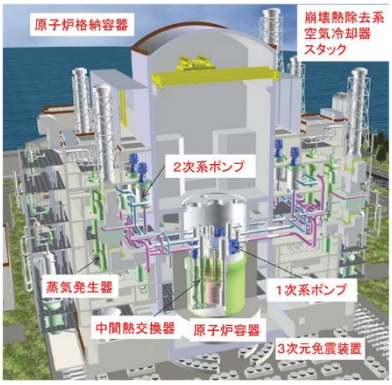
高速炉実証炉建設に向けた中核企業としての取組み

MHI's Activities for Constructing a Demonstration Fast Reactor as a Core Company



栗田 晃一 *1
Kouichi Kurita

河村 雅也 *2
Masaya Kawamura

坂場 弘 *3
Hiroshi Sakaba

鵜澤 将行 *4
Masayuki Uzawa

持田 晴夫 *5
Haruo Mochida

2022 年 12 月に原子力関係閣僚会議にて改訂された"戦略ロードマップ"[1]において，ナトリウム冷却高速炉を対象に 2024～2028 年度頃に実証炉の概念設計・研究開発を実施し，2028 年度頃に実証炉の基本設計・許認可フェーズへの移行の判断を行うという計画が定められ，2023 年 7 月には，三菱重工業株式会社が実証炉開発の中核企業に選定された[2]。三菱重工業株式会社は放射性廃棄物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

原子力エネルギーは，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。その中で高速炉は，高速中性子を核分裂に使用することで高レベル放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減による環境負荷の低減を可能とするとともに燃料の増殖が可能であり，ウラン資源の利用可能年数を飛躍的に高めることができる。また，"戦略ロードマップ"においては，"世界における高速炉を含めた革新炉開発の加速"の状況として，中露が米英仏に先駆けて高速炉の開発・実証を推進し，2030 年代に商用炉を導入予定であることなどを踏まえ，米加においても 2030 年代の前後に高速炉の実証炉建設プロジェクトが立ち上がっている状況が述べられている。

こうした状況を受け，我が国では，高速炉開発に関し，2022 年 7 月の経済産業省原子力小委員会革新炉ワーキンググループ（WG）において革新炉の技術ロードマップが示され，この中で高速炉実証炉は 2040 年代半ばの運転開始が提示されており，それに従って開発が進められる[3]。

2. 実証炉建設に向けた"戦略ロードマップ"と三菱重工の取組み

高速炉にはループ型とタンク型の二つの型式がある。ループ型は炉心を収めた原子炉容器，1 次ナトリウム循環ポンプ，及び中間熱交換器を配管で接続した構成であり実験炉"常陽"，原型炉"もんじゅ"はこの炉型である。一方，タンク型は炉心，1 次ナトリウム循環ポンプ，及び中間熱交換器を 1 つの大きな主容器に収納するものである。三菱重工業株式会社（以下，当社）は 1970 年代から高速炉の開発に取り組み，常陽，もんじゅの設計，製造，建設に携わってきた。2007 年には当時の中核企業に選定され，高速炉のエンジニアリングを専業とする三菱 FBR システムズ株式会社（以下，MFBR）を設立し，高速炉技術の蓄積・向上を図ってきた。2014 年からは日仏国際協

*1 原子力セグメント 先進炉技術部 グループ長
*2 原子力セグメント 先進炉技術部 主席プロジェクト統括
*3 原子力セグメント 先進炉技術部
*4 三菱 FBR システムズ株式会社 プロジェクト部 部長
*5 三菱 FBR システムズ株式会社 プロジェクト部 主席プロジェクト統括

力にも参画し，タンク型炉の知見の獲得も行っており，いずれの形式の高速炉にも対応可能な技術を蓄積してきた[4]。

2022 年 12 月に改訂された“戦略ロードマップ”において，高速炉開発の意義として，“高速炉を活用することで，原子力の最重要課題の一つである放射性廃棄物の問題に対処し，原子力全体を循環型エネルギーとすることが可能である。”と明示されるとともに，世界における高速炉を含めた革新炉開発の加速といった世界の潮流を受け，日本においてもナトリウム冷却高速炉を対象に 2024～2028 年度頃に実証炉の概念設計・研究開発を実施し，2028 年度頃に実証炉の基本設計・許認可フェーズへの移行の判断を行うという計画が定められた。2023 年 3 月に経済産業省資源エネルギー庁から，2024 年度から開始される実証炉の概念設計対象となる炉概念仕様と，その設計，製造，建設を担う中核企業が募集された。当社はこれに応募し，2023 年 7 月に開催された高速炉開発会議・戦略 WG で中核企業に選定された[2]。

