

KUCA 設置変更申請書の添付 10 の「実験物の異常等による反応度の付加」について

1 申請書の記載と一部の間違い

1.1 申請書の解析シナリオ

KUCA 設置変更申請書（平成 28 年 5 月 11 日承認、高濃縮燃料を使った現状版、以下、現申請書）に本文において、炉心装荷物（金、カドミウム等で燃料体に貼り付ける照射物）について、その反応度は「絶対値として 0.5% $\Delta k/k$ 以下」とすることが記載されている。

この炉心装荷物（以下、照射物）が原子炉の出力運転中に位置が変化した場合について（例えば炉心から落下した場合）、添付 10 の「運転時の異常な過渡変化」のシナリオとして解析が行われている。

以下に申請書に記載されている解析シナリオは以下の通りである。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに添付書類 8 で選定したすべての代表炉心とする。

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値

固体減速炉心は 0.35 % $\Delta k/k$

軽水減速炉心は 0.5 % $\Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値

固体減速炉心は $1+0.35=1.35$ % $\Delta k/k$

軽水減速炉心は $1+0.5=1.5$ % $\Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の 1/3 以下）の最大値

固体減速炉心は $1.35 \times 1/3=0.45$ % $\Delta k/k$

軽水減速炉心は $1.5 \times 1/3=0.5$ % $\Delta k/k$

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

固体減速炉心では中心架台上限、軽水減速炉心では炉心タンク満水

線型出力系は指示値が 100%で 100W となるレンジ
制御棒の一部を挿入して、出力 1W の臨界状態

(4) 反応度温度係数

反応度温度係数が負の炉心については温度変化に伴う反応度フィードバックを無視する。

(5) スクラム信号発生

- ・炉心に取り付けていた実験物が炉心から落下し、申請書に記載された実験物の最大反応度 (+0.5% $\Delta k/k$) がステップ状に加わる。
- ・線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・スクラム信号発生と同時に制御棒が落下し、1 秒後にステップ状に負の反応度が印加される。ただし、最大の反応度を持つ 1 本の制御棒は落下しないとする。

1. 2 各炉心の反応度変化

1. 2. 1 固体減速炉心

現申請書では以下のように解析を行っている。

反応度+0.5 % $\Delta k/k$ の照射物を臨界状態で照射するとする。

スクラム時に最大反応度を持つ 1 本の制御棒が挿入されないとすると、残りの制御棒の反応度は

$$1.35 - 0.45 = 0.9 \% \Delta k/k$$

となり、照射物の落下 (+0.5% $\Delta k/k$ の反応度印加) 後の出力が上昇しスクラムにより

$$0.5 - 0.9 = \underline{\underline{-0.4 \% \Delta k/k}}$$

の未臨界状態となる。

しかし、この解析においては制御棒の全反応度のうち過剰反応度分は既に炉心に印加されているために、スクラム時の反応度印加量が少なくなることを見落としてしまっていたことが判った。

正しくは以下のような反応度の評価となる。

反応度+0.5 % $\Delta k/k$ の照射物を臨界状態で照射するとする。

臨界時には制御棒を過剰反応度の 0.5 % $\Delta k/k$ 分だけ挿入しているので、スクラムにより炉心に加えることができる制御棒反応度は

$$1.35 - 0.35 = 1.0 \% \Delta k/k \quad (\text{図 1 左図})$$

となる。

スクラム時に最大反応度を持つ 1 本の制御棒が挿入されないとすると、残りの制御棒の反応度は

$$1.0 - 0.45 = 0.55 \% \Delta k/k$$

となり、照射物の落下 (+0.5% $\Delta k/k$ の反応度印加) 後の出力が上昇しスクラムにより

$$0.5 - 0.55 = \underline{-0.05 \% \Delta k/k}$$

の未臨界状態となる。

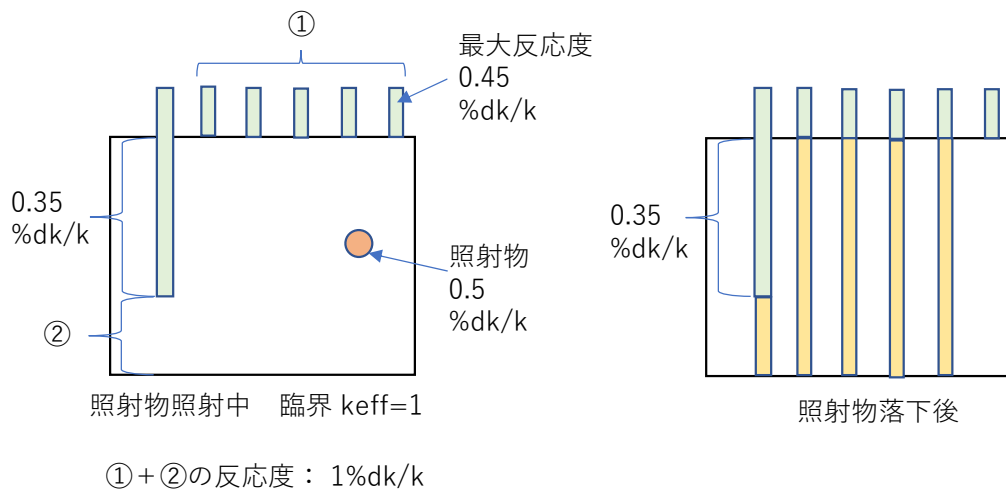


図 1 制御棒の挿入状態
(照射物照射中 (左)、照射物落下後 (右))

スクラム後の未臨界の反応度の値が現申請書の $-0.4 \% \Delta k/k$ ではなく、 $-0.05 \% \Delta k/k$ が正しい値である。

この修正したシナリオでの原子炉の出力変化を図 2 に示す。

$t=0$ で照射物が落下することにより出力は上昇し、8.7 秒後に出力は 120W を越えてスクラム信号が発生し、その 1 秒後にステップ状の負の反応度が印加されて出力は低下する。未臨界状態のため出力は徐々に低下し、1205 秒後には 0.1W となる。

現申請書の添付 10 の解析よりスクラム時に印加される反応度が小さくなるため、停止までに時間が掛かり、積算出力が大きくなり燃料温度上昇量が現申請書の記載値とは異なってくる。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

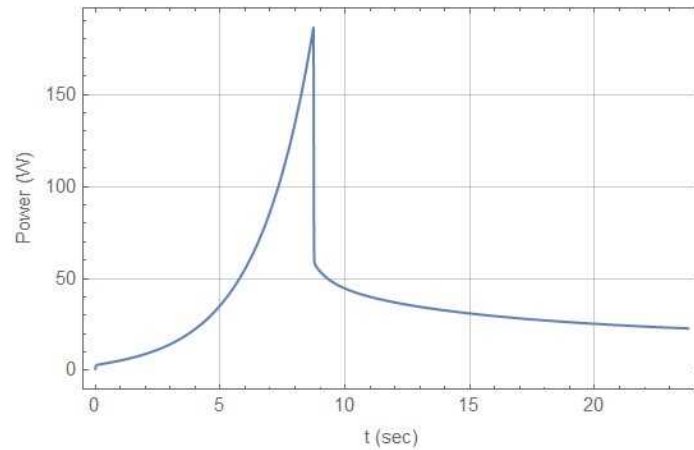


図2 照射物落下に伴う出力変化 (L5.5P-50 炉心)

1. 2. 2 軽水減速炉心について

現申請書では以下のように解析を行っている。

反応度 $0.5\% \Delta k/k$ の照射物を臨界状態で照射するとする。

スクラム時に最大反応度を持つ 1 本の制御棒が挿入されないとすると、残りの制御棒の反応度は

$$1.5 - 0.5 = 1.0\% \Delta k/k$$

となり、照射物の落下 ($+0.5\% \Delta k/k$ の反応度印加) 後の出力が上昇しスクラムにより

$$0.5 - 1.0 = -0.5\% \Delta k/k$$

の未臨界状態となる。

しかし、固体炉心の場合と同様に制御棒の全反応度のうち過剰反応度分は既に炉心に印加されているために、スクラム時の反応度印加量が少なくなることを見落としてしまっていたことが判った。

