

高温ガス炉熱利用技術の 研究開発の現状と今後の課題について

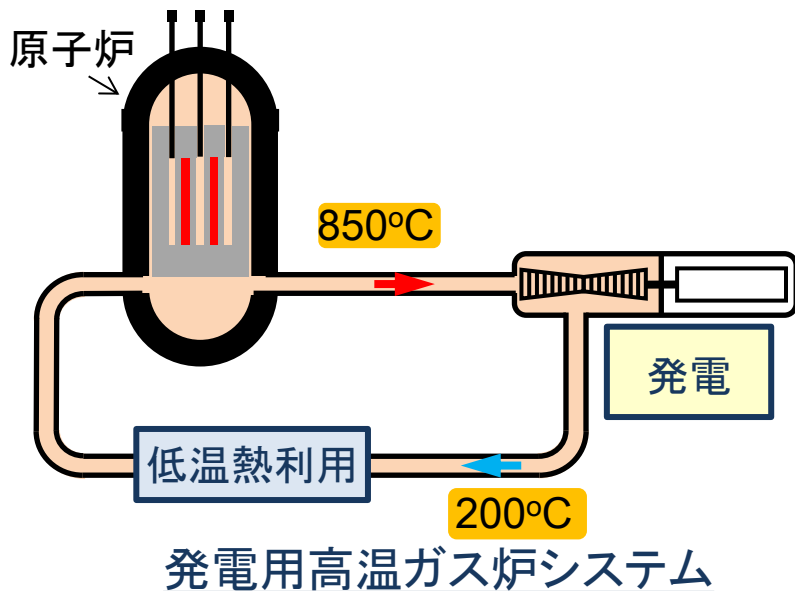
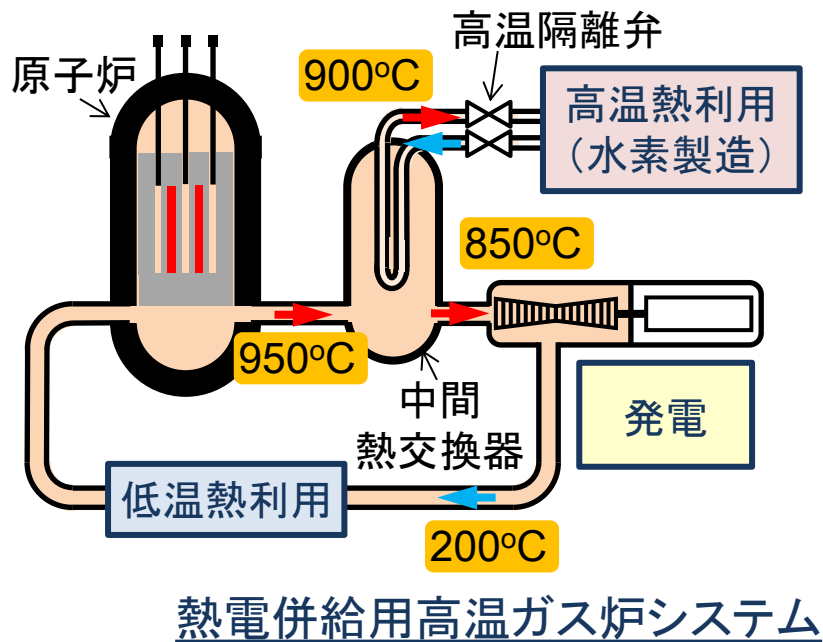
独立行政法人日本原子力研究開発機構

目次

1. 高温ガス炉熱利用技術の概要
2. 水素製造技術
3. 発電技術
4. 接続技術

1. 高温ガス炉熱利用技術の概要

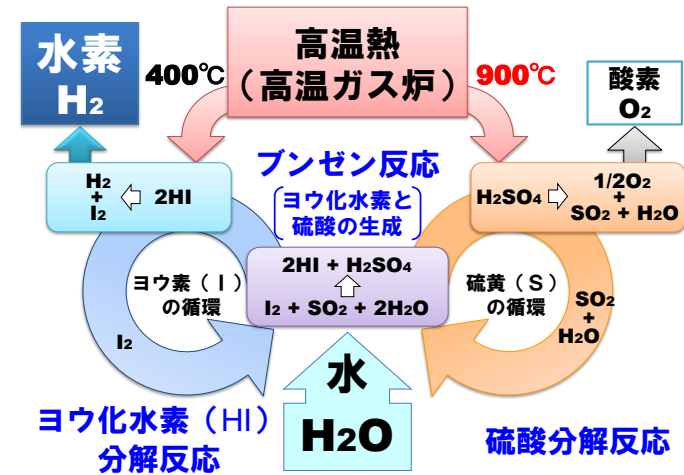
1-1 高温ガス炉の熱利用技術



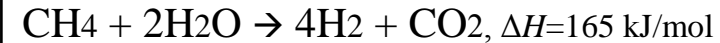
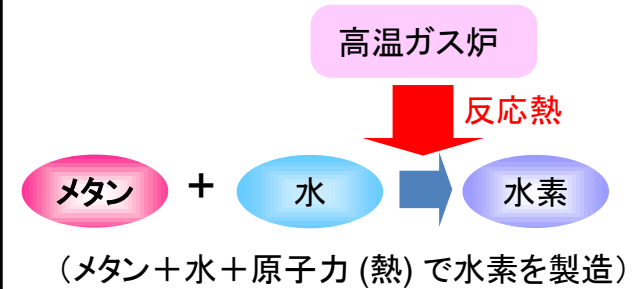
| 熱利用技術 | | 開発状況 |
|---------|-------------|----------------|
| 水素製造技術 | 熱化学法 ISプロセス | 原子力機構で研究開発を実施中 |
| | メタンの水蒸気改質 | 原子力機構で研究開発を完了 |
| 発電技術 | ヘリウムガスタービン | 原子力機構で研究開発を実施中 |
| | 蒸気タービン | メーカーで技術を確立済み |
| 低温熱利用技術 | 海水淡水化 | メーカーで技術を確立済み |
| | 地域暖房 | メーカーで技術を確立済み |
| 接続技術 | 熱利用施設接続 | 原子力機構で研究開発を実施中 |

1-2 熱利用技術の概要(1/2)

| | | |
|--------|----------------|--|
| 水素製造技術 | 熱化学法 ISプロセス | <p>◆ 水を高温熱エネルギーで分解して水素を製造するための技術開発</p> <ul style="list-style-type: none"> • 水分解による水素製造であり、水素製造プロセスからのCO₂排出なし • 資源制約無し |
| | メタンの 水蒸気改質 | <p>◆ メタンなどの化石資源を水蒸気で改質して水素を製造するための技術開発</p> <ul style="list-style-type: none"> • 原子力エネルギーで反応熱を補い、化石資源を高効率利用 |



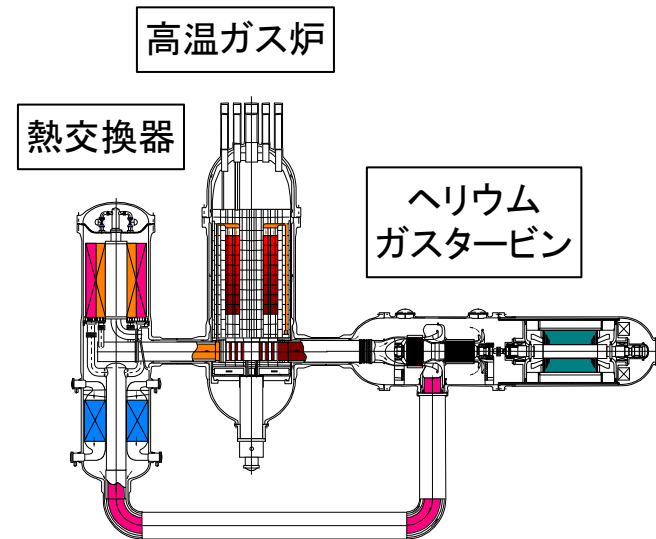
ISプロセスの反応構成



高温ガス炉を用いた水蒸気改質水素製造

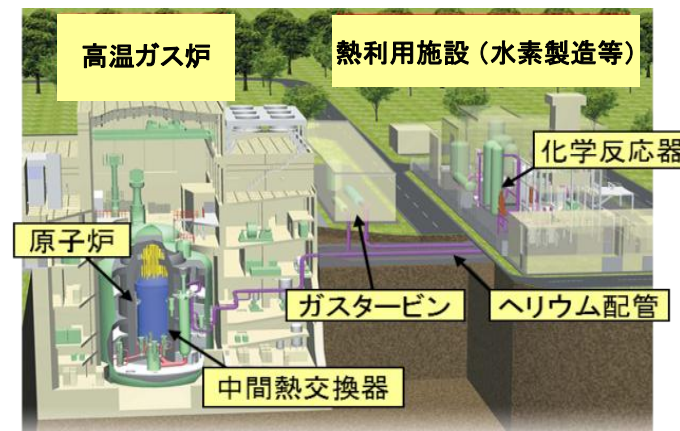
1-3 熱利用技術の概要(2/2)

| | | |
|------|----------------|--|
| 発電技術 | ヘリウム ガスタービン | <ul style="list-style-type: none">◆ 高温ヘリウムを直接発電に利用することにより、高効率で発電を行うための技術開発• 蒸気タービンに比べて高効率発電が可能• 冷却水が不要で、津波の恐れがない内陸に設置できる可能性を持ち、かつ、水侵入事故が発生しないため高い安全性 |
|------|----------------|--|



高温ガス炉発電システム

| | | |
|------|-------------|---|
| 接続技術 | 熱利用施設 接続 | <ul style="list-style-type: none">◆ 高温ガス炉と水素製造などの熱利用施設を接続するための技術開発• 熱利用施設からの可燃性ガス・有毒ガス漏えいに対する安全性確保が可能• 熱利用施設に起因する過渡変化時の原子炉安定運転確保が可能 |
|------|-------------|---|



