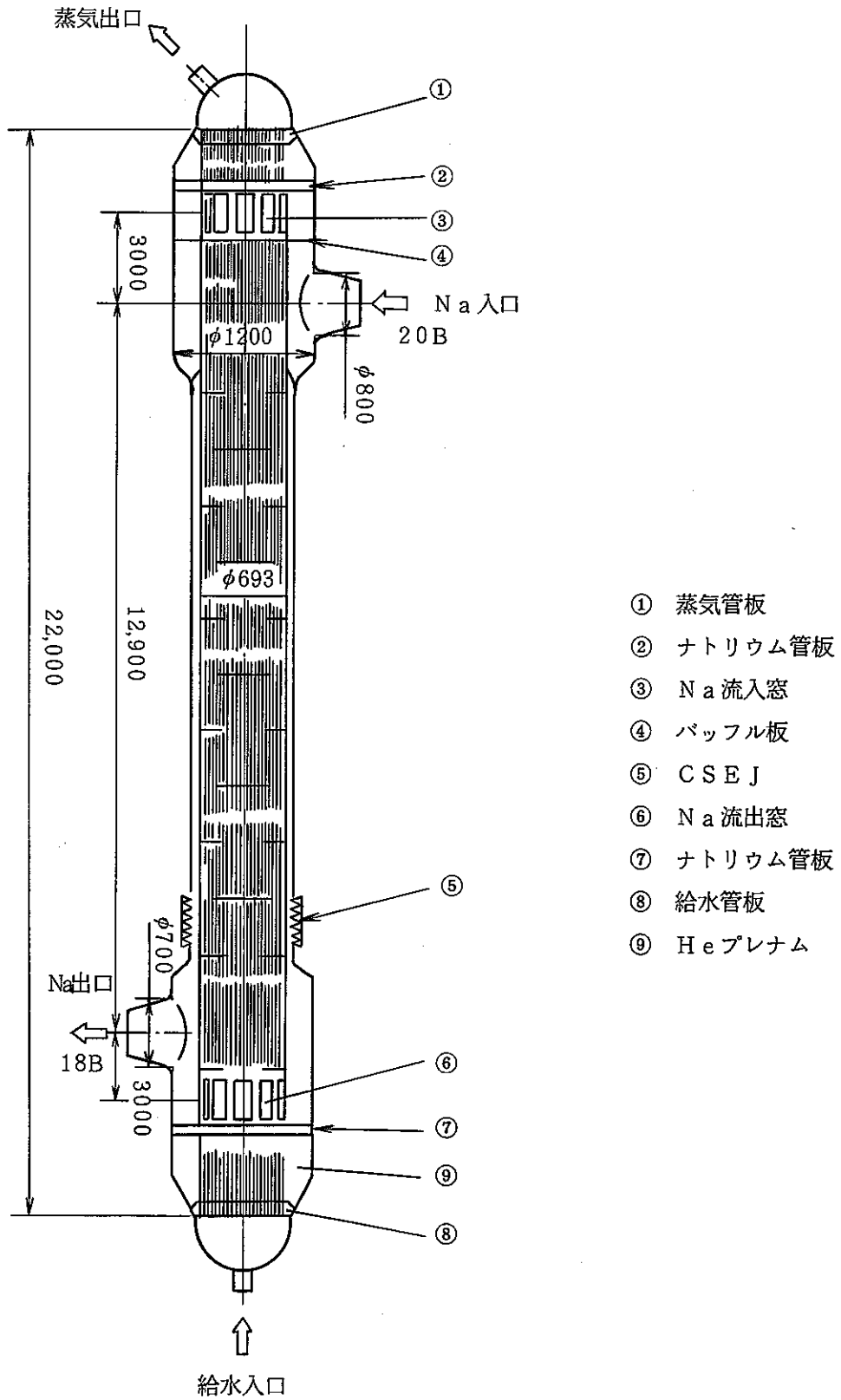
## 5. 検討結果のまとめ

IHXを有する場合の設置方式に対する主な検討結果を、以下にまとめて示す。

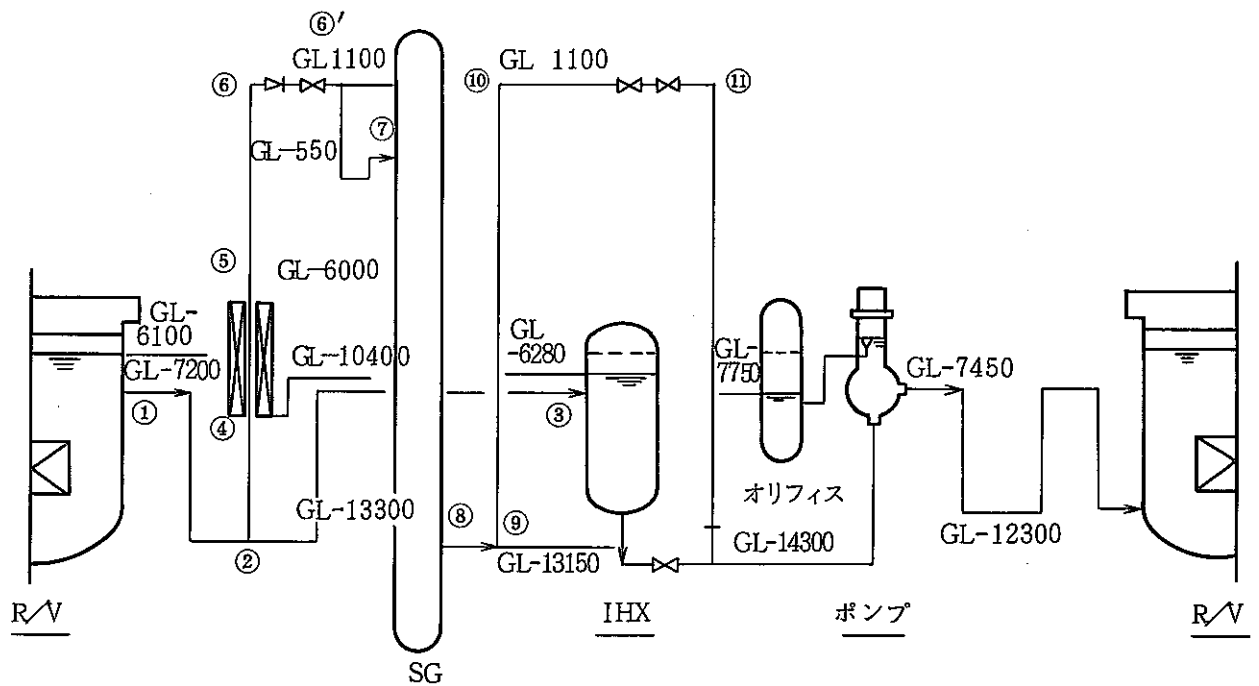
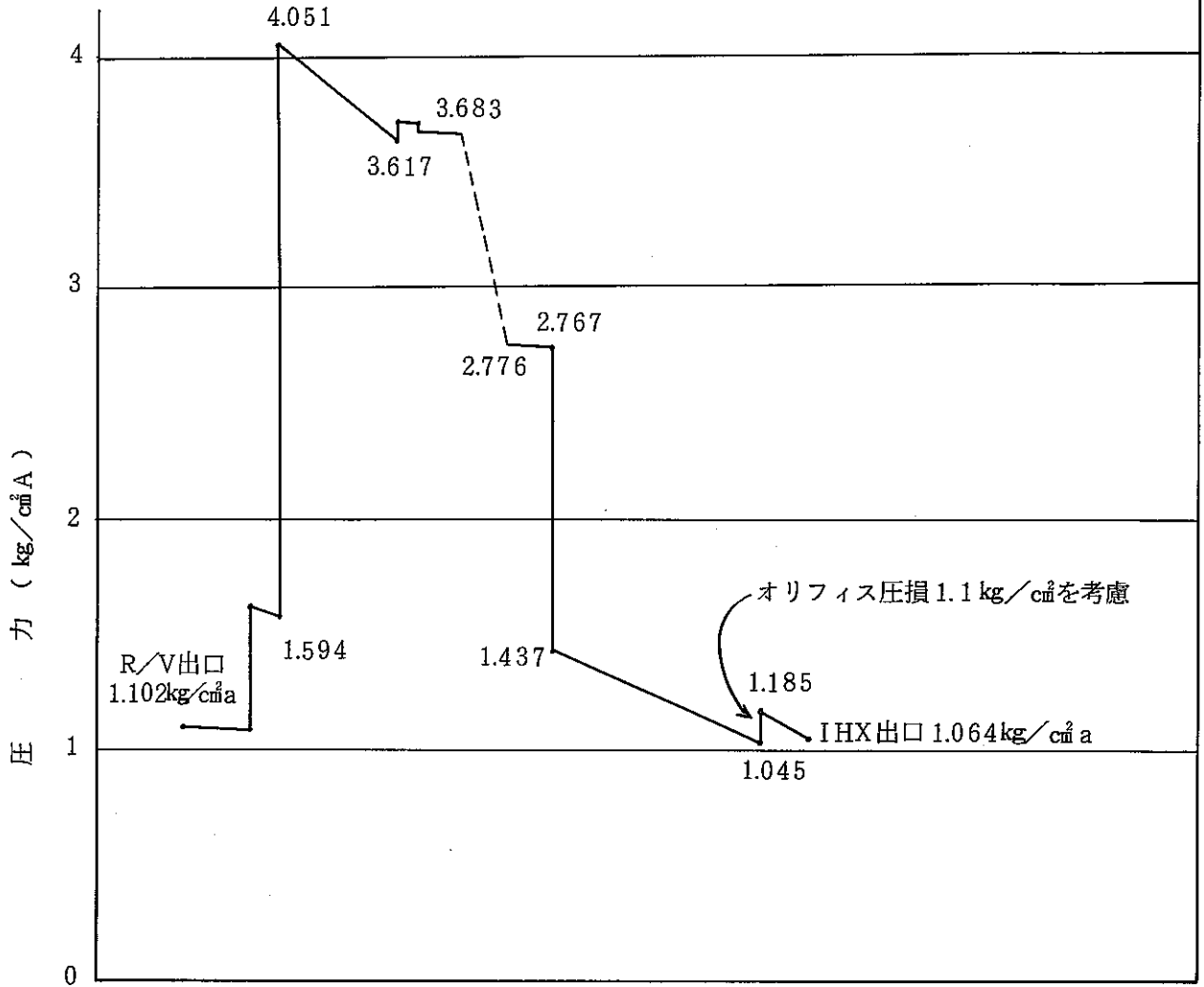
- ① 二重管SGは、1次系Bループより分岐し、IH Xをバイパスする新設ラインに設置される。  
(第1.1(1)項, 図II.1-1参照)
- ② 崩壊熱は、IH Xを介した既設DH Xにて除去される。そのため通常、異常時のプラント停止時にはSG運転から、IH Xを介したDH X運転に切り替えられる。切り替えは、バイパスラインと既設ラインに設けられた切替弁により行われる。(第1.1(2)③項, 図II.1-1参照)
- ③ バイパスループには、二重管SG等での圧損を補うためのブースタ用電磁ポンプが、また、Na-水反応時のSG隔離用に、急速隔離弁がバイパスラインに設置される。(第1.1(2)①, ②項, II 1-1, 図II.1-3参照)
- ④ Na-水反応事故時に発生する反応生成物は、放出系配管を介して反応生成物収納タンクに、更に水素ガスは既設ダンプタンクに放出されることにより、1次系の圧力上昇が抑制されている。(第1.2項, 図II.1-1参照)
- ⑤ 水/蒸気システムのうち復水系に空冷式復水器を採用することにより、夏海湖からの取水量は大幅に削減される。(第1.3項, 図II.1-5参照)
- ⑥ 二重管SGは、原子炉建物西側に隣接する耐圧鋼製格納容器(増設C/V)内に設置される。増設C/Vは、約9.6 m径×3.6 m高さの大きさであり、既設C/Vとは、連絡スリーブにて連絡される。(第1.4項, 第2.1項, 図II.2-1, 2参照)
- ⑦ Na-水反応事故評価の結果、発生する準定常圧力の上昇はSG出口配管で約2~3 kg/cm<sup>2</sup>程度であり、プラント構造健全性上問題となるものはなく、また、炉心に移行する反応生成物も安全評価上問題とならない見通しである。(第4.1(2)項, II.4-2~7参照)
- ⑧ 蒸気管破断事故評価の結果、増設C/V内圧力上昇は1 kg/cm<sup>2</sup>程度に抑制され、構造健全性上問題は回避できる見通しである。(第4.2(2)項, 図II.4-10参照)



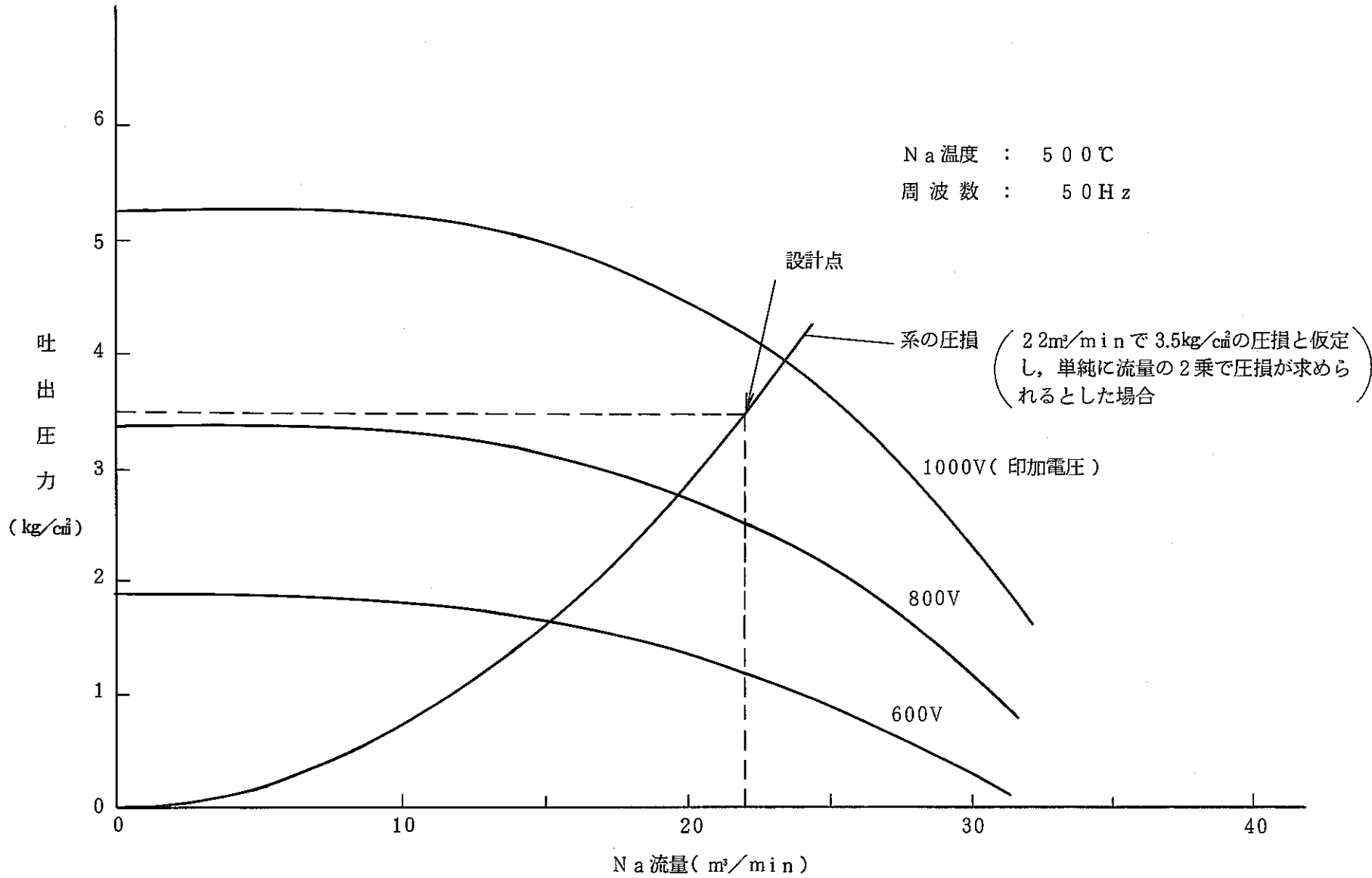
図II. 1-1 1次主冷却系等系統図 (IHXを有する方式)



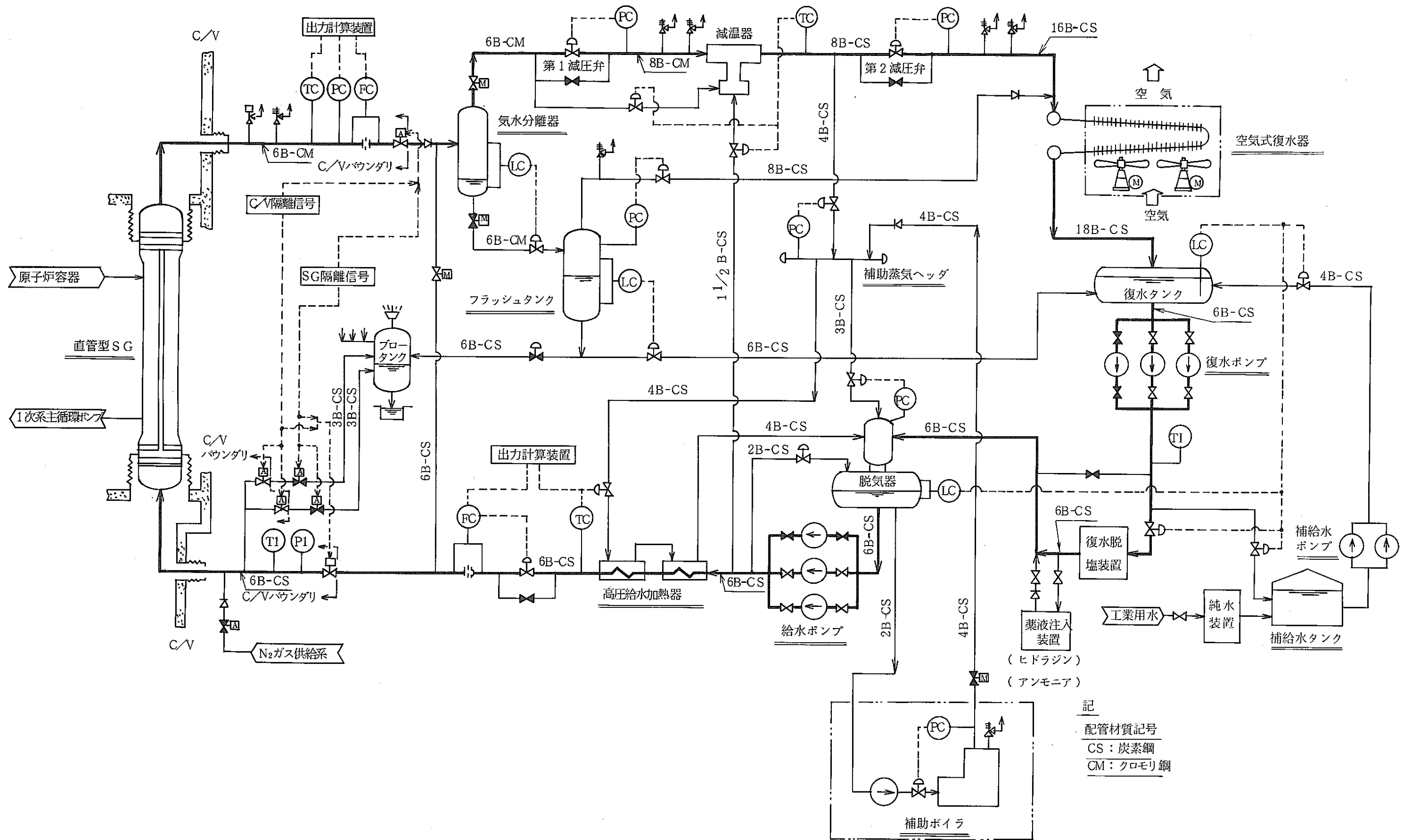
図Ⅱ. 1-2 2重管SG概念図(50MW)



