

## A2 プラント設計とシミュレーション

中 杉 浩 (東洋エンジニアリング)

### 1 はじめに

…エンジニアリング会社というのが近頃めっきりふえて、その名前はなじみ深いものになってきたが、その多くはプラント建設を目的としている。化学プラントなどを建設するに当って多くのシミュレーションがコンピュータで実施されるが、その中からいくつかを拾ってみよう。

(1) 営業活動の中で、客先の要望に沿って実施するフィージビリティ・スタディがある。これは LP を主体としたシミュレーションで、プラントの企業化計画のさいにその収益性をチェックするようなものである。

(2) プラント建設のためのプロジェクト・チームが発足すると、プロジェクト遂行上のプランニングが詳細に実施される。これは、いわゆる PERT 手法によるもので何度も練り直したのち、実行予算会議に提出される。

(3) 基礎設計の段階ではプロセス・フロー、ユーティリティ・フローなどを確定するためのシミュレーションが行なわれる。プラント全体の物質収支、熱収支をとるため、各機器の入口・出口の関係を数式で表わすことにすれば、結局、巨大な非線型連立方程式を解くことになる。そこで、われわれの問題はこの連立方程式を制限条件とし、その中に含まれるパラメーターを用いて収益最大というような目的関数を設定して最適化することである。

(4) 詳細設計になると上に述べた各機器の条件を満し、かつ、もっとも経済的な機器設計が行なわれる。ただし、エンジニアリング会社では普通、機器の製作を行なわないので、設計範囲はレイティングまでである。このような各機器に関するシミュレーションのほか、計装のための設計が行なわれ、CSMP と称するシミュレーターを使用してダイナミック・シミュレーションを行ったり、また建設敷地内のレイアウトおよび配管設計に巨大なマンパワーを要しているが、その中には配管の熱応力、振動などの計算が含まれている。

(5) 調達・工事の段階では納入・輸送計画の問題があり、配管工事用の自動製図の問題もある。

これら多くのシミュレーションのうち、特にわれわれが開発に成功したプロセスについて、および、未だ解決されていない配管設計上の諸問題について触れて見たい。

### 2 アンモニア合成プロセスの開発

当社では従来、アンモニア合成技術は主としてフランスの Grande Paroisse 社のノーハウを蓄積していたが、プラントが大型化するにつれてその技術の優位性が薄れてきたので、そ

の開発が急がれていた。何しろアンモニアは普通、300 atm、500℃といった厳しい条件で、鉄系触媒の中で水素・窒素の発熱反応によって合成されるものであり、また、新規アイデアを投入するための危険も含まれているので基礎試験、中間試験などいくつかの段階を経て工業化するのが正道であろう。

ところが、われわれの場合、過去蓄積した経験や技術をもとに、新たに従来法を解析することを前提として、一切中間段階を経ずに開発することになった。つまり、その省略をコンピュータによるシミュレーションによって補なうこととしたのである。このシミュレーションの過程を概略列記するとつぎのようになる。

### (1) 物性定数推算法の確立

多くの文献が発表されているが、信頼できる範囲は純粋成分の限られた状態だけである。ところが実際には混合成分を扱わねばならず、特に高温、高压における値、臨界状態に近い値はうまく推定できないので結局は単純な仮定が入りこんでくる。必要な物性定数は、エンタルピー、比熱、圧縮係数、フガシティ、粘度、熱伝導度、気液平衡データなどである。

### (2) 反応速度式の確立

アンモニア合成反応に対する速度論的研究はかなり古くから行なわれており、代表的な Temkin-Pyzehev の式、あるいは久保田らの式を検討し、活性係数の調整によって実測データに合わせることを考えた。

### (3) 実測データの解析

既存のアンモニア合成管(図1)より、入口の圧力、温度、組成、流量、管内の温度分布、触媒層長さ、伝熱面積、出口における組成、生産量などのデータを数多く採集した。そして解析に使用した数学モデルは、

触媒層の物質収支から

$$\frac{dx}{de} = \frac{r(1+x)^2 A}{F_o}$$

触媒層内熱収支

$$\frac{dT_1}{de} = \frac{(1+x)(Q_R \cdot r \cdot A_o - U \cdot A_T (T_1 - T_2))}{F_o \cdot C_P}$$

