



日本原子力学会「2018年春の年会」  
新型炉部会セッション「第4世代原子炉の国内外の開発動向」

# 高温ガス炉の開発状況と計画

ヤン ジングロン (Xing L. YAN)

平成30年3月26日

日本原子力研究開発機構  
高温ガス炉水素・熱利用研究センター

# 高温ガス炉の概要

## セラミックス被覆燃料

1600°Cでも放射性物質を閉じ込める

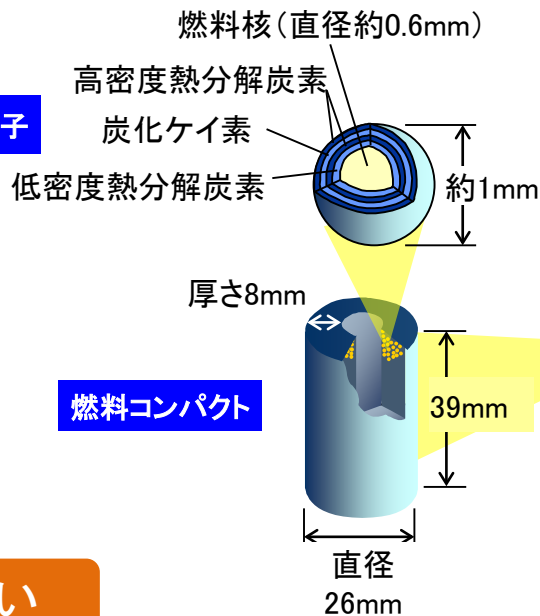
## ヘリウム冷却材

高温でも安定  
(温度制限なし)

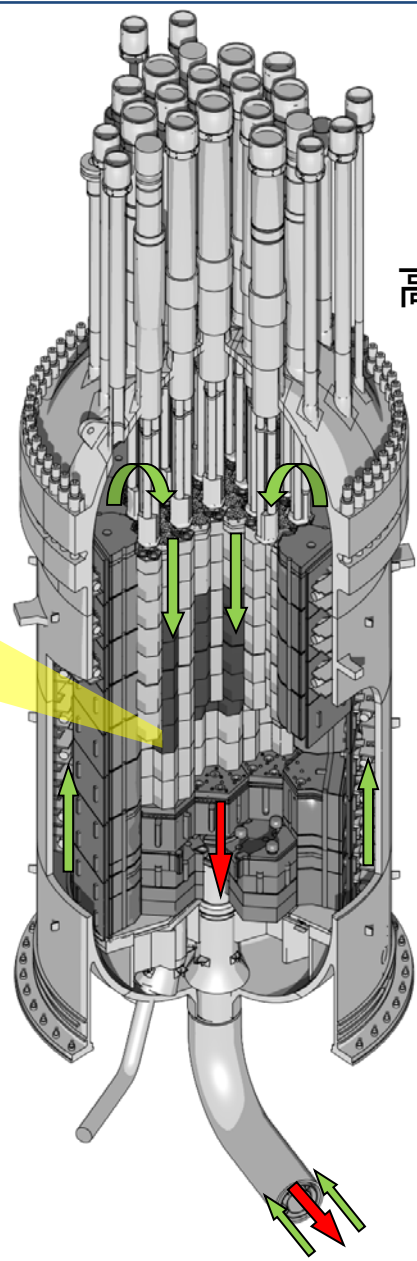
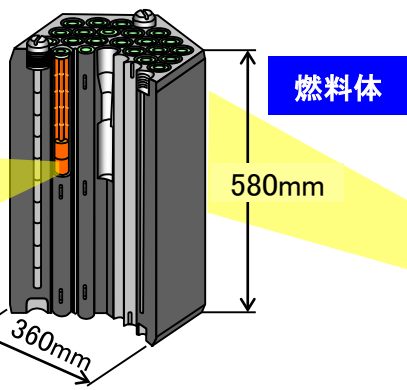
## 黒鉛構造材

耐熱温度2500°C

被覆燃料粒子



燃料コンパクト



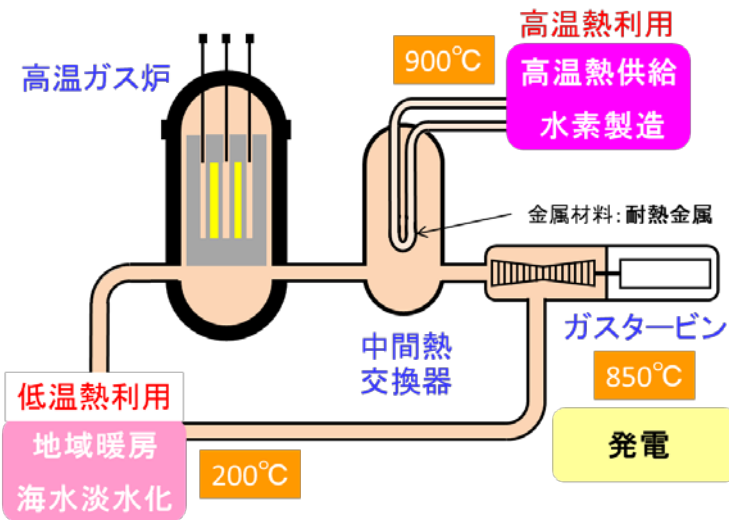
高温ガス炉

## 軽水炉との違い

項目	軽水炉	高温ガス炉
電気出力(熱出力)	~100万kW (~300万kW)	~30万kW (~60万kW)
原子炉出口温度	約 300°C	850°C~950°C
燃料型式	金属製被覆管(ジルカロイ)	セラミック製被覆燃料粒子
原子炉冷却材	軽水	ヘリウムガス
減速材	軽水	黒鉛
用途	発電	熱供給、発電

