

評価の詳細

研究開発課題名（研究機関名）：
炉心損傷評価技術（レベル2 PSA）の開発

(独立行政法人日本原子力研究開発機構)

研究開発の実施者

機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構 代表者氏名：中井良大
 機関名：三菱 FBR システムズ株式会社 代表者氏名：小山和也
 機関名：国立大学法人九州大学 代表者氏名：守田幸路

研究期間及び予算額：平成18年度～平成21年度（4年計画） 464,541千円

研究開発予算

平成 18 年度	43,825 千円
平成 19 年度	202,930 千円
平成 20 年度	113,210 千円
平成 21 年度	104,575 千円

項目	内容
1. 目的・目標	<p>本研究開発では、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）の既得成果に本研究で得られる成果を加えることにより、実用化戦略調査研究フェーズⅡのナトリウム冷却炉設計概念を対象とするレベル2 PSA（確率論的安全評価）で考慮すべき事象の全スペクトルに対応した評価手法を整備することを目標とする。そのために解決すべき項目は、(1)炉心損傷時における核分裂連鎖反応停止後の炉心物質再配置に関する評価手法の開発、(2)ナトリウム冷却炉の特徴を踏まえた格納容器内事象に関する評価手法の開発、及び(3)炉心損傷事象の全スペクトルについて事象推移を支配する現象の抽出と当該現象に関するデータ収集によるレベル2 PSA のための技術的根拠の整備である。</p> <p>(1)に対しては、炉心物質が崩壊熱による低出力条件で長時間にわたり再配置する過程全般の事象推移を評価するために MUTRAN コードを開発するとともに、再配置の過程で再臨界の可能性が生じた場合など出力変化を伴う事象を評価するために SIMMER-LT コードを開発することによって解決を図る。(2)については、ナトリウム冷却高速炉の格納容器内事象解析コード CONTAIN/LMR の解析モデルのうちデブリ・コンクリート相互作用に関連するモデルを実験データの取得を通してナトリウムが存在する体系にも適用できるように整備する。(3)では(1)及び(2)の成果も踏まえて実用ナトリウム冷却炉のレベル2 PSA に必要な事故過程での支配現象の抽出を行い、事象進展確率の定量化に必要な実験的・解析的知見等の技術的根拠を、外部有識者のレビューを受けつつ整備する。</p> <p>本研究開発ではナトリウム冷却炉への適用実績を有する上記既存コードの機能拡張を軸としているが、この分野において十分な経験を有するトップレベルの研究者からなる研究体制を敷くとともに、研究者全員が参加する全体会議を定期的で開催することによって研究業務の効率化を図る。ま</p>

	<p>た、本研究開発で得られる技術は世界で初めての高速炉に関するレベル2 PSA標準の技術基盤を提供するものとなるが、客観性を高めつつ研究成果をより優れたものとするために外部有識者による技術的レビューの結果を反映させながら研究業務を推進する。</p>
<p>2. 研究成果</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 成果 ・ 副次的な成果 ・ 論文、特許等 	<p>【研究開発項目(1) 炉心物質再配置に関する評価手法の開発】 [得られた成果]</p> <p>炉心損傷時における核分裂連鎖反応停止後の炉心物質再配置過程を対象とし、熔融・凝固を伴う伝熱流動を考慮して損傷炉心物質の移行挙動を評価する手法を開発した。このため、同過程の全般的な事象推移を評価するMUTRANコードの開発と検証を実施するとともに、再臨界の可能性が生じた場合の事象推移を評価するSIMMER-LTの開発と検証を実施した。</p> <p>①MUTRANの開発と検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 炉心物質再配置過程の特徴（崩壊熱による低出力条件、及び長時間にわたる緩慢な物質移行挙動等）を踏まえて、MUTRANに求められる機能とそのモデル化の方針を検討した ・ MUTRANのパイロットモデルをベースとして、全炉心規模の解析に必要なモデル（燃料ピン等の形状模擬、相間の運動量・熱交換、炉心残留物質のリフラックス冷却等）を導入し、制御棒案内管の破損に伴う流出挙動を解析可能にした ・ GEYSER試験、EAGLE試験等の試験解析の実施、及び既存の解析コードとの比較を通して、導入したモデルの妥当性を検証した <p>これらにより、MUTRANは損傷炉心における発熱と除熱のバランスを適切に考慮しながら、数時間～数10時間に及ぶ一連の損傷炉心物質の再配置挙動を全炉心規模で評価できるレベルに到達した。</p> <p>②SIMMER-LTの開発と検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ SIMMER-III（遷移過程における数秒オーダーの炉心挙動と臨界性を評価するコード）をベースとして、コード並列化、タイムステップ制御法の改良、及び熱・物質移行モデルの簡略化を実施し、再配置過程の長期的挙動が現実的な計算時間で解析できるよう計算速度の高速化を達成した ・ EAGLE試験等の試験解析、既存コードとの比較を通してモデルの妥当性を検証した <p>これらにより、SIMMER-LTは損傷炉心の反応度変化を考慮しながら、一連の損傷炉心物質の再配置挙動を現実的な計算時間で評価できるレベルに到達した。</p> <p>以上、①及び②を踏まえて、MUTRANによる全炉心規模の解析体系を用いて炉心残留燃料の再配置挙動の解析を実施し、この結果をSIMMER-LTに接続して炉心の再臨界挙動が解析できることを確認した。これにより、従来は系統的な評価手法そのものが確立されていなかった炉心物質再配置過程について、MUTRANとSIMMER-LTを適切に併用することにより再臨界の可能性を伴う長期的な物質挙動が系統的に評価できるようになった。</p>

