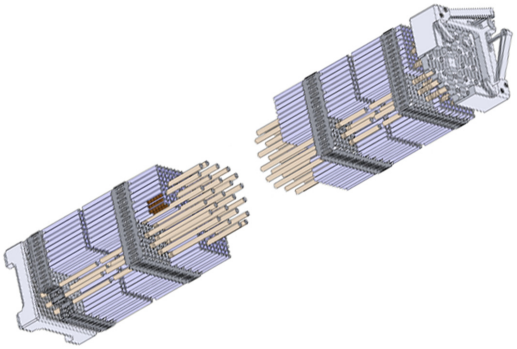
PWR 安全設計のための新限界熱流束予測評価式

New Concept of Critical Heat Flux Correlations
for Safety Analysis of Pressurized Water Reactors



原子力事業本部
炉心技術部 熱水力・炉構造技術課
☎(078)672-5788

原子力発電施設の設計において最も重要な要求事項は安全性の確保であり、東日本大震災に伴う東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故は、我々に改めてこれを再認識させ、継続的な安全性向上に努めることを求めている。当社では，加圧水型軽水炉(Pressurized Water Reactor; PWR)プラントを今後もより安全かつ柔軟に運転できるよう，安全設計評価の精度・信頼性の向上に継続的に取り組んでおり，今般，その要となる限界熱流束予測評価技術について新規開発・実用化を行った.

1. 限界熱流束と予測評価式

PWR 燃料は，焼結された二酸化ウランペレットをジルコニウム合金の被覆管に封入した燃料棒で構成され，被覆管は燃料棒内の核分裂生成物を外部に放出しないための重要なバリアの1つとなっている. 燃料は高圧の冷却材(軽水)により冷却され，沸点に対して十分余裕のある温度で運転されるため，冷却材が失われて炉心が露出するような重大事故に至らない限りは，被覆管が過熱焼損する可能性は少ない. しかしながら冷却材が十分にある状態でも，出力が局所的に著しく高い状態に至ると，急激に発生した気泡が燃料表面に蒸気の膜を作り，被覆管が過熱焼損に至る可能性がある. このような状態を核沸騰からの離脱(Departure from Nucleate Boiling; DNB)と呼び，これを未然に防止することが安全設計上の重要な課題である.

DNB に至る局所的な熱出力を限界熱流束と呼ぶ. 限界熱流束は冷却材の圧力，温度(エンタルピー)，流速といった条件に依存し，また，燃料の構造－特に燃料棒を正方配列に束ねて保持する支持格子の形状・配置－に影響される. このため，安全設計では，実機燃料を精密に模擬した電気加熱試験を行い，限界熱流束を種々の冷却材条件に対して計測する. これをデータベースとして作成した実験相関式(DNB 相関式)を限界熱流束予測評価式として，原子炉の安全余裕評価に使用する.

2. 新相関式開発の背景と特色

当社ではこれまで，異常時における炉心内の流動挙動解析技術及びDNB 相関式の評価精度を向上し，それにより DNB 発生条件に対する余裕を明確化することで，安全性を損なうことなく，高燃焼度化，長サイクル化といった炉心運用の多様化に対応し，燃料経済の向上に資してきた. 一方で，このような評価技術の高度化やさらには燃料の性能向上によって，炉心の運転条件は拡大しており，今後の安全設計評価手法には従来よりも広い範囲への拡張性が要求される.

これらの技術は主に米国で 1970～80 年代に開発されてきた技術がベースとなり，改良されてきたものであるが，当社では，今後の更なる安全評価技術の向上に対応するため，これらを刷新

し，これまで蓄積してきた解析・評価技術，知見に基づいた，より拡張性の高い技術として自主開発を行っている．

(1) 新相関式システムの構成

新相関式は，その適用条件，燃料種別に応じた複数の相関式から構成されるシステムであり，今後も拡張していく計画であるが，現時点では，MG-S(Mitsubishi Generalized Correlation for Standard grid)相関式及び MG-NV(同 for Non-Vane grid)相関式の開発を完了している．

