The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	プラント配置設計における配置制約の自動生成
Author(s)	藤田, 喜久雄; 赤木, 新介; 土居, 秀人
Citation	日本機械学会論文集 C編. 1992, 58(555), p. 3449-3454
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/3186
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

日本機械学会論文集 (C 編)
58 巻 555 号 (1992-11)

論文 No. 92-0706

プラント配置設計における配置制約の自動生成*

藤田 喜久雄†, 赤木 新介†, 土居 秀人‡

Automated Acquisition of Constraints in Plant Layout Design Problems

Kikuo FUJITA, Shinsuke AKAGI and Hideto DOI

In layout design, a plant must be arranged so as to satisfy various conditions imposed by its components. We have presented a constraint-directed approach for layout design of power plants by representing the conditions as spatial constraints. The constraints are very important for realizing a suitable arrangement, but they depend on the designer's judgment. In this paper, we clarify the causality between constraints and a plant configuration, and develop an automated acquisition system of layout constraints, by describing the causality as production rules. Finally the constraints defined with it are used in the layout design of a nuclear power plant in order to check the causality.

Key Words : Design Engineering, Layout Design, Constraints, Knowledge Acquisition, Expert System, Power Plants

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いる．しかし，その処理内容は大きく設計者に依存しており，従来より，コンピュータによる支援は容易ではなかった．これに対して，著者らは，機器の位置を定める配置そのものの過程に対して，そのなかで扱われる様々な条件をあらためて「配置制約」としてとらえた上で，制約指向探索と最適化手法とをハイブリッド化した設計手法を提案するとともに，原子力発電プラントの配置設計問題へ適用することにより，その有効性を検証した[(1)(2)]．この手法を用いるためには，配置設計に係わる様々な設計条件を前もって宣言的な配置制約として記述しておくことが必要であり，そのような制約についても自動的に生成することができれば，配置設計支援手法をより高度なものとすることができる．

本研究では，そのような配置制約が，プラントの必要機能や経済性・安全性などに基づいて定められたものであり，個々のプラントの構成や各構成機器の機能に対応したものであるとの考え方に立って，配置制約の内容とプラント構成や各機器についての属性情報との因果関係について検討を加え，配置制約を生成するための設計知識を明らかにする．さらに，それらを「if —, then —」型のプロダクション・ルール[(3)]として記述することにより，プラントの構成や機器情報から配置制約が自動的に生成できるようにする．また，上述の著者らによる配置手法[(1)(2)]との統合化をはかり，具体的な原子力発電プラントの配置設計への適用を通じて，その妥当性を検証する．

2 プラント配置設計と配置制約

緒言でも述べたように，配置設計は，プラントを構成する各種構成機器の性能を発揮させ，かつ空間的な位置条件を満足するようにそれらの位置関係を定める過程であり，これに対して著者らは，図 1に示すような配置設計手法[(1)(2)]を提案した．本手法では，機器を配置すべき建屋の空間をある特定の大きさを有する単位格子の集合としてとらえた上で，配置すべき機器についても単位格子の大きさをもとにその形状や大きさを

*平成 4 年 3 月 21 日第 67 期関西支部定時総会講演会にて講演，原稿受付 平成 4 年 5 月 14 日．
†正員，大阪大学工学部 (〒 **565** 吹田市山田丘 2-1).
‡学生員，三洋電機 (研究当時 大阪大学大学院).

