

# 高温ガス炉技術に関する 研究開発の経緯と現状について

独立行政法人日本原子力研究開発機構

# 目次

1. 高温ガス炉について
2. 高温ガス炉技術研究開発
3. 熱利用技術研究開発
4. まとめ

# 1. 高温ガス炉について

# 1-1 高温ガス炉開発の経緯

## なぜ、高温ガス炉が開発されたのか

- 英国の世界初の商用原子力発電所である黒鉛減速炭酸ガス冷却炉(マグノックス炉)を皮切りに、各国で軽水炉と競合するシステムとして高温ガス炉の開発が開始され、高温化、高出力密度化、高熱効率化の研究開発が進められた。
- 米国、ドイツでは、政府と民間が連携し、発電効率約40%の経済性に優れた蒸気タービン発電を用いた高温ガス炉(原型炉)が開発された。
- ドイツ、日本では化石燃料の不足に対処するため、石炭ガス化や還元製鉄のための熱利用高温ガス炉の研究開発を実施した。
- スリーマイル島原子力発電所事故を契機として、炉心溶融事故が起こらない小型モジュール炉の概念が提案され、更なる経済性向上を目指したガスタービン発電高温ガス炉の開発が進められた。

## 高温ガス炉特有の技術

- 金属製の被覆管は被覆管温度が650°C以上では使用が困難。
  - 被覆管に代わり核分裂生成物を閉じ込め、高温に耐える、被覆燃料粒子を開発。
- 高温では炭酸ガスが熱分解するため冷却材としては使用が困難。
  - 高温で熱分解せず、構造物と反応しない不活性ガスであるヘリウムガスを使用。

# 1-2 高温ガス炉の特長

## 優れた安全性

- 福島第一原子力発電所(1F)事故によって強く認識された軽水炉のリスク(炉心溶融、水素爆発、大量の放射性物質放出)
- 原理的には、高温ガス炉は1F事故と同様の事故を起こす可能性がない。

### 高温ガス炉

- 制御棒未挿入でも自然に原子炉出力低下
- 崩壊熱除去のための炉心冷却設備が不作動でも自然に冷却
- 原子炉が自然に静定

### 東電福島第一原発事故(1F事故)

- ✓地震
  - 制御棒挿入
  - 原子炉停止
- ✓津波
  - 電源喪失等
  - 崩壊熱除去不能
  - 炉心溶融
- 水素爆発
- 放射性物質放出

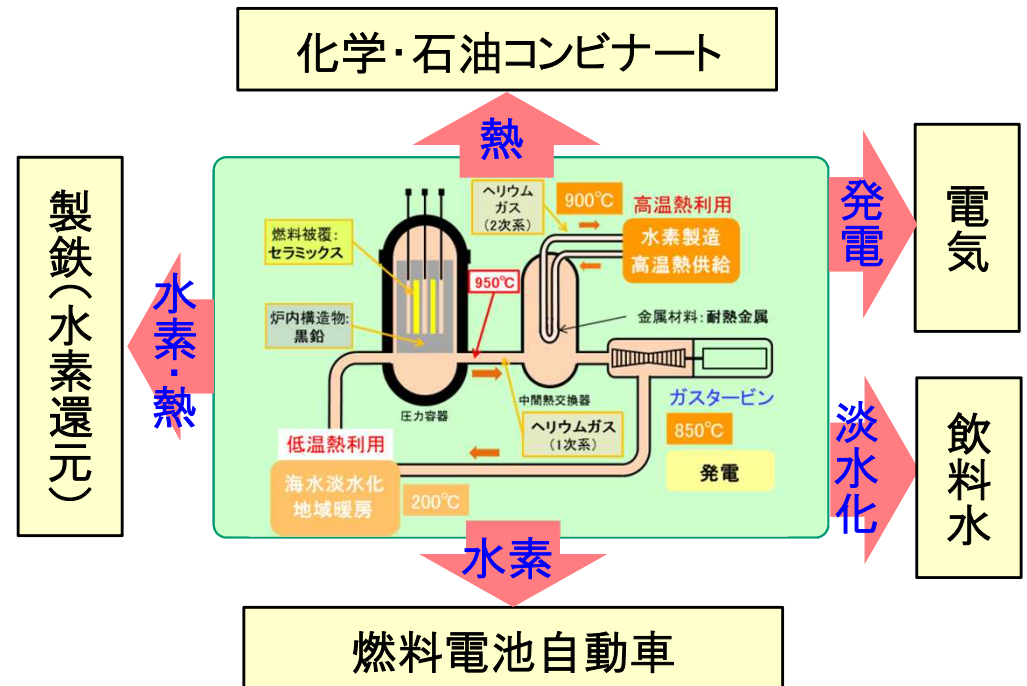
## CO<sub>2</sub>排出量の大幅な低減に貢献

### 熱利用

- 高温ガス炉は950℃が取り出せるので、熱利用分野で多様な利用が可能
- 化石燃料からのCO<sub>2</sub>排出量を削減可能

### 発電

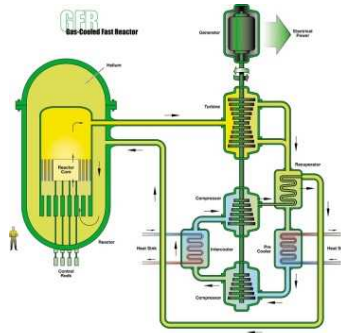
- 軽水炉と比べて高い発電効率・熱利用率
  - ✓ 発電効率: 約33% → 約50%
  - ✓ 熱利用率: 約33% → 約80%



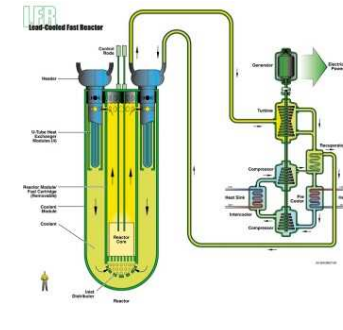
# 1-3 第4世代原子力システム

第4世代原子力システムは2030年頃からの実用化を目指した原子炉で、米国原子力エネルギー研究諮問委員会が中心となり、6つの炉形を選択した。

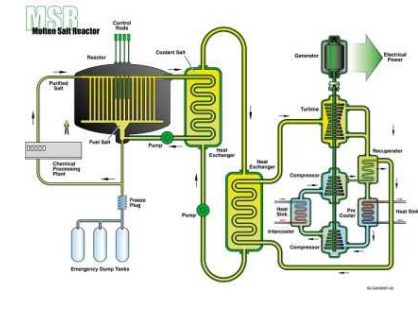
- ガス冷却高速炉 (GFR)
- 鉛冷却高速炉 (LFR)
- 熔融塩炉 (MSR)
- ナトリウム冷却高速炉 (SFR)
- 超臨界圧水冷却炉 (SCWR)
- 超高温ガス炉 (VHTR)



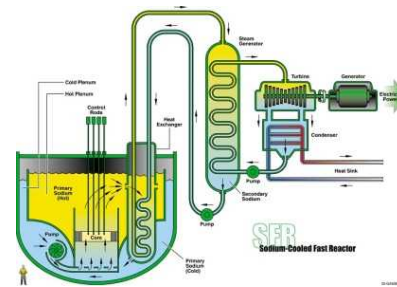
ガス冷却高速炉 (GFR)



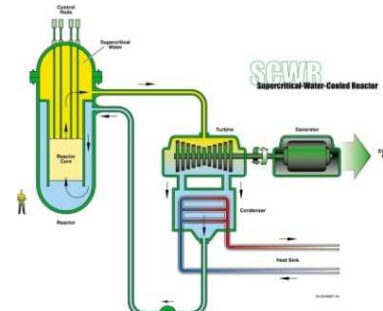
鉛冷却高速炉 (LFR)



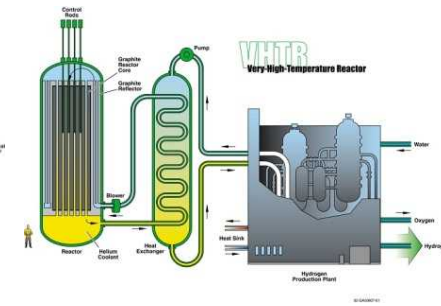
熔融塩炉 (MSR)



ナトリウム冷却高速炉 (SFR)



超臨界圧水冷却炉 (SCWR)



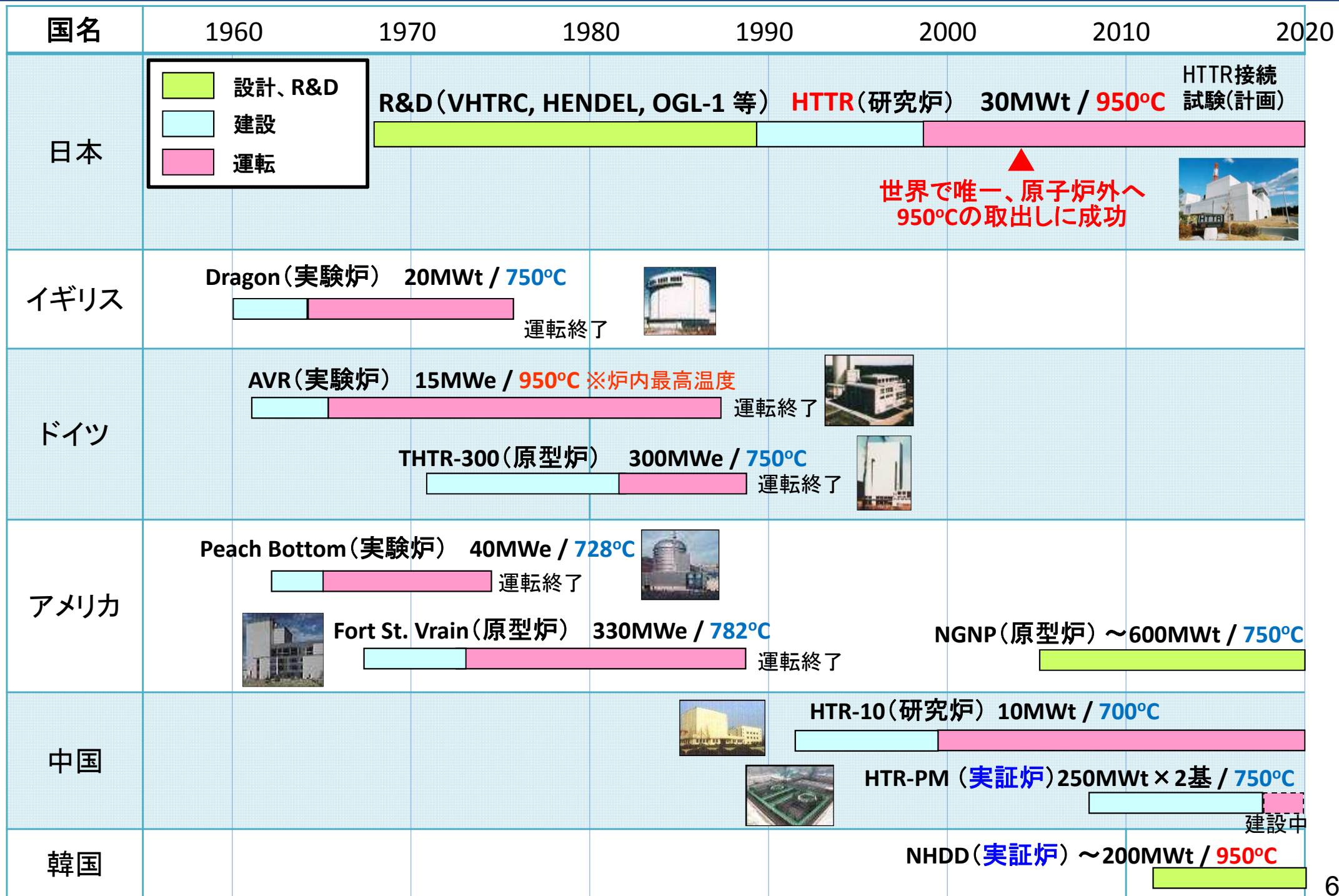
超高温ガス炉 (VHTR)

