

Title	制約指向探索と最適化法とのハイブリッド化によるプラントの配置設計手法
Author(s)	藤田, 喜久雄; 赤木, 新介; 長谷, 宏明 他
Citation	日本機械学会論文集 C編. 1992, 58(547), p. 967-974
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/3142
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

制約指向探索と最適化法とのハイブリッド化による プラントの配置設計手法*

藤田 喜久雄[†] 赤木 新介[†], 長谷 宏明[‡]
仲戸川 哲人[§] 竹内 誠[§]

Hybrid-Type Approach for Plant Layout Design with a Constraint-Directed Search and a Mathematical Optimization Technique

Kikuo FUJITA, Shinsuke AKAGI, Hiroaki HASE,
Tetsundo NAKATOGAWA and Makoto TAKEUCHI

A hybrid-type approach for plant layout design is presented with a constraint-directed search procedure and a mathematical optimization technique. In layout design, a plant must be arranged to satisfy spatial constraints imposed by its components. In our approach, the whole space of a plant building is divided into the finite compartments with a modular size in order to separate the description of the layout into the combinational part and the dimensional part. According to this, the approach consists of two steps. In the first step, a constraint-directed search procedure is applied for fixing the combinational relations among plant components so as to satisfy the spatial layout conditions. In the second step, an optimization technique is applied for determining the actual dimensions of compartments so as to minimize the size of a plant building considering the size of components. In the optimization, mixed-integer programming and sequential linear programming are combined and the formulation is carried out automatically from the result of the first step. This hybrid approach has been applied to the design of a nuclear power plant in order to check its validity and effectiveness.

Key Words : Design Engineering, Layout Design, Optimal Design, Mathematical Optimization, Constraint-Directed Search, Plant Layout

1 緒言

各種発電設備をはじめとするプラントの設計においては、プラントを構成する各種機器の位置関係を定める配置設計が大きな比重を占めており、コンピュータの利用による省力設計への期待が大きい。このため、古くから最適化手法や人工知能技術の援用による設計支援システムが試みられている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、最適化手法の援用⁽¹⁾については、各種の空間的な配置条件を数学的な形式で取り扱うことが困難であるため、比較的小規模の問題にその適用が限られている。また、記号処理やヒューリスティクスを導入したエキスパートシステム⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾についても、その多くが平面的な配置問題を扱っており、プラント設計における配置問題に比べてなお小規模の問題を対象としている。

プラント設計における配置問題の特徴は、空間的な

配置問題であることはもちろんのこと、各配置要素のサイズが多様であること、さらに、各種の機器がプラント建屋内に詰め込まれるようにして配置されるなどの点にある。このため、従来からの上記手法をそのままプラント配置設計に適用することは容易ではなく、新たな手法の導入が望まれる。これに対して、著者らは先に、プラント建屋の空間を標準的な大きさをもった単位格子の集合として表現することを基本として、制約指向探索による手法⁽⁵⁾を導入することにより、プラントの基本配置設計を支援するシステム⁽⁶⁾を構築した。また、そのシステムを原子力発電プラントの配置設計に適用して有効性の検証を行なった。

本研究では、先に提案した手法をさらに発展させ、プラント配置設計の過程に対するより全体的な支援ができるようにする。すなわち、配置対象の空間であるプラント建屋の内部をまず標準的な大きさを有する単位格子の集合として表現し、そのもとで各種機器間の位置関係を制約指向探索により定めた⁽⁵⁾⁽⁶⁾後、数学的な定式化のもとで最適化手法を融合することにより、

