

## 原子力発電用コンクリート格納容器の基準について

伊 部 幸 美\*

## 1. ま え が き

鉄筋コンクリート (RC) で構築される原子力施設としては、使用済み燃料ピットのように容器としての機能をもつもの、原子炉建屋の一部のように二次格納施設としての機能をもつものなど特殊な場合もあるが、その大部分は生体遮蔽壁であるとともに機器・配管系を収納、支持する構造物であり、これらは現在のところプレストレストコンクリート (PC) とする必要性は認められない。しかし、内圧を考慮する必要のある容器、例えば原子炉容器や格納容器については諸外国ですでに PC 製のものが実用に供されて久しい。我が国では PC 原子炉容器の差し当たっての必要性はないが、格納容器の場合は以前から採用についての検討がなされ、現在いくつかの具体的な建設計画が出始めている。

ここでは行政上の立場から格納容器に要求される安全性と、これに関連する基準等の概要について述べる。

## 2. 原子炉格納容器

## 2.1 格納容器の機能

原子力発電所では炉心を冷却するための冷却水がなくなる事故 (冷却材喪失事故)、すなわち原子炉圧力バウンダリの破断のような最も重大な事態が起こった場合を想定し、これに対して種々の対策が講じられている。

まず、このような事故時でもさらに重大な事態に発展することがないように緊急に核反応を停止させ、かつ熱を除去して炉心の健全性を確保し、原子炉を安全に停止させるため、スクラム装置を始め非常用炉心冷却系、余熱除去系等熱除去のための複数の系統設備が設けられる。

しかしこの時、破断口からは放射性物質を含む高温高圧の蒸気が噴出することになるため、これを閉じ込めて外部に放散するのを防ぐ目的で格納容器が存在する。

さらに、内部に充満する蒸気の圧力や温度により格納容器の健全性を損なうことがないように内部に水を噴霧して圧力温度を下げるための格納容器スプレー系がある。

格納容器には配管等の多数の貫通部があり、事故と同時に隔離弁が閉じて格納容器バウンダリを構成することになるが、これらの貫通部 (弁) からは多少の漏洩があ

るため、その周辺を気密性のある空間部とし、漏れた気体をチャコールフィルターに通して放射性物質の除去を行い、安全を確認したうえで外部に放出する役割をもつ非常用ガス処理系が設けられている。

このように格納容器は冷却材喪失事故時に発生する圧力や温度等による荷重に耐え、他の諸設備と連携をとって放射性物質の外部への放散を防止するための重要な機能を要求されているものである。

## 2.2 格納容器の型

沸騰水型軽水炉 (BWR) では事故時に発生する蒸気を水中に導いてこれを凝縮させ、圧力と温度の低減をはかるための圧力抑制用プールを格納容器内に持つものに対し、加圧水型軽水炉 (PWR) では格納容器の空間部のみによってこれに対処するものが普通であり、当然その大きさや形状、発生する圧力温度の程度が異なる。

通産省では昭和 50 年から原子炉施設の改良および標準化をはかる作業を進めており、原子炉周辺の主要機器を始め格納容器についても標準となる形を定めている。PC 格納容器 (PWR 型 110 万 kW 級) もこの標準型の一つとなっている。

## 2.3 関連法規、指針

## (1) 電気事業法に関連するもの

電気事業法第 41 条では、電気工作物の設置の工事を行う場合は通産大臣の許可をうけなければならないとされ、それが省令で定める技術基準に適合しないものでないことと定めている。

技術基準を定める省令第 32 条には原子炉格納施設等として次のような主旨の要求事項がある。すなわち、①一次冷却システムの故障、損壊の際生ずると想定される最大圧力および最高温度に耐え、漏洩率が公衆に放射障害を及ぼすおそれがないこと、②圧力温度の上昇により安全性が損なわれないよう容器内に発生した熱を除去する装置、ならびにこの時発生する水素および酸素の濃度を抑制する装置 (水素濃度抑制系) を施設すること、③開口部には気密性のとびらを設け、配管の貫通部に隔離弁を設けること、などである。これらに対する具体的な設備の例としては、前述の格納容器の機能の項で示したとおりである。同省令第 9 条には材料および構造の規定があり、発電用原子力設備に関する構造等の技術基準 (告示

