

2020年12月2日 ヒアリング資料の修正

## 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 (B3/8”P36EU(3)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 (図 1) 及びペリオド法による実測値から求めています。図 1 は A3/8”P36EU(3)炉心にて測定されたデータですが、この補足-1 の炉心とは全く同じ燃料体を用いているため制御棒の反応度校正曲線は同じであると考えております。

算出方法は以下の通りです。

表 1 固体減速炉心での照射実験時のデータ

制御棒	制御棒価値 (% $\Delta k/k$ ) ①	照射物装荷時の 臨界制御棒位置 (mm)	挿入分の規格化 反応度 <sup>3)</sup> (図 1) ②	挿入反応度 (% $\Delta k/k$ )
C1	0.3761	722.34	0.812	0.0708 <sup>1)</sup>
C2	0.1055	723.05	0.813	0.0197 <sup>1)</sup>
C3	0.4286	722.00	—	0.0801 <sup>2)</sup>
合計				0.1706

1) ① × (1 - ②)

2) ペリオド法による測定

3) 図 1 の測定点のデータを直線内挿で算出

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

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 = 0.0564 %  $\Delta k/k$

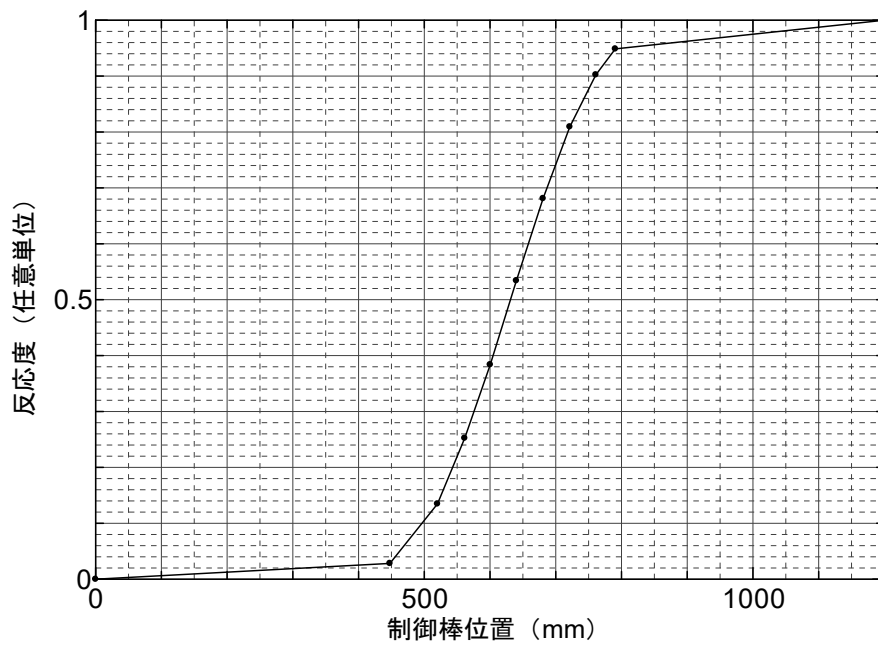


図1 A3/8”P36EU(3)炉心 制御棒積分反応度曲線  
(全反応度を1に規格化、点は測定結果)

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に、」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に、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

$$1.35 - 0.35 = 1.0\% \Delta k/k$$

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。

⑤11/28 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 (図 2-1、図 2-2) から求めています。これらの制御棒校正曲線は C35 炉心の別の炉心の C1 と C2 制御棒の反応度校正曲線 (図 2-2 は両制御棒共に最大値を 1.0 と規格化している) でありませんが、補足-2 の炉心とは全く同じ燃料体を用いているため制御棒の反応度校正曲線は同じであると考えております。

算出方法は以下の通りです。

表 2 軽水減速炉心 (補足-2) での照射実験時のデータ

制御棒	制御棒価値 ( $\% \Delta k/k$ ) ①	照射物装荷時の 臨界制御棒位置 (mm)	挿入分の規格 化反応度 <sup>2)</sup> (図 2-2) ②	挿入反応度 ( $\% \Delta k/k$ ) <sup>1)</sup>
C1	0.0494	458.94	0.8564	0.0071
C2	0.4871	458.06	0.8544	0.0709
C3	0.5485	458.93	0.8563	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))

