

Na 冷却中型モジュール炉設計研究 (研究報告)



2002年5月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

Na 冷却中型モジュール炉設計研究 (研究報告)

島川 佳郎^{*1}、新部 信昭^{*1}、堀 徹^{*1}、藤井 正^{*1}、木曾原 直之^{*1}、
内田 昌人^{*1}、近澤 佳隆^{*1}、惣万 芳人^{*1}、笠井 重夫^{*2}、此村 守^{*1}

要 旨

実用化戦略調査研究フェーズⅠにおいて、経済性目標を初めとする設計要求を満足する可能性のある有望な Na 冷却中型モジュール炉概念として、アドバンスト・ループ型炉が抽出された。

本研究のフェーズⅡでは、アドバンスト・ループ型炉をベースとした Na 冷却中型モジュール炉の予備的な概念設計を進め、実用炉としての魅力と優位性を持ったプラント概念に仕上げ、フェーズⅡ終了時の候補概念の絞り込みに供する計画である。

本資料は、フェーズⅡ初年度に当たる平成 13 年度に実施した Na 冷却中型モジュール炉設計研究の成果をまとめたものである。

フェーズⅠで構築した Na 冷却中型モジュール炉概念は、その建設コストが Na 冷却大型炉に比べて約 10% 高かったことから、平成 13 年度の設計研究では、アドバンスト・ループ型炉をベースに新たな合理化アイデアを盛り込み、経済的に大型炉に匹敵し得ると考えられる中型モジュール炉概念を再構築した。また、再構築した概念について主要設備の基本仕様を設定し、安全性、構造健全性及び熱流動に関する成立性評価を行って概念成立性を検討するとともに、運転・保守補修性の検討、経済性評価等を実施した。

本研究の結果、経済性目標（建設コスト 20 万円/kWe 以下、等）を満足し、概念成立性に関する基本的な見通しを有する Na 冷却中型モジュール炉のプラント概念が構築された。今後は、要素試験の成果等を適宜反映しつつ予備的概念設計を進め、プラント基本概念を明確化するとともに、概念成立性の見通し、経済性目標達成見通しを確たるものとして行く計画である。

*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 : 日本原子力発電株式会社（現、株式会社 東芝）

WBS 番号 : 121120

本研究は、実用化戦略調査研究フェーズⅡの一環として実施したものである。

Design Study on Sodium-Cooled Middle-Scale Modular Reactor

Yoshio Shimakawa^{*1}、Nobuaki Nibe^{*1}、Toru Hori^{*1}、Tadashi Fujii^{*1}、
Naoyuki Kishohara^{*1}、Masato Uchita^{*1}、Yoshitaka Tikitazawa^{*1}、
Yoshito Soman^{*1}、Shigeo Kasai^{*2}、Mamoru Konomura^{*1}

Abstract

In Phase 1 of the "Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems (F/S)", an advanced loop type reactor has been selected as a promising concept of sodium-cooled middle-scale modular reactor, which has a possibility to fulfill the design requirements of the F/S.

In Phase 2 of the F/S, it is planned to precede a preliminary conceptual design of a sodium-cooled middle-scale modular reactor based on the design of the advanced loop type reactor. Through the design study, it is intended to construct such a plant concept that can show its attraction and competitiveness as a commercialized reactor.

This report summarizes the results of the design study on the sodium-cooled middle-scale modular reactor performed in JFY2001, which is the first year of Phase 2.

As the construction cost of the sodium-cooled middle-scale modular reactor, which has been constructed in Phase 1, was about 10% higher than that of the sodium-cooled large-scale reactor, a new concept of the middle-scale modular reactor, which is expected to be equal to the large-scale reactor from a viewpoint of economic competitiveness, has been re-constructed based on the design of the advanced loop type reactor. After that, fundamental specifications of main systems and components for the new concept have been set, and critical subjects related to safety, structural integrity, thermal hydraulics, operability, maintainability and economy have been examined and evaluated.

As a result of this study, the plant concept of the sodium-cooled middle-scale modular reactor has been constructed, which has a prospect to satisfy the economic goal (construction cost: less than 200,000yens/kWe, etc.) and has a prospect to solve the critical subjects. From now on, reflecting the results of elemental experiments, the preliminary conceptual design of this plant will be preceded toward the selection for narrowing down candidate concepts at the end of Phase 2.

*1 : FBR System Engineering Group, System Engineering and Technology Division OEC, JNC

*2 : The Japan Atomic Power Company (Present, TOSHIBA Corporation)

目 次

要旨	i
Abstract	ii
表リスト	iv
図リスト	v
1. 緒言	1
2. 新たな中型モジュール炉概念の構築	6
2.1 基本方針、検討条件及び検討方法	6
2.2 各設備の候補概念	7
2.3 新プラント概念の構築	10
2.4 クリティカルな課題	13
3. 研究成果概要	39
3.1 プラント概念構築	39
3.2 安全性評価	42
3.3 構造健全性評価	43
3.4 熱流動評価	43
3.5 運転・保守補修性等の検討	44
3.6 経済性評価	44
4. クリティカルな課題の検討	69
4.1 2次系関連の課題	69
4.2 崩壊熱除去系関連の課題	71
4.3 水・蒸気系関連の課題	73
4.4 BOP 設備関連の課題	73
4.5 燃料取扱設備関連の課題	75
5. 結言	87
6. 略語一覧	88
7. 参考文献	89

表リスト

表 1-1	フェーズⅡにおける Na 冷却中型モジュール炉設計研究の基本計画	4
表 2. 2-1	各設備の候補概念（2次系）	14
表 2. 2-2	各設備の候補概念（崩壊熱除去系）	16
表 2. 2-3	各設備の候補概念（Na 漏えい対策）	17
表 2. 2-4	各設備の候補概念（Na 水反応対策）	18
表 2. 2-5	各設備の候補概念（水・蒸気系）	19
表 2. 2-6	各設備の候補概念（BOP）	20
表 2. 2-7	各設備の候補概念（燃料取扱設備）	21
表 2. 2-8	各設備の候補概念（建屋・配置、建設工法）	22
表 2. 3-1	候補概念案の一覧及び新概念案の選定方針	23
表 2. 3-2	新プラント概念の構築（2次系：SG 型式）	24
表 2. 3-3	直管型 SG の採用による物量及びコストの削減効果	25
表 2. 3-4	直管型 SG の採否に関する議論	26
表 2. 3-5	新プラント概念の構築 (2次系：2次ポンプ型式、機器合体・分離型式)	27
表 2. 3-6	新プラント概念の構築（崩壊熱除去系）	28
表 2. 3-7	想定事象に対する除熱機能の充足性	29
表 2. 3-8	新プラント概念の構築 (Na 漏えい対策及び Na 水反応対策)	30
表 2. 3-9	新プラント概念の構築（水・蒸気系）	31
表 2. 3-10	新プラント概念の構築（BOP）	32
表 2. 3-11	新プラント概念の構築（燃料取扱設備）	34
表 2. 3-12	新プラント概念の構築（建屋・配置）	35
表 2. 3-13	新プラント概念の経済性目標の達成見通し	36
表 2. 4-1	クリティカルな課題	37
表 3-1	研究成果概要	46
表 3-2	フェーズⅡにおける設計要求	52
表 4-1	クリティカル課題に関する検討の概要	76

図リスト

図 1-1	新たな中型モジュール炉概念構築に向けての作業フロー	5
図 2.3-1	新たな Na 冷却中型モジュール炉概念	38
図 3.1-1	レファレンス炉心（ABLE 型均質炉心）の炉心構成及び主要仕様	54
図 3.1-2	原子炉構造概念	55
図 3.1-3	1 次・2 次冷却系系統概念	56
図 3.1-4	IHX・1 次ポンプ合体機器構造概念	57
図 3.1-5	SG 構造概念	58
図 3.1-6	2 次ポンプ構造概念	59
図 3.1-7	2 次系代案設計（EMP 使用）	60
図 3.1-8	崩壊熱除去系系統概念	61
図 3.1-9	原子炉建屋平面図	62
図 3.1-10	原子炉建屋鳥瞰図	63
図 3.2-1	制御棒誤引抜きの解析・評価結果	64
図 3.2-2	1 次ポンプ軸固着の解析・評価結果	65
図 3.3-1	熱応力に対する構造健全性	66
図 3.5-1	定検工程	67
図 3.5-2	建設工程	68
図 4.1-1	クリティカル課題 (直管型 SG 伝熱管間、管一胴間の熱膨張差の吸収)	77
図 4.1-2	クリティカル課題 (直管型 SG 水・蒸気側流動不安定の抑制)	78
図 4.1-3	クリティカル課題 (直管型 SG 伝熱管破損伝播挙動の把握)	79
図 4.1-4	クリティカル課題 (2 次系システムの総合評価)	80
図 4.2-1	クリティカル課題 (自然循環除熱能力の把握)	81
図 4.2-2	クリティカル課題 (崩壊熱除去系システムの総合評価)	82
図 4.4-1	クリティカル課題 (非常用電源 (安全系) 共用化に関する検討)	83
図 4.4-2	クリティカル課題 (コンクリート設計温度引き上げに関する検討)	84
図 4.4-3	クリティカル課題 (格納容器内空調の常用系化に関する検討)	85
図 4.5-1	クリティカル課題 (レールレス走行方式燃料出入機の検討)	86

1. 緒 言

Na 冷却中型モジュール炉については、実用化戦略調査研究フェーズⅠでの検討により、経済性目標を初めとする設計要求を満足する可能性のあるプラント概念としてアドバンスト・ループ型炉が抽出された。

しかしながら、その建設コストは Na 冷却大型炉に比べて約 10%高く、各部の設計も大型炉ほど詰められていない状況であったため、このプラント概念をベースに新たな合理化アイデアを盛り込み、さらなる経済性向上の見込める中型モジュール炉のプラント概念を再構築し、その概念を対象に予備的な設計研究を進めることとした。

本研究のフェーズⅡ（平成 13～17 年度）における Na 冷却炉設計研究のスケジュールを表 1-1 に示す。同表に示すように、新たな合理化アイデアを盛り込んだプラント概念の再構築をフェーズⅡの初年度に当たる平成 13 年度に実施するとともに、フェーズⅡ終了時のプラント概念の絞り込みに向けて 3 年後及び 5 年後の目標を下記のように定め、Na 冷却中型モジュール炉の各年度の設計作業を展開するスケジュールとしている。

(1) 5 年後の目標

フェーズⅡ終了時に、フェーズⅢに向けて実用化候補概念を 2 概念程度まで絞り込むが、設計要求を満足する Na 冷却中型モジュール炉概念を構築し、概念選定に供することができるようとする。

(2) 3 年後の目標

5 年後の目標クリアに向けて、下記の目標をフェーズⅡのなるべく早い時点で達成する。次期長計の策定に向けて必要な情報提示を行う必要があることも勘案し、その期限を 3 年後に設定する。

a. プラント基本概念の明確化

概念成立性を左右する安全性、熱流動、構造健全性等の課題について実験的研究を含む検討を進め、それらの課題解決の見通しを得てプラント基本概念を明確にする。

また、Na 冷却炉のポテンシャルを活かした高性能炉心概念の追求、Na 冷却炉に特有の弱点をカバーする設計方策の追求等により、燃料サイクルとの整合性を有し、かつ、実用炉に相応しい高い信頼性の確保が可能となるプラント概念に仕上げて行く。

b. 経済性目標達成可能性の明確化

プラントの予備的概念設計を進め、詳細物量データを得て経済性目標達成の見通しを確たるものとする。

本資料は、平成 13 年度に実施した Na 冷却中型モジュール炉の設計研究の成果をまとめたものである。図 1-1 に平成 13 年度作業の検討フローを示す。上期には「中型炉概念創出 WG」の活動を中心に、メーカ提案等を通じて新たな Na 冷却中型モジュール炉概念の再構築を行い、下期には再構築したプラント概念について設備・機器の具体化を進めるとともに、成立性評価及び経済性評価を実施した。

上期に実施したプラント概念の再構築に関しては、原子炉構造及び1次系の概念はフェーズIで構築したベース概念を踏襲し、2次系、BOP、燃料取扱設備、Na漏えい対策、Na水反応対策、建屋・工法等について、これまでの設計にとらわれず、さらなる建設コスト削減と信頼性向上を見込める新たな概念を検討した。その結果、直管型SGと機械式ポンプを分離配置した2次系システム、2系統のPRACSと1系統のIRACSより成る完全自然循環型崩壊熱除去系システム、1500MWeのタービンの3原子炉での共用、電気設備、換気空調設備及びユーティリティ設備の容量削減並びに共用化、といった概念を採用した新プラント概念を構築した。

上期のプラント概念の再構築を受けて、下期には設備・機器の具体化、成立性評価及び経済性評価を実施した。その概要は以下のとおりである。

(1) プラント概念構築

炉心・燃料、原子炉構造、冷却系、崩壊熱除去系、燃料取扱設備、BOP、建屋・配置等のプラント概念設計検討を行い、主要設備の基本仕様を設定した。

(2) 成立性評価

プラントの成立性に関わる安全評価を実施するとともに、主要設備の成立性に関する構造健全性評価及び熱流動評価を実施した。

(3) 運転・保守補修性等の検討

プラント基本計画、運転制御、保守・補修計画等について検討した。また、定検期間及び建設期間の短縮について検討した。

(4) 経済性評価

物量データ、建設工期等に基づく建設コストを評価した。また、建設コスト、所内負荷率、稼働率等に基づく発電コストを評価した。

なお、新たな合理化アイデアの導入に伴って、安全性、構造健全性及び熱流動に関するNa冷却大型炉と共通の課題に加え、さらなる建設コスト削減及び信頼性向上を実現する上でキーとなる新たな課題（下記）が発生している。下期作業では、これらをクリティカル課題と位置付け、重点的に検討・評価を行った。

(1) 2次系関連の課題

- a. 直管型SGの伝熱管間、管一胴間の熱膨張差の吸収
- b. 直管型SGの水・蒸気側流動不安定の抑制
- c. 直管型SGの伝熱管破損伝播挙動の把握
- d. 2次系システムの総合評価

(2) 崩壊熱除去系関連の課題

- a. 自然循環除熱能力の把握
- b. 崩壊熱除去系システムの総合評価

(3) 水・蒸気系関連の課題

- a. 原子炉1基トリップ時の水・蒸気系制御方式の検討

(4) BOP設備関連の課題

- a. 非常用電源（安全系）共用化に関する検討

b. コンクリート設計温度引き上げに関する検討

c. 格納容器内空調の常用系化に関する検討

(5) 燃料取扱設備関連の課題

a. レールレス走行方式燃料出入機の検討

本資料の第2章では上期に実施した新たなプラント概念についてまとめる。また、第3章では下期に実施したNa冷却中型モジュール炉設計研究の研究成果概要を網羅的にまとめ、第4章ではクリティカル課題の検討結果についてまとめる。

表 1-1 フェーズⅡにおけるNa冷却中型モジュール炉設計研究の基本計画

項目	平成13年度	平成14年度	平成15年度	3年間の達成目標	平成16年度	平成17年度	5年間の達成目標
課題の整理・検討	主要課題の整理及び検討 (Na炉設計検討会での指摘事項の解決)		—	①プラント基本概念の明確化 ・安全性、熱流動、構造健全性等に関する課題解決の見通しを確たるものとする ・燃料サイクルとの整合性を有し、かつ、実用炉に相応しい高い信頼性の確保が可能となる概念に仕上げる	調整設計 ・フェーズ2のR&Dの中間的成果を踏まえた設計の見直し	総合評価 ・経済性、安全性、構造健全性、製作建設性、運転・保守補修性を総合的に評価 ・フェーズ3以降の開発計画を策定	①実用化戦略調査 研究の設計要求を満足するプラント概念を提示
中型炉概念再構築	新たな概念の構築 (将来炉心、2次系、BOP、建屋・工法等の検討)	—	—				
設計方針、基準、条件等の整備	基本的設計条件を整備 (構造、材料、耐震、遮蔽、安全、サイト条件等)	設計条件の見直し	設計条件の最終設定				
プラント基本仕様の設定	基本仕様の選定・選定根拠の明確化 (炉型、H/B、ループ数、合体方式、DHRS等)	基本仕様の見直し	基本仕様の最終設定				
炉心・燃料設計	炉心仕様設定 (基本仕様を反映)	詳細設計	詳細設計 (必要なら)				
炉構造、冷却系系統・機器設計	系統・機器仕様設定 (基本仕様を反映)	詳細設計	詳細設計 (必要なら)	②経済性目標達成可能性の明確化 ・詳細物量データに基づき見通しを判断する	設計図書類整備	設計図書類整備	
	熱流動、構造健全性評価 (成立性に関わるもの)	熱流動、構造健全性評価 (主要な課題について)	熱流動、構造健全性評価 (一式)				
BOP、建屋等の設計	合理化検討	設備仕様設定 (プラントとの整合)	詳細設計				
燃取設備設計	合理化検討、設備仕様設定	合理化検討、設備仕様設定 (EVST削除採否判断)	詳細設計				
安全設計	事象分類、安全評価 (成立性に関わるもの)	安全評価 (主要な事象について)	安全評価(一式)				
プラント計画	プラント基本計画、運転制御、保守・補修計画、定検等の概念のまとめ	システムデータを整備し、制御特性解析、熱過渡解析等を実施	プラント基本運用、補修計画等の設定				
経済性評価	物量による概算	物量による概算	物量による評価				

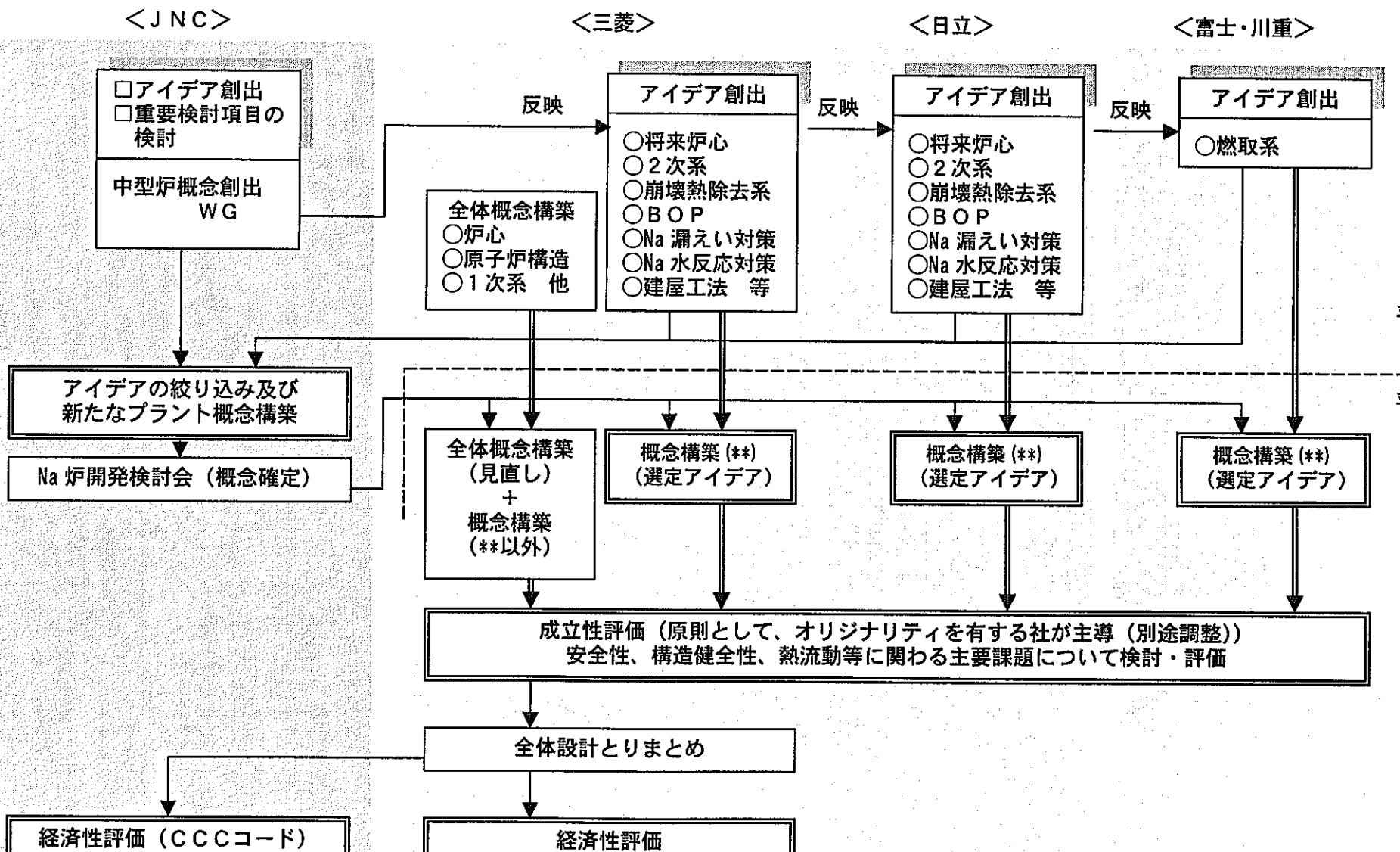


図 1-1 新たな中型モジュール炉概念構築に向けての作業フロー

2. 新たな中型モジュール炉概念の構築

2.1 基本方針、検討条件及び検討方法

(1) 基本方針

新たなNa冷却中型モジュール炉概念の構築に当たっての基本方針は下記の通りとした。

- a. 原子炉構造及び1次系は、フェーズIで構築したアドバンスト・ループ型炉の基本概念を踏襲する。すなわち、原子炉構造コンパクト化、配管短縮化、ループ数削減（2ループ構成）、機器合体（IHXと1次ポンプとの合体）というアドバンスト・ループ型炉の基本概念には手を加えない。
- b. 2次系、崩壊熱除去系、BOP、燃料取扱設備、Na漏えい対策、Na水反応対策、建屋・工法等については、フェーズI終了時点のアドバンスト・ループ型炉の設計にとらわれることなく、さらなる建設コスト削減及び信頼性向上に向けて新たな概念を構築する。

(2) 検討条件

また、主要な検討条件は下記の通りとした。

- a. 想定する技術レベルは、2015年の時点で実用化に向けた技術体系を確立する見通しのあるものをベースとする。
- b. 出力レベルは原子炉1基当たり50万kWe、サイト合計300万kWeとする。
- c. 建設コスト目標は、モジュールプラントとする場合17.5万円/kWe程度以下とする。この値は、フェーズIにおけるアドバンスト・ループ型炉（中型モジュール炉）の建設コストのJNC評価値を基に、約10%の削減を目指して設定したものである^(*)。
- d. また、シングルプラントとして設計する場合の建設コスト目標を30万円/kWe程度以下とする。この値は、フェーズIでの検討をベースにモジュールプラントとシングルプラントとの建設コスト比率を求め、それを上記c. の値に乘じた値を参考に設定したものである。

(3) 検討方法

新たな概念構築に向けての作業フローは図1-1に記した通りであり、JNC内及びメーカーからの合理化アイデアの提案を集約・検討し、有望なアイデアを絞り込んで新たなプラント概念を構築した。具体的な手順は以下の通りである。

- a. 提案された合理化アイデアを分類・整理して、2次系、崩壊熱除去系、Na漏えい対策、Na水反応対策、水・蒸気系、BOP、燃料取扱設備及び建屋・配置について、それらを取り入れた複数の候補概念案を作成する。
- b. 経済性、運転・信頼性、開発リスク及び成立性の観点からこれらの候補概念案を総合的に評価し、設備毎に最も有望と考えられる概念を選定する。
- c. 選定された各設備の概念を組み合わせ、新たなプラント概念を構築する。

(*) 本研究ではコマンド・コスト・コード（CCC）を用いて物量ベースで建設コストを評価しているが、既設軽水炉を対象に同コードで求めた建設コストと実際の建設コスト（公開データ）を比較すると、CCC評価値は約13%低めの値となることが分かっている。したがって、建設コスト目標を17.5万円/kWe程度以下としておけば、この補正を行った場合でも20万円/kWe以下の経済性目標をほぼクリアできる。

上記 b. の概念選定に当たっては、大型炉に匹敵し得る経済性を達成するという本検討の目的に照らして、経済性を最も重視し、経済性→運転・信頼性→開発リスク及び成立性、の優先順位とした。

なお、このような議論を行う場として、炉心燃料システム Gr、FBR サイクル安全設計 Gr、構造信頼性研究 Gr、流体計算工学研究 Gr 及び FBR システム Gr よりのメンバーで構成される「中型炉概念創出 WG」⁽²⁾を設け、本 WG での議論を中心に概念構築を進めた。

2.2 各設備の候補概念

提案された合理化アイデアを取り入れた各設備の候補概念を表 2.2-1～表 2.2-8 のように集約した。これらの表には、候補概念の特徴・狙い、経済性向上効果及び開発課題をコンパクトにまとめている。以下、その概要を記す。

(1) 2 次系（表 2.2-1 参照）

下記の 6 つの候補概念を設定した。

- a. M-1 : 直管型 SG + 機械式ポンプ + 分離配置
- b. M-2 : ヘリカルコイル管型 SG + 機械式ポンプ + 分離配置
- c. H-1 : 直管型 SG + 電磁式ポンプ + 分離配置
- d. H-2 : ヘリカルコイル管型 SG + 電磁式ポンプ + 分離配置
- e. H-3 : ヘリカルコイル管型 SG + 機械式ポンプ + 機器合体
- f. H-4 : ヘリカルコイル管型 SG + 電磁式ポンプ + 機器合体

これらの概念は、いずれも 2 次系ループ数を削減し、1 ループ構成としている点は共通であるが、SG 型式（直管型、ヘリカルコイル管型）、2 次ポンプ型式（機械式、電磁式）、機器合体・分離型式（分離配置、機器合体）に関して、どの型式を選択するかにより上記のバリエーションが生じている。

直管型 SG を採用した概念（M-1 及び H-1）は、ヘリカルコイル管型 SG を採用した他の概念に比べて SG の物量及びコストを 20%程度削減できる可能性があるが、直管型 SG は国内での実績に乏しく、また、本型式に特有の技術課題（伝熱管間、伝熱管一胴間の熱膨張差、水側流動不安定領域の拡大等）が存在することに注意が必要である。

電磁ポンプを採用した概念（H-1、H-2 及び H-4）は、保守補修性の向上、配置上の自由度の拡大が期待できるが、現状開発レベル以上の容量の電磁ポンプを使用する場合、その開発に長期の R&D を要すること、所内負荷率がやや増加することに注意が必要である。

また、SG と 2 次ポンプとの合体を採用した概念（H-3 及び H-4）は、系統簡素化による物量削減を狙っているが、機械式ポンプと合体する場合（H-3）は、IHX・1 次ポンプ合体機器でも課題となっている伝熱管の振動・摩耗への配慮、万一のインペラミサイルによる伝熱管大規模破損への配慮が必要である。

(2) 崩壊熱除去系（表 2.2-2 参照）

下記の 3 つの候補概念を設定した。

- a. M-1 : PRACS × 2 系統 + IRACS × 1 系統 + 窒素ガス冷却小型 DHX
- b. H-1 : PRACS × 2 系統 + RVACS

c. H-2 : PRACS×2系統+メンテナンス冷却系

これらの概念は、いずれも電磁ポンプや送風機などの動的機器を使用しない完全自然循環型のPRACS及びIRACSを基本とした崩壊熱除去系であるが、M-1は2次系の熱容量の有効活用を狙ってPRACSとIRACSを併用する構成とし、H-1及びH-2は2次系の非安全系化を狙ってPRACSのみからなる構成としている。

また、Na炉設計検討会で指摘された事象（1系統が使用不可の状況下で法律上定められた他の1系統のメンテナンスに入る場合）及びメンテナンス時のサイフォンブレークに対応するため、M-1では窒素ガス冷却小型DHX（常用系）、H-1ではRVACS（安全系）、H-2ではメンテナンス冷却系（安全系）をそれぞれ設けている。

(3) Na漏えい対策（表2.2-3参照）

下記の2つの候補概念を設定した。

a. M-1 : エンクロージャ（ホット式）+A/C伝熱管二重管化+N₂ガス雰囲気等

b. H-1 : エンクロージャ（ホット式）+A/C伝熱管二重管化+Arガス雰囲気

これらの概念は、2次系のNaバウンダリをエンクロージャにより二重化し、その内部を小区画化するとともに内部の雰囲気を不活性化してNa漏えいの影響の局限、復旧期間の短縮化を図っている。また、A/C伝熱管にも二重管を採用し、設計対応の難しいA/C伝熱管部でのNa漏えい・燃焼をBDBEとすることを狙っている。Na漏えい検出器の種類等、細部に相違はあるものの、これらは基本的には同様の概念であるといえる。

なお、H-1では、高温Arガス洗浄による復旧期間の短縮化を視野に、不活性ガスとしてArを採用している。

(4) Na水反応対策（表2.2-4参照）

下記の2つの候補概念を設定した。

a. M-1 : 固体電解質水素計及び音響計の安全保護系化

b. H-1 : 音響計の安全保護系化+SG伝熱管コーティング等

これらの概念は、検出系の高度化（固体電解質水素計及び音響計の信頼性向上）によりSG伝熱管破損の早期検知を可能とし、DBLを局限するとともに反応生成物処理系の簡素化を図るものであり、基本的には同様の概念であるといえる。

なお、H-1ではセラミクスコーティングにより伝熱管の耐ウエステージ性を向上させる方策が提案されているが、現時点ではアイデア段階に留まっている。

(5) 水・蒸気系（表2.2-5参照）

下記の3つの候補概念を設定した。

a. M-1 : 1500MWeタービン×2+給水ポンプ電動化等

b. H-1 : 1500MWeタービン×2+給水ポンプ電動化等

c. H-2 : 500MWeタービン×6+給水ポンプ電動化等+低圧タービン1車室化

これらの概念のうち、M-1及びH-1は原子炉3基で1タービンを共用するもので、基本的には同じものである。また、H-2は原子炉1基にそれぞれ1タービンを設けるもので、タービンを共用した場合（M-1及びH-1）に予想される運転制御上の課題を回避することを狙ったものである。また、全ての概念で給水ポンプの電動化を採用しているが、これは、（発電量の減少

というデメリットはあるが) 水・蒸気系設備の簡素化と保守費の低減が期待できることから採用されたものである。

(6) BOP (表 2.2-6 参照)

下記の 2 つの候補概念を設定した。

- a. M-1 : 電気設備、換気空調設備及びユーティリティ設備の容量削減+共用化
- b. H-1 : 電気設備、換気空調設備及びユーティリティ設備の容量削減+共用化

これらの概念は、設備合理化と共用化により BOP 設備の容量及び系統数を削減するものである点は共通であるが、M-1 では徹底した設備合理化と共用化が図られており、アイデアとしては、H-1 は M-1 にほぼ包絡されるので、以下 M-1 の概念について説明する。

非常用電源設備に関しては、完全自然循環型崩壊熱除去系の採用に伴ってポニーモータが削除され、非常用電源への早期起動要求がなくなったことから、従来のディーゼル発電機に替わり、冷却系、潤滑油系等の補助設備がないコンパクトなガスタービン発電機を採用している。また、完全自然循環型崩壊熱除去系の採用と格納容器内空調の常用系化により非常用電源負荷が大幅に削減されることから、ガスタービン発電機は小容量のものとし、かつ、モジュール間で共用することにより設備数を大幅に削減している。

換気空調設備に関しては、室温上限値の緩和、2 次系設備室の自然通風除熱の採用により設備容量の削減を図っている。また、常用系電気設備、ユーティリティ設備等についても、モジュール間での共用化を進め、系統数の削減を図っている。

さらに、中央制御室をモジュール間で共用化してその面積を削減するとともに、運転員の削減を図っている。

(7) 燃料取扱設備 (表 2.2-7 参照)

下記の 3 つの候補概念を設定した。

- a. M-1 : 水プール直接貯蔵方式+レールレス走行方式燃料出入機
- b. FK-1 : EVST 貯蔵方式+レールレス走行方式燃料出入機
- c. FK-2 : EVST 貯蔵方式+切替走行・中継方式燃料出入機

これらの概念では、燃料貯蔵方式として、M-1 は水プール直接貯蔵方式、FK-1 及び FK-2 は EVST 貯蔵方式を採用している。また、燃料移送方式として、M-1 及び FK-1 はレールレス走行方式、FK-2 は切替走行・中継方式を採用している。

燃料貯蔵方式については、直接貯蔵方式と EVST 貯蔵方式との比較・評価が別途進められており、平成 14 年度末に概念選定が行われる計画であるため、本検討では燃料移送方式の選定のみを行う。

レールレス走行方式は、燃料出入機を 2 次元走行の可能な無軌道車に搭載して運用し、各モジュールと燃料取扱設備との間の軌道(レール)やターンテーブルを削除する概念であり、従来型の切替走行・中継方式に比べて物量削減が可能であるが、停止位置精度、耐震性、ケーブル処理等の課題をクリアした無軌道車の開発が必要となる。

(8) 建屋・配置 (表 2.2-8 参照)

下記の候補概念を設定した。

- a. M-1 : 燃料貯蔵設備の移設+A/C の屋上への移設

燃料貯蔵設備を従来の燃料出入機走行通路の下階に移設し、燃料貯蔵建屋を削除するとともに、崩壊熱除去系の A/C を屋上に移設して、建屋容積を削減する概念である。

2.3 新プラント概念の構築

上記 2.2 で述べた候補概念案を経済性、運転・信頼性、開発リスク及び成立性の観点から総合的に評価し、設備毎に最も有望と考えられる概念を選定する。表 2.3-1 に候補概念案の一覧表と有望概念の選定方針を示す。同表に示すように、大型炉に匹敵し得る経済性を達成するという本検討の目的に照らして、経済性向上の可能性を最も重視して選定の優先順位を、経済性 → 運転・信頼性 → 開発リスク及び成立性、とし、Na 冷却大型炉にはない新たな開発課題が発生することもある程度許容することとした。

以下、有望概念の選定結果とその理由を設備毎に記す。

(1) 2 次系

2 次系の候補概念は、SG 型式、2 次ポンプ型式及び機器合体・分離型式についてそれぞれ異なるオプションを選択して組み立てられた概念であることから、SG 型式（直管型、ヘリカルコイル管型）、2 次ポンプ型式（機械式、電磁式）、機器合体・分離型式（分離配置、機器合体）の 3 点について、それぞれの有望概念を選定することとした。

a. SG 型式

表 2.3-2 に評価結果をまとめる。

直管型 SG を採用した場合、ヘリカルコイル管型 SG を採用した場合と比べ、SG コストを約 16% 削減できる可能性があるため、経済性向上効果を優先して直管型 SG をオプション 1 とした。軸長の長い直管型 SG を採用した場合、SG は必然的に高所配置となるので、大きな伝熱中心差と 2 次系の熱容量を有効活用できる IRACS により、効率良い崩壊熱除去が可能となることが期待できる。また、IHX 伝熱管破損時のインリーク確保が容易となる。

ただし、直管型 SG を採用した場合の SG コストの削減効果については、表 2.3-3 に示すように、メーカによりその見解が異なっている（加工費に関する見積もりが異なっている）ので、今後の設計研究の中で SG コストの詳細検討を行う必要がある。

また、直管型 SG にはヘリカルコイル管型 SG にはない課題がいくつか存在する。表 2.3-4 に実証炉基本仕様設定時の SG 型式選定に関する議論を要約して示すが、ここに挙げられた課題（伝熱管間、伝熱管一胴間の熱膨張差、水側流動不安定領域拡大、水リーク時の伝熱管破損伝播挙動等）について今後の設計研究の中で詳細検討を行い、直管型 SG の成立性を確認していく必要がある。本検討では、これらの開発リスクにより直管型 SG が成立困難となつた場合を考慮して、ヘリカルコイル管型 SG をオプション 2 とした。

b. 2 次ポンプ型式

表 2.3-5 に評価結果をまとめる。

電磁ポンプを採用した場合、建設コストを削減できる可能性があるが、その削減幅は約 0.3~0.4% と見積もられ、その経済的メリットは小さい。

電磁ポンプを採用した概念のうち、H-1 及び H-2 は現状開発レベルのポンプ 2 基を 2 次系配管に横置きで抱かせる方式であり、H-4 は現状開発レベルの約 2 倍の容量を持つポンプ 1

基を SG 内に設置する方式としているが、前者の場合は横置き電磁ポンプの耐震性確保方策及び熱膨張に対する健全性確保方策に課題があり、サポート等のための物量が増加して経済的メリットが出てこなくなる可能性がある。また、後者の場合は現状開発レベル以上の容量を持つ電磁ポンプのために長期間の R&D が必要となる。

このように、経済的メリットが期待できることから、実績のある機械式ポンプをレファレンスに選定した。ただし、H-1 及び H-2 で想定している規模の電磁ポンプの試験データが得られていること、保守補修性の向上が期待できることから、電磁ポンプを代案と位置付け、今後ともその開発状況をフォローすることとした。

c. 機器合体・分離型式

表 2.3-5 に評価結果をまとめる。

SG と 2 次ポンプを合体した場合、SG 本体が大型化するため建設コストが僅かに(約 0.2%) 増加し、経済性向上に繋がらない。また、ポンプと SG 伝熱管の検査が干渉する可能性、伝熱管の振動・摩耗やインペラミサイルによる伝熱管大規模破損の可能性がある。

機器合体による経済的メリットが期待できないことから、SG と 2 次ポンプの分離配置を採用する。

(2) 崩壊熱除去系

崩壊熱除去系の建設コスト比率は約 1.2% と低いので、経済性の多少の善し悪しは決定要因にならないと考えられる。そこで、上記(1)で選定した 2 次系システム(直管型 SG+機械式ポンプ+分離配置)との整合性を探査の基準とした。

表 2.3-6 に評価結果をまとめる。

前述のように、軸長の長い直管型 SG をオプション 1 したことから SG は必然的に高所配置となる。そのため、大きな伝熱中心差と 2 次系の熱容量を有効に活用する IRACS は、直管型 SG を採用した 2 次系システムとの適合性が良い。IRACS を採用する場合、2 次系を安全系として設計する必要があるが、元来 2 次系は大量の Na を包含する設備であり、高いグレード(B(S₂)) で設計・製作するので、安全系とすることでコストが大きく上昇することはないと考えられる。

したがって、崩壊熱除去系の基本構成として、PRACS × 2 系統 + IRACS × 1 系統のシステム構成をレファレンスとする。ただし、今後、直管型 SG が成立困難と判断される可能性があることも考慮して、PRACS × 2 系統のシステム構成を代案とする。なお、PRACS × 2 系統 + IRACS × 1 系統の完全自然循環型システムの場合、PRACS と IRACS の自然循環流動が干渉する可能性があるので、注意が必要である。

Na 炉設計検討会で指摘された事象、メンテナンス時のサイフォンブレークへの対応としては、ループ型炉との適合性や Na 漏えい対策との整合性を考慮して、窒素ガス冷却小型 DHX(常用系) をレファレンスとする。ループ型炉との適合性の悪い RVACS は不採用とするが、メンテナンス冷却は代案とする。なお、想定事象に対する除熱機能の充足性は、各概念(M-1, H-1 及び H-2) とも表 2.3-7 に示すとおり確保されている。

(3) Na 漏えい対策及び Na 水反応対策

Na 漏えい対策及び Na 水反応対策については、本検討ではシステム設計の概略方針のみ選定

することとし、詳細は別途進められている「Na 技術高度化 WG」の議論等を踏まえて決定することとした。

表 2.3-8 に評価結果をまとめる。

事故影響局限、復旧作業日数短縮化の観点から、Na 漏えい対策として、エンクロージャ+A/C 伝熱管二重管化を採用し、Na 水反応対策としては、検出系の高度化（固体電解質水素計及び音響計の信頼性向上）を採用することとした。

(4) 水・蒸気系

表 2.3-9 に評価結果をまとめる。

経済性に優れる 1500MWe タービン×2 の構成を採用し、給水ポンプ電動化、ポンプ予備機削減等の新たな合理化方策も取り入れて建設コスト削減を図ることとした。

(5) BOP

表 2.3-10 に評価結果をまとめる。

経済性目標の達成を優先して、新たな課題が発生し、開発リスクは高くなるが、徹底した設備合理化と共にによる大幅な物量削減が可能となる M-1 を採用する。

非常用電気設備に関しては、完全自然循環型崩壊熱除去系の採用により非常用発電機への早期起動要求がなくなったため、従来のディーゼル発電機から、冷却系、潤滑油系等の補助設備のないコンパクトなガスタービン発電機への変更が可能となった。また、完全自然循環型崩壊熱除去系の採用により崩壊熱除去系の電磁ポンプや送風機の負荷がなくなったこと、格納容器内空調の常用系化により非常用空調系の負荷が大幅に削減されたことから、非常用発電機容量の大幅な低減が可能となった。さらに、非常用電気設備をモジュール間で共用することにより、非常用発電機の数を大幅な低減が可能となった。

換気空調設備に関しては、格納容器内空調の常用系化、コンクリート設計温度の見直しによる室温条件の緩和、2 次系室への自然循環除熱の採用により換気空調系の物量（風量）の大幅な低減が可能となった。

常用系電気設備、ユーティリティ設備等についても、モジュール間での共用化を進め、系統数の削減を図っている。また、中央制御室をモジュール間で共用化してその面積を削減するとともに、運転員の削減を図っている。

(6) 燃料取扱設備

表 2.3-11 に評価結果をまとめる。

経済性目標の達成を優先して、新たな課題が発生し、開発リスクは高くなるが、建設コスト削減の可能性のあるレールレス走行方式燃料出入機を採用する。

(7) 建屋・配置

表 2.3-12 に評価結果をまとめる。

建設コスト削減の可能性があることから、燃料貯蔵設備の移設+A/C の屋上への移設を採用する。

選定された各設備の概念を組み合わせて構築した新たなプラント概念を図 2.3-1 に示す。

原子炉及び 1 次系についてはアドバンスト・ループ型炉の基本概念（原子炉構造コンパクト化、配管短縮化、ループ数削減、機器合体）を踏襲しており、フェーズ I で構築したプラント

(基準プラント) 概念と同じである。2次系、崩壊熱除去系及び水・蒸気系についても、細部には変更があるものの、基本的なシステム構成は、結果的に基準プラントと同じもの（直管型 SG + 機械式ポンプ十分離配置、完全自然循環型の 2 系統の PRACS + 1 系統の IRACS、1500MWe タービンの 3 原子炉での共用等）となった。本検討により最も大きく変化したのは BOP であり、電気設備、換気空調設備及びユーティリティ設備の容量削減と共用化が徹底され、大幅な簡素化と物量削減が図られている。

本検討で新たに構築したプラント概念の経済性目標達成見通しを検討した。表 2.3-13 に示すように、建設コスト削減率は 6%台と推測される。

2.4 クリティカルな課題

新たなプラント概念の構築に付随して、安全性、構造健全性及び熱流動に関する Na 冷却大型炉と共に通の課題に加え、下記のような新たな技術課題が発生する。

(1) 2次系関連の課題

- a. 直管型 SG の伝熱管間、管一胴間の熱膨張差の吸収
- b. 直管型 SG の水・蒸気側流動不安定の抑制
- c. 直管型 SG の伝熱管破損伝播挙動の把握
- d. 2次系システムの総合評価