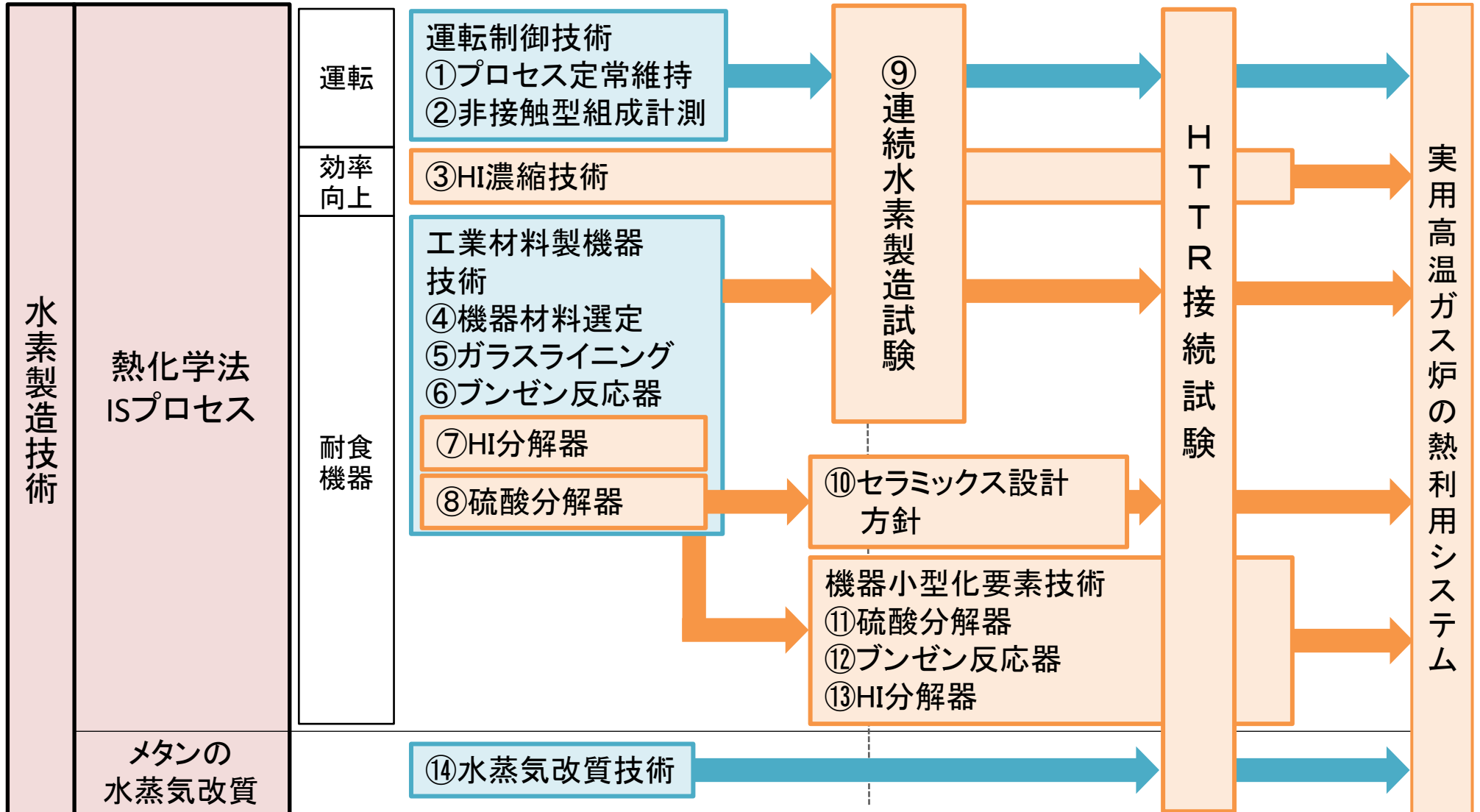
高温ガス炉熱電併給システム

2. 水素製造技術

2-1 水素製造技術に関する研究開発

HTTR接続試験のための研究開発

熱利用技術の実用化
に向けた研究開発



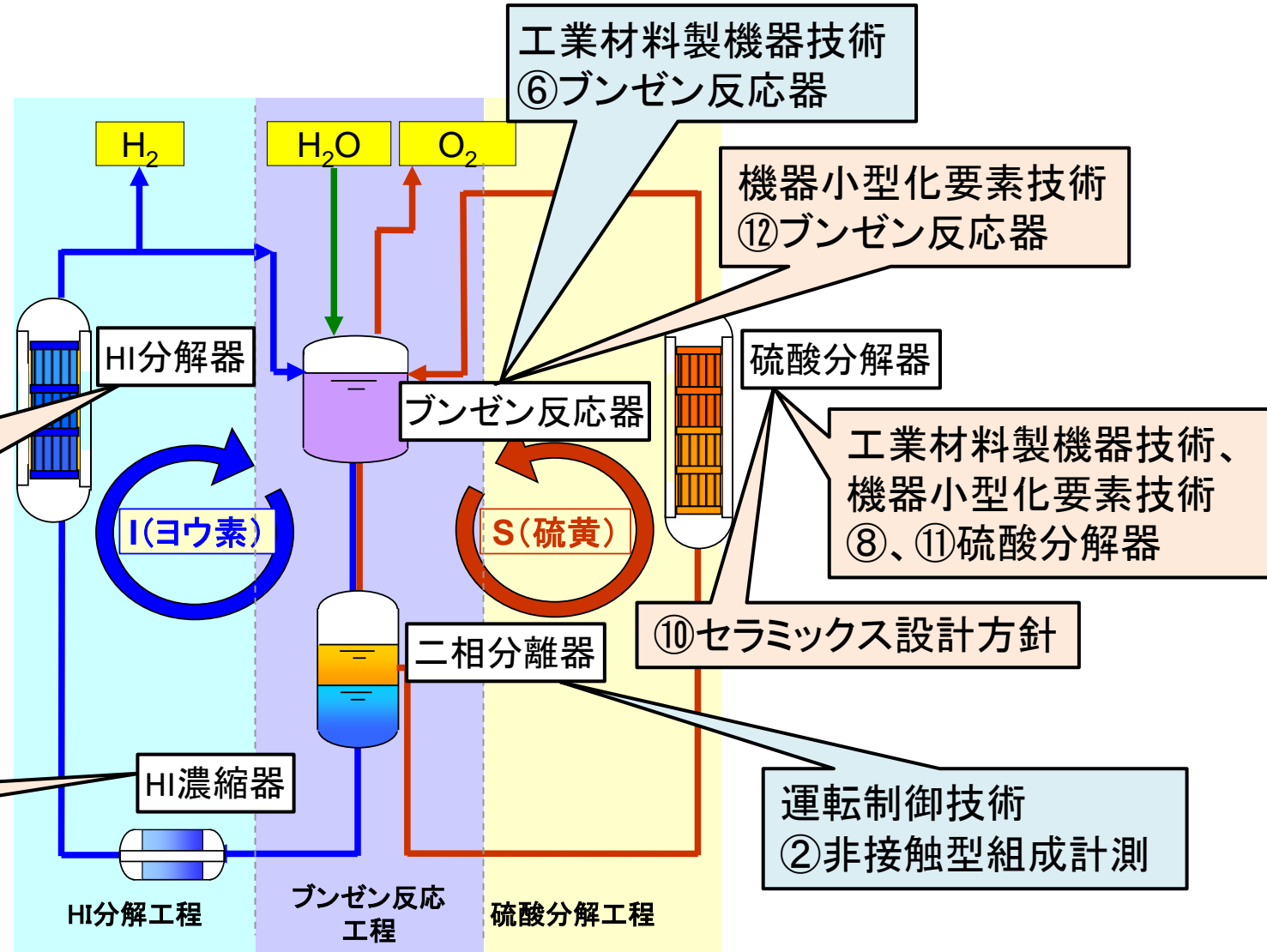
2-2 水素製造技術の達成度

| | 達成された技術 | 今後の課題 |
|------|--|--|
| 運転 | <ul style="list-style-type: none"> • プロセス定常維持 • 非接触型組成計測技術 | <ul style="list-style-type: none"> • 性能検証(連続水素製造試験) |
| 効率向上 | <ul style="list-style-type: none"> • 効率向上の提案(HI濃縮) → • HI濃縮用放射線製膜技術 → • HI濃縮特性のデータ整備 → • 膜の積層構造化技術 → | <ul style="list-style-type: none"> • 性能向上(HI濃縮エネルギー低減) • 大型膜の製膜技術 • 性能検証(連続水素製造試験) |
| 耐食機器 | <ul style="list-style-type: none"> • 耐食性の工業材料の選定 → • 工業材料製機器の開発(主要機器の製作性確認、ガラスライニング材の適用範囲の確認) → • 工業材料製機器の信頼性検証(主要機器) → | <ul style="list-style-type: none"> • プラント全系機器の信頼性確認(連続水素製造試験) • セラミックス設計方針の確定 • 機器小型化要素技術開発 |

• HTTR 接続試験

2-3 ISプロセス技術開発の概要

- 運転制御技術
①プロセス定常維持
- 工業材料製機器技術
④機器材料選定
⑤ガラスライニング
- ⑨連続水素製造試験



ISプロセスの概略フロー

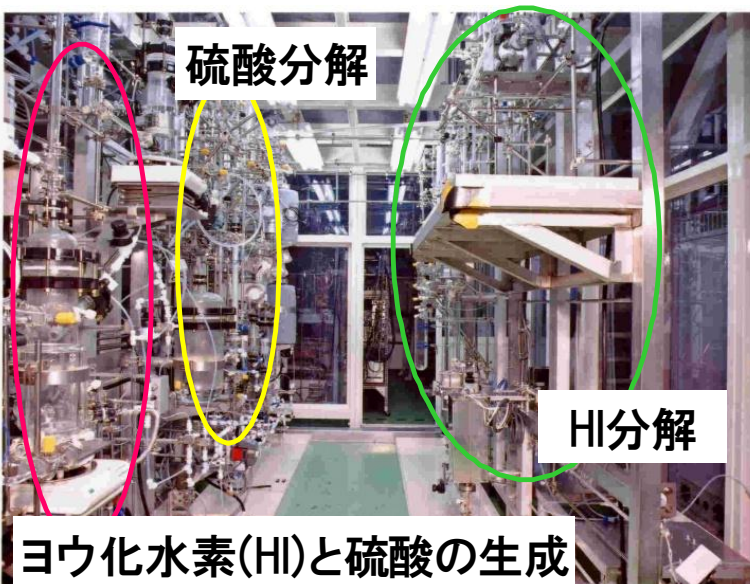
2-4 ① 運転制御技術：プロセス定常維持

目的 ● 安定した連続水素製造のため、プロセスを定常維持するための制御技術を開発

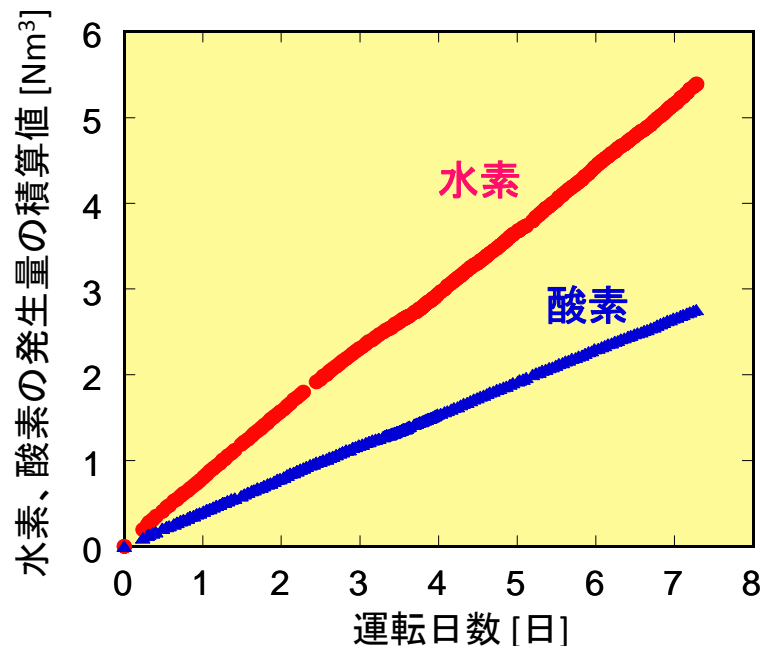
内容 ● ISプロセスの3つの反応工程間に設置したバッファにより循環物質量の変動を吸収しつつ、各工程を処理速度の調整により安定させる制御法を構築

成果 ● ガラス製試験装置により、毎時30 Lの安定した連続水素製造に成功（世界初）

- ✓ 硫酸分解器への硫酸供給流量を調節することにより、硫酸処理速度を決めて水分解速度を調節
- ✓ 水素・酸素比及びブンゼン反応状態の変動に対し、それぞれヨウ化水素処理速度及びヨウ素と水の循環速度を調節



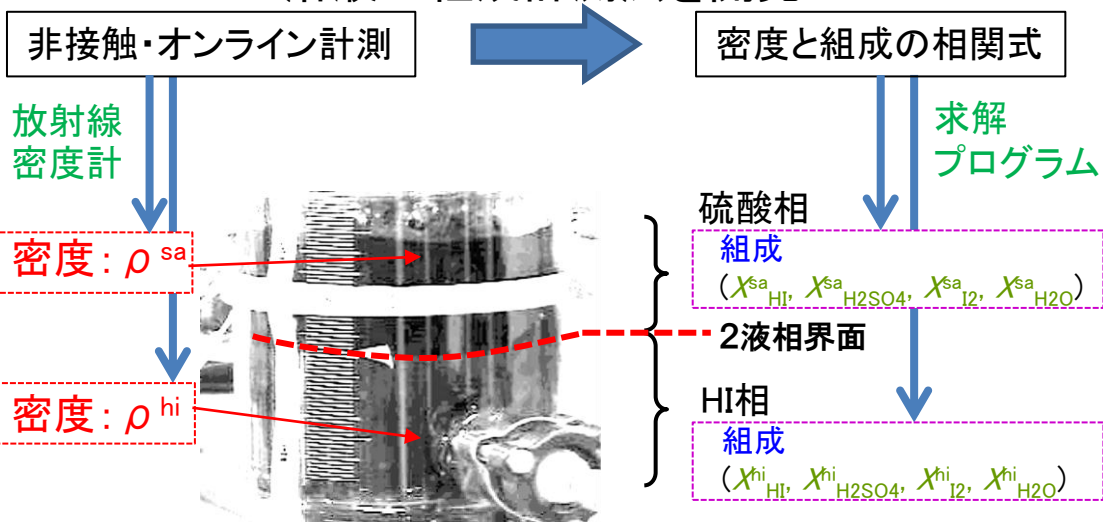
ガラス製連続水素製造試験装置



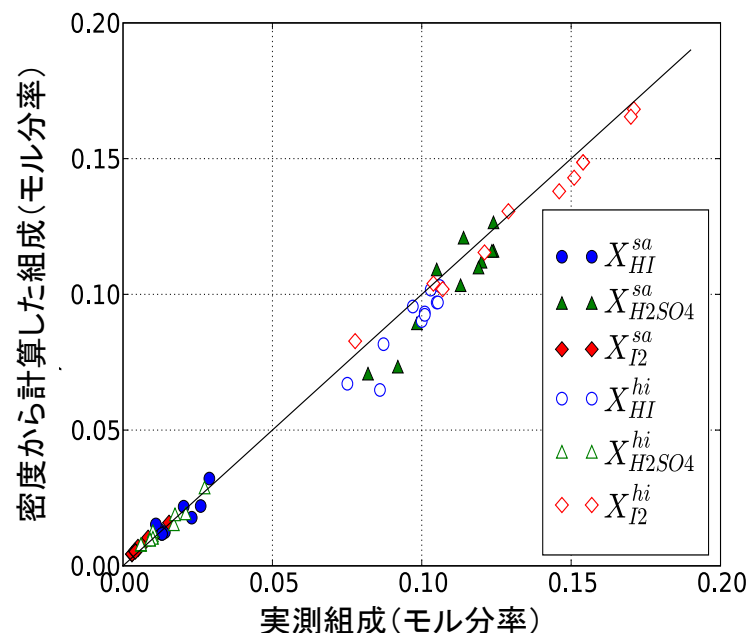
連続水素製造試験結果

2-5 ② 運転制御技術：非接触型組成計測

- 目的**
- 運転制御に不可欠なブンゼン反応溶液の反応状態を特定するため、強腐食性溶液に適用可能な非接触型組成計測技術を開発
- 内容**
- 多成分系(4成分2液相)のブンゼン溶液に対し、連続オンライン計測が可能で、かつ、強腐食性溶液の影響を受けない放射線密度計*を適用
 - 2液相溶液(硫酸相、HI相)の密度データを解析し、密度と組成の相関式(非線形8元連立方程式)を作成し、求解プログラムによりブンゼン溶液組成を決定
- 成果**
- 非接触でオンライン計測が容易、かつ組成と強く関連する密度を用いたブンゼン溶液の組成計測法を開発



2液相分離状態(硫酸相とHI相)のブンゼン溶液
の非接触型組成計測



密度からの計算値と実測値の比較

* γ 線などが測定対象を透過する際の減衰を利用して密度を得る計測方法。線源と検出器で構成。

2-6 ③HI濃縮技術

目的

- HI分解工程において、ヨウ化水素(HI)濃縮により水分の蒸発エネルギーを低減させ、水素製造効率を向上

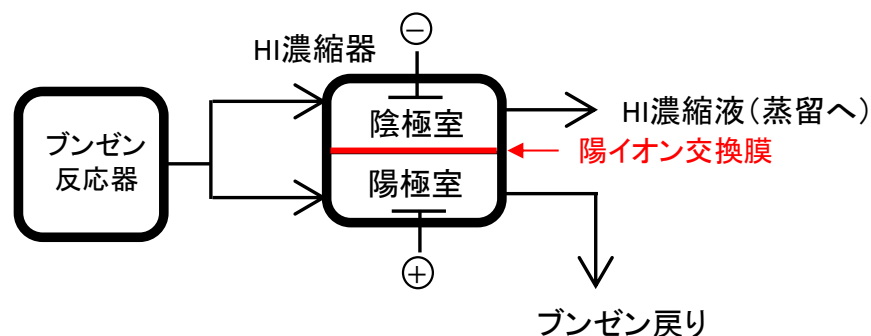
内容

- 電解電気透析(EED)法によるHI濃縮のため、濃縮時の温度(約100°C)に耐え、かつ、濃縮エネルギーが少ない分離膜(陽イオン交換膜)を開発
- 分離膜の性能評価データ(温度依存性、微量成分の影響、濃度依存性)を取得し、水素製造効率を向上させるHI濃縮工程の運転条件を明確化

計画

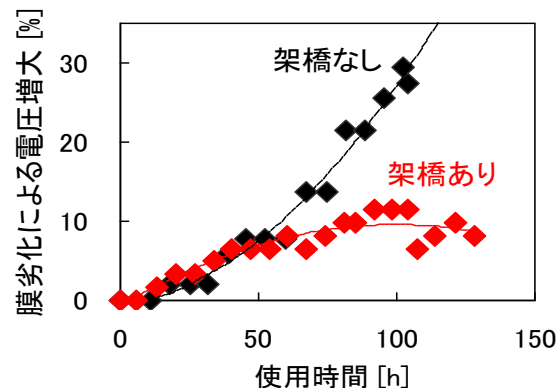
- 分離膜の性能評価データを基に、水素製造効率を向上させるHI濃縮の運転条件を提示(H26年度完了予定)
- 濃縮エネルギーの低減、膜の大型化

◆ HI溶液の濃縮



HI溶液を供給し、電極におけるヨウ素の酸化還元反応と陽イオン交換膜におけるプロトンの選択的透過により、陰極室からHI濃縮液を得る

◆ HI濃縮における膜の劣化抑制



100°Cのヨウ化水素濃縮における膜の劣化
陽イオン交換膜を架橋処理し、高分子同士を強固に連結して耐熱性を向上

2-7 ④工業材料製機器技術：機器材料選定

目的

- ISプロセスの各工程(広い温度範囲にわたった腐食性の高い環境)で使用可能かつ実用プラントの機器材料として利用可能な工業材料を選定

内容

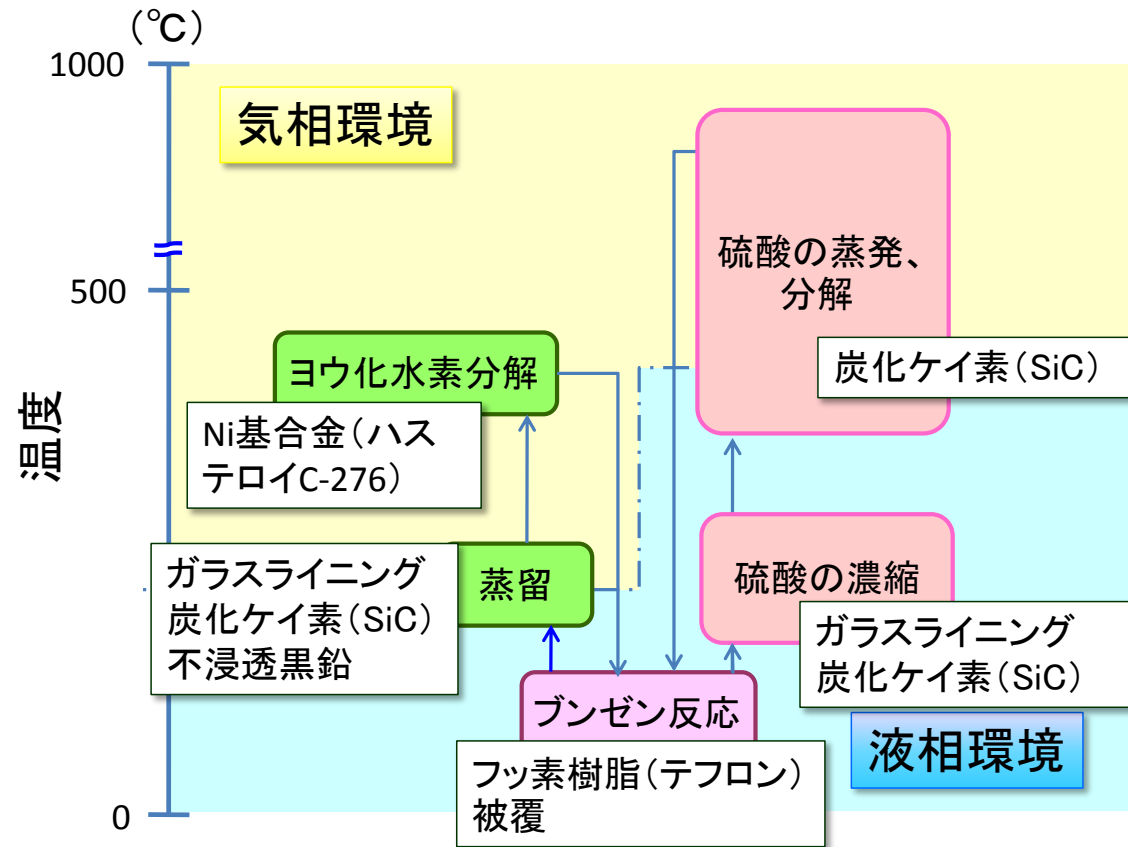
- 市販の耐食材料について、ISプロセスの各工程の環境を模擬した腐食試験等により耐食性を評価

