

平成 28 年度 研究開発・評価報告書
評価課題「高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発」
(中間評価)

Assessment Report on Research and Development Activities in FY2016
Activity "Research and Development on High Temperature Gas-cooled Reactor and
Related Heat Application Technology"
(Interim Report)

(編) 立松 研二 西原 哲夫
(Eds.) Kenji TATEMATSU and Tetsuo NISHIHARA

原子力科学研究部門
高温ガス炉水素・熱利用研究センター
HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center
Sector of Nuclear Science Research

September 2017

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Evaluation

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 (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒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.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
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

© Japan Atomic Energy Agency, 2017

平成 28 年度 研究開発・評価報告書
評価課題「高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発」
(中間評価)

日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門
高温ガス炉水素・熱利用研究センター

(編) 立松 研二、西原 哲夫

(2017 年 7 月 25 日受理)

日本原子力研究開発機構理事長は、外部有識者からなる高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会に、高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発に係る第 3 期中長期計画の中間評価を諮問し、評価を受けた。その結果、HTTR の再稼働に向けた新規制基準対応、水素製造技術開発等については B 評価を受けたが、全ての機器仕様の設定が完了した HTTR-熱利用試験施設の設計、当初計画を超えて SiC を含有した耐酸化燃料要素を試作してその有効性を確認した燃料要素開発等については A 評価を受けた。これらを勘案し、総じて期待以上の成果が得られたと評価され、総合評価として A 評価を受けた。

また、HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断は、HTTR が再稼働を果たした後、判断材料の一つである HTTR を用いた熱負荷変動試験等を実施した後で、今後 3～4 年後に実施することが妥当であると評価された。

本報告書は、高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会の構成、審議経過、評価項目について記載し、同委員会により提出された「高温ガス炉及び水素製造研究開発 課題評価報告書」を添付したものである。

本報告書は、高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会が「国の研究開発評価に関する大綱的指針」等に基づき実施した外部評価の結果を取りまとめたものである。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

Assessment Report on Research and Development Activities in FY2016
Activity "Research and Development on High Temperature Gas-cooled Reactor and
Related Heat Application Technology"
(Interim Report)

(Eds.) Kenji TATEMATSU and Tetsuo NISHIHARA

HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center
Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 25, 2017)

The President of Japan Atomic Energy Agency consulted with the "Evaluation Committee of Research Activities for High Temperature Gas-cooled Reactor and Related Hydrogen Production Technology" (hereinafter referred to as "Evaluation Committee"), which consists of specialists in the fields of the evaluation subjects of high temperature gas-cooled reactor and related heat application technology, about the relevance of the management and research activities of the HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center during the period from April 2015 to March 2017. The assessment of the Evaluation Committee concluded with a score of B for the confirmation of adjustability to the new regulation standard to restart HTTR and for the development of hydrogen production technology, a score of A for the design of HTTR-GT/H₂ test plant in which all equipment design specification was determined and for the development of oxidation resistant fuel element containing SiC which exceeded the original scope. The Evaluation Committee concluded with a score of A for the overall activity by evaluating that more results than originally required were acquired.

In addition, the Evaluation Committee recommended that the judgement to move to the construction phase of the HTTR-GT/H₂ test plant be made after 3-4 years, after the HTTR will be restarted and the thermal load fluctuation tests using HTTR will be carried out.

This report lists the members of the Evaluation Committee and outlines the assessment item and the review process for procedure of the assessment. The assessment report which was issued by the Evaluation Committee is attached.

Keywords: Hydrogen and Heat Application Research, HTGR, HTTR, IS Process, GT

目 次

1. 概要	1
2. 高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会の構成	2
3. 審議経過	3
4. 評価項目	3
5. 評価結果	3
付録 課題評価委員会配布資料集	51

Contents

1. Outline	1
2. Members of Evaluation Committee of Research Activities for High Temperature Gas-cooled Reactor and Related Hydrogen Production Technology	2
3. Review process of assessment	3
4. Item of assessment	3
5. Result of assessment	3
Appendix Handouts in the Evaluation Committee	51

This is a blank page.

1. 概要

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）理事長は、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成 24 年 12 月 6 日内閣総理大臣決定）の下に整備された「文部科学省における研究及び開発に関する評価指針」（平成 26 年 5 月 19 日文部科学大臣決定）及び原子力機構の「研究開発課題評価実施規程」（平成 17 年 10 月 1 日制定、平成 27 年 7 月 21 日改定）等に基づき、第 3 期中長期計画における「高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発」に関する中間評価を、高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会に諮問した。

これを受けて、高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会は、平成 29 年 1 月 19 日に「高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発」に関する中間評価を実施した。原子力機構、高温ガス炉水素・熱利用研究センターから提出された資料を基に、平成 27～28 年度までの研究実績について審議し、評価シートを用いて委員の意見を集約し、「高温ガス炉及び水素製造研究開発課題評価報告書」（以下「課題評価報告書」という。）を取りまとめた。

本報告書の第 2 章では、高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会の委員構成を示した。第 3 章では、評価委員会の開催日時、主な議題及び配布資料リストについて記載し、諮問から答申までの審議経過を示した。第 4 章では、評価の基本的考え方及び評価項目を示した。第 5 章では、高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会により提出された課題評価報告書を添付した。また、付録として評価委員会で配布した資料を末尾に添付した。

2. 高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会の構成

高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会は、以下の10名により構成される。

高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会委員

氏 名	区 分	所 属・職 位
藤井 康正	委員長	東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授
糸井 達哉	委員（新規）	東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 准教授
小原 徹	委員	東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所 教授
加藤 之貴	委員	東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所 教授
小島 由継	委員	広島大学 先進機能物質研究センター センター長・教授
原 輝夫	委員	三菱重工業株式会社 エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 プラント設計部 次長
福家 賢	委員	株式会社 東芝 原子力技術部 第五担当部長
細野 恭生	委員	千代田化工建設株式会社 プロジェクト開発事業本部・参与/本部長代行
正木 康浩	委員	新日鐵住金株式会社 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼管研究部 上席主幹研究員
三輪 博通	委員	日産自動車株式会社 総合研究所 EV システム研究所

3. 審議経過

(1) 諮問：平成 29 年 1 月 13 日

(2) 高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会

平成 29 年 1 月 19 日 於 富国生命ビル 20 階 東京事務所 第 1 会議室

主な議題：「高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発」の中間評価

配布資料：付録 1. 研究開発課題の中間評価について(諮問)

付録 2. 高温ガス炉及び熱利用技術開発の概要

付録 3. 平成 27 年度研究実績の評価結果と原子力機構の措置

付録 4. 平成 28 年度研究実績の評価と平成 29 年度の研究計画 (案)

付録 5. HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断及び第 3 期中長期計画の中間評価

付録 6. 参考資料

(3) 答申：平成 29 年 3 月 14 日

4. 評価項目

「高温ガス炉とこれによる熱利用技術」の研究開発に関する評価における基本的考え方として、我が国のエネルギー政策を踏まえた「高温ガス炉とこれによる熱利用技術」に関する研究開発の意義及び研究開発を取り巻く動向を整理した上で、高温ガス炉水素・熱利用研究センターにおける研究活動全般について課題評価の対象とし、以下の項目に分けて評価を行った。

(1) 平成 28 年度研究実績の年度評価

(2) 平成 29 年度の研究計画 (案) の確認

(3) HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断

(4) 平成 27～28 年度までの中間評価

5. 評価結果

(1) 研究開発課題の中間評価について(答申)

(2) 高温ガス炉及び水素製造研究開発 課題評価報告書 (中間評価)

This is a blank page.



平成 29 年 3 月 14 日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

理事長 児玉 敏雄 殿

高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会

委員長 藤井 康正



研究開発課題の中間評価について（答申）

平成 29 年 1 月 13 日付け、[28 原機（水）005] により諮問がありました下記の事項について、別紙のとおり中間評価の結果を答申します。

記

〔諮問事項〕

第 3 期中長期計画における「高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発」に関する中間評価

以上

This is a blank page.

高温ガス炉及び水素製造研究開発
課題評価報告書（中間評価）

平成 29 年 3 月

高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会

目次

1. はじめに	9
2. 総合所見	10
3. 評価の方法	12
3. 1 評価委員	12
3. 2 中間評価の対象と観点	12
3. 3 評価基準	13
4. 中間評価結果	14
4. 1 平成 28 年度研究実績の年度評価	14
4. 2 平成 29 年度の研究計画（案）の確認	16
4. 3 HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断	17
4. 4 平成 27～28 年度までの中間評価	17
4. 5 まとめ	19
参考資料 1 平成 28 年度中間評価における評価委員からの意見一覧	23
参考資料 2 平成 27 年度年度評価における評価委員からの意見一覧	41

1. はじめに

高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発では、エネルギー基本計画を受けて、発電、水素製造など多様な産業利用が見込まれ、高い安全性を有する高温ガス炉の実用化に資する研究開発を通じて、原子力利用の更なる多様化・高度化に貢献するため、目標や開発期間を明らかにするとともに、国の方針を踏まえ、高温ガス炉の安全性の確証、固有の技術の確立、並びに熱利用系の接続に関する技術の確立に資する研究開発や国際協力を優先的に実施している。

高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発課題評価は、研究開発を督励するとともに、経営資源を有効に活用して、研究開発成果の最大化及び業務運営の効率化を達成するための効果的な研究開発業務に資することを目的に、評価を行っている。

また、高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会は、高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発の評価を実施するとともに、研究開発に関する事項について討議するため、将来の実用化を目指した研究開発であることを踏まえ、産学界の専門家や有識者でバランスよく構成されている。

高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会は、「高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発」に関する中間評価を行うようにとの理事長からの諮問を受け、平成 29 年 1 月 19 日（木）に開催した研究評価委員会では、7 年間ある第 3 期中長期計画の 2 年が経過した時点での中間評価として、高温ガス炉水素・熱利用研究センターから提出された資料に基づき、HTTR の再稼働や連続水素製造試験装置を用いた水素製造試験の今後の見通しなどを審議のポイントに、平成 28 年度研究実績の年度評価、平成 29 年度研究計画（案）の確認および HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断を含む平成 27～28 年度までの中間評価を実施した。

評価委員会の開催後、10 名の委員から提出された評価シートに記載されたご意見を集約し、本報告書を作成した。エネルギー基本計画の方針（3E+S）を満たす高温ガス炉は、日本の温室効果ガス排出削減に関する長期的目標（2050 年に 2013 年比で 80%削減）に貢献する最適なシステムであり、今回の評価結果を、原子力機構が、高温ガス炉技術及び熱利用技術の研究開発を社会のニーズ・情勢に沿った正しい方向に進めるために、役立てることを期待する。

評価委員会の委員各位には、多忙を極める中で、非常に熱心に評価活動を進めていただいた。そのご尽力に対して、ここに深甚なる謝意を表する。

平成 29 年 3 月 14 日

高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会
委員長 藤井 康正

2. 総合所見

高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発は、原子力エネルギー利用の多様化を図る上で極めて重要である。第3期中長期計画において実施中の HTTR の新規制基準対応、高温ガス炉の安全基準の整備、高燃焼度化・高出力密度化のための燃料要素開発、HTTR-熱利用試験施設のシステム設計と安全評価および連続水素製造試験装置を用いた IS プロセス技術の確証などについて、中間評価の観点ごとに所見を記す。

研究開発の進捗状況の妥当性の観点では、HTTR 再稼働に至っていないが、新規制基準への適合性確認対応が適切に実施され着実に前進している。また、現時点で実施可能な非核加熱（コールド）試験でデータも取得した。安全基準の整備においては、炉心及び燃料の安全設計において評価すべき設計事項を定め、また、IAEA での安全要件の国際標準の検討を主導した。燃料要素開発では、高充填率化燃料の製作性と性能を確認した。さらに当初計画を超え、SiC を含有した耐酸化燃料要素を試作してその有効性を確認した。HTTR-熱利用試験に向けた設計では、全ての機器仕様の設定が完了、異常事態を想定した安全評価により技術的成立性を確認した。さらに、ヘリウムガスタービンの新たな軸封システムの概念を提案した。これは目標を上回る大きな成果である。水素製造技術開発では、ヨウ素ポンプ軸封部の工夫により、ヨウ化水素溶液移送安定化を図り、31 時間の連続水素製造を実現したが、新たに漏えい事象が生じた。以上のように、幅広い高度な開発に取り組んでおり、随所に独自技術を採用するなどの工夫が見受けられ、総じて期待以上の成果が得られたと評価できる。

情勢変化に対応した研究開発の目的・目標、進め方などの見直しの必要性の観点では、HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断について、HTTR の再稼働が不可欠であるため、判断の時期を3～4年後に延期することが妥当であると判断した。

効果・効用（アウトカム）の暫定的確認の観点では、熱利用システムの機器仕様の決定と HTTR 熱利用システムに係る安全評価において、ガスタービンの He 漏えい量は目標値より1桁小さくでき、IHX 寿命は従来の2倍となる等、期待を上回る成果が得られたことが挙げられる。これは高温ガス炉を利用した炭酸ガスの排出がない水素製造、ガスタービン発電技術の将来的な実用化に資する技術である。

研究資金、人材等の研究開発資源の再配分の妥当性の観点では、限られた人的・物質資源を有効活用し世界に類のない先進的な研究を実施していると評価できる。

このような状況の下で、平成27～28年度までの中間評価は、高温ガス炉とこれによる熱利用技術に関して、A評価（顕著な成果の創出や将来的な特別な成果の創出の期待等が認められる。）とした。

平成29～33年度に向けた取り組みに対して、以下のコメントを付す。

- ・ 高温ガス炉開発の最優先課題は HTTR の運転再開である。安全審査、設工認、使用前検査等、規制庁対応に最大限のリソース投入を期待する。
- ・ 今回の漏えい事象を反映した対策、材料の健全性含めた安全設計を考慮し早期に更なる長時間データを取得し、新たな課題抽出及び解決に期待する。
- ・ 高温ガス炉の安全性は高く、日本の数少ない世界レベルの国産技術である。技術レベル維持のために人材の確保と特許権の保護と延命に関わる知財対策にも配慮していただきたい。

また、今回の中間評価における審議事項の一つである HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断に関しては、HTTR-熱利用試験に向けて、熱利用システムの全ての機器仕様の設定が完了、異常事態を想定した安全評価により技術的成立性を確認できたものの、熱利用系の外乱が HTTR に及ぼす影響を評価することが必要であり、そのためには HTTR の再稼働が不可欠である。したがって、HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断は、HTTR が再稼働を果たし、判断材料の熱負荷変動試験等を実施するまでに 3 年程度必要であることから、今後、3～4 年後に実施することが妥当であると判断した。

平成 28 年度研究実績の年度評価に関しては、原子力規制庁による新規制基準への適合性確認において、基準地震動の策定に時間を要しているが、やれる事を計画通り着実に実施し、幾つかの研究開発で優れた成果が認められ、十分な技術蓄積、発信がなされていることから A 評価（顕著な成果の創出や将来的な特別な成果の創出の期待等が認められる。）とした。また、平成 29 年度計画（案）は妥当であると判断した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 高温ガス炉開発の最優先課題は HTTR 再稼働と考える。熱利用システムの実証も高温ガス炉開発継続に重要なテーマなので、着実に推進して頂きたい。
- ・ これまで水素製造試験装置で積み上げたデータを振り返り、打つべき手を打って、これまでよりも長時間の連続運転達成、対外的なアピールを期待する。

最後に、昨年度に実施した平成 27 年度研究実績の年度評価結果については、限られた予算の中で、着実に研究成果がでており、全体を通して計画通りの研究成果が得られたものと判断されることから B 評価（成果等の創出に向けた着実な進展が認められる。）としている。

3. 評価の方法

3. 1 評価委員

表 1 に示す委員で構成される高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会において、第 3 期中長期計画における 1 回目の中間評価として、平成 28 年度研究実績の年度評価、平成 29 年度研究計画（案）の確認および HTTR・熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断を含む平成 27～28 年度までの中間評価を実施した。

表 1 高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会委員

氏 名	所 属 ・ 職 位	専 門
藤井 康正	東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授	エネルギーシステム評 価、原子力システム
糸井 達哉	東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 准教授	安全性
小原 徹	東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所 教授	炉物理
加藤 之貴	東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所 教授	原子力熱利用、 化学工学、製鉄
小島 由継	広島大学 先進機能物質研究センター センター長・教授	水素製造・貯蔵
原 輝夫	三菱重工業株式会社 エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 プラント設計部 次長	原子力プラント、 高温ガス炉
福家 賢	株式会社 東芝 原子力技術部 第五担当部長	原子力プラント、 高速炉
細野 恭生	千代田化工建設株式会社 プロジェクト開発事業本部・参与/本部長代行	化学プラント建設、水 素利用（化学）
正木 康浩	新日鐵住金株式会社 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼管研究部 上席主幹研究員	水素利用（製鉄）
三輪 博通	日産自動車株式会社 総合研究所 EV システム研究所	水素利用（燃料電池自 動車）

3. 2 中間評価の対象と観点

第 3 期中長期計画における 1 回目の中間評価は、原子力機構が実施する「高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発」を対象に、以下に示す領域に分けて、それぞれに示す観点から評価を行った。

具体的な手順は、まず第 1 回中間評価の最終的な審議事項である平成 27～28 年度までの中間評価を実施するための準備として、平成 28 年度研究実績の年度評価を実施し、併せて平成 29 年度計画の策定に向けて平成 29 年度の研究計画（案）に対するコメントを付した。次に HTTR・熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断については、第 3 期中長期計画において、平成 28 年度を目安に研究開発の進捗状況について外部委員会の評価を受け

ると記載があるため、第 1 回中間評価の一環として審議した。以上の審議結果と昨年度に実施した平成 27 年度研究実績の年度評価結果を併せて平成 27～28 年度までの事後評価とし、平成 27～28 年度までの中間評価を実施した。

(1)平成 28 年度研究実績の年度評価

平成 28 年度に実施した研究開発項目に対して、

- ・ 研究開発の進捗等

(2)平成 29 年度の研究計画（案）の確認

平成 29 年度の研究計画に対して、

- ・ 第 3 期中長期計画を達成するための研究開発の進め方の妥当性など

(3)HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断

- ・ 優れた成果を上げている実施項目や内容
- ・ 欠落／不足しており拡充が必要と判断される実施項目や内容
- ・ 建設段階への移行の可否

(4)平成 27～28 年度までの中間評価

平成 27 年度から平成 28 年度に実施した研究開発項目に対して

- ・ 研究開発の進捗状況の妥当性
- ・ 情勢変化に対応した研究開発の目的・目標、進め方などの見直しの必要性
- ・ 効果・効用（アウトカム）の暫定的確認
- ・ 研究資金、人材等の研究開発資源の再配分の妥当性

3. 3 評価基準

評価基準は、表 2 に示すとおり。

表 2 評価点と評価基準

評価点	評価基準
S	特に顕著な成果の創出や将来的な特別な成果の創出の期待等が認められる。
A	顕著な成果の創出や将来的な特別な成果の創出の期待等が認められる。
B (標準)	成果等の創出に向けた着実な進展が認められる。
C	一層の工夫・改善の必要性が認められる。
D	抜本的見直しを含め特段の工夫・改善の必要性が認められる。

4. 中間評価結果

4. 1 平成 28 年度研究実績の年度評価

(1)高温ガス炉技術研究開発

- HTTR の新規規制基準への適合性確認の対応（規制庁による審査）及び HTTR の維持管理のための非核加熱試験を通した高温ガス炉の熱負荷変動に対する固有の安全性の把握

4 名の委員が A、6 名の委員が B と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 既設炉でも規制庁の審査が滞る中、新型原子炉である HTTR の審査が前進したことは十分評価できる。
- ・ 耐震クラスの緩和は、今後の開発促進に向けて成果といえる。

- 炉心及び燃料の安全設計における設計事項の設定

7 名の委員が A、3 名の委員が B と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ IAEA での国際標準の検討を主導したことは評価される。
- ・ 国際協力もしており、高温ガス炉の安全設計・管理能力を十分示せた。
- ・ 設計事項の設定など、計画以上の成果を上げた。

- 燃料要素の性能評価と製作性の確認

2 名の委員が S、7 名の委員が A 並びに 1 名の委員が B と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 高充填率燃料の開発で極めてすぐれた成果が認められる。
- ・ SiC を用いた耐酸化燃料要素の試験もなされている。

- 熱利用システムの機器仕様の決定と HTTR 熱利用システムに係る安全評価

4 名の委員が S、6 名の委員が A と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 建設コストの低減を狙い構造の工夫を取り入れながら、熱利用システムを構成する全ての機器仕様の設定を完了したことを大いに評価する。
- ・ 安全性向上、コスト低減に向けた構造設計課題をクリアしており、特許による技術保護もなされている。

(2)熱利用技術研究開発

- 連続水素製造試験装置を用いた定常かつ安定な水素製造

- プラント運転制御特性データの取得及び長期間安定な運転を可能とするヨウ化水素溶液移送技術の開発

1 名の委員が S、2 名の委員が A、6 名の委員が B 及び 1 名の委員が C と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 連続水素製造が実現されたものの、31 時間に留まったのは残念に思う。
- ・ ヨウ素ポンプ軸封部を工夫してヨウ化水素溶液移送安定化に寄与できている。試験装置の長期連続運転、装置全体の稼働率向上を考えた場合は、各反応間のバッファ、脆弱ラインの 2 系列化も考慮する必要がある。

- ・ 連続水素製造は昨年より約 4 倍長い 31 時間となったものの、目標は 100 時間程度に設定していたものと思慮される。さらなる連続運転を可能とするための最適な試験条件への改善が必要である。

○ セラミックス試験片の製作と強度データの取得

2 名の委員が A、8 名の委員が B と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ セラミック構造体の強度データ取得を目的とした試験装置の整備は完了できている。個体差によるバラツキが大きいと予想されるため、より多くのサンプル数で評価願う。

○ 実用水素製造システムの経済性評価

5 名の委員が A、5 名の委員が B と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ これまでの研究開発成果を反映し、魅力あるコスト試算ができたことは評価できる。この結果が一般性を有することの裏付け（他製造方法の算出・比較等）が必要と考える。
- ・ 水素製造効率がこれまでよりも 10% 高い実用システムを提案した。

○ 翼候補合金と核分裂生成物同位体の拡散特性の検討

8 名の委員が A、2 名の委員が B と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ タービンプレード汚染の解決のための重要な知見を得ている。
- ・ Mo を含む粒内化合物に Ag が選択的に捕獲されることを見出した。
- ・ タービンの翼開発方針が提案できたことは、大きな成果である。

(3) 人材育成

1 名の委員が S、8 名の委員が A、1 名の委員が B と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 若手研究生に対し、HTTR に関する様々なテーマを与えて学ばせ、高温ガス炉を含む原子力技術者のすそ野を広げることに寄与できていることを評価する。

(4) 産業界との連携

3 名の委員が A、7 名の委員が B と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 産学官協議会ははじめ、種々の対外的技術普及活動を進めている。

