



原子炉施設保安規定のLCOの扱いに係るご相談

2021年5月20日
関西電力株式会社



1/4炉心出力偏差のLCOの扱い

- 原子炉熱出力が50%を超える状態においては、1/4炉心出力偏差が制限内（1.02以下）であることを要求している。
 - 定常運転状態において意図せぬLCO逸脱が生じた際の対応としては、所定の出力まで出力降下した後、炉内出力分布の確認、安全評価等を行い、運転を継続する上での評価を行うことになる。
- また、所要時間(AOT)内に必要な措置が完了できない場合には、B.1の措置として原子炉熱出力50%以下の出力状態まで移行することとなる。
- 一方で、計画的に出力降下を継続する場合においては、B.1の措置を計画的に実施していることになり、出力降下と共に熱的余裕が確保（増加）されていく状態であることから安全性に影響を与えず、最終的には適用範囲から外れることになる。

(1/4 炉心出力偏差)

- 第 33 条 モード 1（原子炉熱出力が 50 % を超える）において、1/4 炉心出力偏差は、表 33-1 で定める事項を運転上の制限とする。
2. 1/4 炉心出力偏差が前項で定める運転上の制限を満足していることを確認するため、次号を実施する。
- (1) 当直課長は、モード 1（原子炉熱出力が 50 % を超える）において、1 週間に 1 回、1/4 炉心出力偏差を確認する。
- ただし、出力領域上部中性子束偏差大を検知する警報または出力領域下部中性子束偏差大を検知する警報が動作不能である場合、1 2 時間に 1 回、1/4 炉心出力偏差を確認する。また、出力領域中性子束計装からの 1/4 炉心出力偏差への入力動作不能な場合、以下により 1/4 炉心出力偏差を確認する。
- (a) 当直課長は、原子炉熱出力が 75 % 未満で、出力領域中性子束計装 1 チャンネルからの 1/4 炉心出力偏差への入力動作不能な場合、1 週間に 1 回、残りの 3 チャンネルによる計算結果により確認する。
- (b) 原子燃料課長は、原子炉熱出力が 75 % 未満で、出力領域中性子束計装 2 チャンネル以上からの 1/4 炉心出力偏差への入力動作不能な場合、1 週間に 1 回、炉内出力分布測定結果により確認し、その結果を当直課長に通知する。
- (c) 原子燃料課長は、原子炉熱出力が 75 % 以上で、出力領域中性子束計装 1 チャンネル以上からの 1/4 炉心出力偏差への入力動作不能な場合、1 2 時間に 1 回、炉内出力分布測定結果により確認し、その結果を当直課長に通知する。
3. 当直課長は、1/4 炉心出力偏差が第 1 項で定める運転上の制限を満足していないと判断した場合、表 33-2 の措置を講じるとともに、原子燃料課長および計装係課長に通知する。通知を受けた原子燃料課長および計装係課長は、同表の措置を講じる。

