

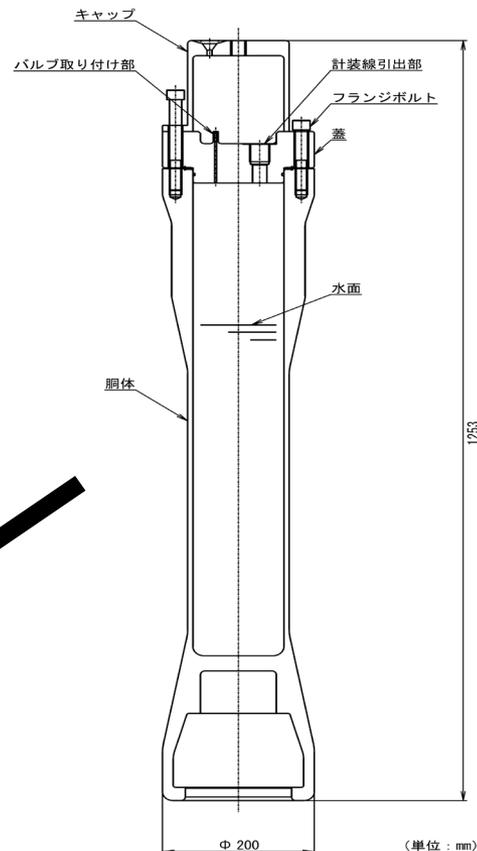
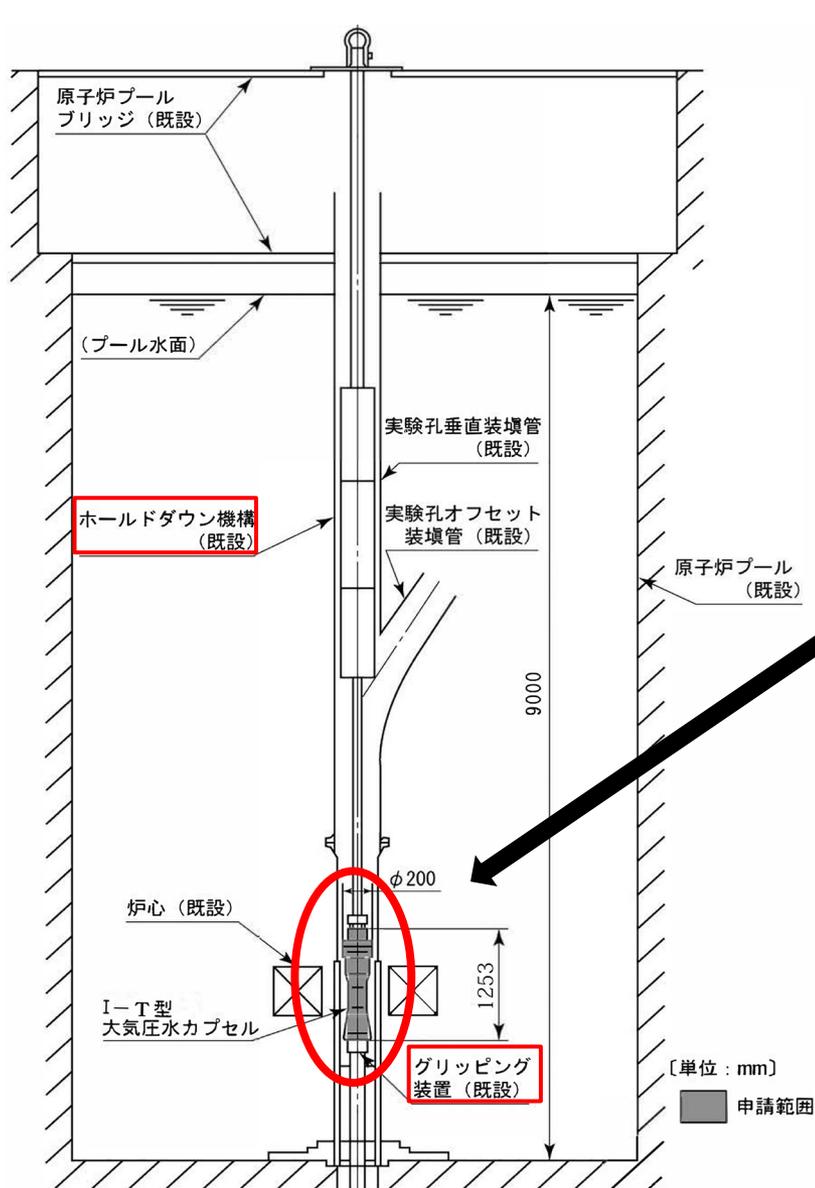
NSRR設工認申請 (I - T型大気圧水カプセルの製作) 概要説明資料