図II.1-3 1次系圧力分布図



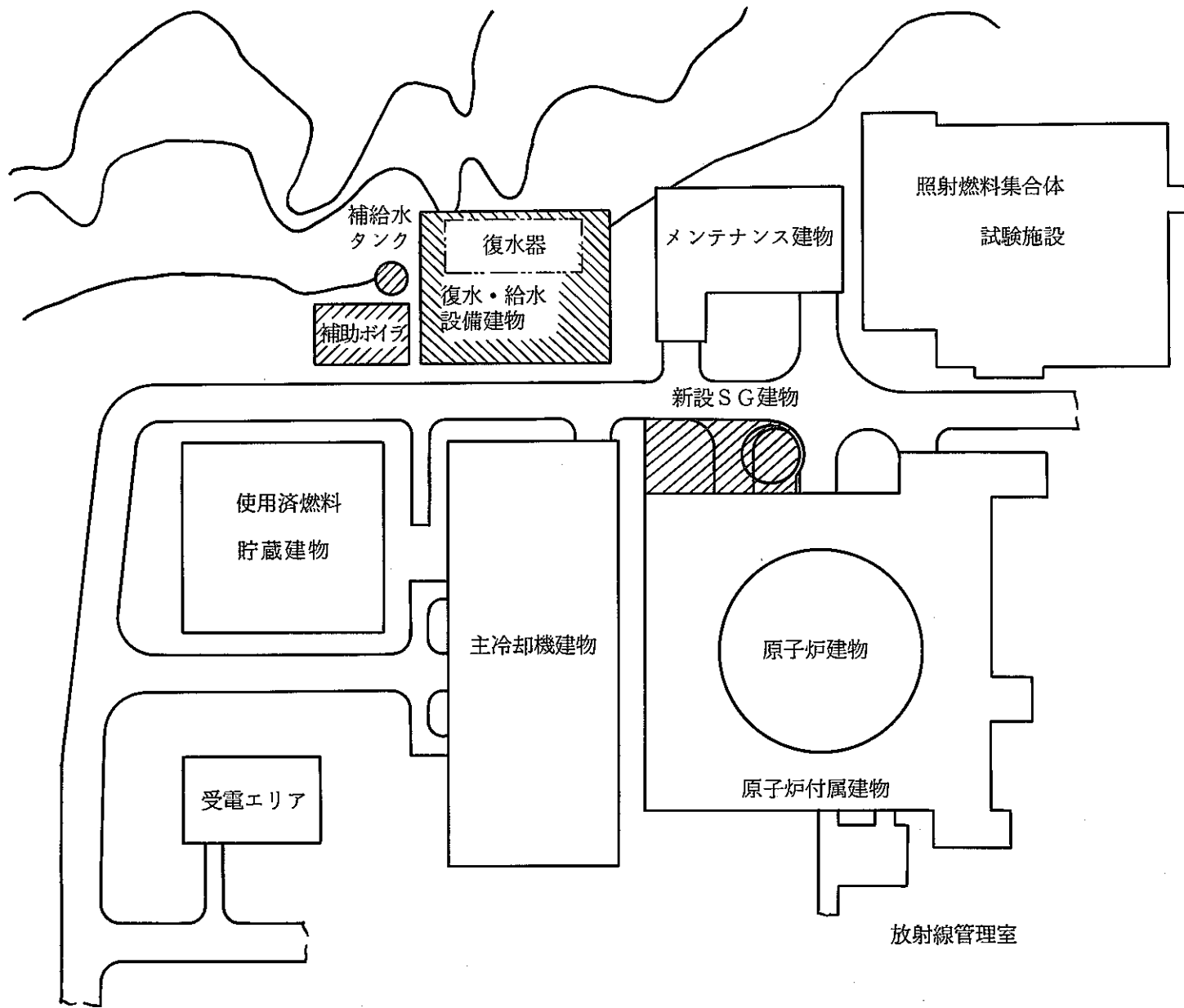
図Ⅱ.1-4 ALIPの出力特性と系の圧損との関係



記  
 配管材質記号  
 CS: 炭素鋼  
 CM: クロモリ鋼

図 II. 1 - 5 水 - 蒸気系系統概念図





図II.2-1 建物全体配置図

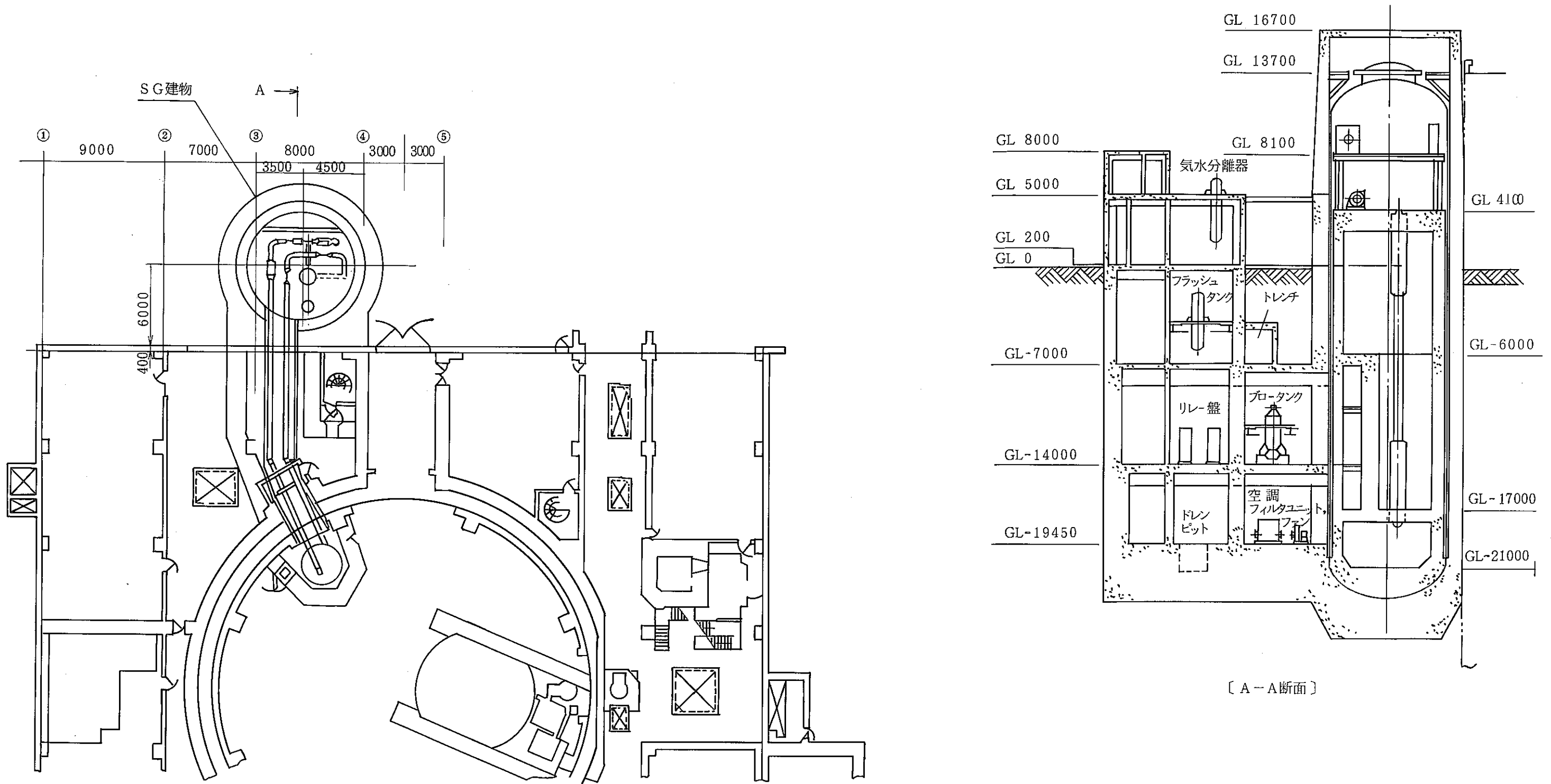
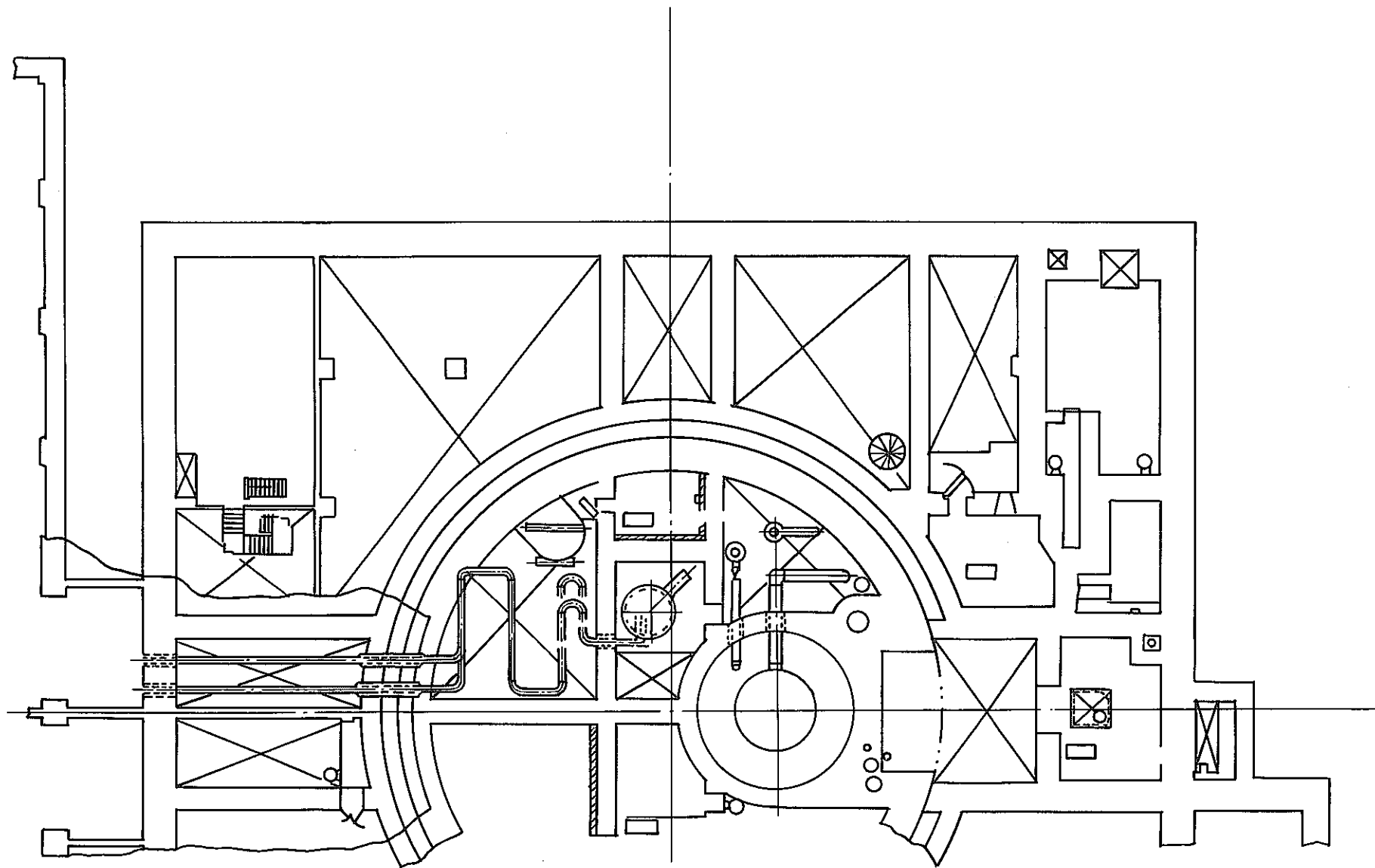
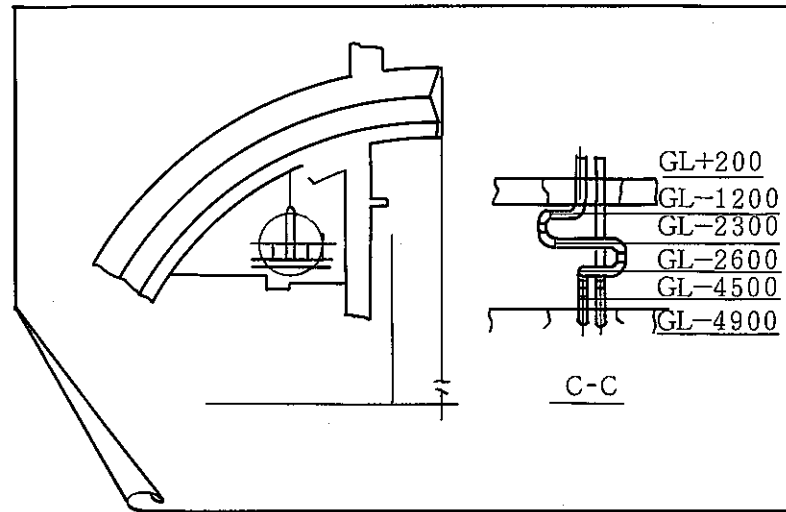
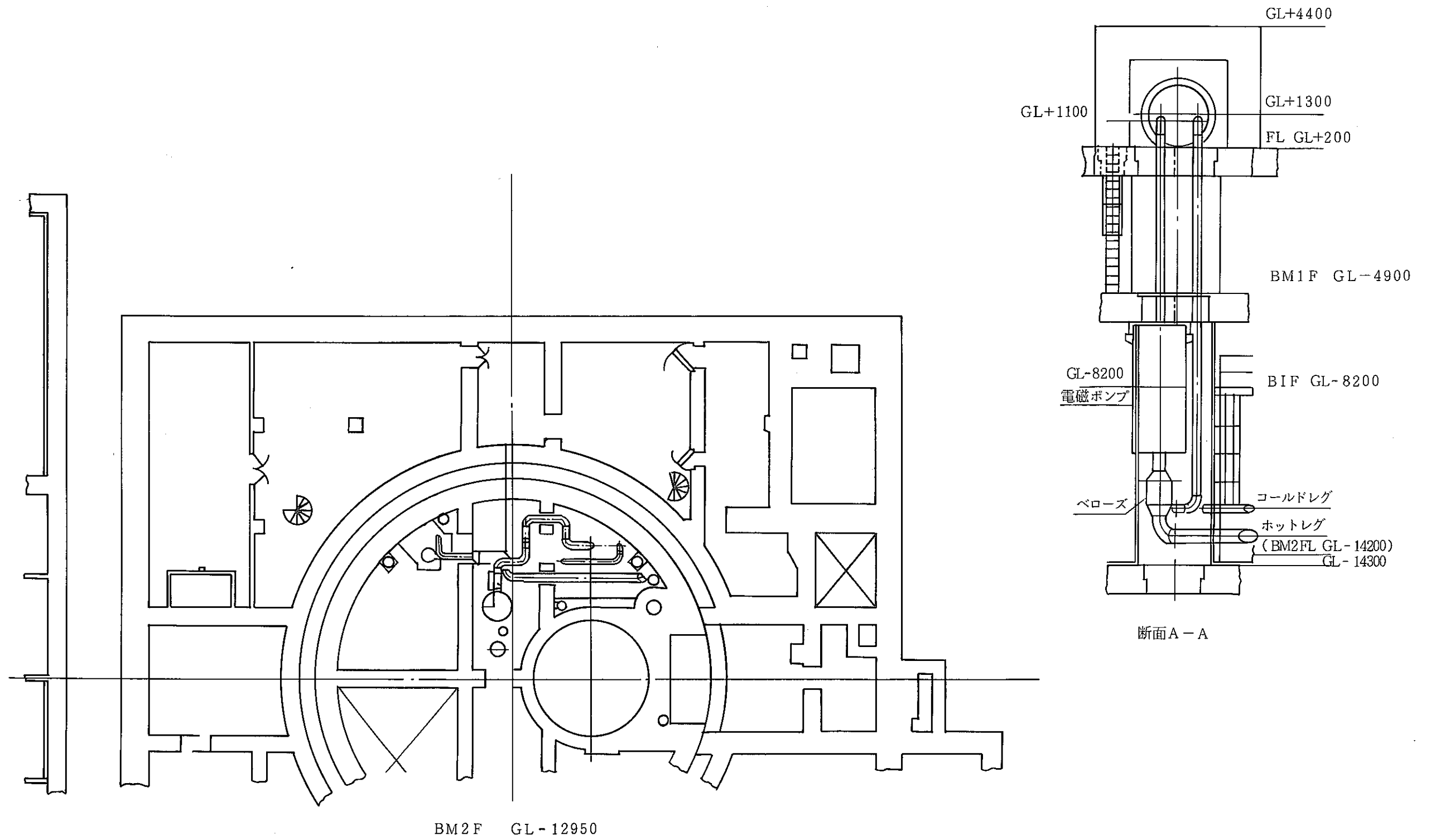


図 II.2 全体配置配管図( 1 F )

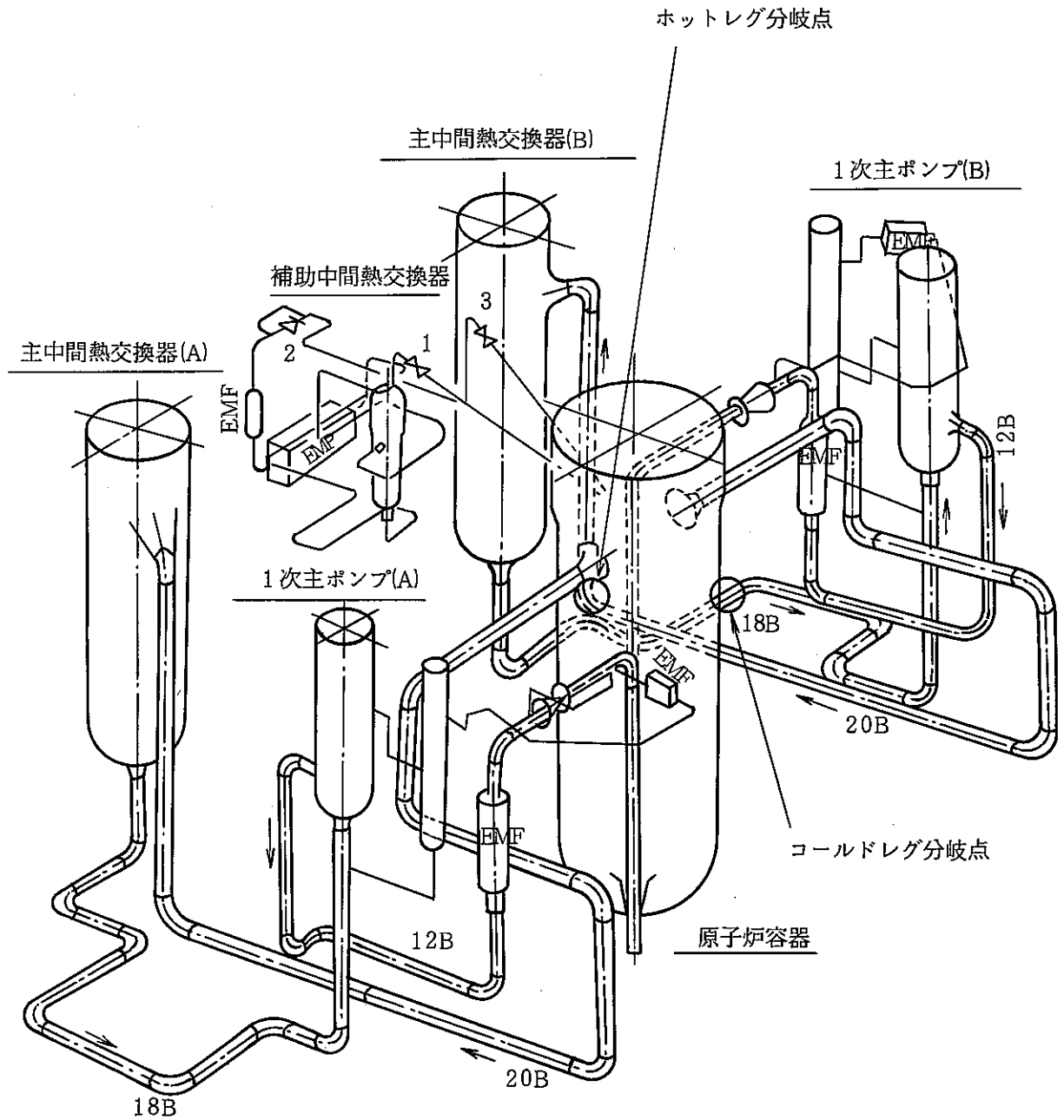


B1F GL-7300

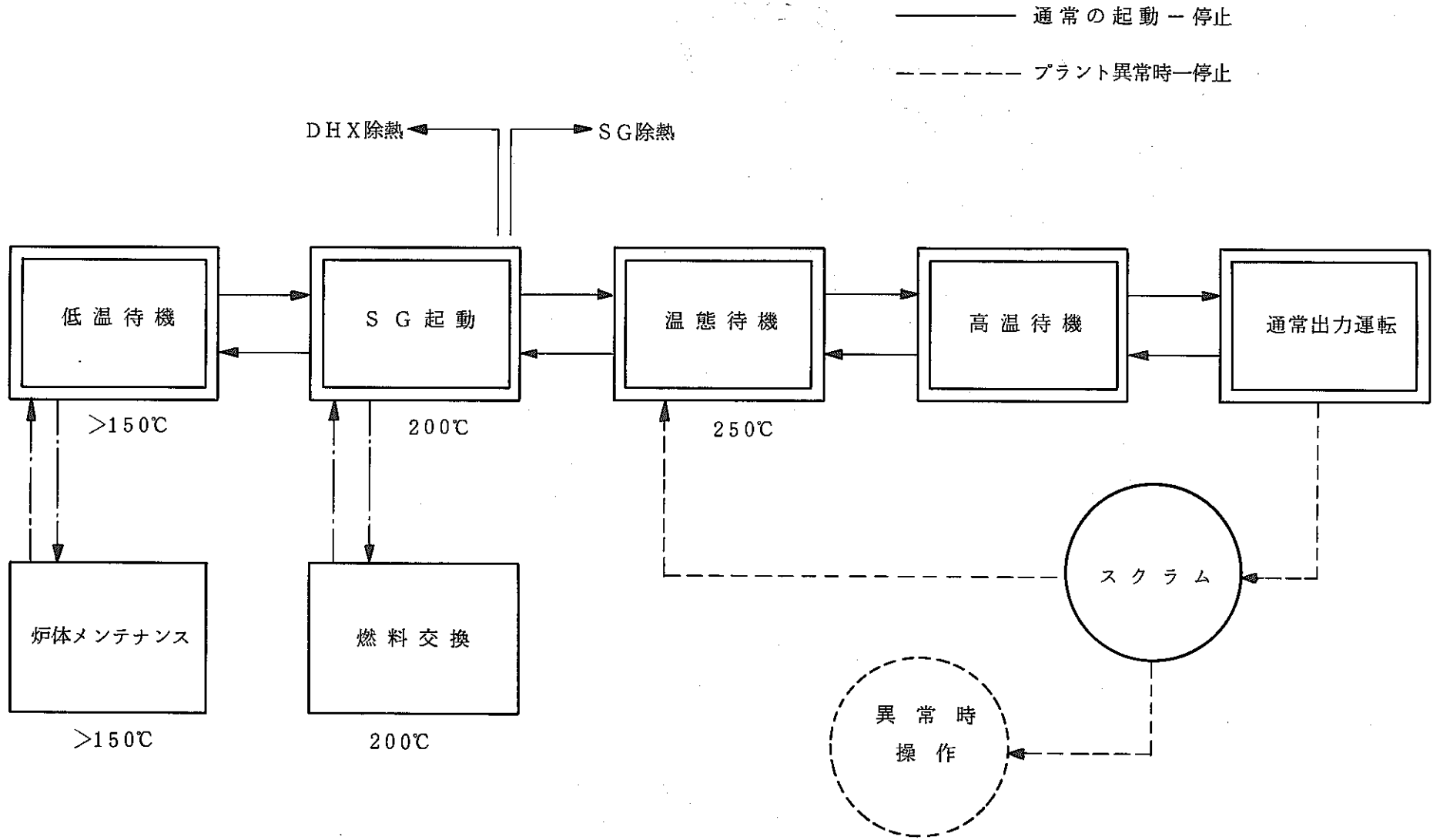
图II.2-3 全体配置配管图(BM1F, B1F)



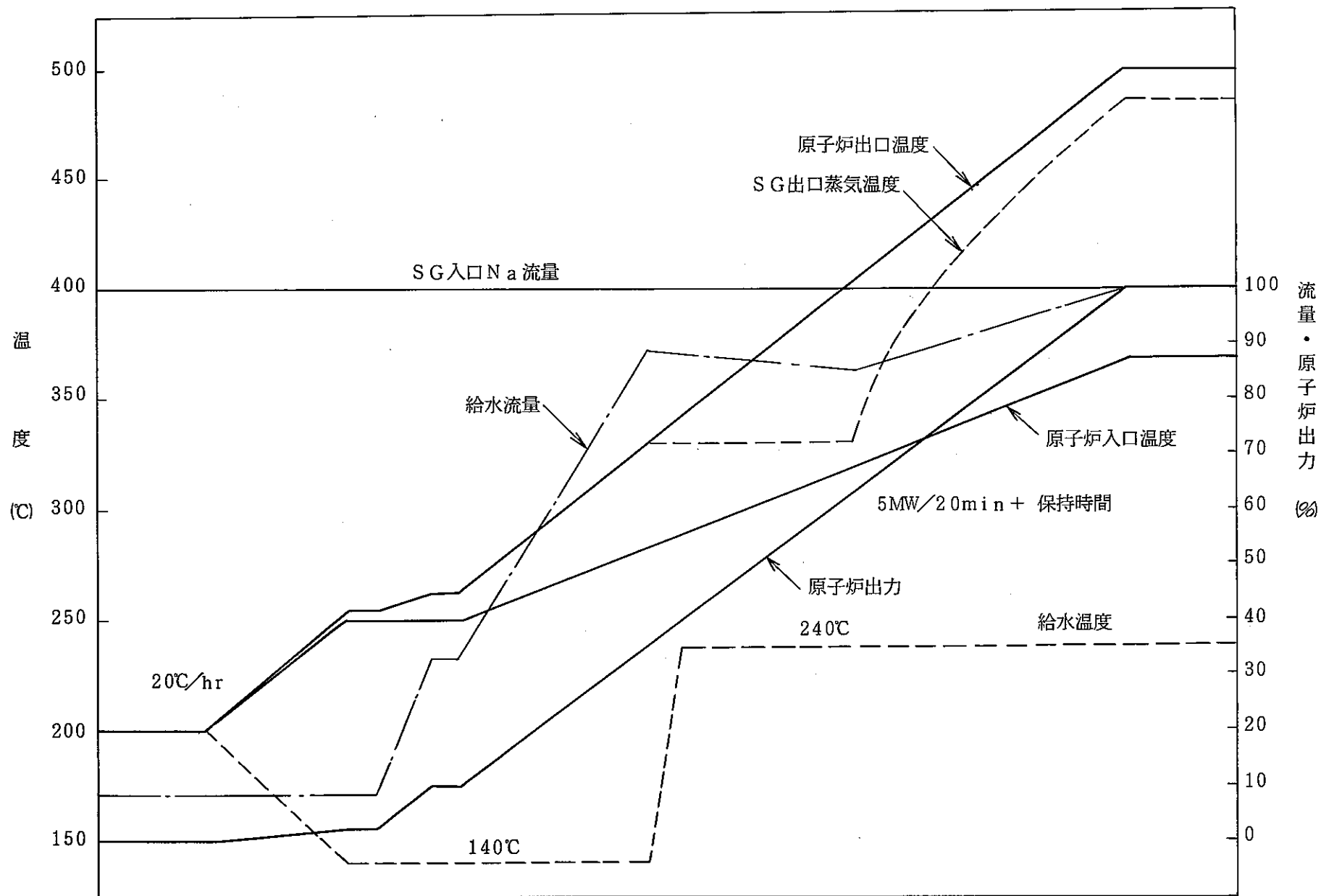
図Ⅱ.2-4 全体配置配管図(BM2F, B2F)



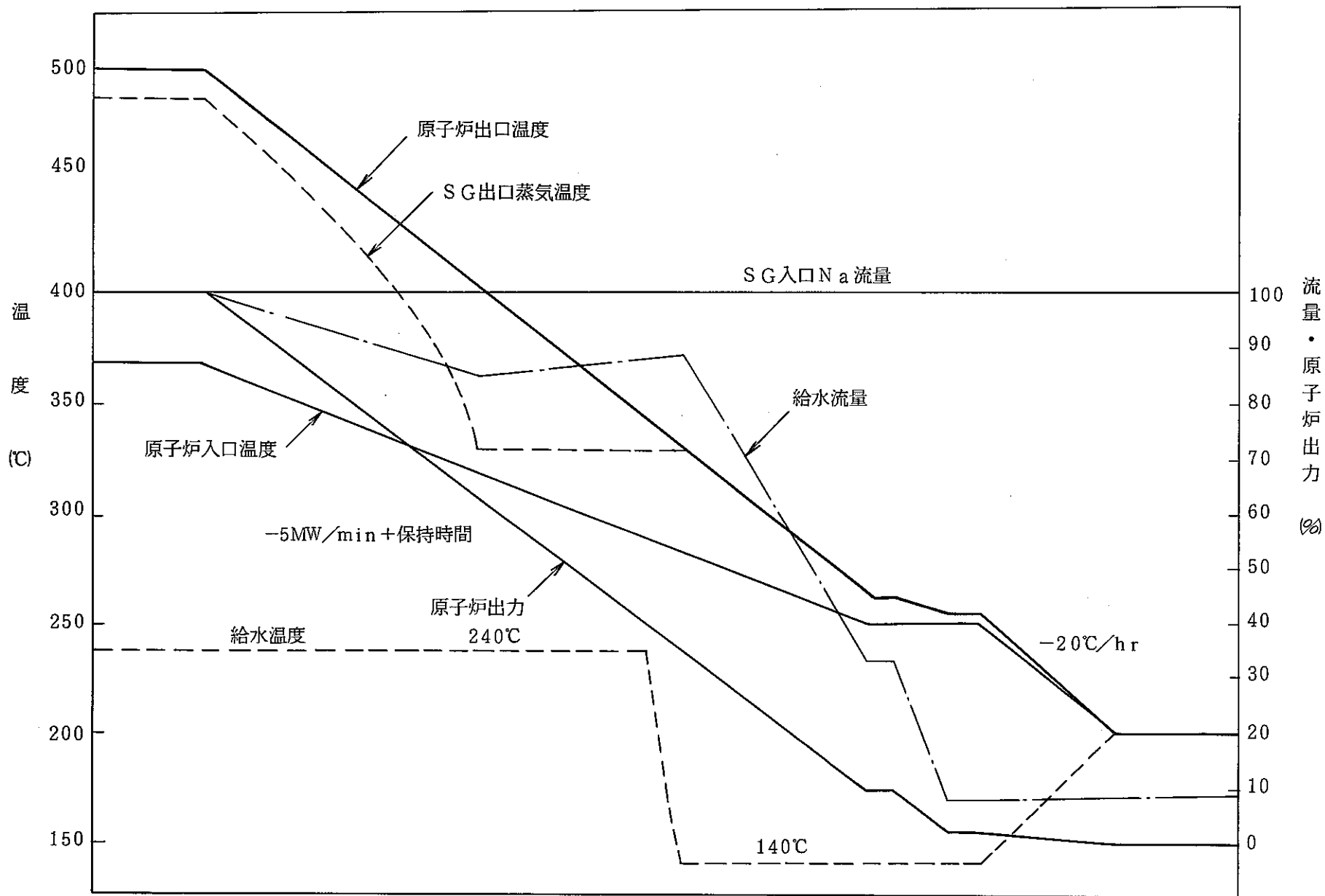
図II.2-5 既設配管分岐点



図II. 3-1 プラント運転サイクル図

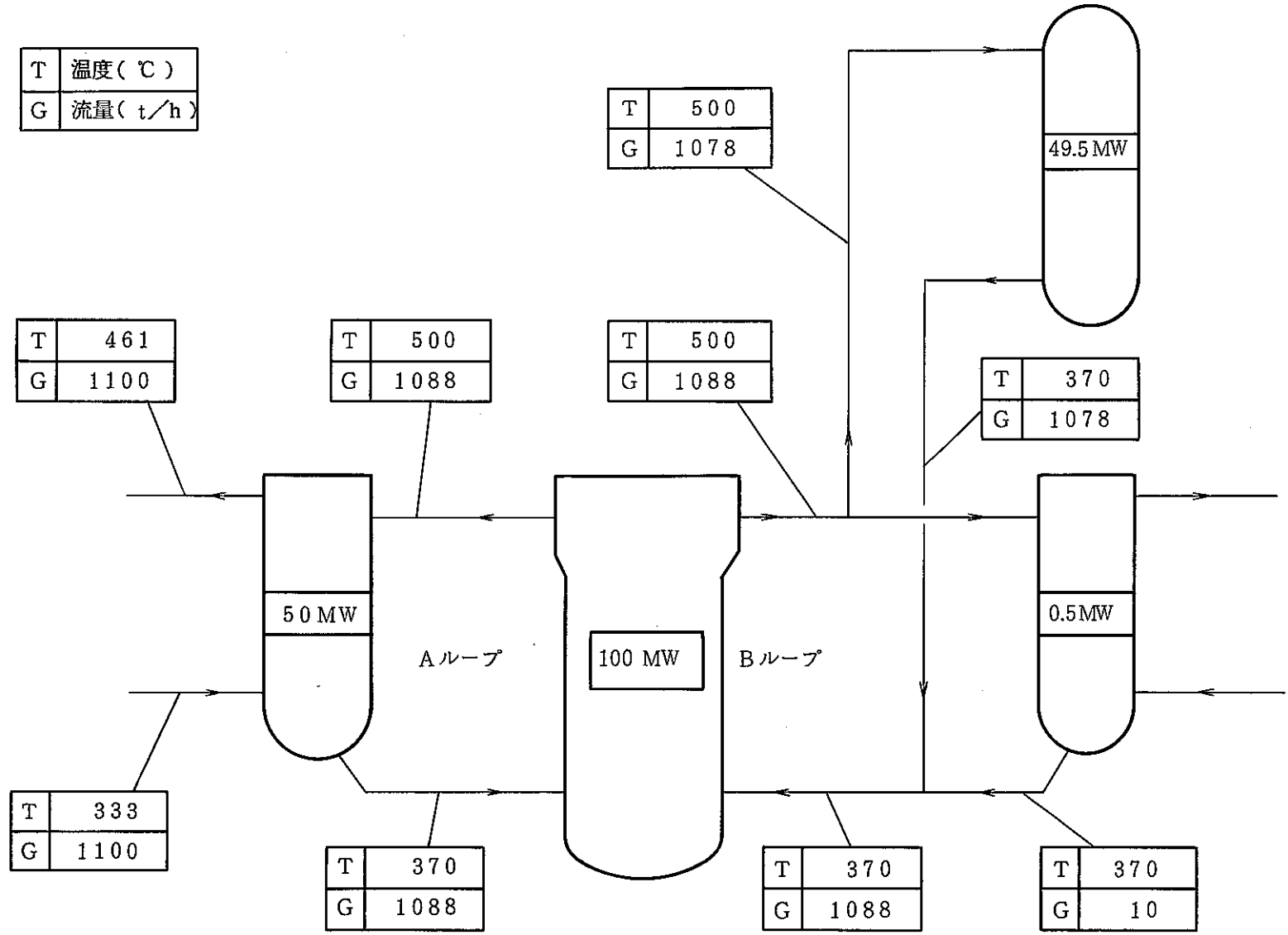


図II. 3-2 通常起動曲線 (計画)

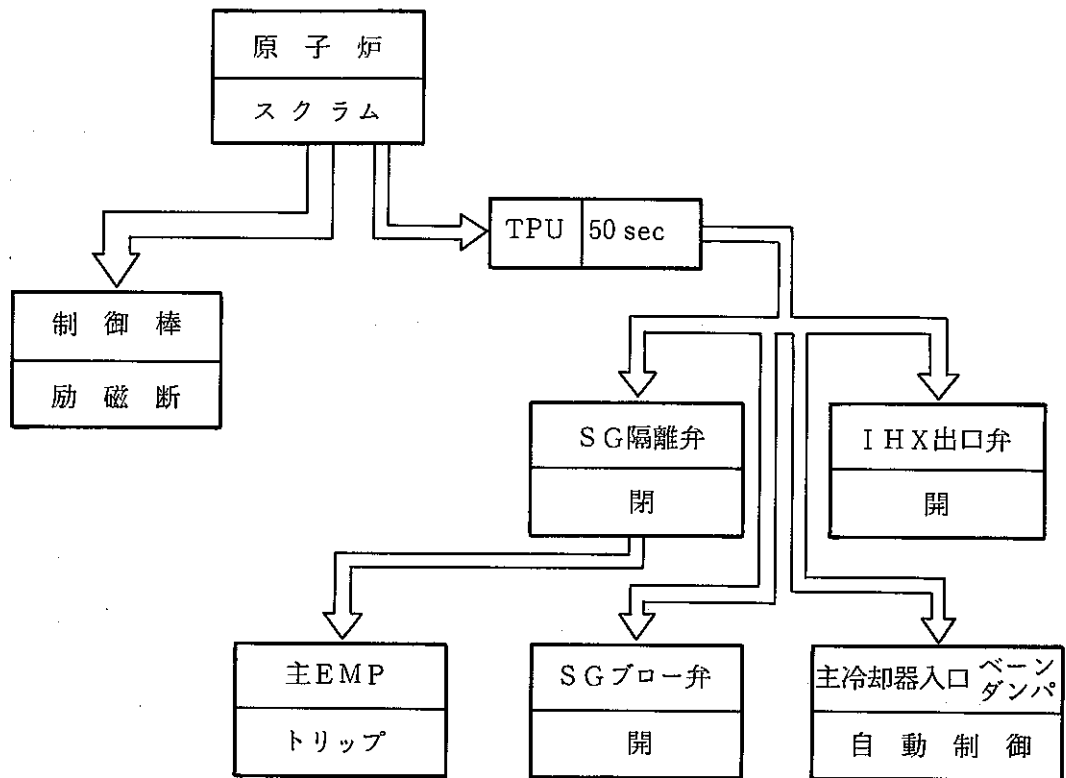


图II. 3-3 通常停止曲线 (計画)