MG-S 相関式は当社製の標準的な燃料設計に対して適用できる相関式である．原子炉には，この相関式を用いて評価された運転可能範囲が定められ，異常時にはこれを超える前に原子炉保護系によって自動停止される．また，そのような安全機能の有効性を確認するための解析(安全解析)にも本相関式が使用される．

MG-NV 相関式は，安全解析で想定する特殊な条件として，一旦停止した原子炉が低圧／低流量状態で再起動してしまう事象の安全性評価に使用するもので，MG-S 相関式が適用できない低圧／低流量条件での使用に特化した相関式である．低圧／低流量条件で PWR 燃料を模擬した試験データは限られていることから，標準燃料に比べて DNB を生じやすい燃料形状(支持格子に冷却材の攪拌機構(ミキシングベーン)を持たない)の試験データに基づくことで、保守的な相関式としている．

これらの相関式は PWR の安全解析で必要な条件範囲をカバーするものであり，また，従来相関式では適用範囲を超えるため非常に保守的な評価によらざるを得なかった低圧／低流量条件に対しても信頼性の高い評価が可能である(図1)．

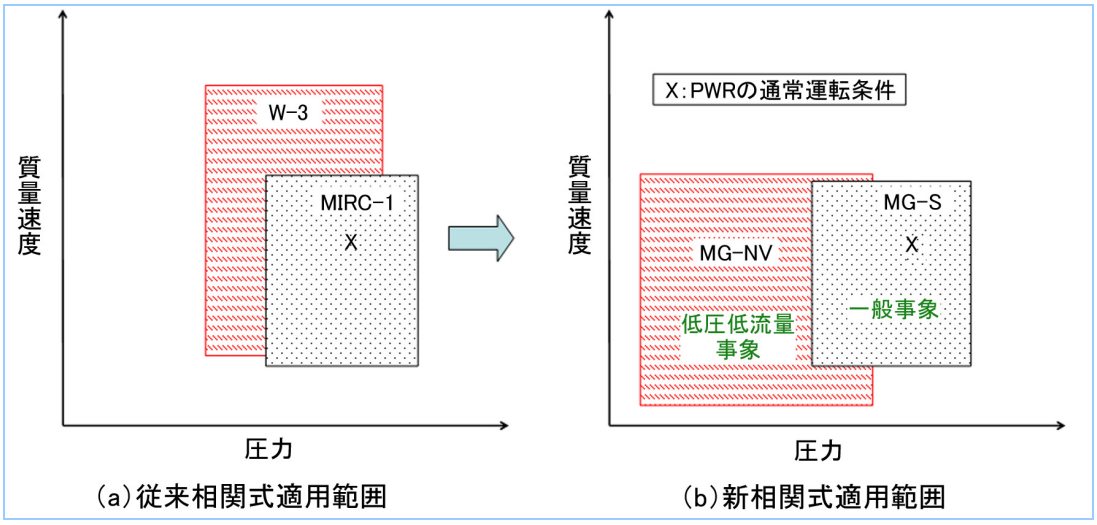


図1 限界熱流束予測相関式の適用範囲

MG-S 相関式の現在の適用範囲は従来相関式 MIRC-1 と同一である．
MG-NV 相関式の適用範囲は従来相関式 W-3 から不要な高圧/高流量域を外して，低圧/低流量域に拡張された．

(2) 新相関式の特性

一般に限界熱流束は冷却材のエンタルピー上昇に伴い低下していく．試験データの分析技術が十分とは言えなかった時代にその緒を持つ従来の多くの相関式は，この特性を熱平衡クオリティ(エンタルピーを無次元表示したもの)の1次関数として与えていた．この仮定により，相関式の適用範囲は狭い熱平衡クオリティ範囲に限定されていた．MG-S/MG-NV 相関式の開発にあたっては，限界熱流束の冷却材条件依存性を詳細に分析し，熱平衡クオリティに対する特性を適切な曲線形で模擬する技術を開発した(図2)．

