

2007 年 3 月

RAHP ニュースレター *No.9*

世界の高温ガス炉開発の 現状と将来計画

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、高温ガス炉(HTGR)開発に関するPA活動の一環として、高温ガス炉プラント研究会(RAHP)が1999年3月以来、毎年定期的に発行しているもので、世界の高温ガス炉開発の最新状況と将来計画の概要を示すものである。

現在、日本、中国で試験炉による開発が、並びに南アフリカ、中国、米国・ロシア等で電気出力で150～300MW級の発電用小型モジュール・ガスタービン型高温ガス炉の2010年代の実用化に向けた原型炉・実証炉開発が推進されている。また南アフリカ、米国、欧州等で高温ガス炉の発展形である超高温ガス炉(VHTR)による2010年代の水素製造、並びに各種熱利用開発に関連する新しい動きが顕著になって来た。

以下に最近の重要な動向を中心に概述する。

■ 2006年現在の状況 ^{(1)～(3)}

(1) 日本

我国では、日本原子力研究開発機構(JAEA、以下、「旧原研」という。)が建設した高温工学試験研究炉(HTTR)が1998年に初臨界に達し、1999年に出力上昇試験を開始、2001年に定格出力30MW_t(原子炉出口温度850℃)を達成した。その後、定格運転、安全性実証試験等を実施しており、2004年に短期間ながら世界に先駆けて950℃を達成した。また、原型炉(発電用GTHTR-300、発電・水素併給用GTHTR-300C、水素専用GTHTR-300H)の概念設計が進行している。利用系では、二酸化炭素を排出しない水素製造技術として高温熱化学法(ISプロセス)の開発実証研究を進めており、2004年6月に31リットル/時、1週間の水素連続製造に成功した。また、次のステップであるISプロセスのパイロットプラントの検討を開始している。その後、HTTRへISプロセスを接続する計画としている。

高温ガス炉プラント研究会(RAHP)、日本原子力産業協会(JAIF)、日本原子力学会、官庁等では、実用化を目指す高温ガス炉や原子力水素の調査・検討が行なわれている。原子力委員会では、2001年度から研究開発専門部会が設置され、その下に小型高温ガス炉を含めた革新的原子炉に関する検討会を設置し開発政策の検討を行い報告書としてまとめた。

また、2001年1月に電力、ガス会社、旧原研等広い分野の有識者による原子力水素研究会が発足し、水素の製造・利用に関する調査・研究を開始している。

(2) 中国

国家計画に基づいて、発電、ならびに石炭改質(ガス化、液化：合成ガソリン製造)、

地域熱供給、海水淡水化、水素製造等の各種の熱利用を含めた「多目的利用高温ガス炉」の開発を進めている。

2006 年に策定された「第 11 次国民経済・社会発展 5 カ年長期計画(2006～2010 年)」にも加圧水型軽水炉(PWR)と並んで高温ガス炉の開発が含まれている。

1990 年代から清華大学が「高温ガス炉試験炉(HTR-10)プログラム」(10MWt/2.6MWe、フェーズ1(～2005 年)で蒸気タービンサイクル、700℃;フェーズ 2(2006 年～)でヘリウムガスサイクル、900℃)を進めているが、最近は、その実績をベースに、華能集团公司、核工業集团公司(CNEC)、清華大学が共同で核電有限公司を設立し、「高温ガス炉ペブルベッドモジュール(HTR-PM)」(458MWt/195MWe、当面は蒸気タービン発電、700℃)実用化計画にも着手している。

但し、現在、発電用と熱利用の需要規模見通し、プラント性能等につき全体的な見直しを行っており、実証炉の着工、運開は、非公式ながらこれまでの 2007 年、2010 年から 2008～2009 年、2013～2015 年頃にずれ込む見通し、としている。サイトは山東省である。