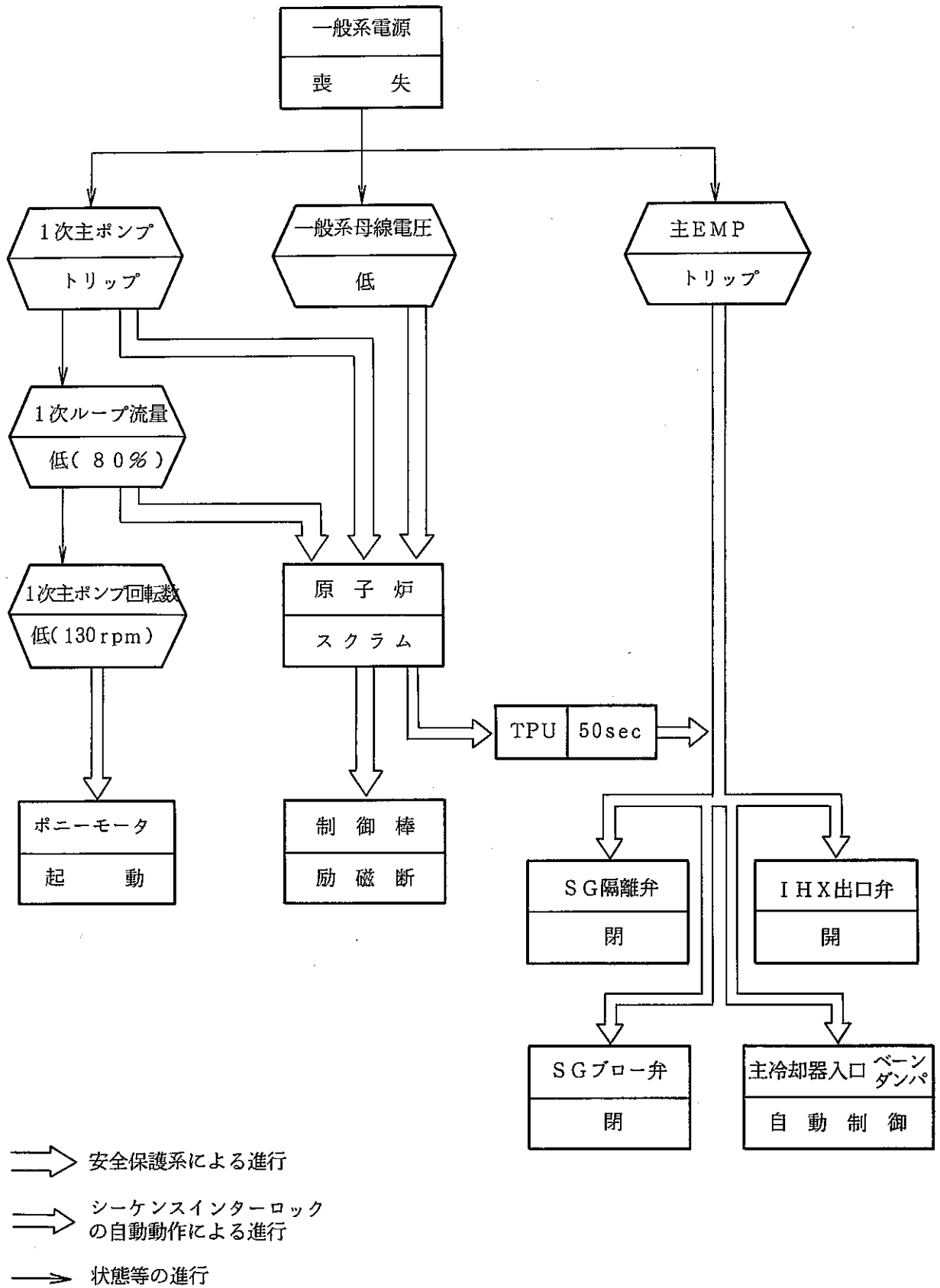


図II.3-4 定格時ヒートマスバランス

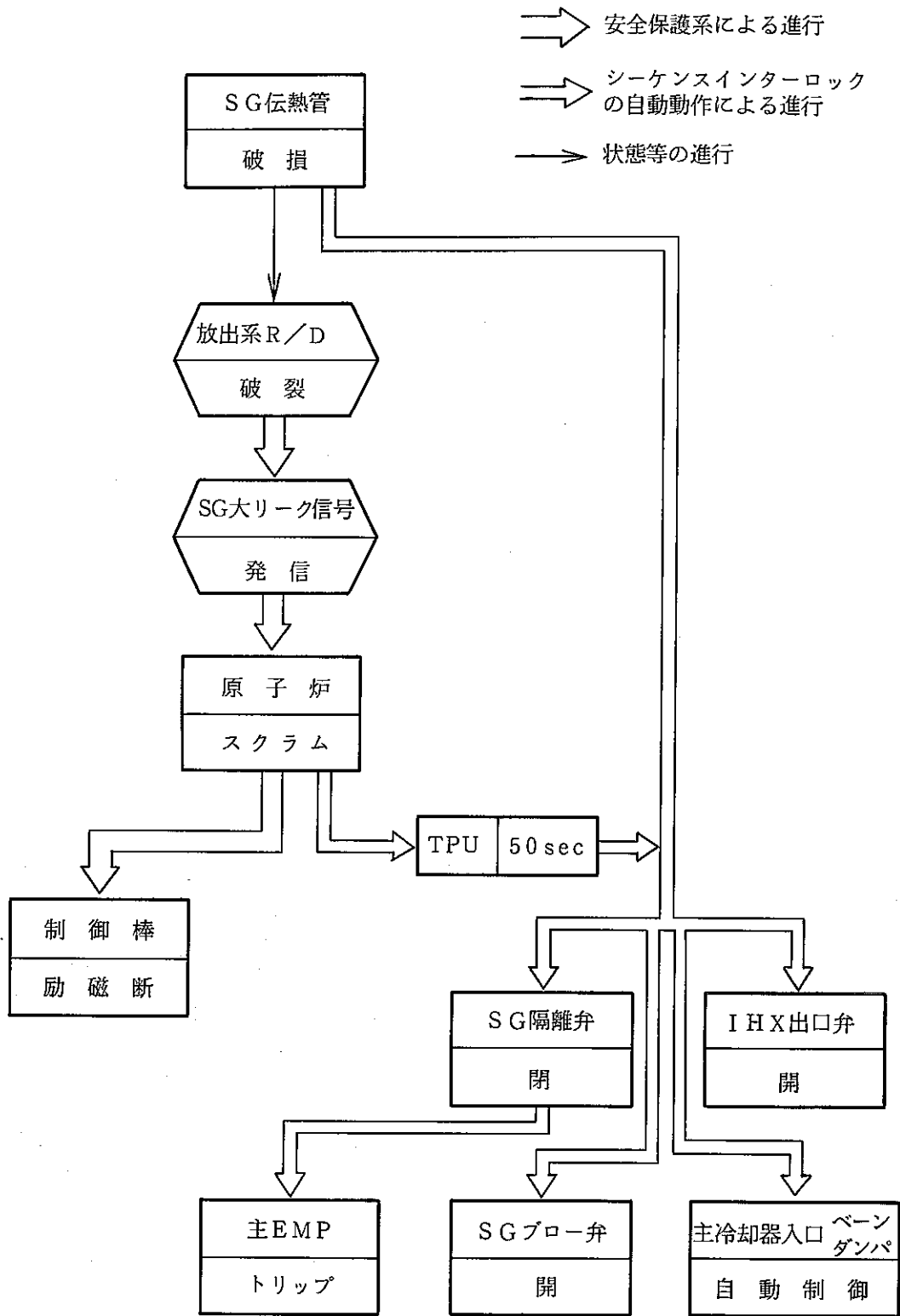


- ⇒ 安全保護系による進行
- ⇒ シーケンスインターロックの自動動作による進行
- ⇒ 状態等の進行

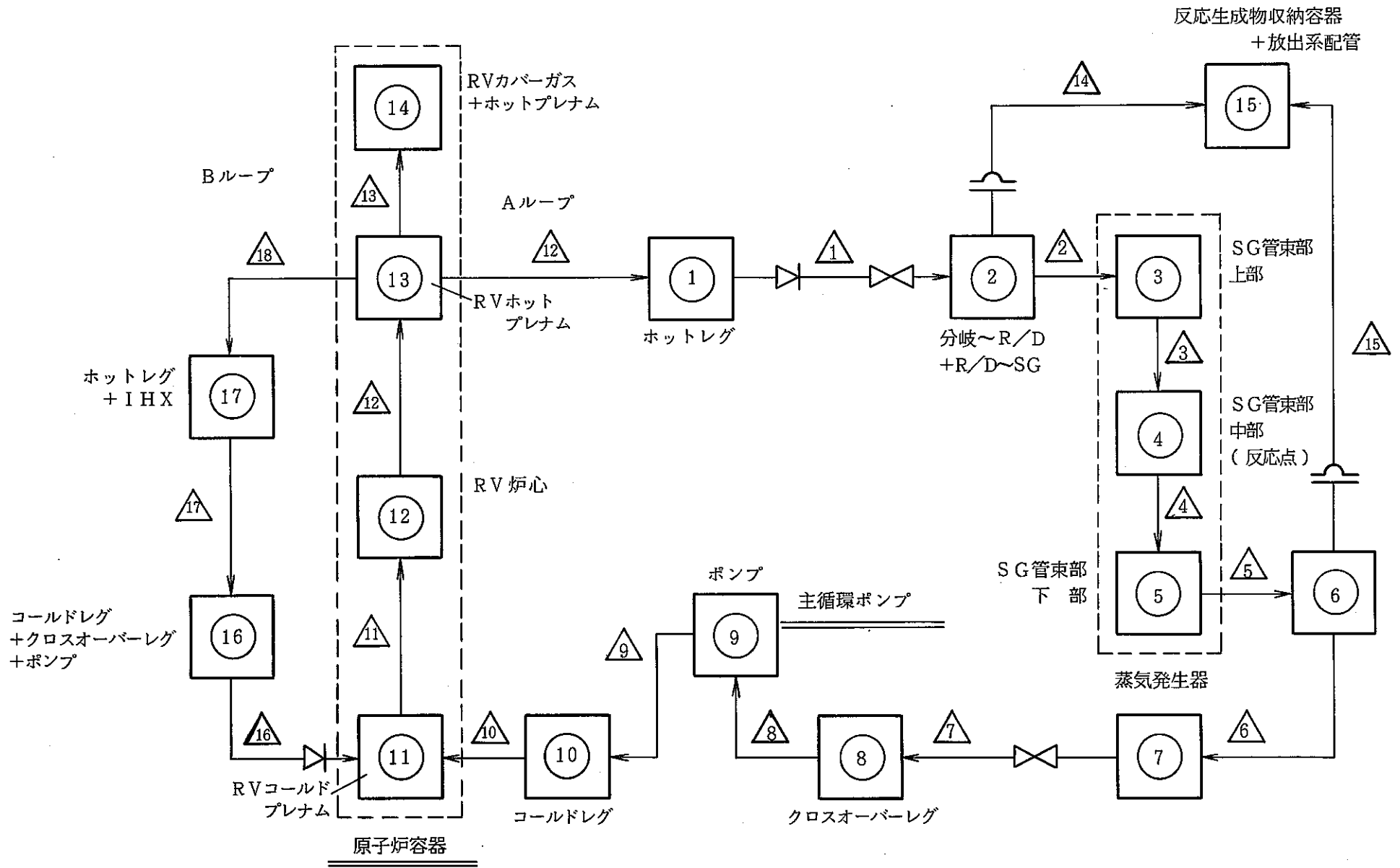
図II.3-5 手動スクラム時事象シーケンスブロック図



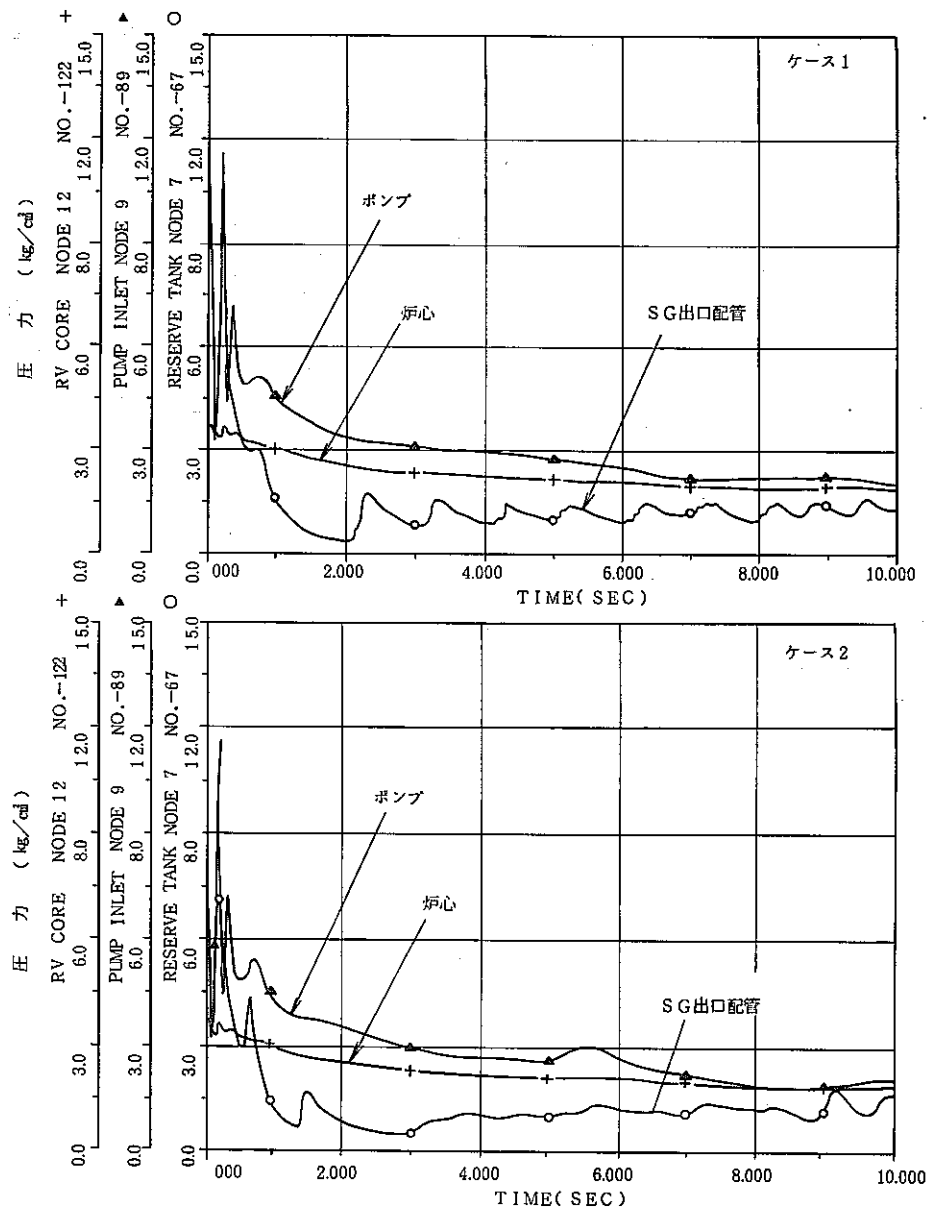
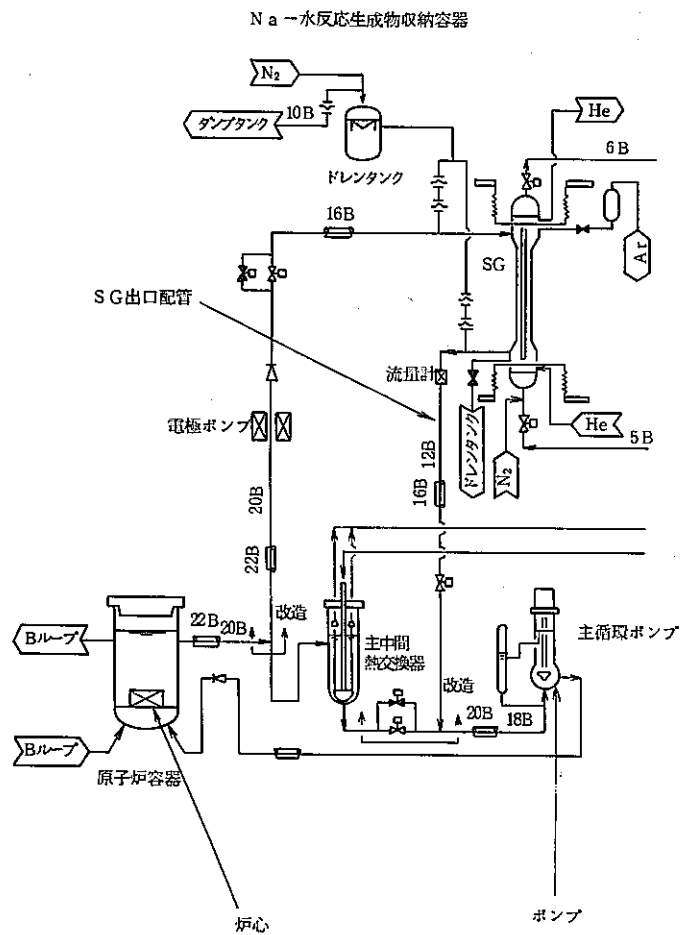
図II.3-6 一般系電源喪失時事象シーケンスブロック図



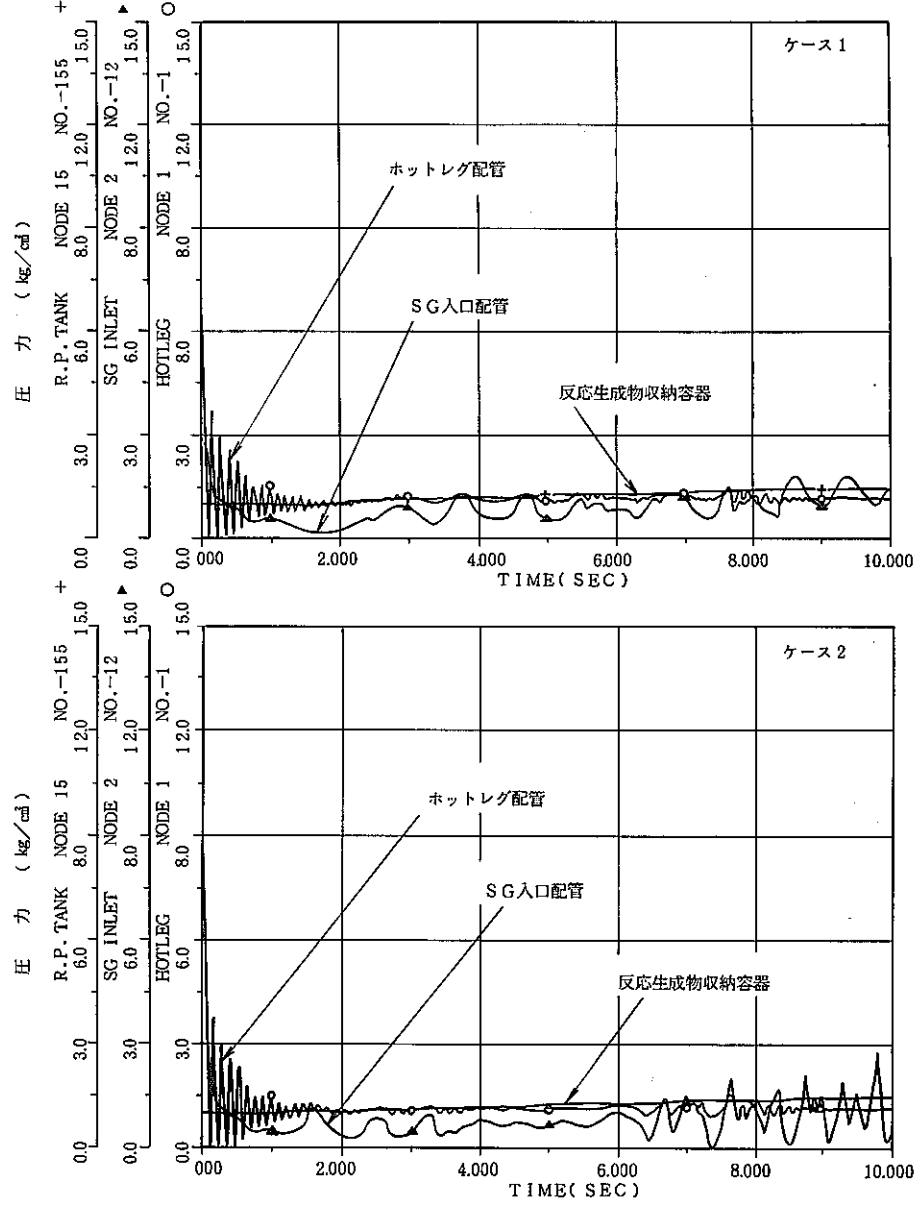
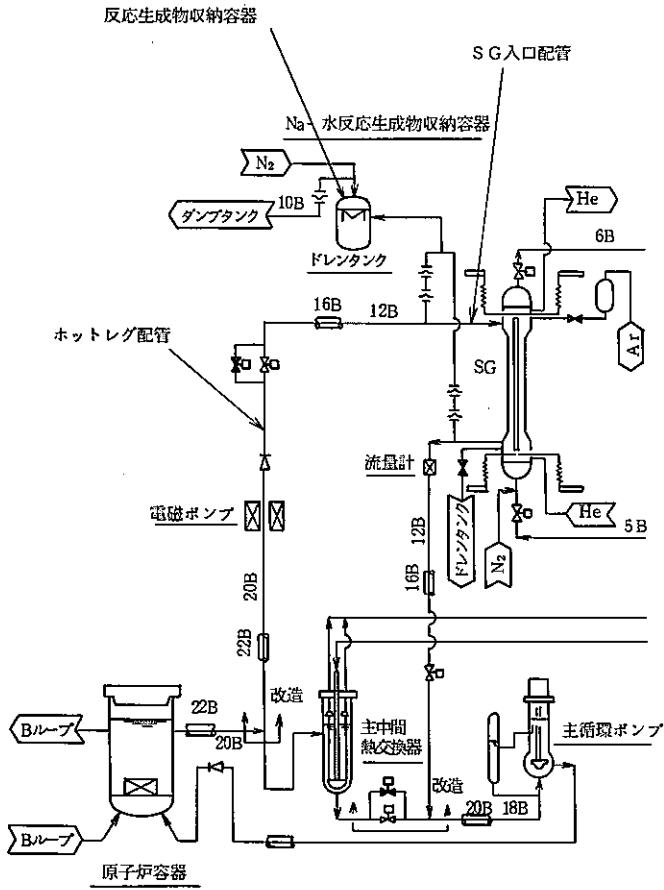
図Ⅱ.3-7 SG伝熱管破損時事象シーケンスブロック図



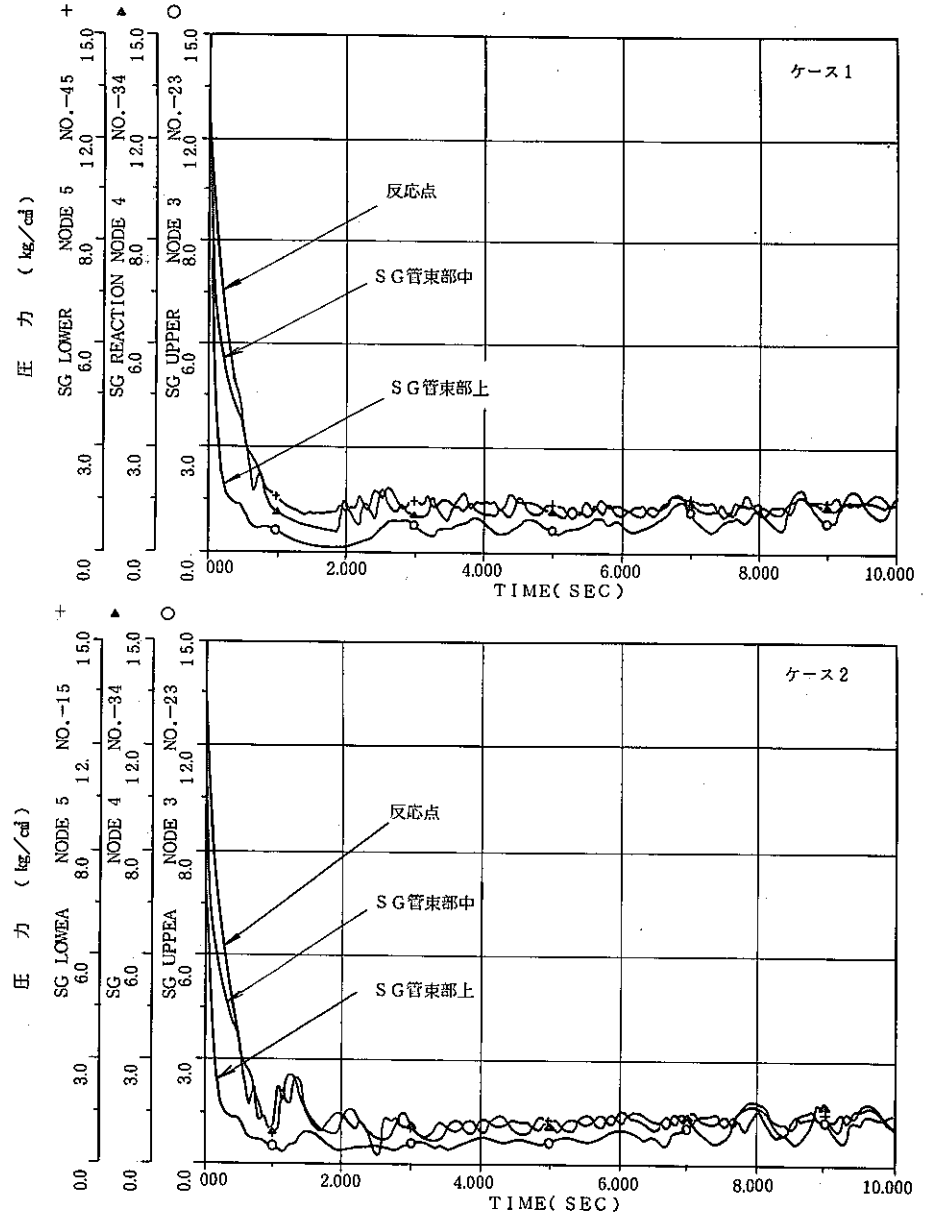
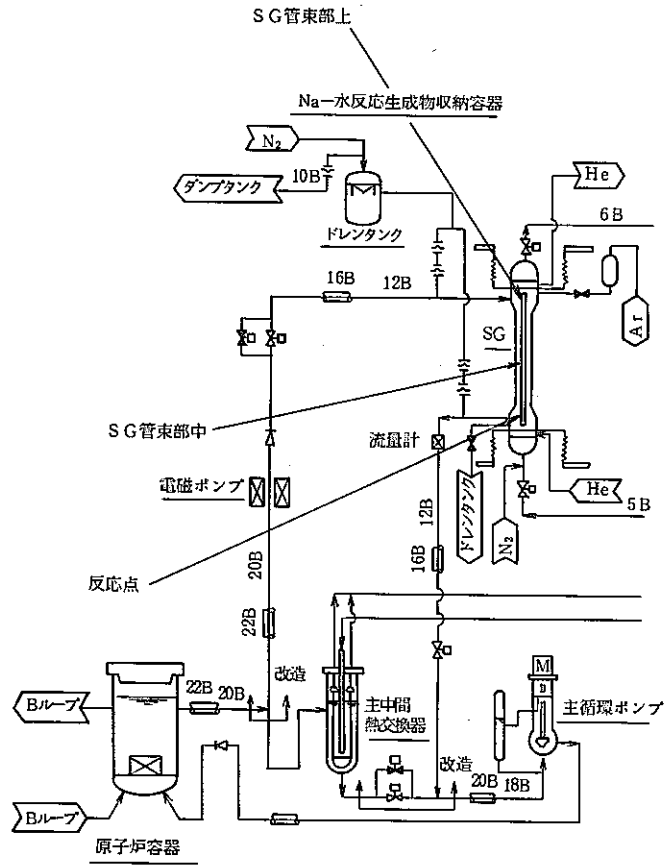
図II.4-1 解析モデル図



図II. 4-2 準定常圧力 (1)

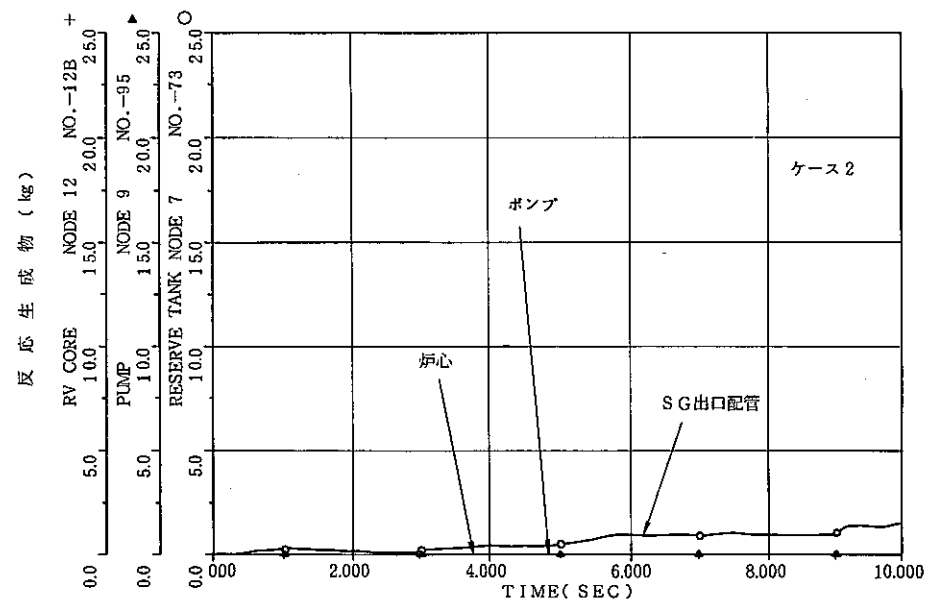
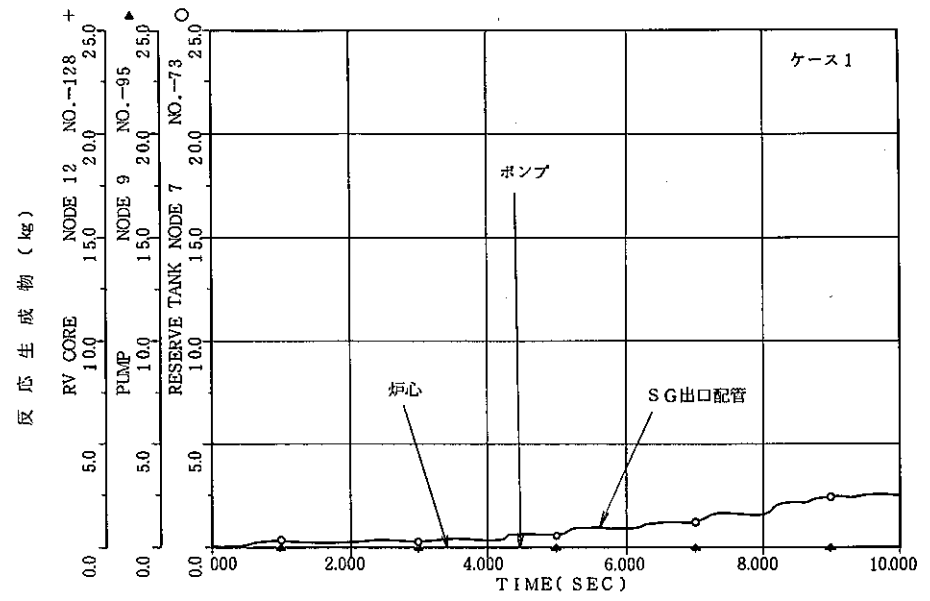
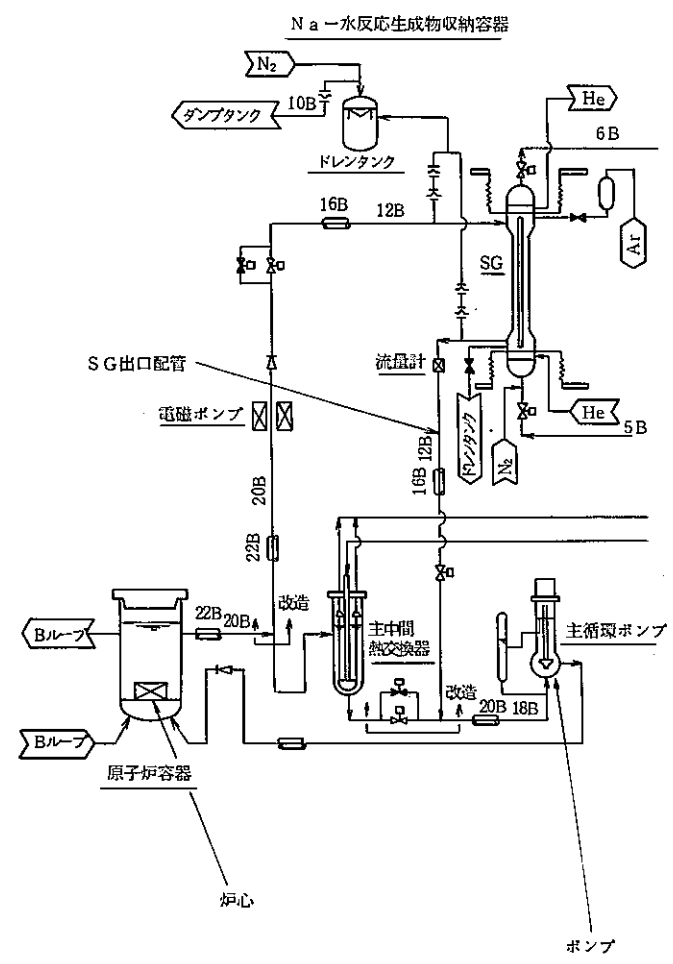


