

添付資料の記載方針

本資料のうち、枠囲みの内容は、
商業機密あるいは防護上の観点
から公開できません。

「強度に関する説明書」の記載方針

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第23条及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」に基づき、17行17列A型燃料集合体（ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料）（以下「燃料集合体」という。）が原子炉内における使用期間中に生じ得る種々の因子を考慮しても、その健全性を失うことがないように設計されていることを説明するものである。


なお、炉心は193体の燃料集合体で構成され、原子炉熱出力3,411MWを安全に出せるように設計されている。燃料集合体は所定の燃焼率（以下「燃焼度」という。）を達成できるように設計されている。


1.1 燃料集合体の構造

燃料集合体は、燃料要素（以下「燃料棒」という。）、上部ノズル押えばねが組み込まれている上部ノズル（以下「上部ノズル組立体」という。）、下部ノズル、制御棒案内シンブル、炉内計装用案内シンブル及び支持格子から構成されている。以下に個々の構成要素を説明する。

1.1.1 燃料棒

燃料棒は核分裂により発生する熱を1次冷却材に伝える機能及び核分裂生成物を燃料棒内に保持する機能を有する。

燃料棒は、燃料被覆材（以下「被覆管」という。）に、ウラン・プルトニウム混合酸化物焼結ペレット（以下「MOXペレット」という。）、また、ペレットの上部には、コイルばね（以下「ペレット押えばね」という。）が入れられ、上端及び下端に燃料被覆材端栓が溶接された構造となっている。さらに、燃料棒はペレットと被覆管の相互作用を軽減するために上部端栓に設けられた加圧孔を通してヘリウムが加圧充てんされ、封入溶接された密封構造となっている。また、下部端栓については、円柱をテーパ加工（以下「大テーパ形状」という。）した後に  を設けた形状（添付図面 第1-1図 原子炉本体の構造図（燃料体） 17行17列A型燃料集合体（ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料）(1/5) 下部端栓詳細参照）の下部端栓を使用する。なお、燃料棒を溶接補修（リペア）する場合、上端の燃料被覆材端栓に通常端栓あるいはリペア用長尺端栓を使用する。

MOXペレットは、二酸化ウラン粉末と二酸化プルトニウム粉末の混合粉が圧縮成形され、 雰囲気焼結された円柱形の焼結体で

(2) 燃料棒曲がりの炉心性能に及ぼす影響 (DNB 評価)

燃料棒曲がり DNB 試験結果から、接触曲がり DNB ペナルティ δ_{contact} 及び 85%曲がり DNB ペナルティ $\delta_{\text{pb},85}$ が求められる。

部分曲がりに対する DNB ペナルティは、第 3-25 図に示すように原点と $\delta_{\text{pb},85}$ と δ_{contact} を直線で結んだもので与えられる。

一方、第 3-23 図は、曲がりが最大になるクリティカルスパンでの 0.3% タイル曲がり $Y_{0.3}$ (注 1) を表しているが、これから標準偏差 σ_c が次のように求まる。

$$\sigma_c = \frac{Y_{0.3}}{2.75} \dots\dots\dots(3-35)$$

これより、95%確率の投影クリアランス減少量 ΔC_{95} は、

$$\Delta C_{95} = 1.645 \sigma_c \text{ で与えられる。}$$

ΔC_{95} が 0.85 より小さければ、95%確率の DNB ペナルティ δ_{95} は

$$\delta_{95} = \frac{\Delta C_{95}}{0.85} \delta_{\text{pb},85} \dots\dots\dots(3-36)$$

で与えられ、また、0.85 より大きい場合には

$$\delta_{95} = \delta_{\text{pb},85} + \frac{\Delta C_{95} - 0.85}{1 - 0.85} \times (\delta_{\text{contact}} - \delta_{\text{pb},85}) \dots\dots\dots(3-37)$$

