



OECD/NEA ROSAプロジェクトの進捗と成果

平成21年3月17日

安全研究審議会

日本原子力研究開発機構
安全研究センター
熱水力安全評価研究グループ
中村 秀夫

目次

ROSAプロジェクト

- 背景
- 目的と構成
- **LSTF**
- 実験の概要、特徴、実施計画
- 主な成果

ROSA-2プロジェクト

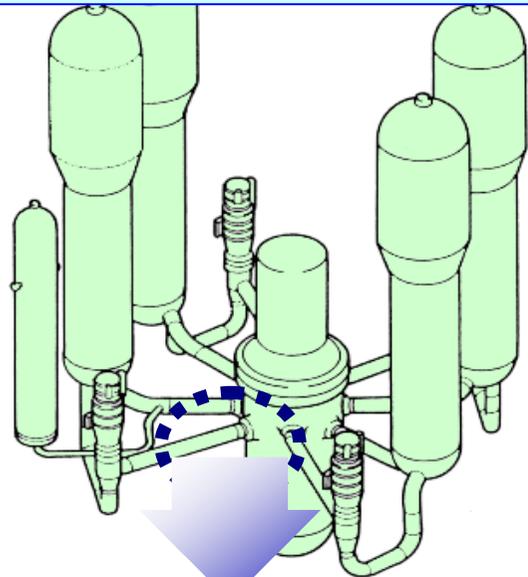
- 経緯、構成など
- 実施予定内容

まとめ

背景

- OECD/NEA SESAR-FAPの議論
各国の大型装置を国際協力で利用し、
安全研究の効率的実施を図る
- 炉利用の高度化、高経年化、次世代軽水炉
→ 安全評価手法の高精度化への要請

- 安全評価手法への産官からの要請
 - 安全評価解析での保守性を定量評価
 - より高精度なクロスチェック解析
 - 合理的な安全余裕の設定(過大な余裕を削減)
 - 最適評価(BE)手法の安全解析への利用
- 熱流動現象の忠実な再現を目指すBE手法は、
複雑現象の精度良い予測に課題が残存



ニーズ

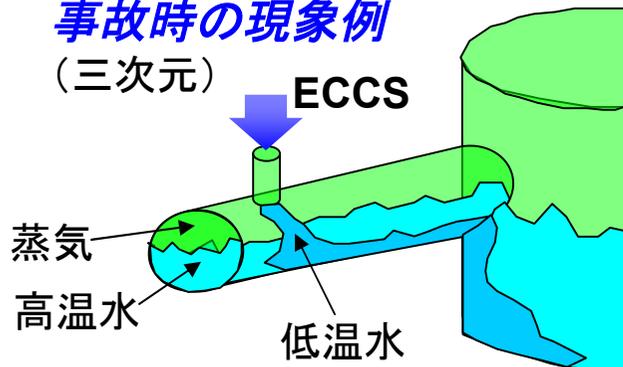
- 安全余裕をより高精度に
評価するBE手法
- 多次元現象を十分な精度で
解析する高精度な解析手法

- 解析手法の開発・検証
用に、より詳細なデータ
- 計測データによる
複雑現象の十分な表現

事故時の現象例

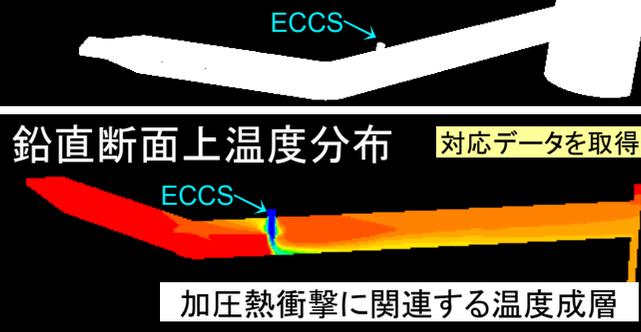
(三次元)

ECCS



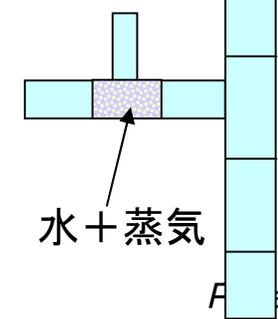
多次元解析手法による解析例

三次元解析メッシュ(171万)



BE熱流動解析

(一次元)

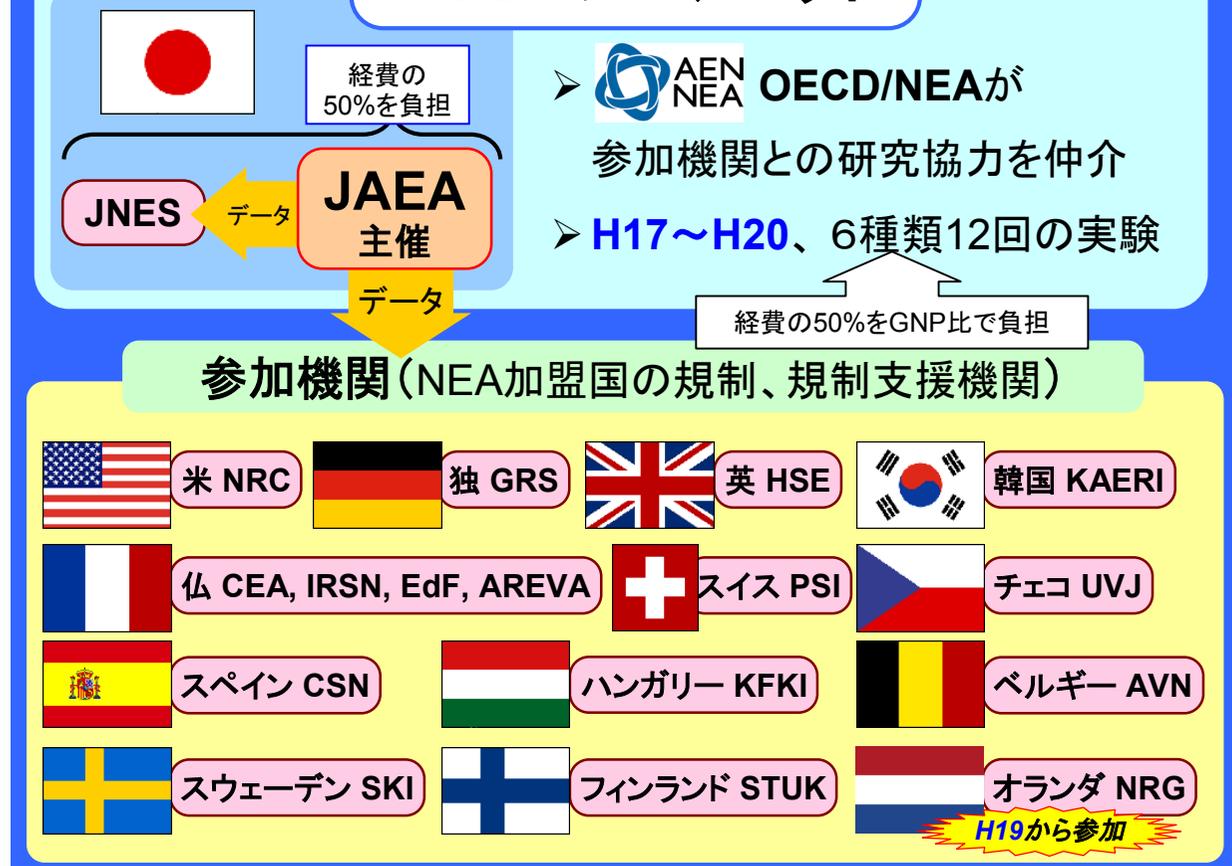


目標と構成

目標

- **LSTF**の総合・個別効果試験
(性能限界条件)
- 事故時の伝熱流動現象に関する詳細なデータ(新たな計装)
- 安全評価上の課題である複雑流動などの解明
(3次元、非定常、非均一流動や非凝縮性ガスの影響)
- 安全余裕を高精度に評価する**BE**手法を、参加機関と共に検証・開発
- 得られた知見を国際的に共有

