

3次元プラントレイアウト計画CADシステム

Three-Dimensional Computer Aided Design System for Plant Layout

原子力発電プラントの配管、ケーブルトレイ、空調ダクトなどの配置を短期間にかつ効率よく計画設計できる3次元プラントレイアウト計画CADシステムについて述べる。

このシステムは、設計者の豊富な経験とノウハウをコンピュータの中に知識として蓄え、これを用いて、所定の順序で自動的に配置を決めていく自動ルーチングシステム、ルーチング結果をより高いレベルから見直し、最適な配置に修正するための対話形レイアウトシステム、配置計画を点検保守など操作性の観点から総合的に評価するレイアウト評価システム、及びこれらの計画・設計を有効に行なわせるデータベースシステムから成っている。

ここでは、このシステムの全体構成及び個々のサブシステムの技術的特長と効果について概要を紹介する。

好 永 俊 昭* *Toshiaki Yoshinaga*

木 口 高 志** *Takashi Kiguchi*

徳 増 真 司*** *Shinji Tokumasu*

熊本健二郎**** *Kenjiro Kumamoto*

1 緒 言

原子力発電プラントは、原子炉、タービン、ポンプ、弁、制御装置など、大小様々の多数の機器で構成され、これら機器を、配管、ケーブルなどで有機的に結合することにより、発電プラントとしての機能を発揮することができる。これらの機器は、用途・目的に応じ、原子炉建屋、タービン建屋あるいは補機建屋に適切に収納・配置されているため、配管、ケーブルなど機器を結合する要素は複雑かつ多量となり、これらが適切に配置されているか否かが、プラントの運転操作性・保守点検性に大きくかかわってくる。このため、プラントの配置計画では、建屋・主要機器の配置を決め、次いで主要配管ルートを計画し、総合的に試行錯誤によって追加・修正を加え、レイアウトを決定している。

特に、配管のレイアウト(ルーチング)は、約100系統、長さ数百キロメートル、口径も約30種類のものがあり、内部流体も主蒸気から海水までと多岐にわたり、放射線量やメンテナンス性などを考慮し、限られた建屋内を効率的にルーチングしなければならない。したがって、高い技術力と豊富な経験をベースに試行錯誤的に計画する必要がある、多大なマンパワーを要しているのが現状である。

これらレイアウト計画の効率を上げるため、これまでカラーコンポジット図(配管、ケーブルトレイ、空調ダクトを重ねた図面)やプラスチックモデルを導入し、干渉対策や保守点検性などの調整を行ない設計効率を上げてきたが、レイアウトの追加、変更などに対する迅速な対応には、まだ大きなマンパワーをかけているのが現状である。

一方、近年のコンピュータ分野の技術の発達が目覚ましく、これら最新のコンピュータ技術を取り入れたCAD(Computer Aided Design)システムを開発することにより、プラスチックモデルと同等以上の効果を得ることが予測された。そこで、プラスチックモデル、対話形CADなどの従来の技術をベースとして、コンピュータ最新技術を用いた「3次元プラントレイアウト計画CADシステム」を開発し、実用化した。

以下、その詳細を報告する。

2 3次元プラントレイアウト計画CADシステム

従来、プラントレイアウト計画設計は、プラスチックモデルを中心に行なってきた。これは建屋・機器配置をベースとし、配管、トレイ及びダクトのルート計画を個々に行ない、プラスチックモデル上で相互干渉、通路性などを考慮し、総合調整しながらレイアウト計画を進める方法である。この中で配管ルーチングは、下記理由により技術と豊富な経験をもつ配管技術者が試行錯誤的に計画することになり、多大なマンパワーがかかっていた。

(1) 経路の満たすべき仕様が配管ごとに異なり、画一的に定まらない。

(2) 技術と豊富な経験をもつ設計者は、設計基準、ノウハウなどの多くの設計クライテリアをもっており、これらを総合的に判断しルート決定する必要がある。

以上の問題をもつ配管ルーチング作業を機械化するため、本システムでは知識工学的手法¹⁾を応用し、設計クライテリアを知識としてコンピュータで取り扱うことに成功し、自動レイアウトシステムを開発した。

次に自動レイアウトシステムで計画したルートを設計者がチェックし対話形式で修正可能なように、対話レイアウトシステムを補助システムとして作成した。

また従来、プラスチックモデルで社内調整、顧客レビューを行なってきたが、これに替わる手法として、レイアウト評価システム(グラフィックモデルシミュレーションシステム)を作成した。

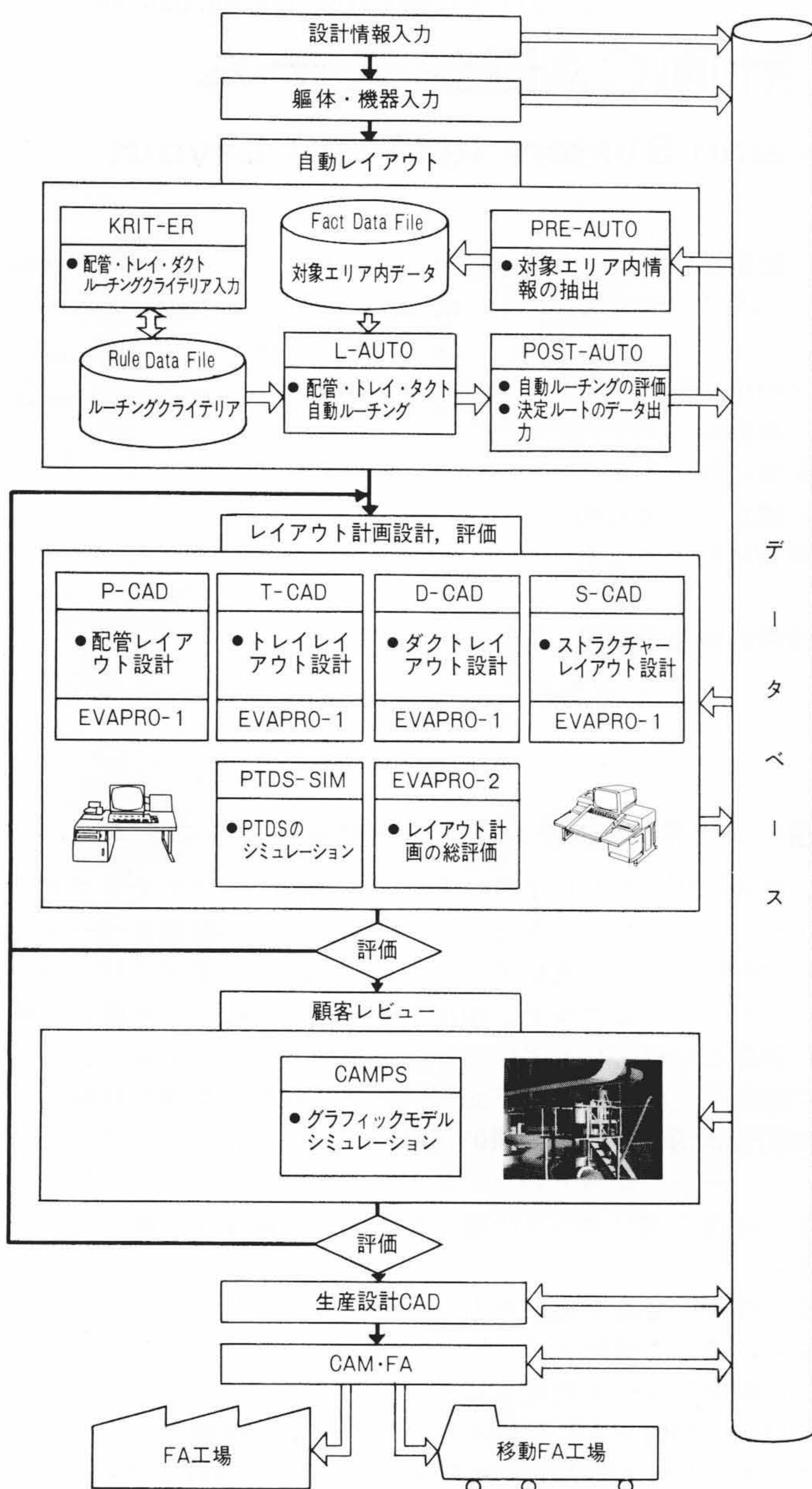
これら三つのシステムを効率よく稼働させ、かつ設計データの一元化を図るため、データベースシステムを導入した。