で与えられる。

本申請の燃料集合体を装荷する原子炉に関する評価結果を第 3-15 表に示す。同表より明らかなように、DNB ペナルティは熱設計上の余裕の範囲内にある。

なお、本申請の MOX 燃料体は [] を設けた大テーパ形状の下部端栓を使用しているが、流水試験の結果、 [] のない大テーパ形状の下部端栓を採用した 17 行 17 列型 A 型 48GWd/t 燃料 (以下「A 型 48GWd/t 燃料」という。) 等と同等の圧力損失係数であることが確認できており、燃料集合体内の冷却材の流況に影響はないため、DNB 評価に影響はない。

(注 1) それよりも大きな曲がりが全体の 0.3%に相当する閉塞割合

とし、評価上はサイクル1のばね力を[]に、また、サイクル2、3のばね力を[]と安全側に仮定して被覆管の摩耗減肉量を求めると、[]mm以下と被覆管肉厚の10%より小さいことから、被覆管の健全性は確保される。

なお、本申請のMOX燃料体は[]を設けた大テーパ形状の下部端栓を使用しているが、流水試験の結果、励振力による燃料棒下端部の振動はA型48GWd/t燃料と同等であり、フレットング摩耗を起因とする漏えいの可能性の低減が図れていることが確認できている。

3.4.7 上部ノズル炉内計装用水抜き穴について

上部ノズル組立体の中央には、炉内計装用案内シンプル内を通ってきた1次冷却材が通過するための小さな水抜き穴を設けている。(第3-30図参照)

ウラン燃料では上部ノズルを制御棒案内シンプルに取り付けた状態で、制御棒案内シンプル、炉内計装用案内シンプルと支持格子(最下部は除く)及び上部ノズルを連続で拡管結合させるため、上部ノズルに拡管装置を挿入させる穴が必要となる。そのため、拡管後にアダプタプラグを溶接する必要がある。

これに対して、MOX燃料では上部ノズルを取り付けていない状態で、制御棒案内シンプル、炉内計装用案内シンプルと支持格子(最下部は除く)を国内で拡管結合し、メロックス工場では上部ノズルと制御棒案内シンプルを拡管結合するため、上部ノズルに拡管装置を挿入させる穴が不要となる。そのため、MOX燃料では、作業員の被ばく低減を図るため、ウラン燃料におけるプラグ溶接を避け、上部ノズルに水抜き穴のみを加工している。

このように、MOX燃料とウラン燃料では、水抜き穴を施工する対象に違いがあるものの、水抜き穴の仕様は共通であり、要求される性能を満足している。

3.4.8 ペレット押えばねの評価

MOXペレットはウランペレットと比べFPガス及びヘリウムガスの放出量が多くなる傾向にあることから、MOX燃料棒では内圧低減対策の一つとして、48GWd/tウラン燃料に使用しているペレット押えばねの寸法を、ばねの体積が小さくなるように第3-19表に示すように変更し、燃料棒内自由体積の増加を図っている。

えられる。

- 最下部支持格子の位置は互いに重なり合った状態にあることから、支持格子の位置ずれに起因する横流れは小さい。

以上のとおり、17行17列型4ループ炉心のA型55GWd/t燃料では、複数の要因が重畳したことによって燃料漏えいが発生したと推定されるが、本申請の燃料集合体を含む混在炉心においては、これらの要因が重畳することはなく、異なる設計の燃料が共存してもフレットング摩耗による燃料漏えいの可能性は小さい。

なお、本申請のMOX燃料体は[]を設けた大テーパ形状の下部端栓を使用しているが、流水試験の結果、励振力による燃料棒下端部の振動はA型48GWd/t燃料と同等であり、フレットング摩耗を起因とする漏えいの可能性の低減が図れていることが確認できている。

b. 燃料集合体の耐震性への影響

燃料集合体の耐震性への影響については、支持格子の位置ずれによる支持格子の衝撃強度低下を考慮しなければならない。最上部及び最下部の支持格子は地震時には衝撃力が発生せず耐震上問題とならないため、中間部支持格子の位置ずれが問題になる。中間部支持格子位置ずれが最大となるのはB型燃料集合体同士が隣接した場合、[]となり、支持格子に生じる衝撃力は衝撃強度を上回り、支持格子には最大約[]mmの変形が生じるが、基準地震動 S_s における制御棒挿入時間については、挿入規定時間（2.5秒）以内に挿入できることを確認しており支持格子の位置ずれは耐震上の問題とならない。