表 33-1

項目	運転上の制限
1/4 炉心出力偏差	1.02 以下であること

計画的な50%以下への出力降下操作中においては、LCO逸脱を除外する規定を追加することの申請を計画している。（詳細は次頁以降）

なお、申請に関して設備の変更はなく、安全保護系及び制御系等の信号に影響を与えることはない。

ご相談事項

1 / 4 炉心出力偏差は、原子炉設置許可及び工事計画認可の内容に影響するものではないことから、保安規定のみの手続きでよいか確認させていただきたい。

表 33-2

条件	要求される措置	完了時間
A. 1/4 炉心出力偏差が運転上の制限を満足していない場合	A.1 当直課長は、1/4 炉心出力偏差の 1.00 から超過分 1 % あたり、原子炉熱出力を 100 % から 3 % 以上下げる。 および A.2 当直課長は、1/4 炉心出力偏差を確認し、A.1 措置後の状態からさらに増加する傾向にある場合は、再度 A.1 の措置を講じる。 および A.3 原子燃料課長は、炉内出力分布測定を行い、 $F_{\circ}(Z)$ および $F_{\Delta H}^N$ が運転上の制限を満足していることを確認し、その結果を当直課長に通知する。 および A.4 原子燃料課長は、安全解析の再評価を行い、その結果が運転期間を通じて有効であることを確認し、その結果を当直課長に通知する。 および A.5 計装係課長は、1/4 炉心出力偏差をなくすように出力領域中性子束計装を調整し、その結果を当直課長に通知する ^{*1} 。 および A.6 原子燃料課長は、炉内出力分布測定を行い、 $F_{\circ}(Z)$ および $F_{\Delta H}^N$ が運転上の制限を満足していることを確認し、その結果を当直課長に通知する ^{*2} 。	2 時間 1 2 時間 その後の 1 2 時間に 1 回 2 4 時間 その後の 1 週間に 1 回 原子炉熱出力が A.1 の措置で制限される値を超える前 原子炉熱出力が A.1 の措置で制限される値を超える前 原子炉熱出力 100 % 到達後の 2 4 時間以内 または 原子炉熱出力が A.1 の措置で制限される値を超えた後の 4 8 時間以内のいずれか早い方
B. 条件 A の措置を完了時	B.1 当直課長は、原子炉熱出力を 50 % 以下に下げる。	4 時間

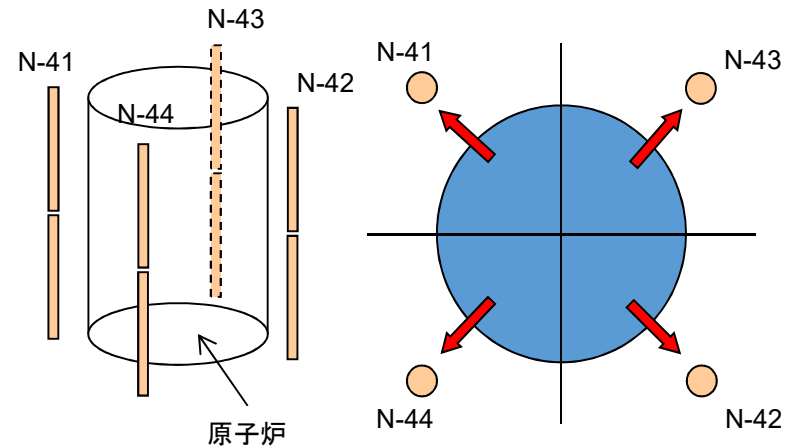
*1 : A.5 の措置は、A.4 の措置が完了後に実施すること。

*2 : 条件 A に至った場合は、1/4 炉心出力偏差が制限値内に回復しても、A.6 の措置を完了しなければならない。
保安規定条番号は大飯発電所を例に示す（以降も同様）

1 / 4 炉心出力偏差の LCO の目的

- 「1/4炉心出力偏差」とは、炉心の上部／下部ごとの監視のために設置されている4つの中性子束検出器による水平方向の出力偏差のことをいい、水平方向出力分布の歪みによる過大な出力ピークを監視している。

