

民間における高温ガス炉に関する取組
原子燃料工業株式会社

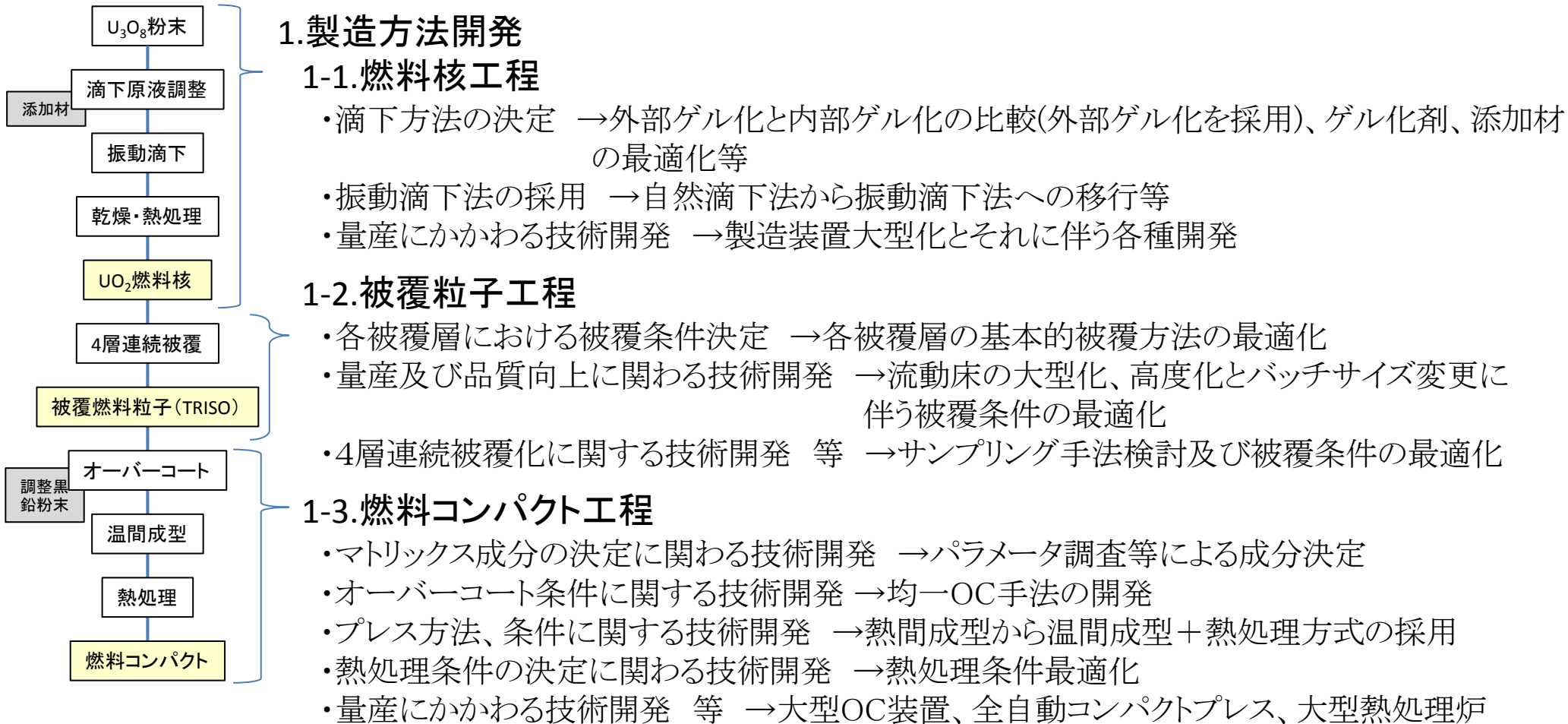
原子燃料工業における実績 (1/4)

はじめに

原子燃料工業(株)は1960年代※より高温ガス炉燃料開発を開始、HTTR向け燃料2炉心分(燃料体300体分)を納入した実績を有する。以下に主な開発項目と歴史等を示す。

※前身である古河電気工業(株)中央研究所時代を含む

製造工程における主な開発内容



原子燃料工業における実績 (2/4)

