

RAHP ニュースレター

No. 17

世界の高温ガス炉開発 ～ 現状と将来計画 ～

2018年3月

高温ガス炉プラント研究会

Research Association of
High Temperature Gas Cooled Reactor Plant
(RAHP)

Tokyo, Japan

1. はじめに

本ニュースレターは、日本の産業界（電力、原子力メーカー等）と学識経験者で構成する「高温ガス炉プラント研究会（RAHP）」が「高温ガス炉（High Temperature Gas Cooled Reactor = HTGR）」プラント開発に関して開発戦略検討、並びに国内・外（産、官、学、一般）向けの理解促進活動の一環として、定期的に、世界の高温ガス炉開発の背景、狙い、最新状況、将来計画等を調査し、その概要を紹介するものであり、2018年3月末現在のものである。本年度のニュースレターは、「2016年度版、RAHP ニュースレター No.16」を改訂する形で作成した。

2. 高温ガス炉開発の背景、狙い、最近の動向概要

世界は今、政治、経済、社会、環境が不安定化しており、①エネルギーの持続安定的確保、②地球温暖化の抑制が共通課題となっている。それらの主要な解決策として、オイルサンド、シェールガス等の「非在来型」化石燃料資源、並びに「原子力」、「水素」等「低炭素・クリーンエネルギー」の開発が鋭意行われている。中でも、持続性、クリーン性、多様性等の観点から「原子力」が見直され、2011年に発生した「福島第一原発事故」以降も、一部の国は脱原発に向かったものの多くの国は、過酷事故時の安全性を強化しつつ、原子力の新規開発&導入を進めようとしている。

「高温ガス炉」プラントは、それら原子力共通の特性に加えて、

- 1) 固有（本質的）安全性、高温性（750～1,000℃程度；発電、水素製造・プロセス熱利用（水素発電、燃料電池、肥料製造、化石資源・バイオマスから輸送用燃料合成、地域熱供給、海水淡水化・・・）、核不拡散（余剰Pu焼却）、資源有効活用、産業振興などの視点から、先進国、大需要国、資源国が開発や導入検討を進めている。最近の高温ガス炉プラント開発に関する顕著な動向は下記のとおり。
- 2) 中国で実証プラント（HTR-PM）が建設中。実用プラント設置計画も具体化中。
- 3) ポーランドで高温ガス炉の導入を計画。日本は国際協力により、この計画を支援。
- 4) 米国やカナダで仏国、独国、南アの技術使用の複数の開発計画が進行中。
- 5) 開発プログラムが途中で中止～停滞しているものも幾つかある。
- 6) 日本で国家戦略としての開発の在り方、ロードマップ等を議論中。原子炉に連結したガスタービン発電&水素製造の実証計画が具体化中。
- 7) 開発対象はいずれも小型モジュール炉（1基当り300MWe相当以下）プラントで、考えられている開発取組手順は概ね、当面は「高温ガス炉（HTGR）（750℃級、蒸気サイクル、発電と中温（～低温）熱利用）」、将来は「超高温ガス炉（VHTR）（850℃以上級、ガスサイクル、高効率発電と高効率水素製造など高温（～中～低温）熱利用）」。

以下に世界の高温ガス炉開発の最新状況を国別に概説する。また、直近のポーランドや中国のHTR-PMに関するトピックスや代表的会議での研究内容を第1表と第2表に示す。

3. 国別開発状況

3.1 米国

(1) Xe-100 プログラム

2013年、X-energy社が、LWR使用済燃料の処理・処分、プロセス熱利用等を狙って、高温ガス炉開発プロジェクトを立ち上げた。現在、石炭ガス化（CTG）プロセスへの適用

性、米国内の電気・ガス会社と組んだプラント立地可能性、被覆粒子燃料の全面的商業化戦略等を検討中とのこと。Xe-100 はペブル型で、200MWth の熱出力のマルチパスの高温ガス炉である。2016 年に DOE はその開発に対し 5 年間で 40M\$ の資金提供を発表。2018 年までに概念設計を完了する予定。また、2017 年 11 月に、ヨルダンに Xe-100 を建設することを想定して、ヨルダンの原子力委員会と覚書を締結。

