

【確認事項1】カプセルの密封性（気密性）はどのように確保されるのか説明すること。（蓋の穴とキャップの関係も含む。）また、計装プラグが試験燃料破損時の衝撃に耐える仕様になっているかについて説明すること。

【回答1】

カプセルの密閉性の確保については、蓋貫通穴も含めこれまでのカプセルと同様以下のように考えている。なお、当該カプセルは燃料破損による衝撃圧力、水撃力に耐えることを前提とした設計であり、蓋貫通穴についてもそれらの荷重に耐える仕様となっている。

カプセルの胴体と蓋は、Oリング及び銅合金製のパッキンにより気密性を確保する。

蓋の貫通穴のうち計装線引出部に装着する計装プラグは、フッ素ゴム製のOリングにより蓋との気密性を確保します。計装プラグの構造を図1に示す。蓋の貫通穴のうちバルブ取り付け部に装着するガス抜きバルブは、ナットの締め付によりバックフェルール及びフロントフェルールが機能することで、蓋との気密性を確保します。ガス抜きバルブの構造を図2に示す。これら計装プラグ及びガス抜きバルブは、製造メーカーの規格品である。

また、キャップは密閉境界を有していないことから密閉の機能を期待するものではない。

計装プラグ及びガス抜きバルブの最高使用圧力はそれぞれ、16MPaと41.3MPaである。これにかかる荷重として、試験時圧力と水撃力による圧力が考えられる。試験時圧力における負荷荷重では、15.9MPaにおける気密性保持であり、最高使用圧力を下回る。水撃力については、本来、水撃力が作用するに際して、質量の水塊は円柱形状を保持したまま上方へ移動し、カプセル上部の気体を圧縮して速度を失い下降する*（図3）。カプセル上部の気体を圧縮することによる減速は理想気体の状態方程式から求められる。健全燃料で想定する水撃力による速度15.6m/sの水塊は蓋に到達する前に速度を失い下降する。この時蓋底面にかかる最大の圧力は0.37MPaであり、計装プラグとガス抜きバルブの最高使用圧力を十分に下回る。

* 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号をもって許可)追補1(p8)

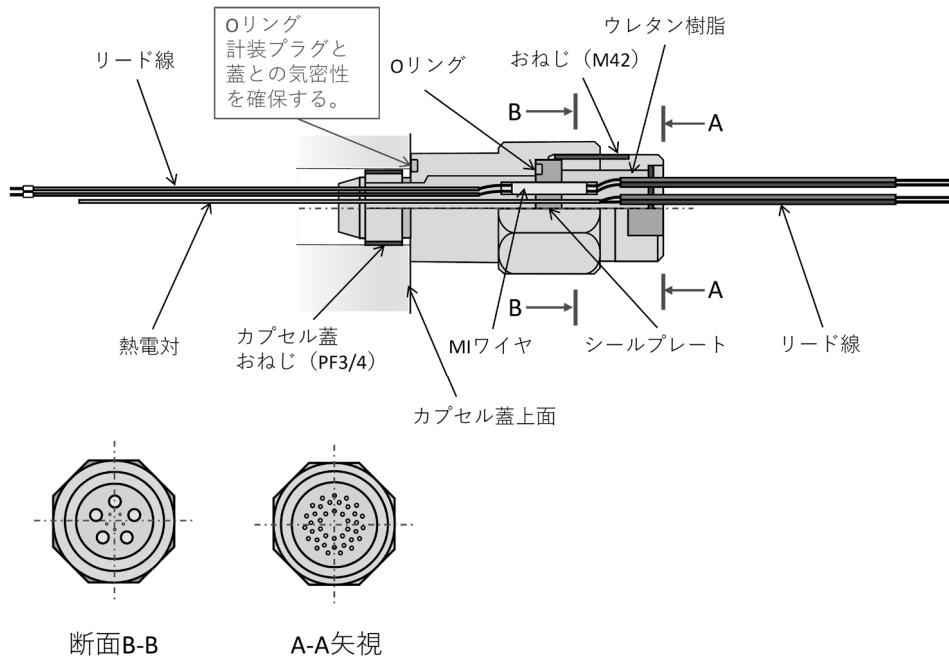


図1 計装プラグ (MIケーブル式計装線引出プラグ)