$$\text{1/4炉心出力偏差} = \frac{\text{4つの検出器の出力のうちの最大値}}{\text{4つの検出器の出力の平均値}}$$



- 1/4炉心出力偏差を制限する目的

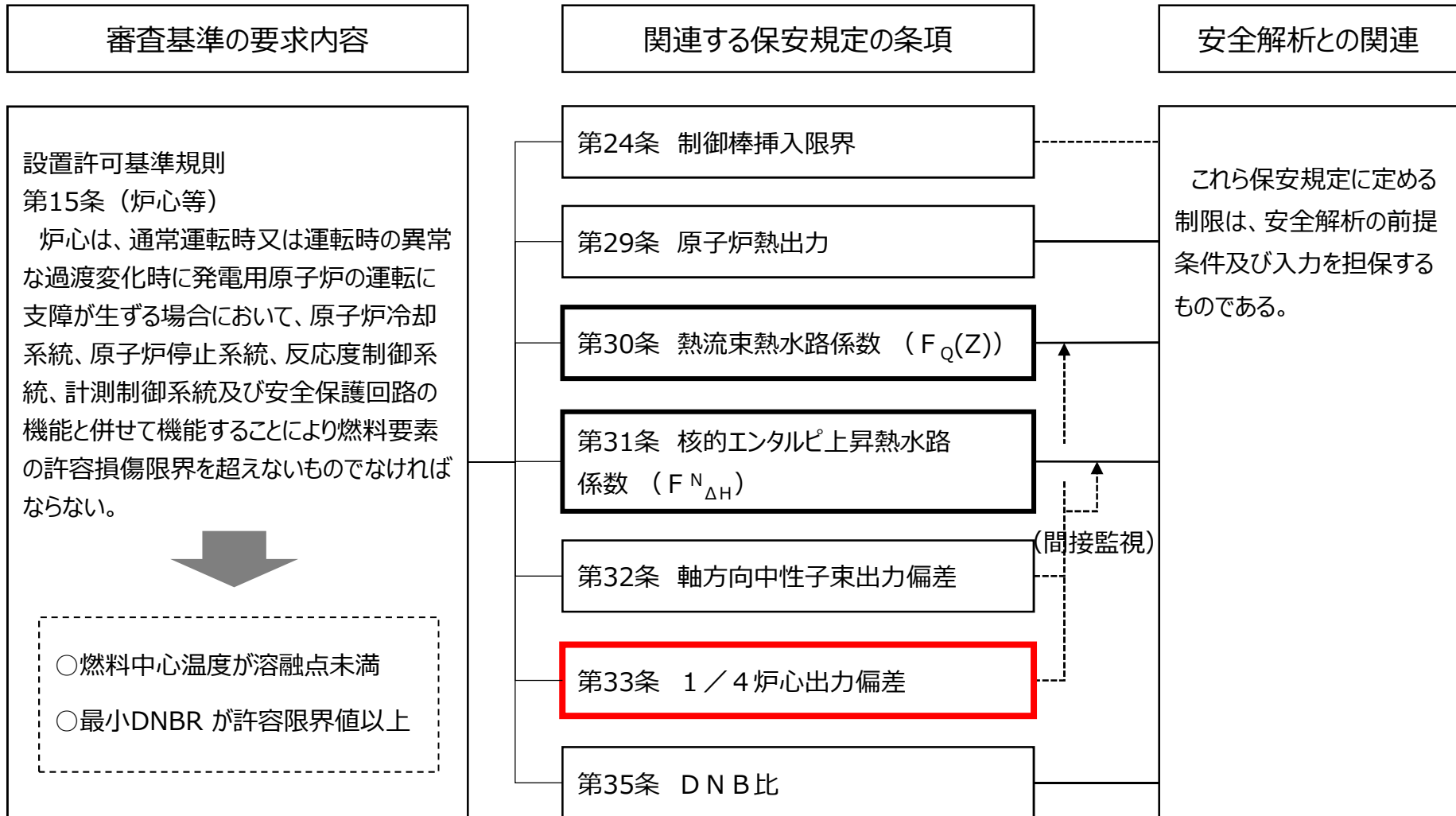
1/4炉心出力偏差が拡大することによって炉内の熱水路係数（核的エンタルピ上昇熱水路係数（ $F_{\Delta H}^N$ ）及び熱流束熱水路係数（ $F_Q(Z)$ ）も増加することになるが、保安規定による制限の目的としては、この変化量が $F_{\Delta H}^N$ 及び $F_Q(Z)$ の評価での不確定性や運転余裕として見込んでいる範囲内で収まるように運転上の制限（LCO：1.02以下）を決定している。

この制限により、水平方向の出力分布の歪みによる過大な出力ピークの発生を防止しているが、併せて、軸方向の出力分布の歪みを制限（第32条 軸方向中性子束出力偏差）すること等により、炉心の3次元的な出力分布が制限される。

これらのパラメータを制限内に収めることにより、出力分布が安全解析で入力した条件内にあり、炉心が燃料の許容損傷限界内で運転されることが担保される。（保安規定の制限値が安全解析の入力の前提条件となっている）

