

原子力発電所建物の構造設計用プログラムシステム

東京電力 工博 田中 宏志 東電設計 内田 紀郎
鹿島建設 笹川 和郎 ○佐藤 俊作 伊藤 博夫

1.はじめに

原子力発電所施設の構造設計はその重要性から精密かつ複雑なものが要求されている。その為、我国で設計が行われる様になった初期の頃から振動解析、応力解析等に大型計算機が利用されてきた。最近ではめざましい構造解析手法の発達あるいは安全に対する考え方の進歩等によりその設計手法もさらに複雑になりコンピューターの利用が益々増加してきている。特に有限要素法の著るしい成達は複雑な構造物の応力解析を可能にした為、原子力発電所の解析に多く利用される様になり設計におけるコンピューターの使用が不可欠になっている。又コンピューターの容量や性能も近年著るしく発達しこれらの解析に必要な計算時間も以前よりはるかに短縮されている。その為設計においては従来解析に必要なであった労力と時間とが大巾に短縮されてきたが、その一方ではインプットの作成、解析結果の検討整理にかかる労力が飛躍的に増大してきた。さらに種々の荷重条件の組合せを考慮すると数十ケースに及ぶ応力に対して各部材をチェックする必要性が生じ、計算結果に対する検討も人力では不可能に近くなってきた。そこでインプットの作成、アウトプットの整理及び各部材の断面計算等をすべてコンピューターで行うプログラムシステムを作成した。

このシステムは一つのプログラムに集約されているものではなくそれぞれの部分が独立して使用され、各部分は必要に応じ磁気テープあるいはカードを介して連結されている。又応力解析部分はその手法の発達に柔軟な追従をすべく一般の汎用プログラムを用いる様になっている。特にアウトプットを整理する部分にはラインプリンターによる打出し以外にプロッターやCOMを使用し視覚的にわかりやすく表現することにも注意を払った。本報告では設計の流れに沿ってこのプログラムシステムについて紹介しその評価について述べる。

2.原子炉建屋の構造概要

Fig. -1に原子力発電所のプラントレイアウトの1例を示す。このプラントは大別すると原子炉を格納する原子炉建屋(R/B)、タービンを収容しているタービン建屋(T/B)、原子炉を制御するコントロール建屋(C/B)、廃棄物を処理する廃棄物処理建屋(RW/B)、の4つより成る。この例ではR/BとRW/Bとが同一の建屋(C/S)に納められている。

以下これらの建屋のうち最も重要な原子炉建屋についてその構造概要を述べる。Fig. -2にMARK-II型と呼ばれる原子炉建屋(出力110万KW)の断面図を示す。建物は地下2階、地上6階の鉄筋コンクリート造でその高さは基礎下端から頂部まで約

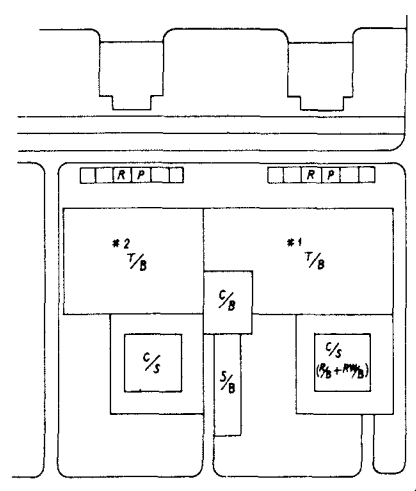


Fig. -1 Plant Layout

7.5 Mで平面は下部で70 Mのほぼ正方形である。

基礎版は約6 Mの厚さで岩盤上に直接設置され、その一部は1次格納容器（上部は鋼製）の底部を形成している。上部構造は厚さが1.5 Mから0.5 Mまで連続的に変化する耐震壁、下部円筒型上部円錐型の生体遮蔽壁（厚さ2.0 M、以下シェル壁と呼ぶ）、およびこれらを結ぶラーメン架構よりなっている。この他の構造要素としてはスラブ、小梁の他に使用済燃料を貯蔵するプール、原子炉を支持するペDESTAL、格納容器の仕切に用いるダイヤフラムフロア等がある。断面図でも見られる様に一般の床や壁も遮蔽の為かなりの厚さが要求されているので原子炉建屋は重量剛構物としての設計がなされている。

