

実機スプレイ設備を用いた液滴径計測試験及び液滴条件設定について

目 次

	頁
1. はじめに	別添4-1
2. スprayヘッド実機を用いた液滴径取得試験	別添4-1
2.1 試験目的	別添4-1
2.2 試験方法	別添4-1
3. 試験結果及び考察	別添4-3
3.1 試験結果	別添4-3
3.2 試験結果の考察	別添4-12
4. 液滴径の基本ケース条件の設定	別添4-19
5. 液滴径の不確かさを考慮した条件の設定	別添4-19

1. はじめに

使用済燃料ピット（以下「SFP」という。）未臨界性評価における水分条件である気相部水密度の算出に必要な放水中液滴の落下速度については、スプレーヘッド及び放水砲による放水の液滴径より計算している。今回評価では、スプレーヘッド実機を使用した試験により取得した液滴データを踏まえた値を、放水砲由来の液滴にも設定することとしている。本資料では、スプレーヘッド実機を用い実施した液滴径計測試験について、及び試験結果を踏まえた基本ケース条件及び不確かさを考慮した条件の設定について説明する。

2. スプレーヘッド実機を用いた液滴径取得試験

2.1 試験目的

気相部水密度の算出式($Q/A \cdot V$) [g/cm^3] (Q : 流量 [g/s] A : 面積 [cm^2] V : 液滴下降速度 [cm/s])により評価するが、液滴の下降速度を算出するには放水中の液滴径が必要となることから、スプレーヘッド実機を用いた試験によりスプレー時の液滴径データを取得する。

2.2 試験方法

第1図に示すように、SFP類似設備にてスプレーヘッドにより放水を行い、燃料ラック頂部高さ相当位置での液滴径を測定した。測定点の配置（平面図）を第2図に示す。

スプレー時の液滴を、シリコンオイルで満たされた容器に捕獲し、シリコンオイル表面に浮かんだ液滴を画像処理によりサンプリングし、液滴径分布を取得した。液滴捕獲装置の概要を第3図に示す。

流量等の諸条件は、スプレー設備の運用を踏まえ第1表に示すとおり設定した。また、本試験は計2回行った。

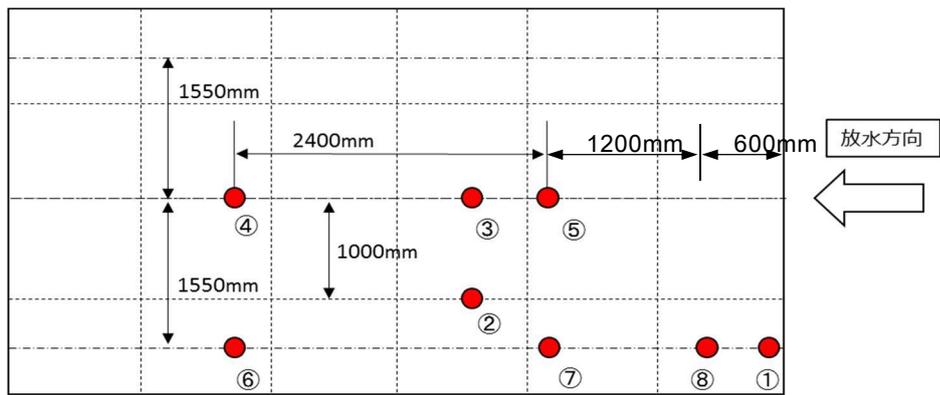
第1表 試験条件

使用設備	スプレーヘッド 可搬型消防ポンプ
流量等	
水	水道水（常温）

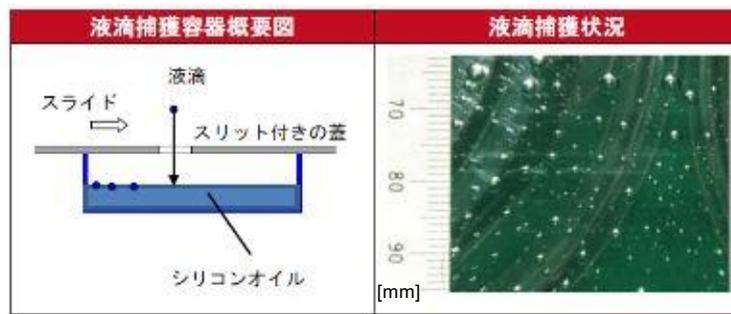
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第1図 液滴径測定試験 試験体系及び試験の様子



第2図 液滴径分布測定位置 (平面図)



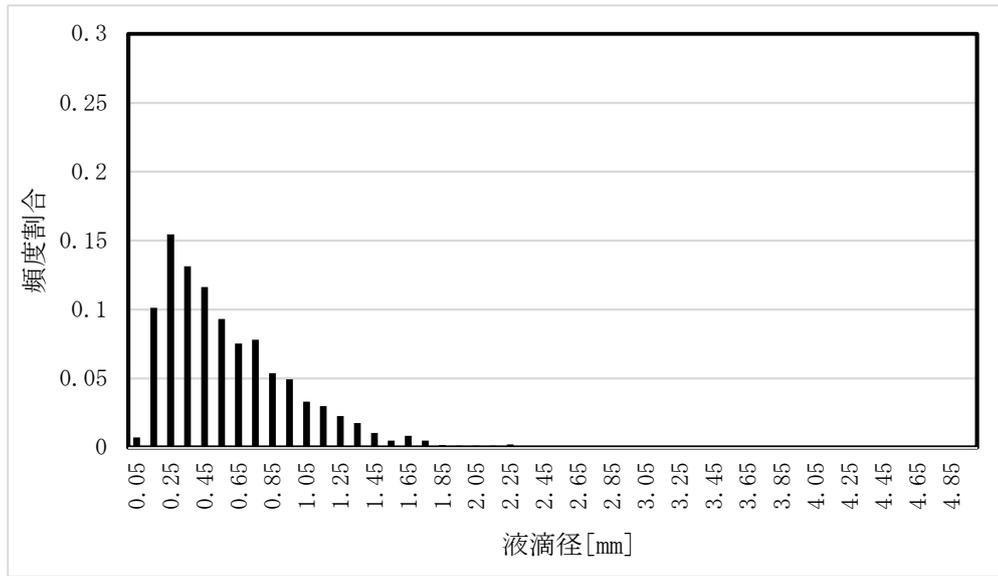
第3図 液滴捕獲装置の概要及び取得液滴の様子

3. 試験結果及び考察

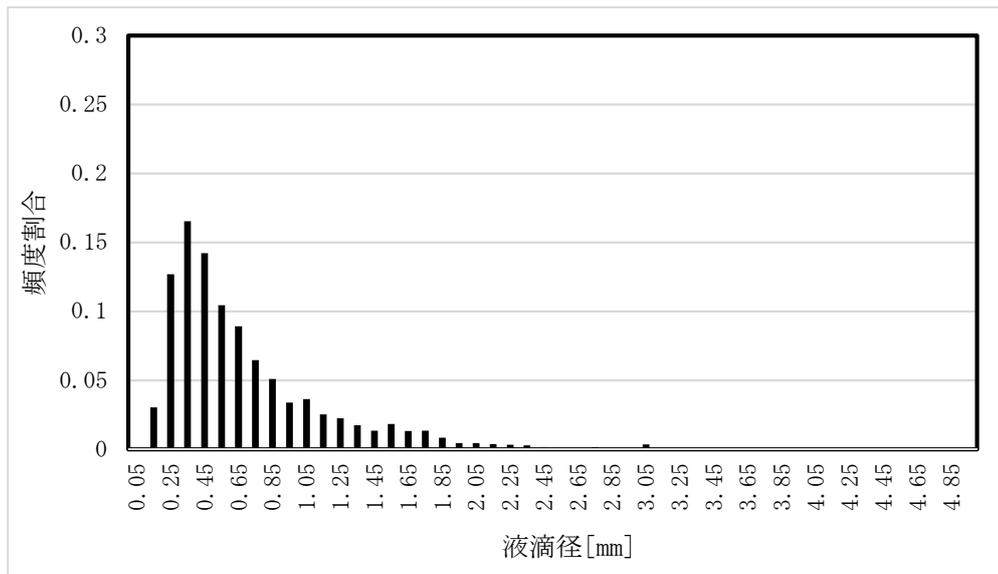
3.1 試験結果

2回の試験で得られた液滴径ごとの個数割合をグラフにしたものを第4-1図及び第4-2図に示す。使用済燃料ラック上部におけるスプレー水は、液滴径0.2～0.4mmの液滴が個数としては支配的であり、液滴径が大きくなるにつれ、徐々に個数が減少していく傾向にある。

測定点①

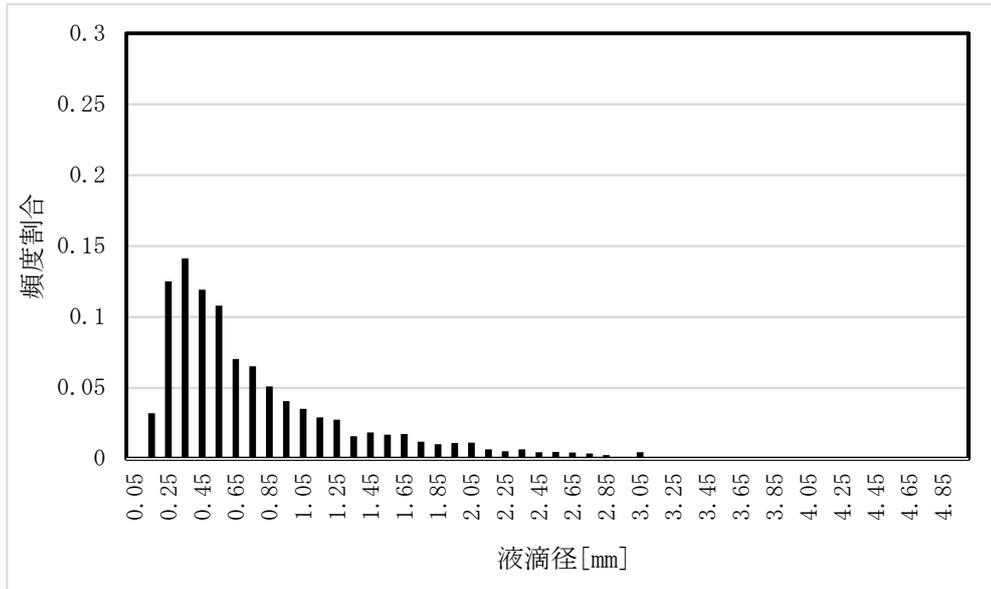


測定点②

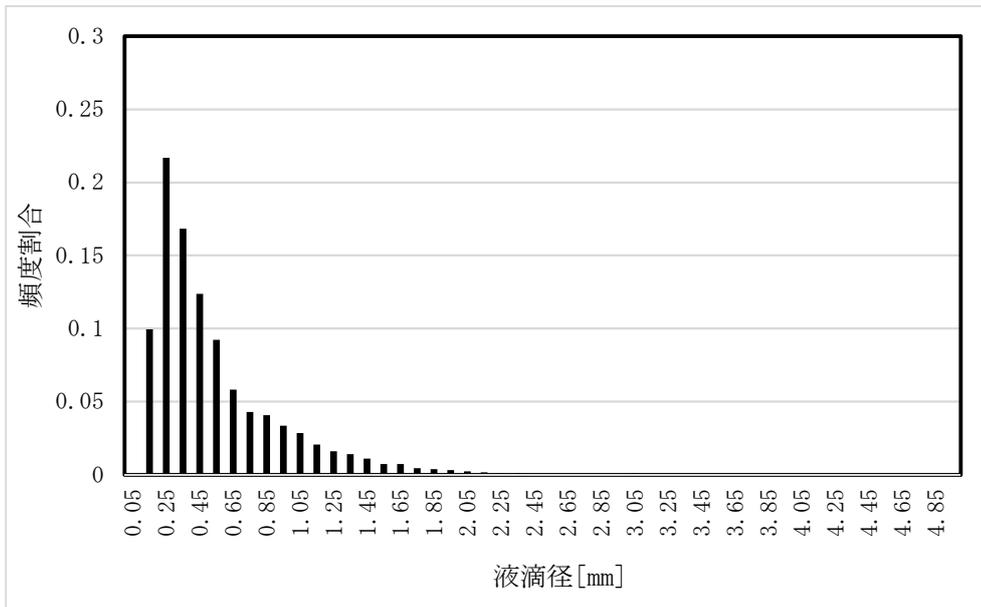


第4-1図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点③

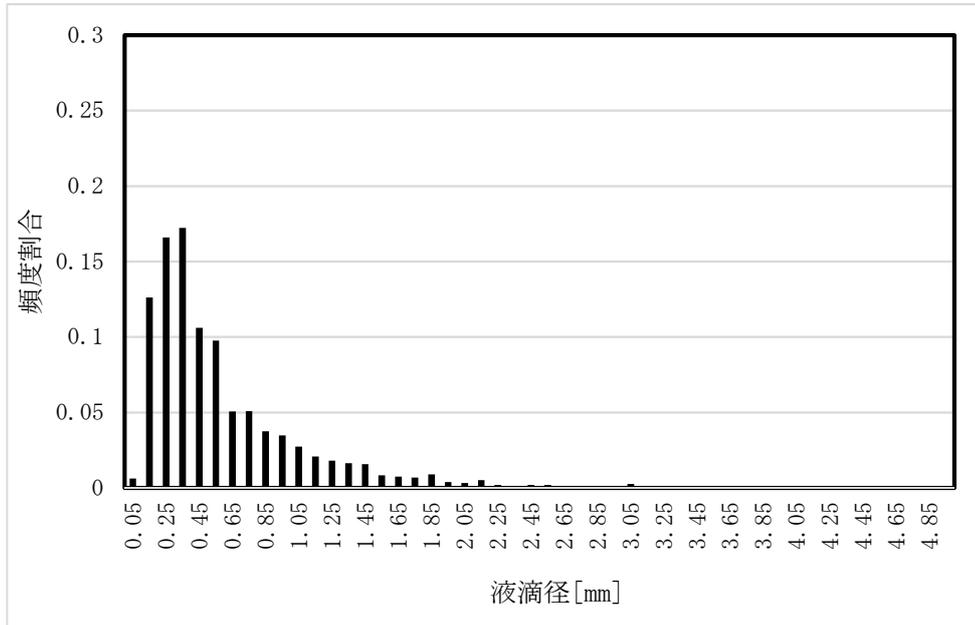


測定点④

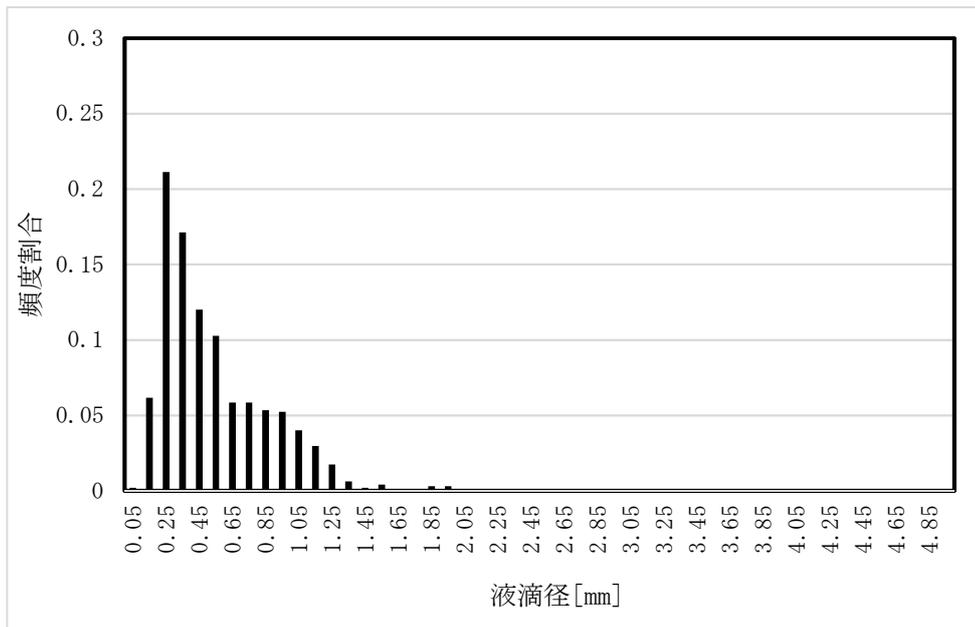


第4-1図(2/4) 液滴体積分率の取得結果(1回目)

