

資料 1 - 1 に関する補足説明資料

P15 基本ケース条件および不確かさ重畳条件における液膜レイノルズ数範囲を踏まえた液膜評価式（包絡式）の包絡性確認

液膜厚さを評価するに当たっては、1960 年代以前に策定された実験式である Nusselt 式および Zhivaikin 式を使用するが、当該の実験式が策定された以降にも新たな実験式が策定されていること、また実験値自体にも不確かさが存在すると考えられることから、文献（「新田勉 他、垂直流下液膜における流動および波動特性（1985）、化学工学論文集」）の実験データを参考に、不確かさを考慮した液膜評価式として、全測定値を包絡する評価式（包絡式）を設定している。

基本ケース条件および不確かさ考慮条件における液膜レイノルズ数を表 1 に示す。本評価で用いる液膜レイノルズ数の範囲（10～3000 程度）において、評価に用いた包絡式は、比較的新しい Takahama & Kato および Karapantsios らの液膜評価式を包絡していることを図 1 の通り確認している。

表 1. 各解析ケースにおける液膜レイノルズ数

	流入流量 [m ³ /h]	流入範囲 [-]	流入割合 [%]	液膜レイノルズ数 [-]
ピット水大量漏えい時の解析条件 (基本ケース)	□	SFP 全面 (424 ラック)	23	16
不確かさが重畳した場合の影響を確認する解析条件 (重畳ケース①)	□	局所 (3×3 ラック～)	30	～1691
不確かさが重畳した場合の影響を確認する解析条件 (重畳ケース②)	□	局所 (3×3 ラック～)	30	～2492

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。

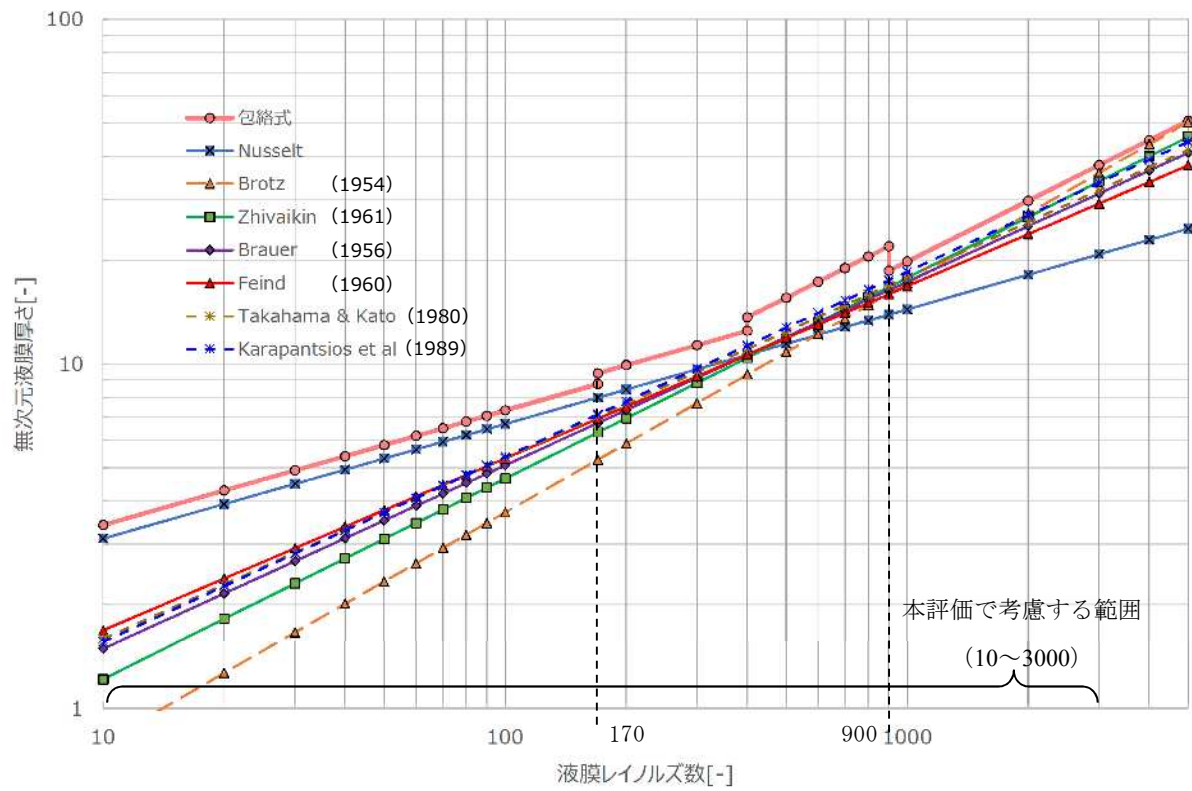


図 1. 各液膜評価式の液膜レイノルズ数－無次元液膜厚さの関係

(参考)

各液膜評価式の液膜レイノルズ数－無次元液膜厚さの関係は下表の通り。

Re	無次元液膜厚さ										
	包絡式①	包絡式②	包絡式③	包絡式④	Nusselt	Brotz	Zhivaikin	Brauer	Feind	Takahama & Katō	Karapantsios et al
10	3.4	3.7	1.6	1.4	3.1	0.8	1.2	1.5	1.7	1.6	1.6
20	4.3	4.6	2.4	2.0	3.9	1.3	1.8	2.2	2.4	2.3	2.3
30	4.9	5.3	3.0	2.6	4.5	1.7	2.3	2.7	2.9	2.8	2.8
40	5.4	5.8	3.6	3.0	4.9	2.0	2.7	3.1	3.4	3.3	3.3
50	5.8	6.3	4.1	3.5	5.3	2.3	3.1	3.5	3.8	3.7	3.7
60	6.2	6.6	4.5	3.8	5.6	2.6	3.4	3.9	4.1	4.1	4.1
70	6.5	7.0	5.0	4.2	5.9	2.9	3.8	4.2	4.5	4.4	4.4
80	6.8	7.3	5.4	4.5	6.2	3.2	4.1	4.5	4.8	4.7	4.8
90	7.1	7.6	5.7	4.9	6.5	3.5	4.4	4.8	5.0	5.0	5.1
100	7.3	7.9	6.1	5.2	6.7	3.7	4.6	5.1	5.3	5.3	5.4
170	8.7	9.4	8.3	7.1	8.0	5.3	6.3	6.7	6.9	7.0	7.1
200	9.2	9.9	9.1	7.8	8.4	5.9	7.0	7.4	7.5	7.7	7.8
300	10.6	11.4	11.6	9.8	9.7	7.7	8.8	9.1	9.2	9.5	9.7
400	11.6	12.5	13.7	11.6	10.6	9.3	10.4	10.6	10.6	11.1	11.3
500	12.5	13.5	15.6	13.2	11.5	10.8	11.9	12.0	11.9	12.4	12.8
600	13.3	14.3	17.3	14.7	12.2	12.2	13.2	13.2	13.0	13.7	14.1
700	14.0	15.1	19.0	16.1	12.8	13.5	14.5	14.3	14.1	14.8	15.3
800	14.7	15.8	20.5	17.4	13.4	14.8	15.6	15.4	15.0	15.9	16.4
900	15.2	16.4	22.0	18.6	13.9	16.0	16.7	16.4	16.0	16.9	17.5
1000	15.8	17.0	23.4	19.8	14.4	17.2	17.8	17.3	16.8	17.9	18.5
2000	19.9	21.4	35.0	29.7	18.2	27.3	26.7	25.1	23.8	25.8	26.9
3000	22.8	24.5	44.3	37.6	20.8	35.7	33.8	31.2	29.1	31.9	33.5
4000	25.1	26.9	52.4	44.5	22.9	43.3	40.0	36.3	33.6	37.1	39.1
5000	27.0	29.0	59.7	50.7	24.7	50.3	45.5	40.9	37.6	41.7	44.1

青枠囲み：各包絡式を適用する液膜レイノルズ数の範囲

参考 1-2 集合体出力の誤差の詳細について

燃料集合体の燃焼度誤差に影響する「集合体出力の誤差の標準偏差」については、2～4 ループの取替炉心（14炉心）に対して、サイクル初期・サイクル中期・サイクル末期それぞれにおける高温全出力時での集合体出力の測定値と計算値の差を評価し、統計処理することで求めている。3ループ取替炉心のサイクル初期における出力分布の測定値と計算値の差を図1に、サンプルとした炉心出力分布測定の内訳を表1に、度数分布を図2に示す。燃料集合体平均燃焼度は、これら燃料集合体毎の出力および炉心全体の発熱量の不確かさの影響を受けることになり、その不確かさの影響評価においては保守的に6%を見積もっている。

なお、出力の不確かさとして燃料棒出力の誤差も存在するが、燃料集合体の燃焼度は燃料集合体毎の出力および炉心全体の発熱量により計算されており、且つ未臨界性評価における燃焼度設定は燃料集合体として設定することから、燃料棒出力の誤差を考慮する必要はない。

