



もんじゅの配置設計における モデルエンジニアリングの活用

山屋 佳昭 柳沢 務*
井上 達也 長谷川 操

動力炉建設運転本部
*高速増殖炉もんじゅ建設所(現企画部)

資料番号：70-4

Application of the Model Engineering Method for the
"Monju" Layout Design

Yoshiaki Yamagishi Tsumomu Yanagisawa*
Tatsuya Inoue Misao Hasegawa
(Reactor Construction and Operation Project,
*Monju Construction Office, Presently, General Planning
Division.)

高速増殖炉もんじゅ発電所のプラント配置設計においては、信頼性の確保、作業の効率化の観点から軽水炉プラントですでに活用されている、立体モデルを作りながら設計を行うモデルエンジニアリングの手法を導入した。これにより複雑・多岐にわたる各種配管、ダクト、トレイ等の合理的レイアウト設定、干渉チェック、運転・操作性、保守・補修性のチェック等、質の高い配置エンジニアリング業務が推進でき、大きな成果を収めることができた。本モデルは、設計終了後は現地に移管し、据付工事等に活用を図る計画をしている。

1. はじめに

1.1 原子力発電プラントにおけるプラント設計の特徴

原子力発電プラントでは、放射線に対する遮蔽や耐震のための厚いコンクリートの床や壁をもった建物内に膨大な量の機器、配管、空調ダクトおよびケーブルトレイなどが配置されている。これら機器、配管などの配置設計を行うにあたっては、それらの機能確保、保守点検のスペースおよび据付け時の作業性を考慮し、かつ従業員の放射線被ばく低減を図った上、各部について詳細な応力解析を行い、構造強度が十分であることを確認する必要がある。これらの要求を満足する合理的な配置設計を行うため、少数の専門技術者が配置設計図を作成、検討する従来の方法に代わり、立体的モデルを使い多数の関係者による設計検討を行う、いわゆるモデルエンジニアリング手法を導入することにより、プラント設計は質的に格段と向上することとなった。すなわちモデルの導入により、機器、配管、ケーブルトレイ、空調ダクトなどのルートや建物躯体などが視覚化できるため、同時に多数の関係者によるプラント全体のスペース利用の効率化や機器などの機能、運転・

保守性、安全上の分離などの検討が容易となる。

1.2 軽水炉発電プラントにおける配置・配管設計手法の推移

軽水炉発電プラントも初期においては機器、配管、空調ダクト、ケーブルトレイ等の総合調整を総合機器配管配置図(以下「コンポジット図」と呼ぶ)のみで行っていた。

次の世代(昭和50年代前半)になると、これらの設備の総合調整は初期と同様にまずコンポジット図で行い、コンポジット図における設計が完了した段階で縮尺モデルを作成し、干渉の発見を行うという「チェックモデル」が導入されることになる。

2次元図面上での発見が難しい干渉チェックの強化がこのモデルの主目的であり、この結果に基づきコンポジット図を改訂し詳細設計を進めていく方法である。

3次元モデルが従来の2次元コンポジット図と比べて、総合調整能力、設計の把握という点で非常に優れていることが認識されて、その後系統図、配置図、基本ルート図といった上流の設計図書から直接モデル上で総合調整、設計を行うモデルエンジニア

リング手法（「デザインモデル」手法）へと発展してきている。最近では、さらに電算機ハードウェアの発達に伴い、モデル上の設計結果を電算機に入力して各種図面の作図・リスト類の作成がなされている。このような電算機を用いたデータの一元化により設計の品質向上が図られるとともに、設計情報を早期に下流側へ伝達できるようになってきている。また、設計の変更が生じた場合にもただちに対応できるようになってきている。

1.3 モデルエンジニアリングの効用

プラント設計にモデルを導入することにより、次のような効用が期待できる。

(1) プラント設計の効率化

モデルの導入により、次のようなプラント設計の効率化が可能となる。

- 1) 機器、配管、ケーブルトレイ、空調ダクトの配置、建物躯体などが三次元的に視覚化でき、また各設計共通の基本条件が確認でき、総合調整が容易となる。
- 2) 干渉問題やスペース不足などの設計未調整箇所の発見が容易になり、見過しによるそれが大幅に減って配置設計の質の向上につながる。

さらに、より具体的な効用としては次のようなものがある。

- 1) ISI (In-Service Inspection) を含め、日常または定期的な保守点検に必要なスペースやアクセ

スルートの検討が容易となる。

- 2) 非常時の避難ルートおよび機器の搬出入についても最適なルートが検討できる。
- 3) 安全上の分離、溢水対策、火災対策などの検討が容易となる。
- 4) 照明、空調、通信設備、消火設備などを効果的に決定できる。
- 5) 同時に検討すべき図面を大幅に減らすことができる。
- 6) 日常または定期的な検査の計画的な立案ができる。
- 7) 運転員等のトレーニングに利用できる。

(2) 建設現場での利用

モデルはプラント設計終了後は、建設現場で活用できる。

- 1) モデルの導入により、プラント設計の質的向上を活用して建設現場における調整、改造、変更の作業が大幅に減少する。そのため、無用のトラブル、工程の遅れ等が減少する。
- 2) 工事要領、手順の詳細検討が容易となる。
- 3) 現場の工事担当エンジニアが、工事完了時のイメージを容易に把握でき、工程管理などに有用である。

2. もんじゅ発電所の概要

(1) 主要系統構成

もんじゅ発電所の冷却系は、いわゆるループ型で

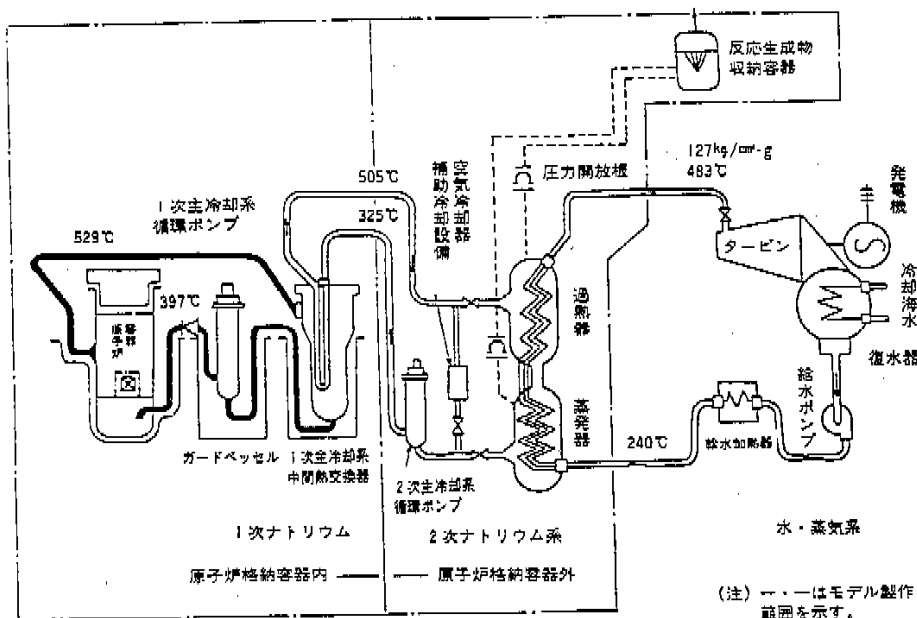


図1 主系統概要図

構成される系統から成る。原子炉の熱を受ける1次系および中間熱交換器を介して1次系から熱を受ける2次系には、それぞれ冷却材としてナトリウムが使用される。3次系は水・蒸気系であり、PWRタイプの軽水炉の2次系と同じである。3次系は蒸気発生器を介して2次系より熱が伝達される。図1に主要系統の概要（3ループ構成のうち1系統のみ）を示す。

