

*RAHP*  
ニュースレター  
*No.14*

世界の高温ガス炉開発  
～ 現状と将来計画 ～

2015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

## ■ 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、2015年3月末現在のものである。

## ■ 高温ガス炉開発の背景、狙い、最近の動向概要

世界は今、人口が増え、人々の生活レベルが向上し、それに伴って、

- エネルギー資源(電力、熱、輸送用燃料等)、水、食糧の持続安定的確保
- 地球環境保護

が共通課題となっている。それらの解決策として、オイルサンド、シェールガス等の「非在来型化石燃料」や原子力、水素等の「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3月に発生した「福島第一原発事故」以降も、一部の国は脱原発に向かったが、多くの国は、過酷事故時の安全性を強化しつつ、原子炉の新規開発&導入を進めている。

「高温ガス炉」は、それら原子力共通の特性に加えて、

- ◆ 固有(本質的)安全性、高温性(800~1,000℃程度;高効率発電、水素製造、産業用プロセス熱利用)、核不拡散、資源有効活用、産業振興

などの視点から、先進国、需要国、資源国で開発や導入検討が行われている。

最近の高温ガス炉開発に関する顕著な動向は下記のとおり。

- ◆ 中国で実証炉が建設中、次いで実用炉計画も具体化中
- ◆ インドネシアで多目的利用実験&原型炉、実用炉計画が具体化
- ◆ 日本で国家戦略としての開発の在り方、ロードマップ等の議論が開始。原子炉に連結するガスタービン発電&水素製造試験計画が具体化

なお、現在の開発対象は全て「小型モジュール炉」(出力がモジュール当り300MWe相当以下)プラントであり、想定需要は、市場性や技術成熟度等から、

- <当面> ~750℃程度の需要: 蒸気サイクル: 「発電」&「中~低温熱利用」;  
石炭改質、オイルサンド回収改質、海水淡水化・
- <将来> 850℃~の需要: ガスサイクル: 「高効率発電」&「高温~低温熱利用」;  
高効率水素製造、肥料製造、燃料電池車(FCV)、水素還元製鉄・

等である。

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。また開発プログラムの段階別一覧を表 1～3 に、プラント概念や開発状況例を図 1～16 に示す。

## ■ 国別開発状況

### (1) 米国

#### (1-1) 次世代原子力プラント(NGNP)プログラム:

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(Minatom、現 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設計、提案等に生かされている。

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(実質的に高温ガス炉プラント)開発・実証プログラムを推進してきた。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℃以上」から「当面 750～800℃程度」に変更した。

「フェーズ 1(2005～2010 年; プラント概念設計、技術絞込み)」の作業はほぼ終了したが、下記の状況により、当初予定していた次の「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のみを実施中。

- ◆ 北米潜在需要は、熱電併給、水素製造、オイルサンド回収・改質(輸送用燃料合成)等で膨大だが、プログラム完遂に今後更に 3～4B\$が必要
- ◆ 官民連携の強化(プラント供給/所有/運転者、最終顧客の参加)が必要
- ◆ 炉心設計、設置サイト、プラント完成時期等の絞込みや見直しが必要

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(H<sub>2</sub>-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。

上記の原子力メーカーや電力、化学などが「NGNP 産業連携機構(NIA)」を形成し、顧客要件提示や北米地区で～800 モジュール程度との潜在市場評価を行った。NGNP 実証プログラムの国家による戦略的推進を要望しつつ、独自に、初期段階における最適プラント設計として上出 SC-HTGR を選定し、2015 年の許認可申請を目指してサイト選定等の準備を進めている。

なお当「NGNP」プログラムは現在、「小型モジュール炉(SMR)」プログラム等と合わせて一本化された DOE「新型炉技術(ART)」プログラム枠内で継続されている。

#### (1-2) 国家プロジェクト管理会社ペブルベッドガスタービン超高燃焼度型高温ガス炉(NPMC/PBMR-GT-DB)プログラム:

2013 年、National Project Management Corp.(NPMC)社が南ア PBMR(5-1 項参

照)と連携して、PBMR-GT 開発プロジェクトを開始。米国が現在困っている軽水炉使用済燃料の処理・処分(プルトニウム(Pu)や超ウラン元素(TRU)の燃焼処理)、並びに発電、水素製造、プロセス熱利用を同時に狙うものであり、また NGNP、世界原子力パートナーシップ(GNEP)、先進燃料サイクルイニシアティブ(AFCI)等の既存の DOE プログラムを支援、補完するものと位置づけている。既にニューヨーク(NY)州、同州 Oswego 市等が数 100M\$規模の出資を確約済。プラント実証は世界銀行からの融資を活用し南アで、機器製造や実用化は米国で行うことを想定。2013 年 7 月、DOE 宛に SMR 開発支援を申請済。

### (1-3) Xe-100 プログラム:

2013 年、X-energy 社が、前項と同様、軽水炉使用済燃料の処理・処分、プロセス熱利用等を狙って、かつ南ア PBMR と連携して、高温ガス炉開発プロジェクトを立ち上げた。現在、南ア国策石炭液化会社(SASOL)の石炭ガス化(CTG)プロセスをモデルにその適用性を検討中。

### (2) カナダ: スターコア・ペブルベッド炉(SPB)プログラム:

StarCore 社(米国、カナダ)が、遠隔地・寒冷地・分散需要(小都市、鉱山、軍事戦略基地...)を主対象に当プログラムを立ち上げ、2015 年の初期展開を目指して、カナダ原子力安全委員会の設計認可申請を準備中。衛星通信を使用した原子炉遠隔運転、リース方式によるプラント設置等を提案中。Areva との連携取組みが開始された。

### (3) ロシア

#### (3-1) ガスタービンモジュール炉(GT-MHR)プログラム:

米国とロシアが共同開発してきた GT-MHR(1-1 項参照)のロシア進展版であり、動力変換系機器や被覆粒子燃料の開発を継続中。

#### (3-2) MHR-T(=MGR-T)プログラム:

GT-MHR(1-1、3-1 項参照)をベースに Rosatom と OKBM が発電、原油精製、水素製造等を狙ったシリーズ開発プログラムであり、ロシア経済圏でのその潜在市場は数 100 モジュール規模と評価している。

### (4) 欧州

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)」等、一連の高温ガス炉プログラムを進め、現在、それらの成果を引継いで「熱電併給向け先進炉研究開発(ARCHER)」、「熱電併給産業イニシアティブ(NG21R)」等を推進中。

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(1-1 項参照)に向けて設計提案を行った。

ポーランドは政府が、大学や産業と共に、「ポーランド高温炉建設可能性調査(HTR-PL)プログラム」を開始した。

## (5) 南アフリカ

### (5-1) 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が、「リーマンショック」で財政危機に陥り、2010 年に中止された。

その後、開発試験施設や知的財産を維持管理しながら、その復活・活用策を模索しており、南ア国内や米国からの TH-100(5-2 項参照)、HTMR-100/25(5-3 項参照)、NPMC/PBMR-GT-DB(1-2 項参照)、Xe-100(1-3 項参照)等の開発プログラム新提案に繋がりがつつある。

### (5-2) 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、PBMR の場合のウラン(U)燃料の代わりにトリウム(Th)燃料を使う TH-100 プログラムを発足させた。Th は南アではレアアース(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・代替策と位置づけている。

プラント概念設計を行い、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中。2022 年頃に米国での初号機運転を構想している。

### (5-3) 高温モジュール炉(HTMR-100/25)プログラム:

前記の南ア STL 社や Neopanora 社が香港で設立した合併会社 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(発電用、低濃縮 U 燃料または Th/Pu 燃料など)と HTMR-25(熱電併給可能)を開発中。インドネシアの多目的炉(MPPR)開発計画(9 項参照)に対し設計採用等を提案中。

## (6) 中国

### (6-1) 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。

### (6-2) 高温炉ペブルベッドモジュール(HTR-PM)プログラム:

HTR-10 プログラム(6-1 項参照)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&実用を目指すものであり、先ず実証炉(HTR-PM200)プラントが、「福島原発過酷事故」(2011年3月)後の安全性再レビューを経て、2012年12月に山東省榮成(Rongcheng)市石島湾(Shidao Bay)地区で着工された。2017年末に運開を予定。

