

評価計算書

燃料要素貯蔵設備の未臨界性に関する評価計算書

燃料要素貯蔵設備の未臨界性に関する評価計算書

1. 燃料要素の保管状況

本申請によって追加される固体減速炉心用低濃縮燃料要素と軽水減速炉心用低濃縮燃料は、過去に所有した高濃縮燃料要素と同様、浸水のおそれのない臨界集合体棟の ■■■■■ ■■■■■ に保管される。燃料室には、■■■■■ ■■■■■ の棚をもつ貯蔵棚（設置変更承認申請書上は最大で ■■■■■ まで拡張することが可能）が設置されており、それぞれの燃料要素はそれぞれ固体用燃料バードケージ、軽水用燃料バードケージに収納され、この貯蔵棚に収納される（図 1 赤枠部分、図 2 参照）。（ユニットとは、固体用バードケージ 1 つが入る大きさの棚を ■■■■■ とし、軽水用バードケージは、おおよそ固体用バードケージ ■■■■■ の大きさとなるため ■■■■■ を使用する。）

燃料棚は、KUCA 建設時に製作されたもので、昭和 48 年 9 月の設工認申請書に、以下のように記載されている。



燃料貯蔵棚の詳細な寸法については、図 3 及び図 4 に示す（固体用棚はバードケージ ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■ を使用、軽水用棚はバードケージ ■■■■■ ■■■■■ を使用）。



