

JAERI-Tech
2002-101



JP0350029



HTTRに接続する水素製造システムの系統
及び機器設計
(受託研究)

2003年1月

西原 哲夫・清水 明・谷平 正典*・内田 正治*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

HTTR に接続する水素製造システムの系統及び機器設計
(受託研究)

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部
西原 哲夫・清水 明・谷平 正典*・内田 正治**

(2002年11月25日受理)

地球温暖化の要因となっている二酸化炭素の排出量を削減することが世界的に重要な課題となっている。そして、石油や石炭等の炭化水素系燃料に代わるクリーンエネルギーとして水素が大きな役割を占めることが期待される。

水素製造法としては水電解法や炭化水素の水蒸気改質法等がある。産業界では経済性に優れた水蒸気改質法による水素製造が主流となっている。しかし、一般の水蒸気改質法では化学反応に必要な熱を石油等の燃焼熱で賄っているため、水素製造過程で大量の二酸化炭素を環境に放出している。水蒸気改質法において熱源に炭化水素系燃料を使用しないシステムは、環境への負荷が軽減でき、地球温暖化問題の解決に貢献できる。

高温ガス炉は原子炉出口で 950℃ という非常に高温のヘリウムガスを供給できる原子炉である。この特徴を生かすことにより、高温ガス炉は発電のみならず化学プロセスへの熱源供給も可能となる。日本原子力研究所では、大洗研究所に HTTR (High Temperature engineering Test Reactor) を建設し、試験運転を実施している。

HTTR の研究課題の 1 つに核熱利用技術の確立がある。そして、水蒸気改質法による水素製造プラントを HTTR に接続して水素製造を実証するためのシステム検討を進めている。本報告は HTTR 水素製造システムの系統設計及び機器設計の成果を纏めたものである。

本研究は文部科学省の受託研究「核熱利用システム技術開発」の中で実施されたものである。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

*三菱重工業株式会社

**新型炉技術開発株式会社

Study on System Layout and Component Design in the HTTR Hydrogen Production System
(Contract Research)

Tetsuo NISHIHARA, Akira SHIMIZU, Masanori TANIHIRA* and Shoji UCHIDA**

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 25, 2002)

The global warming becomes a significant issue in the world so that it needs to reduce the CO₂ emission. It is expected that hydrogen is in place of the fossil fuels such as coal and oil, and plays the important role to resolve the global warming.

There are several hydrogen making processes such as water electrolysis and steam reforming of hydrocarbon. Steam reforming of hydrocarbon is a major hydrogen making process because of economy in industry. It utilizes the fossil fuels as process heat for chemical reaction and results in a large CO₂ emission. New steam reforming system without fossil fuel can contribute to resolve the global warming.

High temperature gas-cooled reactor (HTGR) has a unique feature to be able to supply a hot helium gas whose temperature is approximately 950°C at the reactor outlet. This makes HTGR possible to utilize for not only power generation but also process heat utilization. JAERI constructed the high temperature engineering test reactor (HTTR) that is a sort of HTGR in Oarai establishment and starts operation.

Nuclear heat utilization is one of the R&D items of the HTTR. The steam reforming system coupled to the HTTR for hydrogen production has been designed. This report represents the system layout and design specification of key components in the HTTR steam reforming system.

Keywords : HTTR, Hydrogen Production System, Steam Reforming, Safety Design Concept,
System Layout, Design Specification, Component Design

Present study is entrusted from MEXT of Japan

* Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

** Advanced Reactor Technology Co., Ltd.

目次

1	はじめに	1
2	HTTR 水素製造システムの概要	2
2.1	HTTR の概要	2
2.2	水蒸気改質水素製造プラントの概要	3
2.3	水素製造プラント接続に伴う設備変更	4
3	安全設計方針	6
3.1	水素製造プラントの設計クラス	6
3.2	火災爆発に関する設計方針	6
3.3	運転制御性に関する設計方針	8
3.4	トリチウムに関する設計方針	9
4	系統設計	10
4.1	2次ヘリウム系	10
4.2	原料ガス供給系	11
4.3	水蒸気供給系	11
4.4	後処理系	12
4.5	不活性ガス供給系	13
4.6	ユーティリティ系	13
4.7	ヒートバランスの設定	14
5	機器設計	15
5.1	2次ヘリウム系	15
5.2	原料ガス供給系	18
5.3	水蒸気供給系	18
5.4	後処理系	19
5.5	不活性ガス供給系	19
5.6	ユーティリティ系	19
6	まとめ	20
	謝辞	20
	参考文献	21

Contents

1	Introduction	1
2	HTTR Hydrogen Production System	2
2.1	HTTR	2
2.2	Steam Reforming Hydrogen Production Plant	3
2.3	Modification of HTTR for Hydrogen Production	4
3	Safety Design Concept	6
3.1	Design Class of the Hydrogen Production Plant	6
3.2	Design Concept for Fire and Explosion	6
3.3	Design Concept for Operability and Controllability	8
3.4	Design Concept for Tritium Contamination	9
4	System Layout	10
4.1	Secondary Helium Loop	10
4.2	Feed Gas Supply Unit	11
4.3	Steam Supply Unit	11
4.4	Product Gas Disposal Unit	12
4.5	Nitrogen Gas Supply Unit	13
4.6	Plant Utility	13
4.7	Heat Balance of the Hydrogen Production System	14
5	Component Design	15
5.1	Secondary Helium Loop	15
5.2	Feed Gas Supply Unit	18
5.3	Steam Supply Unit	18
5.4	Product Gas Disposal Unit	19
5.5	Nitrogen Gas Supply Unit	19
5.6	Plant Utility	19
6	Conclusion	20
	Acknowledgement	20
	References	21

1. はじめに

近年、地球温暖化が大きな社会問題となっている。これは、産業活動のエネルギー源として大量の炭化水素系燃料を消費し、その結果として二酸化炭素を大量に排出していることが主たる原因である。そこで、炭化水素系燃料の消費量をいかに削減するかが緊急の課題となっている⁽¹⁾。

新エネルギーとして、太陽光、風力、バイオマスなどの再生可能なエネルギーに大きな関心が集まっており、これらのエネルギーを利用した発電システムが実用化されている。しかし、コストやエネルギー効率の面からエネルギー生産システムの中心的な役割を果たすことは難しい⁽²⁾。一方、既存のクリーンエネルギーとして水力があるが、水力発電所の建設には大規模な自然破壊を伴うため、新たな建設は困難な状態にある。そこで、原子力エネルギーが大きな役割を果たすことが期待される。

ところで、新しいエネルギーキャリアとして水素が注目されている⁽³⁾。水素は燃焼後に水しか排出しない最もクリーンなエネルギーであり、燃料電池の燃料として利用の拡大が期待されている。現在、経済性に優れ、産業界に広く普及している水素製造方法は、天然ガスなどの軽質の炭化水素を原料とした水蒸気改質法である。しかし、一般の化学プラントでは水蒸気改質反応に必要な熱を炭化水素系燃料の燃焼熱で賄っているため、大量の二酸化炭素を放出している。そこで、二酸化炭素を放出しない熱源を利用して水素を製造するシステムを構築できれば、環境への負荷を軽減でき、地球温暖化の解決に大きく貢献できる。

高温ガス炉は冷却材にヘリウムガスを、炉内の主要構造物に黒鉛を使用することにより、原子炉出口で950℃と非常に高温のヘリウムガスを取り出すことができる原子炉である。そのため、発電のみならず化学プロセスの熱源として利用することが可能である。日本原子力研究所(以下、原研という)では、わが国初の高温ガス炉であるHTTR (High Temperature engineering Test Reactor)から供給される高温の2次ヘリウムガスを熱源とした水素製造システムの実証試験を計画し、研究開発を進めている⁽⁴⁾。そして、水蒸気改質法による水素製造プラントを接続するための設計研究を行なっている。本報告書は、系統設計及び機器設計の結果をまとめたものである。

なお、本研究は文部科学省からの受託研究として実施したものである。

2. HTTR 水素製造システムの概要

HTTR は日本初の高温ガス炉である。そして、原子力エネルギーの利用分野を拡大するため、HTTR から供給される高温のヘリウムガスを熱源として利用して水素製造を実証するとともに、原子力システムとしての運転制御性及び安全性を確立することを研究課題の一つとしている。そこで本章では、HTTR、並びに、HTTR に接続する水素製造プラントとして選択した水蒸気改質プラントについて説明する。そして、HTTR に水素製造プラントを接続するためにどのような設備変更が必要か検討する。

2.1 HTTR の概要

HTTR は原子炉冷却材にヘリウムガスを用いた熱出力 30MW の黒鉛減速型熱中性子炉である。その基本仕様及び主冷却系統構成を表 2.1 及び図 2.1 に示す。HTTR の最も大きな特徴は、燃料要素や炉心構成要素に耐熱性に優れた黒鉛を使用することにより原子炉出口で 950°C という高温のヘリウムガスを取り出せることにある。

HTTR の 1 次冷却設備は、炉心の冷却を目的とした 1 次加圧水冷却器 (1 次 PWC) と核熱利用設備の接続を目的とした中間熱交換器 (IHX) の 2 つの冷却器を有している。現在の系統設計では、IHX で熱交換された高温の 2 次ヘリウムガスは 2 次加圧水冷却器 (2 次 PWC) を用いて冷却される。そして、1 次 PWC 及び 2 次 PWC でヘリウムガスと熱交換した冷却水は加圧水空気冷却器で冷却される。HTTR では 1 次冷却設備に 2 基の熱交換器を有していることから、運転形態として 1 次 PWC 単独で原子炉を冷却する単独運転と、1 次 PWC と IHX の両方を用いて原子炉を冷却する並列運転の 2 つがある。単独運転では 1 次 PWC の除熱量は 30MW であるが、並列運転では 1 次 PWC の除熱量を 20MW に減じ、IHX で 10MW の除熱を行なう。なお、原子炉スクラム時には、炉心の過冷却を防止する観点から、1 次 PWC や IHX での冷却を停止し、補助冷却器 (AHX) により炉心残留熱を除去する設計となっている。

HTTR の原子炉出口ヘリウム温度は設計上 950°C まで上げられる。しかし、諸外国の高温ガス炉を見てもこのような高温で運転した経験はないため、十分な安全余裕を持って原子炉を運転するという観点から、定格運転の原子炉出口ヘリウム温度は 850°C に設定した。そして、950°C の運転は高温試験運転と定義した。

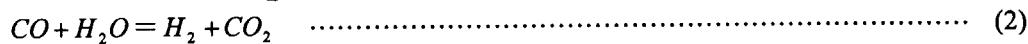
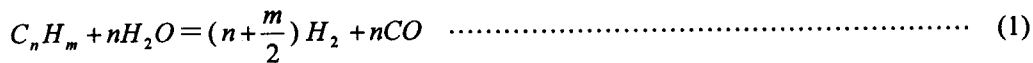
HTTR に接続する水素製造プラントは原子炉建家に隣接した敷地に設置されるので、熱源であるヘリウムガスを輸送する配管も屋外に引き出される。このようなシステムにおいては、核分裂生成物を含んでいる 1 次ヘリウムガスを熱源とすることは放射線安全の観点から好ましくない。そのため、HTTR 水素製造システムは IHX から供給される 2 次ヘリウムガスを熱源とする。また、後で述べるように、水蒸気改質反応は吸熱反応であり温度が高いほど反応が促進されるため、供給されるヘリウムガスはできる限り高温であることが好ましい。従って、HTTR を用いて水素製造を行なう場合、HTTR は並列運転で、かつ、高温試験運転となる。この運転状態における 1 次冷却設備のヒートバランスを図 2.2 に示す。

HTTR の詳細については他の文献を参照されたい⁽⁴⁾。

2.2 水蒸気改質水素製造プラントの概要

水素の需要は2020年から2030年にかけて、燃料電池の普及とともに急激に増加することが予想される⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この水素を供給するシステムの1つとして高温ガス炉水素製造システムを実用化することを最終目標に掲げる。そこで、HTTRを利用した水素製造の実証試験を2010年頃までに行ない、運転制御技術及び安全技術の開発を行ない、実用化の目途をつけることを本研究のゴールとする。そのためには、水素製造法に関する研究開発課題が少ないシステムを選択する必要がある。そこで、HTTRに接続する水素製造プラントとしては、昭和40年代後半に行なわれた原子力製鉄プロジェクトにおいて様々な試験が行なわれ基礎データが取得され⁽⁷⁾、さらに産業界でも広く普及し、最も成熟した水素製造法である水蒸気改質法を選択した。

水蒸気改質法は天然ガスやナフサなどの炭素成分が少ない軽質の炭化水素と水蒸気を原料として下記の反応により水素を製造する。



ここで、(1)式は水蒸気改質反応、(2)式は水性ガスシフト反応である。

水蒸気改質反応は吸熱反応で、反応熱はメタンの場合206kJ/molである。一方、水性ガスシフト反応は発熱反応で、反応熱は41kJ/molである。したがって、反応系全体としては吸熱反応となり、反応温度が高いほど反応が促進される。また、(1)式の水蒸気改質反応は、反応によってガスのモル数が増加するため、化学平衡論的には反応圧力が低いほど反応が促進される。

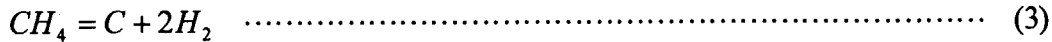
HTTR水素製造システムの運転条件を設定するに当たり、一般産業界における水蒸気改質プラントの各種運転条件について調査した⁽⁸⁾。

圧力は水蒸気改質反応の促進や改質器触媒管の耐圧強度確保の観点から低圧のほうが好ましい。一方、単位時間あたりの原料供給量を増やし水素製造量を高めるには、ある程度圧力を高くする必要があり、その結果、反応圧力は1.5MPa～3.0MPaの間に設定されている。

温度は改質反応促進の観点からは高温の方が好ましいが、あまり高温になると高圧下で使用される触媒管の健全性を確保するために板厚を厚くしなければならず、コストアップの要因となる。そのため、合理的な触媒管サイズを実現するために反応温度は900℃程度に設定されている。

一般プラントでは、触媒管の周囲に配置されたバーナーの燃焼熱を利用して反応に必要な熱を供給している。この熱源の温度は約1300℃と非常に高温であることから、改質反応に熱を供給した後の排熱を利用して原料の水蒸気の生成や原料ガスの予熱を行なっている。原料ガスは約500℃～600℃まで加熱して改質器に供給されている。

一般的な化学プロセスでは触媒を使用し、反応の活性化エネルギーを下げて反応を促進している。水蒸気改質反応ではニッケル触媒を使用している。触媒の活性が低下すると水素製造量も低下する。触媒の活性を低下させる要因としては長期間の使用による経年劣化のほかに、硫黄や炭素による被毒がある。そこで、原料ガス中に含まれる硫黄は改質器に供給される前に脱硫器を用いて除去している。一方、炭素は、原料中に含まれるメタンの熱分解((3)式)や反応副生物として生成される一酸化炭素のBoudouard反応((4)式)により、触媒管内部で析出する可能性がある。



(3)式は吸熱反応、(4)式は発熱反応である。高温状態で未反応状態のメタンが大量に存在すると(3)式が促進されるが、水素が多量に存在すると化学平衡的に分解は抑制される。(4)式の反応は発熱反応であるため、ガスが高温状態にあれば反応は抑制される。一酸化炭素は水蒸気改質反応により生成され、触媒層出口における一酸化炭素を含む生成ガスは高温となっていることから、触媒層内で(4)式により炭素が析出する可能性は小さい。

一般プラントでは、水蒸気を過剰に供給して(1)式及び(2)式の反応を促進し、水素を大量に製造することで(3)式の反応を抑制するとともに、生成ガスの触媒管内の滞留時間を短くして(4)式による炭素析出を抑制する対策をとっている。水蒸気の供給量は化学量論的に必要な水蒸気と原料ガス中に含まれる炭素成分の割合 (S/C) は約 2.0 であるのに対して、実際の運転では S/C を 2.5 ~ 3.5 としている。

圧力 2MPa、反応温度 900°C、S/C=3 の場合、化学平衡論的には供給した天然ガスの 87%が水素に転換される。

2.3 水素製造プラント接続に伴う設備変更

HTTR に水素製造プラントを接続する場合、2次 PWC を撤去する必要がある。また、図 2.2 に示すように、現在のヒートバランスでは 2次ヘリウム温度は最高 869°Cとなっているが、一般プラントでは反応温度が約 900°Cとなっていることを勘案すると、HTTR 水素製造システムにおいても更に高温のヘリウムガスを供給できる方が望ましい。そこで、水素製造プラントを接続するためにどのような設備変更が必要となるか検討した。

(1) 2次 PWC の撤去

水素製造プラントは IHX から供給される 2次ヘリウムを熱源とするため、既設の 2次 PWC を撤去する必要がある。この結果、加圧水冷却設備は 1次 PWC のみとなり、単独運転では 30MW を、並列運転では 20MW の除熱を行なう変則的な運転が要求される。そこで、この 2つの運転モードに対応するために、加圧水冷却設備でどのような変更が必要となるか検討した。

加圧水を供給する加圧水循環ポンプは遠心式ポンプで、一定回転数制御方式で運転し、30MW の除熱に必要な加圧水量を供給している。現在、単独運転時に必要な加圧水量は 618 t/h であるが、水素製造を行なう並列運転では加圧水の供給量を 412 t/h まで低下しなければならない。この加圧水の供給量を減じる方法として、

- ① 流量制御弁の開度を制御することにより流量を変更する。
- ② パイプラインを新たに設置して、余剰となる加圧水をポンプ上流側に戻す。

等の対策が考えられる。

現在のシステム構成では、加圧水循環ポンプと 1次 PWC の間には加圧水流量を制御するための弁や、1次 PWC と 2次 PWC の流量配分を行なうための弁が設置されている。従って、これらの弁を絞ることにより流量を減じることが可能である。

一方、加圧水空気冷却器は 6 台の電動ファンを用いた強制通風方式を採用している。そして、加圧水の戻り温度制御は放熱器に設けたバイパスラインを用いて行っている。従って、加圧水空気冷却器の冷却容量を 30MW から 20MW に減じる方法としては、