*平成3年3月30日第68期通常総会にて講演，原稿受付 平成3年7月22日。

[†]正員，大阪大学工学部，(〒565 吹田市山田丘 2-1)。

[‡]学生員，三菱電機，(研究当時 大阪大学大学院)。

[§]正員，三菱原子力工業，(〒105 港区芝公園 2-4-1)。

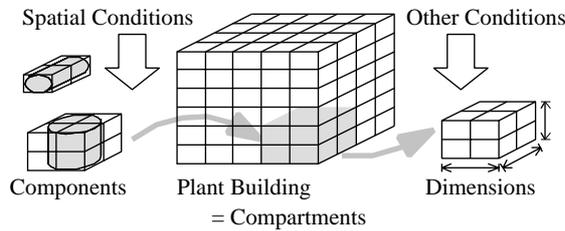


図1 配置設計と単位格子

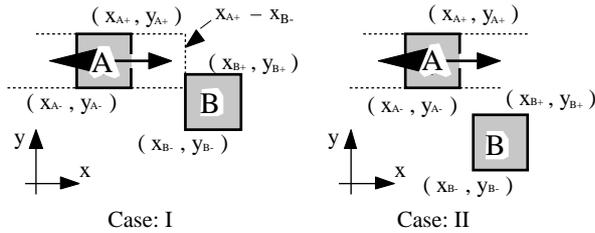


図2 配置要素の位置関係

各機器のプラント建屋内における具体的な位置寸法を決定するようにする(図1)。また、本手法を原子力発電プラントの配置設計に適用してその有効性を検証する。

2 プラント配置設計とその特徴

2.1 プラント構成要素の配置位置 配置設計の過程では、各種の配置条件を満足するようにプラントの構成要素(ポンプや熱交換器、タンクなどの機器、あるいはそれらが配置される部屋)の位置を定める必要がある。この過程では同時に各要素間の重なりを避けつつ配置を行う必要がある、その重なりを避けるためには、位置関係についての位相的な関係を固定した上で、数量的な検証を行う必要がある。図2はその状況の一例を示したものである。なお、各要素の形状は長方形であり、それぞれが $(x_{i-}, y_{i-}) - (x_{i+}, y_{i+})$, $(i = A, B)$ の位置に配置されているものとする。このとき、ケースIにおいて要素Aがx軸方向に移動する場合、重なりを検証は $x_{A+} \leq x_{B-}$ という不等式によって行うことができる。一方、ケースIIにおいて要素Aがx軸方向にのみ移動する場合には重なりを検証する必要はない。しかし、要素Aがいかなる方向にも動き得る場合には、もはや上記のような不等式によりその検証を行うことはできず、「要素Aが要素Bよりも上方に配置されているかどうか」などの位置関係についての組合せ条件をあわせて検証することが必要である。このため、要素間の重なりを具体的な配置位置に対して検証するためには、あらかじめ図2に示すような組合

表1 配置要素の例とそのサイズ

Component	Dimensions	Compartments
	[W × D × H in meters]	[W × D × H]
boric acid pump room	9.0 × 8.0 × 7.0	1 × 1 × 1
boric acid tank room A	7.6 × 6.5 × 14.5	1 × 1 × 2
charging pump room A	17.0 × 6.75 × 3.8	3 × 1 × 1
filter room	25.0 × 13.0 × 7.6	3 × 2 × 1
new fuel pit	18.4 × 11.0 × 12.5	3 × 1 × 2

せ的な位置関係を固定することが必要となる。

一方、配置設計における各種の条件そのものは、制約条件式や目的関数として定義することができるものの、図2をはじめとする数多くの組合せ条件が問題の定式化に含まれるため、最適化手法の適用をはじめとする数量的な取り扱いにより直ちに配置解を求めることは困難であるものと考えられる。

以上のような問題点を解決するためには、配置要素の位置に関する情報を「要素間の位置関係に関する部分」と「具体的な位置寸法に関する部分」とに分けて表現することが必要であり、その上で、様々な組合せ条件を扱うための手法とそれに対して具体的な位置寸法を定めるための手法とをハイブリッド化することが有効であると考えられる。

2.2 単位格子による配置空間の表現 このようなハイブリッド化を実現するためには、配置要素間の空間的な位置関係を数量的な取り扱いから分離して処理するためのフレームワークが必要である。それに対して、著者らは既報⁽⁵⁾で、単位格子による空間表現の方法を提案した。すなわち、プラント建屋の空間を前出図1のように標準的な大きさの単位格子の集合として表現し、それに伴って各配置要素の大きさについても単位格子の数により表現するようにした。表1は原子力発電プラントにおける例を示したものであり、配置要素の具体的な大きさとそれに対応する単位格子の数を示したものである。なお、表の場合、各単位格子は一辺の長さがおおよそ6~9mの立方体に相当する。

以上のような単位格子による表現を導入することにより、本研究では、配置設計の過程を以下の二つの過程に分けて考えることにする。

- (1) 配置位置関係決定過程： 単位格子に基づいて配置要素間の位置関係を空間的な配置条件を満足するように決定する過程。
- (2) 配置位置寸法決定過程： 上記の位置関係のもとで具体的な配置の位置寸法を決定する過程。