# 高温ガス炉システムの開発の意義

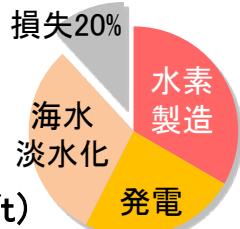
## 高温ガス炉コージェネレーションシステム



エネルギー基本計画のエネルギー政策の基本的視点(3E+S)に応える

## 経済効率性の向上(E)

- 熱利用率 約80%
- 発電効率 約50%
- 燃料の高燃焼度化(160GWd/t)
- 供熱と発電のコージェネレーションによる効率的なエネルギー利用

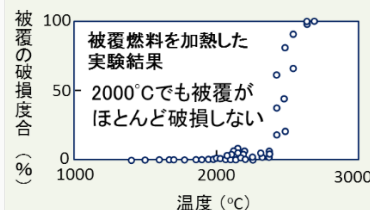
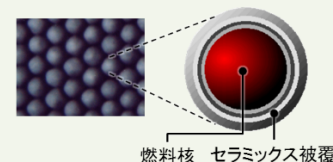


## 固有の安全性(S)

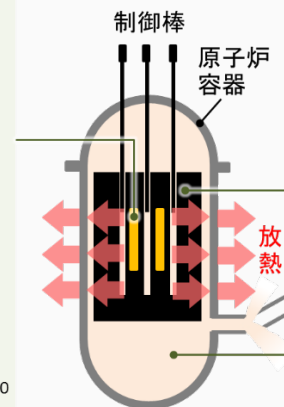
- 電源や冷却材が喪失しても自然に止まり、冷え、放射性物質が閉じ込められるから、福島第一原子力発電所と同様の事故(炉心溶融、水素爆発、大量の放射性物質放出)を起こす可能性がない。

### セラミックス被覆燃料

耐熱性が高く燃料溶融しない



### 燃料温度 < 1600°C



### 黒鉛構造材

大熱容量・高熱伝導であるため原子炉容器外側での放熱で燃料が冷える



### ヘリウム冷却材

化学反応、蒸発しないため水素・水蒸気爆発が発生しない

## エネルギーの安定供給(E)

- 950°Cの高温熱を供給で、水素製造、発電、高温蒸気供給、海水淡水化等の多様な熱利用が可能

## 環境への適合性(E)

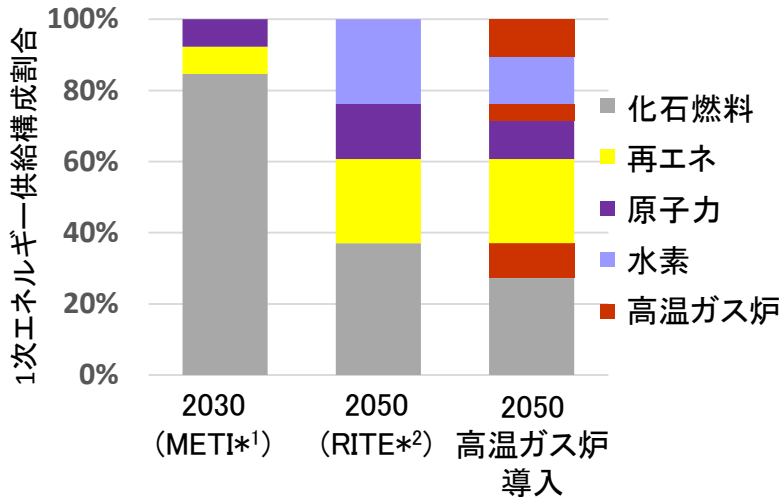
- 軽水炉の1/4程度の使用済燃料発生量
- 多様なエネルギー供給により、発電以外の分野における炭酸ガス排出量を大幅に削減可能