以上四つのシステムを中心として組み合わせたものが、「3次元プラントレイアウト計画CADシステム」であり、これを図1に示す。

このようにして計画したレイアウトデータをデータベースに登録し、生産CADやCAM・FA(Computer Aided Manufacturing・Factory Automation)用データとして使用する。

特に、移動FA工場は、ニーズに応じて現地から現地へ移動

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 *** 日立製作所日立研究所 工学博士 **** 日立製作所システム開発研究所



注：略語説明 KRIT-ER(Knowledge Representation and Inference Tool Editor)
 PRE-AUTO(Pre Processor-Automated)
 L-AUTO(Layout-Automated System)
 POST-AUTO(Post Processor-Automated)
 EVAPRO(Evaluation-Program)
 PTDS(Piping Tray Duct Structure)
 CAMPS(Computer Animated Model of Piping System)
 CAD(Computer Aided Design)
 CAM・FA(Computer Aided Manufacturing・Factory Automation)

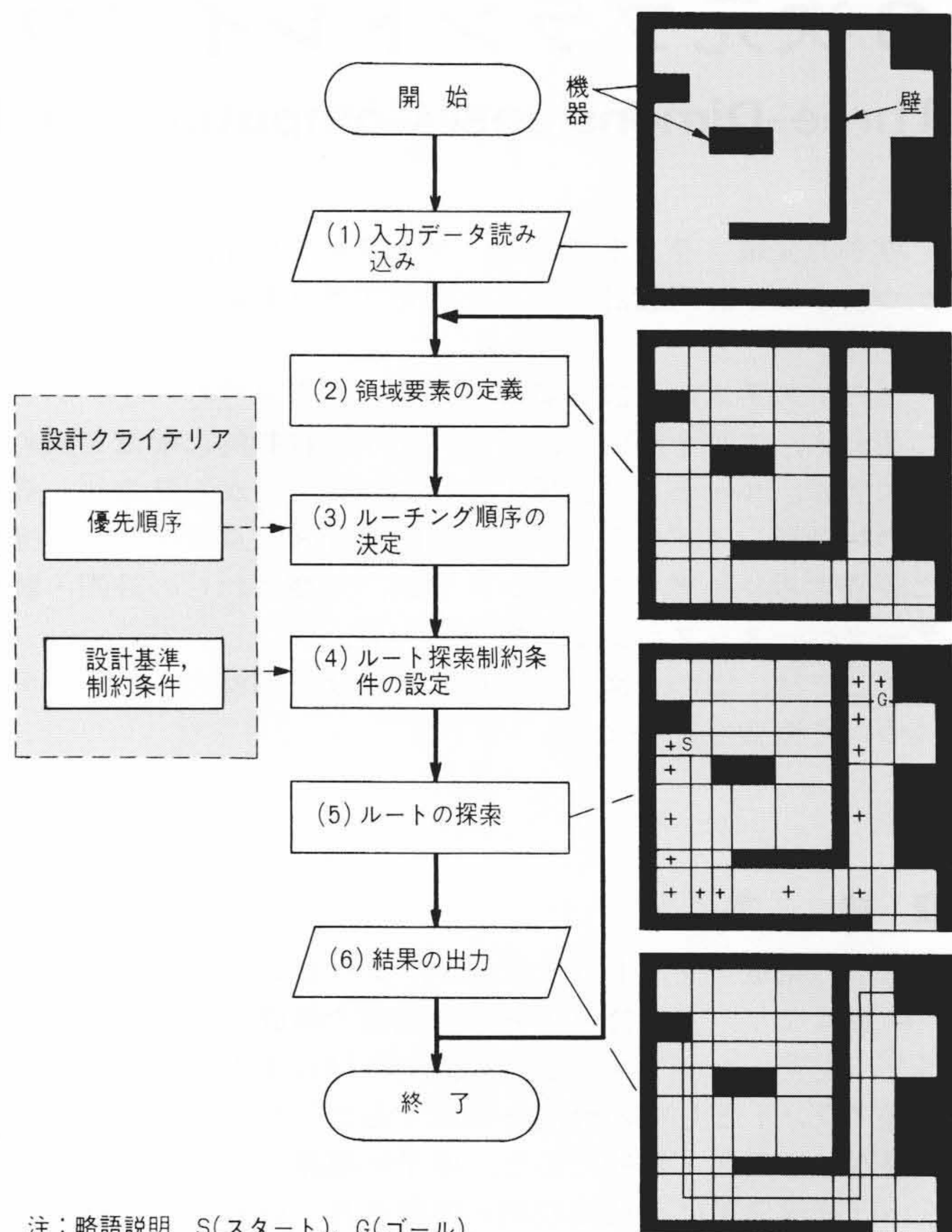
図1 3次元プラントレイアウト計画CADシステムフロー 設計情報入力、躯体・機器入力から自動レイアウト、対話レイアウトで配管、ケーブルトレイ及び空調ダクトのルート計画を行ない、機能性・操作性の評価を行なった後、グラフィックモデルシミュレーションを用い、それらの総合調整評価を行なう。最終的な承認を受け、関連する図面、図書を出力する。更に、データはFA・CAMシステムへ引き継がれる。

できる小口径管のFAシステムであり、製作情報をデータベースから電話回線を通じて入手し、稼動する配管加工工場である。

3 レイアウトシステム

3.1 自動レイアウトシステム

本システムは、配管ルートの始点から終点までを最短距離で結び、しかも設計クライテリアを反映することにより熟練



注：略語説明 S(スタート), G(ゴール)

図2 自動レイアウトシステムのフロー 左側に処理手順を、右側に2次元での例を示す。

者と同等のレイアウト計画が可能な自動レイアウトシステムである。その処理手順は図2に示すように以下に述べるとおりである。

- (1) 躯体・機器配置情報、P&ID(配管計装線図)情報など配管ルーティングに必要な情報をデータベースから自動的に読み込む。
- (2) 読み込まれた物体・機器などの障害物データをもとに、レイアウト空間を3次元的に自動メッシュ分割し、その情報をコンピュータに登録する(領域要素の定義)。
- (3) 口径の大きい配管、重要な配管を優先的に選定し、ルーティング順序を決定する。
- (4) 設計クライテリアをもとに、ルート探索の際に守らなければならない制約条件を設定する。
- (5) 設計クライテリアを守りながら、始点から終点までを最短距離となるようルート探索を行なう。
- (6) ルート探索結果(位置座標)をデータベースへ自動的に登録する。