測定点⑤

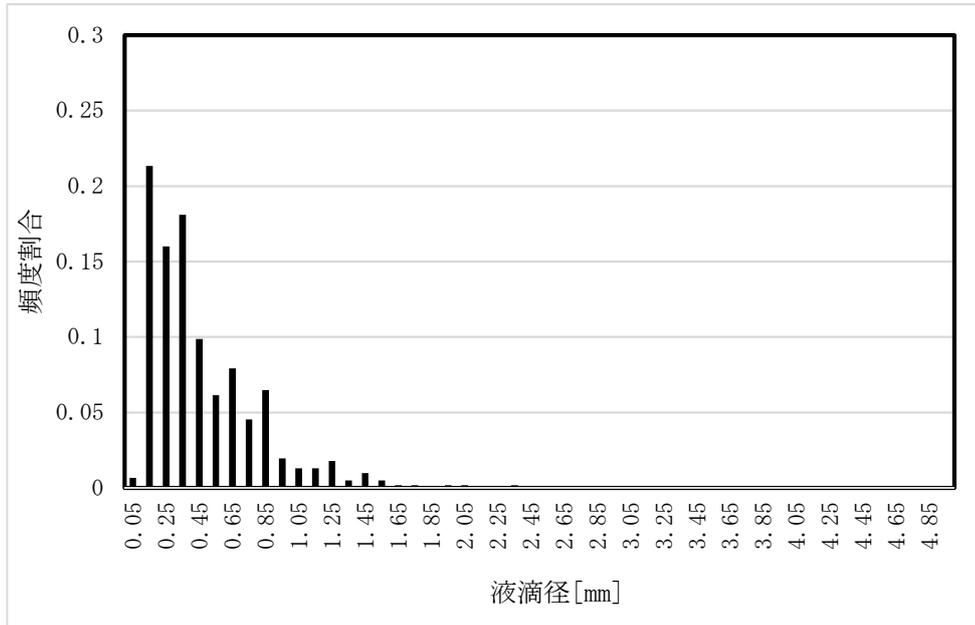


測定点⑥

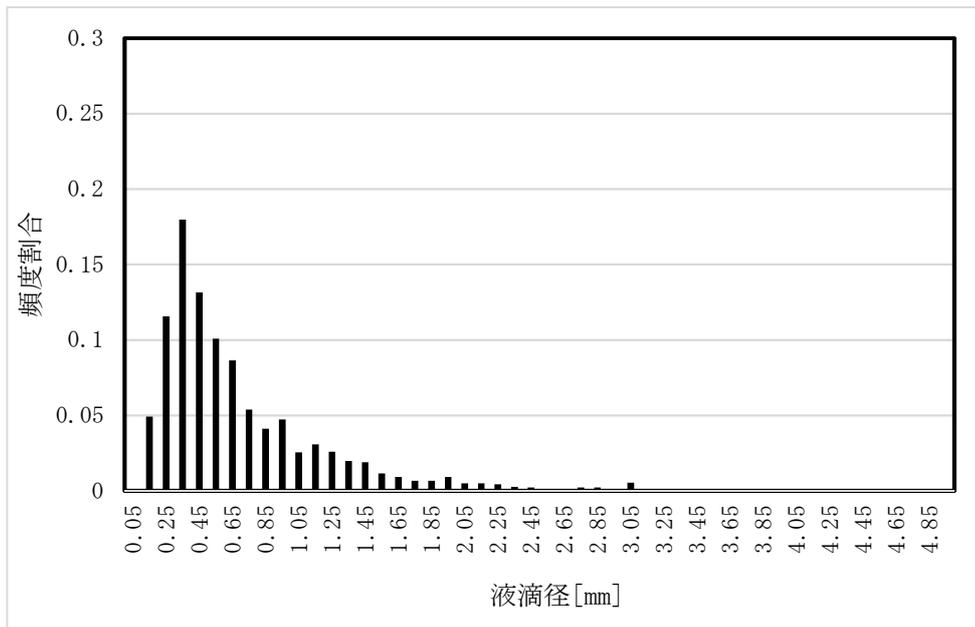


第4-1図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑦

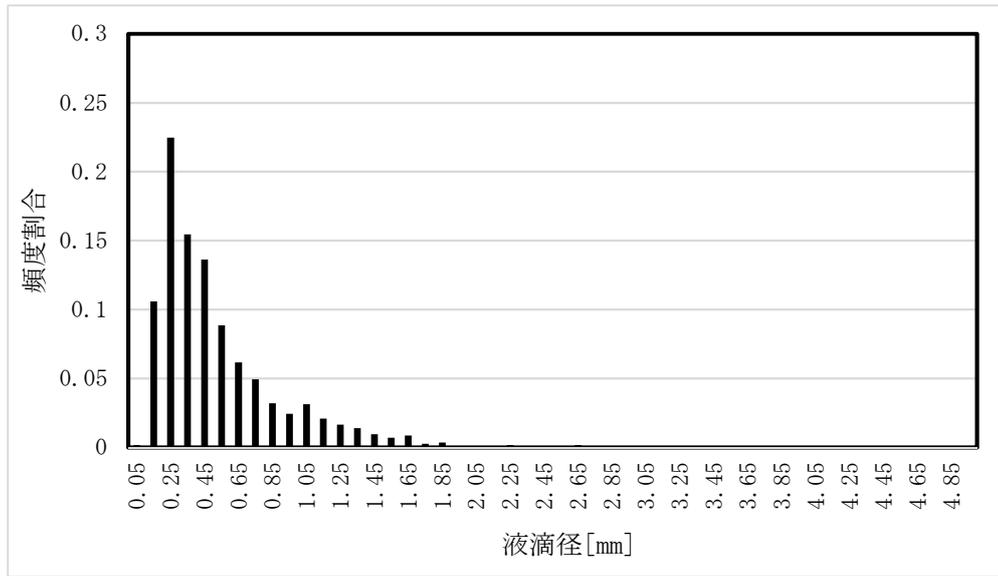


測定点⑧

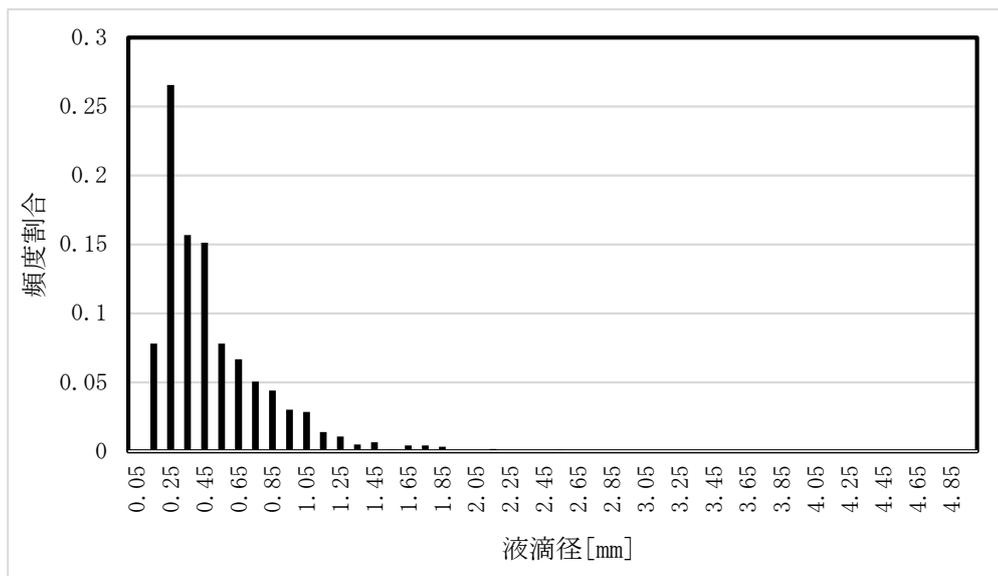


第4-1図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点①

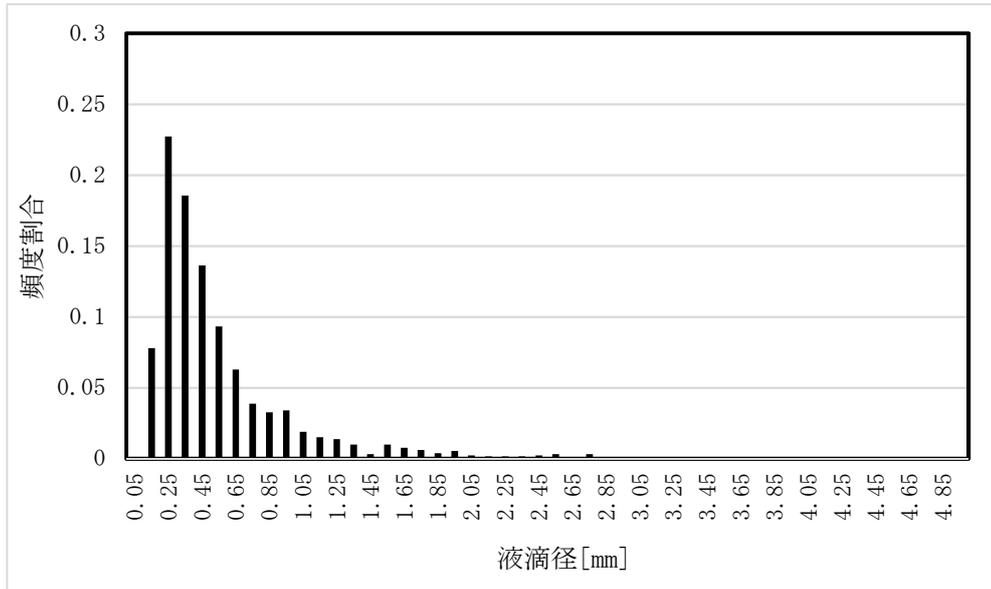


測定点②

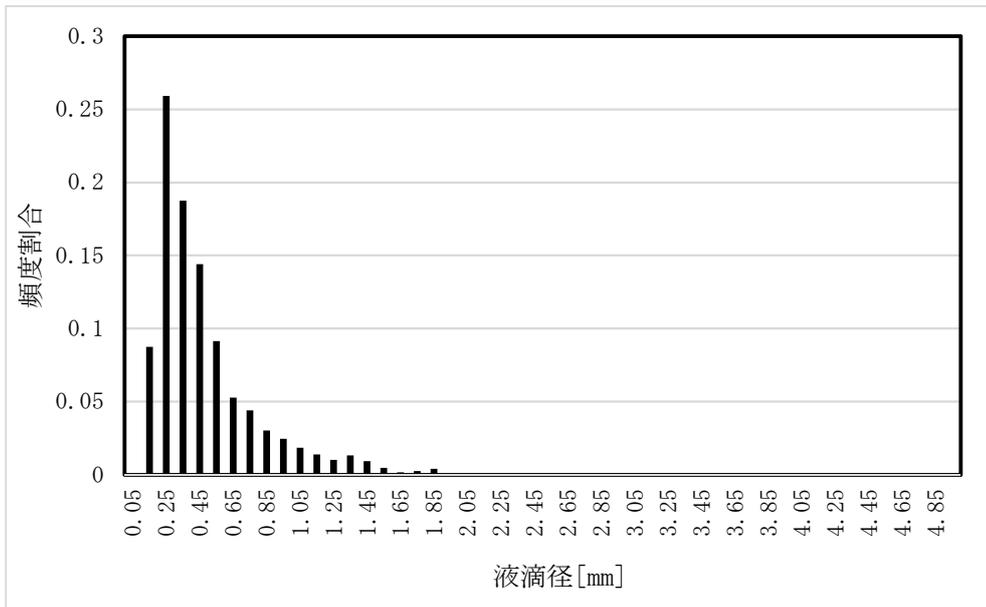


第4-2図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点③

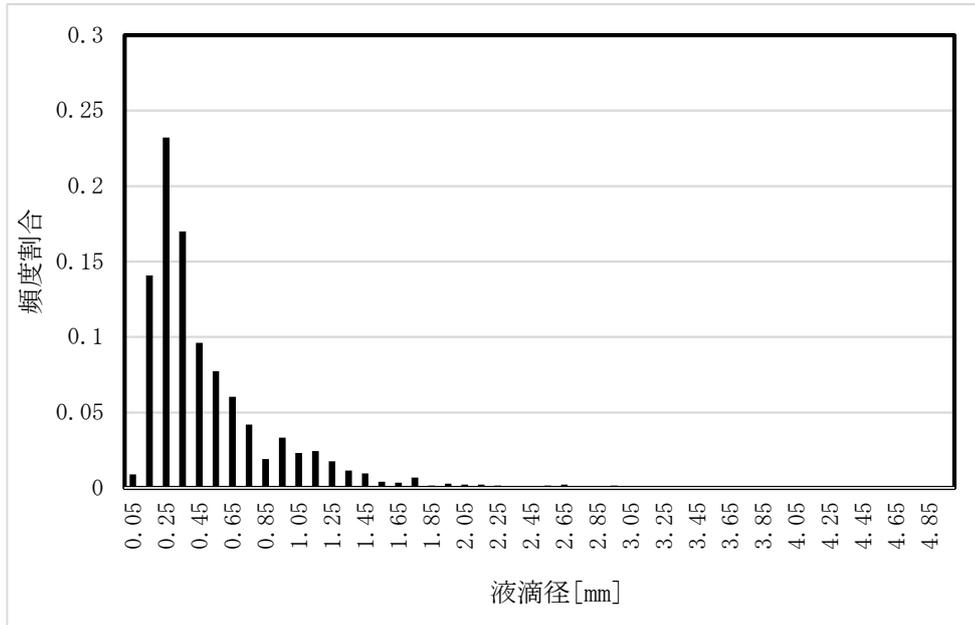


測定点④

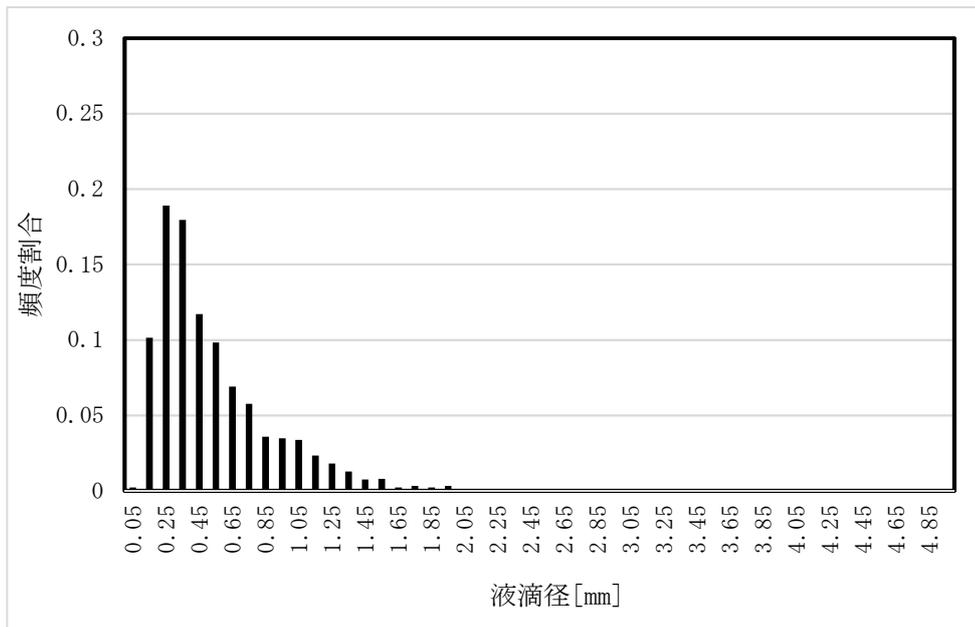


第4-2図(2/4) 液滴体積分率の取得結果(2回目)

測定点⑤

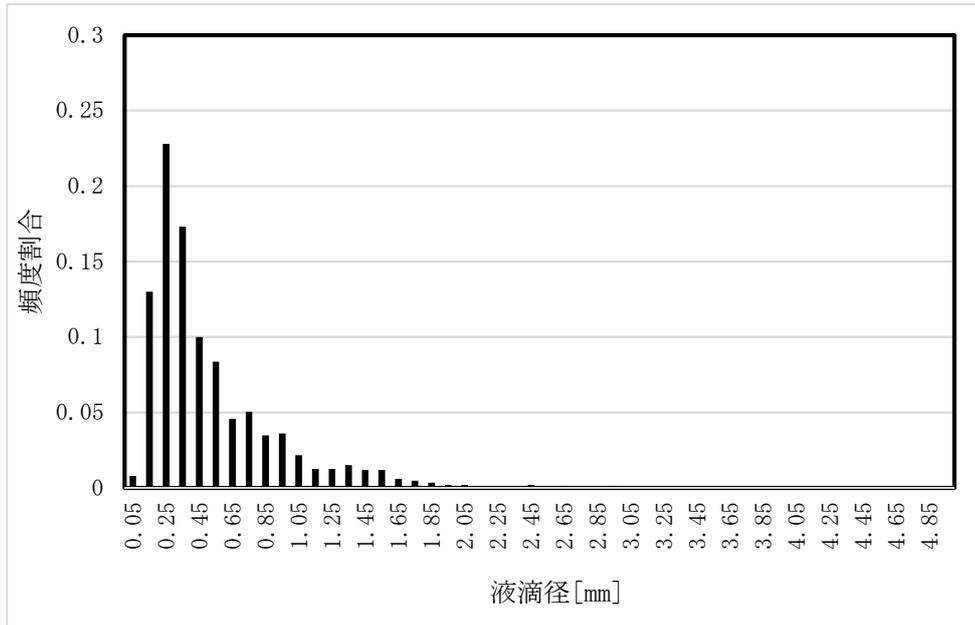


測定点⑥

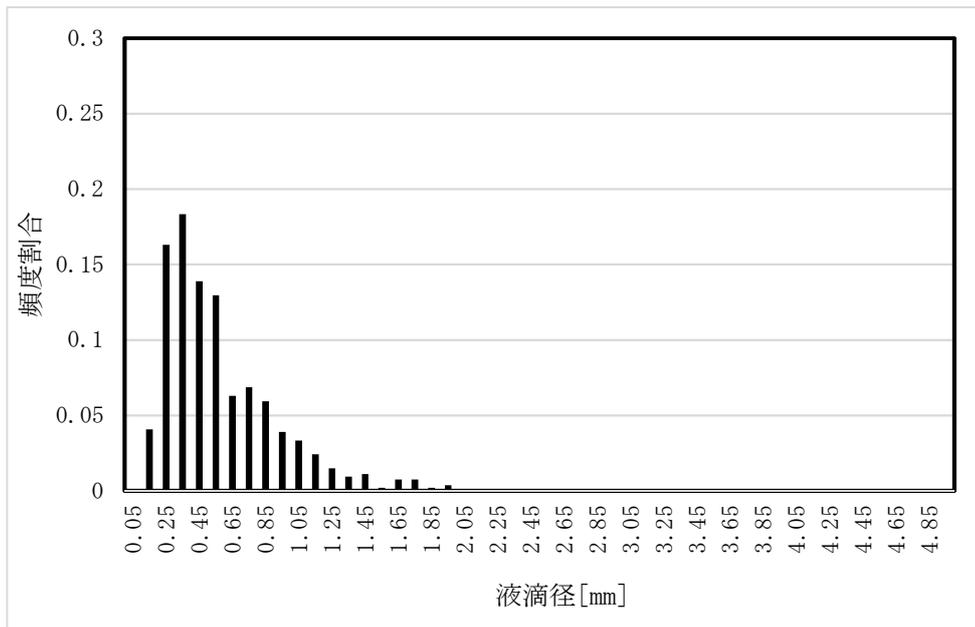


第4-2図(3/4) 液滴体積分率の取得結果(2回目)

測定点⑦



測定点⑧



第4-2図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

3.2 試験結果の考察

第4-1図及び第4-2図に示す試験データ（第1回目と第2回目）の試験結果より、試験ごとに8点計測したすべての計測点において、数百個以上取得された液滴の個数割合分布が0.2～0.4mmで支配的となっていることから、試験回数を増やしたとしても液滴個数割合の分布形状は大きく変わることはなく、また測定点以外の箇所であっても同様の液滴径の分布をとることが推定される。

液滴や周囲の気体の流れは、流量等の試験条件が一定であっても変動を伴うことから、結果として生じる液滴径にはばらつきが生じる。加えて、実際のスプレーでは飛程のなかで衝突/分裂等も生じ、これらもばらつきの要因となる。

本試験では、上記のばらつきの分布を把握できるように各計測点においてそれぞれ数百個以上の液滴を計測した。これら多数のデータについて正規確率プロット（詳細は以下参照）を用いて正規性の確認を行ったところ、各計測点とも対数正規分布に近い液滴径分布を得た。計測結果に正規性があるということは、一般に自然現象としてのばらつきを再現したサンプリングと捉えることができる。