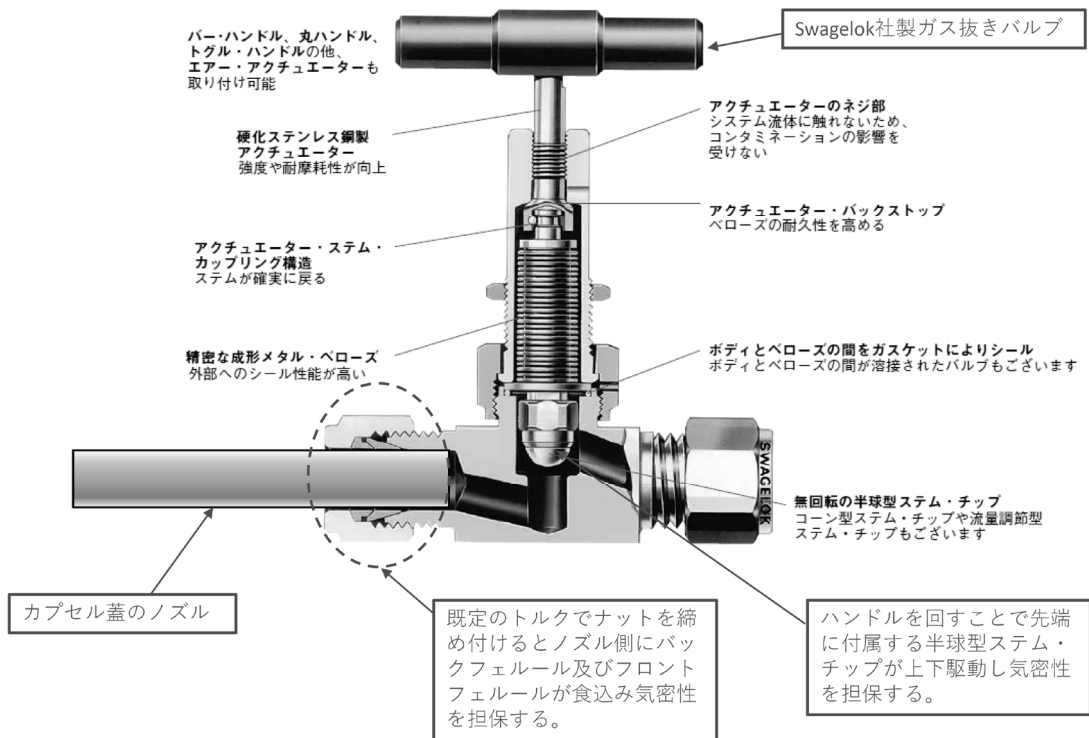


図2 ガス抜きバルブ

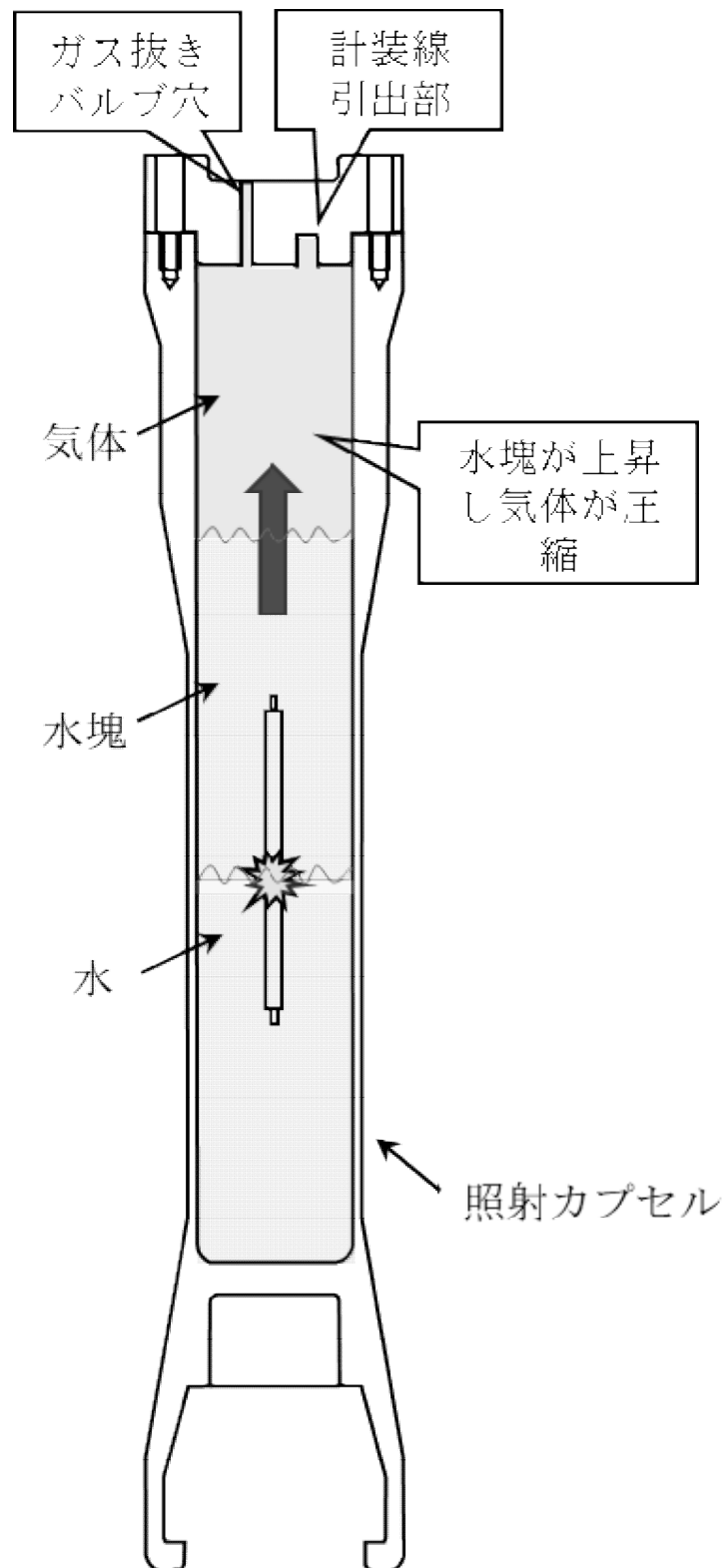


図3 水塊上昇による気体圧縮のイメージ図

【確認事項2】 弾性設計と弾塑性設計の対象部位の選定の考え方を説明すること。また、中性子吸収を減らすため、カプセルをできるだけ薄くするように、当該部位に弾塑性設計を適用しているのでしょうか。

