

委員 1-4

## 高温ガス炉に関する国内外動向調査

2024 年 9 月 10 日

### 目 次

1. 原子力学会春の年会	・ ・ ・ 1
2. 国外の学会，研究会等に関する情報収集－ICONE31	・ ・ ・ 17
3. 国内外開発動向調査（政治的側面）	・ ・ ・ 26

## 1. 原子力学会春の年会

### 会議概要

日本原子力学会 2024 年春の年会は、3 月 26-28 日にかけて近畿大学東大阪キャンパスで開催された。調査は予稿集を入手して行い、高温ガス炉に関連する発表を調査対象として、計 16 件を選定した。

研究機関の内訳としては、名古屋大学、原子力機構、東京大学、東京工業大学、九州大学、近畿大学、東北大学、QST、東芝エネルギーシステムズ、大阪大学、三菱重工業、そして北海道大学であった。分野内訳は総合講演、スリーブレス燃料、トリチウム製造と閉じ込め、核計算、核計算コード開発、反応度測定であった。

主なポイントを下記に示す。

- 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、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て 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。
- 東大・東工大・JAEA によるスリーブレス燃料コンパクトのシリーズ発表では、事故時の燃料母材ふるまいとその安全性検討、また核熱計算による事故時燃料最高温度の解析結果が紹介され、事故時においても燃料の健全性が担保されることが示された。
- 九大等によるシリーズ発表で高温ガス炉による核融合炉への初装荷燃料を想定したトリチウム製造とその閉じ込め技術に関する最新の進捗が報告された。
- 東芝、MHI 等によるシリーズ発表でオリジナルの核計算コードに関する開発状況の最新報告がなされた。
- JAEA からは、今後の英国実証炉開発等の進捗を含めた高温ガス炉展望についてのまとめが紹介された。

表 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-1 日本原子力学会春の年会の調査結果のまとめ

番号	機関	炉型	分野	特記
3D_PL01	名大	B 型・HTGR	総合講演	専門委員会報告
3D_PL02	JAEA	B 型・HTGR	総合講演	専門委員会報告
3D_PL03	東大	B 型・HTGR	総合講演	専門委員会報告
2E14	東大, 東工大, JAEA	B 型・HTGR	核燃料	スリーブレス燃料コンパクト
2E15	JAEA, 東大	B 型・HTGR	原子炉設計	スリーブレス燃料コンパクト

1G11	九大, 近大, 東北大, JAEA, QST	B型・HTGR	核分裂工学	トリチウム製造閉じ込め
1G12	九大, QST	B型・HTGR	核分裂工学	トリチウム製造閉じ込め
1G13	九大, QST	B型・HTGR	核分裂工学	トリチウム製造閉じ込め
2L04	東芝	B型・HTTR	炉物理	核計算コード
2L05	阪大, 名大, MHI	B型・HTTR	炉物理	核計算コード
2L06	阪大, 名大, MHI	B型・HTTR	炉物理	核計算コード
2L07	北大, 名大	B型・HTTR	炉物理	核計算コード
2L08	北大, 名大	B型・HTTR	炉物理	核計算コード
3L02	九大, 近大	B型・HTTR	炉物理	反応度測定
2M_PL03	JAEA	B型・HTTR	総合講演	新型炉の最前線
2M_PL04	MHI	B型・HTTR	総合講演	新型炉の最前線

## 内容詳細

### 3D\_PL01 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 FY2023 Annual Report of Research Committee on Investigation on Safety Standards of Prismatic-type HTGR

#### (1) 検討の背景と目的

#### (1) Background and Objective

\*山本 章夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学

#### 要旨

本セッションでは、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された。

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて製鉄や運輸分野での脱炭素化が求められ、水素エネルギーの利活用が期待されている。その中でも、高温ガス炉は優れた安全性を持ち、二酸化炭素を排出せず高温熱を供給できるためカーボンフリー水素の大量生産が期待されている。「GX実現に向けた基本方針」（2023年2月閣議決定）では2030年代の運転開始を目指す高温ガス炉実証炉の開発工程が示され、経済産業省の革新炉ワーキンググループは技

術ロードマップを定めた。この枠組みにおいて、2027年度中に基本設計を完了し、早急に実証炉の設置許可に向けた準備が求められる。

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する。

委員会は、大学、研究機関、産業界の専門家で構成され、主査の山本章夫（名古屋大学）、幹事の野本恭信（原子力機構）、その他ワーキンググループメンバーおよび委員により構成されている。

委員会では、技術的な論点候補に基づき以下の6つの論点を対象に議論を進めている。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。報告書では主たる論点に対するロジックを取りまとめ、公開することを目指すとした。

最後に、本セッションでは高温ガス炉の設計及び安全上の特徴について報告がなされ、技術的論点及び検討の進め方が説明された。

3D\_PL02 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  
FY2023 Annual Report of Research Committee on Investigation on Safety Standards of  
Prismatic type

HTGR

(2) 高温ガス炉の設計及び安全上の特徴

(2) HTGR design and safety features

\*佐藤 博之<sup>1</sup>、坂場 成昭<sup>1</sup>

1 原子力機構

**要旨**

本講演では、高温ガス炉における安全確保の設計およびその特徴について報告がされた。

高温ガス炉の設計および安全上の特徴

高温ガス炉の設計は、軽水炉と異なる材料を使用する点が特徴である。燃料被覆材にはセラミックス材、減速材には黒鉛、冷却材にはヘリウムを用いる。

## セラミックス被覆粒子燃料

三重等方性（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ることができる。

## 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

ヘリウムは高温ガス炉で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、瞬時にエネルギーが放出されない。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

高温ガス炉は、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されている。

- **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する。
- **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℃以下に保たれる。
- **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している。異常事象を模擬した試験を実施し、安全性を確認している。

- **制御棒引抜き試験、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も自然に静定・冷却されることを確認。

このように、高温ガス炉はその設計と安全性の特徴により、非常に高い安全性を有していることが実証されている。

3D\_PL03 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  
FY2023 Annual Report of Research Committee on Investigation on Safety Standards of  
Prismatictype  
HTGR

(3) 技術的論点と検討の進め方

(3) Technical topics and investigation approach

\*更田 豊志<sup>1</sup>

1 東京大学

**要旨**

本セッションでは、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」における技術的論点や検討の進め方が報告された。

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。

技術的論点

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した。

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

まとめ

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である。

## 2E14 高出力密度高温ガス炉におけるマルチフィジクス挙動

### (1) 燃料母材の事故時ふるまい

#### Multiphysics Behavior in HTGRs with High Power Density

##### (1) Accident Behaviors of Fuel Matrices

\*西村 洋亮<sup>1</sup>, アンナ グバレビッチ<sup>2</sup>, 吉田 克己<sup>2</sup>, 高松 邦吉<sup>3</sup>, 岡本 孝司<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京大学, <sup>2</sup>東京工業大学, <sup>3</sup>日本原子力研究開発機構

## 要旨

次世代炉として位置付けられる高温ガス炉では、炉心出力密度の増大化と空気侵入事故時の安全性向上を目指し、炭化ケイ素 (SiC) を母材としたフルセラミックス革新燃料の開発が進められている。先行研究で採用した反応焼結法により製作した SiC 燃料母材は、高温ガス炉の通常運転時における燃料最高温度の許容値を超えない熱伝導率を有していること

