

J A E R I - M  
92-206

MSC/NASTRANによるプルトニウム用  
グローブボックスの耐震解析

1993年1月

平田 勝・石川 一哉・黒沢 誠  
福島 獨・星名 博文\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこみください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

MSC/NASTRANによるプルトニウム用  
グローブボックスの耐震解析

日本原子力研究所大洗研究所管理部

平田 勝・石川 一哉・黒沢 誠

福島 福・星名 博文\*

(1992年12月3日受理)

地震時におけるプルトニウム取扱用グローブボックスの構造強度解析は、プルトニウムの閉じ込め機能を評価するうえで重要である。しかしながら、プルトニウムの閉じ込め機能をより高い精度で評価するためには、地震時に発生するグローブボックス本体の窓枠とアクリル樹脂製窓面との相対変位について解析する方法を検討する必要がある。

このため、有限要素法による構造解析コードMSC/NASTRANを用いて、大洗研究所燃料研究棟の標準的なグローブボックスを対象に耐震解析を行った。固有振動数および静的震度法による解析の結果から、グローブボックス窓枠周辺部の最適モデル化の手法について検討した。また、最適モデルについてグローブボックスの地震時における構造強度および窓枠周辺部の変位量を床応答スペクトル法および時刻歴応答法により詳細に評価した。

Seismic Analysis of Plutonium Glovebox by MSC/NASTRAN

Masaru HIRATA, Kazuya ISHIKAWA, Makoto KUROSAWA  
Susumu FUKUSHIMA and Hirofumi HOSHINA\*

Department of Administrative Services  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 3, 1992)

Seismic analysis of the structural strength of gloveboxes is important for plutonium confinement evaluation. However, the analytical methods must be developed for evaluating the mutual displacement between the window frame and acrylic resin window panel with regard to plutonium confinement during an earthquake. Therefore, seismic analysis for a standard glovebox in Plutonium Fuel Research Facility at Oarai Research Establishment of JAERI has been conducted by FEM (Finite Element Method) computer code MSC/NASTRAN (MacNeal-Schwendler Corporation NASA Structural Analysis).

Modelling of glovebox window frame has been investigated from the results of natural frequency analysis and static analysis. After the acquisition of a suitable model, displacement around the window frame and glovebox structural strength have been evaluated in detail by use of floor response spectrum analysis and time-history (transient response) analysis.

Keywords: Glovebox, Seismic Analysis, MSC/NASTRAN, Finite Element Method, Natural Frequency Analysis, Static Analysis, Time-History Analysis, Plutonium, Confinement

---

\* CRC Research Institute, Inc.

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.耐震設計方針 .....	2
2.1 燃料研究棟の概要 .....	2
2.2 耐震設計上の重要度分類 .....	2
3.グローブボックスの耐震解析 .....	3
3.1 解析対象グローブボックス .....	3
3.2 有限要素モデル .....	4
3.3 物性値および境界条件 .....	5
3.4 解析方法 .....	6
3.5 解析結果 .....	8
4.まとめ .....	11
謝 辞 .....	13
参考文献 .....	13
付録1 グローブボックスの要素番号および節点番号 .....	47

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Plan for Seismic Design .....	2
2.1 Outline of Facility .....	2
2.2 Classification of Seismic Design .....	2
3. Seismic Analysis of Glovebox .....	3
3.1 Analyzed Glovebox .....	3
3.2 FEM Model .....	4
3.3 Material Data and Boundary Conditions .....	5
3.4 Analytical Methods .....	6
3.5 Analytical Results .....	8
4. Conclusion .....	11
Acknowledgments .....	13
References .....	13
Appendix 1 Element and Node Numbers of Glovebox .....	47

## 1. はじめに

プルトニウムを取り扱う施設では、給排気設備の整備された建家内に、常時負圧に維持したグローブボックスを設置してプルトニウムを取り扱うことになる<sup>1)</sup>。

このような施設の耐震設計では、最も重視されるグローブボックスの構造強度に加えて、プルトニウムの閉じ込め機能を維持することが特に重要な課題であると言える<sup>2) 3) 4) 5)</sup>。このプルトニウムの閉じ込め機能維持の観点から、地震時に最も影響を受けると考えられる構造部は、気密維持のためにアクリル樹脂製の窓面とグローブボックス本体との間に取り付けているネオプレンゴム製のパッキング周辺である。従来、グローブボックスの耐震安全評価では、グローブボックスの転倒防止、内装機器の転倒に伴うアクリル樹脂製窓面の破壊防止などに重点を置いて解析を行っていた。しかしながら、このような構造強度上の耐震安全評価のみでは、プルトニウムの閉じ込め機能維持を保証するためには不十分である。このため、大洗研究所燃料研究棟では、代表的なグローブボックスを取り上げ、窓面周辺の変形挙動に重点を置いて構造解析を行った。

はじめに、グローブボックス本体の天井部、床、側壁を板要素とし、架台を梁要素としてモデル化して固有値解析および静的震度法による解析を行った。その結果、窓面周辺での変形が著しく、プルトニウムの閉じ込め機能を維持することが困難であるような変位量（絶対変位）であった。このため、グローブボックス本体と窓面との相対変位を求めるために、アクリル樹脂製の窓面を板要素としてモデル化し、固有値解析および静的震度法による解析を実施した。その結果、グローブボックス全体としての剛性が向上することを確認したほか、静的震度法による解析の結果として得られた変位量（絶対変位）は、窓面を考慮しない場合の値より低くなることとアクリル樹脂製の窓面と本体との相対変位が極めて小さいことを確認できた。

これらの結果から、アクリル樹脂製の窓面を構造材の一部として解析時に用いた場合には、剛性の向上が期待できることが明らかになった。しかしながら、耐震安全審査上の観点から窓面を考慮することは、必ずしも裕度のある評価とは考えられない。このため、剛性をグローブボックス本体のみで持たせるために、グローブボックス窓面周辺の曲げ加工部（窓枠）を詳細にモデル化した後、固有値解析および静的震度法による解析を実施した。すなわち、グローブボックス本体の天井部、床、側壁を板要素としてモデル化した後、さらに窓面周辺の曲げ加工部を板要素として解析モデルに追加した。この解析の結果から、窓面周辺の曲げ加工部は、窓面周辺の変形の抑制に大きく寄与することが明らかであり、このような評価を加えることにより、耐震安全評価をさらに確実なものにすることが可能であることが明らかになった。

## 2. 耐震設計の方針

### 2.1 燃料研究棟の概要

燃料研究棟は、高速増殖炉用新型燃料であるウラン・プルトニウム混合炭化物および混合窒化物燃料の研究開発を行うため、昭和49年2月に大洗研究所に建設された施設である。Fig.-2.1に燃料研究棟とその周辺施設との関係を示す。燃料研究棟は、大洗研究所の西部、HTTR原子炉施設の北西約400mに位置しており、ともに第四紀層である鹿島台地に建設されている。建家は、東西方向に20.0m、南北方向に50.9m、高さ8.20mの2階建構造であり、1階は、グローブボックスを配置した実験室であり、2階は、気体廃棄施設である。グローブボックスを配置している建家1階の平面図をFig.-2.2に示す。

棟内には新型燃料の製造研究、確性試験、物性研究、照射試験用の燃料ピン製作に必要な装置および大小33台のグローブボックスが整備されている。これらプルトニウム取扱設備を使用した実験研究は、昭和51年10月に開始し、以来順調に進められている。しかし、最近、設備の老朽化および研究内容の進展に対応してグローブボックスの更新もしくは解体撤去・新設が必要な時期にきている。

### 2.2 耐震設計上の重要度分類

燃料研究棟に設置するグローブボックスは、耐震設計上の施設別重要度および地震により発生する可能性のある放射線による環境への影響の観点からの分類によれば、耐震Bクラスに該当する。Bクラスの施設では、静的地震力の算定時に層せん断力係数を $1.5 C_i$  ( $C_i$  は標準せん断力係数を0.2とし、建物・構築物の振動特性、地盤の種類等を考慮して求められる値) として解析する必要があり、かつ、共振する恐れのある場合には、その影響を評価する必要がある<sup>⑥)</sup>。この場合には、共振を避ける設計法の一つとして、グローブボックス自体の剛性を高めることにより剛構造とする方法がある。しかしながら、剛構造とする設計が困難である場合には、有限要素法を用いたより高精度な動的挙動の解析が必要である。

これら動的挙動解析のために必要となる地震力は、先にHTTR原子炉施設の設計時に使用した、基準地震動 $S_1$ （設計用最強地震）を $1/2$ として、燃料研究棟設置地盤表面での地震力を算出し、建家の応答解析を実施してグローブボックス設置床面での時刻歴床応答波および床応答スペクトルを求めたものを使用した。

### 3. グローブボックスの耐震解析

#### 3.1 解析対象グローブボックス

解析対象としたグローブボックスは、Fig.-2.2に示す燃料研究棟101号室に既設の、 $\alpha$ 有機性廃棄物焼却用グローブボックス(142-D)である。このグローブボックスは、形状・寸法等が燃料研究棟内に設置されている他のグローブボックスと同程度であり、しかも、内装装置として比較的重量の大きい環状式電気炉を設置しているために、耐震安全性を評価するためのモデルとして最適であると考えられた。そのグローブボックスの概要を Fig.-3.1 に示す。解析を行ったグローブボックスの構成は以下に示す通りである。

##### (1) グローブボックス本体

- イ) 構造・形式 : 両面操作、薄板箱型構造
- ロ) 構造材料 : ステンレス鋼(SUS304)板(厚さ4mm)
- ハ) 外形寸法 : 幅225×奥行100×高さ100(単位cm)
- ニ) 窓材料 : 透明アクリル樹脂板(厚さ1cm)
- ホ) 窓寸法 : 縦90×横85、縦90×横130(各2枚)(単位cm)
- ヘ) グローブポート : 合成樹脂製8インチポート、20個
- ト) バックポート(1) : 内径30cm、SUS304製、グローブボックス側壁に取付
- チ) バックポート(2) : 内径55cm、SUS304製、天井板に取付
- リ) 連結ポート : 内径30cm、SUS304製、グローブボックス側壁に取付

##### (2) グローブボックス架台

- イ) 外形寸法 : 幅221×奥行89×高さ90(単位cm)
- ロ) 構造材料 : L型鋼(SS41)、(65×8)(単位cm)溶接構造

##### (3) 給排気系

- イ) 配管 : SUS304製管
- ロ) 高性能エアフィルタ : 200角セルフコンテント型、3式
- ハ) 背圧ダンパー : SS41製、1式
- ニ) 電磁三方ボールバルブ : SCS13製、1式

##### (4) 内装装置 環状式電気炉

##### (5) 固定ボルト

- イ) グローブボックス本体-架台間(スタッド・ボルト)
- ロ) グローブボックス架台-建家床間、高さ調節用(アジャスト・ボルト)

##### (6) 含鉛アクリル樹脂製の窓遮蔽 板厚18mm(鉛当量0.8mm)、総重量116.6kg

### 3.2 有限要素モデル

3.1 に示したグローブボックスを、グローブボックス本体ースタッド・ボルトー架台ーアジャスト・ボルトー建家床から成る3次元系とし、架台補強板は3節点板要素としてモデル化した。また、天井積載物、内装装置および連結ポート等はそれらの有する質量を質点として考慮するため、剛梁としてモデル化し、アクリル樹脂製の窓面に付属するグローブポートおよびグローブボックス側壁に付属する物品搬出入用のバックポート、隣接するグローブボックスとの接続に用いる連結ポートおよび含鉛アクリル樹脂製の窓用遮蔽材ならびに給排気系配管を除く天井積載物については付加質量とした。グローブボックスを構成する各部材は、各々以下に示す要素としてモデル化した。そのグローブボックスの有限要素モデルの概要をFig.-3.2に示す。

グローブボックス本体プレート	板要素
グローブボックス本体窓枠用曲げ加工部	梁要素 (MODEL-①および②)
補強材	板要素 (MODEL-③)
グローブボックス架台	梁要素
ボルト	梁要素
給排気系配管	梁要素
アクリル樹脂製窓面	板要素 (MODEL-②)
ネオプレンゴム製パッキング	バネ要素 (MODEL-②)
内装装置、窓遮蔽その他	付加質量

今回の解析では、グローブボックス本体に加工されている窓枠とアクリル樹脂製窓面との接触面周辺でのグローブボックス本体の地震時における変形挙動に重点を置いた。このため、グローブボックスの窓面周辺のモデル化を変更したものとして、下記の3ケースについて解析した。

- ① アクリル樹脂製窓面のない（窓枠梁要素）場合 (MODEL-①)
- ② アクリル樹脂製窓面のある（窓枠梁要素）場合 (MODEL-②)
- ③ 窓面周辺を板要素としてモデル化した場合 (MODEL-③)

MODEL-①は、Fig.-3.3 に示すように、アクリル樹脂製窓面のないモデルであり、窓面取付け用曲げ加工部を梁要素としてモデル化したものである。MODEL-②は、Fig.-3.4に示すように、MODEL-①にアクリル樹脂製窓面を追加してモデル化したものであり、アクリル樹脂製窓面の有無によるグローブボックス全体の強度（剛性）、振動特性への影響を調べるとともに、地震時のブルトニウムの閉じ込め機能維持を図るために窓面とグローブボックス本体の窓枠周辺の相対変位を求めるためのモデルである。しかしながら、MODEL-②のようにアクリル樹脂製の窓面がグローブ

ボックスの強度を支持する要素の一つである場合には、耐震安全評価上、必ずしも裕度のある評価であるとは考えられない。このため、Fig.-3.5に示すようにアクリル樹脂製窓面のない場合であり、かつ窓面取り付け用の曲げ加工部をより実際のものに近い板要素として詳細にモデル化したもの MODEL-③とした。

今回の解析には、米国、NASA (The National Aeronautics and Space Administration)によって開発され、MSC社(The MacNeal-Schwendler Corporation)によって商業用として提供されている有限要素法(Finite Element Method)による汎用大型構造解析プログラムであるMSC/NASTRANを用いた<sup>7) 8)</sup>。また、解析したグローブボックスの有限要素モデルの要素番号および節点番号を付録-1に示す。

### 3.3 物性値および境界条件

#### 3.3.1 物性値

今回の解析対象としたグローブボックスは、本体がSUS304鋼板製であり架台はSS41製の溶接組み立て構造である。本体と架台はSUS304製のスタッド・ボルトで、また、建家床面と架台はSS41製のアジャスト・ボルトで接続されている。本体、架台およびアクリル樹脂製窓面の各部材の材料および形状特性データをTable-3.1に示す。また、各部材の付加質量をTable-3.2に示す。

#### 3.3.2 ネオプレンゴム製パッキングのバネ定数

MODEL-②(アクリル樹脂製窓面のある場合)の解析においては、窓面周辺にネオプレンゴム製のパッキングが取り付けられている。このため、このネオプレンゴムをバネ要素としてモデル化した。

ネオプレンゴムのバネ定数は、その弾性的な特性を考慮し、ポアソン比( $\nu$ )、せん断弾性率(G)およびヤング率(E)を天然ゴムの値と同程度であると考え<sup>9)</sup>、

$$\nu = 0.495$$

$$G = 0.035 \text{ kgf/mm}^2$$

$$E = 0.107 \text{ kgf/mm}^2$$

とし、バネ定数(K)は、Fig.-3.6に示すモデルに従って以下のように算定した。なお、回転剛性 $K\theta$ の値は、 $K_x$ の値を $10^8$ 倍することにより定義した。

$$K_x = (L \cdot H/T) \cdot E$$

$$K_y = (L \cdot H/T) \cdot G$$

$$K_z = (L \cdot H/T) \cdot G$$

$$K\theta = K_x \times 10^8$$

### 3.3.3 境界条件

グローブボックス架台を建家床面に固定しているアジャストボルトは、床に固定している側の一端が床面と同一の挙動を示すものとみなし、これらの節点番号である3701～3706（付図-2参照）に変位境界条件を定義した。Table-3.3 に各解析手法とその境界条件を示す。

なお、応答スペクトル解析および時刻歴応答解析における $U_x$ 、 $U_y$  および $U_z$  は、入力地震波により加振される自由度であり、 $\theta$  は回転方向に加振される自由度である。

## 3.4 解析方法<sup>10) 11) 12)</sup>

### 3.4.1 固有値解析

グローブボックスの固有振動数は、静的震度法による解析と地震波を用いた動的解析のいずれを採用するかを決定する上で重要なデータである。グローブボックスの固有振動数が建家床面での卓越振動数域より十分高ければ、そのグローブボックスは剛構造物であるとして静的震度法による耐震設計のみで十分である。しかしながら、グローブボックスの固有振動数が建家の固有振動数と近接している場合には、このグローブボックスは共振構造物であると考えられる。このため、減衰が非常に大きい場合を除いて固有振動数と卓越振動数との関係で共振倍率が大きく変化することが予想されるためにかなり厳密な動的挙動の解析が必要である。今回の解析では、グローブボックスが取り付けられている建家床面での地震波による動きをグローブボックスの振動特性と比較するために、上述のMODEL-①、②および③の3モデルについて、10次程度（固有振動数20 Hz程度）までの固有値解析を行い、各モデルの固有振動数、固有振動モードを求めた。これらの固有値解析には、修正ギブンス(MGIV)法<sup>13)</sup>を用いた。このMGIV法は、大幅な動的縮退が実行された後の、多数の固有ベクトルが必要である大きな問題に最適であり、質量マトリクスに起因する数値的不安定性を被ることがないために信頼性が高いとされている手法である。

### 3.4.2 静的震度法による解析

静的地震力の算定において、水平震度Kを次式により算定し、その値を用いて静的震度法による解析を行った<sup>8)</sup>。

$$K = n \cdot D \cdot C_0 \cdot G = 0.36G$$

ここで、 $n$  : 重要度係数 (Bクラス) ( $=1.5$ )

$D$  : 機器に対する増倍係数 ( $=1.2$ )

$C_0$  : 建築基準法による震度 ( $=0.2$ )

MODEL-①、②および③の3モデルについて水平方向静的震度0.36Gを長辺(X(EW))方向および短辺(Y(NS))方向に作用させ、注目する各節点での応力分布を解析した。応力評価の際、各解析結果として得られる応力値に自重のみによる応力値を加算して評価した。

### 3.4.3 応答スペクトル解析

応答スペクトル法に基づく解析には、各モードの最大値の重ね合わせに二乗平均値を用いて評価する手法であり、安定した近似解を得られる S R S S (Square Root of Sum of Square) 法を用いた。また、入力地震波としては、 $1/2 \cdot S_1$  波に相当する模擬応答スペクトルと燃料研究棟における建家の床応答スペクトルの相方を用いて比較検討を行った。

模擬応答スペクトルとして、Table-3.4 に示す基準地震動  $S_1$  波の模擬地震波を作成した<sup>6)</sup>。このとき、減衰定数を 1 % とし、得られた  $S_1$  波相当の模擬地震波を  $1/2$  として  $1/2 \cdot S_1$  波に相当する模擬応答スペクトルとした。解析に用いた基準地震動および模擬応答スペクトル ( $S_1$  波相当) を Fig.-3.7 に示す。

また、燃料研究棟建家の床応答スペクトル [ X (EW) 方向、Y (NS) 方向,  $\pm 10\%$  の拡幅したもの] は、大洗研究所の地形、地層などを考慮し、H T T R 原子炉施設設置位置での解放基盤表面に定義した基準地震動 [ 燃料研究棟は耐震クラスが B クラスであるため、 $S_1$  基準地震動 (設計用最強地震) の  $1/2$  の地震動] を一次元波動理論による地盤の応答解析を実施して建家モデルに入力し、建家の地震応答解析を行って求めたものである。その結果として得られた応答スペクトルを Fig.-3.8, 3.9, Table-3.5, 3.6 に示す。グローブボックスの位置は、建家の方向に合わせ、グローブボックスの長辺方向が X (EW) 方向であり、短辺方向が Y (NS) 方向である。また、減衰定数は 1 % とした<sup>14)</sup>。

### 3.4.4 時刻歴応答解析

外力として与えられる加速度を微小時間ごとの時刻歴として入力する地震応答解析手法の一つである時刻歴応答解析では、応答値を低次の固有モードを重ね合わせ時間について積分して求める必要がある。今回は、応答スペクトル解析のところで示した模擬地震波および燃料研究棟建家の時刻歴床応答波がグローブボックスを設置している床面に 20 秒間作用するものとして、固有振動数 20Hz までを積分時間刻み幅 0.01 秒として解析した。 $1/2 S_1$  波に相当する模擬地震波を Fig.-3.10 に、また、燃料研究棟建家の時刻歴床応答波 [ X (EW) 方向、Y (NS) 方向に 20 秒間作用する] を Fig.-3.11 および 3.12 に示す。

解析の対象としたモデルは、グローブボックス本体の窓枠周辺を板要素としてモデル化した M O D E L - ③ について模擬地震波 ( $1/2 \cdot S_1$  波相当) および燃料研究棟における建家の時刻歴床応答波の X (EW) 、Y (NS) 方向について解析した。また、実際の地震波が、同時方向から加振されることはなく、かつ、今回の解析では、応答スペクトル解析による応答値の方が大きな値を示しており安全側の評価結果であるために、X・Y (EW・NW) 同時入力の時刻歴応答解析については除外した。