実証炉に続く「実用炉」については、先ず同地区に、2020 年までに計 18 基を順次設置し、その後、内陸部を含む中国全土に展開していく計画は変わっていない。

(3) 南アフリカ

今、エネルギー需要(発電、熱利用)の増大に直面しており、原子力による対応戦略につき再検討中である。

先ず急増中の電力需要に対して、急いで調達できる大容量の原子力発電が必要となっており、南ア原子力公社(NACSA)は、これまで国営電力(ESKOM)／PBMR が開発してきた高温ガス炉(PBMR、900℃、400MWt、165MWe)の新規設置か軽水炉(PWR)増設で賄いたいと考えて、現在ケーススタディを実施中。一方、同政府とPBMRプログラムに参加している米国 WH は、同国北部にある豊富な石炭資源の改質(ガス化、液化;合成燃料製造)、インド洋沖合いで採掘が始まった天然ガスの改質(水素製造等)、並びに水素製造等に対して、PBMR 熱利用専用炉(PHP、950℃、500MWt)の適用可能性につき、プラント構成、水素製造法の検討や市場性調査を鋭意開始している。

PBMR の実証炉については、現在、同国内に設置した燃料製造試験施設、ヘリウム試験施設(HTF)、動力変換系マイクロモデル施設(PBMM)等により、技術的な開発詰めや運転訓練等を行っている。2007 年中に最終決断、Koeberg 地区に 2008 年着工、2012 年運開、また同実用炉は同地区に計 24 基、2015 年以降順次運開、また PHP 実用炉は、2015～2016 年以降、需要地近くに順次設置、運開の予定である。

(4) 米国

米国では、エネルギーセキュリティと地球温暖化防止の観点から、エネルギー省(DOE)が中心となって、「次世代原子力プラントプログラム(NGNP)」として「超高温ガス炉(VHTR)」による「発電」ならびに「水素製造」開発を進めている。

この炉は、同 DOE が主導し、日、欧、中、南ア等も参加している「第 4 世代炉プログラム国際フォーラム(GIF)」が開発を推奨している6炉型のうちの1つであり、かつ米国自身が今後の最優先開発対象に選んでおり、2005 年 8 月に成立した「エネルギー政策法(EPACT-2005)」の目玉の1つにもなっている。

上記の政策法によると、この NGNP プログラムでは、DOE が米国の産業界や外国機関の参加・協力を得ながら、アイダホにおいて、「フェーズ1(～2011 年)」で研究開発ならびにプラント設計、「フェーズ 2(2012～2021 年)」でプラント建設、運転、ならびに発電・水素供給実証を行う、としている。

2006 年 2 月、DOE が、原子力の国際的展開、核廃棄物(使用済燃料や超ウラン元素)発生量低減、ならびに核不拡散の観点から、国際協力による「新型焼却炉(ABR)」の開発や途上国向け「小型炉」の開発を盛り込んだ「国際原子力パートナーシップ(GNEP)」を新たに発表して以来、上記 NGNP との相対的位置付けや今後の DOE 予算配分等につき不透明さが生じた。

しかし、エネルギー省(DOE)/アイダホ国立研究所(INL)は同 7 月に米国内産業界に対して NGNP(2016 年着工、2021 年運転)の予備的概念設計を公募し、応募していた 6 社の内、WH、AREVA、GA の計 3 社との間で、9 月 28 日、契約を締結することが決まった。

契約期間は 2007 年 9 月末までの 1 年間、総予算は 8M\$であり、WH は NGNP の予備的概念設計(Pre-conceptual design)を、また AREVA と GA はその補完的工学研究(Complementary engineering studies)を行う。これらは、今後の数年間にわたる研究開発内容を決定するに足る幅広い技術的入力を与え、それに続く設計作業への技術的、機能的な仕様の確立に繋げていくことになる。

なお上記 3 社はそれぞれ、米国内外の機関とコンソーシアムを組んで、各業務への取組みを開始する。

(5) フランス

軽水炉、高速炉を開発しているが、別途、ガス炉開発路線(高温ガス炉(HTGR)→超高温ガス炉(VHTR)→ガス冷却高速炉(GFR))を推進中。AREVA は増えつつある発電、並びに水素製造を含む 1,000℃程度の高温から低温までの種々の熱利用需要に向けて、2003 年より、EU 諸国の協力を得ながらも自費で高温ガス炉(ANTARES、間接サイクル、850℃(将来は 1,000℃)、600MWt、280MWe)開発

に取り組んでいる。三菱重工(日)が設計検討に参画している。

小型空気ループ(CLAIRE、850℃(後で 950℃にする))、多目的ヘリウムループ(HELITE、850℃、2009 年運開)、実規模大型ヘリウム機器試験施設を用いながら、幾つか可能性のある技術につき調査開発中。

