

コールドターホール型原子炉容器の応力解析

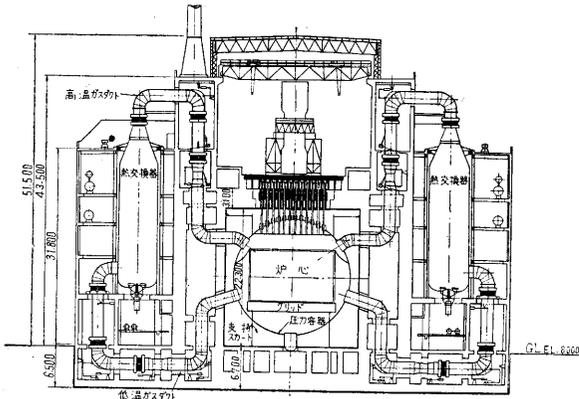
坪井善勝・秋野金次・川股重也・鄭 瑠

1. はしがき

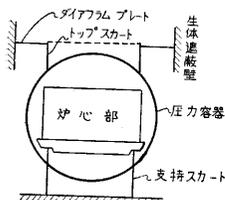
コールドターホール型発電炉の輸入に当たって、その耐震性を頂点とする技術的諸問題が、わが国独自の立場から検討されてきた。

この型の原子炉が採用している炉容器は、その規模からいっても、構成の複雑さからいっても、わが国の容器構造の分野では未経験のものであり、さらに内容物が放射性物質を含むことから、運転状態および地震時における高度の安全性を確保しなければならない、という立場から、合理的な設計方針を立てることと、これを裏付ける精度の高い応力解析が要求された。

日本原子力発電・地震対策委員会の活動の一端として上記の要求に応えるべく、圧力容器とその支持構造に関する応力解析を行なったので、その概略と問題点を述べよう。



第1図 原子炉全体図



2. 容器構造と応力解析の主題

原子炉容器は第1, 2図に示すように、グラファイトブロックを組み合わせた炉心部を支持する円筒殻（これを支持

スカートという）とこれの上と交叉して炉心全体を包む完全な球殻の圧力容器より成り、圧力容器の直径が約 19m、支持スカートの直径が約 13m である。支持スカートに支えられる炉心部の

重量は約 2500t、圧力容器の自重が断熱材を含めて約 1600t である。圧力容器の頂部には、燃料棒、制御棒の操作を行なうスタンドパイプが取り付けられ、重量は約 300t である。容器の周囲は放射線を遮断するため、円筒形の厚いコンクリート壁、生体遮蔽壁でかこわれている。

圧力容器下方の4本のダクトから送り込まれた冷却用炭酸ガスは炉心を通り、熱せられて上部の4本のダクトより熱交換器に送られる。

圧力容器は完全な球殻であるから、14.7 気圧という冷却ガスの内圧を受けても一応曲げを伴わない面内だけの応力、いわゆる膜応力（この場合は一様な引張り力）だけで対抗できる。しかしこの圧力容器を支えている支持スカートが相当に剛なものであって、内圧による球殻の自由膨脹を拘束するため、その接合部には相当の曲げ応力が発生することが予想される。

また 2500^t の炉心重量は支持スカートの軸方向圧縮力によって問題なく支えられるとしても、圧力容器の自重とスタンドパイプの重量は膜応力のみでは支持スカートに伝えることができない。圧力容器は支持スカートと約 40° の角度をなして接合されているから、接合部分の力の伝達にはかなりの曲げ応力が伴うはずである。支持スカートは、圧力容器の支持体としては、常時の場合も地震時にも、径が大きいほど曲げ応力の発生を少なくして有利であるが、一方炉心構造の支持体であることが、径の大きさを制限し、この程度の交角をよぎなくされる。

熱応力については、圧力容器の内部は相当高温になるが、クリープを防ぐために容器の温度を常に 200°C 以内に抑えるように熱遮蔽を施してある。支持スカートは、圧力容器に接する上部では高温に、基盤に接する下部では常温近くになる。この間の温度勾配をなるべく小さくするように thermal radiation pocket と呼ばれる部分を設け、さらに断熱材を施してあるが、圧力容器との接合部および基盤よりの立上りの部分には、ある程度の熱応力が生じることが予想される。