### 3.5 解析結果

#### 3.5.1 固有値の解析結果

MODEL-①、②および③の固有値解析の結果として得られた固有振動数をTable-3.7に示す。また、各モデルごとの1次および2次の固有振動モード図をFigs.-3.13から3.15に示す。

各モデルの1次固有振動数を比較すると、アクリル樹脂製の窓面を考慮したMODEL-②の値が最大であり、9.936Hzであった。このMODEL-①と②では、窓面の固有振動数に与える影響を比較することが可能である。MODEL-②の1次固有振動数の値は、窓面を考慮しないMODEL-①の1次固有振動数4.932Hzの約2倍の値を示しており、窓面がグローブボックス全体の剛性を高めることに寄与していることが明らかである。

Figs.-3.13および3.14に示した固有振動モード図のMODEL-①の1次固有振動モードとMODEL-②の1次固有振動モードを比較すると、窓面のないMODEL-①では、グローブボックス本体の長辺方向(X(EW)方向)のモードが1次のモードとして大きく寄与しているのに対して、MODEL-②では、長辺方向のモードは小さく天井積載物および排気系配管のモードが現れている。

一方、窓面周辺のグローブボックス本体の曲げ加工部を梁要素としてモデル化したMODEL-①および②に対して、曲げ加工部を幅61mm、板厚4mmの板要素としてモデル化した場合(MODEL-③)の固有振動数は9.832Hzであり、窓面を考慮したMODEL-②の場合とほぼ同程度の固有振動数が得られた。また、Fig.-3.15に示した固有振動モード図からは明らかにグローブボックス本体の剛性の向上が認められ、MODEL-②と同様に天井積載物および排気系配管のモードが1次のモードとして大きく寄与していることが明らかである。

また、MODEL-①および②の比較結果から、MODEL-③においてアクリル窓面をとりつけた場合を考えすれば1次固有振動数はさらに大きな値になることが予想され、さらに耐震安全性が増すものと考えられる。

#### 3.5.2 静的震度法による解析結果

MODEL-①、②および③のそれぞれのグローブボックスモデルの長辺方向(X(EW)方向)と短辺方向(Y(NS)方向)に水平方向静的震度0.36Gを負荷することにより静的震度法による解析を実施した。その結果として得られたアジャスト・ボルトの軸力およびスタッド・ボルトのせん断力をTable-3.8に示す。また、解析結果として得られた変形図をFigs.-3.16から3.21に示す。また、MODEL-③については、参考のためにX(EW)方向およびY(NS)方向からの同時入力の場合についても静的震度法による解析を行った。その結果として、得られた変形図をFig.-3.22に示す。着目するそれぞれの節点の絶対変位(水平方向静的震度を加える前後の変位量:単位mm)およびアクリル窓面とグローブボックス本体窓枠周辺の相対変位をTable-3.9およびTable-3.10に示す。

Table-3.8に示すアジャスト・ボルトの軸力の最大値は154kgfであるが、軸応力( $\sigma_N$ )に換算すると $\sigma_N = N/A = 154/292.4 = 0.527\text{kgf/mm}^2$ であり、またスタッド・ボルトのせん断力の最大値は129.1kgfであるが、せん断応力( $\tau$ )に換算すると $\tau = S/A = 129.1/34.7 = 3.720\text{kgf/mm}^2$

であり、これに自重のみによるせん断応力 $0.099\text{kgf}/\text{mm}^2$ を加算すると $\tau = 3.819\text{kgf}/\text{mm}^2$ となる。

鋼構造設計基準<sup>15)</sup>によると、静的震度法による解析は地震時状態のため短期応力の部類となり、アジャスト・ボルトの許容引張り応力度は $18.0\text{kgf}/\text{mm}^2$ である。一方、スタッド・ボルトはSUS304製であるが、この材質の許容応力度は鋼構造設計基準に示されていないため、解説原子力設備の技術基準（通産省告示第501号）<sup>16)</sup>に示されている値 $12.1\text{kgf}/\text{mm}^2$ を用いた。解析結果として得られたボルトの最大応力値は、上述の許容応力値よりかなり小さな値となっており、グローブボックスの強度上の特に問題はないものと考えられた。

Table-3.9においてMODEL-①と②とでX方向の絶対変位がグローブボックス本体の窓枠上部の節点番号1001でそれぞれ $4.25\text{mm}$ 、 $0.93\text{mm}$ となっており、窓面を考慮するとグローブボックスのX（EW）方向の剛性が4倍程度向上することがわかる。また、Table-3.10にはMODEL-②の窓枠周辺とアクリル樹脂製窓面の相対変位を示しており、最大でも $0.1\text{mm}$ 以下であり、かなり小さな値となっている。以上のことから、窓面を考慮することによりグローブボックス本体の剛性向上が期待できるとともにアクリル樹脂製の窓面とグローブボックス本体の窓枠との相対変位についても有意な変位ではなく、プルトニウムの閉じ込め機能維持の観点からも裕度のある結果となっている。また、さらに、MODEL-③において窓面を考慮した解析を行えば、MODEL-②の相対変位より小さくなることが考えられる。

### 3.5.3 応答スペクトル法による解析結果

3.5.1に示した固有値解析および3.5.2に示した静的震度法による解析の結果から剛性向上が期待でき、かつ、グローブボックス本体の窓枠周辺を詳細にモデル化した、MODEL-③について、模擬応答スペクトル〔 $1/2 \cdot S_1$ 波相当、X（EW）方向、Y（NS）方向〕および燃料研究棟建家の床応答拡幅スペクトル〔X（EW）方向、Y（NS）方向、XとY（EWとNS）方向の同時入力〕を用いて、応答スペクトル法による解析を行った。解析の結果として得られたアジャスト・ボルトの軸力およびスタッド・ボルトのせん断力をTable-3.11に示す。また、各解析におけるMODEL-③の着目節点の最大応答変位をTable-3.12に示す。

Table-3.12に示したように、静的震度法による解析および応答スペクトル解析結果において燃料研究棟建家のX（EW）方向とY（NS）方向同時入力のケースで最大応答変位 $2.6\text{mm}$ 程度となっている。これを $1/2 \cdot S_1$ 波相当とX、Y（EW、NS）方向によるものを比較するとほぼ2倍程度燃料研究棟建家の床応答スペクトルによるものが大きな応答値となっている。これは入力となる応答スペクトルの最大値が2倍程度大きいためである。なお、MODEL-③においてアクリル窓面を考慮した解析を行えば、応答スペクトル解析も線形解析であることと、Table-3.12とTable-3.10の結果から窓枠周辺の相対変位は、MODEL-②の相対変位より小さい値となることが予想される。一方、Table-3.11に示したアジャスト・ボルトの軸力の最大値は $376.4\text{kgf}$ であるが、これを軸応力（ $\sigma_N$ ）に換算すると $\sigma_N = N/A = 376.4/292.4 = 1.287\text{kgf}/\text{mm}^2$ 程度であり、また、応答スペクトル解析において最大応力が生じたボルトはTable-3.11に示すX・Y（NS・EW）方向同時入力のケースで要素番号2902のスタッド・ボルトであり、表中のせん断力 $342.2\text{kgf}$ をせ

ん断応力 ( $\tau$ ) に換算すると  $\tau = S/A = 342.2/34.7 = 9.862 \text{kgf/mm}^2$  であり、この値に自重のみによる解析のせん断応力  $0.177 \text{kgf/mm}^2$  を加算すると  $\tau = 10.039 \text{ kgf/mm}^2$  となる。

鋼構造設計基準および解説原子力設備の技術基準（通産省告示第501号）によると、応答スペクトル解析も地震時状態のため短期応力の部類として評価するために、アジャスト・ボルトの許容引張り応力度は  $18.0 \text{ kgf/mm}^2$  であり、スタッド・ボルトの許容せん断応力度は  $12.1 \text{ kgf/mm}^2$  である。解析結果として得られた上記の応力値は、これらの技術基準および設計基準より小さく、応答スペクトル法の解析結果としてもグローブボックスの構造強度上の問題は特ないものと考えられる。

しかしながら、Table-3.11の18本のスタッド・ボルトのせん断力値に大きな差が生じており、発生する応力の最大値が許容応力値に近い値であるために、さらに安全性を高めるための対策を講じる必要がある。これは、架台上部の梁の剛性が低く、内装装置によるモーメントが18本のボルトに均一にかかるないことによると考えられる。上述の解析結果からグローブボックス本体の強度および架台とグローブボックス本体との接続用のスタッド・ボルトなどの強度には、特に問題点は認められなかった。しかしながら、さらに安全性を高めるためには、架台上部の梁の剛性を高めることによりスタッド・ボルトの応力値をできるかぎり均一になるような設計をほどこした方がよいことが明らかになった。

### 3.5.4 時刻歴応答法による解析結果

Fig.-3.10 に示した模擬地震波 [1/2 · S<sub>1</sub>波相当、 X (EW)、 Y (NS) 両方向] および Figs.-3.11および3.12に示した燃料研究棟建家の時刻歴床応答波 [X (EW)、 Y (NS) 両方向] を用いて MODEL-③のグローブボックスの時刻歴応答解析を実施した。その結果として得られた、アジャスト・ボルトの軸力とスタッド・ボルトのせん断力を Table-3.13 に示す。

Table-3.12に示したように時刻歴応答解析の結果として得られた最大応答変位は、 EW 方向のケースの  $1.97 \text{mm}$  であるが、全解析を比較して最大となる応答スペクトル解析の  $2.6 \text{mm}$  に比べて小さい値となっている。このことと、時刻歴応答解析も線形解析であるために、MODEL-③においてアクリル窓面を考慮した解析を行えば、窓枠周辺の相対変位は  $0.06 \text{mm}$  以下になることが考えられる。

Table-3.13に示したアジャスト・ボルトの軸力の最大値は  $244.6 \text{kgf}$  であり、軸応力 ( $\sigma_N$ ) に換算すると  $\sigma_N = N/A = 244.6/292.4 = 0.837 \text{kgf/mm}^2$  程度である。しかし、曲げ応力も合わせて考慮すると X (EW) 方向のケースで要素番号3520のアジャスト・ボルトにかかる応力は、  $7.578 \text{kgf/mm}^2$  と大きな値となっている。また、時刻歴応答解析において最大応力が生じたのは、応答スペクトル法による解析と同様に、Table-3.13に示した X (EW) 方向のケースであり、要素番号2902のスタッド・ボルトである。表中のせん断力  $292.6 \text{kgf}$  をせん断応力 ( $\tau$ ) に換算すると、  $\tau = S/A = 292.6/34.7 = 8.43 \text{kgf/mm}^2$  であり、この値に自重のみによる解析のせん断応力  $0.179 \text{kgf/mm}^2$  を加算すると、  $\tau = 8.609 \text{kgf/mm}^2$  となる。この値を前述の応答スペクトル法による解析

結果と比較すると15%程度低い応力値であり、応答スペクトル法による解析結果の方が安全側の評価となっている。鋼構造設計基準および解説原子力設備の技術基準（通産省告示第501号）によると、時刻歴応答解析も短期応力に属し、アジャスト・ボルト（SS41）の許容引張り応力度は $18.0 \text{ kgf/mm}^2$  であり、スタッド・ボルト（SUS304）の許容せん断応力度は $12.1 \text{ kgf/mm}^2$  である。上記の応力値はこれらの値より小さいため強度上の問題はないものと考えられる。

#### 4. まとめ

プルトニウムを取り扱うグローブボックスの耐震設計では、地震時におけるグローブボックス本体の転倒防止や、内装装置の転倒、破壊に伴うアクリル樹脂製窓面の破壊等によるプルトニウム閉じ込め機能喪失を未然に防ぐことを目的として構造強度解析が行われている。しかしながら、これらの構造強度解析の結果から得られるグローブボックス本体と架台とを接続しているスタッド・ボルトおよび架台と建家床面の固定に使用している架台脚部のアジャスト・ボルトのせん断応力や軸応力がそれぞれのボルトの許容値を下回ることを確認する必要のあることは言うまでもないが、本体窓枠周辺の変形挙動を解析することにより、さらにプルトニウム閉じ込め機能を維持するための詳細な設計が可能であると考えられる。

今回の解析結果として得られたスタッド・ボルトおよびアジャスト・ボルトのせん断応力および軸応力は、いずれも許容値を下回っており、水平方向 $0.36G$ を加えた静的震度法による解析結果としては、グローブボックスの構造強度に問題のないことを確認した。しかしながら、グローブボックス本体の窓枠周辺を単純な梁要素としてモデル化したMODEL-①では、固有値解析の結果として得られる固有振動数が低く、かつ、静的震度法による解析の結果として得られた窓枠の変位量が大きくなり、プルトニウムの閉じ込め機能を担保するためには不十分であった。

さらに、グローブボックス本体の窓枠とアクリル樹脂製窓面との相対変位を調べる目的で解析したMODEL-②の例では、剛性の向上、窓枠の変位量を抑制できることが明らかとなった。しかしながら、アクリル樹脂製窓面にグローブボックスの構造強度を持たせる設計では、耐震安全性を保証するためには裕度のある評価とは考えられない。このため、窓枠周辺に曲げ加工を施している部分を板要素としてモデル化に追加した例をMODEL-③として、固有値解析および静的震度法による解析を実施した。

その結果、固有振動数からグローブボックスの剛性が向上すること、静的震度法による解析の結果から窓枠の変位量の低下することなど耐震安全性をより確実にする解析が可能となった。

しかしながら、このMODEL-③の例でも、1次固有振動数は $9.832\text{Hz}$  であり、Figs. -3.8 および3.9に示した建家のX（EW）、Y（NS）両方向の床応答スペクトルの卓越振動数域にあり共振構造物である。このため、このMODEL-③について応答スペクトル法および時刻歴応答法による動的挙動の解析を実施し、スタッド・ボルトおよびアジャスト・ボルトのせん断応力および軸応

結果と比較すると15%程度低い応力値であり、応答スペクトル法による解析結果の方が安全側の評価となっている。鋼構造設計基準および解説原子力設備の技術基準（通産省告示第501号）によると、時刻歴応答解析も短期応力に属し、アジャスト・ボルト（SS41）の許容引張り応力度は $18.0 \text{ kgf/mm}^2$  であり、スタッド・ボルト（SUS304）の許容せん断応力度は $12.1 \text{ kgf/mm}^2$  である。上記の応力値はこれらの値より小さいため強度上の問題はないものと考えられる。

#### 4. まとめ

プルトニウムを取り扱うグローブボックスの耐震設計では、地震時におけるグローブボックス本体の転倒防止や、内装装置の転倒、破壊に伴うアクリル樹脂製窓面の破壊等によるプルトニウム閉じ込め機能喪失を未然に防ぐことを目的として構造強度解析が行われている。しかしながら、これらの構造強度解析の結果から得られるグローブボックス本体と架台とを接続しているスタッド・ボルトおよび架台と建家床面の固定に使用している架台脚部のアジャスト・ボルトのせん断応力や軸応力がそれぞれのボルトの許容値を下回ることを確認する必要のあることは言うまでもないが、本体窓枠周辺の変形挙動を解析することにより、さらにプルトニウム閉じ込め機能を維持するための詳細な設計が可能であると考えられる。

今回の解析結果として得られたスタッド・ボルトおよびアジャスト・ボルトのせん断応力および軸応力は、いずれも許容値を下回っており、水平方向 $0.36G$ を加えた静的震度法による解析結果としては、グローブボックスの構造強度に問題のないことを確認した。しかしながら、グローブボックス本体の窓枠周辺を単純な梁要素としてモデル化したMODEL-①では、固有値解析の結果として得られる固有振動数が低く、かつ、静的震度法による解析の結果として得られた窓枠の変位量が大きくなり、プルトニウムの閉じ込め機能を担保するためには不十分であった。

さらに、グローブボックス本体の窓枠とアクリル樹脂製窓面との相対変位を調べる目的で解析したMODEL-②の例では、剛性の向上、窓枠の変位量を抑制できることが明らかとなった。しかしながら、アクリル樹脂製窓面にグローブボックスの構造強度を持たせる設計では、耐震安全性を保証するためには裕度のある評価とは考えられない。このため、窓枠周辺に曲げ加工を施している部分を板要素としてモデル化に追加した例をMODEL-③として、固有値解析および静的震度法による解析を実施した。

その結果、固有振動数からグローブボックスの剛性が向上すること、静的震度法による解析の結果から窓枠の変位量の低下することなど耐震安全性をより確実にする解析が可能となった。

しかしながら、このMODEL-③の例でも、1次固有振動数は $9.832\text{Hz}$  であり、Figs. -3.8 および3.9に示した建家のX（EW）、Y（NS）両方向の床応答スペクトルの卓越振動数域にあり共振構造物である。このため、このMODEL-③について応答スペクトル法および時刻歴応答法による動的挙動の解析を実施し、スタッド・ボルトおよびアジャスト・ボルトのせん断応力および軸応

力を求めた。その結果、いずれも許容値を下回っておりグローブボックスの構造強度上特に問題は認められなかった。

また、内装装置の下部にあるスタッド・ボルトの一本に応答スペクトル法による解析結果として得られたせん断応力値 $10.039\text{kgf/mm}^2$ が生じている。これは、有限要素法のモデル化を行う際に安全側の評価にするために、スタッド・ボルトに $0.5\text{mm}$ の長さを与え、18本のボルトでグローブボックスを支持した状態を仮定して解析しているために、荷重がすべて18本のボルトに分散されていることが一つの原因であると考えられる。現実には、グローブボックスは架台の上に直接接触しており、通常の構造解析では、ボルトの位置を同一節点として解析し、そこに発生する断面力を用いてボルトのせん断応力を求めている。このため、今回の解析では、グローブボックスの荷重はボルトで支持することになり上述のせん断応力値は相当安全側の評価結果である。

また、最大応力値が発生しているスタッド・ボルトは内装装置(180kgf)の荷重を直接受けており、しかも、内装装置は梁でグローブボックス床面に接続しているために、内装装置の荷重がグローブボックス床面に不均一に分布していることがボルトの応力値を高めている原因の一つであると考えられる。

上述のように、今回の解析モデルであるグローブボックスは、本体窓枠のモデル化を詳細に行うことにより、剛性向上を期待できること、変形量を抑えてアルミニウムの閉じ込め機能を詳細に評価することができた。MODEL-①からMODEL-③の各々の静的震度法による解析の結果として得られたボルトの応力値は、剛性の低いMODEL-①より剛性の高いMODEL-③の方が高くなっている。これは、静的震度法による解析結果として得られたグローブボックスの最大変位量がMODEL-③ではMODEL-①の約4分の1程度であり、ボルトの応力値が高くなる一方で変位量を抑えることができるため結果的には安全側になると言える。

Figs.-3.16および3.20に示したMODEL-①およびMODEL-③のX(EW)方向の変形図を比較すると、MODEL-①では架台の変形は小さいもののグローブボックス本体の変形がかなり大きくなってしまい、本体の剛性が低いために上部(天井部分)が局所的に大きく変形していることが明らかである。しかしながら、下部(架台と本体との接続部分であるスタッド・ボルトの周辺)では変形量が小さいために、ボルトにかかる応力値も低くなっている。これに対して、剛性の向上を図ったMODEL-③では、グローブボックス本体が全体的に変形しており、上部と下部との変形が同程度であり、加えられる地震力を上部と下部ではほぼ同等に受け持っているために、結果として架台と本体との接続部分であるスタッド・ボルトにより大きい応力が発生することになる。

グローブボックスの設計・製作を行うにあたり、剛性を高める設計を行ってグローブボックス本体の変形を抑え、かつ、可能な限り建家との共振を避けることが特に重要である。その上で、建家の時刻歴加速度を入力とする時刻歴応答解析を行って着目点であるグローブボックスを固定するためのボルトおよび本体の窓面周辺の変形等を解析して耐震安全評価とすることが好ましいと考えられる。

## 謝意

今回、グローブボックスの耐震解析を実施するにあたり、御指導・御鞭撻をいただいた宮川邦男管理部長および大内穆前管理部長に厚く御礼申し上げます。また、燃料研究棟の床応答スペクトル作成時に御協力いただいた建設部の鈴木偉之建設課長および熊谷茂氏に御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) ASTM C852-81: Standard for Design Criteria for Plutonium Gloveboxes (1981).
- 2) T. Fujita, K. Ohtani, M. Hayashi, M. Kozeki, T. Ide and K. Sakuno  
10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology  
vol. k1-k2. Anaheim, CA (U.S.A.) (1989).
- 3) H. Sato, H. Sakuraba, H. Kawamata and K. Kono, PNCT N831-83-01 (1983).
- 4) D. W. Coats, UCRL-85458 (1981).
- 5) D. L. Bernreuter, D.W. Coats, R.C. Murray and F.J. Tokarz, UCRL-52705 (1979).
- 6) 電気技術基準調査委員会編、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987  
日本電気協会 (1987).
- 7) R. H. MacNeal ed. The NASTRAN theoretical manual (Level 15.5)  
The MacNeal-Schwendler Corporation (1972).
- 8) R. H. MacNeal ed. The NASTRAN user's manual (Level 15.5)  
The MacNeal-Schwendler Corporation (1972).
- 9) D. W. Van Krevelen: Properties of Polymers, Elsevier Scientific Publishing Co.,  
(1976)
- 10) 鶴津久一郎他編、有限要素法ハンドブック 培風館 (1990).
- 11) 日本機械学会編、耐震設計と構造動力学 日本工業出版 (1985).
- 12) 土木学会編、動的解析と耐震設計 技報堂出版 (1989).
- 13) W. Givens, ORNL-1575 (1954).
- 14) 土木学会編、原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の  
評価手法報告書 (社) 土木学会 (1985).
- 15) 日本建築学会編、鋼構造設計基準 丸善 (1973).
- 16) 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課編：  
解説 原子力設備の技術基準 株電力新報社 (1986).