- ① 運転するファンの台数を減らすことにより空気流量を減じて、除熱量を低減する。
- ② 空気取り入れ口のルーバの角度を変更して空気流量を減じて、除熱量を低減する。
- ③ バイパス流量調節弁を制御して加圧水空気冷却器への加圧水流量を減らし、除熱量を低減する。

という方法が考えられる。いずれの方法を採用するかは定量的な評価を行なって決めることとなるが、いずれにしても 1 次 PWC に供給する加圧水温度を所定の温度 (135°C) に制御することは既存設備により対応可能である。

従って、2 次 PWC の撤去に伴う加圧水冷却設備の冷却容量の変更は、既存設備の改造は行わず運転条件を変更することで対応する。

(2) 2 次ヘリウム温度の高温化

高温試験運転における 2 次ヘリウム温度は IHX 出口で 869°C である。水素製造プラントと IHX を接続する配管は原子炉建家内に設置されている機器の間を通り屋外まで引き出されるが、スペースの関係上、約 80m の長さになる。従って、配管からの放熱により改質器入口では 30°C 程度の温度低下がある。一方、水蒸気改質反応は吸熱反応であり、アレニウス型の温度依存性を示すことから、反応温度が高いほど原料から水素への転換率が大きくなる。ちなみに、一般化学プラントにおける反応温度は約 900°C となっている。HTTR 水素製造システムでは運転制御性及び安全性の確立を主な試験課題として掲げているものの、水素製造システムとして水素製造量が多いほうが魅力的なシステムとなることから、HTTR の現状設備の改造を伴わないで 2 次ヘリウム温度を高くする方策を検討する。

現在、IHX 出入口の 2 次ヘリウム温度はそれぞれ 869°C、237°C で、流量は 10.8 t/h である。このとき IHX 出口 2 次ヘリウム温度を高くするにはヘリウム流量を減らす必要がある。ただし、熱交換量を確保するためには、IHX 入口 2 次ヘリウム温度を低くしなければならない。そこで、IHX 伝熱管の健全性を考慮し、出口 2 次ヘリウム温度を 905°C とした時の IHX まわりのヒートバランスを見直した。その結果、入口温度を 150°C、流量を 9.07 t/h とすることにより定格除熱量 10MW を確保できる。

IHX 伝熱管温度は 1 次ヘリウム温度に大きく依存する。そこで、2 次ヘリウム温度を 905°C としたときの伝熱管温度を評価したところ、定格運転時の最高温度は 913°C であり、温度制御誤差を考慮しても 920°C 程度である。IHX 伝熱管の設計では定格温度 933°C を仮定して実施されているので、伝熱管の健全性は十分確保できる。

そこで、HTTR 水素製造システムでは、2 次ヘリウム流量を 10.8 t/h から 9.07 t/h に減じ、IHX 出口 2 次ヘリウム温度を 905°C とする。

3. 安全設計方針

HTTR 水素製造システムでは、原子炉システムとして高い安全性を確保するとともに、安定な運転制御性を確保することを設計課題としている。そこで系統設計及び機器設計を行なうに当たり安全設計方針を定めた。

3.1 水素製造プラントの設計クラス

原子炉施設の設計においては、全ての系統・機器を対象として安全機能の重要度、耐震クラス及び機器種別のクラス分類を行ない、設定された設計クラスに対して要求される安全機能を満足するように系統及び機器の設計を行なう⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

HTTR に接続する水素製造プラントは 2 次ヘリウムを熱源として水素を製造する設備である。すなわち、原子炉から見ると水素製造プラントは 2 次ヘリウムの冷却を行なう設備と位置付けられる。現在、2 次ヘリウム圧力バウンダリを構成する機器は、安全機能の重要度はクラス 3、耐震クラスは C、機器種別は第 4 種機器に分類されている。これを踏まえて、水素製造プラントの設計クラス分類を行なうと、追設する 2 次ヘリウム圧力バウンダリを構成する機器の設計クラスは既存設備と同じであり、安全機能の重要度はクラス 3、耐震クラスは C、機器種別は第 4 種機器となる。それ以外の系統・機器の設計クラスは 1 段階低くなるが、安全機能の重要度及び耐震クラスは、2 次ヘリウム圧力バウンダリにおいて既に最下位のクラスに分類されていることから、その他の設備においても同じ設計クラスとなる。ただし、機器種別に関しては原子力設備の機器とはみなされず、クラス分類の範囲外となり、一般機器に分類される。安全上の特別な要求がない限り、水素製造プラントの系統・機器のクラス分類は上記に従う。

安全機能の重要度において、クラス 3 に分類される系統・機器に対する安全要求は、一般産業設備と同等以上の信頼性を確保し、かつ、維持することである。すなわち、原子力施設として信頼性を向上するために、機器や計装類の多重化、商用電源喪失時の電力確保のための非常用発電機への接続などは要求されない。ただし、水素製造プラントは高圧ガス設備としての一面を有していることから、高圧ガス保安法など関連する法規で要求されている安全機能を備えておく必要はある。

耐震クラス C の系統・機器に対する安全要求は、一般産業設備と同等の安全性を確保することであり、耐震設計における地震力も静的地震力のみを考慮すればよい。なお、この静的地震力は高圧ガス設備に対して要求されている耐震性評価で用いる地震力を下回る場合、高圧ガス設備の評価用地震力を用いて耐震性を評価する必要がある。

機器種別が第 4 種機器に分類される 2 次ヘリウム圧力バウンダリを構成する機器は、原子炉施設に適用されるの技術基準に従って構造設計を行なう。一方、一般機器に分類される系統・機器は、一般産業設備に適用される技術基準、例えば、高圧ガス保安法や労働安全衛生法などに規定される技術基準に従って構造設計を行なう。

3.2 火災爆発に関する設計方針

原子炉施設では火災や爆発に対して十分な安全対策を取ることが要求されている⁽¹²⁾。既存の

原子炉施設では、原子炉施設の周囲に大量の可燃性物質を貯蔵しないことや、施設の周辺に潜在的な火災爆発の危険性を有する施設がない場所に原子炉を立地することなどにより、設計上大規模な火災や爆発の発生を考慮しないようにしている。そして、原子炉建家内部で発生しうる比較的小規模な火災のみを考慮して安全対策を施している。一方、HTTR 水素製造システムでは原料に天然ガスを使用して水素を製造する。すなわち、原子炉施設の周囲で大量の可燃性物質を取り扱う。従って、施設周囲で大規模な火災や爆発が発生しうることを想定した安全対策が必要となる。

原子炉施設に適用される安全対策の基本的な考え方は深層防護であり、発生防止、拡大防止、影響軽減の3方策からなる。従って、HTTR 水素製造システムでもこの深層防護の考えに基づいて火災・爆発に対する安全対策を設ける。

発生防止の観点から最も重要な安全対策は可燃性物質の漏えい防止対策である。そのため、可燃性物質を内包する機器は十分な強度を有するように設計するとともに、誤操作や誤動作により可燃性物質が漏えいしないような系統構成とする。また、漏えいが起こっても火災爆発に至らないようにする対策も重要である。可燃性物質が漏えい後に空気と混じりあい可燃性の混合気(蒸気雲)を形成し、この蒸気雲に着火すると火災や爆発が発生する。蒸気雲が燃焼するためには燃焼下限界濃度以上の濃度が必要であることから、蒸気雲が早期に希釈されるように蒸気雲が滞留しにくいような設備配置とする。また、蒸気雲の着火源となるような電気設備や動的機器を防爆仕様として厳重に管理する。

拡大防止の観点からは、可燃性物質の漏えいを早期に検知し、漏えいを停止する対策が必要である。そのため、漏えいする物質の特性を考慮して適切な漏えい検知装置を設置するとともに、緊急遮断弁等により漏えい箇所を隔離して漏えい量を抑制する。さらに、機器内部で爆発が起こらないように系統内に残留している可燃性物質を安全に処理できるようにする。

影響軽減の観点からは、万一火災や爆発が発生した場合でも、周囲の健全な機器が破損しないように、火災による輻射熱や爆発による爆風圧を十分低減するために安全上必要な距離を設備間で確保できるように機器を配置する。

火災爆発対策に係わる安全機能は非常に重要である。そこで、これらに関連する機器の設計クラスは他の設備より高く設定することとし、安全機能の重要度はクラス2に、耐震クラスはC(S₂)に分類する。ここで、C(S₂)とは、構造評価上はCクラスで設計されるが、設計で考慮している最大の地震力である限界地震力S₂に対して気密性を維持できることを確認することをいう。

HTTR に隣接して設置される水素製造プラントは上記の設計方針に従って火災や爆発に対する安全対策が施される。ところが、事故シナリオを詳しく検討した結果、原子炉建家内部に可燃性ガスが流入して火災爆発を引き起こすおそれがあることから、さらに原子炉建家内部への可燃材ガス流入事象に対して設計方針を定める必要がある。

HTTR と水素製造プラントは2次ヘリウム配管で接続される。何らかの原因により2次ヘリウムと可燃性ガスの圧力境界を形成する改質器触媒管(第4章を参照)が破損すると、高圧の可燃性ガスが2次ヘリウム配管内に流入する。さらに原子炉建家内部で2次ヘリウム配管が破損すると、可燃性ガスが原子炉建家内部に流入する。可燃性ガスが原子炉建家に流入することは、原子炉の安全確保の観点から非常に大きな問題となる。ところで、触媒管や2次ヘリウム配管は耐圧

部材であることから、適切な安全余裕を有するように設計が行なわれるはずである。従って、触媒管の破損により2次ヘリウム系の圧力がわずかに上昇したとしても、この事象に起因して2次ヘリウム配管が破損する確率は非常に小さい。一方、耐震性に関しては、2次ヘリウム系の圧力バウンダリを形成する機器の耐震クラスはCであることから、設計で考慮している地震力以上の地震が発生した場合にはこれらの機器が同時に破損することを想定しなければならない。そこで、可燃性ガスと2次ヘリウムの圧力バウンダリを形成する改質器反応管、並びに、原子炉建家内部の2次ヘリウム圧力バウンダリを構成する機器の耐震クラスをC(S₂)に分類し、想定される最大の地震力に対して気密性を確保することとし、同時破損による原子炉建家内への可燃性ガス流入を防止する。

3.3 運転制御性に関する設計方針

IHXから供給される2次ヘリウムは905℃で水素製造プラントに供給され、150℃でIHXに戻される。ところで、HTTRでは1次ヘリウム温度の変動を厳しく制限しており、原子炉圧力容器の健全性を確保する観点から原子炉入口部で定格状態の395℃から15℃上昇したら原子炉がスクラムする。IHXの熱容量や1次PWCから戻るヘリウムガスとのミキシング効果を考慮すれば2次ヘリウム温度が変化しても1次ヘリウム温度が即時に大きく変動することはない。しかし、安全設計の観点からは2次ヘリウム温度に対しても一定の許容変動幅を規定しておく必要がある。そこで、保守的に2次ヘリウムに対しても1次ヘリウムと同様に温度上昇に対して15℃を許容変動幅と規定する。

一方、1次ヘリウム温度が低下すると原子炉の温度係数により反応度が添加され、原子炉出力が上昇する。HTTRでは定格状態より12%上昇したら原子炉がスクラムする。この場合、1次ヘリウム温度に対して明確な制限値は規定されていないが、安全審査における解析では原子炉入口温度が約150℃低下しても出力増加量は7%程度であり原子炉はスクラムしない。従って、1次ヘリウムの温度低下に対する許容変動幅は上昇に対する許容値ほど厳しくない。そこで、HTTR水素製造システムの設計方針としては、温度上昇と温度低下の両者を比較して保守的な値を採用することとし、2次ヘリウムの温度低下に対する許容変動幅を15℃とする。

ところで、水蒸気改質反応はアレニウス型の温度依存性を示すことから、温度上昇に伴い指数関数的に反応が進行するため、反応に必要な熱も急速に増加する。それに対してHTTRの起動時の温度上昇速度は、出力30%から定格状態までの間、原子炉出口で約15℃/h、入口で約5℃/hとなっている。2次ヘリウム温度は1次ヘリウム温度に比例して上昇する。熱を供給する側のHTTRの温度特性と熱を消費する側の水蒸気改質反応の温度特性は図3.1のように大きく異なる。そのため、水素製造プラントの起動時にはこの温度特性の違いを考慮し、2次ヘリウムの冷却不足や過冷却を引き起こさないように原料ガス供給量を制御する必要がある。また定格運転時においても、原料供給量が変動すると水蒸気改質反応で消費する熱量が大きく変動する。その結果、改質器出口ヘリウム温度が変動し、この変動がIHXまで伝播すると原子炉がスクラムするおそれがある。

原料ガスの供給量を制御する設備の設計クラスは一般設備であり、信頼性も高くない。従って、ある程度の頻度で原料ガス流量制御異常が発生することを想定する必要がある。そこで、水蒸気

改質反応で消費する熱量が変動した場合に、その温度変動を抑制し、IHX 入口 2 次ヘリウム温度を所定の温度 (150°C) に制御するための設備を 2 次ヘリウム系に設置する。この設備の安全機能は水素製造プラントの運転を継続するための機能であり、原子炉の安全性に直接関連する機能でないことから、安全上の重要度はクラス 3 である。

3.4 トリチウムに関する設計方針

HTTR の炉心部では、燃料の三体核分裂反応の他に、黒鉛中に含まれる Li、制御棒中に含まれる B 及び冷却材ヘリウムの中性子吸収反応によりトリチウムが定常的に生成されている。このトリチウムは 1 次ヘリウム中を循環し、大部分はヘリウム純化設備の水素除去装置において除去される。しかし、純化設備の容量は 200kg/h であり、時間あたりの純化量は 1 次ヘリウムインベントリの約 1/4 である。そのため、微量のトリチウムは IHX 伝熱管を透過して 2 次ヘリウム中に移行し、さらに改質器反応管を透過して成ガス中に混入してしまう。

ところで、HTTR 水素製造システムでは製造した水素は貯蔵せず、燃焼処理する計画となっている。そのため、水素中に混入したトリチウムは HTO として大気に放出される。従って、このトリチウムにより一般公衆の被ばく量のリスクが著しく増加してはならない。

現在、運転中に HTTR から放出されるトリチウムによる周辺公衆の被ばく量は $0.015 \mu\text{Sv/y}$ と極僅かである⁽¹³⁾。また、大洗研究所敷地周辺の一般公衆の年間被ばく量は $13 \mu\text{Sv/y}$ と評価されている。そこで、水素製造システムから環境に放出されるトリチウムにより一般公衆の被ばく量が著しく増加しないように適切な対策をとる必要がある。

定格運転時のトリチウム移行量を評価したところ、2 次ヘリウム純化設備の容量を現在の 10kg/h から 200kg/h に増強することにより、水素中のトリチウム量は最大でも $90\text{Bq/g}\cdot\text{H}_2$ となる⁽¹⁴⁾。この水素を燃焼し、高さ 20m のスタックから放出することにより、200m 以上離れた敷地境界における被ばく量は $0.7 \mu\text{Sv/y}$ 以下となる。現在の HTTR から放出されるトリチウムによる被ばく量から若干増加するものの、大洗研究所全体における一般公衆の年間被ばく量の増加量はわずかである。従って、HTTR 水素製造システムにおいては 2 次ヘリウム純化設備容量を適切に見直して、一般公衆の被ばく量が増加しないようにする。

4. 系統設計

HTTR に接続する水蒸気改質水素製造プラントの主系統構成を図 4.1 に示す。水素製造プラントは大きく以下の 6 系統に分けられる。

- ① 2 次ヘリウム系
- ② 原料ガス供給系
- ③ 水蒸気供給系
- ④ 後処理系
- ⑤ 不活性ガス供給系
- ⑥ ユーティリティ系

この 6 系統について機器構成、機能等について説明し、定格運転状態におけるプラント全体のヒートバランスを示す。

4.1 2 次ヘリウム系

2 次ヘリウム系は HTTR の 2 次冷却設備であるとともに、水素製造に必要な熱を供給する系統でもある。本系統は図 4.2 に示すように改質器、蒸気過熱器（水蒸気供給系）、蒸気発生器（水蒸気供給系）、ヘリウム冷却器、ヘリウム循環機から成る。さらに、ヘリウム配管の原子炉格納容器貫通部には隔離弁が設置される。

IHX に接続された 2 次ヘリウム配管は格納容器を貫通し、原子炉建家内の配管敷設スペースを通過して建家外部に導かれ、さらに HTTR 原子炉建家と水素製造プラントを結ぶ配管トレンチを通過して水素製造プラントに接続される。最も高温の熱を必要とするのは水蒸気改質反応であることから、2 次ヘリウム配管は最初に改質器に接続される。IHX から改質器までの配管長は約 80m と長いことから、配管からの放熱や二重管内での低温ヘリウムとの熱交換により 2 次ヘリウム温度は 905℃ から 880℃ まで低下する。（第 5 章参照）改質器では 880℃ の 2 次ヘリウムを熱源として原料ガス（水蒸気と天然ガスの混合ガス）を 800℃ 以上に昇温する。改質器を出た 2 次ヘリウムは原料の過熱蒸気を生成するため、蒸気過熱器、蒸気発生器の順に熱を供給する。

水素製造プラントの系統圧力は、改質器触媒管に負荷される圧力が常に内圧状態となるように胴側を流れる 2 次ヘリウム圧力より高圧に設定することとし、改質器で 4.3MPa に設定した。そして、蒸気発生器から改質器までの系統圧損を考慮して、蒸気発生器で生成する蒸気圧力は 4.9MPa に設定した。このとき、蒸気発生器内の保有水温度は 264℃ となることから、2 次ヘリウムは 270℃ 程度までしか冷却できない。HTTR 水素製造システムでは、第 2 章で述べた理由から IHX 入口 2 次ヘリウム温度を 150℃ にしなければならない。2 次ヘリウムの熱を有効に利用する観点からは、この熱を利用して蒸気発生器の給水を予熱することも可能であるが、実用プラントでは蒸気発生器を出た 2 次ヘリウムは直接 IHX に戻されると考えている。そこで、HTTR で開発する運転制御技術が汎用性をもてるように、蒸気発生器下流には水素製造に関係する機器は設置せず、ヘリウム冷却器により約 130℃ まで冷却する。そして、ヘリウム循環機によるポンプ入熱、二重管内での高温ヘリウムからの入熱により 150℃ まで昇温されて、IHX に戻る。

