

新規作成

| | |
|--------------------|----------------|
| 玄海原子力発電所 2 号炉 審査資料 | |
| 資料番号 | 添六追補-1 |
| 提出年月日 | 令和元年 12 月 25 日 |

玄海原子力発電所 2 号炉

SFP 未臨界性評価に使用する SCALE コードの適用性について

令和元年 12 月
九州電力株式会社

目 次

| | |
|------------------------|---|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. SCALE コードの適用性 | 1 |

1. はじめに

本資料は、追補 1「Ⅲ. 玄海 2 号炉 使用済燃料ピット水大規模漏えい時の未臨界性について」に示す解析において使用した SCALE コードの適用性について説明するものである。

2. SCALE コードの適用性

SCALE コードは使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価に広く使用されており、国内において使用済燃料貯蔵設備大規模漏えい時の未臨界性評価に係る多数の許認可実績を有するコードである。

計算コードの不確定性を求めるために、OECD/NEA によりまとめられた臨界実験ベンチマーク集(INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS September 2010 Edition (OECD/NEA))に登録されている臨界実験から、国内 PWR の燃料貯蔵設備及び燃料仕様等を考慮して選定した 147 ケースのベンチマーク解析を実施している。ベンチマーク解析を行うにあたっては、国内 PWR の燃料貯蔵設備及び燃料仕様のパラメータ範囲を包含する範囲を整理し、臨界実験を第 1 表のとおり選定した。

また、選定した臨界実験 (147 ケース) に対し、横軸に EALF (Energy corresponding to the Average neutron Lethargy causing Fission : 核分裂に寄与する中性子平均エネルギー) を、縦軸に C/E (C:計算値と E:測定値の比) をプロットしたものを第 1 図に示す。選定した臨界実験の EALF は本評価体系における冠水状態および低水密度での最適減速状態の EALF を含んでおり、また、147 ケースの臨界実験の C/E は 1 近傍であり精度よく一致している。

なお、各ベンチマーク解析では、申請用評価モデルと同様に 400 万ヒストリ (各世代の中性子発生数 2000 個×2000 世代) のモンテカルロ計算を行っており、上述するように C/E は 1 近傍であり精度よく一致していることから、国内 PWR の燃料貯蔵設備及び燃料を対象として、SCALE コード (400 万ヒストリのモンテカルロ計算) によって未臨界性評価を実施することは妥当である。

ベンチマーク解析の結果得られた実効増倍率及び標準偏差並びに各実験の実効増倍率測定値及び実験誤差を用いて、ラック体系の未臨界性評価に用いる SCALE 6.0 システムの平均誤差 ($1-k$) 及び不確かさ (Δk) を、ウラン燃料を対象とした場合、MOX 燃料を対象とした場合及び全ケースを対象とした場合のそれぞれについて導出した結果を第 2 表に示す。表に示すとおり、ウラン燃料を対象とした場合の SCALE 6.0 システムの平均誤差は 0.0007、不確かさは 0.0065 であり、MOX 燃料を対象とした場合の SCALE 6.0 システムの平

均誤差は 0.0013、不確かさは 0.0104、全ケースを対象とした場合の SCALE 6.0 システムの平均誤差は 0.0007、不確かさは 0.0066 となった。本評価は新燃料と燃焼燃料を含む体系の評価であるため、ウラン燃料と MOX 燃料が混在する全ケースの臨界実験を対象として設定した計算コードの不確定性を使用することも可能であるが、「ウラン燃料」又は「燃焼燃料と同様にプルトニウムを含む MOX 燃料」に対する不確定性のうち、評価結果が厳しくなる MOX 燃料に対する不確定性を使用している。

第1表 選定したパラメータ範囲（製作公差を含まない）

| 項目 | 単位 | 燃料貯蔵設備及び燃料仕様のパラメータ範囲 | | 選定した臨界実験のパラメータ範囲 | |
|-------|------------------------------|----------------------|---------------|------------------|-----|
| | | MIN | MAX | MIN | MAX |
| 燃料 | ウラン燃料 ²³⁵ U濃縮度 | wt% | 1.60 | 4.80 | |
| | MOX燃料 Pu含有率 | wt% | 5.5 | 10.9 | |
| | 燃料材径 | mm | 8.19 | 9.29 | |
| | 燃料要素径 | mm | 9.5 | 10.72 | |
| | 被覆材 材質 | — | ジルコニウム合金 | | |
| | 燃料要素ピッチ | mm | 12.6 | 14.3 | |
| | 燃料体内の減速材 体積／燃料体積 | — | 1.88 | 2.00 | |
| | 燃料要素 配列条件 | — | 正方配列 | | |
| 減速材 | 体系条件 | — | 燃料体配列体系 | | |
| | 減速材 | — | 無／軽水 | | |
| | 減速材密度 | g/cm ³ | 0 | 約 1.0 | |
| ラックセル | 減速材中の ほう素濃度 | ppm | 0 | 4400 以上 | |
| | ラックセル材質 | — | 無／SUS／B-SUS | | |
| 反射体 | SUS製ラックセル のほう素添加量 | wt% | 0 | 1.05 | |
| | 反射体 材質 | — | 軽水 ／コンクリート | | |

