

<概要>

高温ガス炉の開発は、OECDと英国が行った研究用実験炉DRAGON炉（ブロック燃料要素炉心、1966年～1976年）の建設が最初である。その後、ドイツ（球状燃料要素炉心）と米国（ブロック型燃料要素炉心）が中心となって開発が進められ、実験炉3基及び原型炉2基が建設、運転されてきた。さらに、発電効率向上を目指したガスタービン発電用モジュール型炉の設計、研究開発も行われたが、高温ガス炉建設の計画は相次いで中止に迫られた。しかしながら、その概念は南アフリカPBMR計画、米国/ロシアGT-MHR計画に引き継がれた。2003年1月に中国の清華大学核能・新能技術研究院（INET）にあるペブルベット型試験炉HTR-10が、熱出力10MW、電気出力2.5MW、原子炉出口温度700℃を達成している。日本でも1998年に高温工学試験研究炉（HTTR）の初臨界を達成後、1999年から出力上昇試験を開始し、10MW、20MWの各出力段階で順次性能を確認しながら定格出力30MWまでの出力上昇を行った。2004年3月に高温試験運転を開始し、同年4月に原子炉出口冷却材温度950℃を世界で初めて達成した。さらに2010年3月に出口温度950℃で50日間の連続運転を達成した。近年、米国のVHTR建設計画、中国のHTR-PM建設計画等が進められるとともに、日本、フランス、韓国等で高温ガス炉に関連した研究開発が進められている。

<更新年月>

2011年08月

<本文>

1956年に英国は高温に耐える被覆粒子燃料の開発に成功した。これを受けて、OECD及び英国が参加したDRAGON炉開発計画が開始され、同炉は1964年に初臨界を達成した。このDRAGON炉の運転では、燃料、材料の開発と健全性の実証のため広範囲の照射試験が実施された。ほぼ10年間にわたり高温ガス炉としての貴重な運転経験を蓄積した後、1976年に運転を終了した。被覆粒子燃料の成功は高温ガス炉の燃料設計に大きな自由度もたらした。その後建設・運転されたドイツのAVR及びTHTR-300の球状燃料要素、米国のピーチ・ボトム炉の棒状燃料要素、フォート・セント・ブレイン炉のブロック型燃料要素のいずれにおいても被覆粒子燃料が採用されている。図1にドイツと米国における高温ガス炉の運転実績をまとめた。1990年代に入り、日本や中国において相次いで試験炉の建設が開始され、90年代後半以降は小型モジュール型高温ガス炉の開発研究が進められた。2000年以降は高効率発電と水素製造の両方が可能である電力水素併産型の超高温ガス炉（VHTR）システムの実用化を目指した研究開発が注目されるようになってきた。

他方、第四世代原子力システム（Generation IV Nuclear Energy Systems）の検討を進めることを目的に米国の主唱で第四世代原子力システム国際フォーラム（Generation IV International Forum：GIF）が創設され、2001年7月には、GIFの憲章が制定された。これまでに、米国、仏国、英国、スイス、カナダ、韓国、南アフリカ、ブラジル、アルゼンチン、日本の10カ国とEUからEURATOMが参加して、第四世代原子力システムの選定、国際共同研究プロジェクト及びR&D課題の内容、プロジェクト実施の枠組み等が検討されてきた。VHTRは第四世代原子力システム概念の一つとして選定され、システムを実用化するために必要な研究開発内容をまとめたロードマップが報告されている。現在のVHTRシステム概念（図2参照）は、ウラン燃料のワンスルーサイクルを採用した熱中性子スペクトル高温ガス炉である。炉心形状としてはブロック型と

ペブルベッド型の両方が検討されており、熱出力は400～600MWで、ヘリウムガス冷却システムを採用している。冷却材出口温度は900℃から1000℃以上を目標とし、電力・水素の併産を目指している。2005年2月には、多国間研究協力の枠組み協定が締結された。その後、第四世代原子力システムの各システムに関する共同研究が協議され、VHTRについては2006年11月に日本原子力研究開発機構が「システム取決め」に調印した。さらに、個別の研究開発協力について実施機関が締結する取決めとして、2008年1月に、VHTR「燃料・燃料サイクルプロジェクト取決め」、2008年3月に、VHTR「水素製造プロジェクト取決め」が発効した。VHTR「材料プロジェクト取決め」には2009年9月に参加国すべてが調印した。