(6) 欧州連合(EU)

同域内での高温ガス炉の立ち上げを目的に、加盟国による共同分担開発、並びに「欧州高温ガス炉ネットワーク(HTRTN)」活動を実施中である。また HTTR(日)、HTR-10(中)とも協力契約を結んでいる。

(7) その他

米国が中心となって進められている前出の第 4 世代炉開発国際フォーラム(GIF)では、参加 10 カ国が協議し、2030 年代までに開発する新型炉候補として 6 概念が選定されたが、その中にガス冷却炉として高温ガス炉の技術を活用する VHTR と GFR の 2 つの概念が含まれた。現在、参加国間の具体的な研究開発協力について議論が進められている。

以上の概要を添付表に示す。

■ 情報源

- (1) ICAPP-2006(2006.6、リノ、米国)
- (2) ICONE-2006(2006.7、マイアミ、米国)
- (3) OECD/NEA 高温ガス炉国際会議(HTR-2006)(2006.10、南アフリカ、ヨハネスブルグ)

■ 本ニュースレターに関する質問、問合せ先

(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

■ 略語

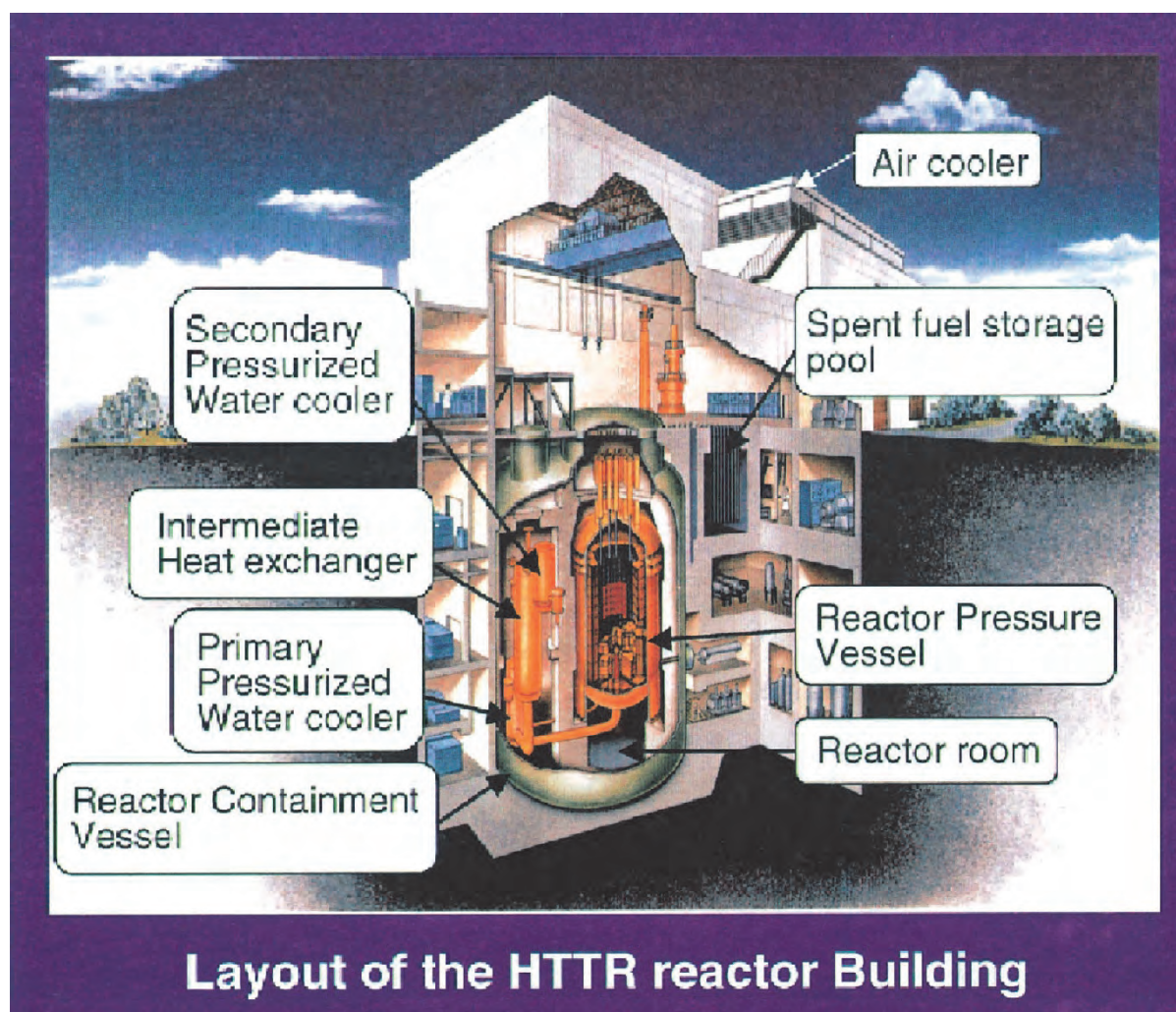
CEA	：	フランス原子力庁
DOE	：	米国エネルギー省

GA	: ゼネラルアトミック社(米国)
GHTRN	: IAEA／EU 国際高温ガス炉研究開発ネットワーク
GIF	: 第四世代開発国際フォーラム
GTHTTR300(C,H)	: ガスタービン・モジュール型ヘリウム冷却炉(電力・水素併産用、水素生産用)
HTR-10	: 高温ガス炉試験炉(中国)
HTR-PM	: 高温ガス炉ペブルベッド・モジュール(中国)
HTTR	: 高温工学試験研究炉(JAEA)
IAE	: (財)エネルギー総合工学研究所
IDC	: 産業開発公社(南アフリカ)
INET	: 清華大学原子力・新エネルギー研究院(中国)
JAEA	: (独)日本原子力研究開発機構
JAERI	: 日本原子力研究所
JAIF	: (社)日本原子力産業協会
MINATOM	: ロシア原子力省
OKBM	: OKB メカニカルエンジニアリング(ロシア)
PBMR	: ペブルベッド・モジュール型高温ガス炉(南アフリカ)