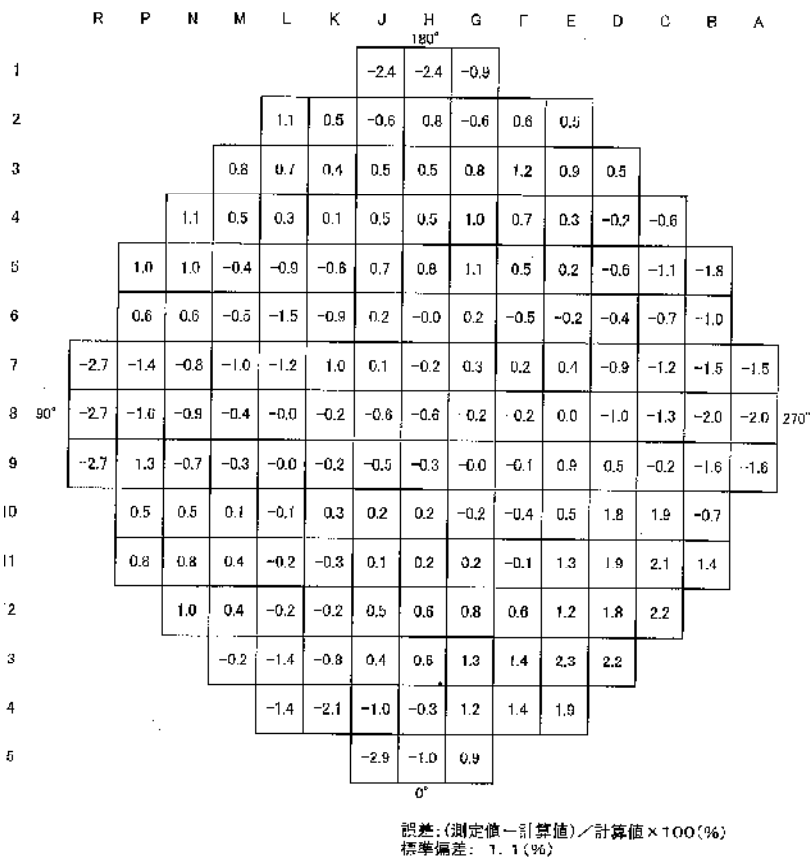


図 1. 取替炉心における各燃焼集合体の出力分布測定値と計算値の誤差※
(3ループ、サイクル初期、高温全出力の例)

※MHI-NES-1025 改 2「三菱 PWR の PHOENIX-P/ANC による核設計の信頼性」(平成 18 年、三菱重工業 (株))

表1. サンプルとした炉心出力分布測定結果の内訳

プラント	マップ数

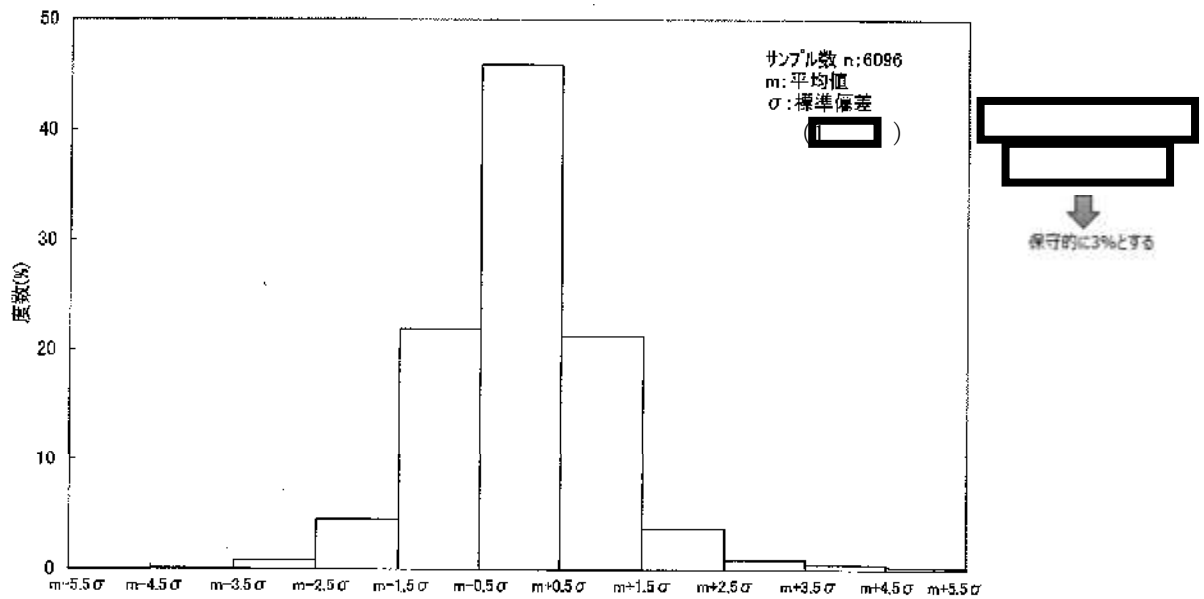


図2. 集合体出力分布誤差の度数分布※

※MHI-NES-1025 改2「三菱 PWR の PHOENIX-P/ANC による核設計の信頼性」(平成 18 年、三菱重工業 (株))

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。

P4、参考 3-1 AC 核種および FP 核種の選定および冷却期間設定の考え方について

AC 核種および FP 核種は、燃焼燃料に存在する核種のうち、燃焼期間、プールでの保管中長時間にわたって燃料ペレット内にあり、燃料核種と均一組成をなしているとみなすことができる核種で実効増倍率が大きくなるような設定とする。また、冷却期間設定は以下の考えに基づき [] とする。

【AC 核種】

表 1 に AC 核種の半減期を示すが、 []

[] が保守的である。

表 1. 解析時に考慮する AC 核種

AC 核種	高浜 1/2 号炉		半減期
	新規制基準 適合審査時	今回申請	
^{235}U	[]	[]	約 7.0×10^8 年
^{238}U			約 4.5×10^9 年
^{238}Pu			約 87 年
^{239}Pu			約 2.4×10^4 年
^{240}Pu			約 6.5×10^3 年
^{241}Pu			約 14 年
^{242}Pu			約 3.7×10^5 年
^{241}Am			約 432 年
^{239}Np			約 2.3 日

【FP 核種】

中性子吸収効果を有する FP 核種については、多種存在する核種のうち、 []

[] する。

また FP 核種は冷却期間を考慮することで以下①と②の影響を受ける。

- ① 親核種の崩壊により生成され、中性子吸収能力が大きくなる効果。
- ② 核種自体の崩壊により、中性子吸収能力が小さくなる効果。

表 2 に示す FP 核種のうち、 [] しており②の効果は無視できることから、 [] が保守的である。

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。

表 2. 解析時に考慮する FP 核種

FP 核種	高浜 1/2 号炉		半減期
	新規制基準 適合審査時	今回申請	
^{83}Kr			— (安定)
^{93}Zr			約 1.5×10^6 年
^{95}Mo			— (安定)
^{99}Tc			約 2.1×10^5 年
^{101}Ru			— (安定)
^{103}Rh			— (安定)
^{105}Rh			約 35 時間
^{105}Pd			— (安定)
^{108}Pd			— (安定)
^{109}Ag			— (安定)
^{133}Cs			— (安定)
^{134}Cs			約 2.1 年
^{135}Cs			約 2.3×10^6 年
^{131}Xe			— (安定)
^{135}Xe			約 9.1 時間
^{139}La			— (安定)
^{141}Pr			— (安定)
^{143}Nd			— (安定)
^{145}Nd			— (安定)
^{147}Sm			約 1.1×10^{11} 年
^{149}Sm			約 2.0×10^{15} 年
^{150}Sm			— (安定)
^{151}Sm			約 90 年
^{152}Sm			— (安定)
^{147}Pm			約 2.6 年
$^{148\text{m}}\text{Pm}$			約 41 日
^{149}Pm			約 53 時間
^{153}Eu			— (安定)
^{154}Eu			約 8.6 年
^{155}Eu			約 4.8 年
^{155}Gd			— (安定)

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。

なお、原子炉停止から SFP に燃料が取り出されるまでには 8.5 日（SFP の冷却性評価において用いられる取り出し直後の燃料に対して適用されている冷却日数）以上かかるが、未臨界性評価においては [redacted] として、さらに [redacted] の組成を簡易的に評価した結果を表 3 に示す。ここから、今回申請において使用した燃料組成は 8.5 日冷却後の組成よりも核分裂性核種は多く、中性子吸収核種である [redacted] となっており、未臨界性評価の上では保守的である。なお、本評価においては中性子吸収効果のある [redacted]

表 3. AC 核種の原子個数密度の時間的推移

AC 核種	半減期
^{235}U	約 7.0×10^8 年
^{238}U	約 4.5×10^9 年
^{238}Pu	約 87 年
^{239}Pu	約 2.4×10^4 年
^{240}Pu	約 6.5×10^3 年
^{241}Pu	約 14 年
^{242}Pu	約 3.7×10^5 年
^{241}Am	約 432 年
^{239}Np	約 2.3 日

※ [redacted]

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 3-1 PHOENIX-P と MVP-BURN による評価の詳細について

今回の申請は既許可と同様に燃焼燃料を扱っており、この燃焼燃料組成の計算には、取替炉心設計で広く使用され、妥当性が確認できている PHOENIX-P コードを用いている。

この PHOENIX-P コードにより求めた燃焼燃料組成を用いた実効増倍率評価を行うにあたって、PHOENIX-P 以外の燃焼計算コードを用いて得られた燃焼燃料組成と比較し、未臨界性評価結果にどの程度の影響が生じるかを確認することが臨界安全設計の観点から重要となる。

そこで、PHOENIX-P コードと SCALE6.0 コードの組み合わせによる核種組成の実効増倍率への影響を比較するため、連続エネルギーモンテカルロ法に基づく燃焼計算コード MVP-BURN を用いて 50GWd/t までの燃焼計算を行った。

また MVP-BURN による計算では断面積ライブラリの違いによる影響を確認するため、3つの異なる断面積ライブラリを用いた。

表 1 は、この確認評価における中間データとして各々の燃焼計算コードにより生成された核種組成を比較し、参考情報としてまとめたものである。

続いて、MVP-BURN による核種組成の誤差が全て実効増倍率を厳しく評価する側となるよう、核分裂性核種については最大値を、中性子捕獲核種には最小値を使用し、SCALE6.0 を用いて核種組成の誤差が実効増倍率へ与える影響を確認した結果、実効増倍率への影響は 0.0041 であった。

なお、PHOENIX-P と MVP-BURN の核種組成の差異に起因する実効増倍率に対する影響は燃焼が進むと大きくなるが、今回の申請で考慮している燃焼燃料の燃焼度は 25GWd/t と 50GWd/t より低く、PHOENIX-P と MVP-BURN の核種組成の差異による実効増倍率への影響は 0.0041 より小さくなると考えられる。

以上のことから、燃焼計算コードの違いによる核種生成量の違いを保守的に臨界評価に取り込んだ場合においても、実効増倍率への影響は軽微である。

<解析条件> (核種組成量の精度確認)