令和3年5月25日
日本原子力研究開発機構
NSRR管理課

本申請は、令和3年度に製作する I-T型大気圧水カプセルに係る申請である。

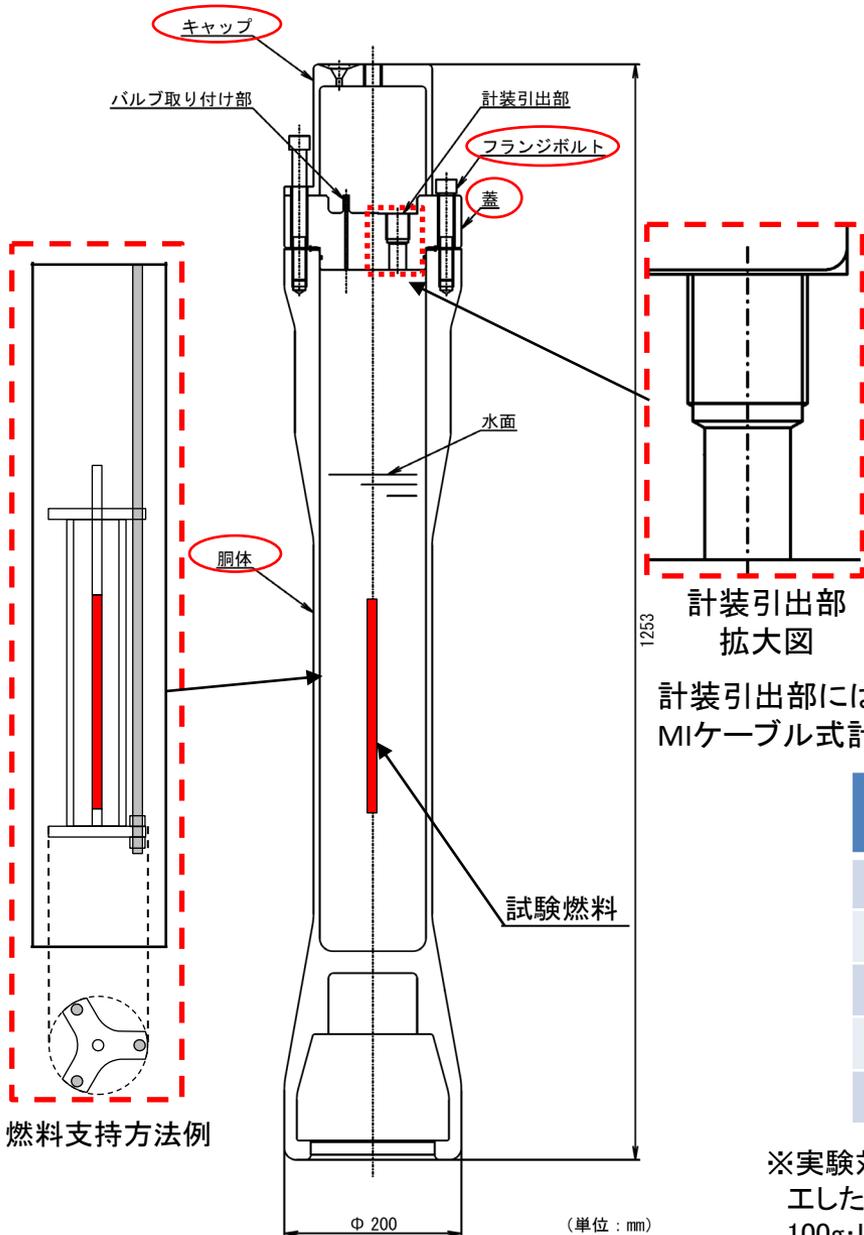
I-T型大気圧水カプセルは、濃縮度20%未満の未照射酸化ウラン燃料を照射実験するためのものである。その構造は、一重構造であり、容器が試験燃料の破損に伴い発生する圧力に耐え、かつ、密封性を有する設計としている。

NSRRでは、これまで未照射酸化ウラン燃料を用いた実験をするために、I-S型大気圧水カプセル等を製作してきたが、溶接構造ではなく一体削り出し構造を採用するなど、設計を合理化した新たなカプセルとして I-T型大気圧水カプセルを製作する。



実験孔に装填された照射カプセルは、実験孔内下部のカプセル掴み装置(グリッピング装置)に着底して固定させるとともに、実験孔上部よりホールドダウン機構により抑え、照射カプセルが実験中に逸脱しないようにする。

実験孔設備



| | |
|--------------|--|
| 設計方法 | <p>本カプセルは、弾性解析と弾塑性解析の2つの評価方法で強度評価を行っている。 フランジボルト、胴体メネジ、キャップ、計装線引出部、バルブ取り付け部及び耐圧試験については、弾性解析を実施する。 胴体(メネジネジ山を除く。)及び蓋(貫通穴(計装線引出部、バルブ取り付け部)周辺を除く。)については、弾塑性解析を実施する。</p> |
| 弾性設計 | <p>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(JSME S NC1-2012)」を準用し、クラス1容器(原子炉圧力容器)相当として設計する。</p> |
| 弾塑性設計 | <p>原子力科学研究所原子炉設置変更許可申請書に基づき弾塑性設計を行い、許容変形量として同申請書に基づく値を用いる。</p> |

計装引出部にはカプセル内から計装信号を外部へ取り出すためにMIケーブル式計装線引出プラグ(製造メーカーの規格品)を装着する。

| 名称 | 員数 (1体あたり) | 材料 |
|---------|---------------|---------|
| 胴体 | 1 | SUS304 |
| 蓋 | 1 | SUS304 |
| フランジボルト | 9 | SNB23-1 |
| フランジボルト | 3 | SNB23-1 |
| キャップ | 1 | SUS304 |

※実験対象として想定される17×17型の標準的な燃料棒を想定すると、試験燃料棒に加工した際の長さは10cm程度、長くとも15cm程度であり、これに相当する重量にして約100g・UO₂の燃料を使用予定である。現在これ以上の燃料を使用した実験計画は無い。

I - T型大気圧水カプセルの設計条件

| 項目 | | 設計条件 |
|--------|-------------|---|
| 機器 | | クラス1容器相当*1 |
| 試験燃料 | | 未照射酸化ウラン燃料(濃縮度20%未満) |
| 主要材料 | | ステンレス鋼 |
| 冷却材 | | 軽水 |
| 最大実験条件 | 発熱量 | 健全燃料90g・UO ₂ に対して1591J/g・UO ₂ 浸水燃料90g・UO ₂ に対して963J/g・UO ₂ |
| | 有効破壊エネルギー | 健全燃料:344J (82.2cal) 浸水燃料:312J (74.6cal) |
| | 総発熱量 | 1.3×10 ⁶ J (3.1×10 ⁵ cal) |
| 荷重条件 | 衝撃圧力による負荷荷重 | 12.7MPa |
| | 水撃力による負荷荷重 | 23.4MPa(動的圧力) 46.8MPa(相当静圧) |
| | 水撃力による軸力 | 5.29×10 ⁵ N |
| 最高使用温度 | | 100℃ |
| 耐震条件 | | Bクラス |
| 固定方法 | 上端 | ホールドダウン機構 |
| | 下端 | グリッピング装置 |