1) ① × (1-②)

2) 図 2-2 のデータを内挿

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 :  $0.2617 - 0.1568 = \underline{0.1049\% \Delta k/k}$

「グレーのマスクング範囲は不表示情報」

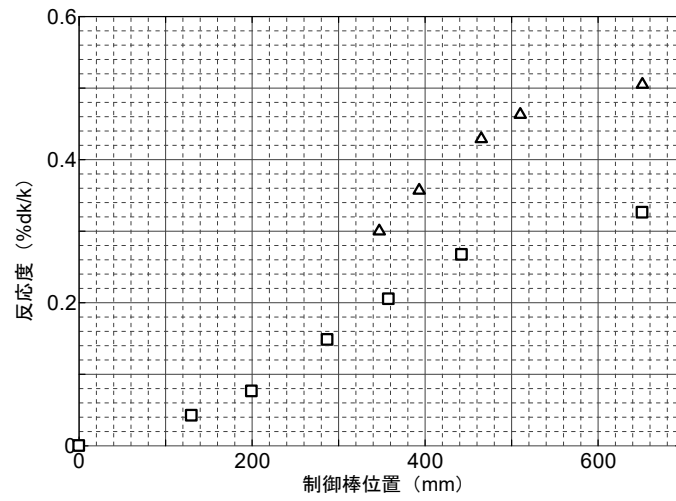


図 2-1 C35 炉心 制御棒積分反応度曲線  
(□は C1 制御棒、△は C2 制御棒の測定結果)

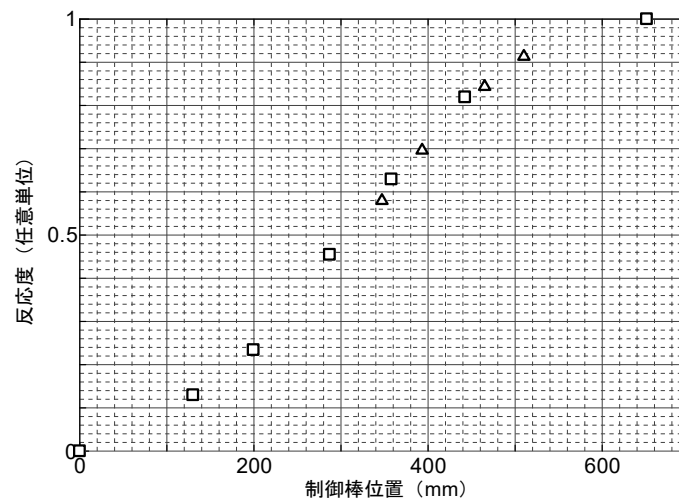


図 2-2 C35 炉心 制御棒積分反応度曲線  
(全反応度を 1 に規格化、□は C1 制御棒、△は C2 制御棒の測定結果)

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。)

表 3-1 軽水減速炉心 (補足-3) での照射実験時のデータ  
C35G0(4 列) (燃料板を 432 枚装荷)

制御棒	制御棒価値 (% Δ k/k) ①	照射物装荷時の 臨界制御棒位置 (mm)	挿入分の規格 化反応度 <sup>2)</sup> (図 2-2) ②	挿入反応度 (% Δ k/k)
C1	0.289	504.34	0.897	0.029
C2	0.464	505.05	0.898	0.048
C3	0.849	504.49	0.897	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))

- 1) ① × (1 - ②)
- 2) 図 2-2 のデータを内挿

430 枚装荷時の余剰反応度 : 0.394% Δ k/k  
燃料板 1 枚当たりの反応度 : 0.0466 % Δ k/k/枚  
(算出方法は下に示す)

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 :  $0.487 - 0.163 = \underline{0.324\% \Delta k/k}$



燃料板 1 枚当たりの反応度算出方法

実験では以下のような手順で測定を行った。

① 422 枚装荷炉心

3501～3508 燃料フレーム：各 40 枚 (合計 320 枚)

