



高温ガス炉に関する国内 外動向調査報告

西村洋亮、都筑和泰

調査対象

国内外の学会、研究会等に関する情報収集

- 原子力学会春の年会（2024年3月26～28日近畿大学東大阪キャンパス）
- ICONE31（2024年8月21～26日 チェコ プラハ）
- 原子力学会秋の大会（2024年9月11～13日（東北大学川内北キャンパス）

関係機関からの情報発信やニュース等の公開情報の収集と整理

番号		情報源	具体的な調査対象 HP
国内	B1-1	JAEA	JAEA の HP・プレス発表
	B1-2	日本の政府関連	文科省、外務省、経産省、大学等
	B1-3	国内の民間関連	原子力学会誌、電事連、JAIF 等 注) 海外の HP 等で記載されている紹介記事の場合、 海外の HP 記事と一緒に記載。
	B1-4	国内の報道機関	新聞(電子版)等
国外	B2-1	国際機関	IAEA、OECD/NEA 等
	B2-2	海外の政府関連	NRC、DOE、BATAN、NCJP
	B2-3	海外の民間関連	WNA(世界原子力協会)と WNN 等
	B2-4	海外の報道機関	Newspaper、etc.

世界の概況

- 現在稼働中の高温ガス炉プラントは中国のHTR-PM、HTR-10、及び日本のHTTRである。このうち商用規模なのはHTTR-PMのみである。HTR-PMは熱出力250MWのモジュールを2基有し、電気出力200MWである。日本のHTTRの約16倍の熱出力に相当する
- 国際展開を積極的に実施し、ニュースに取り上げられているのはX-Energy社のXe-100、Ultra Safe Nuclear社のMMR、日本の高温ガス炉（英、ポーランド、日本）程度である。
- IAEAのARIS（Advanced Reactor Information System）では、上記以外にも開発中の炉をいくつか紹介している
 - 南アフリカ共和国ではPBMRの検討を進めていたが、2012年にはHTMR100プロジェクト、2020年にはAMRプロジェクトを開始。
 - ロシアは2020年より、主に熱供給を想定したMHR100、水素製造を想定したMHR-Tの検討を開始しているが、まだ概念検討段階のようである。
 - フランスでは、2020年に設立されたJIMMY社が主に産業熱供給を想定して10MWtクラスの高圧高温ガス炉の開発を行っている。
 - アメリカでは2018年に設立されたHolosGen社が10MWeクラスのモジュールの開発についてARISにアップしている。

X-Energy社 Xe-100

- 燃料調達：完全子会社であるTRISO-Xが、2022年10月よりテネシー州オークリッジに先進核燃料施設を建設中2024年10月には4080万ドル（約60億円）の敷地開発にGeiger Brothers, Inc. を選定
- 立地；2024年4月英国政府から334万ポンドの助成金（X-Energyも同額）。後述する通り、ハートルプールに12基の炉を建設し、2030年代初頭までに完成させる計画で、英国で最大40基の炉を建設することを目指している
- 資金：2020年10月にDOEの「先進的原子炉実証プログラム（ARDP）」における初回補助金の交付対象の一つとして選定され、「Xe-100」の実証炉建設に向けた7年間の補助金として総額12億ドル交付することとした。その後もDOEなどから各種支援を受けている。2024年10月、アマゾンが5億ドル投資。

中国HTR-PM

- 前記の通り、250MWtのモジュール2基を有している。
- 2012年ファーストコンクリート。2021年初臨界。2023年12月商用運転開始
- 2024年4月には地域暖房プロジェクトを始動した
- 出資者は、中国華能集团公司、中国核工業建設集团公司、精華大学が出資、合計約12000億円
- なお、既に建設を開始している、商用炉HTR-PM600は同じ規模(250MWt)のモジュールを6基で構成される予定。