解析体系 : ピンセル体系

燃料燃焼度 : 50Gwd/t

考慮核種 : 表 1 に記載の核種

使用コード : PHOENIX-P、MVP-BURN

MVP-BURN の断面積ライブラリ : JENDL4.0、ENDF/B-VII、JEFF3.1

<解析条件> (核種組成誤差による実効増倍率への影響確認)

使用コード : SCALE 6.0

解析体系 : 50Gwd/t 燃焼燃料敷き詰め (無限体系)

水密度条件 : 最適減速 (約 0.1g/cm³)

燃料内核種の原子個数密度 : ①PHOENIX-P での計算結果そのまま

②MVP-BURN での計算結果から核分裂性物質は最大、中性子捕獲核種
は最小の値を選択

<評価結果>

実効増倍率への影響 : 0.0041

表 1. PHOENIX-P と MVP-BURN の核種生成量比較

核種	PHOENIX-P と MVP-BURN の原子個数密度比			特徴	keff が最大となる 原子個数密度比
	MVP-BURN のライブラリ				
	JENDL4.0	ENDF/B-VII	JEFF3.1		

表 2. 核種組成誤差による実効増倍率への影響確認結果

原子個数密度条件				ΔK_1^{**}
①		②		
実効増倍率 K_{PHNX}	統計誤差 σ_{PHNX}	実効増倍率 K_{MAX}	統計誤差 σ_{MAX}	
□	□	□	□	0.0041
※ □				

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3-5 FPを含んだ体系に対するベンチマークのため選定した臨界実験の詳細について

未臨界性評価において考慮している核種は、その核種を含んだ体系に対し、ベンチマーク解析を実施することを基本としている。

未臨界性評価に用いる SCALE6.0 の FP 核種を含む評価体系に対する精度を確認するため、追加でベンチマークを実施した臨界実験について、実験体系およびベンチマーク結果を表1に、計算コードの誤差を算出するにあたり実施した他のベンチマーク（塩素を含むベンチマークを除く）も含めた結果を図1に示す。臨界実験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」、および「中性子エネルギー」であるが、表1の通り、追加で選定したベンチマークでの各パラメータは燃料貯蔵設備仕様及び燃料仕様と同等であり、ベンチマーク対象として適当である。

一方で、1998年から2004年にかけてフランス規制当局（IRSN）において ISG-8 で参照されている FP 核種のうち、 ^{103}Rh 、 ^{133}Cs 、 ^{143}Nd 、 ^{145}Nd 、 ^{149}Sm 、 ^{152}Sm および ^{155}Gd に焦点を当てた臨界実験が valduc 炉にて実施されているが、当該実験情報は IRSN の商業専用情報となっているため、ベンチマークを実施できなかった。一方、臨界実験ベンチマークに関する公開文献（An Approach for Validating Actinide and Fission Product Burnup Credit Criticality Safety Analyses – Criticality(keff) Predictions）において、SCALE6.2 を用いた FP 核種を考慮した臨界実験における実効増倍率の不確かさは 0.002 とされている。よって未臨界性評価において考慮している FP 核種設定が有する保守性に、上述の不確かさが包含されることを、参考3-3に示す解析により確認する。

なお、今回の評価においては、多種存在する核種から FP 核種を限定的に考慮することにより十分保守的な条件設定としている。

また、塩素を含んだ体系3ケースのベンチマーク解析を追加実施した結果を表2に示す。すべてのケースで C/E は 1.01 を超えており、塩素を含んだ体系は 1%（実効増倍率 0.01 に相当）以上、安全側の評価結果を与えることを確認している。

なお、塩素に起因する誤差については、ベンチマーク解析に関連する文献（Sobes, VALIDATION STUDY FOR CREDITING CHLORINE IN CRITICALITY ANALYSES FOR SPENT NUCLEAR FUEL DISPOSITION (2015), ICNC）において、100pcm（実効増倍率 0.001 に相当）程度と小さいことが報告されている。

以上のことから、塩素が実効増倍率に与える影響は、安全側な実効増倍率となる評価結果が有する裕度に包含される。

表 1. 追加した臨界実験の実験体系およびベンチマーク結果

項目		単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲	
			MIN	MAX
燃料	²³⁵ U濃縮度	WT%	1.6	4.8
	燃料材径	mm	8.19	9.29
	燃料体内の減速材 体積／燃料体積	—	1.88	2.00
	被覆管外径	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	
	水位	mm	完全喪失／冠水	
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。

項目		単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲	
			MIN	MAX
EALF		eV	0.2~6.7eV**	
中性子 吸収材	FP（中性子吸収体） 核種／元素	—	収率曲線に応じた核種	
	中性子吸収体性状	—	固体／液体／気体	
解析 ケース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

※ワーストケース条件（総流量： m³/h、流入範囲：5×5、流入割合：30%）での EALF 範囲

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。

項目	
実験体系	
ベンチマーク 解析結果	SCALE6.0による 実効増倍率の平均、 σ

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。

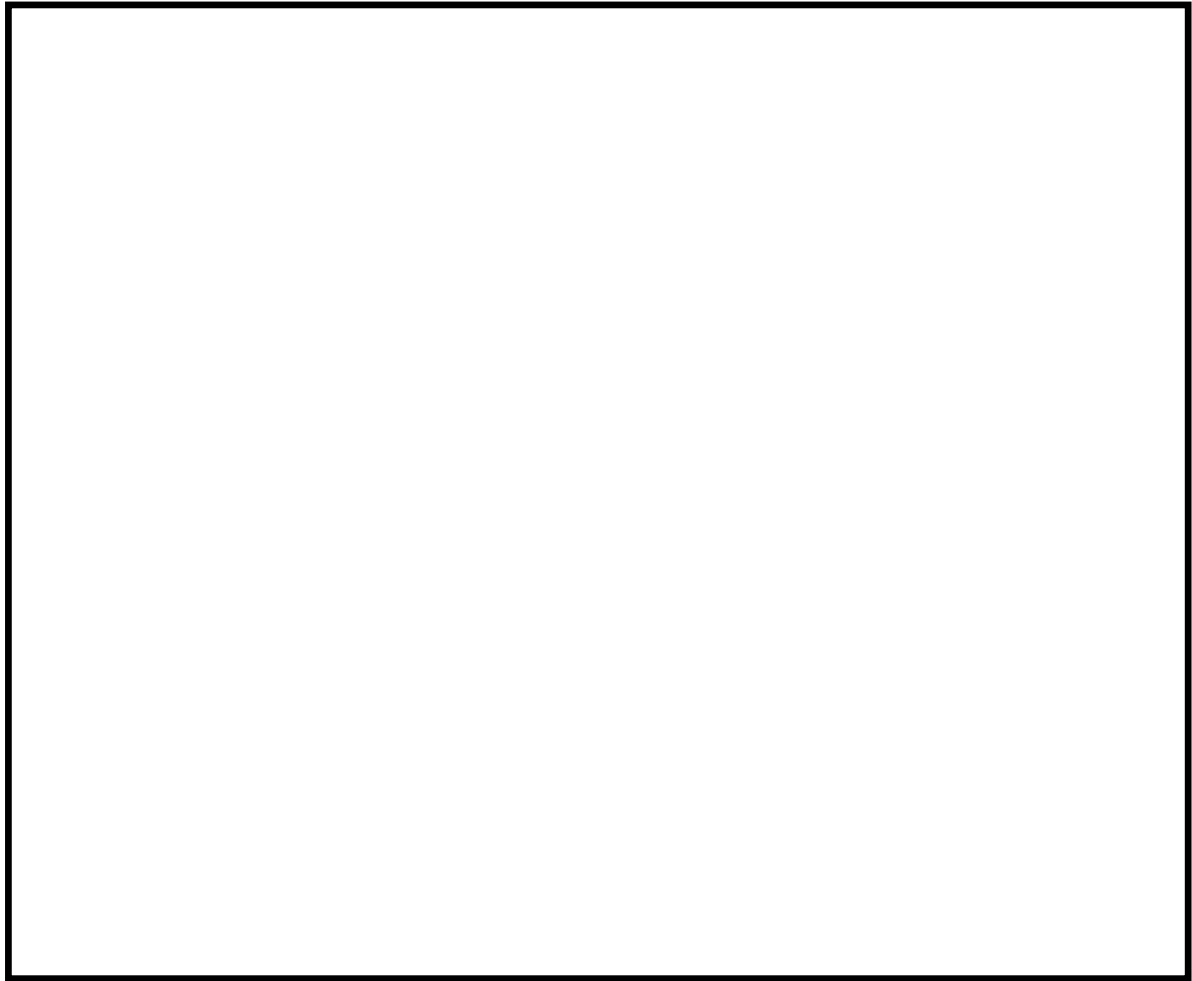


図 1. 臨界実験ベンチマーク結果

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。

表2. 塩素を含んだ臨界実験に対するベンチマーク結果

項目		単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲	
			MIN	MAX
燃料	²³⁵ U 濃縮度	WT%	1.6	4.8
	燃料材径	mm	8.19	9.29
	燃料体内の減速材 体積／燃料体積	—	1.88	2.00
	被覆管外径	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	
	水位	mm	完全喪失／冠水	
反射体	反射体材質	—	軽水／コンクリート	
EALF		eV	0.2～6.7eV*	
中性子吸収材	FP (中性子吸収体) 核種／元素	—	収率曲線に応じた核種	
	中性子吸収体性状	—	固体／液体／気体	
解析ケース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

※ワーストケース条件 (総流量: m³/h、流入範囲: 5×5、流入割合: 30%) での EALF 範囲

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。

項目		
実験体系		
ベンチマーク 解析結果	SCALE6.0による 実効増倍率の平均、 σ	

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。

P21、22 大規模損壊を考慮した評価条件設定の妥当性について

放水砲による流量について、設置許可基準規則第54条2項の要求に係る評価においては、重大事故等発生時の対応手順を踏まえた使用台数である1台分の流量とし、大規模損壊を踏まえた評価においては、未臨界性上保守的な想定として、非被災号炉の放水砲をも被災号炉SFPへ使用されるとし、放水砲2台分の流量を考慮している。

