JAEA-Technology 2014-031



高温ガス炉の多様な産業利用に向けた HTTR熱利用試験計画

HTTR Demonstration Test Plan for Industrial Utilization of Nuclear Heat

佐藤 博之 大橋 弘史 Xing L. Yan 久保 真治 西原 哲夫 橘 幸男 稲垣 嘉之

Hiroyuki SATO, Hirofumi OHASHI, Xing L. YAN, Shinji KUBO Tetsuo NISHIHARA, Yukio TACHIBANA and Yoshiyuki INAGAKI

> 原子力科学研究部門 原子力水素・熱利用研究センター

Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center Sector of Nuclear Science Research September 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency. 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2014

JAEA-Technology 2014-031

高温ガス炉の多様な産業利用に向けた HTTR 熱利用試験計画

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力水素・熱利用研究センター

佐藤 博之、大橋 弘史、Xing L. Yan、久保 真治、西原 哲夫、橘 幸男、稲垣 嘉之

(2014年7月30日 受理)

日本原子力研究開発機構では、優れた安全性を有し高温熱供給が可能な高温ガス炉の多様な産 業利用に向けて、高温工学試験研究炉(HTTR)を中心とした研究開発を進めている。これまで、 HTTR への熱化学法 IS プロセスや水蒸気改質法による水素製造施設、ヘリウムガスタービン発電 設備の接続に係る設計検討に加え、水素製造施設の原子炉施設への接続に係る安全基準やこれに 適合する設計対策についての検討が実施されてきた。

本報告では、高温ガス炉及び熱利用技術の実用化に向けた技術課題である、原子炉施設と水素 製造施設の接続時の安全基準及びこれに適合する設計対策の確立やヘリウムガスタービンの総合 性能の検証の解決に資する、HTTR を用いた熱利用試験での技術実証項目とこれに対応する試験 項目並びに試験項目を実施可能な熱利用システムのプラント概念の検討結果について報告する。

HTTR Demonstration Test Plan for Industrial Utilization of Nuclear Heat

Hiroyuki SATO, Hirofumi OHASHI, Xing L. YAN, Shinji KUBO, Tetsuo NISHIHARA, Yukio TACHIBANA and Yoshiyuki INAGAKI

> Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency

> > Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 30, 2014)

Japan Atomic Energy Agency has been conducting research and development with a central focus on the utilization of High Temperature engineering Test Reactor (HTTR), the first High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) in Japan, towards the realization of industrial use of nuclear heat. Several studies have made on the integration of the HTTR with thermochemical iodine-sulfur process and steam methane reforming hydrogen production plant (H₂ plant) as well as helium gas turbine power conversion system. In addition, safety standards for coupling a H₂ plant to a nuclear facility has been investigated. Based on the past design information, the present study identified test items to be validated in the HTTR demonstration test to accomplish a formulation of safety requirement and design consideration for coupling a H₂ plant to a nuclear facility as well as confirmation of overall performance of helium gas turbine system. In addition, plant concepts for the heat utilization system to be connected with the HTTR are investigated.

Keywords: HTTR, HTGR, Hydrogen Production, Helium Gas Turbine, Demonstration Test

目 次

1.	はじる	めに	1		
2.	HTTF	₹に接続する熱利用システムの検討例	2		
	2.1	HTTR の概要	2		
	2.2	IS プロセス水素製造施設	2		
	2.3	水蒸気改質水素製造施設	4		
	2.4	ヘリウムガスタービン発電設備	5		
3.	水素	製造施設の接続に係る原子炉施設の安全基準及びこれに適合する設計対策	14		
	3.1	水素製造施設の接続に係る安全上考慮すべき事象	14		
	3.2	水素製造施設の一般産業施設化	15		
	3.3	安全基準及び適合する設計対策	15		
4.	HTTF	そ を用いた熱利用試験計画	17		
	4.1	目的及び検討方針	17		
	4.2	技術実証項目	17		
	4.3	試験項目	18		
	4.4	プラント概念	19		
	4.5	まとめ	21		
5.	おわ	りに	28		
謝辞	斧		28		
参考	参考文献				

Contents

1.	Intro	duction	1	
2.	Selee	cted work for heat utilization system design for the HTTR	2	
	2.1	Outline of the HTTR	2	
	2.2	Iodine-sulfur process hydrogen production plant	2	
	2.3	Steam-methane reforming hydrogen production plant	4	
	2.4	Helium gas turbine power conversion system	5	
3.	Safet	ty requirements and design considerations of nuclear facility for coupling hydrogen production		
	plant	t	14	
	3.1	Postulated events relevant to safety of nuclear facility	14	
	3.2	Application of non-nuclear regulation to hydrogen production plant	15	
	3.3	Safety requirements and design considerations	15	
4.	HTT	R demonstration test plan	17	
	4.1	Test objective	17	
	4.2	Validation items in demonstration test	17	
	4.3	Test items	18	
	4.4	Plant concept	19	
	4.5	Summary	21	
5.	Conc	clusion	28	
Ack	knowl	edgement	28	
Ref	References 2			

1. はじめに

高温ガス炉は、燃料に二酸化ウラン等の燃料核をセラミックス材により被覆した被覆燃料粒子、 冷却材にヘリウム、減速材や原子炉内の主な構造材に黒鉛を用いた原子炉であり、これらの基本 要素の固有の特性を活用することで、優れた安全性を有するのみならず、高温熱供給が可能であ ることから、我が国のみならず、世界各国で活発な研究開発が進められている。

日本原子力研究開発機構(原子力機構)では、このような特性を有する高温ガス炉の水素製造 等の多様な産業利用に向けて、大洗研究開発センターに建設された高温工学試験研究炉(High Temperature engineering Test Reactor; HTTR)を中心とした研究開発を進めている。HTTRは2004 年に世界で初めて原子炉出口温度950°Cを達成¹⁾するとともに、2010年に定格熱出力状態での50 日間の高温連続運転に成功し²⁾、高温ヘリウムガスを原子炉圧力容器外に安定して取り出せるこ とを実証している。これらの成果を踏まえ、HTTRに水素製造施設やヘリウムガスタービン発電 設備からなる熱利用システムを接続し、世界で初めてとなる原子炉の熱を用いた水素製造、並び に、ヘリウムガスタービンによる発電の実証を目指した検討を進めている。

本報は、HTTR に接続する熱利用システムのプラント概念や、これを用いた試験計画の検討結 果をまとめたものである。第2章において HTTR に接続する熱利用システムの既往検討結果につ いて述べ、第3章において水素製造施設の接続に係る原子炉施設の安全基準及びこれに適合する 設計対策の概要を示し、第4章で HTTR を用いた熱利用試験計画や HTTR に接続する熱利用シス テムのプラント概念の検討結果を示す。

2. HTTR に接続する熱利用システムの検討例

2.1 HTTR の概要

HTTR は原子炉熱出力 30 MW の黒鉛減速、ヘリウム冷却型の試験研究炉である。炉心は六角柱 形状の黒鉛製ブロックにより構成され、燃料には二酸化ウランの燃料核をセラミックス材で4重 に被覆した被覆燃料粒子を用いている。HTTR の主要な仕様を Table 2.1 に、系統構成を Fig.2.1 に示す。

主冷却設備は1次冷却設備、2次ヘリウム冷却設備、加圧水冷却設備から構成される。原子炉 と1次加圧水冷却器 (Primary Pressurized Water Cooler; PPWC)、並びに、中間熱交換器 (Intermediate heat eXchanger; IHX)の間は原子炉冷却材である1次ヘリウムガスが循環し、ぞれぞれの熱交換 器を介して加圧水及び2次ヘリウムガスへ熱を供給する。2次ヘリウムガスに伝えられた熱は2 次加圧水冷却器 (Secondary Pressurized Water Cooler; SPWC)を介して加圧水に供給され、加圧水 の熱は加圧水空気冷却器において大気へ放散される。

