

## 放射性廃棄物輸送容器の固有振動および圧壊強度

青木 元也\*

### Natural Frequencies and Collapse Strength of Radioactive Waste Transport Casks

By  
Genya Aoki

#### Abstract

The natural frequencies and collapse strength of radioactive waste transport casks are analyzed by means of finite element method. The calculated casks are those for high, intermediate and low level waste. The natural frequencies are obtained in two cask-positions, vertical and horizontal. The buckling or collapse strength is analyzed under external pressure. MARC is used as a finite element program. Conclusions obtained are as follows.

(1) The natural frequencies calculated by the handbook formulas of beams can be considerably higher than those by finite element method in case of bending mode shapes.

(2) The vibration modes of the casks for low or intermediate level waste are mainly the deflection of lid and bottom plates, whose natural frequencies can be estimated by the handbook formulas of circular plate.

(3) The collapse strength of casks can be obtained by elastic buckling analysis in case of the cask for low level waste with small rigidity, or by non-linear analysis in case of the cask for high or intermediate level waste with large rigidity.

(4) The collapse modes in non-linear analysis are same as the first modes in elastic buckling analysis.

#### 1. ま え が き

我が国の原子力発電所において発生した使用済核燃料の大部分はイギリスおよびフランスの再処理工場において処理されている。そして、その再処理工程で生じた多量の放射性廃棄物が、放射能の強さによって高、中、低の各レベルに分類されて、1990年以降我が国へ返還されることになっている。また、現在青森県に建設が計画されている再処理施設が完成し、我が国における核燃料サイクルが確立されると、国内における放射性物質の輸送がさらに増大すると考えられる。

これらの放射性廃棄物の安全な輸送を計るためには、その輸送容器について放射線遮蔽、熱特性、構造強度等の各方面からの検討が必要となる。構造強度面に限ってみても、たとえば国際原子力機関IAEAの放射性物質安全輸送規則では静的および動的な各種の条件下における強度の試験あるいは解析が義務付けられている。これらの各条件のうち本報告では固有振動と圧壊強度、すなわち固有値問題に関連した課題について解析的な検討を加えた。

各レベルにおける放射性廃棄物輸送容器の構造寸法はまだ確定していないが、いくつかの設計案が提案されている。ここでは、各レベルについての案の中からひとつずつ代表例を選び、それらの構造を簡略化した。Fig. 1に計算対象とした高、中、低各レベルの輸送容

\* 構造強度部

原稿受付：昭和62年10月29日

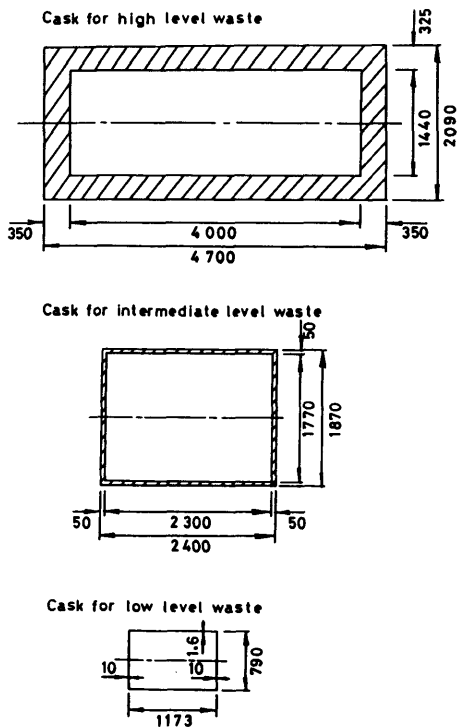


Fig.1. Simplified models of casks

器の構造寸法を示す。解析には有限要素法による汎用構造解析プログラムMARCを用いた。使用した要素は、板厚方向のせん断効果を有する厚板シェル要素である。

## 2. 固有振動

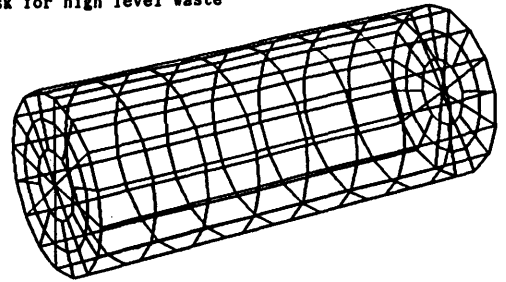
輸送容器は、車両あるいは船舶による運搬中において、強制振動を受ける。この際にも共振することがあると、ボルト類のゆるみあるいは構造部材の亀裂が生じ、放射線遮蔽上好ましくない結果が起こる可能性がある。したがって、各レベルの輸送容器がどの程度の振動数でどのようなモードの固有振動を行うかを把握しておく必要がある。