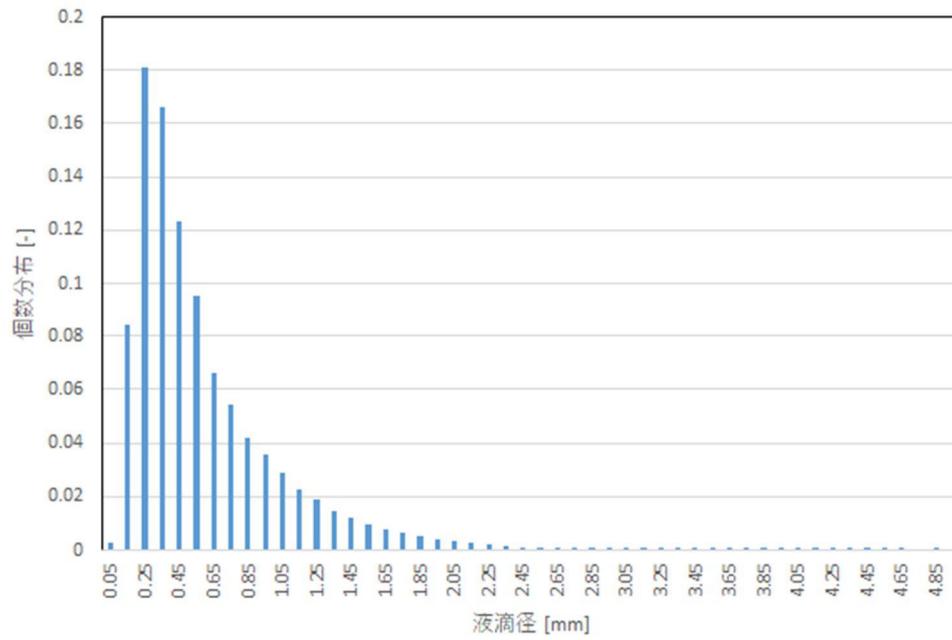
なお、既往の研究にて、ノズルから噴出された水が液滴に微粒化するまでの過程を確率的にモデル化した場合の粒径分布が対数正規分布で近似され、実際に測定した粒径分布とも良好に一致すること¹、種々のスプリンクラー・スプレーノズルを用いた試験で取得した粒径分布が対数正規分布で近似されたことが知られて²おり、これらからも、各測定点での個数分布割合が対数正規性を有していた今回試験結果は妥当と考えられる。

また、試験データがスプレーヘッドの液滴の特徴を代表した液滴データを取得できているかを確認するため、全測定点のデータを合算したもの（第5図）と、放水方向の直線上に位置する点のうち放水分布図の中心付近に位置し計測点を代表していると考えられる⑤点（第1回試験及び第2回試験）について、個数割合取得結果に対する検定を有意水準5%として実施した。検定に当たっては各測定点での個数分布割合には対数正規性があることを踏まえ、個数割合を対数変換し、F検定により等分散性を確認したうえで、「等分散を仮定したt検定」を実施した。

結果を第2表及び第3表に示すが、2群間の分散及び平均に差が無いとする仮説を棄却しない結果となった。つまり平易には、全測定点のデータを合算し得られる液滴個数分布は95%の確率でスプレーヘッド実機によるスプレー時の液滴個数分布に等しいと言える。よって、試験で取得した液滴個数割合は、スプレーヘッドの液滴の特徴を代表できていると言える。

¹ 松本史朗、高島洋一、スプレーの粒径分布：化学工学第33巻第4号（1969）

² Spray Characteristics of Fire Sprinklers(NIST GCR 02-838) : David Thomas Sheppard, Northwestern University(2002)



第5図 液滴径ごとの個数分布(全測定点データ合算)

第2表 ⑤点と全測定点データ合算値に対するF検定

帰無仮説 H_0 ：2群間の分散に差がない（等分散である）

対立仮説 H_1 ：2群間の分散に差がある（等分散ではない）

検定対象	第1回⑤	全測定データ
分散	0.001703	0.001531
自由度	41	48
F値	1.1123	
P値	0.3594	
棄却域の境界値	1.6395	
判定	P>0.05より、帰無仮説 H_0 は棄却されない	

検定対象	第2回⑤	全測定データ
分散	0.001867	0.001531
自由度	48	48
F値	1.219	
P値	0.2476	
棄却域の境界値	1.615	
判定	P値>0.05より、帰無仮説 H_0 は棄却されない	

<第2表に関する説明>

二つのサンプルにおいてカイ二乗変数に従う変数の比は「F分布」に従う。F値とは二つのサンプルの分散の比であり、F検定ではF値を、F分布において上側確率が有意水準0.05となる数値（棄却域との境界値。以下「 $F_{0.05}$ 値」という。）と比較する。F値 $>F_{0.05}$ 値である場合、F値は棄却域に入るため有意水準5%で有意であり、帰無仮説を棄却して対立仮説を採択する。反対にF値 $<F_{0.05}$ 値であれば、帰無仮説は棄却されない。

P値は、帰無仮説が正しいという仮定のもと、今回得られた値が偶然ではないとする確率のことであり、F分布における $F_{0.05}$ 値に対する外側確率である。P値が有意水準0.05よりも小さい場合、得られた値は偶然ではないという確率は小さいと判断し、帰無仮説を棄却し対立仮説を採択する。反対にP値が0.05より大きい場合、帰無仮説は棄却されない。

今回検定の結果、F値 $<F_{0.05}$ 値（P値 >0.05 ）であったため、全測定点のデータを合算し得られる個数割合の分布（第5図）と、計測点を代表していると考えられる⑤点での個数割合の分布という2群のデータについて、F値は棄却域に入らないことから、それぞれの分散に差があるとは言えない、という結果となった。

第3表 ⑤点と全測定点データ合算値に対するt検定

帰無仮説 H_0 ：2群間の平均に差が無い

対立仮説 H_1 ：2群間の平均に差がある

検定対象	第1回⑤	全測定データ
自由度	89	
t値	0.3846	
P値（両側）	0.7014	
棄却域の境界値 （両側）	1.9870	
判定	P>0.05より、帰無仮説 H_0 は棄却されない	

検定対象	第2回⑤	全測定データ
自由度	96	
t値	-0.0215	
P値（両側）	0.9829	
棄却域の境界値 （両側）	1.9850	
判定	P>0.05より、帰無仮説 H_0 は棄却されない	

<第3表に関する説明>

t値は平均値や自由度に基づく関数である。これは確率密度関数である「t分布」に従うものであり、t検定ではt値を、t分布において外側確率が有意水準0.05となるtの値（棄却域の境界値。以下「 $t_{0.05}$ 値」という。）と比較する。 $|t値| > t_{0.05}$ である場合、t値は棄却域に入るため有意水準5%で有意であり、帰無仮説を棄却し対立仮説を採択する。反対に、 $|t値| < t_{0.05}$ である場合、帰無仮説は棄却されない。

P値はF検定と同様に、t分布におけるt値に対する外側確率である。P値が有意水準0.05よりも小さい場合、得られた値は偶然ではないという確率は小さいと判断し、帰無仮説を棄却し対立仮説を採択する。反対にP値が0.05より大きい場合、帰無仮説は棄却されない。

今回検定の結果、 $|t値| < t_{0.05}$ （P値>0.05）であったため、全測定点のデータを合算し得られる個数割合の分布（第5図）と、計測点を代表していると考えられる⑤点での個数割合の分布という2群のデータについて、t値は棄却域に入らないことから、それぞれの平均に差があるとは言えない、という結果となった。

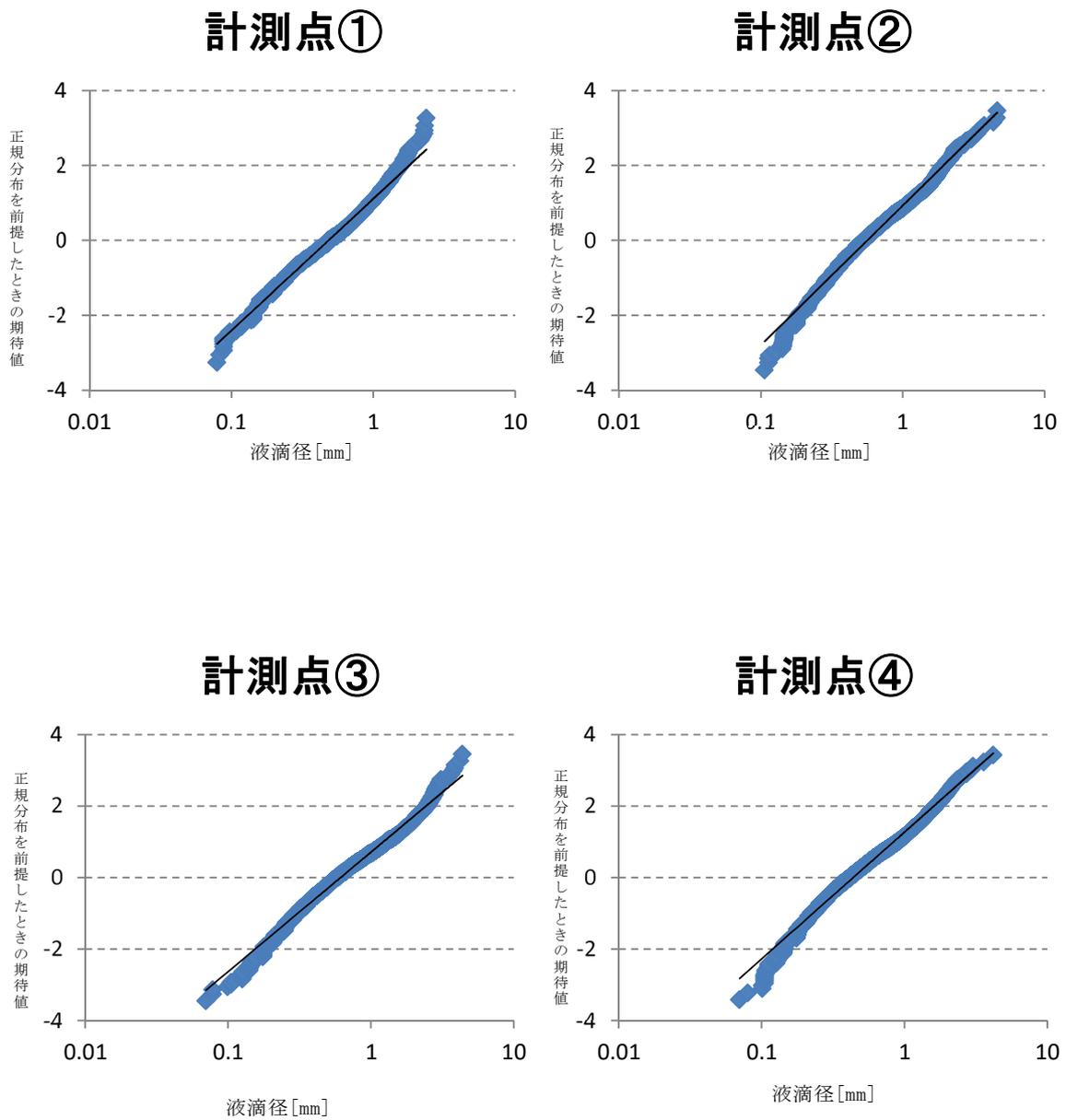
<正規確率プロットについて>

データが正規分布しているかどうかを目視判断するための手法であり、測定値を累積度数分率で整理し、そのプロットが直線状に並べば正規性有り判断できる。

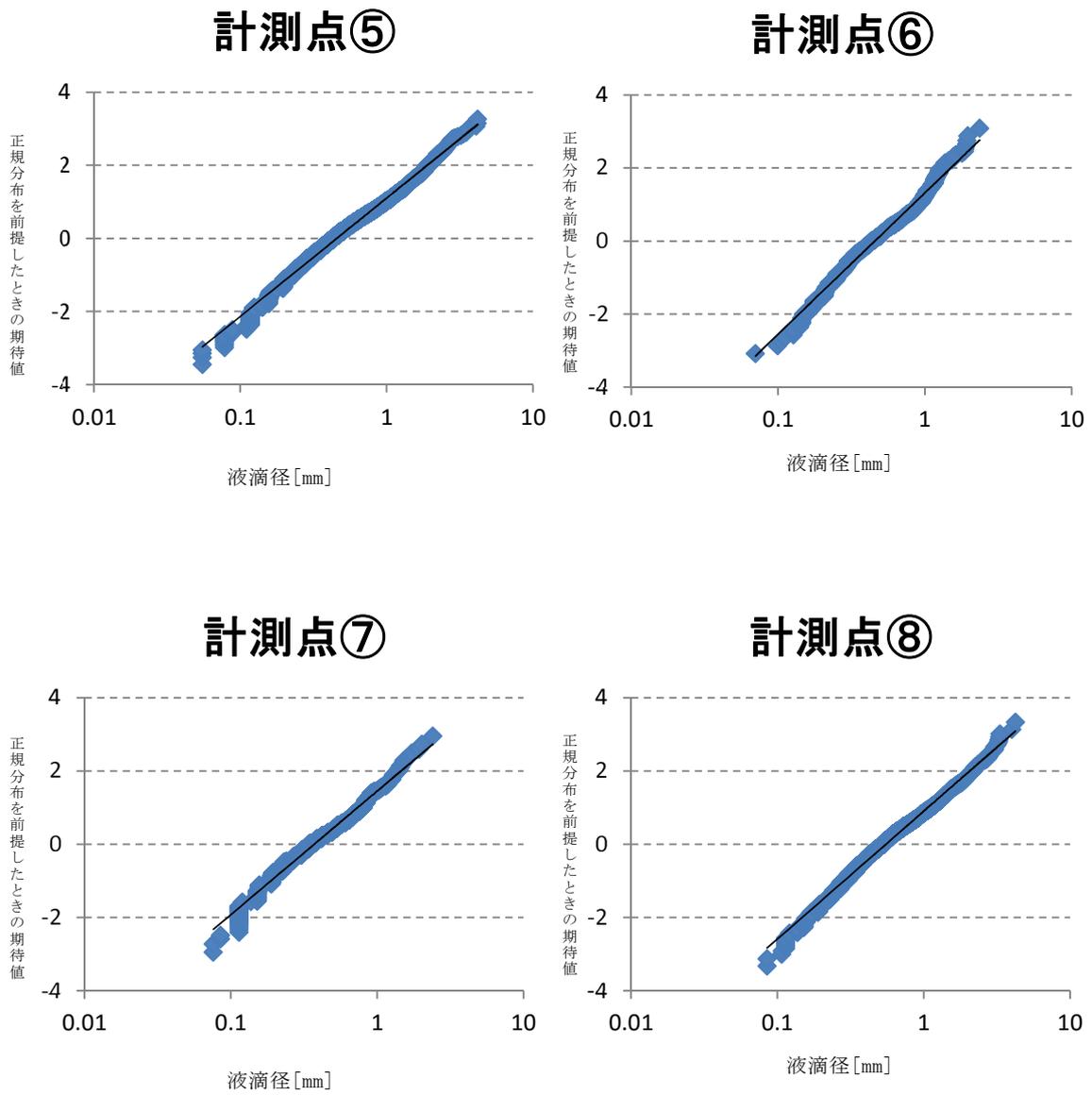
具体的には、取得されたデータについて累積比率（確率 P_i ）を求め、 P_i に対して正規分布の累積分布関数の逆関数を用いて求めた値をプロットし、正規分布なら直線、対数正規分布なら片対数グラフ上の直線に沿うかどうかを判断するものである。

この意味は、標準正規分布に従う x に対応する累積比率（確率 P_i ）を求める関数を逆算しているもので、測定値が正規分布に従うならば散布図を描くと直線状にプロットされることとなる。すなわち、正規性が無い＝正規分布に沿わない＝直線から外れるとして、目視にて正規性の有無を確認できる。

本試験結果の正規確率プロットを第6-1図及び第6-2図に示す。横軸に対数をとるとプロット結果は全点で概ね直線状となることから、本計測結果は対数正規分布に従うと判断できる。



第6-1図 対数正規確率プロット (第1回試験 測定点①~④)



第6-2図 対数正規確率プロット (第1回試験 測定点⑤～⑧)

4. 液滴径の基本ケース条件の設定

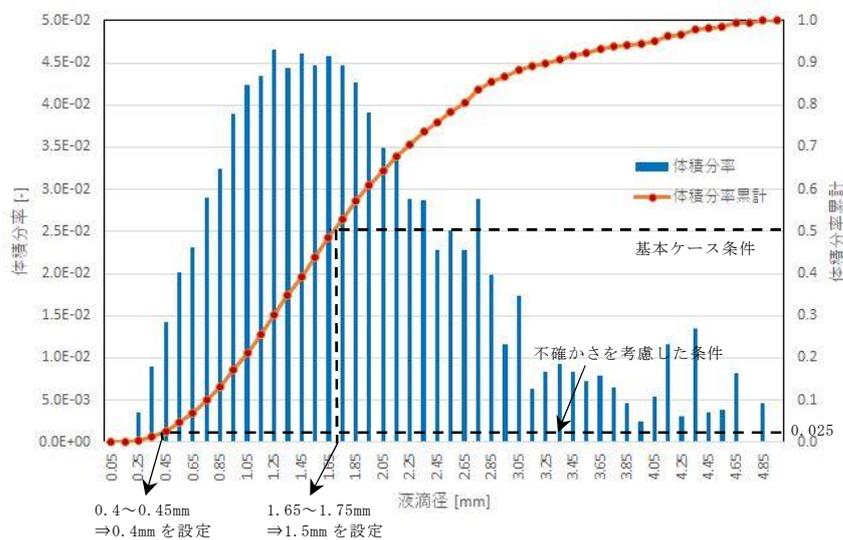
3.2での検討より、各測定点のデータにおいて自然現象のばらつきを示す正規性を有する分布であることが得られたことから、基本ケース条件の設定に当たっては全測定データを合算することにより液滴径を評価する。全測定点の合算データについては、全計測点を代表していると考えられる放水方向の直線上に位置する点（点⑤）との比較検定において有意な差が見られないことから、スプレイヘッドの特徴を代表するデータであり、基本ケースの条件として妥当であると言える。

第5図にて得られた個数分布に対し液滴径ごとの体積を乗じた体積分率で整理した結果、体積分率50%出現値は第7図のとおり1.65～1.75mmとなった。液滴径が小さいほうが、液滴下降速度が小さく気中に液滴が滞在する時間は長くなり、気相部水密度は大きくなることから、基本ケース条件はより小さい液滴径1.5mmを設定する。

5. 液滴径の不確かさを考慮した条件の設定

不確かさを考慮した条件としては、第7図に示す体積分率における両側5%を切り捨てた際の下限值、すなわち体積分率2.5%出現値（0.4mm～0.45mm）を踏まえ、0.4mmを設定する。

なお放水される流量の大部分は、スプレイヘッドではなく放水砲が占めることとなるが、放水砲由来の放水を特徴づける液滴径は2.9mm（文献^{※1}）とされており、スプレイヘッドの液滴径を放水砲由来の液滴に適用することは大幅な保守性を有することになる。



第7図 液滴径ごとの体積分率

※1：宮下達也、石油タンク火災消火時における大容量放水及び泡放射軌跡の予測モデルの構築（2014）

以上

液滴下降速度の算出について

目 次

	頁
1. はじめに	別添5-1
2. 液滴下降速度の算出方法	別添5-1
3. 液滴下降速度算出結果	別添5-3

1. はじめに

使用済燃料ピット（以下「SFP」という。）未臨界性評価における水分条件である気相部水密度の算出に必要な液滴の落下速度について、基本ケース条件としては液滴径を1.5mmとした場合の下降速度を、不確かさ影響を考慮した条件としては液滴径を0.4mmとした場合の下降速度を、それぞれ使用することとした。本資料では、液滴径を用いた下降速度算出方法の詳細について述べる。

2. 液滴下降速度の算出方法

液滴下降速度 v_i は、使用済燃料ピットラック上面を通過する液滴について、ラック頂部高さ相当位置まで落下していることから個々の液滴が終端速度に達していると仮定し、液滴径により決まる終端速度を算出する。

