

京都大学臨界実験装置 (KUCA)

設置変更承認申請について

【燃料について】

ウラン・モリブデン燃料について.....	1
軽水減速炉心の燃料	31

京都大学複合原子力科学研究所

1. ウラン・モリブデン燃料について

1. 1. 概要

研究炉で LEU を使用するためにはウラン密度を上げることが必要であり、研究炉の性能向上のためにこれまで使用されてきたウランシリサイド分散型燃料 (U_3Si_2-Al) よりさらにウラン密度が高い燃料の開発が求められるようになった。そのため、例えば U_3Si や U_6Fe などのウラン密度の高い燃料の研究が行われたが、照射特性が良くないということが判り利用するまでには至らなかった。そのような中で 1990 年代以降ウラン・モリブデン燃料 (以下、U-Mo 燃料) の研究が進み、米国、カナダ、フランス、韓国などで試験が行われた結果、照射特性が優れていることが判り、さらに研究が進められるようになった。

U-Mo 燃料は元々 1960 年代に高速炉の特にパルス炉で用いる燃料として開発が始まった燃料である。高速炉のための照射試験は高温で実施されるため、当時の照射試験に関するデータベースは研究炉で使用する U-Mo 燃料のためには一部しか利用できないが、開発研究を通じて U-Mo 燃料の相変化や物理的特性、熱的特性、機械的特性などに関する多くのデータが取得されていた。

U-Mo 燃料は U_3Si_2 と同様にアルミニウム中に分散させて使用する場合と、さらにウラン密度を高めるために U-Mo 単体 (U-Mo monolithic) で使用する場合は考えられているが、KUCA の固体減速炉心で使用を予定しているのは前者の U-Mo 分散型燃料 (Mo を 7wt% 用いた U-7Mo) である。現在使用予定の U-Mo 燃料の仕様を表 1 に示す。[redacted] の粒で、それをウランシリサイド分散型燃料の場合と同様にアルミニウムパウダー (粒径 [redacted]) と混合して整形したものである (アルミニウムとウランの原子数比は [redacted]、アルミニウム体積が全体の [redacted])。

(なお、KUR のウランシリサイド分散型燃料の場合、 U_3Si_2 の粒径は [redacted] の粒子は最大 [redacted]、アルミニウムパウダーは粒径 [redacted] で、アルミニウム体積が全体の [redacted]。)

U-Mo の諸物理特性¹⁾

融点： 1130 °C (U-7Mo)

熱容量： 30.5 J/mol/K (U-10Mo、25°C)

熱伝導率： 14.2 W/m/K (U-8Mo、10~100°C)

(ここで、U-7Mo 中の数字は Mo の wt%)

U-7Mo の密度

(参考文献 1 の (2.3) 式、Mo を 7wt% とすると 15.7at%)

$$10.2 \times 0.157 + 19.05 \times (1 - 0.157) = 17.7 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

U の密度

燃料コンパクトの体積は

なので、ウラン密度は

6.61 (gU/cm³)

表 1 U-Mo 燃料に関する仕様

項目	公差等
²³⁵ U 量	
ウラン濃縮度	
ウラン分布均一性	
Mo 量	
アルミニウム	
アルミニウム粒径	

1. 2. 照射特性

U-Mo ハンドブック 1) に記載された U-Mo 燃料 (U-Mo monolithic) の燃料スウェリングのデータを図 1 に示す。

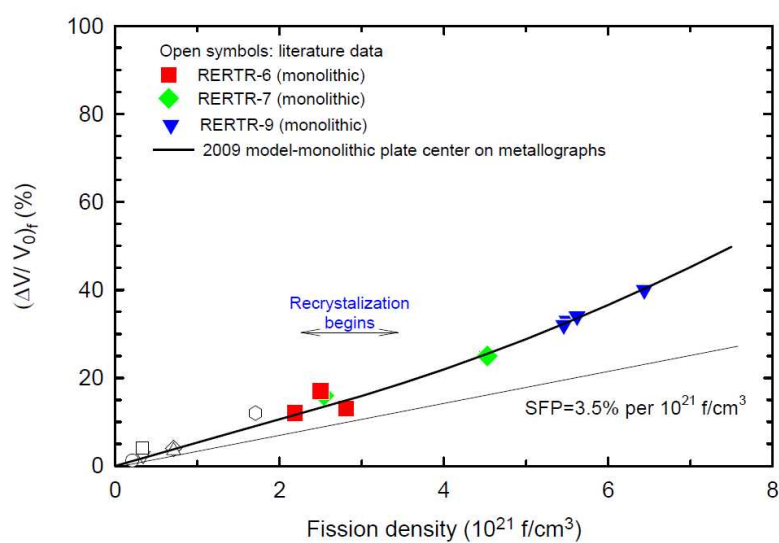


図 1 燃料スウェリングの実験値

KUCA で使用する燃料のスウェリング量を求めるために、KUCA の設置変更申請書（以下、申請書）に記載した数値から燃料の燃焼度に対応する核分裂密度（fission density、以下 F_d ）を求める。

KUCA の年間積算出力：1 kWh （申請書 添付 2）
 最小臨界炉心： [] （申請書 添付 8）
 U 密度：16.3 g/cm³ （U-7Mo（Mo を 7%）の U 密度）
 1 核分裂当たりの回収エネルギー：200MeV

KUCA で使用する燃料は U-Mo 分散型燃料であるが、個々の U-Mo 粒子の F_d は U-Mo 単体の燃料の場合と同じであるので、燃料を同じ炉心で 50 年間使用したときの F_d は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{積算出力} &: 1 \times 10^3 \text{ (Wh)} \times 3600 \text{ (s/h)} \times 50 \text{ (year)} = 1.8 \times 10^8 \text{ (J/50-year)} \\ \text{核分裂数} &: 1.8 \times 10^8 \text{ (J/50-year)} \div \{200 \times 10^6 \text{ (eV)} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ (J/eV)}\} \\ &= 5.6 \times 10^{18} \text{ (fissions/50-year)} \\ \text{U 体積} &: [] \div [] \text{ (U-235 濃縮度)} \div 16.3 \text{ (U 密度)} = [] \text{ (cm}^3\text{)} \\ F_d &= 5.6 \times 10^{18} \div [] = [] \text{ fissions/cm}^3 \\ &\text{(U-235 の燃焼度として [])} \end{aligned}$$

これらの照射実験データより、U-Mo 燃料の swelling についてガス以外の FP によるもの (solid swelling) とガス状の FP によるもの (gas bubble swelling) について以下のような実験式が示されている¹⁾。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta V}{V_0} \right)_{total} (\%) &= \left(\frac{\Delta V}{V_0} \right)_{solid\ swelling} + \left(\frac{\Delta V}{V_0} \right)_{gas\ bubble\ swelling} \\ \left(\frac{\Delta V}{V_0} \right)_{solid\ swelling} (\%) &= 3.5 \times 10^{-21} F_d \\ \left(\frac{\Delta V}{V_0} \right)_{gas\ bubble\ swelling} (\%) &= 1.8 \times 10^{-21} F_d \quad (F_d \leq 3 \times 10^{21} \text{ fissions/cm}^3) \end{aligned}$$

KUCA の F_d を代入すると、total swelling (solid swelling と gas bubble swelling の和) は [] となる。x-y-z 方向に均等に膨張すると仮定すると、各方向のサイズ変化は

となり、図 2 に示す燃料板の製作公差に比べても十分に小さい値であることから照射に伴うスウェリング量は無視することができる。すなわち、核分裂で生成した核分裂生成物 (FP) は U-Mo 燃料の形状に影響を与えることなく U-Mo 燃料の内部に保持されるといえる。

U-Mo 分散型燃料の場合、FP の一部は U-Mo 粒子の表面から外部に放出されることになる。その放出率 F_r は以下のように表される²⁾。

$$F_r = \frac{3}{4} \left(\frac{\mu}{R} \right) - \frac{1}{16} \left(\frac{\mu}{R} \right)^3$$

ここで μ は U-Mo 中での FP の平均飛程、 R は U-Mo 粒子の平均半径である。U-7Mo について μ は $5 \mu\text{m}$ 、 R は $35 \mu\text{m}$ とすると、 F_r は約 12% となる。 μ は UAl_x の場合は $10 \mu\text{m}$ 、 U_3Si_2 の場合は $8 \mu\text{m}$ であるため、同じ粒径であれば密度が高い U-Mo のほうが F_r は小さくなる。

この放出された FP はウランシリサイド分散型燃料の場合と同様に U-Mo 周囲のアルミニウム中に保持されることになるが、その FP の保持能力については従来のウランシリサイド分散型燃料で十分に実績があり問題は無い。

1. 3. 燃料板の強度

燃料板はアルミニウム製の額縁の内部に U-Mo 分散型燃料のコンパクトを入れ、その上にアルミニウム製の板を置いて周囲を溶接しているという構造である (図 2、図 3)。また燃料板は燃料さや管に収納されて炉心に設置されるため、燃料板自体の耐震強度は必要なく、ここでは、燃料板を積み重ねたときの圧縮荷重に対しての燃料板の強度を検討した。

荷重条件としては、燃料さや管の燃料領域 (下部ポリエチレン反射体の上) に燃料板があり、その上部に KUCA で使用する物質の中で最も密度の大きなウラン金属が高さ 40cm、その上部に 50cm のポリエチレン反射体が挿入されている場合を考える。また圧縮荷重は燃料板周囲の幅約 \square アルミ枠 (図 3、P の矢印の箇所) に作用すると考える。

圧縮荷重：

$$\square (\text{U 面積}) \times 40 (\text{U 高さ}) \times 18.95 (\text{U 密度}) \\ + \square (\text{ポリエチ面積}) \times 50 (\text{ポリエチ高さ}) \times 0.96 (\text{ポリエチ密度}) = \square \text{ kg}$$

圧縮応力：

$$\square \text{ kg} / \square (\text{mm}^2, \text{隅の R3 の箇所も考慮}) \\ = \square \text{ kgf/mm}^2 = \square \text{ N/mm}^2$$

一方、アルミニウム合金 AG3NE 相当である A5052 は引張強さ 175 N/mm^2 以上、耐力

(0.2%) 65 N/mm²以上 (JIS H4000 A5052P-O 板) であり、圧縮強度も同じと考えれば燃料板上部からの圧縮荷重に対して燃料板は十分安全である。

なお、U-7Mo 単体での降伏点は 700 N/mm² であり¹⁾、混合するアルミニウムパウダーについては強度が弱い純アルミ系 (A1100) と同等の降伏点であるとしても耐力 (0.2%) は 25 N/mm² 以上 (JIS H4000 A1100P-O 板) であるため、仮に燃料板上部の挿入物の重量が U-Mo 燃料に直接加わったとしても圧縮応力 (= kgf/mm² = N/mm²) より大きく問題はない。

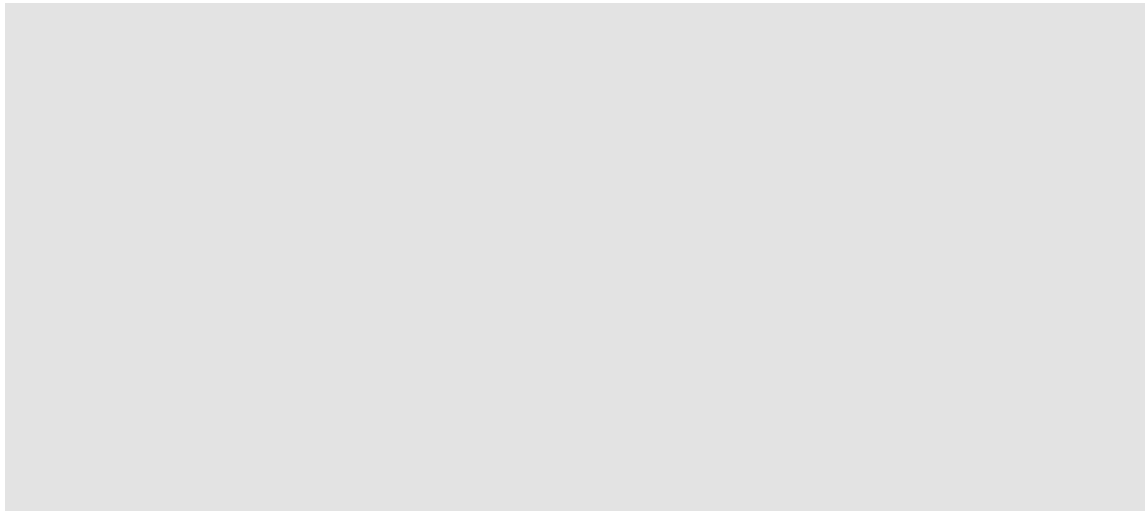


図 2 燃料板外形 (単位 : mm)

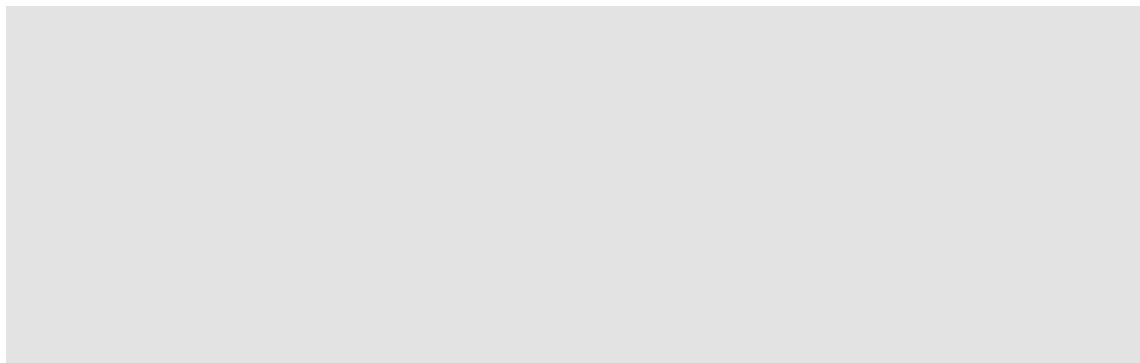


図 3 燃料板構造 (断面図) (単位 : mm)

1. 4. 燃料板の腐食

燃料板は KUCA の炉室内で使用するものであり、運転に伴う発熱は最大でも 100℃以下であるため燃料板が高温になることはない (申請書 添付 10 の解析結果より)。また使用する炉室内では昼間は空調設備が働いており (火曜日から金曜日は 9 時～20 時、それ以外の日は 9 時～12 時)、温度は夏場で最大 25℃程度、冬場で最低 15℃程度である。また除湿されているため高湿度になることはない。

このような使用環境であるので、燃料板 (表面およびレーザー溶接部) が腐食する可能性

としては上記の使用環境を超えた温度変化および湿度変化が想定される最も厳しい状況であると考えられる。

そこで KUCA で使用するものと同じ方法で作成された複数枚の燃料板サンプルの耐食性試験を実施した。試験では温度 10℃で湿度 30%の低温乾燥の環境と、温度 40℃で湿度 85%の高温多湿の環境を繰り返す温湿度サイクル試験を実施し（図 4、図 5）、試験後に表面およびレーザー溶接部に腐食が認められるか確認した。

試験の結果、試験前後で外観上の変化は無く、レーザー溶接部および母材部に腐食は認められなかった（図 6）。

KUCA の炉室内には燃料板の材質とほぼ同等のアルミニウム合金（A5052）を用いた設備が多く存在する（例えば、軽水減速炉心の炉心タンク、配管など）。1974 年の設置以来、約 45 年が経過しているが、これまでにこれらの機器の表面や溶接部に腐食が認められたことは無いので、今回使用する燃料板についても腐食の恐れはほとんど無いと考えられる。

KUCA の燃料集合体は年に数回は組み立て、解体を行っており、各燃料板についてはこれらの作業時に表面の状況を目視で確認している。また使用していない燃料板についても少なくとも年 1 回は目視で確認しており、これらの確認作業で何らかの異常が発生した場合には使用しないようにする。