被覆管表面に液膜として存在する量を決める条件は、「流量」、「流入範囲」、「燃料集合体内への流入割合」及び「液膜厚さ評価式」の4つであり、これらは相互に相関があるが、現状の評価条件は大規模損壊時の状況を踏まえた保守的な条件として、「総流量： \square m³/h、流入範囲：局所、燃料集合体内への流入割合：30%、液膜厚さ評価式：包絡式」（以下、現評価条件という。）を設定している。

ここでは、大規模損壊時に放水砲による流量が局所に集中する状況において、横風の影響により斜めから水が燃料集合体内へ流入することにより、燃料集合体内への流入割合（以下、流入割合と記す）が増加する場合における液膜厚さへの影響を評価し、横風による影響が現状の評価条件が有する保守性に包絡されることを確認する。

具体的には、現状の評価条件が、未臨界性評価上重要である燃料棒の液膜厚さを最大とする条件となっていることを、横風の影響を考慮した場合に算出される液膜厚さと比較することにより示す。

1. 検討の目的

横風の影響により燃料集合体へ斜めから水が流入することによる流入割合の増加を考慮しても、現状の評価条件が、未臨界性上重要なパラメータとなる液膜厚さを最大に設定していることを示し、他のパラメータが有する保守性に包含されていることを確認する。

2. 局所領域に同時に集中しうる流量条件について

局所領域に流量が集中する状況としては、図1に示す通り、放水砲により放水された水がSFP建屋天井に溜まり、SFP建屋天井に空いた狭い穴（2m四方程度）からSFP内に集中して流入することが想定される。図1の状況において局所に集中する流量は、現評価条件では大規模損壊の発生を考慮した総流量： \square m³/h（放水砲2台分）としており、影響評価においても同流量を設定する。

また、参考1に示す通り、恒設注水配管の設置状況やスプレイヘッドのスプレイ特性を踏まえれば、局所領域に同時に流入する流量は最大でも \square m³/hとなることから、当該流量における液膜厚さを求め、 \square m³/hで評価することの保守性を確認する。

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。

なお、高浜発電所内には3, 4号炉登録となっている放水砲（敷設ホース含む）も存在するが、3, 4号炉側が大規模損壊した際に当該号炉の初動対応を円滑に行う必要から3, 4号炉設備を用いた放水砲ラインの追加は想定せず、放水砲の使用台数上限は1, 2号炉用に登録されている2台とする。

また、図1はSFP建屋天井に溜まった水がSFPの直上に1か所だけ空いた穴から流入することを想定しているものであるが、参考2に示すSFPの損傷シナリオや、SFP建屋天井には強度の低いパラペットや雨水側溝があることを踏まえれば、大規模損壊発生時に放水全量が1か所の穴から流入することは考え難い。

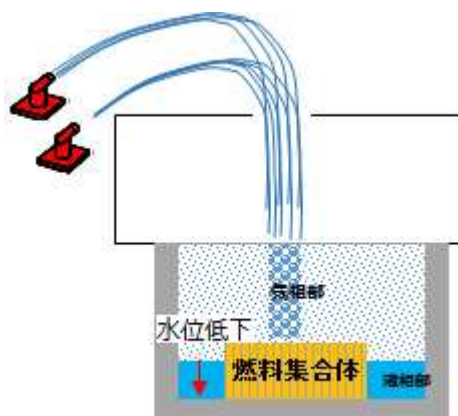


図1. 局所領域に流量が集中する状況

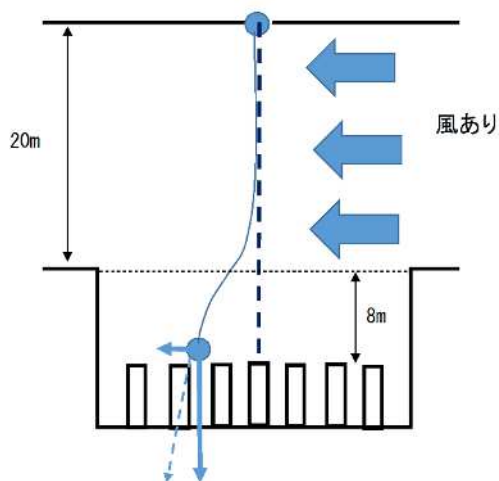
3. 「燃料集合体内外の流入割合」に対する横風の影響検討

「燃料集合体内外の流入割合」について、現評価条件では横風の影響は考慮していないものの、燃料上部から流入する流量を保守的に見積もった流入割合として30%を設定している。一方、横風の影響を評価するに当たっては、燃料集合体の上部ノズルの構造をふまえ流入割合を23%として設定し、SFP建屋天井から流入してくる放水に横風が作用した場合の燃料頂部位置における垂直方向・水平方向の速度ベクトル（流入角度）を求め、斜めからの流入分として加算する。

流入角度の計算モデルおよび計算式を図2に、計算諸元を表1に示す。

ここで横風の風速は、図3に示す2019年度の高浜発電所における風速測定結果の平均値2m/sを設定する。2019年度以前においても同様の傾向を示すことを確認している。また、横風が作用する高さは建屋天井～SFP建屋フロア床面までの距離として20mを設定し、その区間全体に渡って横風が一定の方向に吹く保守的な（流入角度が大きくなる）条件とした。

なお、より大きな風速を設定した場合、局所領域の外側へ流出する流量が増える、即ち局所領域内に流入する流量が減ることとなるが、今回の影響評価においては、流量は保存したままで流入割合を最大とした場合の影響も確認する。



鉛直方向

$$m_d \ddot{y}_d = -m_d g + F_D$$

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho_g (\dot{y}_d - u_g) |\dot{y}_d - u_g| \cdot \frac{\pi}{4} d^2$$

水平方向

$$m_d \ddot{x}_d = G_D$$

$$G_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho_g (\dot{x}_d - u_g) |\dot{x}_d - u_g| \cdot \frac{\pi}{4} d^2$$

m_d : 液滴質量[kg] d : 液滴径[m]

F_D : 鉛直方向抗力[N] G_D : 鉛直方向抗力[N]

ρ_g, ρ_l : 気相、液相の密度[kg/m³]

μ_g, μ_l : 気相、液相の粘性係数[Pa · s]

C_D : 抗力係数[-]

図2. 液滴流入角度の計算モデル

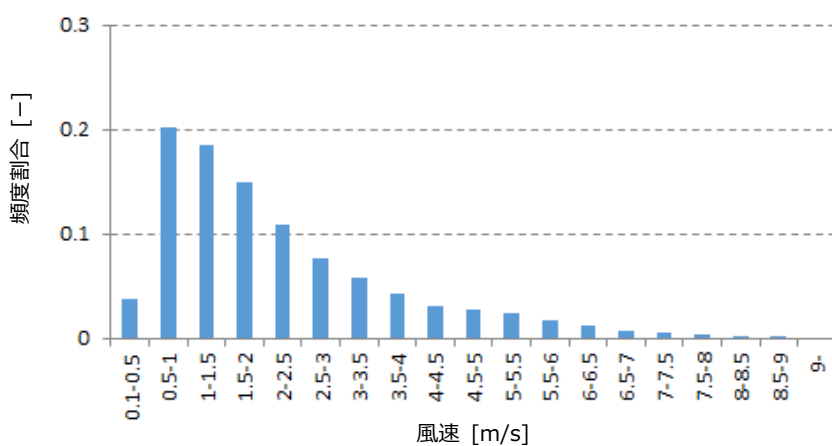


図3. 高浜発電所での風速頻度分布
(2019年度データの一時間当たり平均値 (約8700点)) (平均 約2.0m/s)

表1. 流入角度計算諸元

計算諸元	
SFP 建屋流入時の液滴の初速	0 m/s
横風作用高さ	20m
SFP 建屋床面から燃料領域までの距離	8m
横風風速	2m/s

3. 1. 平均液滴径の算出

建屋天井より流入してくる放水に対し、(1)式に示すマーシャル・パルマー分布に基づく粒度分布を仮定する。本分布は降雨時の単位体積中の粒度分布を求めるため、広く一般的に使用される式である。

$$N(D) = N_0 e^{\Delta D} [cm^{-3} cm^{-1}], \quad \Delta = 41R^{-0.21} [cm^{-1}] \dots \dots \dots (1)$$

(D : 液滴径[cm]、R : 降水強度[mm/h]、 $N_0 = N(0) = 0.08$)

図1のモデルに基づき、建屋天井の穴の径を5×5ラック相当面積とし、また流入液滴の平均径を見積もる条件として、放水砲による流量を [] m³/hとした場合の降水強度Rは [] [mm/h]となり、この時の平均液滴径は約7.0mmと算出される。

R = [] [mm/h]での粒度分布 N(D)および各液滴径の体積分率整理結果を参考3に示す。

3. 2. 液滴径7.0mmの液滴が斜めに落下する場合の燃料への流入割合

液滴が斜めに落下する場合、燃料への流入割合は「①ラックに対する流入方向」、「②液滴の流入角度」により影響を受けると考えられる。液滴径7.0mmの液滴が落下する場合の①、②の状態を踏まえ流入割合を求める。

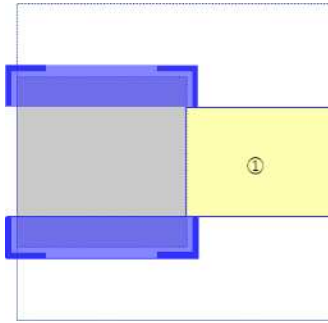
3. 2. 1. ラックに対する流入方向と流入割合

ラックに対する角度によっては流入割合への影響度合いが異なる。例として、流入方向が0°の場合と45°の場合を図4に示す。SFラック構造材による影響を考慮した液滴流入面積は、図4中の黄色部分と想定する。燃料への流入割合は、黄色部面積がラックピッチ面積 ([] mm × [] mm) に占める面積の割合で表され、黄色部分の占有率が大きくなる45°方向における流入割合は下式の通り約45%と算出される。