自由落下する液滴の終端速度 v_i は重力と空気抵抗が釣り合う速度として式(1)により求められる。

$$\begin{cases} (\rho_{water} - \rho_{air})gV_i = C_d \rho_{air} \frac{1}{2} v_i^2 A_i \\ V_i = \frac{\pi}{6} d_i^3 & A_i = \frac{\pi}{4} d_i^2 \end{cases} \quad (1)$$
$$\therefore v_i = \sqrt{\frac{4(\rho_{water} - \rho_{air})gd_i}{3\rho_{air}C_d}}$$

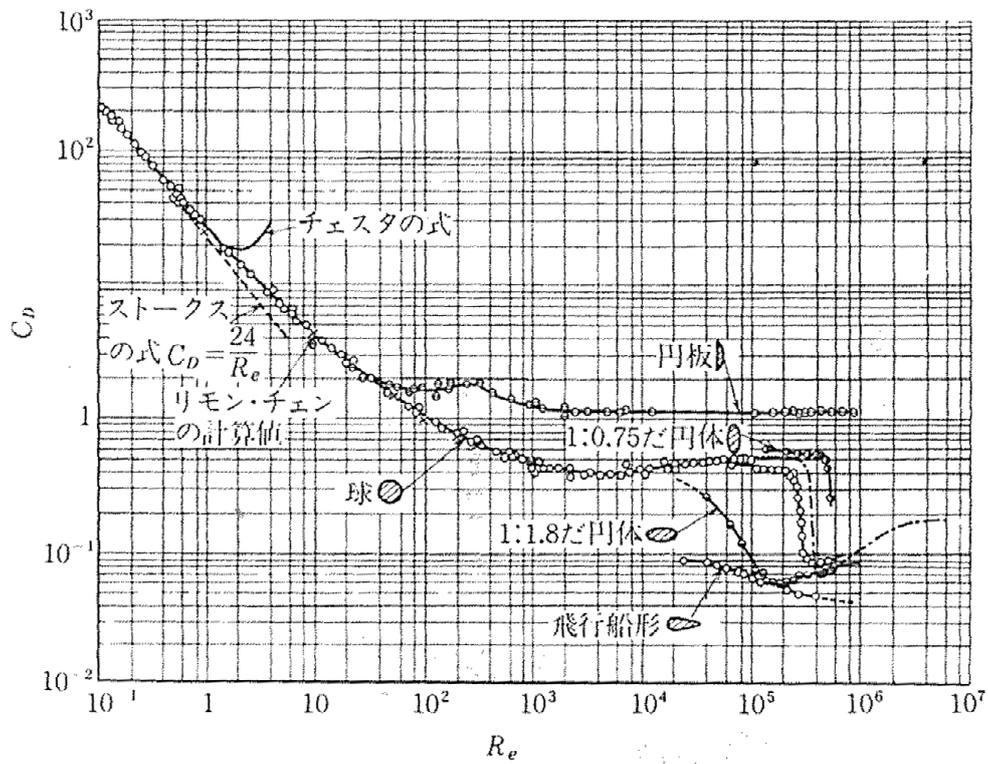
上記の式におけるパラメータの定義は以下のとおりである。

v_i	:	液滴の終端速度 (m/s)
ρ_{water}	:	液滴の密度 (kg/m ³)
ρ_{air}	:	空気密度 (kg/m ³)
V_i	:	液滴体積 (m ³)
A_i	:	液滴断面積 (m ²)
g	:	重力加速度 (m/s ²)
d_i	:	液滴径 (m)
C_d	:	抗力係数 (-)

C_d は、第1図に示す球体に対する実験結果から求められる経験式として式(2)で与えられる。

$$\begin{cases} C_d = \frac{24}{Re} & (Re < 1) \\ C_d = \left(0.55 + \frac{4.8}{\sqrt{Re}}\right)^2 & (1 < Re < 500) \\ C_d = 0.44 & (500 < Re < 10^5) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、レイノルズ数は空気の動粘性係数 ν を用いて $Re = v_i d_i / \nu$ で表される。抗力係数はレイノルズ数が小さい領域で、レイノルズ数すなわち終端速度に依存することから、式(1)の式において抗力係数の導出に用いる速度が計算結果の終端速度と一致するよう繰り返し計算を行う。



第1図 球体に対する抗力係数¹

¹ 機械工学便覧 A5 流体工学 (新版)

3. 液滴下降速度算出結果

液滴径が1.5mm、0.4mmである場合の液滴下降速度を、算出に使用した各物性値とともに第1表に示す。なお、下降速度は1の位を保守的に切り下げた値を使用する。

第1表 下降速度算出条件及び算出結果

ρ_{water}	998.2 [kg/m ³]
ρ_{air}	1.166 [kg/m ³]
ν	1.56×10^{-5} [m ² /s]
g	9.807 [m/s ²]
d_i	1.0×10^{-3} [m]
C_d	0.7279 [-]
液滴 (1.5mm) の 下降速度	530 [cm/s]
液滴 (0.4mm) の 下降速度	160 [cm/s]

なお、実際のスプレー時におけるSFP内環境は高温条件下であると考え、第1表中の物性値は常温 (20℃) の値を用いている。第1表の物性値のうち、温度の影響を受けるものは ν 、 ρ_{water} 及び ρ_{air} であるが、式(1)より下降速度への温度影響が大きい ν 、 ρ_{air} については、温度が高いほど値は小さくなる傾向をもつ。 ν 、 ρ_{air} のどちらも値が小さいほど液滴下降速度が大きくなる。また、スプレー時には高温であるSFP内に低温の液滴が落下することから、空気は高温状態、液滴は低温状態となるが、その状態を考慮し物性値を設定した場合、式(1)より物性値の変化は下降速度をより大きくする方向である。

以上より、水密度を大きく算出するという観点から常温 (20℃) の物性値を用いることは妥当である。

また、実際のスプレー時は海水を用いるが、下降速度算出の際は純水の物性値を使用している。第1表の物性値のうち、液体の種類により変化する物性値は ρ_{water} であるが、 ρ_{water} は純水のほうが海水より小さいことから、より下降速度を小さくし水密度を高く算出する観点から純水の物性値を使用している。

以 上

流量条件に対する使用済燃料ピットの未臨界性上の頑健性について

目 次

	頁
1. はじめに	別添6-1
2. 頑健性確認結果	別添6-1

1. はじめに

最適評価手法を適用した今回の評価結果が有する未臨界性上の頑健性を確認するため、基本ケース条件に対して流量条件を過大に設定した解析を行った。

2. 頑健性確認結果

解析条件を第1表に、結果を第1図に示す。

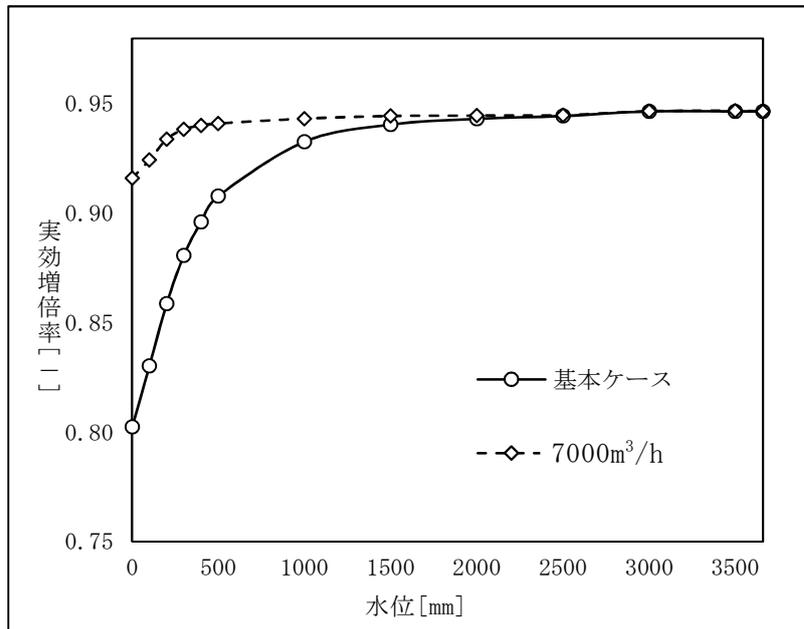
これによると、使用済燃料ピットの冷却と放射性物質の拡散抑制のための設備と手順から求めた基本ケースの流量条件（放水砲1台ベース）に対して、高浜発電所に配備している放水砲全台（予備を含め5台）を使用した場合の流量をさらに上回る7,000m³/h※においても、実効増倍率は基本ケースと同じく水位低下に伴い単調に減少する挙動を示し、未臨界性を満足する結果が得られたことから、今回の流量条件は未臨界性上の十分な頑健性を有している。

※福島第一原子力発電所事故での対応において、SFPに向け放水・注水された流量は、最大でも500m³/h以下である。

（東京電力株式会社「福島原子力事故調査報告書」（平成24年6月）より）

第1表 評価条件（流量に対するパラメータスタディ）

燃料条件	燃料配置		基本ケース	未臨界性上の 頑健性確認解析		
	燃料種類		新燃料のみで満杯 通常ウラン燃料 (Gd入り燃料の存在は考慮しない)		←	
水分条件	流量		□ (m ³ /h)	7,000 (m ³ /h)		
	SFPへの流入範囲、流量分布	流入範囲	SFP全面	←		
		流量分布	一様	←		
	燃料集合体内への流入割合		23 (%)	←		
	液膜厚さ	燃料集合体内へ流入した流量のうち液膜となる流量割合		100 (%)	←	
		液膜厚さ評価式		包絡式	←	
	気相部 水密度 (放水の 液滴径等)	流入範囲内	燃料集合体内へ流入した流量のうち液滴のまま落下する流量割合		0 (%)	←
			燃料集合体内		飽和蒸気密度 0.0006 (g/cm ³)	←
燃料集合体外		液滴径1.5mmを用いた水密度	←			
流入範囲外		—	—			
海水中の塩分濃度			0 (%)	←		



第1図 流量パラメータスタディ結果

以上

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません

計算機プログラム（解析コード）の解析手法等について

目 次

	頁
1. はじめに	別添7-1
2. SCALE Ver. 6.0の解析手法について	別添7-2

1. はじめに

本資料は、高浜 1, 2 号機 設計及び工事計画認可申請（使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更）において使用した解析コードの解析手法等について説明するものである。

2. SCALE Ver. 6.0の解析手法について

(1) 一般事項

SCALEは、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）により米国原子力規制委員会（NRC）の原子力関連許認可評価用に作成された公開コードシステムであり、臨界計算コードが整備されている。本解析では臨界計算のCSAS6モジュールを用い、モンテカルロ法に基づく3次元輸送計算コードとしてKENO-VI、断面積ライブラリは、ENDF/B-VIIベースの238群ライブラリを使用している。

(2) 解析コードの特徴

- ・米国NRCにより認証された標準解析コードであり、国内外の臨界解析の分野で幅広く使用されている。
- ・燃料及び構造材の材質組成と幾何形状を与えることにより、断面積作成から実効増倍率評価まで一連の解析を実行できる。
- ・3次元輸送計算コードであり、複雑な幾何形状における臨界計算が可能である。

(3) 断面積ライブラリの特徴

- ・断面積ライブラリはSCALE Ver. 6.0の内蔵ライブラリデータのうち、ENDF/B-VIIベースの238群ライブラリを使用している。
- ・ENDF/B-VIIは、米国及びカナダの国立研究所、産業界、及び大学が構成するCSEWG（Cross Section Evaluation Working Group、断面積評価ワーキンググループ）により作成された断面積ライブラリであり、ENDF/B-VIを基にIAEAとOECD/NEAによるワーキング委員会であるWPEC（Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation）によって開発されたH、Li6、B10、Auの断面積データを新たに登録する等の更新がなされている。断面積ライブラリについては、JAEA-Data/Code2017-006（JENDL 開発のための軽水炉ベンチマークに関するデータ集の整備）の臨界実験データを用いて国内の最新断面積ライブラリであるJENDL4とENDF-B/VIIの比較を行っており、ライブラリ間の計算誤差の差が小さいことを確認している。

(4) 解析手法

本解析で用いた臨界計算のCSAS6モジュールについて、以下に示す。

a. BONAMI

BONAMIコードは、バックグラウンド断面積と領域の温度から自己遮蔽因子を内挿し、多群実効断面積を作成する。BONAMIコードは、非分離共鳴エネルギー

領域に適用する。作成された多群実効断面積は、CENTRMコードにおける中性子スペクトル計算に使用される。

b. CENTRM

CENTRMコードは、セル形状をモデル化して、連続エネルギーの中性子スペクトルを求める。CENTRMコードは、分離共鳴エネルギー領域に適用する。

c. PMC

PMCコードは、CENTRMコードにより作成された連続エネルギーの中性子スペクトルを用いて、連続エネルギーの断面積を多群に縮約し、分離共鳴エネルギー領域の多群実効断面積を作成し、BONAMIで評価された非分離共鳴エネルギー領域の多群実効断面積と組み合わせる。

d. KENO-VI

KENO-VIはORNLで開発された多群モンテカルロ臨界計算コードであり、複雑な体系の中性子増倍率の計算を行うことができる。

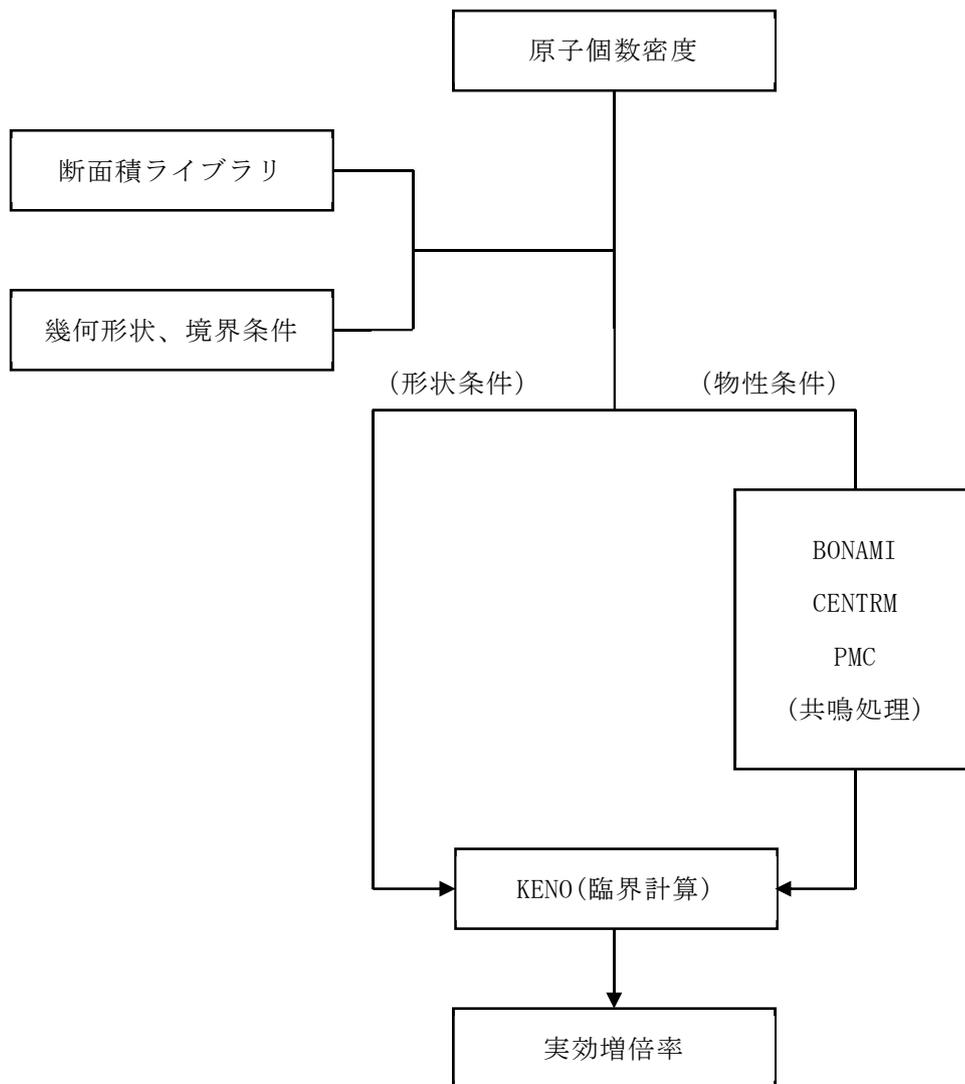
本コードでは、体系内の一つ一つの中性子の振舞いを追跡し、核分裂によって発生する中性子数 F 、吸収されて消滅する中性子数 A 、体系から漏えいする中性子数 L を評価し、次式により実効増倍率 k_{eff} を算出する。

$$k_{\text{eff}} = \frac{F}{A + L}$$

(5) 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを第1図に示す。

なお、今回の解析で使用するSCALE Ver. 6.0の機能は、臨界計算であるため、第1図の解析フローチャートは、臨界計算のCSAS6モジュールについて記載している。



第1図 解析フローチャート

(6) 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

OECD/NEAによりまとめられた臨界実験ベンチマーク集とのベンチマーク解析によりSCALE Ver. 6.0の適用検証及び妥当性確認を実施し、本解析コードを使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価へ適用することについて評価を行った。

a. 検証(Verification)

コードに付属のサンプル問題を実行し、解析解があらかじめ準備された参照解を再現することを確認した。また、本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認した。

b. 妥当性確認(Validation)

OECD/NEAによりまとめられた臨界実験ベンチマーク集(「INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS」September 2010 Edition(OECD/NEA))に登録されている臨界実験から選定した□ケース(「MOX燃料を使用(FPなし)した実験□ケース」+「ウラン燃料を使用(FPなし)した実験□ケース」+「FPを含む実験□ケース」+「水位低下時のEALFに相当する実験□ケース」)のベンチマーク解析(以下「ベンチマーク解析」という)を実施した。ベンチマーク解析を行うに当たっては、国内PWRの燃料貯蔵設備及び燃料仕様のパラメータ範囲を包含する範囲を整理し、臨界実験を選定した。臨界実験の選定結果を第1表に示す。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第1表 選定したパラメータ範囲（製作公差を含まない）

項目	単位	燃料貯蔵設備 及び燃料仕様の パラメータ範囲		選定した臨界実験の パラメータ範囲	
		MIN	MAX	MIN	MAX
燃料	ウラン燃料 ²³⁵ U濃縮度	wt%	1.60	4.80	
	MOX燃料 Pu含有率	wt%	5.5	10.9	
	燃料材径	mm	8.19	9.29	
	燃料要素径	mm	9.5	10.72	
	被覆材 材質	—	ジルコニウム合金		
	燃料要素ピッチ	mm	12.6	14.3	
	燃料体内の減速材 体積/燃料体積	—	1.88	2.00	
	燃料要素 配列条件	—	正方配列		
	体系条件	—	燃料体配列体系		
減速材	減速材	—	無/軽水		
	減速材密度	g/cm ³	0	約1.0	
	減速材中の ほう素濃度	ppm	0	4,400以上	
ラック	ラック 材質	—	無/SUS/B-SUS		
	SUS製ラックの ほう素添加量	wt%	0	1.05	
反射体	反射体 材質	—	軽水 /コンクリート		

