

重金属冷却炉の検討
－平成14年度成果－
(研究報告書)

2003年9月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

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

2003

重金属冷却炉の検討

—平成14年度成果—

(研究報告書)

江沼康弘^{※1}、早船浩樹^{※1}、惣万芳人^{※1}、
此村 守^{※1}、水野朋保^{※2}、堺 公明^{※3}

要 旨

本研究では、実用化戦略調査研究において有望な高速炉概念のひとつとして検討されている中型鉛ビスマス冷却炉に関して、構造健全性、耐震性、運転性等の概念成立性を左右する枢要課題の見通しを確認するための検討を行った。主な内容は以下のとおりである。

(1) 原子炉構造、炉内構造に対する耐震健全性

(a) 原子炉構造：耐震成立性を確保できる見通しが得られた。

(b) 炉上部構造：

燃料の炉内中継用案内管は、片持ち梁状では耐震性確保が困難であるので、内筒などの近くにある比較的剛性の高い構造物からサポートする必要がある。

(2) 热的健全性

実用化戦略調査研究で検討されている中型タンク式鉛・ビスマス冷却炉とナトリウム冷却大型炉の热的健全性の観点からの特質を整理し、温度成層化や温度揺らぎ等の特徴的な現象を対象として両者の差異を評価した。

(3) 運転性

以下の検討を実施し自然循環炉の運転性見通しを得た。

(a) 制御特性検討に必要な水蒸気系概念の具体化

(b) 一体型炉の制御特性、過渡特性の検討

(c) 冷却材チャージ、予熱処理手順を含む初期起動時運転手順の具体化

(4) 安全性

伝熱管破断時の炉心部の流量変化に伴う炉心出力、温度変化などに着目した熱流動解析、熱的側面からの炉心安全性評価及び炉心への水蒸気侵入による印加反応度について検討した結果、炉心部の温度上昇は小さく、炉心の健全性は確保できるとともに安全上問題になることはない見通しが得られた。

(5) 炉内構造とBOP設備の具体化

※1：大洗工学センター システム技術開発部 FBR システムグループ

※2： 同 炉心燃料システムグループ

※3： 同 热流体技術開発グループ

Heavy Liquid Metal Coolant —Results 2002—

Yasuhiro Enuma^{*1}、Hiroki Hayahune^{*1}、
Mamoru Konomura^{*1}、Tomoyasu Mizuno^{*2}、Tomoaki Sakai^{*3}

Abstract

Main issues of structural integrity, seismic integrity and operation are studied to confirm feasibilities of the medium size lead-bismuth cooled reactor as a candidate for one of the concepts of fast reactor in the feasibility studies on commercialized FBR cycle system. The results are following.

(1) Integrity under loading of earthquake

(a) Reactor system : Seismic integrity of the reactor is confirmed.

(b) Upper core structures and fuel exchanging machine :

Those structures are necessary for increasing stiffness by bonding.

(2) Structural integrity for thermal loading

Characteristics of both the medium size lead-bismuth cooled reactor and the large size sodium cooled reactor in the feasibility studies are arranged and structural integrity for thermal loading is evaluated about particular phenomena of thermal stratification and thermal striping.

(3) Operation

Feasibility of the natural circulation operation is confirmed.

(a) Water-steam supply system concerned with control system

(b) Control characteristics and transient characteristics of lead-bismuth reactor

(c) Initial start-up operation concerned with preheating and charging of coolant

(4) Safety

Core integrity on SG tube rupture is evaluated to be confirmed its safety, by analyzing thermal hydraulic behavior of transient of power, flow and temperature, by calculating characteristics of core and by evaluating additional reactivity by steam coming into core region.

(5) Internal core structures design and system power balance design.

^{*1} : FBR System Design Group、System Engineering and Technology Division,
O-arai Engineering Center JNC

^{*2} : Fuel Core System Engineering Group、System Engineering and Technology Division,
O-arai Engineering Center JNC

^{*3} : Thermal Hydraulic Research Group、System Engineering and Technology Division,
O-arai Engineering Center JNC

目 次

	頁
1. はじめに	1
2. 自然循環炉と強制循環炉のプラント計画の概要と課題	2
2.1 プラント概要のまとめ	3
2.2 検討すべき課題	4
3. ロードマップの検討	13
4. 耐震健全性	19
4.1 強地震耐震条件の影響評価	19
4.2 3次元免震性能確認	50
4.3 炉上部構造の対策概念設定	53
4.4 スロッシングに対する検討	63
5. 热的健全性	69
5.1 炉壁の健全性	69
5.2 サーマルストライピング	72
6. 運転性	74
6.1 水・蒸気系概念の具体化	74
6.1.1 タービン側部分負荷時のヒートバランス	74
6.1.2 プラント起動及び停止時運転曲線の作成	81
6.1.3 SG回り水・蒸気系系統図の作成	90
6.2 一体型炉の制御特性、過渡特性の検討	93
6.2.1 プラント制御方式の検討	96
6.2.2 起動停止の解析検討	104
6.2.3 通常出力運転時の出力変更特性の解析検討	111
6.3 起動時運転手順の具体化	129
6.3.1 初回起動時運転手順	129
6.3.2 通常起動時運転手順	134

7.	安全性	137
7.1	検討目的	137
7.2	検討項目及び検討手順	137
7.3	検討条件	137
7.4	検討内容	138
7.4.1	水リーク率	138
7.4.2	破断点圧力変化の解析	138
7.4.3	気泡ポンプモデルの検討	143
7.4.4	プラント熱流動解析のための境界条件	147
7.4.5	プラント熱流動解析	150
7.4.6	炉心への蒸気侵入の影響	153
7.5	安全性検討のまとめ	156
8.	炉内構造とBOP設備の具体化	157
8.1	BOP設備の具体化	157
8.1.1	燃料交換システムの小型化	157
8.1.2	廃棄物処理系統	182
8.1.3	空調系統	188
8.1.4	配置の合理化	192
8.1.5	純化系設備の検討	205
9.	物量データの整備	208
9.1	物量データの整備	208
9.2	機器主要仕様の整備	208
10.	おわりに	221

表リスト

	頁
表 2.1-1 中型モジュール方式・自然循環型 鉛ビスマス冷却炉 基本概念···	4
表 2.1-2 中型モジュール方式・強制循環型 鉛ビスマス冷却炉 基本概念···	5
表 2.2-1(1/4) 重金属中型炉 まとめと今後の課題 -経済性向上のための全体計画-	9
表 2.2-1(2/4) 重金属中型炉 まとめと今後の課題 - 構造関係 - ······	10
表 2.2-1(3/4) 重金属中型炉 まとめと今後の課題 - 運転性・安全性関連 - ······	11
表 2.2-1(4/4) 重金属中型炉 まとめと今後の課題 - 構造健全性 - ······	12
表 3-1 鉛ビスマス冷却炉のロードマップ 一全体一 ······	15
表 3-2 重金属冷却炉の要素技術開発 一機器開発一 ······	16
表 3-3 重金属冷却炉の要素技術開発 一システム・評価手法一	17
表 3-4 国産FBR材の鉛ビスマス中 耐腐食性確認試験 ······	18
表 4.1-1 耐震成立性評価条件···	29
表 4.1-2 コントロールポイントの比較 (水平) ······	29
表 4.1-3 耐専スペクトルとレファレンスS2スペクトルの速度比(水平)···	29
表 4.1-4 コントロールポイントの比較 (上下) ······	30
表 4.1-5 耐専スペクトルとレファレンスS2スペクトルの速度比(上下)···	30
表 4.1-6 自然循環炉の解析結果···	31
表 4.1-7 自然循環炉の炉心支持板の上下応答加速度···	31
表 4.1-8 自然循環炉の反応度投入評価···	32
表 4.1-9 自然循環炉の原子炉容器の座屈評価 (上部胴) ······	32
表 4.1-10 自然循環炉の原子炉容器の座屈評価 (下部胴) ······	32
表 4.1-11 強制循環炉の解析結果···	33
表 4.1-12 強制循環炉の炉心支持板の上下応答加速度···	33
表 4.1-13 強制循環炉の反応度投入評価···	34
表 4.1-14 強制循環炉の原子炉容器の座屈評価···	34
表 4.1-15 FHM振動解析モデル形状データ···	35
表 4.1-16 FHM振動解析モデル物性値(12Cr系鋼材)···	35
表 4.1-17 FHM振動解析における付加重量···	36
表 4.1-18 上下免震特性と座屈評価の関係(強制循環炉, レファレンスS2)···	36
表 4.2-1 3次元免震装置の適合性検討結果···	51
表 4.3-1 各種UIS形状に対する地震応答解析結果···	56
表 4.3-2 UISと炉心側の結合方式···	56
表 4.4-1 スロッシング波高(対策前)···	65
表 4.4-2 スロッシング波高(スロッシング抑制対策あり)···	65
表 5.1-1 鉛ビスマス炉の原子炉容器液面部の起動時発生応力の推定···	70
表 5.1-2 鉛ビスマス炉の原子炉容器の熱成層通過による発生応力の推定···	70
表 5.2-1 鉛ビスマス炉の炉心出口部の耐サーマルストライピング性の推定···	73

表 6.1.1-1	タービン部分負荷時主要目	75
表 6.1.2-1	1 次系一巡圧力損失値の算定	83
表 6.1.3-1	SG 回り水・蒸気系統の配管及び機器寸法	91
表 6.2.3.2-1	制御系定数の設定値(予備解析暫定値)	114
表 6.2.3.2-2	制御棒駆動速度と制御棒軸伸びに関する諸量	115
表 6.2.3.3-1	制御系定数の設定値(リファレンス解析用暫定値)	116
表 6.3.2-1	各系統設備の運転状態説明	135
表 7.4.3-1	SG 伝熱管破断時破損チャンネルの鉛ビスマス吐出流量計算結果 (自然循環炉)	145
表 8.1.1-1	自然循環炉 燃料交換システム小型化のサーベイ検討	161
表 8.1.1-2	強制循環炉 燃料交換システム小型化のサーベイ検討	173
表 8.1.2-1	放射性廃棄物処理系の設備容量	186
表 8.1.3-1	空調設備を必要とする系統	190
表 8.1.3-2	換気設備のみでよい系統	190
表 8.1.4.5-1	鉛ビスマス炉 建屋容積一覧	198
表 9.1-1	自然循環方式鉛ビスマス冷却炉 経済性評価用物量データ	209
表 9.1-2	強制循環方式ビスマス冷却炉 経済性評価用物量データ	210
表 9.2-1	自然循環炉 機器の主要仕様	211
表 9.2-2	強制循環炉 機器の主要仕様	216

図リスト

	頁
図 2.1-1 自然循環型 鉛ビスマス冷却炉(55万KWe)	6
図 2.1-2 強制循環型 鉛ビスマス冷却炉(75万KWe)	7
図 2.1-3 鉛ビスマス中型炉 概要とR&D	8
図 4.1-1 自然循環炉 原子炉構造概念図(平成13年度設定形状)	37
図 4.1-2 強制循環炉 原子炉構造概念図(平成13年度設定形状)	38
図 4.1-3 原子炉容器 据付位置の床応答曲線	39
図 4.1-4 レファレンスS2スペクトルと耐専スペクトルM7.1の比較(水平)	40
図 4.1-5 耐専スペクトルとレファレンスS2スペクトルの速度比(水平)	40
図 4.1-6 レファレンスS2スペクトルと耐専スペクトルM7.1の比較(上下)	41
図 4.1-7 耐専スペクトルとレファレンスS2スペクトルの速度比(上下)	41
図 4.1-8 原子炉構造の上下応答解析モデル(自然循環炉)	42
図 4.1-9 原子炉構造の水平応答解析モデル(自然循環炉)	42
図 4.1-10 原子炉構造の上下応答解析モデル(強制循環炉)	43
図 4.1-11 原子炉構造の水平応答解析モデル(強制循環炉)	43
図 4.1-12 コラム型UIS解析モデル(自然循環炉)	44
図 4.1-13 コラム型UIS解析モデル(強制循環炉)	44
図 4.1-14 UISの固有振動数(水平)	45
図 4.1-15 UISの水平応答解析結果(自然循環炉)	45
図 4.1-16 UISの水平応答解析結果(強制循環炉)	45
図 4.1-17 FHMの振動解析モデル概念	46
図 4.1-18 (1/3) FHMの支配振動モード	46
図 4.1-18 (2/3) FHMの支配振動モード	47
図 4.1-18 (3/3) FHMの支配振動モード	47
図 4.1-19 S1地震時におけるFHM本体胴及び収納ケースの水平面外方向変位	48
図 4.1-20 FHMの水平面外方向支配モード固有振動数	48
図 4.1-21 FHMの水平面外方向最大変位	48
図 4.1-22 fv=5Hzの厚肉積層ゴムを用いた場合の床応答曲線(レファレンスS2)	49
図 4.2-1 自然循環炉 配置概念図(H13年度設定値)	52
図 4.3-1 原子炉容器 据付位置の床応答曲線(水平)	57
図 4.3-2 UISと遮へい体を結合する方式の概念図(PNC大型炉)	58
図 4.3-3 CRBRP方式UIS概念図	59
図 4.3-4 UISとFHM一体型の場合の地震応答解析結果	59
図 4.3-5 原子炉構造 耐震性向上対策概念	60
図 4.3-6 自然循環炉 原子炉構造概念図(平面図)	61
図 4.3-7 自然循環炉 原子炉構造概念図(定格時、立面図)	61
図 4.3-8 自然循環炉 原子炉構造概念図(燃料交換時、立面図)	61

図 4.3-9	回転プラグジャッキアップ構造及びUIS下端のランシェ構造(自然循環炉)	61
図 4.3-10	強制循環炉 原子炉構造概念図(平面図)	62
図 4.3-11	強制循環炉 原子炉構造概念図(定格時、立面図)	62
図 4.3-12	強制循環炉 原子炉構造概念図(燃料交換時、立面図)	62
図 4.3-13	回転プラグジャッキアップ構造及びUIS下端のランシェ構造(強制循環炉)	62
図 4.4-1	スロッシング解析モデル(自然循環炉)	66
図 4.4-2	スロッシング解析モデル(強制循環炉)	66
図 4.4-3	原子炉容器据え付け位置の水平方向加速度時刻歴波(レファレンスS2)	67
図 4.4-4	スロッシング波高の時刻歴(自然循環炉、スロッシング対策無し、レファレンスS2)	67
図 4.4-5	スロッシング波高の時刻歴(強制循環炉、レファレンスS2)	67
図 4.4-6	スロッシング解析モデル(スロッシング対策有り)(自然循環炉)	66
図 4.4-7	スロッシング波高の時刻歴(自然循環炉、スロッシング対策有り、レファレンスS2)	67
図 4.4-8	スロッシング最大波高時の液面	68
図 5.1-1	ナトリウム冷却大型炉及び鉛ビスマス冷却炉の熱成層条件	71
図 6.1.1-1	SG給水温度	76
図 6.1.1-2	自然循環炉のプラント運転モード(50%～定格出力)	77
図 6.1.1-3	自然循環炉のプラント運転モード(30%～50%出力)	77
図 6.1.1-4	自然循環炉のプラント起動曲線(計画)	78
図 6.1.1-5	プラント起動時ヒートマスバランス図(30%出力)	79
図 6.1.1-6	プラント起動時ヒートマスバランス図(50%出力)	79
図 6.1.1-7	プラント起動時ヒートマスバランス図(75%出力)	80
図 6.1.1-8	プラント起動時ヒートマスバランス図(定格出力)	80
図 6.1.2-1	自然循環炉のプラント運転モード(核加熱開始時)	84
図 6.1.2-2	自然循環炉のプラント運転モード(核加熱による昇温時)	84
図 6.1.2-3	自然循環炉のプラント運転モード(温態待機時)	85
図 6.1.2-4	自然循環炉のプラント運転モード(過熱(乾き)蒸気発生時)	85
図 6.1.2-5	自然循環炉のプラント運転モード(タービン起動前)	86
図 6.1.2-6	プラント起動運転時ヒートマスバランス図(①核加熱開始時:炉心流量10%)	87
図 6.1.2-7	プラント起動運転時ヒートマスバランス図(②温態待機時:熱出力3%)	87
図 6.1.2-8	プラント起動運転時ヒートマスバランス図(③過熱蒸気発生開始時:熱出力32%)	88
図 6.1.2-9	プラント起動運転時ヒートマスバランス図(④タービン起動前:熱出力37%)	88
図 6.1.2-10	自然循環炉のプラント起動曲線と各モード	89
図 6.1.2-11	自然循環炉のプラント停止曲線(計画)	89
図 6.1.3-1	自然循環炉 SG回り水・蒸気系系統図	92
図 6.2.1.1-1	自然循環炉 プラント系統図	97
図 6.2.1.1-2	プラント起動運転時ヒートマスバランス図(30%出力)	98
図 6.2.1.1-3	プラント起動運転時ヒートマスバランス図(定格出力)	98
図 6.2.1.1-4	プラント制御系構成概念図	99
図 6.2.1.1-5	出力指令装置制御ブロック図	100
図 6.2.1.1-6	原子炉出力制御系	100

図 6.2.1.1-7	制御棒制御系ブロック図	100
図 6.2.1.1-8	主蒸気温度制御系及び給水流量制御系ブロック図	101
図 6.2.1.1-9	主蒸気圧力制御系ブロック図	101
図 6.2.1.2-1	自然循環炉 プラント起動曲線(計画)	102
図 6.2.1.2-2	起動停止時制御系統図	103
図 6.2.2.1-1	自然循環炉の動特性解析モデル図(熱計算)	106
図 6.2.2.1-2	自然循環炉の動特性解析モデル図(冷却材流量計算)	106
図 6.2.2.1-3	水・蒸気系動特性解析モデル図	107
図 6.2.2.1-4	反応度計算モデル	107
図 6.2.2.1-5	起動時特性解析結果(自然循環炉)	108
図 6.2.2.1-6(1/2)	ランプ状出力変更(30%→100%)起動解析結果(自然循環炉)	109
図 6.2.2.1-6(2/2)	ランプ状出力変更(30%→100%)起動解析結果(自然循環炉)	110
図 6.2.3.2-1(1/2)	ステップ状出力変更(100%→90%)予備解析結果(自然循環炉)	117
図 6.2.3.2-1(2/2)	ステップ状出力変更(100%→90%)予備解析結果(自然循環炉)	118
図 6.2.3.2-2(1/2)	ランプ状出力変更(100%→30%、1.4%/分)予備解析結果(自然循環炉)	119
図 6.2.3.2-2(2/2)	ランプ状出力変更(100%→30%、1.4%/分)予備解析結果(自然循環炉)	120
図 6.2.3.2-3	ランプ状出力変更予備解析—不安定な制御の例(自然循環炉)	121
図 6.2.3.3-1(1/2)	ステップ状出力変更(100%→90%)解析結果(自然循環炉)	122
図 6.2.3.3-1(2/2)	ステップ状出力変更(100%→90%)解析結果(自然循環炉)	123
図 6.2.3.3-2(1/2)	ステップ状出力変更(30%→40%)解析結果(自然循環炉)	124
図 6.2.3.3-2(2/2)	ステップ状出力変更(30%→40%)解析結果(自然循環炉)	125
図 6.2.3.3-3(1/2)	ランプ状出力変更(100%→30%, 1.0%/分)解析結果(自然循環炉)	126
図 6.2.3.3-3(2/2)	ランプ状出力変更(100%→30%, 1.0%/分)解析結果(自然循環炉)	127
図 6.2.3.3-4	PWR における日負荷追従運転パターン	128
図 6.3.1-1	原子炉容器／炉内構造物 加熱設備構成と初回起動手順の概要	132
図 6.3.1-2	崩壊熱除去系(PRACS)による運転温度	133
図 6.3.1-3	炉内自然循環流量	133
図 6.3.2-1	プラント運転サイクル	136
図 6.3.2-2	自然循環炉のプラント起動曲線(計画)	136
図 7.4.2-1	SG 伝熱管破断時準定常圧計算モデルと流動方程式	140
図 7.4.2-2	破断点(水蒸気)圧力(自然循環炉、11kg/s)	141
図 7.4.2-3	水蒸気と鉛ビスマスの界面位置(自然循環炉、11kg/s)	141
図 7.4.2-4	SG 破断チャンネルの流速(自然循環炉、11kg/s)	141
図 7.4.2-5	炉心通過流路の流速(自然循環炉、11kg/s)	141
図 7.4.2-6	破断点(水蒸気)圧力(強制循環炉、12kg/s)	142
図 7.4.2-7	水蒸気と鉛ビスマスの界面位置(強制循環炉、12kg/s)	142
図 7.4.2-8	SG 破断チャンネルの流速(強制循環炉、12kg/s)	142
図 7.4.2-9	炉心通過流路の流速(強制循環炉、12kg/s)	142
図 7.4.3-1	揚水ポンプ模式図	146

図 7.4.3-2	SG 伝熱管破断時の気泡ポンプモデル	146
図 7.4.3-3	鉛直管上向流の流動様式線図	146
図 7.4.4-1	SG 伝熱管破断時破損チャンネル境界流量(水リーグ率 11kg/s)	148
図 7.4.4-2	SG 伝熱管破断時破損チャンネル境界流量(水リーグ率 5kg/s)	148
図 7.4.5-1	SG 伝熱管破断時解析モデル図(熱計算)	149
図 7.4.5-2	SG 伝熱管破断時解析モデル図(冷却材流量計算)	149
図 7.4.5-3	SG 伝熱管破断時プラント熱流動解析結果(リーグ率:11kg/s)(自然循環炉)	151
図 7.4.5-4	SG 伝熱管破断時プラント熱流動解析結果(リーグ率:5kg/s) (自然循環炉)	152
図 7.4.6-1	SG 伝熱管破断時破損口径と気泡径の関係	155
図 7.4.6-2	鉛ビスマス中の気泡径と気泡終端速度の関係	155
図 8.1.1-1	自然循環炉 原子炉構造と燃料出し入れ設備カバーガスバウンダリー構成	162
図 8.1.1-2	燃料交換機分割方式(案1) (自然循環炉)	163
図 8.1.1-3	燃料交換機伸縮方式(案2) (自然循環炉)	164
図 8.1.1-4	燃料交換機伸縮・浮力活用方式(案3) (自然循環炉)	165
図 8.1.1-5	燃料交換機建屋側取合寸法図(自然循環炉)	166
図 8.1.1-6	燃料交換システム小型化の効果 建屋容積比較図 (自然循環炉)	167
図 8.1.1-7	燃料交換手順計画概念図(手順1／前準備作業) (自然循環炉)	168
図 8.1.1-8	燃料交換手順計画概念図(手順2／燃料交換作業) (自然循環炉)	169
図 8.1.1-10	強制循環炉原子炉構造と燃料出し入れ設備カバーガスバウンダリー構成	174
図 8.1.1-11	燃料交換機分割方式(案1) (強制循環炉)	175
図 8.1.1-12	燃料交換機伸縮方式(案2) (強制循環炉)	176
図 8.1.1-13	燃料交換機伸縮・浮力活用方式(案3) (強制循環炉)	177
図 8.1.1-14	燃料交換機建屋側取合寸法図(強制循環炉)	178
図 8.1.1-15	燃料交換システム小型化の効果 建屋容積比較図 (強制循環炉)	179
図 8.1.1-16	燃料交換手順計画概念図(手順1／前準備作業) (強制循環炉)	180
図 8.1.1-17	燃料交換手順計画概念図(手順2／燃料交換作業) (強制循環炉)	181
図 8.1.2-1	気体廃棄物処理設備 系統概念図	187
図 8.1.2-2	液体廃棄物処理設備 系統概念図	187
図 8.1.2-3	固体廃棄物処理設備 系統概念図	187
図 8.1.3-1	原子炉格納容器空調系、原子炉建屋コンフィnementaria換気系及び 非常用ガス処理系系統図(1 モジュール炉分を示す)	191
図 8.1.3-2	原子炉建家管理区域換気系系統図(各モジュール炉共有)	191
図 8.1.4.3-1	自然循環炉 容積削減案(平面図)	199
図 8.1.4.3-2	自然循環炉 容積削減案(立面図)	199
図 8.1.4.3-3	自然循環炉 プロットプラン	200
図 8.1.4.3-4	自然循環炉 配置図(平面図)	201
図 8.1.4.3-5	自然循環炉 配置図(立面図)	201

図 8.1.4.4-1	強制循環炉 容積削減案(平面図)	202
図 8.1.4.4-2	強制循環炉 容積削減案(立面図)	202
図 8.1.4.4-3	強制循環炉 プロットプラン	203
図 8.1.4.4-4	強制循環炉 配置図(平面図)	204
図 8.1.4.4-5	強制循環炉 配置図(立面図)	204

1. はじめに

実用化戦略調査研究においては、安全性を前提に、経済性、資源の有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性に優れた高速炉システムの開発を目指としている。

本研究では、実用化戦略調査研究において有望な高速炉概念のひとつとして検討されている中型タンク式鉛-ビスマス冷却炉に関して、構造健全性、耐震性、運転性等の概念成立性を左右する枢要課題の見通しを確認することを目的とする。

特に本年度は、昨年度まで行われた自然循環炉と強制循環炉に関して、まとめと今後の課題を検討し、課題となった項目のうち重要度の高いものについて詳細に検討を行った。

2. 自然循環炉と強制循環炉のプラント計画の概要と課題

昨年までの検討により、自然循環型と強制循環型のプラント概要データが得られた。本項では、これらのデータをまとめプラントイメージを作ると共に、検討すべき課題をまとめた。なお、検討すべき課題の一部については本年度実施し、本報告書に示されている。

2.1 プラント概要のまとめ

昨年までの検討データを基に、自然循環型と強制循環型のプラント概要をまとめた。これを表2.1-1、表2.1-2に示す。これらをもとに、これを、図2.1-1、図2.1-2に示す。また、各炉の3D鳥瞰図を作成した。これを図2.1-3に示す。

これらのまとめから、各炉の概要を示すと以下の通りとなる。

(1) 自然循環炉：表2.1-1、図2.1-1

熱出力1450MWt（電気出力550MWe）の炉心を有し、炉容器の内周に沿うように1体型のヘリカル型蒸気発生器が設置されている。炉容器の径を10m程度にし、鉛ビスマス側の圧力損失を抑えたため、蒸気発生器の高さが高くなっている。崩壊熱除去系の熱交換器が蒸気発生器の上部に設置され、炉容器高さが高い構成となっている。

炉心上部機構、燃料交換系は、ナトリウム炉と同様の構成であるが、炉容器の全体高さが高いため、これらの機器の長さも長くなっている。

原子炉容器の支持は、耐震性能を上げるために側部支持方式とし、原子炉構造全体の重心に近い炉容器側部を支持している。

プラントは6モジュール構成で、プラント全体で電気出力3300MWeとなっている。6モジュールは一体の原子炉建物にまとめて配置され、各モジュール間で設備を供用することで、プラント全体の設備削減を計っている。

(2) 強制循環炉：表2.1-2、図2.1-2

熱出力1875MWt（電気出力750MWe）の炉心を有し、炉容器の内周に沿うように分割型のキドニーモデル蒸気発生器が設置されている。炉容器の径を10m程度にしているために、蒸気発生器の高さが高くなっているが、循環ポンプがあることにより圧力損失制限が緩く、自然循環型ほどには高さは高くなっていない。崩壊熱除去系の熱交換器は、蒸気発生器の上部に設置され、自然循環炉ほどではないが、炉容器高さが高い構成となっている。

炉心上部機構、燃料交換系は、ナトリウム炉と同様の構成であるが、炉容器の全体高さが高いため、これらの機器の長さも長くなっている。

原子炉容器の支持は、耐震性能を上げるために側部支持方式とし、原子炉構造全体の重心に近い炉容器側部を支持している。

プラントは4モジュール構成で、プラント全体で電気出力3000MWeとなっている。4モジュ

ールは一体の原子炉建物にまとめて配置され、各モジュール間で設備を供用することで、プラント全体の設備削減を計っている。

なお、以上のまとめは、今後の設計の進捗に合わせて隨時見直しを行ってゆく。

2.2 検討すべき課題

昨年までの検討項目をまとめると共に、今後検討すべき課題を、プラント機器を中心にまとめた。これを表2.2-1に示す。この内容を、以下に示す。

(1) 全体計画

プラントの概要を決める項目については検討されたが、経済性の評価に必要なデータを得るために、設備関連の設計が必要であることが分かった。このうちプラント建設費に影響のある項目として、燃料取り扱い設備があり、本年度検討を実施することとした。

最終的にデータを整備すればよい項目については、最終評価時点に合わせて実施することとなる。

(2) 構造関係

重金属炉においては内蔵する冷却材の密度が大きい（ナトリウムの約10倍）ため、耐震性に対応した構造とすることが課題である。昨年までは、これまで基準としてきた地震入力について評価を行い、健全性の確保できる構造とした。しかし、地震入力が大きくなることも予想され、これに対しても耐震性のある構造を見通す必要がある。このため、本年度以降、地震入力が大きくなる場合を推定して、原子炉内部構造も含めて、耐震性のある構造の検討を行うこととした。

(3) 運転性・安全設備関係

自然循環炉については循環力が自然循環であるため、特に炉心部での発熱のない初回起動時の運転方法を確立する必要があり、本年度検討することとした。また、一般的な起動停止の確認も必要で、本年度実施することとした。

安全性については、蒸気発生器伝熱管破損時の炉心に対する影響のないことの検討が必要となる。これについては、重金属炉の検討の初期において概略の検討が行われているが、蒸気発生器を炉容器内に設置する構成において基本的な課題であるため、新しい知見を入れて本年度再度検討を実施することとした。

(4) 構造健全性

鉛ビスマス冷却材の場合、構造物に対する腐食が重要な課題である。このため、高速炉用に開発された国産に対する鉛ビスマス環境効果試験が、国際協力を含めて実施されている。次年度に、静止鉛ビスマス中での試験結果がまとまるので、その結果がプラント計画を決める上で重要なデータとなる。今後、このデータに注目して検討を進める。

表 2.1-1 中型モジュール方式・自然循環型 鉛ビスマス冷却炉 基本概念

No	項目	基準仕様
1	原子炉型式	(2次系削除)自然循環冷却タンク型
2	電気出力発電端	550MW _e
3	熱出力	1,450MW _t
4	ループ数	
5	1次系 PbBi 温度	46°C / 285°C
6	主燃氣流量／圧力	約 14350 m ³ /h
7	給水温度／流量	400 °C, 5.98 MPa
8	タービン発電機	210 °C / 約 2287 ton/h
9	プラント熱効率	38%
10	炉心移動部	93.5%
11	炉心・燃料	鉛化物燃料(液化物燃料対応可; 構成比低下なし)
12	遮蔽体外接斗笠	5.99 mm
13	燃費度	15 万 MWd/t (IRU 1% 程)
14	增殖比	1.22 (鉛化物燃料)
15	原子炉停止系	主炉停止系及び後備炉停止系
16	炉心安全性	①受動的炉停止装置: SASS 装置 ②耐 CDA 強化型: 高燃度導管燃料+高沸点 PbBi+受動安全性 炉心下部支持方式
17	炉心支持方式	ライナ一構造方式 (*SC シュラウド構造兼用)
18	炉心保護構造	単回転ブラング+切込み付コラム型 UIS
19	炉心上部機構	1次系配管方式
20	炉心主循環ポンプ	- (タンク型炉)
21	蒸気発生器	- (完全自然循環方式)
22	副燃焼除去系	PRACS(3系統: 完全自然循環方式)
23	漏えい対策	ライナ型ガードベッセル(新燃プロック+ライナ)
24	原子炉格納施設	ライナ内張一体型コンクリート鋼筋熱容器 (炉内:船形炉ライナ + 生体遮蔽シングルトライア)
25	プラント通話サブル	約 18ヶ月 (EPPM) 8 ベッチ
26	①燃料貯蔵装置	水プール貯蔵 (IVS 及び EVST の減衰なし)
27	②炉内燃料交換	単回転ブラング+コラム型 UIS+バングラフ式 PRIM
28	③炉内燃料移送	炉内炉門構造なし/直接取出し水プール保管
29	免震	3 次元免震
30	プラント寿命	40 年以上
31	モジュール構成	複数モジュール方式 (165 万 m ³ / 165 万 kW _e × 3 モジュール / ベット × 2 ベット) (約 18.6 万 m ³ / 165 万 kW _e × 1 モジュール)
32	原子炉構造	約 18.6 万 m ³ / 165 万 kW _e × 1 モジュール

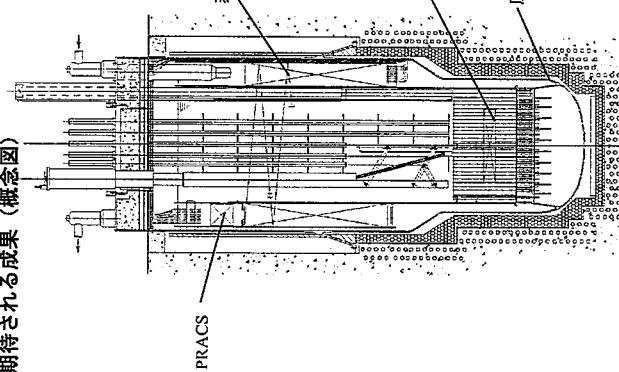


図 1 原子炉構造 (1 モジュール)

図 2 建屋内原子炉モジュール配置 平面図

表 2.1-2 中型モジュール方式・強制循環型 鉛ビスマス冷却炉 基本概念

a. 基本概念と着眼点

基本概念

- ・重金属冷却材の採用により、Na炉の弱点 (Na-水反応、漏洩Na燃焼) を克服した高速炉概念の構築
- ・炉心性能、安全性、経済性等の主要な性能はNa炉と同等以上を目標とする

着眼点

- 安全性
 - ・高熱伝導の塗化物燃料と高沸点のPb-Bi冷却材を採用すること、異常時の燃料温度の許容上昇幅を拡大し、固有安全を強化する

○経済性

- ・2次系削除によるシステム簡素化、所内負荷低減
- ・キドニーSG採用による無駆スベースの削減

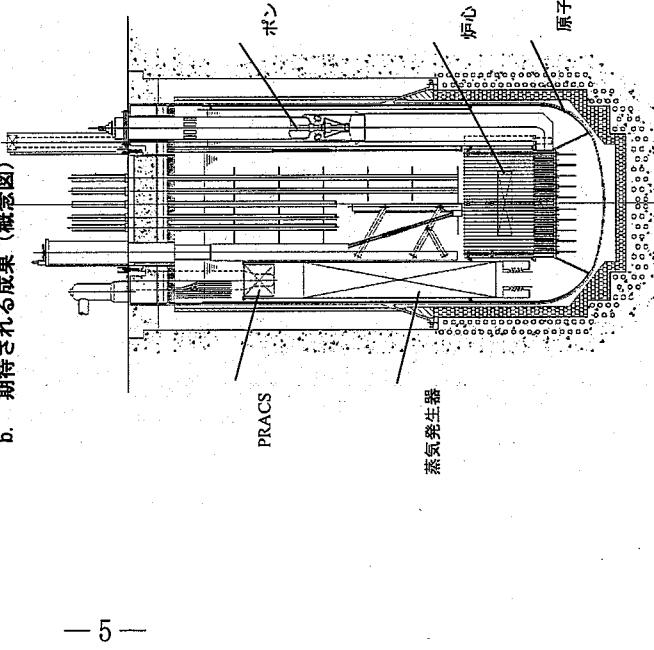
・高速炉用に開発されている新材料(ODS、12Cr系鋼等)の採用による物量低減

・モジュール方式による量産効果、習熟効果及び設備共用化による建設費低減

○炉心性能

- ・Pb-Biの優れた核的特性+塗化物燃料の採用
- ・強制循環方式採用により、燃料体積比向上

b. 期待される成果 (概念図)



No	項目	基本仕様
1	原子炉型式	(2次系削除)強制循環炉タング型
2	電気出力(総電端)	750MW _c
3	熱出力	1875MW _t
4	ループ数	
5	1次系 PbBi 温度	520°C / 352°C
6	1次系流量	約 14350 m ³ /h
7	主蒸気温度/圧力	450 °C / 15.2 MPa
8	給水温度/流量	240 °C / 約 3121 ton/h
9	タービン発電機	蒸気タービン
10	プラント熱効率	40%
11	プラント稼働率	93.3%
12	炉心・燃料	塗化物(液化物燃料対応); 安全性確認
13	遮蔽体外径円径	5270 mm
14	燃焼室	15 万 MWd/t(取出平均)
15	増殖比	1.19(塗化物燃料)
16	原子炉停止系	主原子炉停止系及び後備原子炉停止系
17	炉心安全性	①受動的原子炉停止方策 : SASS 設置 ②CDR 防止強化型; 高熱伝導塗化物燃料+高沸点 PbBi+受動安全生
18	炉心支持方式	炉心下部支承方式 炉心下部支承方式
19	炉心保護構造	炉心保護構造
20	炉心上部機構	単回転アブリ+駆込み付ゴラム型 UIS
21	1次系配管方式	一(タンク型炉)
22	1次主循環ポンプ	継続性機械式送心ポンプ(2基)
23	然気発生器	一体貫流キドニータイプ(2基)
24	崩壊熱除去系	PRACS(3系統: 完全自然循環方式)
25	漏れい対策	ライナ型ガードベッセル(沸騰プロック+ライナ)
26	原子炉格納施設	ライナ内隔壁一体型コンクリートライナ (炉上部鉛遮蔽ライナ + 生体遮蔽コンクリートライナ)
27	プラント運転サイクル	約 18ヶ月 (GTPM)、アシチ
28	①燃料貯蔵待機槽	水プール貯蔵槽 (VS 及び EVSI の機能なし)
29	②炉内燃料交換	単回転アブリ + コラム型 UIS + ベンタグラフ式 FIM
30	③炉内外燃料移送	炉内燃料移送
31	免震	3 次元免震
32	プラント寿命	40 年以上
33	モジュール構成	複数モジュール方式: 2 モジュール / ユニット × 2 ユニット
34	原子炉建屋	(150 万 kW _e × ユニット: 2 モジュール / ユニット × 2 ユニット) (約 6.2 万 m ³ / 1 モジュール)

図 2 建屋内原子炉モジュール配置 平面図

図 1 原子炉構造 (1モジュール)

プラント主要目

出力	1450MWt／550MWe
炉心出口冷却材温度	465°C
炉心入口冷却材温度	285°C
蒸気温度／給水温度	404°C／210°C
主蒸気圧力	約6.5MPa
炉心・燃料	Pu・U混合塗化物
炉心構成要素 外接円径	約594cm
燃焼度	約15万MWd/t
増殖比	約1.2
受動安全	SASS
炉心上部機構	単回転プラグ & 切込付コラム型UIS
蒸気発生器	1体型ヘリカルコイル×1
崩壊熱除去方式	PRACS(NC) × 3
プラント運転サイクル	18ヶ月・8バッチ
免震	3次元免震

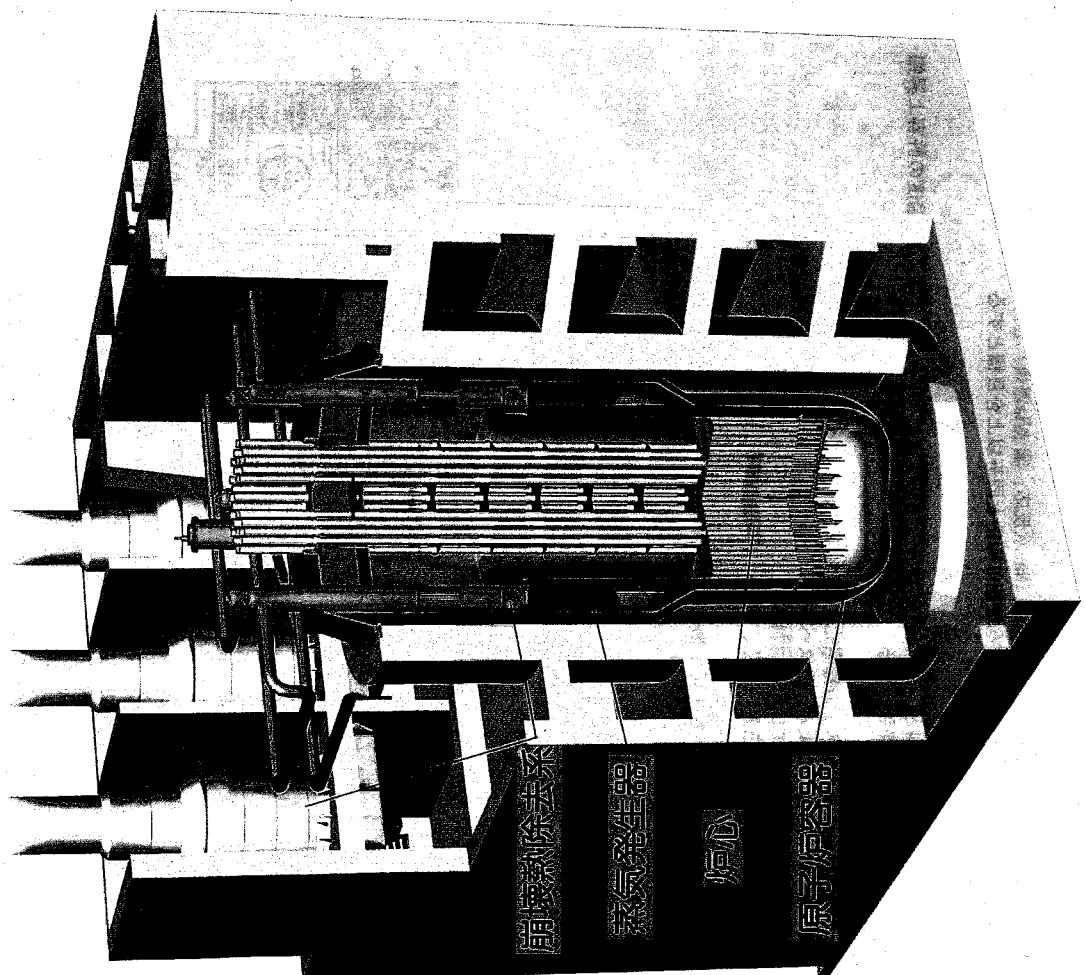


図 2.1-1 自然循環型 鉛ビスマス冷却炉（55万kWe）

プラント主要目

出力	1875MWe／750MWe
炉心出口冷却材温度	520°C
炉心入口冷却材温度	352°C
蒸気温度／給水温度	453°C／240°C
主蒸気圧力	約15.7MPa
炉心・燃料	Pu-U混合塗化物
炉心構成要素外接円径	約530cm
燃焼度	約15万MWd/t
増殖比	約1.2
受動安全	SASS
炉心上部機構	単回転プラグ & 切込付コラム型UJS
蒸気発生器	キドニー型SG × 2
崩壊熱除去方式	PRACS(NC) × 3
プラント運転サイクル	18ヶ月・7バッチ
免震	3次元免震

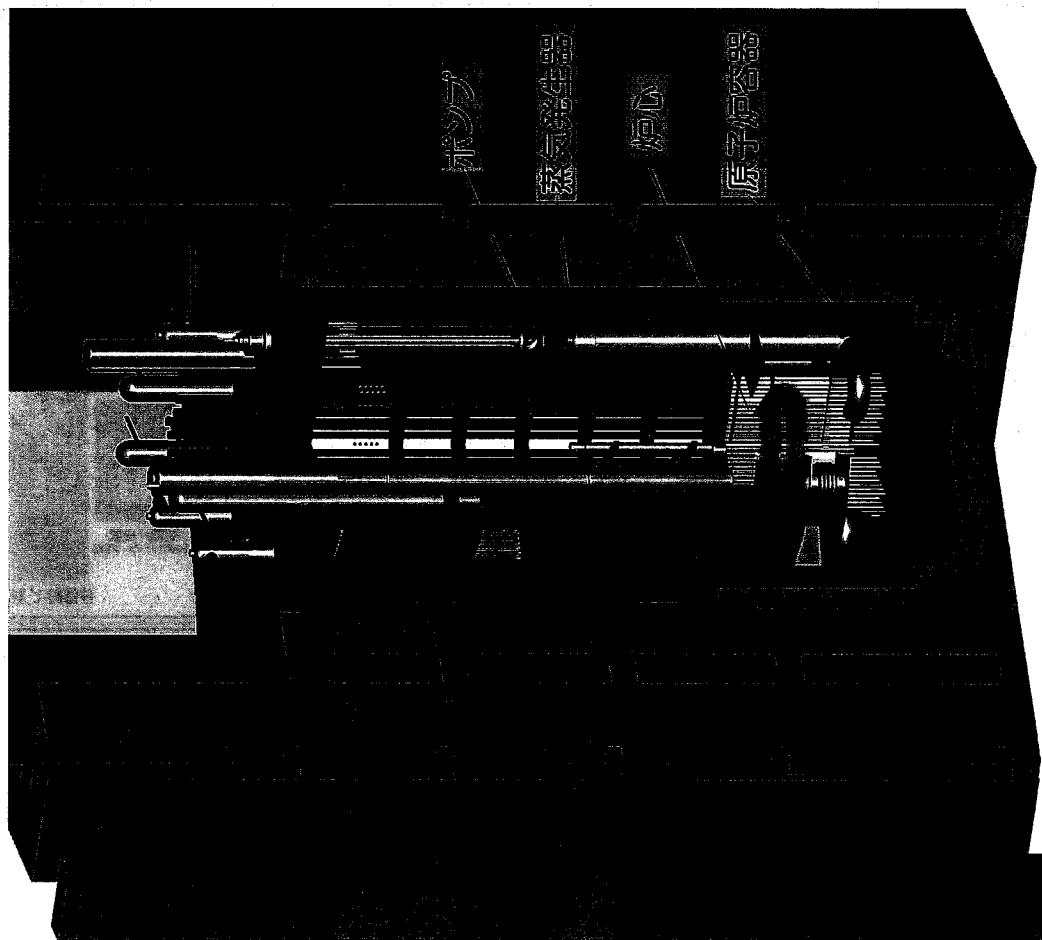


図 2.1-2 強制循環型 鉛ビスマス冷却炉（750kWe）

鉛-ビスマス冷却高速炉

【基本概念】 ○冷却材の特徴（化学的不活性、高沸点、核的特性）を活用し、システム簡素化による経済性を追求すると共に、固有の安全性を強化したタンク型鉛ビスマス冷却モジュール炉

冷却材の特長

鉛-ビスマスは水や空気と化学的反応性が低い

鉛-ビスマスは高沸点（約1670°C）

優れた核的特性
(中性子吸收断面積小、中性子反射効果大)

鉛-ビスマスは高比重
(水の約10倍)

システム簡素化による経済性向上

許容される温度上昇幅大

燃料体積比の低減が可能
(低圧換炉心)

耐震性から大出力化困難

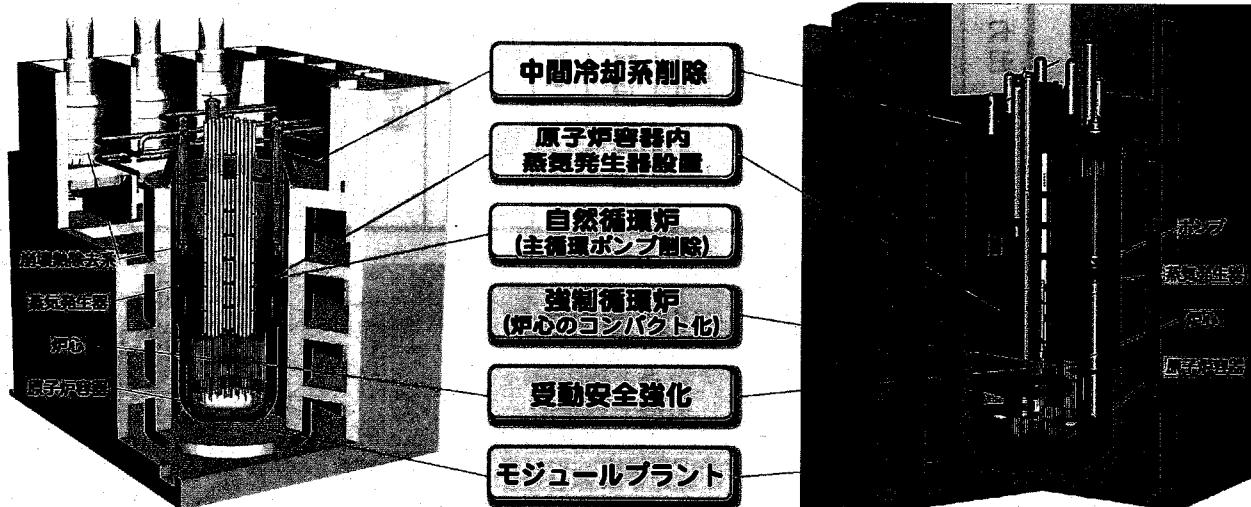
設計方針

中間冷却系削除
原子炉容器内に蒸気発生器を設置

受動安全強化
(ドップラー、制御棒軸伸び等)

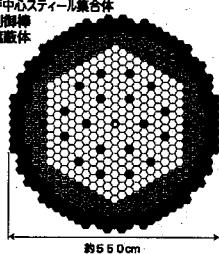
自然循環崩壊熱除去
(自然循環炉も可能)

中型モジュールプラント
(設備の共用化、量産効果、省熱効果による建設費の低減)



自然循環炉 (55万kWe)

- 内側炉心燃料集合体
- 外側炉心燃料集合体
- 炉心中心スタイル集合体
- 制御棒
- 適度体



炉心概念図例(自然循環炉)

基本仕様表

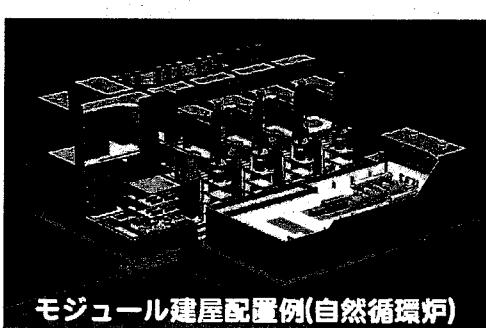
項目	自然循環炉	強制循環炉
出力	1450Mwt / 550MWe	1875Mwt / 750MWe
炉心出入口冷却材温度	465°C / 285°C	520°C / 352°C
蒸気温度/圧力	404°C / 6.5MPa	453°C / 15.7MPa
炉心 燃 料	Pu, U混合窒化物	Pu, U混合窒化物
炉心構成要素外接円径	約5.0cm	約5.3cm
燃焼度	約15.0 GWd/ton	約15.0 GWd/ton
増殖比	約1.2	約1.2
蒸気発生器	ヘリカルコイル×1	キドニー×2

強制循環炉 (75万kWe)

ドイツとの国際協力 (FZK: 材料腐食試験)



停留鉛-ビスマス中腐食試験装置(COSTA)



モジュール建屋配置例(自然循環炉)

鉛-ビスマス冷却炉の主要な開発課題

開発課題	内 容
①防食技術	鉛-ビスマス腐食特性評価、腐食制御基礎技術の開発
②免震技術	3次元免震装置の開発
③窒化物燃料	窒素15濃縮、窒化物燃料の開発
④ポロニウム	ポロニウムエアロゾル挙動等の特性把握、ポロニウム除去技術開発

図 2.1-5 鉛ビスマス中型炉 概要と R&D

表 2.2-1(1/4) 重金属中型炉 まとめと今後の課題

検討項目	達成目標、進め方	2001 年度までの達成度		2002、2003 年度の検討内容（案）	
		自＝自然循環、強＝強制循環、共＝自然・強制共通		自＝自然循環、強＝強制循環、共＝自然・強制共通	
建設費の低減（物量削減、スケールメリット追求）	2 次系削除タンク型建屋 3 次元免震中型モジュール範囲内でのスケールメリットの追求（製作性、運輸性、耐震性見通しから判断）	共 ・ SG コンパクト化 (NG 炉容器一体型 SG、FG、キドニーモデル SG) による幹容積炉心降水量 ・ 原子炉容器室 1.0m を部屋	共 ・ 自然循環炉 出力 5.5 万 kWe モード数 3 × 2 unit コスト 約 20.4 万円/kWe (メーク評価)	[H14 年度に実施] ・ コマンドコストコードによる経済性評価 (NC) [H14～15 年度に実施] ・ FC 炉コスト炉価格のためのコード改良点検出 ・ コマンドコストコードによる経済性評価 (FC) ・ サイクルコスト算出に必要なデータ整備（プラント廃止措置費、発電物発生量等システム全体の性能評価に係るデータ整備）	共 ・ SG コストコードによる経済性評価 (NC) [H14～15 年度に実施] ・ FC 炉コスト炉価格のためのコード改良点検出 ・ サイクルコスト算出に必要なデータ整備（プラント廃止措置費、発電物発生量等システム全体の性能評価に係るデータ整備）
建設費の低減（設計改善）	炉心コンパクト化	共 ・ 径方向吸収体削除 Puf 約 7ton/kWe 以下を制限に炉心特性パラメータサーベイを実施。 ・ 燃料要素の太口径化、壁比物燃料、炉心圧力損失低減 (0.015MPa) の採用により炉心の燃料体積比向上	共 ・ 径方向吸収体削除 Puf 約 7ton/kWe 以下を制限に炉心特性パラメータサーベイを実施。	[H14 年度に実施] ・ 中間評価以降に実施] ・ 燃料取扱設備詳細設計	共 ・ 中間評価以降に実施] ・ 前燃熱除去系詳細設計
燃料取扱設備の簡素化		共 ・ Na 煙の知見を参考に、経済性向上が期待できる単回転ブラング + UIS 連入型 FHM、EVS1 削除・水フル直接貯蔵方式を採用	共 ・ Na 煙の知見を参考に、経済性向上が期待できる完全自燃循環型循環熱除去系を採用	[H15 年度に実施] ・ 中間評価以降に実施]	共 ・ 中間評価以降に実施] ・ 前燃熱除去系詳細設計
前燃熱除去系の局限化		共 ・ 2 次系削除タンク型を採用し、冷却材バウンダリを原子炉容器に限定。	共 ・ 2 次系削除タンク型を採用し、冷却材バウンダリを原子炉容器に限定。	[H15 年度に実施] ・ 漏洩対策設備詳細設計	共 ・ 中間評価以降に実施] ・ 漏洩対策設備詳細設計
漏洩対策設備の簡素化		共 ・ Na 煙検討で得られた、干渉率の削減等	共 ・ Na 煙検討で得られた、干渉率の削減等	[H15 年度に実施] ・ 建屋容積削減 ・ 設備共有 ・ 燃取設備合理化	共 ・ 建屋容積削減 ・ 設備共有 ・ 燃取設備合理化
建設費の低減（標準化、習熟効果等の追求）	量産効果、QA/QC の合理化、燃料取扱設備、廃棄物処理系等の共用化、日 O/P 容量の削減等	共 ・ ユニット工法、一體吊り込み工法等の採用により建設工建屋工法の合理化	共 ・ ユニット工法、一體吊り込み工法等の採用により建設工期削減 (NC 3.5、5ヶ月、FC 3.5、5ヶ月)	[H15 年度に実施] ・ 定期検査工程の最適化を図るとともに、モジュール炉に適した運転計画を検討	共 ・ 中間評価以降に実施] ・ 所内負荷詳細検討
操業費の低減	燃焼度、発電効率、稼働率の向上	共 ・ ヒートバランスの検討を実施し、経済性上最適な発電効率を設定 ・ 定期検査工程の最適化を図るとともに、モジュール炉に適した運転計画を検討	自然循環炉 燃焼度 1.5 万 MW/t 熱効率 約 3.8 % 所内負荷 3.2 日 稼働率 約 9.3.5 %	自然循環炉 強制循環炉 燃焼度 1.5 万 MW/t 熱効率 約 4.0 % 所内負荷 3.3 % 稼働率 3.6.5 日 約 9.3.3 %	自然循環炉 強制循環炉 燃焼度 1.5 万 MW/t 熱効率 約 4.0 % 所内負荷 3.3 % 稼働率 3.6.5 日 約 9.3.3 %

表 2.2-1(2/4) 重金属中型炉 まとめと今後の課題

検討項目	達成目標（対象）	進め方	自=自然循環、強=強制循環、共=自然・強制共通又は厳しい炉型で評価	
			2001年度までの達成度	2002、2003年度の検討内容（案）
構造的具体化	全体 重金属炉全体システム計画	・重金属の特長を生かしたシステム構成とする。	共	・炉構造内に蒸気発生システムまでを包含し（タンク型）、炉容器外に冷却材が出来ないシステム構成とした。
	炉構造 炉容器（支持構造含む）	・炉心径を基本に、SGまでを内包する炉容器構造の具体化。 ・条件として厳しいは耐震。	共	・炉構造の設計。 -耐震性評価を行った支持方式を設定。 (炉容器中間支持を採用)
	炉内構造 炉心支持構造	・耐震性(GR 振入性、反応度投入)が構造を決める。 ・炉上部機構と炉心槽の結合が必要となる可能性有り。	共	・炉上部構造の設計 (炉容器支持部、炉心下部構造、支持部)
	炉心集合体 制御棒等(SASS含む)		共	・切り離し(落下型)SASS概念構造の設計 (H12は浮上型を設計)
	燃料交換機		共	・基本構造の設計。 (単回転ブレード+US進入型FHM)
	S G (放出システム含む)	・炉容器保護構造とマッチングを図った構造 ・漏洩時の影響(炉心、放出システム)評価まで含む。	自	・漏洩時対応の放出システム(設備含む)検討
	冷却系 ・ポンプ ・S G ・PRACS ・純化系	・從来の知見(ロシア等)により基本設計を実施。 ・設計されたものについて、課題を把握する。	強	ヘリカル型S G設計(炉容器一体型S G) (シユラウド健全性評価含む) キドニー型S G設計(二分割漏形断面 SG) (シユラウド健全性評価含む)
	ポンプ(大容量 222. 6m ³ /min)		強	・基本設計を実施(調査データを基本)。 (例: インペラ専用 20m/s=ロシアデータ)
	炉内流路(配管 or ダクト) ポンプ出口 488相当		強(自)	・配管(ダクト)設計実施(調査データを基本)。 (例: 流速 4m×3m/s=配管設計)
	PRAGS		共	・鉛ビスマス自然循環方式を設計。
酸素濃度制御系			共	・純化装置設計(コールドトラップ方式) ・酸素濃度制御の有効性を流動解析で確認。 (自然循環炉、2次元熱流動解析、水素添加方式)
	BOP タービン系 格納系設備	・重金属の特長を生かした設備設計。 =漏洩関連設備の合理化等 ・標準的なものは、他形式炉等を参照。	共	・BOP設備について概略設計実施。 -建物計画、配管計画実施
BOP タービン系 格納系設備			共	・合理的BOP設備の計画。(H15) (ex モジュール効果反映、漏洩設備合理化)

表 2.2-1(3/4) 重金属中型炉 まとめと今後の課題

検討項目	達成目標、進め方	2001 年度までの達成度		自 = 自然循環、強 = 強制循環、共 = 自然・強制共用	
		2002、2003 年度の検討内容（案）		2002、2003 年度の検討内容（案）	
確率論的安全機能	・重金属冷却炉に適用する機器故障率の設定は、既往設計例のデータを参考として外挿するものとして、炉心損傷発生頻度 $10^{-6}/\text{炉年未満}$ を達成できることを示す。	共 ・炉心損傷発生頻度については未検討であるが、動的機器がないため炉心損傷発生頻度は強制循環方式に比べ自然循環が有利な見込みである。	共 ・独立 2 系統の能動的炉停止系を設置すると共に、受動的炉停止系としてキューリー一点式 SASS (落下型) を付加し、受動的炉停止能力を強化した。 ・炉心仕様のパラメータサーベイを実施し、炉心性能だけでなく、安全性にも留意した炉心仕様を選定した。	共 ・炉心損傷発生頻度以降に実施 ・落下型 SASS の構造具体化	共 ・炉心損傷発生頻度
原子炉停止機能	・受動安全機構として SAS を付加し、受動的な炉停止能力を強化する。また、重金属冷却材の特徴として、沸点が高いことによる温度許容幅が Na 炉よりも拡大できることや、流体慣性が Na よりも大きく流量変動時の事象進展挙動が緩やかとなる設計が指向できること等を活用し、整水炉のように 30 分程度の短時間で炉心損傷に至らないシステムの追求可能性についても検討する。	共 ・炉停止後の一回復熱除去系として、自然循環型前段熱除去系 (PRACS、Po-Bi 冷却) を採用し、100% × 3 系統 (PRACS) 構成で Na 炉と同等の信頼性を確保した。	共 ・前段熱除去系とともに、動的機器の不動作を想定しても炉心冷却が可能な設計とする。また、事故管理方策により、その機能回復が図れる設計とする。	共 ・中間評価以降に実施 ・前段熱除去系詳細設計 ・コンクリート冷却系詳細設計	共 ・中間評価以降に実施
崩壊熱除去機能	・崩壊熱除去機能について、多重性あるいは多様性を有する炉心損傷事象に対する炉心損傷の事象性移過過程を検討し、重金属冷却炉に適用可能な再臨界回避対策を具体化する。	共 ・固有安全により炉心損傷を防止する炉心損傷防止強化型を目標として評議を実施。その結果、安全性に留意した炉心仕様を採用するとともに適切な前倒棒設計を採用することにより炉心損傷を防止する可能性を追求可能な見通しを得た。	共 ・中間評価以降に実施 ・代表事象の選定 ・SGTR 時の蒸気停炉進入量検討及び格納の考え方整理 ・温冷却事象 ・前段熱除去系非対称運転等の炉容器内多次元流動に係る評議	共 ・中間評価以降に実施	共 ・中間評価以降に実施
BDBE 再臨界回避	・代表的な炉心損傷事象に対し炉心損傷の事象性移過過程を検討し、重金属冷却炉に適用可能な再臨界回避対策を具体化する。	共 ・ATWS 時の材料腐食に対する調査を実施し、材料の使用条件 (鋼種、温度、流速)、腐食速度を設定。 ・ATWS 時の被覆管健全性見通しの確認	共 ・冷却材中酸素濃度制御技術に関する調査を実施し、材料の使用条件 (鋼種、温度、流速)、腐食速度を設定。 ・ATWS 時の被覆管健全性見通しの確認	共 ・中間評価以降に実施 ・材料腐食試験から得られた知見の反映	共 ・中間評価以降に実施
ATWS 時の材料腐食対策	・ロシアで開発された冷却材中酸素濃度制御技術を採用する。	自 ・系統全体を適切な酸素濃度に制御する。	自 ・水素と酸素の反応を考慮した酸素濃度制御性把握のために、2D 热流動解析を実施し、見通しがあることを確認。	自 ・詳細化反応 ・3 次元熱流動	自 ・中間評価以降に実施
酸素濃度制御性	・自然循環の課題の一つである運転性 (起動、停止、外部影響) の見通しを得る	自 ・起動用ヒートバッフルの採用 ・現実的な制御棒駆動速度範囲内の起動計画検討	自 ・起動計画の妥当性確認 ・停止計画定及び見通し確認	自 ・中間評価以降に実施	自 ・中間評価以降に実施
運転性	・運転員の作業環境及び外部環境への影響見通し	共 ・冷却材中の Po 除去設備なし、カバーガス中の餘去設備のみで成立性を検討。ロシア IPE における SIBR の評価と同様の手法を JNC 規定に適用し、見通しがあることを確認。	共 ・Po エアソリューション評価 ・ソースターム評価	共 ・Po エアソリューション評価	共 ・中間評価以降に実施
作業環境 (Po-210)					

表 2.2-1(4/4) 重金属中型炉 まとめと今後の課題

検討項目	達成目標	進め方	2001 年度までの達成度		2002、2003 年度の検討内容（案）	
構造健全性 (材料)	環境効果（主に耐腐食）の把握 防食技術開発 流速効果の把握 構造設計指針への反映	・重金属炉の成立性を左右する課題かつ開発試験含む）に長期間かかる。 ・国産材についての耐腐食性試験を実施。 ・防食技術の調査と効果の把握	共	・詳細は添付資料参照。 ・腐食データの調査 ・国産材の試験中（各研究機関と共に） ・防食技術の調査 ・流速効果の調査（ポンプインペラ速度含む）	共	・詳細は添付資料参照。 ・国産材の腐食データ取得（2005 年目途）。 （共同研究機関：JZK、電研、東工大） ・各種調査は継行
耐熱性	温度制御	・重金属炉の特徴を勘案、見通しをつける。 ＝20t 鋼＝熱膨張率小 ＝Pb-B＝熱伝導率低、熱伝導率低、流速低 ・厳しいと考えられる温度成層について健全性評価を行い見通しを立てる。 ・熱温渡、ゆらぎ等は Na 炉の結果を参考にする。（基本的に重金属炉の方が楽と考える） ・構造基準高度化は Na 炉と併用。 （材料の環境効果除外）	強	・熱流動解析を実施し温度勾配を把握。	強	・熱流動解析で得られた温度勾配で、炉壁の健全性評価を実施。（H15）
	温度ゆらぎ 定常温度分布、熱過渡				共	・Na 炉のストライピング評価を参考。（H15）
	構造設計基準の高度化				共	・SG ジュウド部の定常温度分布に対する健全性評価を実施。（ジュウド層数に対する緩和効果把握）
					自	必要に応じ、ジュウド層数の見直し。
					強	・材料、冷却材の特性によるパラメータ的評価手法整備（予定）
耐震性	耐震成立性 (座屈強度・C.R.挿入性・ スロッシング等)	・重金属炉の基本課題である。 ・炉上部機構の支持方法を含め、検討する。 ・径の大きな容器で検討を行う。 ・スロッシングが構造物（炉容器、UIS 等） 与える効果を把握する。	強	・M6.5 条件成立性見通し（概略）をたてた。 (条件 = 三次元免震、炉容器中間支持)	強	・見通しの確認。 ・強地盤耐震条件見直しの場合の影響評価 (対策、板厚増加、支持位置再考、径縮小=出力) ・3 次元免震性能確認（建物見直し）
					共	・スロッシング高さを算出し、炉構造上部フレーム寸法で問題ないことを確認
					共	・強地盤対応に於する見通し検討 (ex: I.S 強度検討等)

3. ロードマップの検討

鉛ビスマス重金属炉の開発について、必要な開発課題を整理し、それをロードマップの形にまとめた。なお、ロードマップにおいて開発のターゲットとなる時期やプラントを設定しているが、これらは開発手順や必要な許認可事項を明確にするためのもので、本検討において仮に設定したものである。今後、開発時期やプラント規模が明確になれば、それに合わせた見直しを行う。

(1) 全体計画

全体計画を、表3-1に示す。我が国にては、重金属炉の冷却材である鉛ビスマスについてのデータや取り扱った実績がほとんど無い。このため、鉛ビスマスの基本物性から整備する必要がある。また、鉛ビスマスは腐食性が強いと言われており、構造材への環境効果を十分に把握する必要がある。さらに、中性子照射によってポロニウム-210 (α 線源) が生成するが、これについて冷却材中からの捕獲精製に関するデータがない。これらの基礎的な開発を、基礎試験で実施する。基礎試験は二段階に分け、第一段階でプラント成立性に係わる腐食性についての確認を行い、その状況を踏まえ第二段階のプラント設計に必要な技術開発に進む。

以上の基礎試験の後、プラントを構成する機器やシステムの開発を進める。鉛ビスマスについての経験が少なかったため、ここでの開発は要素試験的なものから開始し、最終的にプラント機器の数分の一レベルの確証試験に進み、設置認可や工事認可に必要なデータ取得へと進む。

実用炉に向かってはこれまで鉛ビスマスの経験がないため、試験炉、原型炉の手順を踏んで経験を積んでゆくのが妥当と考えられる。

鉛ビスマスについては経験が無く基礎的な開発となるが、鉛ビスマス自身は化学的に安定な物質であり、基礎的試験や小型試験は容易に行えるという特徴がある。

(2) 機器開発

上述するとおり、鉛ビスマスの経験がないため、機器開発も要素試験のレベルから進める必要がある。このため、要素的な試験から開始し、これに基づいて次ぎの段階に進める計画としている。鉛ビスマスの場合、熱的な特性はナトリウムが参考となるが、密度（重量）、材料腐食はナトリウムとは大きく異なる。特に、腐食に関しては材料開発と並行して進める必要があり、開発に要する時間もこの材料開発に掛かる時間が制限となると思われる。本計画は、材料の基本構成（材質と概略成分）は、その時点で決まったものとして計画しており、材料の選定の時期が遅れる場合は、それに従って計画も延びることになる。

材料については表3-4に示すとおり高速炉用に開発された国産材についての腐食特性を取る試験は進行中であり、ここでの試験から、材料開発の必要性がわかる。

強制循環型と自然循環型の違いは、機械式ポンプである。機械式ポンプの場合、インペラ部や液中軸受け部は、特に腐食や損耗の効果が大きいものであるため、材料開発との相関が大き

い項目である。

(3) システム・評価手法の開発

システム的な開発課題として重要なものは、鉛ビスマス中の酸素濃度制御を含む環境影響因子の制御である。現状は小規模のループや容器での研究は行われているが、狭隘部を含む複雑なシステムについての試験は行われていない。また、材料試験ループでの酸素濃度制御の実態からも、相当に難しい課題であることが分かってきており、研究開発の主要な課題となる。

鉛ビスマス中のポロニウムの除去については、実証試験の難しさはあるが、手法としては上記ほど難しい問題ではないものと思われる。

以上と合わせて、必要なコードの開発も行われる。特に、上記に対応する評価を行う3次元熱流動（化学成分濃度分布を含む）評価コードの開発が必要となる。

(4) 現在の材料開発計画

現状の材料開発計画は、表3-4の通りである。

現在実施中の計画は、国産材に対する鉛ビスマスの耐腐食性を確認する試験であり、FZK（独：カールスルーエ研究所）との共同研究を基本として進めている。この試験は、停留鉛ビスマス中での試験と、流動中での試験に大きく別れている。

停留中での材料試験は、鉛ビスマス中酸素濃度制御方法の検討も含めて実施されたもので、本年度で浸漬試験は終了し、次年度半ばにかけて評価が行われる。この結果は、次年度の設計に反映される。腐食の影響が大きい場合は、設計への反映も行うものとする。

流動環境中の試験は、次年度から開始されるが、まず、材料試験ループの酸素濃度制御手法を確立し、これを基礎に温度分布制御等が行えるように計画を行う。これらの環境設定方法は、停留試験の結果からも相当難しいもので、この手法は本設計にも反映することとなる。

表3-1 鉛-ビスマス冷却炉のロードマップ - 全体 -

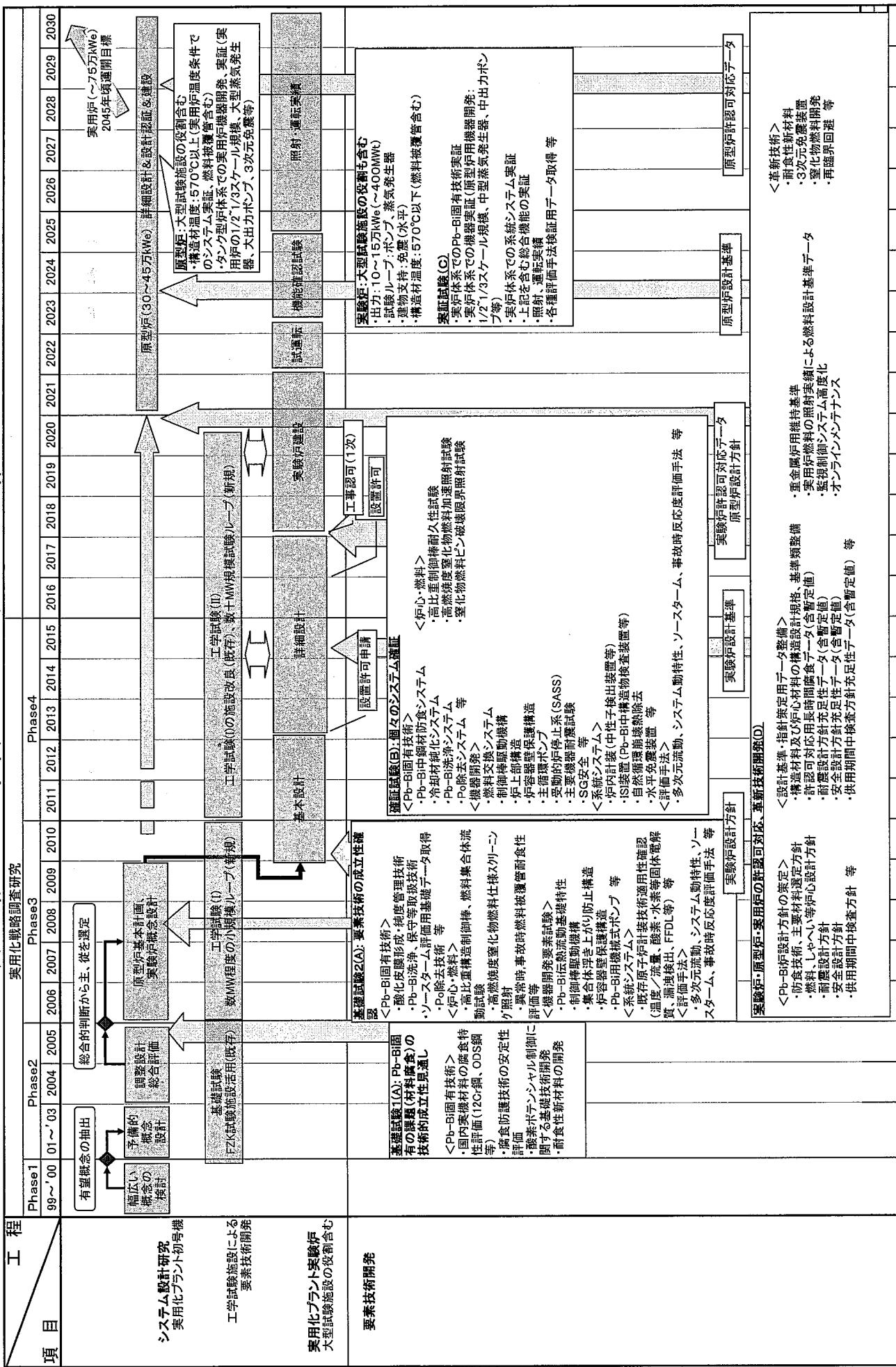


表3-2 重金属冷却炉の要素技術開発 一 機器開発 一

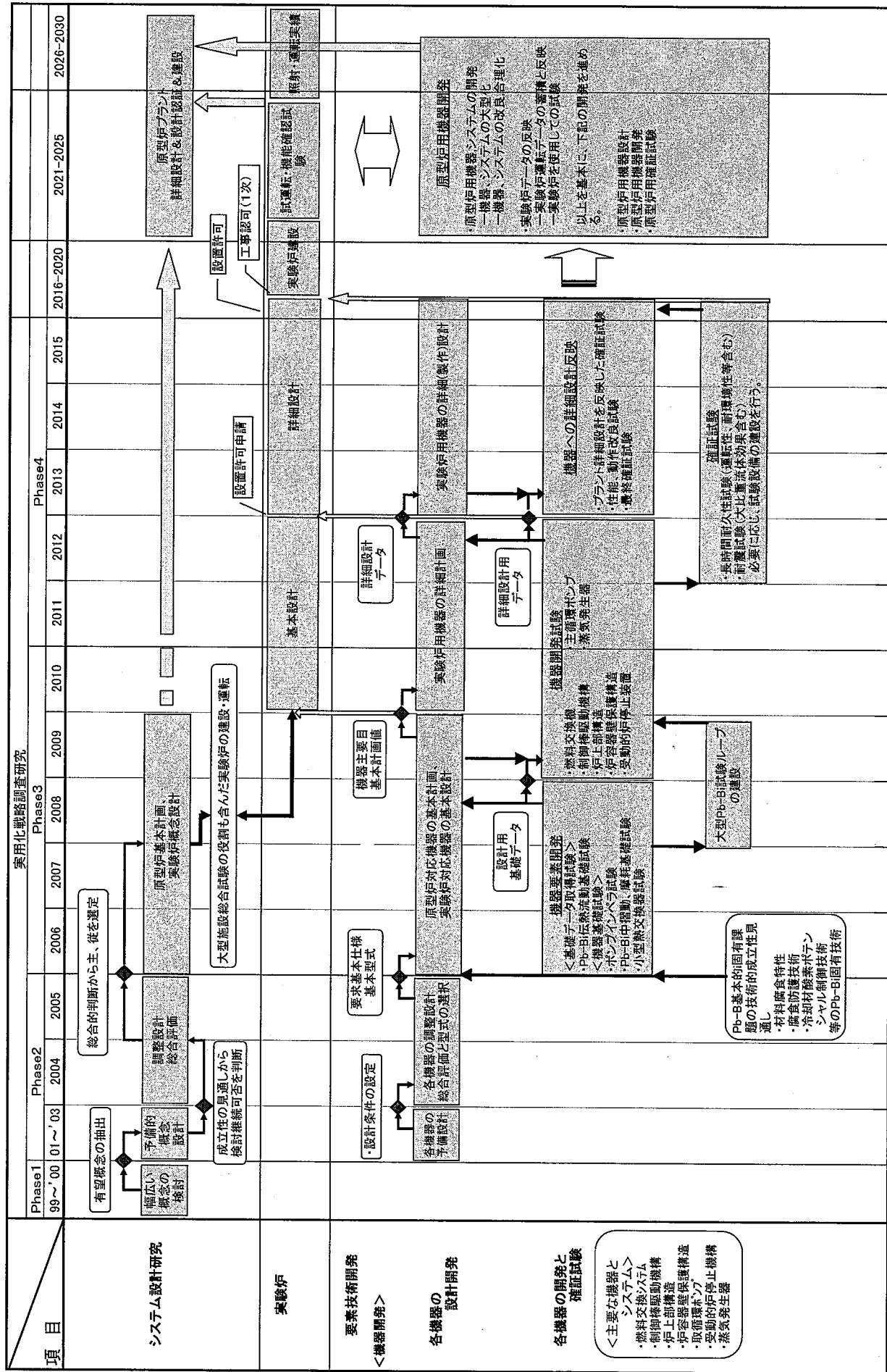


表3-3 重金属冷却炉の要素技術開発－システム・評価手法－

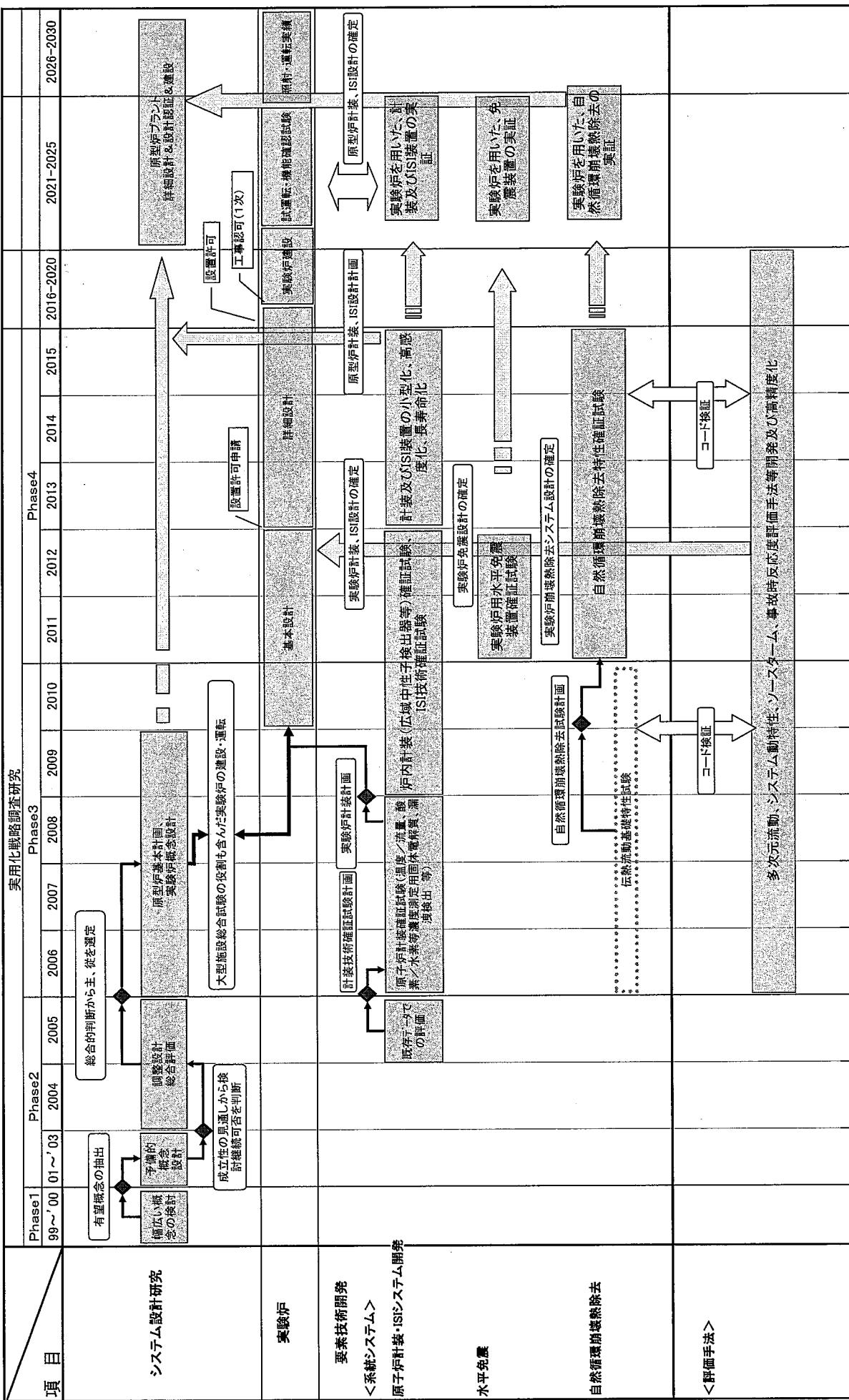


表 3-4 国産 FBR 材の鉛ビスマス中 耐腐食性確認試験

試験機関	試験項目	取得情報/データ	2001JFY	2002JFY	2003JFY	2004JFY	2005JFY
FZK	A. 停留環境耐食性 確認試験: COSTA基	①主用国産材耐食性(含 温度依存性) ②FZK防食技術耐食性確 認 ③LBE腐食動的性質 ④試験装置温度制御能 力 ⑤試験装置酸素制御機能 (ガス分圧制御)	COSTA4基		供試材 : 316FR、12Cr、ODS 及び各表面改質材 試験温度 : 500、550、600°C for 316FR、12Cr、+650°C for ODS 酸素濃度 : 10 ⁻⁶ wt%	供試材 : 316FR、12Cr、ODS 及びODS表面改質材 試験温度 : 550°C for 316FR、12Cr、650°C for ODS 酸素濃度 : 10 ⁻⁴ 、10 ⁻⁸ wt% 試験時間 : 800、2,000、5,000、10,0000 h	
	B. 流動LBE中耐食性 確認試験: CORRIDA	①流動LBE中耐食性 ②FZK防食技術耐食性確認 ③LBE腐食動的性質 ④腐食流速依存性 ⑤温度分布依存性 ⑥系統温度制御性 ⑦系統酸素制御機能(含 酸素センサー性能)			CORRIDA: 4種[550°C, 10 ⁻⁶ wt%, 2m/s, ~10000h] CORRIDA: 4種[550-650°C, 10 ⁻⁶ wt%, 0.5-3m/s, ~10,000h]	CORRIDA: 4種[550-650°C, 10 ⁻⁶ wt%, 0.5-3m/s, ~10,000h] CORRIDA: 4種[550°C, Δt=200°C, 10 ⁻⁶ wt%, ~10000h]	
東工大 (三井造船)	C. ループ(系統)運 転・制御確認試験	①系統制御技術開発課題 ②酸素制センサー開発 (含酸素センサー) ③各種制御技術の確立				ループ運転初期課題の摘要と解決方策 ①系統内諸元(温度、温度差、流速)制御 ②系統内酸素濃度制御、計測 ③系統内不純物除去 ④試料取扱(洗浄、観察、分析)	
関西大/ 名古屋	D. 主用元素LBE中 溶解度評価試験	①ロシア提供式信頼性確 認 ②溶解度及ぼす環境因子 評価 ③化学的溶解度(液体金 屬腐食)促進/抑制因子			溶解度データ調査/予備実験(極低酸素濃度下Fe溶解度測定)	評価元素: 合金元素(Fe, Cr, Ni, Mn)、添加元 素(Nb, Ti)、難溶解元素(Mo, W)、 軽(ガス系)元素(O, C, Si) 酸素濃度: 10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁸ wt%	
電力中央 研究所 (柏江)	E. 停留環境耐食性 /防食技術 確認試験	①停留環境耐食性 ②回転板における浸食発 生目視・確認試験(2002-)			予備試験 試験条件等は未定		

4. 耐震健全性

実用化戦略調査研究では「レファレンス S2」がレファレンス地震条件と暫定されているが、鉛ビスマス炉の耐震設計裕度を確認する観点から、強地震条件(M7.1相当)に対する自然循環炉及び強制循環炉の耐震性検討を行う。図 4.1-1 に自然循環炉の原子炉構造概念図、図 4.1-2 に強制循環炉の原子炉構造概念図を示す。強制循環炉は、SG の耐熱性確保のためスタンドパイプ・シュラウドが 3 層構造となり、原子炉容器径が $\phi 10.8\text{m}$ になっている。免震装置は上下 1Hz の 3 次元免震装置を適用する。

4.1 強地震耐震条件の影響評価

(1) 制限条件の設定

評価条件を表 4.1-1 にまとめて示す。各制限条件の設定根拠は以下の通りである。

- a. 炉心支持板の上下応答加速度は 9.8m/s^2 以下とする。

上下加速度が大きいと集合体の浮き上がり防止のラッチスプリングのバネ力を大きくしなければならなくなる。燃料交換機の挿入引抜力の容量増大への負担を軽減するため、制限値を 9.8m/s^2 とした。なお、本制限値は耐震評価上の目安であり、設計により変わり得る値である。

- b. 投入反応度は、制御棒引抜きと炉心のコンパクションによる投入反応度を 1\$ 以下に抑える。なお、各循環方式の燃料のコンパクション 1mm当たりの投入反応度、制御棒引抜き量 1mm当たりの投入反応度は下記の通りである。

・自然循環炉	： 燃料のコンパクション 1mm当たりの投入反応度	$: 8\phi/\text{mm}$
	制御棒引抜き量 1mm当たりの投入反応度	$: 3\phi/\text{mm}$
・強制循環炉	： 燃料のコンパクション 1mm当たりの投入反応度	$: 7\phi/\text{mm}$
	制御棒引抜き量 1mm当たりの投入反応度	$: 3\phi/\text{mm}$

反応度投入については、上下動による制御棒引抜き及び炉心のコンパクションに伴う反応度に対して、燃料の健全性（燃料が溶融しない）を確保する必要がある。燃料最高温度を燃料溶融温度以下とするには、主炉停止系スクラムを想定した場合で約 105ϕ 以下、後備炉停止系スクラム（主炉停止系スクラム失敗重ね合わせ）を想定した場合で約 101ϕ 以下とする必要がある。以上から、反応度投入については、許容値を 1\$ としている。

- c. 原子炉容器の座屈は、高速増殖実証炉高温構造設計方針(案)(DDS)で定められている座屈の評価を満足させる。
- d. FHM の制限は、S1 地震時に UIS 切込部と FHM とが衝突しないことを目標とした。
(変位 30mm 以下)
- e. 制御棒挿入性は、UIS 下端と炉心槽頂部の水平方向相対変位を 15mm 以下に制限する。
(制限値はナトリウム炉の値を準用)
・制御棒挿入性については、水平地震時に制御棒と制御棒案内管の軸心がずれても、制御棒

と制御棒案内管との3点拘束によりスクラム途中でスティックしないように設計する。

そのため、炉心（制御棒案内管）とUIS(CRD上部案内管)の水平相対変位については、以下を満足する必要がある。（ナトリウム炉の値を準用。）

「 $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 < \delta_c$ 」を満足する $\delta_2 = 20\text{mm}$ に、余裕を見込み $\delta_2 \leq 15\text{mm}$ を制限とする。

δ_1 ：据付誤差。各機器の製作精度及び据付精度を考慮した、UIS下端と炉心槽頂部位置間の水平方向変位である。実証炉設計では 12mm と想定した。原型炉の実績値はこの $1/2$ であった。但し、RV径が大きいため原型炉より大きくなると推定し 10mm と設定した。 $(12\text{mm} \times (1/2) \times (9.70\text{m}/7.06\text{m}) \approx 10\text{mm})$

δ_2 ：水平地震時による炉心とUISの相対変位。

δ_3 ：炉心総偏りとして、 20mm と暫定。

（ハットギヤップ寸法 $0.7\text{mm} \times (\text{CR集合体～炉心槽のギヤップ数}+1) = 0.7\text{mm} \times (27+1) \approx 20\text{mm}$ ）

δ_4 ：カバーガス部に位置する機器の周方向温度分布や、遮へいプラグ上板等の温度分布等により生じる、UIS下端位置に換算した熱変位。実証炉設計での設定値 6mm を制御棒包絡円径に比例するとして補正し、 10mm と設定。

δ_c ：炉心（制御棒案内管）とUIS(CRD上部案内管)の水平相対変位。CRD構造に依存するが、暫定値として 60mm と設定。

(2) 地震応答解析及び評価

a. 地震条件は、強地震及びレファレンスS2の条件に対して検討を行う。

(a) レファレンスS2の床応答曲線を、図4.1-3に示す。

(b) 強地震条件

i. 水平動の強地震条件は、簡易的にレファレンスS2の床応答曲線補正係数を求め、強地震条件用水平動の床応答曲線を推定する。

イ 地震動スペクトルの比較

図4.1-4に水平動に関してレファレンスS2と耐専スペクトル（1996年度耐特委スペクトルとも呼ばれ、地震観測記録に基づく、解放基盤表面における水平地震動及び上下地震動の平均応答スペクトルの評価法をコントロールポイントを用いて表現した標準応答スペクトル、M7.1、等価震源距離 $X_{eq}=10\text{km}$ 、断層方向考慮）を比較したものを示す。表4.1-2には両者のコントロールポイントの値を示す。また、表4.1-3及び図4.1-5には耐専スペクトルとレファレンスS2の速度比を示す。これより免震構造である建屋の周期である1秒から2秒での両スペクトルの比を求めた。それを以下に示す。

「速度スペクトル比」

1.4程度 ($V_s=1500\text{m/s}$) : 硬質地盤

1.8程度 ($V_s=1000\text{m/s}$)

2.3程度 ($V_s=700\text{m/s}$) : 軟質地盤

- i) レファレンス S2 の床応答曲線を基にした強地震検討用水平動の推定
補正係数は地盤のせん断波伝播速度に依存するが、レファレンス S2 は硬質地盤を対象にしていることから、ここでは $V_s=1500\text{m/s}$ の場合の速度スペクトル比 1.4 を丸めて 1.5 を用いることとする。設定した床応答曲線を図 4.1-3 の上段に示す。
- ii. 上下動の強地震条件は、簡易的にレファレンス S2 の床応答曲線補正係数を求め、強地震条件用上下動の床応答曲線を推定する。

iv) 地震動スペクトルの比較

発電所建設できる地盤を条件として、耐専スペクトルが定義されている S 波速度 (V_s) 700m/s 以上の岩盤を想定する。 V_s パラメータは水平動と同様とするが、上下動の場合には地盤剛性の指標として V_s よりも P 波速度 (V_p) が適当であるので、JEAG4601-1987 の例題に用いられている地盤の密度、ポアソン比により V_p 値を算定してパラメータとした。

【マグニチュード(M) : 7.1】、【等価震源距離 (Xeq) : 10km】

【S 波速度 $700, 1000, 1500\text{m/s}$ に相当する地盤の P 波速度 : $1800, 2400, 3400\text{m/s}$ 】

【上下地震動に対する地盤の卓越周期 (Tp1) : 5s】

図 4.1-6 にレファレンス S2 と上下耐専スペクトル ($M7.1$, 等価震源距離 $X_{eq}=10\text{km}$) の比較を示す。表 4.1-4 には両者のコントロールポイントの値を示す。また、表 4.1-5 及び図 4.1-7 には耐専スペクトルとレファレンス S2(上下動)の速度比を示す。これより上下免震層による上下方向固有周期 0.3 秒以上を対象周期としたとき以下の係数が得られる。

「速度スペクトル比」 1.25 ($T=0.8\text{s}, V_p=3400\text{m/s}$)、($V_s=1500\text{m/s}$)

1.80 度程 ($T=0.8\text{s}, V_p=2400\text{m/s}$)、($V_s=1000\text{m/s}$)

2.35 度程 ($T=0.8\text{s}, V_p=1800\text{m/s}$)、($V_s=700\text{m/s}$)

v) レファレンス S2 の床応答曲線を基にした強地震検討用上下動の推定

補正係数は地盤の P 波速度に依存するが、レファレンス S2 は硬質地盤を対象にしていることから、ここでは $V_p=3400\text{m/s}$ の場合の速度スペクトル比 1.25 を用いる。

設定した床応答曲線を図 4.1-3 の下段に示す。

b. 原子炉容器及び炉心支持構造の耐震性（自然循環炉）

自然循環炉の原子炉容器及び炉心支持構造を対象に、地震応答解析を行い、耐震性を評価する。

(a) 解析モデル

i. 主要形状・材料

- ・内径 : 10.1m (上部)、 7.8m (下部) 　・軸長 : 25.5m 　・材料 : 12Cr 系鋼
- ・板厚 : 50mm (ナックルより上の上部胴)、 40mm (下部胴及び下部鏡)
- ・炉心支持構造物 : 炉心支持板に補強リブを設けて補強する。
- ・炉心支持構造底板板厚 : 100mm 、補強リブ (高さ : 約 1m 、板厚 : 50mm)

ii. 上下応答解析モデルを図 4.1-8 に示す。解析は汎用 FEM 解析コード FINAS を用いた。

iii. 水平応答解析モデルを図 4.1-9 に示す。解析は汎用 FEM 解析コード FINAS を用いた。

(b) 解析結果 ; 表 4.1-6

原子炉容器の固有振動数は上下が 4.97Hz、水平が 3.58Hz である。

(c) 評価結果

i. 炉心支持板の上下応答加速度を、表 4.1-7 に示す。レファレンス S2 及び強地震条件とも制限条件以下となる。

ii. 投入反応度を、表 4.1-8 に示す。レファレンス S2 及び強地震条件の両者とも制限条件を満足できる見通しである。

iii. 原子炉容器の座屈評価を、表 4.1-9 及び表 4.1-10 に示す。同表よりレファレンス S2 及び強地震条件の両者とも座屈は防止できる見通しである。

以上より、自然循環炉は、レファレンス S2 及び強地震条件に対して、耐震性確保の見通がある。

c. 原子炉容器及び炉心支持構造の耐震性（強制循環炉）

強制循環炉の原子炉容器と炉心支持構造を対象に地震応答解析を行い、耐震性を評価する。

(a) 解析モデル

i. 主要形状・材料

- ・内径 : 10.8m ・板厚 : 50mm ・軸長 : 21.3m ・材料 : 12Cr 系鋼
- ・炉心支持構造物 : 炉心支持板に補強リブを設けて補強する。
- ・炉心支持構造底板 板厚 : 100mm、補強リブ (高さ : 約 1m、板厚 : 50mm)

ii. 応答解析モデル

上下応答解析モデルを図 4.1-10 に示す。水平応答解析モデルを図 4.1-11 に示す。いずれも、解析は汎用 FEM 解析コード FINAS を用いて、床応答解析を行う。

(b) 解析結果

結果を表 4.1-11 示す。原子炉容器の固有振動数は上下 5.29Hz、水平 3.92Hz である。

(c) 評価結果

炉心支持板の上下応答加速度結果を、表 4.1-12 に示す。レファレンス S2 及び強地震条件の両者とも制限条件以下となる。投入反応度結果を、表 4.1-13 に示す。レファレンス S2 及び強地震条件の両者とも制限条件を満足できる見通しである。

原子炉容器の座屈評価は、発生応力が最も大きくなる原子炉容器据付位置近傍部に着目して行った。表 4.1-14 に座屈評価結果を示す。同表よりレファレンス S2 及び強地震条件の両者とも座屈は防止できる見通しである。

以上より、強制循環炉は、レファレンス S2 及び強地震条件に対し、耐震性が確保できる。

d. UIS の耐震性

自然循環炉及び強制循環炉を対象に UIS の地震応答解析を行い、耐震性を評価する。

(a) 解析モデル

図 4.1-12 に自然循環炉、図 4.1-13 に強制循環炉のコラム型 UIS の解析モデルを示す。

解析モデルは下記の考え方に基づいて作成した。

- CRD 案内管板厚をパラメータとする。ただし、水平板枚数は 10 枚とする。
- バッフルプレートは最下端から上へ 1.2m の位置から液面の下 1.7m の間に設置する。
- UIS 切込部に隣接する案内管の板厚は 10mm で固定する。
- ホールドダウンプレートから 1 段目のバッフルプレートまでの各案内管の板厚は 10mm。