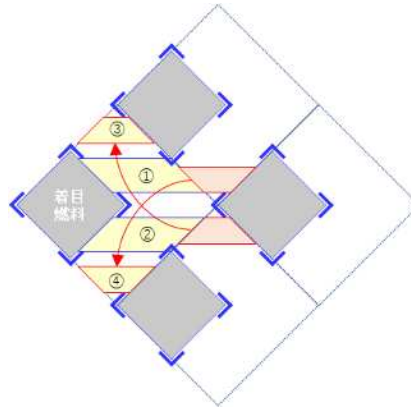
$$\text{流入方向 } 0^\circ \text{ の場合} \dots \frac{[]}{[]} \approx 16\%$$

$$\text{流入方向 } 45^\circ \text{ の場合} \dots \frac{[]}{[]} \approx 45\%$$

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。



流入方向が 0° の場合



流入方向が 45° の場合

図 4. 流入方向による流入割合への影響

3. 2. 2. 液滴の落下角度

液滴径 7.0mm の液滴が SFP 建屋天井から燃料集合体頂部へ到達した際の落下角度は、図 2 に示す計算式および表 1 に示す諸元を用いて、 1.9° と算出される。(図 5)

算出結果	
燃料頂部位置での水平方向速度	0.4 m/s
燃料頂部位置での鉛直方向速度	12.9 m/s
液滴落下角度	1.9°

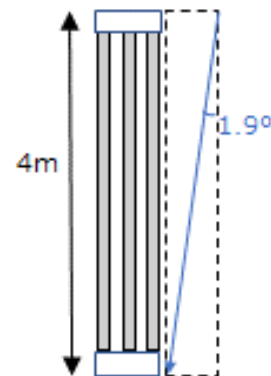


図 5. 液滴の落下角度模式図

3. 2. 1および3. 2. 2から、流入方向を45°、液滴の落下角度を1.9°とした場合、燃料集合体に付着しうる液滴は図6に示す赤囲部面積に落下するものと考えられる。また流入形態を考慮すると、赤囲部面積に高さを乗じた体積の半分が影響範囲と考えることができる。

よって、横風により斜めから液滴が流入してくる影響は、下式の通り約7.9%と算出される。

$$\left\{ \frac{\text{赤囲部面積}}{\text{燃料集合体面積}} \right\} \div 2 \approx 7.9\%$$

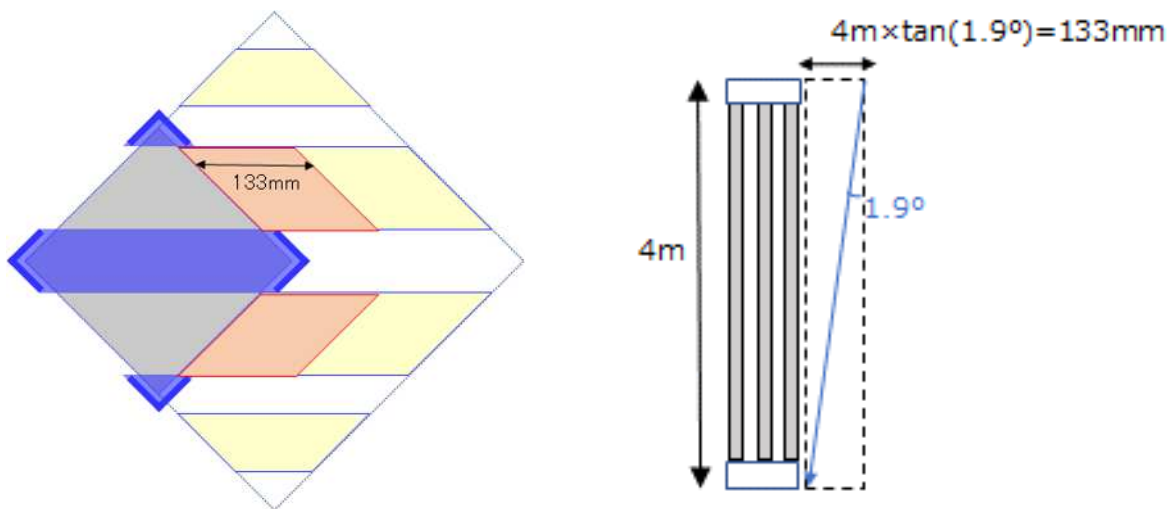


図6. 斜めから液滴が流入する場合の影響

なお、燃料の幾何形状のみで計算した最大の流入割合に対する影響は、3. 2. 1に示す結果より、45% ÷ 2 ≈ 23%となる。

4. 「液膜厚さ」についての評価

「液膜厚さの評価式」については、現評価条件では包絡式を設定している。このときは、落下液滴はすべて鉛直下向きとし、斜め流入は考慮していない。しかし、斜めから液滴が流入してくる状況を想定した場合、燃料棒表面に存在する液膜界面に波立ちが発生することとなり、この波が液膜厚さに及ぼす影響を考慮する必要がある。

これに関しては、液膜の助走領域から発達領域までの流動特性に着目し、非接触で計測すると、実際の液膜厚さはこれまでの実験式を下回るという研究結果（「レーザーフォーカス変位計による鉛直流下液膜の測定（第3報、円管内壁面の液膜界面波形の測定原理）

（1998）」、日本機械学会論文集）があり、当該研究では、液膜は管を流下する過程で波が発達し、流速が増加することで液膜厚さが減少することが示されている。これは、波によってせん断力と重力の均衡が崩れ、波高が高い部分に作用するせん断力が低下し、結果として鉛直下向きの速度が増加したところで重力とせん断力が釣り合うためと考える。

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。

この作用に着目すると、斜めからの液滴の衝突は、波立ちをより大きく、また流速を加速させる因子になることから、実験式により求まる液膜厚さよりもさらに下回る（液膜が薄くなる）方向に働く。

よって、斜め流入の影響を考慮する場合において、実験式をそのまま適用することは保守的である。

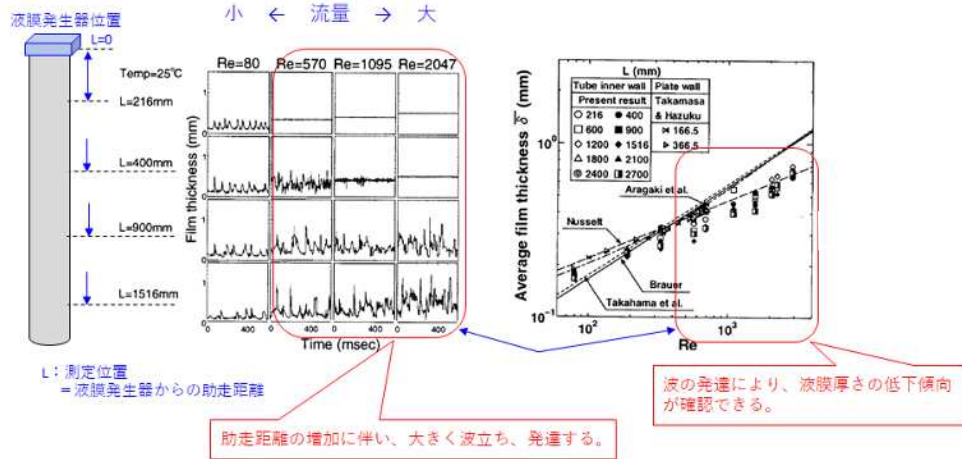


図7. 液膜界面の波立ちによる平均液膜厚さへの影響

● レーザーフォーカス変位計の計測原理

下図のように光源から照射されたレーザー光は、ハーフミラー、対物レンズを通り対象物上で小さなスポットを形成する。対象物より散乱反射した光は再びハーフミラーまで戻り、直角に反射してピンホールで一点に集光されるため、ピンホールを通過し受光素子に到達する。対象物の距離が変動した場合に、反射した光による受光信号が変動するが、対物レンズを音叉によって機械的に高速動させることにより、レンズがどの位置にあるときに、光がピンホールを通過するかを検出することで対象物までの距離を測定する。

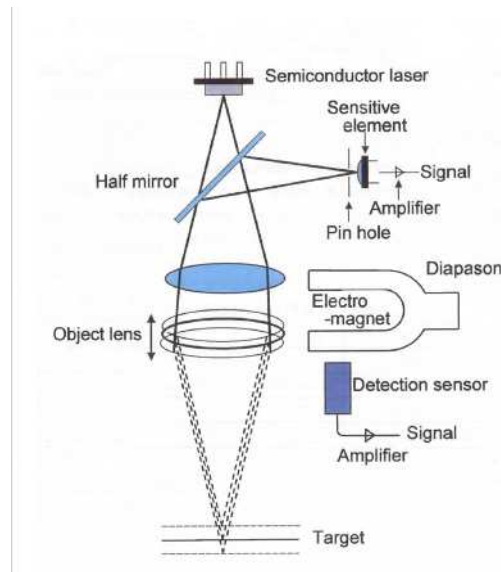


図8. レーザーフォーカス変位計の計測原理

出典：波津久達也，レーザーフォーカス変位計による液膜界面構造発達特性の測定，東京大学博士学位論文

●実験体系

公開文献における実験体系を試験部入口には焼結金属でできた液膜発生器が設置されており、試験部円管の長さは3 m、管の内径と外径は26mm/32mmである。

流量条件は液膜レイノルズ数を80~3000の範囲で変化させた10ケース、それぞれの流量条件に対し、試験部入口から216mm~2700mmの10ヶ所で液膜厚さが計測された。