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

c. 使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価への適用性確認

ベンチマーク解析結果と臨界実験の実効増倍率は概ね一致しており、第2図のとおりその差は正規性を有することを確認している。また、選定した臨界実験には、部分水位で臨界となるケースも含まれており、気相と液相の境界についても適切に取り扱うことができると言える。

ベンチマーク解析の対象となる臨界実験の選定において重要なパラメータは、体系に含まれる「物質（燃料、構造材（吸収材含む）、減速材等）」、その「形状」、及び「中性子エネルギー」であり、ベンチマーク解析では第1表に示すとおり燃料貯蔵設備仕様及び燃料仕様等を踏まえ臨界実験を選定している。これらのパラメータのうち、中性子スペクトルの特性を表す指標であるEALF（Energy corresponding to the Average neutron Lethargy causing Fission：核分裂に寄与する中性子平均エネルギー）について、妥当性確認に選定したベンチマーク解析 ケースのEALFとC/E（C：計算値とE：測定値の比）の関係を第3図に示す。臨界実験ベンチマークには、部分水位で臨界となった臨界実験及び1.0g/cm³よりも低い水密度での臨界実験（第2表参照）が含まれており、平均C/Eは1.0近傍であり、特異な傾向はみられない。また、気相部による実効増倍率への寄与が支配的になる水位200mm程度のEALF（約7eV）に相当する臨界実験を含む範囲において、C/Eは1近傍で特異な傾向はみられないことから、冠水から水位200mmまでの範囲において本解析コードを適用することは妥当である。

d. 極低水位における解析結果の妥当性

水位0～200mmの範囲について解析した結果、水位の低下に応じて実効増倍率が単調減少する結果が得られた。補足説明資料 別添2「解析結果の妥当性確認について」に示す通り、類似解析として示す水密度を一様に変化させた場合の実効増倍率は水密度約0.1g/cm³で最大値をとり、その後水密度が小さくなるに伴い低下していく推移を示す。基本ケースの水位0mmの状態の水分条件を空間平均水密度に換算した場合の結果は概ねこの推移上に位置しており、この水密度では冠水状態（水密度1.0g/cm）と比較して実効増倍率が小さいことを確認した。加えて、補足説明資料 別添6「流量条件に対する使用済燃料ピットの未臨界性上の頑健性について」に示す通り、7000m³/hまで流入流量を増加させた場合においても中性子最適減速状態は発現していないことから、今回の水分条件においては解析結果と同様に水位200mm以下の領域においても水位が低下するに伴い単調減少傾向が継続し未臨界を維持することは確認できたため、当該範囲にお

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

ける解析コードの精度を必要としなくなるので、適用妥当性確認をしていなかったとしても問題はない。

e. 計算コードの不確定性

ベンチマーク解析により得られた実効増倍率及び標準偏差並びに各実験の実効増倍率測定値及び実験誤差を用いて、ラック体系の未臨界性評価に用いる SCALE Ver. 6.0システムの平均誤差($1-k_c$)及び不確かさ(Δk_c)を導出した結果を第3表に示す。

臨界計算に考慮すべき平均誤差及びその不確かさは、本評価体系の燃料要素に着目し、ウラン燃料を使用（FPなし）した臨界実験のベンチマーク解析結果より算出した値を計算コードの不確定性として考慮する。

第2表 低水密度状態の臨界実験リスト

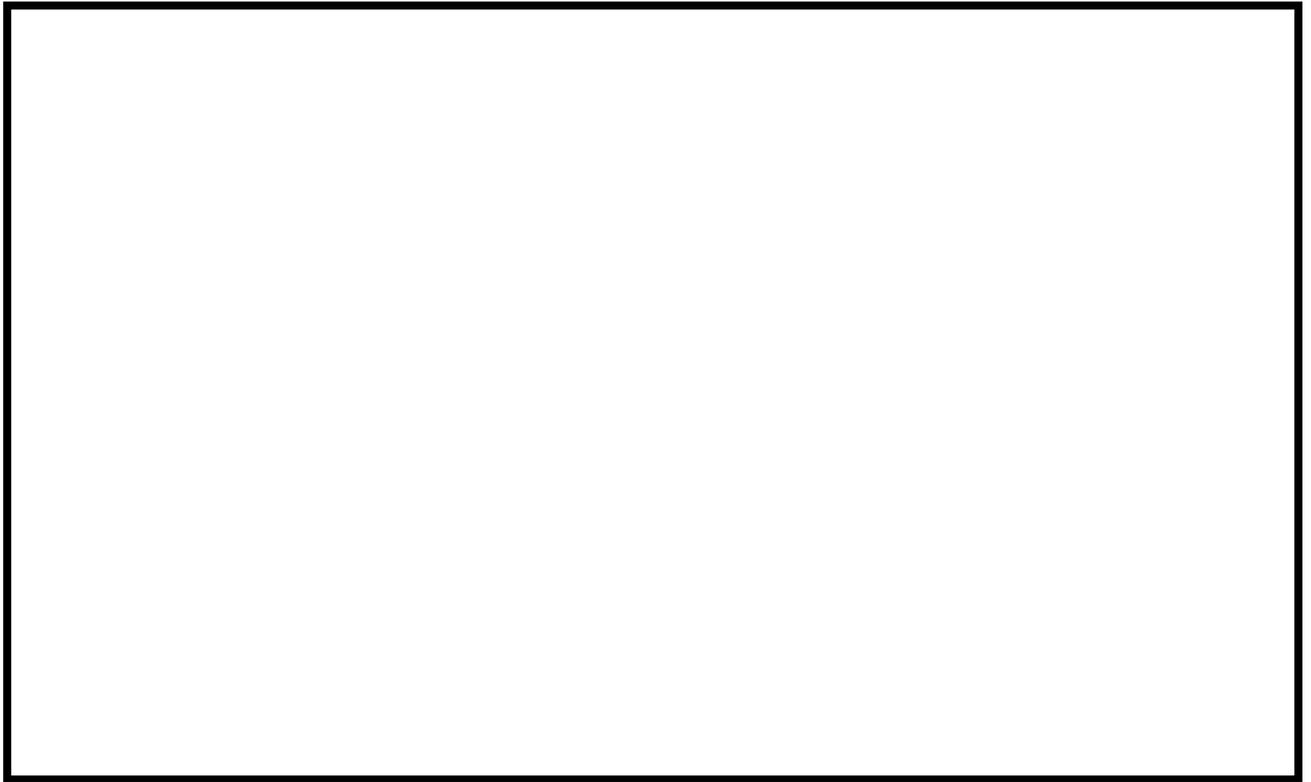
臨界実験	減速材密度	ケース数

第3表 SCALE Ver. 6.0システムの平均誤差及び不確かさ

条件	計算コード	SCALE Ver. 6.0 システム (KENO-VI)
	断面積ライブラリ	ENDF/B-VII 238群
	対象燃料	ウラン燃料 (FPなし)
	ベンチマークケース数	
評価結果	平均誤差 ($1 - k_c$)	0.0007
	加重平均実効増倍率 $\overline{k_{\text{eff}}}$	
	不確かさ ($\Delta k_c = U \times S_p$)	0.0065
	信頼係数 (U)*1	
	$\overline{k_{\text{eff}}}$ の不確かさ (S_p)	

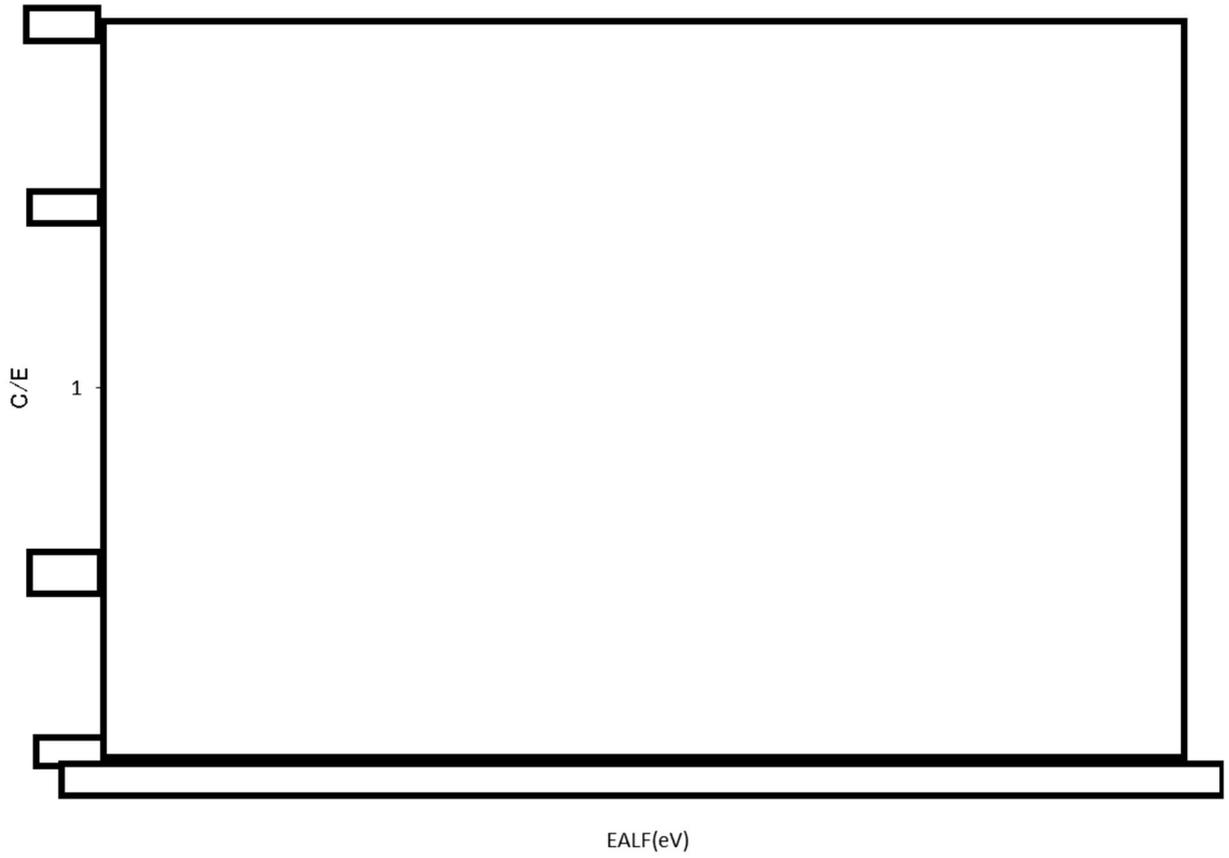
※1 ベンチマーク解析ケース数に対する95%信頼度・95%確率での信頼係数

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第2図 Δk に対するヒストグラム

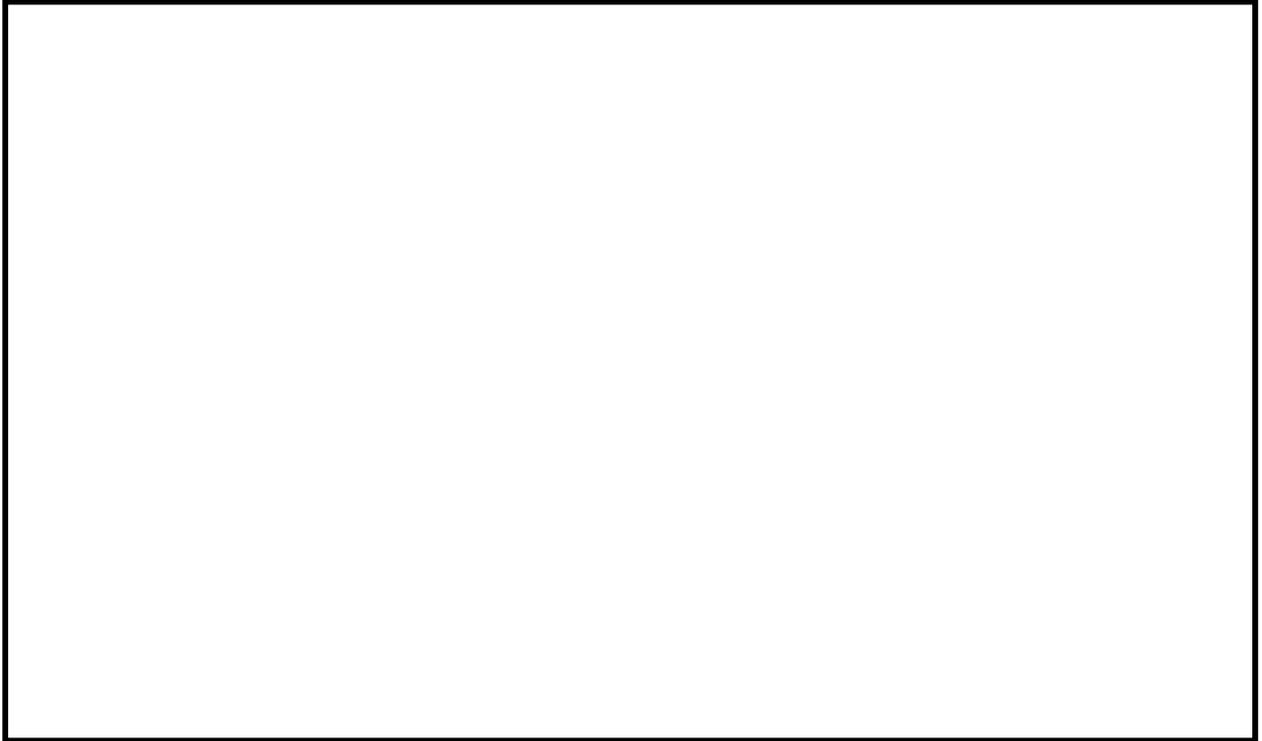
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第3図 選定したベンチマーク実験のEALFとC/Eの関係

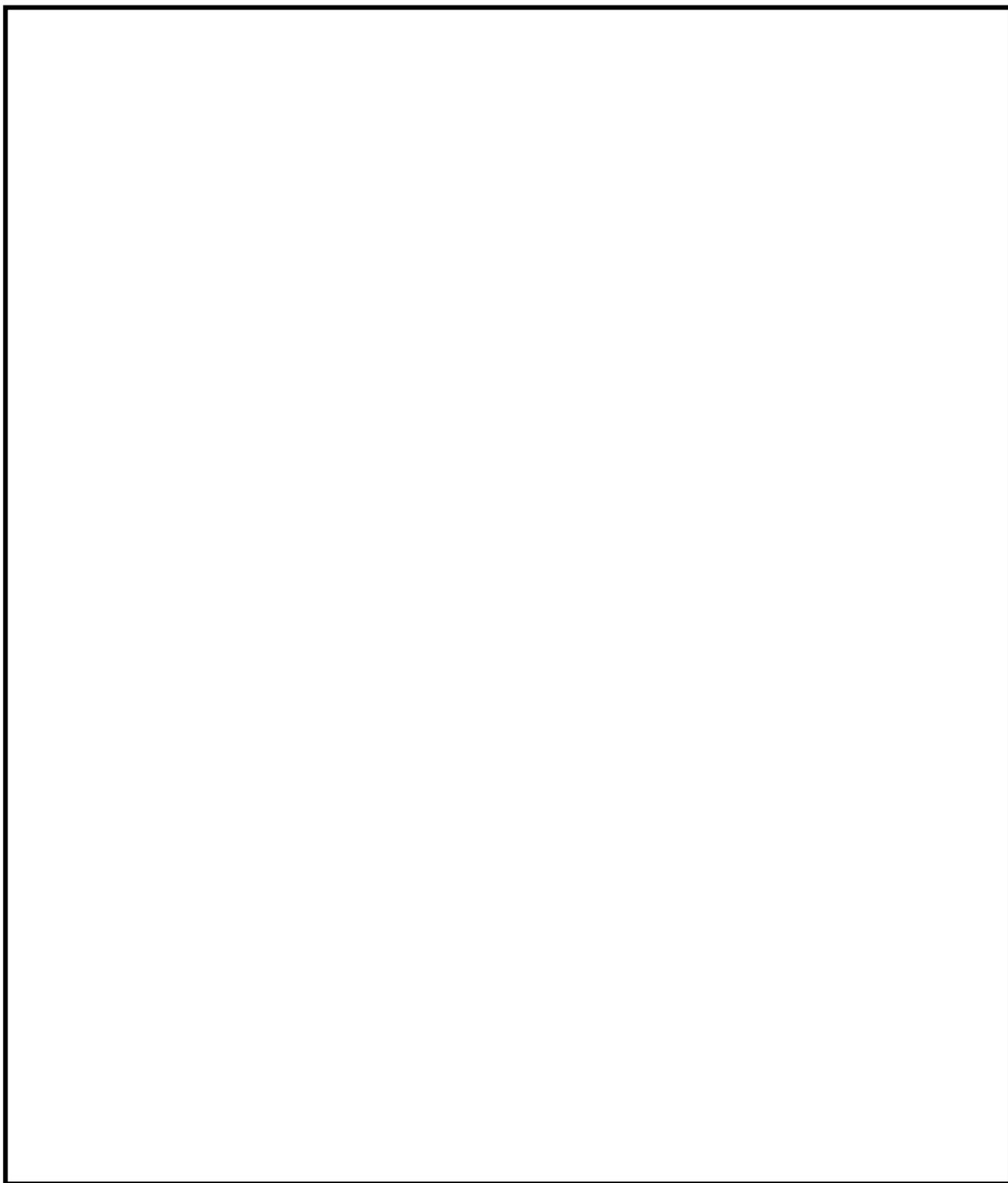
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考1) 第2表に示す臨界実験の概要

