

HTTR-熱利用試験施設の安全設計の考え方

Safety Design Philosophy of HTTR Heat Application Test Facility

青木 健 清水 厚志 飯垣 和彦 沖田 将一郎
長谷川 武史 水田 直紀 佐藤 博之 坂場 成昭

Takeshi AOKI, Atsushi SHIMIZU, Kazuhiko IIGAKI, Shoichiro OKITA
Takeshi HASEGAWA, Naoki MIZUTA, Hiroyuki SATO and Nariaki SAKABA

高速炉・新型炉研究開発部門
大洗研究所
高温ガス炉研究開発センター
水素・熱利用研究開発部

Department of Hydrogen and Heat Application Research and Development
HTGR Research and Development Center
Oarai Research and Development Institute
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

July 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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

HTTR-熱利用試験施設の安全設計の考え方

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所
高温ガス炉研究開発センター 水素・熱利用研究開発部

青木 健、清水 厚志⁺¹、飯垣 和彦⁺¹、沖田 将一朗、長谷川 武史、水田 直紀、
佐藤 博之、坂場 成昭⁺²

(2022年3月31日受理)

日本原子力研究開発機構では、高温ガス炉による大量かつ安価なカーボンフリー水素製造技術の実用化を目指し、世界最高の原子炉出口冷却材温度 950℃を達成した高温工学試験研究炉 (HTTR) を用いて水素製造を行う HTTR-熱利用試験を計画している。HTTR-熱利用試験では、原子力規制委員会からの設置変更許可取得を通じて、高温ガス炉と水素製造施設の接続に関し、高い安全性を実現する安全設計を確立することが求められている。そこで、HTTR 安全設計をベースに、施設の変更や水素製造施設の接続に伴い安全設計上新たに考慮すべき事象に対する対策を考慮し、HTTR-熱利用試験施設の安全設計の考え方を検討した。検討に当たっては、原子炉安全の観点からの十分な安全性を確保することを大前提としつつ、水素製造施設に対して、高圧ガス災害に対する安全確保の多くの実績を有する一般産業法規を適用することを基本方針とした。

本報では、水素製造施設への高圧ガス保安法適用に係る合理性や条件、HTTR-熱利用試験施設の安全機能の重要度分類や耐震設計上の重要度分類、重要安全施設の選定、原子炉設置変更許可申請に係る安全設計の考え方に関する検討結果を報告する。

大洗研究所：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地

+1 高温工学試験研究炉部

+2 高温ガス炉研究開発センター

Safety Design Philosophy of HTTR Heat Application Test Facility

Takeshi AOKI, Atsushi SHIMIZU⁺¹, Kazuhiko IIGAKI⁺¹, Shoichiro OKITA,
Takeshi HASEGAWA, Naoki MIZUTA, Hiroyuki SATO and Nariaki SAKABA⁺²

Department of Hydrogen and Heat Application Research and Development,
HTGR Research and Development Center, Oarai Research and Development Institute,
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 31, 2022)

Japan Atomic Energy Agency is planning a High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) heat application test producing hydrogen with the HTTR which achieved the highest reactor outlet coolant temperature of 950°C in the world to realize a massive, cost-effective and carbon-free hydrogen production technology utilizing a high temperature gas cooled reactor (HTGR). In the HTTR heat application test, it is required to establish its safety design for coupling a hydrogen production plant to HTGR through the licensing by the Nuclear Regulation Authority (NRA). A draft of a safety design philosophy for the HTTR heat application test facility was considered taking into account postulated events due to the plant modification and coupling of the hydrogen production plant based on the HTTR safety design which was authorized through the safety review of the NRA against New Regulatory Requirements. The safety design philosophy was examined to apply proven conventional chemical plant standards to the hydrogen production plant for ensuring public safety against disasters caused by high pressure gases. This report presents a result of a consideration on safety design philosophies regarding the reasonability and condition to apply the High Pressure Gas Safety Act for the hydrogen production plant, safety classifications, seismic design classification, identification of important safety system.

Keywords: HTGR, Hydrogen Production, HTTR, HTTR Heat Application Test

+1 Department of HTTR

+2 HTGR Research and Development Center

目 次

1. はじめに -----	1
2. HTTR-熱利用試験の概要 -----	2
2.1 HTTR の概要 -----	2
2.2 電力水素併産型高温ガス炉システム（GTHTR300C）の概要 -----	2
2.3 HTTR-熱利用試験の概要 -----	3
2.4 HTTR-熱利用試験に係る既往研究開発 -----	3
2.5 HTTR-熱利用試験施設の特徴 -----	4
3. HTTR-熱利用試験施設の安全設計検討方針 -----	11
3.1 安全設計の対象 -----	11
3.2 基本方針 -----	11
3.3 原子炉施設と水素製造施設に適用すべき法規の考え方 -----	11
3.4 原子炉施設と水素製造施設（一般産業施設）との境界の考え方 -----	12
3.5 安全設計で考慮すべき変更点 -----	12
3.6 安全設計における検討事項 -----	16
4. HTTR-熱利用試験に係る適用法規の検討 -----	31
4.1 水素製造施設の適用法規 -----	31
4.2 水素製造施設への高圧ガス保安法適用の条件 -----	32
4.3 高圧ガス保安法の適用範囲 -----	34
5. HTTR-熱利用試験施設の安全設計 -----	40
5.1 安全機能の重要度分類の考え方 -----	40
5.2 耐震設計上の重要度分類の考え方 -----	41
5.3 重要安全施設選定の考え方 -----	42
5.4 原子炉設置変更許可申請に係る安全設計の方針 -----	43
5.4.1 外的事象の防護方針 -----	43
5.4.2 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止 -----	48
5.4.3 多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止 -----	50
6. おわりに -----	56
謝辞 -----	58
参考文献 -----	58

Contents

1. Introduction -----	1
2. Overview of the HTTR Heat Application Test -----	2
2.1 Summary of the HTTR -----	2
2.2 Summary of the High Temperature Gas-cooled Reactor Hydrogen Cogeneration System (GTHTR300C)-----	2
2.3 Overview of the HTTR Heat Application Test-----	3
2.4 Past R&D related to the HTTR Heat Application Test -----	3
2.5 Characteristics of the HTTR Heat Application Test -----	4
3. Consideration of Safety Design Philosophy of the HTTR Heat Application Test -----	11
3.1 Scope of the Safety Design -----	11
3.2 Basic Approach -----	11
3.3 Applicable Regulation for the Hydrogen Production Plant-----	11
3.4 Philosophy of the Boundary for Application of the High Pressure Gas Safety Act-----	12
3.5 Overview of Modification in Safety Design of the HTTR -----	12
3.6 Overview of Modification in Safety Design of the HTTR -----	16
4. Safety Design Philosophy for the HTTR Heat Application Test -----	31
4.1 Applicable Regulation for the HTTR Heat Application Test - -----	31
4.2 Conditions to Apply the High Pressure Gas Safety Act to the Hydrogen Production Plant ---	32
4.3 Demarcation Boundary for Application of the High Pressure Gas Safety Act -----	34
5. Safety Design Philosophy of the HTTR Heat Application Test -----	40
5.1 Safety Classification Approach -----	40
5.2 Seismic Design Classification Approach -----	41
5.3 Selection Approach for Important Safety System -----	42
5.4 Safety Design Philosophy for an Application for the Permission for a Change in Reactor Installation License -----	43
5.4.1 Measures against the External Event -----	43
5.4.2 Measures to Prevent Progression of Anticipated Operational Occurance and Design Basis Accident -----	48
5.4.3 Measures to Prevent Progression of the Accident Releasing Massive Radioactive Material -----	50
6. Summary -----	56
Acknowledgements-----	58
References -----	58

表リスト

Table 1	HTTRの基本仕様	7
Table 2	炉外技術開発試験装置の基本仕様	7
Table 3	高温隔離弁の基本仕様	7
Table 4	2次ヘリウム冷却設備に対する起因事象の同定結果	19
Table 5	水蒸気供給設備に対する起因事象の同定結果	21
Table 6	原料ガス供給設備に対する起因事象の同定結果	24
Table 7	不活性ガス供給設備に対する起因事象の同定結果	27
Table 8	後処理設備に対する起因事象の同定結果	28
Table 9	外部ハザードに係る安全設計方針や影響評価条件の変更点	30
Table 10	HTTR-熱利用試験における配管を介して与える影響	37
Table 11	高圧ガス保安法適用範囲の候補	38
Table 12	HTTR-熱利用試験施設の火災防護対策案	53

図リスト

Fig. 1	HTTR-熱利用試験施設の鳥瞰図	8
Fig. 2	HTTR-熱利用試験施設の運転開始までに想定される行政手続きの流れ	8
Fig. 3	原子炉冷却系統施設の設備構成	9
Fig. 4	HTTR 熱利用試験施設の設備構成	10
Fig. 5	耐震重要度分類の判定方法	54
Fig. 6	重要安全施設の選定プロセス	54
Fig. 7	安全評価の流れ	55

List of Table

Table 1 Specifications of HTTR ----- 7

Table 2 Specifications of mock-up test facility ----- 7

Table 3 Specifications of high temperature isolation valve ----- 7

Table 4 Initiating event identification for secondary helium cooling system ----- 19

Table 5 Initiating event identification for water and steam supply system ----- 21

Table 6 Initiating event identification for raw gas supply system ----- 24

Table 7 Initiating event identification for nitrogen gas supply system ----- 27

Table 8 Initiating event identification for product gas combustion system ----- 28

Table 9 Changes in safety design philosophy and effect evaluation condition for external hazards 30

Table 10 Effect through pipe in the HTTR Heat Application Test ----- 37

Table 11 Candidate application area of the High Pressure Gas Safety Act ----- 38

Table 12 Protection measures against internal fire in the HTTR Heat Application Test ----- 53

List of Figure

Fig. 1 Birds-eye view of the HTTR Heat Application Test facility ----- 8

Fig. 2 Schematic flow of anticipated administrative process until start of operation of the HTTR Heat Application Test ----- 8

Fig. 3 Schematic diagram of reactor cooling system facility ----- 9

Fig. 4 Schematic diagram of the HTTR Heat Application Test facility ----- 10

Fig. 5 Identification process of seismic design classification ----- 54

Fig. 6 Identification process of important safety system ----- 54

Fig. 7 Schematic flow of safety evaluation ----- 55

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、世界的に実用化に向けた機運が高まっている。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」¹⁾を受けて、大量かつ安価なカーボンフリー水素製造に必要な技術の開発に向け、高温ガス炉と水素製造施設の高い安全性を実現するべく、商用技術が確立されている天然ガス水蒸気改質法（SR法）による水素製造施設を世界最高の原子炉出口冷却材温度 950℃を達成した高温工学試験研究炉（HTTR: High Temperature Engineering Test Reactor）²⁾に接続し、高温ガス炉と水素製造施設の接続に必要な機器及びシステム設計技術を確立することを目的としたHTTR-熱利用試験の実施を計画している³⁾。

高温ガス炉による大量かつ安価なカーボンフリー水素製造技術の実用化には、高温ガス炉水素製造システムに対し原子炉安全の観点からの十分な安全性を確保することが求められる。これまで、原子炉施設に水素製造施設を接続した例はなく、HTTRを含め既存の原子炉施設における安全設計ではこのようなシステムを想定していない。一方、多量の高圧ガスを保有する水素製造施設は、一般産業法規の元の技術基準に基づき建設されることで、想定される高圧ガス災害に対して安全性を確保してきた実績がある。また、経済性の観点からも、高温ガス炉に接続する水素製造施設を一般産業法規の下で建設する「水素製造施設の一般産業施設化」^{4),5)}が、産業界から望まれている。このような背景を踏まえ、原子力機構は、原子炉施設の安全確保を大前提としつつ、水素製造施設の接続に係るHTTR許認可を通じて、水素製造施設への高圧ガス保安法適用を可能とする高温ガス炉の安全設計を確立することを計画している。

2021年度は、原子力機構が提示するHTTR-熱利用試験施設の安全設計原案の評価を目的として、外部専門家から構成されるHTTR-熱利用試験専門委員会を設置し、HTTR-熱利用試験施設の適用法規や原子炉施設の新規制基準への適合のための設計の考え方の妥当性に関して検討・審議を行った。

本報は、今後のHTTR-熱利用試験施設の安全設計への利用を想定し、HTTR-熱利用試験専門委員会での検討結果を反映したHTTR-熱利用試験施設の安全設計の考え方をとりまとめた。なお、ここでの安全設計とは、HTTR設置変更許可申請書添付書類八（試験研究用等原子炉施設の安全設計に関する説明書）の第1章「安全設計」を指しており、一般産業施設の安全設計を含まない。第2章ではHTTR-熱利用試験の概要を述べ、第3章ではHTTR-熱利用試験施設の安全設計検討方針を示し、第4章ではHTTR-熱利用試験施設の安全設計として、HTTR-熱利用試験施設の適用法規、安全機能の重要度分類や重要安全施設選定、耐震設計上の重要度分類の考え方、試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則⁶⁾（以下「試験炉設置許可基準規則」という。）への適合のための設計方針の考え方に関する検討結果及び今後の検討課題を示す。

2. HTTR-熱利用試験の概要

2.1 HTTR の概要

HTTR は、我が国初かつ唯一の高温ガス炉であり、高温ガス炉に関する基盤技術及び核熱利用に関する基盤技術を確立することを目的に建設された。その基本仕様を Table 1 に示す。原子炉熱出力は 30MW であり、冷却材にはヘリウムガス、減速材には黒鉛、燃料にはセラミックスの被覆燃料粒子が用いられている。また、HTTR では、原子炉入口冷却材温度 395℃に対して、原子炉出口冷却材温度が、定格運転時に 850℃、高温試験運転時に 950℃となる。HTTR の 1 次冷却設備は、1 次加圧水冷却器 (PPWC: Primary Pressurized Water Cooler) 及び中間熱交換器 (IHX: Intermediate Heat Exchanger) の 2 つの熱交換器を有しており、原子炉熱出力 30 MW の時、PPWC のみで除熱する単独運転、及び PPWC で 20 MW、IHX で 10MW を除熱する並列運転の 2 つの運転モードがある。

HTTR は、平成 10 年 11 月 10 日に初臨界、平成 13 年 12 月に熱出力 30 MW の定格運転を達成し、平成 22 年 4 月には原子炉出口冷却材温度 950℃での 50 日間連続の並列・高温試験運転に成功した。さらに平成 22 年 12 月には、高温ガス炉固有の安全性の実証を目的として、原子炉熱出力 9 MW 時に全ての 1 次系ガス循環機を停止させる試験 (炉心流量喪失試験 Run 1) を実施し⁷⁾、その結果、主に減速材温度の上昇による負の反応度フィードバックが生じることで、原子炉出力が低下するとともに燃料温度の異常な上昇等もなく、安定な状態になることを確認した。

しかし、平成 23 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所事故を受けて、国内の他の実用発電炉や試験研究炉と同様に、HTTR は長期にわたる運転停止を余儀なくされた。その後、原子力機構は、平成 26 年 11 月に新規制基準適合性確認のための HTTR の設置変更許可を申請し、令和 2 年 6 月に許可を取得、令和 3 年 7 月には HTTR の運転を再開した。

運転再開後の令和 4 年 1 月には、HTTR を用いて、高温ガス炉の炉心流量喪失時における安全性を実証することを目的に、原子炉熱出力 9 MW 時に全てのガス循環機及び原子炉圧力容器周りに設置される炉容器冷却設備を停止させる試験 (炉心冷却喪失試験 Run 3) を実施した⁸⁾。今後は原子炉熱出力 30 MW 時に全ての 1 次系ガス循環機を停止させる試験 (炉心流量喪失試験 Run 2) を実施する予定である⁹⁾。

2.2 電力水素併産型高温ガス炉システム (GTHTR300C) の概要

原子力機構は、HTTR の建設・運転を通じて得られた知見を基に、電気出力約 300MW のブロック型高温ガス炉ガスタービン発電システム (GTHTR300) の設計研究、ガスタービン発電システムに関連する要素技術の研究開発を行ってきた¹⁰⁾。高温ガス炉を用いた水素製造システムのひとつとして、GTHTR300 をベースに電力水素併産型高温ガス炉システム (GTHTR300C、以下「実用システム」という。) の設計が進められている¹¹⁾。GTHTR300C における原子炉には、水素製造施設に高温のヘリウムガスを供給するための中間熱交換器とガスタービン発電システムが接続されている。中間熱交換器の 2 次側に接続する水素製造設備は、一般の化学プラントに適用される規制法規に従って、設計、製作、運転、保守を行う方針であ

る。

2.3 HTTR-熱利用試験の概要

原子力機構では、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を受けて、大量かつ安価なカーボンフリー水素製造に必要な技術の開発に向け、高温ガス炉と水素製造施設の高い安全性を実現する接続技術を確認するべく、商用技術が確立されているSR法による水素製造施設をHTTRに接続し、高温ガス炉と水素製造施設の接続に必要な機器及びシステム設計技術を確認することを目的としたHTTR-熱利用試験を計画している。HTTR-熱利用試験施設の概要をFig.1に示す。原子炉から供給された高温の1次ヘリウムガスは、中間熱交換器で2次ヘリウムガスと熱交換する。昇温された2次ヘリウムガスは、高温ヘリウム配管及び高温隔離弁を通り、原子炉格納容器及び原子炉建家の外部に取り出される。2次ヘリウムガスは、水蒸気改質器に熱を供給し、低温となった後、再び配管を通じて中間熱交換器へと戻る。水蒸気改質器では、SR法により天然ガス及び水蒸気を原料に水素を製造する。製造された水素は、その大部分をフレアスタックで燃焼させるため、施設内に滞留しない。

HTTR-熱利用試験に向けては、水素製造施設の接続に伴うHTTR既設設備の改造及び水素製造施設の新規設置を行うため、HTTRの基本設計及び詳細設計の変更を原子力規制委員会に対して申請し、許認可を取得する。併せて、茨城県原子力安全協定（原子力施設周辺的安全確保及び環境保全に関する協定）第5条（新增設等に対する事前了解）に基づく新增設等計画書を茨城県、所在市町村である大洗町、鉾田市に提出し、事前の了解を得る。加えて、HTTR-熱利用試験では、水素製造施設が高圧ガス設備を有するため、高圧ガス保安法に基づき茨城県の許可を得る必要がある。HTTR-熱利用試験施設の運転開始までに想定される行政上の手続きの流れをFig.2に示す。

2.4 HTTR-熱利用試験に係る既往研究開発

HTTR-熱利用試験に係る主な既往研究開発として、原子力機構は、これまでに水蒸気改質技術¹²⁾及び高温隔離弁の開発^{13),14)}を実施している。

水蒸気改質技術の開発では、高温ガス炉によるSR法による水素製造に係る要素技術確立を目的として、ヘリウム熱交換型水蒸気改質器の開発及び電気ヒーターを用いた試験ループである炉外技術開発試験装置による水素製造性能検証がなされた。水蒸気改質器の基本仕様⁹⁾をTable 2に示す。炉外技術開発試験装置は、HTTRの2次ヘリウム冷却設備に水蒸気改質器を接続した場合を模擬した条件下で、110Nm³/hの水素製造量を達成し、ヘリウム熱交換型水蒸気改質器の設計技術を確認するとともに、ヘリウム外部加熱方式のSR法による水素製造性能を検証した。HTTR-熱利用試験施設では、ここで開発した触媒管が1本のヘリウム熱交換型水蒸気改質器の構造をベースとして、触媒管を複数本、環状に2層以上配列したものを採用予定である。