4.2 原料ガス供給系

原料ガス供給系は液化天然ガス (LNG) の形で貯蔵されている天然ガスを気化、脱硫し、水蒸気供給系から供給される過熱蒸気と混合して所定の温度で改質器に供給するための系統である。本系統は、図 4.3 に示すように LNG タンク、LNG ポンプ、LNG 蒸発器、脱硫器、原料ガス加熱器から成る。安全設計方針で述べたように原料として使用する天然ガスは可燃性物質であり、原子炉施設の近傍で大量に取り扱うことから、他の設備より高い安全性を確保するために特別な対策を施している。

LNG タンクは LNG の大量漏えい防止の観点から、地下式メンブレンタンクを採用する。本タンクは地下埋設されていることからタンクが破損しても LNG が周囲の漏えいすることはなく、タンク内圧も常圧であることから、配管破損時に内部から LNG が噴出することはない。従って、異常時にはポンプによる LNG の汲み上げを停止することで LNG の漏えいを防止できる。

タンクから LNG を汲み上げ、LNG 供給圧力を 4.5MPa まで昇圧するため、ロータリー式ポンプを直列に 2 機設置する。ロータリー式ポンプを採用することにより、ポンプの脈動の発生を抑制できるので、サージタンクを設置する必要はない。LNG は LNG 蒸発器で気化された後、脱硫器で触媒の活性を低下させる硫黄が除去される。気化・脱硫された天然ガスは水蒸気供給系から供給される蒸気と混合され、原料ガス加熱器で生成ガスの排熱を利用して 450°C まで昇温された後、改質器に供給される。

HTTR 水素製造システムでは製造した水素の精製及び貯蔵は行なわない。すなわち、生成ガスはフレアスタックにより燃焼処理する。運転中、フレアスタックは常時点火されている必要があり、そのための種火が必要となる。LNG タンクは断熱タンクであるが、大気からのわずかな入熱により LNG はわずかに蒸発している。そこで、この蒸発した天然ガス (ボイルオフガス) を種火用のガスとして利用する。更にボイルオフガスが不足した場合に備えて、LNG 蒸発器で気化された天然ガスの一部も種火として利用する。

原料ガス供給配管が破損した場合の天然ガスの漏えい量を抑制するため、LNG タンクと蒸発器の間、蒸発器と脱硫器の間、並びに、脱硫器と原料ガス加熱器の間に緊急遮断弁を設置する。ガス漏えいが検知された場合には緊急遮断弁が作動して漏えい箇所を隔離し、漏えい個所以外の区画から漏えい箇所への天然ガスの流入を防止し、漏えい量を抑制する。

4.3 水蒸気供給系

水蒸気供給系は水蒸気を生成、供給する系統である。本系統は、図 4.4 に示すように蒸気発生器、蒸気過熱器、放熱器、給水予熱器、給水バイパス冷却器、ブロー蒸気冷却器、凝縮水冷却器、ドレン水冷却器、水精製器、脱気装置、薬液注入装置、給水タンク、純水タンク、給水ポンプ及び純水ポンプから成る。

純水製造装置で製造された水は給水タンクに送水される。そして、水精製器で微量に含まれる Ca や Na イオン等を除去し、脱気装置で溶存酸素を除去する。また、蒸気発生器に供給される水の水質は JIS により厳しく制限されており、pH については弱アルカリ性とすることが求められている⁽¹⁵⁾。必要に応じて薬液注入装置からアンモニア水を注入し、水質を調節する。所定の水質に調整された水は純水タンクに貯蔵される。

純水タンクから蒸気発生器に供給する水は給水予熱器で約 190℃まで昇温する。蒸気発生器では 4.9MPa、264℃の蒸気を生成するが、生成蒸気は湿り蒸気なので、蒸気過熱器により 400℃まで昇温して過熱蒸気とする。そして、過熱蒸気は原料ガス供給系に供給され、天然ガスと混合された後に改質器へ供給される。

安全設計方針では、運転制御性の向上のために IHX 入口 2 次ヘリウムの温度変動を±15℃以内に制御することを安全目標に設定し、それを満足するための設備を設けることとした。著者らは蒸気発生器固有の特性に着目し、蒸気発生器を用いて温度変動を緩和することを考えた。すなわち、蒸気発生器は圧力が一定ならば飽和水温度も一定であり、伝熱面積が十分確保されていればヘリウム温度が変化しても蒸気発生量が増減することで温度変動分を吸収でき、蒸気発生器出口のヘリウム温度をほぼ一定に保つことができる。そして、蒸気発生器に放熱器を接続し、発生蒸気を凝縮してこの凝縮水を給水として再利用することにより、定格運転時の給水不足を回避する。さらに、蒸気発生器及び放熱器は蒸気や冷却空気が自然循環することで受動的安全性を高める設計とする。

放熱器は蒸気圧力の制御のためにも利用し、定格流量の 5%程度の蒸気を常に供給する。そして、過渡的に改質器の運転を停止する必要がある場合には蒸気全量を放熱器に供給する。蒸気は放熱器で凝縮され、凝縮水は凝縮水冷却器で 50℃程度まで冷却された後に給水タンクに戻される。

蒸気発生器では保有水の水質を維持する観点から、給水流量の 1%をブローラインから廃棄する。蒸気発生器からブローされる水は高温であるため、ドレン水冷却器で 50℃以下に冷却する。廃棄される水は定期的にサンプリングして水質を検査する。

水素製造システムの起動方法は、蒸気圧力が定格に達し、改質器の温度が所定の温度に達した後、予め系統内に充填されている窒素ガスと置換しながら蒸気を改質器に供給する。しかし、工業用触媒として広く使用されているニッケル触媒は長時間水蒸気に晒されると酸化して触媒性能が低下する。そのため、天然ガスの供給を開始するまでは水蒸気を改質器に供給できない。一方、蒸気過熱器は蒸気が供給されないと伝熱管温度が高くなり、合理的な設計を行なえない。そこで、改質器への蒸気供給条件が整うまでは蒸気過熱器へ供給された蒸気は過熱器出口から回収する。過熱器出口から回収された蒸気はブロー蒸気冷却器で凝縮され、給水タンクに戻される。

4.4 後処理系

後処理系は改質器で生成されたガス（生成ガス）を冷却して生成ガス中に含まれる蒸気を凝縮した後、ガス成分をフレアスタックで燃焼処理するとともに、凝縮水を給水として再利用するために給水タンクへ送水する系統である。また、起動停止時には不活性ガス系から供給される窒素ガスを用いて系統内の圧力を制御する。本系統は、図 4.5 に示すように生成ガス冷却器、セパレータ、水封ドラム、フレアスタック、窒素ガスコンプレッサから成る。

生成ガスは水素のほかに未反応の天然ガス及び水蒸気、反応副生物である一酸化炭素及び二酸化炭素の混合ガスで、改質器出口部での温度は 600℃程度である。そこで、この排熱を有効に利用し、原料ガスの予熱及び蒸気発生器の給水の予熱を行なう。給水を予熱した後の生成ガスは生成ガス冷却器で冷却してガス中の水蒸気を凝縮し、セパレータにて気液分離を行なう。凝縮水はセパレータから水蒸気供給系の給水タンクに送り、給水として再利用する。ガス成分は系統内への

空気進入を防止するために設けた水封ドラムを経て、フレアスタックで燃焼処理する。フレアスタックの種火は LNG タンクのボイルオフガスを使用するが、異常時のバックアップとして LPG ボンベから供給できるラインも用意しておく。

起動時のヘリウムガス温度が低い状態では改質器に原料ガスを供給できないので、供給条件が確立するまでは窒素ガスにより水素製造プラントの系統圧力を制御する。窒素ガスはセパレータと水封ドラムの間から回収され、所定の圧力まで窒素ガスコンプレッサにおいて昇圧され、原料ガス供給系の脱硫器と原料ガス予熱器の間から供給される。この窒素ガスは起動停止時には常時循環している。

4.5 不活性ガス供給系

不活性ガス供給系は起動停止時には系統圧力を維持するために、緊急時には系統内に残留している可燃性ガスをパージするために窒素ガスを供給する系統である。本系統は LN₂ タンク、LN₂ ポンプ、LN₂ 蒸発器及び窒素ガスサージタンクから成る。

タンクローリーから供給された液体窒素は LN₂ タンクに貯蔵され、LN₂ ポンプにて約 19.6MPa まで昇圧した後、LN₂ 蒸発器で気化し、窒素ガスサージタンクに充填する。この窒素ガスを昇圧する LN₂ ポンプは間欠運転とし、サージタンク圧力が低下した場合に自動起動して蒸発器に送液し、サージタンクの圧力を所定の圧力まで上昇させる。

起動停止時には原料ガス系の原料ガス加熱器の上流から窒素ガスを系統内に供給する。供給された窒素ガスは後処理系のセパレータと水封ドラムの間から回収され、系統内を循環する。そして、圧力制御のために圧力制御弁からわずかに系外に放出される分を常時補給する。

緊急時にはパージラインから窒素ガスを供給し、系統内に残留している天然ガスをフレアスタックから大気放出する。

4.6 ユーティリティ系

水素製造プラントのユーティリティとして冷却水供給設備、圧縮空気供給設備、電気設備がある。

冷却水供給設備は、各系統に設置された冷却器や LNG 蒸発器、液体窒素蒸発器で使用する冷水を供給する設備である。本設備は、クーリングタワー、ろ過水タンク、薬液注入設備、冷却水ポンプ及びろ過水ポンプから成る。

圧縮空気供給設備は、空気作動弁に作動用高圧空気を供給する設備である。本設備は空気貯槽及び空気圧縮機から成る。

電気設備は、水素製造プラントに必要な電力を供給する設備である。本設備は常用電源設備、非常用電源設備及び無停電電源設備から成る。常用電源設備には構内の中央変電所から電力を供給する。非常用電源設備は常用電源設備の異常時に水素製造プラントを安全に停止するために必要な機器に電力を供給する設備であり、非常用発電機から電力を供給する。無停電電源設備は異常時に非常用電源設備から電力が供給される間の停電を保証するための設備であり、蓄電池から計測設備や重要度の高い安全機能を有する機器に電力を供給する。

4.7 ヒートバランスの設定

HTTR 水素製造システムのヒートバランスを設定するにあたり、IHX から供給される 10MW の熱を改質反応と蒸気生成でどのような割合で利用するのが最も効果的か明らかにするため、改質器出口ヘリウム温度並びに蒸気と天然ガスの供給割合 (S/C) をパラメータとして水素製造量を評価した。評価モデルを図 4.6 に示す。本解析では以下の 8 項目を入力条件とした。なお、第 5 章で詳しく述べるが、改質器は熱を有効に利用し、水素製造性能向上の観点から、バイオネット型の触媒管を採用しており、生成ガスと原料ガスの熱交換を触媒管内部で行なう構造となっている。

- ① 反応温度：800℃
- ② 改質器入口ヘリウム温度：880℃
- ③ 改質器入口原料ガス温度：450℃
- ④ 蒸気過熱器出口蒸気温度：400℃
- ⑤ 蒸気発生器入口給水温度：190℃
- ⑥ 蒸気発生器出口蒸気温度：264℃
- ⑦ 蒸気発生器出口ヘリウム温度：275℃
- ⑧ 蒸気発生器のブロー蒸気量は定格の 5%

改質器出口ヘリウム温度をパラメータとして、S/C を変化させた時の蒸気発生量と水素製造量を図 4.7 に示す。S/C を大きくすると必要水蒸気量は多くなる。一方、改質器出口ヘリウム温度を低くすると蒸気生成に使用する熱量が低下し、水蒸気が不足する場合が発生する。水素製造量を見ると、改質器出口ヘリウム温度が低い方が改質反応に多くの熱量を使用できるので、水素製造量が増加する。

今回サーベイした範囲では、S/C を 3.5、改質器出口ヘリウム温度を 585℃としたときに水素製造製造量が 4240Nm³/h と最大になる。この時の天然ガス供給量は 1400kg/h、蒸気供給量は 5612kg/h である。そこで、この条件を採用してシステム全体のヒートバランスを設定した。HTTR 水素製造システムの定格運転時のヒートバランスを図 4.8 に示す。

5. 機器設計

第4章では系統構成及び定格運転時のヒートバランスを設定した。そこで、このヒートバランスを基に設計仕様を定めた。

5.1 2次ヘリウム系

2次ヘリウム系の主要機器の設計仕様を表5.1に示す。ヘリウム冷却器は一般的な水冷却器を採用し、2次ヘリウム循環機はHTTRで使用している循環機を流用する。2次ヘリウム配管の格納容器貫通部に設置する隔離弁のうち高温配管に設置する弁は、現在開発試験を実施中であり、その結果を基に詳細構造を定めることとしている。蒸気発生器及び蒸気過熱器は水蒸気供給系で詳しく説明する。そこで、本節ではヘリウム配管及び改質器の構造について検討した結果を示す。

(1) ヘリウム配管

ヘリウム配管の設計上要求される機能は想定される温度及び圧力の変化に耐え、IHXから供給される905℃の2次ヘリウムをできる限り高温で改質器へ輸送することである。2次ヘリウムは4.0MPaと高圧であることから、圧力バウンダリが高温になると健全性を確保するために必要な最小板厚は非常に厚くなる。従って、高温のヘリウムガスが流れる配管に対しては、合理的な板厚とするために内部断熱構造を採用して配管温度を低くする対策をとっている。

高温ヘリウム配管としては単管と二重管の2つの構造が考えられる。単管は構造がシンプルである反面、圧力バウンダリには4.0MPaの圧力が負荷される。また、周方向の温度不均一や断熱材のサポート部で局所的な温度上昇が生じ、構造設計的には厳しい条件となる。一方、二重管は内側を高温ヘリウムが、外側を低温ヘリウムが流れる。従って、高温ヘリウムが流れる内管は、高温ヘリウムと低温ヘリウムの差圧が負荷されるのみである。また、低温ヘリウムにより強制的に冷却されるので、配管温度も低温となる。そこで、格納容器貫通部、IHX接続部、改質器接続部など二重管構造が採用できない箇所を除き、2次ヘリウム配管は二重管とする。

二重管及び単管において必要な断熱材厚さを定めるため、以下の条件で断熱材厚さをパラメータとして、ヘリウム温度低下量及び配管温度を計算した。

- ① ヘリウムの流速は40m/s以下となるようにライナー内径を220mmに設定する。
- ② 高温側のヘリウム温度は905℃、低温側のヘリウム温度は150℃一定とする。
- ③ 断熱材の熱伝導率を1.7kJ/mh℃とする。
- ④ 管外面の自然対流による熱伝達率は42kJ/m²h℃、外気温度は40℃とする。
- ⑤ 二重管の長さは60m、内管の板厚はスケジュール40とする。
- ⑥ 単管の長さは40m、板厚はスケジュール60とする。

配管からの放熱量を図5.1に、単管の表面温度を図5.2に示す。断熱材厚さが厚くなると放熱量や表面温度は低下するが、配管径が大きくなる。配管を合理的に設計する観点から、あまり配管口径が大きくなるのは好ましくない。そこで、配管サポートや隔離弁からの放熱量を5℃と見積もり、断熱材の厚さは全配管からの放熱量が20℃以下になるように設定する。その結果、断熱材の厚さは150mm以上必要となる。ライナー内径、ライナー厚さ(5mm)及び断熱材厚さを積

算すると、配管内径は約 530mm となる。そこで、耐圧部材となる二重管の外管及び単管は安全余裕をとり、板厚を 1 クラス大きくすることとし、二重管の内管は 22BSch40 (外径 558.8mm、厚さ 15.9mm)、外管は 28BSch80 (外径 711.2mm、厚さ 36.0mm) とし、単管は 24BSch80 (外径 609.6mm、厚さ 31.0mm) とする。

また、単管の表面温度は約 270℃ となり、ホットスポットや周方向の温度不均一を考慮しても構造健全性を十分確保できる温度に抑えられる。

二重管及び単管の基本的な構造を図 5.3 及び図 5.4 に示す。

(2) 改質器

改質器は 2 次ヘリウムを熱源とし、原料ガスを 800℃ 以上に昇温して水蒸気改質反応により水素を生成するための機器である。改質器では球形や中空円筒形の工業用触媒を用いるが、この触媒を保持する必要があるため、触媒管内に触媒を充填し、管側に原料ガスが、胴側にヘリウムが流れる構造とする。また、触媒管は 880℃ の高温ヘリウムと接触しているため非常に高温となり、設計上クリープ損傷に対する考慮が必要となる。触媒管の内部圧力より外部圧力の方が大きく外圧状態となると、製作時のわずかな変形が大きなクリープ変形を生じるきっかけとなり、必要強度を確保するための板厚が厚くなる。そこで、クリープ損傷量を抑制するため、触媒管に加わる圧力が内圧状態になるように原料ガス圧力を 2 次ヘリウム圧力より 0.3MPa 程度高圧に設定した。また、触媒層出口の原料ガス温度は 800℃ 以上の高温であることから、この熱を有効に利用するためにバイオネット型の触媒管を採用した。

改質器では 880℃ の 2 次ヘリウムを利用して原料ガスを 800℃ 以上に昇温する。従って、触媒管は高温となり、材料も高価な耐熱合金を使用しなければならない。そこで、ヘリウム側からの熱伝達率を向上させて必要伝熱面積を小さくし、コンパクトな改質器を設計することが望ましい。

伝熱促進法として検討対象としたのはバッフル方式、ガイド管方式、フィン方式の 3 種類である。それぞれの熱伝達率を比較したところ、ガイド管は触媒管とのクリアランスを小さくすることにより容易にヘリウムの流速を高めることが可能であり、バッフル方式より熱伝達率を大きくすることが可能である。さらに、触媒管にフィン加工することにより表面積が増加し、乱流が促進されることで一層の伝熱促進が期待できる。そこで、触媒管は直交フィン付きガイド管方式を採用する。