各国から公募したアイデアは技術作業グループで検討され、その結果をロードマップ統合チームでレビューし、概念候補が決定された。

A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, U.S.DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, GIF-002-00, 2002

我が国においては、もんじゅ等のナトリウム冷却高速炉 (SFR) の他、超高温ガス炉 (VHTR) に関する研究が先行している。

# 1-4 高温ガス炉開発の歴史と将来展望



## 1-5 海外における高温ガス炉実用化の現状

- 中国では、高温ガス実証炉HTR-PMを建設中で、2017年に建設完了予定である。福建省等で新たな高温ガス炉の建設計画がある。
- 米国では、原型炉FSV(Fort St. Vrain)で大型化を目指した(1968年～1989年)が、その後、中小型炉でモジュール化により経済性と安全性を高めたシステム設計に移行した(1990年代)。これは、次世代原子力プラント(NGNP)計画(2005年～)に引き継がれ、水素製造及びプロセス蒸気供給の熱利用のための高温ガス炉の研究開発を進めているが、天然ガス価格の下落の影響もあり、建設段階に至っていない。
- 米国、韓国では高温ガス炉システムの建設に向けた産業界のアライアンスが設立されている。
- ドイツでは、原型炉THTR-300で大型化を目指した(1971年～1989年)が、原子力から撤退する政策変更により実用化せずに終了した。
- カザフスタンやインドネシアなど、日本の技術を導入して高温ガス炉を建設したい国が現れており、日本からの技術移転、建設コストの分担が期待されている。



## 2. 高温ガス炉技術研究開発

# 2-1 高温工学試験研究炉 (HTTR) の概要

## 高温連続運転



## 建設



原子炉格納容器の設置



着工

## 研究開発と概念設計

## 基盤技術の確立

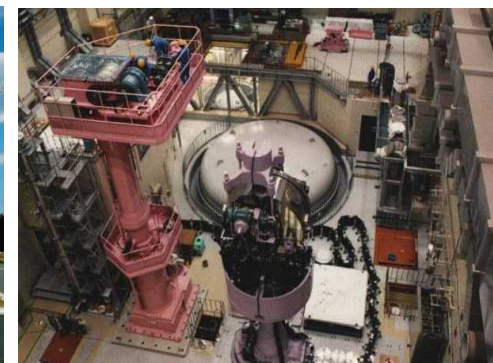
## 実用システムの原型提示



- 我が国初の黒鉛減速ヘリウムガス冷却型原子炉 (高温ガス炉)

- ✓ 原子炉熱出力: 30MW
- ✓ 原子炉出口冷却材温度: 850°C / 950°C
- ✓ 原子炉入口冷却材温度: 395°C
- ✓ 1次冷却材圧力: 4MPa
- ✓ 炉心有効高さ: 2.9m
- ✓ 炉心等価直径: 2.3m
- ✓ 出力密度: 2.5W/cc
- ✓ ウラン濃縮度: 3~10% (平均6%)

## HTTRの外観および内部



## 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)

## 2-2 燃料の研究開発成果

### ■ 燃料

#### ➤ 商用規模の燃料製造技術の確立

(原子燃料工業と共同開発)

- 高真球度・高密度燃料核(二酸化ウラン)を製造可能な振動滴下-外部ゲル化法
- 被覆燃料粒子の製造時破損を防止する連続被覆技術およびコンパクト成形技術

#### ➤ 燃料性能の把握

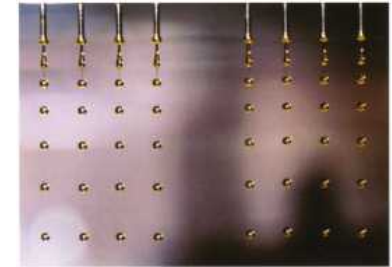
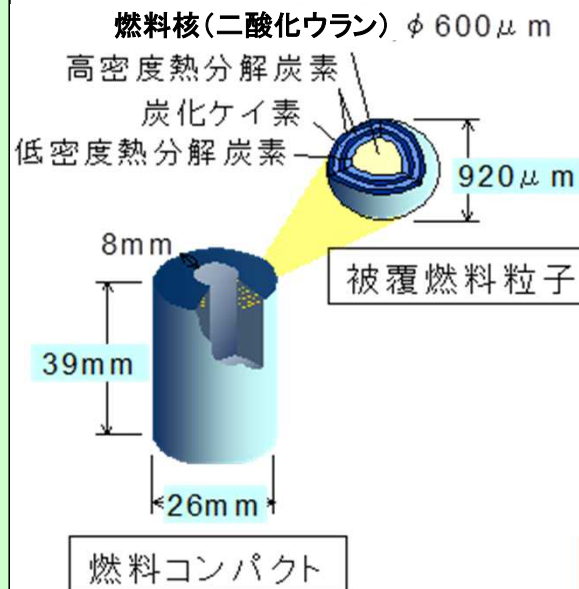
(原子力機構)

- HTTR環境を模擬したOGL-1試験やキャプセル照射試験により、核分裂生成物(FP)閉込め性能を把握
- 照射後試験により各種物性値(熱伝導率、照射寸法変化、強度、FP拡散係数、等)を取得し、被覆燃料粒子の破損機構を解明

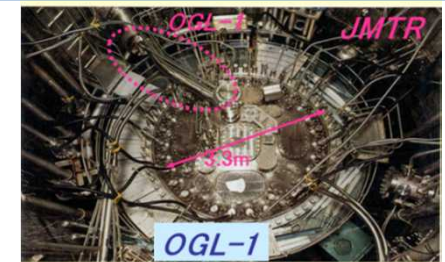
#### ➤ HTTR運転による燃料性能の実証

(原子力機構)

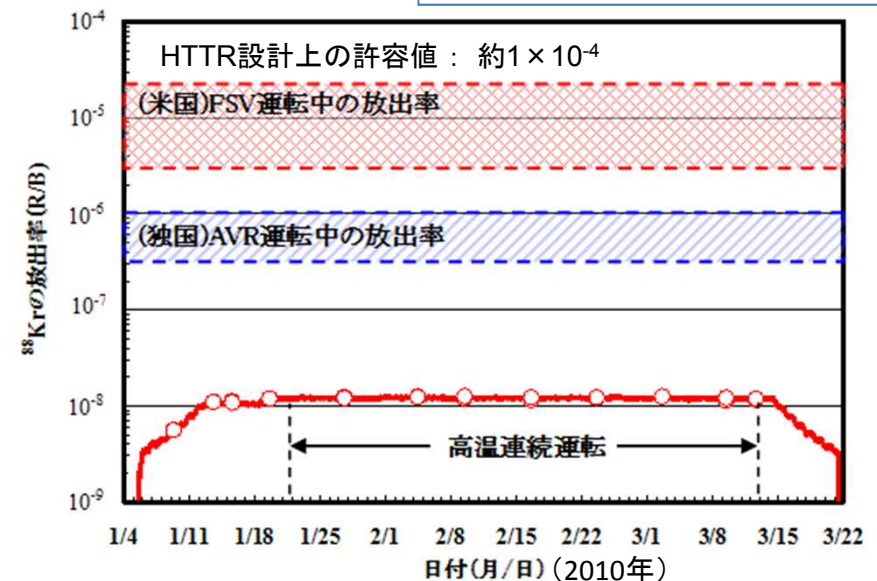
- 950°C高温連続運転でFPの放出量が米国、独の実証炉より2~3桁低いことを実証



燃料核の振動滴下-外部ゲル化法



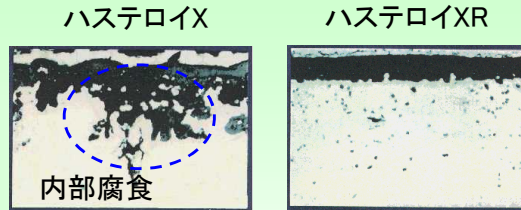
JMTRの炉内ガスループ(OGL-1)を用いて照射データを取得



高温ガス炉は、民間企業を含めた世界一の国産技術のみで建設可能

## 2-3 材料の研究開発成果

### ■ 高温金属材料ハステロイXR



1000°C 10000hr腐食試験後断面写真

➤ 高温ガス炉ヘリウム環境に適したハステロイXRの開発（三菱マテリアルと共同開発）

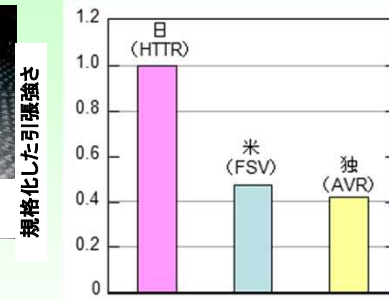
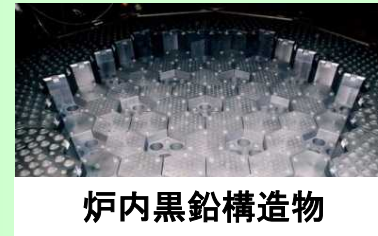
- 既存合金ハステロイXをベースに、Mn、Si、Al、Ti、Co、の各種合金成分の含有量を最適化し、ヘリウム中の不純物による腐食を抑制。
- B含有量を最適化し、クリープ特性を改善。



