

評価の詳細

研究開発課題名（研究機関名）：  
**新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発**  
 (国立大学法人東京大学)

**研究開発の実施者**

機関名：国立大学法人東京大学	代表者氏名：越塚誠一
機関名：国立大学法人九州大学	代表者氏名：守田幸路
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：飛田吉春
機関名：国立大学法人豊橋技術科学大学	代表者氏名：伊藤高啓
機関名：財団法人エネルギー総合工学研究所	代表者氏名：内藤正則
機関名：日本システム株式会社	代表者氏名：山本雄一

研究期間及び予算額：平成17年度～平成21年度（5年計画） 472,039千円

研究開発予算

平成 17 年度	17,291 千円
平成 18 年度	116,222 千円
平成 19 年度	124,964 千円
平成 20 年度	120,767 千円
平成 21年度	92,795千円

項目	内 容
1. 目的・目標	<p>高速増殖炉（FBR）の実用化時代に向けて社会的受容性の高い安全論理を構築するために、FBRの炉心損傷事故（CDA）における熱流動現象を明らかにし、これを精度良く評価することが求められている。これまで多年にわたりSIMMER-IIIを代表とするFBR安全解析のためのコードが開発されてきたが、その解析結果の精度は構成式の不確かさに依存するところが大きく、安全評価上の保守性を低減することは容易ではなかった。特に、損傷した炉心領域が拡大していく過程での構造材の機械的強度や、溶融炉心の多次元な挙動については、依然として不確かさが大きい。</p> <p>そこで構成式に依存しない新しい計算科学（MPS法および分子動力学法など）に基づく解析技術を結集し、汎用的な安全解析用個別現象詳細解析コードを開発する。基本的には既存実験を用いて検証しつつ段階的にコード開発を進め、SIMMER-IIIを補完的に利用して境界条件を設定し、CDAにおける物理現象に適用する。対象とする個別現象は、(1)燃料ピンの破損・崩壊挙動、(2)炉心物質の分散・固化挙動、(3)溶融物質の沸騰プール挙動、(4)構造壁の破損挙動、(5)低エネルギー損傷炉心の運動挙動、(6)溶融炉心物質の移行挙動、(7)炉心デブリベッドの冷却性、である。特に、大型実用高速炉においてはCDAが再臨界に至ることなく終息することが重要であり、カザフスタンにおいて実施されているEAGLE試験に対応する詳細解析をおこない、現象の解明に貢献する。さらに、酸化燃料だけでなく金属燃料も対象とする。金属燃料では燃料とスチールが共晶反応を起こして融点が大きく低下することが知られているが、その物性については十分解明されていない。そこで、燃料と被覆管、及び溶融燃料とラッパー管の共晶反応に対する物性を分子動力学等の様々な解析手法を駆使して解析し、安全解析コードで用いる。さらに、制御材と被覆との共晶反応についても研究する。</p>

<p>2. 研究成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 成果</li> <li>・ 副次的な成果</li> <li>・ 論文、特許等</li> </ul>	<p><b>【研究開発項目（1） MPS 法による解析コードの開発と検証】</b>  <b>[得られた成果]</b></p> <p>①MPS 法による解析コードの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 研究開発計画</li> </ul> <p>東京大学で独自に開発された粒子法である MPS(Moving Particle Semi-implicit)法にもとづいて、高速炉の炉心損傷事故における個別事象の詳細解析が可能な構造解析や相変化も含む多成分多相熱流動解析コードを開発する。平成 17 年度は東京大学においてこれまでに開発されたコードを用いて事故時の個別事象解析への適用性を検討する。平成 18, 19 年度は本事業のために新たにコード開発を行う。平成 21 年度はプログラムおよび関連ドキュメントの整備を行う。(日本システム、エネルギー総合工学研究所)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現在までの実績及び得られた成果</li> </ul> <p>平成 17 年度は東京大学の流体解析コードに新たに相変化の機能を加えて熔融金属の固化に関する実験解析をおこない、よい一致を得た。構造解析コードでは境界条件に新しい機能を加え、既存の商用コードと比較計算をおこない、よい一致を得た。以上より、MPS 法が炉心損傷事故時の個別事象解析への適用性に優れた手法であることが確認できた。平成 18, 19 年度は熱流体力学部、流体・構造連成部、物性ライブラリ、構造力学部のコード開発を予定通り実施した。なお、本事業で開発するコードは COMPASS と名づけた。平成 21 年度はプログラムおよび関連ドキュメントの整備を行った。</p> <p>②MPS 法による解析コードの検証</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 研究開発計画</li> </ul> <p>COMPASS コードの個別機能の基礎的な検証および、高速炉の炉心損傷事故の代表的な 7 つの個別事象について総合的な検証をおこなう。平成 17 年度には本項目は実施しない。平成 18 年度は流体力学部および構造力学部の個別機能の検証をおこなう。平成 19 年度は気液二相流及び構造壁破損挙動の基礎的検証に加えて、実験解析を実施する。平成 20, 21 年度も実験解析を実施する。(日本システム、エネルギー総合工学研究所、九州大学)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現在までの実績及び得られた成果</li> </ul> <p>平成 18 年度に流体力学部の検証に関して水柱の崩壊など 8 種類の個別機能の検証解析を行った。さらに、固化を伴う流動の実験解析を 1 種類行った。構造力学部の検証解析では、パイプ破壊問題など 6 種類の個別機能の検証解析を行った。さらに、構造物の熔融の機能検証解析を 1 種類実施した。平成 19 年度は流体力学部の基礎的検証を 1 種類と実験解析を 2 種類行った。構造力学部の機能検証解析を 1 種類と実験解析を 1 種類行った。平成 20 年は流体力学部の実験解析を 4 種類、構造解析部の実験解析を 2 種類行った。平成 21 年度は流体力学部の実験解析を 3 種類、構造力学部の実験解析を 3 種類行った。いずれも妥当な結果を得ることができた。</p> <p><b>【研究開発項目（2） 金属燃料の物性予測解析】</b>  <b>[得られた成果]</b></p> <p>①CALPHAD 法による金属燃料の共晶物性予測</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 研究開発計画</li> </ul> <p>金属燃料炉心における炉心損傷事故では、熔融した燃料とステンレス鋼の共晶反応が事故の事象進展に大きく影響する。しかしながら現状では共晶による融点の低下など共晶時の物性の情報が不足している。本項目では熱力学的平衡計算にもとづく CALPHAD(Calculation of Phase Diagram)法によって平衡状態での共晶物性を予測する。得られた物性は COMPASS の物</p>
---	--