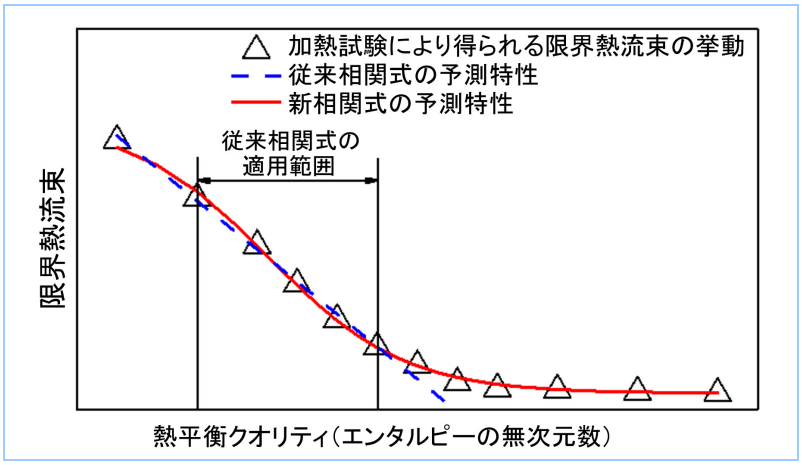


図2 新限界熱流束予測相関式の特徴(イメージ)
従来は狭い熱平衡クオリティ範囲に限定された相関式形を採用していた.
新相関式は高クオリティ条件への拡張を考慮した曲線の相関式形を採用した.

これにより MG-S 相関式は，今後のデータベース範囲拡張に際しても適合が容易となっており，今後の DNB 防止性能向上を目的とした燃料設計改良などにも柔軟に対応できる．このような拡張性を備える一方で，現行データベース範囲に対しては，従来相関式と同等の高い精度(不確定性 17%)も確保した(図3)．また，MG-NV 相関式では，従来相関式が熱平衡クオリティ範囲の制約により適用が難しかった低流量条件へと適用範囲を拡大し，これを含んだ低圧条件における予測精度を大幅に向上(不確定性 30%→19%)した(図4)．このことは安全解析の信頼性向上に大きく貢献するものと期待される．

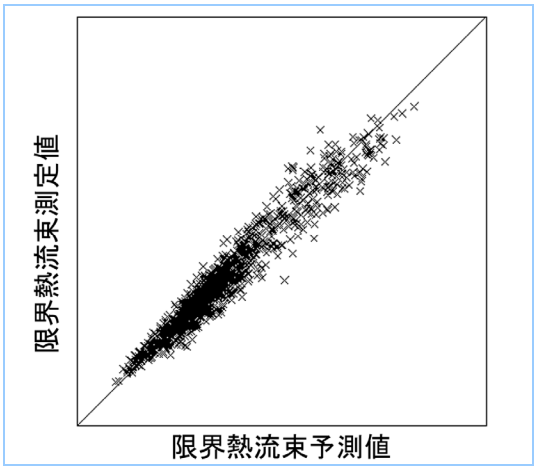


図3 MG-S 相関式の予測結果
MG-S 相関式は試験結果を良く予測している．不確定性幅は従来相関式と同等である．

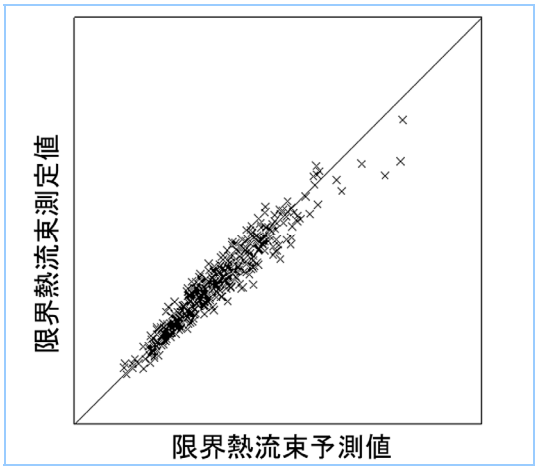


図4 MG-NV 相関式の予測結果
MG-NV 相関式は低圧/低流量条件を含む試験結果を良く予測している．不確定性幅は従来相関式に比べて大幅に低減された．

3. 今後の展開

当社では今後も原子炉の安全性と信頼性の向上のため，安全設計評価手法の精緻化や信頼性の高い燃料の導入のための研究・開発を進めていく．これらに伴い取得される限界熱流束データは新相関式システムのデータベースに反映され，相関式システムを，より適用範囲の広く，信頼性の高いものへと継続的に拡張していく．