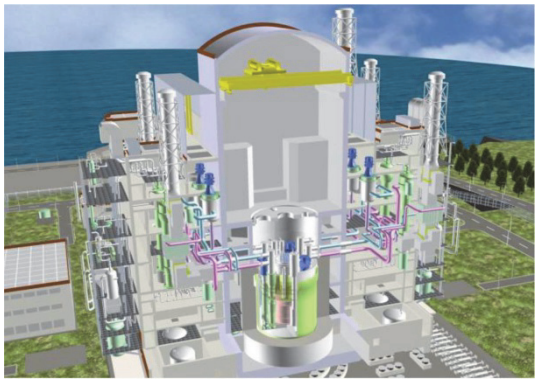
高速炉開発への取組み

Mitsubishi Activities for Advanced Reactor Development
- Sodium-cooled Fast Reactor -



碓井 志典*1 Yukinori Usui
飯塚 透*2 Toru Iitsuka
坂場 弘*3 Hiroshi Sakaba
小林 茂樹*4 Shigeki Kobayashi
持田 晴夫*5 Haruo Mochida
清水 亮*5 Ryo Shimizu

我が国は，資源の有効利用，高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から，使用済燃料を再処理し，回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本的方針としており，高速中性子によるプルトニウムの核分裂反応を利用する高速炉を開発している。東日本大震災の後，高速炉の開発環境は大きく変化し，2016 年 12 月，高速増殖原型炉“もんじゅ”の廃止措置移行が決定されたが，昨今の状況変化によっても，ウラン資源の有効利用や廃棄物の減容化・有害度低減を可能とする高速炉開発の意義は何ら変わるものではない。国は，2018 年 12 月，“戦略ロードマップ”にて 21 世紀半ば頃の高速炉の運転開始への期待を表明している。当社は，“戦略ロードマップ”を達成して環境負荷の低減と化石燃料に頼らない未来を実現するため，我が国の高速炉開発を一手に担う中核企業として高速炉開発に取り組み続けている。

1. はじめに

中国やインドに代表される新興国のエネルギー消費が急速に増加する中，化石燃料を始めとする資源枯渇が現実の問題となりつつある。最近の調査によると，石油や天然ガスは約 50 年程度で，石炭は約 130 年程度，そしてウラン資源を利用する原子力発電においても使用済燃料の再処理によるリサイクルを考慮しない場合，約 100 年程度が利用の限界と推定されている。

このような状況の中，地球温暖化の問題も相まって，太陽光や風力等の利用により発電時に CO_2 などのグリーンハウスガス(Green House Gas，以下 GHG)を排出しない再生可能エネルギーが注目され，主力電源化に向けて整備が進められている。しかし，再生可能エネルギーのみでは“安定的で経済的”という産業基盤を担うエネルギー源には成り難い。そこで，GHG の排出がなく，さらには資源枯渇問題に対応できるエネルギー源である原子力発電との共存が有効となる。その中で高速炉は，軽水炉のような減速材を用いず，高速の中性子を核分裂に使用することで燃料の増殖が可能となり，現在の原子力発電所の使用済燃料から取り出されるプルトニウムも再び燃料として使用することで，ウラン資源利用可能年数を 100 年から数千年規模へと飛躍的に高めることができる。

また一方で，使用済燃料にはマイナーアクチニド(Minor Actinide，以下 MA)と呼ばれる寿命の長い放射性物質が含まれるため，その処理・処分に課題がある。高速炉は高速中性子を使用し

*1 原子力セグメント新型炉・原燃サイクル技術部 次長
*2 原子力セグメント新型炉・原燃サイクル技術部 主席プロジェクト統括
*3 原子力セグメント新型炉・原燃サイクル技術部 主席技師
*4 三菱 FBR システムズ(株)企画・プロジェクト部 部長
*5 三菱 FBR システムズ(株)企画・プロジェクト部