1. 米国

米国は、ブロック型燃料要素を採用した発電用実験炉であるピーチ・ボトム炉及び原型炉であるフォート・セント・ブレイン炉の開発と運転経験を有している。ピーチ・ボトム炉は1966年に初臨界達成後、高い稼働率で運転実績を残したが、1974年に運転を終了した。フォート・セント・ブレイン炉は高温ガス炉を用いた蒸気タービンサイクル発電の実証を目的として、1974年に初臨界の後、マルチホール型のブロック燃料や蒸気発生器、純化系等に関する経験を残し1989年に運転を終了した。これらに続く建設計画もあったが、フォート・セント・ブレイン炉の水浸入トラブルや需要の鈍化などにより中止となった。1978年からは米国ガス冷却炉協会と米国エネルギー省（DOE）の資金援助によりリードプロジェクトと呼ばれる開発計画がゼネラルアトミック（GA）社を中心にして進められた。1990年代に入ると、さらに経済性向上の検討が進められ、従来の蒸気タービン発電に代わってガスタービン発電を採用したGT-MHR（Gas Turbine Modular Helium Reactor）の設計概念が生まれた。GA社発案のGT-MHR（熱出力600MW、電気出力290MW；[図3](#)参照）は、高い固有安全性を備え、原子炉から取り出された高温のヘリウムガスで直接ガスタービンを回し、高い発電効率（約45～50%）による発電を目指した高温ガス炉である。GT-MHRは、核兵器解体プルトニウムの燃焼処分のためのGT-MHRプロジェクトとして、1994年にGA社とロシア原子力省（MINATOM）との間で共同開発を行うことが合意され、1995年2月にはGT-MHR概念設計プロジェクトが開始された。その後1996年1月にはフランスのフラマトム社（現AREVA NP社）が、1997年4月には日本の富士電機（株）がこの概念設計プロジェクトに参加し、国際協力プロジェクトになった。概念設計は1997年10月に終了した。その後、燃料や動力変換システムの開発が原型炉建設に向けて、米国/ロシアの出資率50/50をベースに進められている。また、GA社は2010年に大型炉の使用済燃料で稼働する小型炉を12年間で開発する計画を開始した。この小型炉はEM2（Energy Multiplier Module）と呼ばれ、通常の商用炉の約1/4の大きさで、ヘリウム冷却の高温ガス炉であり、発電以外にも石油精製等に利用可能としている。GA社は5年以内に原子力規制委員会（NRC）の設計認証を得たいとしている。

2000年以降、DOEは相次いで第四世代原子力システム構想（Gen IV Nuclear Energy Systems Initiative）や原子力水素構想（Nuclear Hydrogen Initiative：NHI）を発表した。DOEはVHTRを次世代原子力プラント（Next Generation Nuclear Plant：NGNP）の最有力炉型と位置づけて研究開発を進めてきており、NHIにおいてNGNPに接続する水素製造技術の研究開発を進めている。2005年8月にはエネルギー政策法（Energy Policy Act 2005：EPACT2005）が成立した。この中で、原子力に関するサブタイトルの一つに発電用、水素製造用、または、水素電力コジェネ用のNGNPの研究開発、原型炉の設計・建設・運転が規定されている。VHTRの実現に向けてDOEとNRCは2008年8月に連邦議会へ共同報告書を提出した。VHTRは熱出力300MWまたは600MWで電力・水素コジェネレーション、冷却材出口温度950℃を目指している。米国は国際協力を積極的に生かしてNGNP計画を実現する方針であり、DOEによるGen-IV計画と国際原子力研究構想

（International Nuclear Energy Research Initiative：I-NERI）への寄与、NRCのOECD/NEA/CSNIの新型炉に係る実験装置に関するタスク（TAREF）への参加等がなされている。DOEは、アイダホ国立研究所（INL）を中心にして2011年度まで研究開発を行い、2013年度に許認可申請、2017年度建設開始、2021年度建設完了とする予定である。しかし、2011年9月までに原子炉設計を選定し、詳細設計を進める作業は遅れており、DOE長官の諮問委員会であるNEAC（Nuclear Energy Advisory Committee）は、次の段階に向けて決定を行う準備が完了していないと報告している。

2. 日本

日本原子力研究開発機構（原子力機構）が中心となって、1969年以来、高温ガス炉に関する研究開発を進めてきた。1987年の原子力委員会策定の「[原子力開発利用長期計画](#)」に従って、高温工学試験研究炉（HTTR、熱出力30MW、[図4](#)参照）の建設が決定され、1990年に原子炉設置許可を取得し、1991年に着工して1996年3月までに建家、機器の製作、据付工事を終了した。1998年7月から燃料装荷を進め、1999年11月10日に初臨界を達成した。その後、1999年から出力上昇試験を開始し、10MW、20MWの各出力段階で順次性能を確認しながら定格出力30MWまでの出力