高温隔離弁の開発では、約900℃のヘリウム環境で異常時に原子炉施設と水素製造施設を隔離可能な高温隔離弁の基盤技術の確立を目的として、高温で耐摩耗性に優れた弁座盛金材の開発及びモデル試験による性能検証がなされた。開発された高温隔離弁の基本仕様¹⁴⁾をTable 3

に示す。高温隔離弁の構造には、単純でシート弁に熱歪みが生じにくい内部断熱型アングル弁を採用した。作動流体はヘリウムガスであり、使用温度は 905°C、使用圧力は 4.1 MPa である。また、弁座内径は、100 mm である。本研究では、高温で耐摩耗性に優れる弁座盛金材料として、ステライト複合材を新たに開発した上で、弁座からのヘリウム漏えい量が目標値を満足することを確認し、HTTR-熱利用試験施設の 2 次ヘリウム冷却設備における温度や圧力条件で高温隔離弁を使用できる目処が得られた。HTTR-熱利用試験施設では、ここで開発した高温隔離弁の構造をベースとしたものを採用予定である。

2.5 HTTR-熱利用試験施設の特徴

本節は、既設 HTTR における原子炉冷却系統や主要機器、計測制御系統施設等の設備構成、HTTR-熱利用試験施設の設備構成及び施設変更点をまとめる。

(1) 既設 HTTR の設備構成

HTTR における原子炉冷却系統施設は、主に原子炉、1 次冷却設備、2 次ヘリウム冷却設備、補助冷却設備、炉容器冷却設備から構成される。HTTR の原子炉冷却系統施設の設備構成を Fig.3 に示す。

1 次冷却設備は、1 次冷却材を循環させて炉心を冷却する設備であり、原子炉圧力容器、1 次ヘリウム循環機、中間熱交換器、1 次加圧水冷却器、1 次ヘリウム配管、弁類等から構成し、原子炉格納容器内に設置する。炉心で加熱された 1 次冷却材は、原子炉圧力容器に接続する二重管の内管を通して 1 次加圧水冷却器あるいは中間熱交換器に送られ、加圧水あるいは 2 次冷却材であるヘリウムガスと熱交換して低温になり、各 1 次ヘリウム循環機で昇圧された後、二重管の内管と外管との間の環状部を通して原子炉圧力容器に環流する。1 次冷却設備は、中間熱交換器で約 10MW 及び 1 次加圧水冷却器で約 20MW の除熱を行う並列運転、又は 1 次加圧水冷却器で約 30MW の除熱を行う単独運転のいずれかの方法で運転する。並列運転と単独運転の運転方法の変更は、原子炉を停止して行う。1 次冷却設備は、補助ヘリウム冷却系及び関連する原子炉補助施設の配管等との接続部を含めて原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する。

2 次ヘリウム冷却設備は、並列運転時に運転し、2 次冷却材（ヘリウムガス）を循環させて 1 次冷却材を冷却する設備であり、2 次ヘリウム循環機、2 次加圧水冷却器、2 次ヘリウム配管、弁類等から構成し、原子炉格納容器内に設置する。中間熱交換器で加熱された 2 次冷却材は、中間熱交換器に接続する二重管の内管を通して 2 次加圧水冷却器に送られ、加圧水と熱交換して低温になり、2 次ヘリウム循環機で昇圧された後、内管と外管の間の環状部を通り、中間熱交換器に環流する。中間熱交換器における 2 次冷却材の圧力は、1 次冷却材の 2 次冷却材（ヘリウムガス）中への侵入を防止するため、1 次冷却材の圧力よりも高くなるよう制御する。

補助冷却設備は、1 次冷却設備、2 次ヘリウム冷却設備及び加圧水冷却設備の冷却能力喪失等の運転時の異常な過渡変化に伴う原子炉スクラム時及び設計基準事故時等において、強制循環による炉心の冷却が可能な場合に、炉心からの核分裂生成物の崩壊熱及び他の残留熱を除去するための設備である。補助冷却設備は、1 次冷却材が循環する補助ヘリウム冷却系及び 1 次冷却材の除熱を行う補助冷却水系から構成する。補助ヘリウム冷却系は、補助冷却器、補助へ

リウム循環機、配管、弁類等から構成し、補助冷却水系は、補助冷却水空気冷却器、補助冷却水循環ポンプ、補助冷却水加圧器、配管、弁類等から構成する。通常運転時には、補助冷却設備起動時の急激な温度上昇と熱衝撃を緩和するため、少量の1次冷却材を原子炉から補助冷却器に導く。補助冷却器で補助冷却水により冷却された1次冷却材は、1次ヘリウム純化設備に導かれ、不純物を除去した後、1次ヘリウム純化設備のガス循環機により補助冷却器を経て原子炉に環流する。運転時の異常な過渡変化に伴う原子炉スクラム時及び設計基準事故時には、補助冷却設備起動信号により、補助ヘリウム循環機、補助冷却水空気冷却器のファン等が起動し、原子炉を冷却する。

炉容器冷却設備は、強制循環による炉心の冷却が期待できない減圧事故及び1次冷却設備の二重管内管破損事故時等に、原子炉圧力容器、炉内構造物、炉心構成要素等の健全性を維持し、燃料に過大な損傷を生じさせないように、炉心からの核分裂生成物の崩壊熱及び他の残留熱を除去するために設けるものであり、水冷管パネル、循環ポンプ等から構成する。水冷管パネルは、原子炉圧力容器を取り囲む1次遮へい体等の表面に設け、ふく射及び自然対流によって、原子炉圧力容器の外面から間接的に炉心を冷却する。炉容器冷却設備は、原子炉の通常運転時において、原子炉圧力容器を取り囲む1次遮へい体のコンクリートを冷却するために稼働しており、設計基準事故が発生した場合には継続して運転する。

HTTRにおける計測制御系統施設は、原子炉計装及びプロセス計装、原子炉制御設備、原子炉保護設備、工学的安全施設作動設備、制御室から構成される。原子炉計装及びプロセス計装は原子炉保護系や原子炉の運転制御及び保護動作に必要な情報を得るための計装施設である。原子炉制御設備は、原子炉出力、原子炉出口冷却材温度等を制御し、原子炉施設の主要なパラメータが安定な応答をするように設ける制御系、誤操作の防止や異常の拡大防止のためのインターロック回路等からなる。原子炉保護設備は、異常状態を検知し、異常又は故障の程度によっては原子炉スクラム信号を発生し、制御棒を炉心に挿入させることにより原子炉を自動停止する役割を有する。工学的安全施設作動設備は、設計基準事故の拡大を防止あるいは環境への放射性物質の放出を抑制するための設備を作動させる。

(2) HTTR-熱利用試験施設の設備構成

HTTR-熱利用試験施設の設備構成を Fig.4 に示す。HTTR に対する水素製造施設の接続に伴い、既設の中間熱交換器上部に位置する2次ヘリウム配管分岐を改修し、2次ヘリウム配管を改修部から原子炉格納容器外、原子炉建家外へ引き出す計画である。2次ヘリウム冷却設備には、新たに水蒸気改質器、蒸気過熱器、蒸気発生器、ヘリウム冷却器、隔離弁、ヘリウム循環機を設置する。中間熱交換器から取出された2次ヘリウムガスは、水蒸気改質器、蒸気過熱器及び蒸気発生器で熱交換され、ヘリウム冷却器で所定の温度まで冷却された後、ヘリウム循環機によって原子炉建家内に移送され、2次加圧水冷冷却器から出てきたヘリウムガスと合流して中間熱交換器に戻される。水蒸気改質器、蒸気過熱器、蒸気発生器の2次側（原子炉から見て3次側）には、弁を介して水素製造施設を接続する。本稿は、水素製造施設を一般産業法規の下で建設することを図る。一般産業法規を適用する範囲や原子炉等規制法と一般産業法規の境界について、複数のケースを検討しており、その議論については4.3を参照されたい。

水蒸気改質器は、2次ヘリウムを熱源として原料ガスを水蒸気改質することで生成ガスである水素を発生させる、ヘリウム熱交換型の化学反応器である。ヘリウムと生成ガスは、触媒管を介して熱交換する。触媒管の形状には、旧原研での開発実績を踏まえ、熱膨張吸収が容易で、改質反応後の生成ガスの熱の有効利用が可能であることから、バイヨネット型を採用する。炉外技術開発試験装置から、触媒管を7本に、交換熱量を0.96MW程度に増大させる予定である。

蒸気発生器は、2次ヘリウム冷却設備に設置される機器で、水素製造施設通常運転時は2次ヘリウムを熱源として蒸気過熱器へ所定の水蒸気を供給する機能を担う。また、水素製造施設異常時は、蒸気発生器出口の弁を閉止し、蒸気過熱器への水蒸気供給を停止し、2次ヘリウム冷却設備の通常除熱機能を担う。蒸気発生器は、水素製造施設通常運転時、異常時ともに、蒸気発生器の圧力を一定に維持することで保有水温度が一定に維持されるため、蒸気発生器出口でのヘリウム温度が一定に維持される。

隔離弁は、原子炉格納容器及び原子炉建家を貫通する2次ヘリウム冷却設備に、原子炉格納容器隔離弁及び原子炉建家隔離弁として設置する。隔離弁は、高温環境で使用されることから、弁箱の設計温度を低減するため、内部断熱方式の弁を採用する。また、隔離弁は、弁箱内部構造をシンプルとしつつ、シート面に熱歪が生じにくい構造とするため、アングル弁を採用する。過去の開発成果を踏まえ、弁体の着座時の急激な衝撃を避ける観点から、締め切り速度を調整できる電動式の駆動機構を採用する。隔離弁は、事故時の原子炉格納容器及び原子炉建家の隔離機能を有する。具体的には、原子炉格納容器隔離弁は、事故時に格納容器隔離信号により閉止し、放射性物質の外部への放散を抑制する。また、原子炉建家隔離弁は、水蒸気改質器の触媒管破損検出により閉止し、事故時の可燃性ガスの水素製造施設から原子炉施設への移流拡散を抑制する。

水素製造施設は、液化天然ガスを気化させ、水蒸気改質器に供給する原料ガス供給設備、水蒸気改質器への水蒸気の供給や蒸気発生器への水の供給を担う水蒸気供給設備、水蒸気改質器で生成された水素を燃焼処理する後処理設備、水素製造施設の起動停止時に、水蒸気改質器内に不活性の窒素ガスを供給する不活性ガス供給設備で構成する。

Table 1 HTTR の基本仕様

原子炉熱出力	30 MW
冷却材	ヘリウムガス
減速材	黒鉛
燃料	被覆燃料粒子
燃料体方式	ブロック型
原子炉入口冷却材温度	395 °C
原子炉出口冷却材温度	定格運転：850 °C / 高温試験運転：950 °C
1次冷却材圧力	4.0 MPa

Table 2 炉外技術開発試験装置の基本仕様

ヘリウムガス側	
水蒸気改質器圧力	4.0 MPa
水蒸気改質器入口温度	880 °C
水蒸気改質器出口温度	650 °C
プロセスガス側	
水蒸気改質器入口圧力	4.3 MPa
水蒸気改質器入口温度	450 °C
水蒸気改質器出口温度	600 °C
蒸気炭素比	3.5
1時間当たりの水素製造量	110 Nm ³ /h

Table 3 高温隔離弁の基本仕様

型式	内部断熱式アングル弁
作動流体	ヘリウムガス
使用温度	905 °C
使用圧力	4.1 MPa
弁座内径	100 mm
弁座盛金材料	ステライト複合材
目標ヘリウム漏えい量	4.4 cm ³ /s 以下