成果

- 各工程の環境に適用可能な機器材料を選定

ISプロセスに存在する以下の多様な環境条件に適用可能な材料を選定

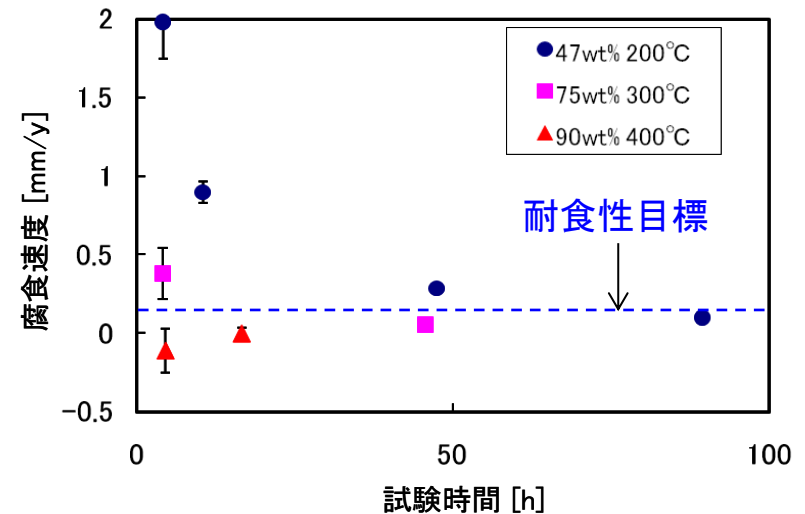
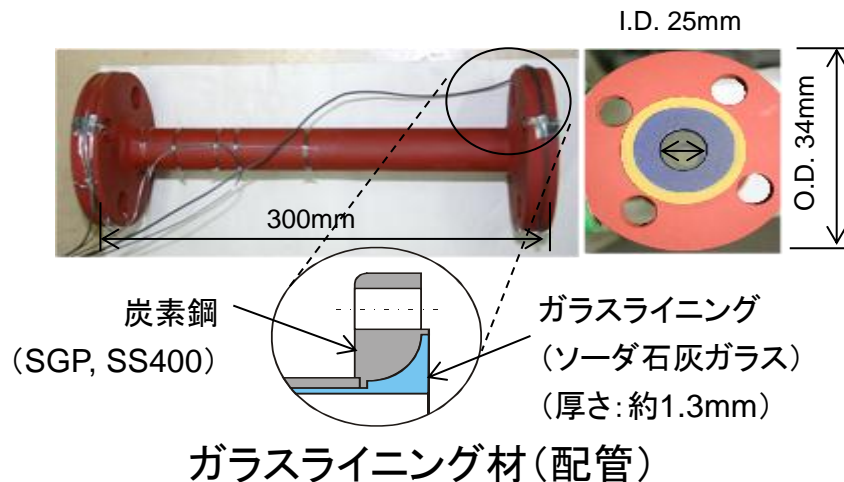
- 腐食性物質の種類
- 相状態(気液)
- 温度



各工程の環境における機器材料の選定結果

2-8 ⑤工業材料製機器技術: ガラスライニング

- 目的**
- 安価で耐食性に優れたガラスライニング材の容器・配管への適用性を評価
- 内容**
- 高温硫酸環境における腐食及び耐熱性データの取得
- 成果**
- ガラスライニング材の高温硫酸環境への耐食性、耐熱性を確認し、連続水素製造試験装置における中・低温の腐食環境で使用する容器、配管等に採用



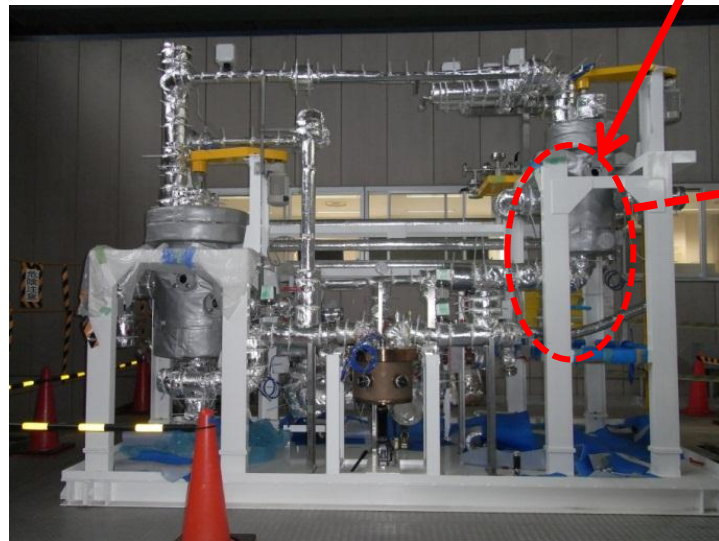
硫酸中の腐食速度の時間変化

- 通常の化学プラントで想定する10年程度の寿命を期待できる耐食性を有することを確認

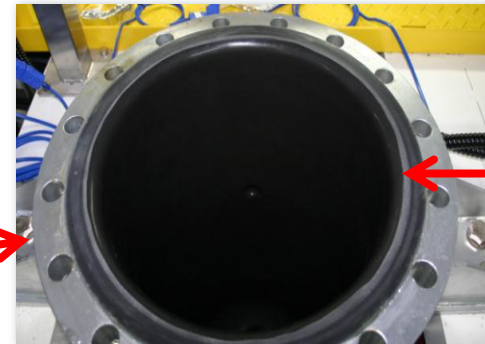
2-9 ⑥工業材料製機器技術：ブンゼン反応器

- 目的**
- ブンゼン反応溶液環境における工業材料製ブンゼン反応器の信頼性検証
- 内容**
- 工業材料(フッ素樹脂被覆炭素鋼)製のブンゼン反応系試験装置を製作
 - 実環境を模擬したブンゼン反応試験を行い、機器性能及び熱サイクル試験後の耐食被覆(フッ素樹脂)の損傷(剥離等)の有無、膜厚の変化を確認
- 成果**
- 10年間の起動停止を模擬したブンゼン反応溶液環境での熱サイクル試験後の耐食被覆が健全であることを確認

◆ ブンゼン反応系試験装置



ブンゼン反応器



ブンゼン反応器内部

炭素鋼の内表面をフッ素樹脂(テフロン)でライニング

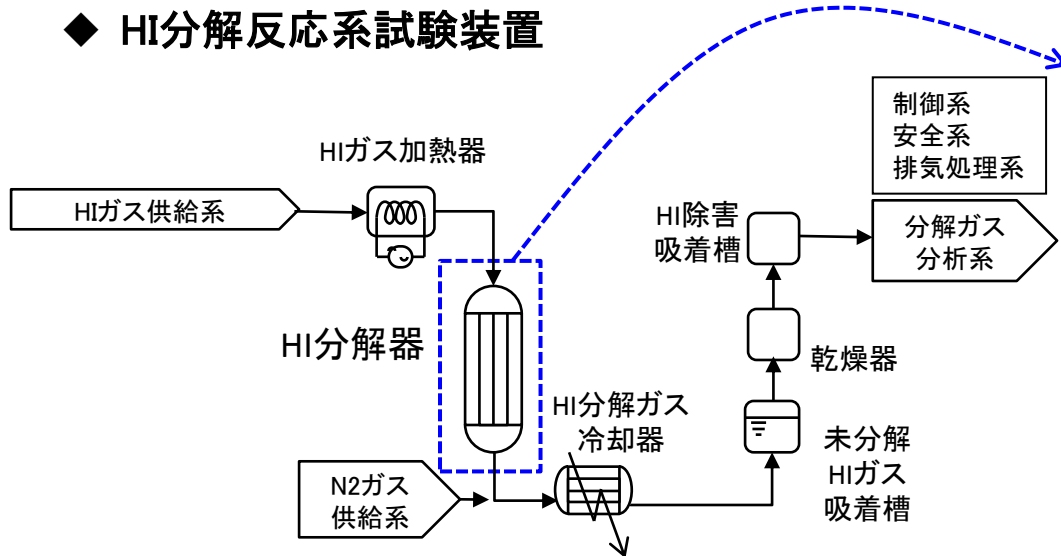
◆ 熱サイクル試験

- ブンゼン反応溶液(HI, I₂, H₂SO₄, H₂O混合溶液)を循環させつつ昇降温を行う
- 温度/圧力/サイクル数: 90°C/0.5MPa/30サイクル
- 検査項目: 耐食被覆の外観検査、膜厚計測

2-10 ⑦工業材料製機器技術：HI分解器

- 目的** ● 最高500°CのHI分解環境における工業材料製HI分解器の信頼性検証
- 内容** ● 工業材料(Ni基合金)製のHI分解反応系試験装置を製作
- 計画** ● 実環境を模擬したHI分解試験を行い、機器性能及び腐食に関するデータ取得を実施中(平成26年度完了予定)

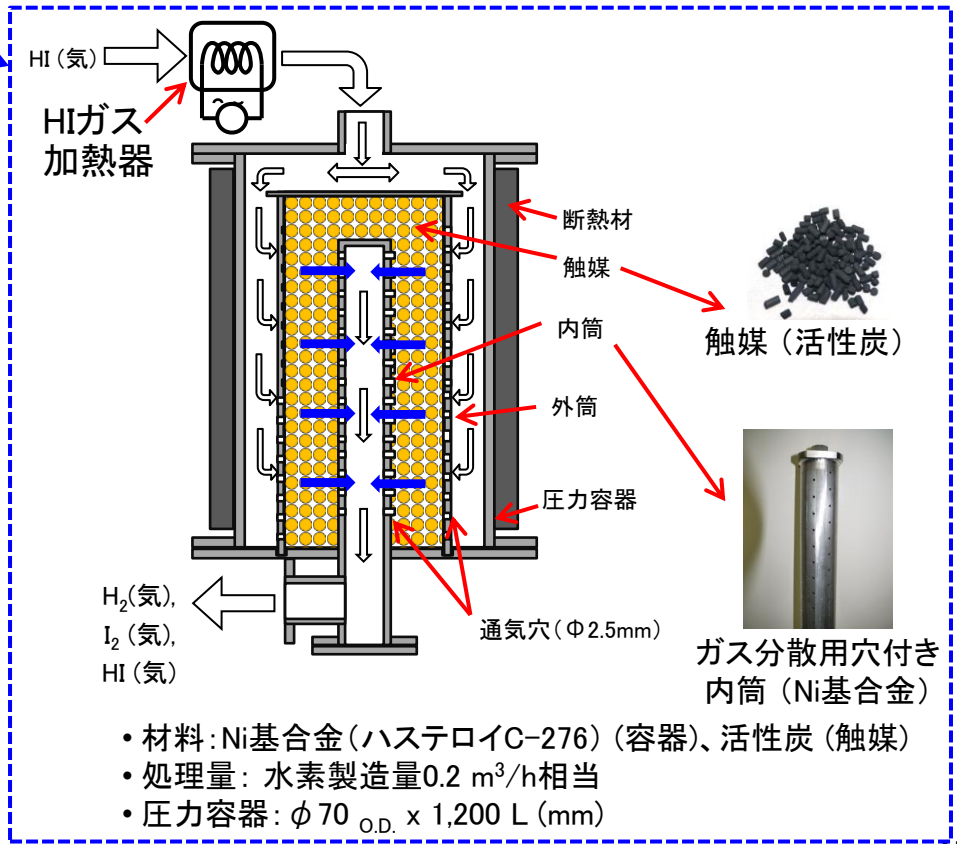
◆ HI分解反応系試験装置



◆ HIガス分解試験

HIガス：100 wt%
 温度：最高500°C
 時間：約100時間
 検査項目：Ni基合金サーベイランス
 試験片検査(腐食速度)等

HI分解器



2-11 ⑧工業材料製機器技術：硫酸分解器

目的

- 硫酸温度が850°C*の硫酸分解環境における工業材料製硫酸分解器の信頼性検証 (*中間熱交換器を介した900°Cのヘリウムガスで加熱された硫酸温度を模擬)

内容

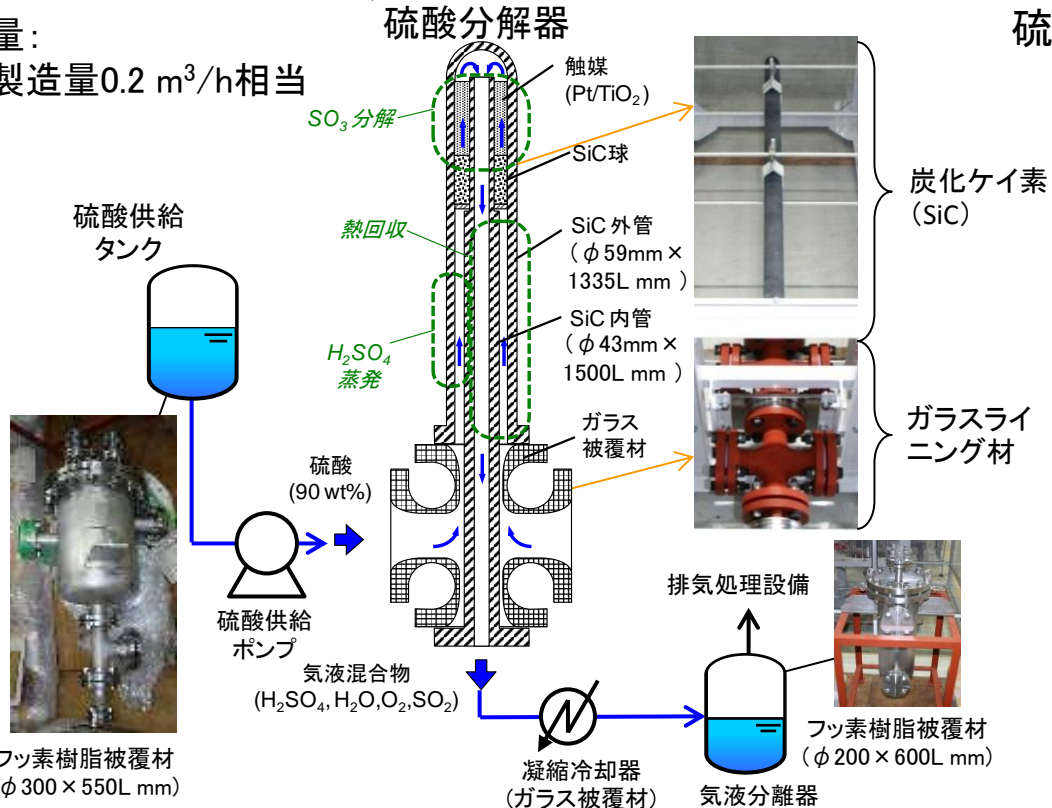
- 工業材料(炭化ケイ素(SiC)、ガラスライニング)製の硫酸分解反応系試験装置を製作