(2) 核的共存性

A型燃料集合体とB型燃料集合体は被覆管肉厚及びペレット径がわずかに異なる。少数群定数計算コードによる計算では、この構造上の差異を考慮しており、炉心計算コードを用いてA型燃料集合体とB型燃料集合体の混在炉心の核特性が問題のないことを確認している。

ここではこれらの計算コードの計算モデルに含まれていない燃料有効部分の位置ずれの影響を評価する。

A型燃料集合体及びB型燃料集合体の有効部分位置については、燃焼が進行するとA型燃料集合体の燃料棒はオフボトム型であるため上方及び下

方へ伸び、B型燃料集合体の燃料棒はオンボトム型であるため上方へ伸び、有効部分の位置ずれ量が増加することになる。

したがって、炉心を構成する燃料の間で最大となる位置ずれは、燃料棒がオンボトムの状態になったA型燃料集合体と、製造時の状態のA型燃料集合体との間の□mmである。

ここで、この燃料有効部分からずれている箇所は反応度に寄与しないと仮定して評価しても、反応度変化は約□%程度の減少であり無視できる。

同様に、軸方向出力ピーキングへの影響として、燃料有効部分からずれた箇所は出力発生に寄与せず、また、ずれ部分の軸方向相対出力が、平均出力の100%を発生するものと保守的に評価したとしても、軸方向出力ピーキング変化は約□%程度の増加であり無視できる。

(3) 熱水力的共存性

燃料の熱水力的性能を示す DNB 特性は、型式ごとに熱流動試験を行うことにより十分な性能を有することが確認されている。型式の異なる燃料が隣接する混在炉心において DNB 性能を確認するには、燃料集合体間横流れによる影響を評価する必要がある。

燃料集合体の構造上、燃料集合体間横流れに影響を与えるのは、燃料集合体各部での圧力損失差が大きくなる場合や支持格子の位置の差が大きくなって重なりがなくなる場合であるが、燃焼期間を通じて互いに重なり合った状態にあり、支持格子の位置の差に起因する横流れは生じない。

また、支持格子の圧力損失係数の差は小さく、したがって、設計の異なる燃料が隣接した場合においても熱水力設計上問題とならない。

なお、本申請の MOX 燃料体は□を設けた大テーパ形状の下部端栓を使用しているが、流水試験の結果、A型48GWd/t燃料等と同等の圧力損失係数であることが確認できており、燃料集合体内の冷却材の流況に影響はないため、熱水力的共存性に影響はない。

4. 燃料集合体の強度計算

4.1 燃料集合体の設計基準

燃料集合体は、燃料輸送及び取扱い時並びに運転時に次の基準を満たすように設計し、その構成部品の健全性を確保している。

- ・ウラン燃料集合体と同等の構成部品^(注1)を使用しているため、ウラン燃料集合体と同様、燃料輸送及び取扱い時の常温における 6G の設計荷重に対して、著しい変形を生じないこと。
- ・通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において生じる荷重に対する応力は、原則として ASME Sec.Ⅲに基づいて評価されること。

ただし、燃料輸送及び取扱い時の強度評価においては、MOX 新燃料集合体は、輸送中に高温となり、強度が低下することから、燃料輸送及び取扱い時の荷重を 4G と制限し、構成部品がこの荷重に対して、十分な強度を有し、燃料集合体としての機能が保持できることを確認する。

強度評価の対象となる燃料集合体の構成部品、荷重及び評価基準を第 4-1 表及び第 4-2 表に示す。

なお、これらの基準は、原子力規制委員会規則「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年 6 月 28 日原子力規制委員会規則第 5 号）」、技術基準規則及び原子炉安全専門審査会内規「加圧水型原子炉に用いられる 17 行 17 列型の燃料集合体について（昭和 51 年 2 月 16 日）」及び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に用いられる混合酸化物燃料について（平成 7 年 6 月 19 日原子力安全委員会了承）」に記載されている考え方に基づいている。

