

高温ガス炉の確率論的安全評価手法の開発

(受託者) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(研究代表者) 佐藤博之 高温ガス炉水素・熱利用研究センター

(再委託先) 学校法人五島育英会東京都市大学、国立大学法人東京大学、日揮株式会社

(研究期間) 平成27年度～29年度

1. 研究の背景とねらい

東京電力福島第一原子力発電所事故を受け、実用発電用原子炉では重大事故対策の有効性評価を目的とした重要事故シーケンス導出や自主的安全性向上のため講じた措置の分析に、確率論的リスク評価(PRA)を積極的に活用することが求められている。一方、高温ガス炉はその基本構成要素である、被覆燃料粒子、黒鉛製炉内構造物、ヘリウム冷却材の固有の特性から、炉心溶融が想定されず、溶融燃料による格納系への脅威がないため、異常時の事象進展が軽水炉や高速炉と大きく異なり、「炉心損傷」や「格納容器損傷」を最終状態とする在来の評価体系が適用できない。また、諸外国の高温ガス炉PRAでは静的な構築物、系統及び機器(SSC)の機能喪失を考慮した事故シーケンスの網羅性が不十分であった。そこで、本事業では、高温ガス炉の安全上、設計上の特徴を考慮したPRA手法の開発を目標に、高温ガス炉信頼性データベース、高温ガス炉の地震時における具体的な事故シナリオの検討に資する事故シーケンス評価手法や地震フラジリティ評価手法、建屋及び黒鉛構築物の損傷を考慮したソースターム評価手法を構築することを目的とする。

2. これまでの研究成果

2. 1 事故シーケンス頻度評価手法の開発

(1) HTTR 運転経験の調査・分析

高温ガス炉信頼性データベース構築に資するため、原子力機構大洗研究開発センターにある高温工学試験研究炉(HTTR)の運転経験を活用したPRA用パラメータ推定方法について検討した。具体的には、高温ガス炉特有の環境下や他データベースで取扱わない機器に焦点を当て、HTTR運転保守データを収集するとともに、PRAパラメータ推定に必要な情報を整理した。まず、原子力機構設計の実用高温ガス炉をベースとしたモデルプラントにおいて安全機能を有するSSCであることや高温環境で使用するものや構造が特徴的であること、同種SSCがHTTRにあることを基準に、制御棒系、後備停止系及び中性子検出器を対象SSCとして選定した。次に選定したSSCの機器バウンダリ及び故障モードを分析し、対応するPRA用パラメータやこれの導出に必要な情報を調査した。

(2) 事故シーケンス評価手法の開発

高温ガス炉信頼性データベース構築の一環として、日本原子力学会のPRA実施基準や米国原子力学会(ANS)及び米国機械学会(ASME)発行の非軽水炉用PRA標準を参考に、信頼性データベースが備えるべき基本的な要件をとりまとめた。また、事故シーケンス評価手法の構築に資するため、高温ガス炉の事故進展に適した事故シーケンス分類のあり方を検討するとともに、軽水炉用地震起因炉心損傷頻度評価コードSECOM2の改良を行った。具体的には、米国モジュラー型高温ガス炉PRAの実施例やANS及びASME発行の非軽水炉用PRA標準を調査し、手法上の改善課題についての検討等を行い、事故シーケンス分類のあり方をとりまとめた。また、SECOM2について、同コ

ードが従来有していた応答係数法を用いて炉心損傷事故シーケンス発生頻度を評価する機能に加えて、確率論的応答解析コードとのインタフェースを整備するとともに、事故シーケンスごとにユーザーが与えるソースタームの情報を用いて、事故シーケンス別の頻度-影響分布や放出の時間依存性を考慮した頻度-影響分布などのリスクプロファイルの情報を整理して出力する機能を整備した。この研究は、軽水炉、高速炉、核燃料施設の設計・運転やPRA用データベースに係わる6名の専門家による委員会を組織して助言を受けつつ進めた。

2. 2 影響評価手法の開発

(1) ソースターム評価手法の開発

1) 地震応答解析

地震時におけるSSCの損傷位置や損傷形態の検討、フラジリティ評価に資するため、地震応答解析を目的としたモデルプラントの建屋質点系モデル及び主要機器の3次元有限要素モデルを構築した(図2)。また、検証解析として、構築したモデルに対して固有値解析を実施するとともに既往検討結果との比較を行い、いずれのモデルも既往検討結果との良好な一致を確認した。