(2) 次世代原子力プラント (NGNP) プログラム

- 1) 1993 年、米国 (エネルギー省 (DOE)、ゼネラルアトミックス (GA)、オークリッジ国立研 ORNL が参加) はロシア (原子力省 Rosatom、OKBM が参加) と共同で、核不拡散 (核兵器解体 Pu の焼却処理) と発電利用を目的として「ガスタービン型モジュール式ヘリウムガス冷却炉 (GT-MHR)」の開発を開始した。共同研究は 2013 年に終了したが、その成果は米国やロシアの夫々の後続開発プログラムの設計、提案等に生かされている。
- 2) DOE は、「2005 年エネルギー政策法 (EPA-2005)」並びにそこに明記の官民連携の原則に基づき、「次世代原子力プラント (NGNP)」(実質的に高温ガス炉プラント) の開発・実証プログラムを推進した。途中、需要動向や技術的成熟度等の判断から、その主目的を「水素製造 & 発電」から「熱利用 & 発電」に、また冷却材出口温度条件も「950°C 以上」から「当面 750~800°C 程度」に変更した。
- 3) 「フェーズ 1 (2005~2010 年; プラント概念設計、技術絞込み)」はほぼ終了したが、プログラム完遂までの費用、官民連携見通し等を考慮して、当初予定の「フェーズ 2 (2011~2021 年; プラント詳細設計、建設、実証)」には入らず、現在は、内容を縮小し、被覆粒子燃料や高品質黒鉛材の製造や照射特性評価研究を実施中とのこと。フェーズ 1 では米国内外の産業界も参加、協力した。GA は上記 GT-MHR の進展版として「水素製造炉 (H2-MHR)」、「蒸気サイクル炉 (SC-MHR)」、「超高燃焼度炉 (DB-MHR)」を、ウェスチングハウス (WH) は南ア PBMR 設計の進展版を、またアレバ (Areva-USA) はフランス ANTARES 設計の進展版「蒸気サイクル炉 (SC-HTGR)」を、夫々提案した。日本の三菱重工、東芝、富士電も提案側に参加、協力した。
- 4) 2016 年 3 月、米国、欧州、日本、韓国の産/官の参加を得てブロック (BI) 型高温ガス炉実用化展開会議を開催した。この国際協力を PRIME 計画 (国際実証炉計画) と呼ぶ。なお当「NGNP」プログラムは、DOE「新型原子炉技術 (ART)」または「小型モジュール炉許認可技術支援 (SMR-LTS)」プログラム枠内で継続中とのこと。

3.2 欧州連合

フランス、オランダなど欧州連合 (EU) 加盟国が、次世代軽水炉、高速炉、高温ガス炉 (水素製造、熱利用) を 3 本柱とする原子力開発共同戦略を展開中。

これまでに「欧州持続的原子力技術プラットフォーム (SNETP)」、「プロセス熱利用・水素・発電統合プロジェクト (RAPHAEL)」、「原子炉プロセス熱利用顧客要件評価 (EUROPAIRS)」、「熱電併給向け先進炉研究開発 (ARCHER)」、等、一連の高温ガス炉プログラムを進め、それらの成果を引継いで「熱電併給産業イニシアティブ (NC2I)」を開始。現在は、NC2I と米国 NGNP アライアンスに、日本と韓国が加わった GEMINI+プロジェクト (欧州に高温ガス炉熱電併給システムを展開するための共同研究開発プロジェクト)

を推進中。

フランスは、上記 EU の活動に加えて、Areva が GT-MHR のフランス進展版「エネルギー供給用新型ガス冷却炉 Areva 新技術 (ANTARES)」を開発し、その更なる改良版「蒸気サイクル高温ガス炉 (SC-HTGR)」を米国 NGNP プログラム (3.1(2) 項参照) に向けて設計提案を行った。

ドイツ Siemens/HTR GmbH 社は HTR-M 技術をロシアに売却した。

ポーランド政府は、2025 年までに研究炉 (10MWt) を、2031 年までに商用炉 (165MWt) を導入する計画である。2050 年までにポーランド国内で 10-20 基、EU 全体で 100-200 基の需要を見込んでいる。