(注 1) 本申請の MOX 燃料体は  を設けた大テーパ形状の下部端栓を使用。

4.2.2 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における評価方法

(1) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における応力評価

通常運転時においては、水力的揚力(L)、浮力(B)、ホールドダウン力(F)、自重(W)^(注1)を考慮して応力評価を行う。第4-2図に通常運転時に作用する荷重を示す。また、運転時の異常な過渡変化時においては通常運転時荷重に加えて、スクラムによる荷重を考慮して応力評価を行う。

スクラム時の荷重としては、

a. ダッシュポット部^(注2)に制御棒クラスタ^(注3)が挿入され、落下速度が急激に減速する際の衝撃力(SF)

b. 上部ノズルに制御棒クラスタが着底する際の衝撃力(SC)

が挙げられる。a.はダッシュポット部よりも下部に対して、b.は上部ノズルより下部に対して荷重が作用する。また、これら2つの荷重は同時に発生しない。

したがって、上部ノズル、上部ノズル-制御棒案内シムル結合部及び支持格子-制御棒案内シムル結合部に対してはb.を、ダッシュポット部及び下部ノズルに対してはa.又はb.の大きい方を考慮して応力評価を行う。第4-3図に通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に作用する荷重を示す。

また、支持格子のばねには燃料棒の水力振動に伴う横方向荷重が作用するため、燃料棒保持機能に影響しないことを確認する。

燃料寿命中にスクラムが□回と設定しても累積疲労損傷係数は上部及び下部ノズルで□%、制御棒案内シムルで□%程度であり、疲労に与える影響は小さい。

なお、本申請のMOX燃料体は□を設けた大テーパ形状の下部端栓を使用しているが、流水試験の結果、A型48GWd/t燃料等と同等の圧力損失係数であることが確認できており、燃料集合体内の冷却材の流況に影響はないため、スクラム時の荷重に影響はない。

(注1) 下部端栓大テーパ化による質量変化は、燃料集合体総質量(□kg)の0.1%未満とわずかであり、評価のインプットの有効桁数未満であるため、評価に用いるインプットに変更なし。

(注2) 制御棒案内シムルの下部の径を細くすることによって内部に保有する1次冷却材の抵抗により、制御棒クラスタ落下による燃料集合体への衝撃を減少させる部分

(注3) 1つの制御棒スパイダ及び24本の制御棒から構成された構造物

(2) 上部ノズル押えばねの機能評価

上部ノズル押えばねに要求される機能は次のとおりである。

- a. 機械設計流量に対して、燃料集合体の浮き上がりを防止する。
- b. 運転時の異常な過渡変化時の事象であるポンプオーバースピード^(注1)条件で、上部ノズル押えばねの塑性変形は進行しない。

通常運転時の燃料集合体の評価は、最も条件が厳しい燃料寿命初期において行い、浮き上がり方向の荷重としては、水力的揚力及び浮力を、それと反対方向の荷重としては、燃料集合体自重及びばね力を考慮する。

運転時の異常な過渡変化時の事象であるポンプオーバースピード条件下では、流量に対し、上部ノズル押えばねの健全性を評価する。

なお、本申請の MOX 燃料体は を設けた大テーパ形状の下部端栓を使用しているが、流水試験の結果、A 型 48GWd/t 燃料等と同等の圧力損失係数であることが確認できており、燃料集合体内の冷却材の流況に影響はないため、上部ノズル押えばねの燃料集合体押え力に影響はない。

(注 1) 運転時の異常な過渡変化として負荷急減が発生した場合、タービン及び発電機の回転数が増加し、それに伴い 1 次冷却材ポンプの回転数が増加することにより、1 次冷却材流量が増加する現象

「燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐腐食性説明書その他の性能に関する説明書」の記載方針