2.3 プラント配置における設計条件 配置設計手法について示す前に、配置設計において満たされるべき条件について整理しておく。表2は、そのような

表 2 配置設計条件の種類と内容

	配置設計条件の種類	配置設計条件の内容	(1) 位置関係決定過程における扱い	(2) 位置寸法決定過程における扱い
配置要素に関する条件	各配置要素の大きさに関する条件	各機器や機器室について必要な領域を確保する必要がある。	各機器室の大きさに対応する単位格子の数を定める。	各機器室の最小サイズを規定する。
	プラントの機能に関する要素間の空間的な条件	所要の機能を実現するためには、機器間の位置関係に所定の条件が満たされる必要がある。	各機器質間における位置関係を規定する(表3参照)。	(1) で定めた位置関係を保持する。
	機器間の通路に関する条件	各機器室に対して、建屋の出入り場所から必要な幅を有する通路が確保されなければならない。	各機器室から出入り場所の間に通路に対応する単位格子の列を確保する必要がある。	通路に対応する単位格子部分の最小サイズ(幅)を規定する。
プラント建屋に関する条件	プラント建屋の構造強度などに関する条件	プラント建屋を構成する壁や床はプラントの重量を支えるに足る、などの条件を満たす必要がある。	プラントの建屋の何れかの断面が構造壁になり得るように、単位格子を設定する。	プラント建屋や機器を支える壁や床の厚さを規定する。
プラントのコストに関する条件	プラント建屋に関するコスト	建屋自体の大きさに比例するものと見なすことができる。	総単位格子の数を設定条件として与える。	建屋のサイズを最小化すべき目的関数とする。
	プラントの配管長さに関するコスト	配管長さは最終的には配管設計の結果によって定まるが、配置設計の結果により大きな影響を受ける。	配管により接続された機器は互いに近い空間に配置されるべきである。	(1) で定められた位置関係を保持する。

条件を配置要素に関するもの・プラント建屋に関するもの・プラントのコストに関するものに分類した上で、その内容、および、前項で示した配置過程のそれぞれにおいてどのように取り扱われるかを示したものである。表中の各条件は、前項で示した配置過程の両者において考慮すべき条件やそれぞれの一方においてのみ考慮すべきものに分けることができる。また、各条件のうち、コストに関する条件は設計最適化手法における目的関数に対応し、他の条件は制約条件に対応するが、配置設計においては、それらを単に数式として表現することは容易ではない。そのため、前者の設計過程においてはコストに関する条件も制約条件のように扱って、各条件を満たす満足解を得ることが必要となる。

3 ハイブリッド化手法の構成

前節で示した空間表現の方法に基づいた配置設計手法の構成を図3に示す。本手法は、上述した配置位置関係決定過程と配置寸法決定過程との分割に対応して、2つの段階からなるハイブリッド化構成となる。

まず、第1段階では、AI手法のひとつである制約指向探索の手法を導入することにより配置要素間の位相的な位置関係を決定する。すなわち、プラント建屋に対する総単位格子の数を設定し、各要素の大きさや位

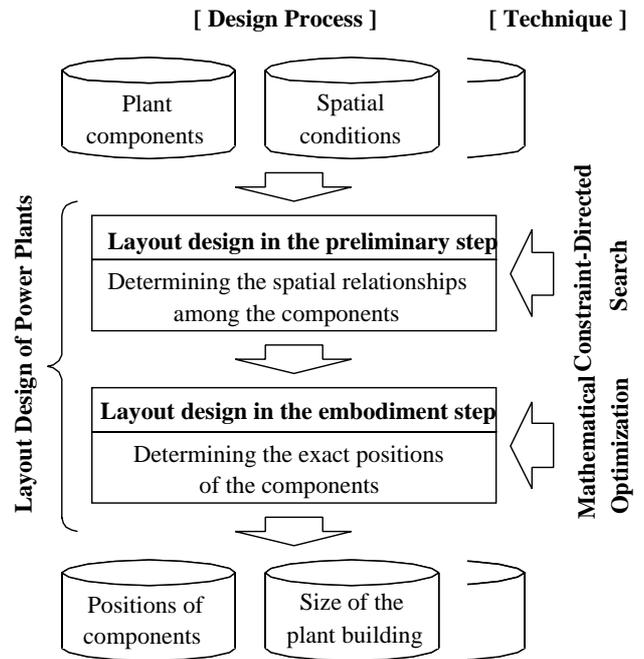


図 3 ハイブリッド化手法の構成

置関係についての条件を単位格子を用いて表現した上で、表2に示した配置条件のうち空間的な位置関係に関する条件を満足するように、それらの組合せを求めようにする⁽⁵⁾⁽⁶⁾。その過程については4節で示す。

表 3 配置制約の例

Classification	Examples
Obligatory type	
Regional constraint	A is located higher than B. A is located in the highest floor.
Combination constraint	A is located touching B. A is located in the different direction from B.
Global constraint	A has a path way to the entrance.
Suggestive type	
Priority constraint	A is located close to B. A is located in a higher floor.