\* 通商産業省資源エネルギー庁原子力発電安全審査課

501号)に定められる規格に適合していることが要求されているが、同告示によれば材料として鋼材を使用した場合に限られてしまう。しかし省令第3条によれば通産大臣の認可をうけた場合は省令に定める規格によらず、特殊な設計によってもよいことになっている。

格納容器に関連し省令第3条を適用している例としては、MARKII型格納容器のうち原子炉建屋基礎中央部分の格納容器バウンダリを構成している底部コンクリートがこれに該当している。

PC格納容器の場合は、全体構造が特殊設計ということになるが、ライニングおよび貫通部分は省令に基づく技術基準が適用されると考えた方がよい。

なお告示501号は以前から改正案の検討作業が進められ、55年10月から改正告示が適用されることになった。これによれば格納容器は第二種容器と分類され、設計および運転状態ごとの鋼材の応力強さの限界、特殊な応力限界として支圧荷重、純せん断およびジェット力等に対する規定、格納容器支持構造物の規定など種々の新しい項目もとり入れられているので注意を要する。

#### (2) 指針に関するもの

発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針にも格納容器に対するいくつかの要求事項があるが、基本的には通産省令の内容と異なるものではない。

発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針には、その発電所で考慮すべき地震動(基準地震動 $S_1$ および $S_2$ )の策定方法などの規定があり、格納容器は耐震上の重要度が最も高いものに分類され、 $S_1$ 地震動に対して材料の降伏応力程度、 $S_2$ 地震動に対して過大な変形、亀裂等が生じ格納容器の機能に影響を及ぼすことがないことなどが要求されている。

### 3. コンクリート格納容器の基準作成の経緯

出力100万kW以上の大型の発電所では、冷却材喪失事故時に必要とする格納容器内のフリーボリウムが大きく、現状の設計では鋼製格納容器が非常に大型化することによって、耐震性や施工法および関連の構造物の設計上から建設が困難となる。したがって使用鋼材の板厚を厚くするか、高張力鋼を用いて小型化することによって対処することが考えられるが、一方、溶接施工上特殊な工法によらない場合は板厚に制限があり(技術基準上は38mm)、また高張力鋼の場合も技術的、経済的に難点があって、その使用例は諸外国においてもいまだない。

しかし以上のような設計は別に不可能なものではなく、技術面、経済面、工事期間など総合的に判断したうえで比較上の問題ではあるが、コンクリート格納容器

(CCV)の方が有利とされ、現在2~3の設置計画が具体的になっている段階にきており、以前から今後の大型PWR型格納容器の主流になるものと予想されていた。

また、CCVは前述のとおり法的には特殊な設計ということであるから安全審査にとっては個々のケースごとにその設計に対し特別の検討をしなければならず、設置する側にとってみれば設計の目安となるものがないため不便を感じることになる。

一方、PC関連では土木学会、建築学会、建設省告示等にそれぞれ設計、施工の指針または基準があるが、いずれも橋梁、建物などを対象としたものであり、格納容器にそのまま適用することはできない。格納容器を対象としたものとしては、米国のASMEを始め英国、仏国など海外ではある程度の基準が作成されているようであるが、これを借用するわけにもいかず、また我が国においては、土木学会原子力土木委員会のPC原子炉構造物設計施工要領(案)、建築学会構造標準委員会の原子力用コンクリート格納容器設計基準(案)等の検討があるが、いずれも正式に制定されるまでには至っていない。

このようなことから通産省では、昭和50年学識者19名の委員によって構成される「原子力発電用コンクリート容器技術基準検討会」を設置し、試設計、実験等の実施などに電力会社、関連研究所や企業の技術者多数の協力を得て基準案の検討を進めてきた。52年に中間案をとりまとめ、その後各種の実験を行ってその結果を反映させるための検討がなされたため長期間を要したが、54年11月最終案が完成の運びとなった。

### 4. 基準の構成とその概要

「原子力発電用コンクリート格納容器に関する技術基準」案はRCおよびPC構造について適用される。

全体は本文と解説からなり、本文は最も基本的な事項に限定し、多少定性的な表現にとどまる部分も多い。このため、本文のみによっては内容の正確な把握がなし得ないと考えられる事項については、その解釈の方法、具体的な内容を解説の中で定めているので、技術的に重要な内容はむしろ解説に盛り込まれていると考えた方がよい。