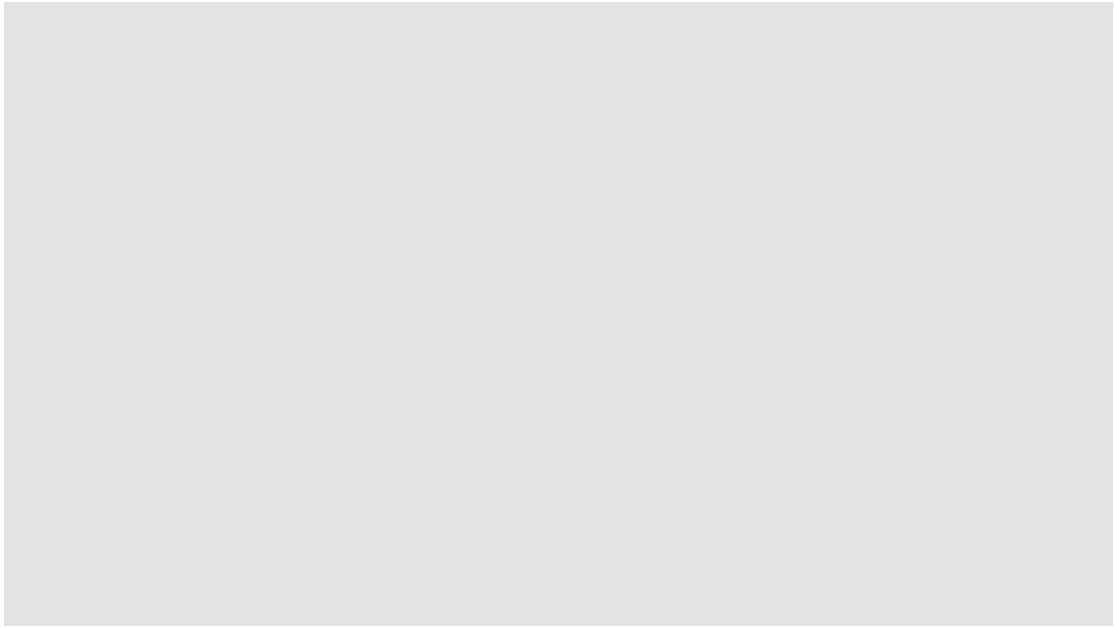


図 4 温湿度サイクル試験条件



図 5 温湿度サイクル試験

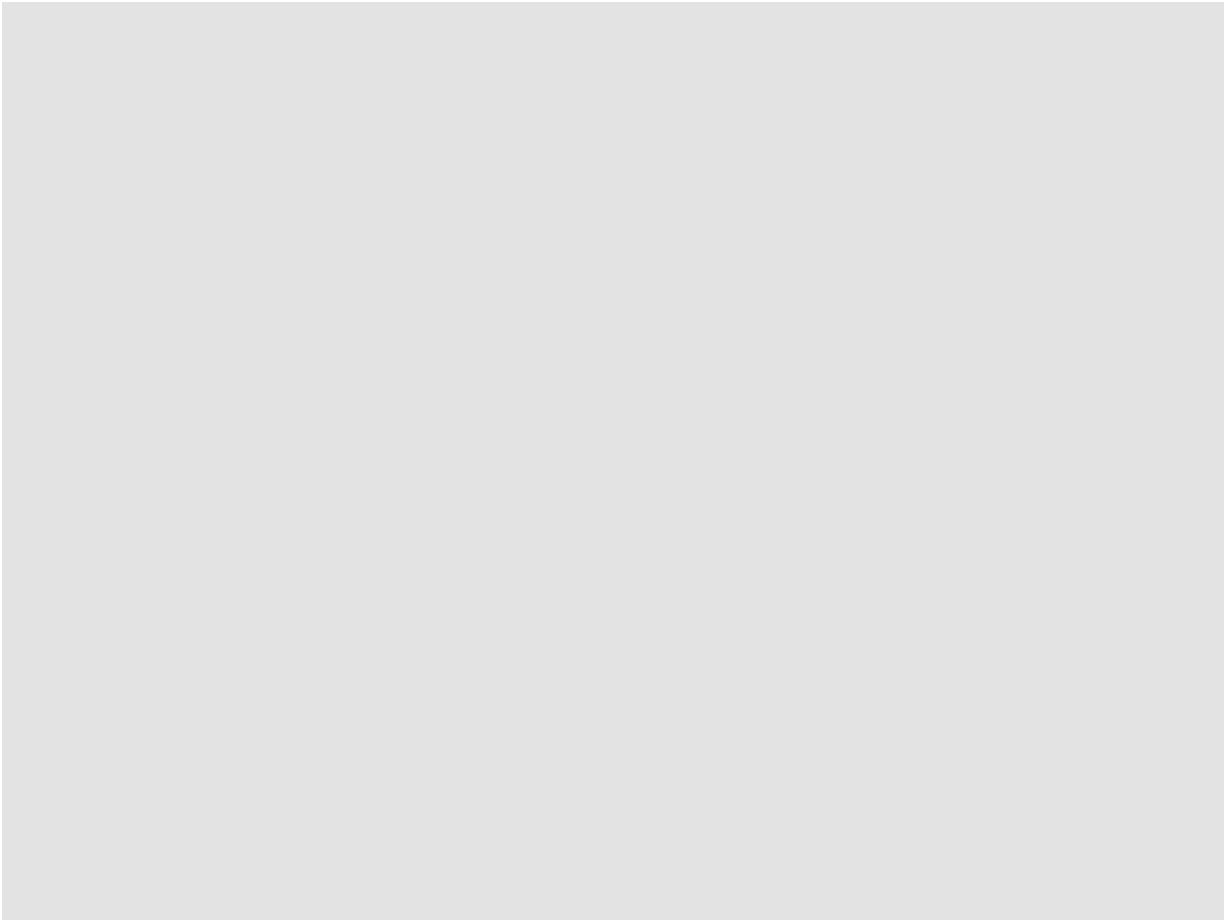


図 6 試験結果（右図は溶接部の拡大図）

1. 5. 燃料板のブリスタ

今回使用する燃料板は U-Mo 粒子をアルミニウムパウダーと混ぜて製作した燃料コンパクトを厚さ 0.4mm のアルミニウム製の被覆材中に封入した構造をしており、これまで KUCA の軽水減速炉心で使用してきた燃料平板や KUR で使用している燃料平板（共にアルミニウム製被覆材厚さ 0.5mm）と極めて類似した構造をしている。KUR 等においてブリスタの発生防止するために燃料芯材の最高温度は 400℃を超えないことを求めており、今回の U-Mo を用いた燃料板についてもブリスタの発生を防止するために燃料芯材の最高温度は 400℃を超えないことを設計基準事故時の判断基準としている。これは、U-Mo 分散燃料はウランシリサイド分散型燃料と同様にアルミニウムパウダー中に融点の高い燃料粒子が分散した構造をしており、ブリスタの発生はこれまでの基準（燃料破損閾値としてブリスタ発生温度の約 500～600℃に安全余裕を見た温度である約 400℃）と同じとして良いと考えられるからである。

U-Mo 燃料のブリスタの発生要因についてはウランシリサイド分散型燃料の場合と同様に、燃料被覆材と U-Mo の燃料コンパクトの間の密着性の低い箇所の燃料芯材が高温にな

ることにより燃料表面が変形すること、さらに燃料と燃料被覆材の隙間に気体の核分裂生成物が蓄積することなどの要因ブリストが発生すると考えられる。

今回の U-Mo を用いた燃料板についてもブリストの発生を防止するために燃料芯材の最高温度は 400°C を超えないことを設計基準事故時の判断基準としている。これは、U-Mo 分散燃料はウランシリサイド分散型燃料と同様にアルミニウムパウダー中に融点の高い燃料粒子が分散した構造をしており、ブリストの発生はこれまでの基準（燃料破損閾値としてブリスト発生温度の約 500~600°C に安全余裕を見た温度である約 400°C）と同じとして良いと考えられるからである。

しかし添付 10 の解析結果によると燃料板の最高温度は 100°C 以下であること、また U-235 の燃焼度としては最大でも [] 程度であり、ほとんど燃焼は進まずに核分裂生成物の蓄積はほとんど無視できる。そのため詳細なブリスト発生要因については調べ切れていないが、KUCA の U-Mo 燃料についてはブリストの発生心配は無いと考えられる。

1. 6. 燃料の固着度、強度について

現在、固体減速炉心で使用予定の U-Mo 燃料の芯材は [] の粒と [] の粒を [] の重量割合で混ぜて平均粒径 [] の粉末としたものを、ウランシリサイド分散型燃料の場合と同様にアルミニウムパウダー [] と混合し圧縮して芯材として整形したものである（アルミニウムとウランの原子数比は約 2.1 : 1、アルミニウム体積が全体の []）。

この製造方法は、現在開発中の高出力研究炉用の燃料の製造方法と同じであり、その U-Mo 燃料を照射試験で FP の閉じ込め性能などを含めた照射特性を確認しており、KUCA 用に製造する U-Mo 燃料についても同様の照射特性を有していると考えられる。

芯材の固着度についてのデータはないが、燃料製造では芯材の均一性を X 線撮影で確認（ [] が判定条件）、および成型した芯材の寸法、重量が基準値内であることを確認する。

なお KUCA の燃料板はアルミニウム製の額縁の内部に U-Mo 分散型燃料のコンパクトを入れ、その上にアルミニウム製の板を置いて周囲を溶接するという構造であるため、その機械的強度については心材ではなく周囲のアルミニウム製被覆材（アルミニウム製の額縁）で担保している。

1. 7. 燃料板の落下試験

固体減速架台用の U-Mo 燃料のサンプルを使用しサンプルの落下試験を実施した。

KUCA での燃料取扱時には、燃料組み立ての際に誤って燃料をコンクリートの床に落とす可能性があり、その影響によって溶接部分等が破壊され、核物質の漏洩につながるものが危惧される。そこで、現在製作予定の燃料が実際の燃料取扱時の落下にも十分耐えうることを確認するため落下試験を行い、その強度と密封性能を確認した。

使用したサンプルは全て U-Mo 燃料を製作する予定のフランスの CERCA 工場において全く同じ手法で製作したもので、寸法およびアルミニウム被覆の材質は実際に製作予定のものと同じ、サンプルの内部には燃料コンパクトと密度が近いステンレス板（燃料コンパクトは ██████████）が梱包されている。図 7 にサンプルの概略図を示す。Front face は識別番号が刻印されている側とし、Back face は溶接が施されている側とした。各 Side face の位置は図 8 に示したとおりである。落下試験の前と数回の落下の後、さらに 100 回の落下試験後に、Front、Back、各 Side face の 6 面について写真撮影を行った。Side face 撮影時はサンプルを立て、Front face が必ず右側になるように設置して撮影を行った。

試験は KUCA 燃料室と同じコンクリート床である KUCA の総合測定室で実施した。サンプルを落下させる高さは、KUCA の燃料取扱時に使用している作業機が約 75 cm であるため、それより倍の高さである 150 cm とした。また、サンプルを落下させる際は、試験者は必ず刻印側が下となるようにサンプルを持ち落下させた。試験者は、サンプル落下後、破損等がないことを確認した後に、次の落下試験を行った。図 9 に落下試験の概略図を示す。

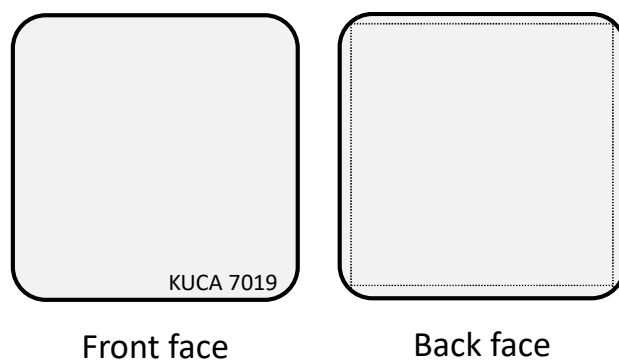


図 7 使用したサンプルの概略図

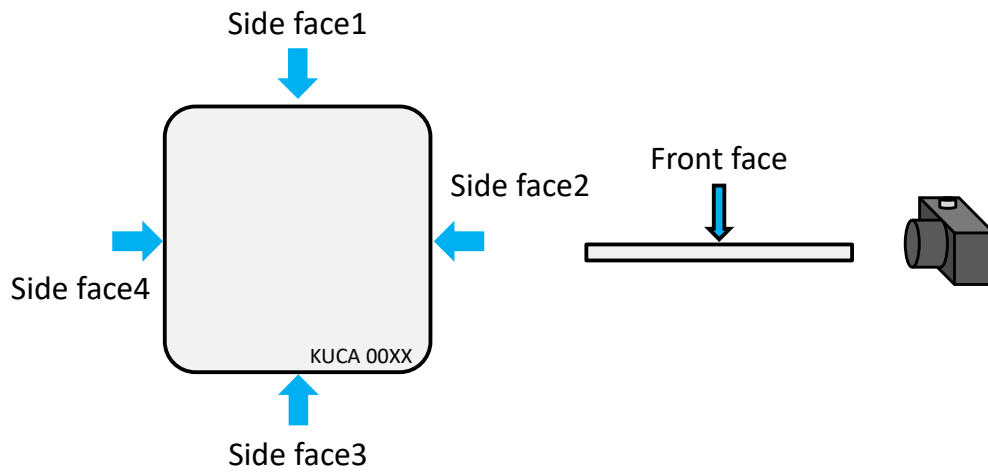


図 8 各 Side face の位置

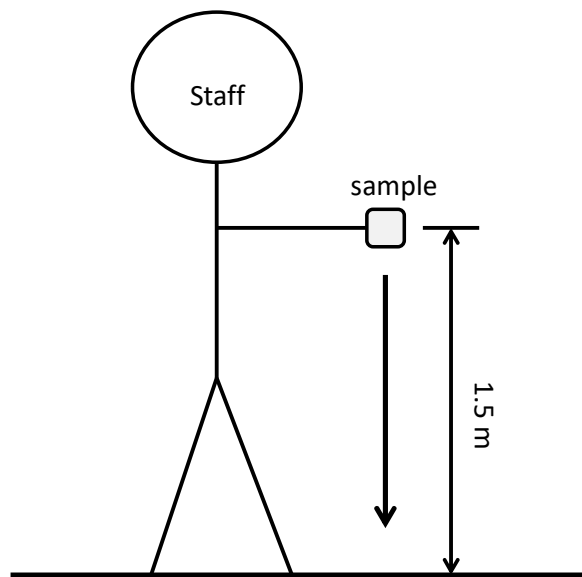
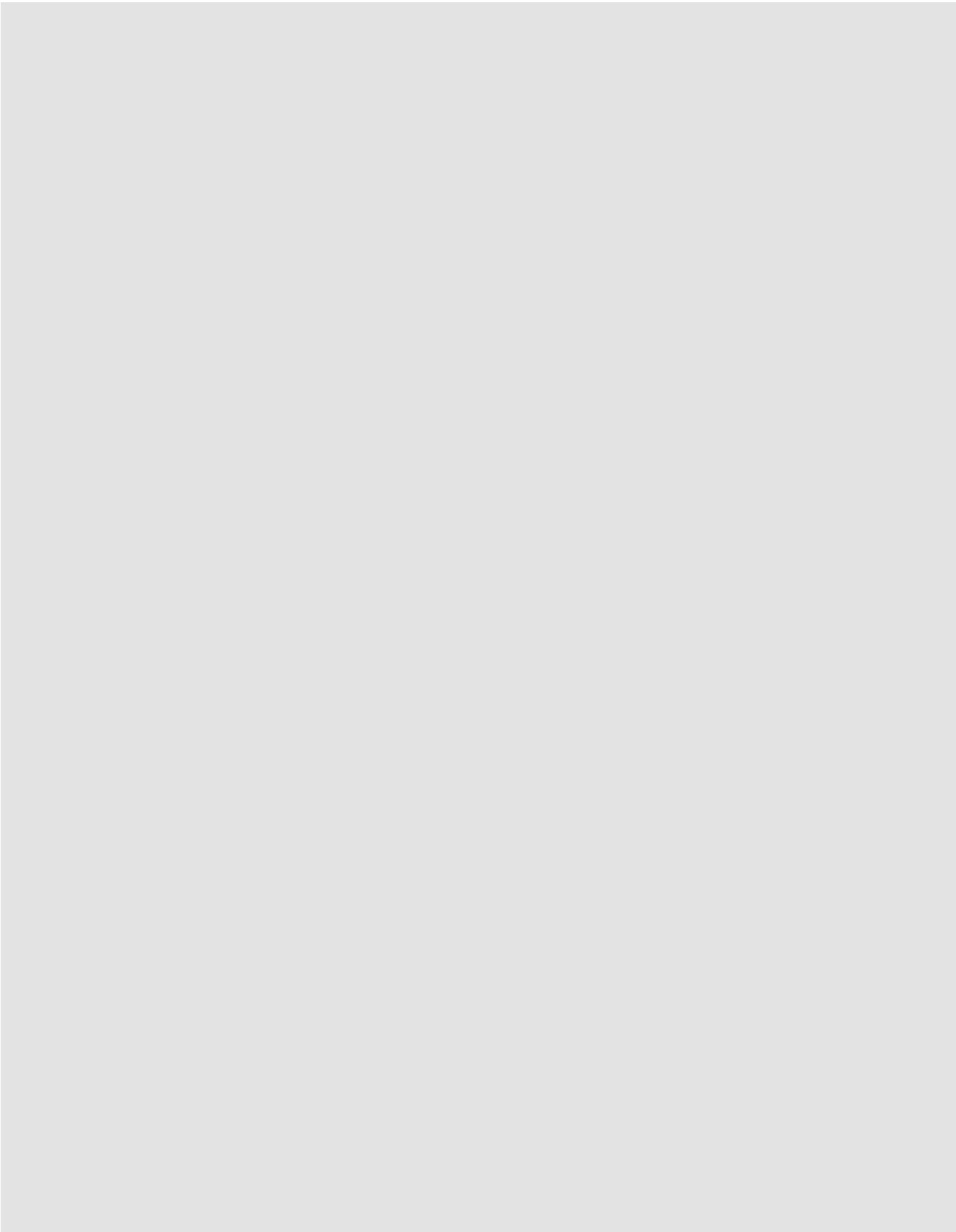


図 9 落下試験の概略図

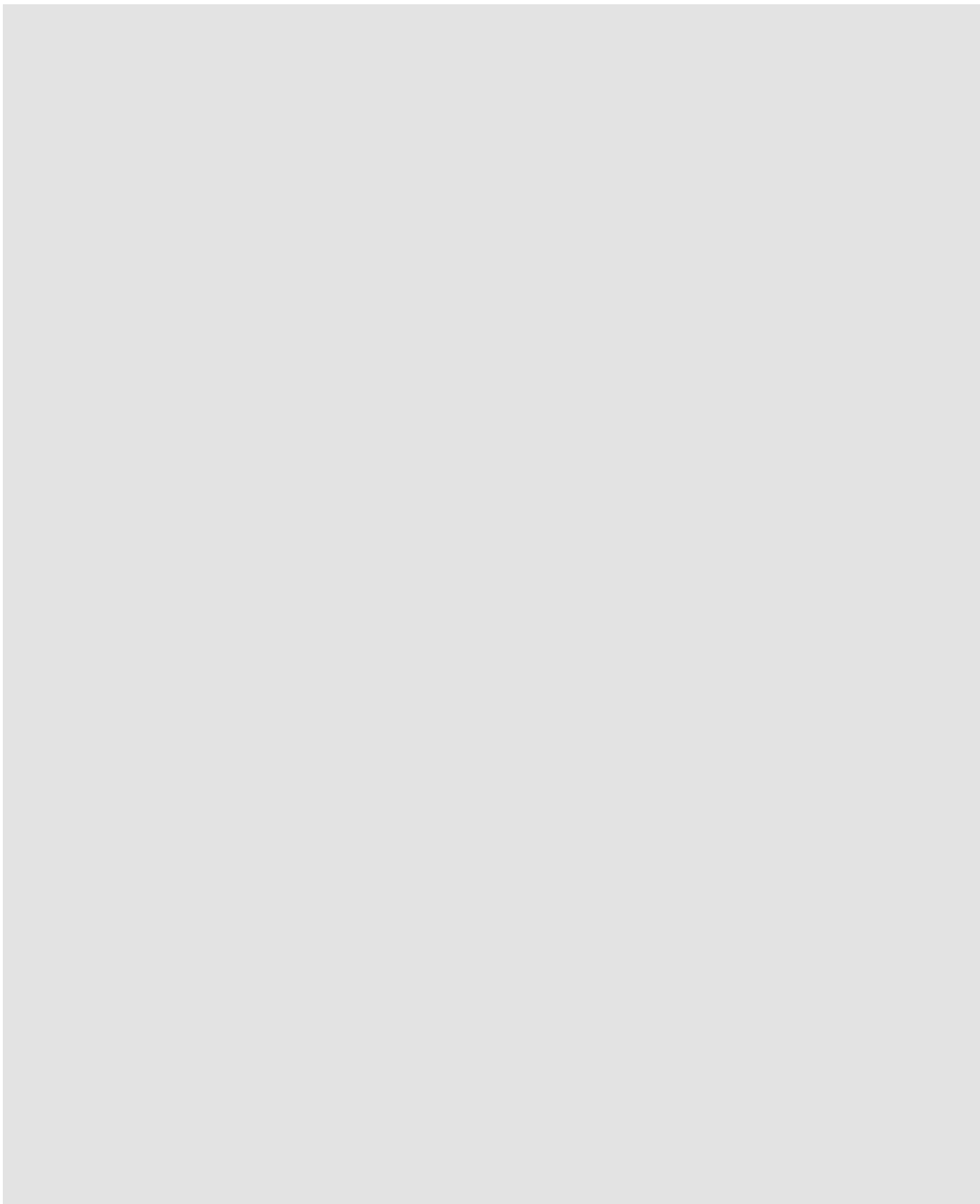
図 10-1～図 10-7 に試験前、1 回落下後、9 回落下後、20 回落下後、50 回落下後、75 回落下後、100 回落下後の各面の写真撮影結果を示す。1 回落下後は特に大きな変化は見られなかったが、9 回落下後にサンプル角に大きな曲がり確認できたが、燃料板の溶接箇所には異常は見られず密封性能に影響を与えるものではなかった。その後、落下を繰り返していくに連れて角の傷や角の曲がり等は多くなっていたが、100 回の落下試験後も燃料の大きな破損はなく、溶接箇所には異常は見られず密封性能に影響を与えるものではなかった。