(b) 評価結果

図 4.1-14 に固有振動数、図 4.1-15 に自然循環炉の解析結果、図 4.1-16 に強制循環炉の解析結果を示す。制御棒挿入性を満足させるためには UIS 下端と炉心槽頂部の水平方向相対変位を 15mm 以下にする必要がある。強制循環炉のレファレンス S2 波の条件で CRD 案内管板厚が 40mm のとき UIS 下端の水平方向変位が制限値 15mm をぎりぎり下回っているほかは、いずれの地震条件に対しても自然循環炉及び強制循環炉の両者とも制限値 15mm を大きく上回っている。

鉛ビスマス冷却炉の場合、冷却材比重が大きく付加質量が大きいこと、UIS の軸長が長いこと及び固有振動数が低く応答加速度が大きくなることから水平方向変位が大きくなっている。CRD 案内管板厚としては 20mm 程度が現実的な寸法（20mm を超えて製作は可能であるが、低コストな冷間押し出しによる製作方法では $\phi 200$ 程度の円筒の場合、板厚 20mm 程度が限界である。また、20mm を大幅に超える板厚は直径と板厚のバランスが良くない。）であるが、今回の解析の結果から、片持ち梁タイプのコラム型 UIS では制御棒挿入性が厳しいことが分かる。

(c) 結論

UIS の耐震成立性に対しコラム型 UIS 方式では成立性が厳しい結果が得られた。UIS の耐震成立性を満足させるためには UIS と炉心側を結合させるなどの対策が必要である。

e. FHM の耐震性

FHM について、形状検討を行った。FHM の耐震性でクリティカルなのは、FHM が UIS のスリット部に入っている状態で地震が発生した場合の FHM と UIS の衝突の有無である。そこで、FHM の地震時の変位を求め、その耐震性を確認する。ここでは円筒胴部が長く条件が厳しいと想定される自然循環炉についての FHM を対象に解析を実施した。

(a) 検討条件

i. 制限条件：S1 地震時に UIS 切込部と FHM とが衝突しないことを目標とする。

（変位 30mm 以下）

ii. 地震条件：地震波の加振方向は、応答変位が大きくなると想定される FHM の水平面外方向を入力条件とした。解析に使用する S1 地震条件における床応答曲線を、図 4.1-3 の上段に示す。

(b) FHM の振動解析モデル

FHM(パンタグラフ式)は、アームを伸ばした状態で地震が発生した場合を検討した。FHM の支持方式として、本体円筒胴のデッキ上端据付部についてはピン支持条件とし、デッキ下端部において水平方向拘束のピン支持条件として解析を行った。

本体円筒胴の外径は $\phi 940\text{mm}$ とし、成立性を見通すため板厚をパラメータとした。強度部材としてモデル化した本体円筒胴、アーム及び収納ケースの構造についての重量は重量密度として入力している。また、鉛ビスマス接液部の鉛ビスマス排除重量及び、強度部材として考慮していない構造材の重量は負荷重量としてモデル化した。ここで、解析モデルは次の図、表を参照。

解析コード	: FINAS	解析モデル(梁モデル)	: 図 4.1-17
形状データ	: 表 4.1-15	物性値	: 表 4.1-16
付加重量	: 表 4.1-17	地震条件 (S1)	: 図 4.1-3

(c) 解析結果

本体円筒胴板厚を 30mm とした場合における各方向の支配振動モードを図 4.1-18 に示す。

同じく、本体円筒胴板厚を 30mm とした場合の応答変位を図 4.1-19 に示す。また、板厚及び地震条件をパラメータとした場合の結果を以下に示す。

- ・水平面外方向の支配振動モードの固有振動数 : 図 4.1-20
- ・S1 地震に対する水平面外方向の最大応答変位 : 図 4.1-21

固有振動数はいずれの板厚でも 1Hz 以下で、床応答曲線から入力加速度が比較的高い領域である。このため、円筒胴板厚を厚くしても固有振動数を上げられず、図 4.1-21 に示す最大応答変位から分かるように板厚を増やしても最大応答変位が数百 mm となり、成立見通しがない。

(d) 結論

自然循環炉の FHM はいずれの地震条件に対しても円筒胴の水平変位量の制限を満たせず、現状の構造では成立性見通しがない。また、強制循環炉の FHM においても同様で、自然循環炉よりも軸長が短いが、板厚を厚くしても水平面外変位は数百 mm 程度発生すると予想されるので、成立見通しがなく、別途構造検討が必要である。

(3) その他の検討

a. 上吊り方式原子炉容器の耐震成立性

(a) 概要

平成 13 年度に、制御棒挿入性(UIS と炉心側の相対変位が制限値内にある)の成立性を助ける目的で原子炉容器支持方式を上吊りから側部支持に見直した。一方、今年度の検討で

UIS と炉心側を結合する対策を施すことにしたため制御棒挿入性評価は耐震性のクリティカルパスではなくなった。製作据付性の観点からは上吊り方式の方が容易であるため、ここでは原子炉容器支持方式を側部支持から上吊り方式への変更の可能性について検討する。

(b) 検討内容

原子炉容器を上吊りとした場合に増大するのは水平動による応答である。評価項目では原子炉容器の座屈及びスロッシング波高の評価が厳しくなる。ここでは強制循環炉を例にこの両者の成立性を見通す。以下に水平モードの固有振動数及び水平方向応答加速度を示す。

なお、水平モードの固有振動数は側部支持の場合が 4.1(2)b. 項の解析結果から、上吊り方式の場合が平成 13 年度報告書の検討結果からの推定値である。また、水平方向応答加速度の値は側部支持方式の場合が 4.1(2)b. 項の解析結果から、上吊り方式の場合は水平モードの固有振動数と図 4.1-3 に示す水平動の床応答曲線からの推定値である。

[水平モードの固有振動数]

- ・側部支持方式 : 3.9Hz
- ・上吊り方式 : 約 2Hz (板厚 60mm で 2.2Hz であったので 50mm では約 2Hz)

[水平方向応答加速度 (レファレンス S2)]

- ・側部支持方式 : 約 3m/s²
- ・上吊り方式 : 約 5m/s²

i. 原子炉容器の座屈評価

原子炉容器の座屈は水平地震入力による応力が支配的である。側部支持方式では座屈評価の裕度 (=座屈限界荷重/発生荷重) は 2.96 であった。上吊り方式では発生荷重が約 5/3=1.7 倍になる。従って裕度は $2.96/1.7=1.74$ となり、必要裕度 1.5 を満たしている。従って、レファレンス S2 の地震条件に対して上吊り方式でも座屈評価を満足する見通しである。

強地震検討用条件の場合には発生荷重がレファレンス S2 の 1.5 倍になる。従って裕度は $1.74/1.5=1.2$ となり、板厚 50mm では必要裕度 1.5 を満たさない。板厚を 60mm 乃至 70mm 程度にすれば満足できると考えられる。

以上は、強制循環炉を対象とした検討結果であるが、自然循環炉でも概ね同様と推定される。

ii. スロッシング波高の評価

スロッシング波高の結果をまとめて表 4.4-1 に示す。上吊り方式にすると原子炉容器の水平方向の応答加速度が 1.7 倍になるので、スロッシング波高は 1.7 倍になる。S1 地震及びレファレンス S2 地震では波高が 1.7 倍になつても評価を満足するが、強地震検討用条件の場合は波高が 2.4m となりルーフデッキ下面までの高さを上回るため衝突が発生する。従って、強地震検討用条件の場合はスロッシング対策を講じて波高を 3 割近く低減する必要がある。なお、以上は強制循環炉を対象とした検討であるが、自然循環炉でも概ね同様な結果と推定される。

(c) 結論

原子炉容器を側部支持から上吊り方式に変更する場合の耐震成立性を概略的に検討した。レファレンス S2 地震までの条件であれば上吊り方式でも成立する見通しがある。強地震検討用条件の場合には原子炉容器の板厚を 50mm から 60mm 乃至 70mm 程度に増やすとともに、スロッシング対策を強化する必要がある。

b. 上下免震特性に関する検討

(a) 概要

これまでの検討では上下の固有振動数 1 Hz、減衰率 20% の耐震特性を有する 3 次元免震装置を適用することを想定して耐震性検討を行ってきている。ここでは中型タンク式鉛-ビスマス冷却炉の耐震性確保に必要な上下免震特性を推定する。検討対象とする評価項目は上下動が大幅に増えた場合にクリティカルとなりやすい炉心支持板の応答加速度及び原子炉容器の座屈に加えて、原子炉容器の飛び上がり力とした。

(b) 検討内容

i. 免震特性と応答加速度の関係

3 次元免震開発 R&D ではケーススタディ S2 地震条件に対して上下免震特性をパラメータに床応答曲線を作成している。原子炉容器の上下の固有振動数は約 5Hz であり、これを上記の代表的かつ現実的な条件の床応答曲線に適用して得られる応答加速度を以下に示す。

- $f_v=14\text{Hz}$, $h_v=2\%$ (上下免震無し): $\alpha v=\text{約 }60\text{m/s}^2$, $f_v=3\text{Hz}$, $h_v=10\%$: $\alpha v=\text{約 }20\text{m/s}^2$
- $f_v=1.5\text{Hz}$, $h_v=10\%$: $\alpha v=\text{約 }12\text{m/s}^2$, $f_v=1\text{Hz}$, $h_v=20\%$: $\alpha v=\text{約 }7\text{m/s}^2$

注 1) f_v : 上下の固有振動数、 h_v : 上下の減衰率、 αv : 原子炉容器の上下の応答加速度

注 2) レファレンス S2 地震条件の応答加速度は上記の約 1/3 である。

注 3) $f_v=1\text{Hz}$, $h_v=20\%$ のケースはこれまでの検討で想定してきた特性である。

ii. 炉心支持板の応答加速度の評価

これまでの検討では炉心支持板の上下の応答加速度を約 10m/s^2 以下に制限していた。これは鉛ビスマス炉では集合体の浮き上がり防止のためにラッチスプリングでホールドダウンする方式を用いており、上下の加速度が大きくなるとラッチスプリングのバネ力を大きくしなければならず、FHM の挿入・引き抜き力が増えて FHM の設計が難しくなると考えたためである。

なお、ナトリウム炉の FHM では 20kN の挿入・引き抜き力を持たせているが、鉛ビスマス炉の FHM はラッチスプリングのために 30kN 程度の挿入・引き抜き力が必要になる。

FHM の挿入・引き抜き力は現行の FHM のサイズでは大幅な向上は望めないが、胴部の径を増やすことができるならば 40kN 程度は可能ではないかと推定している。この場合は上下の応答加速度を従来の 2 倍の約 20m/s^2 まで許容できるものと考えられる。

炉心支持板の応答加速度は上記の原子炉容器の応答加速度の 1.1 倍程度である。従って、

FHM の容量増大まで視野に入れるならば強地震条件までを含めて f_v が 3Hz 程度以下の上下免震装置であれば十分に成立する見通しがある。

iii. 原子炉容器の座屈評価

$f_v=1\text{ Hz}$, $h_v=20\%$ の特性の 3 次元免震装置を用いた場合の解析結果、及び先述の免震特性に対応した応答加速度を基に原子炉容器の概略的な座屈評価を行った。これを表 4. 1-18 に示す。

表 4. 1-8 より、上下免震無しの条件では成立しないが、 f_v が 3Hz 以下であれば成立見通しが有るという結果が得られた。これは強地震条件でも同じである。また、原子炉容器の座屈評価の観点からは上下の応答加速度が 15m/s^2 程度までは成立性のあることが推定される。

iv. 原子炉容器の飛び上がり力の評価

鉛ビスマス冷却炉の原子炉構造の重量は約 2 万 ton である。上下加速度が例えば 9.8m/s^2 を超えて 19.6m/s^2 に至ると原子炉容器の取付部に 2 万 ton の引き抜き力が発生する。コンクリートや埋め込み金物がこの引き抜き力に耐えるには、相当の物量増を招き現実でない可能性が高い。従来扱ってきた最重量機器は蒸気タービンで、150 万 kWe 級でも 3000 トン以下である。これから考えても原子炉容器の飛び上がりについてはせいぜい 1 万 ton 程度の引き抜き力に抑えるべきである。これから、上下の応答加速度は $1.5 \times 9.8\text{m/s}^2$ 程度以下に制限することにする。この制限を先述の上下の応答加速度に照らし合わせてみると、 f_v が 3Hz 程度以下であれば強地震検討用条件であっても成立見通しがあるといえる。

(c) 結 論

これまで上下の固有振動数 1Hz、減衰率 20%の耐震特性を有する 3 次元免震装置を適用することを想定して耐震性検討を行ってきたが、強地震検討用までの地震条件であれば上下 3Hz 程度以下の免震装置でも成立性が見込める可能性が高いことが分かった。

なお、厚肉積層ゴムの上下の固有振動数は 3Hz であるが、減衰装置を付加するとシステムとしての固有振動数は 4Hz 程度に増加すると予想される。鉛ビスマス冷却炉の原子炉容器の上下の固有振動数は約 5Hz で共振領域に近くなり、成立性の確保は厳しいと考えられる。減衰装置を除いて上下 2Hz 程度以下の免震装置であることが必要である。図 4. 1-22 に $f_v=5\text{Hz}$ の厚肉積層ゴムを用いた時の床応答曲線を示す。

(4) まとめ

a. 原子炉構造の耐震性評価（上下 1Hz の 3 次元免震を適用）

強地震検討用までの条件に対して自然循環炉及び強制循環炉についての耐震性評価を行った。結果を以下にまとめる。UIS 及び FHM の耐震性向上対策は 4. 3 項で検討を行う。

①自然循環炉及び強制循環炉の原子炉容器は以下の板厚で耐震成立性確保の見通を得た。

- ・自然循環炉：50mm(ナックルより上の上部胴)、40mm(下部胴及び下部鏡)
- ・強制循環炉：50mm

②片持ち梁状のコラム型 UIS では成立性が厳しい。UIS の耐震成立性を満足させるためには UIS と炉心側を結合させるなどの対策を探る必要がある。

③自然循環炉及び強制循環炉の燃料交換機はいずれの地震条件に対しても片持ち梁状の構造では成立見通しが無い。従って、UIS と結合し一体化するなどの対策が必要である。

b. 上吊り方式原子炉容器の耐震成立性

レファレンス S2 地震までの条件であれば原子炉容器を側部支持方式から上吊り方式に見直しても成立する見通しがある。強地震検討用条件の場合は原子炉容器の板厚を 50mm から 60mm 乃至 70mm 程度に増やすとともに、スロッシング対策を強化する必要がある。

c. 上下免震特性に関する検討

強地震検討用までの地震条件であれば上下 3Hz 程度以下の免震装置でも成立性が見込める可能性が高い。なお、減衰装置の剛性付加効果を考えると、減衰装置を除いた免震装置本体の固有振動数は上下 2Hz 程度以下であることが必要である。

表 4.1-1 耐震成立性評価条件

項目	制限条件	
	自然循環炉	強制循環
炉心支持板の上下応答加速度	9.8m/s ² 以下	
投入反応度	1 \$ 以下	
FHM の変位制限	S1 地震時に UIS 切込部と FHM が衝突しないことを目標とする。(変位 30mm 以下)	
制御棒挿入性	UIS 下端と炉心槽頂部の水平方向相対変位 15mm 以下に抑える。	

* : 設定根拠は平成 13 年度報告書「PE-01-005 中型タンク式鉛一ビスマス冷却炉構造健全性解析作業」を参照。

表 4.1-2 コントロールポイントの比較（水平）

レファレンス S2 波

周期 (s)	0.02	0.10	0.114	0.136	0.20*	0.30*	0.36	10.0
レファレンス S2 波	(cm/s)	1.21	18.13	21.22	26.12	38.60	58.20	70.0
	加速度 (Gal)	380.0	1137.06	1171.18	1206.74	—	—	1220.0

* : 速度スペクトル値は、周期の対数軸、速度の対数軸上で直線補間した。

耐専スペクトル(1996 年度)による M7.1 波 (Xeq=10km, NFRD 考慮)

地盤剛性 (m/s)	周期 (s)	0.02	0.1	0.20*	0.30	0.80	2.00	5.00
Vs=1500	(cm/s)	1.91	27.86	43.43	56.31	99.35	90.10	91.15
	加速度 (Gal)	600.0	1750.4	—	1179.4	780.3	283.1	114.5
Vs=1000	(cm/s)	1.91	28.27	47.76	64.90	124.3	124.6	127.6
	加速度 (Gal)	600.0	1776.0	—	1359.3	976.5	391.5	160.4
Vs=700	(cm/s)	1.91	28.63	51.91	73.53	151.5	165.8	171.6
	(Gal)	600.0	1798.7	—	1540.0	1189.5	520.8	215.6

* : 速度スペクトル値は、周期の対数軸、速度の対数軸上で直線補間した。

表 4.1-3 耐専スペクトルとレファレンス S2 スペクトルの速度比（水平）

周期 (s)	0.02	0.10	0.20*	0.30*	0.80	2.00	5.00	
耐専/ レファレンス S2	Vs1500	1.58	1.54	1.13	0.97	1.42	1.29	1.30
	Vs1000	1.58	1.56	1.24	1.12	1.78	1.78	1.82
	Vs700	1.58	1.58	1.34	1.26	2.16	2.37	2.45

* : 速度スペクトル値は、周期の対数軸、速度の対数軸上で直線補間した。

表 4.1-4 コントロールポイントの比較（上下）

耐専スペクトル(1996年度)によるM7.1 上下動 ($X_{eq}=10\text{km}$)

地盤剛性 (m/s)	周期 (s)	0.02	0.1	0.30	0.80	2.00	5.00	備考
$V_p=3400$ ($V_s=1500$)	(cm/s)	1.14	15.87	33.48	41.79	31.58	25.05	$\gamma=2.8 \times 10^4 \text{N/m}^3$ $\nu=0.38$
	加速度 (Gal)	357.0	997.2	701.1	328.2	99.2	31.48	
$V_p=2400$ ($V_s=1000$)	(cm/s)	1.18	17.66	42.28	58.65	46.32	36.62	$\gamma=2.0 \times 10^4 \text{N/m}^3$ $\nu=0.40$
	加速度 (Gal)	372.2	1109.3	885.4	460.6	145.5	46.02	
$V_p=1800$ ($V_s=700$)	(cm/s)	1.23	19.28	51.26	77.60	63.56	50.11	$\gamma=1.8 \times 10^4 \text{N/m}^3$ $\nu=0.41$
	加速度 (Gal)	385.3	1211.3	1073.6	609.5	199.7	62.97	

Vs と地盤の密度、ポアソン比との関係を JEAG4601-1987 p415, p439 により設定したのち V_p を算定した。

レファレンス S2 波（上下）：上下 = 水平 × 0.48

周期 (s)	0.02	0.10	0.114	0.136	0.30*	0.36	10.0
(cm/s)	0.58	8.70	10.19	12.54	27.94	33.6	33.6
加速度 (Gal)	182.5	546.8	561.4	579.2	—	586.43	21.11

*: 速度スペクトル値は、周期の対数軸、速度の対数軸上で直線補間した。

表 4.1-5 耐専スペクトルとレファレンス S2 スペクトルの速度比（上下）

周期 (s)	0.02	0.10	0.30*	0.80	2.00	5.00
耐専／レファレンス S ₂	$V_p=3400$ ($V_s=1500$)	1.97	1.82	1.20	1.24	0.94
	$V_p=2400$ ($V_s=1000$)	2.03	2.03	1.51	1.75	1.38
	$V_p=1800$ ($V_s=700$)	2.12	2.22	1.83	2.31	1.89

*: 速度スペクトル値は、周期の対数軸、速度の対数軸上で直線補間した。

表 4.1-6 自然循環炉の解析結果

項目	単位	地震条件	
		レファレンス S2	強地震検討用
固有振動数	上下	Hz	4.97
	水平	Hz	3.58
炉心支持板 上下応答加速度	上下地震動	m/s ²	2.33
	建屋ロッキング	m/s ²	1.54
	合計(SRSS)	m/s ²	2.79
炉心支持板の 上下応答変位	上下地震動	mm	2.39
	建屋ロッキング	mm	1.58
	合計(SRSS)	mm	2.87
炉心支持板の面外変形	mm	0.35	0.44
上部胴	上下動による軸方向応力	MPa	19.3
	建屋ロッキングによる軸方向応力	MPa	13.5
	水平動による曲げ応力	MPa	40.3
	水平動によるせん断応力	MPa	30.5
	建屋ロッキングによる曲げ応力	MPa	50.4
	建屋ロッキングによるせん断応力	MPa	38.1
下部胴	上下動による軸方向応力	MPa	23.5
	建屋ロッキングによる軸方向応力	MPa	16.4
	水平動による曲げ応力	MPa	36.7
	水平動によるせん断応力	MPa	21.8
	建屋ロッキングによる曲げ応力	MPa	45.9
	建屋ロッキングによるせん断応力	MPa	27.2

注) 「炉システム共通技術の検討免震システムの成立性・経済性評価に関する研究(その2)」

平成14年度検討結果より建屋ロッキングによる応答値は次のように簡易的に求めた。

- ・炉心支持板上下応答加速度 : 上下地震動による応答値の 0.66 倍
- ・上下応答変位 : 上下地震動による応答値の 0.66 倍
- ・軸方向応力 : 上下地震動による応答値の 0.70 倍
- ・曲げ応力、せん断応力 : 水平地震動による応答値の 1.25 倍

表 4.1-7 自然循環炉の炉心支持板の上下応答加速度

炉心支持板の 上下応答加速度	単位	地震条件	
		レファレンス S2	強地震検討用
許容値	m/s ²	2.79	3.49
評価	—	成立	成立

表 4.1-8 自然循環炉の反応度投入評価

項目	単位	地震条件	
		レファレンス S2	強地震検討用
炉心支持板の上下応答変位①	mm	2.87	3.59
炉心支持板の面外変形②	mm	0.35	0.44
燃料のコンパクション③ (②×0.6*)	mm	0.21	0.26
燃料のコンパクションによる 投入反応度④ (③×8c/mm)	c	1.68	2.08
CR引抜きによる投入反応度⑤ (①×3c/mm)	c	8.61	10.77
投入反応度 (④+⑤)	c	10.29	12.85
許容値	c	100	100
評価		成立	成立

*: 炉心のコンパクション 5mm が炉心支持板の面外変形量 3mm に相当 (Na 大型炉の結果を準用)

表 4.1-9 自然循環炉の原子炉容器の座屈評価 (上部胴*)

項目	レファレンス S2 波		強地震検討用
座屈強度	塑性曲げ座屈強度	360.0 MPa	
	塑性せん断座屈強度	185.0 MPa	
	塑性軸圧縮座屈強度	292.8 MPa	
発生応力	曲げ応力	90.7 MPa	136.0 MPa
	せん断応力	68.5 MPa	102.8 MPa
	軸圧縮応力	36.5 MPa	44.7 MPa
座屈評価	座屈限界/発生値	2.33	1.60
	必要安全率	1.50	1.50
	評価	成立	成立

* : 内径 10.1m、板厚 50mm

表 4.1-10 自然循環炉の原子炉容器の座屈評価 (下部胴*)

項目	レファレンス S2 波		強地震検討用
座屈強度	塑性曲げ座屈強度	364.5 MPa	
	塑性せん断座屈強度	178.6 MPa	
	塑性軸圧縮座屈強度	296.4 MPa	
発生応力	曲げ応力	82.6 MPa	123.9 MPa
	せん断応力	48.9 MPa	73.4 MPa
	軸圧縮応力	-125.0 MPa	-115.0 MPa
座屈評価	座屈限界/発生値	3.80	2.43
	必要安全率	1.50	1.50
	評価	成立	成立

* : 内径 7.8m、板厚 40mm

表 4.1-11 強制循環炉の解析結果

項目	単位	地震条件	
		レファレンス S2	強地震検討用
固有振動数	上下	Hz	5.29
	水平	Hz	3.92
炉心支持板 上下応答加速度	上下地震動	m/s ²	2.26
	建屋ロッキング	m/s ²	1.49
	合計(SRSS)	m/s ²	2.71
炉心支持板の 上下応答変位	上下地震動	mm	2.03
	建屋ロッキング	mm	1.34
	合計(SRSS)	mm	2.43
炉心支持板の面外変形	mm	0.22	0.28
上下動による軸方向応力	MPa	21.3	26.7
建屋ロッキングによる軸方向応力	MPa	14.9	18.7
水平動による曲げ応力	MPa	24.5	36.8
水平動によるせん断応力	MPa	23.7	35.5
建屋ロッキングによる曲げ応力	MPa	30.7	46.0
建屋ロッキングによるせん断応力	MPa	29.6	44.3

注)「炉システム共通技術の検討免震システムの成立性・経済性評価に関する研究(その2)」

平成14年度検討結果より建屋ロッキングによる応答値は次のように簡易的に求めた。

- ・炉心支持板上下応答加速度：上下地震動による応答値の0.66倍
- ・上下応答変位 : 上下地震動による応答値の0.66倍
- ・軸方向応力 : 上下地震動による応答値の0.70倍
- ・曲げ応力、せん断応力 : 水平地震動による応答値の1.25倍

表 4.1-12 強制循環炉の炉心支持板の上下応答加速度

単位	地震条件	
	レファレンス S2	強地震検討用
炉心支持板の 上下応答加速度	m/s ²	2.71
許容値	m/s ²	9.8
評価	—	成立

表 4.1-13 強制循環炉の反応度投入評価

項目	単位	地震条件	
		レファレンス S2	強地震検討用
炉心支持板の上下応答変位 ①	Mm	2.43	3.04
炉心支持板の面外変形 ②	Mm	0.22	0.28
燃料のコンパクション ③ (②×0.6*)	Mm	0.13	0.17
燃料のコンパクションによる 投入反応度 ④ (③×7c/mm)	c	0.92	1.18
CR引抜きによる投入反応度⑤ (①×3c/mm)	c	7.29	9.12
投入反応度 (④+⑤)	c	8.21	10.30
許容値	c	100	100
評価		成立	成立

*:炉心のコンパクション 5mm が炉心支持板の面外変形量 3mm に相当
(Na 大型炉の結果を準用)

表 4.1-14 強制循環炉の原子炉容器の座屈評価

項目		レファレンス S2 波	強地震検討用
座屈強度	塑性曲げ座屈強度	311.4 MPa	
	塑性せん断座屈強度	168.6 MPa	
	塑性軸圧縮座屈強度	252.9 MPa	
発生応力	曲げ応力	55.2 MPa	82.8 MPa
	せん断応力	53.2 MPa	79.8 MPa
	軸圧縮応力	39.4 MPa	48.5 MPa
座屈評価	座屈限界/発生値	2.67	1.87
	必要安全率	1.50	1.50
	評価	成立	成立

表 4. 1-15 FHM 振動解析モデル形状データ

名称	節点番号	形状	断面積	断面 2 次モーメント		備考
			A (mm ²)	Iy (mm ⁴)	Iz (mm ⁴)	
本体円筒胴	1/33	φ900 t10	2. 92E+04	3. 16E+09	3. 16E+09	
		φ900 t20	5. 78E+04	6. 12E+09	6. 12E+09	
		φ900 t30	8. 58E+04	8. 88E+09	8. 88E+09	
		φ900 t40	1. 13E+05	1. 15E+10	1. 15E+10	
		φ900 t50	1. 40E+05	1. 38E+10	1. 38E+10	
		φ900 t75	2. 04E+05	1. 91E+10	1. 91E+10	
		φ900 t100	2. 64E+05	2. 33E+10	2. 33E+10	
	33/52	φ900 t10	1. 46E+04	3. 02E+08	1. 58E+09	
		φ900 t20	2. 89E+04	5. 84E+08	3. 06E+09	
		φ900 t30	4. 29E+04	8. 48E+08	4. 44E+09	
アーム	1101/1111 1201/1211	ヨの字型口294×225	1. 74E+04	8. 73E+07	2. 34E+08	側面 t25×2 背面 t25
	1301/1306	225×25(×2)	1. 13E+04	4. 75E+07	5. 86E+05	2 枚分合計
収納ケース	2001/2021	ボックス型口530×280t6	9. 58E+03	3. 70E+08	1. 39E+08	

※) ねじり定数 : J=Iy+Iz

表 4. 1-16 FHM 振動解析モデル物性値 (12Cr 系鋼材)

部位	ヤング率	ポアソン比	参照温度	重量密度	備考
	(N/mm ²)	(-)	(°C)	(kg/m ³)	
デッキ下端より上部	211000	0. 300	100	7930	NsL +3300、 NsL +1800
カバーガス中	208000	0. 300	150		NsL +1800、 NsL +0
鉛ビスマス中	204000	0. 300	200		NsL +0、 NsL-16200

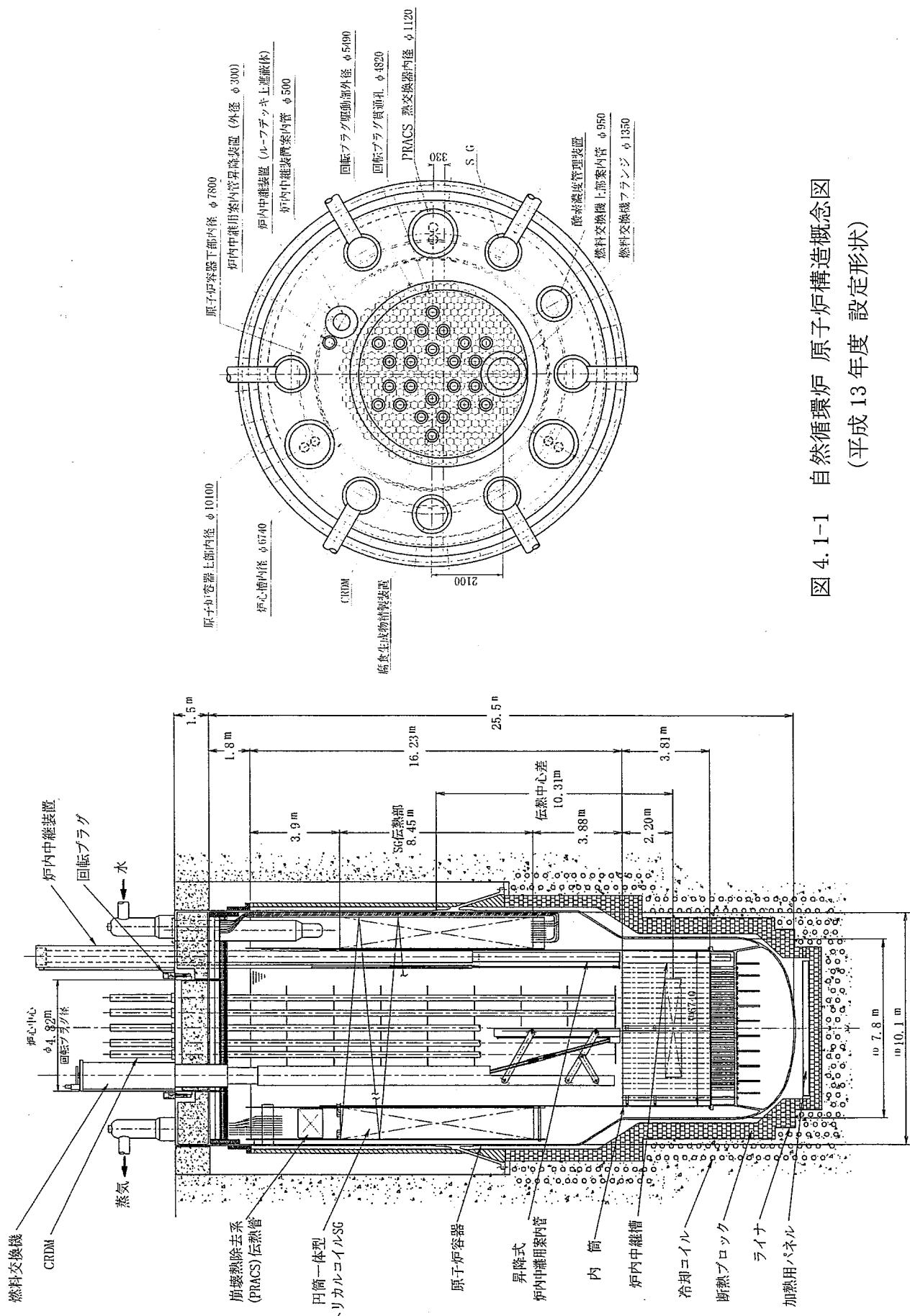
表 4.1-17 FHM 振動解析における付加重量

付加項目	付加部位	節点番号	付加重量			備考
			WX(kg)	WY(kg)	WZ(kg)	
鉛ビスマス (10485kg/m ³)	本体円筒胴	6/52	211750	172456	192103	断面で構成される円型及び半円型領域を内包鉛ビスマス分(96052kg)とした。
	長アーム (上部)	1101/1111	3773	2958	3773	断面で構成される矩形領域を内包鉛ビスマス分とした。 内包鉛ビスマス 長アーム : 1523kg 短アーム : 761kg
	長アーム (下部)	1201/1211	3773	2958	3773	
	短アーム	1301/1306	1887	1479	1887	
燃料集合体	収納ケース	2001/2021	14788	26435	17428	断面で構成される矩形領域を内包する鉛ビスマス分とした。 内包鉛ビスマス : 8714kg
	本体円筒胴	1/52	765	765	765	φ40×L19.2m×4 本
	収納ケース	2001/2021	279	279	279	φ40×L5.6m×5 本
	燃料集合体	2001/2021	525	525	525	
その他 機構部	本体円筒胴 下側半割部	33/52	1028	1028	1028	ガイドレール
	本体円筒胴 下側半割部	33/52	899	899	899	可動筒
	収納ケース	2001	100	100	100	グリッパ部
	収納ケース	2021	100	100	100	軸受部

表 4.1-18 上下免震特性と座屈評価の関係 (強制循環炉、レファレンス S2)

上下 免震特性	上下応答加 速度(m/s ²)	原子炉容器に生じる軸方向応力 (MPa)					座屈評価の裕度 —	成立 見通し
		上下動 (F/A)	水平動 (M/Z)	ロッキング (F/A)	ロッキング (M/Z)	合 計		
fv=14Hz hv=2% (上下免震無)	$60 \times \frac{1}{3} = 20$	$21 \times \frac{20}{2} = 210$	25	0	0	235	$2.96 \times \frac{92}{235} = 1.2$	×
fv=3Hz hv=10%	$20 \times \frac{1}{3} \approx 7$	$21 \times \frac{7}{2} = 74$	25	0	0	99	$2.96 \times \frac{92}{99} = 2.8$	○
fv=1.5Hz hv=10%	$12 \times \frac{1}{3} = 4$	$21 \times \frac{4}{2} = 8$	25	0	0	33	$2.96 \times \frac{92}{33} = 8.3$	○
fv=1Hz hv=20%	$7 \times \frac{1}{3} \approx 2$	21	25	15	31	92	2.96	○

- 1) 上表は fv=1Hz, hv=20% の解析結果を基に、上下の応答加速度が変化した場合の発生応力を推定したものである。
- 2) fv ≥ 1.5Hz では顕著なロッキングは生じないため、ロッキングによる荷重を零とした。
- 3) 座屈評価では 1.5 以上の裕度が要求される。



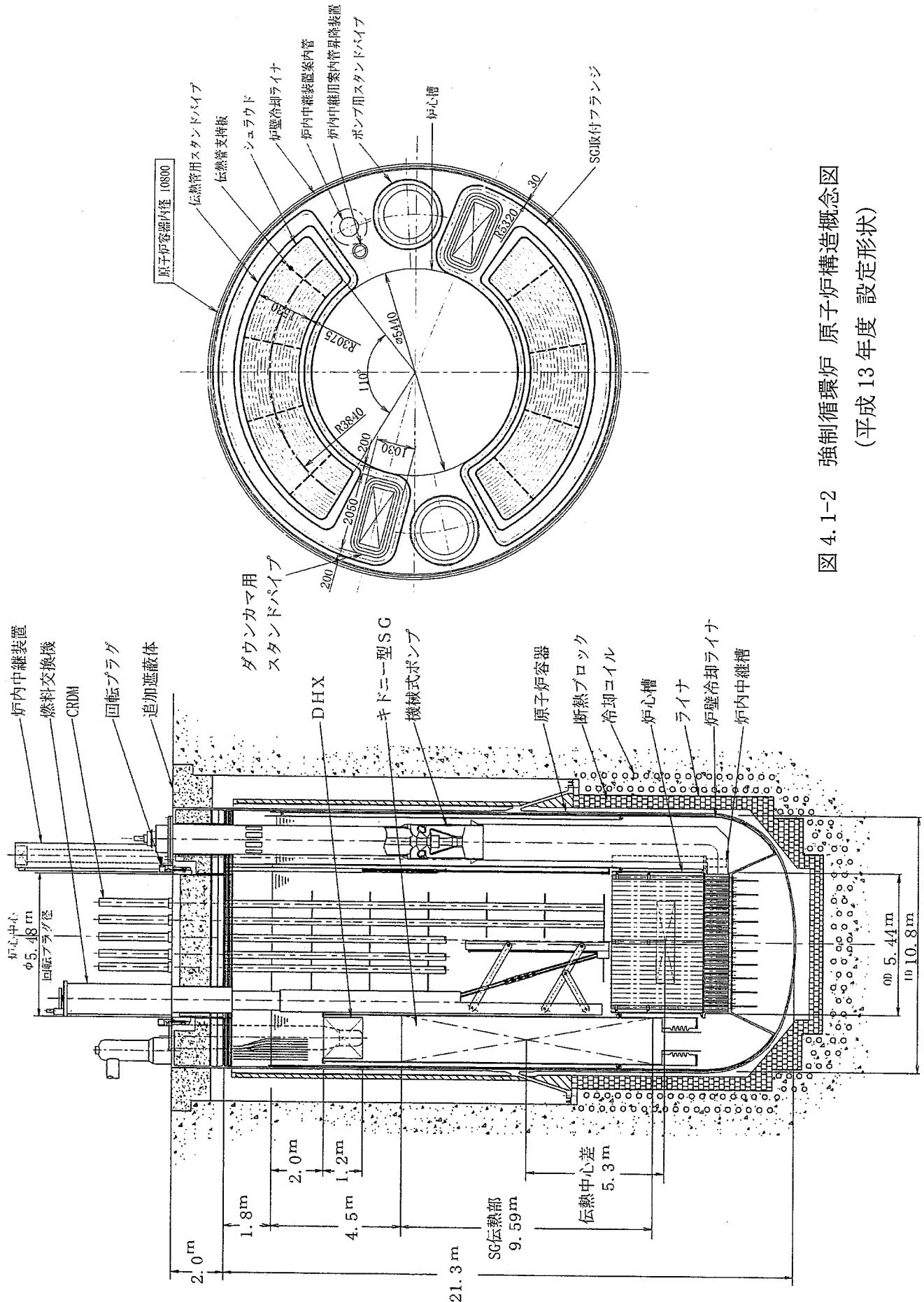


図 4.1-2 強制循環炉 原子炉構造概念図
(平成 13 年度 設定形状)

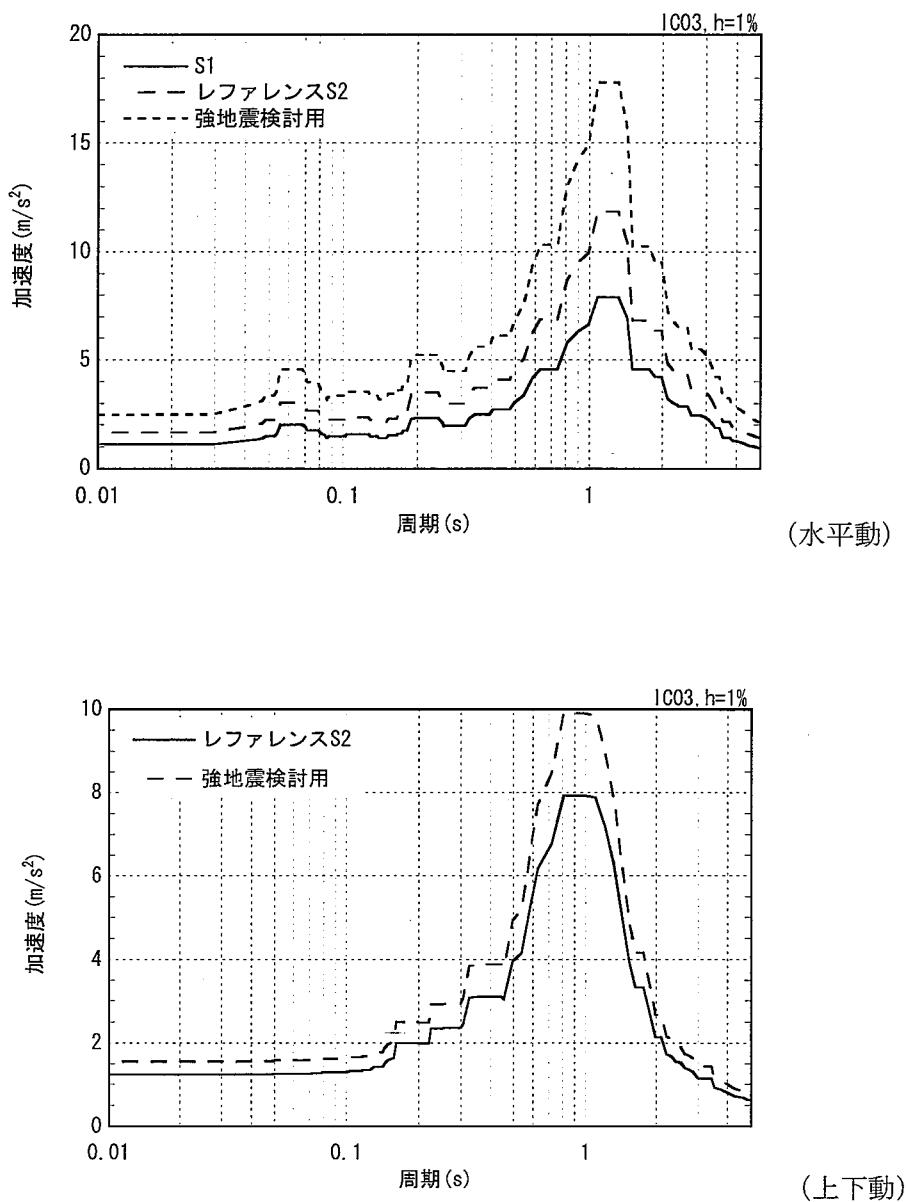


図 4.1-3 原子炉容器据付位置の床応答曲線

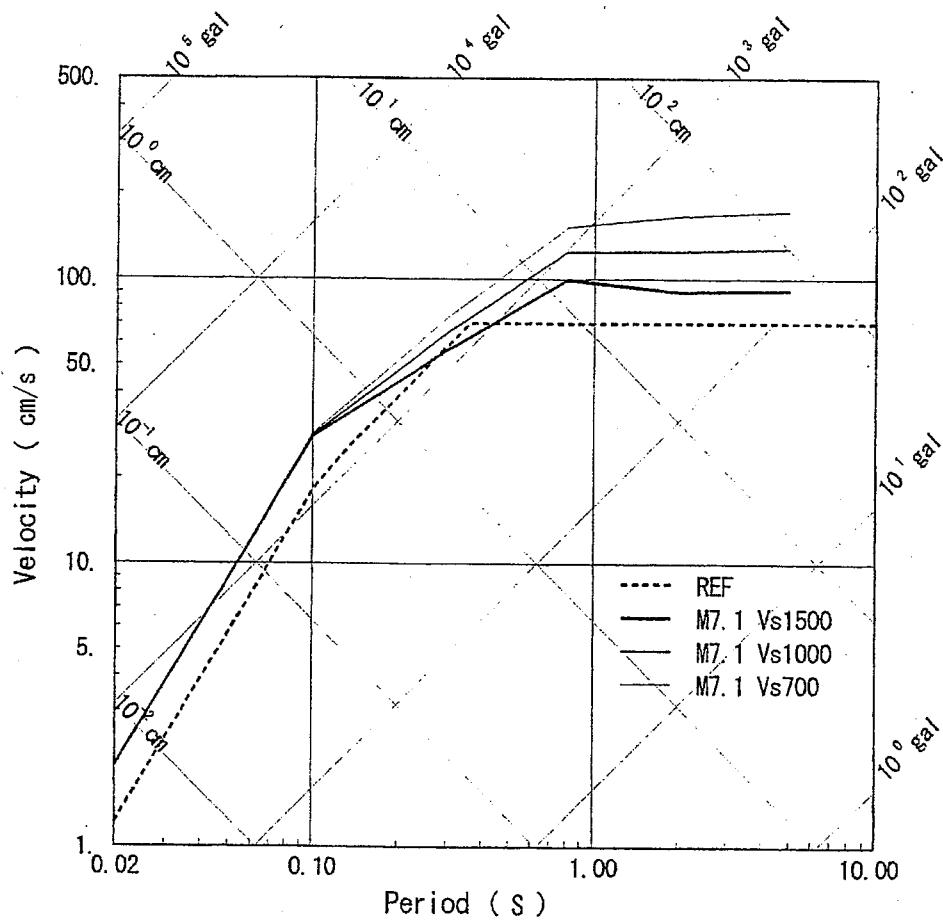


図 4.1-4 レファレンス S2 スペクトルと耐専スペクトル M7.1 の比較（水平）

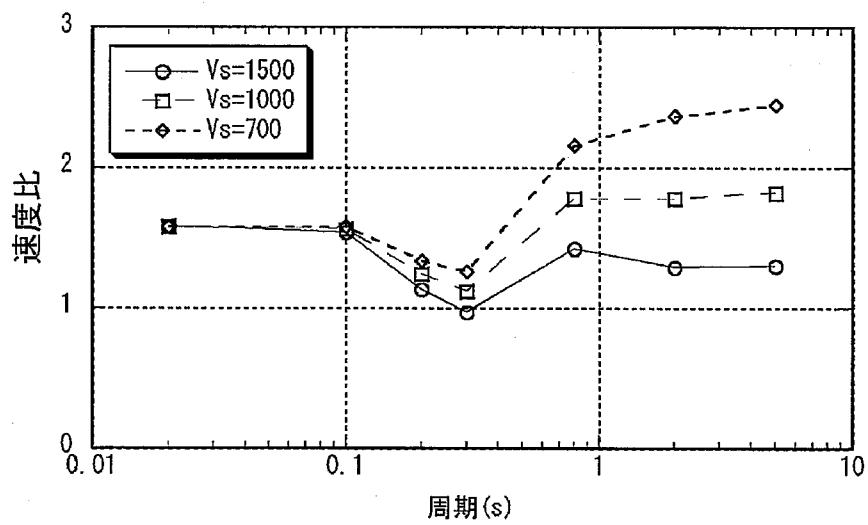


図 4.1-5 耐専スペクトルとレファレンス S2 スペクトルの速度比（水平）

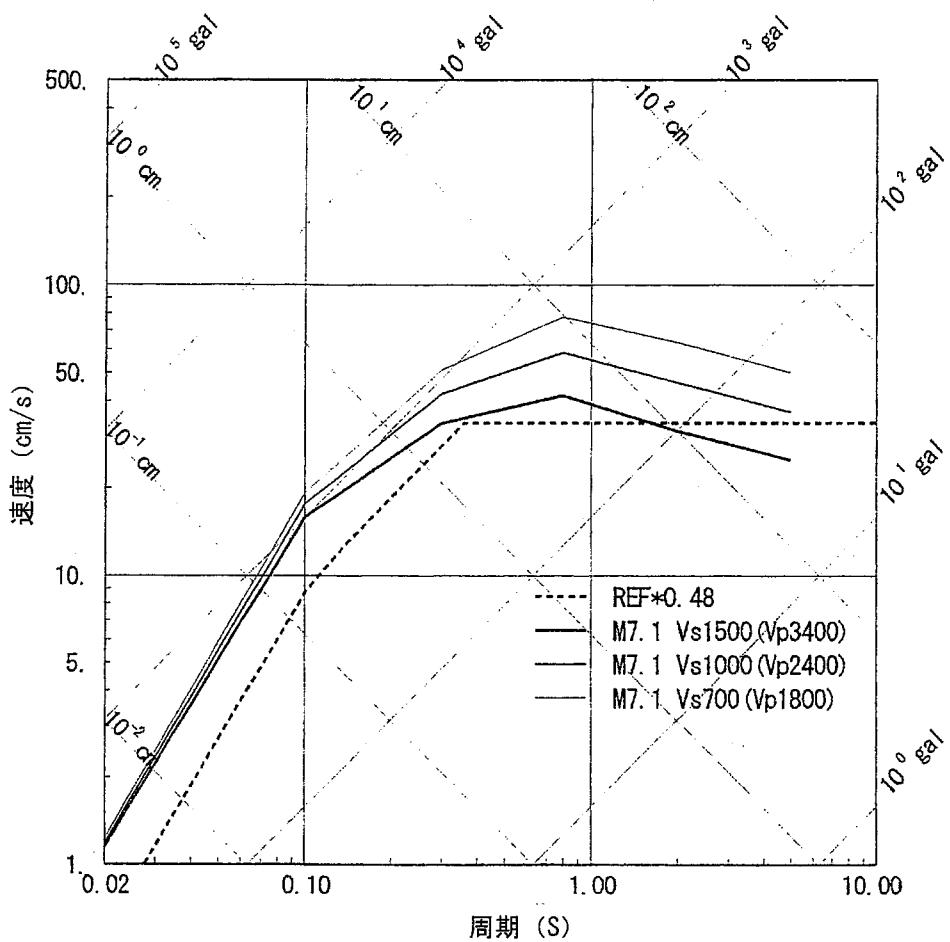


図 4.1-6 レファレンス S2 スペクトルと耐専スペクトル M7.1 の比較(上下)

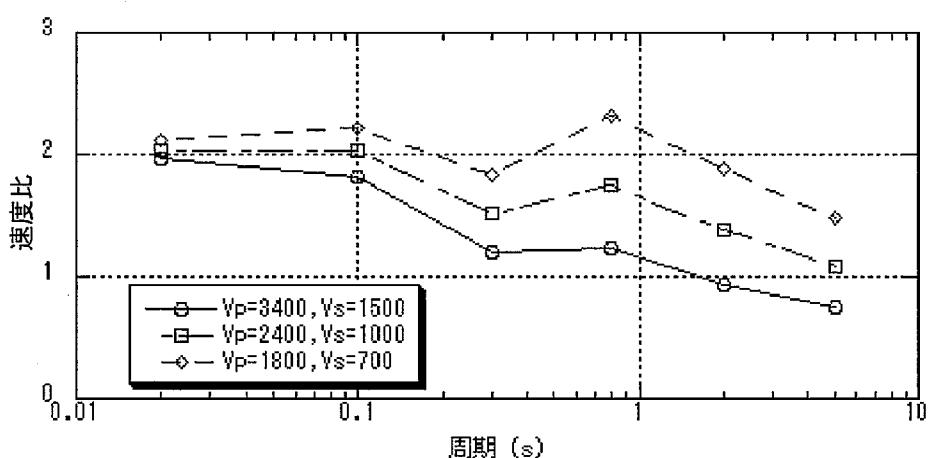
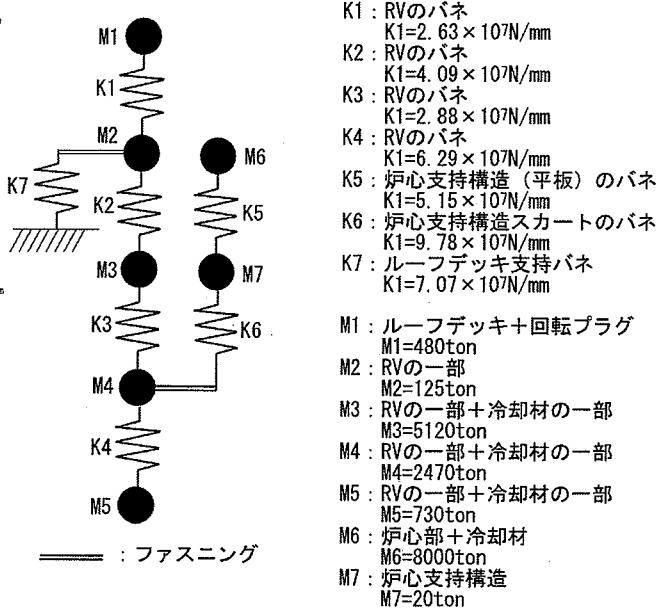
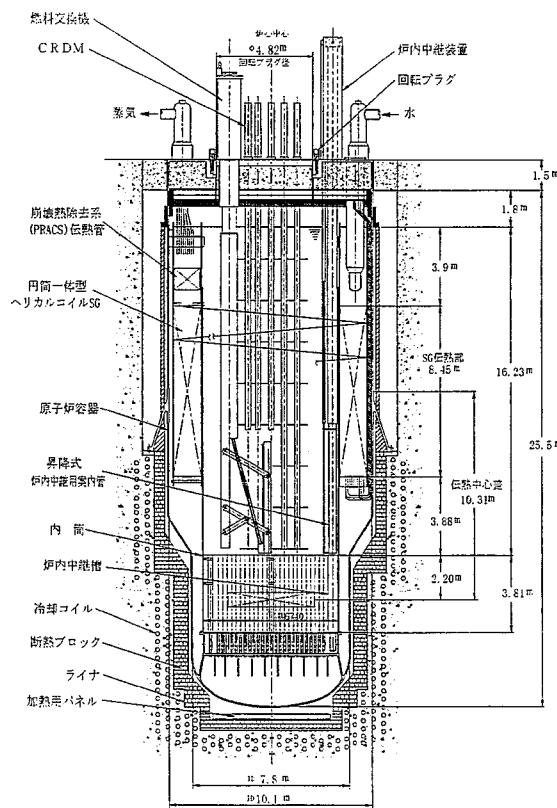
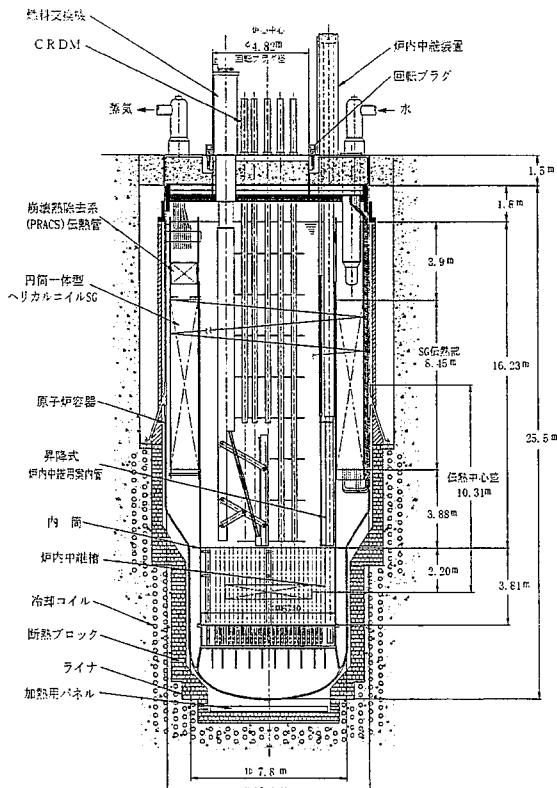


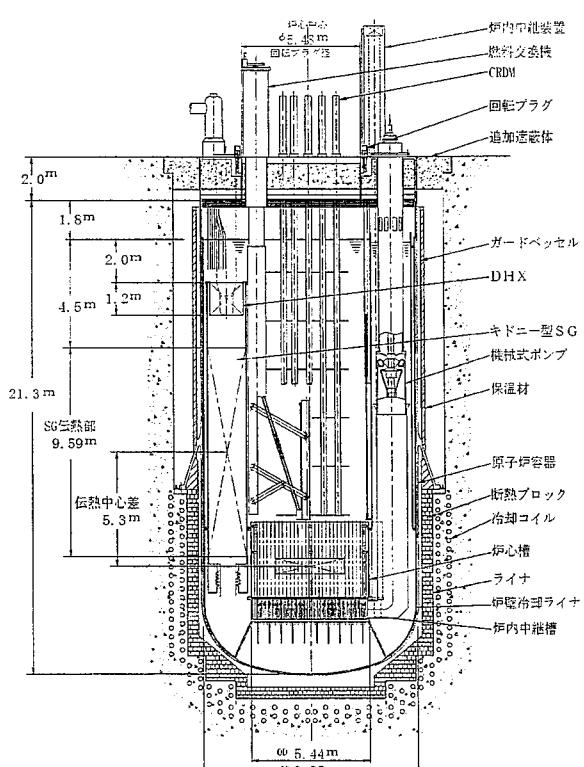
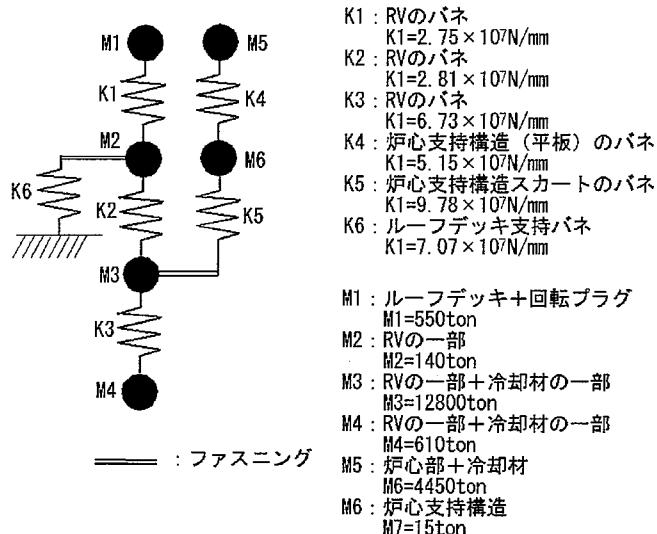
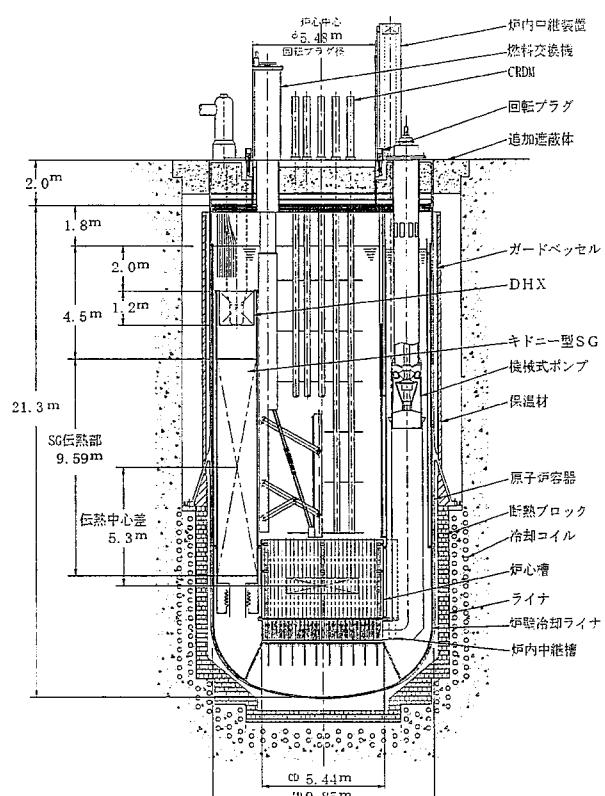
図 4.1-7 耐専スペクトルとレファレンス S2 スペクトルの速度比 (上下)

図 4.1-8 原子炉構造 上下応答モデル
(自然循環炉)

a
b
c
d
e
f
g
h
i
j
k
l
m
n
o
p
q
r

	長さ (mm)	断面積 (mm ²)	断面2次モーメント (mm ⁴)	ヤング率 (N/mm)
a~b	1500	1.59E+06	2.05E+13	1.96E+05
b~c	1800	1.59E+06	2.05E+13	1.96E+05
c~d	1950	1.59E+06	2.05E+13	1.96E+05
d~e	1950	1.59E+06	2.05E+13	1.96E+05
e~f	1717	1.59E+06	2.05E+13	1.96E+05
f~g	1717	1.59E+06	2.05E+13	1.96E+05
g~h	1717	1.59E+06	2.05E+13	1.96E+05
h~i	1795	1.59E+06	2.05E+13	1.96E+05
i~j	1590	1.59E+06	2.05E+13	1.96E+05
j~k	1795	1.59E+06	2.05E+13	1.96E+05
k~l	1800	9.85E+05	7.57E+12	1.96E+05
l~m	1282	9.85E+05	7.57E+12	1.96E+05
m~n	1282	9.85E+05	7.57E+12	1.96E+05
n~o	1282	9.85E+05	7.57E+12	1.96E+05
o~p	1050	9.85E+05	7.57E+12	1.96E+05
p~q	1070	9.85E+05	7.57E+12	1.96E+05
q~r	1500	8.52E+05	4.90E+12	1.96E+05

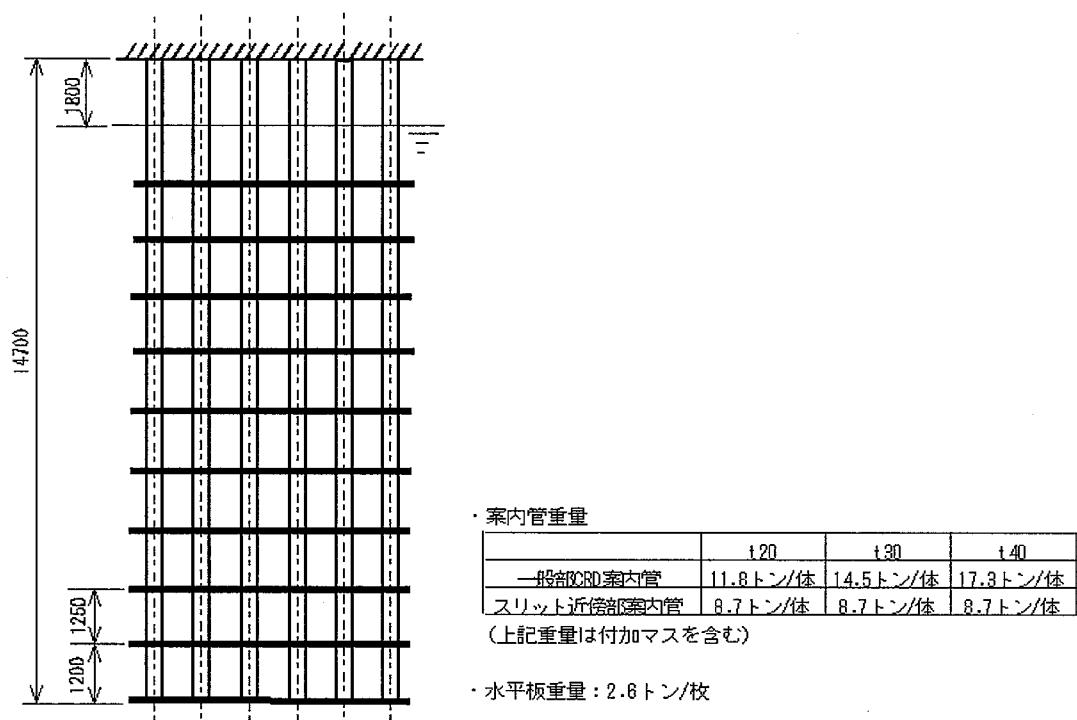
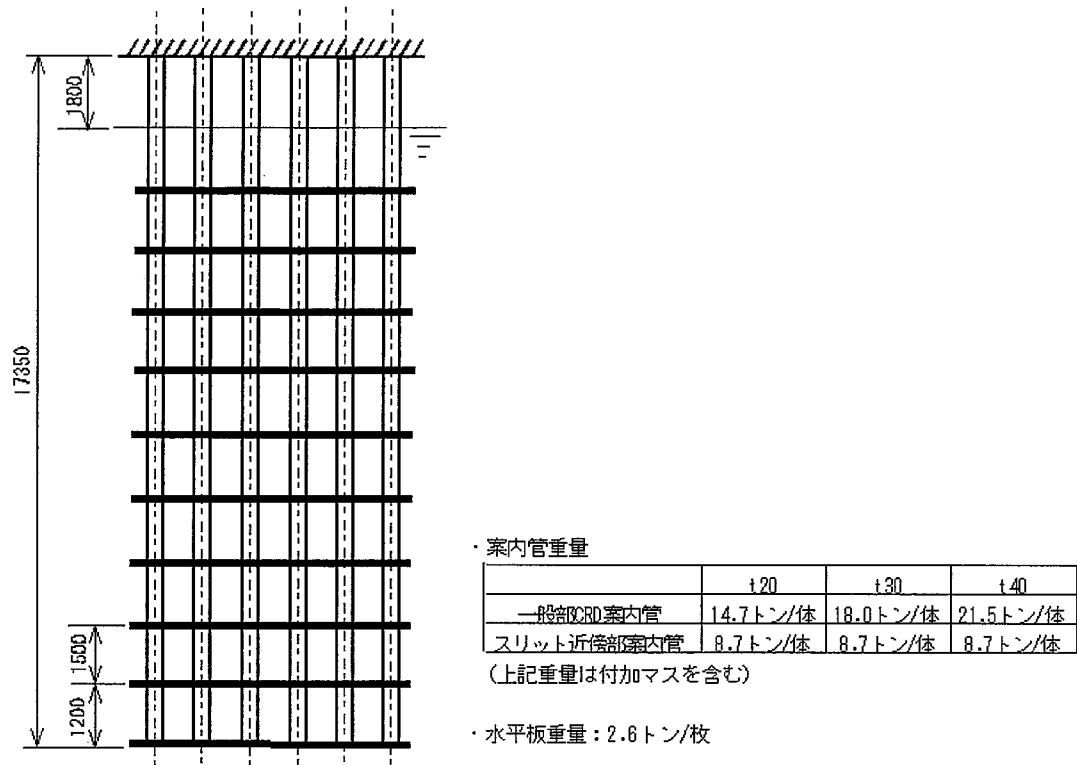
ルーフデッキ回転バネ : $K\theta = 7.07 \times 10^{14} \text{N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 図 4.1-9 原子炉構造 水平応答モデル
(自然循環炉)



a	長さ (mm)	断面積 (mm ²)	断面2次モーメント (mm ⁴)	ヤング率 (N/mm)
a~b	2000	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
b~c	1800	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
c~d	1740	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
d~e	1740	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
e~f	1740	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
f~g	1740	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
g~h	1740	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
h~i	1713	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
i~j	1713	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
j~k	1713	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
k~l	1713	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
l~m	1713	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
m~n	1713	1.70E+06	2.51E+13	1.85E+05
n~o	520	8.64E+05	3.25E+12	1.85E+05

ルーフデッキ回転バネ : $K\theta=8.05 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$

**図 4.1-11 原子炉構造 水平応答モデル
(強制循環炉)**



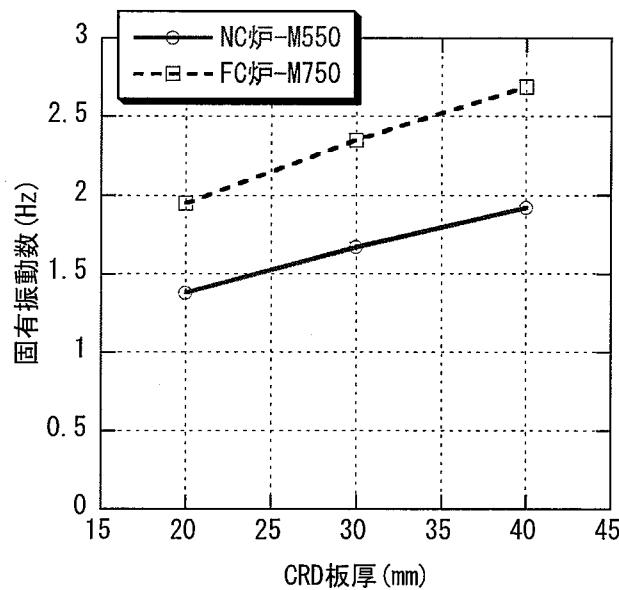


図 4.1-14 UIS の固有振動数（水平）

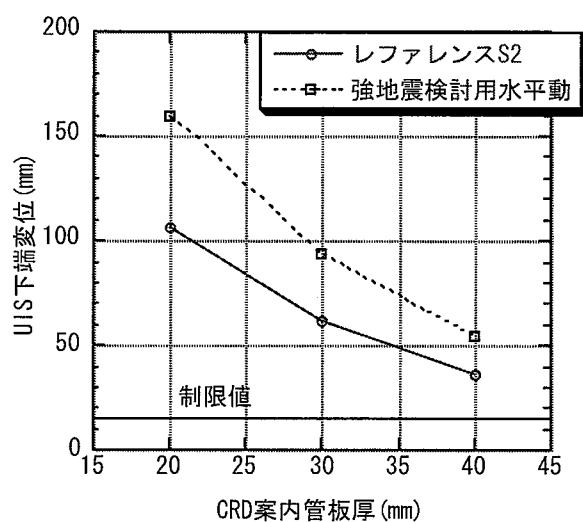


図 4.1-15 UIS の水平応答解析結果
(自然循環炉)

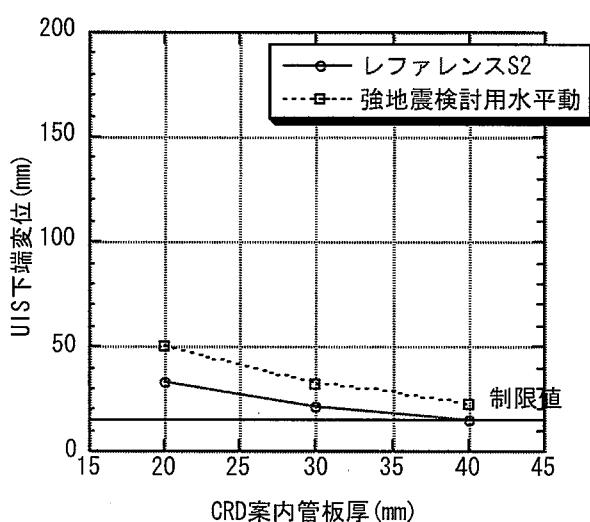
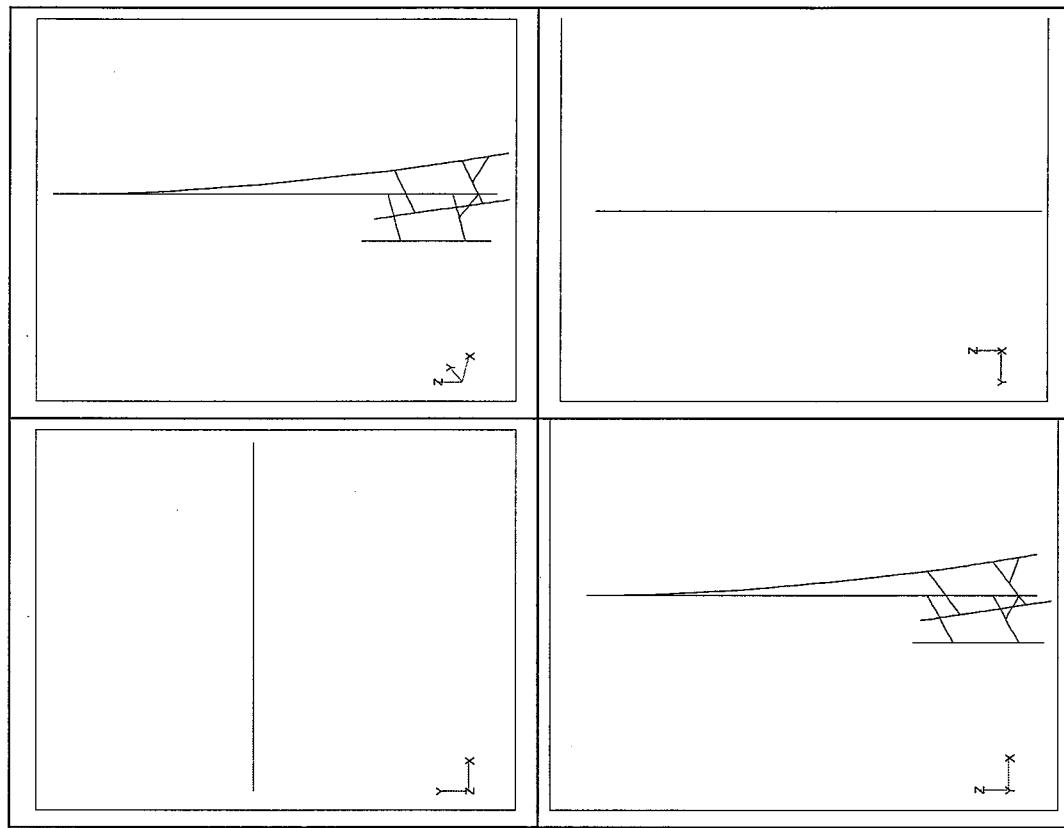


図 4.1-16 UIS の水平応答解析結果
(強制循環炉)



Model1 (水平面内 X 方向) 0.50Hz

図 4.1-18 (1/3) FHM の支配振動モード

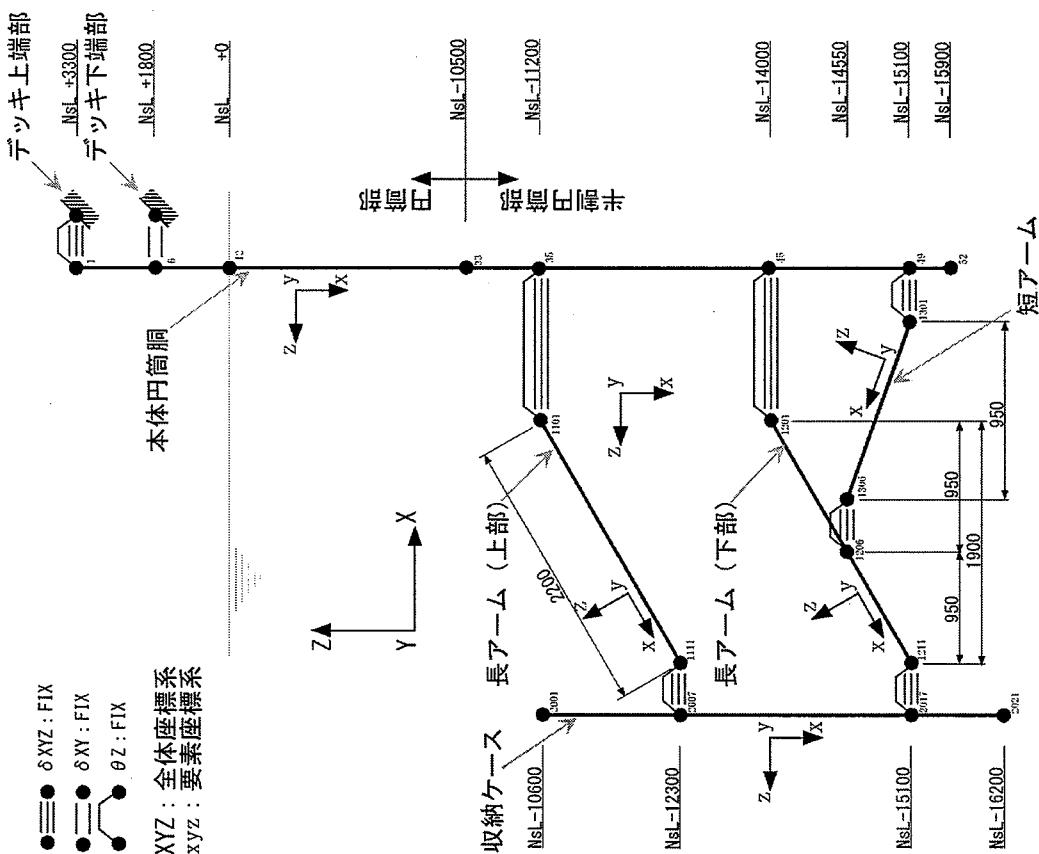


図 4.1-17 FHM の振動解析モデル概念

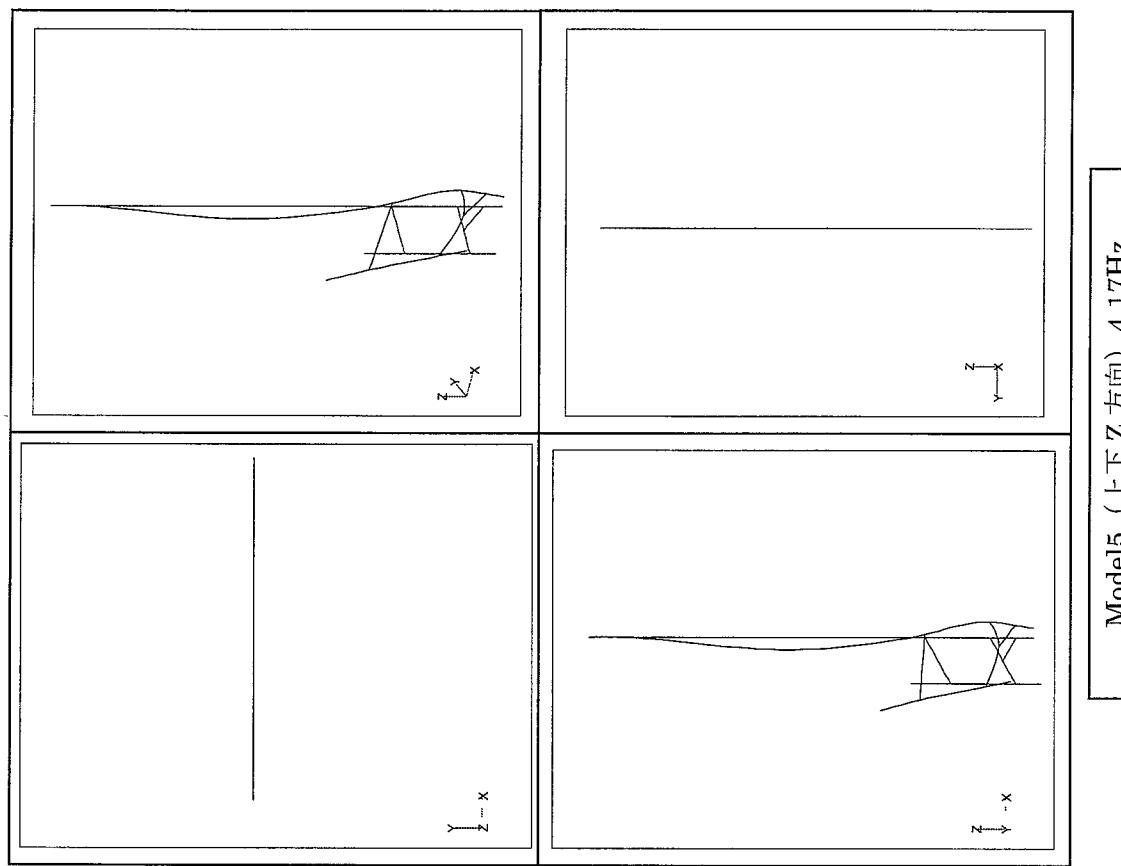


図 4.1-18 (3/3) FHM の支配振動モード

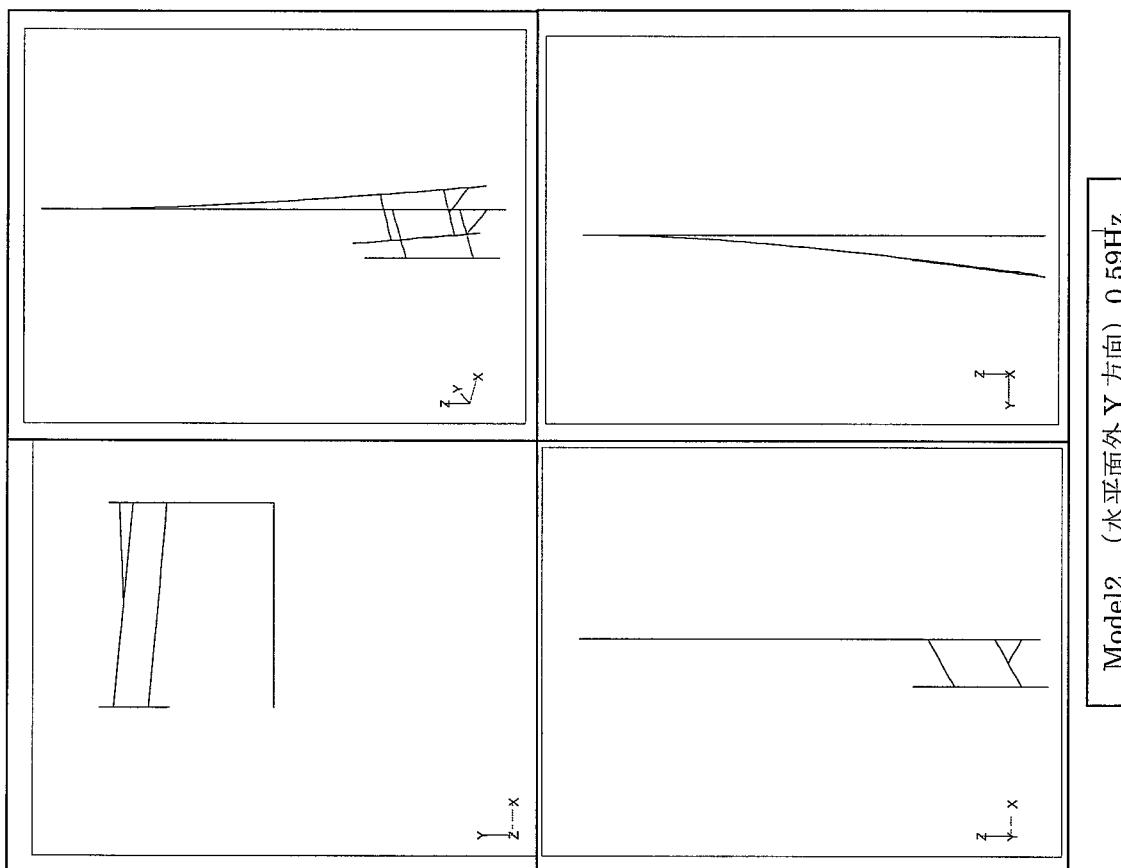


図 4.1-18 (2/3) FHM の支配振動モード

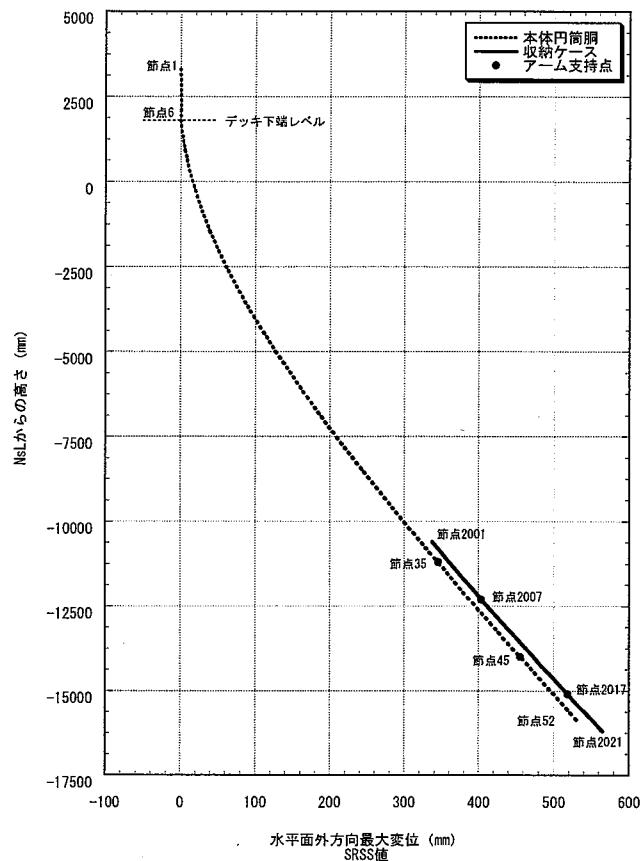


図 4.1-19

S1 地震時における FHM 本体胴及び
収納ケースの水平面外方向変位

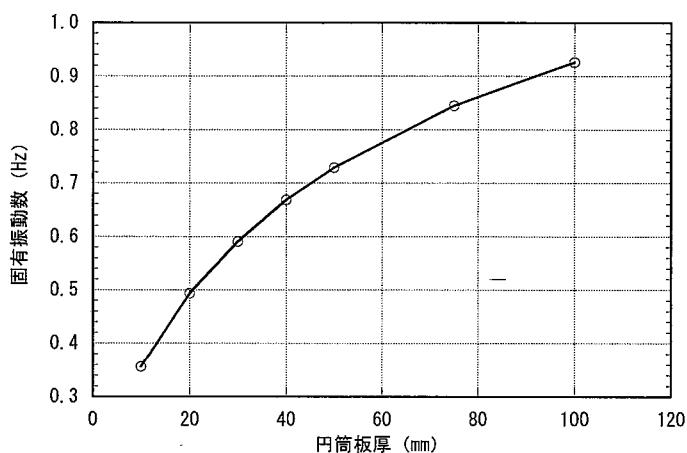


図 4.1-20 FHM の水平面外方向
支配モード固有振動数

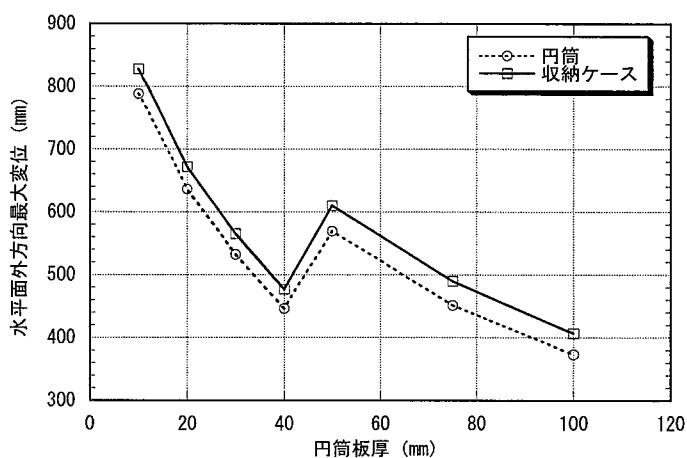


図 4.1-21 FHM の水平面外方向
最大変位

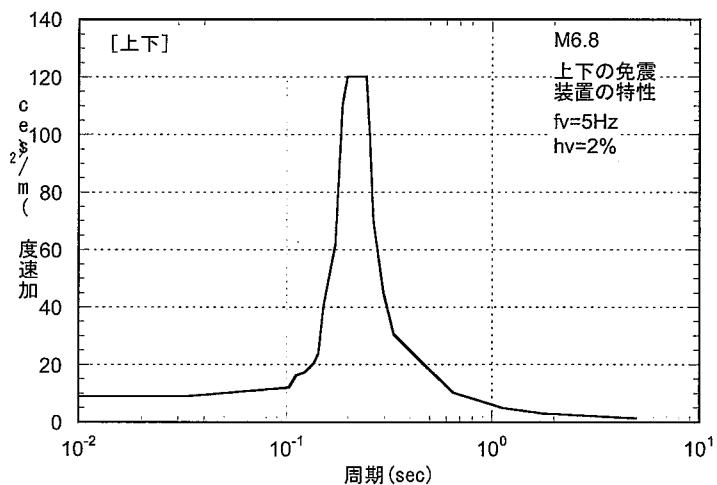


図 4.1-22 fv=5Hz の厚肉積層ゴムを用いた場合の床応答曲線(レファレンス S2)

4.2 3次元免震性能確認

(1) 目的

自然循環炉の建屋を対象に、現在開発中の3次元免震装置を採用した場合の建屋設計との整合性を検討する。

(2) 検討条件

a. 建屋配置図：自然循環炉（平成13年度設定）の建屋配置概念図を図4.2-1に示す。

b. 建屋重量：4933MN

c. コンクリート体積：170000m³

（内訳） 建屋：140000m³、基礎版：30000m³

d. 建屋面積：8067m²

e. 免震装置

3次元免震装置としてはケーブル補強マッシュルーム型空気ばね3次元免震装置、ローリングシール型空気ばねを用いた3次元免震装置及び油圧機構を用いた3次元免震装置の3案が検討されている。表4.2-1に3種類の免震装置の特性を示す。また、免震装置の概念を図4.2-3に示す。

(3) 検討結果

建屋重量と免震装置の支持荷重から必要基数を算出し、必要基数の配置に必要なスペースと建屋面積の比較を行った。表4.2-1に検討結果を示す。同表より提案されている3案とも必要面積が1割から2割不足する結果となった。面積不足を補うためには上部基礎版の跳ね出し、あるいは建屋全体を大きくするなどの対策をとる必要がある。但し、このような対策をとれば建屋重量も増加するので必要な免震装置の基数も増加する。

(4) まとめ

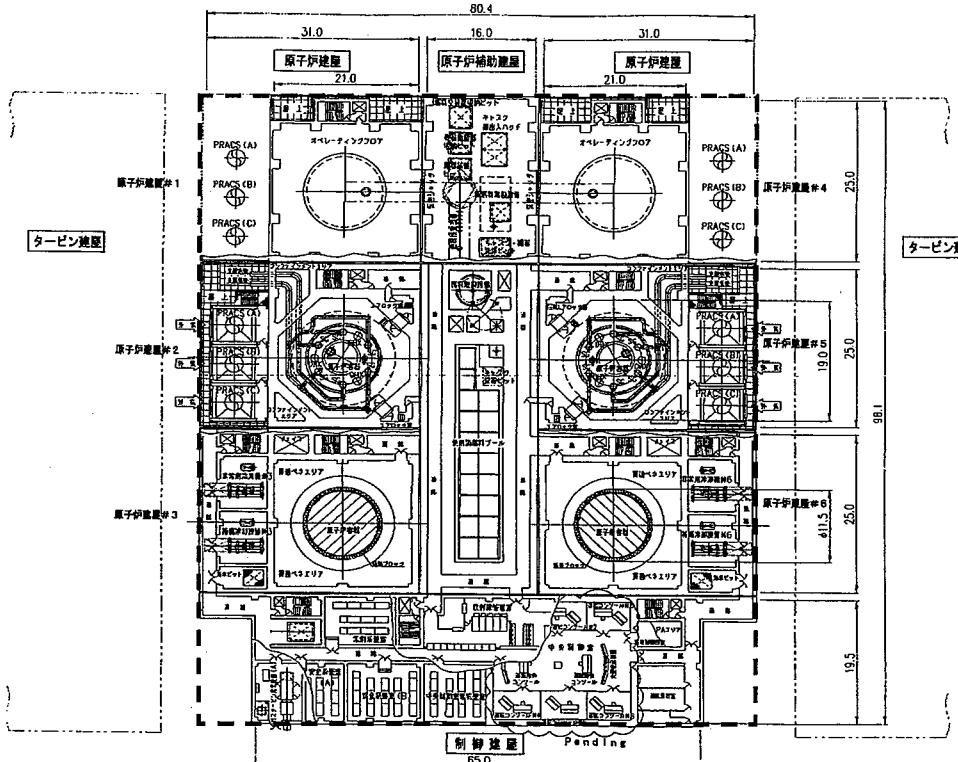
中型タンク式鉛-ビスマス冷却炉は、単位面積当たりの重量が大きく、建屋がコンパクトであるため3次元免震装置を配置するための面積が不足する。3次元免震装置を配置するためには上部基礎版の跳ね出しありは建屋全体を大きくする、あるいは免震装置の容量増などの対策を探る必要がある。

表 4.2-1 3次元免震装置の適合性検討結果

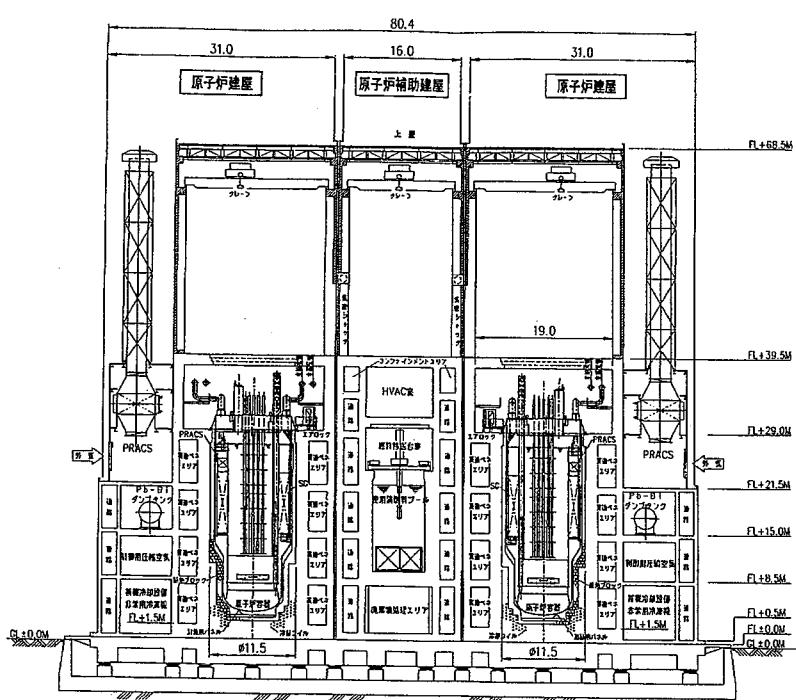
		ケーブル補強マッショルム型空気ばね3次元免震装置	ローリングシール型空気ばねを用いた3次元免震装置	油圧機構を用いた3次元免震装置
建屋側条件	支持重量	$4.93 \times 10^9 \text{N}$		
	建屋面積	8067m^2		
免震装置側条件 (1基当たり)	支持荷重	$5.20 \times 10^7 \text{N}$	$9.80 \times 10^6 \text{N}$	$9.80 \times 10^6 \text{N}$
	必要面積	100m^2	17.2m^2	19.8m^2
必要基数		95 基	504 基	504 基
必要面積		9500m^2	8670m^2	9980m^2
建屋面積/必要面積		0.85	0.93	0.81

注) 各免震装置の概要は、下表の通り

装置の名称	油圧機構を用いた3次元免震システム	ケーブル補強マッショルム型空気ばね3次元免震装置	ローリングシール型空気ばねを用いた3次元免震装置
装置の概念図			
システムの基本概念	積層ゴム(水平)とアクチュエータ型空気ばね(上下)を直列に配置	内筒と外筒の間に張ったローリングシールをケーブルで補強した空気ばね	積層ゴム(水平)とローリングシール型空気ばね(上下)を直列に配置
主要形状寸法	シリンダ外径 2.2m × 装置高さ 3.0m	直径：外筒内法約 9.0m 高さ：塔高 3.0m + 浮上り 0.5m	内筒型空気ばね内法直径 3.02m × 空気ばね高さ 1.37m
上下周期(s) 減衰(%) 許容変位(m)	2.0(設定自由) 20 ±0.2	3.3 15(別置ダンパー) ±0.5	2.0 20(別置きダンパー等) ±0.5
水平周期(s) 減衰(%) 許容変位(m)	1.86 16 ±1.0	4.2 15(別置ダンパー) ±1.5	2.8 20程度 ±1.0
支持荷重(MN)	9.8	37.24	9.8
前提条件 特記事項	通常時油圧 14.7MPa、地震時 25.0MPa ロックリング抑制シリンダ有り	ロックリング防止装置(上下/水平分と兼用、油圧連通管方式) 防火たれ壁 空気ばね調整/保持装置 内圧 0.9MPa(高圧ガス法に接触しない)	ダイアフラム耐圧性能(内圧 1.6MPa、地震時 2.5MPa) 空気ばね摺動部分設計、上下方向減衰確保、積層ゴム大変形時の治具挙動、ロックリング動低減、空気ばね解析法開発、装置設計法開発
保守・補修	油圧要素(作動油シール、油圧源)のメンテナンス必要 装置の取替え可能	60年耐用可(耐候性ゴム) 点検、補修可能 取替え容易	積層ゴム、摺動部、ダイアフラム、空気ばねの維持管理 装置の取換え可



(平面図)



(立面図)

図 4.2-1 自然循環炉 配置概念図 (H13 年度設定値)

4.3 炉上部構造の対策概念設定

(1) 目的

4.1 項の強地震条件の影響評価の結果、従来の UIS 及び FHM では耐震性確保が困難であることが明らかになった。本検討では耐震性を向上させるための対応策をサーベイし、有望と考えられる概念を設定する。