(2) 崩壊熱除去系関連の課題

- a. 自然循環除熱能力の把握
- b. 崩壊熱除去系システムの総合評価

(3) 水・蒸気系関連の課題

- a. 原子炉 1 基トリップ時の水・蒸気系制御方式の検討

(4) BOP 設備関連の課題

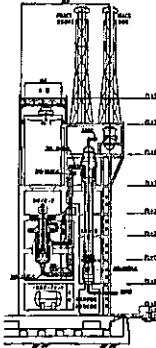
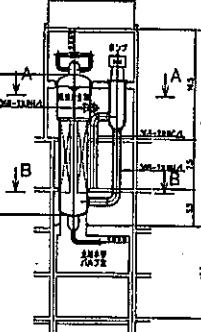
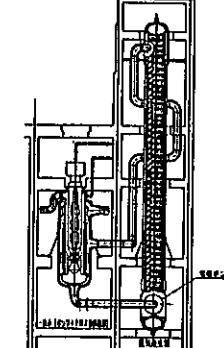
- a. 非常用電源（安全系）共用化に関する検討
- b. コンクリート設計温度引き上げに関する検討
- c. 格納容器内空調の常用系化に関する検討

(5) 燃料取扱設備関連の課題

- a. レールレス走行方式燃料出入機の検討

これらのクリティカルな課題については表 2.4-1 に示す方針で対処することとしているが、これらの解決見通しを概略把握するため、下期の作業の中で重点的な検討・評価を行った（第 4 章参照）。

表 2.2-1 (1/2) 各設備の候補概念 (2次系)

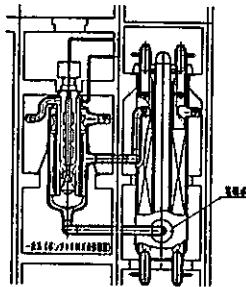
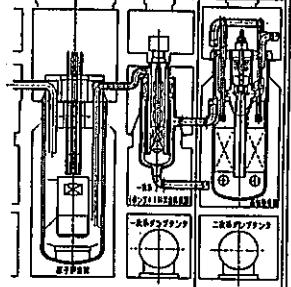
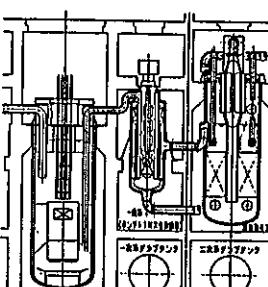
項目	M-1	M-2	H-1																		
候補概念	 <p>基準プラントと同じ</p> <table border="1"> <tr><td>S G型式</td><td>直管型／1基</td></tr> <tr><td>ポンプ型式</td><td>機械式／1基(縦置)</td></tr> <tr><td>合体／分離</td><td>分離配置</td></tr> </table>	S G型式	直管型／1基	ポンプ型式	機械式／1基(縦置)	合体／分離	分離配置	 <table border="1"> <tr><td>S G型式</td><td>ヘリカルコイル管型／1基</td></tr> <tr><td>ポンプ型式</td><td>機械式／1基(縦置)</td></tr> <tr><td>合体／分離</td><td>分離配置</td></tr> </table>	S G型式	ヘリカルコイル管型／1基	ポンプ型式	機械式／1基(縦置)	合体／分離	分離配置	 <table border="1"> <tr><td>S G型式</td><td>直管型／1基</td></tr> <tr><td>ポンプ型式</td><td>電磁式／2基(横置)</td></tr> <tr><td>合体／分離</td><td>分離配置</td></tr> </table>	S G型式	直管型／1基	ポンプ型式	電磁式／2基(横置)	合体／分離	分離配置
S G型式	直管型／1基																				
ポンプ型式	機械式／1基(縦置)																				
合体／分離	分離配置																				
S G型式	ヘリカルコイル管型／1基																				
ポンプ型式	機械式／1基(縦置)																				
合体／分離	分離配置																				
S G型式	直管型／1基																				
ポンプ型式	電磁式／2基(横置)																				
合体／分離	分離配置																				
概念の特徴・狙い	<ul style="list-style-type: none"> SGコスト低減のため直管型を採用。 2次系を安全系としてIRACSを採用、伝熱中心差を大きく取った機器配置として自然循環能力を高め、併せて2次系熱容量を有効利用。 SG高所配置によりIHX伝熱管破損時のインリーク確保が容易。 	<ul style="list-style-type: none"> 直管型の開発リスクを考慮して、ヘリカルコイル管型を採用。 2次系を安全系としてIRACSを採用、伝熱中心差を大きく取った機器配置として自然循環能力を高め、併せて2次系熱容量を有効利用。 SG高所配置によりIHX伝熱管破損時のインリーク確保が容易。 	<ul style="list-style-type: none"> 伝熱管本数が多くプラグ余裕を大きく取れる可能性のある直管型を採用。 保守補修性向上、破損ボテンシャルの低減及び配置上の柔軟性を考慮して、電磁ポンプを採用。 2次系を非安全系としてIRACSを削除。 																		
経済性向上効果	<p>SG (*1)</p> <p>2次系 (*1)</p> <p>建屋 (*1)</p> <p>建設コスト (*2)</p> <p>所内負荷率</p> <ul style="list-style-type: none"> 基準プラントと同じ。 	<ul style="list-style-type: none"> 物量：18%増、コスト：19%増 (*3) 物量：12%増 容積：同程度、コスト：同程度 2次系(1.6%) + 建屋(0.0%) = +1.6% (*3) 基準プラントと同じ。 	<ul style="list-style-type: none"> 物量：同程度、コスト：同程度 物量：4%減、コスト：同程度 容積：5%減、コスト：5%減 (*4) 2次系(0.0%) + 建屋(-0.4%) = -0.4% 送電量：0.2%減 (*5) 																		
開発課題	<ul style="list-style-type: none"> 長尺・薄肉伝熱管(35m級)の製作 直管型SG特有の課題 	<ul style="list-style-type: none"> 特になし。 	<ul style="list-style-type: none"> 電磁ポンプの開発・実証 (現状開発レベルの容量で可) 長尺・薄肉伝熱管(35m級)の製作 直管型SG特有の課題 																		

(*1) それぞれの機器／設備の物量・コストの増減(提案メーカー評価値)を示す。 (*2) トータルの建設コストの増減(提案メーカー評価値)を示す。

(*3) メーカによりヘリカルコイル管型と直管型とのコスト比率が異なっており、注意を要する(後述)。 (*4) 建屋コストは容積に比例するとして評価。

(*5) 電磁ポンプは浸漬型を想定し、効率60%と仮定した(浸漬型でない場合、効率は40%に低下、送電量は0.7%減となる)。

表 2.2-1 (2/2) 各設備の候補概念 (2次系)

項目 候補概念	H-2	H-3	H-4																														
																																	
	<table border="1"> <tr> <td>S G 型式</td><td>ヘリカルコイル管型 / 1基</td></tr> <tr> <td>ポンプ型式</td><td>電磁式 / 2基 (横置)</td></tr> <tr> <td>合体/分離</td><td>分離配置</td></tr> </table>	S G 型式	ヘリカルコイル管型 / 1基	ポンプ型式	電磁式 / 2基 (横置)	合体/分離	分離配置	<table border="1"> <tr> <td>S G 型式</td><td>ヘリカルコイル管型 / 1基</td></tr> <tr> <td>ポンプ型式</td><td>機械式 / 1基 (縦置)</td></tr> <tr> <td>合体/分離</td><td>機器合体</td></tr> </table>	S G 型式	ヘリカルコイル管型 / 1基	ポンプ型式	機械式 / 1基 (縦置)	合体/分離	機器合体	<table border="1"> <tr> <td>S G 型式</td><td>ヘリカルコイル管型 / 1基</td></tr> <tr> <td>ポンプ型式</td><td>電磁式 / 1基 (縦置)</td></tr> <tr> <td>合体/分離</td><td>機器合体</td></tr> </table>	S G 型式	ヘリカルコイル管型 / 1基	ポンプ型式	電磁式 / 1基 (縦置)	合体/分離	機器合体												
S G 型式	ヘリカルコイル管型 / 1基																																
ポンプ型式	電磁式 / 2基 (横置)																																
合体/分離	分離配置																																
S G 型式	ヘリカルコイル管型 / 1基																																
ポンプ型式	機械式 / 1基 (縦置)																																
合体/分離	機器合体																																
S G 型式	ヘリカルコイル管型 / 1基																																
ポンプ型式	電磁式 / 1基 (縦置)																																
合体/分離	機器合体																																
概念の特徴・狙い	<ul style="list-style-type: none"> ヘリカルコイル管型を採用して配管の短尺化、配置のコンパクト化を図る。 保守補修性向上、破損ポテンシャルの低減及び配置上の柔軟性を考慮して、電磁ポンプを採用。 <u>2次系を非安全系としてIRACSを削除、配置の自由度を向上。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ヘリカルコイル管型を採用して配管の短尺化、配置のコンパクト化を図る。 S G を機械式ポンプと合体してミドルレグ配管を削除。 <u>2次系を非安全系としてIRACSを削除、配置の自由度を向上。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ヘリカルコイル管型を採用して配管の短尺化、配置のコンパクト化を図る。 S G を電磁式ポンプと合体してミドルレグ配管を削除。 <u>2次系を非安全系としてIRACSを削除、配置の自由度を向上。</u> 保守補修性向上、破損ポтенシャルの低減及び配置上の柔軟性を考慮して、電磁ポンプを採用。 																														
経済性向上効果	<table border="1"> <tr> <td>S G (*1)</td><td>・物量 : 25%増、コスト : 3%増 (*3)</td></tr> <tr> <td>2次系 (*1)</td><td>・物量 : 6%増、コスト : 3%減 (*3)</td></tr> <tr> <td>建屋 (*1)</td><td>・容積 : 6%減、コスト : 6%減 (*4)</td></tr> <tr> <td>建設コスト (*2)</td><td>・2次系 (-0.3%) + 建屋 (-0.5%) =-0.8% (*3)</td></tr> <tr> <td>所内負荷率</td><td>・送電量 : 0.2%減 (*5)</td></tr> </table>	S G (*1)	・物量 : 25%増、コスト : 3%増 (*3)	2次系 (*1)	・物量 : 6%増、コスト : 3%減 (*3)	建屋 (*1)	・容積 : 6%減、コスト : 6%減 (*4)	建設コスト (*2)	・2次系 (-0.3%) + 建屋 (-0.5%) =-0.8% (*3)	所内負荷率	・送電量 : 0.2%減 (*5)	<table border="1"> <tr> <td>S G (*1)</td><td>・物量 : 42%増</td></tr> <tr> <td>2次系 (*1)</td><td>・物量 : 17%増、コスト : 同程度 (*3)</td></tr> <tr> <td>建屋 (*1)</td><td>・容積 : 4%減、コスト : 4%減 (*4)</td></tr> <tr> <td>建設コスト (*2)</td><td>・2次系 (0.0%) + 建屋 (-0.3%) =-0.3% (*3)</td></tr> <tr> <td>所内負荷率</td><td>・基準プラントと同じ。</td></tr> </table>	S G (*1)	・物量 : 42%増	2次系 (*1)	・物量 : 17%増、コスト : 同程度 (*3)	建屋 (*1)	・容積 : 4%減、コスト : 4%減 (*4)	建設コスト (*2)	・2次系 (0.0%) + 建屋 (-0.3%) =-0.3% (*3)	所内負荷率	・基準プラントと同じ。	<table border="1"> <tr> <td>S G (*1)</td><td>・物量 : 42%増</td></tr> <tr> <td>2次系 (*1)</td><td>・物量 : 12%増、コスト : 1%減 (*3)</td></tr> <tr> <td>建屋 (*1)</td><td>・容積 : 6%減、コスト : 6%減 (*4)</td></tr> <tr> <td>建設コスト (*2)</td><td>・2次系 (-0.1%) + 建屋 (-0.5%) =-0.6% (*3)</td></tr> <tr> <td>所内負荷率</td><td>・送電量 : 0.2%減 (*5)</td></tr> </table>	S G (*1)	・物量 : 42%増	2次系 (*1)	・物量 : 12%増、コスト : 1%減 (*3)	建屋 (*1)	・容積 : 6%減、コスト : 6%減 (*4)	建設コスト (*2)	・2次系 (-0.1%) + 建屋 (-0.5%) =-0.6% (*3)	所内負荷率	・送電量 : 0.2%減 (*5)
S G (*1)	・物量 : 25%増、コスト : 3%増 (*3)																																
2次系 (*1)	・物量 : 6%増、コスト : 3%減 (*3)																																
建屋 (*1)	・容積 : 6%減、コスト : 6%減 (*4)																																
建設コスト (*2)	・2次系 (-0.3%) + 建屋 (-0.5%) =-0.8% (*3)																																
所内負荷率	・送電量 : 0.2%減 (*5)																																
S G (*1)	・物量 : 42%増																																
2次系 (*1)	・物量 : 17%増、コスト : 同程度 (*3)																																
建屋 (*1)	・容積 : 4%減、コスト : 4%減 (*4)																																
建設コスト (*2)	・2次系 (0.0%) + 建屋 (-0.3%) =-0.3% (*3)																																
所内負荷率	・基準プラントと同じ。																																
S G (*1)	・物量 : 42%増																																
2次系 (*1)	・物量 : 12%増、コスト : 1%減 (*3)																																
建屋 (*1)	・容積 : 6%減、コスト : 6%減 (*4)																																
建設コスト (*2)	・2次系 (-0.1%) + 建屋 (-0.5%) =-0.6% (*3)																																
所内負荷率	・送電量 : 0.2%減 (*5)																																
開発課題	・電磁ポンプの開発・実証 (現状開発レベルの容量で可)	・インペラミサイル ・機械式ポンプとの合体による伝熱管の振動・摩耗	・電磁ポンプの開発・実証 (現状開発レベルの2倍の容量)																														

(*1) それぞれの機器／設備の物量・コストの増減（提案メーカー評価値）を示す。 (*2) トータルの建設コストの増減（提案メーカー評価値）を示す。

(*3) メーカによりヘリカルコイル管型と直管型とのコスト比率が異なっており、注意を要する（後述）。 (*4) 建屋コストは容積に比例するとして評価。

(*5) 電磁ポンプは浸漬型を想定し、効率 60%と仮定した（浸漬型でない場合、効率は 40%に低下、送電量は 0.7%減となる）。

表 2.2-2 各設備の候補概念（崩壊熱除去系）

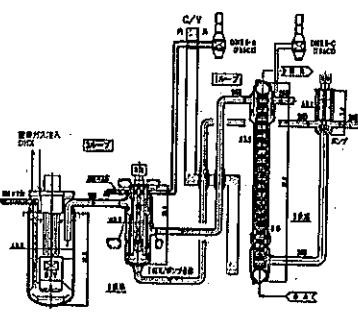
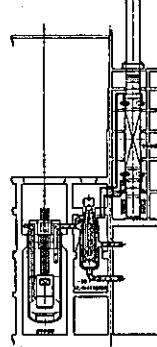
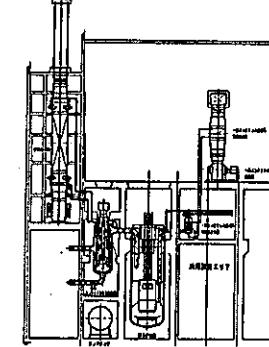
項目	M-1	H-1	H-2																														
候補概念	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>系統構成</th> <th>除熱量</th> <th>クラス</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PRACS×2</td> <td>8MW</td> <td>安全系</td> </tr> <tr> <td>IRACS×1</td> <td>6MW</td> <td>安全系</td> </tr> <tr> <td>窒素ガス冷却 小型DHX×2</td> <td>1MW</td> <td>常用系</td> </tr> </tbody> </table>	系統構成	除熱量	クラス	PRACS×2	8MW	安全系	IRACS×1	6MW	安全系	窒素ガス冷却 小型DHX×2	1MW	常用系	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>系統構成</th> <th>除熱量</th> <th>クラス</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PRACS×2</td> <td>16MW</td> <td>安全系</td> </tr> <tr> <td>RVACS×1</td> <td>4MW</td> <td>安全系</td> </tr> </tbody> </table>	系統構成	除熱量	クラス	PRACS×2	16MW	安全系	RVACS×1	4MW	安全系	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>系統構成</th> <th>除熱量</th> <th>クラス</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PRACS×2</td> <td>16MW</td> <td>安全系</td> </tr> <tr> <td>メンテ冷系×2</td> <td>4MW</td> <td>安全系</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注) メンテ冷系は6モジュールで共用する。</p>	系統構成	除熱量	クラス	PRACS×2	16MW	安全系	メンテ冷系×2	4MW	安全系
系統構成	除熱量	クラス																															
PRACS×2	8MW	安全系																															
IRACS×1	6MW	安全系																															
窒素ガス冷却 小型DHX×2	1MW	常用系																															
系統構成	除熱量	クラス																															
PRACS×2	16MW	安全系																															
RVACS×1	4MW	安全系																															
系統構成	除熱量	クラス																															
PRACS×2	16MW	安全系																															
メンテ冷系×2	4MW	安全系																															
概念の特徴・狙い	<ul style="list-style-type: none"> SG伝熱管小漏えい時、IRACSによる除熱は可能と判断→2次系安全系としてIRACS採用。 PRACS及びIRACSは完全自然循環型を採用。A/Cダンパを多重化して信頼性向上を図る(50%×2)。 さらなる信頼性向上のため、パッシブ型起動系(後述)も検討。 A/C伝熱管: Na漏えい対策として、フィン付き2重管を採用。伝熱管長はヘリカルコイル2重管の15%程度。 サイフォンブレーク対応として、窒素ガス冷却小型DHXを採用。 	<ul style="list-style-type: none"> SG伝熱管小漏えい時、IRACSによる除熱は不可と判断→2次系非安全系としてIRACS削除。 PRACSは完全自然循環型を採用。A/Cダンパを多重化して信頼性向上を図る(100%×2)。 さらなる信頼性向上のため、パッシブ型起動系(後述)も検討。 A/C伝熱管: Na漏洩対策として、ヘリカルコイル2重管を採用。 サイフォンブレーク対応としてRVACSを採用。 	<ul style="list-style-type: none"> SG伝熱管小漏えい時、IRACSによる除熱は不可と判断→2次系非安全系としてIRACS削除。 PRACSは完全自然循環型を採用。A/Cダンパを多重化して信頼性向上を図る(100%×2)。 さらなる信頼性向上のため、パッシブ型起動系(後述)も検討。 A/C伝熱管: Na漏洩対策として、ヘリカルコイル2重管を採用。 サイフォンブレーク対応としてメンテ冷系(モジュール間共用)を採用。 																														
経済性向上効果	・基準プラントと有意な差なし。	・基準プラントと有意な差なし。 (系統数は減るが、除熱量が増大)	・基準プラントと有意な差なし。 (系統数は減るが、除熱量が増大)																														
開発課題	<ul style="list-style-type: none"> 自然循環除熱能力の実証 パッシブ型起動系の具体化及び実証 	<ul style="list-style-type: none"> 自然循環除熱能力の実証 パッシブ型起動系の具体化及び実証 RVACSの除熱性能確認 	<ul style="list-style-type: none"> 自然循環除熱能力の実証 パッシブ型起動系の具体化及び実証 																														

表 2.2-3 各設備の候補概念（Na漏えい対策）

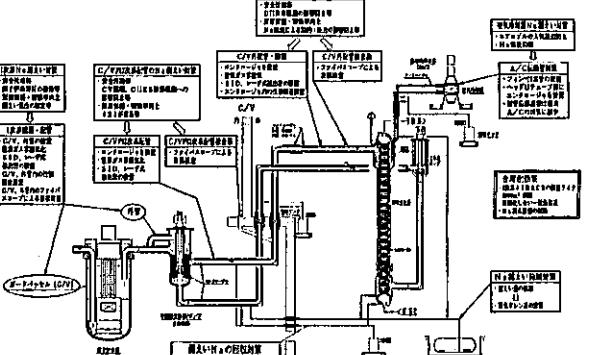
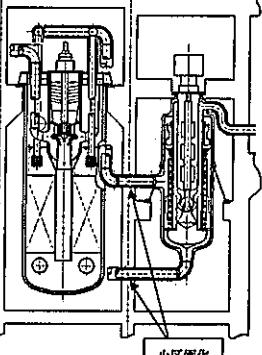
項目	M-1	H-1											
候補概念													
概念の特徴・狙い	<ul style="list-style-type: none"> 漏えい防止 : Na バウンダリ面積の局限 影響緩和 : エンクロージャによる格納 (ホット式) <ul style="list-style-type: none"> + A/C 伝熱管の二重管化 + 内部の不活性雰囲気化 (CV内: 窒素ガス、CV外: 空気) 漏えい検出 : S I D、レーザ式漏えい検出器等 復旧対応 : エンクロージャ内の区画化 	<ul style="list-style-type: none"> 漏えい防止 : Na バウンダリ面積の局限 影響緩和 : エンクロージャによる格納 (ホット式) <ul style="list-style-type: none"> + A/C 伝熱管の二重管化 + 内部の不活性雰囲気化 (全て Ar ガス) 漏えい検出 : S I D、固体電解質式漏えい検出器等 復旧対応 : エンクロージャ内の区画化 + 高温 Ar ガス洗浄 											
	<table border="1" data-bbox="1033 1091 1521 1222"> <thead> <tr> <th rowspan="2">項目</th> <th colspan="2">エンクロージャ型式</th> </tr> <tr> <th>ホット式</th> <th>コールド式</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>物量</td> <td>80~100%</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>ペローズ</td> <td>5 山</td> <td>20 山</td> </tr> </tbody> </table>		項目	エンクロージャ型式		ホット式	コールド式	物量	80~100%	100%	ペローズ	5 山	20 山
項目	エンクロージャ型式												
	ホット式	コールド式											
物量	80~100%	100%											
ペローズ	5 山	20 山											
経済性向上効果	<ul style="list-style-type: none"> 下記を期待できるが基準プラントと有意な差なし。 <ul style="list-style-type: none"> - キャッチパン及び窒素ガス注入系の削除 - エンクロージャ内窒素ガス雰囲気化範囲の縮小 	<ul style="list-style-type: none"> 下記を期待できるが基準プラントと有意な差なし。 <ul style="list-style-type: none"> - キャッチパン及び窒素ガス注入系の削除 - 固体電解質式漏えい検出器による検出システム簡素化 											
開発課題	<ul style="list-style-type: none"> エンクロージャ内の仕切構造の具体化 漏えい検出器の開発 (レーザ式漏えい検出器) 	<ul style="list-style-type: none"> エンクロージャ内の仕切構造の具体化 漏えい検出器の開発 (固体電解質式漏えい検出器) 											

表 2.2-4 各設備の候補概念 (Na 水反応対策)

項目	M-1	H-1
候補概念		
概念の特徴・狙い	<ul style="list-style-type: none"> 漏えい防止：特になし。 影響緩和：固体電解質水素計及び音響計を安全保護系とし、DBLを1+0に低減。 復旧対応：特になし（実証炉と同様）。 	<ul style="list-style-type: none"> 漏えい防止：伝熱管の厚肉化又はコーティング。 影響緩和：音響計を安全保護系とし、DBLを1+0に低減。 復旧対応：UT検査による破損伝熱管の特定。
経済性向上効果	<ul style="list-style-type: none"> 下記を期待できるが基準プラントと有意な差なし。 <ul style="list-style-type: none"> 圧力開放系の簡素化及び共用化 サイクロンセパレータの削除 	<ul style="list-style-type: none"> 下記を期待できるが基準プラントと有意な差なし。 <ul style="list-style-type: none"> 圧力開放系の簡素化及び共用化 伝熱管コーティング等の採用時、SG伝熱面積の増加は10%以下の見込み。
開発課題	<ul style="list-style-type: none"> 固体電解質水素計及び音響計の開発（安全保護系化） 	<ul style="list-style-type: none"> 音響計の開発（安全保護系化） セラミクスコーティング伝熱管の製作性、耐ウエスティジ性の実証

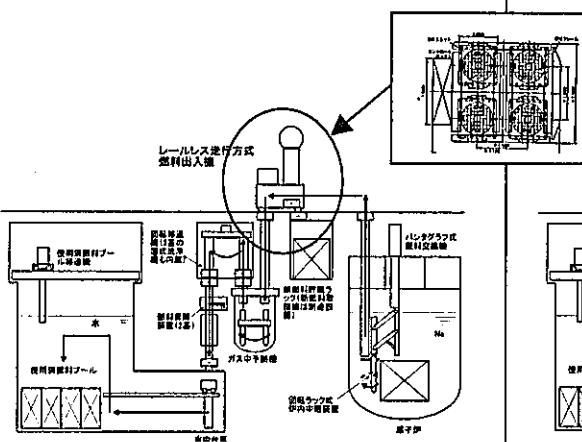
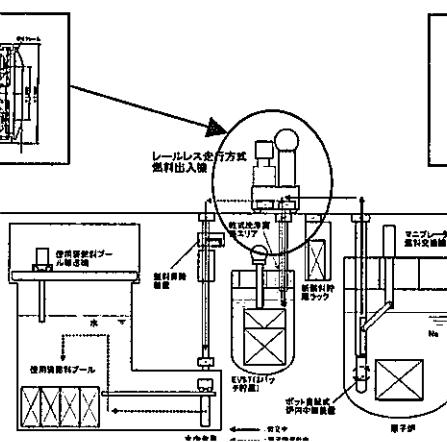
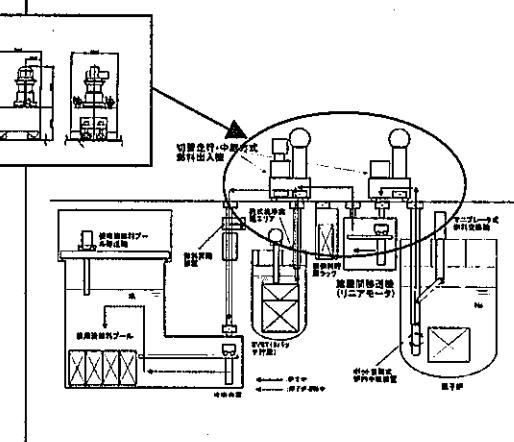
表 2.2-5 各設備の候補概念（水・蒸気系）

項目	M-1	H-1	H-2
候補概念		 1500MWe プラント	 (500MWe プラント×3 基)
概念の特徴・狙い	<ul style="list-style-type: none"> 1500MWe タービン×2 の構成。 (原子炉 3 基で 1 タービンを共有し、スケールメリットを追求) T C 6 F 4 9 1500rpm。 基準プラントからの変更点 <ul style="list-style-type: none"> 給水ポンプの電動化 ポンプ予備機削減等 	<ul style="list-style-type: none"> 1500MWe タービン×2 の構成。 (原子炉 3 基で 1 タービンを共有し、スケールメリットを追求) T C 6 F 5 2 1500rpm。 基準プラントからの変更点 <ul style="list-style-type: none"> 給水ポンプの電動化 ポンプ予備機削減等 	<ul style="list-style-type: none"> 500MWe タービン×6 の構成。 (原子炉 1 基に 1 タービンとし、大容量タービンにおける原子炉 1 基トリップ時の運転制御上の課題を回避) T C D F 5 2 1500rpm。 基準プラントからの他の変更点 <ul style="list-style-type: none"> 給水ポンプの電動化 ポンプ予備機削減等 低圧タービンの 1 車室化
経済性向上効果	<ul style="list-style-type: none"> 設備費削減の見通し <ul style="list-style-type: none"> 給水ポンプの電動化 設備費の低減（約 10 億円）、保守費の低減（約 3 億円）が見込めるが、発電量が約 0.2% 減少するので、経済性向上効果は小さい。 建設コスト削減の見通し <ul style="list-style-type: none"> ポンプ予備機削減他 	<ul style="list-style-type: none"> 設備費削減の見通し <ul style="list-style-type: none"> 給水ポンプの電動化：約 0.5% ポンプ予備機削減他：約 2.3% 建設コスト削減の見通し <ul style="list-style-type: none"> 給水ポンプの電動化：約 0.1% ポンプ予備機削減他：約 0.5～0.6% 	<ul style="list-style-type: none"> 設備費削減の見通し <ul style="list-style-type: none"> 低圧タービンの 1 車室化：約 4% 給水ポンプの電動化：約 0.5% ポンプ予備機削減他：約 2.3% 1500MWe タービン×2 の場合と比べ、設備費が 15～20% 増加（三菱評価）。また、タービン建屋容積も約 2.2 倍に増加。
開発課題	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉 1 基トリップ時の主蒸気圧力、給水流量制御方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉 1 基トリップ時の主蒸気圧力、給水流量制御方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 特になし

表 2.2-6 各設備の候補概念 (BOP)

項目	M-1	H-1																				
概念の特徴・狙い	<p><input type="checkbox"/>非常用電源設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・小型ガスタービン発電機を採用 <ul style="list-style-type: none"> - 完全自然循環型崩壊熱除去系の採用に伴い、非常用電源負荷が大幅減少。 - 早期起動の要求なし（ボニーモータなし）。 - 外電喪時、100時間程度以内の電源復帰を見込んで格納容器空調を安全系から常用系に変更（安全保護系機器にはスポット空調で対応）。これにより、非常用電源負荷が大幅減少。 ・ 6モジュール間で共用（100%×3系統） - モジュール炉向けの指針改訂を前提。 <p><input type="checkbox"/>電気設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 常用系電気設備の3モジュール間共用 <ul style="list-style-type: none"> - タービン発電機（2セット）に対応。 ・ 中央制御室の3モジュール間共用・面積削減、運転員の削減 <p><input type="checkbox"/>換気空調設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 設備容量の削減 <ul style="list-style-type: none"> - 室温上限値の緩和。 (Na室 55°C→65°C、一般室 40°C→50°C) - 自然通風除熱の採用（2次系設備室では自然通風により直接外気と熱交換を行う）。 <p><input type="checkbox"/>ユーティリティ設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 6モジュール間で共用 <ul style="list-style-type: none"> - 補助蒸気設備、淡水供給設備、ガス供給設備、Na供給設備、共通補修設備等を1セット／サイトに削減。 	<p><input type="checkbox"/>非常用電源設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ DGの小型化 <ul style="list-style-type: none"> - 完全自然循環型崩壊熱除去系の採用に伴い、非常用電源負荷が大幅減少。 <p><input type="checkbox"/>電気設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 常用系電気設備の3モジュール間共用 <ul style="list-style-type: none"> - タービン発電機（2セット）に対応。 ・ プロセス計算機システムの分散化 ・ 負荷電源のパワーセンタへの変更 <p><input type="checkbox"/>換気空調設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 常用系換気設備の3モジュール間共用 <ul style="list-style-type: none"> - 設計外気条件の緩和 - 通路の給気ダクト化 <p><input type="checkbox"/>その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 予備機削減、設備共用化 <ul style="list-style-type: none"> - 補機冷却水系のポンプ・熱交換器の予備機削減、Arガス系等の共用化。 																				
経済性向上効果	<p><input type="checkbox"/>非常用電源設備</p> <table> <tr> <td>物量</td> <td>: 90%減</td> </tr> <tr> <td>原子炉建屋容積</td> <td>: 5%減</td> </tr> </table> <p><input type="checkbox"/>電気設備</p> <table> <tr> <td>交流母線物量</td> <td>: 50%減</td> </tr> <tr> <td>中央制御室面積</td> <td>: 30%減</td> </tr> </table> <p><input type="checkbox"/>換気空調設備</p> <table> <tr> <td>物量</td> <td>: 29%減</td> </tr> </table> <p><input type="checkbox"/>ユーティリティ設備</p> <table> <tr> <td>設備基數</td> <td>: 83%減</td> </tr> <tr> <td>設備容量</td> <td>: 50%減</td> </tr> </table>	物量	: 90%減	原子炉建屋容積	: 5%減	交流母線物量	: 50%減	中央制御室面積	: 30%減	物量	: 29%減	設備基數	: 83%減	設備容量	: 50%減	<p><input type="checkbox"/>電気設備</p> <table> <tr> <td></td> <td>: 7%減 (DG小型化を含む)</td> </tr> </table> <p><input type="checkbox"/>換気空調設備</p> <table> <tr> <td></td> <td>: 14%減</td> </tr> </table> <p><input type="checkbox"/>補機系</p> <table> <tr> <td></td> <td>: 9%減</td> </tr> </table>		: 7%減 (DG小型化を含む)		: 14%減		: 9%減
物量	: 90%減																					
原子炉建屋容積	: 5%減																					
交流母線物量	: 50%減																					
中央制御室面積	: 30%減																					
物量	: 29%減																					
設備基數	: 83%減																					
設備容量	: 50%減																					
	: 7%減 (DG小型化を含む)																					
	: 14%減																					
	: 9%減																					
開発課題	<ul style="list-style-type: none"> ・ 非常用電源（安全系）共用に向けての指針改訂 ・ コンクリート設計温度の引き上げ ・ 外電喪時の詳細な建屋温度挙動の把握、電源復帰時間に関する想定（例：100時間程度以内）の妥当性検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 非常用電源（安全系）共用に向けての指針改訂 																				

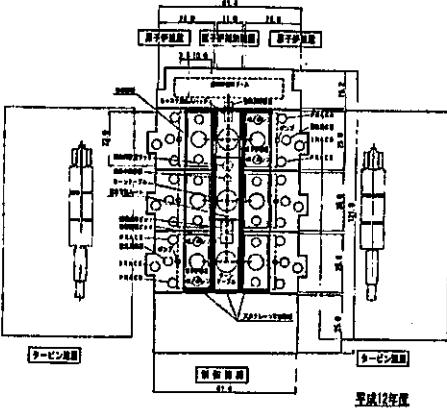
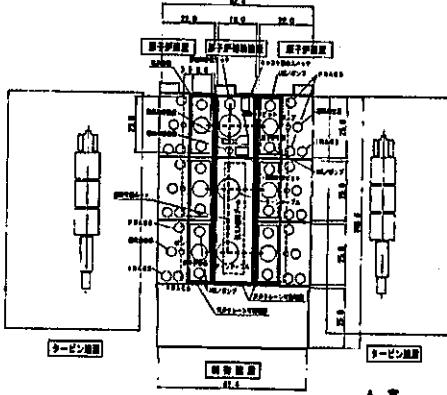
表 2.2-7 各設備の候補概念（燃料取扱設備）

項目	M-1	FK-1	FK-2
候補概念	 <p>レールレス走行方式 燃料出入機</p> <p>バッテリーカラム 蓄電池充電器</p> <p>使用燃料プール 水</p> <p>ガス中子断熱 貯蔵池</p> <p>燃焼炉</p> <p>原子炉</p>	 <p>レールレス走行方式 燃料出入機</p> <p>バッテリーカラム 蓄電池充電器</p> <p>使用燃料プール 水</p> <p>EVSTカラム 燃料搬出機</p> <p>バッテリーカラム 蓄電池充電器</p> <p>燃焼炉</p> <p>原子炉</p>	 <p>切替走行・中継方式 燃料出入機</p> <p>バッテリーカラム 蓄電池充電器</p> <p>EVSTカラム 燃料搬出機</p> <p>バッテリーカラム 蓄電池充電器</p> <p>燃焼炉</p> <p>原子炉</p>
概念の特徴・狙い	<ul style="list-style-type: none"> ・水プール直接貯蔵方式としてEVST削除。貯蔵設備物量、Naインベントリの低減を図る。 ・無軌道台車を使用したレールレス走行方式燃料出入機を採用。 	<ul style="list-style-type: none"> ・EVST貯蔵方式。簡素化による物量削減を図る。 ・無軌道台車を使用したレールレス走行方式燃料出入機を採用。 	<ul style="list-style-type: none"> ・EVST貯蔵方式。簡素化による物量削減を図る。 ・切替走行・中継方式の燃料出入機を採用。
経済性向上効果	<ul style="list-style-type: none"> ・燃取コスト : 81 (*1) ・燃料交換期間 : 4.1 日 ・稼働率 : 93.2% ・建設コスト : -1.3% (-1.5%) (*2) 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃取コスト : 80 (*1) ・燃料交換期間 : 4.1 日 ・稼働率 : 93.2% ・建設コスト : -1.3% (-1.5%) (*2) 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃取コスト : 94 (*1) ・燃料交換期間 : 2.5 日 ・稼働率 : 93.4% ・建設コスト : -0.4% (-0.8%) (*2)
開発課題	<ul style="list-style-type: none"> ・水中浸漬時の高発熱燃料の除熱性 ・破損燃料の取扱対応 ・無軌道台車の開発（高速化、停止位置精度の確保、耐震、ケーブル処理等） 	<ul style="list-style-type: none"> ・EVSTの機器開発（水プールへの早期搬出対応を含む） ・EVST冷却系の自然循環除熱特性 ・無軌道台車の開発（高速化、停止位置精度の確保、耐震、ケーブル処理等） 	<ul style="list-style-type: none"> ・EVSTの機器開発（水プールへの早期搬出対応を含む） ・EVST冷却系の自然循環除熱特性

(*1) 基準プラントを 100 とした値。

(*2) 括弧内は、稼働率補正した値。

表 2.2-8 各設備の候補概念（建屋・配置、建設工法）

項目 候補概念	基準プラント	M-1
		
概念の特徴・狙い	—	<ul style="list-style-type: none"> 燃料貯蔵設備を従来の燃料出入機走行通路の下階に移設し、燃料貯蔵建屋を削除して建屋容積を削減するとともに燃料交換時間の短縮を図る。 P RACS 及び I RACS の A/C を屋上に移設し、建屋容積を削減する。
経済性向上効果	—	<ul style="list-style-type: none"> 建屋容積：約 13% 減、建設コスト：約 1.4% 減 燃料出入機の方向転換にターンテーブルを使用しているが、無軌道方式が可能であれば、さらなる合理化が期待できる。
開発課題	—	特になし。

建設工法について

建設工期の短縮を狙った下記のアイデアが提案されているが、その内容はフェーズⅠと同じであるため、本資料では省略する。

- 大型ユニット工法
- 船殻構造

表 2.3-1 候補概念案の一覧及び新概念案の選定方針

各設備の候補概念のまとめ及び選定のポイント

設備	記号	候補概念の概要	選定のポイント
2次系	M-1	直管型SG+機械式ポンプ+分離配置	下記について選定。 ① SG型式 ②機器合体／分離 ③ポンプ型式
	M-2	ヘリカルコイル管型SG+機械式ポンプ+分離配置	
	H-1	直管型SG+電磁式ポンプ+分離配置	
	H-2	ヘリカルコイル管型SG+電磁式ポンプ+分離配置	
	H-3	ヘリカルコイル管型SG+機械式ポンプ+機器合体	
	H-4	ヘリカルコイル管型SG+電磁式ポンプ+機器合体	
崩壊熱除去系	M-1	PRACS×2系統+IRACS×1系統+窒素ガス冷却小型DHX	2次系との整合を考慮して最適なシステムを選定。
	H-1	PRACS×2系統+RVACS	
	H-2	PRACS×2系統+メンテ冷系	
Na漏えい対策	M-1	エンクロージャ(ホット式)+A/C伝熱管二重管化+N2ガス雰囲気等	概略の方針のみ選定。設備の詳細は、Na炉弱点対策WGでの議論も踏まえ、下期に設定。
	H-1	エンクロージャ(ホット式)+A/C伝熱管二重管化+Arガス雰囲気	
Na水反応対策	M-1	固体電解質水素計及び音響計の安全保護系化	
	H-1	音響計の安全保護系化+SG伝熱管コーティング等	
水・蒸気系	M-1	1500MWeタービン×2+給水ポンプ電動化等	経済性目標達成に向けて、採用可能な方策はすべて採用。 なお、燃料取扱設備は、今回は燃料移送方式のみ選定。
	H-1	1500MWeタービン×2+給水ポンプ電動化等	
	H-2	500MWeタービン×6+給水ポンプ電動化等+低圧タービン1車室化	
BOP	M-1	電気設備、換気空調設備及びユーティリティ設備の容量削減+共用化	
	H-1	電気設備、換気空調設備及びユーティリティ設備の容量削減+共用化	
燃料取扱設備	M-1	水プール直接貯蔵方式+レールレス走行方式燃料出入機	
	FK-1	EVST貯蔵方式+レールレス走行方式燃料出入機	
	FK-2	EVST貯蔵方式+切替走行・中継方式燃料出入機	
建屋・配置	M-1	燃料貯蔵設備の移設+A/Cの屋上への移設	

新概念案の選定方針（優先順位）

経済性：

- ①300万kWe発電所で建設コストを最小にできる概念
- ②単機50万kWeにて建設コストを最小にできる概念

運転・信頼性：

- ①事故(Na漏えい、Na水反応等)後の早期復旧が期待できる概念
- ②運転廃棄物・廃炉廃棄物の低減、プラント寿命延長に繋がる概念

開発リスク及び成立性：

- ①新たな開発課題が少ないか、又は開発見通しのある概念
- ②技術的成立性の見通せる概念

表 2.3-2 新プラント概念の構築（2次系：SG型式）

SG型式			
判断指標	直管型 SG	ヘリカルコイル管型 SG	備考
経済性	<ul style="list-style-type: none"> SG物量：ヘリカルコイル管型 SGより約 20%小。 SGコスト：ヘリカルコイル管型 SGより約 16%小となる可能性あり。 	<ul style="list-style-type: none"> SG物量：直管型 SGより約 25%大。 SGコスト：直管型 SGより約 19%大となる可能性あり。 	<p>①コストについては加工費の見積もりに依存。左記は三菱評価による。</p> <p>②フェーズ 2 公募研究で直管型 SGに関する検討を実施する（フラマトム）ので、その成果にも期待。</p>
運転・信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 国内での実績に乏しい。 水側流動不安定領域拡大による運転性悪化の可能性がある。 水リーク時の伝熱管破損伝播挙動が不明。薄肉伝熱管なので破損本数が増加する可能性があるが、伝熱管本数が多いのでプラグ可能本数も多く設定できる。 	<ul style="list-style-type: none"> もんじゅ等での実績がある。 	
開発リスク及び成立性	<ul style="list-style-type: none"> 特に重要な課題は下記。 ①伝熱管間、伝熱管一胴間の熱膨張差 ②水側流動不安定領域拡大 ③水リーク時の伝熱管破損伝播挙動（不明） 	<ul style="list-style-type: none"> 特になし。 	
総合評価	<p><u>オプション1</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ヘリカルコイル管型 SGとした場合、基準プラントよりコストが約 1.3%増加する可能性がある。経済性目標の達成を優先して直管型 SGをオプション1とする。 軸長の長い直管型 SGを採用すると SGは高所配置となる。大きな伝熱中心差と 2 次系の熱容量を有効活用できる I R A C S により、効率良い崩壊熱除去が可能となる。また、I H X 伝熱管破損時のインリーク確保が容易となる。 しかしながら、直管型 SGには上記のような開発リスクがあるので、ヘリカルコイル管型 SGをオプション2とする。 下期作業にてこれらに関する成立性を概略評価する。成立困難と判断された場合は、その時点でヘリカルコイル管型 SGに切り替える。 	<p><u>オプション2</u></p>	

表 2.3-3 直管型 SG の採用による物量及びコストの削減効果

SGの物量・コスト比較

評価 1

項目	ヘリカル コイル管型	直管型 (35m 級)	直管型 (25m 級)	備 考
伝熱面積 (m ²)	7680	7520	7520	
伝熱管本数	780	5305	5305	
合計物量 (ton)	405	342	342	
材料費	17	17	17	*1
加工費	伝熱管支持構造加工	15	12	12
	伝熱管曲げ加工	15	0	0
	伝熱管溶接費 (溶接箇所数)	13 (9360) 12/本	15 (10610) 2/本	20 (15915) 3/本
	胴溶接費	7	7	7
	その他	7	7	7
加工費合計		57	41	46
設計費	6	6	6	
検査費	10	10	10	
治具費	10	10	10	
合計	100	84	89	

