

プラント建設工程評価システムの開発

横田 毅† 荒木憲司† 高元政典† 野中久典†

吉田美樹‡

† (株)日立製作所 日立研究所

‡ (株)日立製作所 日立工場

プラント建設計画の高精度化、高効率化を図るためのプラント建設工程評価システムを開発した。本システムは各作業単位に作業空間を設定し、その空間の混雑の度合で作業の難易性を評価することを特徴とする。そのために、詳細作業単位に作業空間を定義し、その中の据付部品の体積占有率を算出する機能、据付部品占有率を評価基準として詳細作業順序を自動決定する機能、作業員や作業空間の状況を含む建設シミュレーション、据付部品占有率による作業の難易度の自動評価、作業状況を確認しながらの工程計画の対話修正等を行なう作業性評価機能、を持つ。

Development of Evaluation System for Plant Construction

Takeshi Yokota † Kenji Araki † Masanori Takamoto † Hisanori Nonaka †

Miki Yoshida ‡

† Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

‡ Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

We have developed a schedule evaluation system for plant construction in order to improve the accuracy and the efficiency of plant construction schedule. This system evaluates schedules on the basis of the difficulty of construction process by using the congestion rate of working space defined for each process. This function is implemented using such steps as shown below. (1) Define working space for each detail process, and calculate volume rate of installed parts in that space as a interference measure. (2) Order the detail processes automatically to minimize the interference measure. (3) Improve the efficiency of the construction schedule, based on (a) construction simulation which shows the situation of workers and working spaces, (b) automatic work difficulty evaluation with the volume rate mentioned above, and (c) interactive adjustment of construction schedule according to simulated working situation.

1. 緒 言

電力需要の増大によるマルチプラント建設計画に伴い、原子力発電プラント建設計画の高精度化、及び建設計画作成の高効率化が求められている。そのため、原子力プラント建設統合C-C A Eシステムの開発を行なっている。

上記C A Eシステムは工程計画の基本となる各作業の工数を算出する工程データ作成システム[1]、工程データを用いて最適な工程計画を作成する工程割付システム[2]、作成された工程計画を評価し、それをより高精度化するための工程評価システム[3]の3つの要素に分けられる。本発表ではこのうちの工程評価システムに関して詳細に説明する。また、本研究では工程計画の高精度化とは、工程計画より現実に即したものとすることと定義する。

設計データを基に、最初に作成される工程計画は主に作業期間や作業人員のみを考慮して作成される。そのため、作成された工程計画を作業のしやすさ、各据付部品の干渉の状況、搬入のしやすさ、等の観点で評価し、問題があった場合にはそれを工程計画にフィードバックすることによって、より現実に即した工程計画を作成することができる。そのため、従来の工程評価では作業員の立場に立った評価として、作業の状況をビジュアル化し、その画面を用いて評価を行なう建設シミュレーションと呼ばれる手法が一般的に用いられている[4]。

しかし、工程計画評価をさらに効果的にするためには、建設シミュレーション時の作業状況表示をより現実に近いものにする、建設シミュレーションを実施するための手間をできるだけ少なくすること、作業状況をよりわかりやすく表示すること、可視化のみではなく新たな評価基準に基づく作業性の定量的な評価を行なうこと、等が必要である。よって、本研究では、建設シミュレーション時に各作業員の作業位置や職種の情報を表示する機能、工程計画の情報を用いて建設シミュレーション用のデータを自動的に作成する機能、人工現実感技術を応用して作業状況を立体的に表示する機能、作業空間の混雑の割合を用いた評価を行なう機能、作業状況を確認しながら工程計画を対話的に修正する機能、等を持つ工程評価システムを開発した。

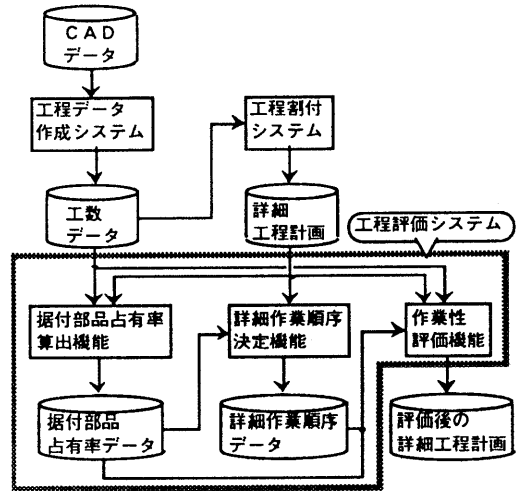


図1 システムの基本構成

2. システムの基本構成

システムの基本構成を図1に示す。工程データ作成システムではC A Dデータを用いて各詳細作業単位の工数(ある作業を行なうのに必要な人数と日数の積の情報)を算出する[1]。そして、工程割付システムで上述の工数の情報と、設計者が対話的に入力する制約条件(各工程の開始日、終了日の制約)を用いて作業人員の山積みができるだけ平準化するような詳細工程計画を作成する[2]。