## 謝意

今回、グループボックスの耐震解析を実施するにあたり、御指導・御鞭撻をいただいた宮川邦男管理部長および大内穆前管理部長に厚く御礼申し上げます。また、燃料研究棟の床応答スペクトル作成時に御協力いただいた建設部の鈴木偉之建設課長および熊谷茂氏に御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) ASTM C852-81: Standard for Design Criteria for Plutonium Gloveboxes (1981).
- 2) T. Fujita, K. Ohtani, M. Hayashi, M. Kozeki, T. Ide and K. Sakuno  
10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology  
vol. k1-k2. Anaheim, CA (U.S.A.) (1989).
- 3) H. Sato, H. Sakuraba, H. Kawamata and K. Kono, PNCT N831-83-01 (1983).
- 4) D. W. Coats, UCRL-85458 (1981).
- 5) D. L. Bernreuter, D.W. Coats, R.C. Murray and F.J. Tokarz, UCRL-52705 (1979).
- 6) 電気技術基準調査委員会編、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987  
日本電気協会 (1987).
- 7) R. H. MacNeal ed. The NASTRAN theoretical manual (Level 15.5)  
The MacNeal-Schwendler Corporation (1972).
- 8) R. H. MacNeal ed. The NASTRAN user's manual (Level 15.5)  
The MacNeal-Schwendler Corporation (1972).
- 9) D. W. Van Krevelen: Properties of Polymers, Elsevier Scientific Publishing Co.,  
(1976)
- 10) 鶩津久一郎他編、有限要素法ハンドブック 培風館 (1990).
- 11) 日本機械学会編、耐震設計と構造動力学 日本工業出版 (1985).
- 12) 土木学会編、動的解析と耐震設計 技報堂出版 (1989).
- 13) W. Givens, ORNL-1575 (1954).
- 14) 土木学会編、原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の  
評価手法報告書 (社) 土木学会 (1985).
- 15) 日本建築学会編、鋼構造設計基準 丸善 (1973).
- 16) 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課編：  
解説 原子力設備の技術基準 (株)電力新報社 (1986).

Table-3.1 Material and geometrical shape data

Element	Material	Young's modulus kg/mm <sup>2</sup>	Poisson ratio	Density kg/mm <sup>3</sup>	Geometrical moment of inertia mm <sup>4</sup>	Geometrical moment of inertia mm <sup>4</sup>	Geometrical moment of inertia mm <sup>4</sup>	Twist const mm <sup>4</sup>	Gross sectional area mm <sup>2</sup>	Thickness or diameter mm
Glovebox(G.R.)	SUS 304	19800	0.266	8.03 × 10 <sup>-6</sup>	—	—	—	—	—	4
Bending frame	SUS 304	19800	0.266	8.03 × 10 <sup>-6</sup>	6463.7	6463.7	6463.7	6463.7	138.2	—
Pillars	SUS 304	19800	0.266	8.03 × 10 <sup>-6</sup>	238176	83789	298176	298176	528.0	—
G.R stand	SS 41	21000	0.3	7.83 × 10 <sup>-6</sup>	368000	368000	368000	368000	976.1	—
Stud bolt	SUS 304	19800	0.266	8.03 × 10 <sup>-6</sup>	95.8	95.8	95.8	95.8	34.7	—
Adjust bolt	SS 41	21000	0.3	7.83 × 10 <sup>-6</sup>	6802.4	6802.4	6802.4	6802.4	292.4	—
Stiff beam	SS 41	2.1 × 10 <sup>7</sup>	0.3	1.0 × 10 <sup>-9</sup>	10000	10000	10000	10000	1.0	—
Duct	SUS 304	19800	0.266	7.12 × 10 <sup>-6</sup>	284732.2	284732.2	284732.2	284732.2	569464.3	710.0
Acrylic window	PMMA *	326.53	0.4	0.623 × 10 <sup>-6</sup>	—	—	—	—	—	10

PMMA \* : polymethyl methacrylate

Table-3.2 Additional mass

	Additional mass(kg)
Acrylic resin (MODEL-①, MODEL-③)	2 4
HEPA filters	2 0
Three-way valve	2 0
Incinerator	1 8 0
Entry port	4
Transfer port	3 4
Lead containing acrylic resin shield	1 1 6. 6

Table-3.3 Boundary conditions

Analytical methods	Boundary conditions	
	Node No.	Degree of freedom
Eigenvalue analysis Static method	3701	$U_x = U_y = U_z = 0.0$
	3702	$\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0.0$
	3703	
	3704	
Floor response spectrum method Time-history method	3705	$U_z = 0.0$
	3706	$\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0.0$

Table-3.4 Standard seismic wave (S1)

	Magnitude M	Distance from epicenter $\Delta$	Maximum velocity V	Maximum acceleration A
S <sub>1</sub>	8.4	90 km	16.09 kine	286.15 gal

Table-3.5 Floor response spectrum of plutonium fuel research facility [X(EW) direction, 10% extended]

Period (sec)	Response accelaration(Gal) ( $\times 10\text{mm/sec}^2$ )	Period (sec)	Response accelaration(Gal) ( $\times 10\text{mm/sec}^2$ )
0.0180	146.3	0.1905	1012.9
0.0198	146.9	0.1980	1012.9
0.0216	147.5	0.1998	971.4
0.0234	148.1	0.2090	971.4
0.0252	148.6	0.2126	895.1
0.0270	149.6	0.2200	895.1
0.0309	149.6	0.2310	724.7
0.0324	153.3	0.2328	712.4
0.0342	157.0	0.2340	746.7
0.0366	157.0	0.2860	746.7
0.0378	165.2	0.2870	728.3
0.0396	169.3	0.3190	728.3
0.0414	189.7	0.3259	580.6
0.0434	189.7	0.3520	580.6
0.0450	264.3	0.3740	418.5
0.0501	264.3	0.3943	399.5
0.0504	276.1	0.4050	413.0
0.0581	276.1	0.4950	413.0
0.0594	322.7	0.5242	379.0
0.0612	522.1	0.6050	379.0
0.0630	577.2	0.6600	187.0
0.0653	577.2	0.7150	157.5
0.0666	795.2	0.7700	128.3
0.0808	795.2	0.7874	124.2
0.0810	822.2	0.8100	131.5
0.0983	822.2	0.9900	131.5
0.0990	891.7	1.1000	131.2
0.1120	891.7	1.1750	101.1
0.1125	933.9	1.3200	101.1
0.1203	933.9	1.3682	89.6
0.1215	1044.5	1.6500	89.6
0.1320	1044.5	1.7600	73.6
0.1350	1393.7	1.8700	61.5
0.1650	1393.7	1.9800	53.3
0.1660	1285.2	2.0900	38.3
0.1870	1285.2	2.2000	26.6

Table-3.6 Floor response spectrum of plutonium fuel research facility [Y(NS) direction, 10% extended]

Period (sec)	Response accelaration(Gal) ( $\times 10\text{mm/sec}^2$ )	Period (sec)	Response accelaration(Gal) ( $\times 10\text{mm/sec}^2$ )
0.0180	138.8	0.1980	971.9
0.0198	139.4	0.1996	938.4
0.0216	140.0	0.2090	938.4
0.0234	140.7	0.2126	864.6
0.0252	141.4	0.2200	864.6
0.0270	143.0	0.2310	702.1
0.0294	143.0	0.2327	690.8
0.0306	145.0	0.2340	727.1
0.0324	148.5	0.2860	727.1
0.0342	150.2	0.2870	708.2
0.0360	159.3	0.3190	708.2
0.0382	159.3	0.3260	559.5
0.0396	174.8	0.3520	559.5
0.0414	175.9	0.3740	417.2
0.0432	178.5	0.3936	398.5
0.0450	345.1	0.4050	413.0
0.0502	345.1	0.4950	413.0
0.0504	361.3	0.5246	378.6
0.0595	361.3	0.6050	378.6
0.0612	592.5	0.6600	187.0
0.0652	592.5	0.7150	157.7
0.0666	777.0	0.7700	128.3
0.0814	777.0	0.7875	124.2
0.0814	775.8	0.8100	131.4
0.0984	775.8	0.9900	131.4
0.0990	827.4	1.1000	131.4
0.1118	827.4	1.1750	101.1
0.1125	876.2	1.3200	101.1
0.1202	876.2	1.3681	89.7
0.1215	981.9	1.6500	89.7
0.1319	981.9	1.7600	73.6
0.1350	1317.9	1.8700	61.5
0.1650	1317.9	1.9800	53.3
0.1659	1231.2	2.0900	38.3
0.1870	1231.2	2.2000	26.6
0.1904	971.9		

Table-3.7 Results of eigenvalue analysis  
for each models (Hz)

Mode	MODEL -①	MODEL -②	MODEL -③
1	4. 9 3 2	9. 9 3 6	9. 8 3 2
2	9. 2 1 0	1 0. 9 4 0	1 0. 5 0 0
3	1 1. 1 9 1	1 2. 9 9 4	1 2. 9 6 6
4	1 2. 6 6 7	1 5. 4 6 4	1 6. 6 6 8
5	1 3. 5 8 9	1 8. 2 4 8	1 8. 1 3 8
6	1 6. 1 5 6	2 0. 0 7 3	2 2. 0 1 1
7	1 8. 1 8 8	2 1. 8 9 1	2 3. 6 4 2
8	1 9. 7 2 3	2 2. 4 4 5	2 4. 4 4 8
9	2 0. 8 4 5	2 3. 3 9 9	2 6. 6 3 4
10	2 3. 3 6 6	2 5. 1 2 8	2 6. 9 6 1

Table-3.8 Calculated shearing force of stud bolt (G.B.-stand) and  
axial force of adjust bolt (stand-floor) by static method

	Element No.	MODEL -①		MODEL -②		MODEL -③	
		X (EW) direction	Y (NS) direction	X (EW) direction	Y (NS) direction	X (EW) direction	Y (NS) direction
A	3410	117.2	129.2	103.4	129.0	114.3	129.1
	3420	-56.4	103.4	-34.2	103.3	-51.5	105.4
	3440	-60.8	151.0	-69.3	151.3	-62.9	154.0
	3510	106.5	-128.2	96.5	-128.3	108.7	-128.6
	3520	-49.6	-105.0	-32.4	-104.4	-49.8	-106.3
	3540	-56.9	-150.4	-64.1	-150.8	-59.0	-153.7
B	2901	18.2	28.4	17.7	28.3	-78.0	28.2
	2902	33.8	1.9	21.2	1.9	128.3	-3.1
	2903	7.9	25.2	29.8	25.1	6.0	25.5
	2904	22.4	4.8	12.2	4.8	14.8	11.2
	2905	9.2	-2.4	10.8	-2.4	70.2	3.8
	2906	13.5	-3.5	12.0	-3.4	71.2	-9.8
	2907	10.0	35.4	11.7	35.4	-91.2	36.6
	2911	-4.3	23.3	-4.9	23.4	11.9	24.9
	2913	-3.3	27.4	-3.2	27.6	1.1	28.4
	2915	-2.0	27.4	-1.8	-4.2	-3.7	-4.4
	2917	-2.4	31.5	-3.2	31.7	-9.5	29.5
	2921	17.2	21.2	16.9	21.1	-79.1	20.9
	2922	30.0	-2.3	21.0	-2.3	129.1	-2.3
	2923	14.5	23.4	34.0	23.2	-6.3	23.1
	2924	24.8	-4.9	15.9	-5.0	15.6	-10.8
	2925	12.5	0.6	12.9	0.6	70.3	0.3
	2926	13.5	4.1	12.6	4.0	85.9	7.9
	2927	11.5	26.7	11.5	26.6	-100.0	28.5

A=Axial Force of Adjust Bolt, B=Shearing Force of Stud Bolt G. B.=Glovebox

Table-3.9 Calculated results of absolute displacement by static method (mm)

Node No.	MODEL -①		MODEL -②		MODEL -③	
	X (EW) direction	Y (NS) direction	X (EW) direction	Y (NS) direction	X (EW) direction	Y (NS) direction
1001	4.223	0.449	0.903	0.448	1.020	0.455
1007	4.223	0.496	0.903	0.496	1.013	0.503
1011	4.223	0.529	0.902	0.529	1.014	0.536
1015	4.223	0.561	0.902	0.562	1.019	0.569
1141	4.251	0.449	0.930	0.448	1.049	0.455
1147	4.250	0.496	0.930	0.496	1.042	0.503
1151	4.251	0.529	0.930	0.530	1.042	0.536
1155	4.251	0.561	0.930	0.562	1.048	0.569
2001	0.491	0.435	0.461	0.435	0.468	0.442
2007	0.492	0.479	0.462	0.479	0.470	0.486
2015	0.491	0.546	0.462	0.546	0.469	0.553
2141	0.518	0.435	0.489	0.435	0.497	0.442
2147	0.519	0.479	0.489	0.479	0.499	0.486
2155	0.519	0.545	0.490	0.546	0.497	0.553

Table-3.10 Mutual displacement between glovebox frame and acrylic resin window (mm)

MODEL -②		
Node No.	X (EW) direction	Y (NS) direction
1001	0.039	0.004
1015	0.068	0.004
1141	0.013	0.004
1155	0.063	0.004
2001	0.056	0.002
2015	0.085	0.001
2141	0.056	0.003
2155	0.091	0.002

Table-3.11 Calculated shearing force of stud bolt and axial force of  
adjust bolt by floor response spectrum method (kgf)

	Ele- ment No.	MODEL -③				
		1/2 · S <sub>1</sub> X direction	1/2 · S <sub>1</sub> Y direction	EW(X) direction	NS(Y) direction	EW(X) + NS(Y)
A	3410	93.1	78.2	239.8	242.6	341.2
	3420	44.8	68.5	115.3	213.2	242.4
	3440	55.4	112.0	142.6	348.3	376.4
	3510	93.0	76.0	239.2	235.8	335.9
	3520	38.1	63.4	98.1	196.5	219.6
	3540	44.7	110.2	114.6	342.5	361.2
B	2901	94.1	17.7	242.1	54.8	242.2
	2902	132.9	5.5	341.9	14.3	342.2
	2903	8.7	16.8	12.9	52.4	53.2
	2904	18.9	8.7	47.7	26.9	54.8
	2905	54.7	6.5	140.5	19.0	141.8
	2906	81.1	5.3	280.6	15.7	209.2
	2907	102.1	25.8	261.6	80.1	262.3
	2911	12.4	14.4	30.6	44.4	53.9
	2913	6.5	18.3	8.3	56.7	57.3
	2915	4.2	2.9	7.5	4.8	9.3
	2917	13.9	21.4	27.9	66.3	71.9
	2921	95.1	11.0	244.5	33.5	244.9
	2922	132.0	4.3	339.8	10.8	340.0
	2923	7.3	15.0	13.7	4.6	48.3
	2924	22.5	7.8	54.0	23.0	58.8
	2925	54.7	3.0	140.3	6.8	140.5
	2926	91.7	7.7	235.8	23.3	237.0
	2927	109.2	22.1	280.9	68.7	281.0

A=Axial force of adjust bolt, B=Shearing force of stud bolt

Table-3.12 Maximum displacement at several nodes of MODEL-③ by each analytical methods (mm)

Node No.	1/2S <sub>1</sub> , X direction			1/2S <sub>1</sub> , Y direction			EW(X) direction			NS(Y) direction			EWNS
	ST	FL	TM	ST	FL	TM	ST	FL	TM	ST	FL	TM	
1001	1.020	0.981	1.248	0.455	0.258	0.287	1.020	2.528	1.929	0.455	0.799	0.588	2.535
1007	1.013	0.973	1.238	0.503	0.320	0.316	1.013	2.508	1.914	0.503	0.994	0.713	2.515
1011	1.014	0.974	1.239	0.536	0.336	0.336	1.014	2.509	1.915	0.536	1.140	0.805	2.517
1015	1.019	0.981	1.247	0.569	0.413	0.408	1.019	2.527	1.928	0.569	1.285	0.896	2.534
1141	1.049	1.003	1.273	0.455	0.258	0.287	1.049	2.584	1.971	0.455	0.799	0.588	2.585
1147	1.042	0.994	1.263	0.503	0.319	0.316	1.042	2.562	1.954	0.503	0.994	0.713	2.563
1151	1.042	0.995	1.264	0.536	0.366	0.356	1.042	2.564	1.955	0.536	1.140	0.805	2.565
1155	1.048	1.002	1.272	0.569	0.413	0.408	1.048	2.581	1.969	0.569	1.285	0.895	2.582
2001	0.468	0.350	0.477	0.442	0.251	0.279	0.468	0.900	0.690	0.442	0.775	0.570	0.908
2007	0.470	0.352	0.477	0.486	0.308	0.311	0.470	0.905	0.690	0.486	0.900	0.690	0.960
2015	0.469	0.351	0.478	0.553	0.401	0.396	0.469	0.902	0.691	0.553	1.248	0.869	1.252
2141	0.497	0.371	0.502	0.442	0.250	0.279	0.497	0.954	0.730	0.442	0.774	0.570	0.958
2147	0.499	0.373	0.502	0.486	0.309	0.311	0.499	0.959	0.730	0.486	0.960	0.690	0.963
2155	0.497	0.371	0.502	0.553	0.401	0.396	0.497	0.955	0.731	0.553	1.247	0.869	1.251

ST=static method, FL=floor response spectrum method, TM=time history method

Table-3.13 Calculated shearing force of stud bolt and axial force of adjust bolt by time-history method (kgf)

	Element No.	MODEL -③			
		1/2 · S <sub>1</sub> X direction	1/2 · S <sub>1</sub> Y direction	EW(X) direction	NS(Y) direction
A	3410	122.69	-93.13	-207.45	176.52
	3420	-57.56	-74.17	99.69	152.88
	3440	-70.81	109.33	123.93	244.56
	3510	122.06	87.80	-207.36	-172.66
	3520	-53.26	75.68	85.67	-144.37
	3540	-63.26	108.34	99.49	-240.90
B	2901	-113.26	-20.72	205.31	39.60
	2902	166.36	-7.17	-292.57	9.02
	2903	5.07	-18.12	-7.40	37.37
	2904	22.36	-8.67	-40.02	18.67
	2905	73.53	5.42	-122.09	12.39
	2906	98.36	-7.98	-177.20	-11.49
	2907	-124.50	26.04	222.60	56.41
	2911	14.70	-17.93	-25.68	-30.16
	2913	-1.33	-20.05	-2.53	40.77
	2915	-3.32	3.05	5.36	-6.34
	2917	-11.83	21.23	21.47	45.94
	2921	114.79	-14.16	207.45	25.20
	2922	164.99	-4.16	-290.80	7.86
	2923	-6.33	-16.30	10.08	33.33
	2924	23.76	-7.64	-44.31	-16.32
	2925	73.25	-3.67	-122.16	-4.39
	2926	114.88	-7.94	-201.86	15.54
	2927	-134.99	-20.82	239.72	47.63