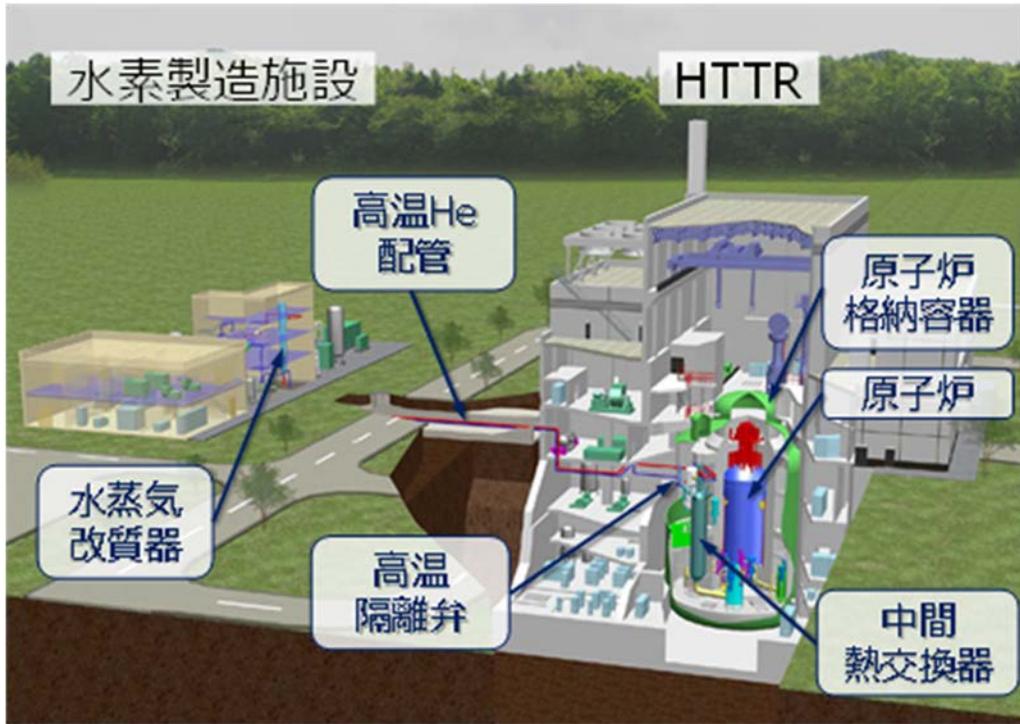


Fig.1 HTTR-熱利用試験施設の鳥瞰図

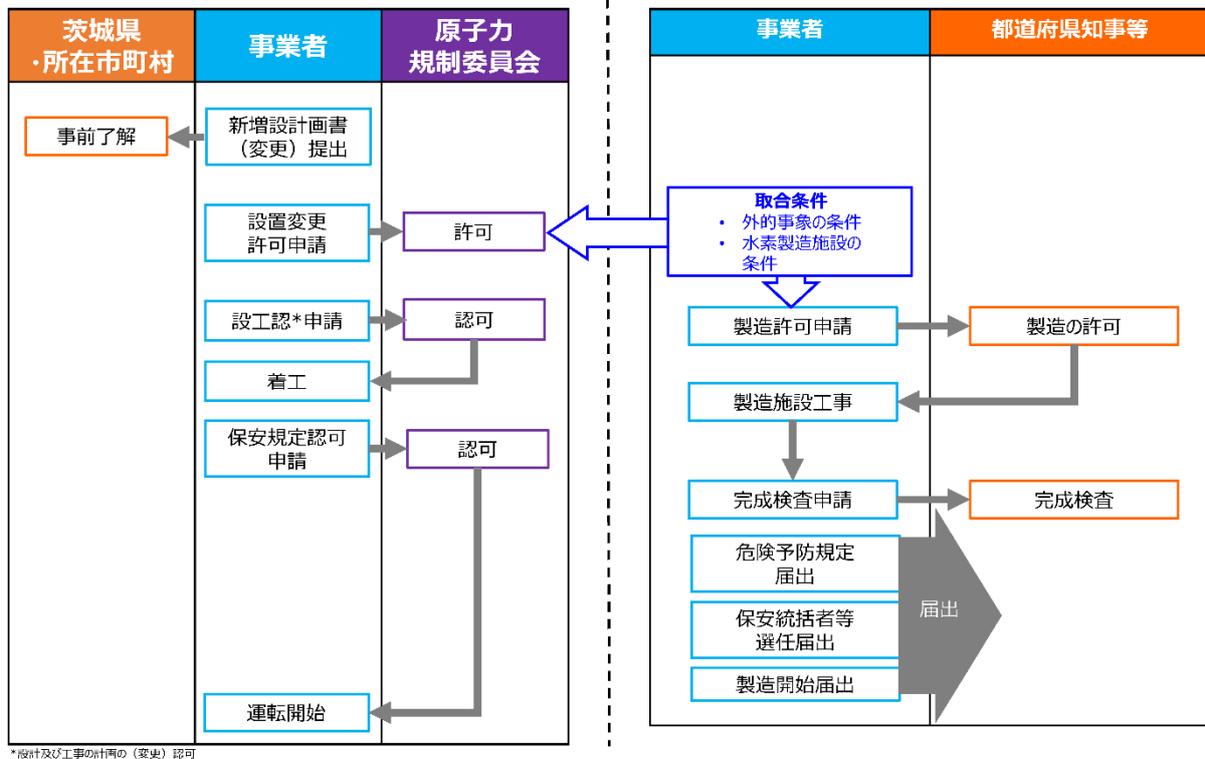


Fig.2 HTTR-熱利用試験施設の運転開始までに想定される行政手続きの流れ

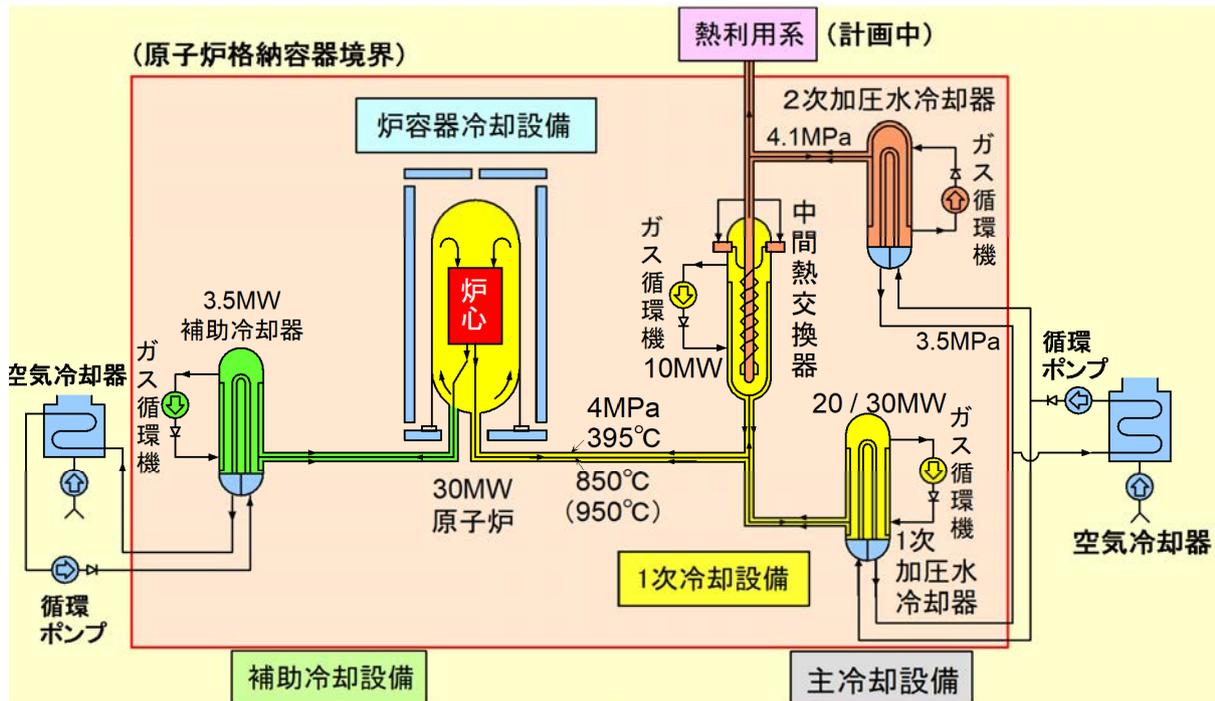


Fig.3 原子炉冷却系統施設の設備構成

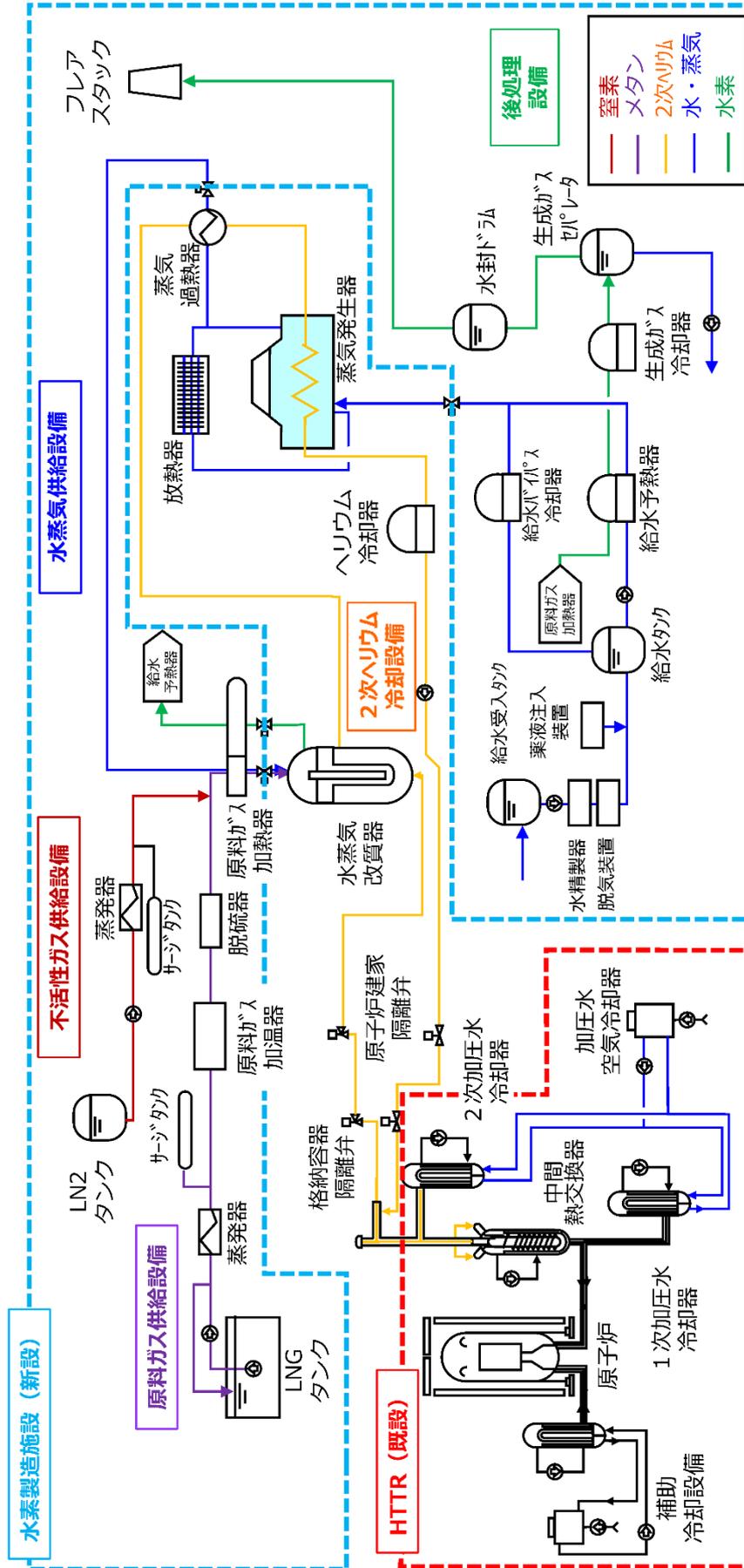


Fig.4 HTTR 熱利用試験施設の設備構成

3. HTTR-熱利用試験施設の安全設計検討方針

3.1 安全設計の対象

本検討における安全設計の対象は、HTTR-熱利用試験施設における、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律¹⁵⁾（以下「原子炉等規制法」という。）を適用する範囲とする。すなわち、HTTR-熱利用試験施設における原子炉等規制法適用範囲外に対する安全設計は、検討対象外とする。

3.2 基本方針

第一に、水素製造施設をHTTRに接続することによって、原子炉施設の安全性が阻害されることがあってはならない。すなわち、HTTR-熱利用試験施設の安全設計では、水素製造施設の如何なる異常も原子炉施設の安全に影響を与えないよう設計する。具体的には、水素製造施設は異常時に熱的又は物理的に原子炉施設から隔離しつつ、原子炉施設は安定した運転の継続を図る方針とする。また、水素製造施設の異常は外的事象として原子炉施設への影響評価を行い、原子炉施設の安全性に影響を与えないことを確認する方針とする。

第二に、多量の高圧ガスを扱う水素製造施設は、一般産業法規の元の技術基準を満足するように建設されることで、想定される高圧ガス災害に対する公衆安全を確保してきた実績がある。また水素製造施設は、経済性の観点から一般産業施設に適用される法規の下で設計、建設及び運転されることが、産業界から望まれている。そこで、水素製造施設には、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の適用を図る方針とする。

最後に、HTTR-熱利用試験施設の安全設計は、既に許可を受けているHTTR設置変更許可申請書¹⁶⁾の添付書類八「安全設計」を基本に、HTTRに対する水素製造施設の接続に伴う施設の変更点や安全設計で新たに考慮すべき事象に対応した記載の見直しを行う方針とする。

3.3 原子炉施設と水素製造施設に適用すべき法規の考え方

HTTR-熱利用試験施設の水素製造施設は、原子炉施設であるHTTRに配管で接続され、原子炉から供給される高温熱を利用して、天然ガスの水蒸気改質法により水素ガスを製造する施設である。水素製造施設は、水素製造施設での異常に起因する災害に対する公共の安全確保のため、適切な法律やその下の技術基準に従って、設計、建設、運転及び管理が行われなければならない。

HTTR-熱利用試験における原子炉施設は、原子炉の運転管理、安全確保に必要な設備等を有するため、既存のHTTRと同様に原子炉等規制法の下での技術基準が適用されなければならない。水素製造施設は、液化天然ガスの貯蔵、製造及び消費、1 MPa以上の高圧の天然ガスや水素の製造及び消費等を行う施設である。水素や天然ガスの主成分であるメタンが空気と混合した場合の爆発限界濃度の下限値は、それぞれ4.0%¹⁷⁾及び5.0%¹⁷⁾であり、10%以下であることから、一般高圧ガス保安規則において、可燃性ガスとして規定される¹⁸⁾。また水蒸気改質反応の副生成物である一酸化炭素は、一般高圧ガス保安規則において、毒性ガスと明示的に定義されている。更に、天然ガス中に微量含まれる可能性があり、常温で気体のn-ブタンは、毒

性が低く、高圧ガス保安法や毒物及び劇物取締法で有毒物質として定義されていないものの、化学品の分類及び表示に関する世界調和システム（GHS）分類ガイドランス¹⁹⁾に基づく特定標的臓器毒性（反復ばく露）物質の有害性区分は区分1とされており、ヒトに対して重大な毒性を持つ可能性がある物質とされる有毒物質である。

水素製造施設は、可燃性物質や有毒ガスを含む高圧ガスを取扱うため、水素製造施設に対して適用すべき法律の候補として、高圧ガス保安法が考えられる。一方で、高圧ガス保安法の第三条の七には、原子炉施設及びその附属施設内における高圧ガスに対する適用除外規定が存在する²⁰⁾。従って、水素製造施設を原子炉施設の附属施設と見なす場合、水素製造施設には高圧ガス保安法ではなく、原子炉等規制法を適用しなければならない。

しかし、原子炉等規制法は、原子炉施設に対する附属施設の適用範囲を定義しておらず、原子炉施設に接続された水素製造施設に対して適用すべき法規が明確ではない。そこで、HTTR-熱利用試験では、安全確保の観点で新たに考慮すべき、水素製造施設での異常に起因する事象とその影響を整理し、法規の目的と公共の安全確保に関する安全要件の観点から、水素製造施設に適用すべき法規を検討する。

3.4 原子炉施設と水素製造施設（一般産業施設）との境界の考え方

HTTR-熱利用試験施設の水素製造施設に高圧ガス保安法を適用し、それ以外の原子炉施設には原子炉等規制法を適用する場合、原子炉施設と水素製造施設の境界を定める必要がある。そこで、既に多数の実績を有している実用発電原子炉の蒸気タービンに対する火力発電所の技術基準の準用範囲の考え方を参考に、原子炉施設と水素製造施設の境界の考え方を検討する。

実用発電用原子炉は、原則として原子炉等規制法下の技術基準である「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則²¹⁾」の適用が求められる。一方、同規則は、実用発電用原子炉の蒸気タービンに、火力発電所の技術基準の準用を要求している。同規則解釈は、加圧水型軽水炉及び沸騰水型軽水炉に対する火力発電所の技術基準の準用範囲を例示している。当該例示によると、いずれの場合も、火力発電所の技術基準と原子炉等規制法の元の技術基準の適用範囲の境界は、弁に設けられている。

従って、HTTR-熱利用試験施設における原子炉施設と水素製造施設の境界は、弁に設定する。

3.5 安全設計で考慮すべき変更点

(1) 施設の変更点

HTTR-熱利用試験施設において、水素製造施設の接続に伴う構築物、系統及び機器の重要な変更点は、以下の通りである。まず、HTTR-熱利用試験施設では、2次ヘリウム冷却設備配管を原子炉建家の外部まで引き出す。異常時の原子炉格納容器及び原子炉建屋の隔離のため、原子炉格納容器隔離弁及び原子炉建家隔離弁を、2次ヘリウム冷却設備配管に設置する。2次ヘリウム冷却設備は、HTTRにおいて安全機能である「2次冷却系の通常時冷却」機能を有するが、HTTR-熱利用試験施設では、新たに設置する水蒸気改質器、蒸気過熱器、蒸気発生器及びヘリウム冷却器が、通常運転時の2次ヘリウム冷却設備全体の除熱量10MWのうち約

2MWを担うこととなる。また、HTTRに接続されるSR法による水素製造施設や水蒸気改質器は、水素製造の原料や反応生成物に含まれる可燃性ガスや有毒ガスを内包している。中間熱交換器を出て、水蒸気改質器に供給されるヘリウムガスの温度低下を低減するため、可燃性ガスや有毒ガスを内包する水素製造施設や水蒸気改質器は原子炉建家の近傍に設置する。

(2) 安全設計で新たに考慮すべき事象

原子炉施設の安全設計では、内の事象と外的事象を考慮する必要がある。更に外的事象は、施設内で発生する事故の誘因となる事象である内部ハザード及び施設外で発生する事故の誘因となる事象である外部ハザードに分類される。代表的な内の事象は、機器のランダム故障、人的過誤、商用電源喪失等に起因する事象である。代表的な内部ハザードは、内部火災や内部溢水、内部飛来物に起因する事象である。外部ハザードは、自然現象や外部人為事象に起因する事象である。

HTTR-熱利用試験施設の安全設計で新たに考慮すべき事象は以下の手順で抽出する。なお、水素製造施設は原子炉等規制法の適用範囲外のため、水素製造施設の異常が原子炉施設に与える影響は、外部ハザードの外部人為事象として考慮する。

1) 内の事象

- ① HTTRの運転時の異常な過渡変化（AOO）及び設計基準事故（DBA）の判断基準に対応する評価項目を頂上事象に、マスターロジックダイアグラム（Master Logic Diagram: MLD）により各項目に影響を与える要因を抽出分析し、異常事象を整理する。
- ② 原子炉施設を対象とした故障モード影響分析（Failure Mode and Effect Analysis: FMEA）により、各設備の機器の故障を仮定して、炉心及び原子炉冷却系に与える影響を整理し、起因事象を抽出する。
- ③ 異常事象と機器故障モードの対応を整理し、判断基準に対応する評価項目に影響を与える起因事象を同定する。
- ④ HTTRの異常事象と本検討で抽出された異常事象を比較し、新たに考慮すべき事象を同定する。

2) 外的事象

a) 内部ハザード、外部人為事象（水素製造施設の異常に分類されるもの）

- ① 水素製造施設及び水蒸気改質器を対象としたFMEAにより、各設備の機器の故障を仮定して、原子炉施設の運転に与える影響を整理し、起因事象を抽出する。
- ② HTTRの異常事象と本検討で抽出された異常事象を比較し、新たに考慮すべき事象を同定する。

b) 自然現象、外部人為事象（試験炉設置許可基準規則解釈で規定されている外部ハザード）

- ① 設置許可基準規則解釈で規定されている想定すべき自然現象及び外部人為事象に関して、水素製造施設の接続に伴う外部ハザードに対する安全要件への適合のための設計方針や

影響評価条件の変更点を分析する。

- ② 上記変更点に基づき安全設計で新たに考慮すべき外部ハザードを同定する。

また、HTTR-熱利用試験施設の安全設計で新たに考慮すべき事象は、化学プラントを含む類似施設での事故事例を分析し、これまで得られている知見に照らし合わせることで、漏れがないことを確認する。

HTTR-熱利用試験施設の安全設計で新たに考慮すべき事象は、上記手順に従い、HTTR 及び炉外技術開発試験装置の設備構成や設計情報を参考としつつ、現状施設からの変更点に着目することで抽出される。FMEAにより、既設改修部を有する2次ヘリウム冷却設備、水蒸気供給設備、原料ガス供給設備、不活性ガス供給設備、後処理設備で想定される故障の故障モードやその要因、当該故障が原子炉施設または水素製造施設に与える影響を整理した結果を、Table 4 から Table 8 に示す。なお、既設改修部や水素製造施設の系統構成は炉外技術開発試験装置の系統構成を参考とした。

2次ヘリウム冷却設備では、水蒸気改質器で想定される触媒管の漏えい、破損に伴う可燃性ガスの2次ヘリウムへの侵入や蒸気発生器伝熱管の漏えい、破損に伴う2次ヘリウムへの水侵入が原子炉施設に与える新たな影響として同定された。2次ヘリウム冷却設備で想定される他の故障が原子炉施設に与える影響には、2次ヘリウム流量や2次ヘリウム温度の変動等が抽出された。また、水蒸気供給設備では、放熱器伝熱管の漏えい及び破損により、水素製造施設異常時の受動的冷却時における蒸気発生器水位低下として水素製造施設に影響を与える。また安全弁の誤開は、蒸気発生器給水流量及び蒸気過熱器水蒸気流量の減少、水蒸気供給設備圧力低下を引き起こし、原子炉施設に対する影響として、2次ヘリウム冷却設備の除熱変動や2次ヘリウム配管バウンダリ荷重増大が抽出された。次に原料ガス供給設備での機器故障が原子炉施設に新たに与える影響には、原料ガス加温器の伝熱管からの漏えいに伴う水蒸気改質器供給原料ガス流量減少、原料ガス供給設備圧力減少等によって生じる2次ヘリウム冷却設備の除熱変動及び2次ヘリウム配管バウンダリ荷重増大が抽出された。また原料ガス供給設備配管の破損による影響には、可燃性ガスであるメタンや有毒ガスであるブタンの環境への漏えいが抽出されるとともに、原子炉施設への影響として、2次ヘリウム配管バウンダリ荷重増大が抽出された。不活性ガス供給設備での機器故障が原子炉施設に与える影響には、制御系の異常等による窒素ガス供給ライン遮断弁の誤開等が原料ガス供給設備の窒素ガス流量を増大または減少させることで生じる2次ヘリウム冷却設備の除熱変動が抽出された。最後に後処理設備での機器故障が原子炉施設に新たに与える影響として、触媒粉塵用フィルタでの容器の漏えいや破損に伴う可燃性ガス及び有毒ガスの漏えい、安全弁の誤開に伴う2次ヘリウム冷却設備の除熱変動や2次ヘリウムバウンダリの荷重増大が抽出された。

安全設計で新たに考慮すべき外部ハザードを同定するため、外部ハザードに係る安全要件への適合のための設計方針や影響評価条件の変更点を分析した結果を Table 9 に示す。安全設計で新たに考慮すべき外部ハザードとして、自然現象では、竜巻及び森林火災が同定された。竜巻に関しては、水素製造施設の機器が設計飛来物となることが想定されることから、HTTR

から設計飛来物に変更となる可能性がある。森林火災に関しては、森林火災起因の水素製造施設の火災の考慮が必要である。安全設計で新たに考慮すべき外部ハザードの内、外部人為事象に関しては、航空機落下、近隣工場の火災、有毒ガスに係る事象が同定された。航空機落下に関しては、航空機落下の標的面積増大による航空機落下確率の上昇を考慮する必要がある。また、近隣工場の火災に関しては、水素製造施設の設置により水素製造施設の異常に起因する火災や爆発に対する影響や、航空機落下による燃料火災に起因する水素製造施設の火災の考慮が必要である。有毒ガスに関しては、水素製造施設の設置により敷地内を発生源とした有毒ガスの影響を考慮する必要がある。

以上より、HTTR-熱利用試験施設の水素製造施設に対して高圧ガス保安法を適用する場合、同定された HTTR-熱利用試験施設の安全設計で新たに考慮すべき事象を以下に示す。

1) 内の事象

- 2次ヘリウム冷却設備への水または蒸気の侵入

2) 外的事象

a) 内部ハザード

- 可燃性ガスの2次ヘリウムへの侵入

b) 外部ハザード

① 自然現象

- 竜巻による飛来物となった水素製造施設の機器の原子炉建家への衝突
- 森林火災と水素製造施設火災の重畳

② 外部人為事象

- 落下した航空機燃料火災と水素製造施設火災の重畳
- 水素製造施設から漏えいした可燃性物質の火災爆発
- 水素製造施設から漏えいした有毒ガスによる運転員被毒
- 水素製造施設の異常に起因する2次ヘリウム冷却設備の除熱減少
- 水素製造施設の異常に起因する2次ヘリウム冷却設備の除熱増大
- 水素製造施設の異常に起因する2次ヘリウムバウンダリの荷重増大

次に、産業技術総合研究所と科学技術振興機構が共同で開発したリレーショナル化学災害データベース（RISCAD）を対象に、水素製造施設との関連が深いと考えられる反応容器及び付属機器、貯槽・ボンベ、配管及び加熱冷却装置に関連する事故の内容及び原因を調査した結果²²⁾を参考に、同定された HTTR-熱利用試験施設の安全設計で考慮すべき事象に漏れないことを確認した。

1949年から2003年に国内外で発生した事故4299件を対象に調査を行った結果、HTTR-熱利用試験に関連が深いと考えられる事故事例には、溶接部やフランジ部ガスケットの経年劣化や腐食による可燃性物質の漏えい、静電気や摩擦熱による可燃性物質の引火、可燃性物質の火災及び爆発等が導出された。水素製造施設から漏洩した可燃性物質の火災爆発は、HTTR-熱利用試験施設の安全設計で考慮すべき事象の内、外部ハザードとして既に同定され

