

# 原子力プラントの熱流動最適評価に関する安全研究 事後評価 説明資料

令和5年4月

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ  
シビアアクシデント研究部門

# 目次

1. 背景
2. 目的
3. 研究概要
4. 研究期間を通じた主要成果
5. まとめ
6. 成果の活用について
7. 成果の公表等
8. 成果目標に対する達成状況

# 1. 背景

- 軽水炉の安全性の評価において、事故時のプラント挙動を適切に評価できることが必要
- プラント挙動評価として、従来の保守的評価から最適評価への切替えが進もうとしている
  - ✓ PWR炉心損傷防止対策の有効性評価、安全性向上評価：SPARKLE-2
  - ✓ BWR CNO会議（10×10新型燃料導入）：TRACG
  - ✓ デジタル安全保護回路のソフトウェアCCF：SPARKLE-2、TRACG
  - ✓ サンプスクリーン下流側影響：MCOBRA/RELAP5-GOTHIC
- 軽水炉の熱流動最適評価に係る技術基盤は一朝一夕で構築できるものではないため、事業者が最適評価を適用することに備えて、以下の安全研究プロジェクトを実施してきた：
  - ✓ 国産システム解析コードの開発（H24～H30年度）
  - ✓ 事故時等の熱流動評価に係る実験的研究（H24～H30年度）
  - ✓ 多重故障事象の影響評価に関する研究（H25～H28年度）
  - ✓ 詳細解析手法の導入に向けた熱流動・核特性安全解析手法の整備（Phase-2）（H25～H29年度）

## 2. 目的

- 事業者が実施する最適評価の内容、適切性等を規制の立場から確認するための技術基盤を構築することを目的に、過去のプロジェクトで抽出された課題解決を含めた継続的な取組として、以下を実施した
  - ① **事故時の物理現象の把握及びモデル高度化**
  - ② **原子炉システム解析コードのV&V**
  - ③ **BEPU手法の高度化及び安全解析への適用**
  
- 得られた知見を実機プラント解析及びその解析の中心となる原子炉システム解析コードに集約させることにより、知見を反映したプラント挙動評価を可能とし、また、事業者評価に対して技術的に踏み込んで確認するのに必要な技術力を得ることを目指す
  
- 実施期間：令和元年度から令和4年度まで（4年間）

## 3. 研究概要(1/4)

### ① 事故時の物理現象の把握及びモデル高度化

- BWR ATWS条件下での液膜ドライアウト・リウエット
  - ✓ 実験データの取得・分析 (ATWS模擬実験、限界出力実験、リウエット実験)
  - ✓ 解析コードによる評価手法の検討 (液膜ドライアウト・リウエットモデルの開発)
- BWR RIA条件下でのボイド挙動
  - ✓ 実験データの取得 (OSV (ボイド急昇開始) に係る低圧実験)
  - ✓ 解析コードによる評価手法の検討 (OSVモデルの開発、既存コードの性能確認)
- LOCA時のFFRD
  - ✓ 解析コードによる評価手法の検討 (FFRDの機構論的なモデル化)
- LOCA時等の再冠水
  - ✓ 実験データの取得・分析 (OECD/NEA RBHT)
  - ✓ 解析コードによる評価手法の検討 (既存コードの性能確認)
- 総合効果試験によるプラント挙動
  - ✓ 実験データの取得・分析 (JAEA LSTF、OECD/NEA PKL4&ETHARINUS)
- プール水中の温度成層化
  - ✓ 実験データの取得・分析 (小型プール実験)
  - ✓ 解析コードによる評価手法の検討 (GOTHICによるS/C温度成層化評価)

### 3. 研究概要(2/4)

#### ① 事故時の物理現象の把握及びモデル高度化

	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
BWR ATWS条件下での液膜ドライアウト・リウエット	JAEA委託			
	電中研委託			
	液膜ドライアウト・リウエットのモデル検討、試験解析			
BWR RIA条件下でのボイド挙動	電通大委託			
	試験解析、実機RIA解析			
LOCA時のFFRD	TRACE/FRAPTRAN-NRA開発、実機LOCA解析			
LOCA時等の再冠水	再冠水モデル検討、RBHTベンチマーク解析			
	OECD/NEA RBHT			
総合効果試験によるプラント挙動	JAEA委託			
	OECD/NEA PKL-4		OECD/NEA ETHARINUS (~R6.9)	
プール水中の温度成層化	早稲田共同研究 (~R5.7)			
	S/C温度成層化解析			