A=Axial force of adjust bolt, B=Shearing force of stud bolt

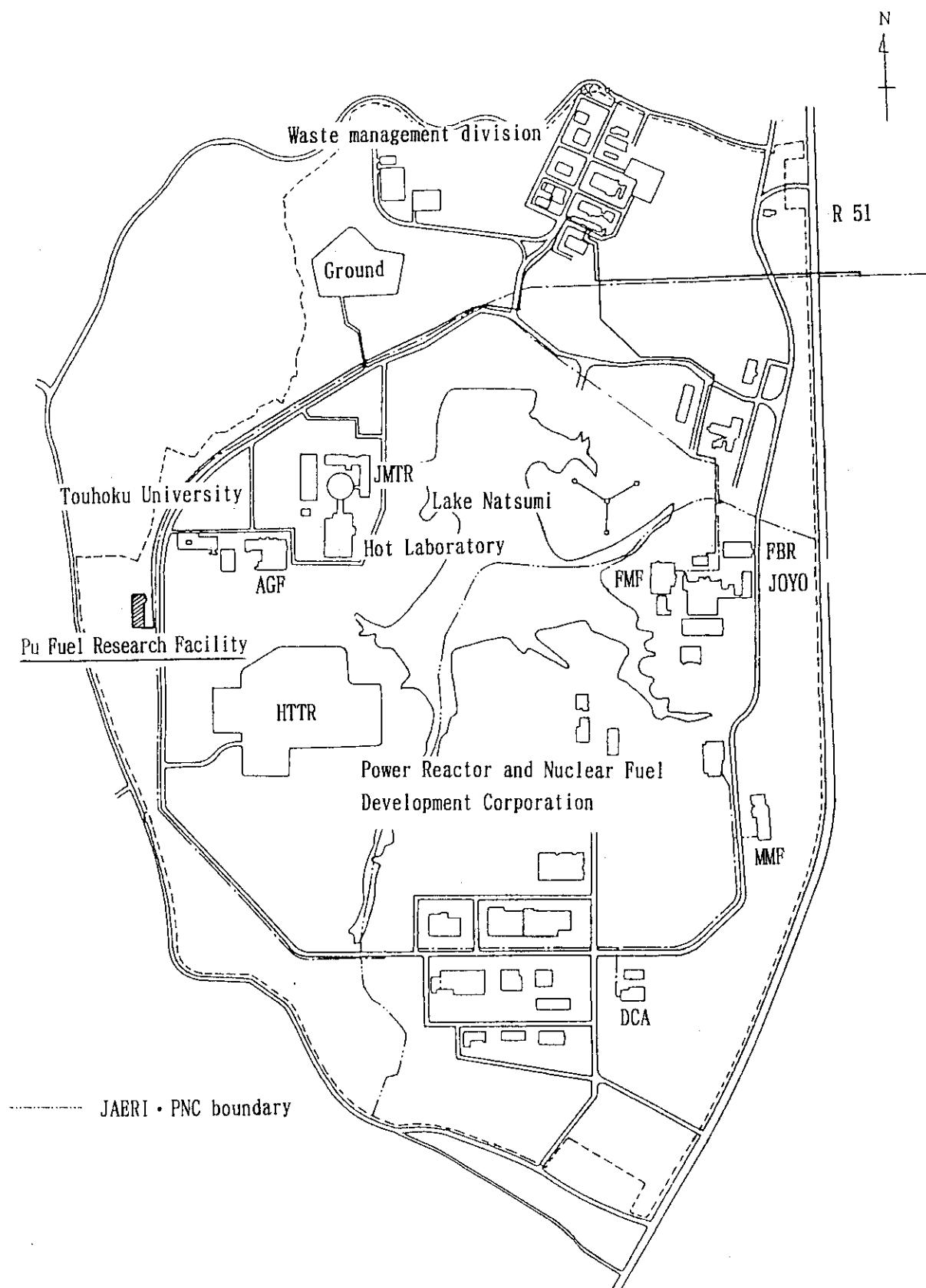


Fig.-2.1 Layout of facilities in Oarai Research Establishment

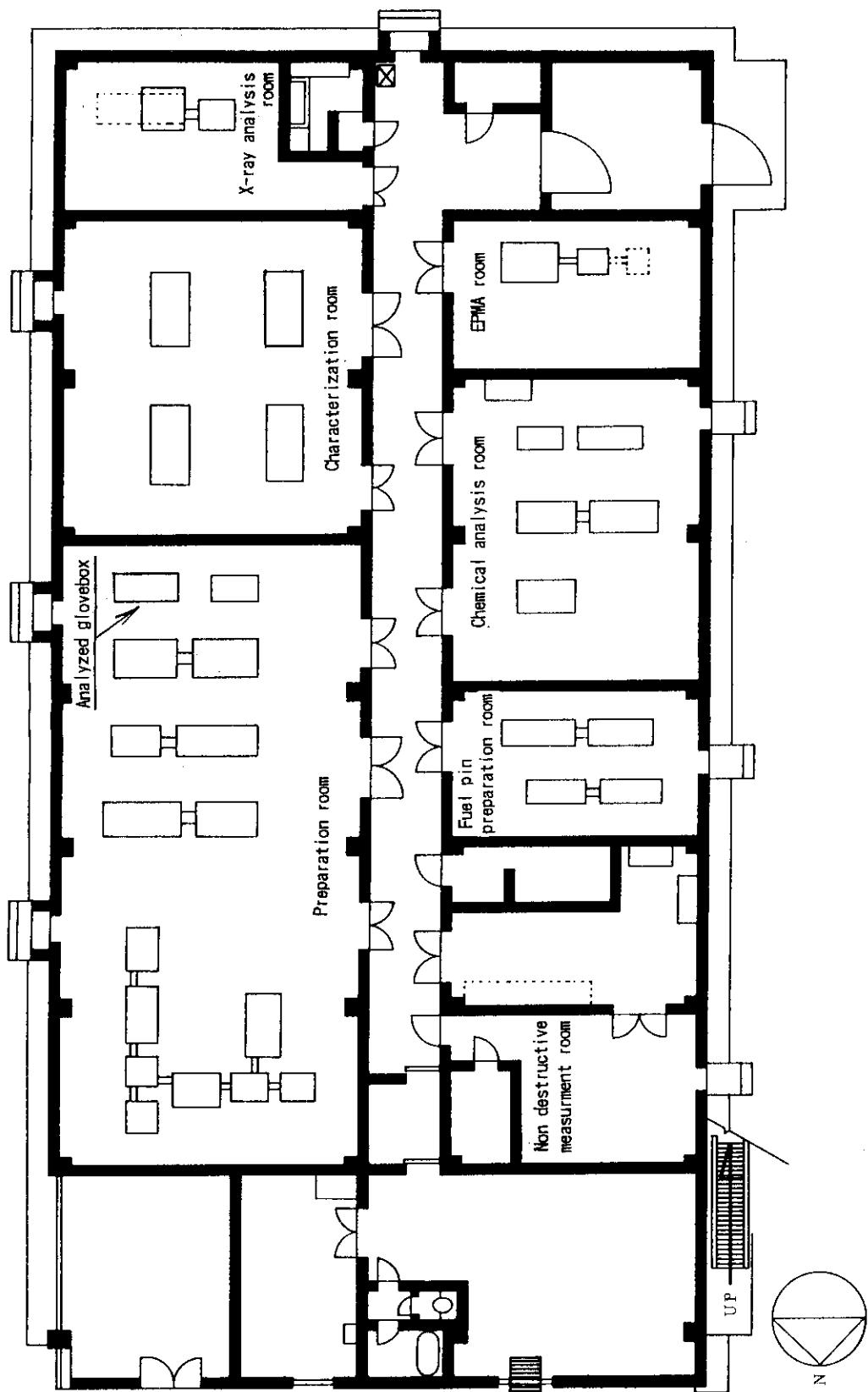


Fig.-2.2 Layout of gloveboxes in Plutonium Fuel Research Facility

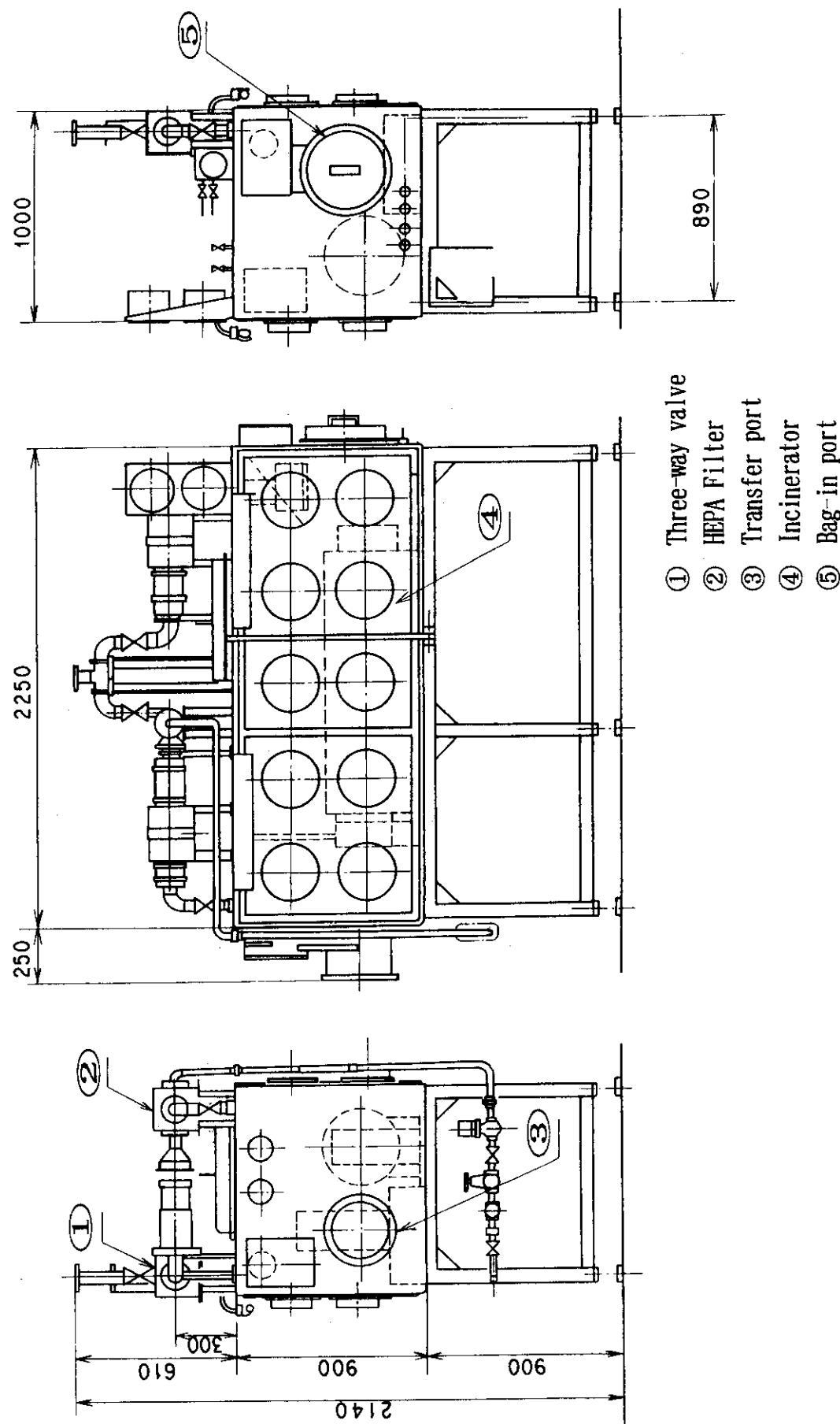


Fig.-3.1 External view of analyzed glovebox (mm)

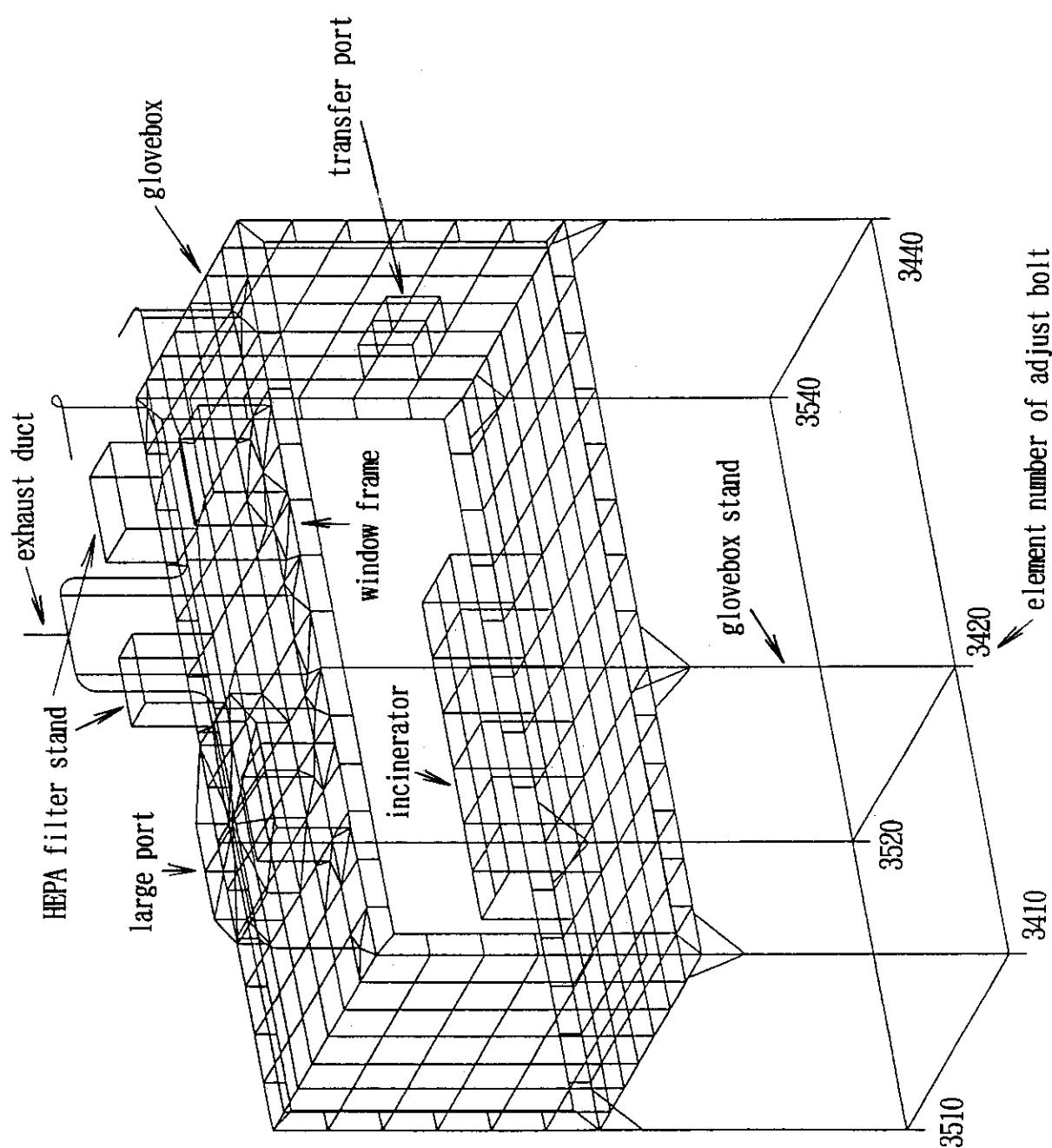


Fig.-3.2 Fundamental FEM model of glovebox

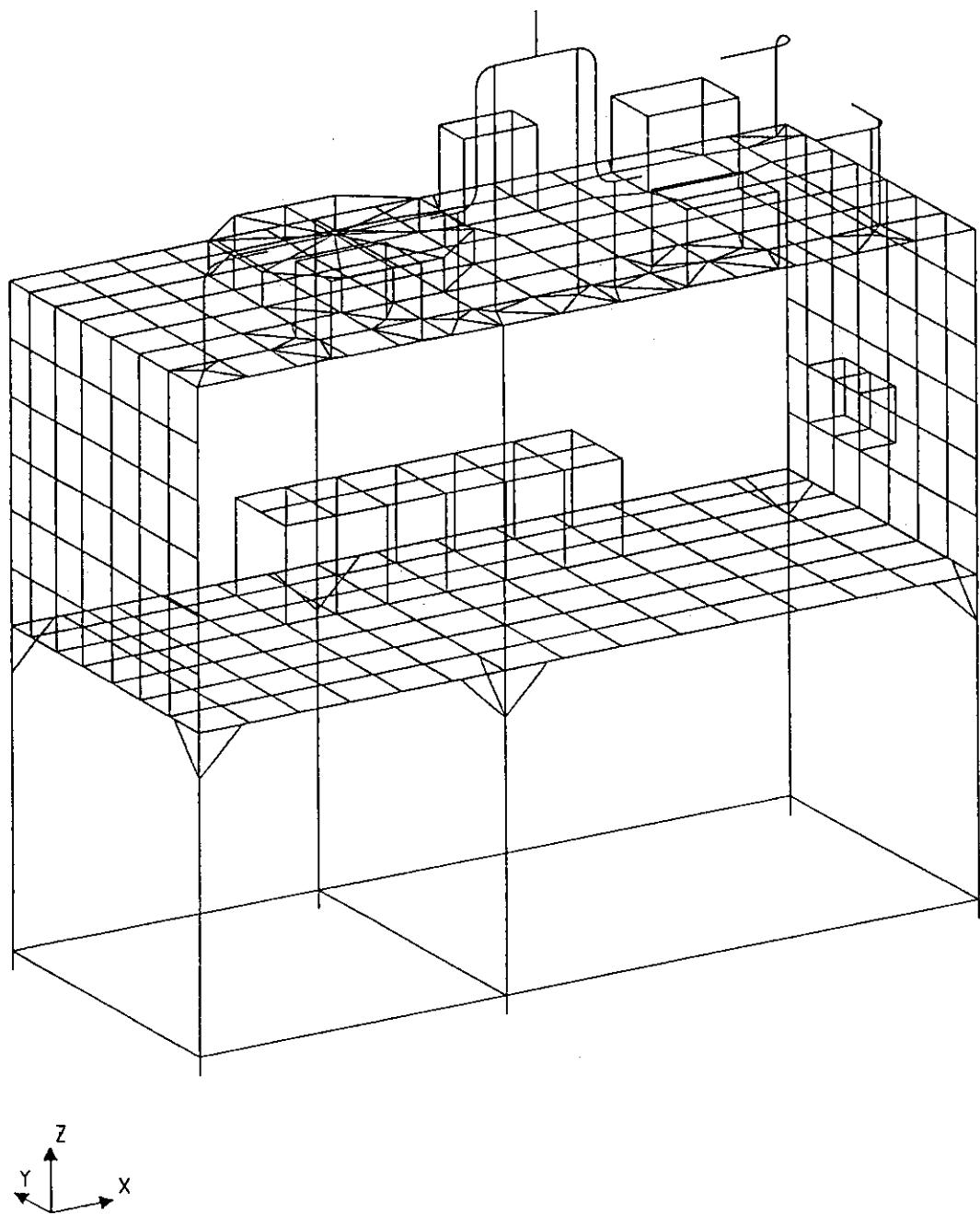


Fig.-3.3 MSC/NASTRAN FEM model of glovebox (MODEL-①)

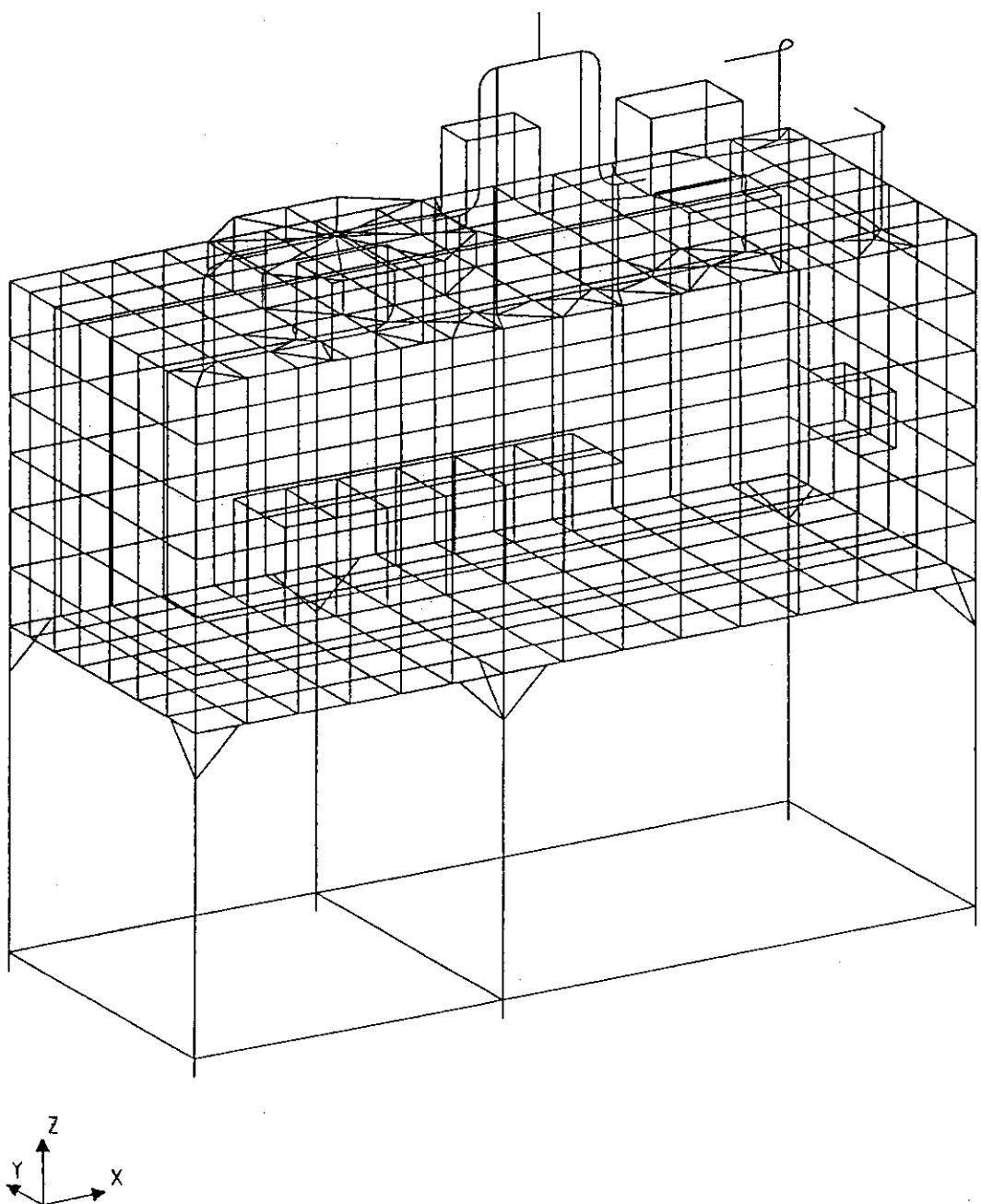


Fig.-3.4 MSC/NASTRAN FEM model of glovebox (MODEL-②)