以上が運転時における応力状態の大体の特徴である。地震に対する原子炉全体の安全性の目標は

- (1) 地震時に放射能に対して周囲の人々、ならびに従業員の安全を確保する。
- (2) 修理が困難な部分、および破損した場合公衆の安全に危険をもたらす部分に対しては、十分な強度と

信頼性を持たせる。

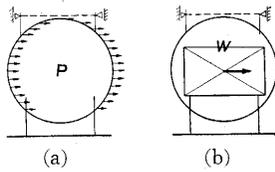
ことに置かれ、設置点（東海村）の地震震度期待値、地盤特性、動力学解析等を検討した結果、原子炉全体に対する耐震設計の方針が定められた。その中で原子炉の中心部（生体遮蔽の内部）に対する要求は

- 1) 日本の建築法規に定められた値の3倍の水平震度すなわち $k=0.6$ (各方向) と、その50%の鉛直震度に対して安全なように設計する。この場合上記の水平力、鉛直力は同時に作用するものとする。

ということであり、さらに压力容器の変位に対して次のような限界が定められた。

- 2) 压力容器と生体遮蔽との相対変位は、次の限度内に抑える。
 - (a) スタンドパイプ、ガスダクト等を破損させない。
 - (b) 燃料棒の装填に支障をきたさない。
 - (c) 制御棒操作に支障をきたさない。

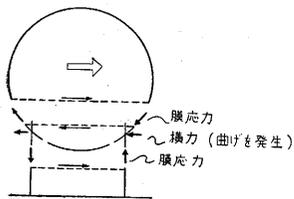
このような要求に対する構造上の技術的解答は、地震動に対して、全体がなるべく一体として動く剛な構造として設計することである。特に水平力に対する剛性の点から、压力容器は下部スカートで支持するだけでは不十分であり、上部においても生体遮蔽コンクリートに固定すること、このためにはトップスカートを設けることが考えられた。トップスカートは1枚の環状プレートによって遮蔽壁に結合され压力容器の温度膨脹による上下方向および水平方向の移動に対して拘束を与えず、しかも地震時には確実に反力をとれるような工夫がなされている。



第3図 地震力

地震時の水平荷重は、大きく分けると炉心構造にかかる水平力（第3図(a)）と、压力容器壁に分布する荷重（第3図(b)）に分けられ、いずれも回転軸を含む一つの平面に対して逆対称の荷重である。

炉心部分に作用する水平力は、頂部を支持しない自立状態では、支持スカートの膜応力のみによって地盤に伝えられる。この時の支持スカートは一端を地盤に埋め込んだ片持梁と考えてよい。しかし自立時には支持スカートの膜変形によって压力容器が傾くので、上部の変位を



第4図 压力容器と支持スカートの接合部における膜応力の伝達

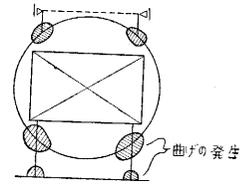
トップスカートによってくい止めることになる。この際には上部反力と釣り合う力が压力容器を伝わって上方に流れ、その経路の折れ曲がりに相当する压力容器—支持スカートの接合部に、複雑な曲げ

応力が発生する。

压力容器の壁体にかかる分布水平力は、自立の場合一応球殻の膜応力で下方に伝えられて行くが、支持スカートとの接合部においては約40°の交叉角があるために、球殻の膜応力が円筒殻の膜応力で支えられる形式が成立せず、面に垂直な横力が発生し、曲げ状態が支配的となる（第4図）。

この曲げによる応力は非常に大きなもので、これに伴う接合部近傍の、局部変形による上部の剛体的な傾きも大きいものになるが、トップスカートを支持して、上部の変位を阻止すると、上述の曲げ応力は、上部反力による曲げ応力と打ち消し合って、非常に小さな値となる。

このように、常時および地震時の各種の荷重によって球殻と円筒殻の交叉部分に曲げの状態が発生するが、球殻と円筒殻の力学的特性として、境界付近に生じた曲げ応力は、境界を離れると急激に減衰して非常に局部的なものに限定される。したがって曲げの発生する個所としては第5図に示すように局部的なもので、これらの部分を除けば、全体的に膜応力状態が成立していると考えてよい。一般に膜状態における応力度は非常に小さいものであるから