上昇が行われた。2001年12月に定格出力運転を行い、定格出力30MWにて原子炉出口での冷却材温度約850°Cを達成した。2004年3月に高温試験運転を開始し、同年4月19日に原子炉出口冷却材温度950°Cを世界で初めて達成した。2010年1月から3月にかけて、出口温度950°Cで50日間の連続運転が達成された。また、冷却材喪失試験などの安全性実証試験が実施されている。さらに、原子力機構では、高温ガス炉の基盤技術の開発とともに、高温ガス炉から取り出される高温ヘリウムガスによる発電と熱利用のための核熱利用研究が実施されており、ガスタービン発電システム、水素製造技術などの研究開発が進められている。原子炉出口冷却材温度950°Cを達成したことにより、熱化学法ISプロセスによる水素製造に十分な温度を達成したこととなり、高温ガス炉による水素製造の実現に向けて大きく前進した。現在、GIFにおける国際共同研究活動やIAEAの共同研究プロジェクト及び米国のI-NERIに参加するとともに、フランス原子力庁、韓国原子力研究所、中国清華大学核能及新能源技術研究院と国際協力を進めながら高温ガス炉技術に関する研究開発を進めている。2013年度に研究開発目標の達成度に関する評価結果と実用化計画において実証炉基本設計以降を実施する主体の有無により、原子力水素製造試験計画への移行の可否について判断がなされる。

3. 中国

ドイツの協力を得てペブルベッド型炉を採用し、清華大学の核能及新能源技術研究院（INET）に建設された高温ガス試験炉（HTR-10、熱出力10MW、[図5](#)参照）は、2000年12月に初臨界、2003年1月に熱出力10MW、電気出力2.5MW及び原子炉出口温度700°Cを達成し、その後、蒸気サイクル発電と安全性実証試験を実施してきた。現在、蒸気タービンをヘリウムガスタービンに変更し、高効率発電を実証するための研究開発がHTR-10GT計画として進められている。また、実証炉HTR-PM（熱出力250MW×2基、電気出力105.5MW×2基、出口温度750°C）に関する計画では、中国核能集团公司、中国核工業建設集团公司及び清華大学が合同で合資会社「核電有限公司」を設立し（2006年12月調印）、同会社がHTR-PMの建設と運営を行う。2008年2月にはHTR-PM計画が政府によって承認され、同年、サイトの整備が山東省威海市榮成石島湾において、2009年に建屋建設が開始された。2013年には建設が完了する見込みである。

4. フランス

フランスは、第四世代原子力システムの一つである[ガス冷却高速炉](#)（GFR）の開発を最終目標として、VHTRシステムの開発計画の延長線上にGFRの技術開発を位置づけている。このため、フランス原子力庁（CEA）は、GFRの開発を進めるに当たっては、多くの共通技術を有するVHTRシステムのヘリウムガス技術、中間熱交換器等の要素技術、高温水素製造技術等の開発を実施し、VHTRシステムの技術開発を進める計画である。また、アレバ（AREVA）社は、熱出力600MW、出口温度850°C以上、ブロック型環状炉心の高温ガス炉であるANTARES（AREVA New Technology based on Advanced gas cooled Reactor for Energy Supply、[図6](#)参照）を発表し、CEAは燃料製造、材料開発、ヘリウム技術、及びIHX（中間熱交換器）等のR&Dを担当することになっている。水素製造技術開発はI-NERIの枠組として、あるいは独自に実施されている。

