

高温工学試験研究炉（HTTR）の最大熱出力30MW達成について

日本原子力研究所

1. 経 緯

日本原子力研究所（原研）は、原子力熱エネルギーの多様な利用を目指して昭和44年から、多目的高温ガス炉の設計を中心とする研究開発を行ってきた（図1）。

その後、昭和62年の原子力開発利用長期計画（原子力長計）では、「高温工学試験研究を、次世代の原子力利用を開拓する先導的・基盤的研究として、これまでに蓄積した技術及び人材を有効に活用しながら、日本原子力研究所を中核機関として、大学、国立試験研究機関及び民間との連携の下に、総合的・効率的に進めることとする。」とされ、また、「高温工学試験研究を行なうための中核となる施設として、・・・（中略）・・・高温工学試験研究炉を建設し、・・・（後略）」とされた。

これを受けて、高温工学試験研究炉（HTTR ; High Temperature Engineering Test Reactor）の建設に向けて技術開発を実施し、この成果を基に平成3年から9年にかけてHTTRが建設され、平成10年11月10日に初臨界を達成した。その後、出力上昇試験を行ない、平成13年12月7日に最大熱出力30MW、原子炉出口温度850℃を達成した（図2）。

今後は、最高温度950℃の達成を目指すとともに、安全性実証試験、燃料照射試験、水素製造試験などHTTRを用いた原子力エネルギーに関する試験を実施する予定である。なお、高温ガス炉は、平成12年の原子力長計で「次世代軽水炉とともに、高い経済性と安全性をもち熱利用等の多様なエネルギー供給や原子炉利用の普及に適した革新的な原子炉」として期待される炉の一つと位置付けられている。

2. HTTRの概要

(1) 目 的

HTTRの目的は、HTTRの設計、建設、運転をとおして、高温ガス炉

の運転性能を把握し、固有の安全性を実証し、高温ガス炉技術を確立すること、また、原子炉から供給される高温ガスの熱を利用して水素製造システムの可能性を実証し、熱利用技術を確立することである(図3)。

(2) 原子炉の構成

原子炉の熱出力は30MW、被覆粒子燃料を使用し、冷却材としてヘリウムガスを使用している。原子炉入口では、冷却材の温度は395℃、最高原子炉出口温度は950℃、圧力は40気圧である。なお、原子炉からの高温のガスを利用するための、高温二重管と中間熱交換器が設置されている。主な仕様を表1に示す。

・燃料

直径0.6mmで平均濃縮度6%の二酸化ウランの燃料核を、低密度及び高密度の熱分解炭素、炭化珪素で多重に被覆した被覆燃料粒子を、さらに直径26mm、内径8mm、高さ39mmの円筒状に成型した燃料コンパクトを黒鉛スリーブの中に収納し、黒鉛ブロック中に挿入して使用する。

・中間熱交換器、高温二重管

高温二重管や中間熱交換器には、原研が開発した耐熱材料であるハステロイXRを使用している。

・中間熱交換器、加圧水冷却器の並列負荷

温度変化の大きい試験を実施できるように、1次冷却系に中間熱交換器と加圧水冷却器を並列に設置し、中間熱交換器を使用する運転と使用しない運転の2種類の運転が可能である。

(3) 主要な技術開発の成果(図4、5)

・被覆粒子燃料製造技術の開発

世界最高の低破損率、照射安定性を備えた被覆粒子燃料製造技術を開発した。

・高品位黒鉛の開発

引張強度、耐食性、照射安定性のバランスが、世界最高の微粒等方性黒鉛を開発した。

・耐熱金属材料の開発

原子炉用金属材料としては、世界で最高温度(1000℃)に耐える金属材料であるハステロイXRを開発した。

- ・ 高温機器の設計方針の確立

世界で最高温度（1000℃）までの範囲についての原子炉冷却材圧力境界用の高温構造設計方針及び世界で初めて原子炉用黒鉛の構造設計方針を確立した。

(4) H T T R 熱利用系統

H T T R では、高温ガスを利用するために中間熱交換器が設置され、中間熱交換器を介して原子炉からの熱は 2 次ヘリウムガスに伝え、2 次ヘリウムガスを直接または間接に利用する構成としている（図 6）。

この中で、中間熱交換器は、世界で最高の温度（955℃）で使用する原子炉用熱交換器である。また、高温二重管は、世界で初めて 1000℃ 程度の高温ガスを導く高温配管である。

3. 世界の高温ガス炉開発の現状

現在、世界で運転中の高温ガス炉は、H T T R と中国清華大学の H T R - 1 0 であるが、南アフリカでは、ペブル型燃料を用いたモジュラー型高温ガス炉（P B M R）、米国、ロシアではブロック型燃料を用いたモジュラー型高温ガス炉（G T - M H R）の計画が進められている（図 7、8）。