3. 技術開発の状況

3.1 選定された国内高速炉実証炉概念と今後の計画

国内高速炉実証炉では，高い経済性が期待できる大型炉への拡張が容易な，ウラン・プルトニウム混合酸化物（MOX）燃料中型ナトリウム冷却タンク型高速炉が主概念として選定された（金属燃料は副概念）。この概念では国内先行炉の設計，建設，運転知見・既往プロジェクトの技術蓄積並びに国際協力での知見取得による高い技術成熟度のプラントを実現できるものであり，選定理由の一つとなっている。高速炉実証炉の概念設計の開始に先立ち，タンク型炉の構造や安全設計概念，実用規模の大型化に関する予備検討を実施している。また，国際的な安全設計基準（GIF-SDC/SDG 第 4 世代炉国際フォーラムの安全設計クライテリア/安全設計ガイドライン）の反映による新規制基準適合を考慮した安全設計を行うことにより高い安全性を確保するとともに，経済性向上のため，より高燃焼度の燃料（太径中空ペレット）を採用している。なお，今後再起動を予定している実験炉“常陽”において，照射試験によりこの燃料の成立性が実証される予定である。

この高速炉実証炉の主要仕様について原型炉“もんじゅ”と比較したもの表 1 に示す。また，プラント概念図を図 1 に示す[5]。

これまでに実施した主要な機器の概念検討の例として，図 2 に原子炉構造の概念図，表 2 に原子炉構造の主要仕様をそれぞれ示す。また，主要な設計課題の検討結果について以下に述べる。

まず，タンク型炉においては，図 3 に示すように主容器内に配置された中間熱交換器（以下，IHX）が液面からガスを吸い込み，伝熱性能の低下や炉心反応度異常の要因となる，主容器内ガス巻込み（主容器内ホットプールの冷却材ナトリウムの液面が乱れると，冷却材中にアルゴンガスを巻き込んで気泡が発生する。この気泡は原子炉の出力に影響を与える可能性があり，安全性を確保するためにこの発生量を抑制する必要がある）を防止することが，流動に係る主要な設計課題の一つである。これについて，IHX 入口窓に到達しうる渦のみを評価対象として，過度な保守性を排除した流動評価を行った結果，IHX 入口窓に到達する渦は生じないことを確認し，ガス巻込みは発生しない見通しを得ている。次に，耐震性の確認については，主容器内の冷却材の液面スロッシングの観点より液面が炉上部に衝突した場合の数値流体力学（以下，CFD）解析による確認を行い，免震装置の採用による構造健全性の成立の見通しを得ている。また，高速炉特有の重大事故である，仮想的炉心損傷事故（外部電源喪失による炉心流量低減時の緊急炉停止失敗事象等）時に発生する機械的エネルギー（即発臨界状態の炉心が高温となり，冷却材等の急激な蒸発により発生する気泡膨張エネルギー）に対する耐衝撃性については，衝撃応答解析により主容器，搭載機器のひずみ等が許容範囲に収まる見通しを得ている。これらを含め，構造健全性や熱流動等の複合的な技術課題に対して設計評価を行い，成立の見通しを確認している[6]。

表1 三菱が提案した高速炉実証炉の主要仕様

	提案したナトリウム冷却高速炉	(参考) 原型炉“もんじゅ”
出力	650 MWe :ニーズに合わせ 150MWe-1 000MWe まで対応可能	280 MWe
炉型	タンク(国際協力で知見獲得)	ループ
燃料(ペレット)	MOX(太径中空ペレット) :副概念として金属燃料も検討	MOX(中実ペレット)
炉心出口温度	550 ℃	529 ℃
原子炉容器径	～ 約 16.5 m	約 8 m
主要構造材	316FR 鋼 (高温強度を高めた高速炉用ステンレス鋼)	SUS304