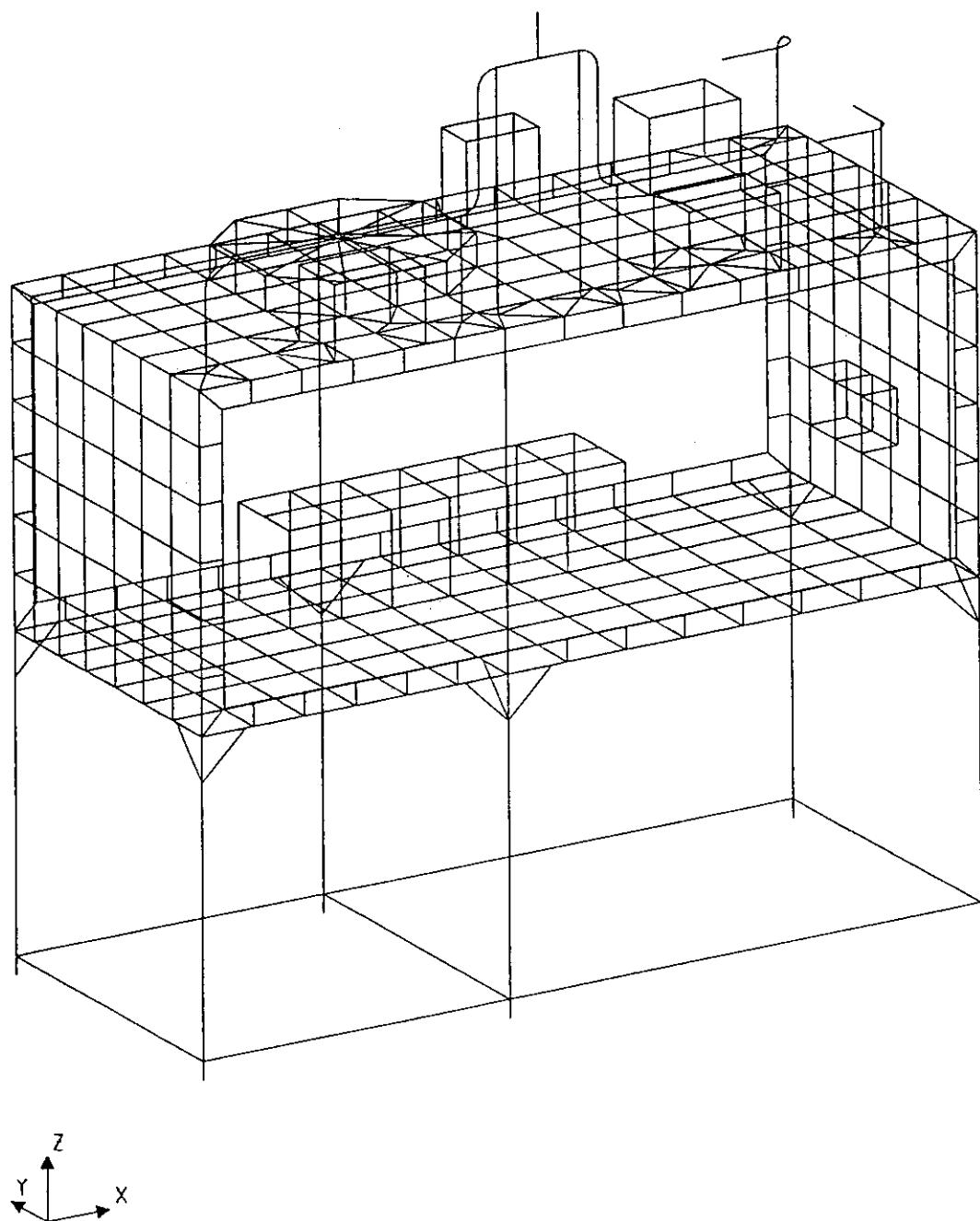


Fig.-3.5 MSC/NASTRAN FEM model of glovebox (MODEL-③)

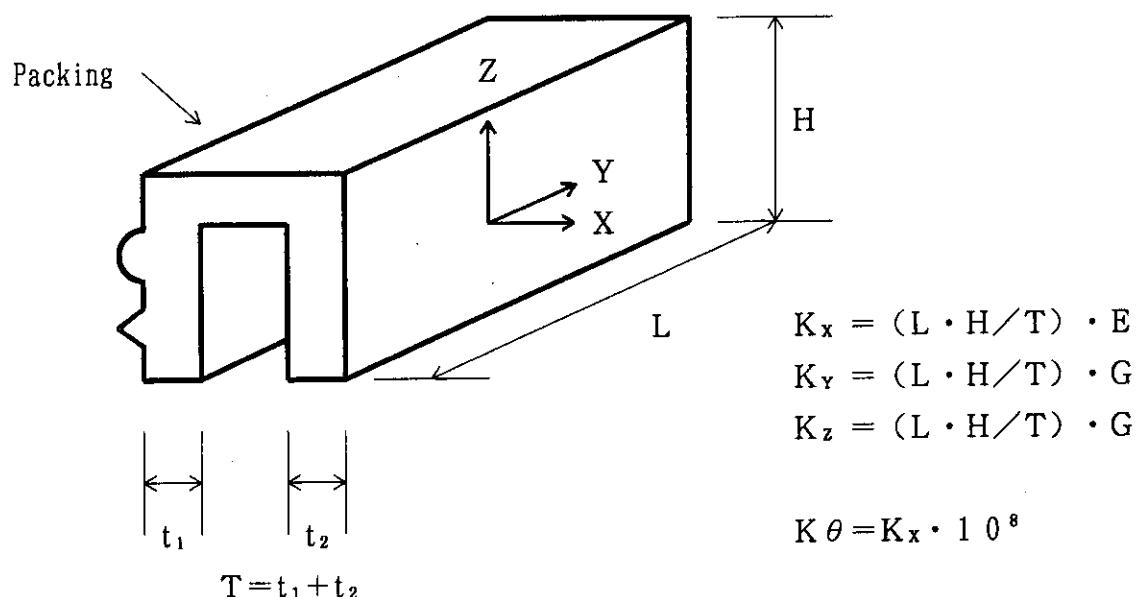


Fig.-3.6 NUMEC type neoprene packing model

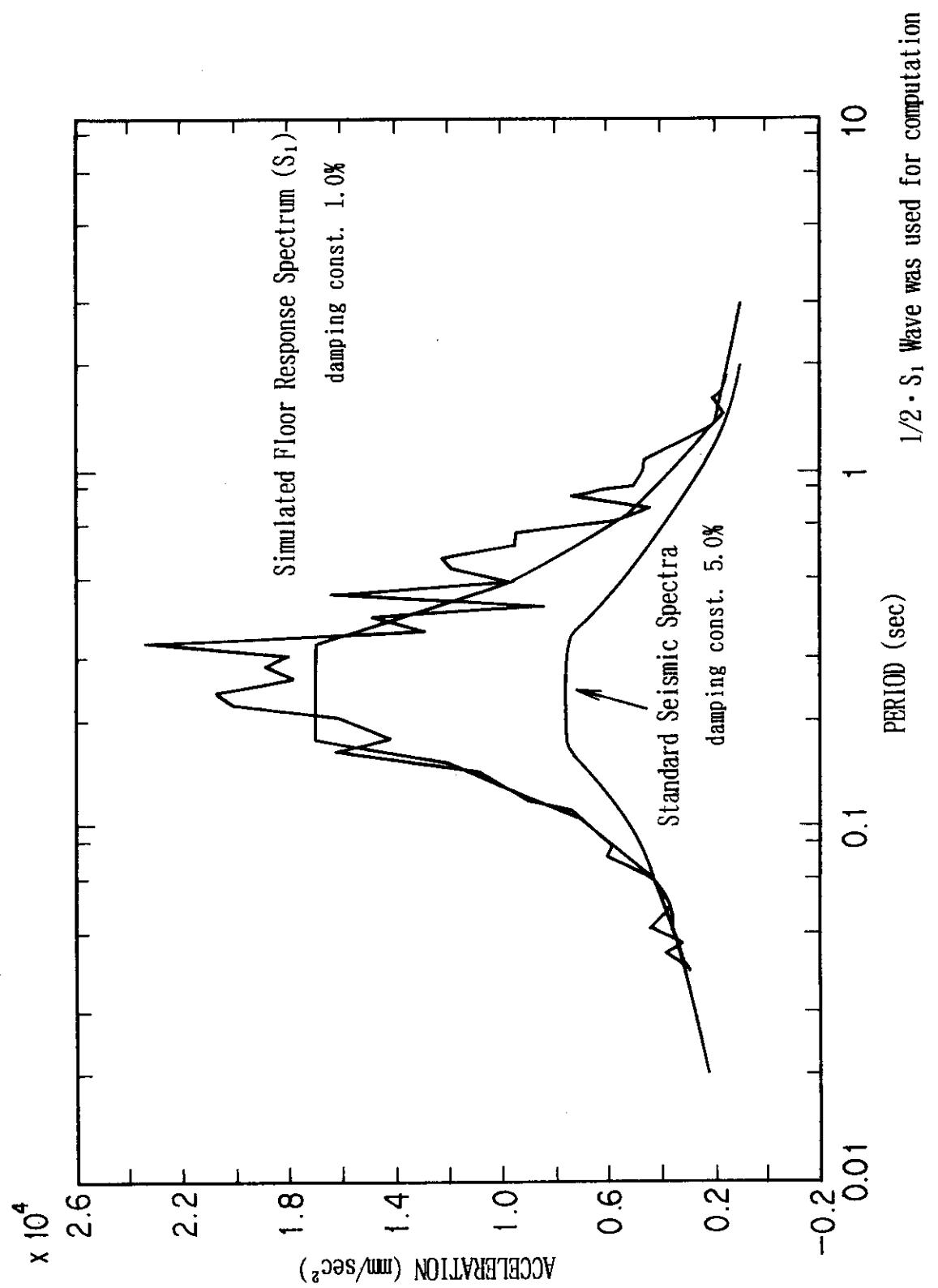


Fig.-3.7 Standard seismic spectrum and simulated floor response spectrum ( $S_1$ )

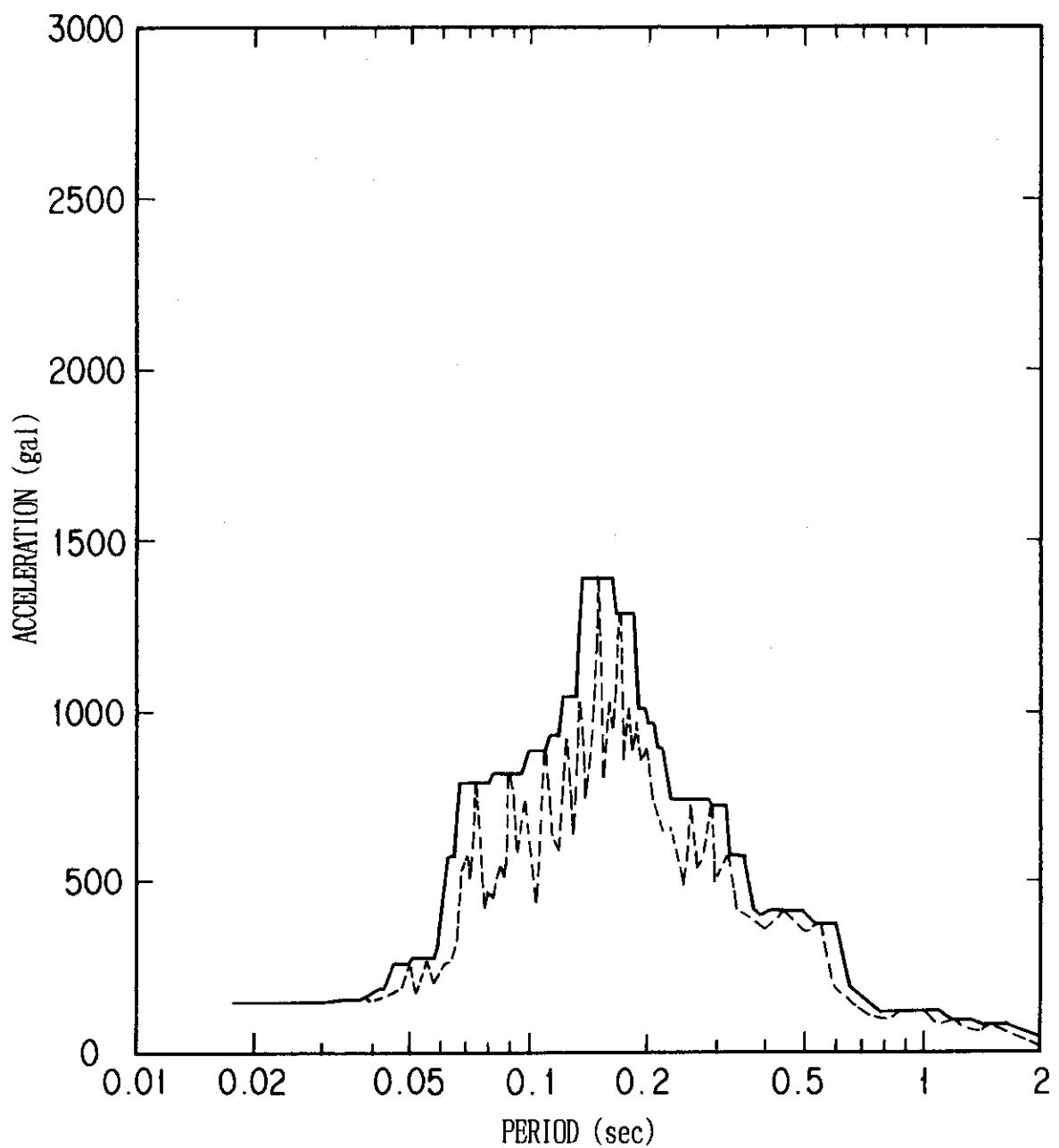


Fig.-3.8 10% extended floor response spectrum of Plutonium Fuel Research Facility  
(EW direction, damping const. 1.0%)

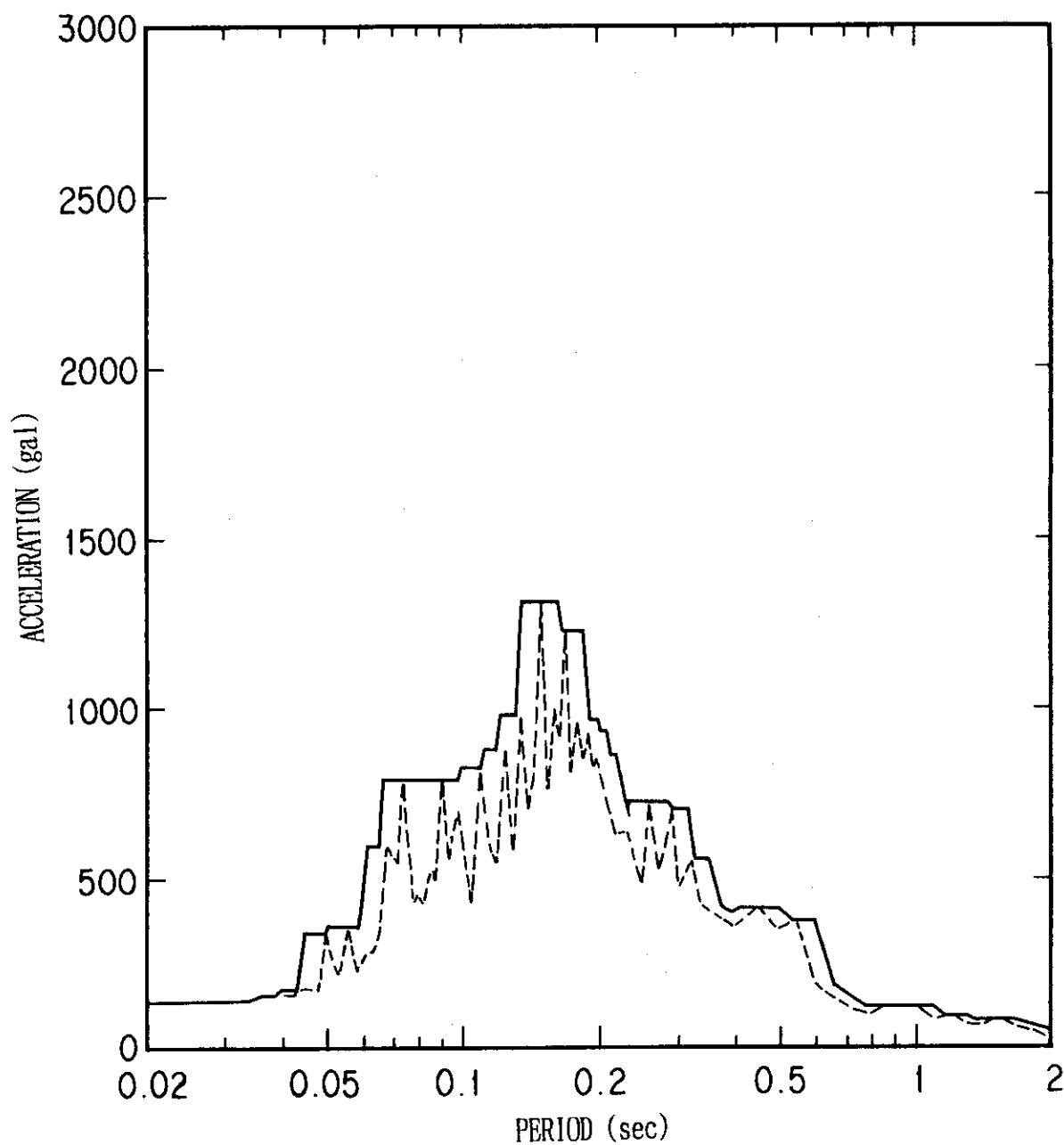
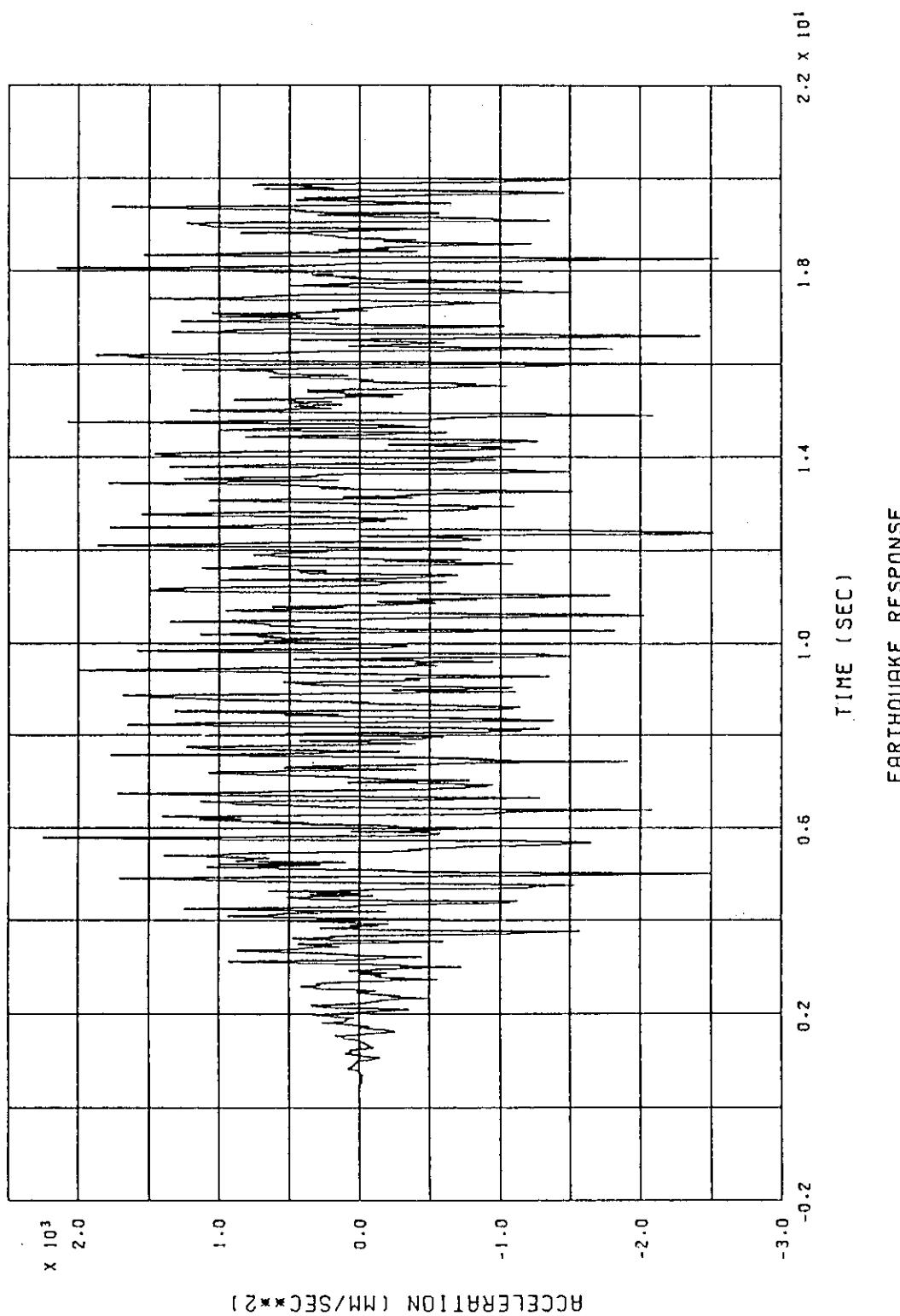