触媒管内部には触媒が充填される。さらに、原料ガスと生成ガスの熱交換を行なうために内管が挿入される。内管に 2B (外径 60.5mm) の管を使用し、触媒の充填層厚さを 30mm 程度確保するため、触媒管の内径を 127.8mm に設定した。板厚については、暫定値として 9mm に設定し、疲労損傷及びクリープ損傷の簡易評価を行い、成立性を確認した。

図 5.5 (c) に示すモデルを用いて定格運転時の触媒管の温度分布を求めた。その結果を図 5.6 に示す。触媒管先端 (高温部) では最高 870℃ となる。一方、触媒管付け根 (高温度差) では、最高温度は 589℃ であるが温度差は 38℃ となり、先端の 17℃ に比べほぼ倍となる。起動停止時及び原子炉トリップ時に発生する最大ひずみは以下のとおりである。それぞれの想定回数を保守的に設定して疲労損傷を評価したところ、起動停止については許容回数が 10 万回以上であり、トリップについては 400 回となった。従って、疲労損傷係数は約 0.25 となり、許容値を十分下

回っている。

表 触媒管に発生するひずみ

	起動 (200回)	停止 (95回)	原子炉トリップ (100回)
先端	0.00021	0.00021	0.0020
付け根部	0.00068	0.00073	0.0016

次に、クリープ損傷の評価を行った。本評価では、触媒管の板厚の妥当性を確認することを目的としているので、評価手法を簡略化するため、HTTRの高温構造設計指針ではなく、ASME Section III Division 1 の評価手法に従った。結果を図 5.7 に示す。クリープ損傷量は先端部及び付け根部でそれぞれ 0.00495 及び 0.00306 となった。疲労損傷とクリープ損傷の和は約 0.26 であり許容値 1 に対して十分小さいことから、通常運転状態においては板厚 9mm で触媒管の健全性を確保できることがわかった。

一方、水素製造プラントで原料ガスや水蒸気の漏えいにより圧力が低下すると触媒管にはヘリウム圧力 4.0MPa が外圧として作用する。そこで、板厚をパラメータとして外圧クリープに対する変形量を評価した。本評価では製作誤差として外径の最大値と最小値の差が最大 2mm あると仮定し、この扁平によりクリープ座屈が発生するとした。評価結果を図 5.8 に示す。水素製造プラントの系統圧力が低下し、触媒管に著しい圧力が負荷される場合、原子炉は緊急停止する。この時、2次ヘリウム系の強制冷却機能は喪失することから、2次ヘリウム系の温度及び圧力は成り行きとなるが、これまで実施された HTTR の定格運転時の原子炉スクラム試験結果では IHX2 次ヘリウム出口温度はスクラム直後に 750℃から 560℃まで低下し、その後 340℃まで低下するのに 13 時間かかった。HTTR 水素製造システムでは運転温度が異なること並びに 2次ヘリウムガスインベントリが異なることから、HTTR の試験結果と同じ挙動を示すとは限らない。そこで、保守的に初期の温度低下を考慮せず、13 時間で 2次ヘリウム温度が 220℃低下すると仮定する。700℃まで温度が低下するとクリープひずみ速度は 900℃の場合の 10^{-4} となり、クリープ変形量は非常に小さく無視できるレベルとなる。温度低下時間の不確定性を考慮して、事故後 50 時間外圧が作用しても大きな変形を起こさないことを安全目標に設定し、触媒管板厚を 13mm とした。

触媒管表面には高さ 2mm、幅 2mm、ピッチ 2mm のフィンを設け、触媒管とガイド管の間隙は 5mm とする。このときのヘリウムガスから原料ガスへの熱通過率を求め、熱交換に必要な伝熱面積から触媒管の長さを設定する。ガイド管付き直交フィンの熱伝達率は Kundsen の式⁽¹⁶⁾、伝熱管内部の触媒層の熱伝達率は八木・国井の式⁽¹⁷⁾を用いて計算した。その結果、触媒管の表面熱伝達率は 1620W/m²K、内表面の熱伝達率は 720W/m²K となる。触媒管に使用する Hastelloy XR の熱伝導率は 24W/mK であるのでヘリウムガスから原料ガスへの熱通過率は 153W/m²K となる。ヘリウムガスと原料ガスの対数平均温度差は 105℃、交換熱量は 13.9GJ/h であるので、必要伝熱面積は 240m²となる。ここで、20%伝熱余裕を考慮して設計伝熱面積を 288m²と設定し、触媒管本数を 37 本、長さを 6.8m とした。

改質器の構造図を図 5.9 に示す。

5.2 原料ガス供給系

原料ガス供給系の主要機器の設計仕様を表 5.2 に示す。

LNG タンクは定格流量の天然ガスを 3 日分貯蔵できるように容量を 100t に設定した。形式は常圧貯蔵型地下メンブレン式タンクを採用した。構造図を図 5.10 に示す。本体は鉄筋コンクリート製で、その内側に保冷材とメンブレンが設置される。地下式タンクの場合、LNG が気化する際に地熱を吸収し、周辺地盤が凍結する。この地盤凍結は、地盤の強度および水密性の向上というメリットと土圧による本体への荷重増加というデメリットがある。そのため、周辺の凍結領域を制限するためにヒータを設置する。

LNG ポンプは標準仕様品の遠心式サブマージド型を採用した。ポンプの必要 NPSH を確保するためインタンク式とポット式の 2 機を直列に設置する。LNG 蒸発器は一般的なシェルアンドチューブ式の熱交換器で、チューブ側に LNG を、胴側に冷却水を流す。活性炭脱硫器は円筒容器を採用し、活性炭の充填、取り出し用のマンホールを設けている。原料ガス加熱器は一般的なシェルアンドチューブ型の熱交換器で、チューブ側に原料ガスを、胴側に生成ガスを流す。

5.3 水蒸気供給系

水蒸気供給系の主要機器の設計仕様を表 5.3 に示す。

蒸気発生器は定格運転時には温度 264℃、流量 5612kg/h の蒸気を蒸気過熱器に、流量 234kg/h の蒸気を放熱器に供給するとともに、2 次ヘリウム温度を 275℃まで冷却する。定格運転時の熱交換容量は約 3.3MW である。それに対して、改質器の除熱能力喪失時には 880℃のヘリウムガスが流入し、これを定格運転時のヘリウム出口温度 275℃より +15℃以内に温度変動を抑制できるように伝熱面積を設定する必要がある。このときの必要熱交換量は約 7.7MW である。この両方の除熱容量を満足できるように、伝熱面積を 136m²とした。形式は機器サイズをコンパクトにする観点から蒸気ドラムを有したサーモサイホン式を採用し、伝熱管形式は胴径を小さくできることから直管式とした。構造図を図 5.11 に示す。

蒸気過熱器は 264℃の飽和蒸気から 400℃の過熱蒸気を生成する。また、改質器の除熱機能喪失時には高温の 2 次ヘリウムが流れてくることから、伝熱管の設計温度は 900℃としている。そこで、高温時の熱膨張による熱ひずみの発生を低減するために、ヘリカルコイル式の伝熱管を採用するとともに、伝熱管群の周方向への熱膨張を拘束しないように伝熱管のサポートにスライド機構を設けた。胴部には内部断熱材を取り付けて外胴の温度上昇を抑制する。構造図を図 5.12 に示す。

放熱器は蒸気発生器から送られてくる飽和蒸気を冷却して凝縮水にする。本システムでは受動的安全性を高める観点から自然通風型の放熱器を採用した。従って、冷却に必要な空気を自然通風するために高さ約 11m のダクトを設けている。放熱器は改質器の除熱機能喪失時に蒸気発生器で生成される蒸気を凝縮できるように、冷却容量は約 7.7MW として伝熱管のサイジングを行なった。構造図を図 5.13 に示す。

この他の冷却器は一般的なシェルアンドチューブ式熱交換器を採用した。

5.4 後処理系

後処理系の主要機器の設計仕様を表 5.4 に示す。

HTTR 水素製造システムでは生成した水素は燃焼処理するのでフレアスタックを設置している。フレアスタックには高所で燃焼するエレベーターフレアスタックと地上で燃焼するグランドフレアスタックがある。エレベーターフレアスタックはスタック頂部から火炎が立ち上るため、フレアスタックの位置および高さを決める際にその直下の地表面におけるふく射熱が $17\text{MJ}/\text{m}^2\text{h}$ 以下とすることが求められている⁽¹⁸⁾。それに対してグランドフレアスタックはスタック内部でガスを燃焼するため安全設計上要求される基準はなく、火炎が立ち上らないため安全性に勝っている。そこで、本システムではグランドフレアスタックを採用した。

生成ガス冷却器は一般的なシェルアンドチューブ型熱交換器で管側に生成ガスを、胴側に冷却水を流す。セパレータ及び水封ドラムは一般的な円筒容器容器である。

5.5 不活性ガス供給系

不活性ガス供給系の主要機器の設計仕様を表 5.5 に示す。

不活性ガス供給系は、通常の起動停止に必要な窒素ガス量と、緊急停止時に系統内をパージするために必要な窒素ガス量の両者を満足する量を供給できるように機器の容量を設定した。この窒素ガス容量は液体窒素換算で約 63m^3 となる。LN₂ タンク 1 基でこの容量を賄うように設計すると規格品を使用できず、新たに機器を設計する必要が生じる。そこで、設備を合理化する観点から、できる限り規格品を使用できるように 2 基並列に設置して必要容量を賄うこととする。

LN₂ タンクの容量は 40m^3 とし、LN₂ ポンプの定格流量は $5\text{m}^3/\text{h}$ とした。サージタンクは水素製造プラントの商用電源喪失時に非常用電源により LN₂ ポンプが起動するまでの間、系統の圧力維持に必要な窒素ガスを供給できるように容量を 7.5m^3 に設定した。

5.6 ユーティリティ系

ユーティリティ系の主要機器の設計仕様を表 5.6 に示す。

通常運転時に 1 時間당りに必要な冷却水量は 2 次ヘリウム系で 104m^3 、原料ガス供給系で 26m^3 、後処理系で 135m^3 、水蒸気供給系で 138m^3 、不活性ガス供給系で 64m^3 であり、総量 $467\text{m}^3/\text{h}$ である。そこで、クーリングタワーの容量を $500\text{m}^3/\text{h}$ とした。また、冷却材を循環させるポンプは予備機を含めて 2 機設置し、ポンプトリップ時には予備機を自動起動することにより連続運転を行なえるようにした。

圧縮空気を使用する弁の総数は 47 台で必要流量は約 $30\text{m}^3/\text{h}$ である。これを賄うため、圧縮機の容量は $1.55\text{m}^3/\text{min}$ (約 $90\text{m}^3/\text{h}$)、貯蔵は 0.7m^3 の容器で常時 0.7MPa の圧力を保持することにより約 50m^3 の空気を貯蔵できるようにした。

水素製造プラントでは常用電力として約 2000kVA の電力を消費している。商用電源喪失時に安全機能を維持する必要がある不活性ガス供給設備や冷却水供給設備のポンプには非常用発電設備から電力が供給される。これらの機器の電気負荷を考慮して非常用発電設備の定格容量を 1000kVA とした。また、計測制御設備には非常用発電設備の電圧が確立するまでの間、機能喪失しないように 10 分間電力を供給できるように定格出力 30kVA の無停電電源装置を設置する。

6. まとめ

高温ガス炉は原子炉出口で 950℃と非常に高温のヘリウムガスを供給できることから、幅広い分野での利用が期待されている。原研では、日本初の高温ガス炉である HTTR の高温核熱を用いて水素製造を実証するためのシステムの研究開発を進めている。HTTR に接続する水素製造プラントは、技術が成熟している天然ガスの水蒸気改質法を選択し、一般プラントにおける運転条件などを参考に、システム構成やヒートバランスを検討した。

水素製造プラントは IHX から供給される 2 次ヘリウムガスを熱源とすることから、2 次 PWC の撤去、加圧水冷却設備の運転条件の変更などが必要となるが、新たな設備追加や大幅な改造なく水素製造を行なえることが分かった。また、水素製造効率を高めるため IHX 出口 2 次ヘリウム温度の高温化について検討し、現状の 869℃から 905℃まで温度を高めても IHX 伝熱管の健全性に大きな影響を与えず達成可能であることから、HTTR 水素製造システムのヒートバランスは 905℃の 2 次ヘリウムが供給される条件で設定した。

水素製造プラントは原子炉側から見ると 2 次ヘリウム系の冷却設備に位置付けられることから、基本的な設計クラスは安全機能の重要度はクラス 3 に、耐震クラスは C、機器種別は一般機器に分類される。ただし、火災爆発対策に関連する機器の安全機能の重要度はクラス 2 に、耐震クラスは C(S2)に分類することとした。また、運転制御性の観点から、水蒸気改質器で発生しうる温度変動に対して IHX 入口 2 次ヘリウム温度の許容変動幅を±15℃と暫定し、この温度変動を改質器下流に設置する蒸気発生器で緩和することとした。

この設計方針に基づいて、水素製造プラントの系統設計及び機器設計を行なった。水素製造プラントはその機能により、2 次ヘリウム系、原料ガス供給系、水蒸気供給系、後処理系、不活性ガス供給系及びユーティリティ系の 6 つの系統に分け、それぞれの系統毎に機器構成、必要な機能を明確にし、系統設計を行なった。そして定格運転状態のヒートバランスを設定した。このヒートバランスに従って各機器のサイジングを行ない、主要機器の設計仕様を定めた。特に重要な機器であるヘリウム配管と改質器については詳細な検討を行ない、各部の寸法を定めた。

今後は、制御設備の設計及び動特性解析、各機器の強度評価及び詳細構造の検討、安全解析、配置設計などを順次実施していく予定である。

謝辞

本報告書をまとめるに当たり懇切丁寧なご指導を受け賜りました核熱利用研究部塩沢周作部長、同小川益郎次長、同部高温機器開発試験グループ稲垣嘉之リーダーに感謝の意を表します。本システムの概念構築に際して御協力いただいた ITER 開発室羽田一彦氏、高温工学試験研究炉開発部 HTTR 技術開発室柴田大受氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) "Climate Change 2001 The Scientific Basis", edited by J. T. Houghton et al., Cambridge University Press (2001)
- (2) "新エネルギー・データ集"、エネルギー、103-143 (1999)
- (3) 朝比奈、他、名古屋工業技術研究所報告、43、282-295 (1994)
- (4) "高温工学試験研究の現状"、日本原子力研究所 (1998)
- (5) "水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) 第Ⅱ期研究開発 タスク 1 システム評価に関する調査・研究"、NEDO-WE-NET-0001、p 274-319 (2001)
- (6) "燃料電池実用化戦略研究会報告"、燃料電池実用化戦略研究会、(2001)
- (7) Tsuruoka K., et al., Trans. ISIJ, 23, 1091 (1983)
- (8) "TOPSO topics", HALDOR TOPSOE A/S (1993)
- (9) "発電用軽水型原子力施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針"、大成出版社 (2000)
- (10) "発電用原子力施設に関する耐震設計審査指針"、大成出版社 (2000)
- (11) "解説原子力設備の技術基準"、電力新報社 (1994)
- (12) "発電用軽水型原子力施設の火災防護に関する審査指針"、大成出版社 (2000)
- (13) "日本原子力研究所大洗研究所原子炉設置変更許可申請書"、日本原子力研究所 (1989)
- (14) 西原 他、原子力誌, 41, p571-578 (1999)
- (15) "ボイラの給水及びボイラ水の水質"、JIS B 8223 (1999)
- (16) "熱交換器設計ハンドブック"、尾花英朗、工学図書、p 674 (1994)
- (17) "伝熱工学資料 改訂第 2 版"、p 175 (1966)
- (18) "コンビナート等保安規則関係基準"、高圧ガス保安協会、p64 (1994)

表 2.1 HTTR の主要諸元

Reactor	
Thermal power	30MW
Coolant	Helium gas
Outlet coolant temperature	850°C / 950 °C
Inlet coolant temperature	395°C
Primary coolant pressure	4MPa
Fuel	Low-enriched UO ₂
Fuel element type	Prismatic block
Moderator	Graphite
Heat removal system	Pressurized water cooler
	Intermediate heat exchanger
Plant lifetime	20 years

表 5.2 原料ガス供給系の主要機器の設計仕様一覧

LNG タンク		地下メンプレン式	
形式		温水式	横型
員数	1 基	1 基	
機器種別	機器種別外	機器種別外	
耐震クラス	C	C (S ₂)	
使用圧力	0.02 MPa	4.8 MPa / 0.1MPa	
使用温度	-164℃	-164℃ / 50℃	
容量	96t	302 kW	
主要寸法	胴体 内径/全高	31.3 m ²	
LNG ポンプ A		活性炭脱硫器	
形式		形式	触媒充填型円筒脱硫器
員数	1 機	員数	2 基
機器種別	遠心式サブマージド型、インタンク引抜型	機器種別	機器種別外
耐震クラス	C (S ₂)	耐震クラス	C (S ₂)
使用圧力	1.1 MPa	使用圧力	4.5 MPa
使用温度	-164℃	使用温度	40℃
容量	5 m ³ / h	容量	5.8m ³
揚程	250 m		
必要 NPSH	0.24 m	原料ガス加熱器	
		形式	シェル&チューブ型熱交換器
		員数	1 基
		機器種別	機器種別外
LNG ポンプ B		耐震クラス	C (S ₂)
形式		使用圧力 (管側/胴側)	4.35 MPa / 4.01MPa
員数	1 機	使用温度 (管側/胴側)	480℃ / 550℃
機器種別	遠心式サブマージド型、ポット型	設計交換熱量	1000 kW
耐震クラス	C (S ₂)	伝熱面積	95 m ²
使用圧力	4.8MPa	主要寸法	
使用温度	-164℃	胴 内径/ 板厚	Φ700 / 38mm
容量	5 m ³ / h	伝熱管外径/肉厚/本数/長さ	Φ18.4 / 3.5mm/ 160 本 U / 3.5 m STL
揚程	850 m	材料	
必要 NPSH	0 m	胴	SUS316
		伝熱管	SUS316 TB