# 環境負荷の低減(炭酸ガス排出量の大幅削減)

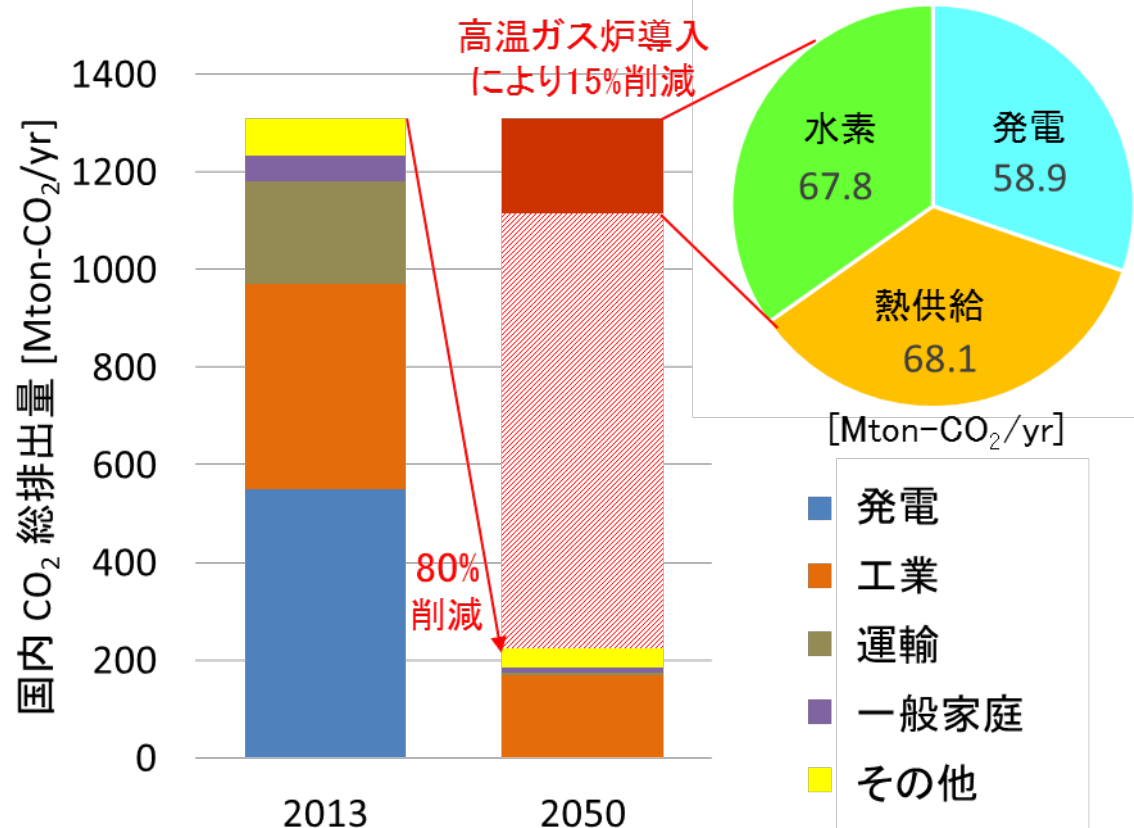
- エネルギー基本計画(3E+S)を満たす高温ガス炉は、日本の温室効果ガス排出削減に関する長期的目標(2050年に2013年比で80%削減)に貢献する最適なシステム

## 高温ガス炉の各需要への導入を仮定

1次エネルギー需要	高温ガス炉導入割合
水素	40%
原子力発電	30%
工業プロセス熱供給	20%



## CO<sub>2</sub>排出削減への高温ガス炉の貢献予測



\*1) 資源エネルギー庁, 長期エネルギー需給見通し, 2015年7月16日

\*2) (公財)地球環境産業技術研究機構(RITE), 2°C目標と我が国の2050年排出削減目標との関係, 2016年3月2日より抜粋

発電以外のエネルギー利用分野で炭酸ガスの排出削減に貢献

## (1) 高温ガス炉技術 (HTTR)



- 定格出力30MW、原子炉出口温度950°C達成(2004年4月)
- 950°C、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、ガスタービン発電に関する基盤技術を完成
- ISプロセスの運転制御技術及び機器信頼性の確証
- ガスタービン翼材の開発



連続水素製造試験装置

0.02m<sup>3</sup>/h、31時間の水素製造に成功  
(平成28年10月)

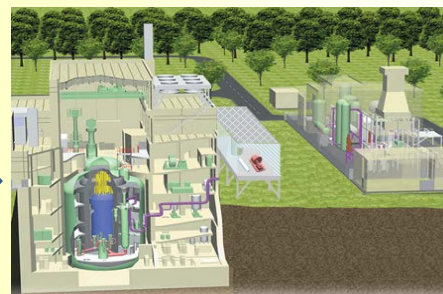
## (3) 実用高温ガス炉設計



- 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
- 実用高温ガス炉の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> システム試験



- 高温ガス炉熱利用技術の総合実証

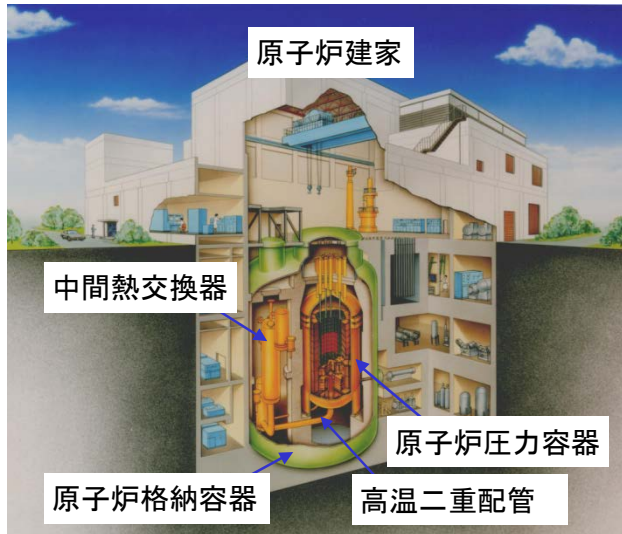


# 高温工学試験研究炉 (HTTR) の概要

## 高温工学試験研究炉 (@JAEA)

### HTTRの設置目的

- 高温ガス炉の炉技術の確立
- 関する熱利用技術の確立



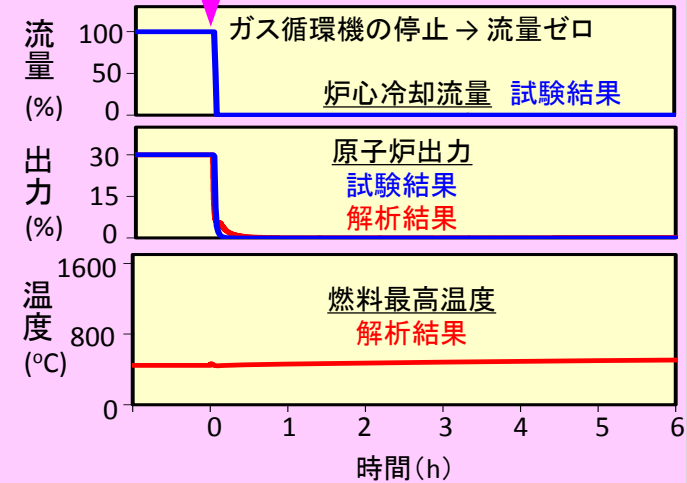
### HTTRの仕様

- 原子炉出力 …… 30MW
- 冷却材 …… ヘリウムガス
- 原子炉出口冷却材温度 …… 850, 950°C
- 炉心構造材 …… 黒鉛
- 燃料 …… UO<sub>2</sub>
- ウラン濃縮度 …… 平均6%