ているため，MA を再度燃料に装荷して半減期の短い放射性廃棄物に変換することが可能であり，放射性廃棄物の減容化に寄与する。すなわち，高速炉は，数千年の超長期に渡り安定したエネルギー源に成りうるとともに，環境負荷を低減できる画期的なエネルギー源である

我が国ではこのような情勢を踏まえ，日本原子力研究開発機構（Japan Atomic Energy Agency，以下 JAEA）が中心となって高速炉の研究開発が行われている。

2. 当社の取組み

当社は，実験炉“常陽”や原型炉“もんじゅ”など，国家プロジェクトとしての高速炉開発に積極的に参画して，主要機器の設計や，製作，据付，現地工事などを実施し，メーカとして主導的な役割を担ってきた。そして，もんじゅに続く炉の開発のために電力会社が実施した“電力実証炉研究”及び JAEA などが実施した“実用化研究”において，ループ型である常陽やもんじゅで国内に蓄積された技術からのつながりも考慮され，当社が提案した三菱重工ループ型炉を基に開発が進められた（図1）。

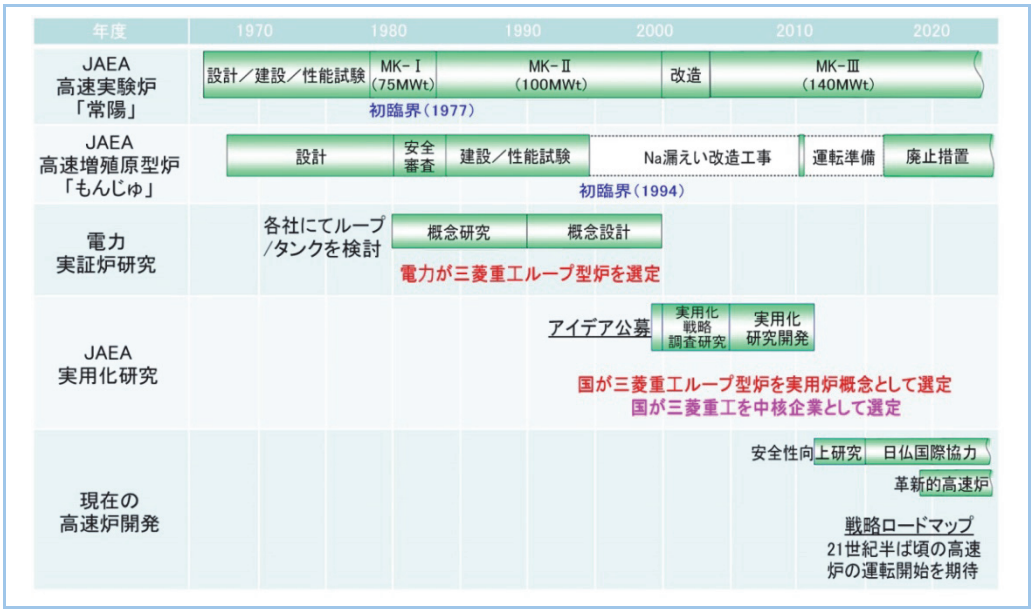


図1 高速炉開発の歴史

その後，国は高速炉の開発を明確な責任体制の下で効率的に実施できるよう，中核企業1社に責任と権限及びエンジニアリング機能を集中することを決定し，公募の結果，当社が中核企業に選定され，高速炉開発やエンジニアリングを集中して実施する三菱 FBR システムズ(株)（以下 MFBR）を設立した。当社及び MFBR は，現在に至るまで我が国の高速炉開発の中核として，日仏国際協力によるタンク型炉の開発や将来の多様化するニーズに柔軟に対応するための革新的高速炉の開発に取り組んでいる。