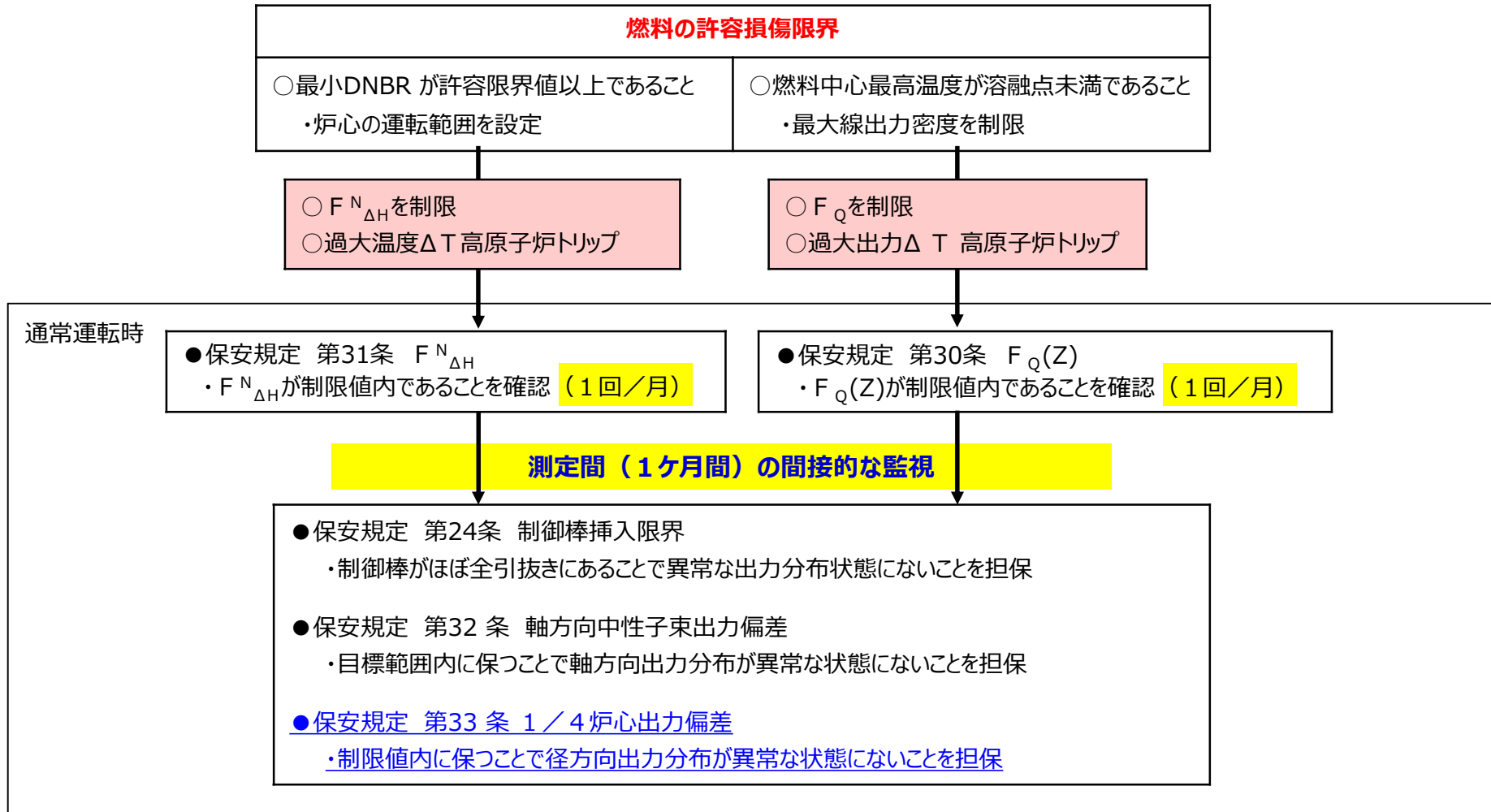
但し、1/4炉心出力偏差が制限を超えたとしても、直ちに安全上問題があることを意味しているとは限らず、上記のとおり評価上の不確定性分を超えたものであり、その意味するところは、相対的な水平方向の出力分布に変化の兆候が現れていることから、炉内出力分布測定による確認を行う必要があるということを示しているものである。

そのため、保安規定におけるLCO逸脱時の措置としては、所定量の炉出力を下げ、熱的余裕を確保したうえで、24時間以内に炉内出力分布の測定を行い運転を継続する上での詳細な評価を行うか、若しくは50%出力以下に下げる位置づけとなっている。



「1 / 4 炉心出力偏差」は、安全解析の入力となる $F_Q(z)$ 及び $F^{N_{\Delta H}}$ を間接的に連続監視する役割を担っているものであり、安全解析で直接使用されるパラメータではない。

