

ナトリウム冷却小型高速炉4Sの概念と安全評価

背景

当所では、長寿命炉心とメンテナンスの低減を目指した小型高速炉（4S）を（株）東芝と共同で開発している*¹。電気出力1万kWの4S炉心は、金属燃料を反射体で制御することにより30年の炉心寿命をもち、寿命中、負の反応度係数を保持するという特長を有している。この炉心を用いることで、高い核拡散抵抗性と安全性を併せもつ原子炉概念の成立が期待でき、さらに、外部電源の不要な自然循環を利用した崩壊熱除去系の導入により、送電インフラの十分整備できていない地域や島嶼での電力供給、熱供給、海水淡水化等、地域共生型の原子力多目的利用に貢献できる可能性がある。当所と（株）東芝では、米国原子力規制委員会（NRC）へ4S炉の事前申請を予定しており、設計基準内および設計基準外事象についての安全評価を分担実施している。

目的

崩壊熱除去系に全モード自然循環システムを採用した4S炉概念を構築し、高速炉安全評価の代表的な設計基準内事象に対し安全性判断条件を満たすことを確認するとともに設計基準外事象での安全余裕を確認する。

主な成果

- (1) 炉型は、炉心周囲に必要とされる径方向遮蔽体上部のアニュラス空間に、中間熱交換器（IHX）および2基の電磁ポンプを直列に収め、1次系自然循環力を最大化するよう工夫された細長い形状のタンク型とした（図1）。崩壊熱除去系としては自然循環除熱が可能なRVACS*²とIRACS*³を設置する（図2）。
- (2) （設計基準内事象）外部電源喪失による炉心冷却流量喪失事象（図3）（1次、2次主循環ポンプ停止、自然循環除熱）、反射体上部に設置されたキャビティの破損による反応度挿入事象において、工学的安全係数を加味した評価で判断条件を十分に満足することを、当所が開発・検証したプラント動特性解析コードCERES*⁴により確認した。
- (3) （設計基準外事象）炉心冷却流量喪失事象および外部反応度投入事象においてスクラム失敗を仮定しても、冷却材沸騰に至らず、また被覆管および燃料の破損温度以下で事象が収束することを確認した。
- (4) （極低頻度事象）過去にNRCから評価を要求された残留リスク領域にある極低頻度発生事象を対象に、汎用熱流体解析コードを用いた解析を実施し、以下の結論を得た。
 - ・RVACS性能劣化：RVACSは事故時に炉心冷却を行う重要なシステムであるため、空気出入口流路の機能の部分喪失（スタックの倒壊や流路閉塞などを想定）を仮定した安全評価が求められた。4S炉を対象にして解析を行った結果、このような仮想的な状況においても安全基準を十分満足することが確認された。
 - ・局所閉塞：代表的な閉塞形態である平板状の中心閉塞および片側閉塞（ともに部分流路閉塞）を仮定し、冷却材流路の局所閉塞時の3次元定常熱流動解析を実施した。その結果、局所閉塞発生時にも冷却材は沸騰せず（図4）、急速な燃料破損の拡大による集合体規模での破損は生じないという見通しが得られた。

主担当者 原子力技術研究所 新型炉領域 上席研究員 西 義久

関連報告書 「The concept of the sodium cooled small fast reactor 4S and the analyses of the loss of flow events」 CRIEPI REPORT L06011（2007年3月）
 「ナトリウム冷却小型高速炉4Sの炉心冷却評価 ―スタック機能喪失時のRVACS性能の検討―」 電力中央研究所報告：L05014（2006年3月）
 「ナトリウム冷却小型高速炉4Sにおける局所事故の解析的評価 ―冷却材流路の部分閉塞を対象とした予備評価―」 電力中央研究所報告：L06010（2007年3月）

* 1： Ueda, N., et al, GENES4/ANP2003, Paper1114, Kyoto, JAPAN, 2003.

* 2： Reactor Vessel Auxiliary Cooling System 原子炉容器冷却方式、原子炉容器外面を自然通風により除熱する方式。

* 3： Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System 2次系冷却方式、2次冷却系内の補助熱交換器により除熱を行う方式。

* 4： Nishi, Y., et al, ICONE-14, ICONE14-89386, Miami, Florida, USA, 2006.