(*1) 直管型は物量が小さいが、鍛造材及びベローズの単価が高くなるので、材料費は同等となる。

(*2) 直管型は伝熱管曲げ加工なし。

(*3) ヘリカルコイル管型は伝熱管本数が少ないが、1本当たりの溶接箇所数が（特に、伝熱管の引き回しが複雑になる連結管部で）多くなるので、トータルの溶接箇所数は直管型と同程度になる。

評価 2

項目	ヘリカル コイル管型	直管型	重 み	備 考
合計物量 (ton)	330	260	—	
材料費	ほぼ同等	—	—	*1
加工費	伝熱管溶接箇所数	○	△	A
	胴部溶接箇所数	○	○	B
	伝熱管溶接線長	○	○	B
	溶接線全長	○	○	B
	溶接部への接近性	○	○	B
	熱処理性	○	○	B
機械加工	要求精度	○	○	B
	内部構造部品数	○	○	B
	伝熱管曲げ加工	△	○	B
組立	要求精度	○	○	B
	手順・工法	○	○	B
	管束組立性	○	○	B
	ハンドリング性	○	○	C
その他（検査性）		○	△	B
加工費合計		64	62	— *2
設計費その他	有意な差なし			—
合計	有意な差なし			—

(*1) 直管型は物量が小さいが、薄肉伝熱管の製作単価が高い（1.7倍）ので、材料費はほぼ同等になる。

(*2) A=3、B=2、C=1／○=1、□=2、△=3 として評価。

35m 級伝熱管を使用すれば、伝熱管溶接箇所数を大幅に低減でき、曲げ加工がない分、直管型が安価となる。

直管型は曲げ加工がない反面、伝熱管溶接箇所数が多いので、両者のコストに有意な差なし。

表 2.3-4 直管型 SG の採否に関する議論

直管型 SG の採否に関する議論			
実証炉の基本仕様設定時の議論 (*1)		理由	新たな知見、対応
項目	ヘリカル	直管	
伝熱管	◎	△	直管型は薄肉であり、伝熱管破損時の裕度小。
伝熱管支持	◎	○	直管型はバッフル板とのフレッティング摩耗の可能性あり。
管板	◎	○	管板の大型化に伴い構造健全性が厳しくなる。
溶接部	◎	○	直管型は溶接部が多く、自動溶接手法の開発が必要。また、一部差し込み溶接の実績がない。
熱膨張吸収	◎	△	管一胴の熱膨張差吸収にベローズが必要。また、管一管の熱膨張差吸収にクロスフローによる温度均質化が必要。
運転経験	◎	○	ヘリカルコイル管型では SPX、もんじゅが無事故。 PFR (U字管) で伝熱管破損多発。
製作性	○	△	一部差し込み溶接の実績がない。
経済性	◎	○	単価は優位な差なし。直管型は R & D リスクが高い。
保守・補修	○	△	直管型は伝熱管本数が多く、小口径。検査時間が長い。
総合評価	◎	○	

(*1) 平成 2 年度「蒸気発生器の基本仕様に関する研究 (その 1)」の表 3.3.1(3)-1 より

表 2.3-5 新プラント概念の構築（2次系：2次ポンプ型式、機器合体・分離型式）

機器合体／分離

判断指標	分離配置	機器合体	備考
経済性	・建設コスト：約 0.2% 小となる可能性あり。	・建設コスト：約 0.2% 大となる可能性あり。 (SG本体が大型化するため)	①経済性については、H-2とH-4との比較に基づく。
運転・信頼性	・特になし。	・ポンプと SG 伝熱管の検査が干渉する可能性あり。	
開発リスク及び成立性	・特になし。	・機械式ポンプと合体した場合のインペラミサイル対策、伝熱管摩耗対策の検討が必要。	
総合評価	<u>採用</u>	<u>不採用</u>	
	・機器合体しても経済的メリットがないので、分離配置を採用する。 ・直管型 SG は機器合体とのなじみが悪く、ヘリカルコイル管型 SG のみに適用可能。		

ポンプ型式

判断指標	機械式ポンプ（縦置）	電磁式ポンプ（横置）	備考
経済性	・建設コスト：約 0.3～0.4% 大となる可能性あり。	・建設コスト：約 0.3～0.4% 小となる可能性あり。	①経済性については、M-1とH-1、H-3とH-4との比較に基づく。
運転・信頼性	・特になし。	・メンテナンス性向上が期待できる。	②浸漬型電磁ポンプで効率 60% とするとき、所内負荷率増加幅は 0.2% となる。浸漬型にできない場合は、効率 40% に低下、所内負荷率増加幅は 0.7% となる。
開発リスク及び成立性	・特になし。	・電磁ポンプを 2 次系配管に横置で抱かせる方式であり、耐震性確保方策、熱膨張に対する健全性確保方策の検討が必要。	
総合評価	<u>レファレンス</u>	<u>代案</u>	
	・電磁式を採用しても経済的メリットが小さい。 ・電磁式の場合、所内負荷率が 0.2% 増加する（備考②参照）。また、電磁ポンプ（横置き）のサポートのための物量が増加して、経済的メリットが出てこない可能性もある。 ・そのため、実績のある機械式ポンプをレファレンスとする。 ・ただし、本概念で想定している規模の電磁ポンプの試験データが得られていること、メンテナンス性向上が期待できることから、電磁式を代案とし、その開発状況をフォローする。		

表 2.3-6 新プラント概念の構築（崩壊熱除去系）

判断指標	P R A C S × 2 系統 + I R A C S × 1 系統 + 窒素ガス冷却小型 D H X (M-1)	P R A C S × 2 系統 + R V A C S (H-1)	P R A C S × 2 系統 + メンテ冷系 (H-2)	備考
経済性	<ul style="list-style-type: none"> ・基準プラントと同程度。 ・フィン付き 2 重管の採用により、A/C 伝熱管長を大幅に低減できる（他の概念でも適用可）。 	<ul style="list-style-type: none"> ・基準プラントと同程度。 ・系統数は減るが、1 系統当たりの除熱量は増大。 	<ul style="list-style-type: none"> ・基準プラントと同程度。 ・系統数は減るが、1 系統当たりの除熱量は増大。 ・メンテ冷系（安全系）により非常用電源負荷が増加。 	<p>①崩壊熱除去系のコスト比率は約 1.2% と低く、経済性は決定要因となるない。</p>
運転・信頼性	<ul style="list-style-type: none"> ・全ての想定事象に対応可。 ・S G 伝熱管小漏えい時にも、I R A C S による除熱が可能となるよう、純化系等の設計対応を取る必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・全ての想定事象に対応可。 ・R V A C S はループ型炉との適合性が悪い。C V バウンダリが複雑化する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・全ての想定事象に対応可。 ・メンテ冷系は、サイフォンブレーク対策になじまない可能性がある。 ・メンテ冷系での Na 漏えい対策が必要となる。 	<p>②直管型 S G が成立困難と判断された場合は、軸長の短いヘリカルコイル管型 S G が採用される。</p> <p>この場合、</p> <p><input type="checkbox"/> S G の高所配置 (2 次系安全系)</p> <p><input type="checkbox"/> S G の低所配置 (2 次系常用系)</p>
開発リスク及び成立性	<ul style="list-style-type: none"> ・自然循環除熱能力の実証。 	<ul style="list-style-type: none"> ・自然循環除熱能力の実証。 ・R V A C S 除熱性能確認。 	<ul style="list-style-type: none"> ・自然循環除熱能力の実証。 	
総合評価	<p><u>レファレンス</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・軸長の長い直管型 S G をオプション 1 としたことから S G は高所配置となる。大きな伝熱中心差と 2 次系の熱容量を有効に活用する I R A C S は、直管型 S G を採用した 2 次系システムとの適合性が良い。 ・I R A C S を採用する場合、2 次系を安全系として設計する必要があるが、元来 2 次系は大量の Na を包含する設備であり、高いグレード (B(S₂)) で設計・製作するので、安全系としてすることでコストが大きく上昇することはない。 ・したがって、崩壊熱除去系の基本構成として、「P R A C S × 2 系統 + I R A C S × 1 系統 (A/C 伝熱管はフィン付き 2 重管)」をレファレンスとする。なお、備考②に記したことを考慮して、「P R A C S × 2 系統」を代案とする。 ・サイフォンブレーク対応としては、ループ型炉との適合性や Na 漏えい対策との整合性を考慮して「窒素ガス冷却小型 D H X (常用系)」をレファレンスとする。ループ型炉との適合性の悪い「R V A C S」は不採用とするが、「メンテ冷系」は代案とする。 	<p><u>不採用</u></p>	<p><u>代案</u></p>	<p>改めて選択、それに適合する崩壊熱除去系の最適システムを再検討することになる。</p>

表 2.3-7 想定事象に対する除熱機能の充足性

各候補概念の想定事象に対する充足性

候補概念	系統構成				想定事象		
	系統名	系統数	除熱量	クラス	事象II～IVの制限事象 (*1)	班目委員会での指摘事象 (*2)	メンテ時サイフォンブレーク
M-1	PRACS	2	8MW	安全系	1系統運転可 (8MW) □区分: D B E □崩壊熱レベル: 高	停止	停止
	IRACS	1	6MW	安全系	1系統運転可 (6MW)	1系統運転可 (6MW)	停止
	窒素ガス冷却小型DHX	2	1MW	常用系	待機	待機	2系統運転可 (2MW)
H-1	PRACS	2	16MW	安全系	1系統運転可 (16MW)	停止	停止
	RVACS	1	4MW	安全系	待機	1系統運転可 (4MW)	1系統運転可 (4MW)
H-2	PRACS	2	16MW	安全系	1系統運転可 (16MW)	停止	停止
	メンテ冷系	2	4MW	安全系	待機	2系統運転可 (4MW)	2系統運転可 (4MW)

(*1) 事象II～IVの範囲で最も厳しい事象想定。下記の想定。

M-1 : SG伝熱管小漏えい(事象II) + A/Cダンパ2基開失敗→事象IV

H-1及びH-2 : PRACS系漏えい(事象III) + A/Cダンパ1基開失敗→事象IV

(*2) 何らかの事故により1ループ使用不可の状況下で、法律上定められた他の1ループのメンテナンスに入ることを想定。

事故ループ: 循環不能状態(Naドレン状態)

他のループ: 除熱不能状態(メンテナンスにNaドレンを要しないため、Naの循環は可能)

(*3) H-1及びH-2のPRACS系除熱量は暫定値(保守側の値)。

パッシブ型起動系の提案

候補概念	パッシブ型起動系	
	名称	アイデアの概要
M-1	電磁ダンパ	外部電源喪失時に電磁石で保持したダンパを重力開放
	ホットパススイッチ	温度上昇に伴うNaの熱膨張で崩壊熱除去系の流路を形成
H-1及びH-2	パッシブ型1	M-1「電磁ダンパ」と同じ
	パッシブ型2	ヒートパイプとバイメタルの組み合わせによりダンパを重力開放

表 2.3-8 新プラント概念の構築（Na漏えい対策及びNa水反応対策）

Na漏えい対策

判断指標	エンクロージャ（ホット式） + A/C伝熱管2重管化+N ₂ ガス雰囲気等 (M-1)	エンクロージャ（ホット式） + A/C伝熱管2重管化+Arガス雰囲気等 (H-1)	備考
総合評価	<ul style="list-style-type: none"> Na漏えい時の事故影響の局限、復旧作業日数の短縮化の観点から、「エンクロージャ+A/C伝熱管2重管化」を採用する。 エンクロージャは、物量、コスト及び復旧作業日数の点で有利なホット式とする。 エンクロージャ内の雰囲気、Na漏えい検出システム、緊急ドレンの有無等については下期作業にて設定する。検討の場は、Na技術高度化WG等。 		 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Na技術高度化 WGの議論</div>

Na水反応対策

判断指標	固体電解質水素計及び音響計の安全保護系化 (M-1)	音響計の安全保護系化 + SG伝熱管コーティング等 (H-1)	備考
総合評価	<ul style="list-style-type: none"> SG水リーク時の事故影響の局限、復旧作業日数の短縮化の観点から「検出系の高度化」を採用、高温ラブチャを排除してDBLを1+0本程度に削減する。 SG伝熱管コーティングについては、現状ではその有効性等が不明であることから、採用は見送る。 Na水反応検出システムの構成や開発の方向性等については下期作業にて設定する。検討の場は、Na技術高度化WG等。 		 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Na技術高度化 WGの議論</div>

表 2.3-9 新プラント概念の構築（水・蒸気系）

判断指標	1500MWe タービン×2 +給水ポンプ電動化等 (M-1)	1500MWe タービン×2 +給水ポンプ電動化等 (H-1)	500MWe タービン×6 +給水ポンプ電動化等 +低圧タービン1車室化 (H-2)	備考
経済性	<ul style="list-style-type: none"> H-2に比べて10~20%の物量削減が可能。 建設コスト：基準プラントより約0.5~0.7%の削減が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> H-2に比べて10~20%の物量削減が可能。 建設コスト：基準プラントより約0.5~0.7%の削減が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> M-1及びH-1に比べ、物量大。 低圧タービン1車室化等の取り込みが可能。 	①M-1とH-1は類似の概念と考えられる。
運転・信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉1基トリップ時も、健全モジュールによる部分負荷運転で稼働率低下を抑制。 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉1基トリップ時も、健全モジュールによる部分負荷運転で稼働率低下を抑制。 	<ul style="list-style-type: none"> 特になし。 	
開発リスク及び成立性	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉1基トリップ時の、主蒸気圧力、給水流量制御方法の検討。 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉1基トリップ時の、主蒸気圧力、給水流量制御方法の検討。 	<ul style="list-style-type: none"> 特になし。 	
総合評価	<p style="text-align: center;"><u>採用</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 6モジュールプラントでは、経済性に優れる1500MWe タービン×2の構成を採用し、給水ポンプ電動化、ポンプ予備機削減等の新たな合理化方策も取り入れて建設コスト削減を図る。 	<p style="text-align: center;"><u>採用</u></p>	<p style="text-align: center;"><u>不採用</u></p>	

表 2.3-10(1/2) 新プラント概念の構築 (BOP)

電気設備 (非常用電源設備を含む)

判断指標	非常用小型ガスタービン (共用) + 3 モジュール共用電気設備 + 中央制御室統合 (運転員削減) (M-1)	小型 DG (共用) + 3 モジュール共用電気設備 (H-1)	備考
経済性	・物量 : 30~90%減。	・物量 : 約 7%減。	① H-1 のみで提案しているアイデアは、M-1 に取り込むことも可能。
運転・信頼性	・共用化に起因する運転・信頼性への悪影響の有無について検討する必要がある。	・共用化に起因する運転・信頼性への悪影響の有無について検討する必要がある。	
開発リスク及び成立性	・非常用電源 (安全系) 共用に向けての検討が必要。 ・コンクリート設計温度の引き上げ。 ・電源復帰時間に関する想定 (例 : 100 時間程度以内) の妥当性確認。	・非常用電源 (安全系) 共用に向けての検討が必要。	
総合評価	<u>採用</u> ・開発リスクは高くなるが、経済性目標の達成を優先してM-1を採用。	<u>不採用</u>	

表 2.3-10 (2/2) 新プラント概念の構築 (BOP)

換気空調設備

判断指標	室温上限値の緩和 + 自然通風除熱の採用等 (M-1)	常用換気系の合理化 + 設計外気条件の緩和 + 通路の給気ダクト化 (H-1)	備考
経済性	・物量：約 29% 減。	・物量：約 14% 減。	① H-1 のみで提案しているアイデアは、M-1 に取り込むことも可能。
運転・信頼性	・共用化に起因する運転・信頼性への悪影響の有無について検討する必要がある。	・共用化に起因する運転・信頼性への悪影響の有無について検討する必要がある。	
開発リスク及び成立性	・コンクリート設計温度の引き上げ。	・設計外気条件の緩和。	
総合評価	採用	不採用	
	・経済性目標の達成を優先して M-1 を採用。		

ユーティリティ設備

判断指標	補助蒸気設備、淡水供給設備、ガス供給設備、Na 供給設備、共通補修設備等の共用化 (M-1)	補機冷却水系のポンプ・熱交換器の予備機削減 + Ar ガス系等の共用化 (H-1)	備考
経済性	・物量：約 83% 減。	・予備機削減：約 9% 減 + α 。	① H-1 のみで提案しているアイデアは、M-1 に取り込むことも可能。
運転・信頼性	・共用化に起因する運転・信頼性への悪影響の有無について検討する必要がある。	・共用化に起因する運転・信頼性への悪影響の有無について検討する必要がある。	
開発リスク及び成立性	・特になし。	・特になし。	
総合評価	採用	不採用	
	・経済性目標の達成を優先して M-1 を採用。		

表 2.3-11 新プラント概念の構築（燃料取扱設備）

判断指標	水プール直接貯蔵方式 +レールレス走行方式燃料 出入機 (M-1)	E V S T 貯蔵方式 +レールレス走行方式燃料 出入機 (FK-1)	E V S T 貯蔵方式 +切替走行・中継方式燃料 出入機 (FK-2)	備考
経済性	<ul style="list-style-type: none"> 建設コスト：基準プラントより約1.3～1.5%の削減が可能。 燃料交換期間が比較的長いが、稼働率への影響は小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設コスト：基準プラントより約1.3～1.5%の削減が可能。 燃料交換期間が比較的長いが、稼働率への影響は小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設コスト：基準プラントより約0.4～0.8%の削減が可能。 燃料交換期間が比較的短いが、稼働率の大幅な向上に繋がらない。 	①今回は燃料移送方式についてのみ選定を行うため、運転・信頼性、開発リスク及び成立性については、燃料移送方式に関わる事項のみを記載。
運転・信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 無軌道台車の開発（高速化、停止位置精度の確保、耐震、ケーブル処理等） 	<ul style="list-style-type: none"> 無軌道台車の開発（高速化、停止位置精度の確保、耐震、ケーブル処理等） 	<ul style="list-style-type: none"> 特になし。 	
開発リスク及び成立性	<ul style="list-style-type: none"> 上記の運転・信頼性に関する課題の解決。 	<ul style="list-style-type: none"> 上記の運転・信頼性に関する課題の解決。 	<ul style="list-style-type: none"> 特になし。 	
総合評価	<p style="text-align: center;">採用</p> <ul style="list-style-type: none"> 経済性目標の達成を優先して、建設コスト削減の可能性のある「レールレス走行方式燃料出入機」を採用する。 	<p style="text-align: center;">採用</p>	<p style="text-align: center;">不採用</p>	

表 2.3-12 新プラント概念の構築（建屋・配置）

建屋・配置		
判断指標	燃料貯蔵設備の移設+A/Cの屋上への移設 (M-1)	備考
経済性	・建屋容積：約13%減、建設コスト：約1.4%減。	
運転・信頼性	・特になし。	
開発リスク及び成立性	・特になし。	
総合評価	<p style="text-align: center;">採用</p> <ul style="list-style-type: none"> ・建設コスト削減の可能性があることから採用する。 	

表 2.3-13 新プラント概念の経済性目標の達成見通し

項目	コスト比率 (①)	直間補正 (②)	補正後の コスト比率 (③=①×②)	削減効果 (④)	建設コスト 削減率 (③×④)	主要因
水・蒸気系	12.8%	100/51.9	24.7%	2~3%	0.5~0.7%	ポンプ予備機削減
B 電気設備	6.2%	100/81.9	7.6%	3%	0.2%	容量削減+共用化
O 換気空調設備	15.9%	100/81.9	19.4%	14%	2.7%	容量削減+共用化
P ユーティリティ設備						
燃料取扱設備	3.5%	100/51.9	6.7%	20%	1.3%	レールレス方式採用等
建屋	5.7%	100/51.9	11.0%	13%	1.4%	配置合理化
合計	—	—	—	—	6.1~6.3%	—

(注1) 2次系、崩壊熱除去系、Na漏えい対策及びNa水反応対策については大幅なコスト削減が期待できない。

(注2) 水・蒸気系、燃料取扱設備、建屋 → J N C 評価に基づく推測
B O P → 三菱による推測



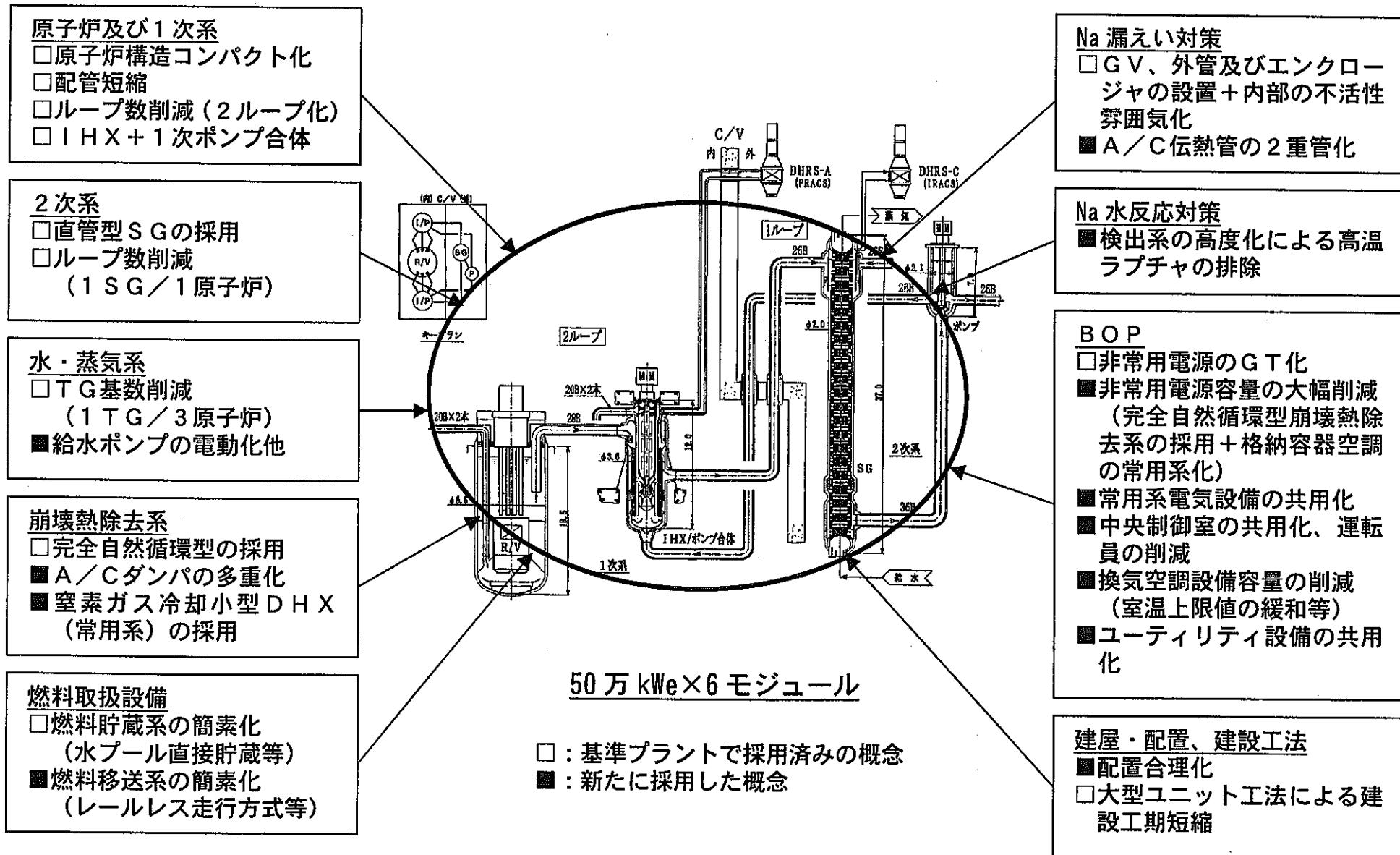
①建設コスト削減率は6%台と推測

②建設コストは19.4万円/kWe→18.2万円/kWeに低減する見通し

表 2.4-1 クリティカルな課題

設備	開発課題	当面の対応方針
2次系 (直管型SG)	伝熱管間、管一胴間の熱膨張差の吸收	・解析によりクロスフローによる伝熱管間温度差の緩和効果を検討。
	水・蒸気側流動不安定領域拡大の可能性	・解析により水・蒸気側流動不安定領域を概略把握。必要に応じて対策を検討(オリフィス等)。
	伝熱管破損伝播挙動(不明)	・水リーク検出特性解析及び伝熱管破損伝播解析を行い、直管型SGの特性を把握。検出系の高度化を中心に、安全性確保、財産保護の観点から対応策と開発計画をまとめる。
崩壊熱除去系	自然循環除熱能力の実証	・1次元プラント動特性解析コードによる除熱特性の把握。 (将来的には、大型Na試験施設での実験検証が必要)
水・蒸気系	原子炉1基トリップ時の主蒸気圧力、給水流量制御方法の検討	・プラント動特性解析による制御特性の把握。
BOP	非常用電源(安全系)の共用化	・P S A的手法により、共用化した場合の炉心損傷発生頻度への影響、稼働率への影響等を検討。
	コンクリート設計温度の引き上げ	・電中研での既往研究の調査。
	格納容器内空調の常用系化	・外部電源喪失時の建屋温度挙動の把握。 ・電源復帰時間の検討。
燃料取扱設備	無軌道台車の開発	・高速化、停止位置精度の確保、耐震、ケーブル処理等について検討を行う。

図 2.3-1 新たな Na 冷却中型モジュール炉概念



3. 研究成果概要

上期のプラント概念の再構築を受け、かつ、実用化戦略調査研究フェーズⅡにおける設計要求を勘案して、プラント概念構築（設備・機器の具体化）を行った。フェーズⅠからの設計要求の変更点としては、設計寿命を40年から60年とすること、負荷追従運転を可能とすること、運転廃棄物を1/10（固体廃棄物の場合）に低減すること等が新たに追加された（表3-2参照）。

また、構築したプラント概念を対象に、成立性評価（安全性評価、構造健全性評価、熱流動評価及び運転・保守補修性等の評価）並びに経済性評価を実施した。

これらの研究成果概要を表3-1にまとめる。

3.1 プラント概念構築

(1) 炉心・燃料

図3.1-1にレファレンス炉心の炉心構成及び主要仕様を示す。

本研究では、増殖比、運転サイクル長、取出平均燃焼度、ボイド反応度等に関する設計要求を満足する FAIDUS型の均質炉心及び非均質炉心、ABLE型の均質炉心及び非均質炉心を検討しているが、本年度は炉心性能が優れる ABLE型均質炉心をレファレンスとした。

大型炉炉心の設計では、燃料サイクルコスト低減に向けて、運転サイクル長を18ヶ月に延長するとともに、径方向ブランケットを2層から1層に削減しているが、中型炉炉心では、増殖比約1.2を確保するため径方向ブランケットを2層のままである必要があり、運転サイクル長の18ヶ月への延長のみ行っている。なお、60年寿命化への要求に対しては、径方向ブランケット2層を有するため、SUS遮蔽体1層+ZrH遮蔽体1層で必要な径方向遮蔽性能を確保できる見通しである。

なお、炉心設計に当たっては、燃料集合体の仕様にDDI(ダクトダクト相互作用)評価結果を反映するとともに、炉定数のADJ2000への変更を行っている。

(2) 原子炉構造

図3.1-2に原子炉構造概念を示す。

炉心設計、炉内流動の適正化方策、耐熱性・耐震性、PAMR/PAHR対策等と整合を図りつつ、主要構成機器（炉容器、炉上部プレナム構造、UIS、炉心支持構造、燃料交換機等）を具体化し、コンパクトな原子炉構造（径：7.06m、高さ：18.3m、板厚：30mm）を設定した。

炉心径増加、回転プラグ径増加及び機器間ギャップ適正化に伴い、炉容器径がフェーズⅠに比べてやや増加している。

(3) 冷却系

図3.1-3に1次・2次冷却系の系統概念を示す。また、図3.1-4にIHX・1次ポンプ合体機器の機器構造、図3.1-5にSGの機器構造、図3.1-6に2次ポンプの機器構造を示す。

IHX・1次ポンプ合体機器は、大型炉の合体機器の設計をベースとしてその機器構造を設定しているが、必要な自然循環ヘッドや液位の確保のため大型炉と同じ高低関係を保ったまま中型炉の出力レベルまで小型化した設計であるため、全体に細長の形となり、ポンプ軸長が

相対的に長く（約10m）なっている。この状態で（大型炉と同様）ポンプの1次固有値を定格回転数よりも高く設定しようとすると、ポンプの軸径を大きく、定格回転数を低く（約600rpm）せざるを得なくなるので、ポンプの性能を十分に引き出し難く、かつ、合体機器径の増大により物量が相当増大（約100t）する結果となる。これに対しては、以下のような3通りの対応策が考えられるが、今後の設計の中でさらに検討を進め、設計の最適化を図って行くこととする。

a. 運転制御方式の見直し

ポンプの1次固有値を定格回転数よりも低い値とすることを許容し、ポンプの軸径を小さく、定格回転数を高く設定する。プラントの運転制御方式を工夫して、起動・停止時等に1次ポンプ回転数がその危険速度領域を短時間で通り過ぎるようにする。

b. 1次系配管形状の変更

1次系ホットレグ配管の形状を逆L字形から逆U字形に変更し、コールドレグ配管ノズル高さを下げる。これによりポンプ軸長を7~8mに短縮して、ポンプの軸径を小さく、定格回転数を高く設定する（図3.1-4参照）。

c. 機器合体方式の見直し

1次系機器を分離配置とする。これによりポンプ設計の自由度が増し、適切なポンプ軸長を設定できるようにする。

SGについては、60年寿命化に対応するために伝熱管肉厚を1.7mmから1.9mmに増加した結果、重量が250tから276tに増加した。

2次ポンプについては、一体型の2次系C/Tと合体する設計としているが（直管型SGとC/Tとの合体が困難なため）、これらを収納し、かつ、Na水反応時の圧力荷重に耐える長円形のケーシング構造の重量が約100tに達しており、相当の物量増大となっている。これに対しては、（Naバウンダリ面積が増加してNa漏えい対策の観点からは不利となるが）2次系C/Tを分離配置してケーシングを削除する方策が考えられる。この点についても、今後の設計の中で検討を進め、設計の最適化を図って行くこととする。

なお、本研究では代案として2次ポンプに電磁ポンプを採用した場合の検討も実施した。図3.1-7に2次系代案システムの構成を示す。本代案では、試験により成立見通しが得られたある160m³/minの電磁ポンプ2基を並列・縦置きに配置している。ポンプの配置の自由度が高く、低所配置が可能なので、レファレンスほど（NPSH_v確保のため）2次系カバーガスを高くする必要がなく、カバーガス圧力は170kPa程度となっている。

(4) 崩壊熱除去系

図3.1-8に崩壊熱除去系の系統概念を示す。

信頼性向上、Na漏えい対策強化及び建設コスト削減を狙って、ポンプや送風機などの動的機器を有さない完全自然循環型を採用するとともに、A/Cベーン・ダンパの多重化・多様化、A/C伝熱管の二重管化等の概念を採用した。フェーズIと同様、2系統のPRACSと1系統のIRACSより成る構成とし、PRACSの除熱量を8MWt、IRACSの除熱量を7MWt（ともに事象IVでの除熱量）に設定した。

本研究では安全系を1次系に限定した崩壊熱除去系の代替概念の検討も実施しているが、

これに関しては第4章で詳述する。

(5) Na補助系設備

60年寿命化を達成するため、熱交換器伝熱管のNa側/水側の腐食しろ・摩耗しろを増加する必要があるが、コールドトラップの純化能力を1次系、2次系とも強化し、Na側腐食しろの増加を抑えて伝熱管肉厚の増加に伴う熱交換器物量の増加を抑制している。コールドトラップの型式はNaバウンダリ面積局限の観点から一体型(分岐配管なし)とし、1次系：2基、2次系：1基とした。

Na漏えい対策設備については、1次系、2次系及び崩壊熱除去系(A/C伝熱管を含む)のNaバウンダリを外管、ガードベッセル等で二重化し、その内部を窒素雰囲気化するとともに仕切り構造によりNa漏えいの影響を局限する設計とした。また、Na水反応対策設備については、安全保護系相当の固体電解質Na中水素計及び音響計を設け、DBLの低減を図った。

(6) タービン設備

タービン系を原子炉3モジュールで共用化する構成(150万kWe)について、主要機器の仕様及びヒートバランスを設定した。また、後述するように、本プラントをシングルプラントとして設計した場合の経済性を評価するため、タービン系を共用化しない場合(50万kWe)の検討も行った。

(7) 燃料取扱設備

水プール直接貯蔵方式及びEVST貯蔵方式について、平成14年度末にシステムを確定するための概念構築を行った。モジュール間での貯蔵容量の共用化、EVST冷却系への自然循環方式の採用等の合理化方策を取り込んだ。また、上期に選定したレールレス燃料出入機の概念を検討した(第4章で詳述)。

(8) 電気計装設備

完全自然循環型崩壊熱除去系の採用により非常用発電機の早期起動要求がなくなったため、従来のディーゼル発電機に替わり、冷却系、潤滑油系等の補助設備がなくコンパクトなガスタービン発電機を採用することとした。また、完全自然循環型崩壊熱除去系の採用及び換気空調系等の合理化により非常用発電機容量を大幅に削減するとともに、非常用発電機をモジュール間で共用する設計とし、6モジュール当たりの非常用発電機の容量及び基数を0.55MW×3台とした。

(9) 建屋・配置

設備側の合理化設計結果を反映して建屋・配置を検討し、モジュール炉としての全体配置概念を明らかにした。建屋全体容積は1ユニット(1500MWe)分で約14万m³となり、フェーズI(15.8万m³)から約11%の削減となった。また、後述するように、本プラントをシングルプラントとして設計した場合の経済性を評価するため、シングルプラント(50万kWe)の場合の建屋・配置の検討も行った。

図3.1-9及び図3.1-10に、原子炉建屋(モジュールプラント)の平面図及び鳥瞰図を示す。

3.2 安全性評価

(1) 概要

本年度は、代表的な過出力事象 (TOP) である「制御棒誤引抜き」、代表的な流量喪失事象 (LOF) である「1次ポンプ軸固着」の解析・評価を実施した。また、完全自然循環型崩壊熱除去系採用との関連で崩壊熱除去特性解析、Na漏えい対策強化との関連でNa漏えい燃焼解析、Na水反応対策強化との関連でSG伝熱管破損伝播解析を実施した。さらに、PAMR/PAHRを中心に行なった再臨界回避シナリオの検討を実施した。

崩壊熱除去特性解析及びSG伝熱管破損伝播解析については、クリティカル課題との関連もあり第4章で詳述するので、ここではこれ以外の評価の概要についてまとめる。

(2) 制御棒誤引抜き

図3.2-1に制御棒誤引抜きの解析・評価結果を示す。

主系スクラムに関しては、低速～高速引抜き (0.1～10¢/s) に対する出力領域中性子束高信号(4ch)による原子炉スクラムが可能であり、バックアップとしては、C/R位置偏差大信号が全引抜き速度領域で有効であるとの見通しを得た。また、後備系スクラムに関しては、広域中性子束高信号(4ch)では低速引抜き領域をカバーできないが、同信号の設定値の1%引き下げ又はチャンネル数の増加(6ch)により炉心・燃料の健全性を確保できる見通しであることが分かった。

(3) 1次ポンプ軸固着

図3.2-2に1次ポンプ軸固着の解析・評価結果を示す。

安全保護系応答時間短縮、健全ポンプトリップ遅れ時間拡大、流量半減時間拡大及び制御棒挿入時間短縮という方策を組合せることにより、主系スクラム、後備系スクラムとも、炉心・燃料の健全性確保に関する判断基準(燃料被覆管温度900°C以下)を満足できる見通しを得た。

(4) Na漏えい

DBEとして、外管又はエンクロージャ内でのNa漏えい、BDBEとしてA/C伝熱管(二重管)のギロチン破損を想定し、Na漏えい燃焼解析を行った。その結果、前者に関しては低酸素濃度の窒素雰囲気中の燃焼であり、温度・圧力の上昇が僅かであること、後者に関しては、Na漏えい量が比較的少なく(約3m³)、漏えいNaが貯留される入口ダンパ部貯留パンの温度は650°C程度に留まり、貯留機能は確保できる見通しであることが示された。

(5) 再臨界回避シナリオ

本件は大型炉と共通する課題であり、大型炉炉心を対象とした検討結果をベースにABLE概念を採用した中型炉炉心の再臨界シナリオを検討した。

ABLE炉心では、炉心下部に流出・固化した燃料が緩やかに約1000秒かけて下部プレナムに流出する過程での未臨界維持及びラッパ管形状の維持(溶融燃料プール連結防止)が重要である。中型炉の場合、炉心高さが大型炉より10cm大であるため、未臨界維持に関してはやや厳しい条件となることが分かった。また、ラッパ管形状の維持に関しては、DRACSを設けていないため、インタ・ラッパ・フローによる冷却能力の不足が予想されることが分かった。

3.3 構造健全性評価

(1) 概要

本年度は、熱応力に対する構造健全性評価、耐震性評価、合体機器伝熱管のフレッティング摩耗に対する健全性評価、LBB の成立性評価等を実施した。また、直管型 SG 採用との関連で、伝熱管間、管一胴間の熱膨張差吸収に関する評価を実施した。

このうち、伝熱管間、管一胴間の熱膨張差吸収に関する評価については、クリティカル課題との関連もあり第4章で詳述するので、ここではこれ以外の評価の概要についてまとめる。

(2) 热応力に対する構造健全性

代表箇所として、炉容器壁、1次主配管、IHX 及び2次主配管を選定し、60年寿命化に対応する熱過渡想定回数の増加（1.5倍）を反映した熱過渡条件を設定して評価を行った結果、熱応力に対する構造健全性は確保できるとの見通しを得た。なお、上記以外に、評価すべき代表箇所として SG 出口蒸気管板が挙げられるが、これについてはフェーズ I の段階で評価を行い、成立の見通しを得ている。

(3) 耐震性評価

地震条件を実証炉のレファレンス S_2 波⁽³⁾とし、水平免震の採用（上下耐震）を条件にプラントの設計を行い、今後予想される入力地震力の増加に対しては、上下免震を採用することで対応する方針とした。

炉容器の耐座屈性、炉心の健全性（反応度投入等）、1次主配管の固有値について評価した結果、すべて許容値の範囲内であり、耐震性が確保される見通しを得た。

(4) 合体機器の成立性評価

2-1/4 1Mo 鋼の比摩耗量データを用い、合体機器の機器仕様を反映した梁要素モデルによる振動解析を行い、伝熱管のフレッティング摩耗量を評価した。評価の結果、伝熱管摩耗量は60年で 0.146mm であり、伝熱管肉厚余裕 0.255mm を下回るとの見通しが得られた。

(5) LBB 成立性評価

Mod. 9Cr-1Mo 鋼のデータを用いて、1次配管及び2次配管を対象に評価を行った結果、検出可能なき裂長さは設計想定荷重に対して不安定破壊を生じる限界き裂長さに対して十分小さく、1次配管及び2次配管とも LBB が成立する見通しが得られた。

3.4 热流動評価

(1) 概要

本年度は、炉上部プレナム内流動、IHX 上部プレナム内流動、直管型 SG の管束部流動（前述の伝熱管間、管一胴間の熱膨張差吸収に関する評価用）、直管型 SG の水・蒸気側流動安定性の評価を実施した。直管型 SG の管束部流動及び水・蒸気側流動安定性の評価については、クリティカル課題との関連もあり第4章で詳述するので、ここではこれ以外の評価の概要についてまとめる。

(2) 炉上部プレナム内流動

大型炉での評価と同様に、上下 2枚の二重構造となっているディッププレート (D/P)、D/P と構造物（配管、炉容器壁等）との隙間部の構造、UIS 切込み部の形状等を詳細にモデル化し

た三次元流動解析モデルにより定格運転時の流況を評価した結果、D/P ギャップから液面部への流入量が大型炉と比較して相対的に増加するが、液面部の流速最大値（水平方向）は現状のカバーガス巻き込み防止のめやす値（0.1m/s）と同程度まで低減されており、カバーガス巻き込みは防止できる見通しであることが分かった。

(3) IHX 上部プレナム内流動、

IHX 上部プレナム内では、1つのノズルから1次Naが流入するため、伝熱管への流量配分に周方向・径方向の大きな分布が生じる恐れがあるが、これに対しては、大型炉と同様に、IHX 入口プレナムへの堰及び整流板の設置により対処する方針である。

IHX 1次Na側の流量配分の不均一度をパラメータとして、定格運転時の IHX 管束部の温度分布及び交換熱量を評価した結果、周方向の流量配分に±20%の不均一がある場合でも、IHX 伝熱管間の最大温度差は約 22K であり、座屈応力に相当する許容温度差（38K）以下に抑えられることが分かった。なお、大型炉での評価から、上記の対応策により周方向の流量配分の不均一を±20%に抑制することは十分可能な見通しである。

3.5 運転・保守補修性等の検討

(1) プラント運用及び運転制御方式

設計要求に追加された負荷追従運転への対応を考慮して、タービン：主、原子炉：従とした協調制御方式を採用した。また、制御系基本構成の設定に当たっては、90%程度の負荷喪失に追従でき、所内単独運転が可能となるよう配慮するとともに、単一モジュールがトリップした場合でも、他の健全モジュールの運転継続が可能となるように配慮した。

(2) ISI、保守補修計画

各機器に対して 60 年寿命化を踏まえた ISI 計画及び補修保守項目を設定した。

(3) 定検期間、建設期間

定検期間については、図 3.5-1 に示すように、燃料出入機の運用方法見直し等により燃料交換期間がフェーズ I に比べて 3 日短縮し、標準定検：31 日、標準外定検：42.5 日となった。建設期間については、建屋容積が約 10%削減されたが、期間短縮への影響は小さく、図 3.5-2 に示すように、フェーズ I と同等の建設期間（33 ヶ月、工場製作期間を含めると 36 ヶ月）となつた。

3.6 経済性評価

(1) 主要物量

NSSS 物量は、下記の理由により合計で約 279t 増加し、約 1477t となった。

- a. 炉容器径増加：約 65t
- b. IHX 径増加：約 97t
- c. SG 伝熱管肉厚増加（60 年寿命化対応）：約 26t
- d. 2 次ポンプのケーシング設置：約 87t

ただし、上記のうち b. 及び d. については、前述の通り、設計の最適化による削減の余地がある。一方、BOP の合理化等により原子炉建屋体積はフェーズ I よりも約 10%減少し、約

4.7万m³となっている（1プラント当たりの値）。なお、定検期間の短縮及び運転サイクル長の増加により、稼働率はやや高くなり約93%となった。

本プラントをシングルプラントとして建設した場合についても評価したが、モジュールプラントの場合と比べて、NSSS物量は1477tと変わらない反面、タービン、BOP等の設備共用がなくなることから原子炉建屋体積が大幅に増加し、約8.5万m³となることが分かった。