基準案全体は次の6章で構成されている。

第1章 主要な用語の定義をし、底部を構成する基礎部分およびライナーを含むCCV全体に適用されることなどの適用範囲についても規定している。

第2章 設計荷重の種類とその組合せ、各材料ごとの設計許容値、応力の算定、剛性評価等構造解析法の基本的内容および詳細設計手法などについて規定している。

第3章および第4章 RCおよびPCに関連する材料

## 設 計

と施工法について規定している。

第5章 ライナーの設計、製作、施工および検査に関して一括して規定しているが基本的には告示501号に準拠している部分が多い。なお貫通部など、コンクリート構造が荷重を負担しない部分については、告示501の格納容器の規格を適用する。

第6章 材料の試験、検査方法のほかに格納容器の健全性（耐圧、漏洩）を確認するための試験、検査についても定めており、耐圧試験では試験時内圧に対して弾性挙動することなどの確認をし機能上安全であることの評価を要求している。また、供用期間中の検査、点検およびPCについて緊張材の経年的変化の性状を把握するための確認試験等を要求している。

### 5. 確証実験

基準案の妥当性を確認するため、特に事故時+地震時の力学的特性と耐力およびコンクリート構造の熱応力に関する実験が行われた。実験の概要を図-1に示し、その結果の要旨について以下に述べる。

#### 5.1 面内せん断耐力

RC, PC シェル部の水平加力および内圧+水平加力実験結果によれば、膜引張力と面内せん断力とが組み合わせられた応力に対する耐力については、鉄筋の降伏から定まる耐力に内圧および有効プレストレス力による膜力を外力として加算して評価することが妥当であることが判明した。また鉄筋の降伏以前にコンクリートの破壊によって耐力が定まる場合があることから、耐力算定の上限值を設定する必要があることも明らかにされた。

水平力に対するコンクリート円筒体の変形性状は、最初のひびわれ発生から最大荷重に達するまでの変形が大きく、ダクタイルな破壊性状を示すことが特徴的である。

#### 5.2 円筒基部の面外せん断力に対する挙動

軸対称荷重（内圧）によって生ずる面外せん断力による円筒基部の破壊は、まず曲げひびわれが発生し、円周方向鉄筋が順次降伏してせん断ひびわれの発生およびそ

の進展に至り、最終的にせん断破壊するメカニズムが把握された。この場合の面外せん断耐力は円周方向鉄筋の降伏耐力に基づいて評価するのが安全側であることが明らかとなった。

#### 5.3 熱応力の評価

半球ドーム付き RC 円筒体による内圧と内圧+温度負荷の状態における破壊実験の結果、熱応力の存在は破壊耐力にほとんど影響を与えないことが確認された。

また、ひびわれ発生に伴う断面の剛性評価に関する実験によれば、通常時や試験時等において鉄筋に生ずる応力度程度では曲げ剛性、軸剛性がひびわれ発生前の弾性剛性の1/2程度に低下し、さらに鉄筋の応力度が降伏点近傍では1/3程度まで低下することが確かめられた。

RC 円筒体による温度負荷時の加圧実験によれば、膜引張と同時に曲げが作用するときの曲げ剛性は弾性剛性の1/5以下になると評価された。

### 6. 設計に関する基本的考え方

設計に関する基本的方針のうちいくつかの重要な点について以下に述べる。

#### 6.1 荷重および設計許容値

格納容器の設計にあたっては運転時、事故時等の多種多様の荷重に対処する必要があるが、これらの荷重の起こる確率や他の荷重発生との同時性などを考慮し、格納容器が荷重をうける状態によって次のように区分された。

すなわち、荷重状態Ⅰは発電所が通常の運転をしている状態での荷重であり、荷重状態Ⅱは気象荷重(台風等)を考慮した状態および試験時の状態であって、これらは長期荷重時の許容応力度設計に対応する。荷重状態Ⅲは地震時および事故時の荷重で、これは短期荷重時の許容応力度設計に対応する。また、荷重状態Ⅳは格納容器の安全評価上想定する状態(地震と事故との組合せ等)であって、終局強度設計に対応するものである。