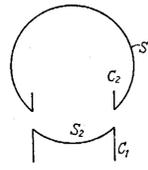


第5図 曲げ応力の発生する領域は局部的なものに限定される（斜線部分）

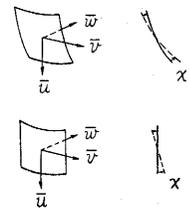
問題は曲げ応力の発生する個所、特に大きい曲げの予想される压力容器—支持円筒の接合部分の曲げの状態をいかに把握するかにしぼられてくる。応力解析の課題としては、設計条件に対してこの接合部の応力状態を正確に定め、提案された容器の板厚で十分な強度が保証できるか、また全体の変形が要求される限度内に納まり、所期の剛性が確保できるか、を検討することである。

3. 压力容器—支持スカート接合部の連続条件

接合部においては第6図のように、2つの球殻 S_1 、 S_2 と2つの円筒殻 C_1 、 C_2 計4個のシェルが集まって



第6図 シェル各部分の名称



第7図 変位の定義

いる。各荷重状態を通じて、この接合部分で各シェルの端部応力が力の釣合を満たすと同時に、それらの応力状態によって生じる変位が、連続していることが必要であ

り、これが変形の連続条件である。

球形殻および円筒殻の変位状態は鉛直方向変位 \bar{u} 、水平面内で円周に対して接線方向の変位 \bar{v} 、同じく法線方向の変位 \bar{w} および子午面内における回転角 χ の4個のパラメータで表わされ(第7図)、各部分が剛に接合されると仮定した時に、変位状態が接合部で連続するためには一般に次の12個の条件式を満足せねばならない。

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_{s1} - \bar{u}_{s2} &= 0 \\ \bar{u}_{c1} - \bar{u}_{c2} &= 0 \\ \bar{u}_{s2} - \bar{u}_{c2} &= 0 \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} \bar{v}_{s1} - \bar{v}_{s2} &= 0 \\ \bar{v}_{c1} - \bar{v}_{c2} &= 0 \\ \bar{v}_{s2} - \bar{v}_{c2} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{w}_{s1} - \bar{w}_{s2} &= 0 \\ \bar{w}_{c1} - \bar{w}_{c2} &= 0 \\ \bar{w}_{s2} - \bar{w}_{c2} &= 0 \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} \chi_{s1} - \chi_{s2} &= 0 \\ \chi_{c1} - \chi_{c2} &= 0 \\ \chi_{s2} - \chi_{c2} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

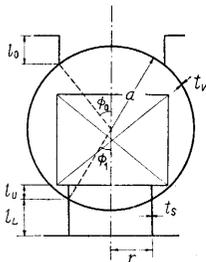
これが連続条件式であり、この外に釣合条件として $\Sigma M = 0, \quad \Sigma H = 0$

(M は各シェル端部の回転軸を含む面内の曲げモーメント、 H は各端部応力の水平方向分力)の2つが要求される。

各種荷重に対して面内力だけによる力の釣合から膜応力状態が定まり、外力に対する釣合形式が一応表現されるが、一般にこの膜応力状態では、球殻と円筒殻の接合点において応力の不連続を生じることは前述したとおりであるが、さらに上記の12個の連続条件を満足せず、各部分の変位状態に違いを生じていることになる。

問題の曲げ応力は、四つのシェルに対する、曲げ状態(曲げの一般解で表現される)を膜応力状態に加え合わせて曲げの一般解に含まれる計14

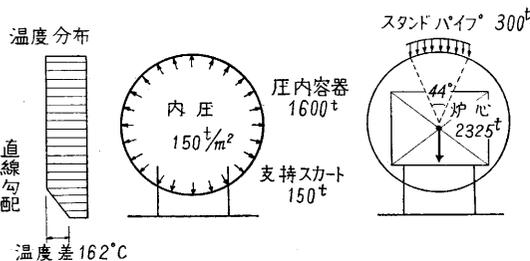
個の積分定数を、上の14個の条件式を満足するように決めることによって定められる。常時応力の場合には、軸対称問題となって条件式は8個に減少するが、いずれにしても、4個のシェルを完全な連続条件の下に解くことは、非常に混み入った計算を必要とする。