英／蘭／独の合弁ウラン濃縮会社 Urenco は、遠隔地熱電併給用小型高温ガス炉「ウランバッテリー炉 (U-Battery)」を研究開発中で、政府支援を探っている。

3.3 南アフリカ

(1) ペブルベッドモジュール式高温ガス炉 (PBMR) プログラム

国家エネルギー戦略の一環として、1993 年以降、国営電力 (ESKOM) がドイツのモジュール式高温ガス炉 (HTR-M) 技術を基にして「PBMR」開発実証プログラムを推進し、世界の「第 4 世代炉」や「小型モジュール炉」開発に大きな影響を与えた。

しかし、「リーマンショック」で財政危機に陥り、2010 年に維持・管理下に置かれた。現在、その復活・活用策を模索中である。

(2) トリウム燃料高温ガス炉 (TH-100) プログラム

2011 年に南アのトリウム鉱山会社 Steenkampskraal (STL) が TH-100 プログラムを発足させた。トリウム (Th) は、ウラン (U) 等核分裂性ドライバーとともに炉心内に置かれ親物質として使われる。南アでは、トリウム (Th) はレアアース (RE) 採掘の副産物であり、その有効活用策または U 燃料の将来的な補完・代替策と位置付けている。

プラント概念設計を終え、現在、詳細設計・建設・運転のためのコンソーシアムを設立中。2014 年に Th 燃料製造施設の概念設計を実施。2022 年頃に米国での初号機運転を構想している。

(3) 高温モジュール炉 (HTMR-100/25) プログラム

前記南ア STL 社と Neopanora 社が香港で設立した合弁会社 HTMR 社が、STL 社の TH-100 を派生させ、アジア等の熱電需要を目指した HTMR-100/25 (発電用／熱電併給用、4 低濃縮 U 燃料または Th/Pu 燃料) を開発中。その概念設計が 2018 年に完了する予定。

3.4 中国

(1) 高温炉試験モジュール (HTR-10) プログラム

高温ガス炉開発は国家エネルギー計画の重要事項の 1 つとして位置付けられ、その一環で当試験炉プログラムの「フェーズ 1 (蒸気タービンサイクル: HTR-10-ST)」を継続中。同時に「フェーズ 2 (ガスタービンサイクル: HTR-10-GT)」への移行も準備中。2007 年 7 月から 2014 年 10 月まで保守作業等を実施。2014 年 11 月末に HTR-10 を再稼働。

(2) 高温炉ペブルベッドモジュール (HTR-PM) プログラム

HTR-10 の技術経験をベースにした当プログラムは、高温炉プラントの実証、実用化を目指すものであり、先ず 2 基構成の実証炉 (HTR-PM200) プラントが、「福島原発過酷事故」(2011 年) 後の安全性再レビューを経て、2012 年に山東省榮成 (Rongcheng) 市石島湾 (Shidao Bay) 地区で着工された。2018 年に運開を予定。

実用に向けて 2014 年に 6 基構成モジュールを 2 組備えた HTR-PM600 プラントの概念設計も終了した。将来に向けて更に高温の炉 (HTR-PM+)、水素製造、Th 燃料炉等も検討中。

(3) 実用炉プラント設置プログラム、その他

2013 年、中国核工業建設集団公司与福建省莆田 (Putian) 市が、地方中核都市の経済発展計画の一環として、実用プラント (HTR-PM600) 設置計画を発表した。狙いは雇用振興、石炭ガス化 & 液化、淡水化、輸出等。江西省瑞金 (Ruijin) 市も、2017 年着工、2021 年運開の計画を発表。

福建省霞浦 (Xiapu) 県寧徳 (Ningde) で、華能霞浦核電有限公司が主体となり、HTR-PM600 を 1 基建設予定。

福建省福州 (Fuzhou) 市万安 (Wan-an) で、HTR-PM600 を建設する計画。2016 年 4 月、専門家により詳細なレビューが行われサイトが原子力発電所の要件を満たすことに合意。