計画

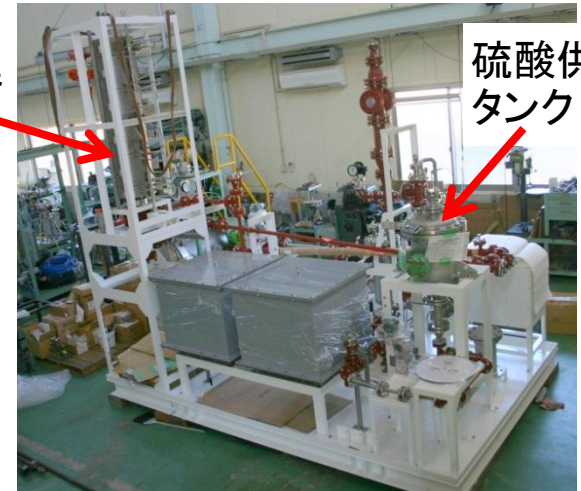
- 実環境を模擬した硫酸分解反応試験を行い、機器性能及び腐食に関するデータ取得を実施中(平成26年度完了予定)

◆ 硫酸分解反応系試験装置

処理量:
水素製造量0.2 m³/h相当



硫酸分解器



硫酸供給タンク

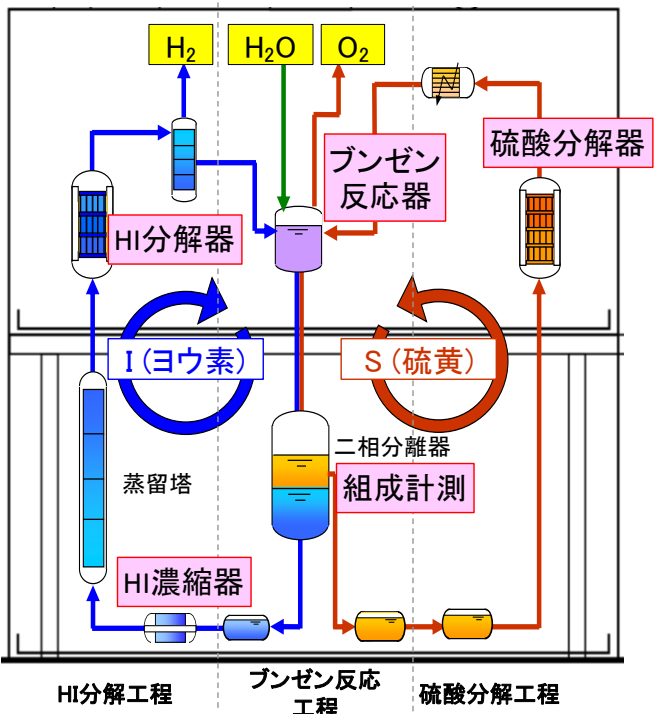
◆ 硫酸分解反応試験

- 硫酸 : 90wt%
- 温度 : 850°C
- 試験時間 : 約100時間
- 検査項目 : ✓ SiCサーベイランス試験片検査 (腐食速度)
✓ ガラスライニング膜厚計測、等

2-12 ⑨連続水素製造試験

- 目的** ● 工業材料製の連続水素製造試験装置による技術・信頼性確証
- 内容** ● これまでの開発技術を統合し、連続水素製造試験装置を製作(平成26年3月完成)
- 計画** ● 連続水素製造試験による信頼性確証、連続水素製造性能の検証(平成26年度開始)

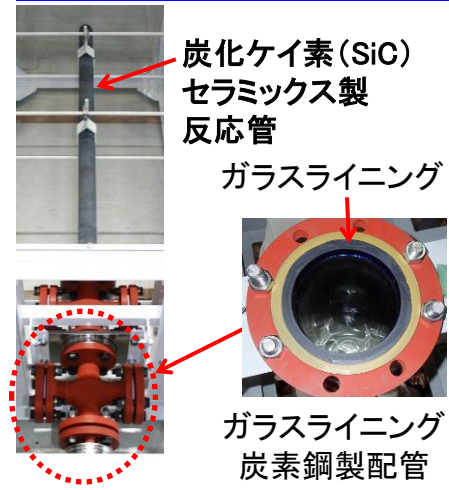
✓ 耐食機器技術: プラント全系機器の信頼性確証
 ✓ 運転技術: ISプロセスの運転方法、長時間運転の安定性を確証



装置材料

- | | |
|-------------------|--------------|
| <液相> | <気相> |
| ・フッ素樹脂ライニング | ・ニッケル基合金 |
| ・ガラスライニング | (ハステロイC-276) |
| ・炭化ケイ素(SiC)セラミックス | ・JIS SUS316 |
| ・不浸透黒鉛 | |

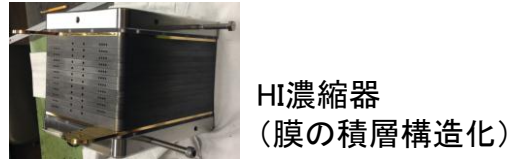
耐食機器技術



運転技術



HI濃縮技術



2-13 ⑩セラミックス設計方針

目的

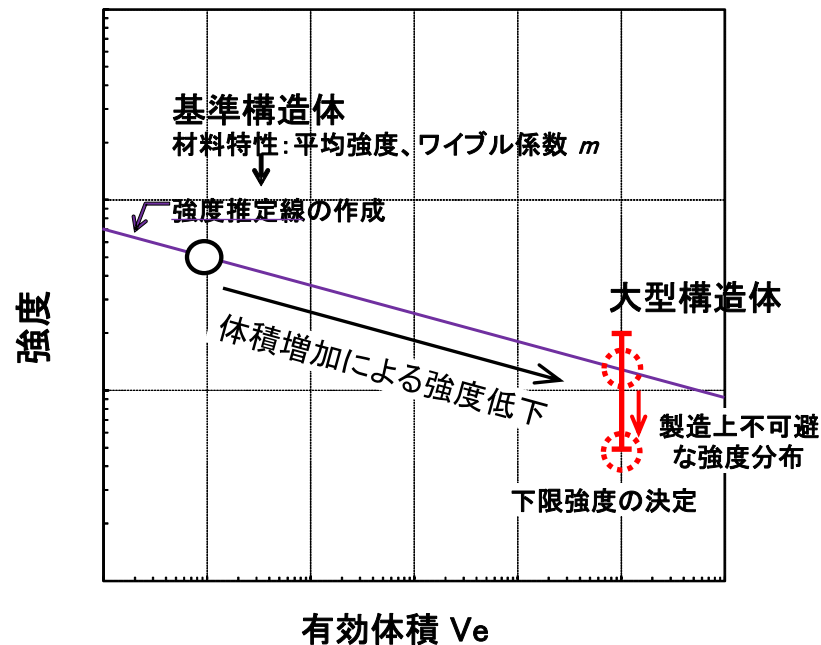
- 硫酸分解に用いるセラミックス製機器の高圧運転に必要な高圧ガス保安法の認可取得のため、セラミックス構造体の設計方針を策定

内容

- 設計方針の策定に必要なセラミックス構造体の下限強度決定法を開発

計画

- 基準構造体の材料特性と既存の脆性破壊統計理論を用いて、大型構造体の下限強度決定法を作成
- 大型構造体の強度評価試験により下限強度決定法の妥当性を確認し、セラミックス設計方針を策定

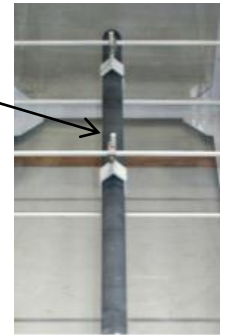


有効体積

$$V_e = \int \left(\frac{\sigma}{\sigma_{max}} \right)^m dV$$

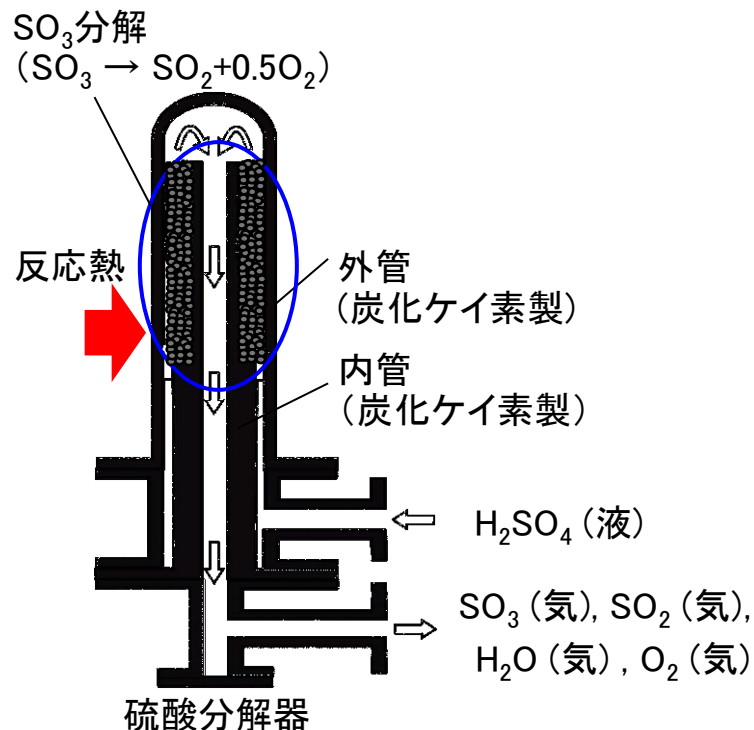
dV : 構造体の微小体積
 σ : dV に発生する応力値
 σ_{max} : 構造体に発生する最大応力
 m : ワイブル係数(強度ばらつきの程度を表す指標)

SiC製反応器
(大型構造体)



2-14 ⑪機器小型化要素技術：硫酸分解器

- 目的**
 - 薄層カートリッジ触媒を用いた硫酸分解器の小型化
- 内容**
 - 耐熱性SiC多孔質体を用いた薄層カートリッジ触媒により、触媒層における熱伝導率を向上
 - 触媒層の薄層化による熱移動促進及び反応物質との接触面積拡大による反応促進を図り、反応器を小型化
- 計画**
 - 薄層カートリッジ触媒を試作し、反応速度及び伝熱性能に対する触媒層形状の影響を解明
 - 機器試作及び実環境を模擬した試験により、健全性を含む小型化を確認

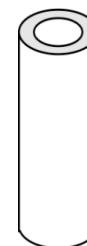
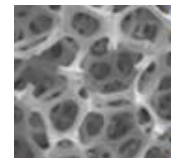


耐熱性SiC多孔質材を用いた 薄層カートリッジ触媒の開発

触媒層自体の熱伝導率向上及び薄層化により壁面近傍の熱移動量を増加させ反応促進

SiC多孔質材
(触媒を固定)

- ・高熱伝導
- ・触媒層を薄層化しても接触面積が大



カートリッジ触媒
触媒 (Cr₂O₃) を
担持材 (TiO₂) に保持し、
薄層多孔質材 (SiC)
に固定

2-15 ⑫機器小型化要素技術：ブンゼン反応器

目的

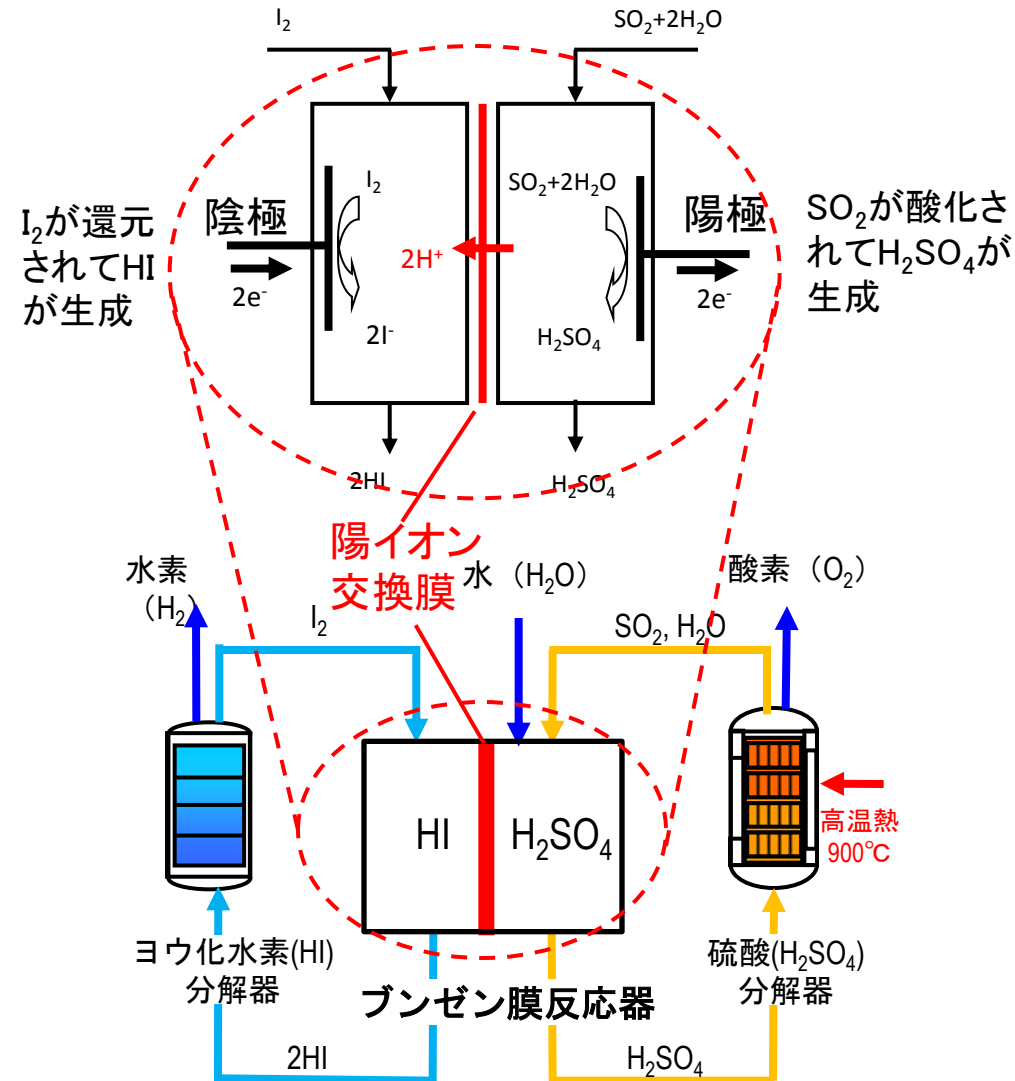
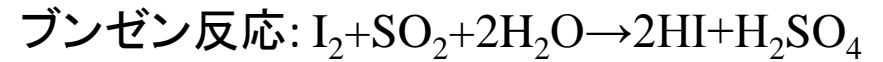
- 陽イオン交換膜を用いた膜反応器の導入により過剰なヨウ素量を低減し、機器を小型化

内容

- 機構独自の分離膜（陽イオン交換膜）を組み込んだ膜反応器を用いてブンゼン反応を起こさせることにより、反応生成物の硫酸とHIを分離膜で隔て、ヨウ素を反応に必要な量のみ添加することで循環量を低減

計画

- 膜反応器の作動に必要な陽イオン交換膜・電極を開発
- 膜反応器試験により設計に必要な特性データを取得



2-16 ⑬機器小型化要素技術：HI分解器

目的

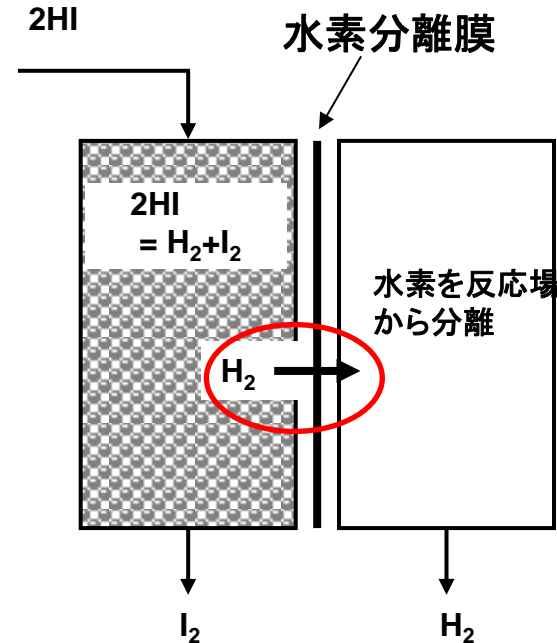
- 水素を選択的に分離する膜を用いた膜反応器の導入により、HI分解反応を促進し、機器を小型化