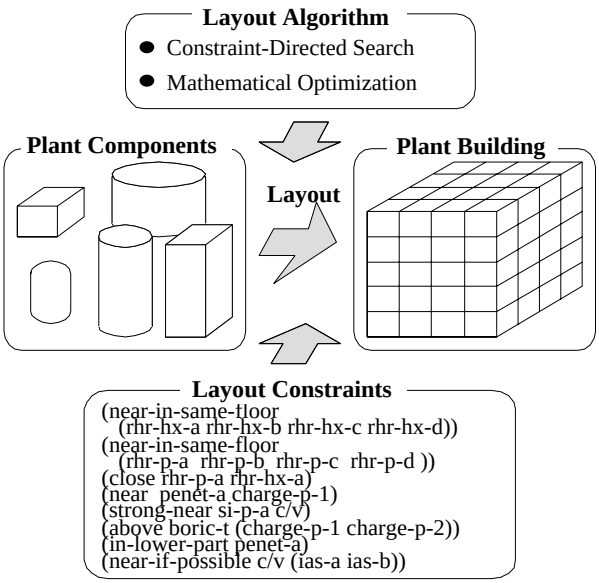

図 1　プラント配置設計と支援手法

表現する一方，配置に関する条件をそれぞれ以下のような宣言的な「配置制約」として表現した．

- 機器 A は，機器 B よりも高い位置に配置する．
- 機器 A は，最上階に配置する．
- 機器 A は，機器 B に隣接して配置する．
- 機器 A は，機器 B とは異なった長手方向に配置する．
- 機器 A には，通路が必要である．
- 機器 A は，機器 B にできるだけ近い方が良い．
- 機器 A は，できるだけ高い階層に配置する．

その上で，以上のような制約を，強く配置位置を限定する「義務的な」制約と，より望ましい配置位置条件を示す「示唆的な」制約とに分類し，制約指向の考え方を取り入れた探索手法を適用することにより，宣言的な制約や機器サイズなどの記述から配置を行なうアルゴリズムを構成した[1]．さらに，そのようなアルゴリズムによって得られる単位格子に基づいた位相的な配置結果に対して，数理計画法を適用することにより，各単位格子の具体的な位置・寸法を決定し，実際的な配置を定めるための手法を構成した[2]．

このような手法における有効性のひとつは，配置を定める条件が「制約」として明示的に，しかも配置処理そのものから分離されて表現される点にあり，このことは，得られる配置の内容を明らかにする点からも有効なものと考えられる．しかしながら，一方では，配置制約の背後には多種多様な条件が隠蔽されており，また，非常に多数の制約を記述する必要があるため，設計実務者といえどもそれらを書き出すことは容易ではなく，上記のような設計手法を適用しようとする場合，配置制約を記述することがひとつの障害となっている．

これに対して，配置制約そのものは，本質的にそのプラントが必要な機能を有し，経済的であるなどの目的を意図して記述されたものであり，個々のプラントの構成や各構成機器の機能に対応したものであると考えることができる．したがって，それらの具体的な条件と配置制約との対応関係を明らかにすることができれば，それに基づいて，配置制約そのものをプラントについての対象表現から生成することができるものと考えられる．

そこで，本研究では，以上のような配置制約の内容に対して，プラントの対象表現との因果関係を明らかにし，それらをルールとして記述することにより，プラントの構成や機器情報から配置制約が自動的に生成できるようにする．

なお，このようにして配置制約に係わる因果関係を明らかにすることは，ひいては，配置設計に関わる様々な条件や設計知識の内容をより明らかにすることにもつながるものと考えられる．

3　プラントの対象表現と制約生成知識

本章では，配置制約を生成するために用いるプラントの対象表現や制約生成知識の内容について示す．

3.1　プラントの対象表現　プラント配置設計において扱われる内容は非常に多岐に渡るが，そのうち，配置処理に先だって以下のような内容がプラントそのものの構成として確定しているものとすることができる．これらは，配置制約を生成する上で対象知識として用いることができる．

- プラントを構成する各機器の種類・規模 ： 各機器それぞれの種類や容量，また，プラントを構成する様々な系統のなかのいずれに含まれるかといった情報．
- プラント構成機器間の配管などによる系統的なつながりと，配管などのサイズや内容物の物性 ： 図2は，なかでも，原子力発電プラントの場合における機器の系統的なつながりのごく一部を示したものであり，系統の構成や機器間の接続関係，管の径，管内を流れる媒体の圧力や温度などの物性情報が添付されている．
- プラント建屋の規模・構成 ： 各種機器を配置すべき建屋のおよその大きさや，その階高など．これらの情報は，プラント配置そのものに深く関係するものであり，配置処理の中で決定されるもので