図 1 臨界集合体棟 ■■■■■

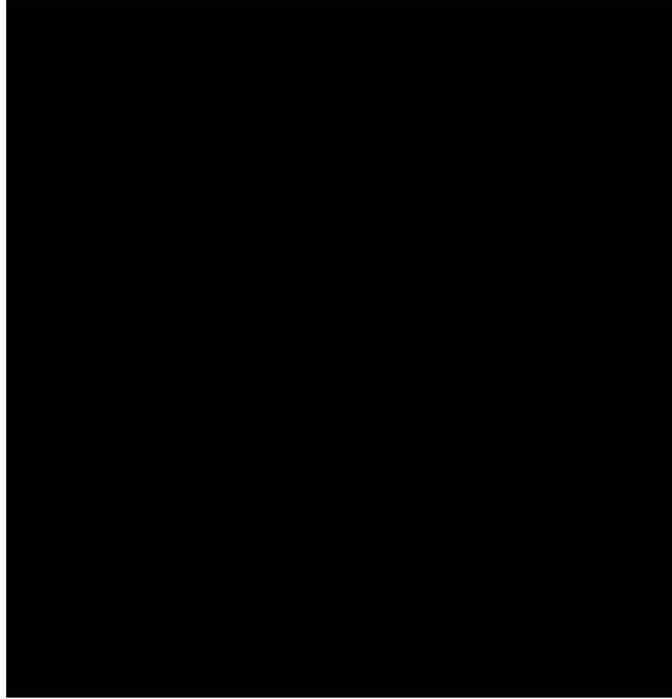


図 2 燃料貯蔵棚の概略図

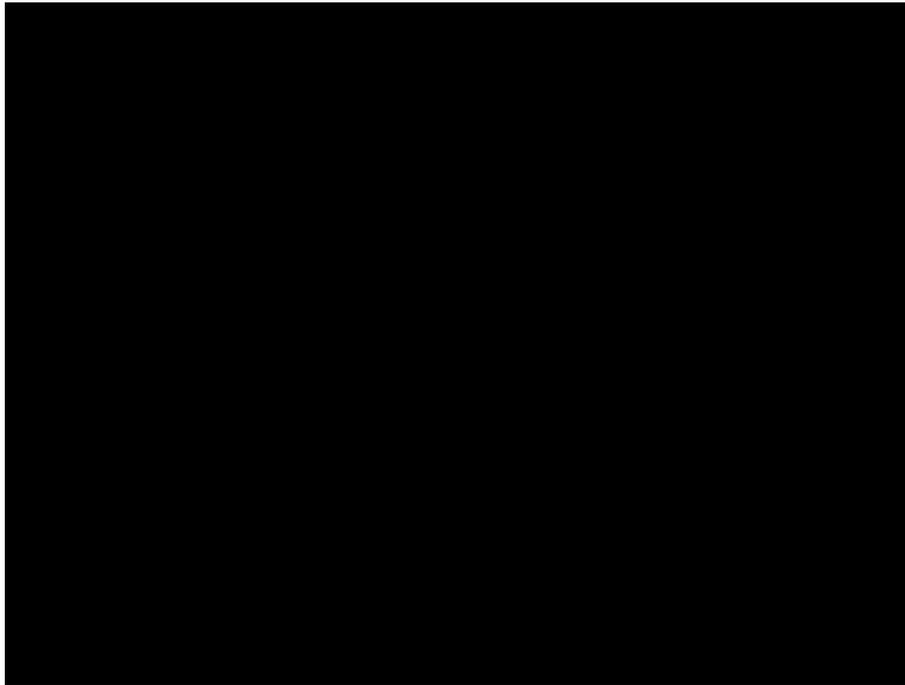
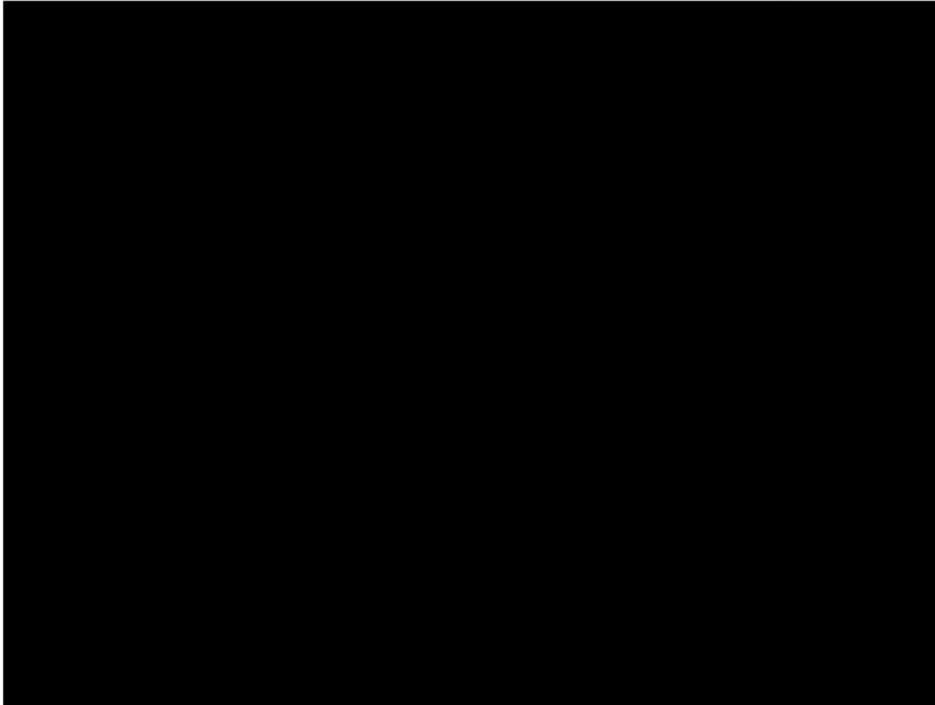
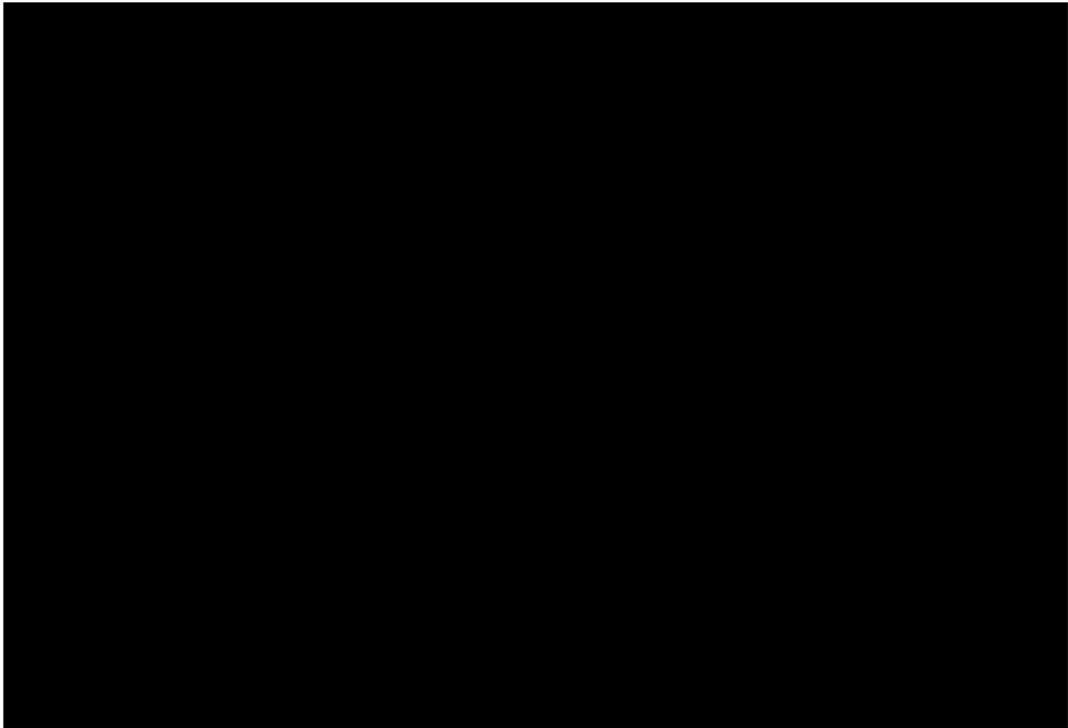