なお、これまでの高濃縮ウラン燃料板の使用時に燃料板に変形が見つかった場合にはそれ以降は炉心で使用しないような措置を取ってきたので、低濃縮ウラン燃料の場合でも同様の対応を行う予定である。





☒ 1 0 – 1 Photos of sample before the test



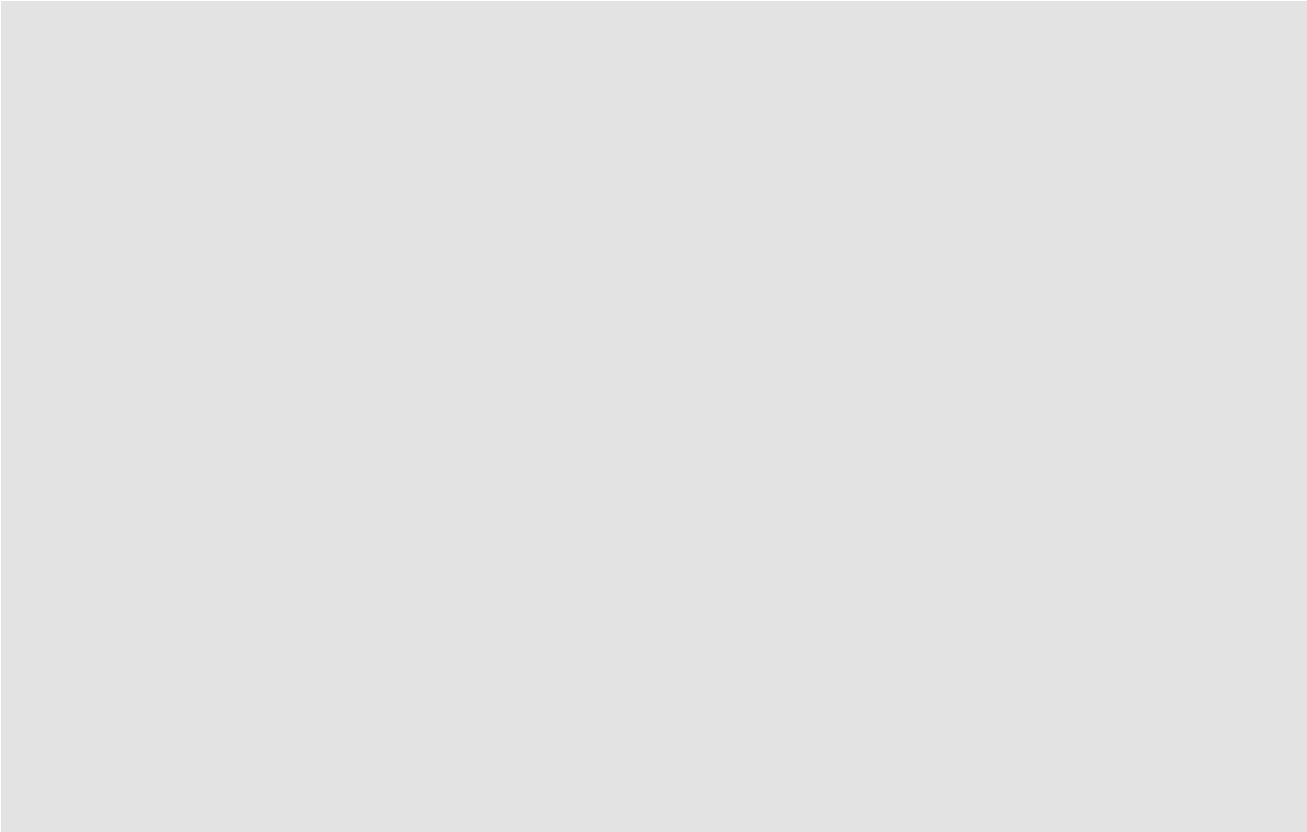
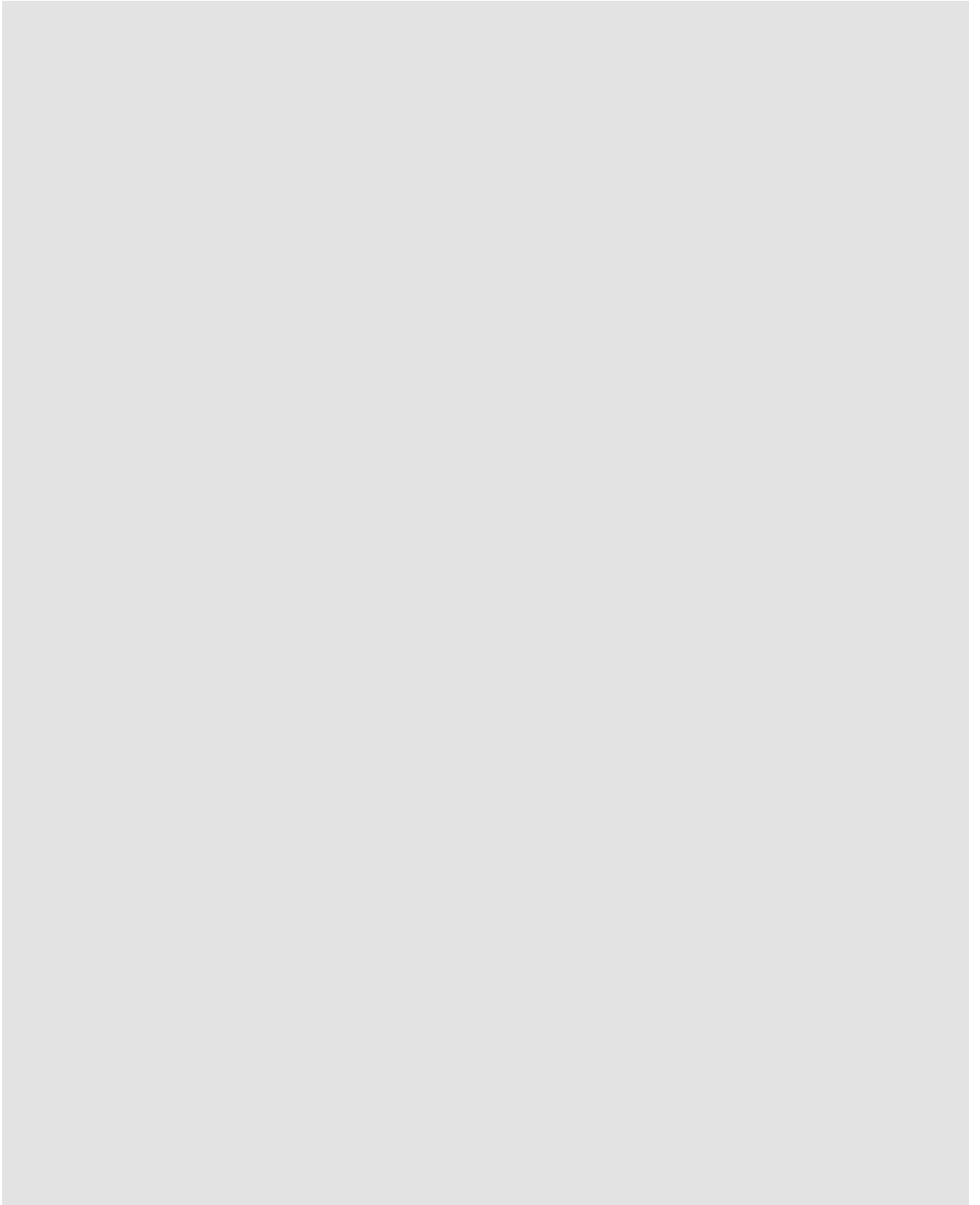
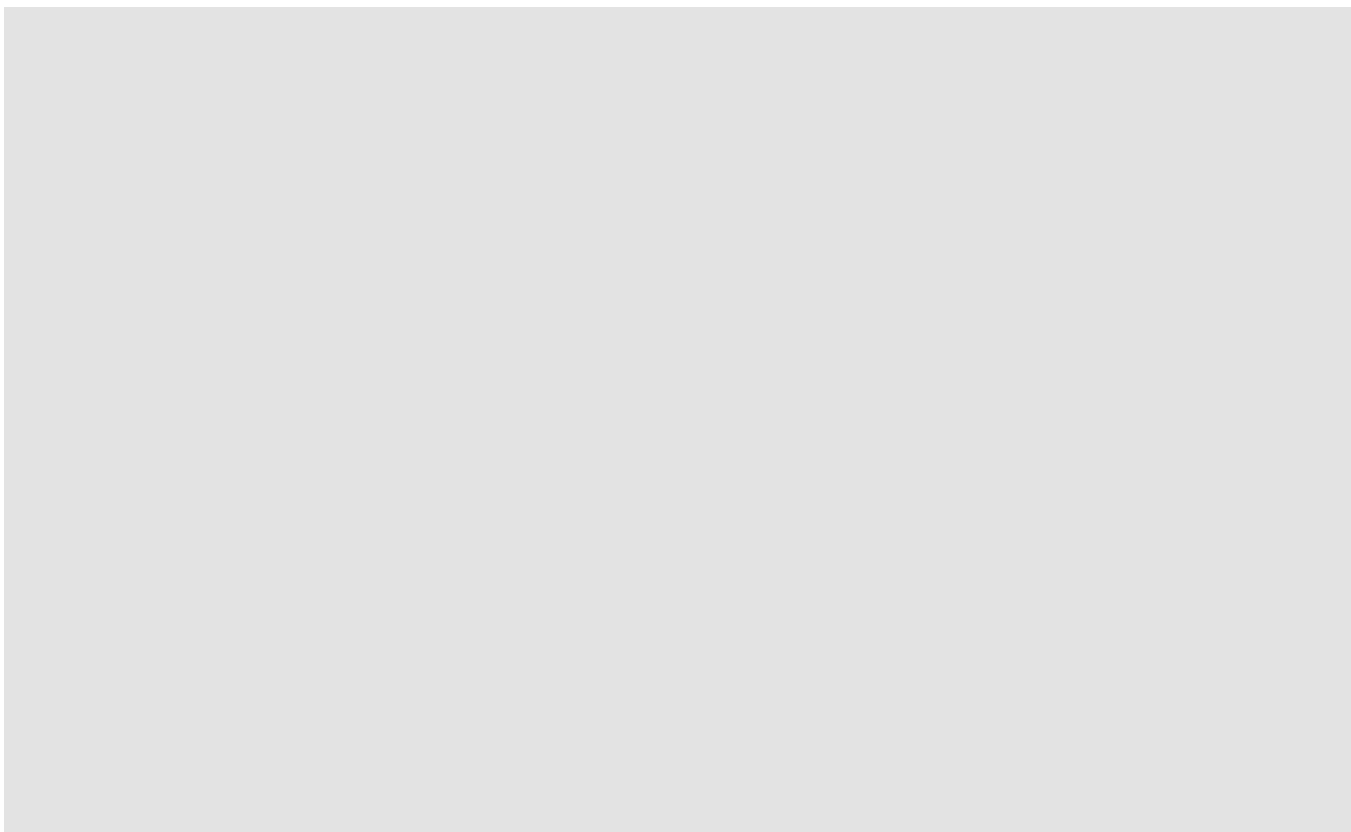
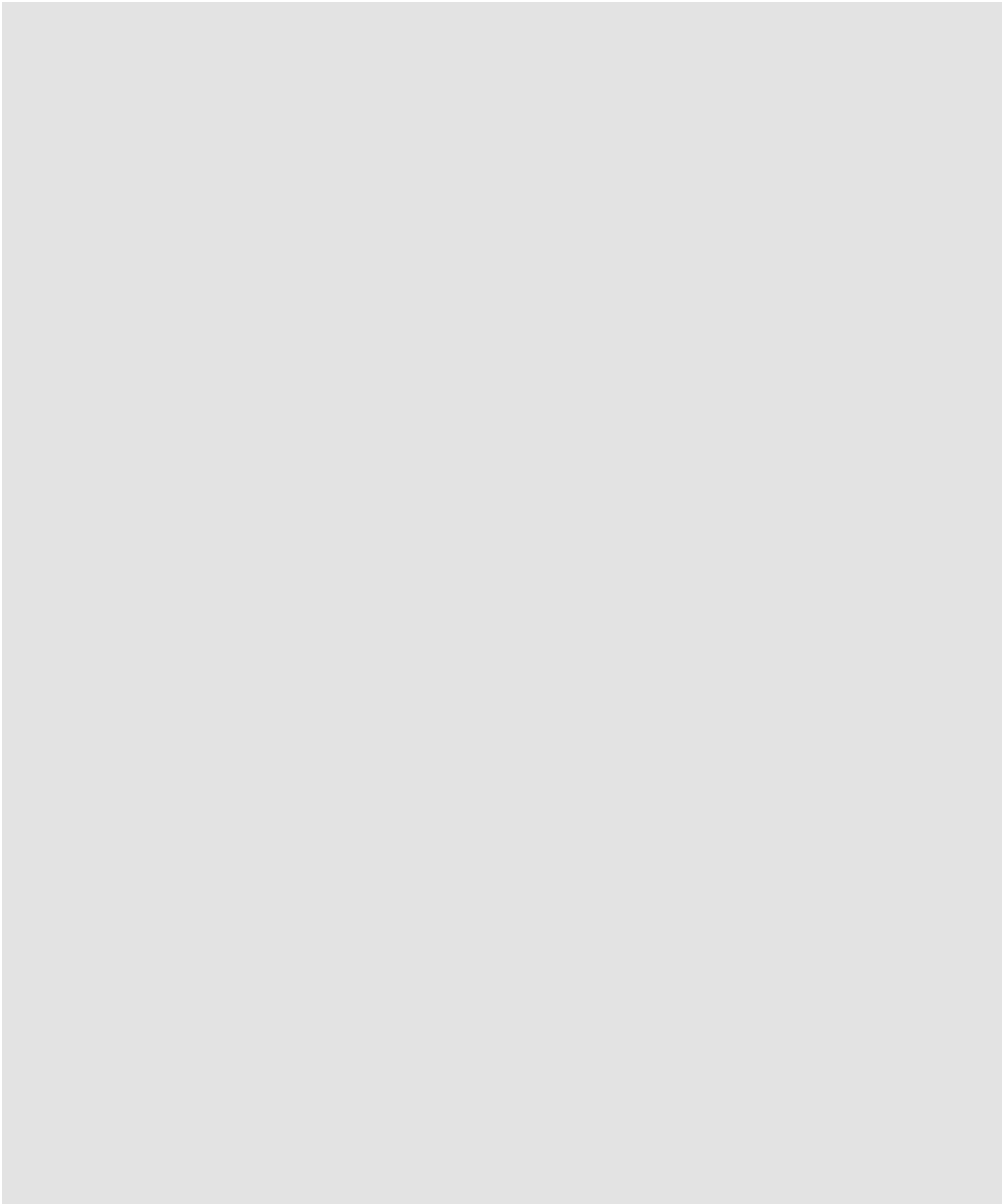


图 1 0—2 Photos of sample after 1st drop





☒ 10-3 Photos of sample after 9th drop



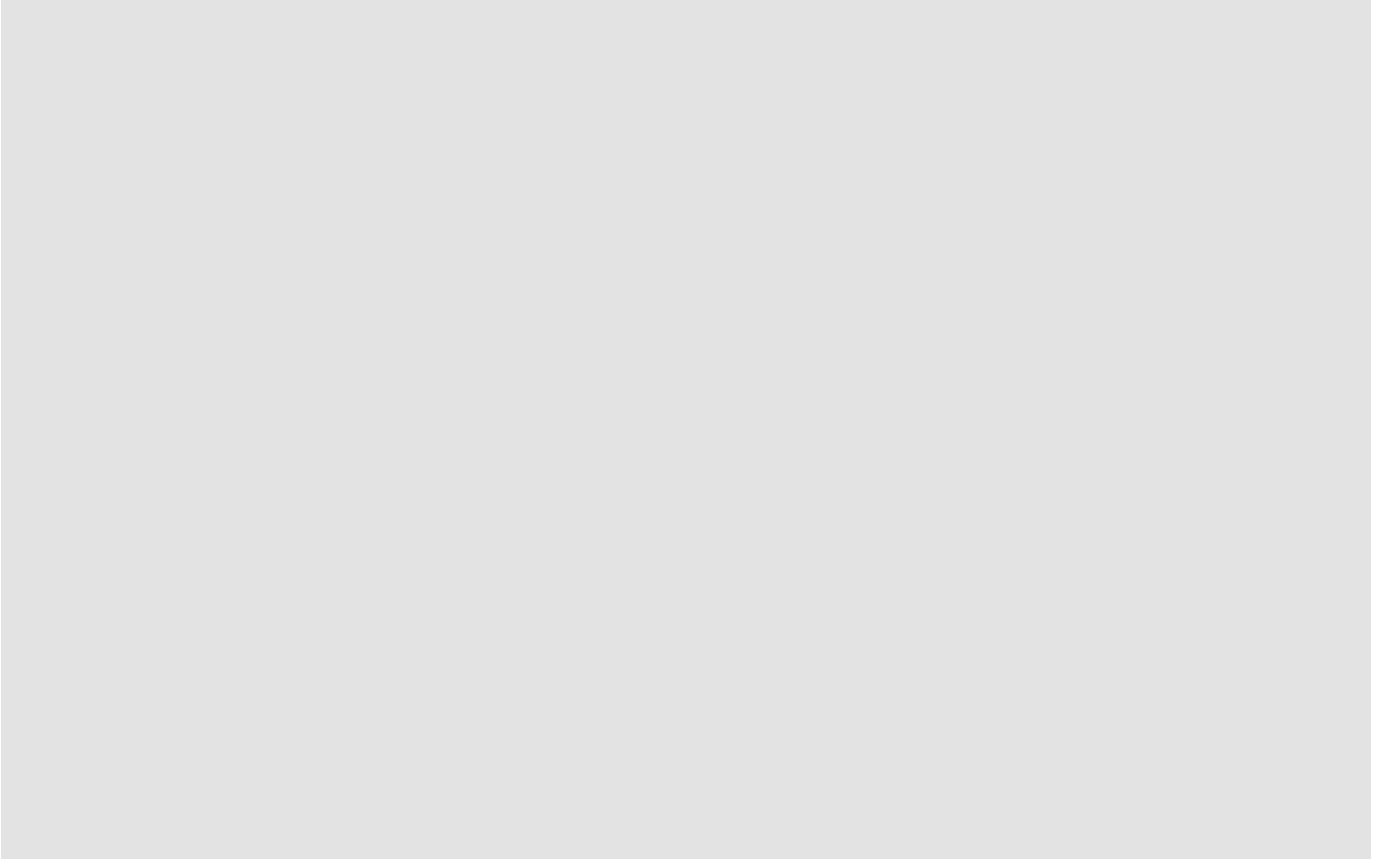
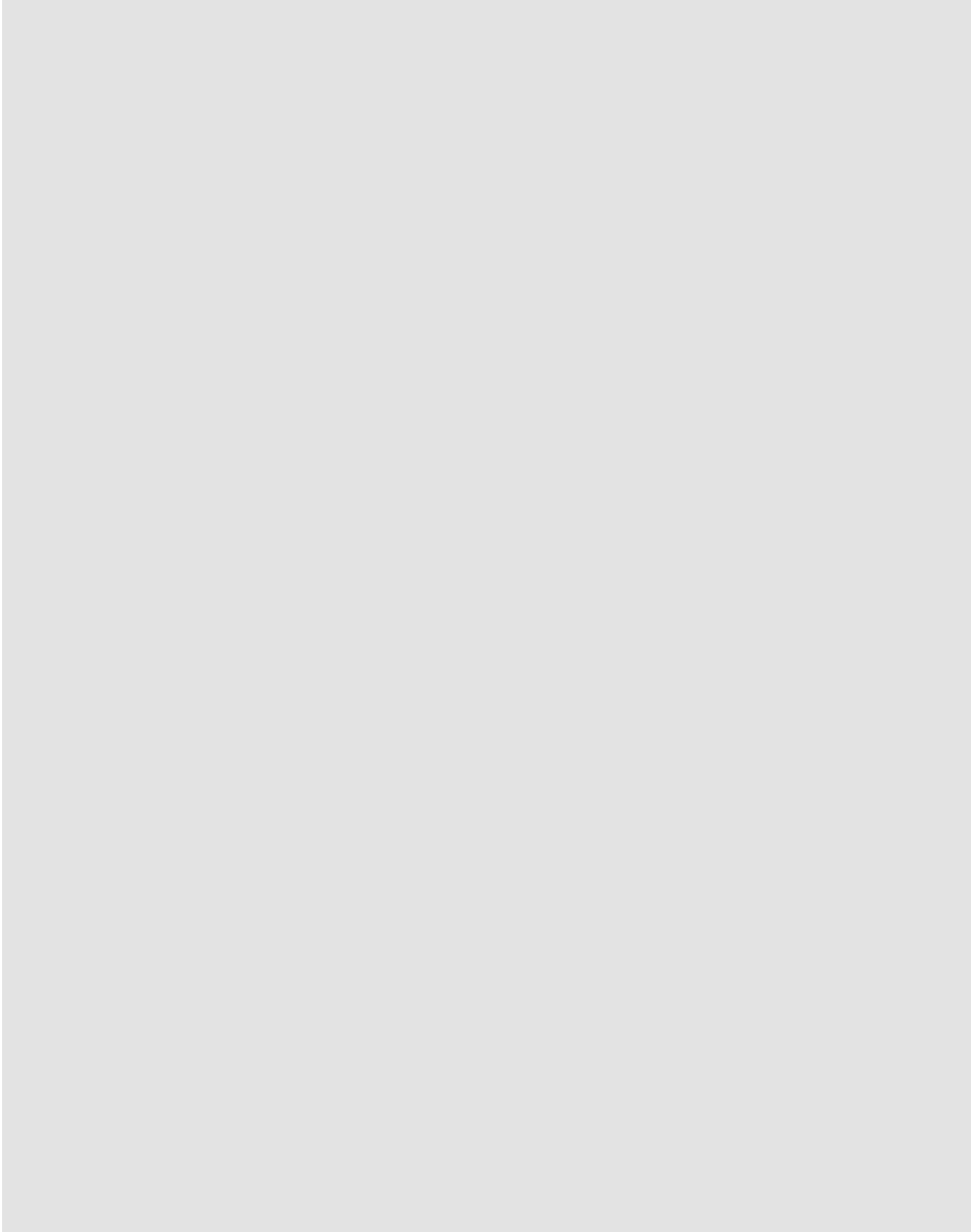