3. 今後の開発作業を特定する“戦略ロードマップ”の策定

国は今後の高速炉開発の進め方を検討するため，2016 年 10 月に経済産業大臣，文部科学大臣，JAEA 理事長，電気事業連合会会長及び当社社長をメンバーとする“高速炉開発会議”を設置した。高速炉開発会議は計5回開催され，同年 12 月に“高速炉開発の方針”が原子力関係閣僚会議にて決定された。これには“引き続き，MOX（Mixed Oxide）燃料によるナトリウム冷却炉を念頭に高速炉開発を継続していく”との記載とともに，“今後 10 年程度の開発作業を特定する『戦略ロードマップ』を策定する”ことと，“その検討のために高速炉開発会議の下に『戦略ワーキンググループ』を設置”することが記載された。

戦略ワーキンググループは計 16 回開催され，2018 年 12 月に『戦略ロードマップ』が原子力関係閣僚会議にて決定された。そこには“高速炉の本格的利用が期待されるタイミングは 21 世紀後

半のいずれかのタイミングとなる可能性がある。”，“例えば21世紀半ば頃の適切なタイミングにおいて，技術成熟度，ファイナンス，運転経験等の観点から現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待される。”と記載された。

研究開発の進め方は，“まず当面5年間程度は，（中略）多様な技術間競争を促進する。”とされ，“今後の開発に当たっては，フランスや米国等との二国間及び多国間でのネットワークを活用した国際協力によって，（中略）実用化のための技術基盤の確立とイノベーションの促進に，国内外一体となって取り組んでいく。”と国際協力の活用も記載された。

当社はこれら高速炉開発の方針及び戦略ロードマップに従い，着実に高速炉を開発していく。

4. 技術開発の状況

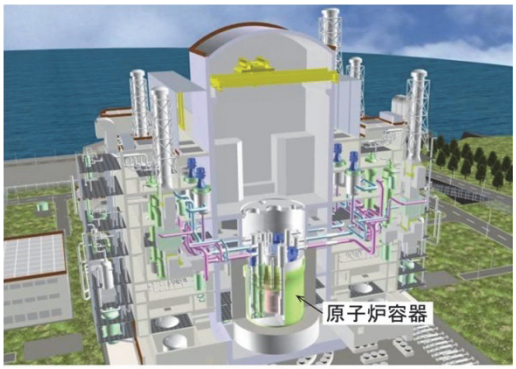
これまで日本では実験炉“常陽”，原型炉“もんじゅ”とループ型炉を開発してきたが，海外ではタンク型炉が主流となっている。ループ型炉は中間熱交換器と1次系ポンプを配管で原子炉容器と接続する概念，タンク型炉は両機器を原子炉容器内に設置する概念であり，両炉型の差は1次系機器の接続方法のみであるため，必要となる技術に大きな差は生じない。

当社は，前項に示す戦略ロードマップに従い，国際協力による効率的な開発を目指し，これまで開発してきたループ型炉に加え日仏国際協力を活用したタンク型炉の開発も進めている。さらに，将来の多様化するニーズに柔軟に対応すべく，革新的高速炉 MCR（Mitsubishi Compact Reactor）の開発も行っており，ユーザーの要求（プラント仕様）に応じて適切なプラントを提供できる技術を蓄積している。これらの開発の中から，タンク型炉及びMCRの開発状況を以下に示す。

4.1 日仏国際協力によるタンク型炉の開発

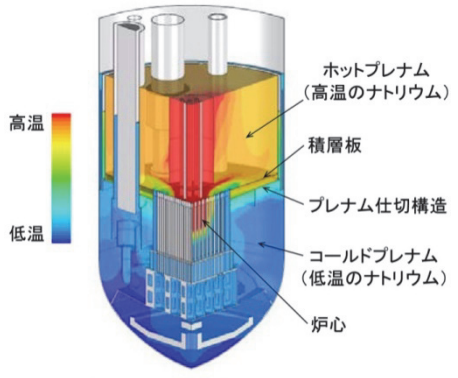
当社及びMFBRは，“仏国次世代炉計画（ASTRID：Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration）及びナトリウム高速炉の協力に関する実施取決め”（2014年～2019年）のもと，JAEA，フランス原子力・代替エネルギー庁（以下 CEA：Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives）らとともに，ナトリウム冷却高速炉の主要技術の共同開発を実施し，タンク型炉に関する知見を獲得した。さらに，本共同開発で獲得した知見をベースに，国内の厳しい地震条件に対応できるタンク型炉の開発を進めている。