なお、本カプセルの使用回数は、200回以下とする。※

*1 JSME S NC1-2012を準用し弾性設計を行う。ただし、胴体(メネジネジ山を除く。)及び蓋(貫通穴周辺を除く。)については、弾塑性設計を行い、許容変形量として次の値を用いる。

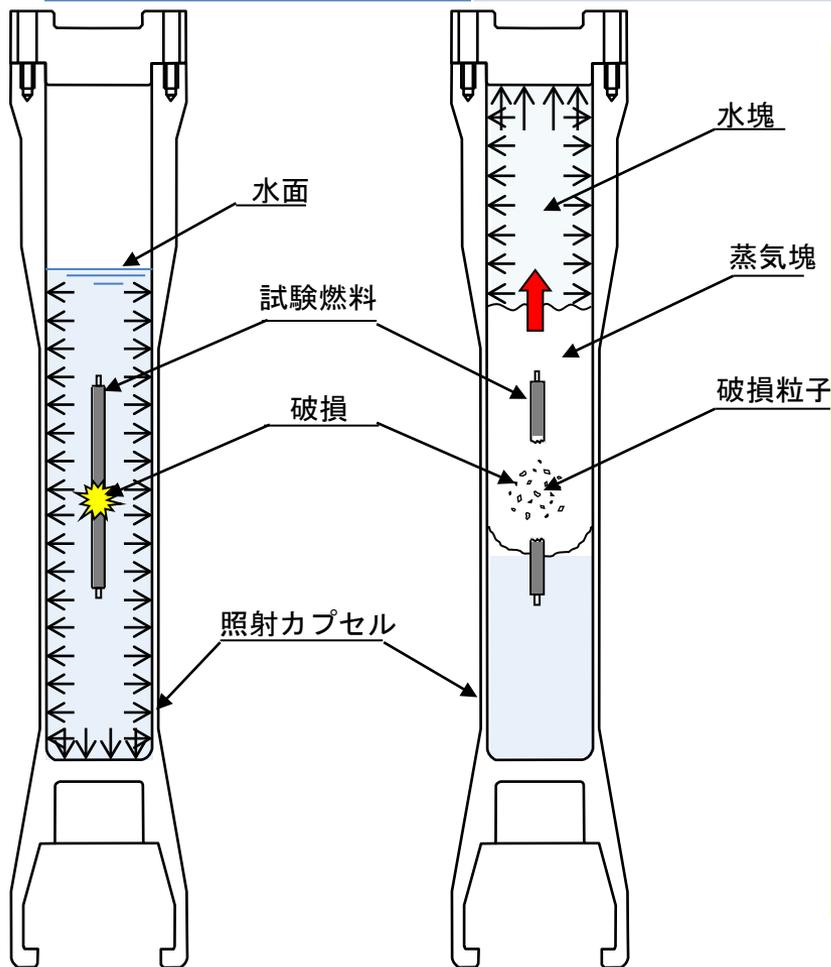
板厚平均歪 ≤2%又は限界変形量の1/10のいずれか小さい方

表面歪 ≤2%又は限界変形量の1/10のいずれか小さい方

局所歪 ≤5%又は限界変形量の1/4のいずれか小さい方

※再使用する場合の管理の方法は、原子力科学研究所核燃料物質使用施設等保安規定及び下部要領に定めており、再使用前にカプセルの寸法を測定し、許容変形量を満足するカプセルを実験で使用する。

| | | | |
|------------|-----------------------------|--------------|------------|
| 構造解析上の負荷荷重 | 動的圧力 | 衝撃圧力及び水撃力 | 弾塑性解析で使用する |
| | 静的圧力 | 動的圧力を相当静圧に換算 | 弾性解析で使用する |
| | 自重 | | 弾性解析で使用する |
| | ホールドダウン機構により下向きに抑えつけられる負荷荷重 | | 弾性解析で使用する |
| 耐震解析上の負荷荷重 | 耐震重要度分類Bクラスの地震力 | | 弾性解析で使用する |



照射カプセルには、試験燃料の破損によって、**衝撃圧力**及び**水撃力**が作用する。

| | |
|-------------|---|
| 衝撃圧力 | 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。 |
| 水撃力 | 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。 |

衝撃圧力のイメージ図

水撃力のイメージ図

日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格(JSME S NC1-2012)に準じ、設計条件、供用状態A~D及び試験状態に分類し、構造解析を行う。