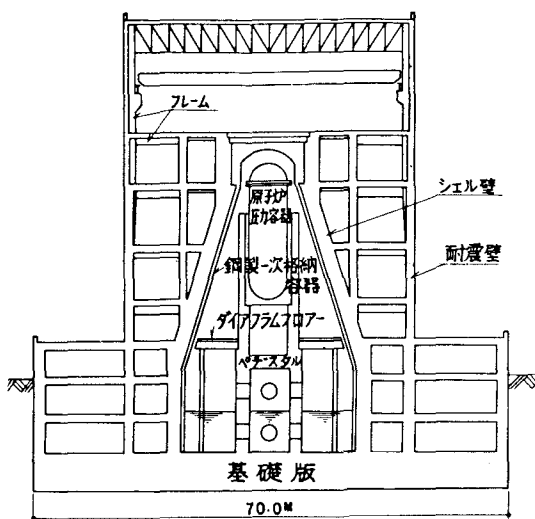


Fig. 2 Section of Reactor Building

3. 原子炉建屋の設計条件

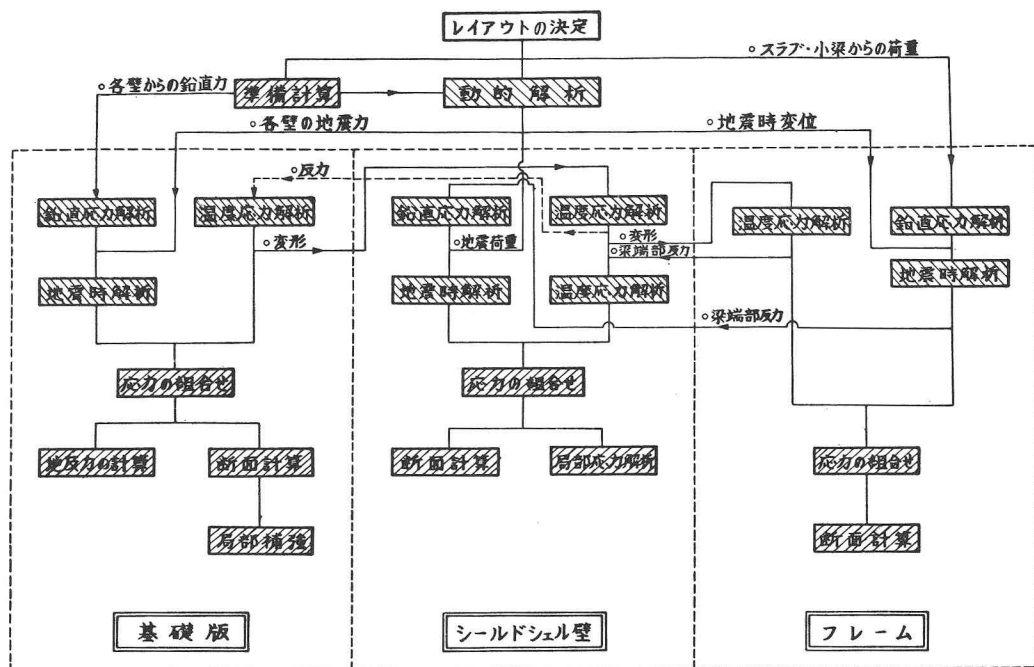
原子力発電所プラントの設計条件は各建屋の重要度により3つのクラスに分類されている。すなわち耐震上非常に重要なものはAクラス、次に重要なものがBクラス、一般建物と同様な耐震性で充分と認められているもの（例えば付属の事務棟等）はCクラスとなっている。原子炉建屋はこのうちAクラスに属しているがその基礎版はAsクラスとして設計される。AsクラスはAクラスよりさらに耐震的な安全性が要求されるもので非常に過酷な条件に対しても機能を保持することが必要となる。又原子炉建屋の荷重としては鉛直荷重、地震荷重の他に温度荷重、クレーン荷重等があり、その組合せも通常運転時、地震時のみならず試験時、事故想定時等を考慮する為非常に複雑になっている。尚Aクラスの地震力は建築基準法の3倍の静的水平震度より得られる水平地震荷重あるいは動的解析により求められる水平地震荷重の他に上下方向の静的地震荷重をも同時に考慮しなければならない。