### 研究開発と概念設計



## 安全性実証試験



制御棒挿入なし、冷却流量ゼロにおいて、物理現象のみで、原子炉が自然に静定・冷却されることを確認

## 研究開発

### 燃料・材料



炉内ガスループ(OGL-1)

### 炉物理



高温ガス炉臨界実験装置 (VHTRC)

### 熱流動



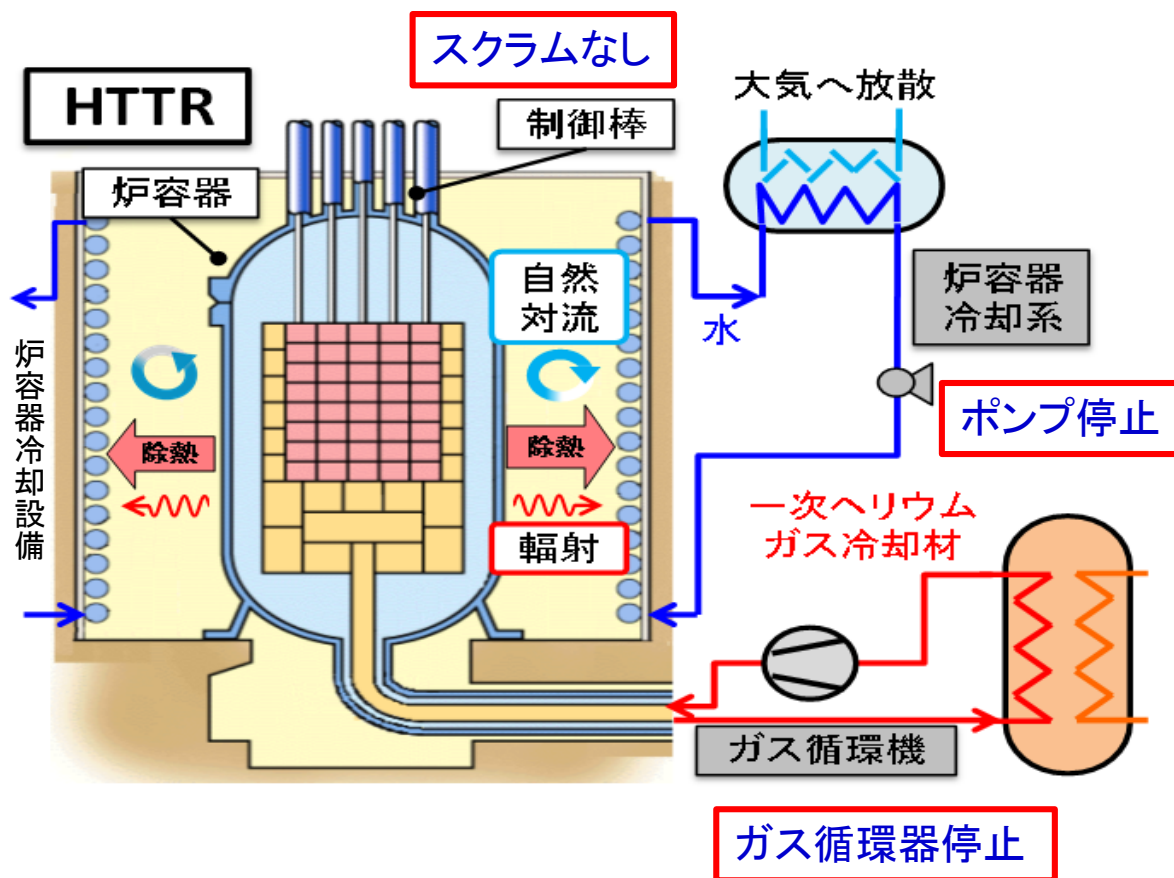
大型構造機器実証試験ループ (HENDEL)

## HTTR再稼働対応

- 平成26年11月26日新規制基準に対応する設置変更許可申請書を規制庁に提出し、計画通りに実質的な審査が終了。今後、設置変更許可取得及び設工認申請を行い、平成31年度中の再稼働を目指す。