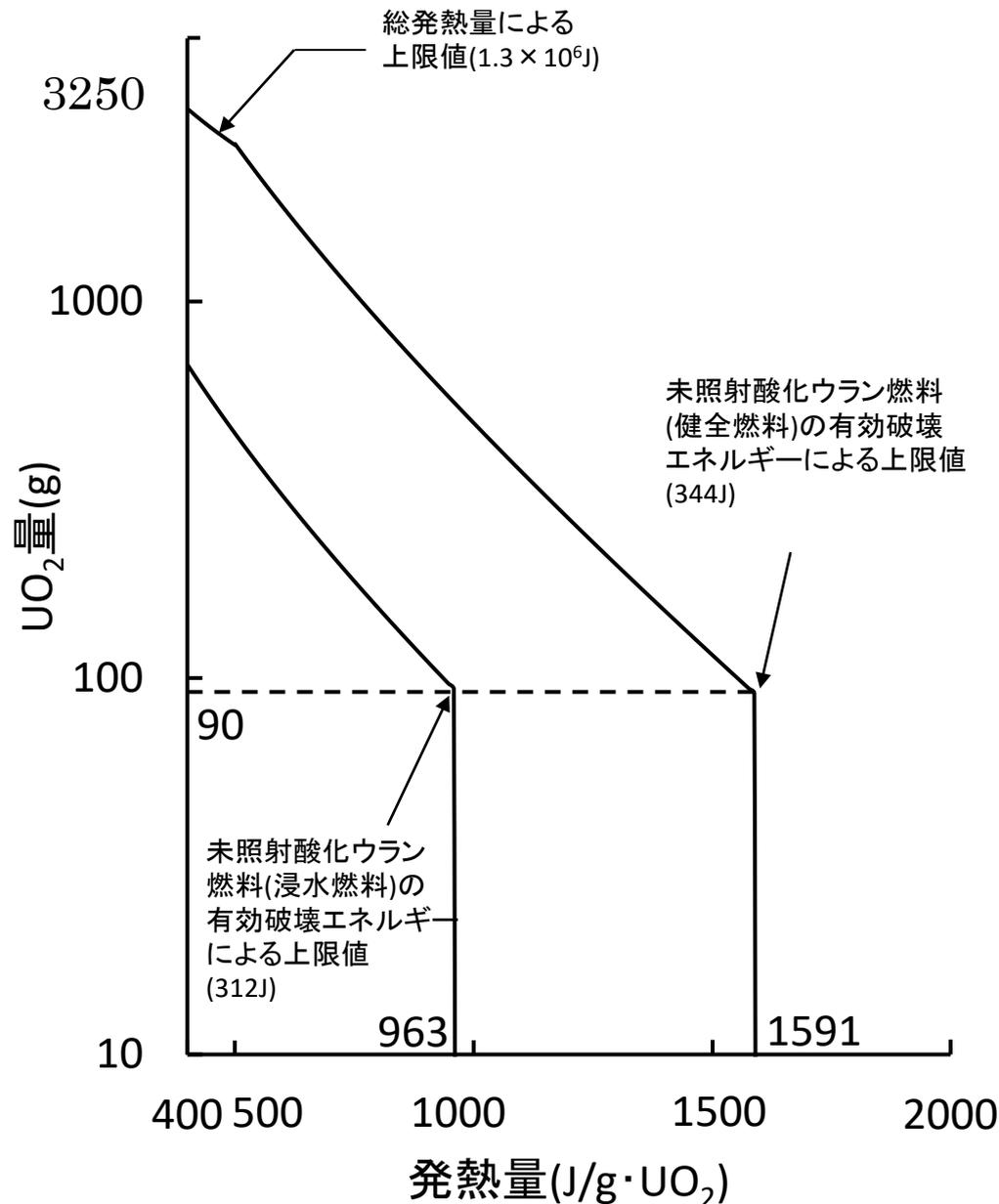
| 運転状態の区分 | 荷重の組合せ |
|--------------------------------|---|
| 設計条件 | 動的圧力又は相当静圧及び機械的荷重を考慮する。 |
| 供用状態A (運転状態Ⅰにおける荷重が負荷された状態) | 燃料破損時に発生する衝撃圧力及び水撃力に相当する荷重を考慮する。 ただし、衝撃圧力と水撃力は発生時刻が異なるため、別々に負荷荷重を算定する。 |
| 供用状態B (運転状態Ⅱにおける荷重が負荷された状態) | 本カプセルで想定される事象はない。 |
| 供用状態C (運転状態Ⅲにおける荷重が負荷された状態) | 地震力による荷重を考慮する。 ただし、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。※ |
| 供用状態D (運転状態Ⅳにおける荷重が負荷された状態) | 本カプセルで想定される事象はない。 |
| 試験状態 (耐圧試験圧力が負荷されている状態) | 製造時の耐圧試験により装置に最高使用圧力を超える圧力を加えた状態を考慮する。 耐圧試験は5回程度しか実施しないため、疲労解析は行わない。 |

※荷重の発生時間は、衝撃圧力が1.1msで水撃力が0.33msである。衝撃圧力と水撃力の発生に数msの間隔があったとしても、作用時間の合計はmsオーダーであり、その間にクラスBの地震が発生することは極めて稀であるため、本設工認では考慮しない。

| | | |
|-------|-------------------------------|----------------------|
| 運転状態Ⅰ | 通常に装置を運転している時に生ずる状態 | カプセル内の試験燃料の破損を考慮する。 |
| 運転状態Ⅱ | 運転状態Ⅰから逸脱した運転状態 | 本カプセルにおいて想定される事象はない。 |
| 運転状態Ⅲ | 通常に装置を運転している状態からかなりはずれた状態 | 地震が発生した場合を考慮する。 |
| 運転状態Ⅳ | 原子炉施設の安全設計上想定される異常な状態が生じている状態 | 本カプセルにおいて想定される事象はない。 |

最大実験条件

- 未照射酸化ウラン燃料(健全燃料)90g・ UO_2 に対して発熱量1591J/g・ UO_2
- 未照射酸化ウラン燃料(浸水燃料) 90g・ UO_2 に対して発熱量963J/g・ UO_2