(2) プラント配置概要

1) プラント概要

もんじゅ発電所敷地内の主要な施設としては原子炉建物、原子炉補助建物、メンテナンス・廃棄物処理建物、タービン建物、ディーゼル建物等の建物および取放水設備等の構築物がある。

2) 全体配置

もんじゅ発電所の全体配置を図2に示す。敷地中央部をEL+42.8mおよびEL+21.0m（一部EL+31.0m）に敷地造成し、主要施設の敷地としている。

EL+42.8mの整地面に北側よりメンテナン

ス・廃棄物処理建物、原子炉建物を取り囲む原子炉補助建物を設備し、EL+21.0mの整地面にディーゼル建物、タービン建物等を設置している。

復水器冷却水は敷地前面港湾内より取水し、放水ピットを経て港湾外に放出する。なお、建設時の重量物の搬入等のため、敷地前面に港湾を設けている。

3) 建物および構築物

各建物および構築物は、地震、台風などを考慮して、これらによって被害を生じないように設計施工する。特にナトリウム機器を収納している建物は、ナトリウムによる火災に対する安全性を考慮している。

原子炉建物、原子炉補助建物およびディーゼル建物等の主要建物および構築物の基礎は、堅固な岩盤上に直接支持するかまたは、岩着する地業を介して支持している。

建物内には数箇所避難階段を設置し、これに通じ、かつ単純・明確・永続性のある標識のついた避難通路を設ける。

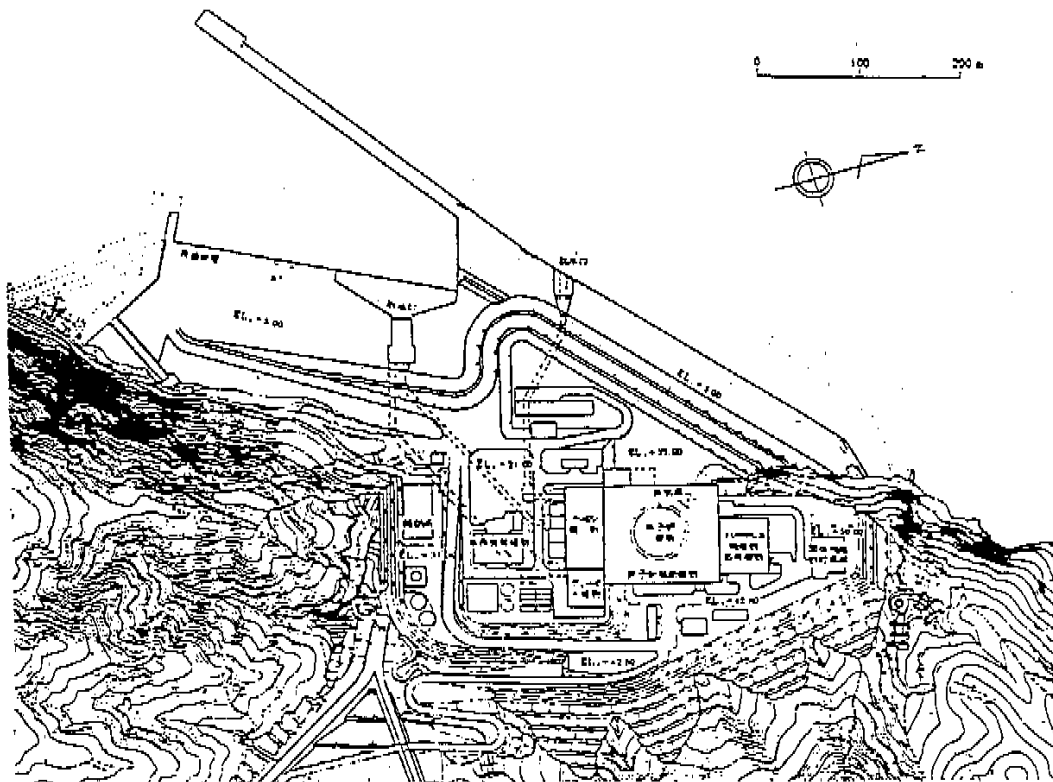


図2 もんじゅ発電所全体図

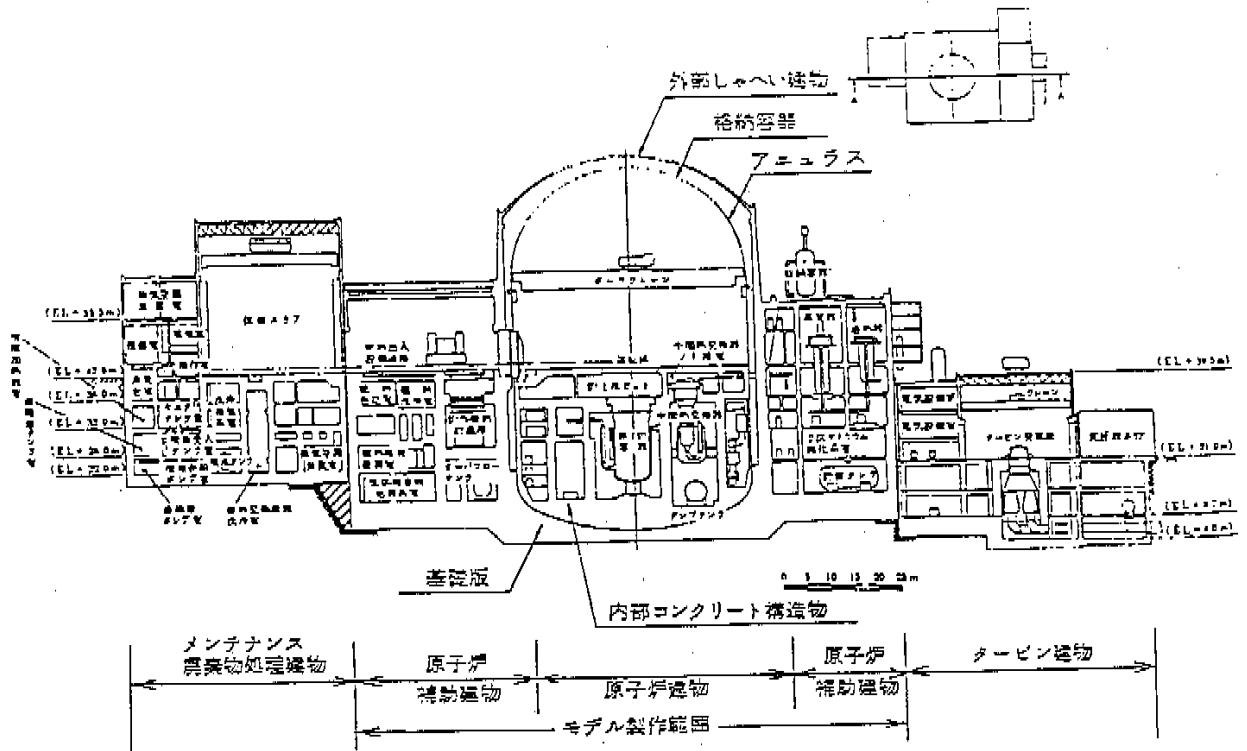


図3 主要建物断面図(A-A断面)