性ライブラリに反映する。平成 17 年度は SIMMER-III (既存の高速炉炉心損傷事故解析コード) で整備された状態方程式モデルを調査し、熱力学平衡計算にもとづく共晶物性のライブラリへの反映方法を検討する。平成 18 年度は CALPHAD 法を用いて Fe-U-Pu の状態図を評価する。平成 19 年度は U-Pu-Zr 系の金属燃料の状態図を評価する。平成 20 年度は金属燃料と被覆の共晶を含む Fe-U-Pu-Zr 系の状態図を作成する。平成 21 年度はマイナーアクチニドの共晶反応への影響を調べる。さらに、制御材 (B4C) と Fe との状態図を評価する。(九州大学)

・ 現在までの実績及び得られた成果

平成 17 年度は SIMMER-III で整備された状態方程式モデルを調査し、COMPASS コードでもそれを拡張して用いることとした。平成 18-20 年度は金属燃料の基本物性ライブラリを整備するとともに、CALPHAD 法にもとづく Thermo-calc コードに各種熱力学データベースを適用することで Fe-U 系, Fe-Pu 系, U-Pu 系, Fe-U-Pu 系, U-Pu-Zr 系, および Fe-U-Pu-Zr 系の状態図の計算ができるようにした。Fe と金属燃料は共晶反応によって融点が低下する現象を定量的に評価できるようになった。平成 21 年度の研究により、マイナーアクチニドについては 5%程度の添加率では共晶反応に影響がないことがわかった。また、制御材 (B4C) と Fe との計算状態図を作成し、共晶反応によって融点が低下することを定量的に評価できるようになった。

②分子動力学法による共晶現象の局所メカニズムの解明

・ 研究開発計画

炉心損傷事故で想定される過渡的な相変化 (溶融/固化) 過程は熱力学的な非平衡状態にあることから、金属燃料炉心での相変化過程における共晶反応挙動を予測するには速度論的な考察も必要となる。本事業では CALPHAD 法を用いて平衡状態での共晶物性を予測する一方で、分子動力学を用いて共晶反応の過渡的な解析をおこない、共晶反応の反応速度を予測する。分子動力学として、古典的分子動力学と第一原理分子動力学を並行して用いる。平成 17 年度は古典分子動力学及び第一分子動力学について、従来の知見の整理と本事業で用いる手法やコードの選定をおこなう。平成 18 年度は、古典分子動力学では従来の知見がある Cu-Ag 系の共晶反応解析をおこなう。第一原理分子動力学では共晶反応に関する基礎的な解析をおこない、その適用性を検討する。平成 19-21 年度は金属燃料に関して解析し、定量的な比較をおこなう。古典分子動力学計算については、共晶反応における界面での原子拡散係数として COMPASS 解析に反映させる。また、平成 21 年度は制御材 (B4C) と Fe との共晶反応に対する第一原理分子動力学を実施する。(豊橋技術科学大学、日本システム、エネルギー総合工学研究所、九州大学)

・ 現在までの実績及び得られた成果

平成 17 年度は、古典分子動力学では Cu-Ag 系を解析対象として選定した。第一原理分子動力学では 33 種類のコードを調査し、VASP コードおよび WIEN2k コードを本事業で用いるものとして選定した。平成 18 年度は古典分子動力学では Cu-Ag 系の計算を実施し、その共晶反応による融点の低下を計算することができた。VASP コードを用いた第一原理分子動力学計算では Al-Si, U-Fe, U-Zr の接触を計算し、文献や実験と同程度の拡散係数を得ることができた。Fe の格子定数とヤング率の計算もおこない精度の良い計算ができることを確認した。また、WIEN2k コードを用いた計算では、U-Fe 系状態図に現れる結晶構造について実験値と数%で一致する結果が得られた。平成 19 年度は Pu-Fe, U-Pu-Fe について共晶現象を解析した。平成 20 年度は Pu-Fe, U-Fe, U-Pu-Zr, U-Pu, U-Zr に関して共晶現象を解析した。

平成 21 年度は U-Pu-Zr の金属燃料と Fe 間の共晶現象を解析した。さらに、制御材 (B4C) と Fe との共晶反応に対する第一原理分子動力学を実施した。また補足的解析として、凍結フォノン法によりフォノン基準モードを求め、状態図などに関する物性予測を行った。

**【研究開発項目 (3) MPS 理論開発とコード開発】**

[得られた成果]

①理論開発

・研究開発計画

本事業で用いる粒子法に関連した理論開発をおこない、コード開発に役立てる。平成 17 年度は東京大学でこれまでに開発してきた粒子法コードを整備する。再委託機関では本事業で新たに検討すべき理論について整理する。平成 18 年度は気相中での圧力波伝播や圧力変化に伴う気相の状態変化を解析するために、圧縮性を扱える粒子法の開発をおこなう。また、炉心損傷事故における炉心物質の分散過程においてデブリベッド状態で再配置された炉心物質の冷却特性等を解析するために、固体粒子系も扱える理論の開発をおこなう。平成 19-20 年度は圧縮性粒子法の開発、粒子法における乱流モデルの開発、流体力学部の数値解析法の改良、物性解析モデルの整備、流体力学部および構造力学部の手法開発をおこなう。平成 21 年度は圧縮性粒子法の開発、粒子法における乱流モデルの開発、デブリベッドからの崩壊熱の除熱を解析するための適用性を確認する。(東京大学、エネルギー総合工学研究所、日本システム、九州大学)

