

## （４）高温ガス炉の今後の研究開発課題

日本原子力研究開発機構  
高速炉・新型炉研究開発部門  
炉設計部 高温ガス炉設計グループ

大橋 弘史

1. これまでの研究開発の概要
2. 実用高温ガス炉システム
3. 原子炉技術の研究開発課題
4. 熱利用技術の研究開発課題
5. 実用化への道筋
6. まとめ

# 1. 高温工学試験研究炉(HTR)の開発経緯



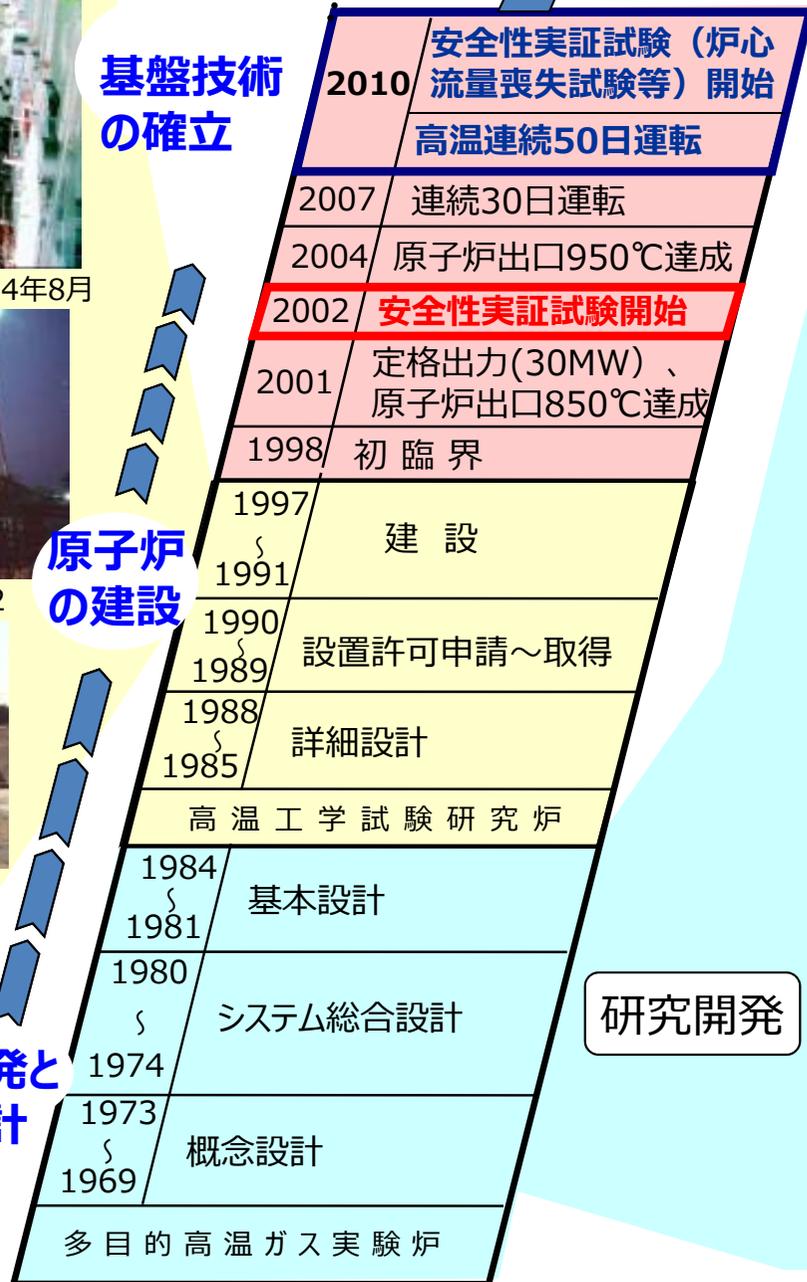
建設

基盤技術  
の確立

原子炉  
の建設

研究開発と  
概念設計

实用システムの原型提示

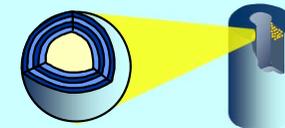


研究開発

燃料



炉内ガスループ (OGL-1)



被覆燃料粒子 燃料コンパクト

安全評価技術  
耐震評価技術

黒鉛材料



等方性黒鉛IG-110

炉物理



高温ガス炉臨界実験装置 (VHTRC)