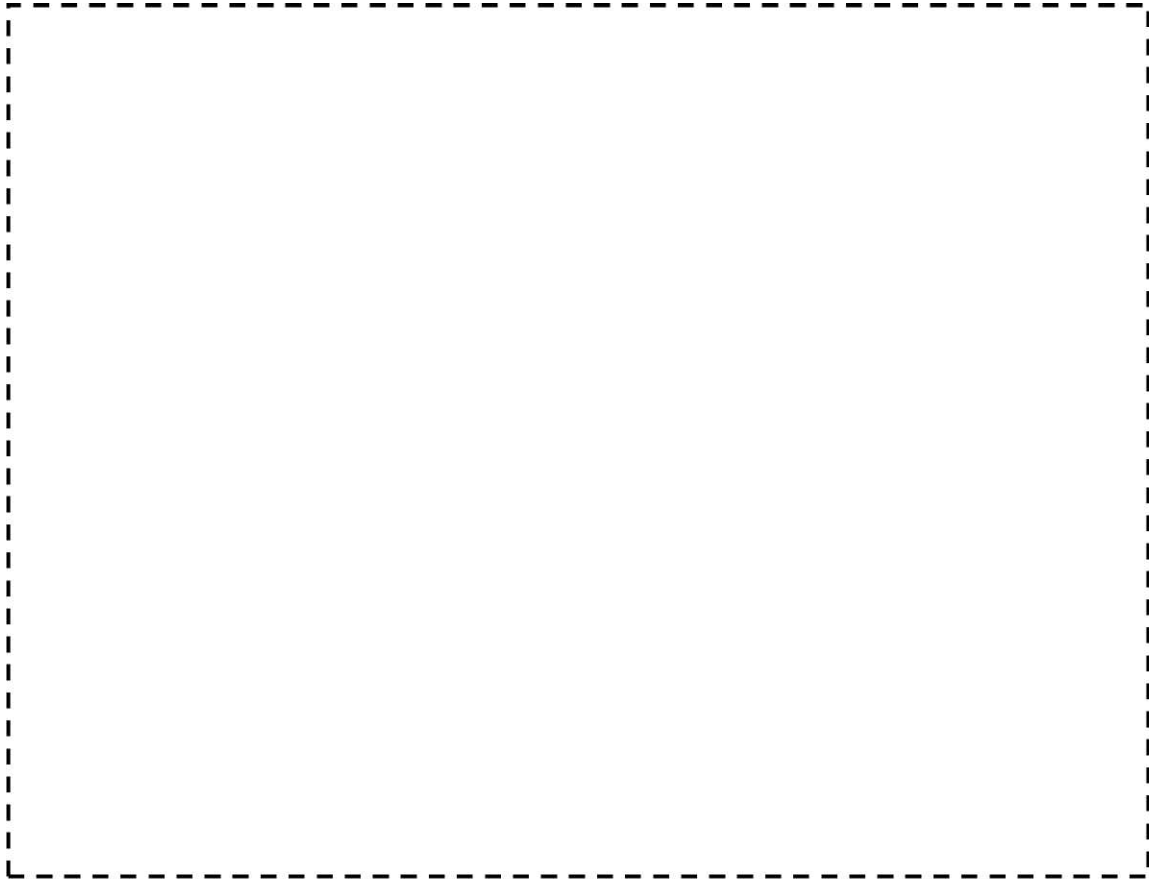
枠囲みの範囲は商業機密に係る事項
 のため、公開できません。

第 2 表 SCALE6.0 システムの平均誤差及び不確かさ

| 条件 | 計算コード | SCALE6.0 システム (KENO-VI) | | |
|----------|---------------------------------------|-------------------------------|--------|--------|
| | 断面積ライブラリ | ENDF/B-VII 238 群 | | |
| | 対象燃料 | ウラン燃料 | MOX 燃料 | 全ケース |
| | ベンチマークケース数 | [] | [] | 147 |
| 評価 結果 | 平均誤差 ($1 - k_c$) | 0.0007 | 0.0013 | 0.0007 |
| | 加重平均実効増倍率 ($\overline{k_{eff}}$) | 0.9993 | 0.9987 | 0.9993 |
| | 不確かさ ($\Delta k_c = U \times S_p$) | 0.0065 | 0.0104 | 0.0066 |
| | 信頼係数 (U) (注1) | [] | [] | [] |
| | $\overline{k_{eff}}$ の不確かさ (S_p) | [] | [] | [] |