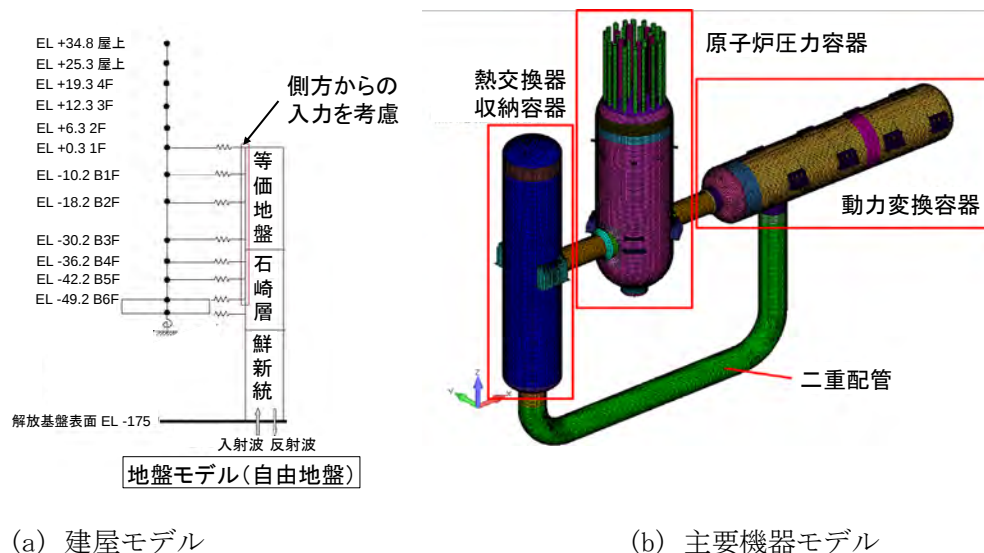


図2 モデルプラントの地震応答解析モデル

2) ソースターム評価手法の開発

初めに、実用高温ガス炉の安全評価結果に基づき、高温ガス炉の通常時及び事故時における燃料から環境中への放射性物質の移行経路を整理した。次に、事故時の環境中への放射性物質の放出過程である「早期放出」及び「時間遅れ放出」を頂上事象に、関連する物理現象やこれに影響を与える因子について展開したマスターロジックダイアグラム(MLD)を作成した。次に、摘出された因子のうち、脆性材料である黒鉛製の構造物損傷がソースターム評価に影響を与えることについて評価モデルを構築した。具体的には、炉心構成要素や固定反射体、制御棒案内ブロックの損傷は結晶粒の最密充填構造を仮定し、これらの熱伝導度は有効媒質理論⁽¹⁾に基づき導出することとした。また、原子炉流動抵抗については、損傷した炉心構成要素や固定反射体を多孔質媒体とみなし、その圧力損失をErgunの式⁽²⁾により評価することとした。

(2) 損傷モードの検討

1) フラジリティ評価手法の構築

地震時のより具体的な事故シナリオの検討に資するため、現実的応答の評価手法を検討した。具体的には、地震ハザード解析により、寄与率の大きい震源を特定し、その震源で地震が発生した場合の地震動を断層モデルによる強震動シミュレーションで求めることで、フラジリティ評価の入力地震動とする方法とした。フラジリティ曲線を求める上で必要となる時刻歴応答解析は、事故への寄与が大きいと考えられる地震動強さを設定した上でその範囲で行い、それらの時刻歴応答解析結果に基づき各 SSC の機能喪失や各部位の損傷の従属性（いわゆる損傷の相関性）をモデル化することとした。

本研究で構築したフラジリティ評価手法による試計算として、高温ガス炉等の建屋モデル等を参考に仮想的な 11 質点モデルを設定し、入力地震動、非線形特性を含む剛性、減衰定数等をランダム変数としてラテン超方格サンプリング (LHS) 法によりサンプリングすることで応答解析を行い、層間変形を指標とし、各層における建屋としての損傷に関するフラジリティ曲線を求めた (図 3)。また、構築した手法に基づくモデルプラント地震フラジリティ評価を行うため、FINAS/STAR をベースにフラジリティ評価を行うための確率論的応答解析コードの雛形の作成を行い、フラジリティ評価の試解析を行った。

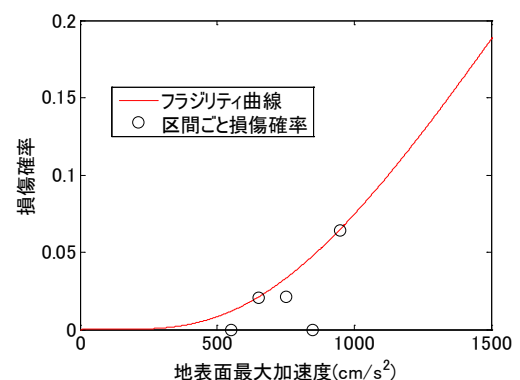


図 3 フラジリティ評価結果例 (第 1 層)