5. 南アフリカ

南アフリカは、ドイツの技術をベースに、ペブルベッド型炉心、ガスタービンを用いたモジュール型高温ガス炉PBMR（Pebble Bed Modular Reactor、熱出力400MW、電気出力165～185MW、出口温度900～950°C）を建設する計画を進めていた。ドイツのペブルベッド型を採用したPBMRの商業発電用原子炉の建設計画を国営電力ESKOMが中心となって、1993年から検討を始めており、概念設計、コスト評価、政府によるレビューを経て、1998年に設置許可を申請している。[初期炉心](#)はウラン濃縮度4%以下であるが、その後7～8%濃縮度の燃料に交換される。[燃焼度](#)は8万MWd/t程度であり、[再処理](#)はしない。正式にプロジェクトとなったのは1999年にPBMR社が発足してからである。PBMR社には、英国BNFL社、米国Exelon社が海外資本参加し、国際プロジェクトとして開発を進めてきたが、Exelon社はその後資本参加からの撤退を発表した。2004年10月には、PBMR社がPBMRの建設プロジェクト開始を公式に宣言した。当初、2013年運転開始予定となっていたが、金融事情等の影響により、計画は大幅に遅れた。2008年8月には、商用規模プラントの建設のため、技術調達、建設管理について、Murray & Roberts社及びSNC Lavalin Nuclear社との契約が締結された。PBMRで使用する燃料の製造は、南アの国営企業NECSA社が行うことになっており、燃料製造施設に関する設置許可も同時期にNECSA社から申請された。2008年12月には9.6%濃縮ウラン燃料の製造に成功、また、2009年9月には高温ガス炉用9.6%濃縮ペブル燃料の製造に成功した。

しかし、2009年12月、PBMR社の収支状況に基づき、理事会は大幅なリストラを検討した。2010年2月にはPBMR社と三菱重工業はペブルベッド炉建設を可能にする協力を進めることで覚書に調印したが、2010年5月に理事会は知的財産の保持と会社存続のためにPBMR社の大幅縮小を受け入れた。2010年9月に南アフリカ政府は、運営規模と組織を縮小し2013年3月までPBMR社を運

営することを承認した。

6. 韓国

韓国においては、韓国原子力研究所を中心として超高温ガス炉を用いた水素製造に関する研究開発プロジェクトであるNHDD（Nuclear Hydrogen Development and Demonstration）プロジェクトが開始されており、このために2019年までに約1000億円を拠出する予定であることを韓国政府が明らかにしている。現在、熱出力200MW、冷却材出口温度950℃のVHTRの概念設計が行われており、2013年頃から詳細設計と安全審査を、2015年頃から建設開始、2022年頃の運転開始を目標としている。韓国は米国DOEとの間でI-NERIの枠組みを利用して、VHTRシステムの技術開発に関する共同研究を進めている。また、日本原子力研究開発機構と韓国原子力研究所の間で研究協力に関する実施取決めが締結されている。

7. ロシア

ロシアは発電と化学コンビナート等での熱利用を主目的にした高温ガス炉を開発してきた。建設予定だった発電用実験炉VGR-50（50MWt）、ドイツの協力を得て1996年度に初臨界の予定だった熱電併給実験炉VGM（200MWt）及び20世紀中に完成予定だった核熱プロセス利用原型炉VG-400（熱出力1060MW、電気出力265MW、アンモニア製造）の開発はいずれも中止となった。1994年以降は、ガスタービン発電のモジュール型高温ガス炉（GT-MHR）の開発をGA社と共同で行なっている。（1. 米国の項を参照）

8. ドイツ

ドイツはペブルベッド（球状）燃料要素を用いた高温ガス炉開発を早くから進めてきており、発電用実験炉AVR（熱出力46MW、電気出力15MW）、発電用原型炉THTR-300（熱出力750MW、電気出力300MW）の建設及び運転経験を有している。ドイツではこれらの経験をもとに、発電用あるいは熱電併給用高温ガス炉HTR-500（熱出力1390MW、電気出力550MW）及びモジュール型高温ガス炉HTR-M（熱出力200MW、電気出力76MW）の開発を行い、基本設計、安全審査は終了したが、その後の社会情勢及び経済情勢の変化により建設計画は中止された。2002年の原子力法は新規原子炉の建設を禁じている。上記のAVR、THTRはデコミッションングの段階にあり、AVRサイトについては2015年に緑地化、THTRについては1994年までに燃料取出しが完了、1997年に閉じ込めが終了し、今後30年間閉じ込め管理がなされる。HTGR関連の研究は安全、材料、廃棄物管理について、EUの研究開発の枠組の中で行われている。なお、ペブルベッド型炉は海外でも関心がもたれ、中国のHTR-10の建設・運転、南アフリカのPBMRの建設計画に引き継がれている。

9. その他の国々の研究開発

EU（オランダ、英国、ドイツ等）では、高温ガス炉開発研究に関連して、RAPHAEL（Reactor for Process Heat, Hydrogen and Electricity Generation）、ARCHER（Advanced High-Temperature Reactors for Cogeneration of Heat and Electricity R&D）等の計画が進行中である。カザフスタンでは、発電・地域暖房用高温ガス炉（50MWt、15MWe、750℃）建設が検討されている。インドネシアでは、コジェネレーション用原子炉の一つとして、高温ガス炉の概念設計研究が進められている。