タンク型炉は，ループ型炉と比較して原子炉容器径が大きくなるため，国内の地震条件では耐震性上厳しいと考えられていたが，耐震性を向上させた構造，免震システム等の採用により成立見通しが得られている。図2にタンク型炉のプラント鳥瞰図を示す[(1)]。特に，タンク型炉の原子炉構造については，耐震評価や熱流動評価に基づいて構造健全性を確保した独自の概念を構築した。例えば，原子炉容器内の高温部と低温部を分けるプレナム仕切構造には補強材を設けて剛性を確保するとともに，構造の上下での温度差が小さくなるよう積層板を設置している。本構造概念によりプレナム仕切構造上下の温度差が低減され，構造健全性が確保できることを3次元熱流動解析で確認している[(2)]（図3）。



ループ型炉と比較して原子炉容器が大型となる。

図2 タンク型炉のプラント鳥瞰図



プレナム仕切構造の上部に積層板を設置し，
上下の温度差を低減した。

図3 タンク型炉の炉内熱流動評価結果

さらに，高速炉の実用化に向けて表1に示す研究開発を現在実施中である。これらの中からループ型炉とタンク型炉に共通する課題であり，特にタンク型炉に対して重要性の高い No.1から No.3の開発状況を 4.2 項から 4.4 項に示す。

表1 高速炉の実用化に向けて実施中の研究開発

	開発項目	目的
1	炉心耐震評価手法	地震時，水平及び上下方向に変位し，相互に衝突する炉心構成要素の群振動挙動を評価可能な手法の開発
2	スロッシング評価手法	地震時のスロッシングにより，原子炉容器内のナトリウム液面が原子炉容器天井へ衝突することで発生する荷重を評価可能な手法の開発
3	3 次元免震システム	水平免震装置と同程度のスペースに配置が可能で，水平に加えて上下方向の地震力を低減可能な免震システムの開発
4	受動的炉停止系システム	高温で磁力を失う電磁石の特性のみにより，ナトリウムの温度上昇で制御棒の挿入が可能な炉停止系システムの開発
5	高温中性子計装	原子炉容器内の高温条件で中性子を計測可能な装置の開発
6	ナトリウム中目視検査装置	超音波を用いて，不透明なナトリウム中での目視検査を可能とする検査装置の開発
7	座屈評価手法	高速炉機器の特徴である薄肉大口径容器の座屈評価手法の開発
8	高温構造材料特性の取得	500℃以上の高温で使用される構造材料の高温長時間材料特性データの取得

なお，日仏協力に関しては前述の取り決め以降も，今後の高速炉開発を効率的に進めていくことを目的として，JAEA，CEA，MFBR及び当社は“ナトリウム冷却高速炉開発計画協力の実施取決め”(2020 年～2024 年)を 2019 年 12 月に締結した。今後は本取決めに基づく研究開発協力で得られた知見も活用し，地震条件も含め国内に立地できるタンク型炉の開発を進めていく。

4.2 炉心構成要素の挙動を把握する炉心耐震評価手法の開発

高速炉の炉心は，燃料棒を内包する燃料集合体など多数の炉心構成要素を炉心支持構造物上に自立させることで構成されている。そのため，地震時には，それぞれの炉心構成要素は他の炉心構成要素と衝突しながら水平方向に変位し，また，強い地震動においては炉心支持構造物の上下動によって上方に跳び上がり，落下する。この多数の炉心構成要素に衝突力や流体力が作用する複雑かつ非線形性の強い3次元群振動挙動を評価するために，当社は炉心群振動解析コード REVIAN-3D[(3)]を開発した。REVIAN-3D は，モーダル解析の手法を取り入れた時刻歴応答解析コードであり，炉心構成要素数が 1000 体を超える大型炉心に対しても，炉心構成要素の跳び上がりを含む群振動挙動を評価可能な解析コードである。