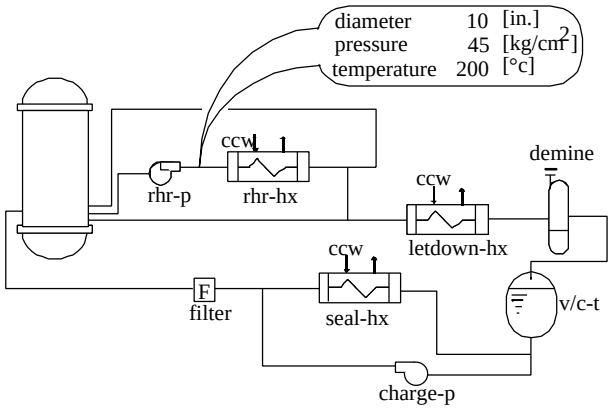

図 2　プラント系統線図 (一部)

あるが，実際にはそれらを仮定した上で配置を行なうため，ここでは，既知のものとする．

なお，次章で示す制約生成システムでは，これらの知識をフレーム型知識として記述する．

3.2　プラント配置制約生成知識　2 章でも述べたように，配置制約は，上記のような個々のプラントについての対象知識に対して，ある種の知識を適用することにより生成できるものと考えられる．そのような知識は，大きく，コストに関するものと機能に関するものに類別することができる．さらに，機能に関するものは大きく，個々の機器に関するものと個別の系統に関するものに分けることができる．以下の項に，それぞれの制約の意味付けや内容を示す．

3.2.1　配管長さなどのコストに関する配置制約　プラントの配置設計においては，プラントそのもののコストを低く押えることが要求される．なかでも，プラントを縦横に走る配管のコストは配置によって大きな影響を受けるため，より高価で太い配管によって結ばれた機器どうしを隣接させたり，近くに配置することが要求される．

例えば，事例として取り上げる原子力発電プラントの配置においては，以下のような基準により制約を生成することによって，配管コストなどの低減を期待することができるようになる．

- 管内圧力が高く，内容物の放射性物質濃度が高ければ，その管で連結された機器どうしは互いに隣接して配置する．
- 管内圧力が高くなく，内容物の放射性物質濃度が低く，かつ，温度が高くない場合には，その管で連結された機器どうしは互いに近い位置に配置した方が良い．

これらの制約は，一般に個々の機器や系統に依存しないため，様々なプラントに対して適用できる汎用性の高いものである．

3.2.2　プラントの機器機能に関する配置制約　配置されるべき個々の機器はそれぞれ，固有の機能を十分に達成できることが必要であり，そのためには，それらが特定の位置や位置関係のもとに配置されなければならない．

個々の機器については，例えば，以下のような条件を考慮する必要がある．なお，それぞれの括弧内は，条件を考慮する理由や目的を示している．

- 貯蔵タンクなどの集液タンクは，建屋下層に配置すべきである (集液効率をあげるため).
- タンクに貯蔵された液体を輸送するためのポンプは，そのタンクよりも下層に配置すべきである (NPSH を確保するため).
- ディーゼル発電機は，建屋グランドレベルに対し短手方向が接するように配置する (機器搬入性とメンテナンス性のため).

これらの制約の多くも，個別の機器に対するものではなく，機器の種類をもとに記述できるため，様々なプラントにおいて一般的に適用可能なものが多い．

3.2.3　プラントの系統機能に関する配置制約　プラントを構成する機器はそれぞれが独立に機能するものではなく，それぞれが一群となって機能するため，互いに関連が強く，特定の目的を有するものは様々な系統を構成している．このような系統についても，機器機能の場合と同様，以下のような条件を考慮する必要がある．

- ある系統に含まれる機器は，互いに近くに配置した方が良い (操作性や管理の容易さを確保するため).
- 中央制御室周辺機器系統は，建屋上層に集中配置する (電気設備であるため，配管との干渉をできるかぎり少なくし，かつ，水気との疎遠化をはかる必要があるため).
- 冷却水系統は，海水取入れ口側に配置する (海水配管長の短縮をはかるため).

