

【質問No. 1】 実験物の異常による反応度を、炉心の過剰反応度を含めない理由

京都大学は、過剰反応度を「実験物の有無にかかわらず、運転状態における炉心の制御棒全引き抜き時における反応度」と定義しており、運転時の異常な過渡変化の解析における事象「実験物の異常等による反応度の付加」（以下、「実験物の異常」という。）において加わる反応度は過剰反応度に含まれないとしている。

実験物の異常により加わる反応度を、炉心の過剰反応度を含めないとする京都大学の考え方を説明すること。

【回答】

ご指摘の通り、過剰反応度は装荷物の有る無しに係わらずある炉心において制御棒をすべて引き抜いた際に加わる反応度と考えており、そのように運用してきました。

そのため、例えばカドミウムを炉心に装荷したとき、そのカドミウムの反応度はカドミウムを装荷する前後の過剰反応度の差として考えることができ、実際にこれまでの KUCA の実験ではそのようにして照射物の反応度を評価してきました。

もしカドミウムに異常が生じたときの反応度を過剰反応度に加えると、カドミウムを装荷する前後で過剰反応度は変化しない、となってしまうこれまで実験を行ってきた感覚と大きく異なってしまいますので、従来通り過剰反応度には実験物の異常により加わる反応度は加えない、という考え方を踏襲したいと考えております。

今回の申請においては、「実験物の異常」による反応度に制限を加えることで、過剰反応度と「実験物の異常」による反応度を加えた値が固体減速炉心では $0.35\% \Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では $0.5\% \Delta k/k$ 以下となるようにしており、「実験物の異常」が生じても従来の過剰反応度の制限値を越えることはないと考えます。

また後述の通り、全制御棒反応度の制限値にこれまでは過剰反応度の値に依存するようにはしていましたが、その考え方を変更して過剰反応度に依存しない制限値に変更することで分かり易くすることを考えております。

【質問No. 2】 炉心の過剰反応度を0% $\Delta k/k$ とする考え方

京都大学は、運転時の異常な過渡変化の解析「実験物の異常等による反応度の付加」において、照射物の反応度を最大とするために、炉心の過剰反応度を0% $\Delta k/k$ としている。

運転範囲として過剰反応度が正となることもあるが、炉心の過剰反応度を0% $\Delta k/k$ とする京都大学の考え方を説明すること。

【回答】

「実験物の異常等による反応度の付加」の解析では過渡変化時の最大出力が最も大きくなるように照射物の反応度が最大となる場合の解析を行っております（「ケースA」）（ゆっくり出力が上昇する場合は「ケースB」として解析）。照射物の反応度と過剰反応度を合わせた値について、補正申請書において固体減速炉心では0.35% $\Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では0.5% $\Delta k/k$ 以下となるように制限しているため、過剰反応度を0% $\Delta k/k$ の場合が照射物の反応度が最も大きくなります。

なお、解析の初期条件として低出力の臨界状態を仮定しているため、中性子源を挿入して原子炉を起動して全制御棒を上限まで引抜き（その時点で臨界）、所定の出力まで上昇させた後に中性子源を引き抜けば過剰反応度が0% $\Delta k/k$ であっても解析条件のような状態とすることは可能です。

「運転範囲として過剰反応度が正となる場合」には、照射物に対する反応度の制限によりその正の反応度分だけ取り付けることができる照射物の反応度が小さくなるため、過渡変化時の出力上昇はより穏やかになります。

【質問No. 3】他の事象の過剰反応度

運転時の異常な過渡変化の解析における炉心の過剰反応度は、「実験物の異常等による反応度の付加」以外の事象では各炉心の最大過剰反応度と等しい値を用いている。

「実験物の異常等による反応度の付加」においてのみ、解析条件である炉心の過剰反応度を変更した京都大学の考え方を説明すること。

【回答】

照射物の反応度と過剰反応度を合わせた値について、補正申請書において固体減速炉心では $0.35\% \Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では $0.5\% \Delta k/k$ 以下となるように制限しているため、過剰反応度を $0\% \Delta k/k$ の場合が照射物の反応度、すなわち異常が発生した場合に印加する反応度が最も大きくなる条件での解析を行いました。(ケースAとして記載)

過剰反応度は $0\% \Delta k/k$ と他の場合と異なってはいますが、異常発生時には他の制御棒引抜き異常の場合と同じ最大の反応度が印加されることとなります。

【質問 No. 4】 申請書等における過剰反応度

京都大学の、過剰反応度を「実験物の有無にかかわらず、運転状態における炉心の制御棒全引き抜き時における反応度」と定義し、実験物の異常により加わる反応度は過剰反応度に含まれないとする考え方は、申請書本文 又. (3) (ii) 照射物の記載では、実験物の異常により加わる反応度は過剰反応度に含まれているため、統一されていないと考えるが、京都大学の考え方を説明すること。