Fig.-3.9 10% extended floor response spectrum of Plutonium Fuel Research Facility  
(NS direction, damping const. 1.0%)



$1/2 \cdot S_1$  Wave was used for computation

Fig.-3.10 Time history simulated seismic wave ( $S_1$ )

ACCELERATION

GLOVE BOX , S1-D , EW , NODE-1-X

MAX . 1 .46      M/S\*\*2 (T=6 .49 SEC)      N= 4096      DT=0 .010SEC

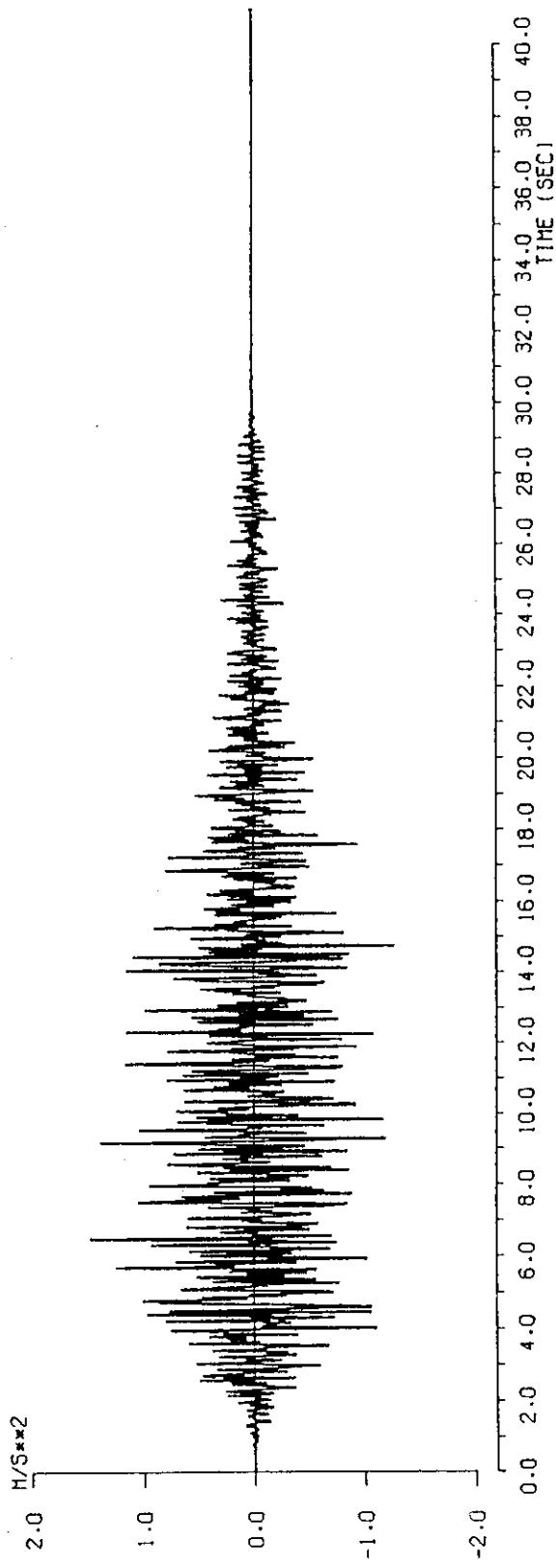


Fig.-3.11 Time history seismic wave of Plutonium Fuel Research Facility (EW direction)

ACCELERATION

GLOVE BOX , S1-D , NS , NODE-1-X

MAX . 1.39      M/S\*\*2(T=6.48 SEC)      N= 4096      DT=0.010SEC

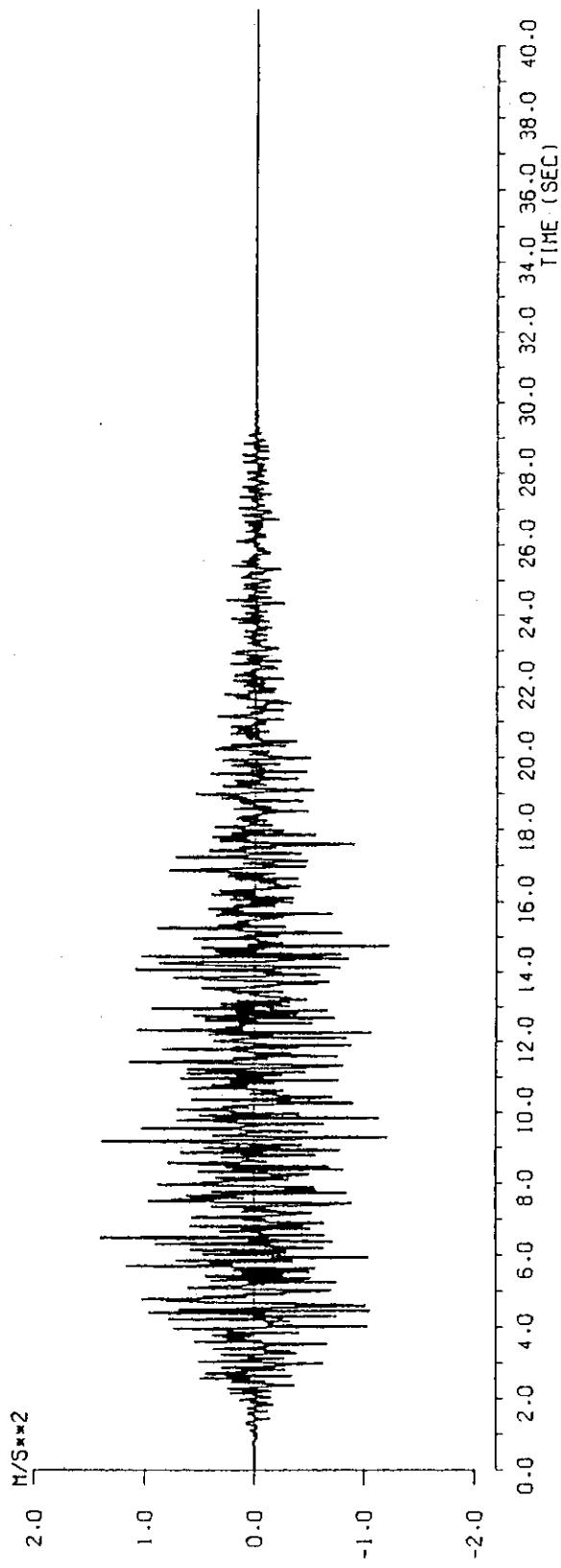
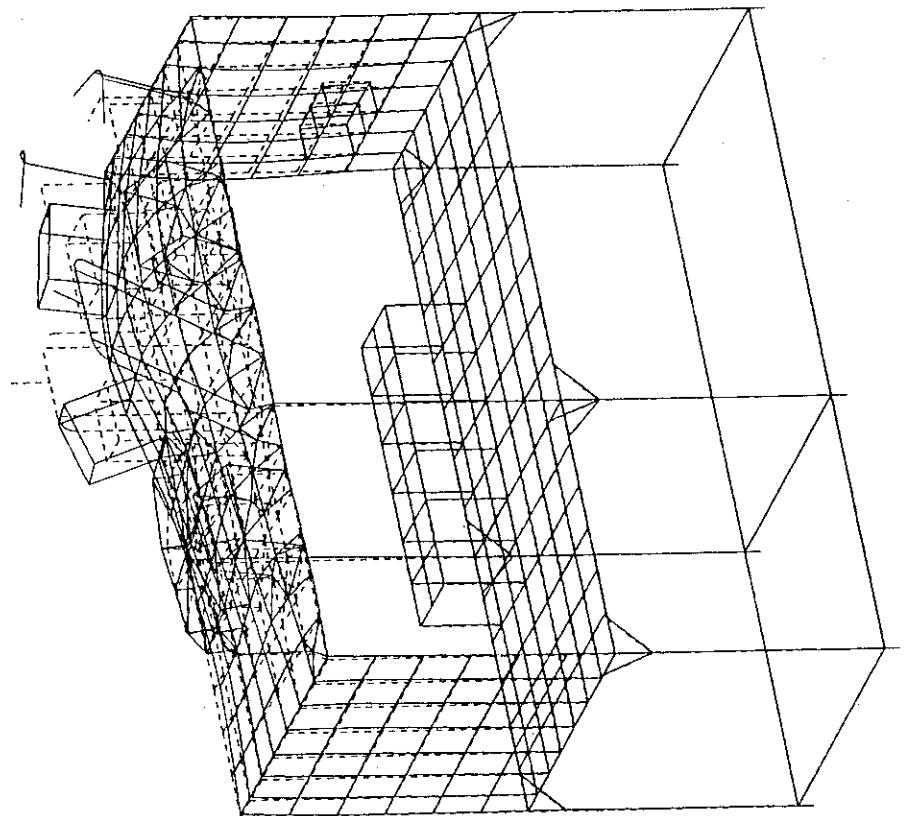
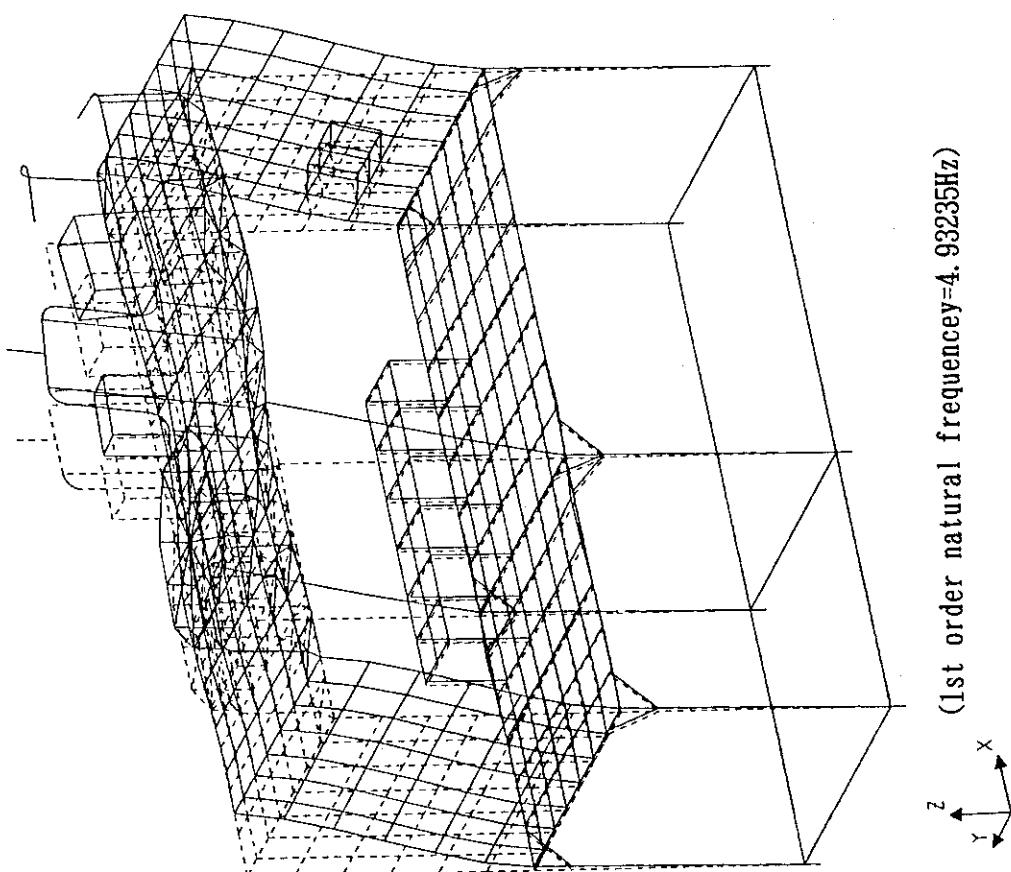


Fig. -3.12 Time history seismic wave of Plutonium Fuel Research Facility (NS direction)

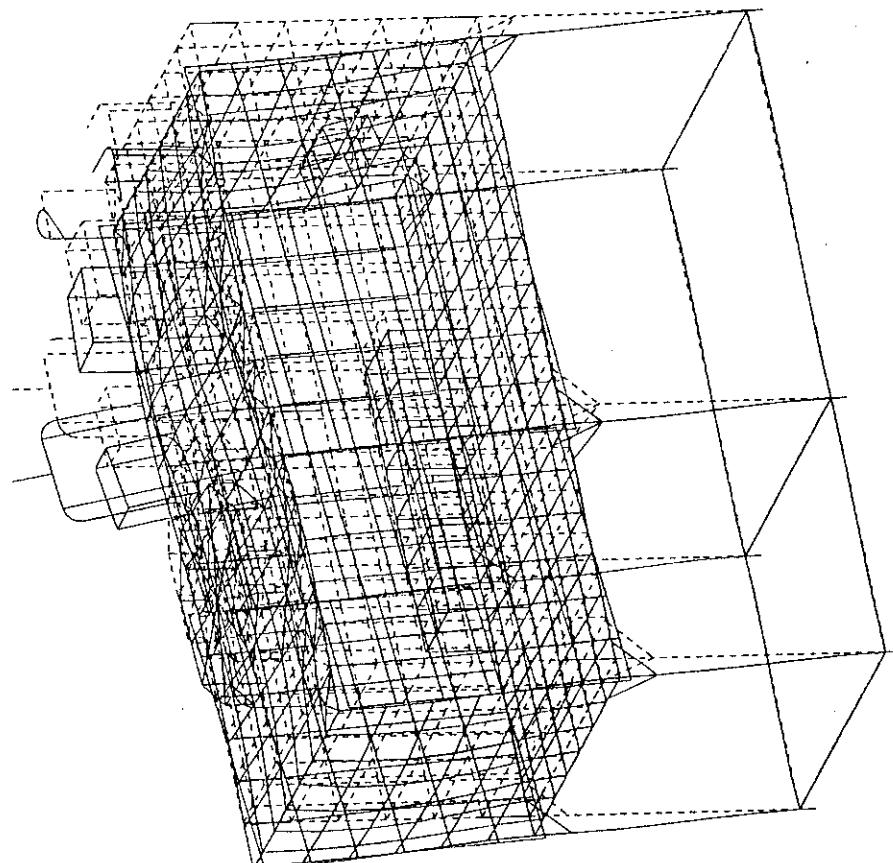


(2nd order natural frequency=9.20974Hz)

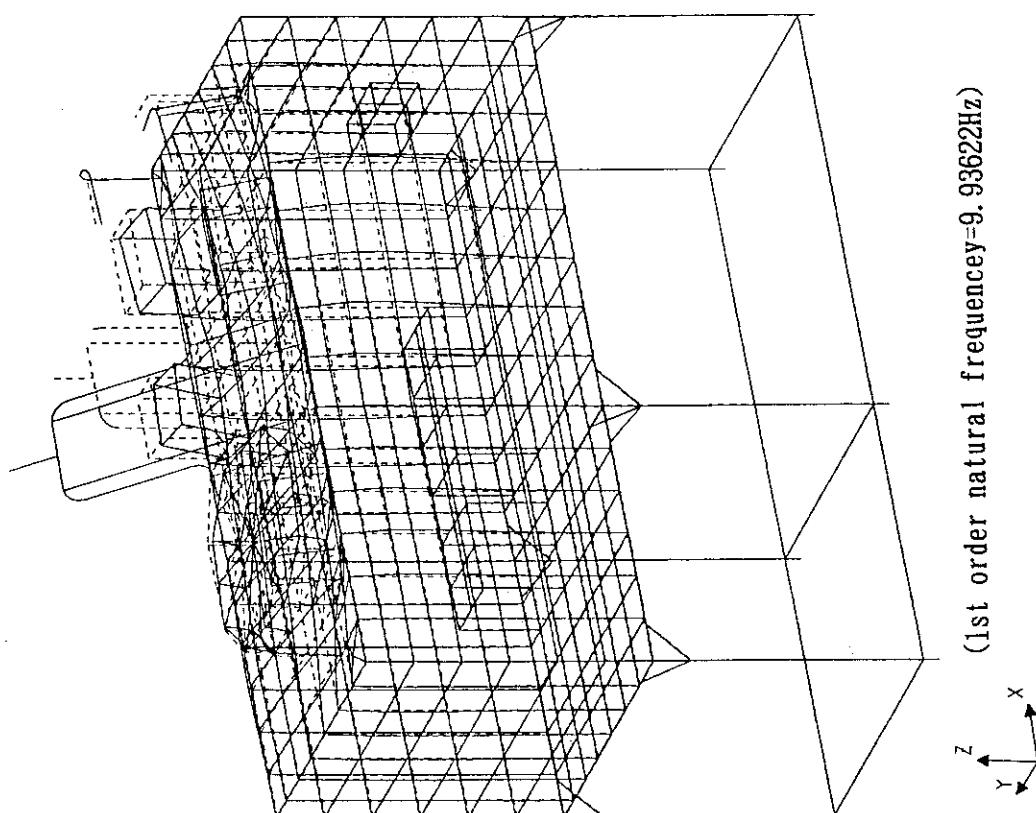


(1st order natural frequency=4.93235Hz)

Fig. -3.13 Result of eigenvalue analysis (MODEL-①)



(2nd order natural frequency=10.93972Hz)



(1st order natural frequency=9.93622Hz)

Fig.-3.14 Result of eigenvalue analysis (MODEL-②)

