

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

(2) 国内外における諸量評価の利用

(2) Domestic and International Activities of Fuel Cycle Analysis

*岡村 知拓¹¹ 東京工業大学

1. 背景

諸量評価とは、原子炉および核燃料サイクルの各プロセスの規模や物量（諸量）を定量化することを指し、長期の原子力発電シナリオの分析や原子力関連施設の整備計画等に活用されている。諸量評価の方法は様々なものの、時間因子の考慮の違いによって大きく Static（静的）と Dynamic（動的）の2種類に分類される。静的な諸量評価は、主に ORIGEN[1]等を用いた単一・平衡炉心の燃焼・崩壊・再処理計算に基づいたシナリオを分析しており、例えば、高燃焼度化やプルサーマル燃料の再処理、核種分離等が高レベル廃棄物や地層処分に与える影響を明らかにするために活用されている[2-4]。また、実際の再処理や地層処分事業においても使用済燃料や放射性廃棄物の組成の分析や施設の設計にも使用されている[5-6]。

一方で、動的な諸量評価は、静的諸量評価における計算スキームに加えて、時間依存や複数の原子力施設の並列稼働、核燃料のリサイクル、それらに基づく同位体組成の変動などを考慮した、より現実に近い核燃料サイクル施設の運転シナリオを定量的に評価ために用いられている。複雑なシナリオを考慮する動的な諸量評価においては、各機関が独自に開発した解析システム（核燃料サイクルシミュレータ）が用いられている。本報告では、国内外で実施されている動的な諸量評価に関する主要な研究および、核燃料サイクルシミュレータ開発についてまとめる。

2. 国内における諸量評価研究

2-1. 国内機関で開発されている核燃料サイクルシミュレータ

国内機関で開発されている4つの核燃料サイクルシミュレータを以下にまとめる。

■ ATLANCYS（東芝 ESS）[7]

ATLANCYS（Advanced TRU Nuclear fuel Cycle Simulator）は、新型炉や新燃料概念を検討するにあたり、その概念が核燃料サイクルに与える影響や貢献を定量的に評価するために開発された。ATRUNCYS では、任意のスペクトルの炉型の燃焼テーブルをユーザが作ることが可能で、様々な核燃料サイクル評価が可能である。解析精度については、ノミナルケースや OECD/NEA Benchmark により検証を行っている。

■ FAMILY-21 [8]

FAMILY-21 は、将来の原子力政策と技術的なリスク管理を目的に開発されている。FAMILY-21 は FAMILY コードシリーズの最新版であり、使いやすさと、核燃料の同位体蘇生の変化を考慮することができる特徴を有している。2003 年以降の日本における原子力政策の議論や原子力機構の FaCT プロジェクト等で大きな役割りを果たし、OECD/NEA Benchmark の報告書[9]に掲載されている日本の代表的なシミュレータである。

■ MISA（MHI）[10]

MISA（Mitsubishi Scenario Analysis）は、燃料サイクルの運用期間全体における物流計算（諸量評価）を高い自由度で実現したシミュレータである。燃料サイクルの主要プロセスを計算対象としており、各プロセスの物質収支について、ORIGEN を用いた原子炉内の燃焼や貯蔵時の崩壊を考慮しつつ、高機能ソルバーも併用することで高度な諸量評価を実現している。

■ NMB4.0（東工大&JAEA）[11]

NMB4.0 (Nuclear Material Balance analysis code version 4.0) は、Fuel Cycle Integrator：核燃料サイクルの全工程のモデル化・定量化を実現し、諸量評価における標準化を目標に掲げた国内唯一公開されているシミュレータである。NMB4.0 は汎用性に優れており、多様な炉型や核燃料サイクルシナリオに対応している。現在のダウンロード者数は 200 名以上となり国内外で最大規模のユーザ数を有している。

2-2. 研究事例

上記の 4 シミュレータを中心に、国内での主要な諸量評価研究事例を表 1 にまとめる。諸量評価研究は、経産省・文科省・原子力委員会・日本原子力学会の委員会などで行われる政策議論時に行われている。また、諸量評価は公募研究における新技術の導入効果の分析にも活用されている。

表 1 日本国内での主要な諸量評価研究事例

シミュレータ	主要な研究
ATLANCYS	◇ 環境負荷低減型軽水炉を使った核燃料サイクル概念の構築，文科省原子力システム公募 2016-2019
FAMILY-21	◇ 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 2001-2005 JAEA-Evaluation 2006-002 ◇ 原子力委員会 新計画策定会議 2004-2005（第 9 回会合資料） ◇ 原子力委員会 分離変換技術検討会 2008-2009（資料第 2-3） ◇ 日本原子力学会 原子力アゴラ 持続的な原子炉・核燃料サイクル検討・提言分科会 2022-2023
MISA	◇ 日本原子力学会「将来世代のための再処理技術」研究専門委員会 2013-2017 ◇ 日本原子力学会 新型炉部会 高速炉戦略ロードマップ検討会 資料集 2019
NMB4.0	◇ 日本原子力学会「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会 2017-2022 ◇ 文部科学省 群分離・核変換技術評価タスクフォース 2021（第 2 回会合資料） ◇ 資源エネルギー庁 原子力小委員会 革新炉ワーキンググループ 2022-2023（第 2 回会合資料）
その他	◇ 日立製作所，FBR の円滑な導入のための柔軟な燃料サイクルに関する研究開発，文科省原子力システム公募 2006-2008