続いて第 2 段階では、第 1 段階で決定した位置関係のもとで各配置要素の詳細な配置位置をその他の条件を満足するように決定する。この処理過程では、既に位相的な位置関係が固定されているため、各要素の大きさやその他の配置条件を数学的な表現により定式化することができる。そこで、各種の条件を制約条件式、プラント建屋のサイズの最小化を目的関数として、最適化手法を適用することにより、各位置寸法を決定するようにする。その詳細については 5 節で示す。

4 制約指向探索による位置関係の決定

本手法の第 1 段階では、単位格子による配置空間の表現のもとで制約指向探索により配置要素間の位置関係を定める⁽⁵⁾⁽⁶⁾。このような位置関係は前出表 2 のような各種の配置条件により規定されており、それらは表 3 に示すような各種の制約として表現することができる。これにより、単位格子による空間や要素の表現と相まって、配置問題を制約条件によって拘束されたある種の探索問題として取り扱うことができる。これに対して、縦型探索の手法を基本とし、義務的な配置制約 (Obligatory Constraints) による枝刈りを行うとともに、ある配置要素について実行可能な配置案に対して示唆的な配置制約 (Suggestive Constraints) や全体的な配置の状況に関するヒューリスティクスを適用することにより適切な優先付けを行って配置を進めていくようにする (図 4)。これにより、後出の図 8 に示すような配置結果を得ることができる。

5 最適化法による位置寸法の決定

本手法の第 2 段階では、前節の手法により定めた位置関係に対してそれぞれの要素の位置寸法を定める。この問題は以下のように、ある種の最適化問題として定式化することができる。

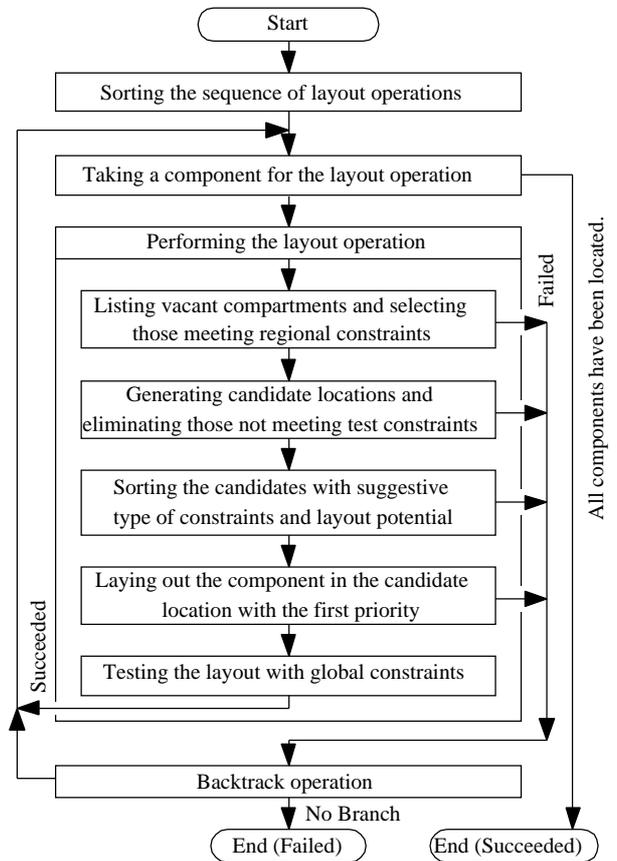


図 4 制約指向探索による位置関係決定過程

5.1 位置寸法決定のための定式化

5.1.1 設計変数 機器室などのある要素に関する位置変数を図 5 のように定義する。図のように、各要素についてそれぞれ天井・床・四方の壁の内側の位置に関する 6 個の変数を用意する。これに対して、それらの外側の位置はそれぞれの厚さをもとに計算することができる。なお、機器室のほか、プラント建屋の外壁や床、構造壁などについても、特殊な要素として図 5 と同様にして取り扱うことにする。一方、以下に示す制約条件式中のいくつかの組合せに関する条件を扱うために整数変数を導入する。また、図中において便宜上、座標系の向きを x 軸が西から東へ、 y 軸が南から北へ増加するように設定する。