原子炉スクラム時の炉心残留熱除去を行うための設備として、補助冷却器、補助冷却水空気冷 却器から構成される補助冷却設備が設置されている。また、配管破断時等の炉心強制冷却機能喪 失時の炉心残留熱除去を目的とした炉容器冷却設備が設置されている。

HTTR の運転には、原子炉出口温度 850℃ の定格運転及び原子炉出口温度 950℃ の高温試験運転がある。また、運転モードには、PPWC にすべての原子炉熱出力 30MW を配分する「単独運転」と PPWC 及び IHX にそれぞれ 20 MW、10 MW を配分する「並列運転」がある。

Fig.2.2 に HTTR サイトの鳥瞰図を示す。HTTR サイトには、原子炉建屋、使用済燃料建屋、 スタック、冷却塔、研究棟等が配置されている。水素製造施設等の熱利用システムの建設を想定 した熱利用系エリアは、スタック、冷却塔等の安全上重要な構築物から原子炉建屋を隔てた原子 炉建屋の南側に設定している。HTTR 設計の詳細については、参考文献を参照されたい³⁾。

2.2 IS プロセス水素製造施設

熱化学法 IS プロセス(IS プロセス)は、以下の化学反応を組み合わせることで水を分解し水素を製造するプロセスである。

$I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow H_2SO_4 + 2HI$	(ブンゼン反応)	(1)
$\mathrm{H_2SO_4} \ \rightarrow \ \mathrm{H_2O} + \mathrm{SO_2} + \ \frac{1}{2}\mathrm{O_2}$		(2)
$2\text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$		(3)

ブンゼン反応の生成物は H₂SO₄-H₂O を多く含む液相(軽液相)と HI-H₂O-I₂を多く含む液相(重 液相)に分離される。各相は精製された後、濃縮、蒸発し、最終的には気相の硫酸とヨウ化水素 の状態でそれぞれ熱分解される。分解生成物のうち、水素と酸素はプロセスの製品として取り出 され、そのほかの成分はブンゼン反応の原料としてリサイクルする。

原子力機構では、世界に先駆けてガラス製試験装置による連続水素製造⁴⁾に成功しており、現

在は実用材料製連続水素製造試験装置を完成させ、信頼性確証や連続水素製造性能の検証を目的 とした運転開始に向け準備を進めている。また、並行して、セラミックス製反応管に高圧ガス保 安法を適用するためのセラミックス設計方針の確定に向けた検討⁵⁾や水素製造熱効率向上につな がる試験データを要素試験装置により取得している⁶。

これまで、HTTR へ IS プロセス水素製造施設を接続した HTTR-IS システムについて系統構成 や主な構成機器の概念が検討されている。以下に検討結果の概要を示す。詳細については参考文 献を参照されたい^{7,8)}。

HTTR に接続する IS プロセス水素製造施設の系統構成の一例として、再生熱交換器の基数を削 減した水素製造量約 600 Nm³/h 規模の検討結果⁷⁾を Fig.2.3 に示す。IHX を介して原子炉で取り出 されたヘリウムガスにより 905℃ まで昇温された 2 次ヘリウムガスは二重管内管をとおり、原子 炉格納容器を貫通し、隔離弁を経由して硫酸分解器、HI 分解器及び HI 蒸留塔リボイラから成る プロセス熱交換器に供給される。約250°Cにてプロセス熱交換器から流出した2次へリウムガス は蒸気発生器をとおり、冷却器により冷却された後、循環機により昇圧され、二重管外管を通り IHX へ戻る。水素製造施設の下流に配置された蒸気発生器は水素製造施設の異常に起因する2次 ヘリウムガスの温度変動を吸収する役割を担う。IS プロセス水素製造施設は硫酸分解工程、ヨウ 化水素分解工程及びブンゼン反応工程から構成されている。硫酸分解工程では、ブンゼン反応工 程から供給される低濃度硫酸を減圧蒸留法による硫酸濃縮装置において濃縮した後、硫酸分解器 において2次ヘリウムガスと熱交換させて吸熱的に酸素、二酸化硫黄及び水に分解し、ブンゼン 反応工程へと供給する。ヨウ化水素分解工程では、ブンゼン反応工程から供給されるポリヨウ化 水素水溶液を電解電気透析器および HI 蒸留塔により濃縮し、HI 分解器において2次ヘリウムガ スと熱交換させて水素およびヨウ素へと熱分解する。ヨウ素、ヨウ化水素はそれぞれ、I2回収塔 及び HI 回収塔にてそれぞれ回収されブンゼン反応工程に戻される。また、生成物である水素は 冷却分離し、フレアスタックを用いて燃焼処理される。ブンゼン反応工程では、硫酸分解工程か ら供給される二酸化硫黄及び水、ヨウ化水素分解工程から供給されるヨウ素を原料に、ブンゼン 反応器において硫酸及びヨウ化水素を生成する。生成された酸(水溶液)は、硫酸を多く含む軽 液相とヨウ化水素水溶液を多く含む重液相に分離された後、それぞれ硫酸精製塔およびヨウ化水 素精製塔により精製され、硫酸分解工程およびヨウ化水素分解工程へ供給される。

構成機器の概念検討においては、機器物量を低減するため、硫酸分解器及びブンゼン反応器を 対象に、従来設計で複数に分かれていた機器の一体化が検討された⁸。**Fig.2.4** にブンゼン反応器 の構造概念を示す。

硫酸分解器はシェルアンドチューブ型のプロセス熱交換器であり、従来設計⁹⁰における三酸化 硫黄(SO₃)分解器、硫酸分解器及び再生熱交換器の三つの機器を一体化している。容器内は硫 酸蒸発及びSO₃ガス分解を行う二つの熱交換要素から構成されており、それぞれ、ヘリウムガス 及び二酸化硫黄と熱交換を行う。熱交換要素は二重管で接続され、ヘリウムガスが内管内を、SO₃ ガスが外管と内管の間の環状流路を流れる。硫酸分解器には880°Cの高温ヘリウムガスが流入す るとともに、腐食性の高い硫酸や亜硫酸ガス等と接触するため、SO₃ガスに良好な耐食性を有す るインコロイ 800Hを基材に、硫酸と接液する箇所にSiCコーティングを施す。

ブンゼン反応器はミキサセトラ型反応器を基本とし、ミキサ部及びセトラ部から構成される。

ミキサ部ではスタティックミキサや攪拌機により二酸化硫黄、ヨウ素及び水を混合させ、ブンゼン反応を進行させる。混合溶液は重力によりセトラ部に移送され、堰で仕切られた流路において相分離を促進させる。分離された二液相溶液は界面を生じ、容器の上下部に設置された出ロノズルを介し、軽液相及び重液相が取り出される。重液相の取り出し口には流量調整弁を設け、界面高さの調整を行う。未反応、未分離溶液は容器中段から流出され、ブンゼン反応器の上流側へ戻される。ブンゼン反応器は発熱反応であるため、容器外側から冷却水により反応熱を除去する。ブンゼン反応器の操作条件は約 100℃ であるものの、取り扱う溶液は強い腐食性を有するため、炭素鋼を基材に接液面にガラスライニングを施工する。

2.3 水蒸気改質水素製造施設

水蒸気改質法は天然ガス等の軽質の炭化水素と水蒸気を原料に、主に以下の二つの反応により 水素を製造するプロセスである。

$CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$	(4)
$\rm CO + H_2O \rightarrow \rm CO_2 + H_2$	(5)

式(4)は吸熱反応であり、反応に必要な熱を外部から供給する必要があるのに対し、式(5)は発熱反応であるが、反応系全体としては吸熱反応となり、外部からの加熱を必要とする。高温ガス炉の熱を用いる場合にはヘリウムガスの顕熱を用いる必要があり、一般産業界で用いられている、触媒管の外側をバーナーで加熱することで必要な反応熱を供給する方式を採用できない。そこで、原子力機構では触媒を充填した触媒管の外側に加熱用ヘリウムガスを流し、触媒管内側に天然ガスと水蒸気の混合ガスを流す方式による化学反応器を用いた水素製造実証試験を行い、本方式の技術的成立性を確認している¹⁰。

