

HTTR－熱利用試験施設に用いる
高温機器及び高温配管を対象とする
高温評価及び材料試験

仕様書

目次

I. 一般仕様.....	1
1. 概要	1
2. 作業内容	1
3. 提出図書	2
4. 提出場所	2
5. 支給品及び貸与品	2
6. 納期	3
7. 検収条件	3
8. 検査員及び監督員	3
9. 品質保証	3
10. グリーン購入法の推進	4
11. その他	4
II. 技術仕様.....	5
1. 高温評価	5
2. 材料試験	7

I. 一般仕様

1. 概要

日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）では、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」に基づき、資源エネルギー庁受託事業「超高温を利用した水素大量製造技術実証事業」として、2030年までに大量かつ安価なカーボンフリー水素製造に必要な技術開発に向け、高温ガス炉と水素製造施設の高い安全性を有する接続技術確立を目的としたHTTR-熱利用試験プロジェクトを開始した。

HTTR（高温工学試験研究炉）「以下「HTTR」という。」とメタン水蒸気改質法による水素製造施設を接続したHTTR-熱利用試験施設に関して、高温機器及び高温配管は高温クリープ領域となるため、高温ガス炉第一種機器の高温構造設計指針に基づく評価により構造健全性を確認する必要がある。しかし、水蒸気改質器の触媒管等を使用することを計画しているアロイ800Hは、高温構造設計指針に材料強度基準等の記載がなく、かつ、ASME等の関連する規格においても使用環境や温度域での材料強度基準等のデータがないため、新たに材料データを取得する必要がある。本作業では、対象機器及び配管に関して、第一種機器相当としての高温評価を実施し、構造の成立性を確認するとともに、高温評価に資する材料試験を実施する。

本作業では高温ヘリウム環境（約900℃）で使用される機器等に係る設計を実施するため、受注者はこれらの機器に係る設計や構造に加えて、HTTR向けの旧科技庁内規*、高速炉用のJSME規格等の高温構造設計に係る記載内容並びに規格で規定された評価手法等に関して十分な知見・技術力を有すること。

* 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

（添付）高温ガス炉第1種機器の高温構造設計指針

（添付）高温ガス炉高温構造設計指針の材料強度基準等

（添付）高温ガス炉炉心支持黒鉛構造物の構造設計指針

（添付）高温ガス炉炉心黒鉛構造物の構造設計指針

2. 作業内容

本作業では、以下の項目を実施する。

(1)高温評価及び材料試験報告書作成

3. 提出図書

請負者は次の書類を提出すること。また、提出にあたっては提出時期を遵守すること。

No.	提出図書	提出時期	部数
1	実施計画書	契約後速やかに	5部
2	作業工程表	契約後速やかに	5部
3	品質保証計画書	契約後速やかに	2部
4	打ち合わせ議事録	打ち合わせの都度	1部
5	中間報告書	年度毎及び作業の進捗に応じて	5部
6	中間報告スライド	年度毎及び作業の進捗に応じて	1部
7	最終報告書※1	納期まで	5部
8	最終報告説明スライド※2	納期まで	1部
9	最終報告書、計算評価に用いた電子ファイルを保存した電子メディア※3	納期まで	1式
10	委任又は下請負等の届出※4	作業開始2週間前まで	1部

※1 検討に用いた情報、汎用表計算ソフトウェアの作業シート、計算プログラムの入力データ及び解析結果のデジタル値、構造図及び鳥瞰図のCADデータ、作成した図表を報告書に含めること。なお、受注者のノウハウ等が含まれ、提出困難なものは、原子力機構との協議により、その提出要否を決定する。

※2 II.技術仕様に定める作業内容をまとめた説明スライドを作成する。

※3 報告書のファイル形式はMS-Word及びMS-Excel、報告スライドの形式はMS-PowerPointとする。

※4 下請負がある場合には提出すること。

4. 提出場所

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 大洗原子力工学研究所 H T T R 研究棟
高温工学試験研究炉部 H T T R 技術課