なお、MOX 燃料棒の被覆管は二酸化ウラン燃料と同様にジルカロイ-4 を適用しており、原子炉内での冷却材条件も二酸化ウラン燃料と同じであることから、腐食（酸化／水素吸収）挙動は同等と考えられる。また、MOX 燃料棒と二酸化ウラン燃料棒とでは、最高燃焼度は同じ（燃料棒平均 53,000MWd/t）であり、使用期間も同等である。したがって、被覆管の耐食性は、二酸化ウラン燃料と同等である。

4.1.4 その他の性能

4.1.4.1 耐 PCI 性

被覆管は、腐食性 FP ガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用(PCMI)を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ(SCC)による破損（PCI 破損）を起こす。この PCI 破損における SCC は、Zr 中の稠密六方晶（ α 相）の底面にほぼ平行な面上を伝播するが、現行の被覆管製法においては、この底面が PCMI 時の発生応力方向、すなわち周方向に配向（C 軸を径方向に配向）されており、PCI 破損の抑制が図られている。

被覆管の耐 PCI 性を把握するため、試験炉において出力急昇試験が実施されており、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にある値（PCI 破損しきい値）を超えた場合に PCI 破損が起こることが経験的に知られている。

MOX 燃料棒に対する出力ランプ試験の結果を第 4-9 図に示す。この結果より、MOX 燃料棒はすべて非破損であり、MOX 燃料棒の耐 PCI 性能は二酸化ウラン燃料棒と同等以上であることが確認されている。これは、MOX ペレットのクリープ速度は、二酸化ウランペレットに比べて大きいことから、出力急昇時に発生する被覆管応力が二酸化ウラン燃料に比べて小さいためと考えられている。

4.1.4.2 耐摩耗性

原子炉内では、燃料棒の流動振動による支持格子との接触部で、被覆管の摩耗が発生する可能性がある。被覆管の硬さの測定結果を第 4-3 表に示す。フレッティング摩耗評価はこれらの特性を考慮する。

MOX 燃料は燃料棒や支持格子の材料及び形状が二酸化ウラン燃料と同等である。また、本申請の MOX 燃料体は、下部端栓については、円

柱をテーパ加工（以下「大テーパ形状」という。）した後に [] を設けた形状（添付図面 第 1-1 図 原子炉本体の構造図（燃料体） 17 行 17 列 A 型燃料集合体（ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料）（1/5） 下部端栓詳細参照）の下部端栓を使用しているが、流水試験の結果、 [] のない大テーパ形状の下部端栓を採用した 17 行 17 列型 A 型 48GWd/t 燃料等と同等の圧力損失係数及び励振力であることが確認できている。

原子炉内での冷却材条件も二酸化ウラン燃料と同じであることから、流動振動特性も同等である。加えて MOX 燃料棒と二酸化ウラン燃料棒とでは、最高燃焼度は同じ（燃料棒平均 53,000MWd/t）であるため、使用期間も同等である。したがって、被覆管の耐摩耗性は、二酸化ウラン燃料と同等である。

4.2 ジルカロイ-4（再結晶焼鈍材）

4.2.1 耐熱性

燃料被覆材端栓、案内シンプル及び制御棒案内シンプル端栓にはジルカロイ-4 材が使用されているが、原子炉内での使用温度は最大約 350℃であるため、第 4-1 表及び第 4-2 表に示した溶融点及び相変態温度よりかなり低いので、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはない。

4.2.2 耐放射線性

高速中性子の照射によりジルカロイ-4 材料内には格子欠陥が生じる。材料の機械的特性は金属内の転位の運動と関係するため、照射により生じた欠陥の影響を受ける。一般に欠陥が転位の運動を妨げるため、強度が増加し、延性が低下すると考えられている。

ジルカロイ-4 材の案内シンプルが高速中性子により照射されたときの機械特性に関するデータを第 4-10 図に示す。これより、引張強さ、耐力は、高速中性子照射によって照射初期に増加するが、照射量の増加とともに著しい変化がなくなる傾向にある。また、破断伸びは、高速中性子照射により減少するが、その後は著しい変化がなくなる傾向にある。また、弾性率やポアソン比は格子欠陥の影響をあまり受けないため、照射によりほとんど変化しない。