

総合講演・報告「原子力将来シナリオの諸量評価技術」研究専門委員会

原子力将来シナリオの諸量評価技術の現状と今後の展開

Current Status and Next Development of Fuel Cycle Analysis Technique for the Future Scenarios

(5) 将来核燃料サイクル技術の諸量評価ベンチマークに向けた留意点

(5) Considerations for Benchmark of Future Nuclear Fuel Cycle Technologies

*中瀬 正彦¹¹東京工業大学

1. 結論

核燃料サイクル技術の諸量評価では、核燃料サイクルに含まれる多様な工程の条件設定が必要である。工程には、フロントエンドとバックエンドがあるが、特にバックエンド技術の設定は与えるパラメータが多く、技術的成立性や、結節性に留意する必要がある。結節性を考慮せずに各工程の数値だけを設定すると、本来成立していないシナリオが成立していることとなり、計算精度もさることながら、諸量評価に用いる技術選定やシナリオ解析結果が非現実的なものになるおそれがある。結節点の妥当性の判断は、高度な専門性と、異分野間の議論による調整が必要となる。更に、諸量評価の目的によっても標準ライブラリの仕様は変わる可能性があり、少なくとも、結節点の設定とともにその前提条件を明示し、ロジックをたどることができるようにすることが品質保証上も重要である。諸量評価においてバックエンド技術のパラメータは極めて多く、その設定には背後の化学、工学的な知見が必要である。また、諸量解析の目的にもよるが、実際には処理量によって用いる装置が変わり、これに伴い性能が変化すること一般的であり、原子力化学工学の知見も重要となる。バックエンドの専門家ではなくても安心してバックエンド条件を設定し、目的に応じた諸量解析が行えるようにすることが肝要であるので、この難しさの中でも、諸量解析上のニーズも考慮した大枠を捉えた前提条件の設定による評価を可能とすることが求められる。

本発表は、研究専門委員会に設置した各工程を検討するサブグループの中で、濃縮、湿式再処理、乾式再処理、処分での議論点を提示し、これから標準ライブラリを設定する方針や留意点の提示を目的としている。

2. 諸量評価における各技術のパラメータ設定における留意点

標準ライブラリの設定においては、当該技術の成立性のみならず上流と下流、全体との整合性、目的に応じた条件設定が必要となる。諸量解析コードに組み込む際は、1.実際の工程を諸量解析コード上で計算する方法、2.固定したパラメータを与える方法 の2通りに大別される。各サブグループで議論した概要を以下にまとめる。諸量どこにどのような因子があるのか、その量的な物の把握と、各工程との結節性が重要である。

2-1. 濃縮

ウラン濃縮に関しては、簡単な2同位体系 (^{235}U および ^{238}U) モデルでは、議論の余地は殆どないが、回収ランの再濃縮など3同位体以上の濃縮を取り扱う場合には、濃縮技術の設定が必要になる。ウラン濃縮に関する技術は、幅広く公開文献をベースに設定することとしたが、濃縮データ(実験、検証)の入手性を考慮して、基本的には経験豊富である日本の技術を中心に検討し、遠心分離を基軸に据える。その他、重要技術であるレーザー濃縮を考慮する。濃縮前後の具体的な組成データをカスケードモデル式で算出し、その結果をライブラリとして設定する方針とした。NMBでは既報文献が充実しているためにガス拡散法に適した数式を搭載しているが、これを遠心分離によるカスケード計算に置き換える作業を実施する必要がある。

2-2. 湿式再処理

再処理工程を詳細に計算する際には、各元素の抽出率(分配比)に対する硝酸濃度依存性や、抽出剤濃度依存性、抽出プロセス概要(抽出装置や運転条件等)が必要であり、国内外に多数の抽出プロセスのシュミレータが