正しくは以下のような反応度の評価となる。

反応度 $0.5\% \Delta k/k$ の照射物を臨界状態で照射するとする。

臨界時には制御棒を過剰反応度の $0.5\% \Delta k/k$ 分だけ挿入するので、制御棒反応度は

$$1.5 - 0.5 = 1.0\% \Delta k/k \quad (\text{図 3 左図})$$

スクラム時に最大反応度を持つ 1 本の制御棒が挿入されないとすると、残りの制御棒の反応度は

$$1 - 0.5 = 0.5 \% \Delta k/k \quad (\text{図 3 右図})$$

となり、照射物の落下 ($+0.5 \% \Delta k/k$ の反応度印加) 後の出力が上昇しスクラムにより負の反応度 ($0.5 \% \Delta k/k$) が印加するが、

$$0.5 - 0.5 = 0 \% \Delta k/k$$

となるので、原子炉は臨界状態にまでしか到達しない。

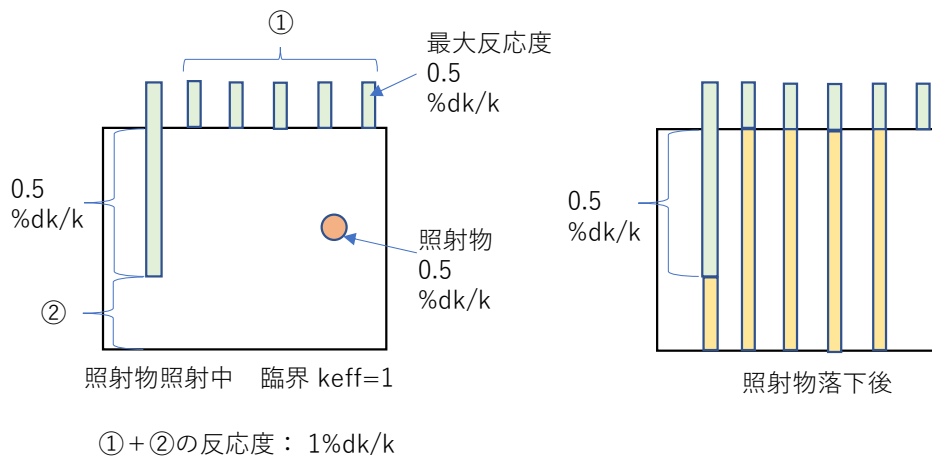


図 1 制御棒の挿入状態
(照射物照射中 (左)、照射物落下後 (右))

2. 経緯

照射物の反応度の制限値については新規規制基準対応の設置申請書を作成する際に追加したもので、それに伴って添付 10 の過渡解析を行うことにした。

制御棒の全反応度は軽水炉心では $1.5\% \Delta k/k$ 以上、固体減速炉心では $1.35\% \Delta k/k$ 以上あり、最大反応度の制御棒の 1 本（全反応度の $1/3$ ）が挿入されない場合であっても軽水炉心では $1.5 \times 2/3 = 1.0\% \Delta k/k$ 、固体炉心では $1.35 \times 2/3 = 0.9\% \Delta k/k$ の反応度を持つので、照射物の移動に伴う反応度印加量が $0.5\% \Delta k/k$ であっても十分に未臨界になると考えてしまっており、現申請書の解析を行っていた。

しかし今回の設置変更申請のヒアリングのためにこの照射物の移動に伴う反応度印加量を説明するための資料を作成していた段階で、上記の 1.2 項で説明した通り制御棒の全反応度のうち過剰反応度分は既に炉心に印加されているためにスクラム時の反応度印加量が少なくなり、現申請書の解析結果が間違っていたことが判った（2020 年 11 月 10 日に判明）。

このことが判って以降、KUCA の運転は行っていない。

3. これまでの照射物を用いた実験での当該過渡変化時の安全性について

現在の設置申請書が承認されて以降、照射物を用いた実験を行ってきている。そのうち、軽水炉心における最も照射物の反応度が大きな実験は学生実験での中性子束分布測定のための金線照射実験である。

炉心はすべて C35G0(4 列)炉心で、炉心の x 方向と y 方向に裸の金線（直径 0.5 mm）を 2 本、z 方向に裸と Cd チューブ（直径 2.2 mm、長さ約 80cm）入りの金線を 2 本張って臨界状態で照射を行った。金線照射時の炉心の過剰反応度、制御棒価値、照射物反応度は以下の通りである。

過剰反応度： $0.16\% \Delta k/k$

制御棒反応度：

C1： $0.85\% \Delta k/k$ 、C2： $0.46\% \Delta k/k$ 、C3： $0.29\% \Delta k/k$

S4～S6(合計)： $1.60\% \Delta k/k$

照射物反応度（すべての金線と Cd チューブ）： $0.32\% \Delta k/k$

この炉心の場合、スクラム時に最大反応度を持つ 1 本の制御棒（C1： $0.85\% \Delta k/k$ ）が挿入されないとすると、臨界状態から印加することができる反応度は

$$0.46 + 0.29 + 1.6 - 0.16 = 2.19 \% \Delta k/k$$

である。照射物の落下後（ $+0.32\% \Delta k/k$ の反応度印加）、スクラムにより負の反応度が印加され、炉心の反応度は

$$0.32 - 2.19 = -1.87 \% \Delta k/k$$

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

となり、原子炉は未臨界状態で、この反応度は現申請書の値 ($-0.5\% \Delta k/k$) より小さいため積算出力の値も現申請書に記載した結果より小さくなるため安全性には問題はなかった。

固体炉心における照射物を用いた実験のうち最も反応度が大きいものは原子炉出力校正のための金線照射実験で、その際にはz方向に裸金線(長さ約 2cm)を 2 本と Cd チューブ(直径 2.2 mm、長さ約 2cm) 入りの金線 2 本張って臨界状態で照射を行った。軽水炉心の場合と比べて Cd チューブの長さは 1/10 以下であるため、照射物の反応度としては $0.05\% \Delta k/k$ 以下と現申請書の照射物の反応度の値より十分に小さいため、安全性には問題はなかった。

(以上)

KUCA 設置変更申請書の添付 10 の「実験物の異常等による反応度の付加」について

炉心装荷物（以下、照射物）が原子炉の出力運転中に位置が変化した場合について（例えば炉心から落下した場合）、KUCA 設置変更申請書（平成 28 年 5 月 11 日承認、高濃縮燃料を使った現状版、以下、現申請書）の添付 10 の「運転時の異常な過渡変化」のシナリオとして解析が行われているが、2020 年 11 月 27 日付けの説明資料の通り、照射物の反応度を「絶対値として 0.5% $\Delta k/k$ 以下」とした場合には、軽水炉心においては one rod stuck を仮定したときの制御棒落下のみでは未臨界に移行できない可能性があることが判った（軽水の排水を併用すれば確実に未臨界に移行することはできる）。

現申請書において、照射物の反応度を「絶対値として 0.45% $\Delta k/k$ 以下」として解析を行った結果を図 1 に示す。

t=0 で照射物が落下することにより出力は上昇し、12.9 秒後に出力は 120W を越えてスクラム信号が発生し、その 1 秒後に出力が 158W まで上昇しステップ状の負の反応度が印加されて出力は低下する。未臨界状態のため出力は徐々に低下し、1277 秒後には 0.1W となる。

現申請書においては照射物の反応度を「絶対値として 0.45% $\Delta k/k$ 以下」と記載すべきであった。

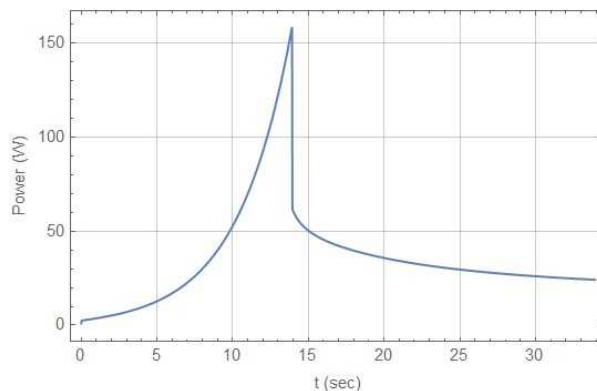


図 1 照射物落下に伴う出力変化 (C30G0(4列)炉心)