図II.4-3 準定常圧力(2)

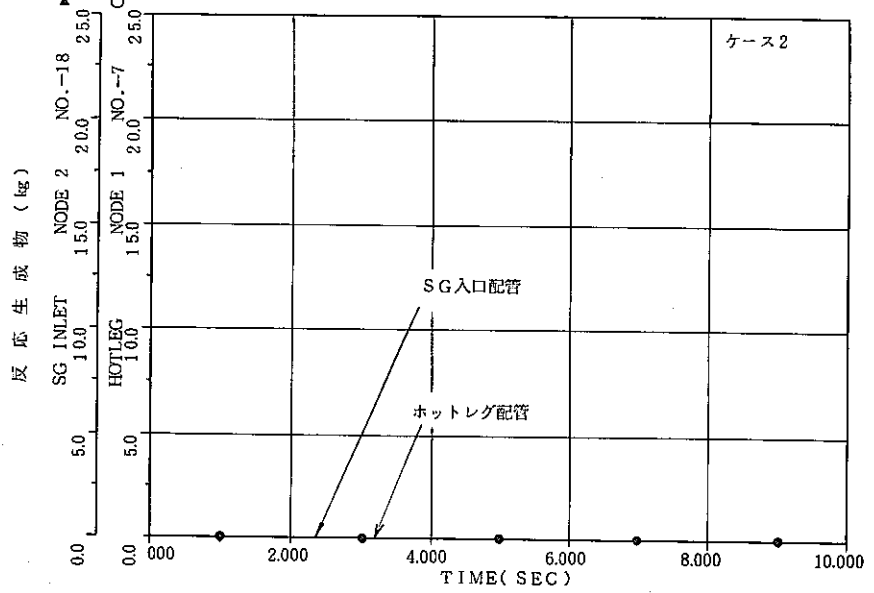
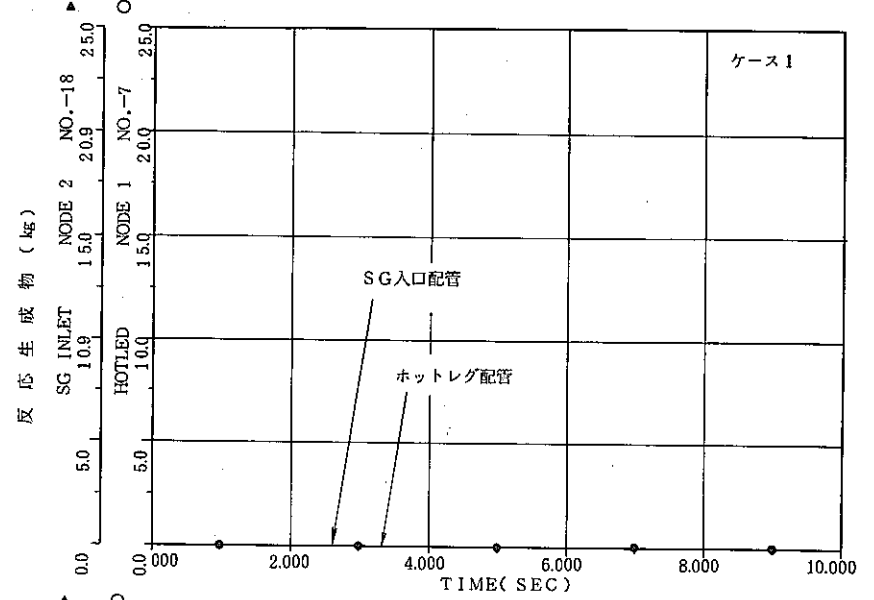
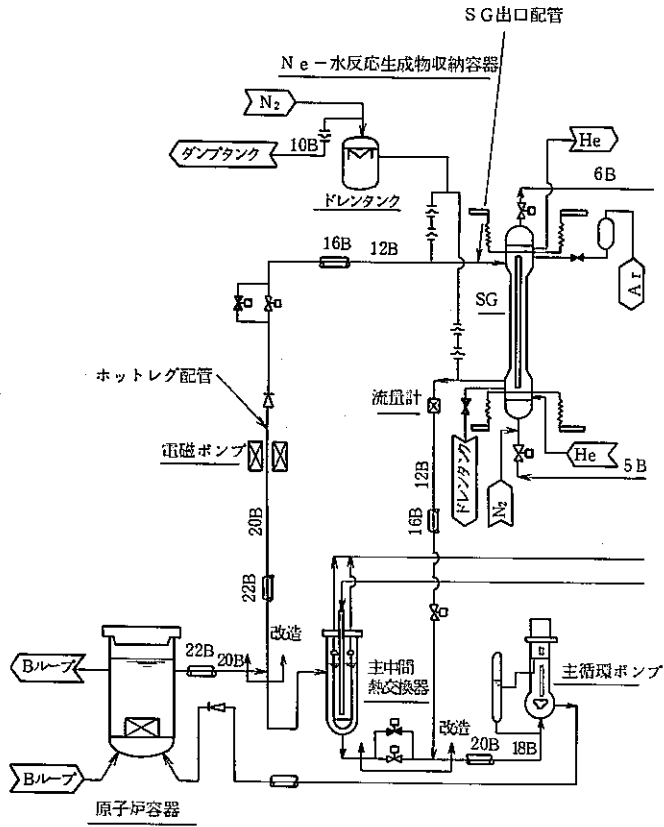


図II. 4-4 準定常圧力 (3)

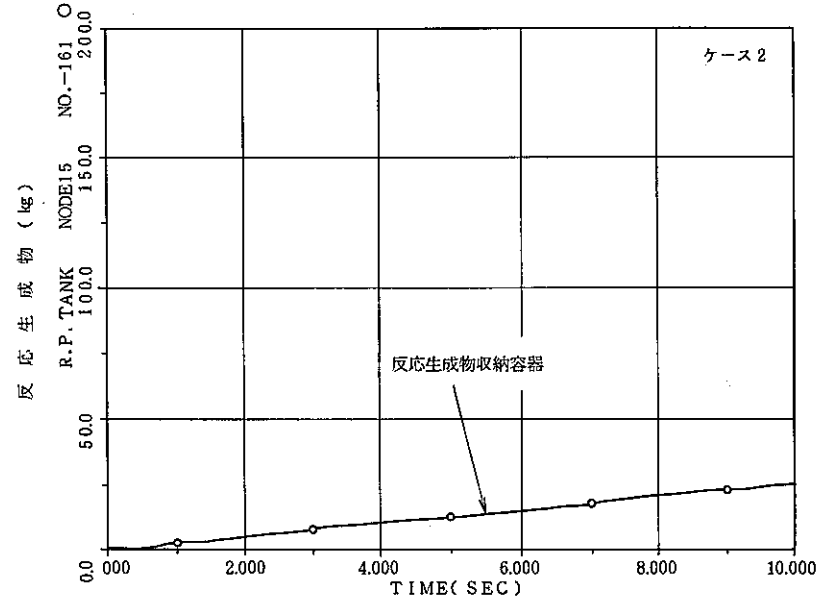
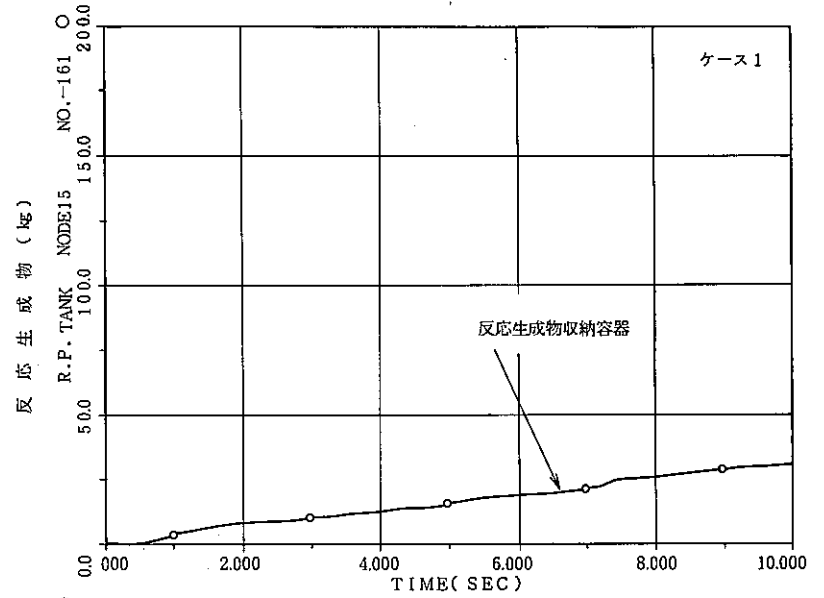
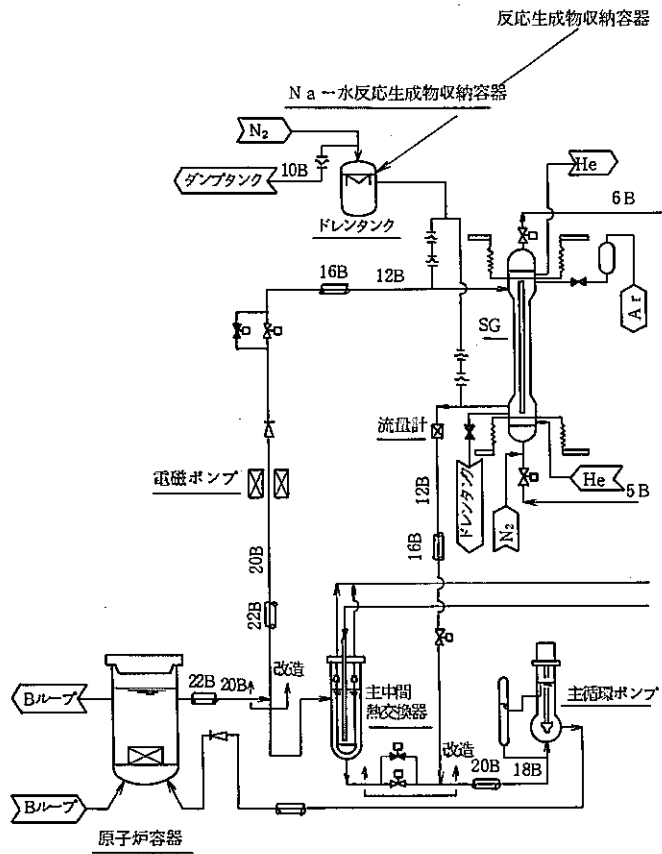




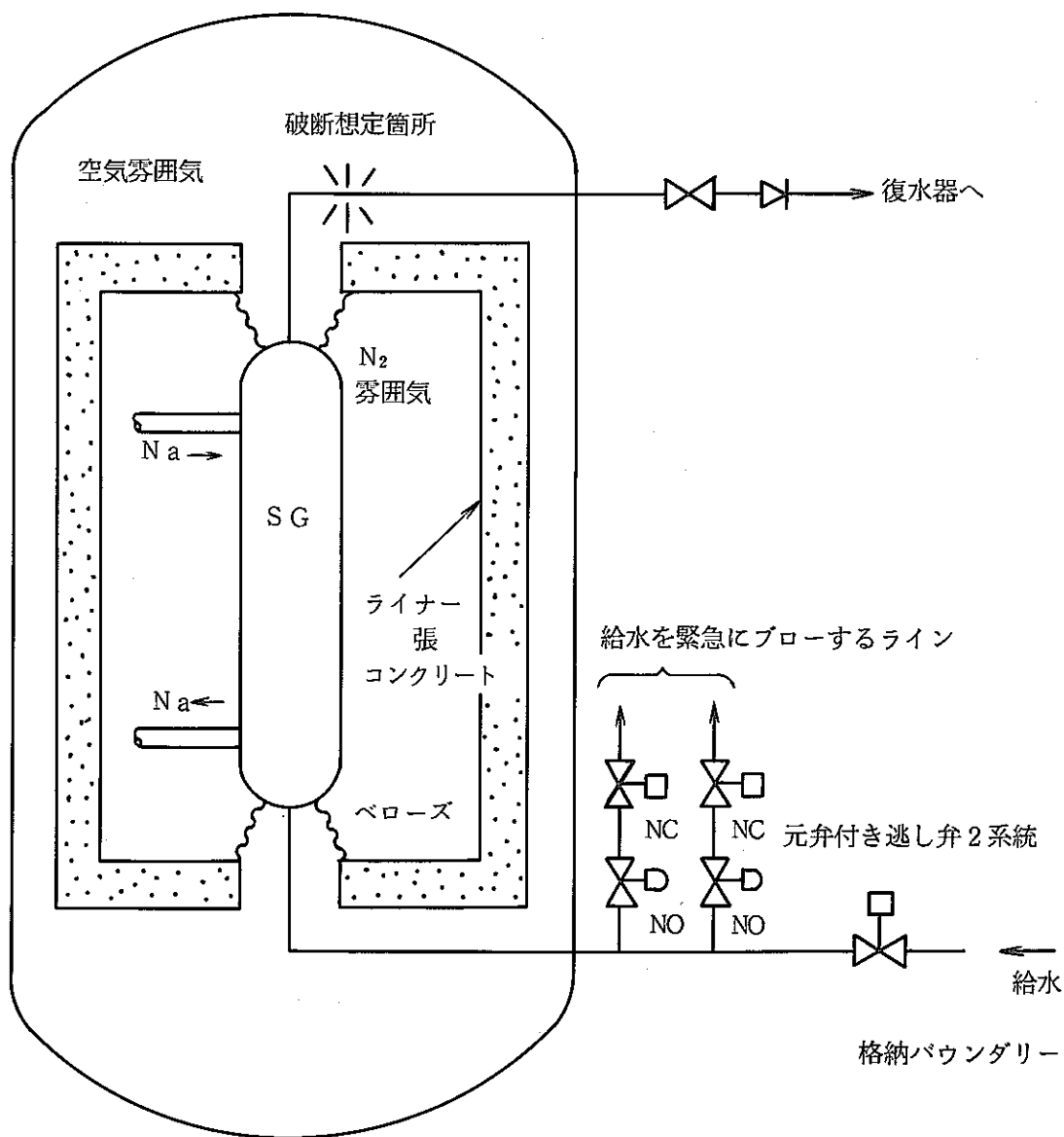
図Ⅱ. 4-5 反応生成物量 (1)



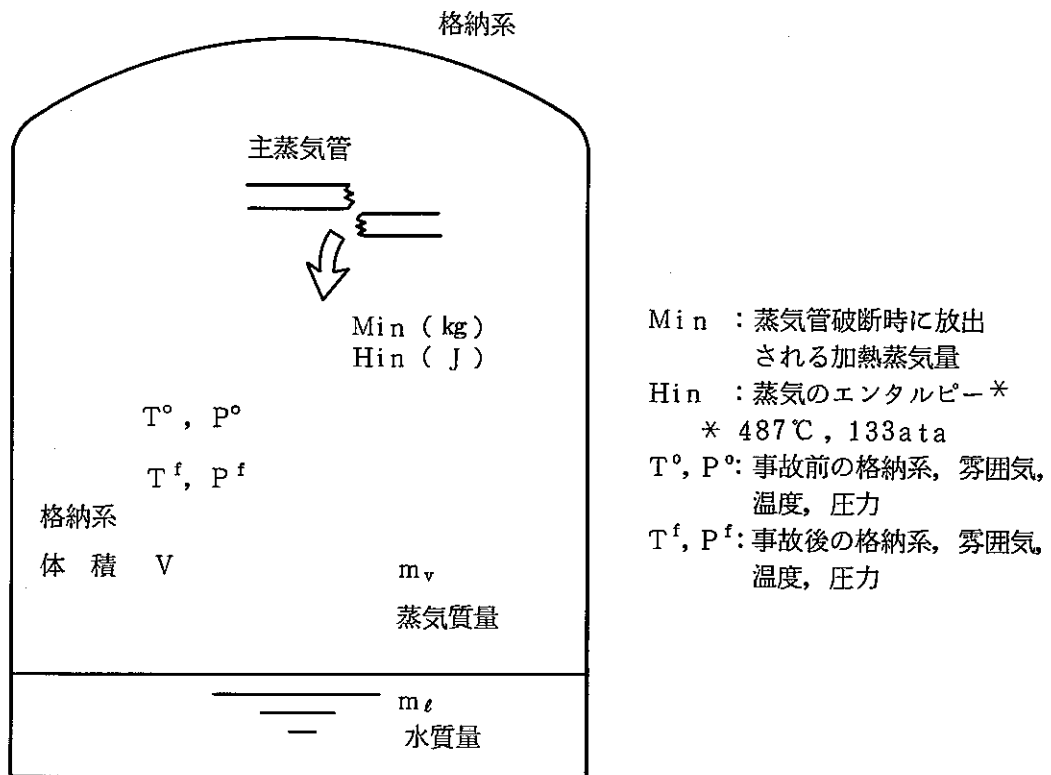
図II. 4-6 反応生成物量 (2)



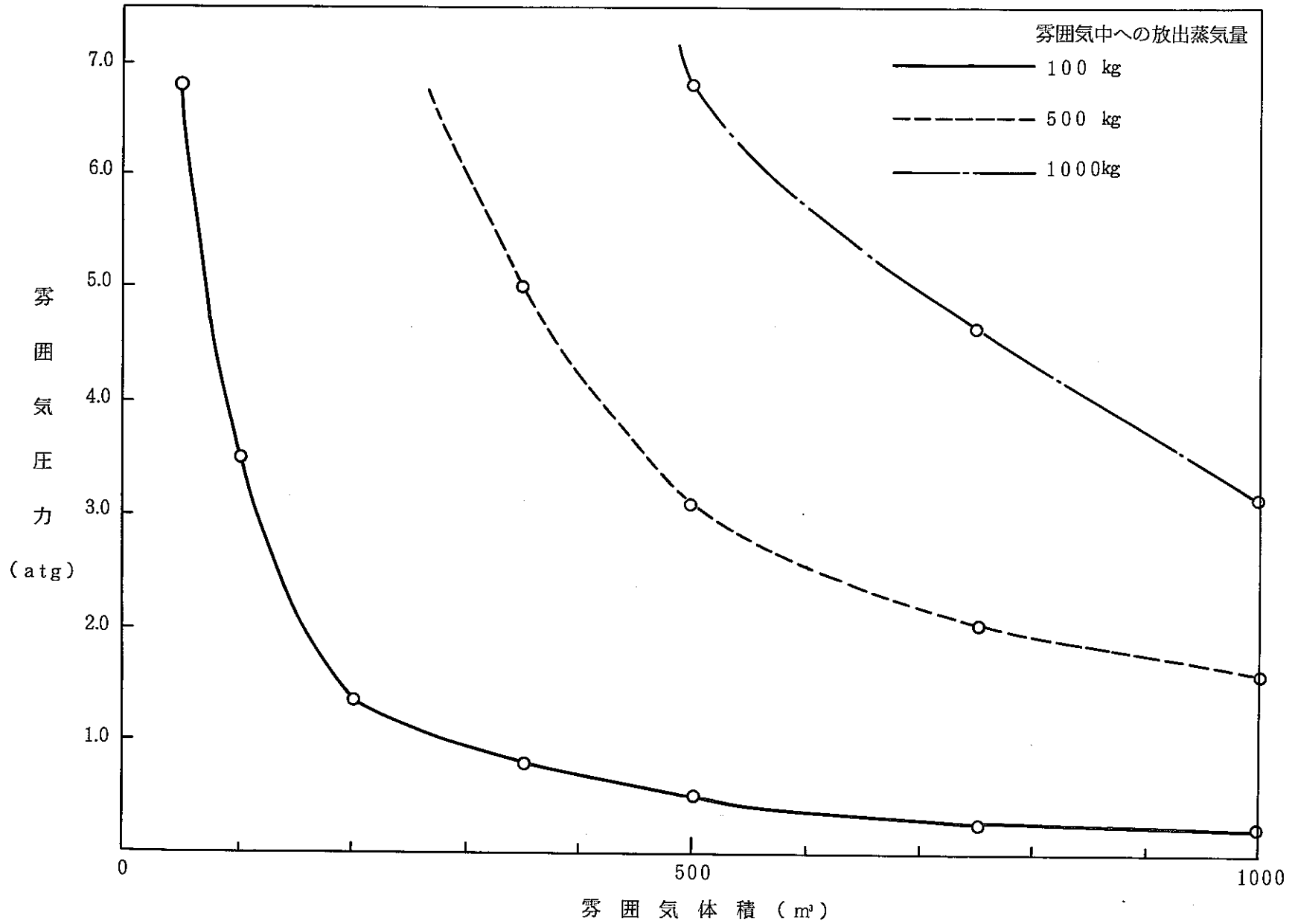
図II.4-7 反応生成物量 (3)



図II.4-8 2重管SG格納バウンダリー概念図



図II.4-9 水素破断時雰囲気評価モデル(定常, 断熱平衡)



図Ⅱ.4-10 格納バウンダリ，霧囲気体積と最高圧力との関係

表II. 1-1 「常陽」二重管SG機器仕様

項 目		主 要 目
機 器 仕 様	形 式	一体貫流2重管式(無液面,直管)
	数 量	1
	交 換 熱 量	50 MW t
	伝 熱 管 形 式	メカニカルボンド
	# 外 径 / 本 数	15.9 mm / 367本
	# 配 列	正三角形
	# ピ ッ チ	33 mm
定 格 運 転 条 件	N a 入 口 温 度	500℃
	N a 出 口 温 度	370℃
	N a 流 量	1088.6 t/h
	給 水 入 口 温 度	240℃
	蒸 気 出 口 温 度	487℃
	給 水 流 量	79.6 t/h
	蒸 気 出 口 圧 力	133 kg/cm <sup>2</sup> a
N a 側圧力損失		1.8 kg/cm <sup>2</sup>
蒸気側圧力損失		4.5 kg/cm <sup>2</sup>

表Ⅱ.1-2 水-蒸気系系統仕様

項 目	仕 様	単 位
除 熱 量	5 0	MW t
給 水 条 件		
給 水 温 度	2 4 0	℃
給 水 流 量	7 9.6	$\times 10^3$ kg/h
蒸 気 条 件		
蒸 気 温 度	4 8 7	℃
蒸 気 圧 力	1 3 7	kg/cm <sup>2</sup> · g
減温・減圧条件		
第 1 減 圧 条 件	6 0	kg/cm <sup>2</sup> · g
減 温 条 件	3 5 0	℃
第 2 減 圧 条 件	1 0	kg/cm <sup>2</sup> · g
復 水 器 条 件		
復 水 流 量	6 0	$\times 10^{-3}$ kg/h
蒸 気 入 口 温 度	3 0 0	℃
復 水 温 度	5 0	℃
空 気 入 口 温 度	3 0	℃



### 第三章 1次系設置方式（IHXを有しない方式）

## 1. 系統設備設計

### 1.1 1次主冷却系統設備

本系統の基本系統図を、図Ⅲ・1-1に示す。SGは、Bループ側に設置される。本方式の特徴は、IHX(B)の管束部を撤去してそのスペース上に、ブースタ電磁ポンプ、PRACSの伝熱コイル等をモジュール化した装置(以下、合体モジュールと称す)を設置し、工事の容易化、特に配管工事の容易化(主配管の切断不要、電磁ポンプ設置スペース不要等)を図っている点にある。合体モジュールの構造概念図を、図Ⅲ・1-2に示す。以下に、合体モジュールが有する機能を示す。なお、詳細については、付録Ⅲ-Aを参照のこと。

#### (i) ブースタ・ポンプ機能

SG設置に伴う系統圧損の他、高所配管引廻しに対する正圧条件確保のために、Na浸漬型の電磁ポンプをモジュール内に設置する。

#### (ii) 崩壊熱除去機能

プラント異常時、従来IHXが分担していた崩壊熱除去機能は、既設のDHXを利用したPRACSにより分担するものとし、そのための伝熱コイルをモジュール内に設置する。

#### (iii) 流路の切換え機能

改造ループでは、SGの稼動時と、SGにナトリウムを流さずPRACSによる除熱を行う2種類の運用があるために、流路を切換える機能を有する必要がある。このために、アルゴンガス圧を利用したバイパスフロー弁をモジュール内に設置する。

#### (iv) バウンダリ機能

従来のIHXの有していた1次ナトリウム/2次ナトリウムバウンダリ機能、格納容器バウンダリ機能、カバーガスバウンダリ機能を有する設計としている。

#### (v) Na-水反応生成物のトラップ機能

本機能は、安全設計上期待するものではないが、Na-水反応生成物の炉心への移行を阻止するものとして、モジュール内にトラップ装置を設置する。

### 1.2 2次主冷却系統設備

改造ループ側の2次系は、合体モジュールのPRACSコイルと既設DHXとを接続し、プラント異常時の崩壊熱除去系として活用される(図Ⅲ・1-1参照)。

しかしながら、既設の二次主循環ポンプ制御系及びDHXは、50MW除熱の設計であるため、数MWの崩壊熱除去を行う運転と整合しない。従って、本設置方式では、低流量運転が行えるよう、2次主ポンプをポニーモータ付ポンプに改造すると共に、DHXについても適切な改造を行う。

### 1.3 Na-水反応生成物収納設備

2重管SGの伝熱管において万一大規模な破損事故が発生した場合、2重管SGに設置した圧力開放板が破裂し、SG内圧力は内部を窒素ガス雰囲気維持されたNa-水反応生成物収納容器内に開放される。

放出された反応生成物のうち液体、固体は本収納容器で分離回収され、水素ガス等の気体はベーパートラップを介しナトリウムベーパーを除去された後、爆発性のある水素ガスは水素ガス再結合器によって分離され、廃ガス系へ送られる。

また、収納容器内圧力が高くなる場合には圧力開放板を介し、炉容器及び中継容器のカバーガス空間に導通させ圧力上昇の抑制を図る構成としている。系統図については、図Ⅲ・1-1を参照のこと。

### 1.4 格納施設系設備

本設置方式では、ライナー張りコンクリート格納容器(C/V)を採用しているが、これは最近通産省の方に答申された「原子力発電用コンクリート格納容器技術基準」を適用することによって、認可は得られるとの判断に基づいている。以下に、本施設の主要設計条件を示す。

- 最高使用圧力 :  $1.5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$
- 最低使用圧力 :  $-0.05 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$
- 最高使用温度 :  $150^\circ\text{C}$
- 許容漏洩率 :  $100\%/\text{day}$
- 耐震クラス : Asクラス
- 高温Na漏洩対策 : キャッチパン等設備対応

## 2. 配 置 設 計

建物配置計画図を、図Ⅲ・2-1に示す。SGは、「IHXを有する方式」と同様に、原子炉付属建物西側に新設するSG建物内に設置される。SG建物は、付属建物側壁部に躯体を張出す形で増設される。増設概念を、図Ⅲ・2-2の断面図に図示する。SG建物は、ライナー張りコンクリートC/V方式を用いることによって、「IHXを有する方式」の耐圧鋼製C/V方式に比べて、増設スペースの縮小化、改造工事の容易化等が図られている。また、水/蒸気系設備は、蒸気配管の短縮化という観点から、主冷却機建物の屋上エリアを活用して設置する計画としている。

一方、配管配置については次のように計画している。すなわち、SGと合体モジュールを接続する増設1次主配管は、「IHXを有する方式」と同様に、茶筒及び非常用エアロックを改造利用するルートを活用して設置される。BMI F及び1FにおけるNa系機器・配管の配置平面図を、それぞれ図Ⅲ・2-3及び図Ⅲ・2-4に示す。本方式の配管配置計画では、配管ベローズを用いない設計としているが、熱膨張解析の結果、熱膨張による発生応力は3 Sm以下に納まることから、配管ベローズ無しでも成立性の見通しのあることを確認した。但し、ベローズの必要性については、地震力に対する検討も含めて今後更に検討を詰めてゆく必要がある。

### 3. 運転制御設計

#### 3.1 通常起動・停止時運転計画

##### (1) 1次系の基本運用

通常起動時の基本運用手順を、図Ⅲ・3-1に示す。1次系は、自由液面を有する合体モジュールの液位制御を考慮して起動・停止運用法を考える必要があり、基本運用を以下のように設定した。