- ・ 中 国

蒸気タービン発電を目指して、熱出力 10MW のペブルベッド型高温ガス実験炉 H T R - 1 0 を開発し、2000 年 12 月に初臨界を達成し、現在、出力上昇試験の準備中である。

- ・ 南アフリカ

ペブルベッド型の発電用商用炉 P B M R を計画している。116 MWe のガスタービン発電を目指して、2002 年に建設開始を予定している。

- ・ 米国とロシア

ブロック型の燃料を利用する発電用商用炉を計画している。ロシアの解体核のプルトニウムを燃料に使用する計画で、285 MWe のガスタービン発電を行なう計画である。

4. 今後の計画

H T T R 試験計画は、H T T R の運転と利用研究から構成されている（図 9）。H T T R の運転では、平成 15 年度に原子炉出口温度最高 950℃、全出

力運転を達成し、その後、安全性実証試験、燃料照射試験などを行う予定である。また、HTTRを利用する研究では、水素製造に関する 1/30 規模の模擬試験を平成 13 年度から実施し、HTTR水素製造システム接続試験設備の設計、製作を平成 15 年度以降に計画している。

(1) 安全性実証試験及び燃料照射試験（図 10）

HTTRの固有の安全性を実証するため、反応度添加事故を模擬した「制御棒引き抜き試験」、1次冷却材喪失事故を模擬した「1次系流量低下試験」として、「ガス循環機停止試験」及び「流量部分喪失試験」等を実施する。

HTTRの高温照射機能、大型試料照射機能等を利用して、高温ガス炉用改良燃料、球状燃料の照射試験、新素材開発等の各種の照射試験を実施する。

(2) 水素製造実証試験（図 11）

HTTRへの水素製造システムを接続するための技術開発を行なうため、1/30 規模の模擬試験を実施し、水素製造システムの静的及び動的挙動解明、運転制御技術の開発を行ない、将来の中間熱交換器の2次ヘリウムガス（最高 905℃）を用いた水素製造実証試験のための技術を確立する。

(3) HTTR試験計画（図 12）

HTTRによる各試験と並行して、発電用実証プラントの概念設計及び熱利用実証プラントの概念設計を産業界と協力して実施する。

以 上

高温工学試験研究炉（HTTR）の最大熱出力 30MW 達成について

- 図 1 HTTR の歴史的経緯
- 図 2 出力上昇試験履歴
- 図 3 HTTR の概要
- 表 1 HTTR の仕様
- 図 4 HTTR の主要な技術開発の成果
- 図 5 HTTR の技術開発成果の例
- 図 6 HTTR の熱利用系統
- 図 7 世界の高温ガス炉開発の状況
- 図 8 各国の高温ガス炉開発スケジュール
- 図 9 HTTR 計画の全体スケジュール
- 図 10 HTTR を用いた安全性実証試験及び照射試験の例
- 図 11 HTTR の高温ガスを利用する水素製造試験
- 図 12 HTTR 試験計画

16	運 転・利 用 研 究 ・水素製造装置接続 ・原子炉出口温度950℃達成 ・照射試験 ・安全性実証試験 ・定常運転	2004
14 11	定格出力30MW達成（平成13年12月7日） 出力上昇試験	2002 1999
10	初臨界（11月10日）	1998
9 3	建 設	1997 1991
2	設置許可（11月）	1990
平成元年	設置許可申請（2月）	1989
63 60	詳 細 設 計 ・熱出力 30MW ・出口温度 850/950℃	1988 1985
	高温工学試験研究炉	
59 56	基 本 設 計 ・熱出力 50MW ・出口温度 950℃	1984 1981
55 49	システム総合設計 ・系統構成の詳細化 ・システムの安全評価	1980 1974
48 44	概 念 設 計 ・熱出力 50MW ・出口温度 1000℃	1973 1969
昭和	多目的高温ガス実験炉	西暦

2000年11月長計

・高い経済性と安全性をもち熱利用等の多様なエネルギー供給や原子炉利用の普及に適した革新的な原子炉が期待される

1987年6月長計

・高温工学試験研究を、次世代の原子力利用を開拓する先導的・基盤的研究として、…総合的・効率的に進める
・高温工学試験研究を行なうための中核となる施設として…高温工学試験研究炉を建設…

