

背景

- 福島第一原子力発電所 1~3号機では、様々な燃焼度、コンクリート含有割合(MCCI生成物)、鉄含有割合、ポロシティー等を持つ多様な燃料デブリが生じている可能性がある。
- 燃料デブリ取出しに係る臨界リスク評価を行うためには、臨界状態を含み、この多様さを網羅した臨界特性データを整備・整理する必要がある。

臨界特性の解析

● 目的

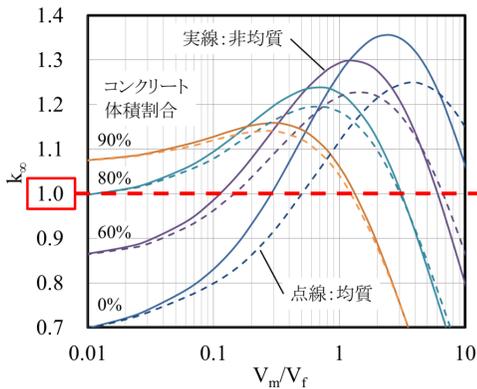
- 多様な性状の燃料デブリの臨界特性(無限増倍率,臨界量等)を解析により取得する。

● 解析パラメータ

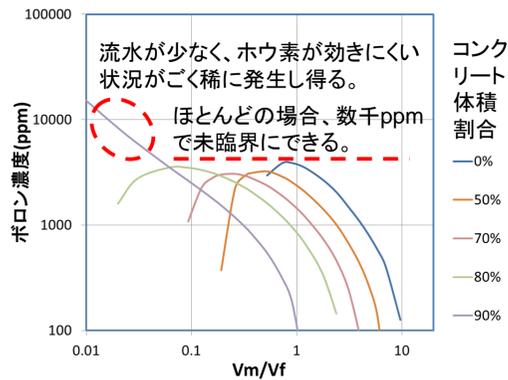
- 燃料タイプ(新燃料/燃焼燃料)
 - ^{235}U 濃縮度: 3%、4%、5%
 - 燃焼度: 5~40 GWd/t (Gdクレジット)
- コンクリート又は鉄の含有率
- V_m/V_f (減速材燃料比)

● 解析結果(例:MCCI生成物 14 GWd/t)

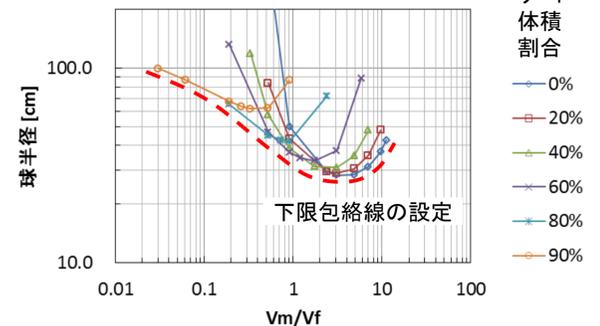
○ 無限増倍率



○ $k_{\infty}=1$ とする冷却水中ホウ素濃度

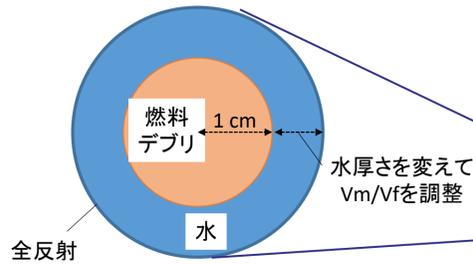


○ 球体系臨界半径(均質体系)



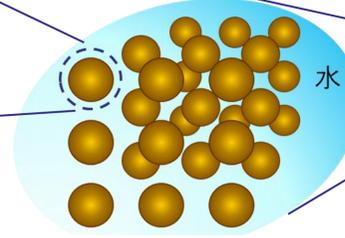
● 解析の流れとモデル(非均質体系)の例

○ 無限増倍率 k_{∞} 計算(MVP)



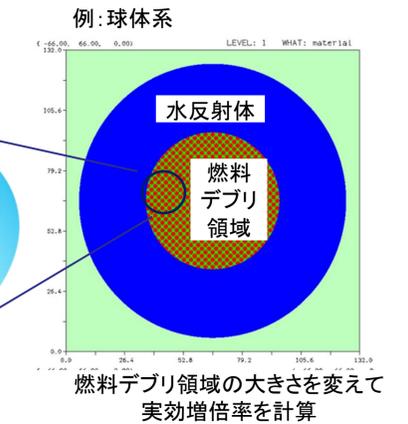
If $k_{\infty} > 1$

燃料デブリ球を水中に配列(面心立方格子配列)



