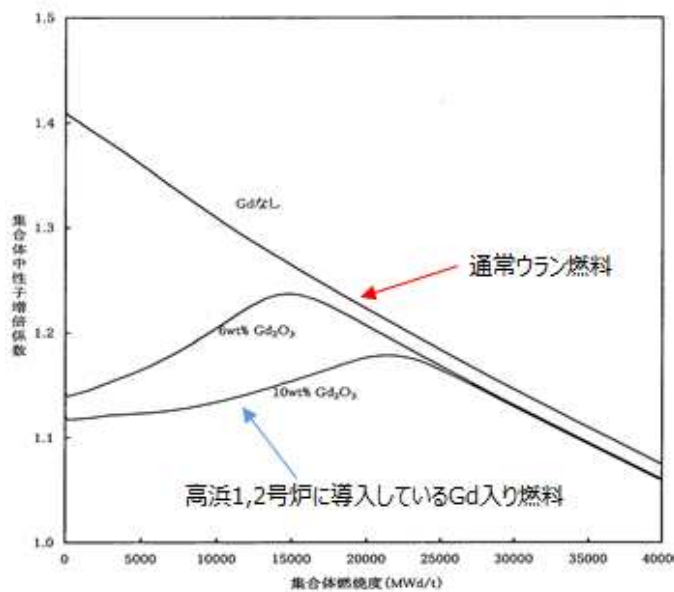


Gd入り燃料と通常ウラン燃料の増倍率評価における計算条件  
(体系、内挿物、考慮するFP条件等)に関する追加説明について

以下第1図では、燃焼を通じて通常ウラン燃料の増倍率が、Gd入り燃料を上回る結果となっている。本結果の妥当性について以降より説明する。

【通常ウラン燃料と Gd 入り燃料の増倍率比較 (資料③ (4) 再掲)】



第1図 通常ウラン燃料および Gd 入りウラン燃料の無限増倍率比較※1

(※1 「MAPI-1066 ガドリニア入り燃料の核設計」(昭和57年12月 三菱重工業株式会社)より抜粋)

【用語の定義】

- ・燃料集合体 : 燃料棒、制御棒案内シンプル及び炉内計装用案内シンプルを支持格子により配列し、制御棒案内シンプルの上端に上部ノズル、下部に下部ノズルを取り付けたもの。
- ・通常ウラン燃料 : 製造時において燃料棒中の燃料要素(ペレット)にウランのみが入った燃料集合体。
- ・Gd入り燃料 : 製造時において、一部の燃料棒中の燃料要素(ペレット)に、ウランに加え可燃性毒物としてGdを入れた燃料集合体。
- ・内挿物 : 内挿物の種類としては主に以下のものがあり、炉内へ装荷される燃料集合体には何らかの内挿物が挿入される。
  - プラグングデバイス : 燃料集合体に流れる冷却水の流量を調整する。
  - 制御棒クラスタ : 原子炉の核反応制御や、炉心の緊急停止に使用。

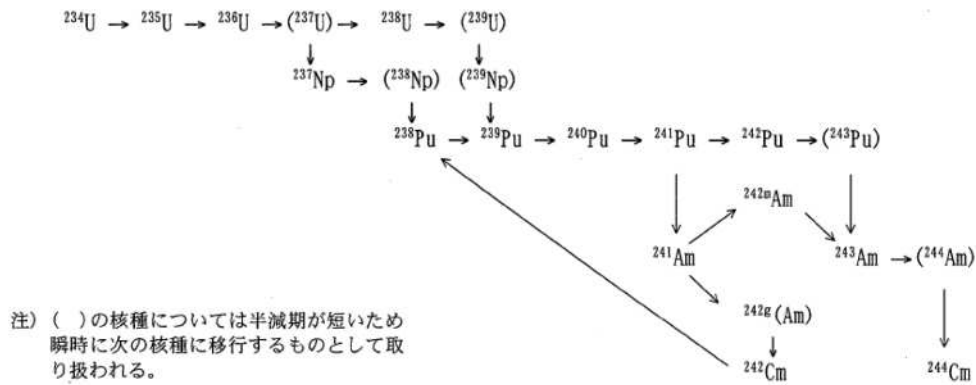
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