(2) 検討内容

a. UIS の耐震性向上対策

(a) 片持ち梁状 UIS の耐震性検討

4.1 項の検討結果より従来概念の UIS では下端変位が大きく制御棒挿入性を確保できない。そのため、まず片持ち梁方式を維持したままで UIS の剛性向上を図った場合の耐震性検討を行った。床応答曲線を図 4.3-1 に、解析結果を表 4.3-1 に示す。

従来のコラム型 UIS(CRD 案内管の板厚は現実的に上限と考えられる 20mm とした。)ではレファレンス S2 地震によって下端で 125mm の水平変位(制限値 : 15mm)が発生している。

円筒一体型の場合はコラム型の場合より水平変位が大きくなつた。これは流体付加重量(UIS 内に内包する冷却材重量と排除マスの和)が大幅に増大したためである。

円筒+コラム型の場合は、上部約 2/3 を円筒構造とし下部はコラム型(「円筒+コラム型」)としたもので、円筒一体型の構造から振動挙動に影響する下部の重量の削減を図った。この時、コラム型より 6 割変位が小さくなつたが、制御棒挿入性の制限条件は満たさなかつた。

コラム型+補強板型の概念は流体付加重量の増大を抑えつつ剛性向上を試みたもので、上部約 2/3 の領域のバッフルプレート及び回転プラグ下端を 6 枚の縦板(リブ)で補強した。しかししながら、コラム型 UIS から有意な変位の削減はできなかつた。

以上より片持ち梁状 UIS では耐震性(制御棒挿入性)を確保できる見通しが無い。UIS 下端と炉心側の相対変位を大幅に減らすためには UIS と炉心側を結合することが必須である。

(b) UIS と炉心側を結合する概念

結合方式としては、ホールドダウンプレートの外周部に差込構造(ランツェ)を設け、ランツェを流量の小さい遮へい体頂部に差し込んで結合する方式とランツェを炉心槽に設けた受け部に差し込んで結合する 2 案が考えられる。前者は国内のナトリウム冷却 FBR の設計の中で採用された概念(図 4.3-2 を参照)であり、後者は米国の CRBR で採用された概念(図 4.3-3 を参照)である。両者の定性的な比較を表 4.3-2 に示すが、ここでは原子炉容器径への影響が少ない前者の方式を採用する。

ランツェを採用による構造上の課題を以下に示す。

- ・燃料交換時にはランツェを引き抜く必要があり、回転プラグにジャッキアップ装置が必要となる。ランツェは燃料集合体のハンドリングヘッド部まで挿入すればよいのでジャッキアップ量は 150mm 前後となる。なお、ジャッキアップ装置はもんじゅで採用している。

- ・ランツェからの反力を受けるホールドダウンプレートの剛性を高くする必要が生じ得る。
- ・集合体群が同方向に群振動する場合は CRD 案内管の変形で変位を吸収できるためランツェに大きな荷重は作用しないが、左右に分かれるモードで群振動する場合にはランツェが左右に水平力を受けてホールドダウンプレートがこじられる。それに対するホールドダウンプレートの健全性確認が必要である。
- ・ランツェを設けることで集合体に特に大きな荷重が生じることは無いと考えられる。
- ・ホールドダウンプレートは遮へい体領域まで広がる。燃料の上部と遮へい体の上部では冷却材の温度差があるため、ホールドダウンプレートの中心部と周辺部で温度差が生じる。この温度差に対する健全性確認が必要である。
- ・ランツェは厚肉構造となり、熱過渡やサーマルストライピングでの健全性確認が必要。

b. FHM の耐震性向上対策

従来の片持ち梁状 FHM は S1 地震の際、下端で約 0.5m の変位が発生しており、UIS 以上に耐震性の確保が困難である。FHM の耐震性向上には FHM を 2 点支持構造とする必要がある。このため、原子炉容器径へのインパクトを抑えつつ FHM の耐震性を向上させるため、FHM を UIS で水平支持する方式を採用する。ここで UIS は変位が小さい「円筒＋コラム型」とする。

次に「円筒＋コラム型」 UIS と FHM を結合させた場合の地震応答解析結果を行った。解析結果を図 4.3-4 に示す。解析の結果、FHM の下端部で 67mm、アーム先端では 102mm の S1 地震時変位となり、片持ち梁状 FHM に比べて大幅に変位が低下した。ただし、切り込み中に FHM が入っている状態で地震が発生すると UIS との衝突が生じる。衝突が発生しても FHM の引き抜きが困難となるような変形や掴んでいる燃料の脱落は生じない見通しであるが、FHM の駆動機構の健全性がどうなるかは不明である。これについては今後の課題であるが、これに対する対策としては UIS のスリット部と FHM との隙間を小さくして積極的に FHM をスリット部で支持する方法が適合すると考えられる。

c. 構造概念の設定

上記の耐震性向上対策を施したことによる原子炉構造概念の変化を図 4.3-5 に示す。また、自然循環炉、及び強制循環炉の原子炉構造概念を各々図 4.3-6～9 及び図 4.3-10～13 に示す。

自然循環炉ではランツェ設置に伴うホールドダウンプレート径の増大及び回転プラグジャッキアップ装置の設置により回転プラグ径が増大し、その結果原子炉容器径は $\phi 10.1\text{m}$ から $\phi 10.8\text{m}$ に増大する。

一方、強制循環炉では同様な対策を採ったものの原子炉容器径は $\phi 10.8\text{m}$ から変わらなかつた。容器径の増大が生じなかつた理由を以下に示す。

- ・ 平成 13 年度の構造健全性検討で SG スタンドパイプの幅を大きくした結果、炉上部配置に余裕が有り、耐震性確保のため回転プラグの径が大きくなつてもこの中で吸収できた。

- ・自然循環炉では炉内中継槽を炉心槽の内側に配置している。回転プラグ径が大きくなると炉内中継槽位置を外側に移動させる必要があり、炉心槽径が増大し、更に SG も外に押しやられた。一方、強制循環炉では炉内中継槽を炉心槽の外(スタンドパイプの並び)に置いている。そのため回転プラグ径が大きくなつても炉心槽径やスタンドパイプ位置を外に移す必要がなかつた。

d. その他の耐震性向上対策

今年度の耐震性検討で UIS 及び FHM のような鉛ビスマス中の長尺構造は、片持ち梁状では耐震性の確保が困難であることが判明した。同様な構造としては燃料の炉内中継用案内管が挙げられる。本案内管は内筒などの近くにある比較的剛性の高い構造物からサポートする必要がある。また、ポンプや SG のスタンドパイプについても耐震性を見通したうえでサポートの必要の有無を決定する必要がある。

(3) まとめ

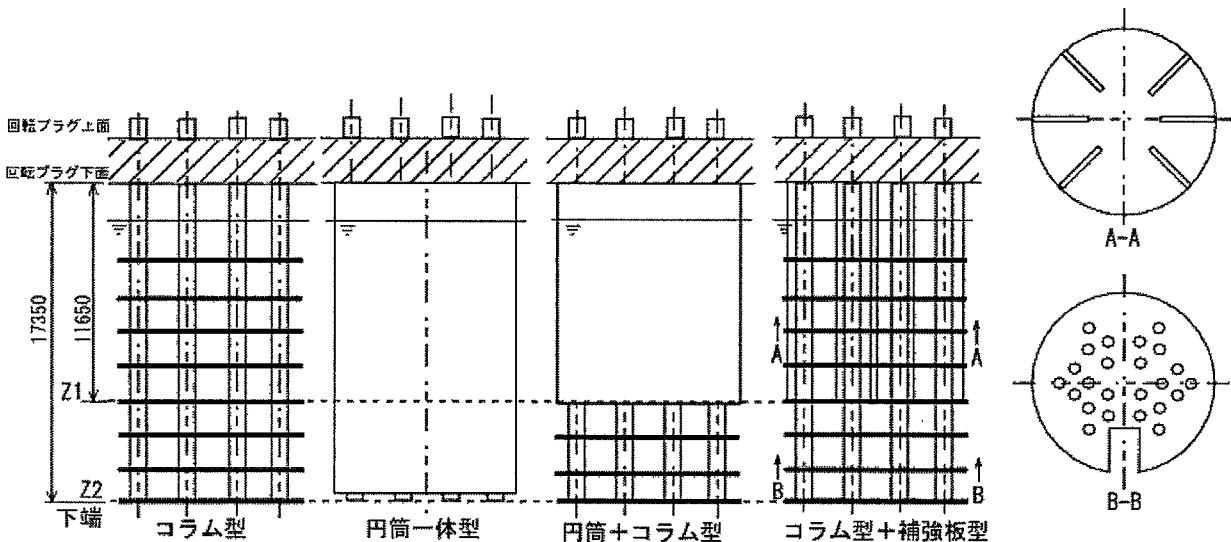
耐震性確保を図るため UIS の下端を炉心側と結合し、FHM を UIS で水平支持する炉上部構造概念を設定した。これにより自然循環炉の原子炉容器径は $\phi 10.1\text{m}$ から $\phi 10.8\text{m}$ に増大する。一方、強制循環炉の原子炉容器径は $\phi 10.8\text{m}$ から変わらなかつた。

なお、今年度の耐震性検討で鉛ビスマス中の長尺構造は片持ち梁状では耐震性の確保が困難であることが判明した。燃料の炉内中継用案内管は内筒などの近くにある比較的剛性の高い構造物からサポートする必要がある。また、ポンプや SG のスタンドパイプについても耐震性を見通したうえでサポートの必要の有無を決定する必要がある。

表 4.3-1 各種 UIS 形状に対する地震応答解析結果

	コラム型	円筒一体型	円筒+コラム型	コラム型+補強板型
Z1 の変位	92mm	81mm	23mm	80mm
Z2 の変位	125mm	141mm	51mm	128mm
固有振動数	1.36Hz	1.38Hz	2.14Hz	1.49Hz

注) NC 炉-M550 を対象。CRD 案内管板厚は 20mm、円筒の板厚は 50mm、補強板板厚 50mm とした。地震条件はレファレンス S2 である。

表 4.3-2 UIS と炉心側の結合方式¹⁾

	UIS と遮へい体を結合	UIS と炉心槽を結合
成立性 ²⁾	□ ランツェのストライピングの検討要	○
信頼性	○ 集合体のずれがあるときのランツェの挿入性が気になるが、ランツェ先端を円錐状にすることで解決できる見通し。	○
経済性	○	△ UIS と遮へい体を結合する方式よりも、更に RV 径が増大する。
評価	選定	—

1) ○: 適合性がある。 □: 適合性はあるが、○より劣る。 △: 適合性が良くない。

2) CR 挿入性については両方式とも満足できる。

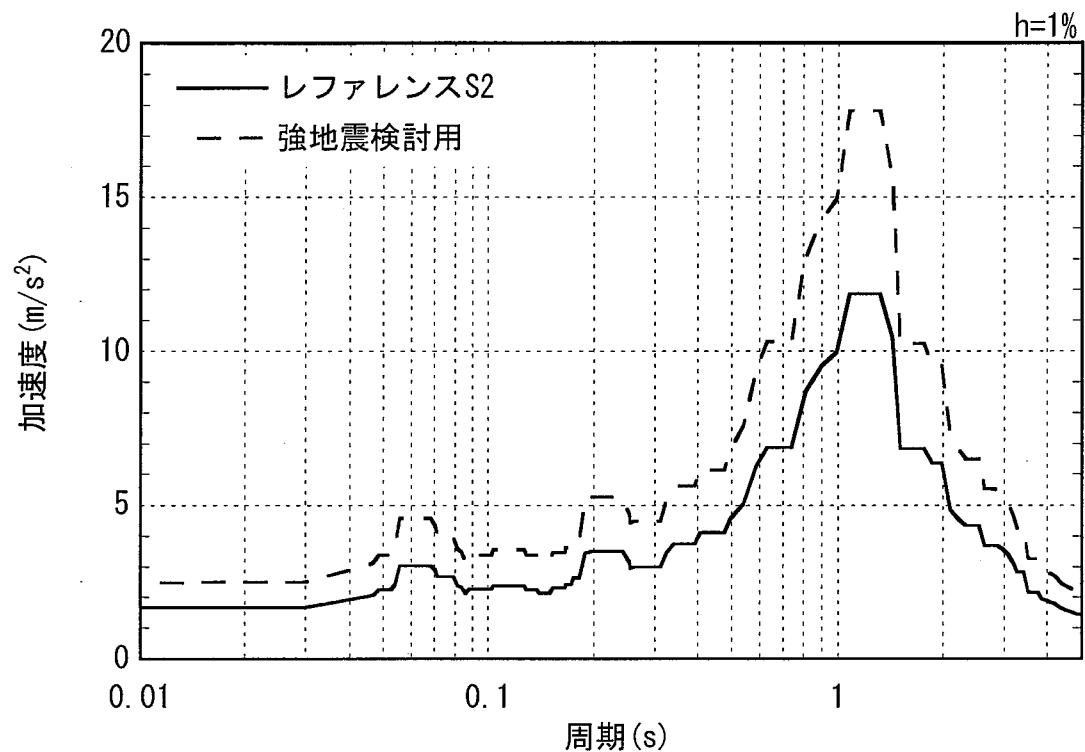
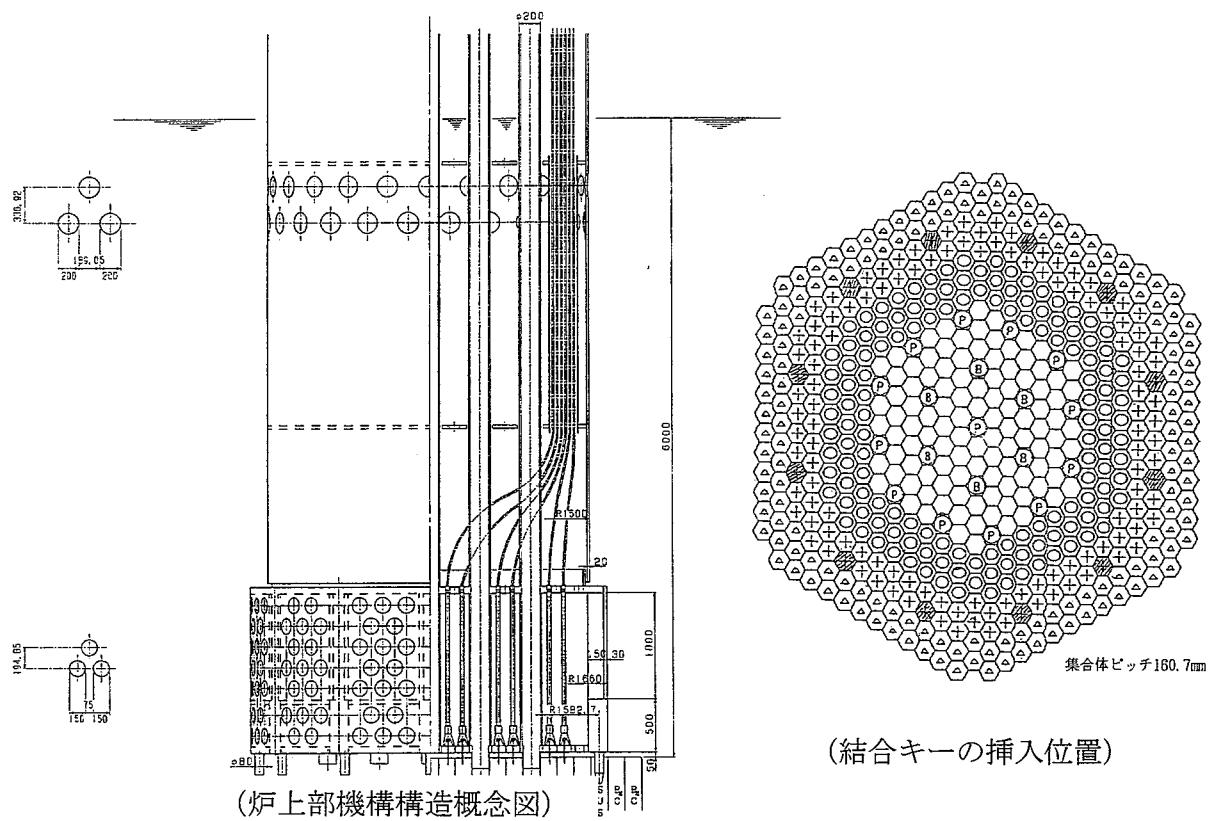
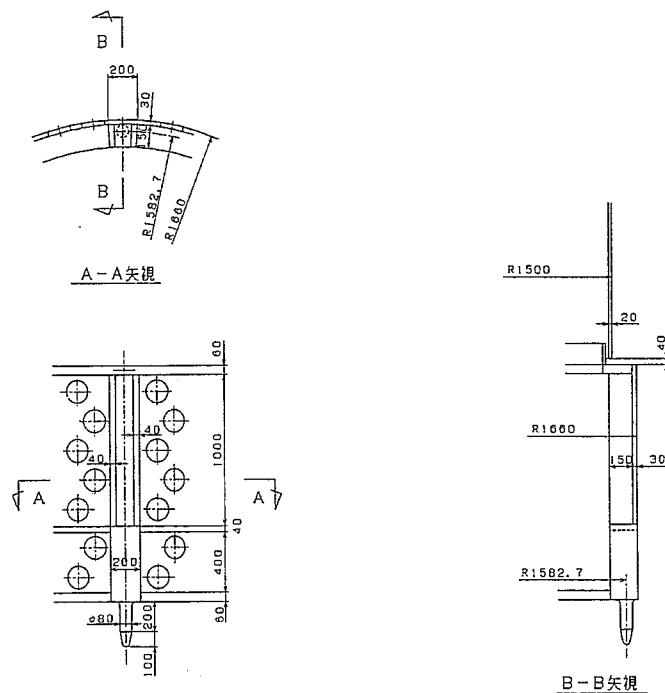


図 4.3-1 原子炉容器据付位置の床応答曲線（水平）



(炉上部機構構造概念図)



(UIS 下部結合キー廻り構造概念)

図 4.3-2 UIS と遮へい体を結合する方式の概念図 (PNC 大型炉)

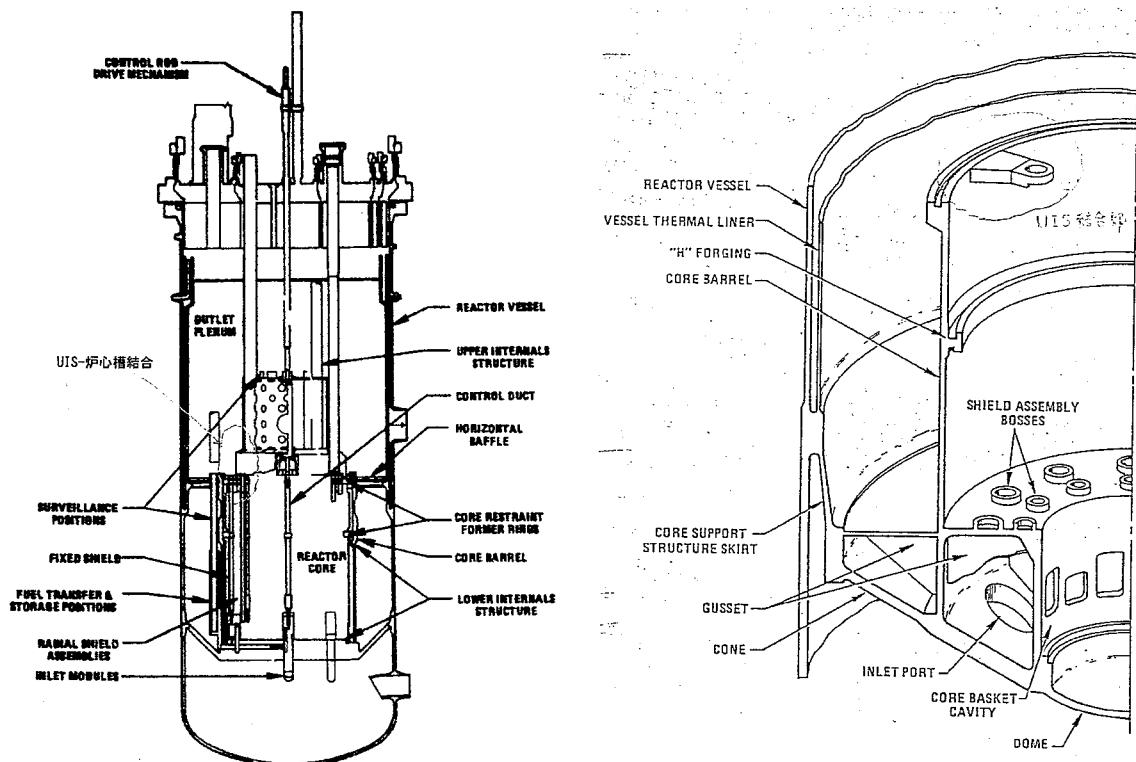


図 4.3-3 CRBRP 方式 UIS 概念図

水平方向変位

A : 18mm
B : 67mm
C : 102mm
D : 38mm
E : 18mm

* : 自然循環炉を対象
* : 地震条件はS1地震
* : UISのCRD案内管板厚は20mm
* : FHMの板厚は30mm

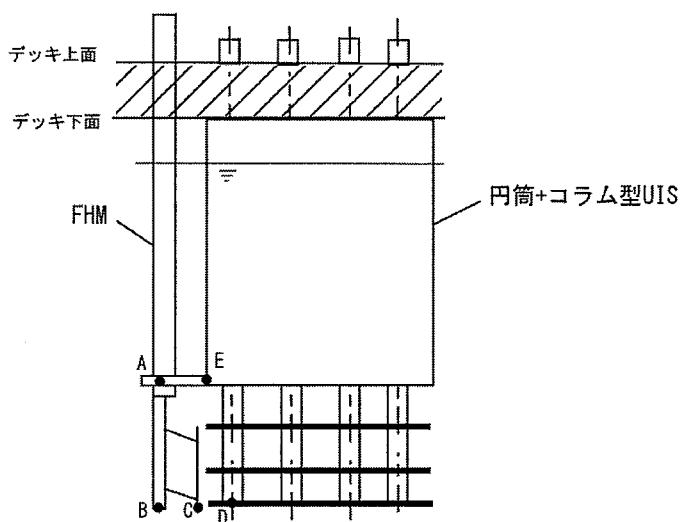


図 4.3-4 UIS と FHM 一体型の場合の地震応答解析結果

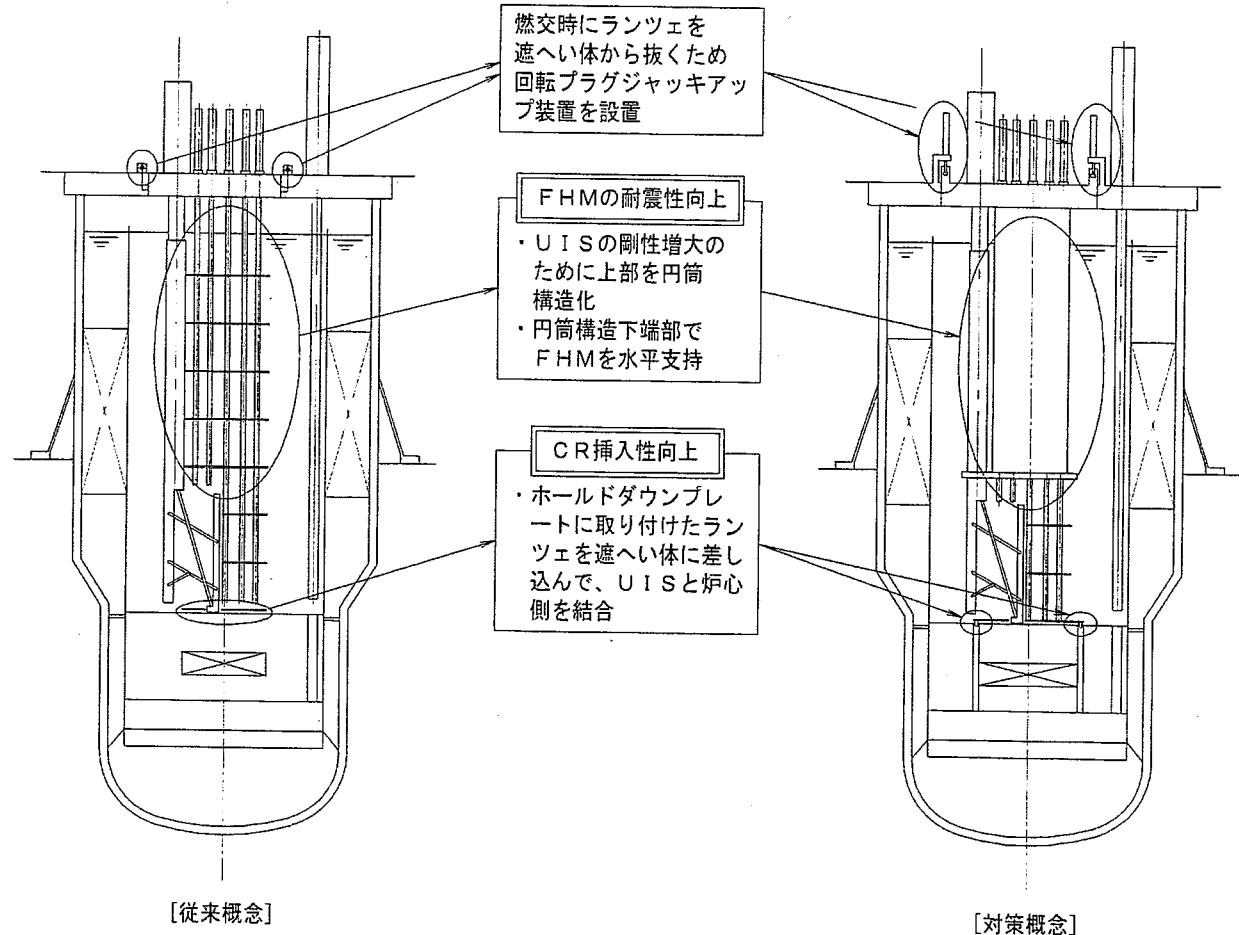


図 4.3-5 原子炉構造耐震性向上対策概念

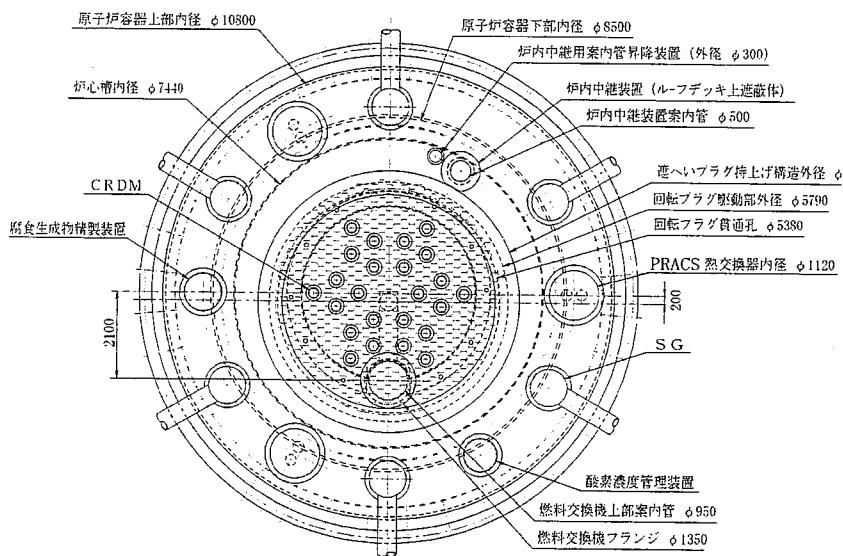


図 4.3-6 自然循環炉 原子炉構造概念図
(平面図)

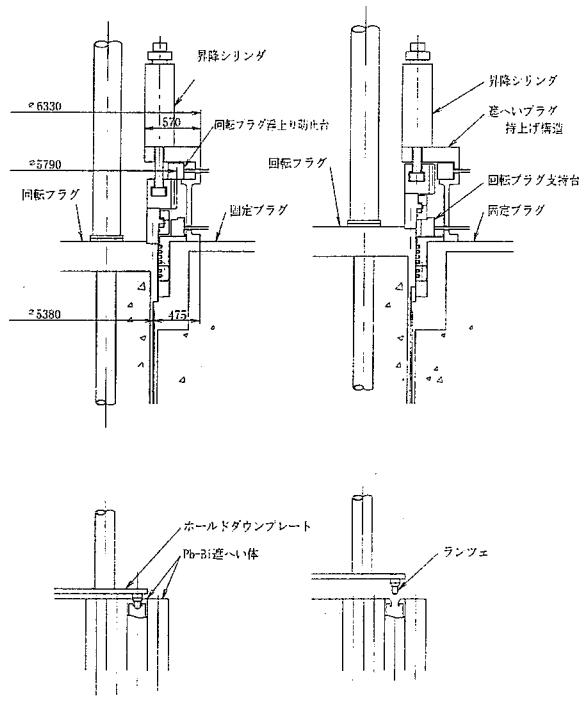


図 4.3-9 回転プラグジャッキアップ構造及び
UIS 下端のランシェ構造（自然循環炉）

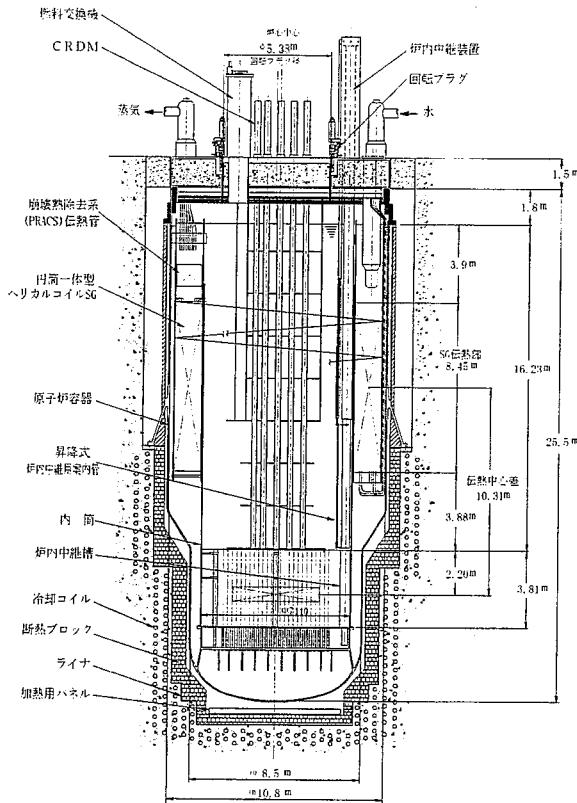


図 4.3-7
自然循環炉 原子炉構造概念図
(定格時、立面図)

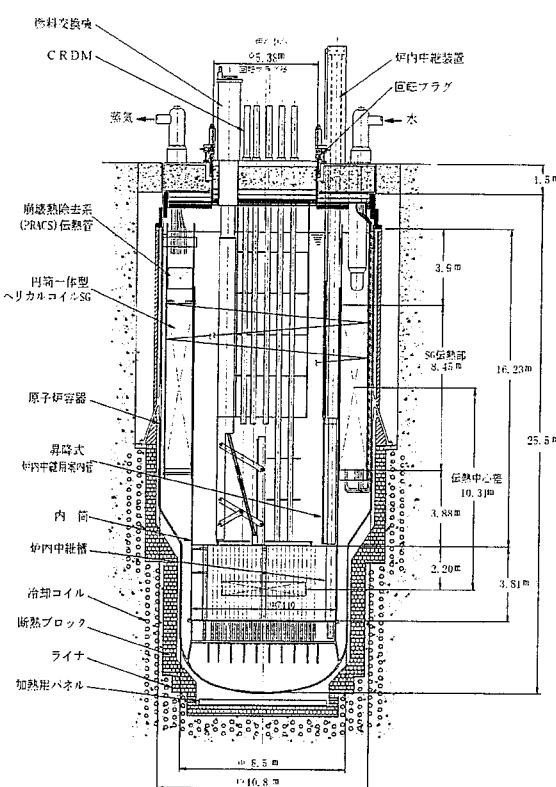


図 4.3-8
自然循環炉 原子炉構造概念図
(燃料交換時、立面図)

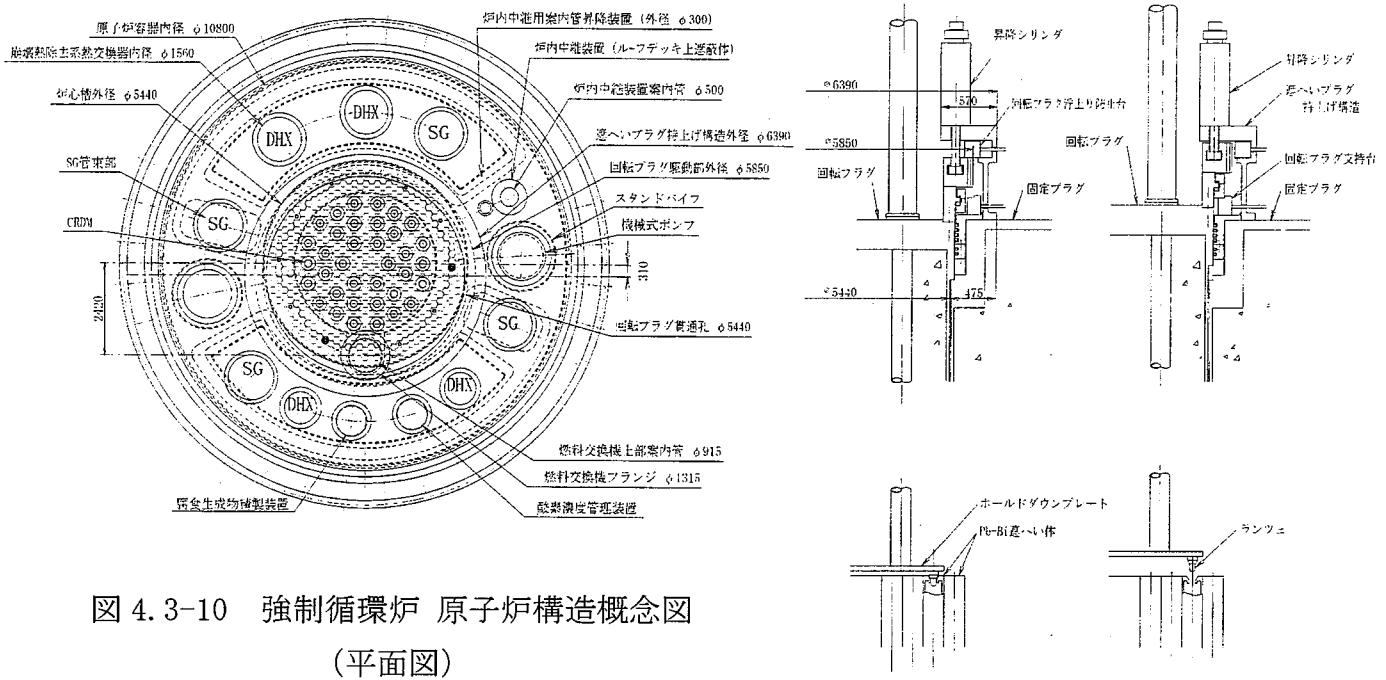


図 4.3-10 強制循環炉 原子炉構造概念図
(平面図)

図 4.3-13 回転プラグジャッキアップ構造及び
UIS 下端のランツェ構造(強制循環炉)

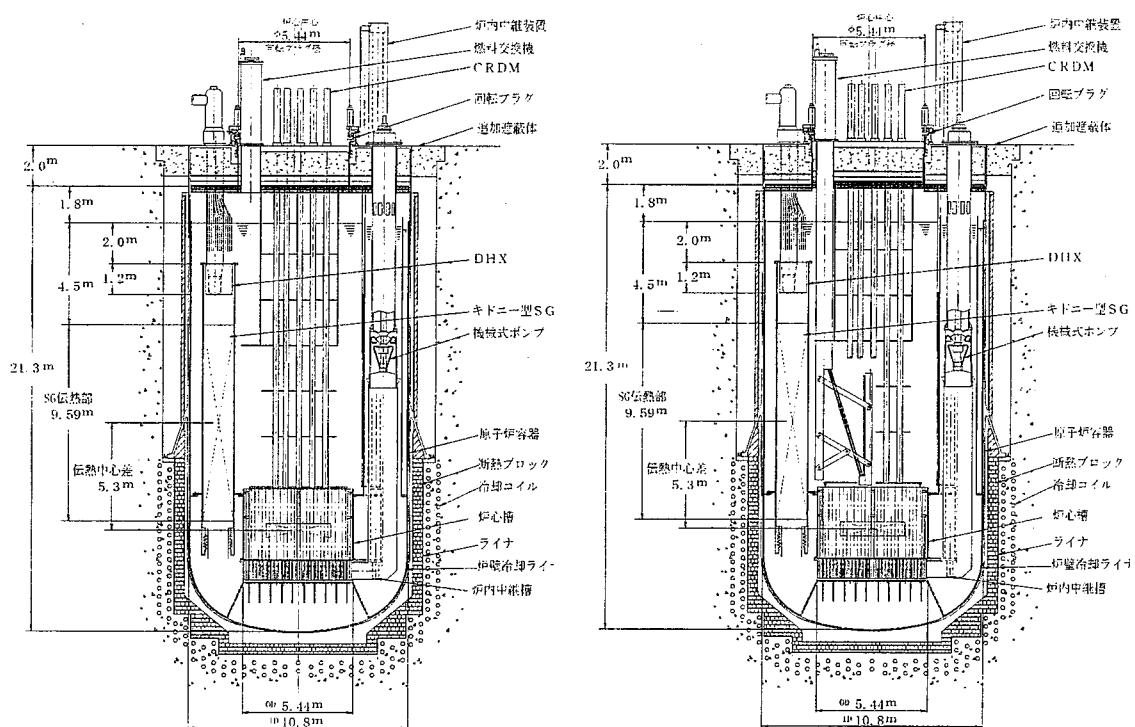


図 4.3-11
強制循環炉 原子炉構造概念図
(定格運転時、立面図)

図 4.3-12
強制循環炉 原子炉構造概念図
(燃料交換時、立面図)

4.4 スロッシングに対する検討

(1) 目的

鉛ビスマス炉は冷却材の比重が大きく地震時にスロッシングが生じた場合にルーフデッキ底板や熱遮へい板等の健全性が懸念される。そのため、スロッシングに対する成立性を検討する。

(2) 検討方法・条件

a. スロッシング波高の検討方法

汎用 FEM 解析コード FINAS を用い直接積分応答解析により水平動によるスロッシング波高を求める。

b. 制限条件

- S1 地震後のプラント再使用が可能であることが必要であり、ルーフデッキ下面の熱遮へい層の健全性を維持するため冷却材が熱遮へい層に到達しないことを条件とする。
- S2 地震に対してはバウンダリが健全であればよく、スロッシングによりカバーガスバウンダリであるルーフデッキ底板が破損しないことを条件とする。

(3) 解析モデル及び荷重条件

a. 解析モデル

自然循環炉の原子炉構造を図 4.1-1、強制循環炉の原子炉構造を図 4.1-2 に示す。

自然循環炉では原子炉容器と内筒を単純な円筒容器にモデル化する。内筒以外の内部構造物を無視することはスロッシング抑制効果を無視することになっているので保守側である。図 4.4-1 に解析モデルを示す。

強制循環炉では、SG スタンドパイプ、ポンプ及び CT などがリング状に密に配置されている。ここでは SG スタンドパイプの炉心側のシェルと同心径を有する円筒が RV 内にあるとして軸対称モデルとして扱う。なお、円筒の高さは SG スタンドパイプの上端レベルに合わせる。(ポンプ、スタンドパイプや CT は液面上まで存在している。これを SG スタンドパイプと同レベルに扱うことはスロッシングにとって保守的な扱いとなる。) 図 4.4-2 に解析モデルを示す。

自然循環炉の場合、原子炉構造の固有周期が 0.2 秒に対しスロッシングモードの固有周期が 2.9 秒と大きな差があることから構造物は剛体として扱った。なお、強制循環炉炉-M750 の場合も同様に構造物は剛体として扱った。

流体部分は 4 節点四辺形軸対称調和級数流体要素 LNQAX4、2 節点軸対称調和級数流体構造境界要素 INLAX2、2 節点軸対称調和級数自由表面要素 SNLAX2 を用いてモデル化した。

b. 荷重条件

スロッシングが支配的な起因力となる水平方加速度時刻歴を容器に負荷する。図 4.4-3 にレフアレンス S2 地震の水平方向加速度(原子炉容器据付位置)の時刻歴波を示す。S1 地震はレフアレンス S2 地震の 2/3 倍、強地震は 3/2 倍である。(なお、ロッキングは電共研でスロッシングに与える影響が小さいとの知見があり、本検討では無視した。ただし、一般的に無視できるかどうかについては課題が残る。)

(4) 応答解析結果

表 4.4-1 にスロッシング波高の最大応答値、図 4.4-4 及び図 4.4-5 にレファレンス S2 地震のときの波高の時刻歴を示す。これらより以下のことが分かる。

(自然循環炉)

- ・S1 地震：積層板に到達しない。
- ・レファレンス S2 地震：ルーフデッキ底板には衝突しない。
- ・強地震：ルーフデッキ底板に衝突する。

(強制循環炉)

- ・S1 地震：積層板に到達しない。
- ・レファレンス S2 地震：積層板に到達しない。
- ・強地震：積層板に到達しない。

(5) 自然循環炉の強地震検討用によるスロッシング対策

(4) の検討の結果、自然循環炉の場合には強地震の条件では積層板に衝突する結果となったため、(4) の解析モデルを更に詳細化し、スロッシング抑制対策を取り入れてうえで検討を行った。図 4.4-6 に解析モデルを示す。解析モデルは SG の効果を考慮し原子炉容器側に短い板をモデル化している。また、SG 上部の原子炉容器と内筒の間に多孔水平板（開口比：75%）を設置するものとして開口比が一致するようにモデル化した。

この解析モデルを用いて解析した結果を表 4.4-2、図 4.4-7 にレファレンス S2 地震のときの波高の時刻歴、図 4.4-8 に最大波高のときの液面の様子を示す。表 4.4-2 から以下のことが分かる。

(自然循環炉)

- ・S1 地震：積層板に到達しない。
 - ・レファレンス S2 地震：積層板に到達しない。
 - ・強地震：積層板には到達し破損する可能性はあるがルーフデッキ底板には到達しない
- 以上の検討より、自然循環炉の場合には強地震検討用条件で制限条件を満足するためには SG 上部の原子炉容器と内筒の間に多孔水平板を設置することが必要である。

(5) まとめ

検討の結果、下記の結論を得た。

- ・S1 地震及びレファレンス S2 地震の場合、自然循環炉及び強制循環炉の両者とも熱遮へい層に到達せず積層板の健全性は維持できる。
- ・強地震検討用条件では自然循環炉の場合、積層板には到達するため破損する可能性はあるがルーフデッキ底板には到達しないことから、カバーガスバウンダリの健全性は維持できる。一方、強制循環炉の場合には積層板にも到達しない。
- ・自然循環炉の場合、強地震検討用条件で制限条件を満足するためには SG 上部の原子炉容器と内筒の間に多孔水平板を設置することが必要である。

表 4.4-1 スロッシング波高（対策前）

	地震条件	スロッシング波高	制限値	評価
自然循環炉	S1 地震	0.69m	1.0m	○
	レファレンス S2	1.03m	1.3m	○
	強地震検討用	1.55m	1.3m	△
強制循環炉	S1 地震	0.64m	1.5m	○
	レファレンス S2	0.96m	1.8m	○
	強地震検討用	1.44m	1.8m	○

表 4.4-2 スロッシング波高（スロッシング抑制対策あり）

	地震条件	スロッシング波高	制限値	評価
自然循環炉	S1 地震	0.51m	1.0m	○
	レファレンス S2	0.77m	1.3m	○
	強地震検討用	1.16m	1.3m	○

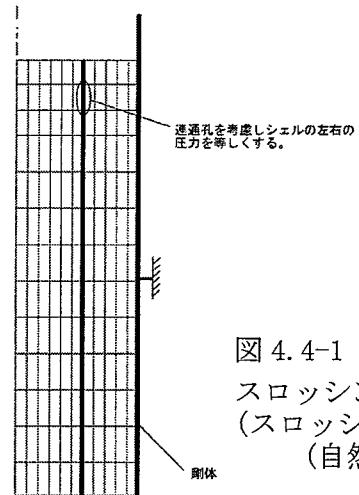
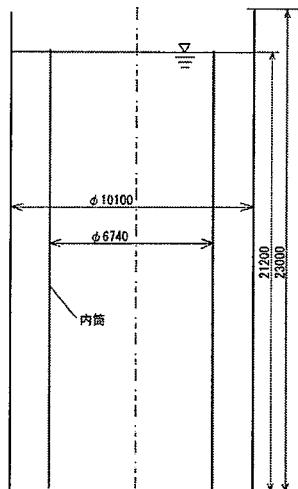


図 4.4-1

スロッシング解析モデル
(スロッシング対策無し)
(自然循環炉)

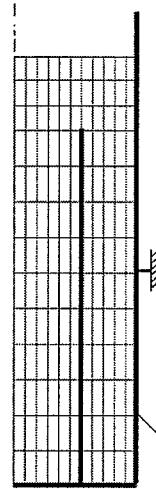
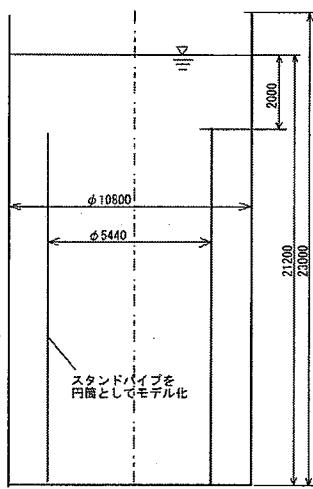


図 4.4-2

スロッシング解析モデル
(強制循環炉)

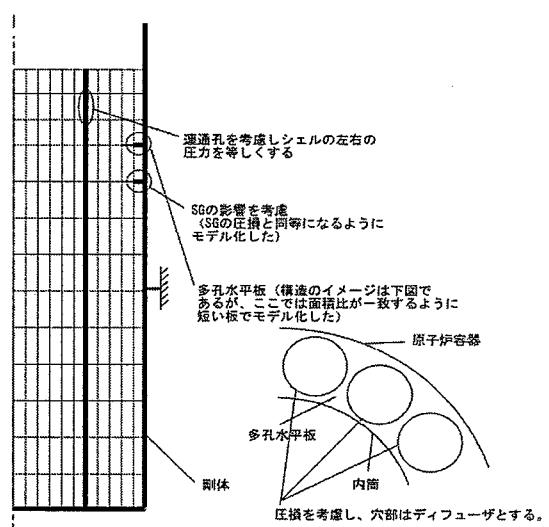
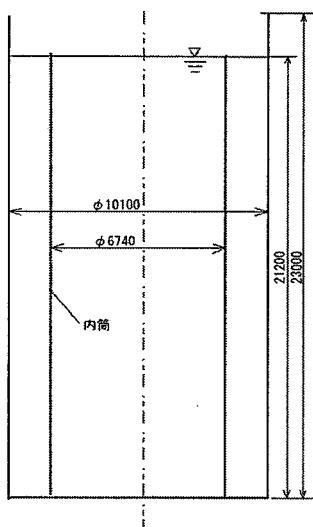


図 4.4-6 スロッシング解析モデル (スロッシング対策有り)
(自然循環炉)

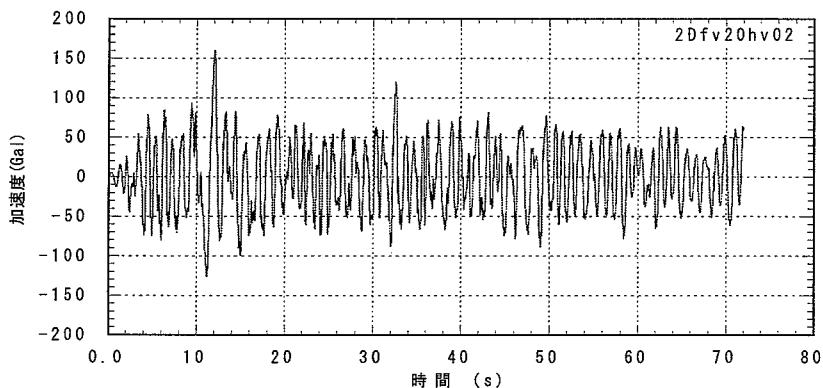


図 4.4-3
原子炉容器据付位置の
水平方向加速度時刻歴波
(レファレンス S2)

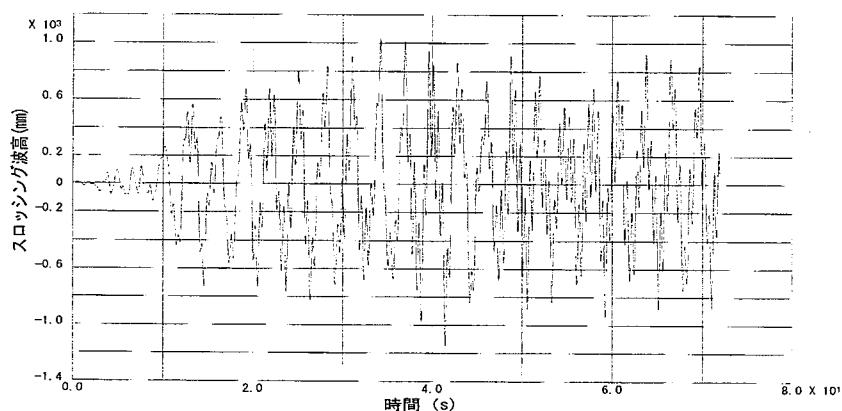


図 4.4-4
スロッシング波高の時刻歴
(自然循環炉, スロッシング対策
無し Reference S2)

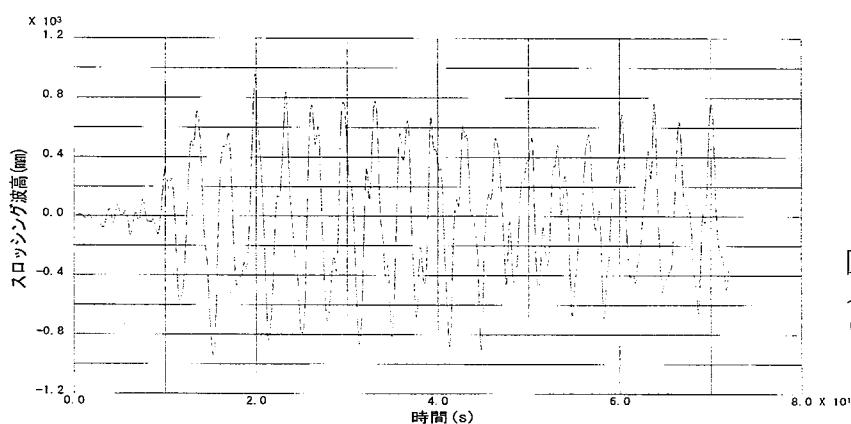


図 4.4-5
スロッシング波高の時刻歴
(強制循環炉, Reference S2)

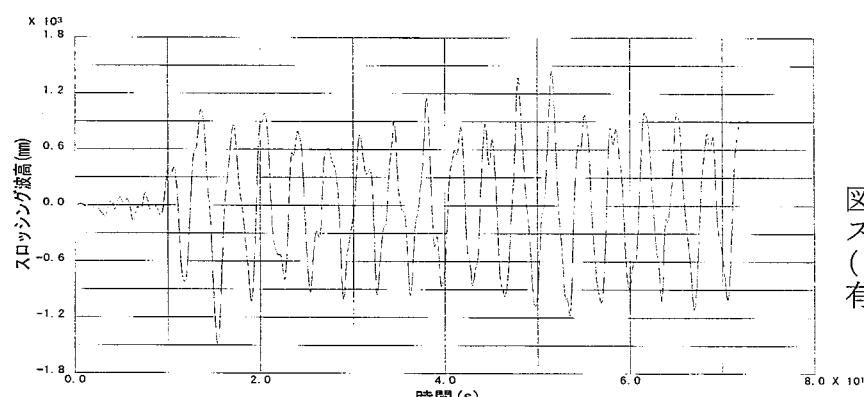


図 4.4-7
スロッシング波高の時刻歴
(自然循環炉, スロッシング対策
有り Reference S2)

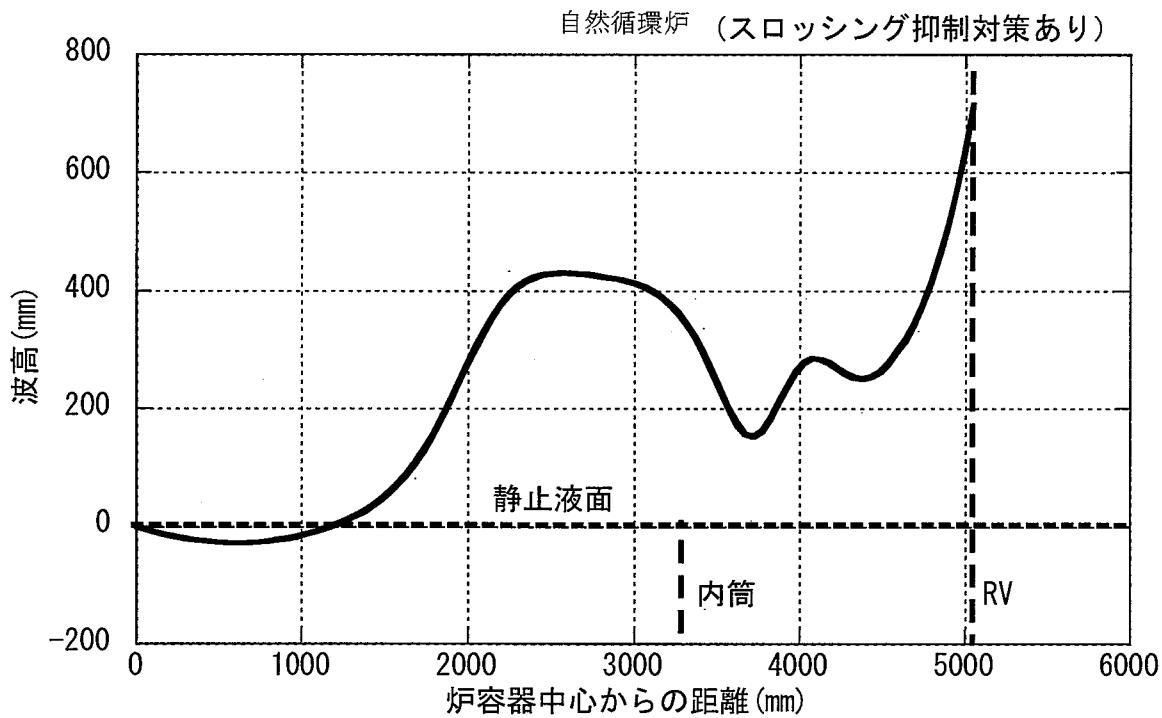


図 4.4-8 スロッシング最大波高時の液面

5. 热的健全性

5.1 炉壁の健全性

(1) 目的

炉壁の健全性についての傾向を見るために、既存の解析結果を参考に検討する。

特に、炉壁の耐熱性でクリティカルとなる通常起動時の液面部及びスクラム後の熱成層発生レベルにおける熱応力をナトリウム冷却大型炉を参考に傾向を把握した。

(2) 検討内容

a. 起動時発生応力の推定

ナトリウム冷却大型炉の解析結果を基に中型タンク式鉛-ビスマス冷却炉の原子炉容器液面部に発生する熱応力を推定した。これを表 5.1-1 に示す。

ナトリウム冷却大型炉における発生応力は 229MPa である。これに応力に大きく影響すると考えられる以下の項目を考慮して発生応力を推定した。

- ・容器形状 : 応力は(直径×板厚)の 0.5 乗比例¹⁾
- ・材料の熱膨張係数 : 応力は熱膨張係数に比例
- ・材料の熱伝導率 : 応力は(熱伝導率)の 0.5 乗逆比例 (経験に基づく傾向)
- ・起動時温度変化幅 : 応力は温度変化幅に比例

注 1) 曲線状の軸方向温度分布の場合は 0.5 乗より低めになる傾向があるが、ここでは保守側に 0.5 乗として扱う。

鉛ビスマス炉は形状効果では大きくなるが、熱膨張係数が小さく、炉壁冷却の効果が大きく発生応力はナトリウム冷却大型炉より小さくなると推定される。

b. 热成層通過時発生応力の推定

ナトリウム冷却大型炉の解析結果を基に原子炉容器に発生する熱成層通過時の熱応力を推定した。これを表 5.1-2 に示す。また、ナトリウム冷却大型炉及び鉛ビスマス炉の解析による手動トリップ後の熱成層の軸方向温度分布を図 5.1-1 に示す。

ナトリウム冷却大型炉における発生応力は 330MPa である。これに応力に大きく影響すると考えられる以下の項目の効果を考慮して発生応力を推定した。

- ・容器形状 : 応力は(直径×板厚)の 0.5 乗比例¹⁾
- ・材料の熱膨張係数 : 応力は熱膨張係数に比例
- ・熱成層の温度勾配 : 応力は温度勾配に比例
- ・熱成層の温度差 : 応力は温度差に比例

注 1) 曲線状の軸方向温度分布の場合は 0.5 乗より感度は鈍くなる傾向があるが、ここでは保守側に 0.5 乗として扱う。

鉛ビスマス炉は形状の効果及び熱成層温度差は大きいが、熱膨張係数及び熱成層の温度勾配が小さく発生応力はナトリウム冷却大型炉の約半分と推定される。

(3) まとめ

ナトリウム冷却大型炉を参考に、鉛ビスマス炉の特徴を考慮して原子炉容器壁に発生する熱応力の傾向を検討した。これから、鉛ビスマス冷却炉の発生応力は使用材質の違いの効果によりナトリウム冷却大型炉より、低い傾向にあると考えられる。

表 5.1-1 鉛ビスマス炉の原子炉容器液面部の起動時発生応力の推定

		ナトリウム 大型炉	鉛ビスマス炉		応力の補正係数		備考
応 力 の 影 響 因 子	(1) RV 形状 (D×t)		自然循環炉	強制循環炉	自然循環炉	強制循環炉	
	9600×30 =288000	10100×50 =505000	9850×50 =492500	1.32	1.31	0.5乗に 比例	
	2.06×10 ⁻⁵ (mm/mm/°C)	1.11×10 ⁻⁵	1.13×10 ⁻⁵	0.54	0.55	比例	
	23.0	32.1	33.1	0.85	0.85	0.5乗に 逆比例	
	350°C 変化幅(°C)	100°C ¹⁾ (300~200)	160°C ²⁾ (360~200)	0.29	0.46	比例	
補正係数		—	—	—	0.18	0.28	
発生応力 : Sn (MPa)		229	41 ³⁾	64 ³⁾	—	—	

1) RV 壁内面に SG 給水管が通る層があるため、定格時温度は約 300°C である。

2) RV 壁内面に壁冷層があるため、定格時温度は約 360°C である。

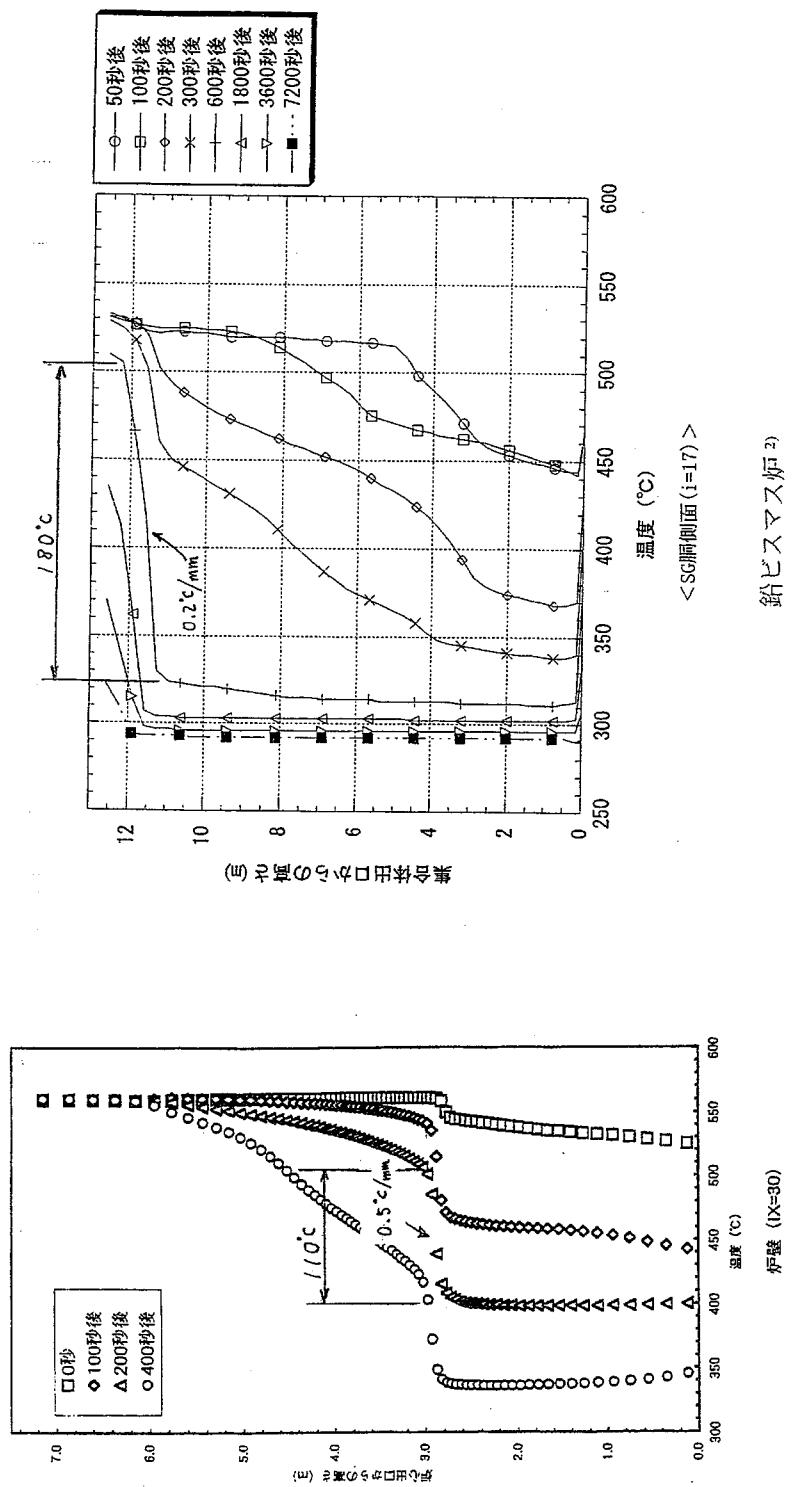
3) 発生応力 = ナトリウム冷却大型炉の発生応力 × 補正係数

表 5.1-2 鉛ビスマス炉の原子炉容器の熱成層通過による発生応力の推定¹⁾

		ナトリウム 大型炉	鉛ビスマス炉		応力の補正係数		備考
応 力 の 影 響 因 子	(1) RV 形状 (D×t)		自然循環炉	強制循環炉	自然循環炉	強制循環炉	
	9600×30 =288000	10100×50 =505000	9850×50 =492500	1.32	1.31	0.5乗に 比例	
	2.06×10 ⁻⁵ (mm/mm/°C)	1.11×10 ⁻⁵	1.13×10 ⁻⁵	0.54	0.55	比例	
	0.5 H12 熱流動 解析結果より	0.2 右と同じ と仮定	0.2 H13 熱流動 解析結果より	0.40	0.40	比例	
	110 H12 熱流動 解析結果より	180 右と同じ と仮定	180 H13 熱流動 解析結果より	1.64	1.64		
補正係数		—	—	—	0.47	0.47	
発生応力 : Sn (MPa)		330	155 ²⁾	155 ²⁾	—	—	

1) 鉛ビスマス冷却炉の原子炉容器内面には SG 外シラウド (自然循環炉)、炉壁冷却構造 (強制循環炉) が設けられているため、発生応力はさらに低下する可能性がある。

2) 発生応力 = ナトリウム冷却大型炉の発生応力 × 補正係数



大型ナトリウム炉¹⁾
出典

- 1) 「炉システムの概念検討 ナトリウム炉の概念に関する研究（その1）ループ型概念の検討」平成13年3月

- 2) 「Pb-Bi冷却中型炉に関する崩壊熱除去特性解析」平成14年3月

図 5.1-1 ナトリウム冷却大型炉及び鉛ビスマス冷却炉の熱成層条件²⁾

5.2 サーマルストライピング

(1) 目的

炉心出口部では燃料からの高温の冷却材と制御棒からの低温の冷却材が混合し所謂サーマルストライピングが発生する。ナトリウム炉ではサーマルストライピングが厳しい場合はインコネル 718 を用いて対処するが、ニッケル基合金であるインコネル 718 は鉛ビスマス中で腐食しやすいため鉛ビスマス炉ではこれを用いることができないという制約条件がある。そのため、ここではナトリウム冷却大型炉のサーマルストライピング条件に基づいて中型鉛ビスマス炉の条件を推定し、これに基づき成立性を検討する。

(2) 検討内容

ナトリウム冷却大型炉の検討結果を基に中型鉛ビスマス炉のサーマルストライピング条件を推定した。これを表 5.2-1 に示す。

中型鉛ビスマス炉ではナトリウム冷却大型炉に比べて炉心の出入口温度差が大きいため炉心出口部の流体の温度差が大きく、さらにそれらが混合しにくいため流体の温度差は大きくなる傾向にある。一方、熱伝達率が低めであるため温度差は構造には伝わりにくい。

次に中型鉛ビスマス炉で使用予定である 12Cr 鋼相当の材料は熱膨張率が小さいため発生する熱ひずみは大幅に小さくなる傾向がある。また、構造材の疲労強度は同程度である。

総合的には熱膨張率の差が大きいためナトリウム冷却大型炉と比べてサーマルストライピングに対する成立性は幾らか良好と推定されるが、対策無しで成立するかどうかの判断は詳細検討を行う必要がある。

(3) まとめ

ナトリウム冷却大型炉と比べてサーマルストライピングに対する成立性は幾らか良好と推定されるが、対策無しで成立するかどうかまでは判断できない。材料試験（腐食に対する影響含む）を行い、見通しを得る必要がある。

表 5.2-1 中型鉛ビスマス炉(炉心出口部)の耐サーマルストライピング性の検討

	ナトリウム冷却 大型炉	鉛ビスマス炉		補正係数		備考
		自然循環炉	強制循環炉	自然循環炉	強制循環炉	
(1) 炉心出口部の ΔT (°C)	117	$117 \times 180 / 155 =$ 136	$117 \times 168 / 155 =$ 126	1.16	1.08	炉心出入口温 度差に比例
(2) ΔT の解消のしにくさ (混合のしにくさ)	小 (解消しやすい)	大	中	>1.0 (NCより小)	>1.0 (NCより小)	流速と流体の 熱伝導率が小 さいほど解消 しにくい
(3) 構造への温度差の 伝わりやすさ	大	小	中	<1.0 (NCより大)	<1.0 (NCより大)	流速と流体の 熱伝導率が大 きいほど伝え やすい
(4) 热膨張率 (mm/mm/°C)	2.06×10^{-5} (SUS/550°C)	1.24×10^{-5} (12Cr/465°C)	1.26×10^{-5} (12Cr/520°C)	0.60	0.61	比例
(5) 許容ひずみ範囲 (炉心出口温度 & 10^6 サイクル)	0.00129	0.00141	0.00132	1.09	1.02	比例
疲 労 強 度						

6. 運転性

6.1 水・蒸気系概念の具体化

6.1.1 タービン側部分負荷時のヒートバランス

(1) 目的

自然循環式中型鉛ビスマス炉（自然循環炉）の制御特性、過度特性を検討するため、自動出力運転範囲であるタービン側の30%、50%、75%部分負荷時のヒートバランスを検討し、タービン熱効率から要求される原子炉熱出力を設定する。

(2) 検討内容

平成13年度に設定したタービン側定格条件をベースとして、部分負荷時のヒートバランスを蒸気圧力条件の近い軽水炉（PWR）を参考として設定する。

検討条件は、以下のとおりである。

- ① 主蒸気圧力は、負荷によらず5.98MPa一定とする。
- ② SG給水温度は、鉛ビスマス冷却材の融点を考慮し180°C以上を保持する。
- ③ 主蒸気温度は、30%負荷時の約370°Cから定格の400°Cへと単調に増加する。

以上の条件下で検討した結果を、表6.1.1-1及び図6.1.1-1に示す。

SG給水温度は、50%負荷以下において従来の高圧タービンからの抽気による高圧給水加熱器における加熱では抽気圧力の減少から180°C以下となる。そこで対策としては、主蒸気の一部を上記加熱器に導入することにより、180°C以上に保持することを可能とした。（図6.1.1-2及び図6.1.1-3参照）

なお、タービン側検討結果をベースとし、プラント起動曲線における部分負荷時プロセス量の推移を図6.1.1-4に、各ヒートバランスを図6.1.1-5～図6.1.1-8に各々示す。

(3) まとめ

タービン側部分負荷（30%、50%、75%）時のヒートバランスを検討して、原子炉熱出力を設定するとともに、本プラントにおける部分負荷時のプロセス諸量を設定し、自動出力運転範囲（30%～100%）の起動曲線を作成した。

表 6.1.1-1 タービン部分負荷時主要目

項目 出力	定格	75%	50%	30%	備考
1. 主蒸気圧力 [MPaAbs]	5.98	5.98	5.98	5.98	一定
2. 主蒸気温度 [°C]	400	391	383	373	
3. 給水温度 [°C]	210	196	180	180	180°C以上保持
4. 給水流量 [t/h]	2287	1736	1201	823.3	
5. 熱出力 [MWt]	1450 (1.00)	1118 (0.77)	791 (0.55)	536.5 (0.37)	
6. タービン熱効率[%]	38	36.9	34.8	30.8	

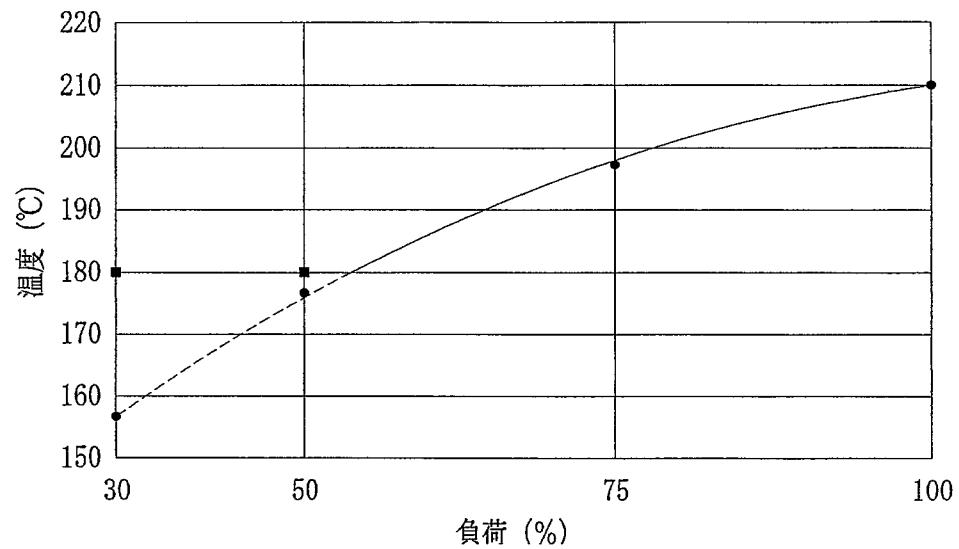


図 6.1.1-1 SG 給水温度

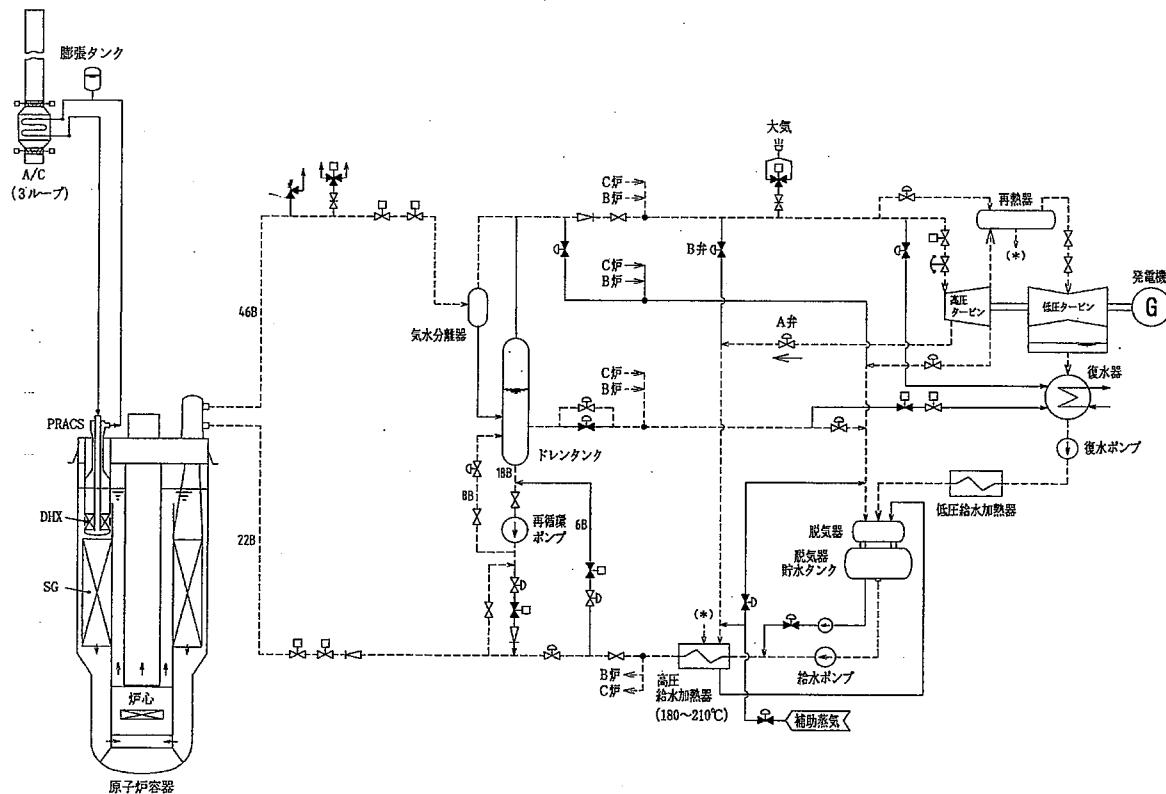


図 6.1.1-2 プラント運転モード；自然循環炉（50%～定格出力）

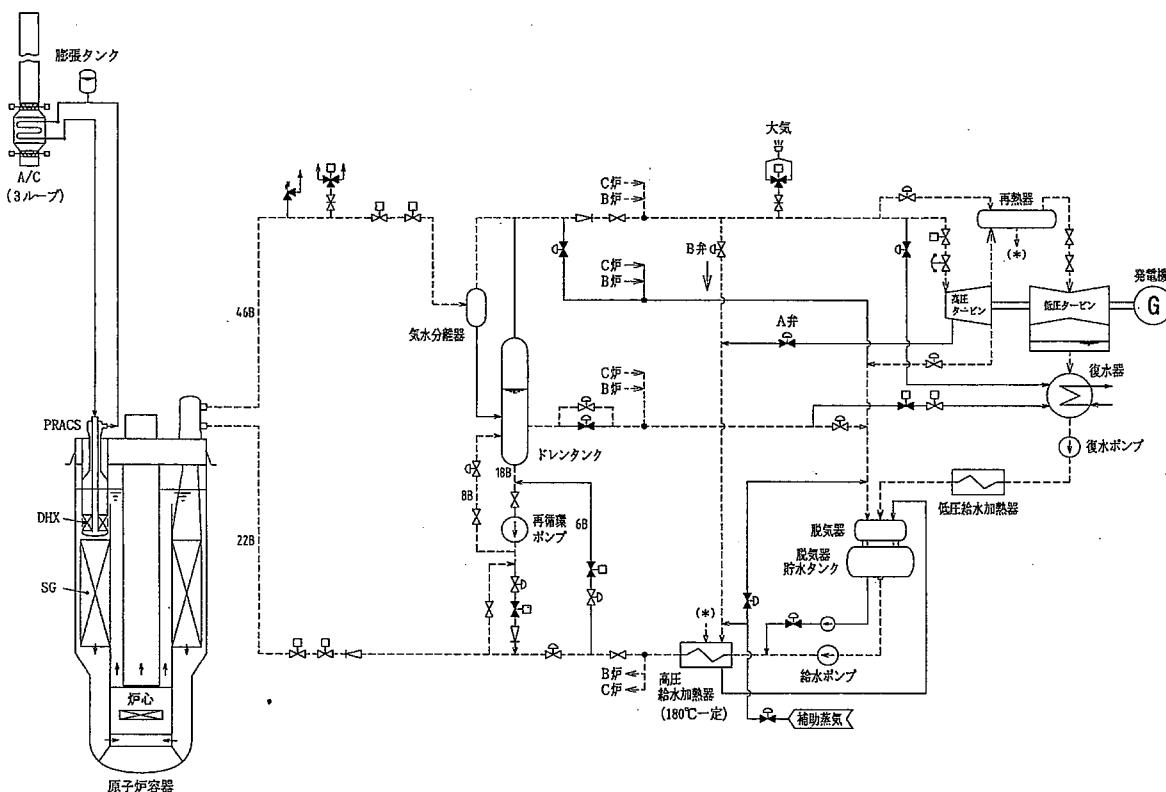


図 6.1.1-3 プラント運転モード；自然循環炉（30%～50%出力）

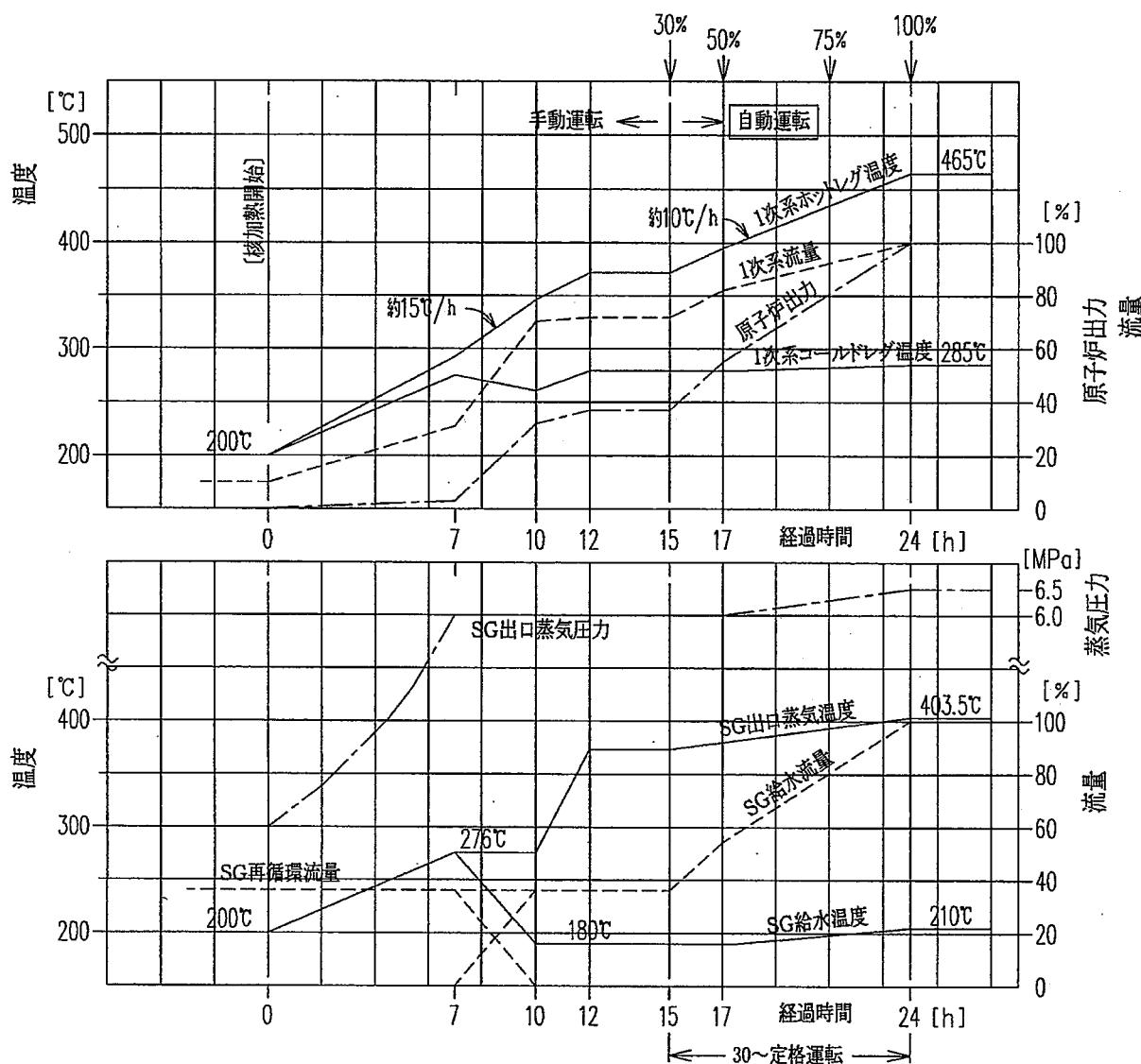


図 6.1.1-4 自然循環プラントの起動曲線（計画）

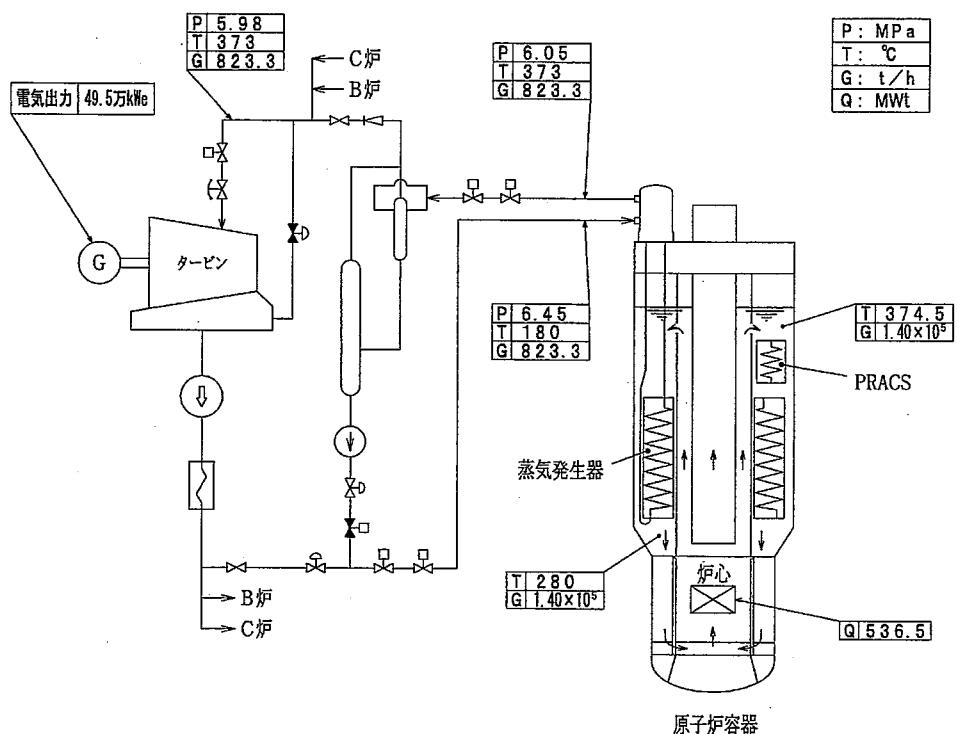


図 6.1.1-5 プラント起動時ヒートマスバランス (30%出力)

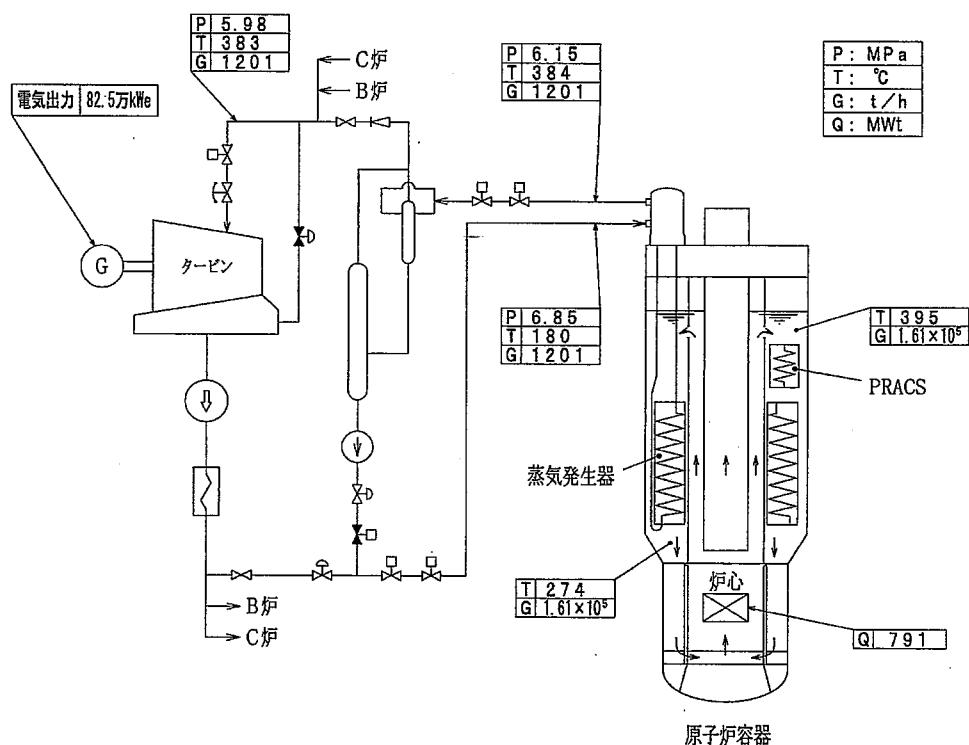


図 6.1.1-6 プラント起動時ヒートマスバランス (50%出力)

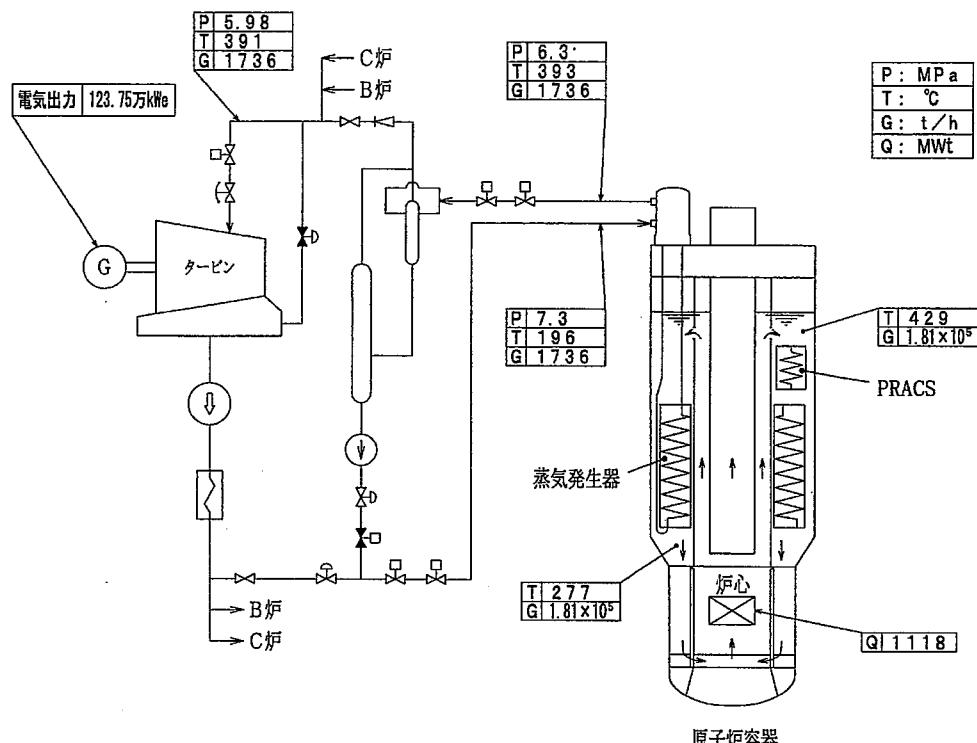


図 6.1.1-7 プラント起動時ヒートマスバランス (75%出力)

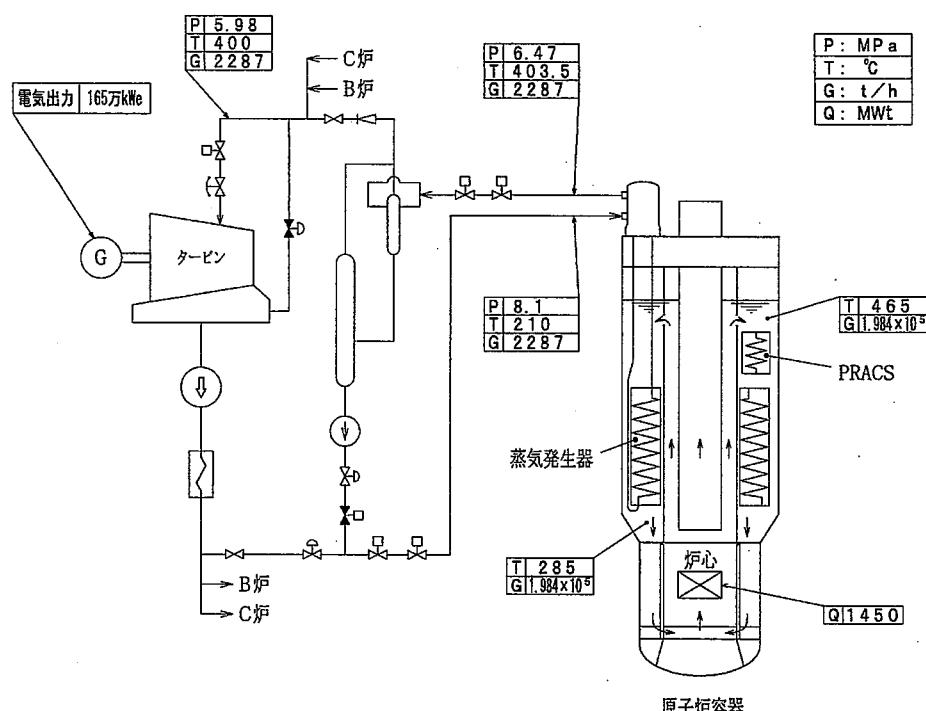


図 6.1.1-8 プラント起動時ヒートマスバランス (定格出力)

6.1.2 プラント起動及び停止時運転曲線の作成

(1) 目的

プラントの通水待機状態(約 200°C)からの核加熱による昇温過程(約 15°C/h)を経て、自動出力運転に至るまでの手動運転範囲のプロセス諸量を設定し、プラント起動曲線を作成する。また、降温過程(約 20°C/h)によるプラント停止曲線も作成する。

(2) 検討条件

検討条件は、以下のとおりである。

- ① 通水待機状態は、補助蒸気により SG 給水温度を約 200°C に調整することにより 1 次冷却材温度を約 200°C 以上に保持可能とする。この状態から制御棒引き抜き操作による核加熱を開始して、系統の昇温を約 15°C/h で行う。
- ② 原子炉熱出力の増加に伴い、SG 回り再循環系機器の運転により、飽和(湿り)蒸気から過熱(乾き)蒸気発生を経て、タービン起動に必要な過熱蒸気を得る。
- ③ 第 6.1.1 項に示すタービン部分負荷 30% 時のヒートバランス (SG 一体貫流運転方式による) 状態にスムーズに運転を引き継ぐため、タービン起動操作を含む手動運転期間 (NSSS 側プロセス諸量は一定) は 3h とする。
- ④ 1 次冷却材流量は、1 次系一巡圧力損失近似式より算出。(表 6.1.2-1(3) 項参照)

(3) 検討内容

a. プラント起動時の SG 回り水・蒸気系運転状態

プラント起動時の各種運転モードにおける SG 回り水・蒸気系の運転状態を図 6.1.2-1～図 6.1.2-5 に各々示す。

i. 核加熱開始時

炉心熱出力は、2MWt で約 10% の流量が確保されている。SG への給水温度は補助蒸気による予熱にて 200°C が保持される。一方 SG 出口飽和蒸気圧力は、水・蒸気系の起動用圧力調節弁にて 1.6MPa に制御される。再循環系への給水は主給水系バイパスインジェクションラインを使用して行い、その戻り分の飽和水は気水分離器ドレンタンクから脱気器へとドレンし熱回収を図る。

ii. 核加熱による昇温時

系統運用は上記 i 項に同じであるが、昇温時における余剰の熱は、気水分離器ドレンタンクから復水器へとドレンする。なお、1 次冷却材の温度上昇に伴い、蒸気圧力は上昇し続ける。

iii. 溫態待機時

炉心熱出力が約 3%になると、SG 出口蒸気圧力が定格の 6.0MPa に達するので、起動用圧力調節弁にて以後一定に制御する。(276°Cでの温態待機状態)

iv. 過熱（乾き）蒸気発生開始時

炉心熱出力が約 32%になると、SG 出口蒸気が乾き蒸気となる。この時点で、SG 再循環系の運転を停止し、SG 給水は主給水系に、一方 SG 出口過熱蒸気は主蒸気系を通り、タービンバイパス系から復水器へとダンプされる。

なお、SG 給水温度は、高圧給水加熱器への蒸気供給により 180°Cに保持される。

再循環ポンプ系はウォーミングのため、小流量の給水を逆流させて待機状態に保持しておく。

v. タービン起動前

系統運用は上記 iv 項に同じであるが、炉心熱出力が約 37%の状態になると、SG 出口蒸気が 373°Cとなりタービン起動用の通気が可能となる。

b. プラントヒートバランスの設定

プラント起動時の各種運転モードのヒートバランスを、図 6.1.2-6～6.1.2-9 に示す。

c. プラント起動時及び通常停止曲線の作成

上記(2)項のプロセス諸量から、プラント起動曲線を作成し、図 6.1.2-10 に、更に、プラント停止曲線は、図 6.1.2-11 に示す。核加熱開始（約 200°C）から定格出力状態までの所要時間は 24h である。また、定格出力状態から原子炉停止を経て通水待機状態（約 200°C）までの所要時間は 19h である。

(4) まとめ

自然循環炉についてプラント通水待機から核加熱による昇温により、温態待機状態を経て所定のタービン起動時蒸気条件を得るまでのプラント起動操作時における代表的な運転モードをとりあげ、その時点でのプロセス諸量を算出した。

それらに基づいて、プラント起動曲線をタービン出力運転時（第 6.1.1 項参照）を含めて作成した。逆操作であるプラント降温による停止曲線も合わせて作成した。

表 6.1.2-1 1次系一巡圧力損失値の算定

(1) 定格出力時の1次系各部圧力損失

(a) 炉心 (ダクト付きグリッドスペーサ : 10段)	15.0kPa	定格流速 $u = 0.584\text{m/s}$
		$\text{Re} = 5.81 \times 10^4$
(b) 入口ノズル部 :	2.0kPa	
(c) SG 1次側圧力損失 :	5.4kPa	
一巡 (全体合計) Δp_{T0} :	22.4kPa	

(2) 流量依存の一巡圧力損失値の算出 : $\Delta p_T = f(w/w_0)$

炉心部 + 炉心入口部 + SG 部

$$\Delta p_T = \Delta p_c \text{ (プログラムによる計算)} + 205 \times w/w_0^2 + 550 \times w/w_0^{1.9} \text{ [kPa]}$$

w/w ₀	0.10	0.20	0.30	0.50	0.70	1.00
Δp_c	0.21	0.76	1.59	4.07	7.60	15.0
入口部	0.02	0.081	0.18	0.50	0.98	2.0
SG	0.07	0.254	0.55	1.45	2.74	5.4
Δp_T	0.30	1.095	2.32	6.02	11.32	22.4