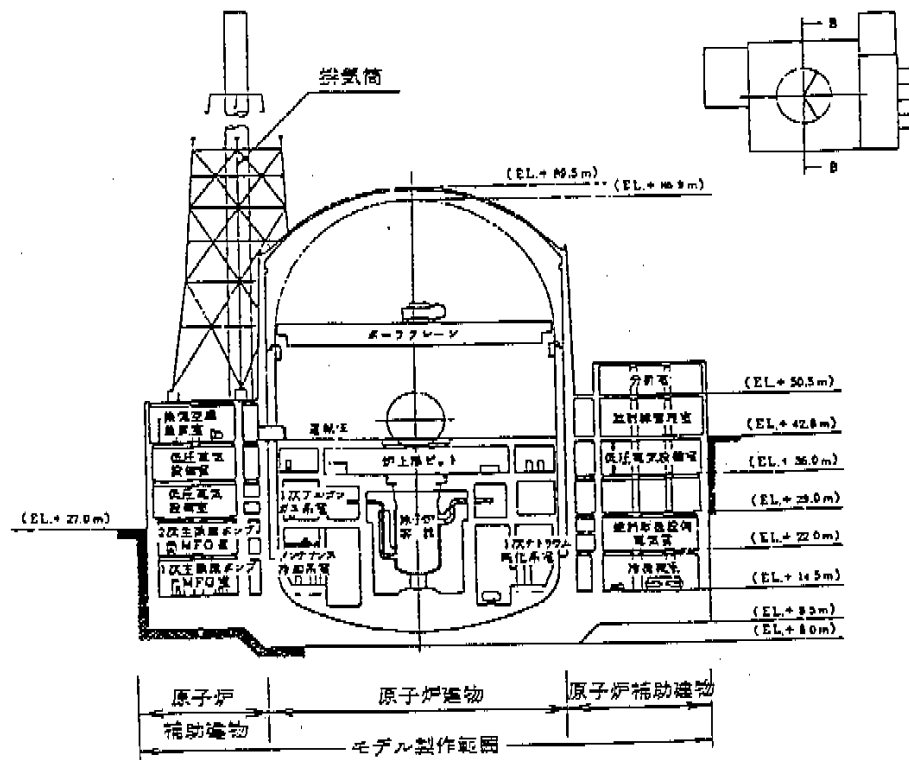


図4 主要建物断面図(B-B断面)

もんじゅ発電所では、主要建物（原子炉建物および原子炉補助建物）を対象にエンジニアリングモデルを作成したので以下にこの2建物について概要を述べる。

i) 原子炉建物（図3、4参照）

原子炉建物は、外部遮蔽建物、原子炉格納容器、内部コンクリート構造物および基礎版からなっており、原子炉容器、1次主冷却系設備、1次ナトリウム補助設備、換気空調設備等を収納している。

外部遮蔽建物は、原子炉格納容器の円筒部および上部半球部をおおう内径約52.5m、地上高さ約46mの鉄筋コンクリート造で、原子炉格納容器円筒部との間にはアニュラスを形成し、二重格納の機能を有している。

原子炉格納容器は、内径約49.5m、全高約79mの上部半球、下部皿形鏡円筒型の鋼板溶接構造で、基礎を介して堅硬な岩盤上に設置されている。

原子炉格納容器内運転床面は、EL+43.0mである。

原子炉格納容器への出入口として通常用エアロック、非常用エアロックおよび機器搬入口を設け、また格納容器上部には、ポーラクレーンを装備している。

内部コンクリート構造物は、原子炉格納容器内機器を収納支持している。

ナトリウムを保持する機器を収納する部屋には鋼製ライナを設け、ナトリウムとコンクリートとの直接接触を防止している。

鋼製ライナはコンクリート壁に埋め込んだアンカに固定した鋼板で、想定する事故時の高温に耐えるように構造設計を行っている。

また、出力運転時、多量の放射性ナトリウムを

保持する機器を収納する部屋は、窒素ガス雰囲気として、万一高温のナトリウムが漏洩した場合にも空気との直接接触を防止し、火災の抑制をはかるような構造としている。

基礎版はEL+5mの堅硬な岩盤上に設置された鉄筋コンクリート造である。

ii) 原子炉補助建物（図3、4参照）

原子炉補助建物は平面約98m×113mで、2次主冷却系設備、補助冷却設備、電気設備、1次アルゴンガス系設備、廃棄物処理設備、燃料受入貯蔵設備、換気空調設備、補機冷却水設備等を収納している。

原子炉補助建物の主要構造は鉄筋コンクリート造で、基礎版はEL+8.5mの堅硬な岩盤上に設置されており、原子炉建物の基礎版と共通である。原子炉補助建物は原子炉建物を取り囲んでおり、原子炉建物と同様、ナトリウム機器を収納する部屋には、万一のナトリウム漏洩を想定し、ナトリウムとコンクリートとの反応防止を目的として鋼製ライナを設けている。また建物の一部にはステンレス鋼でライニングされた燃料池が備付けられる。

排気筒は鋼板製で、原子炉補助建物の屋上に設置し、排気口地上高さは約110mである。

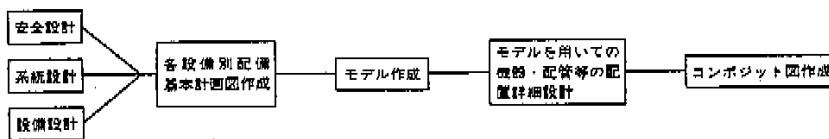
3. もんじゅの配置設計におけるモデルエンジニアリングの活用

3.1 モデルエンジニアリング手法と設計手順

(1) モデルエンジニアリング手法

モデルエンジニアリングの手法としては、従来どおり図面を作り、その後モデルを製作して設計内容を確認するチェックモデルとしての利用法と、まず

1. デザインモデル手法による手順(モデル先行型)



2. チェックモデル手法による手順(図面先行型)