PHP	: プロセス熱利用専用 PBMR(南アフリカ)
RAHP	: 高温ガス炉プラント研究会

各 国 状 況

国・地域	炉・Project	状 況
日本	HTTR(旧原研) ： 30MWt ： ブロック型 ： 試験炉	◆ 1998 年に初臨界、2001 年に 30MWt、850℃運転達成。2004 年に 950℃を達成。(図 1) ◆ 旧原研は文科省委託研究で原型炉 GTHTTR-300 システムと水素製造システムを開発中。 ◆ IS 法による連続水素製造に成功。 ◆ 2004 年度から IS パイロットプラントの研究に着手。 ◆ 2001 年度、ガスタービンプラント(発電用、発電・水素併給用又は水素専用)の開発研究を開始。(図 2)
	GTHTTR-300、 GTHTTR-300C、 GTHTTR-300H (旧原研) ： 600MWt ： ブロック型	
中国	HTR-10 (清華大) ： 10 MWt ： ペブル型 ： 試験炉	◆ 2000 年に初臨界達成。2003 年に全出力・初発電を達成。安全性実証試験を実施中。(図 3) ◆ HTR-10 Phase-1 計画(蒸気タービンサイクル、HTR-10ST)を推進するとともに、同 Phase-2 計画(ガスタービンサイクル、HTR-10GT)をロシア OKBM と共同検討中。(図 3) ◆ 2004 年、華能集団、清華大学等で、実証炉・実用炉 HTR-PM 建設のための新組織(核電有限公司)を設立。
	HTR-PM ： 実証炉・実用炉 ： 458MWt、195MWe	
南アフリカ	PBMR (ESKOM) ： 原型炉・商用炉 ： 400MWt、165MWe ： ペブル型	◆ 1999 年に基本設計終了、安全解析書(rev.0)完成、PBMR 保有会社を設立。 ◆ PBMR 社、原型炉建設の意志を表明。2008 年着工、2011 年完成、2013 年運転を予定。 ◆ 2003 年 6 月 DEAT(環境・観光省)が PBMR の原型炉建設と燃料の製造・輸送につき環境影響評価評定記録(ROD)を発行。 ◆ 2004 年、政府は技術開発予算 80M\$を承認。(図 4) ◆ 2004 年、熱利用専用炉についても、実験炉、商業炉の検討を開始。 ◆ 2006 年 PBMR 社、米国アイダホプロジェクトへ参画。
	PHP 熱利用専用 PBMR ： 500MWt ： ペブル型	