○バーナブルポイズン(BP)：

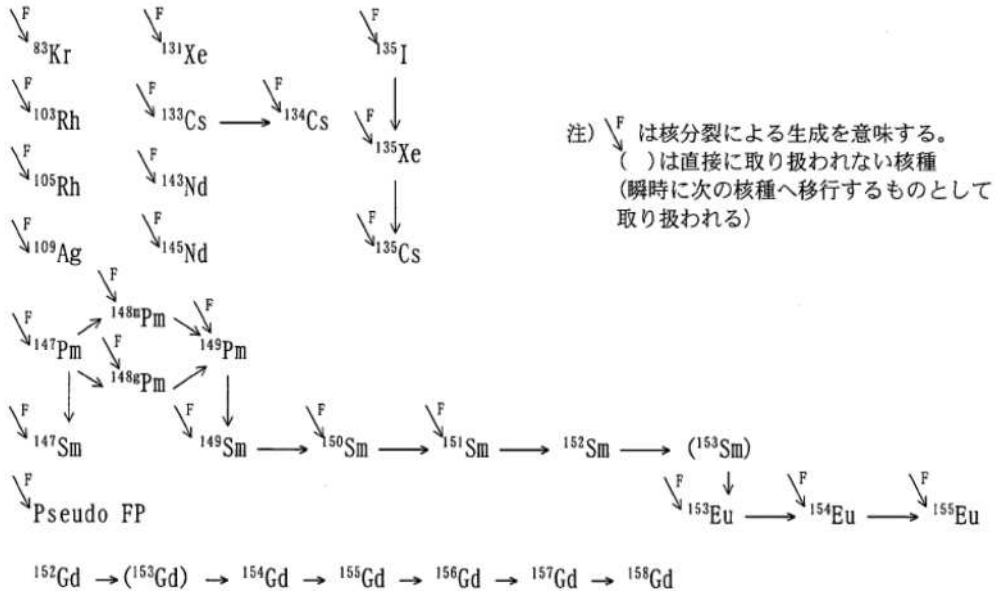
主に炉心のピーキングを抑制するため、反応度の高い燃料集合体を炉心中央部に装荷する場合に用いる。毒物としてほう素を使用している。

【PHOENIX-P に内蔵される燃焼チェーン】

<AC 核種の燃焼チェーン>



<FP 核種の燃焼チェーン>



第 2 図 PHOENIX-P に内蔵される燃焼チェーン※2

(※2 「MAPI-1066 ガドリニア入り燃料の核設計」(昭和 57 年 12 月 三菱重工業株式会社)(旧版)より抜粋)

## 1. 通常ウラン燃料および Gd 入り燃料の反応度差評価結果の妥当性について

### (1) 使用コードについて

第 1 図に示す通常ウラン燃料と Gd 入り燃料の増倍率は単一集合体の無限配列体系において PHOENIX-P により評価したものであり、考慮している AC,FP は当該コードの燃焼チェーンにて考慮されるもの全てである。PHOENIX-P は高浜 1,2 号炉の既許認可における炉心安全解析に使用しているコードであり、且つ多数の実炉心設計で使用された実績があり、その計算結果の妥当性は燃料取替毎に実施している炉物理検査（臨界ボロン濃度測定検査、原子炉停止余裕検査、出力分布測定検査等）での実測値と、PHOENIX-P を使用した計算結果が精度よく一致することでもって確認されている。

燃焼チェーンにおける全ての核種を考慮し評価した結果が炉物理検査結果と精度よく一致しているということは、すなわち PHOENIX-P は燃焼チェーンで考慮される全核種の組成を精度よく計算できると言える。

### (2) 工学的考察

第 1 図に示す通常ウラン燃料と Gd 入り燃料の増倍率差は、両者の  $^{235}\text{U}$  初期濃縮度の差によるものである。最高燃焼度 55GWd/t の通常ウラン燃料の初期濃縮度は 4.6wt%、Gd 入り燃料の  $^{235}\text{U}$  初期濃縮度は 4.47wt% (既認可の燃料体設計認可申請書に基づく値) である。

