

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02669

研究課題名(和文) 社会に受け入れられる事故復旧性スーパー高速炉概念の研究

研究課題名(英文) Development of Super Fast Reactor for Post Severe Accident Management

研究代表者

山路 哲史(Yamaji, Akifumi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00571704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,800,000円

研究成果の概要(和文)：簡素でコンパクトな貫流直接サイクルを採用する超臨界圧軽水冷却スーパー高速炉の炉心設計、過酷事故解析、溶融物挙動解析等から、過酷事故時には全炉心がメルトダウンし、RPV底部に移行することを前提に、RPV内部に燃料デブリを留め、その再臨界を回避して安定冷却を達成する、新しい事故復旧性小型スーパー高速炉の概念を創出した。過酷事故時の投入反応度を低減した炉心設計概念を検討し、主要な炉心設計パラメータと炉心核特性・熱特性の関係を概略明らかにした。また、スーパー高速炉のIVRの実施により格納容器ベントを不要とできる可能性やMPS法によるクラストモデリングの新たな課題とその解決策を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子炉の社会的受容性を改善するには「炉心損傷確率や放射性物質の放出確率の低減、過酷事故の実質的な回避(practically eliminate)や発電所周辺住民の避難を不要とする設計(evacuation free)の考え方に基づく、原子炉の事故耐性の向上だけでは不十分であることに着目し、新たな考え方として設計段階から過酷事故終息後を見据えた研究に取り組み、事故終息時の炉内状況を概念的に設計に盛り込むことができる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Post severe accident management concept of supercritical water-cooled fast reactor (Super FR) has been developed with multi-physics modeling, covering the core neutronics, thermal-hydraulics, the plant safety analyses and the molten core material behavior analyses. It was anticipated that due to the low boiling point of water under atmospheric pressure, the entire core would melt down and relocate to the bottom of the Reactor Pressure Vessel (RPV). A new concept to avoid re-criticality has been developed through core design and criticality evaluation of the fuel debris. Comprehensive relationships between the core design parameters, the core performance and the debris re-criticality has been clarified. New research issues of MPS method for crust modeling has also been identified with a possible solution.

研究分野：原子炉の炉心設計、プラント安全解析、過酷事故

キーワード：超臨界圧軽水冷却炉 スーパー高速炉 原子炉過酷事故解析 In-Vessel Retention 炉心設計 MELCOR コード MPS法 マルチフィジックス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

本研究の開始当初の原子力安全研究及び日本のみならず世界の社会動向等からは、「炉心損傷確率や放射性物質の放出確率の低減、過酷事故の実質的な回避 (practically eliminate) や発電所周辺住民の避難を不要とする設計 (evacuation free) の考え方に基づく、原子炉の事故耐性の向上では原子力発電技術の社会の受容性はほとんど改善していない」ということが明らかになりつつあった。従来の究極安全の追求のみでは絶対安全を求める社会とのギャップを永遠に埋められない可能性があった。そこで本研究では、他の工学システムと同様に、原子炉も万一の炉心損傷事故は不可避の前提で、社会が受容できる復旧のあり方も含めた技術的な提言が必要であると考えた。

原子炉冷却材に水の臨界点 (374 °C, 22.1MPa) を超えて水と蒸気の区別がなくなる高温高压の超臨界水を用いる超臨界圧軽水冷却炉 (SCWR) は水と蒸気を分離するための機器やシステム系統の分離が不要で、炉心で発生する“蒸気”の全量をそのまま貫流でタービンに送ることができるため簡素なプラントが設計できる。同一のプラントシステムで熱中性子炉と高速炉が設計可能であるが、中性子の減速材が不要な高速炉の炉心は最も簡素でコンパクトになる。本研究では、事故終息後に燃料デブリを内包する原子炉压力容器 (RPV) をそのまま原子炉建屋から撤去できる「事故復旧性小型スーパー高速炉」の概念を示すことができれば原子力発電技術に対する社会のパラダイムシフトをもたらせる可能性があると考えた。しかし、そのような炉概念を創出するには全炉心がメルトダウンし、炉心物質の全量が RPV 底部に移行することを前提に再臨界を回避して燃料デブリを安定冷却する必要がある、以下の 2 つの課題が同時に顕在化すると考えた：