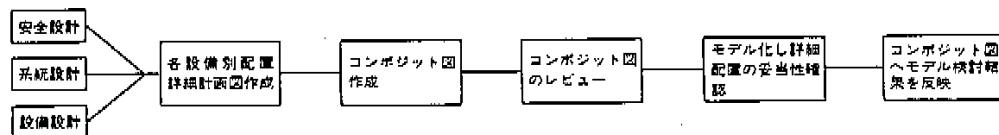


図5 もんじゅの配置設計におけるモデルエンジニアリング手法

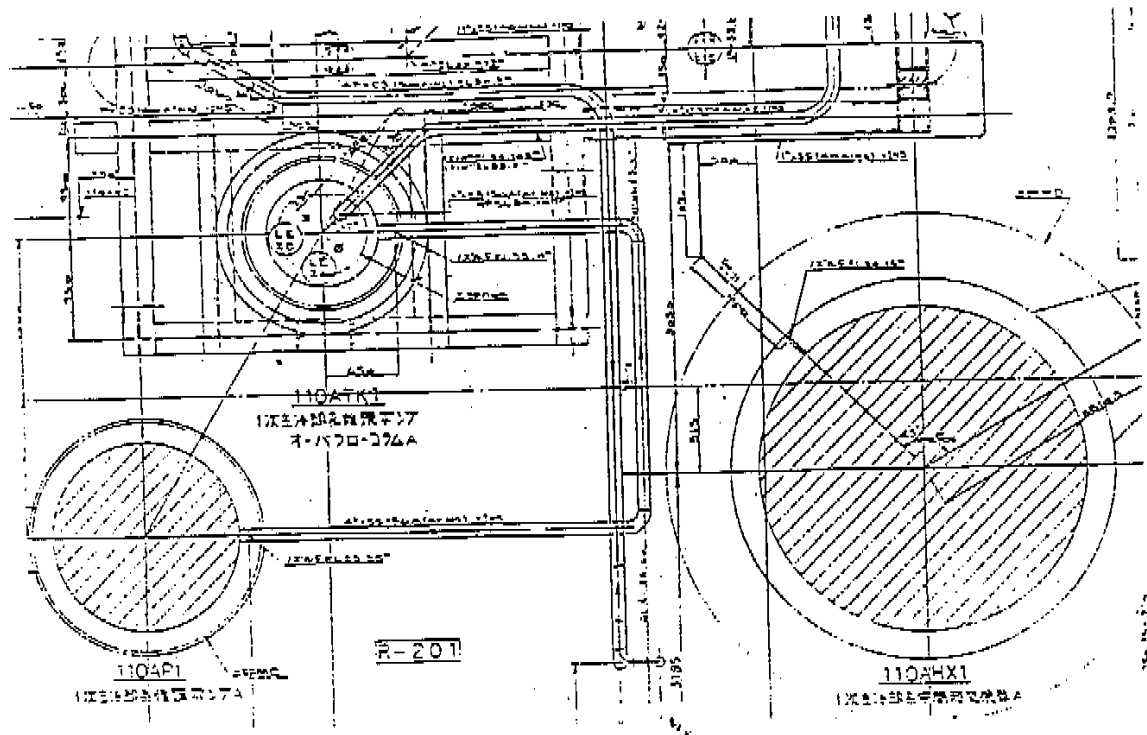


図6 原子炉建屋(R/B)コンポジット図(部分)

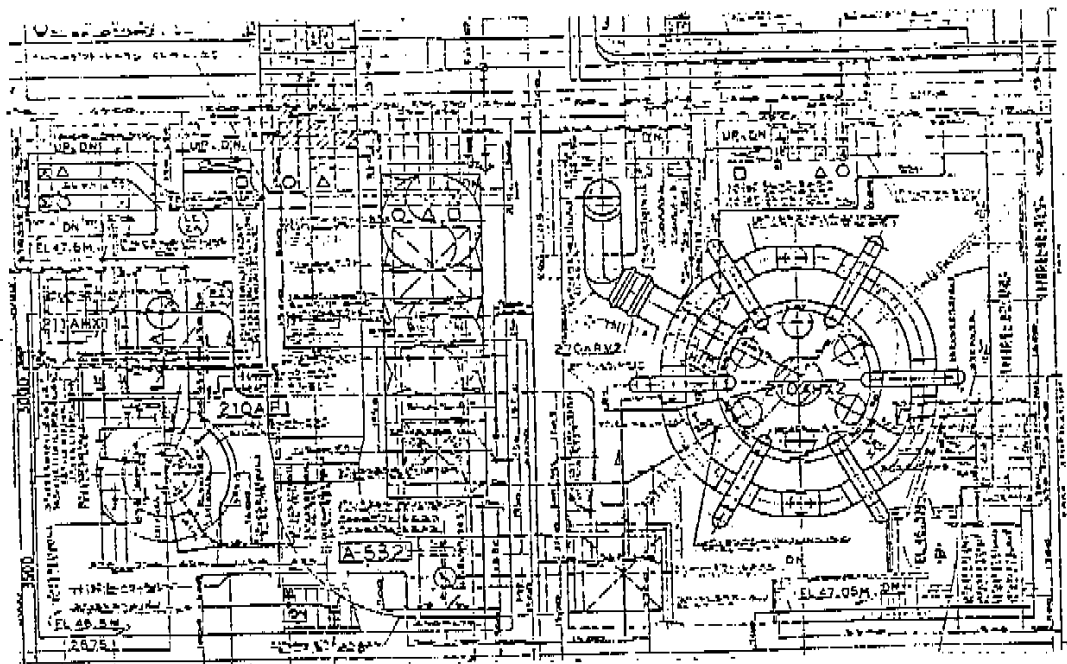


図7 原子炉補助建屋(A/B)コンポジット図(部分)



写真1 デザインモデルによる配置設計状況

モデルを製作し、検討を加えながら設計を行い、そのモデルに基づいて図面を作るデザインモデルとしての利用法がある。

もんじゅ発電所は主要機器供給メーカーが4社におよび、設計情報の伝達上もモデル利用への要求は軽水炉発電プラントよりも高いものとなっており、主要建物である原子炉建物および原子炉補助建物を対象にモデルを作成することにした。もんじゅ発電所においては、図5に示すように機器の配置が混み込んでいる部分（主として2次系関連室、補機冷却系

関連室）にデザインモデル手法、その他の部分にチェックモデル手法を適用して設計の効率化を図っている（写真1にデザインモデルによる配置設計状況を示す）。なお、コンポジット図の例を図6（原子炉建物）、図7（原子炉補助建物）に示す。また、できるだけモデル検討の効率化を図るため、もんじゅ発電所のループ対称性等を活用している。すなわち、

- 1) 原子炉建物モデルについては、3系統（ループ）のうち、Aループとその周辺室を先行して調整を図り、その結果を踏まえてB、Cループと順次検討を進めた。
- 2) 原子炉補助建物モデルは、下層階から順次上階へモデル改造を行い配置調整を図った。まず下層2階（EL14.5M、EL22.0M）を作成し、上下階層の配置関係を見ながら下階（EL14.5M）をモデル検討対象として調整を図るという手順で順次上階へ進めた。
- 3) 2次系関連室に関しては、配管配置調整が複雑化しているため3系統のうち、Aループを先行して上階（EL50.5M）まで一挙に立ち上げ調整を図った。その結果を踏まえて、B、Cループと順次検討を進めた（写真2、写真3に2次系関連室のモデルを示す）。