原子力用構造材として世界最高温度(950°C)で使用できる金属材料。HTTRの中間熱交換器に採用。

中間熱交換器

### ■ 黒鉛材料 IG-110



➤ 高強度、耐放射線性に優れた黒鉛(IG-110)の開発（東洋炭素と共同開発）

- 等方的な構造と特性を持たせる静水圧成形法により、独、米の押出し成形法の黒鉛と比較して引張強度が約2倍大きい黒鉛を開発（東洋炭素）
- 照射効果を含む材料データ（強度特性、熱特性、腐食データ）を取得し、黒鉛構造設計方針を確立（原子力機構）

高温ガス炉は、民間企業を含めた世界一の国産技術のみで建設可能

## 2-4 炉物理の研究開発成果

### 目的

開発したHTTRの核設計計算手法の精度が、設計で考慮している誤差以内に収まることを確認する。

- ①実効増倍率、②制御棒反応度価値、
- ③反応度調整材反応度価値、④出力分布、
- ⑤反応度温度係数

### 方法

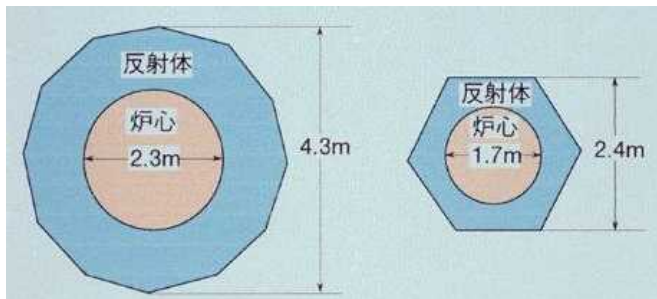
HTTRの核的な特性を模擬した高温ガス炉臨界実験装置(VHTRC)で得られた実験値と計算値を比較した。

### 成果

HTTRの核設計計算手法の精度は、全ての項目について設計誤差以内に収まることを確認。

### VHTRCの概要

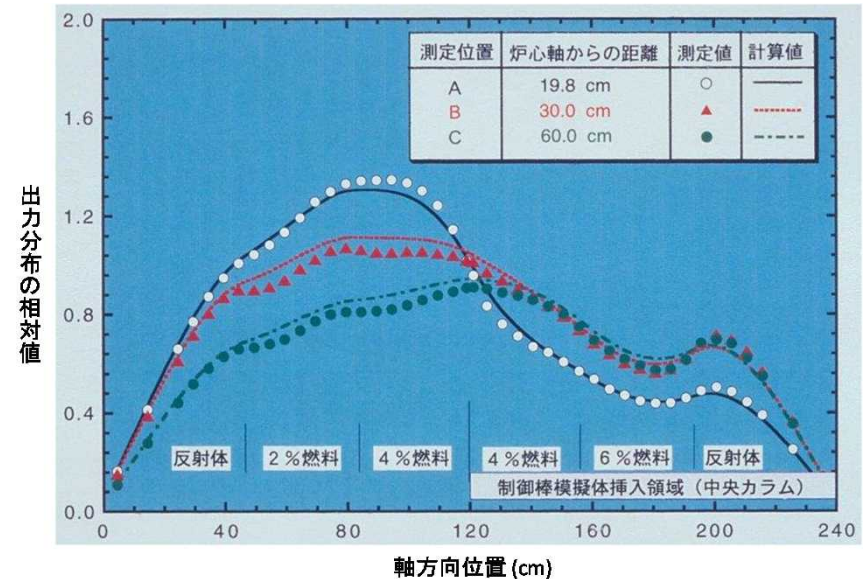
- ✓ 高温ガス炉の核特性データを取得するために製作された臨界実験装置。
- ✓ 1985年に初臨界を達成し、1999年まで運転。2000年度に解体撤去。



HTTR(左)とVHTRC(右)の炉心断面図



VHTRCの外観



実験値と計算値の比較の例(④出力分布)

実験値(プロット)と計算値(線)の差は最大で3%なので、核設計精度は設計で考慮している誤差に収まっている。

### HTTRの核計算手法の計算精度の結果

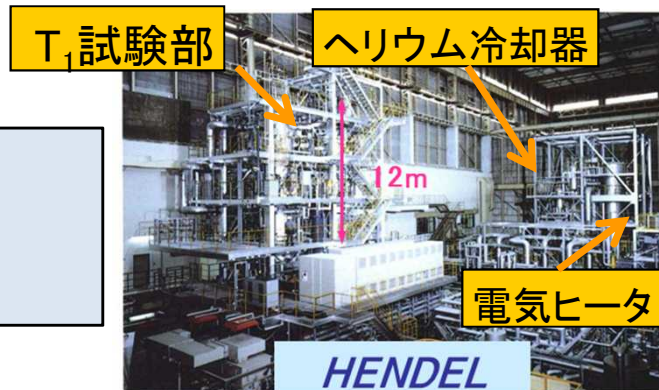
項目	HTTRの設計で考慮している誤差	核計算精度
① 実効増倍率	1% $\Delta k/k$	1.0% $\Delta k/k$
② 制御棒反応度価値	10%	9.5%
③ 反応度調整材反応度価値	10%	4.5%
④ 出力分布(径方向/軸方向)	3% / 4%	2.9% / 3.0%
⑤ 反応度温度係数	10%	7.0%

## 2-5 熱流動の研究開発成果

### HENDEL: Helium Engineering Demonstration Loop

- HTTRと同じ温度(950°C)、圧力(4MPa)で、炉心、炉床部構造物、高温配管、ヘリウム循環機などの主要機器の実証試験を行うヘリウムガスループ

HENDELの外観



#### ヘリウム純化設備

- ・設計性能の検証
- ・運転経験の蓄積

#### ヘリウム循環機

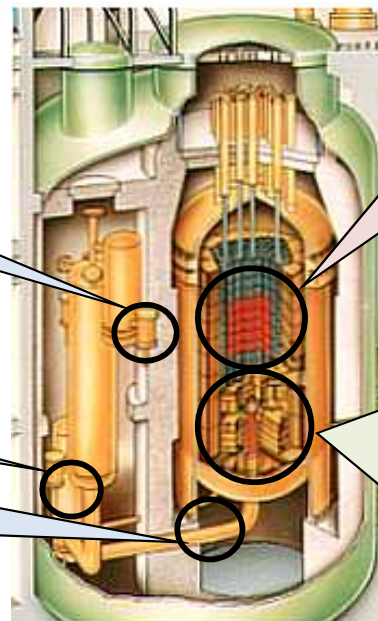
- ・設計性能の検証
- ・運転経験の蓄積

#### ヘリウム冷却器

- ・設計性能の検証
- ・運転経験の蓄積

#### 高温配管

- ・製作性及び構造健全性の実証
- ・内部断熱特性の評価



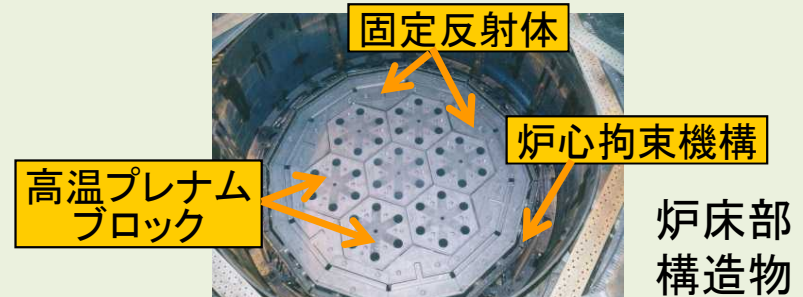
#### 炉心: 燃料体スタック実証試験部 ( $T_1$ )

- ・燃料棒及び燃料ブロックの製作性、組み立て性、構造健全性の確認
- ・燃料棒の伝熱特性及び圧損特性の評価
- ・燃料ブロック間を流れる冷却材の隙間流れの伝熱性能への影響評価

#### 炉床部構造物:

##### 炉内構造物実証試験部 ( $T_2$ )

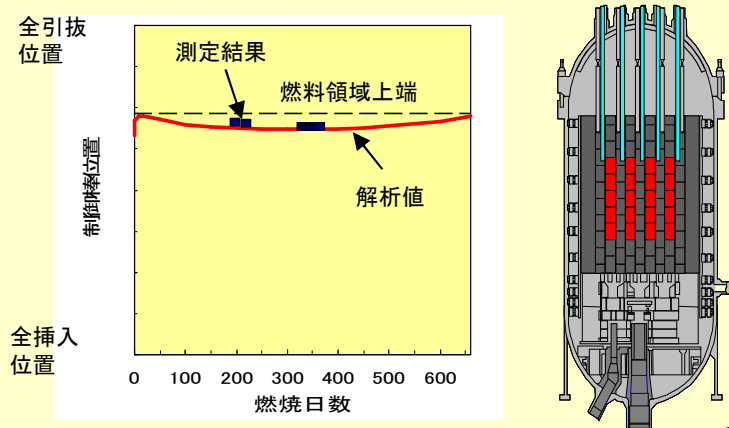
- ・黒鉛構造物及び鋼構造物の製作性、組み立て性、構造健全性の確認
- ・固定反射体間を流れる低温冷却材の流量評価
- ・炉床部内における高温冷却材の温度混合特性及びホットストリークの評価
- ・炭素ブロックの断熱性能の評価



