



JAEA-Technology

2006-062



JP0750018

日本機械学会発電用原子力設備規格に基づく X-IV型大気圧水力プセルの設計

Design of Type X-IV Atmospheric Pressure Capsule for Irradiation Test
Based on JSME S NC-1 2005

村尾 裕之 村松 靖之 大河原 正美 柴田 功

Hiroyuki MURAO, Yasuyuki MURAMATSU, Masami OHKAWARA and Isao SHIBATA

東海研究開発センター
原子力科学研究所
研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

February 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA
Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

日本機械学会発電用原子力設備規格に基づく
X-IV型大気圧水カプセルの設計

日本原子力研究開発機構東海研究開発センター
原子力科学研究所研究炉加速器管理部
村尾 裕之、村松 靖之、大河原 正美、柴田 功

(2006年12月15日受理)

原子炉安全性研究炉 NSRR(Nuclear Safety Research Reactor)の炉内実験は実験燃料を専用の照射カプセルに封入し、炉心へ挿入して行われる。

NSRRではこれまでに17種類の大気圧水カプセルを製作しており、そのうちX-IV型大気圧水カプセルは設計及び工事の方法の認可を6回取得し、平成18年6月に第7回目の設工認申請を行った。第7回目の申請に際しては設計の強度評価に用いる規格を通商産業省告示501号の廃止に伴い、日本機械学会発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005)に変更した。JSME S NC1-2005では、告示501号で用いられていた「炉」の状態を示す運転状態とは別に、「負荷荷重」の状態を示す供用状態が導入されており、今回の申請書では許容応力強さを供用状態に応じて算出した。また、JSME S NC1-2005では、クラス1支持構造物に対して、告示501号にはなかった組合せ応力に関する評価を求めていることから、今回の申請書で同評価を追加し許容応力を超えないことを確認した。

Design of Type X-IV Atmospheric Pressure Capsule for Irradiation
Test Based on JSME S NC-1 2005

Hiroyuki MURAO, Yasuyuki MURAMATSU, Masami OHKAWARA and Isao SHIBATA

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute, Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 15, 2006)

In NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) experiments, test fuels are inserted in the especial capsule and the capsule will be inserted into the experimental tube which is located in the center of reactor core.

In NSRR, there are 17 types of atmospheric pressure capsule, and one of them Type X-IV atmospheric pressure capsule has been produced 6 times under authorization of Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). Application for the 7th time of authorization was submitted to the MEXT in June 2006. On this application, standard which is used to design was changed to The Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) S NC1-2005 from the Notification 501 of the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). The JSME S NC1-2005 introduced the service condition in addition to the reactor condition which has been used in the Notification 501. In this application, stress limits were calculated based on the service condition. The JSME S NC1-2005 requires estimation of combined stress for Class1 support structures, which was unnecessary in the Notification 501. In this application, combined stresses were calculated and confirmed not to exceed the stress limits.

Keywords: NSRR, Atmospheric Pressure Capsule, JSME S NC-2005, Notification 501

目 次

1. 緒言	1
2. NSRR の概要	1
2.1 NSRR の概要	1
2.2 NSRR 実験の概要	2
2.3 運転方式	2
2.4 照射カプセルの概要	3
3. 照射カプセルの設計	4
3.1 設計の基本方針	4
3.2 耐圧強度の評価	4
3.2.1 負荷荷重の考え方	4
3.2.2 荷重の算定	5
3.2.3 供用状態と荷重条件	7
3.2.4 強度計算方法	8
3.2.5 強度評価	9
3.2.6 疲労評価	9
3.3 耐放射線性に関する評価	12
3.4 反応度価値に関する評価	13
4. まとめ	13
参考文献	13

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of NSRR	1
2.1 Outline of NSRR	1
2.2 Outline of NSRR experiment	2
2.3 Operation Pattern	2
2.4 Outline of Experimental Capsule	3
3. Design of Experimental Capsule	4
3.1 Design Policy	4
3.2 Estimation of Strength to Resist Pressure	4
3.2.1 Design Loading	4
3.2.2 Calculation of Loading	5
3.2.3 Loading in the Service Condition	7
3.2.4 Strength Calculation Method	8
3.2.5 Strength Estimation	9
3.2.6 Fatigue Strength Estimation	9
3.3 Estimation of Radiation tolerant	12
3.4 Estimation of Negative Reactivity	13
4. Summary	13
Reference	13

1. 緒言

日本原子力研究開発機構の原子炉安全性研究炉 NSRR(Nuclear Safety Research Reactor)¹⁾は、反応度事故時の燃料挙動を解明する炉内実験のために建設された原子炉であり、昭和 50 年 6 月に初臨界に達した後、同年 10 月より実験に供されてきた。

NSRR の炉内実験は実験燃料を照射実験用のカプセル（照射カプセル）に封入し、炉心中央に設けられた実験孔内へ挿入して行われる。照射カプセルにはカプセル内の初期条件を大気圧、常温とする大気圧水カプセルと BWR 相当の圧力、温度条件とする高圧水カプセルの 2 種類が存在する。

NSRR ではこれまでに 17 種類の大気圧水カプセルを製作しており、そのうち X-IV 型大気圧水カプセルは設計及び工事の方法の認可を 6 回取得し、内部カプセルを 47 体、外部容器を 15 体製作している。さらに、平成 18 年 6 月に第 7 回目の設工認申請を行った。X-IV 型大気圧水カプセルの設計は第 1 回目の製作時になされており、強度設計については「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」（告示 501 号）に準じて計 6 回製作してきた。しかし、平成 17 年 12 月で同告示が廃止され「発電用原子力設備に関する技術基準」（省令 62 号）に性能規定化し取り込まれたことから、第 7 回目の設工認申請に際しては、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令の解釈について」（平成 17 年 12 月 16 日 原子力安全・保安院）に則って、「日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005)」を準用し強度評価を行った。JSME S NC1-2005 では、告示 501 号で用いられていた「炉」の状態を示す運転状態とは別に、「負荷荷重」の状態を示す供用状態が導入されており、今回の申請書では許容応力強さを供用状態に応じて算出した。また、JSME S NC1-2005 では、クラス 1 支持構造物に対して、告示 501 号にはなかった組合せ応力に関する評価を求めていることから、今回の申請書で同評価を追加し許容応力を超えないことを確認した。

本報告書では JSME S NC1-2005 に基づく強度の再評価について報告するとともに、耐震性、耐放射線性、負の反応度価値の評価について報告する。

2. NSRR の概要

2.1 NSRR の概要

NSRR は、米国 GA(General Atomic)社によって開発された熱中性子パルス炉 TRIGA-ACPR に改良を加えたものである。その構造は、Fig.2-1 に示すように、水深約 9m のスイミングプール型の原子炉で、炉心はプール底部に位置しており、炉心の燃料要素の冷却はプール水の自然循環によって行う。この炉心の中央部を、内径約 22cm の中空実験孔が垂直に貫通している。実験孔は、炉心上部で Y 字状に分岐してプール上面に達するが、このうち垂直に伸びた部分を垂直装填管、傾斜して伸びた部分をオフセット装填管と呼ぶ。実験に当たっては、実験燃料を収納したカプセル等を、オフセット装填管を通して炉心中央部の実験孔に挿入する。実験孔に挿入された照射カプセルは、下部をグリッピング装置で固定され、さらに上部をホールドダウン機構によって固定される。

NSRR の炉心燃料は、直径約 3.6cm、有効長約 38cm の濃縮ウランー水素化ジルコニウム (U-ZrH 合金) を燃料体とし、その上下に長さ約 8.7cm の黒鉛反射体を配し、これらをステンレス鋼製被覆材で覆ったものである。この燃料が Fig.2-2 に示すように、157 本炉心に装荷されている。この燃料は、中性子減速材である水素が燃料中に含まれているため、原子炉の出力が急上

昇すると自己制御性により急激に出力を低下させる特徴を持つ。

燃料要素は、Fig.2-2 に示すように実験孔の周囲に配置され、等価直径約 63cm の炉心を構成する。また、炉心内には安全棒 2 本、調整棒 6 本及びトランジエント棒 3 本の合計 11 本の制御棒が配置されている。安全棒は、スクラムを含む原子炉停止を目的として使用され、調整棒は出力調整及び反応度補償を目的として使用される。安全棒及び調整棒の構造は同一であり、長さ約 38cm の中性子吸収体 (B_4C) の下部に、同一長の燃料体 (U-ZrH 合金) (燃料要素の燃料体と同一) を配し、これをステンレス鋼製被覆材で覆った構造となっている。トランジエント棒には、高速トランジエント棒 (2 本) 及び調節用トランジエント棒 (1 本) の 2 種類があり、パルス運転における急速な正の反応度添加を行う目的で使用される。高速トランジエント棒は、長さ約 76cm の中性子吸収体 (B_4C) の下部に空気フォロア (上下を封じた空気筒) を配し、これをアルミニウム合金製被覆材で覆った構造になっている。高速トランジエント棒の駆動は、圧縮空気によって行われる。調節用トランジエント棒は、長さ約 38cm の中性子吸収体 (B_4C) の下部に空気フォロアを配し、これをアルミニウム合金製被覆材で覆った構造となっている。

2.2 NSRR 実験の概要

NSRR では、3 種類のパルス運転、すなわち、未臨界状態から最高 $0.0343 \Delta k$ の反応度を 0.1 秒で投入する単一パルス運転、最高 10MWまでの任意の過渡出力を積算出力 110MWs までの範囲内で実現できる台形パルス運転、単一パルス運転と台形パルス運転を組み合わせた運転の合成パルス運転が行われる。

照射実験では、短尺に加工した燃料を照射カプセルに密封し、反応度事故を模擬した出力暴走状態に曝し燃料の過渡挙動を観察する。

NSRR 実験は 1975 年から第 1 期計画として未照射の燃料を対象とした実験を開始し、1989 年からは第 2 期計画として照射済燃料の実験を行ってきた。第 1 期の実験結果は「反応度投入事象に関する評価指針」(原子力安全委員会 昭和 59 年 1 月 19 日) に反映され、原子力発電所の設計や安全審査に活用されている。第 2 期までの実験結果は原子力安全委員会原子炉安全基準専門部会報告書「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取り扱いについて」(平成 10 年 4 月 13 日) に反映されている。

今後は、照射済燃料に対する BWR の炉内条件を模擬した温度、圧力条件下での照射実験、プルトニウム富化度 12.8%までのプルトニウム・ウラン混合酸化物燃料を対象とした照射実験、燃焼度 110GWD/t までの照射済燃料を対象とした照射実験を進めていく計画である。

2.3 運転方式

NSRR の運転には、最高出力 300kW までの定出力 (SS) 運転、トランジエント棒の急速引抜きによって零出力からの反応度事故を模擬した単一パルス (NP) 運転、異常過渡出力の模擬や小さな出力が徐々に増幅していく出力振動を模擬した台形パルス (SP) 運転、出力運転状態からの反応度事故などを模擬した合成パルス (CP) 運転がある。以下に、各運転モードにおける原子炉の運転方式を示す。なお、Fig.2-3 には各運転モードの原子炉出力特性の例を示す。

(1) 定出力 (SS) 運転

定出力（SS）運転では、原子炉の起動、パルス運転に備えての制御棒位置調整、300kWまでの任意の出力での運転を行う。原子炉出力の調整は調整棒の6本同時操作により行う。

(2) 単一パルス（NP）運転

単一パルス（NP）運転では、トランジエント棒を圧縮空気によって急速に引抜き、零出力から最大投入反応度 $0.0343 \Delta k$ (4.7\$)までの反応度事故を模擬する運転を行う。投入反応度量は、定出力運転による臨界点確認後トランジエント棒及び調整棒の挿入量により調整する。この運転では、燃料温度 900°C以下、出力 23000MW 以下、積分出力 130MWs 以下に制限される。

NP 運転時の出力低下は、機械的な停止機構に依存することなく、燃料温度上昇による固有の負の反応度フィードバックによって行う。

(3) 台形パルス（SP）運転

台形パルス（SP）運転では、調整棒の自動制御により最高出力 10MWまでの任意の出力波形での過渡出力模擬運転を行う。自動制御装置にはあらかじめ、時間に対する調整棒位置と炉出力が入力された運転プログラムを入力する。この運転では、燃料温度 900°C以下、出力 10MW 以下、積分出力 110MWs 以下、制御棒速度 75mm/s 以下に制限される。

SP 運転を行う際は、あらかじめ計算機上でのシミュレーションと実炉の制御系と制御棒駆動機構を利用したシミュレーションを行い、運転プログラムの安全性や妥当性を確認する。