5. 支給品及び貸与品

(1) 支給品

・アロイ 800H

(2) 貸与品

- ・疲労及びクリープ疲労向け試験機
- ・構造の見直しが必要となった場合、機器構造図等の必要な設計図書は原子力機構と協議の上貸与する

6. 納期

令和9年3月31日（水）

7. 検収条件

3.に定める図書が全て提出され、仕様書に従い作業が実施されていることを原子力機構が確認した時をもって検収とする。

8. 検査員及び監督員

(1) 検査員

一般検査 管財担当課長

(2) 監督員

員数検査、提出図書及び仕様検査 H T T R技術課員

9. 品質保証

- ・ 受注者は、原子力機構の「大洗原子力工学研究所原子炉施設等品質マネジメント計画書（QS-P12）」及び「H T T R品質保証管理要領書」並びに受注者の品質保証計画を遵守して、本仕様書に定められた品目を納入すること。契約前又は契約後の業務実施前に品質保証計画書等の内容確認を必要とする場合は、H T T R技術課にて閲覧又は提供が可能とするので、内容を確認すること。
- ・ 本作業に係る受注者の品質保証について、「品質マネジメント計画書」の提出を求めた場合にあっては、受注者は速やかに同計画書を提出すること。
- ・ 重大な不具合が発生した際には、原子力機構は受注者に対して受注者監査を行い、監査の結果、必要な是正処置を指示することがある。その場合は指示に従い、是正処置を行うこと。なお、監査又はその他の試験・検査で受注者施設への立入りを要求する場合は、原子力機構と受注者で協議とする。
- ・ 受注者は、不適合、事故又はトラブルが生じた場合に原子力機構が行う不適合管理、是正処置、未然防止を「不適合管理並びに是正処置及び未然防止処置要領（大洗 QAM-03）」に従い対応すること。
- ・ 受注者は、本仕様書に記載された要求事項を満足して作業が完了したことを報告

書に記載すること。また、設備の維持及び運用に係る技術情報（保安に係るものに限る）がある場合は、報告書に記載すること。

- ・ 受注者は、安全意識を高め、安全文化を育成及び維持するよう努力すること。
- ・ 作業の一部を外注（下請負等を含む）する場合には、受注者の責任において品質に関する要求事項を外注先にも適用すること。

必要に応じて、品質保証活動実施のエビデンスとなる書類を報告書に添付すること。書類の種類、型式等については双方協議の上、原子力機構が指示する。

10. グリーン購入法の推進

- (1) 本契約において、グリーン購入法（国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律）に適用する環境物品（事務用品、OA機器等）が発生する場合は、これを採用するものとする。
- (2) 本仕様で定める提出図書（納入印刷物）については、グリーン購入法の基本方針に定める「紙類」の基準を満たしたものであること。

11. その他

- ・ 受注者は、原子力機構担当者と緊密な連絡を取りつつ作業を行うこと。原子力機構担当者が必要と認めた場合には、適宜技術打合せを行うこと。
- ・ 受注者は、業務上知り得た情報を原子力機構の許可無く第三者に口外してはならない。
- ・ 受注者は、原子力機構から提示される技術資料、情報等を第三者に提供する場合、予め書面による許可を求め、原子力機構の確認を得なければならない。
- ・ 本作業による成果に関する一切の権利は、原子力機構に帰属するものとする。
- ・ 貸与品（使用許可品）に関し、本契約以外での使用は、受注者が予め書面による許可を求め、原子力機構の確認を得なければならない。
- ・ 本仕様書に関して疑義が生じた場合は、双方協議の上、原子力機構が指示する。

II. 技術仕様

1. 高温評価

(1) 評価対象

HTTR－熱利用試験施設の原子炉施設の機器及び配管に関して、使用中の金属温度が「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」（以下「構造等の技術基準」という。）別表第 2 に記載された適用温度範囲を超える範囲を対象に「高温ガス炉第 1 種機器の高温構造設計指針」（以下「高温構造設計指針」という。）に規定された解析を実施する。

2 次ヘリウム冷却設備の機器及び配管は、内部流体が中間熱交換器出口側の高温な 2 次ヘリウムである。高温の 2 次ヘリウムが直接バウンダリとなる機器及び配管に接すると、バウンダリの金属温度は 2 次ヘリウムと同等の高温となる。この状況を踏まえ、HTTR 等の実績を踏襲して内部断熱構造を採用することにより、バウンダリの設計温度を低減する設計としている。

しかし、水蒸気改質器及び蒸気過熱器の触媒管や伝熱管に関しては、機能上あるいは構造上、バウンダリの設計温度を十分に低減することが出来ない。その結果、構造等の技術基準の別表第 2 に記載の適用温度範囲を超過する見込みである。