# 2-6 HTTR高温試験運転の成果

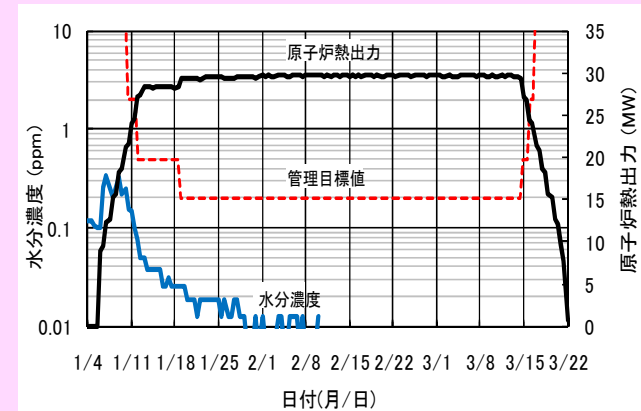
## 炉心の特性

- ▶ 過剰反応度の指標となる制御棒位置を的確に評価できることを確認
- ⇒ 出力密度の向上等、炉心性能向上が可能



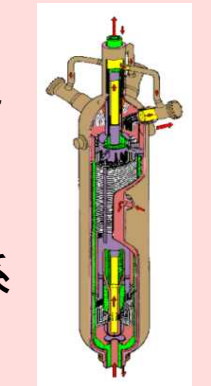
## 冷却材の管理

- ▶ 冷却材(ヘリウム)中の不純物の濃度の管理技術を確立
- ⇒ 炉内構造物、高温機器の長寿命化が可能



## 高温機器の性能

- ▶ 原子炉で発生した熱を中間熱交換器を介して安定して2次系に供給できることを確認
- ⇒ 高温ガス炉で発生した熱の利用系への連続的な供給が可能



中間熱交換器

## プラントの制御

- ▶ 1次ヘリウム流量や温度等の変動幅は小さく、所定の値に運転中安定して制御されたことを確認

⇒ 長期安定  
運転が可能

項目	変動幅
核出力	±0.4%
冷却材温度	約3°C
冷却材流量	±0.5%

高温核熱の安定供給が可能

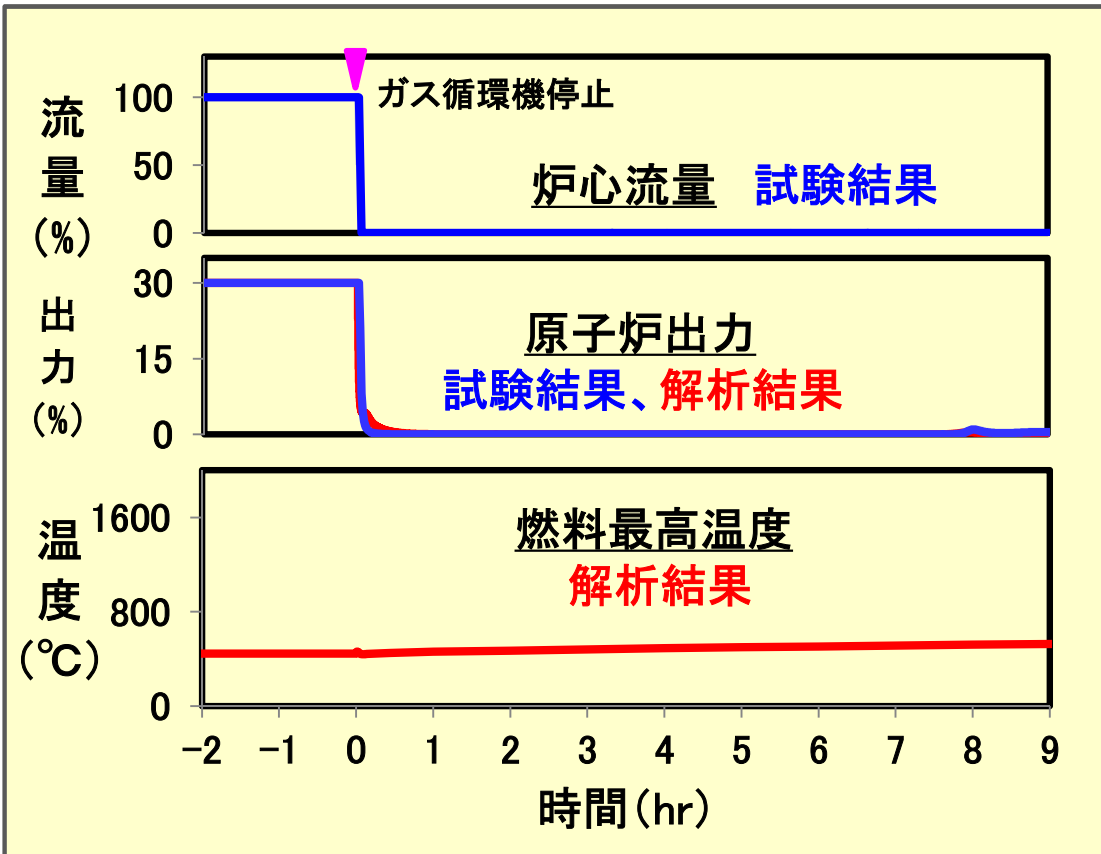
## 2-7 高温ガス炉の安全性に関する研究

想定する事象	想定されうる原因	研究内容
反応度添加(過出力) 停止機能喪失	制御棒誤引抜き 制御棒挿入失敗	<ul style="list-style-type: none"><li>制御棒引抜き模擬試験</li></ul>
冷却機能喪失	冷却材(ヘリウム)流出	<ul style="list-style-type: none"><li>安全性実証試験(炉心流量喪失試験)</li></ul>
被覆粒子燃料の閉じ 込め機能喪失	過度の炉心温度上昇	<ul style="list-style-type: none"><li>高燃焼度における閉じ込め性能の確証実験(実施予定)</li></ul>
放射性物質拡散	過度の炉心温度上昇	<ul style="list-style-type: none"><li>放射性ヨウ素の定量的評価(実施予定)</li><li>事故時の放出放射性物質量の評価(実施予定)</li></ul>
黒鉛の酸化	空気侵入	<ul style="list-style-type: none"><li>空気侵入事故模擬試験</li><li>黒鉛酸化試験</li></ul>



## 2-8 HTTR安全性実証試験の成果

### 冷却機能喪失



- ガス循環機を停止し、1次冷却材流量（炉心流量）をゼロにする。  
**（原子炉冷却機能喪失）**
- 原子炉のスクラム操作（制御棒挿入操作）をしない。  
**（原子炉の安全保護機能停止）**

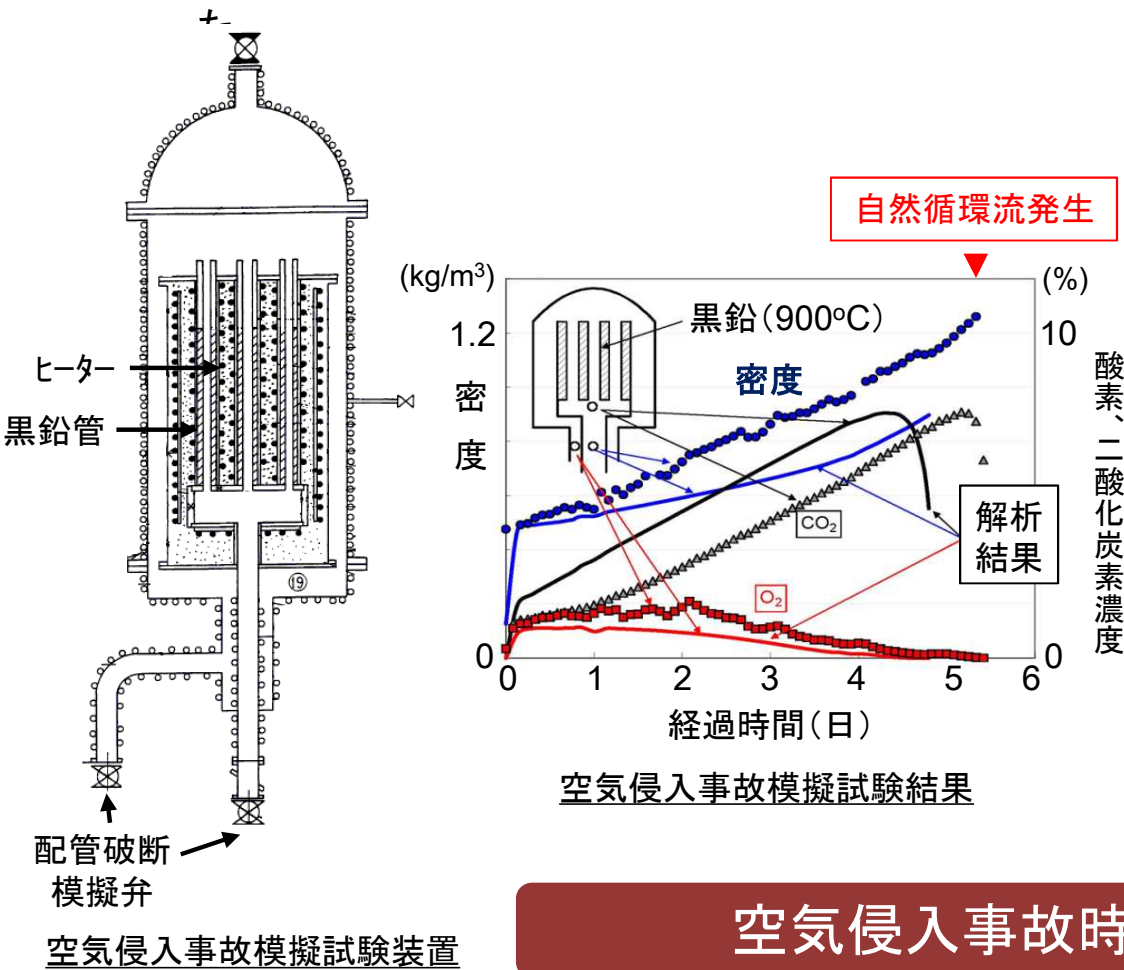
- 炉心流量がゼロになると温度フィードバック特性により、スクラム操作なしでも原子炉は自然に停止
- その後、原子炉出力は一定の低出力へ、安定に推移
- 原子炉は自然に冷却される

