

炉外技術開発試験装置の概要

2024年1月26日

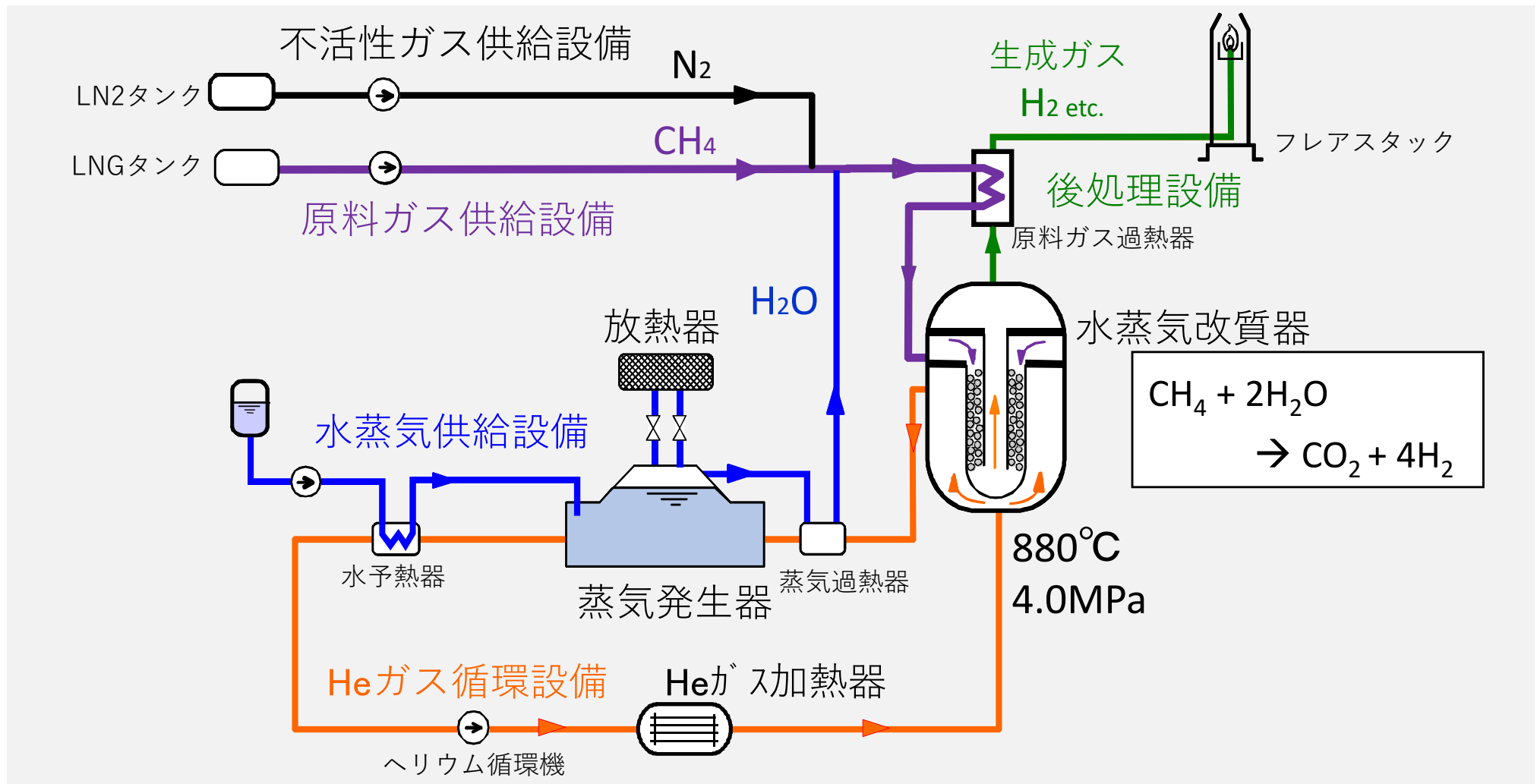
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
高温ガス炉プロジェクト推進室

- (1) 炉外技術開発試験装置の概要**
- (2) 一般産業法規の技術基準**
- (3) 炉外技術開発試験装置の実績**

(1) 炉外技術開発試験装置の概要

- 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
- 開発期間 8年 (1996~2004年)
 (設計製作：5年、水素製造試験運転：3年)
- 成果
 - ・HTTRと同等の圧力、温度条件下における水蒸気改質器の性能を検証し、110 Nm³/hの水素製造技術を確認した。
 - ・以下に示す要素技術の開発を完了した。
 - I 水素製造プラント温度変動時のヘリウムガス温度制御緩和技術
 - II 水蒸気改質器触媒管（ヘリウム圧力バウンダリ部）の健全性確保
 - III HTTR水素製造システムの起動停止手順の確立
 - IV HTTR水素製造システム特有の高温機器の開発・実証
 - V HTTR水素製造システム動特性解析コードの検証

炉外技術開発試験装置の系統構成



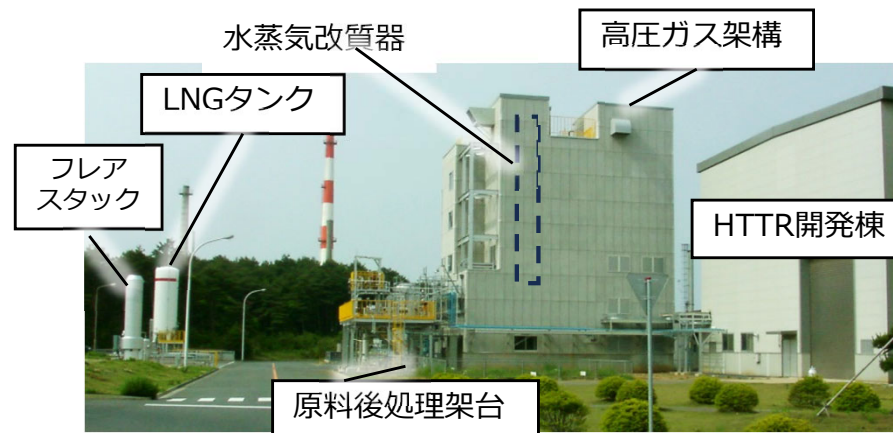
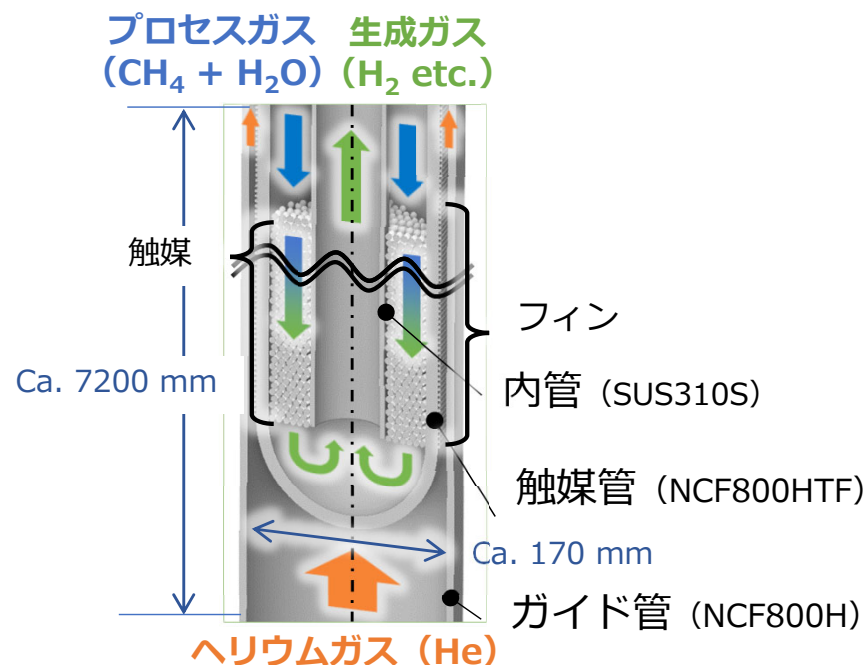
原子炉による核熱の代わりに電気ヒータによる加熱で $900^\circ C$ の高温ヘリウムを供給し、中間熱交換器下流の2次ヘリウムを模擬して水蒸気改質反応による水素製造を行った。