また、(2)～(6)を繰り返すことにより、複数本の自動レイアウトが可能となる。

(1) 領域要素の定義²⁾

領域要素を定義するためのレイアウト空間の分割には、データ量や計算時間の短縮のために次のような手段を用いた。

- (a) 躯体・機器などの障害物をレイアウト空間のX軸、Y軸、Z軸に平行な直方体として取り扱う。
- (b) 障害物の配置と大きさに対応した効率的な空間の分割を行なう(図2参照)。

(2) 設計クライテリアの反映

熟練者と同様のルーティングを行なうには、設計クライテリ

アをコンピュータの中で知識としていかに整理よく扱うかが問題となってくる。現在、コンピュータで扱える設計クライテリアは約140件である。設計クライテリアはコンピュータの中ではIf…、Then…形ルールとして表現され、その内容としては図3に示すようなものがあり、それらは二つに大別できる。

(a) 優先順序

配管口径、流体区分、耐震クラスなどの重要度に基づく優先順序のクライテリアであり、これに従ってルーティング順序を決定する。

(b) 設計基準・制約条件

ルート探索の際の制約条件となるようなクライテリアである。これらはP&ID情報などのデータと組み合わせて推論される。例えば配管Lが「低線量配管」で、エリアAが「分解作業スペース」であるとする、図3に示す最小間隔のクライテリアを用いて「配管LはAから2,500mm以上離さなければならない。」という制約条件が成立する。

(3) ルート探索法³⁾

ルート探索については迷路法を応用して最適ルートを決する手法を開発した。迷路法の原理について図4を用いて説明する。同図で(a)図は探索初期、(b)図は探索途中、(c)図は結果を示す。

迷路法は、スタートから波紋が広がっていくように〔図4(a)〕、ゴールまでの探索可能な領域要素をすべて数え上げそのうち「コスト」がいちばん低いものを順次選択していき〔同図(b)〕、その間の最短ルートを求める〔同図(c)〕最適化手法である。ここで各領域要素の「コスト」とは距離の推定値を表わし、スタートからその領域要素までの探索された距離と、その領域要素からゴールまでの障害物を無視した距離の和である。また、探索された領域要素は以降の配管ルートの障害物として定義される。

このような迷路法を応用することにより、次のような特徴をもつルーティングが可能となる。

- (1) 障害物に対しては領域要素は作られないので、干渉は自動的に回避される。
- (2) 曲がりを生じる場合には、その分を重みをかけてコストに加えることにより、曲がりの少ないルートを求めることができる。
- (3) 制約条件を満足しない領域要素は探索の対象とはならないので、設計クライテリアを守りながらのルート探索が可能となる。

また、この自動レイアウトシステムでは配管だけでなく、ケーブルトレイ、空調ダクトのルーティングにも適用できる。

以上の結果、所定の優先順序に従った設計クライテリアを守り、干渉を避け、最短でかつ曲がり点の少ない最適ルートを求める自動レイアウトが可能となり、次に述べるような効果が期待できる。

- (1) 設計の迅速化による計画段階でのケーススタディが可能となり、最適レイアウト計画が容易となる。
- (2) 干渉、接近回避によるやり直し作業の削減が図れる。
- (3) 設計クライテリアを配管約140件、トレイ約60件、ダクト約32件を各ルーティングに反映できる。
- (4) 自動ルート決定率は100%で、そのうち60~70%は修正が不要となる見通しである。

修正不要率については、クライテリアの数を増やせば増やすほど100%に近づくものと思われるが、データ量及び計算時間が膨大となり実用的でないため、残りは対話レイアウトシステムで修正するものとする。

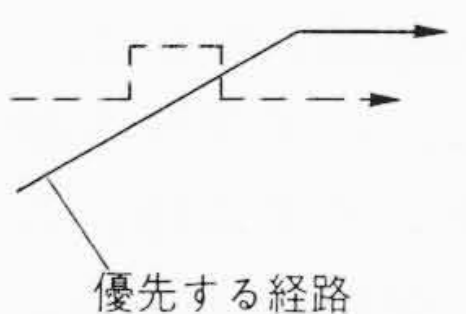
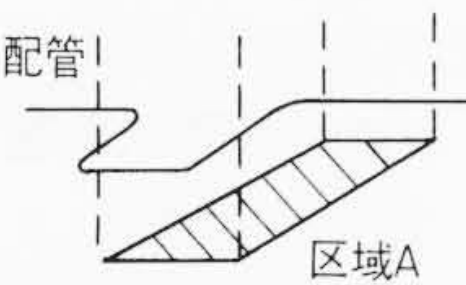
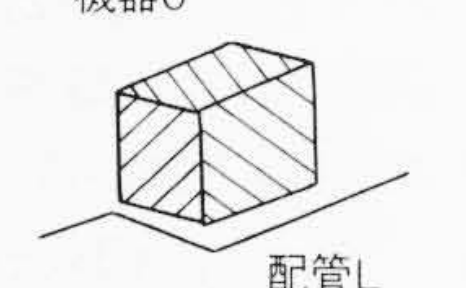
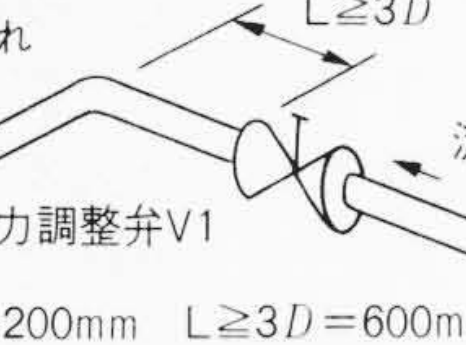
項目	内容	模式図
優先順序	口径の大きな配管を、優先してルーティングする。 口径が同じならば、蒸気ドレン配管は蒸気配管に優先する。	
設計基準・制約条件	禁止区域	低線量配管は、非放射能エリアを通さない。 
	最小間隔	低線量配管は、分解作業スペースから2,500mm以上間隔をおく。 
	直管部長さ	圧力調整弁の下流部には配管の口径をDとして、3D以上の長さの直管部を確保する。 
	分岐方向	空気配管の分岐は、配管の水平部に上方向に設置する。 