図 3 固体減速炉心用燃料貯蔵棚



(a) 固体減速炉心用燃料板のバードケージ



(b) 軽水減速炉心用燃料板のバードケージ

図5 バードケージ概念図 (単位 : mm)

(数字はバードケージの外寸、内部ボックスは燃料板の入るボックスの内寸)

燃料要素は、バードケージの内部ボックスに収納され、バードケージを隣接させても内部ボックス同士の隔離距離は確保される構造となっている。固体減速炉心用バードケージの内部ボックスに物理的に収納可能な燃料要素枚数は■■■であるが、保安規定にて■■■に制限をする予定である。軽水減速炉心用バードケージの内部ボックスに物理的に収納可能な燃料要素枚数は■■■であるが、保安規定にて■■■に制限をする予定である。なお、それぞれのバードケージには、低濃縮燃料要素のみが貯蔵される。

固体減速炉心用の燃料要素は、U235 量で■■■である。バードケージ当たりの最大量は■■■であるので、■■■が必要となる。

一方、軽水減速炉心用の燃料要素は、U235 量で■■■である。バードケージ当たりの最大量は■■■であるので、■■■のバードケージが必要となる。

現在、固体減速炉心用のバードケージ（図 5(a)参照）は、■■■所有している。一方、軽水減速炉心用のバードケージ（図 5(b)参照）は、■■■所有している。そのため、必要なバードケージ数に比べて、保有しているバードケージ数は確保されているため、十分な貯蔵容量を有する。

- トリウム貯蔵庫について

KUCA には、当該燃料要素の他にトリウム燃料が存在する。トリウム燃料は合計で■■■あり、図 6 に示すように現在■■■の貯蔵庫に分けて格納されている。■■■は固体減速炉心用燃料が貯蔵されている燃料貯蔵棚の最も近い位置から■■■離れた位置に■■■されており、■■■は固体減速炉心用燃料が貯蔵されている■■■しており、■■■と同様■■■されている。

■■■のサイズは■■■であり、中には遮蔽用の■■■で入っている。■■■には、合計■■■のトリウムが保管されている。■■■のサイズも■■■と同程度であり、中には遮蔽用の■■■で入っている。■■■には、合計■■■のトリウムが保管されている。

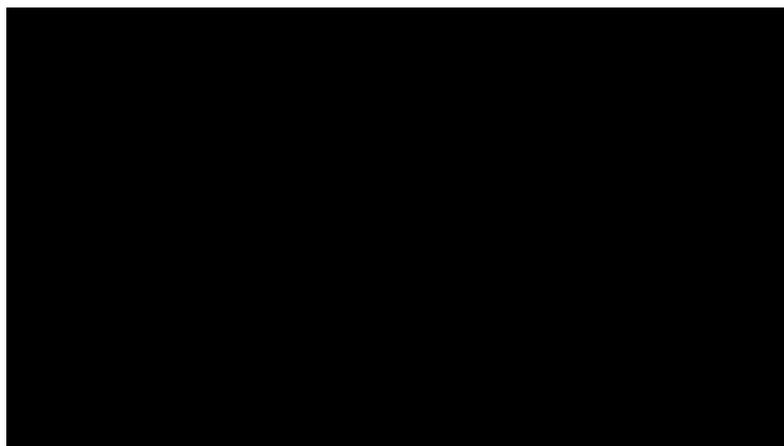


図 6 トリウム貯蔵庫の配置図

2. 解析の考え方と計算モデルについて

- 解析の考え方

上記の燃料要素の保管状況にて示したとおり、当該燃料要素は、バードケージの内部ボックスに収

納され、パードケージは燃料棚に保管される。パードケージを収納する燃料棚は、パードケージ毎に十分な隔離距離を設け、実際の条件では、臨界に達するおそれのない配置となっている。解析においては、より保守的となるよう燃料棚は考慮せず、パードケージが隣接するように配置した。

