

核分裂生成物の移行挙動解析について

森田 能弘* 内藤 正則*

Analysis of Fission Product Transport Behavior

Yoshihiro Morita* and Masanori Naitoh*

原子力プラントのシビアアクシデント時には、放射性の核分裂生成物が炉内から放出される。核分裂生成物の移行挙動解析は、シビアアクシデントの事故事象評価、およびプラントの廃炉作業を安全かつ円滑に推進する上で重要となる。ここでは、解析のために考慮すべき主だった挙動と現在開発中の解析コードの概要を紹介する。

Keywords: シミュレーション、ソフトウェア、FP 移行挙動解析

1. はじめに

核分裂生成物（Fission Product: FP）は原子炉燃料の核反応により生成されるガス状、または微小粒子（エアロゾル）状の物質のことであり、そのほとんどが放射性物質である。原子力プラントのシビアアクシデント時に隔離状態が破られた場合を想定すると、FP はプラント内部に限らず環境を含めた広範囲に拡散することが懸念される。

当社ではシビアアクシデント解析コード ISAAP 開発の一環として FP の移行挙動を解析するソフトウェア FIPRA（Fission Product transport Analysis module）を開発し、ベータ版を完成させた。この記事では、FP 移行の解析にあたり考慮すべき重要な FP の挙動について説明する。

2. FP 移行に関する主な挙動

FP 移行に関する主な挙動の概要を図 1 に表す。実線で囲った枠内は FIPRA ベータ版で考慮している素過程、破線の枠内は今後組込みを予定している素過程を示す。FIPRA は ISAAP のモジュールの 1 つとして設計されており、燃料から放出される FP の核種・放出量および熱水力的挙動は ISAAP の他モジュールの結果を取り込んで使用する。

*アドバンスソフト株式会社 原子力安全工学センター

Nuclear Safety Engineering Center, AdvanceSoft Corporation

FP 移行に関する主な挙動として、まず熱水力的な流体の流れに沿っての移動が挙げられる。これは気相中に存在するガス状 FP、および気相中を浮遊するエアロゾル状 FP において適用できる。また、液相においては溶融した FP および懸濁状態となった不溶性の FP が移動する。

これらの流体の流れに沿う FP の移動は ISAAP 中の流動解析モジュール COTHA と FIPRA を連成させることによって解く。

気液間の移行挙動として、ガス状 FP は溶融、エアロゾル状 FP は液相への沈殿・溶融等を考慮する必要がある。

FP はこれらの挙動の他にも多くの挙動を考慮する必要がある。以降には考慮すべき各挙動について説明する。

2.1. ガス状 FP の挙動

FIPRA で考慮しているガス状 FP の移行挙動として、流動による移行の他に構造物表面への凝縮、再蒸発、化学反応、化学吸着および、エアロゾル状 FP 表面への凝縮がある。

2.1.1 凝縮・蒸発

構造物表面への凝縮は、バルクの気相と比べ構造物近傍の FP 核種の濃度が低い場合、低濃度側に FP が拡散し、構造物表面に FP が衝突することで発生する。濃度差が逆転すれば構造物表面から

