

解説 記事

高い受動的安全性を兼ね備えた 超小型炉 MoveluX™

東芝エネルギーシステムズ株式会社
木村 礼 Rei KIMURA

1. はじめに

脱炭素化の社会的な潮流の中で原子力エネルギーの活用が世界的に議論されている。この議論では従来の大型原子炉による集中的なエネルギー供給以外に、分散型エネルギーとしての小型モジュラー炉（SMR）やマイクロ炉・超小型炉にも注目が集まっている。

東芝エネルギーシステムズ株式会社は図1に示す超小型炉 MoveluX™ の開発に取り組んでいる [1]。本稿では MoveluX™ の持つ固有安全性の考え方やメンテナンスを最小化する原子炉システムの構成、主要な課題を解説する。

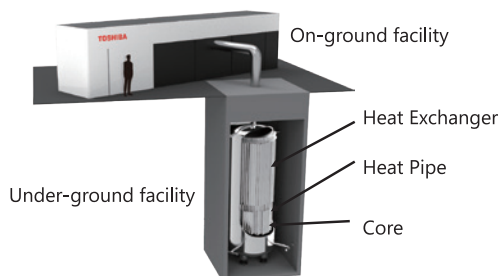


図1 MoveluX™ 鳥観図

2. 超小型炉 MoveluX™ のシステム概要

2.1 システム構成

図2に MoveluX™ のシステム構成を、表1に主な仕様を示す。システムは地上設備と地下設備に分かれており、地上設備には発電系や熱利用系など用途に応じた二次系が、地下設備には原子炉系が設置される。炉心で発生した熱はサーモサイフォン型ヒートパイプによって熱交換器へ輸送され、熱交換器で二次系と熱交換する。燃料には熱伝導率およびウラン密度が高いシリサイド燃料を、減速材には高温で使用可能な固体減速材として水素化カルシウムを用い、減速材を用いる事で5%未満の低濃縮ウランで炉心を成立させる。また、一般的な炉心出

口温度にあたるヒートパイプ内面温度は約 680℃である。

異常時の崩壊熱除去は原子炉容器壁面から空冷で実施し、人的な操作なしに事象を収束させることを意図している。本章では炉心、熱輸送機器について解説する。

表1 MoveluX™ システム仕様

Item	Value
Reactor thermal power (MW)	10
Core life time (year)	20
Fuel material	U ₃ Si ₂
Moderator material	CaH ₂
Neutron breeder material	BeO
Gap fill material	Pb0.6-Sn0.4
Number of the fuel	66
Number of the moderator	72
Number of the neutron breeder	228
Core diameter (cm) (include reflector)	180
Core Height (cm)	220
Width of the fuel elements (cm)	10
Width of the moderator elements (cm)	8.6
Clad thickness	0.1
Maximum ²³⁵ U enrichment (wt%)	4.99

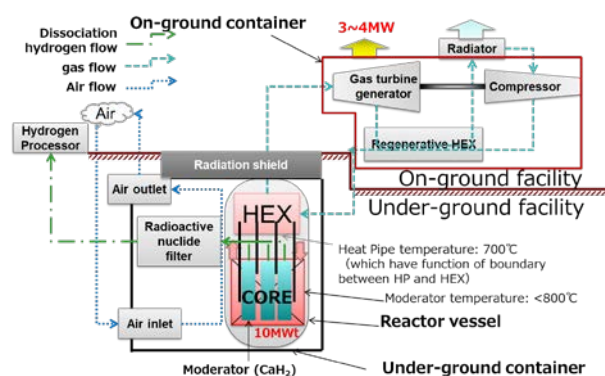


図2 MoveluX™ システム概要

2.2 炉心

図3に MoveluX™ の炉心断面図を示す。炉心は燃料領域と減速材領域が層状に配置され、各層の間にヒートパイプが設置される。減速材である水素化カルシウムは800℃以上で水素が乖離し始めるため、減速材温度を

800℃以下に保つことが炉心の運転上の制約となる。そこで本図に示すような炉心配置とすることでヒートパイプがその熱輸送限界を超えない限り断熱材のように機能し、減速材を一定温度に保持する。減速材の間には中性子増倍材として BeO がおかれ、炉心の実効増倍率を高める働きをする [2]。