（前回更新：2006年9月）

<関連タイトル>

- [高温ガス炉概念の特徴 \(03-03-01-02\)](#)
- [海外における高温ガス炉運転実績 \(03-03-03-03\)](#)
- [新型発電用高温ガス炉の開発動向 \(03-03-04-01\)](#)
- [高温ガス炉の発電炉としての適合性と将来性 \(03-03-04-02\)](#)
- [新型発電用高温ガス炉の開発 \(03-03-04-03\)](#)
- [海外における高温ガス炉開発の経過と計画 \(03-03-07-02\)](#)
- [ペブルベッドモジュール炉（PBMR） \(03-03-07-03\)](#)
- [南アフリカPBMRの建設構想 \(03-03-07-04\)](#)

<参考文献>

- (1) 塩沢周策、他：世界のトップを走るHTTRプロジェクト、日本原子力学会誌、Vol.47、No.5、342-349（2005）
- (2) 日本原子力研究開発機構ホームページ：<http://nsed.jaea.go.jp/index.html#>

(3) 日本原子力産業会議（編集発行）：原子力ポケットブック2002年版、（2002年11月）、p.281

(4) 米国エネルギー省ホームページ：

(5) Generation IV International Forum ホームページ：

(6) Arkal Shenoy, Modular Helium Reactors for Electricity and Hydrogen, Proc. of Workshop on High Temperature Gas Cooled Reactor and Hydrogen Production, Yong-Pyong, Korea, Oct. 27, 2004.

(7) Sydney Ball, Sensitivity Studies of Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor (MHTGR) Postulated Accidents, Proc. of 2nd International Topical Meeting on HIGH TEMPERATURE REACTOR TECHNOLOGY, Beijing, CHINA, Sep. 22-24, 2004,

(8) J-C Gauthier, et al., ANTARES : The HTR/VHTR project at Framatome ANP, Proc. of 2nd International Topical Meeting on HIGH TEMPERATURE REACTOR TECHNOLOGY, Beijing, CHINA, Sep.22-24, 2004,

(9) Jianling Dong and Suyuan Yu, Concept of Pebble Bed Based HTGR with Fast Pebble Discharge System, Proc. of 2nd International Topical Meeting on HIGH TEMPERATURE REACTOR TECHNOLOGY, Beijing, CHINA, Sep.22-24, 2004,