また、後処理設備の機器及び配管の内部流体は、水蒸気改質器の触媒管で 2 次ヘリウムと熱交換し、水蒸気改質反応により生成された水素等を含む高温のガスである。この生成ガスがバウンダリとなる配管及び機器に接すると、バウンダリの金属温度は生成ガスと同等の高温となる。なお、類似の試験施設（炉外技術開発試験装置）の使用実績を考慮した結果、後処理設備においては、2 次ヘリウム冷却設備のような内部断熱構造は採用しない設計としている。そのため、生成ガスの流路である第一段水蒸気改質器入口ガス予熱器、第二段水蒸気改質器入口ガス予熱器及び配管の温度は、構造等の技術基準の別表第 2 に記載された適用温度範囲を超過する見込みである。

以上を踏まえ、評価対象とする機器及び配管は以下とする（図 1 参照）。

- ・水蒸気改質器
- ・蒸気過熱器
- ・第一段水蒸気改質器入口ガス予熱器
- ・第二段水蒸気改質器入口ガス予熱器
- ・配管（原子炉施設）

上記を対象に、高温構造設計指針の記載に従い、以下の各評価を実施する。

- ・1 次応力の制限

- ・特別な応力の制限
- ・ひずみの制限
- ・クリープ疲れ損傷の制限
- ・座屈の防止

(2) 評価条件の整理

計算条件は条件書で明確化する。条件書には、各機器及び配管の評価対象部位、各事象の運転状態や過渡回数、各事象における代表点の圧力、温度、流量のトレンド等の熱過渡条件を機器や配管ごとに整理する。

(3) 評価に用いる許容値

評価に用いる許容値等は高温構造設計指針に基づき、「高温ガス炉高温構造設計指針の材料強度等」(以下「強度基準等」という。)を参考に定める。各評価に必要な許容値は以下のとおりである。(表1参照)。

- i. 1次応力の制限：最大許容応力強さ S_o 、許容応力強さ S_m 、設計応力強さ S_t 、設計引張強さ S_u 、設計クリープ破断応力強さ S_R
- ii. 特別な応力の制限：許容応力強さ S_m 、設計応力強さ S_t 、設計降伏点 S_y
- iii. ひずみの制限：設計応力強さ S_t 、設計降伏点 S_y 、許容応力強さ S_m 、設計緩和強さ S_r 、設計クリープ破断応力強さ S_R 、等時応力-ひずみ線図(弾塑性応力-ひずみ関係式+クリープひずみ式)
- iv. クリープ疲れ損傷の制限：許容ひずみ範囲 ϵ_t 、許容応力強さ S_m 、設計緩和強さ S_r 、設計クリープ破断応力強さ S_R 、等時応力-ひずみ線図(弾塑性応力-ひずみ関係式+クリープひずみ式)、緩和クリープ損傷係数(=クリープひずみ式+クリープ破断式)、クリープ疲れ損傷の制限値 D
- v. 座屈の防止：許容応力強さ S_m 、設計降伏点 S_y 、等時応力-ひずみ線図(弾塑性応力-ひずみ関係式+クリープひずみ式)

評価対象である機器及び配管の一部では、アロイ 800H を用いる計画である。アロイ 800H は構造等の技術基準に記載されており使用可能ではあるが、強度基準等には記載がない。そのため、高温構造設計指針に従った高温評価を実施するためには、表1で示す許容値等を設定する必要がある。この許容値等は、「2.材料試験」で設定する。

(4) 評価の整理

計算結果は評価対象部位ごとの応力や各評価の結果を整理し、機器や配管ごとに計算書としてまとめる。

本章の成果として、機器及び配管ごとに以下の設計図書を作成する。

- ・高温強度計算条件書
- ・高温強度計算書

2. 材料試験

(1) 試験の種類、試験条件等

水蒸気改質器の触媒管等、高温部に使用する材料として、強度基準等に記載のないアロイ 800H を採用する計画である。そのため、今後の設工認申請を見据えて、「1.高温評価」に必要なアロイ 800H の適切な許容値等を設定するとともに、必要な材料試験を実施して設定値の妥当性を確認する。

アロイ 800H の許容値等は強度基準等には記載が無い。一方、ASME には記載があるため、基本的に ASME の許容値等を活用する。ただし、ASME と強度基準等で許容値等の策定方法に差がある値に関しては ASME の記載を補正する。また、ASME に記載がない温度域に関しては、記載がある温度域を外挿して許容値を設定する。このようにして設定した許容値等は、材料試験により確からしさを確認する。

