



第8条（火災による損傷の防止）に係る説明書

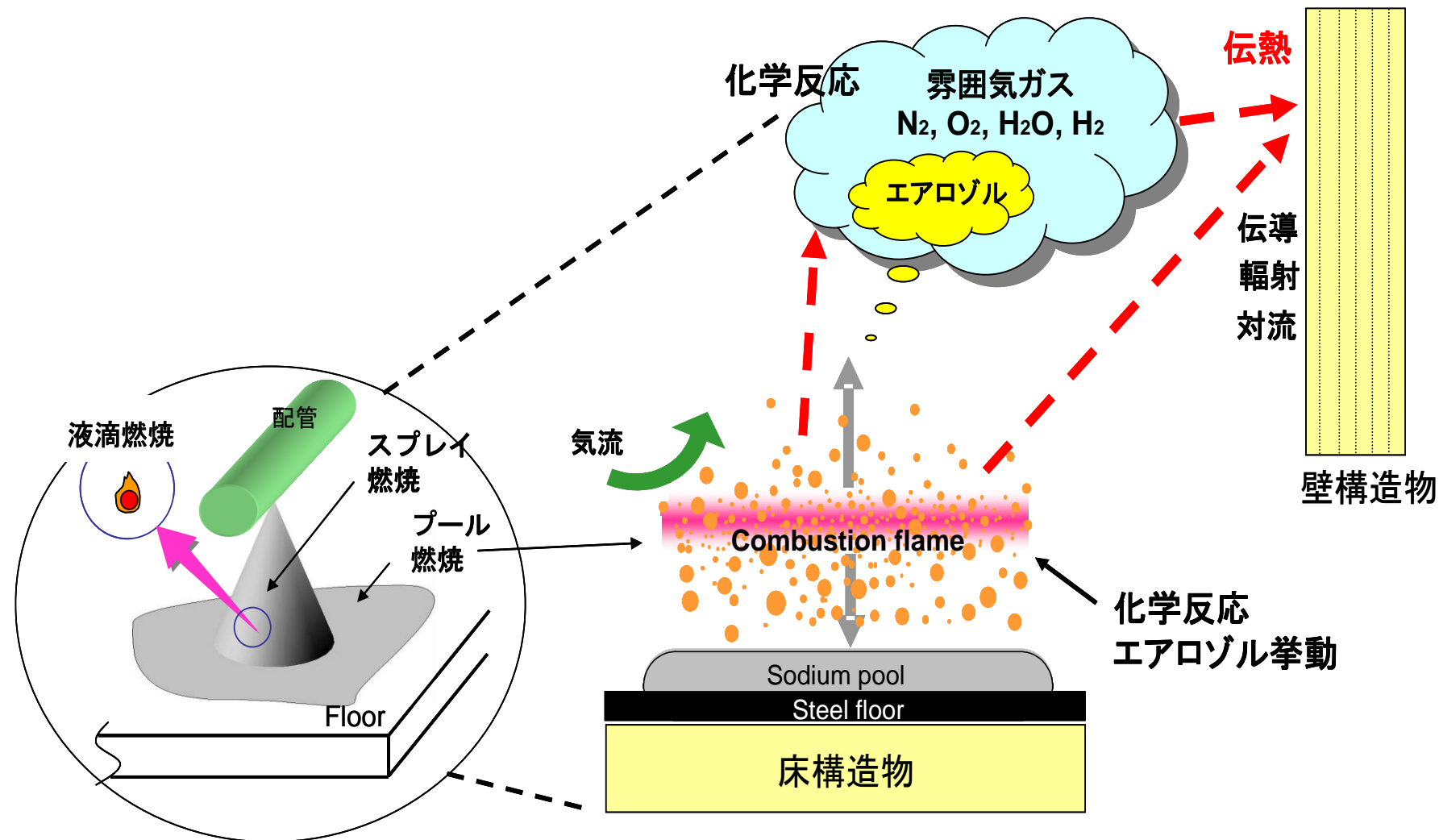
「2次冷却材漏えい時の燃焼影響評価に係る計算コード（SPHINCS）」

2022年3月31日

日本原子力研究開発機構 大洗研究所
高速実験炉部

2次冷却材漏えい時の燃焼影響評価に適用する計算コードの概要

- SPHINCSは、ナトリウム燃焼時に生じる様々な現象を解析し、構造物への熱影響や水素の発生量等を評価する計算コードである。
- SPHINCSでは、解析体系をセルと呼ぶ単位に分割して、各セルの物理量（圧力、ガス温度・成分及びエアロゾル濃度等）は平均値で計算される。



- ナトリウム燃焼事象において、評価指標であるコンクリート温度、ライナ温度、水素濃度及びエアロゾル濃度に対して、PIRT (Phenomena Identification Ranking Table) の作成プロセスにおいて広く行われているシステムの階層的分類に基づき、関連する物理現象を過不足なく抽出した。
- 評価指標に対する重要度 (ランク) が「H」又は「M」となる現象を重要現象として、SPHINCS の検証及び「常陽」解析への適用性を検討する対象とする。
- 評価の結果、下表に示す (1) ~ (15)* を重要現象として抽出した。