2-3. 研究コミュニティ

国内における諸量評価に関する唯一の研究コミュニティとして Nuclear Material Balance Analysis Community (NuMBAC：ナムバック) がある。このコミュニティは、将来の原子力利用に向けた諸量評価研究の発展を目的に 2023 年に発足した。当コミュニティは NMB4.0 開発チームを中心に運営されており、毎年、研究会や講習会を開催し、諸量評価研究に関する提言も公開している[12]。2024 年 2 月に開催された研究会では、IAEA の NFCSS、東芝 ESS の ATRANCYS、日立 GE の諸量評価などの NMB4.0 以外の研究発表も行われている。



図 1 諸量評価研究研究会 NuMBAC（2024 年 2 月 16 日@東工大）

3. 海外における諸量評価研究

3-1. 海外機関で開発されている核燃料サイクルシミュレータ

海外機関で開発されている主要な核燃料サイクルシミュレータを表 2 に示す。これらのシミュレータに実装されているモデルやデータベースは、それぞれの開発元のニーズに基づいており、その精度検証として OECD NEA で国際的なベンチマークが行われている。そこに参加したシミュレータは FAMILY21、COSI6（現在の COSI7）、TR_EVOL、VISION、DESAE であり、その後に開発されたシミュレータの多くで、この国際ベンチマークの結果を用いた精度検証を行っている。なお、CLASS、CYCLUS、NFCSS は一般公開されているシミュレータである。

表 2 海外機関で開発されている核燃料サイクルシミュレータ

コード名	機関	コード名	機関
ANICCA	SCK・CEN	DYAMOND	ANL
CAFCA	MIT	NFCSSim	Los Alamos
CLASS	CNRS	NFCSS	IAEA
COSI7	CEA	ORION	NNL
CYCLUS	Univ. Winsonsin Madison	SITON	Budapest Univ. of Technology
DANESS	Nuclear21	TR_EVOL	CIEMAT
DESAE	Russian Kurchatov Institute	VISION	INL

3-2. 研究コミュニティ

諸量評価に関連する国際的な研究コミュニティに関して、国際学会と OECD NEA の専門家会議を示す。

■ 国際的な諸量評価研究の国際会議 TWoFCS WORKSHOP

TECHNICAL WORKSHOP ON NUCLEAR FUEL CYCLE SIMULATION（TWoFCS WORKSHOP）は、核燃料サイクルシミュレータの開発者と、ユーザー、利害関係者を結び付けた国際協力の促進を目的に 2015 年以降隔年で開催されている諸量評価に特化した唯一の国際会議である。この国際会議は、主に北米と欧州で諸量評価研究および、核燃料サイクルシミュレータを開発している専門家が参加している。

■ WPFC Expert Group on Advanced Fuel Cycle Scenarios (EGAFCS)

WPFC Expert Group on Advanced Fuel Cycle Scenarios (EGAFCS)は、OECD NEA に設置されている諸量評価および、核燃料サイクルシミュレーション開発の専門家委員会である。EGAFCS は、先進的核燃料サイクル技術の情報を収集・整理・理解し、その技術的なサポートを行うことと、加盟国における先進的燃料サイクルの実施に関連する特定の国家ニーズを評価するための枠組みを提供することを目的としている。主なこれまでの活動としては、特定テーマの解析、核燃料サイクルシミュレータのベンチマーク、解析技術開発、情報収集 等である。日本からは、FAMILY-21 と NMB4.0 の開発グループが参加している。

4. まとめ

諸量評価研究は、原子力政策の議論や新規技術の導入効果の分析に活用され、国内外の研究コミュニティでは核燃料サイクルシミュレータ開発が盛んに行われている。国内外には様々なニーズに対応する核燃料サイクルシミュレータが 30 件以上存在し、国際会議や国際機関での専門家会議も開催されている。

参考文献

[1] Transmittal memo of CCC-371/17, 2002 [2] *J. Nucl. Sci. Technol.***58**(10), 2021 [3] *J. Nucl. Sci. Technol.***46**(7), 2009 [4] *J. Nucl. Sci. Technol.***55**(10), 2018 [5] NUMO-TR-20-03, 2021 [6] JNC TN1400 99-020, 1999 [7] S. Wada et al., Proceedings of PHYSOR 2018, 2018. [8] 大滝 他, 日本原子力学会 2010 年秋の大会, 2010 [9] NEA/NSC/WPFC/DOC(2012)16, 2012 [10] 日本原子力学会和文論文誌 **10**(4), 2011 [11] *EPJ Nucl. Sci. Technol.* **7**(19), 2021 [12] <https://nmb-code.jp/workshop2024-report>

* Tomohiro Okamura¹ ¹TokyoTech