(4) 合成パルス（CP）運転

合成パルス（CP）運転は、SP 運転と同様の制御棒の自動制御により最高出力 10MWまでの任意の出力波形での過渡出力模擬とトランジエント棒の急速引抜きを組み合わせた運転を行う。この運転では、燃料温度 900°C以下、台形部最高出力 10MW 以下、パルス部最高出力 23000MW 以下、積分出力 110MWs 以下、制御棒速度 75mm/s 以下、トランジエント棒による投入反応度 $0.0292 \Delta k$ (4.0\$)以下に制限される。

CP 運転も SP 運転と同様に、あらかじめシミュレーションを行う。

2.4 照射カプセルの概要

照射カプセルは原子炉施設及び核燃料物質の使用施設としての規制を受けており、設計及び工事の方法の認可を受けて製作され、使用前検査及び施設検査を受検する。照射カプセルには大別すると大気圧水カプセルと高圧水カプセルの2種類のカプセルが存在する。大気圧水カプセルはカプセル内の初期条件を大気圧、常温にして使用され、高圧水カプセルは初期条件を BWR 相当の圧力、温度条件にして使用される。大気圧水カプセルには 17 種類のカプセルが存在する。大気圧水カプセルの概略図を Fig.2-4 に示す。

X-IV型大気圧水カプセルは、濃縮度 5 %未満の照射済酸化ウラン燃料を照射実験するための照射カプセルであり、主要材料は SUS304 である。X-IV型大気圧水カプセルの主要緒元を Fig.2-5 に示す。

照射カプセルは、内部に装荷した燃料に反応度が加えられ破損した際に生じる破壊力に耐え、かつ密封性を有するよう設計されており、実験を安全に遂行する上で重要な役割を果たしている。

反応度投入により、カプセル内部で燃料が破損した場合「衝撃圧力」及び「水撃力」の2種類の破壊力が発生する。衝撃圧力は燃料破損により燃料内圧が開放されることにより発生し、水中を伝わりカプセル壁面及び底面に作用する。水撃力は、高温の燃料と水とが接触して発生する水蒸気が、上部の水をピストンのように押し上げ、その押し上げられた水塊がカプセル上面に衝突した際に発生する。

照射カプセルは、内部に燃料を配し、その回りに冷却用の水を封入すると同時に照射カプセルの内部には、燃料挙動を観察するための熱電対、圧力センサー、水塊速度計、歪ゲージ等の計装を取り付け、原子炉建家のアンプを通してデータの収録を行う。

3. 照射カプセルの設計

3.1 設計の基本方針

X-IV型大気圧水カプセルの設計に当たっては、試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則（試験炉規則）第3条第2項に照らし合わせて、燃料の破損によって発生する破壊力等の圧力に対する耐圧強度の評価、耐震性の評価、耐放射線性に関する評価そして負の反応度効果に関する評価を行った。

耐圧強度の評価は従来、「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」（告示501号）に準じて行ってきたが、平成17年12月で同告示が廃止され「発電用原子力設備に関する技術基準」（省令62号）に性能規定化し取り込まれたことから、平成18年度のX-IV型大気圧水カプセルの第7回目の製作では、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令の解釈について」（平成17年12月16日 原子力安全・保安院）に則って、「日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005）」を準用した。

耐震性の評価では、耐震クラスAとし、原子炉設置許可申請書に従って算出した地震力を負荷としたときの応力を求め、燃料の破損によって発生する破壊力による応力と合わせてJSME S NC1-2005に従い評価した。

耐放射線性に関する評価では、最大使用回数照射試験に供した場合に受ける中性子線量がカプセルの主要材料であるSUS304の機械的性質に与える影響について評価した。

負の反応度効果については、計算コードによる計算値及び過去に製作した同型カプセルの実測値から評価した。

3.2 耐圧強度の評価

3.2.1 負荷荷重の考え方

設計に当たっては以下の荷重を考慮した。

(1) 燃料破損による破壊力

照射カプセル内に装荷した実験燃料が反応度の添加によって破損した場合に発生する衝撃圧力及び水撃力を考慮した。

Fig.3-1に衝撃圧力と水撃力の模式図を示す。

衝撃圧力は燃料被覆管の破損に伴う燃料内圧の開放に伴って発生し、水中を伝ってカプセル壁面及び底面に作用する。つまり、衝撃圧力の大きさは試験燃料棒内圧と外部の圧力差によって決まる。

試験燃料が破損し、微粒子化した燃料が冷却水中に放出された場合、高温の燃料が広い表面積を介して冷却水に触れるため、冷却水中に大量の水蒸気が短時間に発生する。このとき発生した水蒸気は上方の冷却水を押し上げ、カプセル上部の蓋に衝突させる。この際に作用する圧力が水撃力である。

衝撃圧力と水撃力は発生時刻が異なるため別々に作用するものとした。また、この二つの荷重は動的な荷重であるが、静的な荷重に換算し、より厳しい評価を行った。

(2) ホールドダウン機構による荷重

照射カプセルは、実験孔内でホールドダウン機構により外部容器キャップ上面を下向きに押さえつけられる形で固定される。したがって、ホールドダウン機構の自重及び水塊の飛び上がりによって発生する水撃力に対する反力をカプセルに作用する機械的荷重として考慮した。また、熱膨張による伸びに対する反力を熱的荷重として考慮した。

(3) 地震による荷重

照射カプセルは耐震 A クラスの機器として評価し、地震力は、原子炉設置許可申請書の添付書類八に従って算出した。

3.2.2 荷重の算定

(1) 燃料破損による破壊力

1) 衝撃圧力の算定

衝撃圧力は、試験燃料に与える最大の発熱量に対応する圧力ピーク値を原子炉設置許可申請書²⁾に記載された設計用最大圧力線図から算出し相当静圧換算係数を乗じて求める。X-IV型大気圧水カプセルでは、照射済酸化ウラン燃料の発熱量 837J/g·UO₂ (200cal/g·UO₂) に対応するピーク圧力 1.47MPa に相当静圧換算係数の 2 を乗じ、2.94MPa を衝撃圧力とした。

設計用最大圧力線図は SPERT-CDC 実験³⁾をもとに、その包絡する値を取ったものである。

また、相当静圧換算係数の算出は原子炉設置変更許可申請書（平成元年 11 月 10 日付け元安（原規）第 598 号をもって設置変更許可）追補 1 の「水カプセルの設計検査の考え方」に示された方法で算出した値に十分な余裕を見込み 2 としている。

2) 水撃力の算定

水撃力は原子炉設置変更許可申請書（平成元年 11 月 10 日付け元安（原規）第 598 号をもつて設置変更許可）追補 1 の「水カプセルの設計検査の考え方」に示した次式で算出する。

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot K_e \cdot q_F \cdot W_F}{M_w}}$$

$$P_m = \rho \cdot C \cdot U$$

ここで、

U : 水塊の速度 (m/s)

K_e : 機械的エネルギー転換率

q_F	: 最大実験条件の発熱量	(J/g(UO ₂))
W_F	: 燃料重量	(g)
M_w	: 水塊の質量	(kg)
P_m	: 水撃力のピーク値	(Pa)
ρ	: 常温での水の密度	(kg/m ³)
C	: 常温での水中の音速	(m/s)

機械的エネルギー転換率は、原子炉設置許可申請書に記載されたカプセル設計用最大転換率線図から求める。カプセル設計用最大転換率線図は、衝撃圧力の設計用最大圧力線図と同様、SPERT-CDC 実験をもとに、その包絡する値を取ったものである。

水撃力の相当静圧は計算結果の 15.9MPa に衝撃圧力と同様、相当静圧換算係数の 2 を乗じ 31.8MPa とした。

(2) 地震による荷重

地震による荷重は原子炉設置許可申請書の添付書類八に従い、以下の方法で算出した。ただし、現行の原子炉設置許可申請書（平成 15 年 5 月 12 日付 14 諸文科科代 3396 号で許可）には、「平成 15 年 5 月 12 日付 14 諸文科科第 3396 号以前の設置許可に基づく設計に使用する動的地震力の算定に用いる地震波は、昭和 59 年 12 月 19 日付 59 安（原規）第 229 の設置変更許可の添付書類六の追補に定める地震波と同じものを使用する」と記載されている。X-IV型大気圧水カプセルは昭和 62 年 5 月 27 日付の設置許可に基づいて設計されたカプセルであり第 6 回目の製作までは、昭和 59 年の設置許可に基づく地震波を用いていたが、今回からは平成 15 年 5 月 12 日付の設置許可に基づく地震波を用い、より厳しい評価を行っている。

1) 水平方向の地震力

設計地震力については「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601, 1987」を採用し建物の中の据付位置における動的解析から定まる加速度の 1.2 倍と、建築基準法に定める震度 3Co (Co : 建築基準法に定める標準せん断力係数) の 1.2 倍に相当する加速度 (3.6Co) のいずれか大きい方の加速度を設計用加速度とする。

照射カプセルは実験孔内に装荷されて使用されるため、実験孔内に装荷された状態で照射カプセルに作用する動的解析による加速度を求め、3.6Co (=0.72G) と比較し大なる方の加速度を設計に用いるものとする。

Table3-1にNSRRの実験孔一炉心支持構造体の動的解析による最大加速度分布を示す。

Table3-1の加速度を求めるための地震条件は原子炉設置許可申請書 添付書類八に従い以下のように定めた。すなわち、水平方向地震荷重は、原子炉建家基礎底面における最大加速度 1.8m/s²の地震波について行った動的解析結果と、3.6Co (=0.72G) によるせん断応力及び曲げモーメントを計算し、大きい方の値とした。動的解析に用いた地震波は、原子炉設置許可申請書添付書類六の「5.4 JRR-3原子炉施設位置の設計用地震」に定める設計用基準地震動 S₁ (1.8m/s²) である。

照射カプセルの装荷位置は、質点番号 2 の位置であり、最大震度は 0.518 G である。従って、0.72G > 0.518G × 1.2 であることから、水平方向は 0.72G を震度として地震力を求めるものと

する。

2) 垂直方向の地震力

垂直方向震度は、水平方向震度の 1/2 (0.36G) を震度として地震力を求めるものとする。

3.2.3 供用状態と荷重条件

JSME S NC1-2005 では荷重条件として、告示 501 号で用いていた運転状態に加えて供用状態を導入している。供用状態とは、機器の応力評価を行うにあたって考慮する「負荷荷重」の状態を示すものであり、「炉」の状態を示す運転状態とは異なる。なお、JSME S NC1-2005 では応力強さの限界を供用状態に応じて設定しており、運転状態に応じて設定していた告示 501 号とは異なる部分である。

以下に、X-IV型大気圧水カプセルで考慮した各供用状態での荷重条件を示す。

・設計条件

JSME S NC1-2005 では、設計条件は「対象とする機器等に設計仕様書等で規定された最高使用圧力および設計機械的荷重が負荷されている状態」と定義されている。したがって、燃料破損に伴う水撃力、衝撃圧力及びホールドダウン機構による荷重が負荷された状態とした。なお、設計温度は 100°C である。

・供用状態 A

供用状態 A は「対象とする機器等がその主たる機能を満たすべき運転状態において設計仕様書等で規定された圧力および機械的荷重が負荷された条件下にある状態」と定義されており、一般には運転状態 I で発生する荷重が負荷された状態である。X-IV型大気圧水カプセルは、通常の使用条件で燃料の破損を考慮しているため、燃料破損時に発生する衝撃力及び水撃力に相当する荷重が負荷された状態とした。なお、設計温度は 100°C である。

・供用状態 B

供用状態 B は「対象とする機器等が損傷を受けることなく、健全性を維持しなければならない」と設計仕様書等で規定された圧力および機械的荷重が負荷された条件下にある状態」と定義されており、一般には運転状態 II で発生する荷重が負荷された状態である。運転状態 II とは、運転状態 I から逸脱した状態であるが、X-IV型大気圧水カプセルでは運転状態 I で燃料破損によって発生する最大の荷重を考慮しており、それ以上の荷重は発生し得ない。

したがって、運転ベースの地震力による荷重が負荷された状態とした。ただし、照射試験の実施頻度、衝撃圧力及び水撃力の作用時間を考慮して、地震の発生時には衝撃圧力及び水撃力の発生がないものとしている。ここで、運転ベースの地震力とは 3.2.2 で算出した地震力の 1/2 の地震力として定義した地震力である。なお、設計温度は 100°C である。