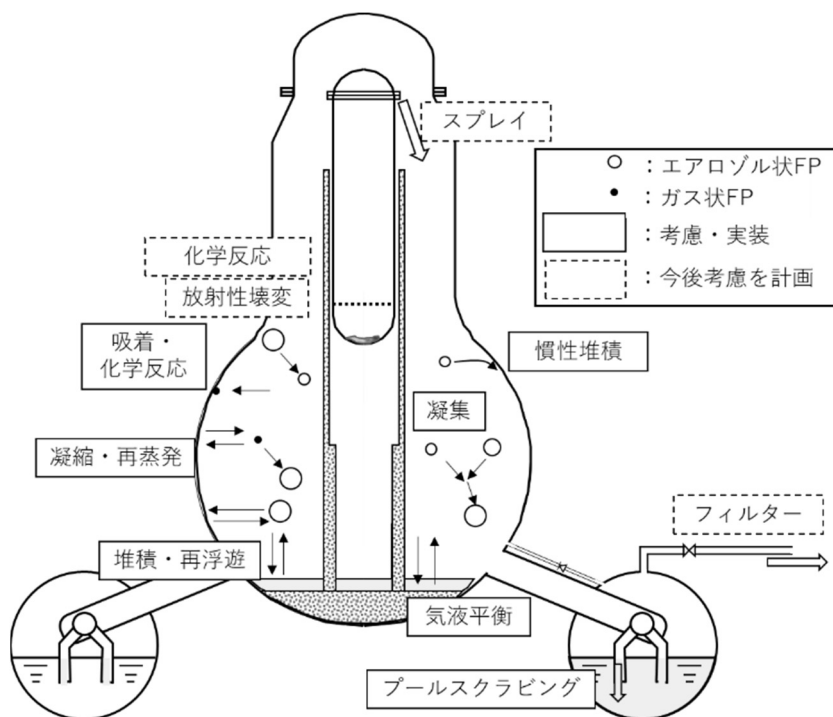


図-1 FP 移行挙動の概要

の再蒸発が発生する。構造物近傍の FP 濃度は構造物の温度に影響されるため、構造物の状態に対する FP 分布の解析に重要となる。

凝縮は構造物以外に、エアロゾル状 FP の表面でも発生し、その結果エアロゾルが成長する。エアロゾルのサイズは移行挙動に影響を与えるため、エアロゾル挙動の解析に重要となる。

2.1.2 化学反応

構造物表面に凝縮した FP の一部は構造物の組成と化学反応を起こし、化学構造を変化させる。この時表面に固着し移行しなくなる挙動が化学吸着である。これらは化学構造による挙動の変化および構造物への FP の固定化など分布解析に影響を与える。

2.2. エアロゾル状 FP の挙動

エアロゾル状 FP の分布を解析する上で重要な挙動として、構造物表面への堆積、堆積したエアロゾルの再浮遊・懸濁、凝集が挙げられる。以下に FIPRA によって考慮されている各挙動を説明する。

2.2.1. 堆積挙動

エアロゾルの堆積はいくつかの現象によって発生する。主なものとして重力沈降、熱泳動堆積、拡散泳動堆積、移流による堆積、流動の慣性による堆積が挙げられる。

(1) 重力沈降

重力沈降による堆積は重力を駆動源とした堆積挙動である。沈降時のエアロゾル周囲の流動はエアロゾルのサイズによって変化するため沈降速度が変化する。

(2) 熱泳動堆積

熱泳動堆積は構造物表面近傍において流体の温度勾配が発生した時、エアロゾルに低温方向への力（熱泳動力）が働き、構造物に衝突すると堆積が発生する。高温系である原子炉においては熱泳動力もまた大きくなるため、堆積挙動の解析には大きな影響を与える。

(3) 拡散泳動堆積

拡散泳動堆積は構造物表面で水蒸気が凝縮した時に発生する圧力勾配により、流体に低圧側へ

の流れが生じることで、エアロゾルが表面に衝突、堆積するものである。シビアアクシデント時に水蒸気が漏出した場合低温の壁面などに対して発生すると考えられる。

(4) 移流堆積

移流堆積は流動によって発生する拡散によって流れ方向に平行な構造物等に堆積が発生する。層流条件ではエアロゾルはブラウン運動の影響を大きく受ける。構造物表面にエアロゾルが堆積すれば濃度勾配が発生し流体中のエアロゾルは表面へと移行し、さらに沈着していく。乱流条件ではエアロゾルは複雑な流れの中で構造物表面方向の力を受けることで慣性によって構造物に衝突し沈着する。これらの挙動は主に配管内での流動で多く発生し FP の分布に影響を与える。

(5) 慣性衝突

慣性衝突は曲げ配管部や配管の急縮部など流動経路の変化によっても生じる。これらは原子炉の形状によるエアロゾルの分布の解析を行うために重要である。

(6) 再浮遊・再懸濁

堆積したエアロゾルは流体によって強い力が与えられると再浮遊、再懸濁する。この挙動によって流動が淀む部分などにエアロゾルの分布が局在化することが考えられるため、解析する上で考慮すべきものとなる。