金属材料



ハステロイXR  
(中間熱交換器伝熱管)

熱流動・高温機器



大型構造機器実証試験ループ  
(HENDEL)

## (1) 高温ガス炉技術



- 定格出力30MW、原子炉出口温度950℃達成(2004年4月)
- 950℃、50日間高温連続運転(2010年3月)

- 高性能燃料要素開発
- 高温ガス炉安全性向上のためのHTTR試験

## (2) 熱利用技術 (発電、水素製造)



ヘリウム圧縮機

- 水素製造 (天然ガス水蒸気改質、ISプロセス)、ガスタービン発電の基盤技術を完成



連続水素製造試験装置

- ISプロセスの運転制御技術及び機器信頼性の確認
- ガスタービン翼材の開発

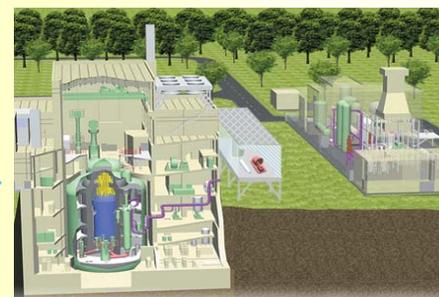
## (3) 実用高温ガス炉設計



- 実用高温ガス炉システムの設計研究
- プルトニウム燃焼高温ガス炉の炉心設計
- 実用高温ガス炉安全基準の策定と国際標準化

- 海外輸出用高温ガス炉の設計

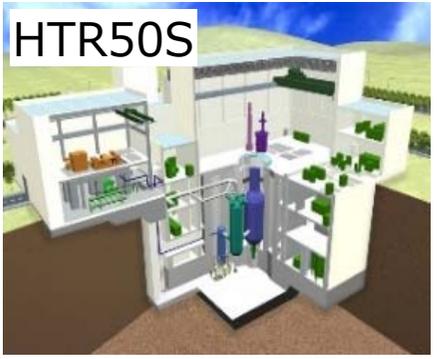
## (4) HTTR-GT/H<sub>2</sub> 試験



- 高温ガス炉熱利用技術の総合実証

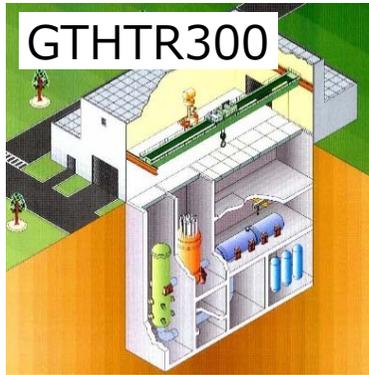
# 2. 実用高温ガス炉システム

## ① 蒸気システム (蒸気タービン発電、高温蒸気供給)



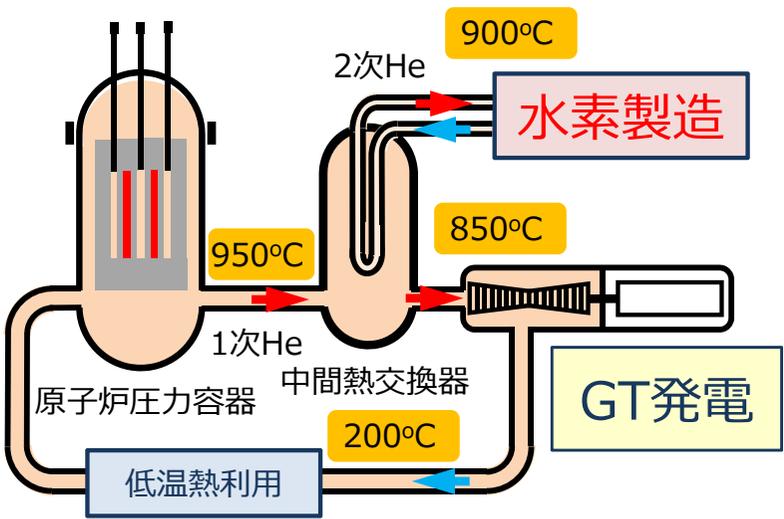
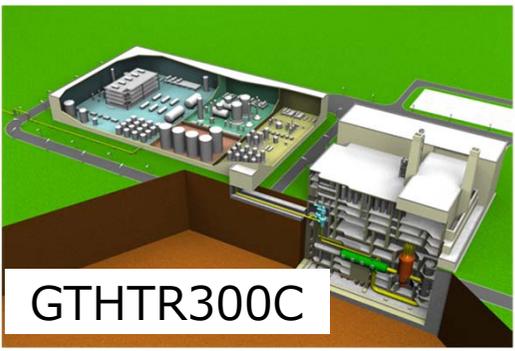
- 原子炉熱出力50MW～200MW級,  
原子炉出口温度750℃
- 既存技術を活用可能