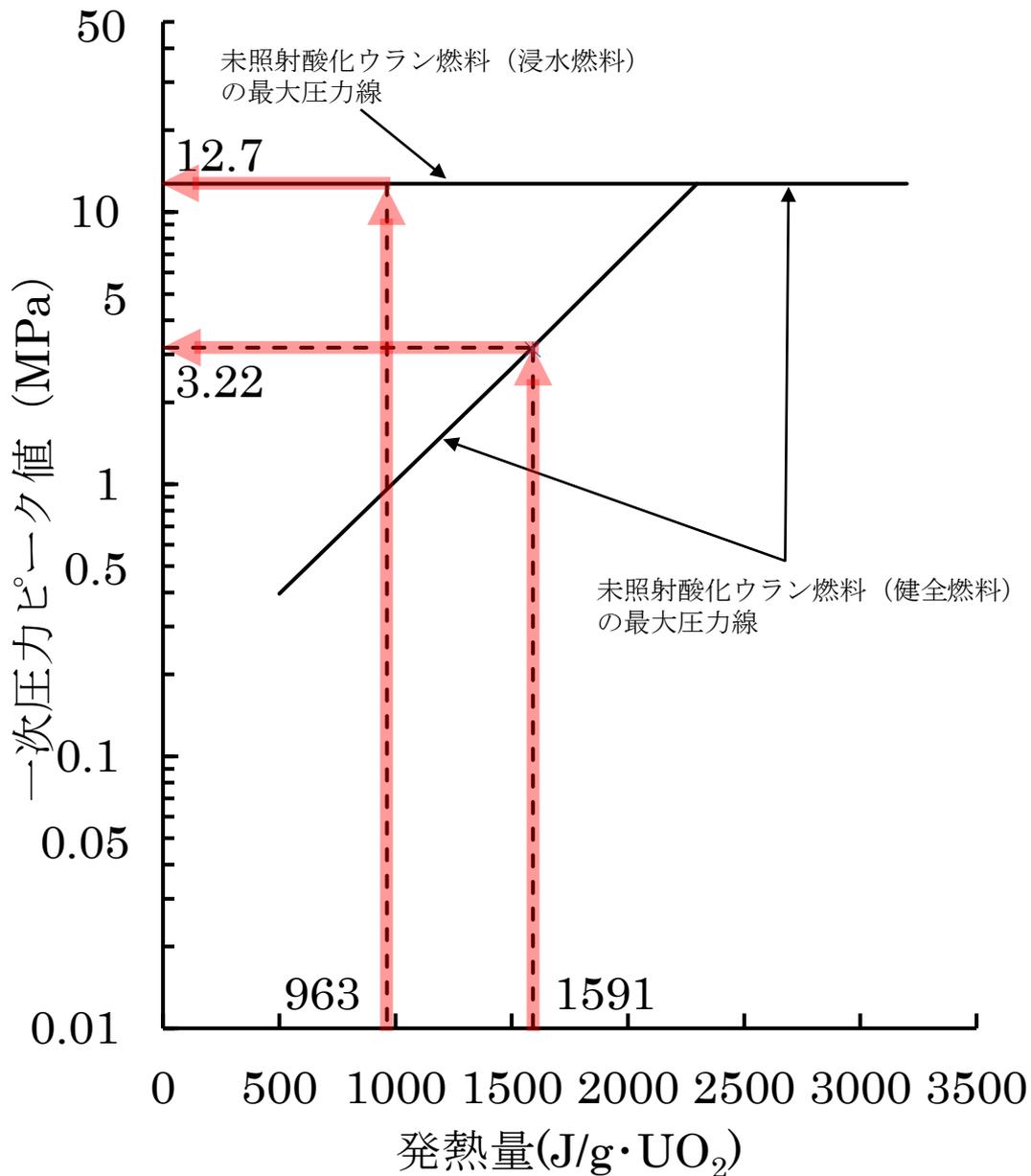
衝撃圧力の算定

最大実験条件に対応する一次圧力ピーク値から衝撃圧力を算定する。

最大実験条件に対応する一次圧力ピーク値

- 健全燃料: 3.22MPa
- 浸水燃料: 12.7MPa

高い値である12.7MPaを動的圧力とする。



水撃力の算定

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の「水カプセルの設計・検査の考え方」の「[I]設計の考え方」のうち、「2. 強度設計」に記載の式で計算する。

計算にあたっては、水撃力が最大となる条件としている。

水撃力のピーク値

- 健全燃料: 23.4MPa
- 浸水燃料: 22.3MPa

高い値である23.4MPaを動的圧力とする。

換算係数を2とすることにより、相当静圧は46.8MPaとなる。

軸力の設定

蓋及びフランジボルトには水撃力が軸力として直接作用するものとして計算する。

- $5.29 \times 10^5 \text{N}$

試験状態における圧力の設定

衝撃圧力の1.25倍*を耐圧試験の圧力として設定する。

- 15.9MPa

*JSME S NC1—2012において、水圧による耐圧試験を行う場合、試験圧力は最高使用圧力の1.25倍とすると定められている。

衝撃圧力による負荷荷重算定結果

| 状態 | 荷重条件 | 圧力 (MPa) | 作用時間 τ (ms) | 温度 (°C) | 繰返し荷重 | 備考 |
|-------|------|----------|------------------|---------|--------------|-------------------------------------|
| 設計条件 | | 12.7 | 1.1 | 100 | — | — |
| 供用状態A | | | | | 内圧、熱 200回 | 最大実験条件における 使用回数200回を 繰返し数とする。 |
| 供用状態C | 0 | | | | — | 地震力1回 を考慮する。 |
| 試験状態 | | 15.9 | — | 常温 | — | — |