分類	評価指標 物理現象	建屋健全性	機器健全性
		コンクリート温度 水素濃度 ライナ温度	水素濃度 エアロゾル濃度
スプレイ燃焼	(1) 液滴化	M	H
	(2) 燃焼(含水分との反応)	M	H
	(3) 反応熱移行	M	L
プール燃焼	(4) プール拡大挙動	M	M
	(5) 燃焼(含水分との反応)	H	M
	(6) 反応熱移行	H	L
雰囲気・構造物 への熱移行	(7) 熱伝導	H	M
	(8) 対流熱移行	M	M
	(9) 輻射熱移行	M	M
雰囲気・構造物への 質量・運動量移行	(10) 質量・運動量移行	M	H
	(11) ガス成分濃度移行	H	H
	(12) エアロゾル移行	M	H
その他ナトリウム特有 の物理現象	(13) 化学反応	M	M
	(14) ライナ腐食・減肉	H	L
	(15) Naとコンクリートとの接触	-	-

* (15) は対象外のため「-」

- 重要現象として抽出された物理現象について、単一液滴燃焼実験（FD）、スプレー燃焼実験（RUN-E1）、プール燃焼実験（RUN-D1）、小規模プール燃焼実験（RUN-F7）、マルチセルプール燃焼実験（RUN-D3）及びナトリウム漏えい燃焼実験-II（RUN-D4）により妥当性を確認した。

分類	重要現象	必要な解析モデル	スプレー燃焼		プール燃焼		マルチセル燃焼	総合実験
			FD	RUN-E1	RUN-D1	RUN-F7	RUN-D3	RUN-D4(実験II)
スプレー燃焼	液滴化	抜山-棚沢分布モデル(液滴径を入力)	-	-	-	-	-	-
	燃焼(含水分との反応)	液滴燃焼(NACOM)モデル	○	○		○		○
	反応熱移行			○		○		○
プール燃焼	プール拡大挙動	未燃焼ナトリウム質量保存則モデル				○		○
	燃焼(含水分との反応)	フレイムシート燃焼モデル		○	○	○	○	○
	反応熱移行			○	○	○	○	○
雰囲気・構造物への熱移行	熱伝導	非定常熱伝導方程式		○	○	○	○	○
	対流熱移行	フローネットワークモデル エネルギー保存 周辺構造物との(自然)対流熱伝達		○	○	○	○	○
	輻射熱移行	輻射モデル		○	○	○	○	○
雰囲気・構造物への質量・運動量移行	質量・運動量移行	フローネットワークモデル 質量、運動量保存					○	
	ガス成分濃度移行	圧力勾配に伴う運動量交換 浮力差に伴う運動量交換 コンクリートからの水分放出モデル					○	○
	エアロゾル移行	フローネットワークモデル(同上) 凝集・沈着モデル ブラウン拡散、熱泳動、重力沈降、凝集、沈着			○	○	○	○
その他ナトリウム特有の物理現象	化学反応	瞬時平衡モデル						○
	ライナ腐食・減肉	NaFeO型/溶融塩型腐食速度モデル (コード上での直接評価は無)	-	-	-	-	-	-
	Naとコンクリートとの接触	-	-	-	-	-	-	-

妥当性確認 (1/6)

単一液滴燃焼実験 (FD)

