

原子力発電プラントの配置・配管設計システムの改良

New Design System for Nuclear Power Plant

原子力発電プラントの機器配置及び配管の設計については、機能・据付・放射線被曝・保守などの要素についての多角的な調整、検討を要し、かつ高い信頼性が要求される。一方、その取り扱う物量が非常に多いことなどから、通常の図面だけによる設計では、上記の要求を完全に満足し、かつ機器、配管などの相互干渉の全くないプラント計画を行なうことは困難であるので、品質の向上及び建設工期の短縮のため、設計手法に以下のような新しい工夫を導入した。

すなわち、新規プラントの設計に当たり、カラーコンポジット図、モデルエンジニアリングの手法を導入して、プラント計画手法の合理化を図るとともに、新しく開発したコンピュータによる配管の設計システムを適用し、妥当性のチェックを行なうことにより信頼性の向上などに大きな成果を収めることができたので、その内容について紹介する。

角田昌隆* Masataka Kakuta
好永俊昭* Toshiaki Yoshinaga
吉田郁三** Ikuzô Yoshida
徳増真司*** Shinji Tokumasu

1 緒 言

原子力発電プラントでは、プラントの安全性確保の観点から、二重、三重の安全システムを配備し、かつ系統の分離配置、しゃへい体の設置などを必要とする。そのために取り扱う物量が非常に多くなり、そのほとんどを建屋の中に設置するので、通常の三面図(正面図・平面図・側面図)による検討だけでは、時には建屋、機器、配管などの相互関係が不適当な場合が発生することがある。このため、国内外でも、原子力発電プラントの縮尺モデルを作製して見やすい形で計画する手法、あるいはコンピュータの力を借りて検討する手法など、種々な方法が試みられている。日立製作所でも、従来の経験の上に立って新しい手法の開発を行なってきたが、現在着々とその実績を重ねつつあるので以下に報告する。

2 配置・配管の設計手順

原子力発電プラントに限らず、火力発電プラントから化学プラントに至るまで、配管などの基本的な設計手順はほとんど同じで、図1に示すようになっている。図の上では、系統計画と配置計画が、あるいは機器、配管、ケーブルトレイ、空調ダクトのルート計画が、それぞれ並行して行なわれるように表わされているが、実際にはこれらは相互に影響を及ぼし合うので、物量が多ければ多いほど、また配置空間が狭ければ狭いほど設計が複雑になってくる。

原子力発電プラントでは、安全性確保の観点から、法規による規制が特に厳しく、このため、顧客及び官庁の図面承認業務の設計手順中に占める比重が、その他の一般プラントのそれに比べて格段に高くなっている。

これらの点を考慮に入れ、プラント配管などの信頼性の向上と建設期間の短縮に最重点を置いて検討を進めた結果、図2に示す設計手順を採用することにした。この設計手順は、配置検討モデル→エリア調整モデル→カラーコンポジット図→総合モデル→コンピュータ設計システムと段階を進めるにつれて、設計精度を高くしてゆく点に特長がある。

3 モデル及びカラーコンポジット図による原子力発電所の配置設計と総合調整

原子力発電プラントでは、前述したように、膨大な量の機器、配管、空調ダクト及びケーブルトレイなどが建屋内に配置される。これらの機器、配管などの配置設計を行なうに当たっては、それらの機能、保守点検及び据付け性を考慮し、かつ従業員の放射線被曝低減を図った上、各部について詳細な応力解析を行ない、構造強度が十分であることを確認する必要がある。日立製作所ではこれらの要求を満足する合理的な配置設計を行なうため、前述したように図2に示す設計手順を採用し、2次元的手法としてのカラーコンポジット図、及び、3次元的手法としてのデザインモデルを主体としたモデルエンジニアリングを導入している。これらの方法の採用によって、より信頼性の高いプラントの完成と、建設工期の短縮が期待できる。

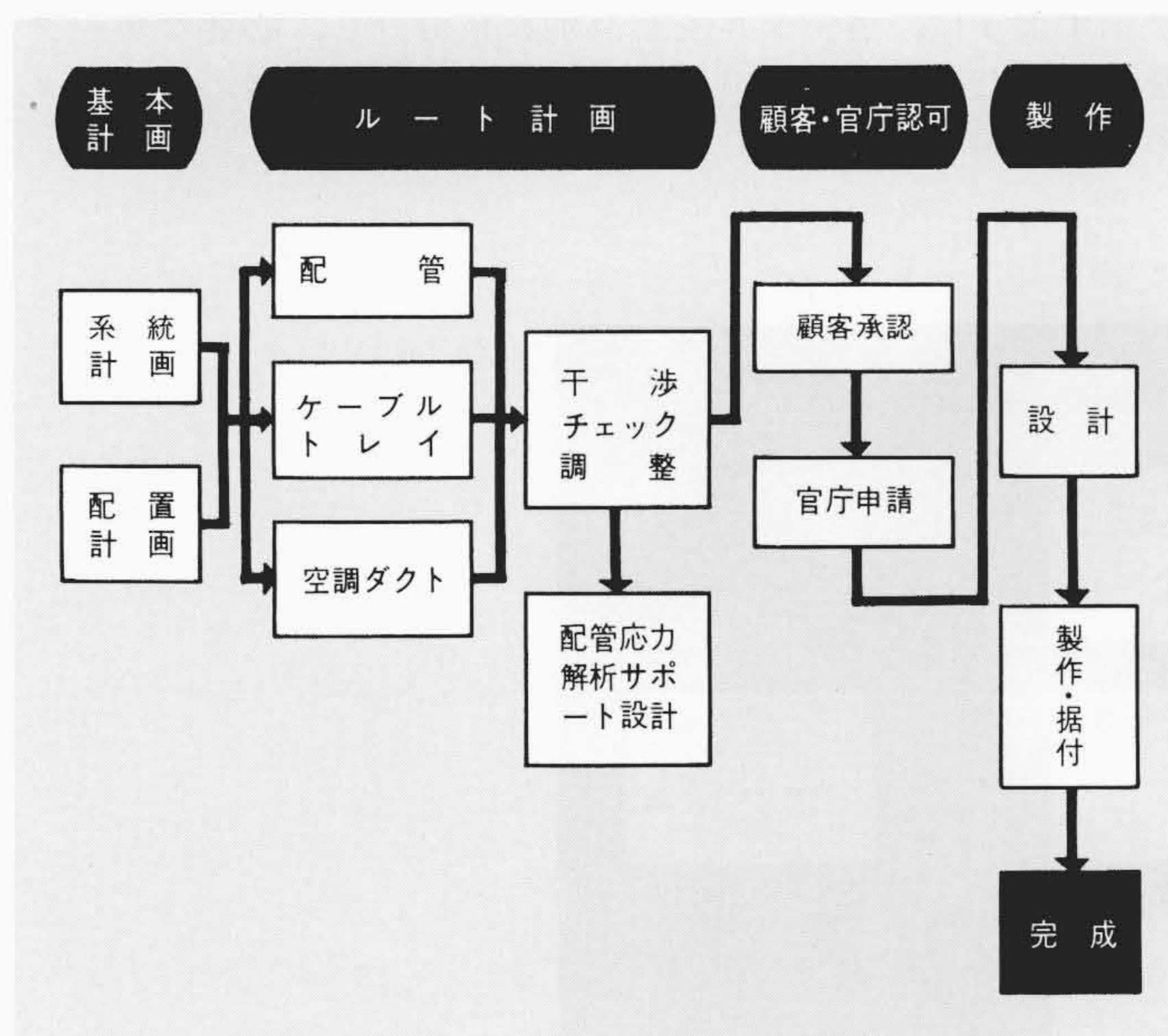


図1 原子力発電プラント配管などの設計手順 原子力発電プラントの配管、ケーブルトレイ及び空調ダクトの設計手順を示す。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所システム開発研究所 *** 日立製作所日立研究所