出典<https://www.jaea.go.jp/04/sefard/faq/files/material050202.pdf>

- 2024年半ばに比較的大きなトラブルがあり、下記技術者連盟主催の視察も延期となっていた。
- トラブルは概ね収束し、3月16日より視察を受入可能とのことである。

http://www.jef-site.or.jp/image/c_HTGR.pdf

国内外の学会、研究会 等に関する情報収集

1. 日本原子力学会 (AESJ) における主な高温ガス炉関係口頭発表

調査対象: 2024年3月春の年会 (近畿大学) & 9月秋の年会 (東北大学)

会議名	研究機関名	炉型	主な分野
AESJ (春・秋計 34件)	JAEA: 10 九州: 5 東大: 4 MHI: 4 北海道: 2 大阪: 2 東芝ESS: 1 サイエンスト キョー: 1 山梨: 1 名古屋: 1 東京都市大: 1 東北: 1	HTGR: 26 HTTR: 8	核計算コード: 7 再エネ調和型: 4 スリーブレス燃料 コンパクト: 3 専門委員会報告: 3 トリチウム製造: 3

① 名古屋大・JAEA・東大による専門委員会の報告では、高温ガス炉実証炉への適用を念頭に、HTTRの建設や運転・試験、新規性基準適合性審査で得た経験と過去の安全基準案検討結果を活用し、原子炉安全確保のための技術要件や安全評価方針の検討が発表された。

② MHI・JAEAによる再エネ調和型新型炉のシリーズ発表では、安全評価にかかるコード開発、IoT利用、実験施設の建設に関する報告がなされた。特に水素製造や蓄熱を狙いとした新型発電事業に関する異常時の安全性評価ツールの開発が喫緊の課題である。

総合講演・報告「ブロック型高温ガス炉の安全基準の調査研究」研究専門委員会
「ブロック型高温ガス炉の安全基準の調査研究」研究専門委員会 2023 年度成果報告

(1) 検討の背景と目的

＊山本 章夫¹

¹名古屋大学

- ◆研究専門委員会「ブロック型高温ガス炉の安全基準の調査研究」の設立背景や目的、高温ガス炉の設計及び安全上の特徴、そして2023年度の成果として技術的論点と高温ガス炉の安全確保の考え方に関する検討状況が報告
- ◆本研究専門委員会は、高温ガス炉実証炉への適用を念頭に、高温ガス炉の特長や性能に基づく安全基準の考え方を構築することを目的とし、2023年度から2年間の計画で活動している。HTTRの建設や運転・試験、新規制基準適合性審査で得た経験と過去の安全基準案検討結果を活用し、原子炉安全確保のための技術要件や安全評価方針を検討

6つの技術的論点

- ①著しい炉心損傷の実質排除の可能性
- ②深層防護の実装の適切性
- ③LBEの選定と評価の適切性
- ④未臨界移行が停止系の一系統に相当し得るか
- ⑤熱利用システム擾乱の影響の定量化
- ⑥安全確保の考え方や機能要求の前提条件の適切性

(2) 高温ガス炉の設計及び安全上の特徴

＊佐藤 博之¹、坂場 成昭¹

¹原子力機構

高温ガス炉における安全確保の設計および安全上の特徴

セラミックス被覆粒子燃料

(TRISO) 被覆粒子燃料は、燃料核を多層のセラミックスで被覆し、高い耐熱性を持つ。1800℃までの加熱試験で破損が認められず、2000℃でも著しい破損はない。

これにより **1600℃を超える範囲でも核分裂生成物を閉じ込め可能**。

黒鉛減速材

黒鉛は耐熱性が高く、2500℃でも使用可能。減速能が低く、炉心出力密度は軽水炉の約1/10となるが、**大きな熱容量**を持つ。さらに黒鉛は高い熱伝導率を有する。