ROSAプロジェクト



- 軽水炉の高度利用や高経年化、安全向上に係わる**国内課題**に対応
 - 原子力安全委員会「原子力の重点安全研究計画」および原子力機構の中期計画に整合
- 熱水力安全に係わる**国際的な共通課題**を効率的・効果的に解決

ROSA計画 大型非定常実験装置(LSTF) Large Scale Test Facility

軽水炉の事故時及び過渡時の熱水力安全に関する研究

国際的評価

NEA/CSNI/R(2007)6

- ✓【運転条件＝世界唯一】 圧力・温度が実機と同一
- ✓【サイズ＝世界最大】 高さ同一、体積1/48
- ✓ ECCS(非常用炉心冷却系): 全タイプ + 新型
- ✓ 計測: 独自開発を含む、1600点以上の詳細計測

良好な現象の
模擬性と
計測能力

2007年 OECD/NEA SESAR/SFEAR
施設評価 (安全研究上級専門家グループ)

- ✓ 熱水力分野で第1位

ROSA-IV 計画

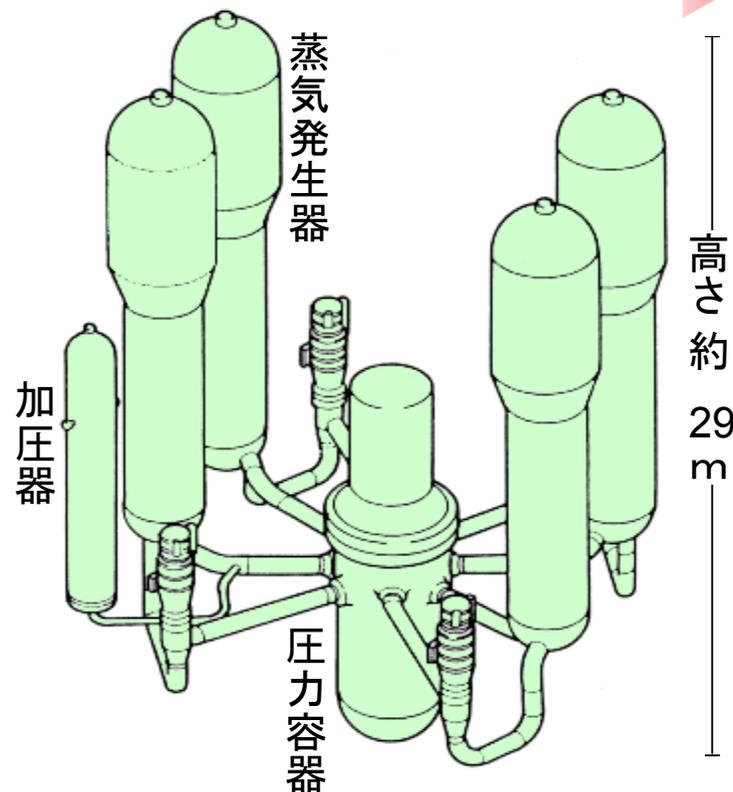
- '85 実験開始
- '86 TMI 事故の原因現象を解明
- '89 OECD/NEA国際標準問題(ISP)-26
データ提供、14カ国17機関が
解析コード性能検証
- '91 美浜2号炉蒸気発生器伝熱管
破損事故(SGTR)再現実験
→ 安全委員会に情報提供

ROSA-V 計画

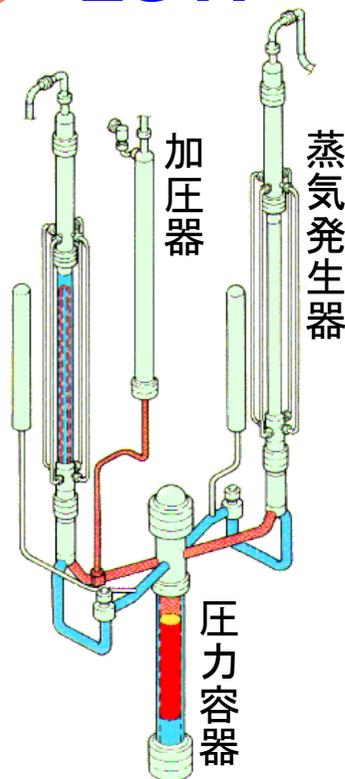
- '92- Westinghouse社AP600受動安全
設備の有効性を米国NRCと確認
→ 型式認証に貢献
- '98- 新型BWR用静的格納容器冷却系
(PCCS)の有効性確認試験
- '05- OECD/NEA ROSAプロジェクト

加圧水型原子炉(PWR)

(炉心熱出力 3423 MW)



LSTF

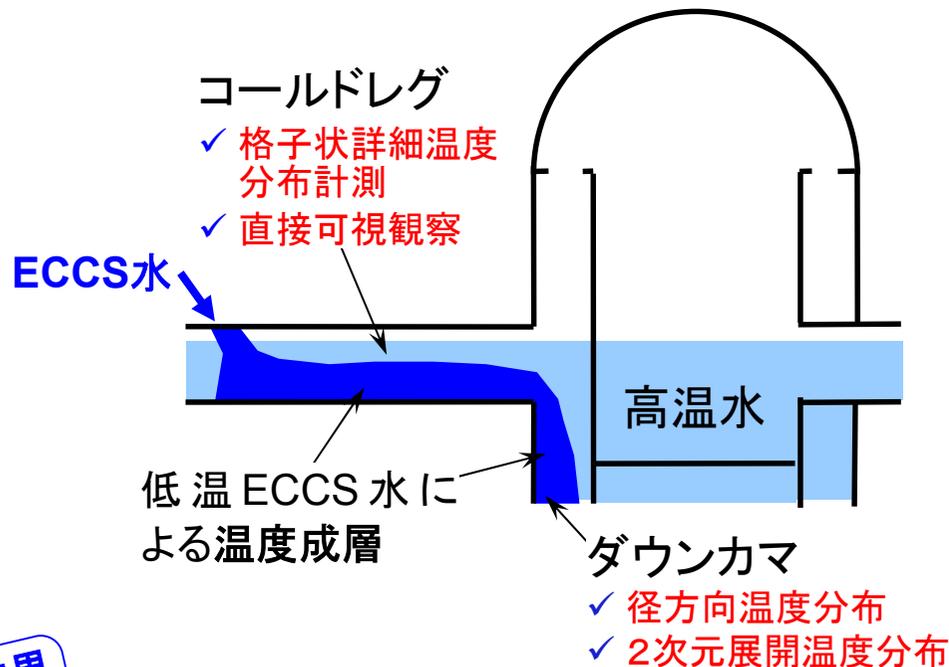


実験の特徴と主な成果(1/4)