图 10-4 Photos of sample after 20th drop



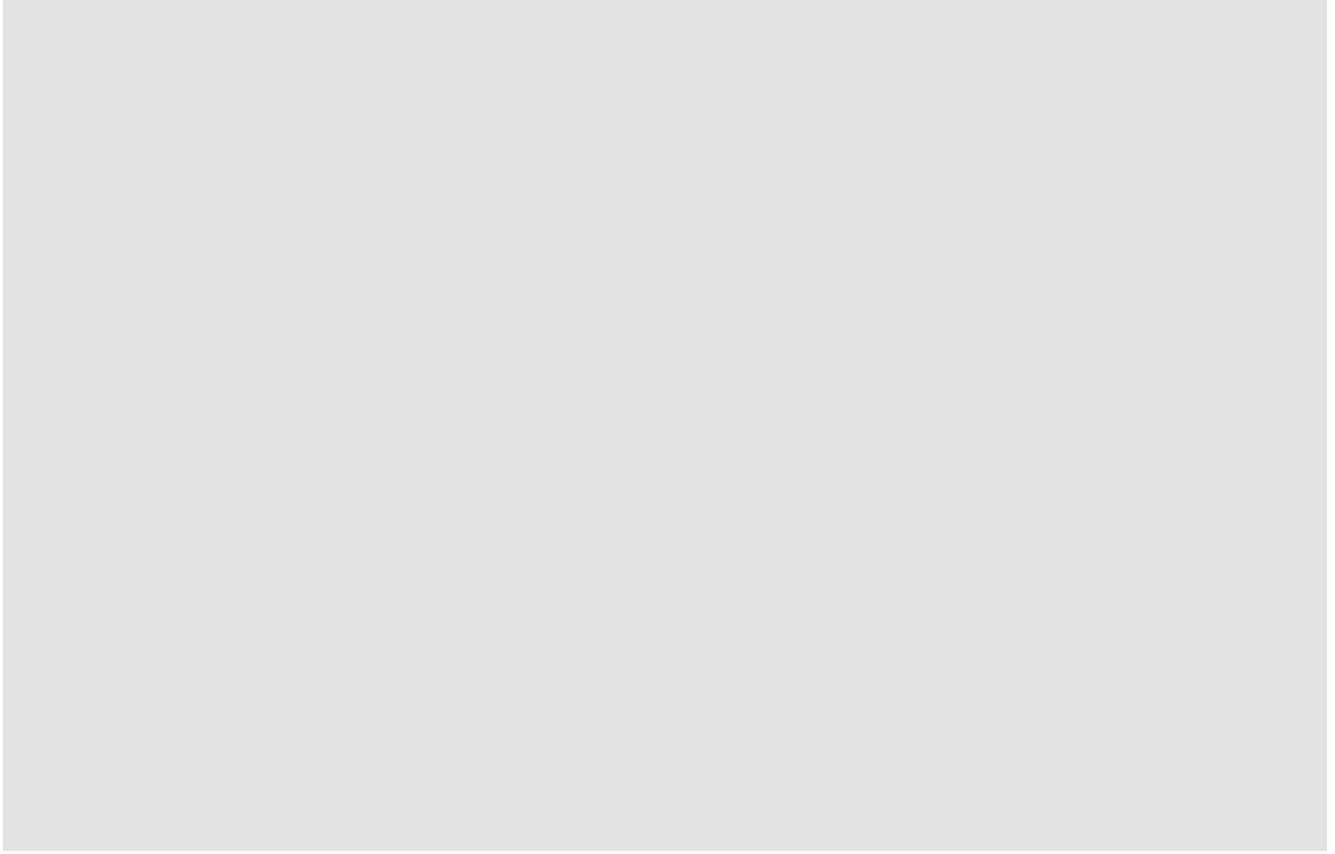
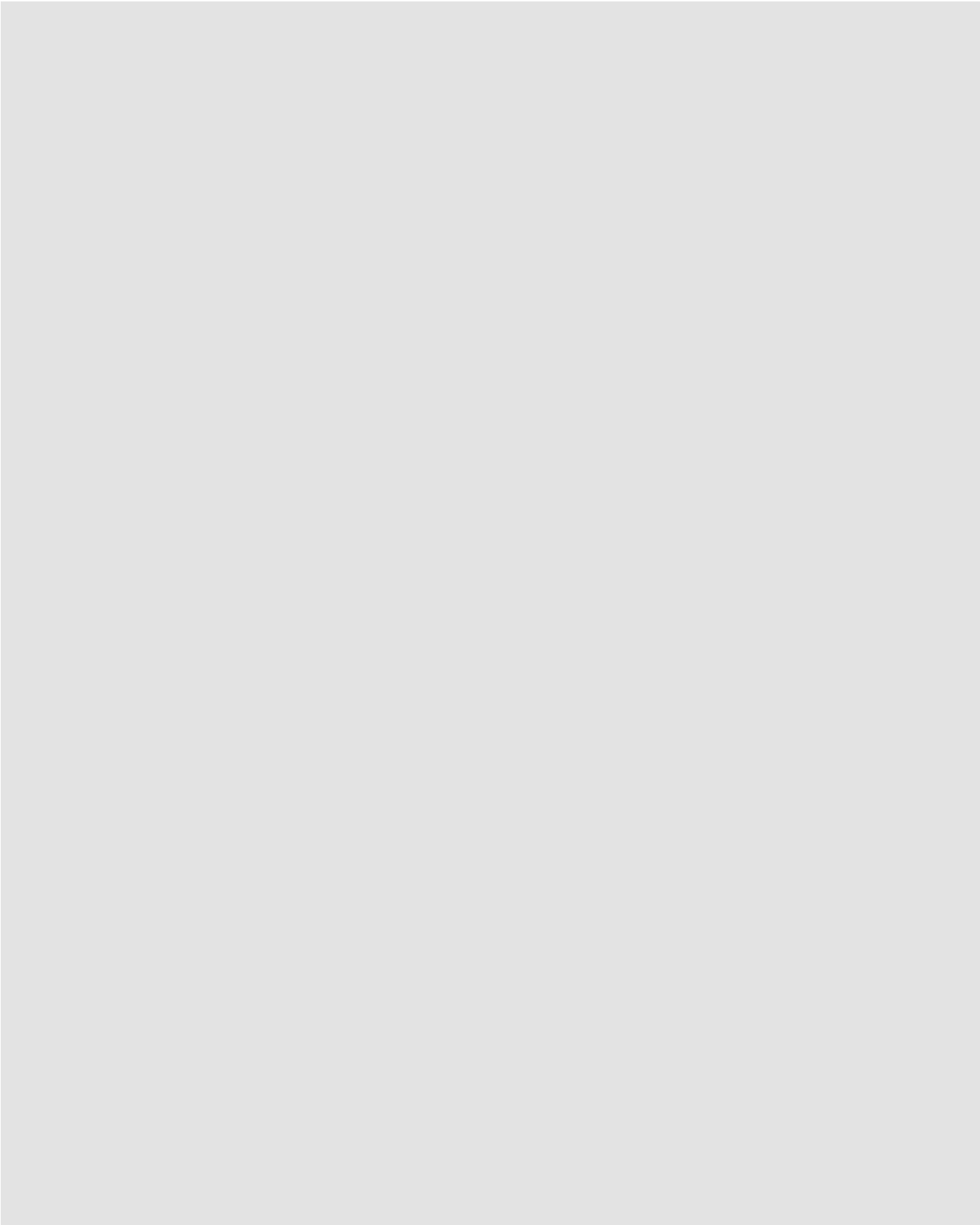
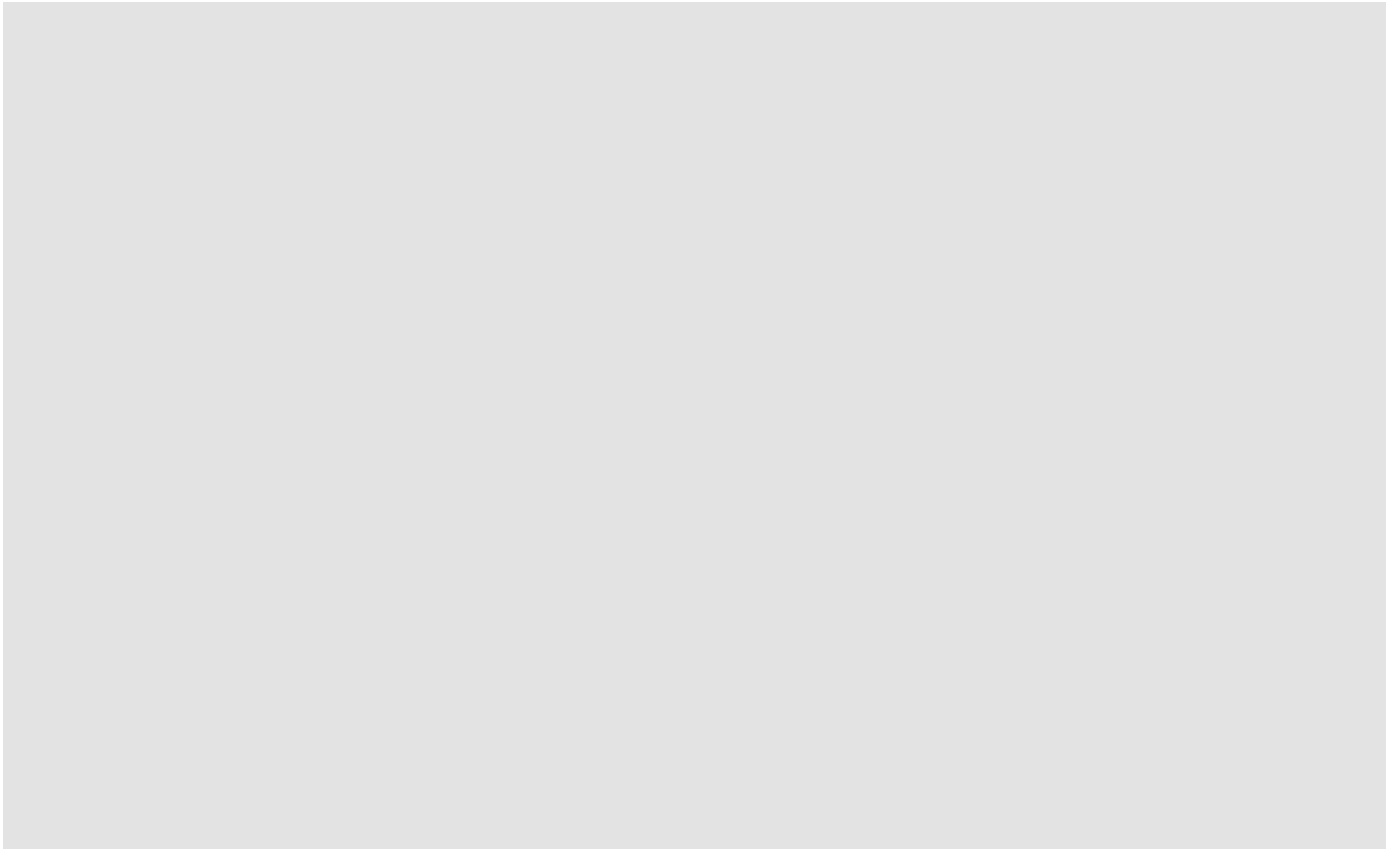
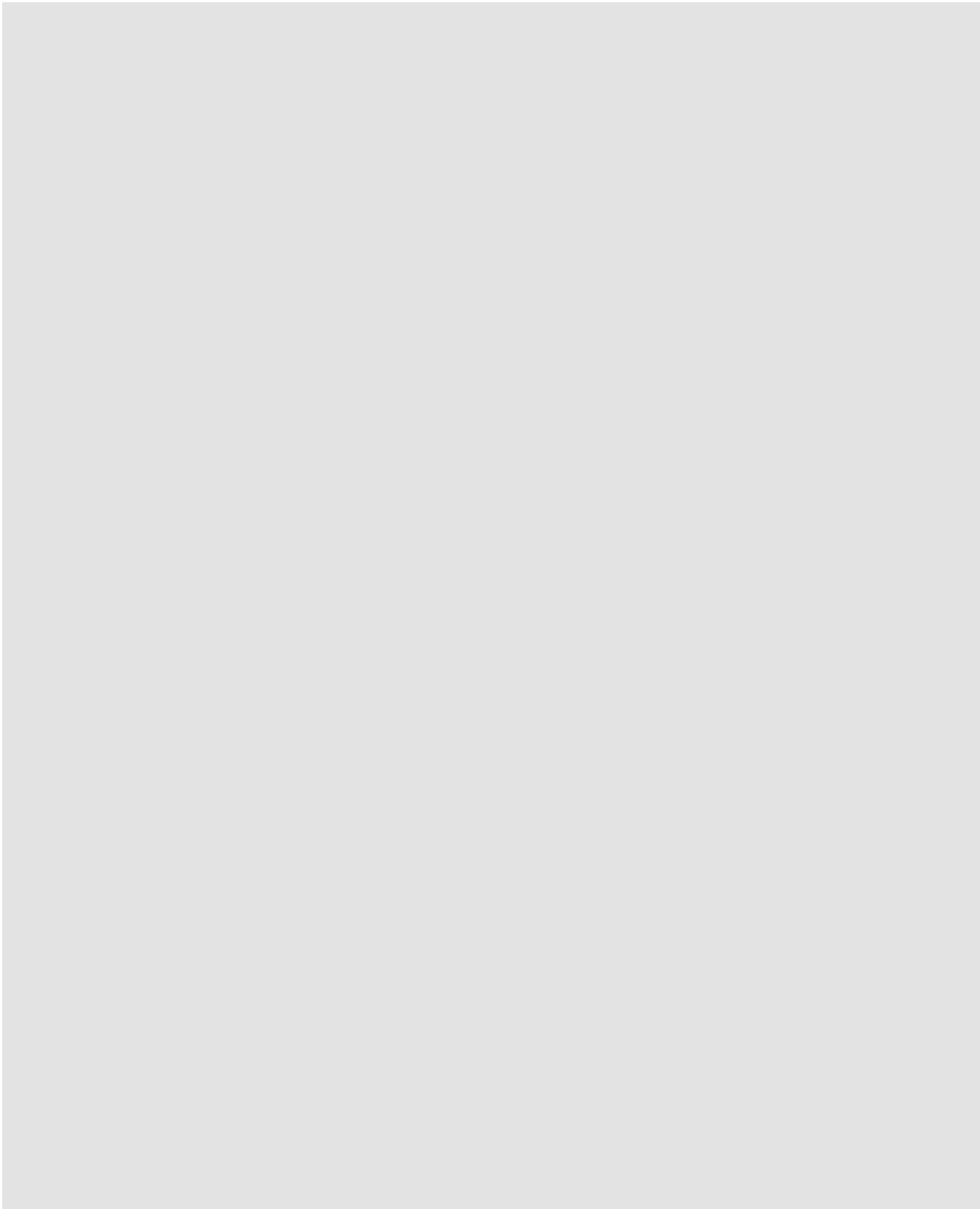