【回答2】

原子炉設置変更許可申請書 添付書類八 別冊9 10.1.3.1(6) 強度設計において、設計方針が以下のように記載されています。

試験部容器については、静的及び動的設計荷重に対し弾性設計又は弾塑性設計を行う。弾性設計を行う場合には、日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」又は同等の基準に準じて設計し、弾塑性設計を行う場合には、最大変形量が板厚平均歪及び表面歪で2%又は限界変形量の1/10、局所歪で5%又は限界変形量の1/4の値のうち、いずれか小さい方を超えないものとして設計する。(略)

また、試験部容器以外については、静的及び動的設計荷重に対し日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」又は同等の基準に準じて弾性設計を行うものとし、溶接部については、日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格」又は同等の基準に準じて設計する。

したがって、試験燃料を封入する試験部容器（胴体及び蓋）については弾塑性設計を実施し、それ以外（フランジボルト及びキャップ）については弾性設計とします。また、弾塑性設計ではカプセルを軸対称2次元モデルとして解析を行うため、不連続部であるメネジネジ山及び蓋の貫通穴（バルブ取り付け部及び計装線引出部）周辺は弾性設計としています。

照射カプセルは中性子吸収を減らすため、できるだけカプセルを薄くする必要があります。

【確認事項3】カプセル内の水位が水撃力の解析結果に及ぼす影響について説明すること。(設置変更許可申請書添付書類8に「カプセル内水面上の空気等の気体の圧縮を考慮し得るものとする」との記載あり。)
水塊高さ0.25mでPmが最大となる理由について説明すること。

【回答3】

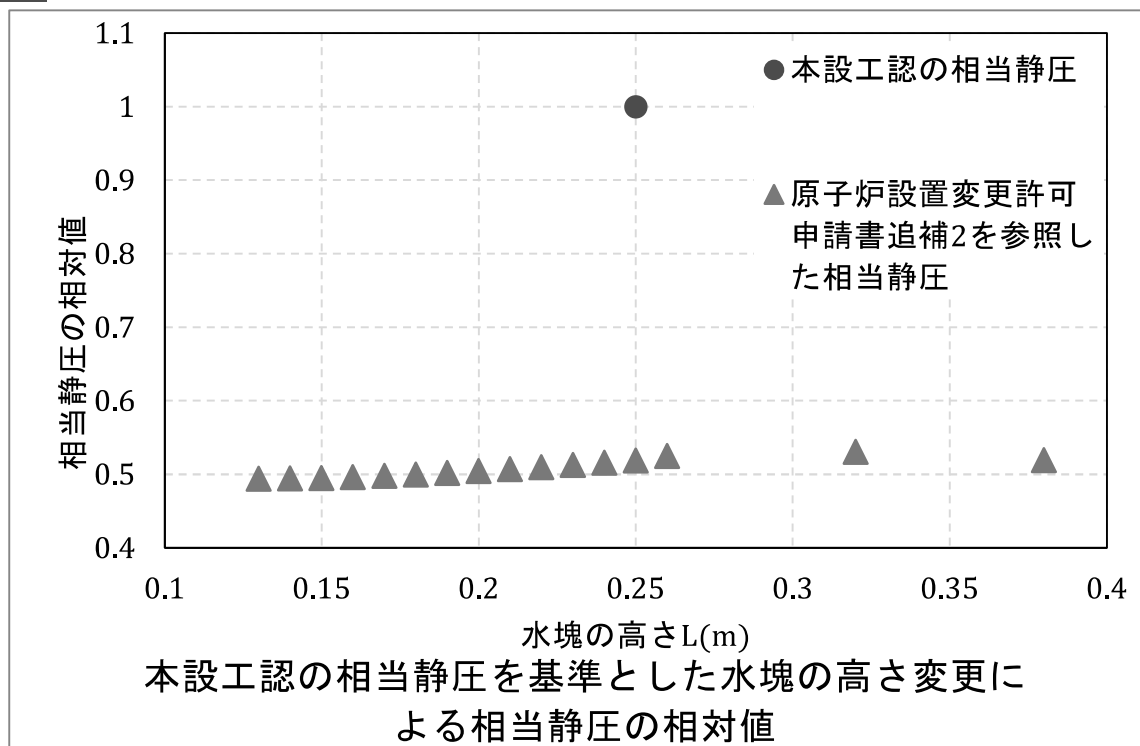
本設工認では、カプセル内の水位は水塊の高さが0.25mとなる高さ、水撃力の作用時間は0.33msで評価をしている。

追補*1に従えば水撃力と相当静圧換算係数の積によって求められる相当静圧は、0.25mよりも少ない水量に対しては小さくなるものの、0.25mより多い水量に対しては、ある量まで増加する。