KUCA での過剰反応度について

これまでの KUCA では過剰反応度については以下のように考えて運用を行っていた。

- ・ 炉心内に照射物が装荷されている、装荷されていないに関わらず、臨界状態から全ての制御棒(6本)を炉心から全引き抜き状態としたときの反応度を過剰反応度とする。

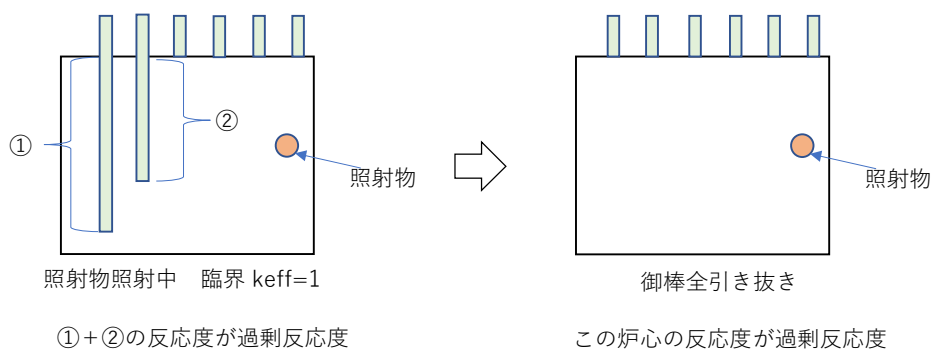


図 2 過剰反応度の説明

(以上)

2020年11月28日
京都大学複合原子力科学研究所

11月27日付けのメールでご質問を頂きました項目につきまして回答いたします。

保安規定第87条にある特性測定を行った記録

保安規定第87条は「新配置の炉心の特性測定」という項目で、これまで実験を行っていません。なかつた新しい炉心で実験を行う際に核的制限値等を確認することが記載されているが、現在の設置申請書が承認された以降は新炉心での実験物の照射は行っていませんため、この条項に該当する資料はない。

保安指示書4.2.2.5にある保安規定の別表第2及び第2の2を満たしていることを確認した書類

毎年実施している施設定期検査において、保安規定に定められた核的制限値を確認すると共に、照射物を装着した運転を行っている。

固体減速炉心であるB架台の炉心（資料1-2）について、保安規定の別表2に示す核的制限値を確認した書類を資料1-1に示す。（「別表2」の「減速材対燃料の割合」は資料1-2の燃料体構成図から確認することができる。「反応度温度係数」が負あることはこれまでの同じ燃料体を用いた体系での計算で確認している。また「別表2の2」の項目は資料1-2の炉心構成図および燃料体構成図から確認することができる。）

この炉心において資料1-3に示すように裸の金線（直径0.5mm、長さ5mm）2本、および金線（直径0.5mm、長さ10mm）入りのCdチューブ（外径2.3mm、長さ15mm）2本を燃料体に装着して照射のための運転を行った。（装着位置はすべて燃料体の高さ方向の中央）

照射物の反応度は0.056% $\Delta k/k$ であり、核的制限値（0.5% $\Delta k/k$ ）より十分に小さな値であった。

軽水減速炉心であるC架台の炉心（資料2-2の炉心配置図から照射物を取り除いた炉心）について、保安規定の「別表2」に示す核的制限値を確認した書類を資料2-1に示す。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

（「別表 2」の「減速材対燃料の割合」は資料 2-2 の炉心配置図で C35 燃料集合体を用いていることから確認することができる。「反応度温度係数」が負あることはこれまでの同じ燃料体を用いた体系での実験および計算で確認している。）

この炉心において資料 2-2 に示すように裸の金線（直径 0.5mm、長さ 30 mm）4 本、および金線（直径 0.5mm、長さ 30 mm）入りの Cd チューブ（外径 2.3mm、長さ 30mm）4 本を燃料体に装着して照射のための運転を行った。（装着位置はすべて燃料体の高さ方向の中央）

照射物の反応度は 0.10% $\Delta k/k$ であり、核的制限値（0.5% $\Delta k/k$ ）より十分に小さな値であった。

(以上)

資料 1-1

KUCA反応度関係計算書(B 架台)

1. 炉心の過剰反応度 (表-B-1)

測定結果	検査日	判定基準
$\rho_{ex} = 0.2270\% \Delta k/k$	7/27	0.35% $\Delta k/k$ 以下

2. 制御棒の反応度抑制効果 (表-B-2~7)

測定結果	検査日	判定基準
C1 0.3761% $\Delta k/k$	7/27	(炉心の過剰反応度+1%) ≤ 全制御棒反応度抑制効果
C2 0.1055% $\Delta k/k$	7/27	
C3 0.4286% $\Delta k/k$	7/27	
S4 0.3826% $\Delta k/k$	7/28	
S5 0.4070% $\Delta k/k$	7/27	
S6 0.1047% $\Delta k/k$	7/27	
合計 1.8045% $\Delta k/k$		+
最大の1本 0.4286% $\Delta k/k$		最大の1本が全体の1/3 (i.e. 0.6015% $\Delta k/k$) を越えないこと

3. 制御棒の反応度添加率 (表-B-1)

測定結果	検査日	判定基準
$\Delta\rho/\Delta t = 0.0129\% \Delta k/k/sec$	7/27	0.02% $\Delta k/k/sec$ 以下
過剰反応度測定時の最大微分反応度	$\Delta\rho/\Delta x =$	1.61E-3 % $\Delta k/k/mm$
制御棒上昇速度	$\Delta x/\Delta t =$	8.01 mm/sec

4. 中心架台の反応度抑制効果 (表-B-8)

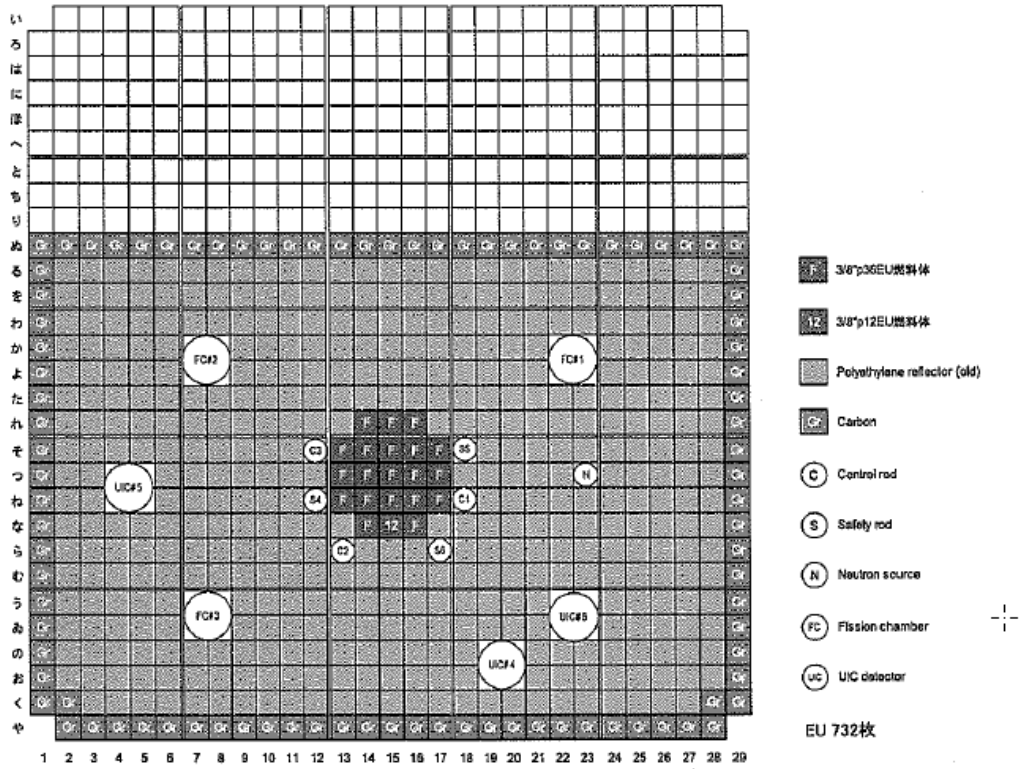
測定結果	検査日	判定基準
$\rho = 4.3211\% \Delta k/k$	7/28	1% $\Delta k/k$ 以上