写真4に原子炉建物全体モデル、写真5に原子

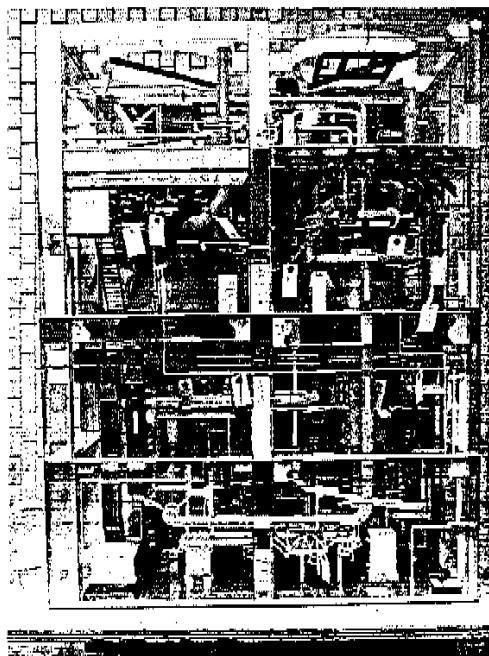


写真2 蒸気発生器室モデル

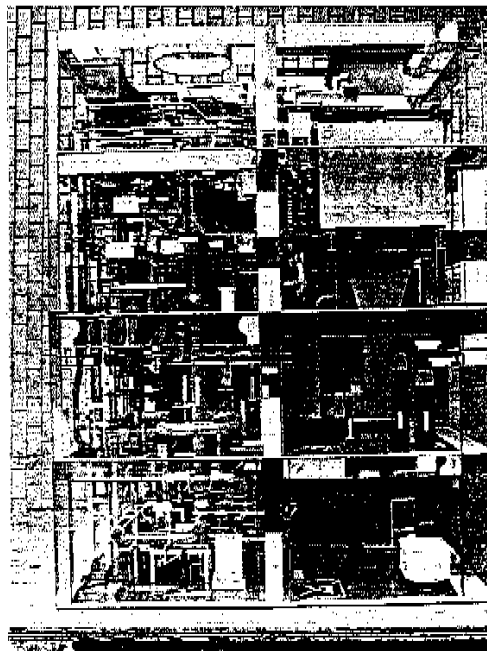


写真3 2次主循環ポンプ、補助冷却設備
空気冷却器関連室のモデル

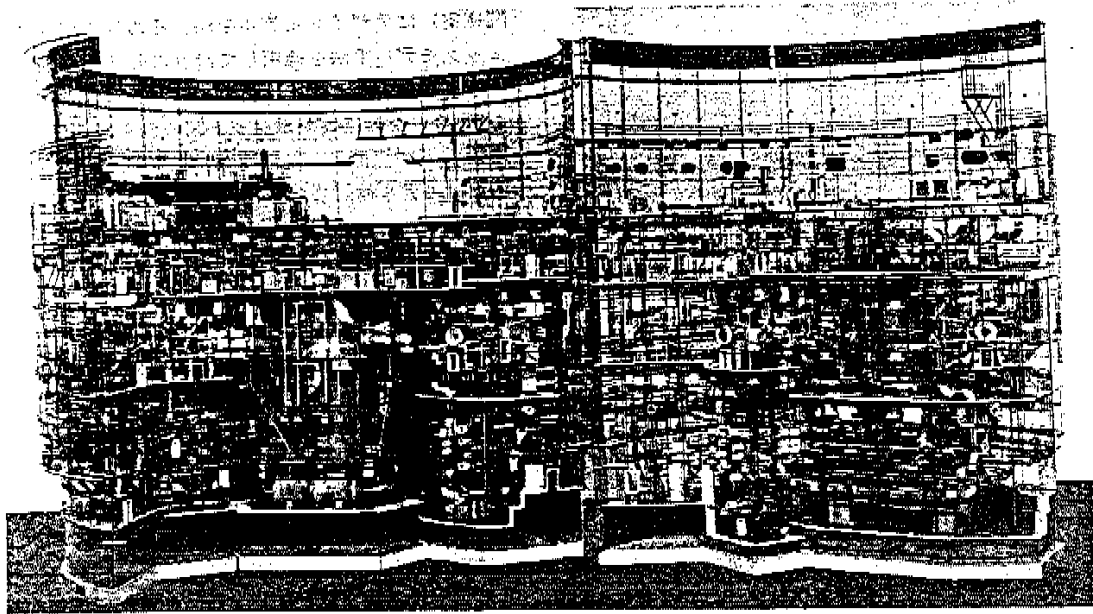


写真4 原子炉建物(R/B)全体モデル

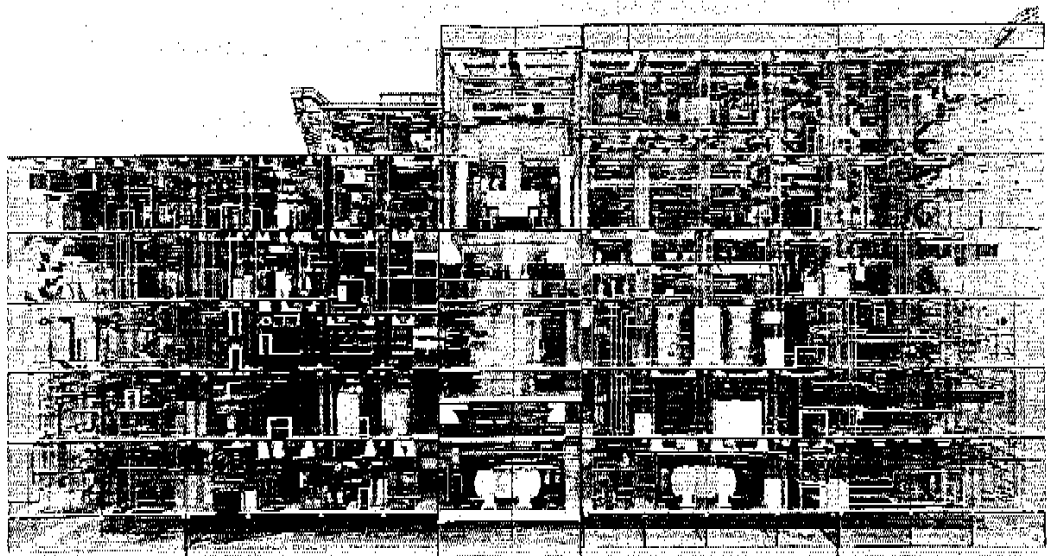


写真5 原子炉補助建物(A/B)全体モデル

炉補助建物全体モデルを示す。

(2) モデルエンジニアリングスケジュール

もんじゅ発電所は、我が国初めての高速増殖炉発電プラントであるため、モデルを活用しつつ設計フェーズをつみ重ねている。モデルによる検討状況を

写真6に示す。また、そのスケジュールを図8に示す。

1) 原子炉建物は、昭和55年6月～9月に詳細モデルを製作し、56年3月までに集中的検討を行い、それ以降58年12月まで継続検討を行った。



写真6 モデル検討状況

2) 原子炉補助建物は、昭和56年10月～57年3月に機器主体のモデルの製作が行われ、57年9月までに主要機器配置に関する検討を行った。その後プロセス配管等のモデル化（詳細モデル）を行い、58年12月まで検討を行った。