【研究開発項目(2) 格納容器内事象に関する評価手法の開発】

[得られた成果]

損傷炉心物質によって原子炉容器が熔融貫通した場合を想定し、ナトリウム冷却高速炉に特有の現象を考慮して格納容器内で生じる一連の事象を評価する手法を開発した。このため、格納容器内事象の解析コード CONTAIN/LMR において、軽水炉用に開発されたデブリ・コンクリート相互作用モデル CORCON 及びデブリからのエアロゾル・放射性物質放出モデル VANESA に関連する改良と検証を実施した。また、モデルの改良と検証に必要な試験データを取得するために、各種要素試験（不揮発性核分裂生成物放出試験、構成成分反応試験、及び小規模試験）を実施した。

①格納容器応答過程評価手法の開発・検証

- ・ 下記②で実施した不揮発性核分裂生成物放出試験の結果に基づき、CONTAIN/LMR の入力用データベースを整備した
- ・ 下記②で実施した構成成分反応試験の結果を踏まえて、ナトリウムに関連する化学反応モデルを CORCON 及び VANESA 等に新たに追加した
- ・ 下記②で実施した小規模試験の試験解析を実施し、ナトリウムプール温度及び水素発生量が定量的に評価できるようになったことを確認した

これらにより、CONTAIN/LMR を使用してナトリウム冷却高速炉における格納容器内事象を評価する上で重要な水素挙動が適切に評価できるレベルに到達した。

②事象評価モデルの開発・検証用試験

- ・ 不揮発性核分裂生成物放出試験を実施することによって、ナトリウムプール燃焼面における水素消費挙動ならびに不揮発性核分裂生成物の放出挙動に関する基礎データを取得した
- ・ 構成成分反応試験を実施することによって、ナトリウム・デブリ・コンクリート環境におけるコンクリート主成分とナトリウムまたは水酸化ナトリウムとの反応性を解明した
- ・ 小規模試験を実施することによって、ナトリウム・コンクリート反応に対するデブリ熱量（試験ではナトリウム中に設置した加熱ヒータで模擬）とコンクリート種類の影響を把握した

これらの各要素試験から得られた知見を①における CONTAIN/LMR のモデル改良とモデル検証に適切に反映させた。

以上、①及び②により、CONTAIN/LMRをナトリウム冷却高速炉に適用するための新たな化学反応モデル等が追加・検証された。これにより、ナトリウム冷却高速炉の原子炉容器が熔融貫通した場合に格納容器内で発生する一連の事象推移について、連続的に評価する手法が開発・整備された。

【研究開発項目(3) レベル2 PSA のための技術的根拠の整備】

[得られた成果]

ナトリウム冷却炉のレベル2 PSA において炉心損傷時の事象推移を定量的に評価する基盤を構築するため、ナトリウム冷却高速炉のレベル2 PSA で対象とする全事象に対して事象推移を判断するための技術的根拠を整備

した。対象としたのは、炉停止失敗事象（起因過程、遷移過程、PAMR/PAHR過程）と除熱源喪失事象から成る原子炉容器内事象、及び炉心損傷の影響が原子炉容器の外へ拡大した場合を扱う格納容器内事象である。

①支配現象の抽出及びデータベースの整備

- ・ レベル2 PSA で対象とする全事象に対して、解析コードによる感度解析を実施し、解析結果を分析することによって事象進展を支配する主要現象を抽出した
- ・ 抽出した支配現象とそれらを構成する因子について関連知見（既往の関連試験データ及び解析評価結果等）を収集・整理し、事象進展を判断するための技術的根拠としてデータベース化した

これらにより、ナトリウム冷却高速炉におけるレベル2 PSA の現象論的イベントツリーを構築・定量化するための技術的な基盤を整備した。

②外部有識者によるレビュー

- ・ 支配現象の抽出及びデータベースの整備の妥当性について、軽水炉または高速炉のレベル2 PSA/シビアアクシデント研究分野の専門家によるレビューを実施した
- ・ 開発した評価手法及び整備した技術的根拠について、ナトリウム冷却高速炉に関するレベル2 PSA への適用性をレビューした