水蒸気改質器供給条件

項目	単位	炉外技術開発試験 ^[1]	HTTR-熱利用試験
反応器	-	バイヨネット反応管収納縦置円筒型	
反応管本数	本	1	7
熱交換量	kW	110	
水素製造量	Nm ³ /h	110	
ヘリウムガス側			
流体	-	ヘリウムガス	ヘリウムガス (HTTR 2次冷却材)
質量流量	kg/s	0.091	
入口温度	℃	880	
加熱源	-	電気ヒータ	HTTR
入口圧力	MPa	4.0	
プロセスガス側			
流体	-	プロセスガス (天然ガス/水蒸気)	
質量流量	kg/s	0.059 (0.012/0.047)	
入口温度	℃	450	
入口圧力	MPa	4.3	
S/C (水蒸気/天然ガス比)	-	3.5	

[1]: 加藤他、HTTR 水素製造システム炉外技術開発試験装置の構成と機器仕様 JAEA-Technology-2007-022

●反応管イメージ図 (※寸法、材料は、炉外技術開発試験)



炉外技術開発試験装置全景

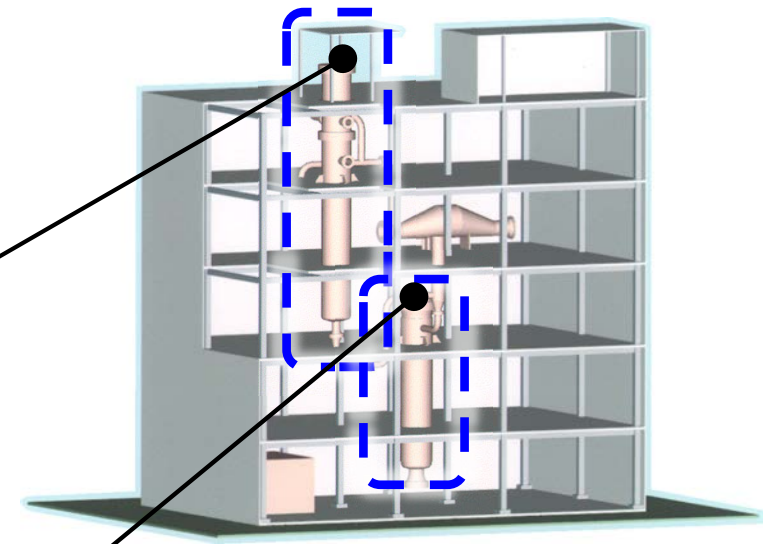
炉外技術開発試験での水素製造は、計画中のHTTR-熱利用試験のおよそ1/7量の110Nm³/hの水素製造量が可能な設計がなされた。

水蒸気改質器

- ・ 高温ヘリウムとの熱交換によって、天然ガス中のメタンと水蒸気を加熱、反応させ、水素を製造する。
- ・ 機器内の反応管は、高温ヘリウムとの圧力境界を形成する。



水蒸気改質器



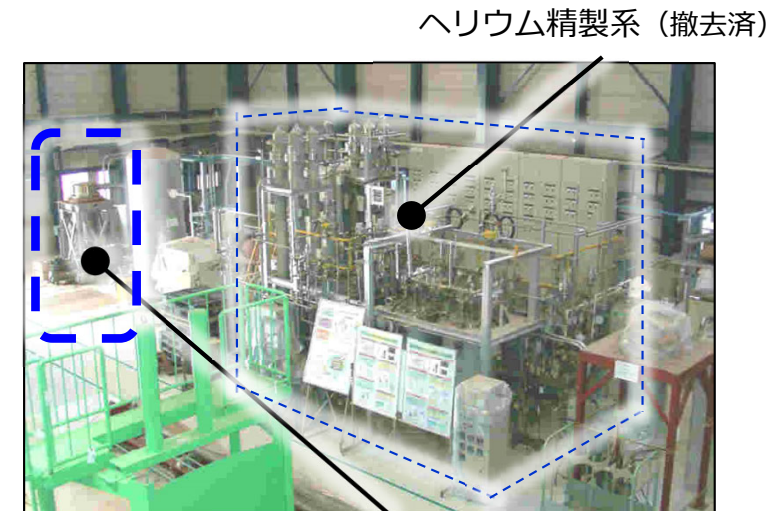
高圧ガス架構

ヘリウム循環設備

- ・ 水蒸気改質器等への所定流量、圧力、温度でのヘリウムガス供給する。



ヘリウムガス加熱器



ヘリウムガス循環機 (撤去済)
(HTTR開発棟内)

ヘリウム精製系 (撤去済)

水蒸気供給設備

- 水蒸気改質反応に必要な水蒸気の供給を行う。
- 化学反応停止等で改質器ヘリウム出口温度が変動した場合、放熱器との組み合わせで変動を緩和することにより蒸気発生器出口のヘリウム温度を $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内に緩和する。

蒸気発生器



蒸気過熱器



放熱器



原料ガス供給設備

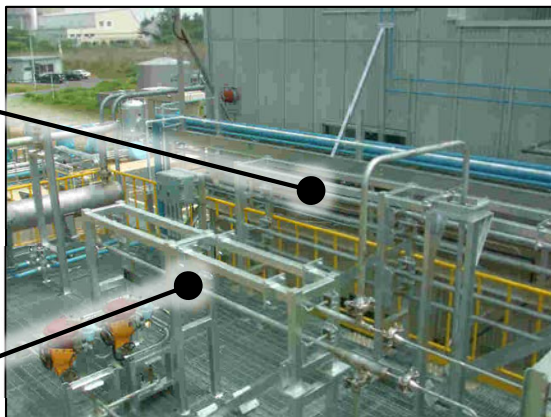
- 液化天然ガスを気化させ、水蒸気と混合し、所定の範囲内での流量、圧力、温度で水蒸気改質器へと供給する。



LNGタンク
(撤去済)

原料ガス過熱器
(撤去済)

原料ガス加熱器
(撤去済)



後処理設備

- 高温の生成ガスを冷却し、水蒸気を分離する。
- 可燃性ガスを燃焼し、安全に大気へ放出する。



フレアスタック (撤去済)

不活性ガス供給設備 (撤去済)

