

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	BF-1-005 改0
提出年月日	平成31年3月20日

発電用原子炉設置変更許可申請書添付書類八「安全設計の方針」「設置許可基準規則 第十五条（炉心等）」におけるBWRとPWRの相違について

1. 発電用原子炉設置変更許可申請書添付書類八「安全設計の方針」「設置許可基準規則 第十五条（炉心等）」に関する表記

東海第二発電所（以下「東二」という。）と四国電力株式会社伊方発電所3号炉（以下「伊方3」という。）の申請書は、以下のとおり表記が異なっている。

<東二の今回の表記>

燃料体は、発電用原子炉内における使用期間中を通じ、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時においても、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化により起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が、十分な強度を有し、その機能が保持できる設計とし、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重、核分裂生成物の蓄積による燃料被覆材の内圧上昇、熱応力等の荷重に耐える設計とする。

燃料体には燃料棒を保護する機能を持つチャンネル・ボックスをかぶせる。

<PWR（伊方3）の例>

燃料体は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重、核分裂生成物の蓄積による燃料被覆材の内圧上昇、熱応力等の荷重に耐える設計とする。

このため、燃料要素は所要の運転期間において、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に、以下の基準を満足できる設計とする。

- (1) 燃料中心最高温度は、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン及びウラン・プルトニウム混合酸化物それぞれの熔融点未満であること。
- (2) 燃料要素内圧は、通常運転時において、燃料被覆材の外向きのクリープ変形により燃料材と燃料被覆材のギャップが増加する圧力を超えないこと。
- (3) 燃料被覆材応力は、燃料被覆材の耐力以下であること。
- (4) 燃料被覆材に生じる円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に対して1%以下であること。
- (5) 累積疲労サイクルは、設計疲労寿命以下であること。

以上のとおり、BWR（東二）は法令の表記を記述し、そのとおり設計する旨表現しており、PWRはいわゆる5基準を記述している。

## 2. 記述の相違の技術的内容

BWR及びPWRの燃料の安全設計の方針においては、従来からそれぞれ異なる指針に基づいて設計されている。BWRについては「沸騰水型原子炉に用いられる8行8列型の燃料集合体について」（昭和49年12月25日、原子炉安全専門審査会）（以下「①」という。）、「沸騰水型原子炉に用いられる9行9列型の燃料集合体について」（平成6年3月3日原子力安全委員会）（以下「②」という。）及び「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について」（昭和63年5月12日原子力安全委員会）（以下「③」という。）等に、PWRについては「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、原子炉安全専門審査会）（以下「④」という。）及び③等に基づく。

このことから、記述の相違については問題ないと考えられるが、1.における③及び④に基づくPWRの5基準について、①、②及び③に基づくBWRの基準と比較すると、以下のとおりとなる。

- (1) 燃料中心最高温度は、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン及びウラン・プルトニウム混合酸化物それぞれの熔融点未満であること。
- 「燃料被覆管は機械的に破損しないこと」の解釈の明確化について」（昭和60年7月18日 原子力安全委員会了承、一部改訂 平成2年8月30日 原子力安全委員会）により、「PWRにおいては、運転時の異常な過渡変化について「燃料中心最高温度は二酸化ウランの熔融点未満であること」を動的解析により確認しているが、これを満足すれば、被覆管の円周方向平均塑性歪の変化量が1%に到らないので、この評価方法は妥当であると判断する。」とされている。一方、BWRにおいては、同資料により、「BWRにおいては、被覆管に1%塑性歪を与える線出力密度を損傷限界線出力密度とし、運転時の異常な過渡変化の解析によって得られる最大線出力密度が損傷限界線出力密度を超えないことを確認している。運転時の異常な過渡変化時に発生する最大線出力密度は、過渡変化の動的解析によって得られる被覆管の表面熱流束の最大値が定常的に発生しているものと仮定して、これを線出力密度に換算して求めている。

この評価法の妥当性について検討した結果、最大表面熱流束が、定常的に発生しているとする仮定は、熱流束が非定常に変化する場合に比較してペレット温度を高く評価し、保守性が確保されるので、妥当であると判断する。」

とされている。すなわち、PWRと比べて方法（最大線出力密度の管理）は異なるものの、同等の安全設計を実現している。

(2) 燃料要素内圧は、通常運転時において、燃料被覆材の外向きのクリープ変形により燃料材と燃料被覆材のギャップが増加する圧力を超えないこと。

→ ④により「燃料棒内圧は、機械的破損の観点からは被覆管応力基準により制限されており、また燃料温度の過大な上昇防止の観点からは新しい燃料棒内圧基準によりサーマルフィードバックの発生が防止されている。」とされており、機械的破損については、(3)被覆管応力基準に集約される。燃料温度の過大な上昇防止については、PWRは③により「通常運転時には、燃料棒の燃焼初期において燃料棒の内圧は外圧を下回っており、被覆管は内向きのクリープ変形により径が減少しペレットとの接触に至る。その後燃焼中期以降放出FPガスの蓄積により内圧が増加し、高燃焼度領域では内圧が外圧を超える可能性がある。このような内圧支配に至った状態では被覆管は外向きのクリープ変形により径が増加し、一旦接触したペレットと被覆管にギャップが生じる可能性がある。このギャップが開くことによりギャップコンダクタンスが低下し燃料温度が上昇すると、更にFPガスが放出され内圧が上昇し、その結果更にギャップが広がるといったいわゆるサーマルフィードバックを起こす可能性がある。」とされている。一方、BWRは②により「9×9型燃料集合体の寿命末期の燃料棒内圧はA型、B型ともに外圧を超えておらず」とされていることからサーマルフィードバックが問題となることはない。

