

論文の内容の要旨

論文題目 スーパー軽水炉の安全性

氏 名 石 渡 祐 樹

原子力発電の競争力強化のためには、高い経済性（特に投資経済性）を有する原子炉システムの研究開発が求められる。最新鋭火力発電の貫流ボイラと同様に超臨界圧水を冷却材に用いる貫流直接サイクルの革新的原子炉概念がスーパー軽水炉である。原子炉系およびタービン系の簡素化、小型化と高い熱効率により、大幅な経済性向上のポテンシャルを有する。

スーパー軽水炉は過去に作られたことのない新しい原子炉概念である。再循環系や二次冷却系が無いこと、炉心流量が小さいこと、相変化が無いこと、高温・高圧であること、等の特徴があり、異常時のふるまいが軽水炉と異なることが予想される。最近の炉心設計で採用している大型の下降流水減速棒も炉心挙動に影響を与えられられる。このような特徴を持つスーパー軽水炉の安全性を解明することが本概念の開発および最適化に必要である。そのためには、スーパー軽水炉に適した安全設計の考え方を構築し、安全系やプラント制御系を設計する必要がある。更に、本概念をモデル化した解析コードを作成し、運転中の異常な過渡変化（以下：過渡）、事故、過渡時スクラム失敗事象 (Anticipated Transients Without Scram: ATWS) の体系的な安全解析を行う必要がある。本研究はこのようなプロセスでスーパー軽水炉の安全上の特徴を示すことを目的とする。

冷却水の循環系である軽水炉の安全設計は、冷却水インベントリの維持を基本原理とし

ている。これに対して貫流型システムのスーパー軽水炉は循環系ではなく冷却水入口／出口が存在するので、冷却水インベントリは本質的に重要ではない。炉心流量の維持が安全確保の基本であり、そのためには入口からの冷却水供給と出口の維持が必要となる。主冷却流量（冷却水供給に対応）と圧力（出口に対応）を基本信号とする安全系の具体的な作動ロジックを作成した。安全系の容量や構成、作動条件は軽水炉を参考にしつつスーパー軽水炉の特徴を考慮して決めた。

スーパー軽水炉に想定される異常事象を軽水炉から抽出し、流量や圧力等の異常タイプごとに代表的な事象を安全解析対象として選定した。貫流型システムで最も重要な全流量喪失を伴う事象については、主冷却系の異常によるものを頻度の低い「事故」、復水系又は主蒸気系の異常によるものを比較的頻度の高い「過渡」に分類し、それぞれ異なる解析シナリオを設定した。

安全解析の判断基準を設定した。過渡基準に求められるのは「炉心の損傷はなく運転に復帰できること」の担保である。スーパー軽水炉の燃料棒設計では、過渡時に燃料被覆管温度が850℃になっても座屈および加圧破損しないように燃料被覆管肉厚が定められている。本研究では安全マージンを考慮して、過渡時の最高被覆管温度が800℃を超えないことを判断基準とした。PCMI (Pellet-Cladding Mechanical Interaction)については、燃料被覆管にかかる応力が材料の0.2%耐力を超えないこと（塑性歪が発生しないこと）を判断基準とした。事故基準に求められるのは「炉心の熔融あるいは著しい損傷の恐れがないこと」の担保である。ステンレス被覆のPWRを参考に、冷却低下型事故については「最高被覆管温度が1260℃を超えないこと」を燃料健全性の判断基準とした。また、反応度事故については軽水炉を参考に「燃料エンタルピーが230cal/gを超えないこと」を判断基準とした。運転圧力が高いこと、圧力変化の相対値が軽水炉より小さいことを考慮して、圧力バウンダリの健全性基準は軽水炉より厳しいものを適用した。具体的には、過渡時／事故時の最高圧力が通常運転時の最高使用圧力のそれぞれ1.05倍／1.1倍を超えないことである。なお、事故よりも頻度が低い設計基準外事象であるATWSについても事故と同じ判断基準を適用した。

安全解析を行うためには解析コードが必要である。本研究では下降流水減速棒モデルを含む1次元ノードジャンクション法のプラント動特性解析コードSPRAT-DOWN(超臨界圧用)および減圧解析コードSPRAT-DOWN-dpを作成した。SPRAT-DOWNについては質量保存計算、エネルギー保存計算、反応度フィードバック計算の妥当性を検証した。SPRAT-DOWN-dpについては、先行研究で開発されたSCRELA-blおよび軽水炉用のREFLA-TRACと減圧速度を比較することで検証した。また、炉心再冠水計算には先行研究で開発されたSCRELA-rfを適用する。このコードで稠密体系軽水炉の強制冠水実験条件を計算し、稠密体系への適用性を示した。