工程評価システムでは上記のC A Dデータと詳細工程計画の情報を用いて工程計画の評価を行なう。本システムでは作業空間の混雑の割合で作業の難易度を評価する。作業空間は各詳細作業単位の作業員が作業を行なうために必要な範囲として定義する。そして、混雑の割合は作業空間中に存在する据付部品の体積の、作業空間の体積に対する割合で示す。具体的には、据付部品占有率算出機能で各作業空間毎にその作業空間中に存在する据付部品の種類と、その占有部分の体積を導出する。そして、詳細作業順序決定機能で上記の据付部品占有率を評価基準として、建設シミュレーションのための詳細作業順序を自動決定する。最後に作業性評価機能で作業状況の可視化による建設シミュレーション、据付部品占有率を用いた作業の難易度の自動評価、作業状況の変化を確認しながらの工程計画の対話修正、等を行なう。

以下、上述の工程評価システムの各機能について詳細に説明する。

表1 作業空間定義方法

部品、作業の種類	作業空間定義方法	
機器据付		$xk = xb \times 1.7$ $yk = yb \times 1.7$ $zk = h + zb \times 0.85$
配管据付		$xk = xb + rs \times 2$ $yk = yb + rs \times 2$ $zk = h + zb / 2 + rs / 2$
配管溶接		$xk = rs \times 2$ $yk = rs \times 2$ $zk = rs \times 2$

□ : 作業空間 ■ : 部品 単位はm

3. 据付部品占有算出機能

(1) 作業空間の定義

建設作業の作業空間を定義する主要因としては作業の種類と作業の対象となる据付部品の種類が挙げられる。よって、本機能ではCADデータと詳細工程計画の情報をを用いて各詳細作業単位に作業の種類と作業対象となる据付部品の種類に応じて表1のように作業空間を仮定した。

(2) 据付部品占有率

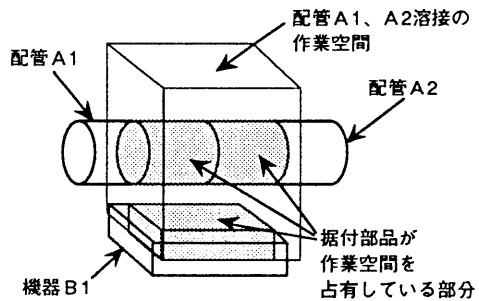
本システムでは各詳細作業を実施する時期にその作業空間の中に各据付部品がどの程度存在しているか、つまり、作業空間がどの程度混雑しているかによって作業の難易度を評価する。そのため図2の例に示すような、作業空間の体積に対する、作業空間中の据付部品の体積の比率（据付部品占有率と定義）を算出する。

4. 詳細作業順序決定機能

工程割付システムで作成される詳細工程計画は各エリアおよび各据付部品の種類単位の工程計画である。そのため、あるエリアに同じ種類の据付部品が複数存在する場合は各据付部品単位の作業時期を限定することができない。一方、より効果的な工程

評価を行なうためには各据付部品単位の詳細作業の評価を行なう必要がある。よって、本機能では詳細工程計画から各据付部品単位の作業順序を決定する。

本システムでは前節で求めた据付部品占有率を用いて作業の難易度を評価する。各作業の据付部品占有率は、その作業を実施する時に据付済みである部品によって定まるので、占有率は各部品の据付順序によって変化する。つまり、どのような順番で作



$$\text{据付部品占有率(\%)} = \frac{\text{作業空間占有部分の体積}}{\text{作業空間の体積}} \times 100$$

図2 据付部品占有率

業を行なうかによって据付部品占有率の合計値（作業の総合難易度）が変わる。よって、据付部品占有率の合計値をできるだけ小さくするような作業順序を最適化の一手法である分枝限定法を用いて求める。

分枝限定法による最適解探索の概念を図3に示す。まず、各作業を次々と付け加える形で作業順序を作成していく。そして、新たな作業を付け加える度に、その作業の追加が可能かどうかを以下の3つの評価基準を用いて判定する。