3509、3512 燃料フレーム：各 25 枚 (合計 50 枚)

3510、3511 燃料フレーム：各 26 枚 (合計 52 枚)

余剰反応度：0.021%  $\Delta k/k$  (正ペリオド法により測定)

② 430 枚装荷炉心

3501～3508 燃料フレーム：各 40 枚 (合計 320 枚)

3509、3512 燃料フレーム：各 27 枚 (合計 54 枚)

3510、3511 燃料フレーム：各 28 枚 (合計 56 枚)

余剰反応度：0.394%  $\Delta k/k$  (正ペリオド法により測定)

上記の①と②より燃料板 1 枚当たりの反応度は

$$(0.394 - 0.021) \div 8 = 0.0466\% \Delta k/k/\text{枚}$$

となる。

③ 432 枚装荷炉心 (図 3)

3501～3508 燃料フレーム：各 40 枚 (合計 320 枚)

3509～3512 燃料フレーム：各 28 枚 (合計 112 枚)

432 枚装荷時の余剰反応度(照射物装着前)：

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

照射物の反応度：

$$0.487 - 0.163 = 0.324\% \Delta k/k$$

②から③の手順で追加した燃料板は外側の燃料フレームであるため、実際には 1 枚当たりの反応度は上記の手順により求められた 0.0466%  $\Delta k/k/\text{枚}$  より小さくなるはずである。そのため余剰反応度(432 装荷時、照射物装着前)の値は 0.487%  $\Delta k/k$  より小さくなるため照射物の反応度は上記の値 0.324%  $\Delta k/k$  より小さくなる。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 3-2 C35G0(4列) (燃料板を 432 枚装荷)

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	0.289	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))

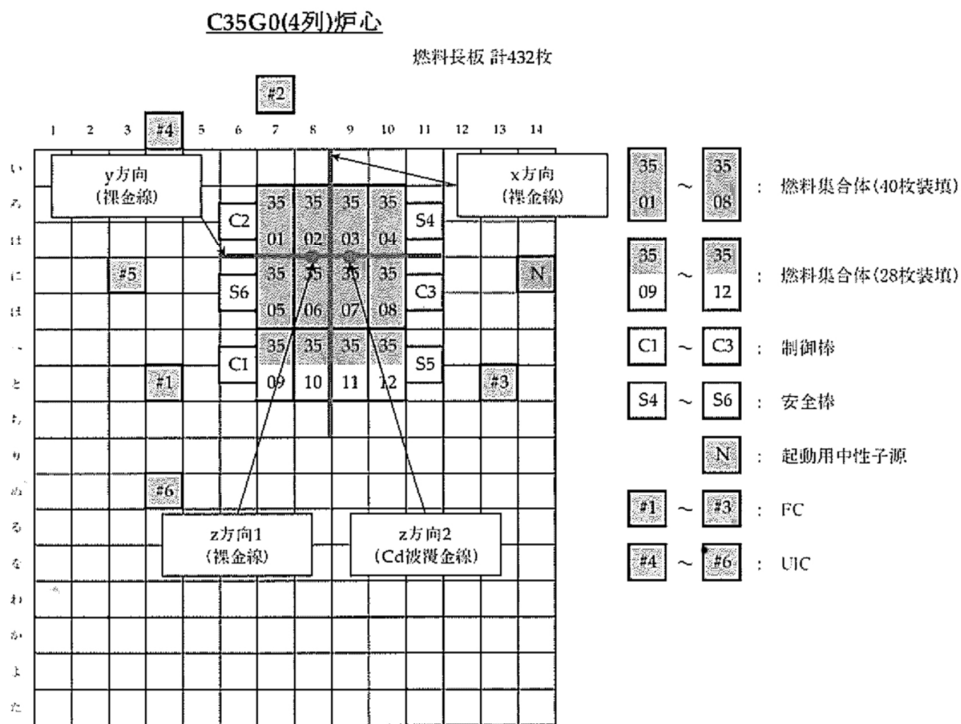


図 3 C35G0(4列)炉心 炉心配置図(432枚装荷)