浙江省台州 (Taizhou) 市三門 (Sanmen) で、HTR-PM600 を建設する計画。2017 年 11 月、電力規画設計総院によりサイトの詳細な技術審査が行われ、専門家の審査をパス。広東省、湖北省、湖南省でも同様の計画がある。

3.5 韓国

(1) 原子力水素開発 & 実証 (NH₂/NHDD) プログラム

開発目的は原子力水素製造システムの設計、建設、実証であり、開発目標は熱出力 200MWt、冷却材出口温度 950°C である。開発経緯は韓国原子力研究 (KAERI) が原子力水素プログラムを提案 (2004 年)。次いで韓国原子力委員会が原子力水素プログラムを承認 (2008 年) した。現在の開発状況は、実証プラントの予備検討段階である。

国家戦略として水素製造を主目的にした当プログラムを推進中。2009 年に原子力水素連合 (NHA) が成立。電力、重工、製鉄、石油等の関連主要産業が連携参加しており、また 2013 年以降、米国 NGNP 産業連携機構 (3.1(2) の項を参照) も連携参加中。2030 年までに原子力水素製造の実証を予定。

3.6 インドネシア

(1) 多目的動力炉 (MPPR) / インドネシア実験動力炉 (I-EPR=RDE) プログラム

2010 年に国がエネルギー開発計画に熱電併給用原子炉を位置付けて以来、原子力庁 (BATAN) が MPPR 開発を計画し、その最初の段階として I-EPR プラントの設置検討を開始した。2015 年にその概念設計国際競争入札が行われ、Roastom (ロシア) が落札した。2015 年の暮れに初期の安全解析に関する概念設計が RENUKO (Nukem、Roastom、Rekayasa、KOGAS) によって行われた。

3.7 日本

高温ガス炉につき、1970年代以降、原子力製鉄など原子力多目的利用の観点から、原研（JAERI、現原子力研究開発機構 JAEA）を中心として、原子炉メーカー、燃料メーカーなどが協力して、高温ガス炉の基礎的研究開発、ならびに高温工学試験研究炉（HTTR）プラントの設計、建設、運転、安全性実証試験、燃料・材料・機器開発を継続している。

現在、被覆粒子燃料製造、高品質黒鉛構造材製造、ヘリウム・ガスタービン設計、水素製造（ヨウ素・硫黄（IS）法）、圧力容器用大型鋼材鍛造等、その枢要技術では世界の最先端にいる。

日本は現在、国としてその実用化展開の計画は持っていないが、高温炉開発への国際協力や技術開発リードが要請されており、米国 NGNP へのプラント設計提案への協力、中国 HTR-10、HTR-PM への黒鉛構造材提供、カザフスタン KHTR やインドネシア開発計画への協力など展開中。2017年5月にはポーランドの国立原子力研究センター（NCBJ）や英国のウレンコ社と高温ガス炉技術の協力を開始した。

2011年の「福島過酷事故」を受けて、時の民主党政権が「原発ゼロ」方針を打ち出し、状況が混乱したが、その後、自公連立政権に交代し、2014年に「エネルギー基本計画」が策定され、「安全性が確認された原発は運転再開」、「高温ガス炉の研究開発は国際協力の下で推進」とされた。

同年、エネルギー、環境、国際貢献、ビジネス戦略等の観点から、当該炉プラントの開発の在り方、ロードマップ等の国家的議論が開始された。

(1) 高温工学試験研究炉（HTTR）プログラム

JAEA の HTTR プラント（30MWt、定格 850°C、高温 950°C）は、2011年の福島事故以来、運転停止を余儀なくされたが、現在、2019年秋頃の運転再開を準備中。HTTR 使用による「OECD/NEA 炉心冷却材喪失試験国際共研（HTTR-LOFC）」を実施展開し、またガスタービン／水素製造技術開発&実証（HTTR-GT/H2）計画を新規立上げ中。

(2) 小型蒸気サイクル式高温ガス炉（HTR50S、MHR-50/100）／ガスタービン式高温ガス炉（GTHTTR300、MHR-100GT）／本質的安全高温ガス炉（NSHTR）／クリーンバーン高温ガス炉（CBHTR）プログラム