これらの制約の多くは，前者の 2 つと対比して，個別のプラントに特有の系統に対して記述されているため，必ずしもあらゆるプラントに対して適用できるものではないが，ある特有の形式のプラントに対しては広く適用できるものと考えられる．

3.2.4　その他の配置制約　以上のような制約条件のほか，一連の機器が整列して配置されるための制約など，配置に固有の条件をあわせて考慮する必要がある．それらは，上記のようなコストや機能に関するも

表 1　制約生成ルール

ルールの種類	ルールの数
コストに関する知識	12
機器機能に関する知識	53
系統機能に関する知識	32
制約検査に関する知識	14
合　　計	111

のではなく，配置そのものに関する条件などによるものであるため，プラントの対象表現から生成することはできないものとして考えることにする．

一方，以上の様々な制約生成知識から生成される配置制約の中には，それらが互いに競合したり，配置を行なう上で制約が強すぎたりするため，配置上の自由度が高い制約に変更したりするための知識を用いる必要がある．なお，そのような知識を「制約検査に関する知識」とする．

3.3　配置制約生成知識のルール化と一般性　以上の各要因を，ある形式の原子力発電プラントの配置設計について検討した場合，表 1に示す数の知識を制約生成ルールとして抽出することができる．これらのルールは，後出の事例を含めた複数のプラントに対して適用可能なものであり，ある形式のプラントに対しては汎用的な生成知識を記述できるものと考えられる．ただし，このような知識を様々なタイプのプラントに汎用的に用いようとした場合，例外の取り扱いや個々の事例に深く依存したような一部の知識内容は，そもそも上記のような形式で知識を記述することは容易ではないとされているため[4]，別途，対応が必要であると考えられる．

4　配置制約生成システム

4.1　制約生成システムの構成　前章に示した配置制約生成知識を，プロダクション・ルール[3]として記述することにより，プラントの配置設計において考慮すべき配置制約を自動的に生成するシステムを構築する．図 3はその構成を示したものであり，プロダクション・システム，知識ベース部，データベース部から構成されている．知識ベース部には制約生成知識がルールとして，データベース部にはプラントの構成や機器，系統的なつながりに関する情報がオブジェクト指向[5]によるフレーム型知識[3]として格納されている．また，推論によってワーキングステージ上に生成される配置制約は配置設計システム[1]において利用できる形式でファイルに保存するようになっている．なお，