内容

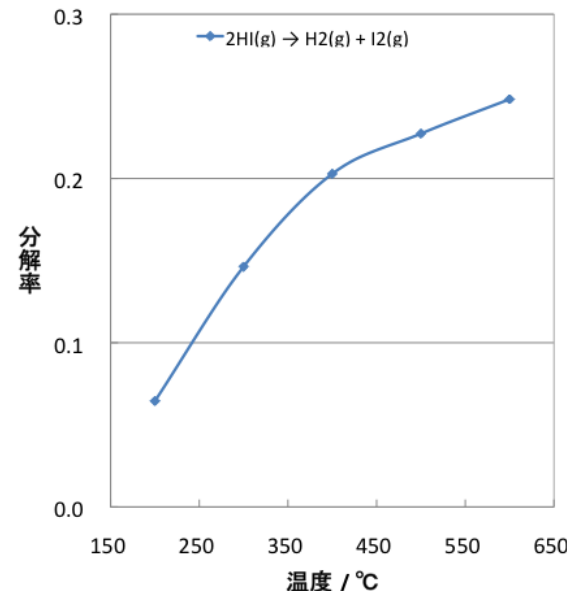
- HI分解工程において大量に循環している未反応HIを、HI分解反応の平衡転化率を向上させることにより削減して機器を小型化

計画

- 耐食性を有する水素分離膜を開発
- 低温化により機器腐食を緩和するため、低温でも高活性を維持できる触媒を開発
- 膜反応器試験により設計に必要な特性データを取得



HI分解膜反応器
(選択的に反応場から水素を分離することにより、平衡転化率を向上)



通常、HI分解反応の平衡転化率が低い
ため、大半の未分解HIを循環させて再利用する必要がある

2-17 ⑭水蒸気改質技術

目的

- 高温ガス炉を利用した水蒸気改質技術の開発

内容

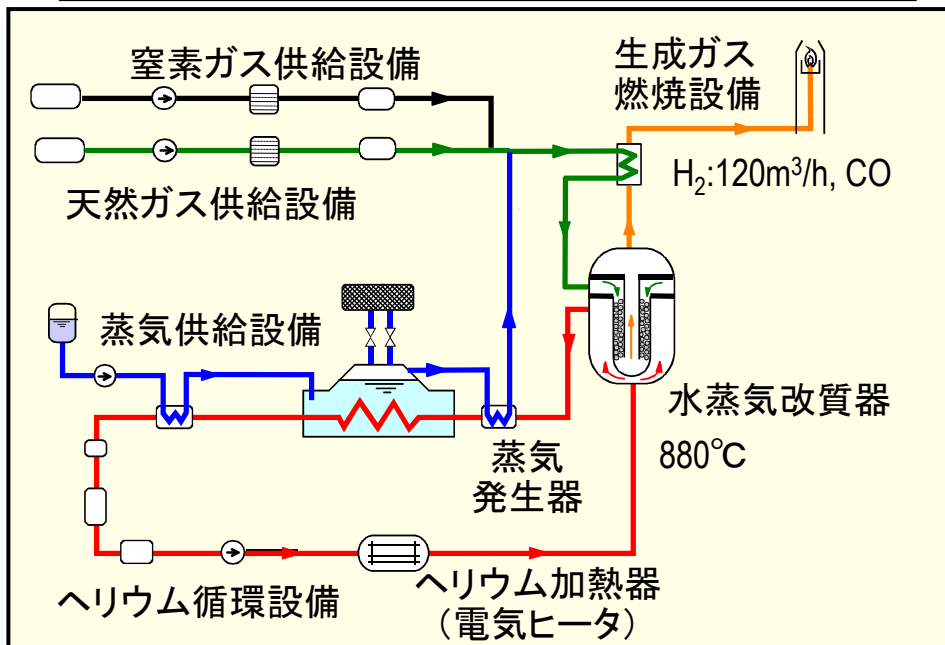
- ヘリウム熱交換型水蒸気改質器の開発
- 試験ループによる水素製造性能検証

成果

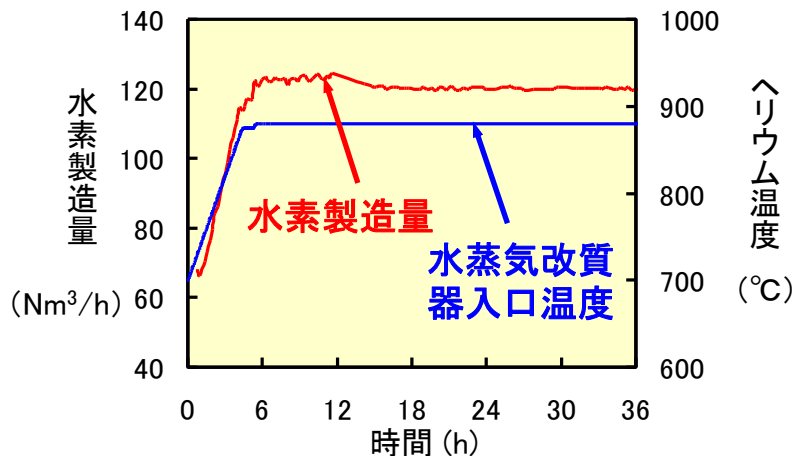
- HTTRと同じ温度、圧力条件下で水蒸気改質器の性能を検証し、メタンの水蒸気改質に関する要素技術開発を完了

試験設備の主な仕様

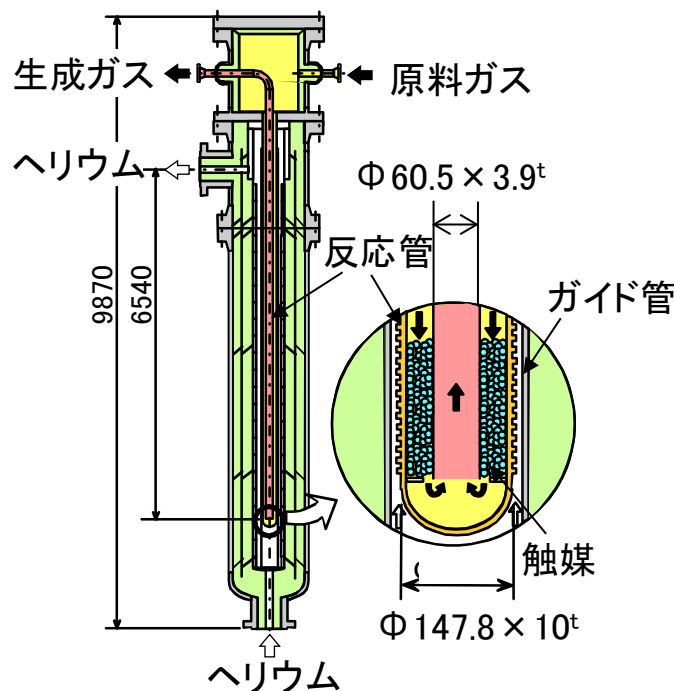
- ・温度: 900°C
- ・水素製造量: 120Nm³/h
- ・圧力: 4MPa
- ・電気ヒータ: 420kW



試験設備系統



水素製造量実測値



反応管外観

水蒸気改質器の構造

3. 発電技術

3-1 発電技術に関する研究開発



現在

HTTR接続試験

発電技術

ヘリウムガスタービン

①、②については、三菱重工業株式会社と協力して実施

①タービン用圧縮機技術

②コンパクト熱交換器技術

③軸シール技術

④FP沈着低減技術

⑤大型化・高温化・メンテナンス技術

HTTR接続試験

実用高温ガス炉の熱利用システム

3-2 発電技術の達成度

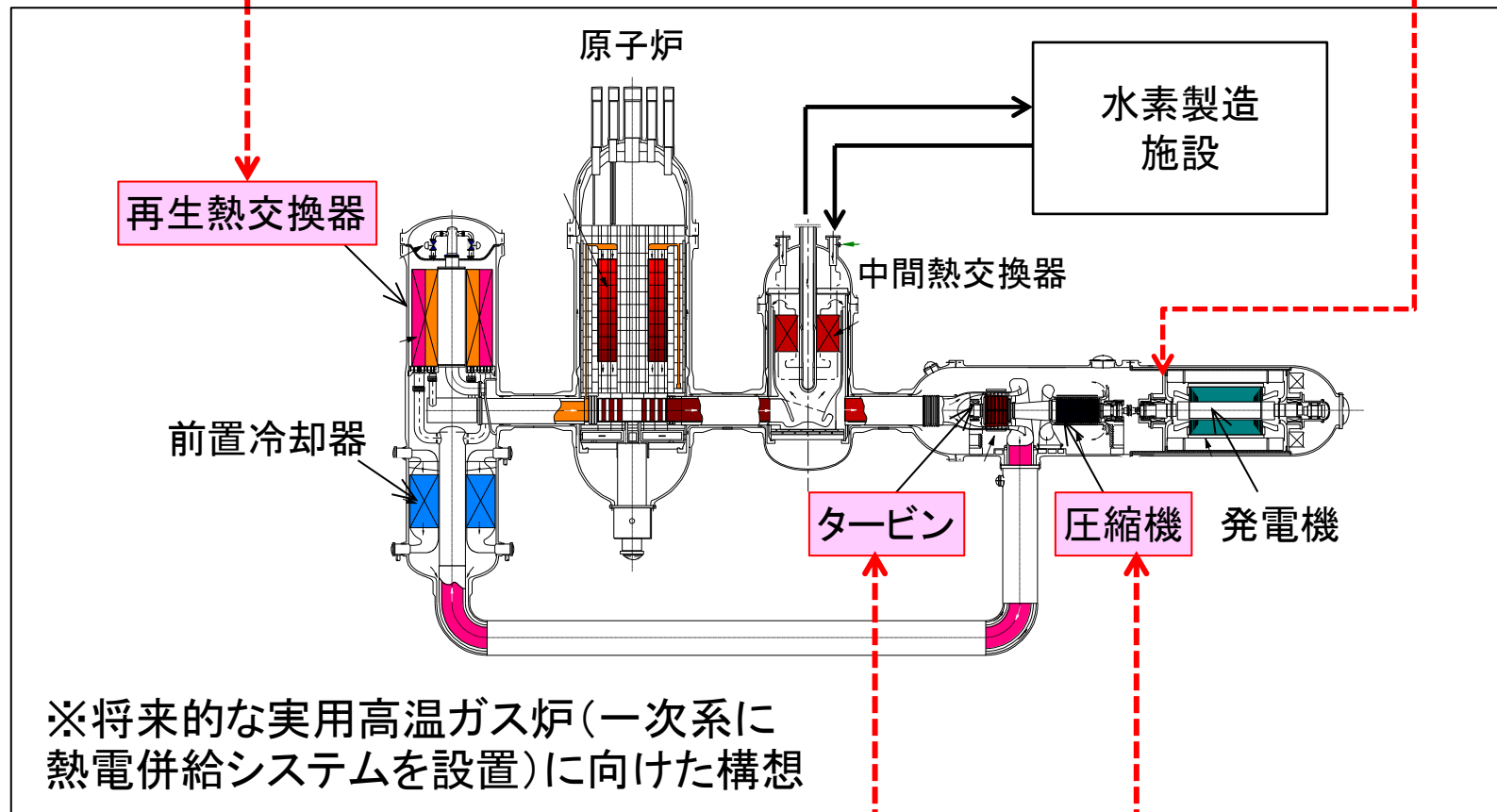
| | 達成された技術 | 今後の課題 |
|------|---|--|
| 材料 | <ul style="list-style-type: none"> ガスタービン翼材料の選定 | <ul style="list-style-type: none"> FP沈着低減材料の開発 |
| 機器 | <ul style="list-style-type: none"> 圧縮機設計手法の開発 → 実機1/3スケールで圧縮機効率を確認 | |
| | <ul style="list-style-type: none"> コンパクト熱交換器モデル試験体の製作 → 熱交換性能の確認 | |
| | | <ul style="list-style-type: none"> 軸シール技術の開発 大型化技術の開発 高温化技術の開発 メンテナンス技術の実証 |
| 運転制御 | <ul style="list-style-type: none"> 運転制御方式の作成 | |

•HTTR
接続
試験

3-3 ヘリウムガスタービン技術開発の概要

②コンパクト熱交換器技術

③軸シール技術



※将来的な実用高温ガス炉(一次系に熱電併給システムを設置)に向けた構想

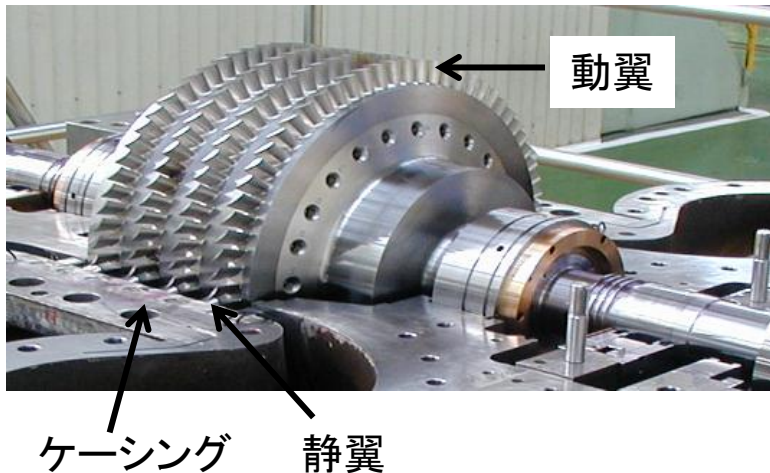
④FP沈着低減技術

①タービン用圧縮機技術

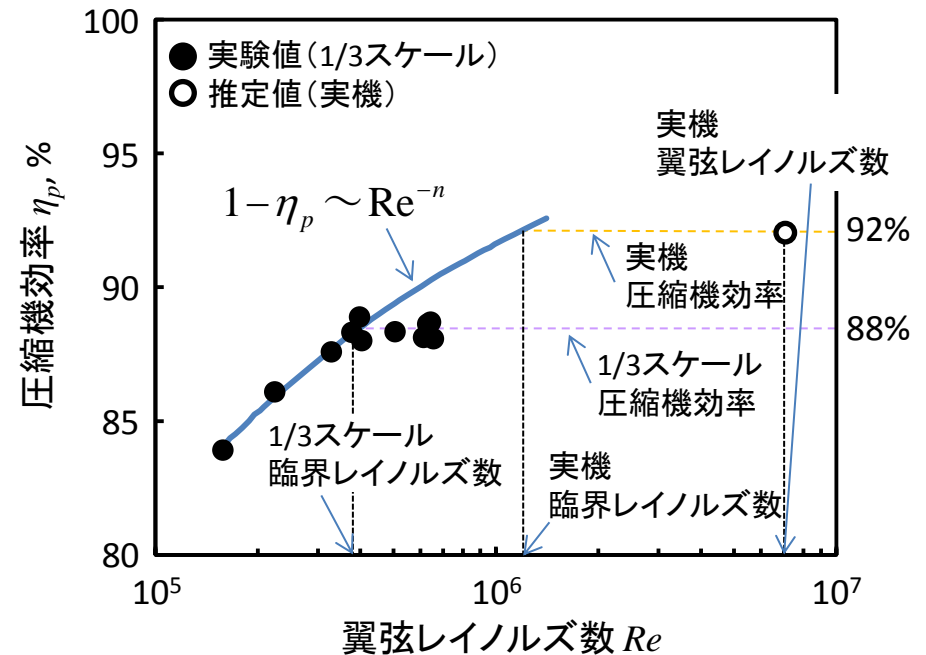
⑤大型化・高温化・メンテナンス技術

3-4 ①タービン用圧縮機技術

- 目的**
 - ヘリウムガスタービン発電システムにおいて高発電効率の達成に不可欠なタービン用圧縮機の開発
- 内容**
 - 翼端部近傍のヘリウムガス流れに着目し、翼角度を調整して損失を低減する設計手法を開発
 - 実機の1/3スケール試験装置を製作し、圧縮機効率を確認
- 成果**
 - 1/3スケール圧縮機の性能試験結果から実験式を作成
 - 実験式を用いた実機圧縮機の性能評価により世界最高の圧縮機効率(92%)を確認し、圧縮機の要素技術開発を完了