### 3. 研究概要(3/4)

#### ②原子炉システム解析コードのV&V

- 妥当性確認のための試験選定
  - ✓ PIRTに基づく選定
  - ✓ 既存試験（公開データ）の把握
- 個別効果試験の解析
  - ✓ 原子炉システム解析コードAMAGIの妥当性確認
  - ✓ 各試験の試験条件、体系の把握
  - ✓ 解析データベースの拡充
  - ✓ 実験データ・コード間の比較による評価モデルの知見拡充

	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
原子炉システム解析コードのV&V	試験選定			
	試験解析（AMAGI、TRACE）			

### 3. 研究概要(4/4)

#### ③ BEPU手法の高度化及び安全解析への適用

- 米国の規制動向調査
  - ✓ 最適評価及びBEPU手法に関する米国規制
  - ✓ 米国PWR/BWRプラントにおけるBEPU手法の採用状況
- 不確かさの評価手法の検討（ベイズ手法に基づく逆解析手法）
  - ✓ OECD/NEA ATRIUMプロジェクトへの参画
- 実機BEPU解析に向けた環境整備
  - ✓ TRACE/PARCSの入カデータ整備
    - PWR：3ループ
    - BWR：ABWR、110万kW級BWR5、80万kW級BWR5
  - ✓ 統計解析ツール整備

	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
BEPU手法の高度化 及び安全解析への 適用		米国規制動向調査		OECD/NEA ATRIUM (~R6.12)
			逆解析手法の検討	
		実機BEPU解析に向けた環境整備		