多次元、冷却材混合、非定常の現象

(1) ECCS注水中の水平配管内温度成層

- 小破断LOCA時のECCS水注入
加圧熱衝撃(PTS)など高経年に関わる課題
- 多次元、非平衡、混合／不混合

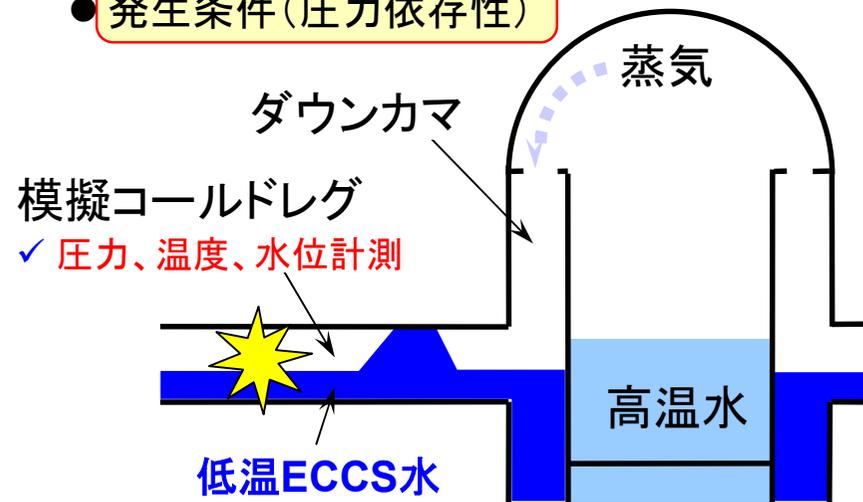


成果

- PV内冷水流下領域のコールドレグ水位依存性を確認
- CFDコード用気液界面凝縮モデルを新たに開発

(2) ウォーターハンマ現象

- ECCS低温水への蒸気凝縮
一次系の急減圧時など ~ 設備の健全性
- 多次元、非平衡、非定常
- 発生条件(圧力依存性)



成果

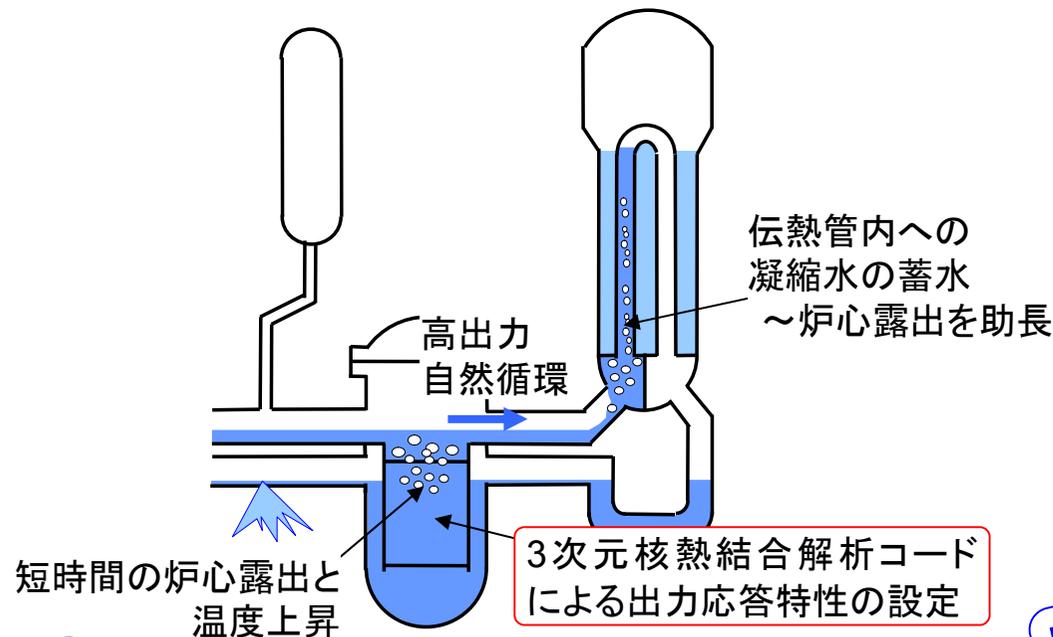
- 高圧(70気圧)迄ウォーターハンマ発生を確認
- ウォーターハンマ発生条件を整理

実験の特徴と主な成果(2/4)

苛酷条件下での複雑過渡現象

(3) 高出力自然循環(スクラム失敗)