- (i) Naチャージ後1次ポンプポニーモータ運転にてA/Bループの低流量運転(等温ループ)を行う。
- (ii) 主モータ運転に切り換え、40%流量、200℃にてA/Bループの流量バランスを確認する。
- (iii) 核加熱開始に伴い、主ポンプ回転数/電磁ポンプ印加電圧を上昇させ、原子炉出力に見合った必要流量を設定する。

以上の基本運用に基づいて設定した計画起動曲線を図Ⅲ・3-2に、計画停止曲線を図Ⅲ・3-3に示す。また、定格時のヒートバランスを図Ⅲ・3-4に示す。

##### (2) 水/蒸気系の運転計画

通常起動時、水/蒸気系は、気水分離器と再循環ポンプとから成る再循環系にて40%の再循環流量でバイパス運転される。本モードでの運転状態を図Ⅲ・3-5に示す。本モードでは、蒸気が発生しないことから給水も不用であり、給水調節弁は全閉となっている。

核加熱開始以降、定格蒸気圧力となるまでは、蒸気圧力(気水分離器の運転圧力)は、SG水・蒸気出口温度の飽和圧力で昇圧し、定格蒸気圧力到達以降は、蒸気圧力弁が定値制御に入るため、微開となり、蒸気の発生が開始される。給水は蒸気の発生に見合う形で供給される。給水流量が40%に達した時点で再循環ポンプを停止することにより、蒸気発生器の運転状態は貫流モードへと切替る。以降、給水流量を40%に保持しつつ、原子炉出口温度を更に上昇することにより、定格蒸気温度を達成する。なお、停止時操作は、基本的に起動モードと逆操作になる。

#### 3.2 異常・事故時の運転計画

次の4ケースについて改造ループを中心に、異常・事故時の運転計画を検討した。

##### (i) 主ポンプトリップを伴わない原子炉スクラム時

基本的には、改造ループの除熱は、SG廻りの水/蒸気系にて行うものとする。原子炉スクラム時、改造ループ側の1次系は、ポニーモータ運転に切り換えると同時に、電磁ポンプを低電圧運転に移行させる。水/蒸気系は、低負荷再循環モードに移行する。なお、既設ループは、改造ループとの除熱量バランスが可能な限り小さくなるように、既設DHXの空気風量の制御

を行う。

(ii) 外部電源喪失時

外部電源喪失時は、合体モジュール内のガス圧制御バイパス弁を開放して流路パスを形成し、既設のDHXを使用したPRACSにて除熱する。この際、既設ループ側とのアンバランスは、2次主循環ポンプのポニーモータを用いた低流量運転により回避できる見通しである。

(iii) SG伝熱管破断時

SG伝熱管破断によるNa-水反応時には、水/蒸気系の隔離弁を全開とし、放出弁よりスタックを介して蒸気をブローするとともに、給水側より窒素ガスを供給してブロー効果を高め、発生水素ガス量を抑制する。

Na側についてはラプチャーディスクの破裂信号にてSG隔離弁を全閉とし、反応生成物が炉心側へ移行するのを防止する。

また、本事象発生時は1次主ポンプを直ちに停止し、既設補助冷却系を立ち上げて崩壊熱除去を行う。

(iv) Na漏洩時

Na漏洩がSG～SG隔離弁の間で生じた場合には、SG隔離弁を全閉とし、PRACS系2次主ポンプポニーモータによる除熱を行い、SG隔離弁～炉容器の間において発生した場合には、SG隔離弁を全閉にすると同時に、ポンプを停止し既設補助冷却系による炉心冷却を行う。

## 4. 安全性評価

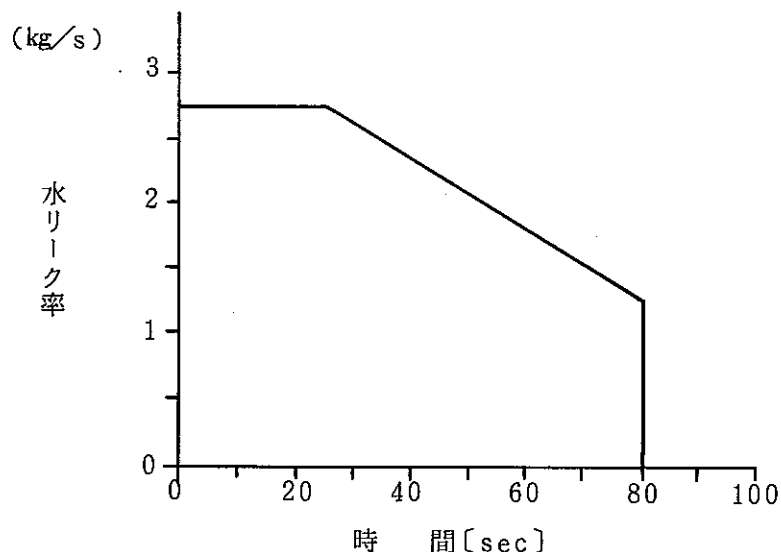
### 4.1 Na-水反応事故評価

「IHXを有する方式」と同様に、SG伝熱管1本ギロチン破断に対するプラントの安全性について評価を行った。

#### (1) 解析条件及び解析モデル

IHXを中継容器として用いる本案では、中継容器内部に3つのナトリウム液面を有し、これらとポンプオーバーフローカラム、炉容器内の液位との相互作用を評価することがプラント各部のナトリウム流量を評価する上で不可欠となるため、ここではMIMIR-DSGコードを用いて、プラント各部の圧力、流量、液位変化を評価することとした。図Ⅲ・4-1に解析モデル図を示す。

本評価では、伝熱管1本ギロチン破断より次図の水リーク条件を設定した。その他、ラプチャーディスクは接液型であることを考慮し、伝熱管破断と同時に破断するものとし、Naと水の反応率は65%、発生水素ガス温度は、1000°K(約540°C)とした。また、SGは破裂後10秒間で隔離するものとした。



[水リーク条件図]

#### (2) 解析結果

##### ① 準定常圧力評価

炉容器圧力に係る解析結果を、図Ⅲ・4-2に示す。入口圧力は初期時4.5 kg/cm<sup>2</sup>程度に達するが、その後徐々に降圧し、合体モジュール出口圧力も初期時急激に上昇するもののそ

の値は高々  $4.2 \text{ kg/cm}^2$  程度である。また、SG入口圧は伝熱管破断と同時に  $4.5 \text{ kg/cm}^2$  に上昇するが、ラプチャディスクの破裂により即低下する。以上、プラント各部の圧力上昇は最高でも  $4.5 \text{ kg/cm}^2$  程度で、設計圧力以下に十分抑えられる。

## ② 反応生成物移行量

本解析では、伝熱管破断と同時にSG出口部のNaがどこまで移動するかを求め、反応生成物の影響度を評価した。図Ⅲ・4-3に解析結果を、図示する。SG出口部Naは、9.4秒のピーク値で移動距離68mに達するが、これは丁度SG出口から合体モジュール下端までの距離に相当する。すなわち、反応生成物のフロントは、合体モジュール下端程度までしか移動せず、炉心部への反応物の流入は防止できる見通しが得られた。

## 4.2 蒸気管破断事故評価

### (1) 解析条件と解析モデル

図Ⅲ・4-4に示すSG廻り水/蒸気系格納バウンダリ概念図にて、事故概念を図示する。本評価では、「IHXを有する方式」と同様に、放出エネルギーが大きい方の主蒸気管のギロチン破断を想定し、ブローアウトパネルを設置しないケースと、設置するケースとについて、設置エリアコンパートメントの圧力・温度上昇について評価を行った。評価は先ず、図Ⅲ・4-5に示した全体系の解析モデルに基づいて蒸気管破断時の流出流量、エンタルピー変化を求め、これを入力条件としコンパートメントの圧力・温度上昇を計算した。

### (2) 解析結果

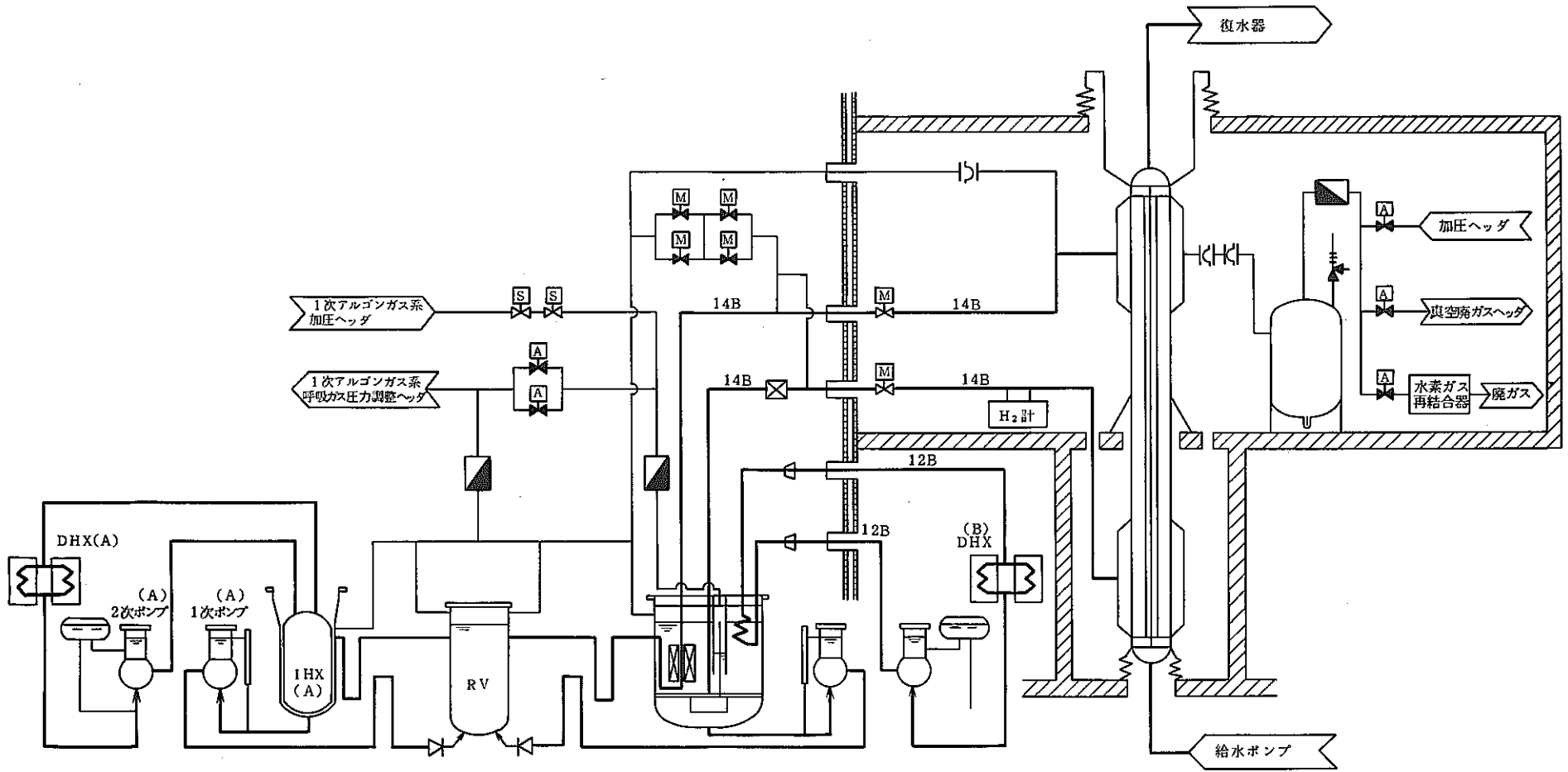
ブローアウトパネルを設置しないケースでは、部屋面積を  $500 \text{ m}^2$  とした場合、破断後10秒で  $4 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$  であり、 $1000 \text{ m}^2$  とした場合でも  $3 \text{ kg/cm}^2$  近くに達し、建物強度上問題となる。一方、設置するケースについての解析結果を図Ⅲ・4-6に示すが、最大圧力は  $1.4 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$  に抑えられ、この程度の圧力上昇であれば建物強度上成立する見通しである。



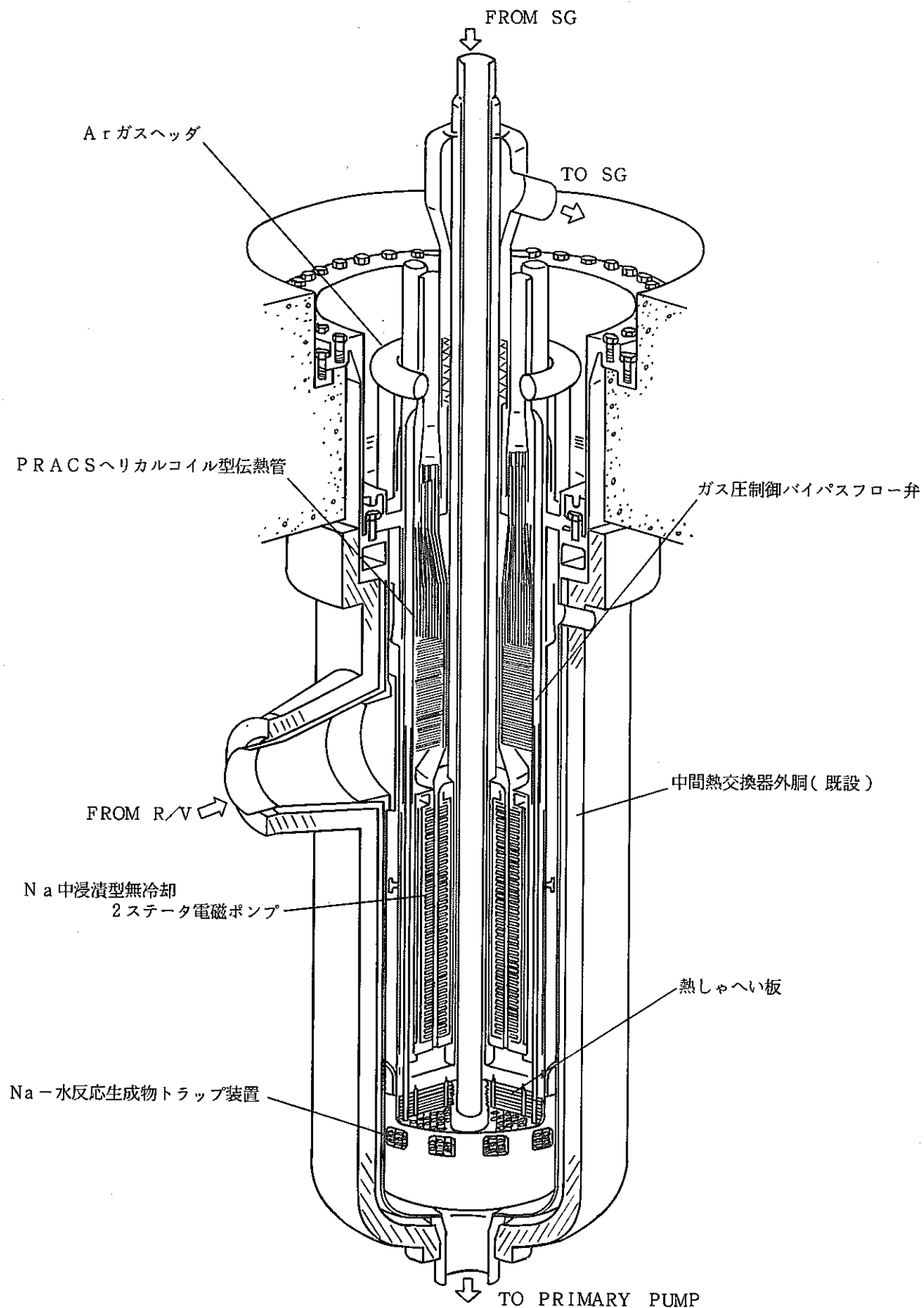
## 5. 検討結果のまとめ

IHXを有しない場合の設置方式に対する主な検討結果を、以下にまとめて示す。

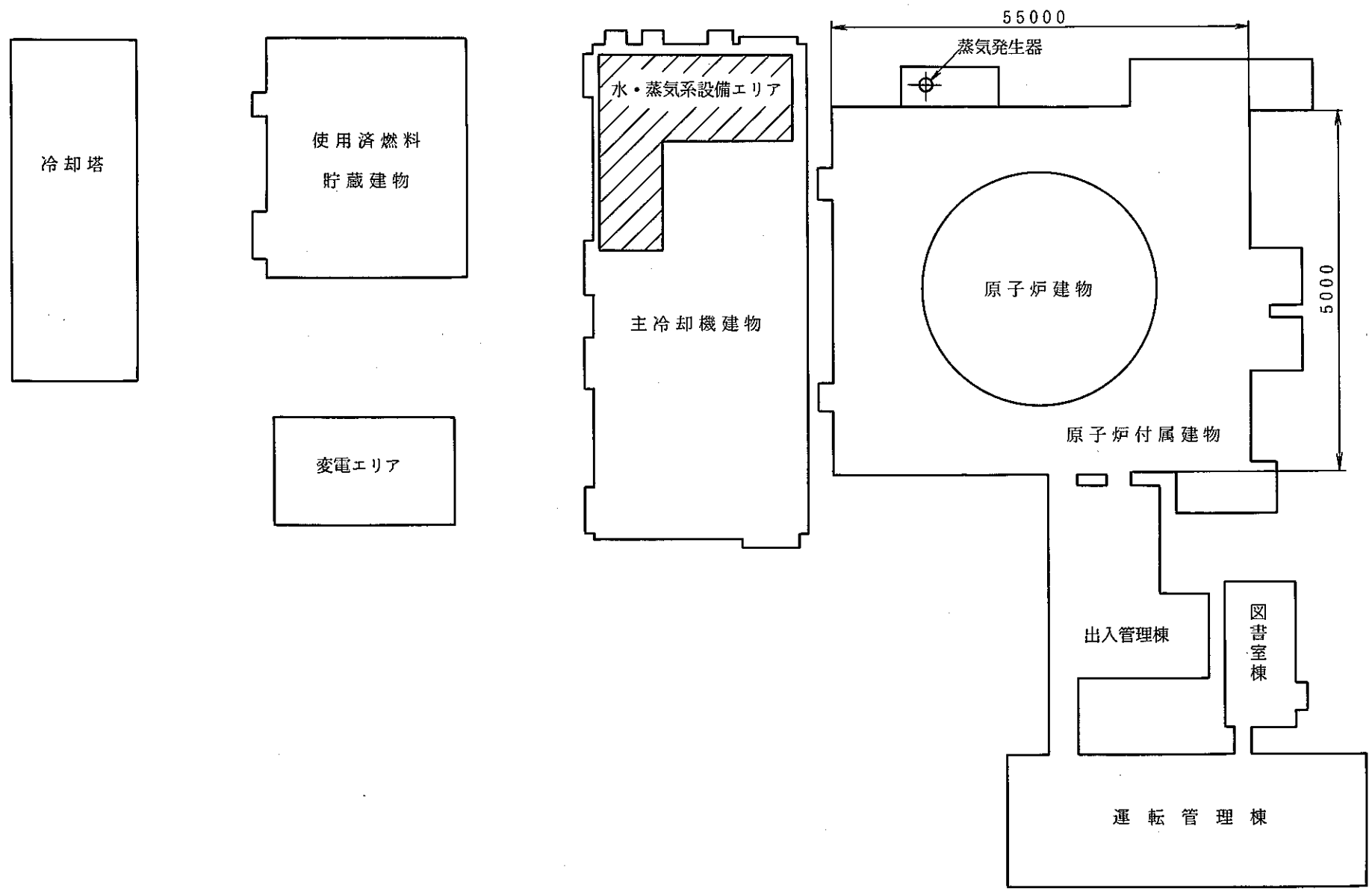
- ① 本方式の特徴は、IHX伝熱管束部を撤去したスペース上に、ブースタ電磁ポンプ及びPRACS伝熱管部をモジュール化した装置(合体モジュール)を設け、主配管溶接をなくすなど、改造工事の容易化が図られている。(第1.1項, 図Ⅲ・1-1, 2参照)
- ② プラント異常時は、合体モジュール内のカバーガス圧を低下させれ静的切換方法により、電磁ポンプを介した主流路からPRACS伝熱管部側へ流路を変更し、既設DHXを用いた崩壊熱除去が行われる。(第1.1項, 図Ⅲ・1-1, 2, 付録Ⅲ-A参照)
- ③ 合体モジュールについて安全性, 成立性, メンテナンス性の観点より検討を行い, 高温浸漬型電磁ポンプについて今後R&Dを進めていく必要はあるものの, 合体モジュールの成立性の見通しを得た。(付録Ⅲ-A参照)
- ④ 二重管SGは, 原子炉附属建物西側に増設する耐圧ライナー張りコンクリートCV内に設置される。(第2項, 図Ⅲ・2-2参照)
- ⑤ ライナー張りコンクリートC/Vの採用により, 増設スペースの縮小化, 改造工事の容易化が図られている。なお, ライナー張りコンクリートC/Vに対する許認可性は, 高温漏洩Na対策(キャッチパンの設置など)を施すことで認可を得られる可能性がある。(第1.4項, 第2項, 図Ⅲ・2-4参照)
- ⑥ Na-水反応事故評価の結果, 準定常圧は, Na-水反応生成物収納設備の効用により, プラント機器の健全性上問題とならない圧力に抑えられると共に, 反応生成物は炉心へは流入せず, 安全評価上問題とならないという見通しを得た。(第4.1(2)項, 図Ⅲ・4-2, 3参照)
- ⑦ 蒸気管破断時評価の結果, ブローアウトパネルの設置により格納バウンダリの健全性は確保できる見通しを得た。(第4.2(2)項, 図Ⅲ・4-6参照)



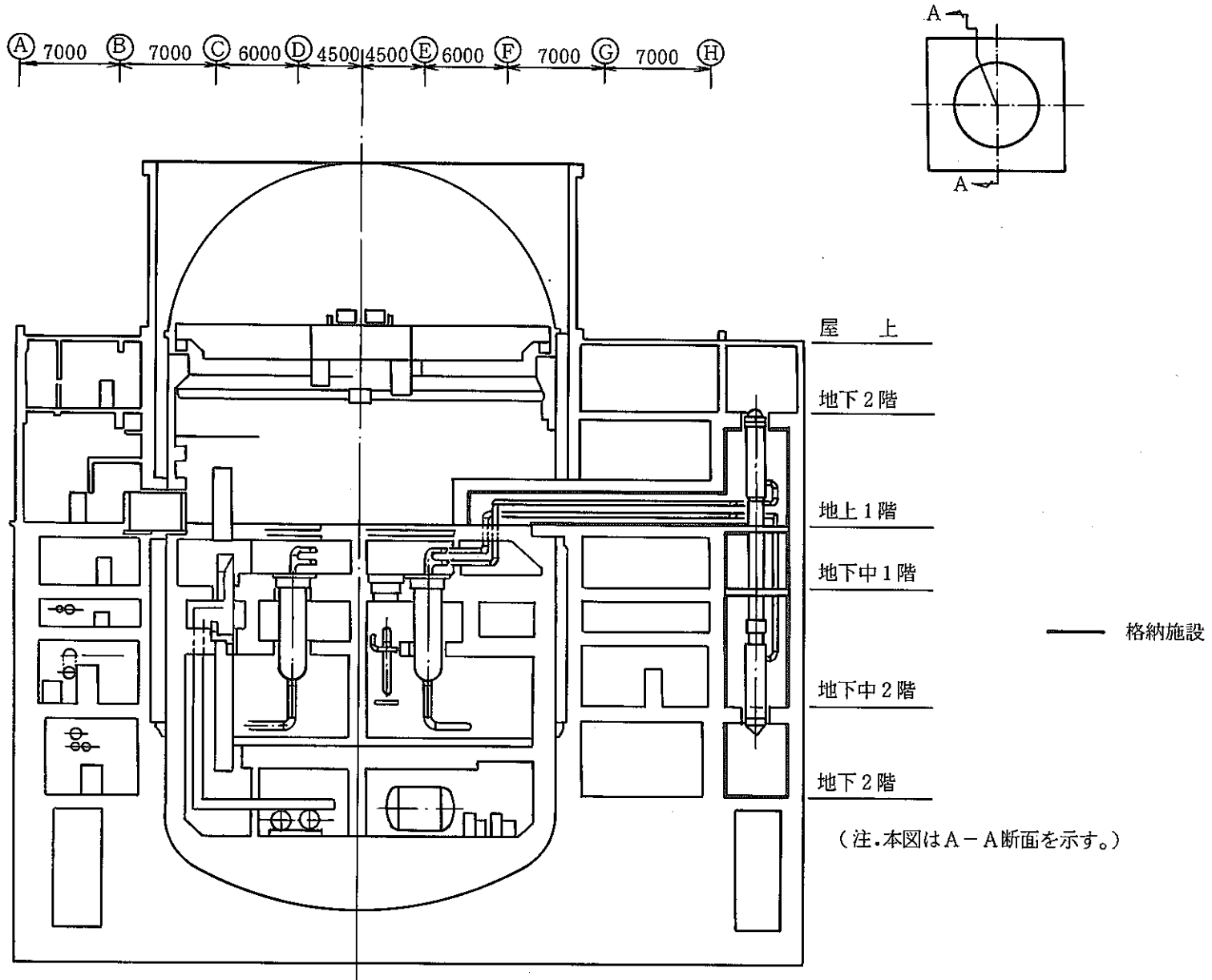
図Ⅲ・1-1 1次主冷却系等系統図( IHXを有しない方式)