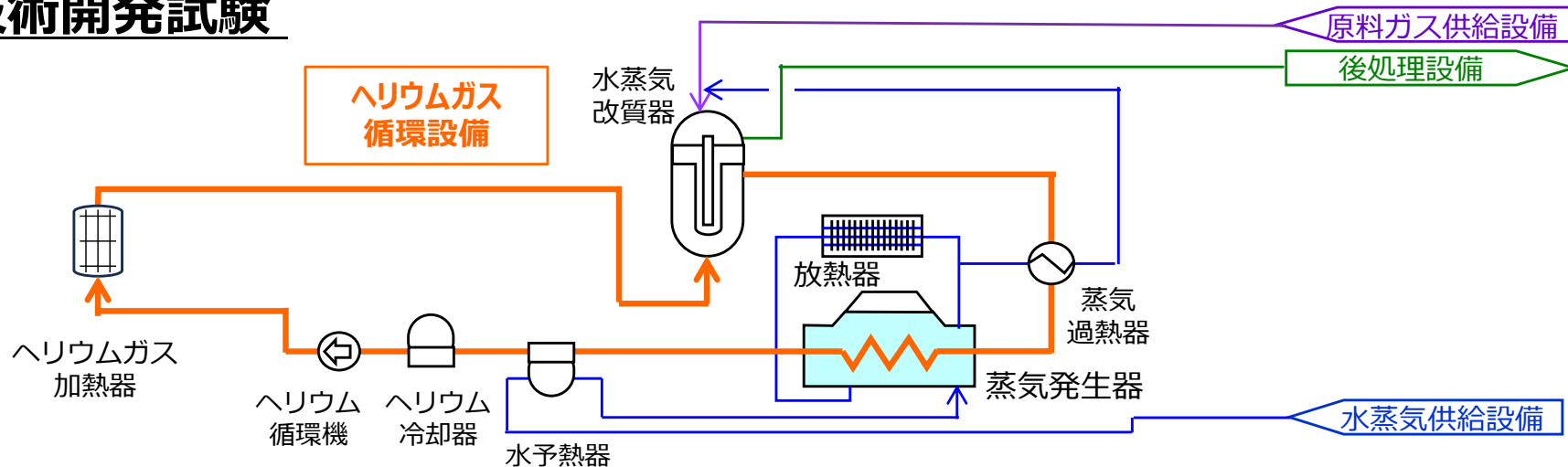
- 試験装置の起動停止時、窒素ガスを供給する。



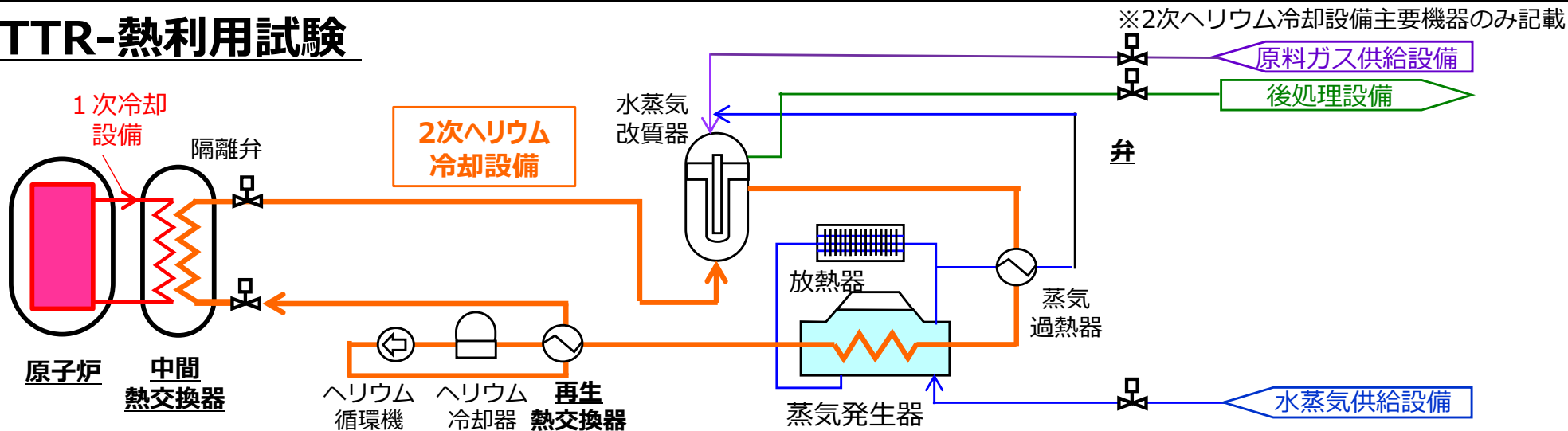
(2) 一般産業法規の技術基準

水素製造に係るヘリウム機器の系統構成

◆ 炉外技術開発試験

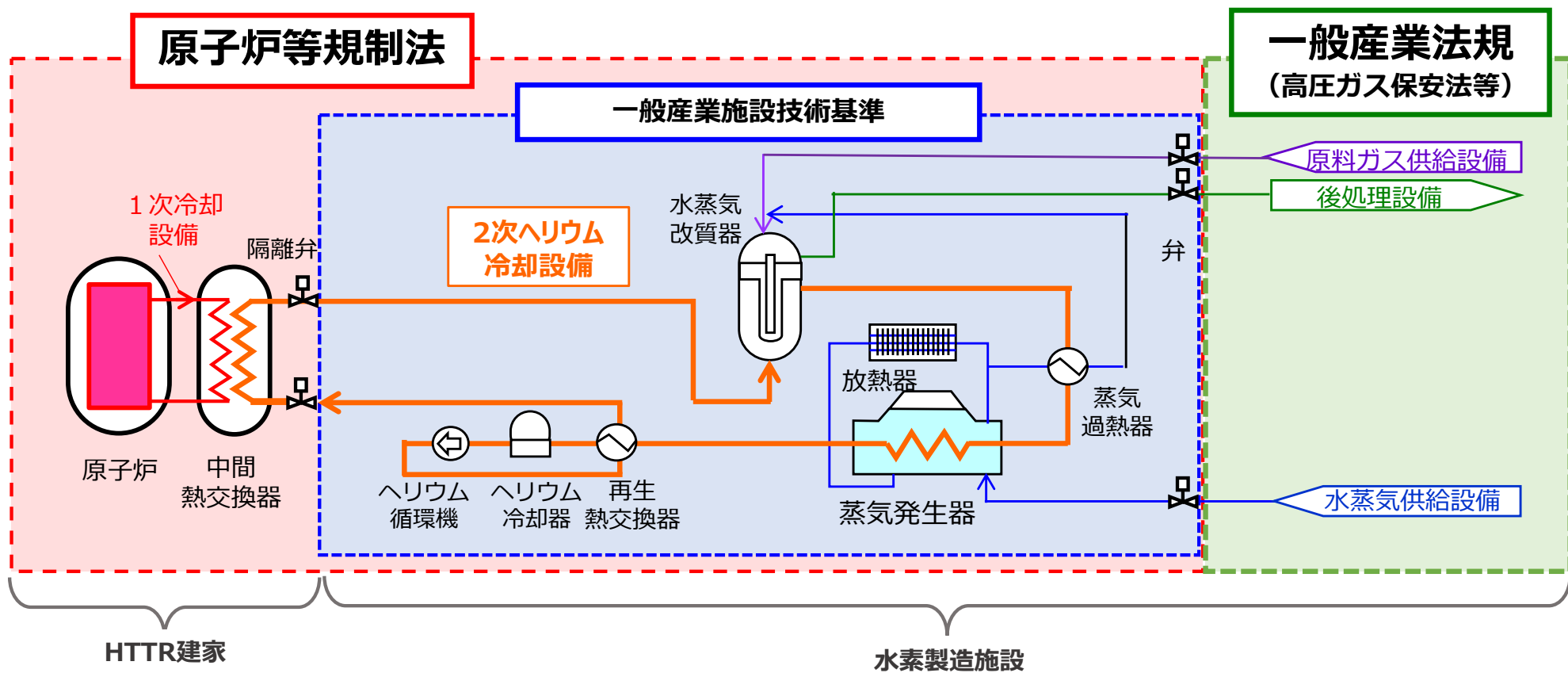


◆ HTTR-熱利用試験

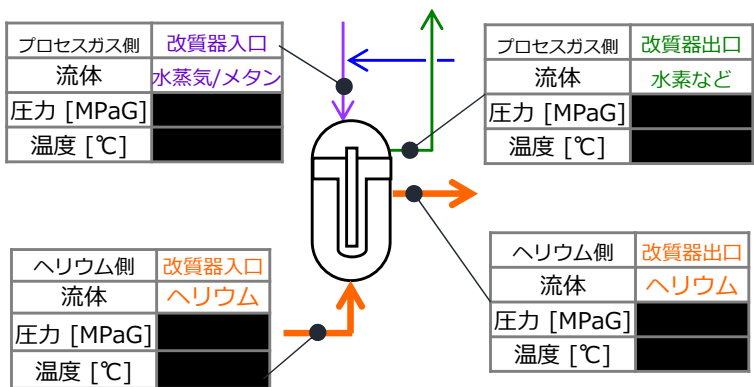


HTTR-熱利用試験の2次ヘリウム冷却設備は、
炉外技術開発試験のヘリウムガス循環設備に基づいた系統構成

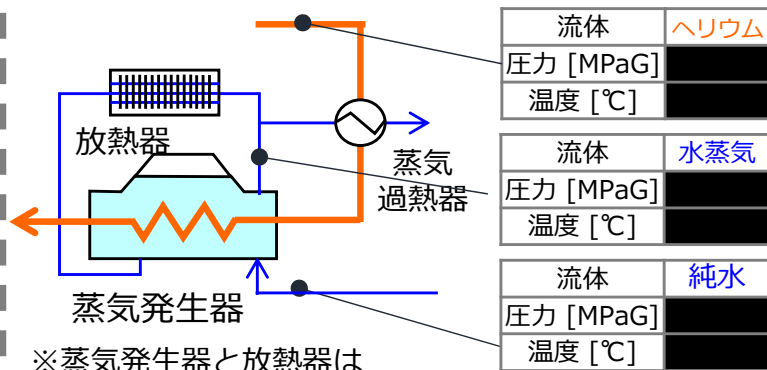
- 水素製造施設は、原子炉施設に直接影響を及ぼす設備（安全機能の重要度クラス3として設計する水蒸気改質器等、青点線部）と直接影響を及ぼさない設備（緑点線部）に分けられる。