試験と解析結果の概要

空気雰囲気内を自由落下するナトリウム単一液滴の燃焼実験

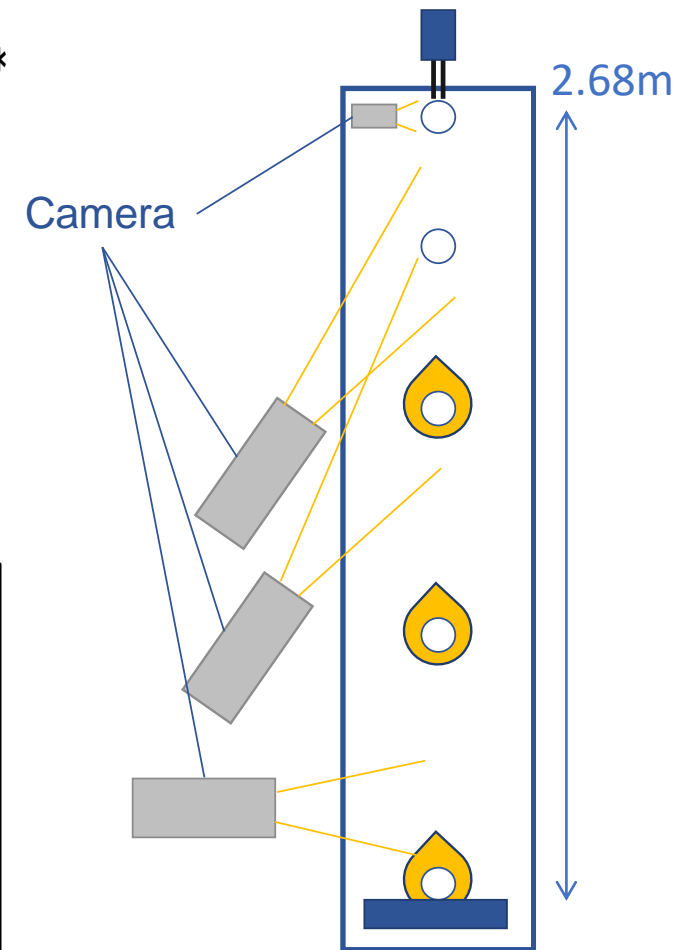
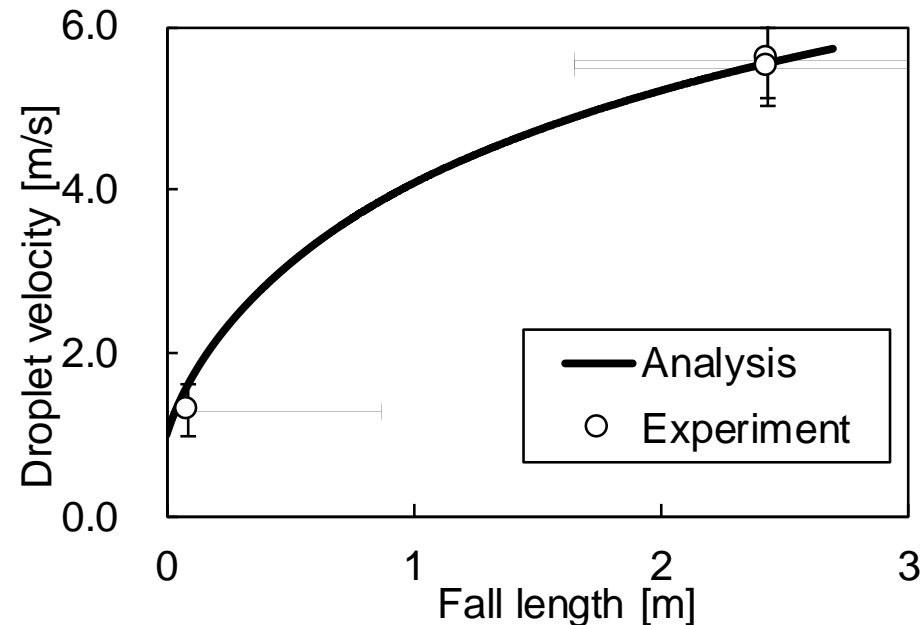
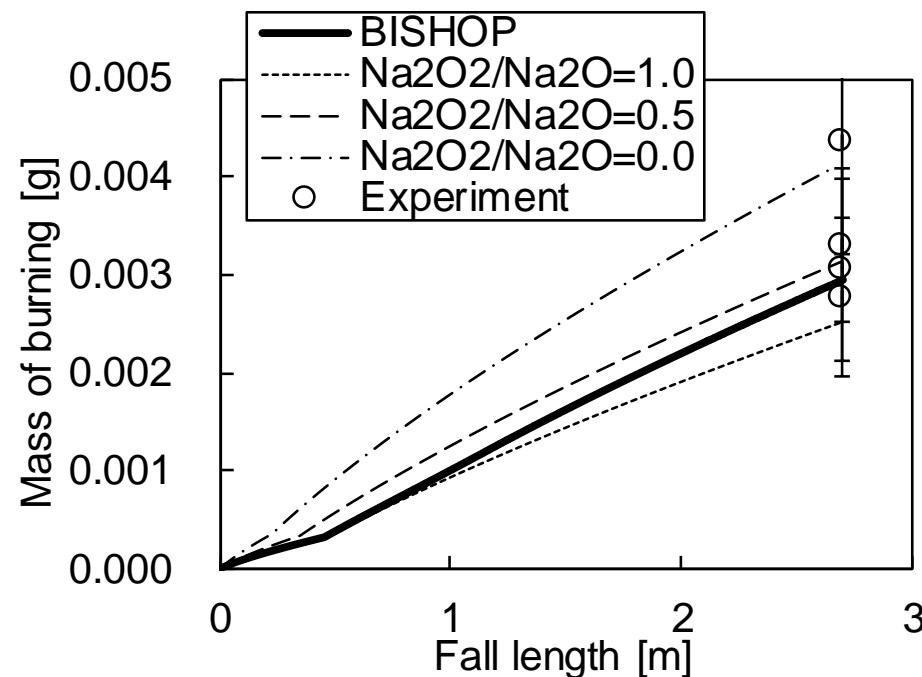
- 実験条件：ナトリウム漏えい温度 約500°C、漏えい高さ 2.68m、液滴直径 約3.8mm*
- 測定項目：液滴質量変化、液滴落下速度等

*液滴生成機構における印加電荷量から評価された値。

凡例の説明：

「Na₂O₂/Na₂O」は化学反応の生成割合（入力値）。

「B I S H O P」は反応量論比モデルであり、入力値を使用しない。



- ✓ SPHINCSにおける反応量論比モデルB I S H O Pによる液滴燃焼量や、液滴落下速度は、実験結果をばらつきもしくは誤差の範囲内で再現している。（以降の解析ではB I S H O Pを使用）

- ✓ 以上より、単一液滴としてのスプレィ燃焼解析の妥当性を確認

妥当性確認 (2/6)