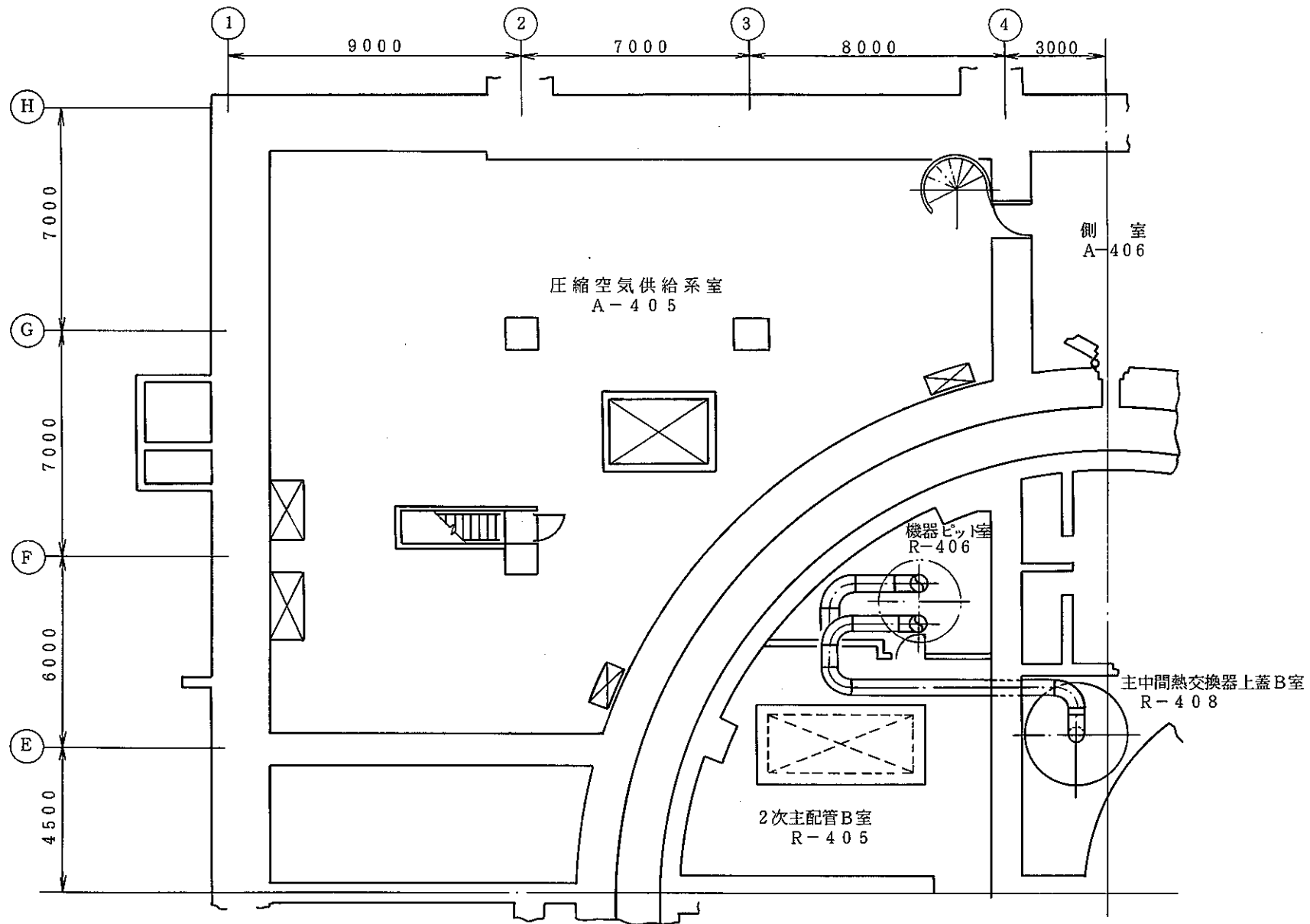
図Ⅲ.1-2 ブースタ電磁ポンプ・PRACS 合体モジュール構造概念図



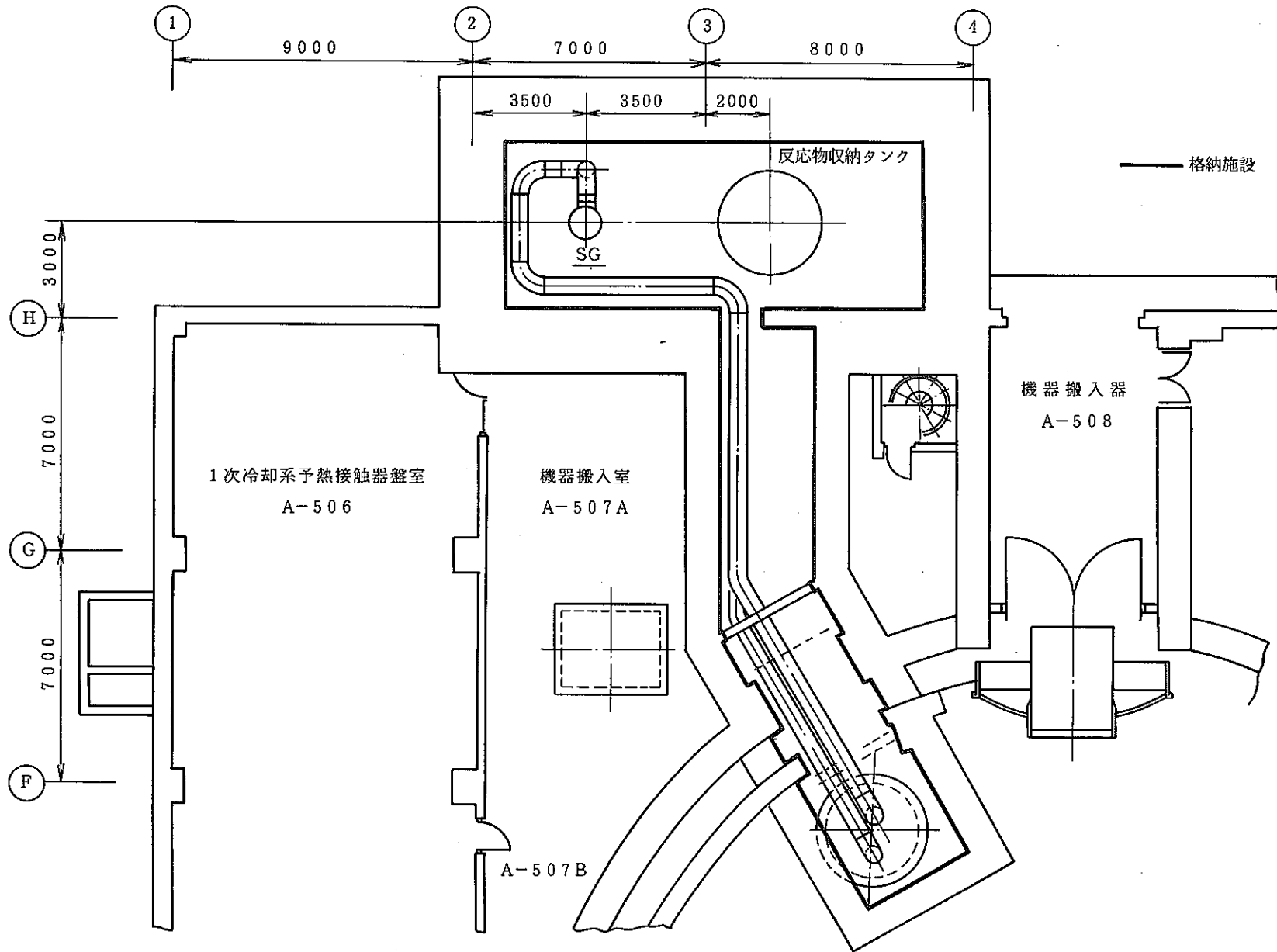
図Ⅲ. 2-1 建物配置計画図



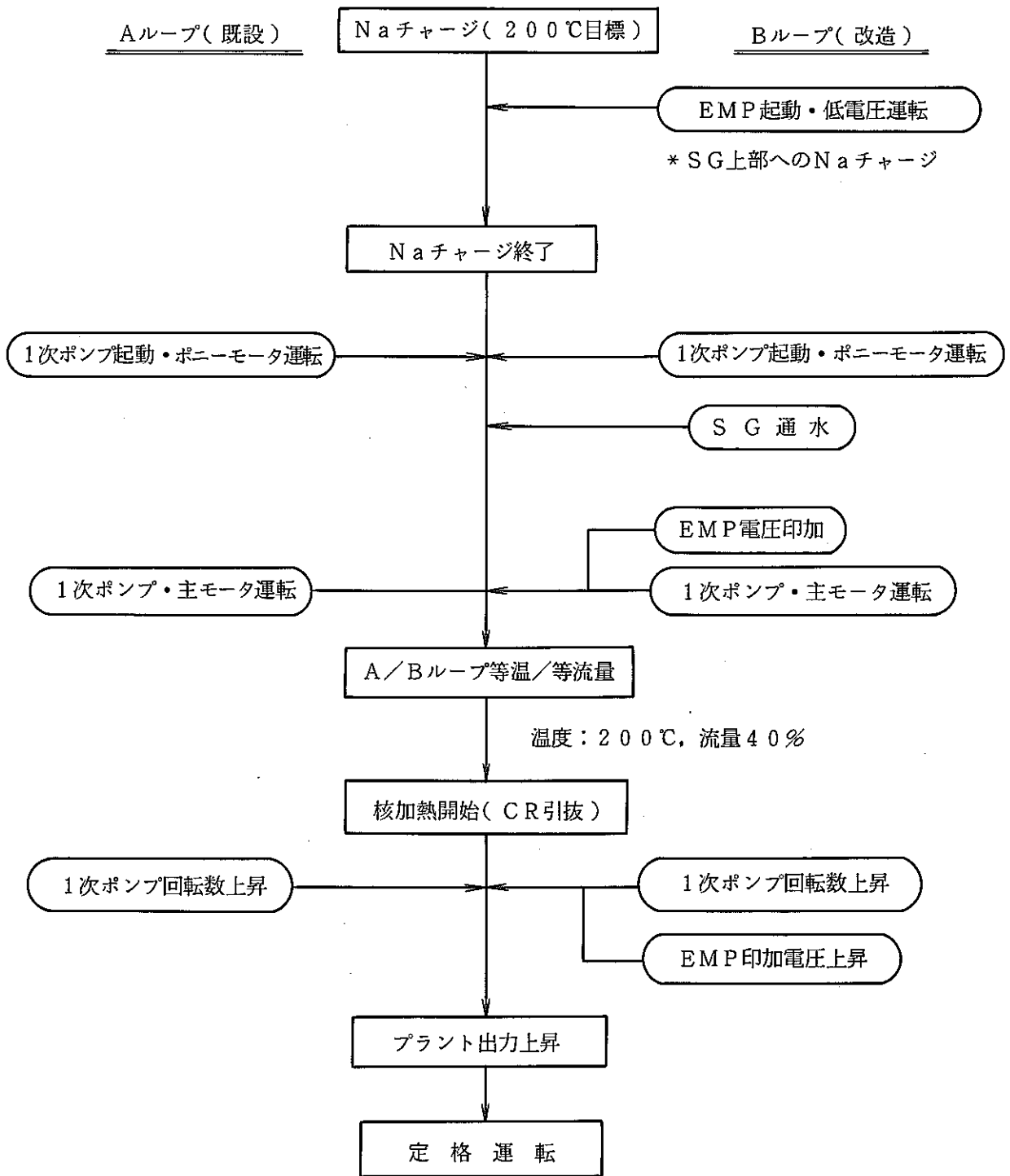
図Ⅲ・2-2 格納施設増設分(断面図)



図Ⅲ. 2-3 Na系機器配管配置図( BM1F )

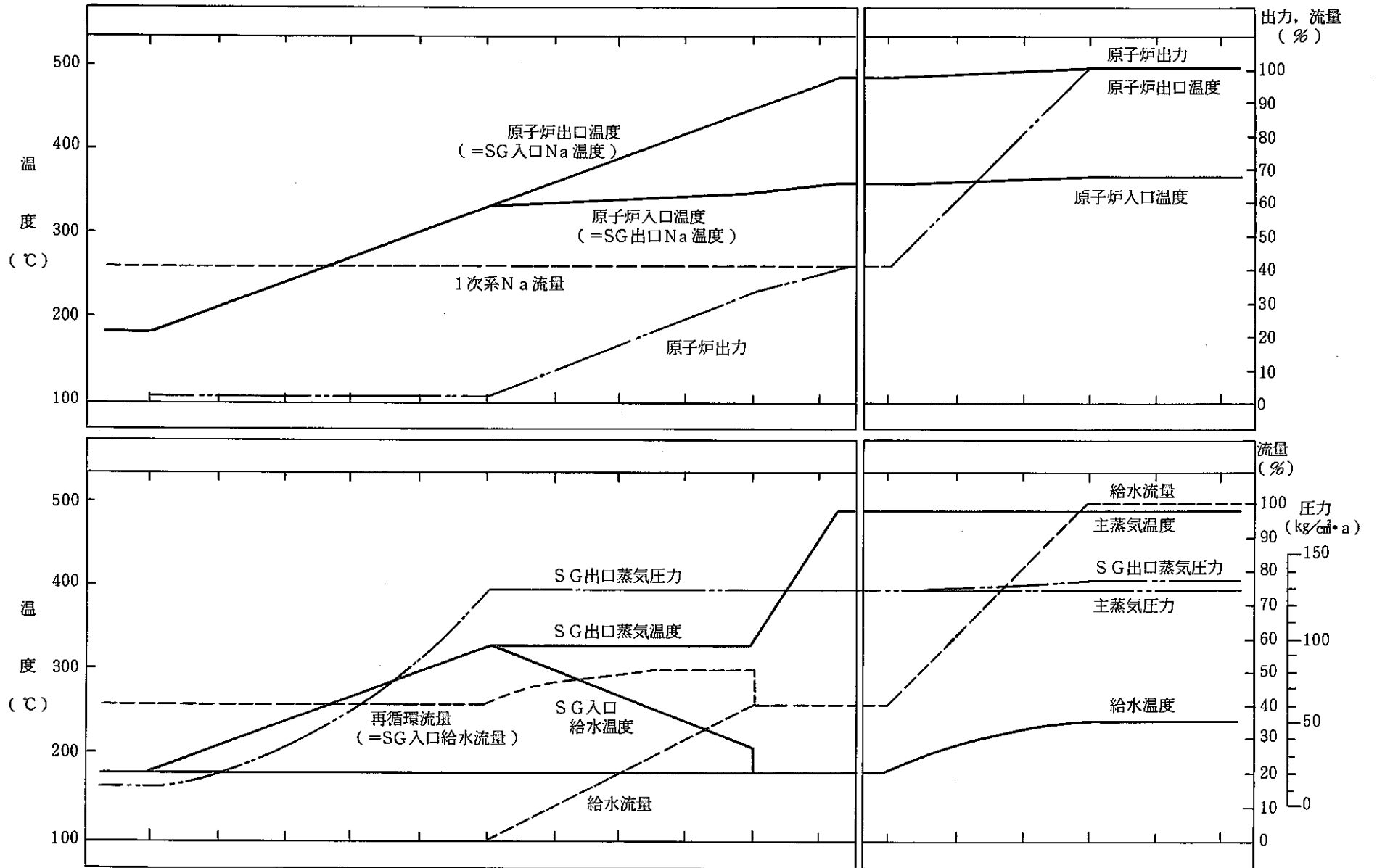


図Ⅲ. 2-4 Na系機器配管配置図(1F)

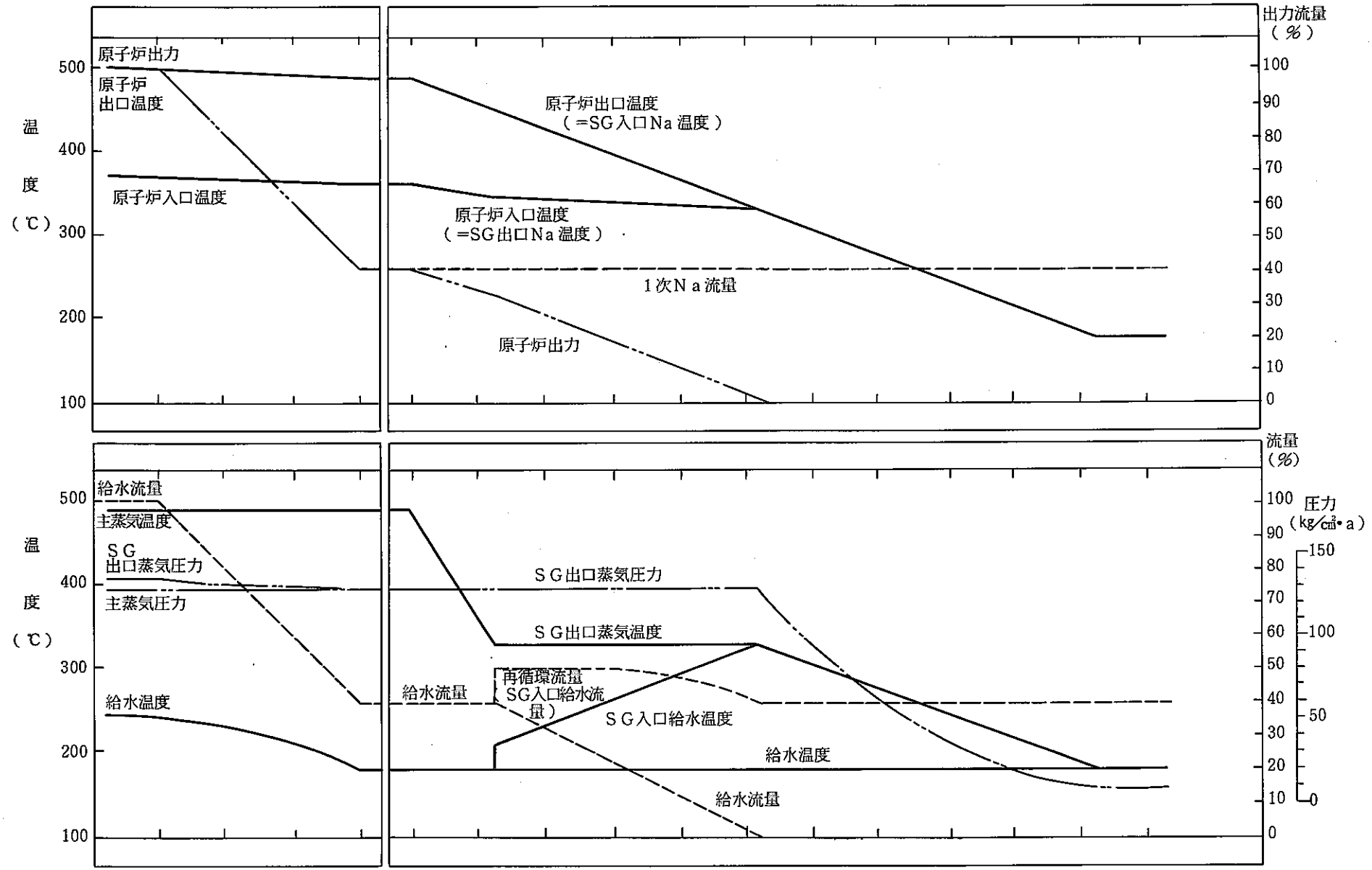


図Ⅲ・3-1 1次系のプラント基本運用

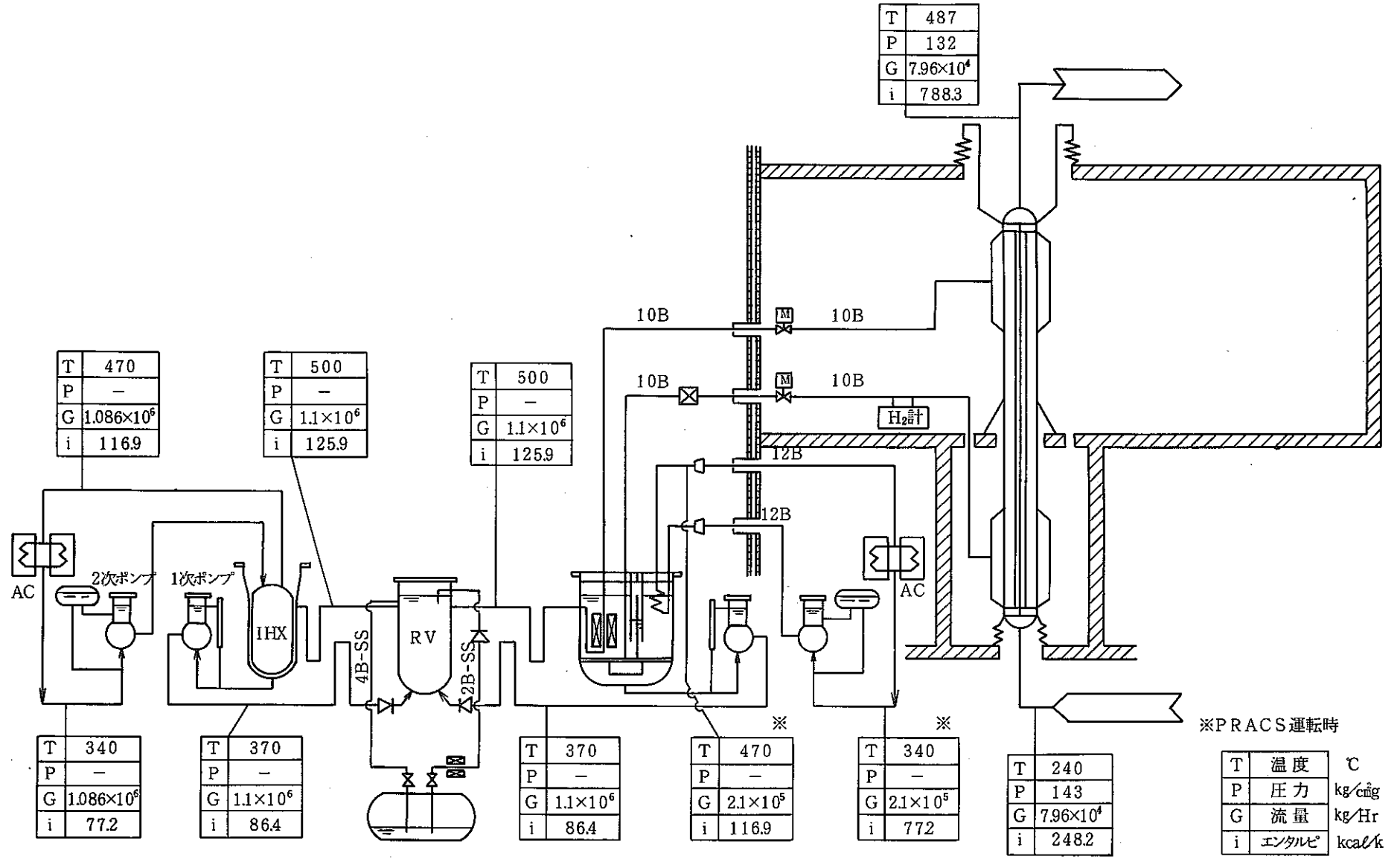




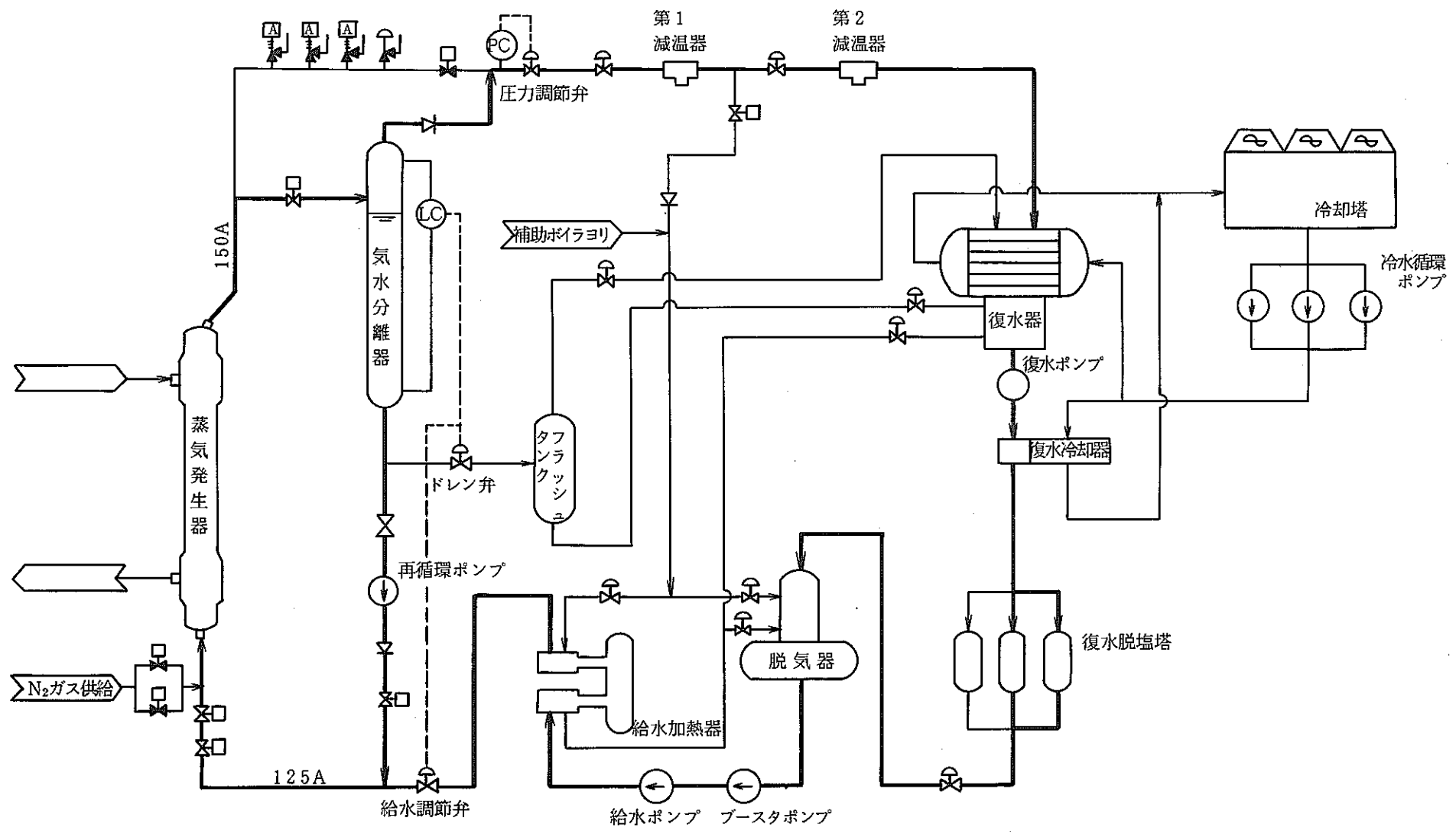
図Ⅲ. 3-2 計画起動曲線



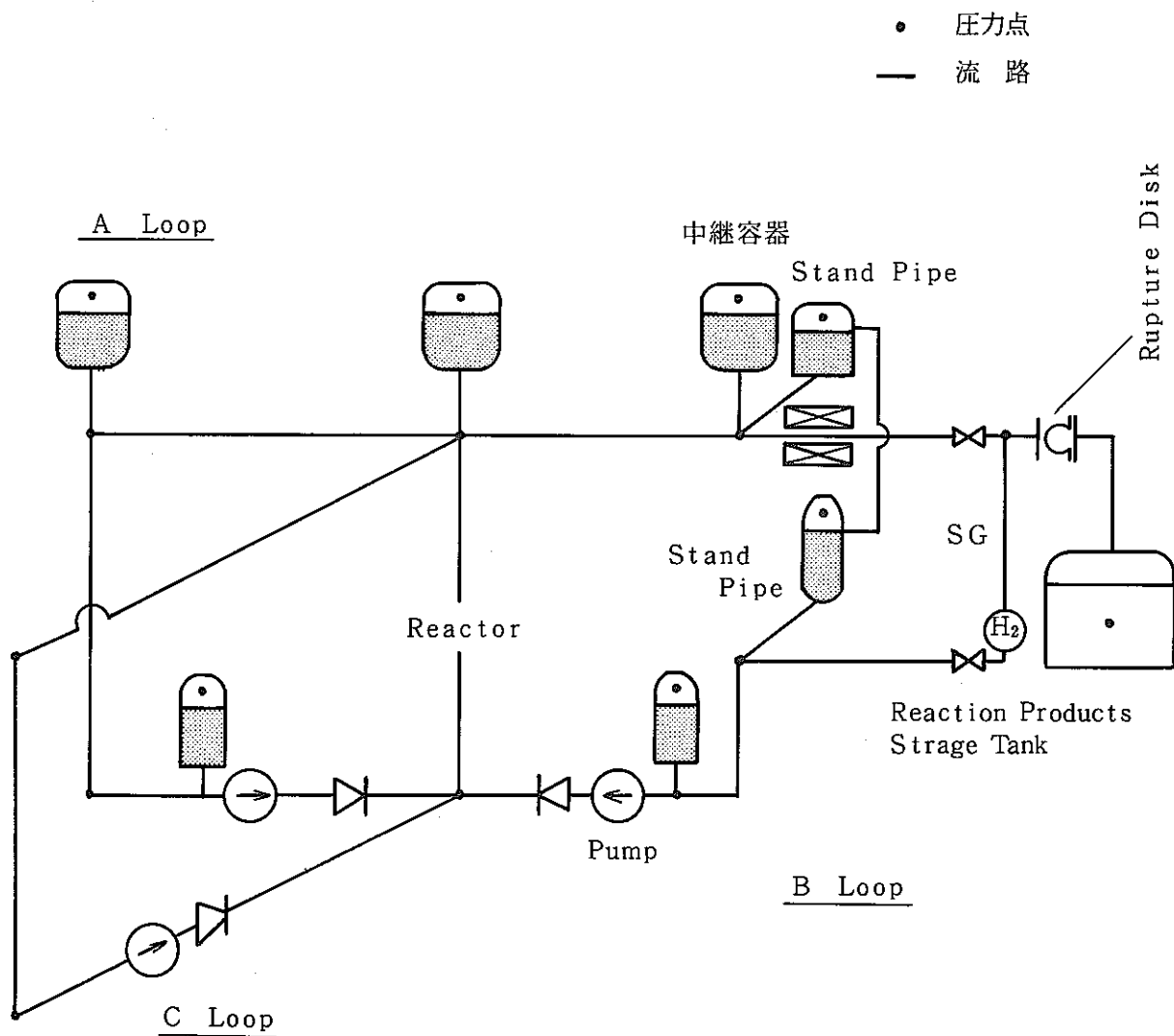
図Ⅲ. 3-3 計画停止曲線



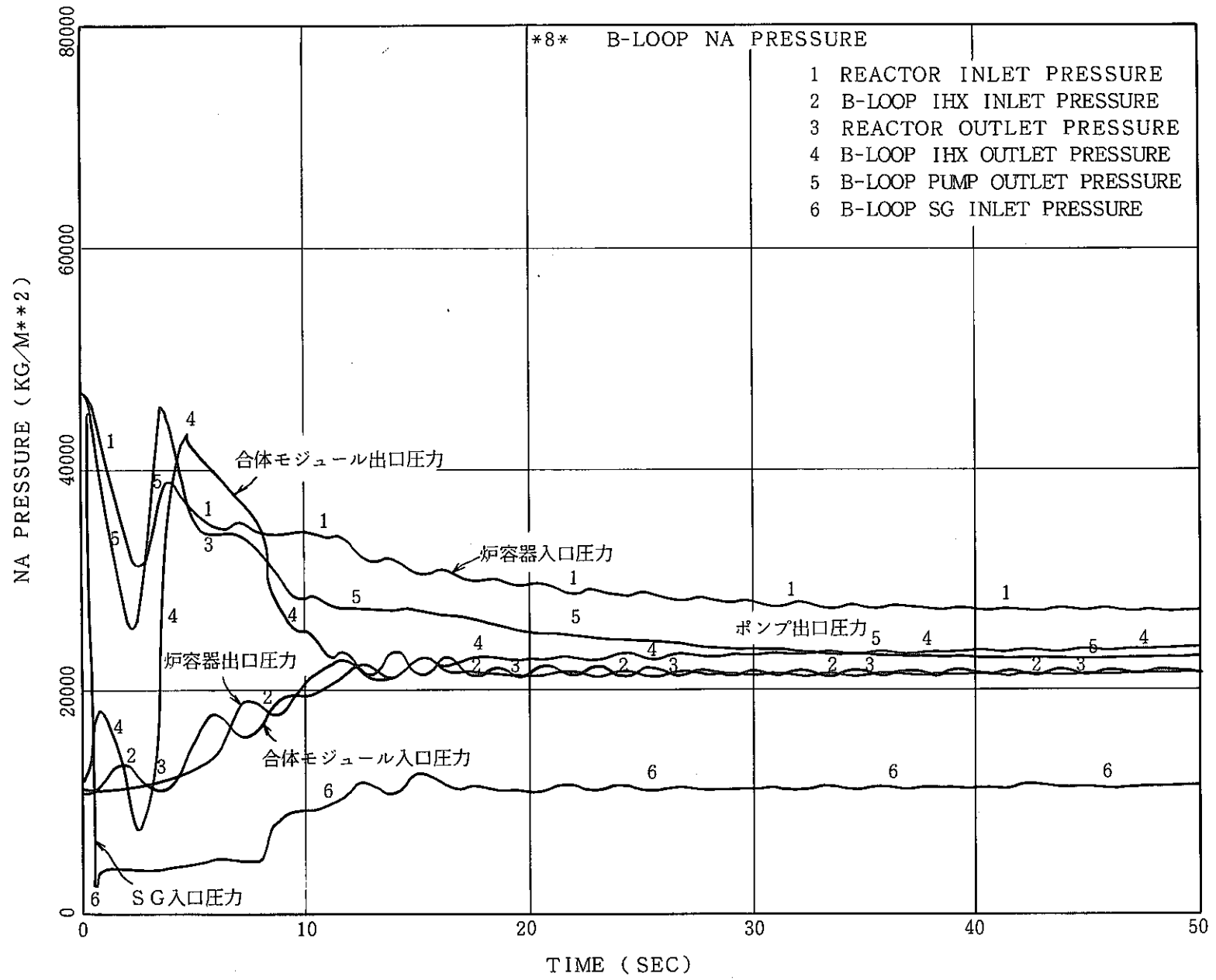
図Ⅲ. 3-4 プラントヒートバランス(定格運転時)