解析では、パードケージの配置と水分含有率について4つの条件において計算を実施した。

前提	低濃縮燃料の保管に必要なパードケージ数は右のとおり。 設置変更承認申請書では最大 [] まで拡張可能。 その場合、固体用では []、 軽水用では [] (物理的に おけるのは []) が配置可能	LEU 燃料保管に必要なパードケージ数 固体 [] 軽水 [] (トリウム貯蔵庫 []。後述のとおり [] [] 離れた 場所に設置されている)
	計算条件	計算でのパードケージ数
条件0 (未臨界性の判定計算)	現在の燃料棚と同じ数のパードケージ数	本条件での LEU 燃料パードケージ数 固体: [] 軽水: [] (トリウム貯蔵庫 [] 今後の配置条件について、固体は []、軽水は [] 以下に配置制限する
条件1 (参考計算)	それぞれの燃料が設置変更承認申請書上、最大数燃料棚に配置された場合 (棚を埋めるため軽水用は多めに配置)	本条件での LEU 燃料パードケージ数 固体: [] 軽水: [] (トリウム貯蔵庫: [])
条件2 (参考計算)	それぞれの燃料が燃料棚から取り出されて床面に配置された場合 (体系を球体に近くなるようパードケージ数を多めに配置)	本条件での LEU 燃料パードケージ数 固体: [] 軽水: [] (トリウム貯蔵庫 [])
条件3 (参考計算)	設置変更承認申請書に記載がある、パードケージ水没、無限配列条件	本条件での LEU 燃料パードケージ数 固体: 無限 軽水: 無限

条件0：現在の燃料貯蔵棚と同じ配置数の場合

まず初めに、現在の燃料貯蔵棚と同じ数となるよう、固体減速炉心用パードケージを [] と軽水減速炉心用パードケージ [] 並べ、実配置に近くなるよう、固体減速炉心用パードケージの [] に、後述のトリウム燃料貯蔵庫 (トリウム燃料のみ) を [] 配置し、乾燥空気中の水分含有率を 0%、2%程度 (湿度で 0%、100%に相当) に変化させた場合と、水没した場合について実効増倍率を計算した。この条件において、貯蔵に関する未臨界性を判定する。そのため、今後の燃料貯蔵棚の配置条件については、固体は []、軽水は [] 以下に配置制限する。

条件1：それぞれの燃料が設置変更承認申請書上、最大数燃料棚に配置された場合

固体減速炉心用バードケージ、軽水減速炉心用バードケージそれぞれについて、それぞれの燃料が設置変更承認申請書に記載されている燃料棚の最大数保管された条件で計算を行った。乾燥空気中に実際に貯蔵されるバードケージ数よりも多い数のバードケージを有限個隣接させて配置し、乾燥空気中の水分含有率を0%、1%、2%程度（湿度で0%、50%、100%に相当）に変化させて実効増倍率を計算した。本条件は、保守的となるよう実際に貯蔵されるバードケージ数よりも多いバードケージ数において計算を行い、空気中の水分含有率を変化させて計算を実施した。この条件では、それぞれのバードケージが個別に全ての貯蔵棚を占拠した場合であっても、未臨界であることを確認するためである。

条件2：燃料棚から取り出し、床面に配置した場合

条件2では、設置変更承認申請書上配置できるバードケージ数について、燃料棚からバードケージを取り出し、床面に設置した場合を想定した。保管状況を包含するように、より保守的な条件となる配置として、体系からの中性子の漏れの効果が少なくなるようバードケージを球体に近くなるように固めて配置した（そのため、固体用は設置変更承認申請書上での数よりも数を多めに配置している）。配置したバードケージの数は、実際に保管されるバードケージ数よりも多い数である。条件2においても、空気中の水分含有量を条件1と同様に変化させた。

条件3：バードケージが水没し、無限に配列した場合

設置変更承認申請書に記載があるとおり、バードケージを水没させ、バードケージを無限に配列させた条件（バードケージ単体に対する完全反射境界条件）で計算を行った。条件1、条件2では、有限個数にて計算を実施しており、完全反射境界条件ではないため、中性子の漏れの効果が考慮されているが、条件3では、無限配列で完全反射境界条件のため、条件3は、条件1と条件2に比べてより保守的な条件となる。