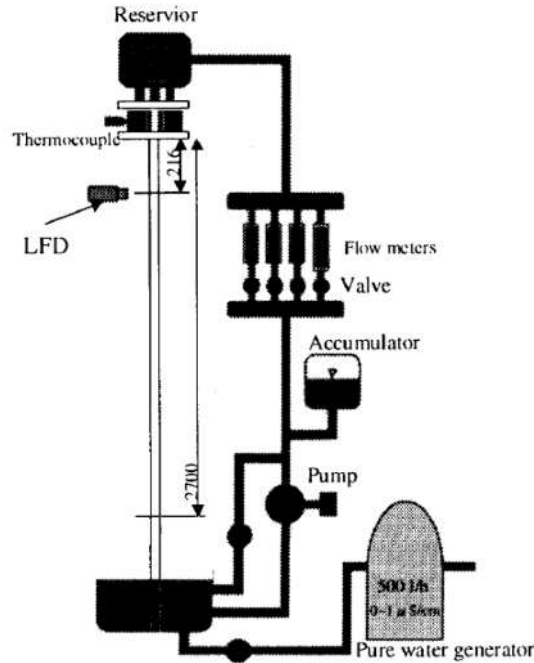


図9. 公開文献における実験体系

なお波立ちによる液膜流下流速の加速、波の成長に関するメカニズムの概念を下図に示す。

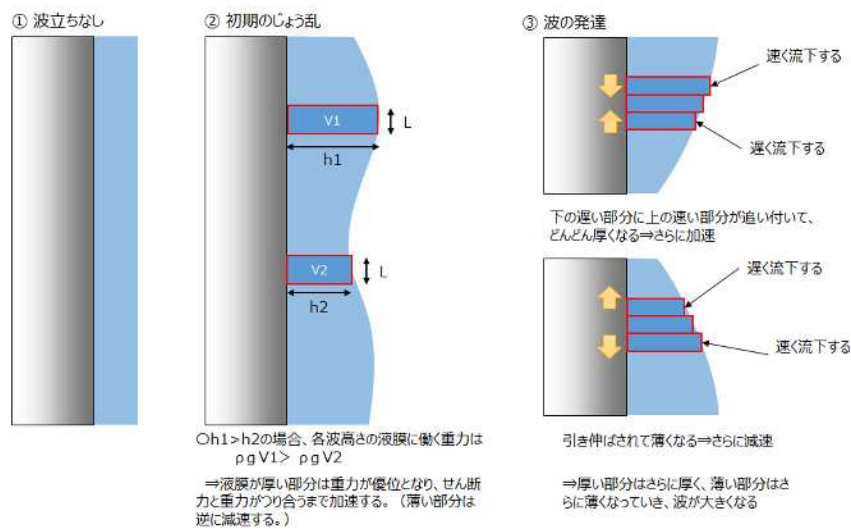


図10. 波立ちによる液膜流下流速の加速、波の成長に関するメカニズム

5. 斜め流入を考慮した場合の液膜厚さへの影響評価

放水砲 2 台分の流量が局所に集中することを考慮した現評価条件（ワーストケース）の液膜厚さ 1.03mm（表 2）が、横風による影響を踏まえ流入割合が増加することを想定した以下の全ケースにおける液膜厚さを上回ることを確認した。

ケース 1：放水砲の流量は 1 台分（SFP 注水による流量含む）とし、平均風速による影響を考慮した流入割合を用いたケース

ケース 2：ケース 1 に対し、ラック幾何形状のみを考慮した最大の流入割合を用いたケース

ケース 3：ケース 1 に対し、設備仕様・構成上の最大流入流量を用いたケース

ケース 4：放水砲の流量はワーストケースと同じく 2 台分とし、平均風速による影響を考慮した流入割合を用いたケース

ケース 5：ケース 4 に対し、ラック幾何形状のみを考慮した最大の流入割合としたケース

ケース 6：ケース 5 に対し、局所へ同時に集中し得ない流量（参考 1 参照）を差し引いたケース

表 2. ワーストケース条件における液膜厚さ算出条件および算出結果

評価 ケース	パラメータ			液膜厚さ	ケース説明
	総流量	燃料への 流入割合	液膜 評価式		
ワースト ケース	□ m ³ /h	30%	包絡式	1.03mm	現評価条件

表 3. 流量および流入割合を変化させた場合の液膜厚さ評価結果

評価 ケース	パラメータ			液膜厚さ	考慮する放水砲使用台数
	総流量	燃料への 流入割合	液膜 評価式		
ケース 1	□ m ³ /h	31% *	実験式	0.48 mm	1 台
ケース 2	□ m ³ /h	46% **	実験式	0.58mm	
ケース 3	□ m ³ /h	31% *	実験式	0.64 mm	
ケース 4	□ m ³ /h	31% *	実験式	0.80mm	2 台
ケース 5	□ m ³ /h	46% **	実験式	1.00 mm	
ケース 6	□ m ³ /h	46% **	実験式	0.91 mm	

* : $23 + 7.9 \div 31$

** : $23 + 45/2 \div 46$

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. 局所範囲に同時に集中し得ない流量

SFP への注水、およびスプレイヘッドによるスプレイ時における流入形態の概要および注水時概略系統を下図に示す。各手順実施時に配管位置により、SFP 内に設定している局所領域に集中し得ない流量を検討した。

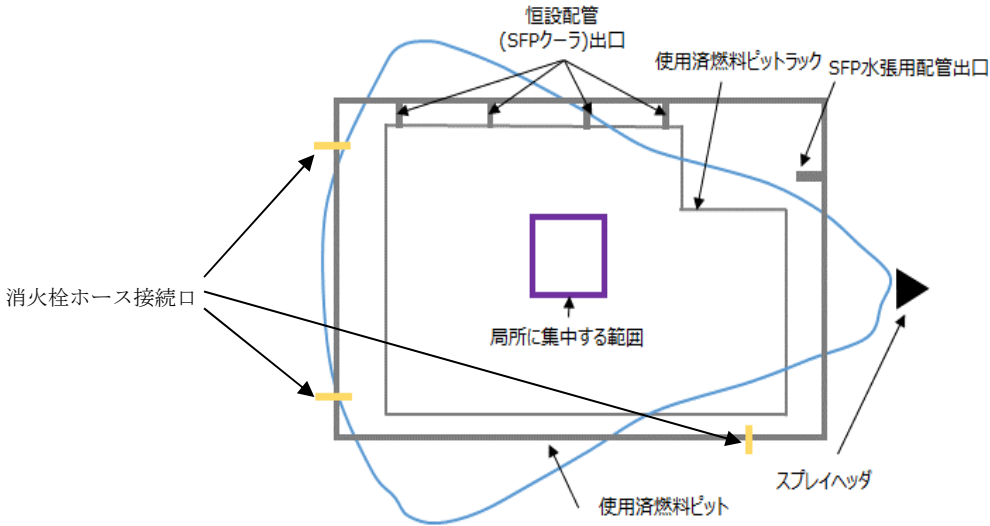


図 1. 集中範囲とフットプリントおよび配管出口の関係

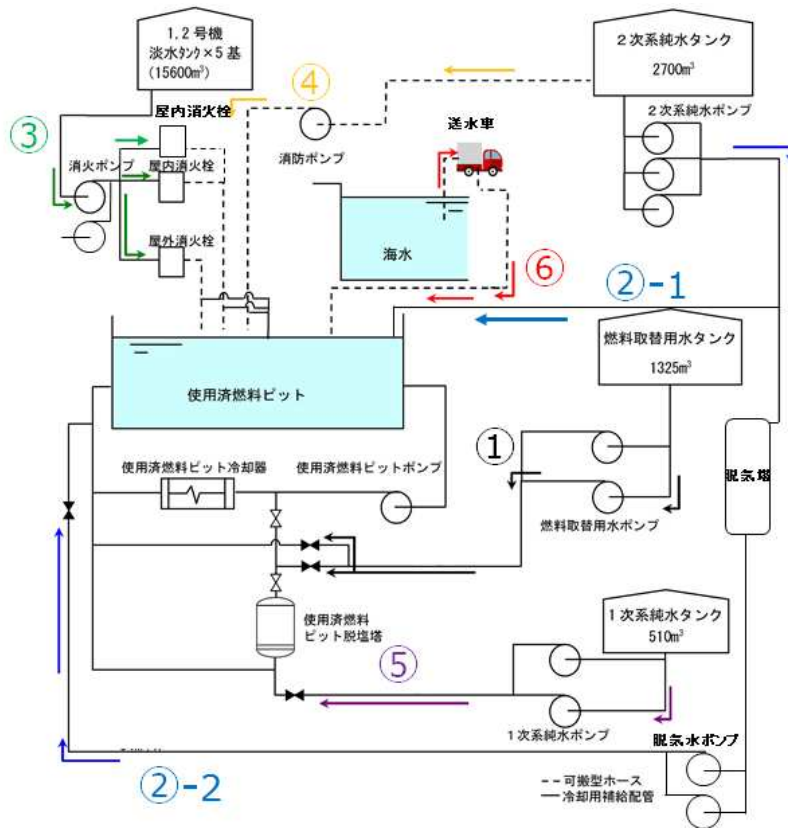


図 2. SFP 注水手順と系統構成

1. 恒設配管（SFP クーラ出口配管）より流入する流量

恒設配管（SFP クーラ出口配管）を經由して注水する手順は、図2に示す手順のうち①、②-2、⑤であり、各手順の合計流量は表1より $200\text{m}^3/\text{h}$ である。一方、恒設配管はピットへ流入する際に4本の配管に分かれて流入することになる。恒設配管設置位置より、4本が同時に局所範囲内に集中し得ないため、 $200 \times 3/4 = 150\text{m}^3/\text{h}$ を差し引く。

2. 消火栓を用いて注水される流量

消火栓を用いて注水する手順は図2に示す手順のうち③であり、3か所設置した消火栓配管接続位置からの流入流量合計値は表1より $132\text{m}^3/\text{h}$ である。一方、それぞれ離れた接続位置より注水された流量が同時に局所集中範囲に流入する可能性はないため、 $132 \times 2/3 = 88\text{m}^3/\text{h}$ を差し引く。

3. スプレイヘッドを用いてスプレイする手順

スプレイヘッドを用いてスプレイする際は、放射性物質拡散抑制の観点から図1に示すようにSFP全面を覆うようにスプレイすることとなり、その際の放水流量最大値は $\square\text{m}^3/\text{h}$ である。SFP全面を覆うようにスプレイするため流量は広範囲に分散することとなり、局所領域に流入する流量はスプレイヘッド放水流量と比較し小さい（SFP全面にスプレイする際に 5×5 ラックに流入する流量は、 $\square \times (5 \times 5 / 424) = \square\text{m}^3/\text{h}$ 程度）。