5.1.2 制約条件 以下の条件に対して制約条件式を定義する。

(1) 配置要素に対して必要な領域を確保するための制約：本制約条件は、必要領域が縦・横・高さ方向の長さとして与えられる場合には、その配置方法をあわせて考慮することにより、以下の不等式として定義する

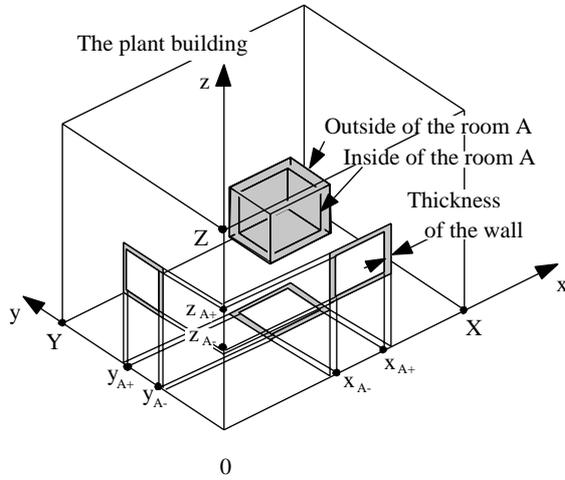


図5 配置要素に関する設計変数

ことができる。

$$\begin{aligned}
 x_{A+} - x_{A-} &\geq w_A, \\
 y_{A+} - y_{A-} &\geq d_A, \\
 z_{A+} - z_{A-} &\geq h_A \\
 \text{OR} \\
 x_{A+} - x_{A-} &\geq d_A, \\
 y_{A+} - y_{A-} &\geq w_A, \\
 z_{A+} - z_{A-} &\geq h_A
 \end{aligned} \tag{1}$$

ただし、 w_A, d_A, h_A ：要素 A の縦・横・高さ方向のそれぞれの必要最小寸法。

これに対して、式 (1) 中の組合せ条件は、0-1 整数変数、 $\delta_A = \{0, 1\}$ を用いることにより以下のように表す。

$$\begin{aligned}
 x_{A+} - x_{A-} &\geq \delta_A w_A + (1 - \delta_A) d_A, \\
 y_{A+} - y_{A-} &\geq (1 - \delta_A) w_A + \delta_A d_A, \\
 z_{A+} - z_{A-} &\geq h_A
 \end{aligned} \tag{2}$$

なお、要素の大きさについての単位格子の数が x 軸方向と y 軸方向とで異なる場合には、位置関係を決定した結果に基づいて本整数変数をあらかじめ決定しておくことができる。

また、必要領域が底面積 \times 高さとして与えられる場合には、以下の不等式として定義することができる。

$$\begin{aligned}
 (x_{A+} - x_{A-})(y_{A+} - y_{A-}) &\geq s_A, \\
 x_{A+} - x_{A-} &\geq 0, \\
 y_{A+} - y_{A-} &\geq 0, \\
 z_{A+} - z_{A-} &\geq h_A
 \end{aligned} \tag{3}$$

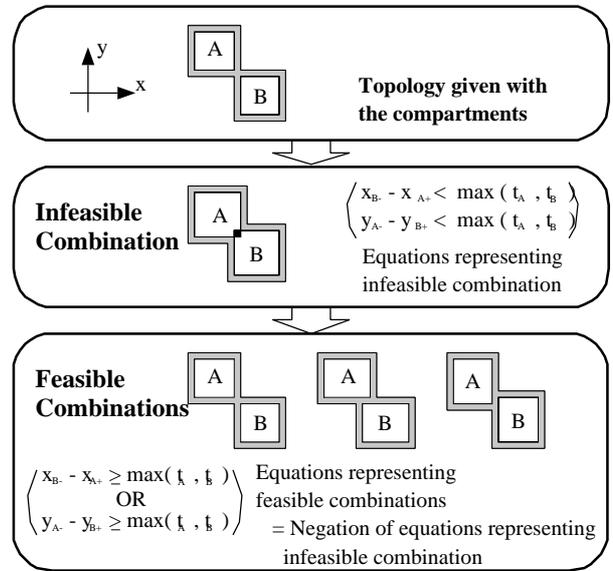


図6 隣接する配置要素についての組合せ条件

ただし、 s_A ：要素 A の必要底面積。

さらに、体積として与えられる場合についても式 (3) と同様の不等式として定義することができる。

(2) 第1段で定めた位置関係を保持し、かつ床および壁の必要寸法を確保するための制約：本制約条件は、例えば要素 A が要素 B の西側に隣接して配置される場合には、以下の等式として表現できる。