(3) 炉内一巡圧力損失近似式 (指数で表示) の設定

$$\Delta p_T = \Delta p_{T0} \times (w/w_0)^{1.88}$$

(注) 流量依存指数 $n=1.88$ は、(2)項の計算値に基づきカーブフィッティングより求めた。

w/w ₀	0.10	0.20	0.30	0.50	0.70	1.00
Δp_T	0.295	1.09	2.33	6.08	11.45	22.4

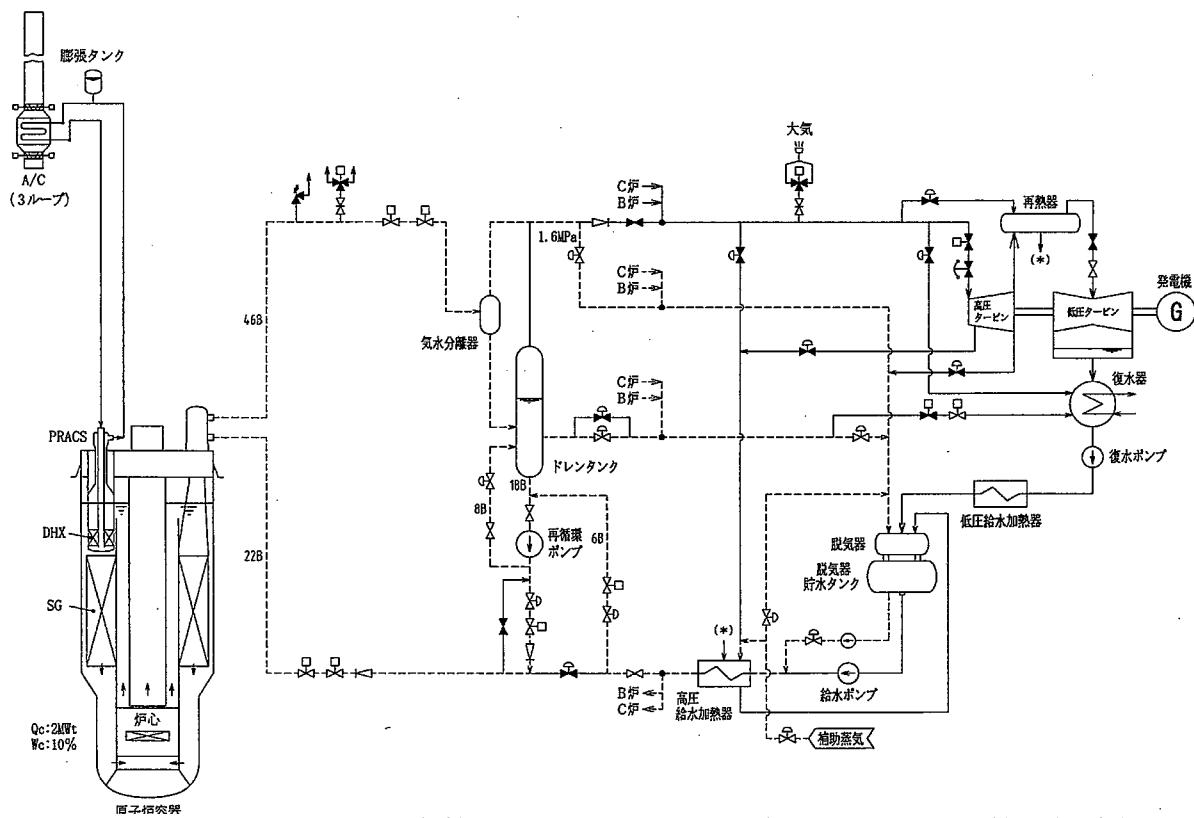


図 6.1.2-1 自然循環炉のプラント運転モード [核加熱開始時]

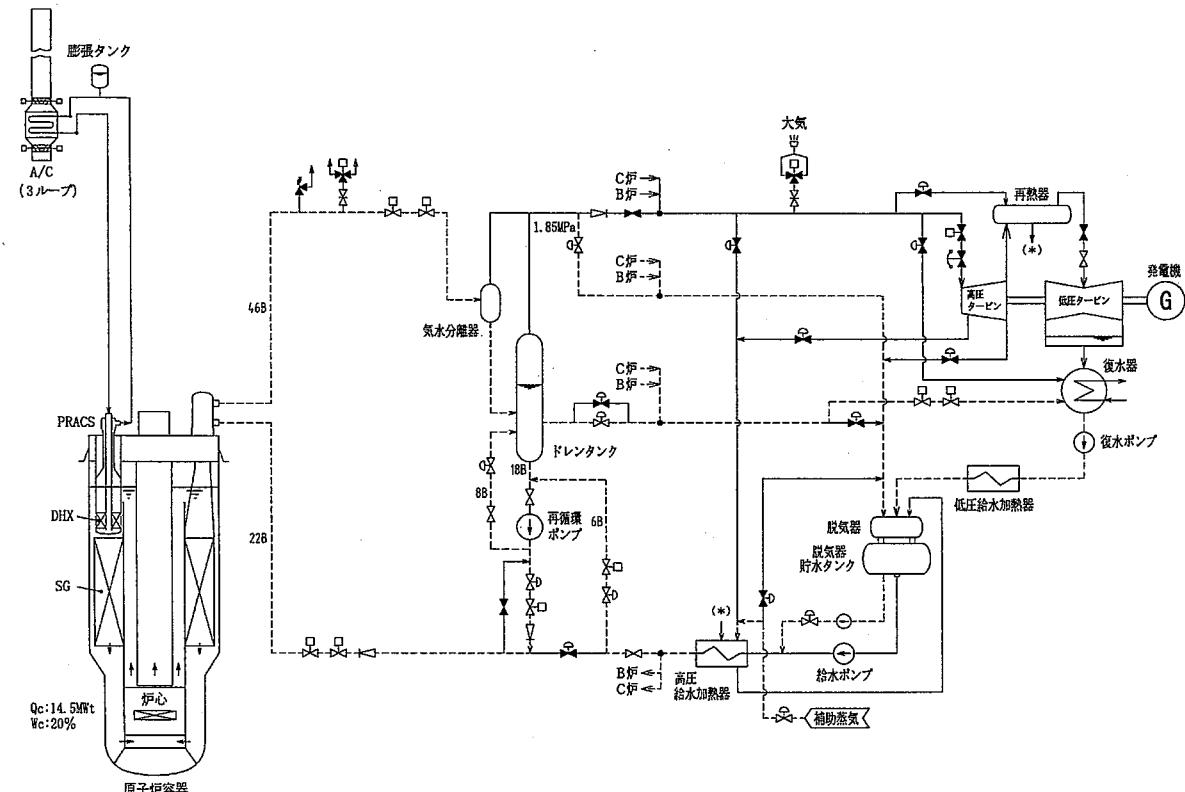


図 6.1.2-2 自然循環炉のプラント運転モード [核加熱による昇温時]

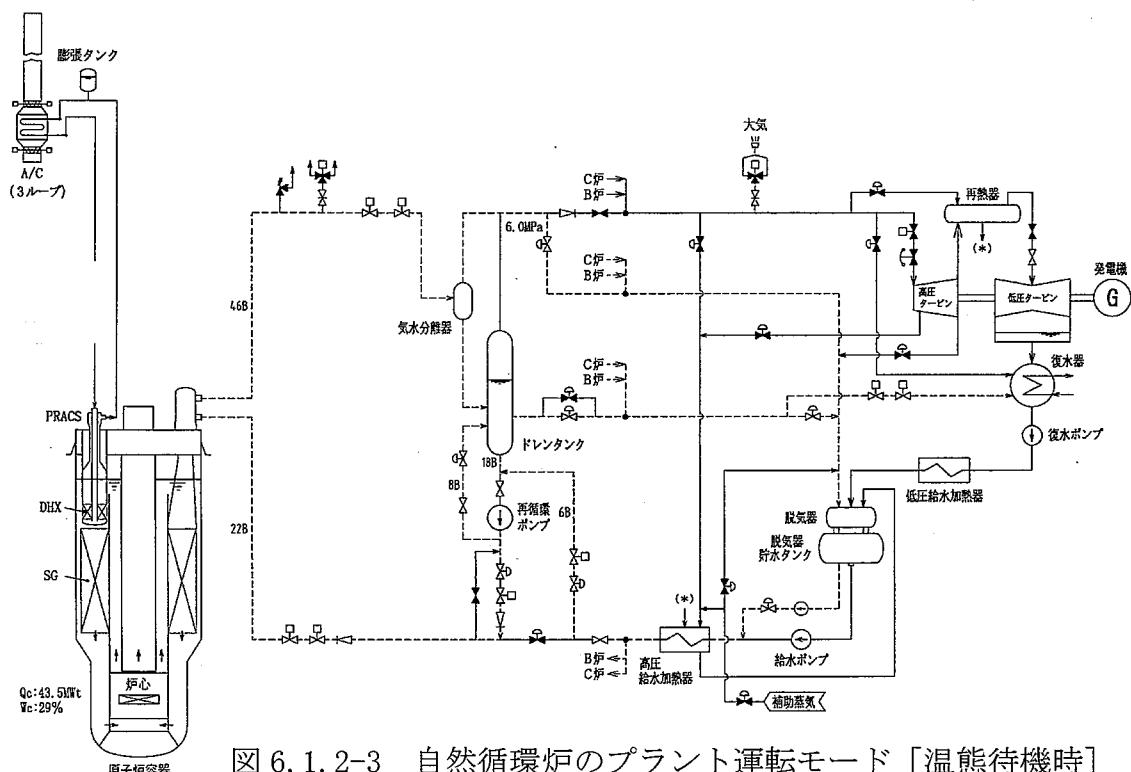


図 6.1.2-3 自然循環炉のプラント運転モード [温態待機時]

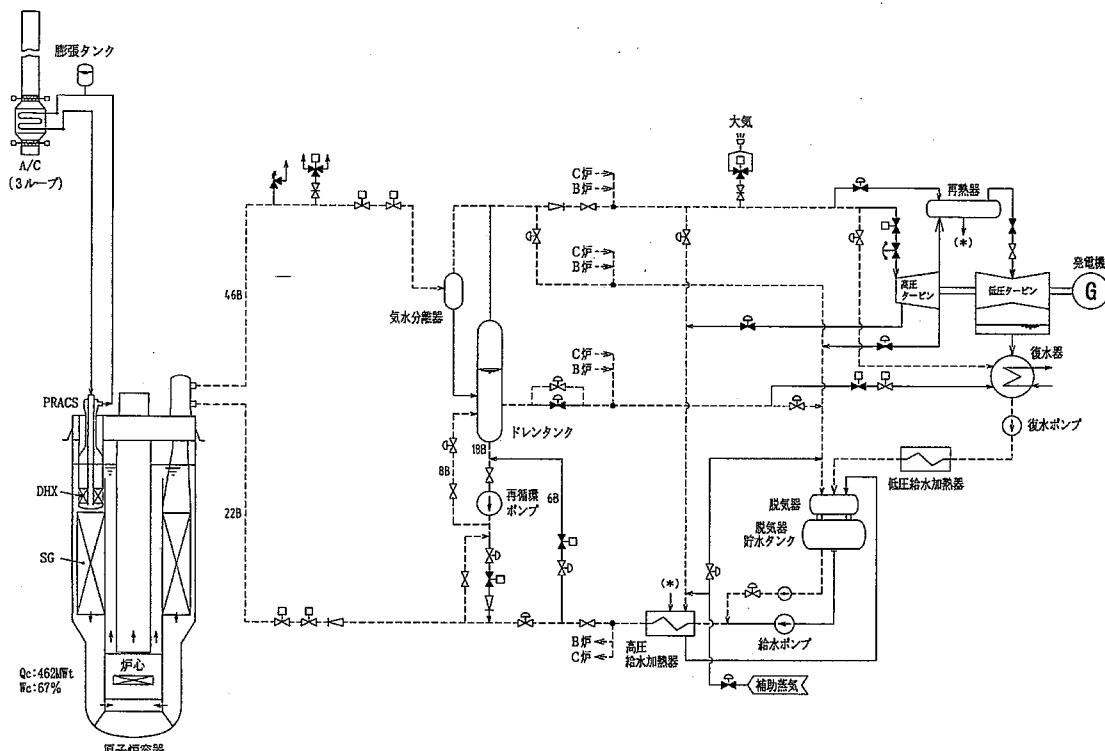


図 6.1.2-4 自然循環炉のプラント運転モード [過熱(乾き)蒸気発生時]

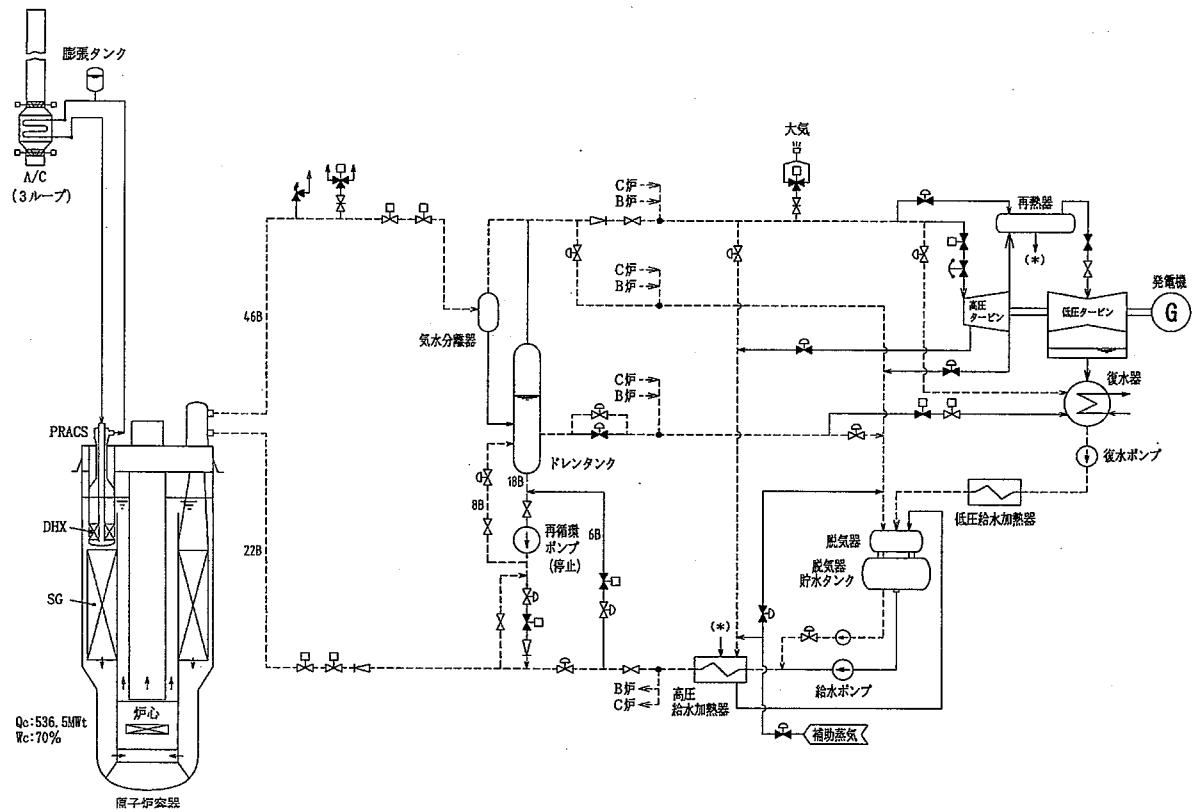


図 6.1.2-5 自然循環炉のプラント運転モード [タービン起動時]

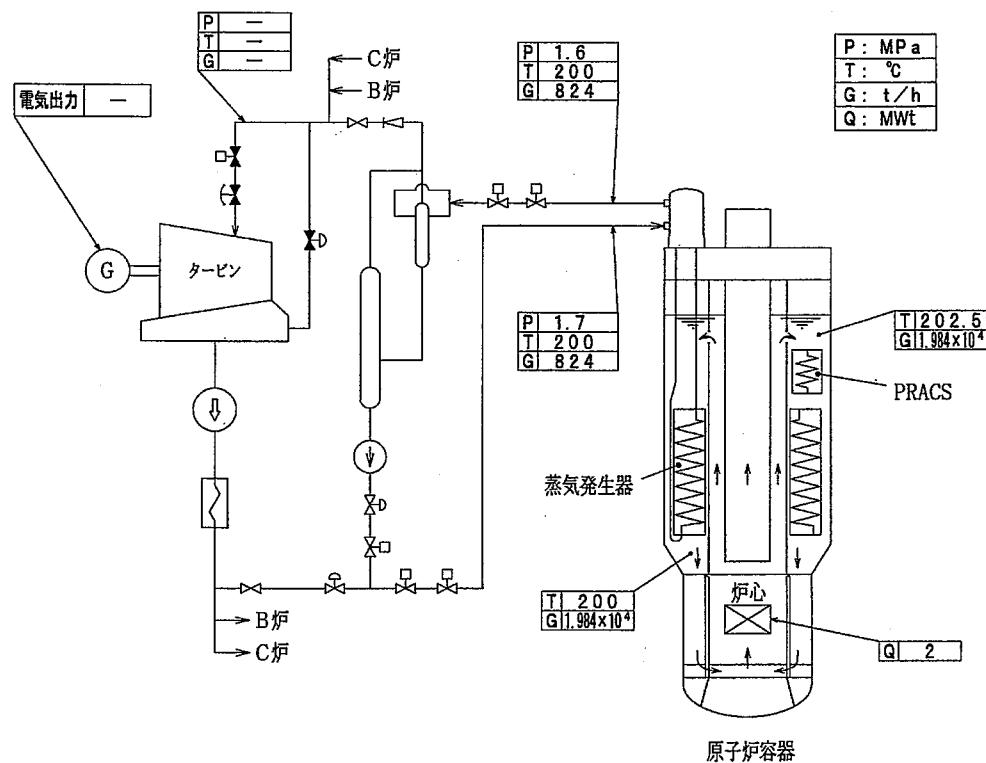


図 6.1.2-6 プラント起動運転時ヒートバランス (①核加熱開始時; 炉心流量 10%)

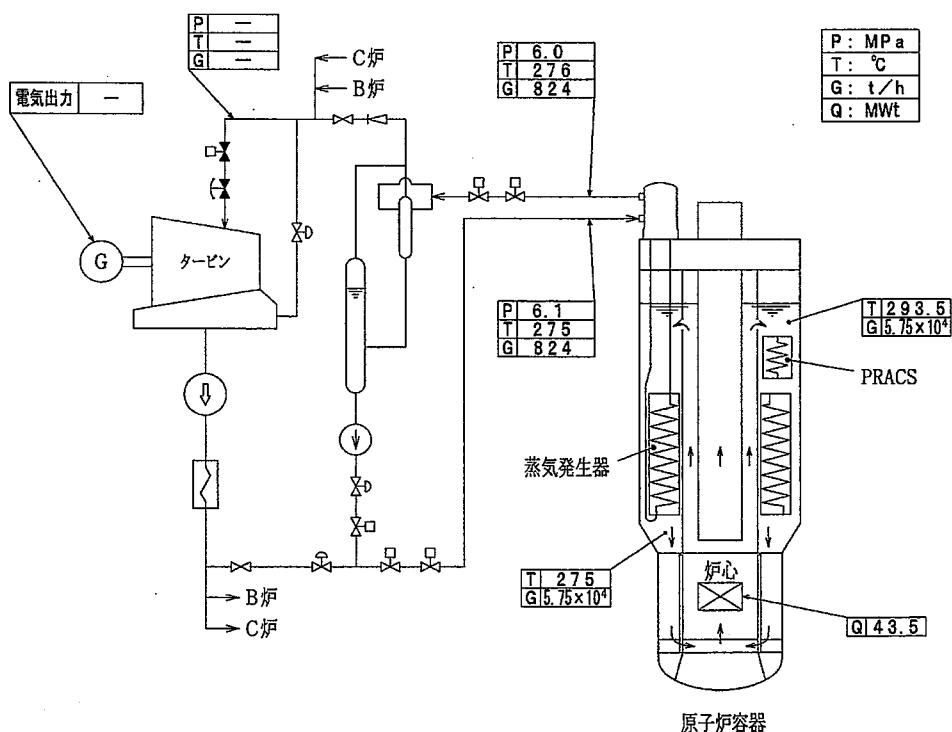


図 6.1.2-7 プラント起動運転時ヒートバランス (②温態待機時; 热出力 3%)

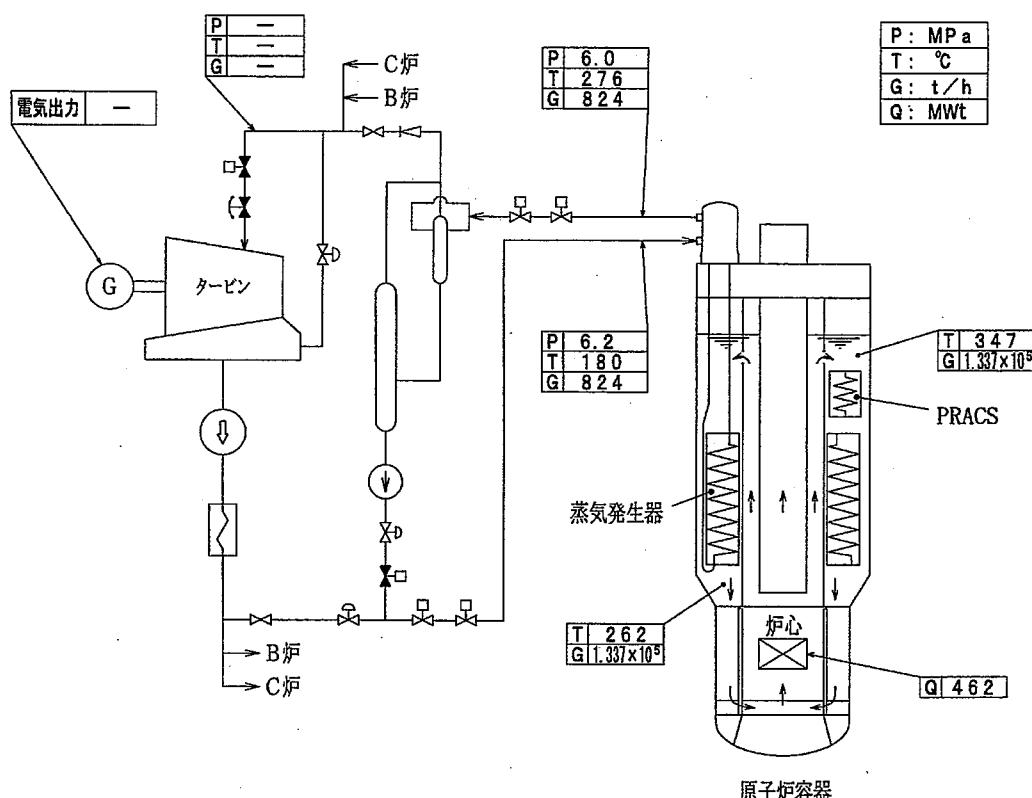


図 6.1.2-8 プラント起動運転時ヒートバランス (③過熱蒸気発生開始時; 热出力 32%)

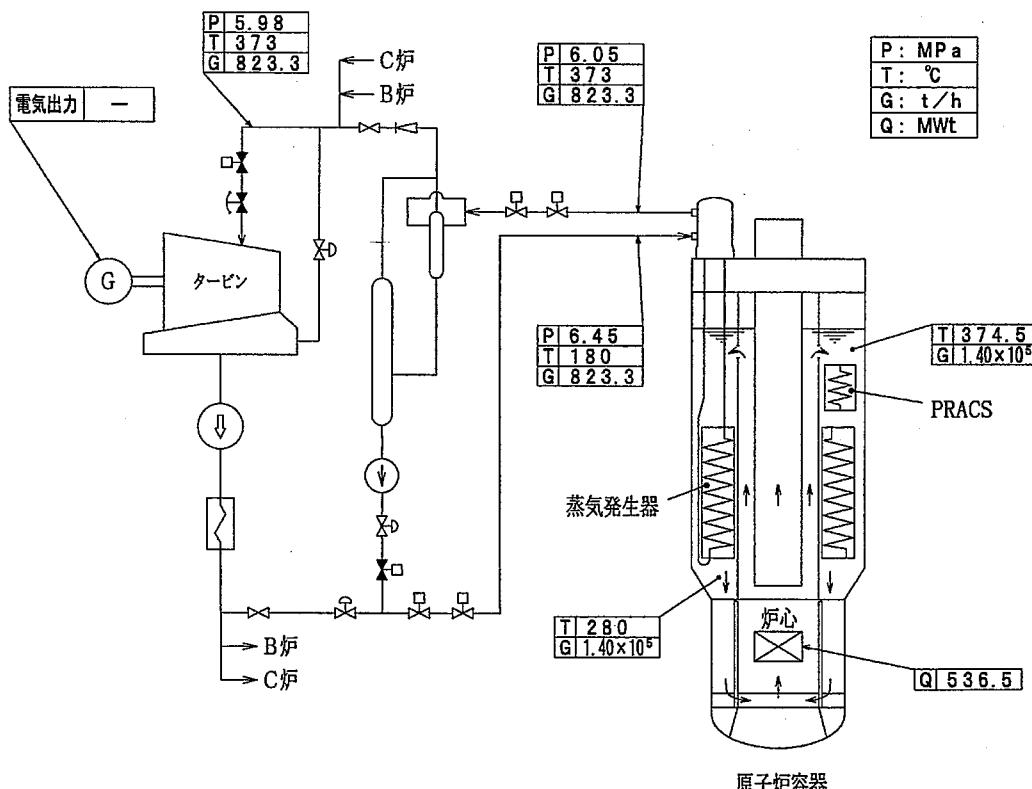


図 6.1.2-9 プラント起動運転時ヒートバランス (④タービン起動前; 热出力 37%)

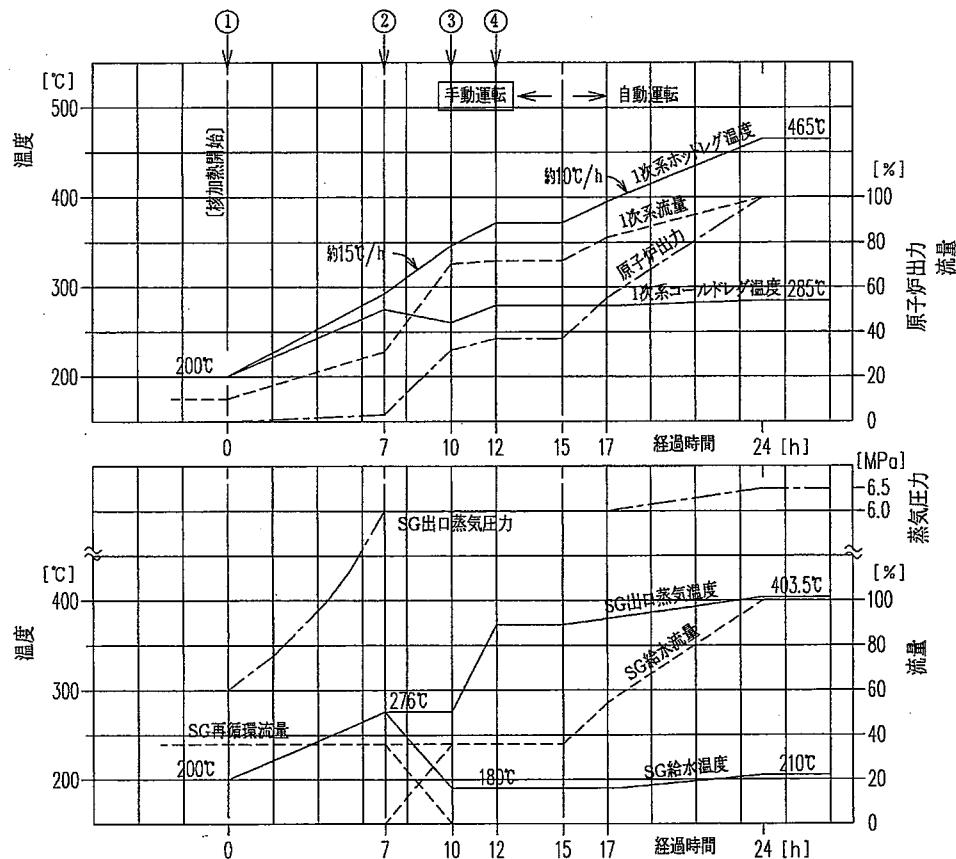


図 6.1.2-10 自然循環炉のプラント起動曲線と各モード

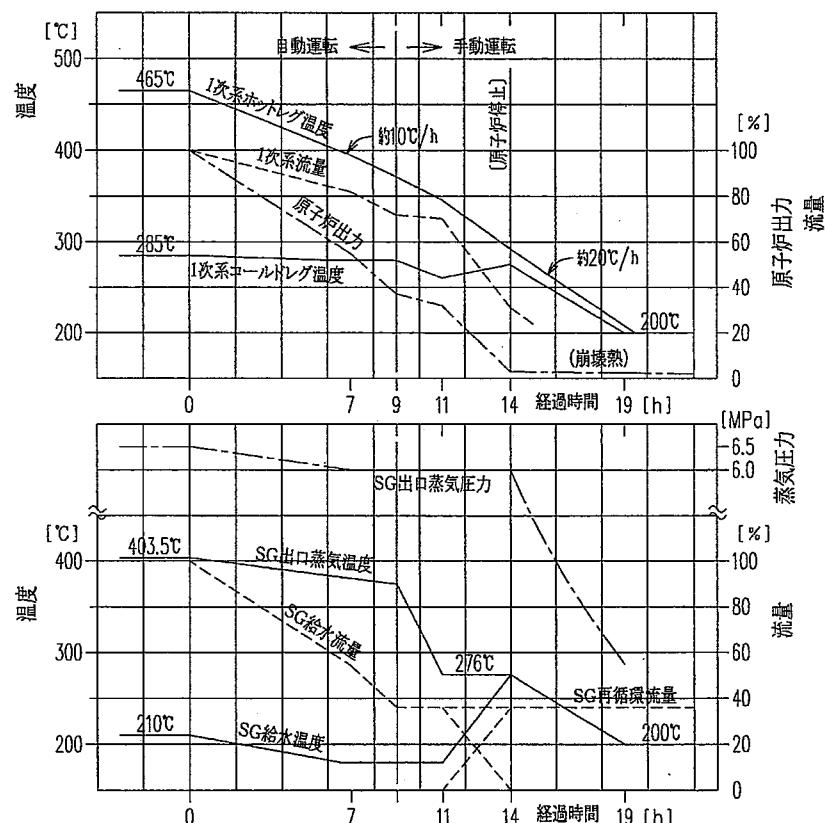


図 6.1.2-11 自然循環炉のプラント停止曲線(計画)

6.1.3 SG 回り水・蒸気系系統図の作成

(1) 目的

第 6.1.1 項及び第 6.1.2 項で行った検討結果を基に、系統構成及び、主要機器設備の設計仕様を設定し、系統図を作成した。

(2) 検討内容

第 6.1.1 項及び第 6.1.2 項のプロセス諸量の検討結果に基づいて、水・蒸気系の系統構成並びに主要配管及び機器設備の設計仕様を設定し、表 6.1.3-1 に示す。

このシステムにおける特徴は、プラント起動及び停止時には、SG 回り再循環系を使用することにより安定した運転を可能としたことである。

以上の検討により本プラントの系統図を作成し、図 6.1.3-1 に示す。

(3) まとめ

本プラントの SG 回り水・蒸気系の主要機器設備の設計仕様を検討し、系統図を作成した。

なお、第 6.1.1 項及び第 6.1.2 項での検討結果と合わせて、第 6.2 節におけるプラント運転特性解析作業の入力条件を与えるものである。

表 6.1.3-1 SG 回り水・蒸気系統の配管及び機器寸法

A. 配管	口径 [B]	内径 [mm]	長さ [m]	流速
1. 再循環ラインと主給水ラインとの合流点～SG 給水ヘッダー	22	500	70	3.5m/s
2. SG 蒸気ヘッダー～気水分離器	46	1050	60	30m/s
3. WS～気水分離器 ドレンタンク	26	590	20	1m/s
4. WSDT～再循環ポンプ				
5. RCP～主給水ラインとの合流点	18	410	20	2.4m/s
6. WSDT～復水器へのドレン水制御弁	18	410	10	同上
7. WS～タービン建屋内 3 モジュール炉 蒸気配管集合ヘッダー	18 46	410 1050	10 60	2.4m/s 30m/s
8. タービン建屋内 3 モジュール炉給水 配管分配ヘッダー～再循環ラインと 主給水ラインとの合流点	22	500	50	3.5m/s
B. 機器	寸法	容量		備考
1. 気水分離器	Φ 2.3m H 9m			
2. 気水分離器 ドレンタンク	Φ 2.3m H 18m			
3. 再循環ポンプ	—	揚程 流量 軸動力	0.5Mpa 824t/h 190kW	

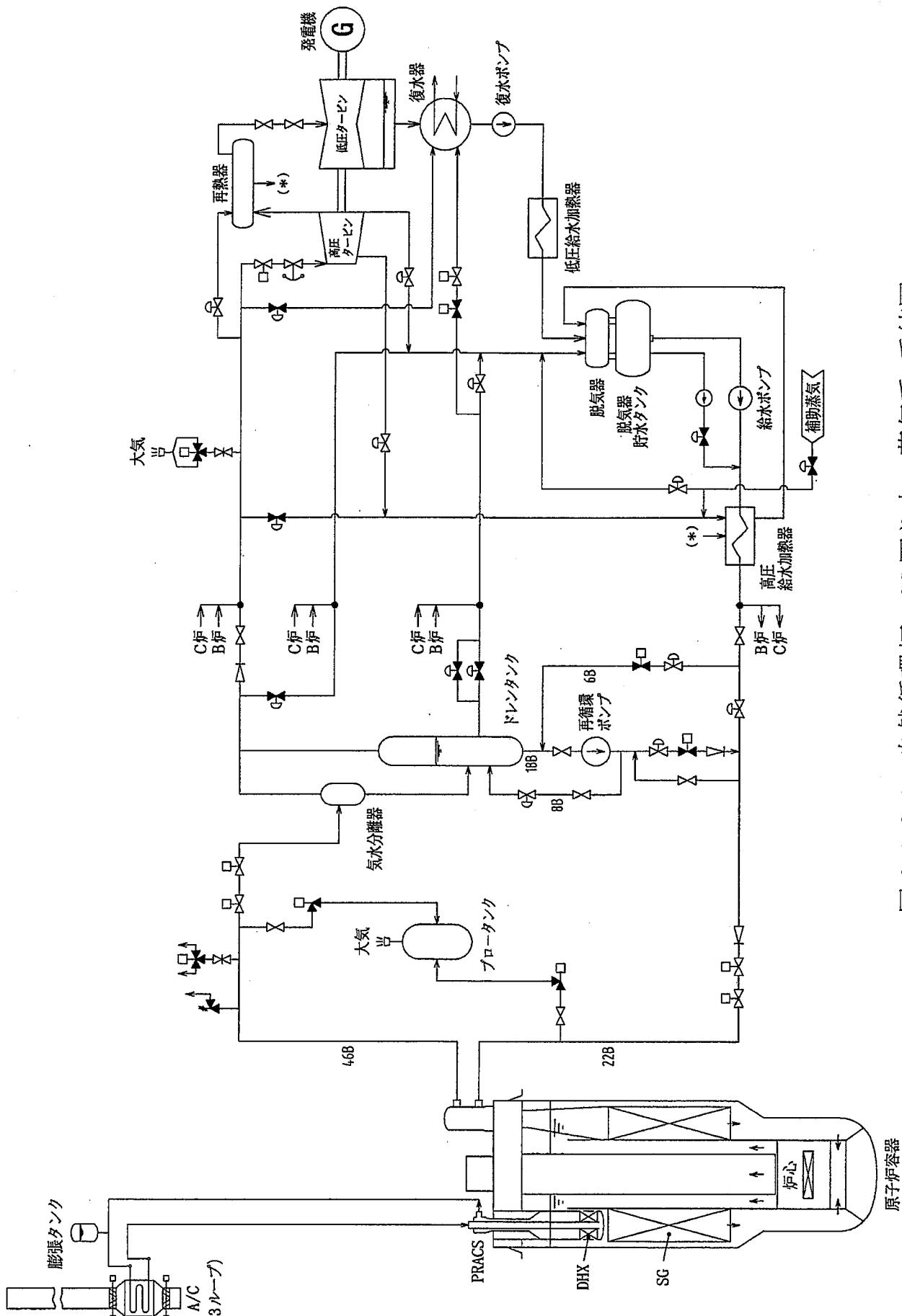


図 6.1.3-1 自然循環炉 SG 回り水・蒸気系 系統図

6.2 一体型炉の制御特性、過渡特性の検討

6.2.1 プラント制御方式の検討

6.2.1.1 プラント出力運転時の制御方式

(1) 基本方針

自然循環炉の出力運転時のプラント制御の基本方針を次のように設定する。

- a. プラント出力運転時のプラント制御は自動制御によるものとする。
- b. 原子炉冷却材流量が自然循環型で冷却材流量の応答性に比較的大きな遅れがあり、また、炉心の安全性を向上させるために原子炉出力の変化率を制限していることから、原子炉；主、タービン；従の制御方式とする。
- c. 原子炉の出力変更率は所定の変化率以下とする。
- d. 実用化炉であることを考慮し、発電機負荷喪失時に所内単独運転が可能な制御方式とする。

(2) プラント出力運転時の制御方式

a. プラント制御系全体構成

プラント系統図を図 6.2.1.1-1 に示す。また、100%出力時と 30%出力時のヒートバランスをそれぞれ図 6.2.1.1-2 と図 6.2.1.1-3 に示す。プラント制御操作は次の 3 項目で行う。

- ① 原子炉熱出力、② 給水流量、③ 主蒸気圧力

プラントヒートバランスを所定の値に制御する上で重要なプロセス量は原子炉出口鉛ビスマス温度（又は、SG 入口鉛ビスマス温度）である。従って、原子炉出口鉛ビスマス温度を所定の温度になるよう原子炉出力を操作する方が適切である。

一方、発電プラントであることから主蒸気条件（温度、圧力）を制御することも重要な要件である。主蒸気温度は一体貫流型 SG の特性を考慮する必要がある。即ち、比較的、高出力（高流量）においては、SG 入口鉛ビスマス温度と主蒸気温度の温度差が比較的大きいことから主蒸気温度変化は給水流量変化に敏感である。一方、低出力（低流量）においては、主蒸気温度は SG 入口鉛ビスマス温度に接近しており給水流量変化に対する感度は小さい。このことから、主蒸気温度は給水流量を操作して制御することを基本とし、また、熱交換器の遅れを補償するとともに主蒸気温度制御のロバスト性を向上させるため、主蒸気温度制御のフィードバックゲインを可変にすることや、給水流量制御を内側ループに構成するカスケード制御方式とする等の対策が必要である。主蒸気圧力は主蒸気加減弁の前圧を一定に制御する方式とする。

プラント出力（タービン発電機出力）は電力系統網からの要求に応じて（ただし、変化率は一定の制限を設ける）変更できるよう考慮し、プラント出力に対応した部分負荷ヒートバランス特性に基づき SG 入口鉛ビスマス温度及び主蒸気温度の制御目標値を設定する構成とする。

これらを考慮したプラント制御系の全体構成概念を図 6.1.1-4 に示す。

b. 出力指令装置

出力指令装置はプラント出力（タービン発電機出力）や電力系統網からの要求に応じ、所定のプラント出力値を設定する機能を有する制御系である。但し、出力設定値及び出力設定

値の変化率には一定の制限を設ける。また、主蒸気圧力制御系で後記するように、タービンバイパス弁の開信号により原子炉側の出力を一定の変化率で強制的に低下させる機能(セットバック機能と呼ぶ。)を持たせる。

図 6.2.1.1-5 に出力制御装置に制御ブロック図を示す。

c. 原子炉出力制御系

原子炉出力制御系は原子炉出口鉛ビスマス温度を所定のヒートバランスとなるよう原子炉出力を操作する制御系である。原子炉出口鉛ビスマス温度としては燃料集合体出口鉛ビスマス温度を制御する方式と、SG 入口鉛ビスマス温度を制御する方式が考えられる。燃料集合体出口鉛ビスマス温度は即応性があることから、安定な制御を行い易いが、一方で、燃焼状態によって温度が変化することから原子炉出口のバルクの平均温度（プラントのヒートバランスを設定する上では平均温度の制御が重要）を表す観点からは制御が難しく、多数の燃料集合体に出口温度計装を設置し、かつ平均温度の演算処理する必要がある。

逆に、SG 入口鉛ビスマス温度は応答性に劣るもの、原子炉出口の平均温度を表す観点からは適切な信号である。自然循環炉は原子炉冷却材が自然循環型であり、冷却材流量の応答性に比較的大きな遅れがあること、及び、原子炉出力の変化率を制限して高い安全性を有する特徴を持たせていることから、本制御方式としては SG 入口鉛ビスマス温度を制御量として設定する。

原子炉出力を変更する操作は制御棒位置の操作によって行う。制御棒の操作方式としては、制御棒駆動速度を一定として制御棒の挿入位置を制御する方式とする。これまでの検討から鉛ビスマス冷却炉の安全特性を確保するため、制御棒駆動速度は比較的遅い速度に制限することとしている。

制御棒の駆動は、制御棒駆動機構（CRDM）によって行い、制御棒の駆動方式としては、PWR で用いられているマグネットとリンク機構による駆動方式、BWR で用いられている液圧駆動方式、常陽、もんじゅで用いられているモータ駆動方式がある。鉛ビスマス炉もナトリウム炉と同様、CRDM の駆動部を炉外に設置できることから、モータの設置が容易であり、モータ駆動の場合には、駆動速度も容易に制御できることから、モータ駆動方式を採用している。

もんじゅでは、出力制御系として微調整棒と粗調整棒があり、微調整棒の駆動は、速度可変制御が必要なことからステップモータを採用し、粗調整棒の駆動は一定速度で良いことから三相誘導モータを採用している。速度を可変とするためのモータとしては、ステップモータ以外にサーボモータがあるが、いずれの方式でも制御系異常を想定すると、制限値以上の速度で駆動する可能性がある。従って、安全上の要求から最大速度が制限され、最大速度を越える速度が生じない対応を探る観点から、供給電源の周波数で速度が決まる三相誘導モータ方式を採用する。三相誘導モータを用いて非常に遅い速度で駆動させるには、減速機を用いることで比較的容易に行うことができ、精度も良く、最大速度も減速比により機械的に制限されるので、制御棒駆動方式として三相誘導モータを用いることは、鉛ビスマス炉に適し

ている。したがって、原子炉出力制御系の出力は制御棒位置の目標値を出力することとする。

SG 入口鉛ビスマス温度は原子炉上部プレナム部の冷却材混合による比較的大きな応答遅れがあることから、制御系の安定性を向上させるため中性子束レベル信号を補助信号として用いる制御方式とする。この方式は、ナトリウム冷却高速増殖炉の原型炉でも採用されている方式で、比較的大きな温度応答遅れを補償する方式として実績のある方式である。

上記による原子炉出力制御系の制御ブロック図を図 6.2.1.1-6 に示す。

d. 制御棒制御系

本制御系は原子炉出力制御系の出力、即ち、制御棒位置の目標値に対し、制御棒を所定の位置に操作する。

制御棒制御系の制御ブロック図を図 6.2.1.1-7 に示す。

e. 主蒸気温度制御系及び給水流量制御系

本制御系は主蒸気温度を所定のヒートバランスとなるよう給水流量を操作する制御系であり、給水流量は給水量節弁開度を変更させることにより制御することを基本制御方式とする。ここで、前記したような一体貫流型 SG の熱交換特性を考慮した制御方式とする。比較的、高出力（高流量）においては、SG 入口鉛ビスマス温度と主蒸気温度の温度差が比較的大きいことから主蒸気温度変化は給水流量変化に敏感であり、主蒸気温度を所定の温度に制御するため給水流量を操作する方式で問題ない。

一方、低出力（低流量）においては、主蒸気温度は殆ど SG 入口鉛ビスマス温度に接近しており給水流量変化に対する感度は小さいため、高出力時と同様のフィードバック制御では良い制御性が得られない。このことから、低出力時においては主蒸気温度制御のフィードバックゲインを小さくするとともに、小さな幅の温度偏差は許容するデッドバンドを設け、所定の給水流量に制御することで主蒸気温度を制御する方式とする。従って、熱交換器の遅れを補償するとともに主蒸気温度制御のロバスト性を向上させるため、給水流量制御を内側ループに構成するカスケード制御方式とする。給水流量制御は給水調節弁開度を操作して制御する。

主蒸気温度制御系及び給水流量制御系の制御ブロック図を図 6.2.1.1-8 に示す。

f. 主蒸気圧力制御系

タービン；従の設計方針から、主蒸気加減弁前圧一定制御方式とする。一方、タービン発電機負荷の大幅な減少により、タービン発電機回転数が急上昇するような場合には、タービン発電機回転数制御を優先させて主蒸気加減弁を閉じる協調制御方式とし、主蒸気加減弁を閉じることによる主蒸気圧力上昇はタービンバイパス弁を開けて圧力制御を行う。タービンバイパス弁の開信号は原子炉側出力の方がタービン発電機の負荷よりも大きいことを意味するため、タービンバイパス弁の開信号により出力指令装置から一定の変化率で強制的に原子炉側の出力を低下させることとする。

主蒸気圧力制御系の制御ブロック図を図 6.2.1.1-9 に示す。

6.2.1.2 起動停止時のプラント制御方式

(1) 基本方針

核加熱開始から定格出力に至るプラント起動停止制御の基本方針を、次のように設定する。

- a. 起動停止時のプラント制御は基本的には手動操作によるものとする。
- b. 起動停止時の運転計画に基づき、運転操作の容易性の観点から、可能な範囲での自動化を図る。
- c. 原子炉の臨界近接操作は手動操作とし、広域系中性子束計装に切り替えた後は、SG 入口鉛ビスマス温度が一定の上昇率で上昇するよう自動制御で原子炉出力を制御する。

(2) プラント起動停止運転計画の概要

6.1.2 項及び 6.3 節の運転計画の概要を次に示す。

- a. SG 給水流量（再循環流量）を 35% 流量で一定に流す。
- b. SG 入口鉛ビスマス温度を温度変化率(15°C/h)で上昇させるよう原子炉出力を増大させる。
- c. SG 入口鉛ビスマス温度の上昇に伴い、SG 出口の水・蒸気は飽和水から 2 相流となりクオリティが上昇する。
- d. SG 出口の水・蒸気圧力は所定の変化率で上昇させる。

これらの起動方法に基づくプラント起動計画図を図 6.2.1.2-1 に示す。プラント停止時の運転方法は起動方法と逆のシーケンスで行う。

(3) プラント起動停止時の制御方式

起動停止時の運転計画から次の制御を行う方式とする。

a. 原子炉出力制御

SG 入口鉛ビスマス温度を所定の変化率(15°C/h)で上昇するよう原子炉出力を制御する。

b. SG 給水流量制御

給水調節弁を操作し、SG の給水流量を 35% 一定に制御する。

c. ドレンタンク圧力制御

圧力調整弁を操作し、ドレンタンク圧力を所定の変化率で上昇させる。

d. ドレンタンク水位制御

ドレンタンクのドレン水調節弁を操作し、ドレンタンク飽和水の水位を一定に制御する。

これらの制御系概念図を図 6.2.1.2-2 に示す。

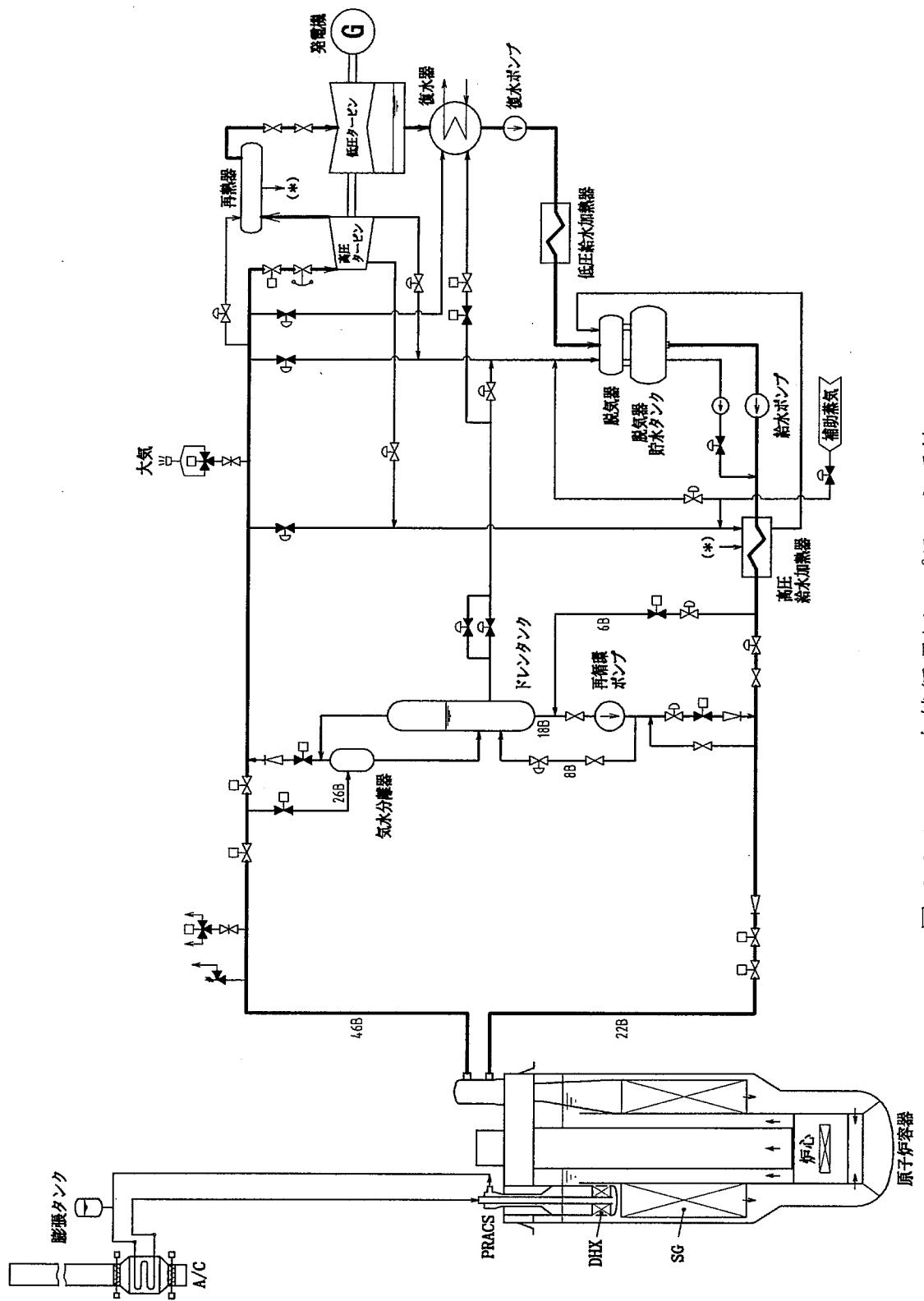


図 6.2.1.1-1 自然循環炉 プラント系統

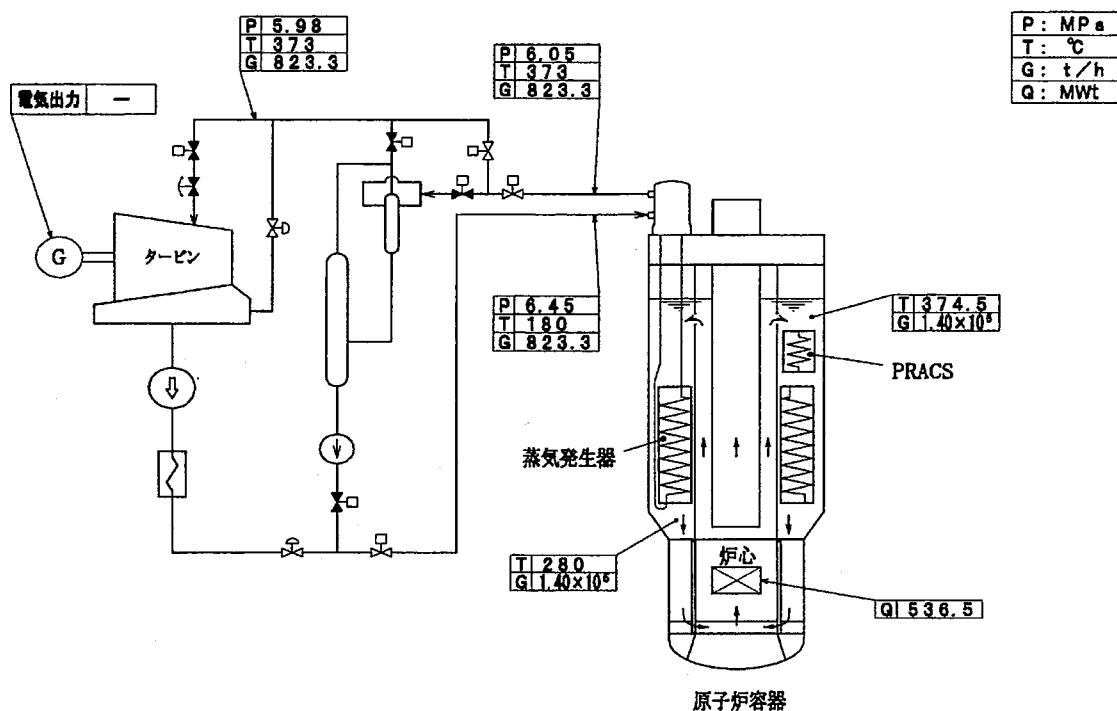


図 6.2.1.1-2 プラント起動運転時ヒートマスバランス図（30%出力）

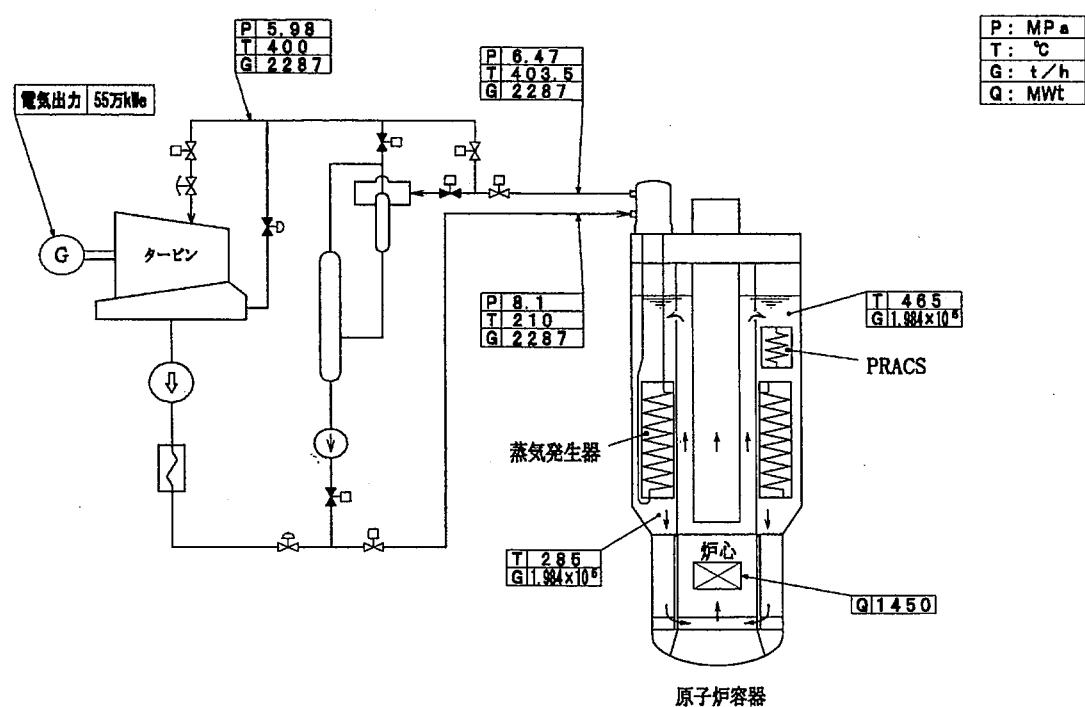


図 6.2.1.1-3 プラント起動運転時ヒートマスバランス図（定格出力）

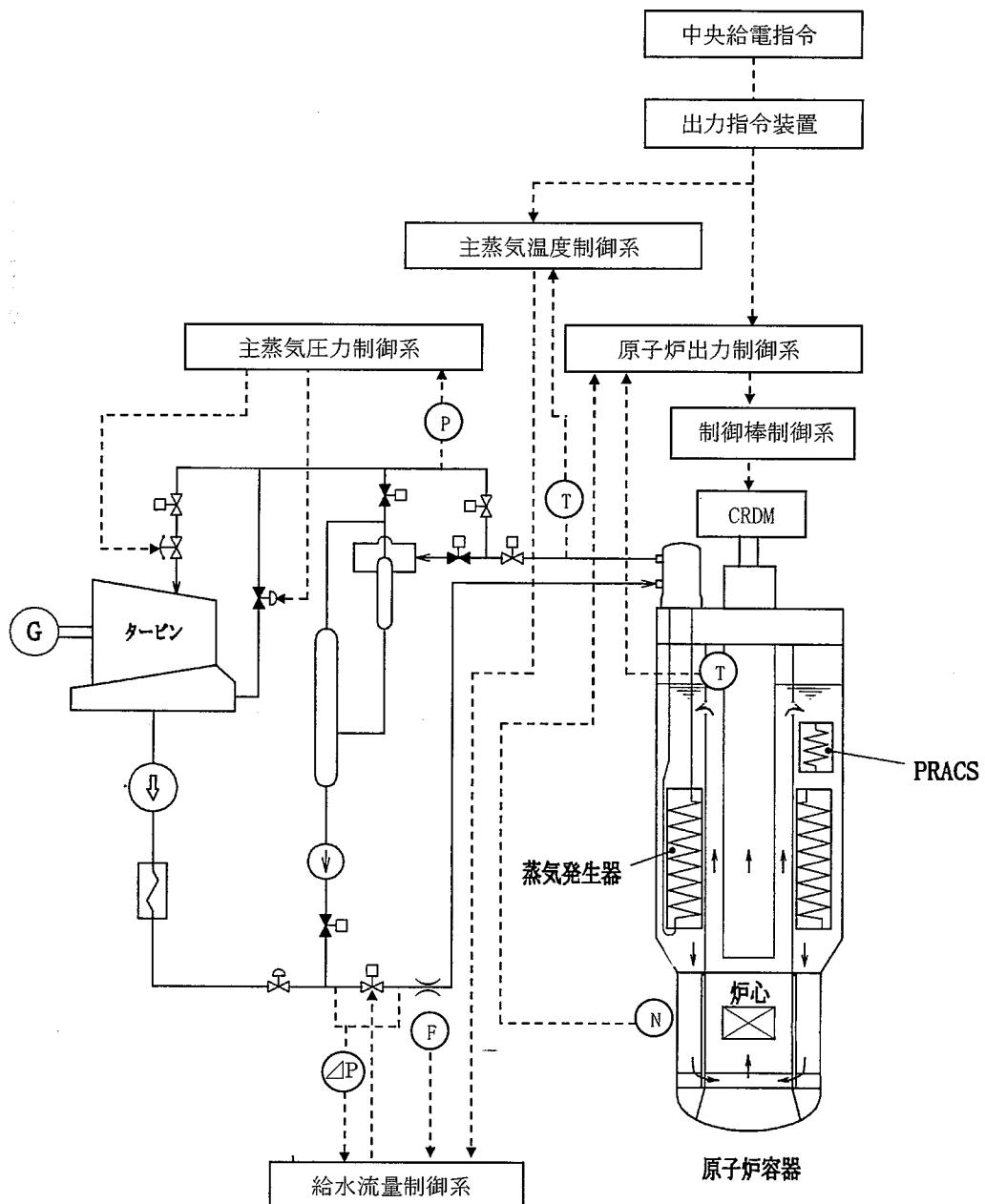


図 6.2.1.1-4 プラント制御系構成概念図

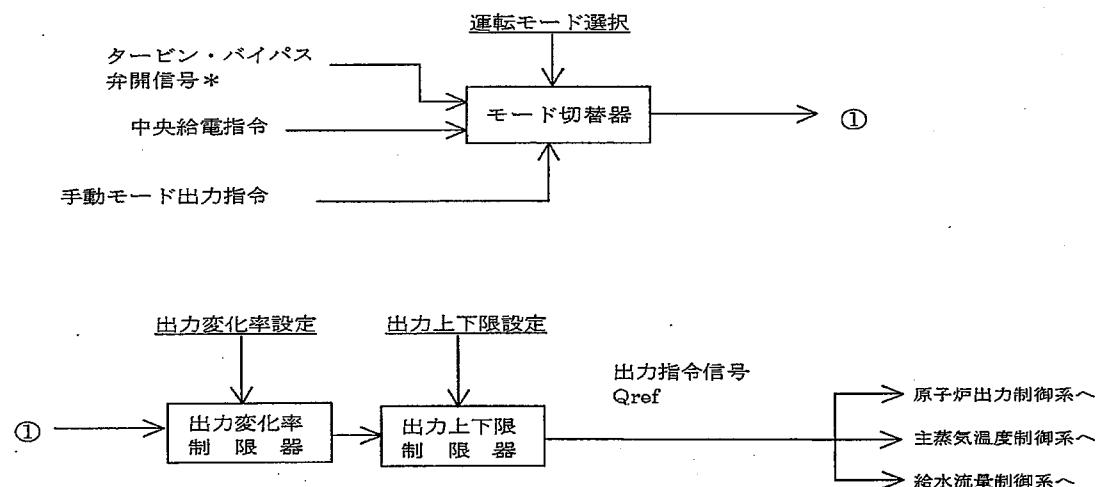


図 6.2.1.1-5 出力指令装置制御ブロック図

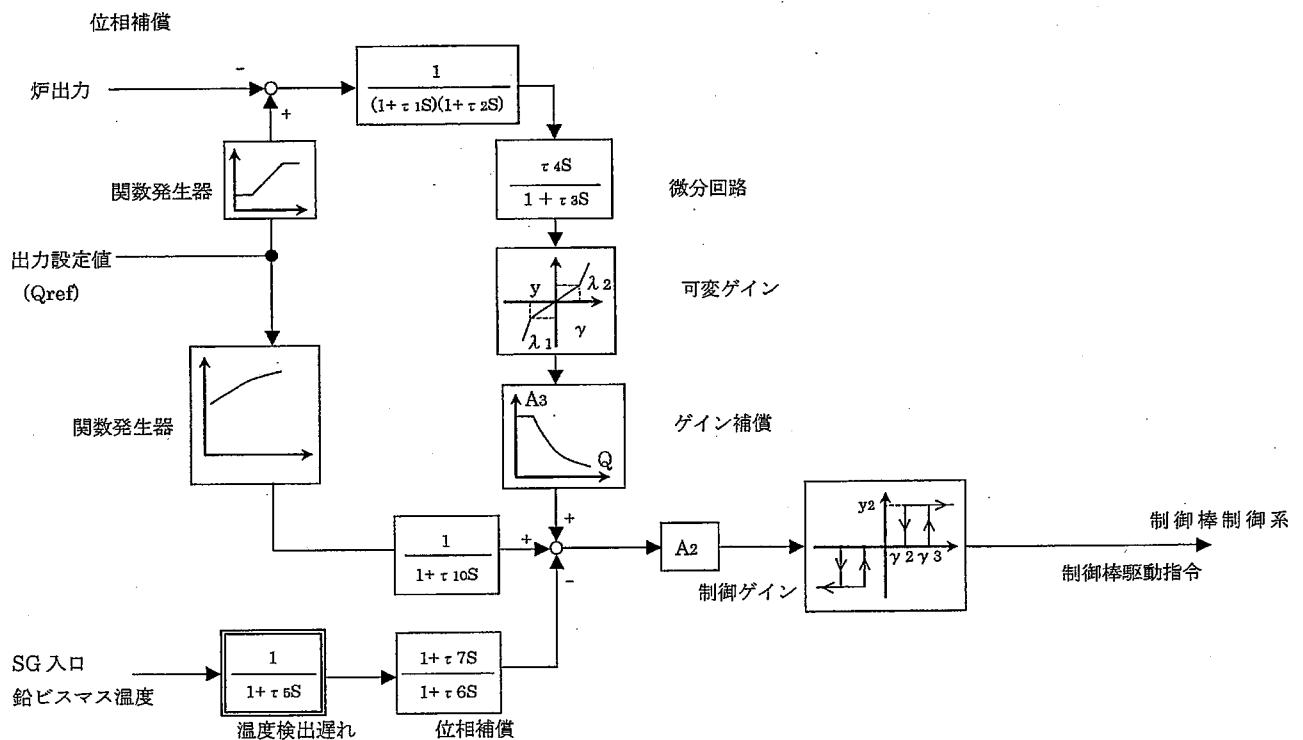


図 6.2.1.1-6 原子炉出力制御系



図 6.2.1.1-7 制御棒制御系ブロック図

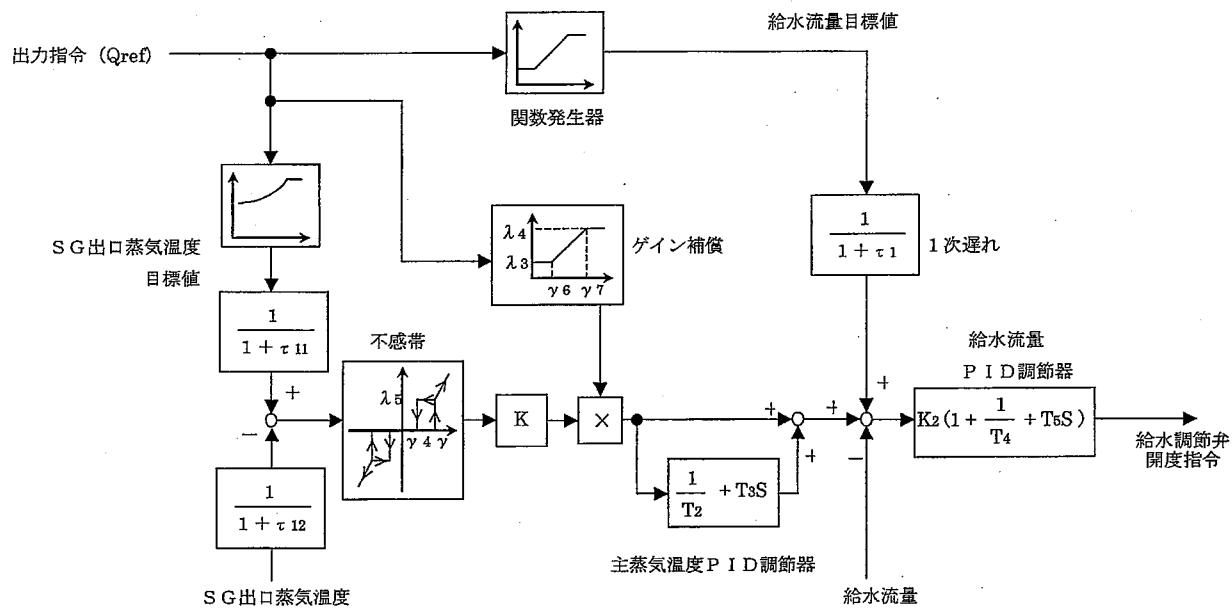


図 6.2.1.1-8 主蒸気制御系および給水流量制御系ブロック図

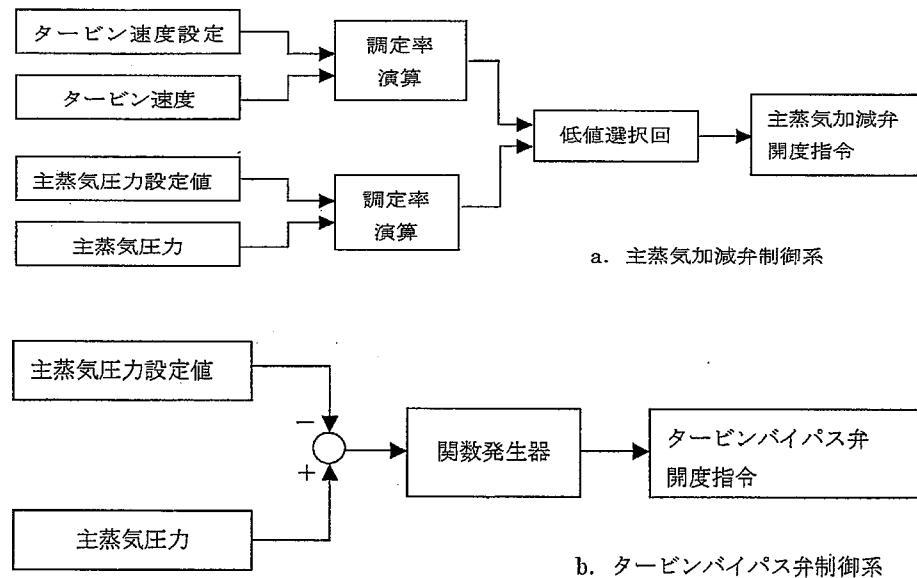


図 6.2.1.1-9 主蒸気圧力制御系ブロック図

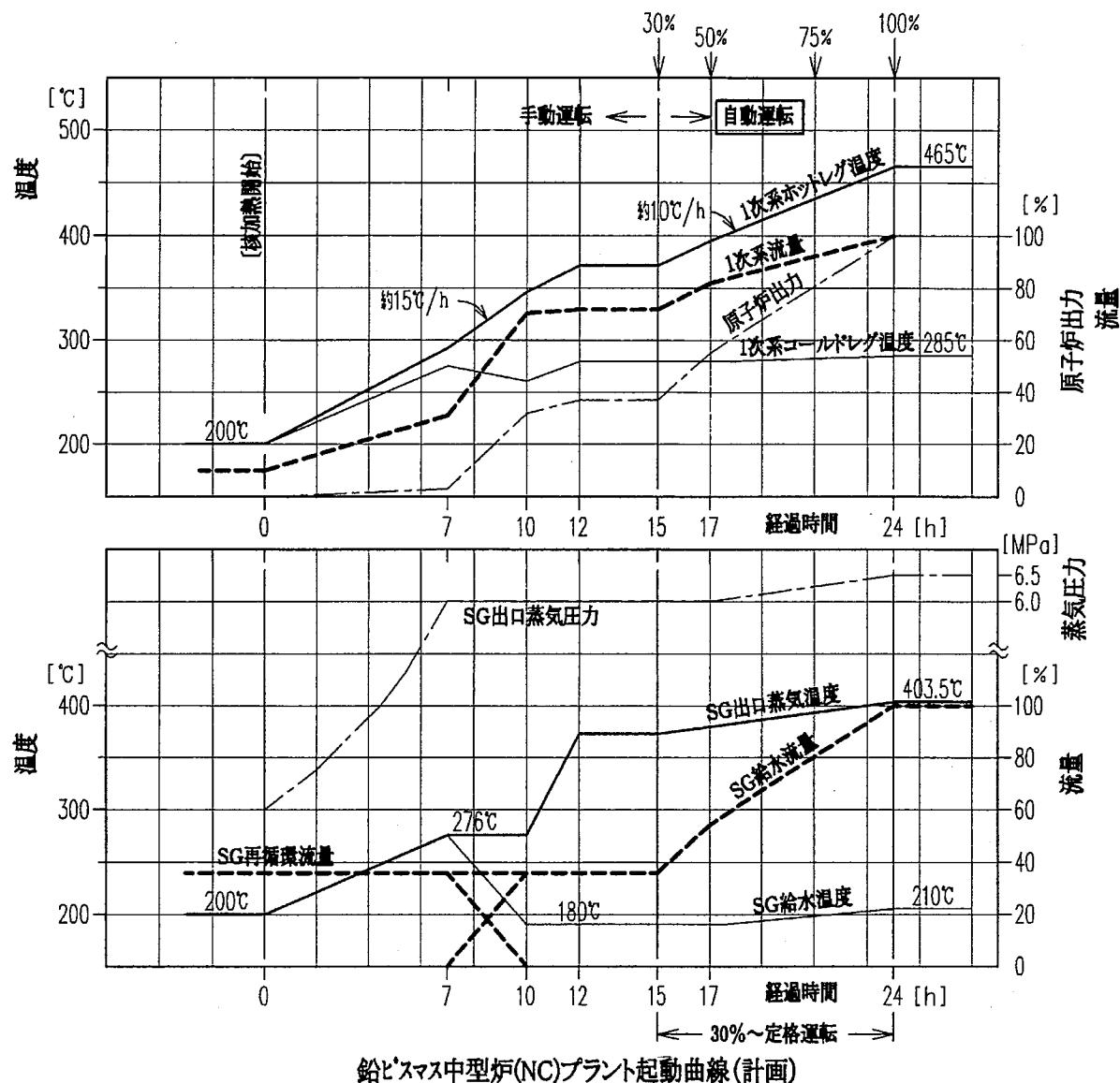


図 6.2.1.2-1 自然循環炉 プラント起動曲線（計画）

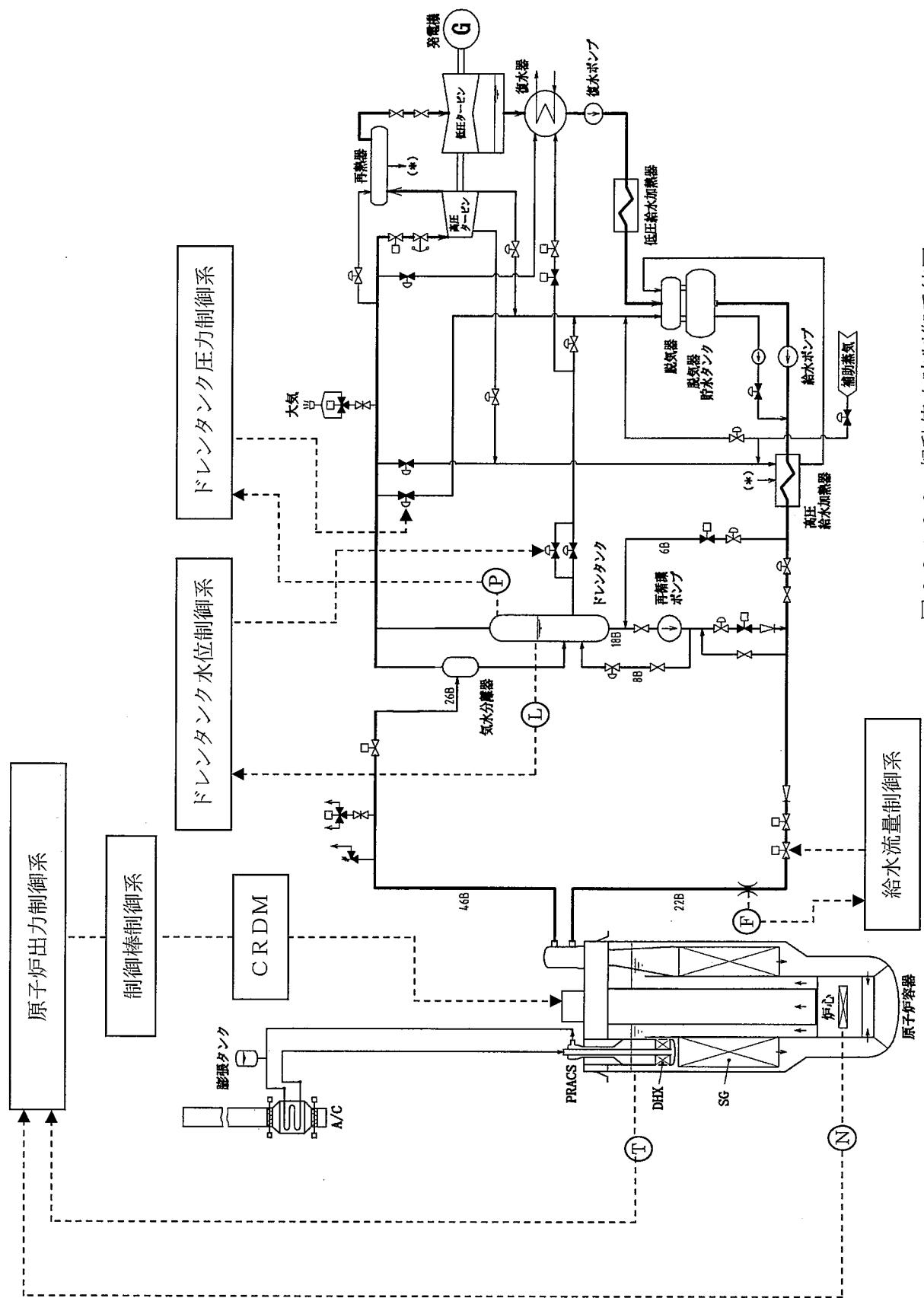


図 6.2.1.2-2 起動停止時制御系統図

6.2.2 起動停止の解析検討

6.2.2.1 検討条件

(1) 動特性解析モデル

a. 解析コード：プラント動解析コード；Super-COPD

b. 解析モデル

次の各図に解析モデルを示す。

図 6.2.2.1-1 解析モデル図（熱計算）

図 6.2.2.1-2 解析モデル図（冷却材流量計算）

図 6.2.2.1-3 解析モデル図（給水・蒸気系流動計算）

図 6.2.2.1-4 炉心部反応度計算モデル図

この解析モデルは平成13年度検討の安全解析モデルと同様であるが、起動停止の特性解析にあたり、次の事項を追加修正している。

- ・水蒸気系の解析モデルとして、再循環系のモデルを改良する。
- ・起動停止時及び出力運転時に動作するプラント制御系をモデル化する。

下記に各々のモデルの概要を示す。

(a) 炉心部

i. 多チャンネルのモデル化が可能な炉心部熱計算モジュール(RX)を用いる。

本モジュールは、径方向に燃料、クラッド、冷却材、ラッパ管を考慮できるようになっており、軸方向には燃料と上下プレナム部を考慮できる。

ii. 本解析では、炉心のホットスポット温度を評価する必要があり、平均チャンネルの他に、ホットチャンネルを考慮する。ホットチャンネルは平均チャンネルと同一のモデルとし、炉心の最高温度を評価する条件設定とする。

iii. 平均チャンネルとホットチャンネルの流量配分は各チャンネルの温度状態による再配分効果を考慮したモデルとする。

iv. 炉心部のフィードバック反応度は炉心特性を適切に表すようモデル化する。

(b) 原子炉容器

i. 上部及び下部のプレナムは完全混合とする。

ii. 原子炉容器内 SG の出入口部もプレナムとし完全混合とする。

iii. 上部プレナムは原子炉構造を考慮し、PRACS より上部とそれ以下の 2 領域とする。

(c) SG 再循環系

i. 再循環系及び起動バイパス系は複雑な系統であるが、本解析ではこれらの系統全てをモデル化せずに、所定の性能・特性を有する設計が行われるものとし、給水条件(流量と温度)と SG 出口条件等について起動計画に整合する適切な境界条件を設定して解析する方法とする。

(2) 解析検討条件

起動停止過渡解析は、起動時の解析で代表させ、停止時は起動時の逆シーケンスとなる。

a. 初期状態

- ・原子炉容器内の鉛ビスマス温度は200°Cとする。
- ・炉心熱出力の初期出力を1MWtとし、この熱出力による鉛ビスマスの自然循環流量(約8%)を初期状態とする。
- ・給水流量は35%とし、給水温度は200°Cとする。
- ・ドレンタンク圧力は200°Cの飽和圧力とする。

b. 核加熱開始～最低出力運転(原子炉熱出力37%)

- ・原子炉出力：起動計画に示す熱出力上昇曲線により上昇(境界条件)。

加圧水型軽水炉や高速増殖原型炉等の先行炉では、この間の出力上昇は手動操作により運転を行っている。一方、前項6.2.1.2起動停止時のプラント制御方式の検討においては、本炉が将来の実用化段階であることを考慮し、運転員の負担軽減の観点から自動制御で起動する計画を設定した。この出力レベルでの原子炉出力の操作は、通常出力運転時とは異なり、線源領域中性子計装や広域中性子計装等の信号をモニタして行うため、その自動制御方式も通常出力運転時とは異なる制御回路を設計する必要がある。本検討では核加熱開始からの自動制御のための制御回路の設計検討は実施していないことから、起動過程での原子炉出力は境界条件として与えた。

- ・給水流量：35%一定(境界条件)。
- ・SG出口水蒸気圧力：所定の変化率で上昇(境界条件)。

c. 最低出力運転～100%定格出力運転

- ・プラント制御系による自動制御により出力を増大させる。
- ・この出力上昇過程は後記する6.2.3項の通常出力運転時の出力変更と同様であり(ただし、出力上昇率は小さい)、過渡解析を行う。

6.2.2.2 起動時特性解析結果

零出力から最低出力運転(原子炉熱出力37%)まで、起動運転手順に沿った過渡解析結果を図6.2.2.1-5に示す。原子炉出力の増大に伴って鉛ビスマス温度が上昇し、また、同温度の上昇に伴い自然循環力が増大して冷却材流量も増大する特性が示されている。

また、最低出力運転(原子炉熱出力37%)から100%出力運転までのプラント制御系の自動運転による出力上昇の過渡解析結果を図6.2.2.1-5に併せて示す。安定に出力上昇する結果が示されている。図6.2.2.1-6はこの出力範囲の詳細図である。

なお、図6.2.2.1-5は零出力から最低出力運転までと、最低出力運転から100%出力運転までの2つの解析結果を繋いで作成した図である。13時間から15時間にかけて若干変化している曲線は双方の最低出力運転状態値に若干のズレがあったためであり、過渡解析上の理由であり、現象として起こるものではない。

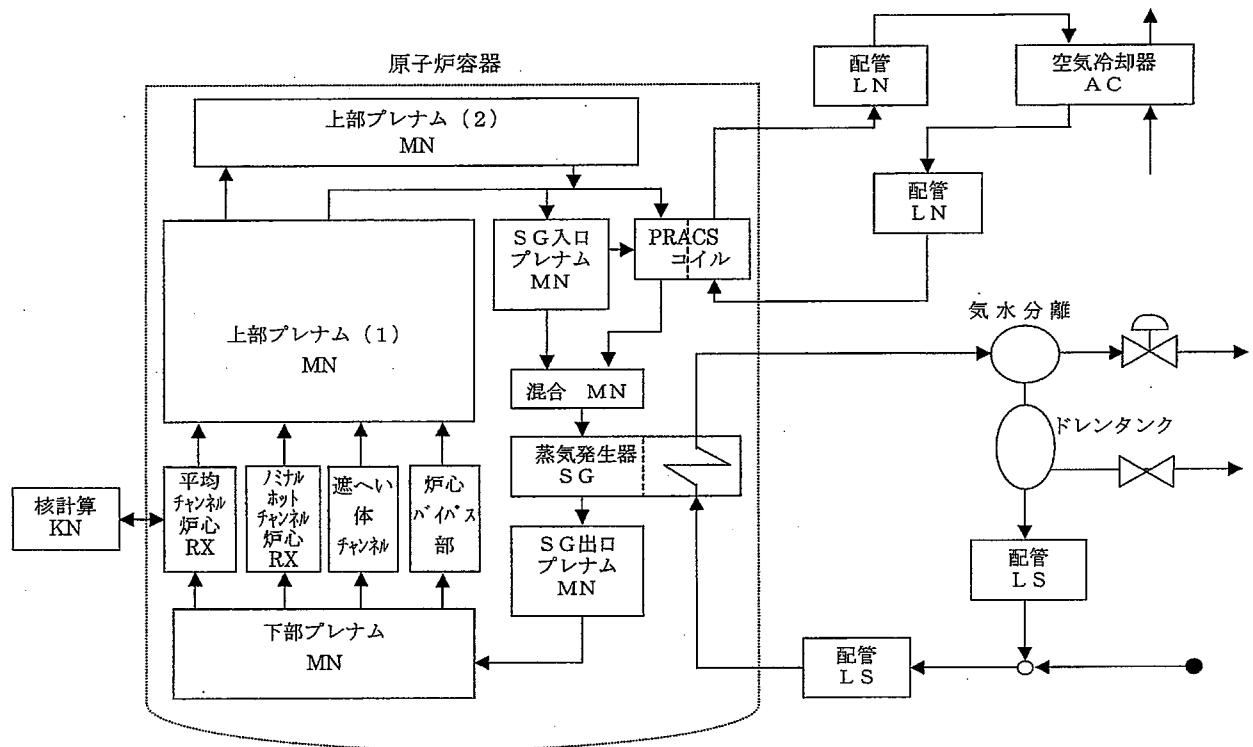


図 6.2.2.1-1 自然循環炉の動特性解析モデル（熱計算）

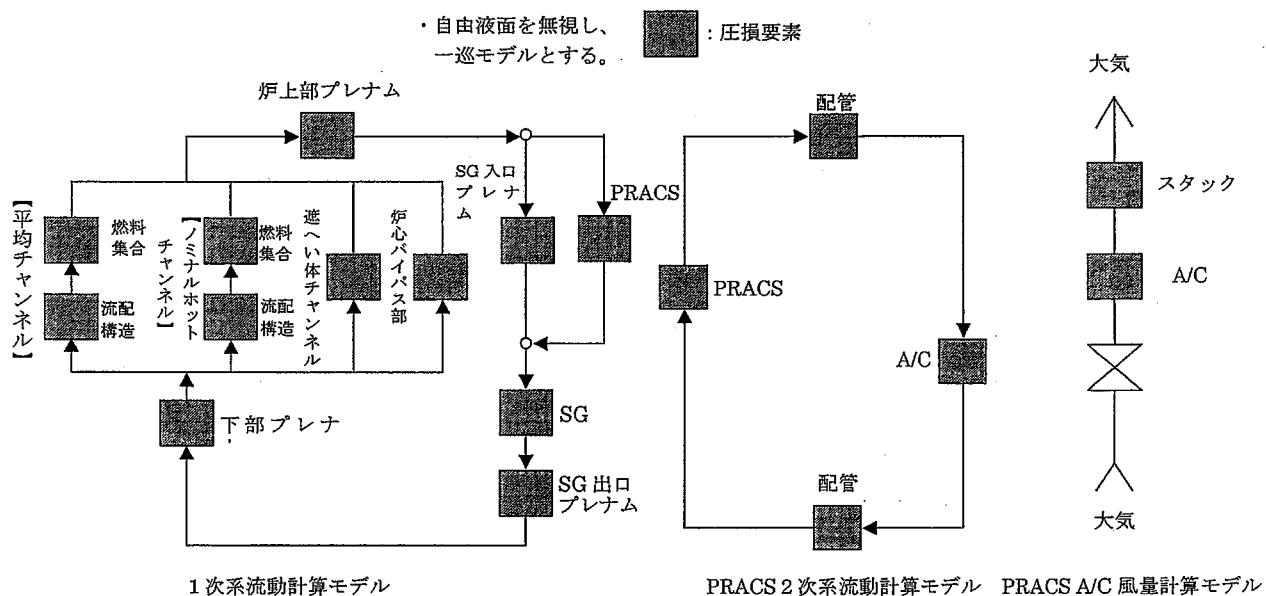


図 6.2.2.1-2 自然循環炉の動特性解析モデル（冷却材流量計算）

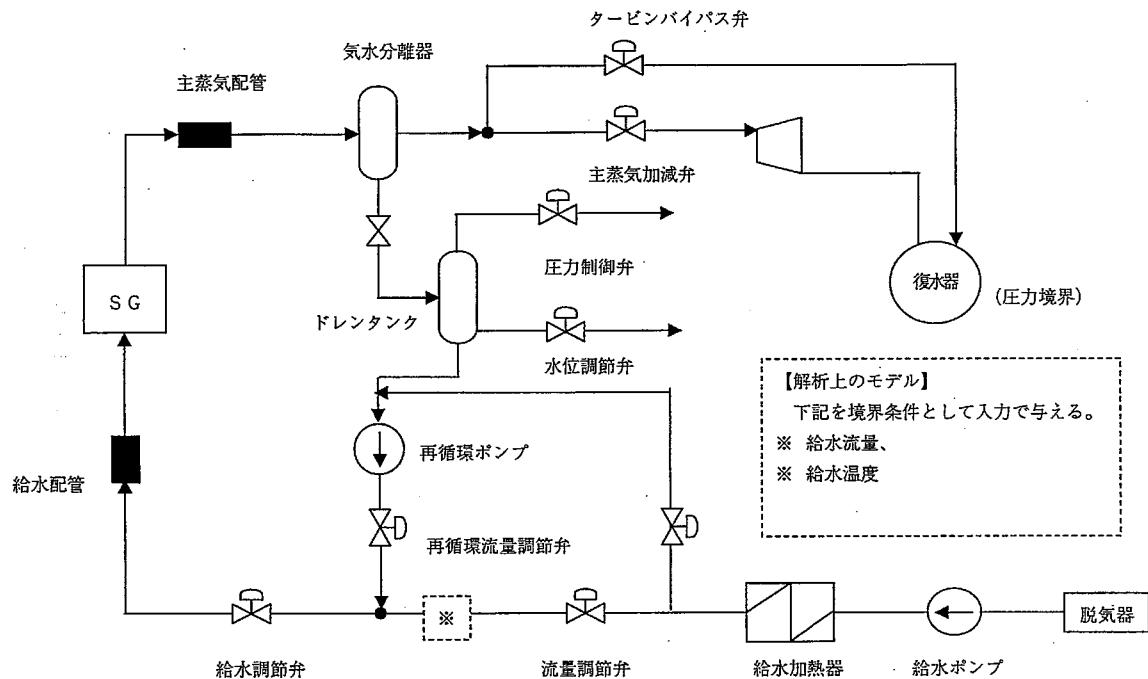


図 6.2.2.1-3 水・蒸気系 動特性解析モデル

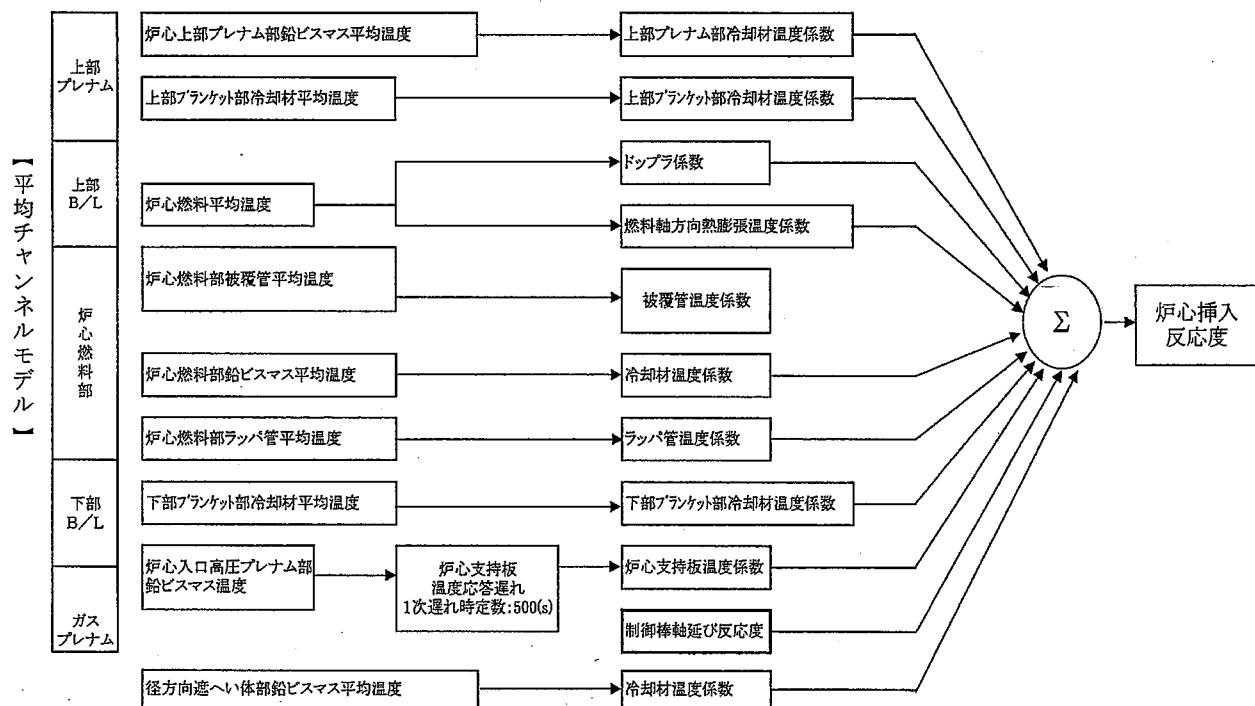


図 6.2.2.1-4 反応度計算モデル

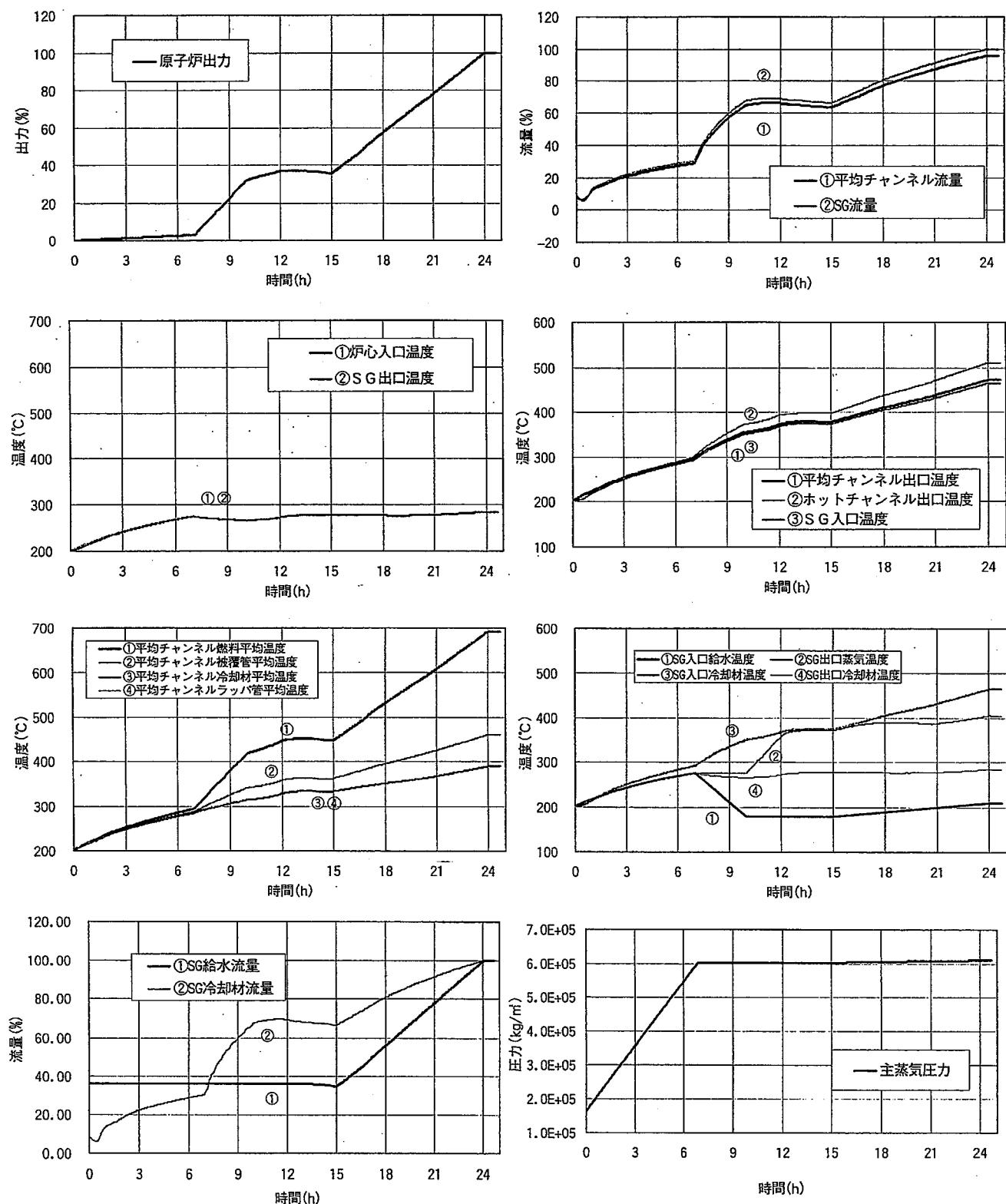


図 6.2.2.1-5 起動特性解析結果；自然循環炉

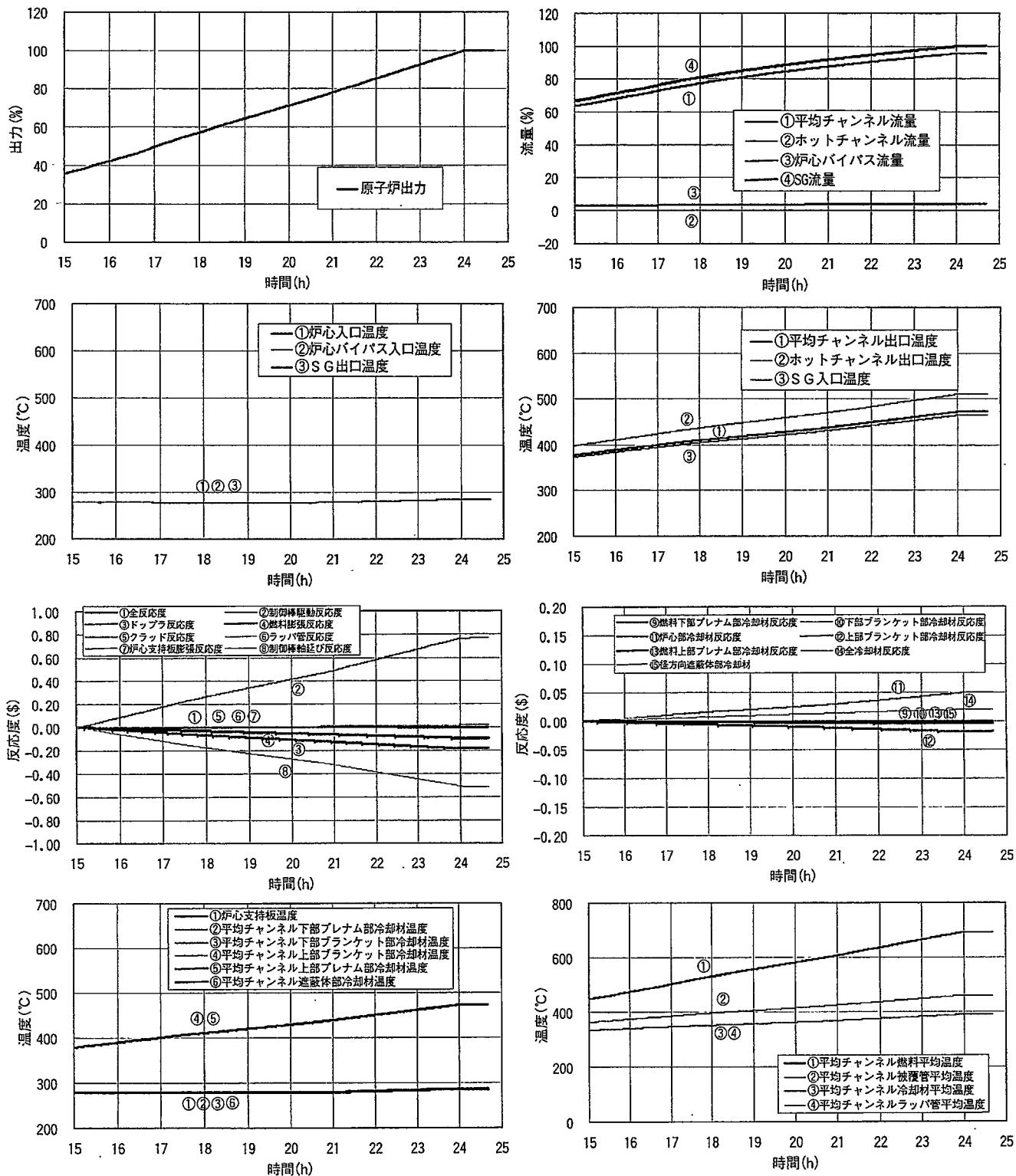


図 6.2.2.1-6(1/2) ランプ状出力変更 (30%→100%) 起動解析結果 ; 自然循環炉

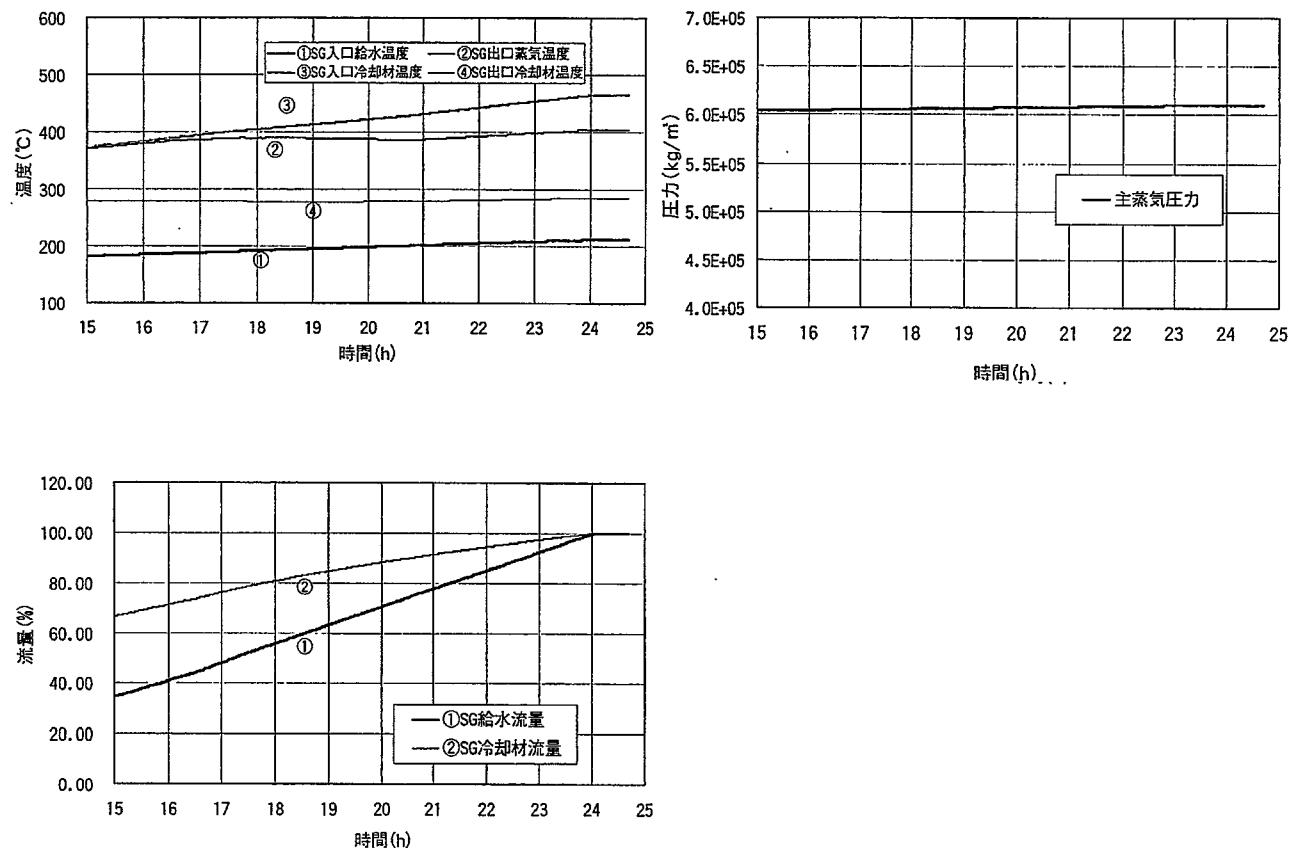


図 6.2.2.1-6 (2/2) ランプ状出力変更 (30%→100%) 起動解析結果；自然循環炉

6.2.3 通常出力運転時の出力変更特性の解析検討

6.2.3.1 検討条件

(1) 動特性解析モデル

解析コード及び解析モデルは前項 6.2.2 起動停止の解析検討と同じである。

(2) 予備解析検討条件

プラント制御系の各制御定数（比例ゲイン、積分時間など）をサーベイして安定な制御特性が得られる定数を暫定するために予備解析を行う。また、プラント出力変更時のシステムの応答性（追従性）を把握する。