### 2.1 計算モデル

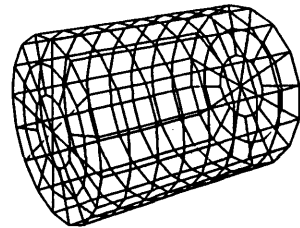
高、中、低各レベルの輸送容器について、Fig. 2に示すような要素分割によって、固有振動をそれぞれ3次まで求めた。全体をモデル化したのは、非対称モードの存在も考慮したからである。要素数は各容器とも208である。使用材料は軟鋼とし、その材料定数は、

(358)

Cask for high level waste



Cask for intermediate level waste



Cask for low level waste



Fig.2 Mesh arrangements for calculation of natural frequency

ヤング率 206 GPa, ポアソン比 0.3, 密度 8030 kg/m<sup>3</sup> とした。

容器が置かれる姿勢は、廃棄物の装荷時においては各レベル容器とも縦置きであるが、輸送中においては高レベル用および中レベル用の一部については横置きであり、また中レベル用の一部と低レベル用については縦置きであると一般的に考えられる。しかし、容器の運搬形態については未だ不確定な面があるので、ここでは各レベルの容器について、Fig. 3に示すような縦置きと横置きとの両方の姿勢についてそれぞれ検討した。

### 2.2 計算結果

計算結果の一覧を Table 1 に示し、また代表的な振動モードを Fig. 4~Fig. 10 に示した。まず、縦置き状態の高レベル用容器については、1次振動の片持梁形の曲げモード (Fig. 4)、2次は捩れモード (Fig. 5)、

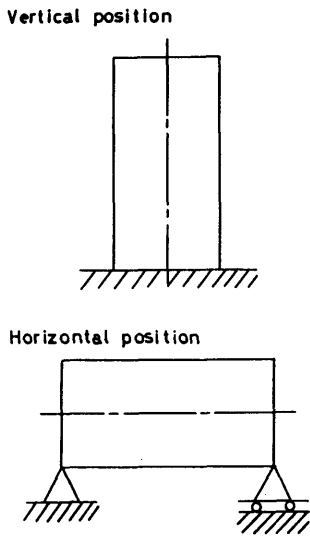


Fig.3 Cask positions for calculation of natural frequency

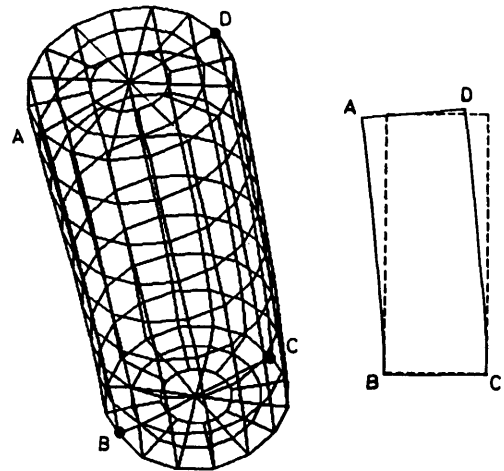


Fig.4 First mode of the cask for high level waste in vertical

Table 1 Natural frequencies and modes

Mode No.	Cask Type	High Level	Int. Level	Low Level	
V.	1st	$f_n$ (Hz)	50	101	92
		Mode Type	Fig.4	Fig.4 *3	Fig.8
	2nd	$f_n$ (Hz)	166	134	102
		Mode Type	Fig.5	Fig.8	Fig.9
	3rd	$f_n$ (Hz)	177	137	103
		Mode Type	Fig.6	Fig.9	Fig.10
H.	1st	$f_n$ (Hz)	125	124	91
		Mode Type	Fig.7	Fig.8	Fig.8
	2nd	$f_n$ (Hz)	174	136	102
		Mode Type	Fig.7 *1	Fig.9	Fig.9
	3rd	$f_n$ (Hz)	183	181	174
		Mode Type	Fig.7 *2	Fig.8 *3	Fig.10

V.=Vertical position  
 H.=Horizontal position  
 $f_n$  =Natural frequency  
 \*1=in horizontal direction  
 \*2=accompanying shear deformation  
 \*3=accompanying local deformation