この REVIAN-3D に対し，当社が所有する大型振動台を用いた振動試験により評価手法の検証を実施してきた[(4)]。開発は炉心構成要素実寸単体の試験から着手し，縮尺モデルを使用した37体群体系，32 体列体系，313 体多数体系と，段階的に体数を増やして試験体系を拡大し，その都度，試験結果と解析結果を比較することによって解析コードの妥当性を確認するとともに，適宜，計算モデルに修正を加えることで，解析コードの精度を向上してきた(図4)。

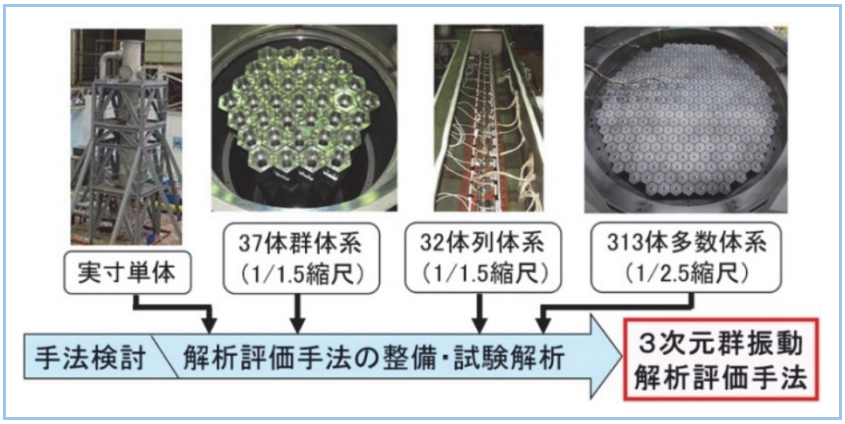


図4 段階を踏んだ炉心群振動解析コードの開発

なお，REVIAN-3D は次世代高速炉に向けて開発された解析コードであるが，原型炉“もんじゅ”の廃止措置計画の変更認可の審査において，廃止措置中の炉心構成要素の耐震評価に使用されている。また，4.1 項に示す日仏共同開発において，日仏双方の解析コードの比較検証を行うためにベンチマーク解析を実施するなど，今後の新規制基準における許認可解析に適用するための検証データの蓄積を続けている。

4.3 液面衝突による荷重を把握するスロッシング評価手法の開発

高速炉は，軽水炉に比べ高温低圧のシステムであり原子炉容器内にはナトリウムの液面が存在する。そのため地震時には液面のスロッシング（液面揺動）が生じるが，次世代の高速炉では免震システムを採用しているため，地震荷重は低減される反面，原子炉容器液面のスロッシングが生じやすくなる。従来の高速炉でのスロッシング評価は，速度ポテンシャル理論を用いて求めたナトリウム液面が原子炉容器の天井へ衝突しないことをクライテリアとしてきたが，免震システムの採用と地震条件が厳しくなったことにより，非線形のスロッシング評価方法の導入と天井へのナトリウム液面の衝突荷重の推定が必要となっている。そのため，非線形スロッシングによって生じる波高や天井衝突荷重を把握するための水試験（図5（1）（2））を実施し，短時間で荷重を評価可能な簡易評価手法と CFD 解析による詳細評価手法の検討を行った[5]。その結果，荷重計位置での荷重は CFD 解析及び簡易評価手法によりおおむね評価できる見通しが得られた（図5（3））。一方，現状の簡易評価手法では天井全体に加わる荷重の評価精度が低い（図5（4））ため，荷重の範囲と分布を合理的に求めるための評価方法を提案し，CFD 解析により検証した[6]。今後，これらの評価方法を簡易評価手法に組み込んで評価精度の向上を図るとともに，設計評価への適用性を確認していく。