- 原子炉施設に直接影響を及ぼす設備（青点線部）は、一般産業法規（高圧ガス保安法等）の下で既に整備済みの技術基準を試験炉技術基準規則に取り込み、炉規法の下で適合性を審査する。



◆ 水蒸気改質器

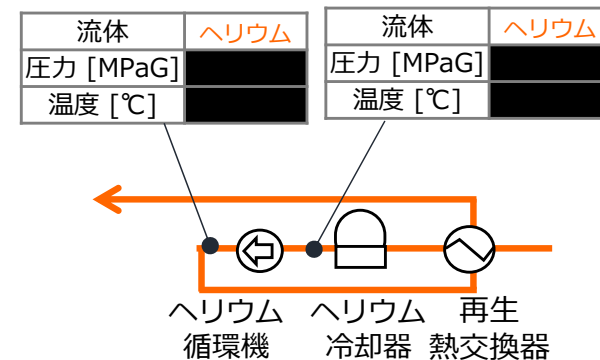


◆ 蒸気発生器/蒸気過熱器



※蒸気発生器と放熱器は保有水量が多いため、ボイラー則が適用される。

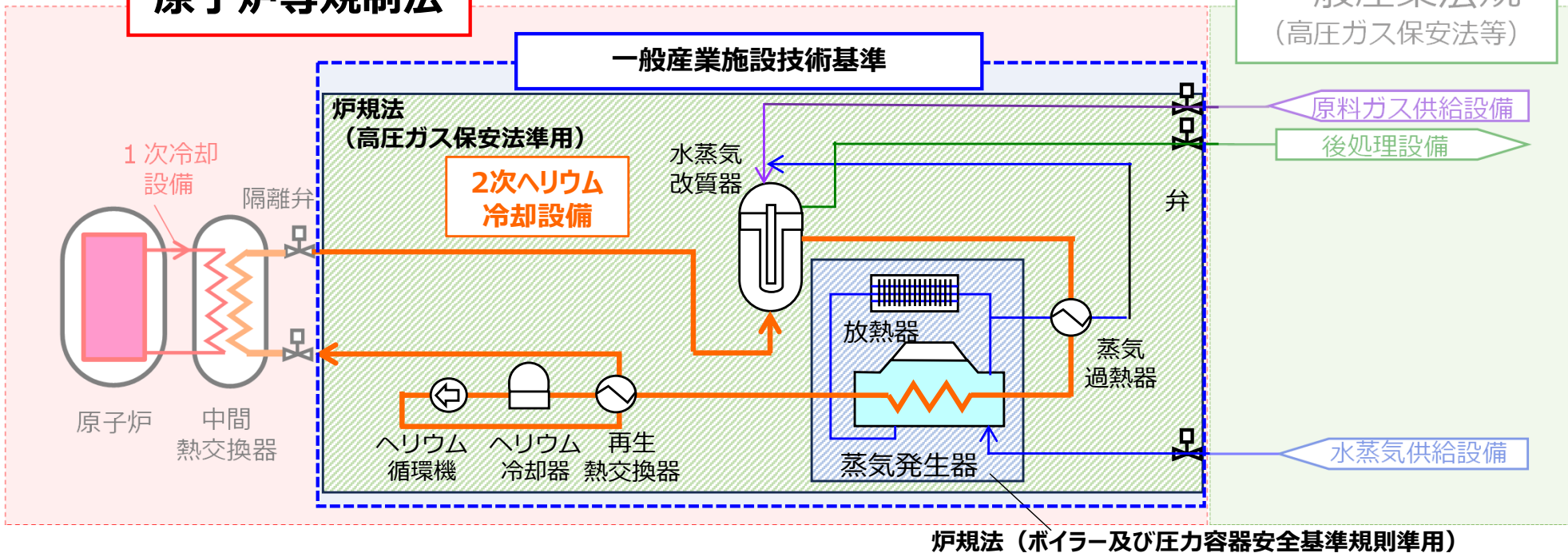
◆ ヘリウム循環機等



原子炉等規制法

一般産業施設技術基準

一般産業法規 (高圧ガス保安法等)



原子炉施設に直接影響を及ぼす設備 (青点線部) は、約40気圧のヘリウムの循環、蒸気の発生等を行うため、技術基準として高圧ガス保安法及びボイラー則等を準用する。

一般産業法規の技術基準 (1/3)

- 原子炉施設 (クラス3機器, 高温ガス炉第4種機器) と一般産業法規 (高圧ガス保安法 特定設備) の技術基準に大差はなく、一般産業法規の技術基準を適用した場合でも、原子炉施設と同等の品質を確保できる。