図3 設計クライテリアの例 設計クライテリアの例を、その模式図とともに示したものである。

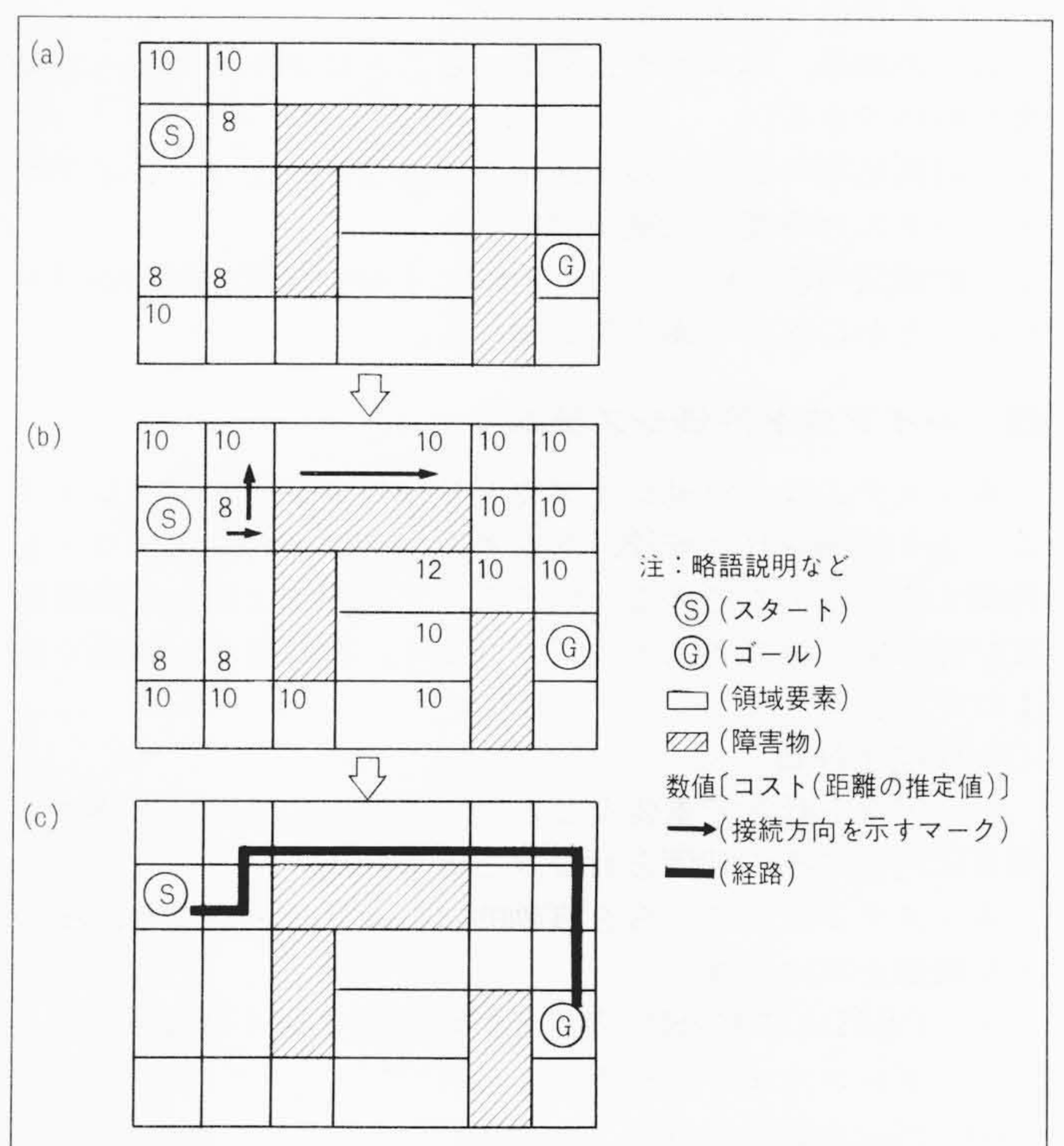


図4 迷路法の原理 経路探索法の原理を示すため、2次元の簡単な例について経路探索のプロセスを示したものである。図(a)は探索初期を、図(b)は探索途中を、図(c)は探索終了結果を示す。ここで、数値はコストを表わす。本図で一目盛を1とすると、例えばスタートの右隣の領域要素のコストは、スタートからの距離1+ゴールまでの障害物を無視した距離7=8ということになる(距離の計算は中心から中心で行なう)。

3.2 対話レイアウトシステム⁴⁾

本システムは、自動レイアウトシステムによって計画されたレイアウト結果を、設計者が長年にわたって培ってきた経験・知識をもとに、一部修正・追加を行なうシステムである。更に、レイアウト結果を計画図として自動的に出力する。

本システムは、これらの処理を設計者がコンピュータと対話しながら行なうシステムとした。対話レイアウトシステムを開発するに当たって、対話処理の応答性を高速化するため下記項目の処理に重点を置いた。

- (1) 図形処理の高速化
- (2) データ構造のコンパクト化
- (3) 操作性

このうち、(1)、(2)について以下に説明する。

- (1) 図形処理の高速化

3次元の立体図形の処理としては投影データの作成、干渉チェック、断面形状の作成、かくれ線処理などがあるが、システムの応答性は投影データ作成の処理時間によって決まる。本システムでは投影データ作成処理を、基本立体単位に専用の作画プログラムを用意することにより処理の高速化を図った。例えば、円柱では中心軸の方向と表示方向のなす角により円、長方形、長円のタイプに分類できる。

- (2) データ構造のコンパクト化

基本立体の組み合わせで記述する方法は、データ構造のコンパクト化にもつながる。本システムでは立体を面、りょう線、頂点の関係を厳密に記述するB-Reps (Boundary Representation) 方法ではなく、基本立体間の組み合わせ方だけを記述するCSG (Constructive Solid Geometry) 方法を用いた。また配管、トレイ及びダクトのルート形状は、ルートの断面形状をルートの曲がり点から成る点列で記述するものとした。これらの方法により検索時間を最小化したコンパクトなデータ構造を実現した。

以上の結果、本システムを用いることにより次のような効果が期待できる。

- (1) 対話処理の応答性の高速化を図ることにより、レイアウトデータ入力時間の低減が図れる。
- (2) 計画図のCAD化により、計画に十分な検討時間がかけられることから内容の高度化が図れる。

4 レイアウト評価システム

本システムは、自動レイアウト及び対話レイアウトシステムにより計画された配管、トレイ及びダクトのレイアウトを評価するシステムである。レイアウトの評価は基本計画段階及び計画完了後の各ステップで行なう。評価項目と特徴を表1に示す。

- (1) 機能性評価

レイアウト計画で重要なことは、下流側の設計に影響する項目に対してその評価を行なうことである。

本システムは、これらを自動的に行なうことができ、その主な機能を次に示す。

- (a) P&IDとの整合性(各ラインの接続に誤りはないか)
- (b) ドレンたまりの有無
- (c) ベント抜きの有無
- (d) 弁位置の妥当性

これらの評価は、設計者がレイアウト計画を行ないながら実施可能であり、いつでも見たいときに評価結果を画面に表示できる。

図5にP&IDと配管ルートとの整合性の評価結果を示す。出

表1 レイアウト評価システムの評価項目と特徴 レイアウト評価システムは、大別して機能性評価、操作性評価及び総合調整評価の3項目から構成されている。

評価項目	内 容	特 徴
1. 機能性評価	(1) P & IDとの整合性 (2) ドレンたまりの有無 (3) ベント抜きの有無 (4) 弁位置の妥当性	評価を自動化し、対話形で結果が表示できる。
2. 操作性評価	(1) 通路性 (2) 機器搬出入性 (3) ISI操作性 (4) 弁操作性 (5) 弁分解点検作業性	動作シミュレーション機能を用いて、詳細なチェックができる。
3. 総合調整評価	(1) 社内レビュー (2) 顧客レビュー	レビュー、コメントに対応したレイアウトの変更がオンラインでできる。

注：略語説明 P & ID(配管計装線図)
ISI(供用期間中検査)

力画面上半分に評価結果が表示された例である。

- (2) 操作性評価

配管、トレイ及びダクトのレイアウト総合調整の段階で、動作シミュレーション機能を用い、主として次のような評価を行なうことができる。

- (a) 通路性
- (b) 機器搬出入性
- (c) ISI(供用期間中検査)点検作業性
- (d) 弁操作性
- (e) 弁分解点検作業性

これらは、高速3次元端末の使用によって、従来のプラスチックモデルに比べてより詳細なチェックが可能となった。

図6に通路性の評価を行なっている画像を示す。画像は歩行中の情景描写をアニメーションで表示することができる。

- (3) 総合調整評価

評価の最終段階として配管、トレイ及びダクトの個別に進められるレイアウト結果を総合調整し、評価する手段としてグラフィックモデルシミュレーション手法を用いた。従来のプラスチックモデルと比較すると、この方式には次のような特徴がある。