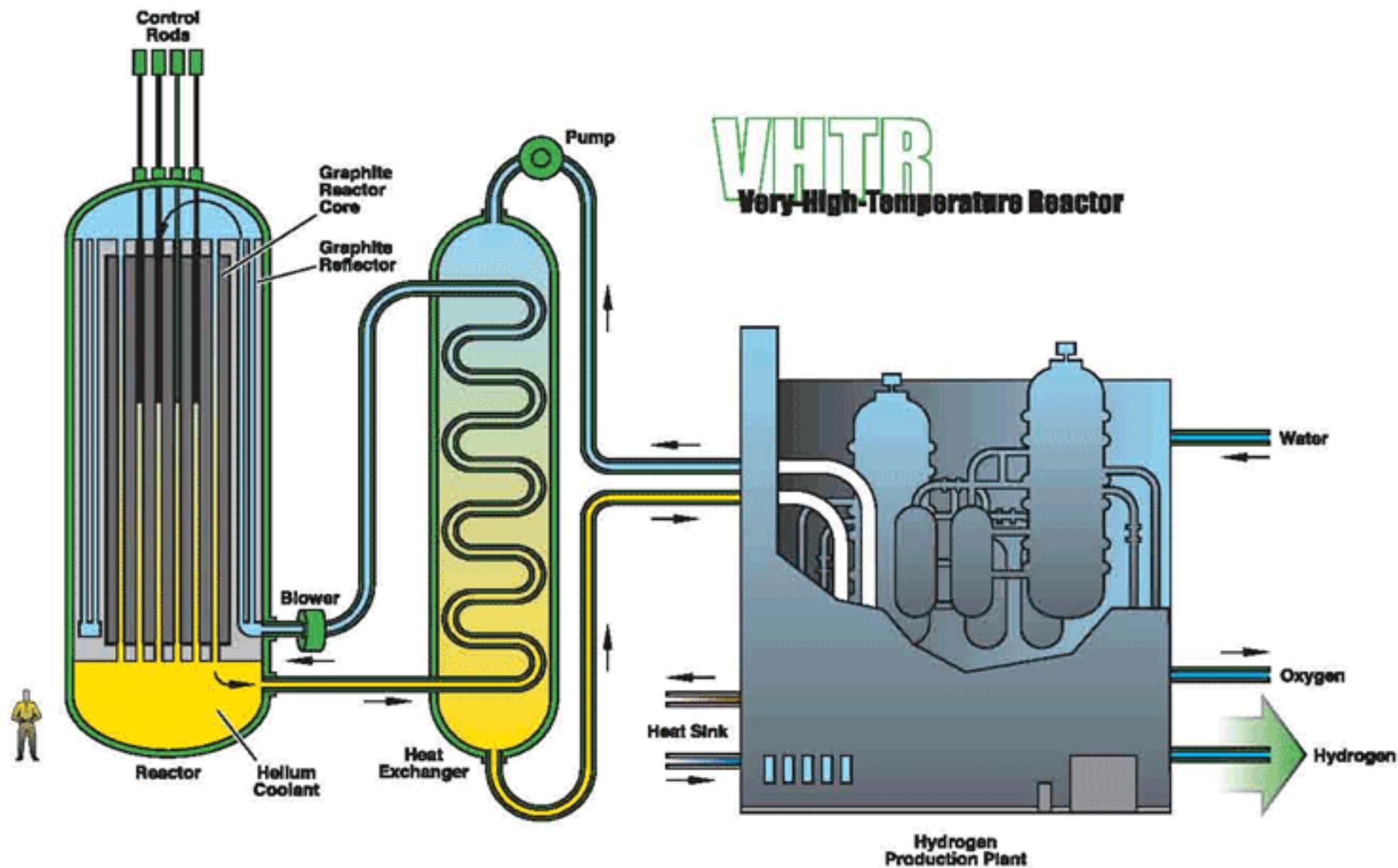
(10) IAEA ホームページ：

22nd Meeting of the IAEA Technical Working Group on Gas Cooled Reactors (TWG-GCR), March 28-30, 2011,

,
International Workshop on Advanced Nuclear Reactor Technology for Near Term Deployment, July 4-8, 2011,

(11) ロシアOKBMホームページ：

(12) 米国GA社ホームページ：



02-QA60807-01

図2 超高温ガス炉(VHTR)システムのレイアウト

[出所] Generation IV Internation Forum ホームページ,
<http://www.gen-4.org/Technology/systems/vhtr.htm>