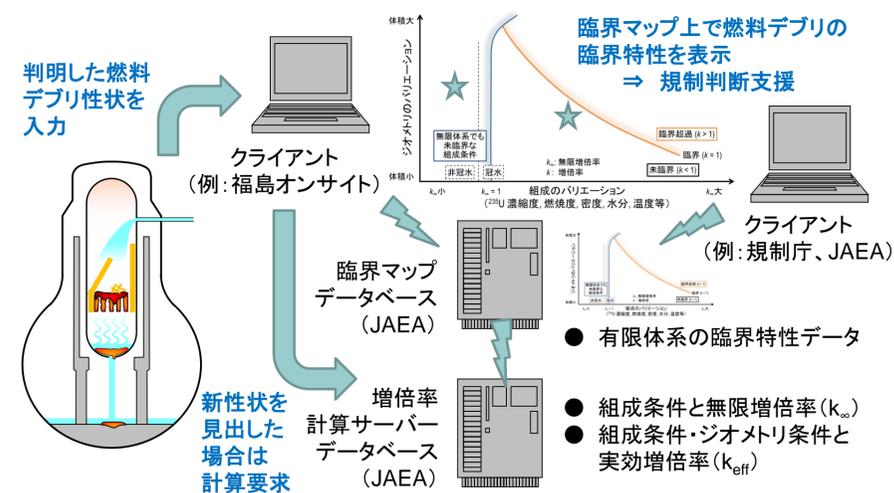
燃料デブリ球間隔を変えて V_m/V_f を調整

○ 臨界量計算(MVP)



解析結果のデータベース化

● コンセプト



● 目的

- 多様な性状の燃料デブリの臨界特性データを効率よく計算・集積・参照可能とし、迅速な臨界安全評価に資する。
- 評価の基礎資料として計算作業のトレーサビリティを確保する。

● 主な機能

- 臨界計算管理
 - デブリ性状の分類と計算インプットのテンプレート(ユーザ操作)
 - パラメータ範囲指定(ユーザ操作)と計算実行(自動)
- 計算結果(増倍率)を臨界特性データとして集積
 - 特定の増倍率(例: $k=1.00$ 、 0.95 等)となるパラメータ値決定(自動)
- 臨界特性データの参照
 - 遠隔地からのネットワーク経由のアクセス

検証

- 臨界近傍において計算精度が十分に高いことが求められる一方、コンクリートや鉄を含有する等、これまでに臨界ベンチマーク実験が行われていない性状モデルを用いることが必要となる。
- 定常臨界実験装置STACYを更新し、燃料デブリを模擬した臨界実験を行い、臨界ベンチマークデータを得る。

結論

- 燃料デブリの臨界リスク評価に資するため、想定される多様な性状を網羅するように、臨界特性計算を進めている。
- 計算の実施、計算結果の集積と参照、及び計算作業のトレーサビリティ確保のため、データベース化する。
- 臨界特性計算手法を検証するため、臨界実験を行うことを計画している。

※本報告は原子力規制庁受託事業「平成26年度東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法整備」の成果の一部である。

参考:

- K. Tonoike, et al., "Criticality Characteristics of MCCI Products Possibly Produced in Reactors of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station," proc. of ICNC 2015, Charlotte, USA (2015).

1. 背景

燃料デブリは、熔融した燃料と格納容器のコンクリートとの反応(MCCI)や、熔融した原子炉構造材（鉄など）との混合、局所的な燃焼度や水分量の偏り等により幅広い性状をもつことが想定される。このような多様な性状は、これまでにその臨界特性が解析・実験の両面において十分に検討されておらず、また大きな不確かさを持っていることから、燃料取出し時等の臨界リスクの定量的な評価、取扱量の決定のためには燃料デブリの多様な性状を網羅する臨界特性データの取得・整備が急務である。そのため、燃料デブリの臨界特性の解析及び解析結果の臨界リスク評価等への効率的な利用のためのデータベースの構築を行うとともに、解析手法検証のための臨界実験を計画している。