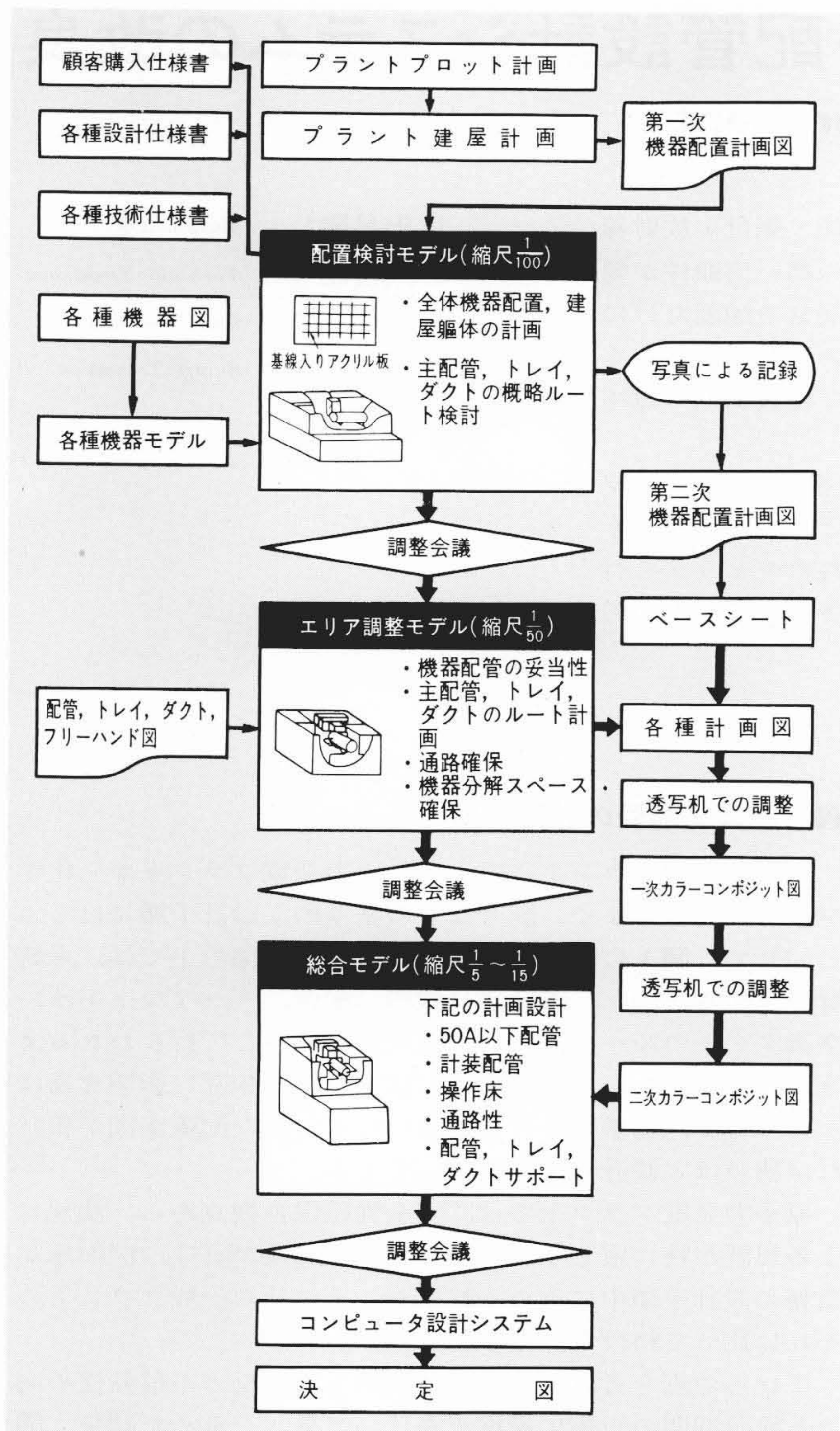


図2 新しい原子力発電プラント配管などの設計手順 モデル, カラーコンポジット図及びコンピュータ設計システムを用いた新しい原子力発電プラントの配管などの設計システムを示す。

3.1 カラーコンポジット図の作成と総合調整

カラーコンポジット図は、原子力発電プラントの建屋躯体図、機器配置図、基礎図、機器図、配管、空調ダクト、ケーブルトレイなどの計画図を、それぞれ独立した図面として描き、それらを重ね合わせてコンポジット図としたものである。その場合、図3に示すように、写真技法により躯体は茶色、配管は黒色、ダクトはオレンジ色というように、製品別に色分けを行なった上で合成するので、従来に比べると格段に見やすい明確な図面となり、干渉などの問題点の摘出及び解決並びに各製品の総合調整の効率化のために、非常に有効な手段となっている。更に、図4に示すカラーコンポジット図は、図2の設計手順に示すように総合モデルに移行する前の段階で作成され、表1に示す二次調整の範囲までを調整するので、総合モデルの工程促進に大いに役立っている。なお、カラーコンポジット図は、原子力発電プラントの竣工図又は総合モデルの完成図としてその利用範囲を拡大すれば、将来発電所の定期検査時の作業検討などにも有用である。

3.2 モデルの作成及び設計・総合調整

図2に示す手順では、モデルエンジニアリングが原子力発電プラントの配置設計の中心になっているが、これは、従来のモデルエンジニアリングが、計画図を作成後、図面チェックのための部分的モデルを作成する、いわゆるチェックモデル方式であったのに対し、設計者が計画を直接モデルに組み込み、モデルで設計を行なうデザインモデル方式を導入したためである。このデザインモデル方式はモデルから図面を作成するのが特長で、配置検討モデルにより、(1)全体機器配置、(2)建屋躯体の計画、(3)主配管、空調ダクト、ケーブルトレイの概略ルートの検討を行ない、まず機器配置計画図を作成する。次に、エリア調整モデルにより、前記計画の妥当性をチェックして、通路などのスペースを確保した計画に練り直す。更に総合モデルでは、図5に示すように、(1)50A以下の配管、(2)操作架台、(3)配管・空調ダクト・ケーブルトレイ用サポートなどすべての製品を追加し、表1に示した三次以降の総合調整を行なうものである。この総合モデルでは、図6に示すように、各モデルを製品別に色分けし、必要なデータを記入したラベルをはり付けて、顧客及び設計者のチェックの便宜を図った。