対象	比較項目	【参考】 JSME発電用原子力設備規格 (設計・建設規格2020Ed 及び維持規格2019Adまで)	旧科技庁内規 平成15年改訂版 (黒鉛減速ヘリウムガス冷却型 原子炉施設に関する構造等の技術基準)	高圧ガス保安法 最新版 (特定設備検査規則)
	分類	クラス3機器	高温ガス炉第4種機器 (告示501号第4種に相当)	特定設備 (PV> 0.004 MPa×m ³)
材料	破壊試験	・破壊靱性試験 (厚さ16mm以上のみ) (厚さ63mm超は落重試験、63mm以下は落重試験に代わり衝撃試験)	同左	記載なし(*) (*) 例示基準別添1別表第1にて材料ごとの最低使用温度を定めることで、確認を不要としている
	非破壊試験	要求無し	同左	超音波探傷試験 (耐圧部材のみ厚さ50mm以上の炭素鋼、厚さ38mm以上の低合金鋼等)
機器設計基準 (圧力容器の胴の例)	設計方法	公式に基づく	同左	同左
	胴厚さの設計例	【設計条件】 最高使用圧力 P : 5.0MPa、温度 : 350℃、 胴の内径 Di : 1.8m、材料 : SCMV4-2、 継手効率 η : 1.0	【設計条件】 同左	【設計条件】 同左
		【胴の最小厚さt】 $t = \frac{P \cdot Di}{2S \cdot \eta - 1.2P} = 34mm$ S=139MPa (SCMV4-2, 350℃) (S : 最高使用温度における許容引張応力、 安全率3.5)	【胴の最小厚さt】 $t = \frac{P \cdot Di}{2S \cdot \eta - 1.2P} = 38mm$ S=122MPa (SCMV4-2, 350℃) (S : 最高使用温度における許容引張応力、 安全率4)	【胴の最小厚さt】 $t = \frac{P \cdot Di}{2S \cdot \eta - 1.2P} = 38mm$ S=122MPa (SCMV4-2, 350℃) (S : 設計温度における許容引張応力、 安全率4)
	溶接	・溶接継手効率を設定 (突合せ両側溶接の長手継手の例) - 放射線透過試験実施 : 1.0 - その他のもの : 0.7	同左	・溶接継手効率を設定 (突合せ両側溶接の長手継手の例) - 放射線透過試験を全線(100%)実施 : 1.0 - 100%未満20%以上 : 0.95、 - 20%未満以外 : 0.7
疲労評価	伸縮継手のみ	同左	記載なし	

一般産業法規の技術基準 (2/3)

対象	比較項目	【参考】 JSME発電用原子力設備規格 (設計・建設規格2020Ed 及び維持規格2019Adまで)	旧科技庁内規 平成15年改訂版 (黒鉛減速ヘリウムガス冷却型 原子炉施設に関する構造等の技術基準)	高圧ガス保安法 最新版 (特定設備検査規則)
	分類	クラス3機器	高温ガス炉第4種機器 (告示501号第4種に相当)	特定設備 (PV> 0.004 MPa×m ³)
機器設計基準 (圧力容器の胴の例)	破壊試験	突合せ溶接部に下記試験を実施 1) 継手引張試験 2) 曲げ試験 3) 破壊靱性試験 (但し、厚さ16mm超のみ。 厚さ63mm以下は落重試験に代わり衝撃試験でも可)	突合せ溶接部に下記試験を実施 1) 同左 2) 同左 3) 破壊靱性試験(但し、厚さ16mm超のみ。 厚さ63mm以下は落重試験に代わり衝撃試験)	突合せ溶接部に下記試験を実施 1) 同左 2) 同左 3) 衝撃試験 (但し、設計温度0℃未満の溶接部に限る)
	検査 非破壊試験	・ 耐圧試験： 水圧P=1.25P0 (又は気圧P=1.1P0) (P0：最高使用圧力)	・ 耐圧試験： 水圧P=1.5P0 (又は気圧P=1.25P0) (P0：最高使用圧力)	・ 耐圧試験： 水圧P=1.5P0 (又は気圧P=1.25P0) (P0：設計圧力)
		・ 漏えいの確認：耐圧部の溶接部等、 水圧P=max[P,0.75×耐圧(水圧)試験圧力]以上、 気圧P=P0以上	・ 漏えい試験：記載なし	・ 漏えい試験：記載なし ・ 気密試験：気圧P=P0以上
		・ 体積試験：溶接部に下記試験のいずれか実施 1) 放射線透過試験 2) 超音波探傷試験 (条件付き)	同左	・ 体積試験：突合せ溶接部に下記試験を実施 1) 放射線透過試験 (厚さ38mm以上の炭素鋼等は 全線(100%)実施が必須) 2) 超音波探傷試験 (厚さ75mm以上の炭素鋼等は全線 (100%)実施が必須)
	・ 表面試験：溶接部に下記試験のいずれか実施 1) 磁粉探傷試験 2) 浸透探傷試験	同左	・ 表面試験：溶接部及び治具跡に下記試験の いずれか実施 1) 磁粉探傷試験 2) 浸透探傷試験	
検査頻度	年1回 (原則として定期事業者検査中に実施)	年1回 (前回の定期事業者検査が 終了した日以降12か月を超えない時期)	年1回 (検査によっては指定の周期ごと)	
保守 検査項目	非破壊検査 1) 系の漏えい試験と目視試験 (耐圧部のみ、 気圧の場合P=運転圧力以上の圧力) 2) 目視試験 (溶接継手、呼び径100mm超の 溶接継手等)	以下に掲げる方法により行う ・ 開放、分解、非破壊検査その他の各部の損傷、 変形、摩耗及び異常の発生状況を確認するた めに十分な方法 ・ 試運転その他の機能及び作動の状況を確認す るために十分な方法、等 保安措置ガイド等に基づき、必要な事項を定めた 検査実施要領書をもとに実施する。	・ 目視検査及び非破壊検査等(*) 1) 目視検査 2) 非破壊検査 (肉厚測定を含む) 3) 気密試験 (気圧P=常用の圧力以上の圧力)、等 (*その他に一般高圧ガス保安規則にて、製造施設の保安 検査を「開放検査、分解検査その他の各部の損傷、変形 及び異常の発生状況を確認するために十分な方法、並び に作動試験その他の機能及び作動の状況を確認するた めに十分な方法」で行うことが定められている。	