Gd 入り燃料の場合、燃料棒中に Gd が存在することにより中性子スペクトルが硬くなり、核分裂性の Pu 生成が増加し FP 核種は少なくなるが、その効果は元々の  $^{235}\text{U}$  初期濃縮度の違いに伴う反応度差を覆す（ある燃焼度を境に Gd 入り燃料の方が通常ウラン燃料より反応度が大きくなる）ほどのものではないことを第 1 図は示している。

## 2. 通常ウラン燃料の燃焼計算手法の保守性に関する追加説明について

今回未臨界性評価では、SFP 内に貯蔵される燃料を全て通常ウラン燃料として評価する。

ここで未臨界性評価における燃料配置としては、新燃料と 24GWd/t 燃焼燃料のチェッカーボード配置とすることから、24GWd/t 燃焼した通常ウラン燃料の核種組成を、未臨界性評価結果を厳しくする観点から保守的に設定する必要がある。よって今回未臨界性評価では、燃焼に伴う Pu の生成量を多くし実効増倍率が厳しくなるよう、燃焼計算において [ ] として評価し、当該計算により得られた核種組成を [ ] に対し適用している。

本燃焼計算手法が保守的な設定であることは、資料③(4)表3に示す解析(下表再掲)により示されるが、下表に示す結果を保守性として取り扱えるかが重要な観点となる。ここで、高浜 1,2 号炉における BP の使用体数は、過去 10 サイクル(燃料取替体数:それぞれ約 500 体)において 1 号炉で 0 体、2 号炉で 8 体である。このように、実炉心設計ではほとんど BP の使用機会がほとんどないところ、未臨界性評価においては全ての燃焼燃料について BP を挿入し燃焼計算した場合の核種組成を設定することから、表 3 に示す実効増倍率差は保

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

守性と整理できると考えている。

(再掲) 表 3 燃焼計算手法が有する保守性評価結果

燃焼計算手法				$\Delta K_2^*$
①		②		
実効増倍率 $K_\alpha$	統計誤差 $\sigma_\alpha$	実効増倍率 $K_\beta$	統計誤差 $\sigma_\beta$	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.0057

※

なお、BP の使用機会は少ないが、実炉心設計においてどの燃料にどの内挿物を挿入して炉心に装荷するかは制限していないことから、燃焼計算時の内挿物挿入条件については、今回未臨界性評価向けに定めた基本ケース設定方針より、方針は c「現実的な値に幅がある場合には、取りうる保守的な値を設定する」としている。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

<検討中事項①>

既許可に記載される BP 使用数上限 (896 本以下 (56 体相当)) を取替炉心毎で追加する場合、多くの燃焼燃料が BP を挿入した状態で燃焼した履歴を有することとなる。

一方で、BP は主に炉心のピーキングを抑制するため、反応度の高い燃料集合体を炉心中央部に装荷する場合に用いるものであるため、Gd 入り燃料を導入して以降 BP を使用する必要がほとんどなくなったことで、昨今の BP 使用実績は少ない。

よって  ことを保守性と整理可能と考えているが、既許可の上限使用数記載を受け保守性と整理できないと判断される場合、今回未臨界性評価の実施方針に則り、臨界計算コードへのインプットを作成するためのパラメータ (核定数計算コードと核定数ライブラリ) が有する不確かさ「核定数計算コードの計算精度」の影響を確認するための感度解析を追加することとなる。

具体的には、基本ケース条件のうち核種組成について、資料③ (4) 2-2. に示す「燃焼内核種の原子個数密度」の② (エネルギー群の縮約及び断面積ライブラリによる組成計算誤差を踏まえ、未臨界性評価上厳しくなるように設定した組成条件) を適用し解析することが考えられる。

<検討中事項②>

「SFP 体系においても通常ウラン燃料の燃焼燃料の反応度は、Gd 入り燃料の燃焼燃料よりも大きい」ことを、24GWd/t 燃焼燃料が貯蔵される SFP 体系においても定量的に示す手段として、次項に示す条件で解析を実施することが考えられる。

具体的には、実施条件①（実施済み）での実効増倍率と条件①'の実効増倍率の差を確認することで、SFP 体系の未臨界性評価において燃焼度 24GWd/t の Gd 入り燃料を使用しないことが保守的であるかを定量的に示すことができる。