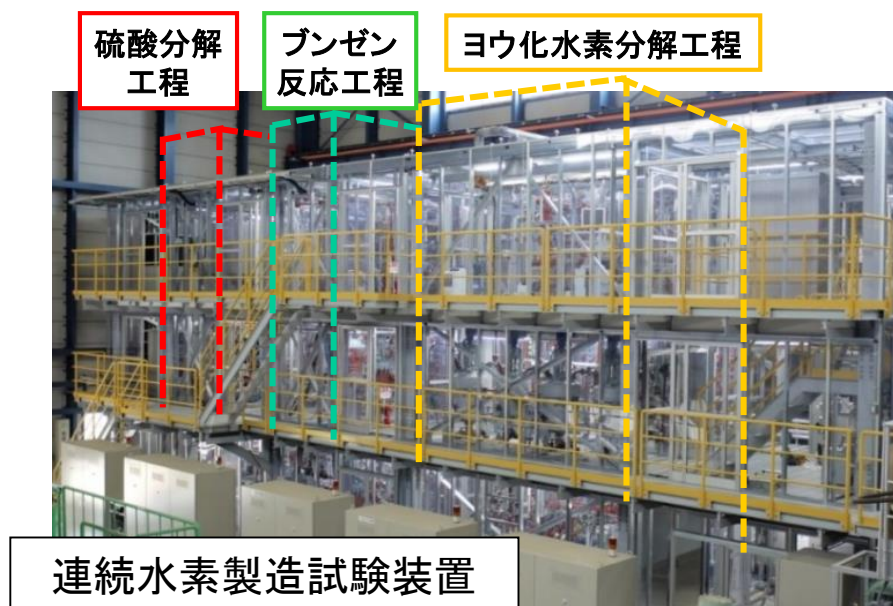
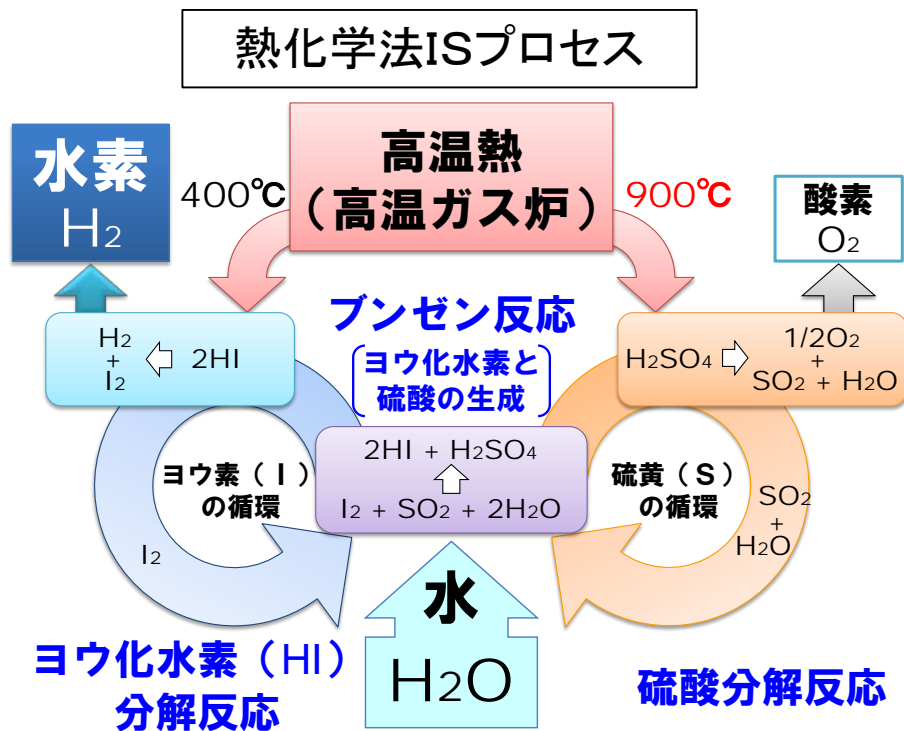
## HTTRを用いた安全性試験 (高温ガス炉の固有安全性を確証)

- 炉心**流量喪失**試験
  - 原子炉出力100%
  - 1次ヘリウム冷却材流量ゼロ
  - 制御棒挿入なし
- 炉心**冷却喪失**試験  
(全交流電源喪失を模擬)
  - 原子炉出力30%
  - 1次ヘリウム冷却材流量ゼロ
  - 炉容器冷却設備停止
  - 制御棒挿入なし



# 水の熱分解による水素製造の技術開発

- 水の熱分解：4000°C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°C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