これらのレビュー結果を①の支配現象の抽出及びデータベースの整備に反映させ、炉心損傷時の事象推移を評価する際の判断根拠の客観性を向上させた。また、収集・整理した個々の関連試験データや解析評価結果がイベントツリーの分岐項目と明確に対応付けられているとのレビュー結果を得た。

以上①及び②により、本研究で整備した技術的根拠はレベル2 PSA におけるイベントツリーを定量化できるだけの知見が集約されており、実用化戦略調査研究フェーズⅡの大型ナトリウム冷却炉への適用性を有していると判断した。

なお、感度解析によって支配現象を抽出するプロセスにおいては、起因過程で即発臨界に至らない炉心設計条件も併せて明確になり、また、再臨界回避方策としての内部ダクト付き燃料集合体の有効性も確認できた。これらは当初の想定を上回る成果であり、FaCTプロジェクトで採用される革新技術の妥当性を評価する上で、重要な判断材料として活用することが可能である。

【事業全体】を通して

4カ年に渡る業務項目を実施し、採択時において計画立案した目標を予定通り達成した。なお、本事業で対象とした評価技術の開発・整備プロセスにおいては、制御棒案内管を通した燃料流出挙動、及び炉容器下部における流出燃料の微粒化/堆積挙動を今後さらに検討することが事象進展評価の不確かさを低減するために重要であることが判明した。また、これらの挙動を究明するための方策も、併せて明確にすることができた。これらは当初の想定を上回る成果であり、FaCTプロジェクトにおいて今後の課題を策定し、研究開発計画を具体化する上で、重要な検討対象になると考えら

れる。

【論文、特許等】

- ・丹羽他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(1) 概要とスコープ,” 日本原子力学会「2007 年秋の大会」H46 (2007).
- ・早川他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(2) 炉心物質再配置に関する評価手法の開発,” 日本原子力学会「2007 年秋の大会」H47 (2007).
- ・清野他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(3) 格納容器内事象に関する評価手法の開発,” 日本原子力学会「2007 年秋の大会」H48 (2007).
- ・大野他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(4) 格納容器内事象の支配因子を抽出するための感度解析,” 日本原子力学会「2007 年秋の大会」H49 (2007).
- ・原子力機構, “高速増殖炉の安全評価技術に関する研究－開発研究の成果の活用－,” 原子力安全委員会原子力安全研究専門部会原子力施設等安全研究分科会, 第 13 回会合資料 (2007).
- ・中井, “炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発,” 原子力システム研究開発事業成果報告会資料集 (2008).
- ・中井他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(5) 平成 19 年度の研究開発の進捗,” 日本原子力学会「2008 年秋の大会」N12 (2008).
- ・佐藤他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(6) 炉停止失敗事象起因過程の支配因子の抽出,” 日本原子力学会「2008 年秋の大会」N13 (2008).
- ・飛田他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(7) 炉停止失敗事象遷移過程の支配因子の抽出,” 日本原子力学会「2008 年秋の大会」N14 (2008).
- ・山田他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(8) 炉心物質再配置・事故後冷却過程の支配因子の抽出,” 日本原子力学会「2008 年秋の大会」N15 (2008).
- ・大野他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(9) 格納容器内事象の支配因子の抽出,” 日本原子力学会「2008 年秋の大会」N16 (2008).
- ・清野他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(10) 格納容器内事象評価モデルの開発・検証用要素試験－水素再結合試験－,” 日本原子力学会「2008 年秋の大会」N17 (2008).
- ・中井, “炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発,” 原子力システム研究開発事業成果報告会資料集 (2009).
- ・R. Nakai, et al., “Development of Severe Accident Evaluation Technology (Level 2 PSA) for Sodium-cooled Fast Reactors (1) Overview of Evaluation Methodology Development,” Proc. ICAPP’ 09, May 12, Tokyo (2009).
- ・I. Sato, et al., “Development of Severe Accident Evaluation Technology (Level 2 PSA) for Sodium-cooled Fast Reactors (2) Identification of Dominant Factors in the Initiating Phase of