表 1 で示した許容値等に対応する必要な材料試験を以下に示す(詳細は表 2 を参照)。

- ・最大許容応力強さ (S_o) : 引張試験、クリープ試験、クリープ破断試験
- ・許容応力強さ (S_m) : 引張試験
- ・設計応力強さ (S_t) : クリープ試験、クリープ破断試験
- ・設計降伏点 (S_y) : 引張試験
- ・設計クリープ破断応力強さ (S_R) : 引張試験、クリープ破断試験
- ・設計引張強さ (S_u) : 引張試験
- ・設計緩和強さ (S_r) : 引張試験、クリープ試験
- ・許容ひずみ範囲 (ϵ_t) : 疲労試験
- ・弾塑性応力-ひずみ関係式 : 引張試験
- ・クリープひずみ式 : クリープ試験
- ・クリープ疲れ損傷の制限値 (D) : クリープ疲労試験

1) 引張試験

ASME では、弾塑性応力-ひずみ線図(等時応力ひずみ線図の 0h) は 760°C まで策定されている。引張挙動の観点からは、ASME のデータは 760°C までしか適用できないため、データ補完を目的として引張試験を実施する。以下の比較を行い、ASME 式の温度外挿性を確認する。なお、設計降伏点(S_y)及び設計引張強さ(S_u)

は ASME900°Cまで策定されているため、確認する目的でこれらも評価する。

- ・ ASME 式 (～760°C) で 800°C、850°Cを代入して得られる弾塑性応力-ひずみ線図
- ・ 800°C、850°Cの引張試験 (応力-ひずみ)

2) クリープ試験

ASME では、クリープひずみ式は 760°Cまで (等時応力ひずみ線図の最高温度まで) 策定されている。クリープ挙動の観点では、ASME のデータは、760°Cまでしか適用できない。このため、データ補完を目的としてクリープ試験を実施する。クリープひずみ式の一次クリープ項「 $\epsilon_t \{1 - \exp(-rt)\}$ 」に含まれる係数「 ϵ_t 」及び指数「 r 」は温度外挿ができないため、実機で想定する応力及び温度条件で一次クリープを含めたひずみ式の妥当性を確認する。なお、設計クリープ破断応力強さ (S_R) は、ASME では 900°Cまで策定されているため、確認する目的でこれらも評価する。試験条件は、使用材料の最高使用温度 (850°C) を考慮して以下のとおりとする。

- ・ 試験温度：850°Cに 50°Cを加えた範囲 (900°C) まで 50°Cピッチとする。
- ・ 試験時間：プラント運転時間を考慮し 10000 時間を最大とする。強度の当たり付けとして 1000 時間、現計画の運転時間 (120 日) を想定した 3000 時間でのデータを取得する。
- ・ 低応力側の条件：温度 850°C、応力 10MPa 程度 (試験限界) とする。

3) 疲労試験

ASME では許容ひずみ範囲 (ϵ_t) は 760°Cまで策定されている。疲労強度を評価するため、以下を目的に疲労試験を実施する。

試験温度は、使用材料の最高使用温度 850°Cを想定し、ASME 最高温度 760°C近傍である 750°C、設計温度域である 800°C及び最高温度近傍である 850°Cの 3 温度とする。

- ・ 750°C：ASME 平均値 (安全率を補正) との対応確認
- ・ 800°C、850°C：760°Cにおける ASME 平均値 (安全率を補正) との対応確認

繰返し数は、 10^3 回 (強度の当たり付け) ～ 10^6 回の 1 桁ピッチ程度とする。

4) クリープ疲労試験

ASME では、クリープ疲労損傷の許容値 (D) は 760°Cまで策定されている。ASME

のデータは 760°Cまでしか適用できないため、データ補完を目的として以下の条件で、クリープ疲労試験を実施する。

- ・試験温度：850°C
- ・保持時間：最長 1 時間（疲労強度に対する保持による寿命低下率は 1 時間で飽和すると予想される^[1]）
- ・ひずみ範囲：0.3～1%程度（既往試験結果^[1]を踏まえる。）

各試験条件を表 3 にまとめる。試験の実施上、表 3 の試験条件を変更する必要がある場合は、原子力機構と受注者で協議の上、対応を決定する。また、試験においては製品形態の影響も確認する。試験対象の製品形態は、管をベースとし、実機で使用する伝熱管及び鍛造品に関して、最高使用温度を中心に代表的な数点で試験を実施する。

参考文献

[1] 深倉寿一, 松本富士男, 荒木隆夫, アロイ 800H の高温疲労寿命に与えるひずみ保持効果, 日本機械学会論文集(A 編), No.57, Vol.540, pp.1700-1705, 1991 年.