・現在までの実績及び得られた成果

平成 17 年度は東京大学でこれまで開発してきた粒子法の理論を整理し、流体解析コードおよび構造解析コードを整備して各再委託機関に配布した。この結果、構造解析では破壊モデルを、熱流動解析では熱伝導と相変化モデルを新たに整備することとした。平成 18 年度は、格子法における C-CUP 法を参考にしつつ粒子法において圧縮性を考慮できる計算方法を開発し、1 次元計算で実証した。また、固体粒子系と MPS 法を連成させて解く方法を開発した。さらに、流体力学アルゴリズム、自由表面モデル、非圧縮性モデル、表面張力モデルに関して改良方法を提案した。平成 19-20 年度は、圧縮性粒子法の開発、粒子法における乱流モデルの開発、固体粒子間の相互作用モデルの開発、流体解析アルゴリズムの改良、表面張力モデルの精度向上、熱伝達モデルの精度向上、物性解析ライブラリの整備、熱膨張モデルの開発および共晶計算モデルの開発を行った。平成 21 年度は圧縮性粒子法と粒子法における乱流モデルを完成させた。また、デブリベッドからの崩壊熱の除熱を解析する手法を、固体粒子間の相互作用モデルを発展させることにより開発した。

②コード設計

・研究開発計画

COMPASS コードの設計を行う。ここで作成した設計に従い項目 (1) ①でコードを開発する。平成 17 年度は COMPASS コードの基本設計を行う。平成 18 年度は基本設計の見直し、熱流体力学部と構造力学部の詳細設計を行う。構造材の材料物性の調査と定式化も行う。平成 19 年度は流体力学部と構造力学部の詳細設計を継続するとともに、SIMMER-III とのインターフェイスプログラムの詳細設計も行う。(日本システム、エネルギー総合工学研究所)

・現在までの実績及び得られた成果

平成 17 年度は基本設計、構造解析に関わる設計、および相変化に関わる設計を行った。平成 18 年度は基本設計の見直し、熱流体力学部と構造力学

部の詳細設計、および構造材の物性について COMPASS コードに組み込むための定式化を行った。(3) ①で開発された圧縮性を扱う機能についても詳細設計を行った。平成 19 年度は流体力学部と構造力学部の熱膨張モデルの詳細設計を行うとともに、SIMMER-III と COMPASS とのインターフェイスプログラムの詳細設計を実施した。

### ③並列計算手法

#### ・研究開発計画

大規模計算では PC クラスタ等による並列計算が必要である。そこで COMPASS には並列計算の機能を加える。平成 17 年度は並列計算に関する基本設計を実施する。平成 18 年度は並列計算の作業を実施する。平成 19 年度は個別解析や実験解析での計算速度を測定するとともに、並列化を改良する。(日本システム、エネルギー総合工学研究所)

#### ・現在までの実績及び得られた成果

平成 17 年度に構造力学部に関してはグルーピングアルゴリズムを開発した。また、並列計算には OpenMP 方式を採用することとした。平成 18 年度は OpenMP による並列計算を具体的に実施し、その性能を測定したところ、例えば粒子数密度の計算において 100 万粒子で 16CPU の計算により 14.4 倍の計算速度が得られ、並列計算の有効性が確認された。平成 19 年度も並列化の改良を実施し、例えば 16CPU の場合に流体力学部の並列化効率 は 12-16 になり、優れた並列化性能が得られた。

### ④可視化手法

#### ・研究開発計画

大規模解析では計算結果を可視化することで現象の理解が可能になる。特に高速炉の炉心損傷事故では、多成分多相の複雑な 3 次元の熱流動現象となり、これに適合した可視化技術の開発が必要である。平成 18 年度に可視化のための既存ソフトウェアを購入し、これを用いて適用性を検討する。もし、機能が不十分な場合には独自に可視化ツールを開発する。平成 19 年度は導入コードによる可視化ツールの機能向上をおこない、ホログラフイーの適用可能性を検討する。平成 20 年度は開発した可視化ツールの取扱説明書を作成し、参加機関に配布した。(日本システム、東京大学)

#### ・現在までの実績及び得られた成果

平成 18 年度に汎用可視化ソフトウェア AVS を導入し、これを用いてボリュームレンダリングによる多成分多相の表示システムを開発した。基本的な機能は本システムで表現できると評価され、独自のツールは開発しないこととした。ただし、今後の検討事項が提起された。平成 19 年度に導入を検討したホログラフイー技術は通常のディスプレイによる可視化と比較して優位性は少なかった。ボリュームレンダリングによる可視化ツールに関しては平成 20 年度に取扱説明書を作成して参加機関に配布した。

### 【研究開発項目 (4) SIMMER-III 解析】

#### [得られた成果]

#### ①現行解析の問題点の抽出

#### ・研究開発計画

COMPASS の開発にあたり、既存の安全解析コード SIMMER-III を用いた現行解析の問題点を抽出する。COMPASS が完成した時には SIMMER-III は炉心全体を扱うコードとして、COMPASS は個別事象の詳細現象を扱うコードとして相補的な関係を目指す。また、本事業で開発する COMPASS コードの検証計画の作成には、SIMMER-III に対してこれまでおこなわれてきた実績を踏まえるものとする。これは平成 17 年度に実施する。(九州大学)