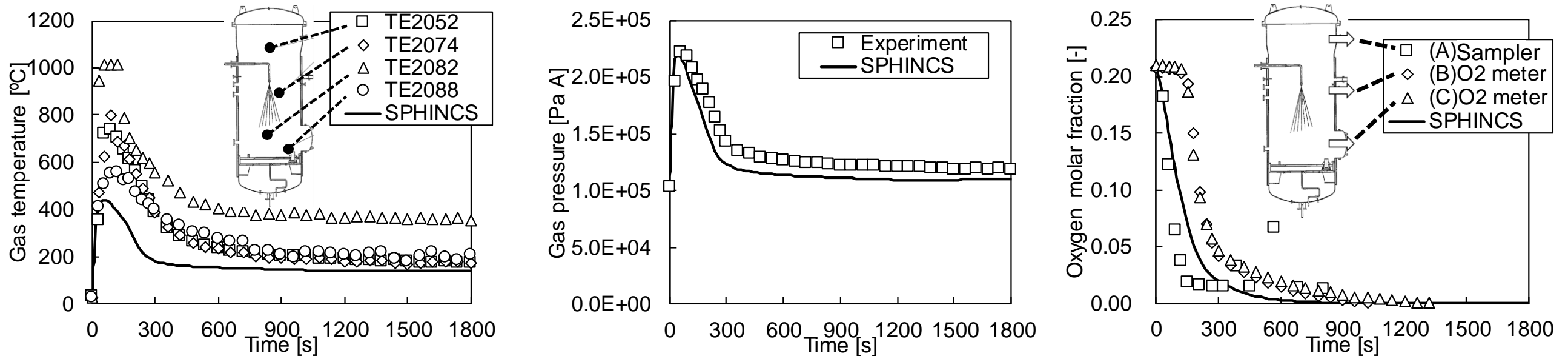
スプレイ燃焼実験 (RUN-E1)

試験と解析結果の概要

密閉鋼製容器(約100m³、空気雰囲気)内での大規模・長時間スプレイ燃焼実験

- 実験条件：ナトリウム漏えい温度 約500℃、漏えい量 約900kg、漏えい継続時間 30分、漏えい高さ 4m、平均液滴直径 約2mm*
- 測定項目：容器内温度・圧力、酸素濃度等
- その他：落下したナトリウムは下端面での傾斜により燃焼抑制室に流入、プール燃焼の影響を除外

*スプレイノズルの性能試験に基づき得られた体積平均径。



- ✓ ガス温度は、解析体系での平均値であるため、スプレイの内部や高温化した気体の上昇流の通過点で測定された実験結果と比べると低いものの、圧力は概ね実験結果を再現している。
- ✓ 酸素濃度についても、全体としての減少傾向は実験と整合している。
- ✓ 以上より、スプレイ燃焼解析の妥当性を確認

妥当性確認 (4/6)

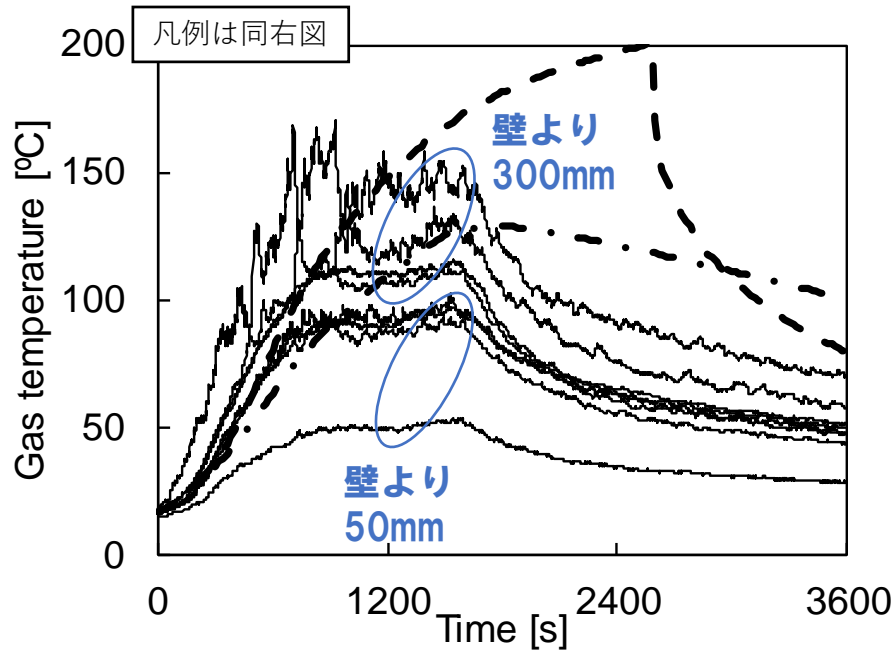
小規模プール燃焼実験 (RUN-F7)