ている。従って、類似施設での事故事例を調査した結果、同定された HTTR-熱利用試験施設の安全設計で考慮すべき事象に漏れがないことを確認した。

3.6 安全設計における検討事項

1) 水素製造施設の適用法規

基本方針に従い、水素製造施設に高圧ガス保安法を適用する場合には、高圧ガス保安法を適用することの合理性や適用上の条件、高圧ガス保安法の適用範囲の検討が必要である。

2) 安全設計の方針

HTTR では安全設計の方針として、以下の 12 の方針が定められている。

- 安全設計の基本方針
- 原子炉の固有の安全性
- 原子炉施設の設計、製作における基本方針
- 核設計及び熱流設計の基本方針
- 核分裂生成物放散の防止・抑制に対する基本方針
- 計測制御系統施設設計の基本方針
- 工学的安全施設設計の基本方針
- 多量の放射性物質等を放出するおそれのある事故に対する基本方針
- 物理的分離に関する基本方針
- 環境に関する基本方針
- 強度設計の基本方針
- 品質保証の基本方針

HTTR の安全設計の方針のうち、「安全設計の基本方針」では、試験炉設置許可基準規則に適合する設計をとする方針のみが示されている。HTTR-熱利用試験では安全設計で新たに考慮すべき事象が複数同定されているが、「安全設計の基本方針」を変更する必要はない。

HTTR の安全設計の方針のうち、「核分裂生成物放散の防止・抑制に対する基本方針」では、燃料内で生成した核分裂生成物の原子炉施設周辺への放散を防止及び抑制するための方法のひとつとして、原子炉格納容器による原子炉冷却材圧力バウンダリから漏えいした核分裂生成物の保持が示されている。HTTR-熱利用試験では、2 次ヘリウム配管を原子炉建家の外部まで引き出すことに伴い、原子炉格納容器に加えて、原子炉格納容器隔離弁が原子炉冷却材圧力バウンダリから漏えいした核分裂生成物を保持する機能を担う。従って、「核分裂生成物放散の防止・抑制に対する基本方針」では、用語の変更が必要となる。

「安全設計の基本方針」及び「核分裂生成物放散の防止・抑制に対する基本方針」以外の 10 の方針に、HTTR-熱利用試験において、HTTR から変更または追加となる項目はない。

3) 安全機能の重要度分類、重要安全施設の選定、耐震設計

原子炉施設では、施設の特徴を十分踏まえて、構築物、系統及び機器の果たすべき安全機能とその重要度を設定しなければならない。HTTR-熱利用試験施設では、水素製造施設の接続に伴い必要となる改修や2次ヘリウム冷却設備に設置する原子炉格納容器隔離弁や蒸気発生器等の新たな設置に応じて、原子炉施設の構築物、系統及び機器の安全機能の重要度分類を設定する必要がある。また、安全機能の重要度分類の変更に伴い、重要安全施設選定や耐震設計上の重要度分類の見直しが必要となる。

4) 原子炉設置変更許可申請に係る安全設計の方針

HTTR-熱利用試験施設では、3.5 節(2)で同定された、HTTR-熱利用試験施設における安全設計で新たに考慮すべき外的事象や内的事象である 10 事象の影響を考慮して、原子炉施設の安全性を損なわないよう、外的事象や内的事象に対する防護対策に係る安全設計方針を変更しなければならない可能性がある。

安全設計で新たに考慮すべき内的事象として同定された「2次ヘリウム冷却設備への水または蒸気の侵入」は、原子炉施設の機器故障によって、系統内の熱流挙動に影響を与える事象であるため、試験炉設置許可基準規則の第十三条（運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止）の中で考慮されなければならない。また、外部ハザード（外部人為事象）として同定されている「水素製造施設の異常に起因する2次ヘリウム冷却設備の除熱減少」、「水素製造施設の異常に起因する2次ヘリウム冷却設備の除熱増大」、「水素製造施設の異常に起因する2次ヘリウムバウンダリの荷重増大」の3事象も、原子炉施設と水素製造施設を繋ぐ配管を通じて、原子炉施設の熱流挙動に直接的に影響を与えるため、同条の中で考慮されなければならない。

安全設計で新たに考慮すべき内的事象として同定された「可燃性ガスの2次ヘリウムへの侵入」は、原子炉施設で発生する内部火災に係る事象のため、同規則の第八条（火災による損傷の防止）の中で考慮されなければならない。

安全設計で新たに考慮すべき事象の内、外部ハザード（自然現象）として同定された「竜巻による飛来物となった水素製造施設の機器の原子炉建家への衝突」及び「森林火災と水素製造施設火災の重畳」に加えて、外部ハザード（外部人為事象）として同定された「落下した航空機燃料火災と水素製造施設火災の重畳」、「水素製造施設から漏えいした可燃性物質の火災爆発」及び「水素製造施設から漏えいした有毒ガスによる運転員被毒」の計5事象は、試験炉設置許可基準規則の第六条（外部からの衝撃による損傷の防止）の中で規定されている想定すべき自然現象及び外部人為事象であると考えられるため、同条の中で考慮されなければならない。

また、原子炉施設の安全性が阻害されないよう、安全設計で新たに考慮すべき事象が、事故の拡大防止措置の実施に与える影響は、第五十三条（多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止）の中で考慮されなければならない。

以上から、HTTR-熱利用試験施設では、外的事象の防護方針、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止、多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止に関して、安全設計で新たに考慮すべき事象による影響を考慮した上で、原子炉施設の設計が、試験炉設置

許可基準規則の安全要件に適合することで、水素製造施設異常に対する原子炉の安全性を確保する。従って、試験炉設置許可基準規則の安全要件への適合に向けた安全設計方針の検討が必要となる。

Table 4 2次へりウム冷却設備に対する起因事象の同定結果 (1/2)

機器名称	故障モード		故障の要因	原子力施設に与える影響	水素製造施設に与える影響	
	影響を与える故障					
2次へりウム循環機		コーストダウン	駆動電源の喪失、電動機の故障	2次へりウム流量の減少	加熱量の変動	
		制動停止	誤信号	2次へりウム流量の減少	加熱量の変動	
		軸固着	軸受けのかじり、固着	2次へりウム流量の減少	加熱量の変動	
		回転数の上昇	2次へりウム流量制御系の故障、2次へりウム流量計の誤信号	2次へりウム流量の増大	加熱量の変動	
		冷却水喪失	冷却水配管の破損	2次へりウム流量の減少	加熱量の変動	
		熱遮蔽機能の低下	熱遮蔽板の性能劣化	2次へりウム流量の減少	加熱量の変動	
		触媒層での炭素析出	運転操作ミス	—	—	
	水蒸気改質器		触媒管の漏えい、破損	過大荷重による貫通亀裂	2次へりウム流量の減少、可燃性ガスの2次へりウムへの侵入	加熱量の変動
			触媒管内管の漏えい、破損	過大荷重による貫通亀裂	2次へりウム流量の減少	加熱量の変動
			胴の漏えい及び破損	過大荷重による亀裂の成長	2次へりウム流量の減少	加熱量の変動
		伝熱管の漏えい、破損	伝熱管の貫通亀裂	2次へりウム流量の減少、2次へりウムへの水侵入	加熱量の変動	
蒸気発生器		胴の漏えい及び破損	過大荷重による亀裂の成長	保有水の漏えい、2次へりウム冷却設備除熱量減少	加熱量の変動	
蒸気過熱器		伝熱管の漏えい、破損	伝熱管の貫通亀裂	2次へりウム流量の減少、2次へりウムへの水侵入	加熱量の変動	
へりウム冷却器		胴の漏えい及び破損	過大荷重による亀裂の成長	2次へりウム流量の減少	加熱量の変動	

Table 4 2次へリウム冷却設備に対する起因事象の同定結果 (2/2)

機器名称	故障モード		故障の要因	原子力施設に与える影響	水素製造施設に与える影響
	影響を与える故障				
へリウム冷却器	伝熱管の漏えい、破損	伝熱管の貫通亀裂	伝熱管の貫通亀裂	2次へリウム流量の減少、2次へリウムへの水侵入	加熱量の変動
	胴の漏えい及び破損	胴の漏えい及び破損	過大荷重による亀裂の成長	2次へリウム流量の減少	加熱量の変動
	冷却水流量喪失	冷却水流量喪失	冷却水配管破損、弁閉止	2次へリウム温度の上昇	加熱量の変動
	温度制御用バイパスライン流量増大	温度制御用バイパスライン流量増大	制御弁の誤開	2次へリウム温度の上昇	加熱量の変動
	温度制御用バイパスライン流量減少	温度制御用バイパスライン流量減少	制御弁の誤閉	2次へリウム温度の低下	加熱量の変動
単管	単管の漏えい及び破損	過大荷重による亀裂の成長	2次へリウム流量、圧力の減少	加熱量の変動	
隔離弁	誤閉	制御系の異常、誤信号	2次へリウム流量の減少	加熱量の変動	
安全弁	漏えい	破裂板の破損	2次へリウム流量、圧力の減少	加熱量の変動	
逆止弁	開固着	ヒンジピンのかじり	—	—	—

Table 5 水蒸気供給設備に対する起因事象の同定結果 (1/3)

機器名称	故障モード		水素製造施設 に与える影響	原子炉施設 に与える影響
	影響を与える故障	故障の要因		
水精製器	イオン交換樹脂の目詰り	不純物の蓄積	水質の低下	—
脱気装置	膜の破損	—	蒸気発生器 給水流量の減少	2次ヘリウム冷却設備の 除熱量減少
	圧力の低下	過圧力制御系故障、 不活性ガス設備異常	蒸気発生器 給水流量の減少	2次ヘリウム冷却設備の 除熱量減少
給水タンク	水位低下	制御系の故障	蒸気発生器 給水流量の減少	2次ヘリウム冷却設備の 除熱量減少
	コーストダウン	駆動電源の喪失	蒸気発生器 給水流量の減少	2次ヘリウム冷却設備の 除熱量減少
給水ポンプ	軸固着	軸受けのかじり、固着	蒸気発生器 給水流量の減少	2次ヘリウム冷却設備の 除熱量減少
	伝熱管の漏えい及び破損	伝熱管の貫通亀裂・破断	蒸気発生器水位低下 (受動的冷却時)	2次ヘリウム冷却設備の 除熱量減少
放熱器	ファンのコーストダウン	駆動電源の喪失、電動機故障	蒸気発生器圧力上昇 (受動的冷却時)	2次ヘリウム冷却設備の 除熱量減少
	ファンの軸固着	軸受けかじり	蒸気発生器圧力上昇 (受動的冷却時)	2次ヘリウム冷却設備の 除熱量減少
給水予熱器	伝熱管の漏えい及び破損	伝熱管の貫通亀裂・破断	蒸気発生器 給水流量の減少	2次ヘリウム冷却設備の 除熱量減少
	胴の漏えい及び破損	過大荷重による亀裂の成長	蒸気発生器 給水流量の減少	2次ヘリウム冷却設備の 除熱量減少
給水バイパス 冷却器	伝熱管の漏えい及び破損	伝熱管の貫通亀裂・破断	給水タンク水位低下	—

Table 5 水蒸気供給設備に対する起回事象の同定結果 (2/3)

機器名称	故障モード		水素製造施設 に与える影響	原子炉施設 に与える影響
	影響を与える故障	故障の要因		
給水バイパス 冷却器	伝熱管の漏えい及び破損	伝熱管の貫通亀裂・破断	給水タンク水位低下	—
	冷却水の増大	冷却水設備の異常	給水タンク温度低下	2次ヘリウム冷却設備の 除熱増大
	冷却水の減少	冷却水設備の異常	給水タンク温度上昇	2次ヘリウム冷却設備の 除熱減少
配管	破損及び破断	最大荷重による貫通亀裂	蒸気発生器給水流量、蒸気 過熱器水蒸気流量の減少、 水蒸気供給設備圧力低下	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少、2次ヘリウム 配管バウンダリ荷重増大
安全弁	誤開	損傷	蒸気発生器給水流量、蒸気 過熱器水蒸気流量の減少、 水蒸気供給設備圧力低下	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少、2次ヘリウム 配管バウンダリ荷重増大
止め弁	—	—	—	—
逆止弁	開固着	ヒンジピンのかじり	—	—
蒸気発生器 給水遮断弁	誤閉	制御系の異常、誤信号	蒸気発生器給水流量の減少	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少
蒸気発生器 給水流量調節 弁	誤開	制御系の異常、誤信号	蒸気発生器給水流量の増大	—
	誤閉	制御系の異常、誤信号	蒸気発生器給水流量の減少	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少
蒸気過熱器 蒸気遮断弁	誤閉	制御系の異常、誤信号	蒸気発生器圧力上昇、 蒸気過熱器水蒸気流量の減 少	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少

Table 5 水蒸気供給設備に対する起回事象の同定結果 (3/3)

機器名称	故障モード		水素製造施設 に与える影響	原子炉施設 に与える影響
	影響を与える故障	故障の要因		
給水予熱器 出口温度制御 弁	誤開	制御系の異常、誤信号	蒸気発生器給水流量 の減少	2次へリウム冷却設備 の除熱減少
給水予熱器 出口温度制御 弁	誤閉	制御系の異常、誤信号	蒸気発生器給水流量 の増大	2次へリウム冷却設備 の除熱減少
蒸気発生器 圧力調節弁	誤開	制御系の異常、誤信号	蒸気発生器圧力の減少	2次へリウム冷却設備 の除熱増大、2次へリウム 配管バウンダリ荷重増大
	誤閉	制御系の異常、誤信号	蒸気発生器圧力上昇	2次へリウム冷却設備 の除熱減少
放熱器入口 遮断弁	誤開	制御系の異常、誤信号	蒸気発生器圧力の減少	2次へリウム冷却設備 の除熱増大
	誤閉	制御系の異常、誤信号	蒸気発生器圧力の減少	2次へリウム冷却設備 の除熱増大

Table 6 原料ガス供給設備に対する起因事象の同定結果 (1/3)

機器名称	故障モード		故障の要因	水素製造施設 に与える影響	原子炉施設 に与える影響
	影響を与える故障				
LNGタンク	胴部からの漏えい	胴部からの漏えい	過大荷重による亀裂の成長	LNGの漏えい	可燃性物質の火災爆発
加圧蒸発器	伝熱管からの漏えい	伝熱管からの漏えい	過大荷重による亀裂の成長	LNG及びメタンガスの漏えい	可燃性物質の火災爆発
LNGポンプ	コーストダウン	コーストダウン	駆動電源の喪失	サージタンクメタンガス供給流量減少	—
	軸固着	軸固着	軸受けのかじり、固着	サージタンクメタンガス供給流量減少	—
LNG蒸発器	伝熱管からの漏えい	伝熱管からの漏えい	伝熱管の貫通亀裂	サージタンクメタンガス供給流量減少	—
サージタンク	胴部からの漏えい	胴部からの漏えい	過大荷重による亀裂の成長	水蒸気改質器供給原料ガス流量の減少、原料ガス供給設備圧力減少	2次へリウム冷却設備の除熱減少、 2次へリウム配管バウンダリ荷重増大
原料ガス 加温器	伝熱管からの漏えい	伝熱管からの漏えい	伝熱管の貫通亀裂	水蒸気改質器供給原料ガス流量の減少、原料ガス供給設備圧力減少	2次へリウム冷却設備の除熱減少、 2次へリウム配管バウンダリ荷重増大
	ヒーター停止	ヒーター停止	電源喪失、断線	水蒸気改質器供給原料ガス流量の減少 (下流の配管損傷等)	2次へリウム冷却設備の除熱減少、 2次へリウム配管バウンダリ荷重増大
配管	破損及び破断	破損及び破断	過大荷重による亀裂の成長	サージタンクメタンガス供給流量減少、水蒸気改質器供給原料ガス流量、圧力の減少	2次へリウム冷却設備の除熱減少、 可燃性物質の火災爆発、 2次へリウム配管バウンダリ荷重増大

Table 6 原料ガス供給設備に対する起因事象の同定結果 (2/3)

機器名称	故障モード		故障の要因	水素製造施設 に与える影響	原子炉施設 に与える影響
	影響を与える故障				
安全弁	誤開	損傷	サージタンクメタンガス供給流量減少、水蒸気改質器供給原料ガス流量、圧力の減少	2次ヘリウム冷却設備の除熱減少、 2次ヘリウム配管バウンダリ荷重増大	
止め弁	—	—	—	—	
逆止弁	開固着	—	—	—	
LNGタンク 出口遮断弁	誤閉	制御系の異常、誤信号	サージタンクメタンガス供給流量減少	—	
原料ガス 供給圧力 調整弁	誤開	制御系の異常、誤信号	水蒸気改質器供給原料ガス流量の増大	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少	
	誤閉	制御系の異常、誤信号	水蒸気改質器供給原料ガス流量の減少	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少	
	誤開	制御系の異常、誤信号	水蒸気改質器供給原料ガス流量の増大	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少	
原料ガス 供給流量 調整弁	誤閉	制御系の異常、誤信号	水蒸気改質器供給原料ガス流量の減少	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少	
	誤開	制御系の異常、誤信号	水蒸気改質器供給原料ガス流量の増大	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少	
原料ガス 加熱器	内管破損	過大荷重による貫通亀裂	水蒸気改質器供給原料ガス流量の減少	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少	
	外管破損	過大荷重による貫通亀裂	可燃性ガス（メタン）、有毒ガス（ブタン）の漏えい、原料ガス供給設備圧力低下	可燃性物質の火災爆発、2次ヘリウム配管バウンダリ荷重増大	

Table 6 原料ガス供給設備に対する起因事象の同定結果 (3/3)

機器名称	故障モード		水素製造施設 に与える影響	原子炉施設 に与える影響
	影響を与える故障	故障の要因		
原料ガス 過熱器	内管破損	過大荷重による貫通 亀裂	水蒸気改質器供給 原料ガス流量の減少	2次ヘリウム冷却設備 の除熱減少
原料ガス 過熱器	外管破損	過大荷重による貫通 亀裂	可燃性ガス（メタン）、 有毒ガス（ブタン）の漏えい、原 料ガス供給設備圧力低下	可燃性物質の火災爆発、2次ヘリウム配管ハバ ンダリ荷重増大

Table 7 不活性ガス供給設備に対する起因事象の同定結果

機器名称	故障モード		故障の要因	水素製造施設 に与える影響	原子炉施設 に与える影響
	影響を与える故障				
LN2 タンク	胴部からの漏えい		過大荷重による亀裂の成長	サージタンク供給流量の減少	—
蒸発器	窒素ガスの漏えい		接続管の貫通亀裂	サージタンク供給流量の減少	—
LN2 ポンプ	コーストダウン		駆動電源の喪失	サージタンク供給流量の減少	—
	軸固着		軸受けのかじり、固着	サージタンク供給流量の減少	—
	誤起動		制御系の誤信号	サージタンク供給流量の減少	—
配管	破損及び破断		過大荷重による亀裂の成長	サージタンク供給流量の減少	—
安全弁	誤開		損傷	サージタンク供給流量の減少	—
止め弁	—		—	—	—
逆止弁	開固着		—	—	—
LN2 タンク 出口 遮断弁	誤閉		制御系の異常、誤信号	サージタンク供給流量の減少	—
窒素ガス供給 ライン遮断弁	誤開		制御系の異常、誤信号	原料ガス供給設備への 窒素ガス流入	2次へリウム冷却設備 の除熱変動
	誤閉		制御系の異常、誤信号	原料ガス供給設備の 窒素ガス流量の減少 (起動停止時)	2次へリウム冷却設備 の除熱減少
窒素ガス供給 流量調整弁	誤開		制御系の異常、誤信号	原料ガス供給設備の 窒素ガス流量の増大 (起動停止時)	2次へリウム冷却設備 の除熱増大
	誤閉		制御系の異常、誤信号	原料ガス供給設備の 窒素ガス流量の減少 (起動停止時)	2次へリウム冷却設備 の除熱減少

Table 8 後処理設備に対する起回事象の同定結果 (1/2)