よってスプレイヘッドによる局所領域への寄与は $10\text{m}^3/\text{h}$ と仮定し、残りの $\square\text{m}^3/\text{h}$ を差し引く。

なお、大規模損壊時の対応フロー上は、スプレイヘッドによるスプレイと放水砲による放水が同時に実施されることはない。

上記より、局所領域に同時に集中し得ない流量の合計は $\square\text{m}^3/\text{h}$ となる。

表1. SFP注水流量およびスプレイヘッドによるスプレイ流量

注水手順(ポンプ)	通常時流量	設定流量	根拠
① 燃料取替用水タンク (燃料取替用水ポンプ)	30m ³ /h	30m ³ /h×2 ^{※1}	定格流量
②-1 2次系純水タンク (2次系純水ポンプ)	5m ³ /h	5m ³ /h×3 ^{※1}	実測値
②-2 2次系純水タンク (2次系純水ポンプ、脱気塔経由)	30m ³ /h	30m ³ /h ^{※2} ×2 ^{※1}	定格流量
③ 1,2号淡水タンク (消火ポンプ-消火栓)	22m ³ /h	22m ³ /h×3 ^{※3} ×2 ^{※1}	実測値
④ 2次系純水タンク (消防ポンプ)	39m ³ /h	96m ³ /h	ポンプ 揚程曲線
⑤ 1次系純水タンク (1次系純水ポンプ)	40m ³ /h	40m ³ /h×2	定格流量
⑥海水(送水車)	15m ³ /h	270m ³ /h	ポンプ 揚程曲線
合計	181m ³ /h	713m ³ /h	—

スプレイ手順	通常時流量	設定流量	根拠
スプレイヘッドによるスプレイ	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	仕様上限

※1 ポンプ台数。なお手順②-2については脱気水ポンプの台数。

※2 脱気水ポンプの定格流量。

※3 消火栓の数(屋内消火栓2か所、屋外消火栓1か所)。

※4 ポンプ揚程曲線の最大値を想定した。

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。

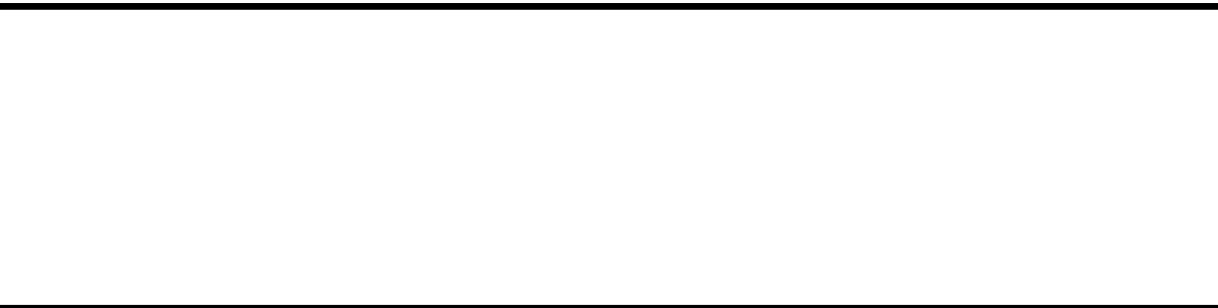
参考 2. SFP からの大量の水の漏えいが発生した状況下において放水流量が局所に集中する蓋然性について

SFP が損傷し、SFP からの大量の水の漏えいが発生する状況下において、放水砲による放水が局所領域へ集中する蓋然性を検討する。

<SFP および燃料取扱建屋の構造及び特徴>

高浜 1, 2 号炉の SFP は、地盤基礎の耐震重要度 S クラスであり、海拔 30m 程度の高さにある、極めて耐震性、耐津波性が高い施設である。

また SFP が設置される燃料取扱建屋は、原子炉補助建屋の基礎から床面までは SFP を構成するマッシブな耐力壁を主要な耐震要素とする鉄筋コンクリート造の壁式構造物であり、柱脚部から上部は鉄骨造の骨組構造であり、天井は鋼板の上に鉄筋コンクリート造の床を設け、地震による剥落のない構造とする。壁は梁や柱の外側に取り付け、SFP 内に落下しない構造としている。



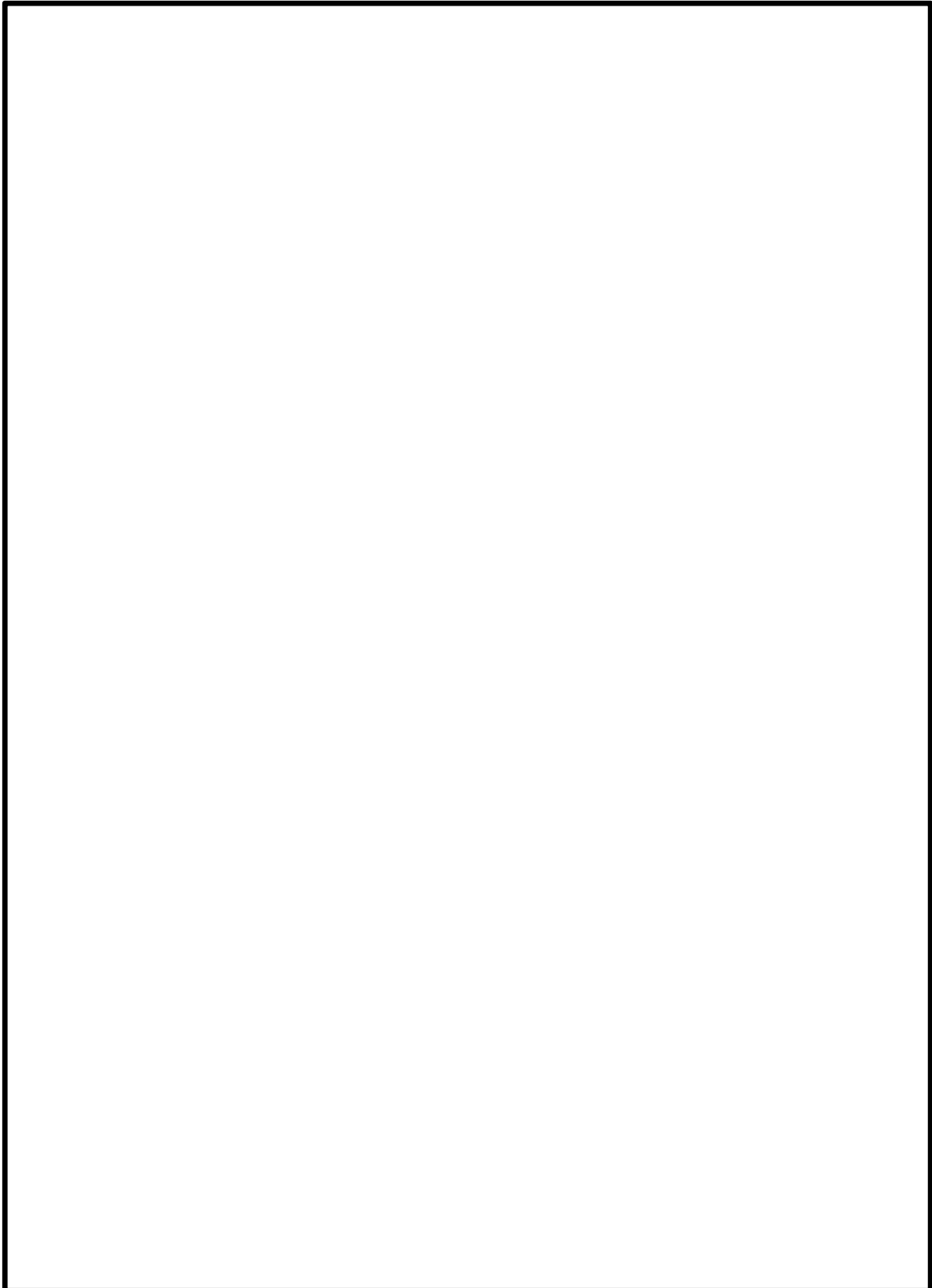
<SFP の損傷が発生した際に放水砲の流量が局所へ流入する蓋然性>

SFP の局所領域に放水砲の流量が集中する状況としては、燃料取扱建屋の天井に 1 か所だけ空いた穴から流入する状況となる（複数個所に穴が開いている場合、SFP への流入流量は分散される。）。