実用炉に向けて、2014年に、HTR-PM600の概念設計も終了した。将来に向けて、より高温の炉(HTR-PM+)、水素製造、Th燃料使用等も検討中。

### (6-3) 莆田・瑞金実用炉導入プログラム：

2013年、核建工集団と福建省莆田(Putian)市が、地方中核都市の経済発展計画の一環として、高温ガス炉実用プラントの導入を企画し、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)市も同様の導入計画を発表した。

### (7) 韓国： 原子力水素開発&実証(NH<sub>2</sub>/NHDD)プログラム

国家戦略として当プログラムを推進中。電力、重工、製鉄、石油等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(1-1項参照)も連携参加中。2028年以降にプラント運転・実証を予定。

### (8) カザフスタン： カザフスタン高温ガス炉(KHTR)プログラム

実験&実証プログラムであり、自国の天然資源(U、RE、鉄鉱石...)を輸出しその対価として外国から有用技術を導入し国内に定着させる、との国家戦略展開の1つとして推進中。日本(JAEA、東芝、富士電、原燃工など)が技術、設計、教育等で全面的に協力中。

### (9) インドネシア

2010年に国がエネルギー開発計画に熱電併給原子炉を位置付けて以来、原子力炉(BATAN)が多目的炉(MPPR)(実験&原型炉(EPR=RDE)と実用炉(RGTT200K))の開発に向けて概念設計、設置候補サイト調査を進めている。基本設計につき2015年に国際競争入札が予定されており、日本、中国、南ア(／香港)等がこれに応札する模様(5-3項、10項参照)。

### (10) 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の多目的利用の観点から、JAEAを中心として、基礎的な研究開発、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、安全性実証試験等を継続して行っている。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)、压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、米国、中国、カザフスタン等での高温炉開発への日本の協力や技術開発リードが要請されており、米国NGNP(1-1項参照)へのプラント設計提案への協力、中国HTR-10&HTR-PM

(6-1、6-2 項参照)への黒鉛構造材提供、カザフスタン KHTR(8 項参照)やインドネシア開発計画(9 項参照)への協力など展開中。

2011 年の「福島原発過酷事故」を受けて、時の民主党政権が「原発ゼロ」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、当該高温ガス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。

#### (10-1) 高温工学試験研究炉(HTR)プログラム:

原子力研究開発機構(JAEA)の HTR プラントは、2011 年の福島原発過酷事故以来、運転停止を余儀なくされたが、現在、2015 年度の運転再開を計画・準備中。

HTR 使用による「OECD/NEA 炉心冷却材喪失試験国際共研(HTR-LOFC)」を展開し、またガスタービン/水素製造技術開発&実証(HTR-GT/H<sub>2</sub>)計画を新規立上げ中。

#### (10-2) ガスタービン高温炉(GTHTR300)、小型蒸気サイクル炉(HTR50S、MHR-50/100)、本質的安全高温炉(NSHTR)、クリーンバーン高温炉(CBHTR)プログラム:

一方、JAEA、三菱、東芝等が、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安全炉の追求等の新しい視点から、それぞれ、炉・プラント概念設計、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。

炉・プラント概念設計には、GTHTR300 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 等が含まれる。

### ■ 情報源

---

- (1) 国際会議論文: IAEA 高温ガス炉関連技術会議(TWG-GCR、TM)、ICONE20(2012)(米国)、HTR-2012(東京)、ANS SMR-2013(米国)、HTR-2014(中国)等
- (2) WEB 検索キーワード: 高温ガス炉、小型モジュール炉(SMR)、第4世代炉(Gen.4)、原子力熱電併給、原子力熱利用、水素製造、燃料合成、等

### ■ 本ニュースレターに関する問合せ先

---

(一財)エネルギー総合工学研究所(IAE)内:  
「高温ガス炉プラント研究会(RAHP)」

Tel: 03-3508-8891、Fax: 03-3501-1735、E-mail: rahp1@iae.or.jp

表1 「試験・研究炉プログラム」一覧(2015年3月現在)  
 (対象:実際の原子炉を使用した試験研究開発プログラム)

名称<機関、国>	背景、目的、諸元	現状、将来計画
HTTR: 高温工学試験研究炉 <JAEA> <日本> [図 1~2]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 原子力多目的利用 (製鉄··)</li> <li>◆ 高温ガス炉試験研究</li> <li>◆ 茨城県大洗</li> <li>◆ 30MWt、850℃ (短期 950℃)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 2015年度の運転再開を計画中</li> <li>◆ OECD/NEA 強制冷却喪失試験 (HTTR-LOFC)、機器開発、水素製造 試験研究等を実施中</li> <li>◆ HTTRと連結したガスタービン/水素 製造実証試験(HTTR-GT/H2)を立 上げ中</li> </ul>
HTR-10: 高温ガス試験炉 <清華大> <中国> [図 3]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 天然資源豊富(石炭、 Th··)、原子力多目的利 用、試験研究</li> <li>◆ 北京市郊外</li> <li>◆ 10MWt/2.6MWe (-ST):700℃ (-GT):750/900℃</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ フェーズ1(蒸気タービンサイクル: -ST)研究を継続中</li> <li>◆ フェーズ2(ガスタービンサイクル: -GT)研究への移行を準備中(電磁ベ アリング開発試験等実施中)</li> <li>◆ 水素製造研究も実施中</li> </ul>

表2 「原型・実証・実用炉プログラム」一覧(2015年3月現在)(1/3)  
 (対象:原子炉設置場所や開発資金など内容が具体化しているプログラム)  
 (Md:モジュール、U:ウラン、Pu:プルトニウム、Th:トリウム、RE:レアアース、  
 P型:ペブルベッド型、B型:ブロック型)

名称<機関、国>	目的、諸元	現状、将来計画
NGNP: 次世代原子力プラント <DOE> <米国> [図 4~6]	<ul style="list-style-type: none"> <li>天然資源豊富(石炭、オイルサンド、オイルシェール)、エネ消費膨大、CO2放出膨大、エネ的独立、クリーンエネ(水素)、原子力熱利用(石炭、オイルサンド等改質:燃料合成)。第4世代炉(Gen.4)開発、小型Md炉(SMR)開発</li> <li>高温ガス炉プラント開発&amp;実証</li> <li>Idaho州(但し別のサイトも調査中)</li> <li>600MWt/? MWe/Md、750~800℃?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>フェーズ1(2005~2010年:概念設計、技術評価)はほぼ終了。GA、WH(=PBMR-USA)、Areva(-USA)が夫々の炉・プラント概念設計を提案。日本(三菱、東芝、富士電)も協力</li> <li>フェーズ2(2011~2021年:プラント詳細設計、建設、運転実証)には、官民連携や資金不足等のため移行せず、内容を縮小した研究開発プログラムとして継続実施中</li> <li>NGNP 産業連携機構(NIA; 炉メーカー、電力、化学、材料) (Areva、WH、Entergy、Dow、東炭)が独自に参照設計の選定(SC-HTGRを選定)、Idaho代替候補サイト(Louisiana州、Alberta州(加)等)も調査中。15年の許認可に向け準備中</li> </ul>
SC-HTGR: <Areva-USA> <仏国/米国>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ANTARES(仏)の米国NGNP向け改良版、熱電併給</li> <li>B型、UCO燃料、蒸気タービン、750℃</li> </ul>	
NPMC/ PBMR-GT-DB: 国家プロジェクト管理社 /ガスタービン超高燃 焼度高温炉 <NPMC/PBMR> <米国/南ア>	<ul style="list-style-type: none"> <li>米国内軽水炉使用済燃料処理&amp;処分(Pu、TRU等燃焼処理)、発電、水素製造、熱利用。南アPBMR技術をベースに、世銀からの融資等を活用</li> <li>プラント実証は南アKoebergで、機器製造&amp;実用化は米国で、P型</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2013年7月、小型モジュール炉(SMR)開発支援プログラムに申請済</li> <li>2013年:ニューヨーク(NY)州、同州Oswego市等が300M\$規模の資金拠出を確約</li> </ul>
Xe-100: <X-energy/ Aerotherm/ Stellenbosch大> <米国/南ア>	<ul style="list-style-type: none"> <li>米国内軽水炉使用済燃料の処理(Pu、TRU等を燃焼)、発電、水素製造、熱利用。南アPBMR技術をベースに、プラント実証は南アで、機器製造、実用化は米国で、</li> <li>南アKoeberg、P型、100MWt/50MWe/Md、850℃</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>南アの国策石炭ガス液化化会社(SASOL)の石炭ガス化(CTG)をモデルに適用性研究実施中</li> <li>2020年代半ばに実用化</li> </ul>