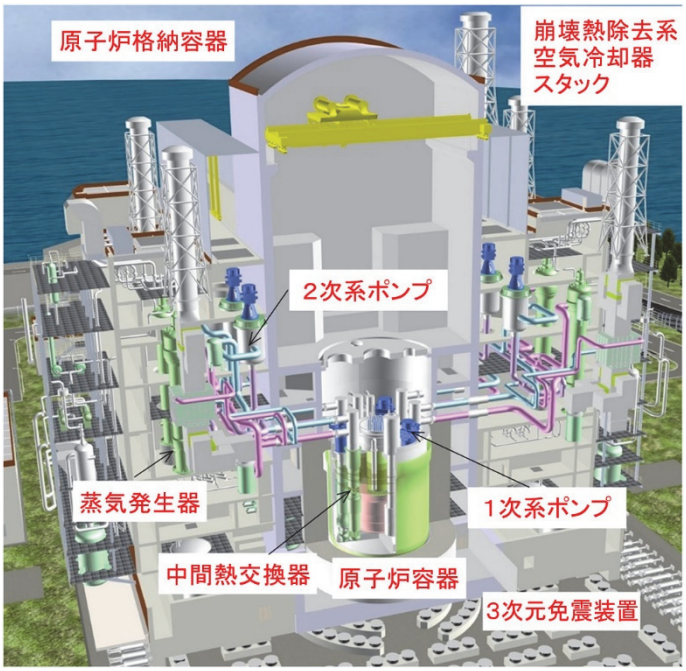


図1 高速炉実証炉プラント概念図

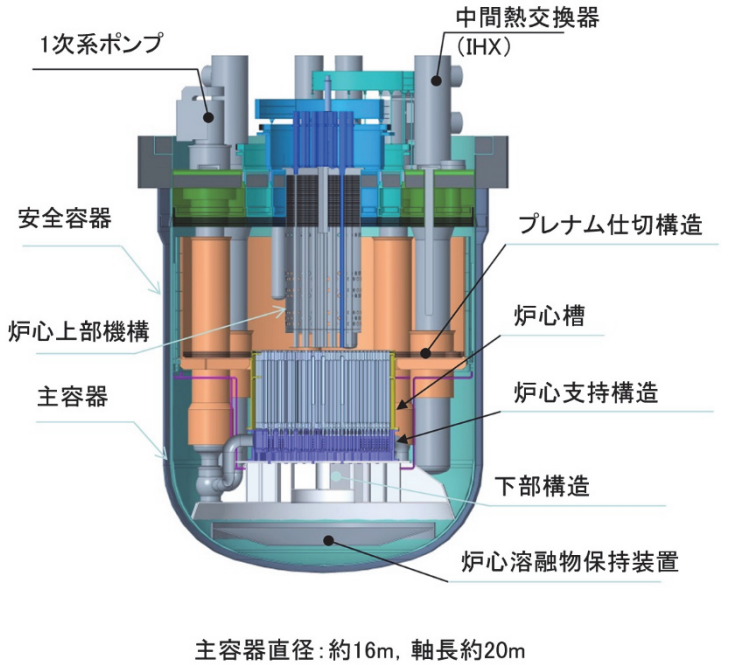


図2 原子炉構造 概念図

表2 原子炉構造 主要仕様

炉壁保護形式	低温ナトリウム循環
主要材料	316FR 鋼
運転温度	高温部:550℃ 低温部:400℃
耐震条件	免震建屋条件
シビアアクシデント対応	炉心損傷時の機械的エネルギー放出を想定
中間熱交換器 基数	4 基
1 次ポンプ 基数	3 基

