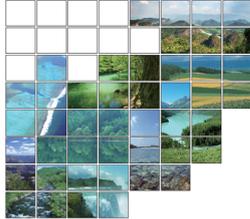


三菱新核設計コードシステム GALAXY/COSMO-S の開発

Development of New MHI Neutronics Design Code System GALAXY/COSMO-S



原子力事業本部 原子力技術センター
炉心技術部 技術開発グループ

三菱重工で自主開発している新核設計コードシステム GALAXY/COSMO-S(GCS)について紹介する。GCS は、国内外の加圧水型軽水炉(PWR)に対する炉心核設計に適用するために開発した計算コードシステムであり、核熱結合手法に基づく安全解析コードシステム SPARKLE2 の一部として運用される。最新知見に基づく炉心解析手法を多数適用することにより、実機 PWR への十分な適用性を確保し、ユーザーに対する利便性やインターフェイス要求に対する適合性を強く志向したソフトウェアとしている。本ソフトウェアについては、ライセンス販売を計画している。

1. GALAXY/COSMO-S の概要

三菱新核設計コードシステム GALAXY/COSMO-S(GALAXY COSMO-S System; GCS)は、国内外の加圧水型軽水炉(PWR)に対する Non-LOCA 安全解析への適用が予定されている次期安全解析コードシステム SPARKLE2 の一部として開発したものである。SPARKLE2 の全容を図1に示す。SPARKLE2 は、炉心解析部分とプラント解析部分からなり、後者はプラント過渡特性計算コード RELAP5 により計算を実行する。炉心解析部分は、3次元炉心動特性計算コード COSMO-K と、3次元熱流動特性計算コード MIDAC からなり、核熱結合手法に基づき、両コードより3次元出力分布、温度分布を算出する。さらに、COSMO-K/MIDAC と RELAP5 の間で炉心/プラント結合計算を実行し、炉心流量、エンタルピ等のパラメータを算出する。

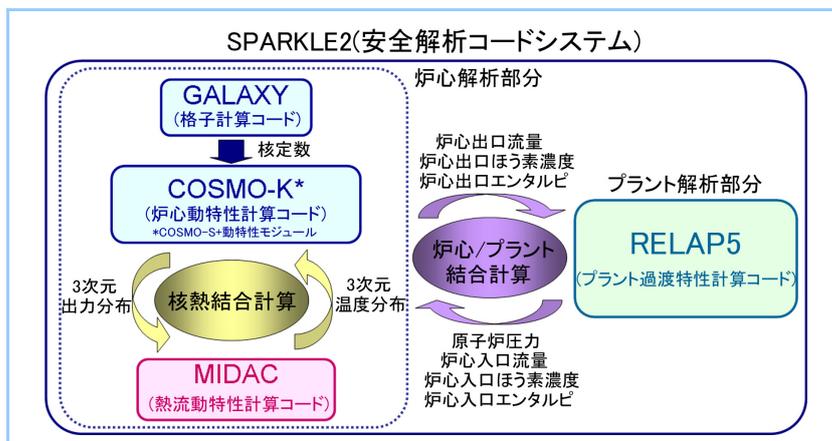


図1 Non-LOCA 安全解析コードシステム SPARKLE2 の全容

GCS は、国内外 PWR/APWR 炉心に対する安全解析及び炉心管理への適用を目的として開発した3次元炉心静特性計算コードシステムである。GALAXY は2次元格子計算コードであり、集合体計算を実行し、燃料集合体平均の核定数を算出する。COSMO-S は3次元炉心計算コードであり、GALAXY で計算した集合体平均の均質核定数を入力として、炉心内の燃料集合体配置を考慮した炉心計算を実行し、臨界ほう素濃度、出力分布等の炉心核特性値を算出する。

COSMO-K は、COSMO-S に安全解析用の動特性計算機能を付加したものであり、静特性計算部分をCOSMO-Sと完全に共有している。GALAXYから算出される核定数は、COSMO-Kに対しても同様に供給される。