予備解析における検討条件は次のとおりとする。

a. 初期状態

- ・原子炉及び冷却系の運転状態は 100%定格出力とする。

b. 出力変更の解析条件

通常出力運転における出力変更解析は、100%定格出力からの出力低下の条件で解析検討を行う。出力上昇時は、出力低下時の逆になる。

i) ステップ状出力変更

鉛ビスマス炉（自然循環型）は冷却材流量が自然循環によるものであり、熱的な応答遅れが大きいため出力変更率については制約を設けている。ここでは、平成 13 年度の安全解析結果（UTOP）を参考として、比較的早い応答性も期待できることから、出力指令信号の 10%幅ステップ状の変更を行った場合の検討を行う。

なお、10%ステップ状出力変更の条件は、もんじゅや実証炉最適化研究の条件と同じである。

ii) ランプ状出力変更

出力指令信号のランプ状の変更を行った場合の検討条件は、所定の制約内での変化率を条件として解析検討する。ここでは、約 1.5%／分の条件にて解析検討を行う。因みに、もんじゅや実証炉最適化研究の条件は 5%／分である。

(3) 出力変更の解析条件

予備解析結果を参考として出力変更の解析条件を次のように設定する。

a. 初期状態

- ・原子炉及び冷却系の運転状態は 100%定格出力または 30%定格出力とする。

b. 出力変更の解析条件

i) ステップ状出力変更

高出力時のステップ変更と、低出力時のステップ変更の双方の特性を解析にて確認するものとし、次の条件とする。

- 100%→90% ステップ状出力指令値変更
- 30%→40% ステップ状出力指令値変更

ii) ランプ状出力変更

出力変更率は系統の応答性を考慮し次の条件とする。

- 100%→30%、1.0%/分のランプ状出力指令値変更

c. 制御系制御定数

予備解析結果を参考として、さらに制御特性向上を考慮した暫定値を設定した。

リファレンス解析で使用したパラメータ値を表 6.2.3.3-1 に示す。

6.2.3.2 予備解析結果

(1) ステップ状出力変更

制御系定数の設定を表 6.2.3.3-1 の値として、以下の解析を行った。

プラント制御系と構成する次の各制御系について、10%幅のステップ状出力指令信号の変更を行い、安定で追従性を有する制御定数（比例ゲイン及び積分時間）のサーベイを実施した。本検討では必ずしも最適な制御定数ではないが、所定の制御特性を有する制御定数を暫定した。

- ① 原子炉出力制御系
- ② 主蒸気温度制御系
- ③ 給水流量制御系
- ④ 主蒸気圧力制御系

解析結果を図 6.2.3.2-1 に示す。また、使用した各制御系の制御定数を表 6.2.3.2-1 に示す。図 6.2.3.2-1 に示すように安定な制御特性を示す。また、約 15 分で原子炉及び冷却系は整定する。

(2) ランプ状出力変更

表 6.2.3.2-1 の暫定制御定数を用いて、100%→30%のランプ状出力指令信号変更の解析を実施した。変化率は系統の応答性を把握するため、暫定的に 70%/50 分とした。解析結果を図 6.2.3.2-2 に示す。同図に示すように安定な制御特性が示される。但し、整定時間は約 8000 秒であり、目標値変化に対する追従性は良くない、これは、制御棒による反応度挿入率を 0.02 ¢ / s に制限していることによる。ランプ状の出力変更特性としては、70%/70 分 (1.0%/分) 程度以下の変更率が適切であるといえる。

また、主蒸気温度制御系の比例ゲインは表 6.2.3.2-1 に示すように出力に応じて可変としている。これは、低出力状態では SG 入口の鉛ビスマス温度と主蒸気温度との温度差が小さく、給水流量の操作による主蒸気温度制御の感度が小さくなるため、制御しにくくなるためである。図 6.2.3.2-3 に高出力時と同じ比例ゲインで解析した例を示す。低出力状態では主蒸気温度制御が不安定となる。これは、一体貫

流型 SG に共通した特性であり、制御の安定性を重視する観点から制御方式の対策が必要である。対策としては、出力レベルに応じて可変ゲインとともに、主蒸気温度の制御幅に不感帯を設ける方法が適切である。

次に、微調整棒駆動による反応度制御と制御棒軸伸び反応度に関する検討を示す。

表 6.2.3.2-2 に制御棒駆動による反応度と軸伸び反応度に関する諸量を示す。70% 幅の出力変更の過渡状態においては、次のような制御棒の相対位置となる。

- ・微調整棒（6 本）は約 9cm 插入される（駆動量 11cm—軸伸び 1.7cm）。
- ・粗調整棒と後備棒は約 1.7cm 引抜かれる。

微調整棒の駆動による位置変化に比較して、軸伸び量は無視はできない変位量となるが、原子炉出力制御に悪影響を及ぼすことはない。

6.2.3.3 出力変更解析結果

(1) ステップ状出力変更

制御系定数の設定を表 6.2.3.3-1 の値として、以下の解析を行った。

100%から 90%へステップ状に出力指令信号を変更した解析結果を図 6.2.3.3-1 に示す。予備解析結果と同様に安定な制御特性を示す。約 15 分で原子炉及び冷却系は整定する。

また、低出力時の特性として、30%から 40%へステップ状に出力指令信号を変更した解析結果を図 6.2.3.3-2 に示す。低出力時においても安定な制御特性が得られる。整定時間は冷却材流量が少なく系統一巡時間が増大するため、約 25 分と若干遅くなる。

(2) ランプ状出力変更

100%から 30%へ 1 %／分の変化率でランプ状出力指令信号を変更した解析結果を図 6.2.3.2-3 に示す。同図に示すように安定な制御特性が示され、目標値変化に對してほぼ追従する特性が得られる。

ランプ状出力変更の例として、昼間と夜間の電力需要に差があるため、深夜はプラント出力を低下するプラント運用（日負荷追従）が考えられる。PWR における日負荷追従運用の運転パターン検討例を図 6.2.3.2-4 に示す。同図に示すように、出力変更時の変化率は約 1 %／分程度であり、ここで示した 1 %／分の変化率はこのような日負荷追従運転が可能であることを示すものである。

表 6.2.3.2-1 制御系定数の設定値（予備解析暫定値）

制御系	制御定数	定数值	単位	備考
原子炉出力 制御系	温度検出遅れ (τ 5)	20	s	
	温度検出位相補償 (τ 6)	0	s	位相補償は考慮せず。
	温度検出位相補償 (τ 7)	0	s	"
	温度目標値遅れ時定数 (τ 10)	150	s	
	NIS 検出位相補償 (τ 1)	0	s	"
	NIS 検出位相補償 (τ 2)	0	s	"
	NIS 微分回路定数 (τ 3)	40	s	
	NIS 微分回路定数 (τ 4)	40	s	
	NIS 可変ゲイン (λ 1)	1	%/%	可変ゲインは考慮せず。
	NIS 可変ゲイン (λ 2)	1	%/%	"
	NIS ゲイン補償(A3)	0.9~0.3	%/%	出力レベルに反比例
	制御ゲイン (A 2)	5	%/°C	
	不感帯 (γ 2)	0.3	%	
	不感帯 (γ 3)	0.5	%	
主蒸気 温度制御系	温度検出遅れ時定数 (τ 12)	30	s	
	温度目標値遅れ時定数 (τ 11)	20	s	
	不感帯 (γ 4)	0	%	不感帯は考慮せず。
	不感帯 (γ 5)	0	%	
	不感帯 (λ 5)	0	%	
	比例ゲイン(K1)	2	%/°C	
	積分時間 (T2)	120	s	
	微分時間(T3)	0	s	
	ゲイン補償 (λ 3)	0.25	%/%	
	ゲイン補償 (λ 4)	1	%/%	
	ゲイン補償 (γ 6)	30	%	
	ゲイン補償 (λ 7)	100	%	
給水流量 制御系	目標値 1 次遅れ時定数	20	s	
	比例ゲイン	1	%/%	
	積分時間	120	s	
	微分時間	0	s	
主蒸気圧力 制御系	圧力調停率	0.1	M P a	

表 6.2.3.2-2 制御棒駆動速度と制御棒軸伸びに関する諸量

【制御棒反応度価値】

項目	本数	全反応度価値	
		%△k/k	\$
主炉停止系	微調整棒	6本	1.5
	粗調整棒	12本	2.82
後備炉停止系	後備棒	6本	1.56
			4.77

 $\beta_{\text{eff}} ; 3.27E-3$

【制御棒軸伸び反応度係数】

項目	本数	微分反応度価値	
		挿入位置*	¢ / cm
主炉停止系	微調整棒	6本	5→10cm
	粗調整棒	12本	25→30cm
後備炉停止系	後備棒	6本	0→5cm

* 100%定格出力 (燃焼初期)

【制御棒駆動速度制限；反応度挿入率制限】

反応度挿入率制限=0.02 ¢ / s 以下

項目	反応度価値／本	ストローク (cm)	平均微分 反応度価値	駆動速度 制限値
微調整棒	76.5 ¢ / 本	70	1.09 ¢ / cm	11.0 mm / 分
粗調整棒	71.8 ¢ / 本	70	1.03 ¢ / cm	11.7 mm / 分

【出力変更時 (100%→30%) の反応度変化】

※0～4000秒までの変化

(1) 微調整棒挿入反応度 (軸伸びを除く)

挿入反応度	72.3 ¢ / 6本
移動ストローク	11 cm (6本)
移動速度 (平均)	1.65mm / 分 / 6本、9.9mm / 分 / 1本

(2) 制御棒軸伸び反応度

RV上部プレナム温度変化	465→379°C、86°C低下
制御棒軸長	15.55 m
線膨張率	1.3E-5 1/°C
制御棒軸伸び量	1.74cm 収縮
SG出口PbBi温度変化	285→274°C、11°C低下
RV下部胴長さ	3.2 m
線膨張率	1.22E-5 1/°C
RV胴伸び量	0.04cm 収縮
制御棒相対軸伸び量	1.7cm 収縮
制御棒軸伸び反応度	+48.3 ¢

表 6.2.3.3-1 制御系定数の設定値（リファレンス解析用暫定値）

制御系	制御定数	定数值	単位	備考
原子炉出力 制御系	温度検出遅れ (τ 5)	20	s	
	温度検出位相補償 (τ 6)	0	s	位相補償は考慮せず。
	温度検出位相補償 (τ 7)	0	s	"
	温度目標値遅れ時定数 (τ 10)	150	s	
	NIS 検出位相補償 (τ 1)	0	s	"
	NIS 検出位相補償 (τ 2)	0	s	"
	NIS 微分回路定数 (τ 3)	40	s	
	NIS 微分回路定数 (τ 4)	40	s	
	NIS 可変ゲイン (λ 1)	1	%/%	可変ゲインは考慮せず。
	NIS 可変ゲイン (λ 2)	1	%/%	"
	NIS ゲイン補償(A3)	0.9~0.3	%/%	出力レベルに反比例
	制御ゲイン (A 2)	5	%/°C	
	不感帯 (γ 2)	0.3	%	
	不感帯 (γ 3)	0.5	%	
主蒸気 温度制御系	温度検出遅れ時定数 (τ 12)	30	s	
	温度目標値遅れ時定数 (τ 11)	300	s	
	不感帯 (γ 4)	3	°C	
	不感帯 (γ 5)	5	°C	
	不感帯 (λ 5)	5	%	
	比例ゲイン(K1)	1	%/°C	
	積分時間 (T2)	300	s	
	微分時間(T3)	0	s	
	ゲイン補償 (λ 3)	0.1	%/%	-
	ゲイン補償 (λ 4)	1	%/%	
	ゲイン補償 (γ 6)	30	%	
	ゲイン補償 (λ 7)	100	%	
給水流量 制御系	目標値 1 次遅れ時定数	120	s	
	比例ゲイン	1	%/%	
	積分時間	120	s	
	微分時間	0	s	
主蒸気圧力 制御系	圧力調停率	0.1	M P a	

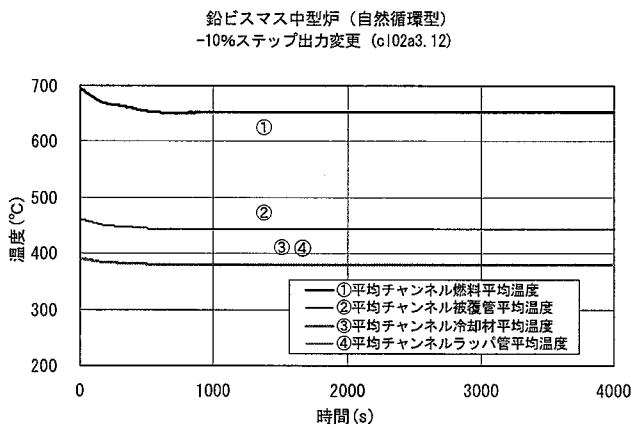
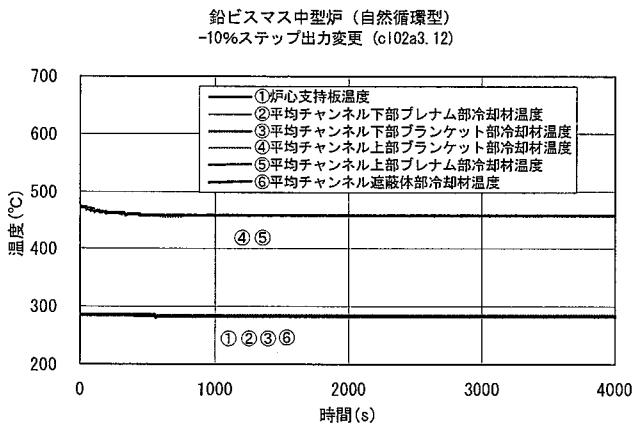
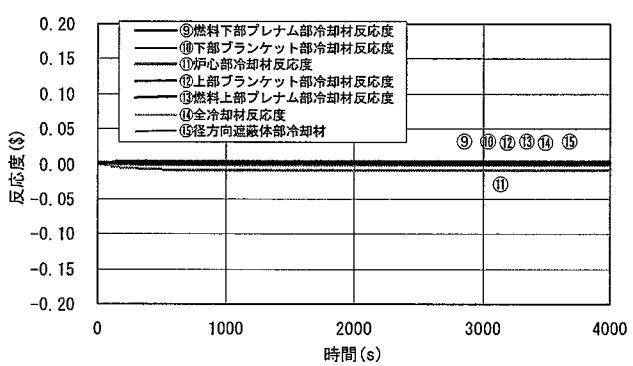
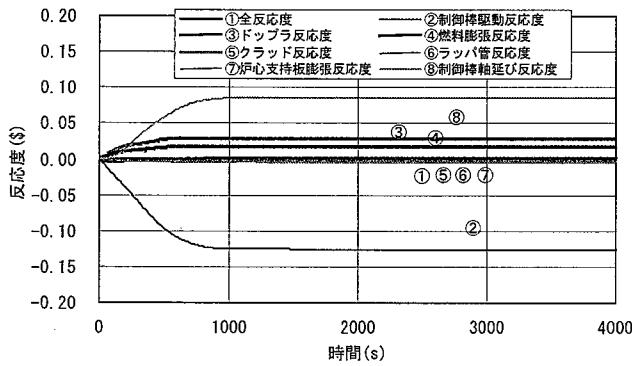
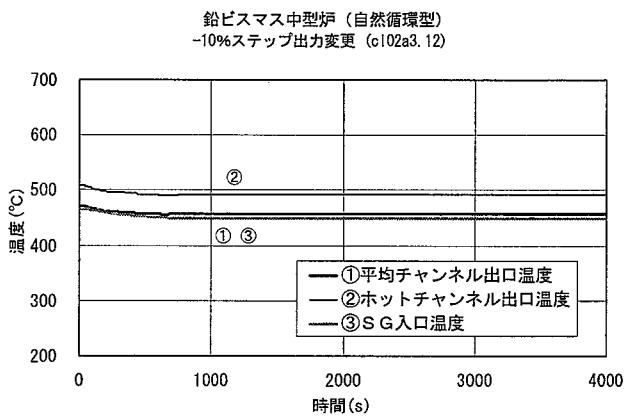
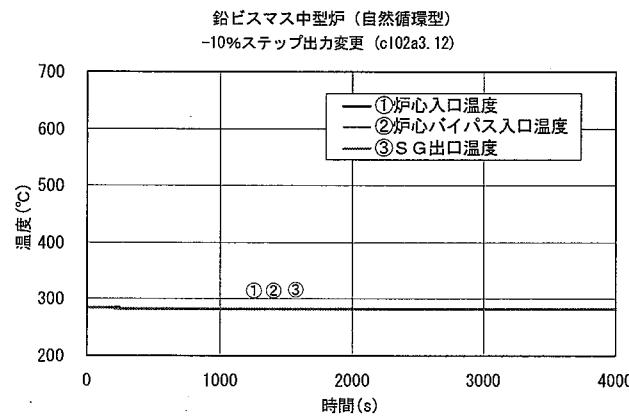
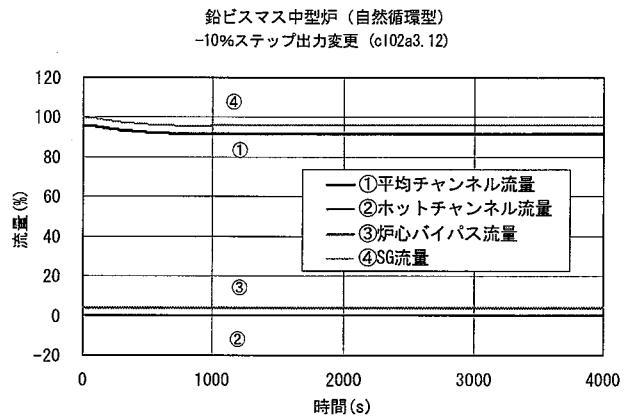
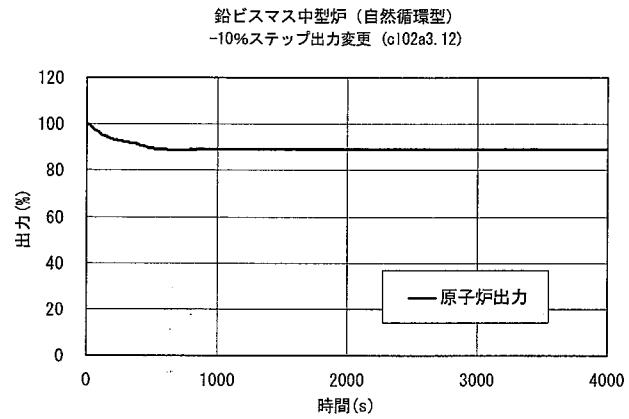


図 6.2.3.2-1 (1/2) ステップ状出力変更 (100%→90%) 予備解析結果；自然循環炉

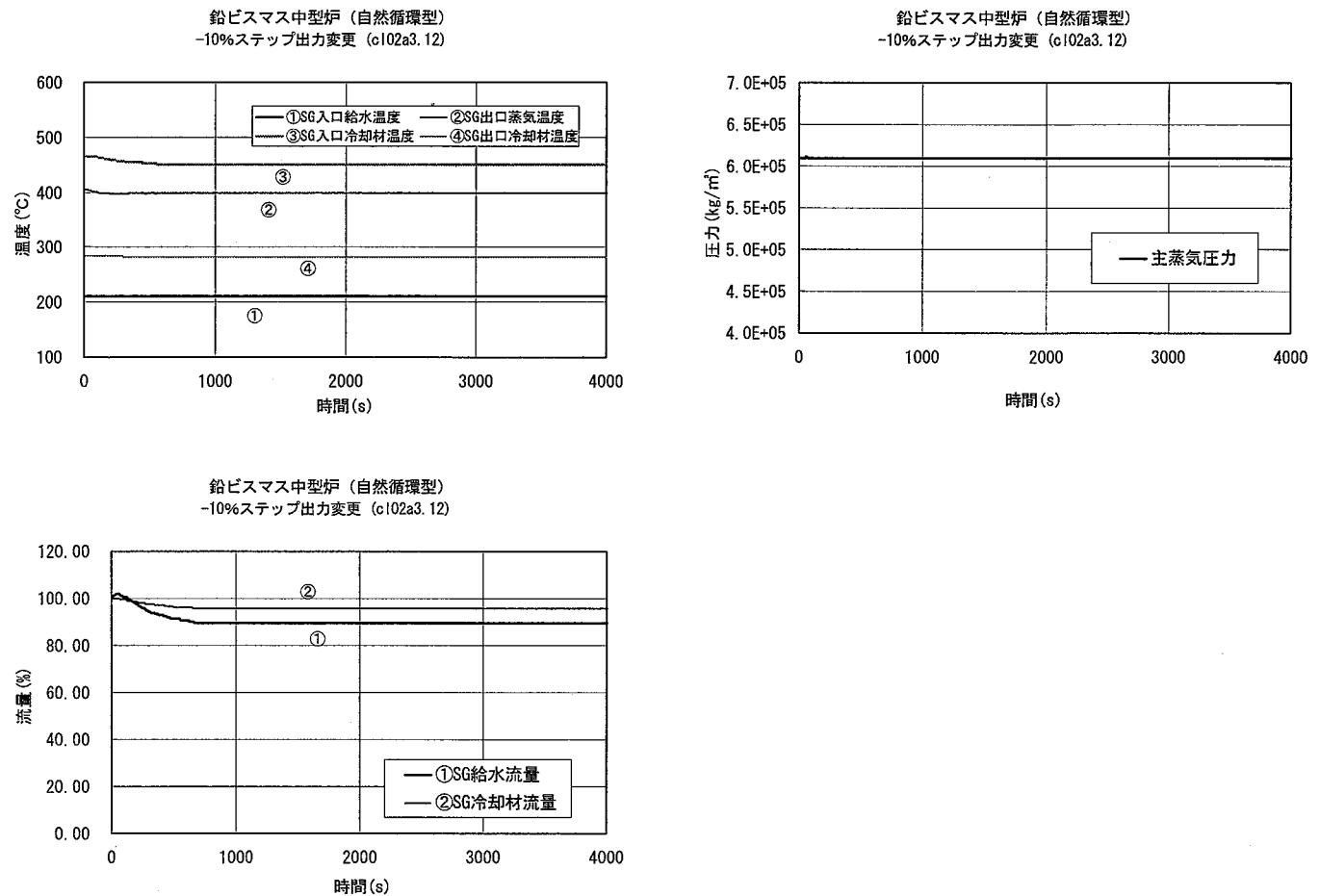
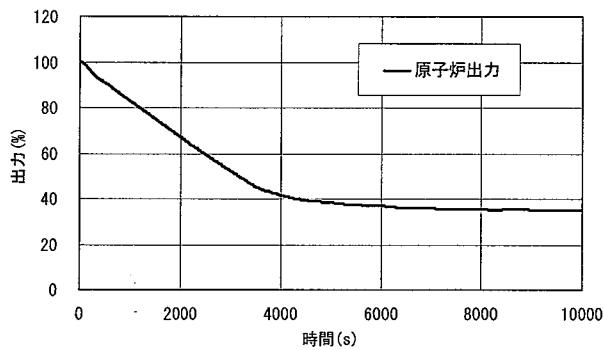
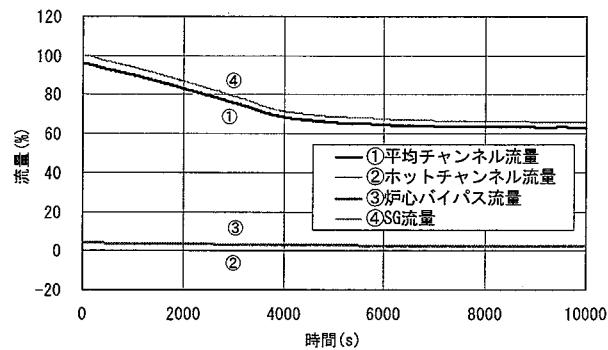


図 6.2.3.2-1 (2/2) ステップ状出力変更 ($100\% \rightarrow 90\%$) 予備解析結果；自然循環炉

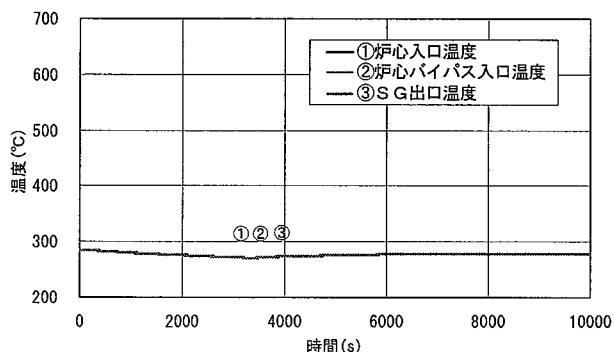
鉛ビスマス中型炉（自然循環型）
100→30%出力変更 (c102b3.1)



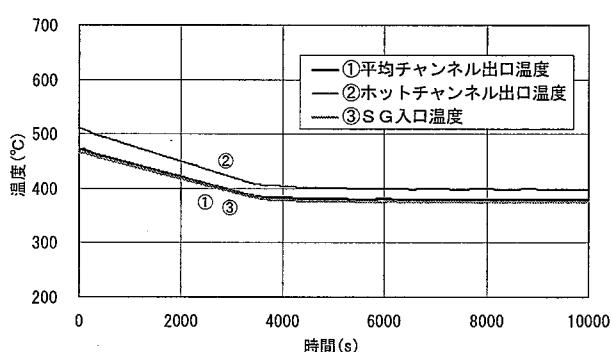
鉛ビスマス中型炉（自然循環型）
100→30%出力変更 (c102b3.1)



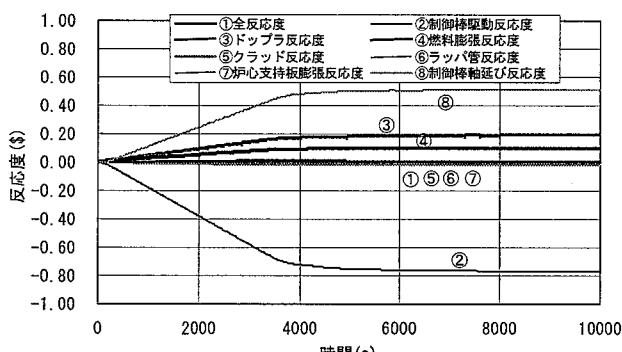
鉛ビスマス中型炉（自然循環型）
100→30%出力変更 (c102b3.1)



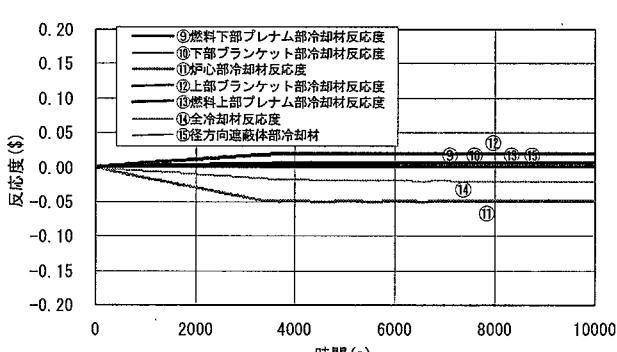
鉛ビスマス中型炉（自然循環型）
100→30%出力変更 (c102b3.1)



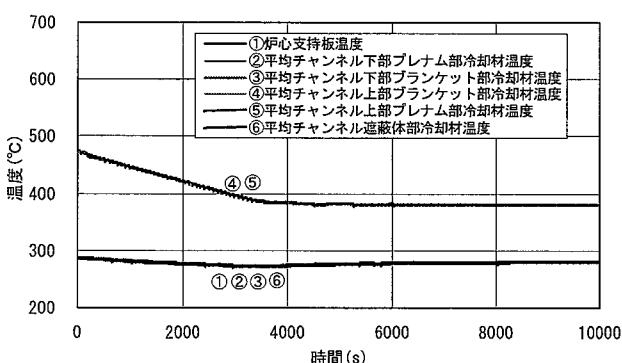
鉛ヒスマス中型炉（自然循環型）
100→30%出力変更 (c102b3.1)



鉛ヒスマス中空炉（自然循環型）
100→30%出力変更 (c102b3.1)



鉛ビスマス中型炉（自然循環型）
100→30%出力変更 (c102b3.1)



鉛ビスマス中型炉（自然循環型）
100→30%出力変更 (c102b3.1)

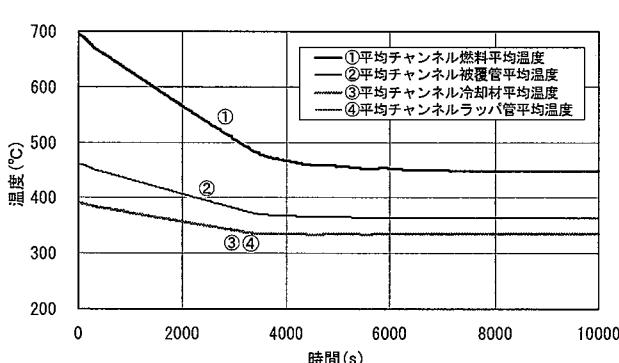


図 6.2.3.2-2 (1/2) ランプ状出力変更 (100%→30%) 予備解析結果；自然循環炉

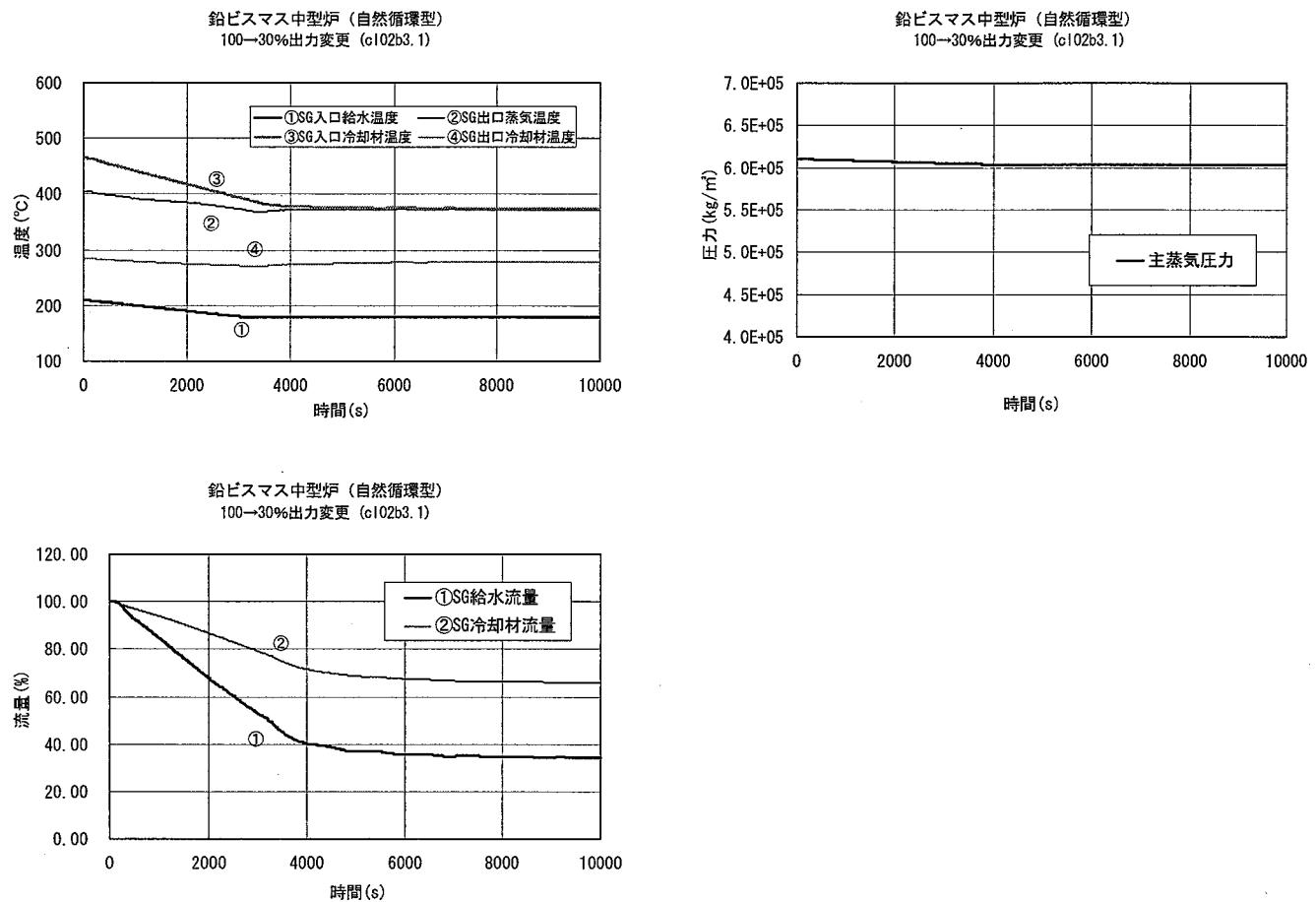


図 6.2.3.2-2(2/2) ランプ状出力変更($100\% \rightarrow 30\%$)予備解析結果；自然循環炉

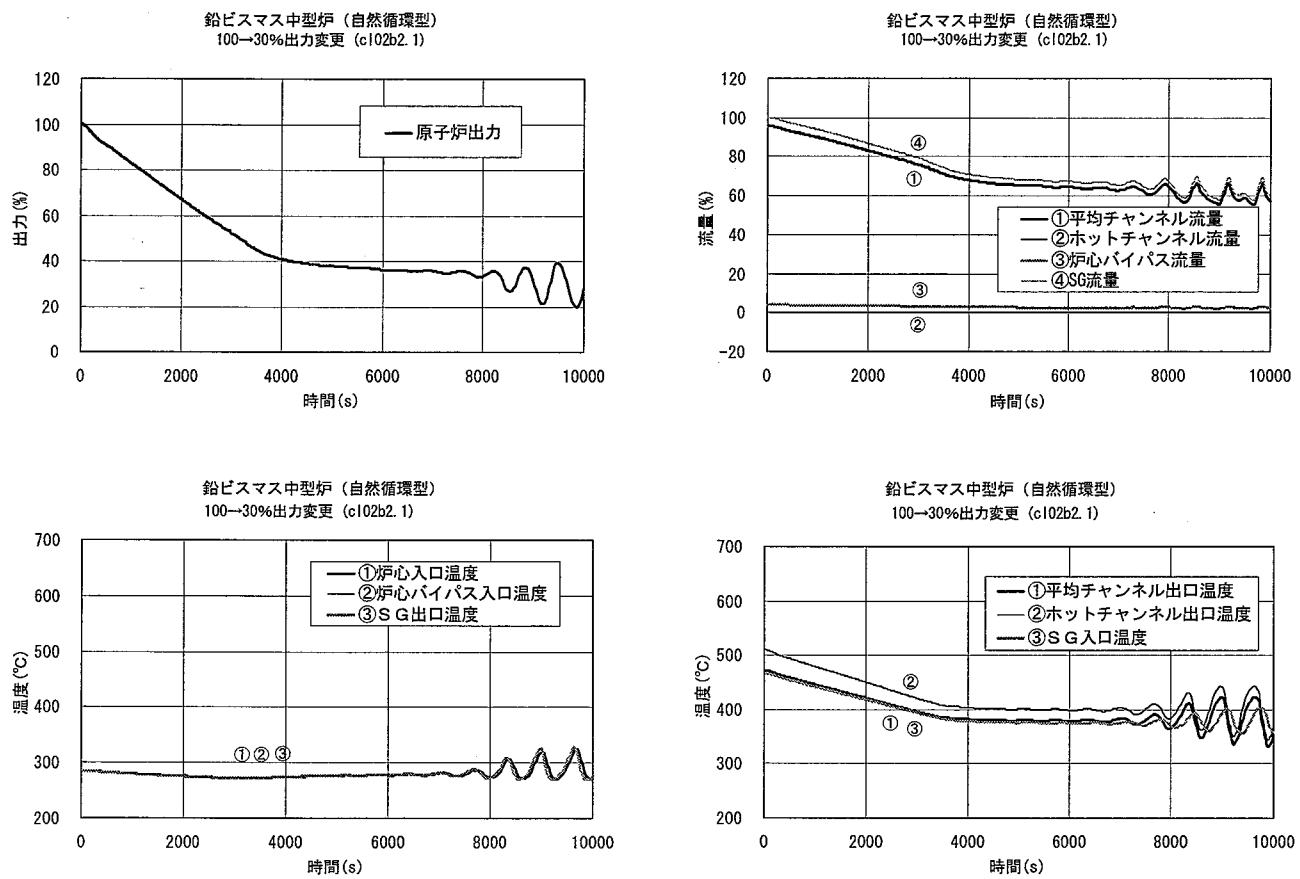


図 6.2.3.2-3 ランプ状出力変更（参考）予備解析—不安定な制御の例；自然循環炉

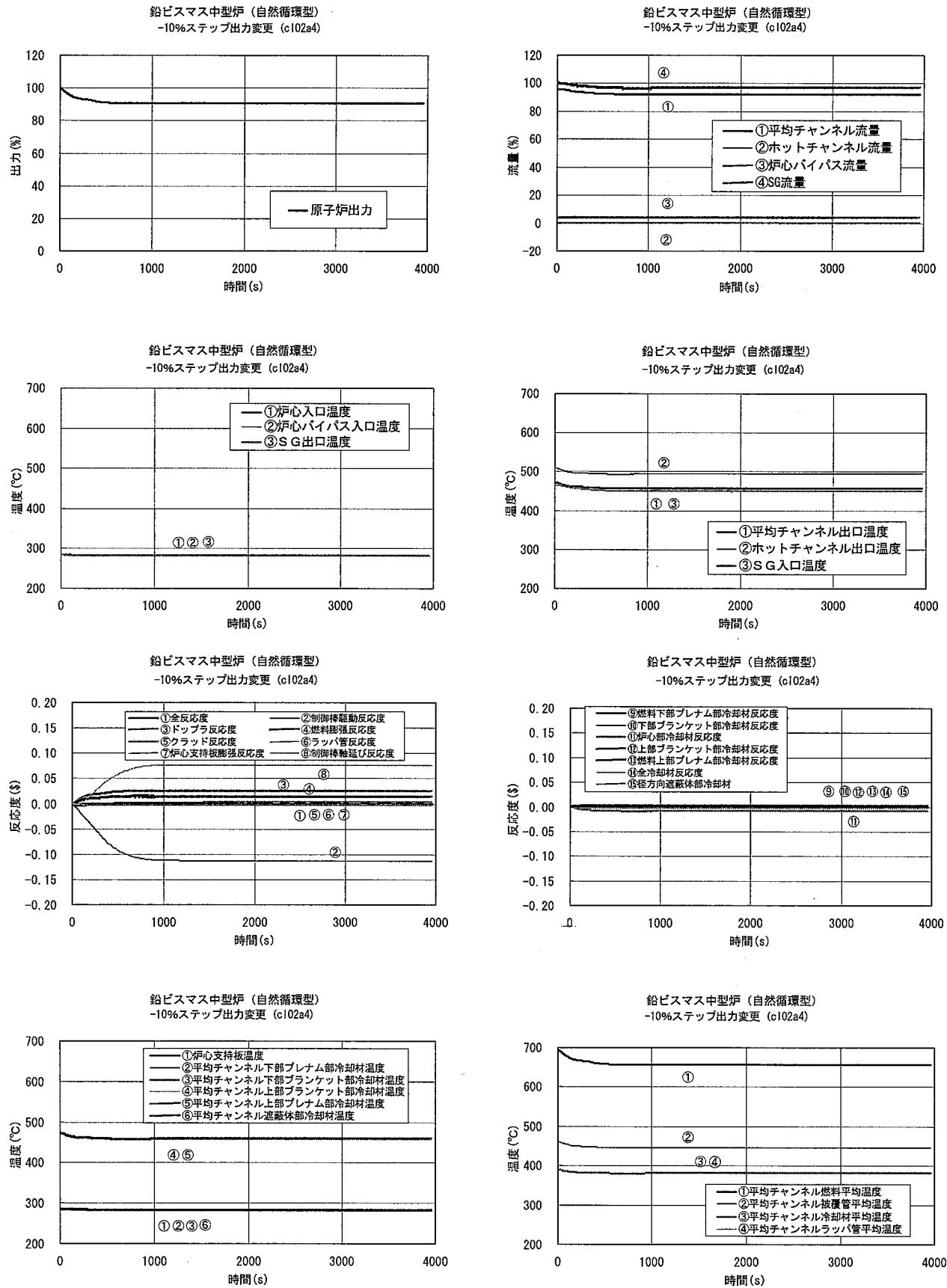


図 6.2.3.3-1 (1/2) ステップ状出力変更 (100%→90%) 解析結果；自然循環炉

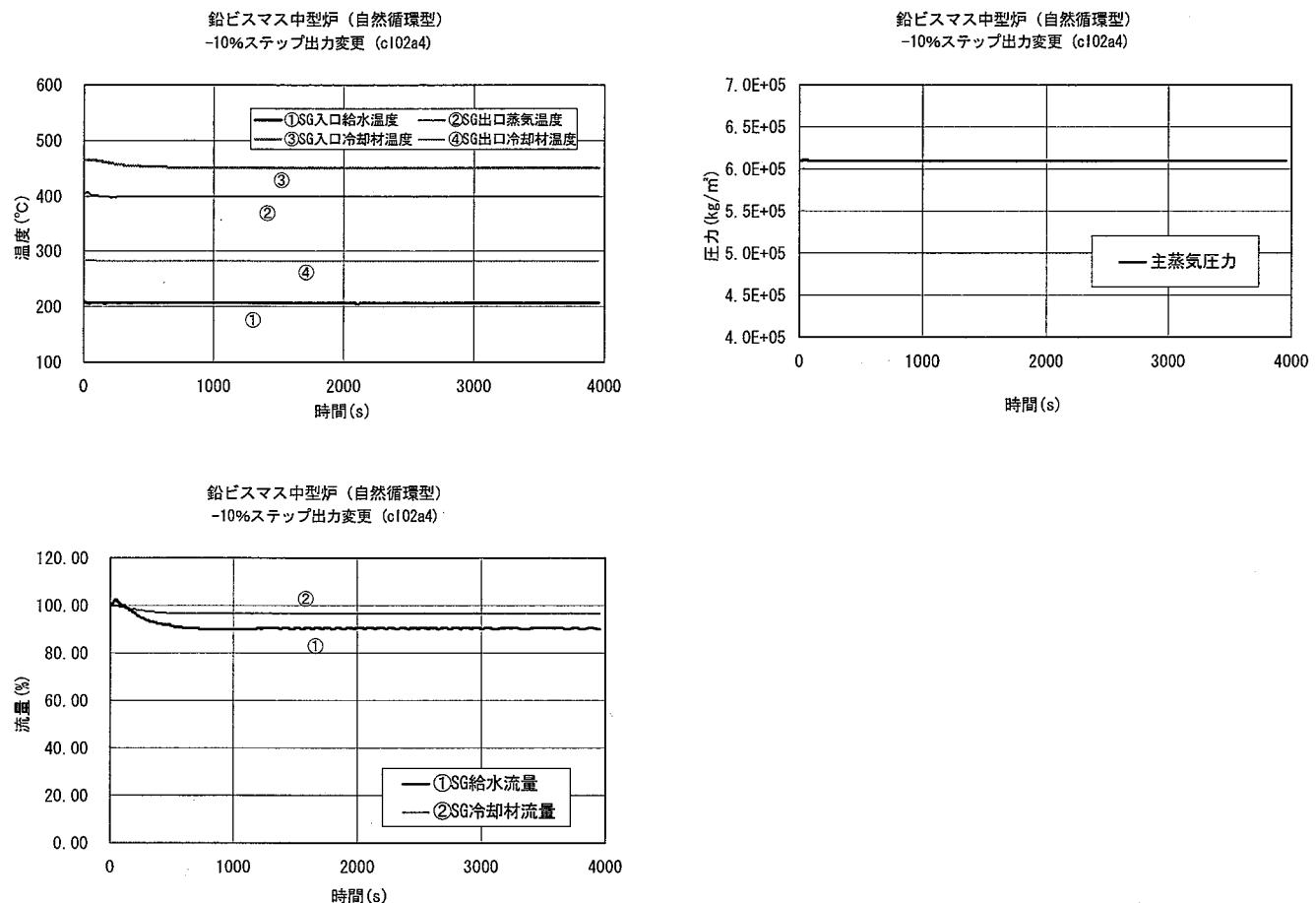


図 6.2.3.3-1 (2/2) ステップ状出力変更 (100%→90%) 解析結果；自然循環炉

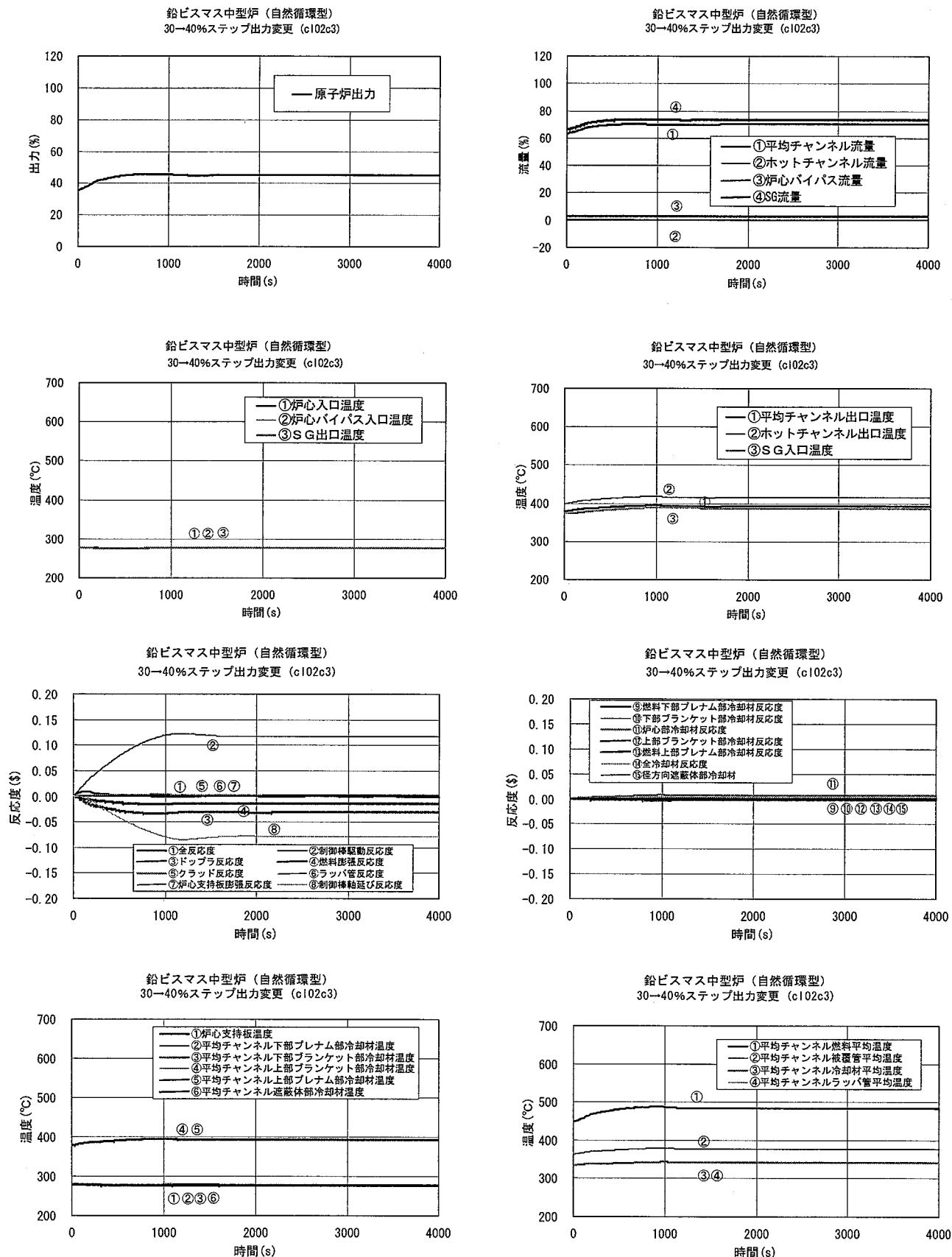


図 6.2.3.3-2 (1/2) ステップ状出力変更 (30%→40%) 解析結果；自然循環炉

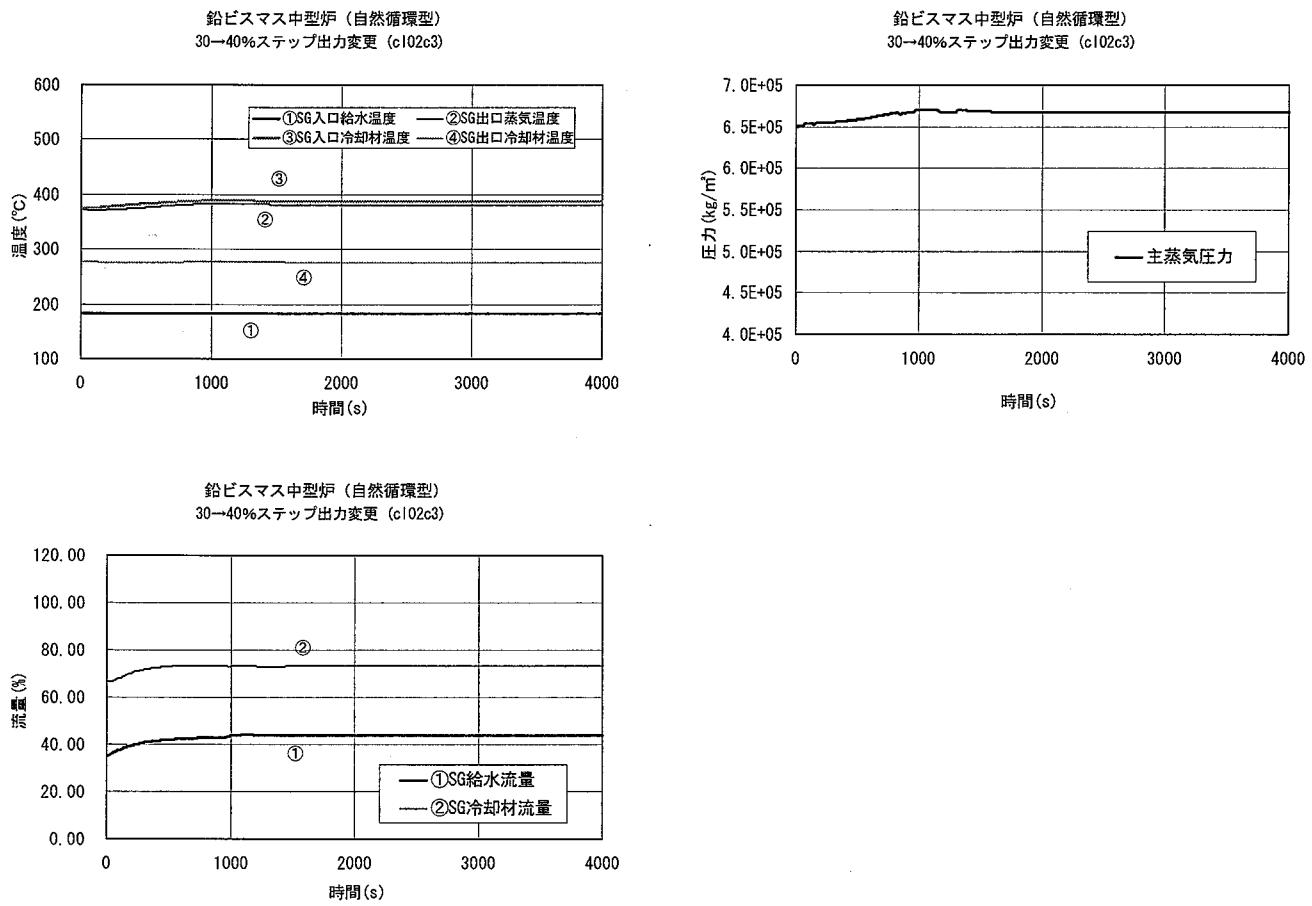


図 6.2.3.3-2 (2/2) ステップ状出力変更 (30%→40%) 解析結果；自然循環炉

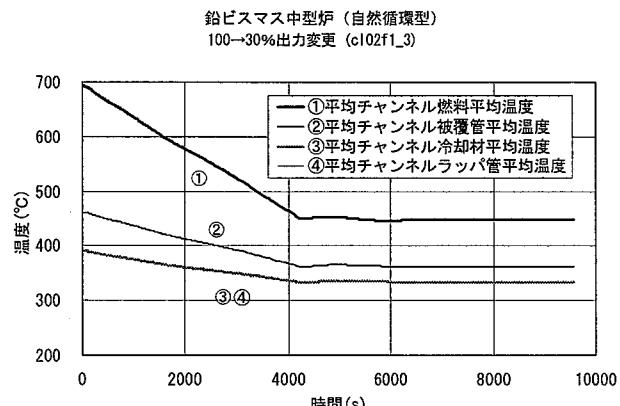
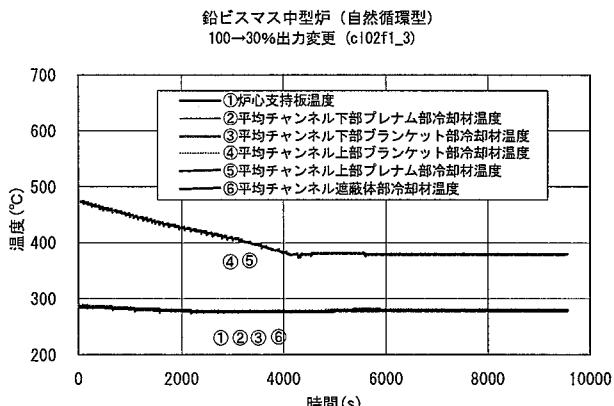
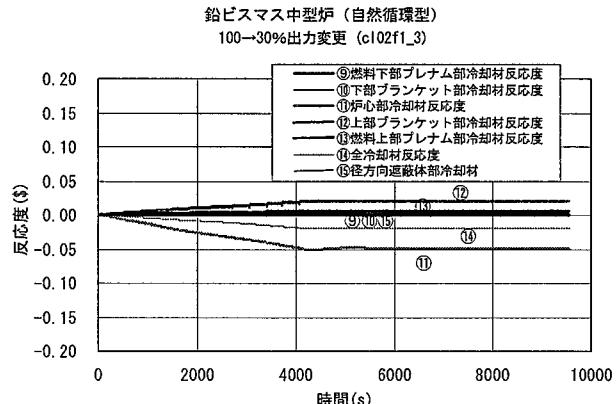
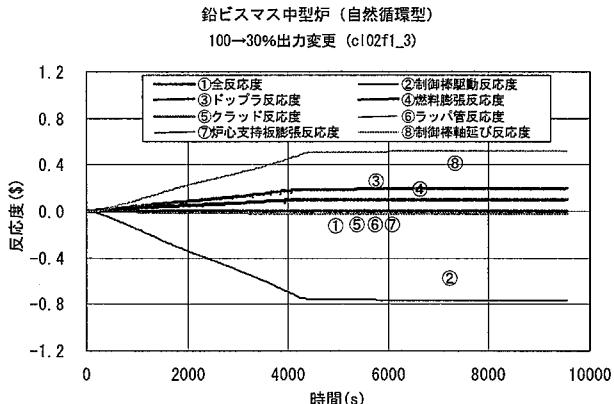
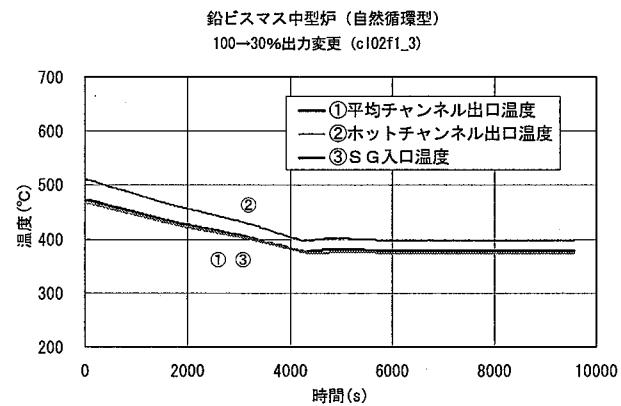
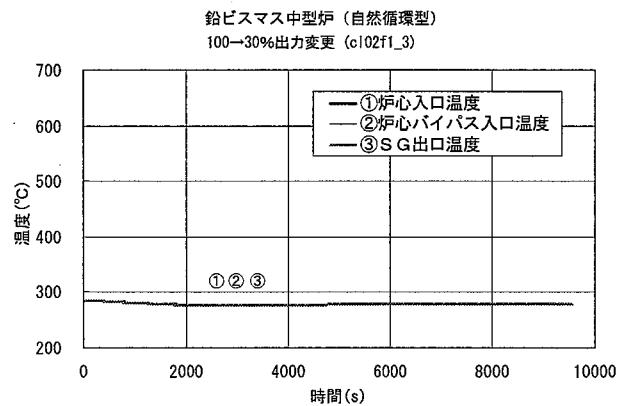
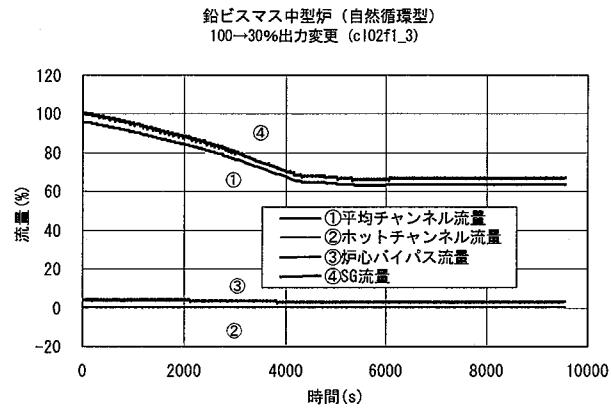
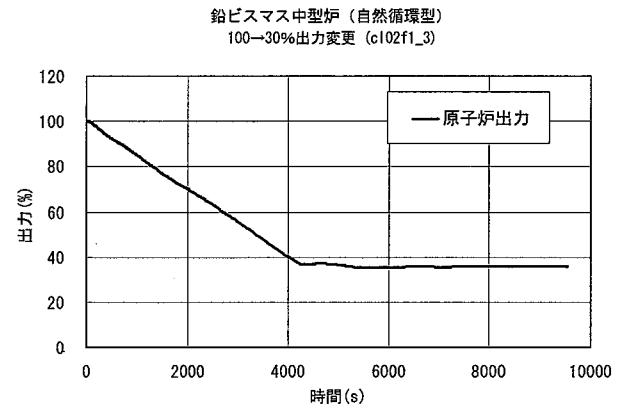


図 6.2.3.3-3 (1/2) ランプ状出力変更 (100%→30%、1.0%/分) 解析結果；自然循環炉

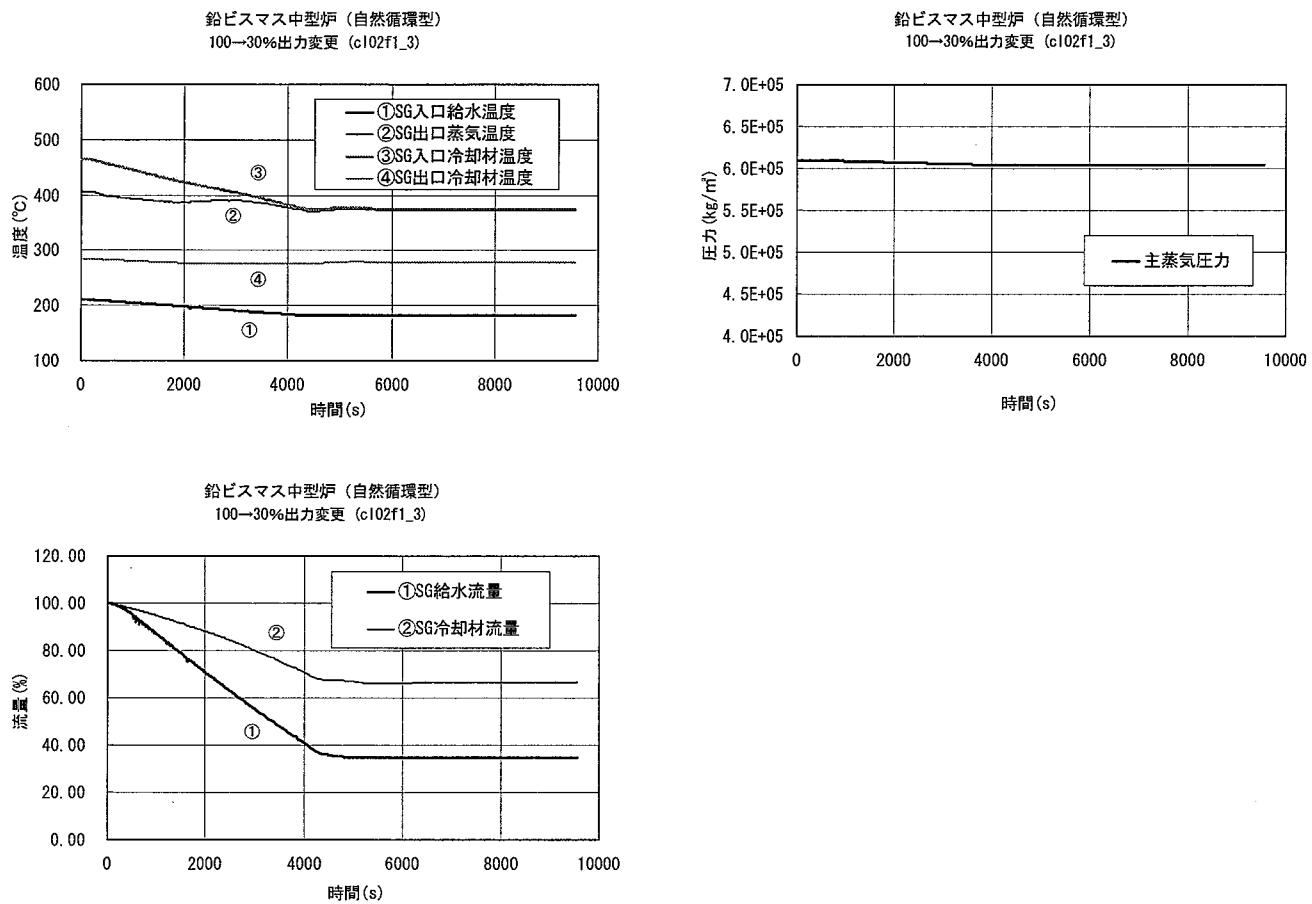
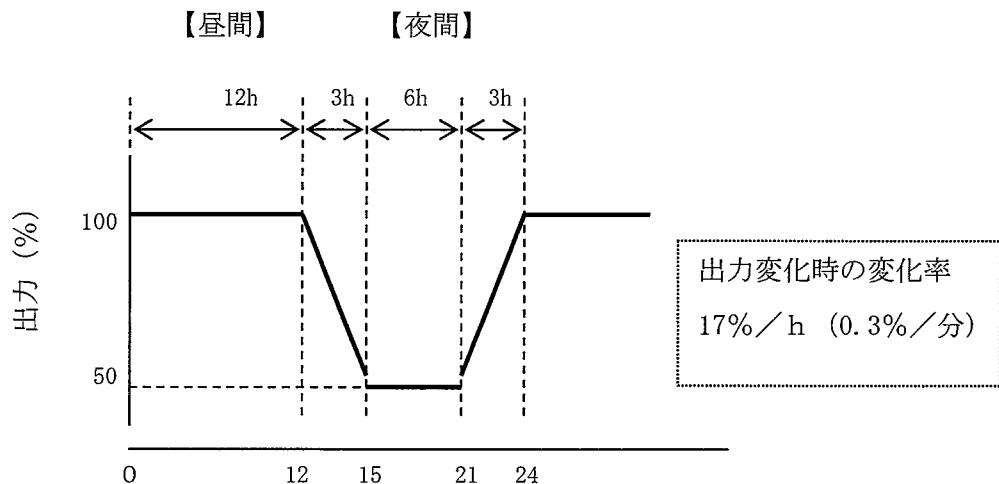
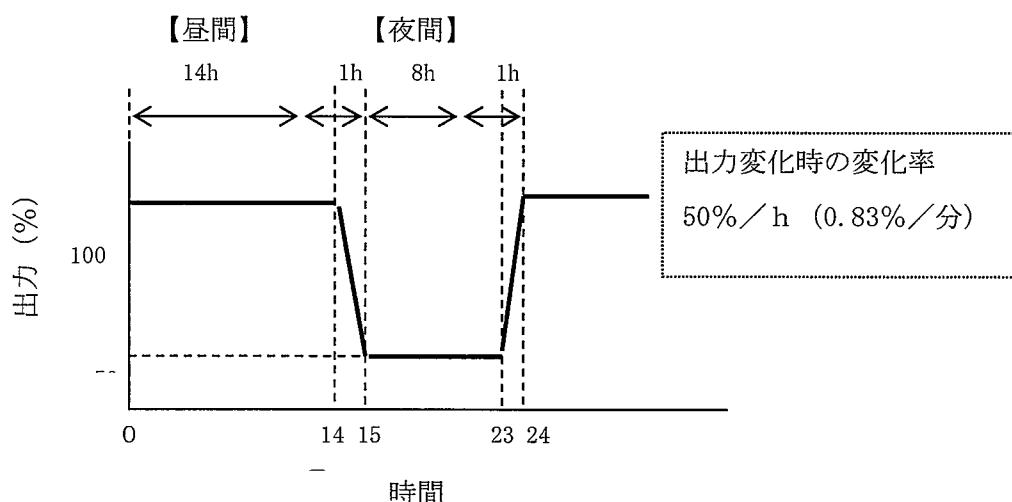


図 6.2.3.3-3 (2/2) ランプ状出力変更 (100%→30%、1.0%/分) 解析結果；自然循環炉



a. 運転パターン ; 1 2 - 3 - 6 - 3



b. 運転パターン ; 1 4 - 1 - 8 - 1

図 6.2.3.3-4 PWR における日負荷追従運転パターン

6.3 起動時運転手順の具体化

6.3.1 初回起動時運転手順

(1) 目的

自然循環炉について、初回の機器予熱状態における冷却材充填から燃料装荷後の核加熱によるプラント昇温に至る運転手順を具体化する。自然循環炉においては、冷却材に循環駆動力を与える機器が無く、特に、冷却材充填後の初回起動時の冷却材循環起動方法が課題である。この初回の循環駆動方式の検討と、これを含めた初回起動の全体手順をまとめた。

(2) 検討内容

(a) 初回循環駆動方式

自然循環炉は循環ポンプが無く、また初回起動時には炉心の崩壊熱もない。このため、炉容器内冷却材の自然対流による循環流を駆動するため、予熱設備である炉容器室内底部設置の加熱用パネルと高温窒素ガス加熱による入熱を使用することとした。更に、炉容器上部内蔵の PRACS 用 DHX または SG 伝熱部での冷却と組合せ、一巡の冷却材循環流を構成することとした。この構成を、図 6.3.1-1 に示す。

炉容器外面のガス予熱は、炉容器と外周断熱ブロックとのアニュラス間隙に高温窒素ガス配管開口部を設け、炉容器の底部に高温ガスを吹出し、炉容器底部に沿ってガスを流す構造とした。ガスが上部に抜けないように、炉容器側部との間に仕切り機構を設け、一定の時間、高温ガスを炉容器底部に滞留させる構成とした。

上記予熱設備等による原子炉容器内への入熱量計画値は、以下のとおりである。

(i) 加熱用パネル（常設）による放射伝熱量：約 750kW

パネル放熱表面温度：500°C（補助蒸気系からの蒸気による）

RV 底部 外面温度：285°C（受熱面 85m²）

(ii) 高温窒素ガス（仮設）による強制対流伝熱量：約 700kW

窒素ガス：500°C ガス流速：約 30m/s

RV 底部 外面温度：285°C（受熱面 85m²）

(iii) RV 底部での冷却材の自然対流伝熱量：約 1450kW

RV 底部 内面温度：250°C

PRACS の DHX から流下する低温鉛ビスマス冷却材温度：約 180°C（仮定）

崩壊熱除去系の検討(*)から、PRACS は約 1.5MW（190°Cの状態）の除熱が可能で、このとき約 9% の流量であることが求められている。約 1.5MW の入熱に対して、PRACS を用いて約 9% の循環流量が得られることが分かる。（* : H12 年度報告書）

なお、上記は基本的な構成に関するもので、今後、必要に応じて炉容器底部への入熱から循環流形成までを熱流動解析で確認する必要がある。

(b) 初回の起動手順

基本的な手順は、原子炉容器内をアルゴンガス雰囲気とし予熱を行い、冷却材の鉛ビスマスを充填後、炉内設置機器表面付着の酸素除去のため純化運転を実施する。引き続き初回用の燃料を装荷して炉物理試験を実施し、核加熱による系統昇温を行う。主要手順は図 6.3.1-2 に示す通りであり、要点を以下に示す。なお、検討に当たり高速増殖原型炉「もんじゅ」(*PNC TN2410 94-023 「高速増殖原型炉もんじゅー設計・建設・試運転の軌跡」) を参考とした。

a. 模擬炉心構成作業（常温空気中）

模擬炉心は、ダミー燃料集合体、ブランケット燃料集合体(実機用)、中性子遮へい体(実機用)で構成される。

b. アルゴンガスの炉容器内充填c. 原子炉容器及び炉内構造物の予熱

炉容器外面に仮設の高温窒素ガス循環系、炉容器内部に仮設高温アルゴンガス循環系を設け、炉容器の内部と外部の両方から加熱する。これらの設備は、前項に示す初回起動時の加熱設備を使用する。

炉容器内部のガス予熱は、ルーフデッキ上の燃料取扱い設備または純化装置据付け用の孔を利用して予熱用ガス配管数本を下部支持板内部空間に挿入してガスを吹き出し、模擬燃料集合体を含む炉心構成体及び SG 管束等を通過させ、ルーフデッキ上の他の孔から外部に取り出し、循環させる。予熱にかかる所要日数を 90 日程度、炉内構造物の予熱温度は 250°C を目標とした。(炉容器は直径約 10m、高さ約 25m、体積約 1800m³で「もんじゅ」の約 2.6 倍から推定。) 容器外周面の温度差制限及び炉内構造物の半径方向温度差制限値は数十°C 以内と考えられ、構造物の表面温度を監視しながら昇温する必要がある。

d. 鉛ビスマス冷却材の充填

約 14,000 トンの鉛ビスマス地金を、2 基の仮設タンクに収容し(予熱温度 250°C 以上)、その後、ルーフスラブ状の設置機器台座を利用して敷設した仮設移送配管を使用して、原子炉容器内へアルゴンガスによる加圧移送を行う。

e. 冷却材の純化運転

前項に示す循環流路形成に従い自然対流流量を確保し、この状態で仮設の純化装置(酸素濃度管理装置)2 基を使用して、冷却材の純化及び酸素濃度調整を行う。(目標酸素濃度: 0.0023 ~0.122ppm)

f. 新燃料集合体を装荷

新燃料装荷に伴い大量の酸素(新燃料表面に付着)が炉内に持ち込まれるため、酸素濃度制御システムにより、冷却材の純化運転を継続する。

g. 臨界近接及び炉物理試験h. 核加熱

新燃料集合体装荷による核加熱開始に際しては、比重の大きな鉛ビスマスの流動慣性を考慮し、数%の炉心流量を確保しておくこととした。このため、原子炉容器室内底部設置の加熱用パネル及び高温窒素ガスの双方による入熱を継続して行う。

外部加熱による入熱量は約 1.45MWt（定格熱出力の 0.1%に相当）であるので、制御棒の引き抜き操作により 0.1%熱出力以上の核加熱量となった時点で加熱用パネル等の予熱系設備及び PRACS による低温停止状態の運転を停止し、SG を使用した再循環水系運転をベースとした「通水待機」運転状態に移行させ、引き続き制御棒引き抜き操作で、計画起動曲線に沿った系統昇温運転を行う。（昇温速度は約 15°C/h で計画する。）

上記のプラント起動時における炉心流量のチェックのため、燃料集合体の出口代表点位置には、監視計装としての「渦電流式温度＆流速計」を設置する。本計測器はナトリウム炉では実機装荷実績があるが、鉛ビスマス冷却材及び測定すべき低流速範囲に関するセンサ出力確認のため、R & Dが必要である。さらに、自然循環流路の代表的位置には、監視用の「熱電対」を設置して温度分布を計測し、炉内の熱移送状態を間接的に把握する。なお、除熱量については、PRACS の 2 次系及び SG の水/蒸気系の温度及び流量計測より算出可能である。

(3) まとめ

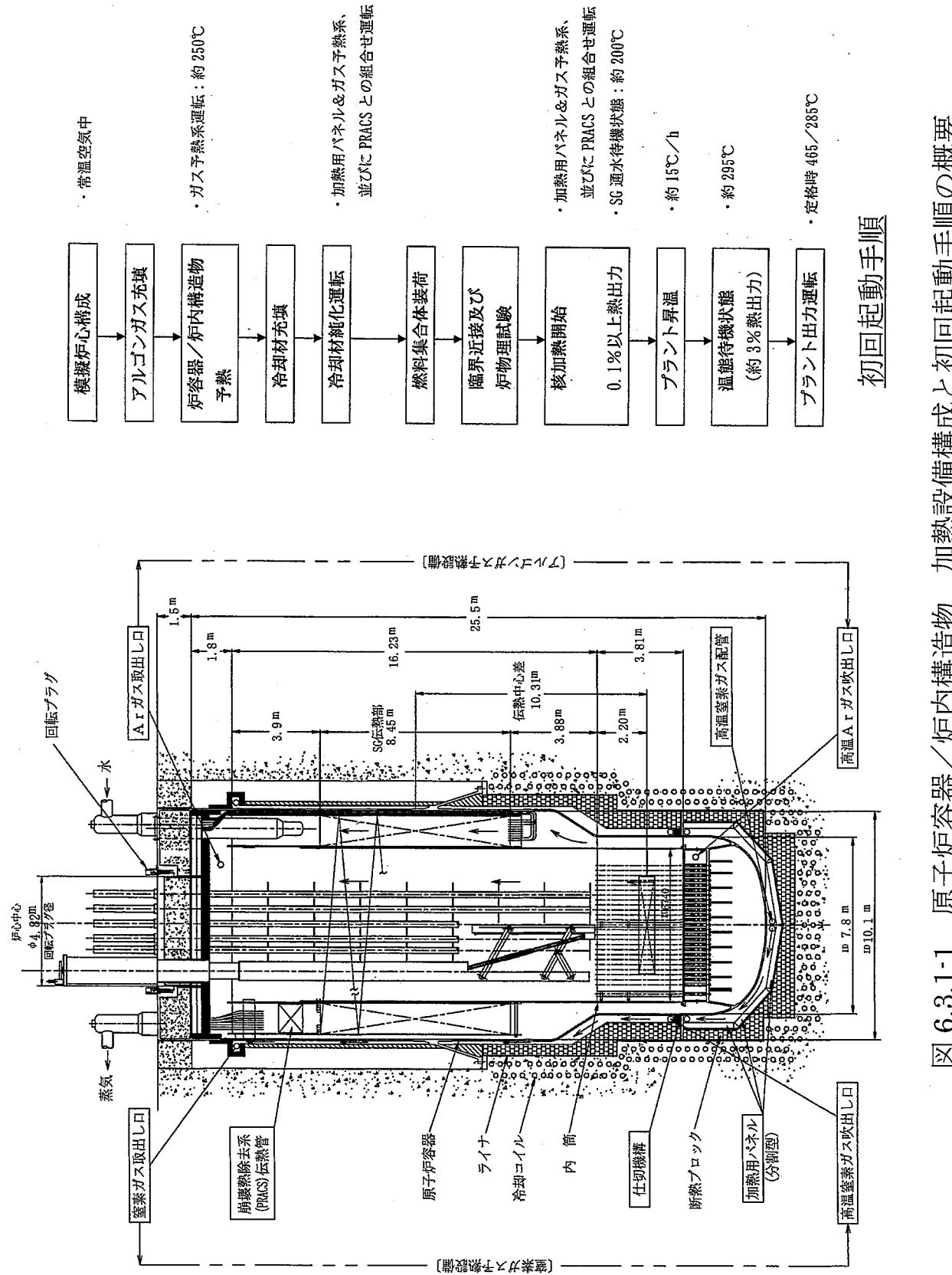
自然循環炉について、初回起動時運転時の冷却材駆動方式と、これを含めた初回起動手順の基本をまとめた。

初回起動時の循環駆動方式は、予熱用の加熱パネル及び高温窒素ガス循環系による入熱（約 1.45MWt）と PRACS による冷却との組合せ運転で、約 9%流量を確保する見通しが得られた。

また、初回起動手順も、基本的に従来の液体金属炉と同様の手順でよいことが分かった。

ただし、加熱パネル等での炉容器への入熱挙動や、炉内での自然対流に依存する冷却材流動挙動は複雑であり、設計の進捗に合わせ、熱流動解析を実施して各時点での循環流量の確認を行うと共に、設備の詳細化を行う必要がある。

なお、本方法はプラントの長期メンテナンス後の再起動時で、崩壊熱が極めて小さい場合にも適用できる。



(注記) 本図は、H12年度報告書「鉛-ビスマス冷却炉の運転保守性検討」
図4.2.1.1-2 による。

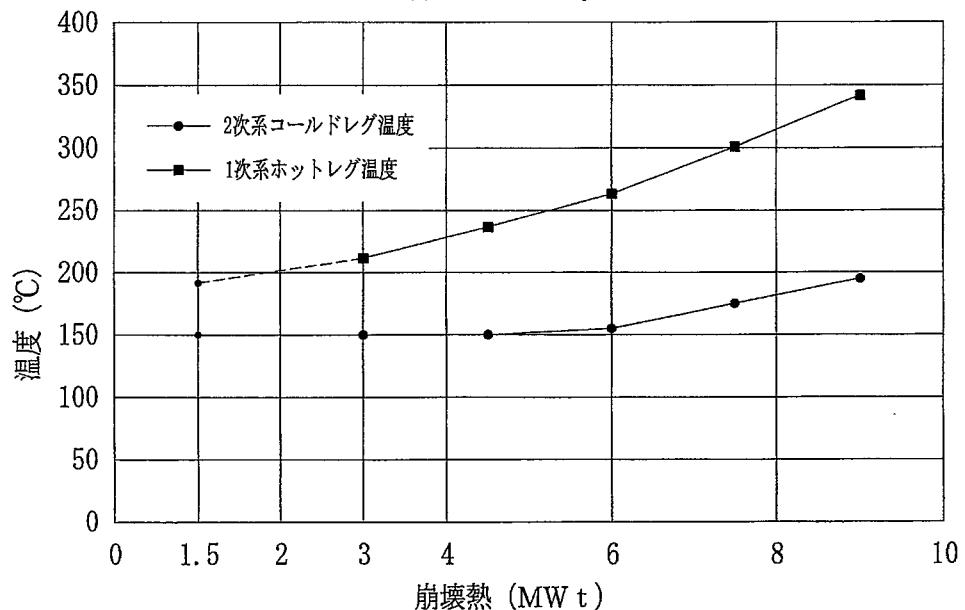


図 6.3.1-2 崩壊熱除去系 (PRACS) による運転温度
(本図は、H12 年度「鉛ビスマス冷却系の運転保守検討」より)

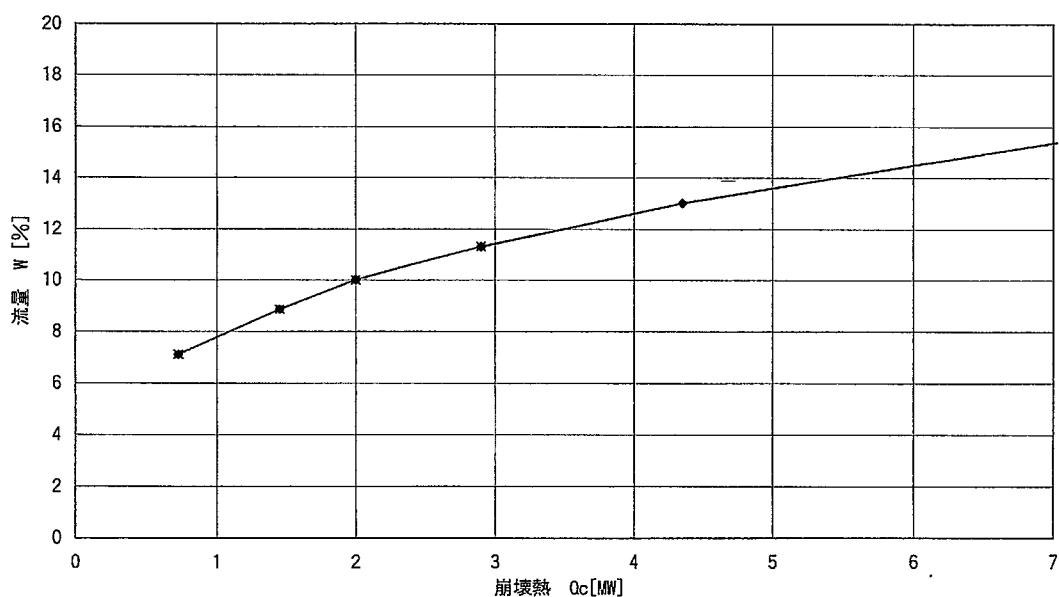


図 6.3.1-3 炉内自然循環流量

6.3.2 通常起動時運転手順

(1) 目的

プラント運転サイクルに従い、燃料交換以後のプラント起動手順を具体化した。

(2) 検討内容

プラント運転サイクルを図 6.3.2-1 に、プラントの運転状態を表 6.3.2-1 に示す。以下に、

プラント運転状態の要点を記す。

a. 低温停止状態

崩壊熱は、定格熱出力の 0.1~0.2% (1.5~3MWt) であり、熱量不足の場合には加熱用パネル等(約 1.45MW 入熱可能)でバックアップ運転する。(第 6.3.1 項参照)

PRACS 除熱運転により、1 次系自然循環流量として 10%以上を確保する。

b. 1 次系純化運転

本設の純化装置（酸素濃度管理装置）を使用して、冷却材の純化を行う。

c. 通水待機状態への移行

崩壊熱（不足時は加熱用パネル等からの入熱を付加）除去運転を PRACS から SG 回り再循環系に切り替えて、200°C以上の冷却材温度に保持するとともに、SG 冷却による自然循環力の確保により 1 次系循環流量を 10%以上確保できるように SG 給水温度を制御する。

d. 核加熱による昇温運転

上記通水待機状態（補助蒸気利用による SG 給水温度調整）から制御棒引抜きにより核加熱による系統昇温（SG 出口飽和水/蒸気の圧力調整）を行い、温態待機状態（約 275°C以上）に至る。この際、系統昇温速度約 15°C/h に設定し、これに見合うように SG 出口飽和蒸気圧力を 6.0MPa まで昇圧し温態待機状態に到達させる。

(3) まとめ

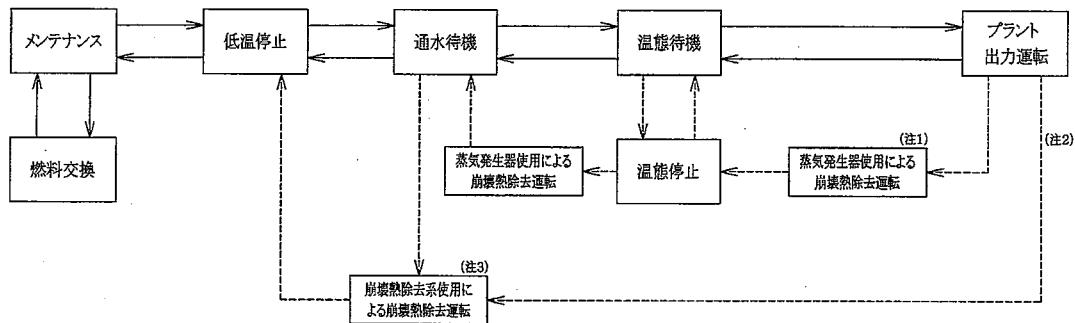
通常のプラント運転サイクルに従い、燃料交換以後のプラント起動時の基本運転手順を具体化し、この運転手順に従った起動曲線を作成した。

なお、自然循環炉の場合、炉内の複雑な自然循環挙動に影響を受けることが考えられる。

このため、自然循環熱流動検討を合わせ、運転手順の詳細化を図る必要がある。

表 6.3.2-1 各系統設備の運転状態説明

プラント運転状態	原子炉熱出力	原子炉：CRD 運用	1 次冷却系 (炉容器内自然循環方式)	SG 回り水・蒸気／タービン系	崩壊熱除去系など (PRACS, 予熱系)
1. 定期検査／メンテナンス／燃料交換	崩壊熱 未臨界 全 CR 挿入；全 CR 切離し	未臨界 約 200°C	水・蒸気系は、窒素ガス封入 熱源不足時は、予熱保持 (加熱用ノズル使用)	熱源不足時は、予熱保持 (加熱用ノズル使用)	熱源不足時は、予熱保持 (PRACS, 予熱系)
2. 低温停止	同上	未臨界 全 CR 挿入	同上	同上	熱源不足時は、予熱保持 (PRACS 運転*)
3. 通水待機	同上	同上 (臨界：核加熱開始)	炉心流量：約 10% 保持(*) 約 200°C	SG：再循環系による水単相 運転；流量 約 36% 圧力 1.6MPa, / 温度 約 200°C	補助蒸気使用による SG 給水温度調整
4. 溫度待機	核加熱 約 3%	主炉停止系：引抜き 後備炉停止系：全引抜き	約 293.5/275°C 炉心流量：約 29%	SG：再循環系による水 2 相 運転；流量 約 36% 圧力 6MPa, / 温度 約 276°C	崩壊熱除去系：待機状態
5. プラント 出力運転	同上 自動運転出力範囲 (約 37～100%)	同上	HL：約 374.5～465°C CL：約 277～285°C 炉心流量：約 70～100%	SG：貫流運転方式による過熱 蒸気発生 タービン：主蒸気圧力 6MPa, / 温度 約 373～400°C	同上
6. 溫度停止	崩壊熱	未臨界 全 CR 挿入	約 275°C	SG：再循環系による温度保持 流量約 36% / 圧力 6MPa	同上



は移行運転状態を示す。

は定常運転状態を示す。

注1:手動トリップ等、水系運転可能の場合。

注2:外電喪失、復水器真空度低等、水系運転不能の場合。

注3:PRACSを示す。

図 6.3.2-1 プラント運転サイクル

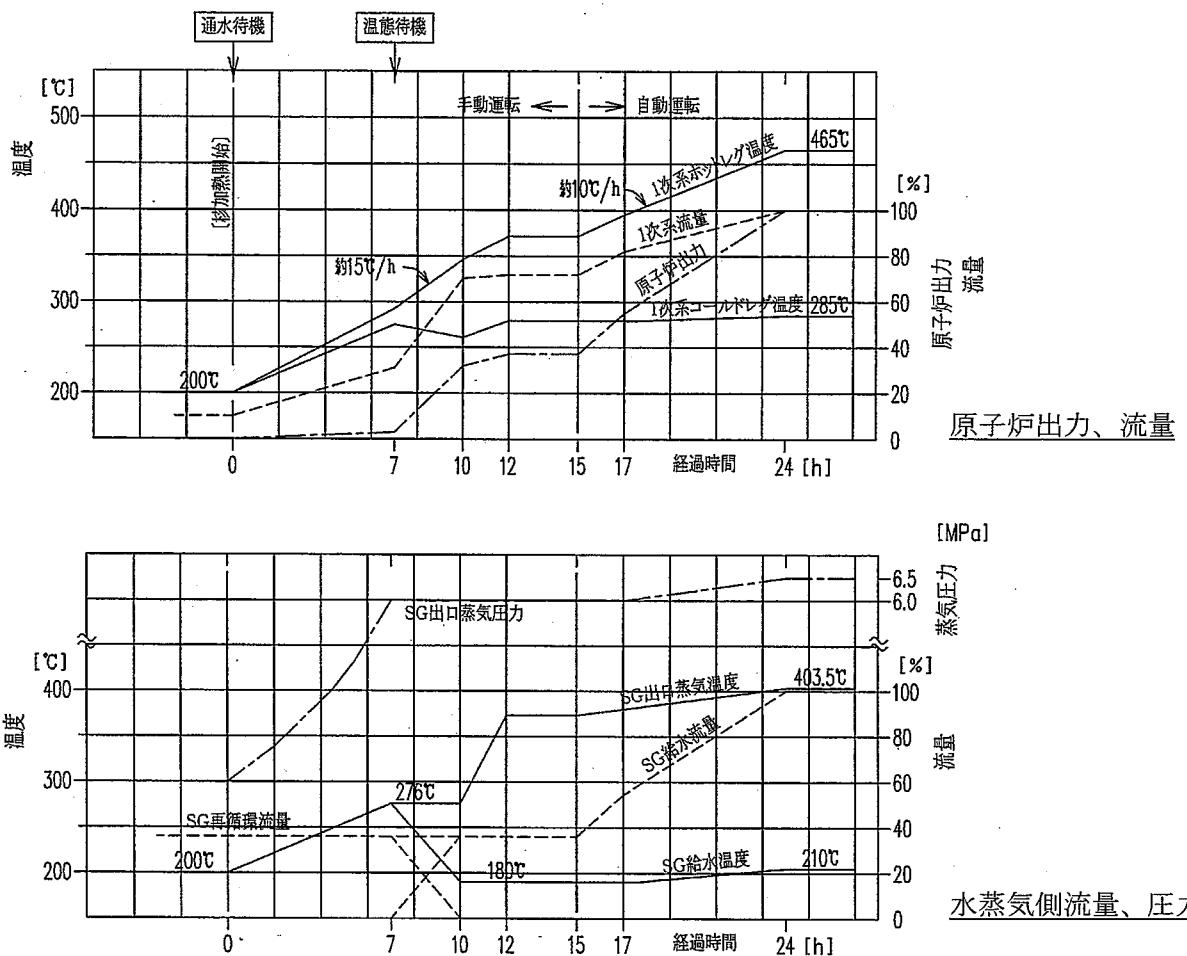


図 6.3.2-2 自然循環炉の起動曲線（計画）

7. 安全性

7.1 検討目的

平成 12 年度の蒸気発生器(SG)伝熱管破断事象の評価では、簡易的な流動モデルで準定常的な炉内圧力上昇が 0.2MPa 程度以下であることから構造健全性上問題ない見通しを得た。今年度は伝熱管破断時の炉心部の流量変化に伴う炉心出力、温度変化などに着目した熱流動解析を行い、熱的側面から炉心安全性評価を行う。また、炉心への水蒸気侵入による印加反応度についても検討する。