- 全ての水冷却炉に共通な課題：水は常圧で沸点が低いため原子炉压力容器 (RPV) から冷却材が完全に失われ、全炉心がメルトダウンすることを前提にした設計が必要。
- 全ての高速炉に共通な課題：高速炉の炉心は最大反応度体系にないため、炉心メルトダウン時の再臨界回避設計が必要

スーパー高速炉の事故復旧性向上には炉心と RPV の小型化が必須だが、電力自由化に適合する高い熱出力と発電効率も求められる。スーパー高速炉は単相流冷却炉であるため、主蒸気の高温度による熱効率の向上が可能である。しかし、炉心を小型化すると中性子漏洩率が増すため、出力分布の平坦化が困難になり、出力ピーキングが増大する。その結果、冷却材流量配分と出力分布のミスマッチが拡大し、主蒸気温度が低下し、プラント熱効率が低下する。主蒸気温度が 500 °C (SCWR の世界標準設計目標) を達成できれば、近年研究されている 500 °C 程度の温度領域の工業的な熱利用の研究とも連携する可能性が開ける。一方、炉心の小型化は出力運転中に臨界を維持するために必要な Pu 富化度の増大をもたらすため、過酷事故時にメルトダウンした燃料デブリの再臨界性が増大する。以上から、スーパー高速炉の炉心は大型炉並みの高主蒸気温度と小型化を両立し、過酷事故時の再臨界を回避してデブリを安定冷却できるかを学術的な問いとした。

2. 研究の目的

上述の問に対する回答案として「デブリ分散型 In-Vessel Retention (IVR)」概念を考案した。過酷事故時には通常の IVR と同様に格納容器サプレッションプール水を RPV 周囲のペDESTAL 領域に注水し、RPV を外側から冷却する。さらに、RPV 内底部に耐熱材を敷設し、RPV 外側からの燃料デブリの安定冷却が達成されるまでの間、再臨界に至るようなデブリの密集を防止する。デブリの安定冷却が達成されれば、耐熱材の溶融浸食 (アブレーション) はデブリの過渡的な移行時に限定されるため、適切な形状の耐熱材を敷設すれば再臨界を回避できることをねらった。上記のような設計概念を示すことを本研究の目的とし、以下の課題に取り組んだ：

- 課題 1：大型炉心と同等の高主蒸気温度を達成する小型スーパー高速炉の炉心設計
- 課題 2：小型スーパー高速炉の過酷事故時のプラント挙動解明 (プラント過酷事故解析)
- 課題 3：粒子法の一つである MPS 法によるデブリ分散型 IVR 概念の検証

3. 研究の方法

【実施項目 1：スーパー高速炉の小型炉心設計】

日本原子力研究開発機構 (JAEA) の中性子拡散近似法と反応断面積内挿法に基づく汎用核計算コード SRAC2006 と研究室で独自に開発した質量・エネルギー保存則に基づく超臨界水伝熱流動計算コード (SPROD) を結合した核熱結合三次元炉心燃焼計算により、大型炉心と同等の主蒸気温度 (~500 °C) を達成する小型炉心概念を構築した。そのために、燃料集合体を小型化し、集合体毎の入口オリフィスの圧力損失に基づく冷却材流量配分により、主蒸気温度の高温度化を図った。但し、燃料集合体は現行 BWR 程度以上の現実的なサイズの範囲とした。また、一般に小型炉 (電気出力 300MWe 以下) に求められる主要な特性 (反応度フィードバックによる固有の安全