- (1) 同じ作業を2度以上使用しない。
- (2) 各作業の実施時期はその作業が属する詳細工程計画によって制約される。よって、新たに作業を追加する場合には、今までに実施済の作業を詳細工程計画の枠組みの中に当てはめていくことにより現時点で最も進んでいる作業の終了日を求め、その終了日より前にある詳細工程に含まれている作業だけを新たに追加可能とする。
- (3) 配管据付の作業に関しては新たに据付ける配管に接続する配管の据付状況を評価し、接続配管のうち少なくとも1つ以上が据付済でなければ作業の追加はできないものとする。ただし、各配管ルートの両端の配管に関しては上記制約は考慮しない。

新たな作業を付け加えることができた場合はその作業の据付部品占有率の値を累積していく。また、新たな作業を付け加えることができなかった場合にはその時点で現在検討中の作業順序に関する探索は終了し、図3のようにバックトラックを行ない探索を続けていく。そして、全ての詳細作業から成る作業順序が導出された場合にはその作業順序の各据付部品占有率の合計値を基準難易度と設定し、以下の探索においては途中の占有率の累積値が基準難易度を越えた時点でその作業順序の探索は終了するという処理を追加する。さらに、基準難易度を下回る占有率合計値を持つ作業順序が導出された場合には基準難易度の更新も行なう。

5. 作業性評価機能

(1) 工程計画に応じた建設シミュレーション
 詳細工程計画は工程計画表として記述される。工程計画表は各作業の開始日、終了日、工数、等を示すバーチャートの情報である。そのため、工程計画表のみから実際の部品の据付状況、他の据付部品との位置関係、等を類推するのは非常に困難である。よって、工程計画表の認識性を向上させるために、工程計画に基づき時系列的に各作業の状況を表示する建設シミュレーションを行ない、工程計画の認識性向上の支援を行なう。

作業状況表示においては従来の建設シミュレーションのように各部品の据付状況を表示するだけではなく、各作業員の作業位置や職種の情報、各作業の作業空間の状況、も表示する。これによって、各部品の据付状況や、各作業員の分布状況の認識性を向上させる。

また、作業状況表示画面では3次元の空間情報を2次元画面上に投影して表示しているため、特に空間の奥行き方向の認識性が低くなってしまふ。よって、本機能では視線方向の変更やウォークスルーをリアルタイムで行なうことにより、動態視差により3次元空間の認識性を高める。

さらに、本機能では3次元空間の認識性をさらに高めるために人工現実感技術を応用した表示として、液晶シャッター方式による両眼立体視と、超音波センサを用いた頭部の位置に応じた画面表示（ヘッドトラッキング）を行なう。これにより、あたかも実物のモデルを見回しているような感覚で作業状況の評価を行なうことができる。

(2) 据付部品占有率を用いた作業の難易度の自動評価

本機能では作業の難易度の認識性を向上させるためにシステムが難易度を自動的に評価し、その結果を表示する。難易度の評価には作業順序決定の評価基準である据付部品占有率を用いる。そして、各作業の据

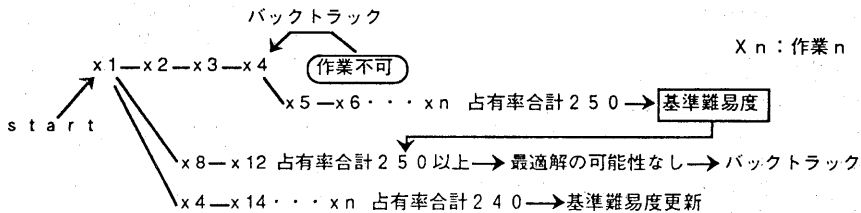


図3 分枝限定法による最適解探索方式の概念

付部品占有率の合計値によって作業の難易度を数段階に評価した結果を表示する。また、難易度が高い作業に関してはその主な原因となっている据付部品を据付部品占有率を評価基準として導出し、その部品の名称を表示する。

(3) 評価結果を確認しながらの詳細工程計画の対話修正

本システムでは工程評価の画面上で詳細工程計画の対話的な修正ができるようにした。その際、工程計画表の修正結果を作業状況の表示にリアルタイムに反映させることによって、工程計画の修正の影響を確認しながら、感覚的に詳細工程計画の修正を行なうことが可能となる。