・供用状態 C

供用状態 C は「対象とする機器等が構造不連続部等においては大変形を生じてもよい」と設計仕様書等で規定された圧力および機械的荷重が負荷された条件下にある状態」と定義されており、一般には運転状態 III で発生する荷重を考慮する。運転状態 III とは、原子炉施設の故障、異常な作動等により原子炉の運転の停止が緊急に必要とされる運転状態であるが、X-IV型大気圧水カプセルでは運転状態 II と同様に、運転状態 I 以上の荷重は発生し得ない。

したがって、設計ベースの地震力による荷重が負荷された状態とした。ただし、ここでも

供用状態 B と同様の理由から、地震の発生時には衝撃圧力及び水撃力の発生がないものとする。ここで、設計ベースの地震力とは 3.2.2 で算出した地震力として定義した地震力である。なお、設計温度は 100°C である。

・試験状態

試験状態は「対象とする機器等に耐圧試験圧力が負荷されている状態」と定義されており、耐圧試験圧力は「最高使用圧力の 1.25 倍」と定義されている。内部カプセルにおいて最高使用圧力は水撃力による 31.8MPa であるが、内部カプセルは入射中性子の利用効率を考慮し、衝撃圧力のみ作用する部位は肉厚を薄くしているため、水撃力の 1.25 倍を耐圧試験圧力とした場合、薄肉部は許容応力を満足することができない。したがって、試験状態は内部カプセル、外部容器共に衝撃圧力の 1.25 倍の荷重が負荷された状態とした。なお、設計温度は 20°C である。

3.2.4 強度計算方法

強度評価は、燃料破損による破壊力、ホールドダウン機構による荷重及び地震力による荷重から、Fig.3-2 及び Fig.3-3 に示す各評価点での応力強さを算出し、各供用状態の評価条件に沿って各応力強さを合成し基準値と比較するという手順で行った。なお、外部容器は繰り返し使用することから疲労評価もあわせて行っている。

(1) 燃料破損に伴う応力に対する強度計算

カプセルの胴部 (P02～P07) に対する強度計算は第 1 回目の製作から有限要素法による解析コード SAP IV によるコード解析を行っている。その他の蓋、ネジ部、ボルト（内部カプセル：P01、P08～P10、外部容器：P01、P08～P12）及び蓋に設けられた計装線等の取り付け穴については手計算によって解析を行っている。

縦弾性係数、熱膨張係数、設計降伏点等の告示 501 号から引用していた材料データは同告示の廃止に伴い、すべて JSME S NC1-2005 のデータに見直しを行った。ただし、X-IV型大気圧水カプセルの材料である、SUS304 及び SNB21-1 に関しては当該カプセルの設計温度において数値の変更はなかった。

内部カプセルの強度計算では Fig.3-4 に示すように、衝撃圧力が作用する領域を低圧領域とし、水撃力が作用する領域を高圧領域として評価した。

外部容器の強度計算では、水撃力が内部カプセルの吊り具を介して伝わる軸力と衝撃圧力を考慮した。このとき、安全側に評価するため、衝撃圧力については Fig.3-5 に示すように、内部カプセルで発生した圧力が 100% 外部容器内の水に伝わると仮定して行った。

内部カプセルの荷重条件を Table3-2、3 に、外部容器の荷重条件を Table3-4 に示す。

(2) 耐震計算方法

耐震計算では水平方向地震力及び垂直方向地震力によって発生する曲げモーメント及び軸力によるカプセル胴体、フランジボルト、吊り具、キャップの応力を評価した。軸力及び曲げモーメントを Table3-5 に示す。曲げモーメントは吊り具と内部カプセル、外部容器の二つに分けて算出しているが、それぞれの上端を固定端として、下端に全重量が集中していると仮定

した場合の固定点でのモーメントとして算出し、すべての評価点で同じ値を用いている。そのため、かなり保守的な評価となっている。

3.2.5 強度評価

JSME S NC1-2005 のクラス 1 容器の規格に従い、カプセル胴部、蓋、ボルトに関する応力強さの制限値を Table3-6 に示すとおりとした。また、クラス 1 支持構造物の規格に従い吊り具に関する応力強さの制限値を Table3-7 に示すとおりとした。

JSME S NC1-2005 では、クラス 1 支持構造物について、告示 501 号にはなかった組合せ応力に関する評価を要求している。X-IV型大気圧水カプセルでは、吊り具に対して圧縮応力と曲げモーメントの組合せ応力と引張応力と曲げモーメントの組合せ応力が発生する。

両応力は以下の式で評価される。

- ・圧縮応力と曲げモーメントを受ける部材の組合せ応力

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{c\sigma_b}{f_b} \leq 1 \quad \text{かつ}$$

$$\frac{t\sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1$$

- ・引張応力と曲げモーメント受ける部材の組合せ応力

$$\frac{\sigma_t + t\sigma_b}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ}$$

$$\frac{c\sigma_b - \sigma_t}{f_b} \leq 1$$

$c\sigma_b$: 圧縮側曲げ応力

$t\sigma_b$: 引張側曲げ応力

その他の記号については Table3-6 を参照。

当該カプセルの吊り具は円形断面であるため

$$c\sigma_b = t\sigma_b$$

として扱えるため、Table3-7 ではいずれの記号も「 σ_b 」としている。

各荷重による応力強さを Table3-8~11 に、各供用状態における各評価点の応力強さと許容値の比較を Table3-12~Table3-15 に示す。

Table3-12~Table3-15 から X-IV型大気圧水カプセルは許容値に対して十分な余裕を有することがわかる。

3.2.6 疲労評価

クラス 1 容器は JSME S NC1-2005 において疲労評価が求められている。ただし、疲労解

析不要の条件を満たす場合は不必要とされている。X-IV型大気圧水カプセルは外部容器のみ再使用し最大使用回数は100回であるが、以下に示すように疲労解析不要の条件を満たしている。

(1) 繰り返し回数に対する制限

大気圧から運転圧力となり、再び大気圧に戻る実際の繰り返し回数をN1とし、 $3S_m$ (S_m : JSME S NC1-2005に定められた設計応力強さ) を繰り返し応力強さとした場合のJSME S NC1-2005に示されたS-N曲線上の許容繰り返し回数をNaとした場合。

$$N1 \leq Na$$

であること。

①容器材料(SUS 304)に対して

JSME S NC1-2005付録図表Part5表1より

$$3S_m = 3 \times 137 = 411 \text{ MPa}$$

これに対するNaはJSME S NC1-2005付録材料図表Part8図2より10⁴回となる。

X-IV型大気圧水カプセルは内部カプセルの使用回数を100回としているので、 $N1=100$ であり条件を満足する。

②ボルト部材(SNB 21-1)に対して

JSME S NC1-2005付録図表Part5表2より

$$3S_m = 3 \times 329 = 987 \text{ MPa}$$

これに対するNaはJSME S NC1-2005付録材料図表Part8図1より120回となる。

容器材料と同様 $N1=100$ であり、条件を満足する。

(2) 圧力変動の全振幅に対する制限

供用状態A及びBにおける実際の圧力変動の全振幅を ΔP としたとき以下の式を満足すること。

$$\Delta P \leq \frac{1}{3} \times P \times \frac{S_a}{S_m}$$

ただし、

P:最高使用圧力 (MPa)

S_a : JSME S NC1-2005付録材料図表Part8図2において圧力変動回数100回を許容繰

り返し回数としたとき、これに対応するピーク応力強さの値(MPa)

ところで、X-IV型大気圧水カプセルの場合、圧力振幅は最高使用圧力に等しいから

$$\Delta P = P \text{ となり}$$

$$\frac{1}{3} \times \frac{S_a}{S_m} \geq 1$$

であれば条件を満足する。

①容器材料(SUS 304)に対して

$$\frac{1}{3} \times \frac{S_a}{S_m} = \frac{1}{3} \times \frac{1800}{137} = 4.4 > 1$$

となり条件を満足する。

②ボルト部材(SNB 21-1)に対して

$$\frac{1}{3} \times \frac{S_a}{S_m} = \frac{1}{3} \times \frac{2100}{329} = 2.1 > 1$$

となり条件を満足する。

(3) 温度差に対する制限

パルス照射前及びパルス照射時の温度差に対する制限条件は以下の①式により計算した値を超えない任意の2点間の温度差が②式により計算した値を超えないこと。

$$\text{①式 } p = 2\sqrt{Rt}$$

ただし、

p : 容器の任意の2点間の距離

R : それぞれの点における容器の半径

t : それぞれの点における容器の厚さ

$$\text{②式 } T = \frac{S_a}{2E\alpha}$$

ただし、

T : 温度差

E : 縦弾性係数

α : 熱膨張係数

S_a : 2)項の計算で用いた S_a に等しい。

任意の2点間の距離 p は、

$$\text{外部容器胴部に対し } p = 2\sqrt{66.5 \times 3} = 28.2 [\text{mm}]$$

また、温度差 T は、

$$T = \frac{S_a}{2E\alpha} = \frac{1800}{2 \times 1.90 \times 10^5 \times 16.43 \times 10^{-6}} = 288^\circ\text{C}$$

となる。

ところで、本カプセルの最高温度は 100°C であり、パルス照射前の温度を室温の 20°C としても温度差は高々 80°C である。従って、 $T=288^\circ\text{C}$ を超えることはなく、温度に対する制限条件は満足している。

(4) 温度差の変動の全振幅に対する制限

供用状態 A の温度差の変動の全振幅に対する制限条件は (3) の①の計算式により計算した値を超えない任意の2点間の温度差の変動の全振幅が、次式により計算した値を超えないこと。

$$T = \frac{S_a}{2E\alpha}$$

ただし、

E, α : それぞれ (3) の②に定めるところによる。

S_a : (2) 項の計算で用いた S_a に等しい。

$$T = \frac{S_a}{2E\alpha} = \frac{1800}{2 \times 1.90 \times 10^5 \times 16.43 \times 10^{-6}} = 288 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ところで、本カプセルの最高温度は 100°C であり、パルス照射前の温度を室温の 20°C としても温度差の変動は高々 80°C である。従って、T=288°C を超えることはなく、温度差の変動の全振幅に対する制限条件は満足している。

(5) 縦弾性係数又は熱膨張係数が異なる材料で作られた部分の温度の変動に対する制限

供用状態 Aにおいて、縦弾性係数又は熱膨張係数が異なる材料で作られた部分の温度の変動を ΔT としたとき以下を満足すること。

$$\Delta T \leq T$$

$$T = \frac{S}{2(E_1\alpha_1 - E_2\alpha_2)}$$

E1、E2 : 縦弾性係数

α_1 、 α_2 : 瞬時熱膨張係数

S : JSME S NC1-2005 付録材料図表 Part8 図 2において許容繰り返し回数を 10^{11} 回としたとき、これに対応するピーク応力強さの値

ところで、外部容器の設計温度は 100°C であるが、冷却水と接し、温度上昇が見込まれる胴部は SUS304 のみで製作されているため評価の対象外とした。

(6) 圧力以外の機械的荷重に対する制限

機械的荷重により生じる応力の全振幅を $\Delta \sigma$ としたとき

$$\Delta \sigma \leq S$$

であること。

S : JSME S NC1-2005 付録材料図表 Part8 図 2において荷重変動回数を許容繰り返し回数とした場合これに対応する繰り返しピーク応力強さ。

X-IV型大気圧水カプセルでは圧力以外の機械的荷重として運転ベースの地震による荷重を考慮した。運転ベースの地震荷重の変動回数 ($4 \times 40 = 160$ 回)を許容繰り返し回数とした場合これに対応する繰り返しピーク応力強さは約 1200 MPa であり、運転ベースの地震荷重による応力の全振幅(22.8 MPa)はこの値を十分下回る。従って、本制限条件を満足している。

3.3 耐放射線性に関する評価

外部容器は繰り返し使用されることから、中性子照射による材料の劣化について評価している。

オーステナイト系ステンレス鋼に対する中性子照射による機械的性質への影響は高速中性子によるものが主であるとされており、中性子照射によって耐力が増加し、伸びが減少する傾向にある。しかし、200°C以下の環境下では 10^{26}n/m^2 の照射においても十分な室温での伸びを残すとされている。⁴⁾

実測値をもとに算出したNSRRの実験孔内炉心部におけるパルス運転 1 回あたりの熱外中性子束による照射量は、カプセルを挿入しない状態で約 $2.0 \times 10^{17} \text{ n/m}^2$ (積分出力 100 MW·s 相

当)である。⁵⁾

X-IV型大気圧水カプセルの使用環境は100°C以下であり、外部容器の最大使用回数である100回の使用を考慮した場合、熱外中性子による照射量は約 $2.0 \times 10^{19} \text{ n/m}^2$ で、 10^{26} n/m^2 に比して十分小さいことから、機械的性質への影響は無視できるものであると考える。