性、自然循環冷却による崩壊熱除去を可能とする低圧損特性、24 ヶ月程度以上の長期運転サイクル)を参考とした。

【実施項目 2：プラント過酷事故解析】

米国 ISS 社のプラント過渡・事故挙動解析コード ASYST コードと、米国原子力規制委員会 (NRC) の原子炉過酷事故解析コード MELCOR を用いたスーパー高速炉の過酷事故解析により、全電源喪失事故等の典型的な事故シナリオに対するプラント挙動を解明し、炉心部から RPV 下部プレナムへ移行するデブリの熱状態を評価した。超臨界圧時のプラント挙動解析には研究者らが ISS 社と改良した ASYST コードを用い、主要な設計基準事象に対する挙動を明らかにした。亜臨界圧に減圧した後のプラント挙動は米国 NRC の MELCOR-2.2 で解析した。

【実施項目 3：デブリ移行溶融挙動解析】

粒子法の一つである Moving Particle Semi-implicit 法 (MPS 法) の改良と解析により、デブリ分散型 IVR 概念の有効性を示すため、MPS 法による解析の課題である計算コストを低減した。具体的には、固体伝熱モード支配のフェーズでは解析タイムステップを流体の自然対流モード支配のフェーズに用いるその 100 倍~1,000 倍に変更できるようにアルゴリズムを改良した。溶融物凝固フェーズでは、MPS 法の主要な解析コスト源である粘性・圧力計算を凝固したデブリについてスキップした。

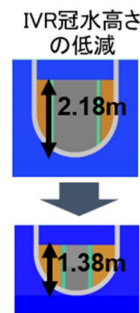
4. 研究成果

【実施項目 1: スーパー高速炉の小型炉心設計】

核熱結合三次元炉心燃焼計算とモンテカルロ法に基づく臨界計算により、過酷事故時の炉容器内終息 (IVR) とデブリ再臨界の回避の両立が可能な炉心設計概念を構築した。当初想定したように、運転サイクル長を伸ばすために炉心の余剰反応度を大きくすると、メルトダウン時の再臨界回避に必要な耐熱材を大きくしなくてはならず、その定量的な関係を明らかにできた。

- ・ デブリ反応度低減のために平均Pu富加度の低減が必要
- ・ 余剰反応度低減→サイクル長短縮
- ・ 炉心臨界性向上→入口温度向上

	参照炉心[1]	提案炉心
熱出力[MW]	650	650
炉心有効長 [m]	2.00	1.80 低減
サイクル長 [日]	720	360
平均Pu富加度 [wt.%]	18.8	15.9
平均取出燃焼度 [GWd/t]	84.8	48.4 向上
冷却材温度入口/出口 [°C]	280/502	370/526



デブリ成層化の影響

提案炉心に対して再臨界を回避するdisperserを求めた

→必要なdisperser大

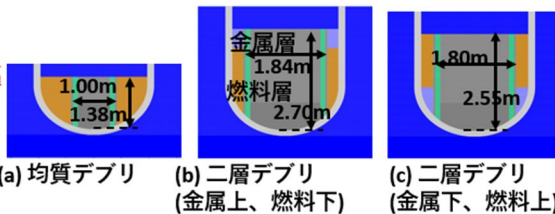


図1：炉心設計仕様とデブリ再臨界の回避設計の定量的な関係

【実施項目 2：プラント過酷事故解析】

設計基準を超えた冷却材喪失事故 (BDDBA-LOCA) 解析を行い、プラント挙動を明らかにした。米国 ISS 社のプラント過渡・事故挙動解析コード ASYST により得られた超臨界圧運転条件のプラント状態を初期条件とし、米国原子力規制委員会 (NRC) の原子炉過酷事故解析コード MELCOR を用いたスーパー高速炉の冷却材喪失事故 (LOCA) 解析を当初の計画通り、設計基準事故を超えた冷却材喪失事故 (BDDBA-LOCA) にまで拡張できた。スーパー高速炉の IVR のためには定格炉心熱出力 (密度) を従来設計値から低減する必要があることを示した。また、IVR 成立時に PCV 加圧破損防止の課題を検討するには D/W スプレイの考慮が必要であることを示した。