(2) 建設コスト及び発電コスト

上記(1)の物量データに基づく建設コスト（コマンドコストコードを用いたJNC評価値）は基準値（20万円/kWe）の約98%であり、余裕は殆どないものの、設計要求を満足する見通しが得られた。フェーズIにおけるNa冷却中型モジュール炉の建設コスト評価値は基準値の約97%であり、今回BOP設備を中心に設備合理化を進めたにもかかわらず、建設コストが僅かに（約1%）増加する結果となったが、これは、60年寿命化や設計の詳細化によりNSSS物量が約279t増加したことによる影響と考えられ、今後の設計最適化でNSSS物量の増加幅を圧縮して行く必要がある。

燃料費：1.1円/kWh、運転費：0.9円/kWhを前提に求めた発電コスト（ただし、使用した建設コストはメーカ評価値）は約5.2円/kWhであり、要求値に届かない結果となった。

表 3-1(1/6) 研究成果概要

大項目	中項目	研究成果（概要）	今後の課題	関連図														
1. プラント概念構築	①炉心・燃料	<ul style="list-style-type: none"> 設計要求を満足する ABLE 型均質 2 領域炉心（レファレンス炉心）を設定。炉定数 ADJ2000 への変更及び DDI 評価結果を反映。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th><th>ABLE 炉心</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>炉心等価直徑</td><td>2.73m</td></tr> <tr> <td>炉心高さ</td><td>90cm</td></tr> <tr> <td>運転サイクル長</td><td>18ヶ月</td></tr> <tr> <td>燃耗比</td><td>1.20</td></tr> <tr> <td>取出平均燃焼度</td><td>150GWd/t</td></tr> <tr> <td>ボイド反応度</td><td>6.0 \$</td></tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> ABLE 型レファレンス炉心について炉心流量配分、被覆管 CDF 評価を実施。バンドル圧損 0.18MPa、被覆管最高温度 700°C、被覆管 CDF 最大値は 0.38、制限値をクリア。 前年度の JNC の検討結果を内外挿して、炉心の遮蔽性能を概略評価。径ブランケット 2 層 + SUS 遮へい体及び ZrH 遮へい体各 1 層で、60 年寿命化に対応できる見通し。 	項目	ABLE 炉心	炉心等価直徑	2.73m	炉心高さ	90cm	運転サイクル長	18ヶ月	燃耗比	1.20	取出平均燃焼度	150GWd/t	ボイド反応度	6.0 \$	<ul style="list-style-type: none"> 再臨界回避方策・シナリオに関する検討結果の反映。 ボイド反応度が 6 \$ ぎりぎり。次年度の早い時点で調整が必要。 	図 3.1-1
項目	ABLE 炉心																	
炉心等価直徑	2.73m																	
炉心高さ	90cm																	
運転サイクル長	18ヶ月																	
燃耗比	1.20																	
取出平均燃焼度	150GWd/t																	
ボイド反応度	6.0 \$																	
②原子炉構造	<ul style="list-style-type: none"> 炉心径増加、回転プラグ径増加及び機器間ギャップ適正化に伴い、原子炉容器径等を見直すとともに、主要機器・配管類の配置や構造概念を具体化。耐熱・耐震性確保、ガス巻き込み防止、PAHR 対策等と整合を取り、コンパクトな炉容器構造（内径：7.06m、高さ：約 18.3m、胴部附厚：30mm）を設定。 熱遮蔽ライナは 2 枚から 1 枚に削減可能。 炉内中維槽（回転ラック式／2 集合体ボット固定ラック式）、及び燃料出入用案内管等の構造概念を具体化。 FHM（パンタグラフ方式／マニプレータ方式）については、アーム構造を検討するとともに地震発生時における変位を評価した結果、UIS 切欠き部での干渉を防止できる見通し。 	<ul style="list-style-type: none"> 炉内構造物に関する詳細検討。 一大型炉と同様の課題（省略） 一炉内中維槽と炉心支持スカートとのギャップ最適化 地震入力条件が厳しくなる場合の対応検討。 	図 3.1-2															
③1 次冷却系	<ul style="list-style-type: none"> IHX・1 次ポンプの構造を具体化。大型炉と高関係を同じとし、各機器を細くした設計としたためポンプ軸長が長くなり、ポンプ回転数の低下/ポンプ軸径の増加/IHX 径の増加を招き、合体機器の物量増加に繋がっている。 IHX 1 次側入口部に整流構造を設置し、管束部への流量均一化を図った。 外管、サポートを含めた 1 次系配管の構造を具体化。外管は低温設計とし、内管との熱膨張差をペローズで吸収。外管内仕切りを設け、Na 漏えいの影響局限を図る。 	<ul style="list-style-type: none"> 1 次 H/L 配管を逆 L 字から逆 U 字に変更すると、合体機器の C/L 配管ノズル高さを下げることができ、ポンプ軸長の短縮/ポンプ回転数の増加/合体機器の物量削減が可能になる。次年度、最適化を行う必要あり。 外管設計の再検討（Na 技術高度化 WG での議論を踏まえ復旧が容易となる構造概念を再検討）。 	図 3.1-3 図 3.1-4															
④2 次冷却系	<ul style="list-style-type: none"> レファレンス設計（直管型 SG+機械式ポンプ+分離配置）の系統・設備仕様を設定。SG の圧損が大きいので、2 次系カバーガス圧力が 0.35MPa と高い（大型炉では 0.1MPa）。また、2 次系 C/T とポンプを一体化するので長円形のケーシングが必要となり、物量増加に繋がっている。 外管、サポートを含めた 2 次系配管の構造を具体化。外管は高温設計とし、内管との熱膨張差をペローズで吸収。外管内仕切りを設け、Na 漏えいの影響局限を図る。 代案として、電磁ポンプを使用した場合の系統・設備仕様を検討。電共研で成立見通しが得られつつある 160m³/min の電磁ポンプを 2 基使用。揚程増加（約 2 倍）には極数増加で対応。縦置き配置。C/L から分歧配管を出して C/T を設置する必要があるが、配置の自由度が高く低所配置できるので、NPSHav 確保のために 2 次系カバーガス圧力を高くする必要はない。 	<ul style="list-style-type: none"> SG 形式（直管型/ヘリカルコイル管型）及びポンプ形式（機械式/電磁式）の選定（次年度末）。 外管設計の再検討（Na 技術高度化 WG での議論を踏まえ復旧が容易となる構造概念、高温設計とすることの得失等を再検討）。 レファレンス設計：Na 水反応による圧力荷重等に対する長円形ポンプケーシングの構造成立性確認。物量インパクトが大きくなる場合は、C/T を分離配置として物量低減を図る設計も検討。 代案設計：電磁ポンプの耐震性、熱膨張に対する健全性の検討。 	図 3.1-3 図 3.1-5 図 3.1-6 図 3.1-7 クリティカル課題 (図 4.1-1) (図 4.1-2) (図 4.1-3) (図 4.1-4)															

表 3-1 (2/6) 研究成果概要

大項目	中項目	研究成果（概要）	今後の課題	関連図
1. プラント概念構築（続き）	⑥崩壊熱除去系	<ul style="list-style-type: none"> 信頼性向上、Na 漏えい対策強化及び建設コスト削減を狙って、完全自然循環型、A/C ベーン・ダンバの多重化・多様化、A/C 伝熱管の二重管化等の設計概念を採用。 1 次元簡易過渡解析により PRACS、IRACS の除熱量を設定。A/C ベーン・ダンバ 1 基開失敗で除熱量が半減するものと仮定し、PRACS : 8MWt、IRACS : 7MWt（事象IV）に設定。 PRACS、IRACS の主要な機器仕様を設定。DHM は PRACS：直管型、IRACS：U字管型、A/C は フィン付き二重管型。PRACS の A/C 伝熱部のサイズは 5.2m × 2.88m × 3.7m 程度。 安全系を 1 次系に限定した代替概念（下記）を検討、安全性、経済性、運転性等の観点からレファレンス設計と比較・評価。 <ul style="list-style-type: none"> - PRACS × 2 + RVACS（格納容器内空調をヒートシンクとする閉鎖型） - PRACS × 2 + メンテナンス冷却系（2 系統を 6 モジュール間で共用） 	<ul style="list-style-type: none"> A/C 伝熱部での Na 漏えいを BDBE に位置付けるための要件と、必要な R&D 項目の検討。 2 次系システム（次年度末に選定）への適合性を考慮した崩壊熱除去系システムの選定。 	図 3. 1-8 クリティカル課題（図 4. 2-1）（図 4. 2-2）
	⑦Na 補助系設備	<ul style="list-style-type: none"> 純化系：熱交換器（SG）伝熱管の腐れ代削減により 60 年寿命化に対応するため、C/T の純化能力を 1 次系、2 次系とも 10→5ppm（運転中の酸素濃度）に強化。一体型 C/T とし、1 次系：2 基、2 次系：1 基設置。1 次系 C/T の設計寿命は 60 年。 Na 水反応対策設備：安全保護系相当の固体電解質 Na 中水素計及び音響計を設け、DBL を 1+0 本相当に低減する。 Na 漏えい対策設備：SID/LLD+液位計による検知、GV+ガードパイプの設置、内部は気密+窒素雰囲気、内部を仕切り構造にして Na 漏えいの影響を局限。 	<ul style="list-style-type: none"> Na 漏えい対策設備及び Na 水反応対策設備については、Na 技術高度化 WG での議論を踏まえて、安全上及び財産保護上の要求条件を満たす対策設備を具体化する必要がある。 	
	⑧ターピン設備	<ul style="list-style-type: none"> ターピン系を原子炉 3 モジュールで共用化する構成（150 万 kW_e）とシングルプラント構成（50 万 kW_e）について、主要機器の仕様、ヒートバランスを設定。 3 モジュール共用化構成を対象に、原子炉 1 モジュールのトリップ時に健全モジュール側の運転を維持するためのターピン側の制御方式を概略検討。また、給水系 1 系統の故障を想定した場合に、プラント稼働率や制御性の観点から、どのような給水ポンプ・給水加熱器の共用化方式が適切かについて比較検討。 	<ul style="list-style-type: none"> プラント制御特性解析による制御系の追従性、安定性の確認。（原子炉 1 モジュールの故障、給水系 1 系統の故障に対する応答性） 	
	⑨燃料取扱設備	<ul style="list-style-type: none"> レールレス燃料出入機について、走行台車の浮き上がり、転倒、滑り防止対応、給電・制御方式、位置決め方法などの技術課題の検討を行い、トロリー方式の採用により 1 基の燃料出入機により各モジュールにアクセス可能な見通しを明らかにした。 また、水プール直接貯蔵方式以外に、EVST 貯蔵方式の検討を行い、モジュール間での貯蔵容量の共用化（3 モジュール）、EVST 冷却系への自然循環方式の採用などの合理化方策を取り込んだ概念構築を行った。 	<ul style="list-style-type: none"> レールレス燃料出入機の概念具体化。 複数体移送方式採用の有無の検討。 水プール直接貯蔵方式、EVST 貯蔵方式の比較による燃料取扱方式の選定（設備合理化検討を含む）。 	クリティカル課題（図 4. 5-1）
	⑩電気・計装設備	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉 3 基にターピン発電機 1 台というモジュールプラント概念に適用する外部及び所内電源設備構成を構築するとともに各設備の合理化を図った。所内変圧器は 3 モジュールに対し 1 台、予備変圧器は 6 モジュールに対し 1 台とし、非常用発電機は 6 モジュールに対し 3 台（600% × 3 台）とした。 完全自然循環型崩壊熱除去系の採用により非常用発電機への早期起動要求がなくなったため、従来のディーゼル発電機から冷却系、潤滑油系等の補助設備がないコンパクトなガスターピン発電機に変更可能となった。また、完全自然循環型崩壊熱除去系の採用、換気空調設備の合理化等により、非常用発電機容量を 0.55MW × 3 台まで削減できる見通しである。 プラント概念構築として、交流電源設備、直流電源設備、計装電源設備、原子炉保護系設備等の基本仕様を策定した。 	<ul style="list-style-type: none"> 崩壊熱除去系からの早期起動要求は無くなったが、換気換気空調系等の起動要求を詳細に検討した上でガスターピン発電機への変更の妥当性を確認する必要有り。 安全保護系設備に関わる詳細検討（下記）。 <ul style="list-style-type: none"> - 炉心出口温度計装の必要性の見極め - DN 法による燃料破損検出の有効性 - 電磁流量計の適用性（大型炉と同じ課題） 	クリティカル課題（図 4. 4-1）
	⑪放射性廃棄物処理設備	経済性評価に資するため気体、液体及び固体廃棄物処理系の処理容量を暫定した。	設計要求である運転廃棄物低減に対応するための検討。	
	⑫換気空調設備	格納容器内空調の常用系化、コンクリート設計温度の見直しによる室温条件の緩和、2 次系室への自然通風除熱の採用により、換気空調系の合理化を図った。その結果、換気空調系の物量（風量）は大幅に削減され、実証炉の約 30%（単位出力換算）となった。	<ul style="list-style-type: none"> 格納容器内空調常用系化の可否の確認。 コンクリート制限温度見直しの可否の確認。 	クリティカル課題（図 4. 4-2）（図 4. 4-3）
	⑬BOP 設備	補機冷却系、圧縮空気供給系、補助蒸気供給系及び Ar ガス供給系について、実証炉フェーズ II 検討結果を基に合理化検討し、物量データを暫定した。	設計データに基づく各系統の物量見直し。	

表 3-1 (3/6) 研究成果概要

大項目	中項目	研究成果(概要)	今後の課題	関連図
1. プラント概念構築(続き)	⑬建屋・配置(含、格納容器)	<ul style="list-style-type: none"> 今年度の設備側の合理化設計結果を反映して、原子炉建屋、補助建屋、制御建屋の各階の配置を検討し、モジュール炉としての全体配置概念を明らかにした。 建屋容積としては、1ユニット(150万kWe)分14万m³(前年度:15.8万m³)となり、前年度設計より約11%の削減となつた。 原子炉建屋クレーンの共用化を図っているが、そのクレーンマネージメントについて考察し、問題ないことを確認した。 	<ul style="list-style-type: none"> 各機器の補修の具体化を図った上で、アクセスルート等問題ないことの確認。 コンクリート格納容器が外気に直接晒される部分の対応策の検討。 燃料取扱設備室廻りの配置の具体化。 補助建屋への大型ブロック工法の適用を考慮した設備配置の検討(水プール等)。 	図3.1-9 図3.1-10
2. 安全性評価	①評価事象、評価条件の検討	MLD手法を用いて安全評価事象を網羅的に抽出・整理。	現状の1次C/L配管設計では炉容器内配管破損を排除できないので、設計見直しの必要あり。	
	②代表的な事象の安全評価	<ul style="list-style-type: none"> TOP「制御棒誤引き抜き」 主系スクラム:NIS(4ch)により低速～高速引き抜き(0.1～10cm/s)に対する出力領域中性子束高信号による炉停止が可能な見通し。バックアップ信号としては、C/R位置偏差大信号が全引き抜き速度領域で有効。 後備系スクラム:広域中性子束高信号(4ch)では低速引き抜き領域をカバーできないが、設定値の1%引き下げ、又はch数の増加(6ch)でクリアできる見通しあり。 LOF「1次ポンプ軸固定」 安全保護系応答時間短縮、健全ポンプトリップ遅れ時間拡大、流量半減時間拡大及び制御棒挿入時間短縮という方策を組合せることにより、主系スクラム、後備系スクラムとも判断基準をクリアできる見通し。 	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒誤引き抜き時に事象の発生頻度に応じて必要な信号数が確保されていることの確認(部分出力時、シーケンシャル引き抜き等も含めた総合的な検討による)。 NIS強化により炉心出口温度計装簡略化を指向する設計の可能性見極め。 現状の炉心設計では、反応度係数の不確かさを保守側に組合せると、出力係数が正となることがある。解析モデル・解析条件を確認し、今年度中に解決する。 	図3.2-1 図3.2-2
	③崩壊熱除去特性解析	<ul style="list-style-type: none"> 事象II～IVの起因事象に外電喪失・単一故障の重ね合わせを考慮して代表事象を設定。SG小リードタイムにもIRACSが使用できることを前提に設定。 崩壊熱除去特性解析の結果、十分な除熱能力を有することを確認。 PRACSとIRACSとの干渉と見られる不安定な自然循環流動が発生している。 	<ul style="list-style-type: none"> SG小リードタイムにもIRACSの運用が可能となるよう、SG伝熱管破損伝播の局限に向けた検討を行う必要がある。 不安定な自然循環流動の解消。 	クリティカル課題(図4.2-1)
	④Na漏えい燃焼解析	<ul style="list-style-type: none"> ガードパイプ内Na漏えい(DBE) 低酸素濃度の空気雰囲気中の漏えい。温度・温度の上昇は僅か。 PRACSのA/C伝熱部1本ギロチン破損(BDBE) 空気雰囲気中の漏えい。漏えいNaが入口ダンバ部貯留パン内に貯留されることを想定。約3m³の漏えい。貯留パンの最高温度は650°C、腐食量は2mm以内で、貯留機能は維持される。 	A/C伝熱部でのNa漏えいをBDBEに位置付けるための要件と、必要なR&D項目の検討。	
	⑤SG破損伝播解析	<ul style="list-style-type: none"> 直管型SGは、ヘリカルコイル管型SGに比べて伝熱管肉厚が薄く、破損伝播の影響が大きくなる可能性があるため、高温ラブチャを考慮した破損伝播解析による評価を行つた。 その結果、R/D破裂信号のみにクレジットを取った保守的な評価でも、最大水リード率を約54kg/s(2次系機器の健全性を確保できる範囲と考えられる)に抑えることができる見通しであることが分かった。 さらに、固体電解質水素計及び音響計にクレジットが取れ、水プローチ時間を短縮できる場合には、高温ラブチャが排除でき、最大水リード率も1+0本相当に抑制できる見通しであることが分かった。 	最大水リード率抑制方策の実現性の検討。	クリティカル課題(図4.1-3)
	⑥再臨界回避シナリオの検討	<ul style="list-style-type: none"> 大型炉の検討をベースに、ABLEを採用した中型炉炉心の再臨界回避シナリオを検討。基本的には、大型炉ABLE炉心での課題が中型炉ABLE炉心にも当てはまる。 ABLEに関しては、炉心下部に流出・固化した燃料が緩やかに(約1000秒かけて)下部ブレナムに流出するまでの過程で ー未臨界を維持 ーラッパ管形状を維持(プール連結防止) することが特に重要。未臨界維持については、大型炉より幾分厳しい条件となる。ラッパ管形状維持については、IWFによる冷却に期待するが、DRACSがないことから冷却能力の不足が予想される。 	大型炉での検討と同じく、静定までを含めたサクセシシナリオをさらに検討するとともに、それを検証するためのR&D計画を具体化する必要あり。	

表 3-1 (4/6) 研究成果概要

大項目	中項目	研究成果(概要)	今後の課題	関連図																
3. 構造健全性評価	①熱応力に対する構造健全性評価	<ul style="list-style-type: none"> ・プラント熱過渡解析：構造解析用のプラント熱過渡条件は、前年度の大型炉を対象とした熱過渡解析結果を基に暫定。別途実施した中型炉を対象としたプラント熱過渡解析結果との比較により暫定熱過渡条件の妥当性を検討したが、1次ポンプ軸固定等、幾つかの事象で暫定熱過渡条件より厳しい解析結果となっている。 ・構造解析：炉容器壁、1次主配管、IHX 及び2次主配管の評価を行い、厳しい箇所があるものの、健全性の見通しを得た。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>部位</th><th>評価値</th><th>制限値</th><th>評価</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>炉容器壁(液面近傍外面)</td><td>疲労損傷値 0.119</td><td>0.996</td><td>○</td></tr> <tr> <td>1次主配管(H/L エルボ部)</td><td>発生応力 184MPa</td><td>400MPa</td><td>○</td></tr> <tr> <td>IHX 管板 取付け根部</td><td>疲労損傷値 0.48</td><td>0.999</td><td>○</td></tr> </tbody> </table>	部位	評価値	制限値	評価	炉容器壁(液面近傍外面)	疲労損傷値 0.119	0.996	○	1次主配管(H/L エルボ部)	発生応力 184MPa	400MPa	○	IHX 管板 取付け根部	疲労損傷値 0.48	0.999	○	<ul style="list-style-type: none"> ・プラント熱過渡解析でも、崩壊熱除去特性解析で見られた PRACS と IRACS との干渉と見られる不安定な自然循環流動が発生。解消が必要。 ・大型炉で厳しい評価となった部位(炉容器下部鏡等)について、健全性の確認を行う。 ・暫定熱過渡条件より厳しいプラント熱過渡解析結果となった要因を分析し、必要に応じて解析条件の見直し・再評価を行う。 ・12Cr 系鋼の開発及び材料基準の整備一部材料データが存在しない物性値については 9Cr 系鋼の物性値を使用。 	図 3.3-1
部位	評価値	制限値	評価																	
炉容器壁(液面近傍外面)	疲労損傷値 0.119	0.996	○																	
1次主配管(H/L エルボ部)	発生応力 184MPa	400MPa	○																	
IHX 管板 取付け根部	疲労損傷値 0.48	0.999	○																	
②耐震性評価	<ul style="list-style-type: none"> ・炉容器、炉心、燃料交換機、1次主配管について、耐震解析(水平免震、上下耐震)及び評価を行い、必要な性能と健全性の見通しを得た。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>部位</th><th>評価事項</th><th>評価結果</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>炉心</td><td>反応度投入等</td><td>許容値に対する裕度約 2 倍</td></tr> <tr> <td>炉容器</td><td>座屈</td><td>許容値に対する裕度約 1.25 倍</td></tr> <tr> <td>1次主配管 H/L</td><td>固有值</td><td>水平 6.95Hz > 3Hz, 上下 38Hz > 15Hz (基準値満足)</td></tr> </tbody> </table>	部位	評価事項	評価結果	炉心	反応度投入等	許容値に対する裕度約 2 倍	炉容器	座屈	許容値に対する裕度約 1.25 倍	1次主配管 H/L	固有值	水平 6.95Hz > 3Hz, 上下 38Hz > 15Hz (基準値満足)	<ul style="list-style-type: none"> ・国で実施中の「耐震指針」見直しに注目して行く(入力地震力の増加等。本年度は実証炉波で評価し入力の増加に対する影響度も検討した)。 ・評価をしていない 2 次系等の評価が必要。 						
部位	評価事項	評価結果																		
炉心	反応度投入等	許容値に対する裕度約 2 倍																		
炉容器	座屈	許容値に対する裕度約 1.25 倍																		
1次主配管 H/L	固有值	水平 6.95Hz > 3Hz, 上下 38Hz > 15Hz (基準値満足)																		
③合体機器の成立性評価	<ul style="list-style-type: none"> ・機械式ポンプの回転振動等による IHX 伝熱管とバッフル板との接触摩耗量を評価した。合体機器の振動解析により伝熱管に作用するワーカーレート(磨耗作用量)を計算し、プラント寿命(60 年)中の伝熱管の磨耗深さを計算した。 ・その結果、伝熱管の許容摩耗量深さが 0.255mm であるのに対し、摩耗深さ(計算値)は 0.146mm であり、伝熱管の健全性を確保できる見通しが得られた。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ポンプ振動の伝熱管への伝達メカニズムについて、振動試験により把握し、解析モデルによる評価の妥当性を確認する。 ・また、伝熱管材料の磨耗定数を把握する。 																		
④直管型 SG：伝熱管間、管-胴間熱膨張差の吸収	<ul style="list-style-type: none"> ・SG 伝熱管について、最高温度と平均温度との差を熱流動解析で評価し、座屈許容温度(13.0°C)以下の 1.0°C であることが確認された。管群と胴の熱膨張差を吸収するペローズ構造(内径約 2.2m、全長 0.8m)を具体化し、健全性の見通しを得た。 	<ul style="list-style-type: none"> ・プラグ管については平均温度差が大きくなり、プラグ時に変位吸収のため切断か、流動の見直し検討が必要。 	クリティカル課題 (図 4.1-1)																	
⑤LBB の成立性評価	<ul style="list-style-type: none"> ・1次主配管、2次主配管について LBB 評価を行い、成立性の見通しを得た。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>部位</th><th>算出値</th><th>判定値</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1次主配管 (H/L Y ピース部)</td><td>48.0mm</td><td>447.4mm</td></tr> <tr> <td>1次主配管 (H/L SG 側端部)</td><td>82.7mm</td><td>465.2mm</td></tr> </tbody> </table>	部位	算出値	判定値	1次主配管 (H/L Y ピース部)	48.0mm	447.4mm	1次主配管 (H/L SG 側端部)	82.7mm	465.2mm	<ul style="list-style-type: none"> ・12Cr 系鋼の開発及び材料データの整備一部材料データが存在しない物性値については、9Cr 系鋼の物性値を使用。 									
部位	算出値	判定値																		
1次主配管 (H/L Y ピース部)	48.0mm	447.4mm																		
1次主配管 (H/L SG 側端部)	82.7mm	465.2mm																		
⑥パイプホイップ評価	<ul style="list-style-type: none"> ・コールドレグ配管のパイプホイップの挙動を解釈し、最も影響を受ける外管ペローズの健全性評価を行い、健全性の見通しを得た。 	<ul style="list-style-type: none"> ・特になし。 																		
4. 热流動評価	①炉上部ブレナム内流動	<ul style="list-style-type: none"> ・大型炉と同様に流動解析モデルの詳細化を図り、定格運転時の流況を評価した結果、D/P ギャップから液面部への流入量が大型炉と比較して相対的に増加するが、液面部最大流速はガス巻き発生限界流速(10cm/s)まで低減し、ガス巻き発生を防止できる見通し。 ・原子炉トリップ時の温度成層化に関しては、上部ブレナム内では H/L 吸い込みレベルで急峻な温度勾配(最大 1000°C/m)が形成されるが、炉容器は構造的に成立。また、H/L 配管水平部についても、配管 Ri 数が 5 以下となり、温度成層化が生じない見通し。 	<ul style="list-style-type: none"> ・D/P 構造(ギャップ幅、上下間隔等)の詳細検討と流動解析による影響評価。 ・1/10縮尺水流動試験によるブレナム全体流況の把握、各種流動適正化方策の比較検討。 ・液面ブレナム部分モデル試験装置の設計。 ・ガス巻き込み評価基準の検討。 																	
	②IHX 上部ブレナム内流動	<ul style="list-style-type: none"> ・1次 Na 側の流量配分(径方向/周方向)の不均一度をパラメータとして、定格運転時における管束部の温度分布や交換熱量を評価。管束部の温度分布から得られた伝熱管の最大温度差(22K : 周方向流配±20% 分布)は、座屈応力に相当する許容温度差(38K)以下であることを確認。 	<ul style="list-style-type: none"> ・上部ブレナム内の整流板や PRACS との整合性も含めて、IHX 伝熱流動特性に関する R&D 課題の整理。 ・ポンプ軸長短縮化に伴い 1 次系配管構造が変更された場合の IHX 側での課題抽出。 																	

表 3-1 (5/6) 研究成果概要

大項目	中項目	研究成果（概要）	今後の課題	関連図											
4. 热流動評価 (続き)	③直管型 SG：管束部流動	<ul style="list-style-type: none"> SG 管束部での熱流動解析により、定格運転時における 2 次 Na 側の流況、伝熱管の温度分布を評価。伝熱管をプラグした場合には、プラグ管と 2 次 Na の温度差（約 24K）が座屈応力に相当する許容温度差（13K）を上回るため、プラグ管を切断する必要あり。 また、伝熱管との熱膨張差吸収と Na-水反応時の内圧等に対する成立性の観点から、SG の胴ペローズ構造を選定。 	<ul style="list-style-type: none"> プラグ管座屈に対する課題と対応策の検討。 <ul style="list-style-type: none"> - プラグ管の切断・補修方法の具体化 - 許容温度差を高くする方策の検討（バッフル板構造・間隔の変更等） 	クリティカル課題 (図 4.1-1)											
	④直管型 SG：水・蒸気側流動 安定性評価	<ul style="list-style-type: none"> 伝熱管部での温度・熱流束分布に基づいて、定格運転時及び 30%負荷運転時における水側流動安定性を評価した結果、給水側の質量速度が大きいこと、また入口圧力の高圧化により、伝熱管に入口オリフィスを設置せずに流動安定性を確保できる見通し。 	<ul style="list-style-type: none"> 給水側流量配分のばらつき等の検討（伝熱管相互での不安定モード発生がないか）。 流動安定性解析コードの検証も含む直管 SG の伝熱流動 R&D 課題の整理。 	クリティカル課題 (図 4.1-2)											
5. 運転・保守補修 性等の検討	①プラント運用、運転制御に 関する検討	<ul style="list-style-type: none"> タービン：主、原子炉：従の協調制御方式、所内単独運転を可能とする設計、單一モジュール故障時に健全モジュールの運転を継続する設計を採用。 通常起動・停止、代表的な異常事象について、プラント運用を設定。 	<ul style="list-style-type: none"> プラント制御特性解析による制御性の確認。 <ul style="list-style-type: none"> - 負荷喪失→所内単独運転 - 単一モジュール故障→健全モジュールによる部分出力運転 												
	②ISI、保守補修計画の検討	<ul style="list-style-type: none"> 炉内構造物の複雑化及び Na バウンダリ局限化等の実用炉の特徴を考慮しつつ、各機器の ISI 計画及び補修・保守項目を設定した。 また、 IHX 伝熱管の補修計画について具体化し、その構想を明らかにした。 さらに、Na ドレンなしでの検査・補修技術の可能性を追求し、上記で設定した検査・補修計画に対する現状の技術的評価を行い、課題の抽出をした。 	<ul style="list-style-type: none"> 60 年寿命に対する適切な検査周期を設定する。 各機器の検査・補修の具体化、検査・補修機器へのアクセスルートの設定、建屋設計への反映。 												
	③定検期間、建設期間の検討	<ul style="list-style-type: none"> 今年度のプラント概念の検討結果を反映した定検期間（モジュール単体）は以下のとおり。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>年度</th> <th>標準</th> <th>標準外</th> <th>稼働率</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>前年度</td> <td>34 日</td> <td>44 日</td> <td>92%</td> </tr> <tr> <td>今年度</td> <td>31 日</td> <td>42.5 日</td> <td>93% (*)</td> </tr> </tbody> </table> <p>(*) 稼働率は、ISI 装置 2 セット設置を前提とし、原子炉の定検を並列で行った場合。</p> <ul style="list-style-type: none"> 建設期間は、前年度から建屋容積 10%削減されたが、期間短縮への影響はほとんどなく、前年度と同じ 33 ヶ月となった。 	年度	標準	標準外	稼働率	前年度	34 日	44 日	92%	今年度	31 日	42.5 日	93% (*)	<ul style="list-style-type: none"> 特になし。
年度	標準	標準外	稼働率												
前年度	34 日	44 日	92%												
今年度	31 日	42.5 日	93% (*)												
④建設工法の評価	<ul style="list-style-type: none"> 中型炉については、すでに大型ユニット工法を適用しているが、その成立性の検討も行い、現状では成立性に問題ないと判断された。 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋の共用部分にも大型ユニット工法を適用することを考慮し、適切な区割りが行えるよう、燃料プール等の建屋配置を検討する。 													

表 3-1 (6/6) 研究成果概要

大項目	中項目	研究成果(概要)	今後の課題	関連図																																																																			
6. 経済性評価	①建設コスト及び発電コストの評価	<p>・経済性評価用物量データ :</p> <p>炉容器径増加(炉心径増加)、IHX 径増加(PRACS スペース確保)、SG 物量増加(60 年寿命化対応)のため NSSS 物量が約 23%増加。一方、今年度上期の BOP の大幅削減により原子炉建屋容積は約 10%減少。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">項目</th> <th rowspan="2">前年度</th> <th colspan="2">今年度</th> </tr> <tr> <th>モジュール</th> <th>シングル</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NSSS 物量合計</td> <td>1198t</td> <td>1477t</td> <td>1477t</td> </tr> <tr> <td>原子炉建屋容積</td> <td>5.22 万 m³</td> <td>4.7 万 m³</td> <td>8.5 万 m³</td> </tr> <tr> <td>建設期間</td> <td>37.5 ヶ月</td> <td>36 ヶ月</td> <td>36 ヶ月</td> </tr> <tr> <td>定検期間</td> <td>34 日/44 日</td> <td>31 日/42.5 日</td> <td>31 日/42.5 日</td> </tr> <tr> <td>稼働率</td> <td>91.6%</td> <td>93%</td> <td>94%</td> </tr> <tr> <td>所内負荷率</td> <td>4.5%</td> <td>4.7%</td> <td>5.1%</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注1) 主要物量(NSSS 物量及び原子炉建屋容積)は 1 モジュール分の値 (注2) 建設期間は工場製作期間(3 ヶ月)を含む (注3) 定検期間は標準/標準外の日数を示す (注4) 稼働率は SG の ISI 検査機器を 2 基設けることを前提に算出</p> <p>・建設単価及び発電単価 :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">項目</th> <th colspan="2">メーカー評価値</th> <th colspan="2">JNC 評価値</th> </tr> <tr> <th>前年度</th> <th>今年度</th> <th>前年度</th> <th>今年度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>建設単価</td> <td>M</td> <td>23.9 万円/kWe</td> <td>22.8 万円/kWe</td> <td>19.4 万円/kWe</td> </tr> <tr> <td></td> <td>S</td> <td>—</td> <td>31.1 万円/kWe</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>発電単価</td> <td>M</td> <td>—</td> <td>5.2 円/kWh</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td></td> <td>S</td> <td>—</td> <td>6.6 円/kWh</td> <td>—</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注1) 上段: モジュールプラント/下段: シングルプラントの値 (注2) 6 モジュール連続製作によるモジュール効果は 12.6%と仮定 (注3) シングルプラントは单基建設を想定 (注4) 発電単価は送電端の値、燃料費 1.1 円/kWh、運転費 0.9 円/kWh と仮定</p>	項目	前年度	今年度		モジュール	シングル	NSSS 物量合計	1198t	1477t	1477t	原子炉建屋容積	5.22 万 m ³	4.7 万 m ³	8.5 万 m ³	建設期間	37.5 ヶ月	36 ヶ月	36 ヶ月	定検期間	34 日/44 日	31 日/42.5 日	31 日/42.5 日	稼働率	91.6%	93%	94%	所内負荷率	4.5%	4.7%	5.1%	項目	メーカー評価値		JNC 評価値		前年度	今年度	前年度	今年度	建設単価	M	23.9 万円/kWe	22.8 万円/kWe	19.4 万円/kWe		S	—	31.1 万円/kWe	—	発電単価	M	—	5.2 円/kWh	—		S	—	6.6 円/kWh	—	<p>・下記により NSSS 物量が 279t 増加した。</p> <table border="1"> <tr> <td>①炉容器径増加</td> <td>+65t</td> </tr> <tr> <td>②IHX 径増加</td> <td>+97t</td> </tr> <tr> <td>③SG 伝熱管肉厚増加(60 年寿命化)</td> <td>+26t</td> </tr> <tr> <td>④2 次ポンプケーシング</td> <td>+87t</td> </tr> </table>	①炉容器径増加	+65t	②IHX 径増加	+97t	③SG 伝熱管肉厚増加(60 年寿命化)	+26t	④2 次ポンプケーシング	+87t	
項目	前年度	今年度																																																																					
		モジュール	シングル																																																																				
NSSS 物量合計	1198t	1477t	1477t																																																																				
原子炉建屋容積	5.22 万 m ³	4.7 万 m ³	8.5 万 m ³																																																																				
建設期間	37.5 ヶ月	36 ヶ月	36 ヶ月																																																																				
定検期間	34 日/44 日	31 日/42.5 日	31 日/42.5 日																																																																				
稼働率	91.6%	93%	94%																																																																				
所内負荷率	4.5%	4.7%	5.1%																																																																				
項目	メーカー評価値		JNC 評価値																																																																				
	前年度	今年度	前年度	今年度																																																																			
建設単価	M	23.9 万円/kWe	22.8 万円/kWe	19.4 万円/kWe																																																																			
	S	—	31.1 万円/kWe	—																																																																			
発電単価	M	—	5.2 円/kWh	—																																																																			
	S	—	6.6 円/kWh	—																																																																			
①炉容器径増加	+65t																																																																						
②IHX 径増加	+97t																																																																						
③SG 伝熱管肉厚増加(60 年寿命化)	+26t																																																																						
④2 次ポンプケーシング	+87t																																																																						

表 3-2 (1/2) フェーズIIにおける設計要求

基幹電源の設計要求

安全性	①安全要求 (1) 決定論的安全要求 開発目標で掲げる高い安全性を実現するために、十分な多重・多様性を有した能動的安全設備に加え、必要に応じて受動的安全機能を導入するとともに、仮想的な炉心損傷時の影響を原子炉容器内あるいは格納施設内で終息させる設計とする。(炉型毎の要求については「⑥個別要求」を参照)
	②確率論的安全要求 決定論的安全要求を補完する目的で、炉心損傷発生頻度の要求値として 10^{-6} /炉年未満を達成できる見通しを示すこと。さらに、炉心損傷あたりの格納機能の非信頼度を十分低く維持できる見通しを示すこと。 ③安全設計の基本的原則の尊守 原則として、現行軽水炉に適用される基準、指針類及び「もんじゅ」の安全審査で適用された基準、指針類、高速増殖実証炉の設計研究における考え方を参考にし、選定した冷却材、燃料及びプラント概念の特徴を考慮した設計とする。 ④原子炉停止機能への要求 原子炉停止系には受動的な炉停止能力(例えば、SASS)を付加するか、あるいは、事象進展緩和を可能とする受動的機構(例えば、GEM)を付加するとともに運転員の介在による事象終息が可能な設計とする。なお、軽水炉のように1時間程度の短時間(基準値)で炉心損傷に至らないシステムの場合には、運転員の介在により炉心損傷が防止できることを示すことにより、受動的な炉停止機能を不要とすることができる。 ⑤前段熱除去機能への要求 炉停止後の崩壊熱除去機能について、多重性あるいは多様性をもたせるとともに、全交流動力電源の喪失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。 ⑥炉心損傷に対する格納機能の確保 代表的な炉心損傷事象に対し、選定したプラント概念及び着目する事象の特徴を考慮して、以下の事項を含め、リスク低減の観点から期待できる合理的な対策を講じることによって事故影響の局限化を図る。 <ul style="list-style-type: none">・高速炉の炉心燃料の特徴を踏まえて、炉心損傷の事象推移過程において再臨界に伴う有意な機械的エネルギー発生が防止できる対策を講ずる(再臨界回避)。・さらに事故後の融体静定、熱除去、放射性物質の閉じ込めを可能な限り炉容器内で達成し、格納施設への熱・機械的負荷を大幅に緩和して放射性物質の閉じこめ能力を確保することで、炉心損傷の影響を周辺環境に有意に及ぼさない設計とする。 ⑦個別要求 上記の要求に加えて、検討対象とする各概念の特徴に応じて以下の事項に留意した設計とする。(ナトリウム炉以外の炉への個別要求は省略) (1) ナトリウム炉 <ul style="list-style-type: none">・低圧系とすることが可能な特長を活かし、漏洩の原因となる異常を極力排除する。漏洩を仮定しても静的機器により冷却材を確保して炉心冷却が可能な設計とするとともに、漏洩の影響を局限化できる設計とすること。・ナトリウムと水の熱交換を行う蒸気発生器については、その漏洩が炉心の安全性を損なわないよう発生防止、発生時の拡大防止の両面から十分な対策を施すこと。異常拡大防止については、異常の早期検出と水系の減圧操作により影響の局限化を追求すること。・炉心損傷の影響については、ナトリウムの高い伝熱特性を活かして原子炉容器内の終息を図ること。
経済性	FBR 本格実用化段階における経済性については、第一段階として発電単価の要求値である4円/kWhを達成できる見込みを有すること。また、第二段階として、海外における発電単価の動向を視野に入れ、経済性に関する国際的水準を達成する見通しを得ること。ただし、発電単価は、建設費、運転維持費、燃料費、廃止措置費の区分で検討すること。なお、燃料費については、適合する再処理及び燃料製造システムの検討結果との整合性を図ること。 以下に、経済性に関する要求値、目標値及び基準値を示す。 (1) 要求値 <ul style="list-style-type: none">【発電単価】 将来の軽水炉サイクルによる発電単価の試算値(4.3円/kWh)を視野に入れ、発電単価の要求値を4円/kWhとする。【連続運転期間】 現行軽水炉の運転期間(12±1)ヶ月を考慮し、連続運転期間の要求値を13ヶ月以上とする。【プラント寿命】 プラント寿命に関する国際的動向を勘案し、プラント寿命の要求値を60年とする。 (2) 目標値 <ul style="list-style-type: none">【建設工期】 軽水炉における建設工期短縮の動向を勘案し、大型炉の建設工期の目標値を42ヶ月とする。また、建設工期の短縮が実現できる中型モジュール炉の建設工期の目標値を36ヶ月とする。 (3) 基準値 <ul style="list-style-type: none">【建設単価】 軽水炉における建設コスト低減を勘案し、建設単価の基準値を20万円/kWeとする。【燃焼度】 サイクルコスト及びバックエンド負荷軽減を図るために、ブランケット燃料を含む全炉心平均燃焼度の基準値を6万MWd/tとする。また、炉心性能における燃焼度の目安として、炉心燃料平均燃焼度の基準値を15万MWd/tとする。【連続運転期間】 軽水炉における運転サイクル長期化の動向を勘案し、連続運転期間の基準値を18ヶ月とする。【稼働率】 将来型軽水炉における検討状況を勘案し、稼働率の基準値を93%とする。