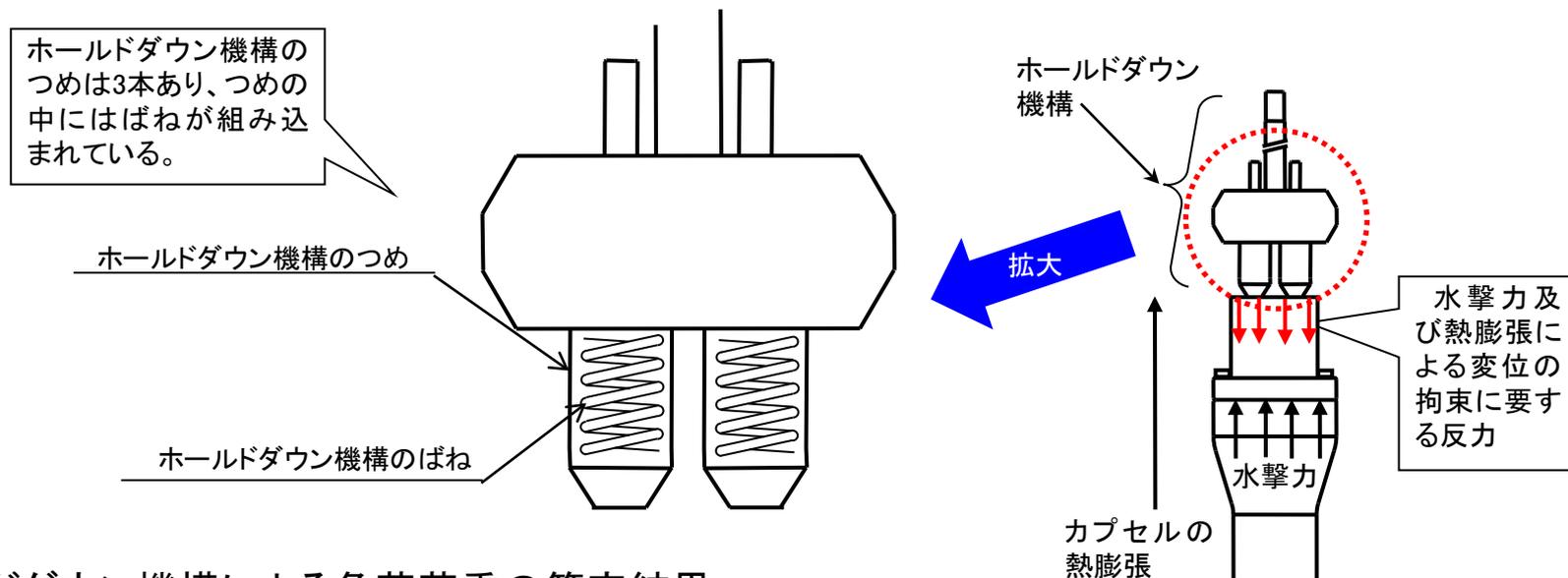
水撃力による負荷荷重算定結果

| 状態 | 荷重条件 | 圧力 (MPa) | 作用時間 τ (ms) | 温度 (°C) | 軸力 (N) | 繰返し荷重 | 備考 |
|-------|------|-----------------|------------------|---------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|
| 設計条件 | | 23.4* (動的圧力) | 0.33 | 100 | 5.29×10^5 | — | — |
| 供用状態A | | 46.8* (相当静圧) | | | | 内圧、熱 200回 | 最大実験条件に おける使用回数 200回を繰返し数とする。 |
| 供用状態C | 0 | — | | | | 地震力 1回を 考慮する。 | — |
| 試験状態 | | 15.9 | — | 常温 | — | — | — |

*水撃力が最大となる条件での水撃力の値。

ホールドダウン機構による負荷荷重算定

機械的荷重による変位及び熱的荷重による変位を求め、負荷荷重を算出する。



ホールドダウン機構による負荷荷重の算定結果

| | | |
|----------------|------------|-----------------------|
| バネの変位 d (m) | 機械的荷重によるもの | 2.19×10^{-2} |
| | 熱的荷重によるもの | 1.69×10^{-3} |
| 負荷荷重 F (N) | 機械的荷重によるもの | 6.90×10^3 |
| | 熱的荷重によるもの | 5.32×10^2 |

ホールドダウン機構によるカプセルへの負荷荷重発生機構

設計条件及び供用状態A

胴体及び蓋の強度計算には、有限要素法による衝撃・構造解析ソフトLS-DYNAを使用し、カプセルの軸対称2次元モデルに動的圧力を作用させる弾塑性解析を行う。

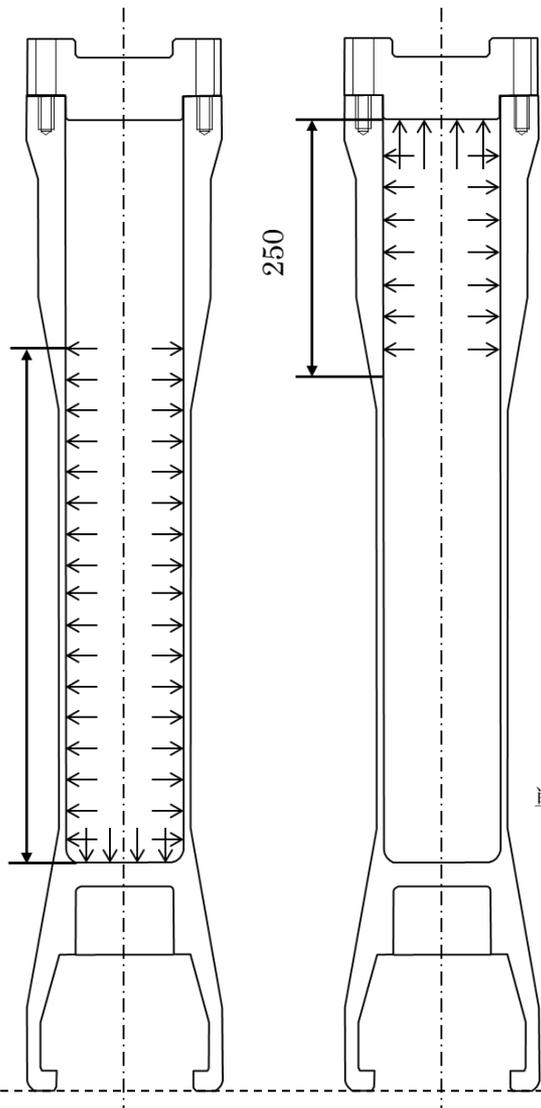
その他の評価項目（フランジボルト、胴体メネジ、キャップ、計装線引出部及びバルブ取り付け部）については、相当静圧を用いて弾性解析を行う。