- (a) コンピュータモデルの作成がレイアウト計画設計と同時にできる。
- (b) 対話処理機能(縮尺度スケール、作業者モデル表示など)

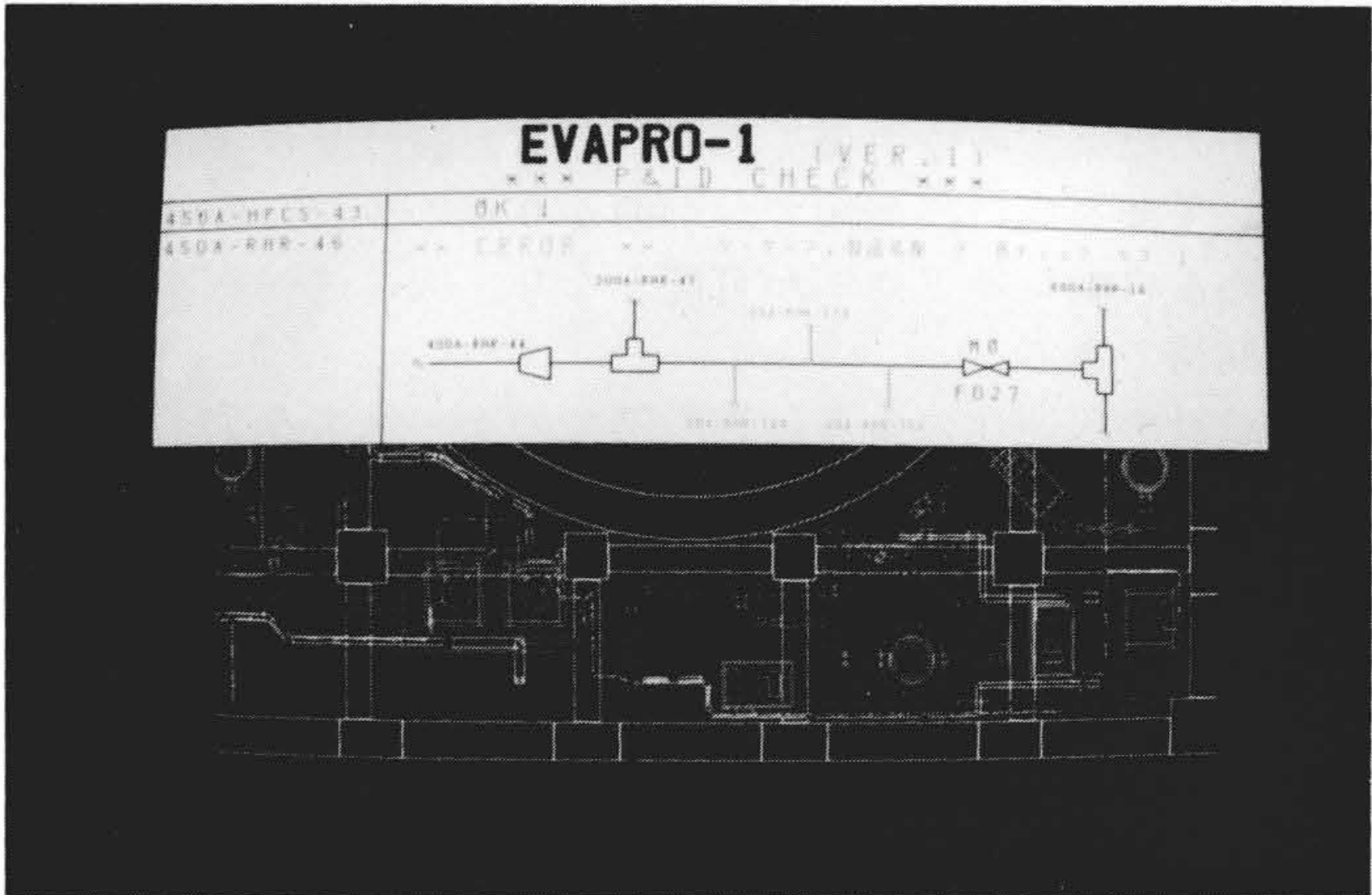


図5 P & IDとの整合性の評価結果 P & IDとの整合性のチェックを行ない、P & IDどおりなら、OK!のメッセージを、接続関係に間違いがある場合には、ERRORのメッセージを出し、同時に正しいP & ID情報が画面に表示される。