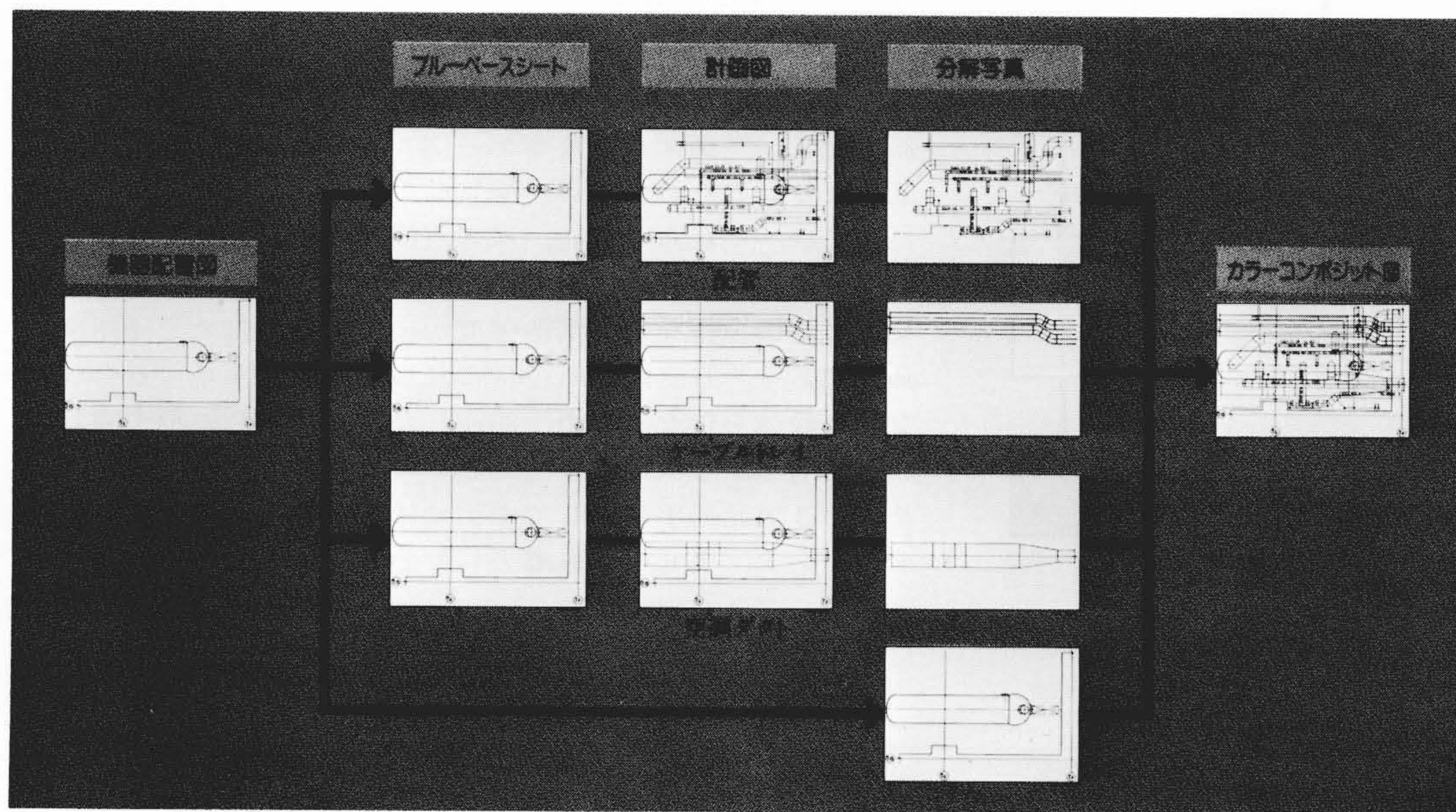


図3 カラーコンポジット図作成手法 機器、配管、ケーブルトレイ、空調ダクト及び躯体のカラーコンポジット図の作成手順を示す。

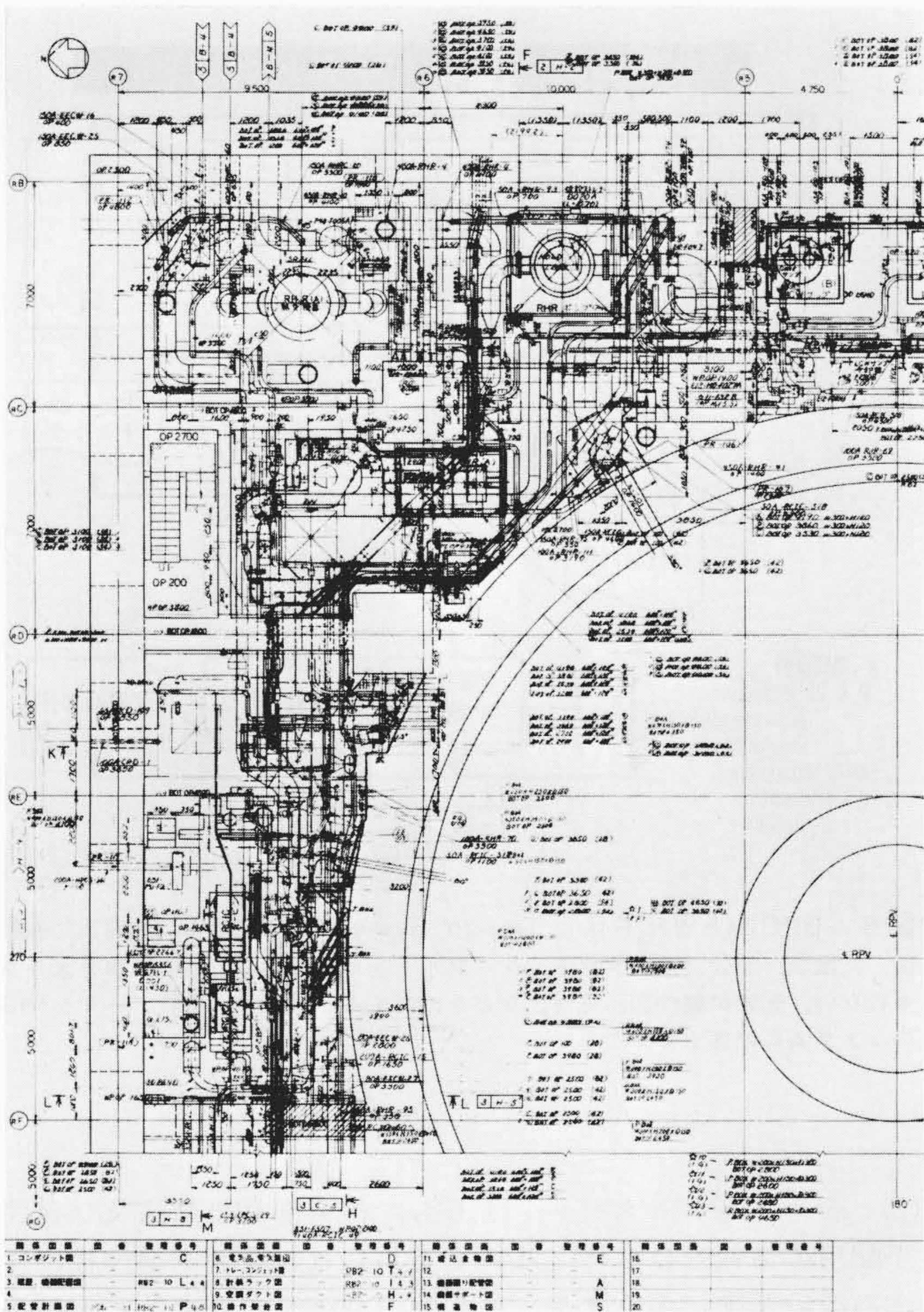


図4 カラーコンポジット図例 完成したカラーコンポジット図の一例を示す。

表1 調整区分表 関連する各図面間の調整を行なう段階を示す。

図面などの種類	調整区分	零次	一次	二次	三次	四次	五次
建屋 軀 体 図		●	●	●	●		●
機 器 配 置 図		●	●	●	●		●
機 器 基 礎 図			●		●		●
機 器 詳 細 図					●		●
配 管 計 画 図		●	●	●	●		●
計 装 配 管				●	●		●
計 装 ラ ッ ク		●	●	●	●		●
空 調 ダ ク ト		●	●	●			
操 作 架 台					●		●
埋 込 金 物				●	●		●
ス リ ー プ				●	●		●
配管支持装置図							
60 A 以上				●	●		●
50 A 以下					●		●
機器回り配管図				●	●		●
構 造 物 図		●	●	●	●		●
通 路 性		●	●	●	●		●
機器分解スペース		●	●	●	●		●
顧客施工のもの					●	●	●