GCS は、燃料ペレットから炉心レベルまでの各種インターフェイスに一貫して適用することができるコードシステムである。GCS の全容を図2に示す。GALAXY は COSMO-S/K に対し、炉心解析用の核定数や安全解析用動特性パラメータを供給するほか、燃料健全性評価に必要なペレット内径方向出力分布計算、次世代燃料の概念設計、臨界安全設計等、広範な核特性計算を可能としている。派生コードとして高速増殖炉(FBR)用六角格子計算コード GALAXY-H の開発も進めており、集合体の内部ダクトやラッパー管の構造を厳密に考慮することができる。一方、炉心計算コードについては、共通の静特性計算コード COSMO-S をベースとして、COSMO-K(安全解析)、COSMO-M(炉心監視)、COSMO-SIM(訓練用シミュレータ)をラインナップしている。

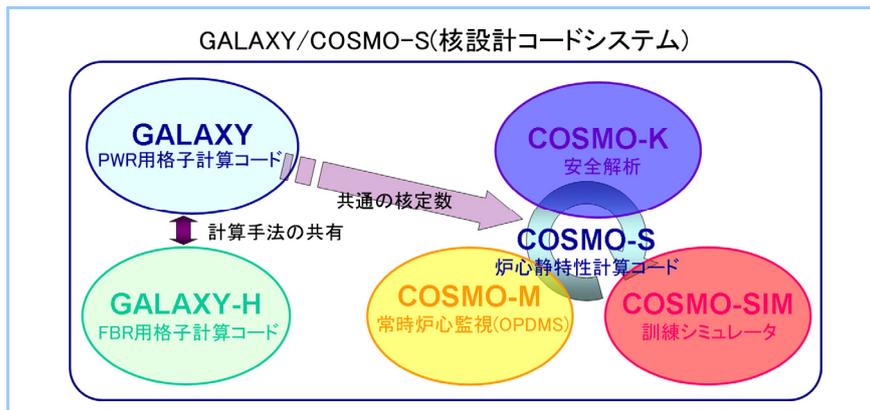


図2 核設計コードシステム GALAXY/COSMO-Sの全容とインターフェイス

GCS の開発にあたっては、コードを複数のモジュールで構成することにより、メンテナンス性の高いソフトウェアとしている。また、本ソフトウェアについては、ライセンス販売を計画していることから、当社の豊富な PWR 炉心管理経験をベースとして、ユーザーが直感的に理解しやすいインターフェイスを構築している。核設計に必要な炉心パラメータの算出にあたっては、自動計算機能を積極的に導入することで、設計効率や利便性の大幅な向上を実現している。自動計算機能は、プログラムソース内部に組み込むのではなく、できる限り“インプットの自動生成と計算実行”の中で対応するよう、インプットとして制御しており、一連の計算の中身や計算条件がブラックボックスとならないようになっている。このため、ユーザーによる計算内容の確認が容易となり、品質保証の観点からも、設計結果の妥当性を明確に確認できる。

GCS の Non-LOCA 安全解析及び炉心核設計への適用を目的として、海外については米国 NRC へのトピカルレポート申請を実施する計画であり、国内については、原子力安全・保安院による“トピカルレポートの技術評価制度”を利用する計画である。GCS を皮切りに、MIDAC, RELAP5 等, SPARKLE2 を構成する全コードについて順次トピカルレポート制度による技術評価を受けることとしており、Non-LOCA 安全解析及び核設計に対し、GCS をスムーズに導入する準備を行っている。また、2章で示すように、開発において当社独自開発の計算手法や最新知見を積極的に適用することで、高い信頼性を以って炉心核特性パラメータを算出することを可能としている。GCS 及び SPARKLE2 の導入により、安全解析における工学的安全余裕を適正化し、原子炉の安全性、経済性を従来以上に両立した設計解析を実施することができる。

2. GALAXY/COSMO-S の計算手法

GCS は炉心内の中性子の挙動を解析するための核設計コードシステムであり、GALAXY による燃料集合体計算と、GALAXY の計算結果を入力とした COSMO-S による炉心計算からなる2段階計算手法を採用している。以下、GALAXY, COSMO-S の計算手法について説明する。