1/3スケール試験装置(圧縮機部分)



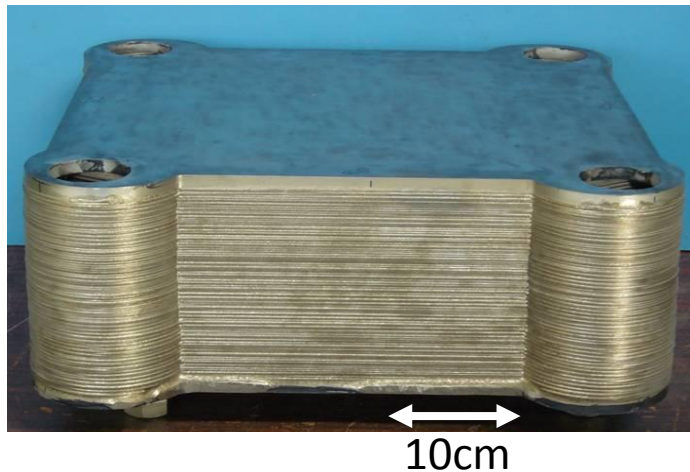
実機圧縮機の性能確認

3-5 ②コンパクト熱交換器技術

- 目的**
- ヘリウムガスタービン発電システムにおいて高発電効率の達成に不可欠な再生熱交換器用コンパクト熱交換器技術の確立

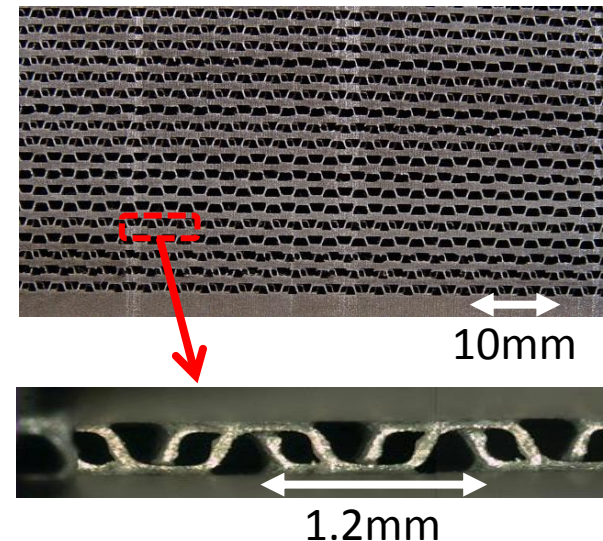
- 内容**
- 高い温度効率(95%)を維持したまま、製造サイズに限界がある圧力容器に収容できるように、プレート型熱交換器に超細密オフセットフィンを導入しコンパクト化
 - 熱交換部のモデル試験体を製作し、製作技術を確立するとともに性能を確認

- 成果**
- 良好なフィン加工性、ロウ付け性を確認し製作技術を確立
 - 超細密オフセットフィンにより、一般産業用熱交換器に比べ約10倍の熱交換密度を実現



熱交換部のモデル試験体 (*1)

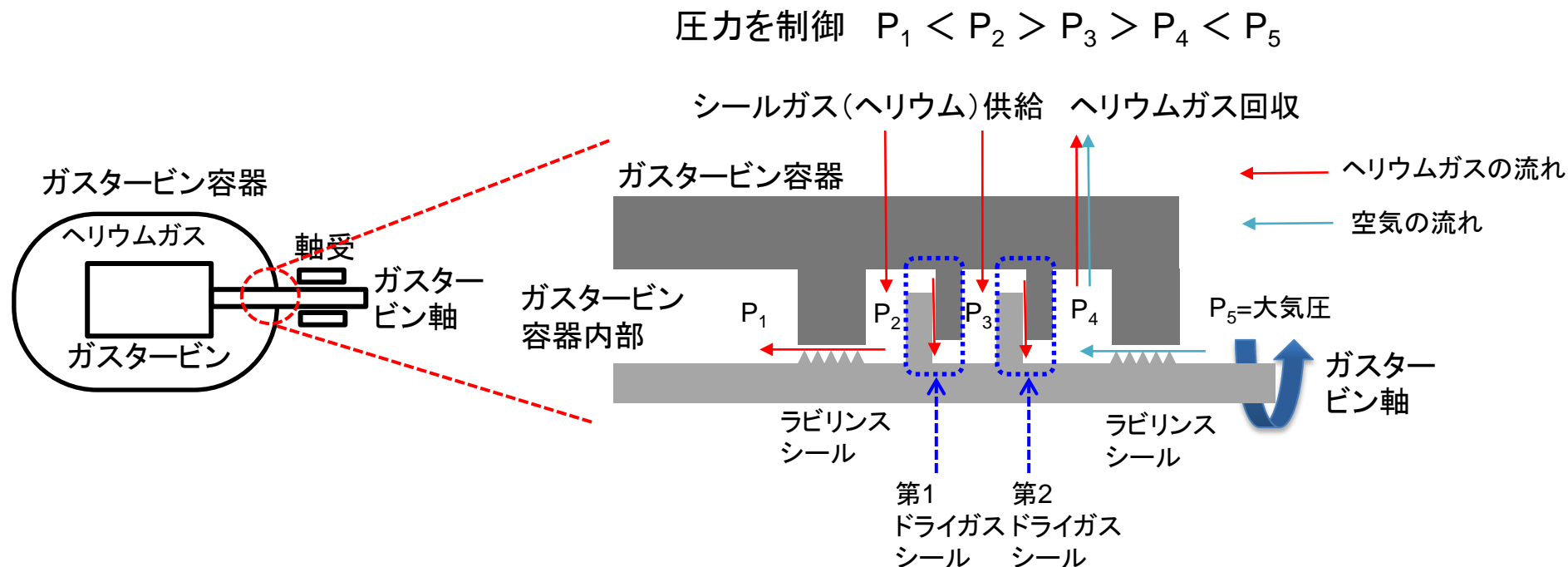
*1) 三菱重工業(株)にて開発



超細密オフセットフィン部(*1)

3-6 ③軸シール技術

- 目的**
- ガスタービン軸からのヘリウムガス漏洩を抑制するための軸シールシステムの要素技術開発
- 内容**
- ドライガスシール (メカシールとシールガスの併用) の導入
 - シール多段化とシールガス圧力制御によるシールシステムの開発
 - シールガス (ヘリウムガス) 回収システムの開発
- 計画**
- 開発した軸シールシステムを用いたヘリウムガスタービン発電施設によるHTTR接続試験で、性能、構造、健全性等を確認
 - 大型のドライガス軸シールシステムの開発



3-7 ④FP沈着低減技術

目的

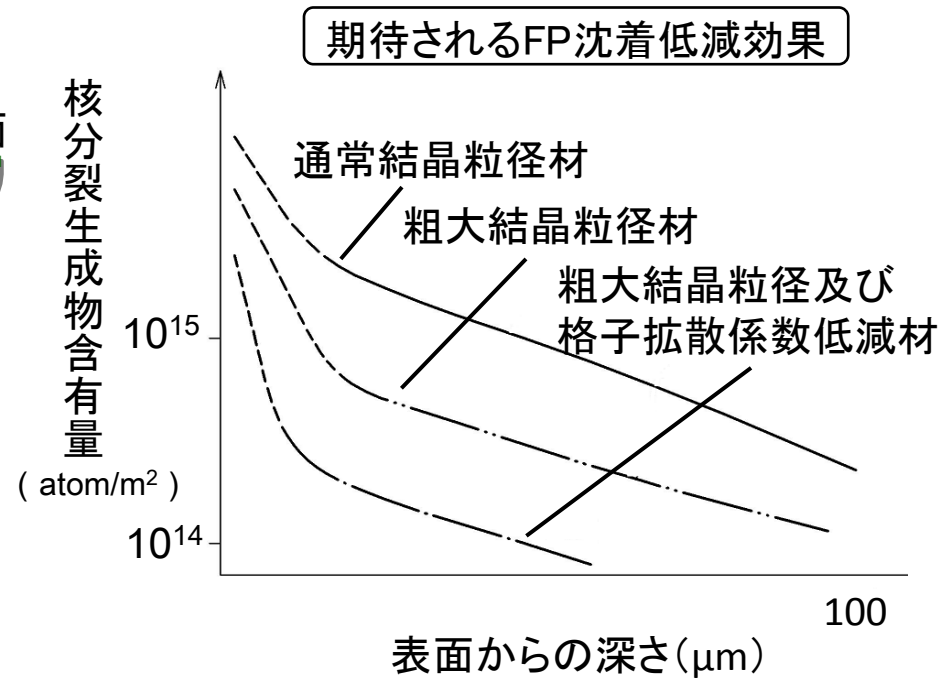
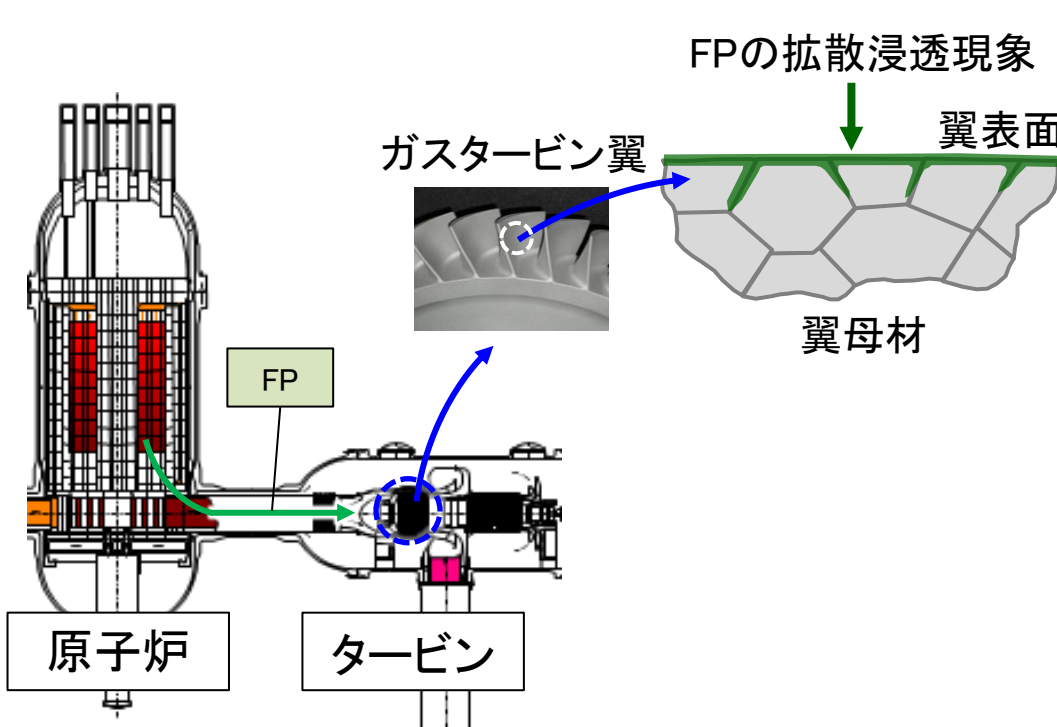
- 一般産業ガスタービンのメンテナンス方法の適用を可能とするため、ガスタービンへの核分裂生成物(FP)の沈着量を低減させる

内容

- FPの拡散浸透の少ないタービン翼材料の開発

計画

- 安定同位体を用いた拡散試験により翼材料の粒界構造及び合金元素を最適化
- 実環境模擬試験により、FP沈着低減効果を確認



3-8 ⑤大型化・高温化・メンテナンス技術

目的

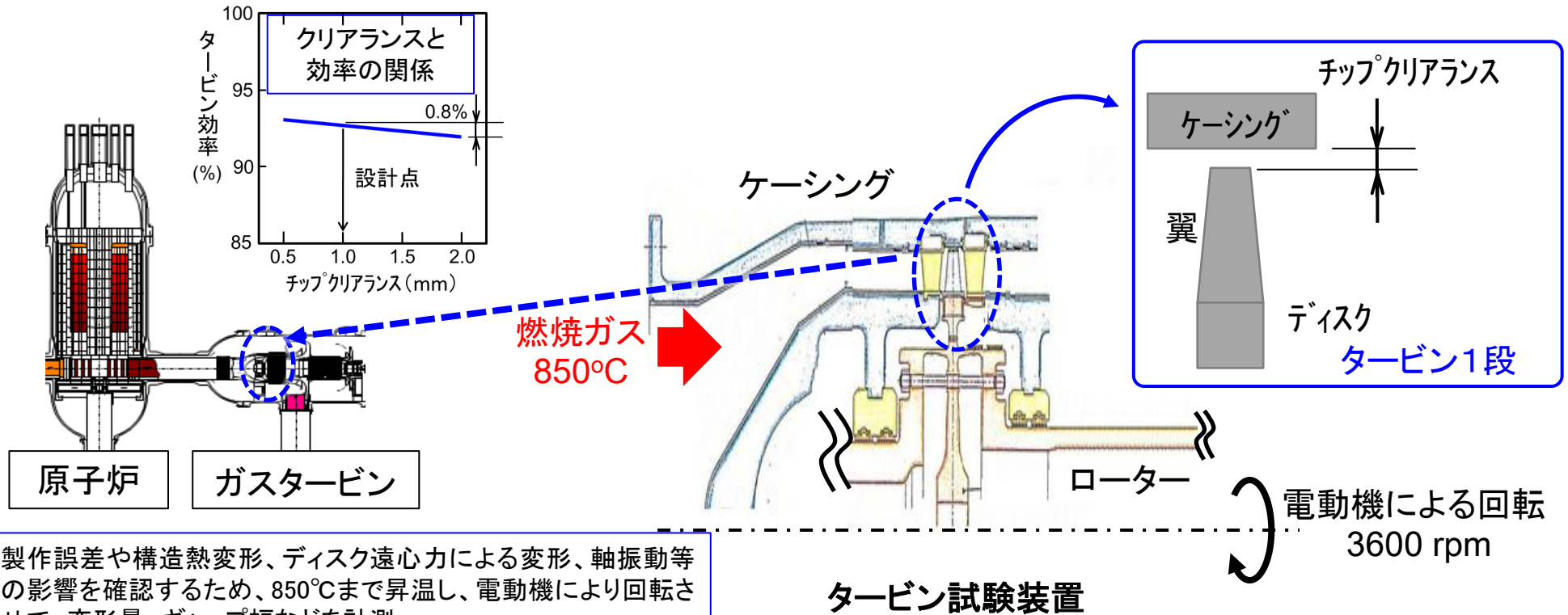
- 実用高温ガス炉に向けたヘリウムガスタービンの大型化・高温化技術の開発及びメンテナンス技術の実証

内容

- 高温条件下でのタービンローター/ケーシングのクリアランス確認
- 高温・高効率化に向けたローター/ブレード冷却システムの開発 (*850°Cヘリウムガスタービンには不要)
- 1次系ヘリウム環境下でのメンテナンス要領の実証

計画

- 実機スケールの高温タービン試験装置を用いた回転試験による動翼/静翼間のクリアランスの確認
- ヘリウム雰囲気下での小型試験装置を用いたローター/ブレード用冷却ガスの流量最適化
- モックアップ試験装置を用いた1次系ヘリウム環境下でのメンテナンス要領の実証