冷却管内熱収支

$$\frac{dT_2}{de} = \frac{(1+x) \cdot U \cdot A_r (T_2 - T_1)}{F_o \cdot C_P}$$

実測値に合わせるため、数個のパラメータを設けて NON-LINEAR-ESTIMATION を行なった。

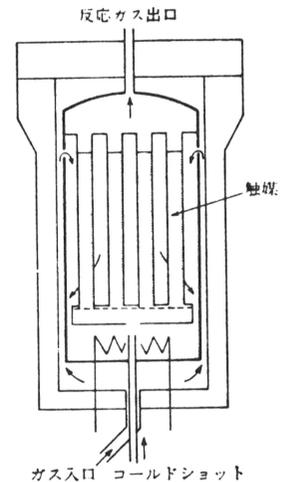


図1. ニュークロートプロセスの合成管内部構造

#### (4) 新アンモニア合成管の設計

新合成管は上に述べた熱交式合成管と、断熱式のものとの組合せであり、その中間に冷ガスを導入するようなシステムであった。この方式により、従来の問題点であった触媒の過熱現象を防ぎ、しかも触媒層全体の効率を一層高めることができる。そこで、触媒層長さ、冷ガス量等の設計値を得るための慎重な計算が数多く実施された。

#### (5) アンモニア合成ループの計算

いままでは単体機器の設計であったが、合成プロセス全体の物質・熱収支の計算が必要である。大まかな流れを図3に示す。このプロセスに入りこむガスは水素、窒素のほか  $\text{CH}_4$ 、Ar 等のイナー特・ガスがある。また、微量の水、油等が触媒毒となるので合成管に入る前にセパレーターによって取り去られる。合成されたアンモニアは液体アンモニアとして別のセパレーターから取り出される。そのとき、僅かなイナー特・ガスも受け込んで系外に去るが、もし、それ以外に出口がなければ、このループ系はイナー特・ガスについて物質収支がとれなくなる。そこで、パージ・ガスと称

して系内に入り込んだイナー特・ガスに等しい量をはき出すための手段を講じている。そのほか、熱の有効利用のため多くの熱交換器が置かれている。

この系のシミュレーションを実行するに当って、つぎのような項目に留意した。

1. 合成管が最も効率よく作動するための主要因について考える。
2. 循環量をなるべく少なくするにはどうすればよいか。
3. セパレーターに関する温度の問題。
4. パージ・ガスをどこに設けたら得か。
5. 触媒が劣化してきたらどんな結果になるか。

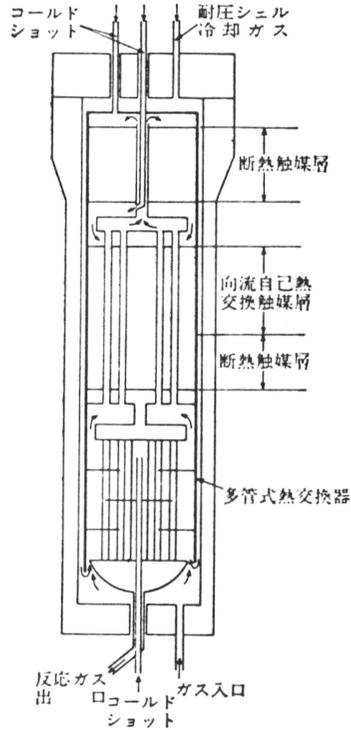


図2. 新しく開発された合成管の内部構造

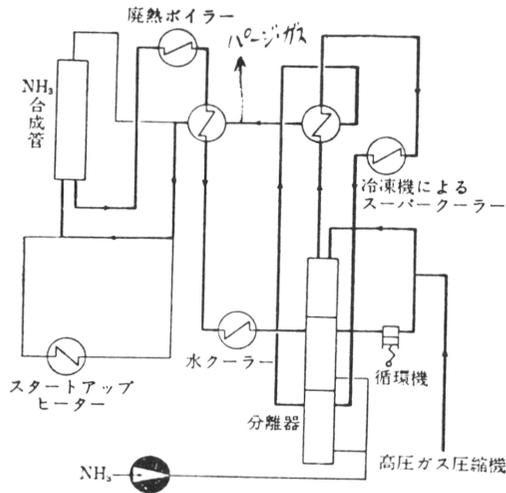


図3. 新プロセスのフローシート

6. 伝熱面がよごれて、伝熱係数が落ちてきたらどうなるか。
7. 減荷運転をする場合の検討
8. オペレーション・ミステークの検討。

本プロセスは三井東圧化学(株)大阪工業所を皮切りに韓国のウルサン工場その他において大型プラントとして現在稼動中である。

### 3 配管設計上の諸問題

#### (1) 背景

プラント設計のなかで最も煩雑な設計作業は配管設計である。何しろエンジニアリング業務の約半分の工数を必要とし、半年以上の長期に亘る代物である。また、一つのプラントで数千トンの配管材料を必要とする場合もしばしばで、全プラント建設工事工数の半分以上を占めると考えられている。