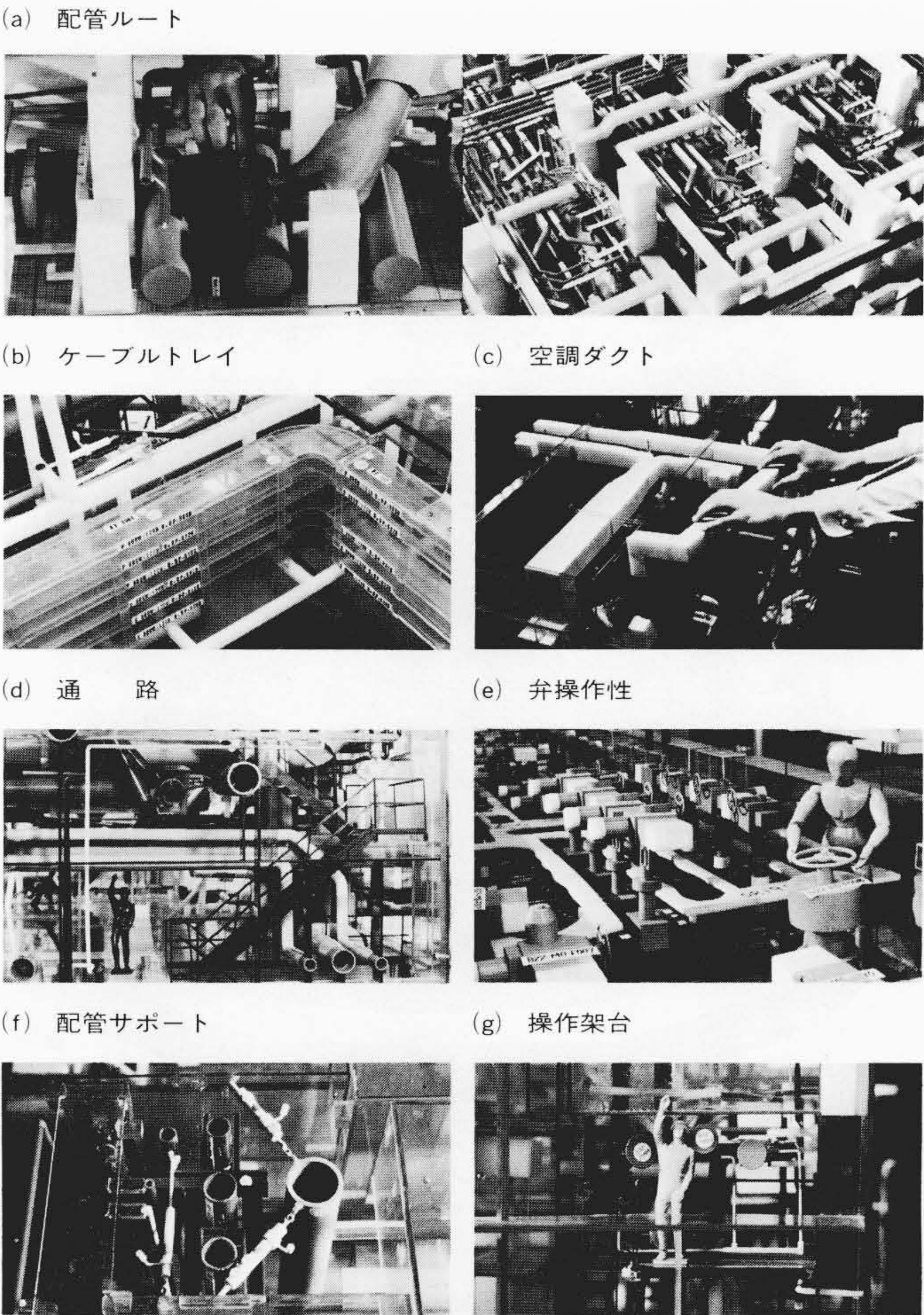


図5 総合モデルによる計画例 総合モデルに組み込まれた配管、配管サポート、ケーブルトレイ、空調ダクト、弁操作架台などの例を示す。

図7は、縮尺 $\frac{1}{100}$ の1,100MWe級モデルを示すもので、底部直径が6m、高さが6mという、世界で最も大きい原子炉格納容器パッケージモデルである。また図8に、縮尺 $\frac{1}{100}$ の原子炉建屋モデルを示す。

4 電子計算機による設計システム

4.1 概 要

大形コンピュータを利用した配管設計システムは数多く報告されているが、その多くは、インテリジェント形の製図システムである。船舶配管では自動ルーチングの手法が採り入



図6 モデルによる総合調整会議 総合モデルを用いた配管、ケーブルトレイ、空調ダクトなどの相互間の調整会議の様態を示す。

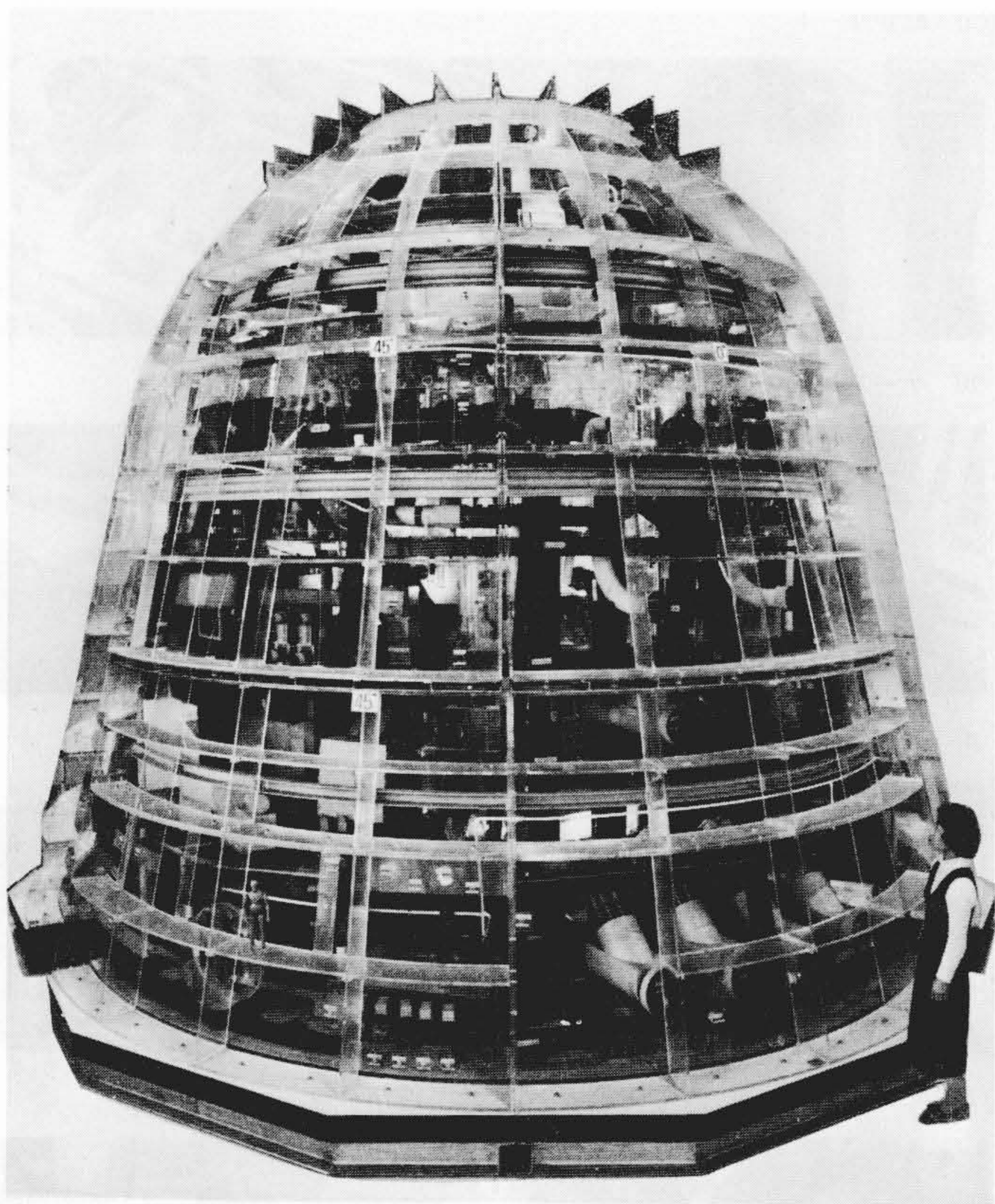


図7 縮尺 $\frac{1}{10}$ 原子炉格納容器パッケージモデル 縮尺 $\frac{1}{10}$ の原子炉格納容器内の機器、配管、ケーブルトレイ、空調ダクトなどのモデルを示す。