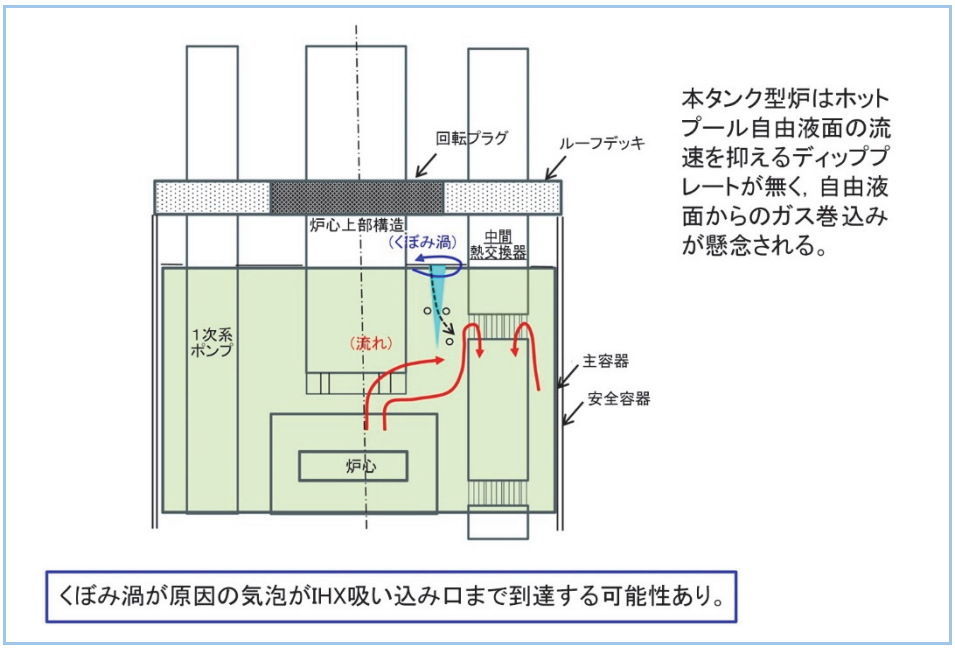


図3 タンク型炉でのガス巻込みの挙動

今後，これまでの検討成果を基に概念設計を開始するあたり，主なプラント仕様と設計条件が定められる予定である。定められた仕様と条件に従って炉心燃料，原子炉構造，冷却系，原子炉格納施設・建屋，周辺機等の設備ごとに設計を固めるための概念設計を実施し，システム全体として整合性があり，技術的成立性が見込めるプラントを構築するとともに，安全性/信頼性，経済性，環境負荷低減性，資源有効利用性等の開発目標適合性に関する評価結果を提示していく。また，新たに導入した設計や評価技術に関する研究開発を進め，それらの成果を反映しながら概念設計の確度を高めるとともに技術的裏付けを整備していく。

さらに，概念設計と合わせて基本設計以降の開発計画を策定するとともに，実用規模の大型炉への外挿性についても引き続き検討していく。それらの成果をもって，2028 年度頃を想定している概念設計終了段階において，基本設計への移行を判断する材料とする計画である。図 4 に高速炉開発の全体計画を示す。

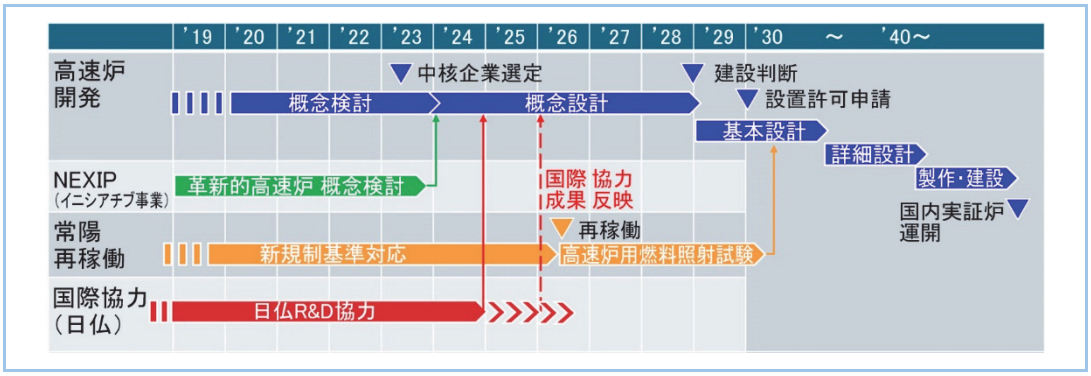


図4 高速炉開発計画

3.2 高速炉実証炉に関する研究開発課題への取組み

概念設計段階で実施する研究開発項目の設定にあたっては，日本原子力研究開発機構（以下，JAEA），MFBR，及び当社において，プラントを構成する各設備が開発目標を満足するために果たすべき機能を整理し，これを実現する上で必要となる研究開発課題を抽出した。これらの研究開発課題については，JAEA，MFBR，及び当社にて分担し，研究開発成果を実証炉設計へ反映する。