4. 原子炉建屋の設計フロー

原子炉建屋の設計は床、フレーム材、耐震壁、シェル壁、基礎版等の各部分について行われるが、その際各部がそれぞれ独立のモデルで計算されている。もちろん建屋全体を一つのモデルとして解析することも考えられるがこれでは建屋が複雑な為未知数が多くなりすぎ設計上の取扱いに種々の不都合が生じるので上記の方法を採用している。この為各部の設計過程では他の部分との間に変形、応力等のやりとりが考慮される。例えば温度応力解析時、シェル壁と基礎版とは互に拘束し合っている所以その間に変形、応力のやりとりが行われる。このやりとりは互に収束するまで繰返さなければならないが実際には事前に別途モデルによる解析を行っておく為ほとんど繰返しの必要はない。

同様なやりとりがシェル壁、フレーム間でも行われる。

F i g. - 3 Design Flow of Reactor Building



F i g. - 3に基礎版、シェル壁、フレームの設計フローを示すが各部分間のやりとりの様子を見ることが出来る。この他の構造要素例えば耐震壁、プール等の設計も同様な過程で行われる。従って本プログラムシステムはこれらの過程を充分考慮に入れて作成されたもので特にやりとりの部分では出来るだけ自動的にデータの受渡しがなされる様考えられている。

この設計フロー中斜線部分が本システムの一部としてコンピューターにより行われるが、このうち左上の準備計算とは動的解析用のインプットデーターを作成するプログラムである。耐震壁、スラブそれぞれの位置、形状を与えると集中マス、曲げせん断棒モデルのデーター（質量、回転慣性、剛性）が計算される。この計算結果は動的解析に用いるだけでなく耐震壁に作用する自重として基礎版の解析あるいは耐震壁の断面計算の際にも利用される。その他の斜線部分については次章の各部設計にて説明を行う。

5.各部の設計

5-1 基礎版 MARK-II型原子炉建屋基礎版の設計モデルの1例をF i g. - 4に示す。この例では基礎版を下部の岩盤に等価なバネにより支持された版と考え有限要素法による解析を行っている。使用要素は8節点を有するスーパーパラメトリックによる厚版シェル要素で面外せん断変形の影響が考慮されているのがその特徴である。この他に汎用プログラムNASTRANのシェル要素を用いて解析を行った例もある。F i g. - 5に基礎版の設計フローを示してあるがこのうち斜線で表示した部分が本システムによる計算で以下各項毎に簡単な説明を行う。

『地盤のバネ定数の計算』：岩盤の物理定数を与えて有限要素法解析に用いる岩盤の等価バネ定数を計算するもので非常に単純な扱いをする場合あるいは岩盤が無限連続体であることを近似的に考慮す

る場合が選択出来る。アウトプットはラインプリンターの他にカードあるいは磁気テープへの打出しを行い応力計算に接続されている。(アウトプットについては以下準備計算項すべて同様)『鉛直荷重,地震荷重データー作成』:荷重が作用する位置及び大きさを与え有限要素法解析に用いる等価節点外力を計算しデーターを作成するもので任意の外力が取扱える。

『変形の整理』:与えられた節点群の変形から必要に応じてシェル壁用のデーターを作成する。

『地震時浮上り計算』:岩盤をバネとしてモデル化している為地震時基礎に浮上りが生じる場合、単純な弾性解析ではバネに引張反力が起り実際の現象とは合わなくなる。この反力を処理する為のプログラムで剛性マトリックスを直接変更する方法と仮想力を想定して荷重ベクトルのみを変更する方法とがあり目的に応じて使い分けている。

このプログラムは応力計算より剛性マトリックス、荷重ベクトルを引継ぎ必要に応じ応力計算プログラムの一部を利用して行われる。

『組合せプログラム』:設計条件で示される荷重の組合せは基本的に、通常運転時、試験時、事故発生想定時、通常地震時、A sクラスの地震時、地震+事故時等に分類されているが実際には温度荷重に冬夏を考慮すること、上下方向の地震を考慮すること、事故時荷重として種々の状態の荷重を考慮すること等の理由により設計用の組合せは数十ケース以上に及んでいる。これらの設計用応力は基本ケース毎のものを組合せて求める。この機能は汎用プログラムにも用意されているが各荷重ケース毎にまとめられるのが普通で断面計算の様に各要素毎にまとめられたものが必要な場合には利用出来ない。この為作成したプログラムで応力計算に於て求められた応力を組合せにより再編集するものでラインプリンターによるアウトプットと共に磁気テープを作成し以後の計算に用