図1 HTTRの歴史的経緯

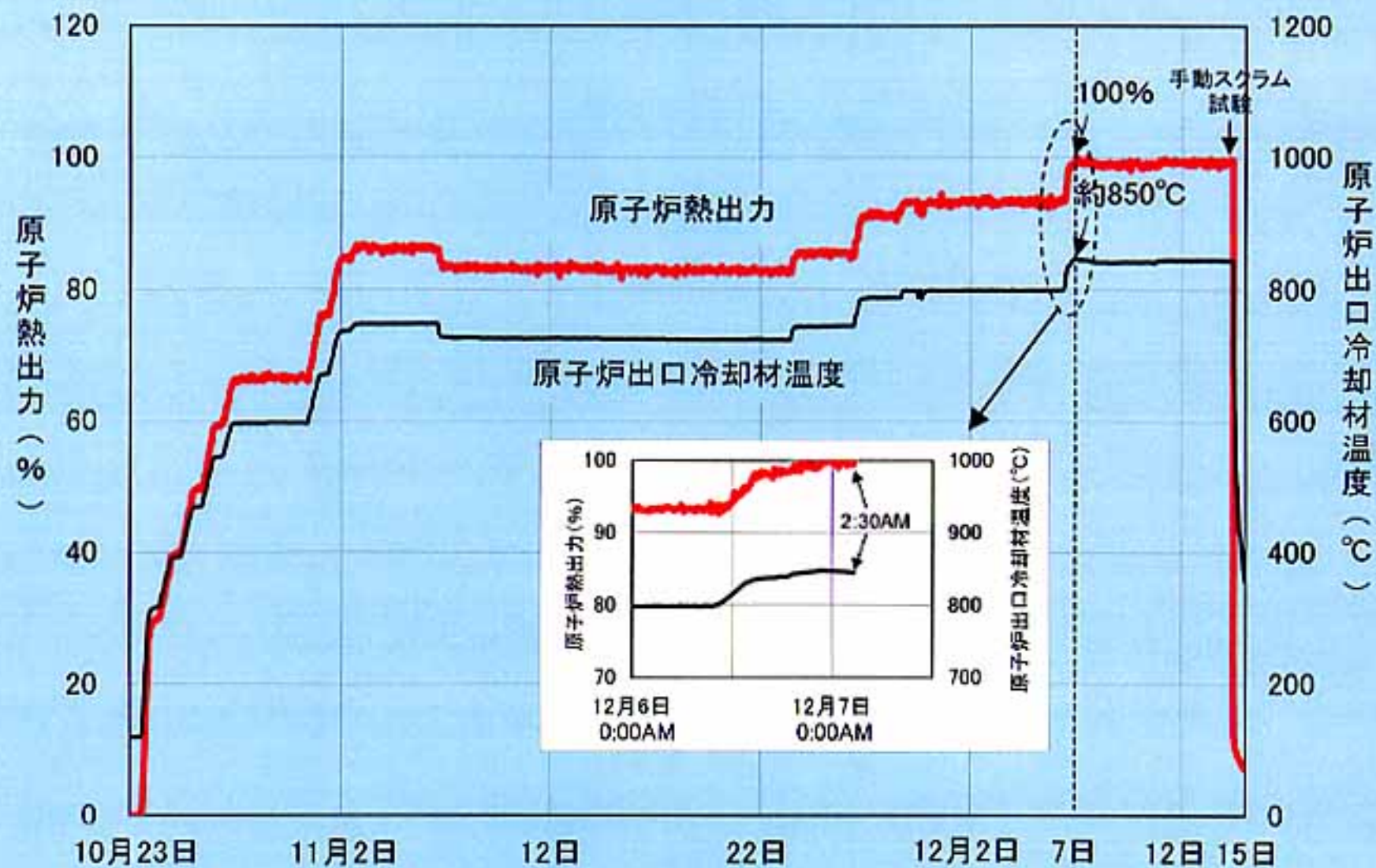


図2 出力上昇試験履歴



目的

高温ガス炉技術の確立

- ・ 高温ガス炉の運転性能の把握
- ・ 固有の安全性の実証

熱利用技術の確立

- ・ 水素製造システムの実証

主な仕様

出力	: 30 MW
燃料	: 被覆粒子・ブロック型
炉心構造材	: 黒鉛
冷却材	: ヘリウムガス
入口温度	: 395°C
最高出口温度	: 950°C
圧力	: 40気圧

図3 HTTRの概要

表1 HTTRの仕様

・ 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°C
・ 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 ³
・ 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

HTTR

金属材料

- 耐熱・耐食金属材料の開発
 - ハステロイーXRの開発
(1000℃まで使用可能、高耐食性)

高温機器の設計方針

- 高温構造設計方針の確立
 - 原子炉圧力容器、中間熱交換器等に適用
 - 1000℃まで適用可能、
(ハステロイーXR)
 - 材料強度基準の策定



燃料

- 被覆粒子燃料製造技術の開発
 - 世界で唯一かつ高品質
(低破損率、照射安定性)