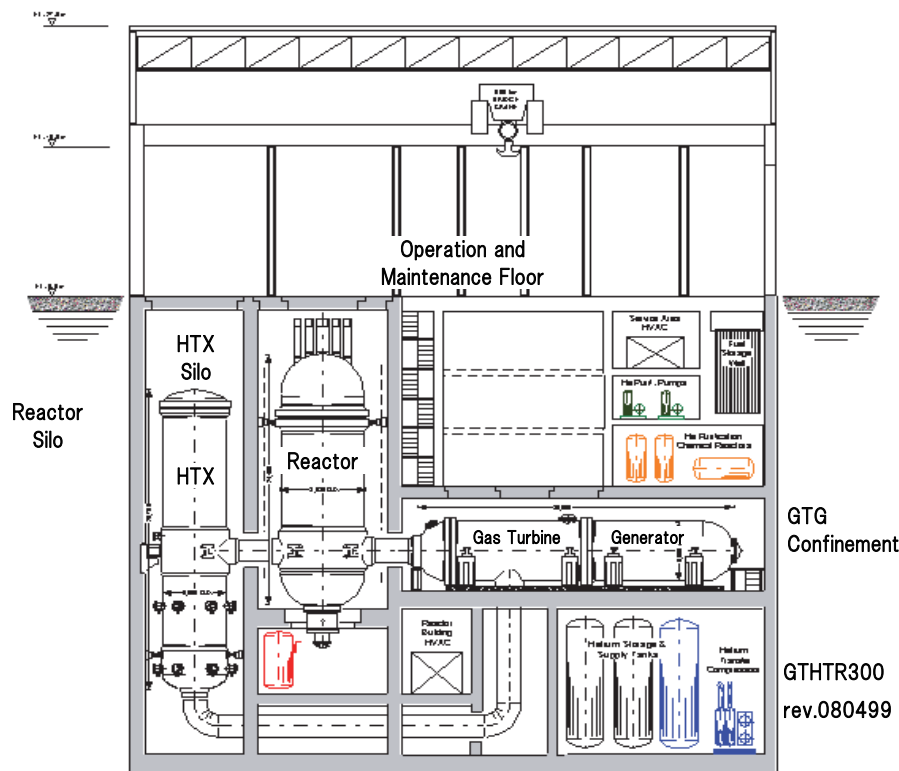
国・地域	炉・Project	状 況
米国	PBMR ： ペブル型 ： 発電用実用炉	- Exelon 電力は 2001 年 1 月、7 モジュールの PBMR を南アから導入する計画を公表、NRC と協議を進めていたが 2002 年 4 月、PBMR の資本参加から撤退を表明。 - WH が 2006 年より PBMR(南ア)に資本参加。 - DOE が「第4世代炉(Gen.IV)プログラム」、「原子力研究開発(NERI)イニシアティブ」、「国際原子力研究開発(INERI)イニシアティブ」、「原子力水素製造イニシアティブ」、次世代原子力プラント(NGNP)等を発表。 2005 年 8 月に「エネルギー政策法」を成立させ、発電／水素併給可能な新型炉プラント(＝超高温ガス炉：VHTR)をアイダホに設置して、2021 年までに実証する計画(NGNP)を推進中である。 - WH、AREVA、GA は、日本のメーカ等と組んで NGNP 予備的概念設計を実施。
	NGNP(＝VHTR) ： 発電・水素併給 実証炉	
	H2-MHR ： 水素併給実用炉	
フランス	高温ガス炉	AREVA グループ(CEA、Framatome、EDF 他)が革新炉開発をガス冷却炉に集中して開発すると表明。その中で高温ガス炉は短期実用炉として位置付け。
	超高温ガス炉	
	ガス冷却高速炉	
欧州(EU)	HTRTN ： 研究開発ネットワーク	- 域内での高温ガス炉立ち上げを目的に共同分担研究開発、並びに「HTRTN」活動を実施中。 - 日本(HTR)、中国(HTR-10)等とも協力契約を締結。 - 上記に加え、独・蘭などが個別に南ア PBMR 計画に詳細設計パートナーとして参加協力中。
IAEA- OECD/NEA	GHTRN 開発計画評価、 情報交換 途上国支援 先進国による 開発戦略検討等	- 国際高温ガス炉研究開発ネットワーク(GHTRN)を開設、運用中。 - 南アフリカ PBMR 計画の技術性、経済性、核不拡散性の評価実施。 - 高温ガス炉、原子力水素製造に関する国際会議を定期開催。
その他(研究 グループ等)	調査、研究	- 小型炉を中心とした最近の高温ガス炉開発計画に先進国並びに途上国が興味を持ち、調査、評価、国際協力参加、開発戦略検討等を開始中。 - 日本でも現在 RAHP、日本原子力産業協会等で、高温ガス炉の調査、検討が行われている。 2001 年、旧原研、電力、ガス会社等が参加した原子力水素研究会が発足。2006 年、原子力高度利用研究会と合併。