## 4. 研究期間を通じた主要成果(1/5)

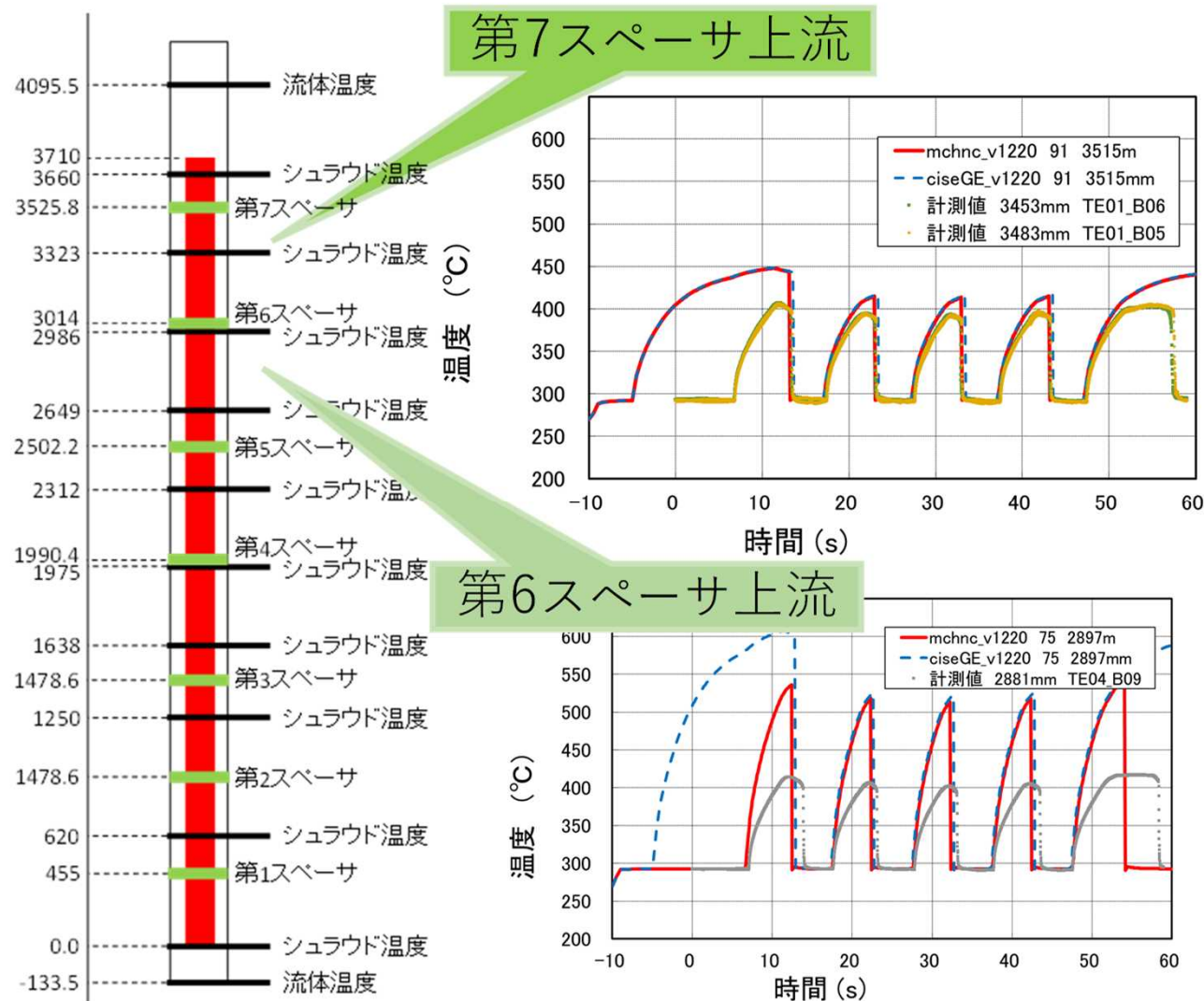
### ① 事故時の物理現象の把握及びモデル高度化

- 実験データの取得（次ページ参照）
  - ✓ ATWS模擬試験（高圧、単管・バンドル、振動条件）
  - ✓ スペーサ効果試験（スペーサ種類を変えての限界出力試験、液滴挙動試験等）
  - ✓ 低圧時サブクール沸騰挙動解明試験（OSV前後の気泡挙動）
  - ✓ 多重故障事象を模擬した総合効果試験（JAEA LSTF）
  - ✓ OECD/NEAプロジェクトを通じたデータ取得（RBHT、PKL-4、ETHARINUS）
- 機構解明と評価モデルの検討（次々ページ参照）
  - ✓ 液膜ドライアウト・リウエットの機構論的モデルの検討
  - ✓ リウエット時の液膜先端における先行冷却の機構解明とモデルの検討
  - ✓ OSVの機構解明とモデル開発
  - ✓ 再冠水モデルの検討

## 4. 研究期間を通じた主要成果(2/5)

### ➤ 実験データの取得【例】 : BWR ATWSを模擬したATWS模擬試験

- BWR ATWSでは、逃し安全弁の開閉により圧力と炉心出力の振動が見られており、その振動を模擬した条件下における液膜ドライアウト・リウエットの挙動について実験データを取得
- 実機を想定した実験範囲の設定
- 圧力、出力、流量を振動させた前例のない実験
- 温度計測点として、スペーサ上流のみではなく多数測定
- モデルの検討に実験データを活用