検査及び付帯設備他における主な開発内容

2. 検査方法開発

2-1. 燃料核工程検査法

- ・直径・真球度測定及び選別、金相検査法の手法検討及び装置開発等

2-2. 被覆粒子工程検査法

- ・被覆粒子膜厚測定、被覆層密度測定、粒子破損率測定における手法検討及び装置開発等

2-3. 燃料コンパクト工程検査法

- ・被覆粒子破損率測定、ウラン量測定、寸法測定等の手法及び装置開発等

3. 製造周辺技術開発

3-1. 粒子・コンパクト回収工程

- ・被覆粒子回収、焙焼の条件最適化及び装置開発

3-2. ウラン精製工程

- ・溶解条件及び溶解残渣回収手法開発、溶媒抽出条件最適化、装置高度化

3-3. 臨界安全対策

- ・臨界安全インターロック、2重装荷防止インターロック等の手法最適化及び装置開発

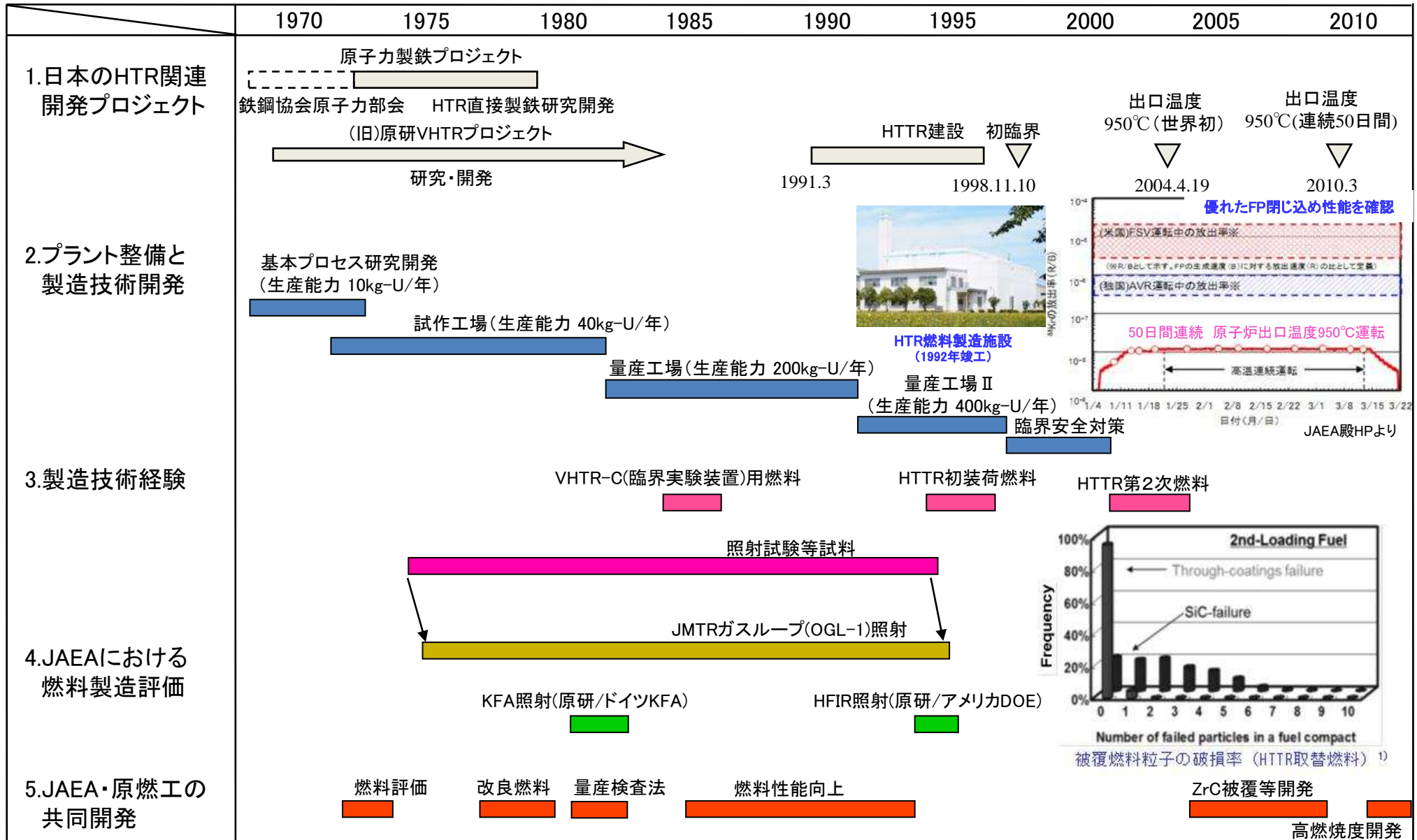
3-4. 製造及びウラン管理システム

- ・製造及び検査データ収集、燃料スタック編成、燃料棒梱包計画、ウラン倉庫管理等の機能を持つ総合システムを設計し導入

3-5. UC燃料等開発、他分野応用(核融合材料等)に関する技術開発

原子燃料工業における実績 (3/4)

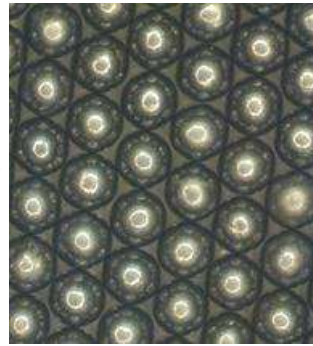
高温ガス炉用燃料開発の歴史



1) S. Ueta, et al., Development of high temperature gas-cooled reactor (HTGR) fuel in Japan, Progress in Nuclear Energy 53 (2011) 788-793

原子燃料工業における実績 (4/4)

例) 燃料核製造工程における開発項目

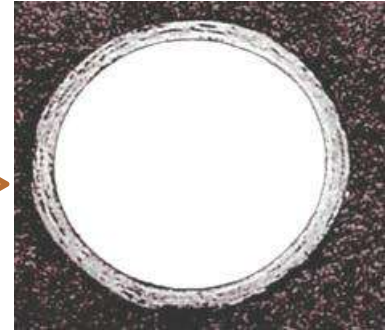
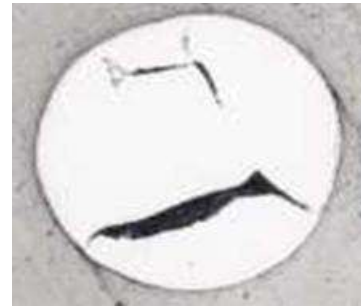


真球度の悪い燃料核

(被覆層形状の悪化による破損率低下の要因となる)

対 策: 振動滴下法の導入

真球度の向上



燃料核の内部欠陥

(歩留り低下、破損率低下要因)

対 策1: 原材料中不純物の管理

対 策2: 還元条件($UO_3 \rightarrow UO_2$)の最適化

内部欠陥の解消

主要な製造設備の現状



ADU粒子生成設備



大型流動床



コンパクトプレス

民間における高温ガス炉に関する取組
株式会社 東芝

東芝における高温ガス炉への取組

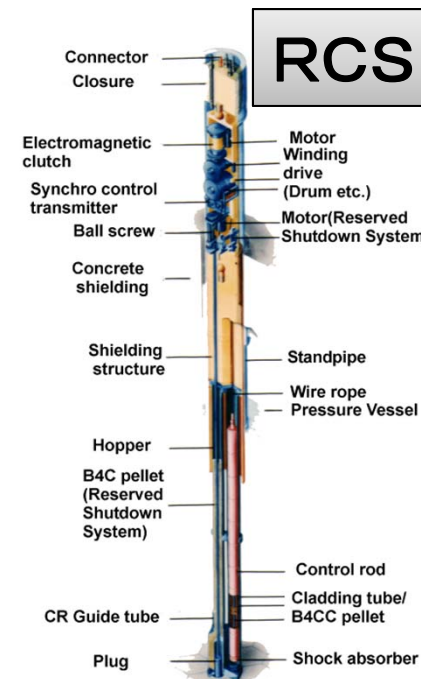
株式会社 **東芝**
電力システム社 原子力事業部

高温ガス炉への取組(国内)

■ HTTRでの実績

高温ガス炉特有の高温機器等を納入

- 中間熱交換器(IHX)
- 反応度制御設備(RCS)
- 燃料 (NFI 所掌)
- 原子炉出力制御設備
- プラント計算機 他



IHX主要目

容量	10 MWt
寸法	Φ2m×11m
最高使用温度	950℃
伝熱管材質	Hastelloy XR

RCS主要目

基数	16対 (制御棒本数 32)
寸法	約8 m
最高使用温度	900℃
制御棒材質	Alloy 800H

高温機器の設計・製造技術を確立し、HTTRで性能を確認

高温ガス炉への取組(海外)

■ 米国NGNP計画に参画

(2004~2008)

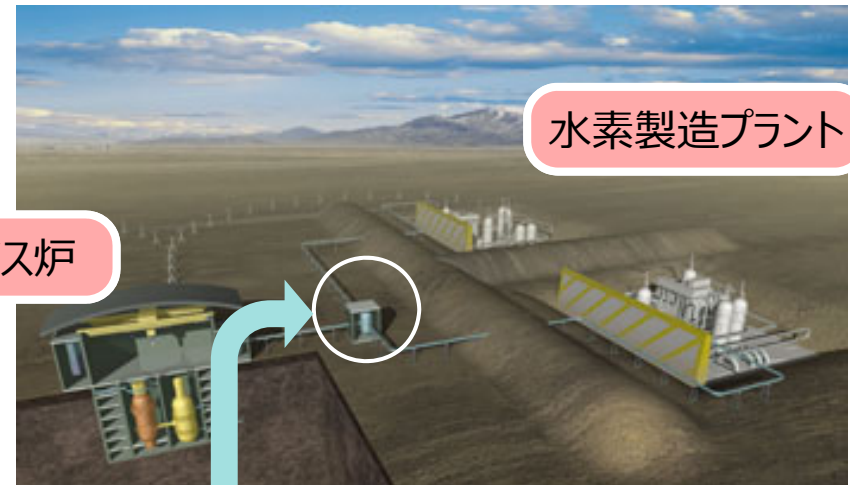
・General Atomic 社との協力

- 原子炉容器設計
- コンパクト型IHX設計
- 水素製造プラント設計

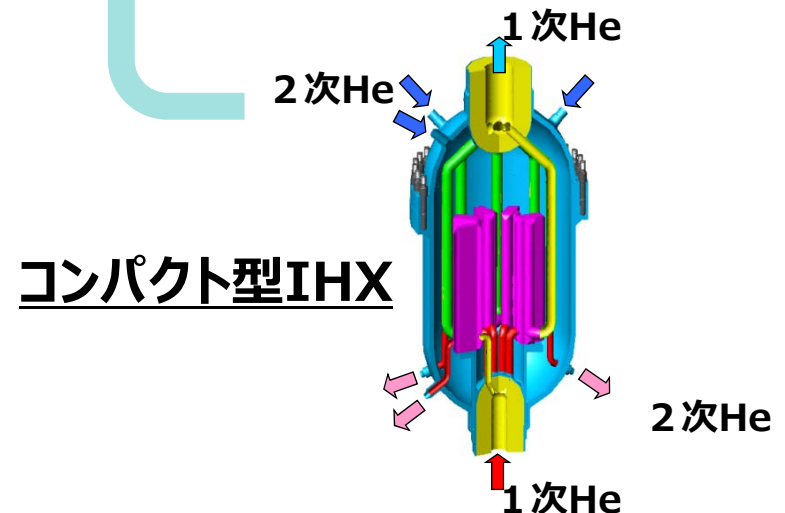
(高温水蒸気電解法)