試験と解析結果の概要

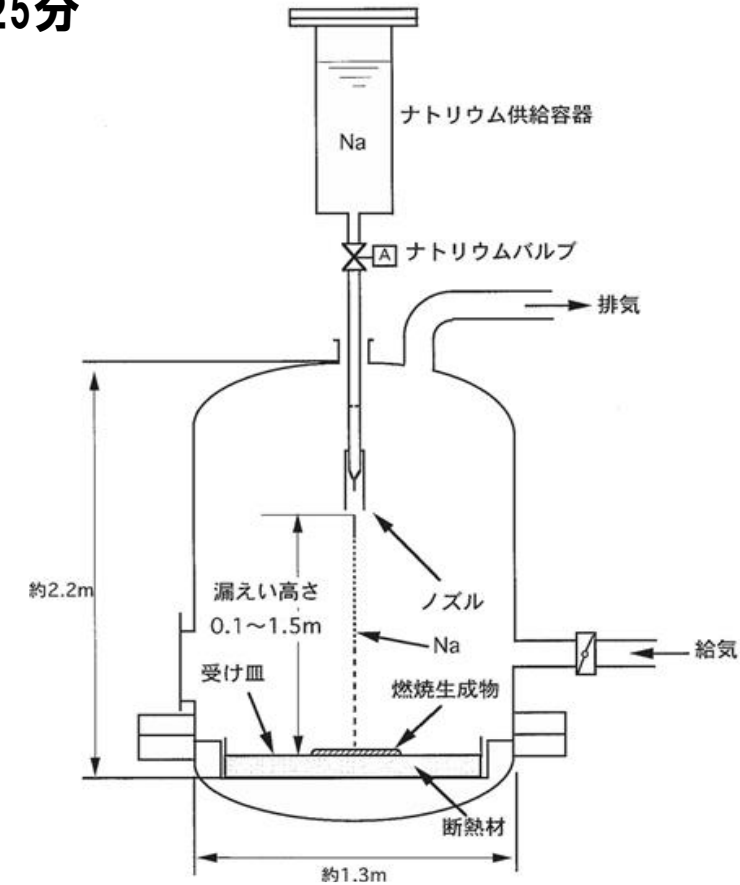
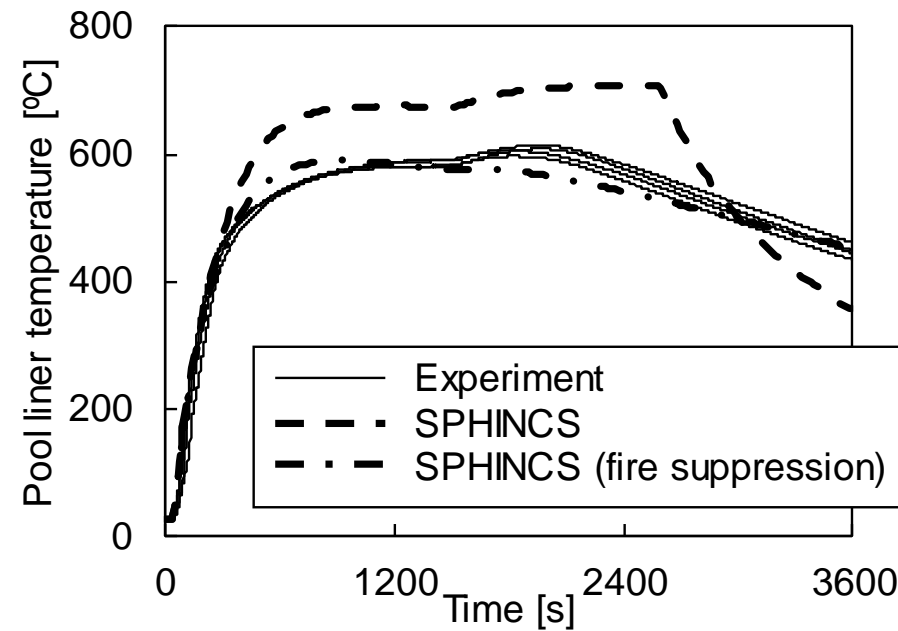
プール面積拡大を伴うプール燃焼実験

- 実験条件：ナトリウム供給温度 約500℃、ナトリウム供給量 約4.9kg、供給時間 25分
- 測定項目：各部温度、酸素濃度等

(測定点は床面から高さ500mmにて、周方向90度毎に配置)



(測定点は中心から100mmにて、周方向90度毎に配置)



- ✓ ガス温度と床ライナ温度は、実験結果よりも高く、保守的な傾向となっている。
- ✓ 試験ではプール表面に反応生成物が付着し、燃焼が抑制されたものと考えられる。解析で燃焼抑制を考慮すると、概ね実験結果と整合している。(ただし、実機評価では保守性の観点から燃焼抑制は考慮しない。)
- ✓ 以上より、プール拡大を含むプール燃焼解析の妥当性を確認

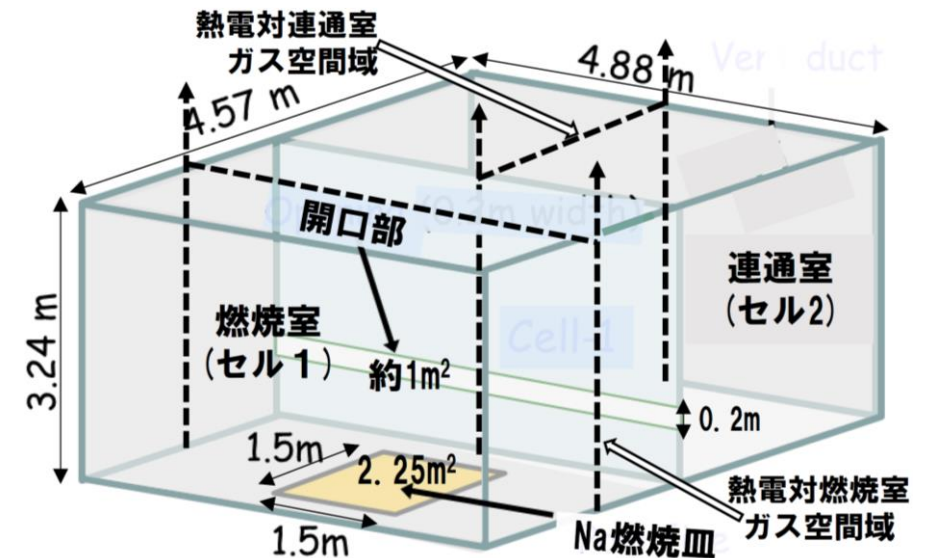
妥当性確認 (5/6)