表2 「原型・実証・実用炉プログラム」一覧(2015年3月現在)(2/3)  
(対象:原子炉設置場所や開発資金など内容が具体化しているプログラム)  
(Md:モジュール、U:ウラン、Pu:プルトニウム、Th:トリウム、RE:レアアース、  
P型:ペブルベッド型、B型:ブロック型)

名称<機関、国>	目的、諸元	現状、将来計画
<b>PBMR:</b> <ESKOM/PBMR> <南ア>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ペブルベッド型高温ガス炉プラント実証。U燃料。発電、水素製造、熱利用(石炭ガス化&amp;液化、..)</li> <li>◆ Koeberg、P型</li> <li>◆ 発電向け: 400MWt/160MWe/Md、900℃</li> <li>◆ 熱利用向け: 200MWt/80MWe/Md、750℃</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 1993年~:概念設計、1995年~:詳細設計、2010年:財政難で開発プログラム中止</li> <li>◆ 各種開発試験施設や知的財産権を維持しつつ、その復活&amp;活用を模索中(TH-100(5-2項参照)、HTMR-100/25(5-3項参照)、NPMC/PBMR-GT/DB(1-2項参照)、Xe-100(1-3項参照))</li> </ul>
<b>HTR-PM200/600:</b> 高温ガス炉 ペブルベッドモジュール <華能石島湾原発 (=華能)/核建工/ 清華大> <中国> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 試験炉(HTR-10)の技術をベースに、高温炉プラントの実証&amp;実用化、P型</li> <li>◆ 実証炉: HTR-PM200、山東省榮成市石島湾、500MWt(=250MWt/Md×2Md)/210MWe/ユニット、750℃</li> <li>◆ 実用炉:HTR-PM600(=250MWt/Md×6Md)/600MWe/ユニット、750℃</li> </ul>	<HTR-PM200> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 燃料製造、蒸気発生器、燃料取扱系等のシステムを実証中</li> <li>◆ 福島原発事故後、安全性再評価</li> <li>◆ 2012年末:実証炉着工</li> <li>◆ 2017年末:運開予定</li> <li>◆ 専用燃料製造施設も建設中</li> </ul> <HTR-PM600> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 2014年:実証炉設計をベースに実用炉の概念設計を終了</li> </ul>
<b>HTGR 導入:</b> <核建工集団/ 莆田市&瑞金市> <中国>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 地方中核都市の経済発展計画(石炭&amp;石油改質、淡水化、雇用&amp;輸出振興等)の目玉としてHTGR導入</li> <li>◆ 福建省莆田市&amp;江西省瑞金市</li> <li>◆ 600MWe (HTR-PM600?)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 2013年:莆田市、瑞金市が夫々導入計画を発表</li> </ul>
<b>KHTR:</b> カザフ高温ガス炉 <国立原子力センター (NNC)> <カザフスタン> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 天然資源(U、RE、石炭..)輸出&amp;外国先進技術の導入&amp;国内定着。高温ガス炉開発(発電、地域暖房..)</li> <li>◆ B型</li> <li>◆ Kurchatov市</li> <li>◆ 50MWt/15MWe/Md、700(将来950)℃</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 日本(JAEA、東芝、富士電、原燃工)が全面協力中</li> <li>◆ 2015年~:成立性評価(予定)</li> <li>◆ 2023年以降:運開予定</li> <li>◆ フェーズ1:蒸気タービン発電、地域熱供給</li> <li>◆ フェーズ2:水素製造</li> </ul>

表2 「原型・実証・実用炉プログラム」一覧(2015年3月現在)(3/3)  
 (対象:原子炉設置場所や開発資金など内容が具体化しているプログラム)  
 (Md:モジュール、U:ウラン、Pu:プルトニウム、Th:トリウム、RE:レアアース、  
 P型:ペブルベッド型、B型:ブロック型)

名称<機関、国>	目的、諸元	現状、将来計画
MPPR (EPR/RGTT200K): 多目的炉 <原子力庁 (BATAN)> <インドネシア> [図9]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 資源(石炭、天然ガス、鉄                          鉱石、アルミ、ジルコニウ                          ム、Th等)を高付加価値                          化(資源輸出、海水淡水                          化、熱電併給炉実用化、                          海洋インフラ強化・・・)</li> <li>◆ P型、U燃料(将来はTh燃                          料も・・・)</li> <li>◆ <u>試験&amp;実証炉(EPR):</u>                          10-30MWt/3-10MWe</li> <li>◆ <u>BATAN Serpong 地区</u></li> <li>◆ <u>実用炉(RGTT200K):</u>                          200MWt/100MWe/Md</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 2007年/2010年～:国家エネ計画                          /中期計画で熱電併給炉開発を位                          置づけ、概念設計、プラント設置候補                          サイト調査開始</li> <li>◆ 2014年:JAEA(日)と協力協定締結</li> <li>◆ 中国、南ア/香港等とも協力協議中</li> <li>◆ 2020年:試験&amp;実証炉運開</li> <li>◆ 2031年:実用炉運開</li> </ul>

表3 「研究開発プログラム」一覧(2015年3月現在)(1/3)  
 (対象:「試験・研究炉」、「原型・実証・実用炉」以外の炉開発プログラム)

名称(機関、国)	目的、諸元	現状、将来計画
GT-MHR: ガスタービン Md 炉 <DOE/GA/ORNL/ Rosatom/OKBM> <米国/ロシア>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 核不拡散(核兵器解体余剰 Pu の焼却)、高効率ガスタービン発電</li> <li>◆ B 型、Pu 燃料</li> <li>◆ 600MWt/Md、850°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 1993~2013年:米ロ共研実施</li> <li>◆ 当技術をベースに、その後、米国では H2-MHR、SC-MHR、DB-MHR 等(1-1 項参照)に、ロシアでは MHR-T (=MGR-T)(3-2 項参照)に夫々発展中</li> </ul>
H2-MHR: 水素製造 Md 炉 <GA> <米国>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ GT-MHR 米国進展版。水素製造</li> <li>◆ B 型</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 米国 NGNP プログラム・フェーズ1(1-1 項参照)で設計提案済み</li> </ul>
SC-MHR: 蒸気サイクル Md 炉 <GA> <米国>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ GT-MHR 米国進展版。蒸気サイクル(発電、熱利用)</li> <li>◆ B 型</li> </ul>	
DB-MHR: 超高燃焼度 Md 炉 <GA> <米国>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ GT-MHR 米国進展版。核廃棄物管理(TRU 燃焼処理)、発電、熱利用、水素製造</li> <li>◆ B 型</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 概念設計検討済み</li> <li>&lt;当該技術を基に、別途、ガス冷却高速炉(GFR;EM2)につき設計検討中&gt;</li> </ul>
SPB: スターコア ペブルベッド炉 <StarCore/Areva> <カナダ/ 仏国/米国> [図 10]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 遠隔地・寒冷地・分散需要(鉱山、小都市、戦略基地…)</li> <li>◆ 地下炉心、通信衛星利用遠隔運転、プラントリース式</li> <li>◆ 30MWt/10MWe/Md</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ カナダ原安委宛に予備的設計認可申請済</li> <li>◆ 2015年に初期展開を計画中</li> <li>◆ Areva(仏/米)との連携展開開始中</li> </ul>
GT-MHR: <Rosatom/OKBM> <ロシア>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ GT-MHR(米ロ共研)のロシア進展版</li> <li>◆ B 型、Pu 燃料</li> <li>◆ 600MWt/Md、850°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 被覆粒子燃料製造、ターボ機器等開発実証試験中。ロシア圏市場評価中</li> <li>◆ カザフスタン、インドネシアに協力中</li> <li>&lt;当該技術をベースに、将来はガス冷却高速炉(GFR)開発に繋ぐ構想&gt;</li> </ul>
MHR-T(=MGR-T): <Rosatom/OKBM> <ロシア>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ MHR-GT(ガスタービン発電)、-OR(原油精製)、-SMC(水蒸気メタン改質法水素製造)、-HTE(高温水蒸気電解法水素製造)</li> <li>◆ B 型、U 燃料</li> <li>◆ 600MWt/Md、950°C</li> </ul>	