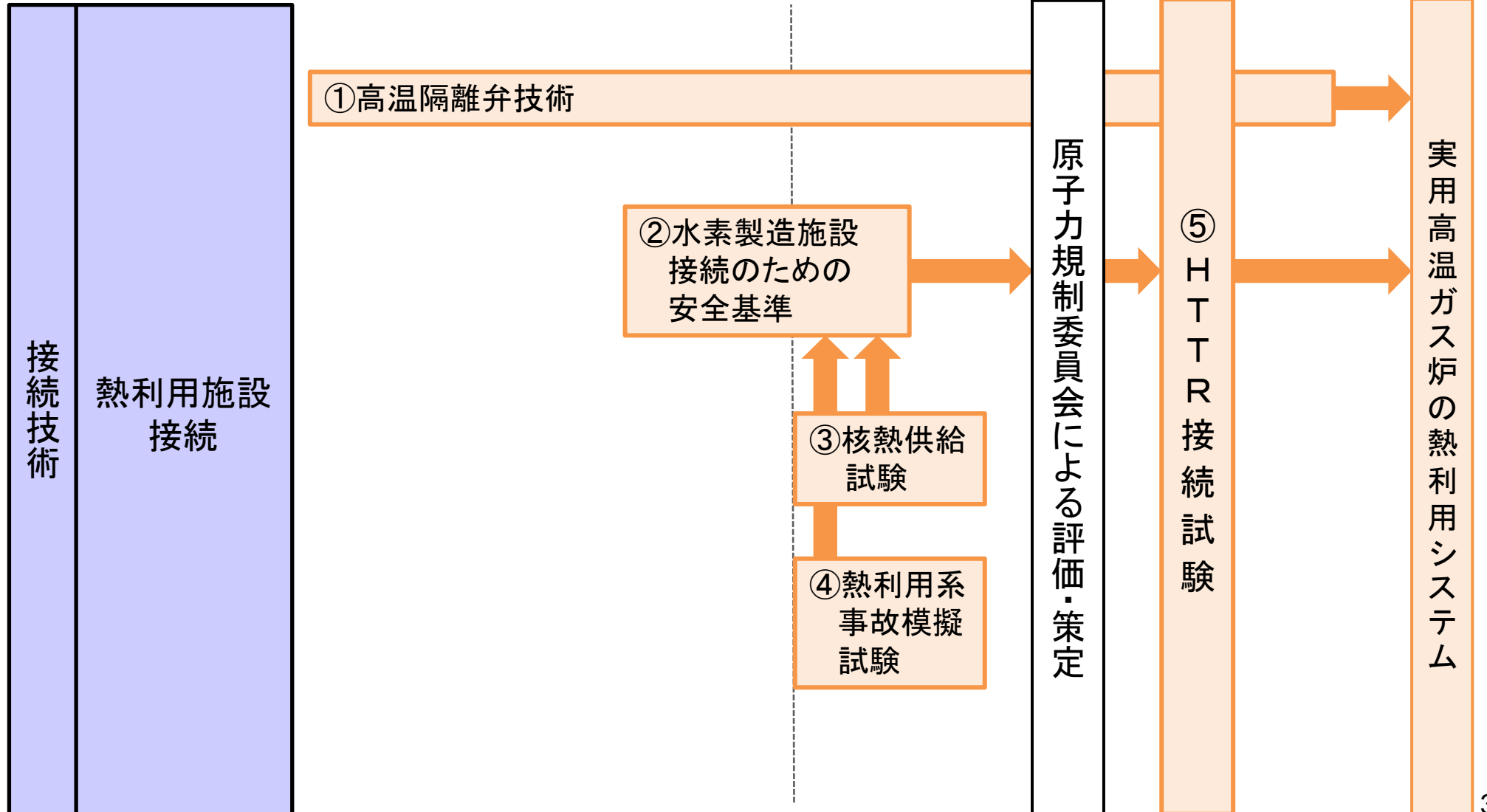


4. 接続技術

4-1 接続技術に関する研究開発

HTTR接続試験のための研究開発

熱利用技術の実用化
に向けた研究開発



4-2 ①高温隔離弁技術

目的

- 異常時に原子炉と熱利用施設を隔離するための高温隔離弁の基盤技術開発

内容

- 高温で耐摩耗性に優れた弁座盛金材の開発
- モデル試験による性能検証

成果

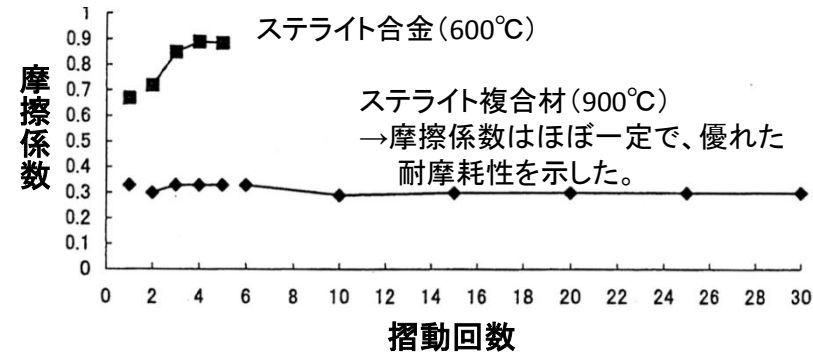
- モデル試験により、弁座からのヘリウム漏えい量が目標値の1/10以下であることを確認
- 約900°Cのヘリウム環境で動作可能な高温隔離弁の実用化に目処

計画

- 口径の大型化

弁座盛金材料開発:

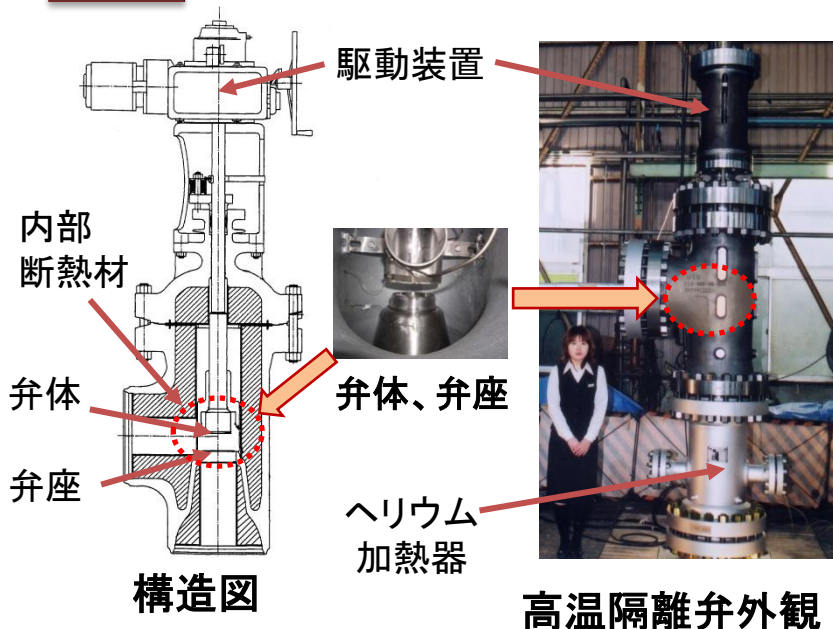
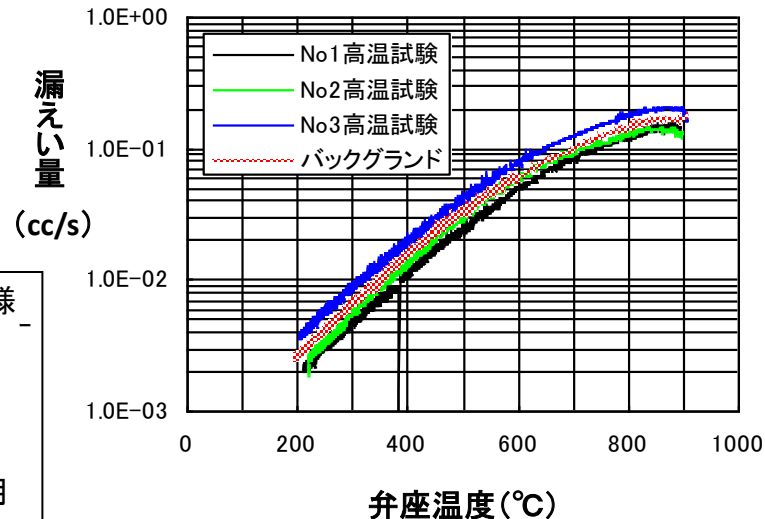
ステライト複合材(高硬度、耐摩耗性)



モデルによる高温時の漏えい量確認

目標漏えい量: 4.4 cc/s以下 (JEM 1423 の第3種弁に対する要求を基に設定)

→弁座からの漏えい量は、目標値の1/10以下



高温隔離弁モデルの主な仕様

- ・型式 : アングル弁
- ・圧力 : 4.5MPa
- ・温度 : 900°C
- ・弁座内径 : 100mm (HTTR用弁の1/2口径)

4-3 ②水素製造施設接続のための安全基準

目的

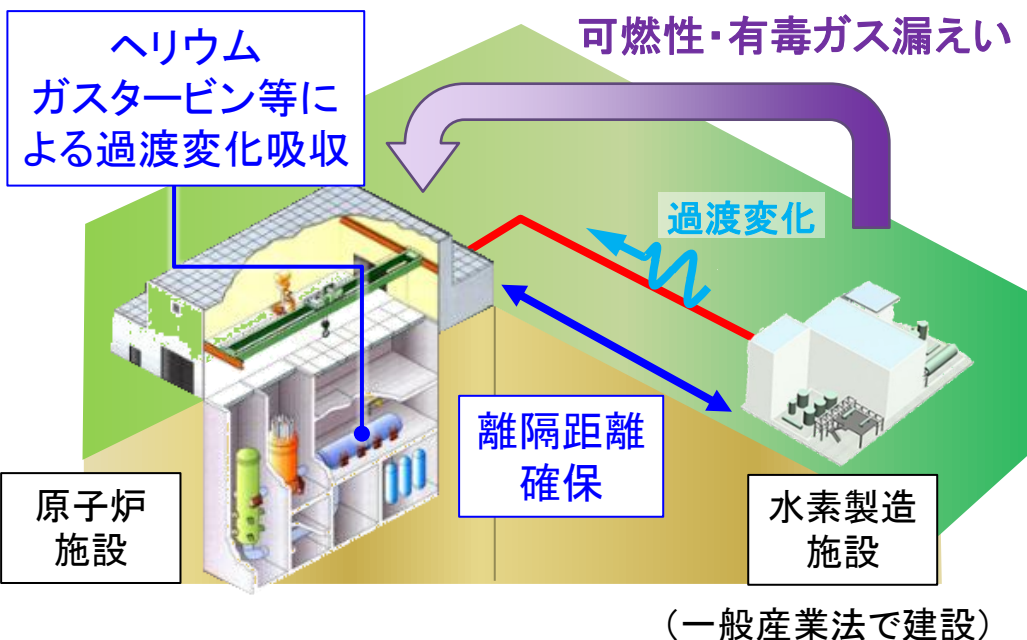
- 実用炉に向けて、高温ガス炉と水素製造施設との接続に関する安全基準を策定するとともに、これに適合する設計対策を確立

方法

- 日本原子力学会「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会での安全基準の原案作成。(平成26年度原案作成完了予定)
- 熱利用施設接続のための安全基準に適合する設計対策の評価

計画

- 安全基準のIAEA国際標準化を目指す。(～平成29年度)
- HTTR接続試験による設計対策の妥当性確認が必要



水素製造施設接続に伴い安全上考慮すべき事象

安全基準

安全要件

可燃性・有毒ガス漏えい時の原子炉の安全性確保

一般産業法での建設の条件
水素製造施設に起因する過渡変化時の原子炉安定運転確保

実用炉の設計対策

原子炉施設と水素製造施設を隔離(離隔距離確保等)

ヘリウムガスタービン等による過渡変化吸収

4-4 ③核熱供給試験

目的

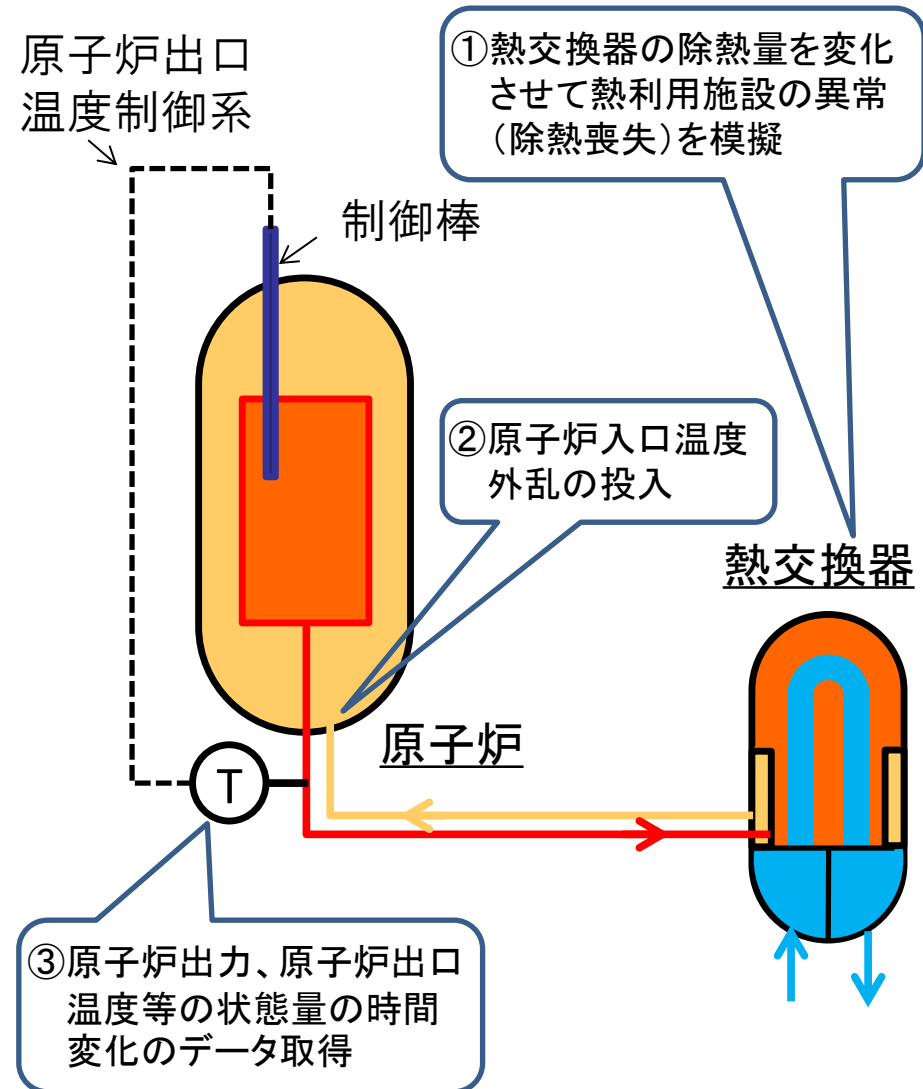
- 熱利用施設の一般産業法での建設に向け、熱利用施設での異常に対して、原子炉の安全を確保した上で、ヘリウムガスタービン制御系を用いた前置冷却器による代替除熱の確保等により、原子炉の運転継続が可能であることを確認

内容

- HTTRを用い、熱利用施設の異常を模擬して原子炉入口温度に外乱を与え、原子炉状態量に関するデータを取得

計画

- HTTRを用いた試験の実施
- HTTRを用いた試験で取得したデータによる解析コードの検証
- HTTR接続試験における熱利用施設異常時の安全評価（原子炉の運転継続が可能であることを確認）