图 10—5 Photos of sample after 50th drop





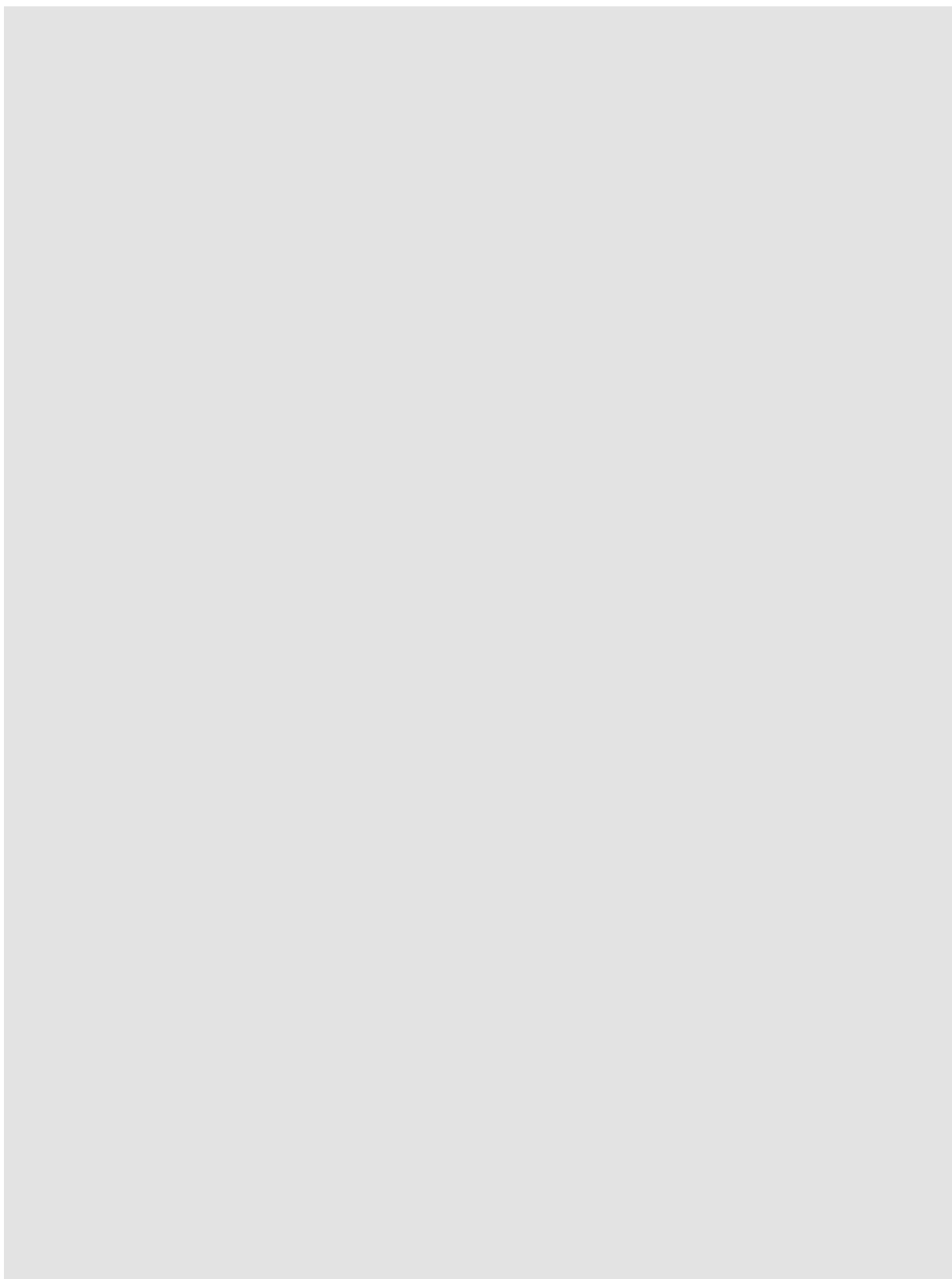
☒ 10—6 Photos of sample after 75th drop

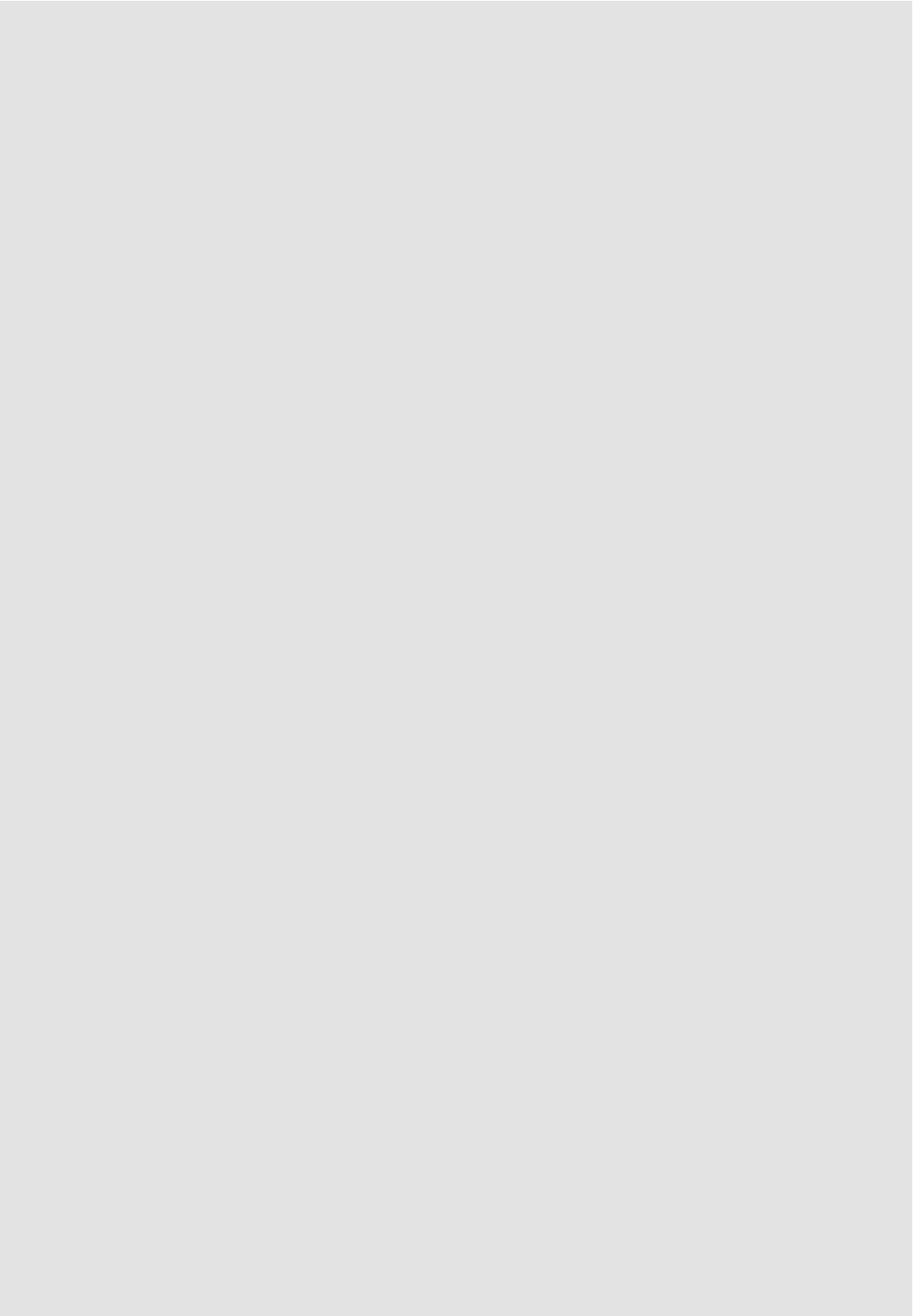


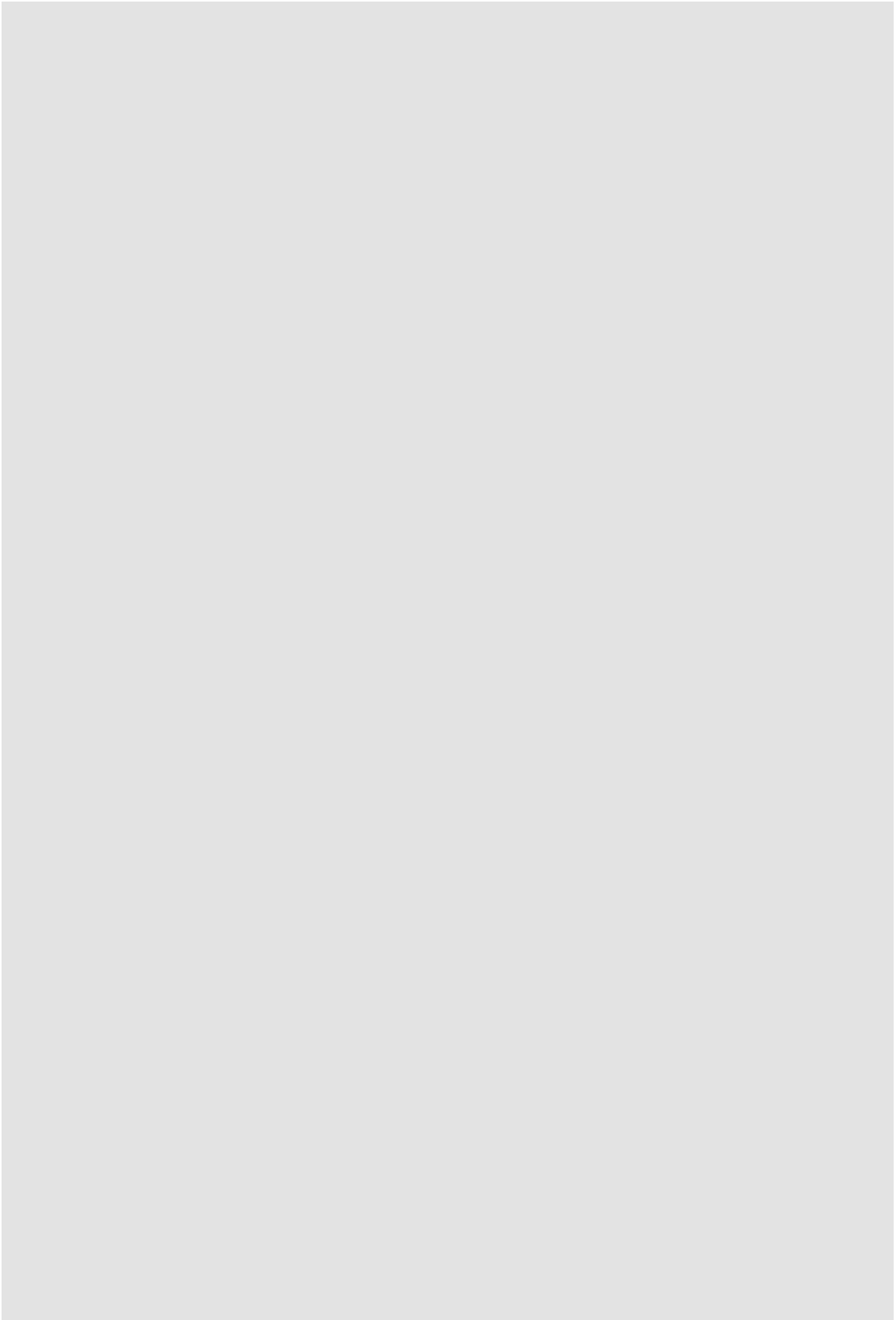


☒ 10-7 Photos of sample after 100th drop

1. 8. 燃料体の組み立て方法について







2. 軽水減速炉心の燃料

2. 1. ウランシリサイド分散型燃料

軽水減速炉心では KUR、JRR-3 などの研究用原子炉で使用されているものと同じウランシリサイド分散型燃料 (U_3Si_2-Al) を使用する。形状は現在 KUCA の軽水減速炉心で使用している燃料平板と同じで、 U_3Si_2-Al の燃料ミート部を KUR と同じ厚さ 0.5mm のアルミニウムで被覆した構造をしている(図 11)。燃料ミート部の U 密度は JRR-3 と同じ約 4.8 g/cm³ である。

ウランシリサイド分散型燃料はこれまでに世界各国の多くの研究用原子炉において使用実績があり、高い燃焼度まで使用することができることが示されている (KUR では最大燃焼度 35%)。

現在予定している U-Si 燃料の仕様を表 2 に示す。

表 2 U-Si 燃料に関する仕様

項目	
ウラン密度	
ウラン濃縮度	
²³⁵ U 量	
Si 量	
アルミニウム	
アルミニウム粒径	

2. 2. 照射特性

KUCA で使用する燃料のスウェリング量を求めるために、申請書に記載した数値から燃料の燃焼度に対応する F_d を求める。全核分裂数は 1.2. で示した結果と同じである。

最小臨界炉心 : (申請書 添付 8)

U 密度 : g/cm³

U 体積 : ÷ (U-235 濃縮度) ÷ (U 密度) = (cm³)

F_d = (全核分裂数) ÷ = fissions/cm³

スウェリングによる体積増加率 $dV/V(\%)$ は、次式によって計算される³⁾。

$$dV/V (\%) = (6.3 \times 10^{-21}) F_d - V_0$$

V_0 : 初期ボイド率 [%]

ボイド率 V_0 を 0 として、体積増加率を求めると次のようになる。

$$dV/V (\%) = \text{ } = \text{ } (\%)$$

スウェリング量は固体減速炉心の燃料より小さい値であり、照射に伴うスウェリング量は無視することができる。すなわち、核分裂で生成した FP は燃板の形状に影響を与えることなく内部に保持されるといえる。

2. 3. 燃料板の応力

燃料板は燃料フレームの溝に挿入して使用しており、他の箇所からの応力が係る可能性は無い。

燃料板の被覆材には、アルミニウム合金である AG3NE (JIS A5052 相当) を使用する。燃料板の中心温度が高く被覆材表面温度が低い場合には燃料板には熱応力が生じる可能性があるが、申請書の添付 10 に記載された運転時の異常な過渡変化の解析の結果によると燃料板の中心の温度上昇は最大でも 2°C 以下と非常に低い値であるため、燃料板に異常をもたらすような応力は発生しない。

2. 4. 燃料板の腐食

燃料板の被覆材には、耐食性の高いアルミニウム合金である AG3NE (JIS A5052 相当) を使用する。KUCA では A5052 の被覆材用いた燃料板を 1974 年の設置以来、約 45 年間使用しているが、これまでに燃料板の表面に腐食が認められたことは無いので、今回使用する燃料板についても腐食の恐れはほとんど無いと考えられる。

2. 5. 燃料板のブリスタ

ウランシリサイド燃料のブリスタ発生温度に関しては米国 ORR 炉 (30MW) において照射したフルサイズ燃料要素を照射後に昇温してブリスタ発生温度を確かめた結果があり、そのデータでは、ブリスタ発生温度は 550°C 以上であるとしている³⁾。また他にミニプレートによる他の実験結果をも参考にして、ブリスタ発生の下限温度を 515°C と評価している実験結果もある⁴⁾。そのためブリスタ発生を防止するため、運転時の異常な過渡変化が発生した場合においても燃料最高温度は 400°C を超えないこととしている。

申請書の添付 10 に記載された解析の結果によると燃料板の中心の温度上昇は最大でも 0.3°C 以下と非常に低い値であるため、ブリスタが発生する恐れはない。

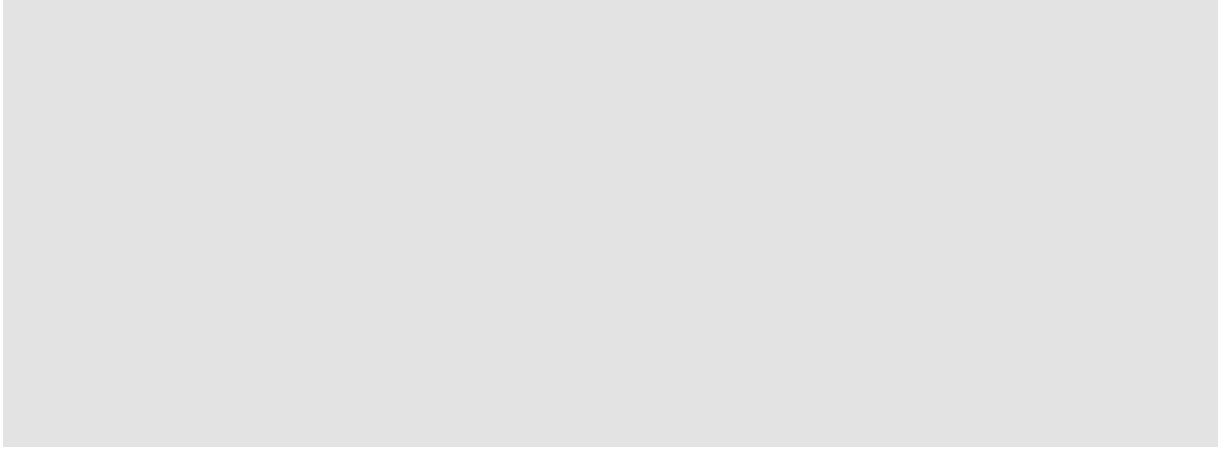


図 11 軽水減速炉心の燃料平板

参考文献

- 1) “U-Mo Fuels Handbook”, ANL-09/31, Argonne National Laboratory (2006).
- 2) D.W. White, A.P. Beard, A.H. Willis, Irradiation behavior of Dispersion fuels, USAEC Report KAPL-P-1849, Knolls Atomic Power Laboratory, 1957.
- 3) U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Safety Evaluation Report related to the Evaluation of Low-Enriched Uranium Silicide-Aluminum Dispersion Fuel for Use in Non-Power Reactors, NYREG-1313 (1988).
- 4) G. H. Hansen et al., "ATR-ETR Rates of Oxide Film Formation on Alminum Fuel Plates," ANS Transaction, Vol.18, p.127 (1974).