黒鉛

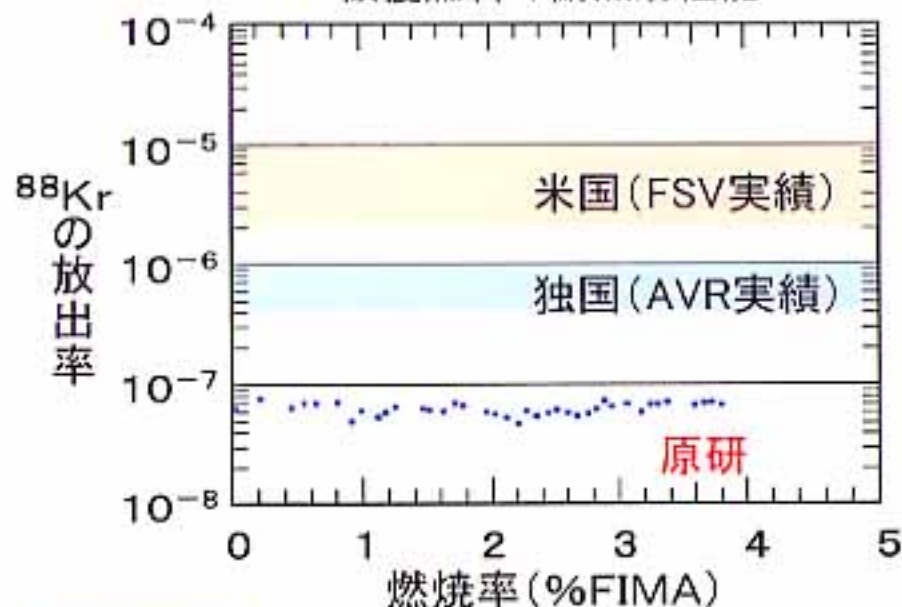
- 高品位黒鉛の開発
 - IG-110の開発
(高強度、高耐食性、照射安定性)
 - 黒鉛構造設計方針の確立

参考：中国HTR-10で使用

図4 HTTRの主要な技術開発の成果

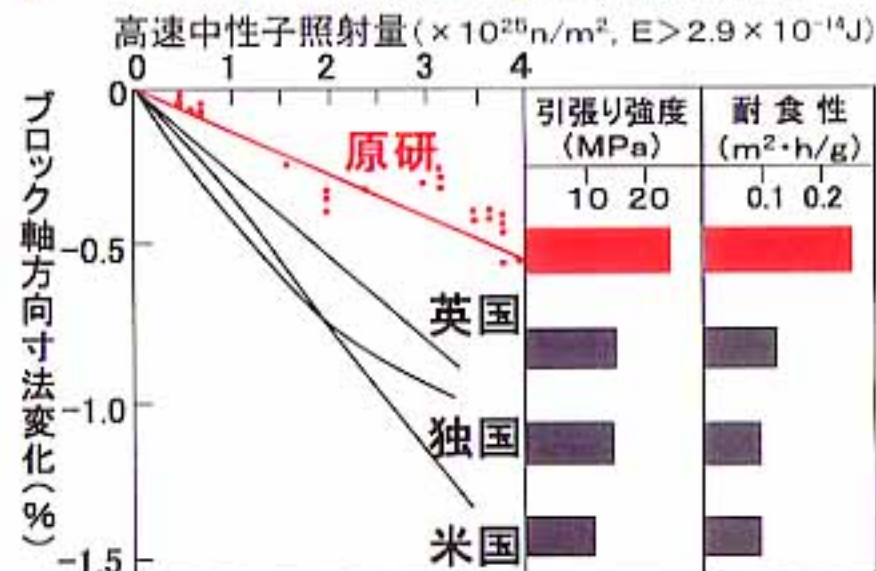
燃料

被覆燃料の耐照射性能



黒鉛材料

各種黒鉛材料の特性比較



金属材料

腐食試験後の断面金属組織写真(ヘリウムガス、1000℃、10000時間)

50 μm

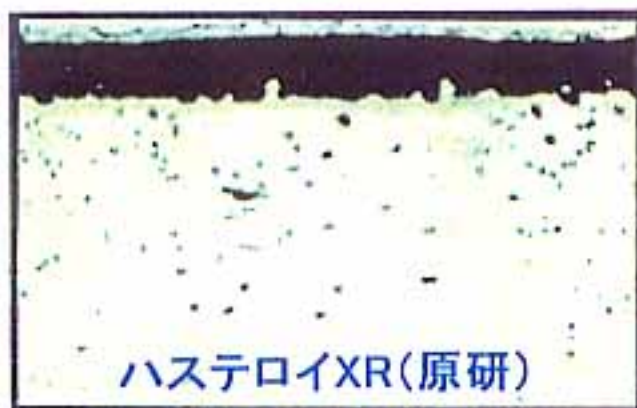


図5 HTTRの技術開発成果の例

[図中の数字は、定格・並列運転時における熱出力、温度、圧力等の値を示す。]