原子炉出力30% (9MW) で試験を実施

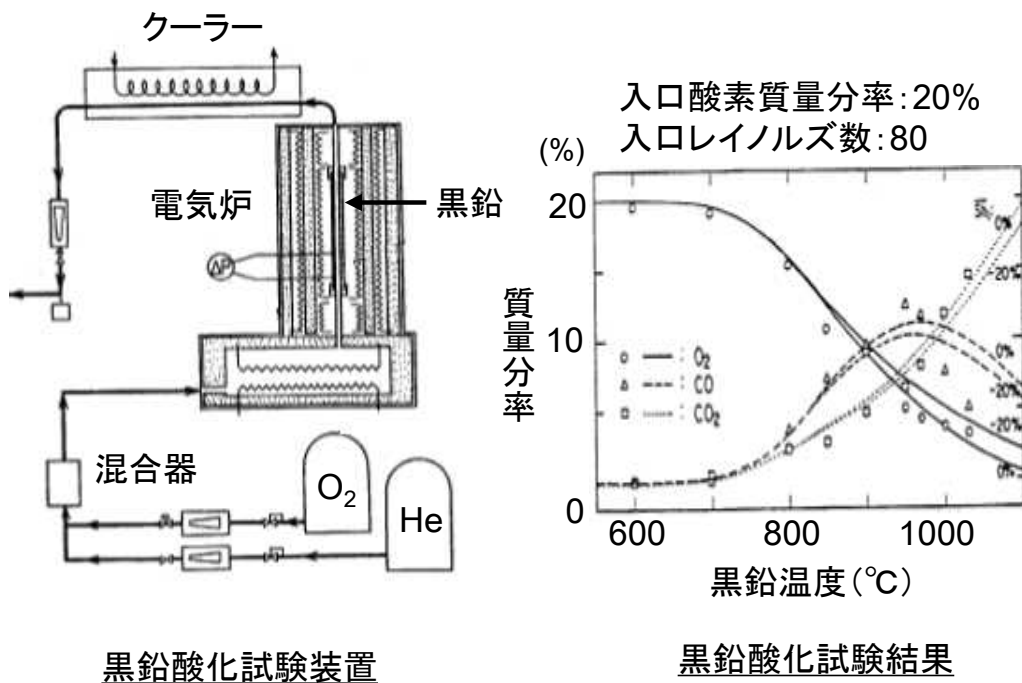
高温ガス炉の優れた安全性を確証

# 2-9 空気侵入事故に関する研究開発成果

- 目的** 1次冷却系の配管破断事故時における炉心への空気侵入挙動を明らかにする。
- 方法** 原子炉内流路を模擬した試験装置を用いて空気侵入挙動を把握する。
- 成果** 空気侵入の律速過程である自然循環流の発生時期が、局所的な自然対流により早まること、黒鉛酸化による生成ガスにより影響を受けないことを明らかにし



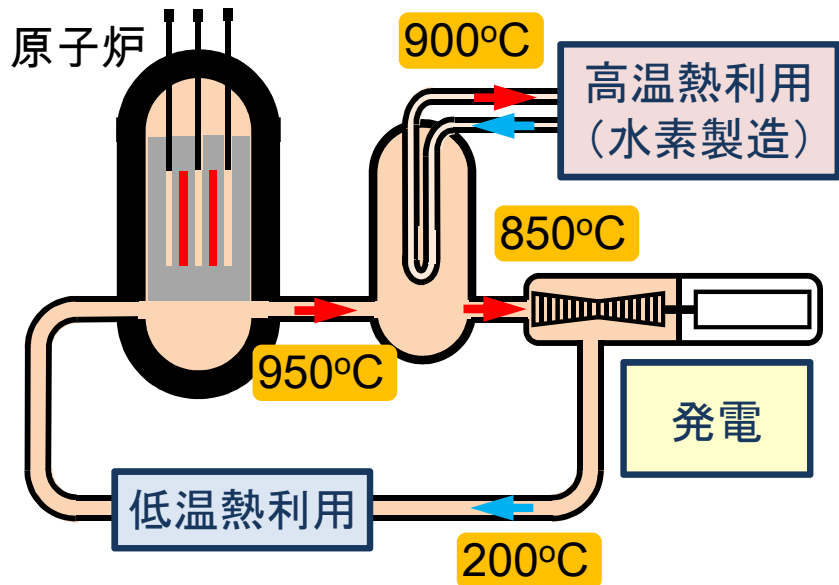
- 目的** 1次冷却系の配管破断事故時の炉心への空気侵入時における黒鉛酸化挙動を明らかにする。
- 方法** 黒鉛温度をパラメータに、黒鉛酸化試験を行い生成ガス濃度データを取得する。
- 成果** HTTRの炉心で使用予定の黒鉛材料に対する化学反応速度を明らかにした。



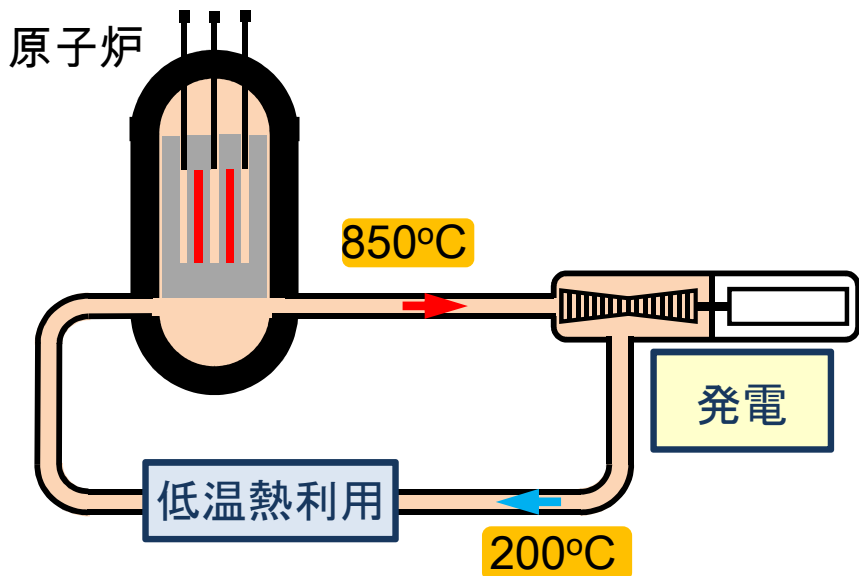
空気侵入事故時の挙動解明に貢献

### 3. 熱利用技術研究開発

# 3-1 高温ガス炉の熱利用



熱電併給用高温ガス炉システム

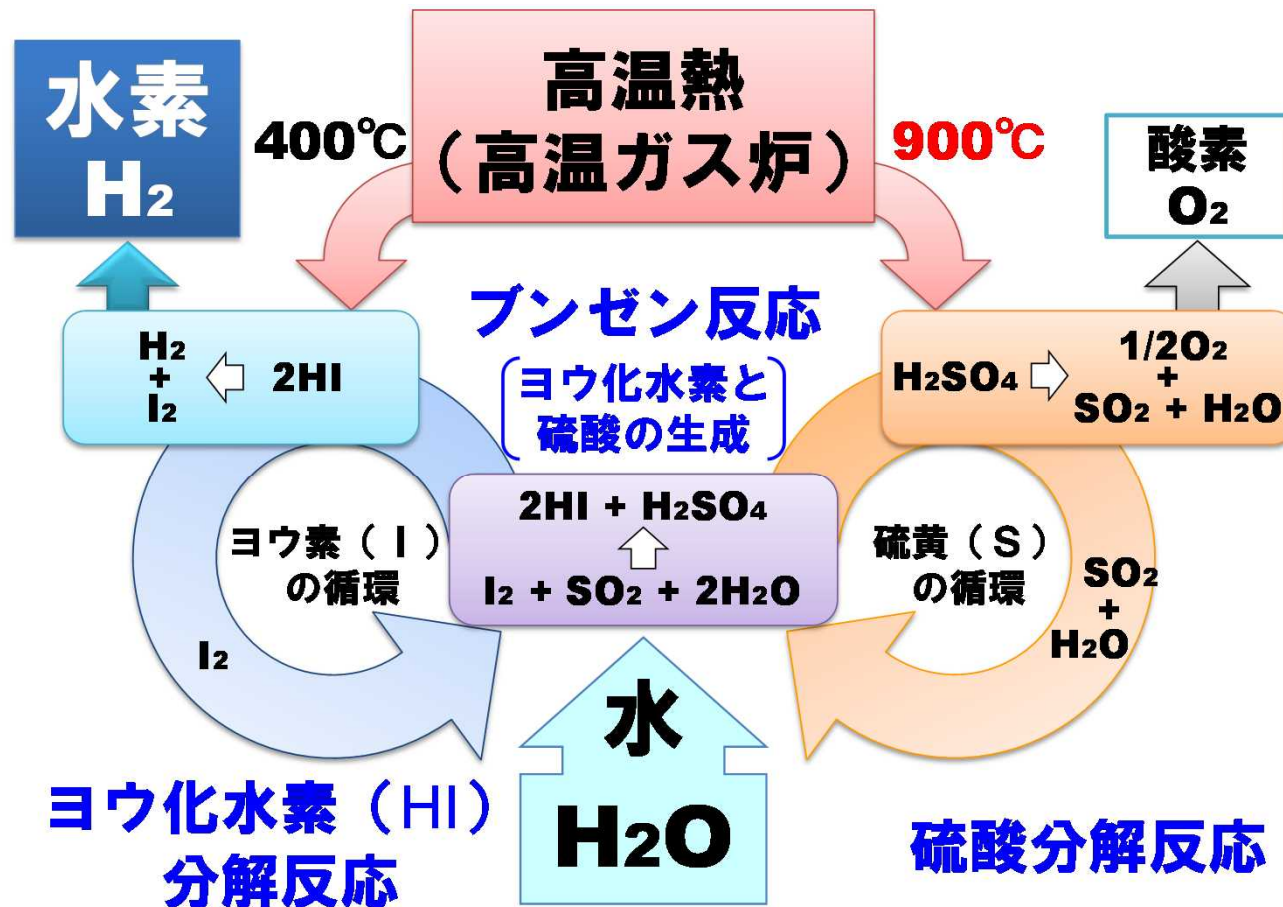


発電用高温ガス炉システム

熱利用技術		開発状況
水素製造	<b>熱化学法 ISプロセス</b>	原子力機構で研究開発を実施中
	メタンの水蒸気改質	原子力機構で研究開発を完了
発電	<b>ヘリウム ガスタービン</b>	原子力機構で研究開発を実施中
	蒸気タービン	メーカーで技術を確認済み
低温熱利用	海水淡水化	メーカーで技術を確認済み
	地域暖房	メーカーで技術を確認済み

## 3-2 水の熱分解による水素製造 — 熱化学法ISプロセス —

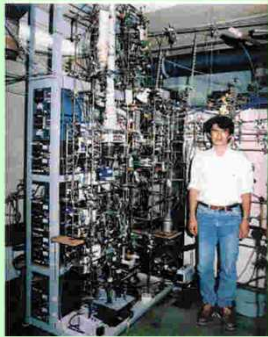
- 水の熱分解：4000°C以上の高温熱が必要
- IS プロセス：ヨウ素(I)と硫黄(S)を利用して 約900°Cの熱で水を熱分解  
ヨウ素と硫黄はプロセス内で循環 ⇒ 有害物質の排出なし  
高温ガス炉との組み合わせ ⇒ 炭酸ガスの排出なし



# 3-3 熱化学法ISプロセスの研究開発の歴史と現状

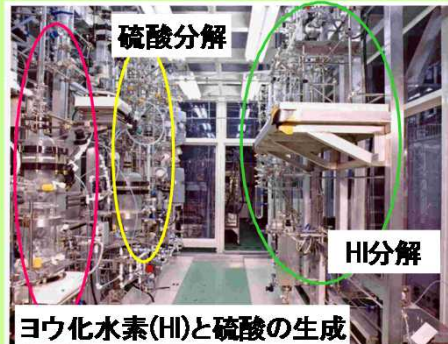
## 原理検証試験

(閉サイクル条件の  
解明)(1997年)