整備されている。基本方針として、濃縮 Gr と同様に現在扱えるデータで議論することとした。再処理対象の燃料は酸化物燃料の UO_2 と MOX、ガス炉からの TRISO 燃料とする。湿式再処理による U、Pu 分離は、PUREX 法を中心にその改良版、抽出剤をリン酸系からモノアミドに置き換えたもの(SELECT プロセスの 1 段階目)等が報告されている。U、Pu の共抽出(単離しない)、Np の随伴有無などについても幅広く標準モデルを検討する。データが充実している UO_2 燃料に比して、MOX は情報が少ない。しかし、これまでの高速炉開発と関連して JAEA の研究としていくつかの文献情報が存在する。ガス炉燃料の再処理についても研究報告がみられ、機械的に粉砕、溶解後に湿式分離で分離可能とされている。大量 TRISO 燃料を溶解させて湿式再処理に供する場合は、化学的見地からは Si 成分の濃度制限が存在する可能性があり、ベンチマーク実施者が独自に分離率を入力できるようにするのが望ましい。標準ライブラルとして、1. 通常の六カ所での PUREX 法、2. 日本の研究所などで開発されてきた改良 PUREX 法、3. モノアミド(TBP の代替)をベースとした再処理 等を設定することとする。再処理後のマイナーアクチノイド分離や FP 元素の分離は後段の処分場面積削減等に効果があり、古くより諸量評価シナリオとして需要が大きい。そこで、U、Pu 分離以外の分離技術についても主要なものを選定し、標準モデルを準備する。ただし、これらは研究開発段階にあるため、ベンチマーク実施者が、オプション選択や独自に分離率を設定できるようにするのが望ましい。現状の NMB コードではプロセスの結節性は考慮せず、数値上分離率を設定することが既にできるようになっている。

更に、再処理プロセスは廃棄物製造ともリンクしている。高レベル廃液は我が国ではホウケイ酸ガラスと選定されているが、ユーザーが任意に設定できるとシナリオ評価の幅が広がる。再処理で発生する廃棄物は、FS、FaCT プロジェクトにおける評価値があり、これをエビデンスとしたリファレンス設定も可能である。

以上を要するに、諸量評価コードへの実装としては、上流燃料組成が変わったとしても、U と Pu の回収率として設定し、そのエビデンスを付す形とする。マイナーアクチノイドやその他の FP 元素の分離率も準備し使用を推奨するが、研究開発中の技術もあるため、ベンチマーク実施者が変更可能なものとする。再処理による廃棄物についても、可能な限り情報を集めるが、ベンチマーク実施者が変更できるものとする。

2-3. 乾式再処理

乾式再処理においても、公開文献ベースでの標準モデルを構築する。電力中央研究所において乾式再処理プロセスの物量評価コードが整備されており、分離以外の工程を含めてモデル化されている。一方、諸量解析コードの中で再処理計算を実施するのは現実的ではなく、湿式再処理と同様に、分離率として設定することとした。燃料としては諸量評価ニーズも想定し、再処理対象の使用済み燃料と製品の燃料の燃料タイプを考え、酸化物(UO_2 、L-MOX)から金属、金属から金属、金属から熔融塩、熔融塩から熔融塩への転換を想定し乾式再処理を検討することとした。これに合わせて、炉心は、軽水炉、金属燃料高速炉、熔融塩炉とした。

フッ化物系熔融塩再処理のプロセスについても文献調査した範囲では技術開発段階が低いと判断されたため、近年世界的に研究開発が加速している塩化物系熔融塩を用いた再処理を主として検討することとした。

既往研究では酸化物から乾式再処理を行い、再度酸化物に転換する検討もなされたことがあるが、乾式再処理からの金属燃料製造が射出成形法で経済的合理性高く実施できることが明らかにされているため諸量解析上のニーズはさほど高くないと判断される。ただし、多様なシナリオを検討できることは重要であるため、検討自体は実施する。なお、乾式再処理は耐放射線性が高く、湿式再処理のように長い冷却期間をとらなくても再処理可能であるなど、再処理側の制限はあまりないとされている。燃料が変わっても、効率はさておき、電解設備は変化しないと考えられる。このように、再処理とその前後をつなぐ条件設定についても結節点の整理と、エビデンスを付与する。一方で酸化物から金属への電解還元工程など、分離以外の工程も検討する必要がある。これらは電力中央研究所の情報をベースとすることとした。乾式再処理やそれに付帯する工程の情報は、電力中央研究所が整備している乾式処理評価コードで示すことが現状可能だが、実装方法については更に議論を実施して決定する。いずれにせよ、再処理側で柔軟に対応が可能な見通しがある。