(2) 試験の整理

本章の成果として、以下の設計図書を作成する。

- ・材料試験計画書
- ・材料試験報告書

試験報告書では、材料試験結果のデータを図表で整理するとともに、「1.高温評価」で使用する許容値等の形でまとめる。また、時間依存性がある場合の座屈の評価方法及び溶接部が高温となる場合の強度評価方法に関しては、高温構造設計指針には規定が無い。このため、これらの評価方法を検討し、検証や追加試験も計画する。

表1 高温評価に必要な許容値等

旧科技庁内規 (高温構造設計指針) における制限	評価に用いる許容値等
1次応力の制限	S_O, S_m, S_t, S_u, S_R
特別な応力制限	S_m, S_t, S_y
ひずみの制限	S_t, S_y, S_m, S_r, S_R ・等時応力－ひずみ線図 (=弾塑性応力－ひずみ関係式+クリープひずみ式)
クリープ疲れ損傷の制限	$\epsilon_t, S_m, S_r, S_R$ ・等時応力－ひずみ線図 (=弾塑性応力－ひずみ関係式+クリープひずみ式) ・緩和クリープ損傷係数 (=クリープひずみ式+クリープ破断式) ・クリープ疲れ損傷の制限値 D
座屈の防止	S_m, S_y ・等時応力－ひずみ線図 (=弾塑性応力－ひずみ関係式+クリープひずみ式)

表 2 許容値等の設定に必要な試験の種類

許容値等	設定に必要な試験の種類
S_0	引張、クリープ、クリープ破断
S_m	引張
S_t	クリープ、クリープ破断
S_y	引張
S_R (=クリープ破断式)	引張、クリープ破断
S_u	引張
S_r	引張、クリープ
ϵ_t	疲労
弾塑性応力-ひずみ関係式	引張
クリープひずみ式	クリープ
クリープ疲れ損傷の制限値 D	クリープ疲労

表3 材料試験案

試験の種類	試験条件案※1	試験本数			
		触媒管	伝熱管	鍛造品 (主鍛造方向)	鍛造品 (主鍛造直角方向)
引張	室温	2	2	2	2
	750°C	2	—	—	—
	800°C	2	2	2	2
	850°C	2	—	—	—
	900°C	2	—	—	—
クリープ (クリープ破断を 兼ねる)	750°C×4 応力/破断時間 (1,000、3,000、10,000hr)	4	—	—	—
	800°C×4 応力/破断時間 (1,000、3,000、10,000hr)	4	3	3	3
	850°C×4 応力/破断時間 (1,000、3,000、10,000hr)	4	—	—	—
	900°C×4 応力/破断時間 (1,000、3,000、10,000hr)	4	—	—	—
	850°C×低応力3条件 (10,000hr で打ち切り)	3	—	—	—
疲労	750°C×4 ひずみ範囲/回数、ひずみ速度 10 ⁻³ %/sec (1%/10 ³ 、0.4%/10 ⁴ 、0.25%/10 ⁵ 、0.2%/10 ⁶ 回)	4	—	—	—
	800°C×4 ひずみ範囲/回数、ひずみ速度 10 ⁻³ %/sec (1%/10 ³ 、0.4%/10 ⁴ 、0.25%/10 ⁵ 、0.2%/10 ⁶ 回)	4	—	4	—
	850°C×4 ひずみ範囲/回数、ひずみ速度 10 ⁻³ %/sec (1%/10 ³ 、0.4%/10 ⁴ 、0.25%/10 ⁵ 、0.2%/10 ⁶ 回)	4	—	—	—
	800°C×1 ひずみ範囲/回数、ひずみ速度 10 ⁻⁶ %/sec (1%/10 ³ 回)	1	—	—	—
クリープ疲労	800°C×ひずみ範囲 1%×保持時間 (0.1、0.5、1hr)	3	—	2	—
	800°C×ひずみ範囲 0.6%×保持時間 (0.1、0.5、1hr)	3	—	—	—
	800°C×ひずみ範囲 0.4%×保持時間 (0.1、0.5hr)	2	—	—	—
	800°C×ひずみ範囲 0.3%×保持時間 (0.1hr)	1	—	—	—