条件1及び条件2では、空気中の湿度100%の条件において、燃料棚に近接するトリウム貯蔵庫 \blacksquare を配置させたバードケージ群下部に隣接させた（図9参照）。トリウム貯蔵庫については、貯蔵庫による遮蔽の効果を無視するために、より保守側となるよう貯蔵庫自体は設置せずに、トリウム燃料のみを配置した。実配置では、上述のとおり固体減速炉心用 \blacksquare の方が、 \blacksquare は少なく、また、 \blacksquare はウラン系燃料棚から遠く離れているため無視できるが、計算においては、貯蔵庫を \blacksquare として、本来は無視できる \blacksquare の分を足した全量を \blacksquare に全貯蔵量を均等に割り振り、さらに、実配置では離れて設置されている \blacksquare を固体減速炉心用燃料貯蔵棚及び軽水減速炉心用燃料貯蔵棚に \blacksquare をそれぞれの \blacksquare させた。トリウムの総重量約 \blacksquare トリウムの密度 \blacksquare とすると、総体積は約 \blacksquare となる。これを立方体の貯蔵庫 \blacksquare とすると一辺が \blacksquare となる。計算では、これより大きめに \blacksquare として計算を行った。また、図9に示すとおり、実配置に近くなるような形で、 \blacksquare のトリウム貯蔵庫 \blacksquare 配置した。

計算には、連続エネルギーモンテカルロ計算コードMCNP6（version 1.0）と断面積ライブラリはJE

NDL-4.0 を用いた（ヒストリー数: 2×10^8 ）。また、未臨界の判定条件は、実効増倍率が 0.95 を下回ることにした。

● 計算モデル

バードケージの内部ボックスには、表 1 に示したとおり、燃料要素を物理的に収納可能な最大枚数まで収納する。図 7(a)、(b)に収納する固体減速炉心用燃料要素図と軽水減速炉心用燃料要素図をそれぞれ示す。また、図 8(a)、(b)に固体減速炉心用燃料要素と軽水減速炉心用燃料要素の計算モデルをそれぞれ示す。固体減速炉心用の計算体系は [] の枠の中心に、燃料角板 [] を積み重ねたスタック [] を束ねて設置した。一方、軽水減速炉心用の計算体系は [] の枠の中心に標準型燃料板 [] を並べたものを [] もとなっている。内部ボックスは [] とし、[] 外枠のモデル化は省略するが、内部ボックス同士の隔離距離は維持されるように外枠の寸法は確保したままとした。外枠の内部については、水または空気を満たす。

条件 0 の計算では、燃料棚は省略し、上述のとおり固体減速炉心用燃料バードケージと軽水減速炉心用燃料バードケージ、トリウム燃料を [] した。

固体減速炉心用燃料バードケージの条件 1 の計算では [] にバードケージを隣接して配置した（実際の貯蔵棚数は []）。軽水減速炉心用燃料バードケージの条件 1 の計算では [] にバードケージを隣接して配置した（実際の貯蔵棚数は []）。

固体減速炉心用燃料バードケージの条件 2 の計算では [] にバードケージを隣接して配置した。軽水減速炉心用燃料バードケージの条件 2 の計算では [] にバードケージを隣接して配置した。例として、図 9 に固体減速炉心用燃料バードケージの条件 1、条件 2 における配置図を示す。それぞれの計算では、実際に保管する燃料バードケージに比べて十分保守的となるような数のバードケージを配置した。表 2～表 7 に燃料ミート部及び被覆材、バードケージ鋼材、トリウム燃料の原子個数密度を示す。保有するトリウムは [] であり、[] とし、現有の総重量から原紙個数密度を算出した。軽水減速炉心用燃料の貯蔵の場合と固体減速炉心用燃料の貯蔵の場合それぞれについて、現在の保管状況を考慮し、遠くに設置してあるトリウム貯蔵庫を [] されているトリウム貯蔵庫に近づけ、さらに、これらのトリウム貯蔵庫を固体用、軽水用それぞれの [] 条件で計算を行った。

● 計算結果

条件 0 :