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価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。

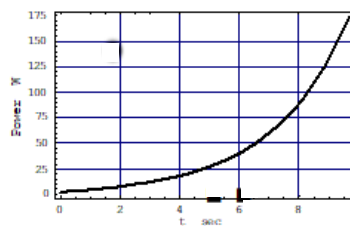


図 1 C35G0(5 列)炉心の実験物の異常等による反応度の付加時の出力変化

補足—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%) $\leq$ 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)

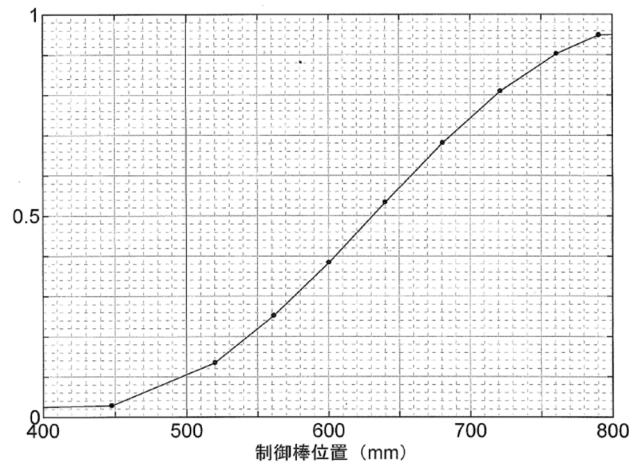
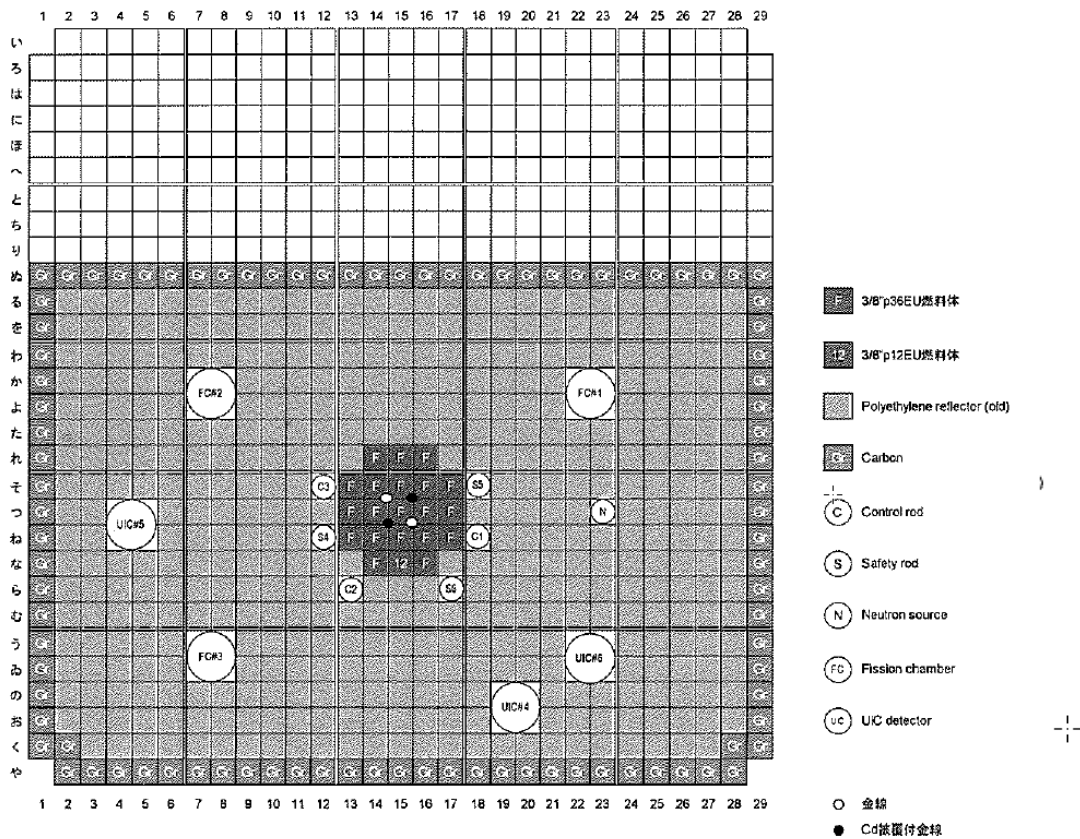