第8図 容器各部の寸法

ここでは、計算の詳細に立ち入ることは避け、求められた結果を検討することにする。

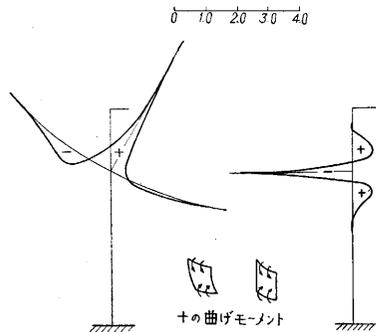
4. 常時応力



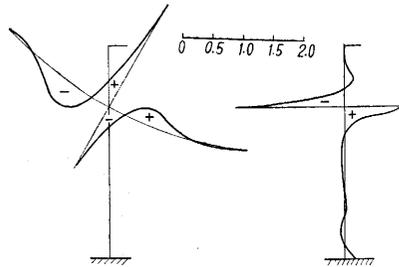
第9図 荷重および温度条件

初めに設計案Aについて常時応力を解析した結果を見よう。この案による諸次元は大体次のとおりである。

- 圧力容器の半径: $a = 9.15\text{m}$
- 同 厚さ: $t_v = 7.6\text{cm}$
- 支持スカートの半径: $r = 4.58\text{m}$
- 同 厚さ: $t_s = 5.1\text{cm}$
- 同 長さ(上部): $l_u = 1.52\text{m}$
- 同 長さ(下部): $l_L = 3.96\text{m}$
- 圧力容器と支持スカートの接合位置: $\phi_1 = 30^\circ$
- 同 交角: $90^\circ - \phi_1 = 60^\circ$



(a) 内圧による圧力容器—支持スカート接合部の縦方向曲げモーメント



(b) 圧力容器自重による縦方向曲げモーメント(単位は(a),(b)ともt/m/m)

第10図

これに対する荷重条件と温度勾配として与えたものは第9図に示したとおりである。

上の条件について解析した結果、たとえば内圧に対する縦方向の曲げモーメントの分布は第10図(a)のように、また圧力容器の自重による曲げモーメントは、第10図(b)のようになる。

これより解るように、接合部に生じる曲げ応力は、接合

第1表 圧力容器—支持スカート接合部の定常時における縦方向応力度(容器内側表面)

単位: kg/cm²

定常時	荷重部分	合計					総計
		内圧	圧容重量	炉心重量	スタンダパイプ重量	熱	
膜応力	S ₁	900	-136	—	-27	—	737
	S ₂	900	10	—	—	—	910
	C ₁	—	-110	-162	-21	—	-293
	C ₂	—	—	-162	—	—	-162
曲げ応力	S ₁	315	198	-24	37	50	586
	S ₂	323	-103	-25	-20	137	312
	C ₁	-889	225	69	45	-704	-1257
	C ₂	-767	-417	59	-80	-479	-1684

点を離れると、急激に減少して、球殻では表面の距離で3mも離れると問題にならない程度の大きさである。も

もちろんこの種の曲げ応力のほかに、膜応力は全体的に存在し、特に内圧は球殻に一樣な引張り応力を生じさせており、これはかなり大きい値となる。

各荷重によって、接合部に集まる各シェル端部に生じる縦方向応力度を第 1 表に示した。これより運転時には、膜状態、曲げ状態ともに内圧が最も大きい応力を生じせしめることが解る。これは压力容器の性質からいって当然であろう。最大応力度は C_2 (支持スカートの压力容器内部にある部分) の端に生じ、 1845kg/cm^2 の圧縮力である。これは炉心重量による圧縮力と、部分的な曲げモーメントの作用が加算されたもので、これに地震時応力が加わることを考えると、過大な応力を生じているといわなければならない。

この案では、第 1 に板厚が発生する曲げに対して薄過ぎることと、第 2 に支持スカートの径が小さいことが指摘された。特に支持スカートの径が小さいことは、地震時の応力、変形を大きなものにするから適当でない。この設計案は結局採用にならなかった。

5. 地震時応力

設計案 B では、A 案に比べて板厚が厚く、支持スカートの径が大きく、さらに 2 で述べたトップスカート方式を採用している。その諸次元は次のとおりである (第 8 図参照)。

- 压力容器の半径: $a = 9.45\text{m}$
- 同 厚さ: $t_V = 8.00\text{cm}$
- 支持スカートの半径: $r = 6.18\text{m}$
- 同 厚さ: $t_S = 6.35\text{cm}$
- 同 長さ(上部): $l_U = 1.68\text{m}$
- 同 長さ(下部): $l_L = 3.66\text{m}$
- 压力容器支持スカートの接合位置: $\varphi_1 = 40.9^\circ$
- 同 交角: $90^\circ - \varphi_1 = 49.1^\circ$
- トップスカートの接合位置: $\varphi_0 = 44.1^\circ$
- 同 半径: $a \sin \varphi_0 = 6.55\text{m}$
- 同 厚さ: $t_t = 2.54\text{cm}$
- 同 長さ: $l_0 = 2.70\text{m}$