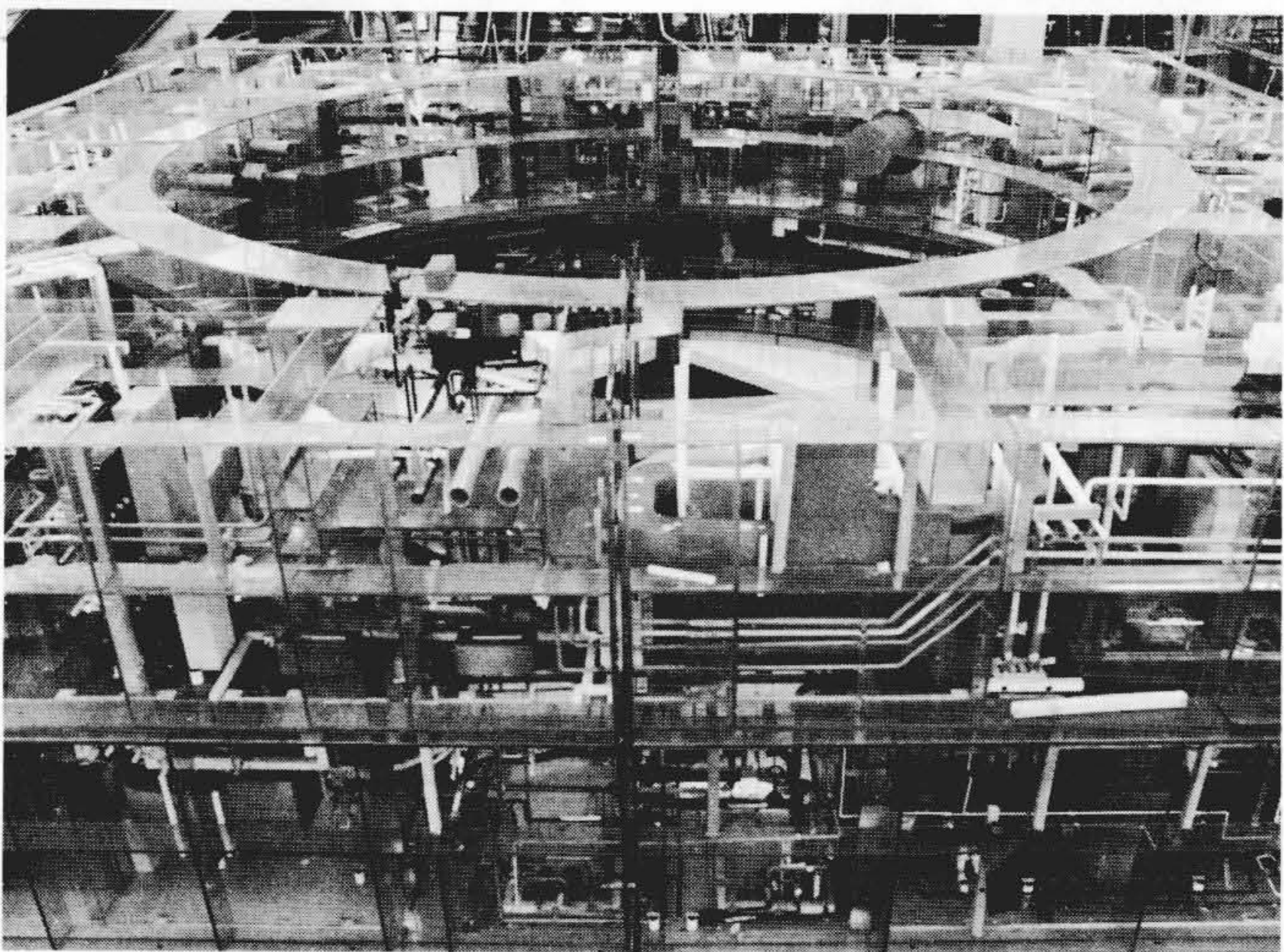


図8 縮尺 $\frac{1}{10}$ 原子炉建屋モデル 縮尺 $\frac{1}{10}$ の原子炉建屋のモデルを示す。図のように各フロアごとに分割して作られている。

れられているが、原子力発電プラントの配管は質量共に膨大であるため、現時点では自動ルーチングのアルゴリズムを作成することが困難である。このため、ねらいを設計の信頼性の向上に置いて、配管の設計システム、BPDS(BWR Piping Design System)を開発した。

BPDSのシステム構成を図9に示す。その特長は、

- (1) データベース構造の採用により、設計データの一元化を図ったこと。
- (2) 全物体及び作業空間の3次元データをデータベース内にもち、配管同士の干渉チェックを行なって、干渉のないことを確認した上で製作手配を行なうこと。

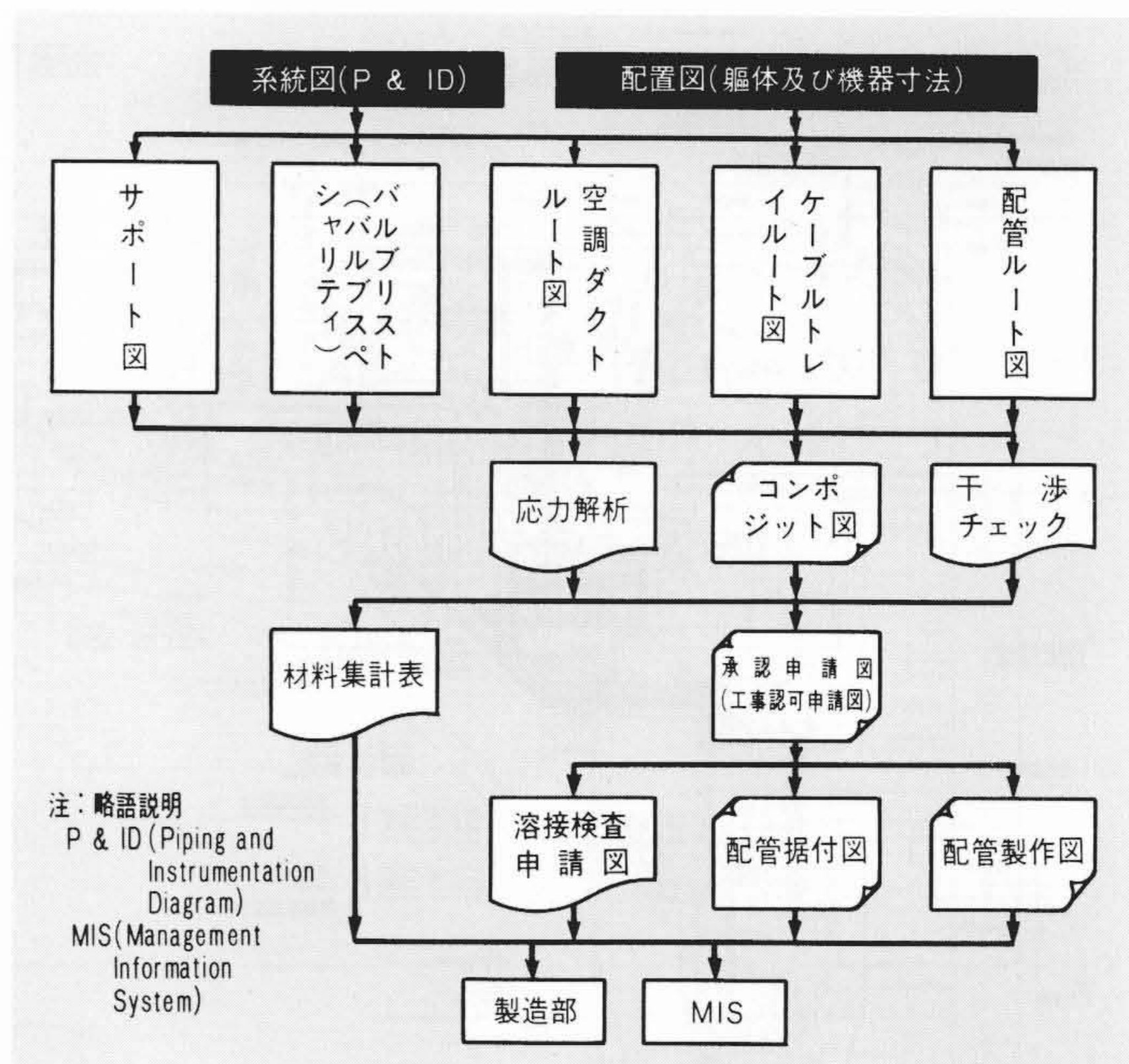


図9 BPDS(BWR Piping Design System)のシステム構成 系統図、配置図、配管、空調ダクト、ケーブルトレイなどを入力して干渉チェックを行ない、配管の製作図、据付図などを出力すると同時に、設計データをMISのシステムに転送する。

(3) テーブルデータベースをもち、標準部品の寸法及び発注手配用の情報をはじめ、法規で定められた設計基準や社内標準の設計基準に至るまで、広範囲の基準データを蓄えることにより、変化に追従できるシステムを採用したこと。

(4) 対話形CAD(Computer Aided Design)システムを応用した入力プログラムを追加したり、既登録データをベースにして自動的に必要データを作り出す自動登録プログラムを追加したりすることにより、容易にシステムの拡張ができること。

(5) 設計データを、MIS(Management Information System)のシステムに直接転送することにより、工程管理精度の向上を図っていること。

である。

本システムを用いて製作手配用のリストや図面を出力することはもちろんであるが、顧客及び官庁に対する承認申請用リストや図面の出力をも目論んでいる。リストは、レーザプリンタを用いて出力するので、文字のかすれもほとんどなく、見やすいものとなっている。