図1-1 B架台の炉心の反応度校正曲線

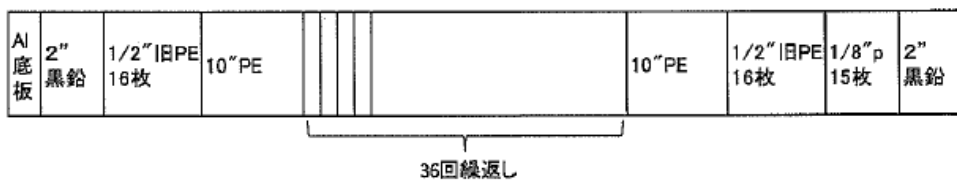
「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



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)**

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



**燃料体(12)**

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

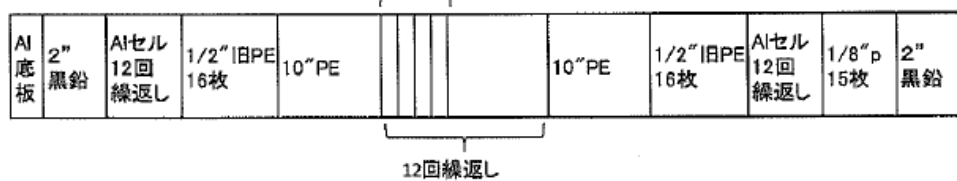


図1 B 架台 (B3/8"P36EU(3)炉心) の金線、および Cd チューブの照射炉心配置図



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)