3) 昭和59年1月以降、原子炉建物、原子炉補助建物は系統設備の設計進捗を反映してモデル改造を進め、最終的な確認、検討作業を進めてきた。

4) モデルレビューは原子炉建物、原子炉補助建物とも完了し、現在はモデルの最終設計ベースへの改造も終了して、現地へ順次移管しながら、サポート工事のチェック等に活用している。

(3) 設計手順

もんじゅ発電所では、チェックモデルとしての活用が主体となっているが、その設計の基本的な流れ

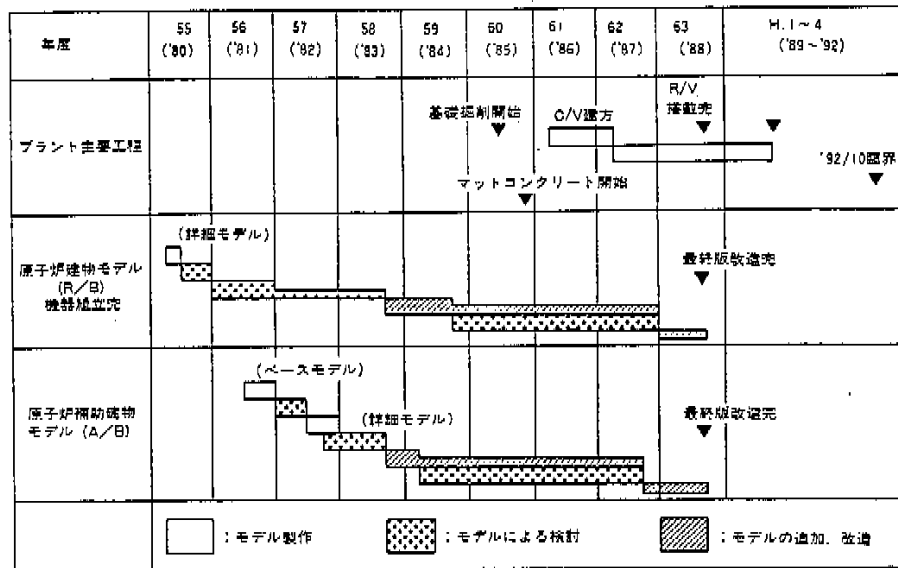


図8 もんじゅ発電所モデルエンジニアリングスケジュール

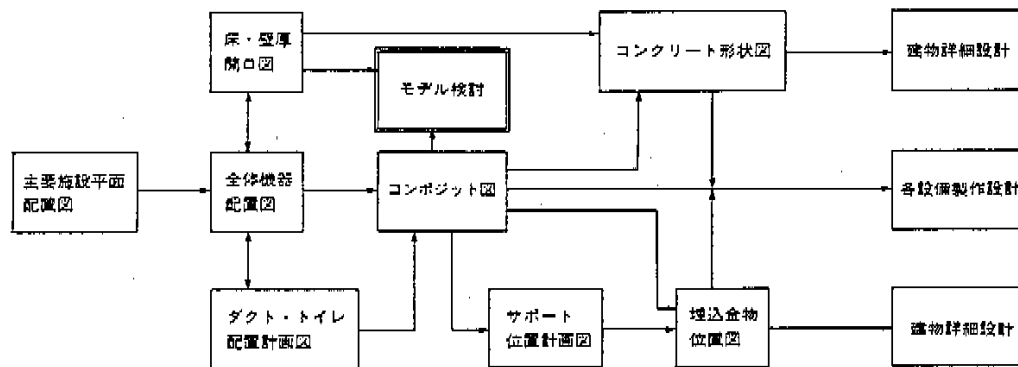
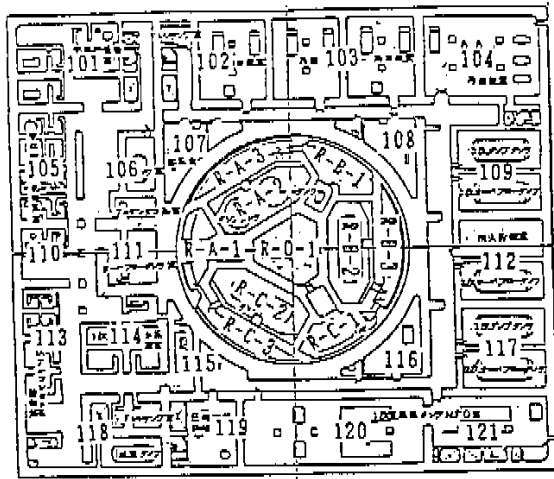
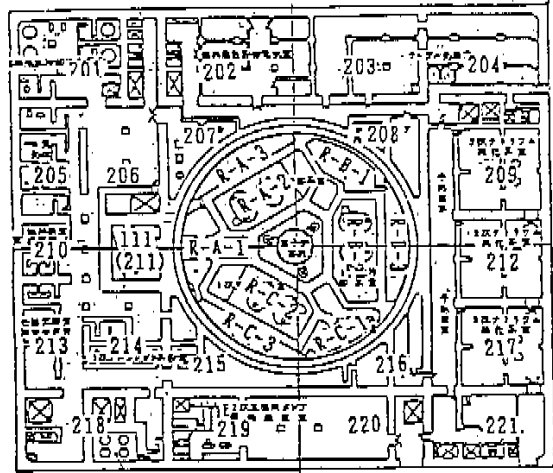


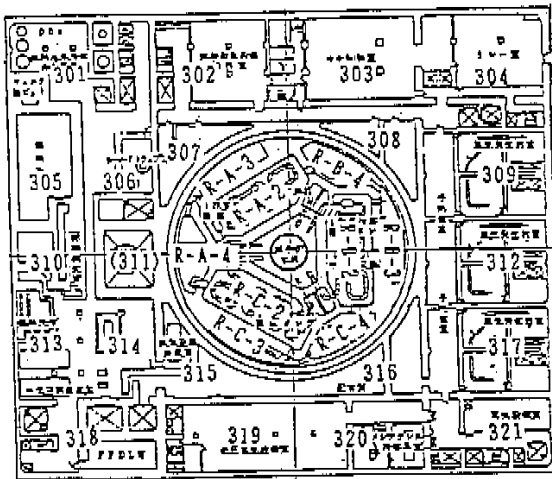
図9 もんじゅ発電所におけるエンジニアリングモデルを使用した配置設計関連図の流れ図