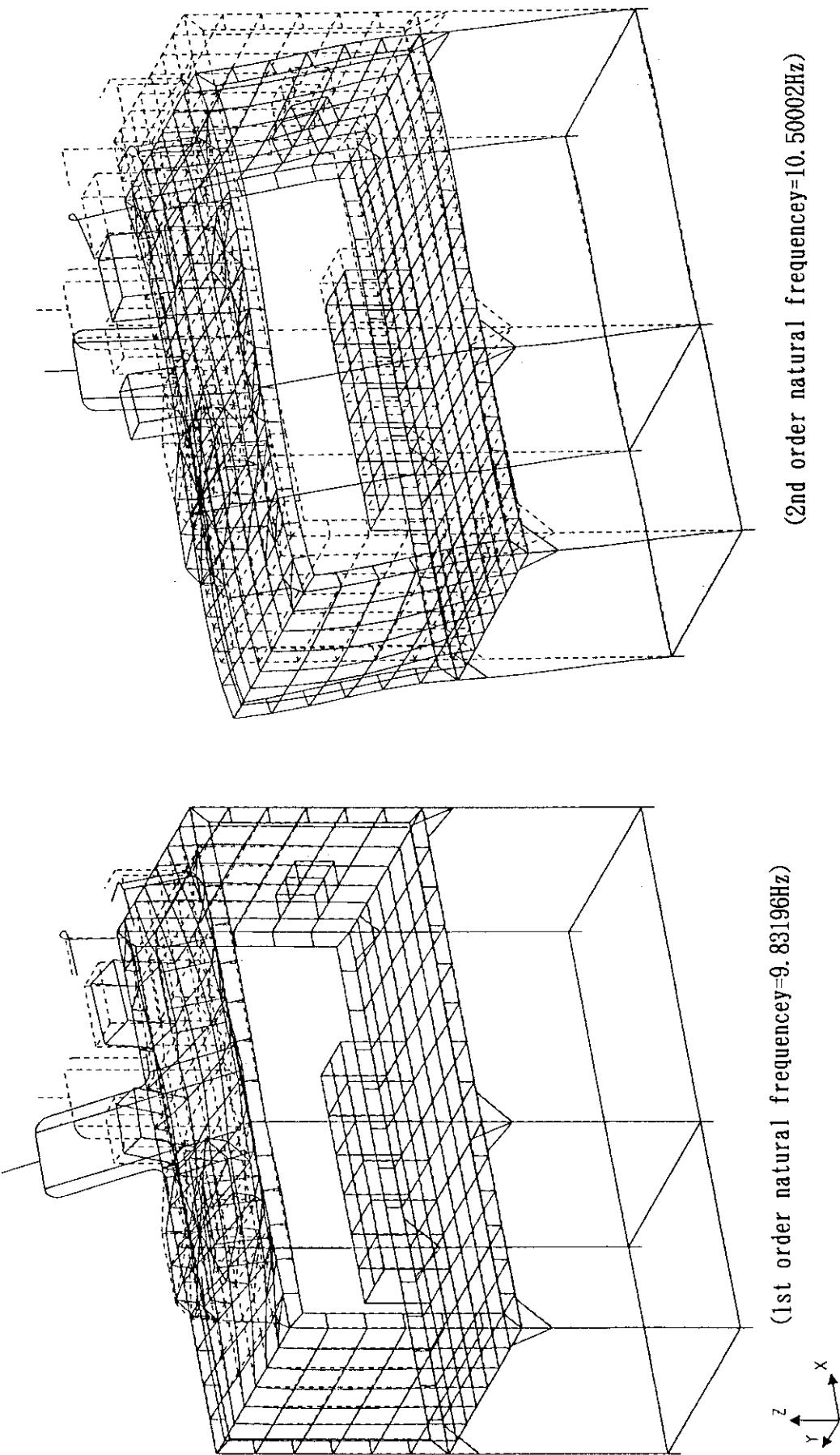
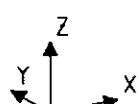
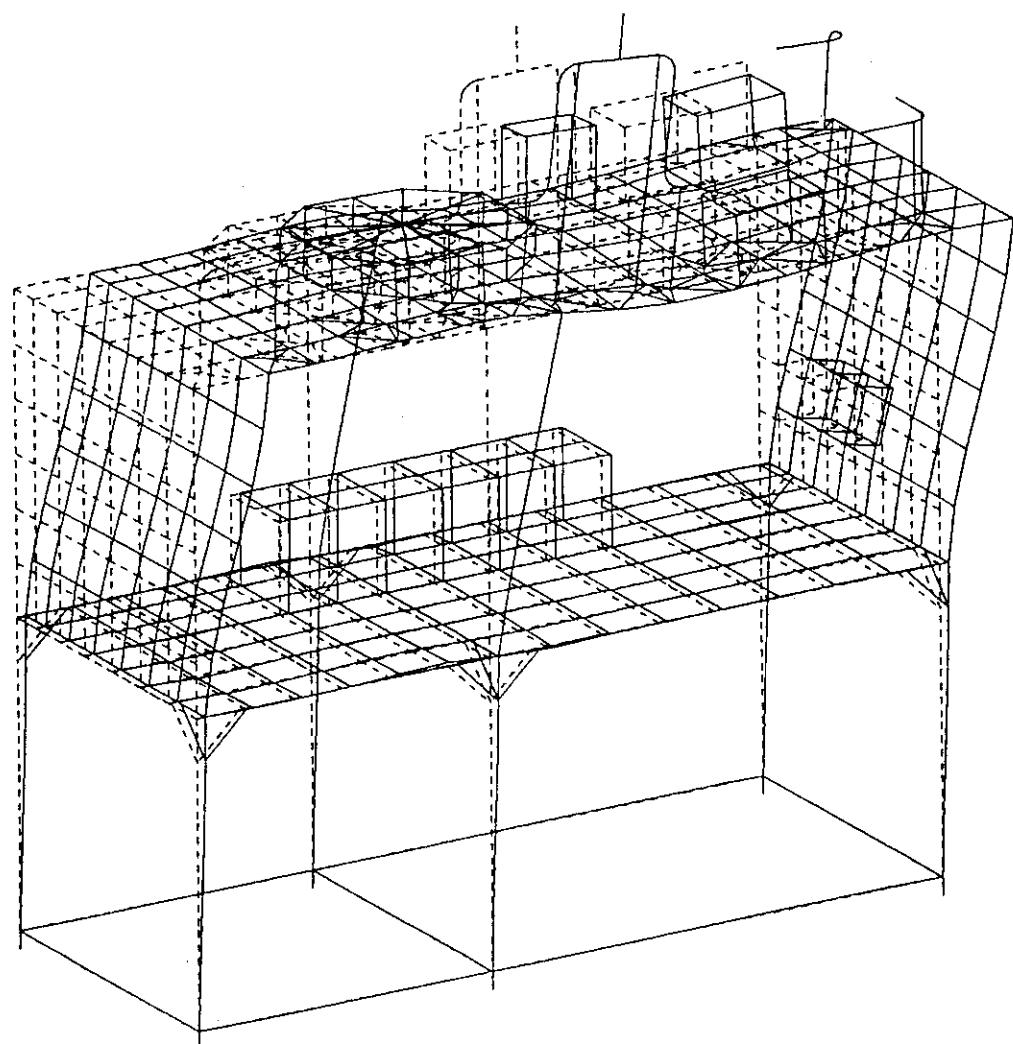
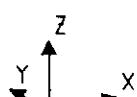
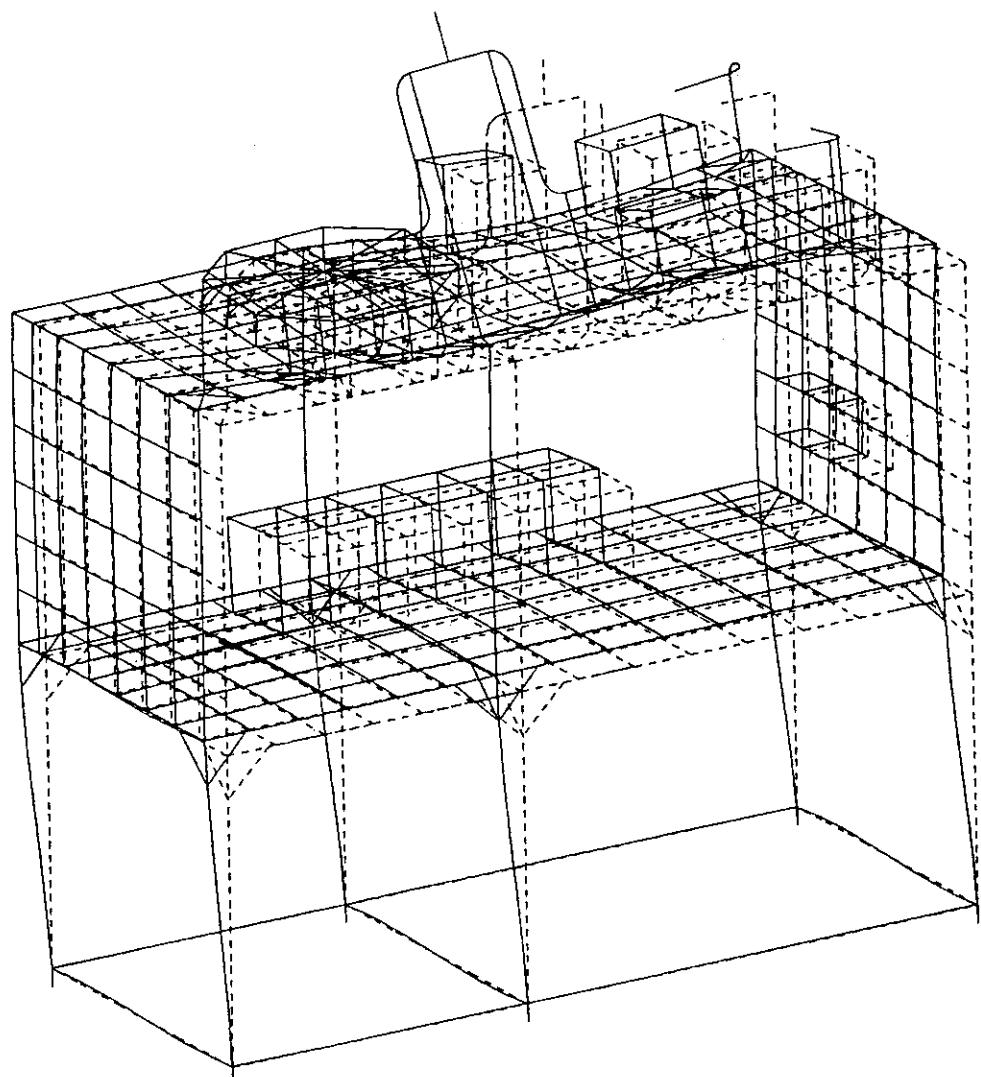


Fig.-3.15 Result of eigenvalue analysis (MODEL-③)



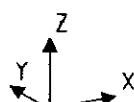
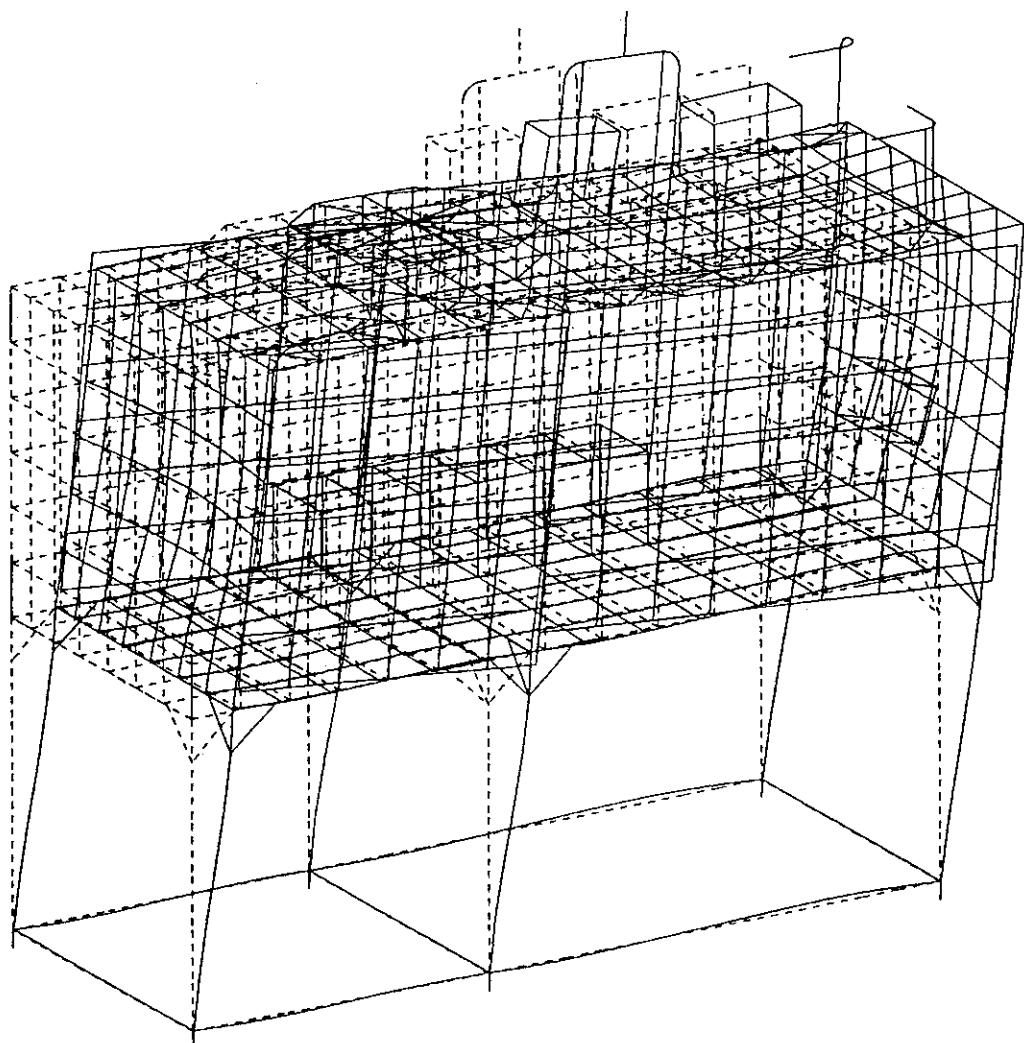
GEO. SCALE  
X:0.06  
Y:0.06  
DIS. SCALE  
1/0.34166

Fig.-3.16 Result of static analysis (MODEL-① X direction)



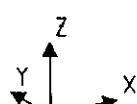
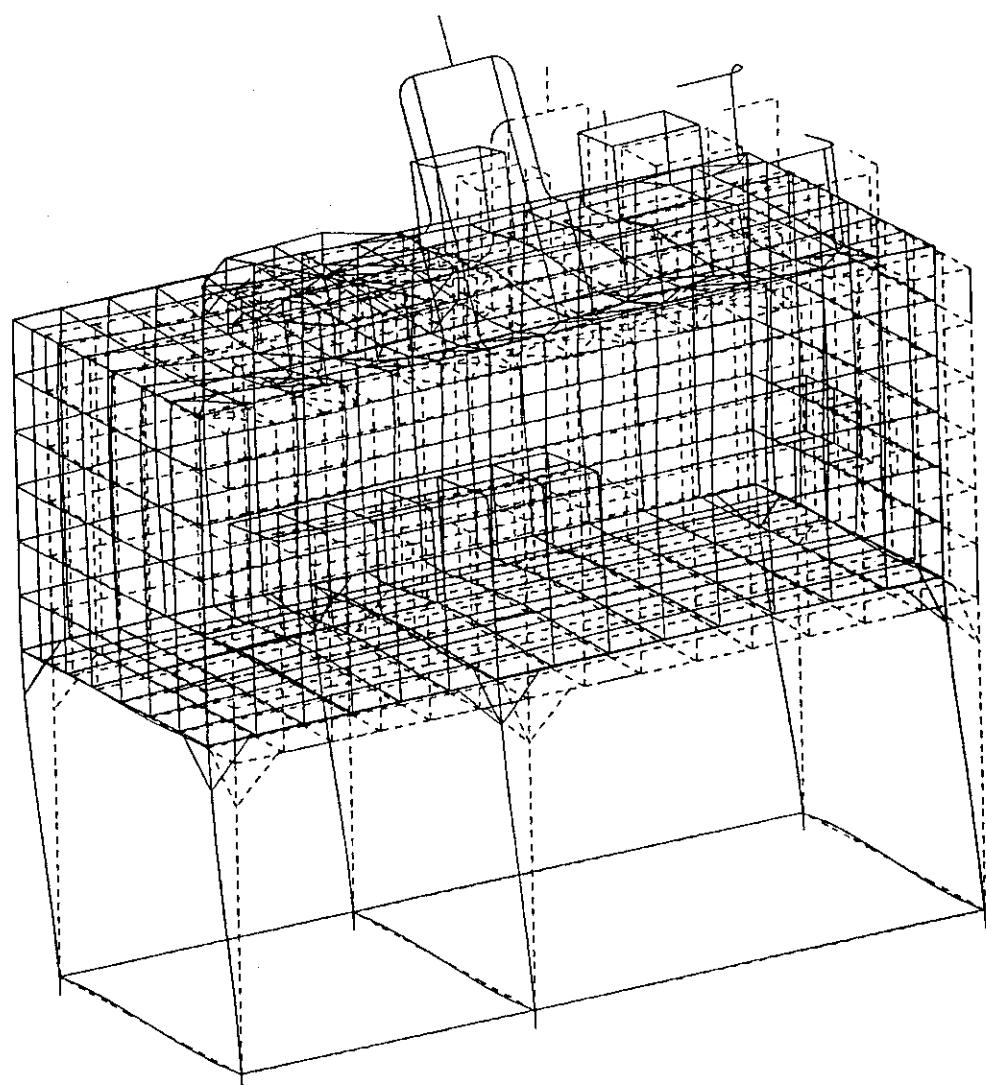
GEO. SCALE  
X:0.06  
Y:0.06  
DIS. SCALE  
1/0.06232

Fig.-3.17 Result of static analysis (MODEL-① Y direction)



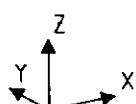
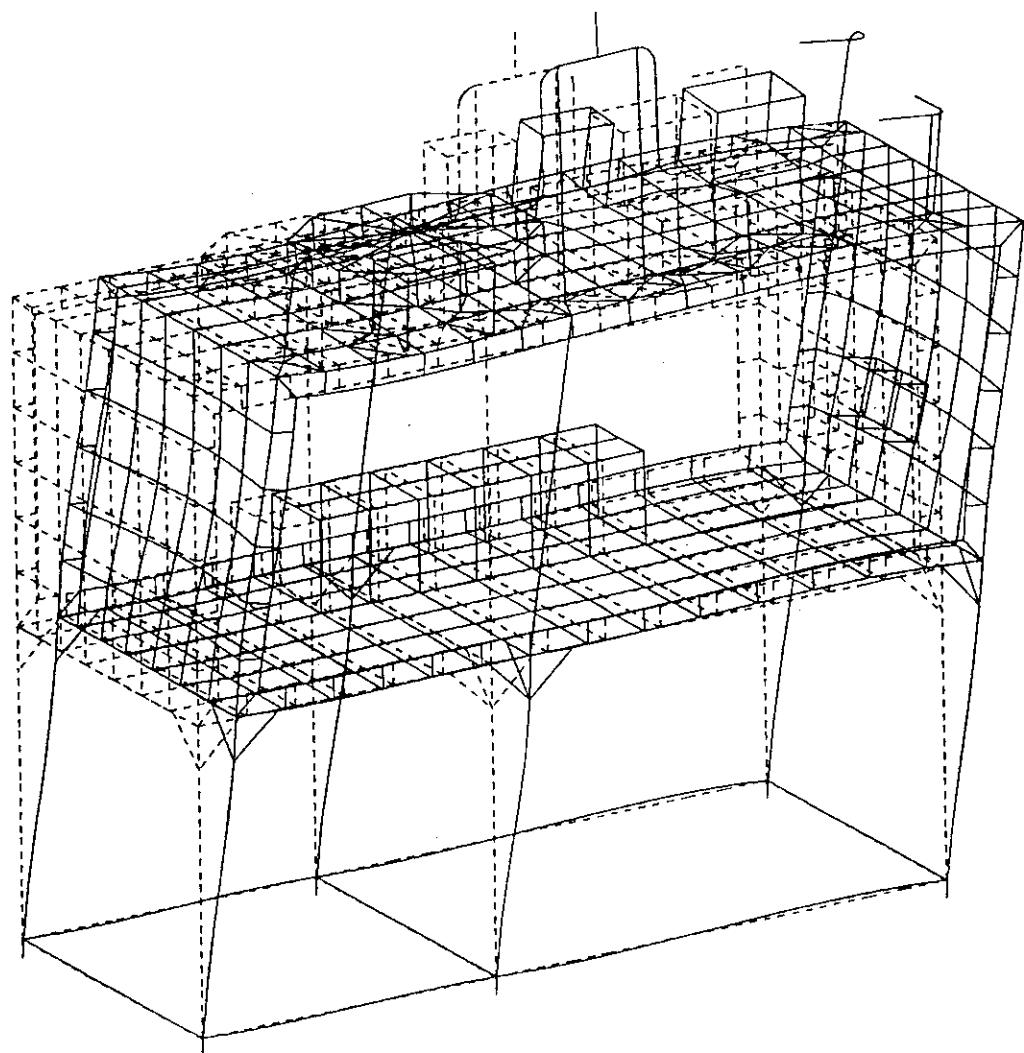
GEO. SCALE  
X:0.06  
Y:0.06  
DIS. SCALE  
1/0.06601

Fig.-3.18 Result of static analysis (MODEL-② X direction)



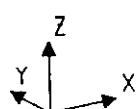
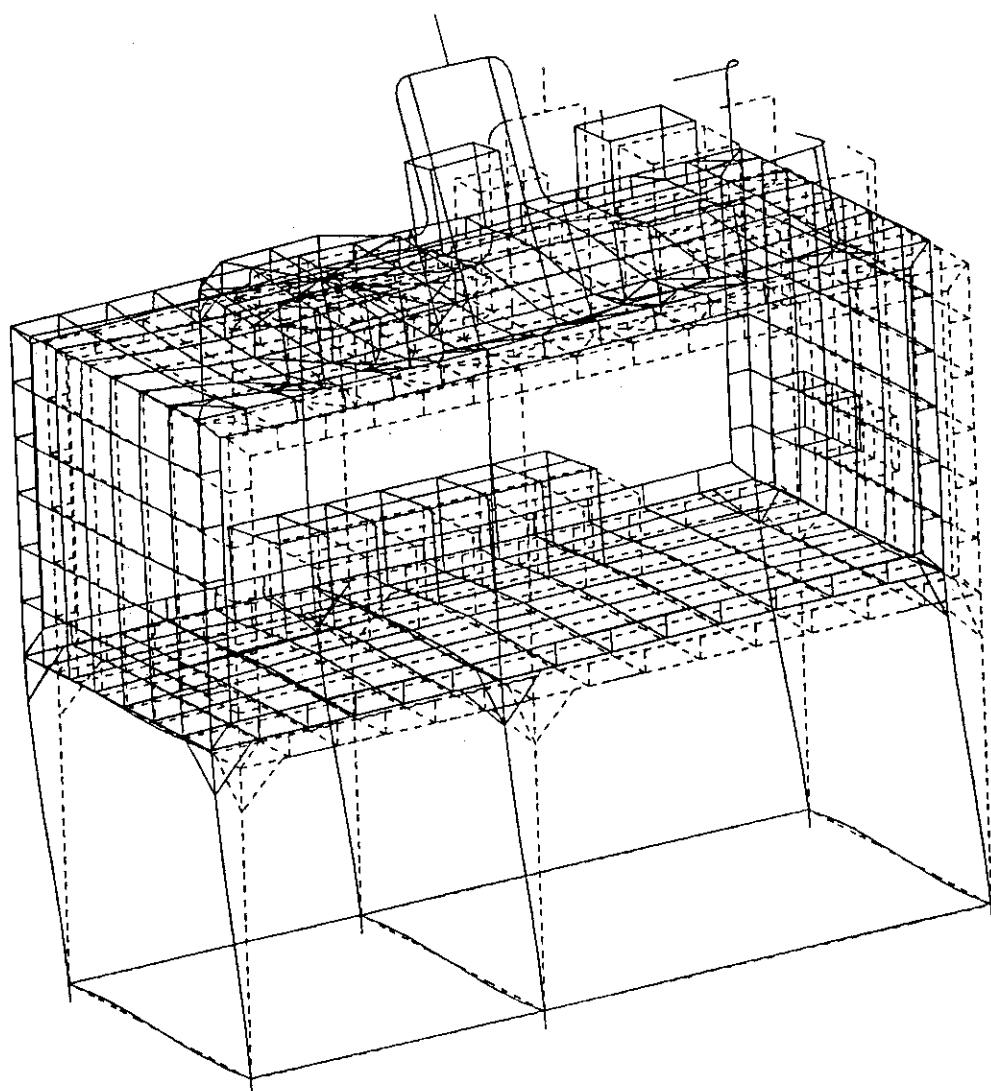
GEO. SCALE  
X:0.06  
Y:0.06  
DIS. SCALE  
1/0.05304