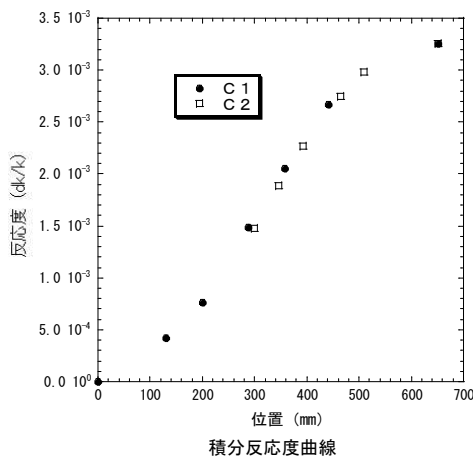


図 2-1 C 架台の制御棒反応度校正曲線

「グレーのマス킹範囲は不開示情報」

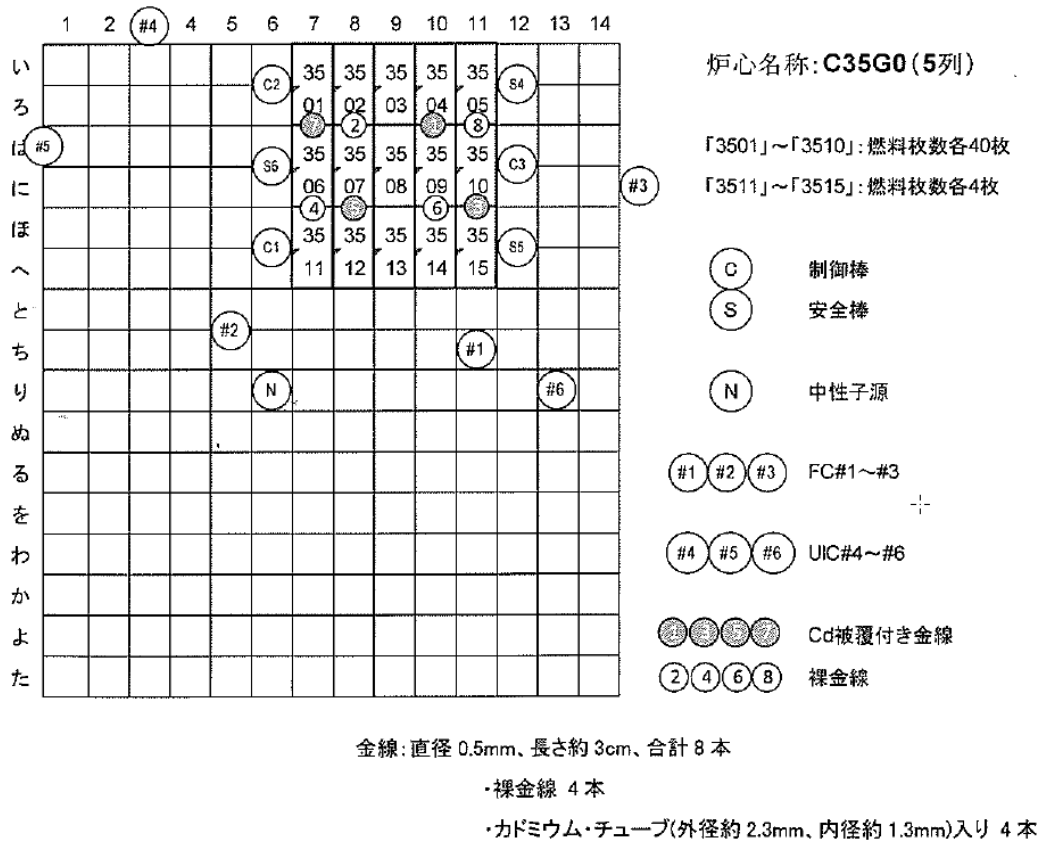
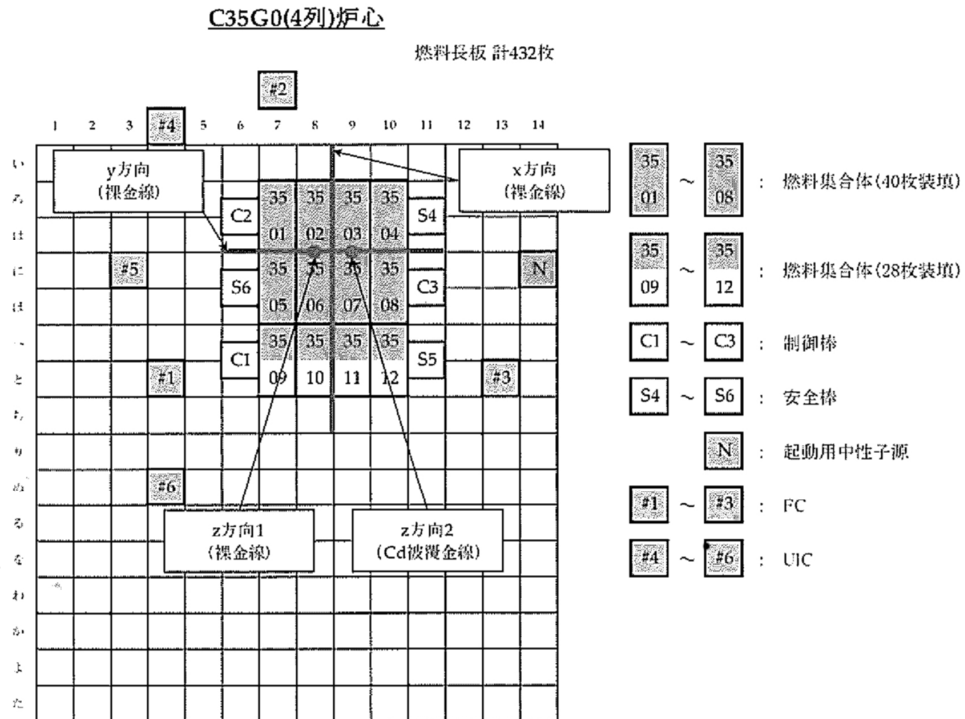


図 2-2 C 架台の金線、および Cd チューブの照射炉心配置図

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: 0.289 %  $\Delta k/k$

C2: 0.464 %  $\Delta k/k$

C3: 0.849 %  $\Delta k/k$

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%  $\Delta k/k$