※1 試験に資する製品形態は、管をベースとし、実機で使用する伝熱管及び鍛造品に関しても最高温度を中心に代表数点の試験を実施する。
なお、環境効果は既往知見の流用及び別途実施する暴露試験で確認し、大気中試験とする。

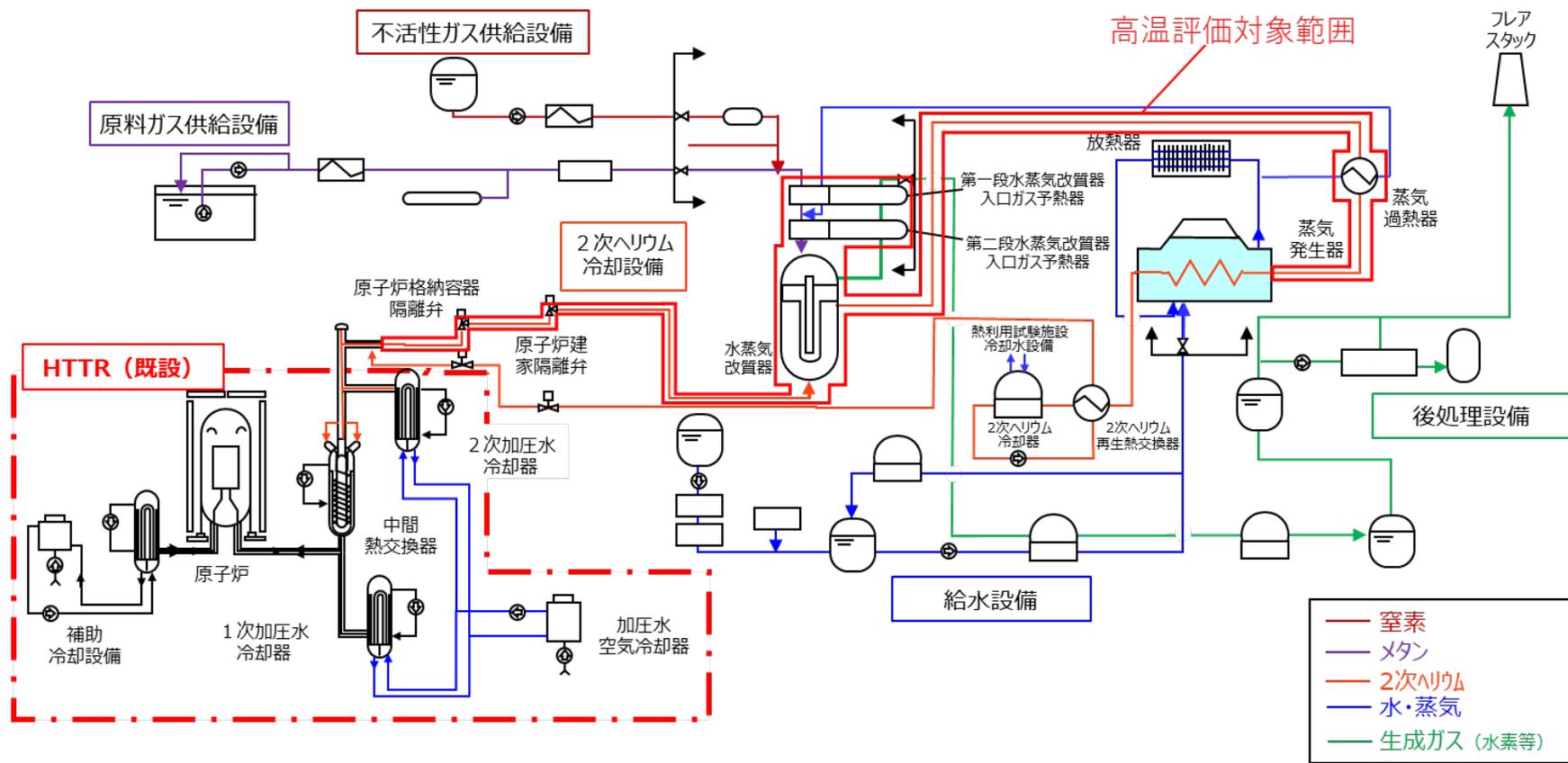


図1 HTTR-熱利用試験施設系統構成概略図及び高温評価対象範囲