(5) 総合所見

1 名の委員が S、4 名の委員が A、5 名の委員が B と評した。

- ・ 限られた人的・物質資源を有効活用し世界に類のない先進的な研究を実施している。
- ・ すべての項目で計画通りの進捗もしくはそれ以上の進捗が認められる。特にいくつかの研究開発においてすぐれた成果が認められる。
- ・ 高温ガス炉実用化、熱利用システムの実証に向けて、着実に研究開発を推進できていると評価する。現時点の最優先課題は、HTTR を早期稼働させ、固有の安全性、熱利用システムの有用性を HTTR を用いた試験結果として対外的にアピールするこ

とと考えるため、新規制基準対応、安全審査に最大限のリソースを傾注頂くことを期待する。

- ・ 再稼働が延期される見込みの中、十分な技術蓄積、発信がなされている。

4. 2 平成 29 年度の研究計画（案）の確認

平成 29 年度計画（案）は妥当であると判断する。以下に、開発項目ごとに代表的なコメントを付す。

(1)高温ガス炉技術研究開発

- ・ 高温ガス炉開発の最優先課題は HTTR の運転再開と考える。また、高温ガス炉固有の安全性を活かして、新規制基準対策工事をコストミニマムで実施することが、後にアピールポイントと成り得るのでこの点も考慮頂きたい。他方、熱利用システムの実証も高温ガス炉開発継続に重要なテーマなので、着実に推進して頂きたい。
- ・ 成果評価の説明責任の観点から、目標に対してどの程度達成できたかが分かるような定量的な目標の設定をお願いしたい。
- ・ 原子力機構にしかできない高温ガス炉の安全性を中心とした技術体系を完成させてほしい。

(2)熱利用技術研究開発

- ・ これまで水素製造試験装置で積み上げたデータを振り返り、打つべき手を打って、これまでよりも長時間の連続運転達成、対外的なアピールを期待する。
- ・ 水素製造試験装置運転の耐久性評価とスケールアップを進めてほしい。
- ・ IS プロセス、特に要素技術は他機関より十分に高い技術レベルが維持されている。今後民間の知見も活用するなど、プラント技術としての最適化設計を期待します。ヨウ化水素の漏えい事象については、装置内に類似の箇所や工程がないか十分検討し、水平展開して頂きたい。
- ・ 水素製造以外の高温熱利用用途を検討しても良いかもしれない。

(3)人材育成

- ・ 研究者の高齢化が気になります。積極的に HTTR 技術を発信し、次の世代に理解してもらい、若い研究者やポスドクを積極的に採用し、競争力や持続性のある人員構成になるようにして頂きたい。

(4)産業界との連携

- ・ 社会に高温ガス炉の有用性を認知してもらうためには、産業界をはじめ、国、学識者等、様々な分野の人に高温ガス炉の意義、位置付け、ロードマップ等を議論してもらうことは重要である。引き続き、産官学協議会等でその議論を前向きに進めて頂きたい。
- ・ 炭酸ガス排出抑制は電力会社のみならず運輸、製鉄、化学等の各業界が積極的に取り組んでいる課題であり、これらの産業界との連携にあたって相互の情報共有が重要である。特に経済性評価等は共通の評価尺度で議論することが肝要である。

4. 3 HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断

HTTR-熱利用試験に向けた実施項目（HTTR を用いた試験、熱利用系の接続に関する技術の確立及び IS プロセス技術開発）の進捗状況について、技術的な観点から研究開発の進捗状況を確認し、判断の理由を添えて、建設段階への移行の可否を判断した。

(1)優れた成果を上げている実施項目や内容

- ・ 熱利用システムを構成する機器仕様を固め、技術的成立性を示すことができた。
- ・ IS プロセスによる約 30 時間の連続水素製造も可能になってきた。

(2)欠落／不足しており拡充が必要と判断される実施項目や内容

- ・ 熱利用系が HTTR に及ぼす影響を評価することが必要である。このためには HTTR の運転が不可欠である。
- ・ 熱利用水素製造システムについては、スケールアップ技術の確立と、耐久性評価を行い大量水素製造技術として工業的に利用できるかどうか判断することが重要である。

(3)建設段階への移行の可否と判断理由

2 名の委員が可と評し、8 名の委員が判断の時期を 3 年延期と評した。判定理由として、HTTR が再稼働を果たし、HTTR-熱利用試験施設の建設段階への移行の判断に必要な熱負荷変動試験等を実施するまでに 3 年程度が必要であることが挙げられた。

4. 4 平成 27～28 年度までの中間評価

(1)高温ガス炉技術研究開発

- HTTR の新規制基準への適合性確認の対応及び炉心冷却喪失試験、熱負荷変動試験等の異常時を模擬した試験の実施

2 名の委員が S、1 名の委員が A、7 名の委員が B と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 再稼働に向けて、確実に進捗させて頂きたい。再稼働後については、コールド試験結果を踏まえ、評価の効率化を進めていただきたい。
- ・ 各種努力にも拘らず結果的に再稼働に至っていないことは残念としか言いようがありません。
- ・ 高温ガス炉開発の最優先課題は HTTR の運転再開。安全審査、設工認、使用前検査等、規制庁対応に最大限のリソース投入を期待。

- 実用高温ガス炉システムの安全基準の整備

1 名の委員が S、6 名の委員が A、3 名の委員が B と評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 実用炉建設に合理化に向けて高温ガス炉の固有の安全性を活かした基準整備を推進頂きたい。
- ・ 計画上、通常運転、過渡変化、事故時と年度で区切られているが、実際は 3 つを 3 年で実施する方が合理的と考える。

○ 高燃焼度化・高出力密度化のための燃料要素開発

1名の委員がS、7名の委員がA、2名の委員がBと評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 経済性、安全性向上のために重要
- ・ 高温ガス炉開発上世界的にも優れた重要な成果をあげつつある。計画では H30 年度で終了することになっているが、是非継続して実施すべき。

○ HTTR-熱利用試験施設のシステム設計、安全評価

4名の委員がS、5名の委員がA、1名の委員がBと評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 全ての機器の仕様設計が完了するなど順調に進められている。
- ・ 発電、多目的利用の基礎となり、高温ガス炉の有用性を定量的に示せるため重要。
- ・ システム全体を俯瞰し、施設建設を念頭に置いた優先順位を考慮して開発を遂行頂きたい。

(2)熱利用技術研究開発

○ 連続水素製造試験装置による運転制御技術及び信頼性等の確証

1名の委員がA、9名の委員がBと評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 運転制御技術開発に加え、運転後のライン点検による脆弱部の抽出、対策も連続運転に寄与すると思慮。
- ・ 今回の漏えい事象を反映し、材料の健全性を含めた安全設計を考慮し、早期に更なる長時間データを取得し、新たな課題抽出及び解決に期待する。

○ セラミックス構造体の強度評価法の作成

2名の委員がA、8名の委員がBと評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 個体差によるバラツキが大きく多数のサンプル数を要するため、専門機関への委託がベターと考える。

○ 経済性評価と民間移転に向けた研究課題の整理

1名の委員がS、3名の委員がA、6名の委員がBと評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ システム全体の移転に加え、開発した個別の要素技術の整理も必要
- ・ 水素の製造コストについては、他の水素製造手法と、計算式を統一し、さらに使用した数値の根拠なども明確にした上で、比較できるようにして頂きたい。

○ ガスタービンにおける核分裂生成物の沈着低減技術

1名の委員がS、5名の委員がA、4名の委員がBと評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 安全上重要な技術である。
- ・ 得られた成果をベースにミルメーカーとの協業も有益と判断
- ・ 熱処理、材料改良と共に、沈着抑制可能な表面処理（母材酸化、塗布等）を並行して進めることが必要か。

(3)人材育成

1名の委員がS、5名の委員がA、4名の委員がBと評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 国内、海外の人材育成により、研究者の裾野拡大が努められている。
- ・ 外部への講義実施や研修受け入れは高温ガス炉への理解促進のためだけでなく、書籍の出版、外部との意見交換等によるセンター内の人材育成、など様々な観点で活用することも併せて検討されてもよいかもしれません。

(4)産業界との連携

1名の委員がS、3名の委員がA、6名の委員がBと評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 十分な技術発信及び協力ができており、引き続き継続を希望する。

(5)総合所見

1名の委員がS、5名の委員がA、4名の委員がBと評した。以下に代表的なコメントを付す。

- ・ 限られた人的・物質資源を有効活用し世界に類のない先進的な研究を計画している。高温ガス炉の安全性は高く、日本の数少ない世界レベルの国産技術である。本計画は日本の将来に大きく貢献するものと期待できる。
- ・ 研究開発上重要な成果をあげているものがあり、更に継続して研究開発を実施すべきである。
- ・ 高温ガス炉実用化及び熱利用に力点を置いた開発計画を評価する。ガス炉固有の安全性を活かした合理化検討、経済性評価、多様な核熱利用を社会のニーズと照らし合わせ、軌道修正しながら進めていくことが重要。
- ・ 高温ガス炉のパイオニアとして幅広い高度な開発に取り組んでおり、開発においては随所に独自技術を採用する等、工夫が見受けられる。また、限られた予算のもと、コストを意識しながら開発を行い、公募による開発資金の獲得にも成功した。総じて期待以上の成果が得られたと判断する。
- ・ 中期計画は総合的に妥当と判断。なお技術レベル維持の為に人材の確保と特許権の保護と延命に関わる知財対策にも配慮していただきたい。

4. 5 まとめ

表3に評価結果の一覧と今後の年度展開をまとめた。平成28年度研究実績の年度評価は、1名の委員がS、4名の委員がA、5名の委員がBと評し、総合評価はA評価とした。平成29年度計画（案）は妥当であると判断した。HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断は、HTTRが再稼働を果たし、判断材料の熱負荷変動試験等を実施するまでに3年程度必要であることから、今後、3～4年後に実施することが妥当であると判断した。平成27～28年度までの中間評価は、1名の委員がS、5名の委員がA、4名の委員がBと評し、総合評価はA評価とした。なお、委員からの全ての意見をP23～P50に示す。

表 3 評価結果の一覧と今後の年度展開 (1/4)

第3期中長期計画							
高温工学試験研究炉(HTR)について、安全の確保を最優先とした上で再稼働するまでの間における維持管理費の削減に努め、 新規基準への適合性確認を受けて速やかに再稼働を果たす。 高温ガス炉の安全性の確認及び固有の技術の確立については、 炉心冷却喪失試験、熱負荷変動試験等の異常時を模擬した試験を実施し、高温ガス炉の固有の安全性を検証する。 また、HTRを用いて運転データを取得し、国際協力の下、 実用高温ガス炉システムの安全基準の整備を進めるとともに、将来の実用化に向けた高燃焼度化・高出力密度化のための燃料要素開発を進める。							
H27 (総合評価B)	H28 (総合評価A)	H29	H30	H31	H32	H33	中間 (総合評価A)
《新規基準への適合性確認を受けて速やかに再稼働》 ・適合性確認審査対応 ・起動用中性子源交換を完遂 ・HTRを用いた熱利用系異常模擬試験(コールド試験)を実施 評価:B ・適合性確認審査対応 ・ガス循環機用ガスケット交換を完遂 ・HTRを用いた崩壊熱評価の適用性確認試験(コールド試験)を実施 評価:B			《炉心冷却喪失試験、熱負荷変動試験等の異常時を模擬した試験》 ・炉心冷却喪失試験、熱負荷変動試験等を実施 ・安全性実証試験、熱負荷変動試験等を実施 ・安全性実証試験、熱負荷変動試験等を実施 評価:B				《新規基準対応》 評価:B 基準地震動以外の審査が終了した。HTRを用いたコールド試験を実施し、運転員の技術能力の維持向上を図りつつ、高温ガス炉の熱負荷変動に対する固有の安全性を把握した。
《実用高温ガス炉システムの安全基準の整備》 ・設計基準事象選定の基本的な考え方を提案 ・実用高温ガス炉の設計基準事象選定を完了 評価:B ・安全要件を達成するために炉心及び燃料の安全設計において評価すべき設計事項を設定 評価:A			・IAEA CRPにおいて、安全要件の国際標準案を策定 ・安全要件の適用性評価(通常運転時) ・安全要件の適用性評価(過渡変化時) ・安全要件の適用性評価(事故時)				《安全基準の整備》 評価:A 設計基準事象の選定、炉心及び燃料の安全設計評価事項を設定した。
《高燃焼度化・高出力密度化のための燃料要素開発》 ・高燃焼度SIC-TRISO燃料粒子の設計手法の妥当性を確認 ・オーバーコート法の改良、燃料要素の試作に成功 評価:A ・高燃焼度化・高出力密度化のための充填率を高めた燃料コンパクトを試作し、性能評価を完了 評価:A			・更なる高充填率化による燃料要素の性能向上 ・被覆粒子のFP保持能力に関する解析評価手法開発 ・海外データ等を活用した燃料要素の成立性評価				《燃料要素開発》 評価:A 高燃焼度燃料の設計手法の妥当性を確認し、高充填率燃料コンパクトの性能評価を完了した。

表 3 評価結果の一覧と今後の年度展開 (2/4)

第3期中長期計画							
熱利用系の接続に関する技術の確立については、HTRと熱利用施設を接続して総合性能を検証するための HTR-熱利用試験施設のシステム設計、安全評価等を進める。 なお、当該施設の建設段階に進むに当たり、 平成28年度を目安に、研究開発の進捗状況について、外部委員会の評価を受け、その建設に向けての判断を得る。							
H27 (総合評価B)	H28 (総合評価A)	H29	H30	H31	H32	H33	中間 (総合評価A)
《HTR-熱利用試験施設のシステム設計、安全評価》 ・実用高温ガス炉の運転制御方式確立に必要な試験を実施可能な全体システム構成及び熱物質収支を定めた。 ・実用高温ガス炉において建設コストを20%削減しつつ、HTR熱利用システムの熱供給配管温度低下量を、系統設計要求15°C以下に抑制可能な熱供給配管仕様を決定した。 評価:A ・実用高温ガス炉において目標冷却材漏えい量達成を見通せるヘリウムガスタービン軸封システムの概念を考案するとともにHTR熱利用システム適用時の仕様を定めた。 ・実用高温ガス炉において大型化を実現可能な及び建設コストを25%削減が見通せる水平型中間熱交換器(IHX)の構造概念を提案するとともにHTR熱利用システム適用時の仕様を定めた。 ・安全評価により、実用高温ガス炉と同じ緩和設備や運転方法を適用した場合のHTR熱利用システムの技術的成立性を確認 評価:A 《外部委員会の評価》			《軸封システム設計、試験》 ・基本設計(構造、システム) ・要素試験装置の設計 ・要素試験装置の製作 ・要素試験(性能確認、耐久、軸振動影響確認、タービントリップ模擬等) ・総合評価 注記:破線部分の計画については、予算を獲得できない場合は、H32以降に実施 《HTR-熱利用試験施設の詳細設計》 ・基本設計(構造、制御システム) ・安全設計 ・詳細設計 ・配置設計 《外部委員会の評価》 ・建設段階に進むか技術的な判断を受ける				《HTR-熱利用試験施設のシステム設計、安全評価》 評価:A 《システム設計》 HTRに接続する熱利用システムの全ての機器仕様を設定を完了 《安全評価》 HTR熱利用システムの安全評価を完了した。

表 3 評価結果の一覧と今後の年度展開 (3/4)

第3期中長期計画							
水の熱分解による革新的水素製造技術(熱化学法ISプロセス)については、耐食性を有する工業材料製の連続水素製造試験装置による運転制御技術及び信頼性等を目標期間半ばを目途に確証し、セラミックス製機器の高圧運転に必要なセラミックス構造体の強度評価法を作成することにより、工学的な研究開発を完了する。これに加えて、経済性の観点も踏まえつつ将来の実用化や技術の民間移転等に向けた研究目標を早期に明確化し、これらの成果を取りまとめ、水素社会の実現に貢献する。 また、ガスタービン高効率発電システムにおける核分裂生成物の沈着低減技術等の要素技術開発を完了する。							
H27(総合評価B)	H28(総合評価A)	H29	H30	H31	H32	H33	中間(総合評価A)
《連続水素製造試験装置による運転制御技術及び信頼性等の確証》							
・反応器の処理速度を調整するための物質収支データを取得 ・処理速度調整方法の確証を完了し、工程統合試験へ移行 評価:B	・連続水素製造31h達成(20NL/h) ・HI濃縮器について、電流制御における濃度データ取得、 I_2 析出温度の明確化 ・HI溶液ポンプ用軸封システム開発 評価:B	・プロセス溶液濃度安定化のため循環する水の蒸発量適正化技術の開発 ・HI溶液の漏えい対策 ・連続水素製造試験	・起動停止などプラント運転手順の確立 ・運転安定性確証	・設備の解体・検査 ・腐食、劣化等データ取得			《連続水素製造試験装置による運転制御技術及び信頼性等の確証》 評価:B 連続水素製造31hを達成。ヨウ化水素溶液用ポンプ用軸封システムを開発。
《セラミックス構造体の強度評価法の作成》							
・試験方法を選定し、破壊試験の準備完了 評価:B	・強度データ(破壊応力とワイブル係数)の取得 評価:B	・強度データにおける体積効果データの取得	・セラミック構造体の強度評価法作成				《セラミックス構造体の強度評価法の作成》 評価:B セラミックス構造体の強度データ取得試験装置整備完了。強度データ取得見込み。
《将来の実用化や技術の民間移転等に向けた研究目標の明確化》							
・約10%効率改善した実用システム概念を提案 評価:B	・水素製造コスト25円/Nm ³ に対し、研究目標を明確化 評価:A	・研究目標について民間知見も取り入れ、技術概念検討	・研究目標達成に必要な技術の具体化	・技術開発時期の明確化。実用化・民間移転の道筋取りまとめ			《将来の実用化や技術の民間移転等に向けた研究目標の明確化》 評価:B 競争力のある水素製造を示し、さらにコスト削減につながる研究課題を提示。
《核分裂生成物の沈着低減技術等の要素技術開発》							
・拡散試験を実施(2,000h) ・結晶構造と拡散挙動のデータ取得 評価:B	・拡散試験結果の解析・シミュレーション ・化学組成と拡散挙動データ取得 評価:A	・長期拡散試験の実施及び解析 ・粒界拡散シミュレーション	・長期拡散試験の実施・解析 ・FP沈着低減材料の選定	・選定材料によるガスタービンブレードの設計			《核分裂生成物の沈着低減技術等の要素技術開発》 評価:A FP拡散に寄与する粒内化合物を見出した。

表 3 評価結果の一覧と今後の年度展開 (4/4)

第3期中長期計画							
さらに、HTTRを人材育成の場として活用し、国内外の研究者等に高温ガス炉の安全性に関する知識を習得させ、高温ガス炉に関する優秀な人材を育成し、技術の継承を図る。 実施に当たっては、国の方針等に基づき、産学官と協議して、具体的な実用化像、高温ガス炉及び熱利用技術の将来的な実用化に向けた課題や得られる成果、実用化の可能性、研究開発の方向性、産業界との協力、産業界への技術移転の項目及び時期等を明確にしつつ研究開発や国際協力を進める。							
H27(総合評価B)	H28(総合評価A)	H29	H30	H31	H32	H33	中間(総合評価A)
《HTTRを活用した人材育成》							
・特別研究生1名、夏期実習生4名を受け入れた。 ・海外若手研究者15名、国内学生2名に対して高温ガス炉の基盤技術に関する講義を行った。 評価:B	・学生実習生1名、夏期実習生10名を受け入れた。 評価:A	・学生等を受け入れ、研究開発現場における実習を通じて、高温ガス炉研究者の裾野拡大に努める。	・学生等を受け入れ、研究開発現場における実習を通じて、高温ガス炉研究者の裾野拡大に努める。	・学生等を受け入れ、研究開発現場における実習を通じて、高温ガス炉研究者の裾野拡大に努める。	・学生等を受け入れ、研究開発現場における実習を通じて、高温ガス炉研究者の裾野拡大に努める。	・学生等を受け入れ、研究開発現場における実習を通じて、高温ガス炉研究者の裾野拡大に努める。	《人材育成》 評価:A 多数の学生を受け入れ、計画的に人材育成を実施した。
《産業界との連携及び国際協力》							
・高温ガス炉産学官協議会を設立し、会合を2回実施 評価:B	・高温ガス炉産学官協議会の会合を2回実施 評価:B	・協議会の定期的な開催 ・産業界と連携の継続	・協議会の定期的な開催 ・産業界と連携の継続	・協議会の定期的な開催 ・産業界と連携の継続 ・中間とりまとめ作成	・協議会の定期的な開催 ・産業界と連携の継続	・協議会の定期的な開催 ・産業界と連携の継続	《産業界との連携及び国際協力》 評価:B 《産業界との連携》 産学官協議会を定期的に開催し、産業界との連携を着実に進めた。 《国際協力》 既存の国際協力を着実に進めるとともに、新たな国際協力の開始に向けた調整を的確に進めた。
・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進 評価:B	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進 ・英国等との新たな協力を調整 評価:B	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進	

This is a blank page.