一方、特殊な配管材は納期が非常に長く設計完了後に発注しては間に合わない。そこで、その部分だけ取り出して未だ充分な情報が得られないまま、実績その他の予想によって配管見積を進め、材質、口径、肉厚、長さ等を決めていち早く発注してしまう。これは設計の進み具合によって変更の可能性を高く含んでいる。また、その他の配管も設計の初期段階で大まかな発注をすませ、あとで追加・修正を行うのが普通である。このような変更を建前としたプロセデュアでも設計完了時にはすべての情報が整い、あとは順調にいくというのならそれでもよいのだが、実際には、工事に着手してからも情報遅れによる設計変更、客先の要望、設計ミスによる変更等があり、これらに対する何回にもわたる材料の集計・発注量の変更の間にミス、取消不能が発生し、プラントの完成時には予想外の残材がでることになる。これを少しでも減らすために配管の切断計画を立てたり、信頼できる配管設計、材料量であることや変更の少ないやり方などが必要である。事実、そのために多大の努力が払われている。

最近では煩雑な配管設計図面を作るより誰にでも理解されやすいモデルを作るやり方がコンピュータとの組合わせて見直されてきた。従来、モデルは配管設計が完了してから展示用、教育用に図面を見ながら作っていたが、ここでいうモデルはデザイン・モデルで、十分な下図を準備しないで直接考えながら作るものである。これだと、予め多くの人が十分検討できるので建設時にミスが発見されるというようなことが少なくなる。モデルに含まれた各ラインは結局 I SOME 図という形に整えられ、材料発注用、工所用などに役立てられる。この過程ではコンピュータ化が進み、自動製図、B/M、工事資料作成などが自動的に行なわれる。そのため、モデル情報をコンピュータにインプットする方法が2、3開発されつつある。

#### (2) 主な作業

配管設計は P & I 線図、プロット・プラン、外形寸法の入った機器図面をインプット・データとして作業が始められる。図面作成を主体とした従来法による作業は大別して、