が分かっているが、SEM と XRD 分析により未反応の C および Si が残存していることが確認されている。

これら約 10wt.%含まれる不純物が空気侵入時の高温酸化挙動に与える影響を調べるため、示差式熱質量測定装置 (TGA) を用いた実験を行った。事故を想定した温度と酸素濃度条件下で 10 時間の酸化試験を行い、燃料安全性の観点から性能評価が行われた。その結果、SiC 表面には安定な SiO<sub>2</sub> 酸化膜が形成されるパッシブ酸化モードを示し、優れた耐酸化性能が確認された。また、市販の反応焼結 SiC と比較して酸化速度が高いことから、Si リッチな SiC 母材は Si 酸化による SiO<sub>2</sub> 酸化物の形成により耐酸化性能が向上し、1400 度の事故時においても腐食せず、燃料安全性を担保できることが確認された。

## **2E15 高出力密度高温ガス炉におけるマルチフィジクス挙動**

### **(2) 実機成立性評価**

#### **Multiphysics Behavior in HTGRs with High Power Density**

##### **(2) Feasibility Study**

**\*高松 邦吉<sup>1</sup>, 沖田 将一朗<sup>1</sup>, 橋 幸男<sup>1</sup>, 西村 洋亮<sup>2</sup>, 岡本 孝司<sup>2</sup>**

**1JAEA, 2 東大**

#### **要旨**

本研究では、SiC 母材を用いた燃料コンパクトを採用した高出力密度高温ガス炉の事故解析を行い、実機の成立性を評価した。高温ガス炉は 900℃を超える高温の熱供給が可能であり、「止める・冷やす・閉じ込める」を物理現象で達成できるため、安全性が高く、ゼロカーボンエネルギー源として注目されている。本研究の目的は、SiC 母材を用いた高出力密度高温ガス炉が受動的安全性を確保できることを確認することである。

具体的には、2 次元非定常伝熱解析コード (TAC-NC) を用いて減圧事故解析を行った。この解析により、燃料の最高温度が受動的安全性を確保できる目標値である 1400℃を超えないことを確認した。解析の結果、HTR50S (原子炉出力 50MW、平均出力密度 3.5MW/cm<sup>3</sup>) に対して、SiC 炉心は原子炉出力 60MW、平均出力密度 4.2MW/cm<sup>3</sup> と 1.2 倍の増加が見られたが、事故解析の初期状態で SiC 炉心部の燃料最高温度は 1125℃、RPV (原子炉圧力容器) の最高温度は 252℃となった。さらに、減圧事故解析においても、SiC 炉心部の燃料最高温度は 1266℃、RPV の最高温度は 375℃となり、どちらも目標値を下回る結果となった。

このように、減圧事故時でも燃料の最高温度が 1400℃を超えないこと、RPV の制限温度 (540℃) 未満であることを確認した。これにより、SiC 母材の燃料コンパクトを採用した



高出力密度高温ガス炉は、受動的安全性を確保できることが明らかになった。今後、この結果を基にして実機燃料開発への応用が期待される。

#### 1G11 高温ガス炉を用いた核融合炉用トリチウム製造法の検討

##### ～Ni 被覆Zr 球の水素吸収性能～

Study on T production method using high-temperature gas-cooled reactor for fusion reactors

##### ～ Hydrogen absorption property of Ni-coated Zr sphere ～

\* 松浦秀明<sup>1</sup>, 川井大海<sup>1</sup>, 北川堪大<sup>1</sup>, 古屋碧海<sup>1</sup>, 片山一成<sup>2</sup>, 大塚哲平<sup>3</sup>,

中川繁昭<sup>4</sup>, 石塚悦男<sup>4</sup>, 飛田健次<sup>5</sup>, 染谷洋二<sup>6</sup>, 坂本宜照<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 九大院工, <sup>2</sup> 九大院総理工, <sup>3</sup> 近大, <sup>4</sup> JAEA, <sup>5</sup> 東北大工, <sup>6</sup> QST

### 要旨

核融合原型炉の運転にはトリチウムの保有が必要であり、高温ガス炉を用いてトリチウムを製造する可能性がある。高温ガス炉は黒鉛減速体系であり、Li との相性が良く、中性子吸収体である可燃性毒物 (BP) を炉心内に粗に配置できる。これにより、構造設計を大きく変更せずにトリチウム製造が可能となる。発電と軽水素製造とトリチウム製造の両立を目指し、製造されたトリチウムを Li 装荷体内に封じ込める方法として Ni 被覆 Zr 球を使用することを検討している。

Ni 被覆 Zr 球を用いた水素吸収実験では、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器を使用した。直径 600  $\mu$ m 程度の Zr 球に 5  $\mu$ m 程度の Ni 被覆を施し、30 粒の Ni 被覆 Zr 球と LiAlO<sub>2</sub> 粉末 50mg を Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器に装荷し、900℃で一定時間共存させた。その後、試験体を 800Pa の水素雰囲気中に設置し、水素吸収量の時間推移を観測した。

酸化物と 3 日間・1 週間共存保持、保持期間無し、共存無しの試料に対する水素吸収性能の変化が観察された。酸化物との共存期間が長いほど拡散係数は 2 桁程度低下したが、溶解度係数には大きな変化はなかった。得られた拡散・溶解度係数を用いて推定された水素吸収量は、T 製造用高温ガス炉の標準設計における想定量の 10 倍以上であった。1 週間保持した試料についても劣化は見られなかった。

今回の実験では、Ni 被覆 Zr 球 30 粒に対し LiAlO<sub>2</sub> 粉末 50mg を使用したが、これは標準設計に比べて Zr との質量比で約 10 倍の量であるため、粉末装荷具合によって Ni 被覆 Zr 球の表面状態にばらつきが生じた可能性がある。今後は、LiAlO<sub>2</sub> 粉末の量を変えた場合や現在実施中の照射試験の状況についても議論・報告がなされるとされた。

1G12 核融合炉トリチウム生産用リチウムロッドにおけるZr 添加効果の検討  
Investigation of Zr addition effect on lithium rods for tritium production in fusion  
reactors

\*五十川 浩希<sup>1</sup>, 片山 一成<sup>1</sup>, 小林正陽<sup>1</sup>, 松浦 秀明<sup>2</sup>,  
1 九大院総理工, 2九大院工

**要旨**

D-T 核融合炉の運転にはトリチウムが必要であるが、その調達方法は確立されていない。高温ガス炉によるトリチウム製造は有望であると考えられているが、リチウムと中性子との核変換反応で生産されたトリチウムの閉じ込め技術が課題である。トリチウム生産にはLiAlO<sub>2</sub> が用いられる予定であり、そのトリチウム放出特性の理解が重要である。

LiAlO<sub>2</sub>試料に中性子照射を行った。Ar 雰囲気において、中性子照射LiAlO<sub>2</sub> 粉末を石英管に充填し、Ar ガスを供給しながら、電気炉を用いて昇温速度5 ° C/min で900 ° C まで加熱し、1 時間保持した。また、本実験では、試料にZr を含むことによる影響を調べるため、加熱実験の開始前に700° C まで30 分の予備加熱を行い、急冷させた後3 時間の加熱実験を行った。放出されるトリチウムは、2 連の水バブラーで捕集した。水蒸気状トリチウムは前置バブラーに捕集し、水素状トリチウムは酸化銅で水蒸気状に転換して後置バブラーに捕集した。加熱後はH<sub>2</sub>/Ar ガスとO<sub>2</sub>/Ar ガスをPt 触媒に導入して湿潤ガスを生成・流通させ、試料および配管表面に捕捉されたトリチウムを回収した。