・Westinghouse 社との協力

- 設計レビュー
 - 原子炉プラント設計
 - 熱利用系設計



出典: <http://www.inl.gov/featurestories/2006-11-30.shtml>



蓄積した技術をベースに、海外プロジェクトにも積極的に参画

高温ガス炉への取組(研究開発)

■ 水素製造法の自社開発を推進

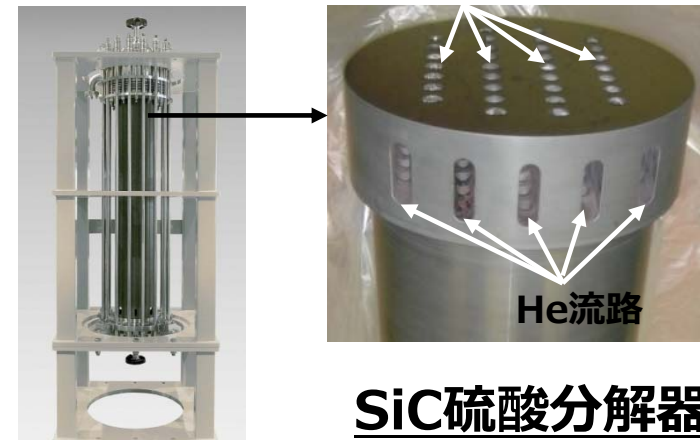
- IS法開発
プロセス設計、機器設計
耐食材料開発 (SiC、ガラスライニング)
高効率を目指した化学反応プロセス開発
- 高温水蒸気電解法
国の資金でプロセス設計、セル開発を推進



IS法ループ(1L/hr)

■ JAEA殿のIS水素製造開発に参画

- 水素製造プラント設計(IS法)
大型セラミック熱交換器の製作実証。
- SiC硫酸分解器の試作
大型セラミック熱交換器の製作実証。
日本原子力学会賞技術賞をJAEA殿と受賞。



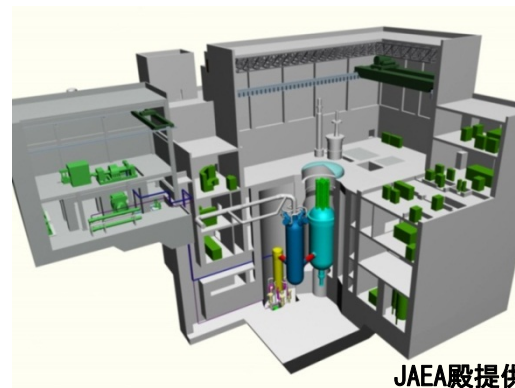
SiC硫酸分解器

工学実証を目指して水素製造法の開発を推進中

高温ガス炉への取組(今後の展開)

■ 現在の取組状況

- ・2007年、JAEA殿と「高温ガス炉並びにそれを用いた水素製造法の開発に関する研究協力協定」を締結。高温ガス炉の実用化に向けて、ポテンシャルカスタマーの発掘活動等の活動を展開中。
- ・カザフスタンの小型高温ガス炉建設計画では、関連企業とともにJAEA殿の活動を支援。
- ・JAEA殿が2010年から着手した小型高温ガス炉の設計研究を原子燃料工業等の協力企業とともに遂行。



小型高温ガス炉

高温ガス炉の実用化に向け、市場調査、プラント概念を構築中

民間における高温ガス炉に関する取組
東洋炭素株式会社

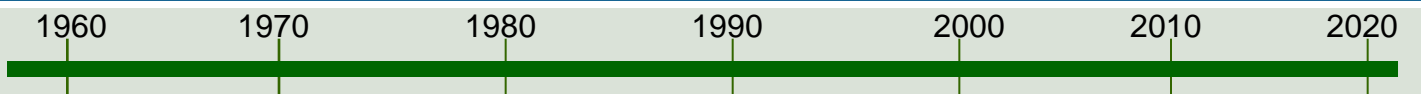
東洋炭素における高温ガス炉への取組

東洋炭素株式会社

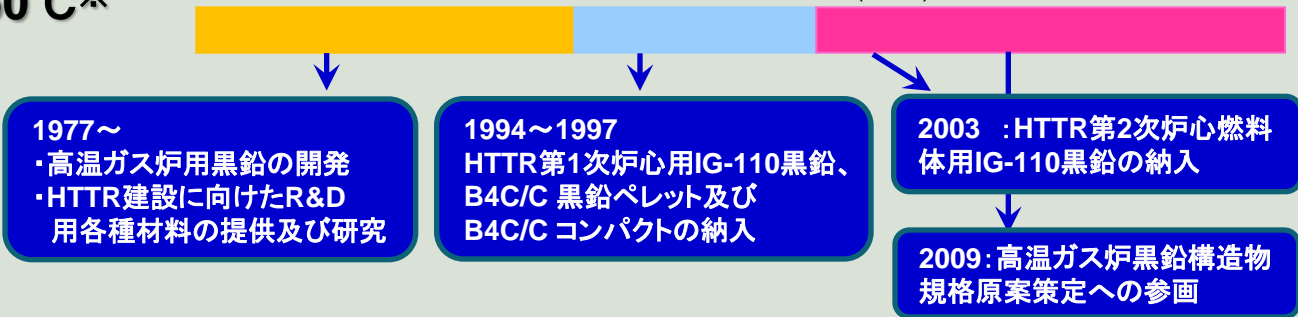
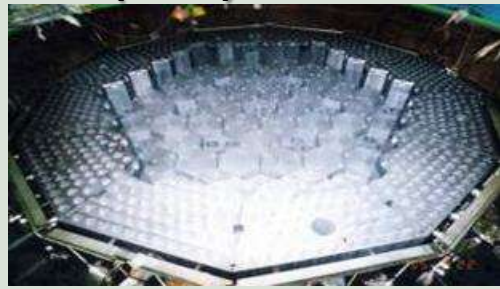
2014年9月3日

東洋炭素株式会社

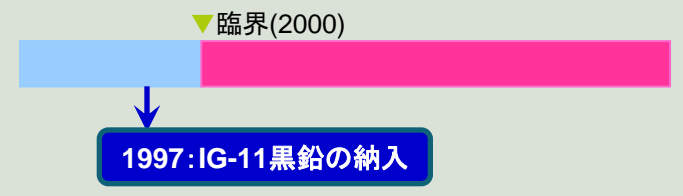
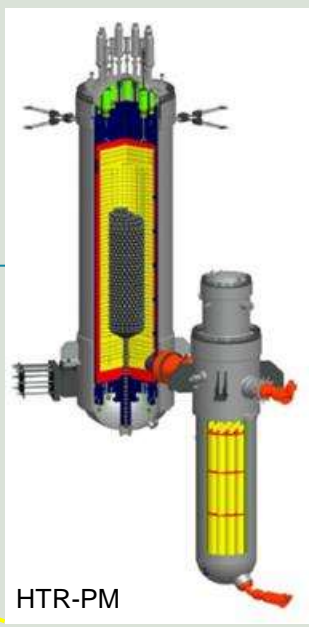
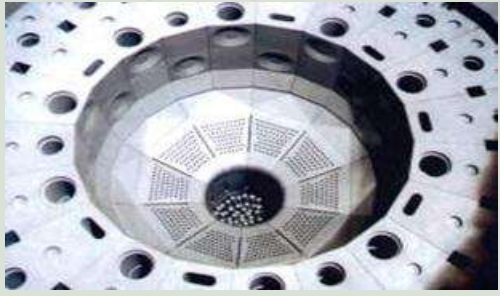
1. 高温ガス炉と当社の関わり