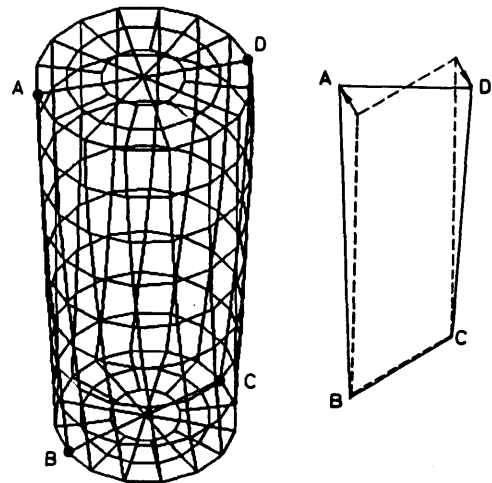


Fig.5 Second mode of the cask for high level waste in vertical position

3次は両端支持梁の曲げに近いモード (Fig.6) となっている。横置き状態の高レベル用容器については、1~3次とも両端支持梁の曲げモードであるが、1次

は垂直面内の曲げ (Fig. 7), 2次は水平面内の曲げ, 3次は垂直面内の曲げにせん断変形が含まれている。

つぎに, 縦置き状態の中レベル用容器については, 1次振動の固定端部に局部変形を含む片持梁形の曲げモード, 2次および3次は蓋部と底部との撓みモードであるが, 2次では同じ方向へ (Fig. 8), 3次では反対方向へ (Fig. 9) 蓋部と底部とがそれぞれ撓んでい

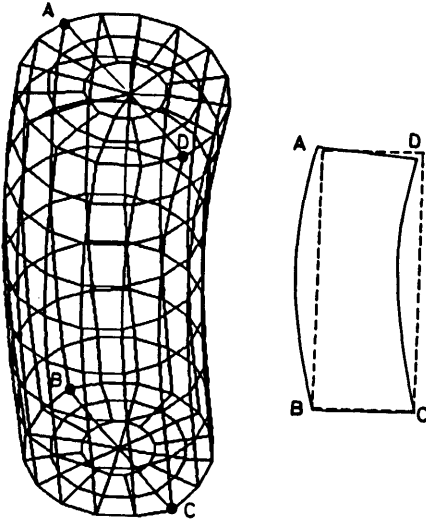


Fig. 6 Third mode of the cask for high level waste in vertical position

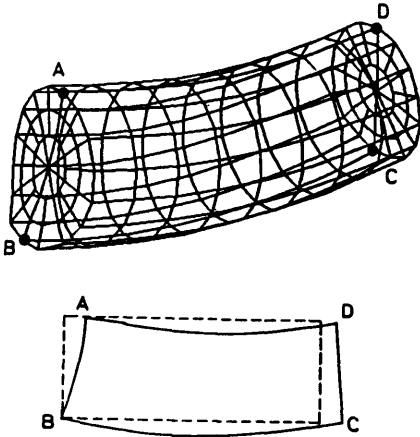


Fig. 7 First mode of the cask for high level waste in horizontal position

る。横置き状態の中レベル用容器については, 1~3次とも蓋部と底部との撓みモード (Fig. 8, Fig. 9) であるが, 3次では円筒部に局部変形が含まれている。

縦置き状態の低レベル用容器では, 1次と2次は蓋部と底部との撓みモード (Fig. 8, Fig. 9) に円筒部の局部変形が多少含まれている。3次は円筒部の5波の撓みモード (Fig. 10) である。横置き状態の低レベル用容器では, 振動次数と振動モードとの関係は縦置き状態のそれと全く同じである。

板厚の大きい高レベル用容器では, 梁部材としての振動モードがみられるが, 板厚が比較的薄い中, 低レベル用容器では板あるいはシェル部材としての振動モードが顕著である。固有振動数については, 縦置き状態の高レベル用容器の1次で約50Hz, 縦横両状態にお