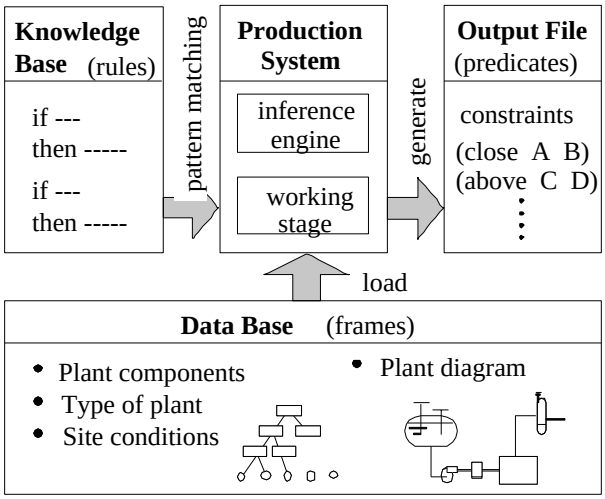

図 3　制約生成システムの構成

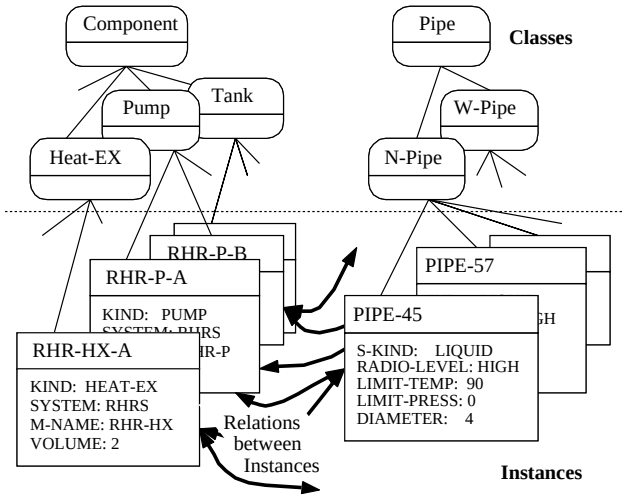

図 4　プラントの対象表現

本システムは，Sun SPARC Station 上で Common Lisp を用いて構築した．

4.2　プラントの対象表現　プラントを構成する各機器の属性やそれらの間の接続関係は，上述のように，オブジェクト指向に基づいたフレーム型表現により表現する．図 4は，その表現方法の概略を示したものである．クラスオブジェクトは機器の種類に応じて階層化されており，個々のオブジェクト (インスタンス) には個別の機器に関する各種の属性情報が “インスタンス変数” として保持されているほか，配管などによって接続されている機器間のつながりについても，両者の間の “関係” によって表現されている．このような表現により，後述のルールの記述も効率的に行なえるようになる．

なお，以上のようなフレーム型式の表現は複雑であ

```
(rule1 :
  if (&eq (&get pipe radio-level) 'high)
     (&>= (&get pipe limit-press) '20  )
     (&>= (&get pipe limit-temp ) '100 )
  then (&create-predicate
                  (: close area1 area2)) )

(rule2 :
  if (&eq (&get tank 'kind) 'store-tank)
     (&not (&eq (&get tank 'system) 'ws))
  then (&create-predicate
          (: strong-in-lower-part tank)) )

(rule4 :
  if (&eq system 'wl)
  then (&create-predicate
         (: strong-near-if-possible
             (&get-association system
                          'consist-of))) )
```

図 5　制約生成ルールの一例

り，それらが容易に記述できるように，記述しやすい宣言的な表現形式の記述から自動的にオブジェクトを生成するインターフェースの機能をシステムに付加した．

4.3　制約生成知識の表現　前述のように，制約生成知識は「if —, then —」形式のルールとして表現する．図 5はその一例を示したものである．例えば，`rule2` は，「タンクの種類が集液タンク (`store-tank`) であり，廃棄物処理系 (`ws`) に属さないならば，そのタンクはできるだけ低い階層に配置する (`strong-in-lower-part`)」ということを示している．

このようなルールの記述の中には，前節で示したオブジェクト表現におけるクラス名をもとに個別の機器 (オブジェクト) を参照するための機能を設けており，それによって，個々のルールによる推論がそのクラス下のすべてのオブジェクトについて行なわれるようになる．

さらに，制約生成ルールは，前章で示したようにその内容に応じていくつかのグループに分類できること，また，一群のルールの中には，他のルール群が既に適用されていることが前提条件となっているものがあることなどを考慮して，表 1に示したようなルールをさらに個別のルールブロックに分けて構成し，明示的にその適用順序を記述するとともに，あわせて，推論の高速化がはかれるようにする．

5　事例 – 原子力発電プラントへの適用 –

最後に，本システム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 個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．配置制約としては，上述のようなコストや機能に関するものを多数，考慮する必要がある．

```
(near-in-same-floor
      (rhr-hx-a rhr-hx-b rhr-hx-c rhr-hx-d))
(near-in-same-floor
      (rhr-p-a  rhr-p-b  rhr-p-c  rhr-p-d ))
(close            rhr-p-a     rhr-hx-a     )
(near             penet-a     charge-p-1   )
(strong-near      si-p-a      c/v          )
(above    boric-t   (charge-p-1 charge-p-2))
(in-lower-part    penet-a                  )
(near-if-possible c/v         (ias-a ias-b))
```