ヘリウム冷却材

気体のまま使用され、**化学的に不活性**であるため燃料や構造材との反応がなく、中性子を減速や吸収する効果もほとんどない。

安全上の特徴

基本構成要素の特性を活かし、事故が発生しても以下の安全上の特徴を持つことが確認

自然炉停止特性：反応度温度フィードバックにより、自然に炉が停止し出力を自己制御

緩慢な温度上昇：炉心の温度上昇は緩やかで、黒鉛構造物の熱伝導や原子炉圧力容器の周囲の自然対流による崩壊熱除去により、燃料温度は1600℃以下に維持

炉心の溶融がない：セラミックス材料で構成された炉心は溶融せず、溶融燃料による脅威がない。

HTTRを用いた高温ガス炉の安全性実証

原子力機構は, HTTR (高温工学試験研究炉) を用いて高温ガス炉の安全性を実証. 異常事象を模擬した試験を実施し, 安全性を確認

制御棒引き抜き試験, 1次冷却材流量部分喪失試験, 炉心流量喪失試験, 炉心冷却喪失試験などを実施.

- 2010年12月の試験では, 出力30%からの炉心流量喪失試験で物理現象のみで自然に静定・冷却されることを確認.
- 2022年1月の試験では, 全交流電源喪失を仮定し, 炉心冷却設備全停止の状態で自然に静定・冷却されることを確認.
- 2024年3月の試験では, 定格出力100%において、ヘリウム循環機を停止して強制冷却機能を喪失させ、かつ、制御棒による原子炉の停止ができない状態においても、物理現象のみで原子炉の出力が低下し、安定な状態を維持することを確認.

(3) 技術的論点と検討の進め方

＊更田 豊志¹

¹東京大学

技術的論点および検討の進め方

第1回委員会において、高温ガス炉の安全基準を既存の軽水炉の設置許可基準の書き換えに矮小化せず、実証可能な根拠を基に議論する重要性が指摘された。これを受け、安全確保の考え方や安全機能への要求に関連する技術的論点を抽出・明確化するために、委員からの意見を集約した。この意見集約には、過去の「高温ガス炉の安全設計方針」や「ブリズマティック型高温ガス炉の安全設計プロセス」、およびIAEAの高温ガス炉に関する安全基準案の検討結果を参考資料とした。集約の結果、75件の技術的論点候補が提出された。

高温ガス炉の設計および安全上の特徴を踏まえ、安全対策の適正化に向けて、軽水炉から安全確保の考え方を変更するという観点で、以下の6つの技術的論点に整理

著しい炉心損傷の実質排除の可能性

- 。 最悪のシナリオを考慮し、炉心損傷の実質的な排除が可能かどうかの検討。

深層防護の実装の適切性

- 。 炉心損傷の実質排除の可否に応じた深層防護の実装が適切かどうかの検討。

LBEの選定と評価の適切性

- 。 深層防護に基づいた炉心冷却手段（LBE）の選定とその評価の適切性の検討。

未臨界移行が停止系の一系統に相当し得るか

- 。 原子炉の固有の安全性による未臨界移行が停止系の一系統に相当するかどうかの検討。

熱利用システム擾乱の影響の定量化

- 。 熱利用システムの擾乱が原子炉安全に与える影響の定量化の検討。

安全確保の考え方や機能要求の前提条件の適切性

- 。 高温ガス炉の安全確保の考え方や機能要求の前提条件が適切であるかの検討。

研究専門委員会「ブロック型高温ガス炉の安全基準の調査研究」の技術的論点や検討の進め方を報告した. 今後は, 高温ガス炉が有する特長と性能に基づいた安全基準の考え方を構築することを目的とし, 深層防護の実装, 事象選定方針, 安全評価方針など, 高温ガス炉の安全確保の考え方の検討を進めていく予定.