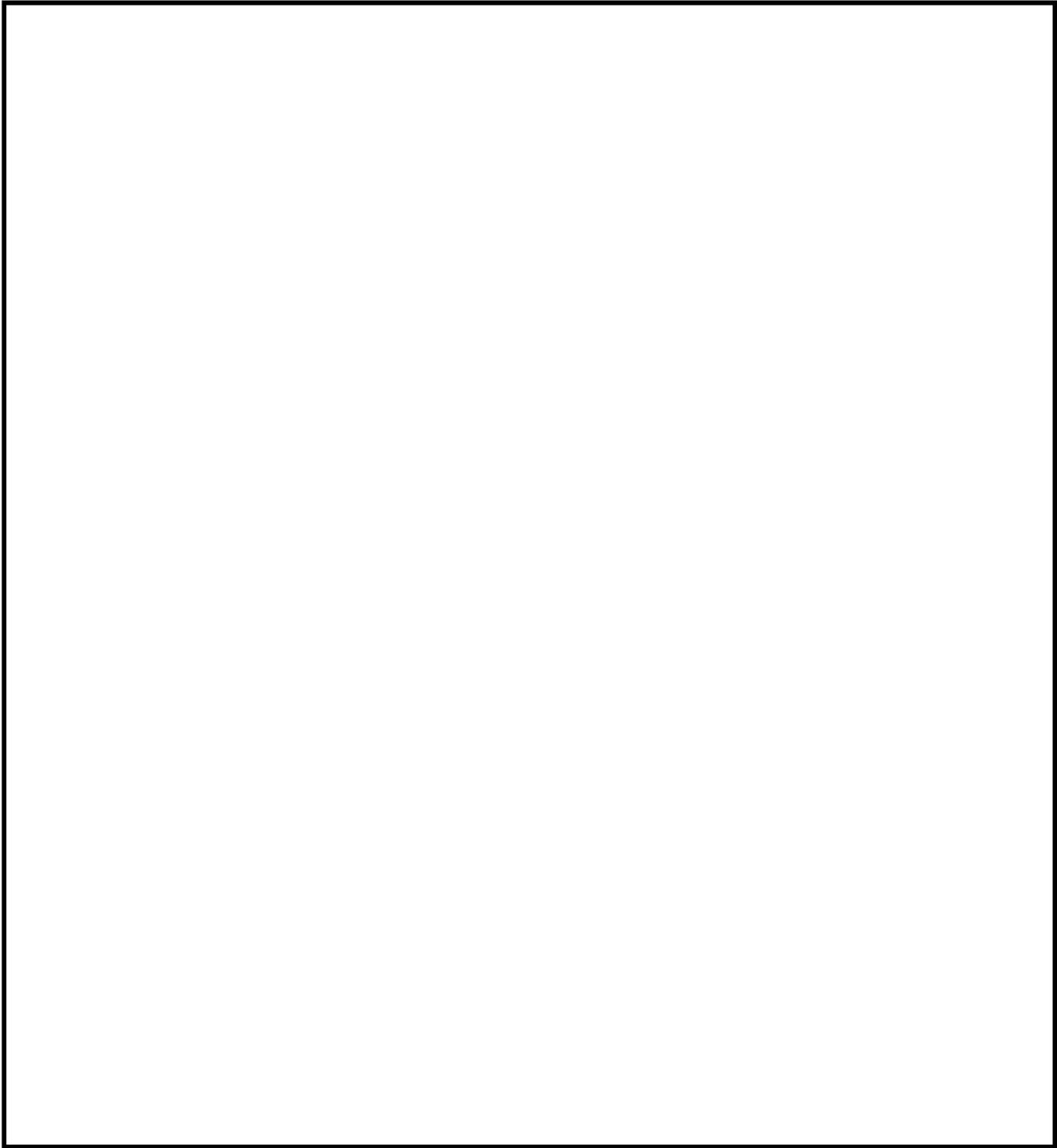


枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

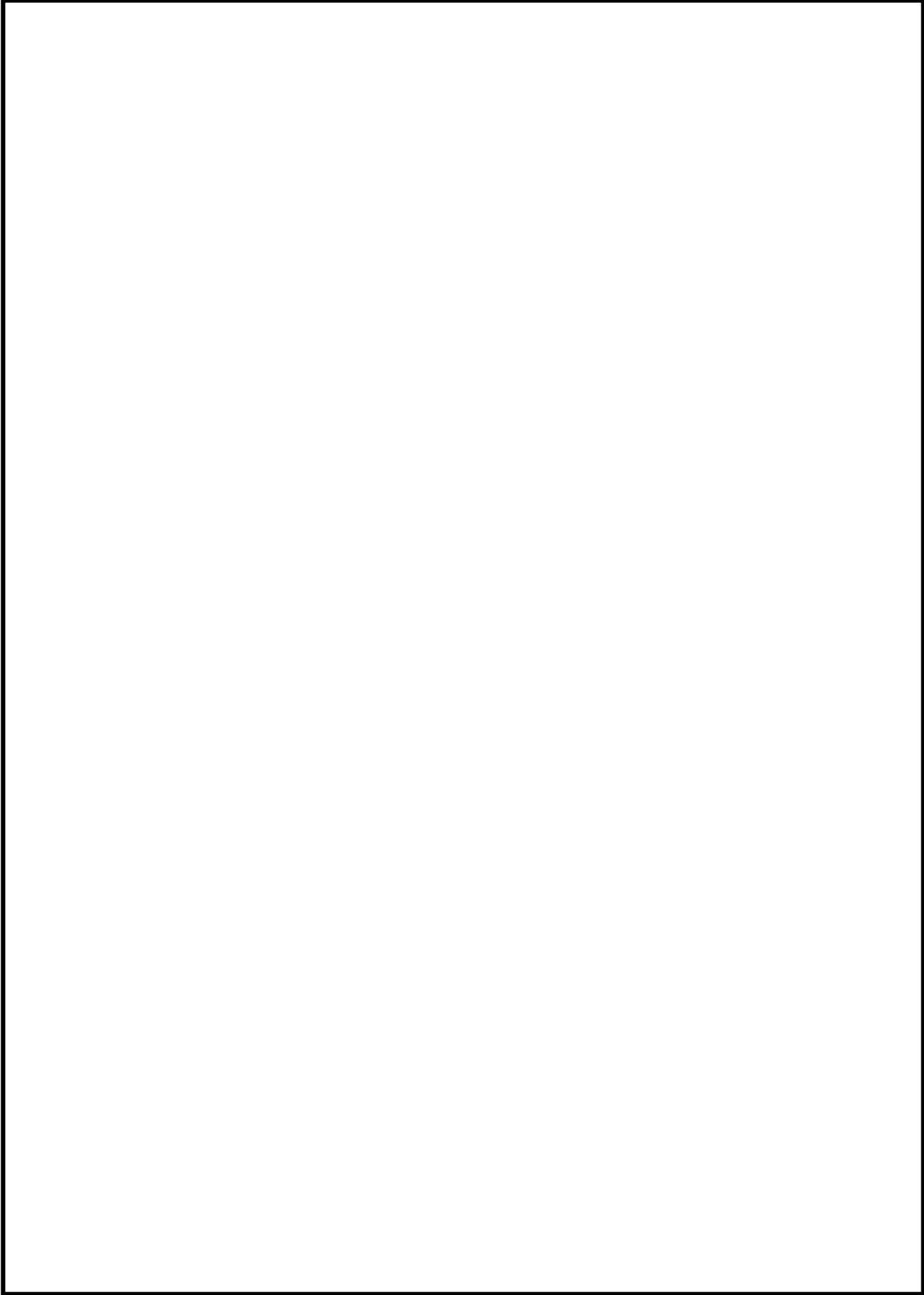
(参考2) 計算コードの不確かさの算出方法



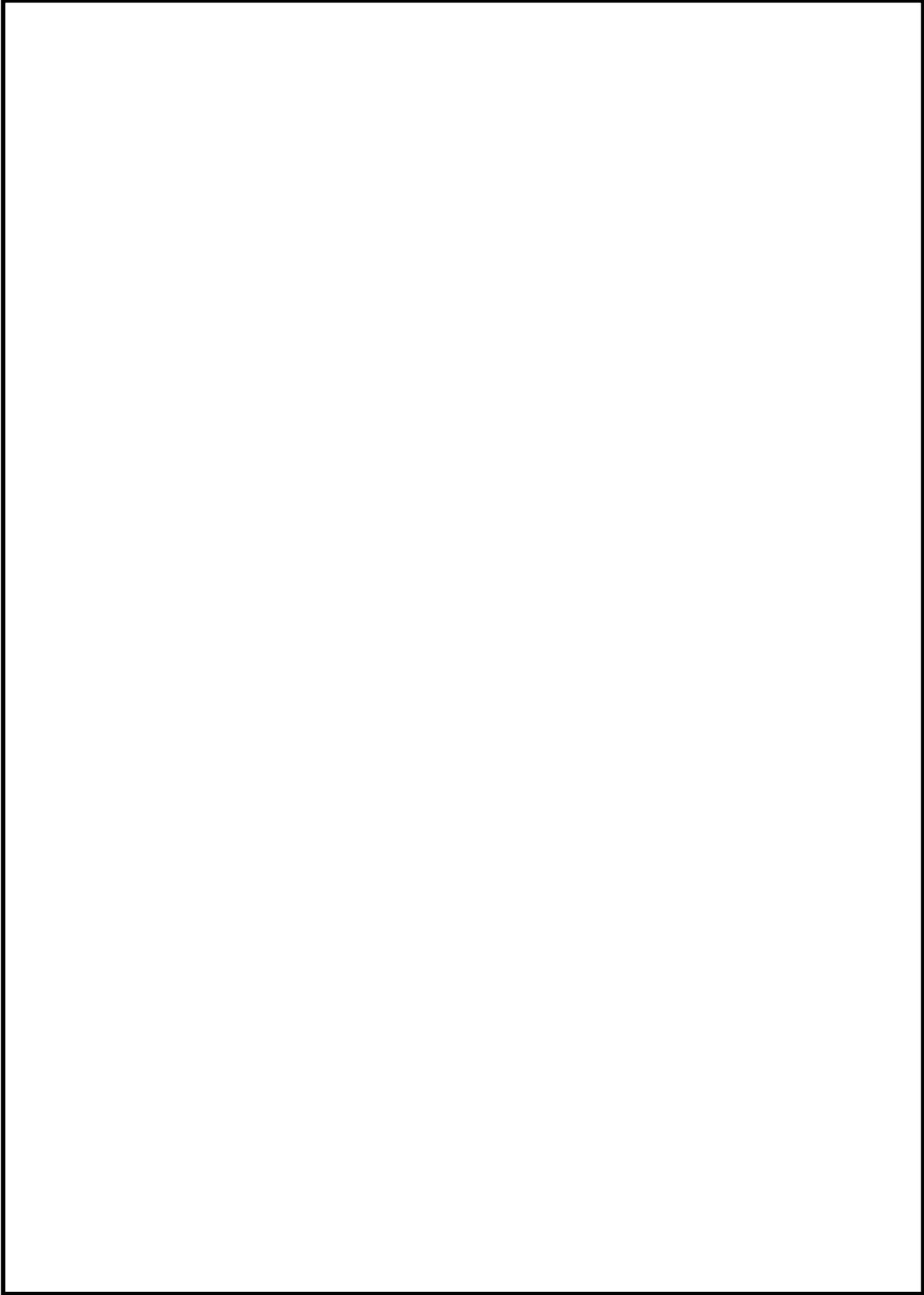
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

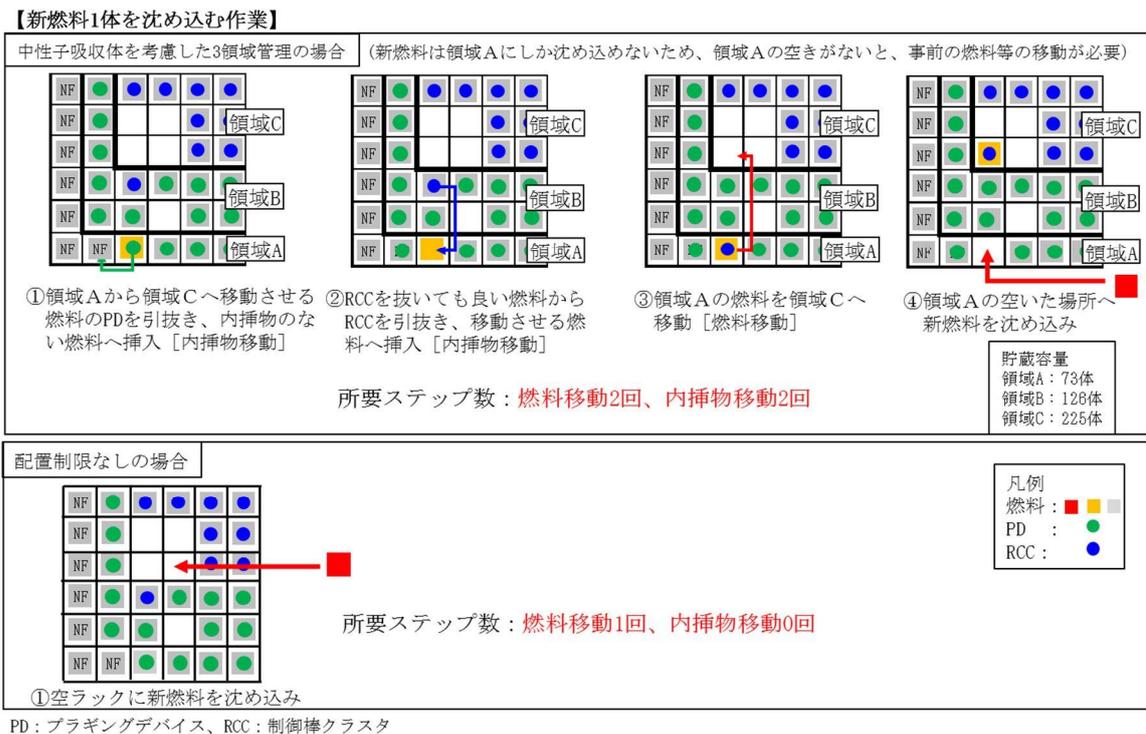
実運用において領域管理を取り除くことによる効果

1. はじめに

SFP用中性子吸収体を考慮した3領域管理がある場合と、配置制限がない場合それぞれについて、燃料等の取り扱い回数（所要ステップ数）がどの程度低減できるか等を確認する。

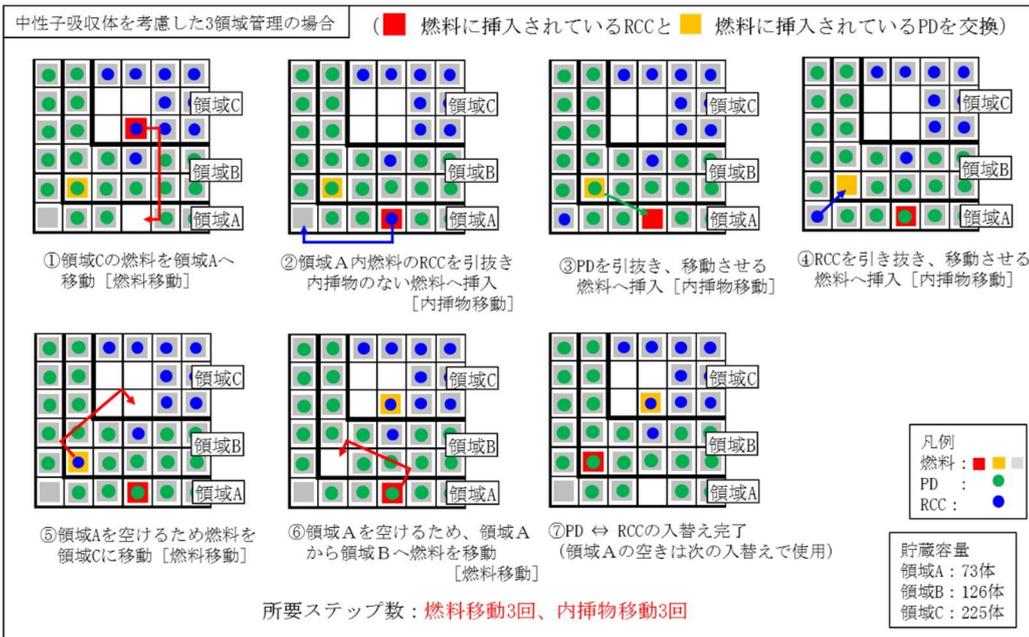
2. 所要ステップ数削減効果の確認

第1図及び第2図に示すシミュレーションにより、領域管理を取り除くことで照射燃料の取り扱い及び内挿物入れ替えの回数を大幅に低減でき、第1表のとおり1定検当たりの燃料等の総取扱回数が大幅に低減されることを確認した。なお、シミュレーションにおいて既工事計画の初期状態としては、領域Aに空きラックが無い状況を想定した。

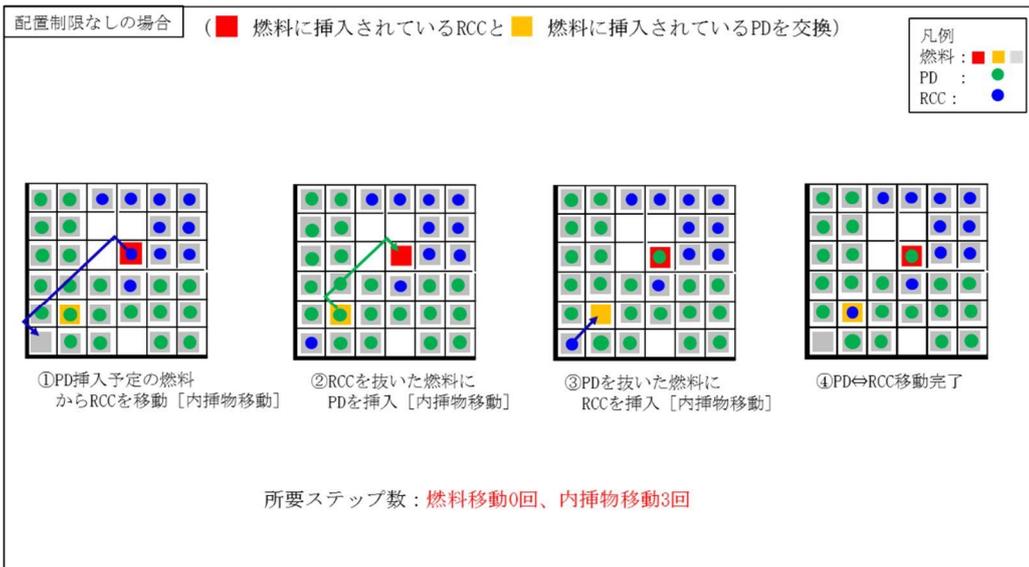


第1図 新燃料沈め込み作業における所要ステップ数比較

【内挿物の交換作業（PDとRCCの入れ替え1回）】



PD：プラグングデバイス、RCC：制御棒クラスタ



PD：プラグングデバイス、RCC：制御棒

第2図 内挿物交換作業における所要ステップ数比較

第1表 配置制限の有無による1定検当たり総取扱回数の違い

	3領域管理	配置制限なし
①新燃料1体を沈め込む作業	燃料移動：2回 内挿物入替：2回 4回	燃料移動：1回 内挿物入替：0回 1回
②内挿物の交換作業 (PDとRCCの入れ替え1回)	燃料移動：3回 内挿物入替：3回 6回	燃料移動：0回 内挿物入替：3回 3回

1定検あたりの総取扱回数は、約460回 ⇒ 約190回に低減*

※ 1定検あたりの標準的な作業量として、新燃料沈め込みを44体、制御棒とプラグングデバイスの入れ替えを48組と想定。
 燃料等の総取扱回数は、3領域管理の場合：4回×44体+6回×48組 = 464回、配置制限がない場合：1回×44体+3回×48組 = 188回

3. 領域管理を取り除くことによるメリット

領域管理を取り除き、所要ステップ数を大幅に削減することで、以下の運用管理上のメリットが期待できる。

(1) 人的リソースの削減

当社はこれまで、許認可上の配置制限が課せられているプラントにおいては、燃料移動時の燃料配置誤りを防止するために専属の”燃料配置監視員”を配備してきている。配置制限がなくなれば、その人的リソースを他の業務へ振り向けることができる。