平成 28 年度中間評価における評価委員からの意見一覧

(1) H28 年度実績の年度評価

総合評価； S 判定 1 名、A 判定 4 名、B 判定 5 名		評価
高温ガス炉技術研究開発	HTTR の新規制基準への適合性確認の対応（規制庁による審査）	B
	HTTR の維持管理のための非核加熱試験を通じた高温ガス炉の熱負荷変動に対する固有の安全性の把握	A
	新規制基準への適合性確認の対応が適切にされている。He 循環試験が順調に実施されている。	B
	再稼動はまだまだであるが、コールド試験でのデータを取得した。	A
	最優先課題である HTTR 運転再開に向け、規制庁審査対応を着実に進めることができている。ハードルの高い基準地震動の確定、耐震評価は残すも、現時点実行可能なコールド試験において当初計画以上の成果が達成できたことを評価したい。	B
	既設炉でも規制庁の審査が滞る中、新型原子炉である HTTR の審査が前進したことは十分評価できる。	B
	-	A
	新規制基準対応については十分な議論がなされていると思います。	B
	規制庁への対応を確実に実施して頂きたい。また維持・管理における管理項目等のチェックに漏れ等なきように確実に実施して頂きたい。	
	耐震クラススの緩和は、今後の開発促進に向けて成果といえる。	
炉心及び燃料の安全設計における設計事項の設定	IAEA での国際標準の検討を主導したことは評価される。	A
	-	A
	必要な設計事項が策定されたと認められる。	B
	安全要件を達成するための準備がされている。	A
	国際標準の検討を主導した。	A
	高温ガス炉の優れた安全性を施設合理化に活かすべく、システムの安全基準整備を目的として、炉	B

	心及び燃料の評価すべき設計事項を策定できている。	-	A
		-	B
		国際協力もしており、高温ガス炉の安全設計・管理能力を十分示せた。	A
		設計事項の設定など、計画以上の成果を上げた。	A
	燃料要素の性能評価と製作性の確認	SiCを用いた耐酸化燃料要素の試験もなされている。	A
		-	A
		高充填率燃料の開発で極めてすぐれた成果が認められる。	S
		高出力密度化のための燃料コンパクトが作成、実証研究されている。	S
		耐酸化燃料要素を試作した。	A
		実用高温ガス炉での使用を想定した高充填率化燃料の製作性、性能が確認できている。	A
		HTTR に比べ充填率を 10%向上させたことは、プラント価値の増大に大きく寄与する。	A
		-	B
		想定以上の成果を上げている。	A
燃料高充填率化については、最終的な目標充填率は、33%以上ということによろしいでしょうか？ もし 33%以上の具体的な目標値があるのであれば、その値を明記したうえ、その目標に対する達成率 についても、記載して頂きたい。		A	
熱利用システムの機器仕様の決定と HTTR 熱利用システムに係る安全評価	仕様設定作業が計画以上に進展している。	A	
	-	A	
	熱利用システムの仕様策定・安全評価において顕著な進展が認められる。	A	
	発電に重要なヘリウムガスタービン研究の先進的検討が進められている。	S	
	熱利用システムのすべての機器仕様を定めた。	A	
	建設コストの低減を狙い構造の工夫を取り入れながら、熱利用システムを構成する全ての機器仕様の 設定を完了したことを大いに評価する。システムの早期建設、実証を期待する。	S	
	ガスタービンの He 漏えい量は目標値より 1 桁小さくでき、IHX 寿命は従来の 2 倍となる等、期待を 上回る成果が得られた。	S	

	計画目標を超える安全性が確保できる結果を得た事は評価できます。 安全性向上、コスト低減に向けた構造設計課題をクリアしており、特許による技術保護もなされている。	A
	今後の詳細設計において、見直しが無いことを期待する。	S
	連続水素製造が実現されたものの、31 時間に留まったのは残念に思う。	B
	-	A
	当初計画していた進展が認められる。	B
	31h の水素製造を実現している。実用的なプラント運転データを取得している。	S
	連続運転に成功したものの、漏えいの問題が生じた。	B
	ヨウ素ポンプ軸封部を工夫してヨウ化水素溶液移送安定化に寄与できている。試験装置の長期連続運転、装置全体の稼働率向上を考えた場合は、各反応間のバッファ、脆弱ラインの 2 系列化も考慮する必要がある。	B
	連続水素製造は昨年より約 4 倍長い 31 時間となったものの、目標は 100 時間程度に設定していたものと思量される。さらなる連続運転を可能とするための最適な試験条件への改善が必要である。	C
	沃素析出による長期連続運転への阻害対応は極めて難しくまだ開発途上と言わざるを得ません。今後に期待したい。	B
	長時間運転に代表されるように世界的に見て最も技術が進んでいる。特に今回はヨウ素液の析出制御技術にノウハウの蓄積が見られ、評価できる。	A
	H31 年度以降に産業界への技術移転を図るとすると、それまでに最低でも 5000h の連続運転の実績、ないしは加速試験で、それと同等の結果が必要となると推察されるため、それに対応した計画にして頂きたい。今年度についても、目標運転時間が明記されていない状況で、31h 連続運転で目標達成という自己評価は、甘いといえなくもない。	B
	データを取得の見込み	B
	-	A
	年度末までに計画通りに進捗すると期待される。	B
	強度データが測定されている。	A
熱利用技術研究開発	連続水素製造試験装置を用いた定常かつ安定な水素製造 プラント運転制御特性データの取得 長期間安定な運転を可能とするヨウ化水素溶液移送技術の開発	
	セラミックス試験片の製作と強度データの取得	

	強度データの取得は順調である。	B
	セラミック構造体の強度データ取得を目的とした試験装置の整備は完了できている。個体差によるバラツキが大きいと予想されるため、より多くのサンプル数で評価願う。	B
	-	B
	今期末までに定量的なデータの取得を期待します。	B
	様々環境要因も考慮してほしい。	B
	破壊試験の確実な実施と、解析を期待。	B
	最新の情報に基づき経済評価の更新がなされている。	B
実用水素製造システムの経済性評価	-	A
	より適切な経済性評価により十分な競争力があることを示している。	A
	水素製造コストの評価がなされている。	A
	水素製造効率がこれまでよりも10%高い実用システムを提案した。	A
	これまでの研究開発成果を反映し、魅力あるコスト試算ができたことは評価できる。この結果が一般性を有することの裏付け（他製造方法の算出・比較等）が必要と考える。	A
	経済性評価は、他の製造方法との評価方法と整合しているかの確認が必要。	B
	目標性能ベースの超概略FSの結果と理解します。	B
	-	B
	水素の製造コストについては、他の水素製造手法と、計算式を統一し、さらに使用した数値の根拠なども明確にした上で、比較できるようにして頂きたい。参考：D0Eの水素コスト計算では、税引き後、内部利益率(IRR)10%での値を公表している。	B
	Moの影響を見出しシミュレーションでも検証されている。	A
翼候補合金と核分裂生成物同位体の拡散特性の検討	-	A
	タービンブレード汚染の解決のための重要な知見を得ている。	A
	拡散試験結果の解析・シミュレーションが実施されている。	A
	Moを含む粒内化合物にAgが選択的に捕獲されることを見出した。	A
	作業員の被ばく低減によるメンテ性向上を図る上で、タービン翼へのFP沈着は重要な課題である。	B

人材育成	翼構造材における Ag の拡散挙動を捉え、材料製作の方向性を示せたことを評価する。	
	被曝量は保守補修方法に依存するので、開発目標の設定にあたって留意頂きたい。	A
	原因の究明に基づく具体的対策が示され評価できます。	A
	固溶強化可能な W の Ag の親和力計算、AI の利用、表面処理にも期待。	B
	タービンの翼開発方針が提案できたことは、大きな成果。	A
	積極的な受け入れがなされている。	A
	-	A
	予算的・人力的制約の中多くの若手研究者・学生を受け入れ顕著な成果が認められる。	A
	実習生を受け入れ、重要課題である次世代人材育成に努めている。	S
	海外の研究者を中心に受け入れている。	B
産業界との連携	若手研究生に対し、HTR に関する様々なテーマを与えて学ばせ、高温ガス炉を含む原子力技術者のすそ野を広げることに取り組んでいることを評価する。さらに、原子力の技術力のポトムアップに貢献して頂くことを期待。	A
	引き続き、国内の学生の技術力を涵養し、原子力人材の育成に貢献いただきたい。	A
	-	A
	-	A
	継続的に推進して頂きたい。	A
	計画通りに進められている。	B
	-	A
	産業界との連携構築や国際協力に努めていると認められる。	B
	産学官協議会はじめ、種々の対外的技術普及活動を進めている。	A
	計画通り進捗している。	B
	産学官協議会を中心に、国、産業界とガス炉の意義、位置づけを議論でき、また、国際協力も着実に進めることができている。	B
	-	B
	-	B

総合所見	イニシアティブが取れる様引き続き技術発信に期待 継続的に推進して頂きたい。	A
	HTTRに関しては、再稼働ができない状況で、主に外的要因によって大きな進展はないように思われる。水素製造については、3 1 時間であっても、連続水素製造が実現できたことは成果といえるが課題も残る。	B
	-	A
	すべての項目で計画通りの進捗もしくはそれ以上の進捗が認められる。特にいくつかの研究開発においてすぐれた成果が認められる。	A
	限られた人的・物質資源を有効活用し世界に類のない先進的な研究を実施している。	S
	水素製造の運転時間については計画以上のスピードで進んでいるものの、漏えいの問題が生じている。海外よりも国内の若手研究者を多く受け入れてほしい。燃料要素について、先行研究と今回の試験条件が同一でなく、同じ条件で比較してほしい。	B
	高温ガス炉実用化、熱利用システムの実証に向けて、着実に研究開発を推進できていると評価する。現時点の最優先課題は、HTTR を早期再稼働させ、固有の安全性、熱利用システムの有用性を HTTR を用いた試験結果として対外的にアピールすることと考えるため、新規制基準対応、安全審査に最大限のリソースを傾注頂くことを期待する。	A
	概ね、年度目標を達成したと評価できる。プラントの維持管理に対する規制要求が従前より厳しくなっているため、HTTR の再稼働に向け万全の備えが必要である。	B
	厳しい行政環境下でやれる事を計画通り着実に実施していると評価します。	B
	再稼働が延期される見込みの中、十分な技術蓄積、発信がなされている。	A
	規制庁対応が、全体の進捗遅延の原因となっている。これに対しては、確実な対応をお願いしたい。また、その間の保守・点検についても抜け等が無いように確実に推進して頂きたい。	B
	その他の項目においては、多くの項目で目標以上の成果が出ているが、全体では、規制庁への対応の項目が全体の進捗に影響しているため、総合的には評価点 B とさせて頂いた。	

(2) 平成 29 年度の研究計画に対するコメント

高温ガス炉技術研究開発	- 特になし 第 3 期中長期計画を達成する上で H29 年度計画は妥当であると認められる。 妥当である。 安全性を最優先しての、再稼働に向けての準備が組織的、計画的に進められている。 HTTR は軽水炉に比べ、廃棄物の処分が容易、安全、熱効率大であり、再稼働が期待される。HTTR について、新規制基準への適合性対応が進められ、施工認申請が目指されている。計画は適切である。HTTR の安全基準の整備として、安全設計において評価すべき設計事項が定められている。また、燃料要素の高性能化等の計画は適切である。 現時点、高温ガス炉開発の最優先課題は HTTR の運転再開と考える。安全審査、設工認、使用前検査等、規制片対応に最大限のリソースを投入し、見直された計画通りに業務遂行できるように配慮頂きたい。また、この際、高温ガス炉固有の安全性を活かして、新規制基準対策工事をコストミニマムで実施することが、後にアピールポイントと成り得るのでこの点も考慮頂きたい。他方、熱利用システムの実証も高温ガス炉開発継続に重要なテーマなので、着実に推進頂きたい。 年度計画の策定にあたっては、成果評価の説明責任の観点から、目標に対してどの程度達成できたかが分かるような定量的な目標の設定をお願いしたい。 妥当と判断します。 炉技術開発については再稼働に備え、引き続き万全の安全対応と基準整備、効率化に向けた取り組みを期待。原子力機構にしかできない高温ガス炉の安全性を中心とした技術体系を完成させてほしい。 できるところは、確実に実行していくというスタンスで問題ない。
熱利用技術研究開発	・電極を用いるヨウ化水素溶液移送技術の大容量化に関する課題の検討も必要ないように思われる。 ・水素製造以外の高温熱利用用途を検討しても良いかもしれない。CO₂ の大気直接回収時の炭酸カルシウムの分解も候補かもしれない。この反応はセメント製造やパルプ業でも利用されているので、既存産業への応用もつながり、長期的には水素とあわせて燃料合成も考えられる。 特になし

	第3期中長期計画を達成する上でH29年度計画は妥当であると認められる。 妥当である。 先進的なヘリウムガスタービンへの導入に向けての基本設計が計画されている。 世界最高水準でISプロセスによる水素製造試験が計画されている。引き続き安定的な水素製造実証が期待される。
人材育成	- 特になし 第3期中長期計画を達成する上でH29年度計画は妥当であると認められる。 妥当である。学生等を受入れ、高温ガス炉技術者の育成を計画している。 HTTRを利用した人材育成については、この領域の研究者数を増やし、将来この技術を実用化する上で重要である。

	特に、国内の若手研究者を多く受け入れて、教育してほしい。 HTTR 建設及び高温ガス炉の開発経過を踏まえると、若手への技術伝承は急務であると考える。今後の高温ガス炉開発を担っていく技術者の人材育成を継続頂き、開発、設計、運転、保守等、多様な角度から高温ガス炉を支える人材を長期にわたって確保願う。 高温ガス炉を研究した学生が産官学に数多く巣立つことも、高温ガス炉の実用化に向けた重要な取り組みであるので、積極的な人材育成に取り組むべきである。 HTTRのみならず、是非、熱利用に関する人材育成にも注力願いたい。 研究者の高齢化が気になります。積極的に HTTR 技術を発信し、次の世代に理解してもらい、若い研究者やポスドクを積極的に採用し、競争力や持続性のある人員構成になるようにして頂きたい。 -
産業界との連携	- 特になし 第3期中長期計画を達成する上でH29年度計画は妥当であると認められる。 高温ガス炉産官協議会での全体的な意見交換のみならず、各国、各企業との連携が進むと良い。 水素の用途にはFCV、鉄鉱石の還元があるが、用途によって水素の純度が異なるものと考えられる。IS法で製造した水素の純度評価が必要と考えられる。IS法で製造した水素を昇圧して燃料電池自動車に利用して社会にアピールすることを検討してほしい。 社会に高温ガス炉の有用性を認知してもらうためには、産業界をはじめ、国、学識者等、様々な分野の人に高温ガス炉の意義、位置付け、ロードマップ等の議論してもらうことは重要である。引き続き、産官学協議会等でその議論を前向きに進めて頂きたい。 炭酸ガス排出抑制は電力会社のみならず運輸、製鉄、化学等の各業界が積極的に取り組んでいる課題であり、これらの産業界との連携にあたって相互の情報共有が重要である。特に経済性評価等は共通の評価尺度で議論することが肝要である。 計画案に異論ありません。 様々な取り組みがなされており、産業界への裾野の広がりと、共研や協業からのバックアップが期待される。 -

(3) HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断

優れた成果を上げている実施項目や内容	熱化学反応による水素連続製造を実現している。 - 熱利用システムの機器仕様や安全評価については着実に進捗している。また IS プロセス技術開発についても、ほぼ計画通りの達成もしくは達成見込であると認められる。 ・ 新規制基準への適合性が高く、再稼働に向けて準備が進められている。 ・ 発電に必須なヘリウムガスタービン発電の検討が良く進められている。 ・ 燃料要素のさらなる性能向上が検討されている。 ・ IS プロセスによる水素製造を実証している。 ・ 耐酸化燃料要素の試作については優れていると判断する。 ・ 30 時間の連続水素製造も可能になってきた。 HTTR 再稼働に向けた新規制基準対応及び施設定期検査、施設メンテナンスを適正かつ着実に遂行できている。また、コールド試験実施による運転員技術力維持もできている。さらには、熱利用システムを構成する機器仕様を固め、技術的成立性を示すことができている。 - 熱利用システム (IS を除く) の安全性やシステム設計などをほぼ完成させた点。 熱利用系の接続に関する技術に関して、He ガスタービン軸封システムや熱交換機等の機器仕様の導出、異常事態を想定した技術的成立性も確認できている。IS プロセスの技術強化、プラントの技術蓄積もなされている。 HTTR に接続に関する技術の確立について、高い成果を上げている。
欠落／不足しており拡充が必要と判断される実施項目や内容	- - HTTR の再稼働のための新規性基準対応については原子力機構は十分な対応をしていると認められる。 ・ 高温ガス炉建設計画が不足している。各国との連携を深め、高温ガス炉導入計画の提示。 ・ 高温ガス炉の安全性、社会的な価値の明示。

	・ IS プロセス以外の高温ガス炉の高温熱出力の多目的利用の可能性を示し、ユーザー、市場の拡大。 ・ HTTR の早期運転が必要である。 ・ 熱利用水素製造システムについては、スケールアップ技術の確立と、耐久性評価を行い大量水素製造技術として工業的に利用できるかどうか判断することが重要である。
	HTTR の再稼働及び HTTR の熱負荷変動試験。
	熱利用系が HTTR に及ぼす影響を評価することが必要である。このためには HTTR の運転が不可欠である。
	・ HTTR 再稼働による熱負荷変動試験・実証試験 ・ IS の長期安定運転実証
	-
	IS プロセスについては、H32 以降の産業界への技術移転を想定しているのであれば、受け入れ先候補との技術移転条件（研究計画の具体的な目標設定など）の摺合せなどの時期の早期化などが必要ではないでしょうか？
建設段階への移行の可否	判断の時期を 3 年間延期
	判断の時期を 3 年間延期
	判断の時期を 3 年間延期
	可
	判断の時期を 3 年間延期
	可
	判断の時期を 3 年間延期
	判断の時期を 3 年間延期
	可（ただし判断の時期を 3 年間延期）
	判断の時期を 3 年間延期
判定の理由	行政的な理由により、HTTR の再稼働が遅れており、必要な実試験が完了できていない。再稼働後の試験結果を慎重に評価したのち判断すべきであり、再稼働に進捗予定を考慮すると、3 年程度の延期が望ましいと考えられる。 - HTTR の再稼働が遅延することが確実なため、平成 31 年度に予定されている中間評価の際に進捗状況を確認の

	上判断することが妥当と考えられる。 高温ガス炉の在来炉に比べての安全性は明確である。また、日本の数少ない世界レベルの国産技術である。この技術を生かし、発展させることは日本の将来に貢献するものと期待できる。本計画は高温ガス炉の実現のために必要な作業を網羅的に、計画的に策定されているため。 HTTR がまだ再稼働できない状況で判断は困難である。 判断の時期は、再稼働が予定されている31年度まで延期したほうがいいものと考ええる。 HTTR の熱負荷試験を除き、HTTR-熱利用試験施設の建設準備はほぼ完了しており、建設段階への移行は可と判断する。HTTR に水素製造システムやガスタービンシステム等の核熱利用システムを接続した試験による安全性、経済性の実証は、高温ガス炉の実用化に向けて極めて重要であり、高温ガス炉の開発経過を踏まえると若手への技術伝承は急務である時期にきていると考ええるため、建設段階への早期移行を期待する。 他のプラントの規制審査の状況から考えて、再起動には最短でも2年はかかると思われるので、判断に必要な試験を行い移行判断を行うには、3年程度が必要と考ええる。 前述の「HTTR 再稼働による熱負荷変動試験・実証試験」及び「IS の長期安定運転実証」を確認できるのが3年後と想定されるため HTTR の再稼働が決まった段階で、炉心冷却喪失、熱変動負荷変動試験などの異常模倣試験の計画や一部進捗とともに、接続、熱利用に関わる技術の精度、信頼性、コスト等を中間評価した後、社会情勢も鑑み建設段階へ進む事が妥当。高温ガス炉技術は中国が発電用途ながら実用化を急ピッチで進めている。水素製造という強みを発揮できる日本の高温ガス炉技術であるが、早急な技術実証が望まれる。また技術移転、協力が不可欠な民間企業の技術の整備に関わるリソース投入、投資マインドも考え合わせると、これ以上の遅延は望ましくないとと思われる。 再稼働時期が未定のため
--	---

(4) 第3期中長期計画の中間評価

総合評価；S判定1名、A判定5名、B判定4名		評価
高温ガス炉技術研究開発	HTTRの新規制基準への適合性確認の対応	-
	高温ガス炉に対する安全目標が軽水炉とも整合する形で規定され、Technology neutral な安全規制が実現されていれば、基準地震動等についての議論ももう少しスムーズになっているのではないかと想像される。このような観点で高温ガス炉技術に関する研究開発項目の見直しについても検討することを期待する。	B
	引き続き継続して実施することが望ましく計画は妥当である。	B
	炉心冷却喪失試験が計画されており、高温ガス炉の安全性実証の適切な機会となると期待される。	S
	計画通り実施した。	B
	高温ガス炉開発の最優先課題はHTTRの運転再開。安全審査、設工認、使用前検査等、規制庁対応に最大のリソース投入を期待。	S
	-	B
	各種努力にも拘らず結果的に再稼働に至っていないことは残念とは言いがありません。	B
	適正かつ真摯に取り組まれており、目標/計画も妥当。	A
	再稼働に向けて、確実に進捗させて頂きたい。再稼働後については、コード試験結果を踏まえ、評価の効率化進めていただきたい。	B
実用高温ガス炉システムの安全基準の整備	-	B
	-	A
	成果をあげつつあり継続して実施することが望ましい。	B
	社会導入に向けて重要。	S
	整備した。	B
	実用炉建設に合理化に向けて高温ガス炉の固有の安全性を活かした基準整備を推進頂きたい。	A
	計画以上、通常運転、過渡変化、事故時と年度で区切られているが、実際は3つを3年で実施する方が合理的と考える。	A

高燃焼度化・高出力密度化のための燃料要素開発	自己評価に同意。	A
	適正に取組、目標/計画も妥当。	A
	計画通り進めていただきたい。	A
	試作や性能評価が順調に進められている。	A
	-	A
	高温ガス炉開発上世界的にも優れた重要な成果をあげつつある。計画では H30 年度で終了することになっているが、是非継続して実施すべき。	S
	経済性、安全性向上のために重要。	A
	燃料要素を試作した。使用済み燃料の安全性を確認してほしい。	A
	既存データの活用、解析による検証等、効率的に推進願う。	B
	-	A
HTTR-熱利用試験施設のシステム設計、安全評価	自己評価に同意。	A
	改善耐酸燃料要素のデータ取得・解釈を海外で十分図れるか少し懸念。	B
	計画通り進めていただきたい。	A
	全ての機器の仕様設計が完了するなど順調に進められている。	A
	-	A
	成果をあげつつあり継続して実施することが望ましい。	B
	発電、多目的利用の基礎となり、高温ガス炉の有用性を定量的に示せるため重要。	S
	早期実証が必要である。	A
	システム全体を俯瞰し、施設建設を念頭に置いた優先順位を考慮して開発を遂行頂きたい。	A
	-	S
	自己評価に同意。	A
	要素試験の実施を含んだ計画通りの履行を期待。	S
	大きな成果を上げているため、軸封システム試験の予算を確保し、実施できるようにして頂きたい。	S

熱利用技術研究開発	連続水素製造試験装置による運転制御技術及び信頼性等の確証	-		B
		-		B
		成果をあげつつあり継続して実施することが望ましい。		B
		水素製造実証が重要である。H32 以後の計画を早急に立てる必要がある。		A
		連続水素製造が可能となった。		B
		運転制御技術開発に加え、運転後のライン点検による脆弱部の抽出、対策も連続運転に寄与すると 思慮。		B
		-		B
		31h の実績を更に実用的なところまで伸ばしてほしい。		B
		今回の漏えい事象を反映、材料の健全性を含めた安全設計を考慮し、早期に更なる長時間データを 取得し、新たな課題抽出及び解決に期待。		B
		産業界への技術移転に向けて、連続運転目標時間の明記、移転条件（各要素技術の性能、信頼性目 標）を明確にした上で、計画を推進して頂きたい。		B
	セラミックス構造体の強度評価法の作成	-		B
		-		B
		成果をあげつつあり継続して実施することが望ましい。		B
		炉の安全性向けに重要である。H32 以後の計画を早急に立てる必要がある。		A
		強度データを取得するなど順調に実施されている。		B
		個体差によるバラツキが大きく多数のサンプル数を要するため、専門機関への委託がベターと考える。		B
		-		B
		あと一歩のところまで来ていると期待。		B
		-		B
		計画通り進めていただきたい。		A
	経済性評価と民間移転に向けた研究課題の整理	-		B
		精力的に進められていると考えられるが、将来的に、必要に応じて、地震も含めた外的要因による プロジェクト中断リスク等の分析等にも広げるとより包括的な評価となる。		A