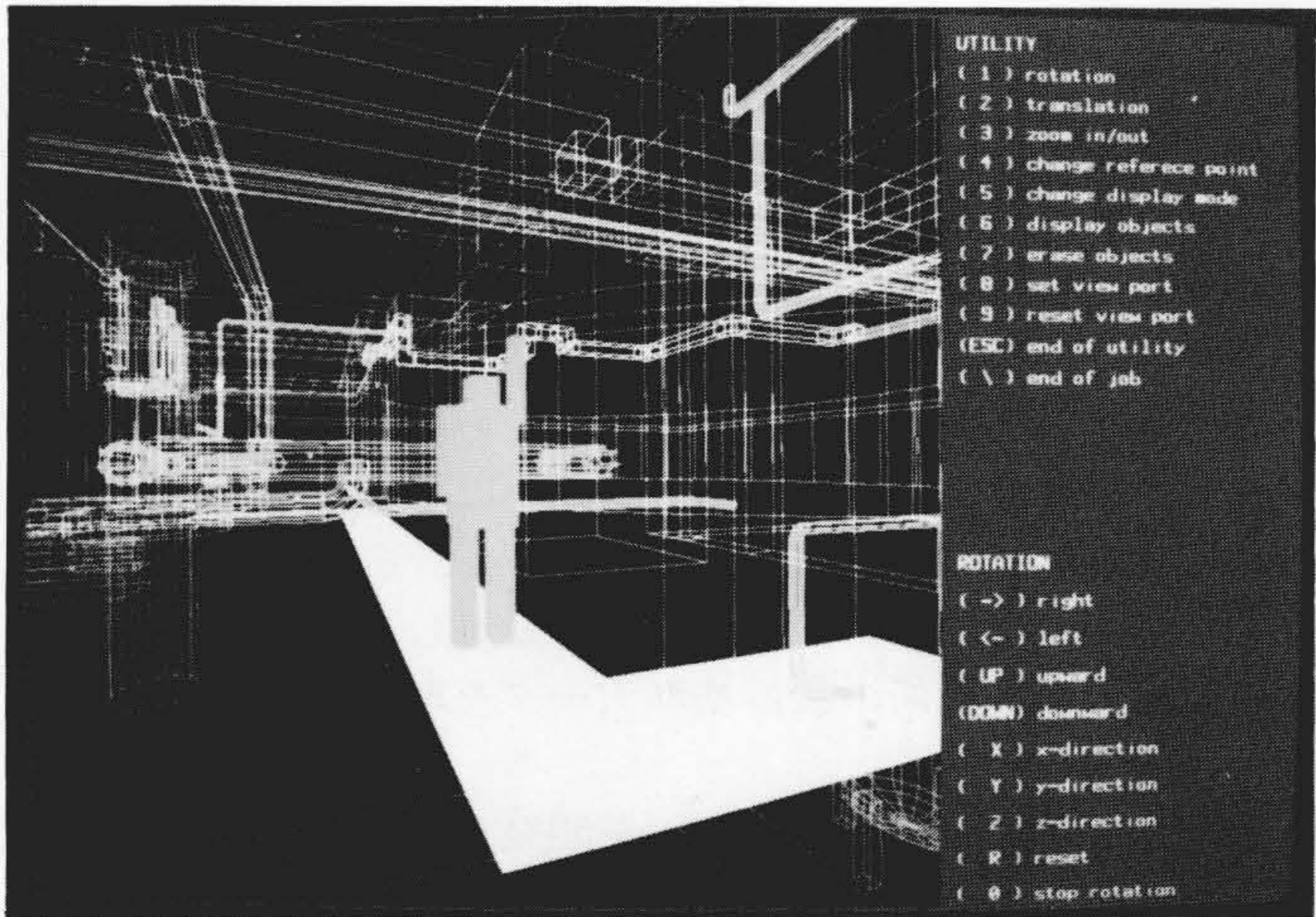


図6 通路性の評価 本図は、通路上の人間を示したものである。人間を通路上で動かすことにより、通路性のチェックを行ない、干渉が生ずると人間が点滅する。また、何に干渉したかも同時に表示される。

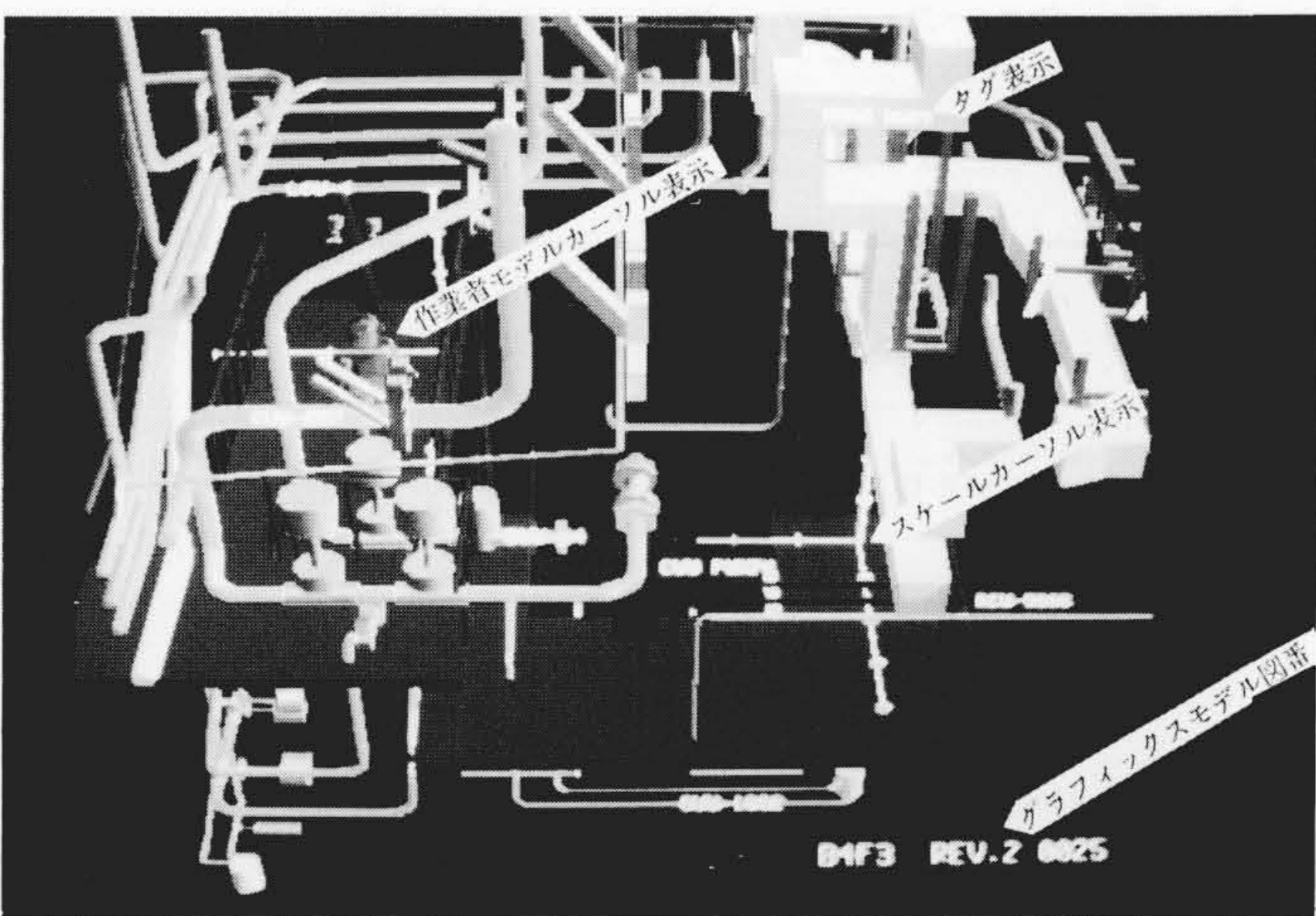


図7 コンピュータモデル表示例 グラフィックモデルシミュレーションによって作成されたコンピュータモデル表示例を示す。作業者モデル、縮尺度スケール、タグなどを対話形式で表示し、各種のチェックができる。

を用いて各種の機能性評価がオンラインでできる。

(c) デザインレビューで、コメントに対応したレイアウトデータの変更がオンラインでできる。

グラフィックモデルシミュレーションによる表示画面を図7に示す。同図は対話処理で作業者モデルや縮尺度を示すスケールなどを表示し、レイアウトの総合調整を設計者が目視で確認可能にした画面である。こうした画面の回転、拡大などをオンラインで表示できる。

以上、本システムを用いることにより、次のような効果が期待できる。

- (1) 機能性評価により、計画の段階で系統構成など、基本的な問題点を摘出できる。
- (2) プラスチックモデルに比べて、混み入った部分の寸法確認及び機器のメンテナンス性、弁の操作性などの確認が容易にできる。
- (3) プラスチックモデルに比べて変更、修正、追加などが容易にかつ迅速にできる。

5 データベースシステム

本システムは上流側のレイアウト計画から下流側の施工設計及びCAM・FAシステムで扱うデータを一元管理し、設計

者に常に最新の情報を提供するものである。更に、種々のデータの整合性、信頼性、機密保護を保証し、エンジニアリング業務の迅速かつ円滑な運用を支援する。

本システムは図8に示す8サブシステムから構成されている。これらのサブシステムの機能を表2に示す。本システムの主な特徴を以下に述べる。

(1) 3次元図形データの表現法

CADシステムによりレイアウト計画された3次元図形データ群は、エンジニアリングデータベースに登録管理される。これらの3次元図形データは、単純な基本図形(四角柱、円柱、円すい台など計15個)の組み合わせ及び接続定義情報による結合関係により表現した。また、3次元図形データの配置位置は、次に示す関係で表現されている。

プラント座標系 → 建屋座標系 → 部品座標系 → 基本図形座標系

図9に3次元図形データのデータベース構造例を示す。

このような表現形式を採用したのは、以下の理由による。

- (a) データベース構造がコンパクトになり、データ量が少なくて済む。
- (b) 複雑な部品も簡単に表現できる。
- (c) 部品の形状変更が容易に行なえる。