また、各要素の間は接触熱抵抗を低減すること、事故時に流動して炉壁面への熱輸送を担うことを意図して液体の Pb-Sn 合金で満たされる。

更に、炉心中心に近い燃料の間には受動的な反応度制御装置が配置される。この反応度制御装置は In-Gd Expansion Module (IGEM) と呼ばれ [3]、図 4 に示すように出力が増加した際は温度上昇によって液体の中性子吸収材である In-Gd が炉内に挿入され、炉心出力が低下した場合は炉心温度低下により In-Gd が炉内から引き抜かれることで一定の炉心出力を自律的に維持する。IGEM については図 5 に示すように中性子ラジオグラフィを用いた試験で実際に昇温・降温で 1mm 厚のスリットに挿入された液位が変化することを確認している。また、内壁面へ付着する中性子吸収材の炉心特性への影響を評価しており、今後中性子吸収材付着の少ない材料の選定および実証試験を進める。

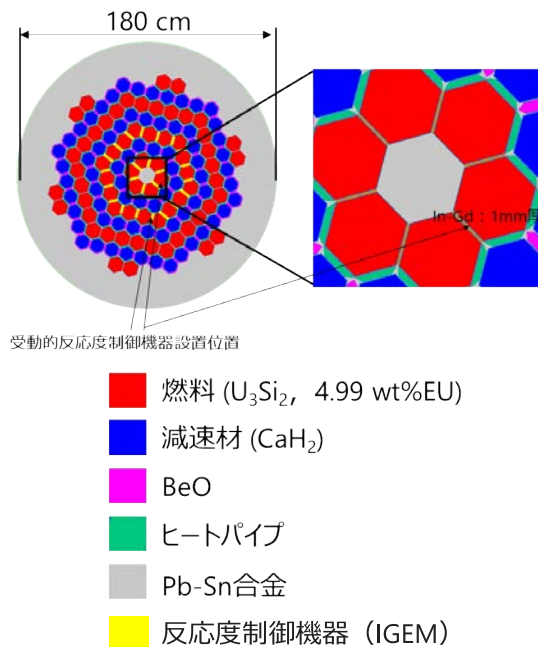


図3 MoveLuX™ 炉心断面図

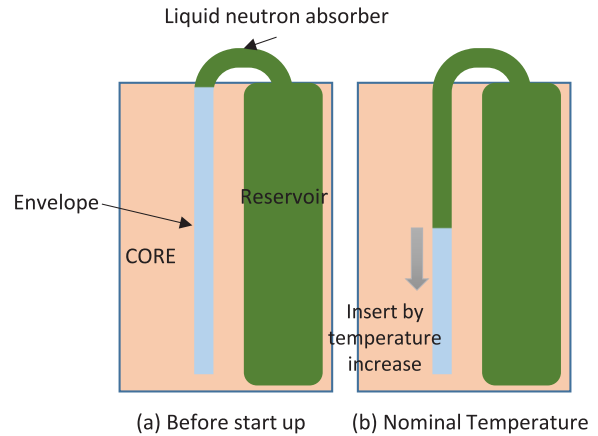


図4 IGEM 概念図

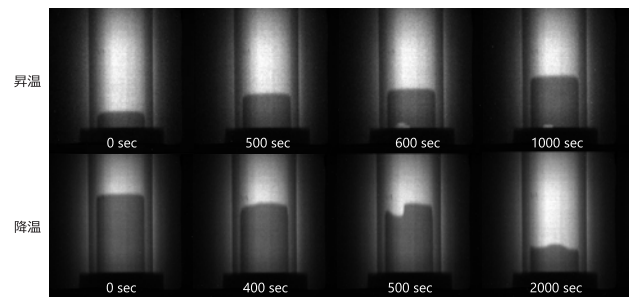


図5 IGEM 動作試験の様子

2.3 熱輸送機器

熱輸送機器は炉心からの除熱、熱輸送および二次系との熱交換を行う。MoveLuX™ では長期間僻地で運用されることを想定して原子炉のメンテナンス性を向上させるため、一般的な原子炉で用いられている冷却材をポンプで駆動させる方式ではなく、ヒートパイプを採用した。これにより原子炉容器内から熱輸送機器の可動部を排除し、受動的に炉心の除熱を行う。また、作動流体は沸点等の観点からナトリウムを用いた。

ただし、一般的な毛細管作用を用いるナトリウムヒートパイプは熱輸送能力の限界が $1\text{kW}/\text{cm}^2$ 程度とされている。そこで液還流に重力を利用するサーモサイフォンを採用し、さらに二重管構造で蒸気流と液流の干渉をなくすことで熱輸送能力の向上を図った。