表 5.3 水蒸気供給系の主要機器の設計仕様一覧 (1/3)

蒸気発生器		放熱器	
形式	水平サーモサイホン型熱交換器	形式	自然通風式空気冷却器
員数	1基	員数	1基
機器種別	第4種機器	機器種別	機器種別外
耐震クラス	C (S ₂)	耐震クラス	C
使用温度 (管側/胴側)	525℃ / 264℃	使用圧力 (管側/胴側)	4.9 MPa / 0.1MPa
使用圧力 (管側/胴側)	4.1 MPa / 4.9 MPa	使用温度 (管側/胴側)	264℃ / 50℃
使用交換熱量 (定格時/異常時)	3.27 MW / 7.72MW	設計交換熱量	7.72 MW
伝熱面積	136.18 m ²	伝熱面積	4268 m ²
主要寸法		伝熱管外径/肉厚/本数/長さ	Φ 25.4mm / 2.77 mm/ 640 本/3.55m
胴内径/板厚	Φ 1050 / 40mm	伝熱管材料	STBA10
伝熱管外径/肉厚/本数/長さ	Φ 31.8 / 4mm/ 199 本 / 6900mm		
主要材料			
胴	SGV480		
伝熱管	STBA23		
汽水ドラム	SGV480		
蒸気過熱器			
形式	縦置きヘリカルコイル型熱交換器	形式	シェル&チューブ型熱交換器
員数	1基	員数	1基
機器種別	第4種機器	機器種別	機器種別外
耐震クラス	C (S ₂)	耐震クラス	C
使用圧力 (管側/胴側)	4.9 MPa / 4.1MPa	使用圧力 (管側/胴側)	5.2 MPa / 3.2MPa
使用温度 (管側/胴側)	405℃ / 580℃	使用温度 (管側/胴側)	190℃ / 350℃
設計交換熱量	0.67 MW	設計交換熱量	1.14 MW
伝熱面積	5.0 m ²	伝熱面積	14.12 m ²
外胴内径/板厚	Φ 1,300 / 35mm	主要寸法	
伝熱管外径/肉厚/本数/長さ	Φ 25.4 / 3.5mm/ 6 本/ 11.5m	胴 内径/板厚	Φ 337 / 25mm
材料		伝熱管外径/肉厚/本数/長さ	Φ 25.4 / 2mm/ 27 本/ 6.4m
外胴	SCMV3	主要材料	
伝熱管	ハステロイXR	胴	SCMV2
		伝熱管	STBA22

表 5.3 水蒸気供給系の主要機器の設計仕様一覧 (2/3)

給水バイパス冷却器		凝縮水冷却器	
形式	シェル&チューブ型熱交換器	形式	シェル&チューブ型熱交換器
員数	1基	員数	1基
機器種別	機器種別外	機器種別	機器種別外
耐震クラス	C	耐震クラス	C
使用圧力 (管側/胴側)	0.69 MPa / 4.9MPa	使用圧力 (管側/胴側)	0.69 MPa / 4.9MPa
使用温度 (管側/胴側)	50°C / 190°C	使用温度 (管側/胴側)	50°C / 170°C
設計交換熱量	0.09 MW	設計交換熱量	0.08 MW
伝熱面積	4.07 m ²	伝熱面積	4.95 m ²
主要寸法		主要寸法	
胴内径/板厚	Φ 248.8 / 9.3mm	胴内径/板厚	Φ 297.9 / 15mm
伝熱管外径/肉厚/本数/長さ	Φ 19 / 2mm / 19 本 / 3.4m	伝熱管外径/肉厚/本数/長さ	Φ 25.4 / 2.3mm / 14 本 / 4.2m
主要材料		主要材料	
胴	STPG410	胴	SB410
伝熱管	STB410	伝熱管	STB410
ブロー蒸気冷却器		ドレン水冷却器	
形式	シェル&チューブ型熱交換器	形式	シェル&チューブ型熱交換器
員数	1基	員数	1基
機器種別	機器種別外	機器種別	機器種別外
耐震クラス	C	耐震クラス	C
使用圧力 (管側/胴側)	0.69 MPa / 4.9MPa	使用圧力 (管側/胴側)	0.69 MPa / 4.9MPa
使用温度 (管側/胴側)	50°C / 405°C	使用温度 (管側/胴側)	50°C / 405°C
設計交換熱量	2.21 MW	設計交換熱量	0.21 MW
伝熱面積	18.23 m ²	伝熱面積	7.55 m ²
主要寸法		主要寸法	
胴内径/板厚	Φ 420 / 28mm	胴内径/板厚	Φ 305 / 20mm
伝熱管外径/肉厚/本数/長さ	Φ 25.4 / 3.5mm / 43 本 / 5.2m	伝熱管外径/肉厚/本数/長さ	Φ 19.05 / 2.6mm / 33 本 / 3.6m
主要材料		主要材料	
胴	SB410	胴	SB410
伝熱管	STB410	伝熱管	STB410

表 5.3 水蒸気供給系の主要機器の設計仕様一覧 (3/3)

水精製器		
形式	非再生式イオン交換型	
員数	1基+1基(予備)	横置き円筒型
機器種別	機器種別外	1基
耐震クラス	C	機器種別外
使用圧力	0.3 MPa	C
使用温度	50℃	0.2 MPa
容量	9 m ³ /h	50℃
		10m ³
脱気装置		
形式	膜脱気	純水ポンプ
員数	1基	形式
機器種別	機器種別外	員数
耐震クラス	C	機器種別
使用圧力	0.2 MPa	耐震クラス
使用温度	50℃	使用圧力
容量	9 m ³ /h	使用温度
		容量
		揚程
		必要 NPSH
		電動機出力
給水タンク		
形式	横置き円筒型	形式
員数	1基	員数
機器種別	機器種別外	機器種別
耐震クラス	C	耐震クラス
使用圧力	0.1MPa	使用圧力
使用温度	50℃	使用温度
容量	14m ³	容量
		揚程
		必要 NPSH
		電動機出力

表 5.4 後処理系の主要機器の設計仕様一覧

生成ガス冷却器		
形式	シェル&チューブ型熱交換器	
員数	1基	
機器種別	機器種別外	
耐震クラス	C (S ₂)	
使用圧力 (管側/胴側)	3.1 MPa / 0.69 MPa	
使用温度 (管側/胴側)	180°C / 50°C	
設計交換熱量	2,622 kW	
伝熱面積	82 m ²	
収容寸法		
胴内径/板厚	Φ 600 / 9mm(shell), 25mm(Channel)	
伝熱管外径/肉厚/本数/長さ	Φ 19.0 / 1.6mm / 458 本 U / 3.0 m STL	
材料		
胴	SUS304	
伝熱管	SUS304TP-S	
セパレーター		
形式	縦置き円筒型	
員数	1基	
機器種別	機器種別外	
耐震クラス	C (S ₂)	
使用圧力	3.1 MPa	
使用温度	50°C	
主要寸法		
胴体 内径	500mm(ガス出口部) / 1,500mm(滞留部)	
肉厚	36 mm	
直胴長さ	825mm(ガス出口部) / 2,650mm(滞留部)	
主要材料	SUS304	
フレスタック		
形式	グラウンドフレア式	
員数	1基	
機器種別	機器種別外	
耐震クラス	C (S ₂)	
使用圧力	大気圧	
使用温度	—	
燃焼能力	3,005kg/h + 飽和水分	
水封ドラム		
形式	縦型円筒容器	
員数	1基	
機器種別	機器種別外	
耐震クラス	C (S ₂)	
使用圧力	0.1 MPa	
使用温度	50°C	
胴体 内径/肉厚/長さ	Φ 4,000 / 8 mm / 3,200 mm	
全高	3,500 mm	
主要材料	SUS304	
N ₂ コンプレッサー		
形式	Y型1段水冷無給油式	
員数	1台	
機器種別	機器種別外	
耐震クラス	C (S ₂)	
使用圧力	4.35MPa G	
使用温度	70°C	
容量	5,000 N m ³ / h	
材料	ケーシング FCD450	
適用法規	高圧ガス保安法	
電動機出力	200 kW	

表 5.5 不活性ガス供給系の主要機器の設計仕様一覧

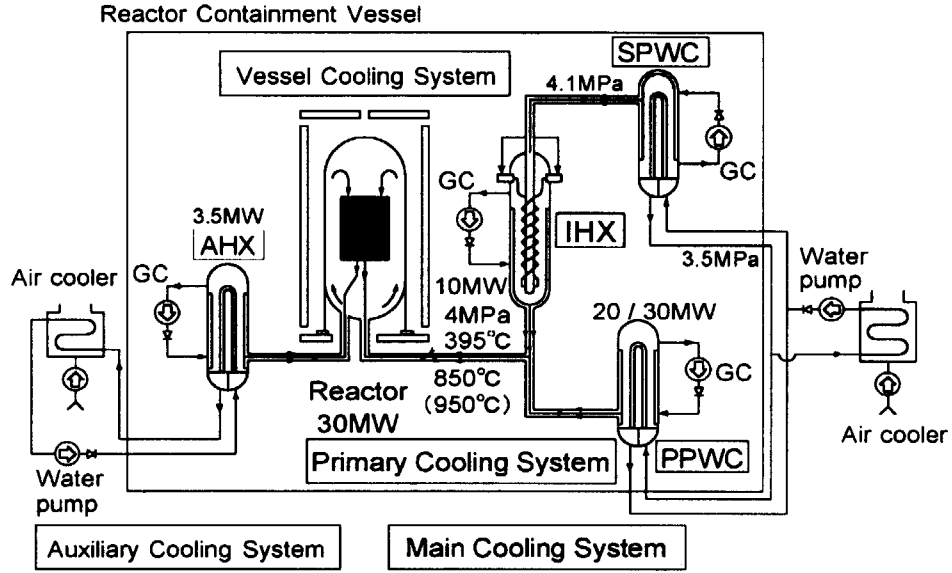
LN2 タンク	LN2 蒸発器
形式	温水式 縦型蒸発器
員数	2 基
機器種別	機器種別外
耐震クラス	C
使用圧力	19.6MPa / 0.1MPa
使用温度	-196°C / 50°C
容量	1.17 × 10 ⁵ kcal/h / 基
主要寸法	伝熱面積
胴体	16.24 m ² / 基
外径/全高	4,300 mm
材料	伝熱管外径/ 肉厚/ 本数/ 長さ
内槽/外槽	Φ 21.6 / 3.7 mm / 20 本 / 10.5 m
	SS400/ SUS316LTP
主要材料	
LN2 ポンプ	窒素ガスサージタンク
形式	形式
員数	長尺継目なし 高压容器
機器種別	1 基 (15 本組カートル)
耐震クラス	機器種別外
使用圧力	C
使用温度	19.6 MPa
容量	40°C
揚程	7.5 m ³ (0.5 m ³ x 15 本)
必要	366 / 17.7 mm
NPSH	7,500mm(L) x 2,900mm(W) x 1,800mm(H)
	材料 銅板
	SCM435
LN2 タンク	縦型円筒パーラライト真空断熱二重殻タンク
形式	2 基
員数	機器種別外
機器種別	C
耐震クラス	0.69 MPa
使用圧力	-196°C
使用温度	40m ³ / 基
容量	3,018mm O.D. / 9,980 mm
主要寸法	SUS 304/ SS400
胴体	
外径/全高	
材料	
内槽/外槽	
LN2 ポンプ	横型単筒往復式高压ポンプ
形式	2 基
員数	機器種別外
機器種別	C
耐震クラス	19.6MPa
使用圧力	-196°C
使用温度	5 m ³ / h
容量	250 m
揚程	2.0m
必要	
NPSH	

表 5.6 ユーティリティ系の主要機器の設計仕様一覧 (1/2)

クーリングタワー		冷却水ポンプ	
形式	開放式冷却塔	形式	横型片吸込うず巻型
員数	1基 (7ユニット)	員数	2基
機器種別	機器種別外	機器種別	機器種別外
耐震クラス	—	耐震クラス	—
使用圧力	大気圧	使用圧力	0.69 MPa
使用温度	42℃	使用温度	32℃
冷却能力	10,470 kW	容量	500 m ³ /h
流体	冷却水	揚程	70 m
流量	500 m ³ /h	必要 NPSH	5.0 m
入口温度 / 出口温度	50℃ / 32℃	電動機出力	160 kW
概略寸法	3,430mm(L) x 14,250mm(W) x 3,180mm(H)		
電動機 出力	5.5 kW/ユニット		
主要材料 構造材	SS400		
ろ過水ポンプ			
形式	横型片吸込うず巻型	形式	縦型円筒容器
員数	1基	員数	1基
機器種別	機器種別外	機器種別	機器種別外
耐震クラス	—	耐震クラス	—
使用圧力	0.69 MPa	使用圧力	0.83 MPa
使用温度	30℃	使用温度	60℃
容量	10 m ³ /h	容量	0.7 m ³
揚程	40 m		
必要 NPSH	3.0 m		
電動機出力	3.7 kW		
		空気圧縮機	
		形式	パッケージ型スクリーン圧縮機
		員数	1基
		機器種別	機器種別外
		耐震クラス	—
		使用圧力	0.69 MPa
		使用温度	40℃
		容量	1.55 m ³ /min
		電動機出力	11 kW

表 5.6 ユーティリティ系の主要機器の設計仕様一覧 (2/2)

非常用電源設備	
形式	屋内キュービクル式
員数	1基
原動機	ディーゼル機関
発電機 励磁方式	ブラシレス方式
定格電圧	440V
定格容量	1000 k VA
無停電電源装置	
形式	商用動機常時インバータ給電
員数	1基
蓄電池	小型シール鉛蓄電池
停電補償時間	10分
定格出力	30 k VA



IHX : Intermediate heat exchanger SPWC: Secondary pressurized water cooler
 PPWC: Primary pressurized water cooler AHX : Auxiliary heat exchanger