他にも乾式的なプロセスとして、日立のフッ化物揮発法によるウランの回収方法が研究開発されている。上流の対象炉心は酸化物燃料、製造燃料は MOX が想定されており、最終的にはフッ化物から酸化物に転換し、湿式再処理に結節させることが想定されており、PUREX 法の前段階で用いられる。特に回収ウランの取

り扱い時など重要であり、幅広いシナリオ解析をできるようにするという点でも重要であるため、モデル化とロジック整理を検討する。

乾式再処理からの廃棄物については、ガラス(希土類ガラス、ソーダライト結合ガラス)、鉄リン酸ガラス(アルカリ土類金属や、塩廃棄物と結節)、金属廃棄物等を想定したマテリアルフローが電力中央研究所で既に検討されている。乾式再処理においても多様な廃棄体マトリクスについて検討できるように既報文献を調査する。ただし、各工程のマテリアルフローにおいては精度にばらつきがある点には留意を促す。他にも湿式再処理からの酸化燃料と、乾式再処理からの金属燃料などは保管方法や場所が若干異なる可能性があり、諸量評価コード上は分けて認識できるのが望ましい。

2-4. 処分

処分事業については、選定されたサイトにおけるテラーメイドな処分場となるのが現実的であるため、NUMO等の報告書はリファレンス的な処分場設定であることに留意する必要がある。一方で諸量評価上は処分場面積の評価などのニーズが存在する。このとき、標準モデル設定時のロジックを二つに分けることを検討している。一つは詳細なシナリオを検討する目的、もう一つは新たな技術を導入する際のタイミングや規模感、それに伴うサイクル全体への影響の見積もる目的である。後者では、感度解析的な評価が重要となる。目的に応じて、どこまで詳細に設定するかという点を考えるべきである。基礎研究としての諸文献等詳細を詰めていくことに意義があるが、将来シナリオなどを検討するのであればそれに必要な精度については議論を深めておく必要がある。

これまでに日本で構築されてきた処分概念に照らし合わせれば、基本的にはどのような廃棄物が来ても、受け入れることができると想定される。一方で放射能の埋設濃度限度など既に決定したパラメータなどについては拘束値として設定することは重要である。

また、多数の諸量評価コードでは高レベル廃棄物に焦点が当てられているが、実際は TRU 廃棄物、低レベル廃棄物なども諸量評価上のニーズが大きい。そこで、まだ日本として決まっていない TRU 廃棄物の処分概要についても報告書を参考にロジックを組み、その前提の下で処分概要を設定することには意義がある。その際は既に決定している埋設方法、安全評価、L1 までの学会基準は拘束値として設定することは重要である。

処分後の核種移行、安全評価についてはあくまで仮定の上での評価であり、結果の提示方法は慎重であるべき側面もある。核種移行計算について、廃棄体の浸出特性や長期安定性について報告値を収集し、コードに実装すること自体の技術的困難性は低い(現状でも NMB に試験的に実装されている)。従って、処分 Gr としては、実質的には標準モデル作りにおける必要な情報をまとめることから開始し、解析のニーズなども想定しながら幅広い処分概念を取り入れられるように、可能な範囲で標準モデルを設定するところを目標とする。

3. 結論

将来の核燃料サイクル技術における諸量評価ベンチマークに向け、各専門家からなる濃縮、湿式、乾式、処分の各グループにおいて議論された内容を整理し、標準モデル策定の方針を提示した。バックエンド技術における設定は諸量評価において極めて重要であり、各グループ内での議論を一層密にし、各工程の結節点に関する議論を深める必要があることが確認された。議論を通じ、諸量解析のニーズに基づき、標準モデルを設定する必要性も示された。諸量評価の目的、例えば詳細な物量の解析や、技術導入時のシナリオ評価を行うための感度解析を目的とする場合には、標準モデルのロジックを調整することも必要となる。今後は、サブグループとの緊密な連携を図り、分野の垣根を越えた議論を進めていくことが重要である。このような議論は、核燃料サイクル全体を俯瞰した広い視座を持つ専門家の育成にもつながり極めて有効である。世界の速い動きと比べて我が国では遅れがちな原子力分野におけるイノベーションの促進と意思決定の迅速化に資するものであり、今後の原子力産業の振興、学术界の活性化にもつながるだろう。

*Masahiko Nakase¹

¹Tokyo Tech