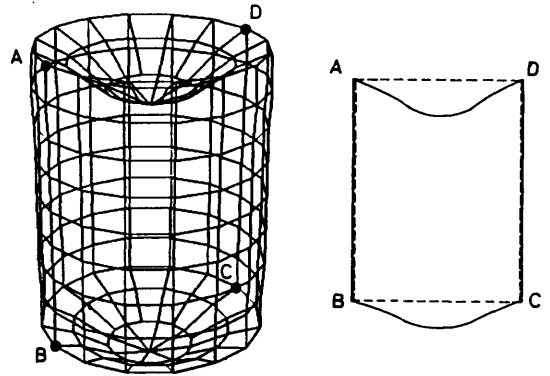


Fig. 8 Second mode of the cask for int. level waste in vertical position

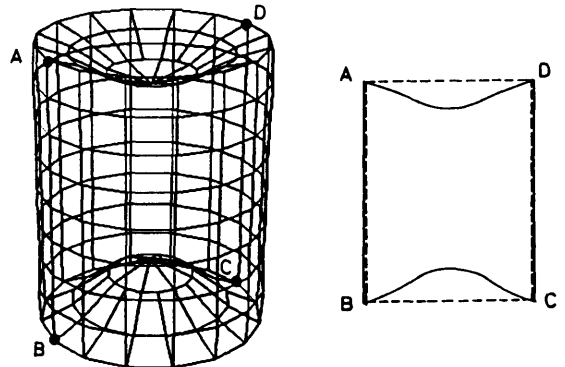


Fig. 9 Third mode of the cask for int. level waste in vertical position

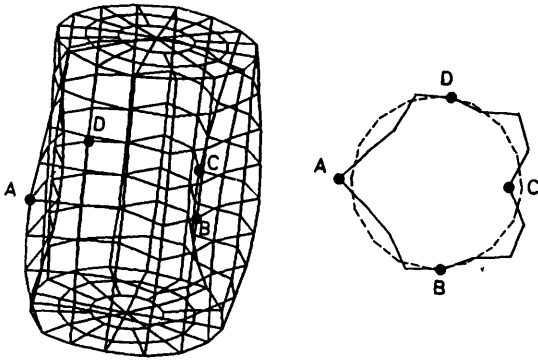


Fig.10 Third mode of the cask for low level waste in vertical position

ける低レベル用容器の1次で約90Hzであるが、それら以外はすべて100Hz以上となっている。

### 2.3 近似計算値との比較

輸送容器の固有振動数を求める際に、梁あるいは板等の単純な構造についての理論式を用いる場合が多い。したがって、この理論式から求めた固有振動数の近似値が、有限要素法による計算値とどのような関係にあるかを知っておくことが、容器の安全性判断のために必要となる。本報告の振動モードに関連する固有振動数  $f_n$  の計算式を次に示す。

一様断面梁の横振動については<sup>1)</sup>

$$f_n = \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EIg}{\gamma A}} \quad (1)$$

ここで、 $L$  = 長さ、 $E$  = ヤング率、 $I$  = 断面2次モーメント、 $\gamma$  = 単位体積の重さ、 $A$  = 断面積、 $g$  = 重力の加速度、 $\lambda$  = 定数 (片持梁の1次振動の場合 1.875、両端単純支持梁の1次振動の場合  $\pi$ ) である。

一様円形断面棒の捩れ振動については<sup>1)</sup>

$$f_n = \frac{\lambda}{2\pi L} \sqrt{\frac{Gg}{\gamma}} \quad (2)$$

ここで、 $G$  = せん断弾性係数、 $\lambda$  = 定数 (1端固定他端自由の1次振動の場合  $\pi/2$ )、その他は(1)式に同じである。

一様板厚円板の撓み振動については<sup>2)</sup>

$$f_n = \frac{ct}{4\pi r^2} \sqrt{\frac{Eg}{3(1-\nu^2)\gamma}} \quad (3)$$

ここで、 $\nu$  = ポアソン比、 $t$  = 板厚、 $r$  = 円板の半径、 $c$  = 定数 (周辺単純支持の1次振動の場合 4.977、周辺固定の1次振動の場合 10.216)、その他は(1)式に同じである。

これらの式に、ここでの計算対象である輸送容器の寸法および材料定数を代入して固有振動数を求め、対応する振動モードの有限要素法による計算値と比較すると Table 2 のようになる。梁の曲げ変形の振動モードの場合には、近似計算値は有限要素法による計算値より2~3倍の高い値を示している。これは、梁についての計算式には円筒部シェルの局所的な変形の影響が含まれていないからである。シェルの局所的な変形がほとんどない捩れ振動モードの場合には両者の計算値はかなり近い値を示している。蓋部あるいは底部における円板の撓み振動モードの場合には、周辺が支持と固定とのそれぞれについての理論計算値の間に有限要素法による計算値がある。これは、容器の蓋部あるいは底部は周辺が回転弾性支持の円板となっているためである。

以上のことから、梁の曲げモードの理論計算式から

Table 2 Comparison of natural frequencies calculated by theoretical equations and finite element method

Cask Type	Position	Mode No.	Mode Type	Eq. (Hz)	FEM (Hz)
High	V.	1st	B.Canti.	97	50
Int.	V.	1st	B.Canti.	336	101
High	H.	1st	B.Simp.	272	125
High	V.	2nd	T.Canti.	185	166
Int.	H.	1st	B.Circ.	73(s.s.)	124
				150(c.)	
Low	H.	1st	B.Circ.	78(s.s.)	91
				160(c.)	