追補によって評価した水撃力の相当静圧と本設工認で使用している相当静圧の相対値を図に示す。

図からわかるように、本設工認では、追補に示された相当静圧換算係数の最大値よりも相当に保守的な2を用いている。

したがって、水塊の高さの変化を考慮しても十分に保守的な評価となっている。



*1 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 号をもって許可)追補 2(p17)

【確認事項 4】試験燃料の発熱量の算出方法について、パルス運転による原子炉の積算出力からどのように算出されるのか説明すること。

質問 1 試験燃料の発熱量の算出方法について、パルス運転による原子炉の積算出力からどのように算出されるのか説明してください。(資料 p. 7)

- ・パルス運転の原子炉出力は 1 点炉近似の動特性解析コードにより算出するとの理解でよいでしょうか。
- ・原子炉出力のうち、試験燃料が分担する割合は静的な解析（2 次元輸送計算）で算出するとの理解でよいでしょうか。

【回答 4】

確認事項 4、質問 1（パルス運転の原子炉出力）について

試験燃料の発熱量 (J/g) は、原子炉の積分出力 (MW・s) に換算係数 (J/g/ (MW・s)) を乗じることにより求めます。換算係数は、実験の都度、実験の体系（実験燃料、照射カプセル、水量、炉心構成）をモデル化し 2 次元 Sn 法による TWODANT コードにより中性子輸送計算を実施して求められるものです※1。NSRR は、炉心構成に変更はなく燃焼度も 0% であることから原子炉積分出力の実測値と原子炉の運転条件（制御棒引抜量で決まる投入反応度）の相関関係※2 があらかじめ求められていますので、予定している積分出力に合わせた投入反応度でパルス運転を実施します。

投入反応度は、パルス運転用の制御棒位置※3 によってコントロールします。

実験後の試験燃料の発熱量については、積分出力の実測値と換算係数を用いて確認します。換算係数の不確かさは別途 PIE の結果を加味して評価されており、概ね 10% 以下となります。

※1:

照射実験の計画に係る手順については、NSRR 本体施設運転手引（以下「運転手引」とする。）に以下のように定められています。

- ・実験の実施者は、運転手引に定められている NSRR 燃料破損実験管理票に換算係数、積分出力、投入反応度を含む必要事項を記載する。
- ・NSRR 管理課は、NSRR 燃料破損実験管理票の照射条件を考慮し、使用する試験燃料及びカプセルの種類等を確認し、保安規定に定められている「試験燃料用カプセルの挿入条件」を満足することを確認する。

なお、換算係数の算出は、実験の都度、実験の体系で中性子輸送計算を行って
います。

※2：

運転手引において、最新の「投入反応度ーパルス出力換算表」を用いて、パルス
運転を行うことが定められています。また、「投入反応度ーパルス出力換算表」
は定期事業者の都度、更新しています。

※3：

運転手引において、パルス運転はトランジェント棒により反応度を投入し、原
子炉を臨界超過にすることにより行うことから、Tr-A, Tr-B, Tr-C の 3 本を調
節して予定投入反応度に見合ったトランジェント棒位置にすることが定められ
ています。

投入反応度とトランジェント棒位置の相関関係については、過去の計測デー
タを基に、品質マネジメント計画に基づき見直しの必要性について検討を行い、
定めています。

例えば、I-S 型大気圧水カプセルを用いて濃縮度 9.84%、81.3g/UO₂ の試験
燃料（健全燃料）で実験を行う場合、換算係数は 16.28 J/g/ (MW・s)（誤差 ±
10%）となります。発熱量 1800J/g を与える場合、原子炉の積分出力は、

$$1800\text{J/g} \div 16.28 \text{ J/g/ (MW} \cdot \text{s)} = 110.6 \text{ MW} \cdot \text{s}$$

で計画します。

発熱量が 1800J/g の場合、機械的エネルギー転換率は 0.369%となることか
ら、有効破壊エネルギーは、

$$1800\text{J/g} \times 81.3\text{g} \times 0.369\% = 540\text{J}$$

となります。換算係数の誤差 10%を見込んでも I-S カプセルの有効破壊エネ
ルギーの制限範囲（2244J）を超えることはありません。

原子炉の積分出力 110.6MW・s は、相関関係から 4.57\$となるため、投入反応
度に応じた制御棒の引抜量（高速トランジェント棒 B 及び C が下限、調節用ト
ランジェント棒 A が 382 ユニット）でパルス運転を実施します。

質問 1（試験燃料が分担する割合）について

そのとおりです。

【確認事項5】水撃力の動的圧力を相当静圧に換算する際の換算係数を2倍としている理由及びその妥当性（理論的な最大値といえるか等）について説明すること。また、水撃力の換算係数2の入力波と反射波の具体的な説明をすること。

【回答5】

燃料破損によってカプセル上部へ押し上げられた水塊がカプセル蓋に衝突することにより、衝撃荷重が蓋下面からカプセル全体に伝わります。この伝わる荷重を弾性波と考えると、弾性波の振幅が最大となるのは入射波/反射波の最大振幅が重畳した場合であり、いずれの波にも減衰がないと想定した場合、入射波の2倍の圧力が作用します。