表 3-2 (2/2) フェーズ II における設計要求

基幹電源の設計要求

環境負荷 低減	<p>①TRU 燃焼</p> <p>半減期が長い超ウラン元素を混入した低除染・TRU 燃料を燃焼させ、高レベル放射性廃棄物中の放射能毒性の低減を図ることを目的として、下記の 2 ケースについて TRU 燃焼特性を評価すること。</p> <p>(1) FBR マルチリサイクル</p> <p>(2) 長期貯蔵 LWR-SF を視野に入れたサイクル②FP の核変換による放射能低減</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電用原子炉として求められる安全要求及び性能要求を満たしつつ、対象となる FP 核種選定、装荷時の化学形態及び装荷位置を検討して、期待される核変換能力を把握し、高速炉炉心での核変換による環境負荷低減能力を評価すること。 ・各核種の化学形態については、再処理・分離工程、各冷却材との適用性、装荷位置と核変換効率等を考慮して、有望な化学形態を選定すること。 ・設計要求として、当面、検討対象とする FP 核種は、Se-129、Zr-93、Tc-99、Pd-107、Sn-126、I-129 及び Cs-135 と暫定するが、今後の検討により上記核種以外についても検討対象とする場合には、追加された核種に対しても検討を実施すること。 ・炉内発生量、放射能、半減期、発熱量、地中における移動性等の観点から環境負荷ポテンシャルが高い I-129 及び Tc-99 については、代表的な炉心での核変換率、炉心特性への影響、放射性廃棄物への移行率などを評価し、当該核種の核変換に最適な炉心概念について検討すること。 ・I-129 及び Tc-99 以外の長寿命核種については、同位体分離を含めた核変換の効果的方策について検討を進め、核変換技術の構築を進めること。 ・なお、FP 核変換を行う場合、サイクル・ロスを除いた増殖比の要求値を 1.0 以上とする。 <p>③運転廃棄物/廃炉廃棄物</p> <p>環境負荷低減の観点から、通常のプラント運転で発生する廃棄物及び廃炉時に発生する廃炉廃棄物については、冷却材を含め可能な限り再利用が図れる設計とすること。</p> <p>運転・保守における放射性固体廃棄物の発生量の目標値を現行軽水炉の 1/10 以下とする。</p> <p>また、運転に伴う放射性気体及び液体廃棄物の環境への放出放射能に関する要求値を、単位発電量当たりの放出量を現行軽水炉の設置許可申請書記載値に対して同等以下とするとともに、これを更に低減する設計目指すこと。</p> <p>廃止措置に伴い発生する放射性固体廃棄物発生量(体積)を極力低減する設計を目指すこと。</p> <p>なお、廃棄物発生量の評価については、国の検討動向を勘案した区分毎に評価すること。</p>
資源 有効利用	<p>①増殖性能</p> <p>増殖炉心として、可能な限り低増殖から高増殖まで柔軟に対応できること。</p> <p>増殖性能については、各冷却材の有する特長の活用を図り、プラント概念に応じた最適な値を目指した設計とすること。</p> <p>増殖性能の評価については、低除染・TRU 燃料の使用を前提とするとともに、FP 核変換を行う場合のサイクル・ロスを除いた増殖比の要求値を 1.0 以上とする。</p> <p>(1) 要求値</p> <p>具体的な増殖性能の評価については、別途、導入シナリオへの適用性に基づき検討を実施する。(増殖性能に関する要求値は設定しない)</p> <p>(2) 目標値</p> <p>[増殖比] 導入シナリオへの適合性向上の観点から、高い適合性を有する炉心が望ましいことから、増殖比の目標値を 1.2 以上とする。</p> <p>[複利システム倍増時間] 増殖比と同様に、導入シナリオへの高い適合性を目指し、複利システム倍増時間の目標値を 30 年以下とする。</p> <p>②TRU 燃焼</p> <p>資源の有効利用の観点から、下記の 2 ケースについて MA 核種を混入した低除染・TRU 燃料を経済的に燃焼できること。</p> <p>(1) FBR マルチリサイクルでの組成及び含有率</p> <p>(2) 長期貯蔵 LWR-SF を視野に入れたサイクルでの組成及び含有率</p>
核不拡散	<p>核不拡散抵抗性向上の観点から、以下の項目について設計上配慮すること。</p> <p>①燃料取扱設備は、核物質防護及び保障措置の対応を考慮した設計とすること。</p> <p>②新燃料及び使用済燃料については、意図しない接近を制限できること。</p>
運転・ 保守補修性 (信頼性)	<p>①日負荷直従運転が可能であること。</p> <p>②運転の簡素化、自動化、運転制御系の高度化、検査及びメンテナンスし易い設計等により、運転・保守作業におけるヒューマンエラーの防止、保守作業量の低減、運転員・保守員の省力化、保守作業員の被ばく低減を図ること。</p> <p>③化学的活性や毒性、放射化等、冷却材の有する特性を考慮し、運転性、保守補修性の向上を図ったプラント設計とすること。</p>

図3.1-1 レファレンス炉心(ABLE型均質炉心)の炉心構成及び主要仕様

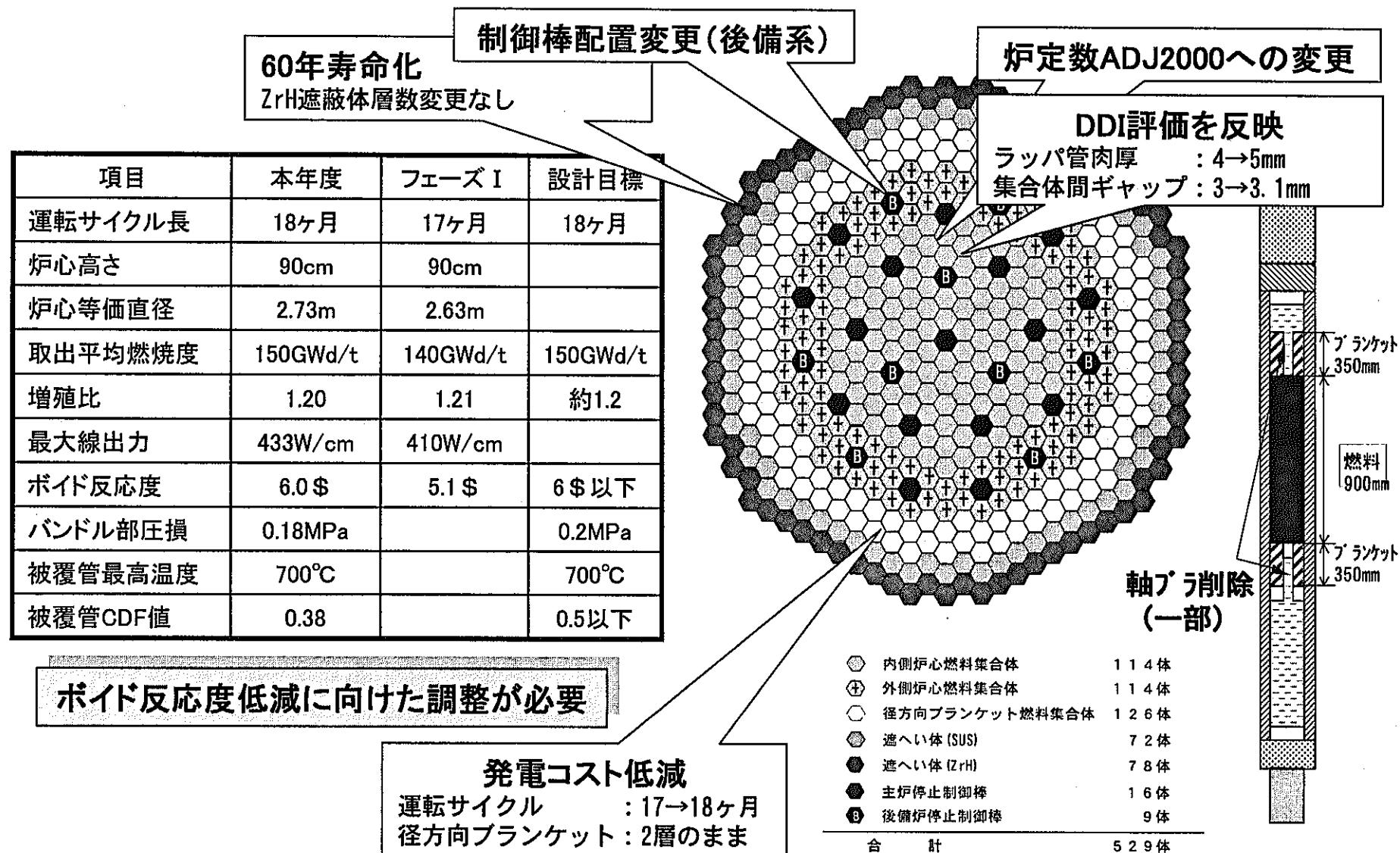


図3.1-2 原子炉構造概念

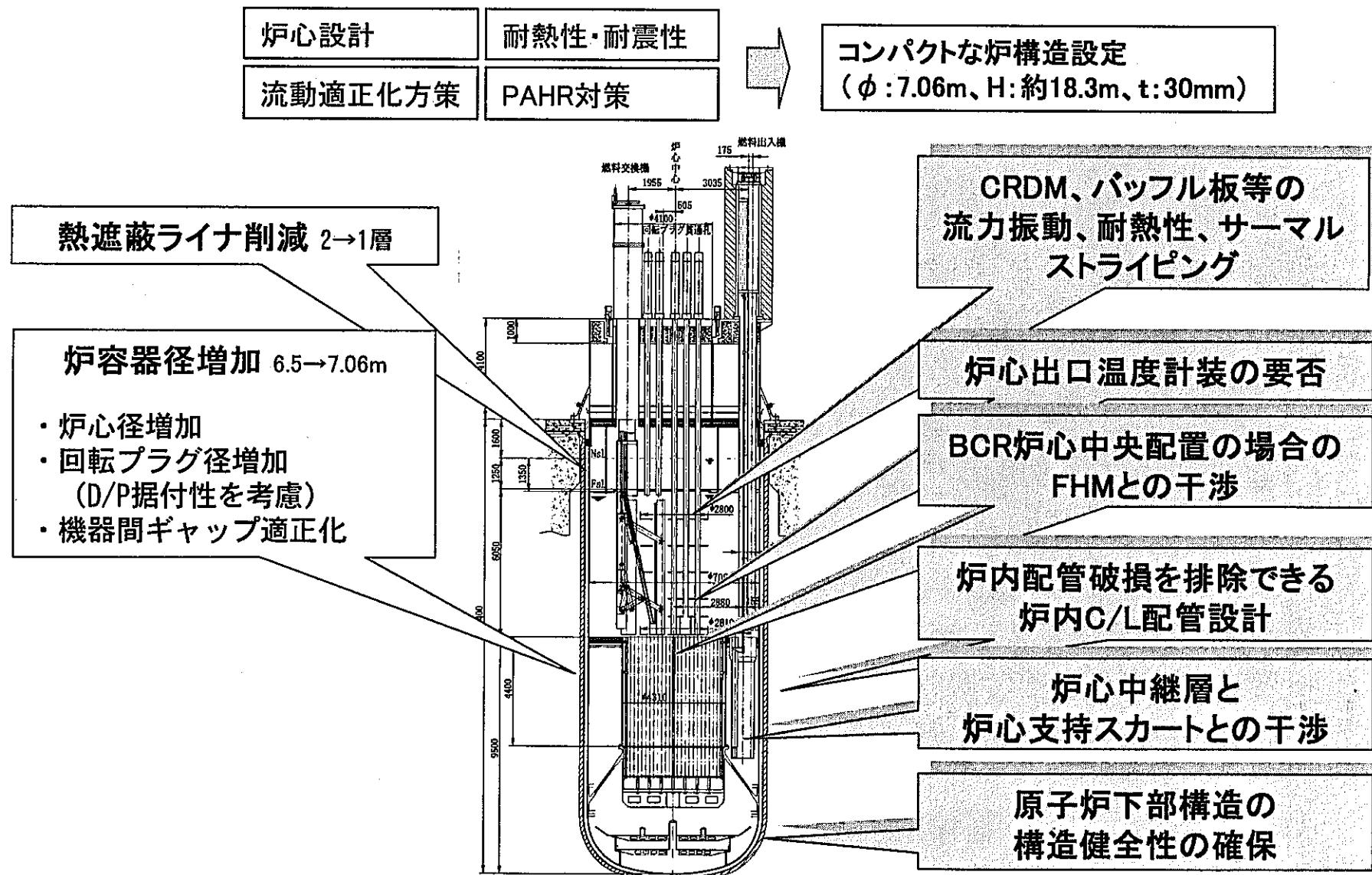
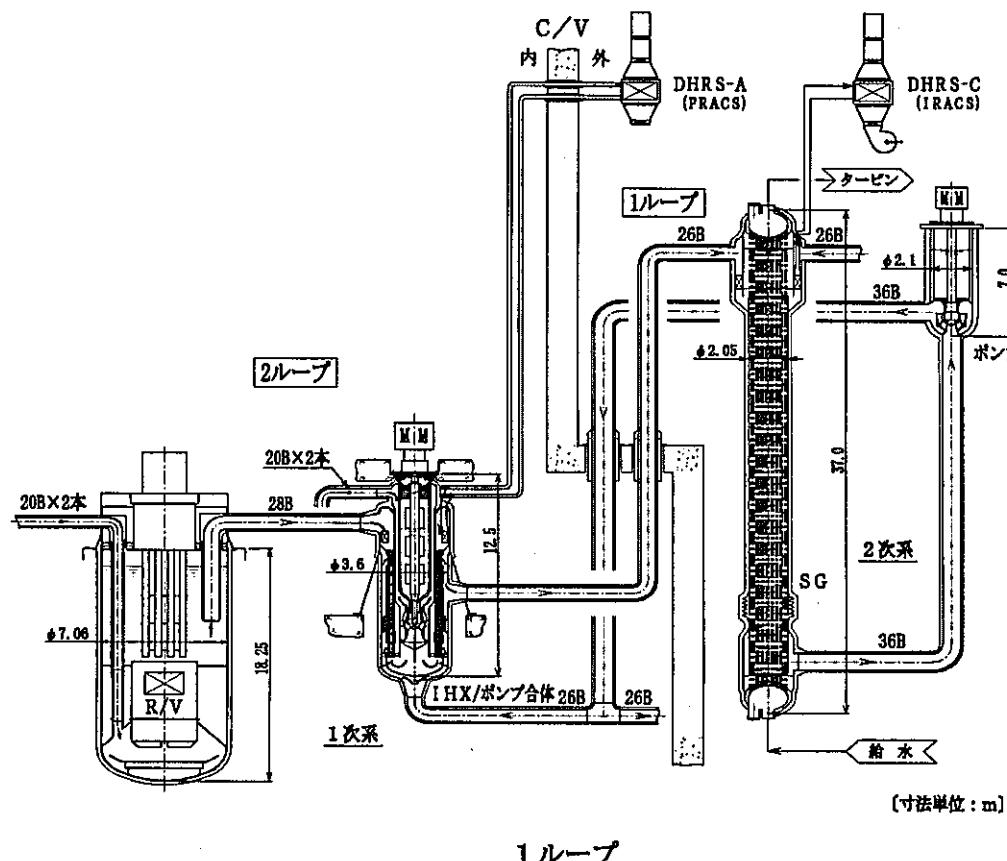


図3.1-3 1次・2次冷却系系統概念



フェーズ1からの大きな変更なし

1次・2次系系統基本仕様

原子炉出力: 1190MWt

1次系

ループ数 : 2ループ
冷却材温度 : 550°C/395°C
配管口径 : 28B、20B×2
カバーガス圧力 : 0.15MPa
液位 : $F_{sL} = N_{sL} - 1.25\text{m}$
 $E_{sL} = N_{sL} - 2.5\text{m}$

2次系

ループ数 : 1ループ
冷却材温度 : 520°C/335°C
配管口径 : 44B
カバーガス圧力 : 0.35MPa
最低液位 : 定格時液位-1.5m

図3.1-4 IHX・1次ポンプ合体機器構造概念

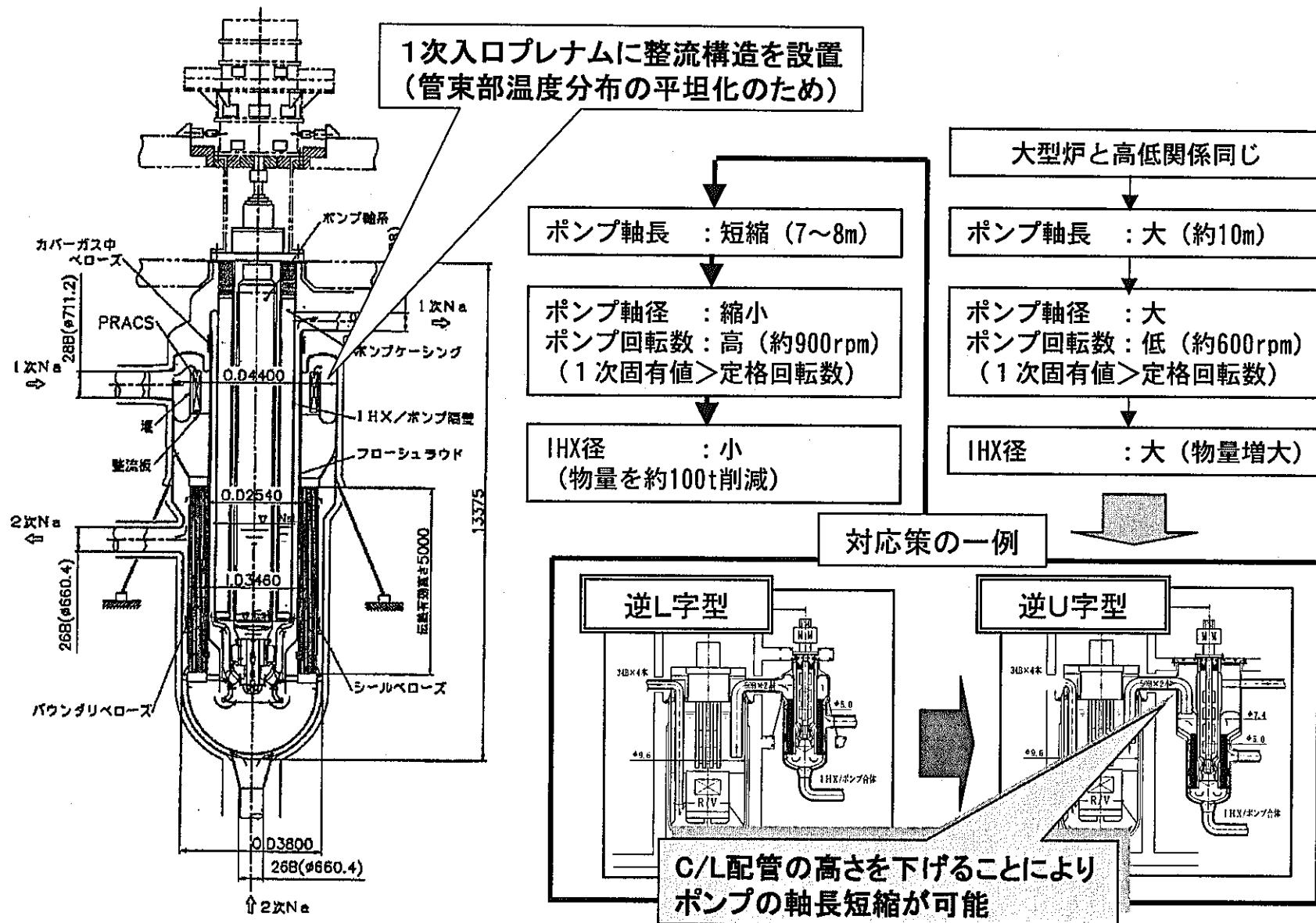
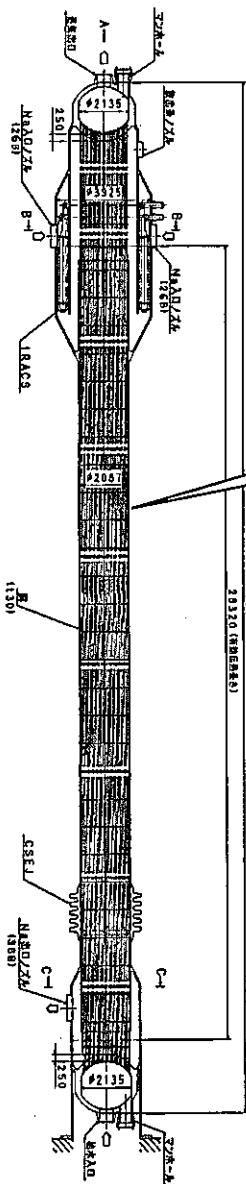


図3.1-5 SG構造概念



60年寿命化

- ・伝熱管肉厚: 1.7→1.9mm
 - Na側/水側の腐食しろ、摩耗しろを増加
 - 運転中の酸素濃度を10→5ppmとしてNa側腐食代の増加を抑制
- ・SG重量: 250→276t

主要目

型式	: 縦置有液面直管型
設計寿命	: 60年
管内流体／管外流体	: 水・蒸気／Na
交換熱量／基数	: 1190MW／1基
伝熱面積	: 5382m ²
伝熱管外径／肉厚／ピッチ	: 15.9mm／1.9mm／31.8mm
有効伝熱管平均長さ／本数	: 28.3m／3805本
定格流量 水・蒸気側	: $1.93 \times 10^6 \text{kg/h}$
Na側	: $1.82 \times 10^7 \text{kg/h}$
給水入口／蒸気出口温度	: 240°C／497°C (17.3MPa)
Na入口／Na出口温度	: 520°C／335°C
高さ／管束部胴内径	: 37m／2.09m
材質／重量	: 12Cr鋼／276t

図3.1-6 2次ポンプ構造概念

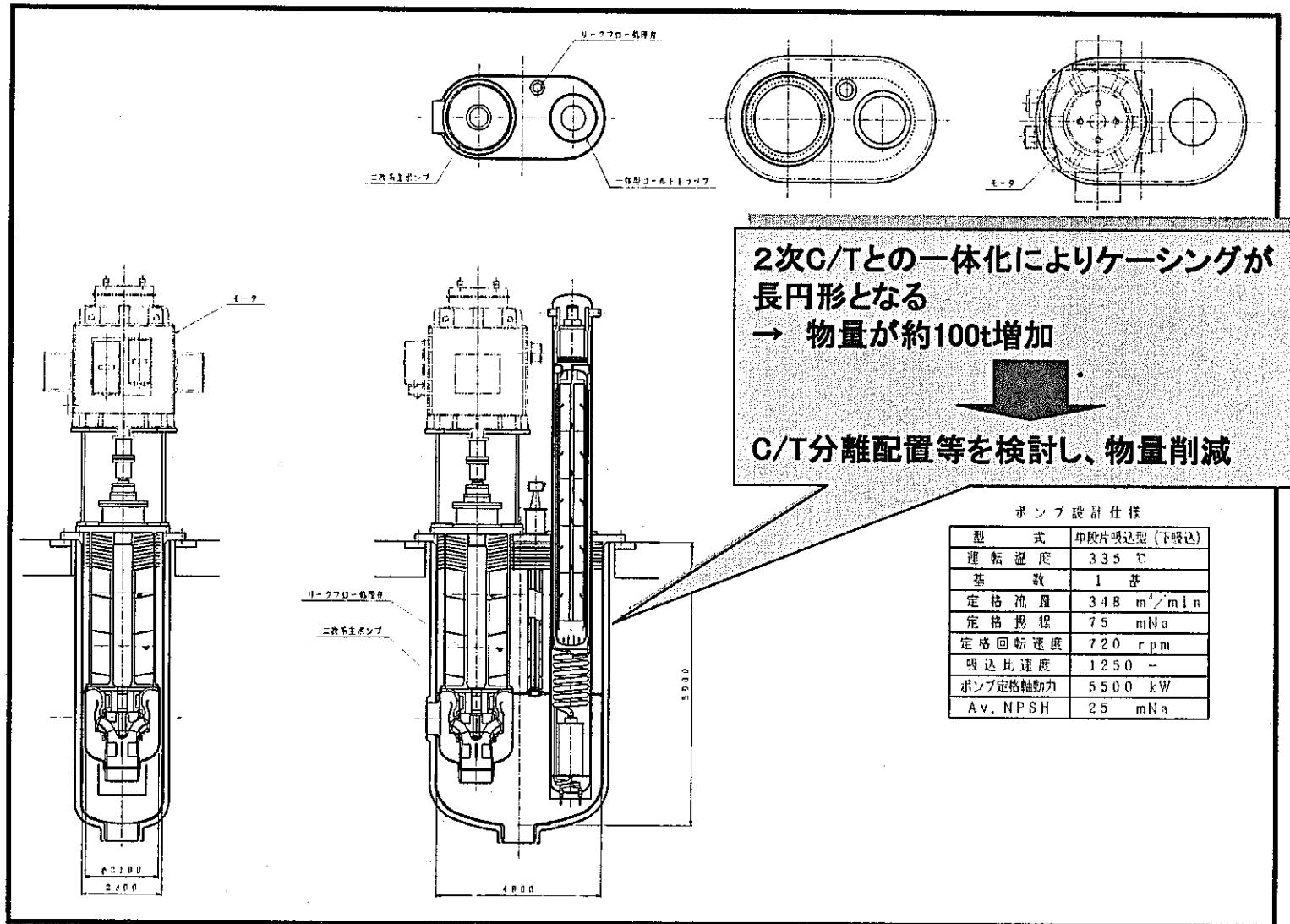


図3.1-7 2次系代案設計(EMP使用)

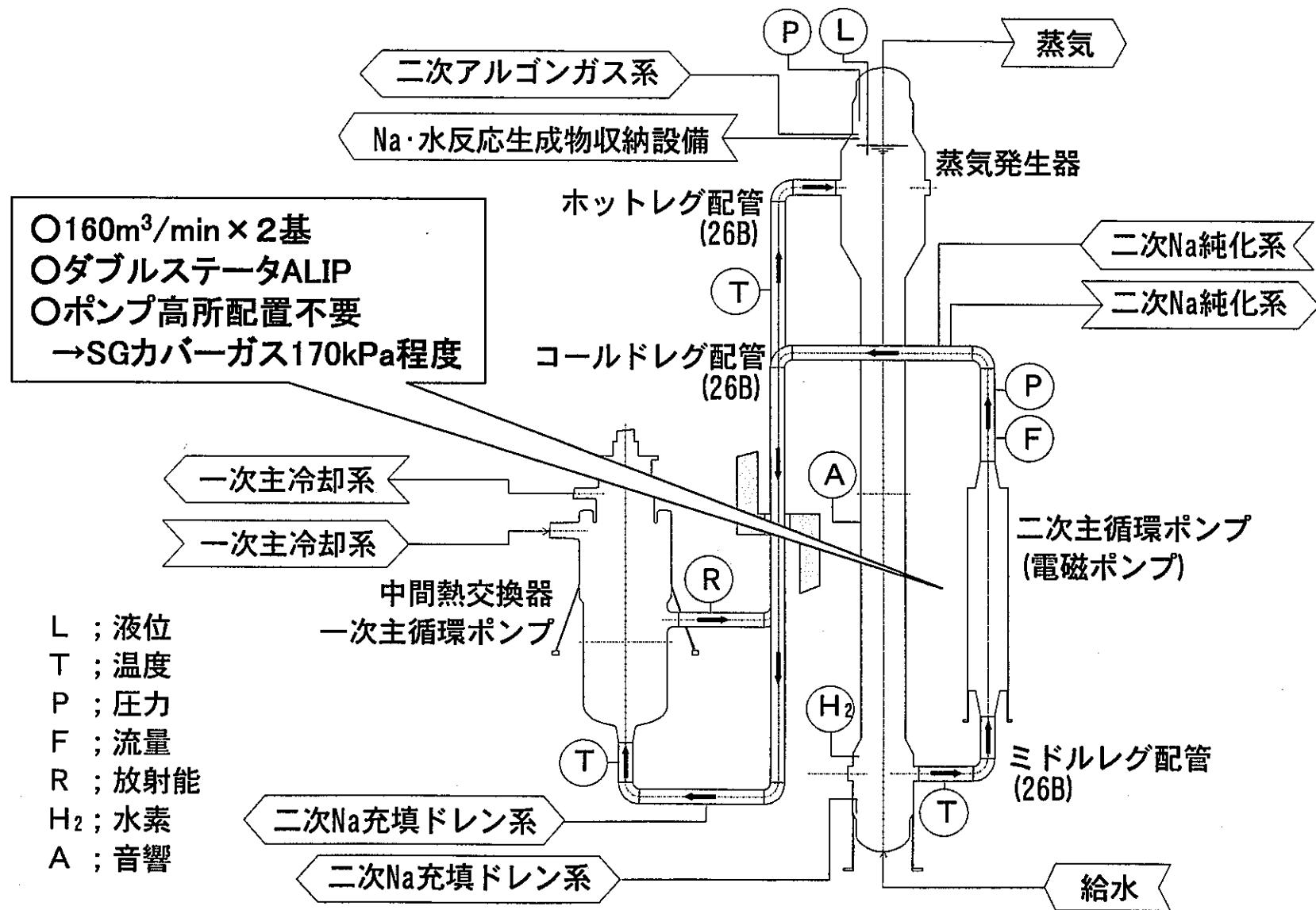


図3.1-8 崩壊熱除去系系統概念

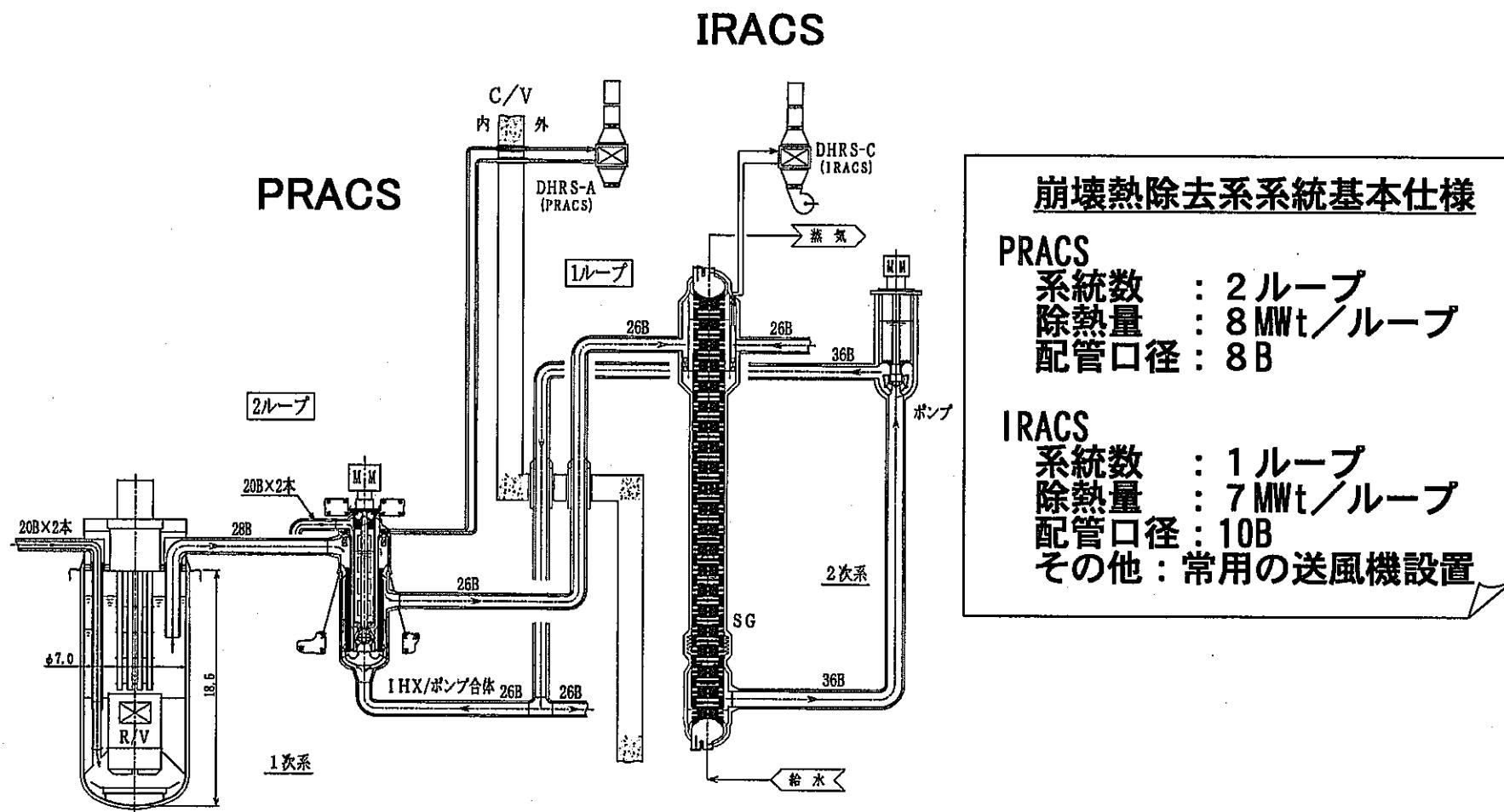


図3.1-9 原子炉建屋平面図

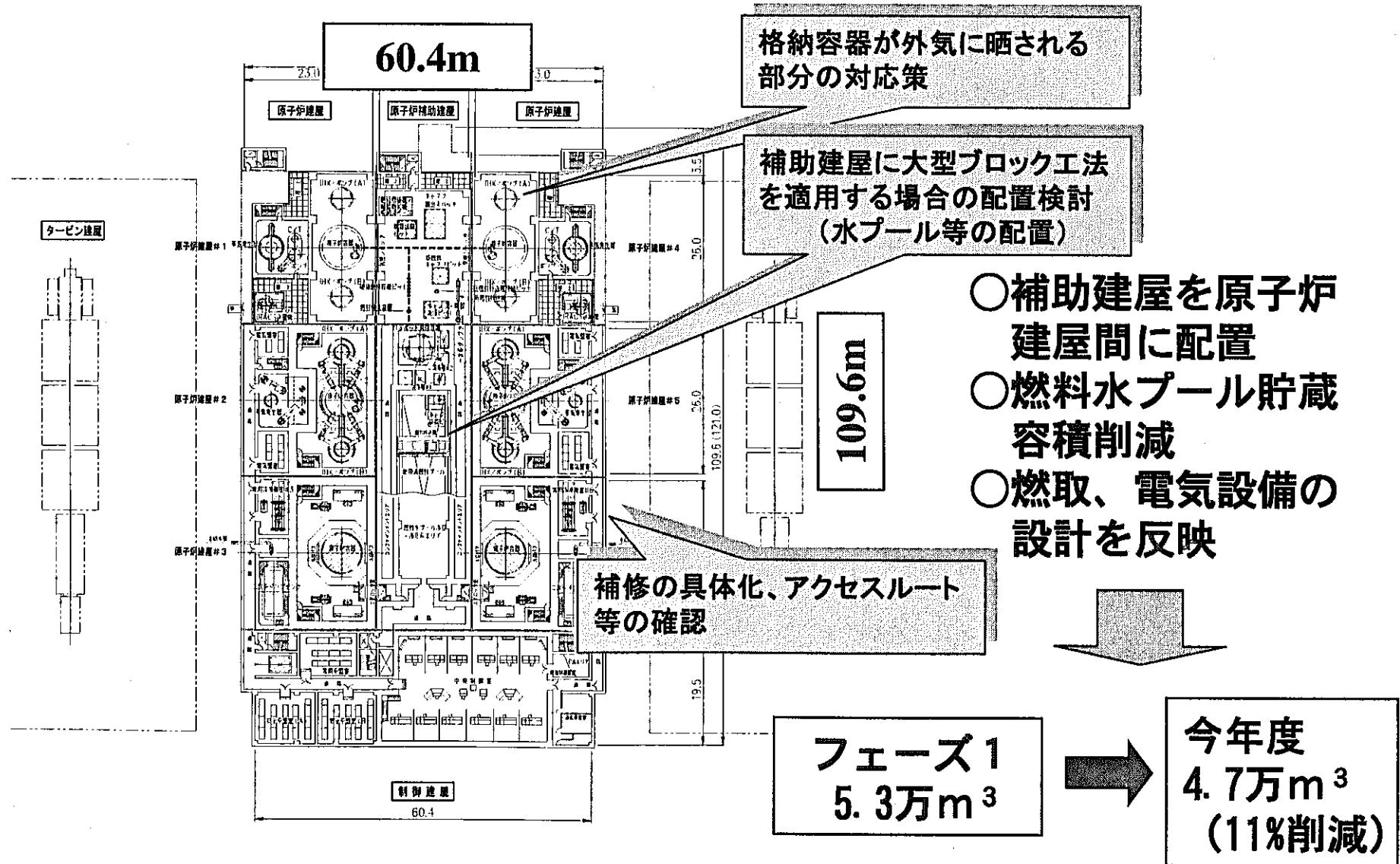


図3.1-10 原子炉建屋鳥瞰図

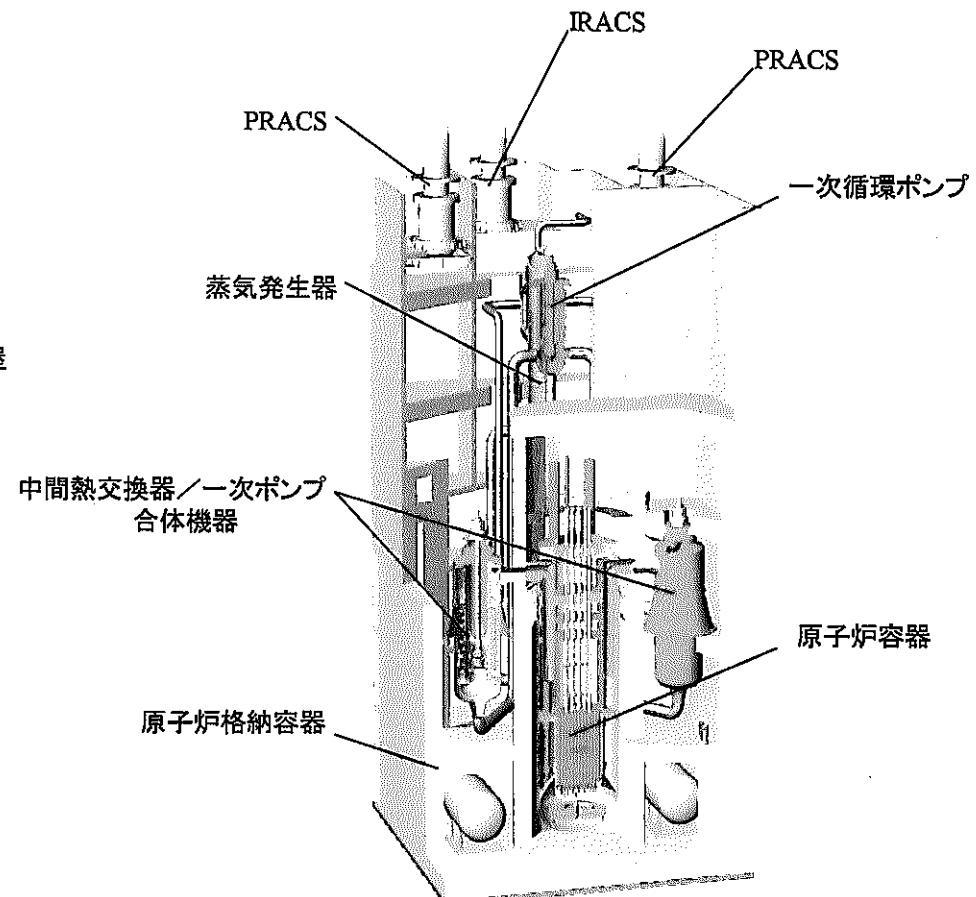
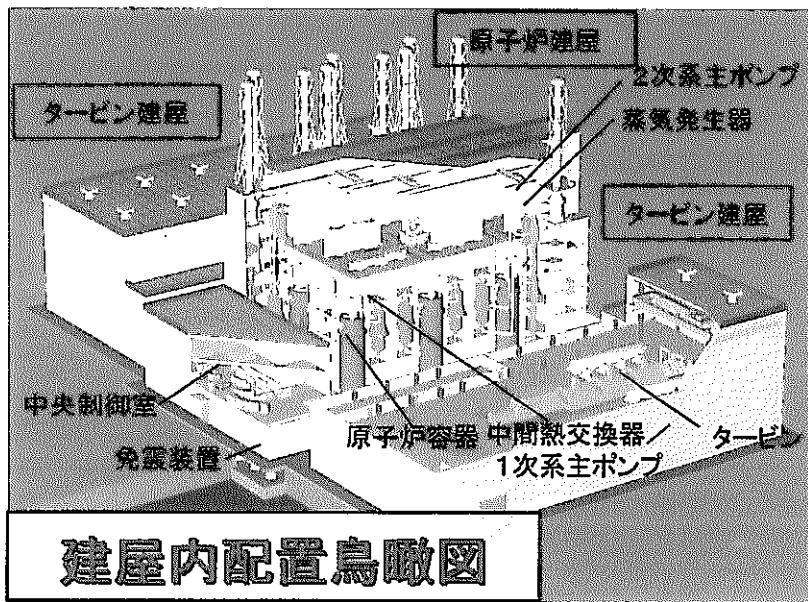
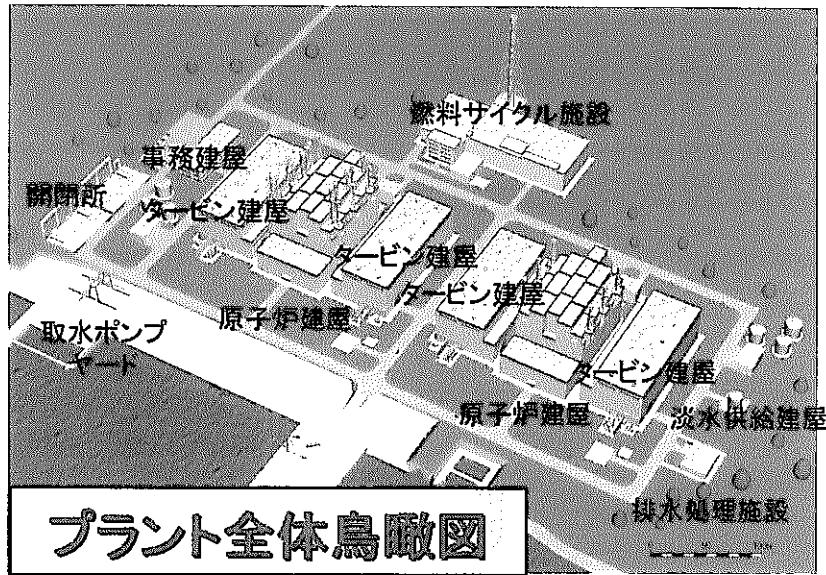
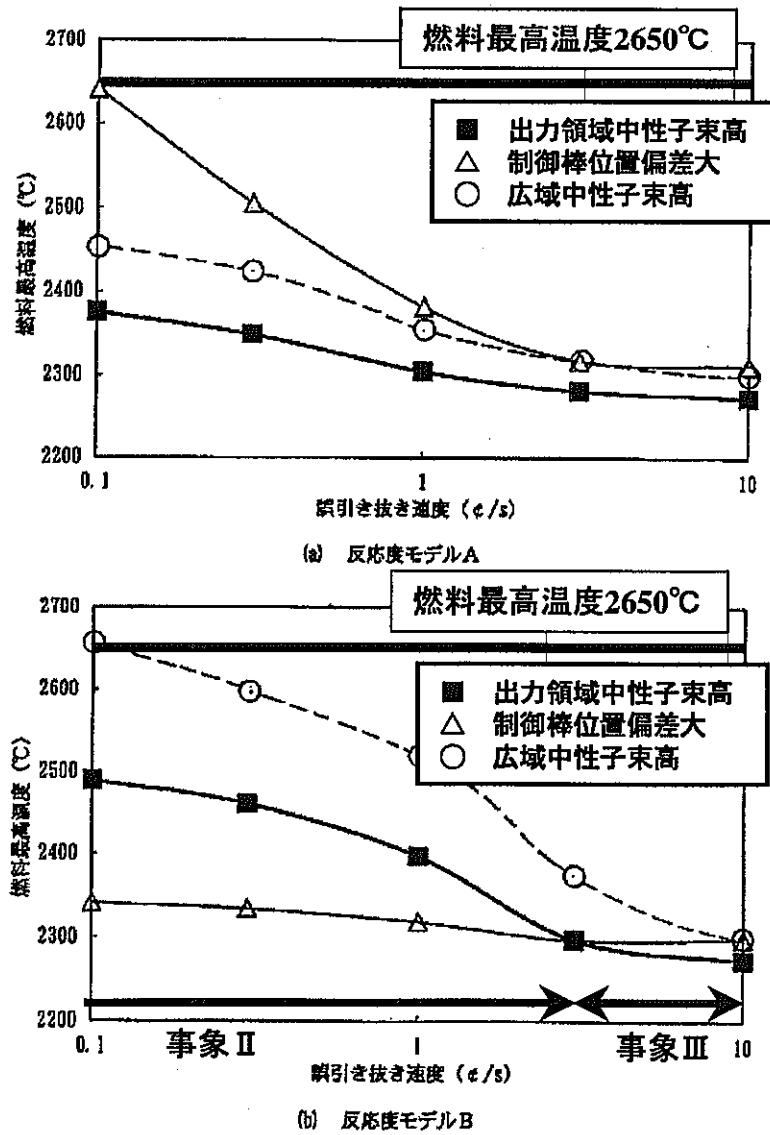