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現在までの実績及び得られた成果 SIMMER-III に対して実施された第 1 期検証研究 (5 分野 34 テスト問題) および第 2 期検証研究 (6 分野) を調査した。基礎過程との関係をマトリックスとして整理した。</li> </ul> <p>②既存試験と今後の試験の分析</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 研究開発計画 検証は安全解析コードの開発にとって本質的に重要な作業である。そこで、SIMMER-III の検証解析の経験にもとづき COMPASS の検証計画を作成する。平成 17 年度は COMPASS の基礎検証計画案および総合検証計画案を作成する。平成 18 年度は検証計画案の各項目についてスクリーニングをおこなう。平成 19 年度は検証計画のスクリーニングを継続し、検証すべき項目や解析条件を決定する。(九州大学、日本原子力研究開発機構)</li> <li>・ 現在までの実績及び得られた成果 平成 17 年度は COMPASS の基礎検証計画案として 6 つのモデルに関して 15 項目の課題を、総合検証計画案として今後の 4 年間で 9 項目の課題を取り上げることとした。また、COMPASS の総合検証計画案の 9 項目について、その境界条件を与える SIMMER-III の解析計画を作成した。平成 18 年度は総合検証計画案の中から平成 18 年度に SIMMER-III で実施する 3 項目について具体的な試験対象を選定した。平成 19 年度は総合検証計画案の中から平成 19 年度に SIMMER-III で実施する 4 項目について具体的な試験対象を選定するとともに、平成 20 年度に実施予定の 3 分野と、平成 21 年度に実施予定の EAGLE 試験解析についても具体的な試験対象を選定した。</li> </ul> <p>③SIMMER-III コードによる解析</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 研究開発計画 COMPASS の総合検証をおこなうため、全炉心を解析できる SIMMER-III で予め対象とする試験の解析をおこなう。その結果を COMPASS の境界条件として与える。平成 18 年度は 3 分野について SIMMER-III 解析を実施する。平成 19 年度は 4 分野について SIMMER-III 解析を実施する。そのうちの 1 分野は EAGLE 試験 (早期燃料排出による再臨界防止のための一連の炉内・炉外試験) で得られた壁破損挙動に関する解析で、当初の計画よりも早期に実施する。平成 20 年度は 3 分野について SIMMER-III 解析を実施する。平成 21 年度は EAGLE 試験の ID1 試験について SIMMER-III 解析を実施する。(日本原子力研究開発機構)</li> <li>・ 現在までの実績及び得られた成果 平成 18 年度は、「炉心物質の分散・固化挙動」に対して GEYSER 試験および CABRI-EFM1 試験を解析した。「熔融物質の沸騰プール挙動」に対して CABRI-TPA2 試験を解析した。「構造壁の破損挙動」では SCARABEE-BE+3 試験を解析した。平成 19 年度は、「燃料ピンの破損・崩壊挙動」に対して CABRI-EFM1 試験と CABRI-E7 試験を解析した。「低エネルギー炉心物質の運動挙動」に対して THEFIS with particles 試験を解析した。「熔融炉心物質の移行挙動」に対して CAMEL 試験を解析した。「EAGLE 試験」については FD 試験を解析した。平成 20 年度は「炉心デブリベッドの冷却性」に対して D10 試験を解析した。「金属燃料の共晶試験」に対して CAFE-UT2 試験を解析した。「EAGLE 試験」については WF 試験を解析した。平成 21 年度は「EAGLE 試験」における ID1、FD、ID2 試験の解析を実施した。</li> </ul> <p>【事業全体】を通して MPS 法を用いた高速炉の炉心損傷事故の個別事象に対する詳細解析コード (COMPASS) の開発および検証は計画通り順調に進展し、既に当初の目標で</p>
--	--

ある7項目の個別事象についても計画に従って解析を実施し、解析の妥当性を確認した。実用化段階の大型高速炉では炉心損傷事故における再臨界が大きな問題であるが、熔融燃料の早期排出によって回避できると考えられており、これを詳細に解析できるコードを開発することができた。また、MPS法は東京大学で開発された新しい計算手法であり、国内外でも広くその有用性が認識されるようになってきており、COMPASSは汎用多相多成分熱流動に対するマルチフィジックス解析コードとして幅広い活用が可能である。本事業において当初の計画を上回る成果としては、制御材(B4C)と被覆との共晶に関する物性、MPS理論開発における副次的な研究成果、及びSIMMER-IIIによるEAGLE試験解析を前倒しで実施したことにより燃料流出挙動を再現できる相関式を得られたことである。

金属燃料については、燃料と被覆の共晶反応に関して熱力学的平衡計算、古典的分子動力学、および第一原理分子動力学を用いて研究を進めた。その成果をCOMPASSおよびSIMMER-IIIの物性ライブラリに組み込むとともに共晶に関する試験解析に反映できた。

従来は相関式として扱われてきた熔融燃料と構造壁との間の熱伝達を、COMPASS解析により相関式を用いずに導出できることが示された。これにより、従来のSIMMER-III解析に用いられてきた相関式の妥当性が確認されるとともに、今後、試験体系とは異なる実炉体系における安全性の解析を合理的に実施することが可能になった。