## 工学基礎試験

(閉サイクル制御技術の  
開発)(2004年)



## 技術・信頼性 確認試験

(技術確認 | 信頼性確認)

現在

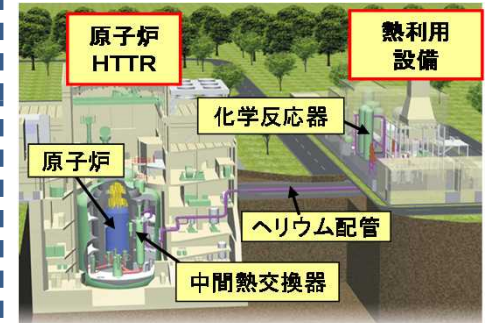


連続水素製造試験装置  
(平成26年3月完成)

工業材料(金属、セラミックス)製機器の強腐食環境下での信頼性確認、連続水素製造性能の検証を実施中

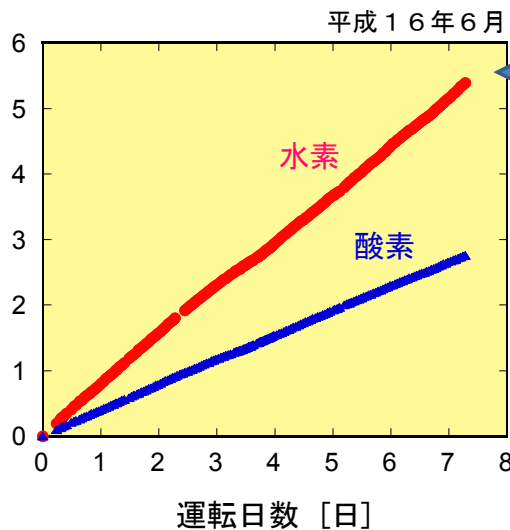
## HTTR接続試験

(熱利用技術の確認)



原子力を利用した水素製造などの熱利用技術、接続に関わる安全性を確認

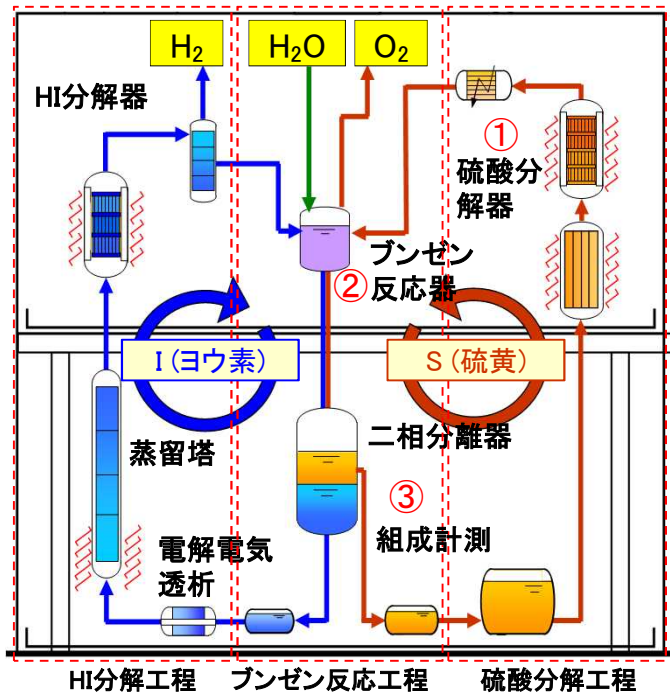
水素、酸素の発生量 [Nm<sup>3</sup>]



ガラス製機器により毎時約30%の水素を1週間にわたって連続製造することに世界で初めて成功(2004年)

# 3-4 熱化学法ISプロセスの研究開発成果

- ガラス製機器により閉サイクル制御技術を開発。
- 強腐食環境下で使用する実用装置材料(金属、セラミックスなど)を用いた機器、非接触型組成分析システムなどを開発。
- 上記の技術を統合した連続水素製造試験装置を完成(平成26年3月)。平成26年度から信頼性確認、連続水素製造性能の検証などを開始。



## 諸元

- ・水素製造量 : 0.2m<sup>3</sup>/h
- ・電気加熱

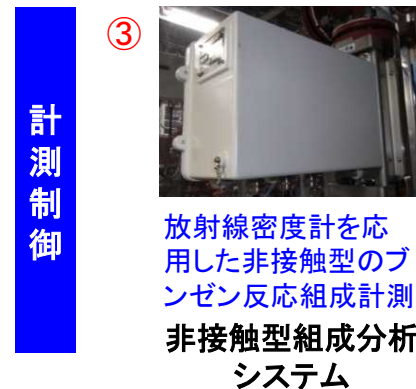
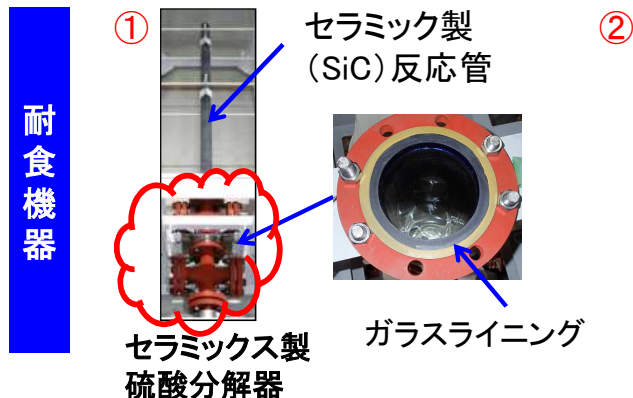
## 装置材料

### 液相

- ・フッ素樹脂ライニング
- ・ガラスライニング
- ・炭化ケイ素(SiC)セラミック
- ・不浸透黒鉛

### 気相

- ・ニッケル合金(ハステロイ C-276)
- ・JIS SUS316



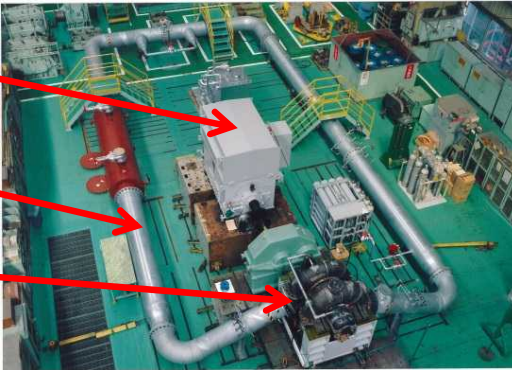
# 3-5 ガスタービン発電システムの研究開発の現状

## 工学試験

ガスタービン要素技術を  
JAEAと三菱重工で確立

1/3スケール圧縮機性能試験装置

電動機  
ヘリウム  
配管  
圧縮機



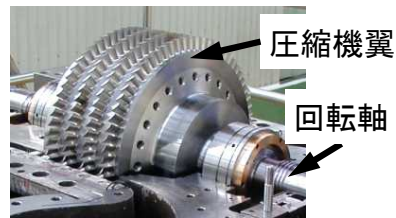
## HTTR接続試験

下記の残された課題を  
HTTR接続試験で実証する



- 高温での安定性試験
- 運転制御性試験
- システム性能の総合検証

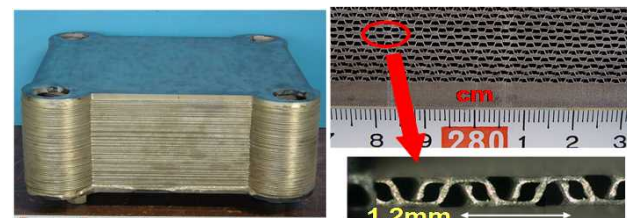
## タービン圧縮機



圧縮機試験モデル

世界最高の効率(92%)で  
ヘリウムガスを循環する  
ガスタービン用圧縮機を開発

## コンパクト熱交換器



熱交換器本体

フィン部

超細密オフセットフィンを採用した  
低コストでコンパクトな  
再生熱交換器を開発

ガスタービン発電の要素技術は確立している。



## 4. まとめ

---

- 高温ガス炉は、原理的には、東電福島第一原子力発電所事故と同様な事故を引き起こす恐れのない優れた固有の安全性を有する原子炉。
- 高温の熱を多様な分野で利用することで、CO<sub>2</sub>排出量の大幅な削減に貢献可能。
- 我が国は、高温ガス炉の燃料・材料、炉物理、熱流動等の分野での技術開発を通して、高温ガス炉に関する世界一の国産技術を保有。
- HTTRの運転を通して、高温ガス炉の安全性、高温核熱の安定供給性を確証中。
- 熱利用技術として、熱化学法ISプロセスによる水素製造技術、ガスタービン発電技術の研究開発を実施中。

# 参考資料

# 世界における高温ガス炉開発の現状(中国HTR-PM計画)

## ■ 発電実証高温ガス炉(HTR-PM)の建設計画

- 華能山東石島湾核電有限公司が建設・運転(2007年1月設立。中国華能集団公司、中国核工業建設集団公司、清華控股有限公司が共同出資)
- 山東省威海市に1組(熱出力250MW×2基)を建設
  - ✓ 2009年:建設開始
  - ✓ 2017年:建設終了予定

## ■ 福建省莆田市と中国核工業建設集団公司在戦略的協力枠組み協定を締結。高温ガス炉建設に合意(2013年5月)

## ■ 江西省瑞金市と核建清潔能源有限公司が戦略的協力枠組み協定を締結。高温ガス炉発電所と関連プラント産業建設に合意(2013年10月)

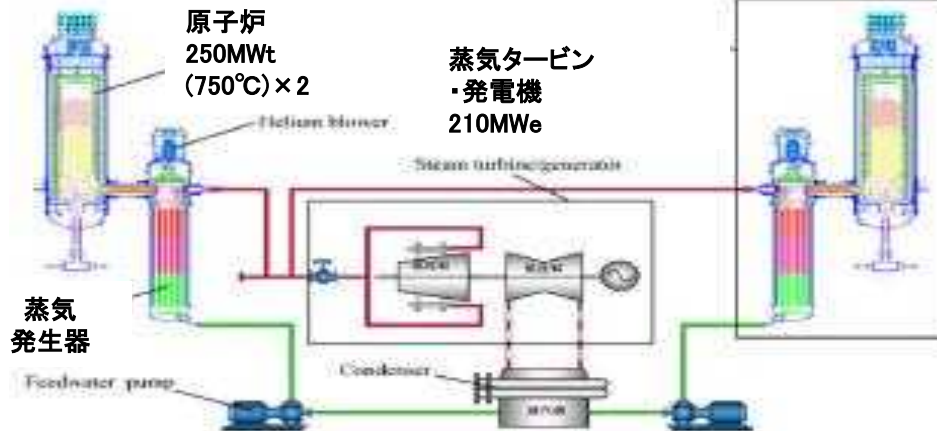
HTR-PMの建設状況(2009年9月)