反射の特性は蓋境界の条件により変わり得るが、ここではそれを保守的に無視しています。

弾性波の概要を下図に示します。媒質に波を入射すると媒質の端で反射して戻ってきます。この入射する波を入射波と言い、反射する波を反射波と言います。反射の仕方は媒質の端が自由端か固定端かで異なりますが、同位相の波が反射する自由端反射では最大で2倍の波（カプセルでは圧力）になります。

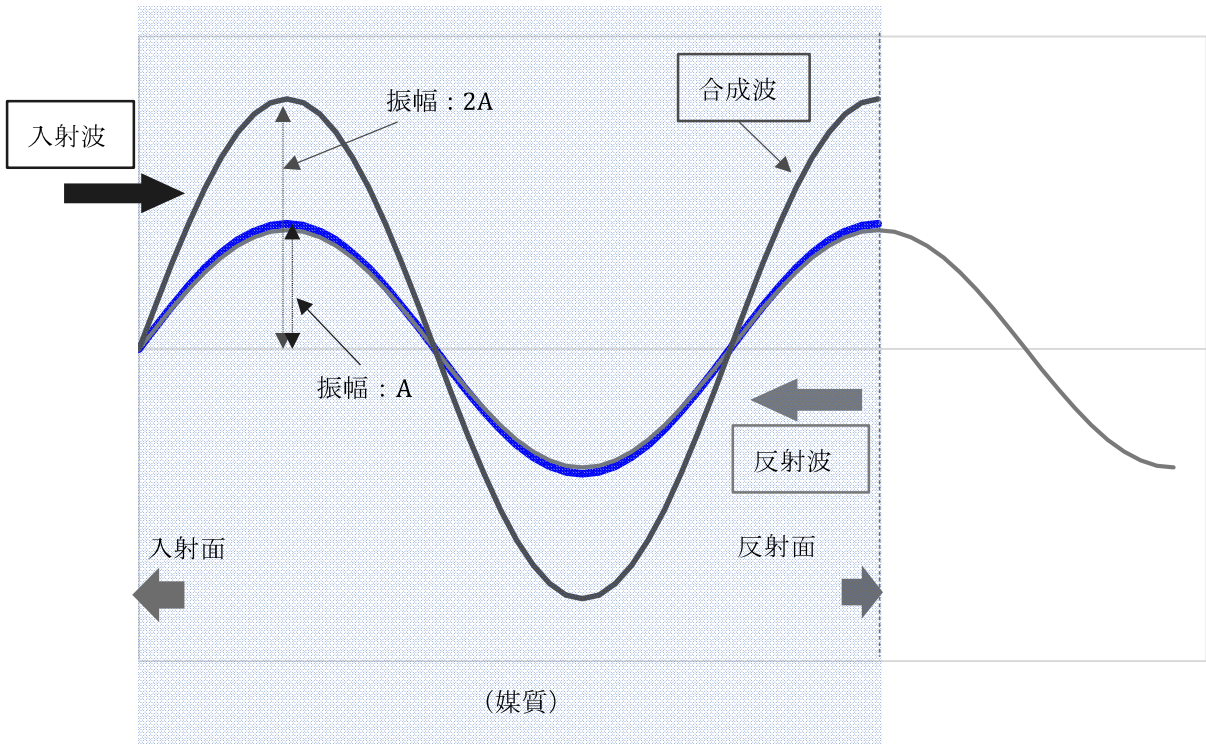
図の左側が蓋下面、右側が蓋上面とすると、蓋下面から衝撃荷重が入射波（青線）として伝わり蓋上面で反射すると、自由端の場合、入射波と反射波の合成は赤線のような波形となります。