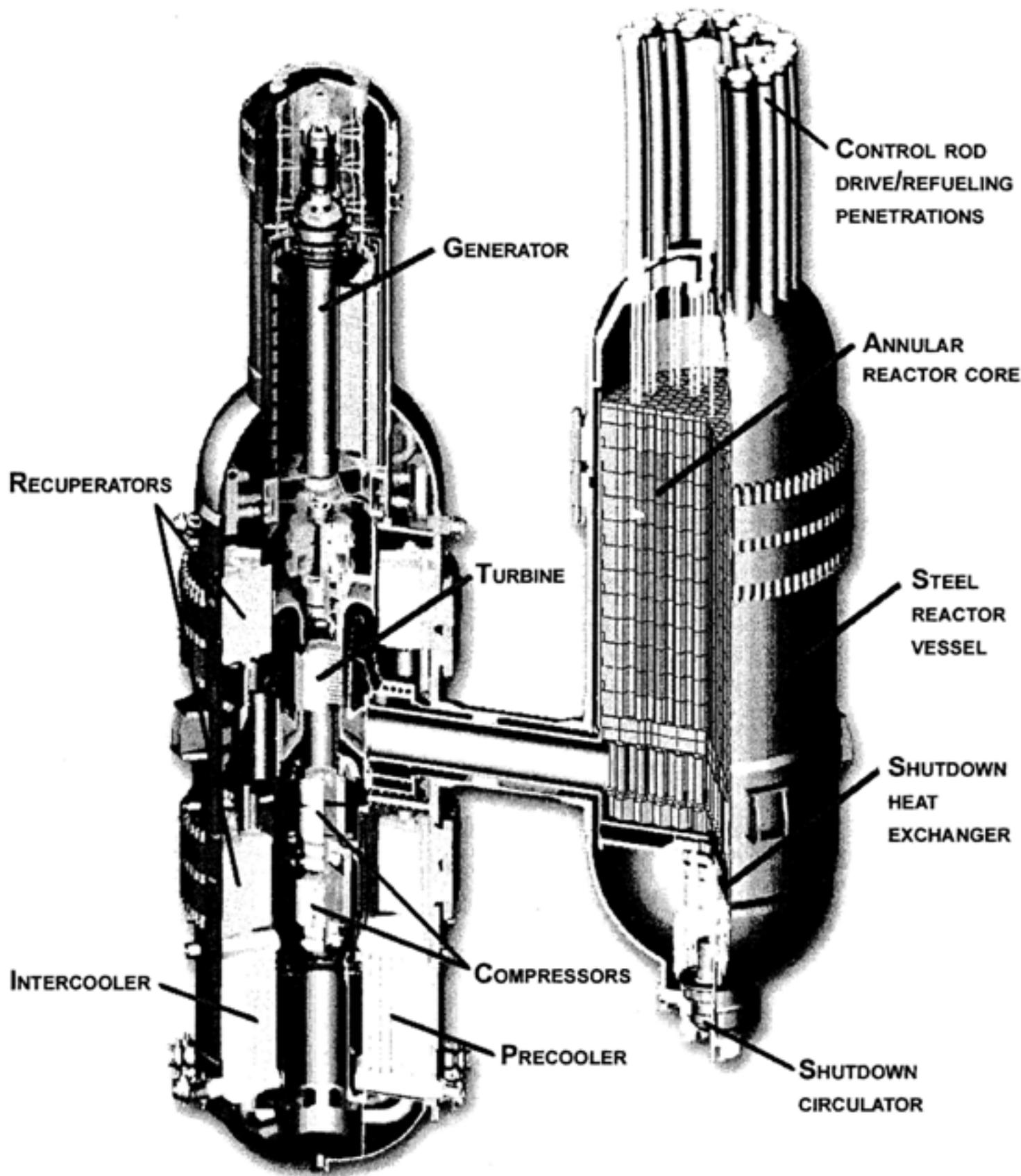


図3 GA社が設計するGT-MHRの概要

[出典]Arkal Shenoy, Modular Helium Reactors for Electricity and Hydrogen, Proc. of Workshop on High Temperature Gas Cooled Reactor and Hydrogen Production, Yong-Pyong, Korea, Oct. 27, 2004.

・ 原子炉熱出力	30MW
・ 冷却材	ヘリウムガス
・ 原子炉入口/出口冷却材温度	395/850, 950℃
・ 1次系冷却材圧力	4MPa
・ 炉心構造材	黒鉛
・ 炉心有効高さ	2.9m
・ 炉心等価直径	2.3m
・ 出力密度	2.5MW/m ²
・ 燃料	二酸化ウラン 被覆粒子/黒鉛分散型
・ ウラン濃縮度	3~10%(平均6%)
・ 燃料体形式	ピン・イン・ブロック型
・ 原子炉圧力容器	鋼製(2 ¹ / ₄ Cr-1Mo鋼)
・ 主冷却回路数	1ループ (中間熱交換器及び加圧水冷却器)



図4 HTTRの構造と仕様

[出典]塩沢周策、他：世界のトップを走るHTTRプロジェクト、日本原子力学会誌、
Vol.47、No.5、342-349(2005)

Design features

- ◆ Spherical fuel elements
- ◆ T_{fmax} lower than 1600 °C
- ◆ Passive residual heat removal
- ◆ Multi-pass charging mode
- ◆ Side by side arrangement
- ◆ All control rods in reflectors