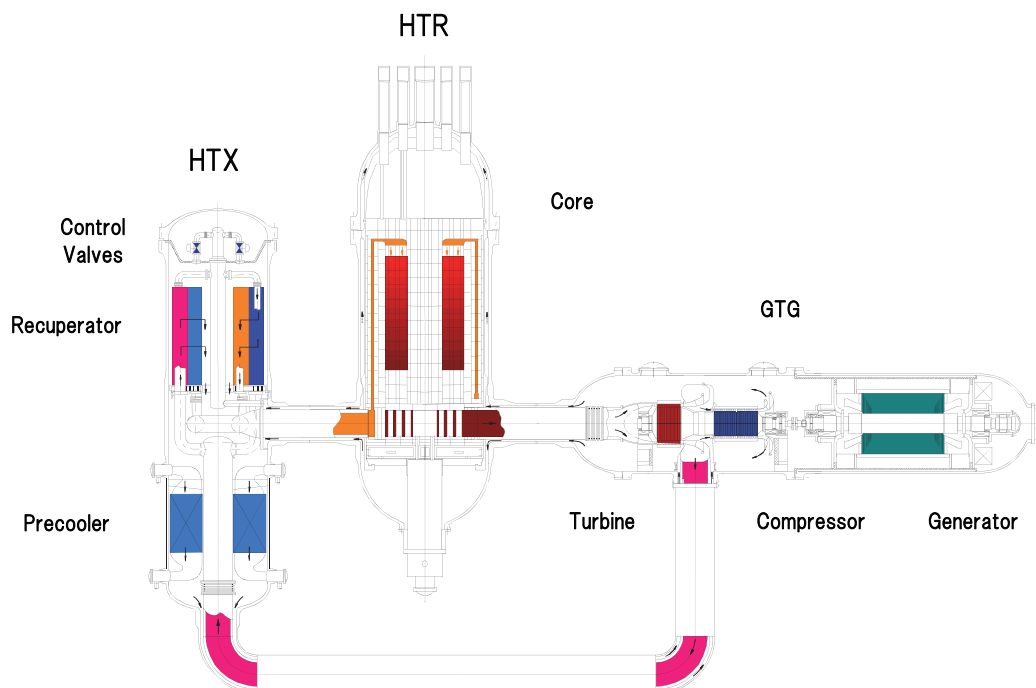
(出典:旧原研)