(注 1) ベンチマーク解析ケース数に対する 95%信頼度×95%確率での信頼係数

枠囲みの範囲は商業機密に係る事項
 のため、公開できません。



第1図 選定したベンチマーク実験の EALF と C/E の関係

枠囲みの範囲は商業機密に係る事項
のため、公開できません。

<参考 1> SCALE コードにおけるモンテカルロ計算

SCALE コードによるモンテカルロ法に基づく未臨界性評価においては、評価体系中に仮想的に発生させた多数の中性子の挙動（燃料、構造材、減速材との相互作用（核分裂、吸収、散乱、体系からの漏れ））を追跡することで観察される中性子数の増減から実効増倍率を算出している。

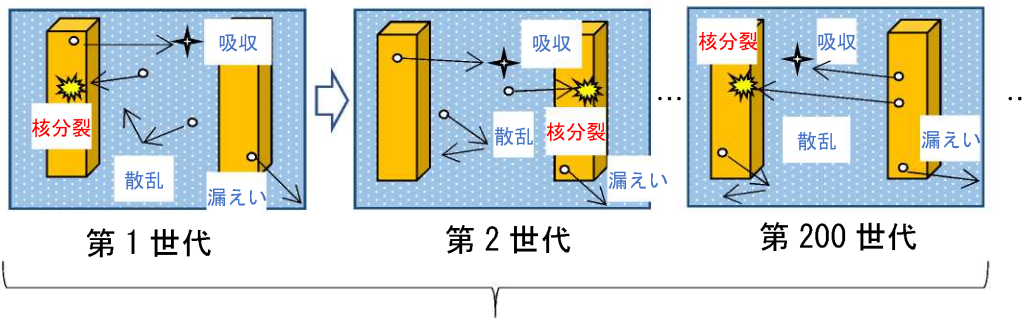
具体的には、1 世代あたり **2000** 個の中性子を同時に発生させ、各中性子が何らかの相互作用を起こすまで追跡し（**2000** 個目の中性子が相互作用を起こした時点でその世代は終了とする）、その時点で存在している中性子数と初期値（**2000** 個）の比をその世代における実効増倍率とする。同様の計算を **2000** 回（世代）実施し、各世代で得られた実効増倍率を統計処理して、実効増倍率の平均値と統計誤差を算出している。

各世代の計算において、世代初期に発生させる中性子数は前世代の末期中性子数によらず **2000** 個としているが、発生場所については、前世代での計算結果に基づき重みづけを行っている。具体的にいうと、第 1 世代では体系中に均等に発生させているが、第 2 世代以降については、前世代での計算結果（どこで核分裂が起きた、どこで吸収された）に基づき重みづけがなされるように発生場所を決定している。こうすることにより、本評価体系のような比較的大きな体系でかつ非均質な体系においても、評価体系が有する実際の中性子束分布（核分裂中性子源分布）を考慮したより実態に近い評価が可能となる。

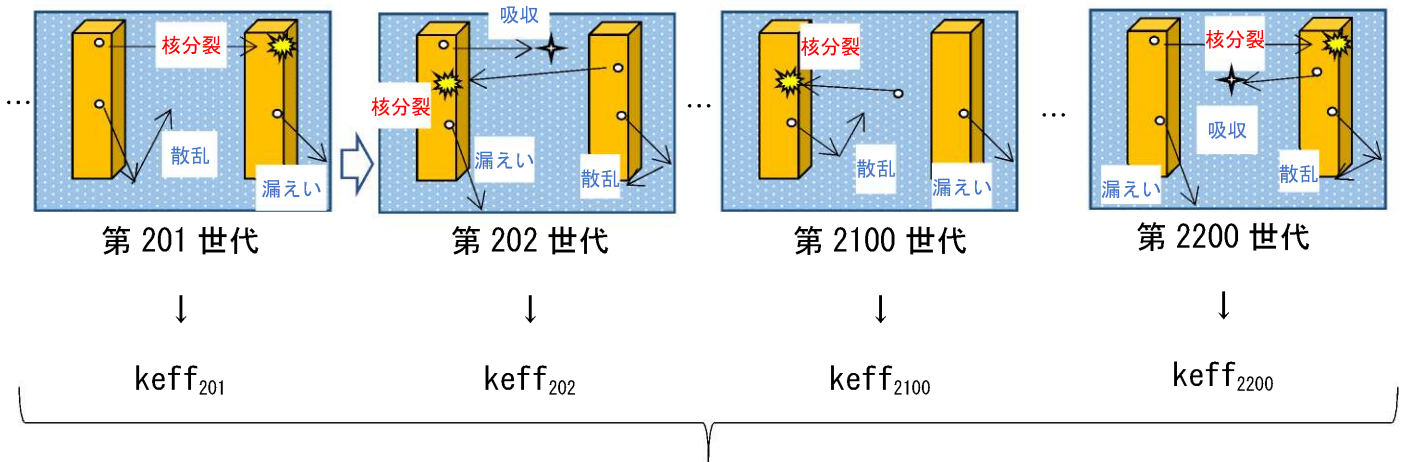
なお、中性子発生場所の重み付けは、世代を重ねるほど正確になり、実際の中性子束分布により近い評価が可能となることから、本評価においては、申請に用いる実効増倍率がより正確な値となるよう、最初の **200** 世代については中性子発生位置が十分に重み付けされていないとみなし、統計処理に含めていない。