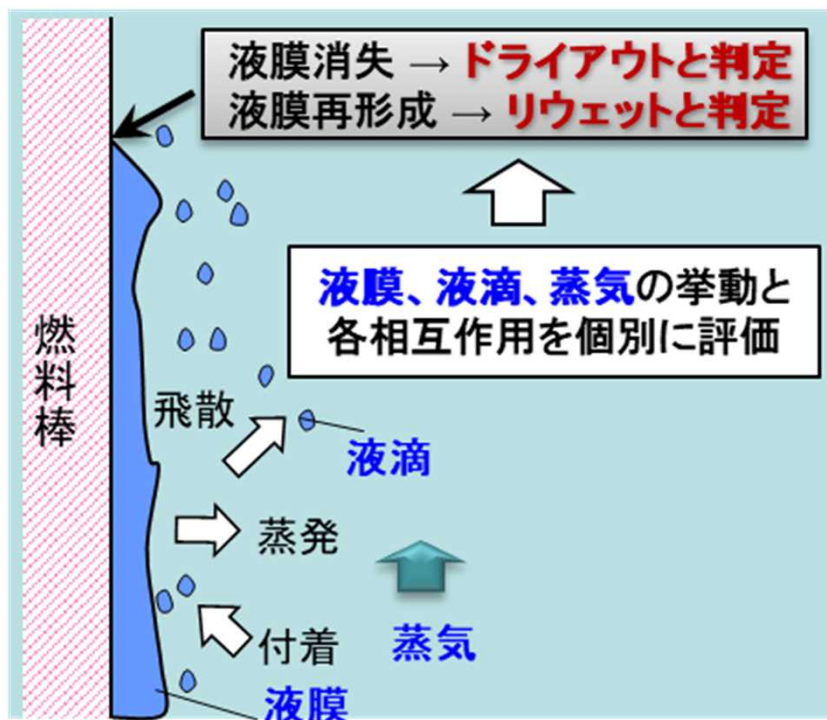
被覆管温度の計算値と測定値との比較

## 4. 研究期間を通じた主要成果(3/5)

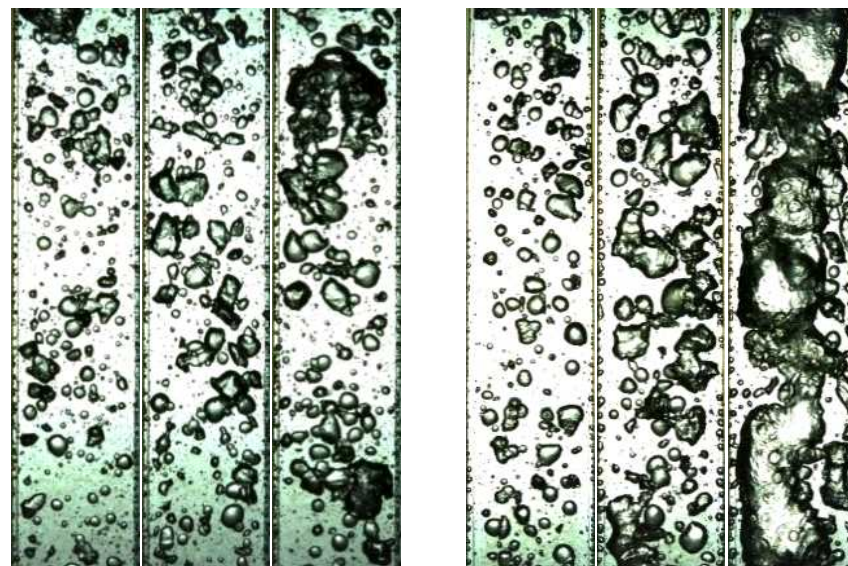
### ➤ 機構解明とモデルの検討

#### 【液膜ドライアウト・リウエット】

- 3流体場の考え（下図）に基づき、評価モデルを検討
  - ✓ COBRA-TFの液膜評価値で判定
  - ✓ MCHNC-CISEの開発



3流体場モデルに基づく評価手法の検討



(e)  $\Delta T_{\text{sub}} = 20.5 \text{ K}$

(f)  $\Delta T_{\text{sub}} = 18.5 \text{ K}$

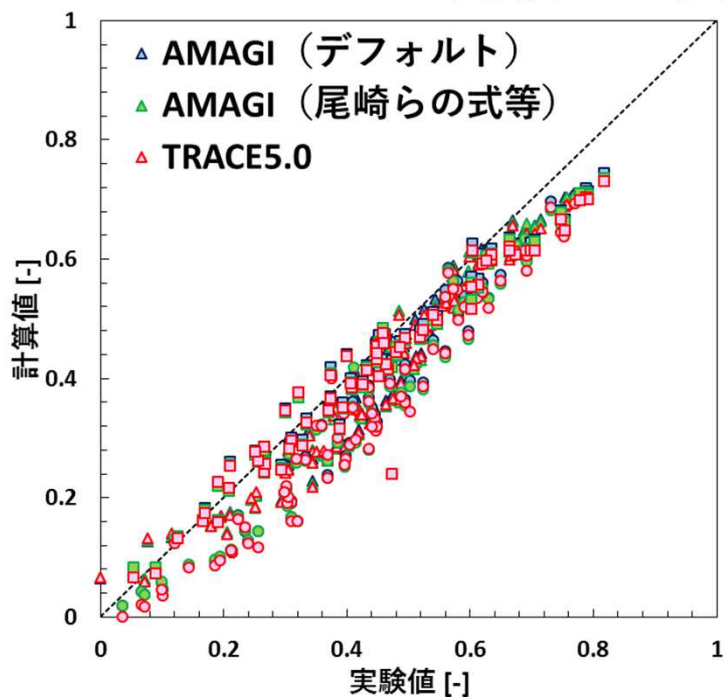
#### 【OSVモデル】

- OSV前後の気泡挙動の観察（上図）から、従来の気泡離脱モデルとは異なる考え方（大気泡形成）に基づき、OSVモデルを開発

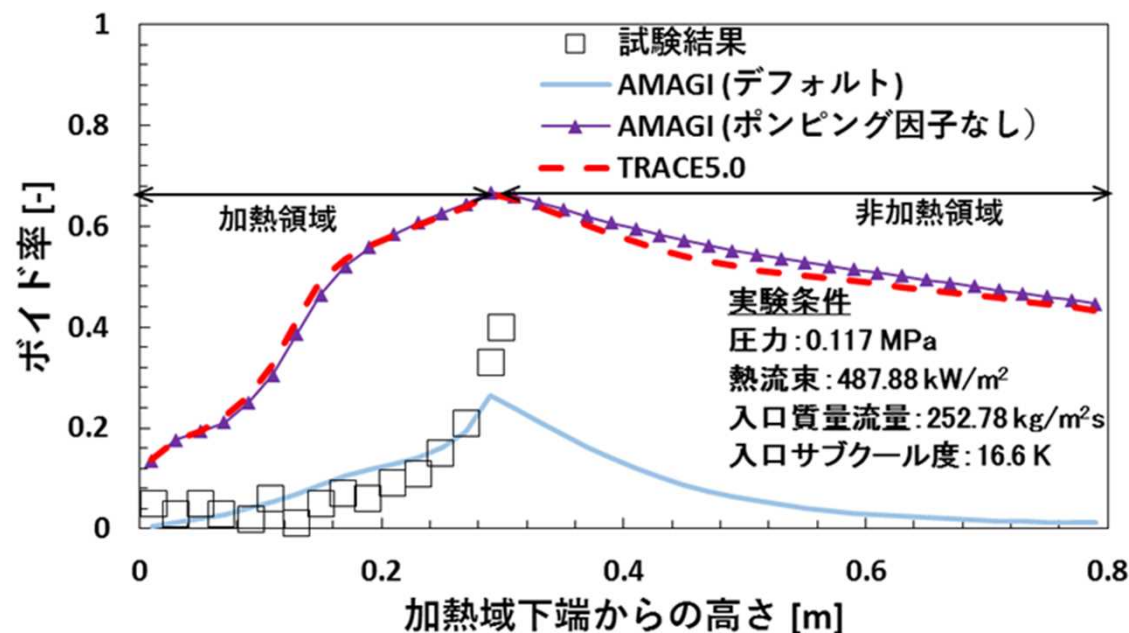