地震荷重としては前述の耐震設計審査指針に従って評価することになる。また事故時の荷重としては冷却材喪

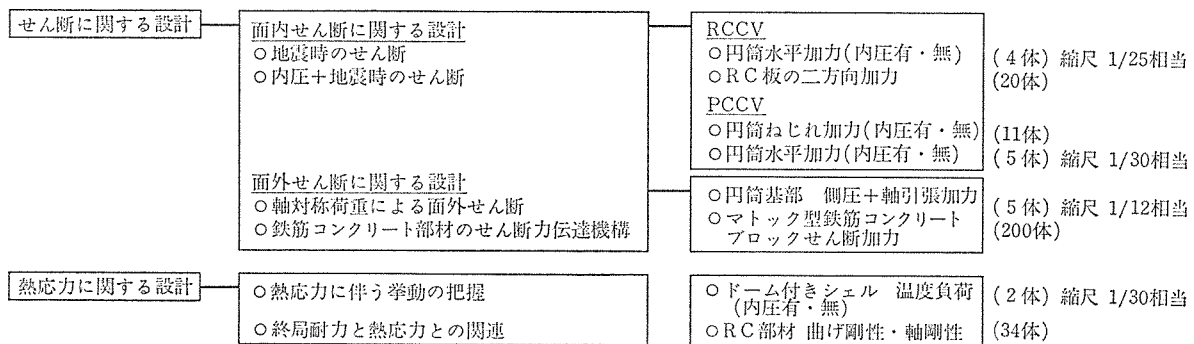


図-1 確証実験の実施

失事故時の現象の経時的变化を考慮し、短時間に収束する荷重（ジェット力等）と事故後長期間継続する荷重（内圧、熱等）とに区分している。

各荷重状態に応じた設計許容値の考え方は上述のとおりであり、これに基づいて各使用材料の設計許容値を定めている。コンクリートの場合は温度荷重を除いた外的荷重による応力を応力状態1とし、温度を含めた全荷重

による応力を応力状態2と分類して、後者は前者を割増した値を用いている。なお温度荷重以外にも二次的応力を生じさせる場合に対しては応力状態2の許容値および集中応力の取扱いに準ずる。荷重状態IVでは耐力評価の際の材料の強度特性に基づく制限値を設けている。

荷重とその組合せを表-1に、許容値を表-2に示す。

表-1 荷重の組合せと荷重係数

| 荷重状態号 | 荷重時名                     | 荷 重 係 数 |     |   |                |                |                |                |     |      |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                |                |       |  |  |
|-------|--------------------------|---------|-----|---|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-------|--|--|
|       |                          | D       | L   | F | P <sub>1</sub> | R <sub>1</sub> | E <sub>1</sub> | T <sub>1</sub> | S   | W    | P <sub>0</sub> | P <sub>2</sub> | R <sub>2</sub> | T <sub>2</sub> | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | E <sub>21</sub> | E <sub>22</sub> | R <sub>3</sub> | T <sub>3</sub> |       |  |  |
| I     | 1 通常運転時                  |         | 1.0 |   | 1.0            | 1.0            | 1.0            | 1.0            |     |      |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                |                |       |  |  |
| II    | 2 試験時                    |         | 1.0 |   |                |                | 1.0            |                |     | 1.0  |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                |                |       |  |  |
|       | 3 暴風時                    |         | 1.0 |   | 1.0            | 1.0            | 1.0            | 1.0            |     | 1.0  |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                |                |       |  |  |
| III   | 4 積雪時                    |         | 1.0 |   | 1.0            | 1.0            | 1.0            | 1.0            | 1.0 |      |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                |                |       |  |  |
|       | 5 S <sub>1</sub> 地震時     |         | 1.0 |   | 1.0            | 1.0            |                | 1.0            |     |      |                |                |                |                | 1.0            |                |                 | 1.0             |                |                |       |  |  |
| IV    | 6 L事故時                   |         | 1.0 |   |                |                | 1.0            | 1.0            |     |      |                | 1.0            | 1.0            | 1.0            |                |                |                 |                 |                |                |       |  |  |
|       | 7 S <sub>2</sub> 地震時     |         | 1.0 |   | 1.0            | 1.0            |                | (1.0)          |     |      |                |                |                |                |                | 1.0            |                 | 1.0             |                |                |       |  |  |
|       | 8 L事故時                   |         | 1.0 |   |                |                | 1.0            |                |     |      |                | 1.5            | 1.0            | (1.0)          |                |                |                 |                 |                |                |       |  |  |
|       | 9 J事故時                   |         | 1.0 |   |                |                | 1.0            |                |     |      |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                | 1.0            | (1.0) |  |  |
|       | 10 L事故+S <sub>1</sub> 地震 |         | 1.0 |   |                |                |                |                |     |      |                | 1.0            | 1.0            | (1.0)          | 1.0            |                |                 |                 |                |                |       |  |  |
|       | 11 L事故+暴風                |         | 1.0 |   |                |                | 1.0            |                |     |      | 1.25           | 1.25           | 1.0            | (1.0)          |                |                |                 |                 |                |                |       |  |  |
|       | 12 L事故+積雪                |         | 1.0 |   |                |                | 1.0            |                |     | 1.25 |                | 1.25           | 1.0            | (1.0)          |                |                |                 |                 |                |                |       |  |  |