B 架台の炉心の核的制限値を確認した書類

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

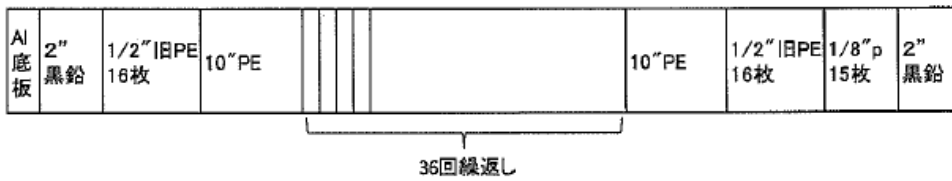
資料 1-2

B3/8"p36EU(3)炉心図
(燃料枚数 : 732 枚)



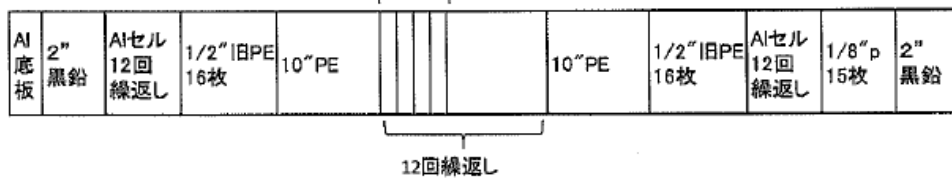
燃料体(F)

1/16"EU+1/8"p × 3枚



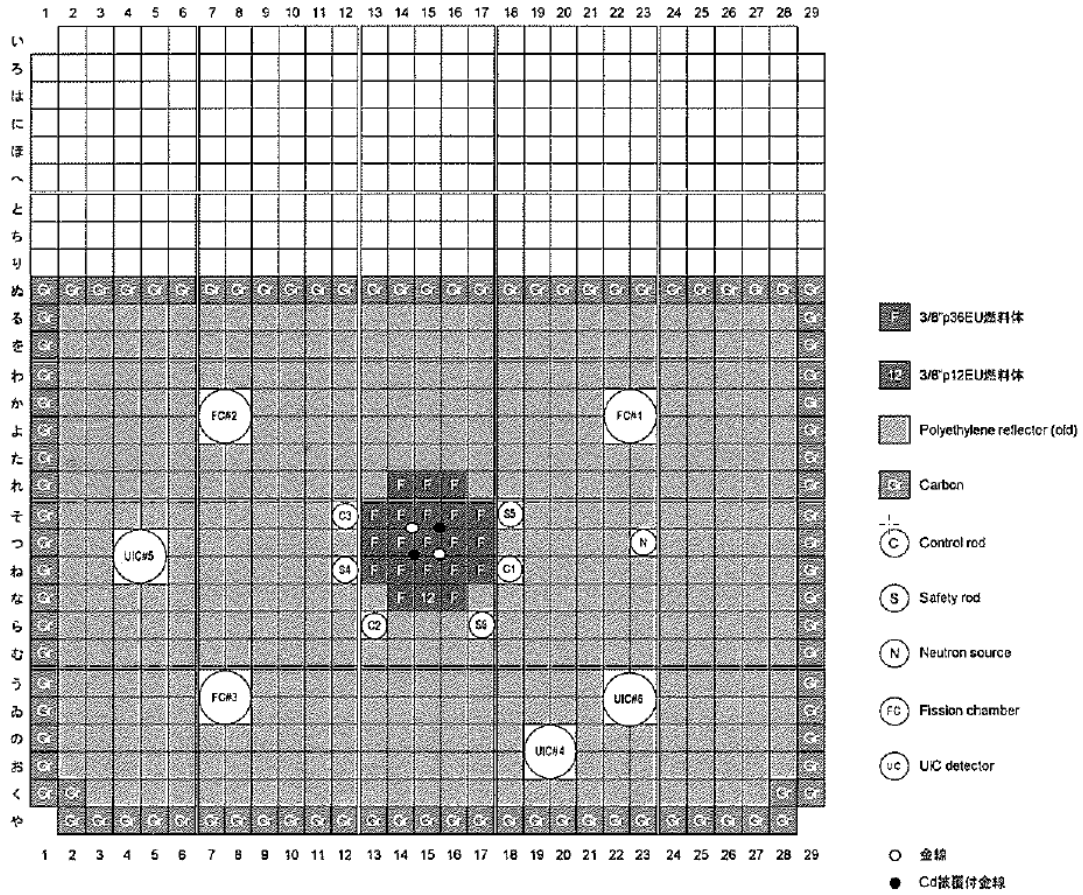
燃料体(12)

1/16"EU+1/8"p × 3



B 架台の炉心配置図および燃料体構成図

資料 1-3



金線:直径約 0.5mm、長さ約 5mm、2 本(裸金線用)、
 直径約 0.5mm、長さ約 10mm、2 本(Cd 被覆付き金線用)、
 被覆用カドミウム チューブ(外径約 2.3mm、内径約 1.3mm、長さ約 15mm)2 本

B 架台の金線、および Cd チューブの照射炉心配置図

資料 2-1

KUCA反応度関係計算書(C 架台)

1. 炉心の過剰反応度 (表-C-1)

測定結果	検査日	判定基準
$\rho_{ex} = 0.2617\% \Delta k/k$	7/15	0.5% $\Delta k/k$ 以下

2. 制御棒の反応度抑制効果 (表-C-2~7)

測定結果	検査日	判定基準
C1 0.0494% $\Delta k/k$	7/15	(炉心の過剰反応度+1%) \leq 全制御棒反応度抑制効果
C2 0.4871% $\Delta k/k$	7/15	
C3 0.5485% $\Delta k/k$	7/15	
S4 0.4998% $\Delta k/k$	7/15	
S5 0.0378% $\Delta k/k$	7/16	
S6 0.5455% $\Delta k/k$	7/16	
合計 2.1681% $\Delta k/k$		
最大の1本 0.5485% $\Delta k/k$		最大の1本が全体の1/3 (i.e. 0.7227% $\Delta k/k$) を越えないこと

3. 制御棒の反応度添加率 (表-C-1)

測定結果	検査日	判定基準
$\Delta\rho/\Delta t = 0.0116\% \Delta k/k/sec$	7/15	0.02% $\Delta k/k/sec$ 以下
過剰反応度測定時の最大微分反応度	$\Delta\rho/\Delta x = 1.44E-3$	% $\Delta k/k/mm$
制御棒上昇速度	$\Delta x/\Delta t = 8.05$	mm/sec