実配置と同じバードケージ数 [] を配置した場合

空気中（湿度0%） : $K_{eff}=0.07684 \pm 0.00002$

空気中（湿度100%） : $K_{eff}=0.07686 \pm 0.00002$

水没 : $K_{eff}=0.39772 \pm 0.00014$

固体減速炉心用燃料バードケージ、軽水減速炉心用燃料バードケージ、トリウム燃料と実配置を模擬した条件では、

判定基準である $K_{eff}=0.95$ に比べて、実効増倍率は十分に小さい値となった。さらに、実際の燃料貯蔵棚に収納するとバードケージ間の隔離距離は拡大することより、実際の燃料を収納した場合の実効増倍率はより小さい値となる。また、実際に収納される燃料要素枚数、バードケージ数は本条件よりも少ないため、実効増倍率はさらに小さい値となる。また、トリウム貯蔵庫の影響は極めて小さい。以上より、実際の貯蔵状態であれば、臨界に達するおそれはない。

条件 1 :

固体減速炉心用燃料バードケージを [] にスタックさせた場合

空気中 (湿度0%) : $K_{eff}=0.07719\pm 0.00001$

空気中 (湿度50%) : $K_{eff}=0.07720\pm 0.00001$

空気中 (湿度100%) : $K_{eff}=0.07720\pm 0.00001$

空気中 (湿度100%) +トリウム [] : $K_{eff}=0.07738\pm 0.00001$

軽水減速炉心用燃料バードケージを [] にスタックさせた場合

空気中 (湿度0%) : $K_{eff}=0.05798\pm 0.00000$ (表示桁数より誤差は小さい、以下同じ)

空気中 (湿度50%) : $K_{eff}=0.05798\pm 0.00000$

空気中 (湿度100%) : $K_{eff}=0.05799\pm 0.00000$

空気中 (湿度100%) +トリウム [] : $K_{eff}=0.05811\pm 0.00000$

最も厳しい結果を与える空気中 (湿度100%) においても、判定基準である $K_{eff}=0.95$ に比べて、実効増倍率は十分に小さい値となった。さらに、実際の燃料貯蔵棚に収納するとバードケージ間の隔離距離は拡大することより、実際の燃料貯蔵棚に収納した場合の実効増倍率はより小さい値となる。また、実際に収納される燃料要素枚数、バードケージ数は本条件よりも少ないため、実効増倍率はさらに小さい値となる。また、トリウム貯蔵庫の影響は極めて小さい。以上より、実際の貯蔵状態であれば、臨界に達するおそれはない。

条件 2 :

固体減速炉心用燃料バードケージを [] にスタックさせた場合

空気中 (湿度0%) : $K_{eff}=0.09022\pm 0.00001$

空気中 (湿度50%) : $K_{eff}=0.09024\pm 0.00001$

空気中 (湿度100%) : $K_{eff}=0.09024\pm 0.00001$

空気中 (湿度100%) +トリウム [] : $K_{eff}=0.09045\pm 0.00001$

軽水減速炉心用燃料バードケージを [] にスタックさせた場合

空気中 (湿度0%) : $K_{eff}=0.06554\pm 0.00000$ (表示桁数より誤差は小さい、以下同じ)

空気中 (湿度50%) : $K_{eff}=0.06555\pm 0.00000$

空気中 (湿度100%) : $K_{eff}=0.06554\pm 0.00000$

空気中 (湿度100%) +トリウム [] : $K_{eff}=0.06573\pm 0.00000$

最も厳しい結果を与える空気中 (湿度100%) においても、判定基準である $K_{eff}=0.95$ に比べて、実効増倍率は十分

に小さい値となった。ただし、実際に収納される燃料要素枚数、バードケージ数は本条件よりも少ないため、実際の燃料貯蔵棚に収納した場合の実効増倍率はより小さい値となる。併せて、貯蔵時と同様トリウム貯蔵庫の影響は極めて小さい。以上より、実際の貯蔵状態であれば、臨界に達するおそれはない。