予備加熱を行った実験では、低温でも水素状トリチウムの放出ピークが確認された。この結果は、予備加熱時に発生したトリチウムが酸化膜により Zr の内外に隔てられ、効果的に吸収されなかったことを示している。また、700° C 以上の温度帯では酸素原子が Zr 内部に拡散して酸化膜が消失することが考えられる。今後の課題として、Zr 酸化膜の直接観測やトリチウムの拡散挙動の温度依存性の理解が挙げられる。

高温ガス炉でのトリチウム生産に向けて、LiAlO<sub>2</sub> からのトリチウム放出特性の理解が重要であり、特に Zr 酸化膜の挙動やトリチウムの拡散メカニズムの詳細な解析が必要である。今後の研究では、これらの課題に取り組み、トリチウムの効果的な回収技術の確立を目指す。

2L04 連続エネルギーモンテカルロ法による高温ガス炉用核定数作成法の開発  
Development of nuclear constant generation method for HTGR based on continuous energy  
Monte Carlo

technique

**\*鈴木 哲1、吉岡 研一1、木村 礼1**

**1 東芝エネルギーシステムズ株式会社**

## **要旨**

東芝エネルギーシステムズは、蓄熱型高温ガス炉の開発を進め、その炉心解析手法の整備を行っている。高温ガス炉の核設計には通常、決定論的手法を用いた多群核定数が利用されるが、東芝は軽水炉向けに開発された連続エネルギーモンテカルロコード“MCNP”を使用し、複雑な幾何学的体系を近似することなく多群核定数を作成する方法を開発した。この手法を高温ガス炉用に適用し、燃料カラムモデルでの炉心解析を実施した。MCNPを用いた多群核定数の作成方法は、独自開発のWFR法を含む散乱マトリクスの評価に基づいている。

MCNPモデルでは確率論的幾何形状は格子（Lattice）として扱われ、散乱マトリクス出力機能を付加したMCNP5およびMCNPのタリー出力からエネルギー3群ANISN型およびMCNP多群モード向けのP1断面積が作成された。これを用いて、カラム全体を1領域に均質化したモデルで決定論コード“DANTSYS”による輸送計算とMCNP多群計算を実施した。MCNP詳細計算の結果と“MVP”コードの確率論的幾何形状（STGM）モードの参照解とを比較した結果、実効増倍率はほぼ同じであり、MCNPで作成した群定数での均質化計算が十分な精度で行えることが確認された。

この研究から、MCNPによる多群核定数の作成とその妥当性検証が成功裡に行われ、今後は制御棒周りのモデル化や全炉心計算の手法についてさらに検討が進められる予定である。

## **2L05 高温ガス炉解析のサーマルカットオフエネルギー**

### **Thermal Cut-off Energy for Analysis of High Temperature Gas-cooled Reactor**

**\*北田 孝典1、竹田 敏1、山本 章夫2、山路 和也3、小池啓基3、浅野耕司3**

**1 阪大、2 名大、3MHI**

## **要旨**

燃料温度が高い高温ガス炉においては、上方散乱を正確に取り扱うことが重要であり、サーマルカットオフエネルギーの設定についても検討が不足していると指摘されている。そこで、本研究ではHTTRを対象とし、サーマルカットオフエネルギーの影響を評価した。

計算条件として、HTTR に基づいた単一燃料体系（濃縮度 6.7 wt%）に対し、MVP3.0 モンテカルロコードを使用してサーマルカットオフエネルギーを変更した場合の影響を評価した。評価は燃焼初期（BOL）と燃焼末期（EOL）において、様々な燃料温度と黒鉛温度に対して行われ、MVP の ETH パラメータを変更して増倍率にどのように影響するかを調査した。

計算結果によると、BOL において燃料温度を 1900K、減速材温度を 300K とした場合、ETH を 4 eV とすると ETH を 100 eV に比べて増倍率が約 250 pcm 小さくなることが確認された。また、ETH が 30 eV 以上の場合、増倍率の変動が 50 pcm 以下であることが示された。EOL においても同様の傾向が観察された。

さらに、ETH = 4, 10, 30 eV の場合における BOL におけるドップラ反応度係数の比較から、ETH の変更がドップラ係数に与える影響は限定的であることも確認された。

## **2L06 三菱3 次元詳細輸送計算コード GALAXY-Z の開発**

### **(8) 高温ガス炉の共鳴計算手法**

#### **Development of Mitsubishi Three-Dimensional Heterogeneous Transport Calculation Code GALAXY-Z**

#### **(8) Resonance Calculation Method for High Temperature Gas-cooled Reactor**

**\*山路 和也<sup>1</sup>, 小池 啓基<sup>1</sup>, 浅野 耕司<sup>1</sup>, 竹田 敏<sup>2</sup>, 山本 章夫<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup>MHI, <sup>2</sup>阪大, <sup>3</sup>名大**

#### **要旨**

MHI は、GALAXY-Z を高温ガス炉に適用するため、被覆燃料粒子における二重非均質効果を取り扱う共鳴計算機能を開発した。この機能の計算精度を確認するため、連続エネルギーモンテカルロコード MVP との比較を行った。

GALAXY-Z は、3 次元非均質輸送計算コードであり、高温ガス炉燃料における二重非均質効果を適切に取り扱うための共鳴計算機能を新たに導入した。この計算手法では、無限体系を仮定した燃料コンパクト内でランダムに配置された被覆燃料粒子を MOC で解析し、輸送計算結果を統計処理する DSTG 法が採用されている。特に、高温ガス炉体系においては、中性子エネルギー 30eV までの上方散乱効果を考慮し、超詳細群計算と等価原理を用いて精度を高めている。

精度確認では、JAEA が開発した FRENDDY V2 を使用し、JENDL-5 に基づく超詳細群断面積ライブラリと SHEM361 群構造の多群断面積ライブラリを作成した。これにより、GALAXY-Z で

高温ガス炉燃料を解析し、MVP と比較した結果、実効全断面積で 2%、無限増倍率で 0.04%dk/k, 単一燃料体の出力分布にて 0.3%以内の差異が確認され、良好な一致が示された。

2L07 CBZ-GENESIS による HTTR 二次元炉心解析(1)-CBZ による多群定数の作成-  
Analysis of the two-dimensional core model of HTTR using CBZ and GENESIS (1)  
-Multi-group constant generation by CBZ-

\*千葉 豪<sup>1</sup>, 山本 章夫<sup>2</sup>

1 北海道大学, 2 名古屋大学

**要旨**

高温ガス炉の核設計には、高精度な決定論的解析手法・ツールが必要である。東芝エネルギーシステムズは、国産かつ公開されている炉物理解析コードである CBZ と GENESIS を利用・拡張する形で、高温ガス炉核設計用コードシステムの開発に着手した。決定論的解析において、体系を構成する媒質の多群実効断面積の高精度な評価が不可欠である。本稿では CBZ を用いた多群定数の作成手法について述べる。多群実効断面積の計算には、以下の手法を採用した。