申請書本文 又. (3) (ii) 照射物

a) 照射物を装荷することで炉心に負の反応度が加わる場合

低濃縮ウランの燃料要素を用いる固体減速炉心では、照射物を取り付ける前の状態（照射物を取り除いた状態）での炉心の過剰反応度を0.35% $\Delta k/k$ 以下に制限する。低濃縮ウランの燃料要素を用いる軽水減速炉心では、照射物を取り付ける前の状態で、かつ、挿入管が破損して内部に水が流入することを考え、水流入の前後で過剰反応度を0.5% $\Delta k/k$ 以下に制限する。

b) 照射物を装荷することで炉心に正の反応度が加わる場合

低濃縮ウランの燃料要素を用いる固体減速炉心では、照射物の装荷により反応度が最も大きくなる位置に照射物がある場合での炉心の過剰反応度を0.35% $\Delta k/k$ 以下に制限する。低濃縮ウランの燃料要素を用いる軽水減速炉心では、照射物の装荷により反応度が最も大きくなる位置に照射物がある状態で、かつ、挿入管が破損して内部に水が流入することを考え、水流入の前後で過剰反応度を0.5% $\Delta k/k$ 以下に制限する。

【回答】

過剰反応度は制御棒の引抜きにより加わる反応度を定義しており、【質問No. 1】の回答に記載しましたとおり今後もそのように運用していきたいと考えております。

上記の記載は再補正申請に記載した内容ですが、過剰反応度に関する記載のみで、照射物そのものの反応度に関する記載が十分ではありませんでしたので、「統一されていない」と受け取られてしまうような記載であったことを反省しております。

現在提出予定の再補正申請では以下のような文章を追加したいと考えております。

=====

a) 照射物を装荷することで炉心に負の反応度が加わる場合

「照射物を取り付ける前後の反応度変化は固体減速炉心では絶対値で0.35% $\Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では絶対値で0.5% $\Delta k/k$ 以下とする。

軽水減速炉心では照射物を取り付けて挿入管に異常が発生していない状態と、照射物を取り除いて挿入管が破損して内部に水が流入した状態での反応度変化は絶対値で0.5% $\Delta k/k$ 以下とする。」

b) 照射物を装荷することで炉心に正の反応度が加わる場合

照射物が反応度が最も大きくなる位置にある場合と照射物を炉心から取り除いた場合の反応度変化は固体減速炉心では絶対値で0.35% $\Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では絶対値で0.5% $\Delta k/k$ 以下とする。

軽水減速炉心では照射物を取り除いて挿入管に異常が発生していない状態と、照射物が反応度が最も大きくなる位置にあり挿入管が破損して内部に水が流入した状態での反応度変化は絶対値で0.5% $\Delta k/k$ 以下とする。

=====

このように、過剰反応度に関する制限と共に、照射物に対する反応度の制限値が明確に判るように記載したいと考えております。

【質問No. 5】全制御棒の反応度抑制効果

申請書本文へ、(3) (iii)において、制御棒の反応度抑制効果は、
全制御棒の反応度値 \geq 過剰反応度 $+1\% \Delta k/k$
であることが求められている。

運転時の異常な過渡変化の解析「実験物の異常等による反応度の付加」において、過剰反応度を $0\% \Delta k/k$ とすると、全制御棒の反応度値は $1\% \Delta k/k$ となり、通常運転時及び異常な過渡変化時に対して、全制御棒の挿入による炉心反応度が -1% の未臨界を維持できないと考える。

炉心反応度が -1% の未臨界を維持できないことについて、京都大学の考え方を説明すること。

【回答】

これまでKUCAの設置変更申請では制御棒の反応度抑制効果(全制御棒反応度)として「過剰反応度 $+1\% \Delta k/k$ 」以上として設定しておりました。

これまでの解析では照射物の反応度を最大とするために照射物を取り付けた状態での過剰反応度を $0\% \Delta k/k$ とした炉心を基準として考え、全制御棒反応度はこの「過剰反応度 $+1$ 」 $\% \Delta k/k$ (ここでの過剰反応度は照射物を取り付けた正常状態での値) としていたため $1\% \Delta k/k$ と設定し、この条件で炉心を照射物の異常が発生した際に炉心を未臨界とすることができていることを確認していました。

しかし、この設定値について原子力規制委員会でのご指摘を受けて京大で再検討した結果、申請書に記載した過剰反応度の値に依存した全制御棒反応度の制限値を見直し、固体減速炉心および軽水減速炉心の各炉心での最大過剰反応度の制限値をそのまま用いて、全制御棒反応度の制限値を固体減速炉心では $1.35\% \Delta k/k$ 以上、軽水減速炉心では $1.5\% \Delta k/k$ 以上に変更することを考えております。(再々補正申請において対応する予定)

この変更の理由は全制御棒反応度の考え方を分かり易くすることであり、実験を行う際の制御棒反応度の管理を行いやすくできると考えております。照射物の反応度の制限値として、過剰反応度と足し合わせた値を固体減速炉心では $0.35\% \Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では $0.5\% \Delta k/k$ 以下とすることを既に補正申請において明記しているため、このような変更を行うことにより実験物の異常に伴う全制御棒の挿入により炉心は $-1\% \Delta k/k$ 以上の未臨界状態を確保できると考えております。