当社にて検討する主なものとして，原子炉構造について抽出された研究開発課題の例を図 5 に示す[6]。安全性に係る要求機能として，バウンダリ機能維持や炉心損傷防止等があり，これらを達成するための技術課題としてガス巻込みの防止や自己作動型炉停止機構（以下，SASS）の開発等を抽出した。

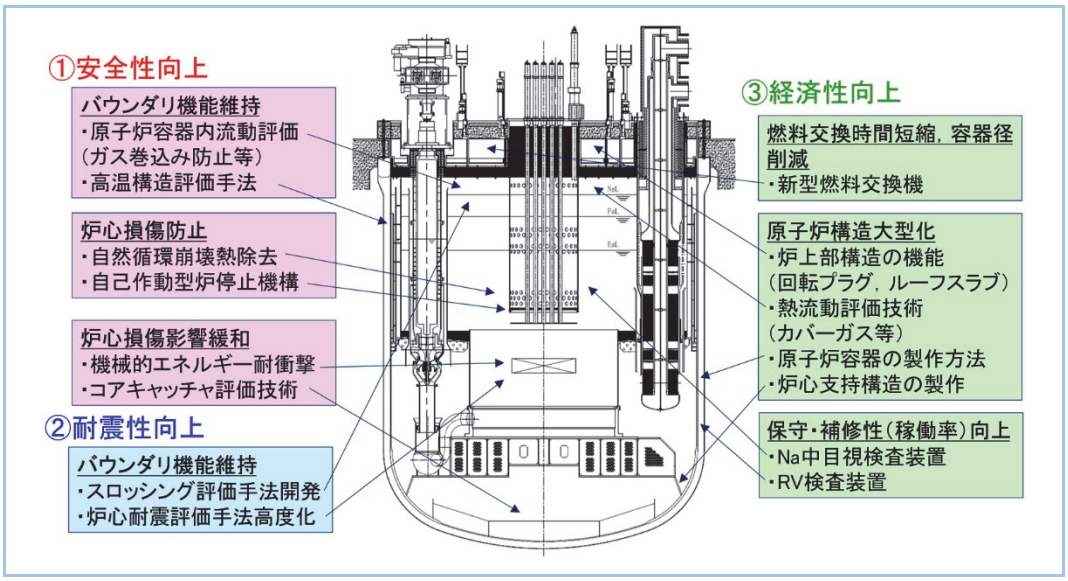


図5 原子炉構造の要求機能と技術課題の整理検討

研究開発の検討例として，SASS のフィージビリティ評価について述べる。高速炉実証炉では，燃料集合体から炉心上部に流出した冷却材の異常な温度上昇により温度感知合金が磁性を失い，受動的に制御棒を落下させることで炉停止できる SASS を後備炉停止系の制御棒切離し部に具備している。実証炉として対象とするタンク型炉では，SASS 周辺にある集合体出口部から温度感知合金近傍までの構造を従来検討していたループ型炉から変更した。このため，SASS の有効性評価では，燃料集合体から出た高温冷却材が SASS に到達するまでに要する輸送遅れ時間（図 6）の把握が重要となるため，この遅れ時間を CFD 解析により改めて評価した。これにより得られた遅れ時間を用いて，プラント動特性解析コードにより，代表的な能動的炉停止失敗（ATWS）事象である冷却材流量喪失（LOF）型事象等の 1 次元過渡解析を行った（図 7）。起因事象である外部電源喪失により冷却材流量が低下し，能動的炉停止系による原子炉トリップに失敗することで出力及び冷却材温度が上昇するが，SASS 感知合金温度が切離れ温度に到達し，制御棒が落下する。この時，冷却材最高温度は，安全性の判断基準（冷却材沸騰温度）を超えることなく，SASS の有効性を確認している[6]。

今後，図 4 の開発計画に示すように 2029 年度の基本設計開始及び 2030 年代の安全審査開始を前提として，2024～2028 年度頃の概念設計段階ではプラント概念を構築するため，機器単体の開発を進める。基本設計段階では，安全審査に向け，実証炉の詳細仕様を設定するため，運転性等のシステム性能の実証・確認を行う計画である。