図 2.1 HTTR の主冷却系統構成

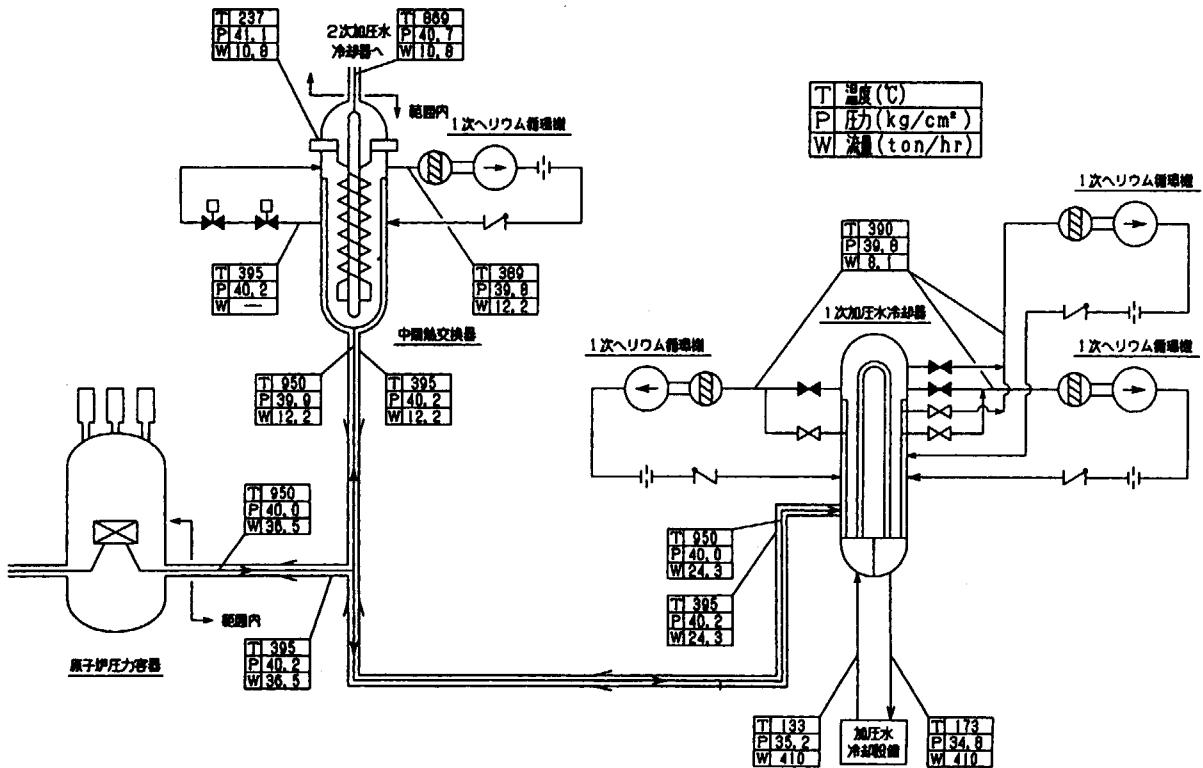


図 2.2 高温試験運転系列運転モードのヒートバランス

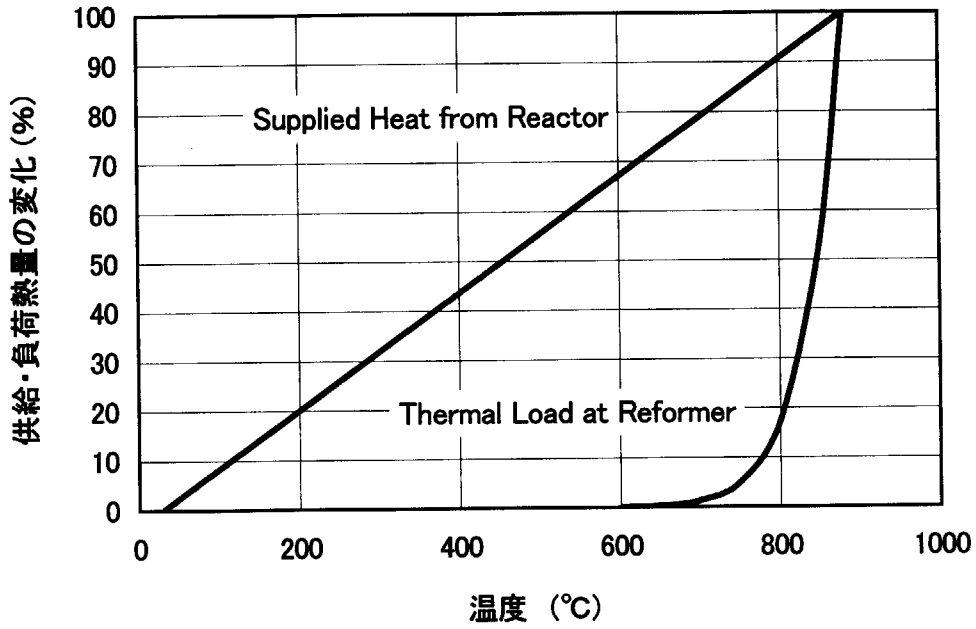


図 3.1 原子炉と水蒸気改質器の温度特性の相違

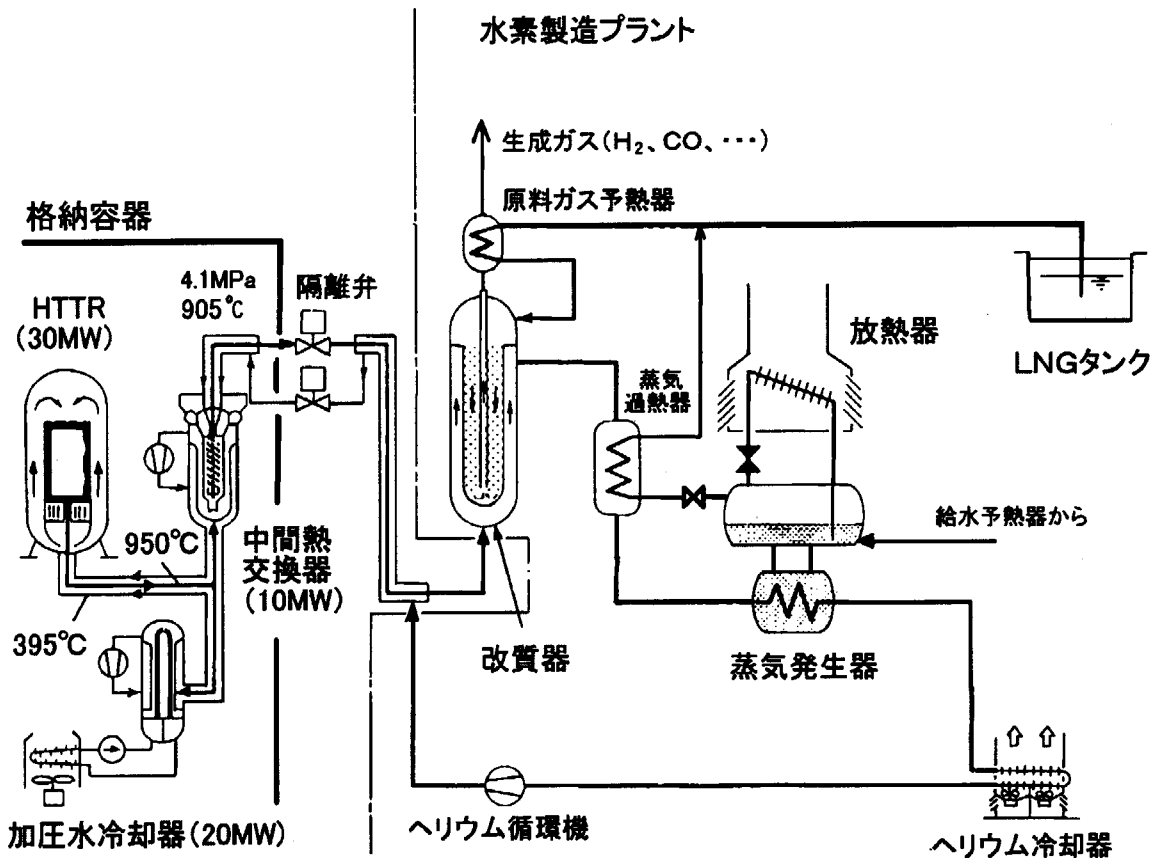


図 4.1 HTTR 水素製造システム主系統構成

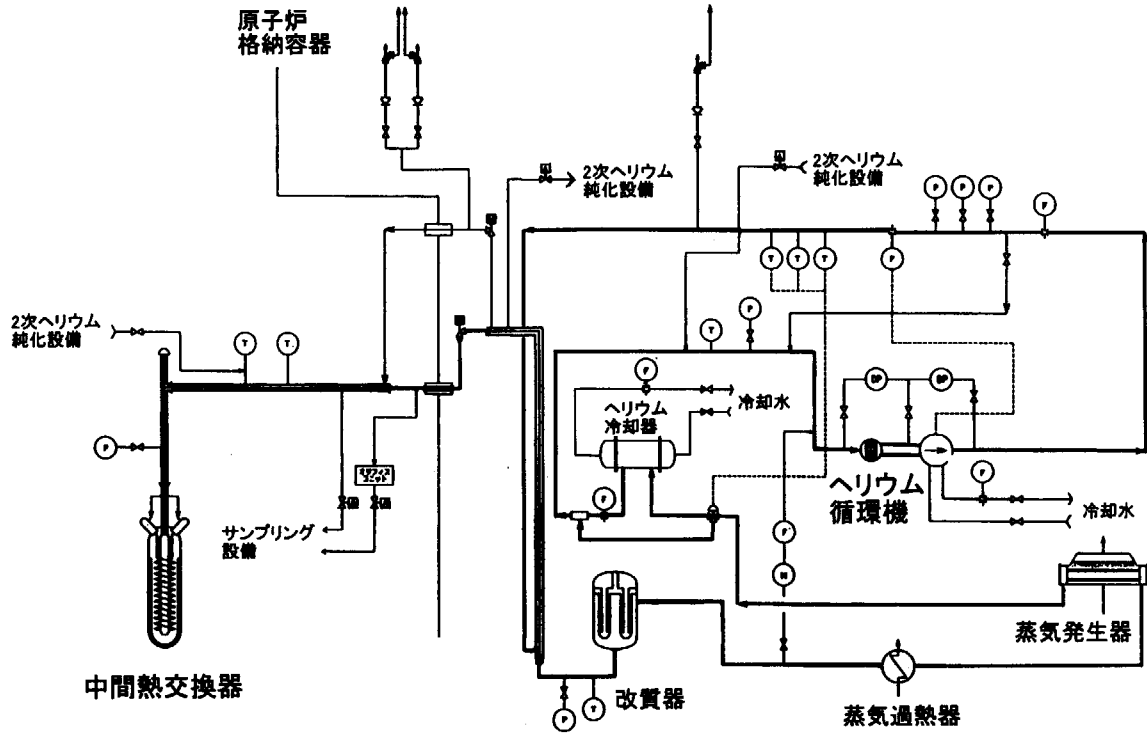


図 4.2 2次ヘリウム系の系統構成

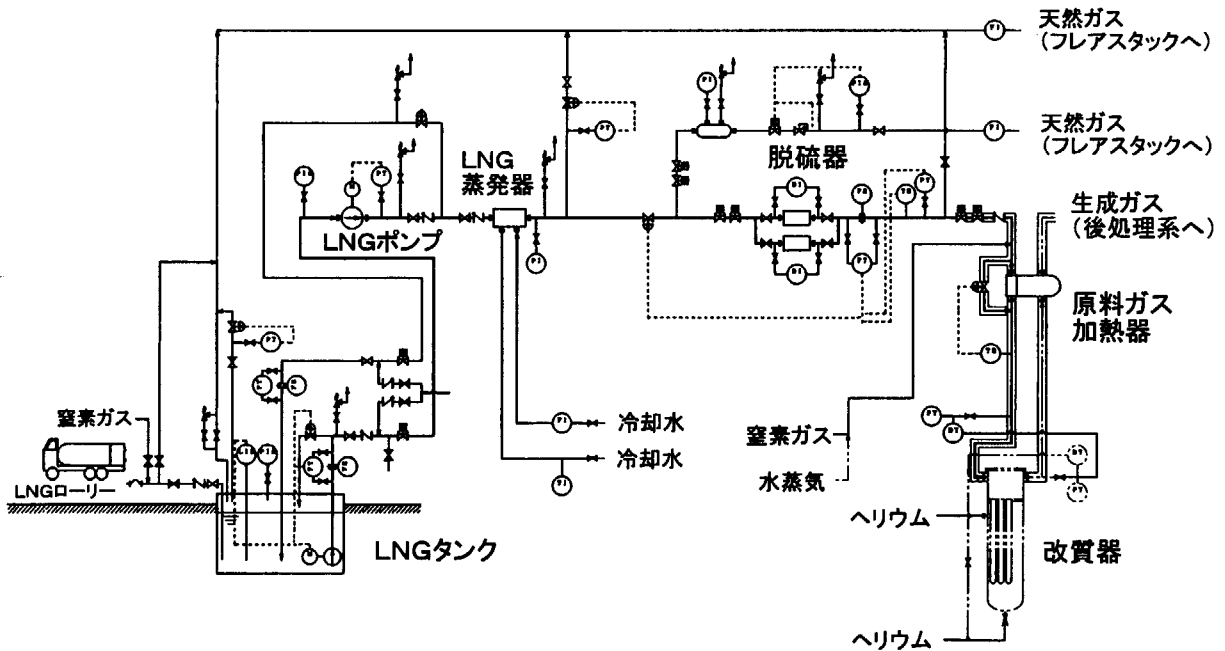


図 4.3 原料ガス供給系の系統構成

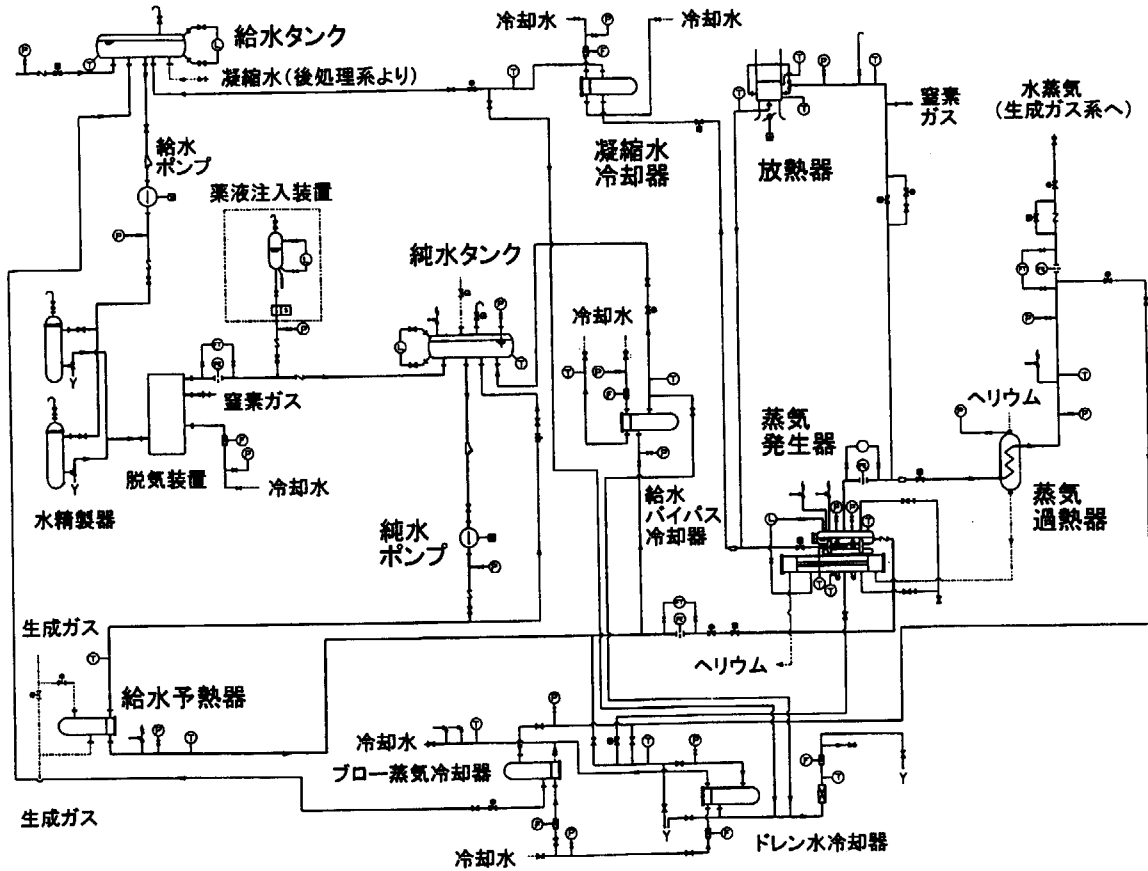


図 4.4 水蒸気供給系の系統構成

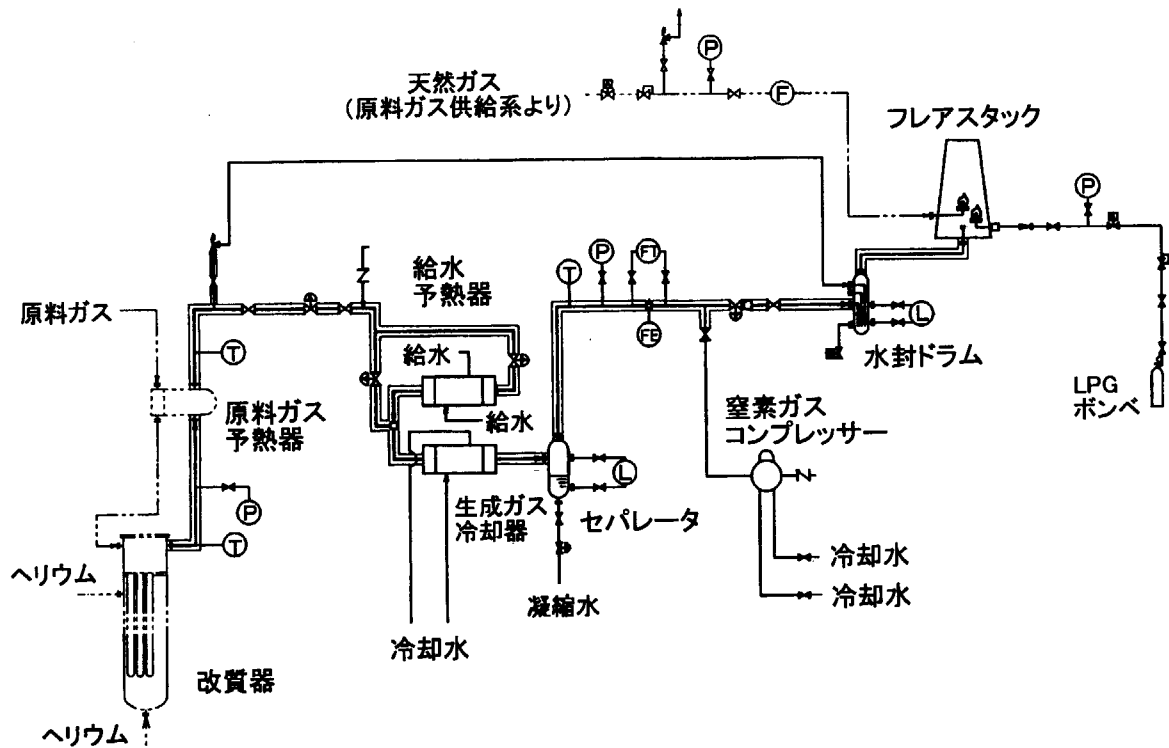


図 4.5 後処理系の系統構成

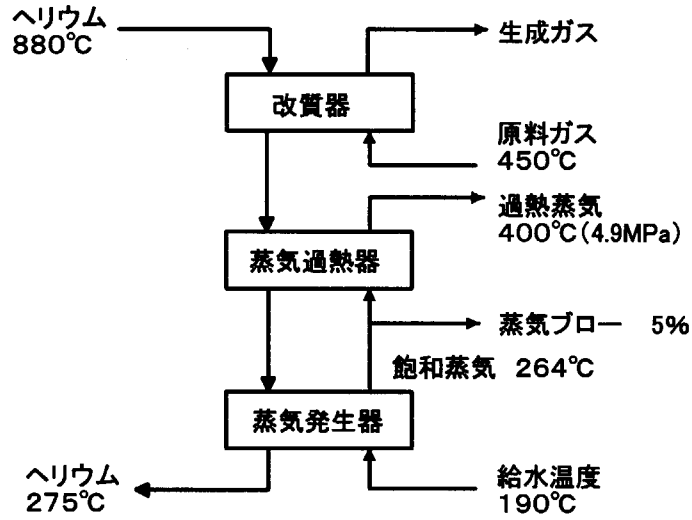