第一層コンクリート注入(2012年12月)



HTR-PMの建設状況(2014年4月)

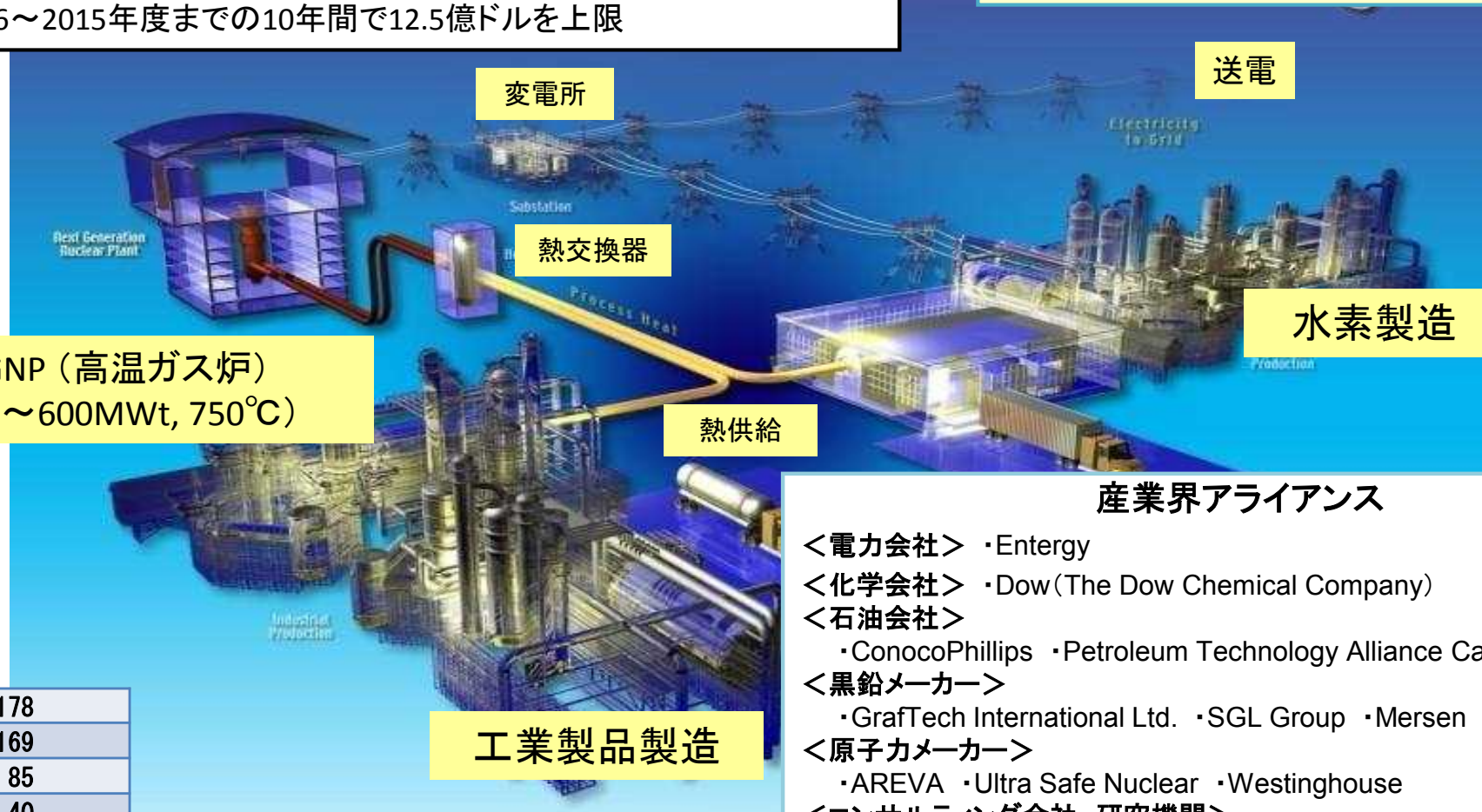


# 世界における高温ガス炉開発の現状(米国NGNP計画)

## 米国エネルギー政策法(Energy Policy Act of 2005)に基づく NGNP (Next Generation Nuclear Plant) 計画の概要

- Phase 1: 概念設計等(2011年1月まで)
  - ✓ 2011年: 概念設計を完了
- Phase 2: 最終設計および原型炉建設
  - ✓ 2019年: 建設着工予定
  - ✓ 2023年: 運転開始予定
- 予算: 2006~2015年度までの10年間で12.5億ドルを上限

- DOEが主導
- 国と利用者が建設費を折半
- 利用者がアライアンスを構成
- 原子力メーカーが設計・建設
- 必要な研究開発をINLが国の資金で実施



単位: 百万ドル

2009年度	178
2010年度	169
2011年度	85
2012年度	40
2013年度	38
2014年度	60 (注)

(注) SFR、FHR、HTGRの3炉型を対象。高温ガス炉用燃料及び黒鉛開発を実施。

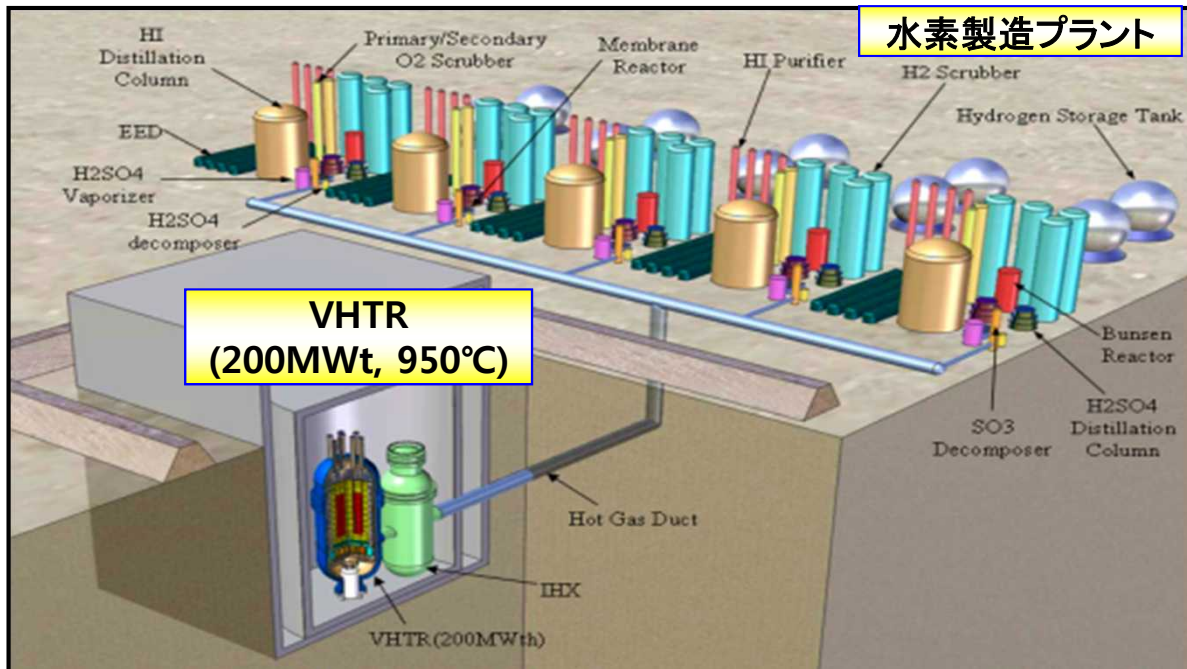
## 産業界アライアンス

- <電力会社> ・Entergy
- <化学会社> ・Dow (The Dow Chemical Company)
- <石油会社>
  - ・ConocoPhillips
  - ・Petroleum Technology Alliance Canada (PTAC)
- <黒鉛メーカー>
  - ・GrafTech International Ltd.
  - ・SGL Group
  - ・Mersen
  - ・Toyo Tanso
- <原子力メーカー>
  - ・AREVA
  - ・Ultra Safe Nuclear
  - ・Westinghouse
- <コンサルティング会社、研究機関>
  - ・Technology Insights
  - ・SRS
  - ・Advanced Research Center
  - ・MEC Inc.
- <州> ・Wyoming

# 世界における高温ガス炉開発の現状(韓国NHDD計画)

## 原子力水素開発(NHDD)計画の概要

- 原子力水素主要技術開発プロジェクト: NHDD計画に向けた主要基盤技術開発
  - ✓ 2012-2016年: 第2開発フェーズ
- NHDD計画: 原子力水素製造システムの設計、建設、実証
  - ✓ 2012-2014年: システムの概念検討(US\$6M)
  - ✓ 2015年: 概念設計開始予定
  - ✓ 2022年: 建設着工予定
  - ✓ 2027年: 運転開始予定



➤ NHDD計画において、企業アライアンスが構成され、検討を開始。(2009年12月)



(2013年12月現在)

➤ 韓国製鉄会社ポスコが、KAERIと協力して、高温ガス炉水素還元製鉄を検討

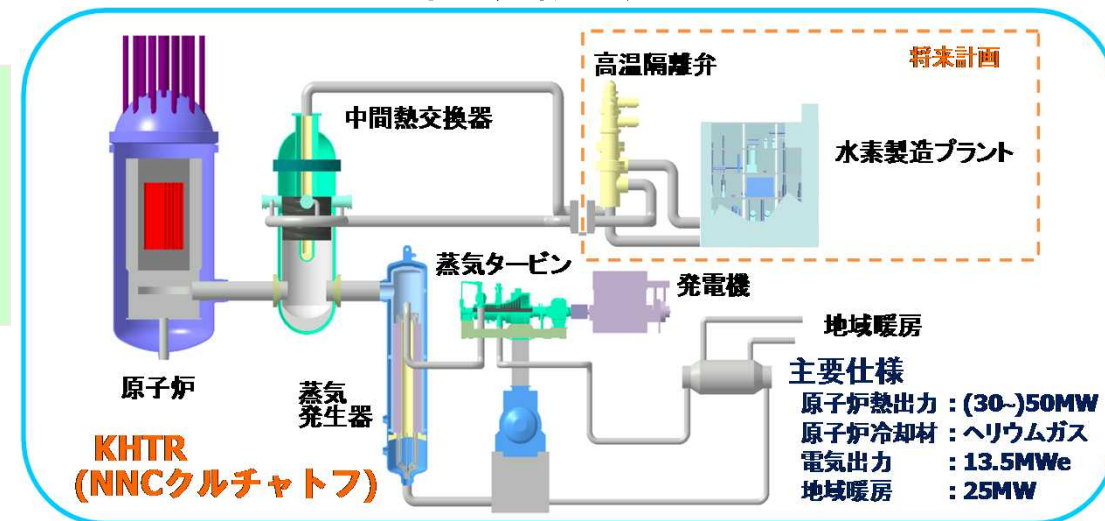
# 世界における高温ガス炉開発の現状(カザフスタンKHTR計画)