図 6　生成された制約の例

事例として取り上げたプラントは，103 個の機器から構成されており，それに対して本システムを適用することにより，計 732 個の制約を導出することができた．図 6は，その一部を示したものである．それらを熟練設計者が設定した配置制約 (計 204 個) と比較した結果，本システムによるものは，一部，冗長な制約を含んではいるものの，適切な配置を得る上で必要であるものは漏らさず獲得されていることを確認した．なお，冗長な制約が生成される点については，自動生成する場合には「できるだけ近い方が良い」といった示唆的な制約が多数生成されること，また，熟練設計者が制約を生成する場合には，義務的な制約を有する機器間にあえて，示唆的な制約を付加することは行なわないことに対して，本システムによって制約を生成する場合は，そのような示唆的な制約をも機械的に生成すること，などの理由によることが確認できた．

さらに，そのようにして得られた配置制約を用いて配置を行なった．図 7は，配置結果の透視図であり，図 8はそのうちの第 2 階層の平面図を示したものである．熟練設計者による配置制約を用いたそれと比較した場合，制約に含まれる示唆的な制約が作用することにより細部での配置は異なるものの，全体としては問題のない十分な配置が得られていることを確認した．

6　結　言

本研究では，プラント配置設計における配置知識，なかでも配置制約の内容について検討を加え，配置制約とプラントの系統的な機器構成情報との因果関係を明らかにした．さらに，それらの関係をプロダクション・ルールとして記述することにより，制約生成システムを構築し，具体的な事例に適用した．その結果，制約生成知識を用いて生成した制約が配置を行なう上

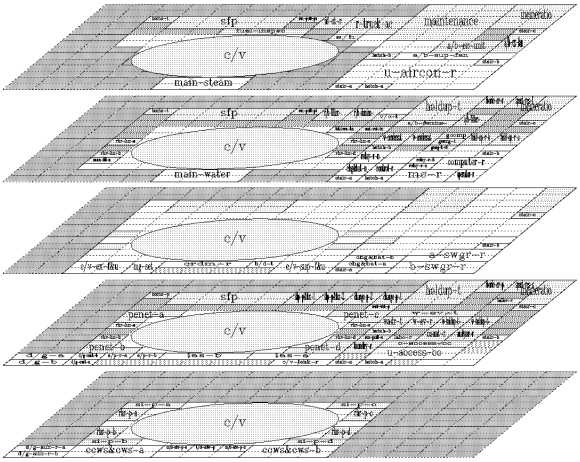

図 7　配置結果の一例 (透視図)

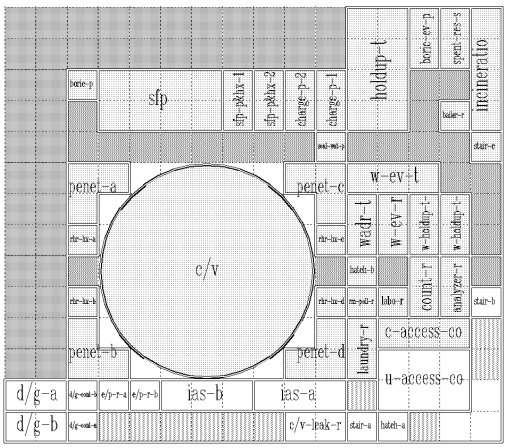

図 8　配置結果の一例 (平面図)

で十分なものであること確認した.

なお, 原子力発電プラントの配置設計については, 三菱原子力工業の 仲戸川哲人, 竹内 誠 の両氏に御教示いただいた. 記して謝意を表す.

文　献

(1) 赤木・藤田, 機論, **56**-528 C, (1990), 2286.
(2) 藤田 ほか 4 名, 機論, **58**-547 C, (1992), 967.
(3) 例えば, 安部・滝, エキスパート・システム入門, (1986), 共立出版.
(4) 例えば, 特集: 知識獲得ボトルネックは解消できるか, 日経 AI 別冊, 1990 春号, (1990), 15.
(5) 例えば, Booch, G., *Object Oriented Design with Applications*, (1991), The Benjamin / Cummings Publishing.