$$x_{B-} - x_{A+} = \max(t_A, t_B) \tag{4}$$

ただし、 t_A, t_B ：要素 A, B それぞれの周囲における壁の必要厚さ。

さらに、各要素が互いの角で接している場合には、上記の制約に加えて、その接し方についての組合せ条件を考慮する必要がある。例えば、図6に示すような平面内において2個の要素が互いの角で接している場合、式(4)のような条件のもとでは4個の組合せが存在し、そのうち3個が実行可能な組合せとなる。その条件は0-1整数変数、 $\delta_{AB} = \{0, 1\}$ を用いることにより以下のように表現できる。

$$\begin{aligned}
 x_{B-} - x_{A+} &\geq \max(t_A, t_B) - K \delta_{AB}, \\
 y_{A-} - y_{B+} &\geq \max(t_A, t_B) - K (1 - \delta_{AB})
 \end{aligned} \tag{5}$$

ただし、 K は十分大きな正の定数。

なお、式(5)のような組合せ条件についても、式(2)の場合と同様、位置関係や各要素の大きさの比較などに基づいてその組合せをあらかじめ決定しておくことができる場合がある。

(3) 構造壁および床に対する制約： 前述のように，構造壁や床についても要素として取り扱う．すなわち，それらについては，(2) 式中における厚さ方向の不等号を等号に，さらに (4) 式の等号のうち，それにより問題が実行不可能になる可能性のあるものを不等号に置き換えて扱うことにより，他の一般的な要素と同様に扱うようにする．

5.1.3 目的関数 プラントの建設コストに大きな影響を及ぼす建屋のサイズを最小化すべき目的関数とし，さらにプラント建屋の空間のうち，余裕のある部分を調整するためのペナルティ項を加えることにより，以下のように定義する．

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z = & \text{ (プラント建屋の容積)} \\ & + k_1 \sum_i (\text{通路の幅})_i \\ & + k_2 \sum_j (\text{要素の底面積})_j \quad (6) \end{aligned}$$

ただし， k_1, k_2 ：ペナルティ係数．

なお，上記のペナルティ項により，余った空間を通路や機器室などのいずれの部分に含めるかを設定することができるようになる．後出の事例では，それらの係数値を， $k_1 = 0.01, k_2 = 0.001$ とし，余った部分を機器室に含めるようにした．

5.2 位置寸法決定問題に対する解法 以上により，寸法決定問題をある種の混合整数計画問題として定式化することができる．これに対して，「制約条件式と目的関数の多くが線形であること」「各設計変数の概略値が単位格子の大きさから推定できること」「若干の 0-1 整数変数を設計変数に含んでいること」などの理由から逐次線形計画法 (SLP)⁽⁷⁾ と混合整数線形計画法 (MILP)⁽⁸⁾ を融合した手法を適用する．

5.3 位置寸法決定手法の適用手順 最適化手法を適用する手順を図 7 に示す．その過程では，4 節に示した第 1 段階の結果やその他の条件を受けて，問題のサイズを縮小したり線形化や数理計画法の繰り返しを制御するための記号処理の部分と数理計画法による最適化処理の部分とを協調させることにより，すべての処理が自動的に行なわれるようにする．

まず，各種の条件をもとに 5.1 項で示した定式化が自動的に行なわれる．続いて，知識処理による問題の縮小が行われる．本問題の場合，問題を効率的に解くためには，等式制約条件の代入により設計変数の数を減らすことはもちろんのこと，整数変数の数を可能な限り減少させることが重要となる．そこで，互いに隣接する配置要素の大きさやその位置関係を考慮することにより，可能であれば，式 (2) や式 (5) など