マルチセルプール燃焼実験 (RUN-D3)

試験と解析結果の概要

連通室への影響も含めたプール燃焼実験

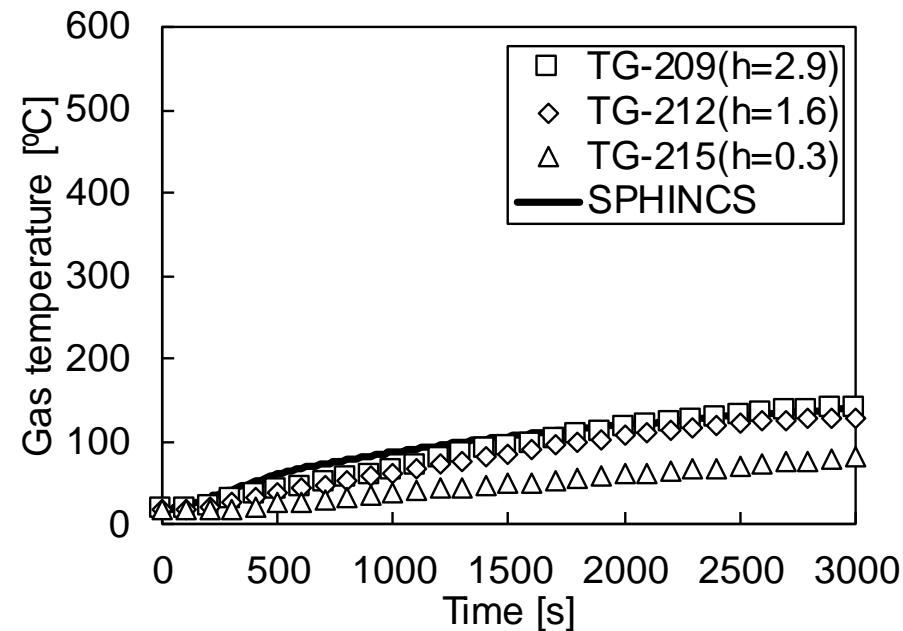
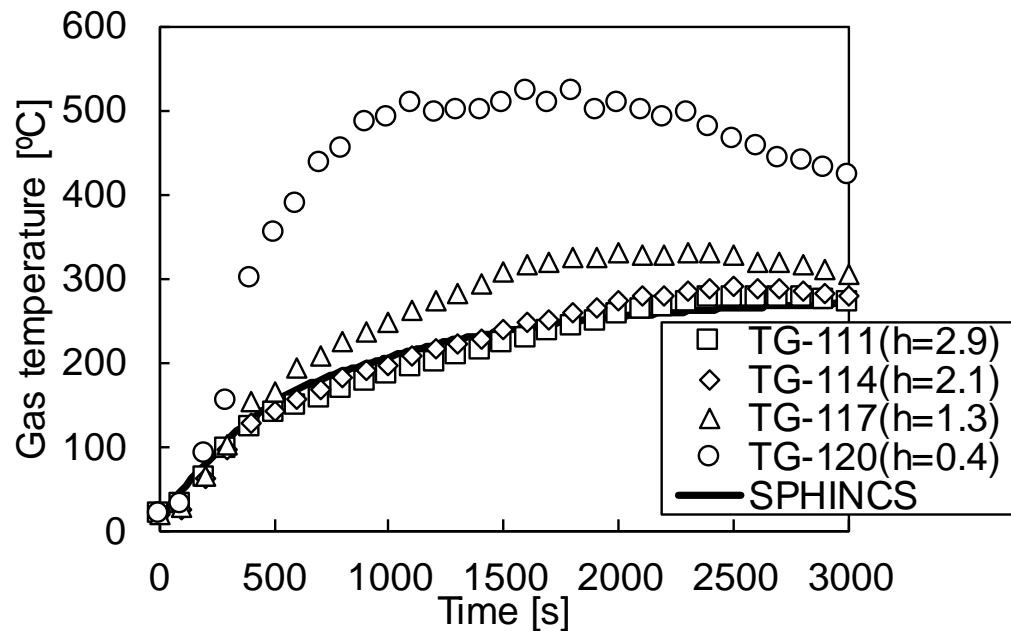
- 実験条件：ナトリウム供給温度 約500°C、ナトリウム供給量 約55kg、供給時間 120秒
- 測定項目：各部温度、酸素・エアロゾル濃度等



燃焼室

(測定点は両室の中心線上、
hは床面からの高さ [m])