## ② ガスタービン発電システム



- 原子炉熱出力600MW,  
原子炉出口温度850℃
- 発電設備にヘリウム  
ガスタービンを採用
- 高い経済性
- 2030年代実証炉 (目標)

## ③ 水素電力併給システム



- 原子炉熱出力600MW,  
原子炉出口温度950℃
- 高温ガス炉ガスタービン発電  
システムと同じ原子炉システム
- 優れた再エネとの共存性
- 水素製造等、エネルギーの  
多目的利用が可能
- 2040年代実証炉 (目標)

# 3 (1) 燃料の研究開発

出力密度  
(MW/m<sup>3</sup>)

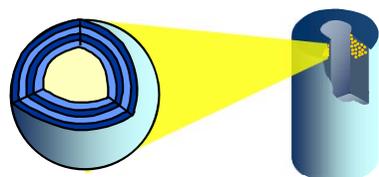
6.0

2.5

## HTTRのための 研究開発

(1970-1999)

- 被覆燃料の製造技術
- 燃料の照射試験(33GWd/t)
- 燃料特性・FP保持性能研究
- 破損機構の研究
- 設計基準、検査基準



被覆燃料粒子

燃料コンパクト

## HTTR



## 実用化に向けた研究開発

(2000-)

- HTTR燃料健全性実証
- 高燃焼度化 (100 GWd/t)  
カザフスタン\*1での照射試験  
(ISTC \*2プロジェクト 2010~)
- 高出力密度化
- 破損機構の研究

\*1 カザフスタン核物理研究所 (INP)

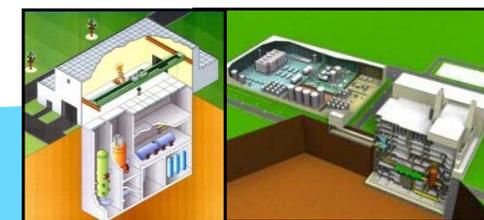
\*2 国際科学技術センター

## 現在



カザフスタン  
WWR-K 照射炉 (INP)

## 実用炉



## 今後

- HTTR燃料照射後試験
- 高燃焼度化 (160 GWd/t)
- 高出力密度化  
(除熱性能向上燃料要素)
- 実用炉燃料設計基準

33

100

燃焼度 (GWd/t)

160

# 3 (2) 黒鉛の研究開発



## HTTRのための研究開発

## 高温ガス炉技術の完成に向けた研究開発

～H2

製造技術開発



- HTTR黒鉛構造設計方針策定
- HTTR黒鉛検査基準策定・供用期間中検査手法開発

高温ガス炉黒鉛構造物規格原案

▽  
現在

- 実用炉条件下での黒鉛特性評価
- HTTRの供用期間中検査の実施

高温ガス炉黒鉛構造規格の民間規格化

HTTR	照射条件 (データベース範囲)
照射温度 (°C)	400～1250 (400～1400)
照射量 ( $\times 10^{25}n/m^2, E>0.1MeV$ )	～1.6 (～3)

実用炉	照射条件 (データベース範囲)
照射温度 (°C)	400～1250 (400～1400)
照射量 ( $\times 10^{25}n/m^2, E>0.1MeV$ )	～6 (～10)

## HTTRのための研究開発

## 高温ガス炉技術の完成に向けた研究開発

### ● ハステロイXRの開発

- ✓ 基本合金系の選定
- ✓ 耐食性改良
- ✓ 総合確証試験
- ✓ 高温強度特性改良
- ✓ 材料強度基準等を策定

### ● 原子炉圧力容器用 2 1/4Cr-1Mo鋼等のデータベースの確立

### ● 中間熱交換器要素技術試験

機器	HTTR	実用炉 (VHTR)	研究課題
原子炉圧力容器、熱交換器外胴等	2 1/4Cr-1Mo鋼	Mn-Mo鋼 (冷却あり*)	特になし
炉内鋼構造物	SUS316, 2 1/4Cr-1Mo鋼	SUS316, アロイ800H他	特になし
中間熱交換器伝熱管等	ハステロイXR	ハステロイXR	特になし