Fig-4 FEM Model of Foundation Mat

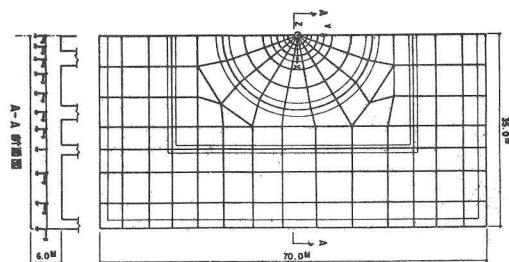


Fig-5 Design Flow of Foundation Mat

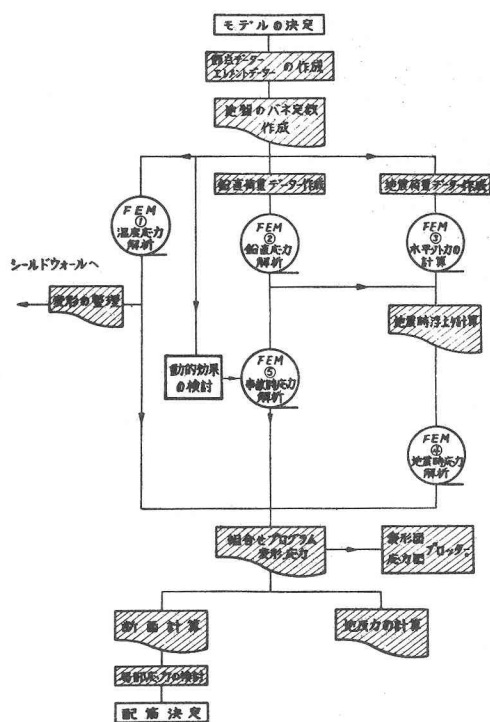
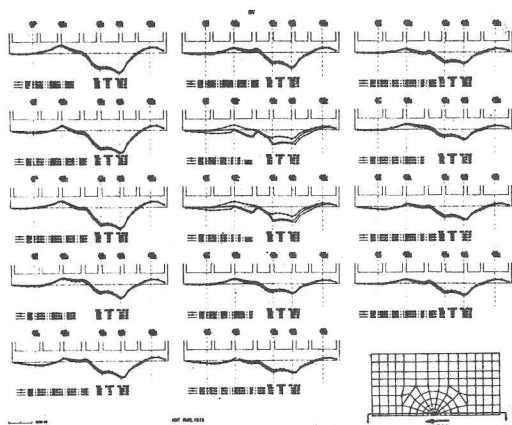


Fig-6 Example of Stress Plotting



いる。尚この組合せは変形に対しても行われる。

『変形，応力のプロット』：モデルが複雑でさらに組合せケースが多い為解析結果をわかりやすく表現することは設計上最も重要なことになる。その為作成したプログラムで各要素毎組合せ応力中最大なものを選び要素展開図に数値でプロットするもの、あるいは任意の切断位置での応力、変形を描くもの等の機能がある。切断位置でのプロットにも一つの要素応力に対して数十の組合せケースを同時に描くもの、あるいは数種類の要素応力を同時に描くもの等種々のまとめ方が可能である。切断位置で数十ケースをプロットした例をFig-6に示す。

『断面計算』：組合せの結果得られた応力を使って断面検討を行うが、これは建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準の柱、梁、耐震壁の計算式に準拠して行われる。従って面外せん断力については種々の計算方法が考えられるがこれらに対するケーススタディ等もオプションとして用意されている。全ケースの応力に対して断面計算を行い各要素毎に最大鉄筋比を選定し要素展開図にプロットするもの、長期、短期それぞれ最大値を示すものを表にしてプロットするもの等アウトプットの表示方法にも種々の機能を有している。

『地反力の計算』：地盤のパネ反力を使って各ケース毎、各位置における地反力を計算するプログラムで各ケース毎の最大値、長短期毎の最大値を選定する。又任意の切断位置における地反力図のプロットも可能である。

『局部応力の検討』：小さな開口部周辺に対する局部補強の検討である。開口が小さいのでFig-4の様な全体モデルでは評価しにくい為、全体の解析を終えた後その結果を利用して局部有限要素法解析を行う場合や理論式による応力集中の計算を行う場合が用意されている。

以上の設計手法は完全に確立されたものではなく事故時荷重に対する詳細解析、温度荷重に対する解析法等種々の考慮すべき点があるがこれらに対する設計法が確立された際には上記の設計フローにも変更が生じこのシステムも改良されていくことになる。