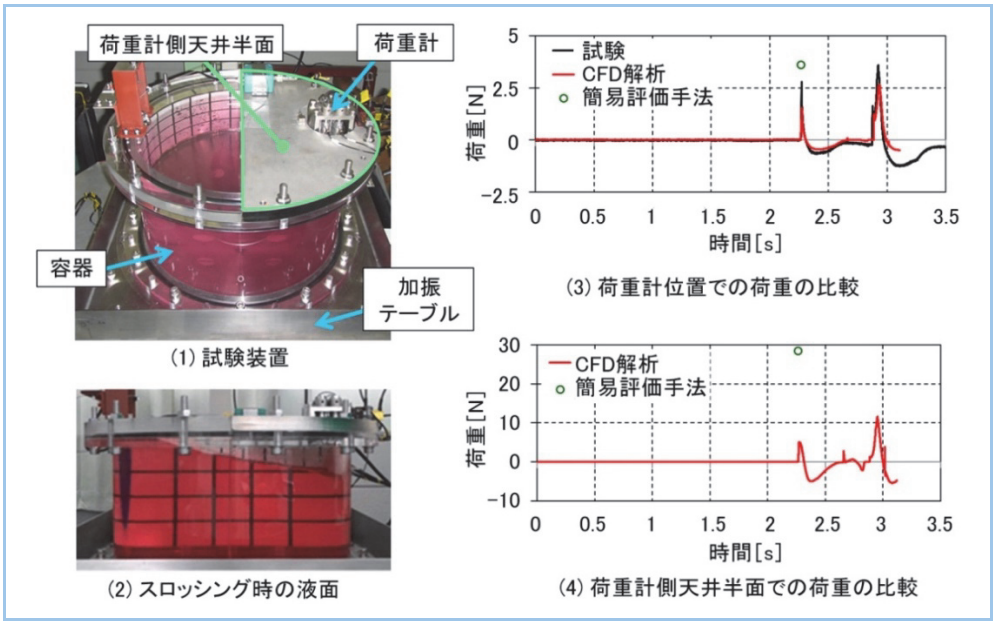


図5 スロッシング試験装置及び試験，解析，簡易評価結果

4.4 水平・上下方向の地震力を低減する3次元免震システムの開発

軽水炉に比べ高温条件で運転される高速炉は，容器の内側と外側の温度差により発生する応力を低減するため機器を薄肉構造とする必要があり，薄肉の機器に作用する地震力を低減するため水平免震技術の導入が検討されてきた。しかし，近年増大している地震条件に対応するためには，水平のみならず上下方向の地震力の低減が重要になっており，この実現に向けて，新たな3次元免震システム（図6）を開発中である[7]。

3次元免震システムでは，水平に加えて上下方向の地震力を低減する機能を，従来の水平免震装置と同程度のスペースに配置することが求められる。これを実現するためには，限られたスペースで支持機能と復元機能を両立させる必要があり，大型の皿ばねを組み合わせた皿ばねユニットにより省スペースでの機能確保を可能としている。