Eq.=Values calculated by eq.(1) ~ (3)  
 FEM=Values calculated by finite element method  
 B.Canti.=Bending of cantilevered beam  
 B.Simp.=Bending of simply supported beam  
 T.Canti.=Twisting of cantilevered bar  
 B.Circ.=Bending of circular plate  
 s.s.=Simply supported edge  
 c.=Clamped edge  
 Int.=Intermediate  
 V.=Vertical  
 H.=Horizontal

輸送容器の固有振動数を算定する場合には、かなり高めの値を得る可能性があるといえる。また、蓋部あるいは底部の撓みモードについては、理論計算式から周辺支持および周辺固定の場合についての値をそれぞれ求め、両者の中間の値からその固有振動数を推定することができる。

### 3. 圧壊強度

放射性廃棄物を運搬中の船舶の事故等によって、輸送容器が海中に没した場合を想定すると、放射線の漏洩および拡散の見地から輸送容器が壊れる水深すなわち圧壊強度を検討しておく必要がある。ここでは、構造および外力の対称性を考慮して全体構造の $\frac{1}{8}$ をFig. 11に示すようにモデル化した。要素数は各レベル用容器とも108である。外力条件として、各面に垂直な一様外圧を加えた。

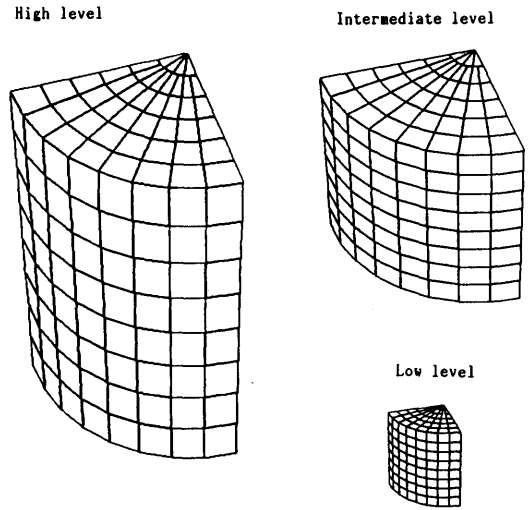


Fig.11 Mesh arrangements for calculation under external pressure

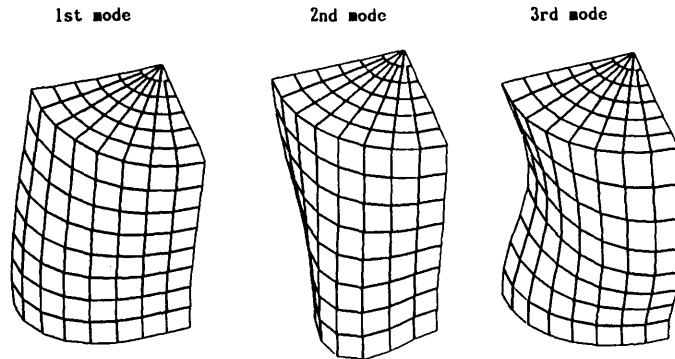


Fig.12 Buckling modes of the cask for high level waste

#### 3.1 弾性座屈解析

材料定数として、ヤング率206GPa、ポアソン比0.3を用いて、まず弾性応力解析を行った。各レベル用容器とも、最も応力値の大きい個所は蓋部の中央外側表面であり、その部分の等価応力が降伏応力に達するときの外圧は高、中、低各レベル用容器についてそれぞれ49.8, 1.22, 0.140MPaであった。

つぎに座屈解析を行ない、各容器について3次までの座屈圧力と座屈モードを求めた。Fig. 12に高レベル用容器についての座屈モードを示す。いずれも円筒

部の変形モードであり、1次では断面が楕円状に変形している。座屈圧力は1次から順に4, 11, 12 GPaであり、いずれも降伏開始時の圧力よりかなり大きい。中レベル用容器の座屈モードをFig. 13に示す。1次では蓋部の変形であるが、2および3次では円筒部の変形となっている。1次から3次までの座屈圧力はそれぞれ69, 71, 151MPaであり、やはり降伏開始時の圧力よりかなり大きい。Fig. 14に低レベル用容器についての座屈モードを示す。いずれも円筒部の変形モードであるが、板厚が相対的に薄いため波数の多い変