- 小破断LOCA時や給水喪失過渡時の高出力過渡における炉心冷却の劣化など
- 多次元、凝縮／混合、高流速凝縮流れ

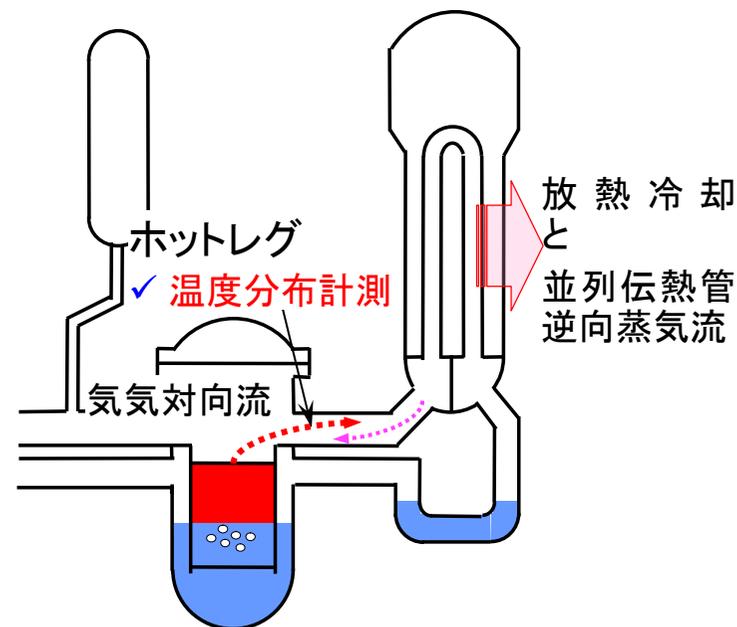


成果

- 自然循環時の射流など特徴的現象を確認
- 高出力過渡時に複雑なSG伝熱管挙動を見出した

(4) 過熱蒸気自然循環

- シビアアクシデント時のSG伝熱管健全性
- 気相対向流と並列伝熱管の非均一循環など
多次元、気相混合、並列流路流れ



成果

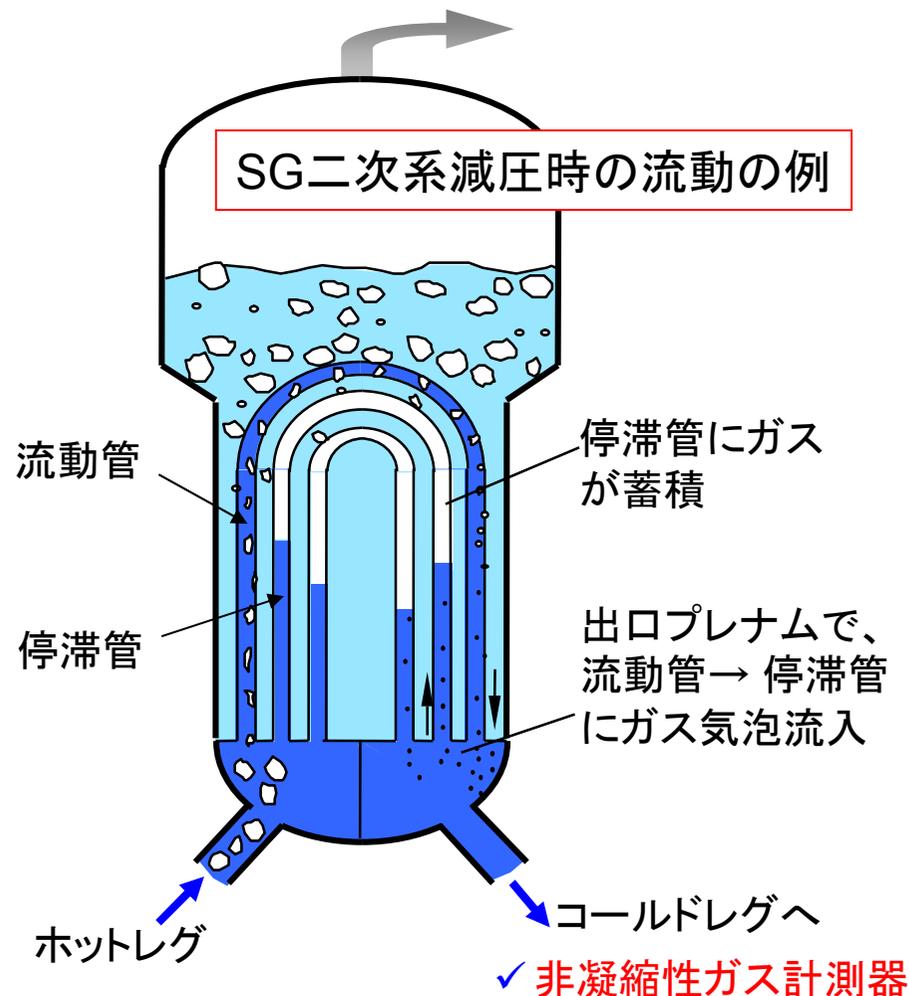
- 自然循環発生条件をCFD解析同定、実験で確認
- 新開発の低速蒸気流速計でホットレグ内の蒸気対向流の計測に成功し、CFD解析と比較

実験の特徴と主な成果 (3 / 4)

並行流路非均一流れと 多次元二相流動との相互作用

(5) 自然循環冷却時の蒸気発生器(SG) 伝熱管群での非均一流動

- 二次系減圧を通じた炉心冷却の確保
アクシデントマネジメント策や
次世代軽水炉安全系などの有効性確認
- 多数本伝熱管内流動と二次側流動の
同時解析
- 流動管本数の変化
- 蓄圧注入系からの非凝縮性ガス流入
による凝縮阻害、流動変動



成果

- ガスの有無によるSG伝熱管内の蒸気凝縮挙動の変化や伝熱管内に
3種類の凝縮二相流の併存等、特異現象を確認
- 新開発の非凝縮性ガス計測器で蓄積したガスの濃度を計測

実験の特徴と主な成果(4/4)

(6) 参加機関の提案課題

① 炉容器頂部破断LOCA

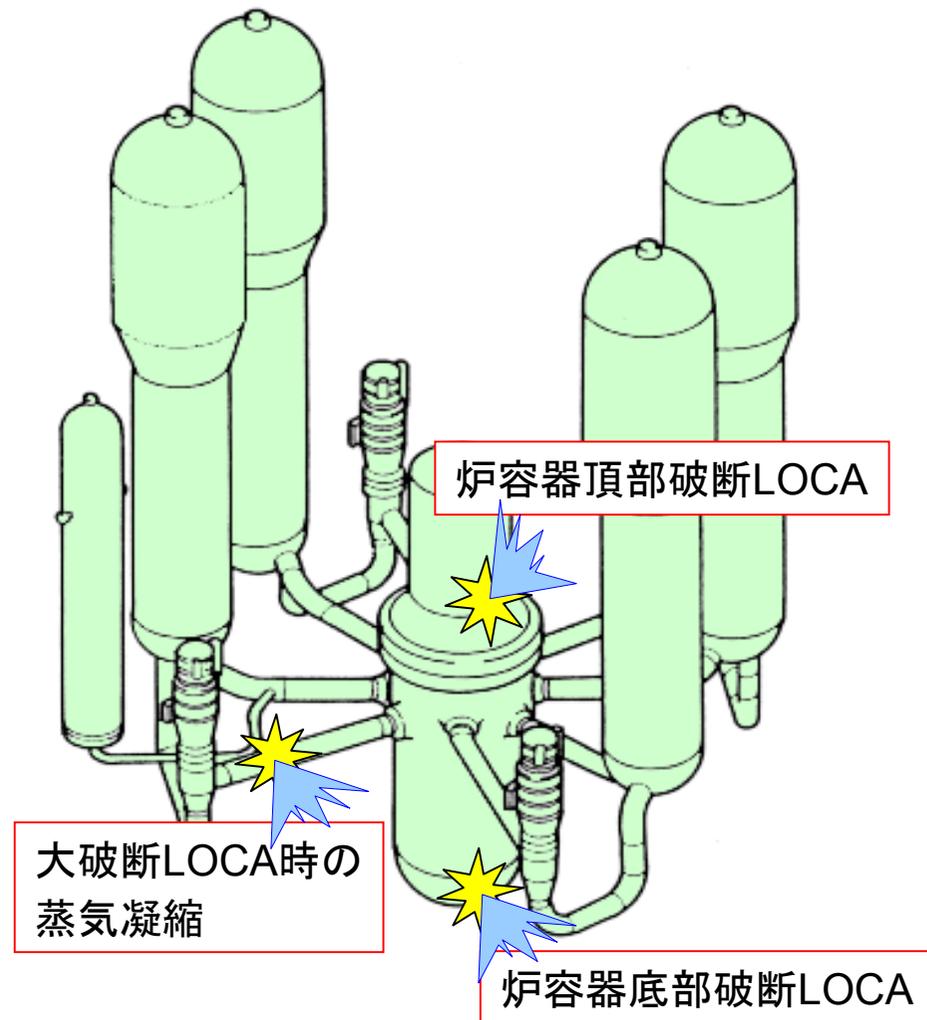
- ✓ 米国Davis Besse炉 → 炉容器頂部減肉
- ✓ アクシデントマネジメント策の有効性