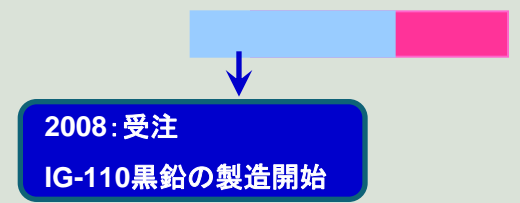
HTTR(日本) 30MWth/950°C※



HTR-10(中国) 10MWth/700°C※



HTR-PM(中国) 195MWe/750°C※



※熱出力(MWth)/ 原子炉出口温度

出典・・・Prof. Dr. Yuliang Sun, "HTR Development Status in China", IAEA TWG-GRC Meeting, March 5-7, 2013, Vienna, Austria

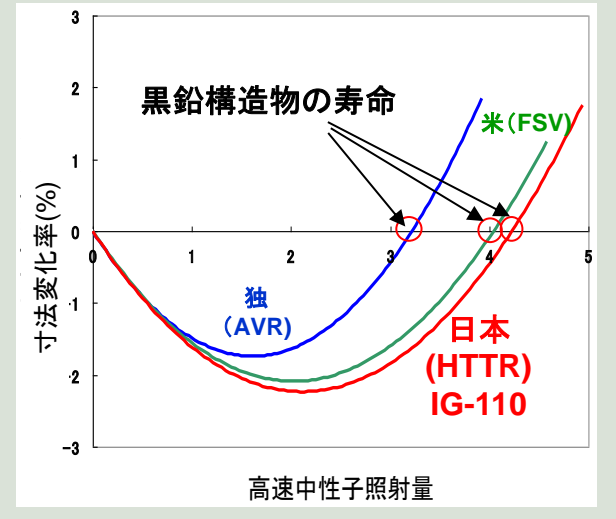
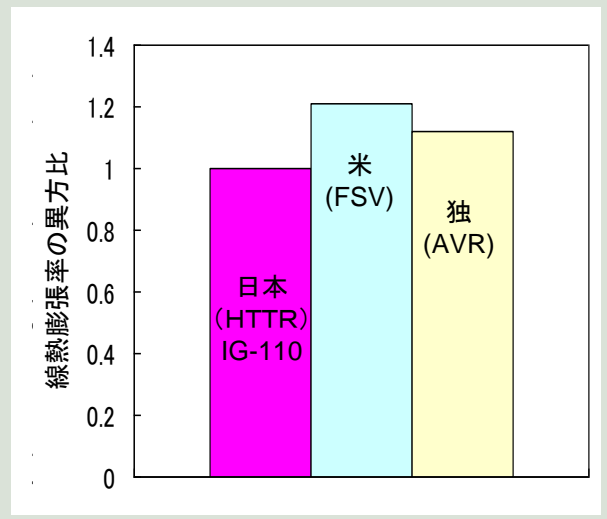
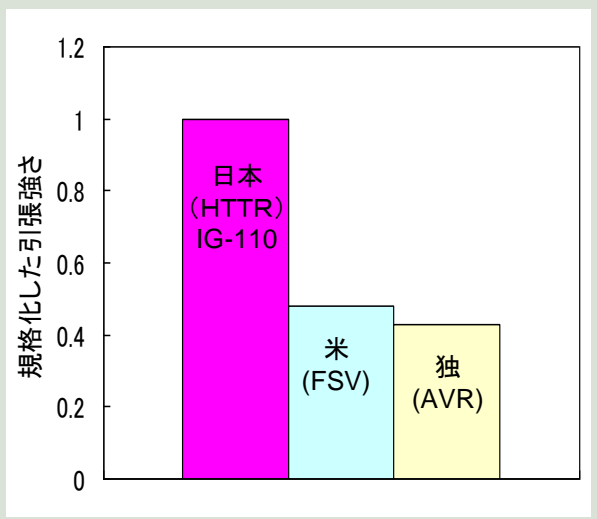
2. HTTR採用のための技術確立とその評価

日本原子力研究開発機構(JAEA)で稼働中の高温工学試験研究炉 (HTTR) 炉内黒鉛構造物としてIG-110黒鉛が採用された。



開発要素

- 長期間の安定供給が可能な等方性大型材の製造技術の確立。
- 耐酸化性の向上に有効となる高純度化技術の確立。
- 設計上必要な熱的・機械的なデータの取得。
- 高温での照射データを取得し、安定した特性であることの確認。
- 黒鉛構造物の受入検査基準の確立。

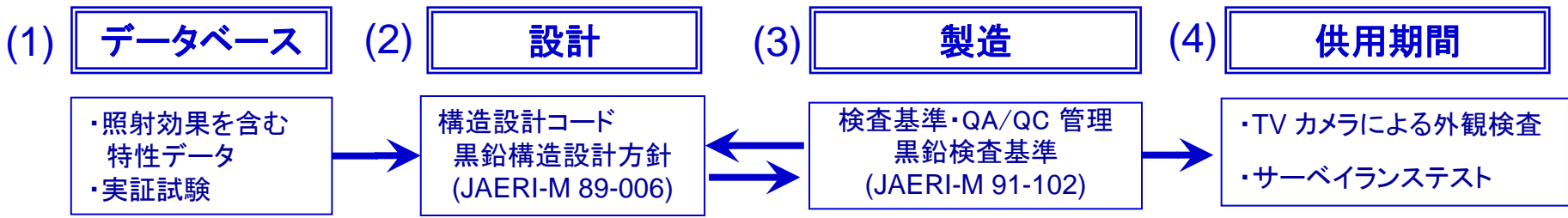


- IG-110黒鉛は高強度であるため、過酷な環境下でも使用可能。
- IG-110黒鉛は等方性であるため、構造物設計が容易。
- IG-110黒鉛は優れた耐照射特性を持つため、構造物としての寿命が長い。

3. 実用炉へ向けた高温ガス炉黒鉛構造物規格原案の策定

高温ガス炉の実用化のため、ASMEに先駆けて世界基準の高温ガス炉用黒鉛構造物規格が必要となり、**HTTRの黒鉛構造物の考え方**を基に、日本原子力学会 特別専門委員会において、「高温ガス炉黒鉛構造物規格原案※1」が作成された(平成21年3月)。

HTTR黒鉛構造物の考え方



高温ガス炉黒鉛構造物規格原案のポイント

- 規格原案には黒鉛構造物の応力制限、酸化された黒鉛構造物の設計の考え方等が示された。
- 規格原案には照射効果を含むIG-110黒鉛の材料特性が含まれており、高温・重照射領域における、IG-110黒鉛の照射効果について合理的な内・外挿案が示された※2。

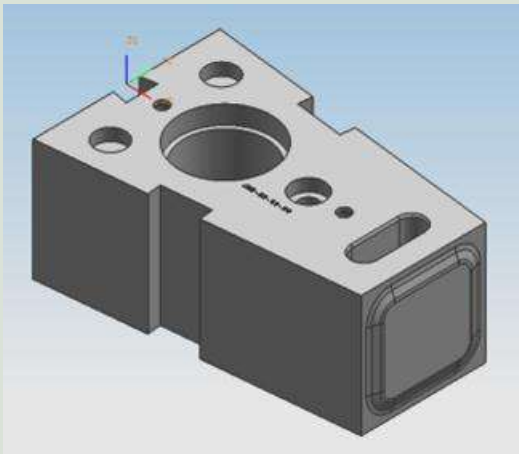
IG-110黒鉛は規格で定められた技術的な基準を満足している。

※1: T. Shibata et al, Draft of standard on graphite core components in High Temperature Gas-cooled Reactor, JAEA-Research 2009-042