再エネ調和型新型炉システムの安全性評価技術の開発

(1) 全体概要

＊相澤 康介¹, 今井 良行¹, 上地 優¹, 赤坂 尚昭¹, ヤン ジングロン¹, 佐久間 渉², 谷平 正典²,
岡本 圭太³, 森本 泰臣³

¹JAEA, ²MHI, ³日揮グローバル

再エネ調和型新型炉システムの安全評価技術の開発計画と現状について報告する。開発の背景には、水素製造や蓄熱を行う新型発電システムの事業化があり、異常状態を模擬し安全性を評価する試験装置や解析ツール、需給バランス最適化のためのIoT開発が必要である。高温ガス炉やナトリウム冷却炉を対象に、事故模擬試験装置は各設備の安全運転技術を確認し、解析コードのデータ取得を行う。解析ツールは発電・蓄熱・水素製造設備の異常挙動を模擬し、IoT装置は複数システムの発電量等を最適化し安全性を評価する。開発状況として、試験装置の設計を完了し、解析ツールで適切な過渡解析が可能であることを確認。IoT装置は最適化計算を実施し、出力指示が出せることが確認された。今後は試験装置の詳細設計と試験計画を進める。

再エネ調和型新型炉システムの安全性評価技術の開発

(2) 再エネ調和型新型炉事故模擬試験装置の設計

＊上地 優¹, 相澤 康介¹, ヤン ジングロン¹, 蔵本 亮一², 溝上 頼賢², 谷平 正典³
1JAEA, 2MHI パワーエンジニアリング, 3MHI

再生可能エネルギー調和型新型炉システムの安全評価技術の中で、特に事故模擬試験装置の設計に関する報告である。これらのシステムは、水素製造や蓄熱が可能な発電技術を含み、その事業化には異常状態を模擬し安全性を評価する試験装置と解析ツールの開発が不可欠である。加えて、再エネ電源の変動に対応した発電量や蓄熱量の最適化を行い、需給バランスと経済性を確保するための高速通信装置（IoT）の開発も求められている。試験装置は高温ガス炉とナトリウム冷却炉を想定し、ヘリウムガスループによる1次系および2次系、熔融塩を使用する蓄熱設備を含む。1次系には、加熱器、ガスタービン、発電機、中間熱交換器が含まれ、2次系には水素製造や蓄熱用の熱交換器が設置されている。さらに、ナトリウム系の熱交換器を持つ3次系も装備され、異常模擬が可能な発電モードとコジェネモードを運転モードとして設定している。設計結果として、各プラント構成要素について熱物質収支計算を行い、加熱器出力は5MW規模、出口温度は発電モードで約750℃、コジェネモードで約850℃と設定された。蓄熱設備には硝酸塩系熔融塩を用いた顕熱蓄熱方式を採用し、伝熱面積増大による大型化が懸念されたが、スタティックミキサー内蔵型の熱交換器設計によりコンパクト化が図られた。これに基づいてプラント全体の配置設計も完了した。結論として、試験装置設計の成果を報告し、今後は試験計画の詳細検討や安全性評価のための装置のコンパクト化、コスト削減のための更なる検討を進めていく予定である。

1G03 再エネ調和型新型炉システムの安全性評価技術の開発

(3) 再エネ調和型新型炉用安全解析ツールの開発事故模擬試験装置の設計

＊佐久間 渉¹, 谷平 正典¹, 相澤 康介², 今井 良行², 幕内 悦予², ヤン ジングロン²
1MHI, 2JAEA

再エネ調和型新型炉システムの安全評価技術の一環として、安全解析ツールの開発状況を報告する。本システムは水素製造や蓄熱など多様な発電用システムを備えており、異常時の挙動を模擬し安全性を評価する試験装置や解析ツールの開発が重要である。さらに、再生可能エネルギー供給に応じて発電量や蓄熱量を最適化するため、高速通信装置（IoT）との連携も必要とされる。今回報告する安全解析ツールは、RELAP5コードを基盤として構築され、事故模擬試験装置に対応するモデルを備える。安全解析ツールは、ヘリウムガスを冷却材とする1次系と、発電や熱利用を模擬する2次系を含むシステム全体の過渡挙動を評価することが可能である。1次系には、原子炉模擬ヒータ、発電機、中間熱交換器があり、2次系は水素製造や蓄熱設備を想定している。この解析ツールは異常発生時の挙動を評価するだけでなく、再エネ電源からの電力供給状況に合わせて運転最適化を行う高速通信装置と連携し、発電と熱利用を同時に行うコジェネモードと発電モードの間で運転条件を過渡的に変更することもできる。模擬試験装置の過渡解析では、発電機負荷喪失や中間熱交換器除熱喪失などのシナリオに対してツールを用いて解析を行った。発電機負荷喪失時、タービンが過回転するもバイパス流量制御系により適切に制御され、また、ヒータ出力制御系の作動により原子炉模擬ヒータの出口温度が維持された。これにより、開発した安全解析ツールが異常発生時のプラント挙動を正確に評価できることが確認された。結論として、再エネ調和型新型炉用の安全解析ツールの開発が進展し、試験装置における異常時の評価が可能であることを報告した。今後、試験装置の詳細設計を反映したさらに精密な解析モデルを作成し、安全性評価の精度を高めていく予定である。