表3 「研究開発プログラム」一覧(2015年3月現在)(Md:モジュール)(2/3)

(対象:「試験・研究炉」、「原型・実証・実用炉」以外の炉開発プログラム)

名称(機関、国)	目的、諸元	現状、将来計画
SNE-TP: 持続的原子力技術 プラットフォーム <EC> <EU>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 欧州共同戦略展開、原子力技術共同開発基盤の整理、構築</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 欧州共通の原子力開発目標、戦略、要件等につき共同研究中(原子炉型、顧客要件調査、国際実証炉設置可能性の検討…)</li> <li>◆ プロセス熱利用/水素製造/発電向け原子炉(RAPHAEL)、プロセス熱利用最終顧客要件調査評価(EUROPAIRS)、熱電併給向け先進炉研究開発(ARCHER)等の成果を引継いで活動中。米国 NGNP 産業連携機構(NIA)とも連携開始</li> </ul>
NC21R: 原子力併給産業 イニシアティブ <EC> <EU> [図 11]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 原子力熱電併給の実証に向けた活動。欧州内に国際実証プラント設置(構想)</li> </ul>	
ANTARES: エネ供給用新型ガス 冷却炉 Areva 新技術 <Areva> <フランス>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 高温ガス炉(発電、水素製造、熱利用)開発</li> <li>◆ B 型</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Areva-USA が米国 NGNP プログラムに向けて ANTARES 進展版(SC-HTGR)設計を提案済み(NGNP 連携機構により当面の NGNP 実証炉向け最適プラント設計として選定)(1-1 項参照)</li> </ul>
HTR-PL: ポーランド高温炉 <AGH/NCBIR> <ポーランド>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 国内での高温炉建設の可能性調査</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 鉱業・冶金アカデミー(AGH)、国立開発センター(NCBIR)、国立原研センター(NCBI)が管理調整、資金提供等で協力中</li> </ul>
TH-100: <STL> <南ア> [図 12]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Th 資源(RE 採掘の副産物)活用。PBMR の Th 燃料版</li> <li>◆ 開発&amp;実用化は南ア&amp;米国で…</li> <li>◆ P 型、100MWt/35MWe/Md、750℃</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 2011 年:プログラム立上げ、概念設計、2012 年~:開発推進に向けてコンソーシアム設立中</li> <li>◆ 2014 年~:Th 燃料商業生産製造施設概念設計</li> <li>◆ 2022 年:初号機運開(予定)</li> <li>◆ (HTMR-100/25 項参照)</li> </ul>
HTMR-100/25: 高温モジュール炉 <HTMR> <南ア/香港>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ TH-100(南ア)のアジア向け改良版</li> <li>◆ P 型、半地下立地</li> <li>◆ 発電用:HTMR-100、100MWt/35MWe/Md、LEU、Th/LEU または Th/Pu 燃料、750℃</li> <li>◆ 熱電併給用:HTMR-25、25MWt/5MWe/Md、750℃</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ STL(南ア)、Neopanora 他が合弁会社 HTMR 社を設立</li> <li>◆ HTMR シリーズ設計開発中</li> <li>◆ インドネシアの多目的炉(MPPR)開発計画に向けて炉設計採用等を提案中</li> </ul>

表3 「研究開発プログラム」一覧(2015年3月現在)(Md:モジュール)(3/3)  
 (対象:「試験・研究炉」、「原型・実証・実用炉」以外の炉開発プログラム)

名称(機関、国)	目的、諸元	現状、将来計画
NHDD: 原子力水素開発& 実証 <KAERI> <韓国> [図 13]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 国家戦略として水素エネ開発</li> <li>◆ 原子力による水、水素、電力生産の開発実証</li> <li>◆ B型</li> <li>◆ 200MWt/Md、750(将来950)℃</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 韓国先進科研院(KAIST)、エネ技研院(KIER)が協力中</li> <li>◆ 電力、重工、製鉄等(KEPCO、Hyundai、POSCO等)が連携参加中。2013年～:米国NGNP連携機構(NIA)も連携参加</li> <li>◆ 2028年～:プラント実証&amp;運転</li> </ul>
GTHTTR300: ガスタービン高温炉 <JAEA> <日本>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ガスタービンサイクル高温ガス炉(-X:発電用、-C:熱電併給用、-H:水素製造用、-A:全乾式プラント)</li> <li>◆ B型、U燃料</li> <li>◆ 600MWt/Md、850℃</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 一連のプラント設計につき、概念設計、経済性評価等実施中</li> <li>◆ HTTRを用いて過酷事故時の炉安全性につき実証試験中(10-1項参照)</li> </ul>
HTR50S: 蒸気サイクル小型高温ガス炉 <JAEA/東芝・・> <日本> [図 14]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 途上国向け多目的小型高温炉開発(発電用、蒸気供給用)</li> <li>◆ B型、U燃料</li> <li>◆ 第1～第2段階:50MWt/(13.5～17.2MWe)/Md、750℃</li> <li>◆ 将来: 50MWt/(10.3MWe(ST)+6.9MWe(GT))/Md</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 概念設計(基本仕様、系統概念)検討済み。市場性、経済性検討中</li> </ul>
NSHTR: 本質的安全高温ガス炉 <JAEA> <日本> [図 15, 16]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 自然の物理現象(熱伝導、対流、輻射、減速材温度効果・・)のみで安全性を確保</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 概念設計、耐酸化性燃料&amp;黒鉛材料開発中</li> </ul>
CBHTR: クリーンバーン高温炉 <JAEA> <日本>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 軽水炉使用済燃料からのPu焼却処理</li> <li>◆ Pu燃料</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 概念設計中</li> </ul>
MHR-50/100: 三菱高温ガス炉 <三菱重工/ JAEA> <日本>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 発電用小型高温ガス炉</li> <li>◆ U燃料</li> <li>◆ 初号基: 120MWt/50MWe/Md</li> <li>◆ 商用基: 250MWt/100MWe/Md、750℃</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 概念設計、市場性、経済性検討済み。ビジネスプラン等検討中</li> </ul>



(JAEA HP)