直接サイクルであるスーパー軽水炉は、BWRと同様にプラント制御系の作動を考慮した現実的な安全解析が必要である。よって安全解析に先駆けてプラント制御系の設計を行った。まず外乱に対するプラントの応答をSPRAT-DOWNで解析し、スーパー軽水炉のプラント基本動特性を把握した。特に重要な特性として、大型水減速棒の存在が流量外乱時に密度フィ

ードバックによる出力変化を緩和することが分かった。プラント基本動特性を踏まえて、スーパー軽水炉に適した制御方式を決定した。主蒸気圧力を主蒸気加減弁で（圧力調定率を用いる方式）、主蒸気温度を給水ポンプで（PI制御）、原子炉出力を制御棒で（上限速度を考慮した比例制御）それぞれ制御する方式とし、各制御パラメータを最適化した。BWRを参考に制御系の作動を考慮したプラント安定性解析を行い、外乱時に各制御系が協調して主要パラメータを安定に制御することを示した。

本研究で行われた安全系設計と具体的な作動ロジック設定、プラント制御系設計、事象選定、判断基準設定に基づいて、超臨界圧状態の過渡および事故、冷却材喪失事故 (Loss Of Coolant Accident: LOCA)、更にATWSの体系的な安全解析を行った。それぞれの判断基準が余裕を持って満たされることを示すとともに、スーパー軽水炉の安全上の特徴を考察した。

貫流型システムの主要な特徴の1つは、炉心減圧の位置付けが軽水炉と大きく異なる点である。減圧で炉内に流れが誘起され燃料棒が冷却される。これは大破断LOCAの緩和に重要な役割を果たす。また、ATWSの代替操作として用いると安全マージンの増加につながる。軽水炉と違って、減圧による冷却水インベントリの一時的な低下は安全上問題とならない。もう1つの特徴は、冷却水出口の閉止で炉内に流量停滞が起こり、燃料棒からの伝熱による温度上昇で冷却材密度上昇が抑えられる点である。これは加圧過渡時にBWRと比べて極めてマイルドな出力挙動をもたらす。

また、超臨界圧水冷却であることの主要な特徴が明らかになった。1つは、「水」と「蒸気」の密度差が小さいので、圧力変化に対して炉内の平均水密度変化が小さい点である（超臨界圧水に相変化が無いが、擬臨界温度以上／以下をそれぞれ慣用的に「蒸気」／「水」と呼ぶ）。この効果も加圧過渡時のマイルドな出力挙動に寄与している。もう1つの特徴は、運転圧力が高圧で「蒸気」の密度が大きいので圧力変化の相対値が軽水炉より小さい点である。

燃料集合体内の水体積の7割を占める大型の下降流水減速棒とその上流にある上部ドームの冷却水もスーパー軽水炉の安全性に重要な特徴を与えることが分かった。水減速棒には伝熱によって燃料棒の温度上昇を緩和するヒートシンクの効果があり、更に全流量喪失時には水減速棒内冷却水が膨張し燃料チャンネルに流入することによって炉心流量が一時的に確保される。これは、自然循環が無いという貫流型の弱点を軽減し、動的な流量回復に対する時間的余裕を与える。また、炉心減圧時に上部ドームや水減速棒内の冷却水インベントリが炉心冷却に寄与する。これはPWRの蓄圧注水系に似た効果なので、本研究では“*In-vessel accumulator*”と呼ぶ。この効果でLOCAのブローダウン中に燃料棒が十分冷却され、再冠水の開始温度および最高温度が低減される。

その他にも、スーパー軽水炉の安全上重要な特徴が明らかになった。1つは、過渡時に燃料被覆管が高温になる時間が極めて短い点である。このような短い時間スケールを考慮して過渡時の燃料健全性基準を合理化できる可能性がある。一方、制御棒異常引抜きや給水加熱喪失等の時間スケールが比較的長い過渡事象は、プラント制御系が効果的に緩和す

る。LOCA解析において小破断LOCA時に自動減圧系を作動させないシナリオでは、大破断LOCAより厳しくなる。特に小破断の上限付近の破断割合で炉心流量低下幅が最大になるため被覆管温度が最も厳しくなる。また、炉心再冠水時は炉内で発生した蒸気が自動減圧系配管を通して圧力抑制プールに放出されるが、プール中での放出口の深さ、すなわち水頭損失が再冠水の速度および最高被覆管温度に大きな影響を与えることが分かった。格納容器の設計上注意が必要である。水減速棒による全流量損失緩和やマイルドな加圧過渡といった過渡時の良好な特性と反応度フィードバックによる出力の自己制御性によってスーパー軽水炉のATWSは緩やかであり、代替操作なしでも判断基準を満たす。これは軽水炉やナトリウム冷却炉と比較したスーパー軽水炉の特長である。更にこの特性はガス冷却炉のように出力に制限されない。

このように、スーパー軽水炉のシステムが持つ安全上の特徴が本研究で示された。