再エネ調和型新型炉システムの安全性評価技術の開発

(4) 高速通信装置の開発

＊岡本 圭太¹, 角谷 亮介², 森本 泰臣¹, 赤坂 尚昭³, 幕内 悦予³, ヤン ジングロン³
1 日揮グローバル, 2 日本エヌ・ユー・エス, 3 JAEA

再エネ調和型新型炉システムの開発において、高速通信装置（IoT）のシステム概要、電力需給調整の最適化評価結果、及び技術課題について報告する。再エネ調和型新型炉システムは、再生可能エネルギーの発電量や電力需要の変動に応じて、発電量と蓄熱量を安全かつ経済的に最適化し、適切なプラント操作を行う必要がある。このため、新型炉と再エネプラント間で高速通信を行い、電力需給調整を行うIoT装置を開発中である。このIoT装置は、RELAP5コードに基づいて構築された新型炉システムの安全解析ツールと連携する形で開発され、Pythonを使用して最適化計算プログラムを構築した。最適化には、経済性の追求に加え、負荷追従運転や事故時の系統安定性を優先するケースも含めた複数の運転モードを考慮している。代表的なシナリオとして、1週間分の電力需要予測データを用いて最適化解析を実施し、機能評価を行った。

その結果、構築したプログラムが想定した最適化と出力配分指示を適切に実行できることが確認された。例えば、負荷追従運転時には需要電力量や再エネ発電量の変動に合わせて原子力発電と蓄熱設備を組み合わせ、安定した運転計画が提示された。これにより、システムが経済的かつ安全に対応可能なことが実証された。

今後の課題として、新型炉システム安全解析ツールとの接続により、安全運転への影響をより詳細に評価することが必要である。また、本研究では負荷追従運転、経済性、事故時の模擬に焦点を当てたが、環境負荷を考慮した運転モード（CO₂排出量削減運転）を新たに導入する可能性も検討中である。これらの改良により、さらに持続可能で効率的な運転を目指す。

2. 原子力工学国際会議 (ICONE) における主な高温ガス炉関係口頭発表

調査対象: 2024年8月ICONE31 (チェコ, プラハ)

会議名	国名等	炉型	分野	概要
ICONE31 (12件)	中国: 10 日本: 2	HTR-PM: 10 HTTR: 1 HTGR: 1	制御: 2 材料: 2 ベンチマーク: 1 核計算: 1 ペブルフロー: 1 動的特性: 1 運転: 1 燃料: 1 熱伝導: 1	・大部分が中国精華大学からの報告であり, 特に近年話題であるAIを活用した運転戦略の成果報告が特筆すべきポイントである. 総じて中国からは10件(熱流動, 機械学習, 腐食化学等), そして日本からは1件(ベンチマーク核計算)の発表がなされた