出力分布監視に関する設計要件と保安規定の関係（2 / 3）

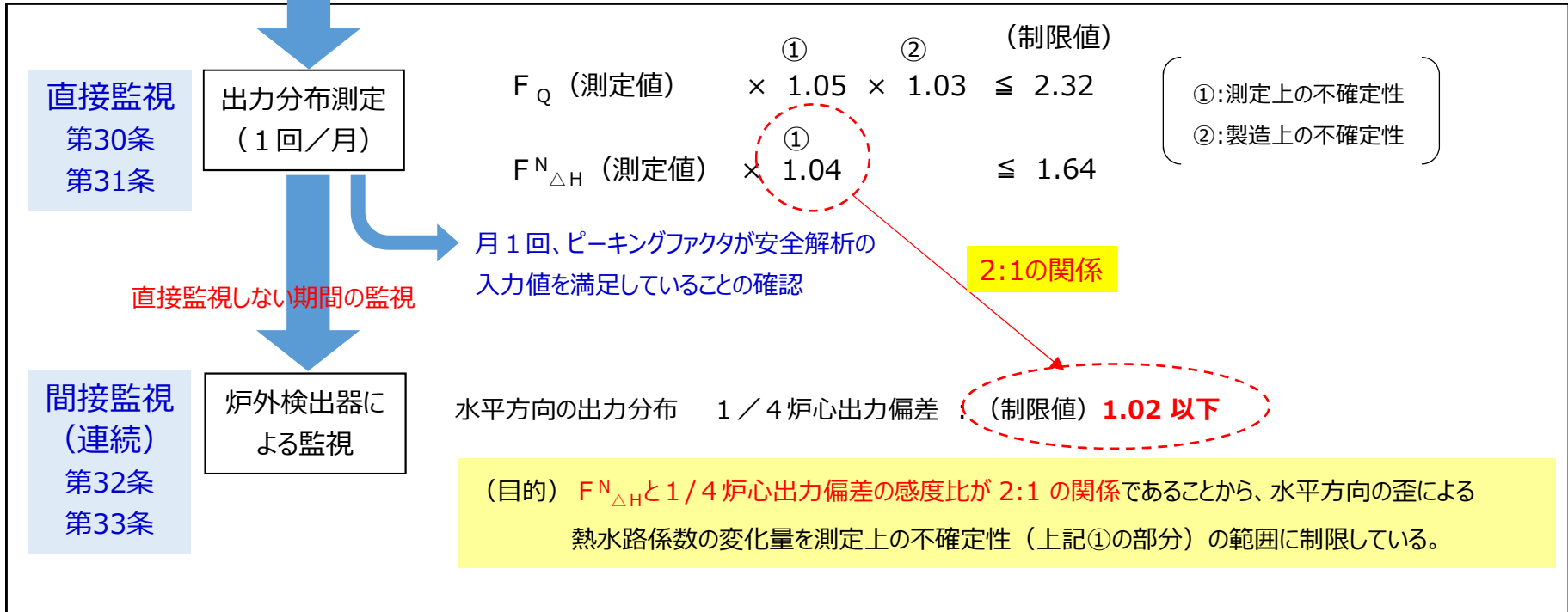


「1 / 4 炉心出力偏差」は、1回/月の $F_Q(Z)$ 及び $F_{\Delta H}^N$ の測定間における径方向の出力分布を監視している。

安全解析 (設置許可)



保安規定



1 / 4 炉心出力偏差に関する原子炉設置許可の記載

(原子炉設置許可の確認)

大飯発電所 3, 4 号炉 原子炉設置変更許可 (原規規発第2105197号 (令和 3 年5月19日許可) 時点)

添付書類 8 3.4.5.1 DNBR

(2)統計的に取り扱う入力パラメータの不確定性 (抜粋)

炉心部分の圧力評価値に基づいて設定した最確値と、圧力測定誤差及び制御系による影響を考慮して設定した標準偏差を用いることにより統計的に取り扱う。

f. 核的エンタルピ昇熱水路係数 ($F_{\Delta H}^N$)

