

## 新型炉部会セッション

## 新型炉の国際協力の現状と今後の研究開発課題（イノベーションの創出）

Current status of international cooperation in advanced reactor development and future R&D issues  
(Innovation creation)

## (3) 高温ガス炉の国際協力の現状

## (3) Current status of international cooperation in high-temperature gas reactor development

\*浅野 和仁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東芝エネルギーシステムズ

## 1. はじめに

高温ガス炉は、高い安全性（①自然に炉停止、②自然に冷却、③高い放射性物質閉じ込め能力）を有し、燃料の高効率利用による資源問題、熱利用による温室効果ガス排出量削減、さらには水素社会といった多方面への貢献が期待されている原子炉であり、日本では国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）を中心として研究開発が進められている。原子力機構が所有する高温工学試験研究炉（HTTR）は東芝エネルギーシステムズ（以下、東芝 ESS）をはじめとする国内メーカーによって設計、建設され、平成10年に初臨界、平成16年に世界で初めて950℃のヘリウムガス取り出しに成功するなど、高温ガス炉の基盤技術の確立に向けた研究開発の中心的な役割を担っている。HTTRについては現在、新規基準への適合性確認を受けた後の再稼働が待たれる状況にあるが、高温ガス炉技術には我が国が原子力安全に関する分野で世界に貢献し得るポテンシャルを有する原子力システムのひとつと考えられる。

高温ガス炉技術の研究開発は、「原子力長期計画」から続く国策として、「水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉など、安全性の高度化に貢献する原子力技術の研究開発を国際協力の下で推進する」ことが「エネルギー基本計画」（平成26年4月閣議決定）ならびに「骨太の方針」「日本再興戦略2014」（平成26年6月閣議決定）に明記された。こうした高温ガス炉開発の推進にあたっては、文部科学省が平成26年7月から9月にかけて、原子力科学技術委員会の下に「高温ガス炉技術研究開発作業部会」（主査：岡本孝司・東京大学大学院工学系研究科教授）を設置し、高温ガス炉技術の開発の必要性と方向性についての検討が行われ、将来の実用化を見据えた高温ガス炉技術の研究開発の今後の進め方について提言がなされた。

その一方で、海外における高温ガス炉の開発状況（図1）としては、米国ではDOEと産業界（NGNP産業界アライアンスやX-Energy社）による研究開発が推進されており、中国等の新興国では高温ガス炉の研究開発が積極的に進められるようになってきている。特に中国は1990年代から急速に研究開発を加速し、実証炉（HTR-PM）建設及び商用炉計画を推進している。また、インドネシアは離島における発電・熱利用の観点から2031年から商用炉としての導入を検討している。その他、カザフスタンでは将来的な商用炉の導入計画、韓国では熱利用を含めた実験炉計画等にもとづいた高温ガス炉システムの研究開発がそれぞれ進められている状況である。最近ではポーランドが高温ガス炉の実験炉と商用炉の開発計画を2016年より検討に着手している。

このような国際的な高温ガス炉を取り巻く動向の中で、平成30年7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画においては、「水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉など、安全性の高度化に貢献する技術開発を、海外市場の動向を見据えつつ国際協力の下で推進する。」と謳われている。本稿では、国際的な高温ガス炉を取り巻く動向における、日本の高温ガス炉開発に関する国際協力の現状について述べる。