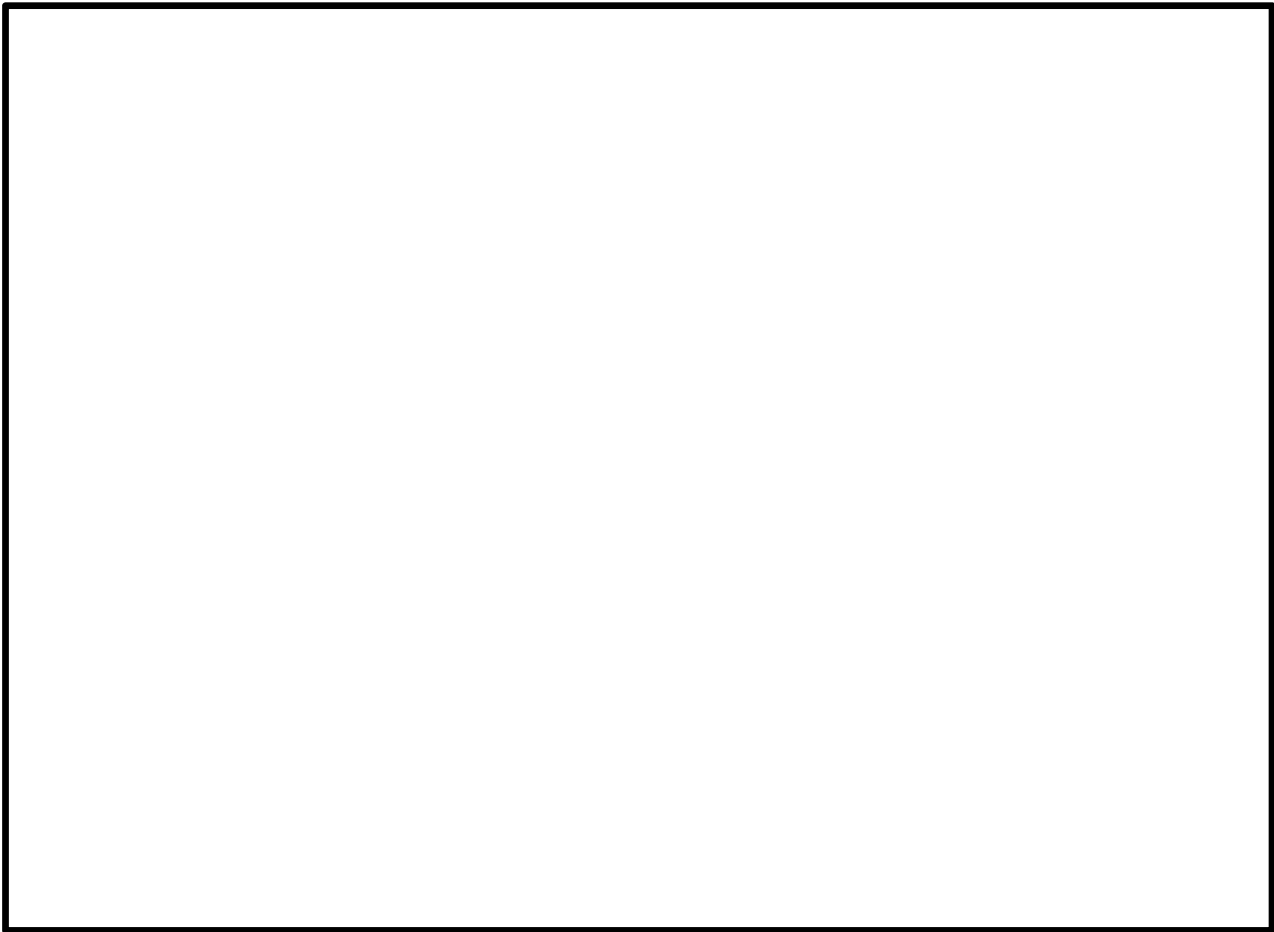
以上の通り、SFP からの大量の水の漏えいが発生するような事象が発生する場合には、SFP 直上の 1 か所のみ穴が開くことは考え難いことから、放水砲による放水の流量全量が、SFP に全量集中する蓋然性は低い。

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。



出典：高浜 1,2 号炉 工事認可申請書 添付資料 13-18-2-2 抜粋

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。



出典：高浜 1,2 号炉 工事認可申請書 添付資料 13-18-2-2 抜粋

図. 高浜 1,2 号炉 燃料取扱建屋の耐震評価部位

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3. N(D)および体積分率の計算結果

D[cm]	n(D)[25ラック][cm-4]	×体積[cm-1]	単位体積中の体積割合	積算分率
0.01	0.077	4.05E-08	4.49E-07	4.49E-07
0.02	0.075	3.14E-07	3.47E-06	3.92E-06
0.03	0.072	1.02E-06	1.13E-05	1.53E-05
0.04	0.070	2.35E-06	2.60E-05	4.13E-05
0.05	0.068	4.44E-06	4.92E-05	9.04E-05
0.06	0.066	7.43E-06	8.22E-05	1.73E-04
0.07	0.064	1.14E-05	1.26E-04	2.99E-04
0.08	0.061	1.65E-05	1.82E-04	4.81E-04
0.09	0.060	2.27E-05	2.51E-04	7.33E-04
0.1	0.058	3.01E-05	3.34E-04	1.07E-03
0.11	0.056	3.88E-05	4.30E-04	1.50E-03
0.12	0.054	4.88E-05	5.40E-04	2.04E-03
0.13	0.052	6.00E-05	6.64E-04	2.70E-03
0.14	0.050	7.25E-05	8.03E-04	3.50E-03
0.15	0.049	8.63E-05	9.55E-04	4.46E-03
0.16	0.047	1.01E-04	1.12E-03	5.58E-03
0.17	0.046	1.18E-04	1.30E-03	6.88E-03
0.18	0.044	1.35E-04	1.50E-03	8.38E-03
0.19	0.043	1.54E-04	1.70E-03	1.01E-02
0.2	0.041	1.74E-04	1.92E-03	1.20E-02
0.21	0.040	1.94E-04	2.15E-03	1.42E-02
0.22	0.039	2.16E-04	2.39E-03	1.65E-02
0.23	0.038	2.39E-04	2.65E-03	1.92E-02
0.24	0.036	2.63E-04	2.91E-03	2.21E-02
0.25	0.035	2.88E-04	3.18E-03	2.53E-02
0.26	0.034	3.13E-04	3.46E-03	2.87E-02
0.27	0.033	3.39E-04	3.75E-03	3.25E-02
0.28	0.032	3.66E-04	4.05E-03	3.66E-02
0.29	0.031	3.94E-04	4.35E-03	4.09E-02
0.3	0.030	4.22E-04	4.67E-03	4.56E-02
0.31	0.029	4.50E-04	4.98E-03	5.06E-02
0.32	0.028	4.79E-04	5.30E-03	5.59E-02
0.33	0.027	5.08E-04	5.63E-03	6.15E-02
0.34	0.026	5.38E-04	5.95E-03	6.74E-02
0.35	0.025	5.68E-04	6.28E-03	7.37E-02
0.36	0.024	5.98E-04	6.62E-03	8.03E-02
0.37	0.024	6.28E-04	6.95E-03	8.73E-02
0.38	0.023	6.59E-04	7.29E-03	9.46E-02
0.39	0.022	6.89E-04	7.62E-03	1.02E-01
0.4	0.021	7.19E-04	7.96E-03	1.10E-01
0.41	0.021	7.49E-04	8.29E-03	1.18E-01
0.42	0.020	7.80E-04	8.63E-03	1.27E-01
0.43	0.019	8.09E-04	8.96E-03	1.36E-01
0.44	0.019	8.39E-04	9.29E-03	1.45E-01
0.45	0.018	8.69E-04	9.61E-03	1.55E-01
0.46	0.018	8.98E-04	9.94E-03	1.65E-01
0.47	0.017	9.27E-04	1.03E-02	1.75E-01
0.48	0.016	9.55E-04	1.06E-02	1.86E-01
0.49	0.016	9.83E-04	1.09E-02	1.97E-01
0.5	0.015	1.01E-03	1.12E-02	2.08E-01

D[cm]	n(D)[25ラック][cm-4]	×体積[cm-1]	単位体積中の体積割合	積算分率
0.51	0.015	1.04E-03	1.15E-02	2.19E-01
0.52	0.014	1.06E-03	1.18E-02	2.31E-01
0.53	0.014	1.09E-03	1.21E-02	2.43E-01
0.54	0.014	1.12E-03	1.24E-02	2.55E-01
0.55	0.013	1.14E-03	1.26E-02	2.68E-01
0.56	0.013	1.17E-03	1.29E-02	2.81E-01
0.57	0.012	1.19E-03	1.32E-02	2.94E-01
0.58	0.012	1.21E-03	1.34E-02	3.08E-01
0.59	0.011	1.24E-03	1.37E-02	3.21E-01
0.6	0.011	1.26E-03	1.39E-02	3.35E-01
0.61	0.011	1.28E-03	1.41E-02	3.49E-01
0.62	0.010	1.30E-03	1.44E-02	3.64E-01
0.63	0.010	1.32E-03	1.46E-02	3.78E-01
0.64	0.010	1.34E-03	1.48E-02	3.93E-01
0.65	0.009	1.36E-03	1.50E-02	4.08E-01
0.66	0.009	1.37E-03	1.52E-02	4.23E-01
0.67	0.009	1.39E-03	1.54E-02	4.39E-01
0.68	0.009	1.41E-03	1.56E-02	4.54E-01
0.69	0.008	1.42E-03	1.57E-02	4.70E-01
0.7	0.008	1.44E-03	1.59E-02	4.86E-01
0.71	0.008	1.45E-03	1.61E-02	5.02E-01
0.72	0.007	1.46E-03	1.62E-02	5.18E-01
0.73	0.007	1.48E-03	1.63E-02	5.34E-01
0.74	0.007	1.49E-03	1.65E-02	5.51E-01
0.75	0.007	1.50E-03	1.66E-02	5.68E-01
0.76	0.007	1.51E-03	1.67E-02	5.84E-01
0.77	0.006	1.52E-03	1.68E-02	6.01E-01
0.78	0.006	1.53E-03	1.69E-02	6.18E-01
0.79	0.006	1.54E-03	1.70E-02	6.35E-01
0.8	0.006	1.54E-03	1.71E-02	6.52E-01
0.81	0.006	1.55E-03	1.72E-02	6.69E-01
0.82	0.005	1.56E-03	1.72E-02	6.86E-01
0.83	0.005	1.56E-03	1.73E-02	7.04E-01
0.84	0.005	1.57E-03	1.73E-02	7.21E-01
0.85	0.005	1.57E-03	1.74E-02	7.38E-01
0.86	0.005	1.57E-03	1.74E-02	7.56E-01
0.87	0.005	1.58E-03	1.74E-02	7.73E-01
0.88	0.004	1.58E-03	1.75E-02	7.91E-01
0.89	0.004	1.58E-03	1.75E-02	8.08E-01
0.9	0.004	1.58E-03	1.75E-02	8.26E-01
0.91	0.004	1.58E-03	1.75E-02	8.43E-01
0.92	0.004	1.58E-03	1.75E-02	8.61E-01
0.93	0.004	1.58E-03	1.75E-02	8.78E-01
0.94	0.004	1.58E-03	1.75E-02	8.96E-01
0.95	0.004	1.58E-03	1.75E-02	9.13E-01
0.96	0.003	1.58E-03	1.74E-02	9.31E-01
0.97	0.003	1.57E-03	1.74E-02	9.48E-01
0.98	0.003	1.57E-03	1.74E-02	9.65E-01
0.99	0.003	1.57E-03	1.73E-02	9.83E-01
1	0.003	1.56E-03	1.73E-02	1.00E+00
合計	2.303	0.090	1.000	

平均液滴径は
7mm~7.1mm