図3.2-1 制御棒誤引抜きの解析・評価結果



主系スクラム信号

- 出力領域中性子束高 (112%)
- 制御棒位置偏差大 (50mm)

後備系スクラム信号

- 広域中性子束高 (117%)

後備系は低速引き抜き領域で
新たな信号の選定が必要

(設定値1%引き下げ/ch数を4→6)

- 部分出力時、シーケンシャル
引き抜き時も含めた総合的な
検討により適切な信号を選定
- 炉心出口温度計装の要否を判
断

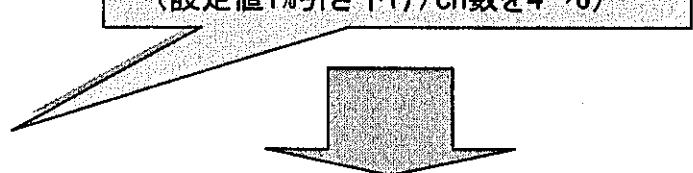
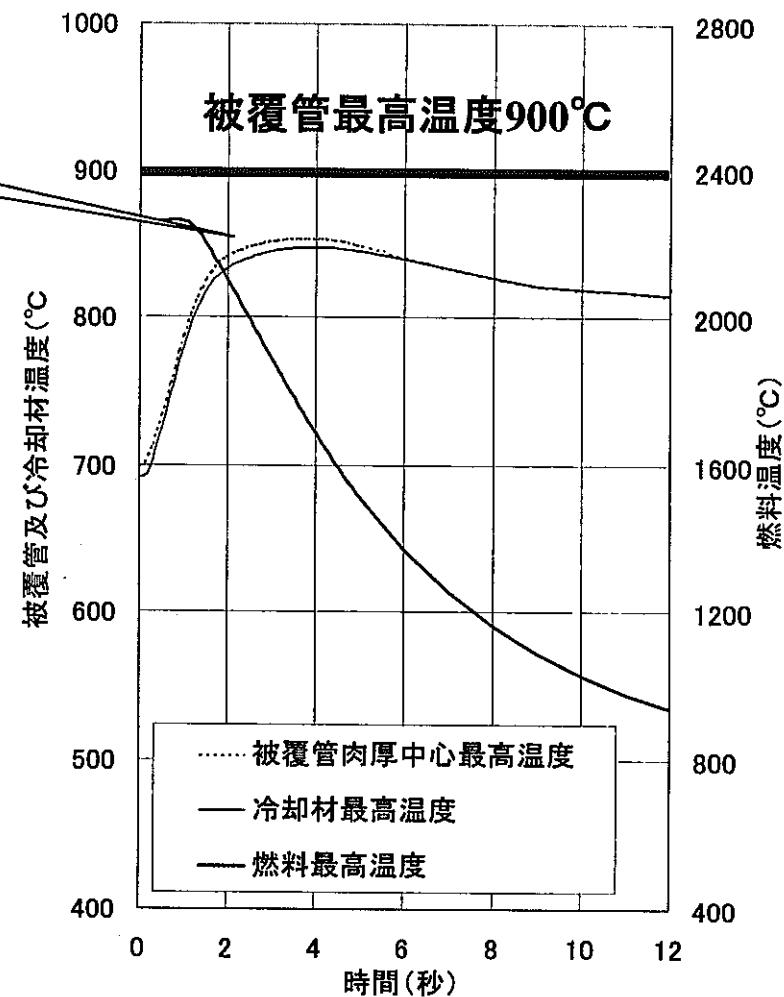


図3.2-2 1次ポンプ軸固着の解析・評価結果

被覆管(肉厚中心)最高温度は
判断基準をクリア

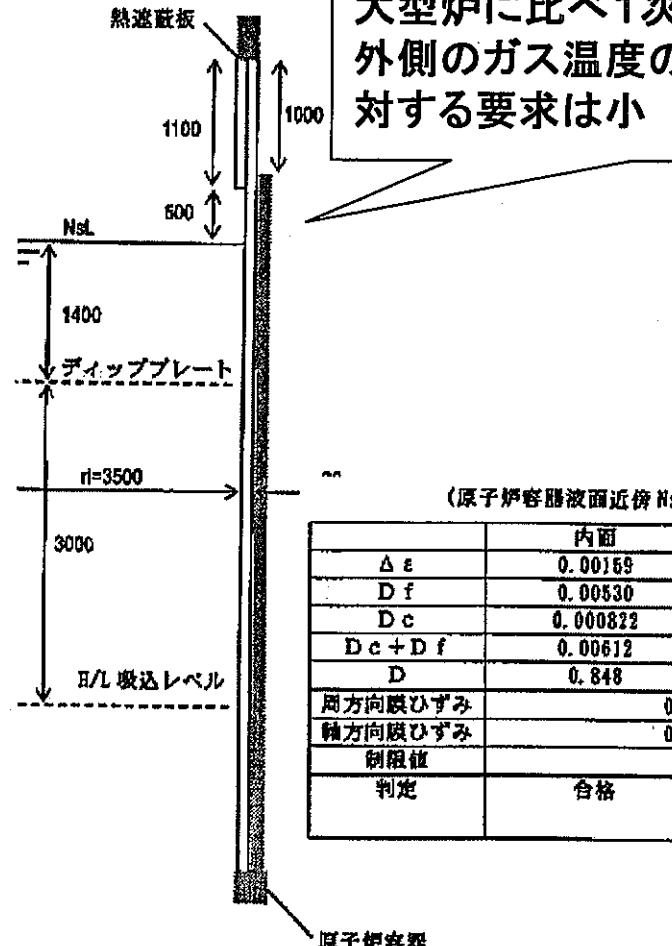
項目	主系	後備系
スクラム信号	1次ポンプ 回転数低	1次冷却材 流量低
安全保護系応答時 間	0.45秒	0.55秒
スクラム時制御棒 挿入時間	1.0秒	1.5秒
健全ポンプトリッ プ遅れ	1.0秒	1.0秒
流量半減時間	5.5秒	5.5秒
被覆管最高温度	854°C	890°C
被覆管CDF値	0.123	0.429



主系スクラムの解析結果

図3.3-1 热応力に対する構造健全性

炉容器液面近傍

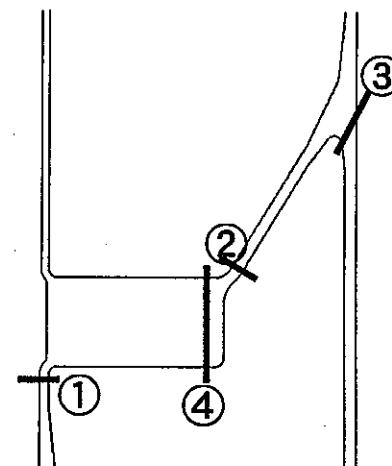


成立性はあるが、1次ポンプ軸固着時の熱過渡が厳しい
→ 热応力緩和のための方策検討要

(原子炉容器液面近傍 NsL-50, 母材)

	内面	外面
$\Delta \varepsilon$	0.00169	0.00190
D f	0.00630	0.119
D c	0.000822	0.000386
D c + D f	0.00612	0.119
D	0.848	0.998
周方向膜ひずみ	0.00304	
軸方向膜ひずみ	0.00309	
制限値	0.1	
判定	合格	合格

IHX管板部



評価断面	①外面	②内面	③外面	④下面
最大応力強さ範囲 S n (N/mm ²)	400	366	234	193
疲労損傷 D f	0.028	0.002	0.000	0.000
クリープ損傷 D c	0.585	0.480	0.300	0.319
D f + D c	0.614	0.483	0.301	0.319
制限値 D	0.942	0.988	0.999	0.999
判定	○	○	○	○

図3.5-1 定検工程

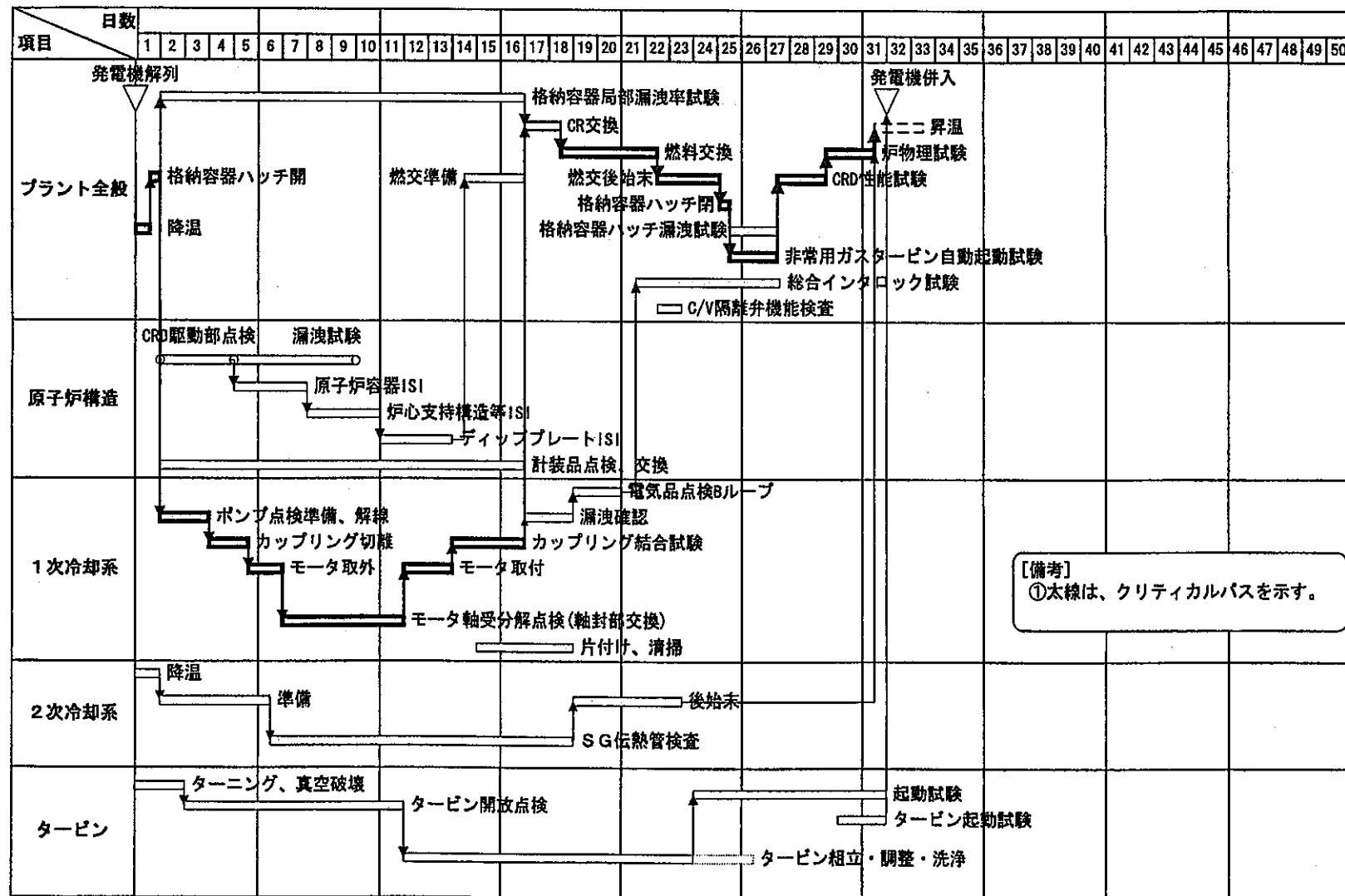
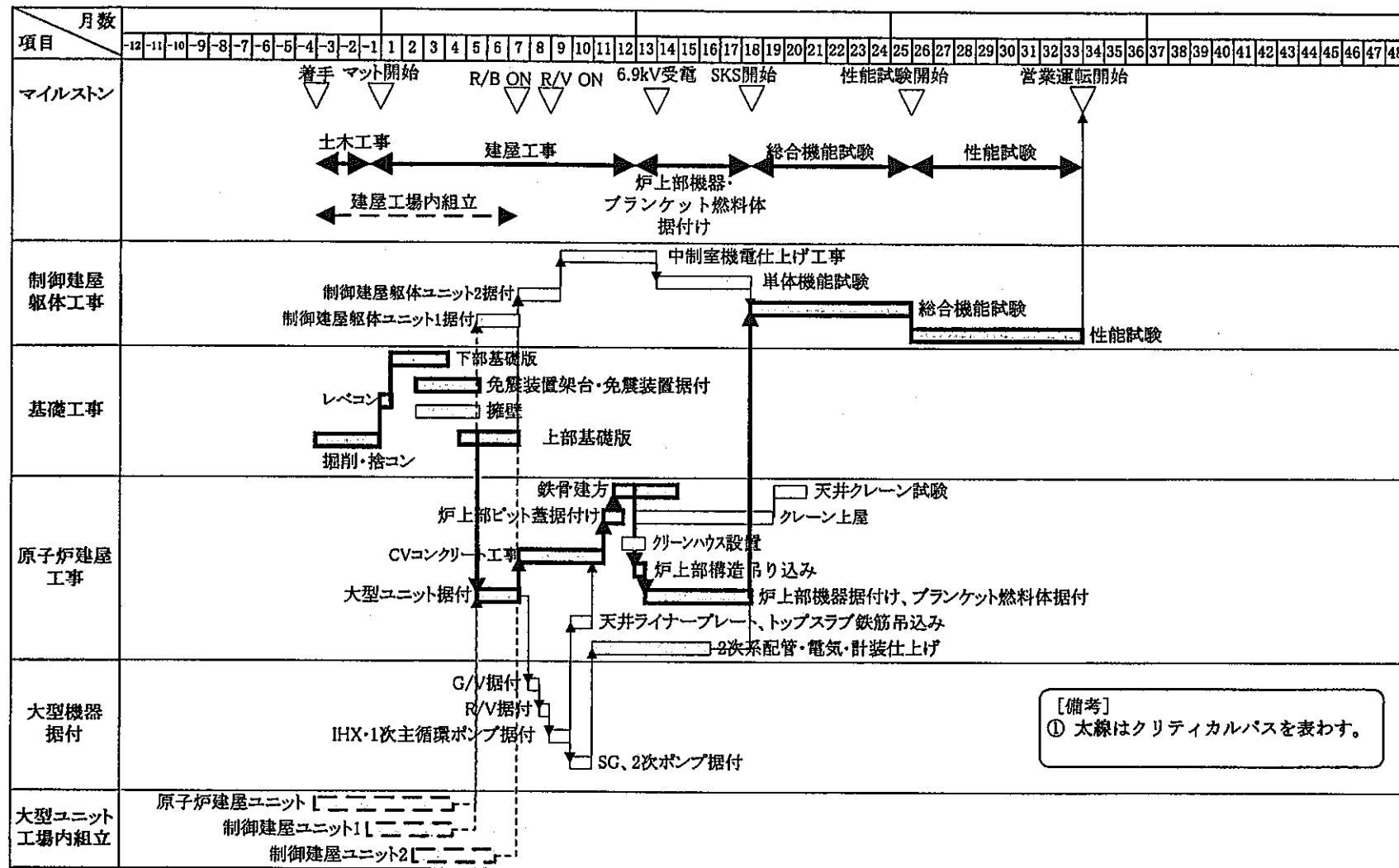


図3.5-2 建設工程



4. クリティカルな課題の検討

第2章で述べたように、Na 冷却大型炉と共に安全性、構造健全性及び熱流動に関する課題に加え、Na 冷却中型モジュール炉では、さらなる建設コスト削減及び信頼性向上に向けて、新たな合理化アイデア等を導入しており、それに伴つていくつかの新たな課題（クリティカル課題）が発生している。表 4-1 に、これらのクリティカル課題への取り組み方針及び本年度実施した検討の概要をまとめた。

4.1 2次系関連の課題

本プラントでは、建設コスト削減の期待できる直管型 SG をオプション 1 として採用したが、本 SG 型式は国内での実績に乏しいこともあり、その成立性に関して注意深い検討が必要である。そこで、直管型 SG の成立性に関わる事項のうち、特に重要度が高いと考えられる下記(1)～(3)の課題を選んで、これらに関する成立性の見通しを概略検討した。

(1) 直管型 SG の伝熱管間、管一胴間の熱膨張差の吸収（図 4.1-1 参照）

直管型 SG の伝熱管は、ヘリカルコイル管型 SG の伝熱管のようにそれ自身で膨張・収縮を吸収する構造ではないので、伝熱管間、管一胴間の熱膨張差が吸収できない場合、伝熱管の座屈等が生じる恐れがある。本プラントでは、伝熱管間の温度差低減のため管東部に穴あきバッフル板を 1m ピッチで設置して管東部温度の均一化を図るとともに、SG の胴部にベローズを設置して伝熱管一胴間の熱膨張差を吸収する設計を検討している。

穴あきバッフル板による伝熱管間の温度差低減効果を検討するため、管東部の熱流動評価を行って伝熱管の径方向各層での温度分布を計算し、最も温度が高くなる伝熱管の平均温度と全伝熱管の平均温度との差を求めた。その結果、その温度差は約 1K であり、伝熱管の座屈応力に相当する許容温度差 13K に対して十分小さく、伝熱管間熱膨張差による伝熱管の座屈は生じない見通しであることが分かった。しかしながら、SG 伝熱管に破損等が生じ、プラグにより伝熱管補修を行った場合には、水・蒸気側での冷却のないプラグ伝熱管の温度が高くなるので、より厳しい温度差が生じる。そこで、管東部にプラグ伝熱管 1 本が存在する場合について同様の評価を行ったが、温度差は約 24K に増加して座屈制限を超える結果となった。すなわち、プラグ伝熱管については補修後に当該管を切断して座屈の発生を防止する等、補修方法の工夫が必要であることが分かった。

また、伝熱管一胴間の熱膨張差を吸収するための胴ベローズの構造を検討した。上記の熱流動評価結果に基づいて計算した伝熱管一胴の熱膨張差は約 9mm であり、板厚 20mm の 12Cr 系鋼製ベローズによりこれを吸収するためには山数 4 が必要となる。また、Na 水反応時の発生圧力に対して胴ベローズの構造健全性を確保するためには、ベローズの山高 200mm、ピッチ 200mm が必要となる。

(2) 直管型 SG の水・蒸気側流動不安定の抑制（図 4.1-2 参照）

直管型 SG は、ヘリカルコイル管型 SG に比べて伝熱管全長が短く水・蒸気側の圧力損失が小さいので、水・蒸気側流動不安定が生じ易くなる傾向がある。そこで、本プラントで採用

した直管型 SG を対象に、水側流動安定性に関する解析を行い、成立性を評価した。

本解析には、周波数応答法を用いた代表管モデルにより水・蒸気側流動の安定性を判別する流動安定性評価コード DALMA を用いた。本コードは、もんじゅの設計のため 1974 年に開発され、50MWSG 等の試験データによる検証、Na 技術委員会の安定性グループによる評価手法や検証性の検討を経て、もんじゅ及び実証炉の設計に供されたものである。

本解析では、100%定格運転時及び 30%部分負荷運転時について評価したが、安定性の判断指標である入口オリフィス係数 K_{in} はいずれのケースでも負の値（100%定格運転時において $K_{in}=-23$ 、30%部分負荷運転時において $K_{in}=-112$ ）となった。したがって、伝熱管に入口オリフィスを設置しなくとも水側流動安定性を確保できる可能性がある。なお、30%部分負荷運転時における安定性が 100%定格運転時よりも向上しているのは、給水サブクール度が大きくなるためと考えられる。

これまでに行われた検証によると、DALMA コードの安定限界評価精度は、Na 流量と給水流量の比で±10%と評価されている。そこで、本コードの評価精度の不確かさを考慮して、100%定格運転時において給水流量が 10%少ない状態を想定し、安定性を評価した。その結果、入口オリフィス係数は $K_{in}=-7$ となり、限界に近くなるものの、入口オリフィスなしでも安定性が確保できる可能性がある。

なお、本解析で使用した DALMA コードは、ヘリカルコイル管型 SG に対しては多くの検証例があるが、直管型 SG に対しての検証例が殆どないので、今後、実験データに基づく検証を行う必要がある。また、本評価では、水側流動に生じる主要な不安定現象として、密度波型不安定に着目した評価を行ったが、今後、これ以外の要因による不安定現象（伝熱管相互間の不安定モード等）についても順次検討を進める必要がある。

(3) 直管型 SG の伝熱管破損伝播挙動の把握（図 4.1-3 参照）

Na 冷却炉の SG では、伝熱管が破損して水がリークすると Na と水が反応し、発生する水素ガス等の影響で 2 次冷却系の圧力が上昇して 2 次系機器の健全性に悪影響を与える恐れがある。また、破損伝熱管からの反応ジェットによる隣接伝熱管の損耗（ウェステージ）や高温ラプチャ現象により周辺の伝熱管が損傷し、破損領域が拡大する恐れがある（破損伝播）。

実証炉の設計では、水素計、音響計、ラプチャディスク（R/D）破裂板等の検出系により水リークを早期に検知して、SG 内の保有水をブローする等の事象終息シーケンスを早期に立ち上げ、最大水リーク率を抑制するとともに、発生した水素ガス等の反応生成物を反応生成物処理系で処理することにより 2 次系機器の健全性を確保している。

本炉概念においても、同様の Na 水反応対策を設けることにより安全性を確保する方針であるが、原子炉の大出力化、ループ数の削減に伴い 2 次系 1 ループ当たりの Na インベントリが増加しており、実証炉に比べ、本プラント概念では水素計等による水リークの検知性が低下している。また、直管型 SG の場合、伝熱管肉厚がヘリカルコイル管型 SG に比べて薄く、水リーク時の破損伝播挙動が厳しくなる可能性がある。そこで、直管型 SG における破損伝播挙動と最大水リークを把握するため、実証炉設計で使用したものと同じ解析コードを用いて、SG 伝熱管破損伝播解析を行った。一般に、2 次系の Na インベントリが大であるほど固体電解質水素計による水リーク検知時間が長くなり、伝熱管破損伝播挙動も厳しくなることを勘案

して、保守側の評価を行う観点から、本解析は、大型炉サイズの直管型 SG（出力 750MWe）を対象とした。

解析の結果、保守的に水素計と音響計に期待せず、R/D 破裂板のみにクレジットを取った場合の最大水リーク率は 54.4kg/s となることが分かった。この値は、約 9.4 本の伝熱管が破断した際の水リーク率に相当している。今後、2 次系の圧力伝播解析を行って確認する必要はあるものの、この程度の最大水リーク率であれば、従来知見から判断して 2 次系機器の健全性を十分確保できる範囲と考えられる。また、水リークを水素計（Na 中固体電解質水素計）或いは音響計で検知する場合、最大水リーク率は 10kg/s 程度まで減少し、高温ラプチャ現象も生じない見通しであることが分かった。さらに、水素計或いは音響計による検知に加えて水プローチ時間を 60 秒から 30 秒に短縮できれば最大水リーク率は 0.5kg/s 程度まで減少し、1 本の伝熱管が破断した際の水リーク率に相当する値（約 5.8kg/s）を超えないレベルに抑えられる見通しであることが分かった。

なお、Na 冷却大型炉の設計研究の中で、出力 750MWe のヘリカルコイル管型 SG について同様の解析を行っているが、R/D 破裂板のみにクレジットを取った場合の最大水リーク率は 81.4kg/s、水素計或いは音響計にクレジットが取れる場合の最大水リーク率は約 18kg/s であり（ただし、水プローチ時間は 60 秒）、直管型 SG における最大水リーク率は、ヘリカルコイル管型 SG と同程度に収まる見通しであることが分かった。

以上のように、直管型 SG においても、DBE として想定される範囲の水リークの影響は適切に抑制され、安全性は確保される見通しであるが、Na 水反応の影響を局限して行くためには固体電解質水素計及び音響計の信頼性向上（安全保護系並みとする）、水プローチ時間の短縮等の課題を解決して行く必要がある。

(4) 2 次系システムの総合評価（図 4.1-4 参照）

フェーズⅡの Na 冷却炉の設計研究では、平成 14 年度末までに SG 型式（ヘリカルコイル管型又は直管型）及び 2 次ポンプ型式（機械式又は電磁式）を選定し、Na 冷却中型モジュール炉の 2 次系システムを確定する計画である。それに向けて、直管型 SG 及び電磁ポンプの成立性に関わる事項を中心に検討を進める必要があるが、下期作業では、直管型 SG の成立性に関わる事項のうち、特に重要度が高いと考えられる課題について検討した。

その結果、上記のように検討した範囲では基本的成立性が確保される見通しであることが分かった。今後、直管型 SG 及び電磁ポンプの技術課題に関する総合的な検討を進め、SG 型式及び 2 次ポンプ型式を選定して 2 次系システムを確定する計画である。

4.2 崩壊熱除去系関連の課題

(1) 自然循環除熱能力の把握（図 4.2-1 参照）

上期の作業で、2 系統の PRACS と 1 系統の IRACS より成る完全自然循環型の崩壊熱除去系をレファレンス概念として選定した。本概念は完全自然循環型の PRACS と IRACS を併用する構成であり、両者の相互干渉が生じる可能性もあることから、プラント動特性解析コードを用いた崩壊熱除去特性解析を行い、崩壊熱除去能力の十分性及び自然循環流動の安定性について評価した。

事象Ⅱ～Ⅳの範囲で想定される代表事象について解析を行った結果、崩壊熱除去能力は十分であり、炉心・燃料の健全性及び原子炉冷却材バウンダリの健全性は確保できる見通しが得られたが、PRACSとIRACSとの干渉により2次系の自然循環流動が一時的に不安定となり、それにより各部の温度に大きな変動が生じる可能性があることが分かった。本概念では、SG上部の2次系NaがIRACSに冷却されることで2次系の自然循環流動が立ち上がるが、PRACSがIRACSと一緒に起動してIHX内の2次系Naを冷却すること、SG上部で冷却された2次NaがSG～2次ポンプ間の2次系コールドレグ配管を上昇するのに時間がかかることから、事象発生後1時間程度は自然循環ヘッドが立ち難い状況となり、2次系の自然循環流動が不安定化している。

今後、自然循環流動を安定化させるための対策について検討する必要があるが、適切な対策が見つからない場合は、PRACSとIRACSとの併用方式の見直しも含めた崩壊熱除去系概念の見直しが必要となる。

(2) 崩壊熱除去系システムの総合評価（図4.2-2参照）

2系統のPRACSと1系統のIRACSより成る崩壊熱除去系システムのレファレンス概念は、直管型SG+機械式ポンプ+分離配置という2次系システム（オプション1）との整合性を考慮して選定している。したがって、平成14年度末にSG型式及び2次ポンプ型式が選定され、2次系システムが確定した段階で、崩壊熱除去系システムの構成を見直す必要がある。

上期の概念選定で代案とした崩壊熱除去系概念は2系統のPRACSから成るもので、安全系の範囲を1次系に限定できる特徴があり、2次系システムの選定によっては、そのメリットを活かした設計が可能になると考えられる。そこで、安全系を1次系に限定した崩壊熱除去系の概念構築、システム設計及びレファレンス概念との比較・評価を行って、レファレンス概念との得失を評価しておくこととした。

構築した概念は下記の2概念である。

- a. A案：PRACS 2系統+RVACS
- b. B案：PRACS 2系統+メンテナンス冷却系

A案におけるRVACSは、ループ型炉との適合性を考慮して格納容器内空調系をヒートシンクとする閉鎖系の概念、B案におけるメンテナンス冷却系は弁の切替により6モジュール間で共用する概念であり、Na炉設計検討会で指摘された事象及びメンテナンス時のサイフォンブレークに対応するために設置するものである。

安全性、経済性、運転性等の観点からこれらの概念とレファレンス概念との比較・評価を行った。その結果は、図4.2-2にまとめているが、A案、B案には、安全系を1次系に限定できること以外に、主要な崩壊熱除去系系統数を3系統から2系統に削減でき、レファレンス概念で課題となっているPRACSとIRACSとの干渉が生じないというメリットがある。その反面、崩壊熱除去系に求められる多重性及び多様性を少ない系統数で満足するために、他の系統への設計上の負担が大きくなるデメリットがある。具体的には、PRACSのベーン・ダンパを100%×2とすることが必須であること（レファレンス概念は50%×2で成立）、RVACS及びメンテナンス冷却系を安全系として設計する必要があること（レファレンス概念で採用した窒素ガス冷却小型DHXは常用系で可）が挙げられる。また、A案の場合、格納容器内空調系

の容量増加による経済的なデメリット、B案の場合、切替弁の誤操作等、安全上・運転上の課題の発生、Na バウンダリの増加による Na 漏えい発生可能性の増加が懸念される。

平成 14 年度末の崩壊熱除去系システムの最終選定に際しては、2 次系システムとの適合性及び崩壊熱除去能力（除熱能力の十分性及び自然循環流動の安定性）を考慮し、さらに上記の評価結果等も参考にしつつ、システム構成を最終的に決定する計画である。

4.3 水・蒸気系関連の課題

(1) 原子炉 1 基トリップ時の水・蒸気系制御方式の検討

本プラントでは建設コスト削減のため 3 基の原子炉で 1 基のタービンを共有する設計をしているが、プラントの高稼働率を維持するためには、NSSS 側の故障で原子炉 1 基がトリップした場合でも、他のモジュールをトリップさせず、タービンを部分負荷で運転継続できるようになることが望ましい。ここでは、このようなプラント運転制御を可能とする給水系及び主蒸気系の系統構成概念並びに制御方式について検討した。

1 モジュールの NSSS で故障が生じた場合、当該モジュールは蒸気ヘッダから隔離されて再循環系による崩壊熱除去運転に移行する。この場合、1 モジュールからの蒸気供給がなくなるため、タービンガバナ弁を絞ってヘッダの蒸気圧力を維持し、健全モジュール側の運転を継続する必要があるが、この場合、電力系統網からの発電要求に応じる運転は不可能となるため、タービン発電機出力を制御量とするタービンガバナ弁制御から主蒸気圧力制御系への切り替えを行う方式（協調制御）を採用する。

1 モジュールの故障により当該モジュールが原子炉トリップに至る場合、短時間のうちに蒸気ヘッダの圧力が急激に低下する。そのため、主蒸気圧力制御系に切り替えた後の主蒸気加減弁による圧力制御には即応性が要求されるが、EHC 式主蒸気加減弁の即応性は優れており、追従性は良好と考えられるので、主蒸気圧力はほぼ一定に維持され、健全モジュールへの影響は小さくできると考えられる。

以上のように、定性的な検討によりモジュール炉の制御方式の見通しを考察したが、今後、プラント動特性解析コードを用いた制御特性解析を行って、本制御方式の成立性を確認する必要がある。

4.4 BOP 設備関連の課題

(1) 非常用電源（安全系）共用化に関する検討（図 4.4-1 参照）

本プラントでは、建設コストの削減のため安全系の非常用電源設備（ガスタービン）を 6 モジュールで集中共用化する設計としている。軽水炉の安全設計審査指針では、このような安全系設備の共用化に関して「安全機能を有する構築物、系統及び機器が 2 基以上の原子炉施設間で共用される場合には、原子炉の安全性を損なうことのない設計であること（指針 7）」を求めており、安全性を中心に共用化に伴う課題を検討しておく必要がある。

非常用電源の共用化の有無が原子炉の安全性に及ぼす影響を概略評価するため、PSA 手法を用いて以下のような簡易評価を行った。

すなわち、共用化を行うケースとして、3 基の非常用電源設備をモジュール間で共用する

設計を想定、共用化を行わないケースとして、各モジュールが2基ずつの非常用電源設備を持ち（6モジュール合計12基）、かつ、モジュール間の電源融通を行う設計を想定し、外部電源喪失時に全交流動力電源喪失に至る確率を比較した。その結果、共用化を行うケースでは、共用化を行わないケースに比べて、全交流動力電源喪失に至る確率が高々1.7倍増加する程度であることが分かった。炉心損傷発生確率全体に占める本シーケンスの割合、評価精度の不確かさ等を考慮すると、この程度の差は有意ではないと考えられる。

なお、本プラントでは、完全自然循環型崩壊熱除去系の採用及び格納容器内空調系の常用系化に伴い崩壊熱除去系、非常用空調系、補機冷却系等の非常用電源負荷が大幅に削減されている。その結果、非常用電源の主要な負荷は、原子炉ルーフデッキ冷却、中央制御室空調等の小容量のスポット空調用負荷、燃料取扱設備用負荷などに限定され、従来設計に比べて非常用電源設備の位置付けが軽くなっている。

このような点も含めて判断すると、非常用電源の共用化により原子炉の安全性が有意に損なわれることはないと判断できる。

(2) コンクリート設計温度引き上げに関する検討（図4.4-2参照）

従来設計におけるコンクリート設計温度は65°Cであり、長期のコンクリート健全性を確保する観点から、設計室温を55°C以下に制限し、これを維持できるように換気空調系等の設計を行っている。コンクリート設計温度を引き上げることができれば、設計室温を高く設定することが可能となるので、換気空調系冷却風量を削減してBOP設備の合理化に繋げることが可能となる。

電力中央研究所における研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾によると、常温、65°C、85°C及び110°Cの温度条件で8年間に亘るコンクリート暴露実験を実施し、コンクリートの力学、物理、化学的性質に関する調査を実施している。その結果、

- a. 圧縮強度及び弾性係数の経年変化については、暴露開始後1～2年経過した時点で強度低下が終息し、以後長期的に暴露開始後1～2年時点での強度を保持する。
- b. 引張強度については、2年経過時点で低下が収まり、それ以降、逆に強度がやや大きくなる傾向が認められたが、実験上のバラツキ程度であり、引張強度についても暴露開始後1～2年で終息すると判断された。

との知見が得られている。これらの知見に基づいて、これらの研究では、コンクリート設計温度を現状の65°Cから85°C程度に設定することが合理的であると結論付けている。

本プラントでは、これらの研究結果を踏まえ、コンクリート設計温度の引き上げが可能になるとの前提の下で設計室温を10°C高くし、65°Cとして換気空調系の設計を行っているが、実用炉の60年寿命設計への対応も考慮すると、本件に関する更なるR&Dを行い、室温条件の見直しの妥当性を確認して行く必要があると考える。

(3) 格納容器内空調の常用系化に関する検討（図4.4-3参照）

外部電源喪失が発生した場合、建屋の換気・空調が停止し、原子炉機器からの放散熱等により建屋内の雰囲気及び躯体コンクリート温度が徐々に上昇して行く。そのため、実証炉等の設計では、格納容器内空調を安全系とし、非常用電源に外部電源喪失時にも格納容器内の雰囲気及び躯体コンクリート温度の過度の上昇を防止する設計としていた。

しかしながら、実証炉の空調停止時温度挙動解析によると、換気・空調が停止した場合の建屋の温度上昇は緩やかであり、最も厳しいエリアにおいても、コンクリート温度が 85°Cを超えるのは約 100 時間以降であることが示されている。また、上記(2)で記したように、コンクリート設計温度が引き上げられた場合、温度上昇に対する時間裕度の拡大が期待できる。さらに、国内の送電線事故事例から、30 分以上継続する外部電源喪失の発生頻度は低く（全の 4.6%）、仮に外部電源喪失が長時間（100 時間以上）に渡ったとしても、非常用 GT 予備機の起動、隣接プラントからの電源融通等、コンクリート温度が制限値を超える前に運用によるリカバリーで電源を確保し、空調を再起動する方策があると考えられる。

以上のことから、本プラントでは非常用電源負荷の多くの部分を占めていた格納容器内空調系を常用系化し、非常用電源設備容量の大幅削減等、BOP 設備の合理化を進めている。

今後は、実用炉体系での空調停止時温度挙動解析、コンクリート設計温度上昇の見通し確認等を行い、格納容器内空調系常用系化の成立性を確認して行く必要がある。

4.5 燃料取扱設備関連の課題

(1) レールレス走行方式燃料出入機の検討（図 4.5-1 参照）

本プラントでは、建設コスト削減に向けて、燃料移送方式としてレールレス走行方式を採用した。本方式の場合、従来型の切替走行・中継方式に比べて物量は削減されるが、耐震性、高速及び停止位置決め精度の確保、滑り・転倒の防止及び給電・制御方式が課題となる。

a. 耐震性

1G 以上の上下方向加速度に対して浮き上がりを防止するためには、走行台車の固有値を 25Hz 以下、又は 1.25Hz 以下とする必要があるが、出入機本体をばね結合とし、一種の上下免震構造とすることにより 1.25Hz 以下の固有値とすることが可能。

b. 高速及び停止位置決め精度の確保

走行装置大型化により 10m/min 程度の高速走行が可能な見通し。また、既往技術ベースの高精度型センサの使用により、数 mm 程度の位置決め精度を確保できる見通しである。

c. 滑り・転倒の防止

上述のように、出入機本体の固有値を下げるにより浮き上がり防止を図っており、転倒は防止できるが、地震時の滑りの発生を完全に防ぐのは困難である。ただし、摩擦係数を適切に設定することにより、万一滑りが生じても、走行台車の移動範囲を小さくすることは可能な見通しである。

d. 給電・制御方式

バッテリ方式とトロリー方式について検討した。バッテリ方式はケーブルが不要となる利点があるが、バッテリ容量が極めて大きくなる欠点がある。一方、トロリー方式はトロリー線を配置する必要があるが、モジュール配置への対応は可能な見通しである。

以上の検討に基づき、浮き上がり・転倒防止対応、トロリー給電方式等を取り込んだレールレス走行方式燃料出入機の概念を構築した。

表 4-1 クリティカル課題に関する検討の概要

設備	課題	取り組み方針	成果
2次系 (直管型 SG)	伝熱管間、管一胴間の熱膨張差の吸収 [図 4.1-1]	穴あきバッフル板構造を採用して伝熱管間温度差を抑制する。また、管一胴間の熱膨張差は胴ペローズで吸収する。多次元熱流動解析により伝熱管間及び管一胴間の温度差を評価し、伝熱管座屈防止の見通しを検討するとともに、胴ペローズの構造を具体化する。	○管束部の熱流動解析結果より、伝熱管をプラグした場合には熱膨張に伴う座屈許容温度差を上回るため、プラグ管の切断／補修が必要となることが明確になった。また、伝熱管との熱膨張差吸収と Na-水反応時の内圧に対する成立性の観点から、SG 胴ペローズ構造を選定した。
	水・蒸気側流動不安定の抑制 [図 4.1-2]	もんじゅ及び実証炉の設計で使用した DALMA コードを用いて、直管型 SG の水・蒸気側流動安定性を定量的に評価する。伝熱管オリフィス等の対策の必要性を明らかにする。	○伝熱管部での温度・熱流束分布に基づいて、定格運転時及び 30%負荷運転時における水側流動安定性を評価した結果、給水側の質量速度が大きいこと、また入口圧力の高圧化（給水サブクール度大）により、伝熱管入口オリフィスなしで流動安定性を確保できる見通しを得た。
	伝熱管破損伝播挙動の把握 [図 4.1-3]	水リーク検出特性解析及び伝熱管破損伝播解析を行い、直管型 SG の特性を把握する。安全性確保及び財産保護の観点から、要件を満たす見通しのある Na 水反応対策設備について検討する。（Na 技術高度化 WG の活動の一環として検討）	○直管型 SG を対象とした破損伝播解析を行い、検出系に固体電解質水素計及び音響計を用い、水プローフダウン時間を 30 秒に短縮することにより、最大水リーク率を 1+0 本破損以下に抑えることができるとの見通しを得た。
	総合評価 [図 4.1-4]	上記の 3 つの課題に関する検討結果等を踏まえて直管型 SG の成立見通しを評価する。また、経済性（物量、稼働率等）、安全性、運転制御性等の観点から、ヘリカルコイル管型 SG と直管型 SG との総合的な比較・評価を行う。（SG 型式及び 2 次ポンプ型式の選定は次年度末の予定であり、2 次系システム概念はそれらを踏まえて確定）	○直管型 SG に特有の課題について概略検討を実施。その結果、検討した範囲では基本的成立性が確保される見通しであることを確認。次年度は直管型 SG 及び電磁ポンプの技術課題に関する総合的な検討を進め、SG 型式及びポンプ型式を選定して 2 次系システム概念を確定する。
崩壊熱除去系	自然循環除熱能力の把握 [図 4.2-1]	プラント動特性解析コードを用いた崩壊熱除去特性解析を行い、PRACS×2+IRACS×1（完全自然循環型）の除熱特性を把握する。	○PRACS と IRACS との干渉と見られる不安定な自然循環流動挙動の解消、SG 小リーク時にも IRACS の運用を可能とする方策の具体化等が今後の課題。
	総合評価 [図 4.2-2]	上記課題に関する検討結果、別途実施する代案（安全系の範囲を 1 次系に限定した概念）の検討結果等を踏まえて、経済性、安全性、運転制御性等の観点から、レファレンスと代案との総合的な比較・評価を行う。（2 次系システム概念の確定を受けて、崩壊熱除去系形式を次年度末に確定）	○安全系を 1 次系に限定した崩壊熱除去系概念を検討し、レファレンス設計に対する得失を評価した。本評価結果を踏まえ、2 次系システムとの適合性を考慮して、次年度には崩壊熱除去系システム概念を確定する。
水・蒸気系	原子炉 1 基トリップ時の水・蒸気系制御方式の検討	NSSS 側のトラブルにより原子炉 1 基がトリップしても、他のモジュールの原子炉トリップに至らないようにするための制御方式を検討する。（プラント動特性解析コードを用いた制御特性解析は次年度）	○次年度以降プラント制御特性解析による検討を行う準備として、左記のような制御を容易にする水・蒸気系の系統構成について検討。
BOP	非常用電源(安全系)共用化に関する検討 [図 4.4-1]	共用化した場合の炉心損傷発生頻度への影響、稼働率への影響等を検討し、非常用電源共用化の見通しを得る。	○安全性、製作建設性、運転・保守補修性及び経済性の観点から非常用電源設備共用化に伴う課題を検討したが、大きな障害となる事項はない見通し。
	コンクリート設計温度引き上げに関する検討 [図 4.4-2]	電中研の研究内容をフォローし、コンクリート設計温度引き上げの可否、或いは必要な R&D 項目について検討する。	○電中研の研究から、コンクリート設計温度を現状の 65°C から 85°C に引き上げ、室温条件を変更することは可能と考えられるが、実用炉の 60 年寿命設計に対応するためには、さらなる R&D が必要。
	格納容器内空調の常用系化に関する検討 [図 4.4-3]	格納容器内空調を常用系化する安全上の考え方を整理する。（外部電源喪失時の建屋温度挙動の解析は次年度以降）	○実証炉の空調停止時温度挙動解析、コンクリート設計温度引き上げの見通し、常用電源の信頼性向上の見通し等を考慮すると、さらなる検討は必要であるが、格納容器内空調の常用系化は可能な見通し。
燃料取扱設備	レールレス走行方式燃料出入機の検討 [図 4.5-1]	高速化、停止位置精度の確保、耐震性、ケーブル処理等について検討し、レールレス走行方式の概念を確定する。	○地震による滑り対応などの課題を有するが、台車構造の工夫や、トロリー給電などの設計対応を取り込んだレールレス走行方式の基本概念を選定した。次年度以降、技術課題の詳細検討やプラントと整合したレールレス走行方式の概念具体化を行う計画。