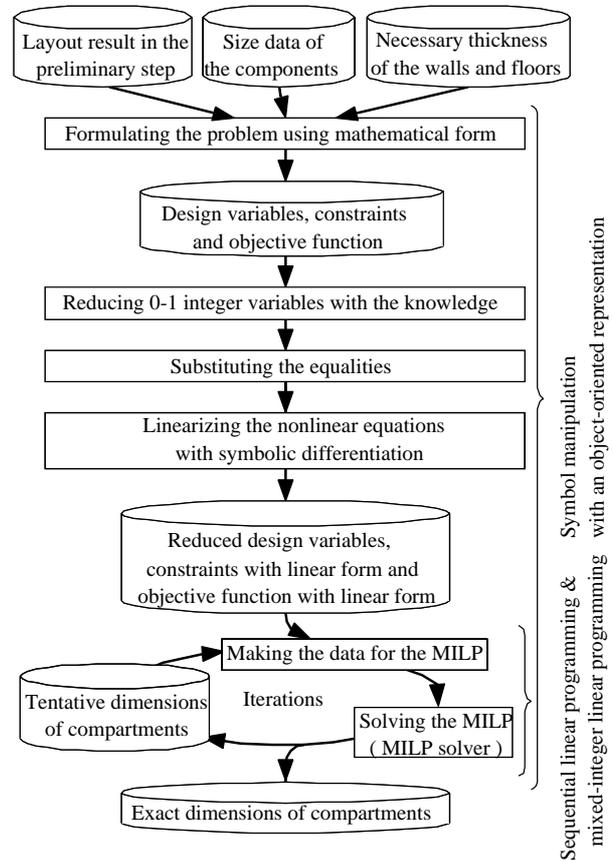


図 7 配置位置寸法決定の過程

れる 0-1 整数変数の値を最適化手法を適用する以前に固定しておくようにする．続いて，式 (3) をはじめとする非線形の式が数式微分され，線形化のための準備が行われる．それを受けて，数理計画法の適用が行われ，その解が収束するまで混合整数線形計画法の適用を繰り返して行く．以上により，配置位置寸法の決定を行うことができる．

5.4 位置寸法決定システムの構築 以上の定式化と解法による配置位置寸法決定システムをエンジニアリングワークステーション上に構築した．本システムの構築にあたっては，定式化の自動化や最適化手法における線形化の繰り返しの部分を Common Lisp を用いて構築したオブジェクト指向プログラミング環境のもとで記述し，最適化プログラムは C 言語により記述した．

なお，後出の事例のように，上記の定式化における整数変数の数が多すぎるため，問題を直ちに解くことが困難な場合も生じる．そのような場合には，整数変数の数を減らすためにプラント建屋をいくつかのサブ空間に分割した上で，個別の問題を解くことにより整数変数の値を固定し，その後全体の問題を解くことに