② 炉容器底部破断LOCA

- ✓ 米国South Texas Project炉 → 計装からの漏水
- ✓ アクシデントマネジメント策の有効性

③ 大破断LOCA時のECCS水上の蒸気凝縮

- ✓ 格納容器圧力へ影響(安全解析で影響を無視)
- ✓ 安全余裕の定量評価



成果

- ① 炉心出口温度計(CET)の信頼性再確認のため、OECD/NEAに新タスクグループ → 議論中
- ② アンバランスSG減圧・冷却操作など、アクシデントマネジメント策の有効性確認用データを得る
- ③ 個別効果実験中～液滴挙動など、現象の詳細な模擬と計測でデータベース整備(3月終了予定)

ROSAプロジェクト 進捗まとめ

プロジェクトの進捗

- LSTFの優れた現象模擬性能を活かし、11回の実験をほぼ予定通り終了
- 参加機関(規制、支援機関、産業界)と実験データや技術情報を共有すると共に、データ分析や解析手法の検証・開発を通じて人材育成に貢献
- CET信頼性など新たな安全上の課題を同定し、内外で軽水炉安全向上に貢献

技術検討グループ(PRG、年2回)

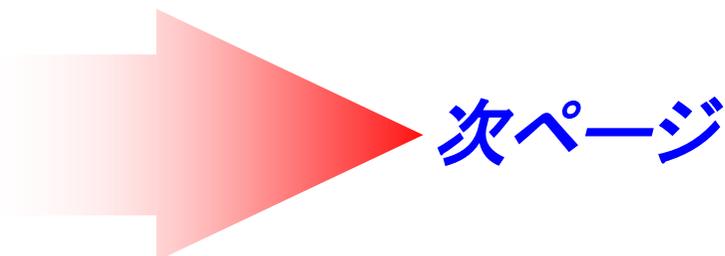
- 40件以上の解析結果や研究成果の交流(実質7回、東海で3回＝実験立会)
- 熱水力最適評価(BE)手法の高精度化などに有用な情報を抽出

最終報告書

- 運営委員会、技術検討グループと協力
- 2009年10月を目標に、ドラフトを作成

第2期計画(ROSA-2プロジェクト)

- 参加機関からの要請
- 共に実施内容を検討して最終案を策定



第2期計画(ROSA-2プロジェクト)

経緯

- H19年5月の運営会議@OECD/NEA から検討を開始
- H19年11月の技術検討会議@東海 で技術内容を提案
 - ✓ 全参加機関が実施を肯定
 - ✓ 参加機関へ、ニーズの確認や重要度の検討を要請
- H20年11月の運営会議@OECDで実施内容に合意

構成

研究の基本方針

- 短中期的な規制課題
- LSTFの特性を活かし、現行炉、次世代軽水炉に係る内外のニーズに対応
- 参加機関からのリクエストを考慮
- 実験準備時にBlind解析へ参加を呼びかけ、BE手法の性能検討を幅広に行う
OECD/NEAの方針に対応

期間 と 実験回数

- H21年4月から3年間、3テーマで6回のLSTF実験

将来

ROSA-2プロジェクト終了後の方針

- 次世代軽水炉の課題へLSTFを積極活用（HP後に具体的内容検討）
- 研究基盤を維持・向上し、熱水力安全に係る基盤情報を引き続き提供

ROSA-2プロジェクト 実施テーマ

実施テーマ

1. 中破断LOCA (約20%ホットレグ破断相当)[#]

1. ECCS評価基準見直し、小破断LOCA安全解析の精度向上
(規制/安全評価の合理化、改善)

2. AM策や回復操作の改良・新たな提案

1. 蒸気発生器伝熱管破断(SGTR)事故からの回復操作[#]
(← フィンランドSTUKから検討依頼、FP放出防止策の検討 等)

3. LOCA後の長期炉心冷却など

1. ボロン析出やデブリ流入、炉心水位変動による炉心冷却の劣化
(← 米国NRCの懸念)
2. ECCSサンプスクリーン閉塞に係わる破断流の影響評価[#]
(下流壁面上の圧力分布評価、周囲壁の影響考慮:未解決課題)
3. 蒸気発生器でのリフラックス蒸気凝縮による炉心冷却の維持
(シビアアクシデント条件を考慮 ← スイスPSIから提案)

実施

- ✓ 短期的に重要な課題
- ✓ LSTFの機能最大限活用
- ✓ リスク評価上の不確かさを低減

実施は断念

- ✓ 実験回数に制約
- ✓ 設備改造の予算大

[#]次世代軽水炉設計への反映が有効と思われる項目

中口径破断LOCA

ECCS評価基準見直し

小破断LOCA安全解析の精度向上

背景

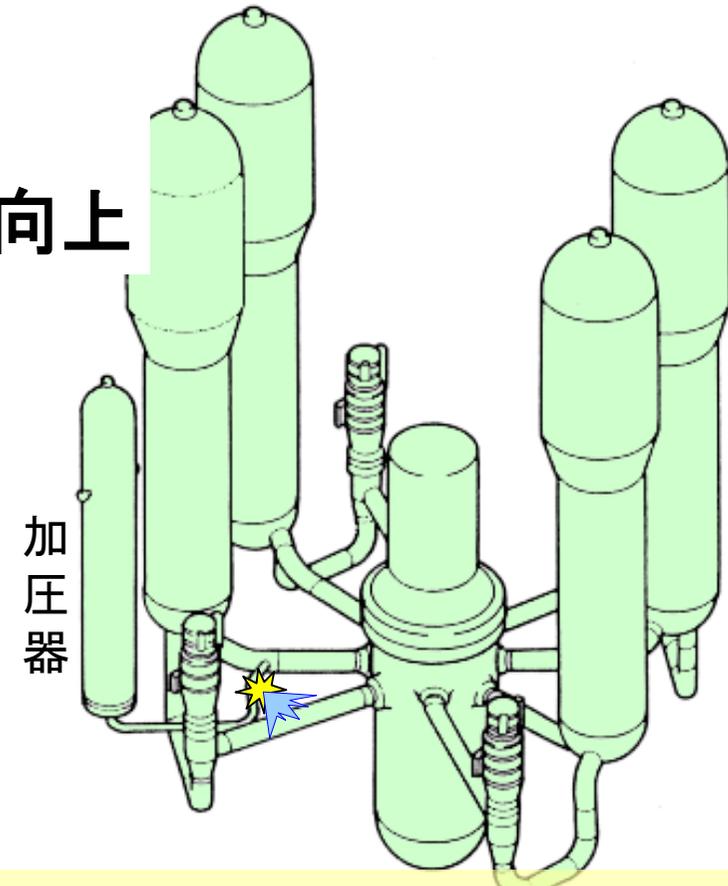
1. リスク情報に基づく設計基準事象の破断配管口径見直しの動き
2. 安全評価におけるLOCA破断口サイズのPWRループ数依存性

目標

1. 中口径破断LOCA(約20%破断相当まで)での熱水力現象の理解
2. 安全評価コードの性能検証用データベースの整備

LSTF実験での主要パラメータ

1. 破断口の位置、サイズ、方向
2. LSTFの炉心出力制限の考慮(実験手順、破断口の構成、循環流量等)と解析によるクロス評価



- TBS(Transition Break Size)の想定
 ホットレグ: 加圧器サージライン200%破断
 コールドレグ: ECCSノズルの200%破断
- プラントループ数の考慮