7.2 検討項目及び検討手順

伝熱管破断時には、リーク水が気泡となって上昇し、カバーガス中に流出する際に鉛ビスマスを駆動する(上昇させる)ことが予想されるが、この駆動力を気泡ポンプとしてモデル化する。この気泡ポンプを体系中の SG 破断チャネルの破断点に設けた流動モデルにより SG 伝熱管破断時の炉内鉛ビスマス熱流動解析を行い、熱的側面から炉心安全性評価を行う。このため、以下の項目の検討を行う。

(1) 水リーク率の検討

ナトリウム冷却の実証炉クラス SG の伝熱管破断時水リーク率解析結果を基に、伝熱管仕様、圧力などの違いを考慮して伝熱管破断時水リーク率を概略評価する。

(2) 簡易的な流動モデルによる破断点圧力変化の解析

破断直後の急激な流動変化を把握するため平成 12 年度と同様な簡易的な流動モデルにより破断点圧力及び流量の変化を解析する。

(3) 気泡ポンプモデルの検討

リーク水が気泡となって上昇する際に駆動される鉛ビスマス流量を検討し、等価な気泡ポンプモデルを作成する。

(4) プラント熱流動解析

気泡ポンプを境界条件とする炉容器内全体の流動モデルにより炉内鉛ビスマス熱流動解析を行い、炉内の流量、温度変化を解析評価するとともに、ホットチャンネルの燃料及び燃料被覆管温度などを計算し、健全性を評価する。

また、上記流動解析結果から、炉心への水蒸気侵入による印加反応度を評価する。

7.3 検討条件

- ① 自然循環炉及び強制循環炉を対象とする。ただし、気泡上昇が炉心流量に及ぼす影響は強制循環炉の方が小さくなるので、上記(3)、(4)の検討対象は影響の大きい自然循環炉のみとする。
- ② 伝熱管破損本数は 1 本 (1DEG) とする。
- ③ 炉心部への水蒸気侵入(鉛ビスマス冷却材ボイド化)に伴う印加反応度の検討には、平成 13 年度に実施した 2 次元、18 群の核計算の結果による炉心冷却材単位体積当たりのボイド反応度(内外炉心平均で自然循環炉: 約 1.67 \$ /m³、強制循環炉: 約 2.05 \$ /m³) を用いる。

7.4 検討内容

7.4.1 水リーク率

平成 12 年度と同様な手法で、実証炉クラス SG の伝熱管破損時水リーク率をベースに、中型タンク式鉛ビスマス冷却炉の SG での 1DEG 相当水リーク率を評価する。水リーク率に影響を及ぼす主要因子は、伝熱管内径、水側圧力、伝熱管長さであり、これらについて各プラントでの値を比較して以下に示す。

	<u>実証炉クラス SG</u>	<u>自然循環炉 SG</u>	<u>強制循環炉 SG</u>
伝熱管内径	24mm	28.4mm	20.2mm
給水圧力	約 18.8MPa	約 8.1MPa	約 18.1MPa
伝熱管長さ	約 90m	約 122m	約 104m
水リーク率	約 17.2kg/s	約 11kg/s	約 12kg/s

水リーク率は、臨界流条件での水流出となることから、水側圧力(給水圧力で代表)にはほぼ比例し、また伝熱管内径の 2 乗に比例する。伝熱管長さの影響は、管摩擦圧損を介しての影響となるため、比較的に小さく、この違いを無視する。これらより、各プラント SG での水リーク率は、実証炉クラス SG のものに対して

$$\text{自然循環炉} : (18.1/18.8) \times (20.2/24)^2 = 0.60 \text{ 倍}$$

$$\text{強制循環炉} : (18.1/18.8) \times (20.2/24)^2 = 0.68 \text{ 倍}$$

となる。また、実証炉クラス SG の水リーク率は約 17kg/s であるから、自然循環炉の SG での 1DEG 相当の水リーク率は 11kg/s 及び強制循環炉の SG では 12kg/s となる。

7.4.2 破断点圧力変化の解析

伝熱管破断直後の急激な流動変化を把握するため、平成 12 年度と同様な簡易的な 1 次元非圧縮性流動モデルにより、発生圧力と流速変化を概略評価する。なお、本自然循環炉の場合は、流量解析結果のうち、初期の結果をプラント熱流動解析の境界条件として用いる。

計算モデルと流動方程式を平成 12 年度報告書より抜粋し、図 7.4.2-1 に示す。計算上の主な仮定は以下のとおりである。

- ① 流路として SG 伝熱管破断チャンネル(のみ)と炉心通過流路の 2 つを考える。また炉心通過流路について、発生圧力は高めに、炉心への流速は大きめに評価するため、全体流路面積の 1/8 を考える。
- ② 水蒸気が SG 伝熱管破断チャンネルと炉心通過流路の鉛ビスマスをピストン状にカバーガス部に向けて押し出すものとする。この際、流路のカバーガス部液面では、鉛ビスマスが速やかに流出するものと考え、液面の上昇は考えない。
- ③ 水蒸気が鉛ビスマスを完全に押し出した後は水蒸気のみがカバーガス部に流出する。
- ④ 水蒸気は理想気体として扱い、その温度は、破断位置における鉛ビスマス中の初期圧力(自然循環炉 : 1.4MPa、強制循環 : 1.6MPa)の飽和蒸気の温度(自然循環炉 : 468K、

強制循環炉：473K)とする。

- ⑤ 炉容器内カバーガス圧は、事故時の圧力上昇を考慮して 0.2MPa とする。
- ⑤ 伝熱管破断位置は管東部下端とし、リーキ率は、自然循環炉：11kg/s、
強制循環炉：12kg/s とする。
- ⑦ 強制循環炉の場合は、初期の冷却材流速分布は模擬するが、計算開始後のポンプの駆動力は模擬しない。

自然循環炉に対する計算結果について、破断点(水蒸気)圧力、水蒸気と鉛ビスマスの界面位置、SG 破断チャンネルの流速及び炉心通過流路の流速の時間変化をそれぞれ図 7.4.2-2～図 7.4.2-5 に示す。定性的傾向は平成 12 年度のものと同様である。

破断点圧力は初期にピークを形成した後、0.1 秒以前に減衰し、その後は準定常的な挙動を示す。準定常圧は約 0.3 秒後にピークを示すが、圧力上昇は 0.1MPa 程度でごく小さい。その後は緩やかに減少し、初期圧力よりも小さくなる。準定常圧ピーク値が小さいのは、破断直後のスパイク状の高い圧力の発生により SG 流路の流れは逆転されるが、これに伴う水蒸気部分の体積増加割合がガス(水蒸気)体積発生率に近いためと考えられる。また、ピーク後圧力が徐々に減少するのは SG 内ピストン柱が徐々に短くなり、上下の静水頭差がそれに伴い減少するためと考えられる。

破断後 5 秒で SG 内水蒸気と鉛ビスマス界面は破断点から約 3m 上昇する。一方、炉心通過流路では、後述するように、約 3.2 秒後には炉心通過流路の界面上昇により、破断点は再び鉛ビスマス中に没するようになる。その後は鉛ビスマス-水蒸気二相流の流出(一種の気泡ポンプ)となると予想される。

図 7.4.2-4 の SG 破断チャンネルの流速については、破断直後のスパイク状の圧力上昇により流れの方向は逆転し、その後、ピストン柱が短くなるにつれて流速は増大する。-

図 7.4.2-5 の炉心通過流路の流速については、流体慣性が大きいため、初期変化は小さいが、水蒸気圧力の上昇が小さく、やがて初期圧力より小さくなること、及び、界面位置が下がり SG 破断チャンネルよりも炉心通過流路側の静水頭差が大きくなることから、流速はその後徐々に減少し、約 1.8 秒後には逆流に転じる。

強制循環炉に対する自然循環炉と同様な計算結果を図 7.4.2-6 から図 7.4.2-9 に示す。炉容器内の流動の体系としては、自然循環炉と似ていることから、それぞれの結果も自然循環炉と同様な傾向となる。SG 破断チャンネルの流速変化で初期に振動が見られるが、これは急激な圧力変化現象を非圧縮性モデルで解くことによるものと考えられる。強制循環炉の場合も水リークによる準定常的な圧力上昇は小さく、安全上問題とならない。

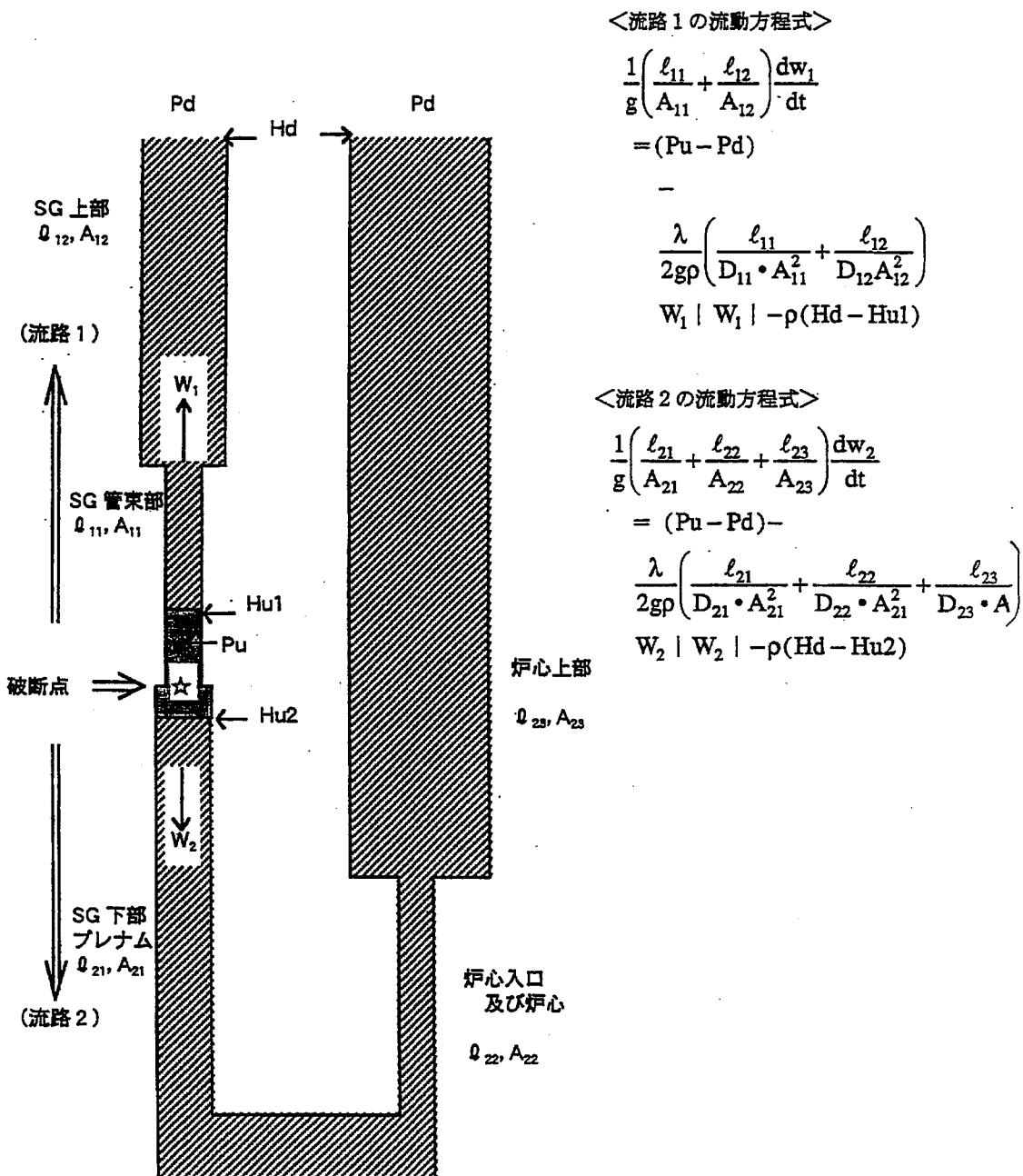


図 7.4.2-1 SG 伝熱管破断時準定常圧計算モデルと流動方程式

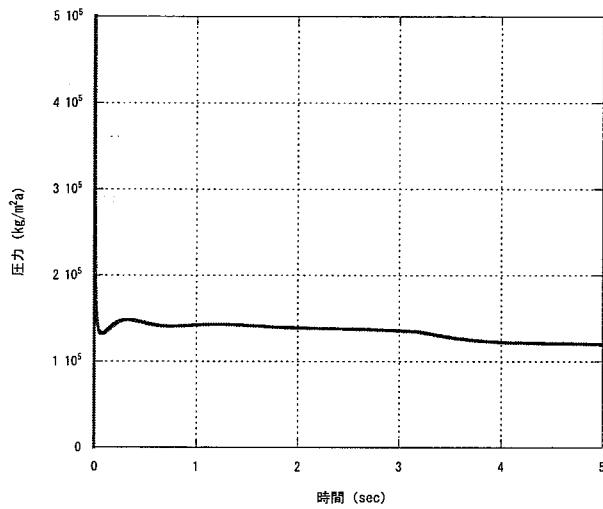


図 7.4.2-2 破断点(水蒸気)圧力
(自然循環炉, 11kg/s)

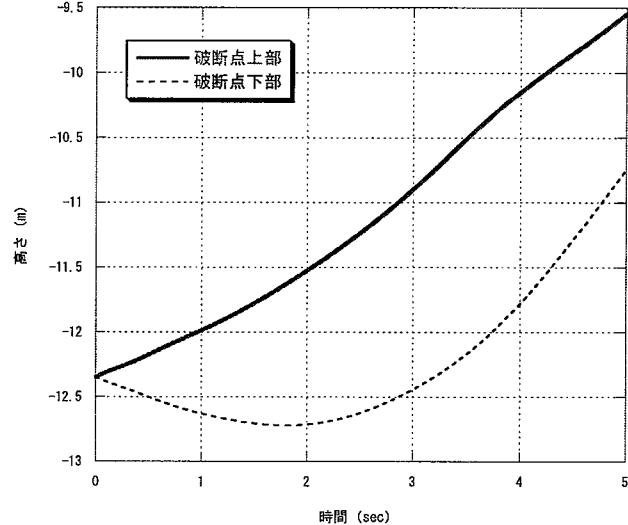


図 7.4.2-3 水蒸気と鉛ビスマスの界面位置
(自然循環炉, 11kg/s)

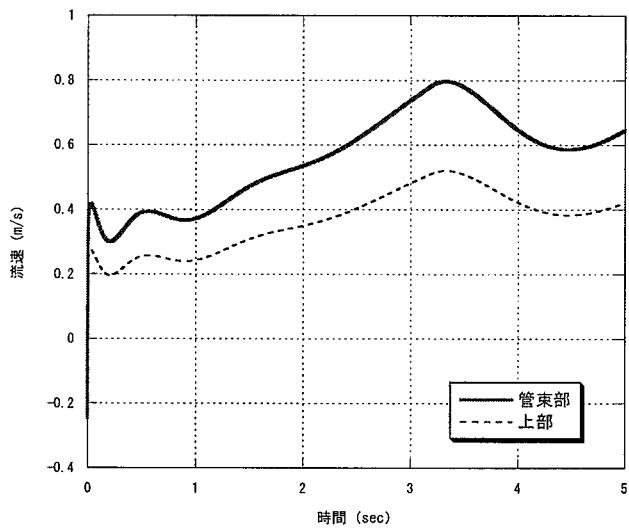


図 7.4.2-4 SG 破断チャンネルの流速
(自然循環炉, 11kg/s)

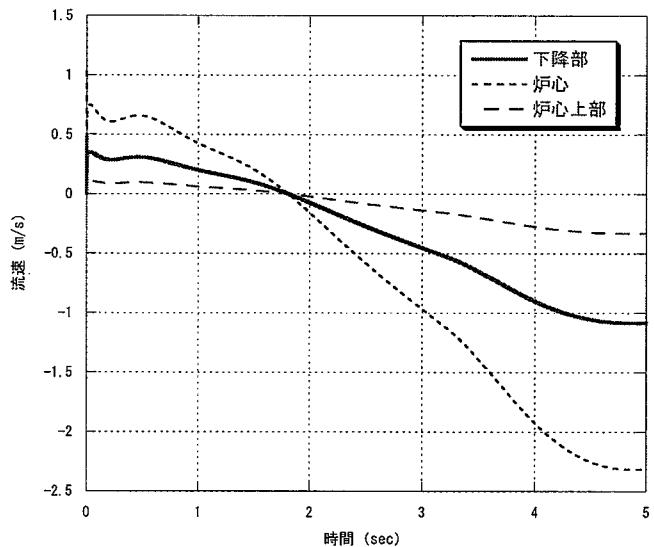


図 7.4.2-5 炉心通過流路の流速
(自然循環炉, 11kg/s)

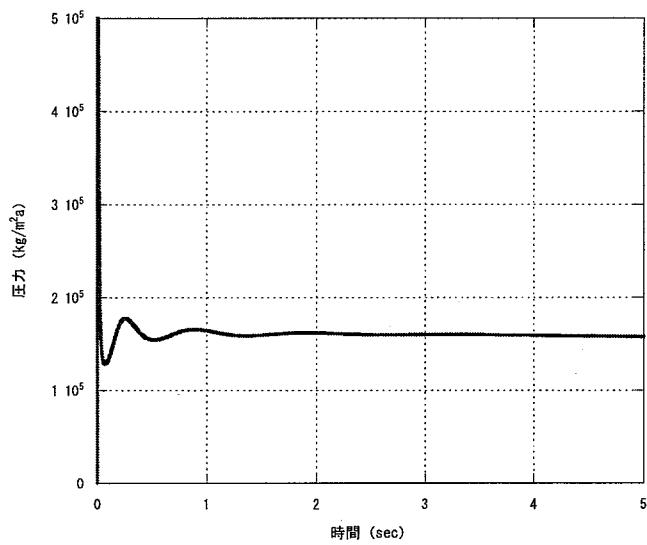


図 7.4.2-6 破断点(水蒸気)圧力
(強制循環炉, 12kg/s)

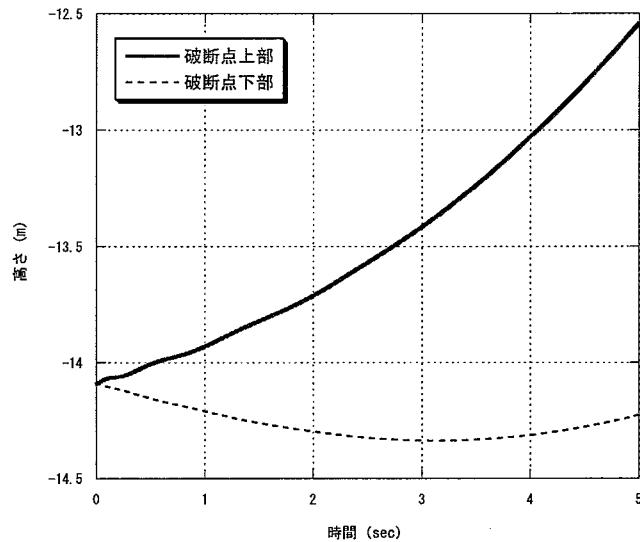


図 7.4.2-7 水蒸気と鉛ビスマスの界面位置
(強制循環炉, 12kg/s)

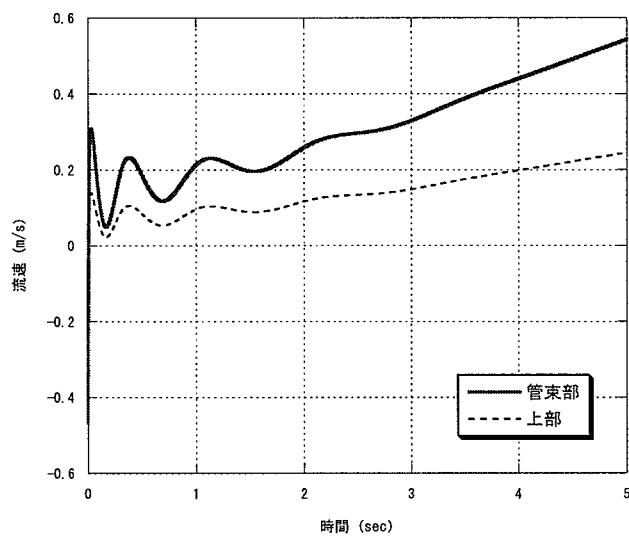


図 7.4.2-8 SG 破断チャネルの流速
(強制循環炉, 12kg/s)

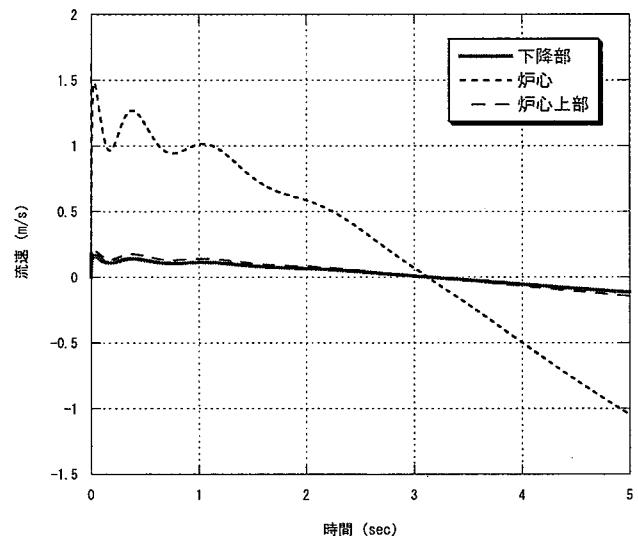


図 7.4.2-9 炉心通過流路の流速
(強制循環炉, 12kg/s)

7.4.3 気泡ポンプモデルの検討

前 7.4.2 項の水リーケ時の準定常圧解析結果でも推察された通り、1DEG 相当リーケ率の場合でも、破断から数秒後には破断点は再び鉛ビスマス中に没し、それから後は SG の破断チャンネルが気泡ポンプのような働きをして、鉛ビスマスを炉容器内カバーガス部に向けて駆動する（逆流が生じる）ことが予想される。この破断チャンネルでの逆流が炉心に及ぼす熱的影響を、7.4.5 項で実施するプラント全体の熱流動解析により把握するが、ここではこの解析用モデルの SG 破断チャンネルの境界条件を定めるため、水リーケに伴う水蒸気泡上昇（鉛ビスマス同伴）現象を気泡ポンプとしてモデル化し、定量化する。

(1) ポンプ特性式

図 7.4.3-1 に示すような揚水ポンプに関する次式を基に考える。¹⁾

$$h = \frac{G_s}{G_{PB}} \cdot \frac{P_o}{\gamma_{SO}} \ln \frac{P_i}{P_o} - (1 + \zeta_o) \frac{u_o^2}{2g} - \zeta_1 \frac{u_i^2}{2g} \quad (7.4.3-1)$$

ここで、

h	: 揚程 (m)	G_s	: 水蒸気流量 (kg/s)
G_{PB}	: Pb-Bi 流量 (kg/s)	P_i	: 破断点圧力 (kg/m ² a)
P_o	: 吐出先圧力 (kg/m ² a)	γ_{SO}	: 吐出圧力での水蒸気比重量 (kg/m ³)
u_o	: 吐出端での流速 (m/s)	ζ_o	: 揚水管全体の圧力損失係数 (-)
u_i	: 揚水管入口での流速 (m/s)	ζ_1	: 揚水管入口部の圧力損失係数 (-)

なお、上式は、導出過程から、均質二相流（スリップ比=1.0）を想定したものと考えられる。また、上式は、空気機械工学便覧²⁾記載の特性式と等価である。

(2) SG 水リーケ時の気泡ポンプモデル（自然循環炉）

SG の支持構造で区分された 1 チャンネルを揚水管と見なし、モデル化(図 7.4.3-2)する。

ポンプ特性式である (7.4.3-1) 式を適用する際の考え方を以下に示す。

- ① リーケ位置は管束下端とする。
- ② 揚程は、液面上昇も考慮して 1m とする。
- ③ カバーガス圧は、0.2kg/cm²g とする。
- ④ 水リーケ点の圧力は、鉛ビスマスの液深で決まる静水圧とする。すなわち、管束（揚水管）入口圧損は無視する。
- ⑤ リーケ水は、蒸発して水蒸気になるものとし、水蒸気は理想気体として扱う。また、水蒸気の温度は、鉛ビスマスと熱交換し、SG 出入口の鉛ビスマスの平均温度になるものとする。
- ⑥ 管束部より上のプレナムは、流路面積が管束部より大きく、流速も低減するが、取扱いを単純化するため、管束部と同じとする。これは、流路全体の圧力損失をやや大きめに評価し、鉛ビスマス流量を小さめに評価することになる。

- ⑦ 管束部(揚水管)全体の摩擦損失は、定格運転時の値を基準に、Lockhart-Martinelli の二相増倍係数を考慮する。具体的には、全体の平均ボイド率(スリップ比=1.0)を仮定し、(7.4.3-1)式に諸値を代入して G_{PB} を求める。その結果から、平均ボイド率を求めて、仮定値と比較し、ほぼ収束する値を求める。収束した状態での G_{PB} が鉛ビスマスの吐出流量である。

以上の考え方で、水リーク率をパラメータ(下記)に、鉛ビスマスの吐出流量を算定する。

$$G_s = 11\text{kg/s} \text{ (1DEG相当)} , = 5\text{kg/s}, = 1\text{kg/s}, = 0.1\text{kg/s}$$

主な諸定数は次の通り。

$$h : 1\text{m} \quad , \quad P_o : 1.2 \times 10^4 \text{kg/(m}^2\text{a)}$$

$$P_i : 13.55 \times 10^4 \text{kg/(m}^2\text{·a)} (=1.2 \times 10^4 + (3.9+8.45) \times 10^4)$$

$$\gamma_{so} : 0.39\text{kg/m}^3 (=P_o \cdot V) (R \cdot T) = (1.2 \times 10^4 \times 1) / (47.06 \times (375+273))$$

$$\gamma_{si} : 4.4\text{kg/m}^3 (=0.39 \times 13.55 / 1.2) \quad , \quad \gamma_{PB} : 10000\text{kg/m}^3$$

$$\zeta_{os} : 21.6 \text{ (単相流での損失係数)}$$

これらの諸値を用いて、上述水リーク率に対する鉛ビスマス吐出流量の計算値を表7.4.3-1に示す。流動特性を把握するため、この表にはボイド率なども示した。(図7.4.3-3参照)

これらの結果は次のようにまとめられる。

- ① 水リーク率が 11kg/s の場合より 5kg/s の方が鉛ビスマスの吐出流量が大きく、また、1kg/s 以下となると吐出流量が減少する。これは、鉛ビスマスの駆動力はリーク率が大きいほど大きいが、逆に水リーク率が大きくなると圧損も大きくなるため、サーベイした範囲では、5kg/s の場合が鉛ビスマスの吐出流量が大きくなったものと考えられる。
- ② 水リーク率 5kg/s の場合の吐出流量は、定格時 SG チャンネル当たりの鉛ビスマス流量の約 50% となる。(SG は 8 チャンネル)
- ③ 水リーク率 0.1~11kg/s の範囲では、流動パターンはフロス流又はスラグ流と予想される。ただし、1DEG 相当リーク率の 11kg/s のようにリーク率が大きい場合、もし仮に、流路が片寄り、実効流路面積が減少した場合には、環状流となり、水蒸気により運び上げられる鉛ビスマス流量は、大幅に減少することが予想される。従って、均質流(スリップ比=1.0)を想定した本モデルは、吐出流量を大きめに評価している可能性が高い。そして、吐出流量は炉心流量を減らす方向に働くため、炉心への熱的影響を把握する意味からは、保守的なモデルとなっていると考えられる。
- ④ いずれにしても、吐出流量は、リーク率、流動パターンなどに影響されることから、より詳細には管束を模擬した流路体系での試験による確認、理論モデルの構築が必要である。

表 7.4.3-1 SG 伝熱管破断時破損チャンネルの鉛ビスマス吐出流量計算結果
(自然循環炉)

: 水リーク率 (kg/s)				11	5.0	1.0	0.1
Pb-Bi	G_{PB}	吐出流量 ^{*1}	kg/s	2400	3300	2200	1600
	V_{PB}	体積流量	m ³ /s	0.24	0.33	0.22	0.16
	j_e	容積速度	m/s	0.087	0.12	0.078	0.057
水蒸気	V_{s1}	体積流量(入口)	m ³ /s	2.5	1.14	0.22	0.023
	V_{s0}	体積流量(出口)	m ³ /s	28.2	12.8	2.56	0.26
	j_{gi}	容積速度(入口)	m/s	0.89	0.40	0.078	8.1×10^{-3}
	j_{go}	容積速度(出口)	m/s	10.0	4.54	0.91	9.1×10^{-2}
	α_i	ボイド率(入口)	—	0.91	0.78	0.50	0.12
	α_o	ボイド率(出口)	—	0.99	0.97	0.92	0.62
	α_{AV}	ボイド率(平均)	—	0.95	0.88	0.71	0.37
フロー	入口	$\rho_e \cdot j_e^2$	kg/(m·s ²)	74.9	137	60.9	32.2
		$\rho_{gi} \cdot j_{gi}^2$	kg/(m·s ²)	3.46	0.72	0.027	2.85×10^{-4}
		パタン	—	スラグ流	スラグ流	(スラグ流)	(スラグ流)
パタン	出口	$\rho_e \cdot j_e^2$	kg/(m·s ²)	74.9	137	60.9	32.2
		$\rho_{gu} \cdot j_{gu}^2$	kg/(m·s ²)	39.0	8.0	0.32	3.23×10^{-3}
		パタン	—	フロス流	スラグ流	スラグ流	(スラグ流)

*1 : 定格時の流量は-6890kg/s である。

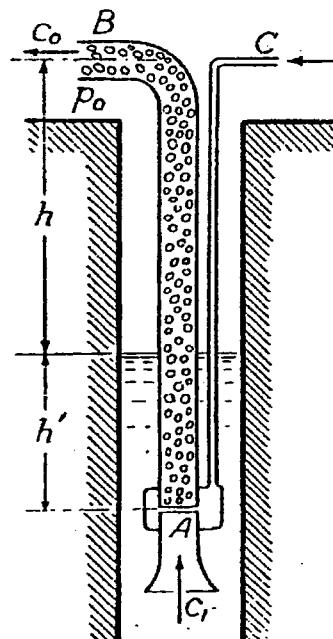


図 7.4.3-1 揚水ポンプ模式図

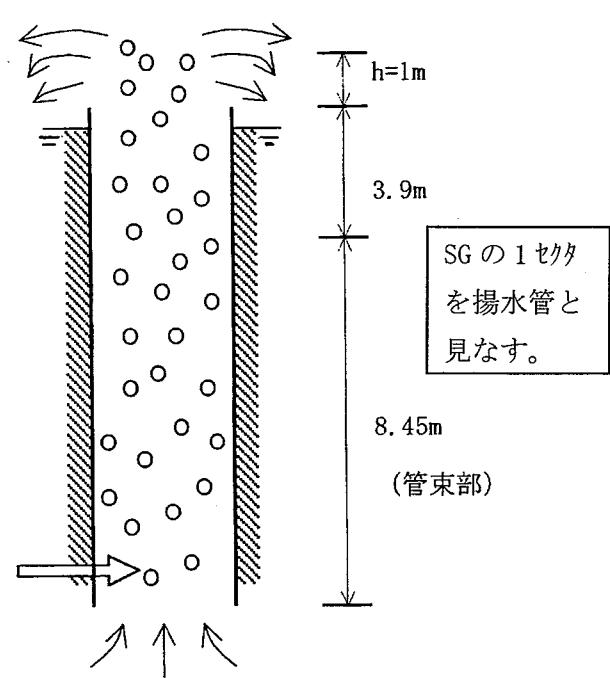


図 7.4.3-2 SG 伝熱管破断時の気泡ポンプモデル

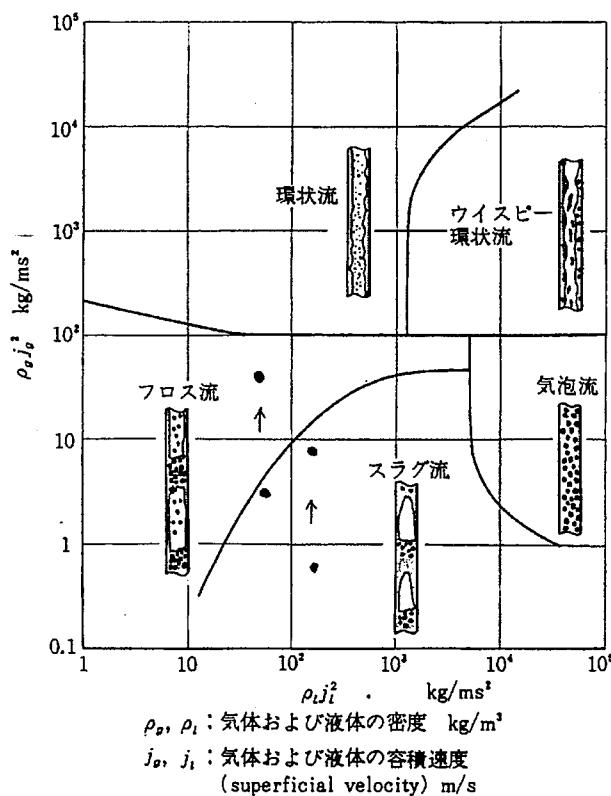


図 7.4.3-3 鉛直管上向流の流動様式線図

7.4.4 プラント熱流動解析のための境界条件

現状のプラント熱流動解析コードでは、SG 伝熱管からの水リーク現象を直接モデル化することは出来ないため、前述したピストンモデル及び気泡ポンプモデルにより求めた水リークの影響評価の結果を境界条件として与え、水リークの影響を間接的に考慮する。具体的な境界条件設定の考え方は次のとおり。

- ① 基本的には破損チャネルの上部及び下部の流量を境界条件とする。破断後初期は圧力境界とすることも考えられるが、境界条件切り替え時には数値的な不連続が生じることが予想されるため破損後初期から流量境界とする。一方、流量境界とした場合、破断後初期には境界で鉛ビスマスが涌出することになるが、その量は数 m^3 と炉容器内全量（約 $1000m^3$ ）に比べて小さいので無視する。
- ② ピストンモデルは SG 破断点上部の、初期の流動方向逆転を模擬するには適切だが流路面積が大きいため、モデルは徐々に現象から外れ、SG 破断点上部の液柱が短くなってくると定常流（気泡ポンプモデル）に移行することが考えられる。
- ③ 従って、初期はピストンモデルによる流量変化を、そしてそれ以降は気泡ポンプモデルによる定常流量を境界条件とする。なお、約 1~2 秒間は両者の結果を内挿するものとする。

以上のような考え方で設定した、伝熱管 1DEG 相当リーク率の $11kg/s$ と定常流量がより大きい $5kg/s$ の場合の境界条件を図 7.4.4-1 と図 7.4.4-2 に示す。なお、流量設定の際には下記を考慮した。

- ① 水リーク検出時間はカバーガス圧力計での検出を想定し、 $11kg/s$ の場合 10 秒、 $5kg/s$ の場合 25 秒とする。
- ② 検出後は 1 秒の時間遅れで原子炉スクラム、水ブローを開始し、水ブローは開始後 60 秒で終了する。ブロー時間中の水リーク率はブロー前の値から 0 までリニアに減少するものとし、同様に水リークによる気泡ポンプの吐出流量もリニアに 0 まで減少するものとする。

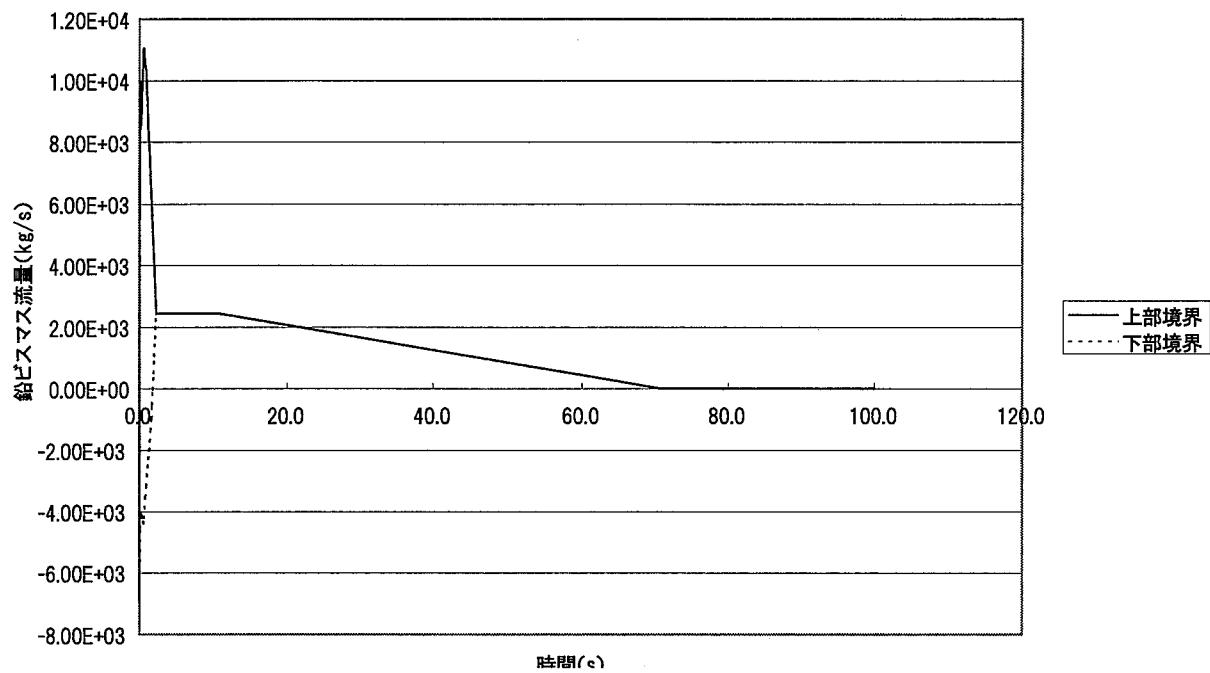


図 7.4.4-1 SG 伝熱管破断時破損チャンネル境界流量 (水リーク率 11kg/s)

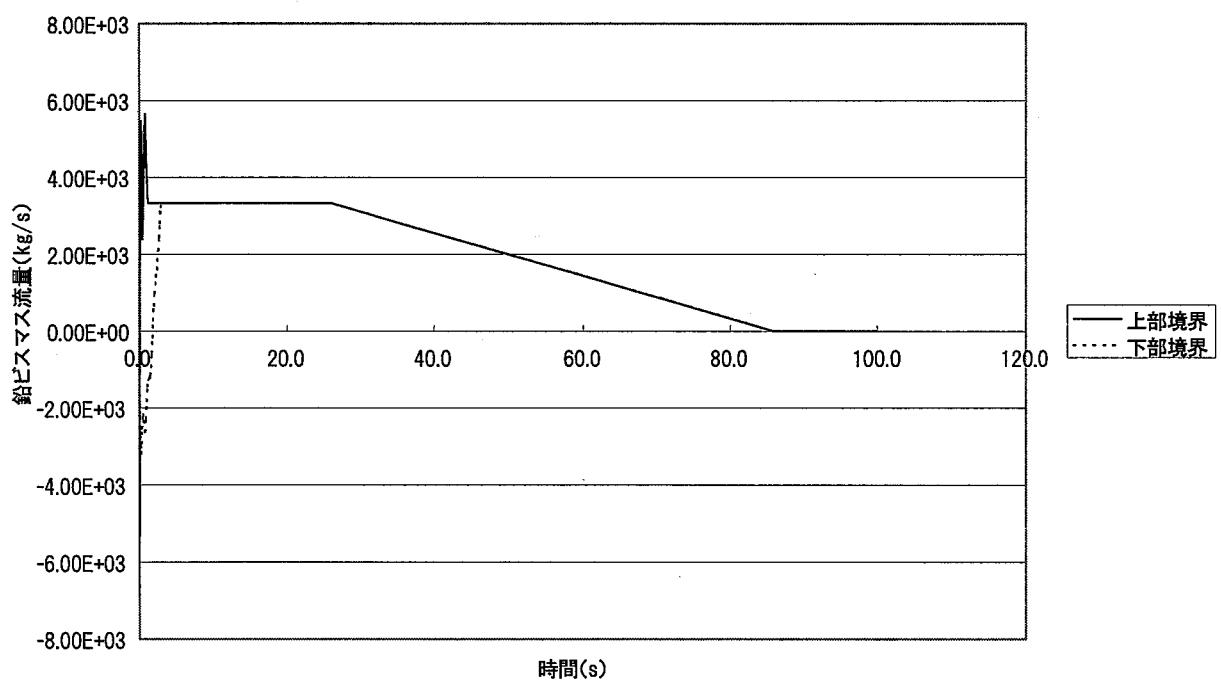


図 7.4.4-2 SG 伝熱管破断時破損チャンネル境界流量 (水リーク率 5 kg/s)

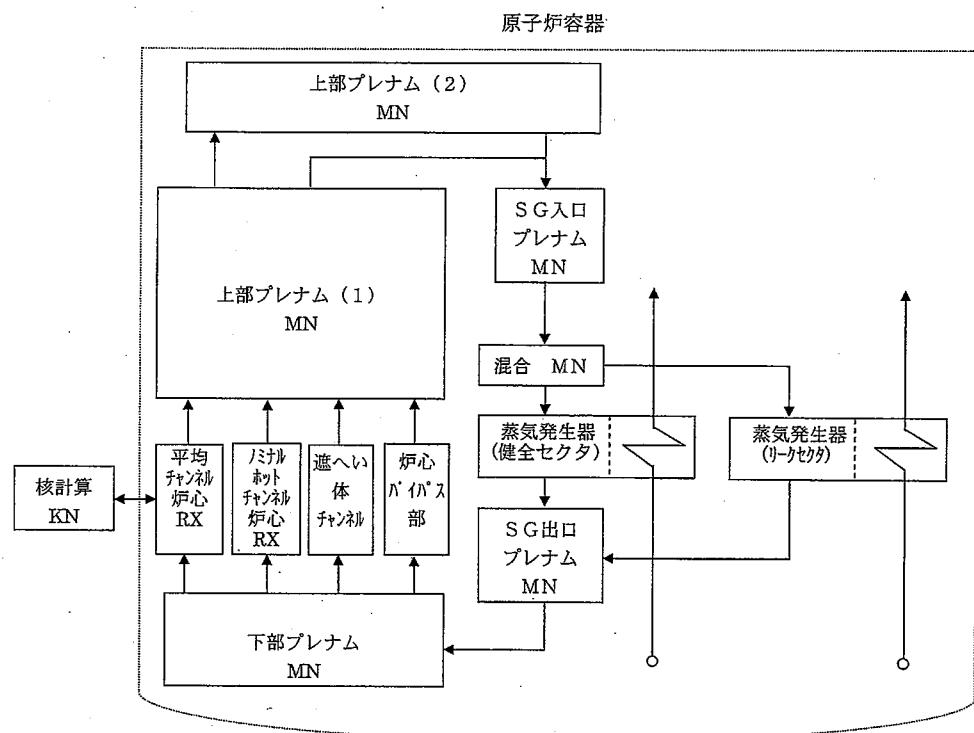


図 7.4.5-1 SG 伝熱管破断時解析モデル図（熱計算）

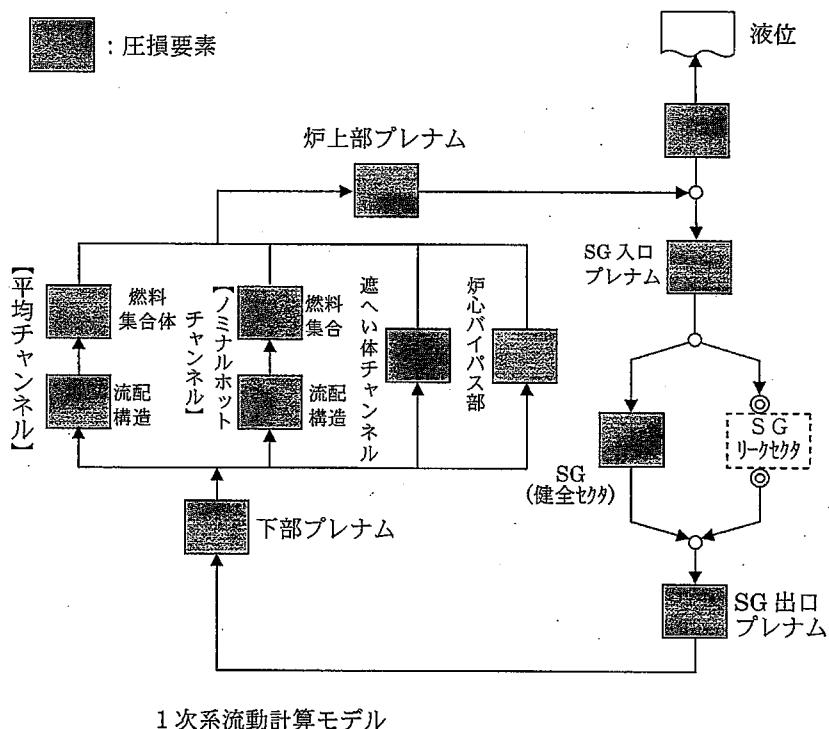


図 7.4.5-2 SG 伝熱管破断時解析モデル図（冷却材流量計算）

7.4.5 プラント熱流動解析

(1) 検討目的

SG 伝熱管が破損し、水蒸気が鉛ビスマス中に噴出した場合の原子炉容器内の冷却材流量変化並びに炉心部の過渡変化を解析し、安全性を検討する。

(2) 検討条件

a. 過渡解析モデル

プラント熱流動解析はプラント動解析コード; Super-COPD を使用する。本解析コードは 6.2 項一体型炉の制御特性、運転特性の検討においても使用しており、そこに解析モデルに関する説明を記載している。

本項目での解析では解析目的に応じて SG 部の解析モデルを修正している。原子炉容器内の熱計算モデルと冷却材流動計算モデルを、それぞれ、図 7.4.5-1 と図 7.4.5-2 に示す。SG 部を伝熱管が破損したチャンネル（セクタと同義）(1/8 チャンネル) と健全なチャンネル (7/8) に分割し、伝熱管が破損したチャンネルの鉛ビスマス流量を前項 7.4.4 熱流動解析モデルのための境界条件にて検討した境界条件を与えるモデルとしている。

b. 解析条件

前項 7.4.4 熱流動解析モデルのための境界条件にて検討した境界条件を与える。解析は水リーケ率が伝熱管 1 本破断時の 11kg/s のケース及び鉛ビスマス吹き上げ流量がやや大きくなる 5kg/s のケースについて行う。

(3) 解析結果

水リーケ率 11kg/s のケースの解析結果を図 7.4.5-3 に示す。SG リーク発生直後はリーク箇所から鉛ビスマスが上部及び下部に流出する。この結果、SG 健全チャンネル部と炉心部の双方の鉛ビスマス流量が増大する。SG リーク箇所の圧力が準定常になった後は気泡ポンプ効果により SG リークチャンネル部の鉛ビスマス流量は上部に流出するため、炉心部鉛ビスマス流量は減少し、一方、SG 健全チャンネル流量は増加する。

炉心部流量の低下は約 96%までの低下であり、炉心部温度が若干上昇するが被覆管の健全性に影響するほどではなく、炉心部の健全性は確保される。なお、SG リーク信号により約 11 秒後に原子炉は自動停止する。

水リーケ率 5kg/s のケースの解析結果を図 7.4.5-4 に示す。SG リーク率が異なるため SG リークチャンネル部の鉛ビスマス流量変化が異なるが、過渡変化の様子は 11kg/s のケースとほぼ同様である。炉心部流量の低下は約 96%までの低下であり、炉心部温度が若干上昇するが被覆管の健全性に影響するほどではなく、炉心部の健全性は確保される。

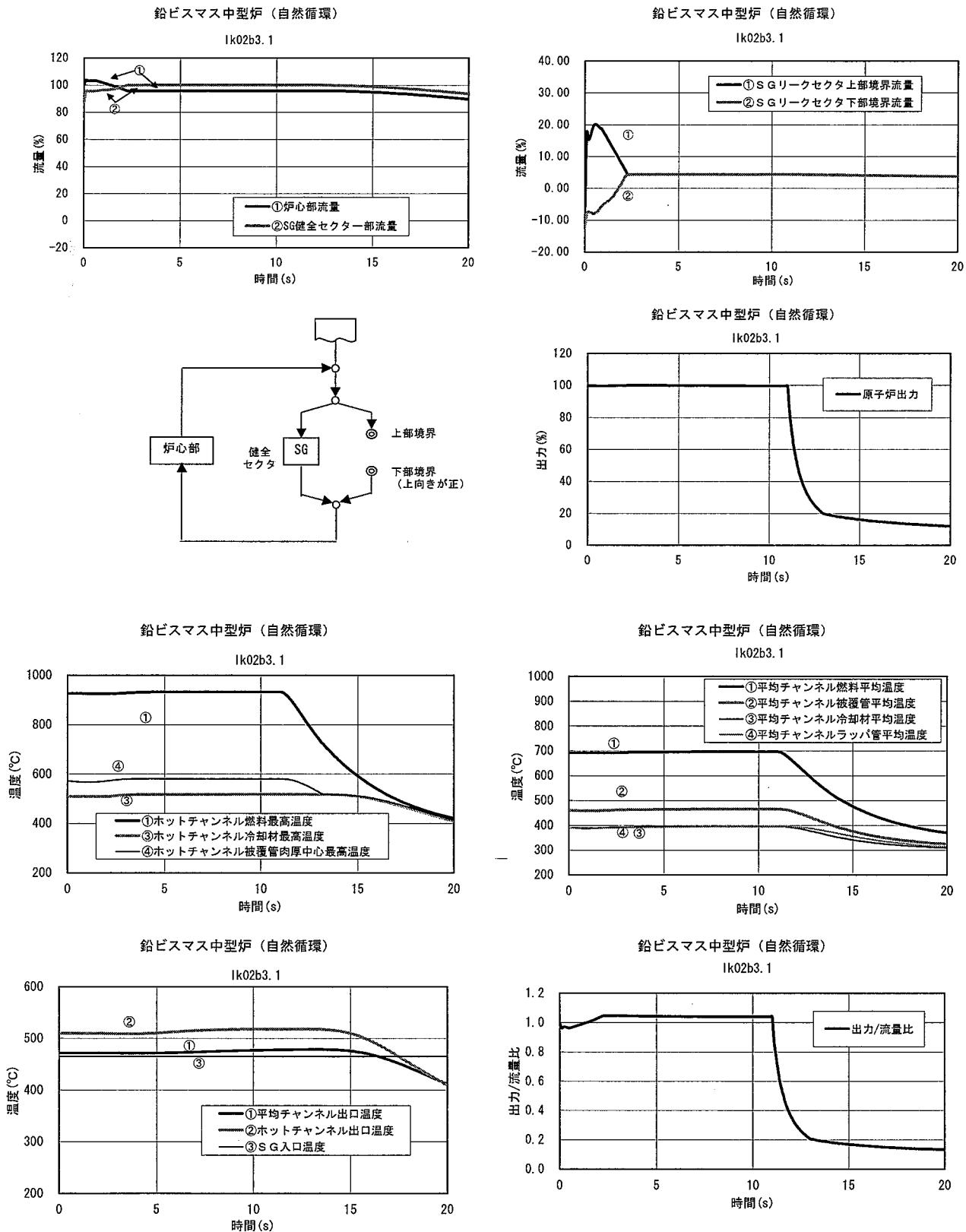


図 7.4.5-3 SG 伝熱管破断時プラント熱流動解析結果(リーク率 ; 11kg/s) ; 自然循環炉

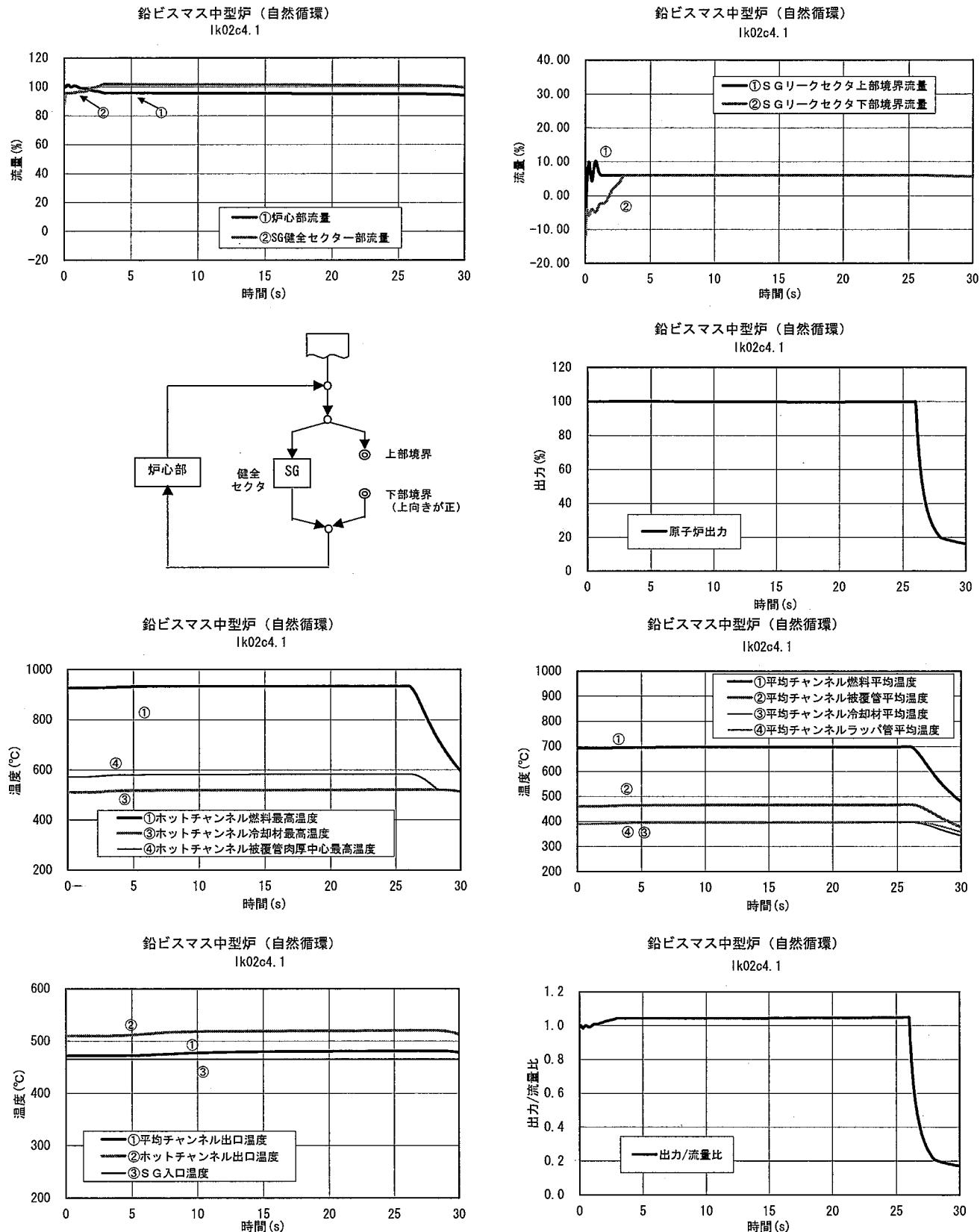


図 7.4.5-4 SG 伝熱管破断時プラント熱流動解析結果(リーク率 ; 5 kg/s) ; 自然循環炉

7.4.6 炉心への蒸気侵入の影響

7.4.5 項までの自然循環炉に対する検討結果を踏まえ、以下の条件で炉心への水蒸気侵入による印可反応度を検討する。また、本項末には、強制循環炉に対する検討も加えた。

- 1) 伝熱管 1 本破断時の水リーク率は 11kg/s。
- 2) 炉心冷却材単位体積当りのボイド反応度は約 1.67 \$ /m³。
- 3) 炉心部での水蒸気 (1.72MPa の飽和蒸気と仮定) の比重は約 5.78kg/m³。
- 4) 水リーク時の炉心入口冷却材流量は、SG 破損チャネルの気泡ポンプ効果 (上昇流) により定格時の約 96%となる。冷却材に同伴する水蒸気侵入を考える場合は冷却材流量が大きいほど厳しくなることから、定格運転時の約 5.51 m³/s を基に検討する。この時、SG 出口から炉心入口までの下降部の鉛ビスマスのインベントリは約 160m³(約 1600t) で、通過時間は約 29s である。(炉心側部の下降流速は約 0.48m/s) また、炉心通過時間は約 1.2s である。
- 5) カバーガス圧力計による水リーク検出時間は、前節の想定をやや詳細化し次式で求める。

$$td = 76. / Gs$$

ただし、td : リーク検出時間 (s)、 Gs:水リーク率 (kg/s)

カバーガス体積は約 140 m³。0.098MPa の圧力上昇 (検出設定値) に必要なリーケ水量はカバーガス平均温度 548K として約 76kg。

上式によれば 11kg/s の場合約 7s となる。(前 7.4.4 項では 10s と想定)

伝熱管 1 本破断の場合、SG 破損チャネル内の平均ボイド率は約 0.95 であり、水蒸気の多くはカバーガス中に放出されると考えられるが、仮に全量が炉心部に移行すると考えると、炉心部での水蒸气体積は最大約 2.28m³ ($= (11 \times 1.2) / 5.78$) となり、印加反応度は約 3.8 \$ となる。逆に、1 \$ となる水リーク率は約 2.89kg/s である。

従って、約 2.89kg/s 未満のリーク率であれば、保守的に全ての水蒸気が炉心部に侵入したと想定しても印加反応度は 1 \$ 以下となり、中性子束高で異常を検出、原子炉をスクラムできることから安全上問題とならない。

リーク率が約 2.89kg/s 以上の場合、カバーガス圧力計の検出時間は約 26s 以下であり、SG 出口から炉心入口までの通過時間約 29s よりも短い。従って、気泡が炉心部に到達する前にカバーガス圧力計でリークを検出し、原子炉をスクラムすることが可能であり、安全上問題ない見通しである。なお、以前の検討¹⁾によれば、気泡径が約 0.02cm 以上の場合、静止鉛ビスマス中の気泡終端速度は約 0.18m/s 以上である。(図 7.4.6-1 及び図 7.4.6-2 参照) SG 出口から下降する鉛ビスマス中に同伴される気泡の下降速度は、鉛ビスマス下降速度より小さくなることから SG 出口から炉心入口までの下降部の通過時間は上記約 29s より大きくなり、リーク発生から検出、原子炉スクラムまでの時間余裕はさらに大きくなる。

一方、強制循環炉の場合は、自然循環炉と同様の関連諸値は次のとおりである。

- 1) 1DEG相当リーク(12kg/s)時、全量が炉心に侵入したとするとその時の印加反応度は1.86\$となる。
- 2) 1\$以上の印加反応度となるのは約6.4kg/s以上のリークである。
- 3) カバーガス圧力計によるリーク検出時間は自然循環炉と同程度で、約6.4kg/sのリークの場合約12sである。
- 4) 鉛ビスマスがSG出口からポンプを経て炉心入口に到達する時間は約90sである。

従って、約6.4kg/s未満のリーク率であれば、保守的に全ての水蒸気が炉心部に侵入したと想定しても印加反応度は1\$以下で収まること、及び、リーク率が約6.4kg/s以上の場合、カバーガス圧力計によるリーク検出により、気泡が炉心に到達する前に原子炉をスクラムできることから、自然循環炉と同様に安全上問題ない見通しである。

いずれにしても、今回の概略評価ではリーク水全量の炉心への侵入を想定したが、実際にはリーク水の多くの部分がカバーガス中に移行することが考えられる。今後、炉心への水蒸気侵入の影響を詳細に評価するためには、リーク水のうちどの程度の割合が炉心に移行するか把握することが必要である。そのため、特に水リーク時の水蒸気気泡の大きさについてのデータはないことから、試験により確認する必要がある。

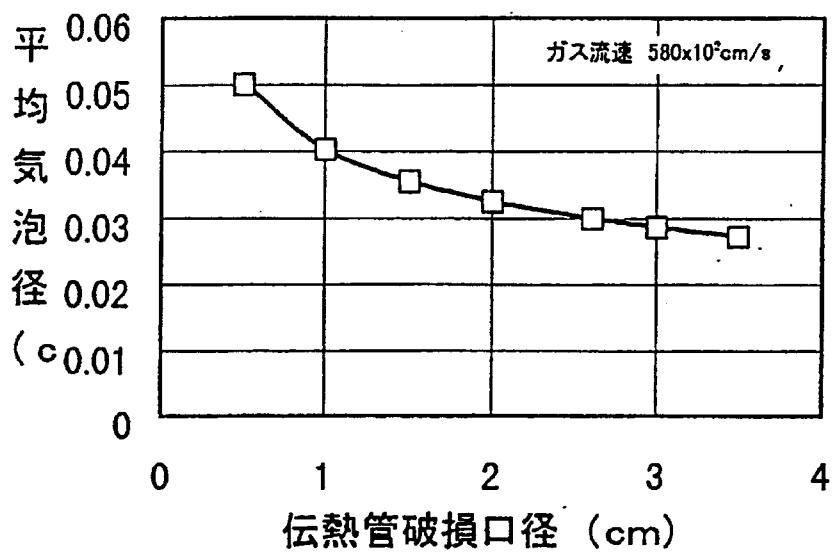


図 7.4.6-1 SG 伝熱管破断時破損口径と気泡径の関係

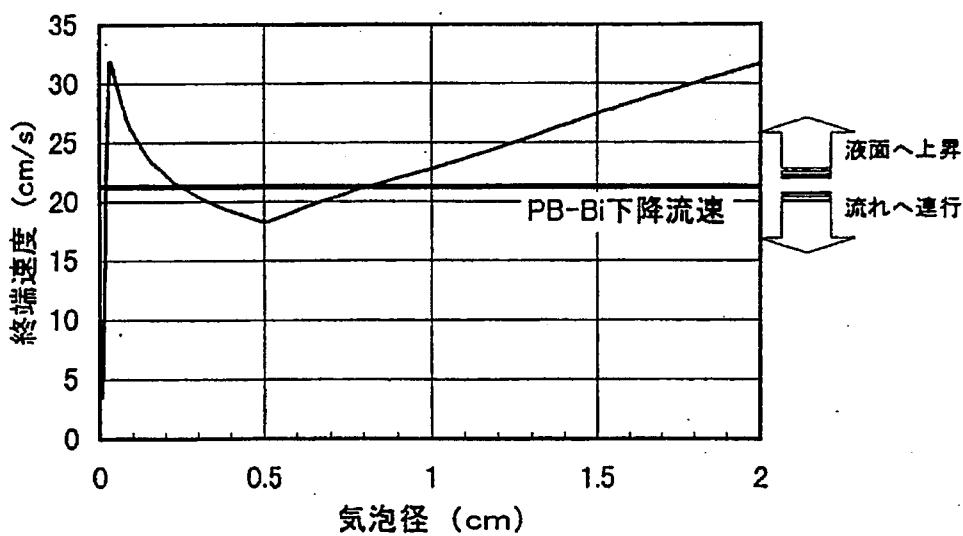


図 7.4.6-2 鉛ビスマス中の気泡径と気泡終端速度の関係

7.5 安全性検討のまとめ

平成 12 年度に実施した SG 伝熱管破断事象の評価では、簡易的な流動モデルにより炉内圧力上昇は 0.2MPa 程度以下であり、構造健全性上問題ない見通しを得手居た。平成 14 年度は伝熱管破断時の炉心部の流量変化に伴う炉心出力、温度変化などに着目した熱流動解析を行い、熱的側面から炉心安全性評価を行った。また、炉心への水蒸気侵入による印加反応度についても検討した。これらの結果は以下のとおりである。

- ① 伝熱管 1 本の破断を想定した場合、自然循環炉の SG での定常水リーキ率は 11kg/s 及び強制循環炉の SG では 12kg/s となる。
- ② 伝熱管破損に伴う水蒸気泡上昇が炉心流量に及ぼす影響が大きいと予想される自然循環炉を対象として、均質二相流による気泡ポンプモデルにより水リーキ率をパラメータに上昇流量（定格時とは逆方向）を評価した結果、水リーキ率 5kg/s の場合が最も大きく、その流量は、定格時 SG チャンネル当たりの鉛ビスマス流量の約 50% となった。（SG は 8 チャンネル）なお、水リーキに伴う流量は、リーキ率、流動パターンなどに影響されることから、より詳細には管束を模擬した流路体系での試験による確認、理論モデルの構築が必要である。
- ③ SG 破損チャネルの流量を境界条件として、炉容器内全体の熱流動解析を行った結果、炉心流量は約 96%までの低下にとどまり、炉心部の温度上昇は小さく、炉心の健全性は確保できる見通しが得られた。
- ④ 水リーキ時に冷却材に同伴する可能性のある炉心への水蒸気侵入の影響を、評価上厳しい定格運転時の鉛ビスマス流量を基に検討した。その結果、自然循環炉及び強制循環炉ともに、保守的に全ての水蒸気が炉心部に侵入したと想定しても、水リーキ率が数 kg/s 以下の場合は、印加反応度は 1 \$ 以下で收まり安全上問題ない。また、リーキ率が数 kg/s 以上の場合も、カバーガス圧力計によるリーク検出により気泡が炉心に到達する前に原子炉をスクラムできることから、安全上問題になることはない見通しが得られた。ただし、水リーキ時の水蒸気泡の大きさについてのデータはないことから、今後試験により確認する必要がある。

8. 炉内構造とBOP設備の具体化

8.1 BOP設備の具体化

8.1.1 燃料交換システムの小型化

8.1.1.1 自然循環炉の燃料交換システム

(1) 目的

燃料交換設備の燃料交換機、燃料出入設備の寸法は、プラント建屋の大きさを決める主要な因子となっている。本項では、以上を踏まえ燃料交換設備の短尺化について、可能性の検討を行う。

(2) 検討条件

- a. 対象とする自然循環炉の原子炉構造（立面図）を図 8.1.1-1 に示す。
- b. 燃料交換方式は、ナトリウム炉と同じ単回転プラグ+コラム型 UIS+パンタグラフ式 FHM。
- c. 燃料交換時の作業員被ばく対策が講じられ、安全かつ利便性のある構造システムとする。

(3) 検討内容

- a. 燃料交換設備の小型化方式のサーベイ検討

設備の短尺化及び建屋規模の縮小・合理化の候補概念として3案（燃料交換機分割方式、燃料交換機伸縮方式、燃料交換機伸縮・浮力活用方式）を抽出し、サーベイ検討した。

(a) 燃料交換機分割方式（案1）

燃料交換機を上下2分割構造とし、アーム開閉駆動部とパンタグラフアーム作動部を分割構成とする。一方、燃料出入設備は炉内中継用案内管、燃料集合体掴み装置（グリッパ）、昇降式案内管（馬蹄形状）などで構成する取扱機を配置する。なお、取扱機上部には巻上装置を配置し、昇降式案内管（取扱機側部3本配置）をボールネジ機構構造で数珠繋ぎする、反復上下操作（連結接続）を行い昇降駆動する。燃料交換機分割方式（案1）の燃料交換機分離構造システム概念及び燃料出入設備構造システム概念を図 8.1.1-2 に示す。

(b) 燃料交換機伸縮方式（案2）

燃料交換機のアーム開閉作動部とパンタグラフアーム作動部の中間筒部に伸縮機構構造を配備し、燃料交換機の全高を小型短尺化する構造とする。一方、燃料出入設備も同様に燃料集合体掴み装置（グリッパ）を一体化した昇降式案内管などで構成する取扱機を配置する。燃料交換機伸縮方式（案2）の燃料交換機構造システム概念及び燃料出入設備構造システム概念を図 8.1.1-3 に示す。

(c) 燃料交換機伸縮・浮力活用方式（案3）

燃料交換機及び燃料出入設備のシステム構造は燃料交換機伸縮方式（案2）を基に構成する。なお、燃料出入設備直下には炉内中継槽を配備せず、下端切欠き（半割）を有する炉内中継用案内管を配置し、燃料交換機で案内管下端に燃料集合体を移送・離脱後、浮力で液位表面まで浮上させ、掴み装置（グリッパ）で取り出す。燃料交換機伸縮・浮力活用方式（案3）の燃料交換機構造システム概念及び燃料出入設備構造システム概念を図 8.1.1-4 に示す。

b. 施設配置による物量評価

燃料交換機の寸法によりオペレーションフロア上の建屋高さ、移送時の建屋開口寸法を取扱機の寸法による重量増減から荷役設備容量など、建屋関係への影響を与える因子はいくつかあるが、本評価では最も影響の大きいオペフロ上の建屋容積に与える比較評価を実施した。設備側からの要求値を図 8.1.1-5 建屋側取合寸法図に示す。

各案の建屋容積比較図を図 8.1.1-6 に示す。比較図に示すクレーン部容積は、6 モジュールと補助建屋部を含むオペフロ上の建屋空間容積であり、建屋全容積の 30%以上を各案とも占めている。比較結果は平成 13 年度ベースに対して案 1 がクレーン部容積で 19.2% 減、建屋全体で 7.2% の減、案 2 と案 3 では各々 15.7% と 5.6% の削減率となり、建屋容積上は案 1 が有利である。建屋容積以外の因子についても、短尺かつ小径に収まる案 1 方式の方が当然有利な結果となることから、経済性の観点からは案 1 が有利と言える。

(4) 燃料交換システム方式のサーベイ比較・評価

設備の小型短尺化及び建屋合理化を達成する各燃料交換システム概念について、システム構成、小型化達成概要、経済性効果などの比較評価を行った。これを表 8.1.1-1 に示す。この結果、離脱部に開発要素は残るが、経済性の観点から、燃料交換機分割方式（案 1）の構造システムが最も優位性があるとの結論を得た。

(5) 燃料交換方法

上記(1), (2)項の比較・評価結果から、最も優位性の高い燃料交換機分割方式（案 1）について検討を行った。燃料集合体交換作業は、前準備作業と燃料交換作業の 2 作業（手順 1, 手順 2）がある。前準備作業（手順 1）は炉上部ルーフデッキ上に案内筒、ドアバルブ A・B、取扱機を積層配置構成し、内部に吊り胴を介して、燃料交換機のパンタグラフアーム作動部とアーム開閉駆動部を回転プラグに搭載する。一方、燃料出入設備の前準備作業（手順 1）は炉上部ルーフデッキ上の炉内中継装置にドアバルブ A・B、取扱機を積層構成する。これらの前準備作業（手順 1）後、燃料交換作業（手順 2）に移行し燃料集合体の交換を行う。

前準備作業である燃料交換設備の炉上部搭載手法などの要領を、時系列的（代表モード）に燃料交換手順計画概念図（手順 1／前準備作業）図 8.1.1-7 に示す。また、使用済燃料取出し、新燃料炉内装荷などの要領を、時系列的（代表モード）に燃料交換手順計画概念図（手順 2／燃料交換作業）図 8.1.1-8 に示す。

a. 燃料交換手順・要領（手順 1／前準備作業）

燃料交換作業の前準備作業として行う、炉上部搭載手法などの手順・要領は以下による。

(a) 燃料交換機搭載

- 手順 1 : 案内筒、ドアバルブ A 据付、

炉上部ルーフデッキ上に案内筒、ドアバルブ A を同一軸芯に据付・積層配備する。

- 手順 2 : ドアバルブ B、取扱機(1) 据付

燃料交換機のパンタグラフアーム作動部を吊り胴(1)を介在した取扱機(1)に内装備する。この状態で炉上部に配置した案内筒上のドアバルブ A に積層配備する。

・手順 3：パンタグラフアーム作動部の炉上部移送

取扱機(1)に内装備された燃料交換機のパンタグラフアーム作動部を吊り胴(1)を介在し炉内に装荷する。パンタグラフアーム作動部は案内筒の仮受台座に仮置きする。

この際ドアバルブ A, B(2 基)は開動作し装荷後閉動作する。取扱機内バウンダリジャケットで炉内の雰囲気を維持する。

・手順 4：取扱機(2)据付

ドアバルブ A, B(2 基)の閉動作後に取扱機(1)を取り外し、取扱機(2)に内装備されたパンタグラフアーム駆動部とドアバルブ C をドアバルブ A の同一軸芯に据付ける。

・手順 5：パンタグラフアーム駆動部の炉上部移送

取扱機(2)に内装備された燃料交換機のパンタグラフアーム駆動部を吊り胴(2)を介在し炉内に装荷する。この際ドアバルブ A, C(2 基)は開動作し、取扱機内バウンダリジャケットで炉内の雰囲気を維持する。

・手順 6：パンタグラフアーム作動部と駆動部の結合

案内筒の仮受台座に、仮置きされたパンタグラフアーム作動部上に装荷された駆動部を接近させ、パンタグラフ作動軸及び制御ケーブルなどの結合作業を行う。結合作業の監視・確認は炉上部ルーフデッキ上に設置される仮設点検用ステージの案内筒作業監視窓で行う。

・手順 7：燃料交換機の炉内装荷

パンタグラフアーム作動部と駆動部の結合後、一体化された燃料交換機を吊胴(2)を介在し炉内に装荷する。取扱機内バウンダリジャケットで炉内雰囲気を維持する。

・手順 8：取扱機(2)、案内筒の取出し

炉上部ルーフデッキ上の燃料交換機は、単回転プラグに固定され、炉内の雰囲気を維持する。その後、取扱機(2)、案内筒を分離・移送する。

(b) 燃料出入装置搭載

・手順 1：燃料出入装置据付

取扱治具にて懸架された燃料出入装置は昇降式案内管(3基)を内装備し、炉上部ルーフデッキ上の炉内中継装置に配備されたドアバルブ D にドアバルブ E を同一軸芯に据付・積層配備する。この際ドアバルブ D, E(2基)は閉動作状態で待機する。

b. 燃料交換手順・要領（手順 2／燃料交換作業）

使用済燃料取出し、新燃料炉内装荷などの手順、要領は以下による。

(a) 使用済燃料集合体取出し

・手順 1：燃料交換開始時

炉内中継装置上に配備された燃料出入装置はドアバルブ D, E(2基)開動作後に巻上げ装置を作動し、自重を利用して炉内に装荷。

・手順 2：昇降式案内管の取付・結合操作

燃料出入装置に内装備された昇降式案内管は第 1 軸装荷後に装置側部に配置された第 2 軸を巻上装置直下に移送し、第 1 軸上端と連結接続し巻上装置を使用して炉内に装荷。第 3 軸～第 4 軸は同様の反復動作を行い、第 1 軸が液位到達後にボールネジ機

構構造が作動し昇降駆動する。

・手順 3：使用済燃料の取込み

昇降式案内管下端に装備された燃料集合体掴み装置（グリッパ）が、炉内中継槽に到達後、炉内中継槽内にある使用済燃料集合体を燃料出入装置内に取り出す。

・手順 4：使用済燃料移送

使用済燃料集合体を燃料出入装置内に取り込み後、手順その 2 に記載した逆操作手順を行い収納・保持後ドアバルブ D、E (2 基) を閉動作し分離・移送する。移送に際しては燃料出入装置搭載時と同様の逆操作手順とする。

(b) 新燃料集合体炉内装荷

・手順 1：新燃料移送

新燃料集合体をドアバルブ E と一緒に形成する燃料出入装置内に収納・保持し炉内中継装置上部ドアバルブ D 上に搬送し据付ける。

・手順 2：新燃料炉内装荷

ドアバルブ D、E(2 基) 開動作後、新燃料集合体を、燃料出入装置直下の炉内中継槽内に、使用済燃料集合体取出し手順 2 の要領で装荷する。装荷後、燃料出入装置内の昇降式案内管を取り出し、ドアバルブ D、E(2 基) を閉動作し炉内雰囲気を維持する。その後、新燃料集合体を燃料交換機で炉内所定位置に装荷し燃料交換を完了する。

(6) カバーガスバウンダリについて

燃料出入設備のカバーガスバウンダリ構成図を図 8.1.1-9 に示す。本燃料出入設備は新規概念システムを構築設定したものであるが、鉛ビスマス冷却材及びカバーガス中の摺動部健全性などについては今後、開発検証が必要である。

(7) 結論

自然循環炉の燃料交換設備の主要設備である燃料交換機分節構造システム及び台車方式を用いない燃料交換システム概念を構築した。燃料交換設備で高さを決める燃料交換機は分節構造システムにより約 7.8m 短尺化した。この小型化は従来計画（平成 13 年度）の施設計画に対してクレーン部容積で 19.2%（建屋全体では 7.2%）の削減率となる。

(8) 今後の検討課題

自然循環炉の燃料交換設備の小型短尺化概念構築を、燃料交換機及び燃料出入設備を主体にサーベイ検討し、優位性有る燃料交換設備概念を設定した。

今後は、この選択された概念について、以下の課題について検討を進める必要がある。

① 燃料交換機分節型（上下 2 分割）構造システムの構造具体化

② 燃料出入設備を含む燃料交換システムの最適化検討

表 8.1.1-1 自然循環炉 燃料交換システム小型化のサーベイ検討

燃料交換方式	燃料交換機分割方式(案1) 燃料交換機伸縮方式(案2)	燃料交換機「単回転アグリコラム型UITS+パンタグラフ式FIM」方式とする。	燃料交換機伸縮・浮ノ活川方式(案3)
システム概要	<ul style="list-style-type: none"> 燃料交換機 従来の燃料交換機のアーム開閉駆動部とパンタグラフアームの作動部に2分離する構造システムとする。 燃料交換機整備手順 <ul style="list-style-type: none"> 手順1：天井クレーンにて炉上部ルーフフレーフデッキにパンタグラフアーム作動部を装着し、仮留きする。 手順2：アーム開閉駆動部を装着し、パンタグラフアームアーム作動部と接続する。 手順3：パンタグラフアーム作動部の仮受け台座を取り外し、所定の位置に装着する。 燃料出入入設備 炉内中継用案内管に燃料集合体上部の組み装着(グリッパ)と案内管を接続し挿入する。また昇降式案内管(馬蹄形状)は数珠繋ぎの反復操作をボルネジ機構で駆動させ、預入・引抜する構造システムとする。なお、案内管のストロークは炉内中継用案内管の上限位置とし、炉内中継槽への受渡しは昇降式案内管が機能する。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料交換機 従来の燃料交換機のアーム開閉駆動部とパンタグラフアームの作動部に2分離する構造システムとする。 燃料交換機整備手順 <ul style="list-style-type: none"> 手順1：天井クレーンにて炉上部ルーフフレーフデッキの所定位に預入する。 手順2：伸縮機構駆動部を作動し、パンタグラフアーム作動部を所定の位置に降下。 手順3：炉内中継槽に燃料集合体を受渡し時の要領は、炉上部ルーフフレーフデッキの回転台面を駆動。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料交換機 伸縮機概念は燃料交換機伸縮方式(案2)と同様 燃料出入入設備 <ul style="list-style-type: none"> システム概念は燃料交換機伸縮方式(案2)と同様 燃料集合体の取出し時に炉内での「浮力作用」を活用し、炉内中継用案内管に沿って彼位表面まで浮上させ燃料棒を組み取出す構造システムとする。 なお、炉内中継槽に配備せざるための連結管を炉端部の位置に燃料集合体下部を仮留するための連結管を炉端から支持する構造物を設け燃料出入入設備のストロークを最短化する。

図 8.1.1-4

図 8.1.1-3

図 8.1.1-2

小型化達成目標	燃料交換機	燃料交換時全高 : 2.4.1.3 m 炉上部装着時全高 : 1.7.1.3 m	燃料交換時全高 : 2.4.1.3 m 炉上部装着時全高 : 1.8.2. m
構造成立性	燃料出入入設備	燃料交換時全高 : 3.3.9.3 m 炉上部装着時全高 : 8.5 m	燃料交換時全高 : 3.8.2 m 炉上部装着時全高 : 1.2.8 m
構造成立性	燃料交換機及び施設の物量評価	<ul style="list-style-type: none"> 燃料交換機 約7.8 m短尺化 クレーン部容積 1.9.2 %削減 建屋全体容積 7.2 %削減 建屋側取合寸法図 8.1.1-5、建屋容積比較を図 8.1.1-6 に示す。	<ul style="list-style-type: none"> 燃料交換機 約6.5 m短尺化 クレーン部容積 1.5.7 %削減 建屋全体容積 5.6 %削減 建屋側取合寸法図 8.1.1-5、建屋容積比較を図 8.1.1-6 に示す。
構造成立性	燃料交換機	従来の燃料交換機を上下2分割する方策には過隔荷物生、気密性などの構造成立性に課題がある。	<ul style="list-style-type: none"> 燃料交換機伸縮方式(案2)と同様 燃料出入入設備 <ul style="list-style-type: none"> システム概念は燃料交換機伸縮方式(案2)と機械原理は同様であるが、浮力作用が活用されるのは取出し時のみであり、再装着ストローケ(押込力)を確保する上で短尺化は困難である。なお、本案導入に伴い炉内中継槽が削除を有するため、これらの削除は燃料交換機分割方式(案1)及び燃料交換機伸縮方式(案2)に適用可能である。
構造成立性	離脱部	離脱部に課題があるが経済性は大きい。	浮力活用効果が少なく経済性は案2と同様。

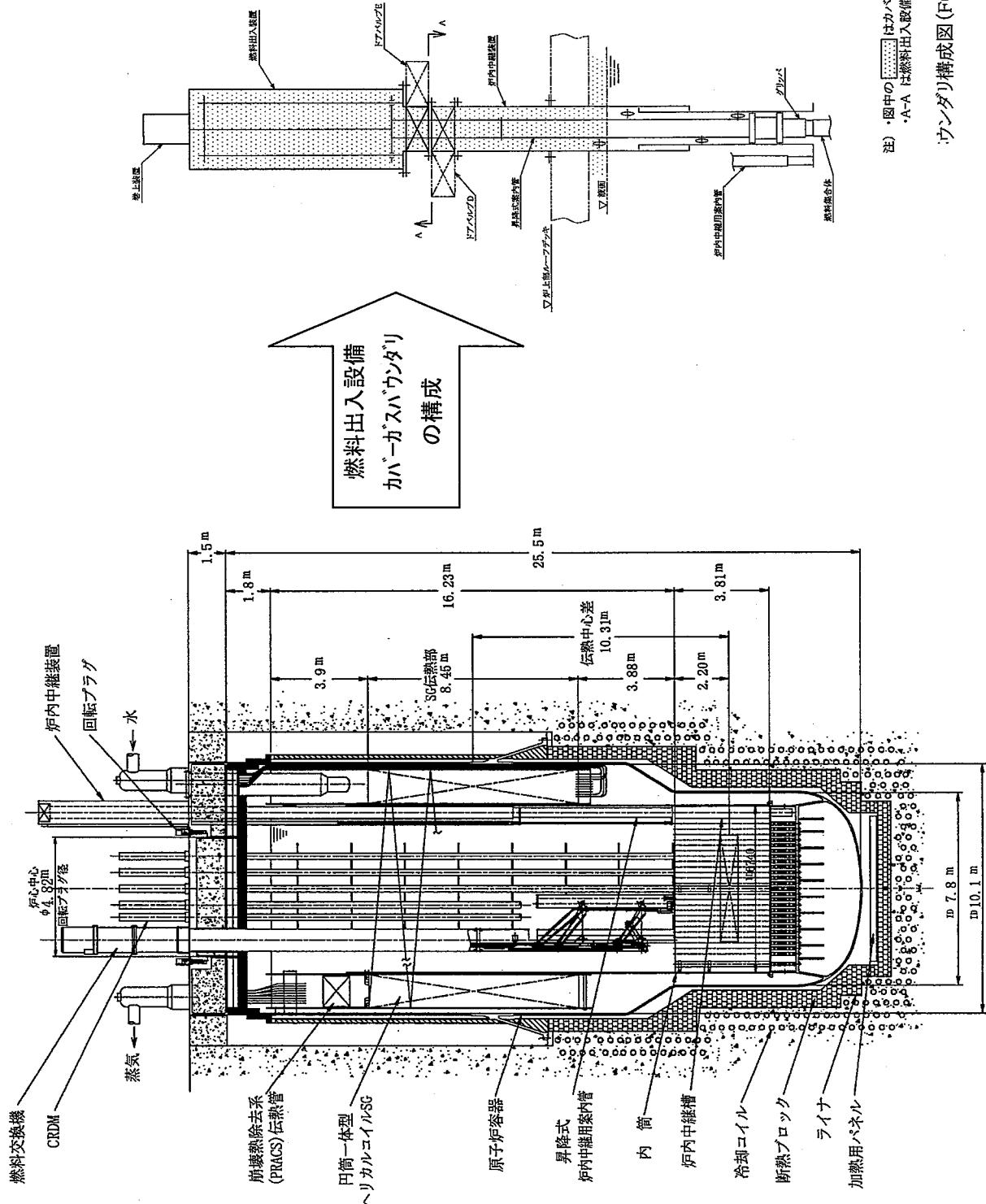


図 8.1.1-1 自然循環炉 原子炉構造と燃料出入設備構造

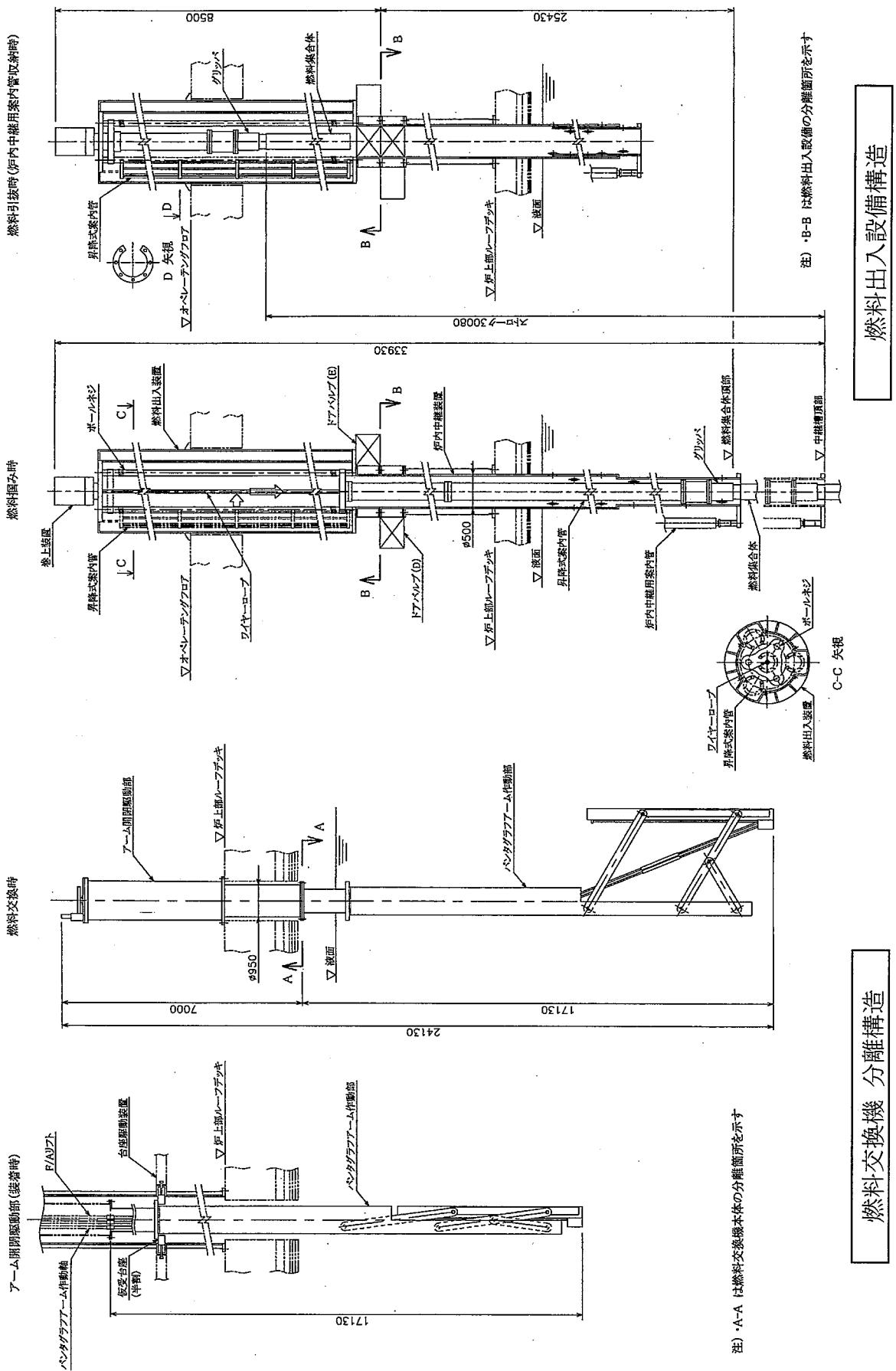
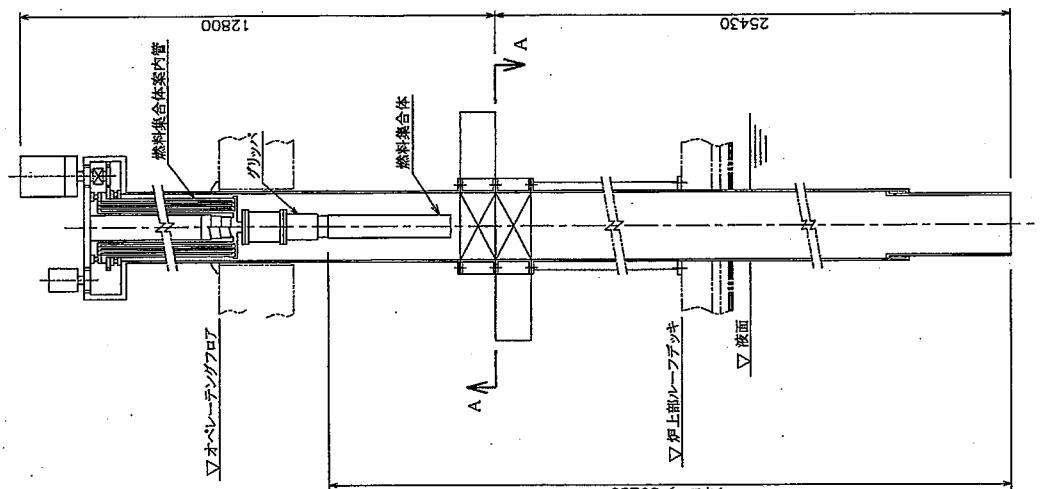


圖 8.1.1-2 燃料交換機分割方式（案 1）；自然循環爐

燃料引抜時(燃料集合体案内管収納時)



注) A-A'は燃料出入設備の分離箇所を示す

燃料出入設備構造

燃料挿み時

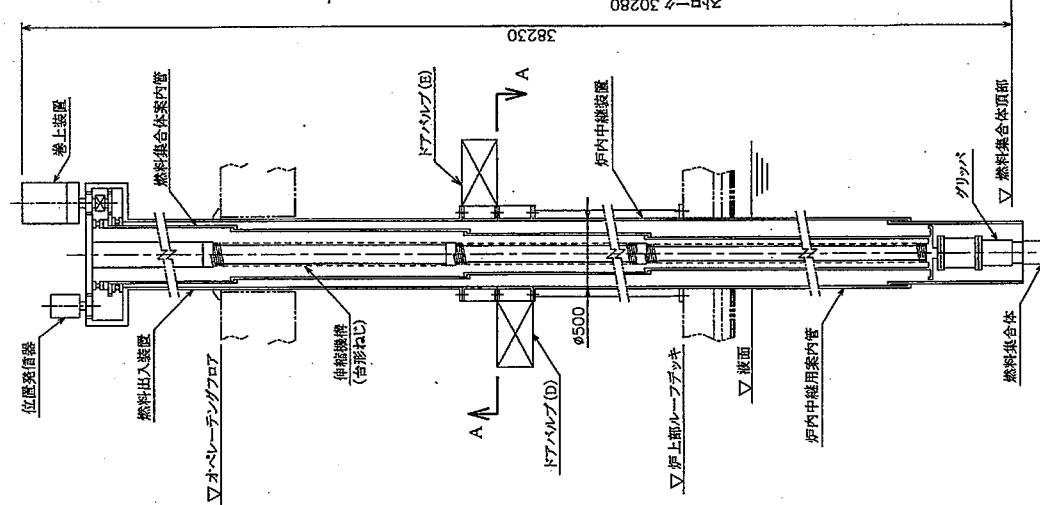
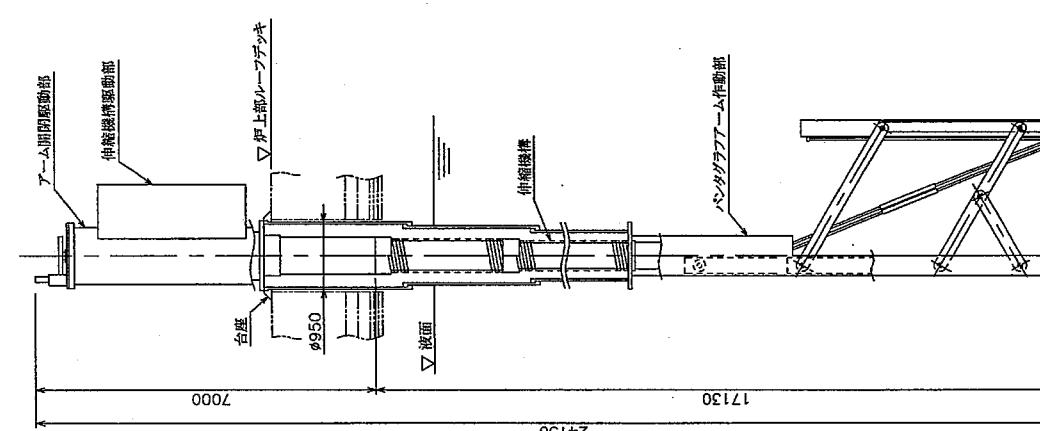


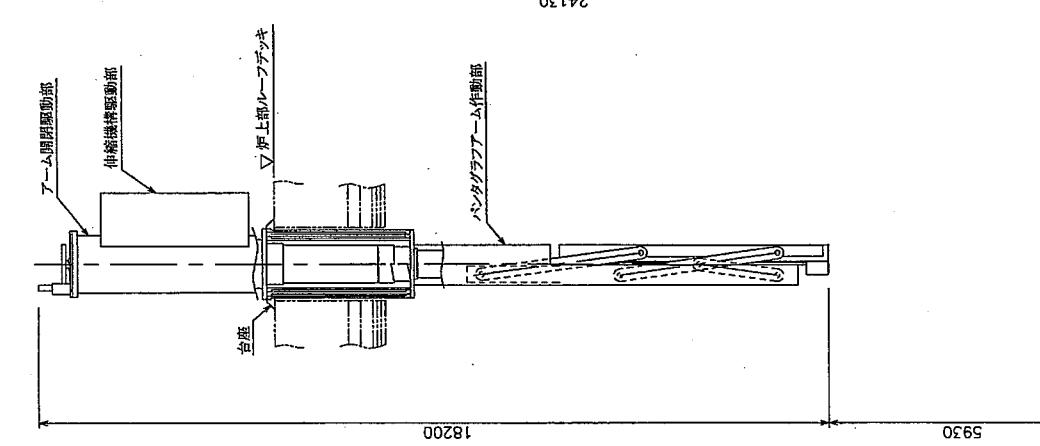
図 8.1.1-3 燃料交換機伸縮方式(案2); 自然循環炉

燃料交換時



燃料交換機構造

燃料交換機(装着時)