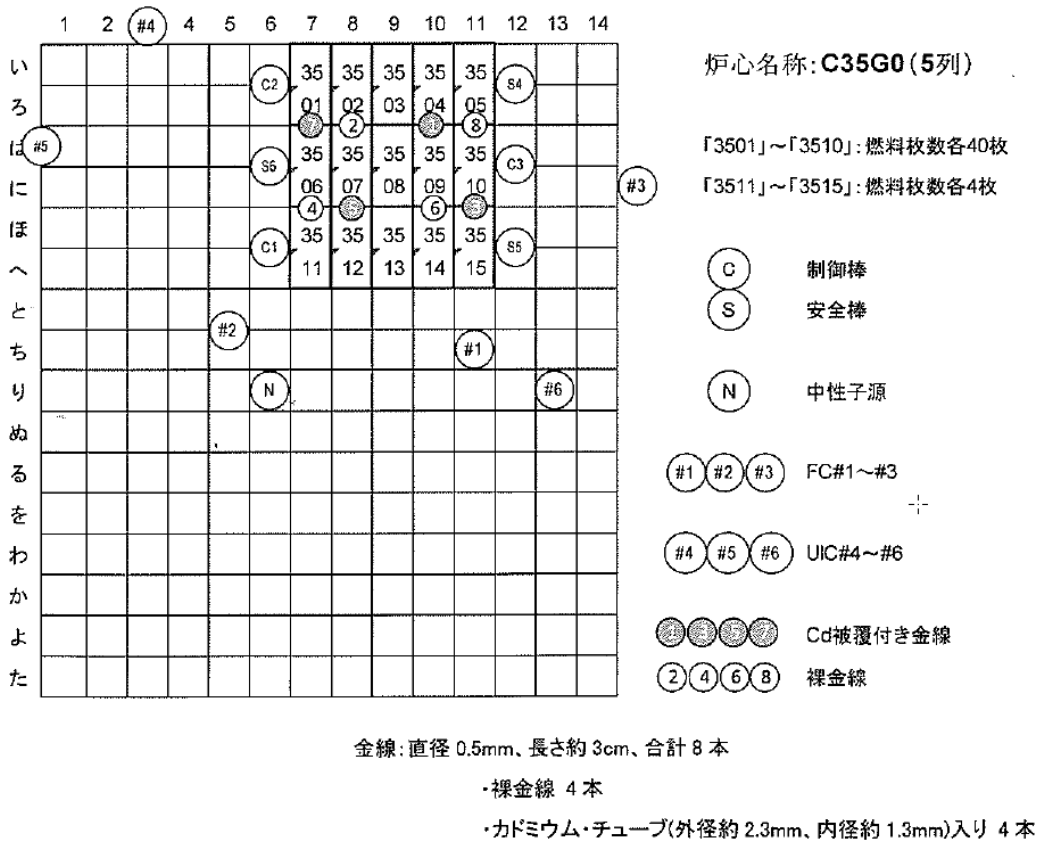
4. ダンプ排水の反応度抑制効果 (表-C-8)

測定結果	検査日	判定基準
$\rho = 1.3252\% \Delta k/k$	7/16	1% $\Delta k/k$ 以上

C 架台の炉心の核的制限値を確認した書類

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

資料 2-2



C 架台の金線、および Cd チューブの照射炉心配置図

2020年12月2日
京大 KUCA ヒアリング資料

京都大学臨界実験装置 (KUCA)
設置変更承認申請について

京都大学複合原子力科学研究所

① 11/26 付資料 P5

- ・ 固体減速架台の過剰反応度、制御棒反応度及び照射物反応度の値に関する書類。
(11/28 付書類には示されていない)
- ・ 照射物の反応度の評価あるいは測定の方法と具体的な手順。

② 11/26 付資料 P6

- ・ Cd チューブの長さから固体減速炉心での反応度は軽水減速炉心での反応度に比較して 1/10 としている具体的な説明。また、軽水減速炉心での Cd 管の条件。

11/26 付資料 P5 で簡単に説明しました固体減速炉心での照射物の装荷炉心とその核的制限値については 11/28 付け資料で説明しておりますが、本資料の補足-1 に再度記載しております。(11/26 付資料で「照射物の反応度としては 0.05% $\Delta k/k$ 以下」と記載してしまいましたが、11/28 付資料の通り 0.056% $\Delta k/k$ という例を記載しております。)

軽水減速炉心での Cd チューブの条件は特に規定はありませんが、スペース的に燃料板表面付近にしか設置できません。

補足-1 の固体減速炉心の照射物の反応度は臨界状態での各制御棒位置と制御棒の反応度校正曲線から求めています。算出方法は以下の通りです。

制御棒	制御棒価値 (% $\Delta k/k$)	照射物装荷時の 臨界制御棒位置 (mm)	挿入反応度 (% $\Delta k/k$)
C1	0.3761	722.34	0.0708
C2	0.1055	723.05	0.0197
C3	0.4286	722.00	0.0801
合計			0.1706

(制御棒 S4~S6 は上限 (炉心から引き抜かれた状態))

照射物未装荷時の余剰反応度 : 0.227 % $\Delta k/k$

照射物の反応度 : $0.227 - 0.1706 = \underline{0.0564 \% \Delta k/k}$

③11/26 付資料 P1

- ・「制御棒を過剰反応度の $0.5\% \Delta k/k$ 分だけ挿入しているので、」 とあるが 0.5% は 0.35% ではないか。
- ・固体減速架台では、最大過剰反応度 0.35% を上回っており、制限が必要ではないか。

ご指摘の通り、11/26 付け資料の固体減速炉心の説明の一部の誤りがありました。正しくは下記の通りです。(太字下線部が修正箇所)

京大側としてはこれまで実験物の有無にかかわらず、最大過剰反応度が最大値を超えなければよいと考えてきた。この件については今後ご相談したいと思います。

=====

反応度 $+0.5\% \Delta k/k$ の照射物を臨界状態で照射するとする。

臨界時には制御棒を過剰反応度の $0.35\% \Delta k/k$ 分だけ挿入しているので、スクラムにより炉心に加えることができる制御棒反応度は

$$1.35 - 0.35 = 1.0\% \Delta k/k \quad (\text{図 1 左図})$$

となる。

スクラム時に最大反応度を持つ 1 本の制御棒が挿入されないとすると、残りの制御棒の反応度は

$$1.0 - 0.45 = 0.55\% \Delta k/k$$

となり、照射物の落下 ($+0.5\% \Delta k/k$ の反応度印加) 後の出力が上昇しスクラムにより

$$0.5 - 0.55 = -0.05\% \Delta k/k$$

の未臨界状態となる。

=====

④11/28 付資料(最初のページ)

- ・「保安規定第 8 7 条にある特性測定を行った記録」において、新炉心での実験物の照射は行っていないとしているが、現在の設置申請書が承認された以前の評価・測定記録。
- ・「照射物の反応度は 0.056%であり」との記載があるが、その評価方法及び評価日。

新規制基準以前には照射物の反応度の評価は行っておりませんでしたので、測定記録はありません。現在の申請書が承認された以降にはその反応度の評価が必要となったため照射物についての評価を行いました。

固体減速炉心、軽水減速炉心共に照射物の反応度が問題となるのは複数本の Cd チューブを装荷した実験であり、補足－1～3に示す炉心が反応度が大きな場合として考えられ、新規制基準以前にも行っていた実験結果を元に反応度を評価しました。(補足－1と2の評価は 2020 年の実施した実験結果、補足－3は 2007 年に実施した実験結果)

「照射物の反応度は 0.056%であり」の評価方法は前述の通りで、ここでの結果は 2020 年 7 月 27、28 日の実験結果を元に評価したものです。

⑤ 11/28 付資料 P1(下中央のページ)

・「保安規定第 8 7 条にある特性測定を行った記録」において、軽水減速架台の「照射物の反応度は $0.10\% \Delta k/k$ であり」との記載があるが、その方法が示されていない。評価方法及び測定方法。直接的な評価がない場合は、核的制限値を満たすとした判断の根拠。
 (11/26 付資料は C35G0(4 列)炉心であるのに対して、11/28 付資料は C35G0(5 列)炉心が掲載されている)

11/28 付け資料 (補足-2) の C35G0(4 列)の軽水減速炉心での照射物の反応度については以下のように評価しています。

照射物の反応度は臨界状態での各制御棒位置と制御棒の反応度校正曲線から求めています。算出方法は以下の通りです。

制御棒	制御棒価値 ($\% \Delta k/k$)	照射物装荷時の 臨界制御棒位置 (mm)	挿入反応度 ($\% \Delta k/k$)
C1	0.0494	458.94	0.0071
C2	0.4871	458.06	0.0709
C3	0.5485	458.93	0.0788
合計			0.1568

(制御棒 S4~S6 は上限 (炉心から引き抜かれた状態))