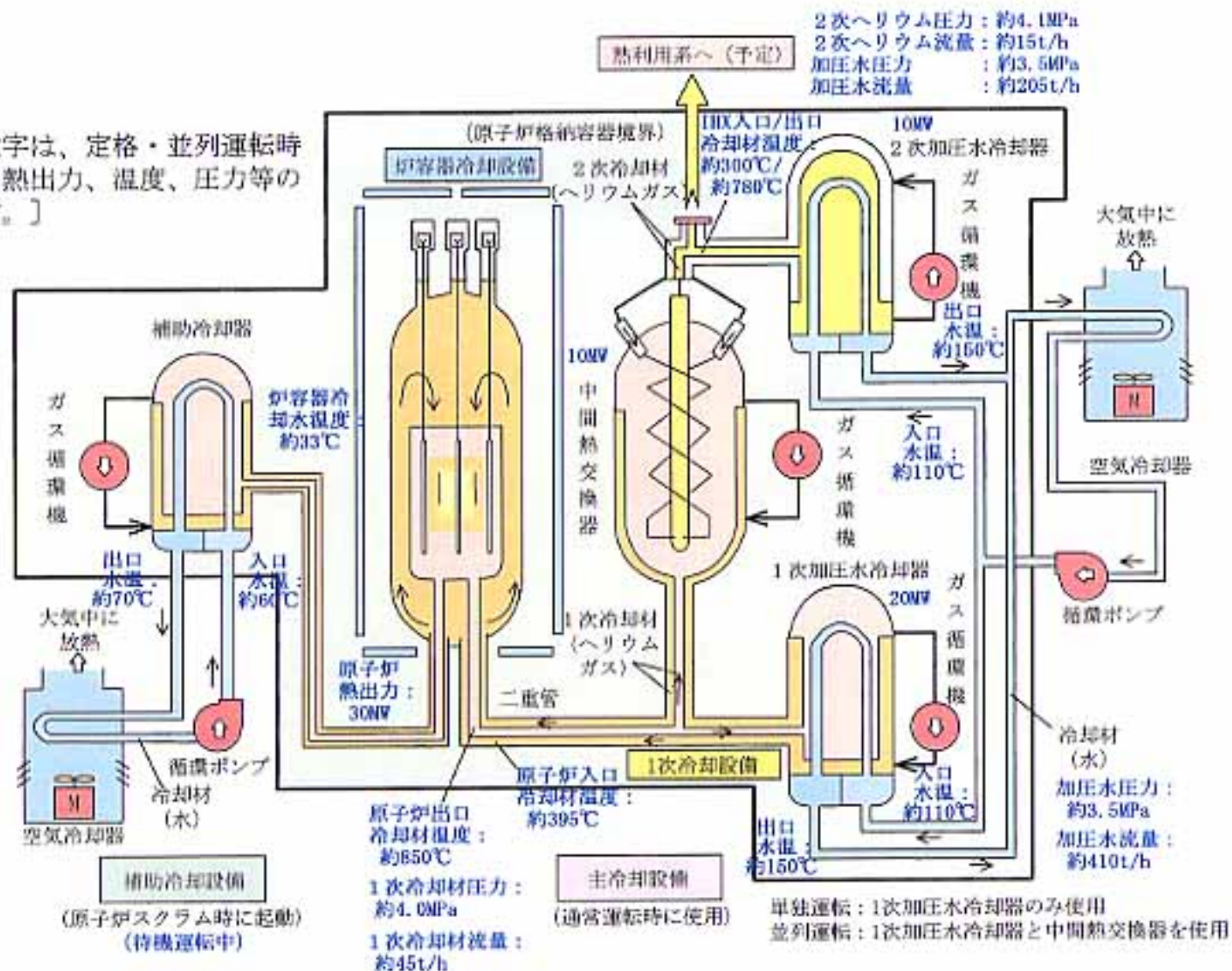


図6 HTTRの熱利用系統



図7 世界の高温ガス炉開発の状況

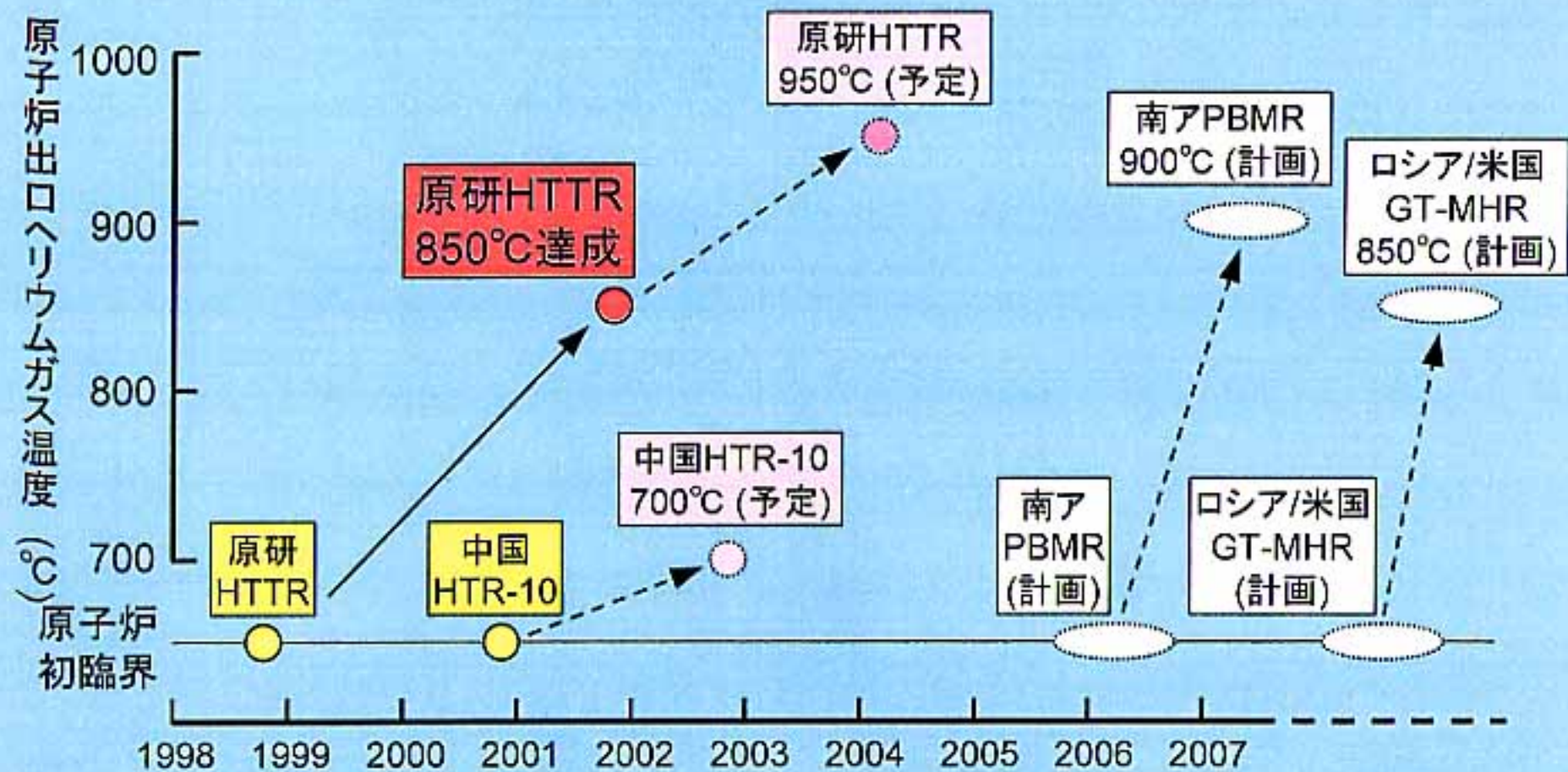