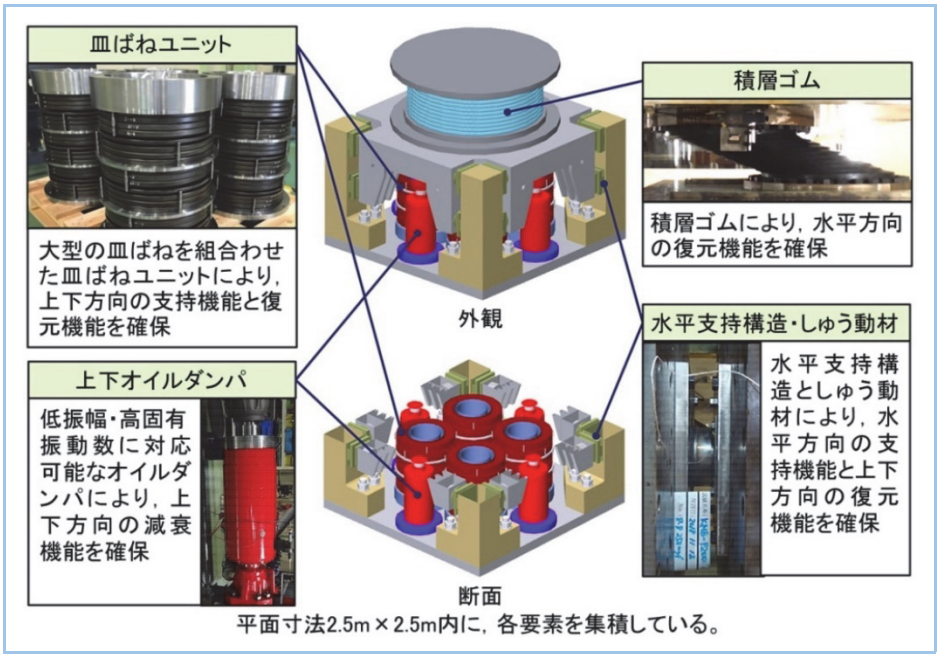


図6　3次元免震システムの概念

皿ばねユニットに使用される多数の皿ばねのばね特性には個体差が避けられないため，皿ばねを組み合わせた際の，①皿ばねユニットのばらつきを低減できる皿ばねの組合せの設定，及び②地震応答解析に用いる解析モデルの設定が課題となる。そこで，これらの課題を，①膨大な皿ばねの組み合わせの最適化問題，及び②試験結果を基に解析モデルの変数を同定させる最適化問題に帰着させ，これを解決するため，AI の一種であるメタヒューリスティックアルゴリズムを適用した手法を開発した[8]。この手法を用いることで，安定した荷重－変位関係を実現可能な皿ばねの組合せと，実現象に即した解析モデルの変数を効率的に取得することができる。これらの結果を用いた地震応答解析により，本3次元免震システムの水平・上下方向の地震応答低減効果を確認している。

今後は，システムを構成する皿ばねやオイルダンパなどの各要素を実際に組み合わせた試験を行い3次元免震システムの性能を確認し，本システムの実現を目指す。

4.5　革新的高速炉 MCR（Mitsubishi Compact Reactor）の開発

高速炉に対する多様化するニーズに対応するため，革新技術による安全性，信頼性，経済性の向上を狙いつつ，これまで培った技術により開発要素の低減と開発期間の短縮が可能で，かつ，投資リスクの小さい小型炉概念として，当社独自の革新的小型ナトリウム冷却高速炉 MCR を開発している（図7）。

MCR は，これまで当社が高速炉開発の中核企業として培った技術・知見をフル活用できる技術的成熟度の高い電気出力 200MWe 程度の小型タンク型ナトリウム冷却高速炉であるが，将来の事業者ニーズに柔軟に対応できるよう，1000MWe 級まで出力拡張が容易にできる設計としている点が特徴である。

MCR において採用している主な革新技術は，粒子型金属燃料を用いた炉心，及びナトリウム冷却材にナノ粒子を混入したナノ流体である。粒子型金属燃料炉心の反応度特性を活用することで，異常な過渡変化後の原子炉トリップ失敗時にも受動的な反応度特性のみによる出力低下を可能とし，高速炉の開発当初から最大の脅威とされてきた仮想的炉心損傷を回避できる概念としている。また，ナノ流体の採用によりナトリウムの化学的活性を抑制し，蒸気発生器でのナトリウム－水反応の影響を限定化するなど，ナトリウムを使用することへの社会的懸念を払拭すべく信頼性を高めている。さらに，将来の他電源に匹敵しうる高い経済性の実現を目指し，小型炉の段階から系統構成を極力簡素化したプラント概念とし，開発費を抑制しつつ社会的要請に応じて出