ホットレグおよびコールドレグでの
 中口径破断LOCA
 → 13%CLB、15%HLB、20%HLB など

AM策や回復操作の改良・新たな提案

SGTR事故からの回復操作

背景

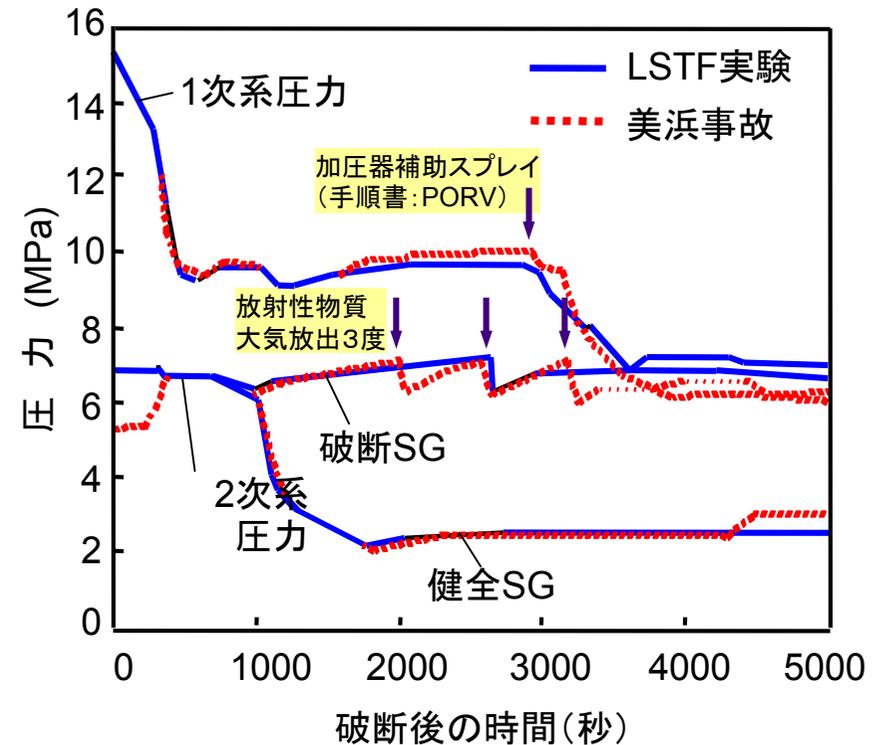
1. 現行手順では破断側SG等から放射性物質が大気放出され、誤操作や機器故障の影響も有り
2. 主蒸気管破断LOCAに付随したSGTRの可能性

目標

1. 大気放出量の予測、ならびに機器故障時の影響評価に必要なデータの取得
2. 放射性物質の放出を低減する代替操作や制御、健全SG自然循環冷却による一次系減圧促進策の考案
3. 主蒸気管破断LOCA + SGTR時の大気放出量の正確な把握(← IRSNからの提案)

LSTF実験での主要パラメータ(例)

1. 加圧器からの蒸気放出手順
2. ECCS注入失敗等、機器故障の仮定



(例)美浜2号機SGTRとLSTF再現実験

- ✓ 高圧ECCS注水により、一次系圧力 > 二次系圧力
- ✓ 加圧器の減圧操作による加圧器水位再形成
→ ECCS手動停止 → 一/二次系均圧
- ✓ 健全SG自然循環冷却は炉心冷却に有効だが、一次系圧力の減圧効果は小

放射性物質の放出量の低減、正確な把握
→ 回復操作を考慮したSGTR模擬
→ 主蒸気管破断事故に伴うSGTR模擬

まとめ

OECD/NEA ROSAプロジェクト

- **SESAR/FAP** ---熱水力安全に係る**国際的な共通課題**を効率的・効果的に解決
- 軽水炉の高度利用や高経年化、新型軽水炉の合理的安全設計に係る**国内課題**に対応
- H17年度から4年間、6テーマ12回の**LSTF**実験に14カ国18機関が参加
- 参加機関(規制、支援機関、産業界)とデータや技術情報を共有すると共に、**CET信頼性**など新たな課題を同定し、内外で軽水炉安全向上に貢献
- 参加機関の解析情報などより、本来目標である熱水力最適評価(BE)手法の高精度化に有用な情報を抽出

OECD/NEA ROSA-2プロジェクト(第2期計画)

- 機構とプロジェクト参加機関からの提案・議論に基づき、実験課題を決定
- H21年度から3年間で3テーマ6回の**LSTF**実験
 - ✓ 中口径破断LOCA + SGTR(主蒸気管破断影響を含む) = 5回
 - ✓ 参加者との合意に基づく実験 = 1回

参考資料

実施計画

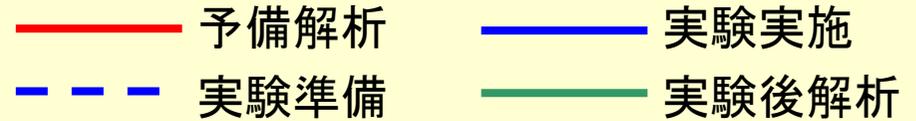


実験項目	年度	2005	2006	2007	2008	2009
(1) ECCS注水時の温度成層と冷却材混合			1	1		
(2) ウォーターハンマに代表される非定常・破壊現象			1			
(3) 高出力自然循環			1	1		
(4) シビアアクシデント時の過熱蒸気自然循環					1 1	
(5) 蒸気発生器二次側減圧による一次側冷却			1	1		
(6-1) 原子炉容器頂部破断LOCA*		1				
(6-2) 原子炉容器底部破断LOCA*		1				
(6-3) 大破断LOCA時の低温側配管内ECCS水上への蒸気凝縮					1	

* 兆候ベースの運転員操作によるAM策を組み合わせた実験

n = 実験数

20年度の実施計画



実験項目	20年4月 PRG&MB 専門部会5/7 独GRS (Garching)	20年9月 PRG&MB 専門部会6/8 NEA本部 (Paris)	20年10月 – 21年3月
(4) 過熱蒸気自然循環	低速蒸気流速計 ホットレグ熱電対	1 終了(成功)	1 明日、実施
(6) 大破断LOCA時の低温側配管内ECCS水上 への蒸気凝縮		テスト部製作(破断口下流側)	1 詳細設計、ほぼ完了

- 最終年度
- 3実験を実施
 - ✓ Test 4: 4-1(Arガス): 成功裏に終了、4-1(水-蒸気): 明日実施。
 - ✓ Test 6-3: 予備解析、予備実験に基いた実験条件の策定、試験部製作に着手
- 解析コードを用いた解析手法に関する議論
 - ✓ 各国から、多くの解析結果 Test 1、Test 3、Test 5、Test 6
CFDおよびBEの多種類のコード
 - ✓ 複数コードの解析結果と利用法からモデル開発に有効な知見の獲得法を模索
- 最終報告書の作成(着手)

最終報告書の構成(案)