ガスタービンにおける核分裂生成物の 沈着低減技術	成果をあげつつあり継続して実施することが望ましい。	B
	H32 以後の計画を早急に立てる必要がある	S
	電気についても従来技術との経済性の比較を行ってほしい。	A
	システム全体の移転に加え、開発した個別の要素技術の整理も必要。	B
	民間移転に必要な課題がコストだけかは、移転先との協議要。	B
	目標と現状のギャップを今後整理する必要あり。	B
	広く民間の意向/データも反映した、多面的な経済性評価に期待。	A
	水素の製造コストについては、他の水素製造手法と、計算式を統一し、さらに使用した数値の根拠なども明確にした上で、比較できるようにして頂きたい。	B
	産業界への技術移転に向けた目標については、現計画より早めに進捗させることが望ましい（技術移転条件等によっては、確認のための時間等が必要となる可能性があるため）。	
	-	
	-	
	成果をあげつつあり継続して実施することが望ましい。	B
	H32 以後の計画を早急に立てる必要がある。	S
	安全上重要な技術である。	A
	得られた成果をベースにミルメーカとの協業も有益と判断。	B
	-	A
	自己評価に同意	A
	熱処理、材料改良と共に、沈着抑制可能な表面処理（母材酸化、塗布等）を並行して進めることが必要か。	A
	計画通り進めていただきたい。	A
人材育成	-	B
	外部への講義実施や研修受け入れは高温ガス炉への理解促進のためだけでなく、書籍の出版、外部との意見交換等によるセンター内の人材育成、など様々な観点で活用することも併せて検討されてもよいかもしれません。	B

産業界との連携	これまで蓄積した技術の伝承のためにも重要で是非継続すべき。	A
	次世代人材育成が計画されている。	S
	国内、海外の人材育成により、研究者の裾野拡大が努められている。	A
	多様なジャンルの若手研究者、技術者を受け入れ、確実に技術伝承していくことを要望したい。	A
	-	A
	自己評価に同意。	A
	開発が長期にわたるため、研究・技術者のマインド維持、技術が散逸せぬよう技術の整備・伝承に配慮希望。	B
	計画通り進めていただきたい。	B
	-	B
	-	B
	実用化に向けた活動として今後も継続すべき。	B
	市場形成のための戦略がより明確になると良い。	S
	計画通り進捗した。	B
	ガス炉の意義を明確にすべく多様な場を活用頂きたい。	A
	-	B
総合所見	益々推進を期待。	B
	十分技術発信&協力できており、引き続き継続希望。	A
	計画通り進めていただきたい。	A
	HTTRの再稼働ができておらず大きな進展はないように思われるが、必要と考えられる各種要素技術の研究開発やシステム設計は着実に進められていると判断される。	B
	-	A
	研究開発上重要な成果をあげつつあるものがあり、更に継続して研究開発を実施すべきである。	A
	限られた人的・物質資源を有効活用し世界に類のない先進的な研究を計画している。高温ガス炉の安全性は高く、日本の数少ない世界レベルの国産技術である。本計画は日本の将来に大きく貢献するものと期待できる。	S

	人材育成として、海外から博士研究員を受け入れているが、コア技術が流出しないように注意してほしい。 高温ガス炉を利用して発電した電気、製造した水素の経済性が従来の技術を利用したもの 비해経済的になることが必要である。	B
	高温ガス炉実用化及び熱利用に力点を置いた開発計画を評価する。ガス炉固有の安全性を活かした合理化検討、経済性評価、多様な核熱利用を社会のニーズと照らし合わせ、軌道修正しながら進めていくことが重要。	A
	高温ガス炉のパイオニアとして幅広い高度な開発に取り組んでおり、開発においては随所に独自技術を採用する等、工夫が見受けられる。また、限られた予算のもと、コストを意識しながら開発を行い、公募による開発資金の獲得にも成功した。総じて期待以上の成果が得られたと判断する。	A
	HTTRの再稼働が遅れる中、出来る事はすべてやっていると評価します。 ここまで技術を積み重ねてきたので再稼働時の研究はスムーズに展開できるものと考えます。	B
	中期計画は総合的に妥当と判断。なお技術レベル維持の為に人材の確保と特許権の保護と延命に関わる知財対策にも配慮していただきたい。	A
	HTTRの新規制基準への適合性確認・再稼働の道筋に対して、遅延が発生しないように進めていただきたい。再稼働時期が明確になっていないため、Bとさせて頂いた。	B

参考資料 2

平成 27 年度年度評価における評価委員からの意見一覧

(1) H27 年度実績の年度評価

総合評価；S 判定 1 名、A 判定 1 名、B 判定 8 名		評価
高温ガス炉技術研究開発	-	B
	計画した必要な対応がなされ着実に進展していると認められる。	B
	適応性について委員会で積極的に論議を進め、良い成果を示している。	S
	再稼動はまだであるが、計画通り実施されている。	B
	HTTR 運転再開に向け、規制庁審査に的確に対応、着実に推進できている。さらに、実用化を念頭に置き、時間をかけてガス炉固有の安全に係る事項の議論を深めている点を評価したい。合理的な決着を期待する。	A
	新規制基準への適合性確認を規制庁と定期的に実施できている、原子炉起動に不可欠な中性子源の交換を完遂したことを含めて計画通りと判断した。	B
	審査に対応した業務が着実にこなされている。	B
	中性子源の交換も完遂されている。	B
	計画通り、着実な進展を確認した。	B
	HTTR の特徴を時間をかけて説明していく必要性には同感である。	B
安全基準の整備に向けた設計基準事象の選定	軽水炉ベースでなく、高温ガス炉の特徴を考慮した事象の選定が妥当と評価。ソフト、ハード面とも安全性向上、費用削減に向けた取り組みを評価。	B
	将来有望な技術であり、従来の軽水炉との相違を粘り強く説明してきたことは、望まれる対応と認識できる。	B
	-	B
	計画された事項が達成され着実に進展していると認められる。	B
	委員会で積極的に論議を進め、適切な設計基準事象を選定している。	A
	実用高温ガス炉の設計基準事象選定を完了した。	B
	多重事故を伴う事象シーケンスを網羅した上で、安全性を重視し、かつ、合理性も加味して実用高温ガス炉の設計基準事象の設定が完了できている。	B
	高温ガス炉の安全基準整備に向け、多重故障を伴う事象シーケンスを網羅し、設計基準事象を選定できた。日本原子力学会で	B

除熱性能を向上させた燃料要素の概念設計	のレビューも主導した。	
	計画通り設計基準事象の選定がなされている。	B
	計画通り、着実な進展を確認した。	B
	妥当と評価。	B
	原子力関連技術に関連する安全設計基準は、非常に重要であり、最終的な実用炉の設計に資することができるレベルに向けて順調に進捗していると言える。	B
	-	B
	燃料要素開発で極めて優れた成果をあげており顕著な成果の創出があると認められる。	A
	効率的な燃料要素の概念設計がしめされている。	S
	燃料要素の概念設計を行い、試作に成功した。	A
	照射試験データを基に、高燃焼度下で燃料粒子破損確率を低減させる燃料粒子概念設計が構築できている。	B
	燃料メーカーと協力して、高燃焼炉TRISO燃料粒子の設計手法の妥当性を照射試験により確認、将来炉に向けた合理的な燃料要素の試作に成功した。	A
	燃料粒子の設計手法の妥当性の確認がなされ、改良方法による試作にも成功している。	A
	計画の期待値以上の成果を確認した。	A
	高温ガス炉の特長を伸ばす取り組みで評価。材料の安定性だけでなく、使用済後の酸化物の粉砕／除去しやすさについても検討を期待します。	B
	SiC-TRISO 燃料粒子は、HTTR の性能、安全性を担保する上で、重要な技術であり、本技術に関する進捗が見られたことは、大きな成果と言える。	A
	-	B
	当初の計画内容の実施による成果に加えコスト低減が可能な熱供給配管仕様を決定しており顕著な成果の創出があると認められる。	A
HTTR に接続する熱利用システムの設計	ガスタービン接続は具体的に、良く検討されている。IS 水素製造への接続準備が適切に検討されている。	S
	建設コストを 20%削減した熱利用システムを設計した。	A
	製作性も含めたタービン構造の工夫により、実用高温ガス炉システムの運転制御を確認できる系統構成、熱収支を決定でき、さらに、コスト低減、温度低下を満足した配管仕様が決定できたことを評価する。熱利用システム早期実証を期待する。	S
	従来の二重管から内部断熱管に変更することで、物量削減の見通しが得られた。	A

		システムの熱物質収支を定めるとともに、性能を向上させた熱供給配管の仕様を求めた。 計画の期待値以上の成果を確認した。	A
		変更した配管材質の腐食性(耐酸化性)、コスト比較、二重管から一重管にした強度尤度などのデータ開示希望。	B
		プラント設計上、熱収支の成立と熱の有効活用は、重要な課題であり、システム設計の基礎となるデータ等が得られたと言える。	A
		-	B
		計画された内容が達成され着実に進展していると認められる。	B
		IS 水素製造への要素実験準備が順調に進んでいる。	S
		工程別試験は終了し、工程統合試験を年度末までに実施する予定である。	B
		水素製造装置の各反応プロセスにおいて、物質収支データを取得し、反応制御できるレベルに到達している。各反応の統合試験では、装置全体の稼働率を向上させるべく、各反応間のバンプアップも考慮する必要がある。	B
		連続水素製造に向け、各プロセスでの調整が進捗していることは確認できた。連続水素製造が今後実施される予定であり、計画通りと判断した。	B
		不具合に対処しつつ、水素製造の工程統合試験の実施に漕ぎ着けている。	B
		現在もテスト中と理解するが計画通りの進展と判断する。	B
		配布資料記載の予定では工程統合試験となつていますが、本年度は工程別の試験が中心であり 28 年度への影響が気になります。	B
		高温度 I ₂ 系列の I ₂ 析出、固化については、実用設計に向けて、温度管理、配管形状、特に留意すべき項目が抽出できたと認識できる。	B
		-	B
		計画された内容が達成され着実に進展していると認められる。	B
		破壊試験に向けて順調に準備が進んでいる。	S
		セラミックス試験片の破壊試験方法の選定を決定した。	B
		セラミック構造体の材料特性データを取得する試験方法の選定は完了できている。材料個体差による強度のパラメータ評価の妥当性は試験により実証頂きたい。	B
		材料の規格として整備を目指して頂きたい。	B
		試験方法の選定を完了し、破壊試験の準備も完了の見込み。	B
熱利用技術研究開発	連続水素製造試験装置の性能評価	セラミックス試験片の破壊試験の準備	

		準備は計画通りと判断するが結果を急ぎたい。	B
		一般的ながら確実なアプローチに基づいている。セラミックスの体積膨張による強度低下の実環境外乱要因について考慮が必要と思われる。	B
経済性評価に資する実用システムの概念検討		今後の試験結果に期待したい。	B
		-	B
		計画された内容が達成され着実に進展していると認められる。	B
		具体的な経済性向上の検討がなされており、評価できる。	A
		水素製造効率がこれまでよりも10%高い実用システムを提案した。	B
		実用化に向けて重要な視点である経済性に着目し、設備コスト因子を分析、評価できたことは大きな成果である。市場ニーズに応じた設備概念構築に寄与するものと期待する。	A
		実用に向けて、種々のアイデアを創出し、コスト削減に取り組んで頂きたい。	B
		計画通りコスト削減効果の感度解析等や効率改善策の検討が進められている。	B
		手法の整備状況は理解した。水素製造熱効率が期待通り50%達成できれば素晴らしい。	B
		概念設計ながら水素製造効率を高める効果的な方法と評価。特許化と実試験による検証を進めてほしい。	A
ガスタービンへの核分裂生成物の沈着低減技術に係る拡散試験		経済性評価手法の整備は、順調に進捗していると言える。但し、近年、欧米では原子力発電電力の価格は、廃炉費用などの勘案によって高価に見積もられる傾向にあるため、他の水素製造技術との比較も必要	B
		-	B
		計画された内容が達成され着実に進展していると認められる。	B
		実用的な検討がなされている。	A
		2000hの拡散試験を実施した。2月に完了見込みである。	B
		1次系にガスタービンを接続する場合は、その保守要領が懸案事項の一つである。タービン翼候補材へのFP沈着低減に向けた第一歩となる結果が得られたものと評価する。	B
		年度内にデータ取得がなされることを前提に、計画通りと評価する。	B
		拡散試験を実施し、年度内に完了の見込み。	B
		本課題対応の状況は理解した。重要な課題であるので試験結果に期待したい。	B
		被ばく低減に向けた取り組みとして必要とは思いますが、耐熱候補合金で所望の違いがあるのか、或いはプレフィルタでFPを取り除けないのか疑問もある。	C

	予定通りに拡散試験と、データの取得が完了することを期待。	B
	-	B
	人材育成に尽力しており計画が着実に達成されているといえる。	B
	研究者人数が少ない中で、良くコミュニケーションを取り人材育成が進んでいる。	S
	特別研究生、実習生を受け入れた。また、海外の若手研究者や国内の学生に講義を行った。	B
人材育成	研究生、学生を中心に、HTTRを活用した人材育成が実施されている。今後とも高温ガス炉を含む原子力技術者のすそ野を広げ、技術力のボトムアップに貢献して頂くことを期待している。	B
	具体的な研究課題の設定にあたり、高温ガス炉をベースにしつつ種々の工夫がなされたと評価できる。	B
	若手研究者の育成に資する活動が実施されている。	B
	計画通り、着実な進展を確認した。	B
	技術習得/継承、教育として十分な取り組みと評価。	B
	原子力関係の技術者が減少する中、確実に進められている。	B
	-	B
	産業界との協議会の実施等により計画が着実に達成されているといえる。	B
	企業の意見聴取を積極的に進め、技術の公知、普及に努めている。	S
	産業界、大学等が参加する高温ガス炉産学官協議会を設立した。	B
産業界との連携	産学官協議会、連携センター等の枠組みで、ガス炉の潜在顧客メーカー、製造メーカー等、幅広く産業界と連携が図られている。	A
	原子力開発には社会的コンセンサスが重要であり、原子力メーカーだけでなく、全日本体制の協議会を主導した意義は大きい。	B
	協議会を通じた議論がなされている。	B
	産業界との協議が開始され、今後の具体的実用化に道を開いた事は評価できる。	B
	広く意見を聞き、技術協力受ける体制が整っている。	A
	確実に実績を上げている。	B
	全体の研究開発ロードマップを公表し、その達成度をチェックする仕組みのようなものを検討すると良いかもしれません。	B
総合所見	すべての項目で計画が達成され着実に進展しており、また一部の研究開発では計画以上の成果をあげ顕著な成果の創出があると認められる。	B
	限られた人材、資金でHTGRの将来に資する大変良い成果を上げている。	S

	一部計画以上の成果を達成しているが、全体的には計画通り進んでいる。HTTRについては協議会を設立し、連携が進んでいる。	B
	高温ガス炉の実用化に向けて、着実かつ適正に研究開発がなされ、成果も出ているものと評価する。今後のHTTR早期再稼働、熱利用システム建設・実証を期待する。なお、今年度は特許登録がなされていない為、日本の技術的優位性を維持するために知的所有権にも配慮頂きたい。	A
	限られた予算の中で、着実に研究成果がでており、全体を通して計画通りの研究成果が得られたものと判断される。	B
	連続水素製造試験装置の不具合の解消の可否が気になるが、計画通りか一部は計画以上の成果を達成している。	B
	準備途上の項目が多いがその計画、準備状況は大凡妥当であり、来期以降の実用化に向かって一定の進捗が期待できる。	B
	全体的な進捗、リソース再配分とも妥当。特許の記述が少なかったが、世界市場をリードし、将来産業移転された際、企業が安心して技術が使える様、小さな改良等でも特許による技術保護を希望します。	B
	新規制基準への適合に係わる議論等が、全体進捗のボトルネックとなっているが、そのような環境下で順調に成果が上がっていると言える。	B

(2) 平成 28 年度の研究計画に対するコメント

高温ガス炉技術研究開発	研究開発ロードマップを策定し、公表する事が望まれます。 いずれの項目も着実に推進していただければと思います。とくに燃料開発は、今後の高温ガス炉開発、さらには日本の原子力利用のあり方、左右する重要な項目と考えています。私の理解では、原子力機構での高温ガス炉燃料開発は新しいアイデアに基づき極めて有用な成果をあげているといえると思います。これまで同様意欲的に研究を推進していただき、優れた成果をあげ、高温ガス炉の新しい未来を切り開いていただければと思います。 1. 安全性の高さ、社会実装性の高さを公正な基準でアピールすることに期待する。軽水炉以外の選択があることを明示できると良い。 2. 再稼働に向けて計画通りの進捗が期待される。 3. 時期 HTGR 建設に向けての着実な準備が期待される。 HTTR は軽水炉に比べ、廃棄物の処分が容易、安全、熱効率大であり、再稼働が期待される。 HTTR について、新規制基準への適合性対応が進められ、計画は適切である。将来的には HTTR 独自の安全基準が必要と考えられる。 燃料要素の成形成最適化等の計画は適切である。 高温ガス炉研究開発において、現時点、最優先課題は HTTR の再稼働と考える。安全第一を念頭に、合理性も考慮しながら H28 年度計画に挙げられている「再稼働」を慎重、かつ、スピーディーに進めて頂きたい。また、今後、実用性高温ガス炉概念を固めるには、ガス炉固有の安全性を踏まえた合理的な安全設計指針を構築することも重要事項であり、この点にも注力頂きたい。一方、熱利用システムの実証は、市場の潜在顧客へのアピールの点で欠かせない事項である。市場への受容性を高めるためにも前進させて頂きたい。 できるだけ具体的に明瞭な達成目標の設定をお願いしたい。但し「運転再開」は規制側の意向もあるので、運転再開に向けた適切な目標となるよう工夫願いたい。 平成 28 年度の計画に対するコメントではないが、高温ガス炉の実用化にあたっては、高温ガス炉の運転実績を蓄積することで、策定した保守計画の妥当性を実証し、保守費用を対外的に示せるようにすることも重要である。安全重要度分類、予防保全・事後保全の分類による保守の合理化等、プラント保全という観点からも技術開発課題があると考えられる。 再稼働がなされない状況が続いており、運転員等の技術能力の維持を図ることは特に重要と思われる。 速やかな再稼働を目指して重点課題点を確実に遂行してほしい。 特に信頼性の高い熱利用システムの全体系統構成を具体化してほしい。
-------------	---

	特に異論はありません。個人的にも、軽水炉ベースの内的事故事象を考慮すべきとの議論は事象の選定も含め軽水炉と構造が異なり、固有の安全性を有する HTTR に対しては不適であるという原子力機構殿の考えが妥当と考えています。 HTTR と従来軽水炉との差異を明確に主張して頂き、過剰な基準とならないように粘り強く交渉を進めて頂きたい。この間、安全設計基準に係わる設計事項の整備を進めて頂きたい。
熱利用技術研究開発	大容量化を目指したスケールアップへの取り組みを進める事が重要に思われます。 いずれの項目も重要な項目であり着実な成果があがることを期待したいと思います。 1. ヘリウムガスタービン技術のさらなる向上が期待される。 2. IS プロセス水素製造実証に向けて、要素試験の順調な進展が期待される。 3. HTGR からの高温熱による多目的熱利用の価値を広報し、種々の産業会に認知、可能性の理解を得る努力が必要である。 4. IS 以外の水素製造の検討、再生可能エネルギーとの連携システムの検討が望まれる。 連続水素製造試験装置の運転を確実に実施してほしい。 プロセスの機器検討、産業界への移行、拡散シミュレーション等の計画は適切である。 今年度成果である各反応プロセスの制御特性を活用し、各プロセスを組み合わせた水素製造システム全体系において、工学的規模での連続運転の実証を果たして頂きたい。実証試験で得られたデータ、不具合事象は、水素製造効率向上、機器合理化設計、装置稼働率向上等、次ステップ検討の貴重な材料となる為、確実に残すようにご配慮頂きたい。 連続して水素製造をどの程度継続できるか、すなわち水素プラントの稼働率が水素製造コストに影響するので、経済性評価に資するデータを取得して頂きたい。これを基に、水素製造コストを提示して頂けると、他の手法との競争力が明らかになり、今後の研究の方向性を議論しやすいと考えられる。 経済性評価には、各要素機器の耐久時間も重要なパラメータとなるが、化学的に反応性が高い物質を大量に使用するため、長寿命化の難易度は高いと思われるが是非克服してほしい。 準備した IS 水素製造装置でとにかく長時間水素を所定量発生出来る事を実証させて頂きたい。また、経済性検討をより精度を高めて実施してほしい。この結果、熱効率期待値の 50% を多少下回っても構わないと考ええる。 IS プロセスは高温ガス炉だけでなく低温作動化が可能になれば太陽熱、高速炉、地熱等にも適用される可能性もあり、水素社会を見据えた時、魅力的なプロセスと考えます。連続運転に向けたプロセスデータの構築だけでなく、体系化につながる触媒、化学工学、(装置) 耐食材料等に関わる基盤的研究の発信にも期待します。 連続水素製造試験装置の性能評価については、今年度の不具合結果から、温度管理、配管形状、熱設計上、特に留意すべき項目が

	抽出できているため、この結果を生かして実用化に資するデータ評価を進めて頂きたい。 水素製造の経済性評価に係わる研究開発目標の明確化については、他の水素製造方法による製造コストも考慮した上で、策定して頂きたい。
人材育成	- 国内外の学生・若手研究者の受入を今後も進め計画を進めていただければと思います。一般には原子力利用イコール軽水炉利用と考えられています。軽水炉にない優れた特徴を有する原子炉が日本国内で開発されていることを特に若い世代に知っていただき、原子力利用についての認識をすこしでも変えていただくためにも、例えば広く大学や高専学生を対象にした短期のセミナー等の開催の可能性も検討もしていただくとよいかもしれません。 1. 世界最高の HTGR 技術を有している研究集団として、世界最高人材育成を目指して欲しい。 2. 魅力あるテーマ設定を行う、研究者が自信を持ち、積極的に研究できる環境を整備することが望まれる。 HTTR を利用した人材育成については、この領域の研究者数を増やし、将来この技術を実用化する上で重要で有る。 今後の高温ガス炉の開発を担っていく技術者のすそ野を広げるためにも門戸を広げ、積極的に人材育成を進めていくことは重要である。特定のガス炉技術に偏ることなく、開発、運転、保守等多様な技術者を育成して頂くことを期待する。 原子力を志す学生のレベルアップは産官学が連携して取り組み課題であり、大学や民間と連携して学生や若手技術者の育成を推進して頂きたい。 専門性の高い博士課程の学生などに対象を絞ることも考えられる。 継続した人材育成を期待する。 もう少しポストドクなど幅広く人材を受け入れ、活性化につなげて頂けたらと思います。高温ガス炉の普及としてオープンスクールなどもご考慮頂けたらと思います。 今年度同様に、技術の継承、高度化に向けた取り組みを期待する。
産業界との連携	- 産業界との連携を一層図りつつ着実に計画を進めていただければと思います。 1. 低炭素産業プロセスに貢献できる安全な原子炉として広報を続ける。 2. HTGR の多目的利用性を示し、理解者を増やす。 3. 共同開発プロジェクトを企画、実施により、HTGR の実質的な理解を進められると良い。 4. HTGR 開発が国際競争事項であることを理解頂き、日本の産業競争力の維持に HTGR が貢献しえることの主張が必要。

	HTTRについて、産業界との連携は実用化する上で重要である。 水素製造についても産業界との連携が今後必要と考えられる。 また、産業界との連携に向けて特許を積極的に出願してほしい。 高温ガス炉の位置付け、出口戦略、ロードマップ等の議論を進めていく上で、産業界をはじめ、国、学者等、専門家のみならず様々な分野の人が入るのは非常に有意義であると考ええる。その議論を前向きに進めて頂き、熱利用システムの建設、実証の必要性の認識が共有化されることを望む。 高温ガス炉の開発は、各国とも国のプロジェクトとして行われており、本格的に国税を投じて開発を行うためには社会的なコンセンサスが不可欠である。原子力業界だけでなく幅広い産業界の理解を得ることがその第一歩であるため、産官学協議会を継続し、シンポジウム等を開催し、高温ガス炉の理解促進を進めることが重要と考ええる。 米国では、自由化された電力市場でも導入可能な、初期投資が少なくリードタイムも短い原子炉として認識され、関心も高まっている。国際情勢の動向にも注意が必要ないように思われる。 具体的適用を目指した協議会運営を期待する。 特に異論なし。 ただ恐縮ながら、熱利用プロセス（ISプロセス）は化学（プラント）メーカーや装置材料メーカーとの技術連携をさらに密に進めることが、確実性も増しますし、将来的に民間に技術移転する際もスムーズと思われれます。 HTTRの実用化に向けた連協、協議を、確実に継続し、発展させて頂きたい。
--	---

付録 課題評価委員会配布資料集

This is a blank page.