図8 各国の高温ガス炉開発スケジュール

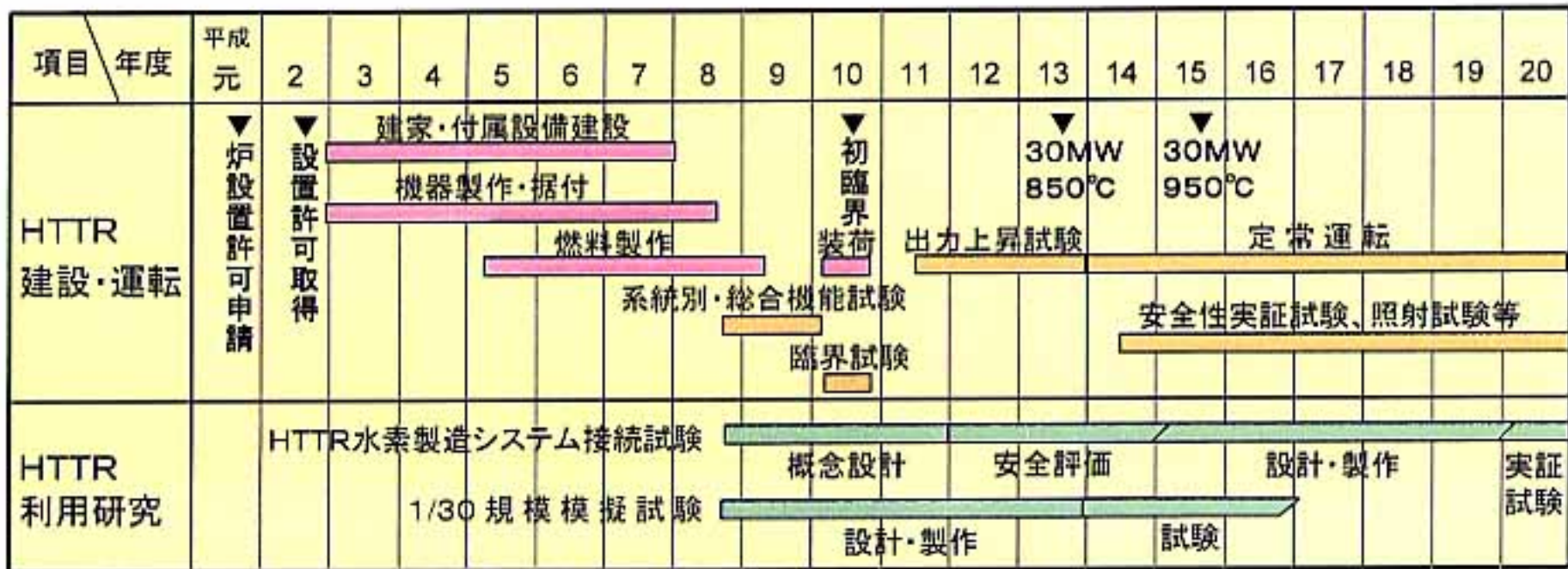


図9 HTTR計画の全体スケジュール

安全性実証試験の例

制御棒引抜き試験

(炉心中央位置の制御棒を引抜く)