炉心の出力分布は、主として濃縮度、燃料集合体装荷パターン、バーナブルポイズン配置、原子炉出力、制御棒クラスタ位置、燃焼度等によって変化する。DNB熱流束の評価には水路に沿って出力を積分したエンタルピ上昇の水平方向分布、すなわち核的エンタルピ昇熱水路係数 ($F_{\Delta H}^N$) が重要になる。 $F_{\Delta H}^N$ の最確値は水平方向ピーキング係数 (F_{PK}^H) の上限値に基づいて設定し、実炉心及び臨界実験装置での測定結果を用いた誤差評価に基づいて標準偏差を設定することにより統計的に取り扱う。

なお、部分出力時における $F_{\Delta H}^N$ の最確値としては、定格出力時の値に係数：{1+0.3(1-P)} (P：相対出力) を乗じたものを用いる。出力の低下に伴って $F_{\Delta H}^N$ の値を大きくするのは、制御棒クラスタを挿入することにより、水平方向出力ピークが上昇するためであるが、「過大温度 ΔT 高炉トリップ」設定にこの影響を盛り込んでいるので、炉心の安全性は確保されている。

g. エンタルピ上昇に関する工学的熱水路係数

ペレットの直径、密度及び濃縮度の製造公差によるエンタルピ上昇への影響については、定格値 (1.0) を最確値とし、製造公差及び燃料製造実績データに基づいて設定した標準偏差を用いることにより統計的に取り扱う。

なお、統計的に取り扱わない以下のものについては、固定値として取り扱う。

a. 軸方向出力分布

軸方向出力分布は制御棒クラスタの動き、負荷変動、キセノン再分布等によって大幅に変化するが、運転中の出力分布変動に余裕をもって対処できるように最大と平均の比が1.62であるコサイン分布をDNB評価に用いる。

8-3-54

添付書類 8 第3.4.1表 熱水力設計値 (抜粋)

第3.4.1表 熱水力設計値

炉心熱出力	約3,411MW
燃料棒からの熱発生割合	約97.4%
1次冷却材圧力	約15.4MPa [gage]
1次冷却材流量	約60.1×10 ⁶ kg/h
炉心バイパス流量割合	約5.5%
実効熱伝達面積	約5,550m ²
原子炉容器入口1次冷却材温度	約289℃
原子炉容器出口1次冷却材温度	約325℃
平均出力密度	約105kW/m ²
熱流束	
定格出力時平均	約599kW/m ²
定格出力時最大	約1,443kW/m ²
線出力密度	
定格出力時平均	約17.9kW/m
定格出力時最大	43.1kW/m
	33.4kW/m (ガドリニア入り燃料)
熱水路係数 (定格出力時)	
F_Q	2.41
$F_{\Delta H}^N$	1.64
燃料中心最高温度	
定格出力時	約1,830℃
	約1,680℃ (ガドリニア入り燃料)
最大線出力密度59.1kW/m時	約2,270℃
(ガドリニア入り燃料に	約2,040℃ (ガドリニア入り燃料)
ついては44.3kW/m時)	
最小DNBR	
定格出力時	2.16
運転時の異常な過渡変化時	1.42以上

8-3-87

(確認結果)

原子炉設置許可の記載には、1 / 4 炉心出力偏差に関する記載はない。

なお、1 / 4 炉心出力偏差が間接的に担保している $F_{\Delta H}^N$ の不確定性に関する記載があるが、本考え方に変更はない。

1 / 4 炉心出力偏差に関する工事計画認可の記載

(工事計画認可の確認)

大飯発電所3号機 工事計画認可 (平成16・06・18原第22号 (平成16年10月1日認可))

熱出力計算書 (抜粋)

メータについて以下に説明する。

(a) 1次冷却材流量

定格流量を最確値とし、流量測定誤差に基づいて設定した標準偏差を用いることにより統計的に取り扱う。

なお、炉心入口流量の不均一性については、高温水路を含む燃料集合体への冷却材流量を平均より5%減少させることにより考慮する。

(b) 炉心バイパス流量

炉心の1次冷却材流量には、熱除去に寄与しないバイパス流量として以下を考慮する。

- ・原子炉容器ふた部へ向かう流れ
- ・制御棒案内シンプルを通る流れ
- ・原子炉容器と炉心槽の間隙を経て原子炉容器出口ノズルに至る流れ
- ・炉心パッフルと炉心槽の間を通る流れ