【配置制限がある場合】

- ・作業責任者
- ・クレーン操作員
- ・燃料取扱工具操作員
- ・荷重監視員
- ・燃料配置監視員

【配置制限がない場合】

- ・作業責任者
- ・クレーン操作員
- ・燃料取扱工具操作員
- ・荷重監視員

(2) 作業員の被ばく低減

配置制限がない場合、既許可での運用と比較し約1.6人・mSvの被ばく量を低減できる。

	既許可の3領域管理		制限なし	
	新燃料沈め込み	内挿物の交換	新燃料沈め込み	内挿物の交換
作業責任者、クレーン操作員、 燃料取扱工具操作員、荷重監視員	各4工数 ^{※1} (計16工数)	各2工数 ^{※1} (計8工数)	各1工数 (計4工数)	各1工数 (計4工数)
燃料配置監視員	1工数	1工数	0工数	0工数
1工数当たりの被ばく線量	0.1人・mSv ^{※2}	0.07人・mSv ^{※3}	0.1人・mSv ^{※2}	0.07人・mSv ^{※3}
線量合計	2.33人・mSv		0.68人・mSv	

※1 シミュレーション結果を踏まえ設定

※2 15分^(※1)/体×157体÷60分
×0.003mSv/h^(※2)×1人
≒0.1人・mSv

※3 7分^(※3)/体×157体÷60分
×0.003mSv/h^(※2)×1人
≒0.07人・mSv

<電離放射線障害防止規則第1条>

事業者は、労働者が電離放射線を受けることをできるだけ少なくするよう努めなければならない。

(※1) 至近定検における燃料取扱作業
時間(実績)の平均値

(※2) 作業時の環境サーベイ結果の平均値

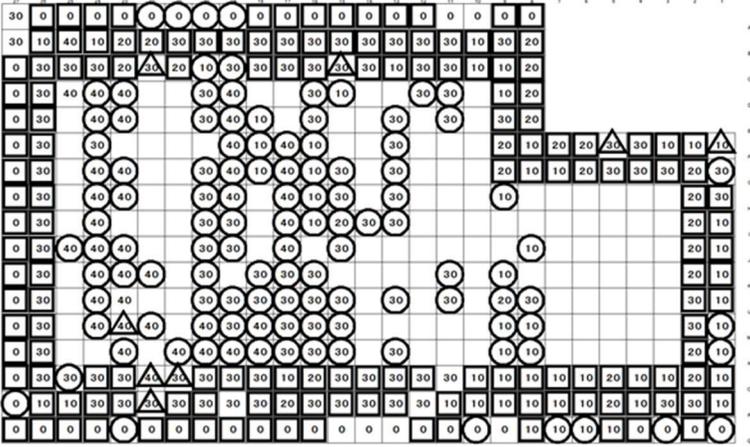
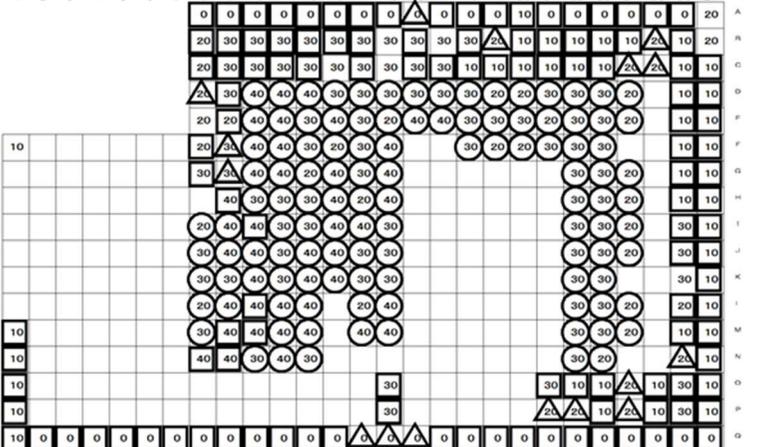
(3) 不要な燃料移動の削減による誤配置、誤操作の防止

配置制限がない場合、燃料等の取り扱い回数(所要ステップ数)が削減でき、燃料等の配置誤りや燃料取扱設備の操作ミス等の発生を低減できる。

以上

内挿物の保管状況及び概要

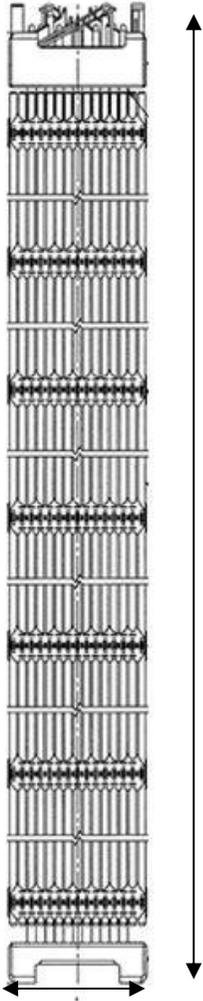
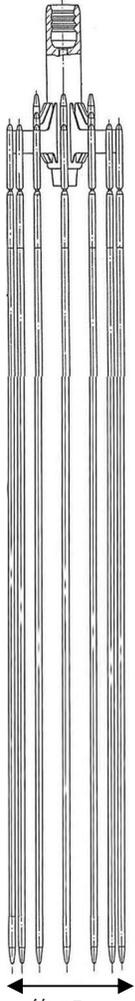
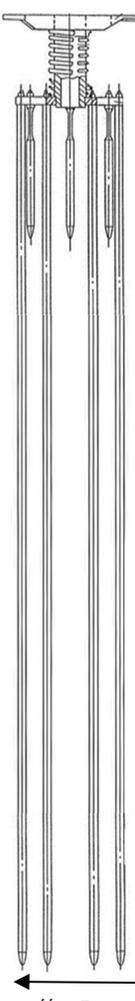
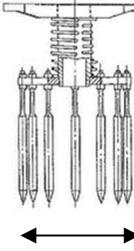
第1表 高浜1, 2号機 SFP内における内挿物等の保管状況※

項目	高浜1号機	高浜2号機																				
配置図																						
燃料集合体 (うち Gd 入り 燃料集合体)	299 体 (196 体)	258 体 (133 体)																				
燃焼度 (GWd/t) 別内訳	<table border="1" style="width:100%; text-align:center;"> <tr> <td>BU<10</td> <td>10≤BU<20</td> <td>20≤BU<30</td> <td>30≤BU<40</td> <td>40<BU</td> </tr> <tr> <td>56 体</td> <td>58 体</td> <td>26 体</td> <td>119 体</td> <td>40 体</td> </tr> </table>	BU<10	10≤BU<20	20≤BU<30	30≤BU<40	40<BU	56 体	58 体	26 体	119 体	40 体	<table border="1" style="width:100%; text-align:center;"> <tr> <td>BU<10</td> <td>10≤BU<20</td> <td>20≤BU<30</td> <td>30≤BU<40</td> <td>40<BU</td> </tr> <tr> <td>44 体</td> <td>45 体</td> <td>39 体</td> <td>87 体</td> <td>43 体</td> </tr> </table>	BU<10	10≤BU<20	20≤BU<30	30≤BU<40	40<BU	44 体	45 体	39 体	87 体	43 体
BU<10	10≤BU<20	20≤BU<30	30≤BU<40	40<BU																		
56 体	58 体	26 体	119 体	40 体																		
BU<10	10≤BU<20	20≤BU<30	30≤BU<40	40<BU																		
44 体	45 体	39 体	87 体	43 体																		
プラグニングデバイス	164 体	120 体																				
制御棒クラスタ	114 体	113 体																				
バーナブルポイズン	8 体	16 体																				

【燃焼度 (BU) 凡例】 0 : BU<10、 10 : 10≤BU<20、 20 : 20≤BU<30、 30 : 30≤BU<40、 40 : 40≤BU (GWd/t)
 【内挿物凡例】 □ : プラグニングデバイス、 ○ : 制御棒クラスタ、 △ : バーナブルポイズン

※2022年12月現在

第2表 内挿物の概要

燃料集合体	内挿物		
 <p data-bbox="371 1345 479 1374">約 21cm</p>	<p data-bbox="712 695 748 916">制御棒クラスタ</p>  <p data-bbox="831 1334 920 1362">約 15cm</p>	<p data-bbox="1167 651 1202 938">バーナブルポイズン</p>  <p data-bbox="1267 1334 1357 1362">約 15cm</p>	 <p data-bbox="1865 451 1955 480">約 27cm</p> <p data-bbox="1720 643 1809 671">約 15cm</p> <p data-bbox="1630 730 1912 767">プラグングデバイス</p>

既工認における核燃施設としての制御棒クラスタ及び使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体に係る記載	既工認申請時の考え方
<p><核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設></p> <p>【本文 要目表】</p> <p>①記載なし</p> <p>【本文 基本設計方針】</p> <p>・以下、関係箇所の抜粋</p> <p>『2. 燃料貯蔵設備 ～略～</p> <p>また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより使用済燃料ピット水位が使用済燃料ピット出口配管下端未満かつ水位低下が継続する場合に、臨 界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び②制御棒クラスタ若しくは使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体（以下「使用済燃料ピット用中性子 吸収体」という。）配置において貯蔵領域を設定することにより、スプレイや蒸気条件においても臨界を防止する設計とする。</p> <p>貯蔵領域は以下の方針に基づき、外周領域、中間領域及び中央領域を設計する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・領域の数を可能な限り少なくする。 ・低燃焼度の燃料を貯蔵する領域では、使用済燃料ピット用中性子吸収体の挿入なしで炉心から取り出した燃料が貯蔵できる容量を確保する。 ・貯蔵領域において、最も反応度の高い燃料体等が当該領域の全てのラックに貯蔵された状態で未臨界を維持する。 <p>使用済燃料ラックは全 424 ラックで構成されており、長辺方向に 27 ラック、短辺方向に 17 ラックの長方形の配置から、チャンネル入口側の角部（長辺方 向に 7 ラック、短辺方向に 5 ラックの長方形）を切り欠いた配置形状である。</p> <p>外周領域は、長辺方向に 27 ラック、短辺方向に 17 ラックの長方形の最外周 1 列から切り欠き部（長辺方向に 7 ラック、短辺方向に 5 ラック）を除いた 73 ラックとする。また、中間領域は外周領域のラック配置から内側に長辺方向列は 2 列、短辺方向列は 1 列として、さらにラック配置の切り欠き部の外周 2 列を加えた計 126 ラックとする。残りの 225 ラックを中央領域とする。</p> <p>各領域には、“初期濃縮度約 4.6wt%、使用済燃料ピット用中性子吸収体なし”の条件下で“外周領域：0GWd/t 以上、中間領域：20GWd/t 以上、中央領域： 50GWd/t 以上”、“初期濃縮度約 4.6wt%、使用済燃料ピット用中性子吸収体あり”の条件下で“外周領域：0GWd/t 以上、中間領域：0GWd/t 以上、中央領域： 15GWd/t 以上”、“初期濃縮度約 4.0wt%、使用済燃料ピット用中性子吸収体なし”の条件下で“外周領域：0GWd/t 以上、中間領域：15GWd/t 以上、中央領 域：45GWd/t 以上”、“初期濃縮度約 4.0wt%、使用済燃料ピット用中性子吸収体あり”の条件下で“外周領域：0GWd/t 以上、中間領域：0GWd/t 以上、中央 領域：10GWd/t 以上”を貯蔵する設計とする。</p> <p>③燃料体等又は使用済燃料ピット用中性子吸収体の移動に際しては、未臨界が維持できることをあらかじめ確認している配置に基づき移動することを保 安規定に定めて、臨界を防止できるよう管理する。</p> <p>④使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体は、20 本の中性子吸収棒をクラスタ状にし、これを燃料集合体内の制御棒案内シムルに挿入する。各中性子 吸収棒は、中性子吸収材をステンレス鋼管に入れた構造で、制御棒クラスタと同様に中性子吸収材の材料に銀－インジウム－カドミウム合金を使用し、外径 を 11.2mm、被覆管厚さを 0.5mm とする。クラスタ全長は 3,938mm 及びクラスタ有効長さは 3,607mm とし、クラスタたて及び横の長さは共に 155.7mm とする。</p> <p>⑤使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体は、使用済燃料ピットにおける圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法 安定性、耐熱性、核性質、耐食性及び化学的安定性を保持する設計とする。</p> <p>また、流路孔を有し、制御棒クラスタより軽量とすることで、燃料体等の冷却性、使用済燃料ピットラック及び使用済燃料ピットクレーンの耐震性並びに 使用済燃料ピットへの波及的影響の観点から、悪影響を及ぼさない設計とする。』</p>	<p><核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設></p> <p>【本文 要目表】</p> <p>①核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設（以下、「核燃施設」とい う）としての制御棒クラスタ及び使用済燃料ピット用中性子吸収 棒集合体（以下「使用済燃料ピット用中性子吸収体」という。） については、実用炉規則の別表第二（以下、別表第二）におい て、記載要求がないことから、記載しなかった。</p> <p>【本文 基本設計方針】</p> <p>②左記下線部の記載のうち制御棒クラスタについては、兼用・兼 用以外といった区分けは行わず、また、燃料の貯蔵状況によりそ の必要数が変化することから、設置許可に記載している貯蔵容量 の範囲内（約 420 体以下）で使用する意図で単に「制御棒クラ スタ」という記載を行っており、計測制御系統施設と兼用である 4 8 体に限定することなく、それ以上に使用することを意図してい た。</p> <p>なお、再稼働時の原子力規制庁殿とのヒアリング（2016 年 3 月 18 日）において、使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体 に対する記載について、「最大値として全ラック数である「424 体 以下」と書くことはできるが、具体的な数値は貯蔵状況により領 域管理の運用の中で決まってくる数であるため記載できない」旨 をご説明していることから、それと同様に、核燃施設として使用 する制御棒クラスタについても具体的な体数を記載しなかった。</p> <p>③保安規定に定めて管理することで運用の中で未臨界維持を管理 することを明確にしていた。</p> <p>④使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体の仕様については、① の理由から要目表へ記載しなかったが、新規の設備であるため基 本設計方針及び添付資料 19 の中で記載している。一方で、制御棒 クラスタの仕様については、⑥の理由により計測制御系統施設の 要目表の中で核燃施設と兼用する旨を記載することで、従前より 使用している制御棒クラスタと同一仕様であることを示していた ため、基本設計方針及び添付資料 19 では記載しなかった。</p> <p>⑤使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体については、新規制基 準に適合するための新規の設備であるため、健全性等について基</p>

<計測制御系統施設>

【本文 要目表】

⑥ 2 制御材に係る次の事項

(1) 制御棒の名称、種類、組成、反応度制御能力、停止余裕、主要寸法及び個数

			変更前 ^(注1)	変更後
名称			制御棒	制御棒 ^(注2)
種類	—		制御棒クラスタ	変更なし
組成	制御材	—	銀-インジウム-カドミウム合金	
反応度制御能力	$\Delta k/k$		(最大反応度効果を有するクラスタ1本挿入不能時) 約 0.05	
停止余裕	$\Delta k/k$		(最大反応度効果を有するクラスタ1本挿入不能時) 0.0177 以上	
主要寸法	クラスタ全長	mm	4,025 ^(注3)	
	クラスタ有効長さ	mm	3,607 ^(注3)	
	クラスタたて	mm	153.4 ^(注3)	
	クラスタ横	mm	153.4 ^(注3)	
	制御棒外径	mm	11.2 ^(注3)	
	制御棒被覆管厚さ	mm	0.5 ^(注4) (0.5 ^(注3))	
クラスタ個数	—		48	

(注1) 記載内容は、既工事計画認可申請書（平成24年2月7日付け関原発第462号工事計画認可申請書、平成24年3月29日付け平成24・02・07原第10号にて認可）による。なお、本工事計画は、認可された既工事計画に対して、基本設計方針の変更を行うことに伴い申請するものである。

(注2) 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設のうち使用済燃料貯蔵設備と兼用

(注3) 公称値

(注4) 既工事計画書に記載がないため記載の適正化を行う。記載内容は、設計図書による。

本設計方針及び添付資料 19 の中で記載していた。一方で、制御棒クラスタについては、新規の設備ではなかったため、使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体と同じ箇所には記載しておらず、補足説明資料の中で記載していた。

<計測制御系統施設>

【本文 要目表】

⑥変更後の「制御棒」へ注記を追記することで、従来から計測制御系統施設として使用している制御棒クラスタを核燃施設として兼用することを明確にしていた。

【本文 基本設計方針】

⑦記載なし

<添付資料>

【資料1 発電用原子炉の設置の許可との整合性に関する説明書】

⑧

設置変更許可申請書（本文）	設置変更許可申請書（添付書類八）該当事項	工事の計画 該当事項	整合性	備考
<p>燃料貯蔵設備の使用済燃料ピットは、使用済燃料ピットの冷却機能喪失、使用済燃料ピットの注水機能喪失、使用済燃料ピット水の小規模な漏えいが発生した場合において、燃料の貯蔵機能を確保できる設計とする。</p> <p>また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより使用済燃料ピット水位が使用済燃料ピット出口配管下端未満かつ水位低下が継続する場合に、臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び制御棒クラスタと同等の反応度抑制効果を有する中性子吸収体（以下「使用済燃料ピット用中性子吸収体」という。）配置においてスプレイや蒸気条件においても臨界を防止できる設計とする。</p> <p>（本文十号） 使用済燃料ピット等の主要機器の形状に関する条件は設計値を用いる。</p>	<p>4.1.2 重大事故等時 4.1.2.1 概要</p> <p>使用済燃料ピットは、使用済燃料ピットの冷却機能喪失、使用済燃料ピットの注水機能喪失、使用済燃料ピット水の小規模な漏えいが発生した場合において、燃料の貯蔵機能を確保する設計とする。</p> <p>また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより使用済燃料ピット水位が使用済燃料ピット出口配管下端未満かつ水位低下が継続する場合に、臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び使用済燃料ピット用中性子吸収体配置においてスプレイや蒸気条件においても臨界を防止する設計とする。</p> <p>燃料配置及び使用済燃料ピット用中性子吸収体配置については、燃料の初期濃縮度、燃焼度及び使用済燃料ピット用中性子吸収体の有無の条件による貯蔵領域を設定し、その領域で最も反応度の高い燃料体等が当該領域の全てのラックに貯蔵された状態で未臨界を維持できる設計とする。</p> <p>なお、燃料体等及び使用済燃料ピット用中性子吸収体の移動に際しては、未臨界が維持できることをあらかじめ確認している配置に基づき移動する。</p>	<p>2. 燃料貯蔵設備</p> <p><中略></p> <p>使用済燃料ピットは、使用済燃料ピットの冷却機能喪失、使用済燃料ピットの注水機能喪失、使用済燃料ピット水の小規模な漏えいが発生した場合において、燃料の貯蔵機能を確保する設計とする。</p> <p>また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより使用済燃料ピット水位が使用済燃料ピット出口配管下端未満かつ水位低下が継続する場合に、臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び制御棒クラスタ若しくは使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体（以下「使用済燃料ピット用中性子吸収体」という。）配置において貯蔵領域を設定することにより、スプレイや蒸気条件においても臨界を防止する設計とする。</p> <p>貯蔵領域は以下の方針に基づき、外周領域、中間領域及び中央領域を設計する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・領域の数を可能な限り少なくする。 ・低燃焼度の燃料を貯蔵する領域では、使用済燃料ピット用中性子吸収体の挿入なしで炉心から取り出した燃料が貯蔵できる容量を確保する。 ・貯蔵領域において、最も反応度の高い燃料体等が当該領域の全てのラックに貯蔵された状態で未臨界を維持する。 <p>使用済燃料ラックは全 424 ラックで構成されており、長辺方向に 27 ラック、短辺方向に 17 ラックの長方形の配置から、チャンネル入口側の角部（長辺方向に 7 ラック、短辺方向に 5 ラックの長方形）を切り欠いた配置形状である。</p> <p>外周領域は、長辺方向に 27 ラック、短辺方向に 17 ラックの長方形の最外周 1 列から切り欠き部（長辺方向に 7 ラック、短辺方向に 5 ラック）を</p>		