3.4 反応度値に関する評価

NSRRでは、実験物による負の反応度の制限値が $-0.0365 \Delta k$ と定められている。これは原子炉の運転中に実験物が炉心から引き抜かれた場合に、原子炉に過大な反応度が投入されることを避けるための制限値である。

照射カプセルの場合、負の反応度効果は充填する水の中性子吸収によるものが主である。²⁾ 次元輸送計算コード(TWOTRAN-II⁶⁾)による計算結果では、X-IV型大気圧水カプセルの負の反応度は $-0.01510 \Delta k$ であり制限値を十分下回るものであることが確認されている。ところで、当該カプセルは過去6回の製作で内部カプセル47体、外部容器15体製作しており照射実験の実績も有する。これまで照射実験に使用されたX-IV型大気圧水カプセルの負の反応度をTable3-16に示す。実測による負の反応度からも、制限値を十分下回るものであることが分かる。

4. まとめ

平成18年6月に第7回目のX-IV型大気圧水カプセルの申請を行った。申請に際し日本機械学会発電用原子力設備規格 設計建設規格(JSME S NC1-2005)に準じて強度の再評価を行い十分安全な設計であることを確認した。また、耐震性、耐放射線性、負の反応度値について問題のないことを再確認した。

参考文献

- 1) 稲邊、他：改良型パルス運転のためのNSRR計測制御系統施設の安全設計、JAERI-M88-113(1988)
- 2) 日本原子力研究所：日本原子力研究所東海研究所原子炉設置許可申請書 別冊9(NSRR) 平成15年5月
- 3) T.G.Texelius et.al, "Annual Report SPERT Project October 1968 -September 1969", IN-1370(TID-4500)(1970)
- 4) 長谷川正義、三島良績監修 原子炉材料ハンドブック 昭和52年
- 5) 斎藤伸三、他：NSRR実験孔内中性子束及び γ 線量率の評価(I) JAERI-M8474(1979)
- 6) K.D.Lathrop,F.W.Brinkley: TWOTRAN-II: An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport, LA-4848-MS

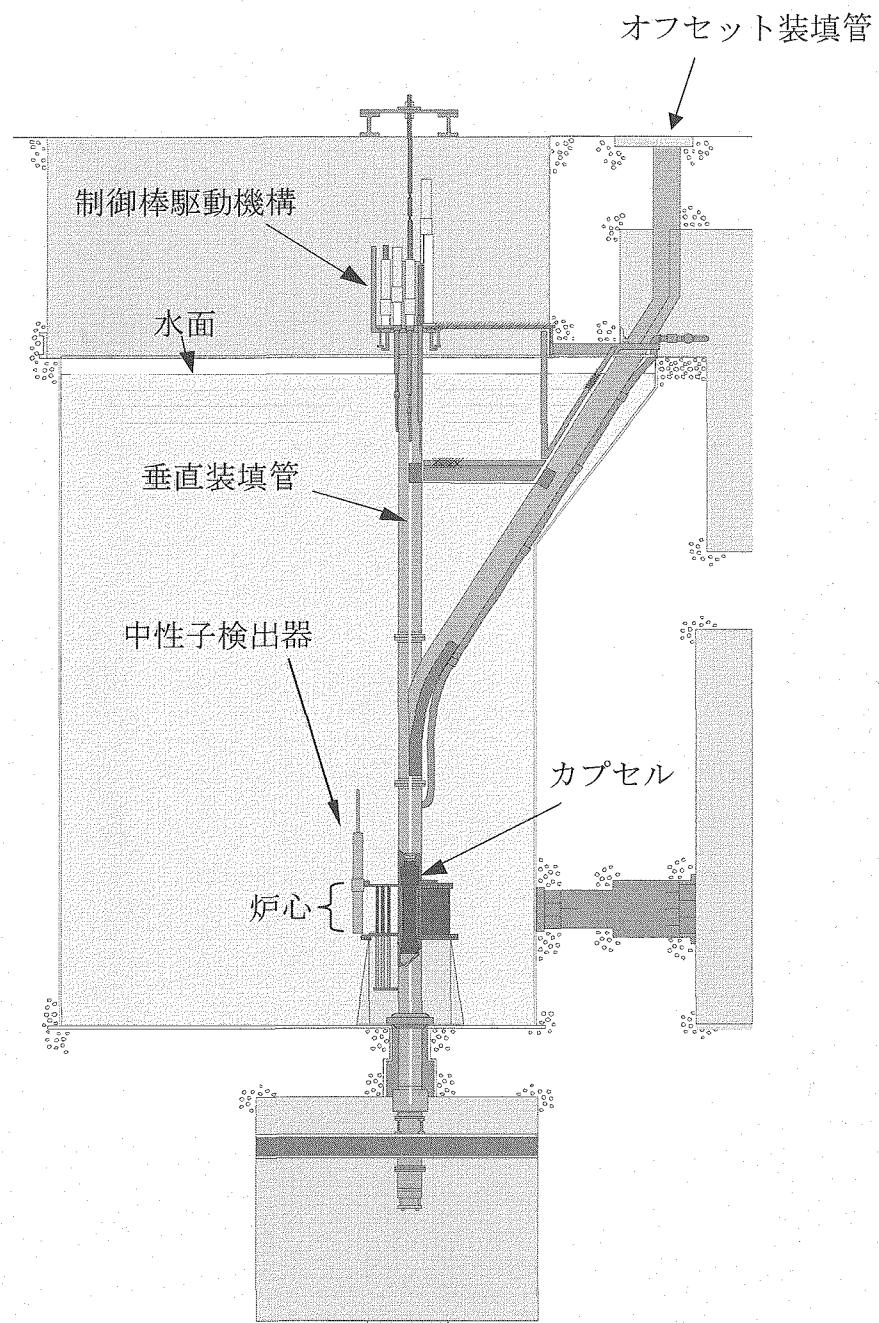
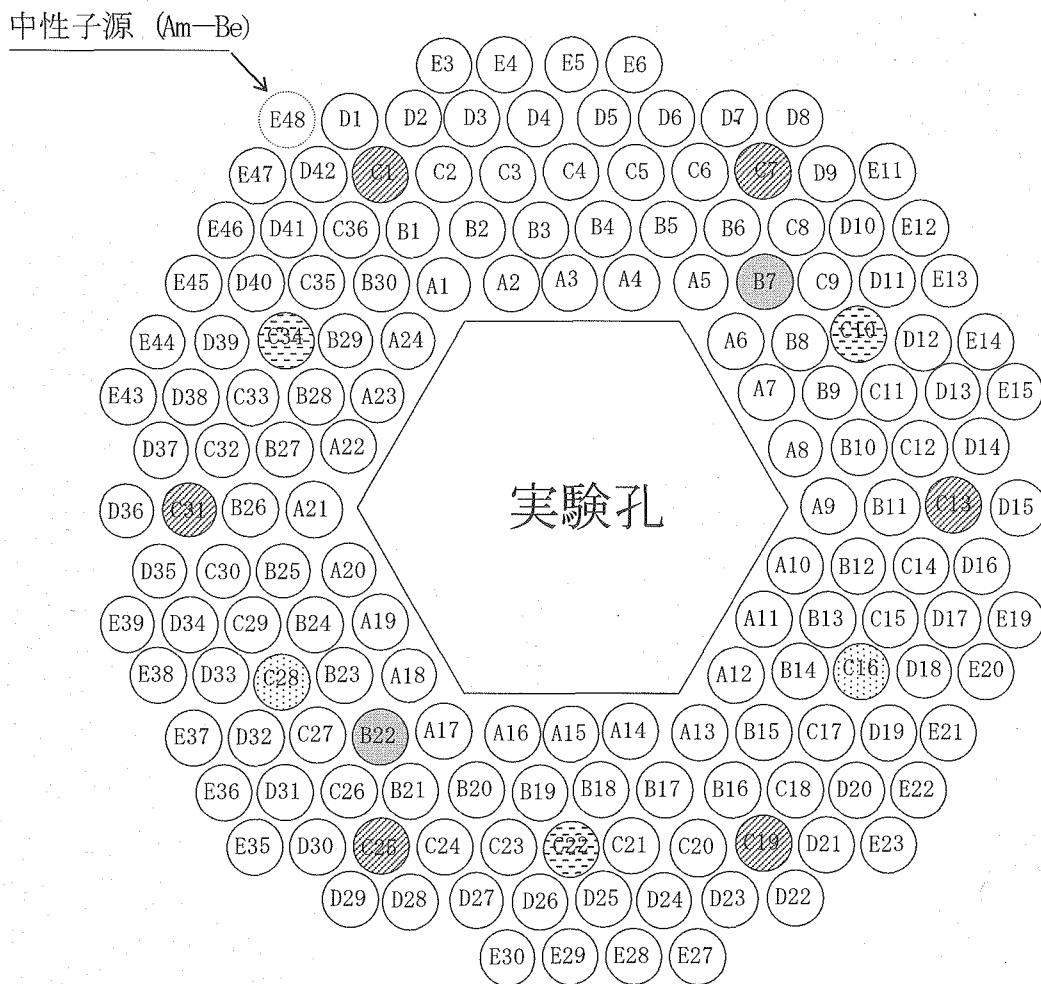


Fig.2-1 NSRR原子炉本体立面図



制御棒の名称	炉心装荷位置	凡 例
調整棒 R-1	C- 1	
R-2	C- 7	
R-3	C-13	
R-4	C-19	●
R-5	C-25	
R-6	C-31	
安全棒 S-1	C-16	
S-2	C-28	●
トランジエント棒 T-A	C-10	
T-B	C-22	
T-C	C-34	●
計装燃料 FT-1	B- 7	
FT-2	B-22	●