図 4.6 ヒートバランス評価モデル

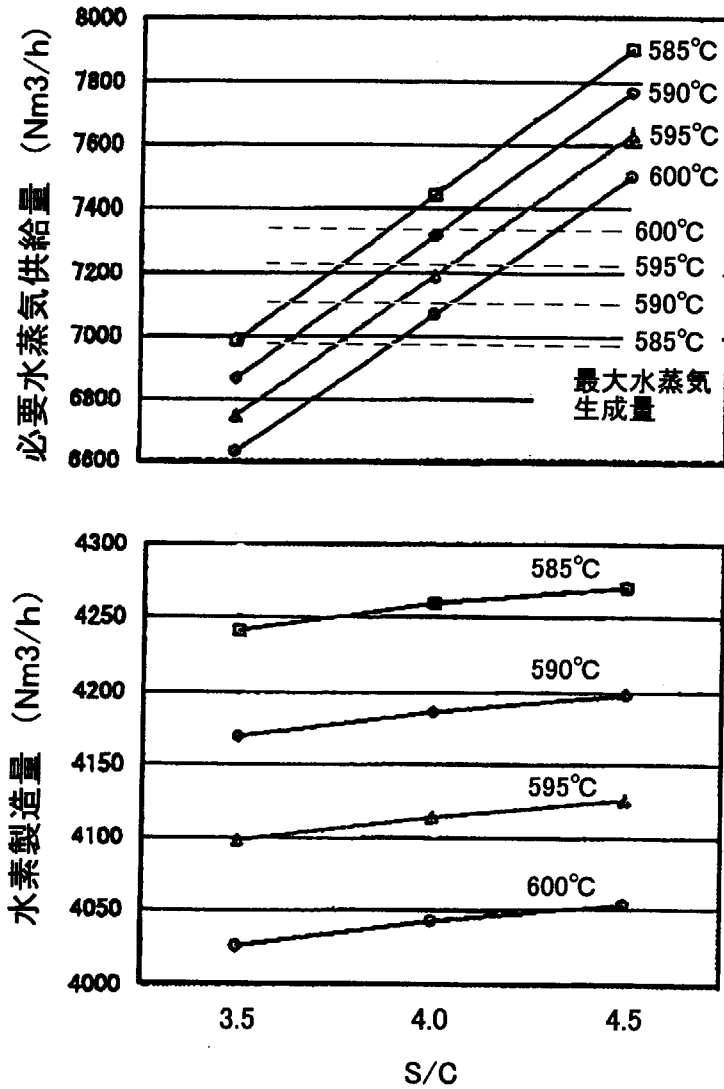


図 4.7 評価結果

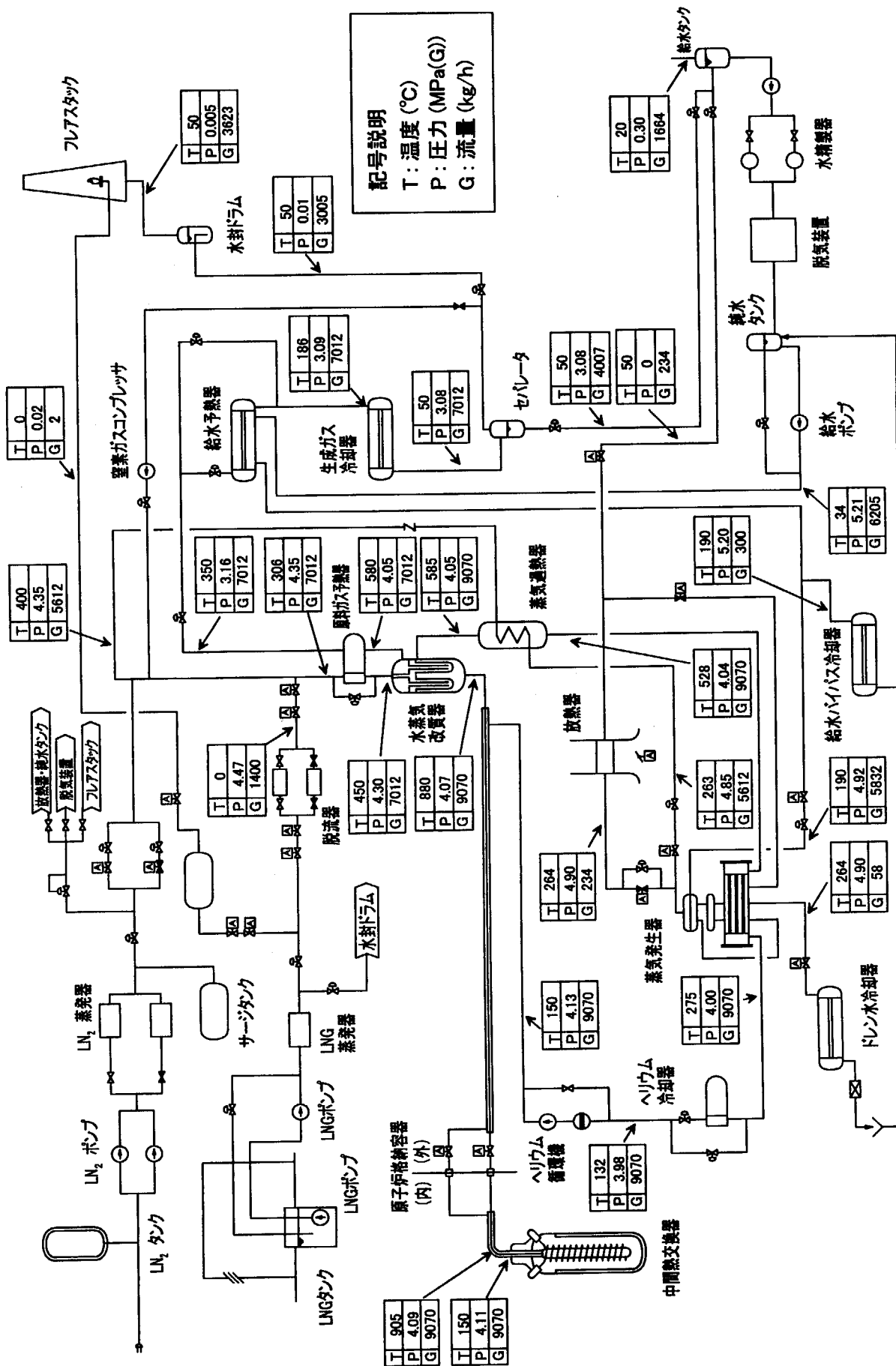


図4.8 HTTR水素製造システムのヒートバランス

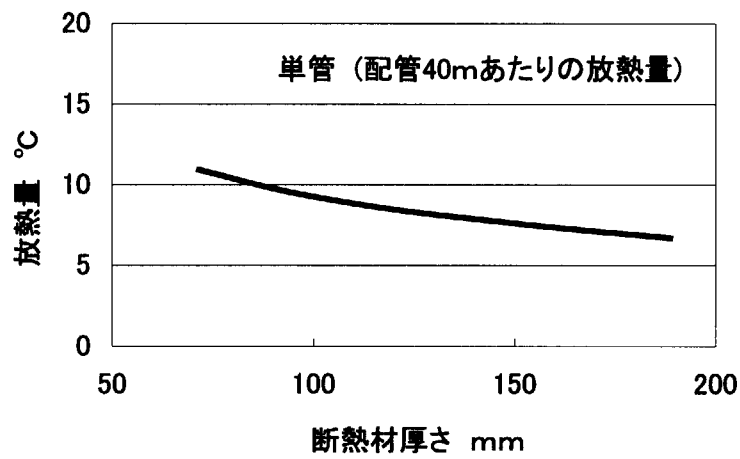
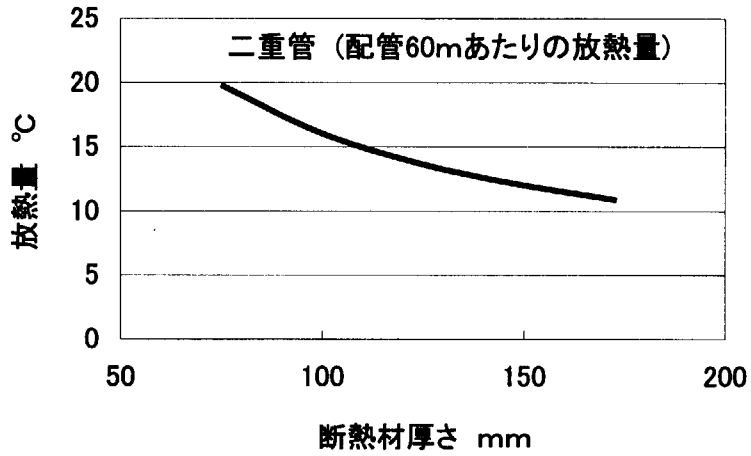


図 5.1 ヘリウム配管の放熱量評価結果

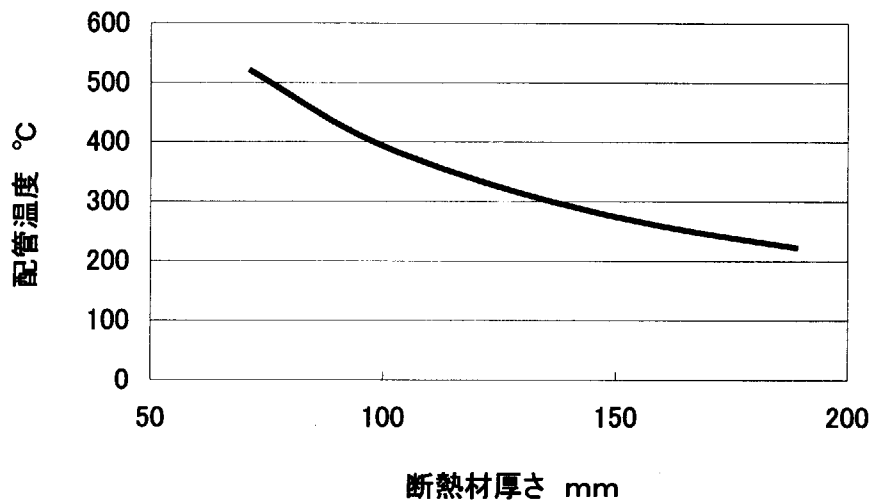


図 5.2 ヘリウム配管の表面温度評価結果

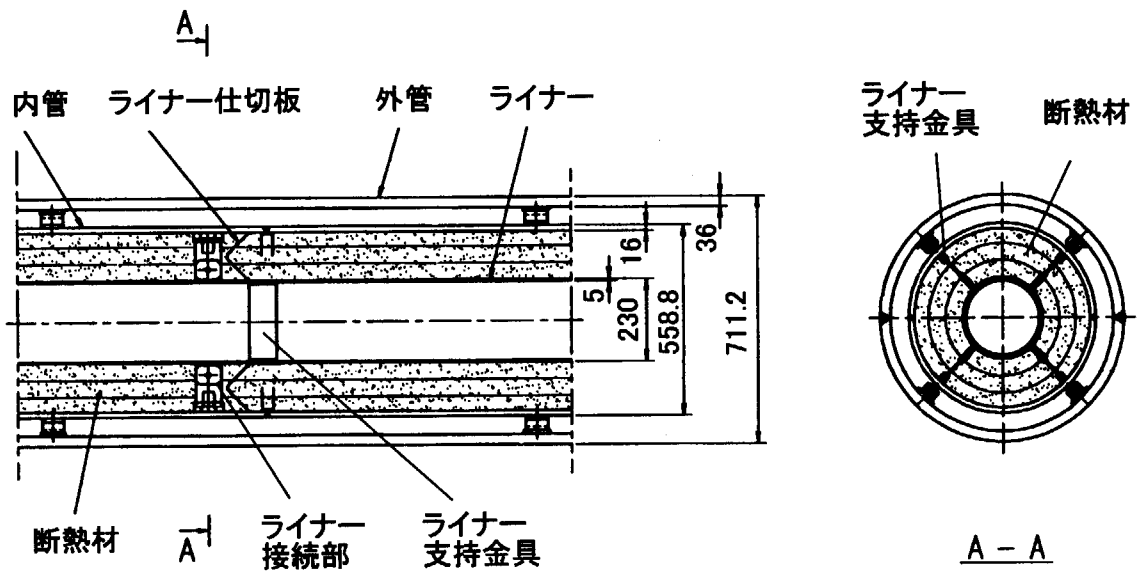


図 5.3 二重管の構造

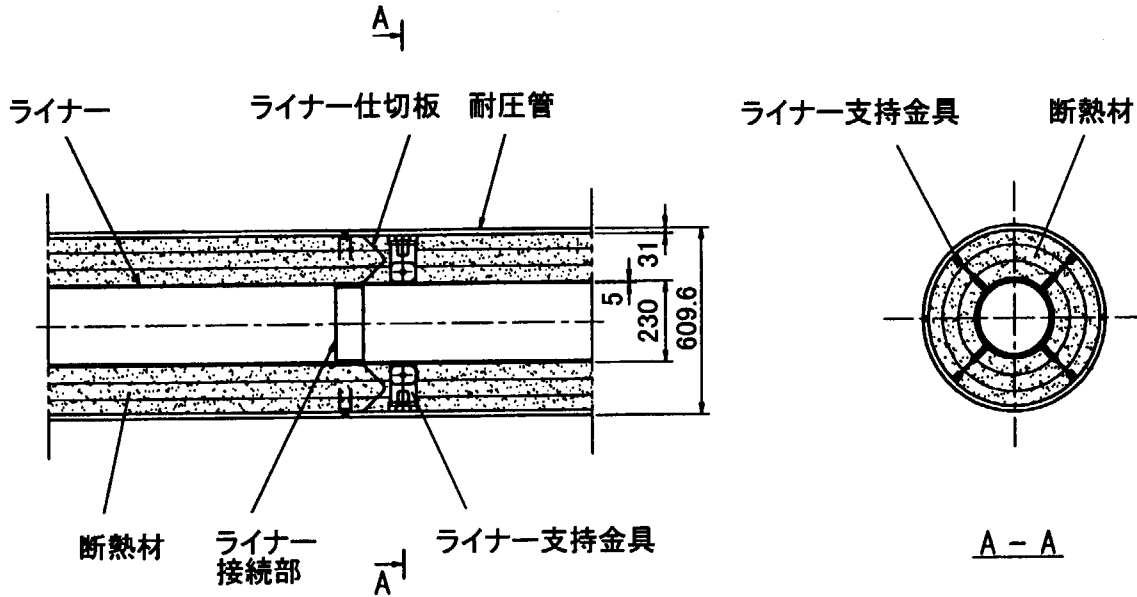
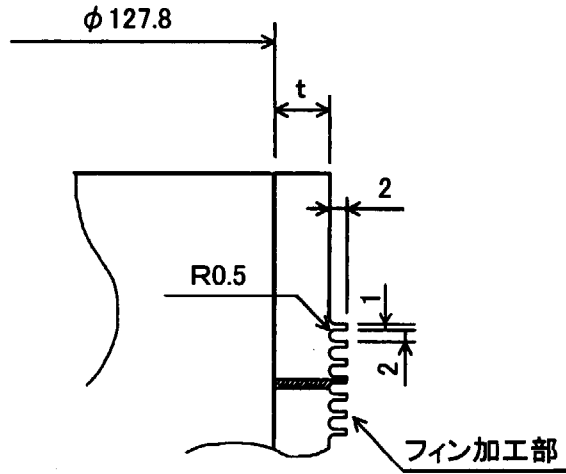
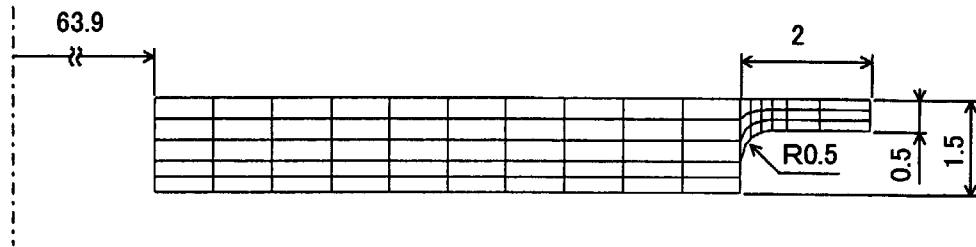