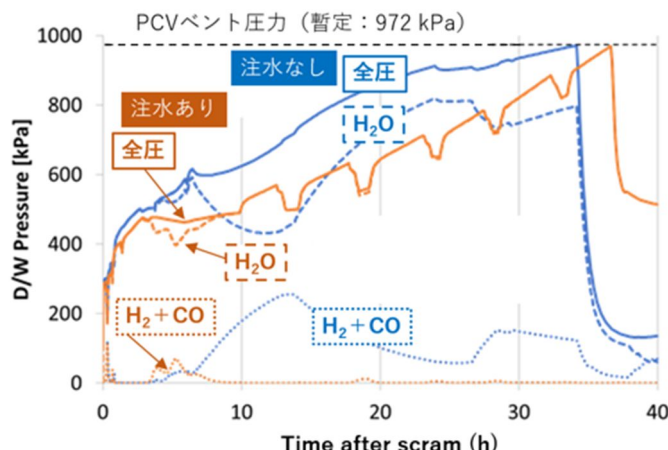


図2：D/W圧力と分圧の推移

【実施項目 3：デブリ移行溶融挙動解析】

粒子法の一つである MPS 法を改良し、固体伝熱モード支配のフェーズでは解析タイムステップを流体の自然対流モード支配のフェーズに用いるその大きなものに変更する方法を考案し、デブリ再溶融過程の解析に成功した。また、クラストモデルの改良により、流路閉塞解析や溶融