- 反応度添加率: $1.0 \times 10^{-4} \Delta k/k/s$
- 反応度添加量: $3.0 \times 10^{-3} \Delta k/k$

1次系流量低下試験

○循環機停止試験

- 1次ヘリウム循環機3台のうち、1台又は2台を停止

○流量部分喪失試験

- 1次冷却材流量制御系により流量の部分喪失を生じさせる

照射試験の例

試料の照射条件

照射領域	試料最大寸法 (cm)	照射温度(°C)
可動反射体(3箇所)	直径11×高さ110	400~800
固定反射体(4箇所)	直径10×高さ290	400~600

熱中性子束最大 : $7 \times 10^{17} \text{ n/m}^2 \cdot \text{s}$

高速中性子束最大: $2 \times 10^{17} \text{ n/m}^2 \cdot \text{s}$

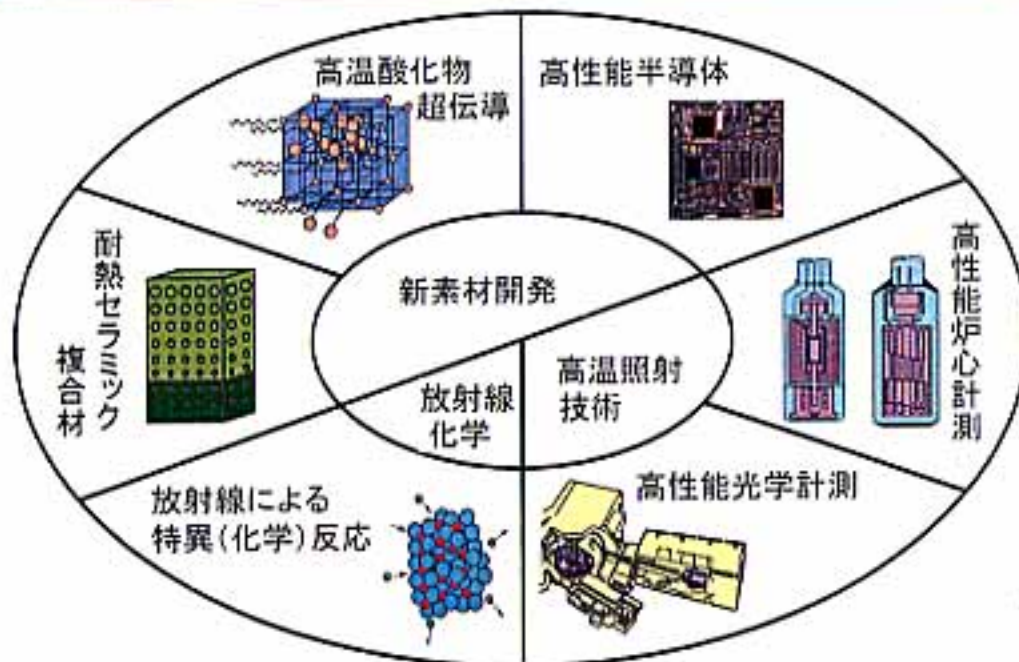


図10 HTTRを用いた安全性実証試験及び照射試験の例

1/30規模模擬試験

●目的

HTTRへ水素製造システムを接続するための技術開発

- ・水素製造システムの静的・動的挙動解明
- ・運転制御技術の開発

●現状

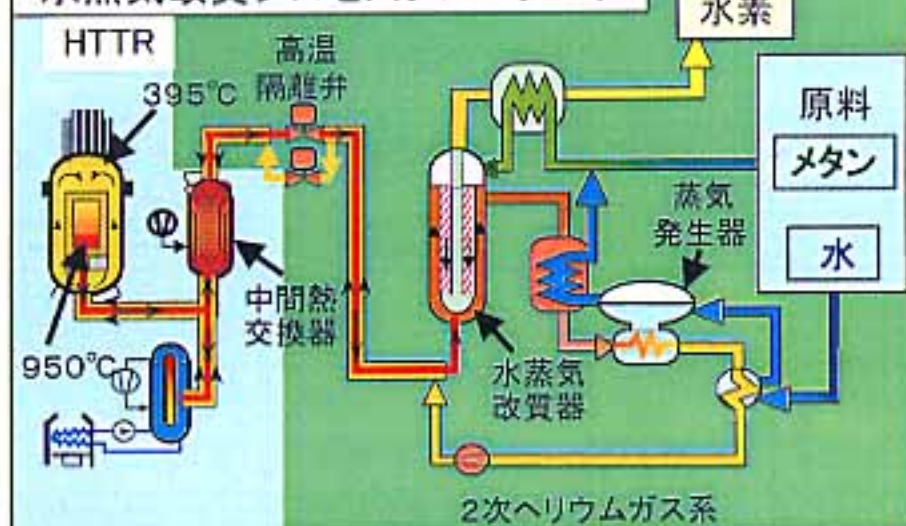
- ・試験装置の建設完了
- ・機能試験を実施中(12月に水素製造開始)