図 6 に MoveLuX™ で用いるサーモサイフォン式ヒートパイプ（以下、HP）の模式図を示す [4]。HP の下部が加熱されて外管内壁面で蒸気が発生し、外管と内管の間を気液二相流となって上昇する。蒸気は熱交換器内（図 6 では青斜線の凝縮部に相当）に流入して凝縮し、内管を液相で下降し HP 内を循環する。

このような構造とすることで、図 7 に示すように模擬

流体を用いた実験で単管の場合の6倍の性能向上を確認した。今後は二相圧損等のデータ取得を進めて理論モデルの精度向上に取り組む。

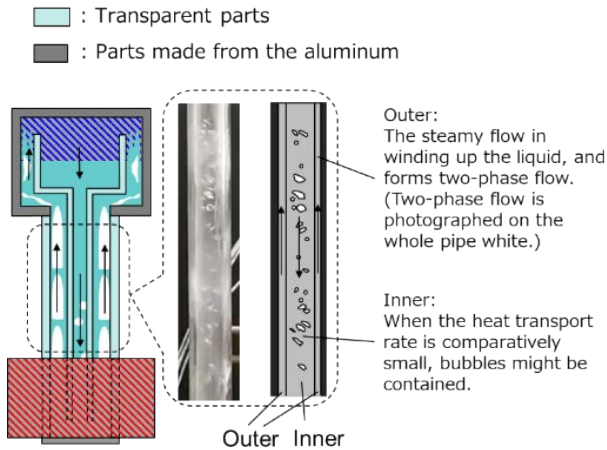


図6 サーマサイフォン式ヒートパイプの模式図

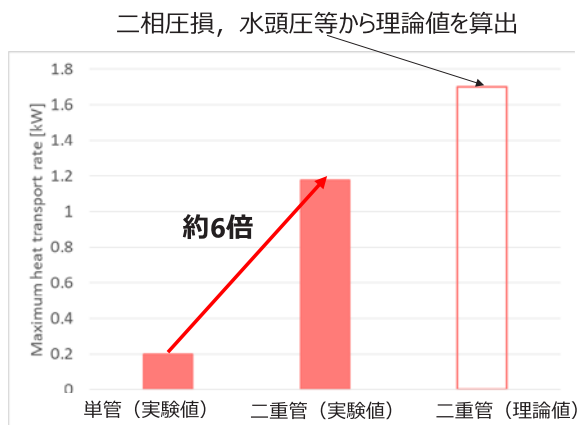


図7 二重管化による HP の性能向上

3. 受動的安全性

3.1 原子炉輸送時の臨界安全性

MoveLuX™ は工場で製造されて設置場所まで運ばれ、設置後に起動するまでその臨界安全性を担保しておく必要がある。MoveLuX™ の炉心は図8に示すように低温時において正の温度反応度係数を持つ [5]。この正の温度反応度は水素化カルシウム中の熱中性子の平衡状態の変化によるものであり、温度が高まる事で熱中性子のスペクトルがシフトしてこのような特性が得られる [6]。本炉心ではこれを原子炉輸送時の臨界安全性の確保に利用している。

製造されてから原子炉起動が行われるまでは炉心の中央に安全棒が挿入されているが、安全棒を引き抜いても

低温状態では図8の破線のように炉心は臨界に到達しない。また、原子炉が加熱されて温度が上昇すると炉心の反応度は上昇するが、安全棒が引き抜かれな限り原子炉は臨界に到達しない。

以上から強制加熱と安全棒の引抜を組み合わせることによって初めて原子炉の起動が可能となる炉心を構築できる。更に、燃料中への微量の Eu 添加により高温時の温度反応度係数を負とすることができ、原子炉起動後の通常運転時には炉心は負の温度反応度係数を持つ。

これらを踏まえて原子炉の製造～起動までのフェーズを図8および図9のように考えることができる。原子炉製造時には安全棒が炉心内に挿入されており、この状態で原子炉を輸送する。原子炉設置時についても常温かつ安全棒が挿入された状態で作業が実施されるため燃料が全装荷されている炉心でも臨界安全性を保つことができる (図8・a)。

原子炉起動時には外部のヒーターなどで強制的に原子炉を加熱して温度上昇によって原子炉に正の反応度を印加し、臨界へ近づける (図8・β)。この状態で安全棒を引き抜くことで原子炉を運転状態へ移行させる (図8・γ)。余剰反応度については IGEM で受動的に制御する。これにより輸送時においても高い臨界安全性を持つ炉心を構成することができる。