これらのバイパス流路の定格寸法及び各部圧力損失に基づいて設定した炉心バイパス流量の最確値と、各バイパス流路の寸法公差及び各部圧力損失の不確定性による影響を考慮して設定した標準偏差を用いることにより統計的に取り扱う。

(c) 原子炉出力

定格値を最確値とし、原子炉熱出力校正誤差に基づいて設定した標準偏差を用いることにより統計的に取り扱う。

(d) 1次冷却材平均温度

定格値を最確値とし、温度測定誤差及び制御系による影響を考慮して設定した標準偏差を用いることにより統計的に取り扱う。

(e) 炉心圧力

炉心部分の圧力評価値に基づいて設定した最確値と、圧力測定誤差及び制御系による影響を考慮して設定した標準偏差を用いることにより統計的に取り扱う。

(f) 核的エンタルピ上昇熱水路係数 ($F_{\Delta H}^N$)

炉心の出力分布は、主として濃縮度、燃料集合体装荷パターン、バーナブルボイゾン配置パターン、原子炉出力、制御棒クラスタ位置、燃焼度等によって変化する。DNB熱流束の評価には水路に沿って出力を積分したエンタルピ上昇の水平方向分布、すなわち核的エンタルピ上昇熱水路係数 ($F_{\Delta H}^N$) が重要になる。核的エンタルピ上昇熱水路係数 ($F_{\Delta H}^N$) の最確値 (1.58) は、水平方向ピーキング係数 (F_{PK}^N) の上限値に基づいて設定し、実炉心及び臨界実験装置での測定結果を用いた誤差評価に基づいて設定した標準偏差を用いることにより統計的に取り扱う。

なお、部分出力時における核的エンタルピ上昇熱水路係数 ($F_{\Delta H}^N$) の最確値と

- 32 -

熱出力計算書 (抜粋)

第5-6表 統計的に取扱うパラメータ

パラメータ	指 針*	パラメータの値
1次冷却材流量	μ	カロリメトリックデータによる測定値に基づいて設定する。 $\mu = 1.0 (= 80,400 \text{ m}^3/\text{h})$
	σ	カロリメトリックデータの測定誤差に基づいて設定する。 $\sigma = \frac{2.0}{\sqrt{3}} \%$ (最確値 $\pm 2.0\%$ の一様分布)
炉心バイパス流量	μ	各バイパス流路の定格寸法及び各部圧力損失の最確値から評価された値に基づいて設定する。 $\mu = 5.5 \%$
	σ	各バイパス流路の寸法公差及び各部圧力損失の不確定性による影響を考慮して設定する。 $\sigma = \frac{1.0}{\sqrt{3}} \%$ (最確値 $\pm 1.0\%$ の一様分布)
原子炉出力	μ	定格値を用いる。 $\mu = 3,411 \text{ MW}$
	σ	カロリメトリックデータの測定誤差に基づいて設定する。 $\sigma = \frac{2.0}{\sqrt{3}} \%$ (最確値 $\pm 2.0\%$ の一様分布)
1次冷却材平均温度	μ	定格値を用いる。 $\mu = 307.1^\circ\text{C}$
	σ	温度測定誤差及び制御系による影響を考慮して設定する。 $\sigma = \frac{2.2}{\sqrt{3}} \%$ (最確値 $\pm 2.2\%$ の一様分布)
炉心圧力	μ	炉心部分の圧力評価値に基づいて設定する。 $\mu = 15.6 \text{ MPa [gage]}$
	σ	圧力測定誤差及び制御系による影響を考慮して設定する。 $\sigma = \frac{0.21}{\sqrt{3}} \text{ MPa}$ (最確値 $\pm 0.21 \text{ MPa}$ の一様分布)
核的エンタルピ上昇熱水路係数 ($F_{\Delta H}^N$)	μ	$F_{\Delta H}^N$ に関する設計限界値に基づいて設定する。 $\mu = 1.58$
	σ	実炉心及び臨界実験装置での測定結果を用いた誤差評価に基づいて設定する。 $\sigma = \frac{4.0}{1.645} \%$ (正規分布)
エンタルピ上昇に関する工学的熱水路係数 ($F_{\Delta H}^E$)	μ	1.0を用いる。 $\mu = 1.0$
	σ	燃料の製造実績データ及び製造公差に基づいて設定する。 $\sigma = \frac{0.02}{1.645}$ (正規分布)