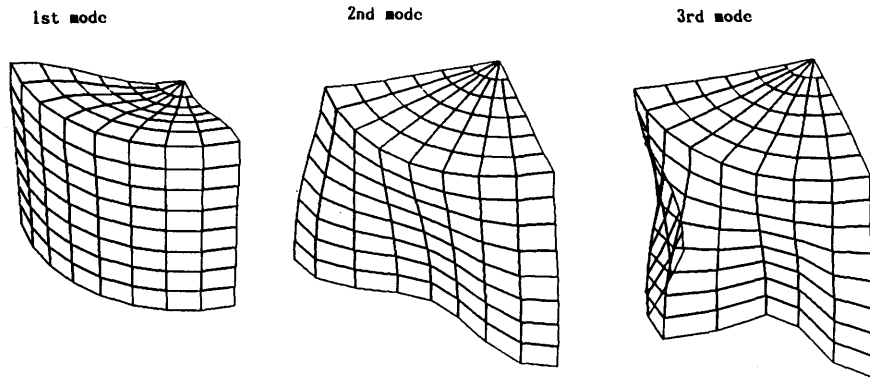


Fig.13 Buckling modes of the cask for int. level waste

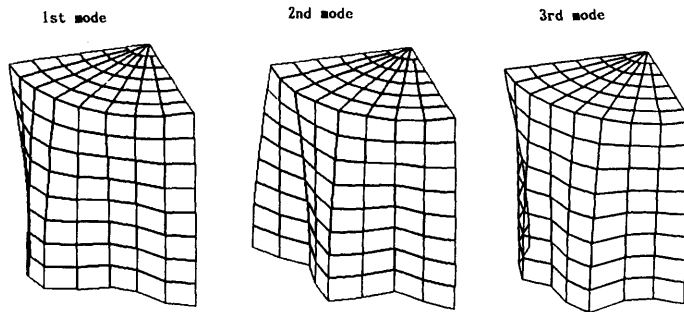


Fig.14 Buckling modes of the cask for low level waste

形となっている。座屈圧力は1次から順に0.091, 0.141, 0.298MPaであり、降伏開始時の圧力に比べて、1次では小、2次ではほぼ同じ、3次では大となっている。

低レベル用容器の座屈は降伏開始より小さい圧力で生じているが、高、中レベル用容器における座屈圧力は降伏開始時の圧力よりかなり高い。したがって、この後者の場合の圧壊は、材料の塑性化の影響によって前述の座屈圧力より小さい圧力で生ずることが考えられる。そこで、材料の塑性化を考慮に入れた解析を次に行った。

### 3.2 弾塑性大撓み解析

Fig. 15に示すような3本の折れ線で表される応力とひずみの関係を用いて大撓み解析を行った。高レベル用容器についての圧力と変位の関係をFig. 16に示す。変位計のシンボル図の位置における矢印方向の変位量を横軸として、外圧を縦軸としている。圧力が100MPa