4.2 データベース

4.2.1 データベースの役割と構成

本システムでは、原子力発電プラントでの設計情報の同期化、干渉トラブル(物と物とのぶつかり)の除去を主目的として、データベースによる設計情報の一元管理を行なっている。図10に示すように、データベースは配管データベース以下計19個から構成され、原子力発電プラントの非図形情報及び図形情報を蓄積する。本システムの入出力プログラム群及び管理プログラムは、これらのデータベース中の情報を共通的に使用する。これにより、データ処理の一貫性を保ち、データの信頼度を向上している。

4.2.2 データベースへの設計データ蓄積方法

上述したように、データベースは、原子力発電プラントの設計、製作及び施工に関する広範囲な情報を蓄積しているが、以下に、これらの蓄積方法の特徴について説明する。

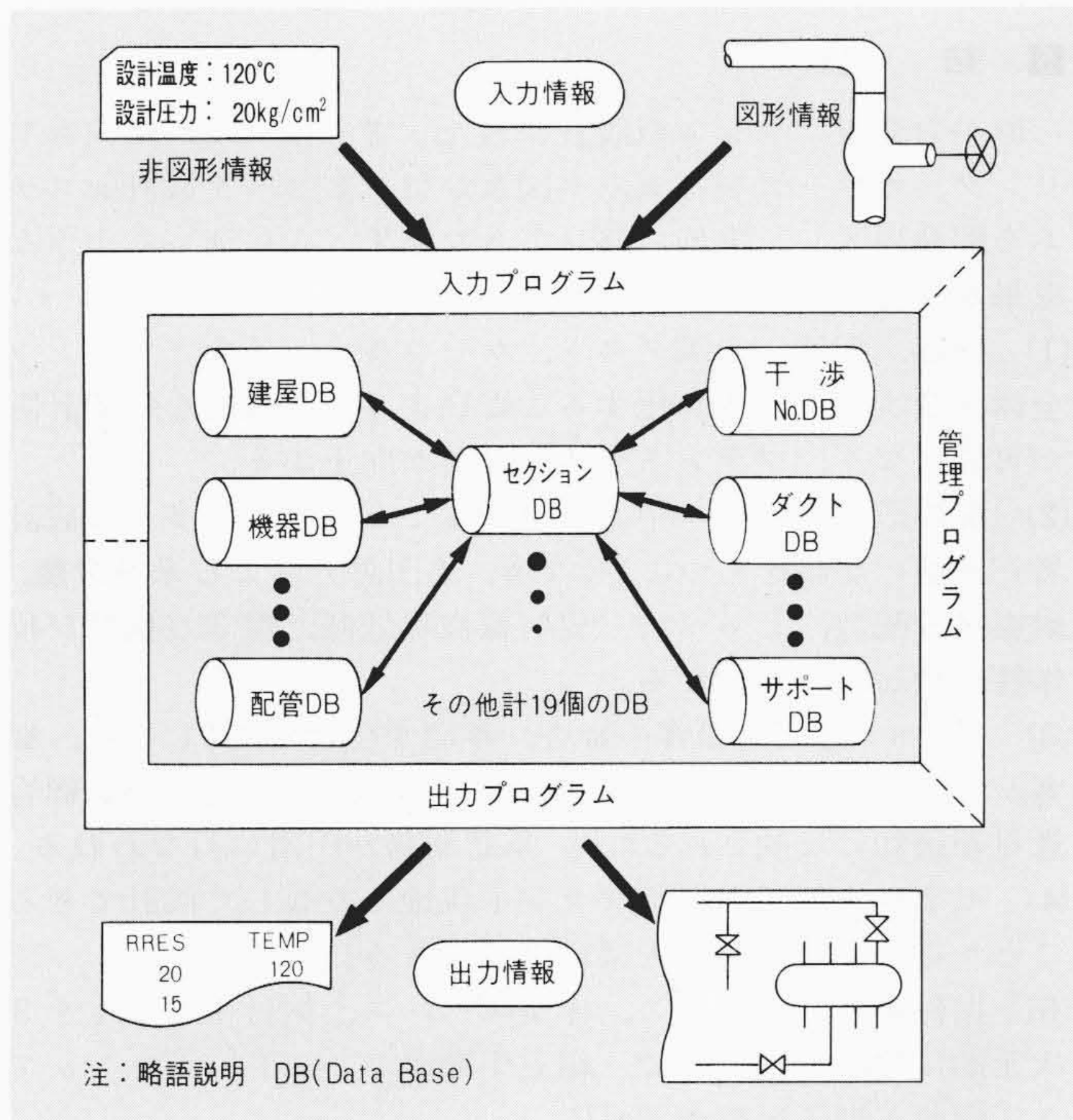


図10 データベースの位置付けと構成 配管データベースをはじめ計19個のデータベースから構成される。データベース化により、設計から製作・施工にわたってデータ処理の一貫性とデータの高信頼化が達成できる。

(1) 原子力発電プラントの配管は、複雑に錯綜したルート(ライン)から構成される。これを単純化するため、ラインを圧力、温度などの基本条件、材質、呼び径の相違により分割する。この方法により、図11に示すように一つのラインは、一つの曲線で表現できる。更に、「ライン」は、「部品」(直管、バルブ、チーズ、レジャーサなど)の順序集合として表現される。各部品には、他ラインなどとの接続関係及び付属品(座、サポート、ガンマホールなど)が発生する。これらは各種の接続点として表現される。この配管情報の構造分析をもとに性能要因を加味し、図11に示す配管データベースを構成している。

(2) 立体構造物は、3次元座標を用いて表わす。この座標系としては、各建屋ごとに独立した直角座標系と、建屋間の関係を表わすための炉心座標系とを用いている。

(3) 物体の形状は、円柱、直方体、球、三角柱など、5種類の基本的な形状の任意の集合体として表現している。

(4) 建屋空間をセクションと呼ぶ単位でメッシュ状に分割し、干渉チェック、図形出力などの処理効率を向上している。

このほか、配管は他データとの関係が強く、これらをデータベースで表現することによって、アプリケーションプログラムの負担を軽減している。

4.3 図形処理

コンピュータ内で行なう図形処理としては、主に干渉チェックと自動製図がある。原子力発電プラントで図形処理の対象となる物体には、建屋、機器、配管、空調ダクト、ケーブルトレイ、サポートなどがある。これらの物体は、図12に示すように5種類の基本図形に分類できる。

干渉チェックは建屋空間を小さい範囲に分割したセクション単位に行なわれ、配置されている物体の空間的近接度(干渉の重大さ)を設計段階で判定する。配置されるエレメント数が非常に多いので、粗いチェックから厳密なチェックとい