\* : 圧縮機からの低温のヘリウムガスを原子炉圧力容器等の冷却に用いることで軽水炉用材料が使用可

~H2

高温ガス炉第1種機器の高温構造設計方針

▽  
現在

ハステロイXRのサーベイランス試験

高温構造設計方針の民間規格化

### HTTR試験

50日高温 (950℃) 連続運転

- HTTR中間熱交換器の性能確認

## HTTRのための研究開発

## 高温ガス炉技術の完成に向けた研究開発

～H2

▽  
現在

### 核設計計算コード (決定論的手法)の開発

- ✓ 高温ガス炉特有の核的な効果である被覆燃料粒子に起因する二重非均質効果を取り扱うコードを開発
- ✓ VHTRCの試験結果を用いて核設計計算の精度を評価



### 核設計計算コード (決定論的手法)の改良

- ✓ 少数群断面積を作成するセル計算手法の改良及びそれに伴う計算コードの改良

### 核データの検証

- ✓ 世界の三大核データライブラリ; JENDL (日)、ENDF(米)、JEFF (欧) を対象
- ✓ HTTRの臨界近接試験結果を用いて検証

### 核設計計算コード (確率論的手法)の改良

- ✓ 燃料コンパクト内における被覆燃料粒子の不規則配置を取り扱う幾何形状モデル; 確率論的幾何形状モデルを開発し連続エネルギーモンテカルロコードMVPに導入

### 核設計計算手法の高度化

- ✓ HTTRデータを用いた、燃焼を考慮した過剰反応度の計算精度評価
- ✓ 核データに起因する誤差評価や誤差低減の手法整備
- ✓ 炉心高性能化設計手法の検討