力を大きくすることが可能なプラントとしている。

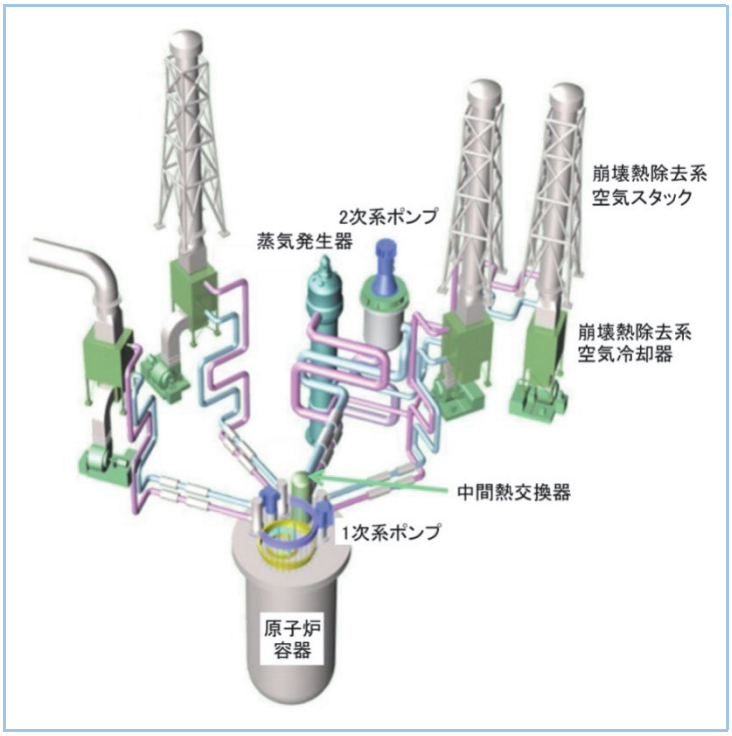


図7 MCR-200 のプラント鳥瞰図

5. まとめ

東日本大震災の後，高速炉の開発環境は大きく変化したが，国は，戦略ロードマップにて，21世紀半ば頃の高速炉の運転開始への期待を表明している。当社は，国家プロジェクトである高速炉サイクルの重要性を認識し，高速炉開発の初期段階から開発に積極的に参画しており，我が国の実用化に向けた高速炉開発を担う中核企業として高速炉の開発に取り組み続けている。今後も，国の方針に従い，国際協力も活用しながら，我が国に適合する高速炉開発を進め，環境負荷の低減と化石燃料に頼らないエネルギー供給の実現に貢献していく所存である。

本論文は，経済産業省からの受託事業である“高速炉等技術開発”及び“高速炉の国際協力等に関する技術開発”の一環として実施した成果の一部を含みます。

参考文献

(1) 令和元年度 高速炉の国際協力等に関する技術開発
(2) Kubo, S. et al, A CONCEPTUAL DESIGN STUDY OF POOL-TYPE SODIUM-COOLED FAST REACTOR WITH ENHANCED ANTI-SEISMIC CAPABILITY, 27th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE27-1651, (2019)
(3) 岩崎晃久ほか，高速炉の炉心耐震解析手法の構築，日本機械学会論文集 Vol.82, No.839 (2016)
(4) 山本智彦ほか，高速炉炉心の耐震性評価技術開発(1)～(3)，日本原子力学会 2019 年秋の年会
(5) Morita, H. et al., Study on the Predictive Evaluation Method of Nonlinear Sloshing Wave Crest Impact Load on the Roof of Cylindrical Tanks, ASME PVP2019-93442
(6) Ikesue, S. et al., Study on the Predictive Evaluation Method for Liquid Surface Shape and Flow Velocity in Nonlinear Sloshing Based on Simplified Equations, ASME PVP2020-21344
(7) 宮川高行ほか，3 次元免震装置開発計画・設計要求，日本建築学会大会学術講演梗概集，(2018)
(8) Fukasawa, T. et al, Research and Development of Three-Dimensional Isolation System for Sodium-Cooled Fast Reactor (Part 4) Proposal of Optimal Combination Method for Disc Spring Units and Newly Friction Model for Sliding Elements, ASME PVP2019-93480