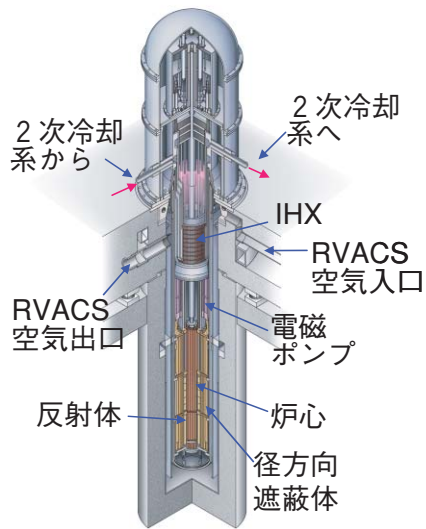


図1 4S炉概念

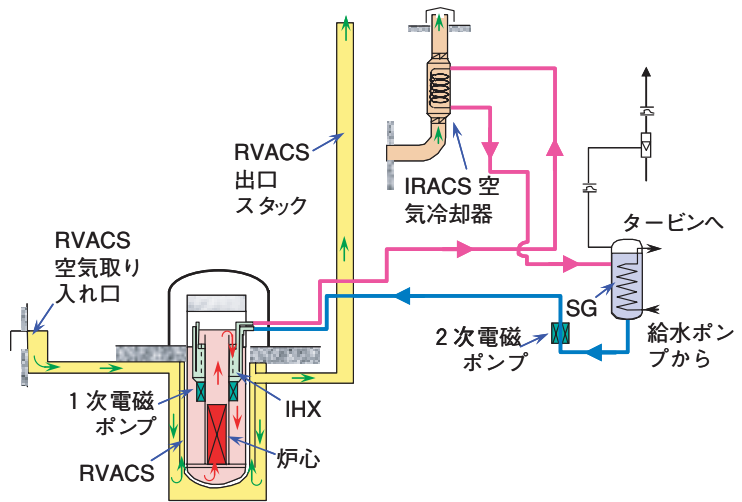
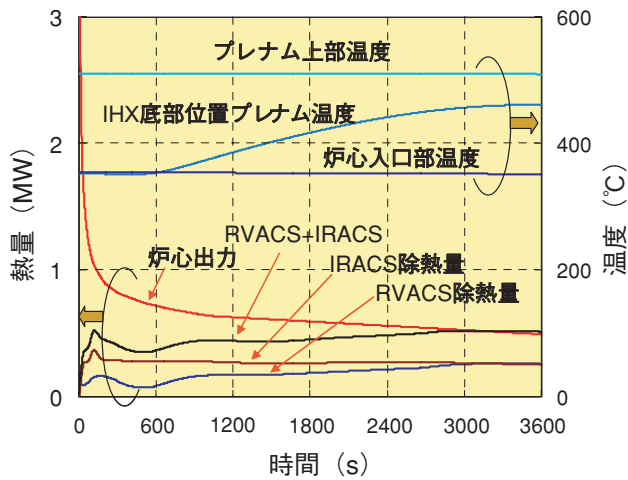
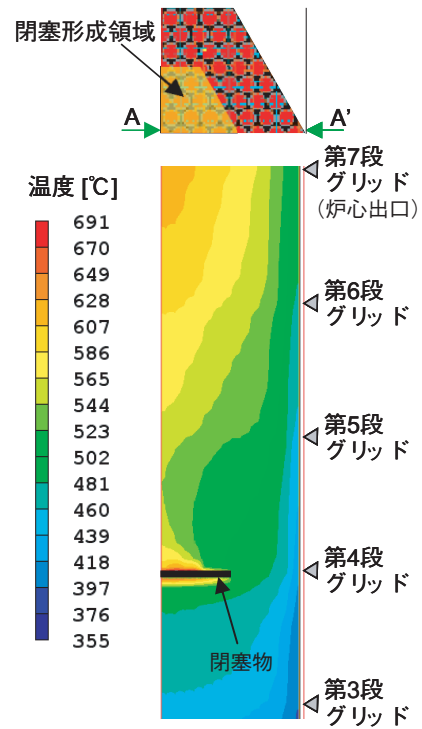


図2 冷却系システム概念



径方向遮蔽体の熱容量が大きく、炉心入口温度はほとんど変化しない。崩壊熱除去系の合計除熱量は、プレナム温度が上昇する以前に、炉心崩壊熱を上回り、その容量は、十分であることが分かる。

図3 外部電源喪失による流量喪失事象



六角形状の燃料集合体の90度対称部分をモデル化。流路閉塞物背後の冷却材が最も高温となるが、冷却材の沸点(約911°C)に比べて十分低く、沸騰は発生しない。

図4 中心平板閉塞時(24%閉塞)の冷却材の温度分布(A-A'断面)