連通室

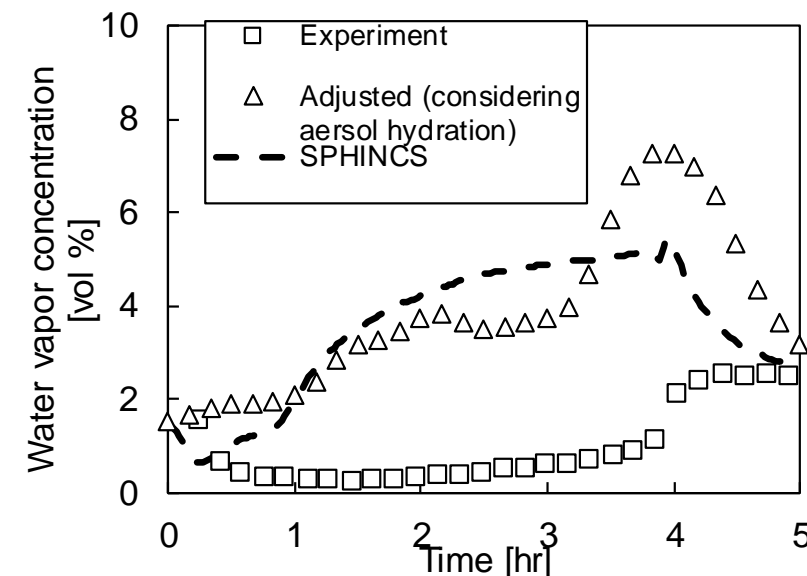
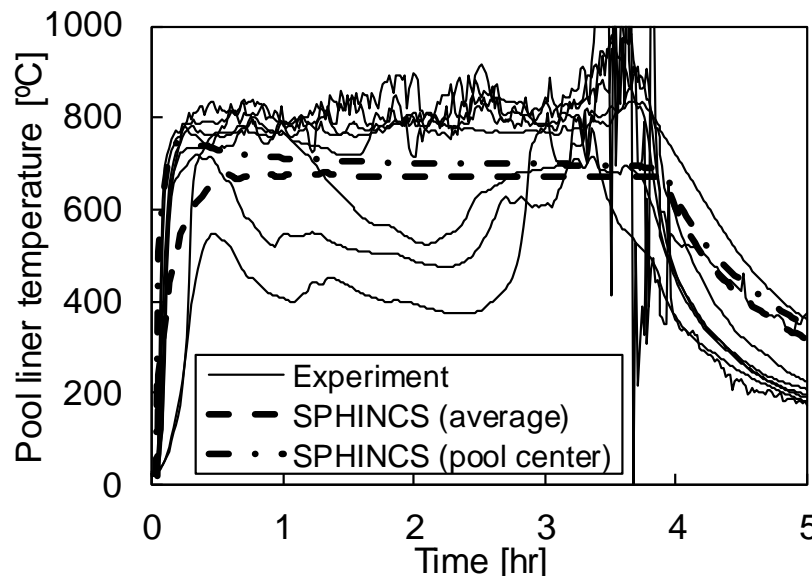
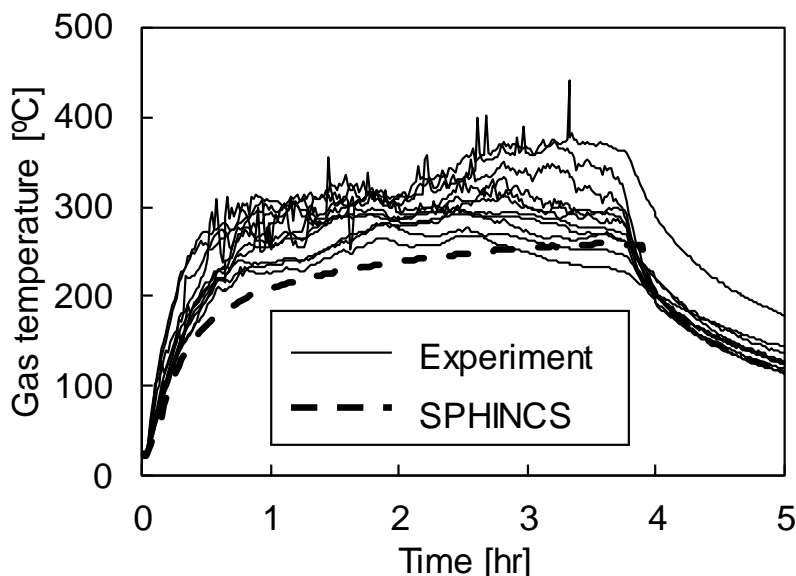


- ✓ 実験結果は、燃焼室ではプール付近 (TG-117, 120) が高温、連通室では開口部より下方 (TG-215) が温度成層化のため低温となっている。
- ✓ 上記を除き、隣接室と連通室ともにガス温度は概ね実験と整合している。
- ✓ 以上より、連通室との通気を含むプール燃焼解析の妥当性を確認

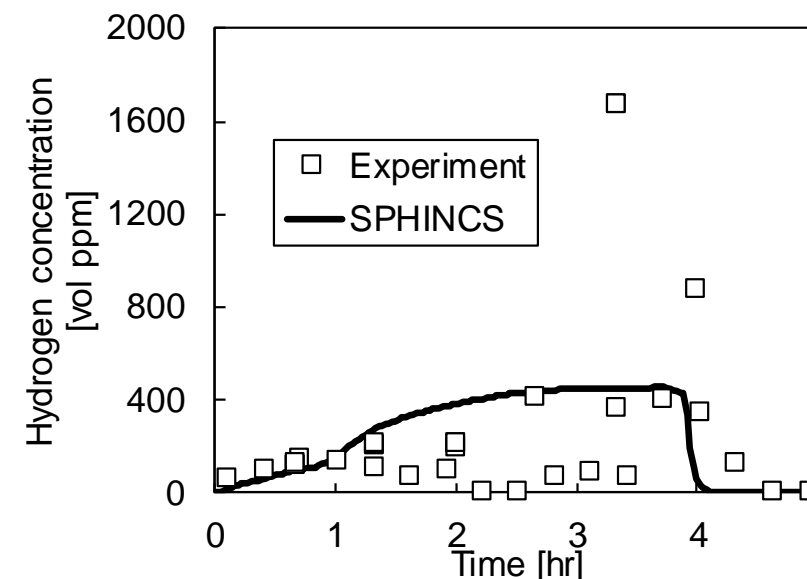
Na漏えい燃焼実験-II (RUN-D4) [2/2]