これまで、約4250 Nm³/hの水素製造規模を有する水蒸気改質水素製造施設を HTTR に接続した 水素製造システムについて、系統構成及び構成機器の仕様が検討されている。以下に検討結果の 概要を述べる。詳細は参考文献を参照されたい¹⁰。

HTTR に接続する水蒸気改質水素製造施設の系統構成を Fig.2.5 に示す。水素製造施設は 2 次へ リウム冷却設備、原料ガス供給系、水蒸気供給系、後処理系に加え、冷却水設備等から構成され ている。IHX を介して原子炉で取り出されたヘリウムガスと熱交換し、905°C まで昇温された 2 次へリウムガスは二重管内管をとおり、原子炉格納容器を貫通し、隔離弁を経由して 880°C にて 水蒸気改質器に供給され、反応熱を供給する。585°C にて水蒸気改質器から流出した 2 次へリウ ムガスは蒸気過熱器と蒸気発生器から成る水蒸気供給系へ熱を供給し、冷却器により冷却された 後、循環機により昇圧され、二重管外管を通り 150°C にて IHX へ戻る。原料ガス供給系は、液化 天然ガス (LNG) タンクに貯蔵された天然ガスの気化、脱硫を行い、水蒸気供給系から供給され る蒸気を混合させ、天然ガスと水蒸気から成る原料ガスを 450°C にて水蒸気改質器に供給する。 水蒸気供給系では、給水タンクから供給される原料ガスを 450°C にて水蒸気改質器に供給する。 水蒸気過熱器を用いて 400°C の過熱蒸気を生成し、原料ガス供給系へ供給する。後処理系で は、水蒸気改質器での生成ガスを冷却することで湿分を分離した後、フレアスタックを用いて水 素を燃焼処理する。

Fig.2.6 に水蒸気改質器の基本構造を示す。水蒸気改質器はバイヨネット型の触媒管を 37 本有 し、触媒管の外側は伝熱促進を図る観点から直交フィン加工されている。容器下端から流入した ヘリウムガスは触媒管とその外側に設けられた円筒状のガイド管との間を流れ、原料ガスに熱を 供給した後、容器上部のノズルから流出する。原料ガスは容器上部ノズルから触媒管の外管と内 管の環状流路に流入し、触媒層を垂直下方向に流れた後、触媒管先端にて流れ方向を反転し、触 媒管内管を通って容器上部のノズルから流出する。触媒層を流出する高温生成ガスから熱回収す るため、触媒管内管を通過する生成ガスと環状流路を流れる原料ガスとを熱交換させる。水蒸気 改質器には 880°C の高温へリウムガスが流入するとともに、触媒管先端での原料ガス温度は 800°C 近くに達することから、これらと接触する触媒管の材料には HTTR の IHX 伝熱管の材料と して使用実績のあるハステロイ XR を使用する。

2.4 ヘリウムガスタービン発電設備

高温ガス炉に接続するヘリウムガスタービンは、ヘリウムガスを作動流体とする外部加熱方式 の密閉サイクルの発電システムであり、タービン、圧縮機、発電機、再生熱交換器及び前置冷却 器の要素機器から構成される。本システムでは、タービン、圧縮機及び発電機が同一軸に接続さ れ、タービンでの膨張仕事と圧縮機での圧縮仕事の差が仕事として取り出される。ヘリウムガス タービンは入口圧力が高く、かつ、作動流体であるヘリウムガスの比熱が大きいため、一般産業 で広く使用される燃焼ガスを作動流体とするガスタービンに比べ翼高さが小さく、かつ、チップ クリアランスが翼高さに対して相対的に大きいため、ヘリウムガスタービンの特徴を考慮した空 力設計が必要となる。また、原子炉の1次冷却設備にヘリウムガスタービン発電設備を設置する 直接サイクルでは、炉心への不純物侵入のリスクを避ける観点から水や油などの潤滑用の液体を 用いない軸受が望ましい。これに対し、原子力機構では、翼端壁部の翼入口角を流れに合わせる 等の工夫を図るとともに、3次元翼形状を設計に採用し、実用炉の三分の一スケール圧縮機モデ ルによる空力性能試験を行い、実用炉において91%を超える圧縮機効率を達成できる見通しを得 ている¹¹⁾。また、軸受には潤滑用の液体が不要な磁気軸受と転がり軸受と滑り軸受から成る補助 軸受の採用を目指し、実用炉の三分の一スケールの磁気軸受制御系試験を行い、基本的成立性を 確認した¹²⁾。加えて、1次系のインベントリや圧力比を調整することで発電機負荷喪失や負荷追 従時の圧縮機サージングによる自励振動を防止可能な制御方式を提案し、プラント動特性解析に より基本的成立性を確認している¹³⁾。

HTTR へのヘリウムガスタービン発電設備の接続については、1次冷却設備並びに2次ヘリウ ム冷却設備に接続する場合を対象に、系統構成や主要機器の配置等のプラント概念が検討されて いる。

HTTR1次冷却設備にヘリウムガスタービン発電設備を設置する系統構成は、可能な限り実用 炉を模擬するものの、新たに増設する機器の配置スペースが限られていることから単純サイクル とし、再生熱交換器は設置しない。また、既存設備を極力用いるため PPWC を改造なしに使用す ることとした。1次冷却設備へ設置する場合の系統構成を Fig.2.7 に示す。本系統構成を対象にヒ ートマスバランスの検討を行った。Table 2.2 に機器出入口におけるプロセス量を示す。検討に当 たっては、原子炉出入口の温度、圧力及び流量条件は定格運転の条件とし、さらには可能な範囲 で実用炉と相似となるよう、圧力比を下げ、回転速度を3倍に上昇させるとともに、これに応じ たタービンや圧縮機の基本設計パラメータを選定した。検討結果から、サイクル熱効率は約1.7% であり、ヘリウムガスタービンの自立運転が可能であることが示された。

本系統構成を対象とする配置概念を Fig.2.8 に示す。ヘリウムガスタービンの収納容器は原子炉 格納容器外に設置し、接続配管はメンテナンスハッチを通して引き回す。そのため、配管引き回 しルートに設置されている IHX や IHX 用循環機、これらに附属する設備を撤去する必要がある。 PPWC は既設の位置から変更せず、既存のノズル位置に配管を接続する。

HTTR 2 次ヘリウム冷却設備へのヘリウムガスタービン発電設備の設置の検討に当たっては、 原子炉及び1 次冷却設備のプロセス量は、高温試験運転並びに並列運転モードの条件とし、IHX を介して 10MW を 2 次ヘリウム冷却設備に供給することとした。また、ヘリウムガスタービン発 電設備の上流に、熱供給量 400 kW の水素製造施設を設置した。IHX の 2 次へリウム出口温度に ついては、熱損失や二重管での熱交換を考慮して水素製造施設の入口ヘリウムガス温度を 880°C とする。このため現在の HTTR での IHX の 2 次へリウムガス出口温度 869°C から 905°C へ上昇 させ、これに伴い、IHX での 2 次へリウムガス流量を 2.52 kg/s とした。一方、本構成でもヘリウ ムガスタービンが駆動する体積流量を確保するため、再生熱交換器の高圧側出口において流路を 分岐し、一部のヘリウムガスをタービン入口へ導入するバイパスラインを設けた。 2 次へリウム 冷却設備へ設置する場合の系統構成を Fig.2.9 に示す。本系統構成を対象にヒートマスバランスの 検討を行い、Table 2.3 に示すプロセス量を得た。検討結果から、ヘリウムガスタービンの自立運 転が可能であり、約 0.8MWe の電気出力を得られることが示された。