【本文 基本設計方針】

⑦核燃施設と兼用となったことについて、計測制御系統施設としての制御棒クラスタの基本設計方針には影響しないため記載しなかった。

<添付資料>

【資料1】

⑧設置許可申請においては、本文五号及び添付書類八に「～臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び制御棒クラスタと同等の反応度抑制効果を有する中性子吸収体配置においてスプレイや蒸気条件においても臨界を防止する設計とする。」と記載しており、既工認においても同様の記載があった。

既工認における核燃施設としての制御棒クラスタ及び使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体に係る記載	既工認申請時の考え方
<p>【資料2 耐震設計上重要な設備を設置する施設に関する説明書（自然現象への配慮に関する説明を含む。）】</p> <p>【資料3 取水口及び放水口に関する説明書】</p> <p>【資料4 設備別記載事項の設定根拠に関する説明書】</p> <p>【資料5 クラス1機器及び炉心支持構造物の応力腐食割れ対策に関する説明書】</p> <p>【資料6 安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書】</p> <p>⑩記載なし</p> <p>【資料7 発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書】</p> <p>【資料8 発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書】</p> <p>【資料9 発電用原子炉施設の蒸気タービン、ポンプ等の損壊に伴う飛散物による損傷防護に関する説明書】</p> <p>【資料10 通信連絡設備に関する説明書】</p> <p>【資料11 安全避難通路に関する説明書】</p> <p>【資料12 非常用照明に関する説明書】</p> <p>【資料13 耐震性に関する説明書】</p> <p>⑪計測制御系統施設としての制御棒クラスタについて資料13-17-4-2「制御棒クラスタの耐震計算書（挿入時間を含む）」に記載しているが、核燃施設としての制御棒クラスタについて記載なし。また、使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体については、資料13-17-2-9「使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体の耐震計算書」に記載している。</p> <p>【資料14 強度に関する説明書】</p> <p>【資料15 原子炉本体の基礎に関する説明書】</p> <p>【資料16 原子炉容器の脆性破壊防止に関する説明書】</p> <p>【資料17 設計及び工事に係る品質管理の方法等に関する説明書】</p> <p>【資料18 使用済燃料貯蔵槽の温度、水位及び漏えいを監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書】</p>	<p>【資料2】対象設備に係るものでないことから不要。</p> <p>【資料3】同上。</p> <p>【資料4】同上。</p> <p>【資料5】同上。</p> <p>【資料6】</p> <p>⑩「添付資料19 燃料取扱設備、新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書にかかる補足説明資料 使用済燃料貯蔵設備の補足説明について」の「4. 使用済燃料ピット用中性子吸収体の取り扱いについて」の表1に、制御棒クラスタ及び使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体について記載していることから、臨界防止の管理に係る記載しなかった。</p> <p>【資料7】対象設備に係るものでないことから不要。</p> <p>【資料8】同上。</p> <p>【資料9】同上。</p> <p>【資料10】同上。</p> <p>【資料11】同上。</p> <p>【資料12】同上。</p> <p>【資料13】</p> <p>⑪計測制御系統施設としての制御棒クラスタについては、資料13-17-4-2「制御棒クラスタの耐震計算書（挿入時間を含む）」にて耐震評価を行っており、新規の設備でないことから「添付資料19 燃料取扱設備、新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書にかかる補足説明資料 使用済燃料貯蔵設備の補足説明について」の「4. 使用済燃料ピット用中性子吸収体の取り扱いについて」の表1にて確認しており、核燃施設としては、計測制御系統施設としての制御棒クラスタの評価に包絡されていることを確認している。また、使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体については、新規の設備であることから、資料13-17-2-9「使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体の耐震計算書」にて確認している。</p> <p>【資料14】対象設備に係るものでないことから不要。</p> <p>【資料15】同上。</p> <p>【資料16】同上。</p> <p>【資料17】同上。</p> <p>【資料18】同上。</p>

【添付資料 1 9 燃料取扱設備、新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書】

(別添 1 領域管理の設定に対する考え方)

・以下、関係箇所の抜粋

『高浜 1 号機使用済燃料ピットでは、大規模漏えい時の未臨界性評価に用いた解析体系（以下、「本体系」という。）に基づき設定した領域に従い、初期濃縮度、燃焼度及び使用済燃料ピット用中性子吸収体の有無に応じて貯蔵する燃料を管理することとしている。領域別の貯蔵可能な燃料体条件を第 1-1 図に示す。⑫本資料では、領域管理による燃料運用の成立性について説明する。』

『各領域への燃料貯蔵の可否を判断する際には、必要に応じて使用済燃料ピット用中性子吸収体の反応度抑制効果を考慮する。仮に高浜発電所 1 号機の使用済燃料貯蔵ピットにおいて、全燃料集合体に使用済燃料ピット用中性子吸収体を考慮した場合、領域 A、B には燃焼度 0Gwd/t 以上の燃料が、領域 C には、燃焼度 15Gwd/t 以上の燃料（55Gwd/t 燃料の場合）が貯蔵可能となり、その燃料貯蔵容量の累積値は最大で第 1-3 図の青色の線となる。⑬実運用上は、青色の線の範囲内で貯蔵燃料体数に応じて必要となる体数の使用済燃料ピット用中性子吸収体を使用する。

第 1-3 図中の緑色の線は、⑭現時点（第 28 サイクル装荷前）で使用済燃料ピットに貯蔵されている制御棒クラスタ（高浜 1 号機：114 体）を考慮した場合の各燃焼度の燃料体に対する貯蔵可能体数の例を示している。第 28 サイクル装荷前では、緑色の線が各プロット点を上回っており、すべての燃料体が使用済燃料ピットに貯蔵可能と判断できる。』

(別添 3 使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体に関する説明書)

・以下、関係箇所の抜粋

『使用済燃料ピット（以下「SFP」という。）用の中性子吸収棒集合体（以下「SFP 用中性子吸収棒集合体」という。）は、SFP 水の大規模漏えい時における未臨界性を確保するために、制御棒クラスタ（以下「RCC」という。）と同等の中性子吸収能力を有する機器として、SFP 内で用いることを想定している。

⑮本資料は、SFP 用中性子吸収棒集合体の概要及び健全性を説明するとともに、SFP 用中性子吸収棒集合体を用いることによる冷却性、他設備の耐震性等について、それぞれの設備の設計や要求機能への影響が問題ないことを説明するものである。』

⑯ 第 2-2 表 SFP 用中性子吸収棒集合体の仕様

名称		中性子吸収棒	
種類	-	使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体	
組成	-	銀-インジウム-カドミウム合金	
主要寸法	クラスタ全長	mm	3,938
	クラスタ有効長さ	mm	3,607
	クラスタたて	mm	155.7
	クラスタ横	mm	155.7
	中性子吸収棒外径	mm	11.2
	中性子吸収棒被覆管厚さ	mm	0.5
個数	-	424以下 (領域管理を満足するために必要な本数)	

【添付資料 1 9】

⑫領域管理による燃料運用の成立性を確認している。

⑬使用済燃料ピット用中性子吸収体の体数は、貯蔵燃料体数に応じて必要となる体数を使用する旨記載している。

⑭⑮の成立性の確認においては、申請時点で 1 号機の使用済燃料ピットに貯蔵されている制御棒クラスタ 114 体を用いて、その時点でのすべての燃料体及使用済燃料ピットに貯蔵可能であることを確認し、領域管理を実践した場合の貯蔵可能体数の例として示している。

⑯使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体の健全性等について説明している。使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体については、新規基準に適合するための新規の設備であるために、健全性等について添付資料 19 の中で記載していた。一方で、制御棒クラスタについては、新規の設備ではなかったため、使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体と同じ箇所には記載しておらず、補足説明資料の中で記載していた。

⑰⑱と同じ考え方にに基づき、使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体の仕様を記載し、その中で、最大貯蔵可能数（424）以下と記載していた。一方で、制御棒クラスタについては、上記のとおり計測制御系統施設の要目表で核燃施設と兼用している 48 体の記載があり、さらに、⑲の添付資料 19 で例として示している領域管理の実機適用性確認の前提条件として申請時点でピットに貯蔵されている制御棒クラスタ 114 体の記載がある。

【添付資料19 燃料取扱設備、新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書にかかる補足説明資料】

(4. 使用済燃料ピット用中性子吸収体の取り扱いについて)

・以下、関係箇所の抜粋

『(2) 設備分類について

⑰SFP 大規模漏えい時の臨界防止については、貯蔵する燃料の初期濃縮度、燃焼度及びSFP用中性子吸収体の有無の条件による貯蔵領域を設定し、燃料体等及びSFP用中性子吸収体の配置管理を行うことにより未臨界性を維持する設計としており、SFP用中性子吸収体は重大事故等発生(SA)時の対処設備としてSA設備に分類する。(表-1参照)』

【添付資料19 補足説明資料】

⑰使用済燃料ピット用中性子吸収体は重大事故等発生(SA)時の対処設備としてSA設備に分類することを記載し、表-1にて要求機能に対して整理している。使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体については、既存設備である計測制御系統施設としての制御棒クラスタとの比較により評価しており、また制御棒クラスタに対しても設計・仕様は同一でありSFPで使用することを踏まえて同様に評価している。

なお、表1の左列の要求事項について、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の要求事項となっているが、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」の要求事項と同じである。

表-1 使用済燃料ピット用中性子吸収体に係る要求機能整理表

要求事項※	SFPに対する設置許可上の記載	SFPでの制御棒クラスタ(RCC)	SFP用中性子吸収棒集合体	既認可(高浜3,4号炉)の考え		
				B-SUSラック	炉心内の制御棒クラスタ(RCC)	
SFP内での機能要求	第四条(耐震)	耐震設計Sクラスとする。	・Sドラック全てに燃料+RCCが装着した状態で耐震評価を実施しているため、Sドラックの健全性に問題なく、内包する燃料及びRCCの健全性を担保。 ・なお、RCC耐震性についてはSFP内の評価条件は炉心での評価条件(Sクラス評価)に包含。	・RCCよりも軽い設備 ・被覆管はRCCと同等の構造 ・上部端栓については、RCCよりも太径構造以上から、SFPでのRCCの評価(左記)に包含され問題なし。	Sクラス評価	/
	第十六条第五十四条	臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び使用済燃料ピット用中性子吸収体配置において、スプレイや蒸気条件においても未臨界を維持できる	大規模漏えい時はRCCの反応度抑制効果を考慮することで未臨界を維持できる。 (中性子吸収材の種類:銀・インジウム・カドミウム)	中性子吸収材部分の材料・構造はRCCと同じであるため、同等の反応度抑制効果がある。 (中性子吸収材の種類:銀・インジウム・カドミウム)	ボロンの反応度抑制効果を考慮することで未臨界を維持できる。	
SA設備に対する要求	環境条件(SFP内・海水影響)	・重大事故等時における原子炉補助建屋内の環境条件を考慮した設計とする。 ・代替水源として海水を使用するため、海水影響を考慮した設計とする。	・SA時のSFP内の燃料棒表面温度は200℃程度(大気圧)となるが、仮にRCCが同等の温度になったとしても、RV内の環境条件に包含されるため問題なし。 ・放射線による影響についても、臨界状態である通常運転時の炉心内で物理的及び化学的性質を保持できる設計であるため問題なし。 ・海水に対して有意な影響なし。	RCCとほぼ同じ材料・構造であるため、RCCの評価に包含される。	・原子炉補助建屋内の環境条件を考慮した設計とする。 ・海水影響を考慮した設計とする。	RV内の環境条件(最高温度343℃、最高圧力17.16MPaG)を考慮した設計。
	操作の確実性	(操作無し)	操作無し(全挿入済み)	操作無し(全挿入済み)	操作無し	操作なし(操作するのは、原子炉トリップスイッチのため)
	試験・検査	外観の確認が可能な設計とする。また、漏えい等の確認が可能な設計とする。	外観確認可能	外観確認可能	外観確認可能	動作確認可能
	切り替え性	(切替無し)	切替無し	切替無し	切替無し	切替無し
	悪影響防止	使用済燃料ピットは、弁操作等によって、通常時の系統構成から重大事故等対処設備としての系統構成をすることで、他の設備に悪影響を及ぼさない設計とする。	・耐震上RCCを考慮した評価をしているためラックへの悪影響なし ・スニダ構造のため、冷却水の流れを阻害することなく燃料体の冷却性への悪影響なし ・クレーン耐震及び燃料体の落下影響に対しては、燃料体+RCC重量を吊り荷重として評価している。	・ラックの耐震、クレーン耐震及び燃料体落下影響に対しては、RCCよりも軽量であるためRCC評価に包含される。 ・流路孔を有しているため、冷却水の流れを阻害することなく燃料体の冷却性への悪影響なし	他の設備に影響を及ぼさない設計	遮断機操作等により、SAとしての系統構成をすることで、他設備に悪影響を及ぼさない設計
	設置場所(放射線の影響)	(操作不要)	操作不要	操作不要	操作不要	操作不要
	容量	(DBでの容量を補い、事故対応に合わせて必要な容量を有する。)	容量なし	容量なし	容量なし	容量なし
	共用の禁止	(共用しない)	共用しない	共用しない	共用しない	共用しない
共通要因故障防止	(屋内、サポートなし)	屋内、サポートなし	屋内、サポートなし	屋内、サポートなし	屋内、サポートなし	
その他	燃料体への挿入性	/	自重で燃料体に挿入可能であり、挿入した状態で維持される。	挿入部分はRCCと同じ構造であるため、挿入性はRCCと同等である	/	(駆動装置用電源を遮断することにより)自重で炉心に落下する。
	取扱性	/	内挿物取扱工具によりラック間の移動が可能。	内挿物取扱工具との場合を既存の内挿物と同形状にすることにより、内挿物取扱工具によりラック間の移動が可能。(設置許可上、内挿物取扱工具で取り換える機器についての制限はない。)	/	内挿物取扱工具によりラック間の移動が可能。
	構造	/	中性子吸収材をステンレス管に入れた構造とする。	RCCと同様に中性子吸収材をステンレス管に入れた構造とする。	/	中性子吸収材をステンレス管に入れた構造とする。

※ 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」における要求事項

既工認における核燃施設としての制御棒クラスタ及び使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体に係る記載	既工認申請時の考え方
<p>『(4) 工事計画認可申請書における整理</p> <p><u>⑱制御棒クラスタ及びSFP用中性子吸収棒集合体は、「核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設」においては、別表第二で要求されている設備ではなく要目表には記載すべき箇所がないため、基本設計方針にその設計方針を記載する。</u></p> <p><u>また、⑲SFP用中性子吸収棒集合体については、新規制基準に適合するための新規の設備であるために、機械的強度、耐震性及び他設備への影響等について添付資料19の中で記載する。なお、⑳制御棒クラスタについては「計測制御系統施設」に該当する設備であるため、兼用する旨のみ記載する。』</u></p> <p>【資料20 新燃料又は使用済燃料を取扱う機器の燃料集合体の落下防止に関する説明書】</p> <p>【資料21 使用済燃料貯蔵槽の冷却能力に関する説明書】</p> <p>【資料22 使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書】</p> <p>【資料23 原子炉格納容器内の一次冷却材の漏えいを監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書】</p> <p>【資料24 蒸気発生器の基礎に関する説明書】</p> <p>【資料25 流体振動又は温度変動による損傷の防止に関する説明書】</p> <p>【資料26 非常用炉心冷却設備のポンプの有効吸込水頭に関する説明書】</p> <p>【資料27 安全弁及び逃がし弁の吹出量計算書】</p> <p>【資料28 計測装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書】</p> <p>【資料29 工学的安全施設等の起動（作動）信号の設定値の根拠に関する説明書】</p> <p>【資料30 発電用原子炉の運転を管理するための制御装置に係る制御方法に関する説明書】</p> <p>【資料31 中央制御室の機能に関する説明書】</p> <p>【資料32 放射線管理用計測装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書】</p> <p>【資料33 管理区域の出入管理設備及び環境試料分析装置に関する説明書】</p> <p>【資料34 生体遮蔽装置の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書】</p> <p>【資料35 中央制御室の居住性に関する説明書】</p> <p>【資料36 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書】</p> <p>【資料37 原子炉格納施設の酸素濃度低減性能に関する説明書】</p> <p>【資料38 原子炉格納施設の基礎に関する説明書】</p> <p>【資料39 圧力低減設備のポンプの有効吸込水頭に関する説明書】</p> <p>【資料40 非常用発電装置の出力の決定に関する説明書】</p> <p>【資料41 常用電源設備の健全性に関する説明書】</p> <p>【資料42 斜面安定性に関する説明書】</p> <p>【資料43 緊急時対策所の機能に関する説明書】</p> <p>【資料44 緊急時対策所の居住性に関する説明書】</p> <p>【資料45 制御能力についての計算書】</p> <p>【資料46 原子炉非常停止信号の設定値の根拠に関する説明書】</p> <p>【資料47 デジタル制御方式を使用する安全保護系等の適用に関する説明書】</p>	<p>⑱①の考え方に基づき記載していることを説明していた。</p> <p>⑲⑤の考え方に基づき記載していることを説明していた。</p> <p>⑳⑥の考え方とおおり、制御棒クラスタは「計測制御系統施設」としての設備仕様の記載がもともと要目表にあることから、添付資料19の中で新たに記載するのではなく、「計測制御系統施設」の要目表の中で兼用である旨を記載することで核燃施設としての制御棒クラスタの設備仕様も同じであることを意図していた。</p> <p>【資料20】対象設備に関係するものでないことから不要。</p> <p>【資料21】同上。</p> <p>【資料22】同上。</p> <p>【資料23】同上。</p> <p>【資料24】同上。</p> <p>【資料25】同上。</p> <p>【資料26】同上。</p> <p>【資料27】同上。</p> <p>【資料28】同上。</p> <p>【資料29】同上。</p> <p>【資料30】同上。</p> <p>【資料31】同上。</p> <p>【資料32】同上。</p> <p>【資料33】同上。</p> <p>【資料34】同上。</p> <p>【資料35】同上。</p> <p>【資料36】同上。</p> <p>【資料37】同上。</p> <p>【資料38】同上。</p> <p>【資料39】同上。</p> <p>【資料40】同上。</p> <p>【資料41】同上。</p> <p>【資料42】同上。</p> <p>【資料43】同上。</p> <p>【資料44】同上。</p> <p>【資料45】同上。</p> <p>【資料46】同上。</p> <p>【資料47】同上。</p>