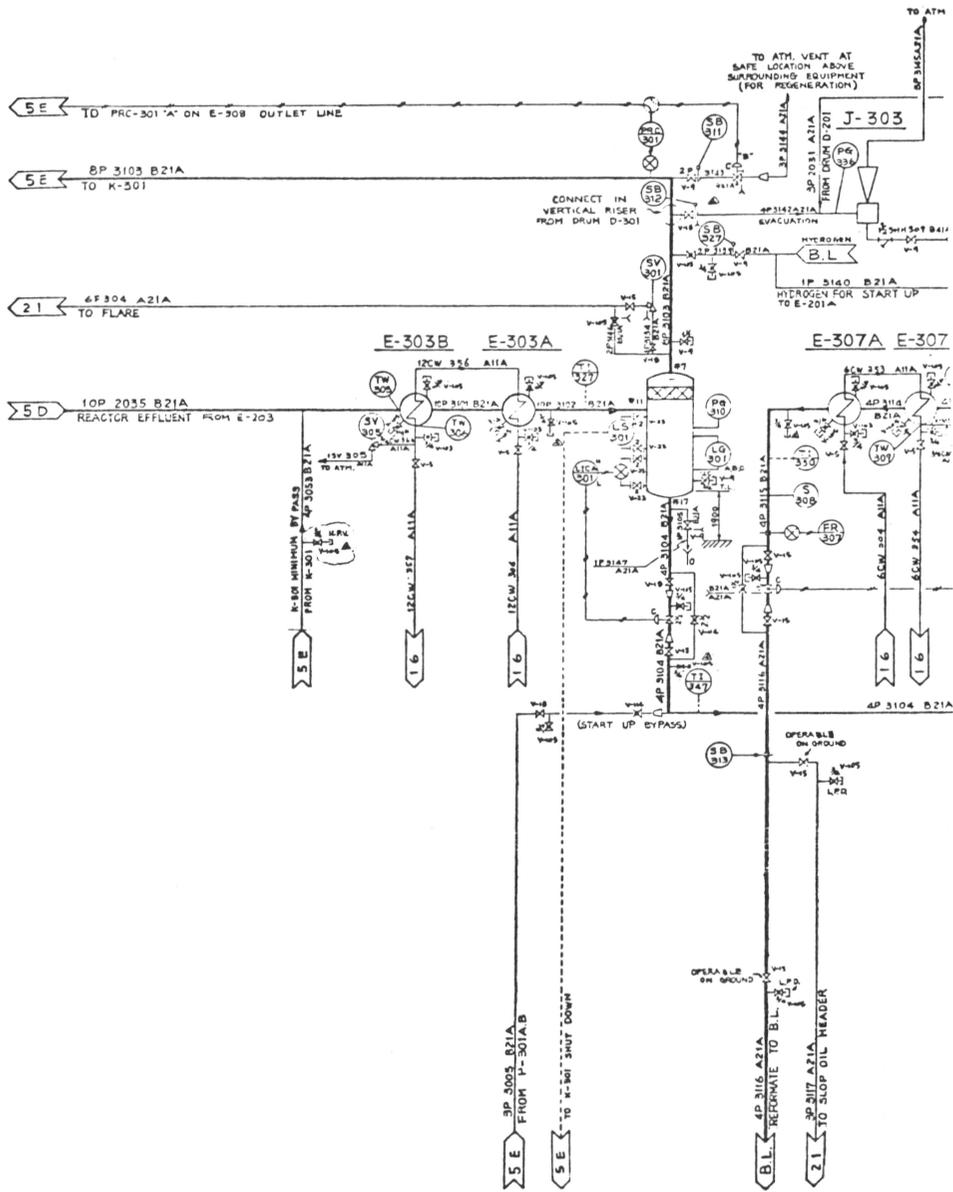


図 4 P & I 線図

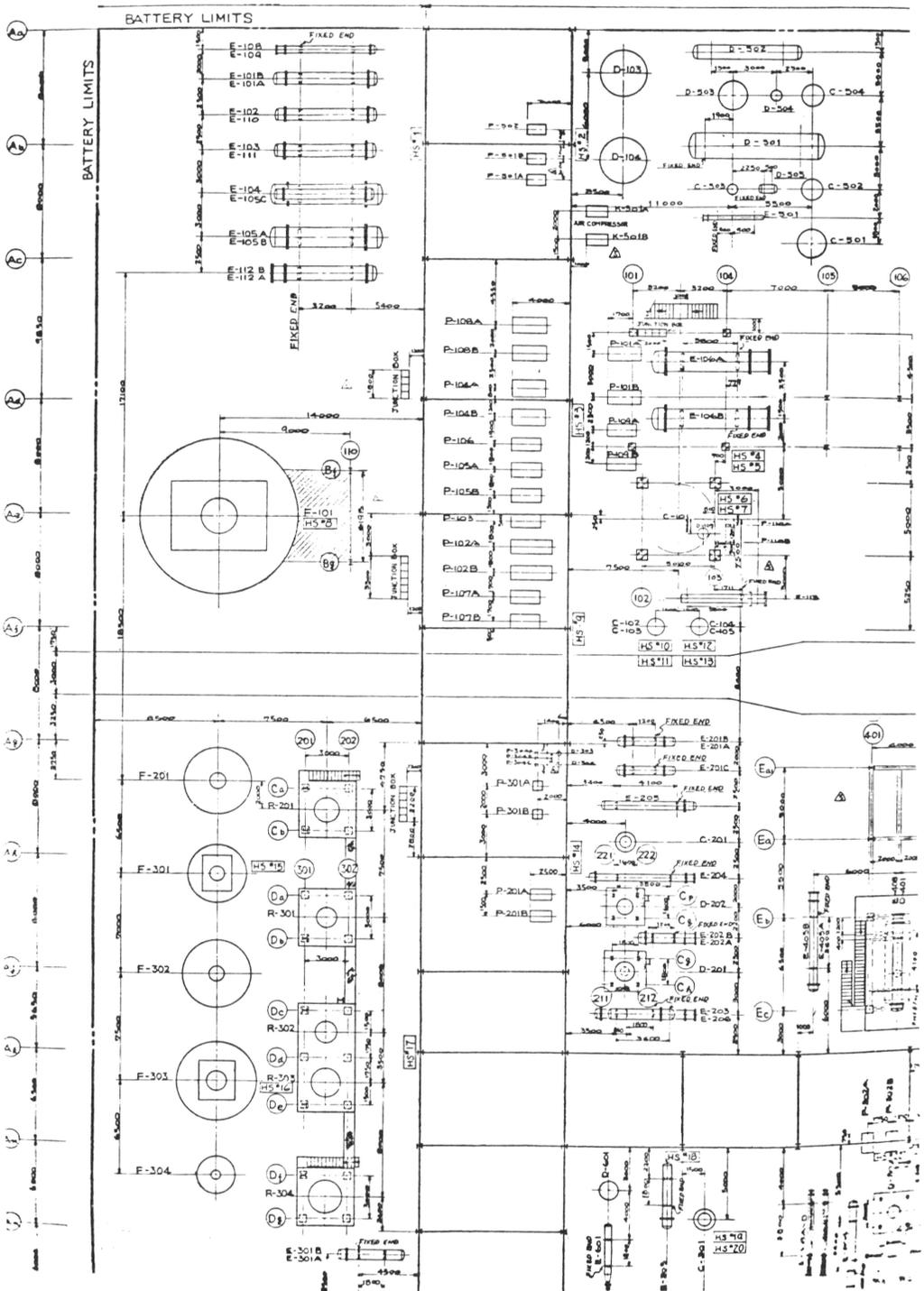


図5 プロット・プラン

ルーティング・スタディ

パイピング・スタディ

配管図作成

から成り立っている。

ルーティング・スタディではパイプ・ラックの利用を含めた最短距離配管について実際に紙面上にルートを描いて見ることを行う。

パイピング・スタディは、ルーティング・スタディのように全プラントを総合して検討するのではなく、区分分けをしたのち、それぞれの区分についてスタディする。

まず、高温、大口径といった重要な配管について熱応力、振動問題を検討し、支持方法、位置などを決める。また、その他の配管についても重い配管の支持を検討する。

つぎに、プロセス、計装上の注意を念頭に置きながら、建設、運転、保守などについてあらゆる制限条件を満足するようパイピング・スタディをする。特に、法規や安全に関する制限は完全にカバーされていなければならない。例えばフランジについて考えると、ルーティング・スタディではどこに取付けるか決っていないので、工事方法、保守方法などを詳細にブレイク・ダウンしてその位置を確定する。

配管図作成は、これまでの検討をもとに工事用として、また客先に提出する商品としてきれいに仕上げられる。このさい、必要な寸法はすべて記入される。