核設計計算の参照解

実用高温ガス炉の核設計手法確立

# 3 (5) 使用済燃料・黒鉛廃棄物の研究開発



HTTRのための研究開発

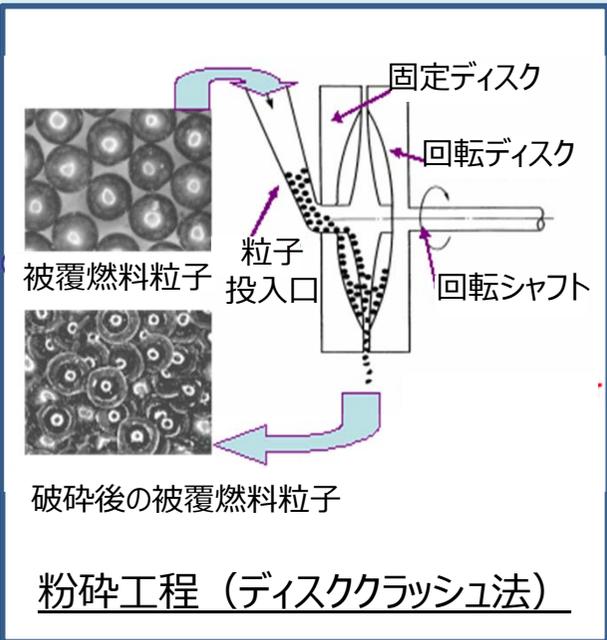
高温ガス炉技術の完成に向けた研究開発

～H2

現在

## 前処理試験

- ✓ 現行再処理施設で再処理するために必要な、高温ガス炉燃料特有の前処理工程（解体工程、焙焼工程、破碎工程）技術の確立



## 中間貯蔵に関する検討

- ✓ 自然循環空冷の可否の評価

## 使用済燃料の処理に関する検討

- ✓ HTTR使用済燃料を用いた試験

## 直接処分に関する検討

- ✓ SiC被覆層の優れた耐腐食性を用いた処分方法の検討
- ✓ 不活性母材型燃料の利用

## 黒鉛廃棄物の評価

黒鉛廃棄物量及び放射エネルギーの評価

## 使用済燃料の発生量の評価

- ✓ 発電量当たりの使用済燃料の発生量を軽水炉と比較

## 廃棄物減容に関する検討

- ✓ 処分場専有面積低減に関する検討

## 有害度低減に関する検討

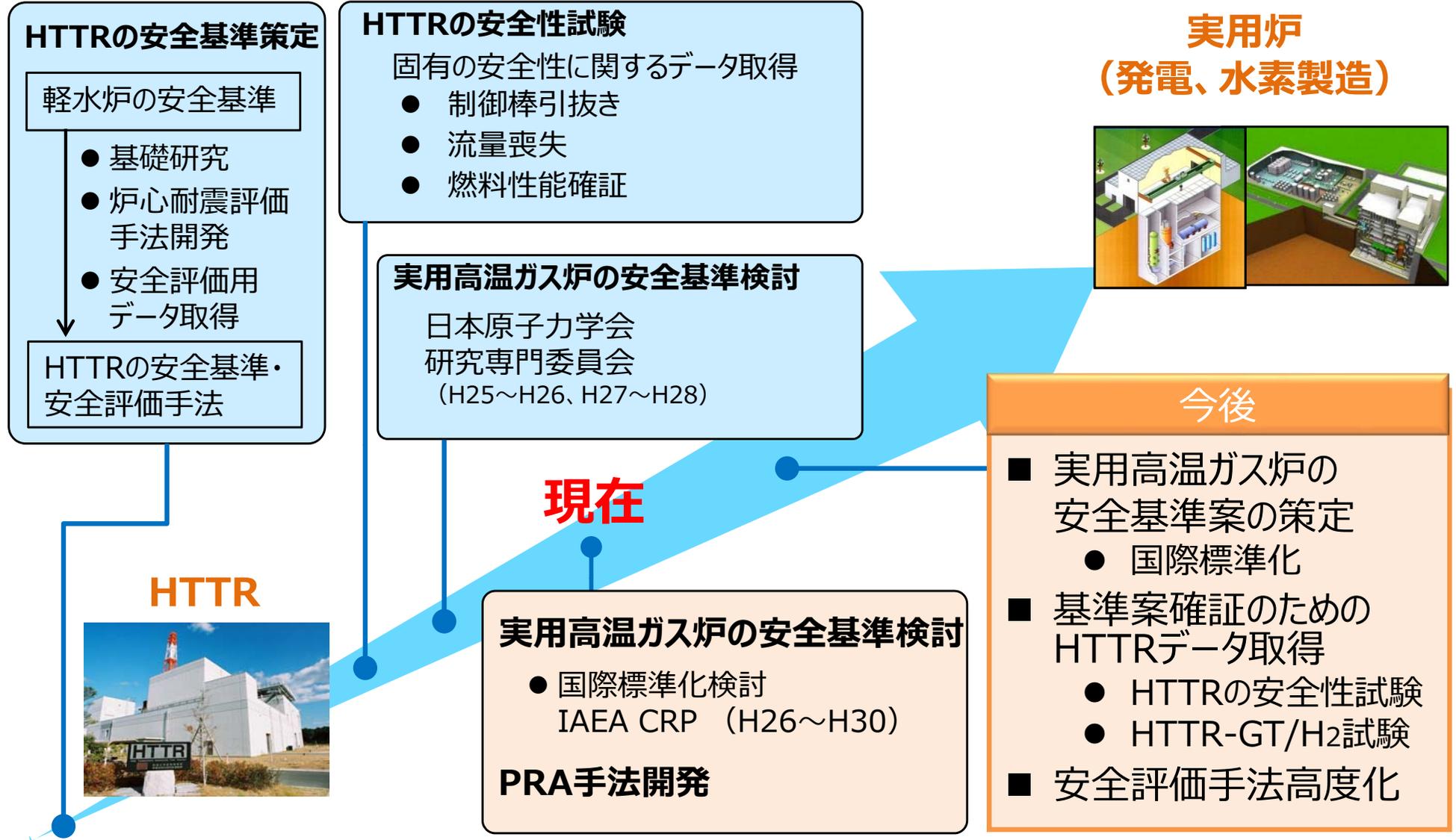
- ✓ 高濃縮ウランを用いたMAがほとんど発生しない炉心設計
- ✓ 多重リサイクルによるMAが発生しない炉心設計