計算イメージ

- ・ 第 1 世代の中性子発生位置は重みづけを行わない（体系中に均等に発生させている）
- ・ それ以降の各世代の中性子発生位置は前世代での計算結果（中性子が生成、消滅した位置）に基づき重み付けを行い決定
- ・ 各世代の初期中性子数は 2000 個とする（前世代終了時点の中性子数は引き継がない）
- ・ 2000 個の中性子が何らかの相互作用（核分裂、吸収、散乱、漏えい）するまで追跡
- ・ 200 世代の予備計算の後、2000 世代の本番計算を実施



中性子発生位置をより評価体系の分布に近づけるため、200 回の予備計算を行っている。



201 世代以降に 2000 回実行した各計算結果(keff_i)の平均値を本評価における実効増倍率とし、この実効増倍率の統計誤差 (σ) は下式の通りとなる。

$$\overline{\text{keff}} = \frac{1}{2000} \sum_{i=201}^{2200} \text{keff}_i$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2000} \sum_{i=201}^{2200} (\text{keff}_i - \overline{\text{keff}})^2}$$

＜参考 2＞ 玄海 2 号炉 未臨界性評価で考慮している燃料の燃焼度毎の体数内訳

未臨界性評価に当たっては、燃焼度を安全側に切下げ処理しており、平均的に燃料 1 体当たり約 4GWd/t の燃焼度を切り下げている。参考に、実炉心（玄海 2 号炉第 23 サイクル）を例に確認すると、約 4GWd/t の燃焼度は k_{eff} に換算すると約 0.03 に相当する。

玄海 2 号炉 未臨界性評価で考慮している燃料の燃焼度毎の体数内訳

| 燃料タイプ | 実燃焼度 | 評価上の燃焼度 | 体数 |
|-----------------|--------------|---------|-----|
| 39GWd/t ウラン燃料※1 | 20 ～ 30GWd/t | 20GWd/t | 5 |
| | 30 ～ 40GWd/t | 30GWd/t | 16 |
| 48GWd/t ウラン燃料 | 10 ～ 30GWd/t | 10GWd/t | 6 |
| | 30 ～ 40GWd/t | 30GWd/t | 62 |
| | 40 ～ 50GWd/t | 40GWd/t | 109 |
| 55GWd/t ウラン燃料 | 0 GWd/t | 0GWd/t | 28 |
| | 20 ～ 30GWd/t | 20GWd/t | 36 |
| | 30 ～ 40GWd/t | 30GWd/t | 20 |
| 体数合計 | | | 282 |

※1 保守的に 48GWd/t ウラン燃料の燃料仕様と同等として評価

<参考 3> 本評価における不確定性

「玄海 2 号炉 使用済燃料ピット水大規模漏えい時の未臨界性評価」における不確定性は、下表のとおり SCALE コードに係る計算コードの不確定性及び製作公差に基づく不確定性の合計を使用している。

表 本評価における不確定性

| 臨界計算上の不確定性評価項目 | | 記号 | 不確定性 |
|------------------------|--------------|--------------|---------------|
| 計算コードの不 不確定性 | 平均誤差 | δk | 0.0013 |
| | 95%信頼度×95%確率 | ϵ_c | 0.0104 |
| 製作公差に 基づく不確定性 | ラックの内のり公差 | ϵ_w | 0.0023 |
| | 燃料製作公差 | ϵ_r | 0.0051 |
| | ラックの中心間距離公差 | ϵ_p | 0.0022 |
| | ラック内燃料偏心 | ϵ_f | 0.0045 |
| 統計誤差 ^(注1) | | σ | 0.0005 |
| 不確定性合計 ^(注2) | | ϵ | 0.0142 |

(注 1) 2000 世代 (各世代の中性子発生数を 2000 個とする。) 計算した場合の統計誤差

(注 2) []

枠囲みの範囲は商業機密に係る事項
のため、公開できません。