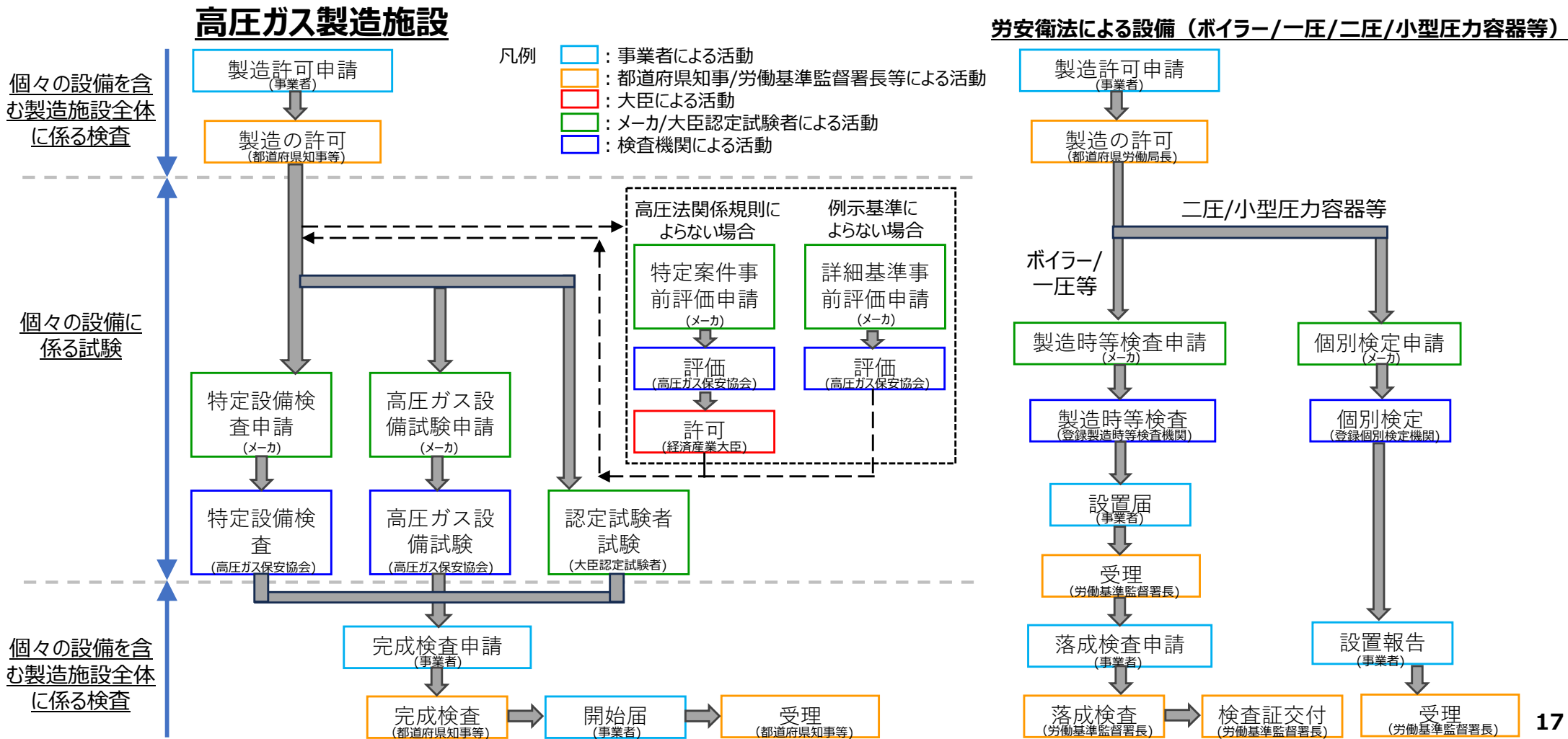
一般産業法規の技術基準 (3/3)

対象	比較項目	【参考】 JSME発電用原子力設備規格 (設計・建設規格2020Ed 及び維持規格2019Adまで)	旧科技庁内規 平成15年改訂版 (黒鉛減速ヘリウムガス冷却型 原子炉施設に関する構造等の技術基準)	高圧ガス保安法 最新版 (特定設備検査規則)
	分類	クラス3機器	高温ガス炉第4種機器 (告示501号第4種に相当)	特定設備 (PV> 0.004 MPa×m ³)
耐震設計基準	分類	耐震Cクラス	同左	重要度分類：Ⅱ (*) (可燃性ガス貯蔵能力10t未満、事業所境界までの距離20-90m) (* : 実際の事業者境界までの距離は90m以上あり重要度分類Ⅲとなるが、事業者自主要求として、原子炉建家までの距離を事業者境界までの距離と考え評価予定)
	応答加速度の計算例	<p>【設計条件】 H=14.15mの鉄骨造架構の7.0mフロアにラグ設置する容器を考える。 最大応答加速度=1.2×n×C_I ここで、 n=1.0 (@Cクラス) C_I=z×Rt×A_i×C_o z=1.0 Rt=1.0 A_i=1.53 (*) C_o=0.2 (* : 7.0m以上の架構の固定荷重と積載荷重の和 (W) を架構全体の固定荷重と積載荷重の和 (W₀) で除した値 (W/W₀) が1/2となる架構上に設置すると仮定)</p>	同左	<p>【設計条件】 同左 水平震度(加速度)K_{SH}=β₄×0.150×μ_k×β₁×β₂×β₃ ここで、 β₁=0.65 (@重要度分類Ⅱ) β₂=0.8 (@A地域) β₃=2.0 (@第3種地盤) β₄=2.0 (Hは16m以下) μ_k=1.0 (@レベル1地震動)</p>
		機器の静的水平震度 (加速度) : 0.33G	同左	機器の設計静的水平震度(加速度) : 0.32G
	許容値	<ul style="list-style-type: none"> 一次一般膜応力 ≤ min[Sy, 0.6Su] 一次応力 ≤ Sy <p>Su : 使用温度における設計引張強さ (MPa) Sy : 使用温度における設計降伏点 (MPa) (降伏点または0.2%耐力)</p>	同左	<ul style="list-style-type: none"> 一次一般膜応力強さ ≤ S 一次局部膜応力強さ + 一次曲げ応力強さ ≤ 1.5S <p>S = min[0.6Su₀, 0.6Su, 0.9Sy₀, 0.9Sy] Su : 設計温度における引張強さ (MPa) Su₀ : 常温における最小引張強さ (MPa) Sy : 設計温度における降伏点または0.2%耐力 (MPa) Sy₀ : 常温における最小降伏点または0.2%耐力 (MPa)</p>
	解析手法	以下のいずれかの応答解析により各部の地震力を算定 1) 静的解析法 (静的震度法) 2) 時刻歴応答解析法、スペクトルモーダル解析法	同左	以下のいずれかの応答解析により各部の地震力を算定 1) 静的震度法、修正震度法、モード解析法 2) 時刻歴応答解析法
備考	日本電気協会JEAC 4601-2015を参照	同左	「高圧ガス設備等の耐震性能を定める告示」(例示基準としてKHKS 0861-2018を適用)	