入射波の関数を $f(x)_{in}=A\sin x$ とすると、反射波も $f(x)_{ref}=A\sin x$ となることから、入射波と反射波の合成は、

$$f(x)_{com}=f(x)_{in}+f(x)_{ref}=2A\sin x$$

となり、振幅は入射波の2倍となります。

この仮定は、媒質中での減衰を無視し、かつ、完全な反射を考慮した保守的なものです。

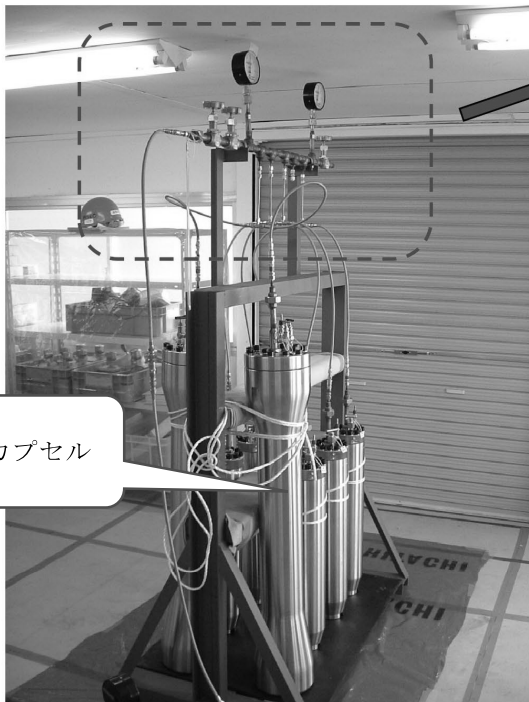


【確認事項6】検査時における15.9MPaの耐压試験について、どのような加圧装置や圧力計を使用して行うのかを説明すること。

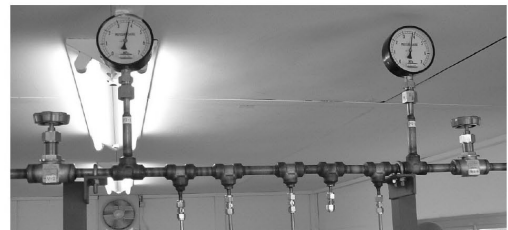
【回答6】

耐压試験時は、組み上げたカプセルに水圧をかけられる系統を構成し、加圧ポンプを用いて加圧します。これまでのカプセルの耐压試験では校正されたブルドン管タイプの圧力計を使用しています。圧力計は、規定試験圧力の1.5～3.0倍までの目盛りのもを2台使用します。

過去の使用前検査で実施したXII-I型大気圧水カプセルの耐压試験時の写真を以下に示します。



照射カプセル



圧力計：ブルドン管タイプ



加圧ポンプ：ハンドルを上下に動かすことでタンクの水をカプセル側に供給し加圧する。

【確認事項 7】照射カプセルを、JSME S NC1 のクラス 1 容器相当として設計している理由を説明すること。

【回答7】

照射カプセル内では、試験燃料の破損に伴う衝撃圧力及び水撃力が発生します。このような大きな荷重に耐えるための設計を行うためには、原子炉の圧力容器相当の設計を行うことが妥当と考え、JSME S NC1 のクラス 1 容器の規格を準用しています。

機能の安全上の重要度の観点で原子炉圧力容器に相当するということではなく、強度設計で用いる規格としてクラス 1 容器のものが適当であるとの考えです。

なお、告示 501 号を準用していた当時も第 1 種圧力容器の規格を準用しておりました。

【確認事項8】カプセルの具体的な実験条件・仕様について説明すること。

また、許容実験条件(有効破壊エネルギー)に与える濃縮度、発熱量の影響を説明すること。

【回答8】

現段階においては、

- ・PWR17×17型の標準的な燃料棒
- ・長さ 10cm～15cm 程度
- ・濃縮度 5%程度
- ・燃料重量 100g・UO₂程度
- ・発熱量 500～600J/g・UO₂程度

を想定しているが、今後の照射実験の結果を考慮して詳細を決定して行く。

また、最大有効破壊エネルギーは、最大実験条件の発熱量及び燃料重量並びに許可書に記載されているカプセル設計用最大転換率線図から求めた機械的エネルギー転換率を用いて算出する。

最大有効破壊エネルギー(J)

=発熱量(J/g・UO₂)×燃料重量(g・UO₂)×機械的エネルギー転換率(%)

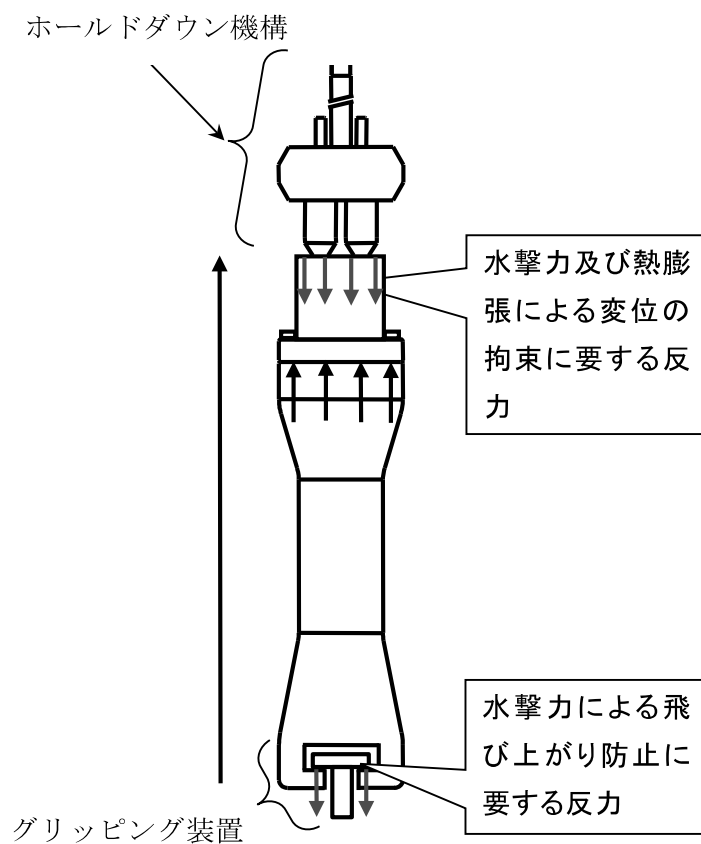
上記の式から、発熱量は有効破壊エネルギーに影響するが、濃縮度は有効破壊エネルギーに影響しない。