これに対する地震荷重として、水平震度 0.6 に対して次の値が与えられる (第 3 図参照)。

压力容器壁に分布する水平力 (P 荷重) ……

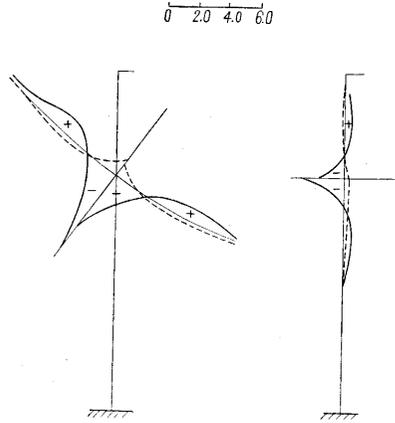
$$P = 0.0842\text{kg/cm}^2 \text{ (全荷重} = 830\text{t)}$$

炉心部に働く水平力 (W 荷重) ……

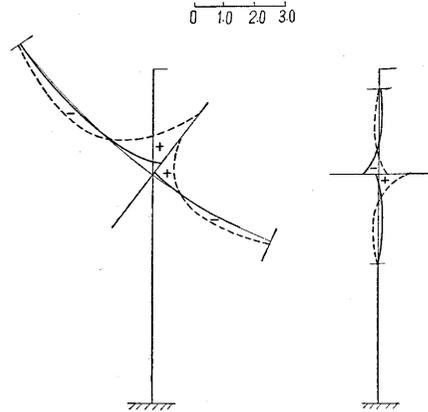
$$W = 1560\text{t} \text{ (W 荷重は支持スカート上端より } 4.78\text{m} \text{ の点に作用する)}$$

この場合の P, W 荷重に対する曲げモーメントの分布をトップスカートを支持した場合と、上端自由の場合に分けて示したのが、第 11 図 (a), (b) である。

また両荷重による各シェルの接合端の応力度を第 2 表に示した。



(a) P 荷重による縦方向曲げモーメント 単位: t m/m 実線はトップスカートを支持しない時、点線はトップスカートを支持した時



(b) W 荷重による縦方向曲げモーメント 単位: t m/m 実線はトップスカートを支持しない時、点線はトップスカートを支持した時

第 11 図

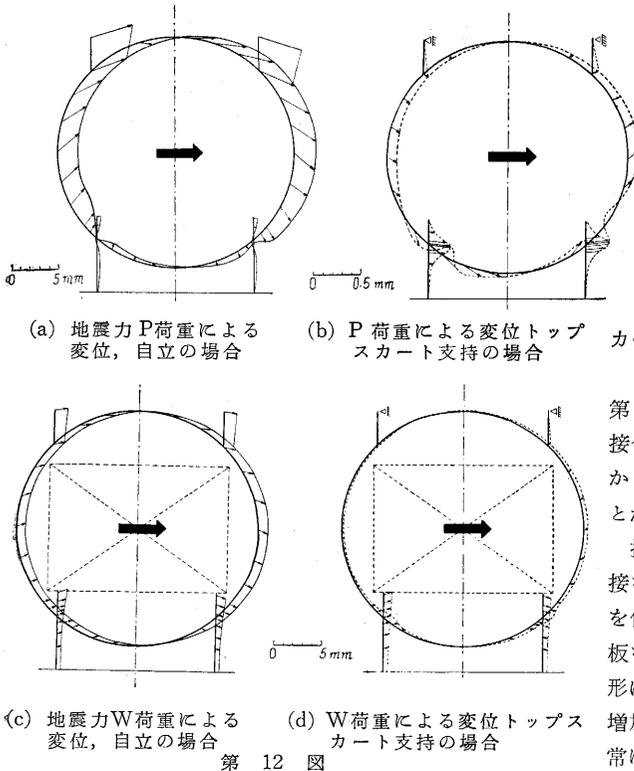
第 2 表 地震力 (水平) による压力容器—支持スカート接合部の縦方向応力度 単位: kg/cm^2 (ただし、地震力の方向に対して最も上手 (かみて) にある点の値, 下手 (しもて) では符号が反対となる)