図1 (日本)高温工学試験研究炉 HTTR

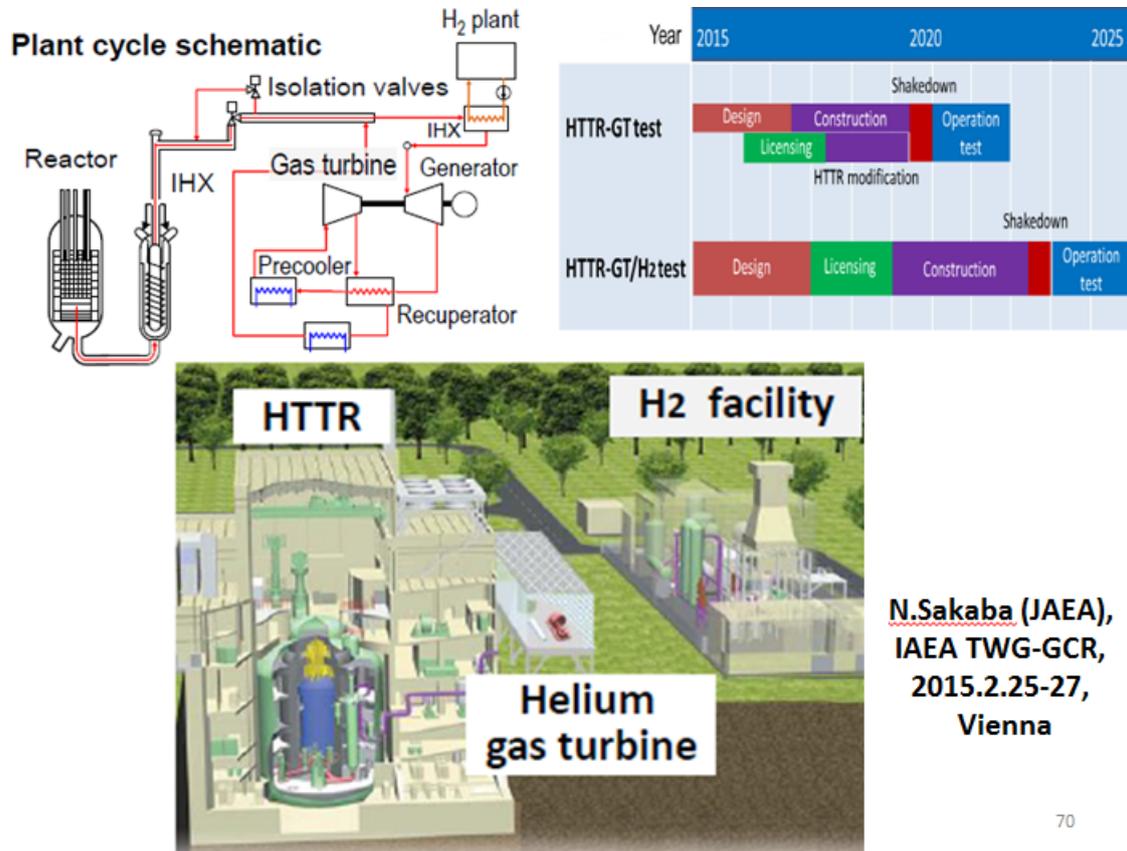
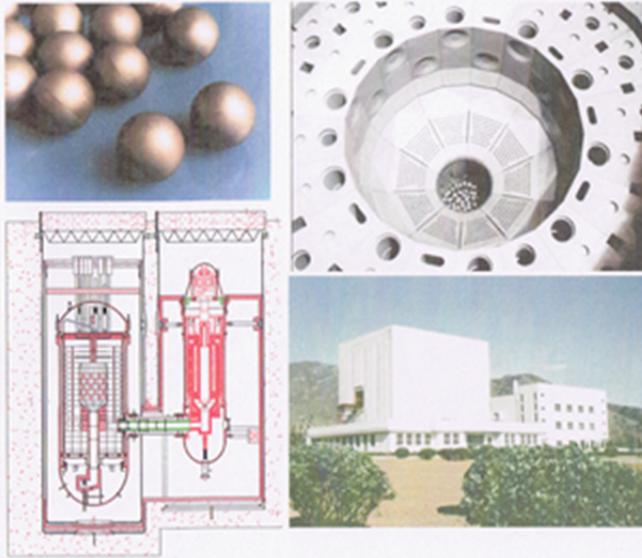


図2 (日本)HTTR ガスタービン/水素製造試験計画(HTTR-GT/H<sub>2</sub>)

# HTGR Development: HTR-10

Reactor Power, MWth	10
Pressure, MPa	3
Reactor Inlet Temp., °C	250
Reactor Outlet Temp., °C	700
Fuel Elements in Core	27000

INET



(Sun Yuliang (INET), "Potential Contributions of Modular HTGRs to Energy Supplies in China", IAEA Technical Meeting on Options to enhance Energy Supply Security with NPPs based on SMRs, Oct.3-6, 2011, IAEA, Vienna)

图 3 (中国)高温試驗炉(HTR-10)

## Design Approach

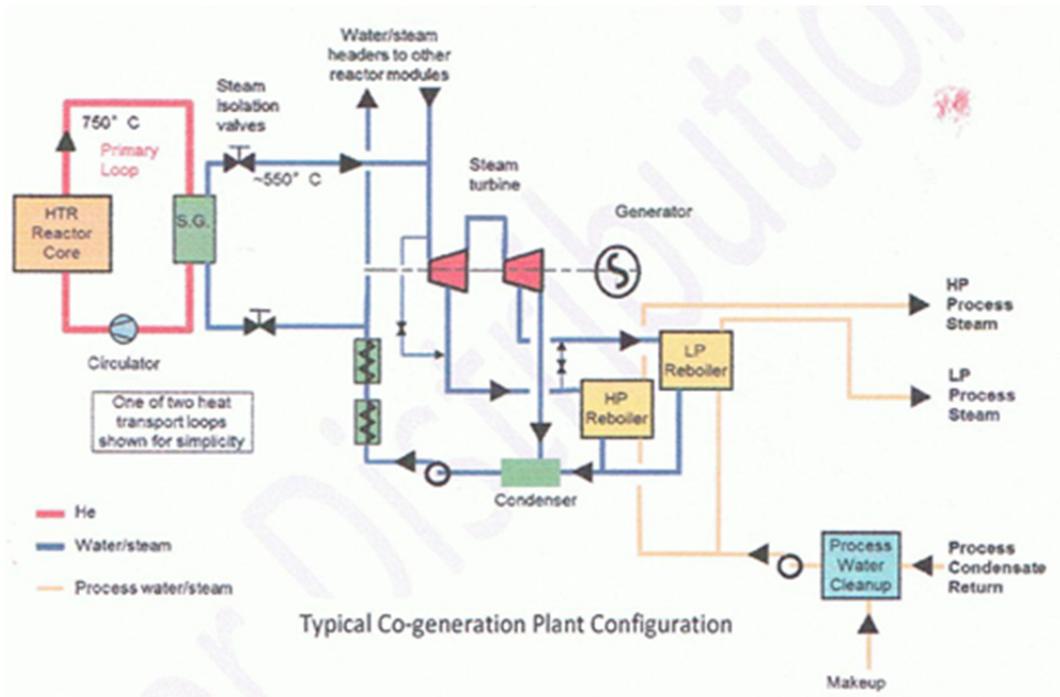
**625 MW(t)**

- Passive safety features
  - Negative temperature coefficient reduces reactivity as temperature rises
  - Helium coolant
    - Non-moderating
    - Gaseous phase during all conditions
    - Radioactively & chemically inert (can be carrier gas)
  - Ceramic coated-particle fuel
    - Maintains structural integrity during LOCA
    - Contains fission products during normal operation
  - Low power density (5.8-6.6 w/cc)
    - Maintain acceptable temperatures during normal operation and accidents
  - Annular graphite core with high heat capacity
    - Limits fuel temperature during LOCA (1600°C)
    - High temperature structural stability (Graphite sublimates ~3700°C)
    - High thermal inertia - long temperature rise time for LOCA
  - Cool reactor vessel & metallic internals with core inlet gas