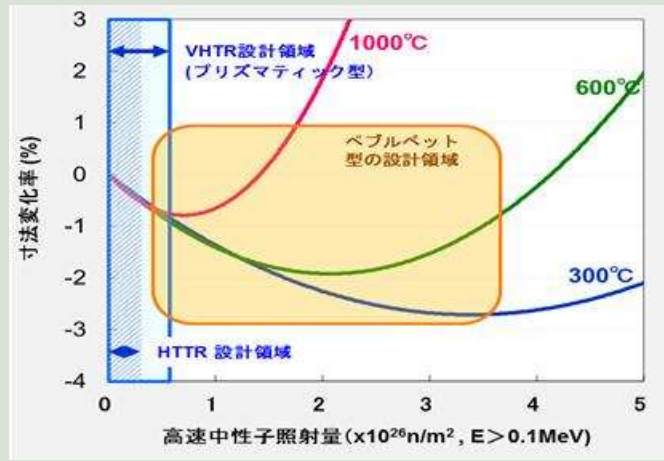
※2: 國本他, 高温ガス炉黒鉛構造物の設計用照射データの内外挿法による拡張 - IG-110黒鉛構造物の設計用照射データの評価 -, JAEA-Research 2009-008

4. 当社黒鉛の実用高温ガス炉採用への取組

1. 当社の長年の実績及びHTR-PM用黒鉛構造物への取り組みを通じて、顧客要求事項である超大型等方性黒鉛の製造・加工・検査技術が確立された。
2. 出口温度950℃高温ガス炉の照射条件(照射温度・照射量)における黒鉛特性を取得し、高温ガス炉黒鉛構造物規格原案で定めた、黒鉛の設計曲線を検証し高精度化する。
 - ・ 現在、オークリッジ国立研究所で、IG-110黒鉛と、次期原子力用黒鉛として期待されるIG-430黒鉛の、高温・重照射データを採取中である。
 - ・ 今後、実機のHTGRからIG-110黒鉛の様々なデータも取得される予定である。
3. 高温ガス炉黒鉛構造物規格の整備



超大型黒鉛の安定供給



高温・重照射データの取得



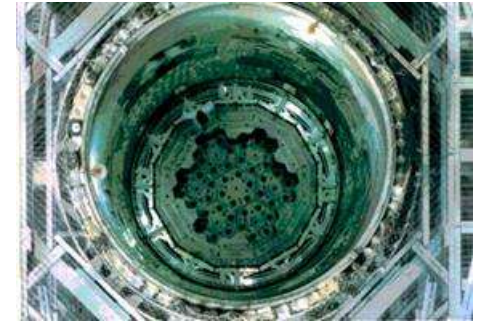
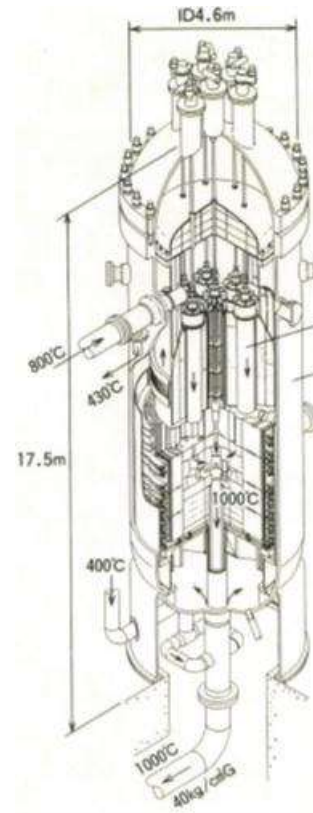
高温ガス炉黒鉛構造物規格

「超大型材の安定供給」、「高温・重照射データ」、「高温ガス炉黒鉛構造物規格」をパッケージングすることにより、今後建設計画があるカザフスタン、中国、韓国、インドネシア、米国の実用高温ガス炉への採用を目指す。

民間における高温ガス炉に関する取組
富士電機株式会社

1. HTTR実現に向けた研究開発の取組み(富士電機)

- 富士電機は、原子力機構が研究開発を開始した当初から、HTTR の設計・研究開発に協力し、炉内構造物の設計・製作などに必要なデータの取得を実施。
- 大型ヘリウムループHENDELにおいて、下記の試験装置の設計・製作・据付けを実施。
 - 燃料体スタック実証試験部 HENDEL-T1 (炉心冷却材流動特性評価用)
 - 炉内構造物実証試験部 HENDEL-T2 (炉床部構造評価用)
- 炉床部耐震試験装置の製作・据付け・試験も実施。



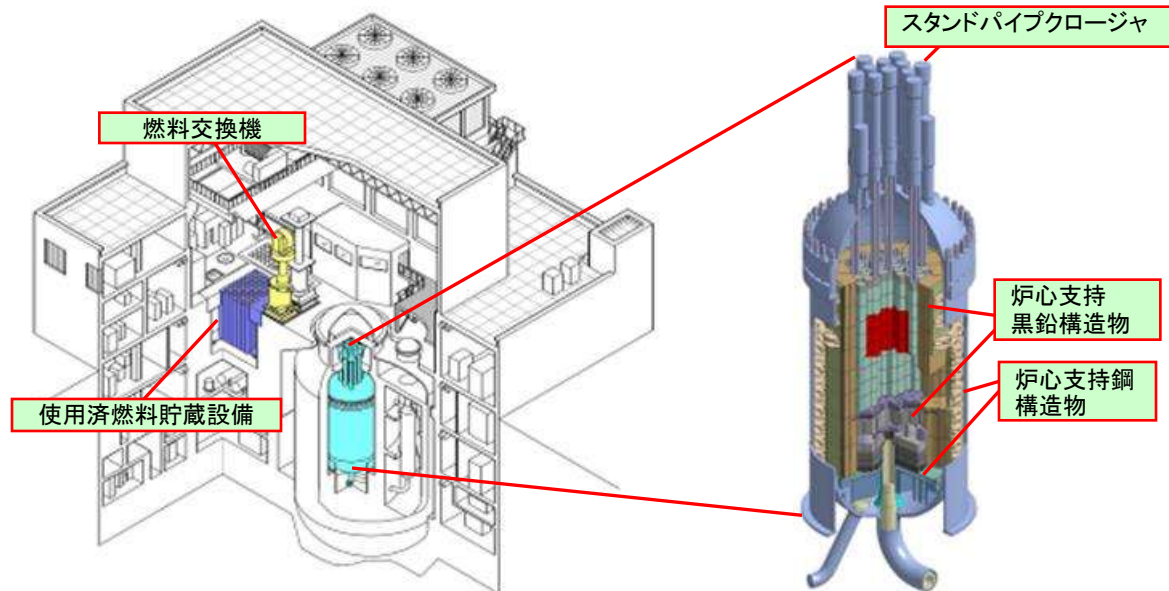
炉内構造物実証試験部(HENDEL-T2)

2. HTTR実機における富士電機の実績

- 原子力機構殿のHTTR (高温工学試験研究炉) 実機においては、炉内構造物、燃料取扱・貯蔵施設等の設計・製作・据付けを実施。



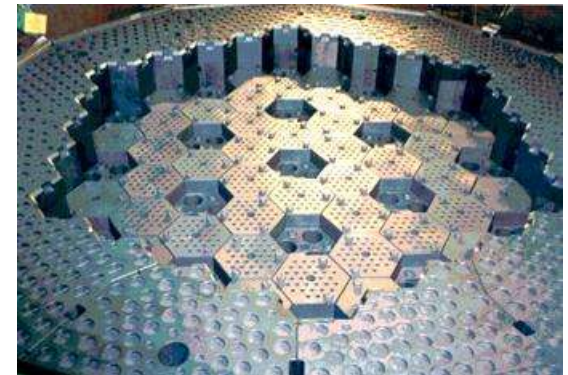
燃料交換機



富士電機が開発・製造した設備



固定反射体、炉心拘束機構
の工場組立試験



炉内構造物

3. 高温ガス炉実証炉の実現に向けた取組み

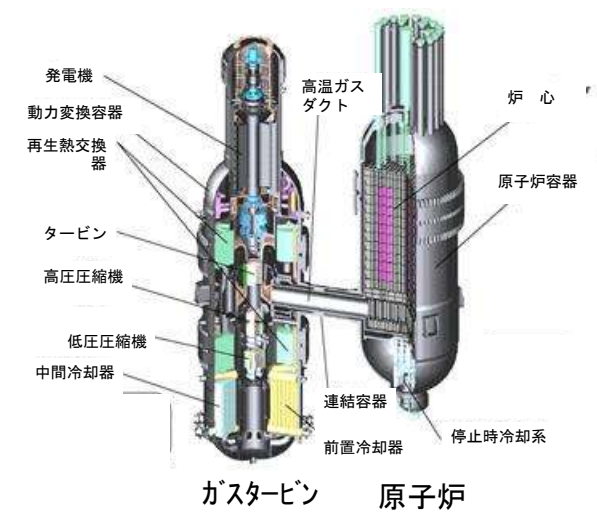
固有安全性を有する小型高温ガス炉の実用化を目指し、国内外で以下の取組み/R&Dを実施。