(3) 燃料被覆材応力は、燃料被覆材の耐力以下であること。

→ (2)とともに被覆管応力に関する基準であり、BWRでは①において「2.2構造強度設計」の「(1)被覆管にかかる応力は、設計応力強さ限界を超えないこと。」により記述されている。なお、「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について（平成29年2月15日 原子力規制庁）」を踏まえた被覆管の応力評価条件は、「基準地震動 $S_s$ の地震による1次応力を加味した運転状態における応力が設計引張強さを下回ること、また、弾性設計用地震動 $S_d$ の地震による1次応力を加味した運転状態における応力が設計降伏点を下回ること」となっておりPWR燃料に対する要求と同じになっている。

(4) 燃料被覆材に生じる円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に対して1%以下であること。

→ PWRについては④において「照射実績に基づいており、妥当なもの」と判

断する。」とされており、BWRについては①に損傷限界「1%の周方向塑性歪」に関する記述として「この損傷限界は、GEがこれまで行ったひずみとり焼なまし材の照射後の高温内圧破裂試験の結果に基づいて定められたものである。

この試験結果によれば、1%の全周平均塑性歪以下で破裂した試験片は実際にはないが、試験結果の統計的分布からは1%以下の全周平均塑性歪であっても破裂する可能性は小さいながらも示されている。しかしながら、8×8型燃料集合体の被覆管に用いられることになっている再結晶焼なまし材の照射後試験結果では、現在のところひずみとり焼なまし材よりも高い内圧破裂伸びを示しており、さらにその伸びのバラツキは小さくなっている。

これらのことから、燃料の損傷限界として、全周伸び平均として周方向塑性歪1%を選定することは、妥当であると判断する。」とされている。すなわち、BWRは上記試験結果に基づき周方向塑性歪1%を破損の判断基準としており、(1)で担保している。

(5) 累積疲労サイクルは、設計疲労寿命以下であること。

→ BWRについても①において「2.2 構造強度設計」「(2)累積疲労サイクル数は設計疲労寿命を超えないこと。」とされており、同等である。

以上より、PWRの「安全設計の方針」の記述については、BWRにおける①の「2.2 構造強度設計」の記述に、(1)、(2)及び(4)の記述が加わっているが、(1)及び(4)については、最大線出力密度の管理により1%塑性歪を防止し燃料の損傷を起こさないことに集約され、東二の法令要求の記載によっても表現できていると考えられる。(2)のサーマルフィードバックの防止という観点ではBWRは問題となることはない。

なお、同様の内容は、設置許可添付書類八の3章において詳述している。

以上

PWR 燃料設計 5 基準と BWR 燃料設計の比較

PWR 燃料設計の考え方	BWR 燃料設計の考え方
<p>(1) 【燃料中心温度】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>燃料の機械的破損防止の観点から、燃料中心温度がペレット溶融点未満であることを確認している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料の機械的破損防止の観点から、損傷限界線出力密度を超えないことを確認している。</li> </ul>
<p>(2) 【燃料棒内圧】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>機械的破損の観点からは被覆管応力に集約されている。</li> <li>高燃焼度領域で内圧が外圧を超える可能性があるため、サーマルフィードバックを避けるための内圧基準を設け、その内圧基準を超えないことを確認している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>機械的破損の観点からは被覆管応力に集約されている。</li> <li>内圧が外圧を超えることはないため、サーマルフィードバックを避けるための内圧基準を設ける必要はない。</li> </ul>
<p>(3) 【被覆管応力】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>被覆管にかかる応力が許容応力以下であることを確認している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>被覆管にかかる応力が許容応力以下であることを確認している。</li> </ul>
<p>(4) 【被覆管歪】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>照射実績により、1%塑性歪を超えないことで機械的破損を防止できることを確認している。</li> <li>燃料中心温度がペレット溶融点未満であれば 1%塑性歪に至らないので、保守的に燃料中心温度がペレット溶融点未満であることを確認している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>照射実績により、1%塑性歪を超えないことで機械的破損を防止できることを確認している。</li> <li>1%塑性歪を与える線出力密度を損傷限界線出力密度とし、最大線出力密度が損傷限界線出力密度を超えないことを確認している。</li> </ul>
<p>(5) 【被覆管疲労】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>累積疲労サイクルは、設計疲労寿命以下であることを確認している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>累積疲労サイクル数は設計疲労寿命を超えないことを確認している。</li> </ul>