試験装置外観



HTTRを用いた実証試験計画

水蒸気改質プロセスフローシート



完成予想図



図11 HTTRの高温ガスを利用する水素製造試験

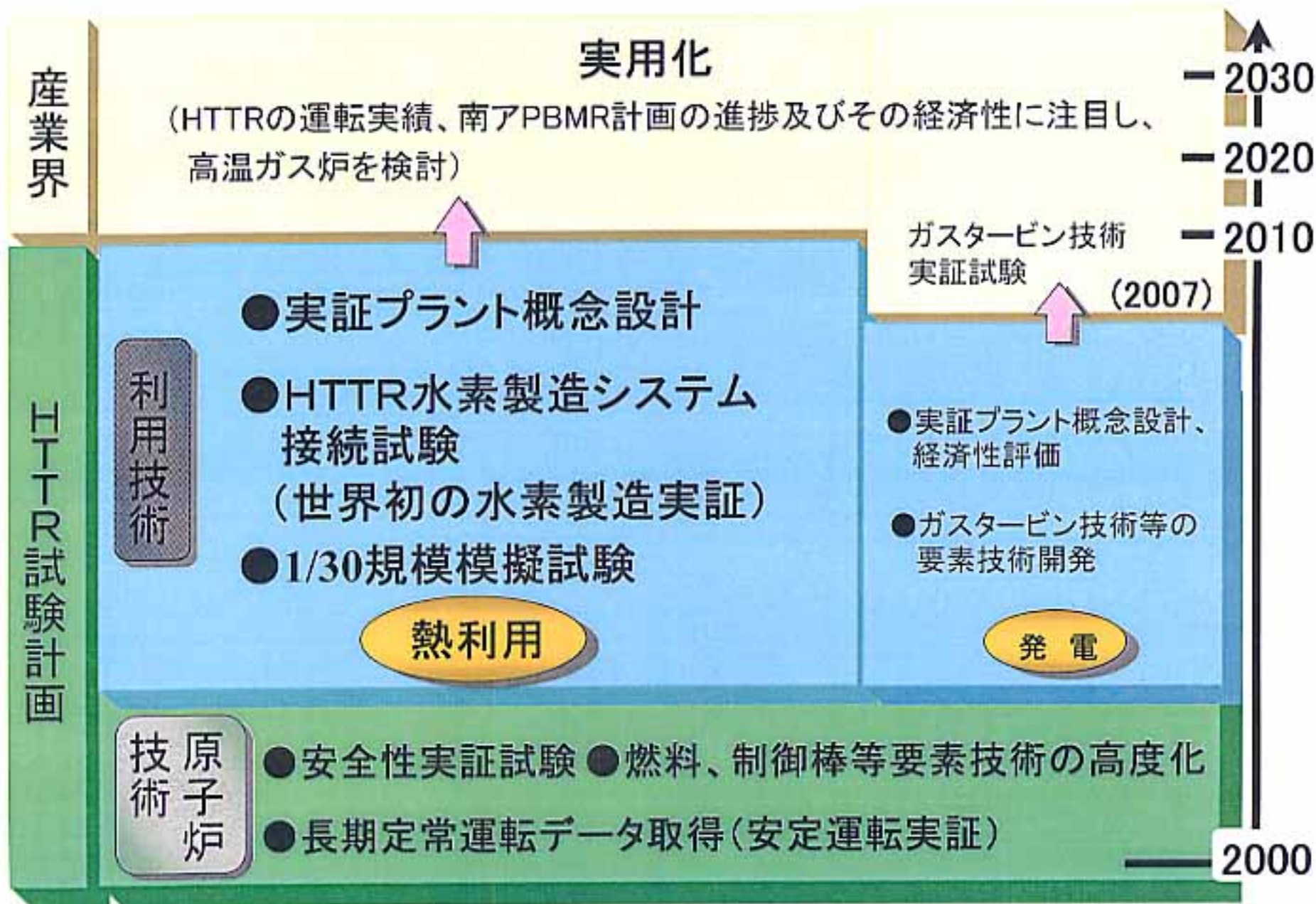


図12 HTTR試験計画