(以上)

京都大学臨界実験装置 (KUCA)

設置変更承認申請について

【運転時の異常な過渡変化】

実験物の異常等による反応度の付加

京都大学複合原子力科学研究所

2-3 実験物の異常等による反応度の付加

原子炉の出力運転中に、炉心に直接挿入又は燃料集合体に取り付けて炉心内挿入する実験物の位置が変化した場合、または挿入管が破損して内部に水が流入することにより炉心に反応度が印加され原子炉出力が急上昇するため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。以下の解析においては挿入管が破損して正の反応度が加わることを含めて「試料の落下」と記載して説明する。

2-3-1 解析シナリオ

(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「第 381 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」（2020 年 11 月 5 日）の説明資料 2-1 で選定したすべての代表炉心を対象とする。

(2) 反応度等

実験物を取り付けられた状態での各炉心の過剰反応度

固体減速炉心、軽水減速炉心ともに $0\% \Delta k/k$

(過剰反応度と試料の落下により加わる反応度を足し合わせたものを過剰反応度の核的制限値以下であるとするので、過剰反応度がゼロの炉心ほど試料の反応度を大きくすることができるので、印加される反応度をできるだけ大きくするためにこのような条件を設定した)

実験物の反応度(取り付けることにより反応度が加わる試料)

固体減速炉心は絶対値で $0.35\% \Delta k/k$

軽水減速炉心は絶対値で $0.5\% \Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値

($1 + \text{過剰反応度} + \text{実験物の反応度}$)

固体減速炉心は $1.35\% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $1.5\% \Delta k/k$

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

線型出力計は指示値が 100% で 100W となるレンジ

制御棒はすべて引き抜いて出力 0.01W の臨界状態

(4) スクラム信号発生

【ケース A】

- ・炉心に取り付けていた実験物が炉心から落下し、固体減速炉心では $+0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心では $+0.5\% \Delta k/k$ の反応度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し、1秒後に制御棒が落下する。
- ・最大反応度効果を持つ制御棒1本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので、「実験物落下による反応度－(全制御棒反応度－最大1本の反応度)」の未臨界度となる。すなわち、固体減速炉心では「 $+0.35-0.9=-0.55\% \Delta k/k$ 」の未臨界度、軽水減速炉心では「 $+0.5-1.0=-0.5\% \Delta k/k$ 」の未臨界度となる。
- ・出力が0.1Wになるまで解析する。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は作動しないとする。

【ケース B】

- ・炉心に取り付けていた実験物が炉心からゆっくり落下するような場合、または軽水減速炉心で炉心近傍の挿入管にゆっくり水が入り込むような場合を想定する。固体減速炉心では最大 $+0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心では最大 $+0.5\% \Delta k/k$ の反応度が1時間（3600秒）かけて加わるとする。
- ・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し、1秒後に制御棒が落下する。
- ・最大反応度効果を持つ制御棒1本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので、「実験物落下による反応度－(全制御棒反応度－最大1本の反応度)」の未臨界度となる。
- ・出力が0.1Wになるまで解析する。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は作動しないとする。

2-3-2 解析結果

ケース A

ケースAについて固体減速炉心の結果を表2-3-1に示す。最も燃料温度が高くなったのがL5.5P-30炉心で燃料温度上昇は約0.44℃であり判定基準値を満たしている（出力変化を図2-3-1に示す）。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）、即発中性子減衰定数の誤差（8%）、温度係数の誤差（32%）を考慮したときの結果を表2-3-2に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は6%高くなる。 β_{eff} と ℓ が各々8%の誤差を持った場合の結果より、 ℓ の誤差が結果に

ほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 18%上昇する。温度係数の誤差も結果に影響しない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.25 倍 (1.06×1.18) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.44^{\circ}\text{C} \times 1.25 = 0.55^{\circ}\text{C})$

ケースAについて軽水減速炉心の結果を表 2-3-3 に示す。最も燃料温度が高くなったのが C45G(2H₂O) 4 列炉心で燃料温度上昇は約 0.14°Cであり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-3-2 に示す）。

この炉心の燃料重量の誤差、即発中性子減衰定数、温度係数の誤差を考慮したときの結果を表 2-3-4 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6%高くなる。 β_{eff} と ρ が各々 8%の誤差を持った場合の結果より、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 19%上昇する。温度係数の誤差も結果に影響しない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.26 倍 (1.06×1.19) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.07^{\circ}\text{C} \times 1.26 = 0.09^{\circ}\text{C})$

ケース B

ケース B について固体減速炉心の結果を表 2-3-5 に示す。最も燃料温度が高くなったのが L5.5P-30 炉心で燃料温度上昇は約 2.5°Cであり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-3-3 に示す）。

この炉心の燃料重量の誤差、即発中性子減衰定数、温度係数の誤差を考慮したときの結果を表 2-3-6 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 7%高くなる。 β_{eff} と ρ が各々 8%の誤差を持った場合の結果より、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 5%上昇する。温度係数の誤差により燃料温度が約 2%上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.15 倍 ($1.07 \times 1.05 \times 1.02$) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(2.6^{\circ}\text{C} \times 1.15 = 2.9^{\circ}\text{C})$

ケース B について軽水減速炉心の結果を表 2-3-7 に示す。最も燃料温度が高くなったのが C45G(2H₂O) 4 列炉心で燃料温度上昇は約 0.41°Cであり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-3-4 に示す）。

この炉心の燃料重量の誤差、即発中性子減衰定数、温度係数の誤差を考慮したときの結果を表 2-3-8 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6%高くなる。 β_{eff} と ρ が各々 8%の誤差を持った場合の結果より、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 6%上昇する。温度係数の誤差も結果に影響

しない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.12 倍 (1.06×1.06) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.54^{\circ}\text{C} \times 1.12 = 0.60^{\circ}\text{C})$

表 2-3-1 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心）

【ケース A（ステップ状反応度印加）】

炉心名称 a、	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	58.0	138.8	297.3	1.55×10^3	1.72×10^{-1}	3.93×10^{-1}
L5.5P-40	58.0	138.8	297.3	1.55×10^3	1.87×10^{-1}	4.30×10^{-1}
L5.5P-30	58.0	138.8	297.3	1.55×10^3	1.92×10^{-1}	4.40×10^{-1} c)
L4P-50	59.7	138.3	301.9	1.59×10^3	1.56×10^{-1}	3.47×10^{-1}
L4P-40	60.6	138.0	304.0	1.60×10^3	1.89×10^{-1}	4.14×10^{-1}
L4P-30	60.6	138.0	304.0	1.60×10^3	2.00×10^{-1}	4.36×10^{-1}
L3P-50	61.5	137.7	306.5	1.63×10^3	1.49×10^{-1}	3.16×10^{-1}
L3P-40	61.7	137.7	307.0	1.63×10^3	1.65×10^{-1}	3.54×10^{-1}
L3P-30	62.0	137.6	307.6	1.63×10^3	1.81×10^{-1}	3.78×10^{-1}
L2P-50	62.4	137.5	309.0	1.65×10^3	1.11×10^{-1}	2.85×10^{-1}
L2P-40	63.0	137.3	310.6	1.66×10^3	1.32×10^{-1}	2.92×10^{-1}
L2P-30	62.6	137.4	309.5	1.65×10^3	1.38×10^{-1}	3.21×10^{-1}
L1P-50	62.0	137.6	308.4	1.64×10^3	6.40×10^{-2}	2.07×10^{-1}
L1P-40	63.0	137.3	311.0	1.66×10^3	6.82×10^{-2}	1.72×10^{-1}
L1P-30	62.8	137.3	310.4	1.66×10^3	7.16×10^{-2}	2.19×10^{-1}
LL1P-50	61.5	137.7	307.2	1.63×10^3	2.69×10^{-2}	1.01×10^{-1}
LL1P-40	62.1	137.5	308.8	1.64×10^3	2.43×10^{-2}	8.84×10^{-2}
LL1P-30	61.9	137.6	308.3	1.64×10^3	2.81×10^{-2}	1.11×10^{-1}

- a) 燃料板のみの温度上昇を考慮
- b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける
- c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-3-2 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心 L5.5P-30 炉心）

（ケース A） 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	58.0	138.8	297.3	1.55E+03	1.92E-01	4.04E-01	—
U 重量 6%減少	58.0	138.8	297.3	1.55E+03	2.03E-01	4.28E-01	1.06
β_{eff} 8%減少	46.0	144.0	265.9	1.28E+03	1.59E-01	3.65E-01	0.83
β_{eff} 8%増加	70.6	135.4	328.6	1.82E+03	2.27E-01	5.19E-01	1.18
ℓ 8%減少	57.9	138.9	297.2	1.54E+03	1.92E-01	4.39E-01	1.00
ℓ 8%増加	57.9	138.9	297.3	1.55E+03	1.92E-01	4.39E-01	1.00
温度係数 32%減少	57.8	138.9	297.2	1.54E+03	1.92E-01	4.39E-01	1.00
温度係数 32%増加	58.0	138.8	297.3	1.55E+03	1.92E-01	4.40E-01	1.00

a),b)は表 2-3-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-3-1 の結果と同じ

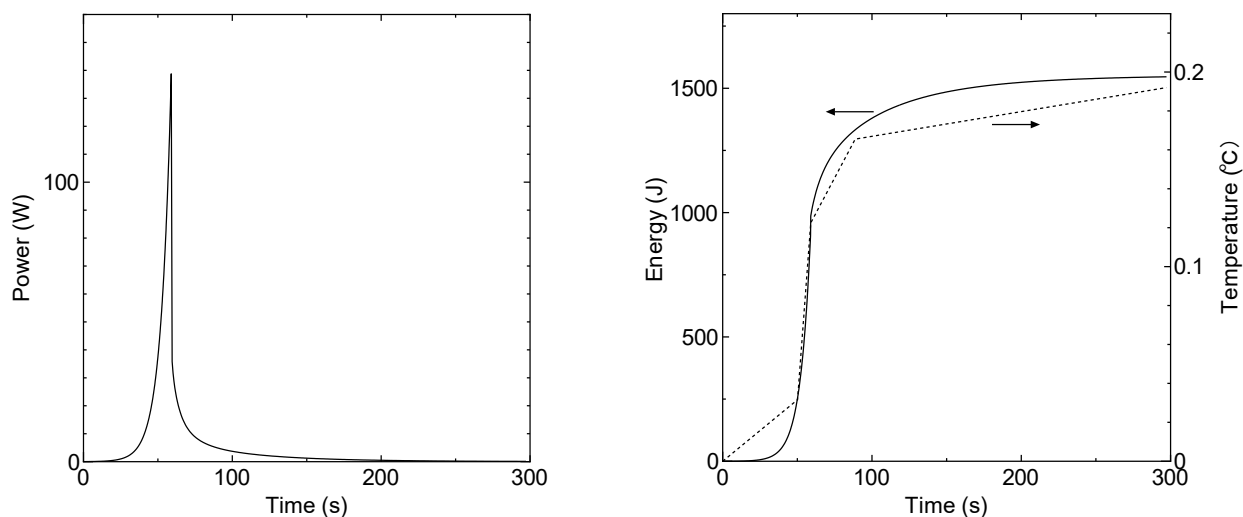


図 2-3-1 L5.5P-30 炉心

実験物の異常等による反応度の付加（ケース A ステップ状反応度添加）

出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

表 2-3-3 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心）

【ケース A（ステップ状反応度印加）】

炉心名称	列	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
C30G0	4	19.9	180.0	239.1	8.80×10^2	1.28×10^{-2}	3.26×10^{-2}
	5	19.9	180.0	239.1	8.80×10^2	1.32×10^{-2}	3.15×10^{-2}
C35G0	4	20.1	179.3	240.0	8.86×10^2	1.80×10^{-2}	4.08×10^{-2}
	5	20.0	179.6	239.6	8.83×10^2	1.78×10^{-2}	4.10×10^{-2}
C45G0	4	19.8	180.2	238.8	8.79×10^2	2.55×10^{-2}	5.08×10^{-2}
	5	19.8	180.2	238.8	8.79×10^2	2.49×10^{-2}	5.26×10^{-2}
C60G0	4	19.3	182.3	236.4	8.64×10^2	2.39×10^{-2}	4.34×10^{-2}
	5	19.3	182.3	236.4	8.64×10^2	2.35×10^{-2}	4.44×10^{-2}
C45G (2H ₂ O)	4	19.4	182.0	236.8	8.67×10^2	2.62×10^{-2}	6.87×10^{-2} ^{c)}
C45G (5H ₂ O)		18.3	186.3	232.4	8.40×10^2	1.96×10^{-2}	6.51×10^{-2}
C45G (6H ₂ O)		18.3	186.3	232.4	8.40×10^2	1.77×10^{-2}	5.84×10^{-2}
C45G (7H ₂ O)		18.4	185.9	232.8	8.42×10^2	1.63×10^{-2}	5.16×10^{-2}
C45G (10H ₂ O)		18.9	183.5	235.2	8.57×10^2	1.41×10^{-2}	3.74×10^{-2}
C45G (15H ₂ O)		19.5	181.3	237.6	8.71×10^2	1.31×10^{-2}	2.79×10^{-2}
C45G (2H ₂ O)	5	19.3	182.3	236.4	8.64×10^2	2.60×10^{-2}	6.70×10^{-2}
C45G (5H ₂ O)		17.9	188.0	230.8	8.31×10^2	1.99×10^{-2}	6.63×10^{-2}
C45G (6H ₂ O)		17.8	188.4	230.4	8.28×10^2	1.79×10^{-2}	6.03×10^{-2}
C45G (7H ₂ O)		17.9	188.0	230.8	8.30×10^2	1.63×10^{-2}	5.41×10^{-2}
C45G (10H ₂ O)		18.6	185.1	233.6	8.47×10^2	1.39×10^{-2}	4.04×10^{-2}
C45G (15H ₂ O)		19.3	182.0	236.8	8.66×10^2	1.28×10^{-2}	3.05×10^{-2}
C60G (2H ₂ O)	4	18.7	184.6	234.0	8.50×10^2	2.29×10^{-2}	5.97×10^{-2}
C60G (5H ₂ O)		17.8	188.3	230.4	8.29×10^2	1.71×10^{-2}	5.26×10^{-2}
C60G (7H ₂ O)		18.0	187.5	231.2	8.33×10^2	1.46×10^{-2}	4.12×10^{-2}
C60G (10H ₂ O)		18.6	185.0	233.6	8.47×10^2	1.30×10^{-2}	3.01×10^{-2}
C60G (15H ₂ O)		19.1	183.0	235.6	8.60×10^2	1.22×10^{-2}	2.28×10^{-2}

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-3-4 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心 C45G(2H₂O) 4 列炉心）
 (ケース A) 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	19.4	182.0	236.8	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	—
U 重量 6%減少	19.4	182.0	236.8	8.67E+02	2.78E-02	7.28E-02	1.06
β _{eff} 8%減少	13.5	215.4	212.6	7.29E+02	2.20E-02	5.78E-02	0.84
β _{eff} 8%増加	25.8	164.7	262.5	1.03E+03	3.12E-02	8.19E-02	1.19
ℓ 8%減少	19.3	182.1	236.7	8.66E+02	2.61E-02	6.86E-02	1.00
ℓ 8%増加	19.4	181.9	236.9	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	1.00
温度係数 32% 減少	19.3	182.0	236.8	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	1.00
温度係数 32% 増加	19.4	182.0	236.8	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	1.00

- a),b)は表 2-3-3 と同じ
- c) 基準の結果に対する比
- d) 表 2-3-3 の結果と同じ

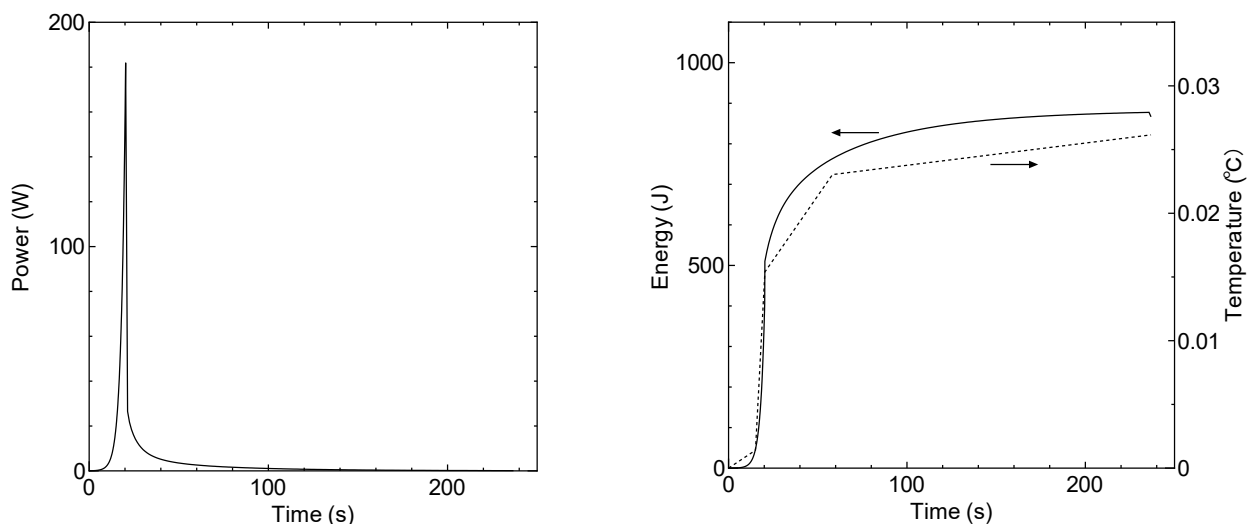


図 2-3-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心

実験物の異常等による反応度の付加（ケース A ステップ状反応度添加）
 出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

表 2-3-5 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心）

【ケース B（ランプ状反応度印加）】

炉心名称 a、	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	1173.7	121.9	1458.5	8.81×10^3	9.77×10^{-1}	2.24×10^0
L5.5P-40	1175.0	121.9	1459.7	8.82×10^3	1.07×10^0	2.45×10^0
L5.5P-30	1174.6	121.9	1459.3	8.80×10^3	1.09×10^0	2.50×10^0 c)
L4P-50	1180.7	122.0	1466.9	8.78×10^3	8.61×10^{-1}	1.92×10^0
L4P-40	1184.7	121.9	1471.8	8.84×10^3	1.04×10^0	2.28×10^0
L4P-30	1184.9	121.9	1472.0	8.85×10^3	1.10×10^0	2.41×10^0
L3P-50	1187.2	122.0	1475.1	8.80×10^3	8.05×10^{-1}	1.71×10^0
L3P-40	1187.8	122.0	1475.8	8.79×10^3	8.88×10^{-1}	1.91×10^0
L3P-30	1188.7	122.0	1477.0	8.80×10^3	9.77×10^{-1}	2.03×10^0
L2P-50	1187.4	122.1	1475.7	8.66×10^3	5.86×10^{-1}	1.50×10^0
L2P-40	1190.6	122.0	1479.6	8.71×10^3	6.91×10^{-1}	1.53×10^0
L2P-30	1188.8	122.0	1477.4	8.69×10^3	7.28×10^{-1}	1.69×10^0
L1P-50	1183.6	122.1	1471.3	8.53×10^3	3.33×10^{-1}	1.08×10^0
L1P-40	1187.9	122.1	1476.6	8.56×10^3	3.51×10^{-1}	8.84×10^{-1}
L1P-30	1187.0	122.1	1475.5	8.55×10^3	3.69×10^{-1}	1.13×10^0
LL1P-50	1180.2	122.2	1467.3	8.45×10^3	1.39×10^{-1}	5.27×10^{-1}
LL1P-40	1182.7	122.1	1470.4	8.47×10^3	1.25×10^{-1}	4.56×10^{-1}
LL1P-30	1181.8	122.1	1469.3	8.46×10^3	1.45×10^{-1}	5.76×10^{-1}

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-3-6 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心 L5.5P-30 炉心）