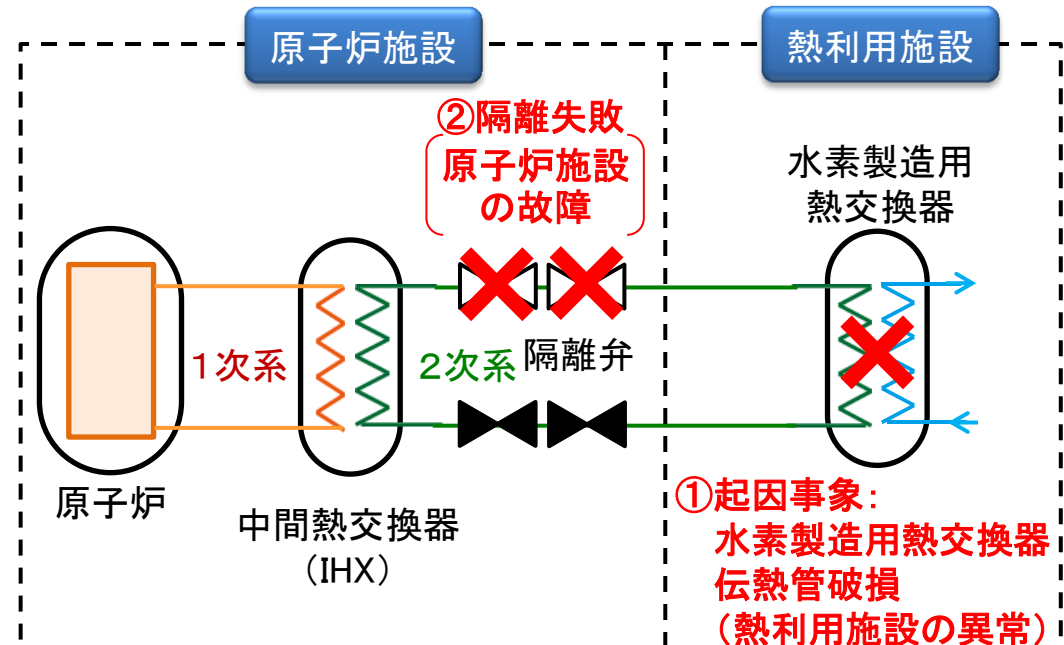
HTTR冷却系統概略図

4-5 ④熱利用系事故模擬試験

- 目的**
- 熱利用施設の一般産業法での建設に向け、熱利用施設の異常に原子炉施設の故障が重なった場合の原子炉の挙動を確認

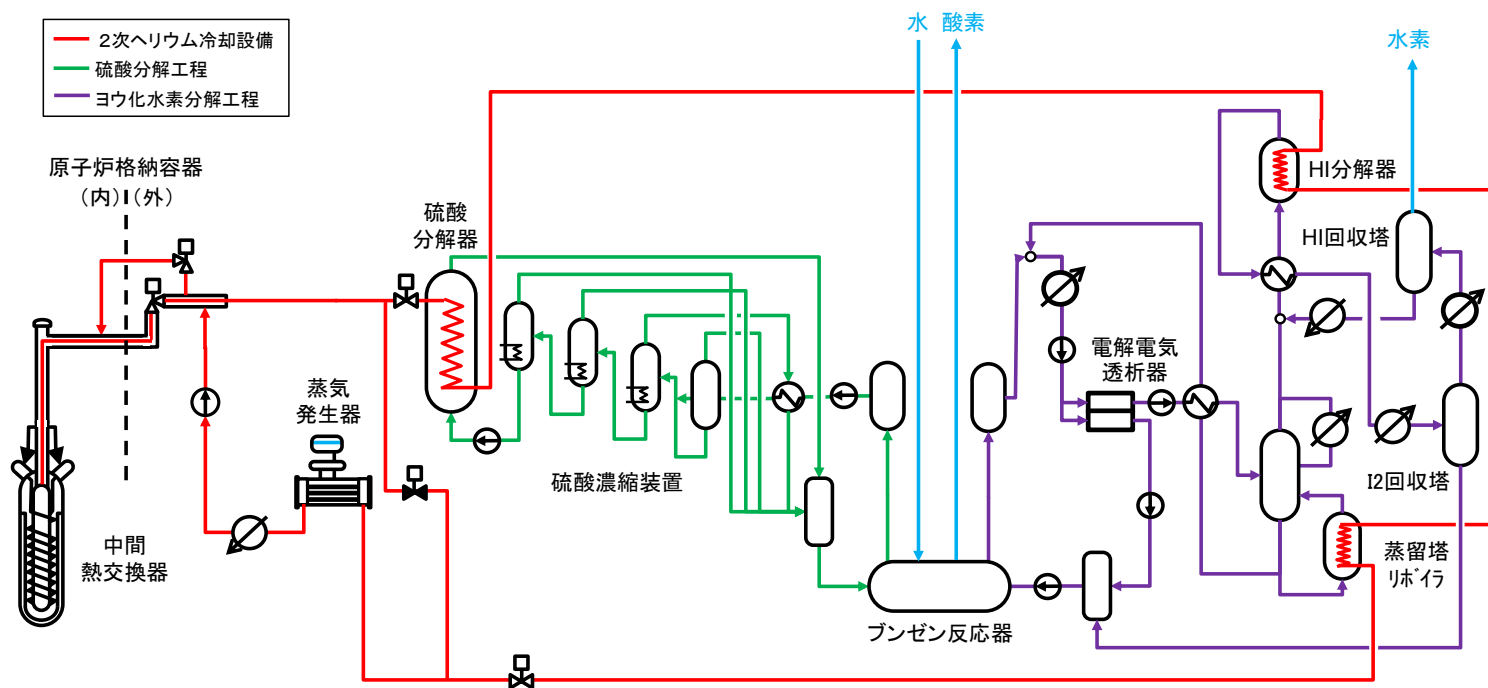
- 内容**
- 2次系圧力を水素製造施設圧力より高く設定し、かつ、原子炉施設と水素製造施設間に十分な離隔距離を確保することで、2次系への腐食性ガス・可燃性ガス侵入を防止
 - HTTRを用い、熱利用施設の異常を模擬して2次系圧力を減少させ、原子炉状態量に関するデータを取得

- 計画**
- HTTRを用いた試験の実施
 - HTTRを用いた試験で取得したデータによる解析コードの検証
 - HTTR接続試験における当該事故時の安全評価



4-6 ⑤HTTR接続試験(1):HTTR-IS

- 目的**
- 原子炉施設と水素製造施設の接続時の安全基準策定、並びに安全基準に適合する設計対策の確立
 - 水素製造のシステム総合性能の検証
- 内容**
- HTTRとISプロセス水素製造施設の接続による検証試験
- 計画**
- HTTRと水素製造施設の接続に係る設置変更許可取得により安全基準を策定
 - 水素製造施設の定格連続運転や異常模擬試験により設計の妥当性を検証



HTTRに接続する熱利用システムの系統案(HTTR-IS)

4-7 ⑤HTTR接続試験(2):HTTR-GT

目的

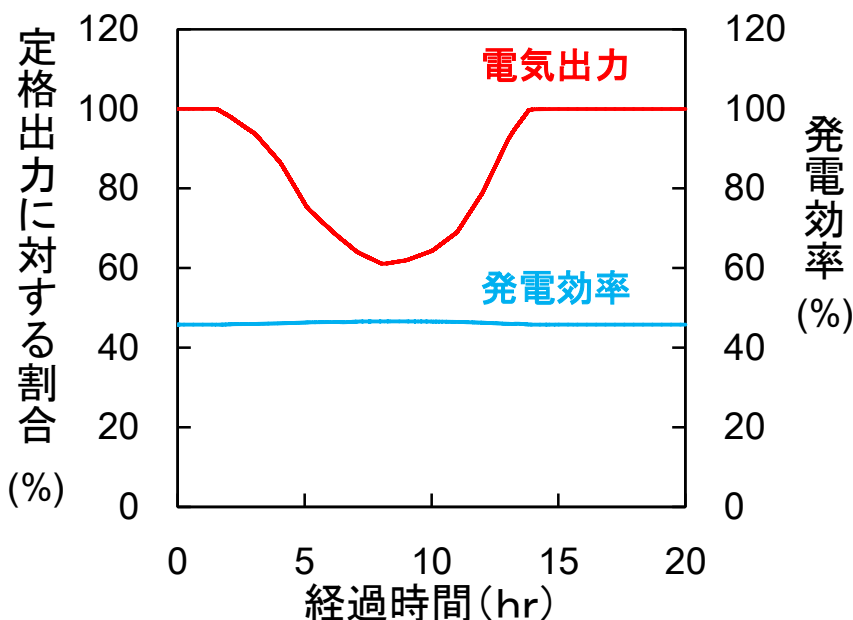
- ヘリウムガスタービン発電のシステム総合性能の検証
- 1次系インベントリ及び圧力比制御等による負荷追従運転方法の確立

内容

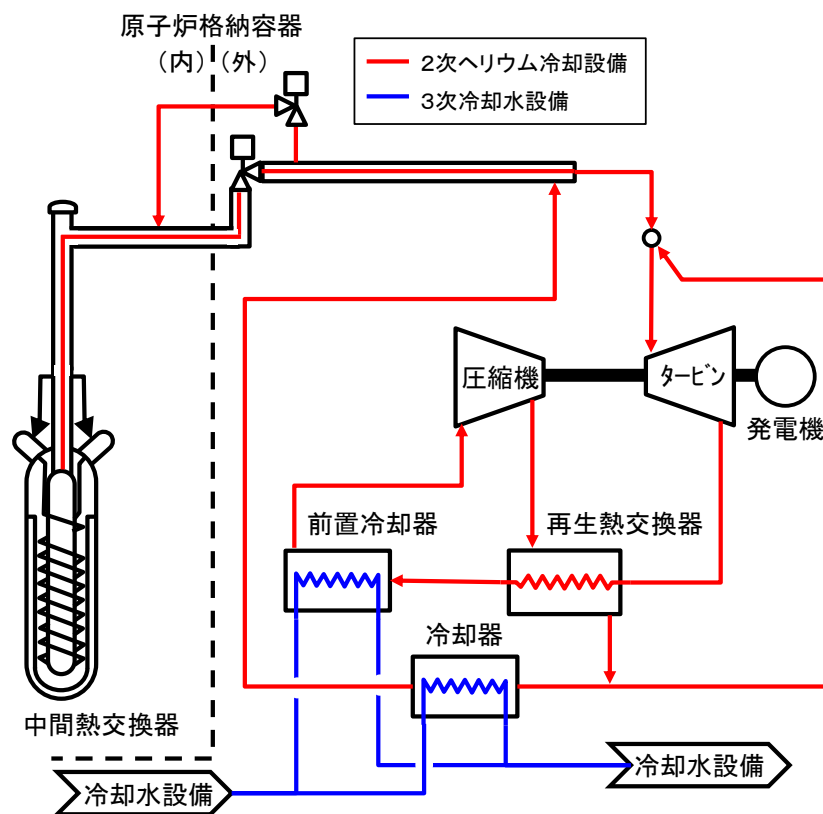
- HTTRとヘリウムガスタービン発電施設の接続による検証試験

計画

- ヘリウムガスタービン発電の定格連続運転や負荷変動試験等により設計の妥当性を検証



負荷変動の解析結果



HTTRに接続するヘリウムガスタービンの系統案(HTTR-GT) 41

4-8 ⑤HTTR接続試験(3):HTTR-GT/IS

- 目的**
- 原子炉施設と水素製造施設の接続時の安全基準策定、並びに安全基準に適合する設計対策の確立

- 1次系インベントリ及び圧力比制御等による負荷追従運転方法の確立

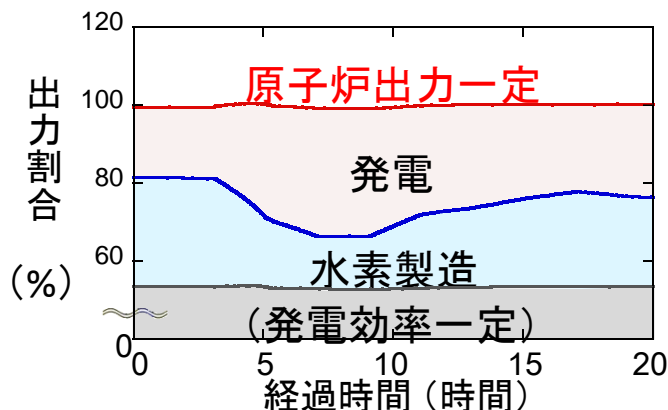
- ヘリウムガスタービン発電システム、水素製造システムの総合性能の検証

- 内容**
- HTTRとヘリウムガスタービン発電施設、水素製造施設の接続による検証試験

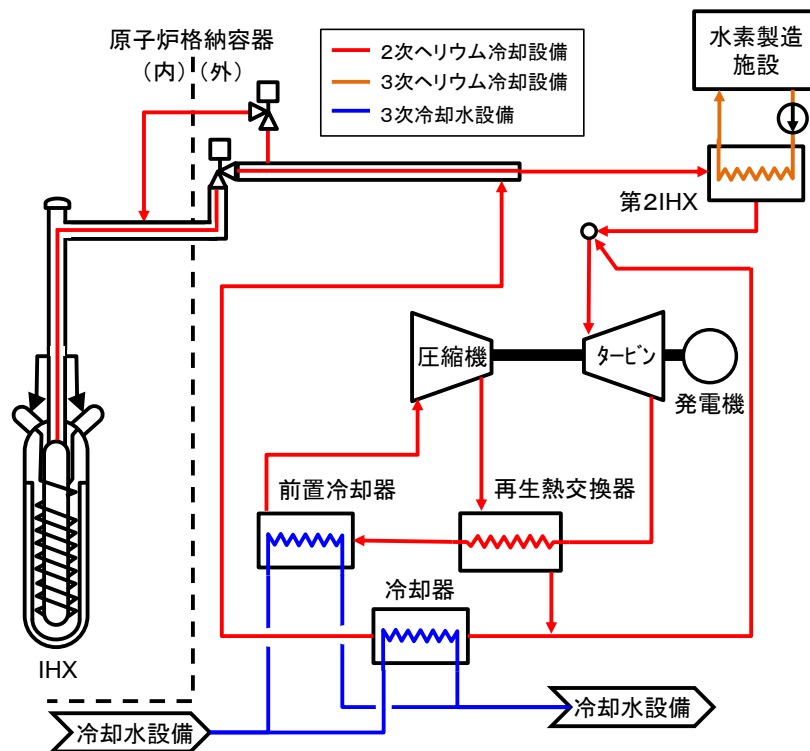
- 計画**
- HTTRと水素製造施設の接続に係る設置変更許可取得により安全基準を策定

- 水素製造施設の定格連続運転や異常模擬試験により設計対策の妥当性を検証

- ヘリウムガスタービン発電施設、水素製造施設の定格連続運転、発電と水素製造の負荷変動制御試験等による総合性能の検証



商用炉における発電と水素製造の負荷変動制御の解析結果



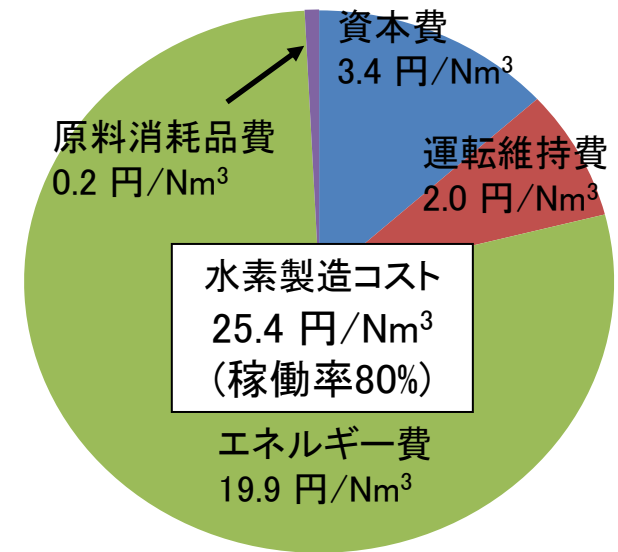
HTTRに接続する熱利用システムの系統案 (HTTR-GT/IS)

参考資料

水素製造コスト

- 高温ガス炉水素製造コスト: 以下の条件のもと
24~28 円/Nm³ (稼働率 90~70%)を目指す
- 算出方法・条件

$$\text{水素製造コスト} = \frac{\text{資本費} + \text{エネルギー費} + \text{運転維持費} + \text{原料消耗品費}}{\text{水素製造量}}$$



- 高温ガス炉: 熱出力600 MW、水素製造量 : 85,000 Nm³/h
- 水素製造効率50%、稼働率80% を想定する。
- プラント建設費は同規模のナフサ改質プラントの2倍と想定する。
- エネルギー (熱及び電力) は高温ガス炉から供給する。
- 原子炉の運転年数は40年とする。化学反応器やプロセス配管など腐食性流体に接する主要機器は10年ごとに更新する。
- プラント建設費は習熟効果により設計費が不要と想定する。
- 技術開発により機器合理化、材料廉価化が達成できると想定する。