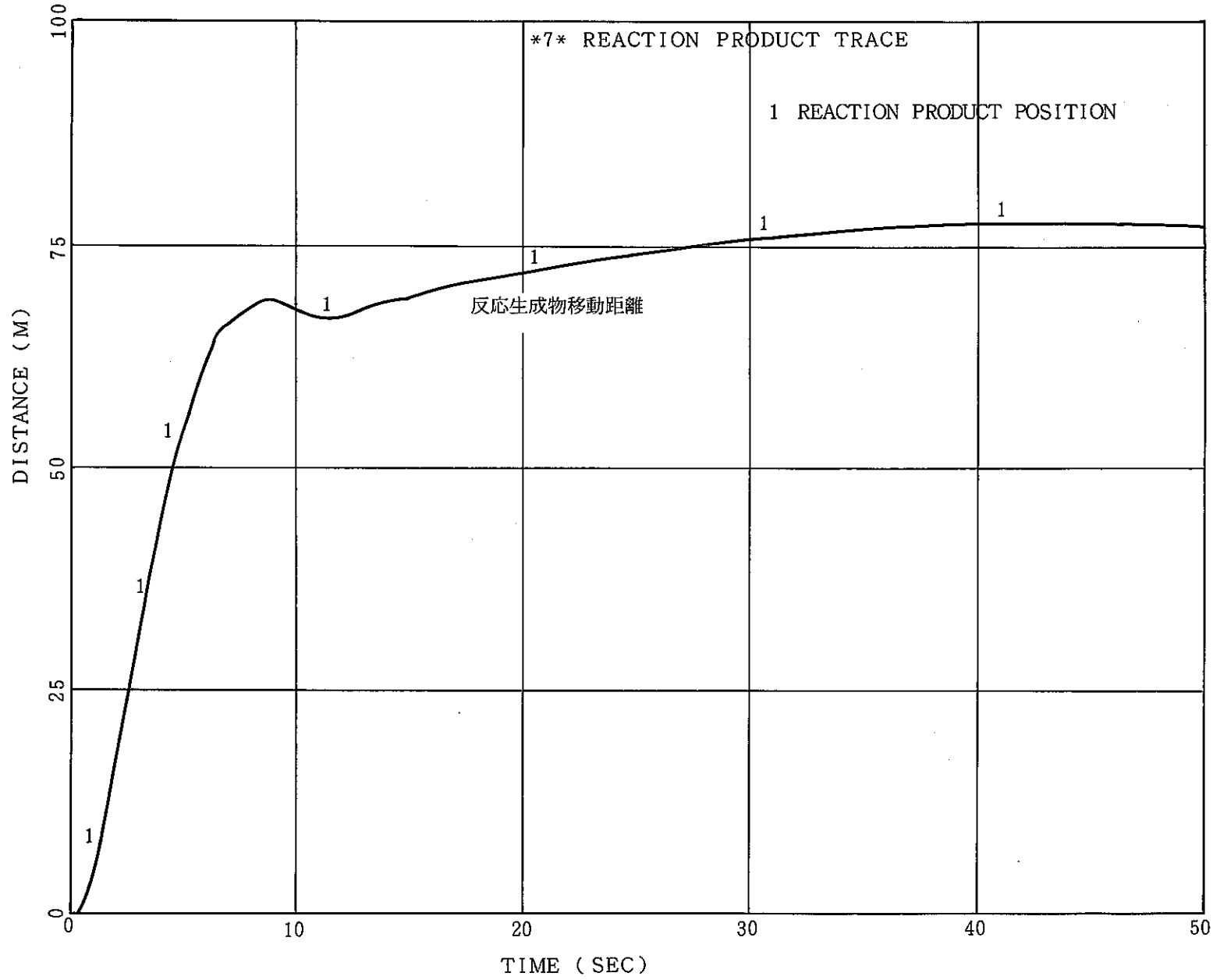
図Ⅲ・3-5 起動時再循環モードにおける運転状態図



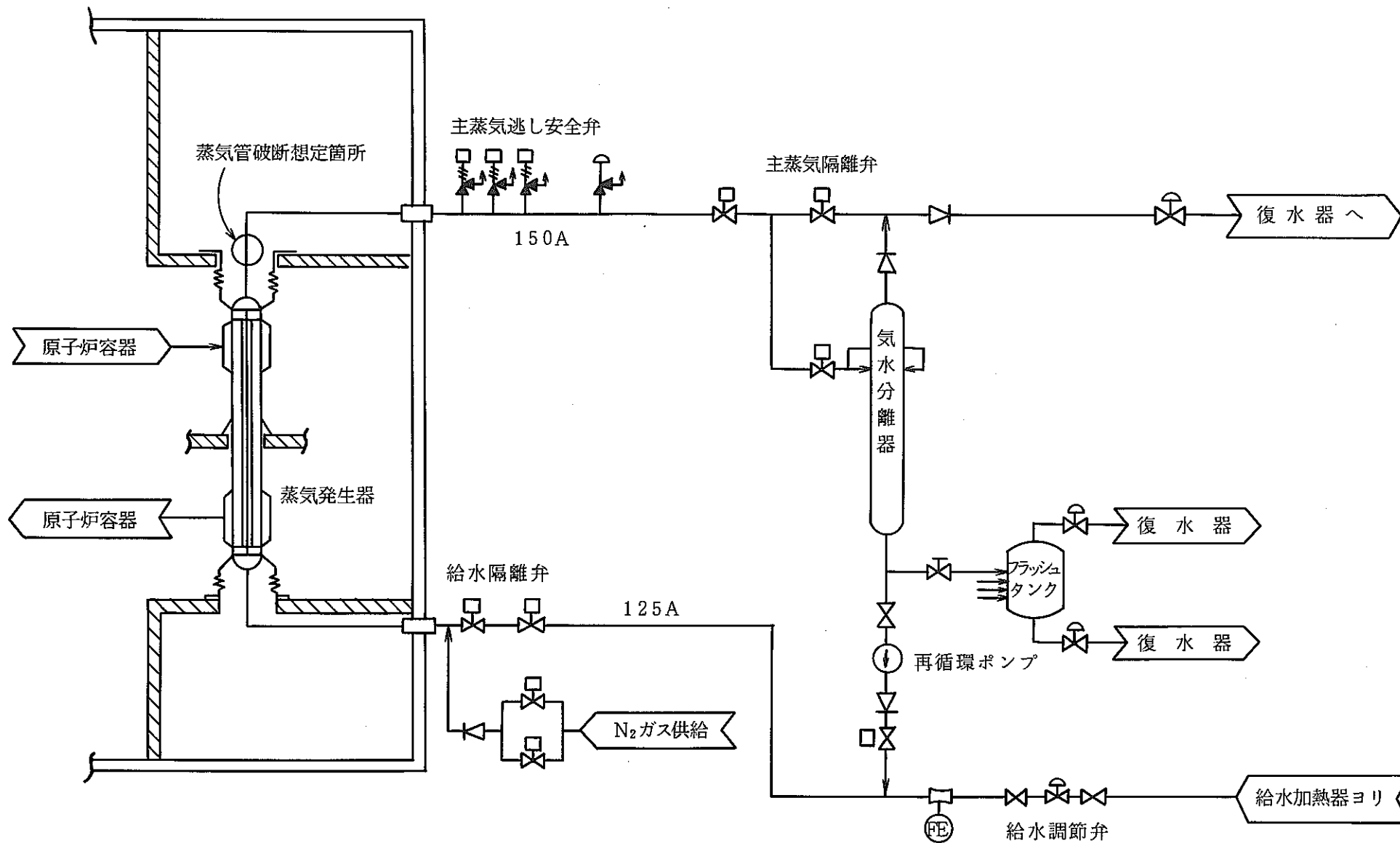
図Ⅲ・4-1 解析モデル図(全系モデル)



図Ⅲ. 4-2 準定常圧力

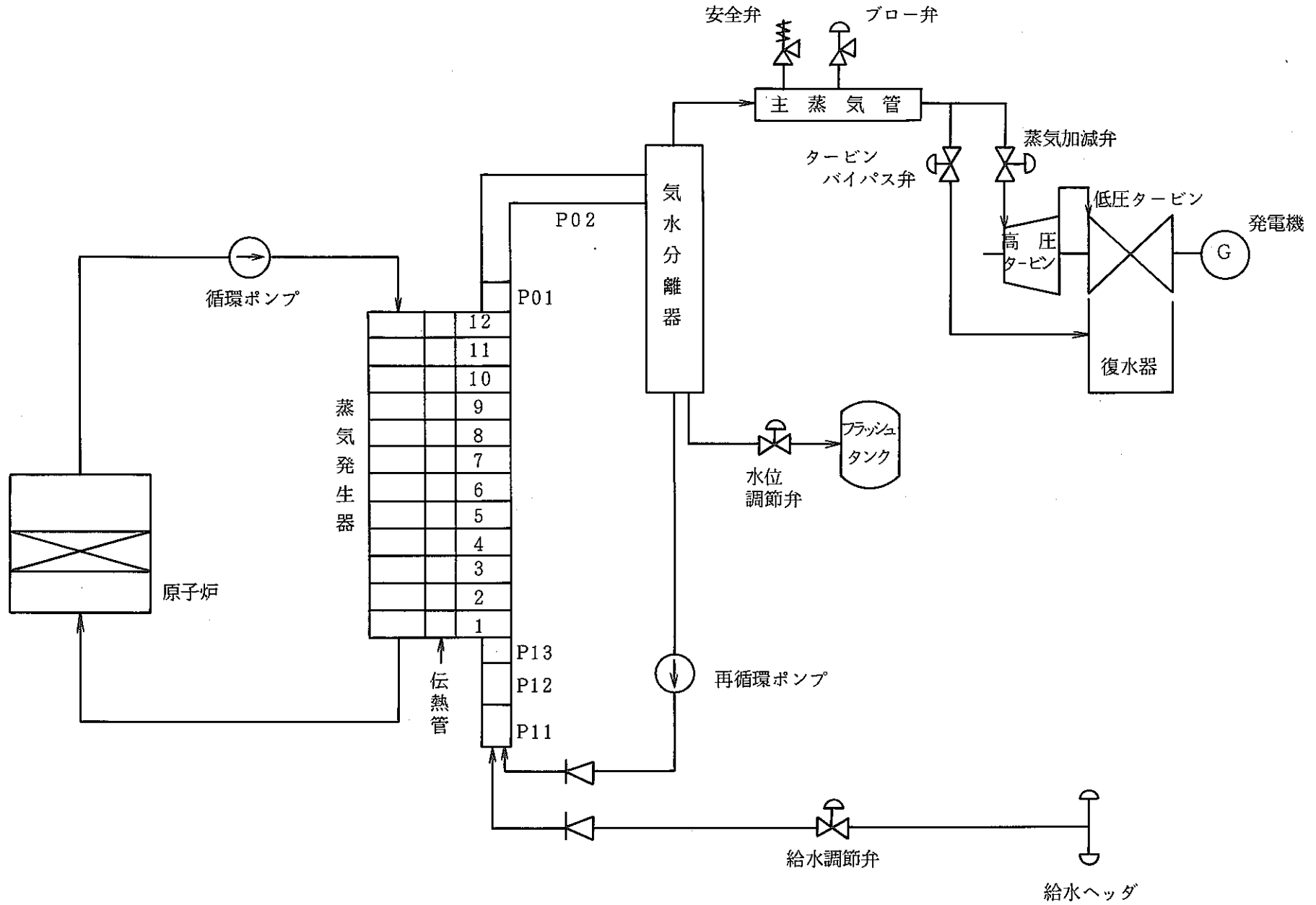


图Ⅲ. 4-3 反应生成物移動距離

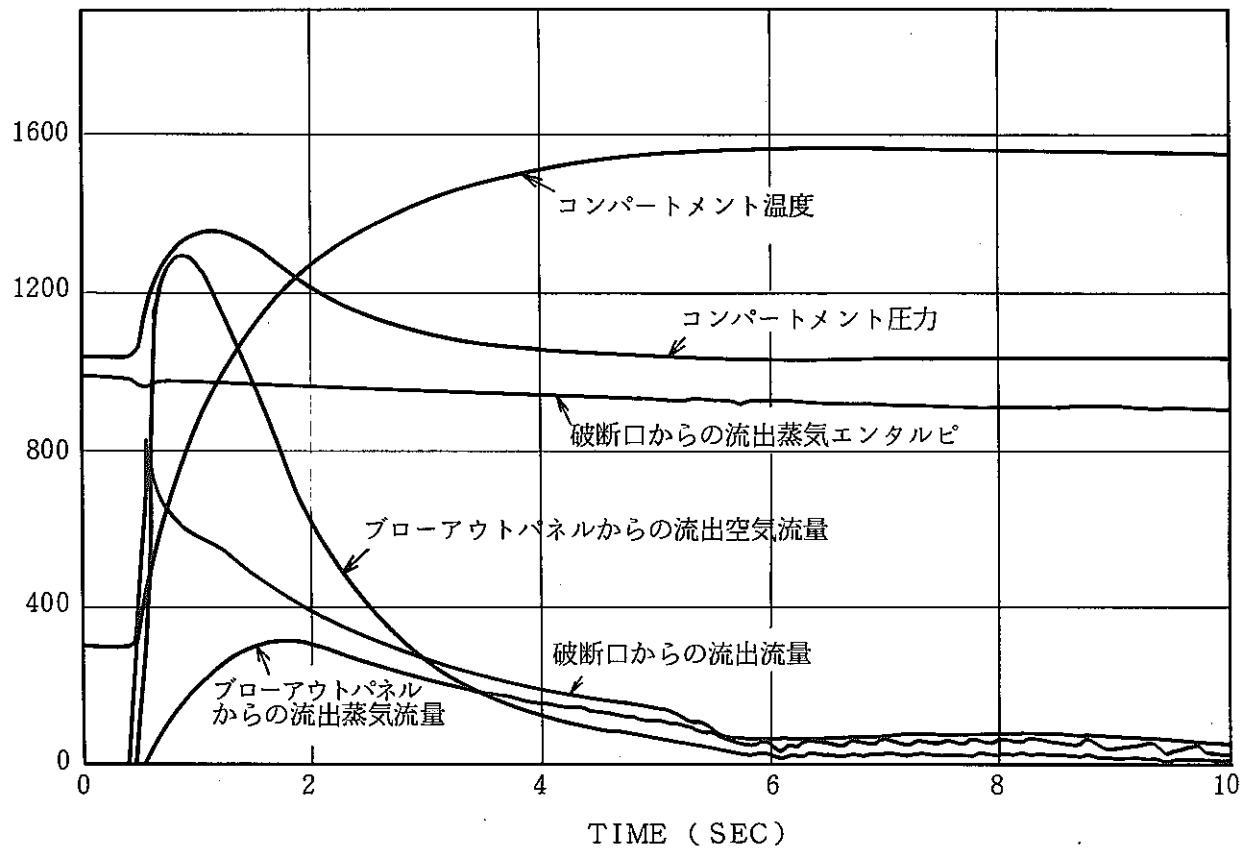


図Ⅲ・4-4 SG廻り水蒸気系格納バウンダリ概念図





図Ⅲ・4-5 全体解析モデル図(放出エネルギー評価)



部屋容量 500 m<sup>3</sup>

図 4-6 主蒸気管破断時 SG 設置室圧力・温度変化  
(ブローアウトパネルを設置した場合)

(面積 2 m<sup>2</sup>)  
(設定圧 0.1 atg)

#### 第Ⅳ章 2次系設置方式(150MWSG設置)

## 1. 概 要

本設置方式は、2次系の2ループを合流させて150MW容量SGを設置するという方式であり、二重管SGのPA上のメリット性を目的とした実証試験に対応して検討を行ったものである。本設置方式による系統図を、図Ⅳ.1-1に示す。SGは、各DHXをバイパスする形で設置され、水/蒸気系には、電気出力60,000KWのタービン発電機を設置するものとしている。

SG及び増設配管により系統圧損は全体で130mNa程度となり、現状ポンプ(定格揚程:35mNa)の交換が必要となる。これより、31m<sup>3</sup>/min、130mNa容量のポンプが要求されるが、同ポンプは既存のポンプ製作技術の延長で十分に設計、製作可能である。しかしながら、動力低減、設置スペース低減等の観点より、配管配置の詳細化、配管口径の見直し等にて圧損低下を図ってゆくことがベターである。

崩壊熱除去運転時における既設2次系の運転方法については、動特性解析の結果、自然循環によっても除熱可能であるとの見通しを得たが、再起動に備えた運転制御性の観点より、2次主ポンプにポニーモータを設け、強制循環運転方式を採用するものとする。

SG伝熱管破断によるNa-水反応事故に対しては、系統圧の圧力上昇に対する対策及び反応生成物がDHX側へ移行するのを防止する対策として、反応生成物収納容器及びSG止弁が設けてある。

水/蒸気系のうち、復水冷却方式としては、「常陽」の立地条件より海水冷却は困難であり、また、クーリングタワー方式による空気冷却では多量の給水を必要とすることから、乾式法による冷却方式を採用することが好ましい。

建物全体配置図を、図Ⅳ.1-2に示す。本設置方式により、SG建物、タービン建物及び冷却塔が増設される。SG建物は、既設主冷却機建物の南側に隣接して設置され、更に、SG建物の南側に隣接してタービン建物を設置する。また、タービン建物に隣接して冷却塔を東側に配置することにより全体を集中化し、既設エリアにおける改造範囲を最少限にとどめるよう配慮している。但し、受電設備については他所に移動する必要がある。

機器配管配置図を、図Ⅳ.1-3に示す。

## 2. 安全ロジック検討

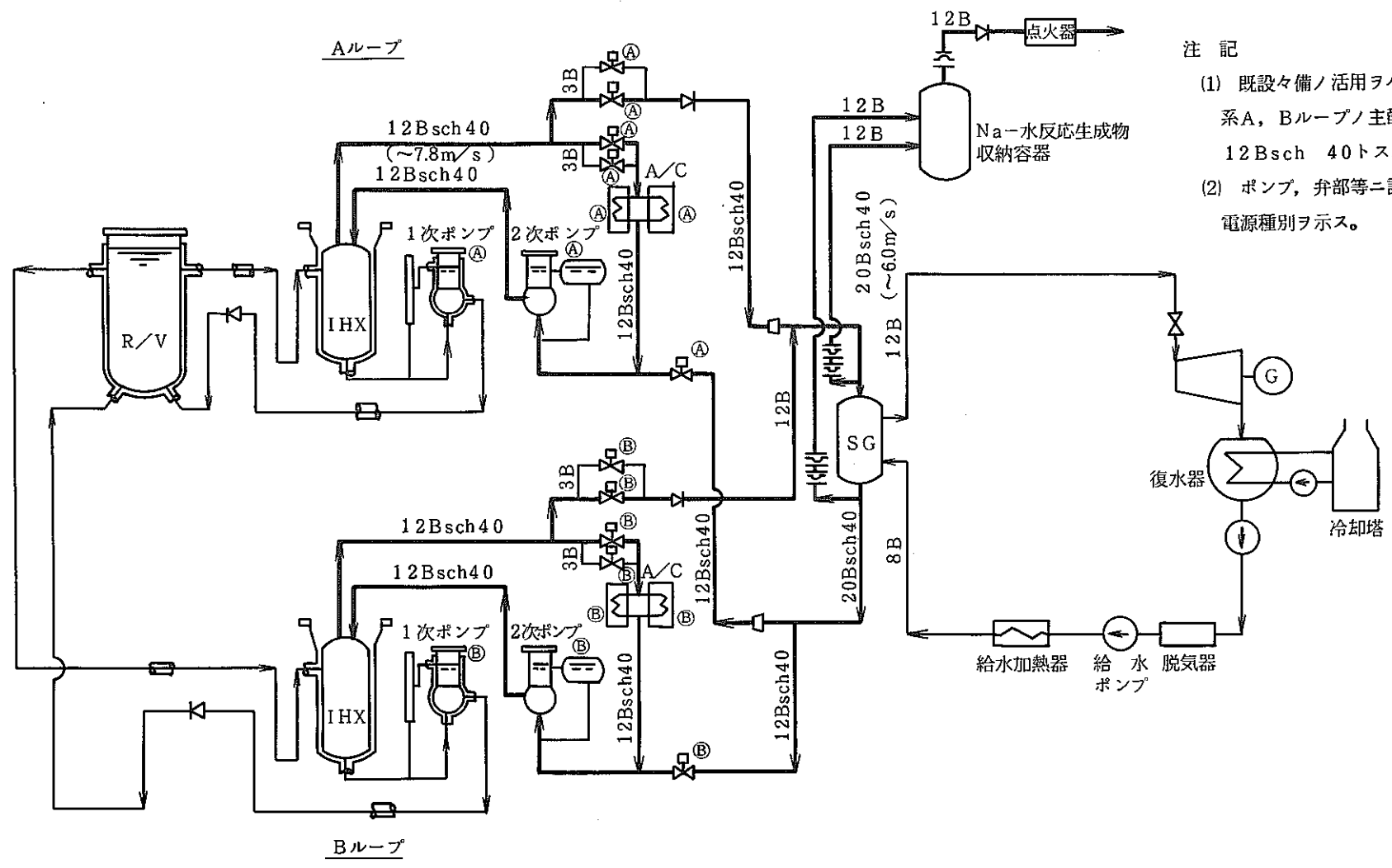
本方式において安全上問題となる点は、2次系を合流させて1ループによる冷却を行う点にあるが、これは、次のような安全設計を行うことにより、許認可は得られる見通しである。

- (i) 2次主冷却系主配管には、SG（蒸気発生器）出入口部及び空気冷却器入口部に各ループとも1基ずつ、計6基のNa止弁（遠隔動作）を設置する。（図M.1-1参照）これは、万一のNa-水反応時に止弁の単一故障を考慮しても、崩壊熱除去のために最低でも1ループは、SG廻りと、空気冷却系<sup>\*1</sup>まわりを隔離できるようにするためである。  
これより、A、Bループのポンプ・弁は無停電電源を使用する。
- (ii) 伝熱管内・外管を貫通する小漏洩時には、運転員判断に基づいて水漏洩信号を発することにより、また大漏洩時にはR/D（破壊板）破裂信号でSG隔離、2次主循環ポンプトリップを行う。又、大漏洩時には多量の反応生成物がフローコストダウン流れによっても、Na止弁まで到達しない（ACS側に侵入しない）設計としている。<sup>\*2</sup>
- (iii) SG隔離以降、Na収縮を考慮してもACS内Na循環が確保できるよう、オーバフロータンク及び2次主循環ポンプ内に適切なNa量を保持できるようにする。
- (iv) Na・水反応放出系の構成は、もんじゅと同様に放出配管～RPT（収納容器）～大気とする。
- (v) 2次主循環ポンプ1台トリップ時に想定されるトリップループへの2次Na逆流については、防止のため各ループに逆止弁を設ける。
- (vi) 2次主冷却系配管～放出系間のR/D（ラプチャディスク）は、経年変化等による万一の破損に備えて2重R/Dとする。
- (vii) 原子炉～主中間熱交換器～蒸気発生器のNa系に関する自然循環が確保されるよう、主中間熱交換器の幾何学的伝熱中心レベルよりも、二重管SGの幾何学的伝熱中心レベルの方が高くなるようにする。
- (viii) 崩壊熱除去系として使用される2次主冷却系（空気冷却系まわりを含む）の独立性を極力保つため、主冷却機建家とは独立に、SG建物を新設し、追加二重管SGはその中に設置するものとする。SG建物の耐震クラスはAとする。

---

\*1 以下、SGまわりを隔離し、空気冷却器（A/C）で除熱している状態の2次主冷却系を“ACS”と称す。

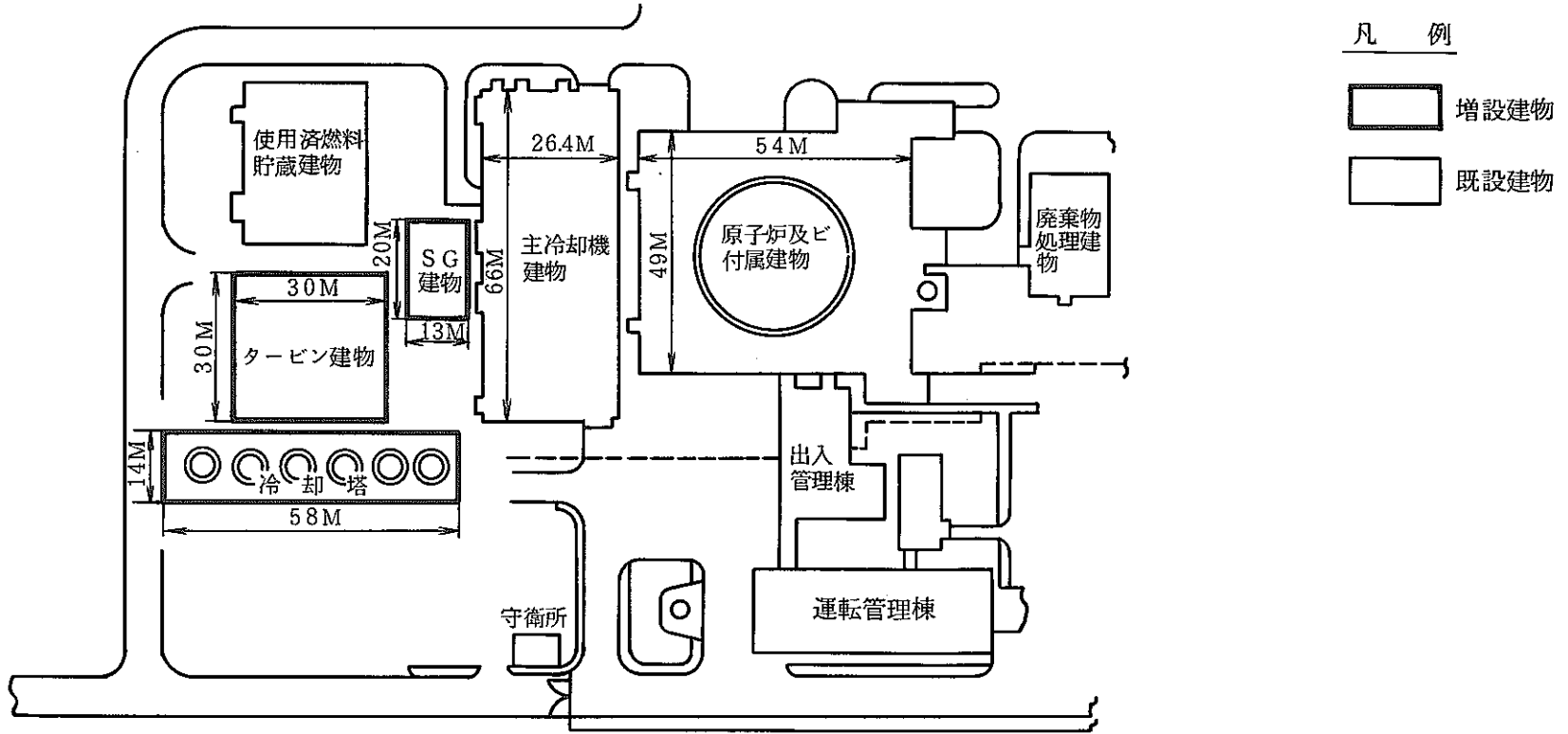
\*2 このために2次主冷却系SG出入口止弁の設置場所を極力SGより離すこともしくは高速隔離Na止弁が必要である。



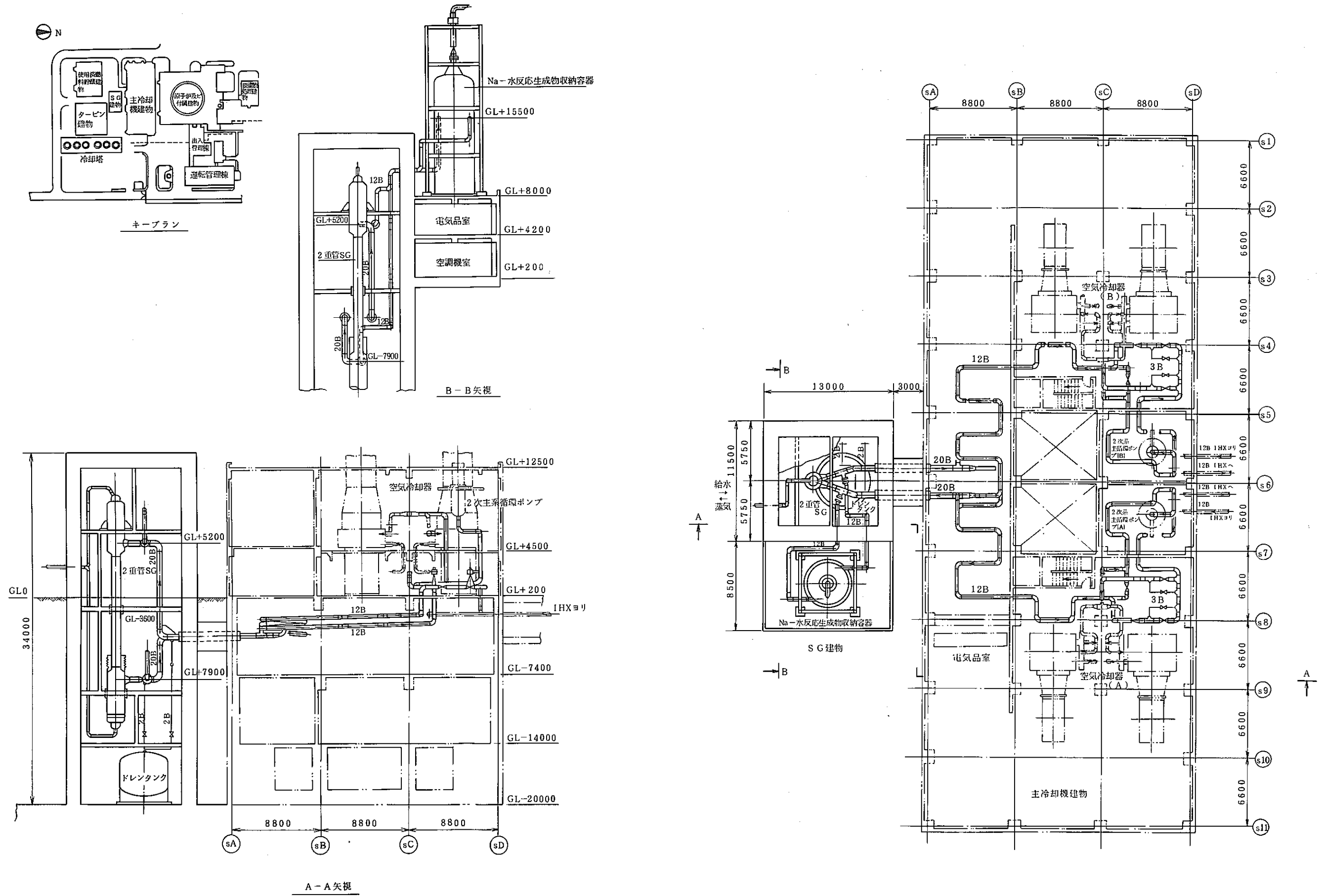
注記

- (1) 既設々備ノ活用ヲハカル為、2次主冷却系A、Bループノ主配管口径ハ従来通り12Bsch 40トスル。
- (2) ポンプ、弁部等ニ記載ノ(A)、(B)ハ非常用電源種別ヲ示ス。