供用状態C

供用状態Cにおける胴体（カプセル内部底面を除く）及びキャップ胴部の強度計算には、相当静圧を用いて弾性解析を行う。

耐圧試験

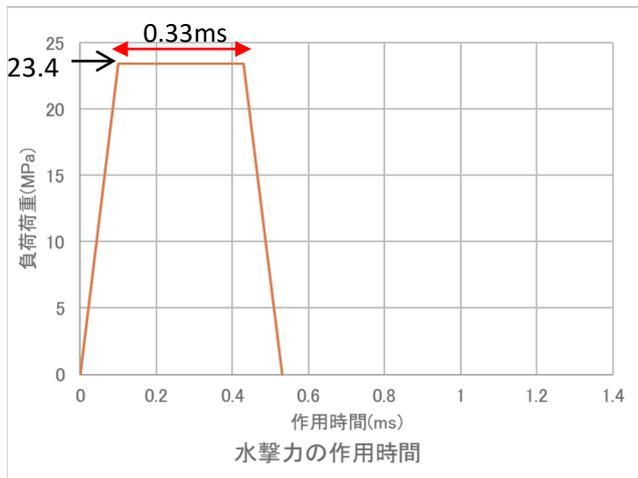
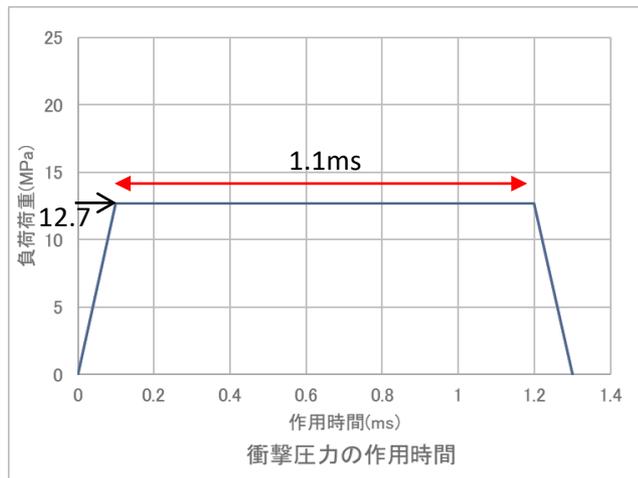
耐圧試験における胴体薄肉部の強度計算には、相当静圧を用いて弾性解析を行う。



衝撃圧力作用範囲

水撃力作用範囲

照射カプセルに作用する衝撃圧力及び水撃力は、発生時刻が異なるため個別に評価している。それぞれの荷重の作用時間は以下のとおり。



歪の評価手法

単位：mm

数点の評価点を設け、歪を評価する。

歪の評価結果

衝撃圧力：最大で $3.85 \times 10^{-4}\%$ であった。

水撃力：歪は発生しなかった。

スカート
下部固定

歪は許容値*を満足している。

*:弾塑性解析では、円周方向、半径方向及び軸方向の応力を区分せず、塑性変形量での評価を行う。許容変形量については、板厚平均歪及び表面歪で2%、局所歪で5%であるため、相当塑性歪の許容値を2%とし評価を行う。

設計条件及び供用状態Aで行う評価

| 評価点 | | 評価結果(MPa) | 許容値(MPa) [※] |
|---------|--------------|-----------|-----------------------|
| 胴体 | メネジネジ山 | 30.1 | 82 |
| 蓋 | 計装線引出部穴 | 73.1 | 205 |
| | バルブ取り付け部穴 | 76.7 | 205 |
| | 計装線引出部メネジネジ山 | 29.0 | 82 |
| キャップ | 胴部 | 2.7 | 137 |
| | 上面 | 14.7 | 205 |
| フランジボルト | ネジ部 | 250 | 343 |
| | オネジネジ山 | 34.4 | 205 |

供用状態Cで行う評価

| 評価点 | | 評価結果(MPa) | 許容値(MPa) [※] |
|------|-------|-----------|-----------------------|
| 胴体 | 胴体薄肉部 | 6.6 | 246 |
| キャップ | 胴部 | 6.3 | 246 |

試験状態で行う評価

| 評価点 | | 評価結果(MPa) | 許容値(MPa) [※] |
|-----|---------|-----------|-----------------------|
| 胴体 | 胴体薄肉部中央 | 145 | 184 |

※許容値はJSME S NC1-2012に基づき、設計応力強さ S_m 及び設計降伏点 S_y に係数を乗じ算出している。

疲労解析の必要性についてJSME S NC1-2012 (PVB-3140 (疲労解析不要の条件)には、以下の条件を満足する場合は、疲労解析は不要と定められている。
 評価の結果、条件を満足するため、本カプセルは設計条件において特に疲労を考慮する必要はない。

| 条件 | |
|------------------|--|
| 繰返し回数に対する条件 | 設計上考慮する使用回数が、設計応力強さの3倍の荷重に対してS-N曲線から求まる回数(使用回数の制限値)以下であること。 |
| 圧力変動の全振幅に対する条件 | 本カプセルに生じる圧力変動の全振幅が、規格に定められた式により求められる圧力変動の全振幅以下であること。 |
| 温度差に対する条件 | 任意の2点間の温度差が、規格に定められた式により求められる値(温度差の制限値)以下であること。 ここで、任意の2点間とは、規格に定められた式により求められる値を超えない2点間である。 |
| 温度差の変動の全振幅に対する条件 | 温度差の変動の全振幅(本カプセルでは、全振幅は最高使用温度と常温の差に相当)が、規格に定められた式により求められる値(温度差の制限値)以下であること。 |
| 圧力以外の機械的荷重に対する条件 | 圧力以外の機械的荷重により生じる応力の全振幅(本カプセルでは、全振幅は地震力の2倍に相当)が、地震荷重変動回数に対してS-N曲線から求まる回数以下であること。 |