Fig.2-2 NSRR 炉心断面図

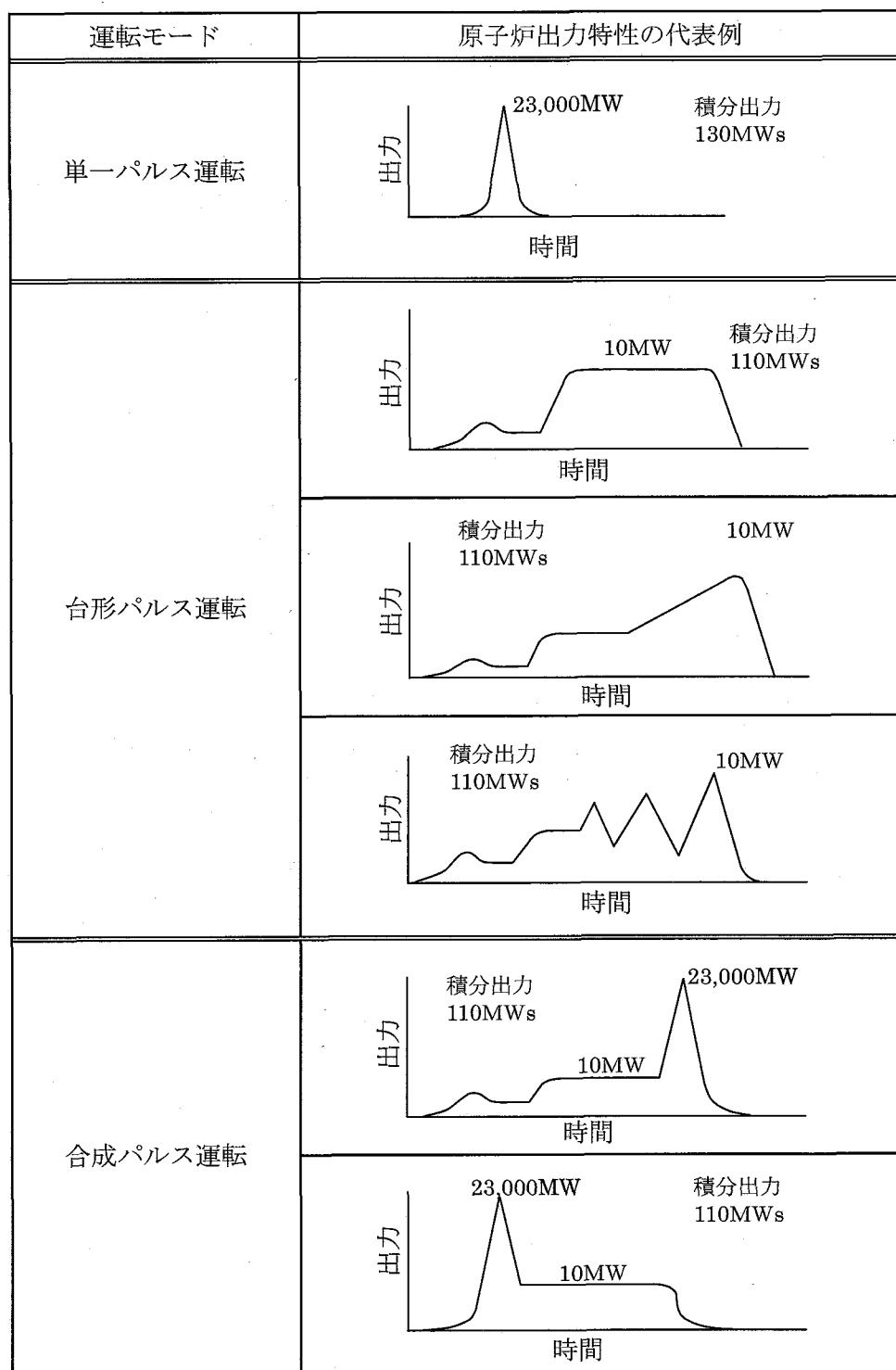
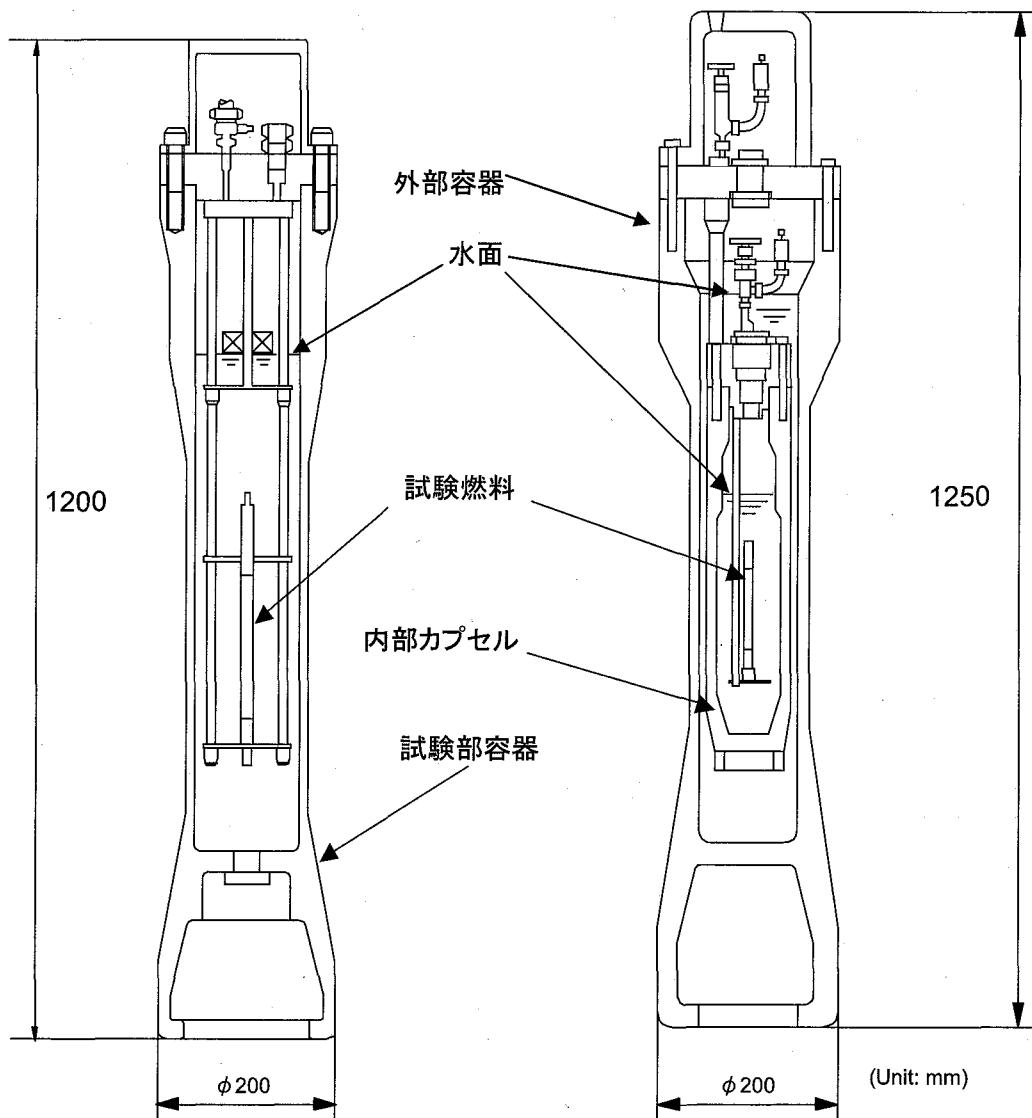


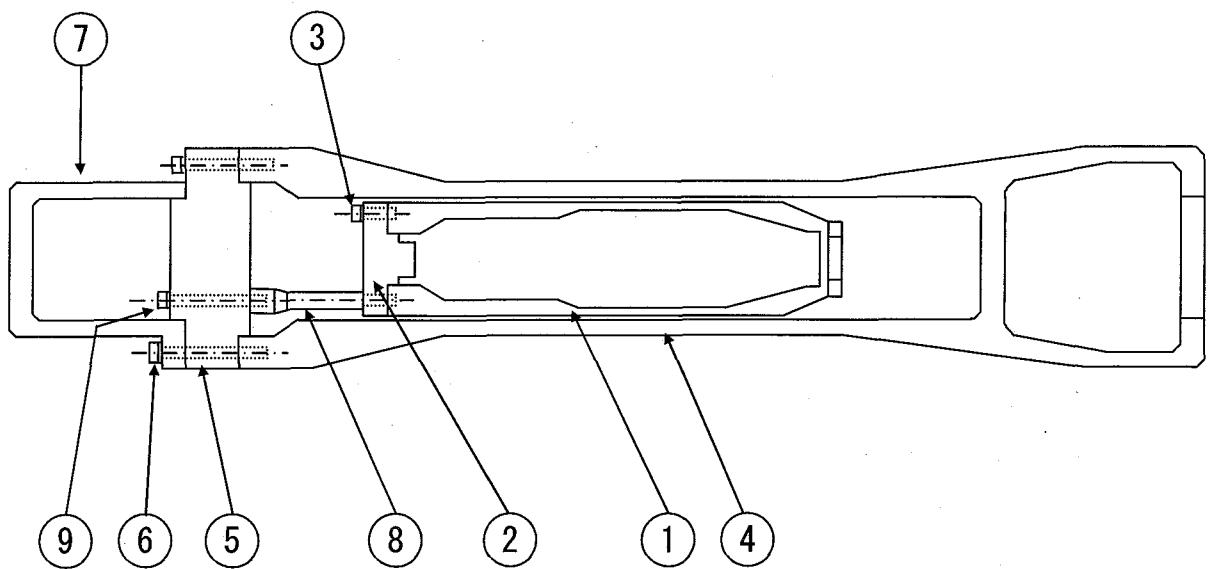
Fig.2-3 運転モード及び出力特性



(A) 未照射酸化ウラン燃料実験用
大気圧水カプセル(一重容器)

(B) 照射済酸化ウラン燃料、未照
射及び照射済混合酸化物燃料実験
用大気圧水カプセル(二重容器)

Fig.2-4 大気圧水カプセルの概略図



名 称		品番	概略寸法 (mm)	材 料	準拠規格
内 部 セ ル カ プ	胴 体	1	$\phi 126 \times 3t \times L645$	SUS304	JIS G 4303
	蓋	2	$\phi 126 \times 65t$	SUS304	JIS G 4303
	フランジボルト	3	M14	SNB21-1	JIS G 4108
外 部 容 器	胴 体	4	$\phi 200 \times 3t \times L1060$	SUS304	JIS G 4303
	蓋	5	$\phi 200 \times 48t$	SUS304	JIS G 4303
	フランジボルト	6	M14	SNB21-1	JIS G 4108
	キャップ	7	$\phi 200 \times H150$	SUS304	JIS G 4303
	吊り具	8	$\phi 32 \times L175$	SNB21-1	JIS G 4108
	吊り具固定ボルト	9	M14	SNB21-1	JIS G 4108

Fig.2-5 X-IV型大気圧水カプセル主要緒元

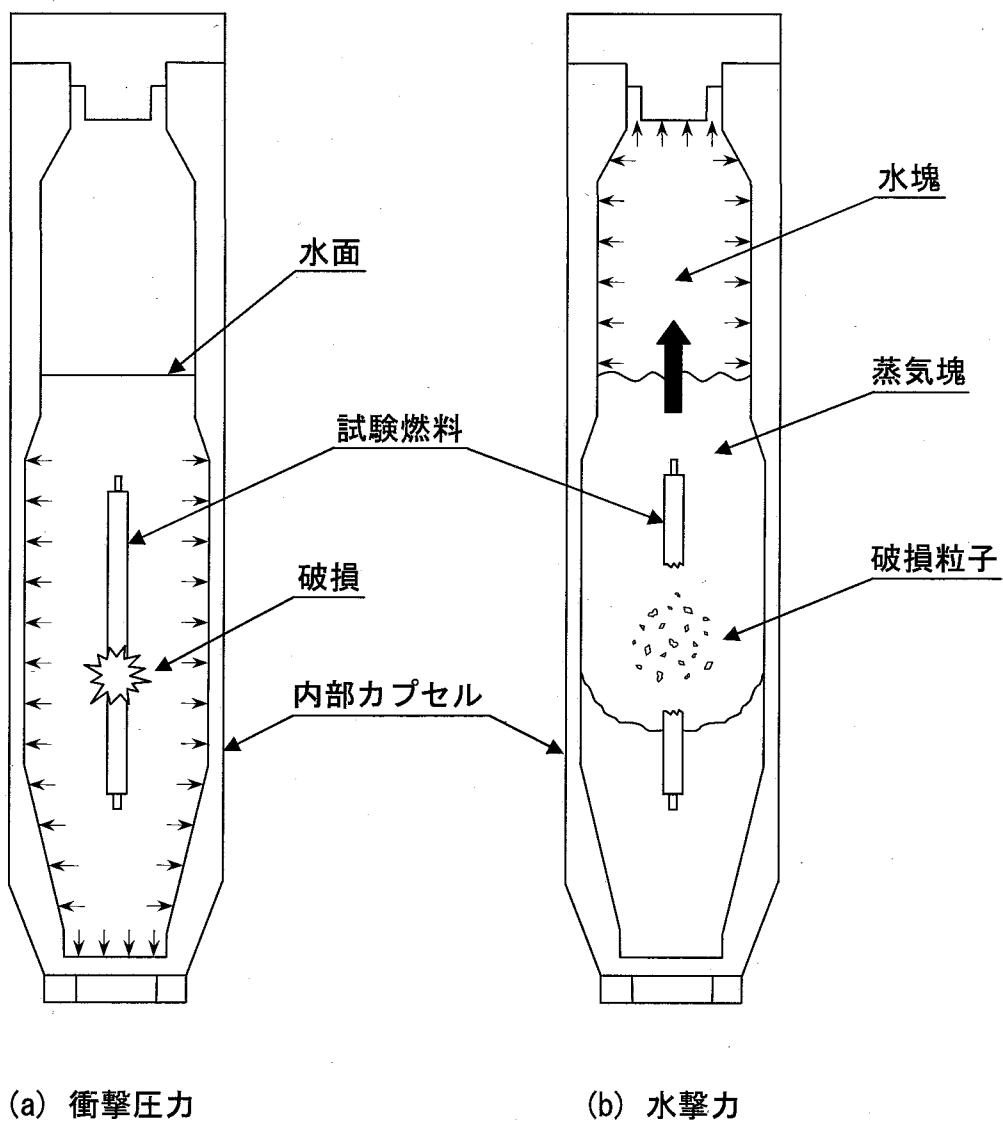


Fig.3-1 衝撃圧力及び水撃力の模式図

Table3-1 実験孔一炉心支持構造体最大加速度分布

解析モデル	質点番号	高さ EL(cm)	集中質量 (kg)	X方向 震度 (G)	Y方向 震度 (G)
	9	-208	0	0.394	0.416
	8	-460	455	0.474	0.377
	4	-707	300	0.531	1.433
	7	-94	27	0.435	1.049
	6	-190	1110 1458*	0.395	0.721
	5	-450	880	0.355	0.376
	4	-707	300	0.531	1.433
	3	-815	50	0.477	1.177
	2	-952	550	0.331	0.518
	1	-1022	568	0.303	0.371
	0	-1140	0	0.288	0.288

(* 上下ブリッジの合計値)