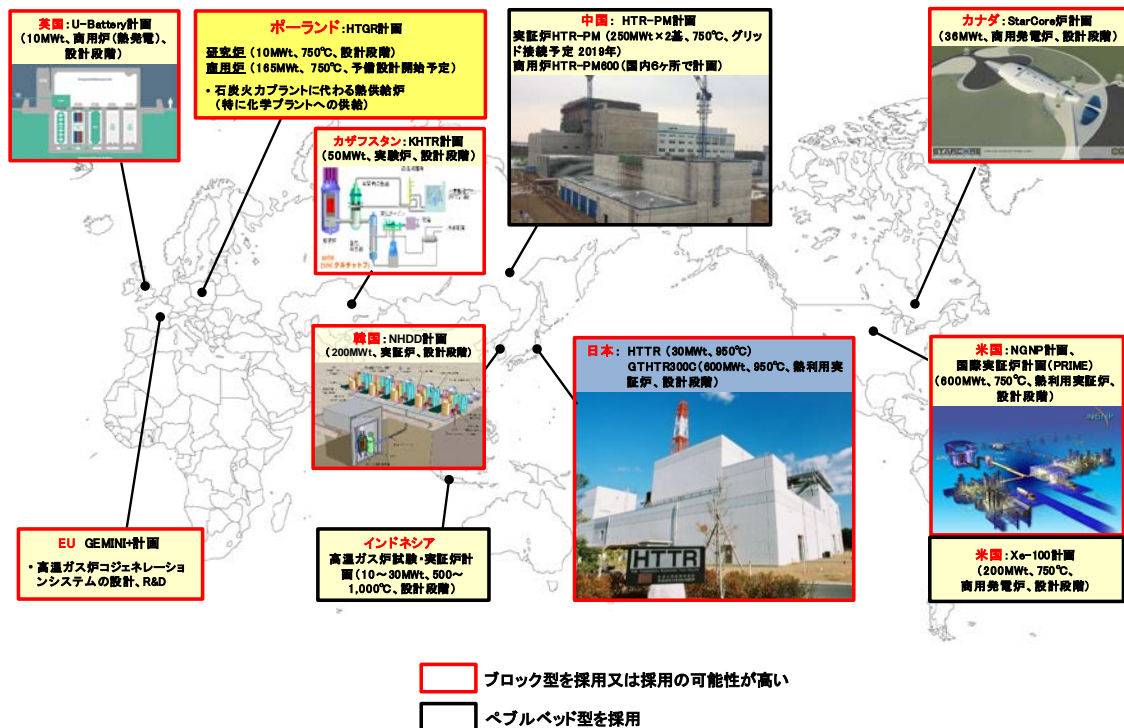


図1 世界の高温ガス炉開発の状況

## 2. 高温ガス炉開発に関する国際協力

### 2-1. ポーランドとの国際協力

ポーランドでは、天然ガス輸入依存からの脱却、石炭火力による二酸化炭素排出量削減等のため、熱利用を目的とした高温ガス炉導入に向けてポーランドエネルギー省が諮問委員会を設立し、2016年から本格的な検討が開始されている。2017年5月18日に開催された日・ポーランド外相会談において、「2017年から2020年までの日本国政府とポーランド共和国政府との間の戦略的パートナーシップの実施のための行動計画」が署名され、経済・科学・技術協力の分野で原子力機構とポーランド国立原子力研究センター（NCBJ）との間における高温ガス炉冷却炉技術の研究開発に向けた協力を奨励することが明記された。これを受け、原子力機構はNCBJとの間で、ポーランドの高温ガス炉（実験炉及び商用炉）開発支援ならびに高温ガス炉技術の研究開発を共同実施することを目的とした高温ガス炉技術分野における研究協力覚書（期間：2017年5月18日～2022年5月17日）を締結した。本覚書のもとで以下の分野に関して人材交流も含めた協力が進められることとされている。

- ① 燃料、材料の照射特性評価、材料シミュレーション手法の開発：黒鉛、被覆粒子燃料等に関する共同照射試験、モンテカルロ法及び分子動力学法等による照射特性評価に関する協力
- ② ポーランドにおける熱利用のための高温ガス炉の設計：HTTR 及び水素製造設備の運転経験、並びに実用高温ガス炉の設計により得られた高温ガス炉熱利用システムの設計を活用した協力
- ③ 高温ガス炉のマーケット評価及び高温技術の一般産業分野への応用に関する検討：NCBJによるポーランドや他のEU諸国等における高温ガス炉、高温技術の需要評価、原子力機構による高温ガス炉システム及び要素技術の提示等を通じた国際的な高温ガス炉技術の展開に向けた協力

本協力を通して、NCBJはHTTRで性能が確認された高温ガス炉技術を活用して、ポーランドに建設する高温ガス炉の設計、建設及び運転ライセンス取得を効率的に進めることが可能となる。一方、原子力機構は日本の高温ガス炉技術の出口戦略として、HTTRで実証された技術をポーランドの高温ガス炉で実証し、当該技術の国際展開と国際標準化を目指している。

日本とポーランドは覚書の締結以降、定期的に会合を開催している。2017年7月には、文科省、東芝ESSなどの国内産業界及び原子力機構がポーランドエネルギー省及びNCBJを訪問し、高温ガス炉導入に向けた成立性評価を協力して進めていくことで合意した。また、原子力機構とNCBJの間における技術会合はこれ