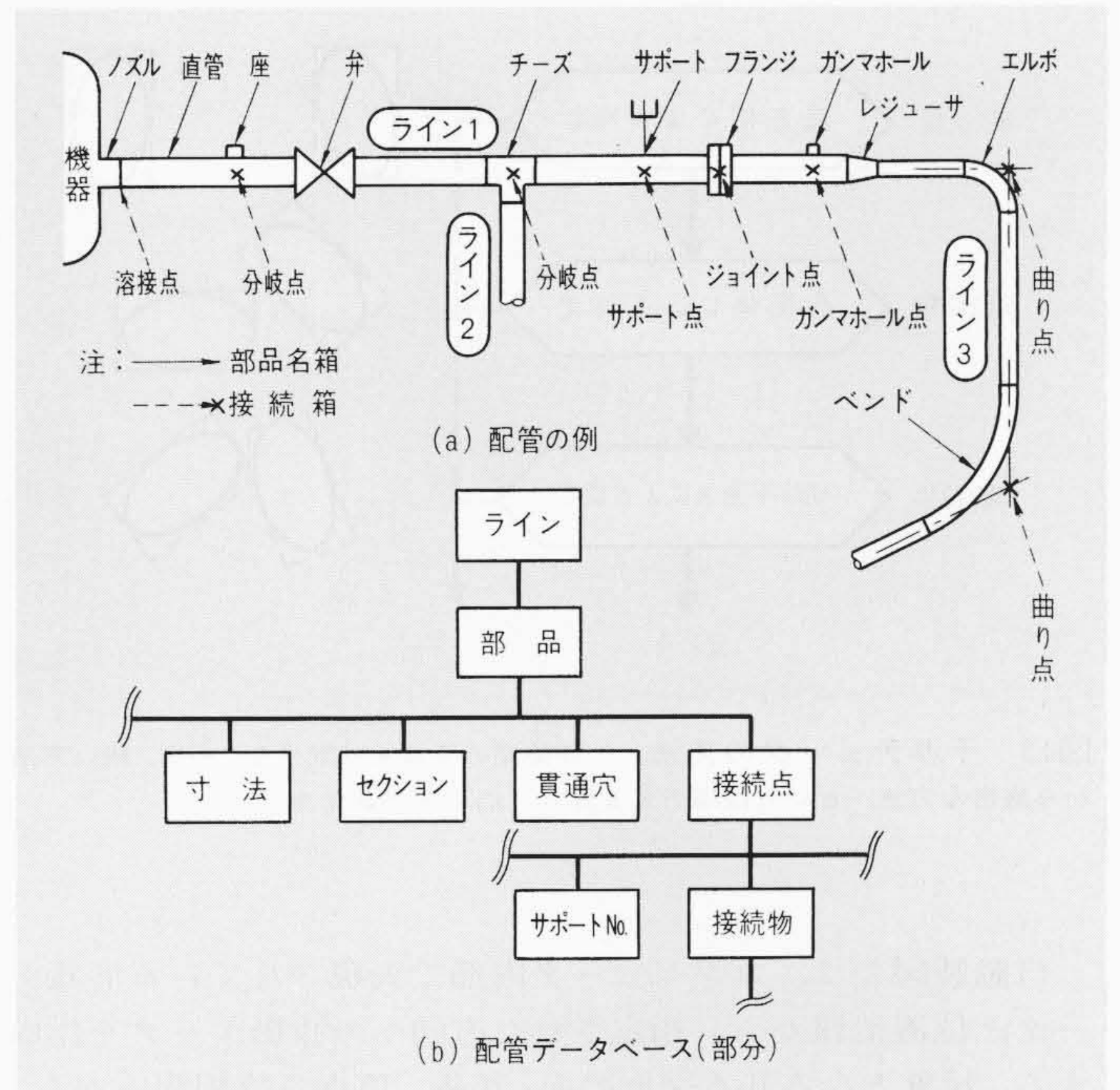


図11 配管のデータベースへの表現 配管データベースにはラインの情報が蓄積される。ラインは直管、弁などの部品とそれらの配置順で表現される。部品には、更に、座、サポートなどの付属品が発生する。これらは接続物として表現される。

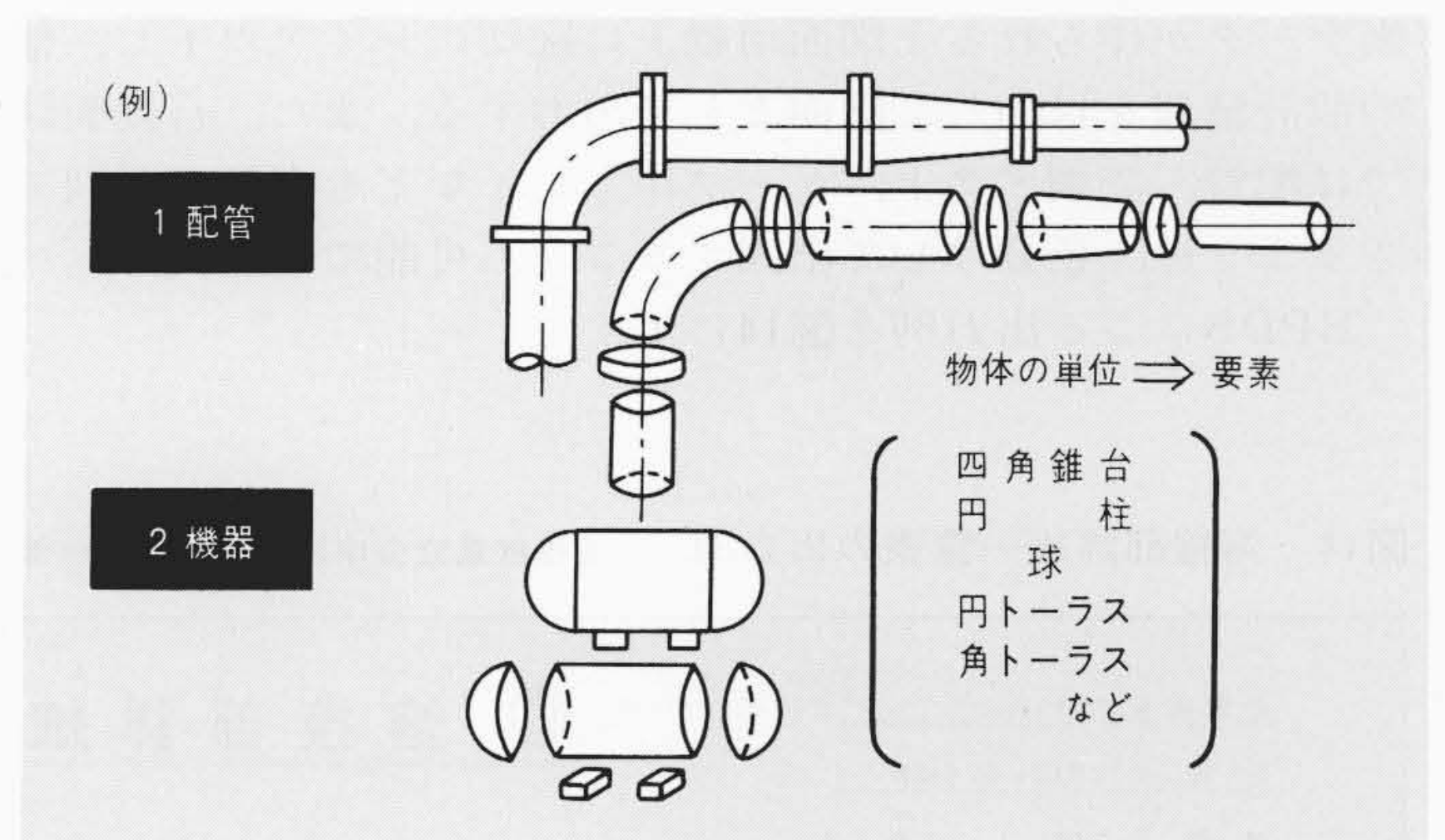


図12 基本図形の分割方法 建屋躯体、機器、配管、空調ダクト、ケーブルトレイ、サポートなどのすべての物体及び据付作業スペース、通路、溶接作業スペースなどの必要空間を5種類の基本形状の3次元要素としてデータベースに蓄積する。

う段階方式を採り、処理の高速化を図っている。基本的な考え方は、基本図形間の共通領域の有無をチェックする方法である。図13に示すように、第1段階では座標系にあった面で基本図形を囲んだ直方体で交差をチェックする。配管、空調ダクト、ケーブルトレイなどはほとんど壁、床に平行であり、多くの組合せはこの段階で判定できる。交差があれば基本図形を凸面体で被覆し、共通領域があるかどうかを判定する(第2段階)。それでも共通領域がある場合には、共通領域内の点から各基本図形の面に垂線を降ろし、不要な部分を削除する接平面を求め、これを含めた新しい凸面体被覆間の共通領域の有無を調べる(第3段階)。更に共通領域がある場合には、同様の操作を繰り返すことにより最終的な判定を下す。また、基本図形を拡大することにより、物体間の近接度を数段階にランク付けできるようになっている。