付録1

28 原機（水）005
平成29年1月13日

高温ガス炉及び水素製造研究開発・評価委員会委員長
藤井 康正 殿

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
理事長 児玉 敏雄



研究開発課題の中間評価について（諮問）

研究開発・評価委員会の設置について（17（達）第42号）第3条第1項に基づき、
次の事項について諮問します。

記

〔諮問事項〕

・第3期中長期計画における「高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発」
に関する中間評価

以 上

This is a blank page.

高温ガス炉及び熱利用技術開発の概要

平成29年1月19日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門
高温ガス炉水素・熱利用研究センター
高温工学試験研究炉部



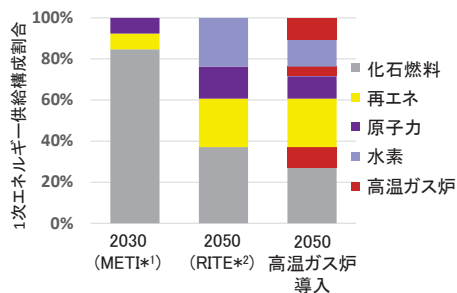
開発の意義

1

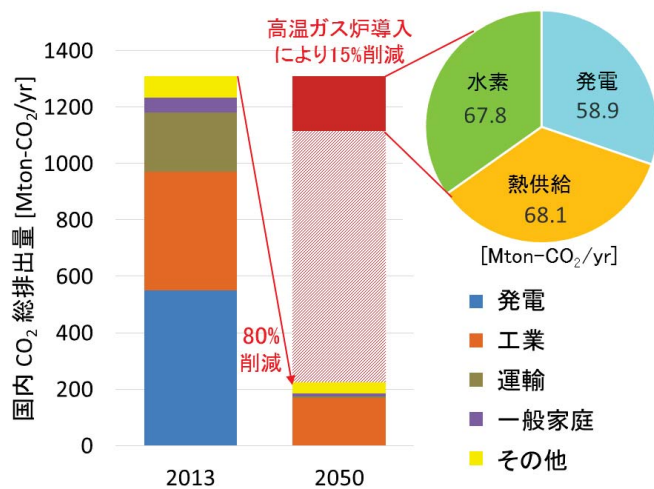
- エネルギー基本計画(3E+S)を満たす高温ガス炉は、日本の温室効果ガス排出削減に関する長期的目標(2050年に2013年比で80%削減)に貢献する最適なシステム

高温ガス炉の各需要への導入を仮定

1次エネルギー需要	高温ガス炉導入割合
水素	40%
原子力発電	30%
工業プロセス熱供給	20%



CO₂排出削減への高温ガス炉の貢献予測



*1) 資源エネルギー庁, 長期エネルギー需給見通し, 2015年7月16日

*2) (公財)地球環境産業技術研究機構(RITE), 2°C目標と我が国の2050年排出削減目標との関係, 2016年3月2日より抜粋

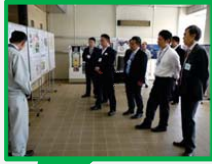


最近の動向

2

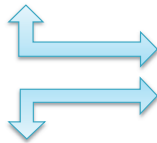
国会議員等のHTTR視察

- 下村文科大臣 (H26.7.7)
- 富岡文科政務官 (H26.8.6)
- 石原環境大臣他6名 (H26.4.7)
- 山本拓衆議院議員 (H26.4.25)
- 民主党吉田泉衆議院議員 (H26.8.1)
- 結いの党柿沢未途衆議院議員、他 (H26.9.25)
- 自民党高温ガス炉推進議員連盟 (H27.10.13)



マスメディアによる報道

- 日本経済新聞 (H26.12.13、H26.1.7、H27.6.29(電子版)、H28.3.24)
- 読売新聞1面 (H26.4.3、H26.9.17、H27.1.16)
- 産経新聞 (H26.8.25、H27.1.7)
- 毎日新聞 (H26.11.20)
- 電気新聞 (H27.10.26)
- その他、日刊工業新聞、茨城新聞など多数
- NHKニュース、下村文科大臣のHTTRの施設訪問など (H26.7.7)



エネルギー基本計画
日本再興戦略改訂2016



自民党高温ガス炉推進議員連盟(野田毅会長)

(H26.6.19第1回総会、H27.3.10第2回総会)

- 自民党議員40名以上が参加
- 第2回総会で以下を決議
 - HTTRの早期運転再開と高温ガス炉技術の研究開発の強化
 - 高温ガス炉に関する基本施策を検討する体制強化
 - 国際協力・人材育成の強化

文科省の取り組み

- 原子力科学技術委員会に高温ガス炉技術研究開発作業部会が設置され、作業部会の中間報告書として、「高温ガス炉技術開発に係る今後の研究開発の進め方について」をとりまとめる (H26.10.1)
 - HTTR-GT/H₂試験、高性能燃料要素開発、ISプロセス開発、安全基準の策定等を今後10年間の研究開発項目に選定
- 文科省、経産省、原子力メーカー、ユーザー、大学、原子力機構等で構成される協議会を設立し、高温ガス炉の開発についての検討を開始
 - 第1回 (H27.4.28)、第2回 (H27.9.29)、第3回 (H28.4.26)、第4回 (H28.6.23)
 - 高温ガス炉の位置付け、意義
 - 将来の実用化像、課題整理
 - 導入シナリオ(国内・国外、ロードマップ)



高温ガス炉及び水素製造技術開発の概要

3

(1) 高温ガス炉技術

HTTR



- 定格出力30MW、原子炉出口温度950℃達成 (2004年4月)
- 950℃、50日間高温連続運転 (2010年3月)

- 高性能燃料要素開発
- 高温ガス炉安全性向上のためのHTTR試験

(2) 熱利用技術(発電、水素製造)



連続水素製造試験装置

- 水素製造設備、ガスタービン発電に関する基盤技術を完成
- ISプロセスの運転制御技術及び機器信頼性の確証
- ガスタービン翼材の開発

(3) 実用高温ガス炉設計



- 実用高温ガス炉システムの設計研究
- プルトニウム燃焼高温ガス炉の炉心設計
- 実用高温ガス炉の安全基準の策定と国際標準化

(4) HTTR-GT/H₂ 試験



- 高温ガス炉熱利用技術の総合実証



懸案事項

4

1. HTTR再稼働

- 中長期計画の開始時には、原子力規制庁による新規制基準への適合性確認を速やかに受けて、平成27年度中の再稼働を目指していた。
- 平成26年11月26日に原子炉設置変更許可申請を提出し、大凡8か月程度の審査期間を想定していた。
- 研究炉のGraded Approachの整理、特に、安全評価(BDBA)や外部事象の防護の考え方についての議論に時間を要したが、現状は議論が収束し、審査がほぼ終了している。
- 東日本の発電炉と同様に、基準地震動の策定に時間を要している。特に、大洗研究開発センターについては海側の断層の審査が継続中であり、再稼働時期に影響している。
- 上記の理由により、再稼働は平成30年度中に遅延する見通しとなった。

2. 連続水素製造試験

- 試験装置は平成26年3月に完成し、平成26年度中に機器動作確認、機密機能及びガス流通機能確認、液流動及び加熱冷却機能確認を順次実施した。
- 平成27年度は、工程別試験を実施し、各反応工程の熱物質収支データを取得して、工程統合試験を実施し、8時間の水素製造に成功した。
- 平成28年度は、27年度に得られた課題を解決し、31時間の水素製造試験に成功した。
- 更なる運転方法の改善を目指して、ブンゼン反応工程の試験を実施中に配管フランジ部からのヨウ化水素の漏えい事象が発生。そのため、漏えい防止対策の検討及び試験装置の復旧を行う必要が生じた。



国際協力

5

● 現在行われている国際協力

■ 二国間協力

米国: エネルギー省 (DOE)

□ 次世代原子力プラント (NGNP) 計画への協力

インドネシア: 原子力庁 (BATAN)

□ インドネシア政府の高温ガス炉建設に向けた協力

カザフスタン: 国立原子力センター (NNC) 等

□ カザフスタン高温ガス炉開発への協力

中国: 清華大学核能及新能源技術研究院 (INET)

□ 研究成果に関する情報交換

韓国: 韓国原子力研究所 (KAERI)

□ 研究成果に関する情報交換

■ 多国間協力

経済協力開発機構原子力機関 (OECD/NEA)

□ HTTR共同試験の実施

国際原子力機関 (IAEA)

□ ガス冷却炉技術ワーキンググループへの参加

第4世代原子力システム国際フォーラム (GIF)

□ 超高温ガス炉の水素製造、燃料・燃料サイクル及び材料の各プロジェクトに参加

● 国際協力の目的

- 日本の高温ガス炉技術の海外プロジェクトへの採用
- 国内メーカーの建設受注
- 黒鉛等の日本製品の売り込み
- 日本の高温ガス炉技術を海外で実証
- 日本の高温ガス炉技術の国際標準化

● 上記目的のため、下記の国々・機関との協力を重視

- 米国
HTTR-GT試験を見据え、接続技術、ガスタービン等の研究協力を注力する。国際的な実証炉計画に関する協力を検討中。
- OECD/NEA
HTTR共同試験の実施
- IAEA
IAEAのCRP(研究計画)を通して、HTTRの試験データに基づく安全基準を、日本がイニシアチブを持って作成する。
- 英国、ポーランド
高温ガス炉開発に関する新たな協力を検討

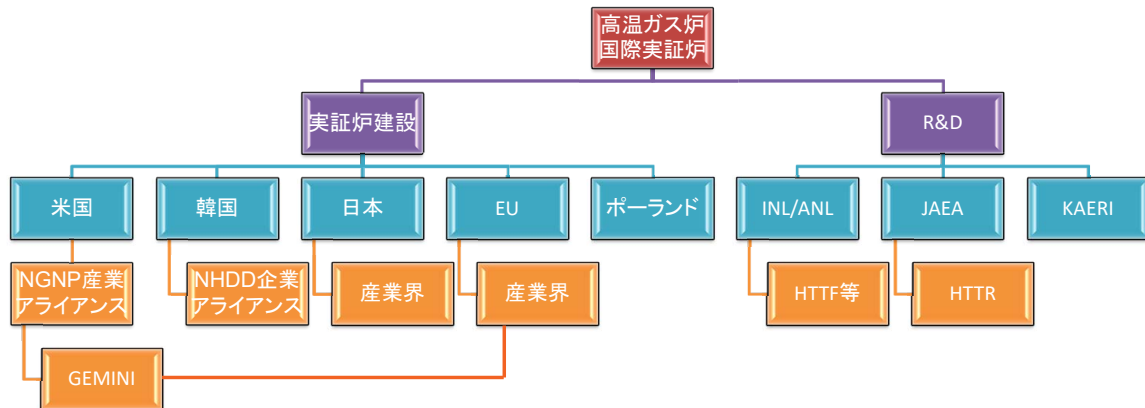


高温ガス炉国際実証炉計画

6

概要

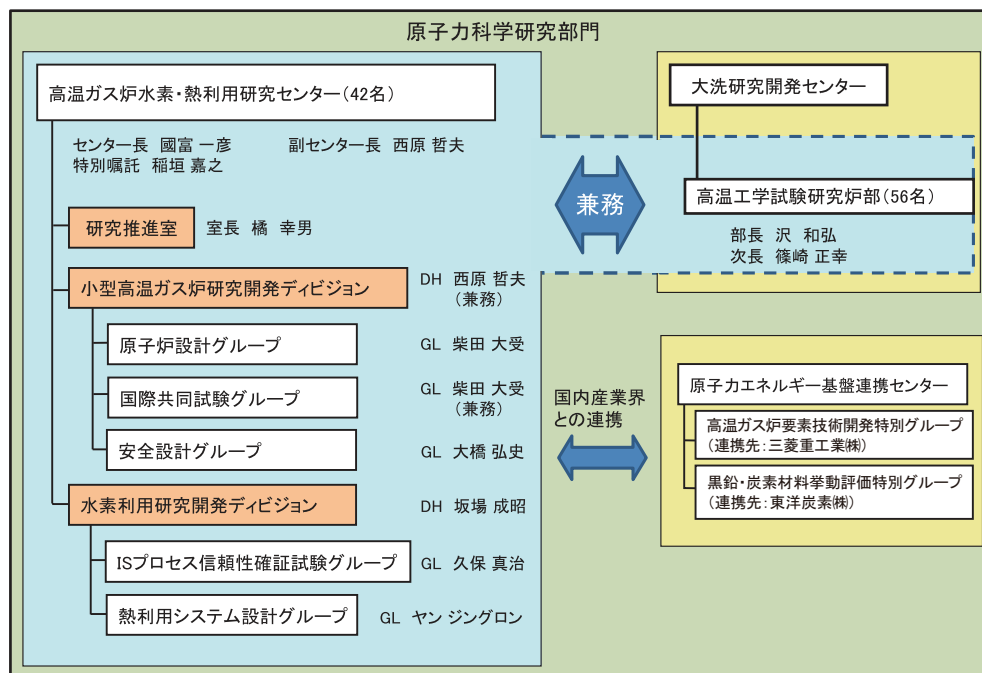
- 中国のペブルベッド型高温ガス炉に対して、ブロック型高温ガス炉の国際実証炉を米国が提案。
- 我が国は、HTTRの許認可、建設、運転等の経験をもとに、実証炉建設（産業界）、R&D（JAEA）の協力が可能か今後検討を進める。



組織・人員・予算

7

○高温ガス炉研究開発の体制





予算と人員の推移

8

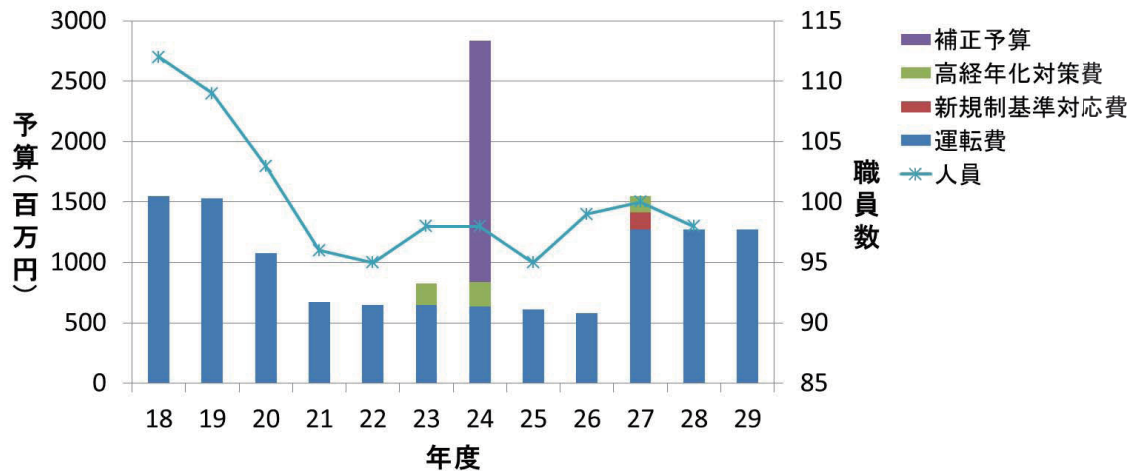
平成29年度予算案

◆原子力の基礎基盤研究とそれを支える人材育成

固有の安全性を有し、水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれる高温ガス炉に係る研究開発を推進するとともに、新たな原子力利用技術の創出に貢献する基礎基盤研究を着実に実施する。また、大学や産業界との連携を通じた次代の原子力を担う人材の育成を着実に推進する。

・高温ガス炉に係る研究開発

1,273百万円(1,273百万円)



論文数

9

		高温ガス炉水素・熱利用研究センター	高温工学試験研究炉部	合計
第2期中期計画期間の平均	査読付き論文	25	5	30
	査読無し論文	7	2	9
	報告書	6	5	11
平成27年度	査読付き論文	12	9	21
	査読無し論文	3	0	8
	報告書	7	1	8
平成28年度*	査読付き論文	17	8	25
	査読無し論文	1	2	3
	報告書	5	1	6

* 12月末時点の集計値

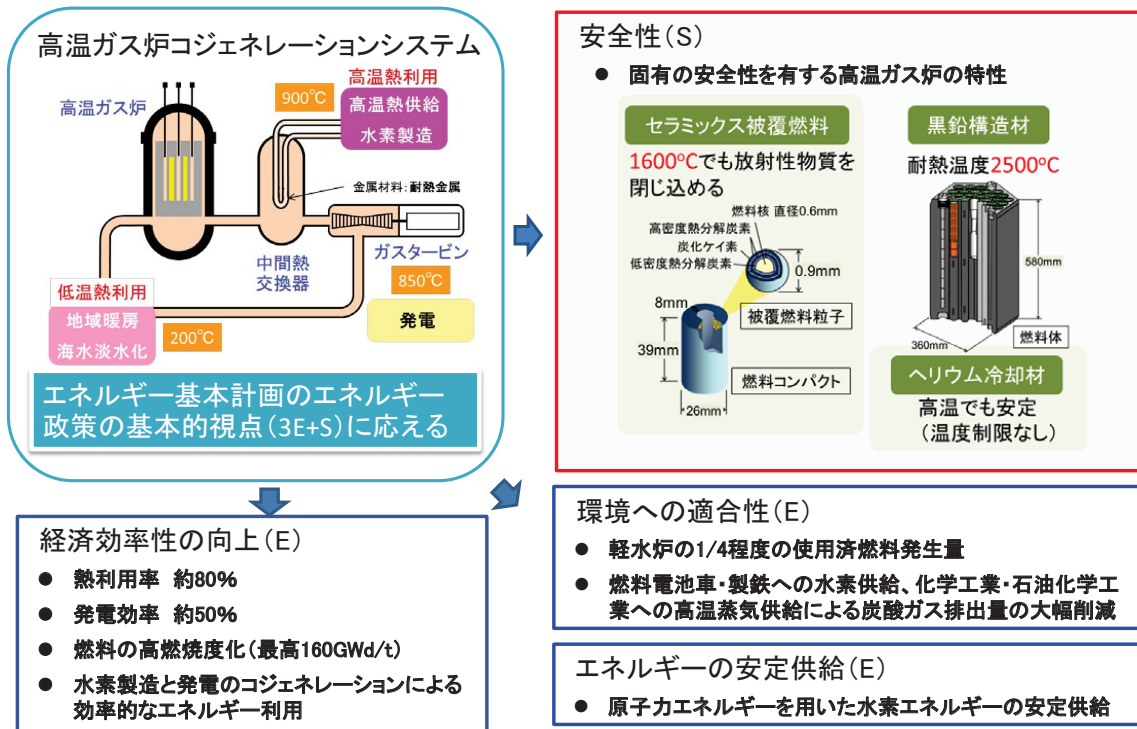
参考資料

10



高温ガス炉システムの研究開発の意義

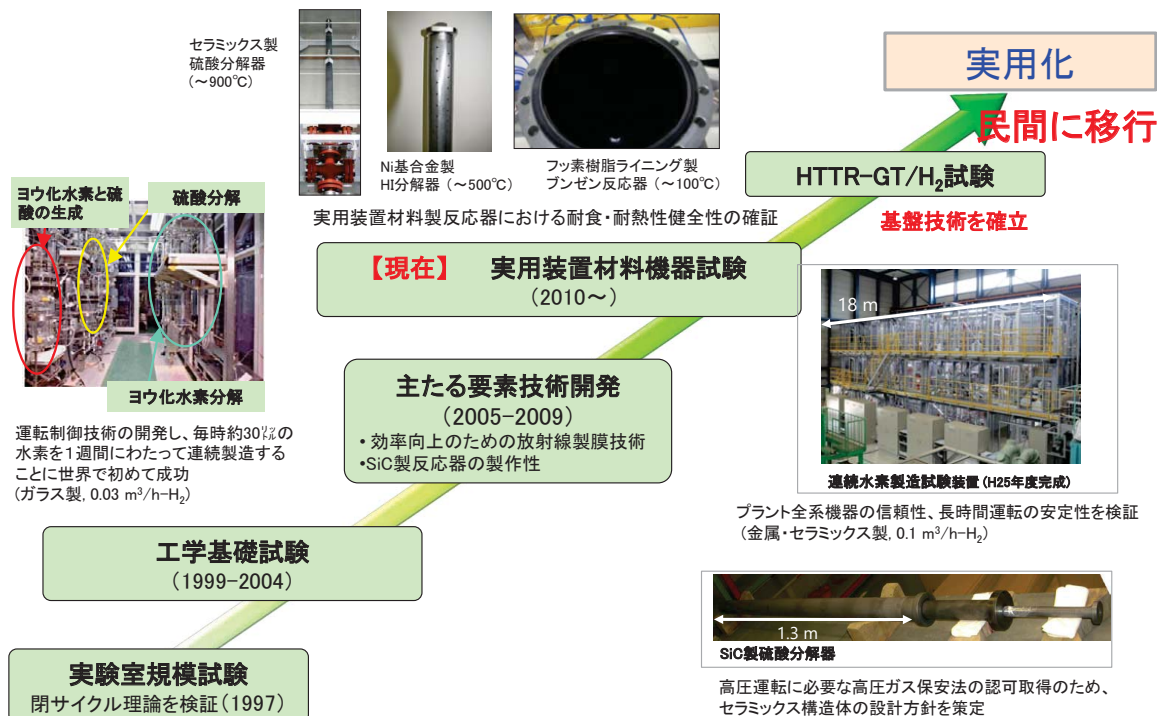
11





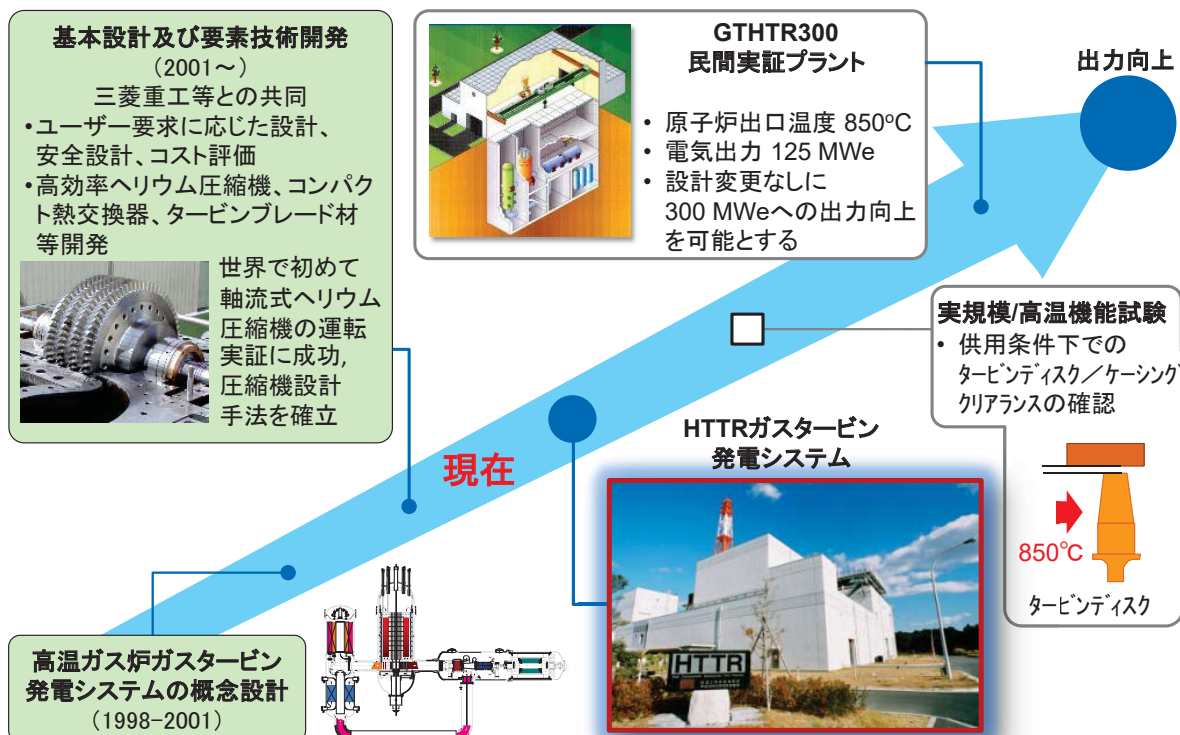
ISプロセス水素製造技術開発

12



ガスタービン発電システム技術開発

13



This is a blank page.