図4 工程評価システムの画面例（メイン画面）

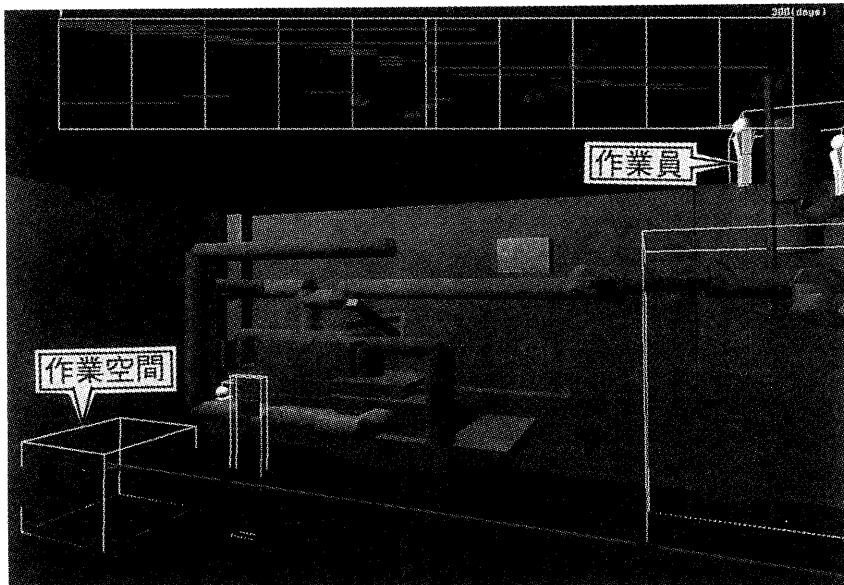


図5 工程評価システムの画面例（サブ画面）

6. システムの評価

実際の原子力プラントのCADデータを基に評価用データを作成し、システムの評価を行なった。

本システムは通常の評価を行なうためのメイン画面と人工現実感技術を応用した作業状況表示を行なうためのサブ画面の2つの画面を用いる。上記評価用データを用いた場合の、メイン画面の画面例を図4に、サブ画面の画面例を図5に示す。

メイン画面では図4に示すように画面の上部を対象となる工程計画表を表示し、画面中央に工程計画に対応した作業状況を表示することにより建設シミュレーションを行なう。この工程計画表表示画面中で日付を示すバーを移動させると、それに応じて作業状況も変化する。

また、据付部品占有率を用いた評価として、画面の左側に各作業単位にその作業空間に存在している据付部品の名称、据付部品のCAD番号、据付部品占有率の値、据付部品占有率の合計値、を表示する。この時、評価時点で据付済の部品と未据付の部品は区別して表示し、未据付の部品に関しては据付部品占有率の合計値にも含めない。さらに、各作業の難易度が高くなる原因となっている据付部品に関する表示は赤色で行なう。このような処理を行なうことにより、各作業の作業空間の現在状況の把握、混雑の原因となっている据付部品の認識、混雑を解消するために動かすべき据付部品の決定の支援、等を行なう。例えば、ある配管の据付作業の据付部品占有率が大きく、その内訳として壁による占有率が最も大きい場合には、その配管の据付位置が壁に近すぎるために作業がやりにくくなっているということを評価することができる。

さらに、作業状況表示画面中に作業空間を表示する際には据付部品占有率の合計値によって、作業空間を構成する線の色を数段階に分けて表示する。これにより、作業状況表示画面においても各作業の難易度の認識を行なえるようにする。

サブ画面では図5のように人工現実感技術を応用した表示を行なう。サブ画面においても工程計画表と作業状況が同時に表示され、工程計画表中の現在日移動することにより、それに応じた作業状況を表示する。

以上の評価の結果、本システムが実データに対して正しく動作することを確認した。

7. 結言

プラント建設計画の高精度化、高効率化を図るためのプラント建設工程評価システムを開発した。本システムは各作業単位に作業空間を設定し、その空間の混雑の度合で作業の難易度を評価することを特徴とする。そのために、詳細作業単位に作業空間を定義し、その中の据付部品の体積占有率を算出する機能、据付部品占有率を評価基準として詳細作業順序を自動決定する機能、作業員や作業空間の状況を含む建設シミュレーション、据付部品占有率による作業の難易度の自動評価、作業状況を確認しながらの工程計画の対話修正、等を行なう作業性評価機能、を持つ。

また、実際の原子力プラントのCADデータを基に評価用データを作成し、システムの評価を行ない、本システムが実データに対して正しく動作することを確認した。

参考文献

- [1]荒木、山田、高元、好永、中嶋：プラント建設計画システムの開発(1)－プラント建設計画システムの構成－、原子力学会1994秋の大会
- [2]高元、山田、小林、野中、大越：工程計画の資源山積みを平準化する0-1 2次計画アルゴリズム、電子情報通信学会論文誌D-2 Vol.J77-D-2 No.10 pp.2075-2082 (1994)
- [3]横田、高元、小林、大越、吉田：プラント建設計画システムの開発(2)－工程計画評価手法の開発－、原子力学会1994秋の大会
- [4]好永、中嶋、宮原、三浦：原子力発電プラントコンストラクションCAEシステム、日立評論 Vol.72 No.10 99.27-38 (1990)