

6-1 燃料の破損限界を高い精度で評価する —NSRR実験データの発電炉条件への適用手法の開発—

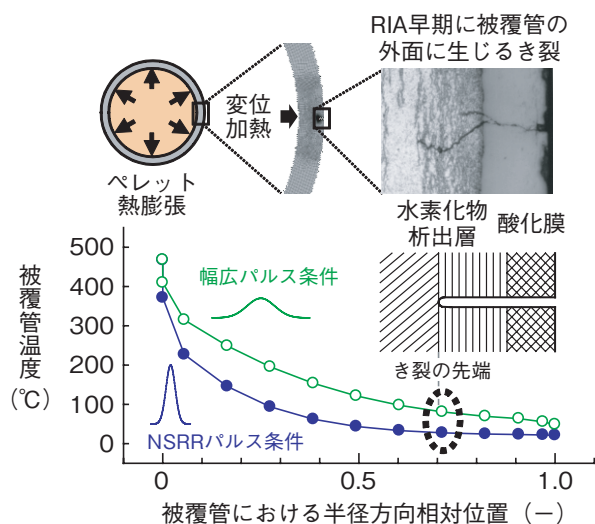


図6-3 燃料過渡挙動解析による被覆管内の温度分布
異なる出力パルス幅に対する被覆管温度分布の例を示します。RIA早期に水素化物析出層までき裂が生じますが、パルス幅が広い場合は、同じ変位に達した時点のき裂先端温度が高くなり、延性が增大するため、結果的にき裂が進展しにくくなると解釈されます。

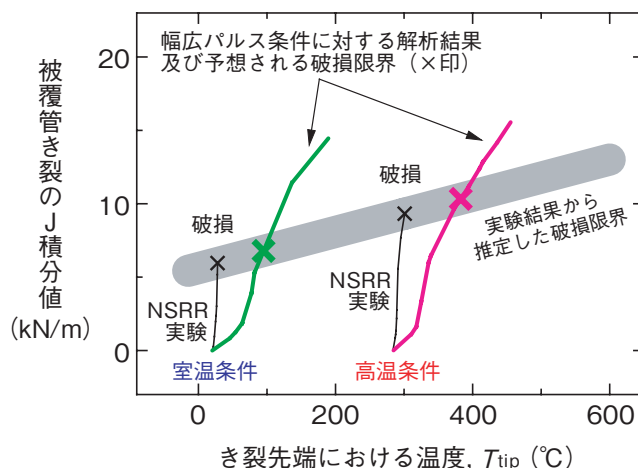


図6-4 出力パルス幅と温度を考慮した燃料破損限界
き裂の力学的状態と先端温度の関係を示します。縦軸は被覆管に作用する負荷の大きさを表し、一つのケースが1本の軌跡に対応します。室温及び高温のNSRR実験結果から、燃料が破損に至る際の負荷を直線で近似し、出力パルス幅が広い場合の破損限界を軌跡との交点として求めました。

原子炉が安全に設計されていることを確認するために想定される事故のひとつが、制御棒が急に抜けた際の出力暴走すなわち反応度事故 (RIA) です。RIAで燃料が破損に至るかどうかを判断するため、我が国では原子炉安全性研究炉 (NSRR) での模擬実験結果に安全余裕を持たせて判断基準 (破損しきい値) が定められています。NSRRは短時間だけ高出力を得るパルス運転でRIAを模擬しますが、発電炉で想定される場合に比べて出力パルスの時間幅が狭く、最大値が高くなります。また、発電炉では高温 (約280 °C) でRIAが起こる場合も想定されますが、NSRR実験の多くは室温で得られたものです。このようにNSRR実験ではパルス波形及び温度の点で発電炉と条件が異なるものの、いずれも厳しい側の結果を与えるため基準に直接適用されてきました。しかし、燃料の限界性能を正しく評価し、安全余裕をより正確に把握するためには、条件の違いが破損限界に及ぼす影響の定量化が重要です。

そこで、燃料破損過程に関する知見や、近年、280 °Cの温度条件で得た破損限界データ (本誌2010年版トピックス6-1) を活用し、NSRRでの破損限界を発電炉条件での値に変換する手法を開発しました。

長期間使用された燃料棒では被覆管外面が酸化し、外周部に水素化物が高密度で析出しています。従来研究では、RIA時のペレット熱膨張で被覆管が押し上げられると水素化物析出層までき裂が生じ、先端の力学的状態が限界に達した場合にき裂が進展して破損に至ることを解明しました。本研究では、燃料過渡挙動解析により被覆管変位や温度分布 (図6-3) を求め、その結果に基づいてき裂先端の力学的状態の時間変化を計算し、さらに、室温及び高温のNSRR実験結果から推定した破損限界 (き裂が進展を開始する条件) を組み合わせました (図6-4)。その結果、出力パルス幅の違いによりき裂先端温度の違い及びそれに伴う延性 (引っ張られたときに伸びる性質) の違いが生じ、結果的にき裂の進展開始条件が影響されるというメカニズムを定量的に扱うことができました。今回開発した手法により、NSRR実験結果を発電炉条件下での値に適切に変換でき、安全余裕を正確に把握した上で合理的な安全基準を定めることが可能になります。

本研究は、原子力規制委員会原子力規制庁 (当時、経済産業省原子力安全・保安院) から受託した「燃料等安全高度化対策事業」の実験データを利用しました。

●参考文献

Sugiyama, T. et al., Influence of Coolant Temperature and Power Pulse Width on Fuel Failure Limit under Reactivity-Initiated Accident Conditions, Proceedings of 2011 Water Reactor Fuel Performance Meeting, Chengdu, China, 2011, T3-022, 6p., in CD-ROM.