までに6回開催され、燃料・材料開発、安全評価、炉心設計の3つの分野で研究協力実施のための取決めを締結する運びであり、ポーランド高温ガス炉計画（実験炉及び商用炉）に対する協力を推進することとしている。更に、2019年1月には、ポーランドにおいて第1回高温ガス技術セミナーが開催され、東芝 ESS、東京大学及び原子機構から講師を派遣し、ポーランド国内の技術者、研究者等を対象に日本の原子力全般ならびに高温ガス炉の技術概要、設計や解析等に関する講義を実施するなど、人材育成の観点からも協力を進めている。当該セミナーの冒頭で東京大学と NCBJ との学術交流協定締結の署名式が行われており、本協定を通じて高温ガス炉の開発に不可欠な原子力基盤技術に関する研究開発の促進が期待される。

また、NCBJ がコーディネーターとなり、EU の研究開発ファンディング（HORIZON 2020）の下で高温ガス炉コジェネレーションシステムの研究開発プロジェクト（GEMINI+）が2017年9月から開始されている。GEMINI+の成果はポーランド商用炉の検討に反映される予定であることから、原子力機構も本プロジェクトに参加している。本プロジェクトは多機関が参加する国際協力であり、原子力機構の他には、EU の原子力コジェネレーション産業界イニシアチブ（Nuclear Cogeneration Industrial Initiative: NC2I）、米国 NGNP 産業界アライアンス、韓国原子力研究所（KAERI）等も参加している。本プロジェクトでは、欧州に展開される高温ガス炉コジェネレーションシステムの安全基準や安全性を高めたシステム概念、実証に向けた枠組みの構築を目的とし、経済性や安全性向上に資する革新的技術の開発、早期導入に向けた実証炉計画の策定を行う計画である。

## 2-2. 米国との国際協力

「原子力関連研究開発分野における協力に関する MEXT、DOE の間の実施取決め」に基づき、「高温ガス炉の研究開発に関する協力のためのプロジェクト取決め」が2014年6月に締結されている。この取決めの下で、原子力機構と米国エネルギー省（DOE）／アイダホ国立研究所（INL）が、日本の高温ガス炉技術の NGNP プロジェクトへの採用とそれに基づく国際標準化を目的として、研究資産や技術の相互活用、先進的シミュレーションコードの開発・検証、HTTR 熱利用試験計画の共同検討、ヘリウムガスタービン翼材料への核分裂生成物移行挙動評価手法の開発等の協力を進めている。

本協力ではまず、原子力機構と INL 間での解析コード入力データや解析結果等の大容量データの交換に向けたデータ共有環境が2017年度に構築された。本環境のもとで、HTTR 安全性実証試験の解析に向け、原子力機構の断面積データを用いた3次元原子炉動特性解析コード PHISICS/RELAP5-3D の改良と、当該コードを用いた崩壊熱ライブラリのデータベースの構築等が行われている。また、HTTR にヘリウムガスタービンと水素製造施設を接続した HTTR-GT/H2 プラントを用いた試験計画の検討に向け、原子力機構のプラント設計データを用いた過渡挙動評価モデルの構築や、タービン翼合金への核分裂生成物の安定同位体拡散試験実験に関するシミュレーションモデルの構築が進められている。

## 2-3. 英国との国際協力

核燃料製造会社である URENCO 社が提案する小型高温ガス炉 U-Battery 計画に対する協力として、2017年5月に原子力機構は URENCO 社と高温ガス炉技術分野における研究協力覚書（期間：2017年5月18日～2022年5月17日）を締結した。本覚書では以下の分野で人材交流も含め協力を進めることとしている。

- ① 小型高温ガス炉の早期実用化に向けた高温ガス炉技術：核熱設計（伝熱・熱流動評価、臨界の最適評価、燃焼評価、動特性評価等）、安全設計（安全裕度、不確かさ評価等）、燃料・材料技術（材料特性評価、燃料製造技術、照射特性評価等）、冷却材中の不純物管理技術（許容不純物濃度、制御技術）等についての協力
- ② 建設リスク軽減及び経済性向上に関する検討：HTTR 及び水素製造設備の運転経験を活用した協力

本協力を通して、URENCO 社は HTTR で性能が確認された要素技術を獲得でき、効率的に高温ガス炉の設計、建設及び運転ライセンス取得が可能となる。一方、原子力機構は U-Battery 計画へ日本の高温ガス炉技術を展開し、ポーランド、カナダ等での技術実証の可能性を探り、日本の高温ガス炉技術の国際展開と国際標準化を目指している。

英国政府は2015年から小型モジュール炉の設計コンペを実施しており、U-Battery も本コンペに参加している。また2017年12月には今後3年間に革新的な新型モジュール型原子炉（AMR）の研究開発等を推進す