3.1 海外の高温ガス炉プロジェクトへの参画

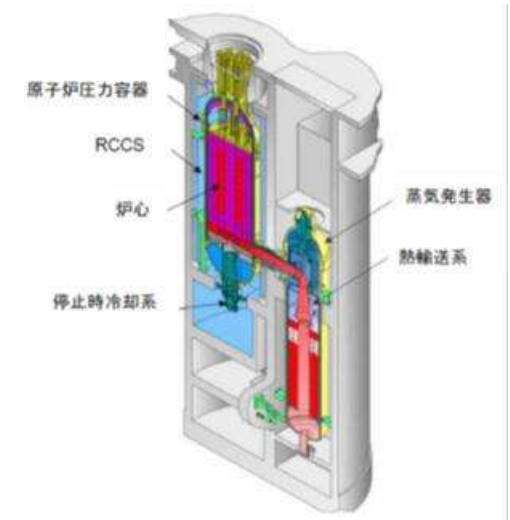
- 核兵器解体Pu消滅用GT-MHR*)計画への参画(1997年～)
 - 米General Atomics (GA)社/露MINATOM(当時の原子力省)/仏フラマトムで推進中の国際共同プロジェクトへ参画。

*) GT-MHR (Gas Turbine Modular Helium Reactor) :
高温ガス炉ガスタービン発電プラント

- 中国清華大学との情報交換協定締結(1998年～)
 - 中国での高温ガス炉市場開拓を目指した情報交換を実施。
- 米国NGNP計画への参画(2003年～)
 - 米国GA社チームの一員として、原子炉設計や炉心設計、燃料取扱設備設計などに参画。
- カザフスタンの高温ガス炉計画(2007年～)
 - メーカー各社と連携し、原子力機構殿の支援活動に協力中。



GT-MHR 原子炉概念図



NGNP プラント概念図

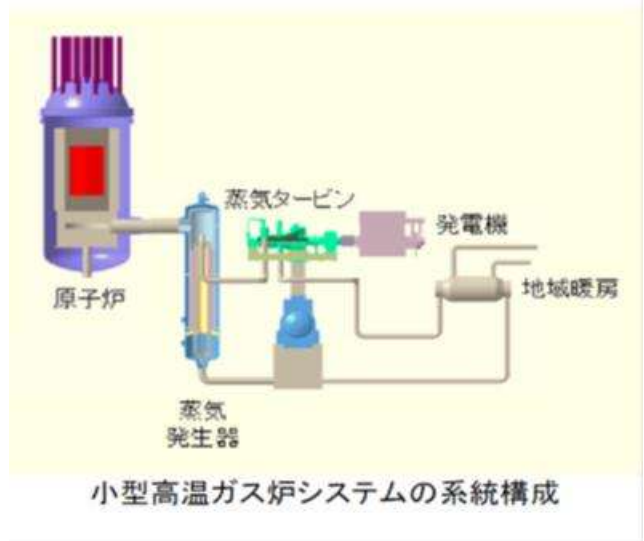
3. 高温ガス炉実証炉の実現に向けた取組み(続)

3.2 国内の高温ガス炉プロジェクトへの参画

■ 原子力機構殿実施の設計研究への参画

下記の設計研究につき、原子炉/炉心設計、燃取設備設計などを担当。

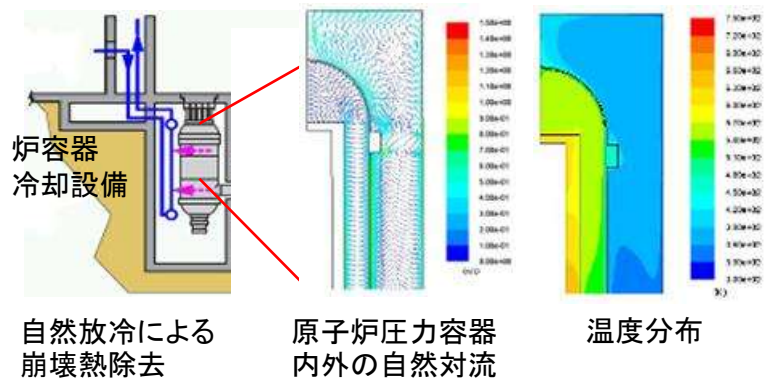
- ガスタービン高温ガス炉プラントGTHTR300
- 途上国向けの小型高温ガス炉プラントHTR50S