12

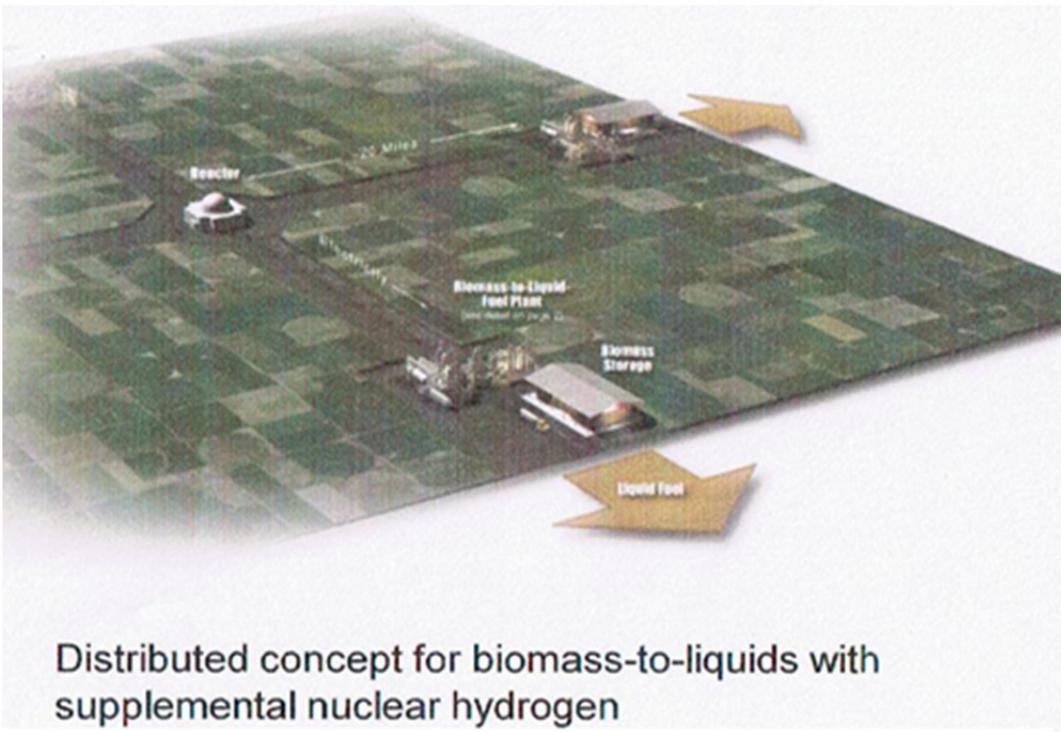
(M.Haynes (NGNP Industry Alliance), Presentation to The Governor's Nuclear Advisory Council, 2013.6.13)

图 4 (米国)次世代原子カプラント(NGNP)向け Areva 設計 SC-HTGR 炉



(Summary Decision Paper – Reference Modular HTGR Reactor Design Concept and Plant Configuration for Initial Applications, NGNP Industrial Alliance, 2012.2.7)

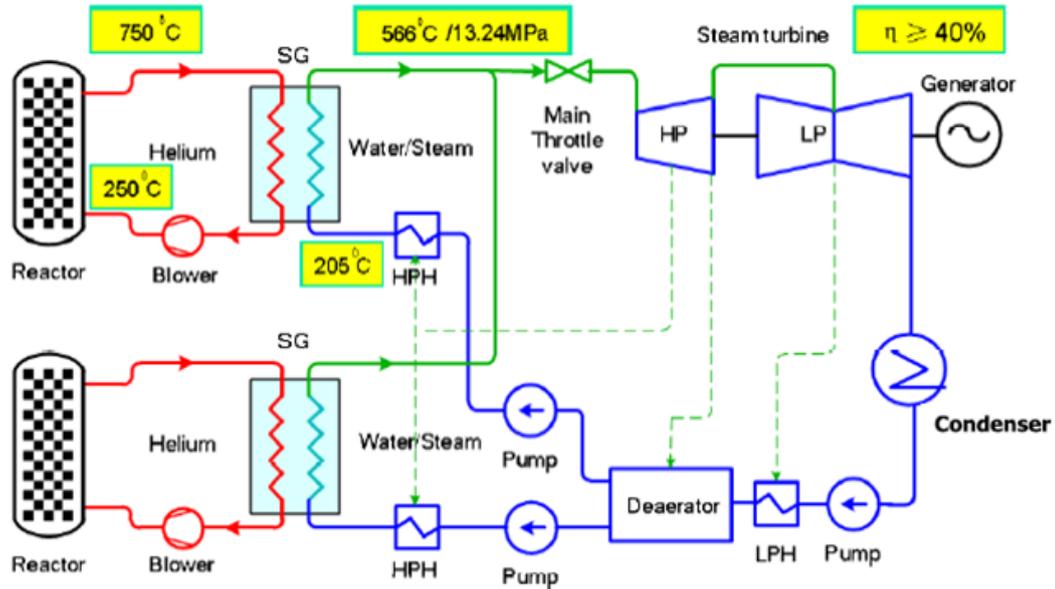
図 5 (米国)次世代原子カプラント(NGNP)熱電併給参照プラント構成



(J.O'Brien, INL; VHTR R&D FY12 Tech. Review Mtg, 2012.5.22-24, Salt Lake City)

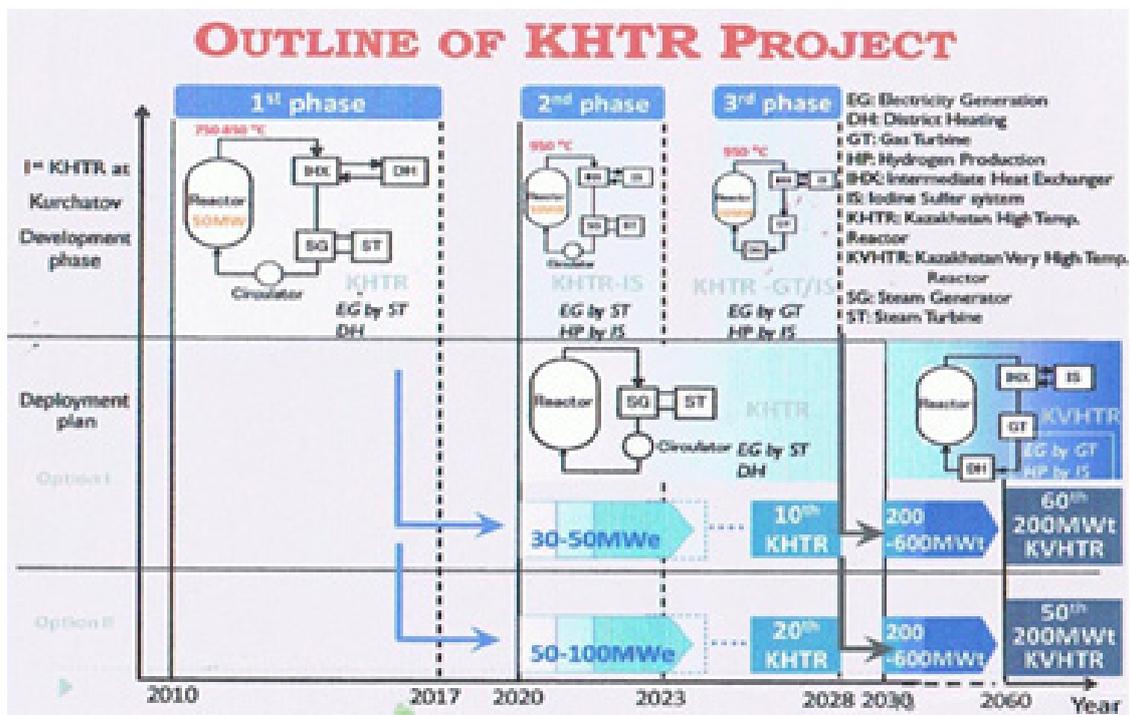
図 6 (米国)次世代原子カプラント(NGNP)水素&バイオ液化燃料供給概念

# HTR-PM: Plant Process Flow



(Sun, Y. (INET), "Potential Contribution of Modular HTGRs to Energy Supply in China", 2011.10.3.6, IAEA, Vienna)

図7 (中国)HTR-PM 実証炉プロセスフロー



(I.Tazhibayeva (NTSC), Tech. Mtg. on Safety of HTGRs In the light of Fukushima Daiichi Accident, 2014.4.8-11, IAEA, Vienna)