Fig.-3.19 Result of static analysis (MODEL-② Y direction)



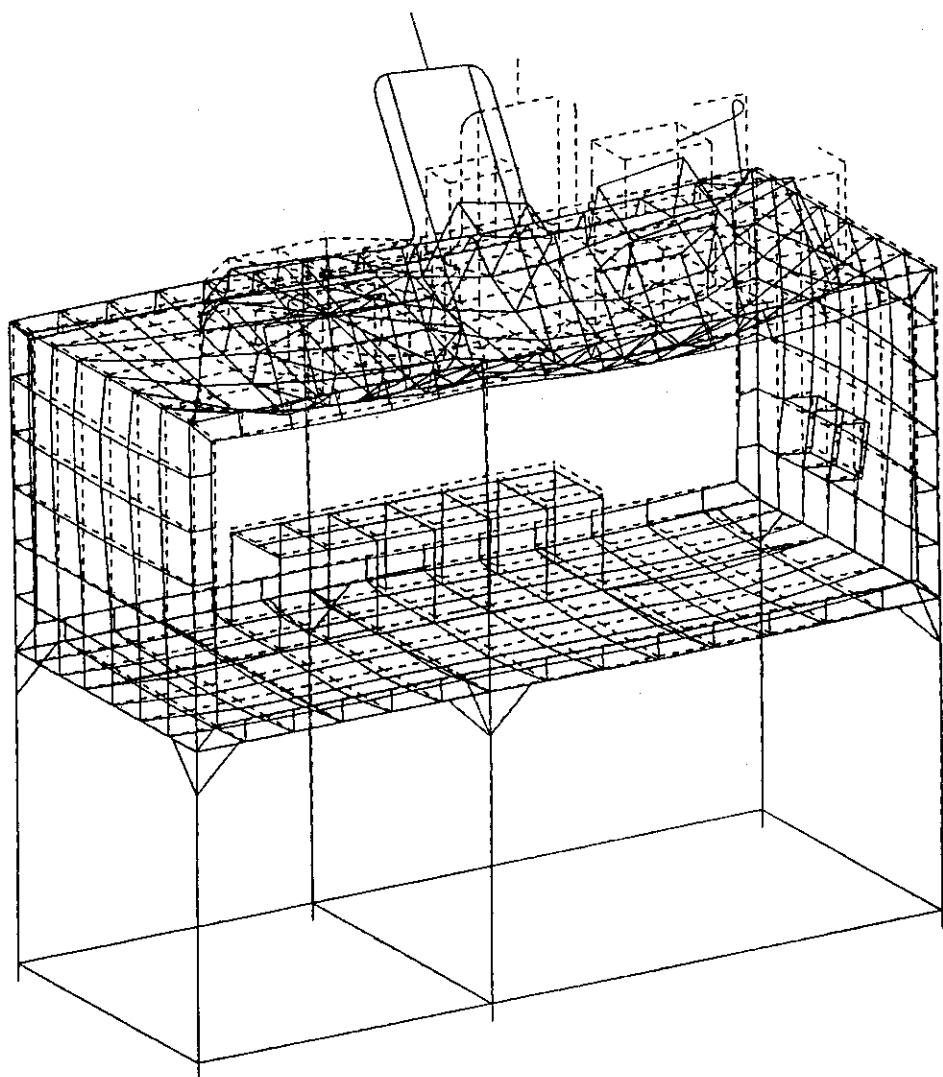
GEO. SCALE  
X:0.06  
Y:0.06  
DIS. SCALE  
1/0.07279

Fig.-3.20 Result of static analysis (MODEL-③ X direction)



GEO. SCALE  
X:0.06  
Y:0.06  
DIS. SCALE  
1/0.05033

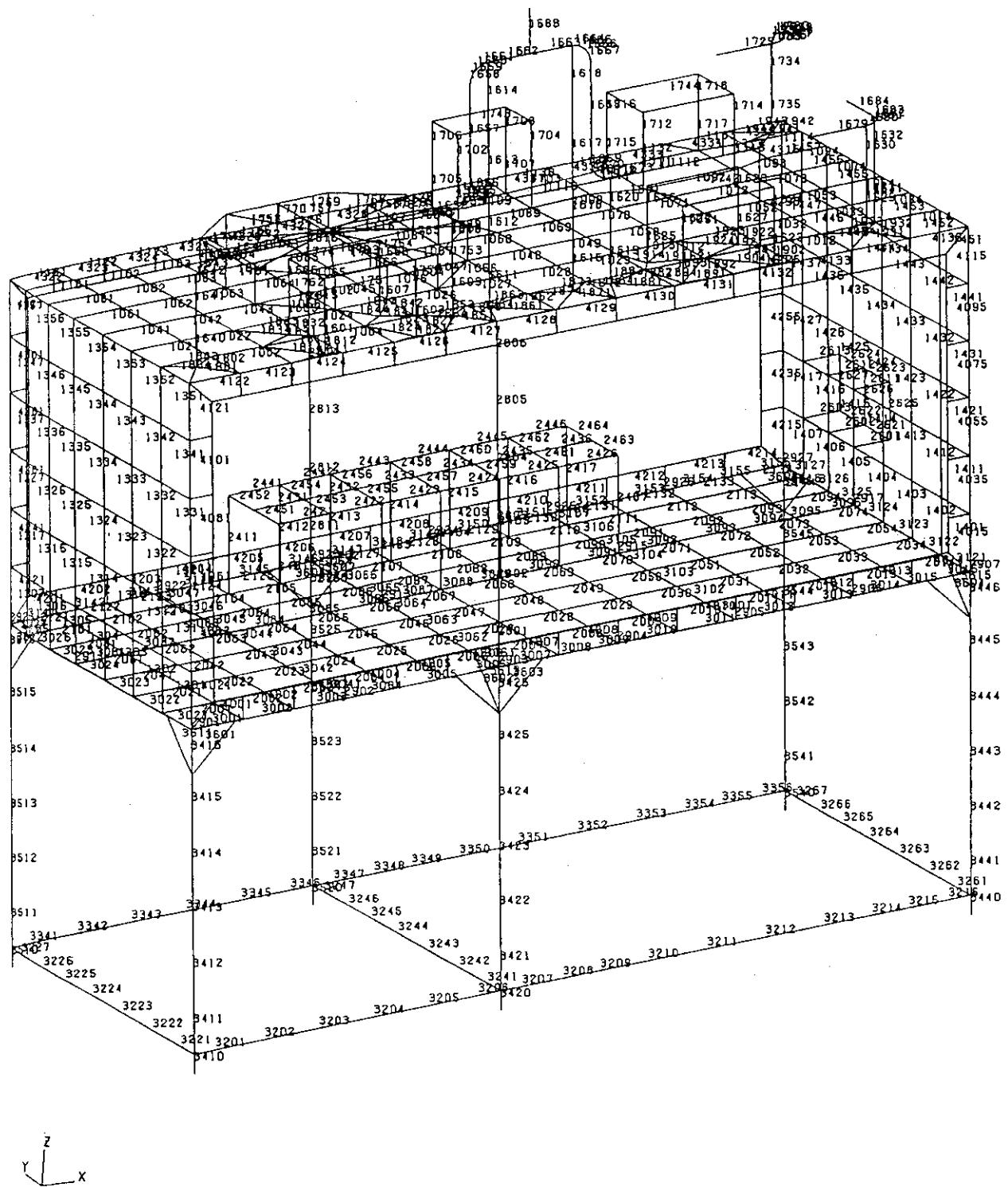
Fig. -3.21 Result of static analysis (MODEL-③ Y direction)



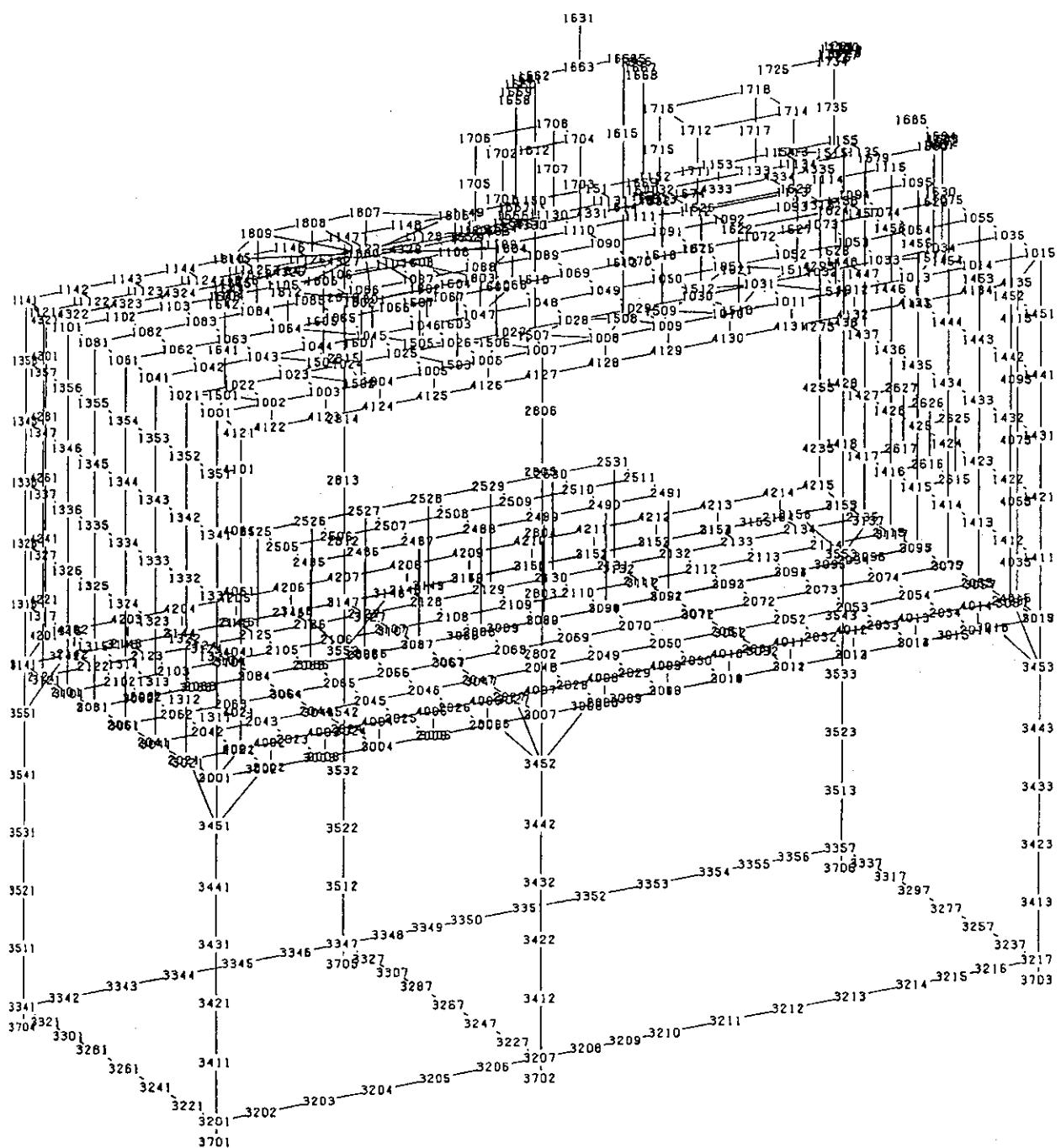
GEO. SCALE  
X:0.06  
Y:0.06  
DIS. SCALE  
1/0.10304

Fig.-3.22 Result of static analysis (MODEL-③ XY direction)

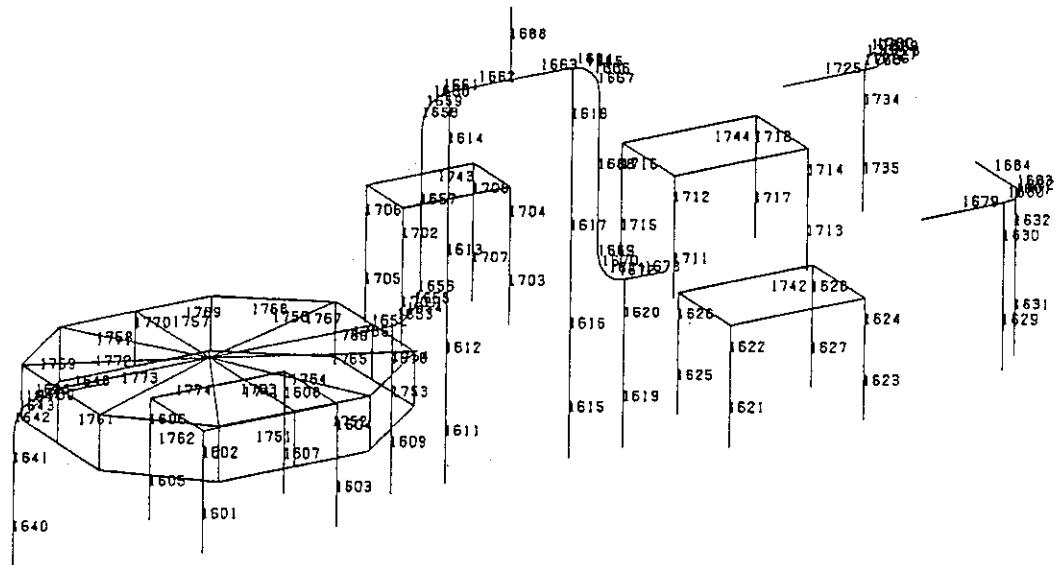
## 付録1 グローブボックスの要素番号および節点番号



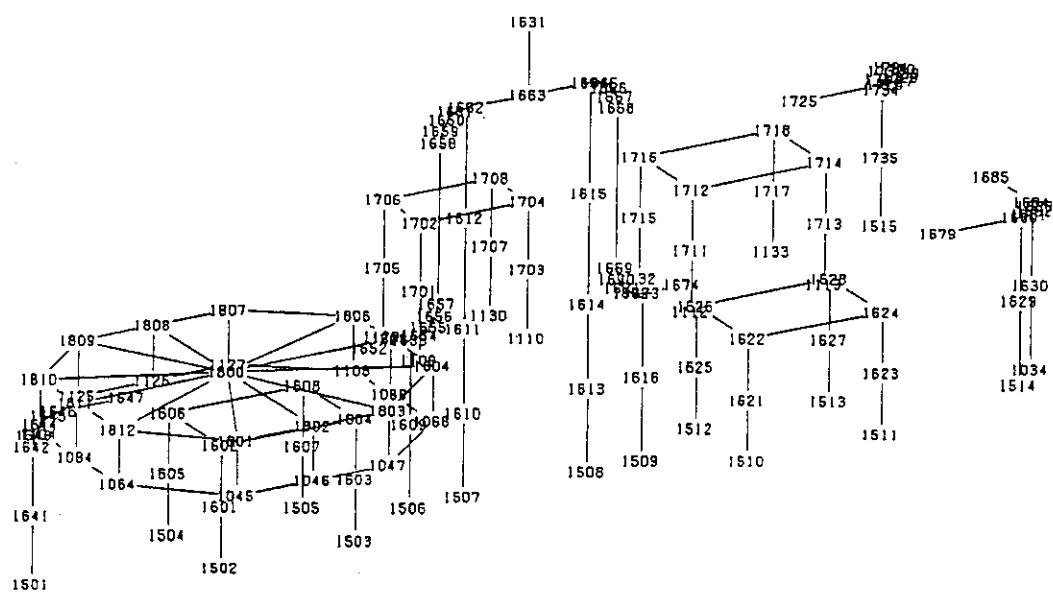
付図-1 グローブボックスの有限要素モデル（要素番号）



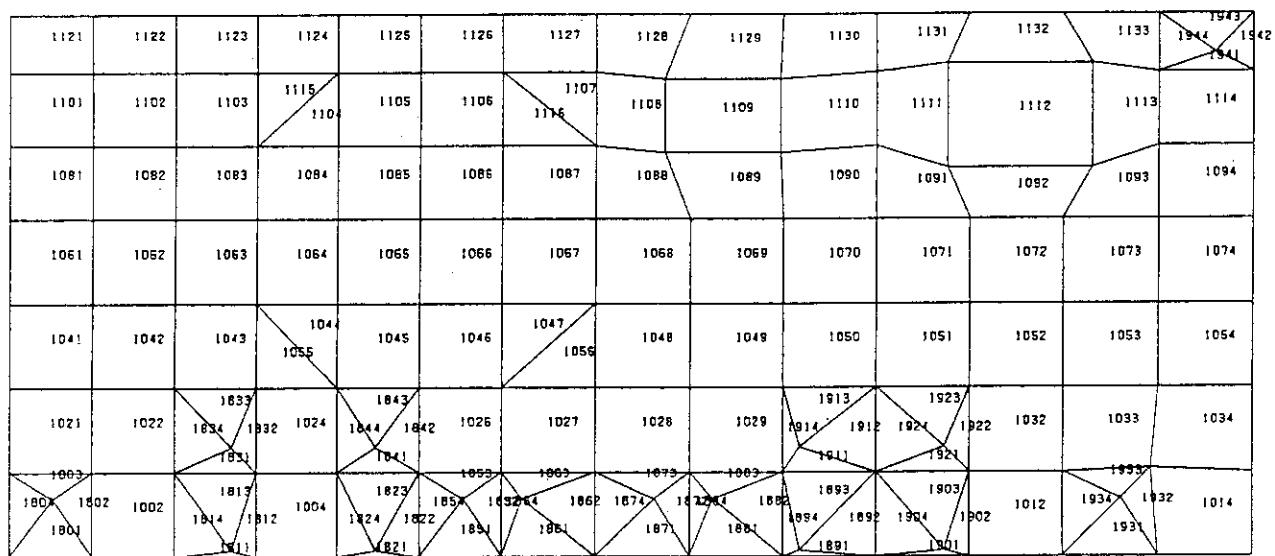
付図-2 グローブボックスの有限要素モデル（節点番号）



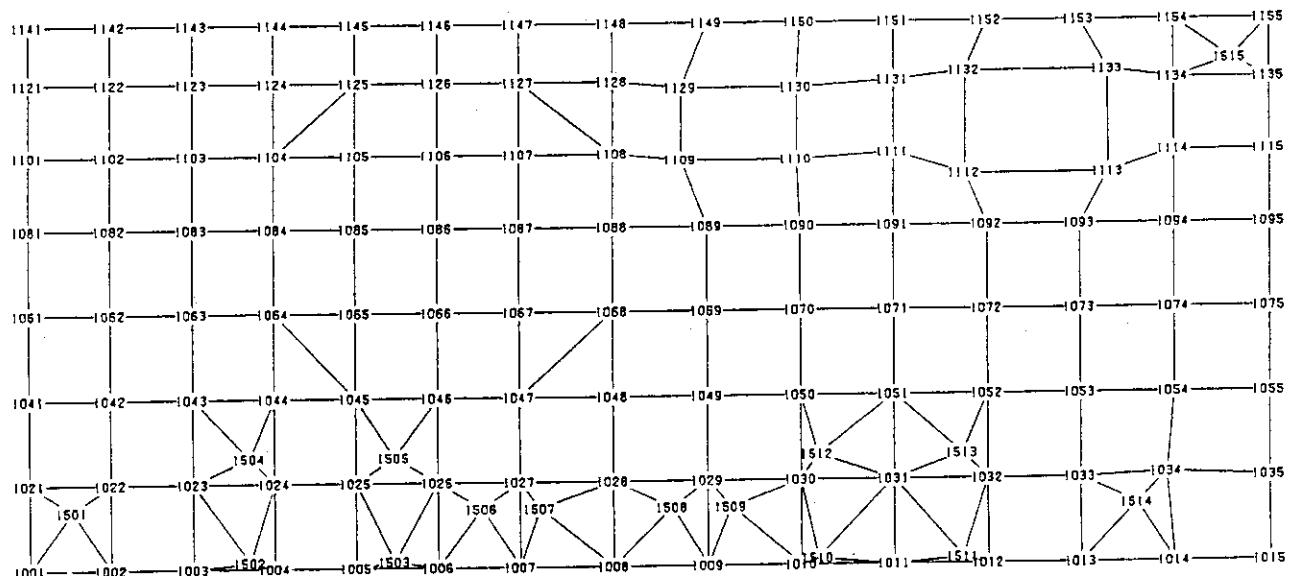
付図-3 グローブボックス天井積載物の有限要素モデル（要素番号）



付図-4 グローブボックス天井積載物の有限要素モデル（節点番号）



付図-5 グローブボックス天井部の有限要素モデル（要素番号）



付図-6 グローブボックス天井部の有限要素モデル（節点番号）