機器名称	故障モード		故障の要因	水素製造施設 に与える影響	原子炉施設 に与える影響
	影響を与える故障				
触媒粉塵用 フィルタ	容器の漏えい及び破損	過大荷重による亀裂の成長	過大荷重による亀裂の成長	可燃性ガス、有毒ガスの漏えい	可燃性ガス火災爆発、 有毒ガスによる被毒
	フィルタ目詰り	触媒の破損	触媒の破損	圧力上昇による生成ガスが 安全弁からフレアスタックに放出	—
生成ガス 冷却器	伝熱管の漏えい及び破損	過大荷重による亀裂の成長	過大荷重による亀裂の成長	可燃性ガス、有毒ガスの漏えい	可燃性ガス火災爆発、 有毒ガスによる被毒
	冷却水流量の増大	冷却設備の異常	冷却設備の異常	—	—
セパレータ	冷却水流量の減少	冷却設備の異常	冷却設備の異常	—	—
	容器の漏えい及び破損	過大荷重による亀裂の成長	過大荷重による亀裂の成長	可燃性ガス、有毒ガスの漏えい	可燃性ガス火災爆発、 有毒ガスによる被毒
凝縮水ポンプ	軸固着	軸受けのかじり、固着	軸受けのかじり、固着	下流へ水蒸気が流入するが 影響小	—
	誤起動	制御系の誤信号	制御系の誤信号	下流へ水蒸気が流入するが 影響小	—
サンプリング ライン除湿器	伝熱管の漏えい及び破損	過大荷重による亀裂の成長	過大荷重による亀裂の成長	可燃性ガス、有毒ガスの漏えい	可燃性ガス火災爆発、 有毒ガスによる被毒
	失火	種火燃料の停止	種火燃料の停止	可燃性ガスの漏えい	可燃性ガス火災爆発
水封ドラム	水位の低下	水位調整計の異常	水位調整計の異常	(生成ガス流量が増大するが 影響小)	—
	水位の上昇	水位調整計の異常	水位調整計の異常	(生成ガス流量が減少するが 影響小)	—

Table 8 後処理設備に対する起回事象の同定結果 (2/2)

機器名称	故障モード		故障の要因	水素製造施設 に与える影響	原子炉施設 に与える影響
	影響を与える故障				
配管	破損及び破断		過大荷重による亀裂の成長	可燃性ガス、有毒ガスの漏えい	可燃性ガスの火災爆発、 有毒ガスによる被毒
安全弁	誤開		損傷	圧力低下	2次ヘリウムを除熱減少、2 次ヘリウムバウンダリの 荷重増大
止め弁	—		—	—	—
逆止弁	閉固着		—	—	—
生成ガス圧力 調節弁	誤開		制御系の異常、誤信号	圧力低下	2次ヘリウムバウンダリの 荷重増大
	誤閉		制御系の異常、誤信号	圧力上昇による生成ガスが 安全弁からフレアスタックに放出	2次ヘリウムバウンダリの 荷重増大
LPG 供給 ユニット	容器の漏えい及び破損		過大荷重による亀裂の成長	可燃性ガス（プロパンガス）の漏 えい	可燃性ガス火災爆発

Table 9 外部ハザードに係る安全設計方針や影響評価条件の変更点

外部ハザード	対応又は条件変更有無 (○;あり、 ×;なし)	対応又は条件の変更の概要
風(台風)	×	新規設備は、HTTRと同様に建築基準法に基づき設計を行う
洪水・降水	×	HTTRと同様に地形上、洪水被害は想定されない
積雪	×	新規設備は、HTTRと同様に茨城県建築基準法関係条例に基づく積雪単位重量指定値により設計を行う
凍結	×	屋外機器は、HTTRと同様に、屋外機器で凍結のおそれのあるものは必要に応じ、適切な凍結対策を行う
落雷	×	新規の安全保護系は、HTTRと同様にシールドケーブルを採用。また、屋外敷設ケーブルは、鉄筋コンクリートトレンチ、金属製トレイ又は金属製電線管に収納し接地する
火山の影響	×	新規設備は防護対象外である
生物学的事象	×	新規の屋外設置端子箱貫通部は、HTTRと同様にシールを行い小動物侵入を防止する
竜巻	○	水素製造施設の機器が設計飛来物となることが想定され、HTTRから設計飛来物に変更となる可能性がある
森林火災	○	森林火災に起因する水素製造施設火災の考慮が必要である
地滑り	×	HTTRと同様に地形上、地滑りによる被害は想定されない
組合せ	×	自然現象の組合せにより影響が多くなる事象組合せは、HTTRから変更はない
航空機落下	○	航空機落下の標的面積増大による航空機落下確率の上昇を考慮する必要がある
ダムの崩壊	×	HTTRと同様に、立地上、ダムの崩壊による被害は想定されない
爆発	×	HTTRと同様に、爆発物の貯蔵設備はない
近隣工場の火災	○	水素製造施設の設置により水素製造施設の異常に起因する火災や爆発に対する影響及び航空機落下による燃料火災に起因する水素製造施設の火災の考慮が必要である
有毒ガス	○	水素製造施設の設置により敷地内を発生源とした有毒ガスの影響を考慮する必要がある
船舶の衝突	×	HTTRと同様に、立地上、船舶の衝突による被害は想定されない
電磁的障害	×	新規の安全保護回路は、HTTRと同様に電磁的障害発生を防止する設計を採用する

4. HTTR-熱利用試験に係る適用法規の検討

4.1 水素製造施設の適用法規

(1) 水素製造施設の適用法規の目的

HTTR-熱利用試験施設の水素製造施設における異常が原子炉施設の安全性に影響を与える可能性がある事象は、3.5節における検討で同定された10事象である。HTTR-熱利用試験施設の原子炉施設は、これら10事象を想定した上で、原子炉等規制法で規定された安全要件に適合することで、一般公衆に対する安全性を確保する。この10事象のうち、水素製造施設における異常が直接的に公共に影響を及ぼす可能性がある事象は、漏えいした可燃性物質の漏えい及び火災爆発、有毒ガスの漏えいである。従って、水素製造施設に対する適用法規の目的は、可燃性物質の火災爆発及び有毒ガスの漏えいを考慮した公共の安全確保であるべきである。

原子炉等規制法において、その目的は次のように定義されている。

「原子力施設において重大な事故が生じた場合に放射性物質が異常な水準で当該原子力施設を設置する工場又は事業所の外へ放出されることその他の核原料物質、核燃料物質及び原子炉による災害を防止し、及び核燃料物質を防護して、公共の安全を図るため、(中略)もつて国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに我が国の安全保障に資すること」¹⁵⁾

一方で、高圧ガス保安法において、その目的は次のように定義されている。

「高圧ガスによる災害を防止するため、(中略)、もつて公共の安全を確保すること」²⁰⁾

原子炉等規制法及び高圧ガス保安法は、いずれも公共の安全確保を目的とした法律である。しかしながら、原子炉等規制法は放射性物質や核燃料物質、原子炉による災害を想定しているのに対して、高圧ガス保安法は高圧ガスによる災害の防止を目的としている。高圧ガス保安法で想定している高圧ガスによる災害(事故)は、可燃性物質の火災爆発や毒性ガスの漏えい、設備等の破裂・破損等が定義されている²³⁾。従って、法規の目的の観点からは、原子炉施設に接続する水素製造施設に対する適切な法規は、高圧ガス保安法であると考えられる。

(2) 水素製造施設の適用法規の安全要件

次に原子炉等規制法及び高圧ガス保安法における公共の安全確保に関する安全要件を比較する。HTTR-熱利用試験における水素製造施設では、公共の安全を損なう可能性がある事象として、可燃性物質の火災爆発や有毒ガスの漏えいが想定される。試験炉設置許可基準規則や実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則²⁴⁾のいずれの規則も、可燃性物質の火災爆発や有毒ガスの漏えいに対する原子炉施設の安全性確保を目的とした安全要件を規定している。例えば可燃性物質(ガス)の火災爆発に対する安全要件は、原子炉施設の安全性が損なわれないよう、必要に応じて、火災発生防止、火災発生感知、消火設備並びに火災影響軽減に係る機能の確保を要求している。有毒ガスの漏えいに対しては、原子

炉施設の安全機能の確保を要求している。

一方で、高圧ガス保安法の安全要件が定められた一般高圧ガス保安規則は、高圧ガスを取り扱う設備から病院や学校、住宅等、公共の保安物件まで、一定以上の離隔距離の確保を要求している。一般高圧ガス保安規則は、その他にも可燃性ガスや有毒ガスの漏えいによる影響防止または影響緩和のため、可燃性ガスを含む設備に係る電気設備の防爆性能、可燃性ガス及び毒性ガスの貯槽に接続した配管における弁の個数や漏えい時の遮断措置、可燃性ガス及び毒性ガス漏えい時に滞留する場所への検知・警報設備の設置等を要求している。

以上から、高圧ガス保安法は、公共の安全確保のため、可燃性物質の火災爆発や毒性ガスの漏えいに対して、保安物件に対する離隔距離の確保等、公共の安全を確保するための安全要件を規定し、技術基準体系が整備されている。従って、HTTR-熱利用試験の水素製造施設に対して適用すべき法規は、可燃性物質の火災爆発や毒性ガスの漏えいに対する公共の安全確保のための技術基準体系が整備されている高圧ガス保安法が適切であると考えられる。

(3) 水素製造施設に対する適用法規

原子炉施設に接続する水素製造施設は、可燃性ガスや有毒ガスを取り扱う施設であり、原子炉施設に接続する水素製造施設では可燃性ガスによる火災爆発や有毒ガスの漏えいといった高圧ガス災害の発生が想定される。高圧ガス保安法は、公共の安全確保を目的として、水素製造施設で想定される高圧ガス災害の発生防止や当該災害に対する公共の安全確保のための規制枠組みや技術基準体系が整備されていることから、原子炉施設に接続する水素製造施設に対して、高圧ガス保安法を適用することは合理的であり、水素製造施設を高圧ガス保安法の下で建設可能であると考えられる。

4.2 水素製造施設への高圧ガス保安法適用の条件

水素製造施設に対して高圧ガス保安法を適用するために満足すべき条件は、高圧ガス保安法が適用されることが明白な「原子炉施設の近隣に設置される水素製造施設」と「原子炉施設に接続された水素製造施設」との相違点が解消される条件に相当すると考えられる。そこで、「原子炉施設の近隣に設置される水素製造施設」と「原子炉施設に接続された水素製造施設」の違いに着目し、その相違点を分析する。

「原子炉施設の近隣に設置される水素製造施設」と「原子炉施設に接続された水素製造施設」は、双方とも原子炉施設の近隣に位置するという点では共通しており、原子炉施設の安全確保の観点では、水素製造施設の異常に起因する影響が空間を伝播して、原子炉施設に与える影響は同等である。一方で、「原子炉施設に接続された水素製造施設」と「原子炉施設の近隣に設置される水素製造施設」の安全上の差違は、以下の4点である。

- 水素製造施設の機器故障が接続配管を介して原子炉施設に与える影響
- 原子炉施設の機器故障が接続配管を介して水素製造施設に与える影響
- 原子炉施設と水素製造施設が構築物を共有する場合に、原子炉施設の異常に起因する構築物の損傷が水素製造施設に与える影響

- 原子炉施設と水素製造施設が構築物を共有する場合に、水素製造施設の異常に起因する構造物の損傷が原子炉施設に与える影響

「原子炉施設の近隣に設置される水素製造施設」は、原子炉施設の附属施設と見なされないため、原子炉等規制法ではなく、高圧ガス保安法が適用されると判断できる。従って、上記の安全上の差違が有意でない、すなわち一方施設の異常が他方施設の安全設計に著しい影響を与えない場合には、「原子炉施設に接続された水素製造施設」に高圧ガス保安法が適用可能と考える。

施設の異常が他方の施設に配管を介して与える影響が有意とならない条件は、以下の過程で導出する。まず、水素製造施設の機器故障が原子炉施設に与える影響または原子炉施設の機器故障が水素製造施設に与える影響を摘出し、影響の伝播に際して配管を介するかどうかで整理する。次に、配管を介して与える影響に関して、その影響が有意とならない条件を同定する。整理した結果を以下の Table 10 に示す。2次ヘリウム冷却設備の除熱量増大及び減少、2次ヘリウムバウンダリの荷重増大による影響が有意とならない条件は、水素製造施設の異常時にそれぞれの影響が生じた場合でも、原子炉施設が通常運転を継続可能であること及び原子炉施設の異常が拡大しないことと考えられる。また、原子炉施設の異常に起因する水素製造施設の加熱量変動に対しては、当該変動に対して水素製造施設に異常が発生しないことが条件であると考えられる。

原子炉施設と水素製造施設が構築物を共有する場合に、一方の施設の構築物損傷が他方の施設に与える影響が有意とならない条件とは、一方の施設の異常に起因する構築物損傷の影響によって、他方の施設の安全機能を有する構築物、系統及び機器（SSC）を損傷し、安全機能の喪失を引き起さないことと考えられる。一方で、「原子炉施設の近隣に設置される水素製造施設」の安全設計では、原子炉施設と水素製造施設が構造物を共有していないが、十分に近接している場合、一方施設の異常に起因する構造物の損傷が、直接的又は間接的に他方施設の安全機能を有するSSCを損傷し、安全機能を喪失しないよう設計上考慮される。従って、一方の施設の異常に起因する構築物損傷が他方施設に与える影響は、「原子炉施設の近隣に設置される水素製造施設」と「原子炉施設に接続された水素製造施設」で共通である。故に、一方の施設の異常に起因する構築物損傷が他方施設に与える影響が有意とならない条件は、「原子炉施設に接続された水素製造施設」への高圧ガス保安法の適用条件に該当しないと考えられる。

従って、「原子炉施設に接続された水素製造施設」に対して、高圧ガス保安法が適用可能となる条件は以下の2点である。

- 水素製造施設の異常時においても、原子炉施設における通常運転の継続または異常の拡大が防止されること
- 原子炉施設異常に起因する水素製造施設の加熱量変動時においても、水素製造施設における異常発生または異常拡大が防止されること

3.6 節 4)の議論から、設置許可基準規則において規定された安全要件に適合することで、原子炉施設の水素製造施設異常に対する原子炉の安全を確保する方針である。従って、1 点目の条件は、設置許可基準規則において規定された安全要件に適合することで達成可能である。また、2 点目の条件は、想定される水素製造施設の加熱量変動に対して、水素製造施設の異常発生または異常拡大が起こらないよう、水素製造施設の構築物、系統及び機器を設計することで達成可能である。

4.3 高圧ガス保安法の適用範囲

HTTR-熱利用試験施設の原子炉等規制法及び高圧ガス保安法適用範囲は、以下の 4 ケースを候補として導出した。また、4 ケースの得失、高圧ガス保安法適用条件を満足する見込み、経済性を検討した。4 ケースの適用範囲区分や検討結果を Table 11 に示す。

(1) ケース 1

ケース 1 は、原子炉等規制法と高圧ガス保安法の適用範囲の境界を、2 次ヘリウム冷却設備の原子炉格納容器隔離弁とし、境界からみて原子炉側の設備に対しては原子炉等規制法、水素製造施設側の設備に対しては高圧ガス保安法を適用する。ケース 1 のメリットは、ケース 2 からケース 4 と比べて、原子炉等規制法の適用範囲が狭く、プラント全体の建設コストが低い点である。また、実用システムと高圧ガス保安法の適用範囲が同じと想定されるため、HTTR-熱利用試験施設の安全審査において高圧ガス保安法の適用範囲の妥当性が認められれば、実用システムでの再審査が不要となることが見込まれる。ここでは、実用システムとは 2.2 節で示した GTHTTR300C を想定している。一方、本ケースを HTTR-熱利用試験施設に適用する場合、高圧ガス保安法適用条件である「水素製造施設の異常時においても原子炉施設における通常運転が維持されること」を満足することが困難である。HTTR では、2 次ヘリウム貯蔵供給設備排出弁の誤開や 2 次ヘリウム冷却設備の配管等の破損等の異常事象に対し、異常を拡大させず事象を終息させるために、異常を検知することを目的として、中間熱交換器の「1 次・2 次ヘリウム差圧大」や 2 次ヘリウム冷却設備の「2 次ヘリウム流量低」の原子炉スクラム信号を設定している。HTTR 建設時には 2 次ヘリウム冷却設備の負荷を変動させる試験を想定しておらず、通常運転時の条件と上記の原子炉スクラム信号の設定点との差は保守的に小さく設定されている。従って、高圧ガス保安法適用範囲の 2 次ヘリウム冷却設備で異常が発生した場合、現行設計では、原子炉スクラム設定値を変更しない限り、原子炉スクラム信号が直ちに発信されることとなり、原子炉施設の通常運転が維持できない。

(2) ケース 2

ケース 2 は、原子炉等規制法と高圧ガス保安法の適用範囲の境界を、2 次ヘリウムバウンダリを含む機器の 3 次側出入口弁とし、境界からみて原子炉側の設備に対しては原子炉等規制法、水素製造施設側の設備に対しては高圧ガス保安法を適用する。原子炉施設の範囲は、高圧ガス保安法の適用条件を満足するよう、水素製造施設の異常時に原子炉施設が通常運転

を維持するために必要な機能を有する機器等を包絡するように設定する。水素製造施設の異常時に原子炉施設が通常運転を維持するために必要な機能は、2次ヘリウム冷却設備の安全機能「通常時除熱機能」である。2次ヘリウム冷却設備の「通常時除熱機能」を維持するには、2次ヘリウムバウンダリの健全性確保及び2次ヘリウム冷却設備の熱除去系の維持が必要である。2次ヘリウムバウンダリを構成する水蒸気改質器触媒管は差圧設計を採用する必要がある、水素製造施設異常時に触媒管差圧が増大した状態が長時間継続すると破損に至る可能性がある。従って、2次ヘリウムバウンダリの健全性確保には、2次ヘリウムバウンダリを構成する機器に加えて、水蒸気改質器触媒管の内外差圧維持のための不活性ガス供給設備や水蒸気改質器の3次側の弁に係る機器、計測制御系、電源系が必要である。また、2次ヘリウム冷却設備の通常時除熱機能の維持には、蒸気発生器及び放熱器、蒸気発生器と放熱器間の自然循環流路を形成する配管及び弁が必要である。従って、2次ヘリウムバウンダリの健全性確保及び2次ヘリウム冷却設備の通常時除熱機能維持に係る系統、設備及び機器は原子炉施設とする。

ケース2のメリットは、実用システムと同様に2次ヘリウム冷却設備に水素製造施設が設置されることである。一方、デメリットは、将来、HTTR-熱利用試験施設がSR法による水素製造施設をカーボンフリー水素製造法による水素製造施設に置き換える際に、原子炉等規制法適用範囲の境界が変更となるため、原子力規制委員会による安全審査を受ける必要があることが挙げられる。また、HTTR-熱利用試験と実用システムでは高圧ガス保安法の適用範囲が異なるため、HTTR-熱利用試験の安全審査で高圧ガス保安法の適用範囲の妥当性が認められても、実用システムで再審査を受ける必要がある。但し、高圧ガス保安法の適用条件は変わらないため、その妥当性に関して実用システムで再審査を受ける必要はないと考えられる。また水蒸気改質器は原子炉等規制法適用範囲内になるため、「高温ガス炉第1種機器の高温構造設計指針」に従い水蒸気改質器の触媒管に Hasteloy XR を使用しなければならない。従って、ケース1に比べて、ケース2は原子炉等規制法適用範囲が大きくなり、コストが高くなると考えられる。