2. 臨界特性の解析

これまでに臨界特性が明らかでなかった性状として、MCCI生成物と鉄含有デブリの解析から着手している。燃料デブリの多様な性状を網羅するための解析パラメータとして、新燃料仮定におけるU-235濃縮度、燃焼燃料とした場合の燃焼度、コンクリート及び鉄の含有率、減速材（水）と燃料デブリの体積比 V_m/V_f 、燃料デブリと水の均質性などを考慮している。燃焼燃料組成モデルは、Gdの燃焼効果を考慮しており（Gdクレジット）、BWR/STEP3燃料集合体のOECD/NEA Phase IIICモデルをSWATにより燃焼解析することにより取得した。

MVPコードを用いて解析パラメータを変動させた場合の無限増倍率 k_{∞} を計算し、 $k_{\infty}>1$ 、すなわち臨界となり得るデブリ性状の条件を整理した。解析結果例として14GWd/t燃焼燃料とコンクリートが混合したMCCI生成物の解析結果を示す。基本的にコンクリート体積割合が高いほど相対的に燃料体積が減り無限増倍率は小さくなる。一方で、低 V_m/V_f 領域ではコンクリート体積割合が高いほど無限増倍率が大きくなることが分かった。これはコンクリートがケイ素を主成分とし、中性子吸収が少なく減速効果をもつためである。

$k_{\infty}>1$ となる条件では、可溶性ホウ素による臨界防止を想定し、無限増倍率の計算体系で水中のホウ素濃度をパラメータとした計算をSRACコードにより実施し、未臨界とするために必要なホウ素濃度を算出した。ホウ素濃度の解析結果に示すように、必要なホウ素濃度はほとんどの条件において数千ppm程度である。ただし、低 V_m/V_f 領域においては冷却水が少なくホウ素が効きにくくなるため、未臨界とするためのホウ素濃度が非現実的な濃度となることに注意する必要がある。

また、 $k_{\infty}>1$ となる条件で、燃料デブリと水から成る燃料デブリ領域と水反射体で構成される体系で燃料デブリ領域の大きさをパラメータとして実効増倍率を計算し、臨界となる燃料デブリ量（臨界量）を取得した。臨界量の解析結果に示すように、MCCI生成物の場合、 V_m/V_f によって臨界量が小さくなるコンクリート割合が変化する。そのため、広範なパラメータで臨界量を計算し、燃料デブリの多様な性状を網羅するように下限包絡線を設定することが重要である。

3. 解析結果のデータベース化

解析結果を整理し、容易に臨界安全評価に利用するための臨界特性データベースの構築を進めている。解析結果はJAEA内の臨界マップデータベースに蓄え、ネットワーク経由で遠隔地からのアクセスを可能とする予定である。ユーザーは任意の燃料デブリの組成、減速条件等を入力することにより、増倍率等の臨界特性を取得することができる。臨界特性データは任意のパラメータ依存の形で図示されるだけでなく、特定の増倍率となるパラメータを自動計算し取得することができる。そのため、今後燃料デブリのサンプル分析が得られた場合などには、臨界管理に必要な核的制限値を迅速に得ることができる。また、臨界特性がデータベースに登録されていないデブリ性状が新たに見いだされた場合には、管理者に計算実行を要求することができる。これにより、迅速かつ効率的にデータベースの拡充が図られる。現在、本データベースの概念設計を終え、実装を進めている。実装後はこれまでに解析により取得したデータを基にJAEA内で仮運用を行って不具合の確認を行った後、順次公開とデータの拡充を進める予定である。

4. 検証

コンクリートや鉄を含む燃料デブリの臨界特性は、これまでに臨界実験により計算精度が検証されていない。解析結果を臨界安全評価に利用するためには、臨界ベンチマーク実験を行いその計算精度を検証する必要がある。JAEAでは、コンクリートや鉄を含む炉心や幅広い減速比を可能とする炉心を構成できるように定常臨界実験装置STACYの更新を進めており、平成30年度末の初臨界を予定している。STACY更新炉と模擬燃料デブリ試料により多様な臨界特性のベンチマークデータを取得し、燃料デブリ臨界特性データベースの整備に利用した解析コード、核データを含む解析手法の検証を行う。