一方でこのような保守性を定量化することは、当該の保守性により包含させる不確かさがある場合には必須だが、今回申請の評価条件において、本条件が有する保守性に含めている不確かさはないことから、基本的には上述の評価は不要と考える。

<条件①（資料① 右肩 22 ページの評価①）>

【核種組成計算】

- ・使用コード : PHOENIX-P
- ・燃焼計算手法 : BP 挿入なしで燃焼計算
- ・到達燃焼度 : 24GWd/t
- ・燃焼計算対象燃料 : 通常ウラン燃料
- ・燃焼計算時に考慮する核種 : PHOENIX-P 内蔵の燃焼チェーンで考慮される全核種

【臨界計算】

- ・臨界計算コード : SCALE6.0
- ・使用燃料 : 燃焼度 24GWd/t の 通常ウラン燃料
- ・臨界計算で考慮する AC,FP : 核種組成計算で得られた組成のうち、今回未臨界性評価での基本ケースにて考慮する核種のみ。
- ・解析体系 : SFP 無限体系
- ・水密度条件 : 純水冠水

<条件①'>

【核種組成計算】

- ・使用コード : PHOENIX-P
- ・燃焼計算手法 : BP 挿入なしで燃焼計算
- ・到達燃焼度 : 24GWd/t
- ・燃焼計算対象燃料 : Gd 入りウラン燃料
- ・燃焼計算時に考慮する核種 : PHOENIX-P 内蔵の燃焼チェーンで考慮される全核種

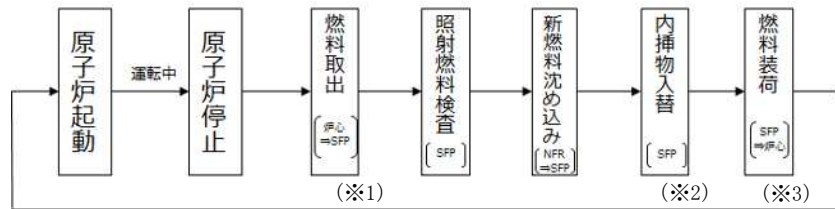
【臨界計算】

- ・臨界計算コード : SCALE6.0
- ・使用燃料 : 燃焼度 24GWd/t の Gd 入りウラン燃料
- ・臨界計算で考慮する AC,FP : 核種組成計算で得られた組成のうち、今回未臨界性評価での基本ケースにて考慮する核種のみ。燃焼計算において考慮していた Gd は無視する。
- ・解析体系 : SFP 無限体系
- ・水密度条件 : 純水冠水

<参考 1> SFP 保管中に燃焼集合体内に挿入されている内挿物について

Gd 入り燃料を導入して以降 BP の使用機会は少ないが、炉心内で BP を挿入した状態で燃焼した燃料集合体が、SFP 内では BP 以外の内挿物が挿入された状態あるいは内挿物なしの状態と保管されるということは起こり得る。

PWR での燃料取替に掛る工程は下図のようになり、原子炉停止後に炉内の燃料全数を SFP へ一旦取り出し（下図※1）、炉心設計により決定される、燃料集合体と内挿物のペアリングと合致するように燃料集合体に挿入する内挿物の入れ替え（下図※2）を行った後、この内挿物が挿入された状態の燃料を炉内に装荷（下図※3）する。この内挿物入替時に、前サイクルに BP を挿入した状態で炉内にて使用（燃焼）した燃料集合体から、他の燃料集合体に BP を移し替えることがあり得る。



参考図 1 PWR における燃料関連作業フロー

<参考 2> SFP 保管中の燃料集合体種類および内挿物の組み合わせ毎の反応度

SFP 保管中の燃料集合体種類および内挿物のペアリング、および当該ペアリング毎での反応度順位を下表に示す。今回未臨界性評価では下表のうち反応度が最大となるペアリングを、全燃料に適用することとしている。