### (3) 問題点

配管設計は、すでに述べたことで想像されるように、膨大な情報量进行处理しなければならない。しかも必要な資料がほとんど集まっていないうちにスタートする。このようなやり方は、詳細にその作業を分析すれば大変有効な方法だという結論が得られるかも知れない。それは多くの経験の上に築かれた手法だから。そこで、種々想定して設計を進めることになる。最近では熱応力などの計算が厳しくなり、いわゆるリミット・デザインを目指しているので、材質や寸法の変更があった場合、当然ルートの再チェックが必要になる。変更の話題はつきない。一寸した変更が以後の作業に大きく影響する。たとえば運転マニュアルの作成なども設計が確定してからかからないと作業の効率が悪くなる。そこで建設が始まるころスタートすると、その過程でプラントのスタートアップにバルブやバイパスなどがさらに必要であることが判明し変更となることがある。機器に関する情報はメーカー待ちとなるがP & I 線図作成時にはその情報がない。結局、のちにメーカー指定によりその機器を特別に冷却したり加熱したりしなければならなくなる。これは配管設計のもとの資料であるP & I 線図にも変更が起り得ることを示している。このように変更が多いのは人間の不注意によるミスのほか作業者が積極的に変更を受け入れるようなシステムの中で働いているからであるが、実は、将来の進歩を見込んでも変更は不可抗力のように見える。つまり、システムの各部分が互に影響しあっているので、Iteration せざるを得ない性質がある。