（ケース B） 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	1174.6	121.9	1459.3	8.80E+03	1.09E+00	2.50E+00	—
U 重量 6%減少	1175.5	121.9	1460.4	8.84E+03	1.16E+00	2.66E+00	1.07
β_{eff} 8%減少	1120.1	122.0	1392.5	8.33E+03	1.03E+00	2.37E+00	0.95
β_{eff} 8%増加	1227.2	121.9	1523.8	9.26E+03	1.15E+00	2.63E+00	1.05
ℓ 8%減少	1174.6	121.9	1459.3	8.80E+03	1.09E+00	2.50E+00	1.00
ℓ 8%増加	1174.7	121.9	1459.4	8.80E+03	1.09E+00	2.50E+00	1.00
温度係数 32%減少	1170.6	122.0	1454.7	8.62E+03	1.07E+00	2.45E+00	0.98
温度係数 32%増加	1178.7	121.9	1464.0	8.98E+03	1.12E+00	2.55E+00	1.02

a),b)は表 2-3-5 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-3-5 の結果と同じ

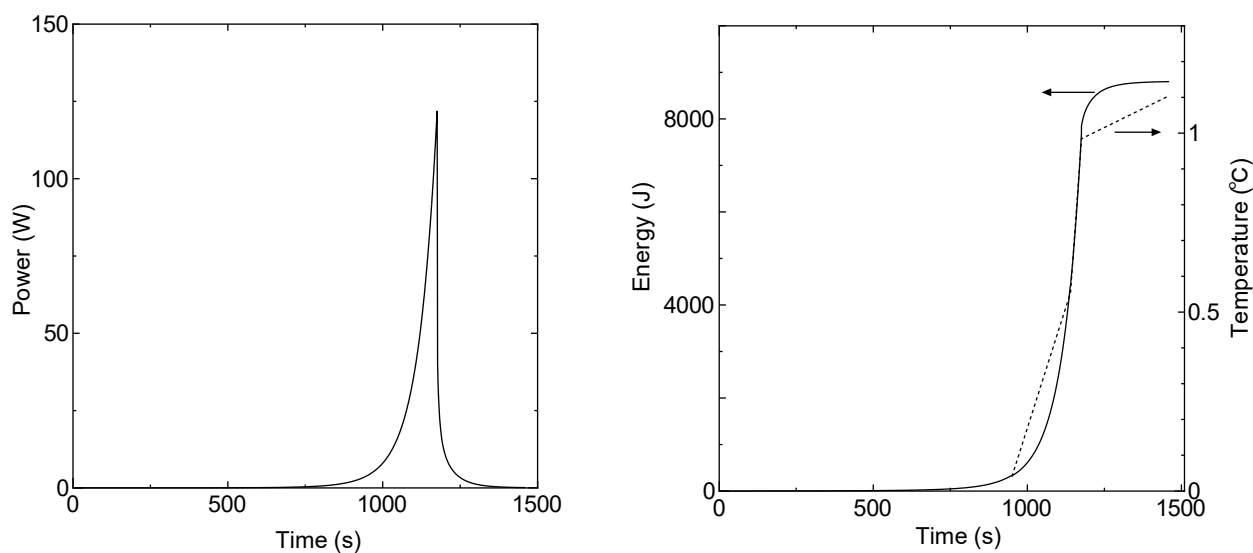


図 2-3-3 L5.5P-30 炉心 出力変化

実験物の異常等による反応度の付加（ケース B ランプ状反応度添加）

出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

表 2-3-7 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心）

【ケース B（ランプ状反応度印加）】

炉心名称	列	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
C30G0	4	960.1	122.7	1228.2	6.84×10^3	9.98×10^{-2}	2.53×10^{-1}
	5	960.1	122.7	1228.2	6.84×10^3	1.03×10^{-1}	2.45×10^{-1}
C35G0	4	961.8	122.7	1230.4	6.86×10^3	1.39×10^{-1}	3.16×10^{-1}
	5	961.1	122.7	1229.5	6.86×10^3	1.38×10^{-1}	3.18×10^{-1}
C45G0	4	960.3	122.7	1228.5	6.88×10^3	2.00×10^{-1}	3.97×10^{-1}
	5	960.3	122.7	1228.4	6.87×10^3	1.95×10^{-1}	4.12×10^{-1}
C60G0	4	955.6	122.7	1222.6	6.82×10^3	1.88×10^{-1}	3.42×10^{-1}
	5	955.6	122.7	1222.5	6.82×10^3	1.85×10^{-1}	3.50×10^{-1}
C45G (2H ₂ O)	4	956.4	122.7	1223.6	6.83×10^3	2.06×10^{-1}	5.41×10^{-1} ^{c)}
C45G (5H ₂ O)		947.5	122.7	1212.3	6.73×10^3	1.57×10^{-1}	5.21×10^{-1}
C45G (6H ₂ O)		947.1	122.8	1211.9	6.71×10^3	1.42×10^{-1}	4.66×10^{-1}
C45G (7H ₂ O)		947.9	122.7	1212.9	6.72×10^3	1.30×10^{-1}	4.12×10^{-1}
C45G (10H ₂ O)		952.6	122.7	1218.8	6.77×10^3	1.11×10^{-1}	2.95×10^{-1}
C45G (15H ₂ O)		957.3	122.7	1224.7	6.82×10^3	1.02×10^{-1}	2.18×10^{-1}
C45G (2H ₂ O)	5	955.6	122.7	1222.5	6.82×10^3	2.05×10^{-1}	5.29×10^{-1}
C45G (5H ₂ O)		943.7	122.8	1207.5	6.66×10^3	1.60×10^{-1}	5.32×10^{-1}
C45G (6H ₂ O)		942.9	122.8	1206.5	6.66×10^3	1.44×10^{-1}	4.85×10^{-1}
C45G (7H ₂ O)		943.9	122.8	1207.8	6.67×10^3	1.31×10^{-1}	4.35×10^{-1}
C45G (10H ₂ O)		949.4	122.7	1214.8	6.73×10^3	1.11×10^{-1}	3.21×10^{-1}
C45G (15H ₂ O)		955.7	122.7	1222.7	6.80×10^3	1.01×10^{-1}	2.40×10^{-1}
C60G (2H ₂ O)	4	950.8	122.7	1216.5	6.77×10^3	1.83×10^{-1}	4.76×10^{-1}
C60G (5H ₂ O)		943.6	122.8	1207.3	6.68×10^3	1.38×10^{-1}	4.24×10^{-1}
C60G (7H ₂ O)		945.0	122.8	1209.2	6.69×10^3	1.17×10^{-1}	3.31×10^{-1}
C60G (10H ₂ O)		949.6	122.7	1215.0	6.74×10^3	1.03×10^{-1}	2.39×10^{-1}
C60G (15H ₂ O)		953.4	122.7	1219.8	6.78×10^3	9.62×10^{-2}	1.80×10^{-1}

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-3-8 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心 C45G(2H₂O) 4 列炉心）
 (ケース B) 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	956.4	122.7	1223.6	6.83E+03	2.06E-01	5.41E-01 ^{e)}	—
U 重量 6%減少	956.5	122.7	1223.7	6.83E+03	2.19E-01	5.74E-01	1.06
β _{eff} 8%減少	911.0	122.8	1166.0	6.44E+03	1.94E-01	5.11E-01	0.94
β _{eff} 8%増加	1000.2	122.6	1279.1	7.21E+03	2.18E-01	5.71E-01	1.06
ℓ 8%減少	956.4	122.7	1223.5	6.83E+03	2.06E-01	5.41E-01	1.00
ℓ 8%増加	956.5	122.7	1223.6	6.83E+03	2.06E-01	5.41E-01	1.00
温度係数 32% 減少	956.0	122.7	1223.1	6.81E+03	2.06E-01	5.40E-01	1.00
温度係数 32% 増加	956.8	122.7	1224.0	6.85E+03	2.07E-01	5.43E-01	1.00

a),b)は表 2-3-7 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-3-7 の結果と同じ

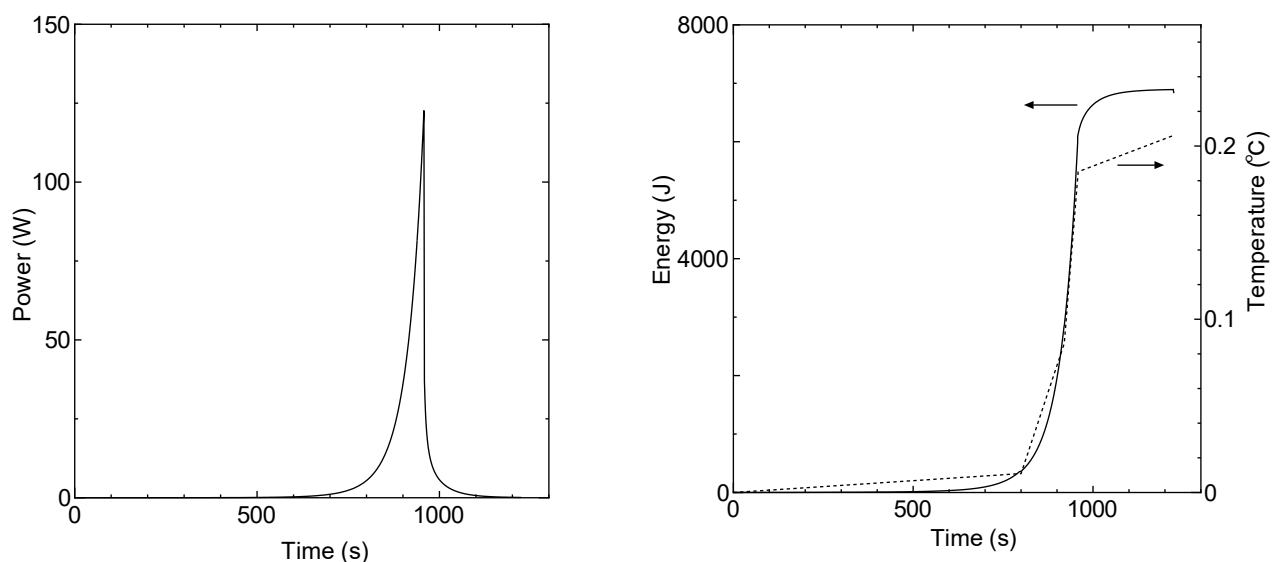


図 2-3-4 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化

実験物の異常等による反応度の付加（ケース B ランプ状反応度添加）
 出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

表 異常な過渡変化および設計基準事故の解析条件の整理 (軽水減速炉心)

事象	ケース	過剰反応度 ^(a) (%Δk/k)	反応度添加率(%Δk/k/s)	全制御棒の反応度 (%Δk/k)	最大1本の反応度	スクラム発生時間 ^(b) (s)	スクラム発生時の出力 ^(c) (W)	スクラム発生時の炉心反応度 ^(d) (%Δk/k)	スクラム後の反応度 ^(e) (%Δk/k)	スクラム発生前の積算出力 (J)	スクラム発生後の積算出力 (J)	全積算出力 (J)	ダンプ弁の作動の有無	備考1	備考2 (スクラム発生時の反応度)	備考3 (スクラム後の反応度)
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き	ケースA	0.5	0.02%Δk/k/s(ランプ状添加)	1.5	0.5	38.4	181.9	0.5	-0.5 (+0.5-1.0) (制御棒はスクラム前に全引抜きであり、1.5-0.5=1.0%Δk/kが挿入される)	4.38E2	4.29E2	8.67E2	無	C45G(2H2O)炉心	温度上昇による-0.00009%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.00018%Δk/kの反応度加わる
	ケースB	0.5	0.05%Δk/k(ステップ状添加)	1.5	0.5	1548.4	120.7	0.05	-0.5 (+0.05-0.55) (制御棒はスクラム前に0.5-0.05=0.45%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.5-0.45-0.5=0.55%Δk/k)	2.13E4	1.99E3	2.33E4	無	C45G(2H2O)炉心	温度上昇による-0.005%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.005%Δk/kの反応度加わる
出力運転中の制御棒の異常な引抜き	ケースA	0.5	0.02%Δk/k/s(ランプ状添加)	1.5	0.5	5.3	127.5	0.086 (0.02×4.3)	-0.5 (+0.086-0.586) (制御棒はスクラム前に0.5-0.086=0.414%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.5-0.414-0.5=0.586%Δk/k)	5.90E2	2.04E3	2.63E3	無	C45G(2H2O)炉心	温度上昇による-0.0001%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.0006%Δk/kの反応度加わる
実験物の異常等による反応度の付加	ケースA	0	0.5%Δk/k(ステップ状添加) ^(f)	1.5	0.33	59.0	138.8	0.5	-0.5 (+0.5-1.0) (制御棒はスクラム前に全引抜きであり、1.5-0.5=約1.0%Δk/kが挿入される)	4.37E2	4.30E2	8.67E2	無	C45G(2H2O)炉心	温度上昇による-0.00009%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.0002%Δk/kの反応度加わる
	ケースB	0	1.39E-4%Δk/k(3600秒で0.5%Δk/kの反応度をランプ状添加) ^(f)	1.5	0.33	957.4	122.7	0.13 (+1.39E-4×956.4)	-0.87 (+0.13-1.0) (制御棒はスクラム前に全引抜きであり、1.5-0.5=約1.0%Δk/kが挿入される)	5.98E3	8.50E3	6.83E3	無	C45G(2H2O)炉心	温度上昇による-0.0013%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.0014%Δk/kの反応度加わる
商用電源喪失		0.5	-	1.5	0.5	0	100	0	-0.5 (0.0-0.5) (制御棒はスクラム前に0.5%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.5-0.5-0.5=0.5%Δk/k)	-	2.97E3 (FP崩壊熱を含む)	2.97E3	有	C45G(2H2O)炉心 スクラム信号発生後の30秒後にダンプ弁の反応度-1.0%Δk/kが加わる	0	0.1Wの時点では温度上昇による-0.002%Δk/kの反応度加わる
炉心タンクヒータ		0.5	-	1.5	0.5	3601	1	0.00073 (ヒータの温度上昇による反応度)	-0.49927 (+0.00073-0.5) (制御棒はスクラム前に0.5%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.5-0.5-0.5=0.5%Δk/k)	6.40E3	9.59E2	7.36E3	無	C45G(6H2O)炉心 3600秒後に手動スクラム	炉心発熱の温度上昇による+0.0006%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による+0.0007%Δk/kの反応度加わる

a.過剰反応度 : 炉心に加わる反応度(ステップ、ランプ)

b.スクラム発生時間 : スクラム信号が発報した時間+1秒後の時間

c.スクラム発生時の出力: 最大出力と同じ(W)

d.スクラム発生時の炉心反応度

e.スクラム後の反応度: 最大反応度の制御棒以外の制御棒が全挿入された状態での反応度

f.過剰反応度と試料の反応度を足したものを過剰反応度の核的制限値以下とするので、過剰反応度がゼロの炉心ほど試料の反応度を大きくすることができる。

KUCA設置変更申請書 添付書類10の安全評価結果 高濃縮燃料（既承認）と低濃縮燃料(今回申請)の比較

	高濃縮燃料（既承認）	低濃縮燃料(今回申請)	備考
	<p>共通事項</p> <p>(1) 燃料から周囲の減速材等への熱の伝達は無視し、発生した熱が全て燃料板の燃料ミート部の温度上昇に費やされるものとする。</p> <p>(2) 温度分布が x, y, z 方向共に cos 分布であるとして、温度上昇の平均値に対する出力ピークの係数を掛ける。</p> <p>(3) 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効果は無視する。軽水減速炉心の2分割炉心で正の反応度温度係数を持つ炉心についてはすべて温度係数が制限値の最大値 ($+2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^\circ C$) であるとし、燃料温度上昇により正の反応度が加わるとして解析を行う。</p> <p>(4) 制御棒挿入後に出力が 1/10 以下に低下するまでの積算出力を算出する。</p> <p>(5) スクラム発生時には最大の反応度を有する1本の制御棒が落下しない。</p> <p>(6) 判定基準は高濃縮燃料、低濃縮燃料で変更無し。</p>	<p>共通事項</p> <p>(1) 燃料から周囲の減速材等への熱の伝達は無視し、発生した熱が全て燃料板の燃料ミート部と燃料被覆材の温度上昇に費やされるものとする。</p> <p>(2) 各炉心の出力分布の最大値と平均値の比を掛け、さらに燃料板内でのピークを求めるための比率を掛ける。</p> <p>(3) 全ての炉心で各炉心の反応度温度係数（正負とも）を考慮して解析を行う。</p> <p>(4) 制御棒挿入後に出力が 0.1W まで低下するまでの積算出力を算出する。</p> <p>(5) スクラム発生時には最大の反応度を有する1本の制御棒が落下しない。</p> <p>(6) 判定基準は高濃縮燃料、低濃縮燃料で変更無し。</p>	<p>LEUでは各炉心の出力分布と燃料板内出力分布考慮して最大値を求める</p> <p>LEUは全炉心で温度係数考慮</p> <p>積算範囲が異なる</p>
	原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き	原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き	
シ ナ リ オ	<p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンブ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付8で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 0.01W の臨界状</p>	<p><u>ケースA</u></p> <p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンブ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値</p> <p>(2) 添付8で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 0.01W の臨</p>	<p>LEUは線型出力</p>

	<p>態、その際の線型出力計の指示値は 100%で出力が 1W となるレンジ。</p> <p>(4) 制御棒の引抜きにより最大反応度添加率 0.02%$\Delta k/k/s$ で反応度が連続的に投入されたとする。対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120%である 1.2W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	<p>界状態、その際の線型出力計の指示値は 100%で出力が 100W となるレンジ。</p> <p>(4) 制御棒の引抜きにより最大反応度添加率 0.02%$\Delta k/k/s$ で反応度が連続的に投入されたとする。対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120%である 120W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p> <p><u>ケース B</u> (ケース A と異なる箇所のみ記載)</p> <p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は 0.05 %$\Delta k/k$ とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値</p> <p>(4) 制御棒の引抜きにより 0.05%$\Delta k/k$ のステップ状の反応度を加える。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) に至らない場合には出力上昇後 1 時間 (3600 秒) を経過した段階で運転員が手動スクラムボタンを押す。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。</p>	<p>系 100W レンジ</p> <p>LEU は線型出力系 120W でスクラム</p> <p>LEU はケース B の小反応度印加を追加</p> <p>LEU は 3600 秒後に手動スクラムもある</p>
結果	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>E3. 7P 炉心 : 積算出力 9.74J、温度上昇 $5.48 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>C60G0 (5 列) 炉心 : 積算出力 4.59J、温度上昇 $1.64 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$</p>	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケース A L5. 5P-30 炉心 : 積算出力 $1.55 \times 10^3 \text{ J}$、温度上昇 $4.41 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>ケース B L4P-30 炉心 : 積算出力 $9.95 \times 10^4 \text{ J}$、温度上昇 $2.71 \times 10^1 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケース A C45G (2H₂O) 4 列炉心 : 積算出力 $8.67 \times 10^2 \text{ J}$、温度上昇 $6.87 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>ケース B C45G (2H₂O) 4 列炉心 : 積算出力 $2.33 \times 10^4 \text{ J}$、温度上昇 $1.85 \times 10^0 \text{ }^\circ\text{C}$</p>	
	出力運転中の制御棒の異常な引抜き	出力運転中の制御棒の異常な引抜き	