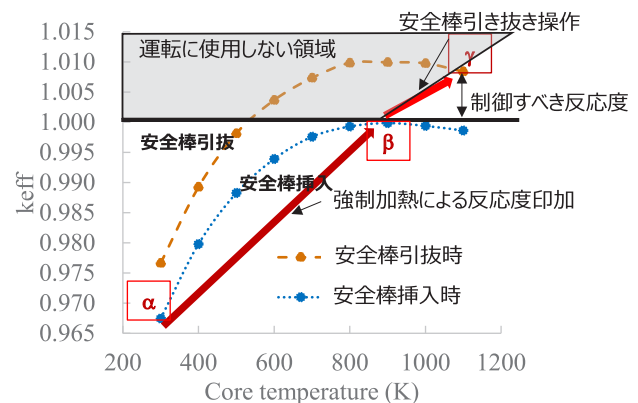


図8 安全棒の有無による炉心の温度反応度特性

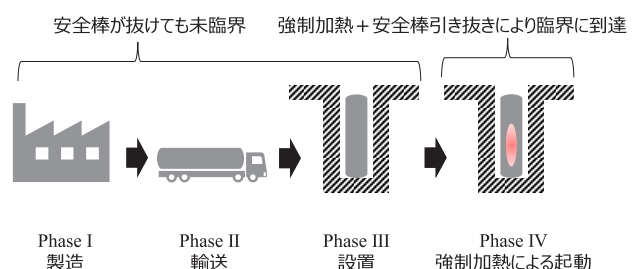


図9 原子炉輸送～起動の各フェーズ

3.2 水素化カルシウムによる自律的な炉停止

減速材に用いている水素化カルシウムは約 800℃ 以上の温度で水素が乖離し始め、1000℃ 程度で分解する。MoveLuX™ ではこの特性を事故時の原子炉停止に用いる。

例えば、ヒートパイプが破断して炉心からの除熱が出来なくなった場合には破断したヒートパイプ周辺の燃料温度が上昇して隣接する減速材の温度も同時に上昇する。減速材の温度が 800℃ 以上に達すると減速材中の水素が乖離して水素化カルシウム減速材は中性子の減速能力を失い、炉心に負の反応度を印加して炉心を停止させる。

通常は異常検知段階で安全棒を落下させて原子炉を停止させるが、安全棒が挿入されない場合には上述の原理で自律的に原子炉が停止する。

3.3 炉壁面からの崩壊熱除去

事故時に原子炉が停止した後、ヒートパイプによる炉心からの除熱機能が失われた際は炉壁面から崩壊熱を除去する。この時には図 2 の Air inlet から Air outlet へ空気が流れ、炉壁面を空冷自然循環で冷却する。

これまでの概算では、炉容器に 10cm 程度のフィンを設置することで、恒常的に炉壁面温度 500℃ で 0.2MW 程度の除熱ができる。原子炉停止直後は 0.6MW 程度の発熱量が見込まれるものの、800 秒程度で 0.2MW まで崩壊熱が低下し、その間の発生エネルギーは構造材等の熱容量で吸収できる見込みである。

このようにして、事故時には受動的な手法で原子炉の停止から崩壊熱を除去することにより MoveLuX™ は高い安全性を有する。

4. 主な技術課題

MoveLuX™ は現在概念検討および要素技術開発の段階にあり、多くの技術課題が存在する。現在取り組んでいるものとしては、サーモサイフォン型ヒートパイプのモデル化および熱輸送量向上、コンパクト熱交換器の凝縮特性取得および製造手法検討、水素化カルシウムの熱中性子散乱データの拡充、IGEM 内壁面材料選定が挙げられる。今後取り組む予定のものとしては、原子炉核熱連成動特性解析コード整備、Na を用いた熱輸送機器試験、原子炉実験による炉心設計妥当性検証などが挙げられる。

5. まとめ

本稿では東芝エネルギーシステムズで開発中の超小型炉 MoveLuX™ のシステム構成や課題について解説した。MoveLuX™ の開発については今後も進捗に応じて適宜報告を行っていく。