	<p>Unprotected Events,” Proc. ICAPP’ 09, May 12, Tokyo (2009).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Y. Tobita, et al., “Development of Severe Accident Evaluation Technology (Level 2 PSA) for Sodium-cooled Fast Reactors (3) Identification of Dominant Factors in the Transition Phase of Unprotected Events,” Proc. ICAPP’ 09, May 12, Tokyo (2009). • K. Koyama, et al., “Development of Severe Accident Evaluation Technology (Level 2 PSA) for Sodium-cooled Fast Reactors (4) Identification of Dominant Factors in Core Material Relocation and Heat Removal Phases,” Proc. ICAPP’ 09, May 12, Tokyo (2009). • S. Ohno, et al., “Development of Severe Accident Evaluation Technology (Level 2 PSA) for Sodium-cooled Fast Reactors (5) Identification of Dominant Factors in Ex-vessel Accident Sequences,” Proc. ICAPP’ 09, May 12, Tokyo (2009). • 清野他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(11)格納容器内事象に関する評価手法の開発ーデブリ-コンクリート相互作用関連モデルの改良ー,” 日本原子力学会「2009年秋の大会」E50 (2009). • 中井, “炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発,” 原子力システム研究開発事業成果報告会資料集 (2010). • 原子力機構, “高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT) ーフェーズ I 中間取りまとめー,” JAEA-Evaluation-2009-003 (2010). • 中井他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(12)研究開発の総括,” 日本原子力学会「2010年春の年会」F13 (2010). • 清野他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(13)格納容器内事象に関する評価手法の開発ーナトリウム-コンクリート反応関連モデルの整備ー,” 日本原子力学会「2010年春の年会」F14 (2010). • 飛田他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(14)炉停止失敗事象起因過程のための技術的根拠の整備,” 日本原子力学会「2010年春の年会」F15 (2010). • 山野他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(15)炉停止失敗事象遷移過程のための技術的根拠の整備,” 日本原子力学会「2010年春の年会」F16 (2010). • 小山他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(16)炉心物質再配置事象のための技術的根拠の整備,” 日本原子力学会「2010年春の年会」F17 (2010). • 大野他, “高速炉の炉心損傷評価技術 (レベル 2PSA) の開発(17)格納容器内事象のための技術的根拠の整備,” 日本原子力学会「2010年春の年会」F18 (2010). • R. Nakai, et al., “Development of Level 2 PSA Methodology for Sodium-Cooled Fast Reactors (1) Overview of Evaluation Technology Development,” Proc. NUTHOS-8 (in submission), Oct. 10-14, Shanghai (2010). • I. Sato, et al., “Development of Level 2 PSA Methodology for Sodium-Cooled Fast Reactors (2) Development of Technical Basis in the Initiating Phase of Unprotected Events,” Proc. NUTHOS-8 (in submission), Oct. 10-14, Shanghai (2010). • H. Yamano, et al., “Development of Level 2 PSA Methodology for
--	--

	<p>Sodium-Cooled Fast Reactors (3) Development of Technical Basis in the Transition Phase of Unprotected Events,” Proc. NUTHOS-8 (in submission), Oct. 10-14, Shanghai (2010).</p> <ul style="list-style-type: none"> • K. Koyama, et al., “Development of Level 2 PSA Methodology for Sodium-Cooled Fast Reactors (4) Development of Technical Basis in the Material-Relocation and Decay-Heat Removal Phases of Unprotected Events,” Proc. NUTHOS-8 (in submission), Oct. 10-14, Shanghai (2010). • Y. Tobita, et al., “Development of Level 2 PSA Methodology for Sodium-Cooled Fast Reactors (5) Development of Technical Basis for the Protected Loss of Heat Removal Source,” Proc. NUTHOS-8 (in submission), Oct. 10-14, Shanghai (2010). • S. Ohno, et al., “Development of Level 2 PSA Methodology for Sodium-Cooled Fast Reactors (6) Development of Technical Basis in Ex-vessel Accident Sequences,” Proc. NUTHOS-8 (in submission), Oct. 10-14, Shanghai (2010).
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> • 研究開発の成果 • 技術の卓越性 • 成果の発展性 	<p>【研究開発の成果】</p> <p>ナトリウム冷却炉に特有な事象について、定量的な評価を行うための解析ツールを整備し、試験によって解析ツールを検証している。本コードを用いることにより、ナトリウム冷却炉のレベル2 PSAで考慮すべき事象が評価可能になった。</p> <p>【技術の卓越性】</p> <p>SIMMER-LTの開発において、モデルの簡略化によって長時間現象を扱えるような改良に成功している。相応の高い技術を適用して所期の成果が得られたと評価できる。</p> <p>【成果の発展性】</p> <p>試験検証を経た解析コードによる評価で内部ダクト等の設計対策が確認できたことは、実用化に向けた研究開発上の成果として重要である。</p> <p>開発したコードは、当初想定したレベル2 PSAへの適用に加えて、今後検証解析を充実させて信頼性を上げることにより、再臨界性、小型化等、ナトリウム冷却高速炉の高度設計概念の成立性の確認にも役立てることができるので、発展性がある成果だと評価できる。</p>
<p>4. その他</p>	<p>レベル2 PSAのための技術的根拠の整備に際しては、外部有識者による技術的なレビューを行い、その時のコメントを適切に反映し、着実な研究開発を実施して、良い成果が得られている。</p>