ただし、実験計画時の発熱量(J)は、原子炉の積分出力(MW・s)に換算係数(J/g/(MW・s))を乗じることにより求める。換算係数は、実験の都度、実験の体系(実験燃料、照射カプセル、水量、炉心構成)をモデル化し中性子輸送計算を実施して求められる。燃料重量が同じものでも濃縮度が増えれば、燃料の体積が小さくなることから、実験の体系は濃縮度による影響を受け、それが換算係数の算出結果に反映される。したがって、実験計画時の発熱量は、濃縮度の影響を含んだ値となっている。

【確認事項9】 ホールドダウン機構の荷重が軸力に比べ2桁小さい理由を説明すること。

【回答9】

ホールドダウン機構は変位の拘束であり、水撃力による飛び上がり防止はグリッピング装置により行う。以下にそのイメージ図を示す。



以上より、水撃力による主な作用はグリッピング装置で吸収しているため、ホールドダウン機構による負荷荷重は小さくなる。

【確認事項 10】

再使用可否の判断基準及びそれにかかわるカプセルの変形量の測定方法について説明してください。

カプセルの再使用については、原子力科学研究所原子炉施設保安規定に再使用点検の管理基準が定められており、組立前に寸法検査を行い、管理目標値である永久変形量 0.2%を超えていないことを確認している。

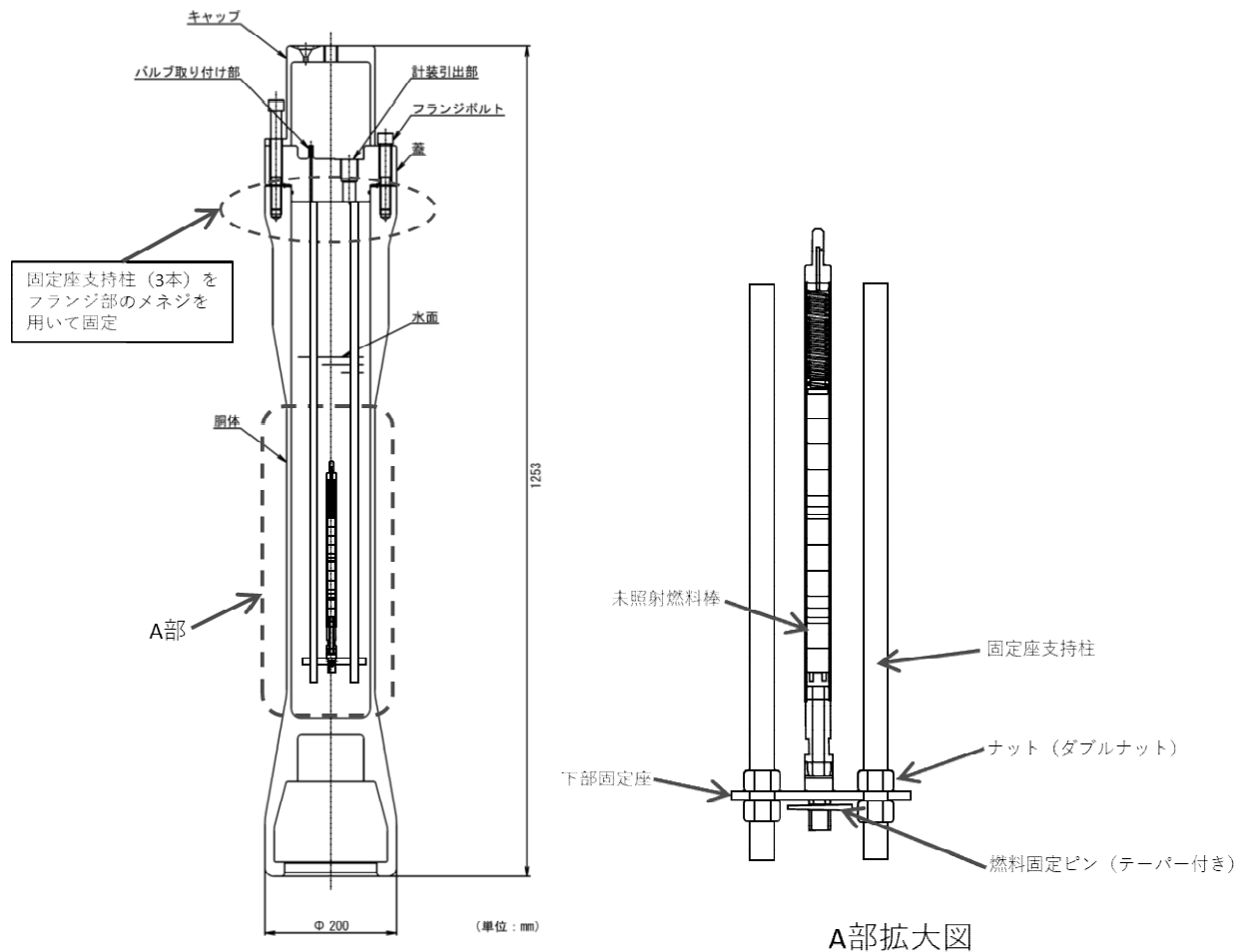
測定方法は、下部要領に定めており、カプセルを測定するための専用装置^{*1}により胴部寸法(円周方向及び軸方向)の測定を行い、初期値からの変形量が 0.2%以下であることを確認している。