付録 3

平成 27 年度研究実績の評価結果と原子力機構の措置

総合評価：S 判定 1 名、A 判定 1 名、B 判定 8 名			
	指摘事項	評価	原子力機構の措置
高温ガス炉技術研究開発	HTTR の新規制基準への適合性確認の対応	S:1 名 A:1 名 B:8 名	
	安全基準の整備に向けた設計基準事象の選定	A:1 名 B:9 名	
	除熱性能を向上させた燃料要素の概念設計	S:1 名 A:6 名 B:3 名	- 耐酸化性 SiC マトリックス燃料については、SiC 自体が安定なセラミックスであることから再処理は行わず、直接処分が適当と考えています。 - ただし、検査技術の一環として、マトリックスの解砕技術を開発しています。 注) ご指摘の「酸化物の粉砕」は「SiC マトリックスの粉砕」のことと解釈します。
	HTTR に接続する熱利用システムの設計	S:2 名 A:6 名 B:2 名	- 熱利用システム早期実証を期待する。 - 変更した配管材質の腐食性(耐酸化性)、コスト比較、二重管から一重管にした強度尤度などのデータ開示を希望する。 - 熱利用システムの早期実証を達成できるよう、HTTR 再稼働と併せ、引き続き鋭意取組みます。 - 変更した配管材質の腐食性(耐酸化性)、コスト比較、二重管から一重管にした強度尤度などのデータは、論文等により順次公開しています。

	指摘事項	評価	原子力機構の措置
熱利用技術研究開発	連続水素製造試験装置の性能評価	S:1 名 B:9 名	- より安定的な水素製造に向けた適切なバッファ量を定めるよう、H29～H30 年度に行う水素製造試験を通して検討します。 - H27 年度に工程統合試験を実施し、水素製造試験を当初計画を超え実施しました。
	セラミックス試験片の破壊試験の準備	S:1 名 B:9 名	- H28 年度に装置を製作し、H29～H30 年度に試験を行います。 - 早期に成果を出せるよう、予算獲得に引き続き取組みます。 - H29～H30 に取得するデータに基づき、解析により加熱等の実環境要因を考慮して評価します。
	経済性評価に資する実用システム概念検討	A:3 名 B:7 名	- H28 年度に中間熱交換器の構造簡素化、耐用年数向上を図りコスト削減を行いました。 - 上記中間熱交換器について民間企業と共同で特許化を図りました。 - 他の技術との比較は、H29 年度の設計完了後に実施します。
	ガスタービンへの核分裂生成物の沈着低減技術に係る拡散試験	A:1 名 B:8 名 C:1 名	耐熱合金の化学組成及び結晶構造の違いによる FP 沈着特性を H28 年度に検討し、沈着量低減のためのガスタービン翼材料の設計方針を提案しました。FP は、プレフィルタでは完全に除去できないため、沈着量低減方策を併せ、メンテナンスコストを評価していきます。

	指摘事項	評価	原子力機構の措置
人材育成	高温ガス炉を含む原子力技術者のすそ野を広げ、技術力のボトムアップに貢献して頂くことを期待している。	S:1名 <u>B:9名</u>	海外から博士研究員を受け入れました。また、昨年以上の夏期実習生を受け入れることで、技術力のボトムアップに貢献しました。
産業界との連携	特になし	S:1名 A:2名 <u>B:7名</u>	
総合所見	- 全体の研究開発ロードマップを公表し、その達成度をチェックする仕組みのようなものを検討すると良いかもしれません。 - 今年度は特許登録がなされていない為、日本の技術的優位性を維持するためにも知的所有権にも配慮頂きたい。特許の記述が少なかったが、世界市場をリードし、将来産業移転された際、企業が安心して技術が使える様、小さな改良等でも特許による技術保護を希望します。	S:1名 A:1名 <u>B:8名</u>	- 高温ガス炉産学官協議会において検討が進められている実用化に向けたロードマップと整合性を確認し、全体計画を見据えて中長期計画に対する研究開発の達成度について、当課題評価委員会において確認を受け、研究開発を進めていきます。 - 研究開発の中で特許出願に値する知的財産が創出されています。原子力機構の知財ポリシーに基づき、概ね10年以内に産業利用の見込める内容に絞り特許出願を進めてまいります。



平成28年度研究実績の評価と 平成29年度の研究計画(案)

平成29年1月19日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門
高温ガス炉水素・熱利用研究センター
高温工学試験研究炉部



目 次

1

平成28年度研究実績の評価	2
4－1 高温ガス炉技術の研究成果	2
4－2 熱利用技術の研究成果	22
4－3 人材育成	36
4－4 産業界との連携	41
4－5 その他の成果	50
平成29年度の研究計画(案)	58



平成28年度研究実績の評価

4-1 高温ガス炉技術の研究成果



1. 平成28年度研究成果

平成28年度の年度計画

1. 高温工学試験研究炉 (HTTR) については、安全の確保を最優先とした上で再稼働するまでの間における維持管理経費の削減に努め、速やかな再稼働に向けて新規制基準への適合性確認対応を進め、設置変更許可の取得を目指す。
2. 実用高温ガス炉システムの安全基準の整備に向けて、安全指針の原案として、安全要件を達成するために炉心及び燃料の安全設計において評価すべき設計事項を定める。
3. また、高温ガス炉燃料の高出力密度化に向けて、充填率を向上させた燃料要素の性能評価を実施し、製作性を確認する。
4. さらに、HTTR に接続する熱利用システムの機器仕様を定めるとともに、HTTR 熱利用システムに係る安全評価を実施する。

平成28年度研究成果

1. について

- 1-1 HTTRの再稼働に向けて、試験研究炉の新規制基準への適合性の確認のための審査について、規制庁による審査会合、ヒアリングに対して着実かつ的確に対応を進め、補正申請を実施した。また、職員が減少する一方で、新規制基準対応等の業務量が増加するなか、業務の効率化により、施設定期検査、ヘリウムガス循環機のカスケード交換などの規模の大きな業務を、維持費削減に努めつつ的確に完遂させた。
- 1-2 HTTRを用いてH26年度から継続的に実施してきた非核加熱(コールド)試験により、原子炉システム全体の熱負荷変動吸収特性の評価手法を完成させ、高温ガス炉の熱負荷変動に対する固有の安全性を把握した。また、炉心冷却喪失試験に向けて、HTTRを用いたコールド試験を実施し、運転員の技術能力の維持向上を図りつつ、崩壊熱評価手法の適用性確認ができる見込み(平成29年2月)。

自己評価: B 再稼働に向けて耐震評価以外は終了。コールド試験で当初計画以上の成果を達成見込み。

平成29年度の計画

高温工学試験研究炉 (HTTR) については、安全の確保を最優先とした上で再稼働するまでの間における維持管理経費の削減に努め、速やかな再稼働に向けて新規制基準への適合性確認対応を進め、設置変更許可取得及び**竣工認申請**を目指す。



1-1 新規制基準対応での主要な議論と成果(1)

4

新規制基準対応について、ヒアリング、審査会合での議論の結果、以下の成果を得た。

研究炉班

■ 自然現象等評価

- ✓ 森林火災については、施設の周囲に防火帯を設けて防護すること等について説明し、審査終了。防火帯についてはHTTR原子炉施設の周囲9.5mの範囲で設置済み。
- ✓ 内部火災については、ケーブル火災等による火災を想定しても、火災防護の三方策の組合せにより防護することについて説明し、審査終了。
- ✓ 航空機落下については、航空機落下確率が航空機落下を考慮しなくても良い 10^{-7} より低いことを示し審査会合終了。
- ✓ 火山については、火山灰の除灰することで防護対象施設を防護することについて審査を行い、対策の実効性を説明し、終了の見込み。火山灰の降灰速度は一日当たり最大5cmとしている。
- ✓ 竜巻については、評価はフジタモデルとランキン渦モデルを併用。設計竜巻の最大風速100m/sで評価し、車の衝突を考慮し建家の健全性を示すことで了解を得て、審査は終了の見込み。詳細は後段規制で示す。

■ 安全評価

➢ 重要度分類

- ✓ 安全上の重要度分類については、自然放熱により炉心冷却が可能であることを示して炉心冷却機能の安全重要度を見直すこと等について説明し、審査終了。
- ✓ 耐震重要度分類については、冷却系及び炉内構造物をSクラスからBクラスへ変更することを説明し、審査終了。使用済燃料貯蔵建家(SF建家)をBクラスに変更することについて、外部事象に対する防護の考え方と合わせてほぼ議論が終了。



1-1 新規制基準対応での主要な議論と成果(2)

5

■ 安全評価(つづき)

➢ 多量な放射性物質を放出する事故

- ✓ 止める、冷やす、閉じ込めるにDBA事象を重畳させた事象選定を行い、対策として放射性物質の飛散防止と炉心冷却のための放水を説明。具体的にはDBA事象として二重管破断事故を想定し、これに重畳する事象はそれぞれ、原子炉停止機能の喪失、炉容器冷却設備による冷却機能の喪失、原子炉格納容器の破損による閉じ込め機能の喪失を想定。また、大規模損壊とその対策について説明し、審査終了。対策はBDBA対策と同じ。なお、SF建家について耐震BクラスとしてBDBA対策をとることについて議論が終了。

地震津波班

- 基準地震動策定に関し、プレート間地震、海洋プレート内地震、内陸地殻内地震などを評価。審査の過程において、パラメータの不確かさを考慮することを規制庁より要求され、地震動の再評価を実施。大洗地区においては、海側の断層において、規制庁のコメントにより断層モデルの変更を余儀なくされ、地震動が大きくなる結果となり、他施設の地盤安定性評価に影響を及ぼす可能性がある。このため、現在地震動をできるだけ小さくできるように断層モデルのメッシュの見直し等を行い、再度地震動の評価を行っているため、地震動の策定が遅れている。
- 再稼働に当たっては、基準地震動の策定が決まらなないと設置許可の要件となっている地盤安定性評価の審査に入れない。更に、その後の設工認における耐震安全性評価の審査を実施する必要がある、基準地震動の策定の遅れにより、再稼働も遅れることになる。



参考 再稼働に向けた新規制基準対応状況について ⁶

- ◆ 平成26年11月26日 新規制基準対応に係る設置変更許可申請
- ◆ 審査、ヒアリングの進捗状況(平成28年12月26日現在:申請後約24か月)
 - ◆ 研究炉班と地震津波班に分かれて審査
 - ◆ 研究炉班:審査会合(19回実施)、ヒアリング(79回実施)
 - ◆ 地震津波班:審査会合(22回実施)、ヒアリング(49回実施)

項目	主な内容	状況	ヒアリング中	審査会合で審査中	審査会合終了
基準地震動策定 地盤安定性評価 基準津波評価	・ 基準地震動策定、地盤安定性評価、三次元地下構造評価を実施し、基準への適合性を示している。	・ 大洗研究開発センター近傍のF3、F4断層に関する断層モデル等の変更で、地震動が増大。モデルのメッシュ等の見直しを行いできるだけ小さくし、施設側で成立性について検討を実施。 ・ 内陸地殻内地震等の説明後、基準地震動の妥当性に関するヒアリングを開始予定。	○(49回)	○(22回*)	—
耐震評価	・ 建物・構築物の評価 ・ 原子炉圧力容器、一次冷却材の機器・配管等(原子炉冷却材圧力バウンダリ)の振動解析及び強度解析	・ 評価の提出方法については、規制庁から設工認として、申請することが求められ、申請範囲等について検討中。	○(1回)	—	—
自然現象等評価	・ 新規制基準において、要求されている自然現象等(森林火災・火山・竜巻、航空機落下等)の影響評価を行い、基準への適合性を示している。	・ 森林火災については、施設の周囲に防火帯を設けて防護すること等について説明し、審査終了。内部火災については、ケーブル火災等による火災を想定しても、火災防護の三方策の組合せにより防護することについて説明し、審査終了。 ・ 航空機落下については、航空機落下確率が航空機落下を考慮しなくても良い10 ⁻⁷ より低いことを示し審査会合終了 ・ 火山については、火山灰の除灰することで防護対象施設を防護することについて審査を行い、対策の有効性が認められ、終了の見込み。 ・ 竜巻については、車の衝突を考慮し建物の健全性を示すことで了解を得、審査は終了の見込み。詳細は後段規制で示す。	○(11回) ○(6回) ○(7回) ○(15回)	○(3回*) ○(2回*) ○(1回) ○(3回)	○ ○ —
安全評価	重要度分類 ・ 発電炉と異なるHTTR固有の安全上の特徴を考慮して、重要度分類を見直すとともに、その妥当性を示している。	・ 安全上の重要度分類については、自然放熱により炉心冷却が可能であることを示して炉心冷却機能の安全重要度を見直すこと等について説明し、審査終了。 ・ 耐震重要度分類については、冷却系及び炉内構造物をSクラスからBクラスへ変更することを説明し、審査終了。使用済燃料貯蔵建家(SF建家)をBクラスに変更することについて、外部事象に対する防護の考え方と合わせて議論が終了。	○(19回)	○(6回*)	○
	設計基準事故に加えて考慮すべき事故(BDBA) ・ HTTRの特徴を考慮し、設計基準事故を超える事故の事象選定を行い、その対策を示している。	・ 多量な放射性物質を放出する事故について、審査が先行している研究炉に倣った事象選定(止める、冷やす、閉じ込める)にDBA事象(重畳)を行い、対策を説明。大規模損壊とその対策について説明し、審査終了。なお、SF建家について耐震BクラスとしてBDBA対策をとることについて議論が終了。	○(46回)	○(9回*)	—

【注】1回の審査会合等において、複数の項目を実施する場合や上記項目以外について実施しているため合計数は不一致。

*質問回答を含む



HTTRを用いたコールド試験

7

高温ガス炉の熱負荷変動吸収特性の把握 (昨年度までの成果)

解決方法

非核加熱という理想的な条件下で試験を実施し、高温ガス炉の熱負荷変動吸収特性の把握のために必要なデータの取得

コールド試験の概要

- ✓ 非核加熱条件下において温度外乱を投入
- ✓ 冷却材圧力、質量流量が異なる非核加熱試験結果により、その熱負荷変動吸収特性への影響評価

核熱供給試験
対象: 原子炉の熱負荷吸収特性の把握

熱利用系異常模擬試験
対象: 中間熱交換器を含む原子炉システムの熱負荷吸収特性の把握

- 高温ガス炉の熱負荷変動吸収特性を把握し、評価手法を確立 ⇒ 熱負荷変動時の固有の安全性を確認
- 研究成果は、研究論文として米国機械学会誌等の学術論文誌に掲載
- 理事長表彰受賞(研究開発功労賞)

高温ガス炉の実炉データに基づく崩壊熱評価(今年度の成果:予定)

背景: 高温ガス炉の崩壊熱への課題

炉心冷却喪失試験の最適評価のために、重要因子の不確かさを把握・低減

解決方法

実炉データに基づく高温ガス炉の崩壊熱評価手法の適用性確認

手順①コールド試験

RELAPコードの除熱特性評価モデル検証のためのデータ取得

①ガス循環機の入熱で炉内を100℃に維持
②ガス循環機を停止

③補助冷却器出入口He温度、補助冷却器He流量を計測

手順②崩壊熱モデルの評価

- ✓ RELAPコードの原子炉除熱評価モデルの検証
- ✓ 検証したコードに崩壊熱モデルを組み込み、核出力のある試験結果と比較 ⇒ 実炉データに基づく高温ガス炉の崩壊熱評価手法の適用性確認

長期運転停止により崩壊熱≒0

過去の核出力状態での試験と比較

崩壊熱評価の適用性を確認できる見込み

運転員の技術能力の維持・向上や、動的機器の機能維持に貢献



HTTRの維持管理

8

目 標

安全の確保を最優先とした上で再稼働するまでの間における維持管理経費の削減に努めつつ機器の機能維持等を図る。

前年度までの主要な実施項目

- 原子力規制庁による機能維持のための施設定期検査（毎年）
- 制御棒交換機及び燃料交換機の点検（H26年度）
- HTTR原子炉起動用中性子源の交換（H27年度）

今年度の主要な実施項目



1次冷却設備のガス循環機（HGC）上部ケーシング
ガスケット交換作業の様子

（品質保証管理要領に従い10年毎に交換）

- ・線量の高いフィルタがある状態でガスケット交換を行う初めての作業において、遮蔽体を作り、工程・人員配置を見直して合理化。
- ・74日間で約1500人・日に及ぶ大掛かりな作業を無事に完遂。
- ・作業員の被ばくを問題無いレベルに管理。（最大0.3mSv）



2. 平成28年度研究成果

9

平成28年度の年度計画

1. 高温工学試験研究炉（HTTR）については、安全の確保を最優先とした上で再稼働するまでの間における維持管理経費の削減に努め、速やかな再稼働に向けて新規基準への適合性確認対応を進め、設置変更許可取得及び施設定期検査の実施を目指す。また、機器の機能維持等を通して運転員の技術能力の維持を図る。
2. 実用高温ガス炉システムの安全基準の整備に向けて、安全指針の原案として、安全要件を達成するために炉心及び燃料の安全設計において評価すべき設計事項を定める。
3. また、高温ガス炉燃料の高出力密度化に向けて、充填率を向上させた燃料要素の性能評価を実施し、製作性を確認する。
4. さらに、HTTRに接続する熱利用システムの機器仕様を定めるとともに、HTTR 熱利用システムに係る安全評価を実施する。

平成28年度研究成果

2. について

- 2-1 安全要件を達成するために炉心及び燃料の安全設計において評価すべき設計事項を不備なく定めた。
- 2-2 日本原子力学会研究専門委員会の2年間にわたる検討をまとめるとともに、国際協力による実用高温ガス炉の安全基準の整備として、IAEA CRPIにおける安全要件の国際標準の検討を主導した。

自己評価：A 年度計画を上回る成果を達成。

平成29年度の年度計画

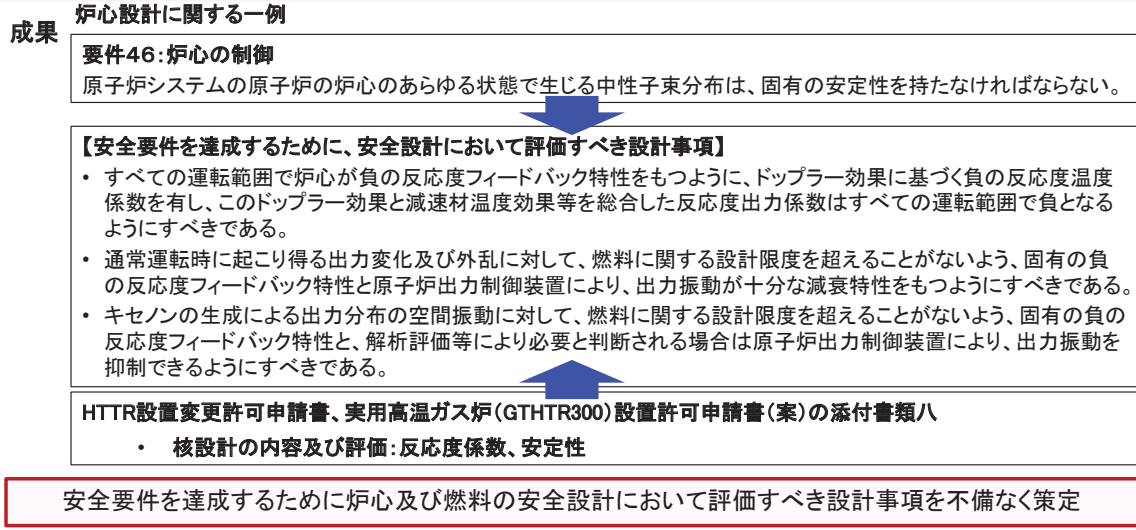
1. 実用高温ガス炉システムの安全基準の整備に向けて、安全指針の原案として、安全要件を達成するために原子炉冷却設備及び格納施設の安全設計において評価すべき設計事項を定める。



2-1 炉心及び燃料の設計事項の策定完了

10

目標	安全要件を達成するために炉心及び燃料の安全設計において評価すべき設計事項の策定
課題	安全設計において評価すべき設計事項を不備なく導出
解決法	これまでに策定した安全要件からのトップダウンとHTTR等における設計知見からのボトムアップによるアプローチによって導出



2-2 日本原子力学会研究専門委員会の概要

11

- 委員会名
「プリズマティック型高温ガス炉の安全設計プロセス」
- 目的
実用高温ガス炉の安全基準整備の一環として、前研究専門委員会で作成した安全要件に基づき、安全指針の基本となる考え方を構築
- 設立期間
平成27年4月1日～平成29年3月31日(2年間)
- 委員
国内の原子力安全、高温ガス炉、水素製造等熱利用の専門家から構成
主査(敬称略): 植田 伸幸(電中研)
委員: 18名(大学4名、産業界7名、財団等2名、原子力機構5名)
- 平成28年度の実績
第4回～第6回委員会を実施し、議論を完了
 - ✓ 炉心設計などについて、安全指針の基本となる考え方を議論し、まとめた。
 - ✓ 設計基準事象選定の考え方及び許容基準を議論し、まとめた。
 - ✓ 日本原子力学会春の年会 企画セッションで最終報告予定