地震力 (水平震度 0.6)	部分	荷重 P		荷重 W		P+W	
		自立	支持	自立	支持	自立	支持
S ₁	内	-466	98	43	213	-423	311
	外	631	-139	-39	-272	592	-411
S ₂	内	-399	92	9	157	-390	249
	外	432	-100	-11	-171	422	-271
C ₁	内	-374	99	111	254	-263	352
	外	553	-142	153	-57	705	-199
C ₂	内	-255	84	62	164	-193	248
	外	254	-84	202	100	456	16

{内…容器の内側表面の応力度
 {外… " 外側表面の応力度
 {自立…トップスカートを支持しない場合
 {支持… " 支持した場合

トップスカートを支持した時の支点反力は
 P 荷重に対して $R = 513 \text{ t}$ (全荷重の62%)
 W " " $R = 155 \text{ t}$ (" 10%)

である。



第 12 図

この図と表から解るように、P 荷重について、上端が自由の場合には大きな曲げ応力が発生しているが、トップスカートを支持すると、反対方向の小さな応力しか残らないことになる。しかし W 荷重に関しては、上部を支持した時の方が大きい曲げを生じている。この原因については、2で述べたとおりである。結局 P, W 荷重を同時に考えると、応力度の絶対値としては、上端が自由の場合と支持した場合ではあまり大きな差がない。

次に、地震荷重による変位の模様を第 12 図(a)~(d)に示した(この図では支持スカート下端の曲げ変形は記入してない)。これらの変位図で、圧力容器—支持スカートの接合部で複雑な変位曲線が表われているが、これはこの部分の曲げ応力による変形である。上端自由の場合に、この部分の曲げ変形によって、上部が傾く様子がよく解る。この時の圧力容器天頂の水平変位は、P, W 荷重を合わせて約 6 mm である。トップスカートを支持することにより、天頂の変位は約 0.1mm となり、またこの場合の最大水平変位は圧力容器の中間部分にあるがこれも約 0.5mm に抑えられ、トップスカートを支持することによって、所期の剛性が得られることを示してい

る。

6. 接合部の局部応力に対する処置

容器ばかりでなく、諸種の点を検討した結果、前項で

第 3 表 地震時の圧力容器—支持スカート 述べた設計
 接合部における縦方向最大応 計画Bを
 力度 単位: kg/cm^2 採用する
 ただしトップスカート支持 ことに決

地震時	部分	定常時	地震力		合計
			鉛直震度 0.3	水平震度 0.6	
震	S ₁	1550	93	411	2054
	S ₂	1636	-74	271	1833
	C ₁	-890	-126	-352	-1368
	C ₂	-691	31	-248	-908

に前掲の地震応力を加算すると、圧力容器—支持スカート接合部では、第 3 表に示す値となる。

この接合部応力が、各シェル部分の最大応力であるが第 10 図、第 11 図に見るように、曲げ応力のピークが接合点を中心としたごく狭い部分に限定されていることから、この部分に対して、局部的に強度を増加させることができるなら、合理的な行き方といえる。

接合部は応力が集中する個所であるから、ここでの溶接を避ける意味で、鍛造によってあらかじめ接合部の形を作り、交叉点よりある程度離れたところより、シェルの板を溶接する方式を採用している。このフォーミングの形は、ある程度任意にでき得るので、交叉付近で肉厚を増加すれば、曲げに対して応力度を減少させる意味で非常に効果的である。

この部分の応力分布と強度については、光弾性等の実験によって別の角度から検討されつつあるが、交叉部分の根もとで 20% の肉厚の増加を行なうものとし、単純な仮定のもとに計算すると、接合部に起こる地震時の応力度のピーク 2054 kg/cm^2 (第 3 表) は 1500 kg/cm^2 程度に抑えられるだろうと予想している。

7. おわりに

上述のような過程を経て、当初心配された炉容器の耐震性について、1) 支持スカートの径をなるべく大きくすること。2) トップスカートを設け、遮蔽壁に結びつけること。3) 接合部フォーミング部分の肉厚の増加等の設計上の手段により、応力の点でも、変形の点でも、不安のないものができ得ることが解析の上から明らかにされた。

最後にこの研究は日本原子力発電株式会社に設けられた原子炉地震対策委員会(委員長 武藤 清教授)解析小委員会の共同研究の一部として当研究室で行なわれたことを記し、あわせて関係者各位のご協力に厚く御礼申し上げます。(1960. 4. 18)