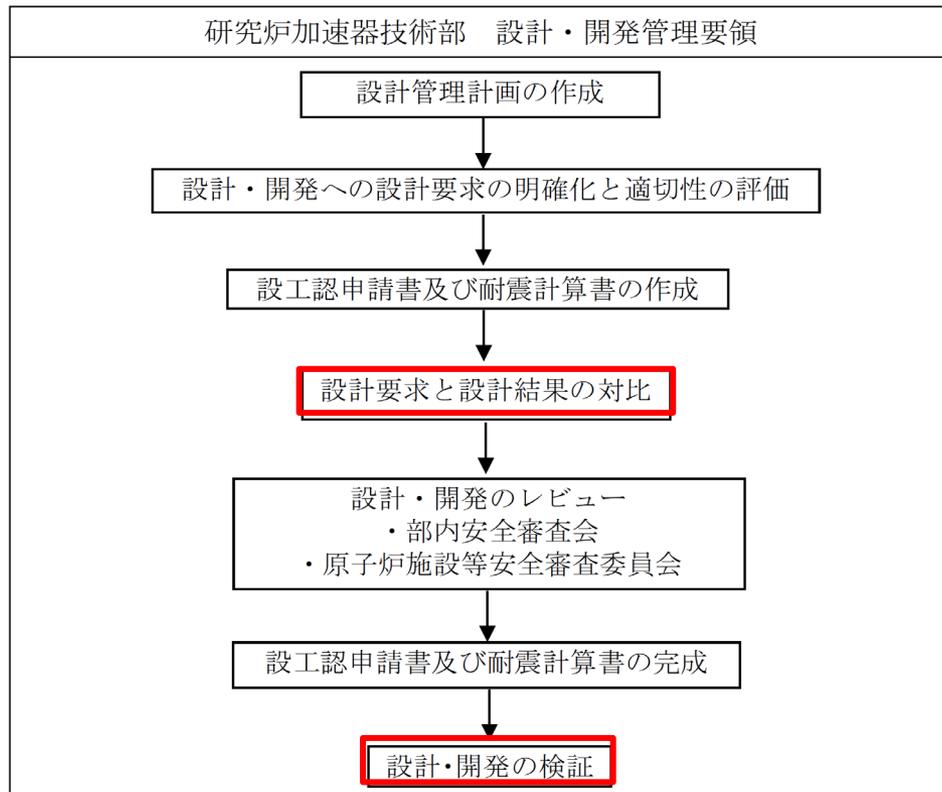
I-T型大気圧水カプセルの耐震設計は、「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則」及び「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」の基本的な考え方を参考に以下のように行う。

- ① I-T型大気圧水カプセルは、耐震重要度に応じて算定したBクラスの静的地震力を用いて耐震設計を行う。
- ② 試験炉設置許可基準規則に基づき算定する地震力が作用した場合においてI-T型大気圧水カプセルが損壊しないように設計する。
- ③ 常時作用している荷重と静的地震力を組合せ、その結果発生する応力に対して、安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とする。

品質管理の方法について

「原子力科学研究所原子炉施設保安規定」、
「原子力科学研究所原子炉施設及び核燃料物質使用施設等品質マネジメント計画書」及び「研究炉加速器技術部設計・開発管理要領」に基づき品質管理を行う。

設計管理における設工認及び耐震計算書の検証までの品質管理のプロセスは、右図のとおり。



I-T型大気圧水カプセルとほぼ同一の構造であるI-S型大気圧水カプセルの反応度価値は、実測で約 $-0.016 \Delta k$ であり、原子炉設置変更許可申請書に記載の実験物による反応度の制限値を満足する。

実験物による反応度の制限値

| | |
|----------------|--|
| 実験物による最大の負の反応度 | 0.0365 Δk |
| 実験物による最大の正の反応度 | <ul style="list-style-type: none"> ・停止余裕を確保できること* ・調整棒以外の制御棒を全部引抜いた場合にも臨界とならないこと |

* 最大反応度を有する制御棒1本を全部引抜いた場合において、実験物の正の反応度を考慮しても、0.01 Δk 以上の停止余裕を確保できること。

(地震による損傷の防止)

第六条 試験研究用等原子炉施設は、これに作用する地震力(試験炉許可基準規則第四条第二項の規定により算定する地震力をいう。)による損壊により公衆に放射線障害を及ぼすことがないものでなければならない。

1. 本申請に係る照射カプセルは、耐震重要度分類に応じた地震力によって損壊しないように設計する。

(機能の確認等)

第十一条 試験研究用等原子炉施設は、原子炉容器その他の試験研究用等原子炉の安全を確保する上で必要な設備の機能の確認をするための試験又は検査及びこれらの機能を健全に維持するための保守又は修理ができるものでなければならない。

1. 本申請に係る照射カプセルは、放射性物質の閉じ込め機能の確認に係る試験及び検査として、原子力科学研究所原子炉施設保安規定に定められている照射カプセルの使用時の外観点検、寸法点検、非破壊点検及び漏えい点検が実施できる設計とする。

(安全設備)

第二十一条 安全設備は、次に掲げるところにより設置されたものでなければならない。

三 安全設備は、設計基準事故時及び設計基準事故に至るまでの間に想定される全ての環境条件において、その機能を発揮することができるものであること。

四 火災により損傷を受けるおそれがある場合においては、次に掲げるところによること。

イ 火災の発生を防止するために可能な限り不燃性又は難燃性の材料を使用すること。

1-3. 本申請に係る照射カプセルは、設計基準事故時及び設計基準事故に至るまでの間に想定される圧力、温度、放射線量等の各種の条件下においても期待されている安全機能を発揮できる設計とする。

1-4. イ. 本申請に係る照射カプセルは、金属性の材料を使用して製作する。

(実験設備等)

第三十八条 試験研究用等原子炉施設に設置される実験設備等(試験炉許可基準規則第二十九条に規定する実験設備等をいう。以下この条において同じ。)は、次に掲げるものでなければならない。

一 実験設備等の損傷その他の実験設備等の異常が発生した場合においても、試験研究用等原子炉の安全性を損なうおそれがないものであること。

二 実験物の移動又は状態の変化が生じた場合においても、運転中の試験研究用等原子炉に反応度が異常に投入されないものであること。

三 放射線又は放射性物質の著しい漏えいのおそれがないものであること。

1-1. 本申請に係る照射カプセルは、設計上許容される実験条件の範囲内で試験燃料がいかなる形で破損しても、破損しないよう十分な強度を有する設計とする。

1-2. 本申請に係る照射カプセルは、試験燃料の破損による逸脱によって、運転中の原子炉に反応度が異常に投入されないように、上部を抑え及び下部を掴むことができる設計とする。

1-3. 本申請に係る照射カプセルは、設計上許容される実験条件の範囲内で試験燃料がいかなる形で破損しても、破損又は放射能の漏えいがないように十分な強度と密閉性を有する設計とする。