(3) ケース3

ケース3は、他のケースとは異なり、2次ヘリウム冷却設備に第2中間熱交換器を、3次ヘリウム冷却設備に水蒸気改質器を設置する。2次ヘリウムガスの熱は第2中間熱交換器を介して3次ヘリウムガスに伝えられ、水素製造施設に供給される。本ケースは、原子炉等規制法と高圧ガス保安法の適用範囲の境界を、3次ヘリウム冷却設備に設置する弁とし、境界からみて原子炉側の設備に対しては原子炉等規制法、水素製造施設側の設備に対しては高圧ガス保安法を適用する。ケース3では、高圧ガス保安法適用範囲での異常に対して、「1次・2次ヘリウム差圧」や「2次ヘリウム流量」等の安全保護系の計測項目の測定値は、通常運転の範囲内に収まることが予想され、高圧ガス保安法の適用条件を満足する見込みである。ケース3のメリットは、将来、本稿におけるHTTR-熱利用試験とは別に、HTTRにカーボンフリー水素製造法による水素製造施設を接続する場合に、設置許可の取合い条件を満足する限りにおいては、原子力規制委員会の審査が不要となる見込みである点、水蒸気改質器に対し

て高圧ガス保安法が適用され、系統構成が実用システムと類似しているため、実用システムの実証性が可能となる点で、拡張性が高いことが挙げられる。また、水蒸気改質器の触媒管に高圧ガス保安法下の技術基準で使用が認められた材料の使用が可能であることも、ケース 3 のメリットである。一方、ケース 3 のデメリットは、実用システムと異なり 3 次ヘリウム冷却設備に水素製造施設が設置されること、第 2 中間熱交換器を含む 3 次ヘリウム冷却設備が必要となり、建設コストが高くなることが挙げられる。従って、コストはケース 1 やケース 2 よりも高くなる。

(4) ケース 4

ケース 4 は、全ての設備に対して原子炉等規制法を適用する。従って、高圧ガス保安法の適用条件を満足する必要はない。ケース 4 のメリットは、許認可上の課題はないことが挙げられる。一方、デメリットは水素製造施設の設備が全て原子炉級となるため、建設コストが高くなることが挙げられる。また、HTTR-熱利用試験施設の許認可において全ての設備に原子炉等規制法が適用された場合、実用システムにおいても適用法規は同じとなることが想定される。この場合、水素製造施設に軽微な仕様変更があった場合においても、その都度原子力規制委員会による安全審査を受け、許認可を取得する必要があるため、原子力を利用した水素製造事業のスケジュールやコストの不透明性による投資リスクが高くなり、事業としての成立が困難となる恐れがある。

今後は、高圧ガス保安法適用範囲の選定に当たり考慮すべき評価項目を設定するとともに、HTTR-熱利用試験施設の基本設計や安全評価で得られた情報に基づき設定項目の評価を進め、評価結果を総合的に勘案し、上記 4 ケースの中から高圧ガス保安法適用範囲を選定する。評価においては、以下項目を考慮する。

- 設計の成立性
- 建設コスト
- 実用システムの経済性
- 拡張性

第 5 章以降は、暫定的に原子炉等規制法と高圧ガス保安法の適用範囲の境界を、2 次ヘリウムバウンダリを含む機器の 3 次側出入口弁に設定する候補（ケース 2）を対象に、HTTR-熱利用試験施設の安全設計の検討結果を示す。

Table 10 HTTR-熱利用試験における配管を介して与える影響

影響の種類	影響の種類	影響	配管を介して与える影響が有意とならない条件
水素製造施設の故障が原子炉施設に与える影響	配管を介して与える影響	2次ヘリウム冷却設備の除熱量増大	水素製造施設の異常に起因する2次ヘリウム冷却設備の除熱量増大時にも原子炉施設が通常運転を継続可能であること
		2次ヘリウム冷却設備の除熱量減少	水素製造施設の異常に起因する2次ヘリウム冷却設備の除熱量減少時にも原子炉施設が通常運転を継続可能であること
		2次ヘリウムバウンダリの荷重増大	水素製造施設の異常に起因する2次ヘリウムバウンダリの荷重増大時にも原子炉施設が通常運転を継続可能であること
	配管を介さず与える影響	可燃性ガス火災・爆発	—
		有毒ガスによる被害	—
原子炉施設の故障が水素製造施設に与える影響	配管を介して与える影響	水素製造施設の加熱量変動	原子炉施設の異常に起因する水素製造施設の加熱量変動時にも水素製造施設に異常が発生しないこと
	配管を介さず与える影響	原子炉施設の構造物損傷が水素製造施設に与える影響	—

Table 11 高圧ガス保安法適用範囲の候補 (1/2)

		ケース 1	ケース 2
概念図			
法規適用範囲の境界		2次ヘリウム冷却設備の原子炉格納容器隔離弁	2次ヘリウムバウンダリを含む機器の3次側出入口弁
運転モード		高温試験運転・並列運転	高温試験運転・並列運転
運転モード選択装置改造の必要性		必要 (スクラム設定値の変更)	不要 (水素製造施設の異常により原子炉側に影響がない)
メリット		<ul style="list-style-type: none"> 水蒸気改質器触媒管に一般工業材料の使用が可能 高圧ガス保安法適用範囲が実用システムと同じ 格納容器隔離弁外側が高圧ガス保安法適用となり建設コスト低減が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 実用システムと同様に2次ヘリウム冷却設備に水素製造施設が設置される
デメリット		<ul style="list-style-type: none"> 2次ヘリウムバウンダリを含む機器の故障が原子炉異常の起因となるため、原子力規制委員会から当該機器に対する高圧ガス保安法適用許可を得ることが困難と判断した 	<ul style="list-style-type: none"> 将来、異なる熱利用系接続時に、高圧ガス保安法適用範囲の妥当性に関して、原子力規制委員会の審査が必要 水蒸気改質器の触媒管にハステロイ XR の使用が必要 高圧ガス保安法適用範囲が実用システムと相違（適用範囲設定ロジックは同じ）
経済性		◎	○

Table 11 高圧ガス保安法適用範囲の候補 (2/2)

	ケース3	ケース4
模式図		
法規適用範囲の境界	3次ヘリウム冷却設備の弁	なし (全ての施設に原子炉等規制法を適用)
運転モード	高温試験運転・並列運転	高温試験運転・並列運転
運転モード選択装置改造の必要性	不要 (水素製造施設の異常により原子炉側に影響がない)	不要 (水素製造施設の異常により原子炉側に影響がない)
メリット	<ul style="list-style-type: none"> • 将来、異なる熱利用接続時に、設置許可の取合い条件を満足する限りにおいて、原子力規制委員会の審査が不要 • 水蒸気改質器触媒管に一般工業材料の使用が可能 	<ul style="list-style-type: none"> • 許認可上の課題はない
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> • 実用システムと異なり3次系に水素製造施設が設置される • 3次ヘリウム冷却設備が必要となり、建設コストが高くなる 	<ul style="list-style-type: none"> • 水素製造施設の設備が全て原子炉施設となるため、建設コストが高くなる
経済性	△	×

5. HTTR-熱利用試験施設の安全設計

5.1 安全機能の重要度分類の考え方

HTTR では、水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計指針（「研究炉指針」）の添付「水冷却型試験研究用原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する基本的な考え方（「重要度分類の考え方」）」²⁵⁾を参考に、かつ、HTTR の特徴・経験を踏まえて、安全機能の重要度分類を定義している。HTTR における安全機能の重要度分類の定義を以下に示す。

- クラス 1
 - (1) その損傷又は故障により発生する事象によって燃料の多量の破損を引き起こすおそれがあり、敷地外への著しい放射性物質の放出のおそれがある SSC（異常発生防止系。以下「PS」という。）
 - (2) 異常状態発生時に、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する SSC（異常影響緩和系。以下「MS」という。）
 - (3) 安全上必須なその他の SSC（MS）

- クラス 2
 - (1) その損傷又は故障により発生する事象によって、燃料の多量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれがある SSC（PS）
 - (2) PS-2 の構築物、系統及び機器の損傷又は故障が及ぼす敷地周辺公衆への放射線の影響を十分小さくするようにする SSC（MS）
 - (3) 異常状態への対応上特に重要な SSC（MS）
 - (4) 安全上特に重要なその他の SSC（MS）

- クラス 3
 - (1) 異常状態の起因事象となるものであって、PS-1、PS-2 以外の SSC（PS）
 - (2) 原子炉冷却材中放射性物質濃度を通常運転時に支障のない程度に低く抑える SSC（PS）
 - (3) 運転時の異常な過渡変化があっても、MS-1、MS-2 とあいまって、事象を緩和する SSC（MS）
 - (4) 異常状態への対応上必要な SSC（MS）

本検討では、HTTR への水素製造施設接続に伴い新規設置または既設改修される SSC を対象に、当該 SSC の安全機能と HTTR で用いられた安全機能の重要度分類の定義に基づき、安全機能の重要度分類を導出する。改修されない既設の SSC は、その安全機能に変更がないため、安全重要度分類に変更はない。また、本検討は、原子炉等規制法と高圧ガス保安法の適用範囲の境界に対して、ケース 2 の適用を前提とする。

HTTR-熱利用試験施設では、施設変更に伴い、「2 次冷却系の通常時冷却」機能、「水蒸気改質器の触媒管差圧維持」機能、「可燃性物質の 2 次ヘリウム冷却設備への侵入防止」機能、「緊

急時の防災対策上重要なもの及び異常状態の把握」に係る機能が追加または変更となる。水蒸気改質器、蒸気過熱器、蒸気発生器、ヘリウム冷却器、放熱器及び水素製造施設異常時の代替除熱に係る SSC は、水素製造施設異常時を含めた原子炉施設の通常運転時に 2 次ヘリウム冷却設備の通常時除熱機能である「2 次冷却系の通常時冷却」機能を有する。不活性ガス供給系、水蒸気改質器 3 次側に設置される遮断弁、弁等の操作に係る計測制御系や電源系は、「水蒸気改質器の触媒管差圧維持」機能を有する。原子炉建家隔離弁及び原子炉建家隔離弁の操作に係る計測制御系並びに電源系は、水蒸気改質器触媒管破損時に 2 次ヘリウム冷却設備配管を介して、水素製造施設から原子炉建家内に可燃性物質が侵入することを防止するための機能である「可燃性物質の 2 次ヘリウム冷却設備への侵入防止」機能を有する。水蒸気改質器と遮断弁までの配管に内包される可燃性物質に起因する内部火災への対策に係る消火設備は、「緊急時の防災対策上重要なもの及び異常状態の把握」に係る機能を有する。

以上から、HTTR-熱利用試験では、水素製造施設の接続に伴い、新規設置または既設改修される SSC の安全機能及び各安全機能の喪失時に想定される影響を考慮し、HTTR における安全機能の重要度分類の定義を基に適切な重要度分類を行う。なお、高圧ガス保安法を適用する一般産業施設に対しては、安全機能の重要度分類は適用外とする。

5.2 耐震設計上の重要度分類の考え方

HTTR-熱利用試験施設における既設改修設備の耐震設計上の重要度分類は、HTTR と同様に、「試験研究用等原子炉施設に係る耐震重要度分類の考え方」²⁷⁾に基づき、設定する。但し、設計用地震動は、地震に対する波及的影響を考慮して定める。

HTTR で用いた耐震設計上の重要度分類の判定方法のフロー図を Fig.5 に示す。本フロー図を適用し〈停止機能→冷却機能→閉じ込め機能〉の順で機能喪失した場合の放射線影響の有無によって S クラスに分類するかを判定する。また、〈停止機能→閉じ込め機能→冷却機能〉の順でも同様に実施した上で分類する。B クラスの施設・機器等を選定する場合に対する本フロー図の適用では、「過度の放射線被ばくを及ぼすおそれ」とあるのは、「敷地周辺の公衆が被ばくする実効線量が発生事故当たり 50 マイクロシーベルト以上であるおそれ」と読み替えて判定する。

原子炉等規制法と高圧ガス保安法の適用範囲の境界として、ケース 2 を適用する場合、HTTR-熱利用試験では、原子炉格納容器バウンダリを形成する配管及び原子炉格納容器隔離弁を新規に設置する。当該 SSC は放射性物質の閉じ込め機能を有する。また、HTTR-熱利用試験では、追加又は変更となる「2 次冷却系の通常時冷却」機能、「水蒸気改質器の触媒管差圧維持」機能、「可燃性物質の 2 次ヘリウム冷却設備への侵入防止」機能、「緊急時の防災対策上重要なもの及び異常状態の把握」に係る機能を有する安全施設を新規設置または既設改修する。これらの安全施設に関して、HTTR において用いられた耐震設計上の重要度分類の判定方法を用いて、耐震設計上の重要度分類を実施する。なお、内部火災に対する防護対策では地震時においては、火災源として耐震 B、C クラスの機器を想定することが求められている²⁸⁾。従って、耐震 B、C クラスで想定される地震動を超える地震に対して、内部火災対策のために

設ける「緊急時の防災対策上重要なもの及び異常状態の把握」に係る機能が維持できるよう、当該機能を有する SSC の設計用地震動を設定する。高圧ガス保安法を適用する一般産業施設は、耐震設計上の重要度分類の適用外とする。改修されない既設の SSC は、その安全機能に変更がないため、耐震設計上の重要度分類に変更はない。

5.3 重要安全施設選定の考え方

重要安全施設は、安全機能を有する安全施設のうち特に安全機能の重要度が高いものであり、試験炉設置許可基準規則第 6 条第 2 項、第 12 条第 2 項及び第 28 条第 1 項の要求事項を満たすことが求められる。HTTR では、重要安全施設の選定に当たっては、以下に示す HTTR の固有の安全性を考慮した安全確保のために必要な機能を確保できるよう考慮している。

- (1) 原子炉の緊急停止機能
- (2) 放射性物質の閉じ込め機能
- (3) 原子炉の停止及び放射性物質の閉じ込めの状態監視に必要な監視機能
- (4) 原子炉建家使用済燃料貯蔵プールの貯蔵機能

試験炉設置許可基準規則第 6 条第 2 項に規定されている重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮するよう設計することが求められている。HTTR の第 6 条に関する重要安全施設には、試験炉設置許可基準規則の解釈に従い、「研究炉の重要度分類の考え方」の「4.(1) 自然現象に対する設計上の考慮」を参考に、クラス 1 の系統、また PS-2 のうち機能喪失時に周辺公衆へ過度の被ばくを及ぼす可能性のある系統及び MS-2 のうち設計基準事故時にプラント状態を把握する機能を有する系統を選定している。

試験炉設置許可基準規則第 12 条第 2 項に規定されている安全機能の重要度が特に高い安全機能を有する安全施設は、同規則において、当該系統を構成する機械又は器具の単一故障が発生した場合であって、外部電源が利用できない場合においても機能できるよう、当該系統を構成する機械又は器具の機能、構造及び動作原理を考慮して、多重性又は多様性を確保し、及び独立性を確保するよう設計することが求められている。HTTR の第 12 条に係る重要安全施設は、試験炉設置許可基準規則の解釈に従い、「研究炉の重要度分類の考え方」の「4.(2)信頼性に対する設計上の考慮」を参考に、通常運転時に開であって閉動作によって原子炉冷却材圧力バウンダリの一部を形成する PS-1 の弁、MS-1 の系統 MS-2 のうち、異常状態発生時に、過度の放射線影響を防止するために必要な異常の影響緩和機能を果たすべき系統及び設計基準事故時のプラント状態を把握する機能を有する系統を選定している。

試験炉設置許可基準規則第 28 条第 1 項に規定されている重要安全施設は、その機能を達成するために電源を必要とする場合には、商用電源又は非常用電源のいずれからも電気の供給を受けられる設計とすることが求められている。第 28 条に関する重要安全施設には、試験炉設置許可基準規則の解釈に従い、「研究炉の重要度分類の考え方」の「4.(3) 電気系統に対する設

計上の考慮」を参考に、通常運転時に開であって閉動作によって原子炉冷却材圧力バウンダリの一部を形成する PS-1 の弁、MS-1 の系統、MS-2 のうち、異常状態発生時に、過度の放射線影響を防止するために必要な異常の影響緩和機能を果たすべき系統及び設計基準事故時のプラント状態を把握する機能を有する系統を選定している。第 28 条に関する重要安全施設として選定される系統は、第 12 条に関する重要安全施設と同じ系統が選定されている。

HTTR-熱利用試験では、安全機能を有する既設改修設備を対象に、HTTR と同じ選定方法に従って、安全機能やその重要度分類を基に、重要安全施設への該非を判定する。判定フローを Fig.6 に示す。一方、改修されない既設の SSC は、その安全機能に変更がないため、重要安全施設に選定される SSC には変更はない。

5.4 原子炉設置変更許可申請に係る安全設計の方針

5.4.1 外的事象の防護方針

HTTR-熱利用試験施設の安全設計で新たに考慮すべき外的事象に関して、それぞれ防護対策基本方針の現行からの変更点を整理する。新たに考慮すべき外的事象は、内部ハザードである内部火災、外部ハザードである自然事象及び外部人為事象である。HTTR-熱利用試験施設の安全設計において新たに防護方針を検討すべき外部ハザードは、竜巻、航空機落下、森林火災、近隣工場の火災、有毒ガスである。本検討では、防護対策基本方針の現行からの変更点を、試験炉設置許可基準規則の安全要件、現行の HTTR における防護対策の基本方針、HTTR-熱利用試験施設における施設変更による防護対象や想定シナリオの変更点を考慮した HTTR-熱利用試験施設における防護対策の基本方針の観点から整理する。また、本検討は、原子炉等規制法と高圧ガス保安法の適用範囲の境界に対して、ケース 2 を適用することを前提とする。

(1) 内部ハザード（内部火災）

- 安全要件

原子炉施設における内部火災に係る、試験炉設置許可基準規則⁶⁾の安全要件を以下に示す。

(火災による損傷の防止)

第八条 試験研究用等原子炉施設は、火災により当該試験研究用等原子炉施設の安全性が損なわれないよう、必要に応じて、火災の発生を防止することができ、かつ、早期に火災発生を感知する設備及び消火を行う設備(以下「消火設備」という。)並びに火災の影響を軽減する機能を有するものでなければならない。

2 消火設備は、破損、誤作動又は誤操作が起きた場合においても試験研究用等原子炉を安全に停止させるための機能を損なわないものでなければならない。

- 現行の HTTR における防護対策の基本方針

現行の HTTR では、内部火災により原子炉施設における安全施設が安全機能を損なわれないようにするため、火災の発生防止、火災の感知及び消火、火災の影響軽減の三方策を適切に組み合わせた火災防護対策を実施している。三方策のうち、まず火災の発生防止では、延焼性及

び自己消火性を有する難燃ケーブルを使用している。次に、三方策のうち火災の感知及び消火に関して、発電用原子炉施設の火災防護基準²⁸⁾を参考として、熱感知器や煙感知器を、火災区画内の全ての場所からの発火を検知できるように設置している。また、火災の消火に関しては、二酸化炭素消火設備、消火器、屋内消火栓及び屋外消火栓を設置している。最後に、三方策のうち火災の影響軽減では、火災により他の区域・区画の火災防護対象設備に影響を及ぼさないよう、耐火壁、耐火扉、防火ダンパ、貫通部シールによって区域・区画を分離している。