図 4.1-1	直管型 SG 伝熱管間、管一胴間の熱膨張差の吸収	今年度の成果	管束部の熱流動／座屈評価																				
背景・課題	<p>直管 SG でのクリティカル課題</p> <ol style="list-style-type: none"> 伝熱管構造健全性の確保 水・蒸気側流動不安定の抑制 伝熱管破損伝播挙動の把握 <p><課題 1> 伝熱管間、伝熱管一胴間の熱膨張差の吸収 管束部の熱流動解析による伝熱管間、伝熱管一胴間の 温度差に基づき、構造健全性（伝熱管座屈）を確認</p>	<p>直管 SG 構造図と主要仕様</p> <table border="1"> <tr><td>型式</td><td>縦置有液面直管型</td></tr> <tr><td>交換熱量</td><td>1190MWt</td></tr> <tr><td>伝熱面積</td><td>5382m²</td></tr> <tr><td>伝熱管</td><td></td></tr> <tr><td>外径</td><td>15.9mm</td></tr> <tr><td>肉厚</td><td>1.9mm</td></tr> <tr><td>有効長さ</td><td>28.5m</td></tr> <tr><td>本数</td><td>3805 本</td></tr> <tr><td>胴 内径 (伝熱部)</td><td>2067mm</td></tr> </table>	型式	縦置有液面直管型	交換熱量	1190MWt	伝熱面積	5382m²	伝熱管		外径	15.9mm	肉厚	1.9mm	有効長さ	28.5m	本数	3805 本	胴 内径 (伝熱部)	2067mm	<p>管束に沿った平行流が形成</p> <p>2次 Na 温度、流速分布（プラグなし）</p> <p>プラグ管なし：温度差約 1 K プラグ管 1 本：温度差約 24 K</p> <p>伝熱管 径方向各層での温度分布</p> <p>○座屈応力に相当する許容温度差：13 K プラグ管なしの場合には、管束部全体の温度均一化 ただし、プラグ管がある場合、座屈制限以上の温度差</p> <p>◎対策：プラグ管の切断、補修方法の具体化</p>		
型式	縦置有液面直管型																						
交換熱量	1190MWt																						
伝熱面積	5382m²																						
伝熱管																							
外径	15.9mm																						
肉厚	1.9mm																						
有効長さ	28.5m																						
本数	3805 本																						
胴 内径 (伝熱部)	2067mm																						
取り組み方針	<p>温度差の低減／吸収策</p> <ul style="list-style-type: none"> ○伝熱管間の温度差低減 <ul style="list-style-type: none"> ・穴あきバッフル板の採用（1mピッチ） ○管束部の伝熱計算 <ul style="list-style-type: none"> → 伝熱管間温度差の評価（プラグ管本数の影響含む） ○伝熱管座屈防止の検討 <ul style="list-style-type: none"> → 座屈許容温度差との比較評価 <p>熱流動評価／座屈評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ○2次Na入口プレナムでの流配検討（管束部評価のための境界条件設定） ○管一胴温度差の吸収 <ul style="list-style-type: none"> ・胴ペローズの採用 	<p>熱膨張差 9mm に対する応力値を満足する山数を選定</p> <p>変位に対する成立性</p> <p>1次応力に対する成立性</p> <p>評価及び今後の検討方針</p> <ul style="list-style-type: none"> 直管 SG の管束部熱流動解析により伝熱管温度差を評価し、熱膨張差による座屈可能性を検討するとともに、伝熱管との熱膨張差を吸収できる胴ペローズ構造を選定した。 当面の課題は下記のとおりである。 <ul style="list-style-type: none"> ○ プラグ管の座屈に対する課題と対応策の検討（プラグ管の切断／補修方法の方針） 	<p>胴ペローズ構造の設定</p> <p>Na - 水反応時の内圧制限から山高／ピッチを選定</p> <p>ペローズ仕様</p> <table border="1"> <tr><td>谷径 (mm)</td><td>2227</td></tr> <tr><td>山高 (mm)</td><td>200</td></tr> <tr><td>ピッチ (mm)</td><td>200</td></tr> <tr><td>板厚 (mm)</td><td>20</td></tr> <tr><td>山数</td><td>4</td></tr> <tr><td>肩数</td><td>1</td></tr> <tr><td>全長 (mm)</td><td>800</td></tr> <tr><td>材質</td><td>HCM12A鋼</td></tr> </table> <p>計算条件</p> <table border="1"> <tr><td>金属温度 (°C)</td><td>520</td></tr> <tr><td>軸方向変位 (mm)</td><td>9</td></tr> </table> <p>設定したペローズ構造</p>	谷径 (mm)	2227	山高 (mm)	200	ピッチ (mm)	200	板厚 (mm)	20	山数	4	肩数	1	全長 (mm)	800	材質	HCM12A鋼	金属温度 (°C)	520	軸方向変位 (mm)	9
谷径 (mm)	2227																						
山高 (mm)	200																						
ピッチ (mm)	200																						
板厚 (mm)	20																						
山数	4																						
肩数	1																						
全長 (mm)	800																						
材質	HCM12A鋼																						
金属温度 (°C)	520																						
軸方向変位 (mm)	9																						

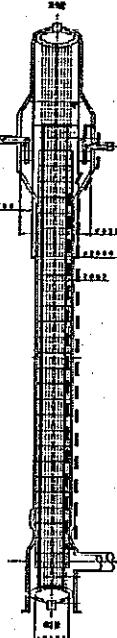
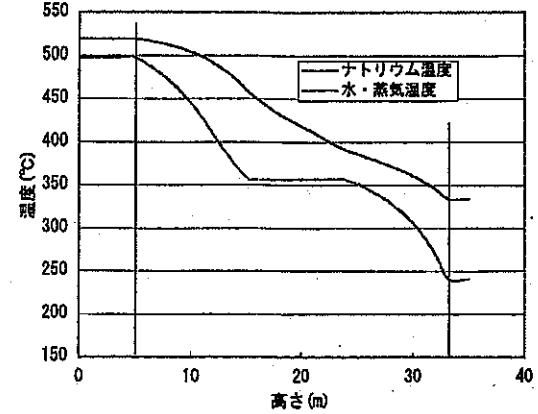
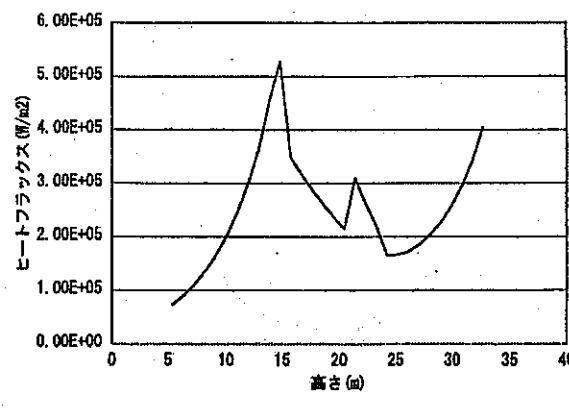
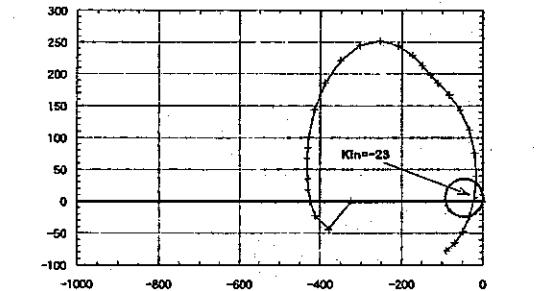
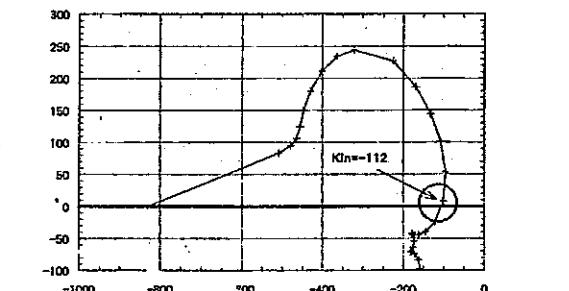
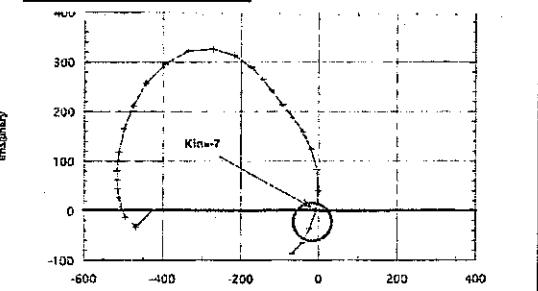
図 4.1-2	直管型 SG 水・蒸気側流動不安定の抑制	今年度の成果	静特性評価結果																
<p>背景・課題</p> <p>直管 SG でのクリティカル課題</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 伝熱管構造健全性の確保 2. 水・蒸気側流動不安定の抑制 3. 伝熱管破損伝播挙動の把握 <p>↓</p> <p><課題2>水・蒸気側流動安定性の評価 ヘリカルコイル型に比べ、伝熱管全長が短く、水・蒸気側の圧損が小さい直管 SG での流動安定性を確認</p>	 <table border="1" style="margin-top: 10px; border-collapse: collapse; width: 100%;"> <tr> <td style="padding: 2px;">型 式</td> <td style="padding: 2px;">縦置有液面 直管型</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">交換熱量</td> <td style="padding: 2px;">1190MWt</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">伝熱面積</td> <td style="padding: 2px;">5382m²</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">伝熱管 外径</td> <td style="padding: 2px;">15.9mm</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">肉厚</td> <td style="padding: 2px;">1.9mm</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">有効長さ</td> <td style="padding: 2px;">28.5m</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">本数</td> <td style="padding: 2px;">3805 本</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">胴 内径 (伝熱部)</td> <td style="padding: 2px;">2067mm</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">直管 SG 構造図と主要仕様</p>	型 式	縦置有液面 直管型	交換熱量	1190MWt	伝熱面積	5382m ²	伝熱管 外径	15.9mm	肉厚	1.9mm	有効長さ	28.5m	本数	3805 本	胴 内径 (伝熱部)	2067mm	<p>今年度の成果</p> <p>静特性評価結果</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>ナトリウム温度 水・蒸気温度</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>ヒートフラックス(W/m²)</p> </div> </div> <p>伝熱管高さ方向の温度、熱流束分布 (定格出力運転時)</p>	<p>流动安定性評価結果</p> <p>給水流量ベース条件</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>定格出力時: $Kin = -23$</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>30%運転時: $Kin = -112$</p> </div> </div> <p>給水流量-10%条件 (コードの評価精度を考慮)</p> <div style="text-align: center;">  <p>定格出力時: $Kin = -7$</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>○ 安定性の判断指標: 入口オリフィス係数 $Kin < 0$</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ いずれの運転条件でも、入口オリフィスなしで流動安定性を確保 ・ 30%運転時の場合、給水サブクール度が大きく定格運転時より安定性が向上 </div> <p>評価及び今後の検討方針</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 直管 SG の水側流動安定性を評価した結果、給水側の質量速度が大きいこと、また入口圧力の高压化（給水サブクール度大）により、入口オリフィスなしで安定性を確保できる見通しを得た。 ■ 当面の課題は下記のとおりである。 <ul style="list-style-type: none"> ○ 給水側の流量配分のばらつき等の検討（伝熱管相互での不安定モード発生がないか） ○ 直管 SG 体系に対する流動安定性解析コードの検証
型 式	縦置有液面 直管型																		
交換熱量	1190MWt																		
伝熱面積	5382m ²																		
伝熱管 外径	15.9mm																		
肉厚	1.9mm																		
有効長さ	28.5m																		
本数	3805 本																		
胴 内径 (伝熱部)	2067mm																		

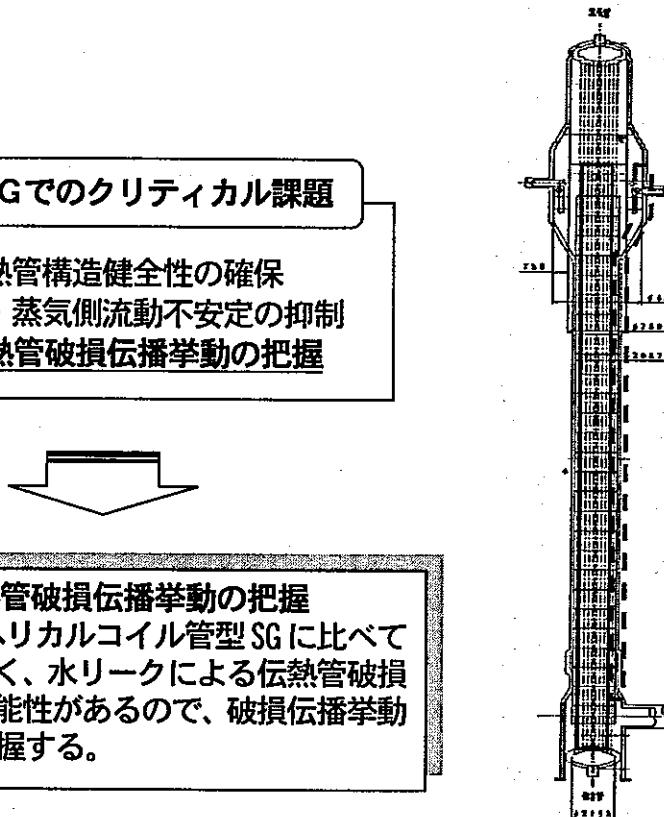
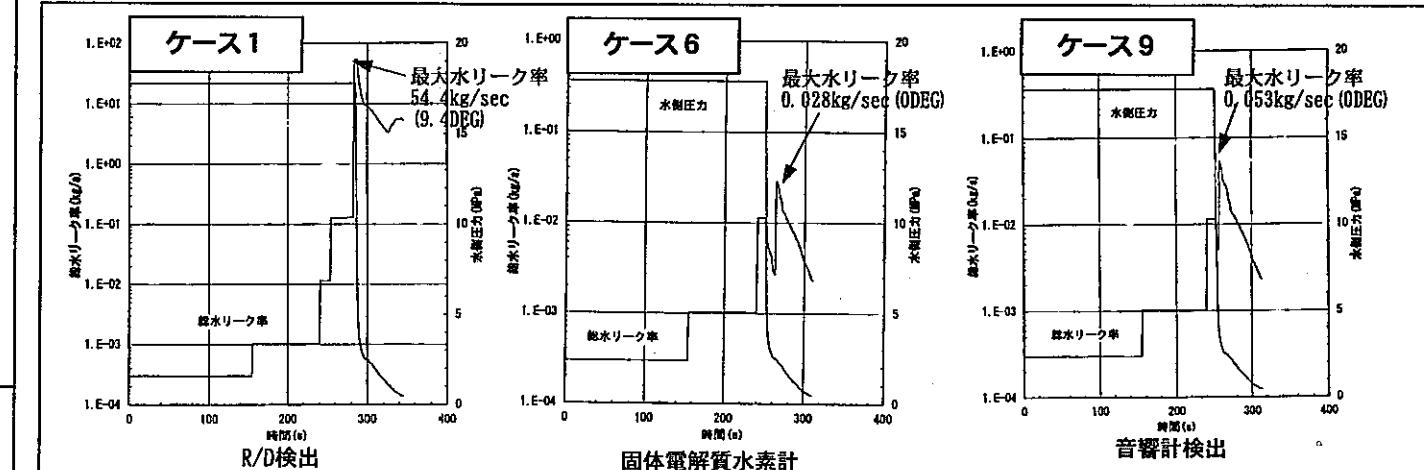
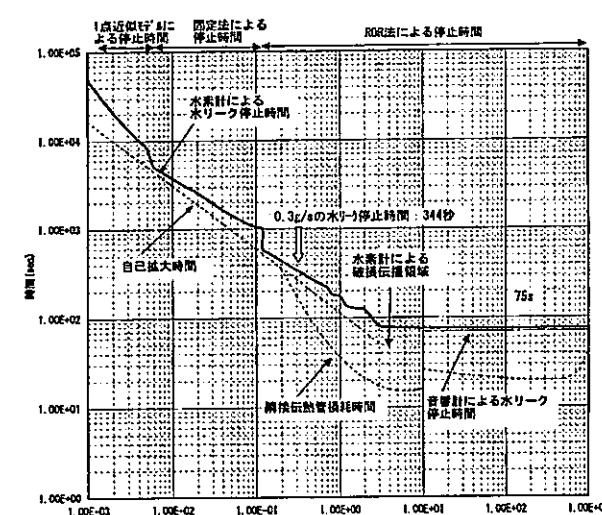
図 4.1-3	直管型 SG 伝熱管破損伝播挙動の把握	今年度の成果																																																																																																		
背景・課題		■ 破損伝播解析																																																																																																		
<p>直管 SGでのクリティカル課題</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 伝熱管構造健全性の確保 2. 水・蒸気側流動不安定の抑制 3. 伝熱管破損伝播挙動の把握 																																																																																																				
 <table border="1"> <tr> <td>型式</td><td>縦置有液面直管型</td></tr> <tr> <td>交換熱量</td><td>1190MWt</td></tr> <tr> <td>伝熱面積</td><td>5382m²</td></tr> <tr> <td>伝熱管 外径</td><td>15.9mm</td></tr> <tr> <td>肉厚</td><td>1.9mm</td></tr> <tr> <td>有効長さ</td><td>28.5m</td></tr> <tr> <td>本数</td><td>3805本</td></tr> <tr> <td>胴 内径 (伝熱部)</td><td>2067mm</td></tr> </table>		型式	縦置有液面直管型	交換熱量	1190MWt	伝熱面積	5382m²	伝熱管 外径	15.9mm	肉厚	1.9mm	有効長さ	28.5m	本数	3805本	胴 内径 (伝熱部)	2067mm																																																																																			
型式	縦置有液面直管型																																																																																																			
交換熱量	1190MWt																																																																																																			
伝熱面積	5382m²																																																																																																			
伝熱管 外径	15.9mm																																																																																																			
肉厚	1.9mm																																																																																																			
有効長さ	28.5m																																																																																																			
本数	3805本																																																																																																			
胴 内径 (伝熱部)	2067mm																																																																																																			
<p><課題 3>伝熱管破損伝播挙動の把握 直管型 SG はヘリカルコイル管型 SG に比べて 伝熱管肉厚が薄く、水リークによる伝熱管破損 が厳しくなる可能性があるので、破損伝播挙動 を解析により把握する。</p>		<p>(注) 初期運転状態は定格出力、リーク想定位置は管束部下部</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>ケース</th><th>初期 リーク率</th><th>リーク 検出</th><th>リーク 検出時間</th><th>水ブロー 時間</th><th>最大水リーク率</th><th>高温ラブチャ 伝熱管本数</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.3g/s</td><td>R/D</td><td>284秒</td><td>60秒</td><td>54.4kg/s (9.4DEG)</td><td>9本</td></tr> <tr><td>2</td><td>7g/s</td><td>R/D</td><td>50秒</td><td>60秒</td><td>45.1kg/s (7.8DEG)</td><td>7本</td></tr> <tr><td>3</td><td>50g/s</td><td>R/D</td><td>44秒</td><td>60秒</td><td>29.8kg/s (5.1DEG)</td><td>5本</td></tr> <tr><td>4</td><td>500g/s</td><td>R/D</td><td>15秒</td><td>60秒</td><td>35.3kg/s (6.1DEG)</td><td>6本</td></tr> <tr><td>5</td><td>1kg/s</td><td>R/D</td><td>19秒</td><td>60秒</td><td>6.8kg/s (1.2DEG)</td><td>1本</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.3g/s</td><td>水素計</td><td>249秒</td><td>60秒</td><td>0.028kg/s (0DEG)</td><td>0本</td></tr> <tr><td>7</td><td>7g/s</td><td>水素計</td><td>10秒</td><td>60秒</td><td>0.07kg/s (0DEG)</td><td>0本</td></tr> <tr><td>8</td><td>500g/s</td><td>水素計</td><td>8秒</td><td>60秒</td><td>8.8kg/s (1.5DEG)</td><td>0本</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.3g/s</td><td>音響計</td><td>251秒</td><td>60秒</td><td>0.053kg/s (0DEG)</td><td>0本</td></tr> <tr><td>10</td><td>7g/s</td><td>音響計</td><td>28秒</td><td>60秒</td><td>2.8kg/s (0DEG)</td><td>0本</td></tr> <tr><td>11</td><td>500g/s</td><td>音響計</td><td>10秒</td><td>60秒</td><td>10.7kg/s (1.8DEG)</td><td>0本</td></tr> <tr><td>12</td><td>500g/s</td><td>水素計</td><td>8秒</td><td>30秒</td><td>0.5kg/s (0DEG)</td><td>0本</td></tr> <tr><td>13</td><td>500g/s</td><td>音響計</td><td>10秒</td><td>30秒</td><td>0.5kg/s (0DEG)</td><td>0本</td></tr> </tbody> </table>	ケース	初期 リーク率	リーク 検出	リーク 検出時間	水ブロー 時間	最大水リーク率	高温ラブチャ 伝熱管本数	1	0.3g/s	R/D	284秒	60秒	54.4kg/s (9.4DEG)	9本	2	7g/s	R/D	50秒	60秒	45.1kg/s (7.8DEG)	7本	3	50g/s	R/D	44秒	60秒	29.8kg/s (5.1DEG)	5本	4	500g/s	R/D	15秒	60秒	35.3kg/s (6.1DEG)	6本	5	1kg/s	R/D	19秒	60秒	6.8kg/s (1.2DEG)	1本	6	0.3g/s	水素計	249秒	60秒	0.028kg/s (0DEG)	0本	7	7g/s	水素計	10秒	60秒	0.07kg/s (0DEG)	0本	8	500g/s	水素計	8秒	60秒	8.8kg/s (1.5DEG)	0本	9	0.3g/s	音響計	251秒	60秒	0.053kg/s (0DEG)	0本	10	7g/s	音響計	28秒	60秒	2.8kg/s (0DEG)	0本	11	500g/s	音響計	10秒	60秒	10.7kg/s (1.8DEG)	0本	12	500g/s	水素計	8秒	30秒	0.5kg/s (0DEG)	0本	13	500g/s	音響計	10秒	30秒	0.5kg/s (0DEG)	0本
ケース	初期 リーク率	リーク 検出	リーク 検出時間	水ブロー 時間	最大水リーク率	高温ラブチャ 伝熱管本数																																																																																														
1	0.3g/s	R/D	284秒	60秒	54.4kg/s (9.4DEG)	9本																																																																																														
2	7g/s	R/D	50秒	60秒	45.1kg/s (7.8DEG)	7本																																																																																														
3	50g/s	R/D	44秒	60秒	29.8kg/s (5.1DEG)	5本																																																																																														
4	500g/s	R/D	15秒	60秒	35.3kg/s (6.1DEG)	6本																																																																																														
5	1kg/s	R/D	19秒	60秒	6.8kg/s (1.2DEG)	1本																																																																																														
6	0.3g/s	水素計	249秒	60秒	0.028kg/s (0DEG)	0本																																																																																														
7	7g/s	水素計	10秒	60秒	0.07kg/s (0DEG)	0本																																																																																														
8	500g/s	水素計	8秒	60秒	8.8kg/s (1.5DEG)	0本																																																																																														
9	0.3g/s	音響計	251秒	60秒	0.053kg/s (0DEG)	0本																																																																																														
10	7g/s	音響計	28秒	60秒	2.8kg/s (0DEG)	0本																																																																																														
11	500g/s	音響計	10秒	60秒	10.7kg/s (1.8DEG)	0本																																																																																														
12	500g/s	水素計	8秒	30秒	0.5kg/s (0DEG)	0本																																																																																														
13	500g/s	音響計	10秒	30秒	0.5kg/s (0DEG)	0本																																																																																														
取り組み方針		 <p>■ R/D 破裂信号のみにクレジットを取った保守的な評価でも、最大水リーク率をヘリカルコイル管型 SG の 1+3 本破損相当の値に抑えることができる見通し。 ■ また、SG 水リーク検出技術の高度化（固体電解質水素計及び音響計を安全保護系並みとする）、水ブロー時間の短縮等により高温ラブチャを排除でき、最大水リーク率を 1+0 本相当以下値に抑えることができる見通し。抑制できる見通し。</p> <p>■ 直管型 SG についても、最大水リーク率をヘリカルコイル管型 SG 並みに抑えられる見通し。 ■ ただし、水リーク検出技術の高度化（ヘリカルコイル管型 SG でも必要）、水ブロー時間の短縮等の課題もあり、これらの実現に向けた R & D が必要。</p> <p>■ ヘリカルコイル管型 SG と同様、SG 水リーク時の安全性確保の見通しあり</p>																																																																																																		
<p>解析対象 一般に、2次系のNaインベントリが大であるほど固体電解質水素計による水リーク検知時間が長くなり、伝熱管破損伝播挙動も厳しくなる。ここでは、保守側の評価を行う観点から、大型炉サイズの直管型 SG（出力 750MWe）を対象に解析を行う。</p> <p>水リーク検出特性 右のセーフティマップに示すように、すべての初期水リーク率に対して、 [水リーク停止時間 > 隣接伝熱管損耗時間] であり、ターゲットウエステージによって隣接伝熱管が開口する以前に水リーク事象を終息させることができない（大型炉サイズではヘリカルコイル管型でも同様の傾向）。</p>		 <p>■ 評価及び今後の検討方針</p>																																																																																																		
<p>代表的な初期リーク率について、高温ラブチャを考慮した破損伝播解析を行い、最大水リーク率を把握する。</p>		<p>- 79 -</p>																																																																																																		

図 4.1-4	2次系システムの総合評価	今年度の成果																
背景・課題																		
<p>平成 13 年度上期に検討した 2 次系システム</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>候補案</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SG 型式</td> <td>直管型 ヘルカルコイル管型</td> <td>オプション 1 オプション 2</td> </tr> <tr> <td>ポンプ型式</td> <td>機械式 電磁式</td> <td>レファレンス 代案</td> </tr> <tr> <td>機器合体/分離</td> <td>分離配置 機器合体</td> <td>採用 不採用</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>・直管型：経済性向上の可能性あり ・直管型：特有の課題が存在 ・電磁式：経済性向上に繋がらない ・電磁式：メンテナンス性向上が期待できる ・機器合体：経済性向上に繋がらない ・機器合体：インペラミサイルに関する懸念がある</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"> </p>				項目	候補案	備考	SG 型式	直管型 ヘルカルコイル管型	オプション 1 オプション 2	ポンプ型式	機械式 電磁式	レファレンス 代案	機器合体/分離	分離配置 機器合体	採用 不採用			・直管型：経済性向上の可能性あり ・直管型：特有の課題が存在 ・電磁式：経済性向上に繋がらない ・電磁式：メンテナンス性向上が期待できる ・機器合体：経済性向上に繋がらない ・機器合体：インペラミサイルに関する懸念がある
項目	候補案	備考																
SG 型式	直管型 ヘルカルコイル管型	オプション 1 オプション 2																
ポンプ型式	機械式 電磁式	レファレンス 代案																
機器合体/分離	分離配置 機器合体	採用 不採用																
		・直管型：経済性向上の可能性あり ・直管型：特有の課題が存在 ・電磁式：経済性向上に繋がらない ・電磁式：メンテナンス性向上が期待できる ・機器合体：経済性向上に繋がらない ・機器合体：インペラミサイルに関する懸念がある																
取り組み方針	<p>選定に向けての要検討事項</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>検討の着眼点</th> <th>要検討事項</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SG 型式</td> <td>経済性 安全性 構造健全性 製作性 運転・保守補修性</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ○直管型：溶接箇所削減（長尺伝熱管使用）によるコスト低減効果 ●直管型：SG 水リーク時の伝熱管破損伝播挙動（要プラグ本数） ●直管型：SG 水リーク時の伝熱管破損伝播挙動（最大水リーク率） ●直管型：伝熱管間、伝熱管一胴間の熱膨張差に対する構造健全性 ○直管型：熱応力に対する構造健全性（管板等） ○直管型：耐震性確保方策（サポート方式等） ○直管型：伝熱管とバッフル板とのフレッティング摩耗 ○直管型：12Cr 鋼製球形管板の製作性（管一管板溶接法、穴廻り加工法等） ●直管型：水・蒸気側の流動不安定領域拡大の可能性 ○直管型：伝熱管 ISI（小口径プローブ、管一管板溶接部検査法等） </td> </tr> <tr> <td>ポンプ型式</td> <td>経済性 構造健全性 製作性 運転・保守補修性</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ○電磁式：ポンプ効率 ○電磁式：耐震性確保方策（サポート方式等） ○電磁式：熱膨張に対する健全性確保方策 ○電磁式：実現可能な最大ポンプ容量（流量及びヘッド） ○電磁式：ポンプの脈動現象 ○電磁式：メンテナンス性の向上効果 </td> </tr> </tbody> </table> <p>(注) 「●」は平成 13 年度下期に概略検討を行う事項</p> <p style="text-align: center;"> </p> <p>これらの事項に関する検討結果を踏まえて SG 型式及びポンプ型式を選定</p>				項目	検討の着眼点	要検討事項	SG 型式	経済性 安全性 構造健全性 製作性 運転・保守補修性	<ul style="list-style-type: none"> ○直管型：溶接箇所削減（長尺伝熱管使用）によるコスト低減効果 ●直管型：SG 水リーク時の伝熱管破損伝播挙動（要プラグ本数） ●直管型：SG 水リーク時の伝熱管破損伝播挙動（最大水リーク率） ●直管型：伝熱管間、伝熱管一胴間の熱膨張差に対する構造健全性 ○直管型：熱応力に対する構造健全性（管板等） ○直管型：耐震性確保方策（サポート方式等） ○直管型：伝熱管とバッフル板とのフレッティング摩耗 ○直管型：12Cr 鋼製球形管板の製作性（管一管板溶接法、穴廻り加工法等） ●直管型：水・蒸気側の流動不安定領域拡大の可能性 ○直管型：伝熱管 ISI（小口径プローブ、管一管板溶接部検査法等） 	ポンプ型式	経済性 構造健全性 製作性 運転・保守補修性	<ul style="list-style-type: none"> ○電磁式：ポンプ効率 ○電磁式：耐震性確保方策（サポート方式等） ○電磁式：熱膨張に対する健全性確保方策 ○電磁式：実現可能な最大ポンプ容量（流量及びヘッド） ○電磁式：ポンプの脈動現象 ○電磁式：メンテナンス性の向上効果 					
項目	検討の着眼点	要検討事項																
SG 型式	経済性 安全性 構造健全性 製作性 運転・保守補修性	<ul style="list-style-type: none"> ○直管型：溶接箇所削減（長尺伝熱管使用）によるコスト低減効果 ●直管型：SG 水リーク時の伝熱管破損伝播挙動（要プラグ本数） ●直管型：SG 水リーク時の伝熱管破損伝播挙動（最大水リーク率） ●直管型：伝熱管間、伝熱管一胴間の熱膨張差に対する構造健全性 ○直管型：熱応力に対する構造健全性（管板等） ○直管型：耐震性確保方策（サポート方式等） ○直管型：伝熱管とバッフル板とのフレッティング摩耗 ○直管型：12Cr 鋼製球形管板の製作性（管一管板溶接法、穴廻り加工法等） ●直管型：水・蒸気側の流動不安定領域拡大の可能性 ○直管型：伝熱管 ISI（小口径プローブ、管一管板溶接部検査法等） 																
ポンプ型式	経済性 構造健全性 製作性 運転・保守補修性	<ul style="list-style-type: none"> ○電磁式：ポンプ効率 ○電磁式：耐震性確保方策（サポート方式等） ○電磁式：熱膨張に対する健全性確保方策 ○電磁式：実現可能な最大ポンプ容量（流量及びヘッド） ○電磁式：ポンプの脈動現象 ○電磁式：メンテナンス性の向上効果 																
<p>評価及び今後の検討方針</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 直管型 SG に特有のいくつかの課題について概略検討を実施した。その結果、検討した範囲では基本的成立性が確保される見通しであることが分かった。 ■ 次年度は、直管型 SG 及び電磁ポンプの技術課題に関する総合的な検討を進め、SG 型式及びポンプ型式を選定して 2 次系システムを確定する。 			<p>検討項目</p> <p>伝熱管間、伝熱管一胴間の熱膨張差に対する構造健全性</p> <p>検討項目</p> <p>水・蒸気側の流動不安定領域拡大の可能性</p> <p>SG 水リーク時の伝熱管破損伝播挙動</p> <p>評価</p> <p>伝熱管の構造健全性確保に関する見通しを得た。ただし、◎プラグ管対策が必要。</p> <p>評価</p> <p>入口オリフィスなしでも安定性を確保できる見通しを得た。ただし、◎直管 SG 体系での流動安定性解析コードの検証が必要。◎伝熱管相互での不安定モード発生がないか、検討が必要。</p> <p>評価</p> <p>SG 水リーク時の最大水リーク率は、適切に抑制できる見通し。ただし、◎固体電解質水素計、音響計の信頼性向上（安全保護系並み）が必要。◎水プローチ時間の短縮のための検討が必要。</p> <p>成績概要</p> <p>熱膨張による伝熱管座屈 指標：許容温度差 < 13°C ・管束端部の熱流動解析の結果、径方向温度差は 1°C。 ・プラグ伝熱管では許容温度を超えるので、プラグ管を切断する等の対策が必要。</p> <p>洞ペローズ構造 ・伝熱管との熱膨張差 (9mm) を吸収する洞ペローズの構造を設定。</p> <p>成績概要</p> <p>給水流量ベース条件 定格出力時: $Kin = -23$</p> <p>初期リーキ率 0.3g/s の場合の解析結果</p> <p>最大水リーク率 0.028kg/s (0DEG)</p> <p>最大水リーク率 0.053kg/s (0DEG)</p> <p>SG 水リーク時の最大水リーク率は、適切に抑制できる見通し。ただし、◎固体電解質水素計、音響計の信頼性向上（安全保護系並み）が必要。◎水プローチ時間の短縮のための検討が必要。</p> <p>評価</p> <p>DBL 低減 指標：最大水リーク率 < 1DEG 相当 ・直管型 SG を対象に破損伝播解析を行い、検出系に固体電解質水素計及び音響計を用いること、水プローチ時間を短縮することにより最大水リーク率を抑えることができる見通しを得た。</p>															

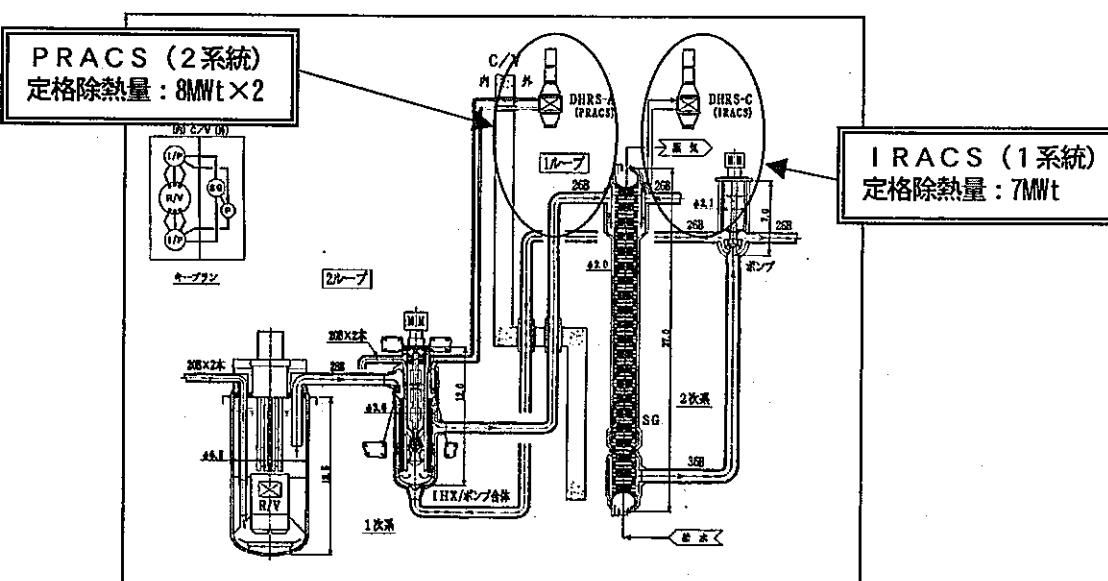
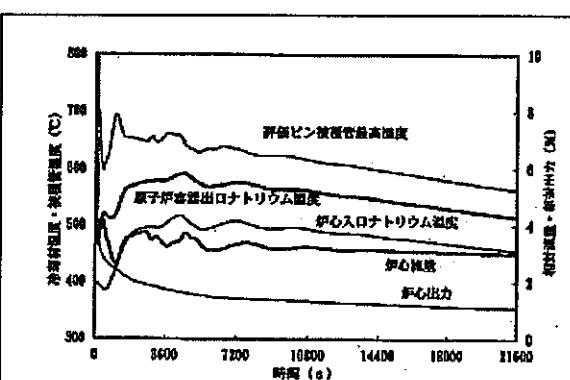
図 4.2-1	自然循環除熱能力の把握	今年度の成果	崩壊熱除去能力																																																																
背景・課題	<p style="text-align: center;">-要検討事項-</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 40%;"> <input type="checkbox"/> PRACS × 2 + IRACS × 1 の崩壊熱除去系構成 <input type="checkbox"/> 完全自然循環型の採用 </div> <div style="width: 40%;"> <input type="checkbox"/> 崩壊熱除去能力は十分か <input type="checkbox"/> 安定した自然循環流動が達成されるか </div> </div>																																																																		
取り組み方針	<p>今年度下期の検討内容</p> <p>プラント動特性解析コード（1次元コード）により崩壊熱除去に関する各種運転モードの過渡解析を行い、下記の事項について検討する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> 炉心・燃料及び原子炉冷却材バウンダリの健全性確保の見通し（除熱能力） <input type="radio"/> 安定した自然循環流動達成の見通し <p>評価事象</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> 事象 II : ① SG 小リーク ② 外部電源喪失 <input type="radio"/> 事象 III : ① SG 小リーク + PRACS ダンパ 1 基開失敗 <input type="radio"/> 事象 IV : ① 外部電源喪失 + PRACS ダンパ 2 基開失敗、 ② PRACS (A) 系 Na 漏えい + 外部電源喪失 + PRACS (B) 系ダンパ 1 基開失敗 <p>(注1) SG 小リーク時にも IRACS 使用可能であることを想定。 (注2) 事象 IV②は、発生頻度の観点からは事象 IV を超えるが、現状の安全評価では事象 IV の起因事象に対しても外部電源喪失と単一故障の重複を要求されるため、本事象を想定。</p> <p>安全性の判断基準</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> 炉心・燃料の健全性 <ul style="list-style-type: none"> ・事象 II : 被覆管最高温度 $\leq 830^{\circ}\text{C}$ CDF ≤ 0.1 ・事象 III、IV : 被覆管最高温度 $\leq 900^{\circ}\text{C}$ CDF ≤ 0.6 <input type="radio"/> 原子炉冷却材バウンダリの健全性 <ul style="list-style-type: none"> ・事象 II、III : 原子炉入口冷却材温度 (C/L 温度) $\leq 550^{\circ}\text{C}$ ・事象 IV : 原子炉出口冷却材温度 (H/L 温度) $\leq 650^{\circ}\text{C}$ 																																																																		
取り組み方針	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">区分</th> <th rowspan="2">想定事象</th> <th colspan="2">プラント運転モード</th> <th colspan="2">1次系最高温度</th> <th rowspan="2">被覆管最高温度</th> <th rowspan="2">被覆管CDF値</th> </tr> <tr> <th>1次系</th> <th>2次系</th> <th>PRACS</th> <th>IRACS</th> <th>H/L</th> <th>C/L</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>II</td> <td>SG 小リーク</td> <td>FC</td> <td>FC</td> <td>2NC</td> <td>1NC</td> <td>553°C</td> <td>526°C</td> <td>700°C</td> <td>8.73E-5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>外部電源喪失</td> <td>NC</td> <td>NC</td> <td>2NC</td> <td>1NC</td> <td>591°C</td> <td>528°C</td> <td>732°C</td> <td>9.37E-3</td> </tr> <tr> <td>III</td> <td>SG 小リーク + PRACS ダンパ 1 基開失敗</td> <td>FC</td> <td>FC</td> <td>1.5NC</td> <td>1NC</td> <td>553°C</td> <td>537°C</td> <td>700°C</td> <td>9.23E-5</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>外部電源喪失 + PRACS ダンパ 2 基開失敗</td> <td>NC</td> <td>NC</td> <td>1NC</td> <td>1NC</td> <td>596°C</td> <td>580°C</td> <td>732°C</td> <td>1.58E-2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>PRACS (A) 系 Na 漏えい + 外部電源喪失 + PRACS (B) 系ダンパ 1 基開失敗</td> <td>NC</td> <td>NC</td> <td>0.5NC</td> <td>1NC</td> <td>632°C</td> <td>583°C</td> <td>732°C</td> <td>9.26E-2</td> </tr> </tbody> </table>			区分	想定事象	プラント運転モード		1次系最高温度		被覆管最高温度	被覆管CDF値	1次系	2次系	PRACS	IRACS	H/L	C/L	II	SG 小リーク	FC	FC	2NC	1NC	553°C	526°C	700°C	8.73E-5		外部電源喪失	NC	NC	2NC	1NC	591°C	528°C	732°C	9.37E-3	III	SG 小リーク + PRACS ダンパ 1 基開失敗	FC	FC	1.5NC	1NC	553°C	537°C	700°C	9.23E-5	IV	外部電源喪失 + PRACS ダンパ 2 基開失敗	NC	NC	1NC	1NC	596°C	580°C	732°C	1.58E-2		PRACS (A) 系 Na 漏えい + 外部電源喪失 + PRACS (B) 系ダンパ 1 基開失敗	NC	NC	0.5NC	1NC	632°C	583°C	732°C	9.26E-2
区分	想定事象	プラント運転モード				1次系最高温度		被覆管最高温度	被覆管CDF値																																																										
		1次系	2次系	PRACS	IRACS	H/L	C/L																																																												
II	SG 小リーク	FC	FC	2NC	1NC	553°C	526°C	700°C	8.73E-5																																																										
	外部電源喪失	NC	NC	2NC	1NC	591°C	528°C	732°C	9.37E-3																																																										
III	SG 小リーク + PRACS ダンパ 1 基開失敗	FC	FC	1.5NC	1NC	553°C	537°C	700°C	9.23E-5																																																										
IV	外部電源喪失 + PRACS ダンパ 2 基開失敗	NC	NC	1NC	1NC	596°C	580°C	732°C	1.58E-2																																																										
	PRACS (A) 系 Na 漏えい + 外部電源喪失 + PRACS (B) 系ダンパ 1 基開失敗	NC	NC	0.5NC	1NC	632°C	583°C	732°C	9.26E-2																																																										
取り組み方針	<p>事象 II ~ IV の範囲で想定される各種運転モードに対して崩壊熱除去能力は十分であり、炉心・燃料の健全性及び原子炉冷却材バウンダリの健全性は確保できる見通し。 (SG 小リーク時にも IRACS を使用できるようにするために前提であることに注意)</p> <p style="text-align: center;">安定な自然循環流動の達成</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>IHX 内の 2 次 Na が PRACS により冷却</p> <p>SG ~ 2 次ポンプ間の上昇配管 (C/L)</p> <p>事象発生後の約 1 時間、IRACS の自然循環ヘッドが立ちにくい状況となる</p> <p>2 次冷却材流量が減少</p> <p>不安定な冷却材温度挙動</p> </div> </div> <div style="margin-top: 20px;"> <p>PRACS と IRACS との相互干渉等により、自然循環流動が一時的に不安定になる可能性がある。 (流動安定化のための対策を検討する必要あり)</p> </div> <p>評価及び今後の検討方針</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 崩壊熱除去特性解析の結果、十分な除熱能力を有することが確認された。 ■ SG 小リーク時にも IRACS の運用が可能となるよう、SG 伝熱管破損伝播の局限に向けた検討を行う必要がある。 ■ 自然循環流動を安定化させるための対策を検討する必要がある。 																																																																		