- **多群ライブラリ**: 無限希釈断面積、散乱行列、共鳴自己遮蔽因子を格納する多群ライブラリを作成した。このために、JENDL-4.0 もしくは JENDL-5 のファイルを FRENDY v2 で処理した。
- **エネルギー群構造**: SHEM361 群を採用した。これに基づいて HTTR 燃料領域の中性子スペクトルを計算し、軽水炉のものと比較した。

高温ガス炉の背景断面積の評価には、二重非均質性を適切に考慮した Dancoff 係数の計算が重要である。具体的な手順は以下の通りである。

- **Dancoff 係数の計算**: 一次元球体系でモデル化した複数の層からなる TRISO 燃料と黒鉛マトリクス（燃料コンパクト）について、燃料核を黒体として扱い、中性子輸送方程式を解いた。これにより燃料の熱中性子不利因子を求め、燃料コンパクトを均質として扱った場合の断面積を評価した。その後、冷却材や黒鉛スリーブ、燃料要素の黒鉛マトリクスで構成される単位燃料コンパクトモデルを用いて、エネルギー 1 群の中性子輸送計算を行い、燃料コンパクトの無限配列中の中性子束を求めた。これらの計算結果を用いて Neutron Current 法の考え方にに基づき、Dancoff 係数を評価した。

本研究では, CBZ による高温ガス炉の多群定数作成手法について述べた. 今後は, この多群定数を用いた決定論的解析手法の計算精度について, 別途の発表にて詳細に示す.

## 2L08 CBZ-GENESIS によるHTTR 二次元炉心解析(2)-CBZ による解析-

### Analysis of the two-dimensional core model of HTTR using CBZ and GENESIS (2) -Analysis by CBZ-

\*奥山 莉子<sup>1</sup>, 千葉 豪<sup>1</sup>, 山本 章夫<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>北海道大学, <sup>2</sup>名古屋大学

#### 要旨

高温ガス炉の設計において, 決定論的解析手法が重要である. 本稿では, CBZ における多群実効断面積の計算機能の実装を踏まえ, 361 群の多群ライブラリと二重非均質性を考慮した Dancoff 係数を用いた CBZ と, 連続エネルギーモンテカルロコード MVP の単一燃料要素の無限増倍率及び燃料コンパクト毎の核分裂率分布を比較した.

- **燃料要素モデル:** HTTR に装荷されている 16 種類の燃料要素モデルについて, 単一燃料要素の計算を実施した. これらのモデルは, U-235 濃縮度や B-10 濃縮度が異なる.
- **計算条件:**
  - **CBZ:** エネルギー群数は 361 群, 非等方散乱は P0 輸送近似で考慮した. レイトレース幅は 0.1cm, 方位角分割数は  $36/2\pi$ , 極角の取り扱いには 2 点の TY-opt を適用し, MOC で多群中性子輸送方程式を解いた. 中性子源の空間分布には平坦近似を適用した.
  - **MVP:** 107 ヒストリーで計算を行った.
  - **使用データ:** JENDL-4.0 を使用し, JENDL-5 での計算も比較した.
- **誤差の評価:** 最も詳細なメッシュ分割モデルを用いた結果を以下に示す.
  - **無限増倍率の誤差:** 0.05%以下
  - **燃料コンパクト毎の核分裂率分布の RMS 誤差:** 0.07%以下
- **依存性の評価:** U-235 濃縮度や B-10 濃縮度の依存性が僅かに見られたが, 全体的には良好な一致が見られた.
- **JENDL-5 との比較:** JENDL-5 を用いた場合でも, 無限増倍率では 0.07%以下, 核分裂源分布では 0.06%以下の誤差であり, JENDL-4.0 を用いた場合とほぼ同程度の精度であることが確認された.

2L09 CBZ-GENESIS によるHTTR 二次元炉心解析(3)-GENESIS による解析-  
Analysis of the two-dimensional core model of HTTR using CBZ and GENESIS (3) -Analysis  
by GENESIS-

\*山本 章夫<sup>1</sup>, 千葉 豪<sup>2</sup>  
1 名古屋大学, 2 北海道大学

**要旨**

HTTRの二次元全炉心モデルに対し、CBZを用いて多群核定数を作成し、GENESISで全炉心計算を行った。実効増倍率と燃料コンパクト毎の核分裂率分布について、二重非均質性を直接考慮した連続エネルギーモンテカルロコードMVPの結果と比較し、両者が良好に一致していることを確認した。CBZ-GENESISによる計算精度の確認として、HTTRの簡略化された二次元炉心モデルを用い、エネルギー群数や非等方散乱の取り扱い、離散化パラメータの影響を検証した。計算結果は、実効増倍率と核分裂率におけるエネルギー群依存性が明確であり、輸送補正による非等方散乱の扱いが適切であることを示した。また、MOCの離散化パラメータに対する感度は大きくないことも確認された。これにより、CBZ-GENESISはMVPと同等の計算結果を提供することが可能であり、高速な設計計算手法の基礎となる可能性がある」と結論した。

3L02 UTR-KINKI におけるCd 試料の反応度価値測定  
Cd sample reactivity measurements at UTR-KINKI  
守屋 壮一郎<sup>1</sup>, \*藤本望<sup>1</sup>, Irwan L. Simanullang<sup>1</sup>, 左近敦士<sup>2</sup>,  
1九州大学, 2近畿大学

**要旨**

高温ガス炉でのBP反応度価値評価手法の高度化を目指し、近大炉でCdサンプルの反応度価値測定を行った。Cdサンプルをアルミ製ホルダーに挿入し、近大炉の中央ストリンガーに装荷した。CICとFC信号を使用して反応度評価を行い、いずれも良好な一致を確認した。Cdサンプルの寸法は3cm×3cm×1mm, 3cm×3cm×3mm, 4cm×4cm×1mm, 4cm×4cm×3mmの4種類を用意し、それぞれ3回の測定を行い、平均値を測定値とした。CICによる測定結果が最も信頼性が高いと考えられ、FC信号による測定でも1pcm以下の差で良好な一致が得られた。測定結果とMVP-3.0による事前解析との誤差は10%前後であった。今後は異なる大きさの試料や複数試料の測定を行い、測定データを拡充し、解析を進めていく予定である。

2M\_PL03 新型炉部会セッション  
次世代革新炉（高速炉と高温ガス炉）開発の最前線  
Forefront of development of next-generation innovative nuclear reactors  
(fast reactor and high-temperature gas-cooled reactor)