ただし（ ）内の荷重は原則として考慮しなくてよい。

表-2 材料の許容応力度

コンクリートの許容圧縮応力度

| 荷重状態 | 応力状態1               | 応力状態2               |
|------|---------------------|---------------------|
| I    | 0.33 F <sub>c</sub> | 0.45 F <sub>c</sub> |
| II   |                     |                     |
| III  | 0.66 F <sub>c</sub> | 0.75 F <sub>c</sub> |

F<sub>c</sub> : コンクリート設計基準強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

底部においてコンクリートの負担できる面外許容せん断応力度

| 荷重状態 | 面外せん断応力度                       |
|------|--------------------------------|
| I    | 5 + $\frac{F_c}{100}$          |
| II   |                                |
| III  | 1.5 × (5 + $\frac{F_c}{100}$ ) |

鉄筋とコンクリートとの許容付着応力度 (kg/cm<sup>2</sup>)

| 荷重状態 | 丸 鋼                            | 異 形 鉄 筋  |
|------|--------------------------------|--|
| I    | $\frac{6}{100} F_c$ かつ 13.5 以下 | $\frac{1}{10} F_c$ かつ 13.5 + $\frac{1}{25} F_c$ 以下 |
| II   |                                |  |
| III  | 1.5 × (同上)                     | 1.5 × (同上)   |

鉄筋の許容応力度 (kg/cm<sup>2</sup>)

| 荷重状態 | 引 張 お よ び 圧 縮 (kg/cm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |
|------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
|      | SR24                                | SR30 | SD30 | SD35 | SD40 | 溶接金網 |
| I    | 1600                                | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| II   |                                     |      |      |      |      |      |
| III  | 2400                                | 3000 | 3000 | 3500 | 4000 | —    |

底部の面外せん断補強筋に対する許容応力度

| 荷重状態 | せん断補強 (面外) (kg/cm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |
|------|----------------------------------|------|------|------|------|------|
|      | SR24                             | SR30 | SD30 | SD35 | SD40 | 溶接金網 |
| I    | 1600                             | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| II   |                                  |      |      |      |      |      |
| III  | 2400                             | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 |

PC 鋼材の許容引張応力度 (表中の値のうち小さい方の値とする)

| 荷重状態 | 許容引張応力度   |
|------|---|
| I    | 0.75 F <sub>u</sub><br>または<br>0.85 F <sub>y</sub> |
| II   |   |
| III  |   |

F<sub>u</sub> : プレストレス鋼材の規格引張強度  
F<sub>y</sub> : プレストレス鋼材の規格降伏点強度

## 設 計

### 6.2 設計手法

コンクリート格納容器を RC にするか PC とするか  
の選択の観点は種々あると思われるが、この基準では  
RC には構造的に設計内圧に対して限界があると考え、  
曲げ等については RC と同様な設計方法を採用するにし  
ても、高い内圧に対しては膜引張応力を低減させる目的  
でプレストレスを導入するものとして PC 構造を位置づ  
けている。

#### (1) 膜および曲げに対する設計

膜および曲げに対する断面設計では、膜力と曲げモー  
メントを同時にうける柱の設計に準じて鉄筋を算定する  
が、この場合膜力は同時に作用する面内せん断力の影響  
を考慮して、これを等価膜力として評価することにして  
いる。このことは面内せん断力の作用によって直交二方  
向と主膜力の方向が一致しない場合に、膜力のみ評価  
では方向によって鉄筋量が不足するケースが考えられる  
ことから、すべての方向で安全側になるよう配慮したも  
のである。

#### (2) せん断力に対する設計

シェル部の面内せん断応力については次のせん断力の  
評価式に基づいて検討することとしている。

$$\tau_{ua} = P_t \cdot f_y + \sigma_{pe} - \sigma_0$$

ここで、

$\tau_{ua}$  : 終局面内せん断強度 (直交二方向の小さい方)