2) フラジリティ評価対象及び損傷モードの設定

初めに、モデルプラントの安全機能を有する SSC を対象に故障モード分析 (FMEA) により、プラント運転状態に影響を与える故障やその原因から成る故障モードやプラント運転状態に与える影響を抽出し、最終的に異常事象に対応する故障モードを有する SSC をフラジリティ評価対象として選定した。次に選定した各 SSC について、異常事象の起因となる故障モードと関連した構成要素を抽出し、フラジリティ評価部位とした。

2. 3 実用高温ガス炉への適用性評価

(1) 事故シーケンス評価

2. 1 章でとりまとめた事故シーケンス分類のあり方に基づき、モデルプラントのイベントツリー (ET) を以下の手順で構築した：①放射性物質閉じ込め機能を有する物理障壁を頂上事象とした MLD により異常事象を抽出、②機器レベルの FMEA により異常事象の要因と成りうる故障モードとその影響を分析、③異常事象と機器故障モードの対応を整理し起因事象を抽出、④事故の進展及び終息に関わる緩和設備の同定、⑤期待する緩和機能の種類により起因事象を類型化 (グループ化)、⑥起因事象グループ毎に ET 法により事故シーケンスを設定。ただし、地震 PRA では、起因となる事象の複数発生を考慮して起因事象を分類する「起因事象モデル」を設定する。起因事象モデルについては、多分岐 ET 法をベースとしつつ、計算負荷低減の観点から、階層

ET 法の適用方法についても検討を行った。多分岐 ET 法による起因事象分類モデルを図 4 に示す。

(2) 影響評価

建屋及び黒鉛構築物の損傷を考慮可能なソースターム評価計算コードシステムを構築した。核熱流動特性評価には、任意に流路や構造体形状を設定可能な RELAP5-3D コードを選定し、モデルプラント二重管破断事故時の炉心への空気侵入挙動評価を行った結果、律束過程である分子拡散と原子炉全体の自然循環流を再現可能であることを確認した。また、燃料酸化挙動評価には、HTTR 安全解析で使用する THYTAN について、一酸化炭素酸化反応モデルを追加するとともに実験結果による検証を行った結果、実験結果を良く再現し、改良コードが妥当であることを確認した。

建屋の大損壊	原子炉冷却材 圧力バウンダリの破損	水冷却器の 伝熱管破損	過渡事象の発生	
なし	なし	なし	なし	放射性物質放出なし
			あり	過渡事象
			なし	水侵入
			あり	水侵入
			なし	水侵入
			あり	水侵入
		小	なし	空気侵入
			あり	空気侵入
			なし	空気侵入 + 水侵入
			あり	空気侵入 + 水侵入
			なし	空気侵入 + 水侵入
			あり	空気侵入 + 水侵入
あり	あり	なし	あり	空気侵入
			なし	空気侵入
			あり	空気侵入 + 水侵入
			なし	空気侵入 + 水侵入
			あり	空気侵入 + 水侵入
			なし	空気侵入 + 水侵入
		小	あり	空気侵入
			なし	空気侵入
			あり	空気侵入 + 水侵入
			なし	空気侵入 + 水侵入
			あり	空気侵入 + 水侵入
			なし	空気侵入 + 水侵入
大	あり	空気侵入		
	なし	空気侵入		
	あり	空気侵入 + 水侵入		
	なし	空気侵入 + 水侵入		
	あり	空気侵入 + 水侵入		
	なし	空気侵入 + 水侵入		
				建屋の大損壊

図 4 モデルプラントの起因事象モデル

(3) 開発手法の適用性評価

全体研究計画の妥当性評価のために専門家委員会を組織して検討を行い、日本原子力学会発行の PRA 実施基準相当の高温ガス炉 PRA 実施ガイド作成を目指した研究を進めることや、伝熱管破損事故時の冷却材中への水侵入量の現実的な評価手法開発の必要性を提言し、研究計画に反映した。

3. 今後の展望

本研究の目的達成のため、HTTR 運転経験を活用した PRA 用パラメータのベイズ更新、3 次有限要素モデル等を用いた地震応答解析による SSC 損傷形態の同定、モデルプラントの公衆被ばくリスク上厳しい代表的な事故シーケンスに係る SSC の脆弱性評価、頻度評価及びソースターム評価、高温ガス炉 PRA 実施ガイド案の作成を行う。

4. 参考文献

- (1) Landauer, R., “The electrical resistance of binary metallic mixtures,” Journal of Apply Physics, 23, p.779-784 (1952).
- (2) Ergun, S., “Fluid flow through packed columns,” Chemical Engineering Process, 48, p. 89-94 (1952).