条件3：

固体・軽水減速炉心用バードケージを水没させ、無限に配列（バードケージ単体に対する完全反射境界条件）

固体減速炉心用バードケージ： $K_{eff}=0.46645\pm 0.00034$

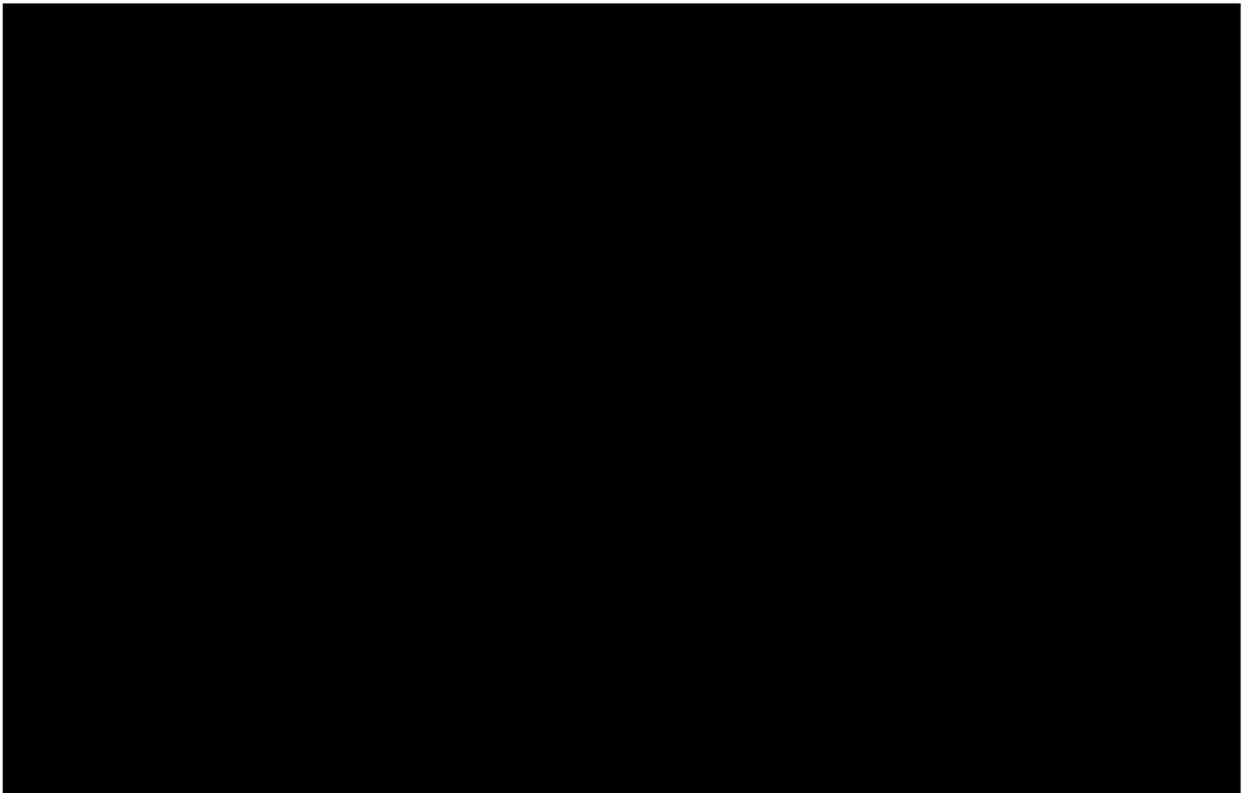
軽水減速炉心用バードケージ： $K_{eff}=0.52072\pm 0.00036$