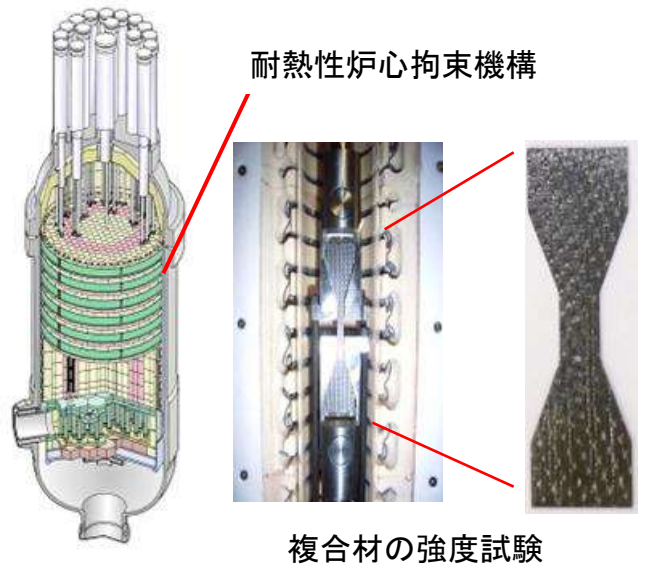
4. 自主R&Dの推進

■ 前記国内外の活動と並行し、高温ガス炉実証炉の実現に向けて下記の研究開発を実施中。

- 超高温ガス炉向けの耐熱性炉心拘束機構の開発
- 受動冷却時の原子炉熱流動評価手法の高度化
- 燃料温度低減のための炉心核熱設計の最適化、等



原子炉自然放熱挙動の解析例

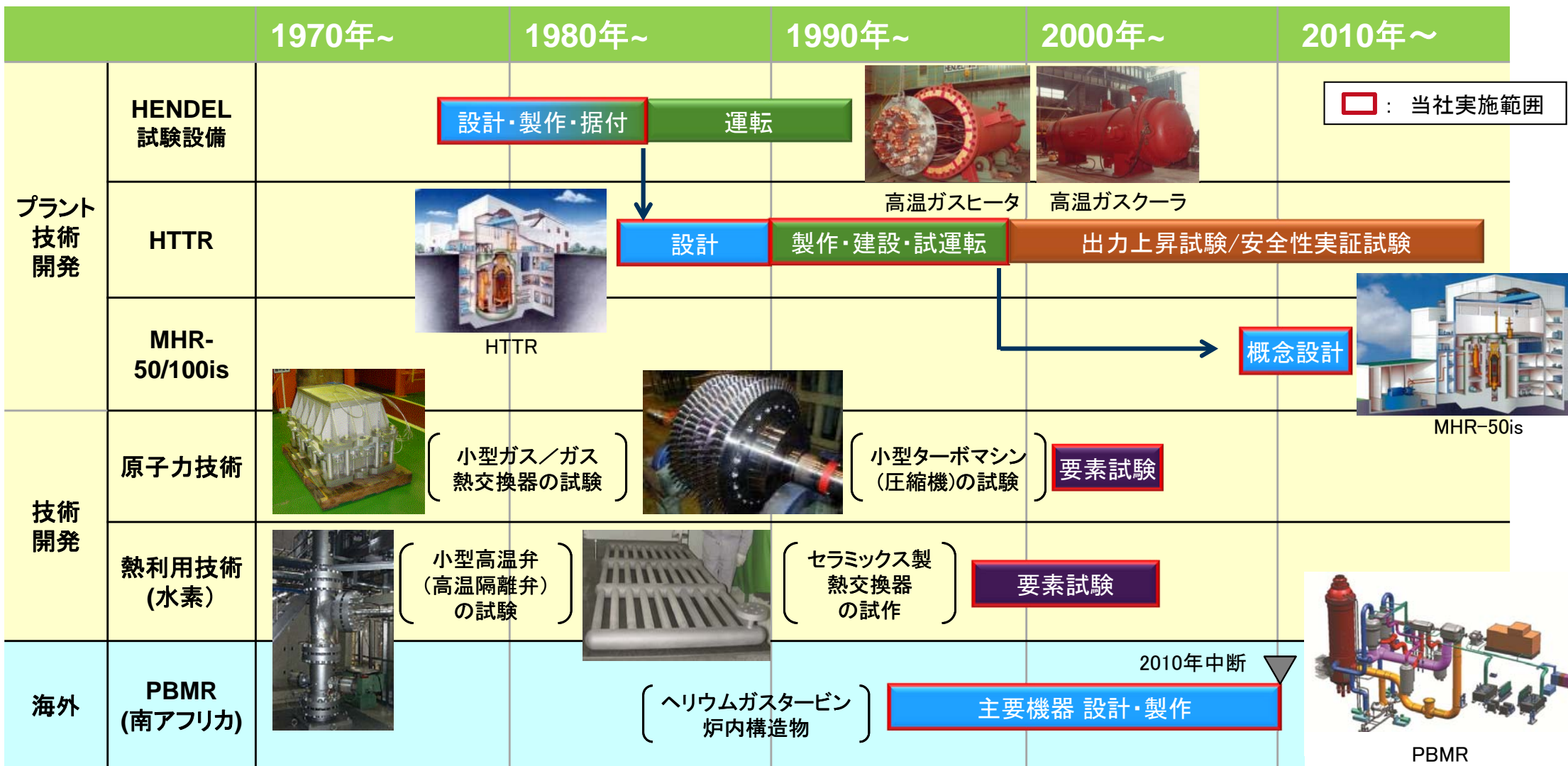


超高温ガス炉用耐熱炉心拘束機構の開発

民間における高温ガス炉に関する取組
三菱重工業株式会社

当社の取組み実績

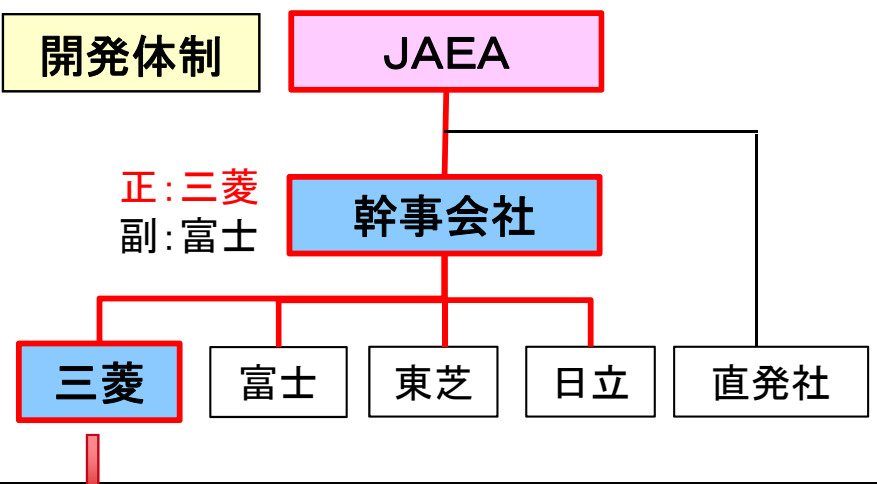
- ・当社は、1970年代から、国産技術によるHTTRの設計・建設に貢献し、実用化に向けて技術力を維持
- ・2009年から、三菱小型高温ガス炉MHR-50/100isの概念設計を開始



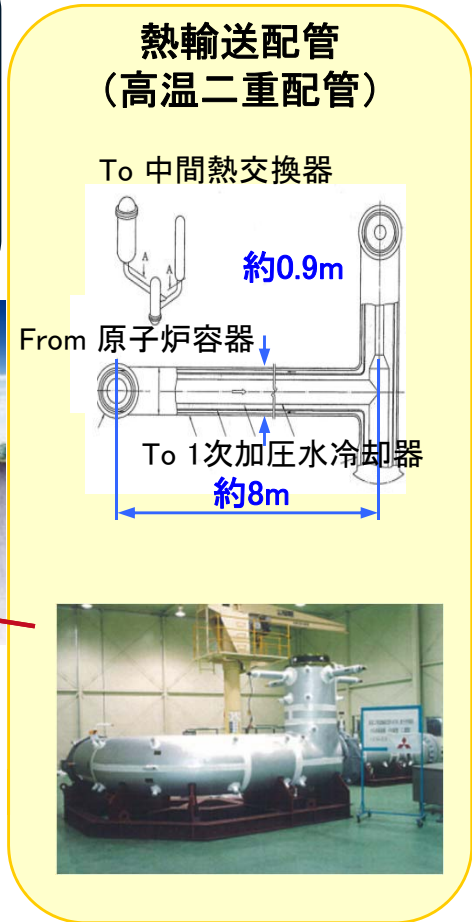
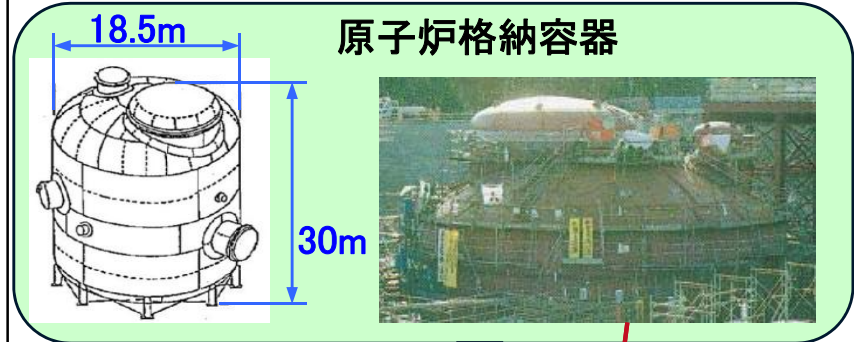
(大型構造機器実証試験ループ HENDEL: Helium Engineering Demonstration Loop)
(高温工学試験研究炉 HTTR: High Temperature engineering Test Reactor)

(MHR: Mitsubishi Small-sized High Temperature Gas-cooled Modular Reactor)
(ペブルベッド型高温ガス炉 PBMR: Pebble Bed Modular Reactor)