## カザフスタン高温ガス炉(KHTR)計画の概要

- 導入目的
  - ✓ 5~10万人規模の都市への電力と熱供給(10万kWt程度)
  - ✓ 原子炉技術の導入による関連産業(燃料、その他)の育成
  - ✓ 電力、熱、将来的には水素などの原子炉エネルギーを利用した新産業の創生
- カザフスタンの原子力に係る国家発展プログラム(2011年6月政府布告)におけるKHTR計画
  - ✓ 2015年以降: 成立性評価(FS)開始予定
  - ✓ 2017年以降: 基本設計開始予定
  - ✓ 2021年以降: 試運転開始予定



## クルチャトフ市に建設予定のKHTR



## ナザルバエフ カザフスタン共和国大統領方針:

「先進50カ国に入るために、資源を売るだけでなく、電力独立と産業創生による雇用の拡大を図る。」

参考: 高温ガス炉は、日カザフ政府間の原子力協定(2011年発効)の協力分野の一つとして明記されている。

# 水素製造技術開発における世界の状況

国名	実施機関	水素製造技術開発の状況			
		水素製造法	水素製造量 (ℓ/h)	材料	現状
韓国	KAERI, KIER, KIST	ISプロセス	50ℓ/h	工業材料	試験中
中国	INET	ISプロセス	100ℓ/h	ガラス、工業材料	試験中
		高温電解	60ℓ/h	工業材料	試験中
米国	INL	高温電解	約5000ℓ/h	工業材料	セル劣化1000時間あたり3% (目標0.5%)で、2012年に国プロ終了
日本	JAEA	ISプロセス	30ℓ/h	ガラス	試験終了 (連続水素製造達成: 2004年)
			200ℓ/h	工業材料	試験中



KIER, KIST; IS試験装置



INET; IS試験装置



INL; 高温電解試験装置

# 国際協力の現状 (OECD/NEA)

## OECD/NEA LOFCプロジェクト; HTTR共同試験

### ● 概要

- ・ 高温工学試験研究炉 (HTTR) を用いて、安全性実証試験
  - ✓ 1次ヘリウム循環機全3台を停止する炉心流量喪失試験
  - ✓ 炉容器冷却設備の停止を重ね合わせた炉心冷却喪失試験に係る事業をOECD/NEA原子力施設安全委員会 (CSNI: Committee on Safety of Nuclear Installations) \* のプロジェクトとして、国際協力により、効率的、効果的に推進する。

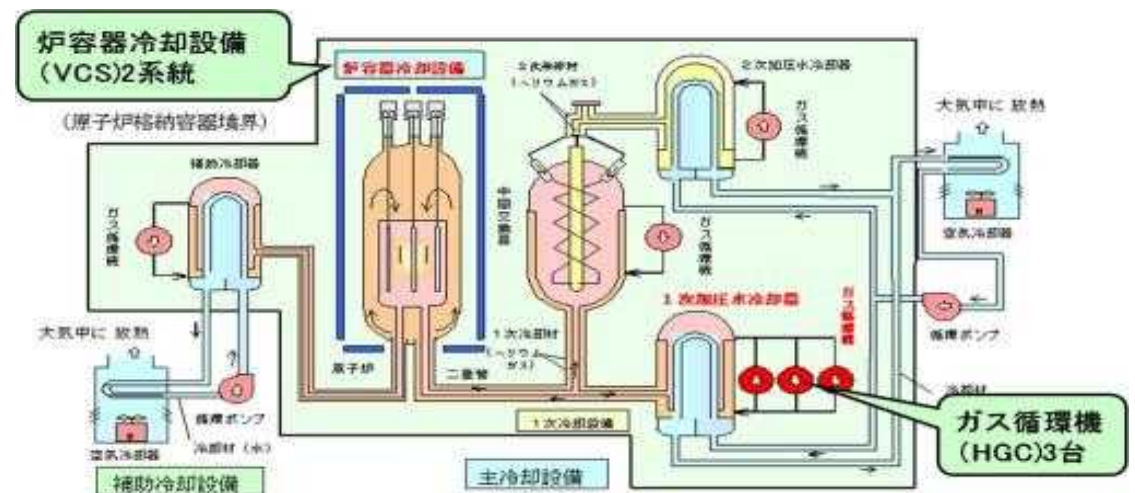
### ● プロジェクト実施期間

- ・ 2011年3月1日～2016年3月31日  
(H22年度～H27年度)

### ● 参画機関 (国名)

- ・ HTTR試験費用を分担して参加。
  - ✓ 原子力規制委員会 (米国)
  - ✓ 原子力委員会及び放射線防護原子力安全研究所 (フランス)
  - ✓ 施設・原子炉安全協会 (ドイツ)
  - ✓ 韓国原子力研究所 (韓国)
  - ✓ チェコ原子力研究所 (チェコ)
  - ✓ KFKI原子力研究所 (ハンガリー)

試験番号	原子炉出力	試験名称	試験内容	実施年度
Run 1	9 MW	炉心流量喪失試験	循環機3台停止	H22
Run 2	30 MW			H27
Run 3	9MW	炉心冷却喪失試験	循環機3台停止 + VCS2系統停止	H27



\* : CSNIは、NEAに7つある常設技術委員会 のうちの1つ

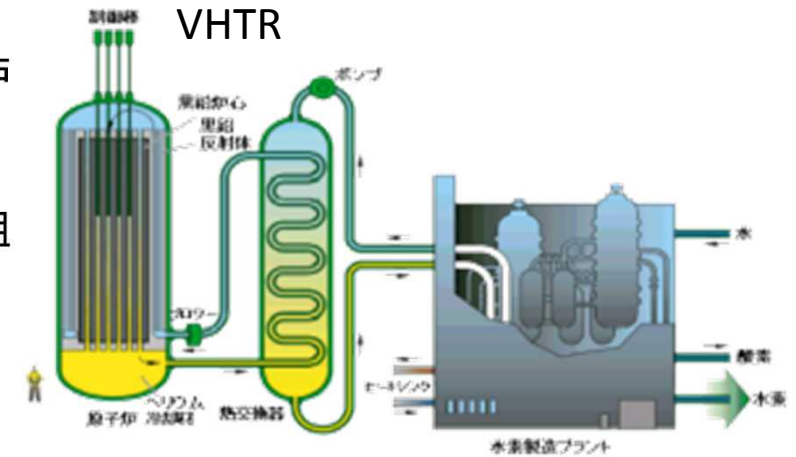


# 国際協力の現状(GIF)

## GIF: 第4世代原子力システム国際フォーラム

### ● 概要

- 第4世代原子力システムは、2030年代に商業導入が見込める原子炉
- 安全性・信頼性、経済性、持続可能性、核拡散抵抗性と核物質防護に優れたシステム
- 実証フェーズの前段階までの研究開発協力を行うため国際的な枠組み; GIFを構築。OECDが運営。
- Gen-IVシステムとして6つの炉型を2002年7月に選定、そのうちの1つが超高温ガス炉(VHTR: Very-High-Temperature Reactor)



### ● VHTR(超高温ガス炉)国際協力研究

プロジェクト名称	参加国	実施期間	最近の活動内容
水素製造	日本、仏国、米国、韓国、カナダ、ユーラトム	2008.03.19 ~ 2018.03.18	ISプロセス、高温水蒸気電解、CuClプロセスの要素技術開発、等。
燃料・燃料サイクル	日本、仏国、米国、韓国、ユーラトム、中国	2008.01.30 ~ 2018.01.29	EU及び米国の照射試験炉を利用した共同照射・照射後試験、燃料挙動モデルのベンチマーク、被覆層特性評価用ラウンドロビン試験、安全性試験結果のまとめ、等。
材料	日本、仏国、米国、韓国、スイス、ユーラトム	2010.04.30 ~ 2020.04.29	黒鉛照射データ取得、材料特性評価モデル作成、等。

# 国際協力の現状 (IAEAにおける協力研究)

## ガス冷却炉技術ワーキンググループ (TWGGCR)

- **概要**  
IAEAのガス炉に関する技術委員会会議、協力研究計画 (CRP) 等の活動方針を本会議を通じて審議する最高機関であり、各国における高温ガス炉技術に関する研究開発の動向等の情報の交換、国際協力研究の調整等を行っている。
- **メンバー: 13カ国**  
日本、米国、中国、仏国、独国、インドネシア、韓国、オランダ、英国、トルコ、南アフリカ、ロシア、ウクライナ

### 協力研究計画 (CRP) の現状

名称	参加国	現状
高温ガス炉の特性評価 (CRP5)	日本、米国、中国、仏国、独国、インドネシア、韓国、オランダ、ロシア、南アフリカ、トルコ	報告書完成 (2013) 終了
高温ガス炉用燃料の技術開発の進展 (CRP6)	日本、米国、中国、仏国、独国、インドネシア、韓国、オランダ、ロシア、南アフリカ、トルコ、	報告書完成 (2012) 終了
原子カププロセス熱利用の発展 (CRP7)	日本、中国、仏国、独国、インド、ロシア、南アフリカ、シリア	報告書完成 (2012) 終了
原子炉級黒鉛の照射クリープ挙動	日本、米国、中国、独国、韓国、オランダ、英国、ウクライナ	活動中
高温ガス炉の安全基準	(日本、米国、中国、独国、インドネシア、韓国、南アフリカ、EU、カザフスタン、等)	2014.8開始予定

## 核熱利用水素製造の技術経済性とIAEA HEEPソフトウェアのベンチマーク解析の調査

- **概要**  
様々な水素製造システム技術の評価、原子力を用いた水素製造技術の可能性及び経済性の評価、核熱水素製造におけるIAEA参加国間の連携に関する活動を実施中。
- **メンバー: 11カ国**  
日本、米国、中国、独国、インドネシア、韓国、アルゼンチン、アルジェリア、カナダ、インド、ロシア