照射物未装荷時の余剰反応度 : $0.2617 \% \Delta k/k$

照射物の反応度 : $0.2617 - 0.1568 = \mathbf{0.1049 \% \Delta k/k}$

⑥ 11/28 付資料 P4, P6(下中央のページ)

・固体減速炉心の照射炉心配置図での Cd 管の長さは、 $15\text{m} \times 2 = 30\text{mm}$ 、C 架台の照射炉心配置図での Cd 管の長さは $1.3\text{mm} \times 4 = 5.2\text{mm}$ となっている。②との関係について明確化。

固体減速炉心、軽水減速炉心共に同じ Cd チューブ (外径約 2.3mm 、内径約 1.3mm) を適当な長さに切って使用しております。11/28 付け資料の説明では、固体減速炉心では長さ約 15mm のものを 2 本貼り付け、軽水減速炉心では長さ約 30mm のものを 4 本貼り付けて照射を行っています。

⑦11/28 付資料 P5

- ・ KUCA 反応度関係計算書 (C 架台) が示されているが、11/26 付資料の値との関係。
(対応関係について明確化)

11/28 付資料については「最近行った照射物を用いた実験について、」とのご要望があったので、直近の実験について説明したものです。11/26 付け資料で説明したものは本資料の補足-3 の炉心についてのものです。新規制基準以降に軽水減速炉心で照射物を使用したものは補足-2、および補足-3 の炉心のみです。

補足-3 の炉心について Cd チューブ等の照射物の反応度は臨界状態での各制御棒位置と制御棒の反応度校正曲線などから求めています。算出方法は以下の通りです。(11/26 付け資料で、C1 と C3 の反応度が逆でした。)

C35G0(4 列) (燃料板を 430 枚装荷)

制御棒	制御棒価値 (% Δk/k)	照射物装荷時の 臨界制御棒位置 (mm)	挿入反応度 (% Δk/k)
C1	0.289	504.34	0.029
C2	0.464	505.05	0.048
C3	0.849	504.49	0.086
合計			0.163

(制御棒 S4～S6 は上限 (炉心から引き抜かれた状態))

430 枚装荷時の余剰反応度 : 0.394% Δk/k

燃料板 1 枚当たりの反応度 : 0.0466 % Δk/k/枚

432 枚装荷時の余剰反応度(照射物装着前) :

$$0.394 + 0.0466 * 2 = 0.487 \% \Delta k/k$$

照射物の反応度 : $0.487 - 0.163 = \underline{\underline{0.324 \% \Delta k/k}}$

⑧11/28 付資料 P2, P5

- ・ KUCA 反応度関係計算書 (B 架台) には実験物の反応度値について記載されていないが、実験物の反応度について、これまで核的制限値を満足していることを確認している資料。

前述の①②の項目の通りです。

⑨11/27 付資料 P1 (1 枚目)

- ・ 「現申請書においては照射物の反応度を「絶対値として 0.45% $\Delta k/k$ 以下」と記載すべきであった。」としているが、0.45%の根拠。(⑩と関連)

11/27 付け資料の計算結果に示した通り照射物の反応度が 0.45% $\Delta k/k$ であれば one rod stuck を仮定しても未臨界として停止させることができるので、照射物の反応度の制限値を 0.5% $\Delta k/k$ ではなく 0.45% $\Delta k/k$ 以下と記載すべきであったと考えております。

⑩11/25 付資料 P 2

- ・ 照射物照射中での照射物落下により 0.5%の反応度が添加されているとしているが、出力上昇時点では一定の反応度があり、落下物の低下により炉心の反応度が、最大過剰反応度を超えることになるのではないか。
- ・ 上記の事から、照射物落下による添加される反応度と、制御棒による炉心の反応度を加えたものが最大過剰反応度以下になる必要があると考えられるが、考え方を示すこと。

⑨で述べたように、軽水減速炉心、固体減速炉心共に現在審査中の設置変更申請書中の照射物の反応度の制限値を少なくとも $0.45\% \Delta k/k$ 以下と変更する必要があり、その場合は one rod stuck を仮定しても未臨界として停止させることができると考えております。

⑪核的制限値について確認した書類については、確認年月日を追加。

補足-1、-2の通り、日付を追記しました。

京都大学にて予定されている今後の予定
いつ、どういう実験(照射物を用いるのか否か等)を予定しているのか(固体と軽水共に)。

- ・現在のところ今年度は3月第1週までの運転を予定しております。
 - 12月：固体減速炉心での共同利用実験（未臨界度測定実験、反応度測定実験）
 - 1月：固体減速炉心での共同利用実験（臨界近接実験、反応度測定実験）
 - 1月下旬～2月中旬：軽水減速炉心での大学院生実験（臨界近接、反応度測定実験）
（今年度は時間の関係で当初より金線照射実験は実施しないことになっていた）
 - 2月下旬：固体減速炉心での共同利用実験（未臨界度測定実験）
 - 3月上旬：軽水減速炉心での共同利用実験（反応度測定実験）
- ・その後、定期事業者検査期間に入る予定です。
- ・来年度の共同利用、学生実験については未定です。
- ・高濃縮ウランが利用できる期間中に照射物を使用する予定はありません。
- ・設置変更申請書については高濃縮ウランに関する記載は残しますが、炉心では使用しないと本文に記載して、添付8と添付10における記載を削除する方向で考えております。（現在の申請書の軽水減速炉心用の彎曲型燃料板について、本文に燃料体としての記載はあるものの「彎曲型燃料板は燃料として炉心で用いないこととする」と記載しているものと同じようにする）

照射物の反応度添加 $0.5\% \Delta k/k$ が、設置変更承認申請書に記載された時期と当時の説明資料

照射物の反応度については2016年5月に承認された設置変更承認申請書に制限値として記載されたもので、それ以前の申請書には照射物の反応度に関する記載はなく、過渡解析も行っておりませんでした。（新規基準以前の最新版は2005年10月27日付け承認の設置承認申請書）

当時の説明資料（平成27年5月15日付け）を次ページに示します。シナリオの説明と結果についての説明を行ってまいりました。

KUCA の「運転時の異常な過渡変化」について

平成 27 年 4 月 17 日付けの資料 3 に基づき、KUCA の「運転時の異常な過渡変化」について説明する。(項目番号は平成 27 年 4 月 17 日付け資料 3 のものと同じ)

1) 炉心内の反応度又は出力分布の異常な変化

③ 実験物の異常等による反応度の付加

- (a) 実験物(実験用照射試料)を装着した状態で 1W の臨界状態。その際に線型出力計は指示値が 100% で 100W となるレンジ。
- (c) 炉心に取り付けていた実験用照射試料が炉心から落下し、実験物の最大反応度が加わる。炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラムおよび一せい挿入には期待しないものとする。
- (d) 原子炉は出力が線型出力系の指示値の 120% である 120W を超えたときスクラムするものとする。ただし、指示値の 110% 超のとき働く一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。スクラム開始の遅れ時間は 0.1 秒、制御棒挿入に 1 秒に掛かるため、スクラム信号が発生した 1.1 秒後にステップ状に負の反応度が加わるとする。

結果を表 1、2 に示す。(表 1 の結果は平成 27 年 4 月 17 日付け資料 3 のものと同じ) 全ての炉心において燃料の温度上昇はごく僅かであり、燃料の最高温度が 400° C を超えないという判断基準を満足している。

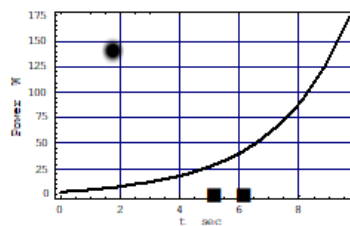


図 1 C35G0(5 列)炉心の実験物の異常等による反応度の付加時の出力変化

KUCA反応度関係計算書(B 架台)

1. 炉心の過剰反応度 (表-B-1)

測定結果	検査日	判定基準
$\rho_{ex} = 0.2270\% \Delta k/k$	7/27	0.35% $\Delta k/k$ 以下

2. 制御棒の反応度抑制効果 (表-B-2~7)