- ・平成26年3月完成、水素製造量 ~0.1 m<sup>3</sup>/h
- ・W 18.5 × D 5 × H 8.1(m) ・加熱方式: 電気ヒーター

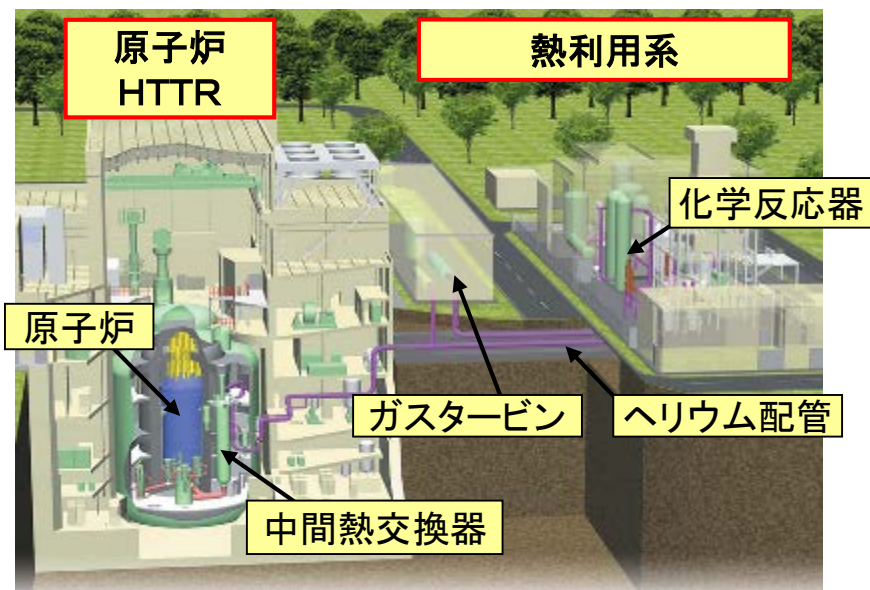
## 今後の技術課題

- 陽イオン交換膜開発等の熱効率向上技術
- セラミックスを用いた反応器高圧化技術
- 経済性向上に資する要素技術開発

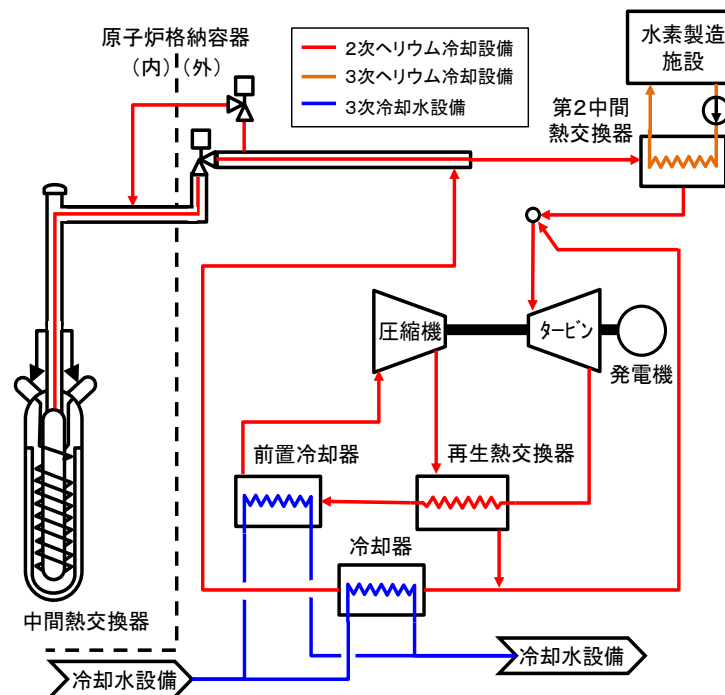
- 実用工業材料製(金属、セラミックス)の連続水素製造試験装置
- 平成28年度に連続水素製造試験に最初成功
- 平成30年度に装置の信頼性試験を実施する計画



- 原子炉に工業プロセスプラントを接続するための安全基準を確立
  - ✓ 一般の工業プラントとしても、原子炉への接続を可能とすることにより、核熱利用の用途拡大を図る。
- 原子力を利用した炭酸ガスの排出がない水素製造、ガスタービン発電技術を世界で初めて確証



HTTR接続試験の構成



HTTRに接続する熱利用系の構成

高温ガス炉システム熱利用技術が完成(実用化可能)