μ : 最確値

σ : 標準偏差

* : 「発電用加圧水型原子炉の炉心熱設計評価指針」

- 43 -

(確認結果)

原子炉設置許可の記載には、1 / 4 炉心出力偏差に関する記載はない。

なお、1 / 4 炉心出力偏差が間接的に担保している $F_{\Delta H}^N$ の不確定性に関する記載があるが、本考え方に変更はない。

(参考) 出力降下中に関する制限の整理

	第30条 熱流束熱水路係数 ($F_Q(z)$)	第31条 核的エンタルピ上昇熱水路係数 ($F_{N_{\Delta H}}$)	第33条 1/4炉心出力偏差
監視頻度	1回/月	同 左	連 続
出力降下中の制限	明確な記載なし	同 左	同 左
LCO逸脱時の措置 (要点)	<p>A.1 熱出力を下げる。(1%/超過1%)</p> <p>A.2 軸方向中性子束出力偏差の許容制限範囲を下げる。</p> <p>A.3 中性子束高トリップ設定値を下げる。</p> <p>A.4 過大出力ΔTトリップ設定値を下げる。</p> <p>A.5 炉内出力分布の確認 (出力超過前)</p> <p>B.1 モード2にする</p>	<p>A.1.1 制限を満足させる または</p> <p>A.1.2.1 熱出力を50%以下に下げる。</p> <p>A.1.2.2 中性子束高トリップ設定値を下げる。</p> <p>A.2 炉内出力分布の確認</p> <p>A.3 同 上 (各出力超過前)</p> <p>B.1 モード2にする</p>	<p>A.1 熱出力を下げる (3%/超過1%)</p> <p>A.2 A.1措置後の確認 (A.1と同じ措置)</p> <p>A.3 炉内出力分布の確認</p> <p>A.4 安全解析の再評価 (出力超過前)</p> <p>A.5 炉外核計装の校正 (出力超過前)</p> <p>A.6 炉内出力分布の確認 (100%到達後 または出力超過後48時間以内)</p> <p>B.1 熱出力を50%以下に下げる。</p>
対応の考え方	逸脱状態から熱的余裕を確保するために出力を下げたうえで、運転継続の評価を行う。規定時間内に措置が達成できない場合は、更に余裕のある状態まで熱出力を下げる。	同 左	同 左

(参考) ATENA大での調整結果

<原子力規制委員会HP議事要旨抜粋>

1. 件名：原子力エネルギー協議会との面談
2. 日時：令和2年12月25日（金）10：00～10：35
3. 場所：原子力規制庁8階会議室
4. 出席者：
原子力規制庁 原子力規制部原子力規制企画課 森下課長、榎本補佐
技術基盤グループ技術基盤課 佐々木企画調整官
原子力エネルギー協議会（以下「ATENA」という。） 事務局長、他2名（テレビ会議システムによる出席）
5. 要旨：
○ATENA から、昨日（12月24日）付けで原子力発電所におけるデジタル安全保護回路のソフトウェア共通要因故障緩和対策に関する技術要件書を発行した旨報告があった。
○ATENA から、原子力施設の状況に応じた運転上の制限（LCO）等の継続的改善に係る検討に関して、具体的な課題については個社にて実用炉審査部門と調整を進めていることから、ATENAとして関与すべき課題の見直しを行っている旨の報告があった。

⇒ 1/4炉心出力偏差のLCOの扱いについては、LCOの一時的な除外規定の妥当性説明であり、安全対策導入に係る事項に直接的にはあたらず、安全性向上に係る検討に該当しないことから、個社案件として進めさせていただきたい。（ATENAおよび各事業者にもご説明）

(参考) ATENAの役割等 (ATENA-HPより)

○原子力エネルギー協議会の役割

- ①原子力産業界全体で共通課題の解決に取り組み、原子力事業者には効果的な安全対策の導入を促す
- ②安全性向上という共通の目的の下、規制当局と対話する
- ③さまざまなステークホルダーと安全性向上の取り組みに関するコミュニケーションを行う