### (3) 国内外の高温ガス炉開発の最前線

#### (3) Forefront of high-temperature gas-cooled reactor development in Japan and foreign countries

\*坂場 成昭<sup>1</sup>、大橋 弘史<sup>1</sup>、佐藤 博之<sup>1</sup>

1 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

#### 要旨

本稿では、世界および日本の高温ガス炉の開発状況について紹介を行う。

#### 1. はじめに

高温ガス炉は、高い安全性と 900℃以上の高温熱の取得が可能のため、日本を含む世界各国でカーボンニュートラル実現の鍵として期待されている。

#### 2. 世界の高温ガス炉開発状況

**2-1. 米国** 米国の X-Energy 社は、DOE の支援のもとでペブルベッド型高温ガス炉の開発を進めている。2029 年には運転を開始する計画で、テキサス州に 4 基の炉を建設予定である。

**2-2. 英国** 英国政府は、軽水炉と並び革新炉として高温ガス炉を採用し、2022 年から高温ガス炉実証炉プログラムを開始した。2025 年までに基本設計を完了し、2030 年代初期に運転を開始する予定である。

**2-3. ポーランド** ポーランド政府は、石炭依存度を下げるために、高温ガス炉の導入を進めている。2024 年までに高温ガス炉研究炉の基本設計を完了し、熱出力 30MW の炉を建設する予定である。

**2-4. 中国** 中国は、清華大学の HTR-PM 商業運転を開始し、さらに HTR-PM600 の開発を進めている。これらの炉は、山東省に建設され、750℃の原子炉出口温度を実現している。

#### 3. 我が国の高温ガス炉開発状況

**3-1. HTTR-熱利用試験** JAEA は、HTTR を利用した水素製造施設の接続技術確立のための HTTR-熱利用試験を進めている。2028 年までに水素製造を開始する予定である。

**3-2. 高温ガス炉実証炉開発** 2030 年代後半に運転を開始する高温ガス炉実証炉の開発が進められている。三菱重工が中核企業として、基本設計から製造・建設までを担当している。



#### 4. おわりに

日本は、高温ガス炉の技術を活用して、多排出産業のカーボンニュートラル実現や社会のレジリエンス強化に貢献していくことが期待されている。世界の高温ガス炉開発競争の中で、日本の強みを最大限に活かし、新たな社会価値を提供していきたいと考えている。

#### 2M\_PL04 新型炉部会セッション

##### 次世代革新炉（高速炉と高温ガス炉）開発の最前線

Forefront of development of next-generation innovative nuclear reactors  
(fast reactor and high-temperature gas-cooled reactor)

##### (4) 高温ガス炉開発における中核企業の取り組み

##### (4) Effort of core company in high-temperature gas-cooled reactor development

\*原 輝夫<sup>1</sup>, 大西 宏行<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 三菱重工業株式会社

#### 要旨

##### 1. はじめに

2050 年に向けたカーボンニュートラル社会の実現に向け、製鉄や化学産業、運輸分野などでの水素利用が進められている。この実現には大量の水素が必要であり、その安定的な供給には高温ガス炉が有効である。高温ガス炉は 900℃以上の超高温熱を供給し、カーボンフリーな高温熱源として、大量かつ安定した水素製造に活用可能である。当社は、高温ガス炉をカーボンフリーな高温熱源として実証・実用化し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献している。

##### 2. 高温ガス炉開発への当社の取り組み

日本では、日本原子力研究開発機構（JAEA）により 1970 年代から高温ガス炉の研究開発が進められ、HTTR（高温工学試験研究炉）が建設された。当社は幹事会社としてこのプロジェクトを推進し、格納容器、主冷却設備、高温二重配管、加圧水冷却器、ヘリウム循環機などの主要機器を納入している。現在、高温ガス炉の開発スケジュールは経済産業省総合資源エネルギー調査会の革新炉ワーキンググループ（革新炉 WG）により 2022 年度に策定され、2030 年までに HTTR を利用した水素製造施設を接続し、高温ガス炉の規格と基準を整備する予定である。同時に、実証炉の基本設計を進め、2030 年代後半に運転を開始する計画である。

HTTR を活用した熱利用試験では、JAEA と連携し、HTTR-熱利用試験施設の基本設計を進めている。この施設では、メタン水蒸気改質法による水素製造施設を設置し、高温隔離弁、ヘリウム循環機、高温断熱配管などの接続技術の開発を行っている。2030 年代に運転開始を目指す実証炉開発においても、当社は中核企業として選定され、資源エネルギー庁の委託事業「高温ガス炉実証炉の設計にかかる研究開発」を受託し、開発を進めている。このプロジェクトでは、商用化済みのメタン水蒸気改質法を用いた水素製造技術を活用し、高温ガス炉の安全性を最大限に生かした初期プラントコンセプト検討を進めている。

### **3. おわりに**

当社は長年にわたり培ってきた高温ガス炉関連技術をベースに、水素製造向けのカーボンフリー高温熱源として、高温ガス炉実証炉の開発を進めている。これにより、将来のカーボンニュートラル社会とエネルギーの安定供給、経済安全保障、地産地消の実現に貢献していくことを目指している。

## 2. 国外の学会，研究会等に関する情報収集－ICONE31

主要な原子力関連の学会，研究会等において，高温ガス炉に関する発表を抽出し，その概要をまとめた．その際，発表の件数，発表者の概況（国，組織，対象分野）を整理するとともに，個別の発表の概要を作成した．調査対象としては以下のとおり．

ICONE31（2024年8月4～8日 チェコ，プラハ）

### 会議概要

ICONE31は，プラハで開催された．全部で15のトラックから構成され，運転，SMR関連，燃料サイクル，CFD等のテーマに分かれている．高温ガス炉限定のセッションは設けられておらず，高温ガス炉に関する発表は関連するテーマのセッションに分散している．調査は予稿集の分析をベースとするが，一部の講演については実際に聴講して情報収集を行った．高温ガス炉に関連する発表を調査対象として，以下の計11件を選定した．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（下表参照）．

表 ICONE31 の調査結果まとめ

講演番号	機関	炉型	分野	特記
ICONE31-130256	Tsinghua Univ.	P型-HTGR	材料	
ICONE31-131748	JAEA	B型-HTGR	ベンチマーク	
ICONE31-131854	INET	P型-HTGR	制御	
ICONE31-131880	Tsinghua Univ.	P型-HTGR	核計算	
ICONE31-132744	Tsinghua Univ.	P型-HTGR	ペブルフロー	
ICONE31-133398	Tsinghua Univ.	P型-HTGR	材料	
ICONE31-135166	Tsinghua Univ.	P型-HTGR	動的特性	
ICONE31-135387	Tsinghua Univ.	P型-HTGR	運転	
ICONE31-135863	Nuclear Power Institute of China	P型-HTGR	燃料	
ICONE31-135983	Tsinghua Univ.	P型-HTGR	制御	
ICONE31-136000	Tsinghua Univ.	P型-HTGR	熱伝導	

主なポイントを下記に示す．

- 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气中で著しく酸化し，

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(ICON31-130256 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 (ICON31-131748 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(ICON31-131854 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 (ICON31-131880 参照)。
- Tsinghua Univ.から粒子流れ研究において、転移学習を用いたデータ拡張戦略により、シミュレーションと実データを組み合わせ、データ収集の負担を軽減する議論がなされた(ICON31-132744 参照)。
- Tsinghua Univ.から二酸化炭素雰囲気での熱処理は、照射黒鉛から C-14 を選択的に分離する有望な方法であるとの報告がなされた。照射された A3-3 黒鉛を用いた実験で、温度とガスの影響が調査され、反応速度や活性化エネルギーが得られた。これらの成果は、C-14 分離の熱処理設計に役立つと考えられる(ICON31-133398 参照)。
- Tsinghua Univ.から MHTGR の熱電併給システムは、熱負荷と電力負荷の相互接続が複雑で、動的特性の調査が重要であるとの報告がなされた。本研究では、過熱蒸気生成システムの動的モデルを開発し、制御スキームの正確性と有効性を確認した (ICON31-135166 参照)。
- Tsinghua Univ.から MHTGR の運転信頼性を設備状態に基づいて評価するモデルが提案され、マルコフ仮定法でモデル化する報告がなされた。実験でこの方法が設備状態の影響を反映し、運転リスクの特定と性能向上に寄与することが示された (ICON31-135387 参照)。
- Nuclear Power Institute of China から、TRISO/SiC 燃料要素は HTGR の安全性向上に寄与する報告がなされ、粒子の配置が燃料要素の応力に影響を与えることを示し、粒子クラスターを避けることで破損のリスクを減らせることが分かった (ICON31-135863 参照)。
- Tsinghua Univ.から、一次ヘリウム循環器の振動抑制のために、新しい非線形適応共振コントローラが提案された。簡素な構造と少ない計算量で、システムの数学モデルに依存せず、その有効性が確認された (ICON31-135983 参照)。
- Tsinghua Univ.から、分散燃料の ETC は内部熱源の影響を受けるため、従来のモデルは温度を過小評価してしまうことが指摘された。本研究は三次元有限要素法を用いて ETC を計算し、熱源分布の特性化が必要であることを示した (ICON31-136000 参照)。