GALAXY は2次元非均質格子計算コードであり、集合体内の非均質構造(ペレット, 被覆管, 減速材)や, 制御棒案内管, 計装案内管等による集合体内の不規則格子配列を正確に考慮した中性子輸送計算を実行し, 中性子束分布を精度よく計算する. 燃料集合体内の中性子束分布計算においては, 任意幾何形状を正確に考慮することができるキャラクタースティックス法を採用し, 当手法に基づき, 微小領域に対しても中性子束計算を安定して実行できる手法(特願2008-307831)を独自開発している. この中性子束分布計算の入力となる多群実効断面積は, 172 群の詳細なエネルギー群構造で作成しており, 核分裂による中性子の発生, 減速, 共鳴吸収, 熱化のプロセスを詳細に取り扱う. ^{238}U 等の共鳴によるドップラー広がり効果を精度よく考慮するため, 実効断面積計算においては, 共鳴吸収の強度がグレーである効果等, 燃料ペレット内の実現象を正確に取り扱う手法(特願2010-201387)を独自開発している. また, 中性子が水素等の軽い原子核に衝突する場合, 中性子が全方向に対して等確率に散乱されない効果を精度よく取り扱うため, 散乱後の中性子の飛行方向分布を開数展開する手法を適用し, ガドリニア入り燃料, MOX燃料, 反射体領域等, 中性子の流れ込みの効果が顕著に現れる体系に対しても, 高い精度で計算を実行することができる. 一方, 燃料の燃焼に伴う核種組成変化を追跡する燃焼計算では, ウラン, プルトニウム等のアクチノイド核種, 及びキセノン, サマリウム等の核分裂生成物核種を含む約 150 核種の崩壊と生成を取り扱う. さらに, 中性子束分布計算における計算速度向上の方策として, 複数の計算機を効率的に活用するための並列計算や, 計算体系の対称性を考慮した計算等を取り入れており, 計算精度と計算速度の両立を図っている.

GALAXY で算出される中性子束分布を重みとして燃料集合体内で平均化した核定数は, COSMO-S による炉心計算の入力となる. 想定される炉心状態全点に対して核定数を算出することはできないため, 品質工学に基づくロバスト性の高い核定数表現手法(特願2010-107585)を独自開発している. 直交表に基づき, 想定される炉心状態を包絡する条件(温度, ほう素濃度, 燃焼度等)を工学的に決定し, 当該条件に対して GALAXY で算出された核定数を, 炉心パラメータの開数として表現している. COSMO-S による炉心計算においては, 炉心パラメータを引数として, 開数表現化された核定数を再構築することにより, 効率的な演算を可能としている.

COSMO-S は3次元炉心計算コードであり, 炉心内の径方向集合体配置及び軸方向の非均質性を考慮した計算を実行する. 炉心内の中性子束分布計算においては, 解析的多項式ノード法を採用し, 燃料集合体の1/4を最小単位とした計算により, 炉心内の出力分布を精度よく取り扱う. 燃料棒単位の詳細な出力分布については, 燃料棒出力再構成法に基づいて評価している. 燃焼計算では, 核種ごとの崩壊生成を詳細に追跡し, アクチノイド核種の消滅, 核分裂生成物核種(FP)の生成, B10減損等を精度よく考慮することができる. 炉心計算を実行することにより, 核設計に必要な炉心内の3次元出力分布, 燃焼に伴う臨界ほう素濃度の変化, 制御棒価値, 温度係数等の核特性パラメータを算出する.

以上のように, GCS の開発にあたっては, 当社独自技術を積極的に開発し, 最新の原子炉物理学の知見及び当社の豊富なPWR炉心管理経験を反映することにより, 現行の計算機性能との親和性が高い詳細な解析を実現している. 本開発で得られた新技術については, 国内外の原子力学会を通じて多数公表している. (2010年実績:8件)

3. GALAXY/COSMO-S による解析

GCSの適用性及び適用範囲について, トピカルレポートにおける多様な解析を通じて実証していく予定である. GALAXY については, 主要な臨界実験解析(TCA- UO_2 , TCA-鉄反射体, B&W, KRITZ, VIP)及び照射後試験解析(UO_2 , MOX, ガドリニア入り UO_2)を実施し, 連続エネルギーモンテカルロ計算コードとの比較検証解析と併せて, 全適用範囲を包絡した実証性を確認している. また, GCS については, 実績のある国内外実機 PWR 炉心解析等により, 核特性パラメータ計算値の妥当性を総合的に検証し, 安全解析への適合性を確認している.