るために最大約 80 億円の拠出を公表し、U-Battery もこれに参加している。2018 年 6 月には第 1 フェーズとして、同資金の一部（約 6 億円）を活用して AMR のフィージビリティスタディを実施することが公表され、U-Battery も採択されている。

このように、英国では、小型高温ガス炉の実現に向けた活動が進展しており、原子力機構では、U-Battery 計画への協力を具体化するため、URENCO 社との協議を継続している。

#### 2-4. 国際原子力機関（IAEA）を通じた国際協力

IAEA においては、ガス炉に関する技術委員会、協力研究計画（CRP）等の活動方針を審議するガス冷却炉技術ワーキンググループ（TWG-GCR）を通じて、原子力機構が各国における高温ガス炉技術に関する研究開発の動向等の情報の交換、国際協力研究の調整等を行っている。隔年で開催されている TWG-GCR 会合は、直近では 2017 年 10 月に IAEA で開催され、ポーランドが新たにメンバーとして参加するとともに、メンバーの登録手続中であるシンガポールがオブザーバー参加した。また、同期間中に原子力機構ウィーン事務所で開催されたセミナー「Prismatic High-Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) for its Development and Deployment」には、各国の TWG-GCR の委員が参加し、将来の高温ガス炉導入に向けた各国（日、波、米、英）の状況及び課題等について議論がなされた。

この他、「モジュラー型高温ガス炉の安全設計」に関する CRP では、日本原子力学会研究専門委員会が策定した安全設計方針（安全要件）の国際標準化を目指した活動が実施されている。また、第 61 回 IAEA 総会（2017 年 9 月）のサイドイベントとして、「Nuclear High Temperature Heat for Industrial Processes（原子力高温熱の産業利用）」が開催され、原子力機構からは HTTR を用いた水素製造等の熱利用システムの試験計画、商用高温ガス炉システムの設計等について報告し、IAEA における原子力の非発電分野（海水淡水化、地域暖房、水素製造等）の利用に関する協力を進めた。2018 年には、原子力水素製造技術の評価及び展開に関する CRP を開始した。その他関連する活動として小型炉の緊急時避難区域（EPZ）に関する CRP が 2018 年に発足、合理的な EPZ 設定のフレームワーク構築を目的とした検討に着手しており、東芝 ESS が検討に参画している。

#### 2-5. 第 4 世代原子力システム国際フォーラム（GIF）を通じた国際協力

2006 年 11 月に、日本、仏国、米国、EU、韓国、カナダ及びスイスの間で、第 4 世代原子力システム国際フォーラム（GIF：Generation IV International Forum）を通じた超高温ガス炉（VHTR）システム取決め（フェーズ I）が署名された。その後、中国の参加、カナダの脱退を経て、2016 年 11 月には引き続き 10 年間活動を延長するためのフェーズ II の取り決めが 6 カ国 1 国際機関の間で署名され、その後、豪国が参加した。

現在、①燃料・燃料サイクル、②水素製造及び③材料の各プロジェクトについて、参加国による署名が行われ、共同研究が実施されている。さらに、4 つ目のプロジェクトとして④計算手法検証・ベンチマークプロジェクトの開始に向けた準備が進められている。各プロジェクトの最近の動向を以下に示す。

- ① 燃料・燃料サイクルプロジェクト：日本、仏国、米国、韓国、EU、中国が参加し、燃料照射試験・照射後試験、燃料物性試験、安全性試験、新型燃料、廃棄物処理、核燃料サイクル他の各分野について情報交換が行われている。これまでに 14 回の会合が開催され、最近では事故時における燃料・核分裂生成物挙動に関するベンチマーク解析を完了し、被覆層特性のラウンドロビン評価試験が進捗している。
- ② 水素製造プロジェクト：日本、仏国、米国、韓国、カナダ、EU が参加し、IS プロセス、高温水蒸気電解、Cu-Cl プロセスによる水素製造、原子炉接続技術の各分野について情報交換が行われており、これまでに 16 回の会合が開催された。現在、中国の新規参加のための手続きが進められている。
- ③ 材料プロジェクト：日本、仏国、米国、韓国、スイス、EU、中国が参加し、各国が分担して取得した黒鉛、金属、セラミックスの材料ハンドブックのデータベース構築に向けて情報交換が行われている。
- ④ 計算手法検証・ベンチマークプロジェクト：日本、米国、中国、韓国、EU が参加を予定し 2019 年の締結を目指す新規プロジェクトであり、計算手法のランキング評価、数値流体解析、炉物理及び核データ、化学不純物の移行評価、プラント動特性解析の各分野について情報交換が計画されている。