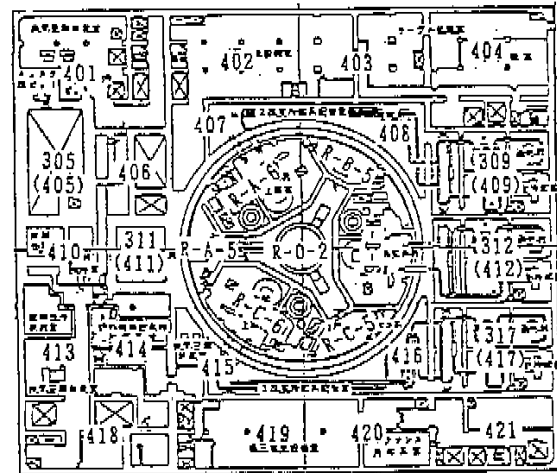
EL 14.5 M



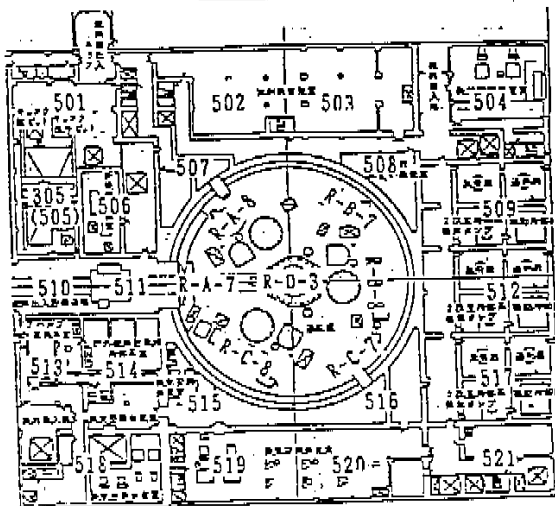
EL 22.0 M



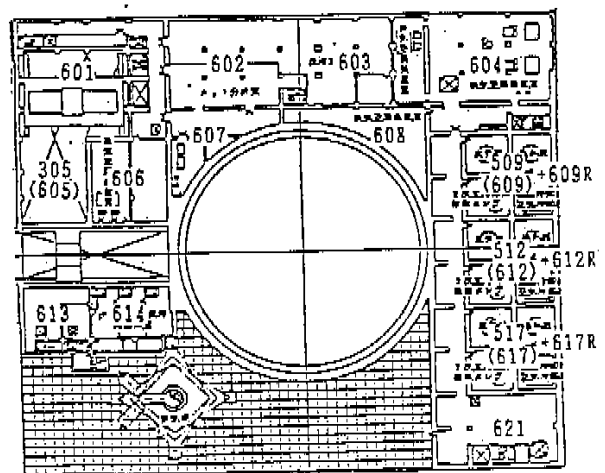
EL 29.0 M



EL 36.0 M



EL 43.0 M



EL 50.5 M+屋上

図10 もんじゅ発電所エンジニアリングモデル分割図

を図9に示す。

3.2 モデルの製作とエンジニアリング手順

モデルは次のような要領で製作され、検討されている。

(1) 縮尺を決定し、ブロック割り、使用材料、カラーコードを定める。

デザインモデルとしては、通常1/15～1/25程度の縮尺とし、ブロック割りは実際の建設ブロックも考慮しながら、組込みやすさ、運びやすさにより決められる。もんじゅ発電所では縮尺を1/25とし、またブロック割りについては図10に示すように、原子炉建屋については20ブロック、原子炉補助建屋については119ブロックとした。

使用材料は、ほとんどがプラスチック（アクリルまたは塩ビ）で発泡スチロール、木材、鋼板等も使われる。また、カラーコードは建屋躯体、機器類、電気計装盤、サポート部材を色分けし、配管類はシステム別、換気ダクトは給・排気別、ケーブルトレイとコンジットは重要度およびトレン別にそれぞれ標準化された色分けが使われる。

もんじゅ発電所でのモデルの主要仕様を表1に示す。

建屋躯体と機器類はその都度加工されるが、そのほかは、標準品またはパーツを主として使用する。なお、本モデルにおいてはナトリウム系配管サポートは特殊な形状のため、その都度製作している。

(2) 詳細設備を組込む前に、ベースモデル（建屋躯体形状、通り芯、主要機器だけを組込んだもの）を精度良く製作する。

(3) 各種設計条件、安全基準、要求事項をベースに配管、ダクト、トレイ、諸設備、電気計装品等の必要設備を組込む。

配管、弁類であれば、配管はできるだけ短く真直

表1 もんじゅ発電所エンジニアリングモデル
主要仕様

(1) モデル製作範囲	原子炉建屋(R/B)、原子炉補助建屋(A/B)	
(2) モデル縮尺	1/25	
(3) モデル分割数	R/B	20、A/B
(4) モデル外形寸法	R/B	2.1mφ×1.9mH
	A/B	4.5m×3.9m×2.2mH
(5) 主要設備色別	1次ナトリウム系	赤 機器
	2次ナトリウム系	オレンジ ガードベッセル
	アルゴンガス系	紫 電気盤
	窒素系	青 ライナ
	冷却水系	黄 ケーブルトレイ
	気体廃棄物系	ピンク 空調ダクト
(6) その他の表示	部屋番号、通り芯、方位角座、原盤厚さ、梁高さ、柱寸法、換打床壁、取り外し可能壁、追加遮蔽、扉種類、吹き抜け、ハッチ、メンテナンススペース、管理区域境界、主動線ルート、遮蔽区分、機器番号配管・口径、流体種類、流れ方向、気配、保温厚さ、ケーブルトレイ・種類、壁、安全系統区分、計測点・位置、種類	

ぐに、ドレン溜りやエアポットができないように、弁は操作・保守しやすい場所に、特にナトリウム系配管については熱膨張による移動には十分注意し、あるいは、高温高压配管は万一の破断を想定しても安全系設備に被害を及ぼさないようにする等、各々の系統設備機能を満足できるようにするほか、被ばく低減をはかるための放射性・非放射性の別、配管サポートのとりやすさ、施工性・検査性等、すべての必要条件を満足するよう、モデル上で検討を重ねる（写真7、写真8参照）。

原子力発電プラントにおける構成機器類は、数量が極めて多く、種類、型式、使用条件、サイズ、重量、材質等によって千差万別であるために、メンテナンス上の要求も様々である。しかし、放射線被ばくの低減、品質管理、稼働率向上、定検期間の短縮を図るためには、それらのメンテナンスの容易さが不可欠である。特に放射性機器、ナトリウム機器に

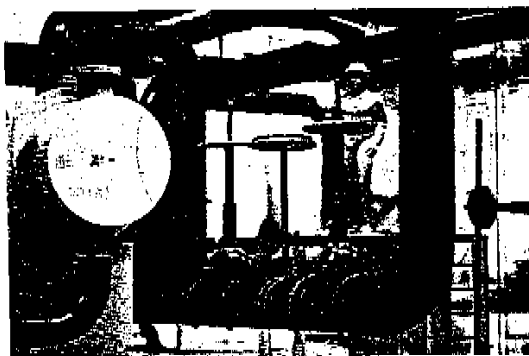


写真7 操作 架台

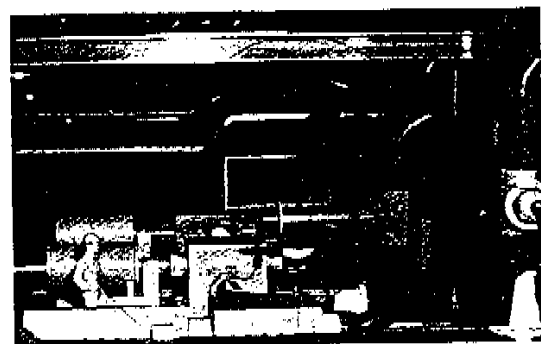


写真8 弁 操作性

については、その保守・点検の内容を明確にし、周囲に必要なスペースおよび保守・点検に必要な付帯設備（クレーン、モノレールホイスト、プラットフォーム、洗浄設備等）を設けなければならないが、これらも合わせてモデル上で検討してゆく。