1. プロジェクトの背景と目的、実験の構成など
2. LSTFについて
 - ✓ 発生現象の実機模擬性について、共通内容(スケーリングの考え方など)を記載
3. 成果の説明
 - ✓ 実験の背景、目標、実施方法、主要な実験成果、成果の実機適用性の記載(実験毎に)
 - ✓ 成果の実機適用性: LSTFにおける発生現象の模擬性や計装による多次元現象の表現性、解析を通じた実機への外挿等を議論(共通内容は2章)
4. まとめ
 - ✓ 1章に対応したデータベース整備の首尾とデータの利用(PRG等での解析)
 - ✓ 実機模擬性(データの有用性)について
 - ✓ 第2期計画の概要

参考文献

付録1 新たな設備改造や計測器類

付録2 実験データ(CDやDVD)のリスト

付録3 実験データに基づく解析結果の検討

- ✓ 実験毎に行なわれた参加者による解析の概要を、数行/件でまとめる(解析実施者に分担協力をお願いする)
- ✓ Test 6-1に対するアンケートの結果と特徴のサマリ

付録4 投稿文献や議論のリスト

参考資料

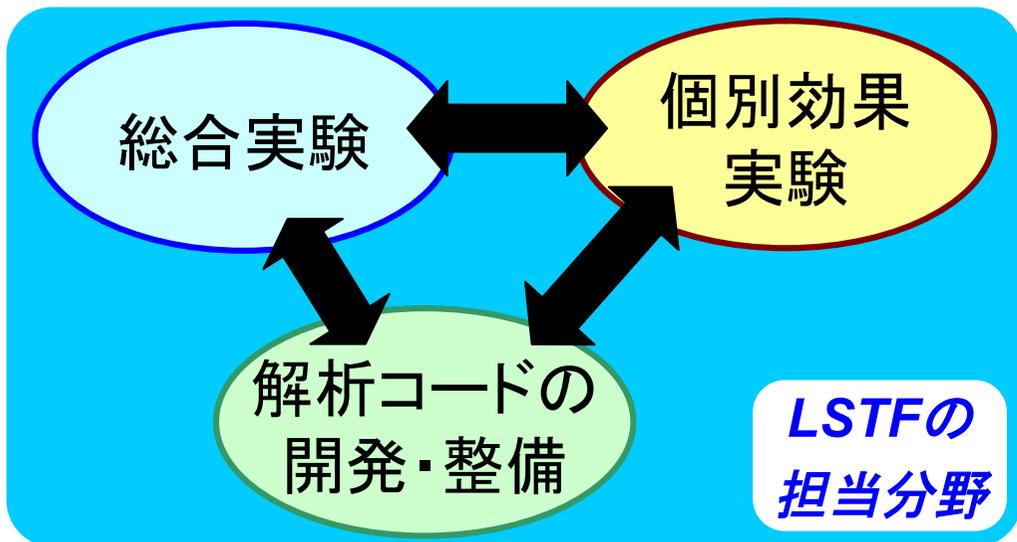
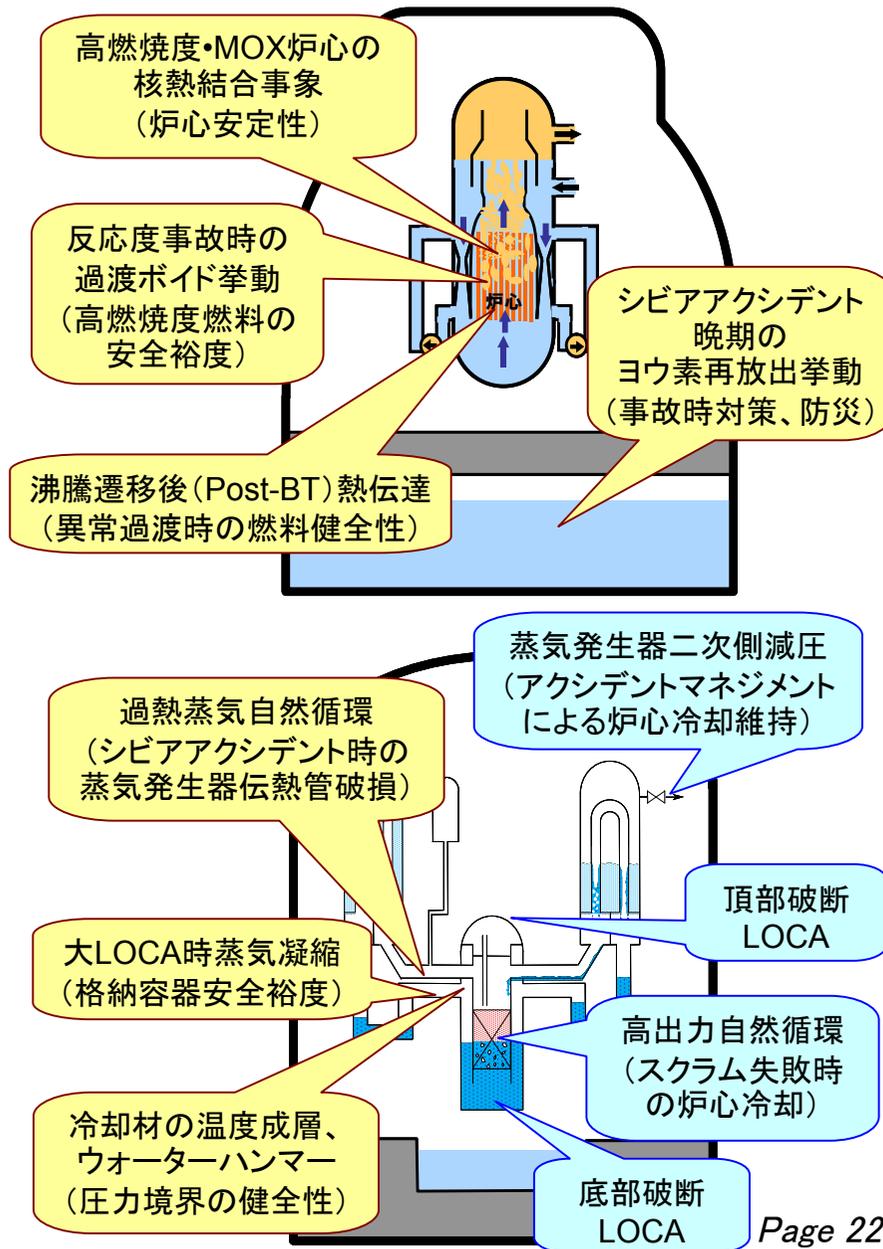
熱水力安全研究の目的

熱水力安全に係わる技術基盤を整備して、 国の安全規制に最新の知見を反映

- 総合実験、個別効果実験による事故現象解明と解析コード検証・開発用データベースの整備
- 安全評価、クロスチェック解析技術の高精度化による安全余裕の現実的評価
- 学協会規格の技術的妥当性評価と規制導入支援

軽水炉の高度利用や次世代軽水炉に対応

- 炉出力向上、長サイクル運転、高燃焼度燃料の利用、MOX燃料の導入、高経年化
- 先進安全系の性能確証



現行中期計画におけるLSTFの位置づけと対応

中期計画（変更認可：平成20年3月31日）でのLSTFに係る記載

- 中期目標期間中に廃止措置の着手時期、事業計画の検討に着手する施設『大型非定常試験装置(LSTF)』
- 『なお、原子力施設の廃止措置については、当該施設に係る外部利用者等のニーズを確認した上で、廃止後の機構の研究開発機能の在り方、国内外における代替機能の確保、機能の他機関への移管、当該施設の利用者の意見等を踏まえて、具体的な原子力施設の廃止時期及び廃止方法の検討を行うものとする。』