測定結果	検査日	判定基準
C1 0.3761% $\Delta k/k$	7/27	(炉心の過剰反応度+1%) \leq 全制御棒反応度抑制効果
C2 0.1055% $\Delta k/k$	7/27	
C3 0.4286% $\Delta k/k$	7/27	
S4 0.3826% $\Delta k/k$	7/28	
S5 0.4070% $\Delta k/k$	7/27	
S6 0.1047% $\Delta k/k$	7/27	
合計 1.8045% $\Delta k/k$		+
最大の1本 0.4286% $\Delta k/k$		最大の1本が全体の1/3 (i.e. 0.6015% $\Delta k/k$) を越えないこと

3. 制御棒の反応度添加率 (表-B-1)

測定結果	検査日	判定基準
$\Delta\rho/\Delta t = 0.0129\% \Delta k/k/sec$	7/27	0.02% $\Delta k/k/sec$ 以下
過剰反応度測定時の最大微分反応度	$\Delta\rho/\Delta x = 1.61E-3$	% $\Delta k/k/mm$
制御棒上昇速度	$\Delta x/\Delta t = 8.01$	mm/sec

4. 中心架台の反応度抑制効果 (表-B-8)

測定結果	検査日	判定基準
$\rho = 4.3211\% \Delta k/k$	7/28	1% $\Delta k/k$ 以上

表1 B架台の炉心の核的制限値を確認した書類
(最終確認日 2020年7月28日)

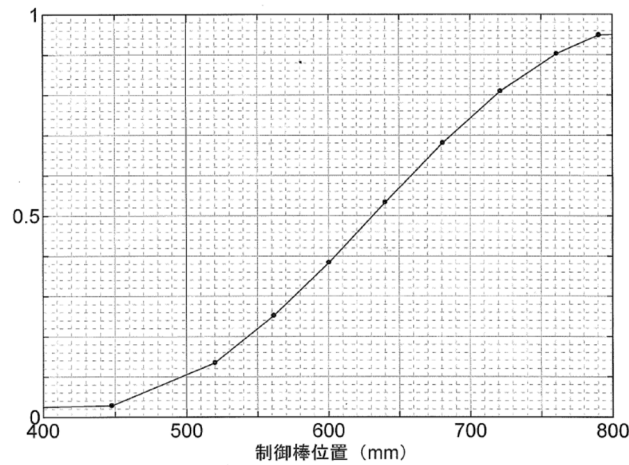
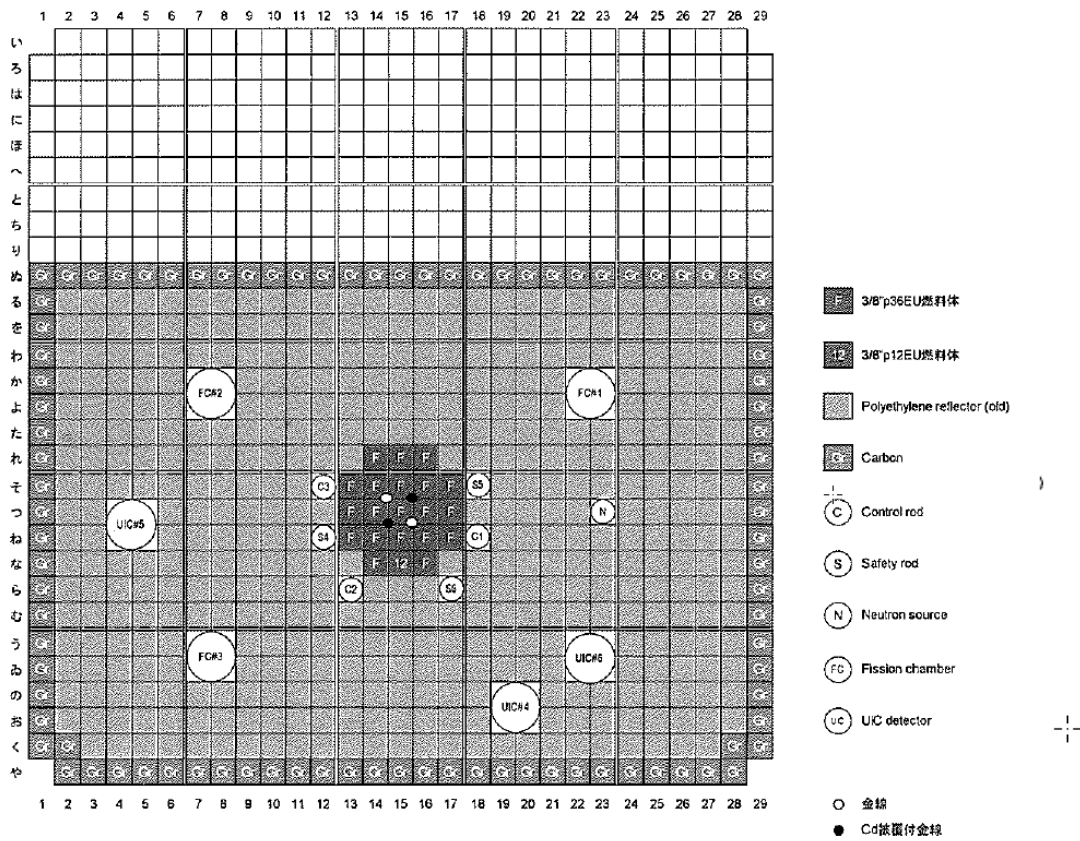


図1-1 B架台の炉心の反応度校正曲線

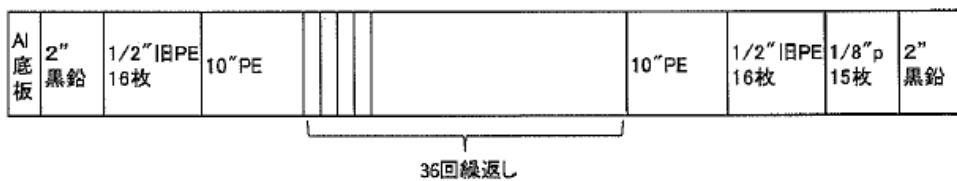
「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



金線: 直径約 0.5mm、長さ約 5mm、2 本(裸金線用)、
直径約 0.5mm、長さ約 10mm、2 本(Cd 被覆付き金線用)、
被覆用カドミウム チューブ(外径約 2.3mm、内径約 1.3mm、長さ約 15mm) 2 本

燃料体(F)

$1/16''\text{EU} + 1/8''\text{p} \times 3$ 枚



燃料体(12)

$1/16''\text{EU} + 1/8''\text{p} \times 3$

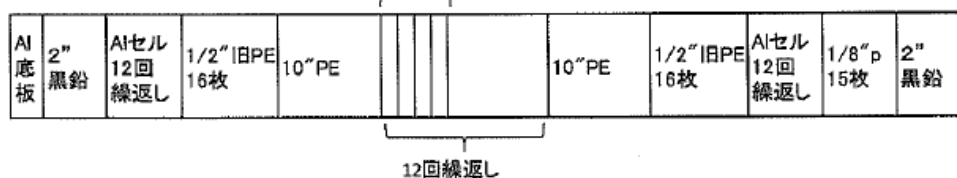


図1 B 架台 (B3/8"P36EU(3)炉心) の金線、および Cd チューブの照射炉心配置図

補足 - 2

KUCA反応度関係計算書(C 架台)

1. 炉心の過剰反応度 (表 - C - 1)

測定結果	検査日	判定基準
$\rho_{ex} = 0.2617\% \Delta k/k$	7/15	0.5% $\Delta k/k$ 以下

2. 制御棒の反応度抑制効果 (表 - C - 2 ~ 7)