- (4) タギング（設備名称、番号、仕様、位置等の設計情報を記入したタグを貼ること）を行い、所定のチェックシートによりモデルの内容を確認する。
- (5) 各設計担当部門、製作部門、工事部門によるモデルのチェック&レビューを行い、必要に応じてコメントする。このコメントはモデルコメントシートに記載するとともに、コメント箇所にコメントカード（荷札タイプ）をつけてモデル改造する際の手助けとする。この関係部門によるチェック&レビュー期間中に十分時間をかけて協議、共同検討を行うことが本手法の重要なステップであり、成果を決する。
- (6) コメント箇所の詳細検討およびモデルの改造。
- (7) 関係部門による改造モデル（最終版）の確認
- (8) モデルの改造完了

3.3 モデルレビュー

モデルエンジニアリングの効果を上げるためには設計部門内でのデザインレビューは勿論、関係各部門の専門技術者による徹底したレビューが必要である。もんじゅ発電所では、このことに留意してモデルレビュー会を適宜実施し完了した。

このようなモデルレビューの徹底によって、建設現地に持ち込む恐れのあった種々の不具合点の解決は勿論、図面上だけでは困難であった改善、改良についても大きな成果が得られた。ここでは昭和59年以降のモデルレビュー結果をまとめたものを示す。

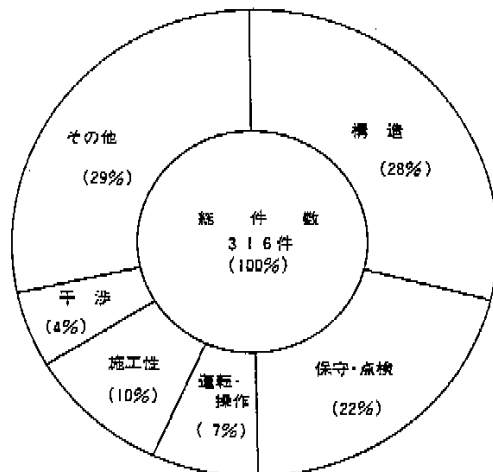


図11 原子炉建物モデルレビュー結果

(1) 原子炉建物 (R/B)

原子炉建物に関するモデルレビュー会でのコメント総件数は約300件であった。その内訳を図11に示す。

- 1) 「構造」に関する指摘は約3割を占める。
- 2) 「保守・点検」に関する指摘が2割以上（約70件）でている。
- 3) 「施工性」に関しては約30件（約1割）の指摘がなされている。

原子炉建物は配置上の裕度が原子炉補助建物と比べて比較的小さいことから「保守・点検」や「施工性」に関する指摘の割合が高くなっている。

(2) 原子炉補助建物 (A/B)

原子炉補助建物に関するモデルレビュー会でのコメント総件数は約1,450件であった。

図12に示すように、そのコメントの内訳は下記のとおりである。

- 1) 系統設備の詳細設計進捗に伴う「構造」に関する指摘が6割を占めている。

系統設備の詳細設計進捗に関し、モデルを活用した例として補機冷却系関連室での海水管の配管配置の見直しがある。従来は、海水管が部屋内に分散配置されていたが、万一の海水管漏洩対策、切り換え弁の操作性等の観点から海水管を山側壁際に集中配置するという見直しを行った。海水管はプラスチックで作成したが、機器・ダクト・トレイ等は発泡スチロールで作り融通性をもたせるようにし、機器のメンテナンス性、機能性、施工性、他設備との干渉等も含め総合的な観点から検討を行った（写真1を参照）。

- 2) 「設備・系統設計」、「運転・操作」、「保守・点

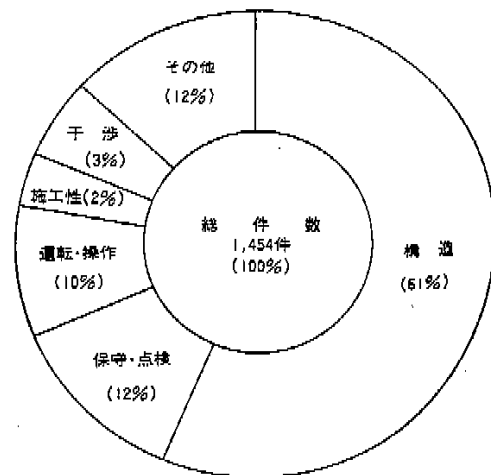
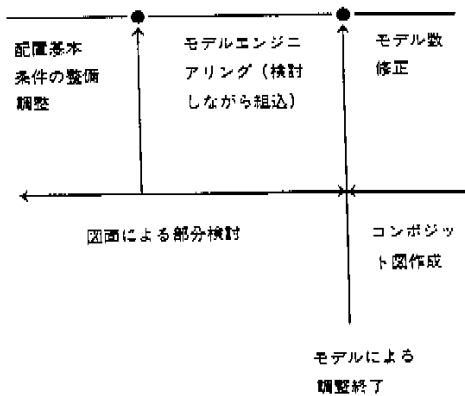


図12 原子炉補助建物モデルレビュー結果

検」の観点から300余りの指摘がなされている。

特に2次系関連室(特に蒸気発生器室)は空間スペースが狭く、しかも異なる設備担当社の設備が配置されているため、配置調整が重要なエリアである。そこでサポートの共用化、メンテナンス時の機器搬出入ルート、作業員・検査員の動線ルート等の確保・改善を目的としてEL43.0M-EL50.5Mを中心として、Aループ(B、Cループについても基本的にAループと同様な配置である)についてエンジニアリングモデルを用いて以下に示すような手順で約1年かけて検討した。



圧力開放板、蒸気発生器伝熱管 ISI 設備等の搬

出入ルートを明確化するとともに、蒸気発生器室および隣接する2次主循環ポンプ室、補助冷却設備室について各ループ毎に一巡することができるように通路計画を行い、その動線を決定した。

また、安全上重要な2次系ナトリウム漏洩対策に係わる連通管の簡素化も本モデル検討により決定した。

3) 「干渉」に関しては、約50件の指摘がなされている。

4) また、「施工性」に関しては約30件の指摘がなされている。

4. 今後の展開

以上、モデルを利用したもんじゅ発電所の配置設計手法およびその成果について概要をまとめた。今後は、設計終了後現地にモデルを順次移管しながら、据付工事等に活用を図ることで作業を突進中である。

参考文献

- 1) 動燃技報 No.51 1984. 9, 「もんじゅ」特集
- 2) 一木、水町：モデルによる原子力発電所のプラント設計、東芝レビュー(34巻4号)、(1979)
- 3) 藤 正樹：モデルエンジニアリング手法を採用した原子力発電プラントの設計、配管技術83. 3
- 4) 高木、水流：モデルエンジニアリングによる火力発電ボイラプラントの配管配置設計、配管技術84. 12
- 5) "Design Model Training Manual", MAN-02(2nd Edition), Engineering Model Associates, Inc.