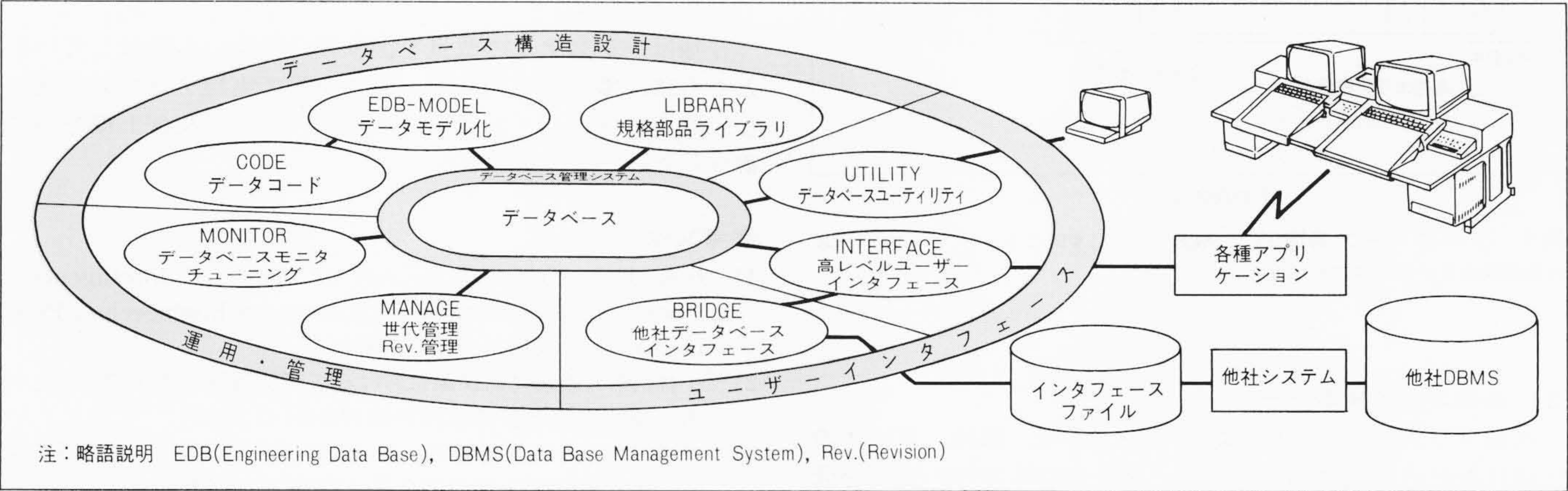
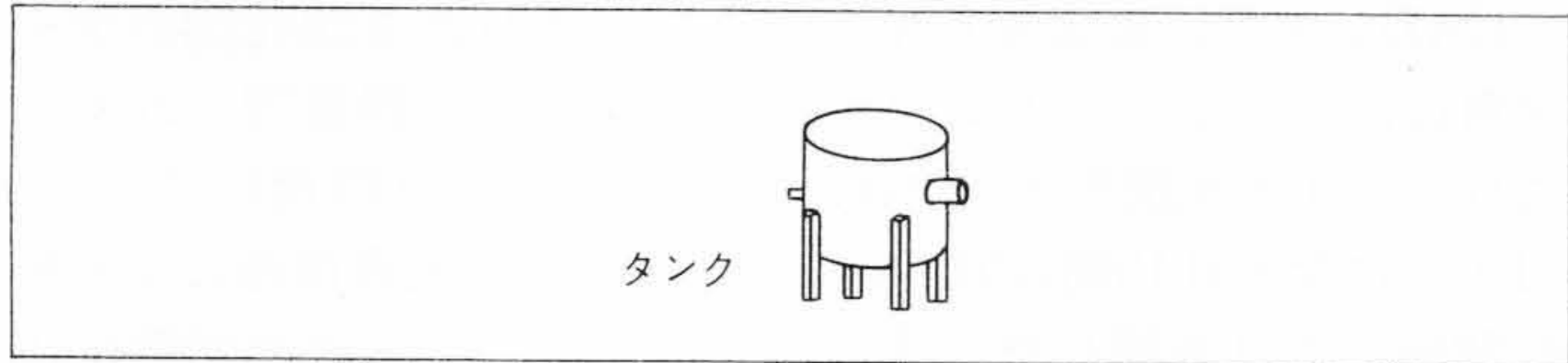


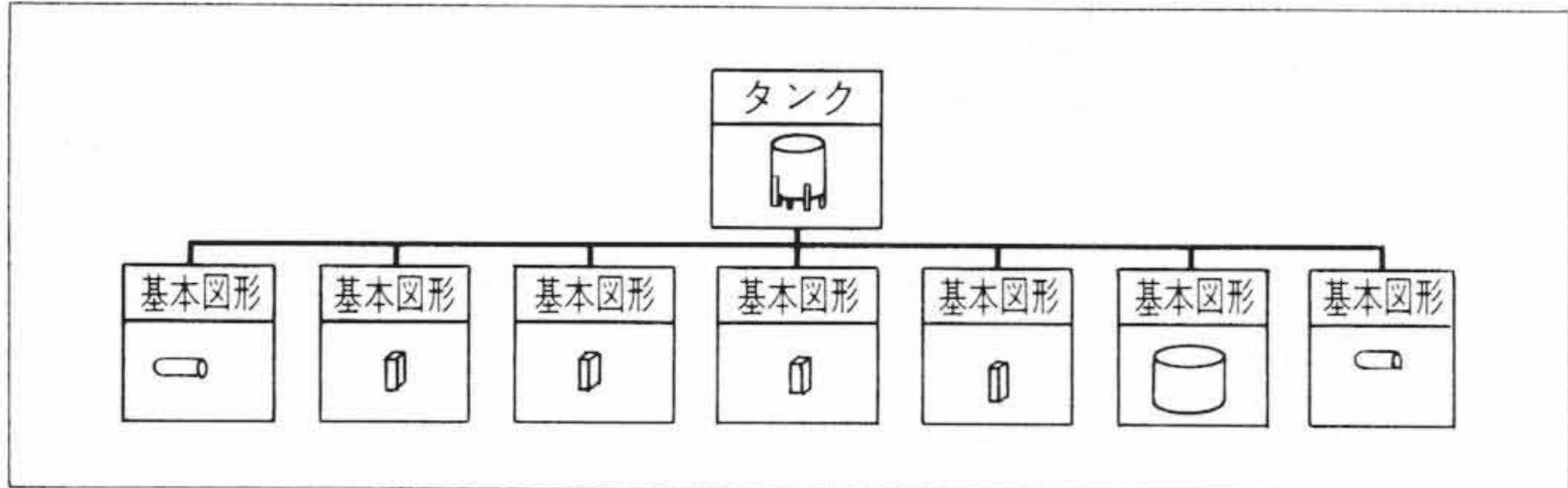
図8 データベースシステム構成 データベース設計にとって不可欠なデータベース構造設計、ユーザーインタフェース、運用・管理を8サブシステムに分割し、効率よく開発を進めた。