5-2 シェル壁 この壁は放射線遮蔽の為に設けられるがその壁厚が2.0M程度と厚い為構造的にはフレーム及びブール壁等から伝わってくる鉛直荷重を負担し地震時には耐震壁と共に地震力の一部を負担する。又さらに通常時及び事故時の熱荷重等も受ける。構造的にかなり特異な形状をしている為上部円錐部と下部円筒部との交点位置の床スラブが厚くなりその強度を高める様になっている。

これらの特性を考慮してモデル化する必要があるが特に要素分割にあたってはフレーム取付け部より集中荷重が作用する為使用要素の特性のみならず梁の大きさにも注意を払わなければならない。モデルの1例をFig-7に示すがこの例ではシェル壁

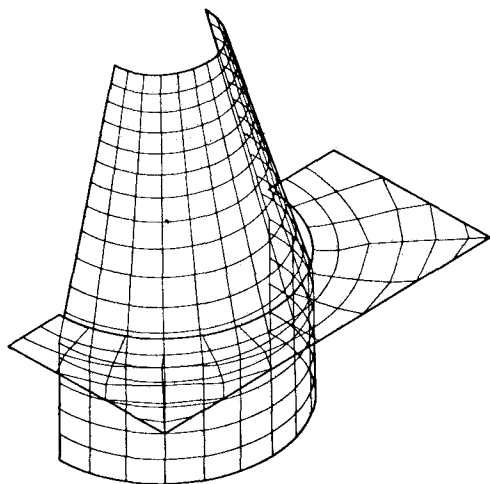


Fig.-7 FEM Model of Shield Shell

〔荷重データー〕：フレームから伝達される

【変形の整理】：シェル壁の解析結果をフレームに渡す際用いるもので梁とシェル壁の交差位置廻りの節点変位を使ってフレーム解析用の梁端部データーを作成する。

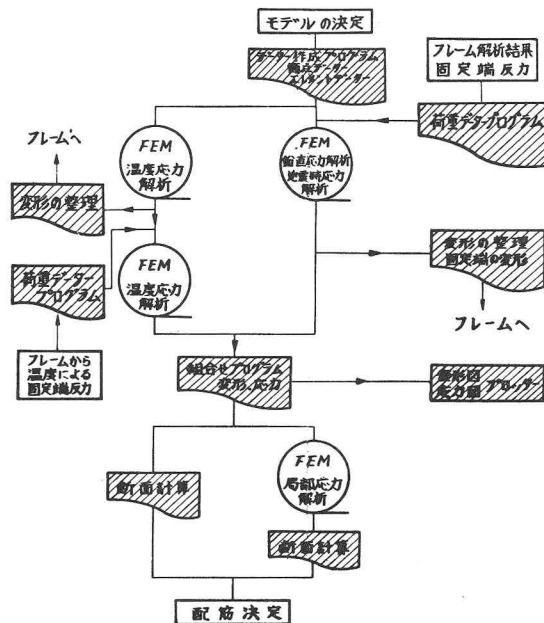
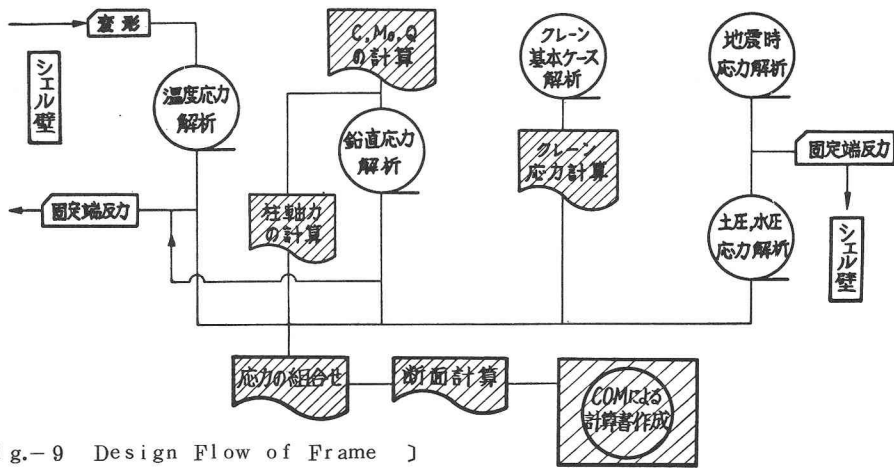