#### 2-6. 経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）を通じた国際協力

HTTR を用いた安全性実証試験である炉心流量喪失試験及び炉心冷却喪失試験に係る事業を、OECD/NEA 原子力施設安全委員会が LOFC プロジェクトとして、原子力機構（日本）、原子力規制委員会（米国）、原子

力委員会及び放射線防護原子力安全研究所（仏国）、施設・原子炉安全協会（独国）、韓国原子力研究所（韓国）、チェコ原子力研究所（チェコ）、KFKI 原子力研究所（ハンガリー）の参加の元で実施している。2010年12月に、原子炉出力30%の運転状態から1次ヘリウムガス循環機を全停止させ炉心流量を喪失させる試験を実施した。再稼働後には原子炉出力100%での炉心流量喪失試験を実施しデータを提供する計画である。

### 2-7. 韓国との国際協力

原子力機構が1994年に韓国原子力研究所（KAERI）と締結した「韓国原子力研究所と日本原子力研究開発機構との間の原子力の平和利用分野における協力のための取決め」に基づき、高温ガス炉及びISプロセス水素製造技術に関する情報交換会議を定期的に行っている。

### 2-8. 中国との国際協力

原子力機構が1986年に締結した覚書の下、公開情報に基づく情報交換を目的とした会議を実施しており、最近では2017年11月に中国清華大学核能及新能源技術研究院（INET、中国北京）で開催した。会議では、両国における高温ガス炉の開発状況、安全要件及び熱利用などについて情報交換を行い、熱化学水素製造法ISプロセスの動特性解析コード開発及びモジュラー高温ガス炉の安全要件等の分野での今後の協力の可能性について検討することとしている。

### 2-9. その他の国際協力

#### (1) カザフスタン

原子力機構が高燃焼度化（100 GWd/t）設計を施し、HTTR用燃料メーカーの原子燃料工業(株)が製造した国産・商用規模の新型高温ガス炉燃料の照射性能を把握するため、カザフスタン核物理研究所（INP）が国際科学技術センター（ISTC）のレギュラープロジェクトのもとで、2010年から2015年にかけて当該新型燃料の照射試験を完了するとともに、新規プロジェクトとして2017年3月から2カ年計画で当該照射済新型燃料の照射後試験を実施している。

また、原子力機構が国立カザフスタン大学（KazNU）と締結している「原子力エネルギー技術に係る研究協力に関する取決め」に基づき高温ガス炉技術分野に関する研究協力、特に燃料材料に関する共同研究を進めている。

#### (2) インドネシア

インドネシア原子力庁（BATAN）が計画する高温ガス炉試験・実証炉（EPR：Experimental Power Reactor）計画に関し技術的な協力を行い、インドネシア民間企業が計画する商用高温ガス炉への日本技術の採用に向けた協力を進めている。BATANでは2015年にロスアトムが行った実験用ペブルベッド型高温ガス炉の概念設計を基に、独自に基本設計に展開するためのチームを構成して活動中である。

2017年8月21日～25日に、インドネシアのジョグジャカルタ市で開催されたIAEAの「高温ガス炉の設計と安全要件に関するワークショップ」に原子力機構から講師として参加し、インドネシア原子力規制庁（BAPETEN）職員を対象に、高温ガス炉の設計と安全要件に関する講義を行っている。

## 3. おわりに

本稿では、高い安全性を有する高温ガス炉技術の研究開発に関して、国際的な高温ガス炉を取り巻く動向及び日本の高温ガス炉技術の国際展開の現状について述べた。日本は高温ガス炉技術の国際標準化や国際展開等に資する取組を中心とした国際協力を通じ、安全性の分野を中心に貢献を果たしている。日本の高温ガス炉技術の研究開発における国際協力・国際展開の在り方としては、過去に原型炉の運転経験等を持つ米国等との連携や、今後商用炉の導入を目指す新規導入国等、二国間取組の強化により相手国に応じた連携が行われてきた。また、多国間においては、IAEAやGIFの枠組みを活用した日本の技術の国際標準化に向けた取組等が強化されつつある。これらの国際協力を通じ我が国が多国間の取組をリードしていくにあたってはHTTRの早期再稼働が望まれる。今後、国際協力によってHTTRを用いた高温ガス炉技術の高度化並びに実用化に資する研究開発成果の創出に向けた取組が推進され、世界に誇る日本の優れた高温ガス炉技術が広く展開されていくことを期待したい。

\*Kazuhiro Asano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Toshiba Energy Systems & Solutions Co.