参考文献

- [1] 岩城智香子, 久保達也, 春口佳子: “原子力基盤技術の開発と新たな展開”, 東芝レビュー, Vol78, No.3, pp35-39 (2023)
- [2] Rei Kimura, Tetu Suzuki, Kazuhito Asano, Chikako Iwaki, Hideki Horie, “The conceptual design of heat-pipe cooled and calcium-hydride moderated vSMR”, Proceedings of ICAPP2019, Juan-les-pins, France, May 2019, 013 (2019)
- [3] Rei Kimura, Shohei Kanamura, Yuya Takahashi and Kazuhito Asano, “Passive Reactivity Control Device with Thermal Expansion of Liquid In-Gd Alloy”, Nucl. Tech., 207(11), 1784-1792, (2021)
- [4] Hongo, T. et al. “Study on the flow and heat transport characteristics of concentric-tube two-phase thermosyphon”, Mechanical Engineering Journal, 7, 3, p.1-10., 2020
- [5] Rei Kimura, Kazuhito Asano, “Ensuring Criticality Safety of vSMR Core During Transport Based on Its Temperature Reactivity”, Nucl. Sci. Eng., 194 (3), 213-220 (2020)
- [6] Rei Kimura, Satoshi Wada, “Temperature Reactivity Control of Calcium-Hydride-Moderated Small Reactor Core with Poison Nuclides”, Nucl. Sci. Eng., 193 (9), 1013-1022, (2019)

(2024 年 7 月 24 日)

著者紹介



著者：木村 礼

所属：東芝エネルギーシステムズ株式会社
原子力システム・量子応用技術開発部

専門分野：炉物理、核データ、炉心設計、
原子炉システム

編集後記

The Editor's Note



私が東京に赴任してきて、約1年半が経過しようとしている。東京勤務は今回が初めてである。これまでも出張ではしばしば東京に来ることはあったが、出張の場合、その日の仕事が終われば帰路に着くことがほとんどであり、たまの宿泊出張でもホテルの近くの店に飲みに行くくらいであった。

そこで、今回の東京赴任を機に、東京の街を散策しようと考え、「東京散歩」という本を購入した。23区内のいろいろな街にある名所や名物を散歩しながら巡るという内容である。所要時間は1エリアあたり1～2時間程度であり、休日の時間を過ごすのにちょうど良い。勤務地である大手町に始まり、皇居周辺、東京駅周辺、浅草、築地、原宿、台場などメジャーどころを巡った。

その中でおすすめスポットを紹介する。まずは「皇居東御苑」。ここは入場の際に手荷物チェックを受ける必要があるが、無料で立ち寄ることができる。中はしっかり手入れされた庭園で、季節の草花を鑑賞できる。庭園内の池には鱸の長い鯉が優雅に泳いでいる。上皇様のご発案により生まれたヒレナガニシキゴイという交配種とのこと。

次に「明治神宮」。JR原宿駅西口から参道入口へ行

くと、真新しい一の鳥居がある。令和4年に建て替えられたばかりらしい。そこから長い参道を進み、二の鳥居、三の鳥居をくぐった先に本殿がある。参道は壮大な杜となっており、本殿の周りもぐるっと散策できる。本殿の西側や北側は人も少なく静けさが広がっている。南参道の途中にある御苑は500円で入場でき、6月上旬には花菖蒲を鑑賞できる（筆者が行ったときには時期が早過ぎてまだ咲いてなかった）。

最後に「築地本願寺」。この寺は普通の寺とは違う独特な建物である。古代インド風な外観であり、初めて見たときはこれが寺だとは思わなかったが、インドは仏教が生まれた地であることを考えると腑に落ちる。本堂の入口には翼のある狛犬っぽい像がある。どうやら犬ではなく、迦楼羅（カルラ）と呼ばれるインドの想像上の動物らしい。本堂内は「ザ・お寺」といった感じであり、なんとも不思議な建造物に魅力を感じた。

とまあ、東京赴任になって1年半の間にいろいろと巡ったように記載してみたが、実際に巡ったのは初めての半年間くらいであり、その後はサボっている。巡った街も、「東京散歩」にある総エリア数の5分の1にも満たない。この編集後記の執筆を機に、東京散歩を再開したい。

(H.T.)



現場からのご意見、投稿を募集します

本誌では、保全に直接たずさわる現場の技術者や保全に興味をお持ちの方々からの投稿を募集します。保全についての考えや疑問、本誌への感想、要望など、形式を問いませんので、編集委員会宛にお送りください。幅広い分野の方々からの積極的な投稿をお待ちしております。

保全学

Vol. 23, No. 3

2024年10月10日発行

発行所 一般社団法人 日本保全学会

発行者 宮 健三

〒110-0008 東京都台東区池之端2-7-17 井門池之端ビル7階

電話：03(5814)5430 FAX: 03(5814)6705 E-mail: secretariat@jsm.or.jp

URL: <https://www.jsm.or.jp>

定価 2,750 円（本体価格 2,500 円）