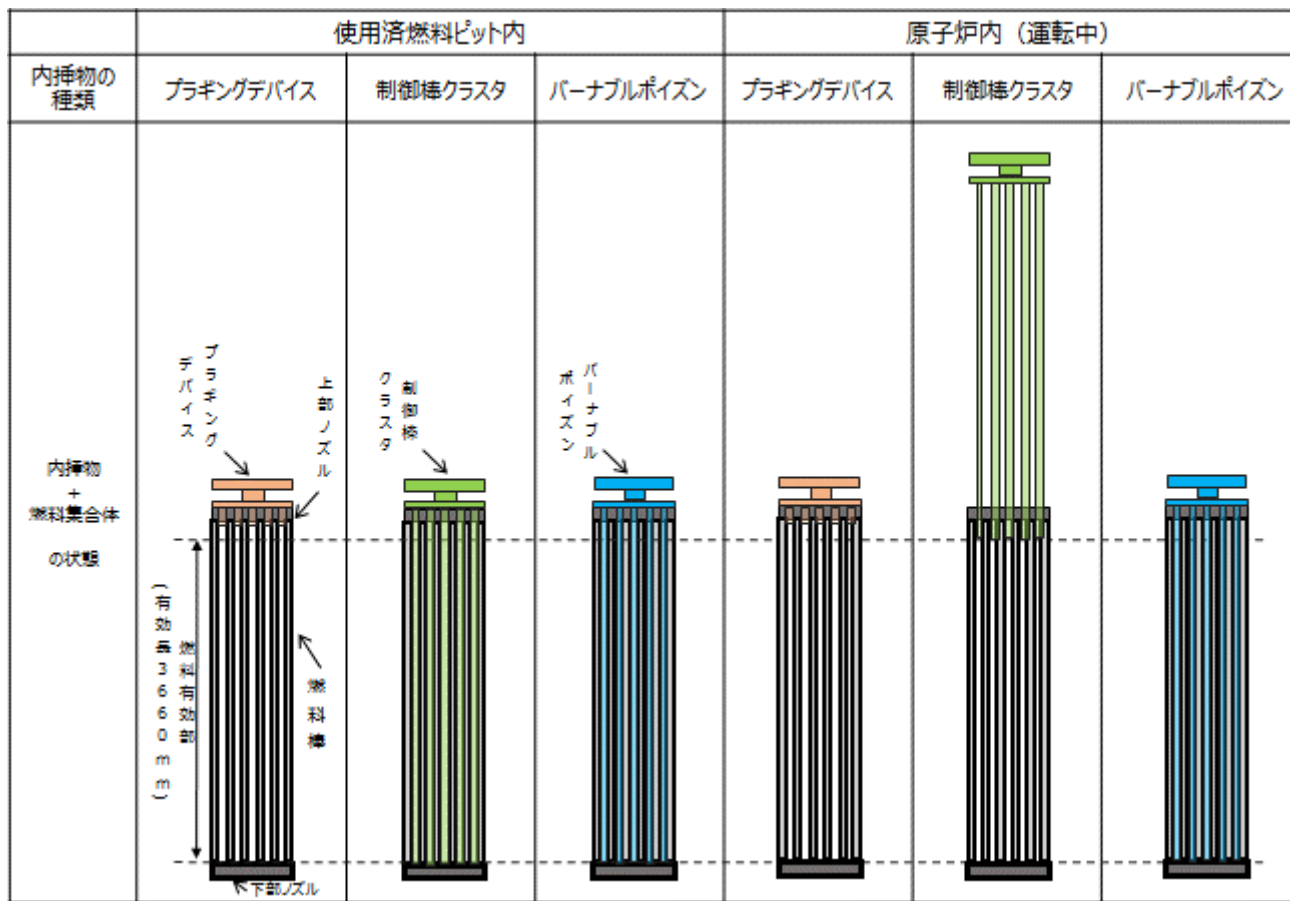
参考表 1 SFP 保管中の燃料集合体種類と内挿物のペアリング

燃料集合体の種類	挿入される内挿物	反応度が最大となる ペアリング
通常ウラン燃料	内挿物なし	○
	プラグングデバイス	
	バーナブルポイズン	
	制御棒クラスタ	
Gd 入り燃料	内挿物なし	
	プラグングデバイス	
	バーナブルポイズン	
	制御棒クラスタ	



<参考 3> SFP 内での保管中および原子炉運転における内挿物の状態について

SFP 内および原子炉運転中における燃料集合体に挿入される内挿物の状態に関する概要を下図に示す。原子炉運転中は、制御棒クラスタは引き抜かれている。



参考図 2 SFP 内での保管中および原子炉運転における内挿物の状態（概要）