このような問題を近い将来、コンピュータで自動化ができるようになるだろうか。少なく

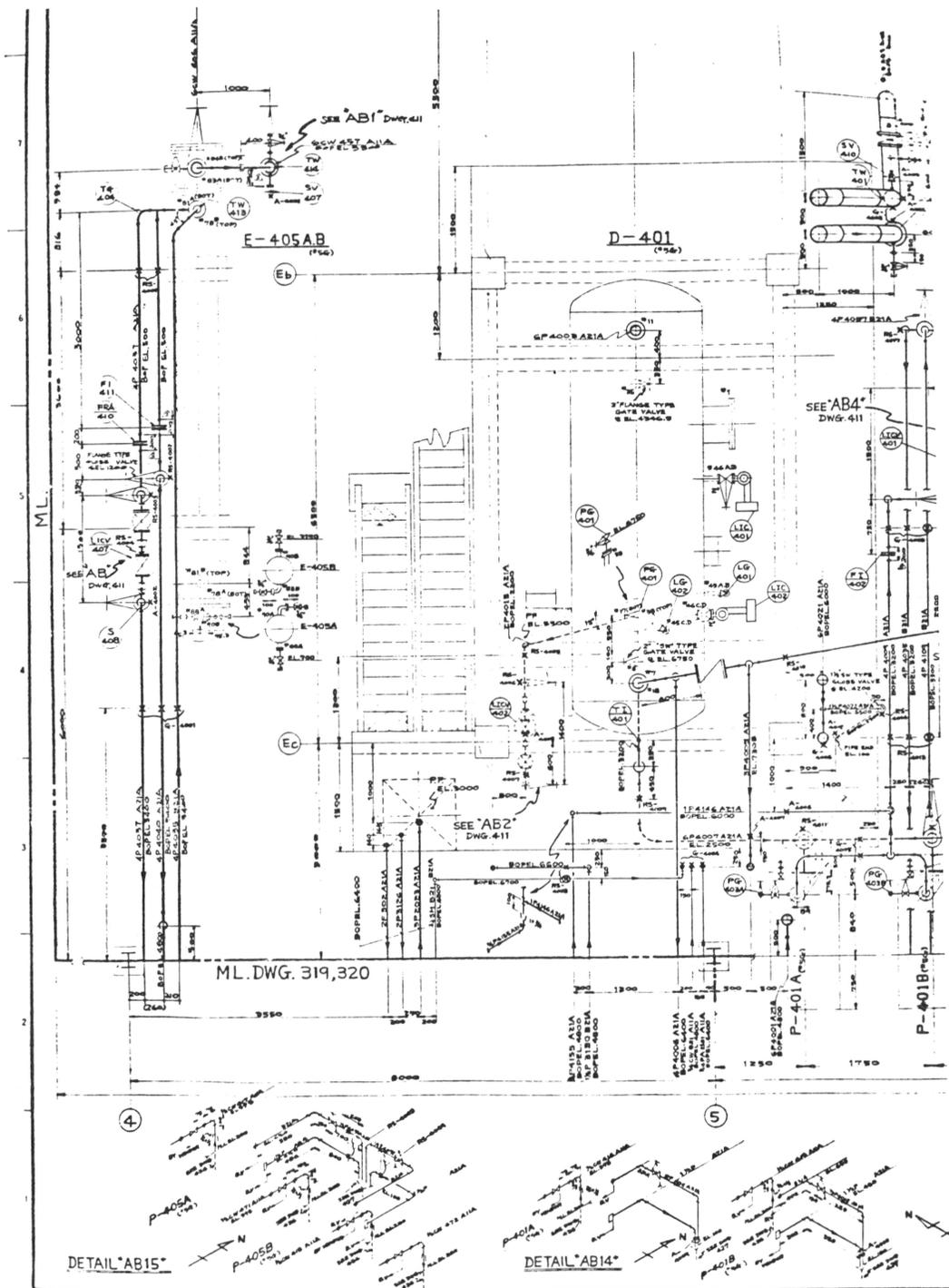


图 6 配管图

とも現在まで成功したという話はない。

配管設計の自動化についていままでは情報処理という面だけで見てきたけれども、自動設計の結果として配管図を作成することになると、この自動化は可能だろうか。最近、自動製図の分野で話題をまいているものとして **I SOME** 図の自動化がある。これは配管図のラインを一本ずつ取り出して立体的な図面として描いたもので図の複雑さという点では大したことはないが、それでも自動製図となると容易ではない。