本系統構成を対象とする配置概念を Fig.2.10 に示す。ヘリウムガスタービン発電設備の設置場 所は HTTR 原子炉建屋南側に用意されている熱利用系エリアへの設置とした。原子炉格納容器を 貫通して引き出された二重管は原子炉建屋を貫通し、新設するトレンチを経由して熱利用系エリ アへ導入する。ヘリウムガスタービン発電設備を収納する建屋は2階構造とし、タービン、圧縮 機、発電機、再生熱交換器及び冷却器を1階に、前置冷却器を2階に配置することで、10 m × 17 m の敷地にすべての機器を収納できることが示された。

- 6 -

Table 2.1 Major specifications of HTTR

	值
原子炉出力	30 MW
原子炉出口温度(定格運転 / 高温試験運転)	850 °C / 950 °C
原子炉入口温度	395 °C
1次冷却設備圧力	4 MPa
燃料	被覆燃料粒子
燃料要素形式	ブロック型
炉心平均出力密度	2.5 MW/m ³
原子炉流量(定格運転/高温試験運転)	12.4 kg/s / 10.2 kg/s

Table 2.2 State points for helium gas turbine system installed in the primary cooling system of HTTR

位置	温度 [°C]	圧力 [MPa]	質量流量 [kg/s]
1	850	3.95	12.4
2	850	3.92	12.4
3	729	2.84	12.8
4	282	2.71	12.8
5	395	4.07	12.8
6	395	4.07	0.40
7	395	3.95	12.4

Table 2.3 State points for helium gas turbine system installed in the secondary helium cooling system of HTTR

位置	温度 [°C]	圧力 [MPa]	質量流量 [kg/s]
1	880	4.09	2.52
2	880	4.09	0.10
3	150	-	0.10
4	650	4.08	6.63
5	581	3.21	6.63
6	108	3.20	6.63
7	30	3.19	6.80
8	71	4.12	6.80
9	533	4.11	6.80
10	533	4.11	4.28
11	150	4.11	2.52



Fig.2.1 Schematic configuration of the HTTR³⁾



Fig.2.2 HTTR site layout³⁾



Fig.2.3 Schematic configuration of IS process H₂ plant



Fig.2.4 Horizontal cross section of Bunsen reactor¹⁴⁾



Fig.2.5 Schematic configuration of steam-methane reforming H_2 plant



Fig.2.6 Vertical cross section of steam reformer¹⁰⁾



Fig.2.7 Schematic configuration of helium gas turbine system installed in the primary cooling system of the HTTR



Fig.2.8 Schematic layout of helium gas turbine installed in the primary cooling system of the HTTR



Fig.2.9 Schematic configuration of helium gas turbine system installed in the secondary helium cooling system of HTTR



Fig.2.10 Schematic layout of helium gas turbine system installed in the secondary helium cooling system of HTTR

3. 水素製造施設の接続に係る原子炉施設の 安全基準及びこれに適合する設計対策

水素製造施設のような化学プラントを原子炉施設に接続した例は世界的に例がないものの、これまでに、原子炉施設への水素製造施設の接続時における原子炉施設の安全確保のための要件や 指針から成る安全基準やこれに適合する設計対策が検討されてきた。以下に既往検討結果を示す。

3.1 水素製造施設の接続に係る安全上考慮すべき事象

水素製造施設の接続に係る原子炉施設の安全基準の検討に当たり、水素製造施設中に内包され る化学物質や原子炉施設との接続形態に基づき、水素製造施設の接続に伴い原子炉施設で安全上 新たに考慮すべき事象が系統的な手法を用いて選定されている^{15,16)}。以下に選定された主な事象 の概要について述べる。

(1) 水素製造施設の異常に起因する熱流力的な過渡変化

水素製造施設においてポンプ故障等、何らかの異常により操作条件が変動した場合には、水素 製造施設での除熱量が変動し、IHX への戻りヘリウムガス温度が変動する。この温度変動が1次 冷却材に伝播した場合に、原子炉冷却材圧力バウンダリの温度上昇による損傷や炉心反応度添加 による燃料温度上昇が懸念される。

(2) 水素製造施設から漏えいした可燃性ガスに起因する火災・爆発

水素製造施設では、可燃性ガスとして水素等を内包している。何らかの要因により水素を内包 する配管や機器等から漏えいが生じた場合に、空気と混合することで可燃性混合気が形成され、 万一、燃焼あるいは爆発に至った場合に原子炉建屋外部に設置された最終ヒートシンクへ熱を放 散する熱交換器や原子炉建屋を損傷させることが懸念される。

(3) 水素製造施設から漏えいした有毒ガスによる、原子炉の運転員の被毒

水素製造施設では、水素製造プロセスに応じて二酸化硫黄、ヨウ素等の有毒ガスを内包してい る。これら有毒ガスが何らかの要因により水素製造施設の配管や機器等から漏えいし、原子炉建 屋の中央制御室系換気空調装置を介して制御室に侵入した場合に、原子炉の運転員が被毒するこ とで事故時における安全な原子炉停止状態の確保に影響を与えることが懸念される。

(4) 原子炉で発生したトリチウムの水素製造施設への移行

高温ガス炉の炉心では燃料の三体核分裂反応、黒鉛中に含まれるリチウム、黒鉛や制御棒に含 まれるボロン、冷却材中のヘリウム3の中性子吸収反応によりトリチウムが生成される。炉心で 生成されたトリチウムは1次冷却材を循環し、熱交換器の伝熱管を透過して製品水素へと移行す る。万一、製品水素中に有意なトリチウム量が混入する場合には、一般公衆へ電離放射線による 有害な影響を与えることが懸念される。

3.2 水素製造施設の一般産業施設化

原子力機構では、経済性の観点から、水素製造施設に核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規 制に関する法律(原子炉等規制法)ではなく、一般産業法である高圧ガス保安法等を適用する水 素製造施設の一般産業施設化を提案している¹⁷⁾。水素製造施設の一般産業施設化は、水素製造施 設が一般産業施設と同等の信頼性であった場合においても、原子炉施設の安全確保が要求される ため、水素製造施設を原子炉施設として建設するのに比べ、原子炉施設に対してはより厳しい安 全要件を課す必要がある。原子力機構では、原子炉施設の安全重要度分類表における機能を水素 製造施設に課さないことを安全要件として提案している。これは、水素製造施設が異常発生防止 系や異常影響緩和系に分類される場合には原子炉施設の設置許可の対象から免除することはでき ないこと、旧来の原子力発電施設の新設や増設時の工事計画認可申請の対象範囲が、電気事業法 施行規則に基づき、安全機能の重要度分類指針におけるクラス1からクラス3までの機器等とす る考え方が示されていることによる。

これまで、2次ヘリウム冷却設備に水素製造施設を設置し、自動隔離弁により原子炉施設と水 素製造施設を区分する Fig.3.1 に示す系統構成を対象に、水素製造施設に課せられる安全重要度分 類表における機能が検討され、「2次冷却系の通常冷却」、「1次・2次へリウムの差圧(バウンダ リ)維持」及び「放射性物質の貯蔵」が該当することが示されている¹⁸⁾。これら機能を水素製造 施設に課さないためには、水素製造施設の状態によらず原子炉の通常運転を確保しかつ水素製造 施設に放射性物質を含まないことが求められる。水素製造施設の状態によらず原子炉の通常運転 を確保するには、水素製造施設での異常に起因する熱流力的な過渡変化に対し、原子炉出力や冷 却材温度、圧力等のプロセス量が通常運転で許容される変動幅を超過しないよう、原子炉施設に おいて設計対策を図る必要がある。具体的な設計対策としては、前置冷却器や蒸気発生器等、水 素製造施設の代替除熱機能を有する冷却器、隔離弁、2次ヘリウム貯蔵・供給設備、1次・2次 差圧制御系による温度及び圧力変動の吸収・低減が挙げられる。「放射性物質の貯蔵」については、 HTTR の高温試験運転時に行った2次ヘリウム冷却設備のトリチウム濃度の試験データを基に HTTR に接続する IS プロセス水素製造施設のトリチウム濃度及び数量を評価した結果、放射性同 位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行令において放射線を放出する同位元素として 定義される数量及び濃度未満となる見通しを得ている¹⁸⁾。なお、水素製造施設が一般産業施設に 分類された場合には、水素製造施設で生じた異常状態の原子炉施設への影響は外部人為事象の扱 いとなる。