図IV.1-1 2次主冷却系等系統図(2次系設置方式)



図IV.1 - 2 建物全体配置図(2次系設置方式)



図IV.1-3 機器配管配置図(2次系設置方式)



## 第V章 今後の作業方針

前述の3案に対する検討結果を踏まえ、今後は次の作業を進めてゆくものとする。

(1) 合理化プラントシステムの検討及びR&D側への要求条件の整備

63年度作業分として現在、1次系設置方式2案を対象として、次の作業を進めている。

① 合理化プラントシステムの検討

Na-水反応生成物収納設備を必要としない水リーク率を、パラメータ解析より把握すると共に、同設備を削除することに伴うプラントシステムの見直しを行う。

② R&D側への要求条件の整備

Na-水反応事故の発生確率を計算し、同計算結果を基にNa-水反応事故を防止するためのリーク検出要求時間を把握し、今後のR&Dへの要求条件とする。

(2) 設置方式の選定

「常陽」への二重管SG設置の意義付けを明確にした上で、MK-III計画の一環として別途検討を進めている冷却系改造との絡みを考慮に入れ、上述の3案設置方式の中から最適方式を選定する。

(3) MK-III 140MW出力に対応したシステムの見直し

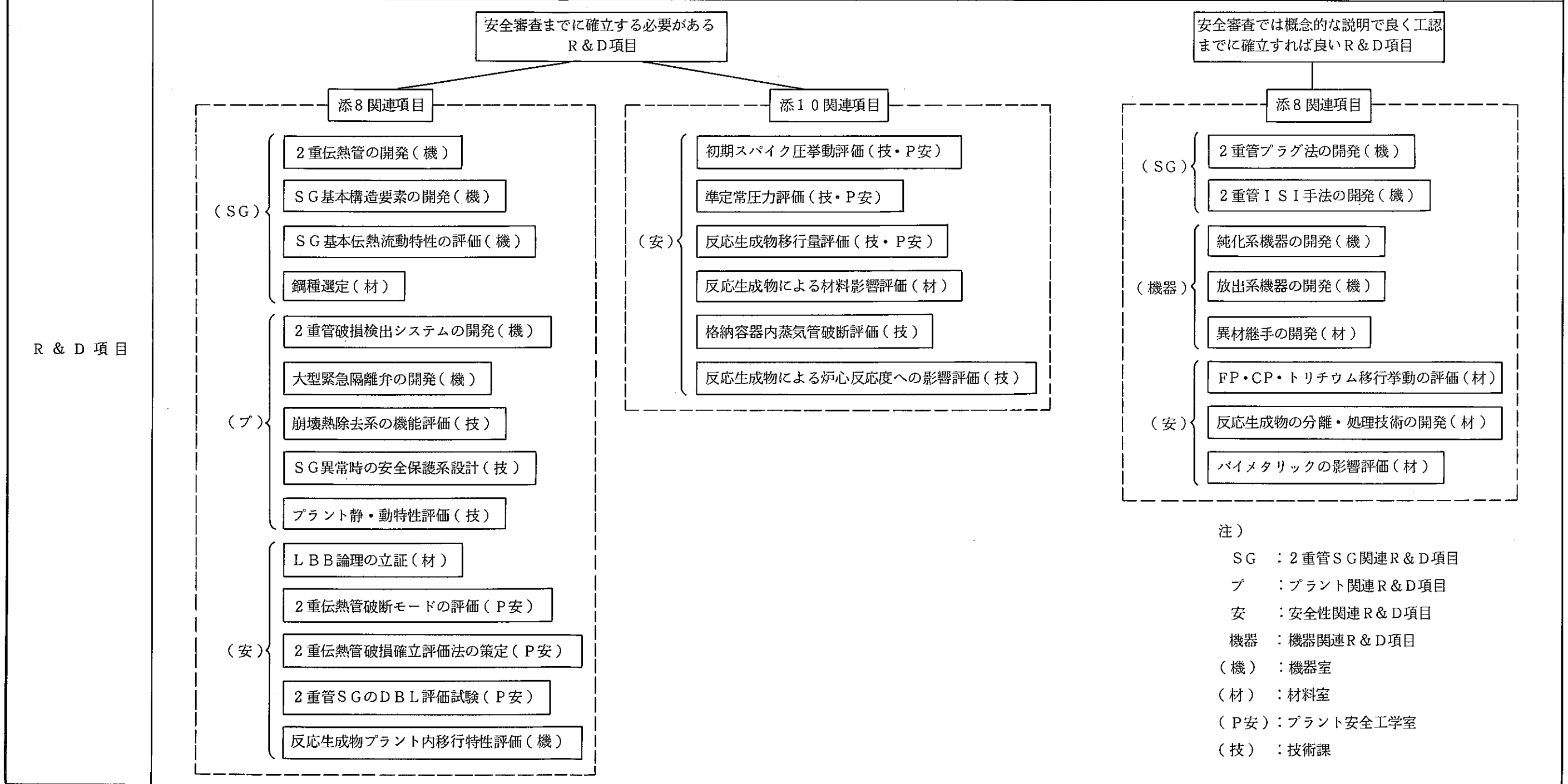
MK-IIIが140MWで、且つ、1次系設置方式が選定された場合を想定し、50MWSGから70MWSGへ変更することに伴うシステムの見直しを行う。

(4) 基本工程計画及びR&D計画に係るR&D側との調整

「常陽」での1999年運開を想定した場合の改造基本工程と、94年からの安全審査に必要とされるR&D項目とを表V-1に示す。今後、同工程を基にMK-IIIサブW/Gとして組織された中間系合理化検討チームにてR&D側との調整を図り、基本工程計画及びR&D計画を策定する。

表V-1 中間系合理化システムの実証に関するR&D項目

項目	年度	平成元	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		1989	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	2000
基本工程		予備検討	予備設計	概念設計	基本設計	安全評価	安全審査	工認	据付工事(炉停止10カ月)				実証試験
		△ 設置方式選定					成果のまとめ (2カ月)	局ヒア申請 (9カ月)	顧問会 ▽ (7カ月)	専門部会 (7カ月)		製作	
			R & D			設計への フィードバック (3カ月)	資料準備(1カ月) (概要, 添8設計, 添10評価)		許可				



注)

- SG : 2重管SG関連R&D項目
- プ : プラント関連R&D項目
- 安 : 安全性関連R&D項目
- 機器 : 機器関連R&D項目
- (機) : 機器室
- (材) : 材料室
- (P安) : プラント安全工学室
- (技) : 技術課

付 録
-----

付録Ⅱ-A 主冷却系締切弁の許認可性への影響検討

付録Ⅱ-B 格納施設の概念選定

付録Ⅲ-A 合体モジュール装置の検討

付録Ⅱ－A 主冷却系締切弁の許認可性への影響検討
--------------------------

## 1. 安全性

安全性に係わる事象としては、通常運転時、SG隔離弁の誤閉及び原子炉スクラム時のIHX側切替弁の開失敗あるいは誤閉が考えられる。まず、SG隔離弁誤閉は事象としては、1次主ポンプスティック事故に類似する。“常陽”添十解析結果によれば、1回路のポンプスティック事故により、炉心流量は2秒後に定格の約50%まで減少する。その結果、被覆材及び冷却材の温度上昇は、それぞれ約150℃及び約160℃で最高到達温度は、それぞれ約800℃及び約780℃となるが、これらの値は、下記の異常な過渡変件事象の設計限界値を越えるものではない。

燃料最高温度	約 2,650℃
被覆管最高温度	約 810℃
冷却材最高温度	約 910℃

本SG隔離弁誤閉は、同弁の故障あるいは運転員の誤操作によって生じ、異常な過渡変化に分類される。本弁誤閉時、流量が半減するのは、弁の閉鎖特性（弁閉時間約10秒）から考えて、ポンプスティックの場合の2秒より遅れることは確実であり、炉心冷却上は上述の1次主ポンプスティック事故に包絡され、上記判断基準を越えることはない。従って、通常運転中のSG隔離弁誤閉は安全評価上問題とならない。

一方、原子炉スクラム時のIHX側切替弁の開失敗、あるいは誤閉はBループの崩壊熱除去機能を喪失させる。この事象そのものは、概念検討段階で考慮されている。すなわち、起因事象としての1ループ故障及び単一故障による他のループ故障を考慮した崩壊熱除去システム構成（すなわち、A、Bの冷却系＋補助冷却系）とされているので、安全設計方針から外れるものではなく、何ら問題とはならない。

しかしながら、近年、安全審査段階で、確率論的安全評価（PSA）が参考とされる方向にあるので、この観点から考察する。

IHX側切替弁の設置は、前述した通り、開失敗あるいは誤閉を生ずる可能性があるため、崩壊熱除去系としてのBループの信頼性は、明らかに低下する。又、SG隔離弁も含め、これらの弁の故障により、全体としての原子炉スクラムの発生頻度は増大する可能性がある。従って、これら2つの要因により、崩壊熱除去失敗の確率は増大する。

本改造プラントは、このような欠点を有するので、今後、上記信頼性のある程度定量的に比較評価し、PSA取扱の方針とロジックを固めて安全審査に臨む必要がある。

## 2. 主ポンプキャビテーション

SG 隔離弁誤閉に伴ない、SG は隔離され、ほぼ同時に冷却流路は切替えられるものの、弁の閉と開の位相差が生ずるため、SG ループ側の圧損が増加し、ポンプ吸込み圧が減少し、そのため、極く短時間（数秒間）ではあるが、インペラ部でキャビテーションが生ずる可能性がある。これについては、弁開度信号（またはスクラム信号）により、主ポンプをポニーモータ運転とする運用法を採用することにより、SG ループ側の圧損の減少と、必要 NPSH の増大をはかることが可能であり、キャビを抑制できる。更に、隔離弁に対する Na-水反応生成物移行防止機能に関する要求条件が緩和され、弁開閉時間の延長が可能ならば、主ポンプのキャビテーションを防止できる見通しである。

## 3. 結 論

主系統に隔離弁を設置した先行プラントとしては、BWR 及び ATR（主蒸気隔離弁：弁閉時間約 3 秒）並びに FBR 原型炉 2 次系（ACS への切換弁：弁閉時間約 60 秒）があり、概念としての先行例はある。

検討の結果は以下の通りである。

- ① B ループに主系統弁を設置しても、安全評価上問題となることはない。ただし、PSA 上は崩壊熱除去失敗の確率は増加するので、今後、定量評価を行い、安全審査時の PSA の扱いとロジックについて固めておく必要がある。
- ② 熱過渡上の影響については、今後、詳細な熱過渡及び構造評価が必要であるが、必要な場合には、緩和対策が可能な見通しである。
- ③ 極く短時間ではあるが、ポンプキャビテーションが生ずる可能性があるため、このキャビテーションが、ポンプの健全性に及ぼす影響を検討、把握する必要がある。（ポンプキャビテーション防止対策は可能）

付録Ⅱ-B 格納施設の概念選定

1. 検討ケース

配管種別, C/V型式, 漏洩Na対策としては, 次のものが考えられる。

- 配管種別 完全二重管<sup>\*)1</sup>, “常陽”並二重管<sup>\*)2</sup>, 単管+サイフォンブレイクシステム(S.B), 単管+ガードベッセル(G.V)

\*)1 内/外管合わせ, 完全無漏洩

\*)2 外管に長期の漏洩Na保持機能有。(内管破損時プラント停止までは保持, メンテナンス時には外管の漏洩も考える。)

- C/V形式 鋼製(耐圧)C/V, コンクリート(非耐圧)C/V, ライナ型格納施設(SPX-IIタイプ)

- 漏洩Na対策
 

Na収納方法	…………	Naライナ(気密性有), キャッチパン
雰囲気	…………	N <sub>2</sub> , 空気

本検討では, 上述の方式の組合せより表Ⅱ.B-1に示す5ケースの組合せを抽出し, 検討を行った。

表Ⅱ.B-1 配管種別とC/V形式に関する検討対象

ケース	配管種別	格納施設	漏洩Na対策	雰囲気
A	完全二重管	非耐圧コンクリート	なし	air
B	“常陽”並二重管	耐圧鋼製	Naライナー	N <sub>2</sub>
C			キャッチパン	air
D	単管-サイフォン ブレイク	"	Naライナー	N <sub>2</sub>
E			キャッチパン	air

<特徴>

- ケースA …… 格納施設を大幅に合理化しようとするもの
- ケースB …… “常陽”と同じ
- ケースC …… “常陽”に現在までのR&D成果を反映してNa漏洩対策設備を合理化したもの
- ケースD …… “もんじゅ”開発の成果を最大限取込んだもの
- ケースE …… ケースDにおいて, Na漏洩対策設備を更に合理化したもの

2. 検討結果






5ケースについて行った検討結果を, 表Ⅱ.B-2にまとめて示す。これより, 特に許認可性を

重視して、ケースBの方式を選定した。以下に、選定理由を簡潔に示す。

- ① ケースBは、既設「常陽」とほぼ同じ概念であり、他案に比べ許認可性は良い見通しである。  
逆に、単管の場合は、従来の「常陽」の安全上の概念を踏み越えることになり、安全性議論の大きな争点になる可能性がある。  
(二重管SG設置を内容とする変更申請の焦点がずれる。)
- ② 既設C/Vと新設C/Vを、ロジック上、設備上うまく切り離せればアニュラスなしも可能な見通しである。
- ③ “ナトリウム・ライナー，窒素雰囲気”については、ナトリウム火災解析を含めた今後の詳細検討段階で、可能であれば、“ナトリウム・キャッチパン，空気雰囲気”に合理化すれば良い。(ケースC)



表II.B-2 配管種別と格納形式概念の評価検討結果のまとめ

ケース	配管：C/V 概念	成立性に係わる検討項目	検 討 結 果	成立のための主な課題	評 価			選定 順位	
					機器	配置	経済性		
A	管全二重管 非耐圧コンクリートC/V  (図2.3-1, 2 参照)	①外管の漏洩Na保持機能の保証	①内管の破損時、外管の漏洩Na保持機能にクレジットをとるため必要な内/外管の独立性の保証。外管のG.V並のISI実施は非常に難しい。	完全二重管の成立性。	×	×	◎	◎	5
B	“常陽”並二重管 耐圧鋼製C/V Naライナー N <sub>2</sub>  (図2.3-3, 4 参照)	①アニュラスなしで被曝評価上問題ないか？ ②ケースDの②と同じ。	①“もんじゅ”評価をベースとした推定では、アニュラス削除も可能な見通し。問題なし。 ②ケースDの②と同じ。	“常陽”並二重管の現時点での許認可性 { -30日間保持の担保(二重管の独立性, 健全性)をどこまで要求されるか, 及び外管の健全性評価(BDSで評価すると現状ペローズは成立せぜ)の要求による。 }	◎	○	△	△	1
C	“常陽”並二重管 耐圧鋼製C/V Naキャッチパン air  図2.3-3, 4 参照	①1重格納系での成立性(Na漏洩時被曝量の視点からの成立性) ②ケースDの②と同じ	①メンテナンス時のNa温度条件であれば成立する見通し。 ②ケースDの②と同じ。	“常陽”並二重管の現時点での許認可性。 { 同上 }	○	○	△	○	2
D	単管+S.B 耐圧鋼製C/V Naライナー N <sub>2</sub>  (図2.3-3, 4 参照)	①許容スペースに納めるため、アニュラス無しとすることが必要。アニュラス無しとする条件。 ②連絡通路C/V化の可能性 ③サイフォン・ブレイクの成立性	①燃料破損率が既設計条件(2%)であればアニュラス不要。 ②成立の見込有(但し、問題点あり) ③詳細検討必要。	サイフォン・ブレイクの成立性。	○	○	△	○	3
E	単管+S.B 耐圧鋼製C/V Naキャッチパン air  (図2.3-3, 4 参照)	ケースCの項目に加えて ①1重格納系での成立性 ②Na 燃焼に伴う、建物構造材の温度上昇	①配管破損規模が1cmであれば(スプレー火災を考えない)成立する ②詳細検討必要	①LBB思想の成立性(特にペローズ) ②サイフォン・ブレイクの成立性。 ③Na 燃焼に伴う建物構造材の温度上昇が問題とならないこと。	△	○	○	◎	4

## 付録Ⅲ-A 合体モジュール装置の検討

### 1. モジュールの基本構造

図ⅢA-1に、モジュール基本構造図を示す。

本モジュールでは、中央にSG出口下降管を設置し、その外側にSG入口環状流路を構成し、電磁ポンプをモジュール下部に、PRACSをモジュール上部に設置している。ガス圧制御バイパスフロー弁はSG出口下降管と電磁ポンプの間に設置し、SG出口下降管とSG入口環状流路との断熱ガス系と併用する。

モジュールの下部には、プレナムを設け、Na-水反応生成物トラップ装置を同筒状に設置する。

次に1次側のNaの流れを示す。

SGを運転する場合には、入口ノズルよりモジュール内に入り、内胴上部窓から、PRACS伝熱管の管外を流れる。PRACSから内胴と電磁ポンプ外側の環状流路を流下し、電磁ポンプ下端で内側に方向転換し、電磁ポンプに入る。電磁ポンプで昇圧された1次NaはSG入口環状流路を上昇し、SGへ導く配管へ流れる。

SGで除熱された1次Naは中央にあるSG出口下降管を流下し、モジュール下部のプレナムに入り、Na-水反応生成物トラップ装置を通過し、下部プレナム窓を通過して出口ノズルへ向い、1次主循環ポンプを経て、原子炉へ向う。

以上のようにSGを運転する場合には、1次Naはガス圧制御バイパスフロー弁へは流れない。このようにするため、ガス圧を高めてバイパスフロー弁の液位を下げるようコントロールして、バイパスフローを防止する。

一方、SGを運転せずにPRACSで1次Naを除熱する場合電磁ポンプは停止し、ガス圧制御バイパスフロー弁のガス圧を下げることにより、バイパスフロー弁の液位を上げ、バイパス流路を構成させバイパスフロー系統を生かす。

この場合入口ノズル、内胴上部窓を通過し、PRACSで除熱された1次Naは、電磁ポンプ下部まで流れた後、電磁ポンプ内には入らず、ガス圧制御バイパスフロー弁側へ流れ下部プレナムへと向う。下部プレナム内のNa-水反応生成物トラップ装置を通過した1次Naは、下部プレナム窓を通過して出口ノズルへ向い1次主循環ポンプを経て原子炉へと向う。

2次側のNaは、モジュール上部の入口ヘッダからPRACS、伝熱管内を流下・上昇する。この間に1次Naと熱交換する。1次Naと熱交換した2次Naは、出口ヘッダを出て2次配管を通して空気冷却器へと流れる。

### 2. ブースタ・電磁ポンプ

電磁ポンプは、基本的には「IHXを有する方式」と同様に、定格流路 $2\text{ m}^3/\text{min}$ 、定格揚

程30mNaのALIP型電磁ポンプであるが、Na浸漬型という点を特徴としている。従って、本電磁ポンプは500℃の高温Na中に浸漬され、このNaを用いた間接方式により冷却されることから、コイルには600℃程度の高温に耐えうる高温用絶縁が施される。これより、コイルによる発熱を極力抑えるという観点から、本電磁ポンプでは、必要な起磁力を内側と外側の2つのコイルに分担させる二重ステータコイル方式を採用し、コイル部の発生熱量低減化を図っている。図Ⅲ.A-2に本電磁ポンプの特徴を図示する。

### 3. PRACS

PRACSは、できるだけ交換熱量を多くするという観点からヘリカルコイル型伝熱管型式を基本形に採用している。この場合、表Ⅲ.A-1に示すように、上部に出入口ヘッダがある場合、下降管部及び上昇管部の構成等により4つのタイプが考えられるが、検討の結果、流動の安定性、伝熱部の組立性等の優位性から、タイプ1の伝熱管構成を選択した。本PRACSの主要目を、表Ⅲ.A-2に示す。

### 4. ガス圧制御バイパスフロー弁

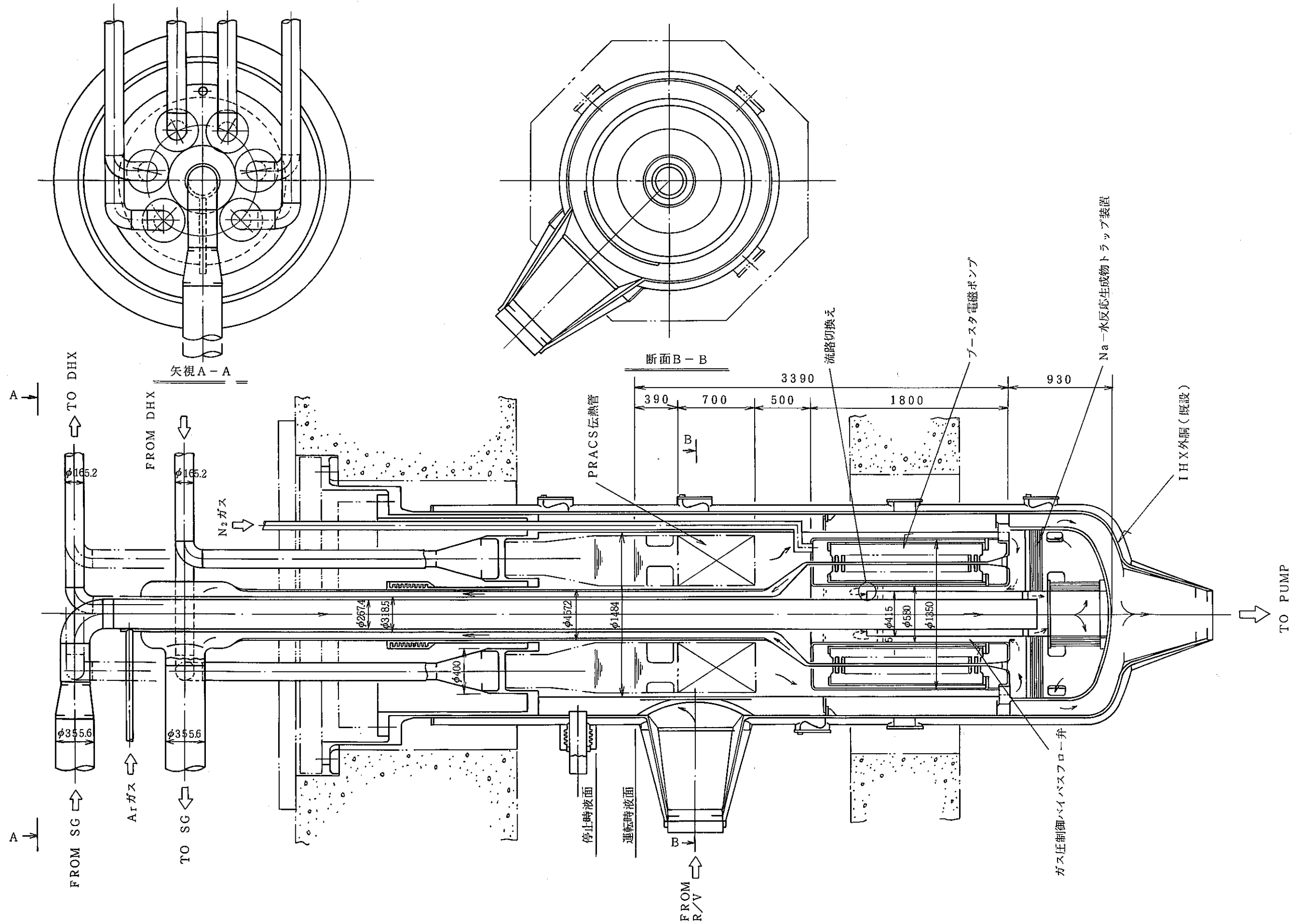
ガス圧制御バイパスフロー弁は1次側を電磁ポンプ内径、2次側をSG出口管外径とし、それらの中央に下部プレナムから垂直に設置した円筒のせきを設けて構成する。

ガス圧制御バイパスフロー弁のガス圧を上げた場合には、弁内の液位が低下し、中央仕切り用の円筒によって1次側と2次側が仕切られる。

一方、ガス圧を下げた場合には弁内の液位が上昇し、仕切り用の円筒の上方に液位を生じさせることにより、1次側と2次側が連通し、バイパス流路が構成される。

モジュールの通常運転時のような流量が一定の場合には、初期設定液位に対して、ガス圧制御バイパスフロー弁の1次側の液位はモジュールの入口ノズルから電磁ポンプの入口までの圧損に相当する。

一方、ガス圧制御バイパスフロー弁の2次側の液位は電磁ポンプの揚程とSG系の圧損水流の差により決まる。この液位は電磁ポンプの揚程を変化させることにより、制御可能である。



図Ⅲ.A-1 電磁ポンプ・PRACS 合体モジュール構造図

(電磁ポンプの特徴)

- 機械式ポンプと比べ小型
- 自由液面が無いいため設置自由度が大きい
- 補機設備が不要(潤滑油系設備, シールガス系設備)
- 静的機器で信頼性が高く, 制御性が良い。

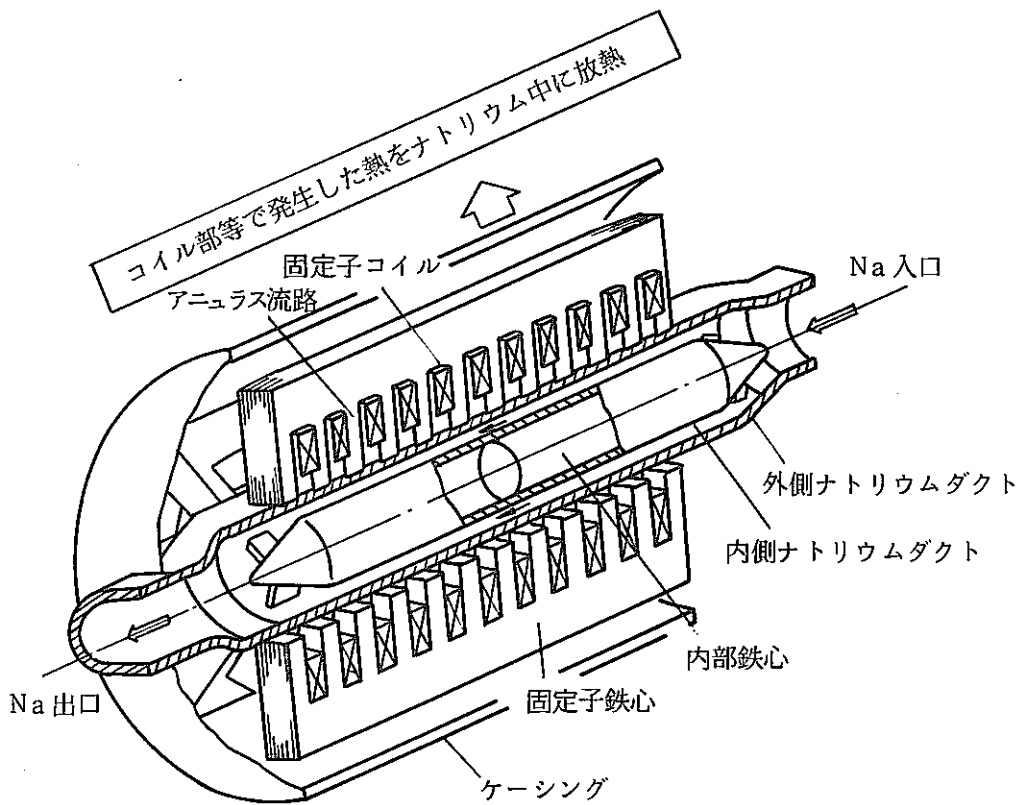


(無冷却電磁ポンプの特徴)

- 設置自由度がさらに大きくなり, 他機器との合体が容易
- 冷却設備が不要でさらに小型化
- コイル部等での自己発熱をナトリウム中に回収可能



• EMP・PRACS 合体機器構成への適用



図Ⅲ.A-2 ナトリウム浸漬型自己冷却ALIPの特徴

表Ⅲ.A-1 PRACSの構成

TYPE	概略構成	特徴
1		<p>下降管部 円側 直管                      上昇管部 外側 ヘリカル</p> <p>バイパス流と防止するための仕切りが必要</p>
2		<p>下降管部 円側 直管                      上昇管部 外側 ヘリカル</p> <p>バイパス流と防止するための仕切りが必要</p>
3		<p>下降管部・上昇管部 ヘリカル</p> <p>下降管部コイル径と上昇管部コイル径が異なる</p>
4		<p>下降管部・上昇管部 ヘリカル</p> <p>下降管部コイル径と上昇管部コイル径が同じ</p>

表Ⅲ.A-2 PRACS主要目

項 目	デ ー タ	備 考
交 換 熱 量	5.9MWt	
型 式	ヘリカルコイル型	TYPE 1
1 次 側 入 口 温 度	500℃	
1 次 側 出 口 温 度	370℃	
2 次 側 入 口 温 度	340℃	
2 次 側 出 口 温 度	470℃	
1 次 側 流 量	130T/h	
2 次 側 流 量	130T/h	
伝 熱 管 外 径	21.7mm	
伝 熱 管 肉 厚	1.2 <sup>+0.4</sup> mm	
伝熱管配列ピッチ	28.2mm	
ピッチ / 外径	1.3	
伝 熱 管 本 数	135本	
層 数	6 層	
段 数	25段	
有 効 伝 熱 面 積	40.5m <sup>2</sup>	20%の余裕含む
伝 熱 管 材 質	SUS304TB	