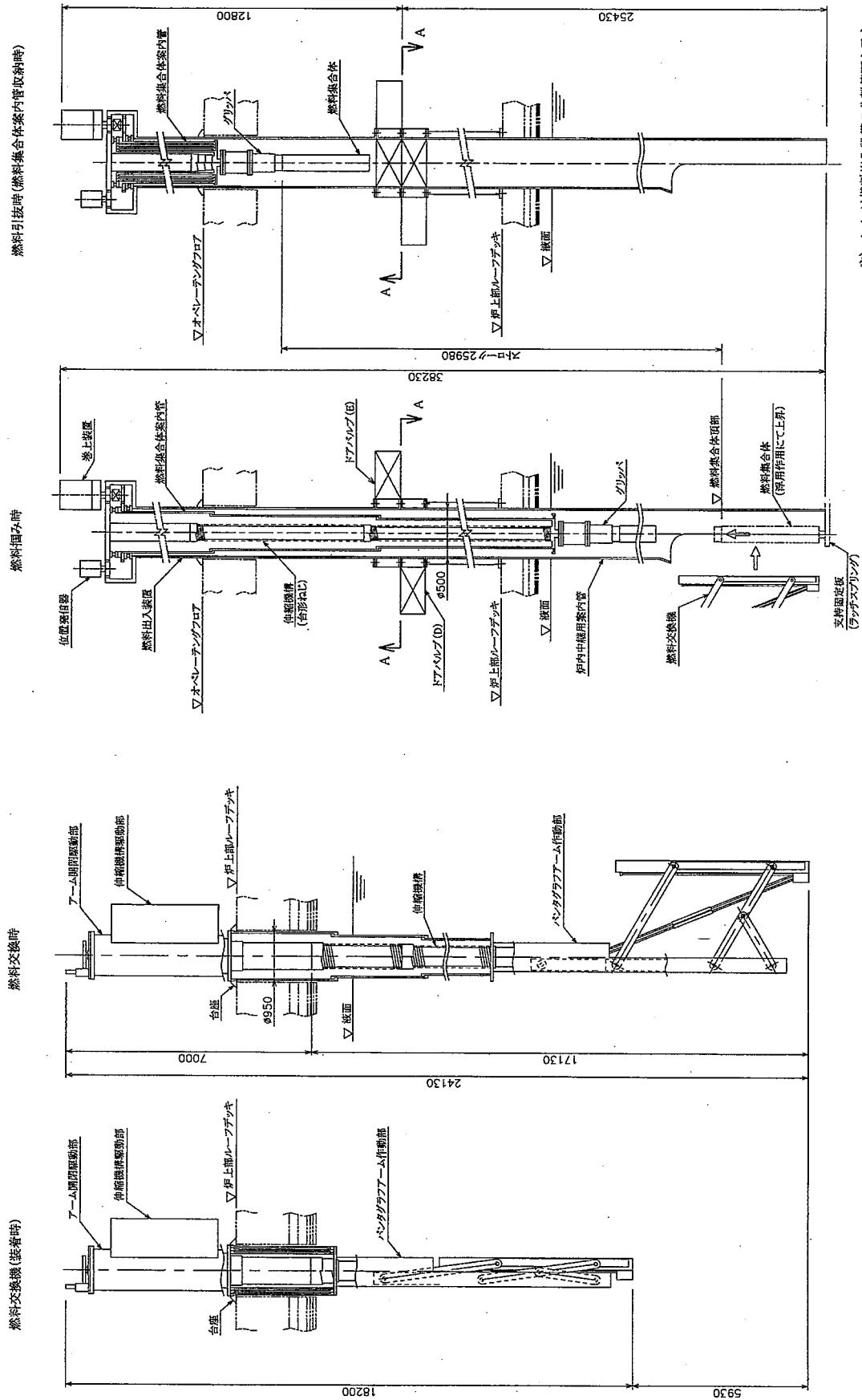
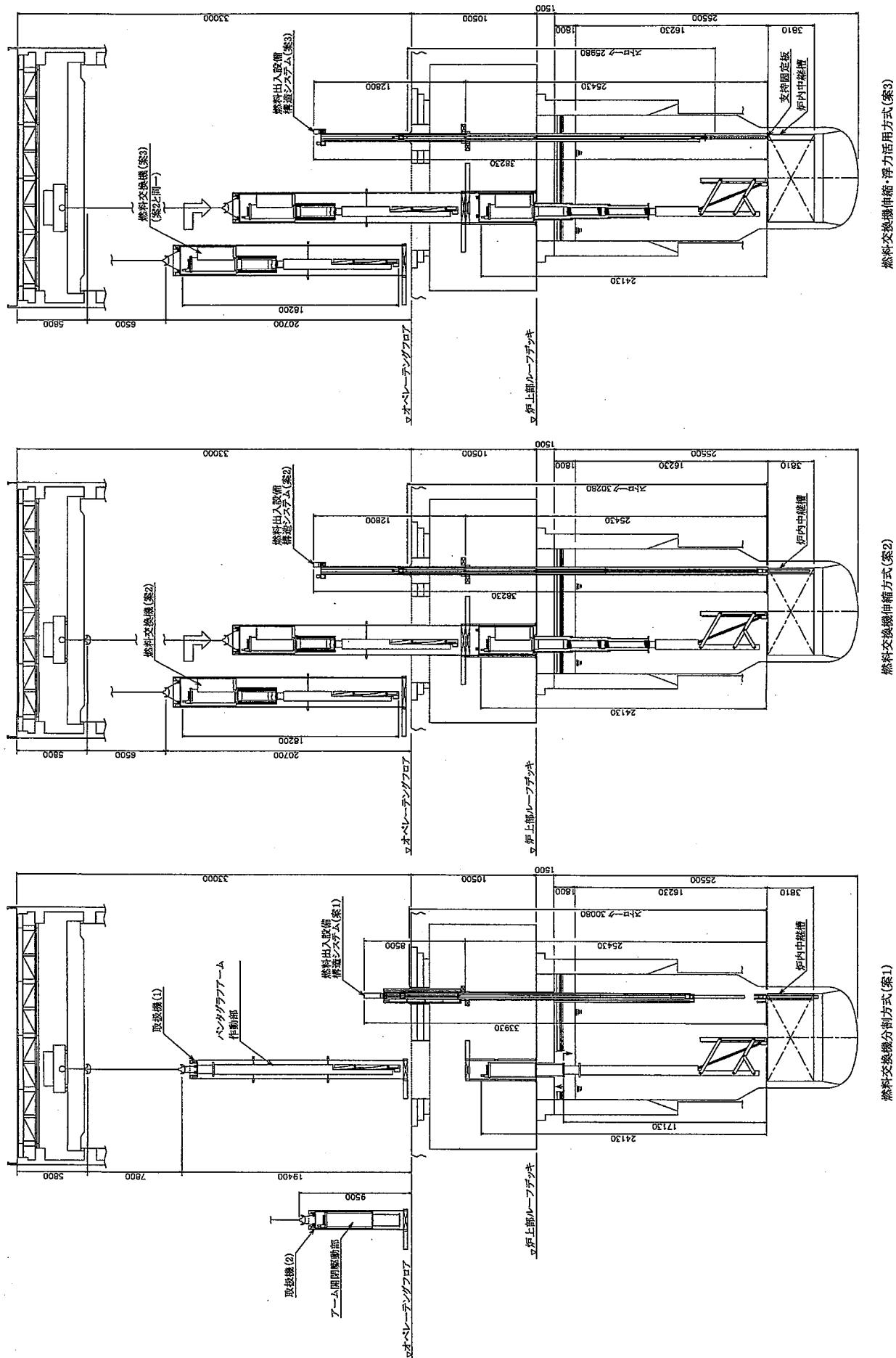
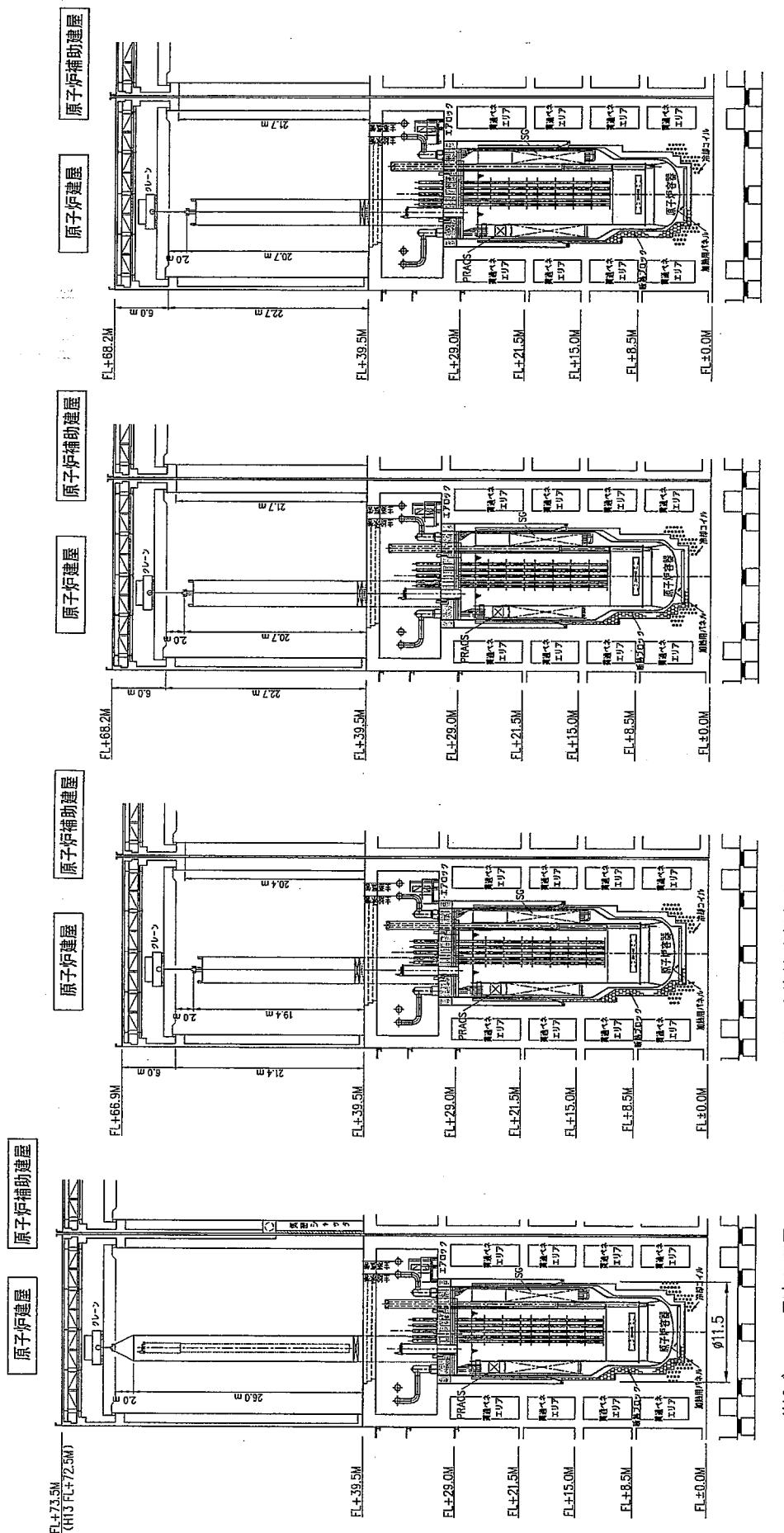


圖 8.1.1-4 燃料交換機伸縮・浮力活用方式（案 3）；自然循環爐

燃料出入設備構造





燃料交換機伸縮方式 (案3)

建屋全体容積 : 36.9万m³/6モジュール
1モジュール容積 : 6.2万m³
クリーン部容積 : 12.3万m³

燃料交換機伸縮方式 (案2)

建屋全体容積 : 36.9万m³/6モジュール
1モジュール容積 : 6.2万m³
クリーン部容積 : 12.3万m³

燃料交換機分割方式 (案1)

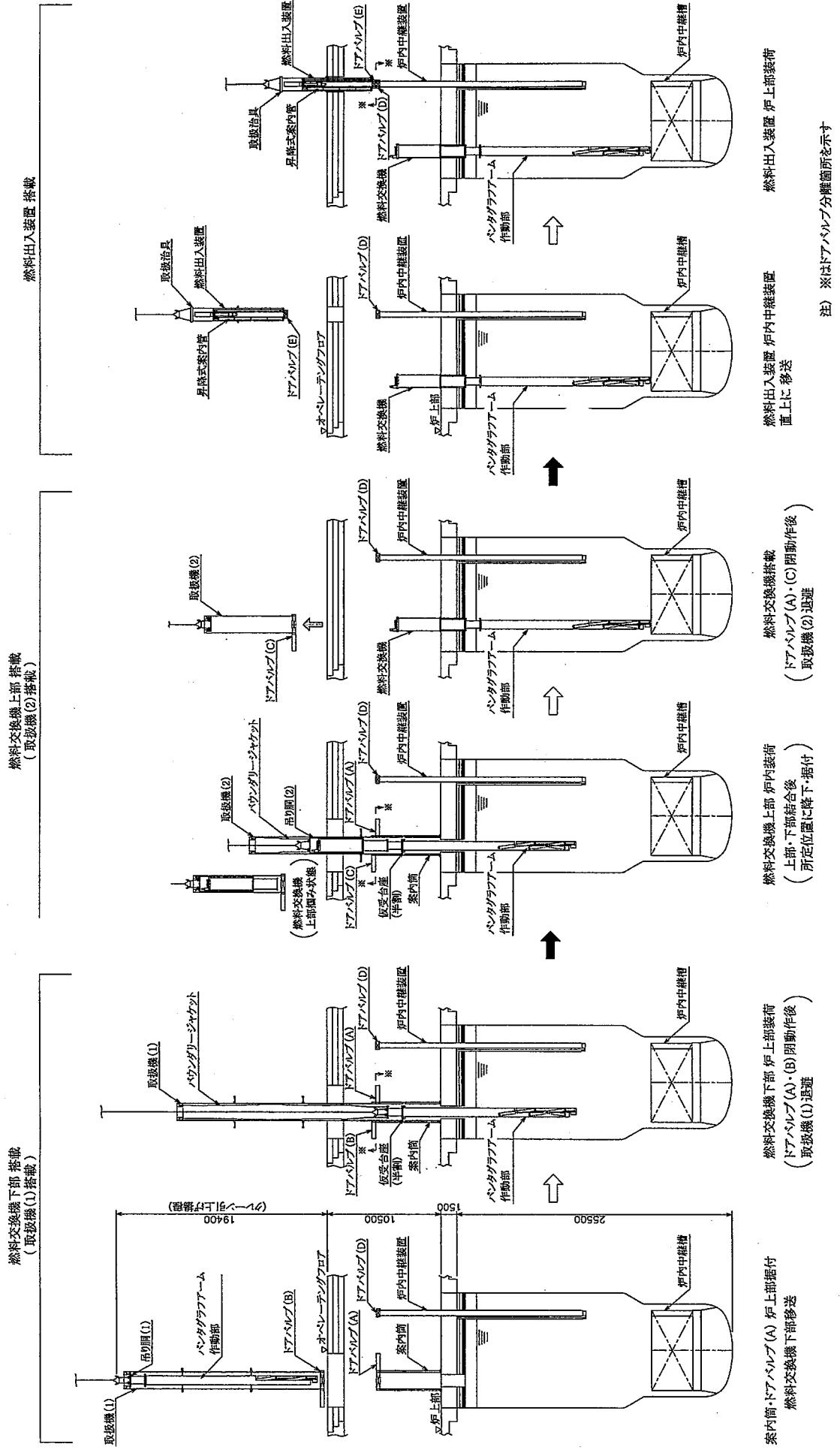
建屋全体容積 : 36.3万m³/6モジュール
1モジュール容積 : 6.1万m³
クリーン部容積 : 11.8万m³

H138-1での見直し配置

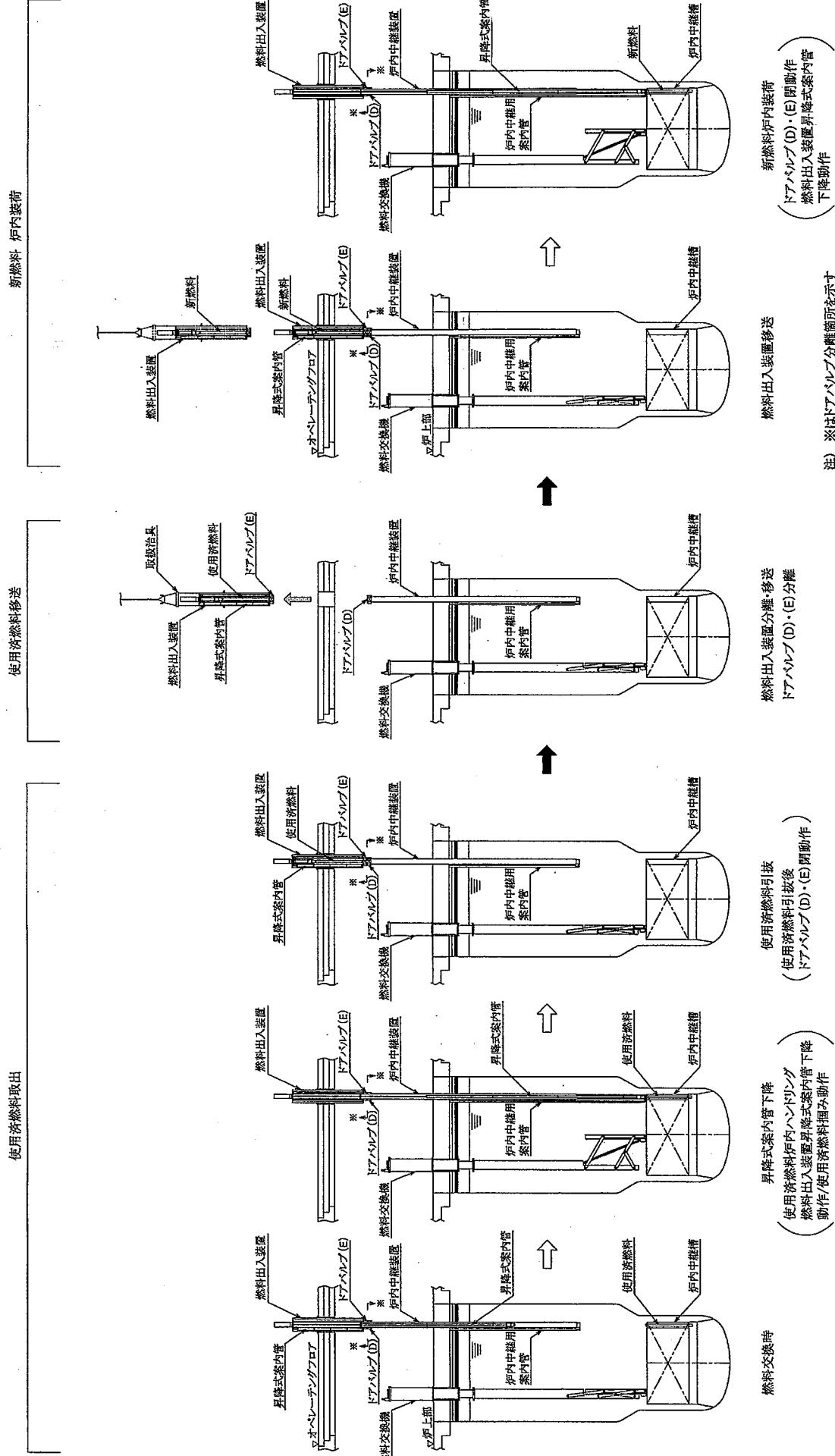
建屋全体容積 : 39.1万m³/6モジュール
1モジュール容積 : 6.5万m³
クリーン部容積 : 14.6万m³

図 8.1.1-6 燃料交換システムの小型化の効果 建屋容積比較 (自然循環炉)

本図は、燃料交換設備の短尺化の効果を示すもので、本年度の建屋計画は「配置の合理化」の項に示す。



四四 8.1.1.7 燃料交換手順 計画概念圖（手順1／前進備作業）：自然循環爐



8.1.1.2 強制循環炉の燃料交換システム

(1) 目的

強制循環炉の燃料交換機、燃料出入設備の寸法は、プラント建屋の大きさを決める主要な因子である。本稿では、以上を踏まえ燃料交換設備の短尺化について、可能性の検討を行う。

(2) 検討条件

- a. 対象とする強制循環炉の原子炉構造（立面図）を図 8.1.1-10 に示す。
- b. 燃料交換方式は、ナトリウム炉と同じ単回転プラグ＋コラム型 UIS＋パンタグラフ式 FHM。
- c. 燃料交換作業時の作業員被ばく対策が講じられ、安全かつ利便性のある構造システムとする。

なお、基本的な構成は自然循環炉と同じで、以下には、概要と変更のある点を中心に示す。

(3) 検討内容

a. 燃料交換設備の小型化方式のサーベイ検討

設備の短尺化及び建屋規模の縮小・合理化の候補概念として 3 案（燃料交換機分割方式、燃料交換機伸縮方式、燃料交換機伸縮・浮力活用方式）を抽出し検討した。

これらの基本的な構成は自然循環炉と同じであり、以下に構造図を示す。

- (a) 燃料交換機分割方式（案 1）；図 8.1.1-11
- (b) 燃料交換機伸縮方式（案 2）；図 8.1.1-12
- (c) 燃料交換機伸縮・浮力活用方式（案 3）；図 8.1.1-13

b. 施設配置による物量評価

燃料交換機の寸法の影響が大きい、オペフロ上の建屋容積の比較評価を実施した。設備側からの取り合い要求値を図 8.1.1-14 建屋側取合寸法図に示す。

各案の建屋容積比較図を図 8.1.1-15 に示す。比較図におけるクレーン部容積は、6 モジュールと補助建屋部を含むオペフロ上の建屋空間容積であり、建屋全容積の 30%以上を各案とも占めている。結果として平成 13 年度ベースに対して案 1 がクレーン部容積で 21%減、建屋全体で 7.2% の減、案 2 と案 3 では 7.4% と 2.7% の削減率となり、建屋容積上は案 1 が有利である。建屋容積以外の因子についても、短尺かつ小径に収まる案 1 方式の方が有利な結果となることから、経済性の観点からは案 1 が有利と言える。

(4) 燃料交換システム方式のサーベイ比較・評価

燃料交換システムの小型短尺化及び建屋合理化などを達成する各構造システム概念、システム構造、小型化達成概要、経済性効果などの比較評価を行った。これを表 8.1.1-2 に示す。

この結果、離脱部に開発要素は残るが、経済性の観点から、燃料交換機分割方式（案 1）の構造システムが最も優位性がある結論を得た。

(5) 燃料交換方法

上記(1)及び(2)項の燃料交換機及び燃料出入設備構造システム比較・評価結果に基づき、燃料交換方法については燃料交換機分割方式（案 1）にて設定した。燃料集合体の交換作業として前準備作業と燃料交換作業の大別 2 作業（手順 1、手順 2）がある。前準備作業（手順 1）は炉上部ルーフデッキ上に案内筒、ドアバルブ A・B、取扱機を積層配置構成し、内部に吊り胴を介して燃料交換機のパンタグラフアーム作動部及びアーム開閉駆動部を回転プラグに搭

載する。一方、燃料出入設備の前準備作業（手順 1）は炉上部ルーフデッキ上の炉内中継装置にドアバルブ A・B、取扱機を積層設置する。これらの一連の前準備作業（手順 1）後、燃料交換作業（手順 2）に移行し燃料集合体の交換を行う。

前準備作業として燃料交換設備の炉上部搭載手法などの手順、要領を時系列（代表モード）に燃料交換手順計画概念図（手順 1／前準備作業）図 8.1.1-16 に示す。また、使用済燃料取出し、新燃料炉内装荷などの手順、要領を時系列（代表モード）に燃料交換手順計画概念図（手順 2／燃料交換作業）図 8.1.1-17 に示す。

a. 燃料交換手順・要領（手順 1／前準備作業）

燃料交換作業に際し、前準備作業として行う手順・要領は以下による。

(a) 燃料交換機搭載；自然循環炉と同じであり、手順名称のみ以下に示す。

- ・手順 1：案内筒、ドアバルブ A 据付
- ・手順 2：ドアバルブ B、取扱機(1)据付
- ・手順 3：パンタグラフアーム作動部の炉上部移送
- ・手順 4：取扱機(2)据付
- ・手順 5：パンタグラフアーム駆動部の炉上部移送
- ・手順 6：パンタグラフアーム作動部と駆動部の結合
- ・手順 7：燃料交換機の炉内装荷
- ・手順その 8：取扱機(2)、案内筒の取出し

(b) 燃料出入装置搭載；自然循環炉と同じであり、手順名称のみ以下に示す。

- ・手順 1：燃料出入装置据付

b. 燃料交換手順・要領（手順 2／燃料交換作業）

使用済燃料取出し、新燃料炉内装荷などの手順、要領は以下によるものとする。

(a) 使用済燃料集合体取出し；自然循環炉と同じであり、手順名称のみ以下に示す。

- ・手順 1：燃料交換開始時
- ・手順 2：昇降式案内管の取付・結合操作
- ・手順 3：使用済燃料の取込み
- ・手順 4：使用済燃料移送

(b) 新燃料集合体炉内装荷；自然循環炉と同じであり、手順名称のみ以下に示す。

- ・手順 1：新燃料移送
- ・手順 2：新燃料炉内装荷

(6) カバーガスバウンダリについて

燃料出入設備のカバーガスバウンダリ構成図を図 8.1.1-18 に示す。本燃料出入設備は新規概念システムを構築設定したものであるが、鉛ビスマス冷却材及びカバーガス中の摺動部健全性などについては今後、開発検証が必要である。

(7) 結論

強制循環炉について、燃料交換設備の主要設備である燃料交換機分節構造システム及び台車方式を用いない燃料出入設備の燃料交換システムを構築した。燃料交換設備で高さを決める燃料交換機は分節構造システムの採用により約7.8m短尺小型化となった。この小型化は従来計画（平成13年度）の施設計画に対してクレーン部容積で21%（建屋全体では7.2%）の削減率となった。

(8) 今後の検討課題

強制循環炉の燃料交換設備の小型短尺化構築を、燃料交換機及び燃料出入設備を主体に検討し、優位性有る燃料交換設備概念を設定した。

今後は選択された概念について、以下の課題について検討を進める必要がある。

- ① 燃料交換機分節型（上下2分割）構造システムの構造具体化
- ② 燃料出入設備を含む燃料交換システムの最適化検討

表 8.1.1-2 強制循環炉 燃料交換システム小型化のサーベイ検討

燃料交換方式		燃料交換機分割方式(案1)	燃料交換機仙縮方式(案2)	燃料交換機仙縮・浮力活用方式(案3)
システム概要	燃料交換機 從來の燃料交換機を上下2分割で構成する構造とし、アーム開閉駆動部とパンタグラフアームの作動部に分離する構造とする。 燃料交換機搭載手順 ・手順1：天井クレーンにて炉上部ルーフデッキにパンタグラフアーム作動部を装荷し、パンタグラフアーム作動部を可定の位置に下降。 ・手順2：アーム開閉駆動部を装荷し、パンタグラフアーム作動部と接続する。 ・手順3：パンタグラフアーム作動部の仮受け台座を取り外し、所定の位置に装荷する。 燃料出入設備 炉内中縦管用案内管に燃料集合体上部の袖み装置(グリッパ)と案内管を接続し押入する。また昇降式案内管(馬蹄形状)は数珠繋ぎの反復操作をボルトにより機械で驱动させ、插入・引抜する構造システムとする。なお、案内管のストロークは炉内中縦管内管の上限位置とし、炉内中縦管への受渡しは昇降式案内管が機能する。	燃料交換機 従来の燃料交換機のアーム開閉駆動部とパンタグラフアーム作動部の中縦管部に仙縮機構を装着し、燃料交換機の張着時高さを短尺化する構造システムとする。 燃料交換機搭載手順 ・手順1：天井クレーンにて炉上部ルーフデッキの所定位置に預入する。 ・手順2：仙縮機構搭載手順 ・手順3：炉内中縦管に燃料集合体を受渡し時の要領は、炉上部ルーフデッキの回転台座を駆動。 燃料出入設備 燃料集合体上部の袖み装置(グリッパ)に仙縮機構を接続した案内管で構成し、仙縮機構の構造は台形ねじの回転動作にて3重化された筒部で構成する構造システムとする。 なお、仙縮機構の案内管ストロークは炉内中縦管上端部までとし、従来の昇降式案内管は廃置しない。	燃料交換機 システム概念は燃料交換機仙縮方式(案2)と同様であるが、炉内中縦管内管に沿って燃焼室表面まで浮上させ燃料を届ける手段として燃焼室システィムとする。 燃料集合体下部を仮置きするための連結管を炉から支持する構造物を設け燃料出入口設備のストロークを最短化する。	燃料交換機 システム概念は燃料交換機仙縮方式(案2)と同様であるが、炉内中縦管内管に沿って燃焼室表面まで浮上させ燃料を届ける手段として燃焼室システィムとする。 燃料集合体下部を仮置きするための連結管を炉から支持する構造物を設け燃料出入口設備のストロークを最短化する。
システム概念図	図 8.1.1-11	図 8.1.1-12	図 8.1.1-13	図 8.1.1-14
小型化達成要素	燃料交換機 炉上部装着時全高：21.26m 炉上部装着時全高：16.4m 燃料交換機 炉上部装着時全高：30.56m 炉上部装着時全高：8.0m 燃料出入設備 燃料交換機及び施設の物理評価 ・燃料交換機 約7.8m短尺化 ・グレーン部容積 21.0%削減 ・処屋全体容積 7.2%削減 ・処屋側取合寸法；図 8.1.1-14、延床容積比較図を図 8.1.1-15。 ・燃料交換機 従来の燃料交換機を上下2分割する方策は遠隔着脱性、気密性などの構造成立性に課題がある。 構造成立性 ・燃料集合体案内管の分割・切離し及び接続するための遠隔機器装置の具体化検討・開発が必要。	燃料交換機 炉上部装着時全高：21.26m 炉上部装着時全高：18.2m 燃料交換機 炉上部装着時全高：35.36m 炉上部装着時全高：12.8m 燃料交換機 約3.5m短尺化 ・グレーン部容積 7.4%削減 ・処屋全体容積 2.7%削減 ・処屋側取合寸法；図 8.1.1-14、延床容積比較図を図 8.1.1-15。 ・燃料交換機 従来の燃料交換機の炉火部に仙縮機構を装着する方策は、アーム開閉駆動部とパンタグラフアーム作動部を接続する駆動軸を仙縮機構と連動させる構造が多い。また1に比し仙縮機構を装着するため取扱機が大きくなるなどの不利な点も課題とする。 ・燃料出入設備 燃料集合体案内管に仙縮機構を装着した構造とするが、先端部に仙縮機構の構造成り、並びに仙縮機構の張着などに課題がある。 構造成立性 ・燃料集合体案内管に仙縮機構を装着するため取扱機が大きくなるなどの不利な点も課題とする。	燃料交換機 炉上部装着時全高：18.2m 燃料交換機 炉上部装着時全高：35.36m 炉上部装着時全高：12.8m 燃料交換機 約3.5m短尺化 ・グレーン部容積 7.4%削減 ・処屋全体容積 2.7%削減 ・処屋側取合寸法；図 8.1.1-14、延床容積比較図を図 8.1.1-15。 ・燃料交換機 従来の燃料交換機とパンタグラフアーム作動部を接続する駆動軸を仙縮機構と連動させる構造が多い。また1に比し仙縮機構を装着するため取扱機が大きくなるなどの不利な点も課題とする。 ・燃料出入設備 燃料集合体案内管に仙縮機構を装着した構造とするが、先端部に仙縮機構の構造成り、並びに仙縮機構の張着などに課題がある。	燃料交換機 炉上部装着時全高：21.26m 燃料交換機 炉上部装着時全高：18.2m 燃料交換機 炉上部装着時全高：35.36m 炉上部装着時全高：12.8m 燃料交換機 約3.5m短尺化 ・グレーン部容積 7.4%削減 ・処屋全体容積 2.7%削減 ・処屋側取合寸法；図 8.1.1-14、延床容積比較図を図 8.1.1-15。 ・燃料交換機 従来の燃料交換機とパンタグラフアーム作動部を接続する駆動軸を仙縮機構と連動させる構造が多い。また1に比し仙縮機構を装着するため取扱機が大きくなるなどの不利な点も課題とする。
評価	燃料集合体案内管が少なくて済む性質は大きい。	離脱部におけるが経済性向上は大きい。	浮力活用効果が少なくて済む性質は案2と同様。	浮力活用効果が少なくて済む性質は案2と同様。

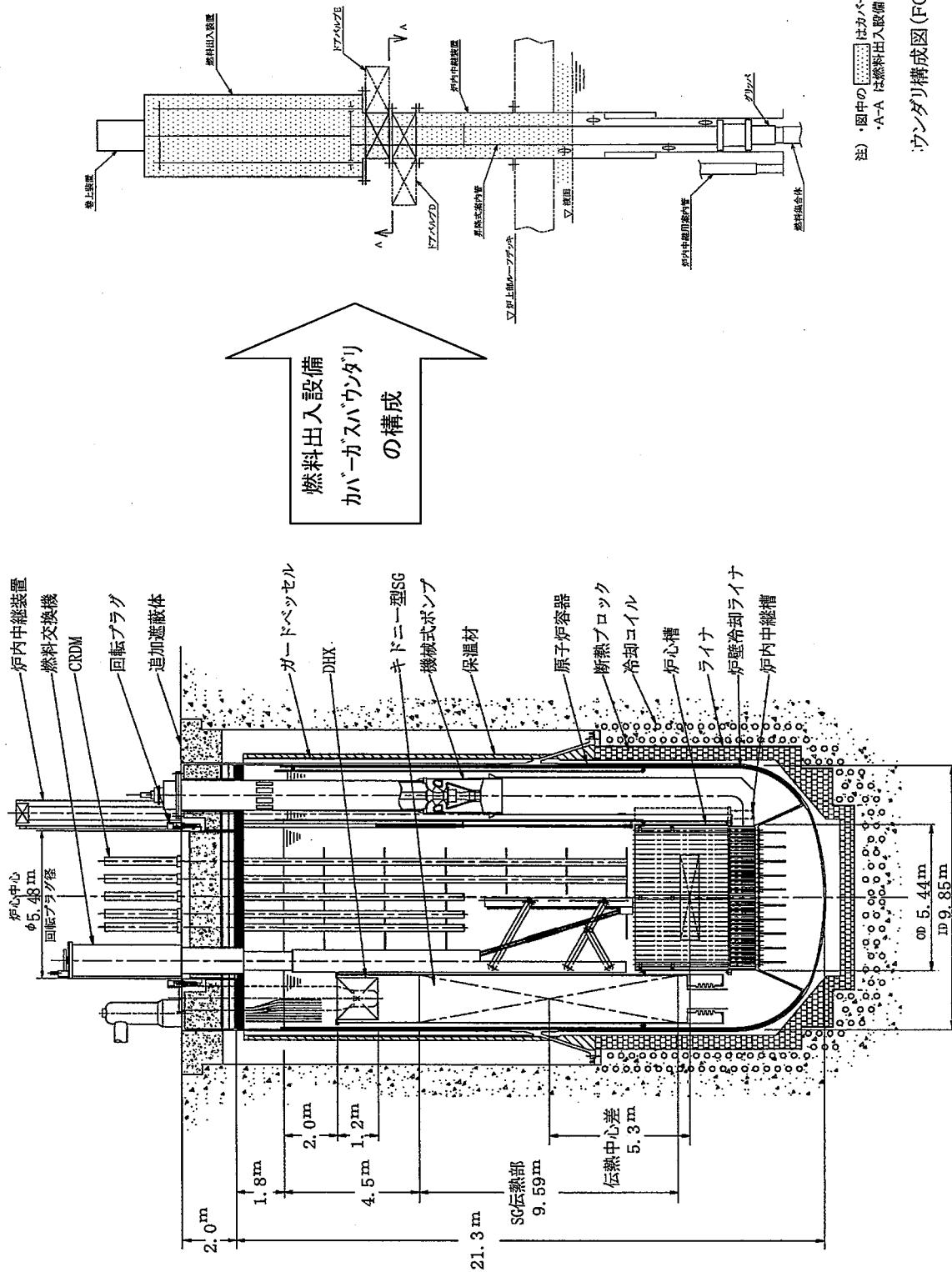


図 8.1.1-10 強制循環炉 原子炉構造と燃料出入設備力ハイガスバウンダリ一構成

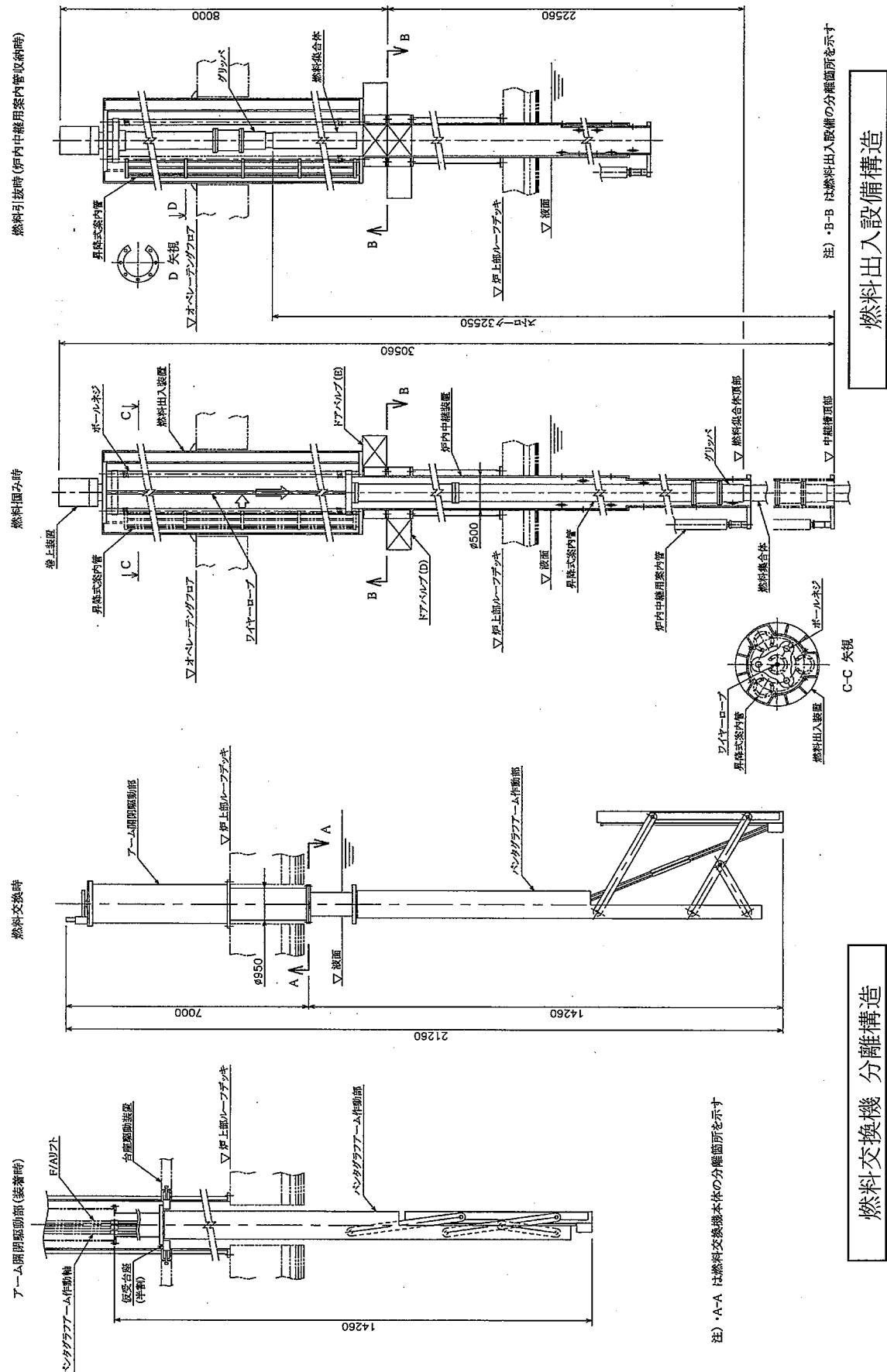


図 8.1.1-11 燃料交換機分割方式 (案 1) ; 強制循環炉

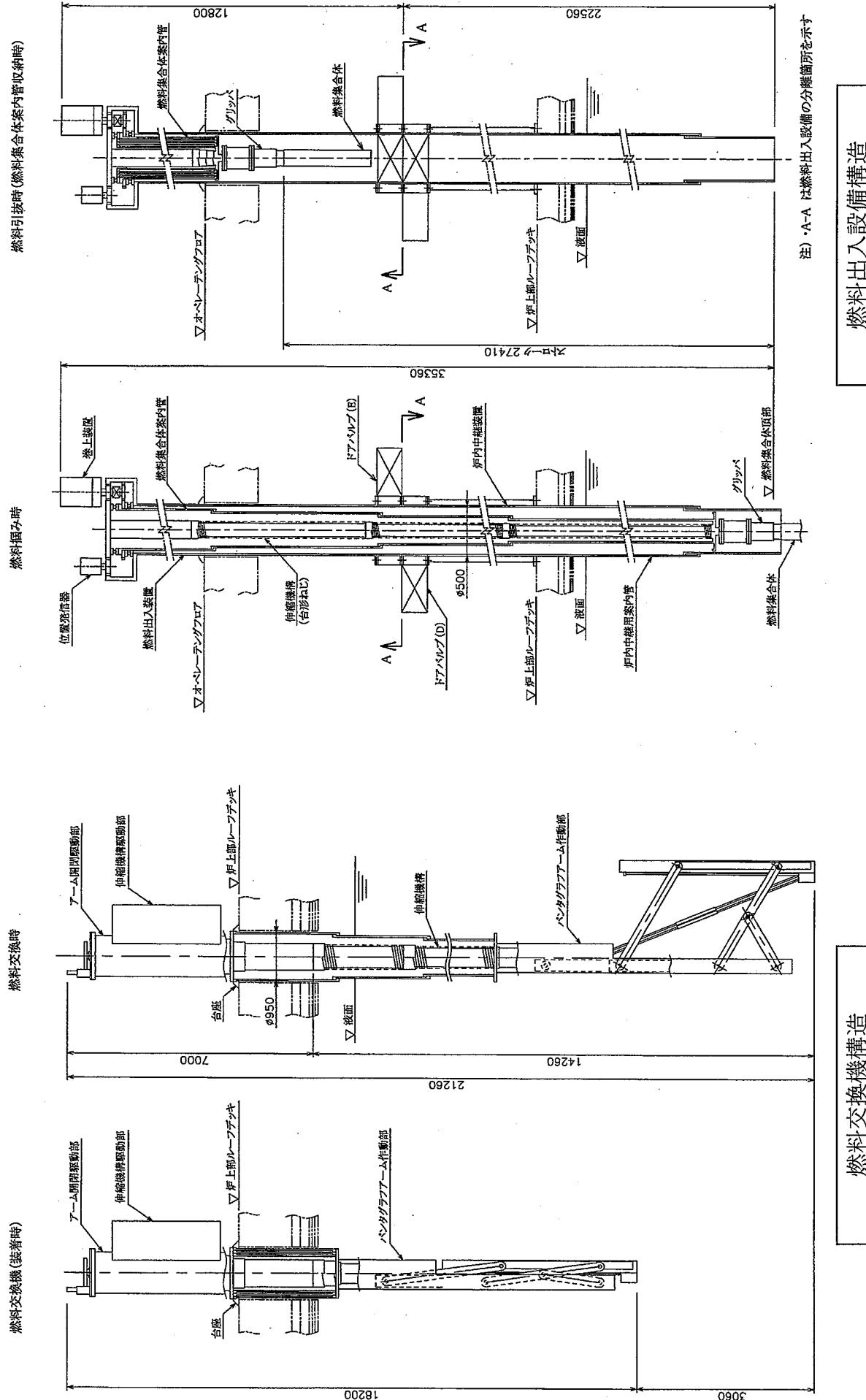


図 8.1.1-12 燃料交換機伸縮方式 (案2); 強制循環炉

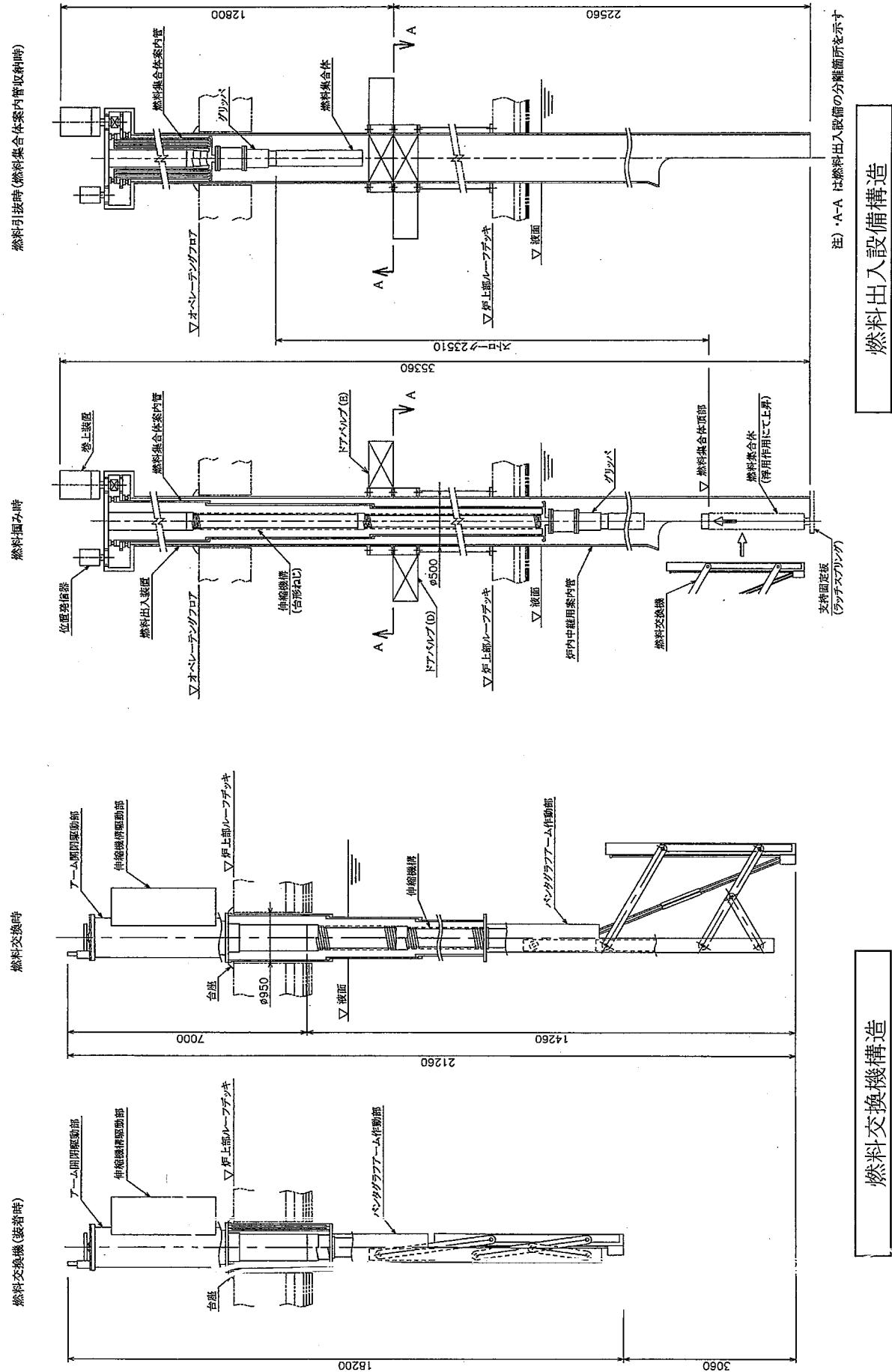
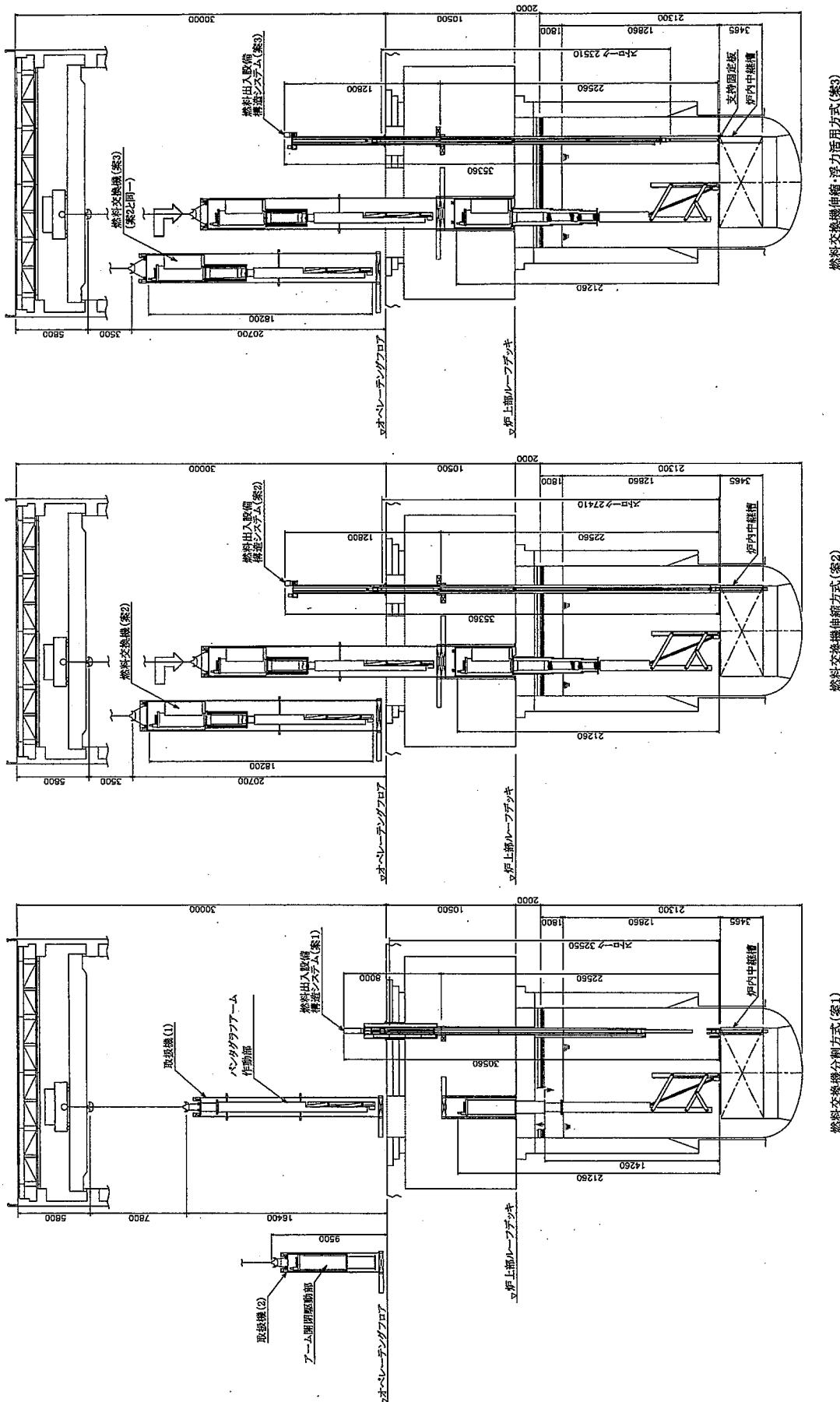


図 8.1.1-13 燃料交換機伸縮・浮力活用方式 (案3) ; 強制循環炉



燃料交換機伸縮方式(案1)

燃料交換機伸縮方式(案2)

図 8.1.1-14 燃料交換機と建屋の取合い寸法；強制循環炉

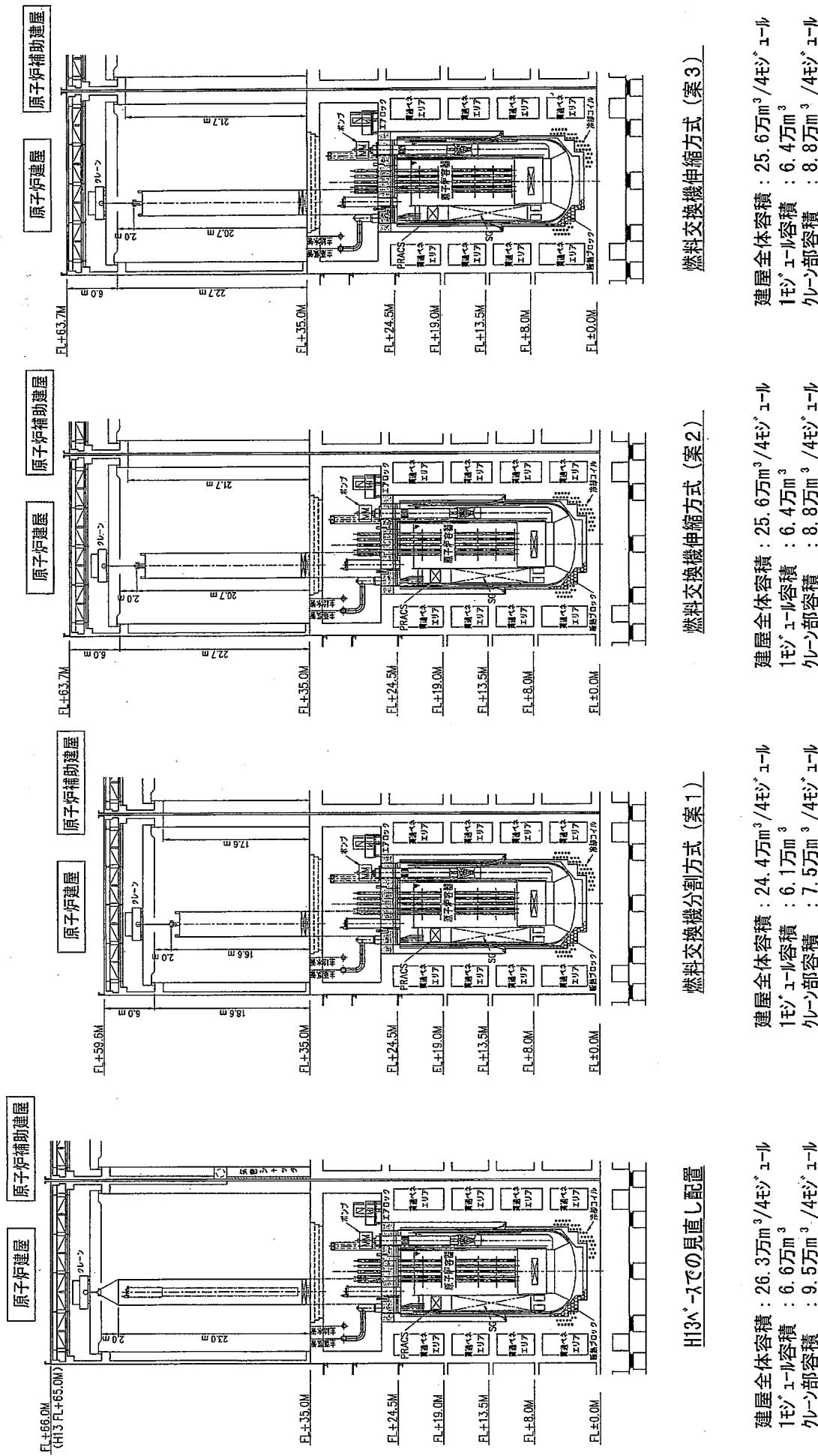


図 8.1.1-15 燃料交換設備の小型化の効果 建屋容積比較（強制循環炉）
本図は、燃料交換設備の短尺化の効果を示すもので、本年度の建屋計画は「配置の合理化」の項に示す。

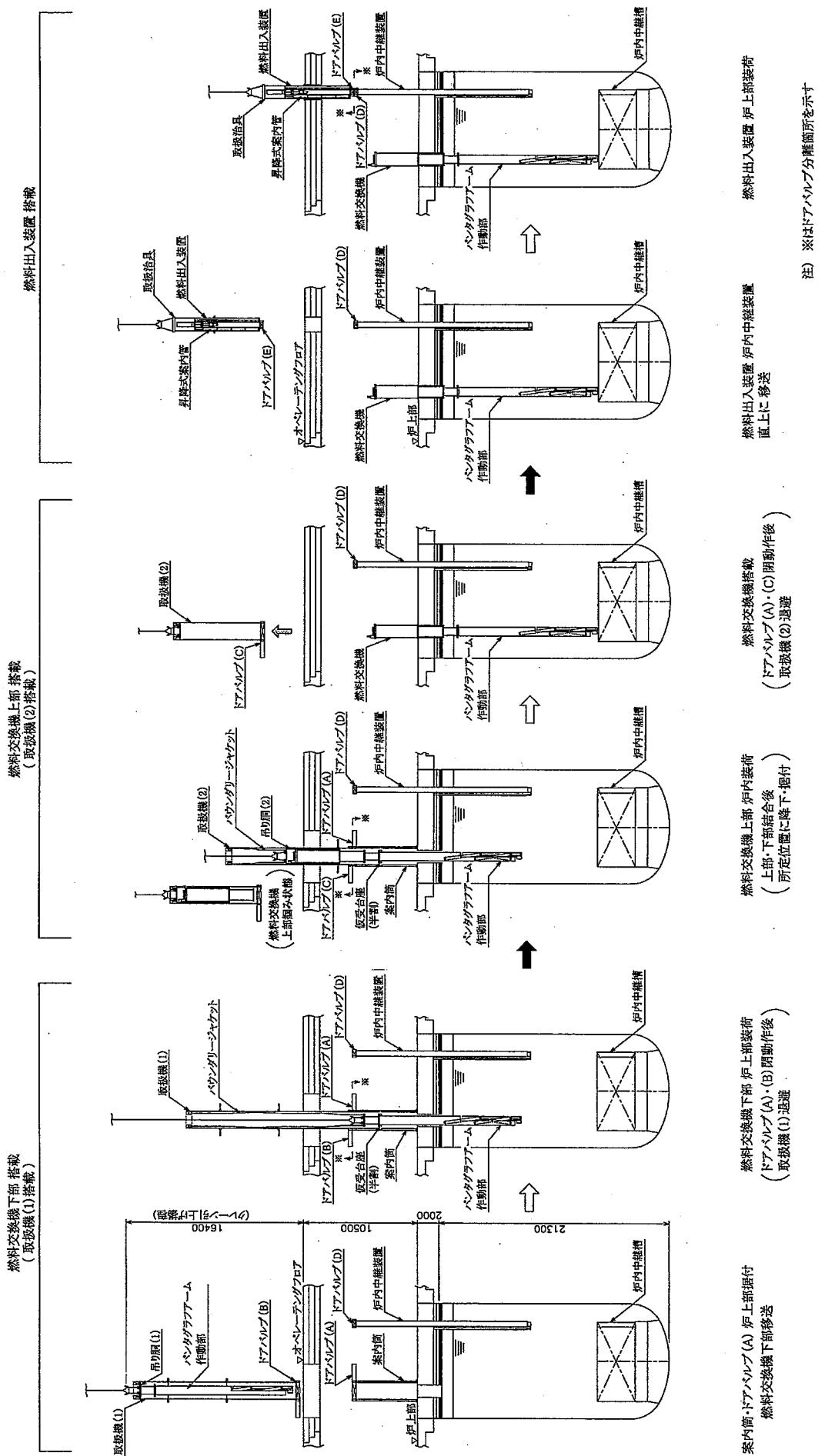
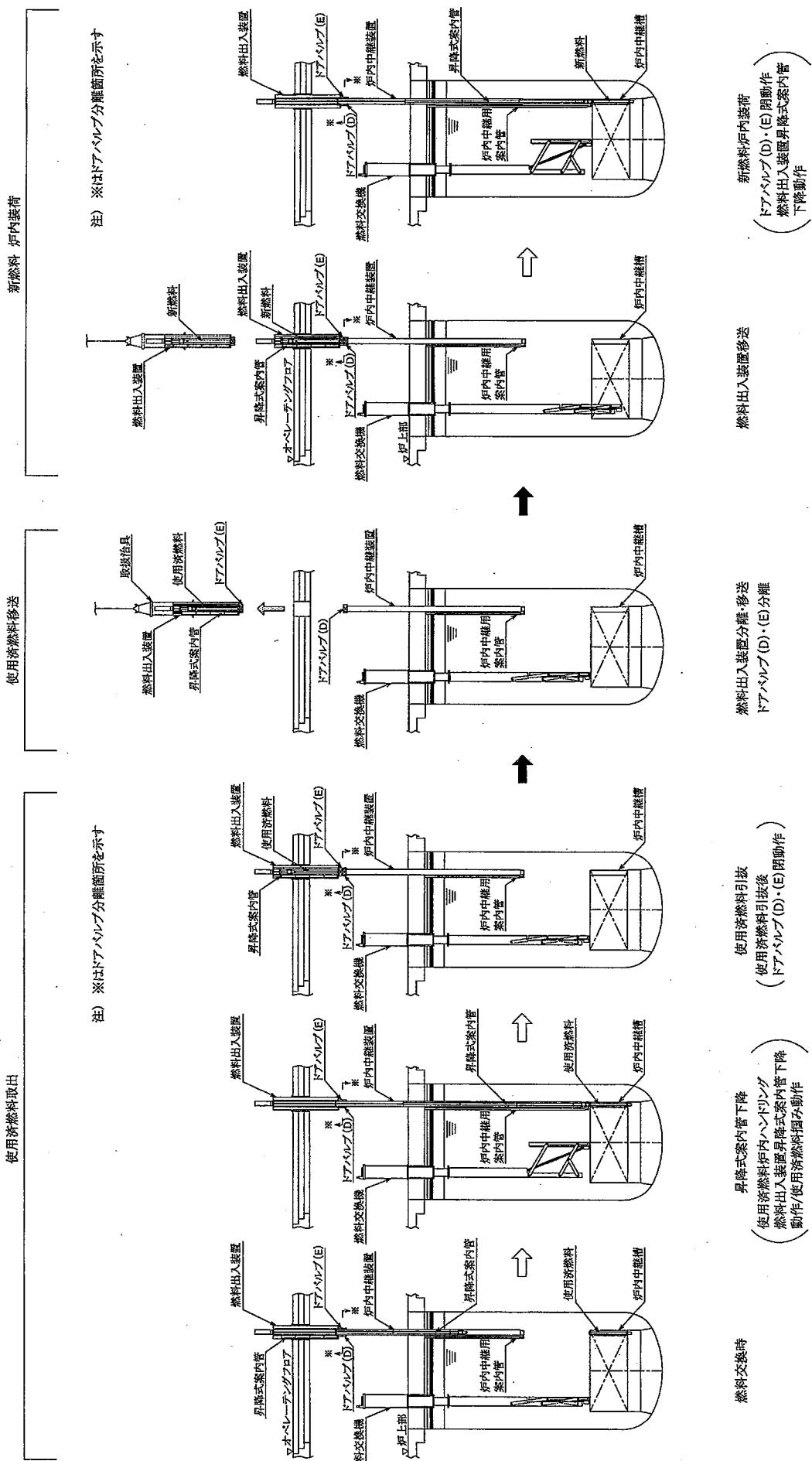


図 8.1.1-16 燃料交換手順計画概念図（手順 1／前準備作業）；強制循環炉



8.1.1-17 燃料交換手順 計画概念図 (手順2 / 燃料交換作業) ; 強制循環炉

8.1.2 廃棄物処理系統

(1) 目的

経済性評価用データ整備に資するため、想定する放射性廃棄物(気体、液体及び固体)の種類と処理設備容量の概算を、ナトリウム炉合理化検討を参考として行う。

(2) 検討条件

本プラントの廃棄物処理系統の概要は、以下のとおりである。

- ① 系統は、6モジュール炉(自然循環炉)及び4モジュール炉(強制循環炉)に対して、各々共有の設備とする。
- ② ナトリウム冷却中型モジュール炉(750MWe:4モジュール炉)における合理化検討結果を参考とする。
- ③ 気体廃棄物処理系は、原子炉カバーガス系、燃料取扱い・洗浄設備から排出される排気アルゴンガス中の放射性ガス(FP及びポロニウム)の濃度を低減させる。即ち、系統内のフィルタにより放射性ポロニウムを含む鉛ビスマスミスト・ダスト除去を先ず行い、次いで圧縮機によりタンクに圧縮貯蔵された後、活性炭吸着塔ホールドアップ装置に移送されて希ガス成分(キセノン及びクリプトン)の吸着・保持により放射能の減衰を図る。(図8.1.2-1参照)本系統は1系統設置とするが、フィルタ及び圧縮機は予備機を含めた2基構成(100%×2)とする。
- ④ 液体廃棄物処理系は、放射線管理区域内から発生する廃液を濃縮及び脱塩して放射能濃度を低減し、処理水は再使用する。即ち、共通補修洗浄設備、分析設備及び燃料取扱い設備などからの廃液や、機器(燃料プール水浄化設備、格納容器内空調設備など)ドレン水及び床ドレン水を収集タンクに集め、蒸発濃縮装置、次いで脱塩装置により放射性核種を除去する。上記系統は1系統設置とするが、収集タンクは予備機を含めた2基構成(100%×2)とする。

一方、洗濯廃液は、一旦専用のタンクに収集後、放射線モニタで監視しながら海洋に放出することとするが、処理する必要がある場合には上記の廃液収集タンクへと移送することとする。(図8.1.2-2参照)

- ⑤ 固体廃棄物処理系は、液体廃棄物処理系から移送される濃縮廃液をセメント固化する他、廃樹脂(液体廃棄物処理設備、燃料プール水浄化設備)の焼却及び雑固体物の減容を行う。即ち、濃縮廃液は貯槽に受け入れた後、インドラムミキシング式セメント固化装置で処理する。一方、各設備脱塩装置からの使用済樹脂は、貯槽に受け入れた後、焼却装置にて処理し、雑固体物は圧縮減容してドラム缶詰めとする。本系統は1系統設置とし、以上の処理済廃棄物は、サイト内の固体廃棄物貯蔵庫にて保管される。(図8.1.2-3参照)

(3) 検討内容

本プラントの各廃棄物処理量の概算を以下に示す。

a. NC炉(550MWe) 6モジュール炉構成プラントのケース

(a) 気体廃棄物

・連続処理量 : 2.2m³[normal]/h (以下に内訳を記す。)

① カバーガス法 FFD パージガス : 0.1m³/h/炉(*)

② 燃料取扱い設備 (燃料処理時) : 1.6m³/h/プラント(*)

$$\text{上記合計値 } 6 \times ① + ② = 0.6 + 1.6 = 2.2 \text{m}^3/\text{h}$$

・最大処理量 : 7.4m³[normal]/h (下記③項から設定。内訳を以下に記す)

① カバーガス法 FFD パージガス : 0.1m³/h/炉(*)

② 通常起動時排出カバーガス : 4.0m³/h/プラント(***)

$$\text{上記合計値 } 6 \times ① + ② = 0.6 + 4.0 = 4.6 \text{m}^3/\text{h}$$

または、

③ 炉停止後のメンテナンス直前の CG パージ(ポロニウム排出) :

$$176\text{m}^3/24\text{h} = 7.4 \text{m}^3/\text{h} (***)$$

(b) 液体廃棄物

・設備廃液処理量 : 1.3m³/h (定期検査時の機器洗浄作業などから設定。)

① 共通補修設備から : 182m³/20d=9.1m³/d(*)

② 分析設備 : 45m³/365d=0.12m³/d(*)

③ 機器・床ドレン : 192m³/31.5d=6.1m³/d(**)

以上の廃液受入れ量の合計値は、①+②+③=15.4m³/d である。そこで、処理量は設備稼働率を 0.5 (12h/d) として、15.4/12=1.3m³/h となる。

・洗濯廃液処理量 : 3.0m³/h

定期検査時受入れ量は、1125m³/31.5d=35.7m³/d(**) ゆえ、処理量は設備稼働率を 0.5 (12h/d) として、35.7/12=3.0m³/h となる。

(c) 固体廃棄物

・設備廃液処理量 : 2.8m³/年 (定期検査時の諸作業から設定。内訳を以下に記す)

6モジュール炉間で、重ならぬように順番に定期検査を実施する。

① 共通補修設備から : 182m³ × 6/1.5=728m³/y (****)

② 分析設備 : 45m³/y(*)

③ 燃料取扱い設備 : 156m³/y(*)

④ 使用済燃料貯蔵プール冷却水浄化系 : 10m³/y(*)

⑤ 液体・固体廃棄物処理設備 : 34m³/y(*)

⑥ 機器・床ドレン : 449m³ × 6/1.5=1796m³/y(**)

以上の合計値として、受入れ量は 2770m³/y となる。

ここで、濃縮倍率を軽水炉の例などを参考として 1000 と想定し、セメント固化すべき濃縮廃液容量は、2770/1000=2.8m³/y とする。

・廃樹脂（粒状）処理量 : 5.3m³/年 (6 モジュール炉として。内訳を以下に記す)

- ① 液体廃棄物処理系脱塩塔 : 0.4m³/y × 6/1.5=1.6m³/y (**)
 - ② 使用済燃料貯蔵プール冷却水浄化系脱塩塔 : 3.7m³/y プラント (*)
- 以上の合計値として、5.3m³/y となる。

b. 強制循環炉 4 モジュール炉構成プラントのケース

(a) 気体廃棄物

・連続処理量 : 6m³[normal]/h (内訳を以下に記す。)

- ① 1次主循環ポンプシールガス (2台分) : 0.5×2=1.0 m³/h/炉 (*)
- ② カバーガス法 FFD ページガス : 0.1m³/h/炉 (*)
- ③ 燃料取扱い設備 (燃料処理時) : 1.6m³/h/プラント (*)

$$\text{上記合計値 } 4 \times [(①+②)] + ③ = 4.4 + 1.6 = 6\text{m}^3/\text{h}$$

・最大処理量 : 7m³[normal]/h (内訳を以下に記す。)

- ① 1次主循環ポンプシールガス (2台分) : 1.0 m³/h/炉 (*)
- ② カバーガス法 FFD ページガス : 0.1m³/h/炉 (*)
- ③ 通常起動時排出カバーガス : 3.6m³/h/プラント (***)

$$\text{上記合計値 } 4 \times [(①+②)] + ③ = 4.4 + 3.6 = 7\text{m}^3/\text{h}$$

または、

- ④ 炉停止後のメンテナンス直前の CG ページ (ポロニウム排出) :

$$168\text{m}^3/24\text{h}=7\text{m}^3/\text{h} (***)$$

(b) 液体廃棄物

・設備廃液処理量 : 1.2m³/h (定期検査時の機器洗浄作業などから設定)

- ① 共通補修設備から : 182m³/20d=9.1m³/d (*)
- ② 分析設備 : 45m³/365d=0.12m³/d (*)
- ③ 機器・床ドレン : 192m³/36.5d=5.26m³/d (**)

以上の廃液受入れ量の合計値は、①+②+③=14.5m³/d である。そこで、処理量は設備稼働率を 0.5 (12h/d) として、14.5/12=1.2m³/h となる。

・洗濯廃液処理量 : 2.6m³/h

定期検査時受入れ量は、1125m³/31.5d=31m³/d (**) より、処理量は設備稼働率を 0.5 (12h/d) として、31/12=2.6m³/h となる。

(c) 固体廃棄物

・設備廃液処理量 : 2m³/年 (定期検査時の諸作業から設定。内訳を以下に記す。)

4 モジュール炉間で、重ならぬよう順番に定期検査を実施する。

- ① 共通補修設備 : 182m³ × 4/1.5=486m³/y (*)
- ② 分析設備 : 45m³/y (*)
- ③ 燃料取扱い設備 : 156m³/y (*)
- ④ 使用済燃料貯蔵プール冷却水浄化系 : 10m³/y (*)
- ⑤ 液体・固体廃棄物処理設備 : 34m³/y (*)
- ⑥ 機器・床ドレン : 449m³ × 4/1.5=1200m³/y (*)

以上の合計値として、受入れ量は 1930m³/y となる。

ここで、濃縮倍率を軽水炉の例などを参考として 1000 と想定し、セメント固化すべき濃縮廃液容量は、 $1930/1000=2\text{m}^3/\text{y}$ とする。

・廃樹脂(粒状)処理量 : $4.8\text{m}^3/\text{年}$ (4 モジュール炉として。内訳を以下に記す。)

① 液体廃棄物処理系脱塩塔 : $0.4\text{m}^3/\text{y} \times 4/1.5=1.1\text{m}^3/\text{y}$ (*)

② 使用済燃料貯蔵プール冷却水浄化系脱塩塔 : $3.7\text{m}^3/\text{y}$ (*)

以上の合計値として、 $4.8\text{m}^3/\text{y}$ となる。

(4)まとめ

廃棄物処理系統の設備構成を設定し、それぞれの基本系統図を作成するとともに想定する放射性廃棄物(気体、液体及び固体)量の推算を行った。

その結果を、表 8.1.2-1 に示す。

鉛ビスマス冷却材を使用する場合は、発生する放射性ポロニウムが鉛ビスマスと共に移行して、使用済燃料集合体や補修機器類の表面に付着すると考えられる点が、ナトリウム炉との違いである。従って、ポロニウムを除去するには、高温のガス吹き付けなどによる洗浄作業が必要であるが、除去温度及び除去率などの実験データがないため、ここではナトリウム炉と同じ処理量と仮定して算定している。

【注記】

(*) 平成 14 年度ナトリウム冷却中型モジュール炉(750MWe:4 モジュール炉)より。

(**) 中型炉-M750 データを基に、各々の炉の定期検査期間を考慮した。

(***) 鉛ビスマス炉として算出。

(****) 中型炉-M750 データを基に、モジュール炉の設置基数に比例。

表 8.1.2-1 放射性廃棄物処理系の設備容量

処理設備	種類	自然循環炉 (550MWe)	強制循環炉 (750MWe)
		6 モジュール炉 (2 ユニット) 分	4 モジュール炉 (2 ユニット) 分
気体廃棄物	連続処理ガス容量 [m ³ /h]	2.2	6
	最大受入容量 [m ³ /h]	7.4	7
液体廃棄物	廃液処理容量 [m ³ /h]	1.3	1.2
	洗濯廃液受入容量 [m ³ /h]	3.0	2.6
固体廃棄物	濃縮廃液処理容量 [m ³ /y]	2.8	2.0
	廃樹脂処理容量 [m ³ /y]	5.3	4.8

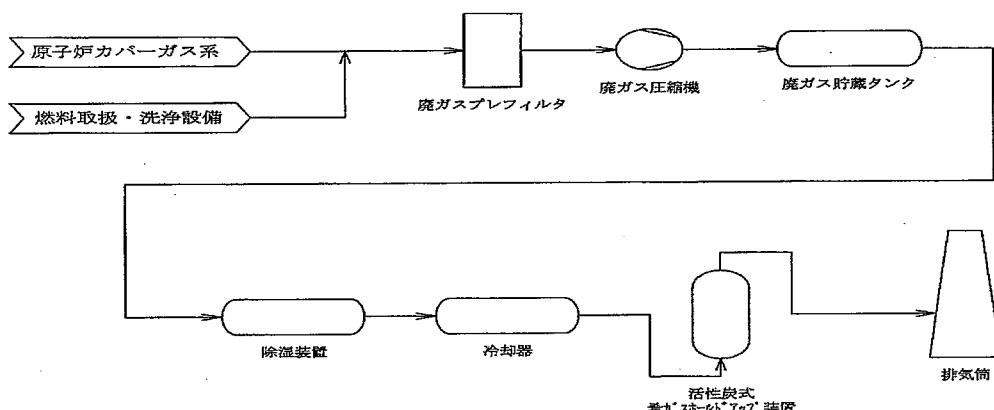


図 8.1.2-1 気体廃棄物処理設備 系統概念図

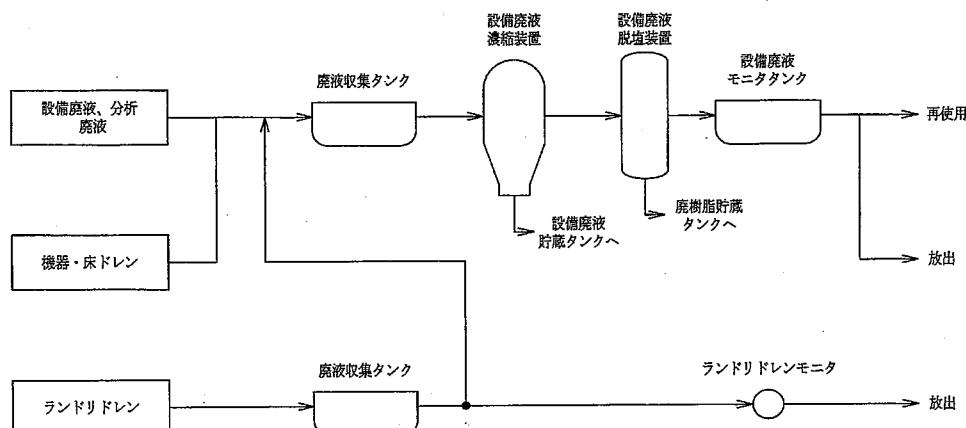


図 8.1.2-2 液体廃棄物処理設備 系統概念図

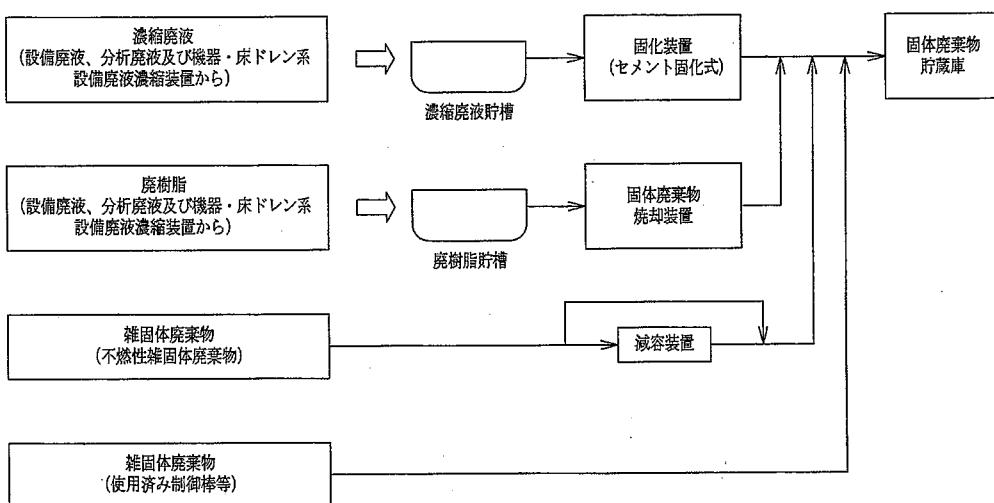


図 8.1.2-3 固体廃棄物処理設備 系統概念図

8.1.3 空調系統

(1) 目的

空調系統設備の設計風量の推算を、空調を必要とする設備と、換気のみでよい設備に区分し、ナトリウム炉の合理化検討を参考として行った。

(2) 検討条件

検討条件は、以下のとおりである。

- ① タンク型方式のため、SG、主循環ポンプなどを含む1次系機器は、原子炉容器内に設置される。原子炉容器室及び原子炉容器上部室は、ライナ付きの鉄骨コンクリート製格納容器内に配置され、外周はコンファインメントエリアである。
- ② 鉛ビスマス2次系機器は、崩壊熱除去系である独立3系統のPRACSの配管、空気冷却器及び付属するドレンタンクなどであり、格納容器外の隣接した原子炉建屋内部屋に設置される。一方、非常用空調冷水系の冷凍機、冷水ポンプ類及び制御用圧縮空気供給系設備なども原子炉建屋内に設置される。
- ③ 燃料取扱い設備、使用済燃料貯蔵プール、放射性廃棄物処理系設備は、6モジュール炉（自然循環炉）及び4モジュール炉（強制循環炉）の各々の共有設備として、隣接の原子炉補助建屋内に配置される。
- ④ 各モジュール炉の中央制御室関連設備は、複数のモジュール炉の共有設備としての隣接の制御建屋内に配置される。

以上の条件で、平成13年度ナトリウム冷却中型モジュール炉の換気空調設備合理化検討結果を参考とし系統構成を設定した。なお、原子炉冷却材が鉛ビスマスであるので、発生する放射性ポロニウム(Po210)に関する事項を付記した。

(3) 検討内容

a. 原子炉建屋関連

(a) 原子炉格納容器 空調系 (図8.1.3-1)

原子炉容器室、ルーフデッキ冷却系及び原子炉容器上部室は、1系統設置とするが、動的機器（空調ファン及びダンパ）は予備機を含めた2基構成(100%×2)とする。

原子炉カバーガス系は、通常運転時、放射性ポロニウムを含むため、格納容器(CV)内設置とし、プラント運転停止後に従業員がメンテナンスのためCV内に立ち入る際には、本空調系を運転して換気しポロニウム空間濃度の低減を図る。

なお、1次冷却系室は、タンク型なので存在しない。

(b) 原子炉建屋コンファインメントエリア 換気系 (図8.1.3-1)

ファン及びフィルタユニット構成は、2系統設置(50%×2)とする。事故時には負圧保持運転で、放射性物質(FP)及び放射性ポロニウムの外部放散を抑制する。

(c) 非常用ガス処理系 (事故時上記(b)項関連循環系) (図8.1.3-1)

1系統設置とするが、動的機器（排気ファン及びダンパ）は予備機を含めた2基構成(100%×2)とする。原子炉カバーガス系配管破損により、CV内にポロニウム及びFPが放出

された場合には、本系統の循環運転によりコンファインメントエリア内の空間濃度を低減する。

(d) 原子炉建屋 一般換気系

常用電気設備室空調系及び崩壊熱除去系（PRACS3 系統）室換気系を主対象とし、

ファン及びフィルタユニット構成は、2 系統設置（50%×2）とする。

なお、2 次主冷却系及び SG 室は、タンク型炉であるため存在しない。

b. 原子炉補助建屋関連

(a) 原子炉建屋管理区域 換気系 (図 8.1.3-2)

放射性廃棄物処理系（気体、液体及び固体）エリア及び放射線管理室を主対象とし、ファン及びフィルタユニット構成は、2 系統設置（50%×2）とする。

なお、プラント運転停止後に従業員が 1 次系機器メンテナンスで CV 内に立ち入る際、原子炉カバーガス中の放射性ポロニウム濃度低減のためページする必要がある時には、カバーガス系設置のポロニウム捕集ベーパトラップを通して浄化後、気体廃棄物処理系を介して、本換気系により希釈して排気塔から大気放散する。

c. 制御建屋関連

(a) 中央制御室 空調系

ファン及び空調ユニットは、予備機を含め 2 系統設置（100%×2）とし、循環系内には浄化フィルタユニットを設置（100%）する。事故時には、運転員の居住性確保なため、循環系により室内の空調とともに浄化を行う。

(b) 非常用電気設備 空調系

ファン及び空調ユニットは、予備機を含め 2 系統設置（100%×2）とする。

(c) ガスタービン発電機室 換気系

ガスタービン発電機室（A）及び（B）に対して、各々 1 系統の独立設置とする。

d. タービン建屋関連

(a) タービン建屋 換気系

タービン建屋、タービン発電機励磁制御室、常用電気盤室及び電気計装関係設備室を対象に、外気取り入れフィルタ及び給気ファンは 4 系統（25%×4）とする。

e. 燃却炉建屋関連； 燃却炉建屋 換気系

ファン、ダンバ及び排気フィルタユニットは、2 系統設置（50%×2）とする。

(4) まとめ

タンク型 1 次系システムである中型タンク式鉛一ビスマス冷却炉の換気空調設備の系統基本構成を空調設備を必要とする系統と換気設備のみでよい系統に区分し、各々の設計風量概算値をナトリウム冷却中型モジュール炉を参考に算出した。（表 8.1.3-1 及び表 8.1.3-2 参照）

更に、原子炉建屋及び原子炉補助建屋関連の主要な系統については系統図を作成し、系統構成を明確化した。（図 8.1.3-1 及び図 8.1.3-2 参照）

表 8.1.3-1 空調設備を必要とする系統

(設計風量 単位 m³/h)

対象エリア	設備名	自然循環炉(550MWe) 3 モジュール炉(1 ユニット分)	強制循環炉(750MWe) 2 モジュール炉(1 ユニット分)
原子炉建屋 原子炉格納容器	原子炉格納容器空調系	430,000 (***)	280,000 (***)
制御建屋	中央制御室空調系	45,000 (*)	30,000 (**)
制御建屋	非常用電気設備空調系	40,000 (*)	27,000 (**)
合 計		515,000	337,000

[注記]

(*) 平成 13 年度 Na 中型モジュール炉 (500MWe : 3 モジュール炉) による。

(**) モジュール炉の設置基数に比例。

(***) Na 中型炉 (500MWe) データより炉容器の放熱表面積及びモジュール炉の設置基数に比例。

表 8.1.3-2 換気設備のみでよい系統

(設計風量 単位 m³/h)

対象エリア	設備名	自然循環炉(550MWe) 3 モジュール炉(1 ユニット分)	強制循環炉(M750) 2 モジュール炉(1 ユニット分)
原子炉建屋コンファインメントエリア	原子炉建屋コンファインメントエリア換気系	35,000 (*)	25,000 (**)
原子炉建屋コンファインメントエリア	非常用ガス処理系	3,000 (*)	2,000 (**)
原子炉建屋及び制御建屋	原子炉建屋一般換気系	300,000 (****)	200,000 (****)
原子炉補助建屋	原子炉建屋管理区域 換気系	60,000 (*)	40,000 (**)
制御建屋	ガスタービン発電機室 換気系	115,000 (*)	115,000 (*)
タービン建屋	タービン建屋換気系	160,000 (*)	160,000 (*)
焼却炉建屋	焼却炉建屋換気系	13,000 (*)	13,000 (*)
合 計		686,000	555,000

[注記]

(*) 平成 13 年度 ナトリウム冷却中型モジュール炉 (M500:3 モジュール炉) による。

(**) モジュール炉の設置基数に比例。

(***) 中型炉-M500 データから、SG 室自然通風換気系を除外。

(****) 上記数値を基に、モジュール炉の設置基数に比例。

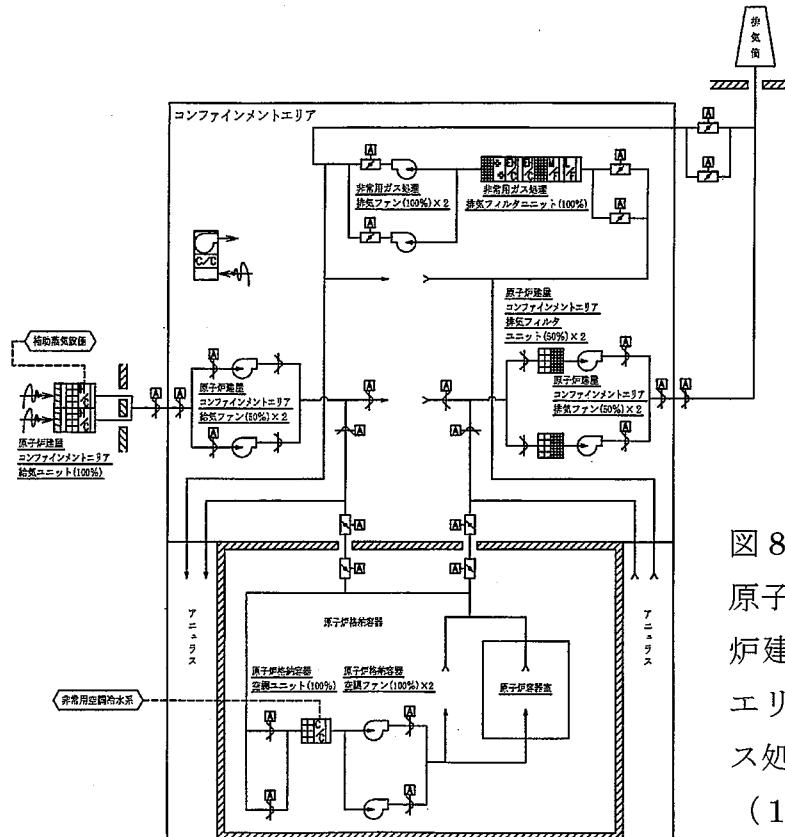


図 8.1.3-1 ;
原子炉格納容器空調系、原子
炉建物コンファインメント
エリア換気系及び非常用ガ
ス処理系 系統図
(1 モジュール分を示す。)

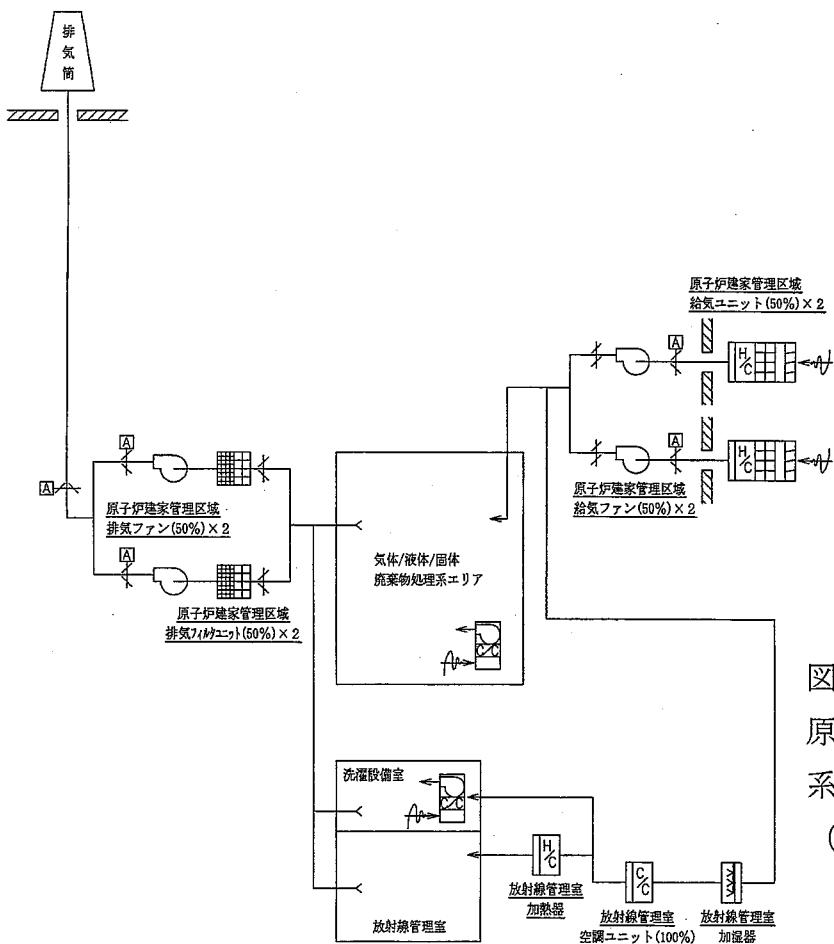


図 8.1.3-2
原子炉建物管理区域
系統図
(各モジュール共有)

8.1.4 配置の合理化

8.1.4.1 目的

自然循環方式及び強制循環方式の各々の建屋計画について、平成13年度の「中型タンク式鉛-ビスマス冷却炉プラント建屋計画」を基本とし、その後の機器設備設計の進捗の反映、および建屋のコンパクト化を目指した建物計画を行った。

8.1.4.2 検討方針・検討条件

(1) 自然循環炉/強制循環炉での共通事項

- ① 平成13年度に検討した建屋配置を基本とし、更にコンパクトな建屋とするよう合理化事項を摘出し、それらの合理化を建屋配置に反映する。
- ② 建設費低減の観点からモジュールプラントとし、習熟によるコスト低減、設備の共用化などによる物量の削減を取り入れた。また建設工期の短縮も狙う。
- ③ 建設工期の短縮並びに建設費低減の観点から、ナトリウム冷却炉のモジュールプラントと同様に大型ユニット工法を採用した。また、3次元免震建屋とする。

(2) 自然循環炉と強制循環炉の相違事項

a. プラント構成

(a) 自然循環炉

- ① 1ユニットは55万kWe /モジュール×3モジュール構成で、出力165万kWeとする。
- ② 1プラントは165万kWeユニットのツインプラントとする（合計出力330万kWe）。
- ③ タービン発電機は、1ユニットに165万kWe/ネット出力を1基設置とする。
- ④ 冷却系（鉛ビスマス）は、完全自然循環冷却方式とする。

(b) 強制循環炉

- ① 1ユニットは75万kWe /モジュール×2モジュール構成で、出力150万kWeとする。
- ② 1プラントは150万kWeユニットのツインプラントとする（合計出力300万kWe）。
- ③ タービン発電機は1ユニットに150万kWe出力を1基設置する。
- ④ 冷却系（鉛ビスマス）は強制循環方式とし、炉内に機械式循環ポンプを収納する。

b. 使用済燃料貯蔵プールの貯蔵容量

(a) 強制循環炉

貯蔵容量は、平成13年度設計と同様に1プラント(6モジュール)で5.5炉心分とする。(1炉心の燃料体数は計396体であり、5.5炉心分は計2,180体)

(b) 自然循環炉

貯蔵容量は、平成13年度設計と同様に4+3/7炉心分とする。(1炉心分の燃料体数は計634体であり、4+3/7炉心分は計2,770体)

c. 小型化燃料交換機の採用

本配置では、自然循環炉及び強制循環炉の各々に対して、第8.1.1項「燃料交換システムの小型化」で検討した案1を建屋配置計画に採用するものとする。

8.1.4.3 自然循環炉の配置検討

(1) 建屋合理化検討

平成 13 年度計画からの容積削減案を図 8.1.4.3-1 及び図 8.1.4.3-2 に示す。

- ① 前記の第 8.1.1 項「燃料交換システムの小型化」検討で自然循環炉用に選定された小型化燃料交換機（案 1）を採用することで建屋高さを低減し、建屋全体容積として約 23,600m³ 削減の可能性がある（図 8.1.4.3-1 中の①）。
 - ② 各モジュールの片側に全階層に渡って、階段室とアクセス通路を設けていたが、制御建屋側に配置されたモジュールは、制御建屋内の通路、階段を利用することで、#3、#4 モジュールの階段室エリアを削除することで、建屋全体容積として約 7,700m³ 削減の可能性がある（図 8.1.4.3-2 中の②）。
 - ③ 建屋のオペフロ部分の高さは、炉上部室の階高で決めているが、燃料出し入れの案内筒の高さを削減することで 1.5m 程度の低減が可能となり、建屋全体容積として約 6,000m³ 削減の可能性がある（図 8.1.4.3-1 中の③）。
 - ④ 炉容器室の炉容器下端部と上部基礎版の間に 2.5m の冷却コイルを埋設したコンクリート床を設けているが、冷却コイルスペースとしては、1.0m 程度あれば可能と暫定し、1.5m の削減を行う。この場合、建屋全体容積として約 10,800m³ 削減の可能性がある（図 8.1.4.3-1 中の④）。
 - ⑤ 平成 13 年度設計では、上部基礎版より上方の建屋躯体は、独立建屋として計画したが、建設工法上及び地震時のモジュール間の相互干渉を回避するため各モジュール間の建屋を一体化し、コンクリート物量の削減を図るとともに、建屋全体容積として約 9,900m³ 程度の削減を図る。（図 8.1.4.3-2 中の⑤）。
- 以上の 5 つの合理化案で全体容積として約 58,000m³ 程度の削減ができる見通しであり、本合理化案の反映と建屋配置の見直し検討を行った。この結果を以下に示す。

(2) プラント全体配置（プロットプラン：図 8.1.4.3-3）

- ① モジュールプラント全体配置は、2 ユニットの各 3 棟の原子炉建屋モジュールを燃取設備などを収容した原子炉補助建屋を挟んで対向する形で配置した。
- ② 主要な建屋は、原子炉建屋、補助建屋、制御建屋、タービン建屋である。上記建屋のうちタービン建屋を除く 3 つの建屋を“原子炉施設建屋”と総称する。その他の付属建屋・施設としては、開閉所、補助ボイラー建屋、取水・放水施設、固体廃棄物貯蔵庫、焼却炉及び事務建屋などがあり、システム上の相関と人の動線などを考慮した。図中には示していないが、その他に淡水供給建屋、排水処理建屋、不活性ガス供給施設及び非常用発電機用の燃料油タンクなどが設置される。
- ③ 2 ユニットのタービン建屋は、平成 13 年度設計ではユニット毎に分離し、原子炉施設建屋を挟む配置であったが、本設計では、原子炉施設建屋の制御建屋側に 2 ユニット分のタービン 2 基を直列に並べる配置とした。これは、建設時の大型ユニット工法を考慮し原子炉施設建屋廻りを極力空けること、及びタービン建屋を連結することで設備とスペースの共有化による合理化を狙ったものである。ただし、各モジュールとタービン間の水蒸気配管長さに相違を生じることがディメリットとなるが、システム設計で対応可能である。