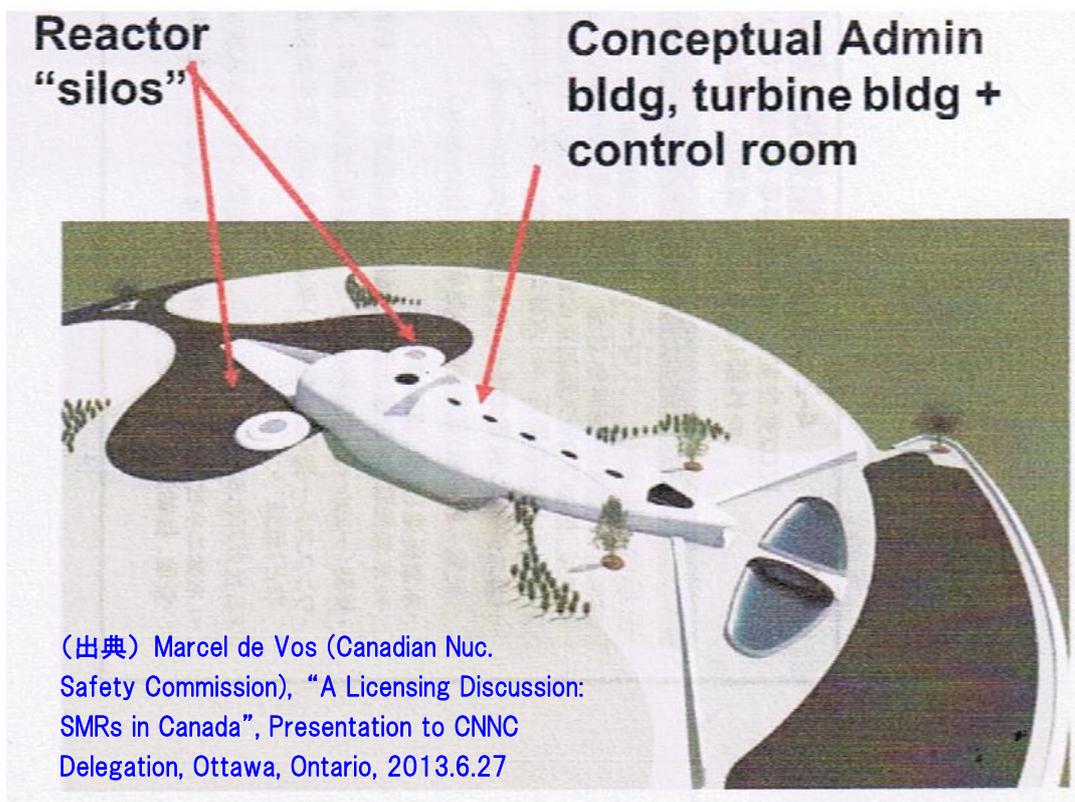
図8 (カザフスタン)高温炉(KHTR)プロジェクト概要

The potential site for heat application:



(G.R.Sunayo, IAEA TM on Hi. Temp. Qualification of HTGR Materials, 2014.6.10-13, IAEA, Vienna)

図 9 (インドネシア)原子力熱利用潜在サイト



(出典) Marcel de Vos (Canadian Nuc. Safety Commission), "A Licensing Discussion: SMRs in Canada", Presentation to CNCC Delegation, Ottawa, Ontario, 2013.6.27

図 10 (カナダ)スターコアペブルベッド炉(SPB)プラント概念

# Background: 17 years of EU HTR R&D

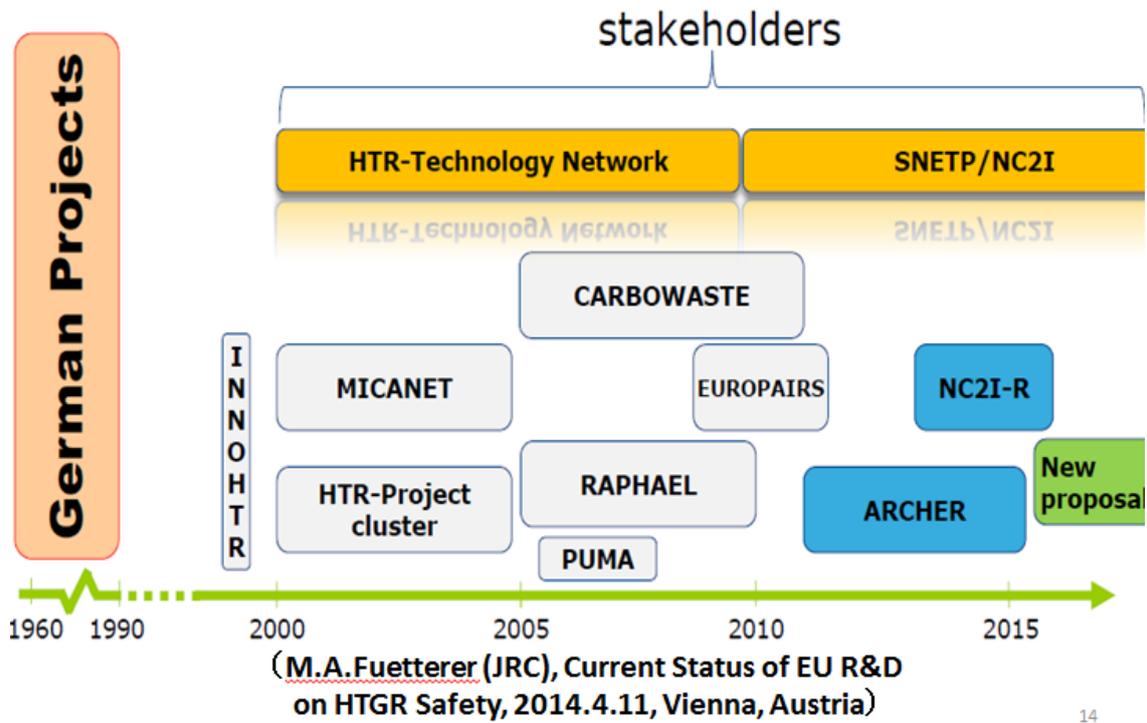


図 11 (欧州連合)高温炉研究開発の流れ(原子力熱電併給 NC21 など)

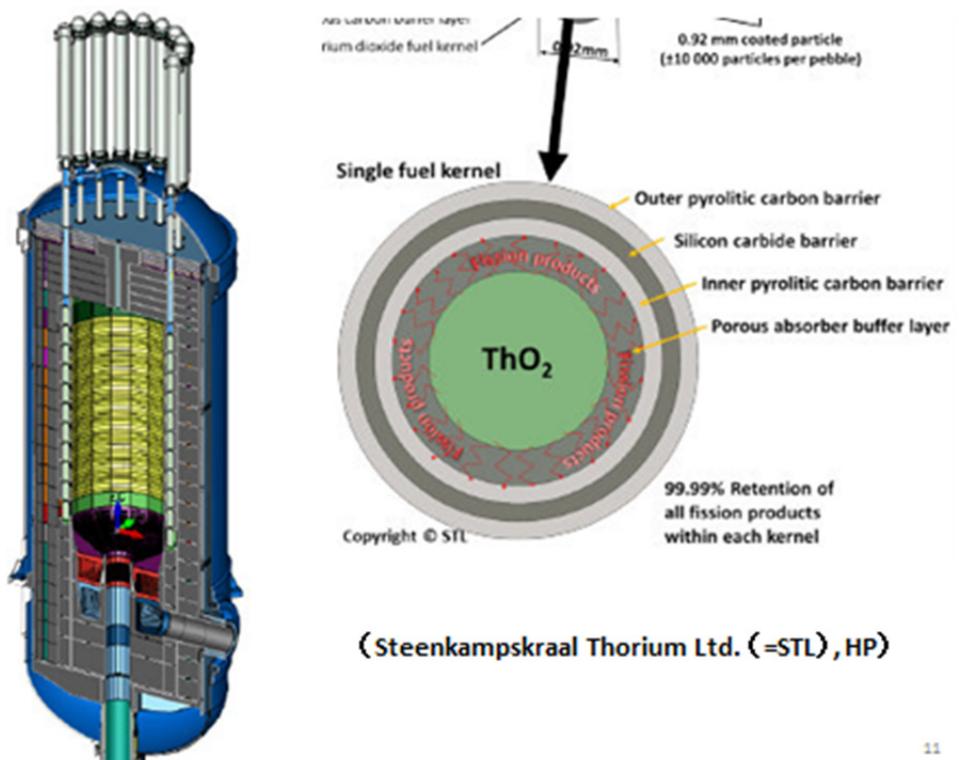
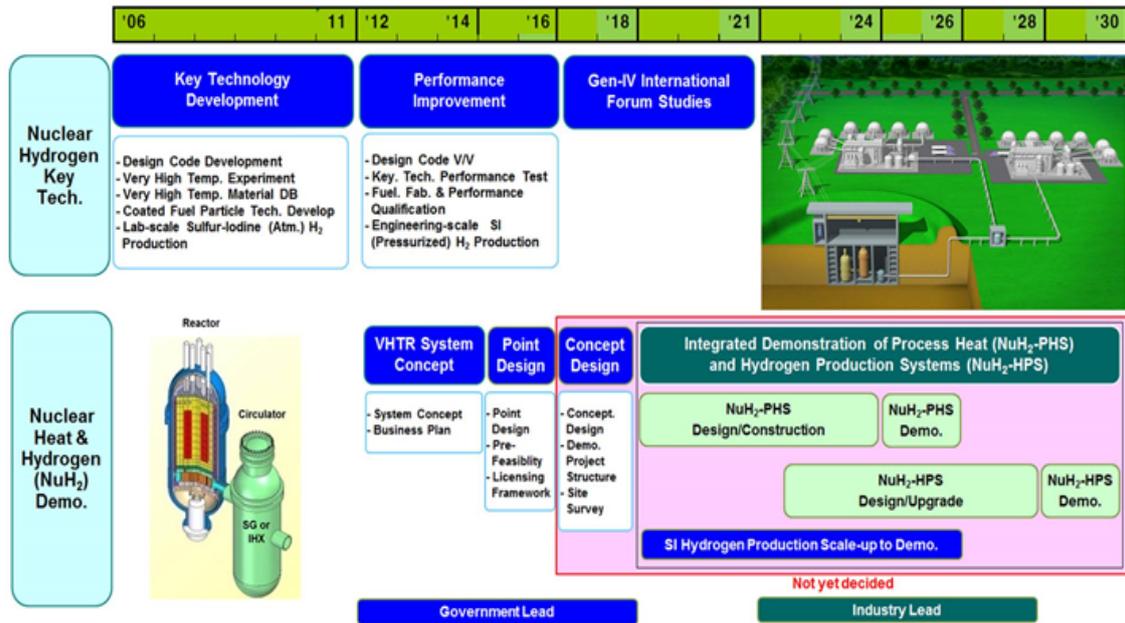