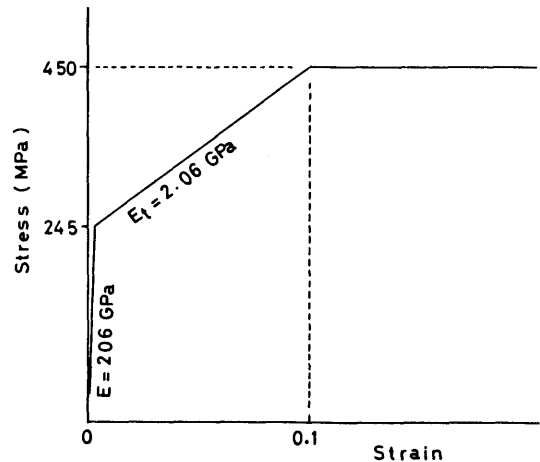


Fig.15 Stress-strain relationship for non-linear calculation

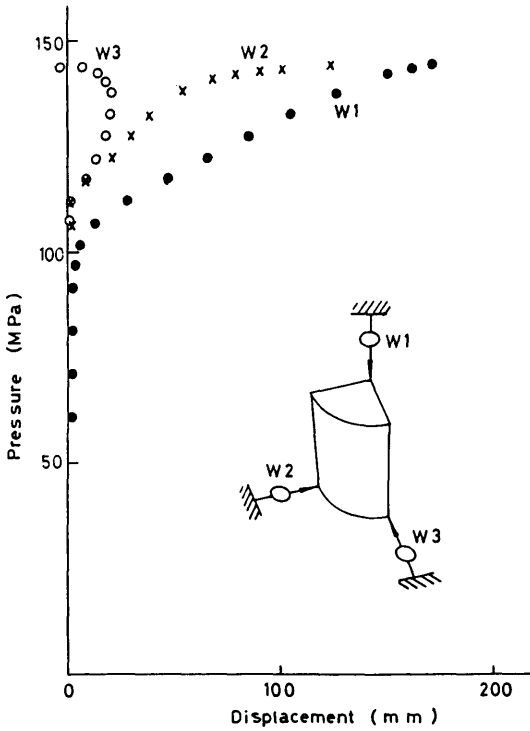


Fig.16 Pressure-displacement relationship of the cask for high level waste

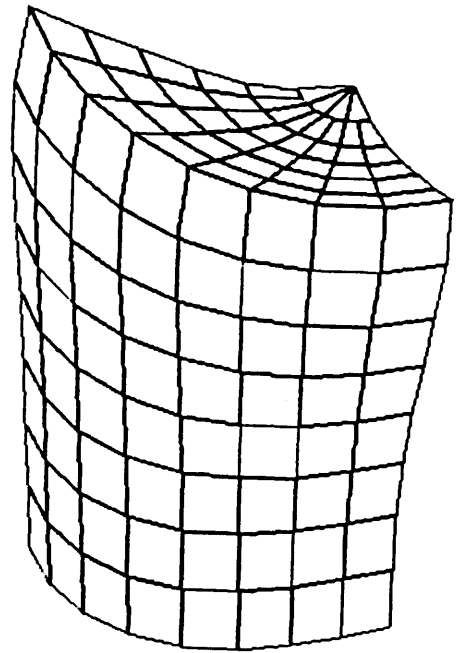


Fig.17 Collapse mode of the cask for high level waste

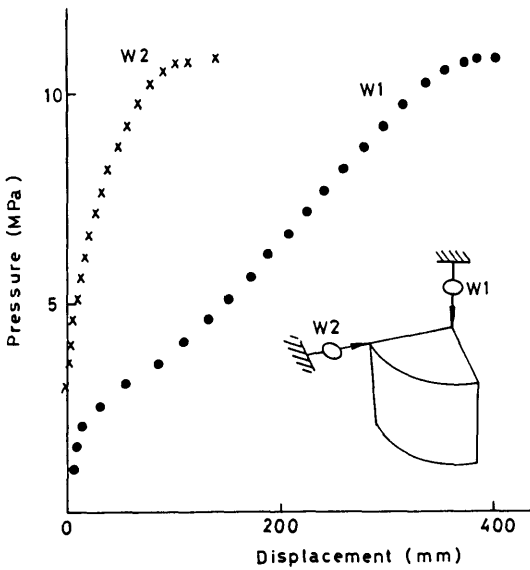


Fig.18 Pressure-displacement relationship of the cask for int. level waste

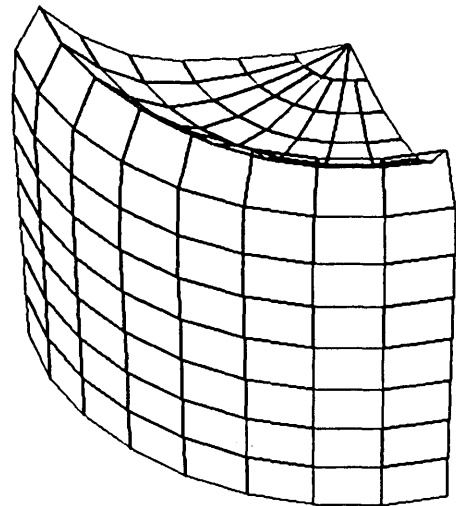


Fig.19 Collapse mode of the cask for int. level waste



程度を越えると変形が増大し、最終的には139MPaの外圧によって圧壊した。そのときのモードは Fig. 17 に示すように、蓋部の撓みとともに円筒部断面が楕円形に変形している。これは弾性座屈解析における1次モードと類似している。

中レベル用容器についての圧力と変位との関係を Fig. 18 に示す。蓋部の撓みは圧力が2MPaを越えるとその変化率が增大するが、10MPa程度の圧力までその増大した変化率をほぼ保ち、最終的には10.5MPaで圧壊した。そのときの変形は、Fig. 19 に示すように弾性座屈解析の1次モードと同じ蓋部の撓みモードであるが、円筒部上端も内側へ変位している。低レベル用容器についての圧力と変位との関係を Fig. 20 に示す。蓋部の撓みが相対的に大きい、圧壊状態に近い圧力における変形の急激な変化は蓋部ではなく円筒部に生じていることがわかる。圧壊は0.091MPaの圧力で生じた。そのときの変形モードを Fig. 21 に示すが、これは弾性座屈解析における1次モードと同じといえる。