シ ナ リ オ	<p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 0.01W の臨界状態、その際の線型出力計の指示値は 100%で出力が 100W となるレンジ。</p> <p>(4) 制御棒の引抜きにより最大反応度添加率 0.02% $\Delta k/k/s$ で反応度が連続的に投入されたとする。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120%である 120W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	<p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 0.01W の臨界状態、その際の線型出力計の指示値は 100%で出力が 100W となるレンジ。</p> <p>(4) 制御棒の引抜きにより最大反応度添加率 0.02% $\Delta k/k/s$ で反応度が連続的に投入されたとする。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120%である 120W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	
結 果	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値 E3.7P 炉心：積算出力 $9.84 \times 10^2 J$、温度上昇 $2.15 \times 10^0 \text{ }^\circ C$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値 C60G0 (5 列) 炉心：積算出力 $4.27 \times 10^2 J$、温度上昇 $5.90 \times 10^{-1} \text{ }^\circ C$</p>	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値 L5.5P-30 炉心：積算出力 $2.40 \times 10^3 J$、温度上昇 $6.83 \times 10^{-1} \text{ }^\circ C$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値 C45G (2H₂O) 4 列炉心：積算出力 $2.63 \times 10^3 J$、温度上昇 $2.08 \times 10^{-1} \text{ }^\circ C$</p>	
	実験物の異常等による反応度の付加	実験物の異常等による反応度の付加	
シ ナ リ オ	<p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 実験物（照射試料）を装着した状態で 1W の臨界状態を保っており、その際の線型出</p>	<p><u>ケース A</u></p> <p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は 0% $\Delta k/k$ とし、制御棒の全反応度は制限値の最小値（固体減速炉心では 1.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心では 1.5% $\Delta k/k$）、ダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値（1% $\Delta k/k$）</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p>	LEU は印加反応度を最大とするために過剰反応度は 0% $\Delta k/k$

	<p>力計の指示値は 100%で出力が 100W となるレンジ。</p> <p>(4) 炉心に取り付けていた実験用試料が炉心から落下し+0.5%$\Delta k/k$ がステップ状に加わる。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 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信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	<p>(3) 実験物（照射試料）を装着した状態で 0.01W の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は 100%で出力が 100W となるレンジ。</p> <p>(4) 炉心に取り付けていた実験用試料が炉心から落下し反応度の最大値（固体減速架台+0.35%$\Delta k/k$、軽水減速炉心+0.5%$\Delta k/k$）がステップ状に加わる。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 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信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p> <p><u>ケース B</u>（ケース A と異なる箇所のみ記載）</p> <p>(4) 炉心に取り付けていた実験用試料がゆっくり落下し試料の反応度の最大値（固体減速架台+0.35%$\Delta k/k$、軽水減速炉心+0.5%$\Delta k/k$）が時間と共に線形に 3600 秒掛けてランプ状に加わる。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p>	<p>LEU は初期出力 0.01W</p> <p>固体減速炉心の反応度印加量変更</p> <p>LEU はケース B のランプ状反応度印加を追加</p>
結果	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>E3.7P 炉心：積算出力 $4.44 \times 10^2 \text{J}$、温度上昇 $2.50 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>C60G0（5 列）炉心：積算出力 $4.33 \times 10^2 \text{J}$、温度上昇 $1.55 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$</p>	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケース A L5.5P-30 炉心：積算出力 $1.55 \times 10^3 \text{J}$、温度上昇 $4.40 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>ケース B L5.5P-30 炉心：積算出力 $8.80 \times 10^3 \text{J}$、温度上昇 $2.50 \times 10^0 \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケース A C45G(2H20) 4 列炉心：積算出力 $8.67 \times 10^2 \text{J}$、温度上昇 $6.87 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>ケース B C45G(2H20) 4 列炉心：積算出力 $6.83 \times 10^3 \text{J}$、温度上昇 $5.41 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$</p>	
	商用電源喪失	商用電源喪失	
シ	(1) 軽水炉心の C35G0（5 列）炉心において、1 ヶ月の最大積算出力（100Wh）となる運転	(1) 固体減速炉心は L5.5P-30 炉心、軽水減速炉心は C45G(2H ₂ O) 4 列炉心において、	LEU は固体減速

ナ リ オ	<p>を行った直後に商用電源が喪失。</p> <p>(2) 過剰反応度は制限値の最大値（軽水減速炉心 $0.5\% \Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(3) 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により最大の反応度をもつ 1 本以外の 5 本が炉心に挿入され、ダンプ弁保持の電磁石電源断によりダンプ弁が開となる。ただし、制御棒落下により 1 秒後にステップ状の負の反応度が加わる。またダンプ弁の開動作により 30 秒後に燃料領域の水が全て排出してステップ状の負の反応度が加わる。</p>	<p>1 ヶ月の最大積算出力（100Wh）となる運転を行った直後に商用電源が喪失。</p> <p>(2) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 $0.35\% \Delta k/k$、軽水減速炉心 $0.5\% \Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(3) 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により最大の反応度をもつ 1 本以外の 5 本が炉心に挿入され、ダンプ弁保持の電磁石電源断によりダンプ弁が開となる。ただし、制御棒落下により 1 秒後にステップ状の負の反応度が加わる。固体減速炉心では 12 秒後に中心架台が落下してステップ状の負の反応度が加わる。軽水減速炉心ではダンプ弁の開動作により 30 秒後にステップ状の負の反応度が加わる。</p>	と軽水減速の 2 炉心を選択
結 果	C35G0（5 列）炉心：積算出力 $3.28 \times 10^3 J$ 、温度上昇 $8.08 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>L5.5P-30 炉心：積算出力 $2.61 \times 10^3 J$、温度上昇 $7.43 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>C45G(2H₂O) 4 列炉心：積算出力 $2.97 \times 10^3 J$、温度上昇 $2.36 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$</p>	
	重水反射体への軽水流入	重水反射体への軽水流入	
シ ナ リ オ	<p>(1) 軽水減速炉心で C30 の単一炉心、または 2 分割炉心の燃料体の外側に重水タンクを設置する。過剰反応度は制限値の最大値、制御棒とダンプ弁の反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 出力が 100W の臨界状態とし、その際に線型出力計は指示値が 100%で 100W となるレンジ。</p> <p>(3) 重水タンクが大きく破損して全ての重水が軽水と混合した、又は、重水タンクが小さく破損して重水の一部が重水タンクから漏れ出して炉心タンクの軽水と混入。</p> <p>(4) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 原子炉は出力が線型出力計の指示値の 120%である 120W を超えたときにスクラム。ス</p>	低濃縮燃料では重水は使用しないため解析は行わない	

	スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下により 1 秒後にステップ状の反応度が加わる。ダンプ弁は作動しない。		
結果	出力上昇せず未臨界	—	
	中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用	中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用	
シナリオ	<p>(1) 固体減速架台で過剰反応度は制限値の最大値 0.35% Δk/k、制御棒と中心架台の反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 1W の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W とするレンジ。</p> <p>(4) 臨界状態で 10^{11}n/s で中性子を打ち込み、炉心には 4×10^9n/s の中性子が入射し出力上昇。</p> <p>(5) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(6) 原子炉は出力が線型出力計の指示値の 120% である 120W を超えたときにスクラム。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下によりステップ状の反応度が加わる。中心架台は作動しない。</p>	<p><u>ケース A</u></p> <p>(1) 固体減速架台で過剰反応度は制限値の最大値 0.35% Δk/k、制御棒と中心架台の反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 0.01W の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W とするレンジ。</p> <p>(4) 臨界状態で 10^{11}n/s で中性子を打ち込み、炉心には半分の 5×10^{10}n/s の中性子が入射し出力上昇。</p> <p>(5) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入には作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(6) 原子炉は出力が線型出力計の指示値の 120% である 120W を超えたときにスクラム。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下により 1 秒後にステップ状の反応度が加わる。中心架台は作動しない。</p> <p><u>ケース B</u> (ケース A と異なる箇所のみ記載)</p> <p>(4) 臨界状態で炉心にはケース A より少ない中性子が入射。中性子発生量は炉心により異なり、燃料温度が最も上昇する中性子発生量をサーベイして決定する。</p> <p>(6) 線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) を超える場合にはケース A と同様にスクラムするが、120% に至らずに出力が低下する場合には出力上昇後 1 時間 (3600 秒) を経過した段階で運転員が手動スクラムボタンを押し、1 秒後に制御棒落下に</p>	<p>LEU は初期出力 0.01W 中性子発生量の変更</p> <p>LEU はケース B の追加</p>

		よりステップ状の反応度が加わる。中心架台は作動しない。	
結果	温度上昇の最大値 E3. 7P 炉心：積算出力 1.28×10^4 J、温度上昇 7.22×10^0 °C	温度上昇の最大値 ケース A L5. 5P-30 炉心：積算出力 5.31×10^2 J、温度上昇 1.51×10^{-1} °C ケース B L5. 5P-30 炉心：積算出力 1.73×10^5 J、温度上昇 4.93×10^1 °C	
	炉心タンクヒータによる温度上昇	炉心タンクヒータによる温度上昇	
シナリオ	(1) 軽水減速架台で正の反応度温度係数が最も大きい C30G (7H ₂ O) (5 列) 炉心で、反応度温度係数が制限値の最大値 ($+2 \times 10^{-4}$ Δk/k/°C) であるする、 (2) 出力が 100W の臨界状態とし、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W となるレンジ。 (3) 軽水の初期温度を 25°C とし、炉心タンクヒータを用いて炉心タンク水の温度を上昇させる。ヒータの熱は全て軽水の温度上昇に用いられる。 (4) 線型出力系の 110% での一せい挿入は作動しない。 (5) 原子炉は安全出力計の指示値の 120% を超えたときにスクラムする。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下によりステップ状の負の反応度が加わる。ダンプ弁は作動しない。	(1) 代表炉心の中で軽水減速架台の反応度温度係数が正となる C45G (6H ₂ O) 炉心など 4 つの炉心を対象とし、反応度温度係数は各炉心の値を用いる。 (2) 出力が 1W の臨界状態とし、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W となるレンジ。 (3) 軽水の初期温度を 25°C とし、炉心タンクヒータを用いて炉心タンク水の温度を上昇させる。ヒータの熱は全て軽水の温度上昇に用いられる。 (4) 線型出力系の 110% での一せい挿入は作動しない。 (5) 原子炉は線型出力計の指示値の 120% を超えたときにスクラムする。ただし、1 時間以内にスクラム信号が出ない場合には 1 時間後に運転員により手動スクラムボタンを押して 1 秒後に制御棒落下によりステップ状の負の反応度が加わる。ダンプ弁は作動しない。	LEU は対象炉心 変更 LEU は初期出力 1W LEU は 3600 秒 後に手動スクラム
結果	温度上昇 1.5×10^0 °C	温度上昇の最大値 C45G (6H ₂ O) 5 列炉心：積算出力 7.36×10^3 J、温度上昇 5.36×10^{-1} °C	
	燃料落下又は燃料誤装荷	燃料落下又は燃料誤装荷	
シナリオ	(1) 固体減速架台で、過剰反応度が制限値の最大値 ($0.35\% \Delta k/k$) となるだけの燃料集合体が装荷されている。制御棒と中心架台の反応度は制限値の最小値。 (2) E3. 7, E3, E2, E1, EE1, EEE1 炉心を対象。	<u>ケース A</u> (1) 固体減速架台で、過剰反応度が制限値の最大値 ($0.35\% \Delta k/k$) となるだけの燃料集合体が装荷されている。制御棒と中心架台の反応度は制限値の最小値。 (2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心の各燃料セルの炉心のうち、(4) の燃料誤装	LEU は対象炉心 を変更。

<p>(3) 6本ある制御棒のうち3本は全引抜き、残りの3本は全挿入とし、中心架台を下限とした状態で炉心配置変更作業を行う。なお、引き抜いた制御棒と挿入された制御棒は燃料領域に対して対称な位置に配置されている。中心架台の反応度は制限値の最低値、または5%$\Delta k/k$とする。</p> <p>(4) 誤ってこの炉心用の燃料集合体をもう1体作成してしまい、炉心の燃料周囲のポリエチレン反射体を取り出してその位置に追加の燃料集合体を装荷した。燃料集合体の装荷位置は1体当たりの反応度が最も大きい位置である。</p> <p>(5) 線型出力計の指示値が100%で0.1Wとなるレンジで中性子源を挿入し、出力0.01Wの定常状態となったとする。その後、中心架台を上昇させる。中心架台の上昇速度は制限値の最大速度。</p> <p>(6) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(7) 原子炉は出力が線型出力計の指示値の120%である0.12Wを超えたときにスクラムする。スクラム信号が発生し、スクラム信号の発生に伴い中心架台を上昇させるための油圧ポンプが停止することにより、中心架台の上昇動作は直ちに停止する。制御棒は3本が上限になっているが、その中に最大の反応度を持つ1本が挿入できないとする。スクラム信号が発生した1秒後に制御棒の挿入によりステップ状に負の反応度が加わるとする。</p> <p>(8) 中心架台はスクラム信号発生後の1秒後に落下を開始し、スクラム信号発生後の12秒後までに時間とともに線型に負の反応度を加える。</p>	<p>荷に伴う反応度印加量が最も大きくなる炉心。</p> <p>(3) 6本ある制御棒のうち3本は全引抜き、残りの3本は全挿入とし、中心架台を下限とした状態で炉心配置変更作業を行う。なお、引き抜いた制御棒と挿入された制御棒は燃料領域に対して対称な位置に配置されている。中心架台の反応度および反応度印加量は各炉心のモンテカルロ法による解析値。</p> <p>(4) 誤ってこの炉心用の燃料集合体をもう1体作成してしまい、炉心の燃料周囲のポリエチレン反射体を取り出してその位置に追加の燃料集合体を装荷した。燃料集合体の装荷位置は1体当たりの反応度が最も大きい位置。</p> <p>(5) 線型出力計の指示値が100%で100Wとなるレンジで中性子源を挿入し、出力0.01Wの定常状態となったとする。その後、中心架台を上昇させる。中心架台の上昇速度は制限値の最大速度。</p> <p>(6) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(7) 原子炉は線型出力計の指示値の120%である0.12Wを超えたときにスクラムする。スクラム信号の発生に伴い中心架台を上昇させるための油圧ポンプが停止することにより、中心架台の上昇動作は直ちに停止する。制御棒は3本が上限になっているが、その中に最大の反応度を持つ1本が挿入できないとする。スクラム信号が発生した1秒後に制御棒の挿入によりステップ状に負の反応度が加わるとする。</p> <p>(8) 中心架台はスクラム信号発生後の1秒後に落下を開始し、スクラム信号発生後の12秒後までに時間とともに線型に負の反応度を加える。</p> <p><u>ケースB</u> (ケースAと異なる箇所のみ記載)</p> <p>(2) 添付8で取り上げた全ての代表炉心の各燃料セルの炉心のうち、(4)の燃料誤装荷に伴う反応度印加量が最も小さくなる炉心。</p>	<p>誤装荷の反応度を全炉心で解析</p> <p>LEUは中心架台反応度を各炉心の解析値</p> <p>LEUは初期出力0.01W</p> <p>スクラム出力変更</p> <p>LEUはケースBの追加</p>
--	---	--

	<p>温度上昇の最大値</p> <p>E3.7P 炉心：積算出力 $3.61 \times 10^9 \text{J}$、温度上昇は最大で $2.0 \times 10^{-3} \text{°C}$</p>	<p>温度上昇の最大値</p> <p>ケース A L5.5P-50 炉心：積算出力 $8.26 \times 10^2 \text{J}$、温度上昇 $2.10 \times 10^{-1} \text{°C}$</p> <p>ケース B L2P-30 炉心：積算出力 $5.80 \times 10^3 \text{J}$、温度上昇 $1.13 \times 10^0 \text{°C}$</p>	
	燃料の機械的破損	燃料の機械的破損	
シ ナ リ オ	<p>(1) 軽水減速架台、又は固体減速架台 (E3.7P 炉心、C60G0 炉心) において、同じ炉心で月末に 100W での運転を 1 時間行うという運転パターンを運転間隔は 30 日間として 9 回繰り返す。その後、最後の運転の 24 時間後 (次の月の初日) に 100W での運転を 1 時間行う。</p> <p>(2) 最後の運転を停止してから、1 日後に炉心配置変更作業を行い 1 体の燃料集合体を取り扱う際に誤って燃料板を損傷させた。</p> <p>(3) 軽水減速架台では燃料を破損させ、燃料芯材において表面より $15 \mu\text{m}$ 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びよう素が全量放出された。燃料板の破損は KUR の使用済燃料の破損の解析と同じように表面の被覆材がすべて外れたとする。固体減速架台では 1 体の燃料体のうち 10% の燃料板が燃料の端面と平行な方向に折れ曲がり (長さ約 5cm) 燃料芯材が露出し、燃料板の切断面から $15 \mu\text{m}$ 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びよう素が全量放出された。</p>	<p>(1) 固体減速炉心では全ての炉心のうち燃料体ごとの出力積分値が最大となる燃料体を有する炉心 (L3P-50 炉心)、軽水減速架台では臨界質量が小さい炉心 (C45G2 (4 列) 炉心) を対象。月末に 100W での運転を 1 時間行うという運転パターンを運転間隔は 30 日間として 9 回繰り返す。その後、最後の運転の 24 時間後 (次の月の初日) に 100W での運転を 1 時間行う。</p> <p>(2) 最後の運転を停止してから、1 日後に炉心配置変更作業を行い 1 体の燃料集合体を取り扱う際に誤って燃料板を損傷させた。</p> <p>(3) 軽水減速架台では 1 枚の燃料が燃料板の対角線方向に折れ曲がり燃料芯材が露出し、燃料芯材において表面より $15 \mu\text{m}$ 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びよう素が全量放出された。固体減速架台では 1 体の燃料体のうち 10% の燃料板が対角線方向 (長さ約 7cm) に折れ曲がり燃料芯材が露出し、燃料板の切断面から $15 \mu\text{m}$ 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びよう素が全量放出された。</p>	<p>LEU では出力積分値が最大となる燃料体を選定</p> <p>燃料の破損方向を軽水と固体共に燃料板の対角線方向に統一</p>
結 果	被ばく量は最大でも小児に対して約 $0.18 \mu\text{Sv}$	被ばく量は最大でも小児に対して約 $0.004 \mu\text{Sv}$	
	実験設備、実験物等の著しい破損	実験設備、実験物等の著しい破損	
シ ナ リ オ	<p>(1) 固体減速架台 (E3 炉心、EE3 炉心) で最大出力 100W においてパイルオシレータにより天然ウラン、又は濃縮ウラン (4.5%濃縮) の試料 (反応度絶対値の最大値 $0.1\% \Delta k/k$) を使用。照射位置は炉心中心。</p> <p>(2) 100Wh の運転直後に試料が破損し、内部の核分裂生成物 (希ガス (Xe、Kr) 及びよう</p>	<p>(1) 固体減速架台の全ての代表炉心を対象として、最大出力 100W においてパイルオシレータにより天然ウラン、又は濃縮ウラン (4.5%濃縮) の試料 (反応度絶対値の最大値 $0.1\% \Delta k/k$) を使用。照射位置は試料の核分裂率の最大値となる位置。</p> <p>(2) 100Wh の運転直後に試料が破損し、内部の核分裂生成物 (希ガス (Xe、Kr) 及び</p>	<p>LEU では全ての炉心を検討。照射位置は核分裂率最大値と</p>

	素) の10%が放出。 (3) 放出の経路については「燃料の機械的破損」と同じとする。	よう素) の10%が放出。 (3) 放出の経路については「燃料の機械的破損」と同じとする。	なる位置
結果	被ばく量は最大でも小児に対して約 $0.092 \mu\text{Sv}$	被ばく量は最大でも小児に対して約 $0.19 \mu\text{Sv}$	