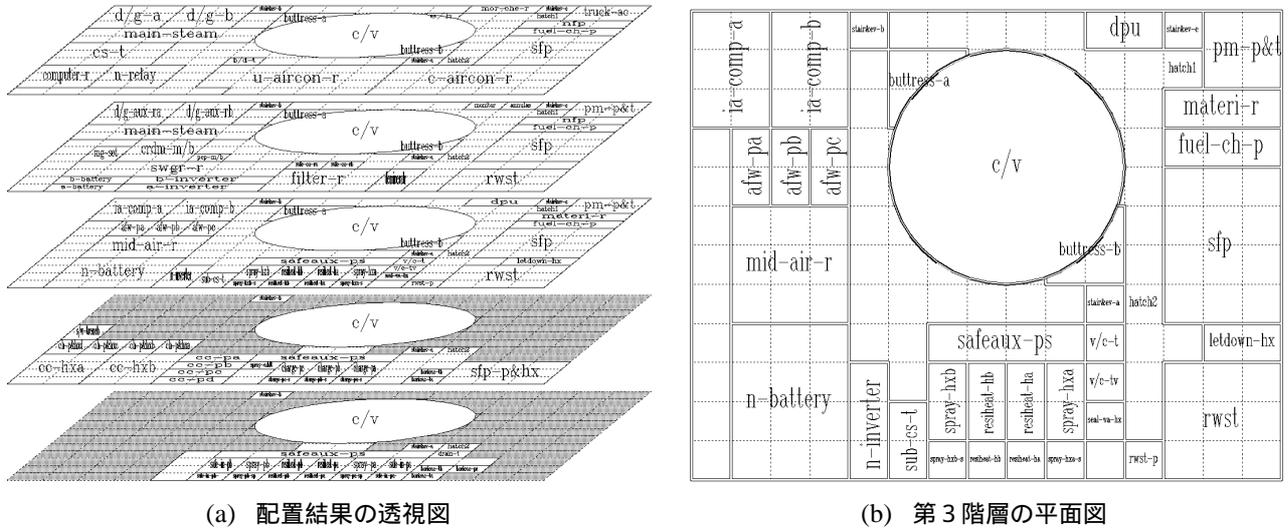


図 8 配置位置関係の決定結果

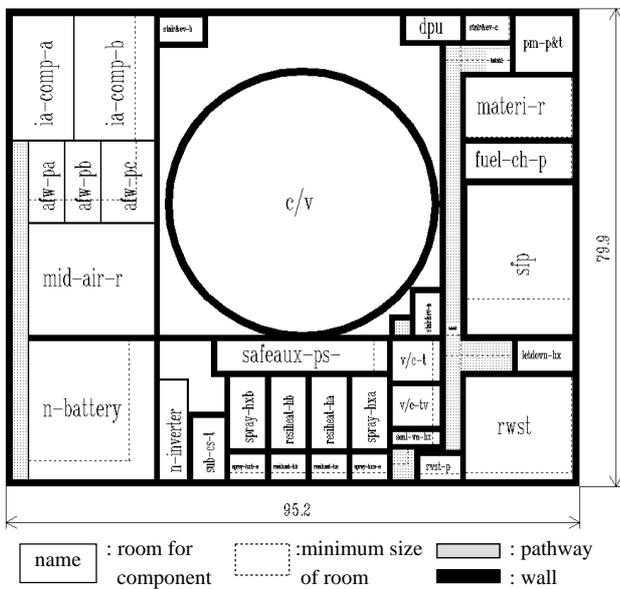


図 9 配置位置寸法の決定結果

より、ほぼ最適解を得ることができる。次節で示す事例もこのような方法により得たものである。

6 事例 – 原子力発電プラントへの適用 –

最後に、本手法をある原子力発電プラントの配置設計に適用した事例を示す。一般に、原子力発電プラントはおよそ 100 程度の要素から構成されており、それらがプラント建屋の複数の階に 3 次元的に配置される。以下に、配置結果を示す。

図 8 は第 1 段により各機器間の位置関係が定められた結果であり、5 階層からなるプラント建屋内に 95 個の配置要素がおよそ 240 個の配置制約を満足するよ

うに配置されている。これに続いて、第 2 段では、最適化法の適用によりそれらの位置寸法が決定される。これに係わる設計変数は計 791 個（うち整数変数が 40 個）、等式制約条件式が計 638 個、不等式制約条件式が計 499 個であり、これを各階層ごとの 5 個のサブ問題に分割した上で整数変数の値を決定し、その後、連続変数に対して全体問題を解いた。図 9 はその最終結果のうち第 3 階層の部分を示したものである。以上のように本手法を適用することにより、複雑で大規模な原子力発電プラントの配置設計を行うことができる。

なお、以上の配置を得るために要した時間は、Sun SPARC Station 2 (28.5 MIPS, 4.2 Mflops) を用いた場合、図 8 に示す第 1 段の配置結果に対して約 30 分、それに続いて図 9 に示す最終的な配置結果を得るために約 90 分を要した。

7 結 言

本研究では、プラントなどの空間的な配置問題に対して、制約指向探索と最適化法をハイブリッド化した設計手法を提案した。すなわち、配置における位置情報を位相的な部分と具体的な寸法の部分に分けることに基づいて、その設計過程を位置関係決定の過程と配置位置決定の過程に分割した。その上で、まず、制約指向探索により位置関係を固定し、その条件のもとで最適化手法を適用することにより配置設計を行えるようにした。また、原子力発電プラントの配置設計への適用を通じてその有効性を検証した。

なお、本研究は文部省科学研究費（一般研究 (B) 02452109) の援助を受けたものである。また、三菱原子力工業の田中和夫氏には原子力発電プラントの配置

設計についての御教示をいただいた。記して謝意を表す。

文 献

- (1) Legget, R. S. et al., *Computer Aided Design*, **13-5**, (1981), 277.
- (2) McDermott, J., *Artificial Intelligence*, 19, (1982), 39.
- (3) 渡辺ほか, 情報処理学会論文誌, **26-5**, (1985), 926.
- (4) Flemming, U. et al., *Applications of Artificial Intelligence in Engineering Problems*, Vol. II, (Sriram, D. and Adey, R., ed.), (1986), Springer-Verlag, 811.
- (5) 赤木・藤田, 機論, **56-528 C**, (1990), 2286.
- (6) 赤木ほか3名, 機論, **56-528 C**, (1990), 2294.
- (7) 例えば, Vanderplaats, G. D., *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: with Applications*, (1984), McGraw-Hill.
- (8) 例えば, Garfinkel, R. S. and Nemhauser, G. L., *Integer Programming*, (1972), John Wiley & Sons.