(3) 炉外技術開発試験装置の実績

炉外技術開発試験装置の許認可プロセス（標準フロー）

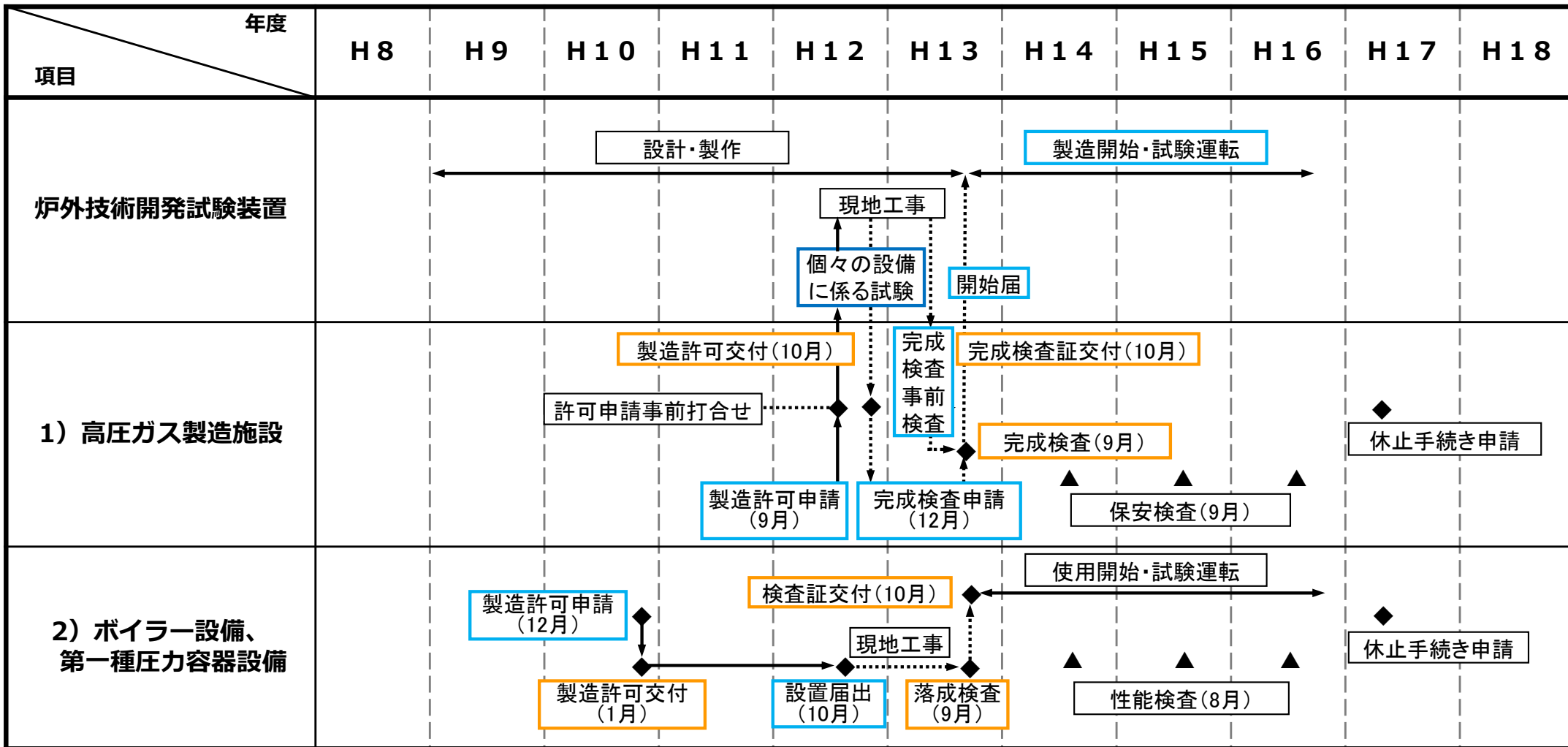
- 高圧ガス製造施設には、「設備に係る試験」と、「製造施設全体に係る検査」がある
- 設備に係る試験には、 $PV > 0.004$ (MPa×m³) の圧力容器に対する「特定設備検査」と、圧縮機・ポンプ・配管・バルブ等に対する「高圧ガス設備試験」がある
- 労安衛法適用設備は、「設備に係る試験」のみ
- 高圧法及び労安衛法設備ともに、指定の規格基準等に基づき、検査機関等により確認される



炉外技術開発試験装置の許認可プロセス (炉外実績)

- 高圧ガス製造施設の製造許可交付はH12年10月、完成検査許可証交付はH13年10月
- 耐圧・耐震強度は、設備に係る試験で確認される。

高圧ガス製造施設申請手続きの流れ

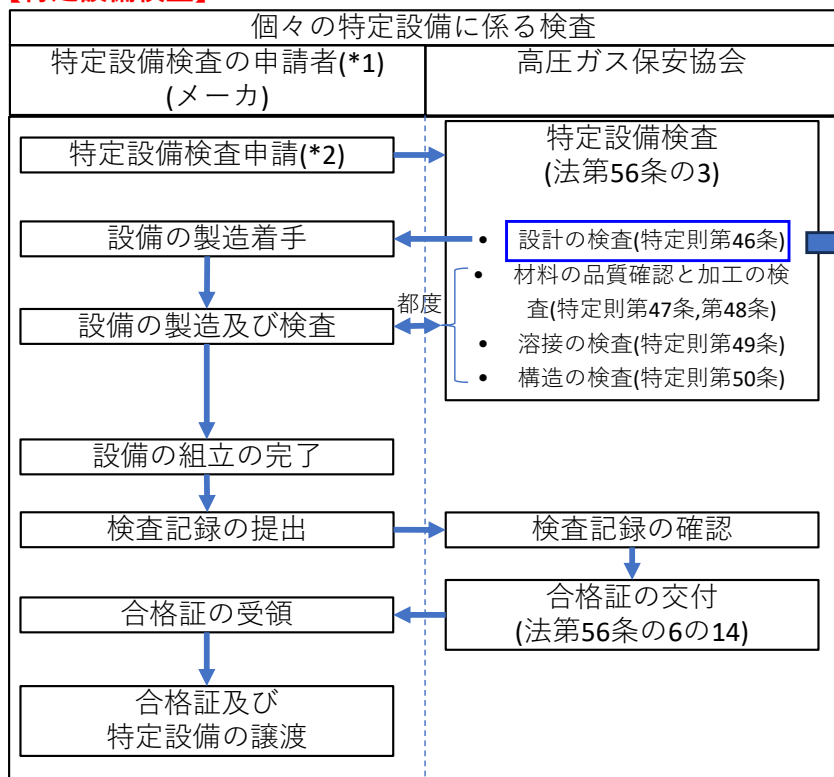


⇒ 次ページ以降に、設備に係る試験として「特定設備検査」及び製造施設全体に係る検査として「完成検査」の実施例を示す。

炉外技術開発試験装置の許認可プロセス（特定設備検査の例）

- 特定設備検査には、「設計の検査」、「材料の品質確認と加工の検査」、「溶接の検査」、「構造の検査」が含まれる。
- 耐圧・耐震強度は、「設計の検査」のうち、「5.内圧、外圧による強度計算」及び「6.耐震設計に基づく応力等の計算」にて確認される。

【特定設備検査】



様式第3 (第46条関係)

設計検査成績表		[Redacted]	
整理番号	12広2074	申請されました特定設備検査申請書については設計に関する検査に合格したので通知します。 平成22年2月25日	
特定設備の区分	反応器(R1R)	高圧ガス保安協会 中国支部	承認 [Redacted] 留置 [Redacted] 担当 [Redacted]
ガスの種類	厨間 以外 管間 空		
検査工程名	規則条項	適用書第	特 定 適合 不合格
1. 材料に関する設計	第11条		[Redacted]
2. 加工に関する設計	第20条~第23条		[Redacted]
3. 溶接に関する設計	第24条~第31条		[Redacted]
4. 構造検査に関する設計	第32条~第35条		[Redacted]
5. 内圧、外圧による強度計算	第12条 第14条~第19条		[Redacted]
6. 耐震設計に基づく応力等の計算	第13条		[Redacted]

サンプル

詳細は、設計書、構造図及び様式第4から第6までの検査成績表による。

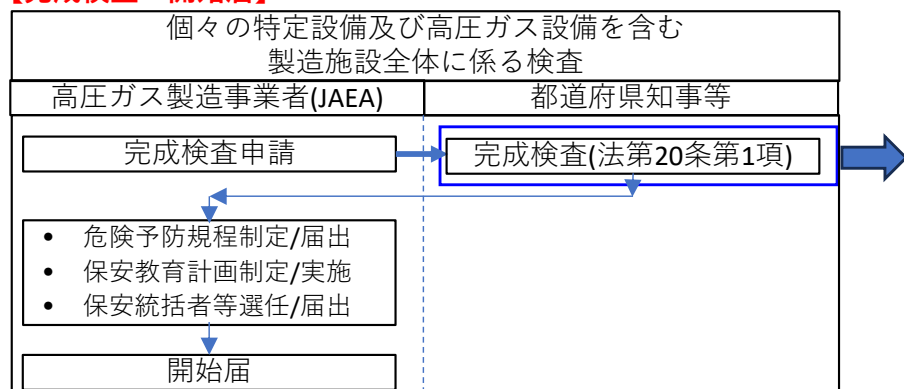
詳細は、強度計算書及び耐震計算書による。

(*1)第一種特定設備の場合を例に記載

(*2)設計書（含む強度・耐震計算書、溶接施工要領書/溶接施工試験成績書（WPS/PQR）等）、構造図などを添付して申請

- 完成検査は、都道府県知事以外に、高圧ガス保安協会、指定完成検査機関も行うことができる。
- 完成検査申請書に事前検査記録を添付することにより、完成検査の検査項目の一部が省略される。
- 炉外技術開発試験装置は、事前検査記録として、「完成検査事前検査記録」、「高圧ガス施設配管工事等完成報告書」等を添付。完成検査当日の立会検査は、浸透探傷試験、肉厚測定試験、気密性能確認等に限定