- 1) **I SOME** 図は本来縮尺を無視し、立体的な感じとして理解できればよいことになっているので、与えられた紙面の上に程よく表現するにはどうすればよいか。
- 2) 既に紙面に描き込むことを決定したものはすべて覚えていて、新たに描くさい干渉しないかどうかチェックしなければならない。
- 3) 干渉した場合、どうやって代案を見つけるか。図面にはパイプ・ラインのほか寸法線、文字などが複雑に入り混っている。このような問題を解決するため、たとえば紙面を格子に分割して、それに相当するビットをコンピュータ内に用意してシミュレートすることが必要になる。対応するビットが1ビットのみであるならば、ある格子が占領されたかどうかの判定しか得られない。文字の上に文字を描いてしまうような絶対に干渉しては困る場合、パイプ・ライン同士が干渉した場合、片方のラインを切断して間隔をあける必要が生じるとか、コメント用指示線が寸法線をよぎるような干渉してもさほど苦にならない場合などいろいろある。

最後に残った問題として既に述べたプロセスや計装上の注意、あるいは建設、運転、保守などの制御条件などをうまくコンピュータの中で表現できるかという問題がある。たとえば、プラント内の多くのバルブを操作しやすくなるよう、位置、方向などを整えようとする場合人間が図面を見れば一見してそのように整えるだろうが、どんなアルゴリズムが対応するだろうか。

結局、**Interactive** な **Man-Machine** のシステムとして処理しなければならないように思う。

そこで、その基本である諸機能がわれわれのまわりに十分整備されているかどうかの問題になる。たとえば、

既述の膨大な情報を変更することを前提として取り扱うためには、おそらく **Associative Data Structure** が有効であるように思う。しかも多くの技術計算プログラムと直結するためには、**FORTRAN** で処理できるようなもの、さらに **Dynamic Allocation**, **Free Space** の有効利用といった機能が要望される。

また、**Man-Machine** システムといえども人間に課せられた役割は一定しておらず、ソフトウェアが開発されるにつれて変化すると思われるが、図面作成といった分野は自動化が進んで **Machine** 側になるのか、あるいは人間の判断にまかせるよう残されるのか、もちろん、その中間過程というものも存在するだろう。

いずれにしろ，CRT およびその関連ソフトウェアの開発速度を早めて，この種の問題に対処できるような体勢が確立することを期待する．そして，人間が図面上で行うシミュレーションを機械に置き換えるためのアルゴリズムについて活発に討論が展開されるよう希望する．

本 PDF ファイルは 1972 年発行の「第 13 回プログラミング・シンポジウム報告集」をスキャンし、項目ごとに整理して、情報処理学会電子図書館「情報学広場」に掲載するものです。

この出版物は情報処理学会への著作権譲渡がなされていませんが、情報処理学会公式 Web サイトの [https://www.ipsj.or.jp/topics/Past\\_reports.html](https://www.ipsj.or.jp/topics/Past_reports.html) に下記「過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について」を掲載して、権利者の検索をおこないました。そのうえで同意をいただいたもの、お申し出のなかったものを掲載しています。

#### 過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について

情報処理学会発行の出版物著作権は平成 12 年から情報処理学会著作権規程に従い、学会に帰属することになっています。

プログラミング・シンポジウムの報告集は、情報処理学会と設立の事情が異なるため、この改訂がシンポジウム内部で徹底しておらず、情報処理学会の他の出版物が情報学広場 (=情報処理学会電子図書館) で公開されているにも拘らず、古い報告集には公開されていないものが少からずありました。

プログラミング・シンポジウムは昭和 59 年に情報処理学会の一部門になりましたが、それ以前の報告集も含め、この度学会の他の出版物と同様の扱いにしたいと考えます。過去のすべての報告集の論文について、著作権者（論文を執筆された故人の相続人）を探し出して利用許諾に関する同意を頂くことは困難ですので、一定期間の権利者検索の努力をしたうえで、著作権者が見つからない場合も論文を情報学広場に掲載させていただきたいと思います。その後、著作権者が発見され、情報学広場への掲載の継続に同意が得られなかった場合には、当該論文については、掲載を停止致します。

この措置にご意見のある方は、プログラミング・シンポジウムの辻尚史運営委員長 ([tsuji@math.s.chiba-u.ac.jp](mailto:tsuji@math.s.chiba-u.ac.jp)) までお申し出ください。

加えて、著作権者について情報をお持ちの方は事務局まで情報をお寄せくださいますようお願い申し上げます。

期間：2020 年 12 月 18 日～2021 年 3 月 19 日

掲載日：2020 年 12 月 18 日

プログラミング・シンポジウム委員会

情報処理学会著作権規程

<https://www.ipsj.or.jp/copyright/ronbun/copyright.html>