図 12(南アフリカ)トリウム燃料高温ガス炉(TH-100)



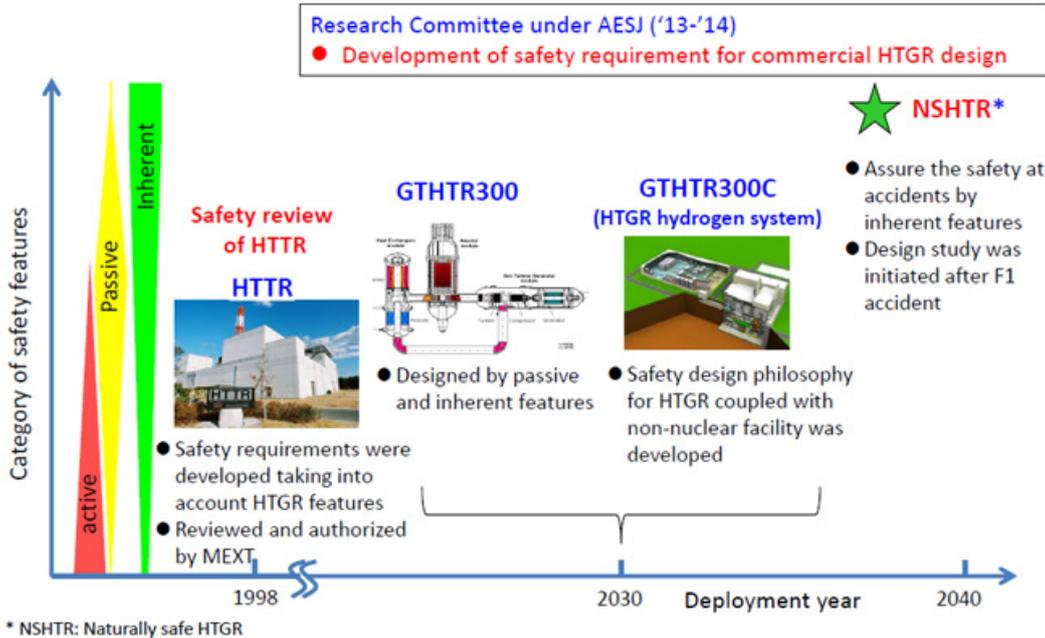
(Eung-Seon Kim (KAERI), "Status of HTGR R&D in Korea, IAEA TM on Hi. Temp. Qualification of HTGR Materials", 2014.6-10-13, Vienna, Austria)  
(Revised 2015.1)

図 13 (韓国)原子力水素開発アクションプラン



H.Ohashi, Status of HTR Project in JAEA, TM on Safety of HTGRs in the light of Fukushima Daiichi Accident, 2014.4.7-11, IAEA, Vienna

図 14 (日本)小型熱電併給高温炉(HTR50S)プラント配置



(H.Ohashi (JAEA), Status of HTTR Project in JAEA, TM on the Safety of HTGRs in the light of Fukushima Daiichi Accident, 2014.4.8-11, Vienna, Austria)

図 15 (日本)高温ガス炉安全性研究開発の流れ(NSHTR など)

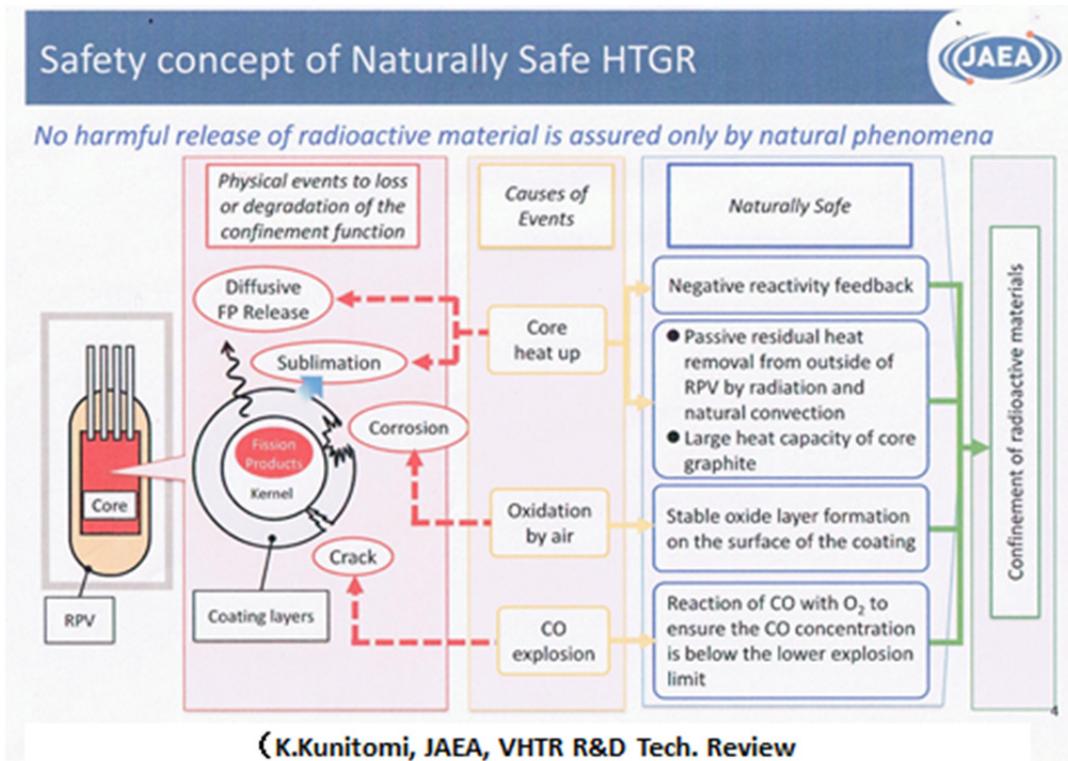


図 16 (日本)本質的安全高温炉(NSHTR)の安全概念