- HTTR-熱利用試験施設における防護対策の基本方針

HTTR-熱利用試験施設の水蒸気改質器は、新たな火災発生源であり、天然ガスや水素を主成分とする可燃性ガスを保有する。そのため、HTTR-熱利用試験施設では、HTTR における防護対策の基本方針を参考に、水蒸気改質器内の可燃性ガスを発生源とする内部火災により、原子炉施設の安全施設が安全機能を損なわないようにするため、(1)火災発生防止、(2)火災感知及び消火、(3)火災の影響軽減の三方策を適切に組み合わせた火災防護対策を追加で実施する方針とする。内部火災から防護すべき安全施設の安全機能は、試験炉設置許可基準規則の解釈において、試験研究用等原子炉を停止でき、放射性物質の閉じ込め機能を維持できること、また、停止時の状態維持、使用済燃料貯蔵槽のプール冷却機能及びプールへの給水機能を維持できることとされている。HTTR-熱利用試験施設の施設変更箇所に、内部火災から防護すべき安全施設の安全機能を有する SSC はない。従って、内部火災から防護すべき安全施設の安全機能を有する SSC には、HTTR と同じ SSC が選定される。実用炉の内部火災防護対策を参考に作成した、HTTR-熱利用試験施設の火災防護対策案を Table 12 に示す。

水蒸気改質器が内包する可燃性ガスを起因とした火災の燃焼形態のひとつとして、爆発が想定される。原子力発電所の内部火災影響評価ガイド²⁷⁾は、爆発に対する影響評価手法を提示していない。一方、実用軽水炉の安全審査では、内部火災防護対策として、発電機水素ガス供給設備から漏えいした水素ガスにより爆轟が発生した場合でも、安全機能を有する SSC を内包する火災区域を、十分な離隔距離で分離することで、安全機能に影響を及ぼさない設計とする方針が、安全要件に適合していることが認められた例がある²⁹⁾。

そこで、HTTR-熱利用試験施設でも、可燃性ガスの爆発が想定される内部火災への対策として、防護対象が想定される可燃性ガスの爆発中心から危険距離以上の離隔距離を確保する設計とする。火災爆発シナリオは、プロセスや操作における危険源の抽出に用いられる手法 HAZard and OPerability studies (HAZOP) を用いることで系統的に導出する。離隔距離の判断基準には、実用炉と同様に、可燃性ガスの爆発により生じる爆風圧が、強化されていない厚さ約 20-30cm のブロックがせん断や撓みにより破損する圧力の最小値である 50kPa^{29),30)}となる時の、爆発中心からの距離（危険距離）を用いる。危険距離は、TNT 等価法に基づく、以下の爆風圧と距離の関係式を用いて評価する。

$$L = 0.04\lambda^3\sqrt{KW_G}$$

L：爆風中心からの距離 (m)

λ：換算距離 (m/kg^{1/3}) ※爆風圧 50kPa では 4.74m/kg^{1/3}

W_G : 可燃性ガスの流出量 (t)

K : 換算係数 (水素 : 2860000³⁰⁾ / メタン : 714000³⁰⁾)

(2) 外部ハザード

- 安全要件

外部ハザードに係る試験炉設置許可基準規則の安全要件を以下に示す。

(外部からの衝撃による損傷の防止)

第六条 安全施設は、想定される自然現象(地震及び津波を除く。)が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。

3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される試験研究用等原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの(故意によるものを除く。)に対して安全機能を損なわないものでなければならない。

【竜巻】

- 現行の HTTR における防護対策の基本方針

原子炉施設は、供用期間中に極めてまれであっても、その発生により原子炉施設に影響を与える竜巻として原子力発電所の竜巻影響評価ガイド³¹⁾を参考に想定した竜巻に対して原子炉の安全性を損なわない設計とする。竜巻に対する防護設計としては、竜巻に対して、HTTRの安全上の特徴を考慮し「原子炉の緊急停止」「放射性物質の閉じ込め(冷却材圧力バウンダリ)」「監視機能」及び「使用済燃料の貯蔵」機能を有する安全施設を竜巻防護施設として防護する方針としている。また、竜巻防護施設は原子炉建家及び使用済燃料貯蔵建家が内包するため、これら建家の外殻が、設計竜巻の風圧力及び気圧差による荷重、選定された飛来物(鋼製材及び鋼製パイプ)の衝撃荷重に耐えることができることを確認した。飛来物となる可能性のあるもののうち、飛来した場合の運動エネルギーが設計飛来物よりも大きい飛来物は、飛来物のサイズや剛性を考慮し、事前に隔離、撤去、固縛、固定を行い、竜巻の接近が予測された場合には、原子炉の停止操作を行う方針としている。また竜巻により商用電源が喪失する可能性があり、非常用発電機も起動できない場合は、蓄電池により原子炉停止後の状態を監視する。蓄電池枯渇後は、可搬型計器、可搬型発電機を用いて必要な監視を継続する。

- HTTR-熱利用試験施設における防護対策の基本方針

HTTR-熱利用試験施設における竜巻防護対策の変更点は、水素製造施設建家の接続に伴い新設されるSSC、またはその一部が、新たな竜巻飛来物として想定される点である。竜巻防護施設は、基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド³²⁾の重要度分類における耐震Sクラ

スの SSC、並びに竜巻防護施設に対して波及的影響を及ぼし得る施設とすることが求められている²⁸⁾。HTTR-熱利用試験施設に新規設置される耐震 S クラスの SSC はないことから、竜巻防護施設は現行の HTTR から変更はない。竜巻防護の基本方針としては、竜巻飛来物として想定される新設 SSC の一部は固縛、固定し、竜巻飛来物として想定される新設 SSC の内、固縛、固定を行わない新設 SSC は、竜巻防護施設との離隔及び竜巻防護施設への影響評価を実施し、影響が許容範囲内であることを確認する。竜巻防護施設への影響評価では、HTTR と同じ設計竜巻における竜巻飛来物の浮き上がりの有無、飛来距離及び飛来速度を評価し、竜巻飛来物が竜巻防護施設である原子炉建家の外殻に衝突することによる貫通や裏面剥離の影響を評価する。

【航空機落下】

- 現行の HTTR における防護対策の基本方針

原子炉施設への航空機の落下確率は、実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準に関して³³⁾等に基づき評価した。航空機の落下確率の評価に用いる標的面積の算出には、原子炉建家、使用済燃料貯蔵建家及び冷却塔を考慮した。航空機落下は、現行では HTTR 周辺の飛行場としては、南南西約 15km の地点にある茨城空港及び自衛隊百里飛行場がある。HTTR 上空に保護空域が重なる航空路等としては、航空路 (R211)、直行経路 (IXE-SWAMP) 及び RNAV 経路 (Y30、Y108) があり、HTTR へ航空機が落下する確率は、約 6.0×10^{-8} 回/炉・年¹⁶⁾であり、防護設計の可否を判断する基準である 10^{-7} 回/炉・年³³⁾を超えないことから、航空機落下に対する防護措置は必要ないことを確認した。

- HTTR-熱利用試験施設における防護対策の基本方針

HTTR-熱利用試験施設では、HTTR からの施設変更により、2 次ヘリウム冷却設備配管及び水素製造施設建家、LNG タンク等が新たに設置される。原子炉施設への航空機落下に対する影響評価では、航空機落下事故時の安全性を確保する観点から大量の放射性物質を蓄えている炉心や使用済燃料プールを保護すること、並びに、原子炉の安全停止 (炉心冷却も含む。)を確保することの重要性が指摘されている³⁴⁾。HTTR-熱利用試験における新設設備に、大量の放射性物質を蓄えている炉心や使用済燃料プールの保護及び原子炉の安全停止 (炉心冷却も含む。)の確保に係る安全機能を有する SSC はないため、航空機落下の標的対象及び標的面積は現行 HTTR での想定または評価結果から変更はない。従って、航空機落下確率も現行 HTTR と変わらず、航空機落下確率は約 6.0×10^{-8} 回/炉・年であり、防護設計の可否を判断する基準である 10^{-7} 回/炉・年^{33),34)}を超えないことから、航空機落下に対する防護措置は必要ないと考えられる。

【森林火災】

- 現行の HTTR における防護対策の基本方針

HTTR における原子炉施設は、想定される外部火災の発生を想定しても、安全施設の安全機能を損なわない設計としている。外部火災から防護する安全施設は、安全機能の重要度分類がクラス 1、クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物、系統及び機器である。このうち、重要安全

施設を内包する原子炉建家及び使用済燃料貯蔵設備を内包する使用済燃料貯蔵建家並びに冷却塔及び排気筒に関しては、外部火災に対して外殻のコンクリート表面温度を評価し、防火帯を設けること等によりコンクリート表面温度を許容温度以下とすることで安全施設の安全機能を損なわない設計とした。コンクリート表面温度の評価は、原子力発電所の外部火災影響評価ガイドを参考にした。森林火災等の熱影響に対し、原子炉建家、使用済燃料貯蔵建家、冷却塔及び排気塔の周囲に防火帯を確保することで延焼を防止するとともに、原子炉建家、使用済燃料貯蔵建家、冷却塔及び排気塔の外殻コンクリート表面温度は、許容温度以下であり、安全施設の安全機能を損なわないことを確認した。

- HTTR-熱利用試験施設における防護対策の基本方針

HTTR-熱利用試験施設における森林火災に対する防護対策の基本方針は、HTTR-熱利用試験施設での施設変更に伴い、現行HTTRにおける基本方針から、防護対象が変更となる。外部火災防護対象であるクラス1からクラス3の安全機能を有する安全施設は、防火帯内側に設置する。クラス1及びクラス2の外部火災防護対象は、建家内の設備に関しては、建家のコンクリート壁の熱影響評価を、屋外設備に関しては、各機器に対する熱影響の評価を実施する。クラス3の外部火災防護対象は代替手段により安全機能を確保する方針とする。

【近隣工場等の火災・爆発】

- 現行のHTTRにおける防護対策の基本方針

近隣の産業施設の火災・爆発に対して、安全施設が安全機能を損なわない設計とする。外部火災評価ガイド³⁵⁾を参考に、これらの火災・爆発に対しては、敷地外近隣に存在する石油コンビナート等の火災・爆発及び敷地内の危険物貯蔵設備等の火災を考慮した評価を実施した。

- HTTR-熱利用試験施設における防護対策の基本方針

HTTR-熱利用試験施設の水素製造施設は、原料ガス系及び生成ガス系、触媒還元用水素タンク、LNG配管、LNGタンクに可燃性物質を内包するため、新たに当該可燃性物質を起因とした火災・爆発を想定する必要がある。火災爆発シナリオは、HAZOPを用いることで系統的に導出する。導出された火災爆発シナリオによる防護対象への影響評価を実施し、十分な離隔距離を確保するよう設計する。火災影響の評価方法は原子力発電所の外部火災評価ガイド³⁵⁾を参考とする。LNGタンク及びLNGタンク-水素製造建家間配管は地下設置とし、十分な耐熱性及び強度を有する材質の屋根を設けることで、LNGタンクから漏えいしたLNGによる液面火災による影響は評価対象外とする。残る評価対象は可燃性ガスのため、爆発事象を想定する。更に、可燃性物質を内包する新設SSCは、それぞれ高圧ガス保安法に基づく火災対策（緊急遮断弁や隔壁の設置等）を実施する。

【有毒ガス】

- 現行のHTTRにおける防護対策の基本方針

現行HTTRの敷地内に、有毒ガスの発生源になると考えられる有毒物質を保管する大規模な

屋外タンクや運搬するタンクローリー等を保有していないため、敷地内を発生源とした有毒ガスの影響を考慮する必要はない。

- HTTR-熱利用試験施設における防護対策の基本方針

HTTR-熱利用試験では、新たに一酸化炭素（メタン水蒸気改質反応の副生成物）及びブタン（LNGの含有物）の有毒ガス源または有毒ガス発生源が存在するため、その影響を考慮する必要がある。有毒ガス漏えいによる原子炉施設への影響評価は、有毒ガス防護に係る影響評価ガイド³⁶⁾を参考にして実施する。

有毒ガスが環境に漏えいし、大気拡散により原子炉施設に接近後、換気空調系空気取入口を通して、制御室に侵入する恐れがある。よって、有毒ガス漏えい時に、適切な対応措置をとるため、従事者が支障なく原子炉制御室に入り、又は一定期間とどまり、かつ、当該措置をとるための操作を行うことができなければならない。従って、有毒ガスに対する防護として、原子炉制御室内の有毒ガス濃度が、従事者の健康状態に影響がないことを確認する。判断指標と判断基準の関係を表す式を以下に示す³⁶⁾。

$$\sum_i \frac{C_i}{C_{i,IDLH}} < 1.0$$

ここで、 C は制御室における有毒ガス濃度、添え字 i は有毒ガスの種類、添え字IDLHは有毒ガスの種類ごとの許容濃度であり、一酸化炭素に対しては1200ppm³⁷⁾、n-ブタンに対しては1600ppm³⁸⁾を用いる。

5.4.2 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止

- 現行のHTTRにおける防護対策の基本方針

試験研究炉用等原子炉施設に対して、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止に関する、試験炉設置許可基準規則の安全要件を以下に示す。

(運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止)

第十三条 試験研究用等原子炉施設は、次に掲げるものでなければならない。

一 運転時の異常な過渡変化時において、設計基準事故に至ることなく、試験研究用等原子炉施設を通常運転時の状態に移行することができるものとする。

二 設計基準事故時において次に掲げるものであること。

イ 炉心の著しい損傷が発生するおそれがないものであり、かつ、炉心を十分に冷却できるものであること。

ロ 設計基準事故により当該設計基準事故以外の設計基準事故に至るおそれがある異常を生じないものであること。

ハ 試験研究用等原子炉施設が工場等周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないものであること。

この安全要件に対して、HTTR では運転時の異常な過渡変化（AOO）及び設計基準事故（DBA）に関して解析を行い、判断基準を満足する設計とすることで、その安全設計の基本方針の妥当性を確認した。具体的には、AOO 及び DBA の判断基準を超過するおそれのある異常事象とその起回事象を同定し、起回事象を対象とした安全解析を行った。次に、安全解析結果に基づき、異常事象ごとに、AOO 及び DBA の判断基準に対応する評価項目がもっとも厳しい結果となる起回事象を代表事象として選定した。選定された AOO 及び DBA の代表事象が判断基準を満足することを確認し、試験炉設置許可基準規則に適合していることを確認した。

- HTTR-熱利用試験施設における防護対策の基本方針

HTTR-熱利用試験施設内の原子炉施設では、HTTR-熱利用試験施設における施設変更箇所を対象に異常事象及び起回事象の摘出、新たな起回事象を対象とした安全解析、代表事象の選定を実施し、選定された代表事象が判断基準を満足することを確認することにより、HTTR-熱利用試験施設の安全設計の基本方針の妥当性を確認する。安全評価の流れを Fig.7 に示す。

HTTR における AOO 及び DBA の判断基準を以下に示す。判断基準は、燃料や炉心、原子炉冷却材圧力バウンダリの破損及び周辺公衆に対する放射線被ばくのリスクの観点から定められている。HTTR-熱利用試験施設における既設改修及び新設箇所に、AOO 及び DBA の判断基準に対応する評価項目に影響を与える機器及び設備は含まれないため、HTTR-熱利用試験施設においても、HTTR と同じ判断基準を用いることができる。

【AOO】

- (1) 燃料最高温度は、燃料粒子被覆層の有意な破損及び著しい劣化を生じさせる温度以下であること。
- (2) 原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力は、設計上の最高使用圧力の 1.1 倍以下であること。
- (3) 原子炉冷却材圧力バウンダリの温度は、使用する金属が十分に安定した強度を確保できる温度以下であること。

【DBA】

- (1) 炉心は著しい損傷に至ることなく、かつ、十分な冷却が可能であること。
- (2) 原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力は、設計上の最高使用圧力の 1.2 倍以下であること。
- (3) 原子炉冷却材圧力バウンダリの温度は、設計上の制限温度以下であること。
- (4) 原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力は、最高使用圧力以下であること。
- (5) 周辺の公衆に対して著しい放射線被ばくのリスクを与えないこと。

AOO 及び DBA の判断基準を超過するおそれのある異常事象とその起回事象の摘出は、HTTR で用いられた方法と同じ方法・手順で実施する。

- (1) AOO 及び DBA の判断基準に対応する評価項目を頂上事象に、MLD 法により各項目に影響を与える要因を抽出分析し、異常事象を整理。
- (2) FMEA 手法により、各設備の機器の故障を仮定して、炉心及び原子炉冷却系に与える影響を整理し、起因事象を抽出。
- (3) 異常事象と機器故障モードの対応を整理し、判断基準に対応する評価項目に影響を与える起因事象を同定する。

5.4.3 多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止

- 現行の HTTR における防護対策の基本方針

試験研究炉用等原子炉施設に対して、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故を超える事故として、多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止に関する試験炉設置許可基準規則の安全要件を以下に示す。

(多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止)

第五十三条 試験研究用等原子炉施設は、発生頻度が設計基準事故より低い事故であって、当該施設から多量の放射性物質又は放射線を放出するおそれがあるものが発生した場合において、当該事故の拡大を防止するために必要な措置を講じたものでなければならない。

また試験炉設置許可基準規則解釈は、想定すべき具体的な事故として、以下の通り、燃料体の損傷が想定される事故と使用済燃料貯蔵設備の冷却機能喪失による使用済燃料の損傷が想定される事故を挙げている。

第 5 3 条 (多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止)

(中略)

3 具体的な事故としては、例えば、以下が挙げられる。

一 燃料体の損傷が想定される事故

イ 設計基準事故時の想定を超える空気侵入又は水侵入による炉内構造物（黒鉛）の酸化、可燃性ガスによる爆発等

二 使用済燃料貯蔵設備の冷却機能が失われ、使用済燃料の損傷が想定される事故

イ 使用済燃料貯蔵設備の冷却システムが故障した際に、水補給にも失敗し、冷却水の蒸発により使用済燃料の冠水が維持できなくなり、使用済燃料の破損に至る可能性がある事故

ロ 冷却系統配管が破断した際に、サイフォン現象等により、使用済燃料の冠水が維持できなくなり、使用済燃料の破損に至る可能性がある事故

ハ 空気により使用済燃料を冷却する使用済燃料貯蔵施設

以上の安全要件に対して、HTTR では原子炉施設は、発生頻度が設計基準事故より低い事故であって、当該施設から多量の放射性物質又は放射線を放出するおそれがあるものが発生した場合において、当該事故の拡大を防止するために、目張り等による原子炉建家の気密の改善、

さらに使用済燃料貯蔵プールへの冷却水の注入による使用済燃料の冷却等、必要な措置を講じる設計とすることにより、その安全設計の基本方針の妥当性を確認した。具体的には、多量の放射性物質等を放出するおそれのある事故を選定し、選定した事象に対して安全評価を実施し、評価結果に基づき、事故の拡大防止に必要な措置を行う運用とすることを定めることで、試験炉設置許可基準規則に適合することを確認した。

HTTR では、原子炉に係る多量の放射性物質等を放出するおそれのある事故には、原子炉の AOO や DBA（以下「設計基準事象」という。）時に、作動を想定していた基本的安全機能（原子炉停止機能、炉心冷却機能、放射性物質の閉じ込め機能）を有する機器等のいずれかの故障が重畳した場合の事象、すなわち、設計基準事象を超える事象の中から、高温ガス炉の特徴を踏まえて、放射性物質等の放出の影響、空気侵入等による黒鉛酸化の影響、黒鉛酸化に伴い発生する可燃性ガスによる爆発の影響が大きい事象を選定した。HTTR の構成上、原子炉冷却材圧力バウンダリが破損しない限り、多量の放射性物質の放出や空気侵入等による黒鉛酸化及び可燃性ガスによる爆発は発生しない。そのため、HTTR における多量の放射性物質等を放出するおそれのある事故は、原子炉冷却材圧力バウンダリの破損による破断口と影響が最も大きくなる 1 次冷却設備二重管破断に、基本的安全機能の喪失が重畳する事象を選定された。