2-2 IAEA CRP「モジュラー型高温ガス炉の安全設計」

12

■ 目的

高温ガス炉の優れた安全上の特長、水素製造等の熱利用を考慮した国際標準となる安全要件案を検討

■ 設立期間

平成26年12月～平成29年12月(3年間)

■ 参加国

日本、中国、独国、インドネシア、カザフスタン、韓国、ウクライナ、米国

■ 平成28年度の成果

- ・ 第2回研究調整会合：平成28年6月13日(月)～6月17日(金)
 - ✓ 日本原子力学会研究専門委員会において作成した高温ガス炉の安全要件を再度詳細に説明するとともに、技術的内容についての議論を主導
- ・ フォローアップ会合等
 - ✓ 日本が提示した安全要件(第1次案)へのコメントに対する回答を提示するとともに、適宜、コメントを反映し第2次案を作成
 - ✓ 高温ガス炉国際会議(HTR2016、米国、11月)にあわせてフォローアップ会合を実施し、今後の検討方針※について合意

※日本と米国が各々提示した2つの安全要件の統合について、IAEA軽水炉安全要件の体裁に従い、上位要件とこれを具体化した下位要件から構成される日本版安全要件のうち、先ずは上位要件とこれに相当する米国の安全要件の統合を図る



3. 平成28年度研究成果

13

平成28年度の年度計画

1. 高温工学試験研究炉(HTR)については、安全の確保を最優先とした上で再稼働するまでの間における維持管理経費の削減に努め、速やかな再稼働に向けて新規基準への適合性確認対応を進め、設置変更許可の取得を目指す。
2. 実用高温ガス炉システムの安全基準の整備に向けて、安全指針の原案として、安全要件を達成するために炉心及び燃料の安全設計において評価すべき設計事項を定める。
3. また、高温ガス炉燃料の高出力密度化に向けて、充填率を向上させた燃料要素の性能評価を実施し、製作性を確認する。
4. さらに、HTRに接続する熱利用システムの機器仕様を定めるとともに、HTR 熱利用システムに係る安全評価を実施する。

平成28年度研究成果

3. について

- 3-1 充填率約33%の燃料コンパクトを製作し性能評価の結果、成立性を確認。
- 3-2 高出力密度化に向けたスリープスー体型燃料の耐酸化性を高めるため、**耐酸化燃料要素を試作し、有効性を確認。**

自己評価：A 年度計画を上回る成果を達成。

平成29年度の年度計画

高温ガス炉燃料について、更なる高充填率化による燃料要素の性能向上を図るとともに、被覆粒子のFP保持能力に関する解析評価手法の開発を行う。



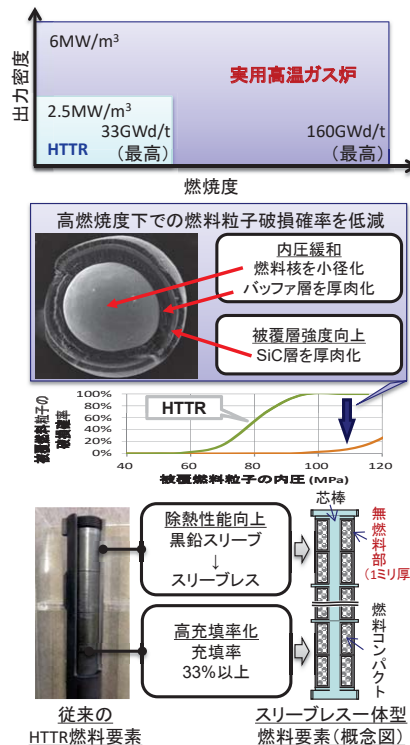
高燃焼度化・高出力密度化のための燃料要素開発(全体計画) 14

目標

実用高温ガス炉に求められる高燃焼度化(最高160GWd/t)ならびに高出力密度化(6MW/m³)に向けた燃料の基盤技術の確立に向け、HTTRで確立した燃料技術に基づく高燃焼度対応SiC-TRISO燃料粒子ならびにスリーブレス一体型燃料要素を開発する。

内容

- ① 高燃焼度対応SiC-TRISO燃料粒子の設計
 - ・ 高燃焼度下で主要な内部ガス圧力上昇による内圧破損モデルを、照射試験で検証
 - ・ 既存の最高燃焼度照射試験データを活用した解析評価を実施し、燃料健全性を検証
- ② スリーブレス一体型燃料要素の製造技術開発
 - ・ 燃料高充填率化(33%以上)に向けた二重オーバーコート法を開発
 - ・ 燃料要素の最適構造を決定
 - ・ 新たな耐酸化燃料要素の開発



3-1 高燃焼度化・高出力密度化のための燃料要素開発

15

目標

実用高温ガス炉に向けて、燃料高充填率化(33%以上)の達成。

課題

HTTR燃料の充填率は30%であり、高充填率化(33%)の際の性能評価と製作性確認が必要

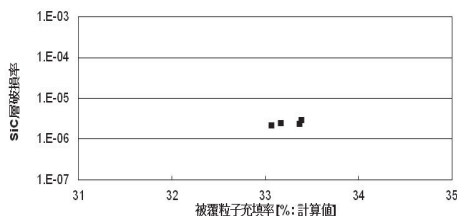
解決法

HTTR燃料の製造プロセスを準用し、成形条件を変えて充填率約33%の燃料コンパクトを製作し、性能を評価。

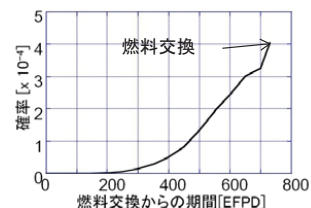
これまでの成果

燃料コンパクトのプレス成型時における被覆燃料粒子同士の接触による破損を防ぐため、被覆燃料粒子表面に均一にオーバーコートを行うよう2段階に分けてオーバーコートを実施。(二重オーバーコート法)

二重オーバーコート法で作成した充填率約33%の4個のコンパクト全てにおいて、被覆燃料粒子の破損割合は 1×10^{-5} 未満であることを確認。(製作性を確認)



GTHTR300(最大燃焼度155 GWd/t)における初期健全被覆燃料粒子の破損確率は最大で約 4.05×10^{-4} 未満。(JAEA-Technology 2012-044 (2013))



充填率33%の燃料の被覆燃料粒子の破損割合(=初期破損粒子割合 + 初期健全粒子の破損割合)は 5×10^{-4} 未満。

この破損割合であれば、減圧事故時においても、敷地境界外における一般公衆の被ばく量は充分小さい。(Nucl. Eng. Des., vol.237, 2007, pp1372-1380.)

従って、充填率33%のコンパクトを製作し、GTHTR300で使用した場合、被覆燃料粒子の破損割合は充分に小さく抑えることが可能。(性能を確認)

高充填率化(33%)の燃料について、製作性と性能を確認。



3-2 高燃焼度化・高出力密度化のための燃料要素開発

16

目標: 新たな耐酸化燃料要素の開発

課題1: SiCを含有する耐酸化燃料要素の耐酸化性の確認。

課題2: SiCを含有する耐酸化燃料要素について、炉心設計の成立性の確認。

解決1: 試作した耐酸化燃料要素の酸化試験により、形状安定性を確認。

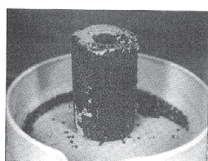
解決2: 耐酸化燃料要素を用いた炉心の核熱計算を実施。

これまでの成果1



今回の試験結果
900°C、30分、He+20%O₂
被覆燃料粒子を全て保持することができた。

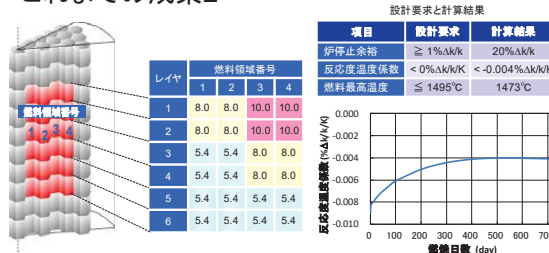
耐酸化性を調べ、従来の燃料要素に対する優位性を確認。



出典: JAERI-Tech 99-077 (1999).

先行研究の結果
900°C、30分、空気
被覆燃料粒子を完全に保持できず。

これまでの成果2



熱出力50MW、燃焼期間2年の高温ガス炉の炉心設計を、3種類の濃縮度(10wt%以下)の耐酸化燃料を適切に配置して成立させることができた。

炉心の核熱設計の成立性を確認



4. 平成28年度研究成果

17

平成28年度の年度計画

1. 高温工学試験研究炉 (HTTR) については、安全の確保を最優先とした上で再稼働するまでの間における維持管理経費の削減に努め、速やかな再稼働に向けて新規基準への適合性確認対応を進め、設置変更許可の取得を目指す。
2. 実用高温ガス炉システムの安全基準の整備に向けて、安全指針の原案として、安全要件を達成するために炉心及び燃料の安全設計において評価すべき設計事項を定める。
3. また、高温ガス炉燃料の高出力密度化に向けて、充填率を向上させた燃料要素の性能評価を実施し、製作性を確認する。
4. さらに、HTTR に接続する熱利用システムの機器仕様を定めるとともに、HTTR 熱利用システムに係る安全評価を実施する。

平成28年度研究成果

4. について

- 4-1 実用高温ガス炉建設に向けて実証が必要な新規概念に基づくヘリウムガスタービン軸封システム及び中間熱交換器等のHTTRに接続する熱利用システムの全ての機器仕様を定め、技術的成立性を示した。
- 4-2 安全評価により、実用高温ガス炉と同じ影響緩和設備や運転方法を適用した場合のHTTR熱利用システムの技術的成立性を確認した。

自己評価 S HTTRに接続する熱利用システムの全ての機器仕様の設定を完了した。年度計画以上の成果を達成する見込み。

平成29年度の年度計画

ヘリウムガスタービン軸封システムの基本設計を行うとともに、性能確認に向けた要素試験計画を定める。



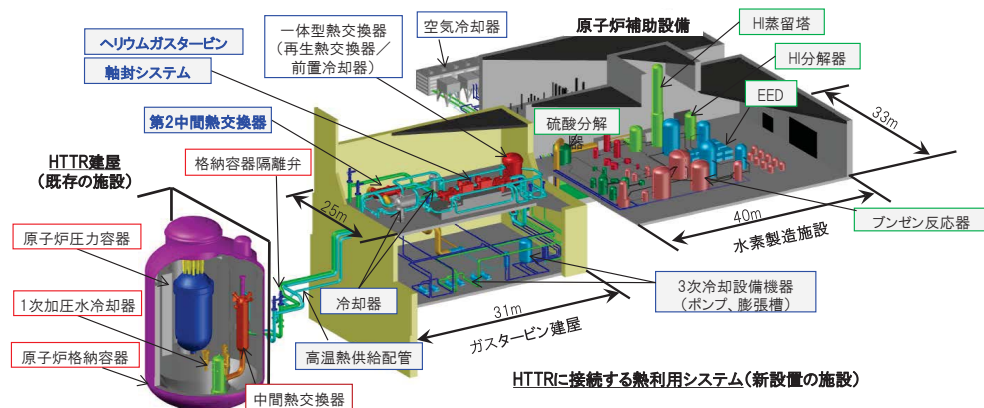
4-1 熱利用システムの機器設計

18

目的： HTTRに接続する熱利用システムについて、H27年度実施した系統設計結果に基づき機器仕様を定め、技術的成立性を示す

内容： ヘリウムガスタービン設計（H27年度実施）、
ヘリウムガスタービン軸封システム概念検討（4-1a）、第2中間熱交換器設計（4-1b）、
 一体型熱交換機（再生熱交換器/前置冷却器）設計、冷却器設計、格納容器隔離弁設計、
 3次冷却設備機器（ポンプ、空気冷却器等）設計、原子炉補助設備機器設計、
 プラント補助設備機器設計、水素製造施設機器設計

成果： **HTTRに接続する熱利用システムの全ての機器仕様の設定を完了**



4-1a ヘリウムガスタービン軸封システムの概念検討 ¹⁹

目標

実用高温ガス炉の許容1次系漏えい量を満足するヘリウムガスタービン軸封システムの開発

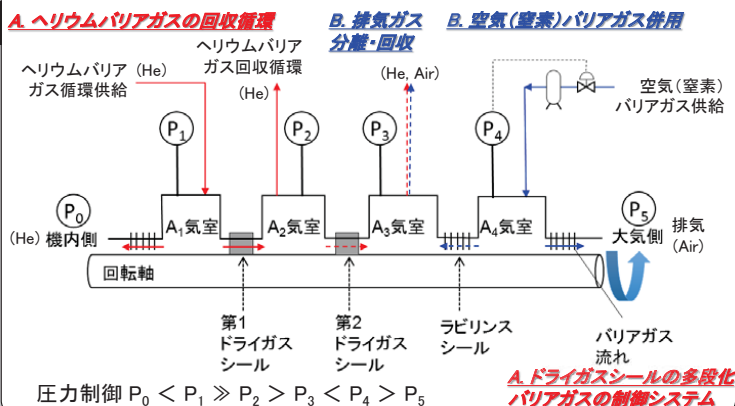
課題

HTTR接続設計におけるヘリウム漏えい量26kg/dの達成

解決法

タンデムドライガスシールシステムの考案

- A. ドライガスシール多段化によるバリアガス制御、ヘリウムガス回収循環システムによるヘリウムバリアガスのリサイクル利用
 B. 空気（窒素）バリアガス併用、及び排気ヘリウムガスの分離・回収



成果

- ドライガスシールの多段化、ヘリウムバリアガスの回収循環システムの構築により、排気ヘリウムガスを低減し、漏えい目標値（26kg/d）を達成

ヘリウム漏えい量評価値：

	H27年度設計評価 (シングル型式)		H28年度成果 (タンデム型式)	
ヘリウム漏洩量	30.0	Nm ³ /h	0.7	Nm ³ /h
HTTR1次ヘリウム 漏えい率換算	19.2	%/d	0.5	%/d
	128.5	kg/d	3.1	kg/d

- 加えて、空気（窒素）バリアガス併用、排気ヘリウムガスを分離・回収することで、**ヘリウム漏えいゼロを達成可能**
- 特許出願予定
- 今後は、システム実現にむけた技術確立の検討として、システム制御性、実物大シールの性能を検証



4-1b 第2中間熱交換器設計

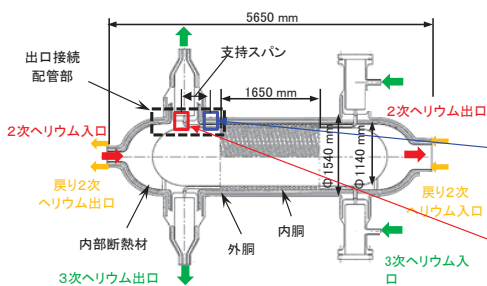
20

目標

水素製造コスト低減を図るため、コスト低減につながる要因となる第2IHXのコスト低減が可能な構造提案

解決法

- ・ヘリカルコイル型熱交換器の水平配置を採用
- ・出口接続センターパイプから胴側の管台へ変更により、接続配管長を短縮することで、支持スパンを短縮し、自重による1次応力を低減
- ・低温ヘリウムガス冷却により、胴主要構造材をCr-Mo鋼からMn-Mo鋼へ変更



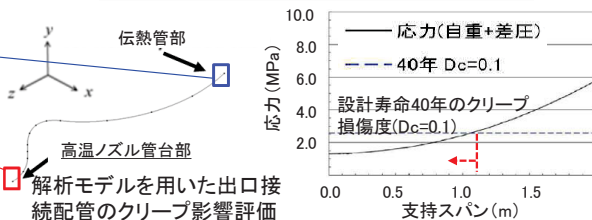
課題

- ・現行技術で製作可能な構造検討
- ・第2 IHXの設計寿命の延長化(20年→40年)
- ・製作コストの低減

成果

- ・設計寿命40年に延長可能となり、第2IHX費用を25%削減
- ・設計寿命40年に延長可能な構造提案（伝熱管のクリープ影響評価により許容支持スパン決定）
- ・実用中間熱交換器の大型化を実現（センターパイプ除去により鍛造サイズ制限なし）
- ・特許出願（出願番号JP2016-179950）

3次元線形応力解析	
1	1次一般膜応力 (1.2MPa) < 許容応力 (3.6 MPa 900°C)
2	支持スパン (596~895mm) < 許容支持スパン (1.07m) 許容支持スパン ← 設計寿命40年のクリープ損傷度 (Dc=0.1)
3	最大発生応力 (1.9MPa) < 許容応力 (2.6MPa) 許容応力 ← 設計寿命40年のクリープ損傷度 (Dc=0.1)



4-2 HTTRと熱利用システム接続に係る安全評価

21

目標

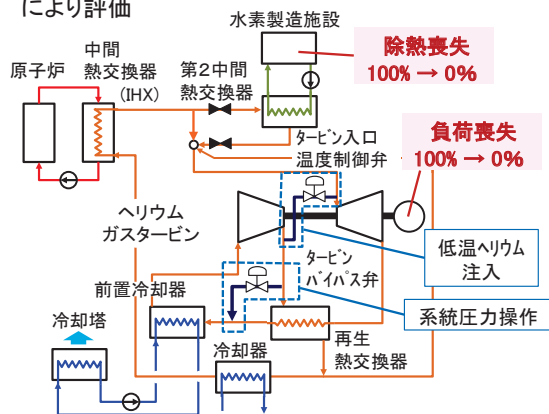
- ・ヘリウムガスタービン異常に起因する負荷喪失により安全評価における評価項目が判断基準を逸脱しない
- ・水素製造施設の除熱喪失により2次ヘリウム冷却設備温度が通常運転で許容される変動幅を逸脱しない

課題

実用高温ガス炉と同じ影響緩和設備や運転方法を適用した場合のHTTR熱利用システムの技術的成立性

解決法

- ・負荷喪失に対して、タービンバイパス弁（影響緩和設備）による系統圧力操作により回転数上昇を抑制
- ・水素製造施設除熱喪失に対して、圧縮機出口低温ヘリウムのタービン入口注入により温度上昇を抑制
- ・上記の影響緩和設備及び運転方法を適用した場合の技術的成立性を原子炉システム解析コード（RELAP5）により評価



試算結果

項目	試算結果	許容値
負荷喪失時のIHX伝熱管温度 [°C]	948	980
水素製造施設除熱喪失時のIHX入口2次ヘリウム温度変動幅 [°C]	+1	+15

- ・実用高温ガス炉と同じ影響緩和設備や運転方法の適用時にも技術的に成立する見込みを得た。
- ・現在、機器設計結果を反映した評価を実施中。（年度内達成見込み）

This is a blank page.



平成28年度研究実績の評価

4-2 熱利用技術の研究成果



1. 平成28年度研究成果

平成28年度の年度計画

1. 熱化学水素製造法であるISプロセスについて、連続水素製造試験装置を用いて定常かつ安定な水素製造を達成する。また、プラントの運転制御特性データを取得することにより、ヨウ化水素溶液の状態変化挙動を明らかにして、長期間安定な運転を可能とするヨウ化水素溶液移送技術を開発する。ISプロセスに用いるセラミックス製機器の構造体の強度評価法作成に向けて、セラミックス試験片を製作し、強度データを取得する。
2. また、実用水素製造システムの経済性評価を行い、産業界へ技術移転を行う上での研究目標を明確化する。
3. ガスタービンへの核分裂生成物の沈着低減技術について、翼候補合金と核分裂生成物同位体の拡散試験及びシミュレーションを実施し、化学組成と拡散挙動の相関を評価する。

平成28年度研究成果

1. について

- 1-1 連続水素製造31hを達成した(20NL/h)。
ヨウ素析出による安定的運転の阻害が懸念されるヨウ化水素(HI)濃縮器について、電流制御におけるヨウ素濃度変化データを取得することにより、濃縮操作によって生じるヨウ素濃度増加に応じたHI溶液のヨウ素析出温度を明らかにし、プラント運転条件に反映した。
ヨウ化水素溶液の安定的送液を可能にする、ヨウ化水素溶液用ポンプ用軸封システムを考案し、この有効性を確認し、ヨウ化水素溶液移送技術の開発を完了した。
- 1-2 セラミックス構造体の強度データ取得のため、硫酸分解器で用いる構造体を模擬した試験体形状を決定するとともに、破壊試験装置の整備を完了。試験体完成後(2月完了見込み)、破壊試験を実施し、強度データ(破壊応力とワイブル係数)の取得を完了させる(平成28年3月完了見込み)。

自己評価: B 計画通り、年度計画を達成する見込み。

平成29年度の年度計画

熱化学水素製造法であるISプロセス連続水素製造試験装置について、HI溶液等の漏えい対策を施し、反応器等の高度化を図るとともに、プロセス溶液濃度安定化のため水の蒸発量適正化技術を開発する。ISプロセス材料としてのセラミックス試験片の強度データにおける体積効果データを取得する。

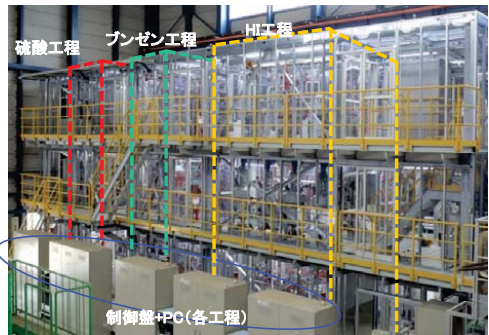


(参考) 連続水素製造試験

24

目的: • HTTR-GT/H₂試験に向け、工業材料製の連続水素製造試験設備によるプラント全系の機器の機器技術(耐食性、機器性能)及び運転制御技術の信頼性を確認し、工学レベルの水素製造技術を確立する。

内容: • 連続水素製造試験による信頼性確認、連続水素製造性能の検証
• HTTRとの接続を想定した起動・停止などの運転制御性検証



連続水素製造試験装置 3階建鉄骨構造
塩ビ板囲い
(幅18.5m×奥行5.0m×高さ8.1m)

諸元

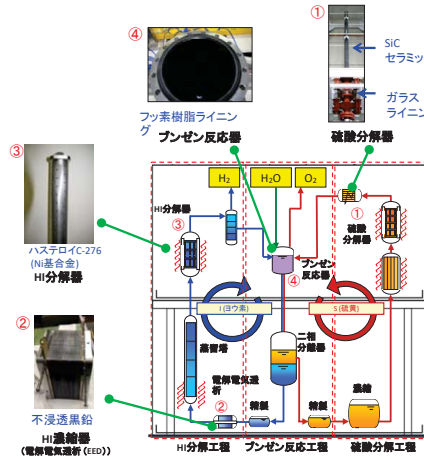
- 温度: 850℃(最高)
- 水素製造規模: 0.1m³/h(定格)
- 電気加熱