表2 データベースシステム構成の役割と効果 図8に示す8サブシステムの内容を示す。

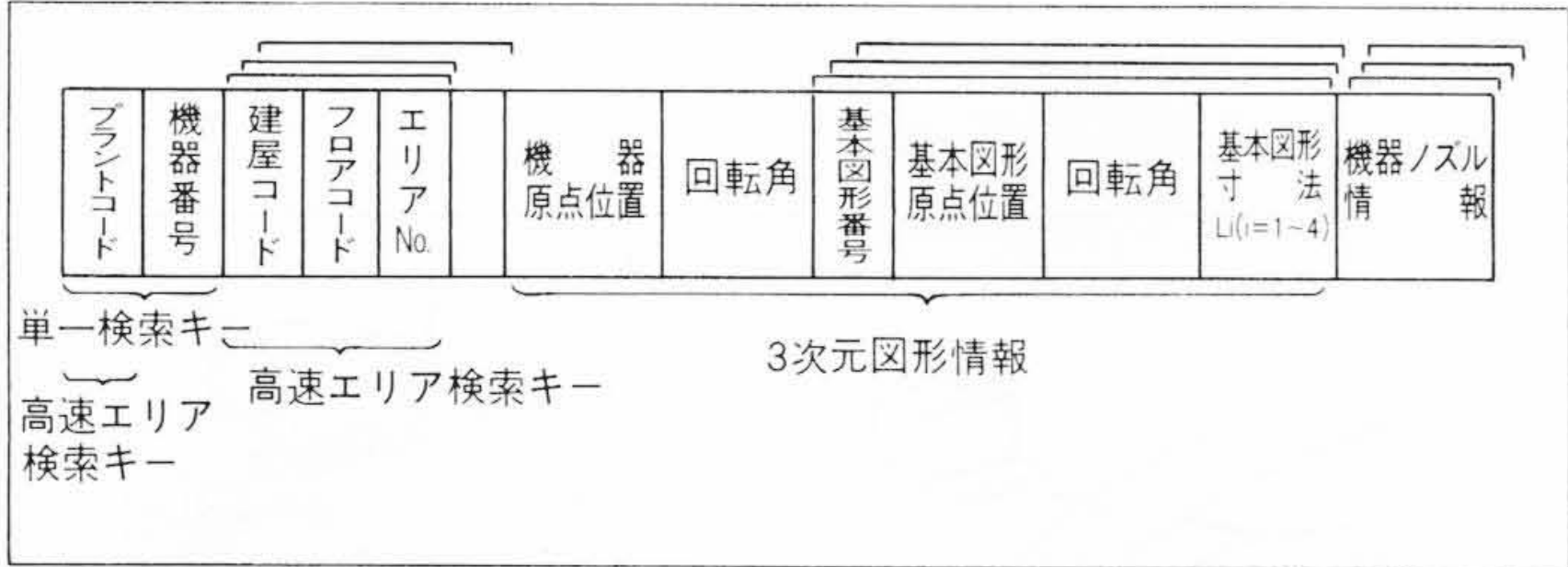
No.	データベースシステム構成	役 割	効 果
1	CODE (データコード)	各種設計データを、各アプリケーションプログラムが共通認識できるコード体系を設定。	膨大な量のデータの整理、統合化が図れた。
2	EDB-MODEL (データモデル化)	3次元図形データの表現法	レイアウトデータの修正、変更、追加を容易にした。
3	LIBRARY (規格部品ライブラリ)	配管、ケーブルトレイなどの標準部品の寸法、重量などのデータを整理、統合化しデータベースに登録する。	各種標準データの一元化によるデータ信頼性向上
4	UTILITY (データベースユーティリティ)	データベース内の種々のデータを端末で容易に追加、削除、変更が行なえ、運用の柔軟性を高める。	データの変更に迅速に対応できる。
5	INTERFACE (高レベルユーザーインターフェース)	データベース管理システムのもつ複雑なユーザーインターフェースを習熟せず、容易にデータベースとやりとりが行なえるインターフェースパッケージである。	各アプリケーションプログラム作成時間の大幅短縮
6	BRIDGE (他社データベースインターフェース)	他社データベースとのデータのやりとりを行なう。	他社設計データの入力可能
7	MANAGE (世代管理、Revision管理)	データの世代管理、Revision管理を行なう。	データ信頼性の向上
8	MONITOR (データベースモニタ、チューニング)	各アプリケーションプログラムのデータベースとの入出力を行なう部分の性能をチェックし、スピードアップを図る。	応答性の改善が図れる。



(a) コンピュータモデル



(b) 論理構造



(c) 物理構造

図9 データベース構造例 機器(タンク)を例にとって、データベースの論理構造及び物理構造を示した。

(2) 高速エリア検索キー

高速エリア検索キーの目的はデータ管理、保護、データの圧縮化などの負荷に起因するデータ検索の応答性の劣化を回避すること、及びより効率の良い検索を行なうことにある。高速エリア検索キーは、プラント建屋の柱心で囲まれた1

区画を1エリアNo.として、プラント名+建屋名+フロア名+エリアNo.で構成している。これを個々の3次元図形データに格納することにより、検索範囲が限定でき、アプリケーションプログラムの読み込むデータ数を最小限にとどめ、応答時間を速くすることができた。

(3) 共通データの統合化

従来各プログラムが重複してもっていた配管、トレイ及びダクトの標準部品の寸法、重量情報をはじめ、法規などで定められた設計基準や社内基準に至るまで、広範囲の標準データを整理、統合化しデータベースに登録した。この結果、常に信頼性の高い最新の設計基準データを取り出すことができる。

以上のデータベースシステムを開発したことにより、次のような効果がある。

- (a) データの一元化を行なうことにより、上流側の計画設計から下流側のCAM・FAまで一気にデータの受け渡しができ、設計データの信頼性が確保された。
- (b) 基本設計データを初期登録することにより設計効率向上が図れた。

6 結 言

原子力発電プラントレイアウト計画に知識工学、CAD/CAM、コンピュータグラフィックスなどの最新技術を取り入れた新しい設計手法として、3次元プラントレイアウト計画CADシステムを開発した。本システムを実機プラント設計に適用することにより、次のような効果が期待できる。

- (1) 自動レイアウトシステムにより、設計の迅速化が図れ、計画段階で種々のケーススタディができ系統的な最適レイアウト計画が可能となった。
- (2) 対話レイアウトシステムにより、配管、トレイ、ダクトの3次元図形処理及びコンピュータモデルの作成・変更・追加が容易となった。
- (3) レイアウト評価システムにより、P&IDとの整合性などの機能性評価、弁分解点検作業性などの操作性評価を行ない、計画段階での問題点の摘出が図れる。
- (4) 総合調整評価及びレビューにグラフィックモデルシミュレーション手法を用いることにより、変更・追加などにも即座に対応でき、設計時間の低減が図れる。
- (5) 計画設計データは、データベースを介して生産設計CAD・CAM・FAシステムへ連携されるため、設計データ転記誤りなどによるトラブルを防止できる。

以上によりプラントレイアウト計画設計の効率向上が期待できる。

今後は、システムの改良を図り使いやすいものにしていくとともに、電力各社の指導・協力を得て実機プラントに適用し、原子力プラントレイアウト計画の最適化及び工程短縮に寄与したい。

参考文献

- 1) E.A. Feigenbaum: The Art of Artificial Intelligence: Themes and Case Studies of Knowledge Engineering, Proc. IJCAI-77, pp.1014~1029(1977)
- 2) 小林, 外: 最適経路探索における空間位置情報の知識表現と利用, 情報処理学会第28回全国大会6H-3(昭59)
- 3) 満田, 外: 3次元迷路法における空間分割とルート探索法の開発, 情報処理学会第30回全国大会2K-5(昭60)
- 4) 太田, 外: 配管レイアウトシステムの開発, 機械学会論文集No. 858-1 p.15(1985)