3.3 安全基準及び適合する設計対策

これまでに、HTTR を対象に、2次ヘリウム冷却設備に一般産業施設化した IS プロセスによる 水素製造施設を設置する場合の改訂内容を検討しており¹⁸⁾、検討結果から、57 ある方針のうち大 幅な改訂が必要なものは「方針3.外部人為事象に対する設計上の考慮」及び「方針42.制御室 の居住性に対する考慮」であった。「方針3.外部人為事象に対する設計上の考慮」については、 水素製造施設の設置に伴い新たに考慮すべき外部人為事象である、水素製造施設から漏えいした 可燃性ガスに起因する火災・爆発や有毒ガスの漏えいに対し、原子炉施設の安全機能が失われな いよう、原子炉建屋と水素製造施設の間の十分な離隔距離の確保や有毒ガス漏えいの早期検知と いう適合のための設計方針を追加している。また、「方針 42. 制御室の居住性に対する考慮」に ついては、水素製造施設の設置に伴い新たに考慮すべき有毒ガスの漏えいに対し制御室の居住性 を確保するため、中央制御室系換気空調装置を有毒ガスの漏えい時に外気としゃ断し、フィルタ を通る閉回路循環運転を行うこととする適合のための設計方針を追加している。改訂文章案の全 文は参考文献を参照されたい¹⁸⁾。



Fig.3.1 Regulatory demarcation boundary for HTGR cogeneration system

4. HTTR を用いた熱利用試験計画

4.1 目的及び検討方針

HTTR を用いた熱利用試験の目的は、高温ガス炉及び熱利用技術の実用化に向けた技術課題の 解決、すなわち、原子炉施設と水素製造施設の接続時の安全基準及びこれに適合する設計対策の 確立並びにヘリウムガスタービンの総合性能の検証である。ここでは、これまでの研究開発や設 計検討での知見に基づき、技術課題の解決に必要でかつ HTTR を用いた熱利用試験で実施すべき 技術実証項目を検討するとともに、候補となる試験項目を摘出した。技術実証項目の選定は、当 該項目が HTTR を用いた熱利用試験のみで実施可能なもの、HTTR を用いた熱利用試験で実施す るのが適切なものという観点から行った。また、摘出された試験項目に対応するプラント概念を 検討した。

4.2 技術実証項目

Table 4.1 に HTTR を用いた熱利用試験での技術実証項目の検討結果を示す。以下に検討の詳細 について示す。

(1) 原子炉施設と水素製造施設の接続時の安全基準及びこれに適合する設計対策の確立

原子炉施設と水素製造施設の接続時に当たっては、まず、安全基準を策定する必要がある。し かしながら、原子炉施設に水素製造施設のような化学プラントを接続した例はまだない。世界的 にも水素製造施設の接続に係る安全基準は存在しないことから、規制当局において新たに安全基 準を評価・策定する必要があるが、実際に事業者が水素製造施設を接続した原子炉施設の設置(変 更)許可を申請しない限り、規制当局が安全基準の評価・策定を進めることはない。HTTR は、 世界で唯一、水素製造に必要な高温を安定して供給可能な原子炉である。そこで、HTTR を用い た熱利用試験計画での技術実証項目として、原子力規制委員会による安全基準の評価・策定を選 定するとともに、HTTR と水素製造施設の接続に係る設置変更許可の取得により、この達成を目 指すこととした。

HTTR を用いた熱利用試験では、水素製造施設の接続に伴い原子炉施設で安全上新たに考慮すべき事象に対応した安全上の要求に対して、安全基準に適合する設計対策の妥当性を示す必要がある。具体的には、以下の設計対策が候補となる。

- ① 前置冷却器や蒸気発生器等、水素製造施設の代替除熱機能を有する冷却器、隔離弁、2次へ リウム貯蔵・供給設備、1次・2次差圧制御系等による水素製造施設の異常に起因する熱流 力的な過渡変化に対する、温度及び圧力変動の吸収
- ② 原子炉施設と水素製造施設間の十分な離隔距離確保等による原子炉施設の安全上重要な機器の損傷防止
- ③ 原子炉施設と水素製造施設間の十分な離隔距離確保等による有毒ガス漏えいによる原子炉運 転員の被毒防止

上記の項目のうち、①については、原子炉と水素製造施設の両者を含んだプラント過渡応答試験 が可能なHTTRを用いた熱利用試験でのみ実施可能な項目であり、技術実証項目として選定した。 一方で、②及び③については、化学プラント等、一般産業の安全対策として十分な知見が蓄積さ れており、かつ、原子炉施設の近傍に産業施設を設置する場合の安全基準が策定済みである¹⁹⁻²¹⁾ ことから、本試験の技術的実証項目から除外した。

(2) ヘリウムガスタービンの総合性能の検証

ヘリウムガスタービンの総合性能の検証には、安定運転の確認、性能の確証及びメンテナンス 方法の確立が必要である。

安定運転の検証では、実用炉の使用条件下で想定される軸系の振動や過渡的なヘリウムガス温 度変化に対して、設計で想定したタービンのチップクリアランスが維持されることを確証する必 要がある。また、実用炉で想定される事象発生時や運転計画で定められた原子炉の運転状態の移 行や負荷変動に対し、1次系インベントリや圧力比を調整する制御方式を組み込んだ制御系が対 応し、安定して運転状態を移行が可能であることを確証する必要がある。HTTR は実用炉でのタ ービン入口温度条件に加えて、原子炉の起動停止に伴う温度変化を模擬可能な唯一の原子炉であ ることから、ヘリウムガスタービン発電設備の安定運転の検証は、HTTR を用いた熱利用試験で の実施が適切であり、技術実証項目として選定した。

性能の確証では、タービンや圧縮機の空力性能等の個々の要素機器の性能のみならず、ヘリウムガスタービン発電設備全体として設計で想定した電気出力が継続して得られることを確証する 必要がある。HTTR では、実用炉相当の温度及び圧力条件を長期間、安定して供給可能であるため、ヘリウムガスタービンの性能確証は HTTR を用いた熱利用試験での実施が適切であり、技術 実証項目として選定した。

実用炉のヘリウムガスタービン発電設備は1次冷却設備に設置されるため、点検時の作業員の 被ばくを考慮に入れた保守点検方法の確立が必要である。また、ヘリウムガスタービンは原子炉 冷却材圧力バウンダリである収納容器内に設置されているため、一般産業ガスタービンの開放点 検工程に対し、収納容器からの点検対象機器の取り出しが追加で必要となる。後述のとおり、改 造にかかる費用や期間を低減する観点から、ヘリウムガスタービン発電設備はHTTRの2次ヘリ ウム冷却設備に設置する予定であり、HTTRを用いた熱利用試験ではヘリウムガスタービンが汚 染されることはない。しかしながら、ヘリウムガスタービンにおける原子炉冷却材との接触部に 使用される材料への核分裂生成物の沈着量や材料放射化量は、数値計算により予測できる見通し を得ており²²⁾、実用炉の汚染状況を模擬した条件で、実用炉の機器構成と同じである HTTR に接 続するヘリウムガスタービンの組立や分解、調整要領の確認を行うことは適切であり、技術実証 項目として選定した。