図1 HTTR

GTHTR 300 REACTOR MODULE ARRANGEMENT WITHIN REACTOR BUILDING

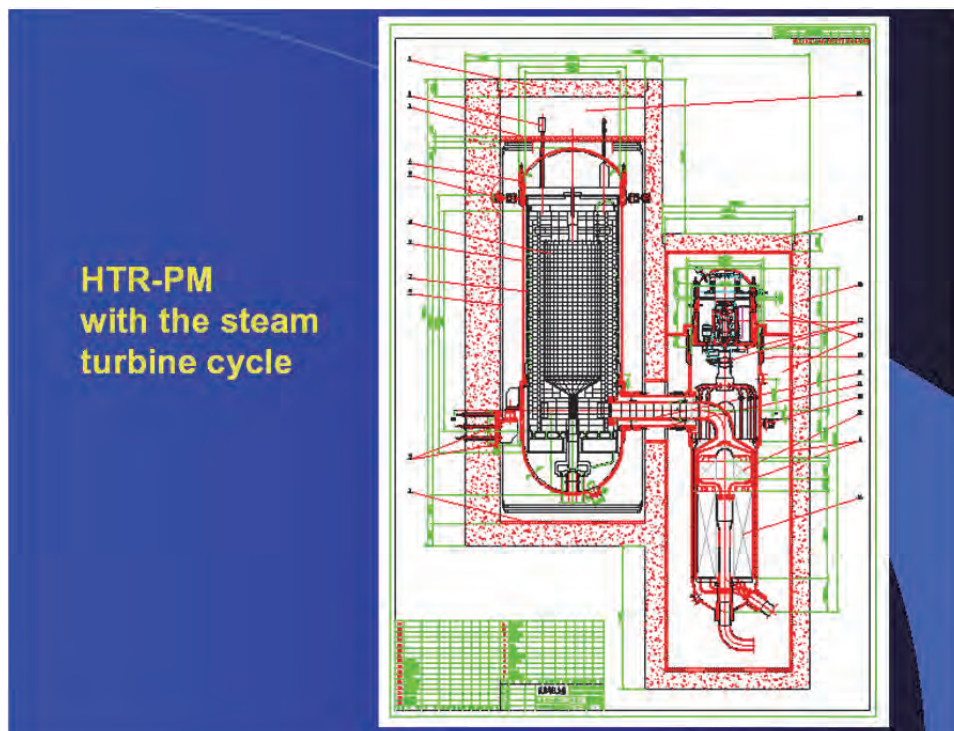
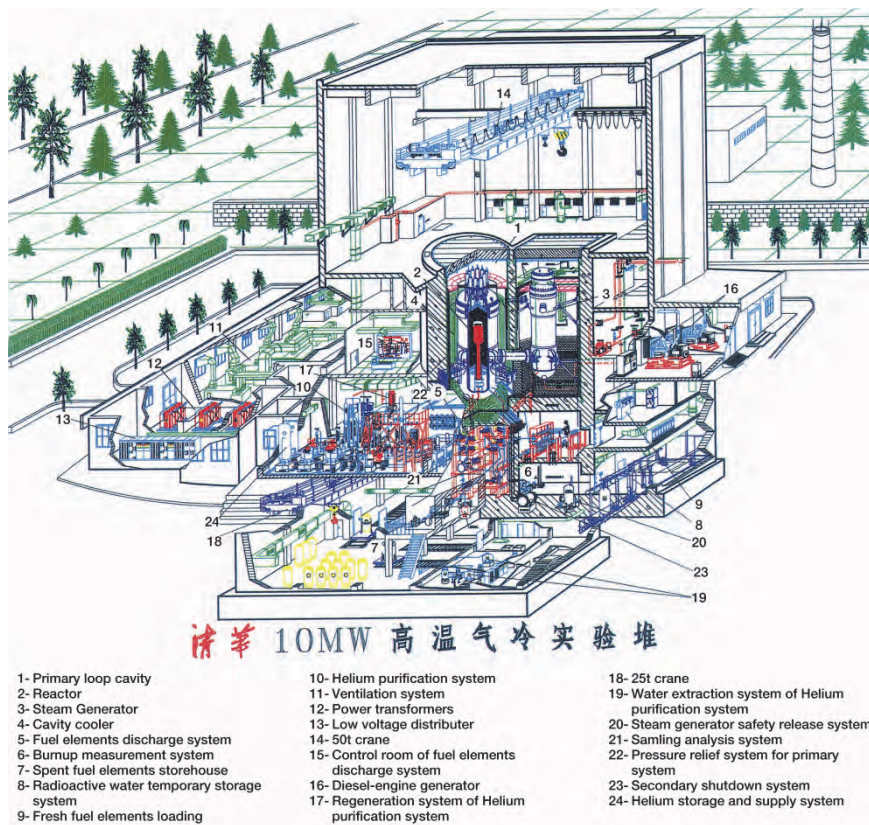


GTHTR 300 REACTOR MODULE LAYOUT



(出典:旧原研)