水没・無限配列条件においても、判定基準である $K_{eff}=0.95$ に比べて、実効増倍率は十分に小さい値となった。

以上のことから、本バードケージ及びそれを収納する燃料棚は、臨界に達するおそれのない設計となっている。

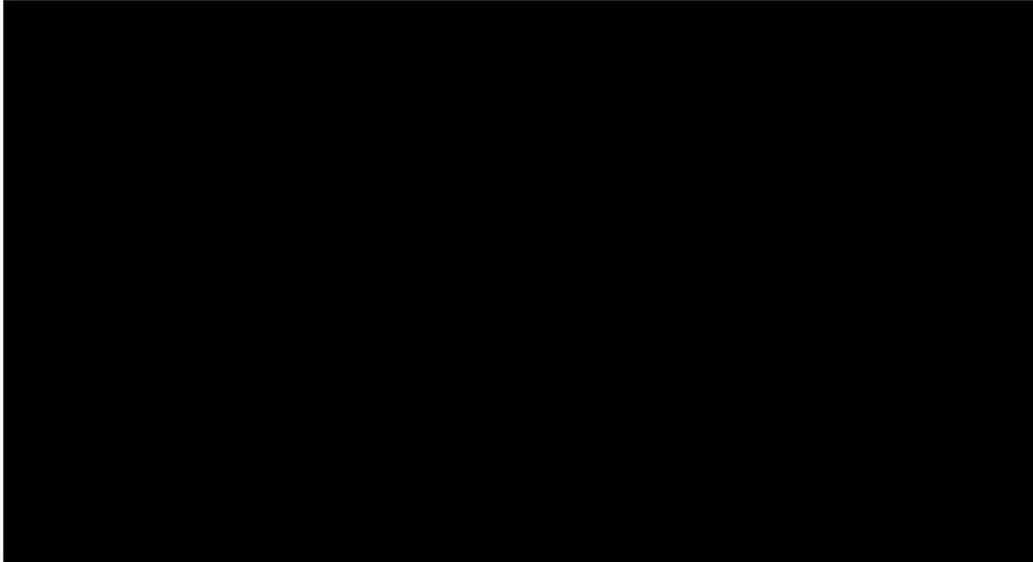


(a) 固体減速炉心用

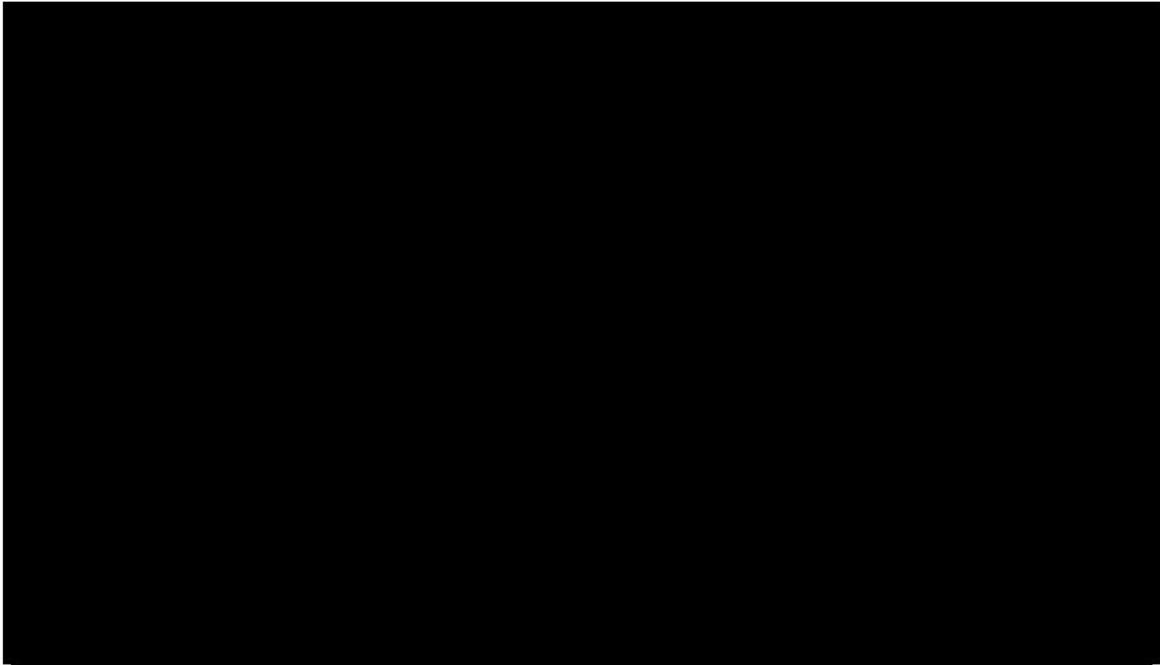


(b) 軽水減速炉心用

図7 収納する燃料要素図



(a) 固体減速炉心用

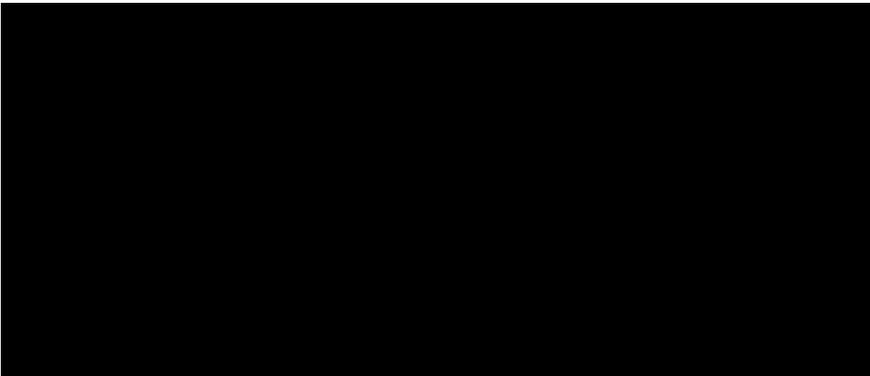


(b) 軽水減速炉心用

図8 計算モデル



(a) 条件1



(b) 条件2

図9 固体減速炉心用燃料バードケージの配置図