2.2.2. 凝集挙動

エアロゾル状 FP の移行時にはガス状 FP と異なり流体との間で抗力が発生し移動に影響が発生する。この力はエアロゾルのサイズに依存するため、サイズの評価は移行挙動の解析に重要となる。

サイズが変化する挙動としてガス状 FP の凝縮によるエアロゾルの成長を前述したが、エアロゾル同士の衝突による凝集も考慮する必要がある。凝集はサイズの変化だけでなく粒子の数密度も変化するためエアロゾル状 FP の挙動に重要な影響を及ぼす。

二体の粒子が衝突し、凝集するには相対的な速度の差が必要である。凝集を発生させる主な現象として重力沈降による凝集、ブラウン運動による凝集、乱流場における凝集が挙げられる。

(1) 重力沈降による凝集

重力沈降による凝集は、エアロゾルの重力沈降速度がエアロゾルのサイズに依存しているため、異なるサイズのエアロゾルの間に速度差が発生し衝突、凝集が発生するものである。

(2) ブラウン運動による凝集

ブラウン運動による凝集はブラウン運動により微粒子が不規則な運動を行うことにより粒子間の衝突が発生する現象である。サイズの小さい粒子は移動度が高く衝突の可能性が高まるため凝集の要因として重要性が高まる。

(3) 乱流場による凝集

乱流場による凝集は乱流場において、異なる方向の流体の力を受けた 2 粒子が衝突を起こすケースや、同一の流体の力を受けたサイズの異なる 2 粒子が抗力の違いによる移動速度の差によって衝突を起こすケースなどがある。

3. FP 除去設備による挙動

原子炉には事故時に FP を除去する機能を有する安全設備が備わっている。そのような安全設備として、圧力抑制プール、スプレー、フィルターなどが挙げられる。FIPRA によって現在考慮されている挙動は圧力抑制プール中に FP が流入した際のスクラビング機能であり、本記事ではプールスクラビングについて説明する。

圧力抑制プールは格納容器内の気体をプール内に導き、水蒸気を凝縮させることによって格納容器の過度な圧力上昇を抑える設備であり、水蒸気に同伴した FP がプール水中に捕捉されることにより、発電所外へ放出される FP 量を抑制させる効果がある。気相から液相へ FP が移行する挙動としては、気相の凝縮、液相の蒸発時に追従することによる移行、ガス状 FP の気液平衡による

移行、気泡内でのエアロゾル状 FP の重量沈降、気泡上昇時に発生する流れによる慣性およびブラウン運動による気液界面への衝突、移行が挙げられる。プールスクラビングによる FP 除去挙動は実験から得られたモデルなどが存在するが、気相注入時の気泡の形状や気泡内のエアロゾルの詳細な挙動などは複雑であるため現在も研究が進められている。

4. 今後の予定

FIPRA は現在ベータ版が完成しているが、今後は実験解析等によるコードの妥当性検証を実施する予定である。さらに、検証作業を進めていくことで移行挙動モデルのさらなる改良と、現段階では実装されていない考慮すべき移行挙動モデルの追加等を行い、正式版の完成へと進めていく予定である。

5. まとめ

FP 挙動の解析を行う上で考慮すべき移行挙動、堆積・凝縮挙動、エアロゾル成長挙動を説明した。これらの挙動を考慮し、最適なモデルを実装することで原子力プラントの FP 挙動を詳細に解析するソフトウェアを開発し、ベータ版を完成させた。今後実験解析等による検証を深めるとともに実機解析を通してモデル追加・改良等の整備を進める。

参考文献

- [1] 石川淳、村松健、坂本亨、JAERI-Research 2005-021(2005).
- [2] N. E. Bixler, NUREG/CR-6131 (1998).

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイル（カラー版）がダウンロードできます。（ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。）