JAEA、三菱、東芝、富士電等が、単独または共同で、世界の多様かつ膨大な熱電需要、軽水炉使用済燃料中の Pu や TRU の燃焼処理、福島事故を教訓とした冷却材喪失や空気&水侵入等の過酷事故条件下にも対応できる究極的安全炉の追求等の新しい視点から、それぞれ、750°C級の蒸気サイクルまたは 850°C級のガスサイクルの炉・プラントの概念設計、市場評価、ならびに耐酸化性に優れた被覆粒子燃料や黒鉛材料の開発試験を展開中。これらの炉／プラント設計には、GTHTTR300 シリーズ（-X：発電用、-C：熱電併給用、-H：水素製造用、-A：全乾式プラント用等）、HTR50S、MHR-50/100、NSHTR、CBHTR、MHR-100GT 等が含まれる。

4. 情報源

(1) 国際会議論文等： ICAPP2017（日本）、ICONE25（中国）、日本原子力学会・2017年秋の大会、等

(2) WEB 検索キーワード： 高温ガス炉、小型モジュール炉、次世代炉、原子力熱利用、水素製造等

(3) 2017 年度版、RAHP ニュースレター No. 16、WNN 等のホームページ

5. 本ニュースレターに関する問合せ先

高温ガス炉プラント研究会 (RAHP)

事務局：(株) 桜門イノベーションリサーチ、東京都港区赤坂 7-6-41-302

E-mail: omonrahp@jcom.zaq.ne.jp (担当：石塚冬樹)

6. 略語

Bl	： Block (type) ブロック (型)
Co-gen.	： (Heat & Power) Co-generation (熱電) 併給
GT	： Gas Turbine ガスタービン
H ₂	： Hydrogen 水素
HTGR	： High Temperature Gas Cooled Reactor 高温ガス炉
HTR	： High Temperature Reactor 高温炉
Md	： Module モジュール
Pe	： Pebble-bed (type) ペブルベッド (型)
Pi	： Pin-in block (type) ピンインブロック (型)
Pu	： Plutonium プルトニウム
RE	： Rare Earth 希土類 (元素)
SMR	： Small Modular Reactor 小型モジュール炉
ST	： Steam Turbine 蒸気タービン
Th	： Thorium トリウム
U	： Uranium ウラン
VHTR	： Very High Temperature Reactor 超高温ガス炉

第1表 ポーランドとHTR-PMに関する最近のトピックス

ポーランド	<p>日本原子力研究開発機構：ポーランド及び英国と高温ガス炉技術の協力を開始～国産高温ガス炉技術の国際展開と国際標準化に向けて～（2017.5.18） (https://www.jaea.go.jp/02/press2017/p17051901/)</p>
	<p>日本-ポーランド外相会談：「日本・ポーランド戦略的パートナーシップに関する行動計画」において、高温ガス炉技術の研究開発を奨励。（2017.5.18） (http://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/press4_004624.html)</p>
	<p>IAEA 総会のサイドイベントで、ポーランドのエネルギー省原子力局長が、高温ガス炉導入計画を紹介。高温ガス炉導入により年間 1,400～1,700 万トンの CO₂ 排出を抑制。（2017.9.19） (https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-high-temperature-heat-could-replace-fossil-fuels-in-industry-mitigate-climate-change)</p>
	<p>ワルシャワにて GEMINI+プロジェクトのキックオフミーティングを開催。26 機関（ヨーロッパ諸国、米国、日本、韓国）が参加。（2017.9.27-28） (https://www.ncbj.gov.pl/en/aktualnosci/htgr-consortium-inaugurating-meeting-warsaw)</p>
	<p>ポーランドのエネルギー省が高温ガス炉導入を検討する特別チームからの報告書を公開。 (http://www.me.gov.pl/node/28011) Ostatnia aktualizacja: 2018-01-30</p>
H T R P M	<p>HTGR 用燃料の大量製造（製造ライン：30 万個/年）を開始。（2017.7.18） (http://english.gov.cn/news/top_news/2017/07/18/content_281475735868940.htm)</p>
	<p>HTR-PM 炉心に球状減速材の装荷を4月5日に開始。 (http://www.world-nuclear-news.org/NN-Fuel-loading-starts-at-Chinese-demonstration-HTGR-0704175.html)</p>
	<p>蒸気発生器の試験ループでの熱流動実証試験が7月14日に終了。 (http://www.neimagazine.com/features/featurechinas-next-htr-5907644/featurechinas-next-htr-5907644-3.html)</p>
	<p>蒸気発生器の最終試験を 2018 年 4 月までに終了予定。 (http://www.world-nuclear-news.org/NN-China-plans-further-high-temperature-reactor-innovation-1909171.html)</p>
	<p>原子炉圧力容器の蓋を 2017 年 12 月 27 日に据付け（HTR-PM の 2 号機）。2018 年に運転開始予定。 (http://www.world-nuclear-news.org/NN-First-HTR-PM-vessel-head-in-place-0401185.html)</p>