#### 【論文、特許等】

##### ジャーナル論文

- [1] H. Yamano and Y. Tobita, "Experimental Analysis by SIMMER-III on Molten Fuel Freezing and Boiling Pool Behavior" J. Power and Energy System **3**, 249-260 (2009)
- [2] T. Ito, "Molecular Dynamics Study on Melting Phenomena in Cu-Ag Eutectic System" J. Power and Energy System **3**, 261-271 (2009)
- [3] S. Zhang, K. Morita, N. Shirakawa and Y. Yamamoto, "Improvement of Basic Fluid Dynamics Models for the COMPASS Code" J. Power and Energy System **3**, 313-320 (2009)
- [4] S. Zhang, K. Morita, N. Shirakawa, and Y. Yamamoto, "Development of a Computational Framework on Fluid-Solid Mixture Flow Simulations for the COMPASS Code" J. Power and Energy System **4**, 126-137 (2010)
- [5] H. Yamano and Y. Tobita, "Experimental Analyses by SIMMER-III on Fuel-Pin Disruption and Low-Energy Disrupted Core Motion" J. Power and Energy System **4**, 164-179 (2010)

##### 国際会議

- [1] S. Koshizuka, J. Liu, K. Morita, T. Arima, Y. Tobita, H. Yamano, T. Ito, N. Shirakawa, S. Hosoda, K. Araki, M. Naitoh, Y. Yamamoto, H. Kozaki, M. Himi, E. Hirano, S. Shimizu and M. Oue, "Multi-Physics and Multi-Scale Simulation for Core Disruptive Accidents in Fast Breeder Reactors" Proc. 5th Korea-Japan Symp. On Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS5), November 26-29, 2006, Jeju, p.472-479
- [2] S. Koshizuka, J. Liu, K. Morita, T. Arima, S. Zhang, Y. Tobita, H. Yamano, T. Ito, M. Naitoh, N. Shirakawa, S. Hosoda, Y. Uehara, Y. Yamamoto, M. Himi, H. Kozakai, E. Hirano, S. Shimizu and M. Oue, "Code Development for Core Disruptive Accidents in Sodium-cooled Fast Reactors" IAEA Topical Meeting on Advanced

	<p>Safety Assessment Methods for Nuclear Reactors, Daejeon, 30 October - 2 November, 2007</p> <p>[3] S. Koshizuka, J. Liu, N. Shirakawa, Y. Uehara, M. Naitoh and Y. Yamamoto, "R&amp;D of the Next Generation Safety Analysis Methods for Fast Reactors with New Computational Science and Technology (1) Introduction of the Project and Development of Structural Mechanics Module" Proc. 16th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE16), Orlando, May 11-15, 2008, ICONE16-48499</p> <p>[4] Y. Yamamoto, E. Hirano, M. Oue, S. Shimizu, N. Shirakawa, S. Koshizuka and K. Morita, "R&amp;D of the Next Generation Safety Analysis Methods for Fast Reactors with New Computational Science and Technology (2) Development and Verification of Thermo-Hydrodynamics Module of the COMPASS Code" Proc. 16th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE16), Orlando, May 11-15, 2008, ICONE16-48485</p> <p>[5] S. Zhang, K. Morita, N. Shirakawa and Y. Yamamoto, "R&amp;D of the Next Generation Safety Analysis Methods for Fast Reactors with New Computational Science and Technology (3) Improvement of Basic Fluid Dynamics Models for the COMPASS Code" Proc. 16th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE16), Orlando, May 11-15, 2008, ICONE16-48475</p> <p>[6] H. Yamano and Y. Tobita, "R&amp;D of the Next Generation Safety Analysis Methods for Fast Reactors with New Computational Science and Technology (4) Experimental Analysis by SIMMER-III for the Integral Verification of COMPASS" Proc. 16th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE16), Orlando, May 11-15, 2008, ICONE16-48385</p> <p>[7] T. Ito, "R&amp;D of the Next Generation Safety Analysis Methods for Fast Reactors with New Computational Science and Technology (5) Study of Eutectic Reaction between Metals: Classical Molecular Dynamics Approach" Proc. 16th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE16), Orlando, May 11-15, 2008, ICONE16-48500</p> <p>[8] M. Himi, H. Kozakai, Y. Yamamoto, S. Hosoda, N. Shirakawa and T. Arima, "R&amp;D of the Next Generation Safety Analysis Methods for Fast Reactors with New Computational Science and Technology (6) Study of Eutectic Reaction between Metals: FPMD Approach" Proc. 16th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE16), Orlando, May 11-15, 2008, ICONE16-48482</p> <p>[9] S. Koshizuka, K. Morita, T. Arima, S. Zhang, Y. Tobita, H. Yamano, T. Ito, N. Shirakawa, M. Naitoh, H. Okada, Y. Uehara, Y. Nagamine, Y. Yamamoto, M. Himi, E. Hirano, S. Shimizu and M. Oue, "Code Development for Multi-Physics and Multi-Scale Analysis of Core Disruptive Accidents in Fast Breeder Reactors using Particle Methods" Proc. 16th Pacific Basin Nuclear Conf. (16PBNC), Aomori, Oct.13-18, 2008, P16P1086</p> <p>[10] S. Koshizuka, J. Liu, K. Morita, T. Arima, S. Zhang, Y. Tobita, H. Yamano, T. Ito, M. Naitoh, N. Shirakawa, S. Hosoda, Y. Uehara, Y. Yamamoto, H. Kozakai, M. Himi, E. Hirano, S. Shimizu and M. Oue, "COMPASS Code Development and Validation: A Multi-Physics Analysis of Core Disruptive Accidents in Sodium-Cooled Fast Reactors Using Particle Methods" 2009 International Congress on</p>
--	--