## 4. 研究期間を通じた主要成果(4/5)

### ②原子炉システム解析コードのV&V

- 学会標準\*を参考にAMAGIの妥当性確認を進めた
- 個別効果試験による妥当性確認の中で得られた知見：
  - ✓ AMAGIに実装した最新モデルの性能評価（左図）
  - ✓ TRACEとの比較により評価モデルの詳細に係る知見の拡充（右図）



最新構成式の性能評価（PSBTバンドル定常ボイド率試験）



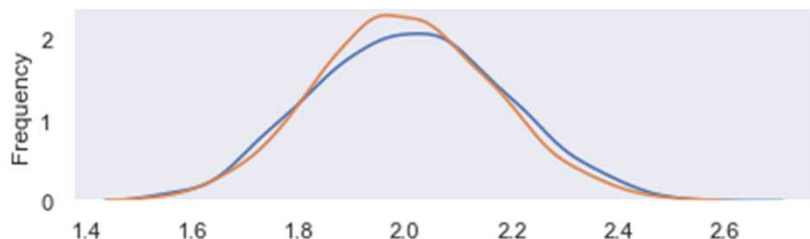
ポンピング因子の有無による影響確認（Zeitounら低圧サブクールボイド実験）

## 4. 研究期間を通じた主要成果(5/5)

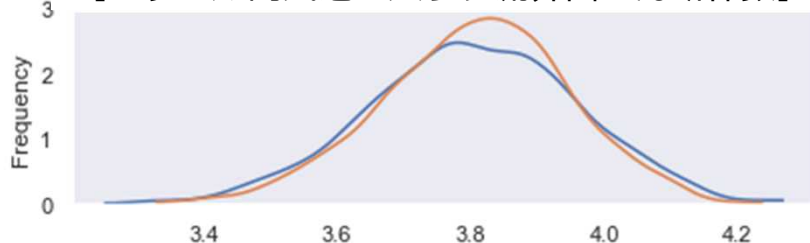
### ③ BEPU手法の高度化及び安全解析への適用

- 逆解析手法による入力パラメータの不確かさ定量化
  - ✓ ベイズ手法に基づく評価の試解析を実施（左図）
  - ✓ OECD/NEA ATRIUMに参加しての情報収集
- プラント解析データの整備
  - ✓ TRACE/PARCSによるプラント解析データを整備（右表）