# 高温ガス炉の開発の全体計画

## ガスタービン発電システム開発 (2001～)

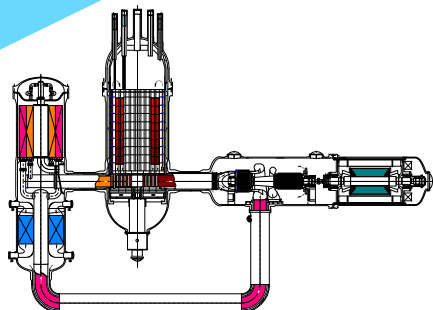
原子力メーカーとの共同

- ユーザー要求に応じた基本設計、安全設計、コスト評価
- 高効率ヘリウム圧縮機、コンパクト熱交換器、タービンブレード材等技術開発



世界で初めて  
軸流式ヘリウム  
圧縮機の運転  
実証に成功、  
圧縮機設計  
手法を確立

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



## GTHTTR300 民間実証プラント

- 原子炉出口温度 850°C
- 電気出力 125 MWe
- 設計変更なしに  
300 MWeへの出力向上  
を可能とする

## 連続水素製造試験(2014～)



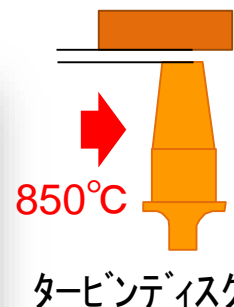
現在

## HTTR-GT/H<sub>2</sub>試験

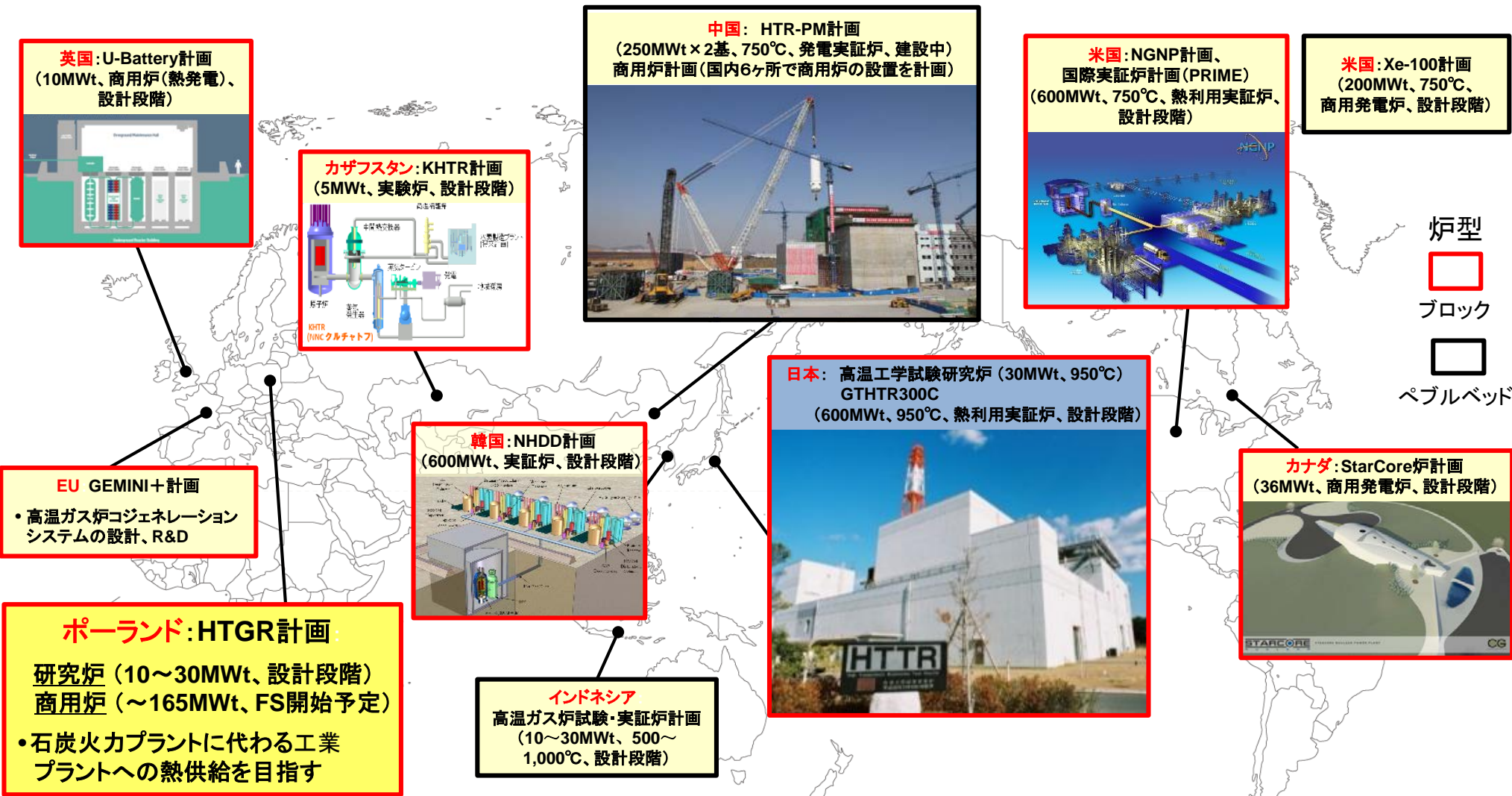


## 実規模/高温機能試験

- 供用条件下での  
タービンディスク/ケーシング  
クリアランスの確認