【完成検査～開始届】



199

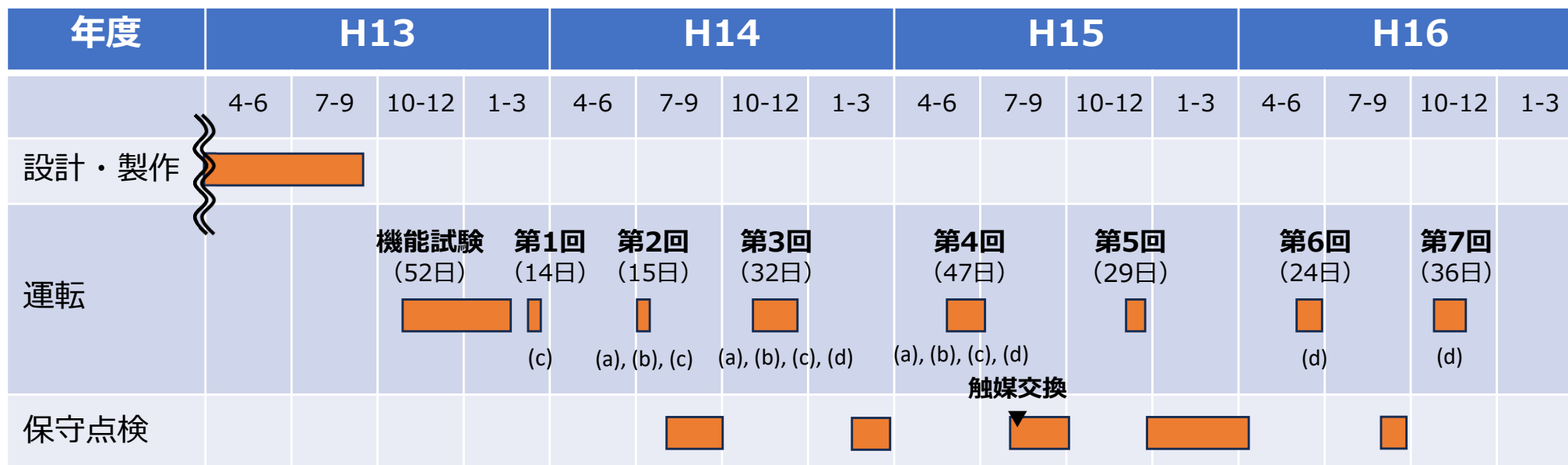
製造施設完成検査証		一般
事業所の名称	日本原子力研究所大洗研究所	
事業所の所在地	東茨城郡大洗町成田町字新堀3607番地	
許可年月日 及び許可番号	平成12年10月30日 工技指令第1217号	
検査年月日	平成13年 9月17日	他2日間
検査職員氏名		他1名
備考		

茨城県知事 橋本 昌



炉外技術開発試験装置の運転実績

炉外技術開発試験装置の運転実績（累積運転日数：249日）



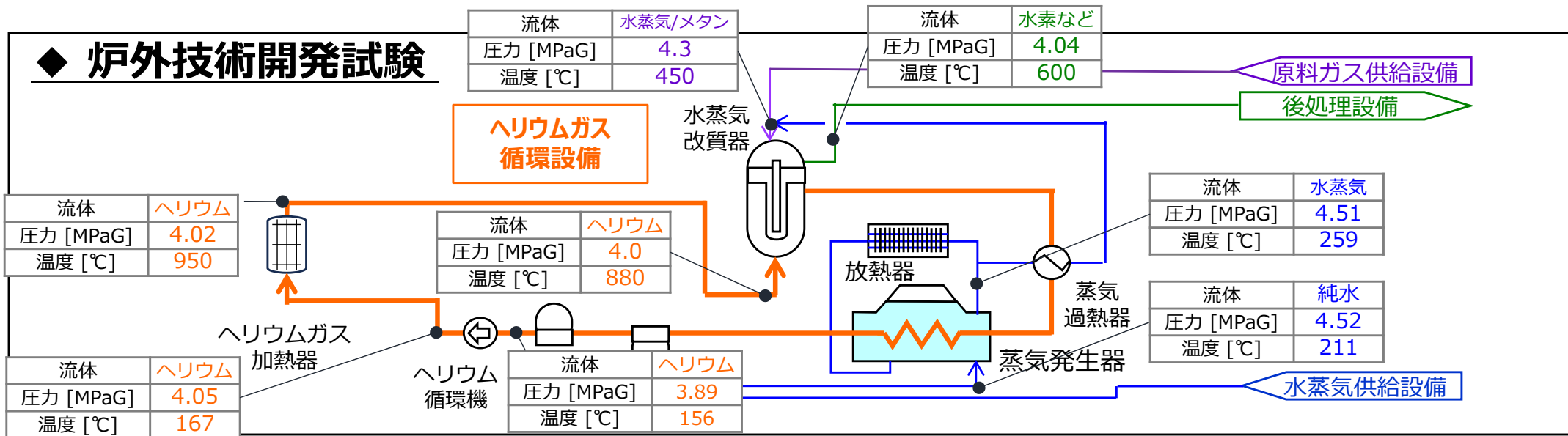
試験内容

試験名	内容	要素技術検証内容との対応
(a) 起動・停止試験	・原子炉の運転に連動した水素製造設備の起動・停止手順を確立する。	Ⅲ HTTR水素製造システムの起動停止の手順確率 Ⅴ HTTR水素製造システム動特性解析コードの検証
(b) プラント特性試験	・原料ガス流量、水蒸気流量、ヘリウム流量をステップ状に変動させ、水素製造システムの応答を測定し、制御特性の把握、水素製造設備の動特性解析コードの検証を行う。 ・定格条件で7日間運転し、安定した水素製造できることを実証する。	Ⅰ プラント温度変動時のヘリウムガス温度制御緩和技術 Ⅱ 水蒸気改質器触媒管の健全性確保 Ⅴ HTTR水素製造システム動特性解析コードの検証
(c) 改質器特性試験	・水素製造量に対する圧力、温度、流量の影響を測定し、水素製造性能の評価、設備の動特性解析コードの検証を行う。	Ⅳ HTTR水素製造システム特有の高温機器の設計妥当性検証 Ⅴ HTTR水素製造システム動特性解析コードの検証
(d) 安全性試験	・蒸気発生器と放熱器を用いた水蒸気改質器の異常（反応停止）時の原子炉戻りヘリウムガス温度変動緩和機能を実証するとともに、その運転手順を確立する。	Ⅰ プラント温度変動時のヘリウムガス温度制御緩和技術 Ⅳ HTTR水素製造システム特有の高温機器の設計妥当性検証 Ⅴ HTTR水素製造システム動特性解析コードの検証

参考

熱収支の比較

◆ 炉外技術開発試験



◆ HTTR-熱利用試験