	<p>Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2009), Tokyo, May 10–14, 2009, No. 9329</p> <p>[11] S. Koshizuka, "Next Generation Safety Analysis Methods for SFRs (1) Brief Introduction of the Project and Basic Study for Algorithm of Particle Method" Proc. 17th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-17), Brussels, July 12–16, 2009, ICONE17-75556</p> <p>[12] H. Yamano and Y. Tobita, "Next Generation Safety Analysis Methods for SFRs (2) Experimental Analyses by SIMMER-III for the Integral Verification of the COMPASS Code on Fuel-Pin Disruption and Low-Energy Disrupted Core Motion" Proc. 17th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-17), Brussels, July 12–16, 2009, ICONE17-75462</p> <p>[13] Y. Yamamoto, E. Hirano, M. Oue, S. Shimizu, N. Shirakawa, S. Koshizuka, K. Morita, H. Yamano and Y. Tobita, "Next Generation Safety Analysis Methods for SFRs (3) Thermal Hydraulics Models of COMPASS Code and Experimental Analyses" Proc. 17th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-17), Brussels, July 12–16, 2009, ICONE17-75521</p> <p>[14] S. Zhang, K. Morita, N. Shirakawa and Y. Yamamoto, "Next Generation Safety Analysis Methods for SFRs (4) Development of a Computational Framework on Fluid-Solid Mixture Flow Simulations for the COMPASS Code" Proc. 17th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-17), Brussels, July 12–16, 2009, ICONE17-75549</p> <p>[15] N. Shirakawa, Y. Uehara, M. Naitoh, H. Okada, Y. Yamamoto and S. Koshizuka, "Next Generation Safety Analysis Methods for SFRs (5) Structural Mechanics Models of COMPASS Code and Verification Analyses" Proc. 17th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-17), Brussels, July 12–16, 2009, ICONE17-75532</p> <p>[16] Y. Uehara, N. Shirakawa, M. Naitoh, H. Okada, H. Yamano, Y. Tobita, Y. Yamamoto and S. Koshizuka, "Next Generation Safety Analysis Methods for SFRs (6) SCARABEE BE+3 Analysis with SIMMER-III and COMPASS Codes Featuring Duct-Wall Failure" Proc. 17th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-17), Brussels, July 12–16, 2009, ICONE17-75533</p> <p>[17] T. Ito, T. Arima and M. Himi, "Next Generation Safety Analysis Methods for SFRs (7) Potential Model for Classical Molecular Dynamics on Pu-Fe System" Proc. 17th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-17), Brussels, July 12–16, 2009, ICONE17-75591</p> <p>[18] M. Himi, Y. Yamamoto, Y. Nagamine, N. Shirakawa, Y. Uehara and T. Arima, "Next Generation Safety Analysis Methods for SFRs (8) Analyses of Eutectics Between Fuel and Steel in Metal Fuel with FPMD Code VASP" Proc. 17th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE-17), Brussels, July 12–16, 2009, ICONE17-75578</p> <p>[19] S. Koshizuka, K. Morita, A. Arima, S. Zhang, Y. Tobita, H. Yamano, T. Ito, M. Naitoh, N. Shirakawa, H. Okada, Y. Uehara, Y. Nagamine, Y. Yamamoto, M. Himi, E. Hirano, S. Shimizu and M. Oue, "Validation for Multi-physics Simulation of Core Disruptive Accidents in Sodium-cooled Fast Reactors by COMPASS Code" [keynote] Proc. 13th Int. Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics (NURETH-13), Kanazawa, September 27–October 2, 2009, N13P1133</p>
--	---

	<p>[20] K. Morita, S. Zhang, T. Arima, S. Koshizuka, Y. Tobita, H. Yamano, T. Ito, N. Shirakawa, F. Inoue, H. Yugo, H. Okada, M. Himi, Y. Yamamoto, E. Hirano, S. Shimizu and M. Oue, "Detailed Analyses of Specific Phenomena in Core Disruptive Accidents of Sodium-Cooled Fast Reactors by the COMPASS Code" Proc. of 18th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-18), Xi'an, China, May 17-21, 2010, ICONE18-29886.</p> <p>国内学会</p> <p>[1] 越塚誠一, 劉傑, 守田幸路, 有馬立身, 飛田吉春, 山野秀将, 伊藤高啓, 白川典幸, 細田誠吾, 荒木和博, 内藤正則, 山本雄一, 小塚博, 氷見正司, 平野悦丈, 清水泉介, 大上雅哉, "新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (1) 概要とスコープ," 日本原子力学会 2007 年春の年会要旨集, 名古屋, March 27-29, 2007, J26, p. 460</p> <p>[2] 山本雄一, 平野悦丈, 大上雅哉, 清水泉介, 白川典幸, 越塚誠一, 守田幸路, "新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (2) COMPASS コード熱流体力学部の開発," 日本原子力学会 2007 年春の年会要旨集, 名古屋, March 27-29, 2007, J27, p. 461</p> <p>[3] 白川典幸, 山本雄一, 荒木和博, 越塚誠一, 内藤正則, "新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (3) COMPASS コード構造力学部の開発," 日本原子力学会 2007 年春の年会要旨集, 名古屋, March 27-29, 2007, J28, p. 462</p> <p>[4] 飛田吉春, 山野秀将, 守田幸路, "新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (4) 検証計画," 日本原子力学会 2007 年春の年会要旨集, 名古屋, March 27-29, 2007, J29, p. 463</p> <p>[5] 守田幸路, 有馬立身, 飛田吉春, "新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (5) COMPASS コード物性解析モデルの研究開発指針," 日本原子力学会 2007 年春の年会要旨集, 名古屋, March 27-29, 2007, J30, p. 464</p> <p>[6] 伊藤高啓, "新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (6) 金属燃料の共晶研究 (a) 古典分子動力学法からのアプローチ," 日本原子力学会 2007 年春の年会要旨集, 名古屋, March 27-29, 2007, J31, p. 465</p> <p>[7] 小塚博, 氷見正司, 山本雄一, 細田誠吾, 白川典幸, 有馬立身, "新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (7) 金属燃料の共晶研究 (b) 第一分子動力学法からのアプローチ," 日本原子力学会 2007 年春の年会要旨集, 名古屋, March 27-29, 2007, J31, p. 465</p> <p>[8] 越塚誠一, 劉傑, 守田幸路, 有馬立身, 張帥, 飛田吉春, 山野秀将, 伊藤高啓, 内藤正則, 白川典幸, 細田誠吾, 上原靖, 山本雄一, 小塚博, 氷見正司, 平野悦丈, 清水泉介, 大上雅哉, "新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (8) 平成 18 年度の研究開発の進捗状況," 日本原子力学会 2007 年秋の大会要旨集, 北九州, September 27-29, 2007</p> <p>[9] 山本雄一, 平野悦丈, 大上雅哉, 清水泉介, 白川典幸, 越塚誠一, 守田幸路, "新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (9) COMPASS コード熱流体力学部の開発," 日本原子力学会 2007 年秋の大会要旨集, 北九州, September 27-29, 2007</p> <p>[10] 白川典幸, 上原靖, 山本雄一, 越塚誠一, 内藤正則, "新技術を活</p>
--	--