測定結果	検査日	判定基準
C1 0.0494% $\Delta k/k$	7/15	(炉心の過剰反応度+1%) \leq 全制御棒反応度抑制効果
C2 0.4871% $\Delta k/k$	7/15	
C3 0.5485% $\Delta k/k$	7/15	
S4 0.4998% $\Delta k/k$	7/15	
S5 0.0378% $\Delta k/k$	7/16	
S6 0.5455% $\Delta k/k$	7/16	
合計 2.1681% $\Delta k/k$		
最大の1本 0.5485% $\Delta k/k$		最大の1本が全体の1/3 (i.e. 0.7227% $\Delta k/k$) を越えないこと

3. 制御棒の反応度添加率 (表 - C - 1)

測定結果	検査日	判定基準
$\Delta\rho/\Delta t = 0.0116\% \Delta k/k/sec$	7/15	0.02% $\Delta k/k/sec$ 以下
過剰反応度測定時の最大微分反応度	$\Delta\rho/\Delta x = 1.44E-3$	% $\Delta k/k/mm$
制御棒上昇速度	$\Delta x/\Delta t = 8.05$	mm/sec

4. ダンプ排水の反応度抑制効果 (表 - C - 8)

測定結果	検査日	判定基準
$\rho = 1.3252\% \Delta k/k$	7/16	1% $\Delta k/k$ 以上

表 2 C 架台の炉心の核的制限値を確認した書類
(最終確認日 2020年7月16日)

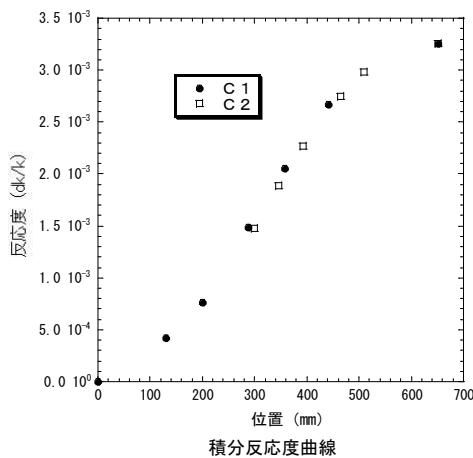


図 2-1 C 架台の制御棒反応度校正曲線

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

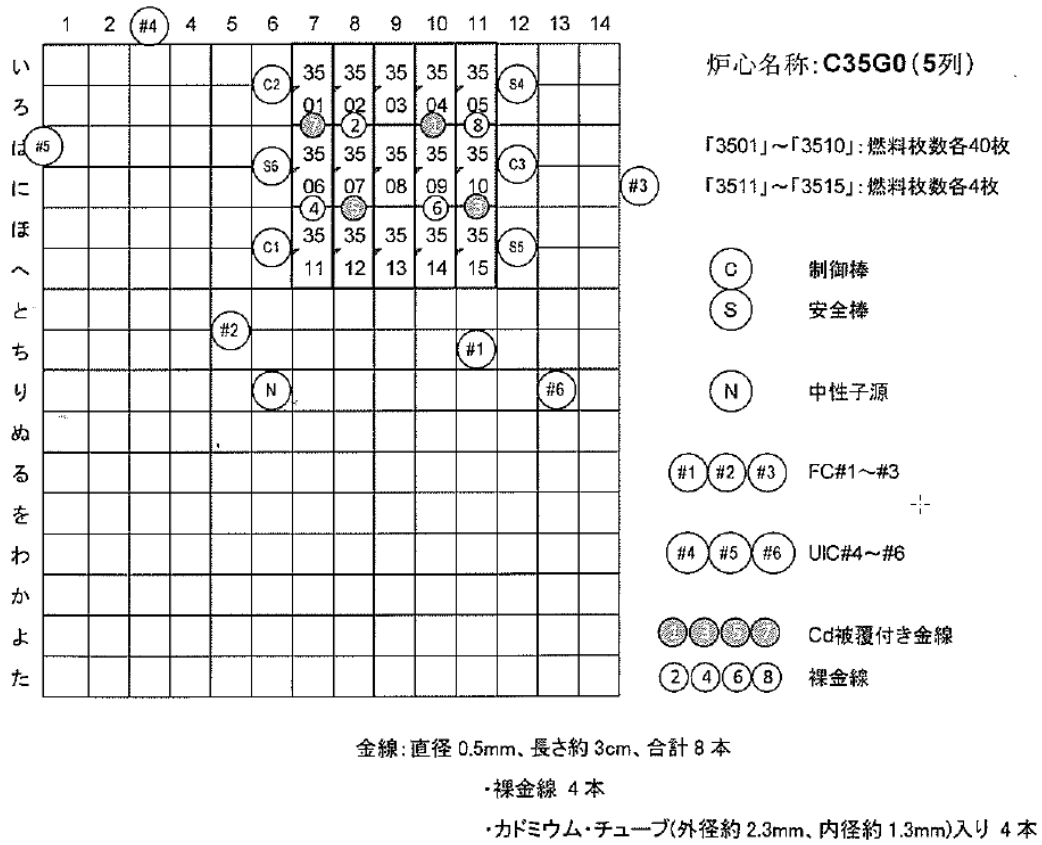
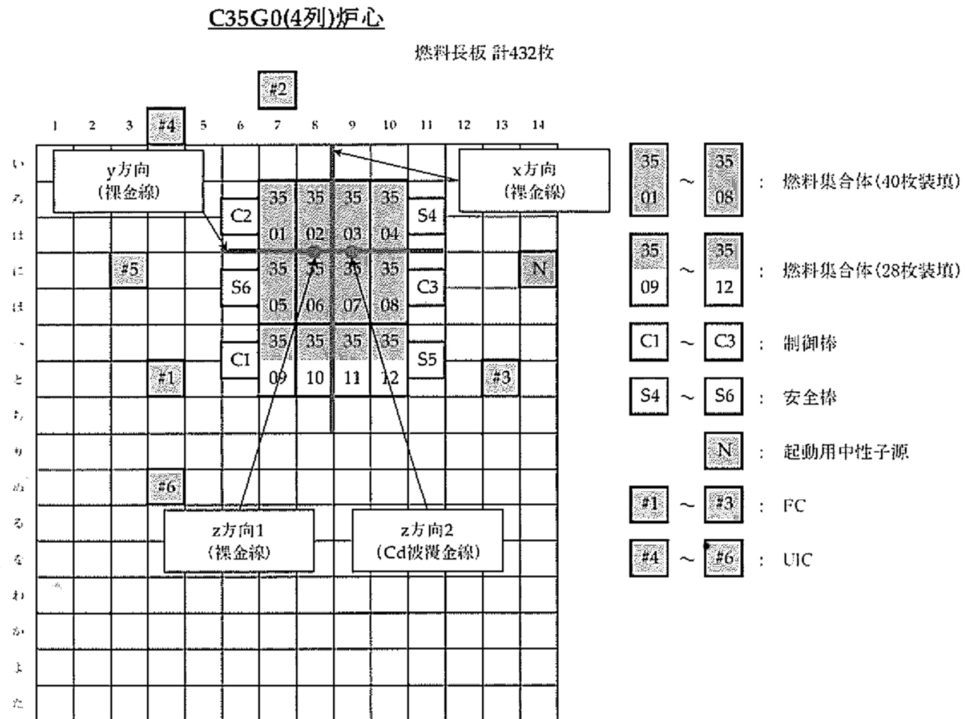


図 2-2 C 架台の金線、および Cd チューブの照射炉心配置図

補足 - 3



金線 (直径 0.5mm)

x 方向(裸) 約 57cm、y 方向(裸) 約 43cm、z 方向(裸) 約 80cm 各 1 本
z 方向(Cd チューブ入り) 約 80cm 1 本

核的制限値の確認 (430 枚装荷時の炉心)

過剰反応度 : 0.1602 % $\Delta k/k$

C1: 0.849 % $\Delta k/k$

C2: 0.464 % $\Delta k/k$

C3: 0.289 % $\Delta k/k$

S4~S6 は C1~C3 との対称性により評価

(全反応度 : 3.204 % $\Delta k/k$)

制御棒の添加反応度 : 0.0145% $\Delta k/k/s$

ダンプ排水反応度 : 0.0144% $\Delta k/k$