*1: 再使用するカプセルを使用する前に寸法測定を実施し、製作したカプセルの寸法(初期値)との比較により変形量を測定する装置

【確認事項 1 1】試験燃料の支持方法について、本設工認のカプセルで使用する試験燃料を例に詳細に説明すること。

【回答 1 1】

燃料支持方法は以下の通りである。



I-T型大気圧水カプセル

燃料棒は燃料固定ピンを用いて下端を下部固定座に固定する。固定したものを(A部)を蓋に固定した3本の固定座支持柱にメネジを用いて固定する。これにより、燃料位置が変化しないようにしている。

【確認事項 1 3】 衝撃圧力と水撃力の発生時刻が 5 ms 違うことを説明すること。

【回答 1 3】

過去に行った実験の測定データを示す。

Bottom Pressure が衝撃圧力を Velocity が水塊の速度を表している。
水塊の速度が急激に低下しきった時刻が、水塊が上限に達した時刻に当たる。
当該実験では衝撃圧力と水撃力の発生時間の差は 15ms であった。

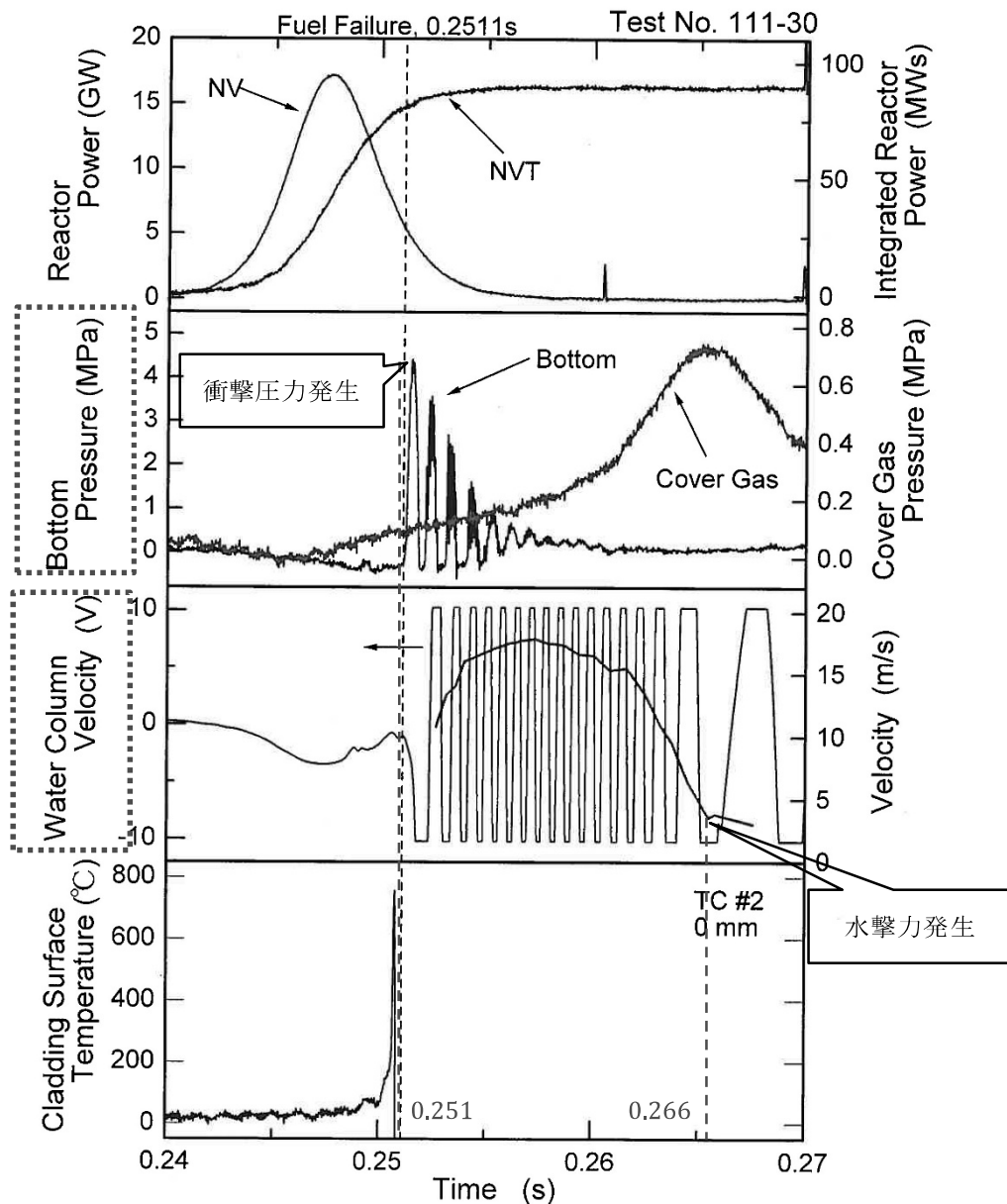


Fig. 3.5.8 Transient Data of Reactor Power, Integrated Reactor Power, Capsule Internal Pressure, Water Column Velocity and Cladding Surface Temperature in Test No. 111-30