以上の弾性解析および弾塑性解析で得られた外圧の値をまとめると Table 3 のようになる。低レベル用容器の場合のように、座屈が弾性状態で生じたときには、そのときの圧力を圧壊圧力とみなすことができる。しかし、高、中レベル用容器の場合のように、弾性座屈圧力計算値が降伏開始時の圧力よりもかなり大きいときには、材料塑性化の影響を考慮した大撓み計算が、

容器の圧壊強度を求めるために必要となる。ただし、この場合にも圧壊モードは弾性座屈計算の1次モードと同じであるといえる。

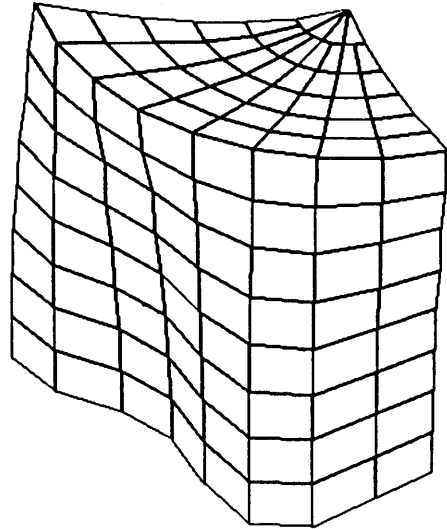


Fig.21 Collapse mode of the cask for low level waste

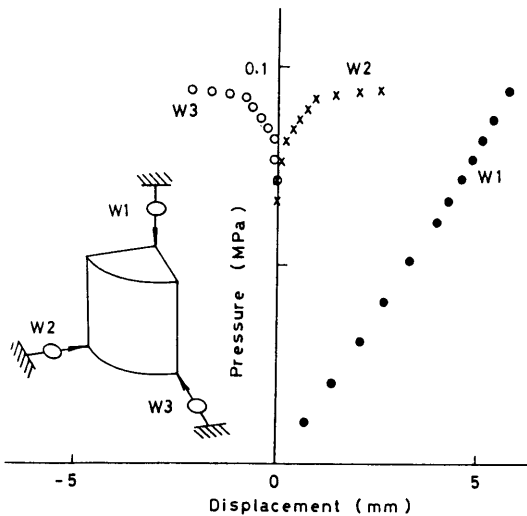


Fig.20 Pressure-displacement relationship of the cask for low level waste

Table 3 Critical values of external pressure

(Unit=MPa)

Cask Type	High Level	Int. Level	Low Level
Init. of Yield	49.8	1.22	0.140
Buckling	1st	4020	69
	2nd	11000	71
	3rd	12000	151
Collapse	139	10.5	0.091

Init.=Initiation

#### 4. あ と が き

高, 中, 低各レベルの放射性廃棄物輸送容器を簡略化した計算モデルについて, 有限要素法を用いた数値解析によって, 固有振動と圧壊強度をそれぞれ検討した。振動および座屈のいずれの場合にも1次モードが強度面から最も重要であるが, 拘束の仕方によっては他の次数のモードが重要になる場合もある。そのことを考慮して本報告ではそれぞれについて3次までの結果を示した。得られた主な項目は次のようになる。

- (1) 曲げモードの固有振動数を梁についての理論計算式から求める場合には, かなり高めの数値を得る可能性がある。
- (2) 中, 低レベル用容器では, 蓋部あるいは底部の撓み振動が顕著であるが, この振動数は円板の理論計算式から推定することができる。
- (3) 容器の圧壊強度すなわち容器が壊れる外圧の大きさは, 比較的剛性の小さい低レベル用容器では弾性座屈解析から求められるが, 剛性の大きい高, 中レ

ベル用容器では弾塑性大撓み計算を行なって求める必要がある。

- (4) 弾塑性大撓み計算から求められる圧壊モードは, 弾性座屈解析の1次モードと同じである。

放射性廃棄物輸送容器の構造寸法は未だ確定していないが, その詳細設計あるいはその後の安全審査にあたって本報告は参考になると思う。

本報告の有限要素法による計算は船舶技術研究所の中央電子計算機 FACOM M-180II AD を用いて行なった。また, 本研究は科学技術庁の原子力試験研究費によるものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本機械学会編: 機械工学便覧 (力学), 日本機械学会, (1970).
- 2) W. D. Pilkey, P. Y. Chang: Modern Formulas for Statics and Dynamics, McGraw-Hill, (1978).