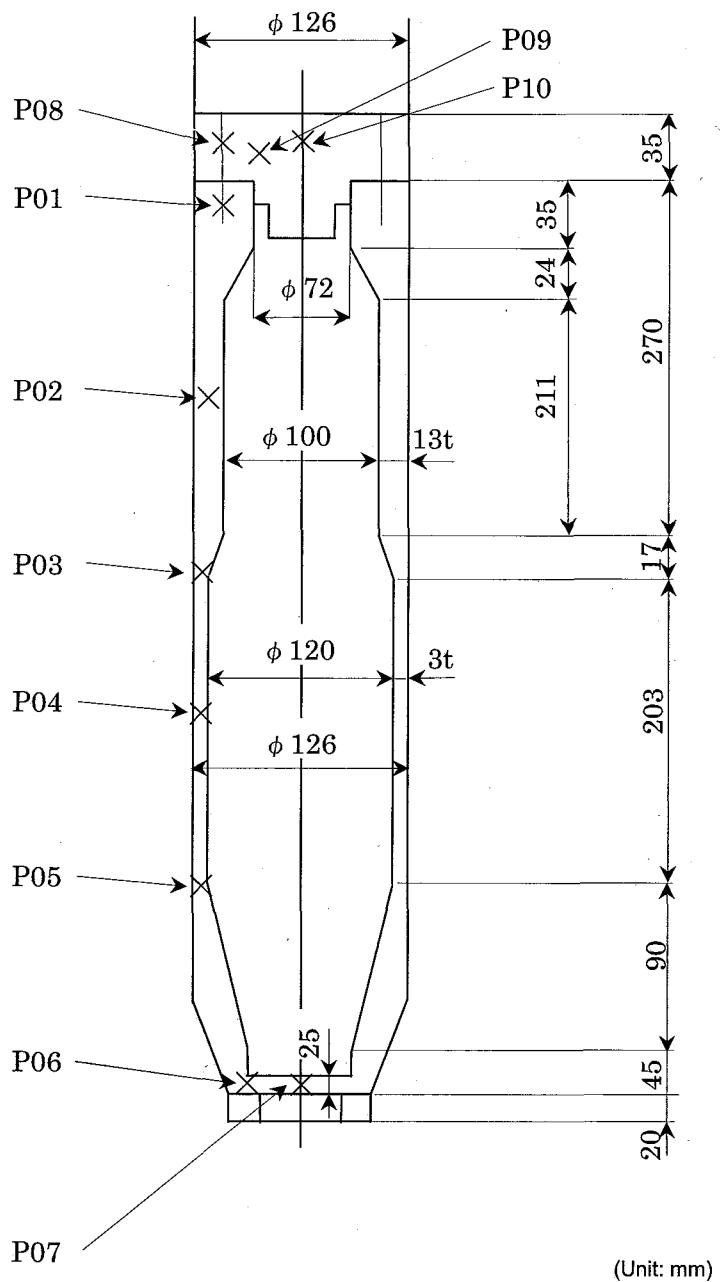


Fig.3-2 内部カプセルの主要寸法及び応力評価点

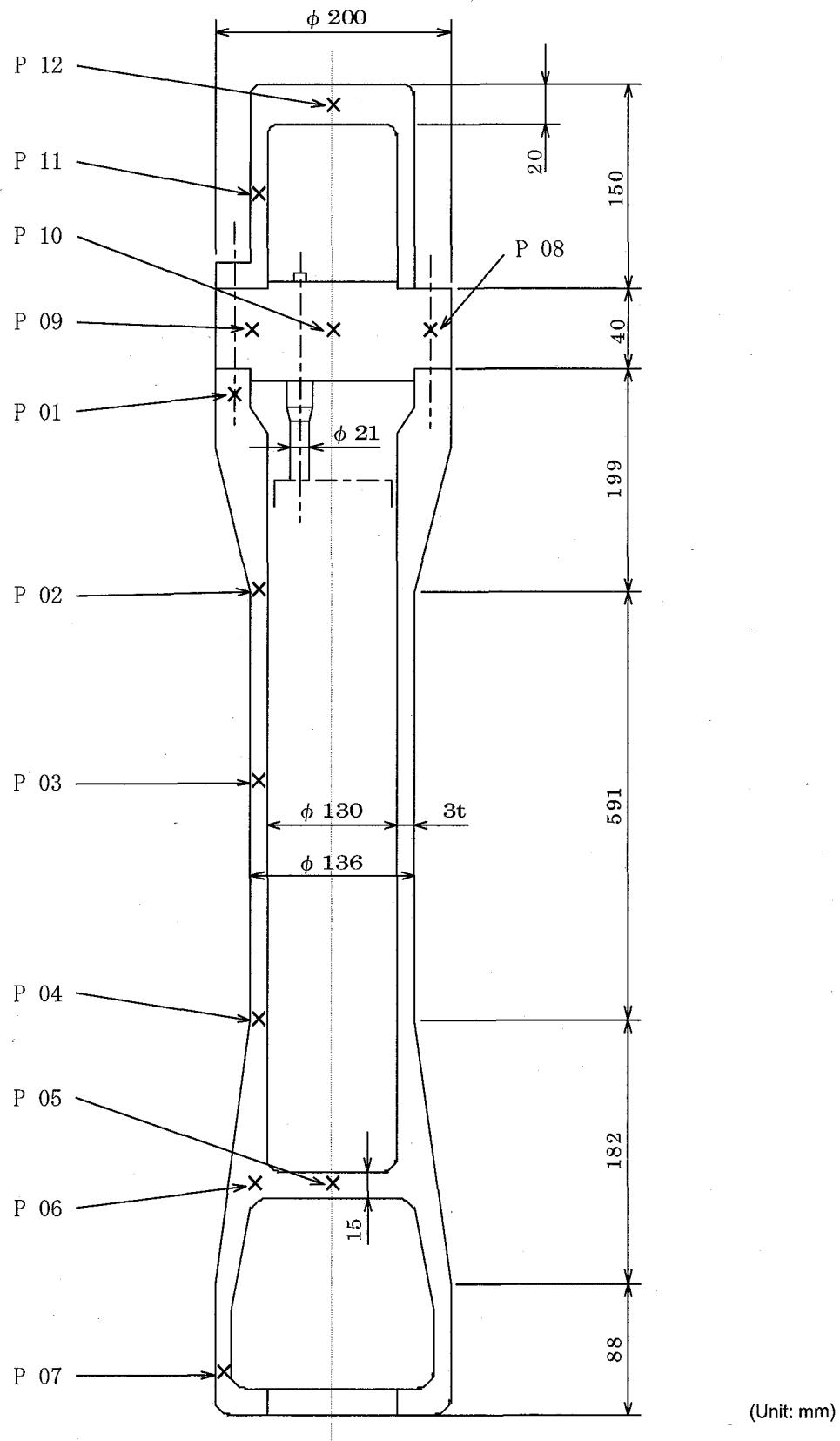


Fig.3-3 外部容器の主要寸法及び応力評価点

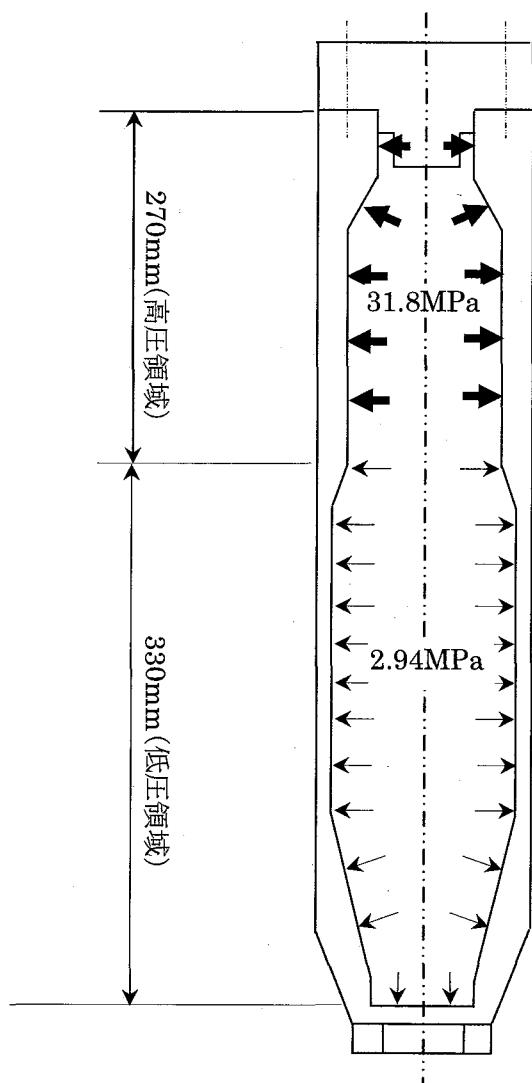


Fig.3-4 内部カプセルの負荷荷重条件

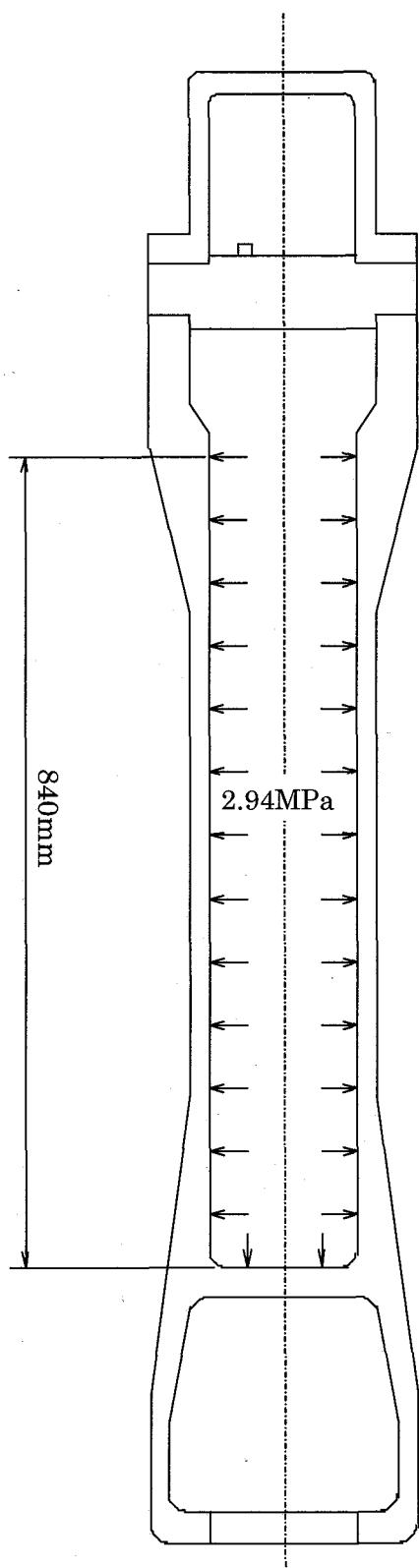


Fig.3-5 外部容器の負荷荷重条件

Table3-2 内部カプセル胴体中央(低圧領域)の負荷荷重

荷重条件 状態	圧力(MPa)	温度(°C)
設計条件	2.94	100
供用状態 A	2.94	100
供用状態 B	0	100
供用状態 C	0	100
試験状態	3.68	常温

Table3-3 内部カプセル胴体上部(高圧領域)及び蓋の負荷荷重

荷重条件 状態	圧力 (MPa)	温度(°C)	軸力(N)	
			蓋	フランジボルト
設計条件	31.8	100	1.29×10^5	6.67×10^4
供用状態 A	31.8	100	1.29×10^5	6.67×10^4
供用状態 B	0	100	0	0
供用状態 C	0	100	0	0
試験状態	3.68	20	—	—

Table3-4 外部容器の負荷荷重

荷重条件 状態	圧力 (MPa)	温度 (°C)	軸 力 (N)	
			胴体、蓋、 フランジボルト 吊り具中央	吊り具ネジ 部、吊り具 固定ボルト
設計条件	2.94	100	6.67×10^4	6.14×10^3
供用状態 A	2.94	100	6.67×10^4	6.14×10^3
供用状態 B	0	100	—	—
供用状態 C	0	100	—	—
試験状態	3.68	20	—	—

Table3-5 地震力による軸力及び曲げモーメント

荷重条件 応力評価点		設計ベース地震力 に対する計算結果		運転ベース地震力 に対する計算結果	
		軸力 F (N)	曲げモーメント M (N·mm)	軸力 F (N)	曲げモーメント M (N·mm)
内カ ブ 部セル	胴体 P02,P03,P04,P05	117	1.84×10^5	59	9.20×10^4
	フランジボルト及び 胴体ネジ部 P01	2476	—	1238	—
外部 容器	胴体 P02,P03,P04,P07	424	9.32×10^5	212	4.66×10^5
	フランジボルト及び 胴体ネジ部 P01	7734	—	3867	—
	中 央	2476	1.84×10^5	1238	9.20×10^4
	吊り具	最小断面積部	2476	—	1238
		ネ ジ 部	2476	—	1238