4.3 試験項目

前節の検討により選定した技術実証項目に対し、HTTR に接続する熱利用システムで実施する 試験項目の候補を検討した。以下に各試験項目の具体的内容を示す。

(1) 定格連続運転

本試験では、ヘリウムガスタービン発電設備について、設計で想定した電気出力が得られるこ とを確証するため、定格連続運転を実施する。具体的には、実用炉に外挿可能な期間連続運転を 行い、電気出力を計測する。

(2) 起動停止試験

本試験では、実用炉の運転で必須となる、原子炉の起動停止に応じたヘリウムガスタービン発 電設備の起動停止試験を実施する。具体的には計画した起動停止曲線に対し、機器が適切に制御 され、制御すべきプロセス量が目標値に追従することで安定して運転状態を移行できることを確 認する。

(3) 水素製造施設の異常模擬試験

本試験では、水素製造施設の異常に起因する熱流力的な過渡変化に対し、前置冷却器や蒸気発 生器等の水素製造施設の代替除熱機能となる冷却器により、原子炉の安定運転が確保可能であり、 その設置が設計対策として妥当であることを確証するため、熱利用システムの定格運転状態から、 プロセス熱交換器のプロセス側流量をポンプの手動トリップ等により減少させ、水素製造施設の 負荷を減少させることで2次へリウム冷却設備に温度外乱を投入し、IHX への戻り2次へリウム 温度変動が許容変動幅以内に抑制されることを確認する。

(4) 発電機負荷喪失試験

本試験では、実用炉で想定される電力系統故障等に起因する発電機負荷喪失に対するヘリウム ガスタービン発電設備の制御方式を確立するため、熱利用システムの定格運転状態から発電機負 荷を遮断することで投入される外乱に対し、圧力比調整によりプロセス量が許容変動範囲を超過 することなく、ヘリウムガスタービン発電設備が安定して待機運転状態に移行することを確認す る。

(5) 水素製造施設負荷追従試験

本試験では、稼働率向上の観点から実用炉に要求される、熱及び電気需要に応じて任意に熱供 給や発電量を調整可能な制御方式を確立するため、熱利用システムの定格運転状態から3次へリ ウム冷却設備に設置した循環機回転数を調整し、3次へリウム流量をランプ状に減少させること で、第2IHX (Fig.4.3 参照)、すなわち、水素製造施設の負荷が減少するのに対し、ヘリウムガス タービン発電設備の制御系の動作により機器が適切に制御され、プロセス量が許容変動範囲を超 過することなく電気出力が目標値に追従することを確認する。

4.4 プラント概念

第2章において示した既往検討での設計情報に基づき、技術実証項目の実施に必要となる系統構成及び配置概念の検討を行った。Table 4.2 に HTTR を用いた熱利用試験での試験項目とこれに

対応する熱利用システムを示す。

HTTR に熱利用システムを接続するに当たり、実用高温ガス炉システムの系統構成を可能な限 り模擬することはもちろん、既設設備の改造や移設を最小限にすることが求められる。ここでは、 HTTR に接続する熱利用システムとして想定される三つのプラント概念、すなわち、水素製造施 設、ヘリウムガスタービン発電設備並びに水素製造施設とヘリウムガスタービン発電設備から構 成されるコジェネレーションシステムを対象に検討を行った。第2章で示したように、HTTR 1 次冷却設備へ熱利用システムを設置した場合、IHX や IHX 用循環機、これらに附属する設備を撤 去する必要がある。また、メンテナンスハッチが配管でふさがれてしまうため、定期検査時の物 品搬出入用の出入口を原子炉格納容器に別途設けなければならない。何よりも、1次冷却設備の 配管を原子炉格納容器外へ引き回すことは、HTTR の安全確保の基本的な考え方に対する大幅な 変更となり現実的でない。以上から、1次冷却設備を改造なしに使用するため、いずれの熱利用 システムも2次へリウム冷却設備に設置することとした。

● 水素製造施設

Fig.4.1 に系統構成の概念を示す。水素製造施設のHTTR への接続の目的は、原子炉施設と水素 製造施設の接続時の安全基準及びこれに適合する設計対策の確立であり、HTTR の設置変更許可 申請を通して安全基準を策定するとともに、水素製造施設異常模擬試験を行う。HTTR は「並列 運転」を行い、IHX には原子炉熱出力の三分の一の熱量を配分する。IHX で1次冷却材と熱交換 した2次へリウムガスは二重管内管をとおり、原子炉格納容器を貫通し、隔離弁を経由して水素 製造施設に熱を伝える。水素製造施設の下流には、水素製造施設異常時の代替除熱確保を目的と した蒸気発生器を設置する。蒸気発生器を流出した2次へリウムガスは温度調整用の冷却器を通 過した後、循環機に昇圧され、二重管外管をとおり IHX へ戻る。なお、本系統構成は IS プロセ ス、水蒸気改質法いずれの水素製造施設にも適用可能である。

● ヘリウムガスタービン発電設備

Fig.4.2 に系統構成の概念を示す。ヘリウムガスタービン発電設備を単独で HTTR へ接続する目 的は、ヘリウムガスタービンの総合性能の検証であり、ヘリウムガスタービン発電設備の定格連 続運転や起動停止試験、発電機負荷喪失試験を行うとともに、定期開放点検を通じてメンテナン ス手法を確立する。HTTR は「並列運転」を行い、IHX を介して 2 次ヘリウムガスに熱を伝える。 IHX で 1 次冷却材と熱交換した 2 次ヘリウムガスは二重管内管をとおり、原子炉格納容器を貫通 し、タービンにより膨張した後、再生熱交換器へ導入され、前置冷却器や圧縮機において冷却、 圧縮され、再生熱交換器を通過した後、温度調整用の冷却器、二重管外管をとおり IHX へ戻る。 また、既往検討結果に基づき、ヘリウムガスタービン発電設備の体積流量を確保するため圧縮機 から出た高圧ヘリウムをタービン入口へ合流させるバイパスラインを設け、バイパスラインと主 流の合流部にはミキシングボリュームを設けた。

コジェネレーションシステム

Fig.4.3 に系統構成の概念を示す。コジェネレーションシステムを HTTR に接続する場合には、

原子炉施設と水素製造施設の接続時の安全基準及びこれに適合する設計対策の確立、並びに、ヘ リウムガスタービンの総合性能の検証の両者に資する試験実施が可能となる。試験項目としては、 水素製造施設やヘリウムガスタービン発電設備それぞれを単独で接続する場合に加えて、水素製 造施設負荷追従試験が実施可能である。定格運転時には、HTTR では「並列運転」を行い、IHX に は原子炉熱出力の三分の一の熱量を配分する。IHX で1次冷却材と熱交換した2次へリウムガス は二重管内管をとおり、原子炉格納容器を貫通し、隔離弁を経由して第2IHX を介して3次へリ ウム冷却設備に熱を伝える。3次へリウムガスは循環機により水素製造施設へ移送され、プロセ ス熱交換器を介して水素製造施設に熱を供給する。第2IHX から流出した2次へリウムガスは、 タービンにより膨張した後、再生熱交換器へ導入され、前置冷却器や圧縮機において冷却、圧縮 され、再生熱交換器を通過した後、温度調整用の冷却器、二重管外管をとおり IHX へ戻る。また、 ヘリウムガスタービン発電設備を単独で接続する場合と同様に、圧縮機から出た高圧へリウムを タービン入口へ合流させるバイパスライン、バイパスラインと主流の合流部にミキシングボリュ ームを設けた。