## 内容詳細

### (1) ICONE31-130256

#### OXIDATION BEHAVIOR AND TENSILE PROPERTY OF INCONEL 617 IN THE SIMULATION ENVIRONMENT OF THE VERY-HIGH-TEMPERATURE REACTOR

Bin Du<sup>1</sup>, Zhiyong Liu<sup>1</sup>, Huaqiang Yin<sup>1</sup>, Penghui Xiao<sup>1</sup>, Huang Zhang<sup>1</sup>, Xuedong He<sup>1</sup>, Tao Ma<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Tsinghua University, Beijing, China

##### ABSTRACT

本研究では、インコネル 617 を CO や O<sub>2</sub> を微量にふくむヘリウムおよび空気中で 950℃ で最大 100 時間腐食させた。結果は、この合金が特に内部において不純なヘリウムよりも空気中で著しく酸化することを示した。これらの雰囲気における合金の酸化の違いには 2 つの理由があると考えられる。1 つは酸化ガス含有量の違いで、空気には 21% の酸素が含まれているのに対し、不純なヘリウムには少量の水蒸気しか含まれていないということである。もう 1 つは微気功反応の発生で、これにより形成された酸化物が還元反応を起こすと考えられる。酸化の違いは、合金の引張特性の違いにもつながる。引張試験の結果、不純なヘリウム中でのインコネル 617 の降伏強度 (YS)、最大引張強度 (UTS)、および伸び (Elong) はそれぞれ 309 MPa、674 MPa、43.5% から 291 MPa、649 MPa、39% に減少した。空気中では、インコネル 617 の YS、UTS、および Elong はそれぞれ 299 MPa、535 MPa、30% であった。劣化に影響を与える最も重要な要因の 1 つは酸化であり、合金粒界に沿って析出する細長い酸化物 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) は、優先的に亀裂伝播の核となり、合金の破損を加速する可能性がある。そのため、炉の中間熱交換器の長期的な安全運転を確保するには、合金からの過剰な内部酸化物の析出をできるだけ避けるべきである。ヘリウム中の CO 含有量を制御することは、合金の酸化を抑制するための有効な方法である。ヘリウム中の酸素と水の量を最小限に抑えることに加えて、CO を制御することも合金の酸化度を低減する上で重要であると議論された。

### (2) ICONE31-131748

#### JENDL-5 BENCHMARKING FOR ADVANCED TEST REACTOR FOR PREPARING BURNUP ANALYSIS USING ISOTOPIC DATA FROM HTGR TYPE FUEL IRRADIATION TESTS

Shoichiro Okita, Takeshi Aoki, Yuji Fukaya, Yukio Tachibana  
Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki, Japan

##### ABSTRACT

日本原子力研究開発機構 (JAEA) は、高温ガス炉用の核種生成・燃焼および崩壊熱評価の方法論を開発している。アイダホ国立研究所で実施された HTGR タイプ燃料照射試験 (AGR 試験) から得られた同位体組成データを用いて、評価方法の検証を行う予定である。この計画の第一歩として、連続エネルギーのモンテカルロコード MVP-3 を用いて、先進試験炉 (ATR) の炉心計算モデルの予備的な検証を行った。日本の最新の核データライブラリである JENDL-5 を使用して計算モデルを作成した。また、ATR 計算モデルの実効増倍率と

相対発電密度を計算した。IRPhE ハンドブックに報告されている測定値との比較の結果、実効増倍率で実験誤差範囲内、相対発電密度分布で $\pm 8.8\%$ 以内で、JENDL-5 と MVP-3 で作成した計算モデルは良好な計算精度を示した。この結果は、AGR 試験データを用いた核種生成・燃焼および崩壊熱評価方法の予定された検証に役立つことが期待される。

### (3) ICONE31-131854

#### DYNAMIC MODELING OF MODULAR HIGH TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR COGENERATION SYSTEM AND CONTROL DESIGN UNDER THE CONDITION OF TURBINE ISOLATION

Xuan Lin, Zhe Dong, Fan Chen, Shuqiao Zhou, Chao Guo, Duo Li, Weidong Sun

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Beijing, China

#### ABSTRACT

HTR-PM600 モジュール型高温ガス炉 (mHTGR) は、固有の安全特性と高い蒸気品質という利点を持ち、工業用熱供給と電力のコージェネレーションに応用することで経済性を向上させることができる。しかし、タービンが孤立した場合、モジュールはユーザー側の電力変動に適応するために負荷調整を行う必要があり、タービンの主蒸気調節弁は蒸気発生器の圧力制御に参加できなくなる。タービン孤立時に熱等の安定運転と負荷追従能力を確保する自動制御システムを設計するために、まず MATLAB/Simulink と Simscape ツールボックスに基づく動的シミュレーションモデルを構築した。典型的な運転条件点での定常状態シミュレーションテストと動的応答実験を行い、モデルの合理性と精度を検証した。構築したモデルに基づいて、タービン孤立状態での NSSS の協調制御スキームを設計し、蒸気発生器の入口で給水ポンプとバルブを調整した。シミュレーション結果は、この制御スキームと制御法則がコージェネレーションプラントの安全で安定した運転を確保でき、またタービンなしでの熱の負荷追従を実現できることを示している。

### (4) ICONE31-131880

#### RESEARCH ON FUEL PEBBLE MODELING METHODS COMPARISON AND EIGENVALUE ANALYSIS OF THE RUNNING-IN PHASE OF HTR-PM

Qianye Yang<sup>1</sup>, Nan Gui<sup>1</sup>, Jiyan Tu<sup>1,2</sup>, Shengyao Jiang<sup>1</sup> <sup>1</sup>Tsinghua University, Beijing, China, <sup>2</sup>RMIT University, Melbourne VIC 3000, Australia

#### ABSTRACT

高温ガス冷却ペブルベッド炉 (HTR) は、外側に黒鉛層を持つ燃料ペブルを使用し、内部の燃料領域には数千の TRi-structural ISotropic (TRISO) 粒子が黒鉛マトリックスに分散しており、二重の非均質効果を引き起こすため中性子計算上の課題が指摘されている。モンテカルロ (MC) 法は、複雑な炉設計の中性子解析において有望とされているが、大規模システムでは計算コストが高く、効率的ではない。本研究では、精度と効率のバランスを取るために、異なる燃料ペブルのモデリング方法を計算し比較した。非均質効果を可能な限り再現したモデルと、高忠実度にさまざまなアプローチで均質化したモデルとを比較検討した。結果は、反応度等価物理変換 (RPT) モデルが非均質効果を十分な精度で捉えつつ、計