応力評価点は Fig.3-1 及び Fig.3-2 を参照

Table3-6 応力強さの制限

荷重条件 状態		Pm [Bm]	PL 及び PL(Pm)+Pb [Bm+Bb]	PL(Pm)+Pb+Q
設計条件		Sm [Sm]	1.5 Sm	—
供用 状態	A	Sm [2 Sm]	1.5 Sm [3 Sm]	3 Sm
	B	Sm [2 Sm]	1.5 Sm [3 Sm]	3 Sm
	C	1.2 Sm [2 Sm]	1.8 Sm [3 Sm]	—
試験状態	0.9 Sy	1.35 Sy	—	—

〔 〕内は、ボルトに対する応力強さの制限値

Pm : 一次一般膜応力強さ、 PL : 一次局部膜応力強さ

Pb : 一次曲げ応力強さ、 Q : 二次応力強さ

Bm : ボルトの平均引張応力、 Bb : ボルトの曲げ応力

Sm : 設計応力強さ、 Sy : 設計降伏点

	Sm(100°C)	Sy(20°C)
SUS304	137	205
SNB21-1	329	1030

注) 純せん断応力の許容値は 0.6Sm とする。

Table3-7 吊り具の応力強さの制限

状態 応力		供用状態 A 及び B	供用状態 C
① 一次引張応力		$\frac{F}{1.5}$ $\left(\frac{F}{2} \right)$	F $\left(1.5 \frac{F}{2} \right)$
② 一次せん断応力		$\frac{F}{1.5\sqrt{3}}$ $\left(\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \right)$	$\frac{F}{\sqrt{3}}$ $\left(\frac{F}{\sqrt{3}} \right)$
③ 一次曲げ応力		$\frac{F}{1.5}$	F
④ 圧縮応力	$\lambda < \Lambda$	$\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$	$1.5 \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$
⑤ 〔一次応力 + 二次応力〕R	引張応力 + 圧縮応力	①に定める値の3倍	_____
注) ボルト等は 除く	せん断応力	②に定める値の3倍	_____
	曲げ応力	③に定める値の3倍	_____
⑥組合せ応力	圧縮 + 曲げモーメント	$\frac{\sigma_c + \sigma_b}{f_c f_b} \leq 1$ かつ $\frac{\sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1$	$\frac{\sigma_c + \sigma_b}{1.5f_c f_b} \leq 1$ かつ $\frac{\sigma_b - \sigma_c}{1.5f_t} \leq 1$
	引張り + 曲げモーメント	$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{f_t} \leq 1$ かつ $\frac{\sigma_b - \sigma_t}{f_b} \leq 1$	$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{1.5f_t} \leq 1$ かつ $\frac{\sigma_b - \sigma_t}{1.5f_b} \leq 1$

吊り具については、クラス1支持構造体の制限値に準ずる。

[] はボルトなどに対する制限

〔記号の説明〕

F : 設計降伏点又は設計引張強さの0.7倍のいずれか小さい方の値

λ : 有効細長比

$$\Lambda : \text{限界細長比} \quad \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

〔一次応力
+
二次応力〕R : 1次応力と2次応力（支持される機器の熱膨張による応力に限る）を加えて求めた応力サイクルにおけるその最大値と最小値との差。

f_c : ④に定める式より求まる供用状態A及びBの制限値

f_b : ③に定める式より求まる供用状態A及びBの制限値

ft : ①に定める式より求まる供用状態 A 及び B の制限値

 σ_c : 平均圧縮応力 σ_b : 曲げ応力 σ_t : 平均引張り応力

Table3-8 内部カプセルの各荷重条件による応力強さ (1/2)

荷 重 条 件 の 成 分 種 類 評 価 点			①								②		③		④		①+②								②+③		②+④			
			内圧				内圧				自重	の運 地転 震ベ 力一 ス		の設 地計 震ベ 力一 ス		設計条件及び供用状態A								供 用 状 態 B		供 用 状 態 C		試 験 状 態		
			2.94MPa				31.8MPa					S		S																
			σ_r	σ_i	σ_θ	S	σ_r	σ_i	σ_θ	S	σ_i	$\pm\sigma_i$	$\pm\sigma_i$	σ_r	σ_i	σ_θ	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S		
胴体	P02	膜	Pm	-	-	-	-	-13.6	-1.1	119.6	133.2	0.3	0.1	0.1	-13.6	-0.8	119.6	133.2	0.4	0.4	-									
		内面	Pm+Pb	-	-	-	-	-31.2	7.3	140.4	171.6	0.3	0.8	1.5	-31.2	7.6	140.4	171.6	1.1	1.8	-									
		外面	Pm+Pb	-	-	-	-	1.1	-6.3	106.1	112.4	0.3	0.8	1.5	1.1	-6.0	106.1	112.1	1.1	1.8	-									
	P03	膜	Pm	-1.1	30.2	38.5	39.6	-	-	-	-	0.3	0.1	0.1	-1.1	30.5	38.5	39.6	0.4	0.4	-									
		内面	Pm+Pb	-2.1	38.5	41.6	43.7	-	-	-	-	0.3	2.7	5.3	-2.1	38.8	41.6	43.7	3.0	5.6	-									
		外面	Pm+Pb	-1.1	25.0	36.4	37.5	-	-	-	-	0.3	2.7	5.3	-1.1	25.3	36.4	37.5	3.0	5.6	-									
	P04	膜	Pm	-2.1	31.2	62.4	64.5	-	-	-	-	0.3	0.1	0.1	-2.1	31.5	62.4	64.5	0.4	0.4	75.5									
		内面	Pm+Pb	-4.2	30.2	63.5	67.7	-	-	-	-	0.3	2.7	5.3	-4.2	30.5	63.5	67.7	3.0	5.6	-									
		外面	Pm+Pb	-1.1	31.2	60.4	61.5	-	-	-	-	0.3	2.7	5.3	-1.1	31.5	60.4	61.5	3.0	5.6	-									
	P05	膜	Pm	-2.1	30.2	48.9	51.0	-	-	-	-	0.3	0.1	0.1	-2.1	30.5	48.9	51.0	0.4	0.4	-									
		内面	Pm+Pb	-2.1	32.3	51.0	53.1	-	-	-	-	0.3	2.7	5.3	-2.1	32.6	51.0	53.1	3.0	5.6	-									
		外面	Pm+Pb	-1.1	30.2	47.9	49.0	-	-	-	-	0.3	2.7	5.3	-1.1	30.5	47.9	49.0	3.0	5.6	-									
	P06	膜	Pm	2.1	1.1	-1.1	3.2	-	-	-	-	-	-	-	2.1	1.1	-1.1	3.2	-	-	-									
		内面	Pm+Pb	3.2	2.1	6.3	4.2	-	-	-	-	-	-	-	3.2	2.1	6.3	4.2	-	-	-									
		外面	Pm+Pb	3.2	1.1	1.1	2.1	-	-	-	-	-	-	-	3.2	1.1	1.1	2.1	-	-	-									
	P07	膜	Pm	3.2	-1.1	3.2	4.3	-	-	-	-	-	-	-	3.2	-1.1	3.2	4.3	-	-	-									
		内面	Pm+Pb	-4.2	-4.2	-4.2	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-4.2	-4.2	-4.2	0.0	-	-	-									
		外面	Pm+Pb	10.4	3.2	9.4	7.2	-	-	-	-	-	-	-	10.4	3.2	9.4	7.2	-	-	-									

Pm:一次一般膜応力強さ Pb:一次曲げ応力強さ σ_r :半径方向 σ_i :軸方向 σ_θ :周方向 S:応力強さ

Table3-9 内部カプセルの各荷重条件による応力強さ (2/2)

		荷重条件 応力の分類	①	②	③	④	①+④	②+④	③+④	単位: MPa 設計条件 及び 供用状態A 供用状態B 供用状態C 試験状態
評価点	内圧による もの		運転ベース の地震力	設計ベース の地震力	熱的荷重					
胴体	P01メネジメント山	平均剪断	10.0	2.3	4.5	16.7	26.7	19.0	21.2	-
蓋	P08	Pm+Pb	34.2	-	-	-	34.2	-	-	-
	P09	Pm+Pb	40.6	-	-	-	40.6	-	-	-
	P10	Pm+Pb	42.6	-	-	-	42.6	-	-	-
	計装線引出部 穴周辺の応力	Pm+Pb	32.2	-	-	-	32.2	-	-	-
	バルブ取り付 け部の穴周辺 の応力	Pm+Pb	34.8	-	-	-	34.8	-	-	-
	計装線引出部 メネジメント山	平均剪断	8.2	-	-	-	8.2	-	-	-
	フランジホール	最小断面積部 平均引張	49.2	11.0	22.0	82.5	131.7	93.5	104.5	-
	オネジメント山	平均剪断	12.2	2.8	5.5	20.5	32.7	23.3	26.0	-

Pm:一次一般膜応力強さ

Pb:一次曲げ応力強さ

Table3-10 外部容器の各荷重条件による応力強さ (1/2)

		荷 重 条 件 応 力 成 分 評価点	①	②	③	④	⑤	①+②+③	②+③+④	②+③+⑤	単位: MPa 設計条件 及び 供用状態A 供用状態B 供用状態C 試験状態						
			軸力 6.67×10^4 N	自重 ウホ ン 荷 ル 重 ド ダ ス	の運 地 転 震 ベ カ ス	の設 地 計 震 ベ カ ス		設計条件 及び 供用状態A		供用状態B							
			内圧 2.94 MPa														
		σ_r	σ_1	σ_θ	S	σ_1	σ_1	$\pm \sigma_1$	$\pm \sigma_1$	σ_r	σ_1	σ_θ	S	S	S	S	
P02	膜	Pm	1.1	50.0	82.2	81.1	-0.8	-5.6	0.2	0.4	1.1	43.6	82.2	81.1	6.6	6.8	-
	内面	Pm+Pb	-3.2	37.5	80.1	83.3	-0.8	-5.6	11.4	22.8	-3.2	31.1	80.1	83.3	17.8	29.2	-
	外面	Pm+Pb	3.2	60.4	83.2	80.0	-0.8	-5.6	11.4	22.8	3.2	54.0	83.2	80.0	17.8	29.2	-
P03	膜	Pm	-3.2	47.9	65.6	68.8	-0.8	-5.6	0.2	0.4	-3.2	41.5	65.6	68.8	6.6	6.8	81.7
	内面	Pm+Pb	-5.2	47.9	66.6	71.8	-0.8	-5.6	11.4	22.8	-5.2	41.5	66.6	71.8	17.8	29.2	-
	外面	Pm+Pb	-2.1	47.9	63.5	65.6	-0.8	-5.6	11.4	22.8	-2.1	41.5	63.5	65.6	17.8	29.2	-
P04	膜	Pm	-1.1	48.9	74.9	76.0	-0.8	-5.6	0.2	0.4	-1.1	42.5	74.9	76.0	6.6	6.8	-
	内面	Pm+Pb	-3.2	43.7	76.0	79.2	-0.8	-5.6	11.4	22.8	-3.2	37.3	76.0	79.2	17.8	29.2	-
	外面	Pm+Pb	2.1	53.1	74.9	72.8	-0.8	-5.6	11.4	22.8	2.1	46.7	74.9	72.8	17.8	29.2	-
P05	膜	Pm	2.1	-1.1	2.1	3.2	-	-	-	2.1	-1.1	2.1	3.2	-	-	-	-
	内面	Pm+Pb	-32.3	-4.2	-32.3	28.1	-	-	-	-32.3	-4.2	-32.3	28.1	-	-	-	-
	外面	Pm+Pb	39.6	2.1	39.6	37.5	-	-	-	39.6	2.1	39.6	37.5	-	-	-	-
P06	膜	Pm	4.2	3.2	2.1	2.1	-	-	-	4.2	3.2	2.1	2.1	-	-	-	-
	内面	Pm+Pb	6.3	6.3	28.1	21.8	-	-	-	6.3	6.3	28.1	21.8	-	-	-	-
	外面	Pm+Pb	3.2	1.1	-18.8	22.0	-	-	-	3.2	1.1	-18.8	22.0	-	-	-	-
P07	膜	Pm	1.1	2.1	-3.2	5.3	-0.8	-5.6	0.1	0.1	1.1	-4.3	-3.2	5.4	6.5	6.5	-
	内面	Pm+Pb	2.1	11.5	-1.1	12.6	-0.8	-5.6	1.4	2.6	2.1	5.1	-1.1	6.2	7.8	9.0	-
	外面	Pm+Pb	-1.1	-5.2	-5.2	4.1	-0.8	-5.6	1.4	2.6	-1.1	-11.6	-5.2	10.5	7.8	9.0	-