図 4.2-2	崩壊熱除去系システムの総合評価	今年度の成果																																																
背景・課題																																																		
平成 13 年度上期に検討した崩壊熱除去系システム																																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">候補案</th> <th style="width: 15%;">評価</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>・PRACS×2 系統 ・IRACS×1 系統 ・N2 ガス冷却小型 DHX</td><td>レファレンス</td><td> <ul style="list-style-type: none"> ○ IRACS は直管型 SG を採用した 2 次系との適合性が良好 ○ 2 次系が安全系となるが、コスト上のデメリットは小さい ○ SG 小リーグ時にも IRACS 運用が可能であることが前提 </td></tr> <tr> <td>・PRACS×2 系統 ・RVACS</td><td>不採用</td><td> <ul style="list-style-type: none"> ○ 安全系の範囲を 1 次系に限定できるが、コスト上のメリットは小さい ○ RVACS、メンテナンス冷却系には安全系としての設計が求められる可能性がある </td></tr> <tr> <td>・PRACS×2 系統 ・メンテナンス冷却系</td><td>代案</td><td></td></tr> </tbody> </table>			候補案	評価		・PRACS×2 系統 ・IRACS×1 系統 ・N2 ガス冷却小型 DHX	レファレンス	<ul style="list-style-type: none"> ○ IRACS は直管型 SG を採用した 2 次系との適合性が良好 ○ 2 次系が安全系となるが、コスト上のデメリットは小さい ○ SG 小リーグ時にも IRACS 運用が可能であることが前提 	・PRACS×2 系統 ・RVACS	不採用	<ul style="list-style-type: none"> ○ 安全系の範囲を 1 次系に限定できるが、コスト上のメリットは小さい ○ RVACS、メンテナンス冷却系には安全系としての設計が求められる可能性がある 	・PRACS×2 系統 ・メンテナンス冷却系	代案																																					
候補案	評価																																																	
・PRACS×2 系統 ・IRACS×1 系統 ・N2 ガス冷却小型 DHX	レファレンス	<ul style="list-style-type: none"> ○ IRACS は直管型 SG を採用した 2 次系との適合性が良好 ○ 2 次系が安全系となるが、コスト上のデメリットは小さい ○ SG 小リーグ時にも IRACS 運用が可能であることが前提 																																																
・PRACS×2 系統 ・RVACS	不採用	<ul style="list-style-type: none"> ○ 安全系の範囲を 1 次系に限定できるが、コスト上のメリットは小さい ○ RVACS、メンテナンス冷却系には安全系としての設計が求められる可能性がある 																																																
・PRACS×2 系統 ・メンテナンス冷却系	代案																																																	
取り組み方針	<p>要検討事項 (安全系の範囲を 1 次系に限定した崩壊熱除去系概念)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">項目</th> <th style="width: 90%;">要検討内容</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①系統構成の検討</td><td>Na 冷却中型炉の冷却系設計に適合する崩壊熱除去系システムを検討する。DRACS、PRACS、RVACS、メンテナンス冷却系の最適な組み合わせを設定する。</td></tr> <tr> <td>②必要除熱量及び除熱特性の検討</td><td>上記①で定めた崩壊熱除去系システムについて、事象区分毎に予想される代表的な事象に対する必要除熱量を定量化するとともに、その除熱特性を評価する。</td></tr> <tr> <td>③比較・評価</td><td>上記①で定めた崩壊熱除去系システムの機器・設備概念を具体化して概略物量を算出し、レファレンス設計に対する経済性を評価する。その上で、安全性、経済性、運転性等の観点から、レファレンス設計に対する得失を総合的に評価する。</td></tr> </tbody> </table>	項目	要検討内容	①系統構成の検討	Na 冷却中型炉の冷却系設計に適合する崩壊熱除去系システムを検討する。DRACS、PRACS、RVACS、メンテナンス冷却系の最適な組み合わせを設定する。	②必要除熱量及び除熱特性の検討	上記①で定めた崩壊熱除去系システムについて、事象区分毎に予想される代表的な事象に対する必要除熱量を定量化するとともに、その除熱特性を評価する。	③比較・評価	上記①で定めた崩壊熱除去系システムの機器・設備概念を具体化して概略物量を算出し、レファレンス設計に対する経済性を評価する。その上で、安全性、経済性、運転性等の観点から、レファレンス設計に対する得失を総合的に評価する。	<p>①系統構成の検討</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">想定事象</th> <th style="width: 90%;">対応設備</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>事象 II ~ IV</td><td> PRACS×2 系統 ベーン・ダンバを多重化 (100%×2) A 案 : RVACS ループ型炉への適合性を考慮して、格納容器内空調系をヒートシンクとする閉鎖型の概念 (下図) B 案 : メンテナンス冷却系 2 系統設置し、弁の切り替えにより 6 モジュール間で共用する概念 </td></tr> </tbody> </table> <p>(*) 1 系統使用不可の状況下で他の健全 1 系統の法定点検に入ることを想定</p> <p>②必要除熱量及び除熱特性の検討</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">設備</th> <th style="width: 30%;">除熱容量</th> <th style="width: 60%;">備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PRACS</td><td>11MWt×2 (計 22MWt)</td><td>ベーン・ダンバを 100%×2 としたため、保守側に 50%×2 としたレファレンスに比べ、除熱容量が 1MWt ほど小さくなっている。</td></tr> <tr> <td>RVACS</td><td>3.8MWt</td><td>1 週間後の崩壊熱に相当する除熱容量を設定。</td></tr> <tr> <td>メンテナンス冷却系</td><td>3.8MWt</td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>③比較・評価</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">項目</th> <th colspan="3" style="text-align: center;">レファレンスとの比較</th> </tr> <tr> <th></th> <th style="text-align: center;">A 案 (PRACS×2+RVACS)</th> <th style="text-align: center;">B 案 (PRACS×2+メンテナンス冷却系)</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>安全性 (除熱容量)</td><td> <ul style="list-style-type: none"> ○ 安全系を 1 次系に限定できる ○ 除熱能力は同等 ● ベーン・ダンバを 100%×2 とすることが必須 </td><td> <ul style="list-style-type: none"> ○ 安全系を 1 次系に限定できる ○ 除熱能力は同等 ● ベーン・ダンバを 100%×2 とすることが必須 </td><td></td></tr> <tr> <td>経済性</td><td> <ul style="list-style-type: none"> ○ 崩壊熱除去系システムのコストは約 5% 減少 ● 格納容器内空調系の容量が増加 (安全系とする場合は非常用電源容量も増加) </td><td> <ul style="list-style-type: none"> ○ 崩壊熱除去系システムのコストは約 4% 減少 </td><td></td></tr> <tr> <td>運転性</td><td> <ul style="list-style-type: none"> ○ IRACS と PRACS との干渉が生じない </td><td> <ul style="list-style-type: none"> ○ IRACS と PRACS との干渉が生じない ● 切替弁誤開により 1 次 Na がモジュール間で連通する可能性がある ● 待機時の運用に検討課題がある </td><td></td></tr> <tr> <td>その他</td><td> <ul style="list-style-type: none"> ● 大型炉への適用は困難 </td><td> <ul style="list-style-type: none"> ● 渡り配管が生じるため、基礎板をモジュール毎に分割することが困難となる </td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>(注) ○ : レファレンスより有利 ○ : 同等 ● : 不利 (或いは課題)</p> <p>評価及び今後の検討方針</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 安全系を 1 次系に限定した崩壊熱除去系概念を検討し、レファレンス設計に対する得失を評価した。 ■ 本評価結果を踏まえ、2 次系システム (平成 14 年度末に選定予定) への適合性を考慮して、最終的な崩壊熱除去系システムの選定を行う予定。 	想定事象	対応設備	事象 II ~ IV	PRACS×2 系統 ベーン・ダンバを多重化 (100%×2) A 案 : RVACS ループ型炉への適合性を考慮して、格納容器内空調系をヒートシンクとする閉鎖型の概念 (下図) B 案 : メンテナンス冷却系 2 系統設置し、弁の切り替えにより 6 モジュール間で共用する概念	設備	除熱容量	備考	PRACS	11MWt×2 (計 22MWt)	ベーン・ダンバを 100%×2 としたため、保守側に 50%×2 としたレファレンスに比べ、除熱容量が 1MWt ほど小さくなっている。	RVACS	3.8MWt	1 週間後の崩壊熱に相当する除熱容量を設定。	メンテナンス冷却系	3.8MWt		項目	レファレンスとの比較				A 案 (PRACS×2+RVACS)	B 案 (PRACS×2+メンテナンス冷却系)		安全性 (除熱容量)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 安全系を 1 次系に限定できる ○ 除熱能力は同等 ● ベーン・ダンバを 100%×2 とすることが必須 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 安全系を 1 次系に限定できる ○ 除熱能力は同等 ● ベーン・ダンバを 100%×2 とすることが必須 		経済性	<ul style="list-style-type: none"> ○ 崩壊熱除去系システムのコストは約 5% 減少 ● 格納容器内空調系の容量が増加 (安全系とする場合は非常用電源容量も増加) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 崩壊熱除去系システムのコストは約 4% 減少 		運転性	<ul style="list-style-type: none"> ○ IRACS と PRACS との干渉が生じない 	<ul style="list-style-type: none"> ○ IRACS と PRACS との干渉が生じない ● 切替弁誤開により 1 次 Na がモジュール間で連通する可能性がある ● 待機時の運用に検討課題がある 		その他	<ul style="list-style-type: none"> ● 大型炉への適用は困難 	<ul style="list-style-type: none"> ● 渡り配管が生じるため、基礎板をモジュール毎に分割することが困難となる 	
項目	要検討内容																																																	
①系統構成の検討	Na 冷却中型炉の冷却系設計に適合する崩壊熱除去系システムを検討する。DRACS、PRACS、RVACS、メンテナンス冷却系の最適な組み合わせを設定する。																																																	
②必要除熱量及び除熱特性の検討	上記①で定めた崩壊熱除去系システムについて、事象区分毎に予想される代表的な事象に対する必要除熱量を定量化するとともに、その除熱特性を評価する。																																																	
③比較・評価	上記①で定めた崩壊熱除去系システムの機器・設備概念を具体化して概略物量を算出し、レファレンス設計に対する経済性を評価する。その上で、安全性、経済性、運転性等の観点から、レファレンス設計に対する得失を総合的に評価する。																																																	
想定事象	対応設備																																																	
事象 II ~ IV	PRACS×2 系統 ベーン・ダンバを多重化 (100%×2) A 案 : RVACS ループ型炉への適合性を考慮して、格納容器内空調系をヒートシンクとする閉鎖型の概念 (下図) B 案 : メンテナンス冷却系 2 系統設置し、弁の切り替えにより 6 モジュール間で共用する概念																																																	
設備	除熱容量	備考																																																
PRACS	11MWt×2 (計 22MWt)	ベーン・ダンバを 100%×2 としたため、保守側に 50%×2 としたレファレンスに比べ、除熱容量が 1MWt ほど小さくなっている。																																																
RVACS	3.8MWt	1 週間後の崩壊熱に相当する除熱容量を設定。																																																
メンテナンス冷却系	3.8MWt																																																	
項目	レファレンスとの比較																																																	
	A 案 (PRACS×2+RVACS)	B 案 (PRACS×2+メンテナンス冷却系)																																																
安全性 (除熱容量)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 安全系を 1 次系に限定できる ○ 除熱能力は同等 ● ベーン・ダンバを 100%×2 とすることが必須 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 安全系を 1 次系に限定できる ○ 除熱能力は同等 ● ベーン・ダンバを 100%×2 とすることが必須 																																																
経済性	<ul style="list-style-type: none"> ○ 崩壊熱除去系システムのコストは約 5% 減少 ● 格納容器内空調系の容量が増加 (安全系とする場合は非常用電源容量も増加) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 崩壊熱除去系システムのコストは約 4% 減少 																																																
運転性	<ul style="list-style-type: none"> ○ IRACS と PRACS との干渉が生じない 	<ul style="list-style-type: none"> ○ IRACS と PRACS との干渉が生じない ● 切替弁誤開により 1 次 Na がモジュール間で連通する可能性がある ● 待機時の運用に検討課題がある 																																																
その他	<ul style="list-style-type: none"> ● 大型炉への適用は困難 	<ul style="list-style-type: none"> ● 渡り配管が生じるため、基礎板をモジュール毎に分割することが困難となる 																																																

図 4.4-1	非常用電源（安全系）共用化に関する検討	今年度の成果	非常用電源設備のサポートする安全機能																																								
背景・課題	<p>平成13年度上期に検討した電気設備</p> <p>非常用電源設備（ガスタービン：GT）を6モジュールで集中共用化</p> <p>GT (100%容量) ×12台 (2台/モジュール) → GT (600%容量) ×3台 (注) 無停電電源は共用化しない</p> <p>発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針 指針7. 共用に関する設計上の考慮 安全機能を有する構築物、系統及び機器が2基以上の原子炉施設間で共用される場合には、原子炉の安全性を損なうことのない設計であること。</p> <p>安全性を中心に、共用化に伴う課題を検討しておく必要がある</p>		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">項目</th> <th colspan="2">非常用電源負荷</th> <th rowspan="2">負荷低減要因</th> </tr> <tr> <th>従来設計</th> <th>本プラント</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>崩壊熱除去系</td> <td>大</td> <td>なし</td> <td>・完全自然循環型崩壊熱除去系の採用 (P/M、EMP、送風機等を削除)</td> </tr> <tr> <td>補機冷却系</td> <td>大</td> <td>なし</td> <td>・完全自然循環型崩壊熱除去系の採用 (P/M、EMP等の冷却不要) ・非常用ディーゼル発電器をガスタービンに変更 (冷却不要)</td> </tr> <tr> <td>非常用空調系</td> <td>大</td> <td>小</td> <td>・格納容器内空調系を常用系化 (100hr程度での外電復帰を想定) ・原子炉容器のルーフデッキ冷却、中央制御室空調等は、小容量のスポット空調（安全系）で対応</td> </tr> <tr> <td>その他</td> <td>大</td> <td>中</td> <td>・BOP設備等の統合により合理化を図る</td> </tr> </tbody> </table> <p>非常用電源設備の負担は大幅に低減している</p>	項目	非常用電源負荷		負荷低減要因	従来設計	本プラント	崩壊熱除去系	大	なし	・完全自然循環型崩壊熱除去系の採用 (P/M、EMP、送風機等を削除)	補機冷却系	大	なし	・完全自然循環型崩壊熱除去系の採用 (P/M、EMP等の冷却不要) ・非常用ディーゼル発電器をガスタービンに変更 (冷却不要)	非常用空調系	大	小	・格納容器内空調系を常用系化 (100hr程度での外電復帰を想定) ・原子炉容器のルーフデッキ冷却、中央制御室空調等は、小容量のスポット空調（安全系）で対応	その他	大	中	・BOP設備等の統合により合理化を図る																		
項目	非常用電源負荷		負荷低減要因																																								
	従来設計	本プラント																																									
崩壊熱除去系	大	なし	・完全自然循環型崩壊熱除去系の採用 (P/M、EMP、送風機等を削除)																																								
補機冷却系	大	なし	・完全自然循環型崩壊熱除去系の採用 (P/M、EMP等の冷却不要) ・非常用ディーゼル発電器をガスタービンに変更 (冷却不要)																																								
非常用空調系	大	小	・格納容器内空調系を常用系化 (100hr程度での外電復帰を想定) ・原子炉容器のルーフデッキ冷却、中央制御室空調等は、小容量のスポット空調（安全系）で対応																																								
その他	大	中	・BOP設備等の統合により合理化を図る																																								
取り組み方針	<p>一般的な設備共用化の検討プロセス（注）</p> <p>設備共用化（案） → 代案検討 → 安全性 → 構造健全性 → 製作建設性 → 運転・保守補修性 → 経済性 → 推奨案</p> <p>「安全系局限化によるコスト低減効果の試算（その4）」にて、共用化する主な設備（非常用電源、補機冷却系、タービン等）について、本プロセスに基づく検討を実施。</p>	<p>参考：想定事象毎の電源確保方策</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">電源確保方策</th> <th colspan="2">短時間喪失</th> <th rowspan="2">長時間喪失 (100hr以上)</th> </tr> <tr> <th>外電喪失 (30分以内)</th> <th>外電喪失+ 予備GT保守</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>予備変圧器</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>×</td> </tr> <tr> <td>所内単独運転</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>×</td> </tr> <tr> <td>予備GT</td> <td>○</td> <td>×</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>電源融通（注）</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> </tr> </tbody> </table> <p>（注）電源融通可能な隣接プラントが存在する場合</p> <p>非常用電源設備共用化の炉心損傷発生頻度への影響</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">外部電源喪失時に全交流動力電源喪失に至る確率の比較</th> <th colspan="2">非常用電源の共用</th> <th rowspan="2">あり</th> </tr> <tr> <th>なし</th> <th>各モジュールに100%×2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>非常用電源の構成</td> <td>なし</td> <td>あり</td> <td>600%×3</td> </tr> <tr> <td>モジュール間での電源融通</td> <td>なし</td> <td>あり</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>全交流動力電源喪失に至るモジュール数</td> <td>1モジュール 任意の1モジュール以上 全モジュール</td> <td>(0.30+0.09*R)*P2 (0.30+0.54*R)*P2~(0.35+0.51*R)*P2 0.29*P2~0.34*P2</td> <td>0.50*P2~0.55*P2</td> </tr> </tbody> </table> <p>（注1）P2：二重故障確率、R：融通失敗確率 （注2）多重故障確率は NUREG/CR-4550 に記載のバッテリについての高次の共通原因故障定量化法を基に算出。</p> <p>非常用電源喪失に起因する炉心損傷発生頻度の増加は高々1.7倍程度</p> <p>評価及び今後の検討方針</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 安全性、製作建設性、運転・保守補修性及び経済性の観点から、非常用電源設備共用化に伴う課題を検討したが、大きな障害となる事項はない見通しである。 ■ 電源容量の大幅削減が非常用電源設備共用化の前提条件であり、今後、電源容量削減の可否との関連で検討を継続する必要がある。 	電源確保方策	短時間喪失		長時間喪失 (100hr以上)	外電喪失 (30分以内)	外電喪失+ 予備GT保守	予備変圧器	○	○	×	所内単独運転	○	○	×	予備GT	○	×	○	電源融通（注）	○	○	○	外部電源喪失時に全交流動力電源喪失に至る確率の比較	非常用電源の共用		あり	なし	各モジュールに100%×2	非常用電源の構成	なし	あり	600%×3	モジュール間での電源融通	なし	あり	—	全交流動力電源喪失に至るモジュール数	1モジュール 任意の1モジュール以上 全モジュール	(0.30+0.09*R)*P2 (0.30+0.54*R)*P2~(0.35+0.51*R)*P2 0.29*P2~0.34*P2	0.50*P2~0.55*P2	<p>短時間はもとより、長時間に渡る外部電源喪失でも電源確保の方策はあるので、運用によるリカバリーを検討する余地がある。</p>
電源確保方策	短時間喪失			長時間喪失 (100hr以上)																																							
	外電喪失 (30分以内)	外電喪失+ 予備GT保守																																									
予備変圧器	○	○	×																																								
所内単独運転	○	○	×																																								
予備GT	○	×	○																																								
電源融通（注）	○	○	○																																								
外部電源喪失時に全交流動力電源喪失に至る確率の比較	非常用電源の共用		あり																																								
	なし	各モジュールに100%×2																																									
非常用電源の構成	なし	あり	600%×3																																								
モジュール間での電源融通	なし	あり	—																																								
全交流動力電源喪失に至るモジュール数	1モジュール 任意の1モジュール以上 全モジュール	(0.30+0.09*R)*P2 (0.30+0.54*R)*P2~(0.35+0.51*R)*P2 0.29*P2~0.34*P2	0.50*P2~0.55*P2																																								

図 4.4-2

コンクリート設計温度引き上げに関する検討

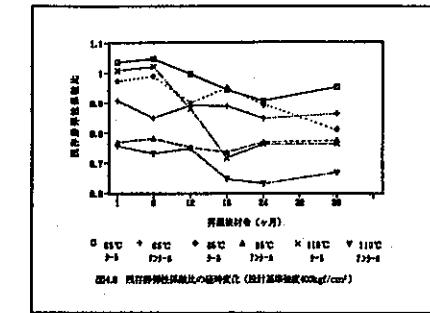
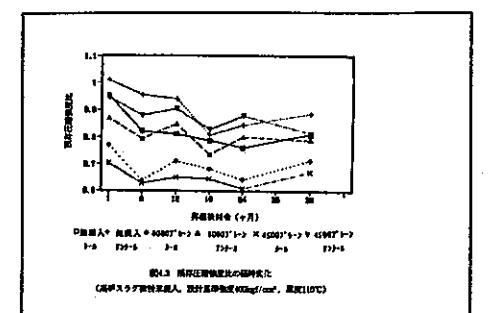
背景・課題

- 現在のコンクリート設計温度は65°Cであり、長期のコンクリート健全性を確保する観点から、従来設計では設計室温を55°C以下に制限し、換気空調系等の設計を行っている。
- コンクリート設計温度を引き上げることができれば、設計室温を高く設定することが可能となり、換気空調系冷却風量を削減してBOP設備の合理化に繋げることが可能となる。

今年度の成果

■既往研究調査

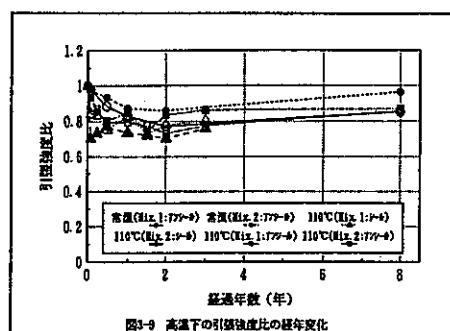
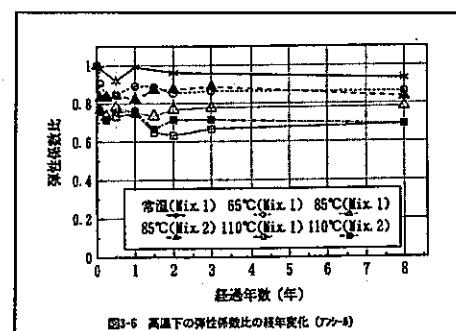
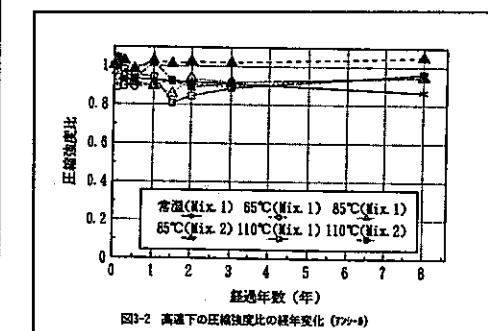
- 「110°Cまでの高温化に3年間さらされたコンクリートの力学特性」(H2年9月、電力中央研究所)
65°Cから110°Cの温度条件におけるコンクリート力学特性(圧縮強度、弾性係数等)の経年変化を把握し、現行のコンクリート制限温度65°Cを85°Cまで引き上げ可能という見通しを得た。



- 「高温下に長期間暴露したコンクリートの力学的性質の変化」(H8年3月、電力中央研究所)

常温、65°C、85°Cおよび110°Cの温度条件で8年間に亘るコンクリート暴露実験を実施し、コンクリートの力学、物理、化学的性質に関する調査した。その結果、

- ・圧縮強度及び弾性係数の経年変化については、暴露開始後1～2年経過した時点で、強度低下が終息し、以後長期的に暴露1～2年時点での強度を保持する。
- ・引張強度については、2年経過時点で低下が収まり、それ以降逆に強度がやや大きくなる傾向が認められたが、実験上のバラツキ程度であり、引張強度についても暴露開始後1～2年で終息すると判断された。



圧縮強度の経時変化

弾性係数の経時変化

引張強度の経時変化

以上より、コンクリート設計温度を現状の65°Cから85°C程度に設定することが合理的であると結論付けている。

評価及び今後の検討方針

- 電力中央研究所の8年間の実験から、コンクリート設計温度を現状の65°Cから85°C程度に引き上げることは可能な見通し。ただし、実用炉の60年寿命設計に対応するためには、さらなるR&Dが必要と考える。なお、電気計装品の設計許容温度見直しも検討されており、その可能性を検討する。

コンクリート設計温度の変更見通し確認

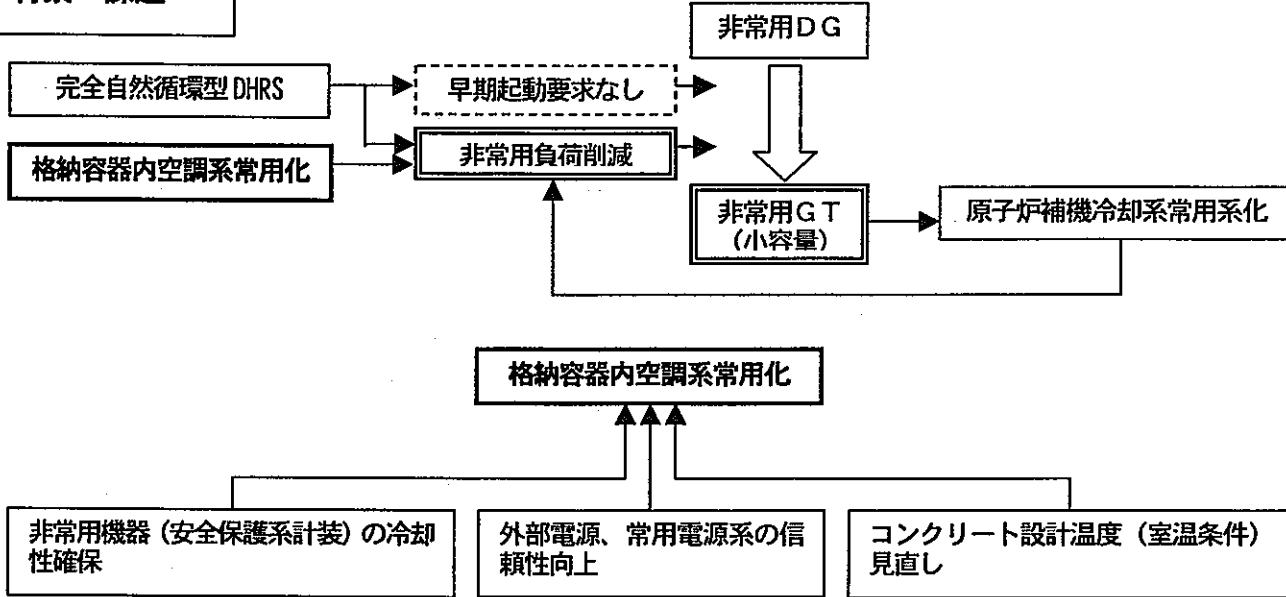
- ・室温条件見直しの妥当性確認
- ・更なる合理化設計を目指した室温条件、設計裕度等評価

図 4.4-3

格納容器内空調の常用系化に関する検討

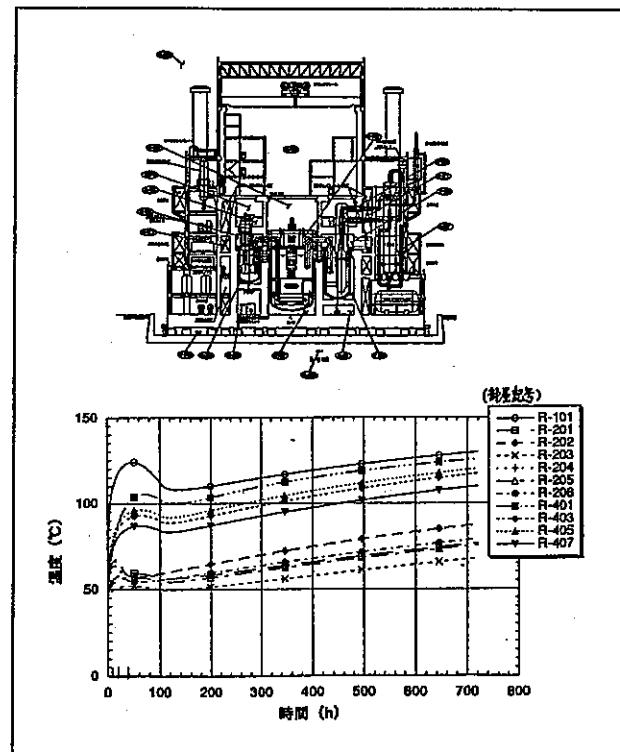
今年度の成果

背景・課題



■格納容器内空調系停止時の温度上昇挙動（右図）

実証炉の雰囲気温度解析結果より、雰囲気温度が最も厳しいエリアにおいて、空調停止後約50時間後に雰囲気温度が85度程度まで上昇。また同様に軸体温度解析結果から、原子炉容器壁のコンクリート温度は、約100時間後に85度に達する。



■コンクリート設計温度等の見直し

電力中央研究所における研究から、コンクリート設計温度については、従来の65°Cから85°C程度まで引上げられる見通し有り。

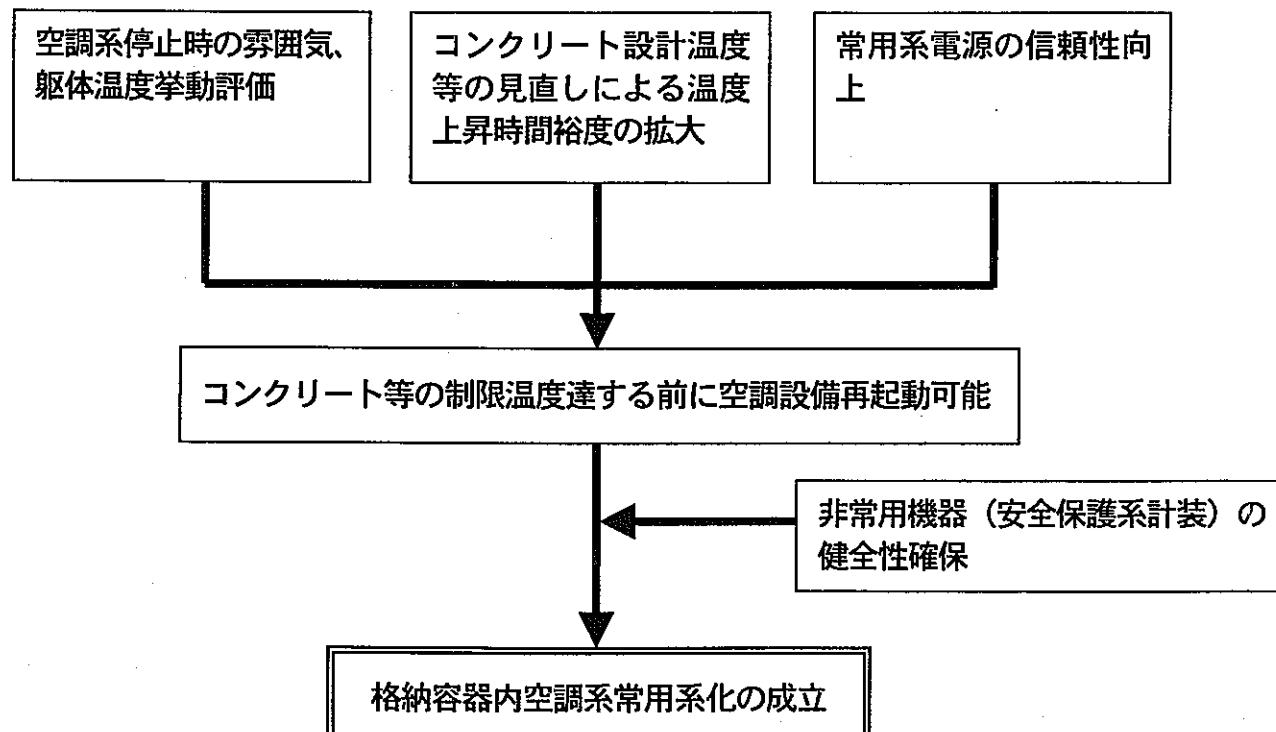
■常用系電源の信頼性向上

国内の送電線事故事例から、30分以上継続する外部電源喪失の発生頻度は低い（全体の4.6%）。また、下表に示すように、短時間はもとより長時間に渡る外部電源喪失でも、予備変圧器の使用、所内単独運転への移行、非常用GT予備機の起動、隣接プラントからの電源融通等、コンクリート温度が制限値を超える前に電源を確保し、空調を再起動する方策があるので、運用によるリカバリーを検討する余地がある。

電源確保方策	短時間喪失			長時間喪失 (100hr 以上)
	外電喪 (30分以内)	外電喪+ 予備GT保守	全交喪 (30分程度)	
予備変圧器	○	○	×	×
所内単独運転	○	○	×	×
予備GT	○	×	○	○
電源融通（注）	○	○	○	△

（注）電源融通可能な隣接プラントが存在する場合

取り組み方針

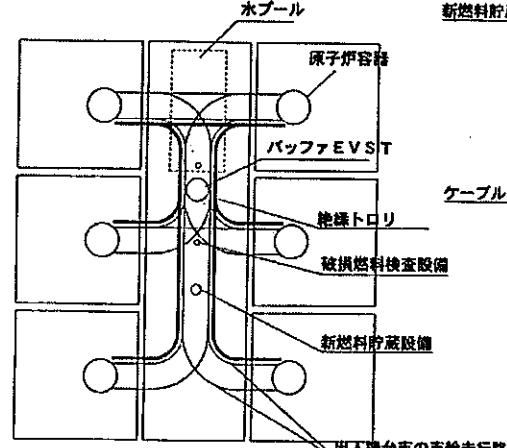
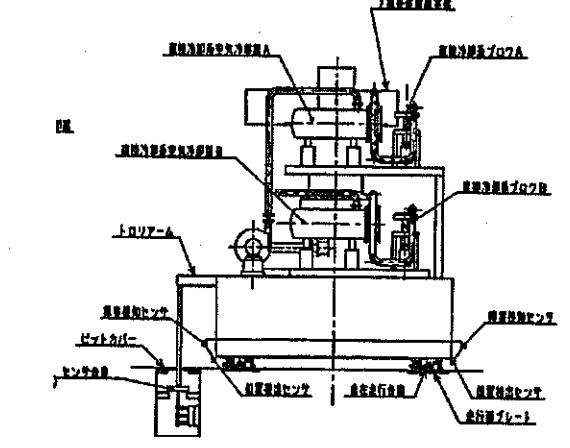


■非常用機器（安全保護系計装）の健全性確保

非常用機器に対しては、スポット空調等により冷却可能な見通し。

評価及び今後の検討方針

- 空調停止時の建屋温度の上昇が緩やかであること、コンクリート設計温度の見直しにより空調停止時の軸体温度制限温度までの時間余裕が増すこと、常用系電源の信頼性向上が期待できること等により、格納容器内空調系を常用系化できる見通しがある。
- 今後は実用炉体系での空調系停止時温度挙動解析、コンクリート設計温度上昇の見通し確認等を行い、格納容器内空調系常用系化の成立性を確認していく。

図 4.5-1	レールレス走行方式燃料出入機の検討	今年度の成果									
背景・課題	<p>一背景・課題一</p> <ul style="list-style-type: none"> モジュール対応の燃料出入機概念の提案 各モジュールへのアクセスを考慮すると、従来の燃料出入機では、基数、物量の増加が懸念 <p>既往検討に基づくレールレス方式による物量削減効果（例）</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>対象¹⁾</th> <th>基数²⁾</th> <th>物量(ton)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>従来型</td> <td>3</td> <td>326</td> </tr> <tr> <td>レールレス</td> <td>1</td> <td>160</td> </tr> </tbody> </table> <p>注1)EVST貯蔵方式を対象 注2)原子炉-EVST間の燃料出入機・基数</p> <p>レールレス燃料出入機の技術課題の抽出と設計対応の検討</p> <ul style="list-style-type: none"> 物量は低減するが、耐震対応、高速及び位置決め精度の確保、滑り・転倒防止対応、給電・制御方法などの課題あり <p>一検討の方向性一</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 基の燃料出入機による移送を前提に、レールレス方式（トロリー、又は、バッテリ）を選定 左記の課題に対する設計対応を検討して、成立性の見通しを評価 	対象 ¹⁾	基数 ²⁾	物量(ton)	従来型	3	326	レールレス	1	160	<p>(1) レールレス燃料出入機の技術課題の検討</p> <ul style="list-style-type: none"> 耐震対応（浮き上り防止） <ul style="list-style-type: none"> 1G以下の上下方向加速度に対応する走行台車の固有値範囲は、25Hz以上、又は、1.25Hz以下 走行台車の構造上、出入機本体のばね結合により1.25Hz以下の固有値を達成可能な見通しのため、これを採用 高速及び位置決め精度の確保（走行速度：10m/min、位置決め精度：数mm） <ul style="list-style-type: none"> マイクロドーリの走行速度は5m/minであるが、走行装置の大型化により10m/min程度の高速化は対応可能 既往技術ベースの高精度型センサの使用により、数mm程度の位置決め精度を確保できる見通し 滑り・転倒防止 <ul style="list-style-type: none"> 上記の浮き上り防止対応も考慮して、地震時の転倒防止が可能なように適切な燃料出入機形状、固有値を設定 地震時の滑り防止対応は困難であるが（摩擦係数を担保する必要あり）、万一の滑り発生を想定しても、走行台車の移動範囲は小さく、滑りによる影響を緩和できる可能性あり 給電・制御方式 <ul style="list-style-type: none"> バッテリ方式は、ケーブル不要の長所を有するが、異常時ガス冷却などのバッテリ容量大（約2000Ah以上）、一方、トロリー方式は、トロリー線を配置する必要はあるが、モジュール配置への対応可能。絶縁トロリーの採用や、ピットへの埋込みなどにより火災の発生防止、影響緩和も可能なため、これを採用。 <p>(2) レールレス燃料出入機の概念構築</p> <p>上記の技術課題対応をもとに、浮き上り・転倒防止対応、トロリー給電方式などを取込んだレールレス燃料出入機の概念を構築。</p>
対象 ¹⁾	基数 ²⁾	物量(ton)									
従来型	3	326									
レールレス	1	160									
取り組み方針	<p>モジュール炉における燃料出入機の特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> 燃料出入機は、各モジュールと燃料取扱設備にアクセスする必要あり 現状技術では、複数の燃料出入機により対応可能であるが、物量、配置スペース増加の傾向 一方、1基の燃料出入機により対応する場合には、可動レールの設置（浮き上り防止機構などを含む）、広範囲なケーブル引廻しなどの対応困難 <p>注1) シングル及びツインプラントでも、レール、ケーブル引廻し機構の削除により合理化可能な見通し</p> <p>基本方針</p> <ul style="list-style-type: none"> 物量低減をねらって、1基のレールレス方式燃料出入機により各モジュール及び燃料取扱設備にアクセス <p>レールレス燃料出入機の候補案</p> <ul style="list-style-type: none"> トロリー方式 バッテリ方式 <p>主要な技術課題への対応方針</p> <ul style="list-style-type: none"> 耐震対応（浮き上り防止）：上下方向加速度が1G以下となるように、走行台車の構造工夫 高速及び位置決め精度の確保：他産業での既往設計例の取り込み 滑り・転倒防止対応：地震時の滑り及び転倒防止が可能となるように走行台車の構造工夫（万一、滑った場合の対応を含む） 給電・制御方式：トロリー、バッテリ方式の特質を比較検討し、いずれかの方式を選定 <p>レールレス燃料出入機方式の成立性の見通し評価</p>	 <p>レールレス燃料出入機の走行範囲</p>  <p>トロリー方式・レールレス燃料出入機の概念図</p> <p>評価及び今後の検討方針</p> <ul style="list-style-type: none"> レールレス燃料出入機について、当初計画の通り、耐震対応や、給電・制御方式などの技術課題の抽出、設計対応の検討を行い、成立性の見通しを有することを明らかにした。 当面の課題は下記のとおりである。 <ul style="list-style-type: none"> レールレス燃料出入機の構造検討（必要に応じて簡易ケーブリングラック方式も視野に入れる） モジュール配置への取り込み 									

5. 結 言

実用化戦略調査研究フェーズⅡの初年度に当たる平成13年度に実施したNa冷却中型モジュール炉の設計研究の研究成果をまとめた。平成13年度の設計研究では、経済性目標（建設コスト20万円/kWe以下、等）を満足し、概念成立性に関する基本的な見通しを有するNa冷却中型モジュール炉のプラント概念を構築した。同時に、本概念の成立性見通しを確実にするために、さらに検討すべき課題も明確にした。

今後は、これらの課題を解決するとともに、フェーズⅡ終了時の概念絞り込みに向けて、要素試験の成果等を適宜反映しつつ予備的概念設計を進め、プラント基本概念を明確化するとともに、概念成立性の見通し、経済性目標達成見通しを確たるものとして行く計画である。

6. 略語一覧

BOP	Balance of Plant
SG	Steam Generator
PRACS	Primary Reactor Auxiliary Cooling System
IRACS	Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System
IHX	Intermediate Heat Exchanger
DHX	Decay Heat Exchanger
RVACS	Reactor Vessel Auxiliary Cooling System
A/C	Air Cooler
BDBE	Beyond Design Basis Event
DBL	Design Basis Leak
EVST	External Vessel Storage Tank
FAIDUS	Fuel Assembly with Inner Duct Structure
ABLE	Axial Blanket Elimination
DDI	Duct-Duct Interaction
PAMR	Post Accident Material Relocation
PAHR	Post Accident Heat Removal
UIS	Upper Internal Structure
C/T	Cold Trap
NPSHav	Net Pump Suction Head available
TOP	Transient Over Power
LOF	Loss of Flow
C/R	Control Rod
DBE	Design Basis Event
LBB	Leak Before Break
ISI	In Service Inspection
NSSS	Nuclear Steam Supply System
EHC	Electro Hydraulic Control
PSA	Probabilistic Safety Assessment

7. 参考文献

- (1) JNC TY9400 2001-012 FBR システム技術検討書 -平成12年度報告- (研究報告) (2001)
- (2) JNC TN9400 2001-107 中型炉概念創出WG活動報告書 (2001)
- (3) Kato, M., et al. "Design study of the seismic-isolated reactor building of demonstration FBR plant in Japan", SMIRT-13, Vol.III: 579-584 (1995)
- (4) 電力中央研究所研究報告 : U90034 110℃までの高温下に3年間さらされたコンクリートの力学特性 (1990)
- (5) 電力中央研究所研究報告 : U95037 高温下に長期間暴露したコンクリートの力学的性質の変化 (1996)