【バンドル内気泡・スラグ流界面せん断係数】



【ベッセル内気泡・スラグ流界面せん断係数】



逆解析手法の試解析による入力パラメータの推定結果例（BFBT試験）

プラント解析データ整備の状況

プラントタイプ	燃料タイプ	シーケンス
ABWR 110万kW級BWR5 80万kW級BWR5	9×9A	AOO/DBA（発電機負荷遮断、給水加熱喪失、冷却材流量喪失）、重大事故等（高圧・低圧注水機能喪失、高圧注水・減圧機能喪失、全交流電源喪失、ATWS、LOCA時注水機能喪失）
3ループPWR	17×17	AOO/DBA（給水流量喪失、LOCA）、重大事故等（2次冷却系からの除熱機能喪失、ECCS再循環機能喪失、ECCS注水機能喪失）

## 5. まとめ

### ① 事故時の物理現象の把握及びモデル高度化

- JAEA、電中研、電通大への委託事業、早稲田大学との共同研究により、実験データを取得し、既往データと合わせて機構解明及びモデル高度化に向けて検討を行った。

### ② 原子炉システム解析コードのV&V

- 公開の実験データを調査し、AMAGIの妥当性確認のための実験を選定した。また、選定した実験の模擬解析によりAMAGIの妥当性確認を進めた。妥当性確認の中で、解析結果と実験データとの比較・分析により、評価モデルに関する知見を得た。

### ③ BEPU手法の高度化及び安全解析への適用

- 米国の規制動向を調査し、入力パラメータの不確かさを定量化のための逆解析手法について試解析を行った。また、BEPUの実機解析に向けて、プラント解析データの整備、統計解析用のツール整備を行った。

## 6. 成果の活用について

### 6.1 プロジェクト期間内

- サンプスクリーン閉塞に係る下流側影響について、事業者から意見聴取会において提示された熱流動実験、最適評価コードによる解析等に対して、本プロジェクト及び過去のプロジェクトで蓄積した技術的知見に基づき確認を行い、本件の規制活用に貢献した。また、本件のきっかけとなった米国の規制動向調査を行い、NRA技術ノートとして取りまとめた。
- 1F事故分析として、1,2号機耐圧強化ベント配管内における1号機ベントガスの流動解析を最適評価コードで実施し、測定で得られた汚染分布に至る原因を推定して事故分析検討会にて報告した。また、その検討内容を中間取りまとめ（2023年版）の別添に取りまとめた。

### 6.2 今後の見通し

- BWR 10×10新型燃料の導入に際し、安全解析への最適評価コード及びBEPU手法の導入が予定されている。その件含め、事業者による最適評価の適用を確認する場合には、本プロジェクトで得られた知見を審査支援等により活用することが可能と考える。

## 7. 成果の公表等

- 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表
  - ✓ NRA技術ノート：1件
  - ✓ 論文（査読付）：3件
  - ✓ 国際会議のプロシーディング（査読付）：3件
  - ✓ 表彰・受賞：1件
  - ✓ 学会発表（査読なし）：6件
  
- 委託先による公表
  - ✓ 論文（査読付）：6件
  - ✓ 国際会議のプロシーディング（査読付）：2件
  - ✓ 学会発表（査読なし）：4件



## 8. 成果目標に対する達成状況

### ① 事故時の物理現象の把握及びモデル高度化

- 幅広い実験データを取得し、それを活用した機構解明及びモデル高度化の検討を進めることができた。特に、液膜ドライアウト、OSV、FFRD、再冠水のモデルは、実機プラント解析に適用できる成果であり、また、LSTF等の総合効果試験のデータは実機プラント挙動の参考となりうるデータと考える。

### ② 原子炉システム解析コードのV&V

- 学会標準を参考に妥当性確認を進め、そのプロセスの具体的な手順を実践するとともに、妥当性確認を進める中で評価モデルに関する知見を得た。これらは、事業者の最適評価コードのV&Vをレビューする際に有益な知見と考える。

### ③ BEPU手法の高度化及び安全解析への適用

- 米国の規制動向を調査し、米国の最適評価、BEPUの審査に関する情報を整理した。BEPUの実機解析に向けた環境を構築することができた。これはBEPU、最適評価の審査支援等の際に活用可能と考える。また、入力パラメータの不確かさ定量化のための逆解析手法については課題があるものの、将来的な規制適用への備えとして、そのベースとなる検討結果が得られたと考える。