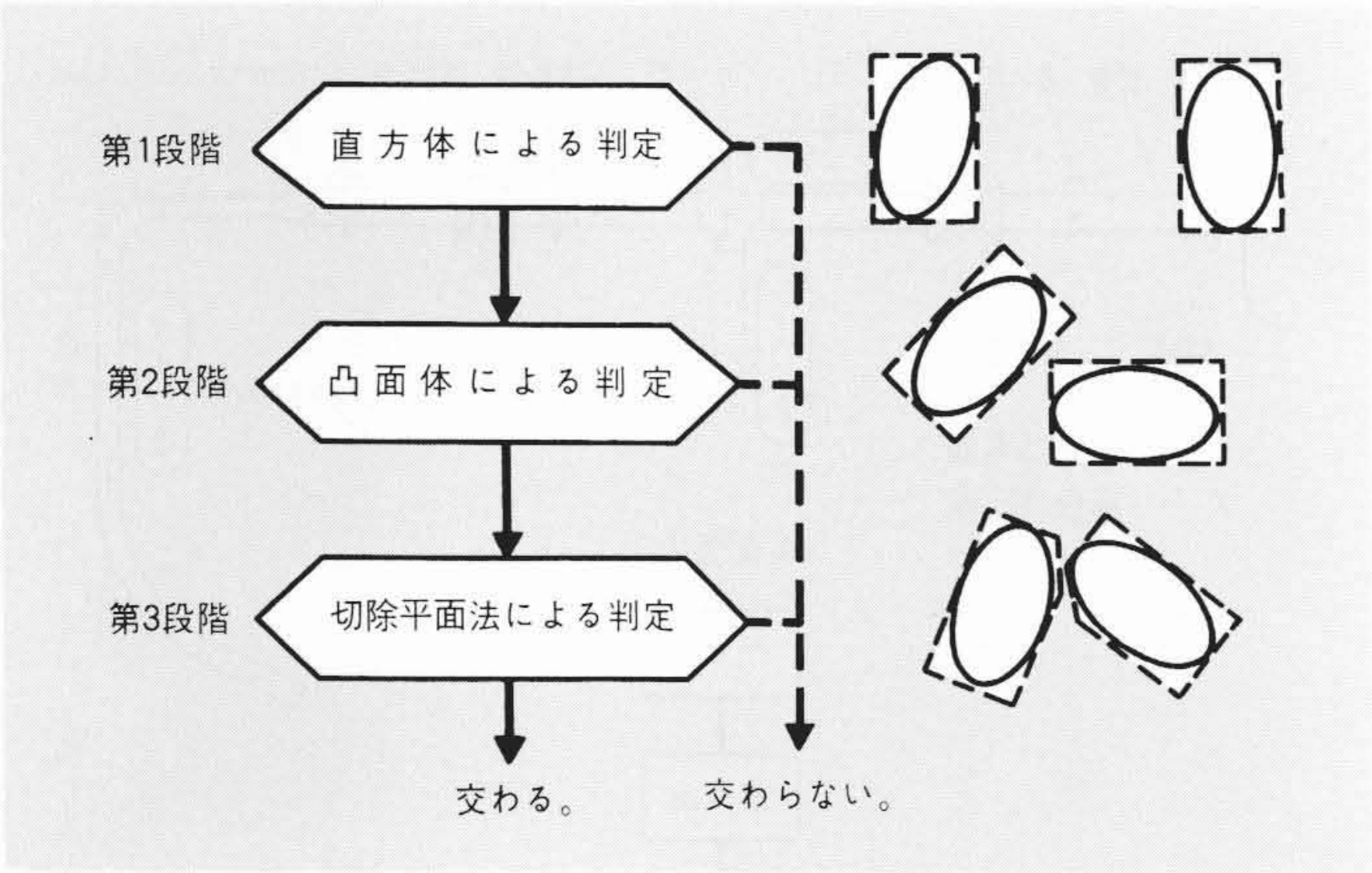


図13 干渉チェックの方法 物体間の干渉を判定するために、粗い方法から厳密な方法へという段階方式を採り、処理の高速化を図った。

自動製図では、コンピュータ内部で表現されている形状データと位置情報から、指定された方向への投影データを作成する。対象となる基本図形の面、稜線、頂点の位相関係から、どの面が見えるかをチェックする。見える面から基本図形の外郭線を抽出し、その閉ループを決定する。対象となるすべての基本図形について同様の操作が行なわれる。更に、基本図形の位置関係から隠れて見えない部分を調べる隠れ線処理を行ない、見えない部分を点線などで表示する。すべての作画データが作られると図面用紙上に適切にレイアウトし、他の設計情報を付加して図面として出力する。また、自動製図では配管、空調ダクト、ケーブルトレイなどを容易に識別できるように、色分けして出図することも可能である。

BPDSによる出力例を図14に示す。

5 結 言

原子力発電プラントの設計に当たって、モデルエンジニアリング、カラーコンポジット図及びコンピュータ設計システムを開発導入し、実施に移してきた結果、次に述べるような成果が得られた。

- (1) 機器、配管、空調ダクト、ケーブルトレイなどプラント全体を3次元的に視覚化することにより、合理的な配置計画が可能となり、プラント全体の品質が向上する。
- (2) 配置設計をモデル中心で進めることにより、多くの設計者が共通の認識をもつことができ、集団思考による系統分離、耐震区分配置、しゃへい、放射線被曝低減、保守点検及び操作性の検討が容易になる。
- (3) モデルによって顧客の審査、承認を受けることにより、顧客がプラントの使用者として様々な角度から検討ができ、顧客意見が適切に反映されるため、承認業務が円滑に行なわれる。
- (4) モデルを原子力発電プラント現地とみなして設計できることから、現地設計を大幅に削減できる。
- (5) 据付搬出入スペース、作業スペース、据付手順などを3次元的に検討できるので、組立手順のシミュレーションができ、建設工期の短縮が図れる。
- (6) 法規による制限などをプログラムチェックすることにより、設計信頼度の向上が図れる。

今後はモデルの活用範囲の拡大を図り、超音波写真技術による新しい座標解析技術の導入の検討を進める考えである。またコンピュータによる合理性チェックの範囲の拡大、精度の向上を図り、原子力発電プラントの品質向上にいつそうの努力を傾注する考えである。

終わりに、システムの設計開発に際し、終始御指導をいただいた関係各位に対し、深く感謝する。

図14 溶接部詳細一覧表の出力例 溶接検査立会申請用及び溶接作業に用いられるリストの出力例を示す。

発電所名 (NF15B)			◎ 溶 接 部 詳 細 一 覧 表										依頼書番号： 日立溶接第 号									
系 統 名 (G10) G10-SB													図 面 番 号： 34208401-									
機 器 名 (001) 0			NSDY FIELD.WELD.IMT																			
継手番号	材 質		寸 法 (mm) 板：板厚 管：外径×肉厚 (D C部肉厚)	継手 ^{※1} 種 別 開 先 形 状	溶接方法	溶 接 棒 ・ 溶 加 材 ワイヤ・フラックス		予熱 温度 (℃以上)	応 力 除 去 ^{※2}				ガス	施行法 認 可 No	溶 接 検 査 項 目				受検 ^{※6} 場 所 工 現 場 地	※1 継手種別		
	規 格	区 分 P No				銘 柄	区 分 F No		区 分 A No	最大 a (℃/Hr)	最小 b (Hr)	最大 c (℃/Hr)			T (℃)	シールド バック ド	整 理 No	加工 面			開 先 面	非 破 壊 検 査
00180 P003 W0310	SUS304TP	P-8	267.40 8.35 267.40 8.35	9.30	TF A	WELTIG308L WEL308L	F-5	A-7					AR	AR		1	PT P P	O		0.0 (L)	3 3	1 2 3 4 5 6
00180 P004 W0340	SUS304TP SUS304	P-8 P-8	267.40 8.35 267.40 8.35	9.30	TF A	WELTIG308L WEL308L	F-5	A-7					AR	AR		1	PT P P	O		0.0 (L)	3 3	1 2 3 4 5 6
00180 P011 W0440	SUS304TP SUS304	P-8 P-8	267.40 8.35 267.40 8.35	9.30	TF A	WELTIG308L WEL308L	F-5	A-7					AR	AR		1	PT P P	O		0.0 (L)	3 3	1 2 3 4 5 6
00180 P012 W0450	SUS304 SUS304TP	P-8 P-8	267.40 8.35 267.40 8.35	9.30	TF A	WELTIG308L WEL308L	F-5	A-7					AR	AR		1	PT P P	O		0.0 (L)	3 3	1 2 3 4 5 6
00180 P014 W0490	SUS304 SUS304TP	P-8 P-8	267.40 8.35 267.40 8.35	9.30	TF A	WELTIG308L WEL308L	F-5	A-7					AR	AR		1	PT P P	O		0.0 (L)	3 3	1 2 3 4 5 6
00180 P014 W0500	SUS304TP	P-8	267.40 8.35 267.40 8.35	9.30	TF A	WELTIG308L WEL308L	F-5	A-7					AR	AR		1	PT P P	O		0.0 (L)	3 3	1 2 3 4 5 6