Pm:一次一般膜応力強さ

Pb:

一次曲げ応力強さ

 σ_r :半径方向 σ_1 :軸方向 σ_θ :周方向

S:応力強さ

Table3-11 外部容器の各荷重条件による応力強さ (2/2)

評価点		荷重条件 応力の分類		①	①'	②	③	④	①+①'+④	①'+②+④	①'+③+④	単位: MPa
				機械的荷重		運転ベースの地震力		熱的荷重	設計条件及び供用状態A	供用状態B	供用状態C	試験状態
		内圧によるもの	ホールドダウン荷重	応力強さ	応力強さ	応力強さ	応力強さ	応力強さ	応力強さ	応力強さ	応力強さ	応力強さ
胴体	P01メジネジ山	平均剪断	10.0	-	7.0	13.9	16.7	26.7	23.7	30.6	-	-
蓋	P08	Pm+Pb	5.5	-	-	-	-	5.5	-	-	-	-
	P09	Pm+Pb	8.2	-	-	-	-	8.2	-	-	-	-
	P10	Pm+Pb	16.8	-	-	-	-	16.8	-	-	-	-
	計装線引出部穴周辺の応力	Pm+Pb	15.1	-	-	-	-	15.1	-	-	-	-
	バルブ取り付け部の穴周辺の応力	Pm+Pb	9.0	-	-	-	-	9.0	-	-	-	-
フランジボルト	最小断面積部	平均引張	49.2	-	34.3	68.5	82.5	131.7	116.8	151.0	-	-
	オネジネジ山	平均剪断	12.2	-	8.5	17.0	20.5	32.7	29.0	37.5	-	-
キャップ	P11	Pm	-	5.2	0.2	0.4	0.4	5.6	5.8	6.0	-	-
		Pm+Pb	-	5.2	11.4	22.8	0.4	5.6	17.0	28.4	-	-
	P12	Pm+Pb	-	22.7	0.9	1.6	1.8	24.5	25.4	26.1	-	-
吊り具	吊り具	Pm	64.3	-	3.6	7.2	-	64.3	3.6	7.2	-	-
		Pm+Pb	64.3	-	37.4	74.7	-	64.3	37.4	74.7	-	-
		圧縮 + 曲げモーメント*2	-	-	0.1	0.2	-	-	0.1	0.2	-	-
		引張り + 曲げモーメント*2	-	-	0.1	0.1	-	-	0.1	0.1	-	-
	最小断面積部	平均引張	19.0	-	11.0	22.0	82.5	101.5	93.5	104.5	-	-
	オネジネジ山	平均剪断	4.7	-	2.8	5.5	20.5	25.2	23.3	26.0	-	-
	メジネジ山	平均剪断	3.9	-	2.3	4.5	16.7	20.6	19.0	21.2	-	-

Pm:一次一般膜応力強さ

Pb:一次曲げ応力強さ

Table3-12 内部カプセルの膜応力強さの評価

評価点		設計条件及び供用状態A			供用状態B			供用状態C			試験状態		
		応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値
胴体	P01メジネジ山	平均剪断	26.7	82	平均剪断	19.0	82	平均剪断	21.2	82	-	-	-
	P02	Pm	133.2	137	Pm	0.4	137	Pm	0.4	164	-	-	-
	P03	Pm	39.6	137	Pm	0.4	137	Pm	0.4	164	-	-	-
	P04	Pm	64.5	137	Pm	0.4	137	Pm	0.4	164	Pm	75.5	184
	P05	Pm	51.0	137	Pm	0.4	137	Pm	0.4	164	-	-	-
	P06	Pm	3.2	137	Pm	-	-	Pm	-	-	-	-	-
	P07	Pm	4.3	137	Pm	-	-	Pm	-	-	-	-	-
蓋	計装線引出部 メジネジ山	平均剪断	8.2	82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
フランジボルト	最小断面積	平均引張	131.7	329	平均引張	93.5	658	平均引張	104.5	658	-	-	-
	オネジネジ山	平均剪断	32.7	197	平均剪断	23.3	197	平均剪断	26.0	197	-	-	-

Pm:一次一般膜応力強さ

Table3-13 内部カプセルの膜応力+曲げ応力の評価

単位: MPa

評価点	設計条件及び供用状態A			供用状態B			供用状態C			試験状態			
	応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値	
胴体	P02	Pm+Pb	171.6	205	Pm+Pb	1.1	205	Pm+Pb	1.8	246	—	—	—
	P03	Pm+Pb	43.7	205	Pm+Pb	3.0	205	Pm+Pb	5.6	246	—	—	—
	P04	Pm+Pb	67.7	205	Pm+Pb	3.0	205	Pm+Pb	5.6	246	—	—	—
	P05	Pm+Pb	53.1	205	Pm+Pb	3.0	205	Pm+Pb	5.6	246	—	—	—
	P06	Pm+Pb	4.2	205	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	P07	Pm+Pb	7.2	205	—	—	—	—	—	—	—	—	—
蓋	P08	Pm+Pb	34.2	205	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	P09	Pm+Pb	40.6	205	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	P10	Pm+Pb	42.6	205	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	計装線引出部穴周辺の応力	Pm+Pb	32.2	205	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	バルブ取り付け部の穴周辺の応力	Pm+Pb	34.8	205	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Pm:一次一般膜応力強さ Pb:一次曲げ応力強さ

Table3-14 外部容器の膜応力強さの評価

単位: MPa

評価点	設計条件及び供用状態A			供用状態B			供用状態C			試験状態			
	応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値	
胴体	P01メネジネジ山	平均剪断	26.7	82	平均剪断	23.7	82	平均剪断	30.6	82	—	—	—
	P02	Pm	81.1	137	Pm	6.6	137	Pm	6.8	164	—	—	—
	P03	Pm	68.8	137	Pm	6.6	137	Pm	6.8	164	Pm	81.7	184
	P04	Pm	76.0	137	Pm	6.6	137	Pm	6.8	164	—	—	—
	P05	Pm	3.2	137	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	P06	Pm	2.1	137	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	P07	Pm	5.4	137	Pm	6.5	137	Pm	6.5	164	—	—	—
フランジボルト	最小断面積部	平均引張	131.7	329	平均引張	116.8	658	平均引張	151.0	658	—	—	—
	オネジネジ山	平均剪断	32.7	197	平均剪断	29.0	197	平均剪断	37.5	197	—	—	—
キャップ	P11	Pm	5.6	137	Pm	5.8	137	Pm	6.0	164	—	—	—
吊り具	吊り具中央	Pm	64.3	328	Pm	3.6	328	Pm	7.2	492	—	—	—
	最小断面積部	平均引張	101.5	352	平均引張	93.5	352	平均引張	104.5	528	—	—	—
	オネジネジ山	平均剪断	25.2	270	平均剪断	23.3	270	平均剪断	26.0	406	—	—	—
	メネジネジ山	平均剪断	20.6	270	平均剪断	19.0	270	平均剪断	21.2	406	—	—	—

Pm:一次一般膜応力

Table3-15 外部容器の膜応力+曲げ応力強さの評価

評価点		設計条件及び供用状態A			供用状態B			供用状態C			試験状態		
		応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値	応力の種類	応力強さ	許容値
胴体	P02	Pm+Pb	83.3	205	Pm+Pb	17.8	205	Pm+Pb	29.2	246	-	-	-
	P03	Pm+Pb	71.8	205	Pm+Pb	17.8	205	Pm+Pb	29.2	246	-	-	-
	P04	Pm+Pb	79.2	205	Pm+Pb	17.8	205	Pm+Pb	29.2	246	-	-	-
	P05	Pm+Pb	37.5	205	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P06	Pm+Pb	22.0	205	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P07	Pm+Pb	10.5	205	Pm+Pb	7.8	205	Pm+Pb	9.0	246	-	-	-
蓋	P08	Pm+Pb	5.5	205	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P09	Pm+Pb	8.2	205	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P10	Pm+Pb	16.8	205	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	計装線引出部穴周辺の応力	Pm+Pb	15.1	205	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	バルブ取り付け部の穴周辺の応力	Pm+Pb	9.0	205	-	-	-	-	-	-	-	-	-
キャップ	胴部 P11	Pm+Pb	5.6	205	Pm+Pb	17.0	205	Pm+Pb	28.4	246	-	-	-
	上面 P12	Pm+Pb	24.5	205	Pm+Pb	25.4	205	Pm+Pb	26.1	246	-	-	-
吊り具	吊り具中央	Pm+Pb	64.3	469	Pm+Pb	37.4	469	Pm+Pb	74.7	704	-	-	-
		-	-	-	圧縮応力 + 曲げモーメント	0.1	1	圧縮応力 + 曲げモーメント	0.2	1	-	-	-
		-	-	-	引張り応力 + 曲げモーメント	0.1	1	引張り応力 + 曲げモーメント	0.1	1	-	-	-

Pm:一次一般膜応力強さ Pb:一次曲げ応力強さ

Table3-16 X-IV型大気圧水カプセルの負の反応度の実測値

Test No.	Capsule Worth(Δk)	Test No.	Capsule Worth(Δk)	Test No.	Capsule Worth(Δk)
TS-5	-0.016	TK-3	-0.017	TK-9	-0.017
OI-2	-0.017	TK-4	-0.017	UC-1	-0.017
OI-3	-0.017	FK-3	-0.017	FK-10	-0.016
KF-1	-0.017	TK-5	-0.017	FK-11	-0.017
OI-4	-0.017	TK-6	-0.017	TK-10	-0.017
OI-6	-0.017	TK-7	-0.017	OI-10	-0.017
OI-7	-0.017	FK-4	-0.017	OI-11	-0.017
OI-8	-0.018	FK-5	-0.017	VA-1	-0.017
OI-9	-0.018	TK-8	-0.017	OI-12	-0.017
FK-1	-0.017	FK-6	-0.017	MR-1	-0.017
TK-1	-0.017	FK-7	-0.017	VA-2	-0.017
FK-2	-0.017	FK-8	-0.017	RH-1	-0.017
TK-2	-0.017	FK-9	-0.017	LS-1	-0.017

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長 質 時 間 電 流 热力学温度 物 質 光 度	メートル キログラム 秒 アンペア ケルビン モル カンデラ	m kg s A K mol cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面 体 速 度 加速度 波 数	積 平 方 積 立 法 度 メートル 每秒 每秒 每秒 每秒	m^2 m^3 m/s m/s^2 m/s^2 m/s^2
密度 (質量密度) 質量体積 (比体積) 電流密度 磁界の強さ (物質量の) 濃度 輝度 (屈折率)	キログラム每立法メートル 立法メートル毎キログラム アンペア每平方メートル アンペア每メートルモル毎立方メートル カンデラ每平方メートル (数の) 1	kg/m^3 m^3/kg A/m^2 A/m mol/m^3 cd/m^2 1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨ	Y	10^{-1}	デ	d
10^{21}	ゼ	Z	10^{-2}	セ	c
10^{18}	エ	E	10^{-3}	ミ	m
10^{15}	ペ	P	10^{-6}	マイ	p
10^{12}	テ	T	10^{-9}	ナ	n
10^9	ギ	G	10^{-12}	ビ	p
10^6	メ	M	10^{-15}	フェ	f
10^3	キ	k	10^{-18}	ア	a
10^2	ヘ	h	10^{-21}	ゼ	z
10^1	デ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1} = 1$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
压力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー, 仕事, 熱量	パスカル	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	W/A
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	シージメンス	S	A/V
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘルツ	H	Wb/A
セリシウス度	セルシウス度 ^(d)	°C	K
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種の) 放射能吸収線量, 質量エネルギー	ベクレル	Bq	lm/m^2
ギガ分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	ギガレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
の分子量	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン每秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン每平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量, エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^3 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量), 質量エンタルピー	ジュール每キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
(比エネルギー)			
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	フアラド每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジユール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジユール每モル每ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h = 60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ = (\pi/180) rad$
分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800) rad$
秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) rad$
リットル	L	$1L = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3$
トン	t	$1t = 10^3 kg$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) 1n10 (Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 dam^2=10^4 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10^5 Pa$
オンストローク	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイニン	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^8 Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホット	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	IX unit	$1 IX unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャンスキ	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
カリ	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$