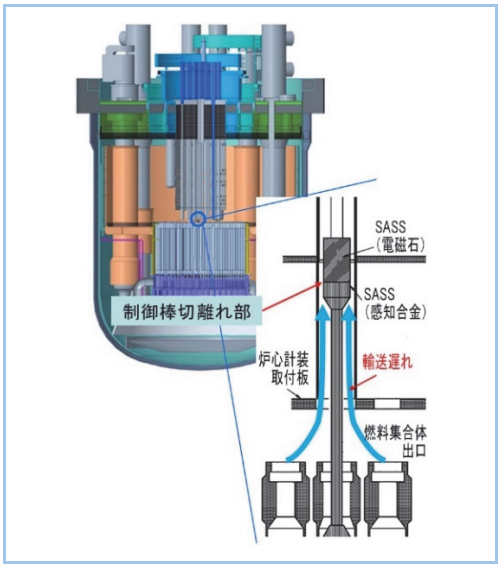


図6 SASS 周辺構造

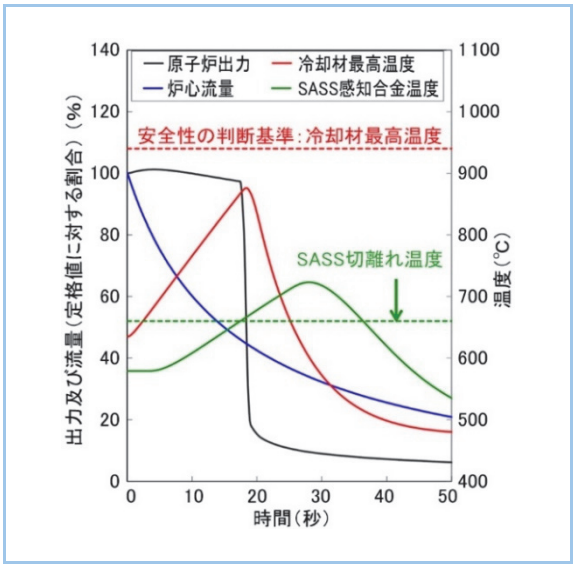


図7 LOF 型 ATWS 事象の過渡解析結果

3.3 日仏・日米における国際協力活動

日仏協力として，MFBR 及び当社は，“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），及び“ナトリウム冷却高速炉開発計画の協力に関する実施取決め”（2020 年～2024 年）のもと，JAEA，フランス原子力・代替エネルギー庁（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てきている。また，日米協力として，高速炉開発協力関係構築及び高速炉開発に関する技術力の維持・向上を目指し，JAEA，MFBR，及び当社は，米国エネルギー省（DOE）のサポートの下，先進的原子炉設計の実証プログラム（ARDP）の中でナトリウム冷却高速炉“Natrium”を開発している米国テラパワー社と，2023 年 10 月，“ナトリウム冷却高速炉技術に関する覚書”（改訂）の締結を行った。これにより，現状計画の Natrium の仕様よりも大型化した場合の各システム等の概念に係る検討や金属燃料のシビアアクシデントの情報交換等を進めている。

4. まとめ

当社は，これまで長年にわたり培ってきたナトリウム冷却高速炉技術をベースに，国内高速炉実証炉の開発を鋭意推進している。引き続き検討を進め，世界最高レベルの技術基盤の維持・発展を図りつつ，高い安全性と経済性を同時に達成する高速炉を開発し，将来的な実用化への貢献を果たしていく。

本報告は，経済産業省からの受託事業である“高速炉の国際協力等に関する技術開発”，“高速炉に係る共通基盤のための技術開発”の一環として実施した成果です。

参考文献

(1) 内閣官房ホームページ
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/genshiryoku_kakuryo_kaigi/dai10/siryou1-2.pdf
(2) 三菱重工業㈱ホームページ https://www.mhi.com/jp/news/23071202.html
(3) 経済産業省ホームページ
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/004.html
(4) 三菱重工技報 Vol.57 No.4(2020) https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574230.pdf
(5) 碓井，日本原子力学会 新型炉部会企画セッション“(2)高速炉開発における中核企業の取り組み” 2024 年春
(6) 久保他，日本原子力学会 シリーズ発表“ナトリウム冷却タンク型高速炉の概念設計” 2024 年秋