配置概念の検討に当たっては、提示した三つの熱利用システムのいずれもが HTTR サイトに設 置可能であることの確認を主眼とし、水素製造施設、ヘリウムガスタービン発電設備の両者を有 するコジェネレーションシステムの系統構成を想定した。水素製造施設については、可燃性ガス 及び有毒ガスを内包する IS プロセス水素製造施設の接続を想定した。また、水素製造施設の熱供 給量やヘリウムガスタービン発電設備のタービン入口温度及び体積流量について、水素製造施設 やヘリウムガスタービン発電設備の敷地面積や原子炉施設と水素製造施設間の離隔距離が最大と なる条件を仮定した。

Fig.4.4 に配置概念を示す。原子炉施設と熱利用系エリアを連絡する2次ヘリウム配管は、地下 埋設トレンチ内を経由して配置する。水素製造施設において有毒ガスを内包する硫酸分解器等に ついては、漏えい早期検知を図るため、機器廻りに囲いを設置することとした。また、可燃性ガ スである水素を内包する機器は、爆ごうへの遷移を防止する観点から、囲い上部を開放した。加 えて、有毒ガスや可燃性ガスを内包するこれらの機器と原子炉建屋の間の離隔距離は、可燃性ガ ス漏えいに起因する火災・爆発について原子力発電所の外部火災影響評価ガイド¹⁹⁾の要求を満足 し、かつ、有毒ガスの原子炉制御室への侵入に対し、米国国立労働安全研究所規定における許容 濃度²³⁾を満足できる約 40m を確保した。一方、ヘリウムガスタービン発電設備については、ター ビンミサイルの原子炉施設への影響を低減する観点からガスタービン軸を原子炉建屋に対し軸直 (I) 型配置とするとともに、建屋内に収納することとした。

4.5 まとめ

高温ガス炉の産業利用に向けた技術課題である原子炉施設と水素製造施設の接続時の安全基準 及びこれに適合する設計対策の確立やヘリウムガスタービン発電設備の総合性能の検証の解決に 資するため、HTTRを用いた熱利用試験での技術実証項目を選定するとともに、これに対応した 試験項目として、ヘリウムガスタービン発電設備の定格連続運転や起動停止試験、発電機負荷喪 失試験、並びに、水素製造施設の異常模擬試験及び負荷追従試験を提案した。 また、HTTR を用いた熱利用試験を実施可能な系統構成として、水素製造施設やヘリウムガス タービン発電設備それぞれを単独で2次ヘリウム冷却設備に設置する系統構成に加えて、両者か ら構成されるコジェネレーションシステムを2次ヘリウム冷却設備に設置する系統構成案を提示 した。加えて、水素製造施設からの可燃性ガスに起因する火災・爆発に対する原子炉施設の安全 上重要な機器の損傷や有毒ガス漏えいに対する原子炉の運転員の被毒の防止に必要な離隔距離を 確保した熱利用システムの配置概念を示した。

	Table 4.1 Identification	a of tech	nical issues that must be validated in HTTR demonstration test (1/2)	
技術課題	技術実証項目	邊 結果	選定の考え方	試驗項目
			 原子炉熱を利用した水素製造の実用化には、規制当局が策定した 	(水素製造施設
	<u> </u>	(安全基準が必要。	の接続に伴う設
	女王本年の永た	\supset	・規制当局による安全基準の評価・策定は、HTTR への水素製造施設	置許可取得)
			の接続についての設置変更許可申請によりのみ実施可能。	
			• 水素製造施設の異常時においても原子炉安定運転が確保される	• 水素製造施設
			よう、前置冷却器や蒸気発生器等の冷却器による水素製造施設の	異常模擬試験
原子炉施設と	水素製造施設異常時の	(代替除熱機能確保が2次ヘリウム冷却設備の温度変動抑制に有効	
水素製造施設の	原子炉安定運転確保	\supset	であることの確認が必要。	
接続時の			• 原子炉と水素製造施設の両者を含んだプラント過渡応答試験は	
安全基準及び			HTTR を用いた熱利用試験でのみ実施可能。	
これに適合する			 離隔距離確保による安全上重要な機器の損傷防止が有効である 	
設計対策の確立	可燃性ガス漏えい時の	>	ことの確認が必要。	
	原子炉施設の安全確保	<	 一般産業での安全対策として蓄積された知見を基に原子炉施設を 	I
			対象とした安全基準が策定済み。	
	右書 ガマ帰ふい時の		 離隔距離確保による運転員被毒防止が有効であることの確認が 	
	○日本シス価ペットすび 「「「「「「「「「「」」」	>	必要。	
	灰丁炉両伸玉い 豆汁沖強炉	<	 一般産業での安全対策として蓄積された知見を基に原子炉施設を 	
	伍'注'注'唯'不		対象とした安全基準が策定済み。	

技術 議 に し し し し し し し し し し し し し	Table 4.1 Identification of te 技術実証項目 安定運転の確認 性能の確証	chnical is 源 結 O O O	sues that must be validated in HTTR demonstration test (2/2) 選定の考え方 ・実用炉の使用条件下で想定される軸系の振動や 過渡的な温度変化に対する安定運転の確証が必要。 。1 次系インベントリや圧力比制御による制御方式の 妥当性確認が必要。 ・ま用炉相当の温度条件や原子炉の起動停止に伴う 温度変化を模擬可能な HTTR を用いた熱利用試験 での実施が適切。 ・設計で想定した電気出力が得られることの確証が 必要。 ・実用炉での高温条件が横擬可能な HTTR を用いた 熱利用試験での実施が適切。	武験項目 定格連続運転 ・ 定格連続運転 ・ 発電機負荷喪失 武験 ・ 水素製造施設 負荷追従試験 (定期開放点検時の)
	メンテナンス方法の確立	0	 数値計算に基づき実用炉の汚染状況を模擬し、組立や分解、調整要領の確認が可能。 実用炉の機器構成が同じ HTTR に接続する ソウムガスタービンを用いることが適切。 	保守点検)

JAEA-Technology 2014-031

試験項目	HTTR に接続する熱利用システム
字校演练演制	ヘリウムガスタービン発電設備、
上 俗 建 税 連 報	コジェネレーションシステム
扫動位止計驗	ヘリウムガスタービン発電設備、
起到 [71] 武阙	コジェネレーションシステム
怒雪烨 母带 南 上計驗	ヘリウムガスタービン発電設備、
光电恢复彻天入码被	コジェネレーションシステム
水麦制洗施設用賞描擬試驗	水素製造施設、
小糸衣垣旭叹共市侯策的歌	コジェネレーションシステム
水素製造施設負荷追従試験	コジェネレーションシステム

Table 4.2 Candidates of HTTR demonstration tests and relevant plant concepts



Fig.4.1 Schematic configuration of H₂ plant for HTTR demonstration test



Fig.4.2 Schematic configuration of helium gas turbine system for HTTR demonstration test



Fig.4.3 Schematic configuration of cogeneration system with H_2 plant and helium gas turbine system for HTTR demonstration test



Fig.4.4 Schematic layout of cogeneration system with H_2 plant and helium gas turbine system for HTTR demonstration test

5. おわりに

原子力機構は、優れた安全性を有する高温ガス炉の多様な産業利用に向けて、HTTR を中心とした研究開発を進めており、本報では、HTTR を用いた熱利用試験計画の検討結果を報告した。

HTTR を用いた熱利用試験で実施すべき技術実証項目には、高温ガス炉及び熱利用技術の実用 化に向けた技術課題、すなわち、原子炉施設と水素製造施設の接続時の安全基準やこれに適合す る設計対策の確立、並びに、ヘリウムガスタービンの総合性能の検証の解決を目的に、原子力規 制委員会による安全基準の評価・策定、水素製造施設異常時の原子炉安定運転確保、ヘリウムガ スタービンの安定運転及び性能の確認、並びにメンテナンス手法の確立を選定した。

また、技術実証項目に対応する HTTR を用いた熱利用試験として、ヘリウムガスタービン発電 設備の定格連続運転や起動停止試験、発電機負荷喪失試験、並びに、水素製造施設の異常模擬試 験や負荷追従試験を提案した。