再処理技術

直接処分技術

廃棄物低減技術

動的安全性
受動的安全性
固有の安全性

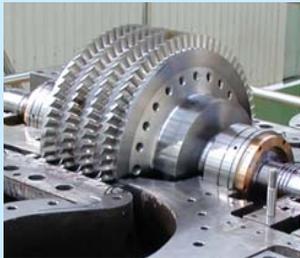


# 4 (1) ヘリウムガスタービン発電技術の研究開発

実用化

## 基本設計及び要素技術開発 (2001-)

- 高効率ヘリウム圧縮機
- 再生熱交換器用コンパクト熱交換器技術\*1



1/3スケール圧縮機



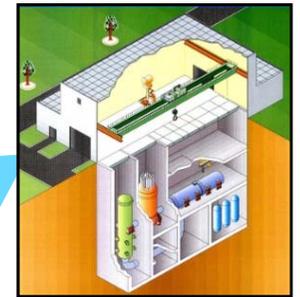
熱交換器試作体

\*1 三菱重工業（株）にて開発

## 要素技術開発

- 低FP沈着タービン翼材開発
- 軸シール技術開発

## 実用炉 (ガスタービン発電)



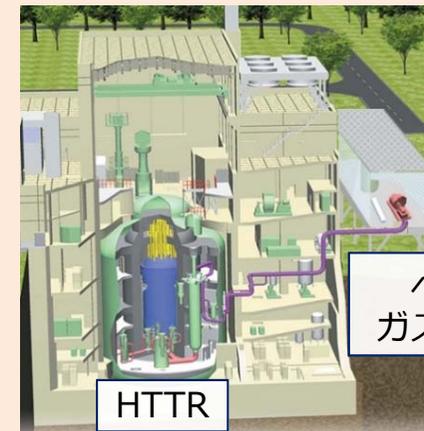
大型化・高温化

現在

## 高温ガス炉ガスタービン発電 システムの概念設計 (1998-2001)

今後

## HTTR-GT試験



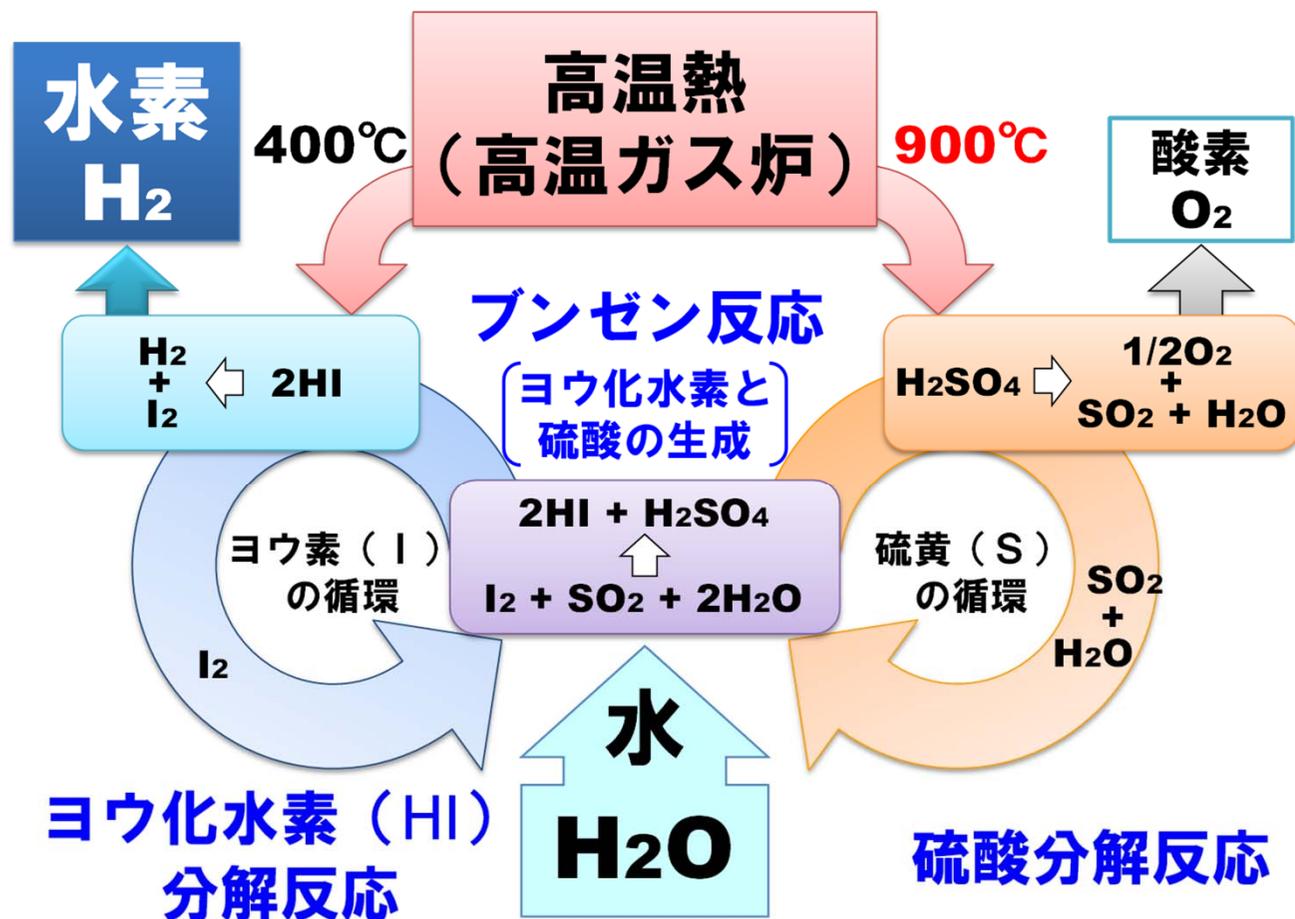
HTTR

ヘリウム  
ガスタービン