また、使用済燃料貯蔵設備に係る多量の放射性物質等を放出するおそれのある事故には、試験炉設置許可基準規則解釈に例示されている事故に相当する、使用済燃料貯蔵設備における使用済燃料の冷却機能が喪失する事象を想定した。

- HTTR-熱利用試験施設における防護対策の基本方針

HTTR-熱利用試験においては、HTTR からの改造及び設備追設に伴い、公衆被ばく上最も厳しい設計基準事象や基本的安全機能に分類される緩和機能の変更となる可能性がある。従って、HTTR-熱利用試験では、HTTR からの改造及び設備追設に伴い、追加となる設計基準事象の抽出、当該事象を対象とした、放射性物質等の放出の影響、空気侵入等による黒鉛酸化の影響、黒鉛酸化に伴い発生する可燃性ガスによる爆発の影響の評価または分析、新たに想定すべき多量の放射性物質等の放出のおそれがある事故を選定する。多量の放射性物質等の放出のおそれがある事故には新たに選定された事故がある場合には、当該事故を対象に、基本的安全機能の喪失の重畳を想定した安全評価を実施し、評価結果に基づき、事故の拡大防止に必要な措置を検討し、運用することとする。

HTTR-熱利用試験で新たに想定される多量の放射性物質等の放出のおそれがある事故の有無を予め見通すため、炉外技術開発試験装置の系統設計情報を参考に、公衆被ばく上最も厳しい設計基準事象や基本的安全機能に係る緩和機能の変更有無を検討した。その結果、公衆被ばく上最も厳しい可能性がある設計基準事象に、以下の 4 事象が同定されたが、HTTR の設計基準事象を対象とした安全評価の結果から、いずれの事象も HTTR で公衆被ばく上最も厳しい設計基準事象に選定されている 1 次冷却設備二重管破断事故よりも著しい放射性物質の放出は見込まれないことが分かった。

- (1) 水蒸気改質器遮断弁の閉失敗
- (2) 放熱器ファン全機のコーストダウン
- (3) 水・蒸気設備排水配管の破損及び破断
- (4) 蒸気発生器伝熱管の漏えい及び破損

また、HTTR からの改造及び設備追設に伴い、基本的安全機能に分類される緩和機能にも変更はなかったことから、HTTR-熱利用試験に対する多量の放射性物質等の放出のおそれがある事故には、HTTR と同じ事象が選定される見通しが得られた。今後は HTTR-熱利用試験の設計情報を用いて、多量の放射性物質等の放出のおそれがある事故を再度選定する必要がある。

また、水素製造施設の接続に伴い、水素製造施設での異常が原子炉施設における事故の拡大防止措置に与える影響への対策を講じる。具体的には、HTTR では事故の拡大防止措置として、主に原子炉建家内で実施する機器等の操作、計器類の監視、状況調査、機器等の復旧作業を実施する際、一部が原子炉建家とは異なる建家内で保管されている資機材を使用して対応に当たる。従って、水素製造施設の異常が原子炉施設に与える影響により、異常時措置に使用する資機材へのアクセスや当該資機材の輸送、当該資機材を使用した異常時措置の実施に支障を与える可能性がある。このため、必要な資機材へのアクセス性や輸送手段の確保及び事故の拡大防止措置の実施手順の整備を行う。

Table 12 HTTR-熱利用試験施設の火災防護対策案

方策	項目	設計対策
火災発生防止	漏えいの防止、拡大防止	溶接構造、圧力制御、扉常時閉運用、機械換気、隔離弁
	配置上の考慮	可燃性物質を内包する機器と安全施設の壁等の設置及び隔離による配置上の考慮
	換気	換気空調設備による機械換気（常用電源） 可燃性ガス漏えい検知器
	防爆	なし（換気により爆発性雰囲気にならない）
	貯蔵	なし（貯蔵しない）
	不燃性・難燃性材料の使用	安全機能を有する SSC には不燃性・難燃性材料を使用
	自然現象による火災発生の防止	落雷対策、耐震設計
火災感知及び消火	早期の火災感知及び消火	炎感知器、煙感知器、熱感知器、自動消火設備、初動消火設備
	自然現象への対策	火災感知設備及び消火設備、壁等は、基準地震動に対する耐震性
	消火設備の破損、誤作動又は誤操作への対策	消火剤誤放出により電気及び機械設備に影響を与えないよう設計
火災の影響軽減	系統分離による影響低減	換気空調作動による悪影響防止対策
	火災影響評価	火災影響評価を実施

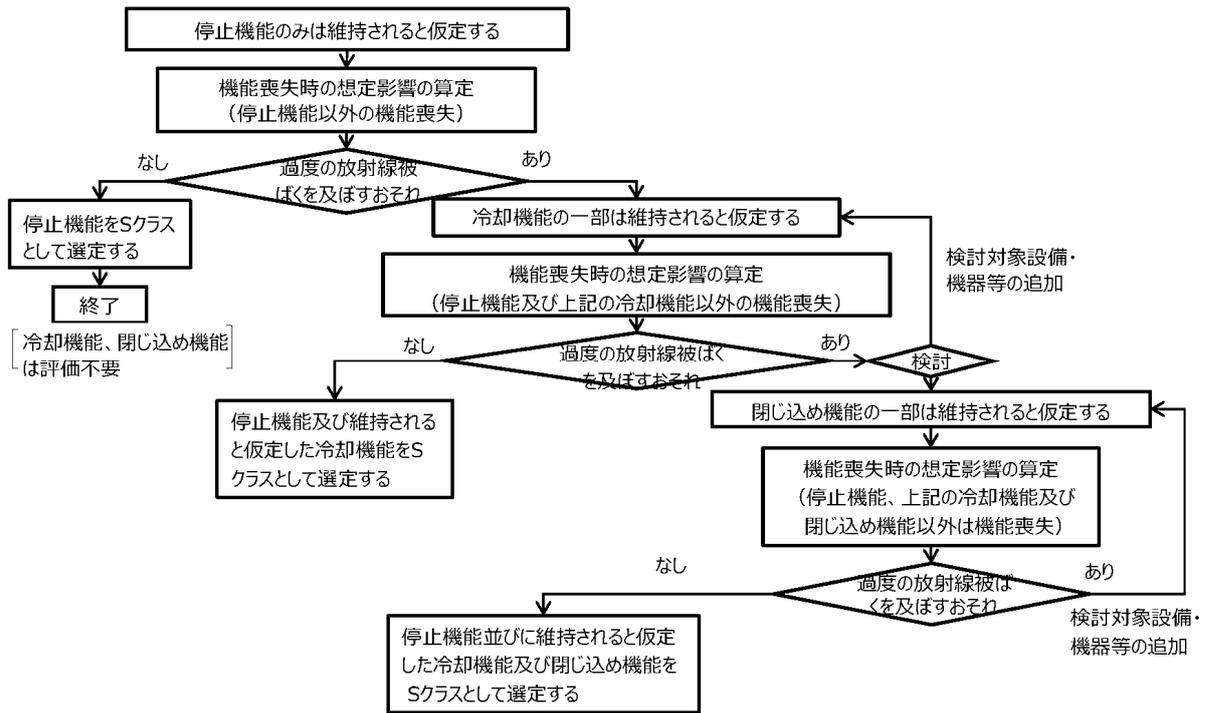


Fig.5 耐震重要度分類の判定方法

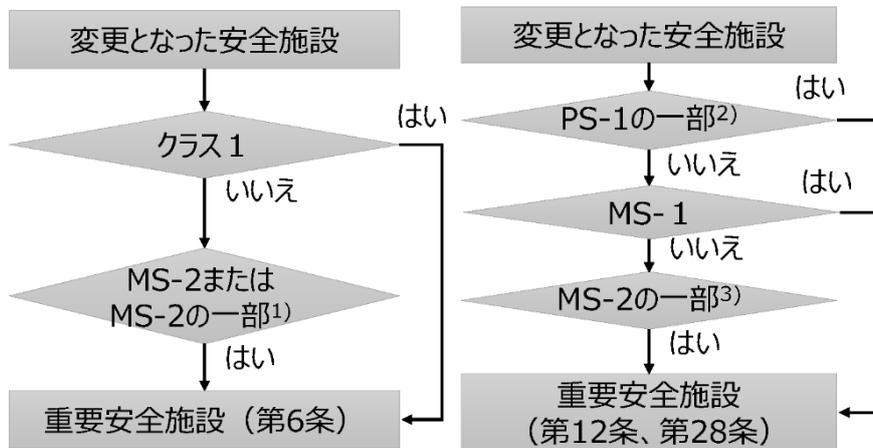


Fig.6 重要安全施設の選定プロセス

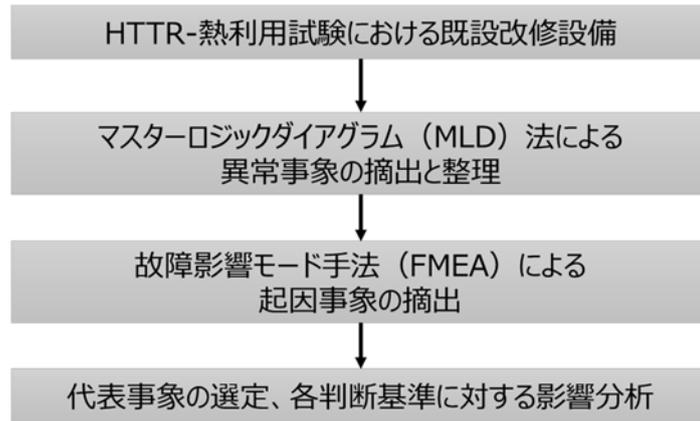


Fig.7 安全評価の流れ

6. おわりに

高温ガス炉研究開発センターの下に設置した「HTTR-熱利用試験専門委員会」では、原子力規制委員会による新規制基準への適合性審査に合格したHTTR安全設計をベースに、施設の変更や水素製造施設の接続に伴い安全設計上新たに考慮すべき事象に対する対策を考慮し、HTTR-熱利用試験施設における原子炉施設の安全設計の考え方の検討を行った。検討に当たっては、原子炉安全の観点からの十分な安全性を確保することを大前提としつつ、水素製造施設に対して、高圧ガス災害に対する安全確保の多くの実績を有する一般産業法規を適用することを基本方針とした。以下に検討結果の概要を述べる。

- HTTR-熱利用試験に係る適用法規に関し、高圧ガス保安法では高圧ガスによる災害に対する公共の安全確保が明確に規定していること、高圧ガス保安法体系下の規則において、高圧ガス災害に対する公共の安全確保を目的とした安全要件が規定されていること、原子炉等規制法の設置許可基準規則において規定された安全要件（外部からの衝撃による損傷の防止等）に適合することで水素製造施設異常（水素製造施設から漏えいした可燃性物質の火災爆発等）に対する原子炉の安全確保が可能であることから、HTTR に接続する水素製造施設を高圧ガス保安法の下で建設可能であると判断された。
- 「原子炉施設に接続された水素製造施設」と、高圧ガス保安法の適用が明白な「原子炉施設の近隣に設置される水素製造施設」の相違点を分析することで、水素製造施設への高圧ガス保安法の適用の条件が、水素製造施設の異常時にも原子炉施設が通常運転の継続または異常の拡大防止であること並びに原子炉施設異常に起因する水素製造施設の加熱量変動時にも水素製造施設に異常発生または異常拡大が防止されることであることを示した。
- 原子炉等規制法と高圧ガス保安法の適用範囲の候補として、4 ケース（(1)2 次ヘリウム冷却設備の原子炉格納容器隔離弁を境界とするケース、(2)2 次ヘリウムバウンダリを含む機器の3 次側出入口弁を境界とするケース、(3)2 次ヘリウム冷却設備に第2 中間熱交換器、(4)3 次ヘリウム冷却設備に水蒸気改質器を設置して3 次ヘリウム冷却設備に設置する弁を境界とするケース及びすべてを原子炉等規制法適用とするケース）を検討し、高圧ガス保安法の適用範囲を決定する上での評価項目として、設計成立性や建設コスト等を抽出するとともに、各ケースの得失を明らかにした。
- HTTR-熱利用試験施設の安全設計、機器設計及び耐震設計を行うため、HTTR-熱利用試験施設の安全機能の重要度分類、耐震設計上の重要度分類及び重要安全施設を設定する方針を示した。
- HTTR の安全設計において考慮されている事象に加えて、HTTR-熱利用試験施設の安全設計において新たに考慮すべき外的事象として、内部火災や竜巻、航空機落下（燃料火災）、森林火災、近隣工場等の火災、有毒ガスを選定した。また、新たに考慮すべき外的事象に対して、想定内部火災と防護対象の十分な離隔距離の確保、新たな竜巻飛来物の固定・固縛措置や竜巻飛来物による影響評価、水素製造施設の火災と航空機落下（燃料火災）または森林火災の重畳事象、有毒ガスによる影響評価等の防護対策の基本方針を提示した。

- HTTR-熱利用試験施設の運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故、多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止に関しては、原子炉等規制法の安全要件への適合方針や、MLD や FMEA を組み合わせた体系的な事象選定方法や、原子炉施設で生じた事故の拡大防止策を提示した。また、多量の放射性物質等を放出する事故には、HTTR と同じ 1 次冷却設備二重管破断と基本的安全機能喪失の重畳事象が選定される見込みであることを示した。水素製造施設異常時に原子炉施設で生じた事故の拡大防止措置を確実に実施するため、必要な資機材へのアクセス性や輸送手段の確保及び事故の拡大防止措置の実施手順の整備が必要であることを示した。

今後は、高圧ガス保安法適用範囲選定に向けた評価を実施する。また、本稿でまとめられた安全設計の考え方にに基づき、水素製造施設接続に伴う HTTR 設置変更許可申請に向けて、HTTR-熱利用試験施設の基本設計や安全設計、安全評価を進める。

謝 辞

2030年にHTTRを用いて水素を製造するための技術確立に向けては、HTTRの改造及び水素製造施設の接続等のため原子力規制委員会から許認可を取得しなければならない。高温ガス炉に化学プラントを接続した事例は過去に無く、今回、安全設計方針案の議論を開始した。原子力機構高温ガス炉研究開発センターの下に「HTTR-熱利用試験専門委員会」を設置し、HTTR-熱利用試験に係る適用法規、工学技術の妥当性等の検討を行った。本検討においては、新型炉の安全設計、高温ガス炉安全性等の視点から国立大学法人北海道大学澤和弘教授に、化学プラントの安全性等の視点から日揮グローバル株式会社田辺雅幸グループマネージャーに、原子力安全工学、特にリスク評価の視点から学校法人五島育英会東京都市大学村松健客員教授に、原子力学、安全工学、炉物理、規制適合性等の視点から東海国立大学機構名古屋大学山本章夫教授に、安全設計方針案の策定に至るまでに要する考え方、評価すべきポイント等に、多大なる極めて貴重かつ有効なご助言を頂き、本報として集約するに至ることができました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 経済産業省, 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 成長戦略会議, 2020.
- 2) Saito S., et. al., Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", JAERI 1332, 1994, 247p.
- 3) 佐藤博之ほか, HTTR-熱利用試験計画 (1) 計画の概要, 日本原子力学会 2022年春の年会, 2022.
- 4) 大橋一孝ほか, 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.
- 5) Sakaba, N., 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.
- 6) 試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則, 平成二十五年原子力規制委員会規則第二十一号, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=425M60080000021> (accessed 2022-02-01).
- 7) 高田昌二, 高温ガス炉 (HTTR) で炉心流量喪失時における安全性を実証する試験を開始; 第1回目の炉心流量喪失試験を終了, ATOMO Σ, vol.53, no.3, 2011, pp.167-168.
- 8) 日本原子力研究開発機構, HTTR (高温工学試験研究炉) における国際共同試験の実施について (お知らせ) - 炉心冷却喪失試験の実施 -, <https://www.jaea.go.jp/02/press2021/p22013101/> (accessed 2022-02-18).
- 9) 日本原子力研究開発機構, HTTRを用いた OECD/NEA 国際共同研究プロジェクトについて 革新炉の安全性を議論する第1回会合の開催 - (お知らせ) ,

- プロジェクトの背景／プロジェクトの内容／今後の予定, <https://www.jaea.go.jp/02/press2011/p11082601/02.html> (accessed 2022-01-26).
- 10) 國富一彦ほか, 高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の設計研究, 日本原子力学会和文論文誌, vol.1, no. 4, 2002, pp.352-360.
 - 11) K. Kunitomi, et al., GTHTR300C for hydrogen cogeneration, Proc. 2nd Int. Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, Sep. 22-24, Paper D18, 2004.
 - 12) 加藤道雄ほか, HTTR 水素製造システム炉外技術開発試験装置の構成と機器仕様 (受託研究), JAEA-Technology 2007-022, 2007, 209p.
 - 13) 西原哲夫ほか, HTTR 水素製造システムの高圧隔離弁の概念設計及び弁座盛金材料の選定 (受託研究), JAERI-Tech 99-078, 1999, 55p.
 - 14) 西原哲夫ほか, HTTR 水素製造システムの高圧隔離弁の開発, 日本原子力学会和文論文誌, vol.3, no.4, 2004, pp.381-387.
 - 15) 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律, 昭和三十二年法律第百六十六号, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=332AC0000000166> (accessed 2022-02-01).
 - 16) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所(北地区)原子炉設置変更許可申請書, 2020.
 - 17) 化学工学協会編, 化学工学便覧 改訂五版, 丸善, 1988.
 - 18) 一般高圧ガス保安規則、昭和四十一年通商産業省令第五十三号, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=341M50000400053> (accessed 2022-02-01).
 - 19) GHS 関係省庁等連絡会議, 政府向け GHS 分類ガイダンス (令和元年度改訂版 (Ver. 2.0)), 2019.
 - 20) 高圧ガス保安法, 昭和二十六年法律第二百四号, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=326AC0000000204> (accessed 2022-02-01).
 - 21) 原子力規制委員会、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=425M60080000006> (accessed 2022-03-28).
 - 22) 本間洋之ほか, HTTR-IS システムの系統設計のための化学プラントの事故事例研究, JAEA-Technology 2007-006, 2007, 60p.
 - 23) 経済産業省、高圧ガス・石油コンビナート事故対応要領, 2018.
 - 24) 原子力規制委員会、実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=425M60080000005> (accessed 2022-02-01).
 - 25) 原子力安全委員会、水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計審査指針, 1991.
 - 26) 原子力規制委員会、「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」の制定に関して, 原規技発第 2104216 号, 2021.
 - 27) 原子力規制委員会、原子力発電所の内部火災影響評価ガイド, 原規技発第 1909069 号, 2018.
 - 28) 原子力規制委員会、実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準, 原規技発第 20033110 号, 2020.
 - 29) 東北電力、女川原子力発電所 2 号炉 設計基準対象施設について, 第 683 回審査会合, 2019.
 - 30) 消防庁特殊災害室、石油コンビナートの防災アセスメント指針, 2013.

- 31) 原子力規制委員会, 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 原規技発第 1909069 号, 2013.
- 32) 原子力規制委員会, 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド, 原管地発第 1306192 号, 2013.
- 33) 経済産業省, 実用発電用原子炉施設への航空機落下確率に対する評価基準, 平成 21・06・25 原院第 1 号, 2009.
- 34) 原子力安全・保安院, 実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について (内規), 平成 14・07・29 原院第 4 号, 2002.
- 35) 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, 原規技発第 13061912 号, 2013.
- 36) 原子力規制委員会, 有毒ガス防護に係る影響評価ガイド, 原規技発第 1704052 号, 2017.
- 37) Centers for Disease Control and Prevention, The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/630080.html> (accessed 2022-02-01).
- 38) Department of Health and Human Services, Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH) Value Profile: Butane, Publication 2016-174, 2016.