$P_t$  : 直交二方向各々の鉄筋比

$f_y$  : 鉄筋の規格降伏点

$\sigma_{pe}$  : プレストレス力

$\sigma_0$  : 外力による膜引張応力度

実験で観測された断面のせん断応力度分布を弾性分布  
とし、作用する最大せん断応力度を求め比較検討したと  
ころ、上記の評価式は安全側の結果を与えることが確認  
された。しかし鋼材補強が多い場合はコンクリート部分  
での破壊が鋼材の降伏以前に生じてこれが耐力を決めて  
しまう例がみられることから、設計上の最大せん断応力  
度の上限として実験値の下限に安全余裕を見込み、 $3.5\sqrt{F_c}$   
と規定している。また荷重状態 I および II の場合  
は 1/2、III では 3/4、IV で 1/1 をそれぞれ断面の終局せん  
断耐力に乗じて設計せん断応力の許容値を定めている。

シェルの軸対称荷重による面外せん断力については、  
円周方向鉄筋の降伏に基づく下記の耐力評価を行い、設  
計応力との比較を要することが実験結果から得られた。

$$\tau_{u(H)} = 10 \cdot P_{t(\theta)} \cdot f_y / (13.2 \sqrt{\beta - \beta})$$

ここで、

$\tau_{u(H)}$  : 終局面外せん断強度

$P_{t(\theta)}$  : 円周方向鉄筋比

$\beta$  : 格納容器の中心半径/壁厚

面外せん断応力が顕著となる円筒基部については、変  
形性能を確保することが重要であり、このため円筒断面  
の内・外軸筋を拘束する鉄筋を表面積の 0.1% に相当す  
る量程度配筋すること、および円筒基部に少なくとも円  
筒一般部の円周方向鉄筋と同程度配筋することを定めて  
いる。

軸対称荷重時以外の荷重時における面外せん断応力に  
ついては、これが直接耐力に係わる要因ではないことが  
実験的に示されたことから、荷重状態 I ~ III での直交二  
方向に生ずる面外せん断力を次の式で検討を行う。

$$R\tau = Q/t < \alpha \cdot (P_t \cdot f_y - \sigma_0) \text{ かつ } \alpha \cdot 3.5 \sqrt{F_c}$$

$Q$  :  $\phi$  方向,  $\theta$  方向の単位長さ当たり面外せん断力  
t/m

$t$  : シェル壁厚

$P_t$  : 直交二方向各々の鉄筋比

$\alpha$  : 荷重状態に対する係数 (状態 I, II で 1/2, III で  
3/4)

$\sigma_0$  : 外力による直交二方向の膜引張応力度

#### (3) 熱応力に対する設計

熱応力についてはその特殊性を考慮に入れ、実状  
に即した合理的な評価を行うことが適切であることから  
断面の弾性剛性を低減して熱応力を求める簡易法を採用  
してもよいとした。この場合、荷重状態 I, II では 1/2  
倍、III では 1/3 倍まで低減してもよいが、プレストレス  
を与えた部分で膜圧縮力が相当に存在する部分に対して  
はその影響を考慮して適切な評価を行う必要がある。た  
だし格納容器の機能と重要性から他の外力による応力と  
を組み合わせて断面設計の対象とすることになった。

なお荷重状態 IV では熱応力の存在を無視して終局耐力  
評価を行ってもよい。

## 7. む す び

コンクリート格納容器の設計、施工は現状でも安全性  
を確保し得るものであるが、なお今後の実験等による検  
討からこれを見直し、改善していくことが望ましいもの  
と考えられる。本報告で述べた技術基準案を法的な形に  
するためには複雑な法令手続きを要し、当面内規として  
運営するが、実質的には今後本案によって安全性の評価  
が行われるものと考えて差し支えない。

本報告をまとめるにあたって日本原子力発電 (株) 渡  
部征男氏に種々助言をいただいた。ここに感謝の意を表  
する。

#### 参 考 文 献

- 1) 原子力発電用コンクリート格納容器技術基準案, 資源エ  
ネルギー庁 (昭和 54 年 11 月)
- 2) 同確認のための実験結果検討報告書, 電力中央研究所 (53  
年度, 54 年度通産省委託)