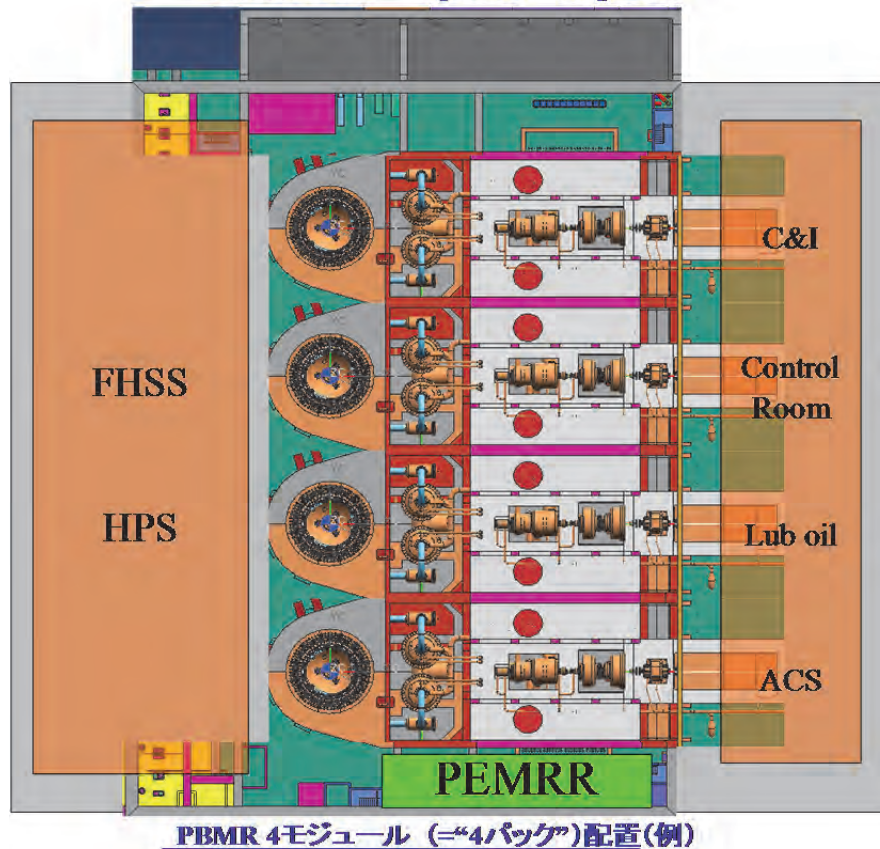
図 2 GTHTR300



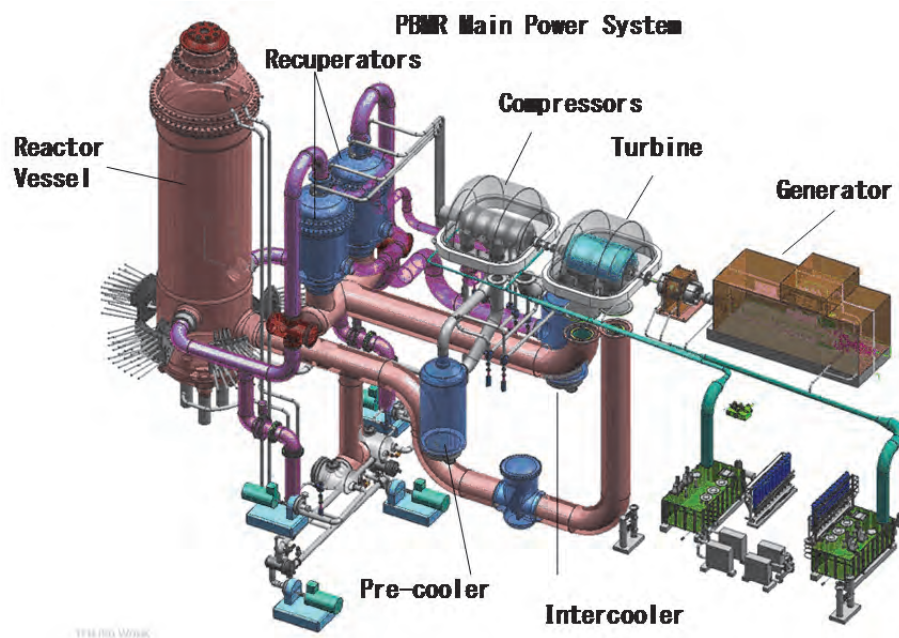
(出典:中国 清华大学核能技术研究所、2004、2005 年)

图 3 HTR-10、HTR-PM

Potential “4 pack” layout



(出典:南ア PBMR 社、2005 年)



(出典:南ア PBMR 社、2004、2005 年)

図 4 PBMR-SA