算コストを削減することを示している。RPT に基づいて、HTR-PM の運転開始段階を計算するために固有値解析が行われた。炉心高さと実効増倍率 ( $k_{eff}$ ) の間に線形相関が見られ、これは HTR-10 のような小型炉における現象と一致している。この比較モデリングと解析は、燃料ペブルの均質化に関する洞察を提供し、全炉心 HTR の設計とシミュレーションに適切な燃料ペブルモデリングを適用する可能性を示唆するものである。

(5) ICONE31-132744

DATA AUGMENTATION FOR DISCHARGING TIME PREDICTION OF PARTICLE FLOW: A DEEP LEARNING AND STYLE TRANSFER APPROACH

Mengqi Wu<sup>1</sup>, Yang Liu<sup>1</sup>, Bin Li<sup>1</sup>, Zhen Zhang<sup>1</sup>, Nan Gui<sup>1</sup>, Jiyuan Tu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nuclear and New Energy Technology, Collaborative Innovation Center of Advanced Nuclear Energy Technology, Key Laboratory of Advanced Reactor

Engineering and Safety, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing, China

<sup>2</sup>School of Engineering, RMIT University, Melbourne, VIC 3083, Australia

**ABSTRACT**

近年、大規模データセットで訓練されたディープラーニングモデルを粒子流れの研究に利用することへの関心が高まっている。ディープラーニング手法により、粒子流れの特性に基づく排出時間を正確に予測することができる。しかし、実験データの収集は、相当な労力と設備費用がかかるため負担が大きい。小規模で不十分なサンプルの課題に対処するため、実データと計算データを効果的に組み合わせる転移学習を用いたデータ拡張戦略を開発し、最小限のコストでデータセットを拡張するためにデータを合成した。本研究では特に排出時間の予測に焦点を当てて、計算データからの流れの特性と実験画像の画像スタイルを組み合わせた合成データを生成した。これは、実データを取得する労力に比べて、シミュレーションおよび合成データ生成に要する時間が短いためである。結果は、スタイル転送モデルが合成データをうまく生成し、データ収集の負担を大幅に軽減することを示している。また、合成データで訓練されたモデルは、粒子流れの実画像の排出時間を予測する能力を持っていることが確認された。粒子流れ研究における実行可能なデータ拡張アプローチを提供し、今後はデータの質とネットワークの能力に関するさらなる取り組みが必要であると議論された。

(6) ICONE31-133398

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE GASIFICATION KINETICS OF IRRADIATED A3-3 MATRIX GRAPHITE

Weishuai Wang, Naizhe Zhang, Xuegang Liu, Feng Xie

Tsinghua University, Beijing, China

**ABSTRACT**

二酸化炭素雰囲気での熱処理は、放射線を照射された黒鉛の中から C-14 を選択的に分離するための有望な方法であることが証明されている。C-14 は、数千年経過しても照射黒鉛の放射能に大きく寄与しうる。熱処理においては、黒鉛の出所、炉の種類、処理中の雰囲気な

ど、いくつかの重要な要因が大きな役割を果たす。照射された A3-3 黒鉛を選択し、CO<sub>2</sub>/Ar/CO ガス混合物の範囲でのガス化反応の動力学を研究し、異なる CO 分圧でのガス化反応速度も調査された。また、CO が存在しない場合、異なる CO<sub>2</sub> 分圧と温度でのガス化反応速度の結果が示された。実験研究の結果に基づいて、全体反応および素反応の活性化エネルギー値と前指数因子が得られた。結論として、975～1045℃の温度範囲で、照射された A3-3 マトリックス黒鉛粒子の表面で均一な気体・固体反応が起こることが推測される。これらの結果は、照射された A3-3 マトリックス黒鉛から C-14 を選択的に分離するための将来の熱処理設計に役立つ可能性がある。

(7) ICONE31-135166

MODELING AND CONTROL SCHEME DESIGN OF A MULTI-MODULAR HIGH TEMPERATURE GAS COOLED REACTOR COGENERATION UNIT

Zhonghua cheng, Zhe dong

Institute of nuclear and new energy technology, Tsinghua university, Beijing, China

**ABSTRACT**

マルチモジュール高温ガス冷却炉（MHTGR）は、固有の安全機能を備え高い出口蒸気温度を生成する能力など、多くの利点を誇っている。高温ガス冷却炉のコージェネレーションの可能性を活用することで、その強みを十分に活かし経済的な実現性を高めることが可能である。MHTGR 発電ユニットと比較して、マルチモジュール高温ガス冷却炉の熱電併給（CHP）システムは、熱負荷と電力負荷の相互接続により、より複雑になることが懸念されている。その運転条件はより多様であり、熱負荷の変動に適応し熱負荷を追跡する必要がある。したがって、マルチモジュール高温ガス冷却炉 CHP ユニットの動的特性を調査することは、関連する協調制御スキームのその後の設計にとって非常に重要である。本研究の焦点は、蒸気変換技術を利用した過熱蒸気生成システムである。このシステムは、高温炉の主蒸気から熱を抽出し、淡水化された水の温度を上げ、化学工業団地に供給するための高温高圧蒸気を生成することが可能になる。本研究では、各コンポーネントの動的モデルを開発し、計算のために統合した。モデルの開ループ動特性は分析に準拠しており、モデルは良好なシミュレーション精度を示し、ほとんどのプロセスパラメータの設定値からの逸脱は 15%未満であった。過熱蒸気の温度と圧力の制御スキームが設計された。2 つの運転条件下でのシステムの閉ループ応答により、設計された制御スキームの正確性と有効性が確認された。

(8) ICONE31-135387

RESEARCH ON OPERATING RELIABILITY OF MULTI-MODULAR HIGH TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR NUCLEAR POWER PLANT BASED ON EQUIPMENT STATE

Chao Guo<sup>1</sup>, Jianghai Li<sup>1</sup>, Qianqian Jia<sup>1</sup>, Ronghong Qu<sup>1</sup>, Xiaojin Huang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nuclear and New Energy Technology of Tsinghua University, Collaborative Innovation Center of Advanced Nuclear Energy Technology, Key Laboratory of



**ABSTRACT**

単一の原子炉蒸気供給システム (NSSS) モジュールを持つ原子力発電所 (NPP) と比較して、マルチモジュール高温ガス冷却炉 (MHTGR) は設備の規模が大きく、操作がより複雑である。MHTGR の運転信頼性を NPP 設備の観点から研究し、オペレーターに現在の NPP の状態を警告することが必要である。本研究では、設備状態に基づく MHTGR の運転信頼性モデルを提案する。マルコフ仮定法を用いて設備やシステムをモデル化し、モデル内の状態爆発を避けるためにシステム状態を簡略化した。共有形式に基づいて、システムセット分類法を使用して MHTGR 全体の運転信頼性モデルを構築した。発電能力、システム故障の重大度、運転信頼性レベルなど、複数の視点からいくつかの運転信頼性指標を提案している。HTR-PM600 ヘリウム循環器システムの異常を例に挙げて、運転信頼性のモデリング方法を検証した。実験結果は、この研究が設備状態がプラント運転に与える影響を反映できることを示しており、オペレーターが運転リスクを特定し、全体的な認識を向上させることで、MHTGR NPP の運転性能を向上させるのに役立つと期待される。