物広がり挙動解析に成功した。一方で、従来の想定を超えた長期間の事象を解析する場合にはクラストモデルのさらなる改良の必要性があることが分かった。すなわち、従来の MPS 法のアルゴリズムでは、各計算ステップの最初に粒子の仮の座標と速度を定めた後に、温度場計算を実施し、その結果得られる粒子の固相率等を用いてクラスト判定を実施し、クラスト判定された粒子についてはそれ以降の流動計算をスキップしていた。しかし、各計算ステップの最後には粒子の乱れや異常接近に伴う数値不安定性を回避するために Particle Shifting 法 (PS) により、粒子の座標等が微修正されていた。その結果、通常の流動計算では問題にはならないものの、極めて長時間そのような計算を継続すると、PS に伴う粒子の座標修正が累積して、無視できなくなることが分かった。そのような問題の解決には、例えばクラスト判定された粒子は PS の適用から除外すること等が考えられ、それによって、従来の MPS 法では解析が困難であったより長期間の固液相変化 (侵食と凝固等) を伴う問題に適用できることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamaji Akifumi、Matsuoka Koki、Sumida Kota、Funatsu Kohki	4. 巻 416
2. 論文標題 Scope of conceptual development of Resilient supercritical Light water-cooled reactor (SCWR-R)	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112756 ~ 112756
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nucengdes.2023.112756	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sasaki Ryotaro、Yamaji Akifumi、Uchimura Kyota	4. 巻 9
2. 論文標題 Design Study of Small Modular Reactor Class Super Fast Reactor Core for In-Vessel Retention	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4053827	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fukuda Takanari、Li Xin、Yamaji Akifumi	4. 巻 150
2. 論文標題 A new potential interface tension model for MPS method avoiding unphysical particle cohesion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 104311 ~ 104311
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pnucene.2022.104311	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fukuda Takanari、Yamaji Akifumi、Li Xin、Haquet Jean-François、Boulin Anne	4. 巻 385
2. 論文標題 Analysis of the localized metallic phase solidification in VULCANO VF-U1 with MPS method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 111537 ~ 111537
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nucengdes.2021.111537	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jubaidah, Umazume Yuki, Takahashi Nozomu, Li Xin, Duan Guangtao, Yamaji Akifumi	4. 巻 379
2. 論文標題 2D MPS method analysis of ECOKATS-V1 spreading with crust fracture model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 111251 ~ 111251
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nucengdes.2021.111251	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takahashi Nozomu, Duan Guangtao, Yamaji Akifumi, Li Xin, Sato Ikken	4. 巻 379
2. 論文標題 Development of MPS method and analytical approach for investigating RPV debris bed and lower head interaction in 1F Units-2 and 3	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 111244 ~ 111244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nucengdes.2021.111244	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawakami Reo, Li Xin, Duan Guangtao, Yamaji Akifumi, Sato Isamu, Suzuki Tohru	4. 巻 15
2. 論文標題 Improvement of solidification model and analysis of 3D channel blockage with MPS method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Energy	6. 最初と最後の頁 946 ~ 958
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11708-021-0754-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uchimura Kyota, Yamaji Akifumi	4. 巻 1
2. 論文標題 Preliminary Core Design Study of Small Supercritical Fast Reactor with Single-Pass Cooling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Engineering	6. 最初と最後の頁 46 ~ 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/jne1010004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukuda Takanari, Yamaji Akifumi	4. 巻 363
2. 論文標題 Conceptual design of Super FR for MA transmutation with axially heterogeneous core	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 110619 ~ 110619
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nucengdes.2020.110619	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Akira Hirose, Takanari Fukuda, Akifumi Yamaji
2. 発表標題 Preliminary Conceptual Development of the Super LWR Spectral Shift Core
3. 学会等名 30th International Conference on Nuclear Engineering(ICONE30) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kota Sumida, Akifumi Yamaji
2. 発表標題 Investigation of the Plant Characteristics and Management of Super-FR during BDBA-LOCA
3. 学会等名 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal- Hydraulics Operation and Safety(NUTHOS-13) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Haruki Takei, Takanari Fukuda, Xin Li, Akifumi Yamaji
2. 発表標題 Analysis of Molten Metal Flow and Freezing in a 3-D Pin Bundle Geometry by MPS Method
3. 学会等名 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal- Hydraulics Operation and Safety(NUTHOS-13) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Sara Honda,Takanari Fukuda, Guangtao Duan, and Akifumi Yamaji ,
2 . 発表標題 Three-Dimensional Analyses of the FARO L-26S Melt Spreading Experiment by MPS Method
3 . 学会等名 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal- Hydraulics Operation and Safety(NUTHOS-13) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Taisei Matsumoto, Akifumi Yamaji , Daisuke Fujiwara
2 . 発表標題 Evaluation of Thermal Load on the BWR Containment With Different Depressurization Timings During Loss of Core Cooling Severe Accidents
3 . 学会等名 29th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE29) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T.Horiguchi, A.Yamaji , T.Fukuda, K.Uchimura
2 . 発表標題 Core design of SUPER FR-MIX for improving neutronics and thermal-hydraulics performances
3 . 学会等名 The 10th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S.Nakamoto, A.Yamaji, T.Okui
2 . 発表標題 LOCA analysis of super FR with RELAP/SCDAPSIM and FEMAXI-7
3 . 学会等名 The 10th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 福田貴斉, 山路哲史, Li Xin
2. 発表標題 VULCANO VF-U1実験における金属コリウム局所凝固挙動のMPS法による解析
3. 学会等名 日本原子力学会春の年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木凌太郎, 山路哲史
2. 発表標題 超臨界圧軽水冷却スーパー高速炉の炉心及び再臨界を回避するIVRの設計
3. 学会等名 日本原子力学会関東・甲越支部第14回学生研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木亨, 山路哲史
2. 発表標題 MELCOR-2.2によるスーパー高速炉の設計基準を超えた冷却材喪失事故解析
3. 学会等名 日本原子力学会関東・甲越支部第14回学生研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------