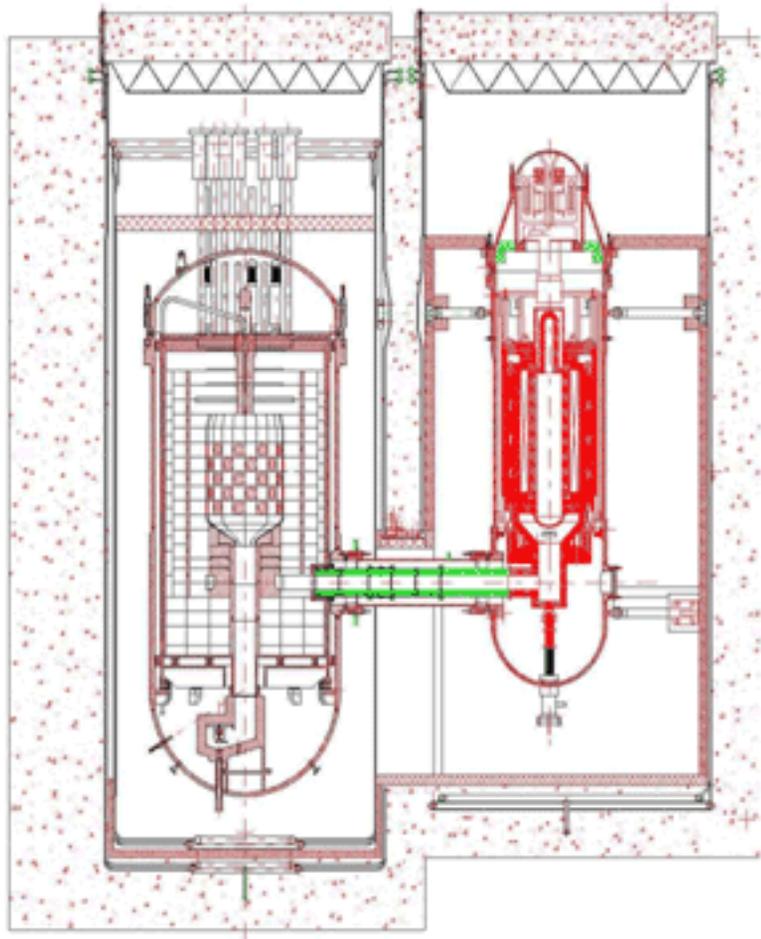


図5 中国清華大学INETのHTR-10の概要

[出典] Jianling Dong and Suyuan Yu, Concept of Pebble Bed Based HTGR with Fast Pebble Discharge System, Proc. of 2nd International Topical Meeting on HIGH TEMPERATURE REACTOR TECHNOLOGY, Beijing, CHINA, Sep. 22-24, 2004, Paper D02.

Reactor Power		≥ 600 MWt
Reactor Outlet Temperature		≥ 1000 °C
Reactor Inlet Temperature		400 °C to 500 °C depending of the vessel material
Maximum Fuel Temp. - Operating - Accident		1300 °C 1600 °C or more, depending of the new fuel developments
Primary Fluid		Helium
Primary Coolant Pressure		~ 5 MPa
Primary Coolant Flow Rate		~ 192 kg/s
IHX Secondary Outlet Temperature		~ 950 °C
Secondary Fluid		N ₂ / He mixture
Secondary Coolant Pressure		~ 5 MPa
Heat Transport Coupling Fluid		To be defined (Helium, liquid,...)
Target Process Fluid Temperature		~ 900 °C

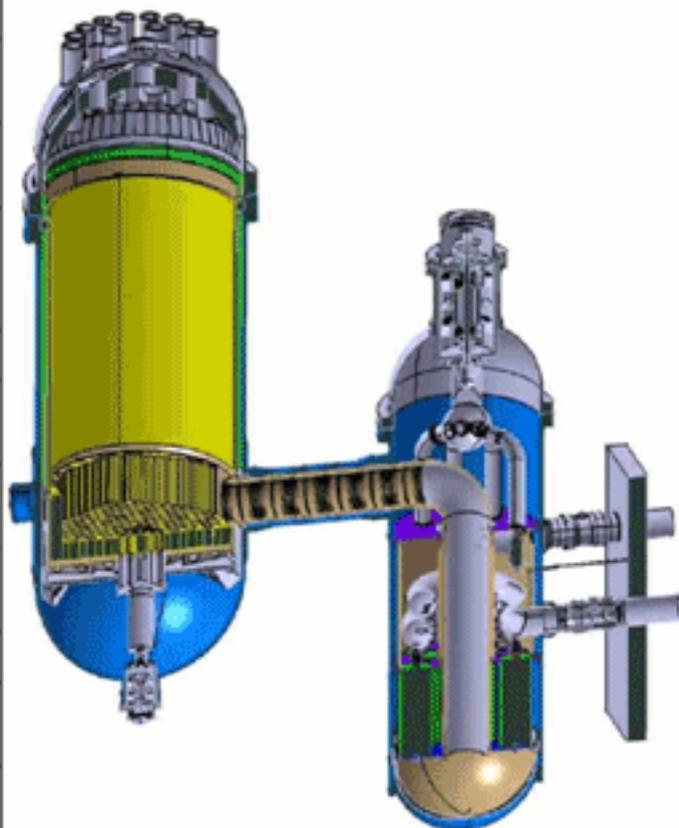


図 6 AREVA社が発表したANTARESの概要

[出典] J-C Gauthier, et al., ANTARES: The HTR/VHTR project at Framatome ANP, Proc. of 2nd International Topical Meeting on HIGH TEMPERATURE REACTOR TECHNOLOGY, Beijing, CHINA, Sep. 22-24, 2004, Paper A10.