解析結果

(測定値のプロットは漏えい・燃焼する付近での代表点)



- ✓ 測定点は燃焼影響が比較的大きい箇所に配置されている。また、実験では視界確保のため強制対流により空気が供給され、プール燃焼が促進された可能性がある。
- ✓ 上記に加えガス温度は解析体系での平均値であるため、実験結果に比べ低めの評価となっている。
- ✓ 水蒸気濃度は、計測系での吸湿を補正した値と概ね整合し、水素濃度も実験値を包絡している。
(なお、実験では約3時間で床ライナが破損したため、ナトリウムとコンクリートの反応が発生し、その後の測定値へ影響)



- ✓ 以上より、SPHINCSの総合的な妥当性を確認

- 妥当性確認の中で、不確かさを評価した結果、その感度は以下となった。

分類	重要現象	必要な解析モデル	妥当性確認	不確かさ	感度評価
スプレー燃焼	液滴化	抜山-棚沢分布モデル	スプレー燃焼実験	-	平均液滴径: -10%で最高圧力約+5%
	燃焼(含水分との反応)	液滴燃焼(NACOM)モデル	単一液滴燃焼実験 スプレー燃焼実験	入力値に含まれる	着火温度: -100°C(500°C)で燃焼量約+20%
	反応熱移行				
プール燃焼	プール拡大挙動	未燃焼ナトリウム質量保存則モデル	小規模プール燃焼実験	入力値に含まれる	プール高さ: 約+50%でプール面積約-20%
	燃焼(含水分との反応)	フレイムシート燃焼モデル	プール燃焼実験 小規模プール燃焼実験 マルチセルプール燃焼実験 ナトリウム漏えい燃焼実験-II	入力値に含まれる	燃焼面~ガス輻射率: 約±20%でガス温度約±10°C、プール下端ライナ温度約-20°C~+30°C
	反応熱移行				
雰囲気・構造物への熱移行	熱伝導	非定常熱伝導方程式	プール燃焼実験 小規模プール燃焼実験 マルチセルプール燃焼実験 ナトリウム漏えい燃焼実験-II	入力値に含まれる	-
	対流熱移行	フローネットワークモデル エネルギー保存 周辺構造物との(自然)対流熱伝達	小規模プール燃焼実験 マルチセルプール燃焼実験 ナトリウム漏えい燃焼実験-II	入力値に含まれる	-
	輻射熱移行	輻射モデル	スプレー燃焼実験 プール燃焼実験	入力値に含まれる	ガス~周辺壁輻射率: 約±30%で輻射熱流束約±10%、ガス温度約±10%、ガス圧力約±6%
雰囲気・構造物への質量・運動量移行	質量・運動量移行	フローネットワークモデル 質量、運動量保存 圧力勾配に伴う運動量交換 浮力差に伴う運動量交換 コンクリートからの水分放出モデル	ナトリウム漏えい燃焼実験-II	浮力差に伴う運動量交換 (定数C: -20%~+30%) その他入力値に含まれる	定数C: 約-20%~+30%で対流通気量約-18%~+22% コンクリート水分放出量: +10%で水蒸気濃度約+7%、水素濃度約+9%
	ガス成分濃度移行				
	エアロゾル移行	フローネットワークモデル(同上) 凝集・沈着モデル ブラウン拡散、熱泳動、重力沈降、凝集、沈着	プール燃焼実験 小規模プール燃焼実験 マルチセルプール燃焼実験 ナトリウム漏えい燃焼実験-II	入力値に含まれる	反応生成物エアロゾルのプール落下割合: 0.75→0.95で最大エアロゾル濃度約-60%
その他ナトリウム特有の物理現象	化学反応	瞬時平衡モデル	ナトリウム漏えい燃焼実験-II	入力値に含まれる	水素再結合割合: 0.90→0.95で水素濃度-約50%

- ナトリウム燃焼に係る重要現象に関するSPHINCSの解析モデルは各試験の結果と比較して妥当であることを確認するとともに、各解析モデルの不確かさを把握した。
- 把握した不確かさを考慮することによりSPHINCSは、ナトリウム燃焼の影響を適切に評価できる。

【参考】CONTAIN-LMRとSPHINCSの関係

- CONTAIN-LMRは、ナトリウム燃焼やナトリウム-コンクリート反応による格納容器応答、カバーガスから格納容器を通じて環境へと放出される放射性物質の移行挙動を評価することが目的である。
- SPHINCSは、ナトリウム燃焼に特化し、各部屋の雰囲気や構造物の温度、雰囲気成分やエアロゾル成分を評価することが目的である。
- SPHINCSは、幅広いナトリウム漏えい条件に対応するため、漏えい規模が比較的小さい場合にプールが時間とともに拡大するモデルや、経験則を可能な限り排除した機構論的なプール燃焼モデルを有している点がCONTAIN-LMRとの差異である。