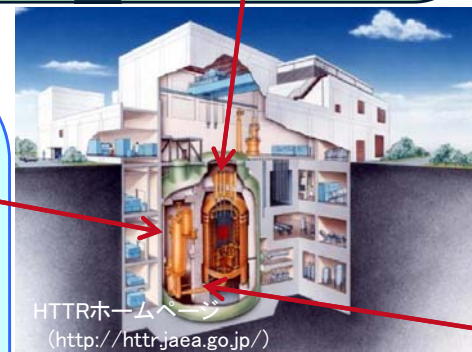
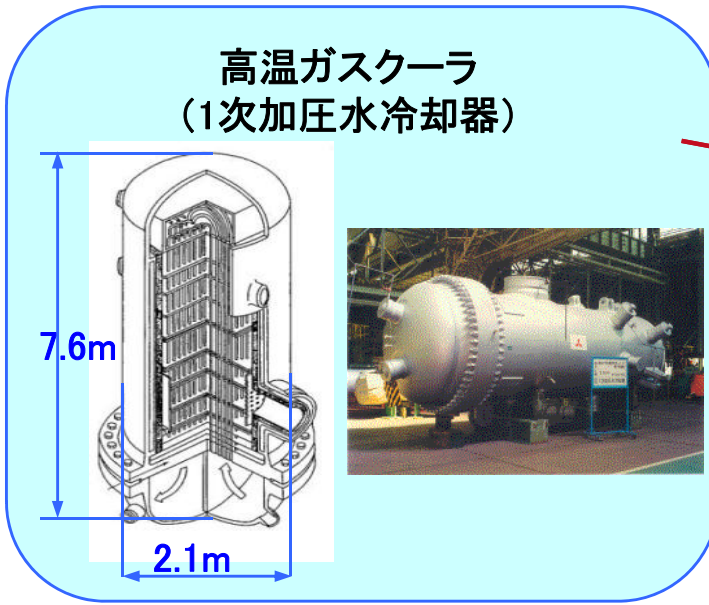
- ・HTTRの幹事会社を担当し、プラント全体設計と主要機器の設計・製作・据付を経験
- ・高温ガス炉実用化を目指し、HTTRで培った技術を活かして、HTTR改造、リードプラント建設に積極的に取り組む予定



主要機器製作例



- プラント全体設計**
- ・システム設計
 - ・安全設計
 - ・遮へい設計
 - ・配置設計
 - ・プラント制御設計
 - 他



HTTR主仕様	
熱出力	30MWt (大気放熱)
炉出口温度	~950°C
炉圧力	4MPa
燃料形式	ブロック型



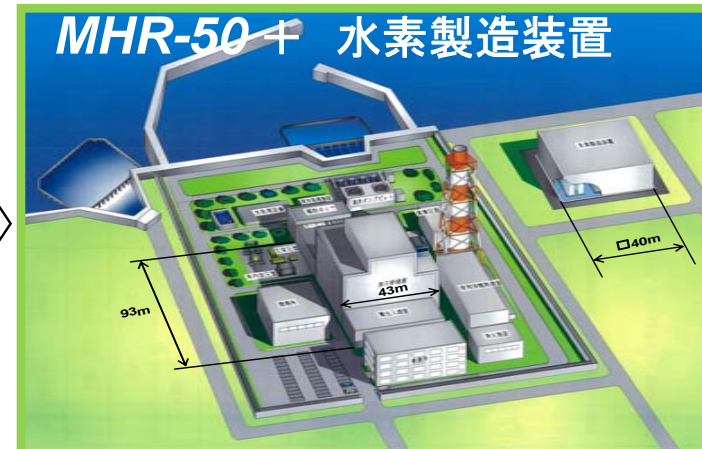
HTTRを礎に、さらなる技術開発、HTTR改造とリードプラント建設による実証のステップで実用化の推進を期待

高温ガス炉:MHR-50

⇒当社が概念設計を実施
(JAEA連携センター支援による)

発電方式：蒸気タービン
Heガスタービン

発電量：5(～10)万kWe/基
(MHR-100の場合)



～2025年-2030年

HTTR

技術開発
HTTR改造

リードプラント
(実用先行炉)

実用炉

大気放熱

・原子炉技術

ヘリウムガスタービン技術
蒸気発生器技術 等

・接続技術(原子炉→熱利用系)

高温ガス熱交換器技術 等

・熱利用技術

水素製造技術 等

・安全性の実証

・経済性の実証

・運転保守性の実証

・直接熱源供給

水素製造、製鉄、

石油化学産業への適用

・分散電源

・実用化に向け、原子炉技術・熱利用技術・接続技術の開発推進とHTTRでの実証が必要

原子炉技術

原子炉システム

- ・高温ガス炉規格・基準整備
- ・Heガス循環機技術(大容量化)
- ・運転・制御技術 等

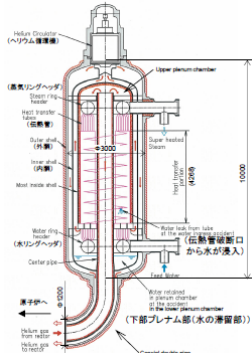


(*)
Heガス循環機(HTTR)

[蒸気発生システムの場合]

蒸気発生器(SG)

- ・Heガス/蒸気熱交換技術(高温・高圧)
- コンパクト化設計
- 大型SG製作・試験 等



実用炉用SG

[ガスタービン(GT)システムの場合]

Heガスタービン(GT)

- ・Heガスタービン・圧縮機技術(世界初)
- 軸受技術
- ドライガスシール
- 大型実証試験 等



GTHTTR300(JAEA)

接続技術(原子炉系→熱利用系)

ガス/ガス熱交換器

- ・超稠密高性能熱交換器技術(プレートフィン方式等)
- 大型化試作・性能実証試験 等



要素試験

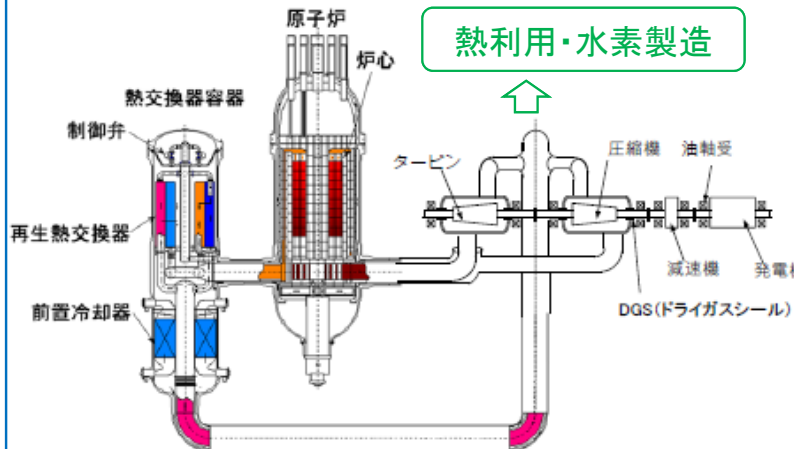
高温隔離弁

- ・ヘリウムガス隔離技術
- 大型製作性
- 隔離性能 等



試作試験(JAEA)

高温ガス実用炉概念 MHR-50/100GT(GT設計)



熱利用・水素製造

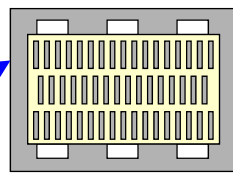
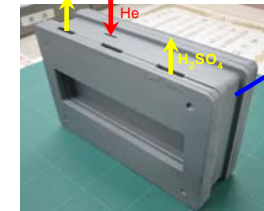
熱利用技術(水素系)

各種熱源利用技術

- (製鉄、石油改質、淡水化他)
- ・法整備、インフラ整備 他

水素製造

- ・I-S法関連技術(I:Iodine、S:Sulfur)
- 高温耐食材料・機器(SiC)
- 制御技術 等



硫酸流路

プレート式セラミックス(SiC)熱交換器

原子力水素安全

- ・水素燃焼挙動評価 等



水素拡散挙動試験(NEDO)(*2)