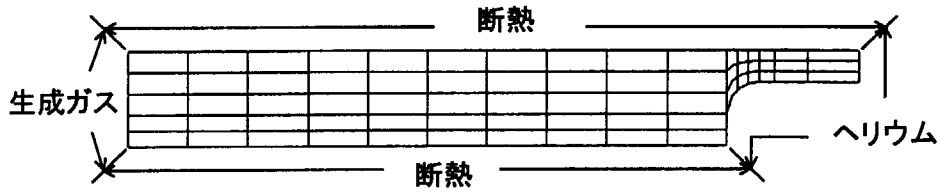
図 5.4 単管の構造



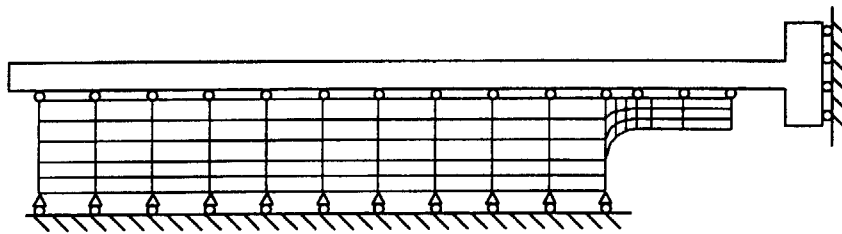
(a) 触媒管構造



(b) フィン加工部詳細



(c) 温度分布解析モデル



(d) 応力解析モデル

図 5.5 クリープ損傷評価モデル

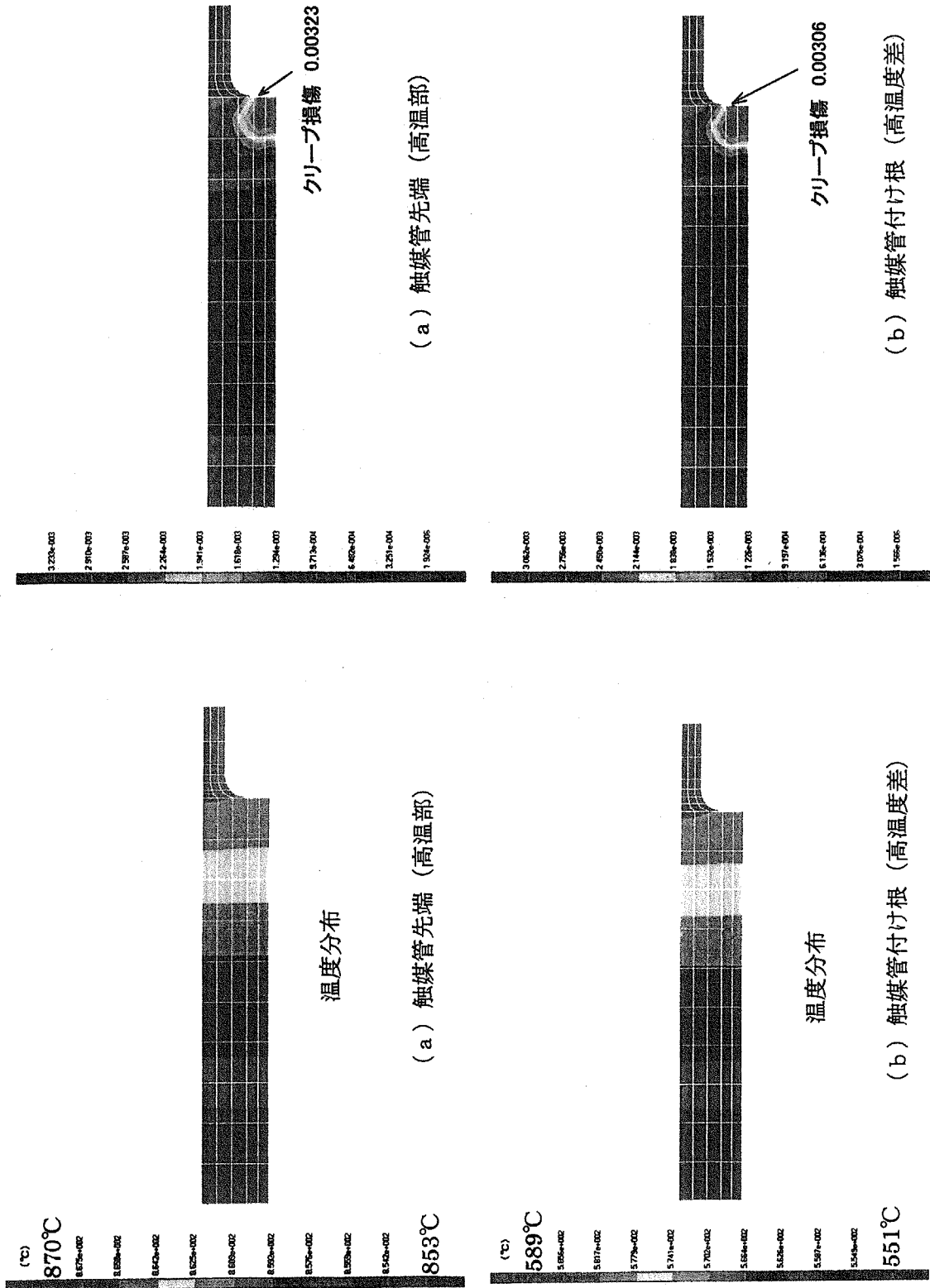
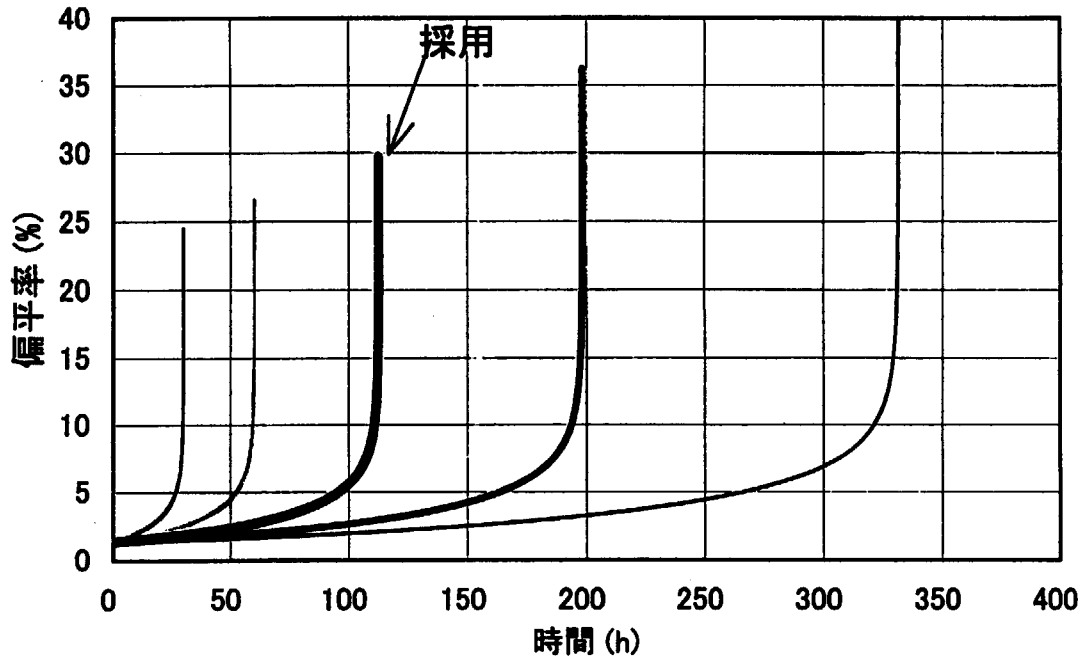


図 5.7 クリープ損傷評価結果

図 5.6 温度分布

This is a blank page.



左から触媒管有効板厚 1 mm、12mm、13mm、14mm、15mm

図 5.8 クリープ座屈評価結果

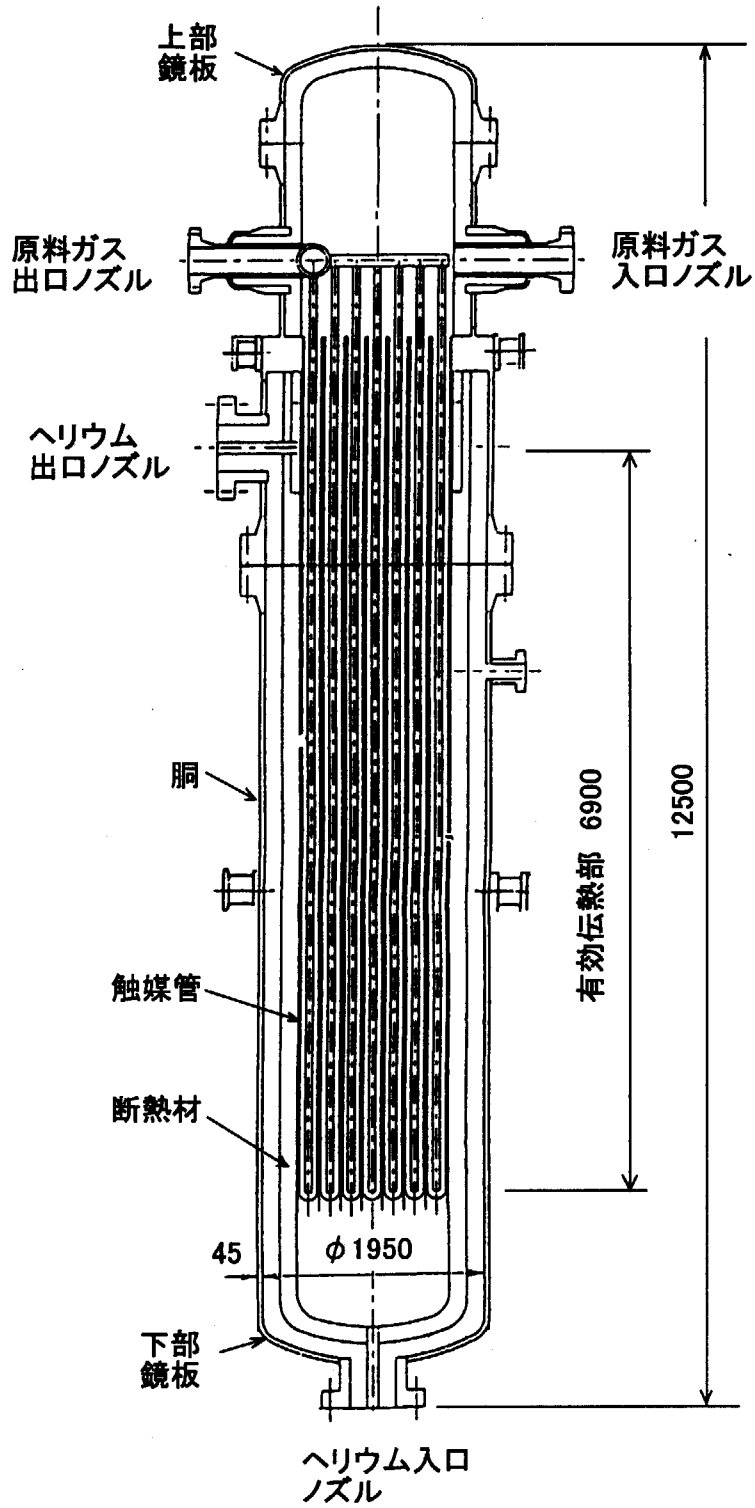


図 5.9 改質器の構造

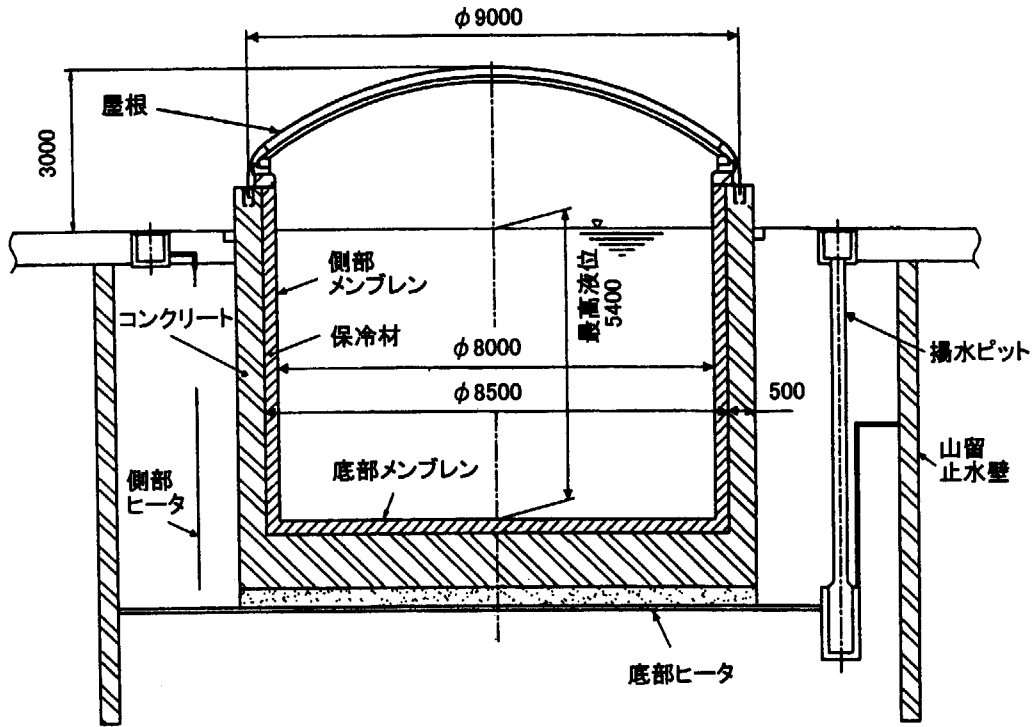


図 5.10 LNG タンクの構造

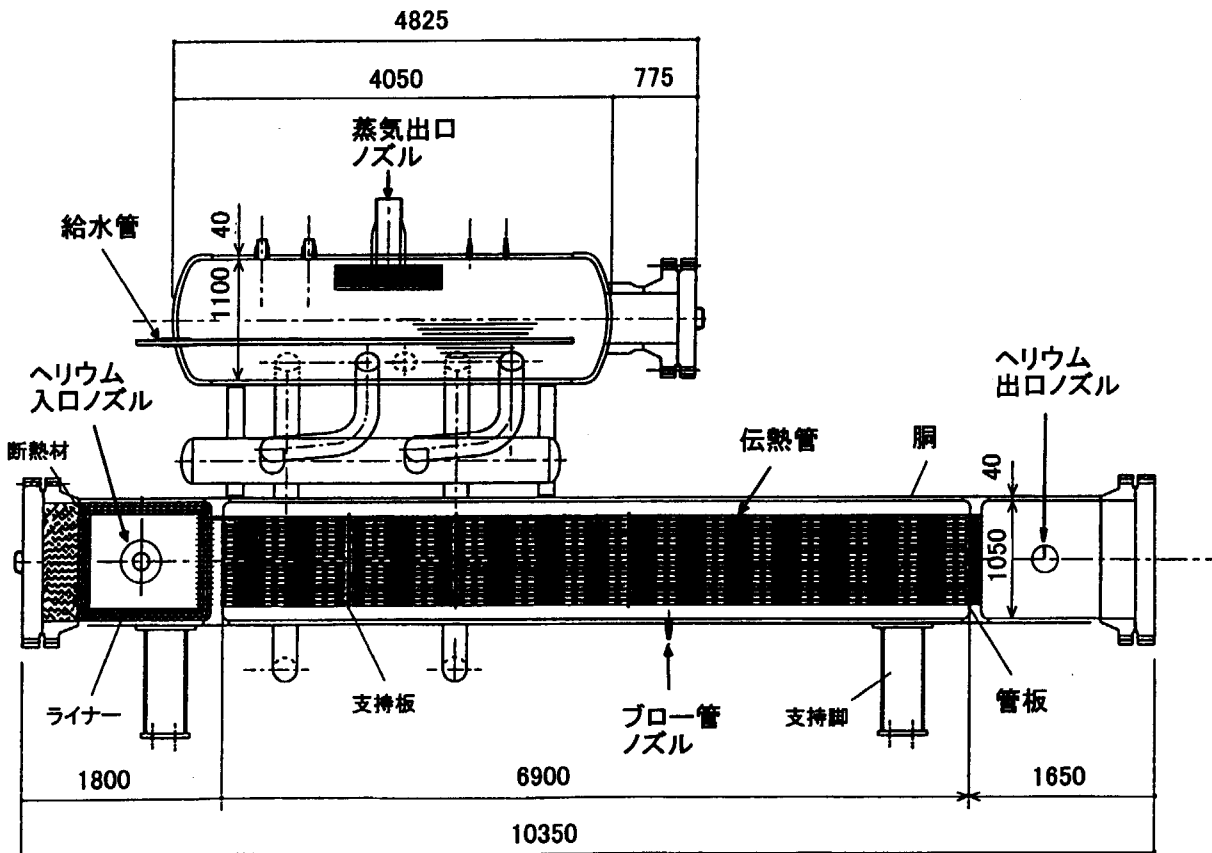


図 5.11 蒸気発生器の構造

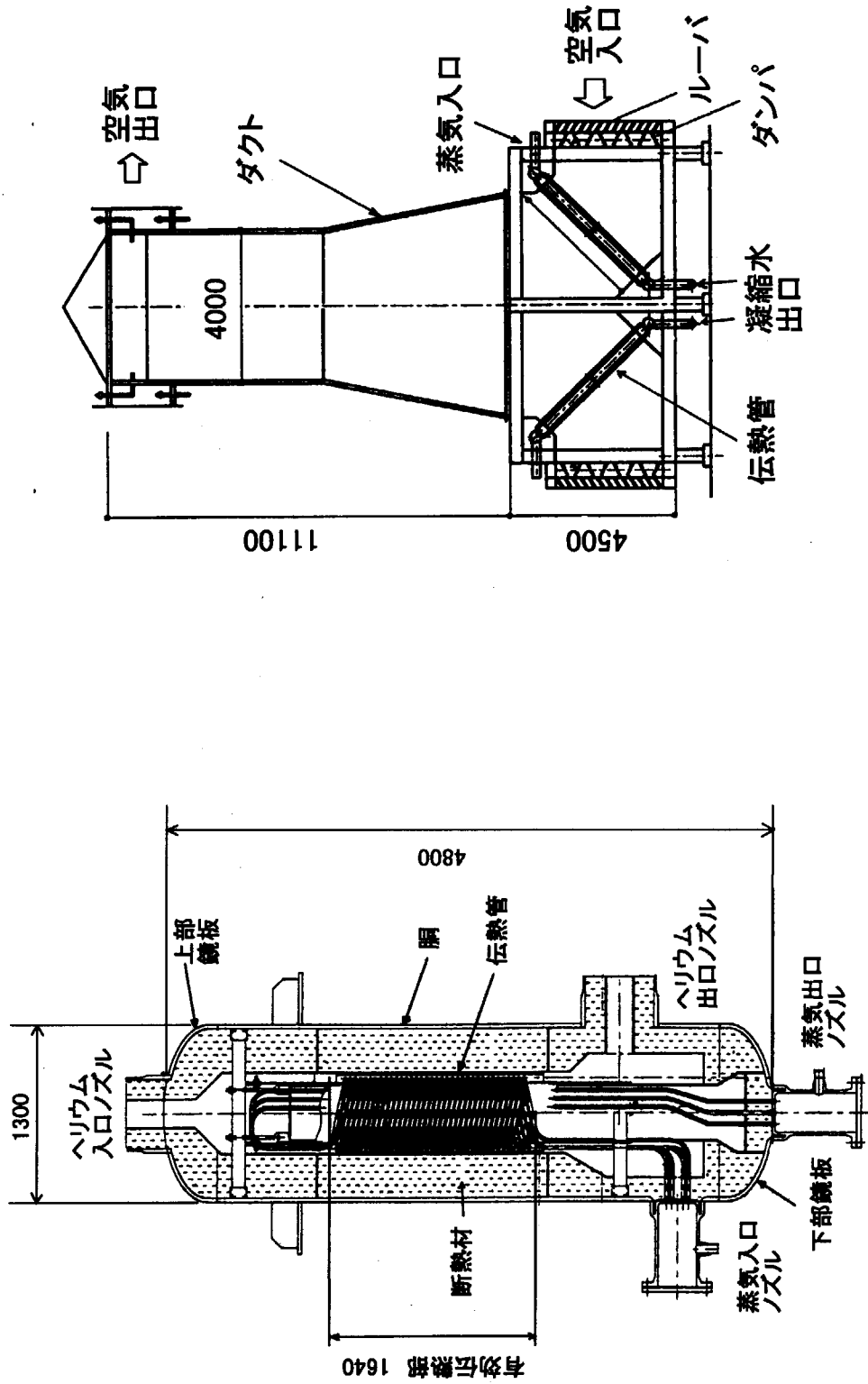


図 5.13 放熱器の構造

図 5.12 蒸気過熱器の構造

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バール	b
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁶
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

HTTRに接続する水素製造システムの系統及び機器設計(受託研究)

R100

古紙配合率100%
白化度70%再生紙を使用しています。