# 4 (2) 水の熱分解による水素製造：熱化学法ISプロセス



- 水の熱分解：4000℃以上の高温熱が必要
- IS プロセス：ヨウ素 (I) と硫黄 (S) を利用して 約900℃の熱で水を熱分解  
ヨウ素と硫黄はプロセス内で循環 ⇒ 有害物質の排出なし  
高温ガス炉との組み合わせ ⇒ 炭酸ガスの排出なし



- 【技術課題】**
- 運転制御
  - 効率
  - 耐食機器

# 4 (2) 熱化学法ISプロセス水素製造法の研究開発



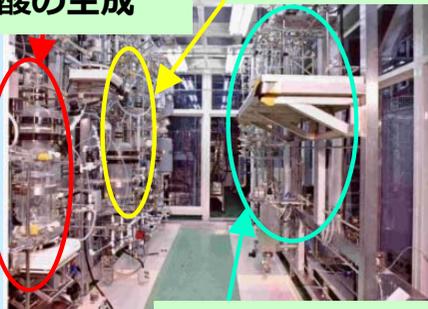
実用化

## 工学基礎試験

(1999-2004)

ヨウ化水素と  
硫酸の生成

硫酸分解



ヨウ化水素分解

ガラス製試験装置により  
1週間連続水素製造を達成

## 実験室規模試験

閉サイクル理論を検証  
(1997)

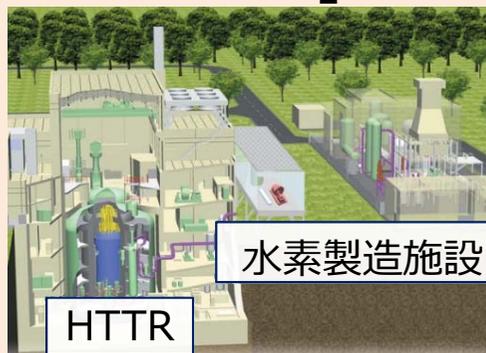
## 要素技術開発

(2005-2009)

- 効率向上のための放射線製膜技術
- SiC製反応器の製作技術

今後

## HTTR-GT/H<sub>2</sub>試験



水素製造施設

HTTR

実用炉 (水素製造)