- Tsinghua Univ. (中国)からインコネル617の酸化挙動と引っ張り特性に関する研究が報告された。インコネル617は不純なヘリウム中よりも空気中で著しく酸化し、引張強度が低下する。酸化を抑えるためには、ヘリウム中の酸素、水、COの制御が重要であると議論された (ICONE31-130256参照)。
- JAEAから、MVP-3とJENDL-5を用いてHTGRの核種生成・燃焼と崩壊熱評価 方法の検証を進めていると報告された (ICONE31-131748参照)。
- INNET(中国)からHTR-PM600の制御システムをMATLABでシミュレーションする研究成果が報告され、タービン孤立時でも安定した負荷追従運転が可能であることが報告された (ICONE31-131854参照)。
- Tsinghua Univ.から高温ガス冷却ペブルベッド炉の燃料ペブルモデリング法を比較する報告がなされ、RPTモデル (Reactivity-equivalent Physical Transformation) が計算コストを削減しつつ非均質性効果を最適に捉えることが示された (ICONE31-131880参照)。

関係機関からの情報発信やニュース等の公開情報の収集と整理

X-energy 社関連

Funds awarded to assist Xe-100 development in the UK

04 April 2024 WNN

<https://world-nuclear-news.org/Articles/Funds-awarded-to-assist-Xe-100-deployment-in-the-U>

X-Energy社, UK Holdings社とCavendish社は, Xe-100小型モジュール炉の設計評価とサプライチェーン開発のために, 英国の将来の原子力促進基金から資金を申請し, 成功した. 英国政府は334万ポンドを提供し, X-Energy社も同額を拠出して合計668万ポンドのプログラムとなる. このプロジェクトは, ハートルプールに12基の炉を建設し, 2030年代初頭までに完成させる計画で, 英国で最大40基の炉を建設することを目指している. このプロジェクトは多くの雇用を創出し, クリーンで信頼性のある電力を提供することを目的としている.

Study to assess benefits of Hartlepool SMR plant

23 May 2024 WNN

<https://world-nuclear-news.org/Articles/Study-to-assess-benefits-of-Hartlepool-SMR-plant>

ティーズサイド大学とX-energy社およびCavendish社は, ハートルプールの原子力発電所プロジェクトの社会経済的影響を評価するために協力関係を築いた. 評価は, 地域社会や経済に与える影響を分析し, 雇用創出や脱炭素化への貢献を見積もることを目的としている. このプロジェクトは, 英国政府とX-energy社の共同資金による668万ポンドのプログラムの一部であり, 2030年代初頭までにハートルプールに12基の炉を建設する計画である. ティーズサイド大学の専門知識と地域社会との連携を活用し, 地域への利益を最大化し, 影響を軽減するための最善の方針を策定する.

Amazon、X-energyへの投資を発表、SMRプロジェクト計画を公開

2024年10月16日 WNN

<https://www.world-nuclear-news.org/articles/amazon-invests-in-x-energy-unveils-smr-project-plans>

Amazonは、X-energyに出資し、2039年までにアメリカ国内で最大5GWの小型モジュール炉（SMR）を展開することを目指していると発表した。

Amazonの気候変動対策基金「Climate Change Pledge Fund」が、X-energyに対する5億ドルの資金調達でメインの投資家として機能した。この資金調達には、シタデルの創業者兼CEOのケン・グリフィン、Ares Management Corporation、プライベート・エクイティ会社NGP、およびミシガン大学も参加している。この資金は、原子炉設計とライセンスの完成、そしてテネシー州オークリッジにおけるTRISO-X燃料製造施設の最初のフェーズの完成を目指している。

JAEA-NNL関連

UK' s NNL and Japan' s JAEA strengthen HTGR fuel collaboration

24 April 2024 WNN

<https://world-nuclear-news.org/Articles/UK-s-NNL-and-Japan-s-JAEA-sign-HTGR-fuel-agreement>

被覆粒子燃料（CPF）は、国立原子力研究所（NNL）のプレストン実験室で生産されているが、日本の経験を学ぶため、JAEAとNNLが協力覚書に署名した。この協力は、HTGR実証炉の燃料製造技術の開発と知的財産権の取り決めに焦点を当てている。英国政府はHTGR研究に6000万ポンドを拠出し、NNLとJAEAは3100万ポンドを受け取った。この協力により、英国はネットゼロ達成に向けて進展し、日本と英国は難脱炭素化産業向けの技術開発を目指す。