(9) ICONE31-135863

IRRADIATION-THERMAL-MECHANICAL COUPLING BEHAVIORS OF A  
TYPICAL TRISO/SiC FUEL ELEMENT BASED ON ACTUAL DISTRIBUTION

Zhang Liangjie, Chen Ping, Liu Shichao, Wang Haoyu, Wei Chong, Pan Xiaoqiang

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, China

**ABSTRACT**

TRISO (Tristructural isotropic) /SiC 燃料要素は、高温ガス冷却炉 (HTGR) 燃料の一種として開発され、商業用原子力発電の安全性、競争力、経済性の向上に寄与する。本研究では、セラミック SiC で製造され、1 万個以上の代用 TRISO 粒子を含む典型的な燃料要素に焦点を当てている。そして、粒子の実際の位置情報を有限要素解析に適用した。有限要素モデルは、包括的な結合挙動（放射線照射による寸法変化、放射線照射によるクリープ、熱膨張、核分裂ガス圧、発熱と伝導、弾性および塑性など）および粒子間の相互作用を考慮し、COMSOL プラットフォームに基づいて開発され、正確に検証された。検証プロセスは主に、単一 TRISO 粒子、三層モデル、BISON を使用した核分裂ガス放出結果の IAEA ベンチマークに基づいている。単一粒子モデルに基づいて、より複雑な FEM が考慮される。これにより、各層の性能の詳細なモデリングと分析が提供され、膨大な計算リソースを必要とする場合がある。そのため、代表的な体積要素 (RVE) が選択され、対称性を持つ幾何構造がモデリングされる。結果は、燃料要素の密集した領域で顕著な高応力が存在し、粒子の破損の可能性が高まることを示した。応力場、温度場、モデルの変形を分析することで、TRISO 粒子の破損の可能性を減らすためには、製造過程で粒子クラスターを避けるべきであることが示されている。

(10) ICONE31-135983

SUPPRESSION OF HARMONIC VIBRATION IN AMB SYSTEM USING  
NONLINEAR ADAPTIVE RESONANT CONTROLLERS

Xiaoyu Bian<sup>1</sup>, Zhengang Shi<sup>1</sup>, Ni Mo<sup>1</sup>, Zhe Sun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nuclear and New Energy Technology of Tsinghua University, Beijing, China

#### **ABSTRACT**

一次ヘリウム循環器 (PHC) は、高温ガス冷却炉の中心的な役割を果たす。PHC の回転機械を支える装置としてアクティブ磁気軸受 (AMB) の非接触特性が重要な役割を果たし、高温ガス冷却炉内のヘリウム環境の純度を確保する。しかし、ロータの質量不均衡とセンサのランアウトにより、AMB システム内で同期振動や高調波振動が発生する可能性が指摘されている。これらの振動はその後、シェルに伝達され、基礎の振動を引き起こし、システムの安定性と安全性に大きな脅威をもたらす。本研究では、システム内の同期振動と高調波振動を抑制するための新しい非線形適応共振コントローラを紹介した。このアルゴリズムは、簡単な構造で計算の複雑さが少なく、システムの数学モデルに依存せずに動作する。提案されたアルゴリズムは、ロータ位相計算モジュール、共振信号抽出モジュール、および適応反復モジュールの 3 つのモジュールで構成されている。ロータ位相計算モジュールは回転速度センサを利用して、1 回転期間内のロータ位相を計算する。共振信号抽出モジュールは、1 回の反復期間内の同期エネルギーと高調波エネルギーを計算することができる。適応反復モジュールは、適切な振幅と位相を持つフィードフォワード補償信号を出力できる。最後に、シミュレーション結果によりアルゴリズムの有効性が検証された。

(11) ICONE31-136000

#### **STUDY ON THE INFLUENCE OF INTERNAL HEAT SOURCE CHARACTERISTICS AND DISTRIBUTION ON EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF CYLINDRICAL PARTICLE DISPERSED FUEL**

Liu Yuhao, Sun Jun

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, China

#### **ABSTRACT**

マトリックス内に燃料粒子を分散させることは、次世代の核燃料の重要な戦略である。分散燃料の内部温度分布は一般的に集計パラメータ法によって決定され、温度分布の決定には実効熱伝導率 (ETC) が重要なパラメータとして挙げられる。しかし、多くの計算では内部熱源を考慮していない古典的な ETC モデル (マクスウェル=オイケンモデル, Chiew-Glandt モデル, 有効媒体理論) が使用されている。いくつかの研究は、古典的なモデルの内部熱源が存在する場合、温度を過小評価する傾向があることを指摘している。さらに、熱源の確率的な分布は、ETC の値とそれに伴う温度予測に不確実性をもたらす。本研究ではランダムに分散した粒子を持つ円筒形分散体に焦点を当て、三次元有限要素法を用いて ETC を計算した。さまざまなケースで、構成要素の熱伝導率、粒子の半径、体積分率、および最小粒子間隔などのパラメータを調整した。各パラメータ設定について、多くのケースがランダムに生成され、シミュレーションされた。ETC 結果の統計的特性が分析された。その結果、内部熱源を考慮した場合、円筒形分散体の ETC の値と不確実性は、体積分率と構成要素の熱伝導率だけでなく、発熱粒子のサイズと最小粒子間隔にも影響されることが明らかになった。これは、分散燃料の新しい ETC モデルを提案する際に、内部熱源の分布を特徴づけ定量化する必要性を強調している。

### 3. 国内外開発動向調査（政治的側面）

海外の民間関連：国外の開発動向 (B2-3)

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-UK>

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。

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。

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。

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。

Jacobs to assist in development of UK-Japanese HTGR

28 May 2024 WNN

<https://world-nuclear-news.org/Articles/Jacobs-to-assist-in-development-of-UK-Japanese-HTG>

NNL の多分野設計コンサルタントである Jacobs は、HTGR の初期設計および提供計画のレビューを担当し、コスト見積もり、規制遵守、市場需要の評価などを行う。2023 年 9 月に NNL と JAEA は HTGR に関する協力覚書に署名し、UK HTGR 実証炉プログラムの次段階に進んだ。2022 年 12 月、英国政府は HTGR 研究に 6000 万ポンドの資金を発表した。AMR R&D プログラムのフェーズ B は 2025 年 2 月に終了予定で、2030 年代初頭に HTGR のライセンス取得、建設、運転が行われる。HTGR 技術は、加工業や製鉄業などの難脱炭素産業における脱炭素化に貢献すると期待されている。

CNNC extends cooperation with ENEC, EDF

04 June 2024 WNN

<https://world-nuclear-news.org/Articles/CNNC-extends-cooperation-with-ENEC,-EDF>

Emirates Nuclear Energy corporation (ENEC) と China National Nuclear Corporation (CNNC) は、原子力発電所の開発と運用における最善の実践を共有するための覚書 (MoU) に署名した。この協力は、燃料サイクル調達、原子力施設の運用・保守、環境保護、新規原子力発電所の開発、研究開発など多岐にわたる。特に、第四世代原子炉や水素生産技術、淡水化技術の利用が含まれる。今回の協力は、昨年の COP28 で署名された既存の協力覚書を基にしており、HTGR 技術の開発と展開の可能性も探っている。