(3) 原子炉施設建屋配置 (図 8.1.4.3-4 及び図 8.1.4.3-5)

原子炉建屋、原子炉補助建屋、制御建屋を含めた原子炉施設建屋の配置について前述の合理化を含めて配置見直し検討を行った。以下に配置概念を記載する。

a. 原子炉建屋

- ① 原子炉建屋モジュールは、通路部の有無の差で各建屋毎で異なる建屋寸法を有するものとなつたが、最大は 25m×31m×H64m である。1 モジュールの原子炉建屋には、NSSS 系として SG を内蔵したタンク型の炉容器、PRACS 空気冷却器の 3 系統分と鉛ビスマスのダンプタンク 1 基並びに水・蒸気系の再循環ラインの気水分離器と再循環ポンプなどが配置される。
- ② その他、原子炉建屋に収容する設備は、共用化が困難で各モジュールプラント毎に設置する方が望ましい設備類を配置する。例えば炉容器廻り空調設備とモジュール炉単体に付属する冷却・加熱設備類、並びに電気計装設備類を配置する。但し、これら設備の運転監視は制御建屋内の中央制御室で集中管理する。
- ③ 原子炉格納容器は、炉容器を支持する円筒形状の生体遮へい壁部分と炉上部室の八角形状の部屋を格納容器バウンダリとした鉄骨コンクリート製格納容器とした。コンクリート内側には、気密性確保のため鋼板製ライナを内貼りする。
- ④ PRACS の空気冷却器 3 基は、炉上部室に隣接して配置した。鉛ビスマスドレンタンク室は PRACS 空気冷却器 3 室の下階の部屋に配置し、比重の大きい鉛ビスマスの充填時の空気冷却器とのレベル差を極力小さくした。
- ⑤ 平成 13 年度設計では、原子炉施設建屋の上部基礎版は、補助建屋、制御建屋を含め物量削減の観点から格子梁構造としていたが、適用範囲が少なく施工の手間がかかること、また上部基礎版を大型ユニットの一部に組込み、上部基礎版を鉄骨トラス構造として工場製作し、輸送・現地据え付けまでのユニットの支持構造物とすることから、鉄筋を格子梁状態で組み込む基礎版形状では輸送時の支持構造体として難点があり、ベタ基礎として計画した。
- ⑥ 原子炉建屋部分の建屋容積は、6 モジュール全体で約 21.6 万 m³ であり、1 ユニット(3 モジュール 165 万 kW_e) 分で 10.8 万 m³ である。

(b) 原子炉補助建屋

- ① 原子炉補助建屋は 18m×70.5m×H64m で、2 ユニットの原子炉建屋モジュールに挟まれた細長い建屋である。各モジュールで共有できるホット設備である燃料取扱い・貯蔵設備、廃棄物処理設備、補修設備などを収容した。
- ② 燃料交換時の燃料移送は、ナトリウム中型炉で計画している高性能・軽量小型化を目指した新型燃料出入機で計画した。その新型燃料出入機がユニット 1 と 2 の間の燃料移送通路を経由して、各原子炉モジュールにアクセスできるように計画した。このため燃料交換時期を各モジュールでずらすことにより燃料出入機は、2 ユニット 6 モジュールで共用化が可能である。新燃料・使用済燃料の移送の流れは、洗浄方式などは異なるが、ナトリウム中型炉を参考に暫定した。
- ③ 燃料移送通路の下部室には、各原子炉モジュールに必要な設備類の他に補助建屋と各モジュールを接続する配管類、ケーブル類の通路を確保した。

④ 本プラントは、モジュール化の特徴を生かし、ナトリウム中型炉と同様に建設工期短縮を図るため建屋躯体は、輸送の可能範囲内で建屋構造体並びに機器類を組み込んだ状態で工場製作し、設備類を組み込んだ大型ユニットとして一体で海上搬送され建設サイトに据え付けられるものとした。

⑤ 原子炉補助建屋の容積は、6 モジュール分の共有建屋で約 7.9 万 m^3 、1 ユニット分(3 モジュール 165 万 kW_e) とすると約 4 万 m^3 である。

(c) 制御建屋（共有建屋）

① 制御建屋は 19.5m×65m×H26m で中央制御室、燃取操作室、電気計装設備、HVAC 設備、放射線管理室、出入り管理室、非常用発電機室などを配置した。中央制御室配置などはナトリウム中型炉を参考に見直しを図った。

② 制御建屋もモジュールによるユニット工法で建設するが、建屋構造体としては、原子炉建屋及び補助建屋と上部基礎版を含め一体の免震建屋とした。

③ 制御建屋の容積は、6 モジュール分の共有建屋で約 3.5 万 m^3 で、1 ユニット (3 モジュール 165 万 kW_e) 分とすると約 1.8 万 m^3 である。

(4) 検討結果

① 平成 13 年度の建屋配置をベースに配置上からの合理化できる事項を抽出検討し、それらを反映した自然循環炉の合理化建屋配置を構築することができた。

② 建屋容積は、2 ユニット (330 万 kW_e) 分で約 32.9 万 m^3 (平成 13 年度は約 37 万 m^3)、1 ユニット (165 万 kW_e) 分で約 16.5 万 m^3 (平成 13 年度は約 18.5 万 m^3) となった。

③ モジュール#3、#6 の階段室エリア削除案は、各モジュールで異なるアクセスルートとなる。緊急時対応で混乱が想定される場合は、この合理化案が採用できず、建屋容積は 2 ユニットで約 34.3 万 m^3 、1 ユニットで約 17.2 万 m^3 となる。

8.1.4.4 強制循環炉の配置検討

強制循環炉の配置検討についても、自然循環炉と同様に、建屋容積削減のための合理化検討と各施設ごとの建屋配置を検討した、その結果を以下に示す。

(1) 建屋合理化検討

平成 13 年度の建屋配置からの合理化事項を図 8.1.4.4-1 及び図 8.1.4.4-2 に示す。合理化事項は、前述の自然循環炉と同様で、以下のとおりである。

① 前記の「燃料交換システムの小型化」検討で強制循環炉用に選定された小型化燃料交換機（案 1）を採用することで建屋高さを低減し、建屋全体容積として約 16,800m³ 削減の可能性がある（図中の①）。

② 各モジュールの片側に階段室とアクセス通路の両方を設けていたが、制御建屋側のモジュールの階段室エリアを削除することで、建屋全体容積として約 6,800m³ 削減の可能性がある（図中の②）。

③ 建屋のオペフロ部分の高さを自然循環炉と同じ考え方で約 1.5m 削減することで、建屋全体容積として約 4,600m³ 削減の可能性がある（図中の③で示す）。

④ 炉容器室下端部の冷却コイルスペース(1.5m)を1.0m程度にし、0.5mの削減をすると、建屋全体容積として約2,700m³削減の可能性がある(図中の④)。

⑤ 自然循環炉と同様の観点で、上部基礎版より上方の建屋躯体を、一体化構造とすることで、建屋全体容積として約3,100m³削減の可能性がある(図中の⑤)。

以上の5つの合理化案により全体容積で約34,000m³程度の削減が可能であり、本合理化案の反映と、建屋配置の見直し検討を行った。以下に検討の結果を示す。

(2) プラント全体配置(プロットプラン;図8.1.4.4-3)

① 強制循環炉のプラント全体配置は、自然循環炉と基本的に同じである。

② タービン建屋配置も、建設工法上とタービン施設の合理化の観点から、制御建屋側にタービン発電機2基を一列に並べた。自然循環炉の場合は、1ユニット3モジュールでタービン建屋間の水蒸気配管の長さが3モジュール間で相違するが、強制循環炉の場合、2モジュールであり、配管長さの差は小さくなる。

(3) 原子炉施設建屋配置(図8.1.4.4-4及び図8.1.4.4-5)

原子炉建屋、原子炉補助建屋、制御建屋を含めた原子炉施設建屋の配置について前述の合理化を含めて配置見直し検討を行った。以下に配置概念を記載する。

a. 原子炉建屋

① 原子炉建屋はモジュール毎に寸法の差があるが、最大は25m×31m×H57.5mである。1モジュールの原子炉建屋には、NSSS系として蒸気発生器及び機械式循環ポンプを内蔵したタンク型炉容器、PRACS空気冷却器(3系統)、鉛ビスマスダンプタンク(1基)、水・蒸気系再循環系の気水分離器、再循環ポンプなどを配置する。

② その他、原子炉建屋には、共用化が困難で各モジュールプラント毎に設置する方が望ましい設備類を配置する。例えば炉容器廻り空調設備とモジュール炉単体に付属する冷却・加熱設備類、並びに電気計装設備類を配置する。これら設備の運転監視は、自然循環炉と同様、制御建屋内の中央制御室で集中管理する。

③ 原子炉格納容器は自然循環炉と同様に、炉容器を支持する円筒形状の生体遮へい壁部分と炉上部室の八角形状の部屋を格納容器バウンダリとして設定し、コンクリート内側には、気密性確保のための鋼板製ライナを内貼りする。

④ PRACSの空気冷却器3基は、自然循環炉と同様に、炉上部室に隣接して配置するとともに、下階の部屋に鉛ビスマスドレンタンク室を配置した。

⑤ 原子炉建屋部分の建屋容積は、4モジュール全体で約12.6万m³であり、1ユニット(2モジュール150万kWe)分で約6.3万m³である。

b. 原子炉補助建屋

① 原子炉補助建屋寸法は20.5m×59m×H57.5mであり、建屋内には、自然循環炉と同様に各モジュールで共有する燃料取扱い/貯蔵設備などが配置される。

② 燃料交換時の燃料移送方法についても、モジュール数の相違など若干の違い(水プールの貯蔵本数の相違など)があるが、自然循環炉とほぼ同じ。

③ 燃料移送通路の下階室に、制御建屋と補助建屋及び各原子炉建屋モジュール間を連絡する通路を兼ねた配管類、ケーブル類の引き廻し空間を確保した。

- ④ 本プラントも自然循環炉と同様、ユニット工法を採用して計画した。
- ⑤ 原子炉補助建屋の容積は、4 モジュール分の共有建屋で約 6.9 万 m³ で、1 ユニット (2 モジュール 150 万 kW) 分とすると約 3.5 万 m³ である。

c. 制御建屋（共有建屋）

- ① 制御建屋は 19.5m × 61m × H26m で、2 ユニット 4 モジュール分の中央制御室、燃取り操作室、電気計装設備室、HVAC 設備室、放射線管理室、出入り管理室、ガスタービン発電機室などを配置した。制御建屋も自然循環炉と同様、免震建屋とする。
- ② なお、建屋寸法は、自然循環炉とは、モジュール数の相違による制御盤数、系統分離による部屋数などの違いから若干であるが建屋の縮小を図った。
- ③ 制御建屋の容積は、4 モジュール分の共有建屋で約 3.1 万 m³ で、1 ユニット (2 モジュール 150 万 kW) 分とすると約 1.6 万 m³ である。

(4) 検討結果

- ① 平成 13 年度の建屋配置を基本に配置上から合理化できる事項を抽出検討し、それらを反映した強制循環炉の合理化建屋配置を構築した。
- ② 建屋容積は、2 ユニット (300 万 kW) 分で約 22.6 万 m³ (平成 13 年度は約 24.8 万 m³)、1 ユニット (165 万 kW) 分で約 11.3 万 m³ (平成 13 年度は約 12.4 万 m³) となった。
- ③ モジュール #2、#4 の階段室エリア削除案は、各モジュールで異なるアクセスルートとなる。緊急時対応で混乱の原因と推定される場合は、この案は採用できず上記建屋容積は、2 ユニットで約 23.7 万 m³、1 ユニットで約 11.9 万 m³ となる。

8.1.4.5 まとめ

自然循環炉と強制循環炉について、プラント配置上の比較をすると以下となる。

- ① 炉容器の径と高さは、強制循環炉 ID 9.85m/H 21.3m、自然循環炉 ID 10.1m/H 25.5m であり、原子炉建屋の平面寸法は、炉容器径を含む機器類に大きな差がなく差は小さい。しかし、高さは自然循環炉の炉容器高さが大きく、燃料交換機器類の長尺化、天井クレーン吊り上げ高さの増加から建屋高さが大きくなっている。
- ② 原子炉建屋モジュールに挟まれた原子炉補助建屋については、自然循環炉が 6 モジュールで、強制循環炉が 4 モジュールであり、強制循環炉は、補助建屋との接線長さが短いため、補助建屋の幅を拡大し、かつ原子炉建屋モジュールから突出した形で水プールを含む燃取施設などを収容した。
- ③ 制御建屋には、電気計測制御設備が主として設置される。自然循環炉はモジュール数が多く原子炉間分離、系統分離を必要とすることから制御建屋寸法を強制循環炉より、大き目に設定した。
- ④ 表 8.1.4.5-1 に両方式の建屋容積を整理した。自然循環炉と強制循環炉を比較した場合、自然循環炉が原子炉の長尺化、燃料交換機の引抜き高さなどにより、建屋高さが大きいため、建屋容積が増加傾向となっている。このため 1 モジュール当たりで比較した場合、出力比の差ほど容積に差が出ない結果となっている。

表 8.1.4.5-1 中型タンク式 鉛ビスマス冷却炉 建屋容積一覧

プラント形式	モジュール出力	1ユニット	1ユニット当たりの建屋容積	1モジュール当たりの建屋容積
平成 13 年自然循環炉 165 万 kW _e	55 万 kW _e 165 万 kW _e	3 モジュール 165 万 kW _e	(18.5 万 m ³) * 19.6 万 m ³	(6.2 万 m ³) * 6.5 万 m ³
平成 14 年自然循環炉 165 万 kW _e	55 万 kW _e 165 万 kW _e	3 モジュール 165 万 kW _e	16.5 万 m ³ (17.2 万 m ³)**	5.5 万 m ³ (5.7 万 m ³)**
平成 13 年強制循環炉 150 万 kW _e	75 万 kW _e 150 万 kW _e	2 モジュール 150 万 kW _e	(12.4 万 m ³) * 13.2 万 m ³	(6.2 万 m ³) * 6.6 万 m ³
平成 14 年強制循環炉 150 万 kW _e	75 万 kW _e 150 万 kW _e	2 モジュール 150 万 kW _e	11.3 万 m ³ (11.9 万 m ³)**	5.7 万 m ³ (6.0 万 m ³)**

* () 内数値は、平成 13 年度報告書の記載数値、() なし数値が、今年度クレーン吊り代の条件を統一するために見直した数値である。

** () 内数値は、合理化項目のうち、原子炉建屋モジュールの制御建屋側の階段室エリアを削除しない場合の建屋容積である。

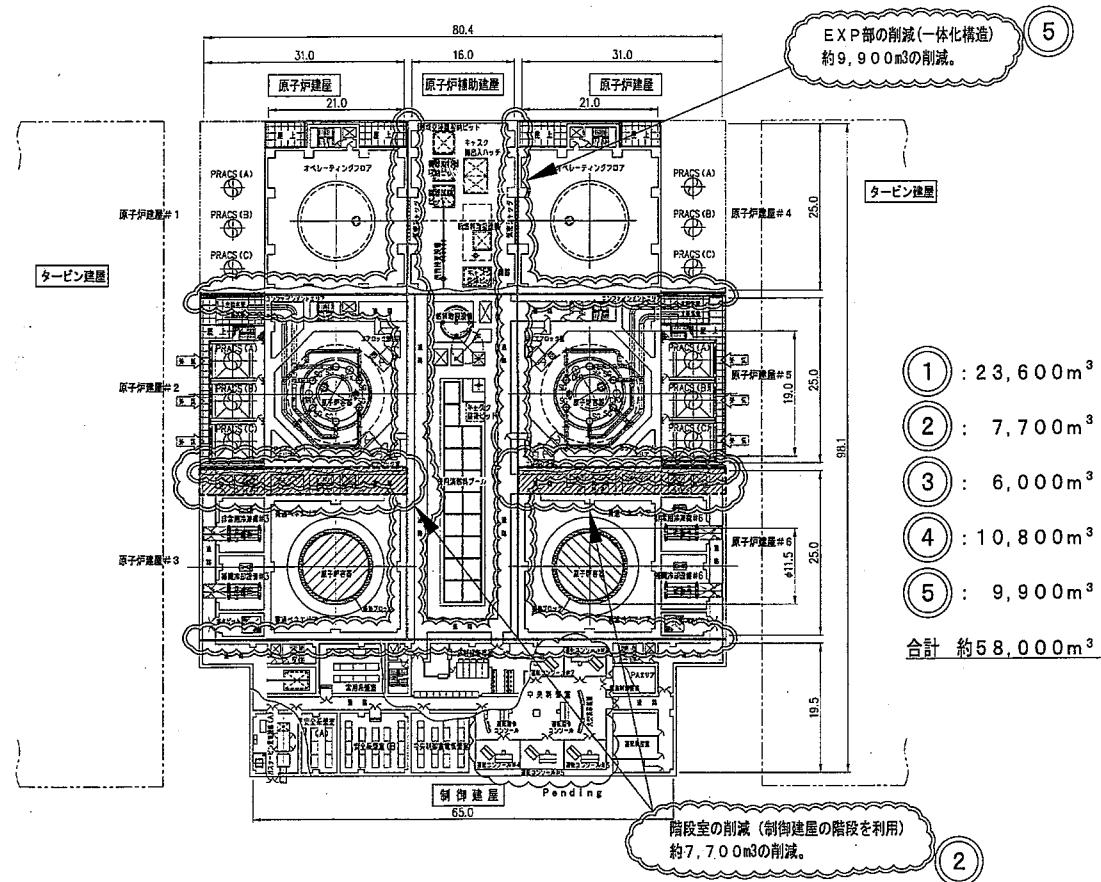


図 8.1.4.3-1 自然循環炉 容量削減案 (平面図)

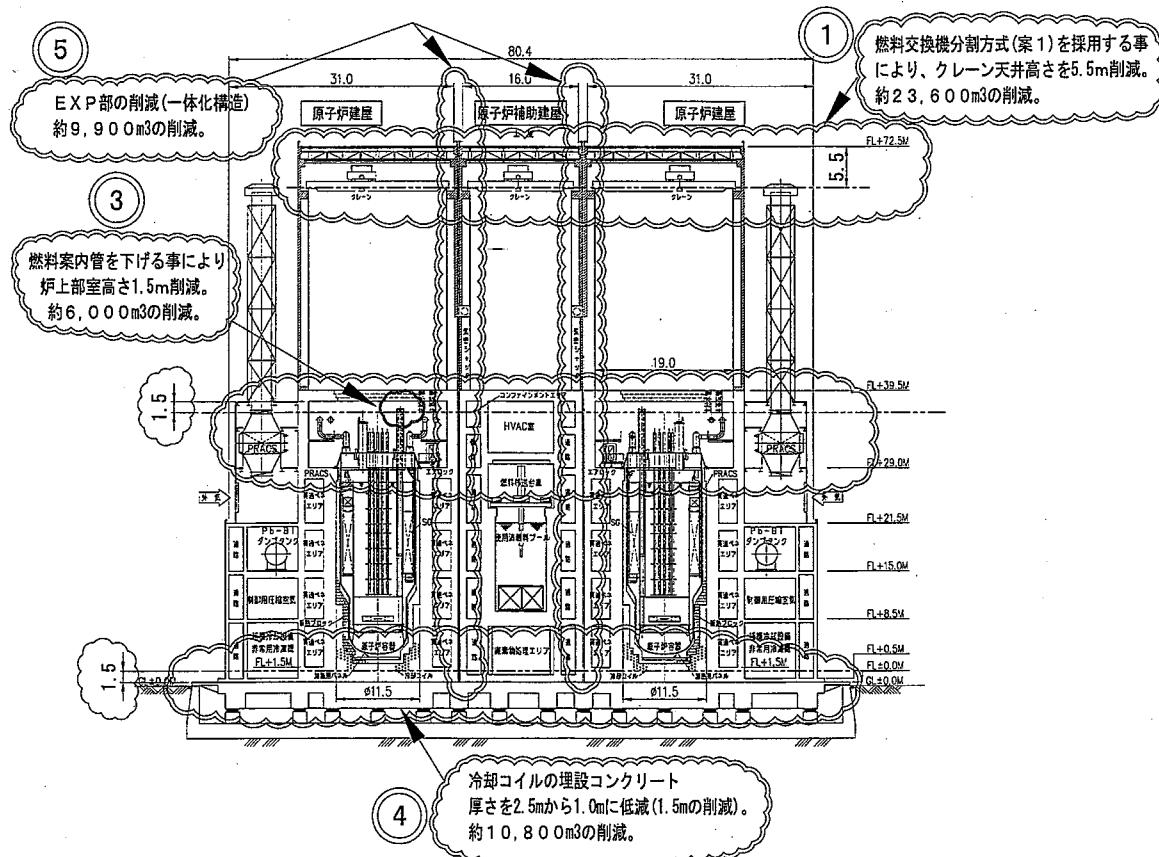


図 8.1.4.3-2 自然循環炉 容量削減案 (立面図)

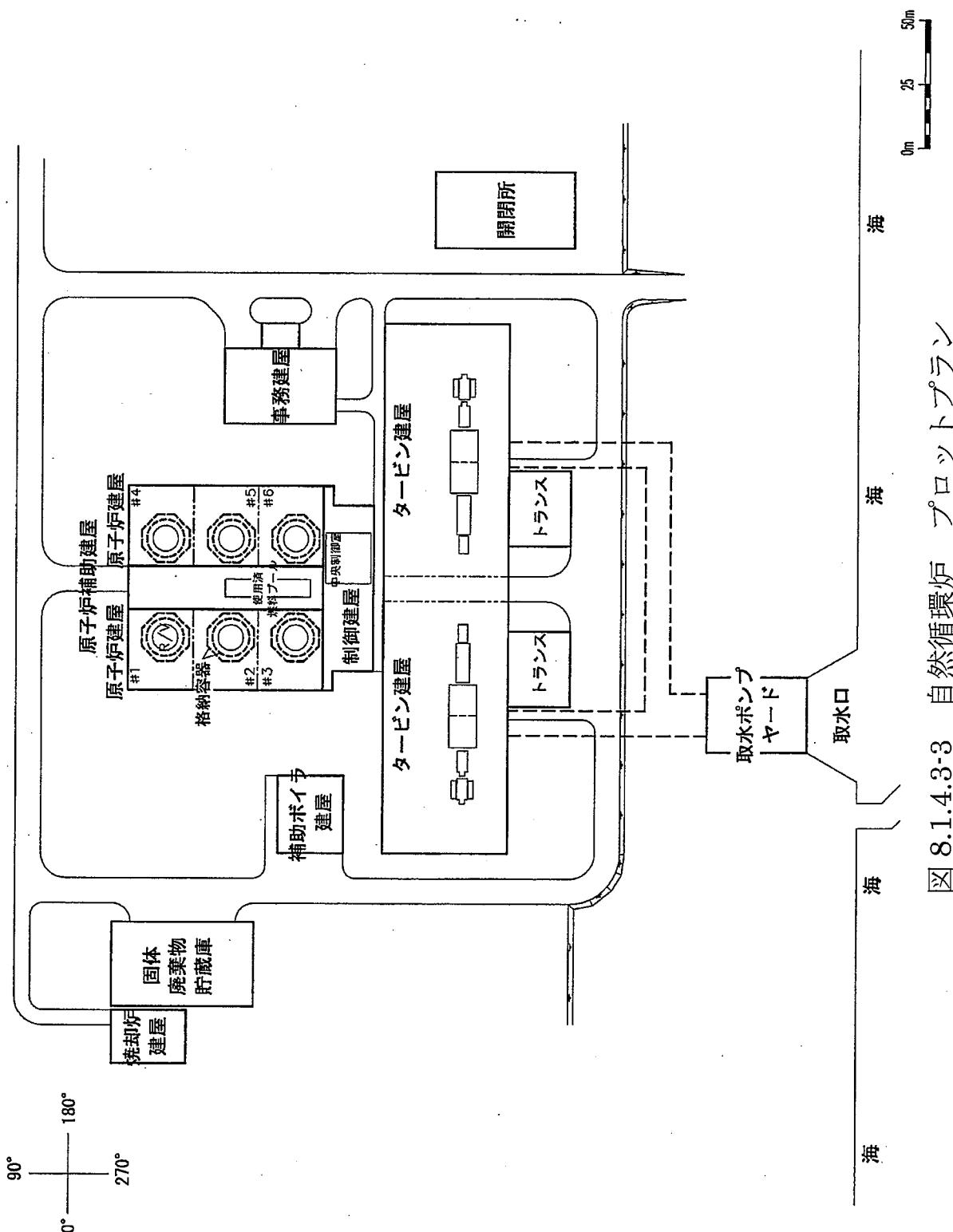


図 8.1.4.3-3 自然循環炉 プロットプラン

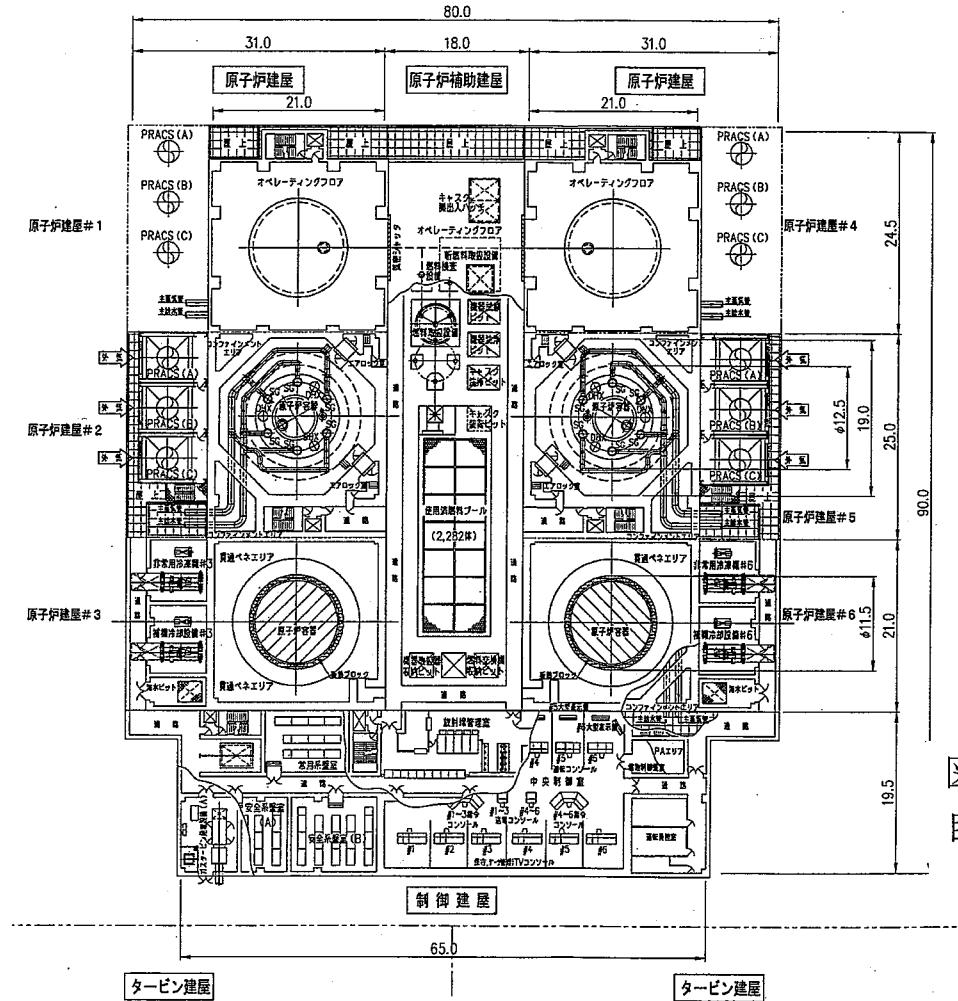


図 8.1.4.3-4
自然循環炉 配置図
(平面図)

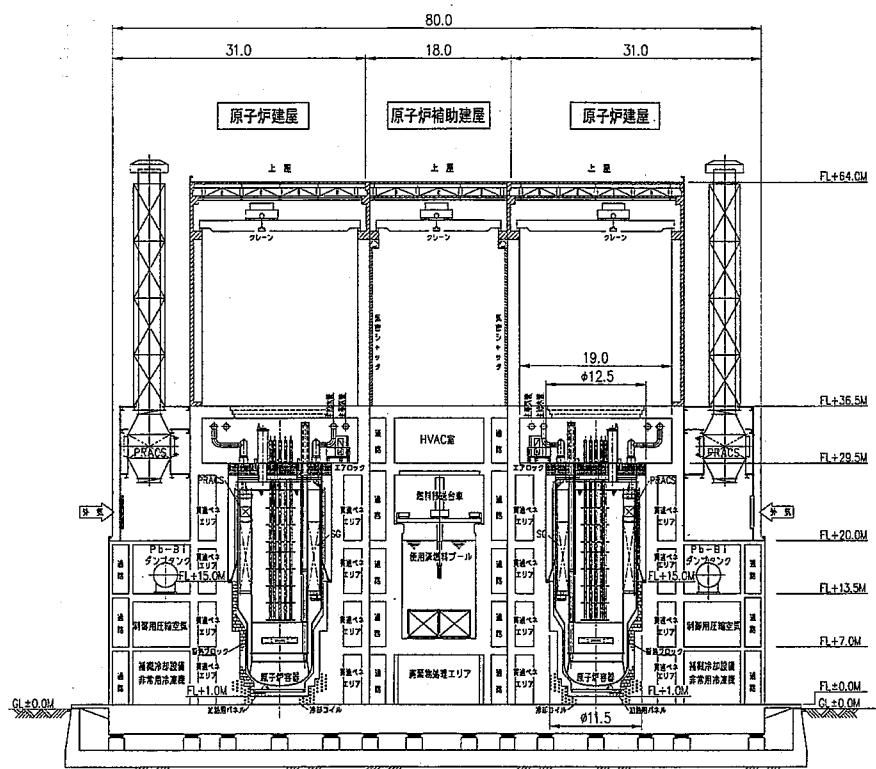


図 8.1.4.3-5
自然循環炉 配置図
(立面図)

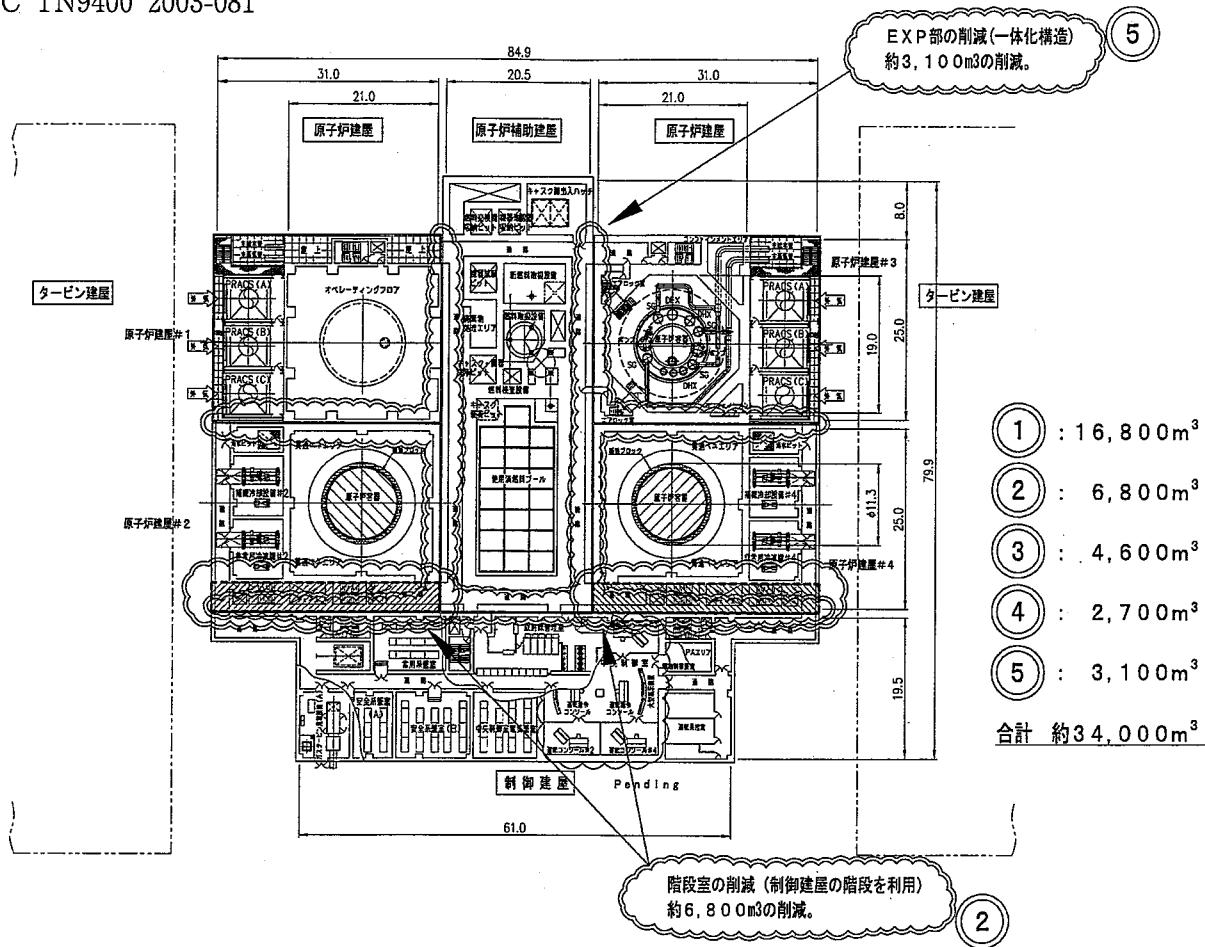


図 8.1.4.4-1 強制循環炉 容量削減案（平面図）

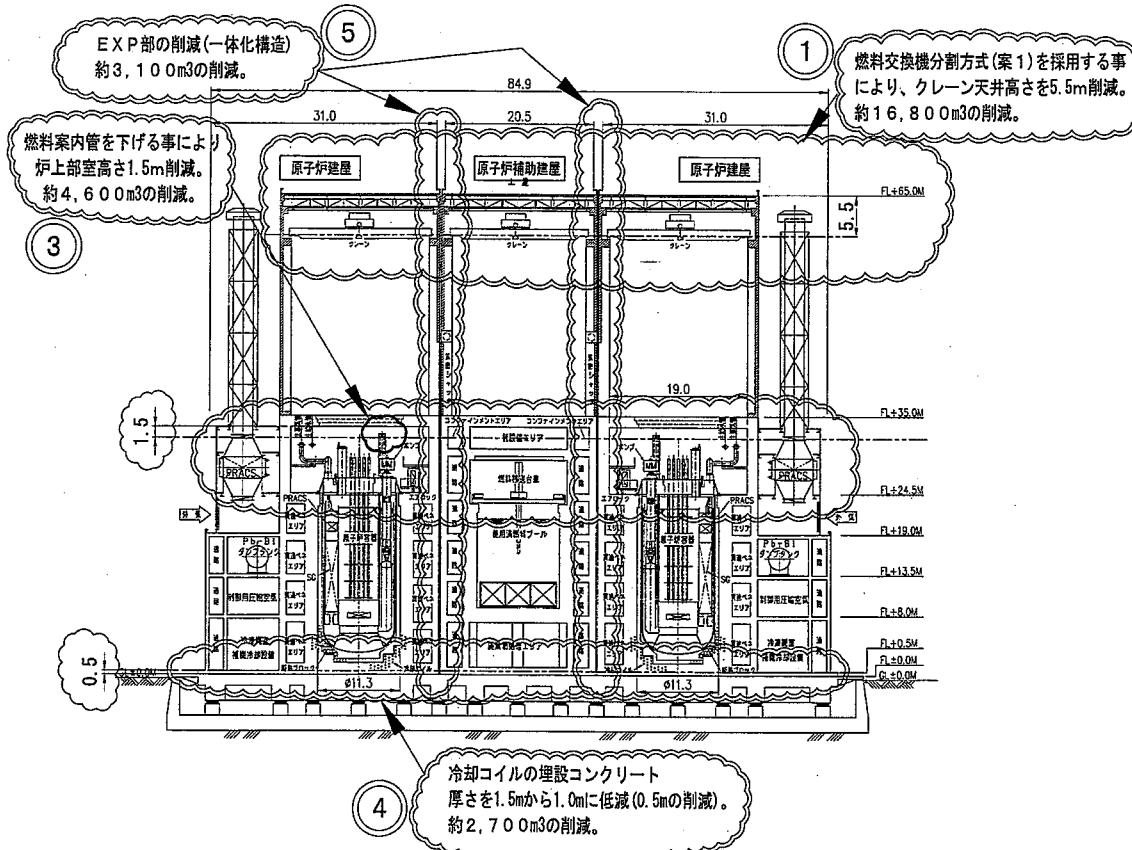


図 8.1.4.4-2 強制循環炉 容量削減案（立面図）

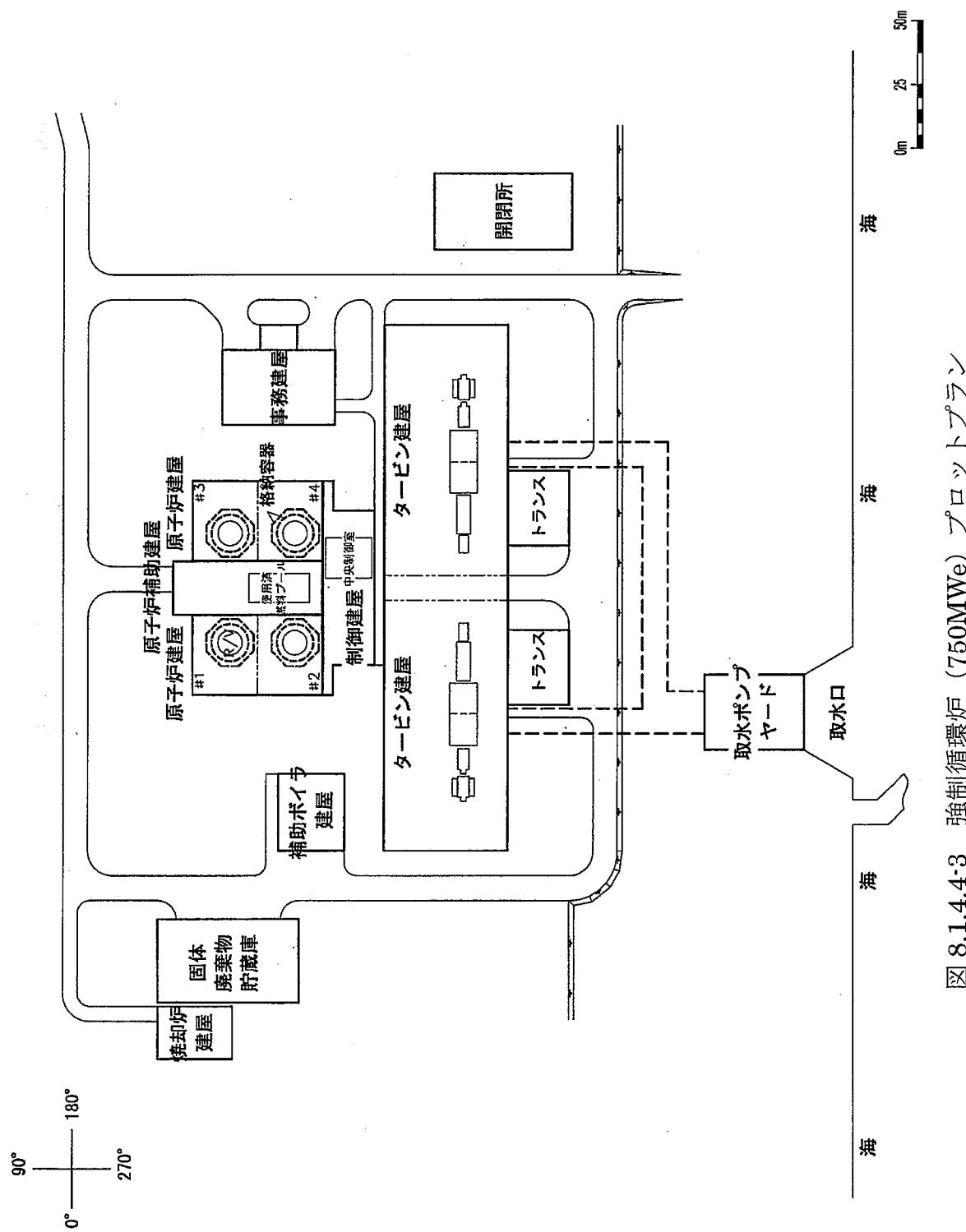


図 8.1.4-3 強制循環炉（750MWe）プロットプラン

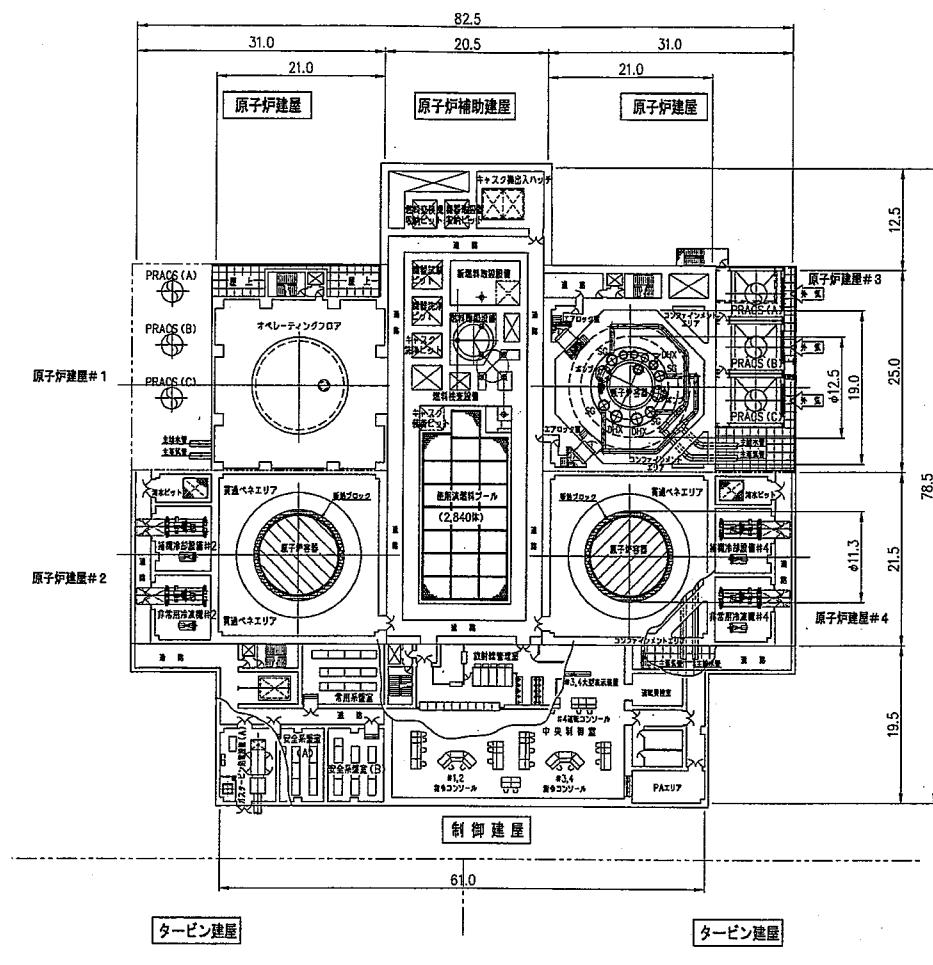


図 8.1.4.4-4
強制循環炉 配置図
(平面図)

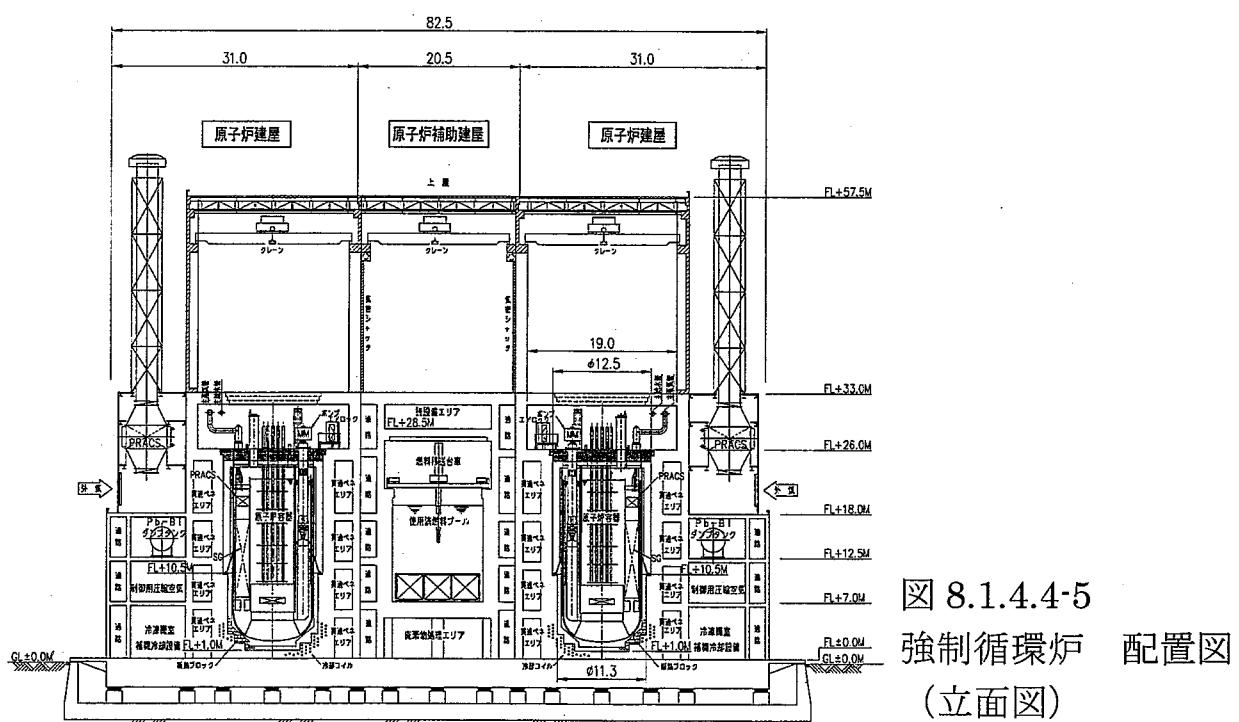


図 8.1.4.4-5
強制循環炉 配置図
(立面図)

8.1.5 純化系設備の検討

8.1.5.1 目的

冷却材として使用している鉛ビスマスは腐食性があり、これを制御するために一定の酸素濃度制御や、腐食生成物の回収が必要となる。鉛ビスマス中の酸素濃度制御については、未だ十分な研究は行われおらず今後データを取る必要があるが、本項では従来の液体金属炉の実績と、鉛ビスマスの一般的な特性をもとに概念計画を行った。

8.1.5.2 装置の検討

(1) 酸素濃度管理装置 設置基数：1基

酸素濃度管理装置は、鉛ビスマス中の酸素能動を監視して、酸素又は水素を注入して酸素濃度を所定の濃度に制御する。目標酸素濃度は、0.0023ppm (200°C) ~ 0.58ppm (352°C) である。鉛ビスマスの駆動は、アルゴンガスの吹き込みによるリフトアップ方式である。これに、水素又は酸素を含ませて注入し、デミスタにより不純物を除去する。ここで、デミスタは交換が必要な部材であり、以下の構成となっている。

デミスタ充填式：材質 クロモリ鋼 (9Cr等)

- Na炉ではステンレス鋼メッシュだが、PbBi炉ではNi成分の溶出があるため9Cr鋼を使用した。
- 充填率は、Na炉用の設計経験（常陽2次系CT）から以下の通りに設定。
但し、PbBi冷却材でのCT運転データは無い。

ワイヤメッシュの線径=0.28[mm]

充填密度=0.08~0.1[g/cm³]=80~100[kg/m³]

(a) 自然循環炉

以上を基本とし、自然循環炉では、2サイクル当たり1基交換して運用する。これに必要なメッシュ量は以下の通りである。

メッシュ重量/基：1.8×100=180[kg]

60年×12/(18+1)=38サイクルとして、38/2=19基 (3420kg)

(b) 強制循環炉

強制循環炉では、1サイクル当たり1基交換し運用する。これに必要なメッシュ量は以下の通りである。基数は、自然循環炉と同様に算出される。

メッシュ重量/基：1.1×100=110[kg]

60年×12/(18+1)=38サイクルとして、38/2=19基 (2090kg)

(2) 腐食生成物精製装置 設置基数：1基

腐食生成物精製装置は、腐食生成物が0.1ppm以下になるように、コールド部より若干低い温度でデミスタを通して腐食生成物を除去する。デミスタの冷却は、室内空気とし、空

調設備のダクトに排出する。ここで、デミスターは交換が必要な部材であり、以下の構成となっている。

デミスター充填式：材質 クロモリ鋼（9Cr等）：材料の選定は酸素濃度管理装置に同じ。

充填率：ワイヤメッシュの線径=0.28[mm]

充填密度=0.08~0.1[g/cm³]=80~100[kg/m³]

(a) 自然循環炉

以上を基本とし、自然循環炉では、2サイクル当たり1基交換して運用する。これに必要なメッシュ量は以下の通りである。

メッシュ重量／基：1.4×100=140[kg]

60年×12/19=38サイクルとして、38/1=38基(5320kg)

(b) 強制循環炉

強制循環炉では、1サイクル当たり1基交換し運用する。これに必要なメッシュ量は以下の通りである。基数は、自然循環炉と同様に算出される。

メッシュ重量／基：1.8×100=180[kg]

60年×12/19=38サイクルとして、38/1=38基(6840kg)

3.1.4.3 過去の設計値とバックデータ

以下は、平成12年度及び平成13年度の設計値とバックデータ（算出根拠）である。

(1) 平成12年度の設計値 炉出力 1053MWt

燃料交換頻度：19カ月運転/2カ月定検

(a) 酸素濃度管理装置：デミスターによる酸素除去

寸法：Φ800、高さ 3200mm；メッシュ 1.4m³（2定検分）

1回の燃料交換毎に、酸素が 20.3kg 混入するとして設定。

Na炉でのCTでの捕獲割合を適用して、0.6m³のメッシュ体積とした。

(b) 腐生成物生成装置：デミスターによる鉄分除去

寸法：Φ850、高さ 1500mm；メッシュ 0.8m³（約1定検分）

1サイクルでの鉄分混入量を 59kg として設定。

捕獲割合 0.05 を適用して、1.0m³のメッシュ体積とした。

(2) 平成13年度の設計値

(a) 自然循環炉：炉出力 1450MWt (H12年度の1.38倍)

不純物除去量は、燃料被覆管表面積が支配的ゆえ、炉心熱出力に比例するものと仮定した。

(i) 酸素濃度管理装置：デミスターによる酸素除去

寸法：Φ900、高さ 3200mm，メッシュ 1.8m³（2定検分）

1回の燃料交換毎に、酸素混入量は 28kg (=20.3*1.38) として設定した。

Na 炉での CT での捕獲割合を適用して、 $0.6 \times 1.38 = 0.83\text{m}^3$ のメッシュ体積とした。

(ii) 腐食生成物生成装置： デミスタによる鉄分除去

寸法：Φ900、高さ 2500mm; メッシュ 1.4m^3 (1 定検分)

1 サイクルでの鉄分混入量を 81.5kg ($=59 \times 1.38$) として設定した。

捕獲割合 0.05 を適用して、 $1.0 \times 1.38 = 1.38\text{m}^3$ のメッシュ体積とした。

(a) 強制循環炉 : 炉出力 1875MWt (H12 の 1.78 倍)

不純物除去量は、炉心熱出力に比例すると仮定した。

(i) 酸素濃度管理装置 : デミスタによる酸素除去

寸法：Φ800、高さ 2600mm, メッシュ 1.1m^3 (1 定検分)

1 回の燃料交換毎に、酸素混入量を 36.2kg ($=20.3 \times 1.78$) として設定した。

Na 炉での CT での捕獲割合を適用して、 $0.6 \times 1.78 = 1.07\text{m}^3$ のメッシュ体積とした。

(b) 腐食生成物生成装置：デミスタによる鉄分除去

寸法：Φ1000、高さ 2500mm, メッシュ 1.8m^3 (1 定検分)

1 サイクルでの鉄分の混入量を 105kg ($=59 \times 1.78$) として設定した。

捕獲割合 0.05 を適用して、 $1.0 \times 1.78 = 1.78\text{m}^3$ のメッシュ体積とした。

3.1.4.4 まとめ

鉛ビスマス冷却材の酸素濃度管理装置と腐食生成物精製装置の検討を行い、特に交換が必要となるデミスタの量を把握した。しかし、鉛ビスマスについては、これまでデータが無く、酸素濃度と腐食量の関係を含め、研究開発が必要となる項目である。

主要な研究開発項目は、以下の通りである。

- ・ 酸素濃度と材料腐食の関係
- ・ 炉内全体の酸素濃度分布の分析（解析コード等の開発含む）
- ・ 鉛ビスマス中の酸素濃度制御方法

9. 物量データの整備

9.1 物量データの整備

本年度の設計結果に従って、自然循環炉及び強制循環炉の物量データを整理した。

基本的には、昨年度のデータから設計の変更による見直しと、新たに検討した内容を加えたものである。

特に、耐震健全性、燃料交換システムの小型化、廃棄物処理系統、空調系統及び配管の合理化検討結果を反映して、主要物量及び建屋容積を算定した結果、自然循環炉においては、NSSS の主要鋼材重量は約 1245ton（炉心構成要素を除く）となり、原子炉建屋容積は約 5.5 万 m³／基となった。

同様に、強制循環炉においては、NSSS の主要鋼材重量は約 1459ton（炉心構成要素を除く）となり、原子炉建屋容積は約 5.7 万 m³／基となった。

これらの結果と昨年度の検討結果とを併せた物量データを、自然循環炉については表 9.2-1 に、強制循環炉については表 9.2-2 に示す。

9.2 機器主要仕様の整備

自然循環炉と強制循環炉の主要機器の主要仕様表を、表 9.2-1 と表 9.2-2 に示す。

これも物量と同様に、昨年度の結果に対して、本年度の設計結果を反映したものである。

表9.1-1 自然循環炉 物量データ

大分類	設備・機器	単位	物 量		備考
			H13年度 (55万kWe×6)	H14年度 (55万kWe×6)	
仕様	電気出力	万kWe	55	55	
	熱出力	万kWt	145	145	
	ループ数	ループ	—	—	
	ユニット数	モジュール	6	6	
	冷却材	—	鉛ビスマス	鉛ビスマス	
原子炉構造	原子炉容器	ton	310	335	
	炉内構造物	ton	165	180	炉心支持構造物、上部機構等
	炉上部構造	ton	235	265	ルーフデッキ、回転プラグ、CRDM等
	炉心構成要素	ton	50	50	遮へい体、CR等
	ガードベッセル	ton	80	85	
原子炉構造合計		ton	790	865	炉心構成要素を除く
1次系	SG	ton	380	380	
	1次ポンプ	ton	—	—	
	1次系配管	ton	—	—	
1次系合計		ton	380	380	
2次系	蒸気発生器	ton	—	—	
	2次系ポンプ	ton	—	—	
	2次系配管	ton	—	—	
2次系合計		ton	—	—	
NSSS物量合計		ton	1170	1245	
崩壊熱除去系		MWt	18 (6MWt×3系統)	18 (6MWt×3系統)	
タービン発電機設備		ton/h	6861 (3モジュール分)	6861 (3モジュール分)	
電気計装	ケーブル	km	220	220	1モジュール分
	非常用G/T	kW	4,950	4,950	1モジュール分
	計装設備	点	1,200	1,200	1モジュール分
	盤設備	m	200	200	1モジュール分
諸設備	補機冷却系	kW	4,500	4,500	1モジュール分
	換気空調系	m ³ /h	560,000	400,000	1モジュール分
	气体廃棄物処理系	Nm ³ /h	0.4	1.2	1モジュール分
	液体廃棄物処理系	m ³ /h	0.4	0.72	1モジュール分
	固体廃棄物処理系	m ³ /y	0.3	1.4	1モジュール分
	冷却材重量	ton	14,000	16,900	1モジュール分
建物構築物	原子炉建屋	m ³	65,000	55,000	1モジュール分
	タービン建屋	m ³	70,000	70,000	1モジュール分
	固体廃棄物貯蔵庫	m ³	3,500	5,100	1モジュール分
	土木工事	m ³	13,700	12,700	1モジュール分
建設期間		月	36.5	36.5	
定検期間		日	32	32	

表9.1-2 強制循環炉 物量データ

大分類	設備・機器	単位	物 量		備考
			H13年度 (75万kWe×4)	H14年度 (75万kWe×4)	
仕 様	電気出力	万kWe	75	75	
	熱出力	万kWt	187.5	187.5	
	ループ数	ループ	2(ポンプ数)	2(ポンプ数)	
	ユニット数	モジュール	4	4	
	冷却材	—	鉛ビスマス	鉛ビスマス	
原 子 炉 構 造	原子炉容器	ton	415	460	
	炉内構造物	ton	180	180	炉心支持構造物、上部機構等
	炉上部構造	ton	220	265	ルーフデッキ、回転プラグ、CRDM等
	炉心構成要素	ton	75	75	遮へい体、CR等
	ガードベッセル	ton	65	70	
原子炉構造合計			880	975	炉心構成要素を除く
1 次 系	S G	ton	365	365	2基分
	1次ポンプ	ton	110	110	2基分
	1次系配管	ton	9	9	炉内配管
1次系合計			484	484	
2 次 系	蒸気発生器	ton	—	—	
	2次系ポンプ	ton	—	—	
	2次系配管	ton	—	—	
2次系合計			—	—	
N S S 物量合計			1,364	1,459	
崩壊熱除去系			24 (8MWt×3系統)	24 (8MWt×3系統)	
タービン発電機設備			6242 (2モジュール分)	6242 (2モジュール分)	
電 気 計 装	ケーブル	km	220	220	1モジュール分
	非常用G/T	kW	6,200	6,200	1モジュール分
	計装設備	点	1,600	1,600	1モジュール分
	盤設備	m	330	330	1モジュール分
	補機冷却系	kW	5,500	5,500	1モジュール分
諸 設 備	換気空調系	m ³ /h	560,000	446,000	1モジュール分
	気体廃棄物処理系	Nm ³ /h	0.4	1.8	1モジュール分
	液体廃棄物処理系	m ³ /h	0.4	0.95	1モジュール分
	固体廃棄物処理系	m ³ /y	0.3	1.7	1モジュール分
	冷却材重量	ton	13,400	16,500	1モジュール分
建 物 構 築 物	原子炉建屋	m ³	66,000	57,000	1モジュール分
	タービン建屋	m ³	105,000	95,000	1モジュール分
	固体廃棄物貯蔵庫	m ³	5,700	7,000	1モジュール分
	土木工事	m ³	16,900	15,800	1モジュール分
建設期間			36.5	36.5	
定検期間			36.5	36.5	

表9.2-1 自然循環炉 機器の主要仕様

	項目	単位	平成14年度	備考
	鉛ピスマス中型炉N C			
20	土地及び土地権		0	
201	土地及び土地権の取得	m2	1	1はプラント共通設備、2はユニット共通設備、3はモジュール設備
21	構築物及び土地改良工事		0	
211	現地改良工事及び施設	m3	0	
	土壤掘削容積	m3	3	
	岩盤掘削容積	m3	0	
212	原子炉格納施設		0	
212.1	建物の基本構造物		3	
	建物体積	m3	0	
	冷却コイル	m3	0	
	冷却コイル冷却水流量	m3/h	0	
	冷却コイル配管径	mm	0	
	冷却コイル配管長	m	0	1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
212.2	建物のサービス施設		3	
	空気雰囲気セル容積	m3	0	
	不活性雰囲気セル容積	m3	0	
213	N1原子炉補助建物		3	
	建物体積	m3	0	
214	タセン建物		3	
	建物体積	m3	0	
215	ディセント発電機建物		2	ガスター・ビン発電機建物
	建物体積	m3	0	
216	放射性廃棄物建物		1	
	建物体積	m3	0	
217	N1保全・補修建物		1	
	建物体積	m3	0	
218	その他の諸設備建物		3	
	建物体積	m3	0	
219	その他		8	固廃貯蔵所+焼却炉
	コンクリート基礎体積	m3	0	
	排気筒高さ	m	0	
	排気筒平均径	m	18.65	
	排気筒基數	基	0.15	
		0	0	
		0	0	
22	原子炉設備		0	
221	原子炉機器		0	
221.1	原子炉容器及び付属品		0	
221.11	炉容器、熱遮蔽板及び支持台		3	
	炉容器重量	ton	0	
	炉容器板厚	mm	0	
	炉容器材質	-	0	12Cr系鋼——1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	熱遮蔽板重量	ton	0	炉上部構造に含む
	熱遮蔽板板厚	mm	0	
	熱遮蔽板材質	-	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	支持台重量	ton	0	炉上部構造に含む
	支持台板厚	mm	0	
	支持台材質	-	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
221.12	原子炉構造物		3	
	炉心上部構造			
	インコネル718重量	ton	0	
	ステンレス鋼重量	ton	0	
	ステンレス鋼材質	-	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	炉内構造物			
	下部内部構造物重量	ton	0	
	下部内部構造物材質	-	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	炉心支持構造物重量	ton	0	
	炉心支持構造物材質	-	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	水平バッフル構造物重量	ton	0	炉上部構造に含む
	水平バッフル構造物材質	-	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	炉内貯蔵設備重量	ton	0	
	炉内貯蔵設備材質	-	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	COSMIC 対応			
	IHX フローガイド重量	ton	0	
	IHX フローガイド材質	-	0	1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
221.13	固定遮蔽体及び可動遮蔽体		3	
	円周方向可動遮蔽体			
	銅製遮蔽体重量	ton/体	0	
	銅製遮蔽体本数	体	0	0.18 鉛ピスマス遮へい体
	B4C遮蔽体重量	ton/体	0	
	B4C遮蔽体数	体	0	162 鉛ピスマス遮へい体
	ZrH遮蔽体重量	ton/体	0	
	ZrH遮蔽体数	体	0	
	ケラフィト遮蔽体重量	ton/体	0	
	ケラフィト遮蔽体数	体	0	
	円周方向固定遮蔽体			
	銅製遮蔽体重量	ton	0	
	非円筒型B4C遮蔽体重量	ton	0	
	非円筒型ZrH遮蔽体重量	ton	0	
	非円筒型ケラフィト遮蔽体重量	ton	0	
	固定遮蔽体-円筒型			
	B4C遮蔽体重量	ton	0	
	ケラフィト遮蔽体重量	ton	0	
221.14	炉上部構造		3	
	上部デッキ構造材重量	ton	0	183 熱遮蔽板含む
	回転フランジ構造材重量	ton	0	82 熱遮蔽板含む
	回転フランジ円周長	m	0	
	ケーブル長さ	100m	15	
	PSR対応		0	5 ケーブル取扱機構で扱う全ケーブル長
	上部鏡板重量	ton	0	
	上部鏡板材質	-	0	0 1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel

表9.2-1 自然循環炉 機器の主要仕様

	項 目	単 位	平成14年度	備 考
221.2	制御棒駆動機構		3 0	
	主炉停止棒駆動機構基數	体	0 18	
	後備炉停止棒駆動機構基數	体	0 6	
222.3	炉容器内配管		3 0	
	流入配管径	mm	0 0	
	流入配管長	m/k-フ"	0 0	
221.5	炉容器カートベッセル及び保溫材		3 0	
	ガートベッセル重量	ton	0 85	
	保溫材表面積	m ²	0 0	
	断熱ブロック体積	m ³	0 440	
222.11	主冷却設備		0 0	
222.12	ヨリック逆止弁		3 0	
	逆止弁口径	mm	0 0	
222.14	1次主冷却配管及び支持装置		3 0	
H/L	配管径	mm	0 0	
	配管長	m/k-フ"	0 0	
	配管厚さ	mm	0 0	
	ペローズ継手口径	mm	0 0	
	ガート配管重量	ton/k-フ"	0 0	
C/L	配管径	mm	0 0	
	配管長	m/k-フ"	0 0	
	配管厚さ	mm	0 0	
	ペローズ継手口径	mm	0 0	
	ガート配管重量	ton/k-フ"	0 0	
222.4	蒸気発生器設備		0 0	
222.41	蒸気発生器		3 0	
	伝熱管本数	本/基	0 690	
	伝熱管長	m	0 131	
	伝熱管外径	mm	0 31.8	
	伝熱管厚さ	mm	0 1.7	
	管板重量	ton/基	0 25	
	バーナ重量	ton/基/枚	0 0	
	バーナ枚数	枚/基	0 0	
	上部鏡板重量	ton/基	0 0	
	胴重量	ton/基	0 0	
	下部鏡板重量	ton/基	0 0	
	ノズル重量	ton/基	0 0	
	下降管重量	ton/基	0 0	
	ショット重量	ton/基	0 0	
	EMP吊胴重量	ton/基	0 0	
	熱造蔽板重量	ton/基	0 0	
	ナゲ重量	ton/基	0 0	
	ヘッド重量	ton/基	0 0	
	内部配管重量	ton/基	0 0	
	支持構造物重量	ton/基	0 37	
	支持構造物重量	ton/基	0 0	
	全重量	ton	0 380	
222.42	気水分離器、配管、再循環設備、トリクル水反応生成物吸納設備		3 0	
	蒸気ドラム重量	ton/k-フ"	0 70	
	給水配管径①	mm	0 609.6	
	給水配管長①	m/k-フ"	0 150	
	蒸気配管径①	mm	0 1168.4	46B
	蒸気配管長①	m/k-フ"	0 70	
	再循環流量	m ³ /min/k-フ"	0 19	
223.1	補助炉心冷却設備		0 0	
223.1	直接炉心冷却設備		3 0	
223.1	自然循環ループ		0 0	
	PbBi-PbBi熱交換器 伝熱面積	m ² /基	0 19.6	
	PbBi-空気熱交換器 伝熱面積	m ² /基	0 2510	
	PbBi配管直徑	mm	0 267.4	
	PbBi配管長さ	m	0 100	
	ガード配管重量	ton	0 9	
	HXエンクロージャ重量	ton	0 0	
	膨張タンク重量	ton	0 3.5	
	自然循環ループ基數	ループ	0 3	
223.2	完全共用方式補助炉心冷却設備		2 0	
	復水器伝熱面積	m ² /k-フ"	0 0	
	k-フ"数	k-フ"	0 0	
	補助給水タンク容量	m ³	0 0	
224.1	放射性廃棄物処理設備		0 0	
224.1	液体廃棄物処理設備		0 0	1/2基配
	液体廃棄物処理量	m ³ /h	0 0.72	
224.2	気体廃棄物処理設備		0 0	1/2基配
	気体廃棄物処理量	Nm ³ /h	0 1.2	
	ガス系配管径①	mm	0 35.6	
	ガス系配管長①	m	0 70	
224.3	固体廃棄物処理設備		3 0	1/2基配
	固体廃棄物処理量	ton/yr	0 1.4	m ³ /year

表9.2-1 自然循環炉 機器の主要仕様

項目		単位	平成14年度	備考
225	燃料取扱及び貯蔵設備		0	
225.1	燃料投入・貯蔵及び搬出設備		0	1/2表記
	プラグ駆動機構	プラグ駆動機構基数	0	
	遮蔽体	基	0	
		鉛重量	0	
		ton	0	
		炭素鋼重量	0	
		ton	32	
		ポリエチレン重量	ton	1.3
	燃料出入機		0	
		Aフレーム方式燃料出入機基数	基	0
		回転チェンバ方式燃料出入機基数	基	0
		台車式燃料出入機基数	基	0
			0.33	台車2台
	炉外燃料貯蔵設備	貯蔵容量	体	0
		移送アーム数	基	0
		検査装置数	基	0
	燃料取扱セル		0	
		燃料取扱機数	基	0
		缶詰装置数	基	0
		缶詰貯蔵ラック数	基	0
		監視窓数	個	0
		新燃料貯蔵ラック数	体	0
		新燃料検査装置数	基	0.17
		新燃料予熱装置数	基	0.17
		燃料昇降機数	基	0.33
		ガスロック数	個	0.5
		パワーマニブレータ数	基	0
	乾式貯蔵設備	貯蔵管本数	本	0
		貯蔵管収納容器及びダクト重量	ton	0
	湿式貯蔵設備	洗浄槽数	基	0
		貯蔵容量	体	0.33
		水中移送機数	基	364
		水処理設備数	基	0.33
	UIS着脱方式		0	0.17
		UISキャスク	キャスク基数	0
		UISピットライナー	ライナー表面積	0
		ドアバルブ	原子炉床バルブ重量	ton
		ドアバルブ	UISピット床バルブ重量	ton
		全重量	ton	0
225.2	格納容器内燃料取扱設備		3	
	燃料交換機		0	
		直動式燃料交換機基数	基	0
		伸縮アーム型燃料交換機基数	基	0
	炉内中継装置	炉内中継装置機基数	基	0.33
	燃料移送セル	燃料移送セル監視窓数	個	1
		全重量	ton	0
226	その他原子炉アシスト設備		0	
226.1	不活性ガス受入及び処理設備		3	
	ガス流量		0	
		1次アルゴンガス流量	Nm ³ /h	0
		2次アルゴンガス流量	Nm ³ /h	0
	ガス配管径		0	通常運転時
		1次アルゴンガス配管径①	mm	0
		2次アルゴンガス配管径①	mm	34
	ガス配管長		0	通常運転時
		1次アルゴンガス配管長	m	0
	リフトポンプアルゴンガス注入系	アルゴンガス注入系ガス流量	Nm ³ /min	60
		アルゴンガス注入系配管径	mm	0
		アルゴンガス注入系配管長	m	34
				水素注入装置
				50
226.2	予熱保温設備		3	
		予熱保温面積	m ²	0
		炉容器加熱用パネル容量	kW	1280
		炉容器加熱用パネル熱流束	kW/m ²	750
				P R A C S を含む
226.3	冷却材受入、貯蔵、充填及び純化設備		3	
		配管径①	mm	0
		配管長①	m	10
		貯蔵タンク重量	ton/基	
		膨張タンク重量	ton/基	
		電磁ポンプ流量	m ³ /min/基	
	1次系炉内コールドトラップ	基数	基	2
		流量	m ³ /min/基	0.1
	1次系炉外コールドトラップ	基数	基	0
		流量	m ³ /min/基	0
	2次系コールドトラップ	基数	基	0
		流量	m ³ /min/基	0
		プラントの冷却材重量	ton	450
		プラントの冷却材重量	ton	17350
		EVST冷却設備除热量	MWh	0.0
				鉛ビスマス P R A C S を含む

表9.2-1 自然循環炉 機器の主要仕様

	項目	単位		平成14年度	備考
226.6	外効率調査設備		3	0	
226.7	予熱保温面積	m ²	0	1280	
226.7	原子炉設置補助冷却設備		0	0	P R A C S を含む
226.7	非常用冷却水設備		3	0	
常用冷却水設備					
流量		m ³ /h	0	0	
配管径①		mm	0	0	
非常用冷却水設備			0	0	
流量		m ³ /h	0	580	
配管径①		mm	0	267.4	
配管長②		m	0	500	
226.72	空素素還りガス冷却設備			0	実験炉プラント最適化研究では該当設備なし
226.8	保守・補修設備		3	0	
226.82	小物除去及び除染装置		0	0	
洗浄槽容積		m ³	3	0	
227	計測制御設備		0	0	
227.1	計測制御設備		0	0	
227.14	計測制御設備及び安全保護系		3	0	
制御機体数		体	0	24	
227.2	処理及び表示設備		3	0	
運転員操作室数		室	0	0.17	
アコス TM 入力点数		点	0	1200	
アコス TM 出力点数		点	0	190	
デジタル入出力点数		点	0	400	
227.3	放射線監視設備		3	0	
放射線監視装置設置部屋数		室	0	2	
23	4-1) 安全機器設備		0	0	
23	4-1) 安電機		0	0	
231.1	ポンプ発電機及少付機品		2	0	
発電機出力		kWe	0	1650000	
231.2	基礎		2	0	
振付架台コンクリート体積		m ³	0	550	
231.3	主及び補助蒸気設備		2	0	
主蒸気流量		ton/hr	0	6861	
主蒸気配管			0	0	
配管径		mm	0	1168.4	46Bが3本
配管長		m	0	450	3本分
232	循環水設備		2	0	
運動物体積		m ³	0	0	
循環水流量		m ³ /h	0	126500	
配管長		m	0	270	
233	復水設備		2	0	
重量流量		ton/hr	0	1500	
屋外設置タク据付基礎コンクリート体積		m ³	0	4500	
234	給水加熱設備		2	0	
給水流量		ton/hr	0	6861	
給水管			0	609.6	
配管径		mm	0	600	
235	その他のタービン設備機器		2	0	
重量流量		ton/hr	0	0	
24	行属性氣設備		0	0	
241	開閉設備		0	0	
241.1	新内給電用開閉設備		2	0	
開閉器数		台	0	3.3	
242	新内給電用設備		0	0	
242.1	新内給電用及び起動用変圧設備		2	0	
変圧器数		台	0	0.5	
基礎体積		m ³	0	1000	
242.2	ニードルフローポン		2	0	
開閉器数		台	0	17.3	
変圧器数		台	0	14	
242.3	補助電力設備		2	0	
バッテリ設備数①		系統	0	4	
バッテリ設備容量①		Ah/系統	0	2000	
バッテリ設備数②		系統	0	0	
バッテリ設備容量②		Ah/系統	0	0	
ディーゼル発電設備数①		系統	0	2	
ディーゼル発電設備容量①		kW/系統	0	2500	
ディーゼル発電設備数②		系統	0	0	
ディーゼル発電設備容量②		kW/系統	0	0	
インバータ数①		系統	0	4	
インバータ容量①		kVA/系統	0	160	
インバータ数②		系統	0	0	
インバータ容量②		kVA/系統	0	0	
インバータ数③		系統	0	0	
インバータ容量③		kVA/系統	0	0	
243	配電盤		0	0	
243.1	制御盤		2	0	
盤数		面	0	40	
243.2	補助電力及び信号盤		2	0	
盤数		面	0	80	

ガスタービン、6モジュール共用
ガスタービン、6モジュール共用

表9.2-1 自然循環炉 機器の主要仕様

	項 目	単 位	平成14年度		備 考
			2	0	
244 防護設備	設備数	式	0	5	
245 真空関係構築物及び配線吸込設備			0	0	
245.1 地下配線用ケーブル	ケーブル長さ	m	2	0	
		m	0	150	
245.2 ケーブルトレイ	トレイ長さ	m	2	0	
		m	0	4100	
245.3 ケーブルトレイ	コネクタ長さ	m	2	0	
		m	0	12100	
246 動力用及び制御用配線			0	0	
246.1 発電機回路用配線	発電機回路用母線長さ	m	2	0	
	高圧母線長さ	m	0	25	
		m	0	220	
246.2 所内給電用配線			2	0	
	所内給電用動力配線長	m	0	160000	
	制御及び計装用配線長	m	0	60000	
	格納容器貫通部数	箇所	0	36	
25 発電用堆設備			0	0	
251 輸送、荷役設備			0	0	
251.1 カーリング&リリ	一般グレード・クーン容量①	ton	0	50	
	一般グレード・クーンスパン①	m	0	16	
	耐震グレード・クーン容量①	ton	0	80	
	耐震グレード・クーンスパン①	m	0	21	
	耐震グレード・クーン容量②	ton	0	0	
252 空気・水・蒸気供給設備			0	0	
252.1 压縮空気供給設備	コンプレッサ数	台	3	0	
	配管径	mm	0	0.5	
	配管長	m	0	34	
252.2 プラットフォーム水設備	接器数	合	1	0	1/2表記
	配管径①	mm	0	139.3	
	配管長①	m	0	100	
	配管径②	mm	0	0	
	配管長②	m	0	0	
252.3 通常消火設備	機器数	台	1	0	1/2表記
	配管径①	mm	0	0.5	
	配管長①	m	0	42.7	
		m	0	3500	
252.4 搭助蒸気設備	機器数	台	3	0	
	配管径①	mm	0	0.33	
	配管長①	m	0	89.1	
		m	0	1000	
252.5 ハザード消火設備			3	0	
26 特殊材料	2次主冷却設備及びSG据付最下室床面積	m ²	0	0	
261 1次冷却材			0	0	
	冷却材重量	ton	0	16900	全冷却材合計
262 2次冷却材	冷却材重量	ton	3	0	
		ton	0	450	PRACS船ビスマス重量追加です
263 その他の流体	その他の流体の全重量	ton	1	0	
		ton	0	0	

表9.2-2 強制循環炉 機器の主要仕様

	項目	単位		平成14年度	備考
	鉛ピスマス中型炉FC				入力データに対する備考
20	土地及び土地権			0	
201	土地及び土地権の取得	m2	1	0.00E+00	1はプラント共通設備、2はユニット共通設備、3はモジュール設備
21	構築物及び土地改良工事			0	
211	地盤改良工事及び施設	m3	3	0	
	土壤掘削容積	m3	0	15800	
	岩盤掘削容積	m3	0	0	(免費)
212	原子炉冷却施設			0	
212.1	建物の基本構造物		3	0	
	建物体積	m3	0	4500	
	冷却コイル			0	
	冷却コイル冷却水流量	m3/h	0	0	
	冷却コイル配管径	mm	0	0	
	冷却コイル配管長	m	0	0	
212.2	建物のサービス施設		3	0	
	空気雰囲気セル容積	m3	0	4500	
	不活性雰囲気セル容積	m3	0	0	
213	II原子炉補助建物		3	0	
214	III建物		3	57000	
215	IV電子発電機建物		3	95000	ガスタービン発電機建物
216	放射性廃棄物建物		2	0	
217	II保守・検査建物		1	0	
218	その他諸設備建物		0	0	
219	299		3	7000	固廢貯蔵所-焼却炉
	コンクリート基礎体積	m3	0	0	
	排気筒高さ	m	0	18.65	
	排気筒平均径	m	0	1.5	
	排気筒基數	基	0	0.25	
22	原子炉設備		0	0	
221	原子炉機器		0	0	
221.1	原子炉容器及び付属品		0	0	
221.1.1	炉容器、熱遮蔽板及び支持台		3	0	
	炉容器重量	ton	0	460	原子炉容器径を9.85mから10.8mに変更した場合の外挿値
	炉容器板厚	mm	0	50	
	炉容器材質	-	0	0	12Cr系鋼—1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	熱遮蔽板重量	ton	0	0	炉上部構造に含む
	熱遮蔽板板厚	mm	0	0	
	熱遮蔽板材質	-	0	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	支持台重量	ton	0	0	炉上部構造に含む
	支持台板厚	mm	0	0	
	支持台材質	-	0	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
221.1.2	原子炉構造物		3	0	
	炉心上部機構		0	0	
	イコモ718重量	ton	0	0	
	アルミ銅重量	ton	0	0	
	ガルニス銅材質	-	0	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	炉内構造物		0	0	
	下部内部構造物重量	ton	0	8.8	
	下部内部構造物材質	-	0	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	炉心支持構造物重量	ton	0	171.2	
	炉心支持構造物材質	-	0	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	水平バッフル構造物重量	ton	0	0	炉上部構造に含む
	水平バッフル構造物材質	-	0	0	
	炉内貯蔵設備重量	ton	0	0	3:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
	炉内貯蔵設備材質	-	0	0	
COSMIC 対応			0	0	
	IHX フローガイド重量	ton	0	0	
	IHX フローガイド材質	-	0	0	1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel
221.1.3	固定遮蔽体及び可動遮蔽体		3	0	
	円周方向可動遮蔽体		0	0	
	鋼製遮蔽体重量	ton/体	0	0.14	鉛ビスマス造へい体
	鋼製遮蔽体本数	体	0	96	鉛ビスマス造へい体
	B4C遮蔽体重量	ton/体	0	0	
	B4C遮蔽体本数	体	0	0	
	ZRH遮蔽体重量	ton/体	0	0	
	ZRH遮蔽体本数	体	0	0	
	ケーブル遮蔽体重量	ton/体	0	0	
	ケーブル遮蔽体本数	体	0	0	
	円周方向固定遮蔽体		0	0	
	鋼製遮蔽体重量	ton	0	0	
	非円筒型B4C遮蔽体重量	ton	0	0	
	非円筒型ZRH遮蔽体重量	ton	0	0	
	非円筒型ケーブル遮蔽体重量	ton	0	0	
固定遮蔽体-円筒型			0	0	
	B4C遮蔽体重量	ton	0	0	
	ケーブル遮蔽体重量	ton	0	0	
221.1.4	炉上部構造		3	0	
	上部"ア"構造材重量	ton	0	183	熱遮蔽板含む
	回転"ア"構造材重量	ton	0	82	熱遮蔽板含む
	回転"ア"円周長	m	0	15	
	ケーブル長さ	100m	0	5	ケーブル取扱機構で扱う全ケーブル長
PSR対応			0	0	
	上部鏡板重量	ton	0	0	
	上部鏡板材質	-	0	0	0:1:316SS, 2:304SS, 3:Mod. 9Cr-1Mo, 4:2-1/4Cr-1Mo, 5:Carbon steel

表9.2-2 強制循環炉 機器の主要仕様

項目		単位	平成14年度	備考
221.2	制御棒駆動機構		3	0
	主炉停止棒駆動機構基数	体	0	30
	後備炉停止棒駆動機構基数	体	0	6
222.3	炉容器内配管		3	0
	流入配管径	mm	0	0
	流入配管長	m/ループ	0	0
221.5	炉容器ガードベッセル及び保温材		3	0
	ガードベッセル重量	ton	0	70
	保温材表面積	m ²	0	620
	断熱ブロック体積	m ³	0	410
222.	主冷却設備		0	0
222.1	1次主冷却設備		0	0
222.11	1次主循環ポンプ 駆動装置及びガードベッセル		3	0
	ポンプ		0	0
	ポンプ長	m	0	11.2
	ポンプ径	m	0	1.81
	ポンプ揚程	mPobi	0	4.8
	ポンプ流量	m ³ /min	0	222.6
	比重量	kg/m ³	0	10300
	ポンプ効率	%	0	78
	ポンプ回転数	rpm	0	260
	リーケフロー処理弁個数	個	0	0
ルースパーティトラップ			0	0
	鍛造品重量	ton	0	0
	鍛造品材質	-	0	0
	ロール加工板板重量	ton	0	0
	ロール加工板板厚	mm	0	0
	ロール加工板材質	-	0	0
	プレス加工板板重量	ton	0	0
	プレス加工板板厚	mm	0	0
	プレス加工板材質	-	0	0
ガードベッセル(ループ型炉)			0	0
	ガードベッセル重量	ton	0	0
	ガードベッセル保温材表面積	m ²	0	0
	全重量	ton	0	110 2基分
222.12	ヨコドレグ逆止弁		3	0
	逆止弁口径	mm	0	0
タンク型炉のみ必要			0	0
	レダンシール	m	0	0
	遮蔽体	ton	0	0
	熱遮蔽板	m ²	0	0
222.4	蒸気発生器設備		0	0
222.41	蒸気発生器		3	0
蒸気発生器			0	0
	伝熱管本数	本/基	0	SGは2基あり
	伝熱管長	m	0	544
	伝熱管外径	mm	0	52
	伝熱管厚さ	mm	0	25.4
	管板重量	ton/基	0	2.6
	スチーパ重量	ton/基/枚	0	40
	スチーパ枚数	枚/基	0	2基分
	上部鏡板重量	ton/基	0	0
	銅重量	ton/基	0	0
	下部鏡板重量	ton/基	0	252
	ノズル重量	ton/基	0	0
	下降管重量	ton/基	0	0
	シェル重量	ton/基	0	0
	EPM吊銅重量	ton/基	0	0
	熱造鞍板重量	ton/基	0	0
	ライケ重量	ton/基	0	0
	ヘッダ重量	ton/基	0	0
	内部配管重量	ton/基	0	0
	内部支持構造物重量	ton/基	0	39 2基分
	支持構造物重量	ton/基	0	0
全重量		ton	0	365 2基分
222.42	蒸気水分離器、配管、再循環設備、カウル-水反応生成物吸収設備		2	0
	蒸気ドラム重量	ton/ループ	0	90
	給水配管径①	mm	0	711.2
	②	mm	0	288
	給水配管長①	m/ループ	0	150
	②	m/ループ	0	0
	蒸気配管径①	mm	0	1016
	②	mm	0	408
	蒸気配管長①	m/ループ	0	70
	②	m/ループ	0	0
	再循環流量	m ³ /min/ループ	0	32
223.1	補助炉心冷却設備		0	0
223.1	直接炉心冷却設備		3	0
DRACS			0	0
自然循環ループ			0	0
	PbBi-PbBi熱交換器 伝熱面積	m ²	0	30.9 1ループ当たり
	PbBi-空気熱交換器 伝熱面積	m ²	0	2904 1ループ当たり
	PbBi配管直徑	mm	0	318.5
	PbBi配管長さ	m	0	100 1ループ当たり
	ガード配管重量	ton	0	12 1ループ当たり
	HXエンクロージャ重量	ton	0	0
	膨張タンク重量	ton	0	4.5 1ループ当たり
	自然循環ループ基數	ループ	0	3

表9.2-2 強制循環炉 機器の主要仕様

	項目	単位		平成14年度	備考
223.2	完全共用方式補助炉心冷却設備			0	
	復水器伝熱面積 m ² /ルーブ	m ² /ルーブ	2	0	
	ルーブ数	ルーブ	0	0	
	補助給水クック容量 m ³	m ³	0	0	
224.	放射性廃棄物処理設備			0	
224.1	液体廃棄物処理設備			0	
	液体廃棄物処理量 m ³ /h	m ³ /h	0	0.95	1/2表記
224.2	気体廃棄物処理設備			0	
	気体廃棄物処理量 Nm ³ /h	Nm ³ /h	0	1.8	1/2表記
	ガス系配管径① mm	mm	0	35.6	
	ガス系配管長① m	m	0	70	
224.3	固体廃棄物処理設備			0	
	固体廃棄物処理量 ton/yr	ton/yr	0	1.7	m ³ /year
225.	燃料取扱及び貯蔵設備			0	
225.1	燃料受入・貯蔵及び搬出設備			0	
	プラグ駆動機構			0	
	プラグ駆動機構基數	基	0	0	
	造蓋体	基	0	1	
	鉛重量	ton	0	0	
	炭素鋼重量	ton	0	32	
	ポリエチレン重量	ton	0	1.3	
	燃料出入機			0	
	Aフレーム方式燃料出入機基數	基	0	0	
	回転チェンバ方式燃料出入機基數	基	0	0	
	台車式燃料出入機基數	基	0	0.5	
	炉外燃料貯蔵設備			0	
	貯蔵容量	体	0	0	
	移送アーム数	基	0	0	
	検査装置数	基	0	0	
	燃料取扱セル			0	
	燃料取扱機数	基	0	0.25	
	缶詰装置数	基	0	0	
	缶詰貯蔵ラック数	基	0	0	
	監視窓数	個	0	0	
	新燃料貯蔵ラック数	個	0	0.25	
	新燃料検査装置数	基	0	0.25	
	新燃料予熱装置数	基	0	0.5	
	燃料昇降機数	基	0	0.75	
	ガスロック数	個	0	0	
	パワーマニフレーテ数	基	0	0	
	乾式貯蔵設備			0	
	貯蔵管本数	本	0	0	
	湿式貯蔵設備			0	
	貯蔵管収納容器及びダクト重量	ton	0	0	
	洗浄槽数	基	0	0.5	
	貯蔵容量	体	0	693	
	水中移送機数	基	0	0.5	
	水処理設備数	基	0	0.25	
	UIS着脱方式			0	
	UISキャスク	キヤスク基數	0	0	
	UISビットライナー	ライナー表面積	m ²	0	
	ドアバルブ	原子炉床バルブ重量	ton	0	
	ドアバルブ	UISビット床バルブ重量	ton	0	
	全重量	ton	0	0	
225.2	格納容器内燃料取扱設備			3	
	燃料交換機			0	
	直動式燃料交換機基數	基	0	0	
	伸縮アーム型燃料交換機基數	基	0	0.5	
	炉内中継装置			0	
	炉内中継装置機基數	基	0	1	
	燃料移送セル			0	
	燃料移送セル監視窓数	個	0	0	
	全重量	ton	0	0	
226.	その他原子炉システム設備			0	
226.	不活性ガス受入れ及び処理設備			3	
	ガス流量			0	
	1次アルゴンガス流量	Nm ³ /h	0	1.1	通常運転時
	2次アルゴンガス流量	Nm ³ /h	0	0	通常運転時
	ガス配管径			0	0
	1次アルゴンガス配管径①	mm	0	34	配管径と配管長が対応するように記載
	ガス配管長			0	0
	1次アルゴンガス配管長	m	0	60	
	窒素ガス流量	Nm ³ /h	0	0	実験炉並
	窒素ガス配管径①	mm	0	0	
	リフトポンプアルゴンガス注入系			0	
	アルゴンガス注入系ガス流量	Nm ³ /min	0	7	水素注入装置
	アルゴンガス注入系配管径	mm	0	34	
	アルゴンガス注入系配管長	m	0	50	
226.2	予熱保温設備			3	
	予熱保温面積	m ²	0	1370	P R A C S を含む
	炉容器加熱用パネル容量	kW	0	750	
	炉容器加熱用パネル熱流束	kW/m ²	0	10	

表9.2-2 強制循環炉 機器の主要仕様

項目		単位	平成14年度	備考
226.3	冷却材挿入、貯蔵、充填及び純化設備		3	0
	貯蔵タンク重量 膨張タンク重量 電磁ポンプ流量	ton/基 ton/基 $m^3/min/基$		
1次系炉内コールドトラップ	基数 流量	基 $m^3/min/基$	2	容器内に設置されるコールドトラップ
1次系炉外コールドトラップ	基数 流量	基 $m^3/min/基$	0.1	
2次系コールドトラップ	基数 流量	基 $m^3/min/基$	0	
	プラントの冷却材重量 プラントの冷却材重量 EVST冷却設備除熱量	ton ton MWh	500 17000 0	鉛ビスマスPRACS 鉛ビスマスPRACSを含む
226.6	井戸水漏洩検出設備		3	0
	予熱保温面積	m^2	0	1370
226.7	原子炉設備補助冷却設備		0	0
226.8	非常用冷却水設備		3	0
	常用冷却水設備	流量 配管径①	0 mm 0 mm 0	0 0 0
	非常用冷却水設備	流量 配管径① 配管長①	0 mm 0 m	710 318.5 500
226.7	空葉挿用ガス冷却設備		0	0 実証炉プラン、最適化研究では該当設備なし
			3	
			0	
226.8	保守・補修設備		0	0
226.8	カリウム除去及び除染装置		3	0
	洗浄槽容積	m^3	0	15 ナトリウムを鉛ビスマスに読み替え
227.	計測制御設備		0	0
227.1	プロセス計測制御設備		0	0
227.14	プロセス制御設備及び安全保護系	制御棒体数	3	0
227.2	データ処理及び表示装置	体	0	36
	運転員操作室数	室	3	0
	アカウント入力点数	点	0	0.25
	アカウント出力点数	点	0	1200
	データ入出力点数	点	0	190
	データ入出力点数	点	0	400
227.3	放射線監視設備		3	0
	放射線監視装置設置部屋数	室	0	2
23.	タービン発電機設備		0	0
231.	タービン発電機		0	0
231.1	タービン発電機及び付属品	発電機出力	2	0
		kWe	0	1500000
231.2	基礎		2	0
	据付架台コンクリート体積	m^3	0	750
231.3	主及び補助蒸気設備		2	0
	主蒸気配管	主蒸気流量 配管径 配管長	0 mm 0	6242 1016 300
			0	40Bが3本
232.	循環水設備	造物体積 循環水流量 配管長	2 m^3/h 0	0 345000 270
233.	復水設備	重量流量 屋外設置シグ据付基礎コンクリート体積	2 m^3	0
234.	給水加熱設備	給水流量 給水管	2 ton/hr 0	0
		配管径 配管長	0 mm 0	6242 711.2 400
235.	その他のタービン設備機器	重量流量	2 ton/hr	0
24.	付属電気設備		0	0
241.	開閉設備		0	0
241.2.	所内給電用開閉設備	開閉器数	2	0
242.	所内給電用設備	台	0	5
242.1.	所内給電用及び起動用変圧設備	変圧器数 基礎体積	2 0	0
242.2.	コンバータステーション	開閉器数 変圧器数	0 台	0.75 1500
242.3.	補助電力設備	台	2	0
	ハーベリ設備数① ハーベリ設備容量① ディーゼル発電設備数① ディーゼル発電設備容量① インバータ数① インバータ容量①	系統 Ah/系統 系統 kW/系統 系統 kVA/系統	0 0 0 0 0 0	4 2000 2 3100 4 160
243.	配電盤		0	0
243.1	制御盤	盤数	2	0
243.2	補助電力及び信号盤	盤数	0	70
		盤数	2	0
		盤数	0	130

表9.2-2 強制循環炉 機器の主要仕様

	項目	単位	平成14年度	備考
244	防護設備	式	2 0	0
245	電気関係構築物及び配線収納設備	台	0 0	5 0
245.1	地下配線用ケーブル	m	2 0	0 0
245.2	ケーブルレイ	m	2 0	130 0
245.3	トレイ長さ	m	2 0	4100 0
245.4	コンクリート長さ	m	2 0	12100 0
246	動力用及び制御用配線	m	0 2	0 0
246.1	発電機回路用配線	m	0 0	25 220
246.2	所内給電用配線	m	2	0
	所内給電用動力配線長 制御及び計装用配線長 格納容器貫通部数	m m 箇所	0 0 0	160000 60000 36
251	発電用堆設備	台	0	0
251.1	輸送、荷役設備	台	0	0
251.2	クレーン及び料作	ton	0 0 2	50 19 0
	一般ケーレド・クーン容量① 一般ケーレド・クーンス*② 耐震ケーレド・クーン容量① 耐震ケーレド・クーンス*② 耐震ケーレド・クーン容量②	ton	0 0 0 0 0	300 21 0
252	空気・水・蒸気供給設備	台	0	0
252.1	圧縮空気供給設備	台	8	0
	コアレガ数 配管径 配管長	台 mm m	0 0 0	0.75 34 60
252.2	フロントヒックス水設備	台	0	0
	機器数 配管径① 配管長①	台 mm m	0 0 0	0.5 139.3 100
252.3	通常消火設備	台	0	0
	機器数 配管径① 配管長①	台 mm m	0 0 0	0.5 42.7 3500
252.4	補助蒸気設備	台	3	0
	機器数 配管径① 配管長①	台 mm m	0 0 0	0.5 89.1 1000
252.5	アリカル消火設備	台	3	0
	2次主冷却設備及びSG接付最下室床面積	m ²	0	0
26	特殊材料	台	0	0
261	1次冷却材	ton	3	0
262	2次冷却材	ton	0	16500 全冷却材合計
263	その他の流体	ton	1	500 PRACS船ビスマス重量追加です
	その他の流体の全重量	ton	0	0

10. おわりに

平成14年度の重金属冷却炉設計研究では、構造健全性、耐震性、運転性等の概念成立性を左右する枢要課題の見通しを確認するための検討を行った。主な内容は以下のとおりである。

(1) 原子炉構造、炉内構造に対する耐震健全性

(a) 原子炉構造：耐震成立性を確保できる見通しが得られた。

(b) 炉上部構造：

燃料の炉内中継用案内管は、片持ち梁状では耐震性確保が困難であるので、内筒などの近くにある比較的剛性の高い構造物からサポートする必要がある。

(2) 熱的健全性

実用化戦略調査研究で検討されている中型タンク式鉛-ビスマス冷却炉とナトリウム冷却大型炉の熱的健全性の観点からの特質を整理し、温度成層化や温度揺らぎ等の特徴的な現象を対象として両者の差異を評価した。

(3) 運転性

以下の作業を実施し自然循環炉の運転性見通しを得た。

(a) 制御特性検討に必要な水蒸気系概念の具体化

(b) 一体型炉の制御特性、過渡特性の検討

(c) 冷却材チャージ、予熱処理手順を含む初期起動時運転手順の具体化

(4) 安全性

伝熱管破断時の炉心部の流量変化に伴う炉心出力、温度変化などに着目した熱流動解析、熱的側面からの炉心安全性評価及び炉心への水蒸気侵入による印加反応度について検討した結果、炉心部の温度上昇は小さく、炉心の健全性は確保できるとともに安全上問題になることはない見通しが得られた。

(5) 炉内構造とBOP設備の具体化