プラント概念の検討では、これまでの HTTR に接続する熱利用システムの設計情報を基に、 HTTR への接続が想定される熱利用システムとして、水素製造施設やヘリウムガスタービン発電 設備をそれぞれ単独で接続する場合に加えて、両者から構成されるコジェネレーションシステム を2次へリウム冷却設備に設置する系統構成を提示した。また、水素製造施設からの可燃性ガス 漏えいに起因する火災・爆発による原子炉施設の安全上重要な機器の損傷や、有毒ガスによる原 子炉の運転員の被毒防止に必要な、原子炉建屋と水素製造施設間の離隔距離を確保可能な配置概 念を提示した。

今後は、文部科学省の科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会の下 に平成26年6月に設置された高温ガス炉技術研究開発作業部会での外部有識者からの提言等に基 づき HTTR へ接続する熱利用システムを選定するとともに、系統、機器及び配置設計を実施し、 プラント概念を詳細化する。また、制御計画の検討やプラント動特性評価を行い、HTTR を用い た熱利用試験の条件を定量化する。さらに、世界で初めてとなる原子炉施設と水素製造施設の接 続に向けて、原子力学会の研究専門委員会「高温ガス炉の安全設計方針」において議論を進めて いる安全要件原案作成を完了するとともに、HTTR の原子炉施設の設置変更許可取得に当たり要 求される安全評価を実施する予定である。

謝 辞

HTTR を用いた熱利用試験計画の検討にあたり貴重なご助言を頂いた原子力水素・熱利用研究 センター 國富一彦センター長、中川繁昭研究主幹に感謝いたします。

参考文献

- Fujikawa, S., Hayashi, H., Nakazawa, T. et al., Achievement of Reactor-outlet Coolant Temperature of 950°C in HTTR, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.41, No.12, 2004, pp.1245-1254.
- 2) Goto, M., Shinohara, M., Tochio, D. et al., Long-term high-temperature operation of the HTTR, Nuclear Engineering and Design, vol.251, 2012, pp.181-190.
- Saito, S., Tanaka, T., Sudo, Y. et al., Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), 1994, JAERI 1332.
- Kubo, S., Nakajima, H., Kasahara, S. et al., A demonstration study on a closed-cycle hydrogen production by the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process, Nuclear Engineering and Design, vol.233, No.1-3, 2004, pp.347-354.
- 5) 竹上弘彰, 石倉修一, 寺田敦彦 ほか, 熱化学法 IS プロセスに用いる SiC の構造設計手法案, JAEA-Technology 2011-002, 2011, 41p.
- Tanaka, N., Yamaki, T., Asano, M. et al., Membrane performance on electro-electrodialysis of HI–I₂–
 H₂O mixture for IS process, Nuclear Engineering and Design, vol.271, 2014, pp.51-54.
- 7) 坂場成昭, 佐藤博之, 原輝夫 ほか, HTTR-IS 水素製造システムの概念設計, JAEA-Research 2007-058, 2007, 31p.
- 5) 坂場成昭, 大橋弘史, 佐藤博之 ほか, 高温ガス炉による水素製造; HTTR-IS 水素製造システムにおける化学反応器の概念設計, 日本原子力学会和文論文誌, vol.7, No.3, 2008, pp.242-256.
- 9) 岩月仁,野口弘喜,寺田敦彦 ほか,熱化学法 IS プロセス水素製造実証試験装置の設計検討, JAEA-Research 2008-125, 2008. 60p.
- 10) 西原哲夫, 清水明, 谷平正典 ほか, HTTR に接続する水素製造システムの系統及び機器設計, JAERI-Tech 2002-101, 2003, 46p.
- Yan, X., Takizuka, T., Kunitomi, K. et al., Aerodynamic Design, Model Test, and CFD Analysis for a Multistage Axial Helium Compressor, Journal of Turbomachinery, vol.130, No.3, 2008, pp.1-12.
- 12) Yan, X., Sato, H., Inaba, Y. et al., "Advanced Reactor Design of Air-cooled, Inherently-safe GTHTR300A for Inland Installation, 18th Pacific Basin Nuclear Conference Busan, Korea, March 18-23, 2012.
- Sato, H., Yan, X. L., Tachibana, Y. et al., Assessment of load-following capability of VHTR cogeneration systems, Annals of Nuclear Energy, vol.49, 2012, pp.33-40.
- 14) 原輝夫,坂場成昭,佐藤博之 ほか,HTTR-IS 水素システムに供するブンゼン反応器および硫酸 分解器の構造概念, JAEA-Technology 2008-020, 2008, 28p.
- 15) 大橋一孝,西原哲夫,國富一彦,HTTR-IS 水素製造システムにおける安全設計の考え方,日本 原子力学会和文論文誌,vol.6, No.1, 2007, pp.46-57.
- US NRC, Next Generation Nuclear Plant Phenomena Identification and Ranking Tables (PIRTs)Volume 6: Process Heat and Hydrogen Co-Generation PIRTs, 2008.

- Sakaba, N., Sato, H., Ohashi, H. et al., Development Scenario of the Iodine-Sulphur Hydrogen
 Production Process to be Coupled with VHTR System as a Conventional Chemical Plant, Journal of
 Nuclear Science and Technology, vol.45, No.9, 2008, pp.962-969.
- 18) 佐藤博之, 大橋弘史, 田澤勇次郎 ほか, 水素製造施設の接続に係る高温ガス炉の安全設計方 針の検討, JAEA-Technology 2013-015, 2013, 68p.
- 19) 原子力規制委員会,原子力発電所の外部火災影響評価ガイド,2013.
- 20) US NRC, Evaluating the Habitability of a Nuclear Power Plant Control Room during a Postulated Hazardous Chemical Release, Reg. Guide 1.78, Rev.1, 2001.
- 21) US NRC, Evaluations of Explosions Postulated to Occur on Transportation Routes Near Nuclear Power Plants, Reg. Guide 1.91, Rev.1, 1978.
- 22) 小杉山真一,武井正信,滝塚貴和 ほか,高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)
 発電系設備の点検方法・手順,日本原子力学会和文論文誌, vol.2, No.4, 2003, pp.532-545.
- 23) NIOSH, NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards, 1997.

表1.	SI 基本単位	1.
甘大昌	SI 基本ì	単位
盔半里	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	Α
熱力学温度	ケルビン	Κ
物質量	モル	mol
光 度	カンデラ	cd

衣2. 基本単位を用いて衣されるSI組立単	<u>11</u> 00191
SI 基本単位	
名称	記号
面 積平方メートル	m ²
体 積 立法メートル	m ³
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s ²
波 数 毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸
質量濃度 キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈 折 率 (b) (数字の) 1	1
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野で	は物質濃度
(substance concentration) ともよげれろ	

(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI租业单位			
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 隹	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立 体 催	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 (b)	$m^{2/}m^2$
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁床	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量,方向 性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{\cdot 2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹ mol
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (a)へルツは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。やレシウス度とケルビンの
 (b)からさは同一である。したがって、温度差や理慮問摘を決す数値はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM動音2 (CI-2002) を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ミヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	$m^2 m^{-2} kg s^{-3} = kg s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10 ⁻³	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピ _コ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^{3}	+ 1	k	10 ⁻¹⁸	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1t=10^{3}$ kg		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される奴値が実験的に待られるもの					
	名	称		記号	SI 単位で表される数値
電	子 オ	ドル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダ	ル	F	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネー バ	Np	の単位しの教徒的な関係は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デジベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{m}^{\cdot 2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx		
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$		
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$		
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹		
(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

	表10. SIに属さないその他の単位の例					
	名	称		記号	SI 単位で表される数値	
+	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq	
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy	
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv	
ガ		\sim	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T	
フ	T.	N	11		1フェルミ=1 fm=10-15m	
メー	ートル	系カラ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg	
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	準	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
力		IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)	
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m	