第2表 最近の代表的会議での高温ガス炉関連の研究内容

調査対象	国名等	研究分野 ^{*1}	主な研究内容
ICAPP2017 ^{*2}	日本:9 中国:3 米国:2 英国:1 計:15件	分野3(金属):1 分野4(核):1 分野5(熱流動・安全):5 分野6(その他原子炉):3 分野7(熱利用):5	・PRAシリーズ ^{*5} (5件) ・ガスタービン発電(5件:日、中、米) ・ブロック型炉心の優位性 ・HTR-PM(ヘリウム循環機)
ICONE25 ^{*3}	日本:8 中国:17 ドイツ:1 英国:2 計:28件	分野1(燃料):4 分野2(黒鉛):3 分野3(金属):2 分野4(核):3 分野5(熱流動・安全):7 分野6(その他原子炉):5 分野7(熱利用):4	・Pu 燃焼炉シリーズ ^{*6} (5件) ・HTR-PM 関連(9件) ・ガスタービン発電(4件:中、英) ・黒鉛ダスト・脱ガス(3件) ・空気侵入防止策
原子力学会 秋の大会 ^{*4}	JAEA:9 大学:9 メーカー:3 計:21件	分野1(燃料):7 分野2(黒鉛):1 分野4(核):3 分野5(熱流動・安全):8 分野6(その他原子炉):2	・Pu 燃焼炉シリーズ ^{*6} (8件) ・PRAシリーズ ^{*5} (3件) ・革新的燃料シリーズ ^{*7} (4件) ・トリチウム生産
<p>* 1) 高温ガス炉の特徴を考慮して、燃料、黒鉛、金属、核、熱流動・安全、その他原子炉関連及び熱利用系の7つの研究分野に分類。</p> <p>* 2) The International Congress on Advances in Nuclear Power Plants、2017.4.24-28@福井・京都</p> <p>* 3) The 25th International Conference on Nuclear Engineering、2017.7.2-6@上海、中国</p> <p>* 4) 2017 年秋の大会、2017.9.13-15、北海道大学で開催。</p> <p>* 5) 高温ガス炉の確率論的安全評価手法の開発</p> <p>* 6) プルトニウム燃焼高温ガス炉を実現するセキュリティ強化型安全燃料開発</p> <p>* 7) 高温ガス炉の安全性向上のための革新的燃料要素に関する研究</p>			
<p>【主な研究傾向】</p> <p>○日本からの発表: 核セキュリティと安全性が両立したプルトニウム燃焼高温ガス炉、高温ガス炉の確率論的評価手法の開発、耐酸化燃料の製造技術開発等、社会的ニーズに沿った高温ガス炉技術の高度化研究を着実に実施</p> <p>○中国からの発表: 殆どがHTR-PM関連で、その他がガスタービン発電。HTR-PM関連は、新燃料輸送、黒鉛の脱ガス・ダストや1次系内の不純物分析、ヘリウム循環機、中央制御室や警報システム、放射線監視や緊急時対応等で、2018年の運転開始に備えたような内容</p>			