対 応

- 機構経営上の有用性を有する施設として、次世代軽水炉の安全確認試験への利用を確実に実施すると共に、国の原子力政策に貢献
- OECD/NEA ROSAプロジェクトの継続により、研究基盤の維持を通じて、炉の安全向上と国際評価の向上に貢献

LSTFの今後の活用に係わる検討

検討の基本方針

- 機構の組織経営上の有用性を評価
- 外部利用ニーズに基づき有効活用

検討の視点

- 機構の自己収入の増大
- 研究基盤（人材・設備）と国際評価の維持・向上

LSTFの外部利用ニーズ

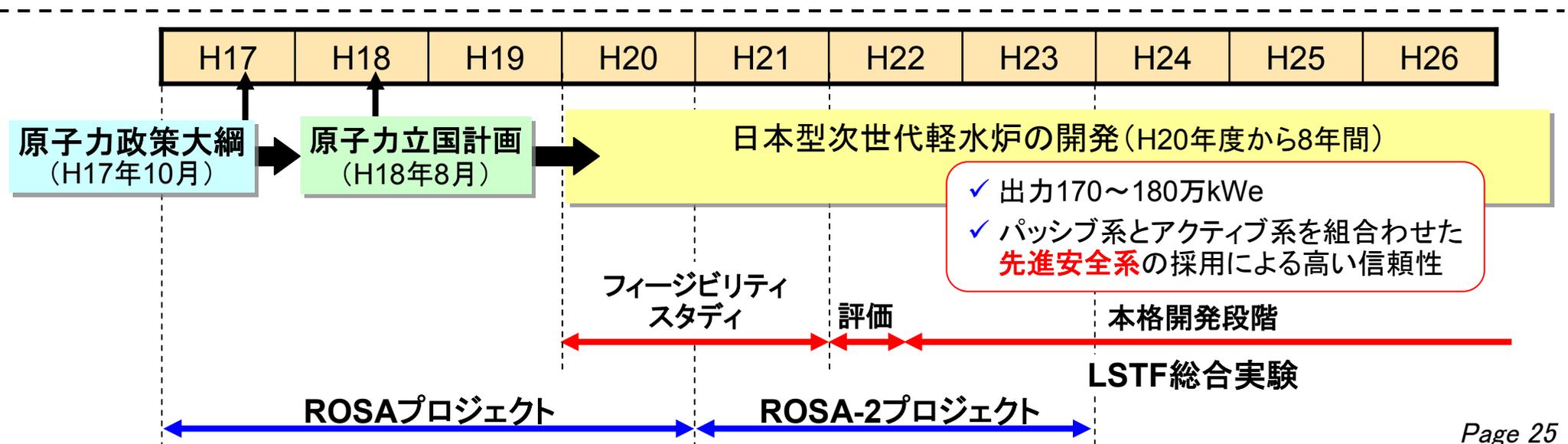
- OECD/NEA ROSAプロジェクト第2期計画(21年度～)
- 「原子力立国」政策に基づき2030年前後からの代替炉建設需要に対応した、世界標準を獲得し得る次世代軽水炉*の国プロによる開発(H20～27年度、エネ庁・電事連・電工会によるプレス発表@H19年9月12日)
- 原子力学会「熱水力安全評価基盤技術高度化検討」特別専門委員会がH20年度に策定する熱水力安全研究の技術戦略マップ(ロードマップ)を参照

*パッシブ系とアクティブ系を組合わせた先進安全系を採用し、高い信頼性

世界標準を獲得し得る次世代軽水炉の開発

ニュースリリース(H19年9月12日) 経済産業省・電気事業連合会・日本電機工業会

- 2030年前後からの代替炉建設需要に対応
- 国、電気事業者、メーカーが一体となったナショナルプロジェクト
 - ✓ **メーカー**: 主体的役割を果たし、海外市場も対象に、主要ラインナップの一つとする。
 - ✓ **電気事業者**: 主要ユーザーとして、開発に積極的に協力。
 - ✓ **国**: 必要な予算の確保のため特段の取組を進め、国際展開に向けて環境を整備。
 - ✓ 次世代軽水炉に必要な**規格基準を整備**すると共に、同炉に適合した**規制制度を提案**。実施に際しては安全当局との連携を図り、**規制高度化を産官が一体的に推進**。



参考資料

熱水力安全研究ロードマップの策定

背景

- 安全基盤小委*での議論
 - 軽水炉の安全確保・向上、規制の合理化・標準化、規格・基準の効率的整備を行なうため、産官学および学協会が連携して安全基盤研究に関する共通認識を図り、安全基盤研究の重要分野に関わる技術戦略マップ(ロードマップ)を策定
- 原子力学会(JNES委託)によるロードマップ**の策定(H16)
 - 燃料と高経年化→改訂版を作成し安全基盤小委にて報告、熱水力→炉出力向上に限定

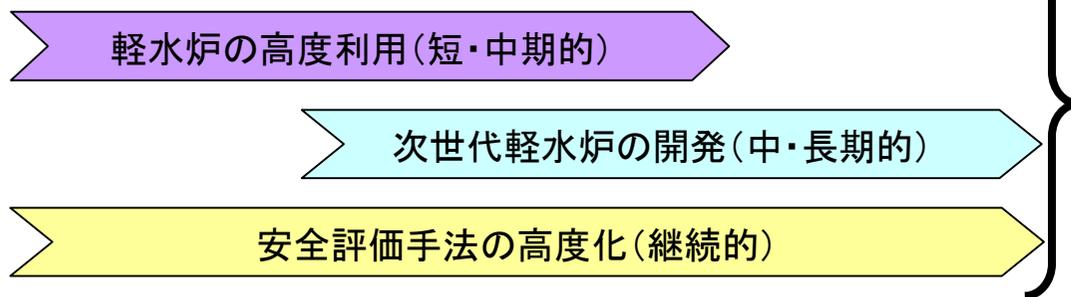
*総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 原子力安全基盤小委員会

**発電炉の安全に関する
研究開発ロードマップ

新たな活動

- 原子力学会「熱水力安全評価基盤技術高度化検討」特別専門委員会の実施
 - 期間: H19年10月~H21年3月 (→ **ほぼ、策定を終了**)
 - 主査: 班目教授(東大)
 - 運営: 産業会(東電、関電、原電、三菱重工#、東芝#、日立GEニュークリア・エナジー#)、JNES#、JAEA#の共同出資 **#幹事**
 - 委員: 産・官・学の専門家(約40名)

産業界の技術導入シナリオ



検討内容

- ◆ 産業界の技術導入シナリオに基づいた課題の同定
- ◆ 課題に係る既存知見の適用限界(技術の到達点)の整理
- ◆ 安全審査や評価解析に新たに必要となる知見や重要度の検討
- ◆ 課題解決に必要な基盤技術の検討
- ◆ 産・官・学の役割やロードマップ活用策の検討



LSTFの新型安全系性能確証等への利用を間接的に明示