	<p>用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (10) COMPASS コード構造力学部の開発,” 日本原子力学会 2007 年秋の大会要旨集, 北九州, September 27-29, 2007</p> <p>[11] 張帥, 守田幸路, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (11) COMPASS コードの流体力学基本モデルの改良,” 日本原子力学会 2007 年秋の大会要旨集, 北九州, September 27-29, 2007</p> <p>[12] 清水泉介, 越塚誠一, 山本雄一, 白川典幸, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (12) COMPASS コードの解析結果の可視化,” 日本原子力学会 2007 年秋の大会要旨集, 北九州, September 27-29, 2007</p> <p>[13] 山野秀将, 飛田吉春, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (13) COMPASS コード総合検証のための SIMMER-III による試験解析,” 日本原子力学会 2007 年秋の大会要旨集, 北九州, September 27-29, 2007</p> <p>[14] 有馬立身, 守田幸路, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (14) 金属燃料の共晶研究 (a) CALPHAD 法および第一原理計算によるアプローチ,” 日本原子力学会 2007 年秋の大会要旨集, 北九州, September 27-29, 2007</p> <p>[15] 伊藤高啓, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (15) 金属燃料の共晶研究 (b) 古典分子動力学法による Cu-Ag 系の解析,” 日本原子力学会 2007 年秋の大会要旨集, 北九州, September 27-29, 2007</p> <p>[16] 氷見正治, 小塚博, 細田誠吾, 山本雄一, 白川典幸, 有馬立身, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (16) 金属燃料の共晶研究 (c) 第一分子動力学法からのアプローチ,” 日本原子力学会 2007 年秋の大会要旨集, 北九州, September 27-29, 2007</p> <p>[17] 守田幸路, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発”先駆的科学計算に関するフォーラム, 福岡, April 24-25, 2008</p> <p>[18] 越塚誠一, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (17) 平成 19 年度の研究開発の進捗状況と MPS 法への圧縮性及び乱流モデルの導入” 日本原子力学会 2008 年秋の大会, 高知, September 4-6, 2008, D07, p. 176</p> <p>[19] 山本雄一, 平野悦丈, 大上雅哉, 清水泉介, 白川典幸, 越塚誠一, 守田幸路, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (18) COMPASS コード熱流体力学部の開発と検証” 日本原子力学会 2008 年秋の大会, 高知, September 4-6, 2008, D08, p. 177</p> <p>[20] 平野悦丈, 山本雄一, 清水泉介, 大上雅哉, 白川典幸, 越塚誠一, 守田幸路, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (19) COMPASS コードによる炉心物質の分散・固化挙動実験解析” 日本原子力学会 2008 年秋の大会, 高知, September 4-6, 2008, D09, p. 178</p> <p>[21] 大上雅哉, 山本雄一, 平野悦丈, 清水泉介, 白川典幸, 越塚誠一, 守田幸路, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (20) COMPASS コードによる溶融物質の沸騰プール挙動実験解析” 日本原子力学会 2008 年秋の大会, 高知, September 4-6, 2008, D10, p. 179</p> <p>[22] 白川典幸, 上原靖, 内藤正則, 岡田英俊, 山本雄一, 越塚誠一, “</p>
--	--