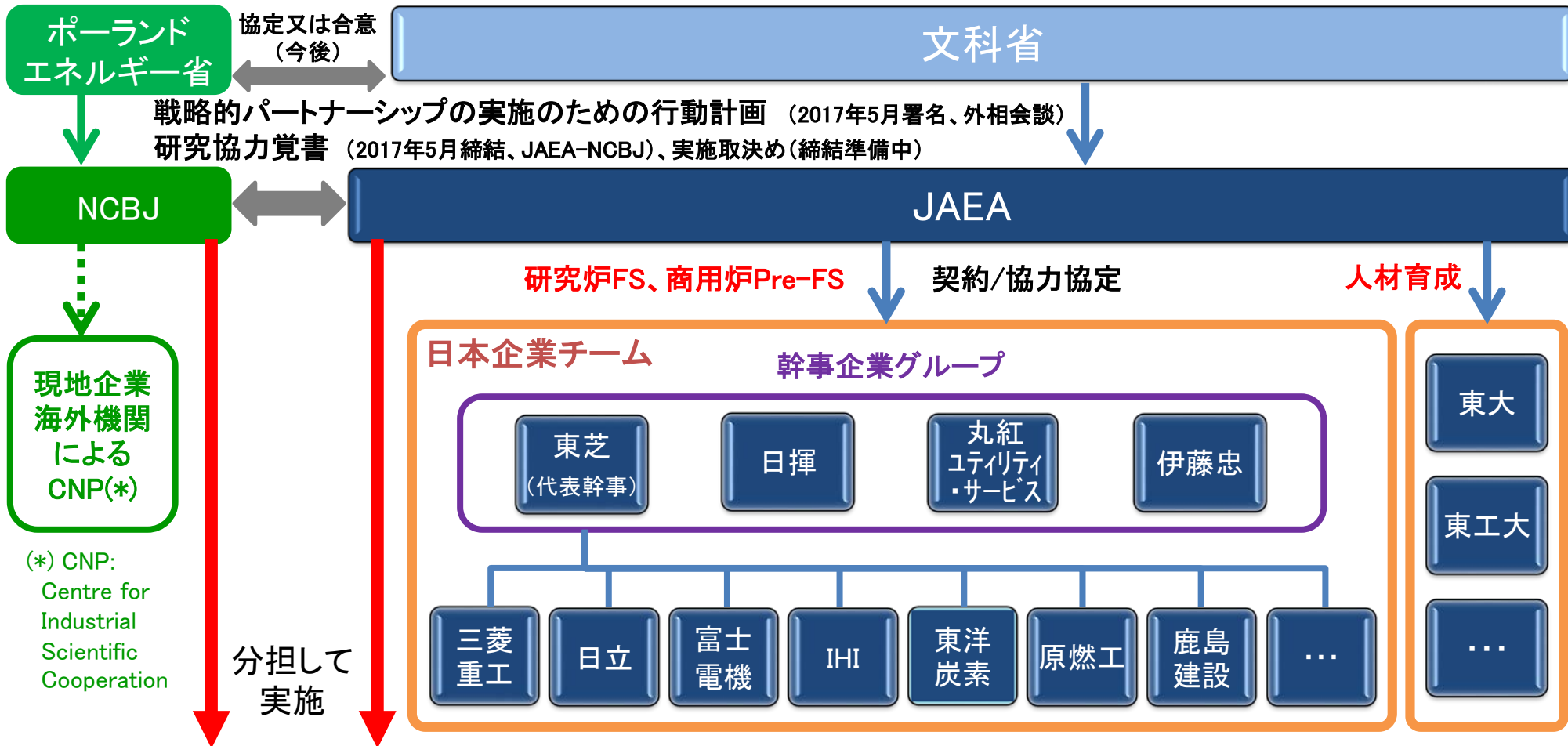
商用化へ  
出力向上



- JAEAとポーランド国立原子力研究センター(NCBI)研究協力覚書を締結(平成29年5月18日)
- 高温ガス炉産学官協議会において、海外戦略検討ワーキンググループを設置し、ポーランドとの協力の進め方を協議することを決定(平成29年6月12日)



# ポーランド高温ガス炉計画への協力体制



## ポーランド高温ガス炉計画に関する共同活動 (Pre Conceptual Study)

### 研究炉 (10~30 MW)

#### HTTRの設計に基づく研究炉の成立性評価 (FS)

- 基本設計
- 現地工事、施工管理等の検討
- 建設費評価
- EPC枠組みの検討
- 資金枠組みの検討

### 商用炉 (165 MW)

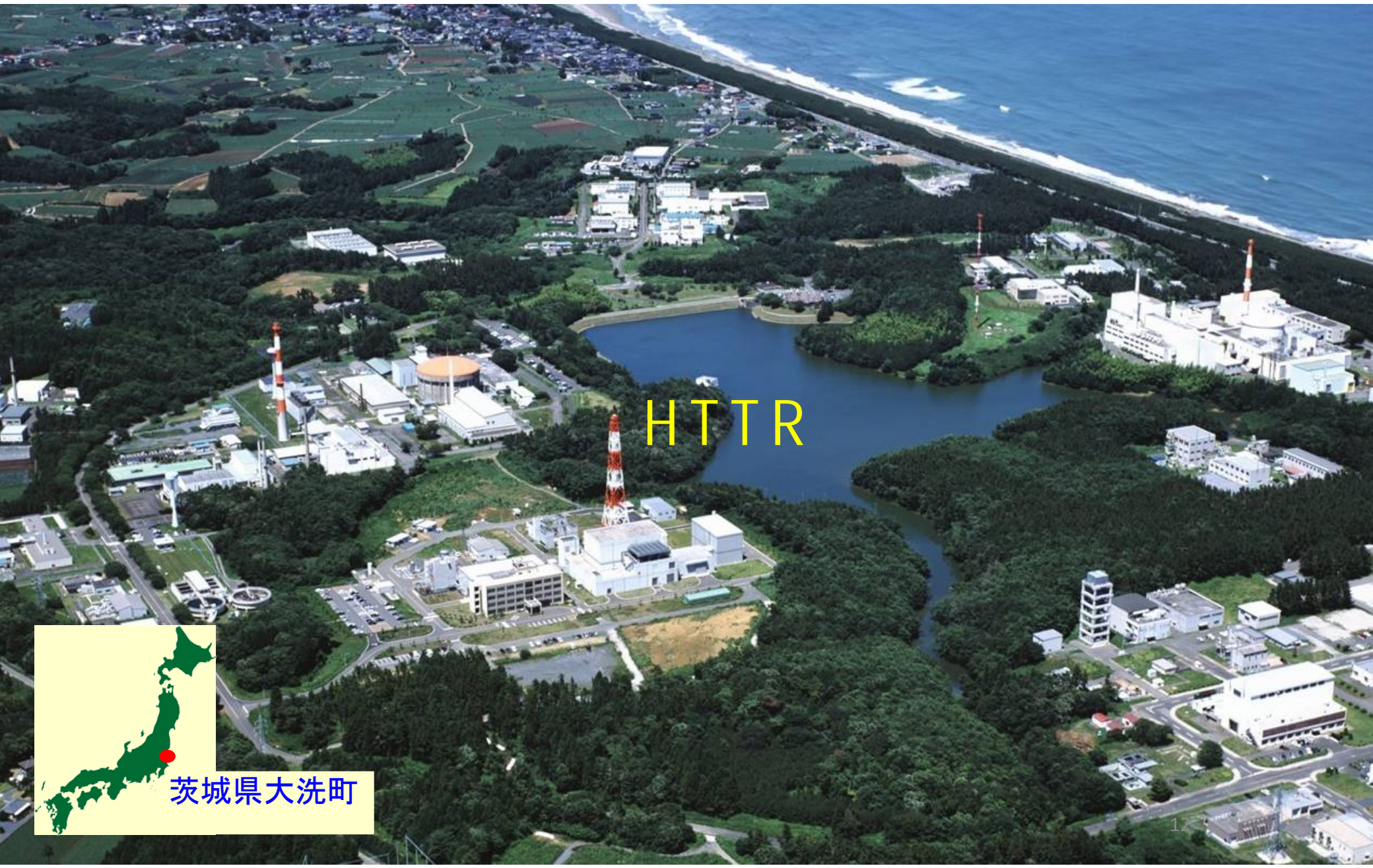
#### 商用炉の成立性予備評価 (Pre-FS)

- 市場調査
- 環境影響評価
- 概念検討・建設計画
- 現地工事、施工管理等の予備検討
- 実現に向けた計画及び推奨案
- 建設費、経済性予備評価





# Welcome to HTTR (高温工学試験研究炉) !



茨城県大洗町