現在

## 工業材料機器試験 (2010~)

連続水素製造  
試験装置

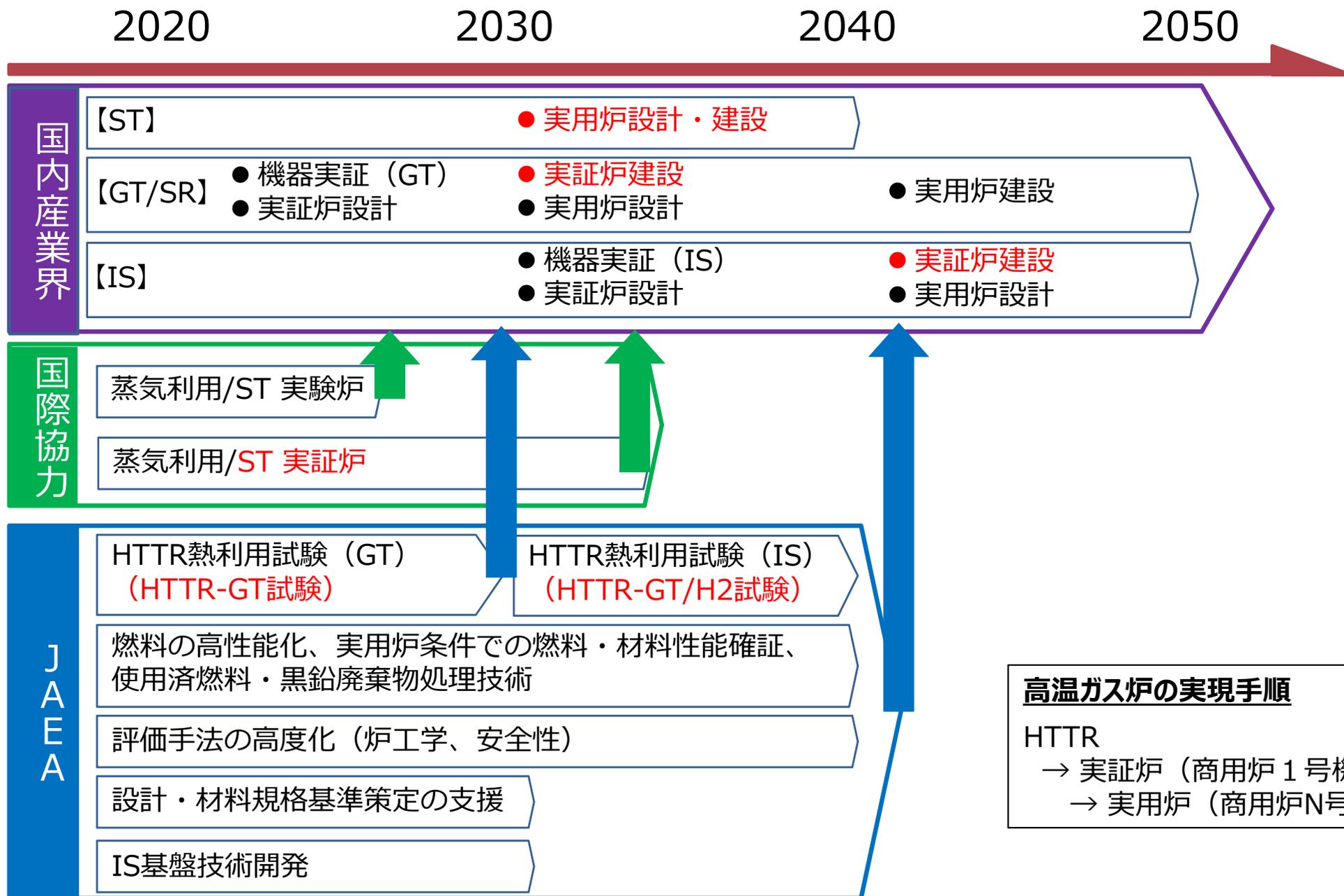
2016年 2月 8時間 (10 L/h)  
2016年10月 31時間 (20 L/h)  
2018年12月 150時間 (30 L/h)



- 工業材料製反応器の耐食・耐熱健全性の確認
- セラミックス構造体設計方針作成
- 機器小型化要素技術開発

研究成果の  
民間事業者への移転

# 5. 実用化への道筋



※ ST : 蒸気タービン発電、GT : ガスタービン発電、SR : 天然ガス水蒸気改質法水素製造、IS : IS<sup>o</sup> 吐入法水素製造

- 原子力機構では、高温ガス炉の実用化に向けて、HTTRを活用した高温ガス炉技術、ヘリウムガスタービン発電や熱化学法ISプロセス水素製造法などの熱利用技術の研究開発を推進している。
- 今後、国内産学官の連携や国際協力の活用により、技術課題の解決を図り、我が国の優れた高温ガス炉技術及びその熱利用技術の実用化を目指す。