	<p>新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (21) COMPASS コード構造力学部の開発と検証” 日本原子力学会 2008 年秋の大会, 高知, September 4-6, 2008, D11, p. 180</p> <p>[23] 張帥, 守田幸路, 山本雄一, 白川典幸, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (22) COMPASS コードの固体粒子系多相流解析への適用性向上” 日本原子力学会 2008 年秋の大会, 高知, September 4-6, 2008, D12, p. 181</p> <p>[24] 山野秀将, 飛田吉春, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (23) COMPASS コード総合検証のための SIMMER-III による試験解析” 日本原子力学会 2008 年秋の大会, 高知, September 4-6, 2008, D13, p. 182</p> <p>[25] 守田幸路, 有馬立身, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (24) U-Pu-Zr 系金属燃料の物性解析モデルの整備” 日本原子力学会 2008 年秋の大会, 高知, September 4-6, 2008, D14, p. 183</p> <p>[26] 伊藤高啓, 氷見正司, 有馬立身, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (25) 金属燃料の共晶研究 (a) 古典分子動力学法による Pu-Fe 系の解析モデル” 日本原子力学会 2008 年秋の大会, 高知, September 4-6, 2008, D15, p. 184</p> <p>[27] 氷見正司, 山本雄一, 長峰康雄, 白川典幸, 上原靖, 有馬立身, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (26) 金属燃料の共晶研究 (b) 第一原理分子動力学法 VASP による混合金属の接触計算” 日本原子力学会 2008 年秋の大会, 高知, September 4-6, 2008, D16, p. 185</p> <p>[28] 長峰康雄, 白川典幸, 上原靖, 氷見正司, 山本雄一, 有馬立身, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (27) 金属燃料の共晶研究 (c) 第一原理分子動力学法コード VASP による共晶状態図解析の検討” 日本原子力学会 2008 年秋の大会, 高知, September 4-6, 2008, D17, p. 186</p> <p>[29] 越塚誠一, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (28) 平成 20 年度の研究開発の進捗状況と MPS 法における圧縮性及び乱流モデルの改良” 日本原子力学会 2009 年秋の大会, 仙台, September 16-18, 2009, D16, p. 155</p> <p>[30] 山野秀将, 飛田吉春, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (29) COMPASS コード総合検証のための SIMMER-III による試験解析” 日本原子力学会 2009 年秋の大会, 仙台, September 16-18, 2009, D17, p. 156</p> <p>[31] 平野悦丈, 山本雄一, 清水泉介, 大上雅哉, 白川典幸, 越塚誠一, 守田幸路, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (30) COMPASS コードによる炉心物質の分散・固化挙動実験解析” 日本原子力学会 2009 年秋の大会, 仙台, September 16-18, 2009, D18, p. 157</p> <p>[32] 大上雅哉, 山本雄一, 平野悦丈, 清水泉介, 白川典幸, 越塚誠一, 守田幸路, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (31) COMPASS コードによる熔融物質の沸騰プール挙動実験解析” 日本原子力学会 2009 年秋の大会, 仙台, September 16-18, 2009, D19, p. 158</p> <p>[33] 守田幸路, 張帥, 白川典幸, 山本雄一, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (32) COMPASS コードの固液多相流現象への適用” 日本原子力学会 2009 年秋の大会, 仙台, September 16-18, 2009, D20, p. 159</p>
--	--

	<p>[34] 白川典幸, 上原靖, 内藤正則, 岡田英俊, 山本雄一, 越塚誠一, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (33) COMPASS コード構造力学部の開発と検証” 日本原子力学会 2009 年秋の大会, 仙台, September 16-18, 2009, D21, p.160</p> <p>[35] 有馬立身, 守田幸路, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (34) 金属燃料の共晶研究 a)U-Pu-Zr-Fe系状態図の評価と共晶反応の電子状態解析” 日本原子力学会2009年秋の大会, 仙台, September 16-18, 2009, D22, p.161</p> <p>[36] 伊藤高啓, 有馬立身, 氷見正司, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (35) 金属燃料の共晶研究 (b) 古典分子動力学法によるPu-Fe間相互作用の解析” 日本原子力学会 2009年秋の大会, 仙台, September 16-18, 2009, D23, p.162</p> <p>[37] 氷見正司, 山本雄一, 白川典幸, 有馬立身, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (36) 金属燃料の共晶研究 (c) 第一原理分子動力学法VASPによる金属燃料中の燃料とスチールの共晶計算” 日本原子力学会 2009年秋の大会, 仙台, September 16-18, 2009, D24, p.163</p> <p>[38] 長峰康雄, 白川典幸, 上原靖, 氷見正司, 山本雄一, 有馬立身, “新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発 (37) 金属燃料の共晶研究 (d) 第一原理分子動力学法VASPによる原子拡散の評価と共晶状態図解析” 日本原子力学会2009年秋の大会, 仙台, September 16-18, 2009, D25, p.164</p> <p>受賞</p> <p>[1] 越塚誠一, マルチフィジックスシミュレーションのための粒子法の開発, 日本学術振興会賞, 2006.3</p> <p>表彰</p> <p>[1] 内藤正則, 原子力安全功労者表彰, 2006.10</p> <p>その他</p> <p>[1] K. Morita (invited speaker), “Multi-component, Multi-phase Flow Simulations for Fast Reactor Safety Analysis,” CFD Seminar of the 18th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-18), Xi’an, China, May 17, 2010.</p>
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 研究開発の進捗</li> <li>・ 研究開発の成果</li> <li>・ ブレイクスルー</li> </ul>	<p><b>【研究開発の進捗】</b></p> <p>計画は、当初予定通りに進捗したものと認められる。MPS 法を元に開発された COMPASS コードは、比較的簡易な体系や境界条件に限定されているものの、対象とした現象に対して相当の予測性能を有することが示されている。</p> <p><b>【研究開発の成果】</b></p> <p>粒子法解析技術を、「熱・相変化・流体力学・構造力学連成」を考慮した多成分体系まで拡張・高度化し、この妥当性をCDA解析に係る個別要素試験等に基づく検証で確認した。また、熱力学的平衡計算、分子動力学の活用により金属燃料の共晶現象に対する有効な予測手法を提案しており、想定どおりの成果が得られたと判断する。さらに、開発された解析コードは、本来の目的である高速炉のCDAだけでなく、軽水炉の事故解析、鋳造、化学プラントの様々なプロセス、土木工学における土砂と水の混相流解析などへの展開が期待できる。</p> <p><b>【ブレイクスルー】</b></p> <p>MPS法を用いて、固体液体気体が共存する複雑な混相状態を計算可</p>

	<p>能とし、様々な条件に対する性能評価を行って、その汎用性を示したことは、今後、同法を用いた解析による、更なる展開に資するものと考えられる。</p> <p>熔融燃料と金属材料との共晶反応による融点の低下は、CDA解析に大きく影響するものである。これを、熱力学平衡計算によってライブラリとして整備し、SIMMER-IIIコードならびにCOMPASSコードで共有し、定量評価を可能としていることは、今後のFBRのCDA事象のための安全解析コードの開発に資するものであると考える。</p>
4. その他	<p>他分野に本研究成果を有効に活用、促進するためには、使いやすいユーザーインターフェースの整備と具体的な活用事例の適切な紹介を行ってゆくことが重要であると考えられる。</p>