Fig.-8 Design Flow of Shield Shell

【C, M₃Q の計算】：原子力発電所の設計では配管設計等の関係上、間仕切壁等（遮蔽の為かなりの厚さを持つ）の配置が施工直前に変更、追加されることもあるのを考慮しなければならない。従って鉛直荷重が直接作用する部材の設計は変更に従従出来る様な方法をとることが重要でこの部分はその為で作成したものである。手計算の際行う荷重項の計算で結果はLP用紙への打出し以外にプロッターを使った計算書型式のプロットも可能である。

『応力の組合せ』：汎用プログラムによる計算、クレーン応力計算及び柱軸力の計算結果を利用して



[Fig.-9 Design Flow of Frame]

行う応力の組合せで結果は各部材毎にまとめられる。部材応力は端部中央以外任意の位置での値を求めることが出来る。尚組合せ数は50ケース程度になっている。

『断面計算』：建築学会の規準に則り柱、梁、耐震壁の断面計算を行うもので全ケースに対して計算を行い最大値を選定する。特に柱、梁は組合せで求められた任意の点についても計算される。

『COMによる計算書作成』：断面計算結果はLP用紙のみを使って表示すると種々の制限があるのでマイクロフィルムを使って計算書型式のプロットを行うものである。

5-4 その他 耐震壁、プール、ペデスタル、ダイヤフラムフロア等の設計の為に種々のプログラムが用意されている。

6. 終りに

以上プログラムシステムについて簡単に説明してきたがこれも実施設計の経験を生かしてさらに改良の余地がある。以下本システムを実際に適用しての反省及び今後の課題について述べる。本システムによって設計を行った結果計算量の非常な増加にもかかわらず設計期間は従来のものと変わらなかった。従って充分その長所を発揮出来たと思われるが同時に次の様な点が目立ってきた。1) 設計に従事したものにとっては設計期間中ほとんどがデーターの作成及びそのチェックの繰返しであったという印象を避けることが出来なかった。特にデーターのチェックには相当な労力と時間とが必要になったのでこれを何如に処理するかが今後の課題になろう。2) 設計上最もクリティカルになっているものの把握が難しかった。計算が自動化されているだけに設計者にとっては非常に重要な分野で今後充分な経験が必要となろう。3) チェック計算にかかる時間が予想外に必要とされた。この計算は設計の大握みのチェックを行うもので設計法が複雑になればなる程重要になってくるので今後の設計工程は充分にこの時間を考えておく必要がある。以上の反省をもとに今後このプログラムシステムをさらに充実したものにすべく努力したいと考えている。

最後に、この設計プログラムシステム作製に御指導頂いた、鹿島建設構造設計部・相原部長殿、同厚美次長殿、および御協力をたまわった多くの方々に対して厚く御礼申し上げます。

THE COMPUTER PROGRAM SYSTEM FOR STRUCTURAL DESIGN OF NUCLEAR POWER
PLANT

Dr. HIROSHI TANAKA* TOSHIRO UCHIDA** KAZURO SASAGAWA***etc.

In recent days, the design method of the Nuclear Power Plant has become more complex than in the past, due to the remarkable development of the method in analyses and the requirements of advanced safety guide. The Finite Element Method (FEM) applied for analyses of Nuclear Power Plants, especially require more computer use. The recent computers have made remarkable progress, so that in design work manpower and time necessary for analysis have been reduced considerably. However instead the arrangement of outputs have increased tremendously. Therefore a computer program system was developed for performing all of the processes, from data making to output arrangement, and rebar evaluations.

This report introduces the computer program system pertaining to the design flow of the Reactor Building, which major portions are performed by this system. The features are as follows:

- Foundation Mat: Rock spring calculation, load data preparation, displacement arrangement for shielding shell, uplift calculation for seismic design, stress combination, stress plotting, rebar evaluation, rock reaction calculations
- Shield Shell: Grid and element data preparation, load data preparation, displacement arrangement for frame analysis, stress combination, stress plotting, rebar evaluations
- Frames: Load data preparation, columns axial force calculation, stress combination, rebar plotting and evaluation

Recently this program system was adopted into the original design method, which use to be executed by handwork, with the exception of the stress analyses. Due to this procedure manpower was greatly reduced, however new problems arose as follows:

- 1) As much time is required to check these datas, the method to shorten time is necessary.
- 2) It was difficult to comprehend what the most critical load was.
- 3) Much time was required to check outputs.

In view of such problems, an effort is being made to improve this computer program system.

*: Tokyo Electric Power Company

** : Tokyo Electric Power Service Company

***: Kajima Corporation