装置材料

- 液相
- フッ素樹脂ライニング
 - ガラスライニング
 - 炭化ケイ素(SiC)
 - セラミックス
 - 不浸透黒鉛

気相

- ハステロイC-276



■ ブンゼン反応工程

H₂OとI₂・SO₂を反応(ブンゼン反応)させて、H₂SO₄溶液(軽液)・HI溶液(重液)を生成

■ 硫酸分解工程

ブンゼン反応工程から供給されたH₂SO₄溶液を濃縮・分解し、SO₂とO₂のH₂SO₄分解ガスを生成

■ ヨウ化水素(HI)分解工程

濃縮工程: イオン交換膜を用いた電解電気透析器により、HI溶液(HI, I₂, H₂O)を共沸点以上の高濃度HI溶液に濃縮

蒸留工程: 高濃度HI溶液を蒸留し、HIをガスとして単離

分解工程: HIガスを熱分解し、H₂とI₂を生成



1-1 連続水素製造試験 (1/4)

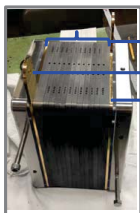
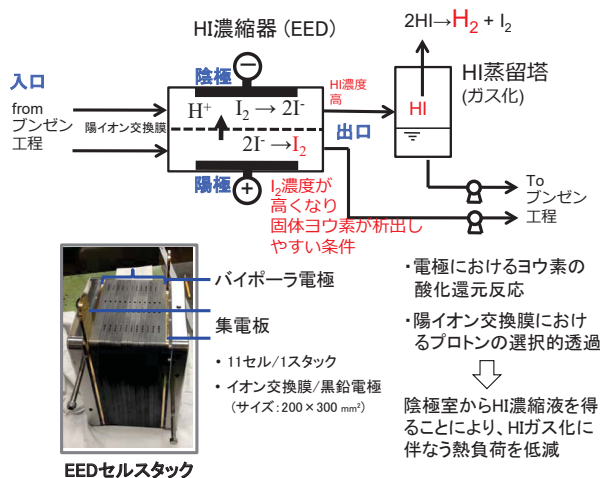
25

プラントの運転制御特性データを取得し、ヨウ化水素溶液の状態変化挙動を明らかにした

目的: 水素発生させるためには、HI濃縮器の陰極でヨウ素を還元してHI(I⁻)を高濃度化することが必須。その際、不可避に、陽極側で高濃度化するI₂の固体析出による閉塞を防止する。

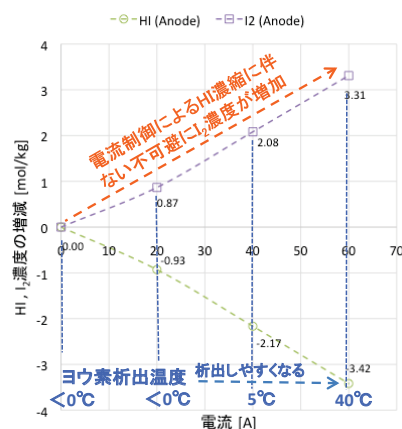
内容: ヨウ素析出による安定的運転の阻害が懸念されるヨウ化水素(HI)濃縮器について、電流制御におけるヨウ素濃度変化データを取得することにより、濃縮操作によって生じるヨウ素濃度増加に応じたHI溶液のヨウ素析出温度を評価する。

成果: HI濃縮における電流制御に伴ない上昇するヨウ素濃度に応じたヨウ素析出温度を明らかにし、ヨウ素析出による閉塞を防止するため、HI濃縮器、配管を析出温度以上に保持するヒートトレース温度の設定値に反映した。



EEDセルスタック

- バイポーラ電極
- 集電板
- 11セル/1スタック
- イオン交換膜/黒鉛電極 (サイズ: 200×300 mm²)
- 電極におけるヨウ素の酸化還元反応
- 陽イオン交換膜におけるプロトンの選択的透過
- 陰極室からHI濃縮液を得ることにより、HIガス化に伴う熱負荷を低減



電流制御における陽極溶液の濃度変化(出口)

ヨウ素析出による閉塞を防止するため、HI濃縮器、配管をヒートトレース温度の設定値に反映

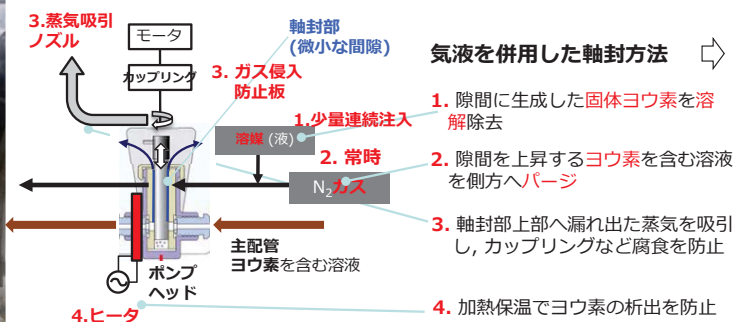
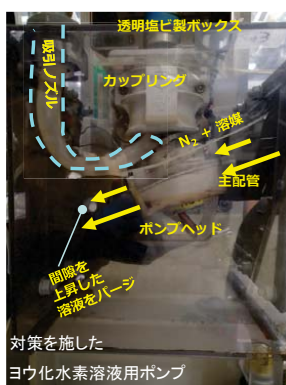
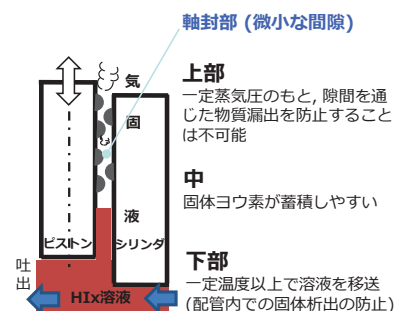


1-1 連続水素製造試験 (2/4)

26

ヨウ化水素溶液移送技術を開発

- 目的:** ・ ヨウ素がシリンダとピストンの隙間に浸入・固着しやすい耐食定量ポンプを改良し、ヨウ化水素溶液の安定的送液を可能にする。
- 内容:** ・ ヨウ素ポンプ軸封部を工夫して、対策ポンプによるヨウ化水素溶液流動試験により、作動良好性を示す。
- 成果:** ・ 気液を併用した軸封方法を開発
(ヨウ素ポンプ軸封部への窒素ガスパージ + ヨウ素溶解用溶媒の注入)を考案し、試験により効果を確認



- ・ 24時間連続運転で、システムの良好動作の確認完了
- ・ 軸封方法は、ポンプ型式によらない汎用技術であるため、広範囲の実用ポンプに適用可能



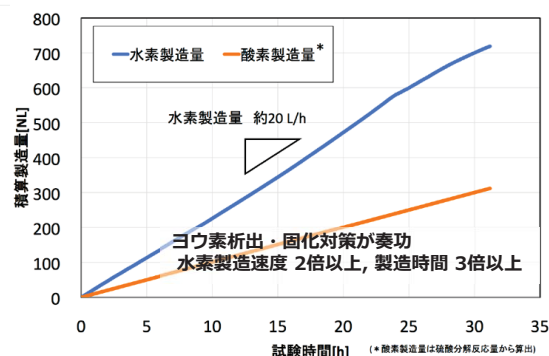
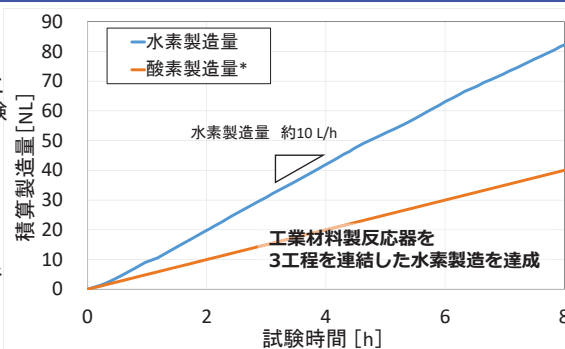
1-1 連続水素製造試験 (3/4)

27

連続水素製造試験装置を用いた水素製造試験

- 成果:** ・ 2016年2月、3反応工程(硫酸分解工程、ブンゼン反応工程、ヨウ化水素分解工程)を統合した連続水素製造試験装置の運転に成功
(プレス発表 (H28.3.18) 全国紙 (日経新聞)に掲載)
- ・ 2016年10月、前回 (10 L/h、8 h) の2倍の水素製造速度で、連続水素製造時間31時間を達成
 - ・ 開発したヨウ化水素溶液移送技術 (対策したポンプの良好動作) を確認
 - ・ ヨウ化水素分解工程のヨウ素の析出の防止技術を確認

- 課題を抽出:** ・ ブンゼン工程中の水濃度を一定化させ、HI成分の相対濃度が低下すること抑制し、 I_2 溶解度が低下することによる生じる I_2 析出・ライン閉塞を防止する。
- ・ HI、 I_2 、 H_2O の混合溶液を沸騰・蒸発させる機器の溶液温度計測用熱電対の引出しノズル部に破損孔が生じて、溶液・ミストが漏出することを防止する。



➡ 課題への対策 (HI溶液の漏えい対策、プロセス内を循環させる水蒸発量の適正化)



1-1 連続水素製造試験 (4/4)

28

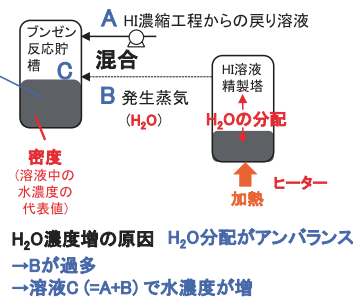
課題を抽出	連続水素製造試験における運転停止想定事象一覧				効果	
	異常事象	発生箇所	運転中の発生原因	これまでの対策	短期	長期
閉塞	析出物(ヨウ素)	HI濃度低下(水分量増加)	配管合流地点(ヨウ素を含む系統)	・合流地点の変更 ・ライン・配管レイアウト変更 ・ヒータ通過	○	○
			ヨウ素を含む系統	・運転中の組成変動(フッ素/反応工程)	○	△
漏えい	ライニング材(ガラス・セラミック)の破損、剥離	ライニング容器、配管、フランジ	・破損、剥離を外部から検出できない ・定期的な交換、試験前の全数目視点検が困難 ・経時変化であり、長期運転時の変化が不明	・1点検時(1年毎)にファイバースコープで確認 ・必要に応じて取り外して目視点検 ・腐食対策を強化	○	○
	ライニング材(ガラス・セラミック)の破損、剥離	ライニング容器、配管、フランジ	・破損、剥離を外部から検出できない ・定期的な交換、試験前の全数目視点検が困難 ・経時変化であり、長期運転時の変化が不明	・1点検時(1年毎)にファイバースコープで確認 ・必要に応じて取り外して目視点検 ・腐食対策を強化	○	△
腐食	HIのフッ素透過	HI分解器	・定期的な交換、試験前の全数目視点検が困難 ・経時変化であり、長期運転時の変化が不明	・1点検時(1年毎)にファイバースコープで確認(容器) ・必要に応じて取り外して目視点検 ・腐食対策を強化	○	△
	金属製機器(ハステロイ製HI分解器)の腐食	HI分解器	・定期的な交換、試験前の全数目視点検が困難 ・経時変化であり、長期運転時の変化が不明	・1点検時(1年毎)にファイバースコープで確認(容器) ・必要に応じて取り外して目視点検 ・腐食対策を強化	○	△
ポンプ・継手破損	運転中の振動	PMHポンプ接続継手(チタン)	・経時変化であり、長期運転時の変化が不明	・定期的な点検・交換	○	○

課題 溶液中水濃度が上昇し、 I_2 溶解度が低下することを防止
 プンゼン工程中の水濃度が規定値以上に増加し、HI成分の相対濃度を低下させ、これにより、 I_2 溶解度が低下したことで I_2 が析出、ライン閉塞に至る。

閉塞を生じさせた溶液



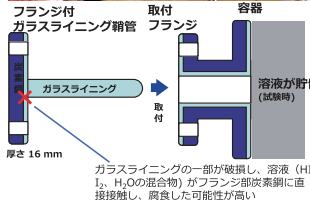
I_2 析出の要因
 溶液の H_2O 濃度が増加し、 I_2 が溶解し難い条件(I_2 が溶解するHIの相対濃度が低下)



対策 水の蒸発量適正化技術を開発する。
 加熱量(水蒸気量)を調整することで密度(水濃度)を制御

漏えいの防止

熱電対を腐食性溶液から保護するフランジ付ガラスライニング鞘管に破損孔が生じ、この孔から溶液が漏出し、ミスト化する。



対策案 HIの漏えい防止対策
 構造・材質の改良など鞘管に破損防止対策を施す。



1-2 セラミックス破壊試験

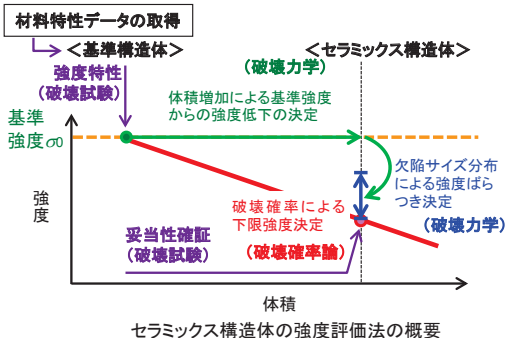
29

【全体概要】

目的: ISプロセスに用いるセラミックス製機器の高圧運転に必要なセラミックス構造体の強度評価法を作成

課題: セラミックス構造体は、体積増加による強度低下及び製造上不可避な強度ばらつきがあり、下限強度が決められない。

解決策: 材料特性データ(平成27年度取得)から決定した基準構造体の強度特性と既存の破壊力学・破壊確率論の組み合わせにより下限強度決定手法を作成し、破壊試験により妥当性を確認。



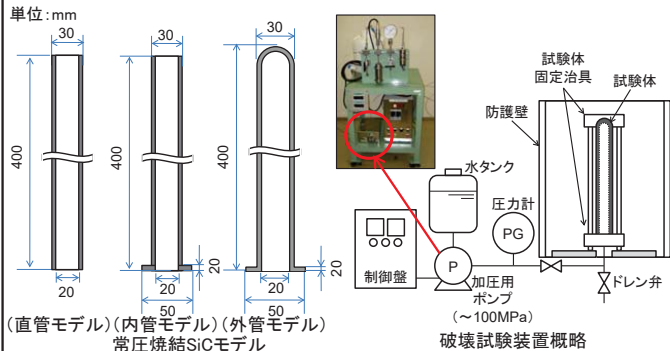
【平成28年度】

目標: ISプロセスに用いるセラミックス製機器の構造体の強度評価法作成に向けて、セラミックス試験片を製作し、強度データを取得する。

内容: ISプロセスに用いるセラミックス(常圧焼結SiC)について、体積及び形状が強度に及ぼす影響を評価するため、異なる形状の試験体を製作し、内圧(水圧)負荷による破壊試験により強度データを取得。

成果:

- セラミックス構造体の強度データ取得のため、硫酸分解器で用いている構造体を模倣した3種類の試験体形状を決定するとともに、破壊試験装置の整備を完了。
- 試験体完成後(2月末)、破壊試験を実施し、強度データ(破壊応力の定量化)の取得を完了見込(3月)。





2. 平成28年度研究成果

30

平成28年度の年度計画

1. 熱化学水素製造法であるISプロセスについて、連続水素製造試験装置を用いて定常かつ安定な水素製造を達成する。また、プラント運転制御特性データを取得することにより、ヨウ化水素溶液の状態変化を明らかにし、長期間安定な運転を可能とするヨウ化水素溶液移送技術を開発する。ISプロセスに用いるセラミックス製機器の構造体の強度評価法作成に向けて、セラミックス試験片を製作し、強度データを取得する。
2. また、実用水素製造システムの経済性評価を行い、産業界へ技術移転を行う上での研究目標を明確化する。
3. ガスタービンへの核分裂生成物の沈着低減技術について、翼候補合金と核分裂生成物同位体の拡散試験及びシミュレーションを実施し、化学組成と拡散挙動の相関を評価する。

平成28年度研究成果

2. について

2-1 昨年度成果である実用システムフローシートに基づき機器設計を行い、実用システムプラント建設費及びエネルギー費、維持管理費を試算し、過去検討よりも競争力のある水素製造コストを示した。

2-2 また、コスト削減につながる研究目標を見出し、更なるコスト削減の可能性を示した。

自己評価: A 年度計画以上の成果を達成した。

平成29年度の年度計画

経済性向上に有効な研究課題として、ISプロセス硫酸分解器の最適化を図る技術等、民間企業の知見も取り入れながら技術概念を検討する。



2. 実用水素製造システムの経済性評価(1/2)

31

目的: 昨年度成果である実用システムフローシートを基に、高温ガス炉による水素製造コストに価格競争力(30円/Nm³以下^{*1})があることを示す

課題: 過去検討よりも競争力のある水素製造コストの試算

方法: 機器コストや耐用年数を実績や近年の研究成果を反映し新たに設定

成果: 競争力のある水素製造コストとして目標値である30円/Nm³以下を示した

<ISプラントコスト>

機器コストを算出し、ラングーチルトン係数法にてプラント建設費を算出

一般機器は重量、伝熱面積、出力などから単価を掛けて算出

EED、HI分解器、硫酸分解器など特殊な反応器(膜、SiC製など)は別途試算

また、工程及び材料に応じて耐用年数を設定し、交換費用も算出

<エネルギー費>

原子炉発電・熱コスト(水素利用分)、IHXコスト、2次He系コスト

<維持管理費>

人件費、原料水、冷却水、薬品代など各単価を乗じて算出

メンテナンス費、保険、固定資産税は建設費に一定割合を乗じて算出

項目	変更点	H18年 JAEA試算	今年度検討	効果
プロセスフロー	水素製造効率	40%	50%(昨年度結果) ^{*2}	水素製造量向上
機器全般	機器単価(炭素鋼価格基準)	2.5万円/m ²	1.5~17万円/m ² (伝熱面積によって決定)	現実的な機器コスト見積もり
	材料係数	5倍(耐食材は一律)	2.1~7.8倍(材料によって決定)	現実的な機器コスト見積もり
	耐用年数	一律10年	SiC40年、金属15年	交換費用削減
反応器	HI分解器	I ₂ 吸着バッチ式	水素分離膜反応器	機器数/物量削減
	硫酸分解器	SiCブロック型	SiCバイヨネット管型	機器数/物量削減
エネルギー費	IHX	耐用年数20年	耐用年数40年 ^{*3} 、GTHTR300C設計反映	核熱費削減
	2次He系	二重管配管	単管	核熱費削減
水素製造コスト		36.4円/Nm ³	27.0円/Nm ³	

^{*1} 経済産業省、水素・燃料電池戦略ロードマップ、2016.3.22

^{*2} Conceptual design iodine-sulfur process flow sheet with more than 50% thermal efficiency for hydrogen production, HTR2016-18681, 2016.

^{*3} HTRR-GT/H2 test plant - conceptual design study on new intermediate heat exchanger, HTR2016-18747, 2016.



2. 実用水素製造システムの経済性評価(2/2)

32

目的: よりコスト競争力のある水素製造コストとして、25円/Nm³以下の達成

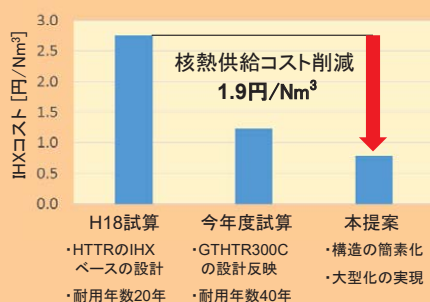
課題: 水素製造コストの大部分を占めるエネルギー費及びISプラント建設費の削減

方法: コストインパクトの大きな項目について、将来技術の発展を含めたコスト低減策を提案しコスト試算に取り込む。

成果: 水素製造コスト25円/Nm³以下を達成するための主な研究目標を以下のように提案した。

①IHX設計変更

既往の縦型IHXから横型への設計変更による構造の簡素化、耐用年数の向上



②硫酸分解器最適化

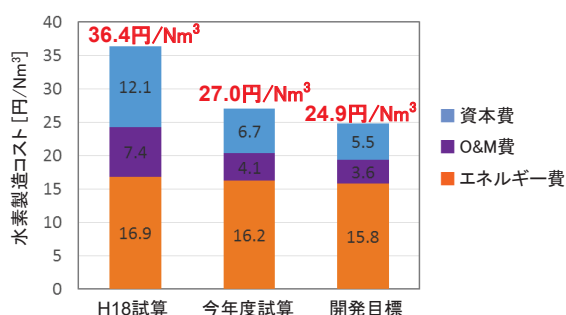
セラミクス加工技術の開発、新規耐食材の開発

③EED膜の性能向上

電流密度の向上

④HI分解器水素分離膜の開発

水素透過性能の向上



2. 平成28年度研究成果

33

平成28年度の年度計画

- 熱化学水素製造法であるISプロセスについて、連続水素製造試験装置を用いて定常かつ安定な水素製造を達成する。また、プラント運転制御特性データを取得することにより、ヨウ化水素溶液の状態変化を明らかにし、長期間安定な運転を可能とするヨウ化水素溶液移送技術を開発する。ISプロセスに用いるセラミックス製機器の構造体の強度評価法作成に向けて、セラミックス試験片を製作し、強度データを取得する。
- また、実用水素製造システムの経済性評価を行い、産業界へ技術移転を行う上での研究目標を明確化する。
- ガスタービンへの核分裂生成物の沈着低減技術について、翼候補合金と核分裂生成物同位体の拡散試験及びシミュレーションを実施し、化学組成と拡散挙動の相関を評価する。

平成28年度研究成果

3. について

- 3-1 化学組成と拡散挙動に係るシミュレーション及び拡散試験を実施し、**Mo粒内化合物がFP安定同位体(Ag)を選択的に捕獲することを見出し、FP拡散に寄与することを明らかにした。**
- 3-2 上記成果に加えて、拡散試験では結晶粒界に沿ってFPが拡散する粒界拡散現象を見出し、FP沈着低減タービン翼開発方針を提案した。

自己評価: A 年度計画以上の成果を達成した。

平成29年度の年度計画

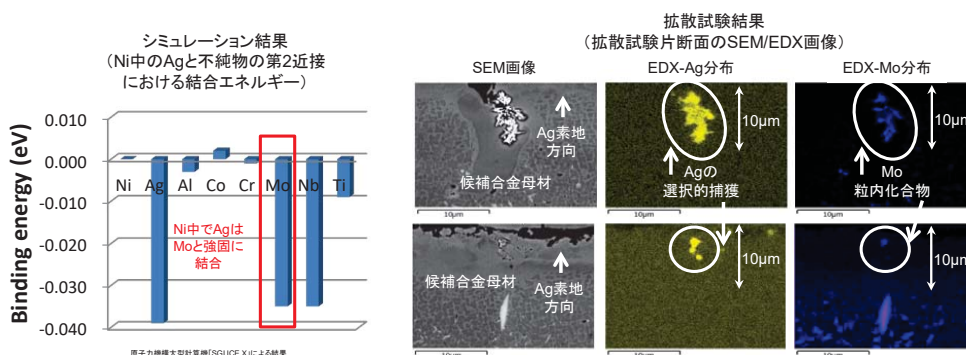
ガスタービンへの核分裂生成物の沈着低減技術について、長期拡散試験を行い、拡散試験結果に基づく候補合金を選定する。



3. 核分裂生成物(FP)沈着低減技術(1/2)

34

- 目標:** 商用高温ガス炉における作業員被ばく線量は、ガスタービンに沈着されるFP(核分裂に伴い放出されたAg-110m)のガスタービン翼への沈着が支配的である。沈着量軽減を図るため、Agの沈着低減技術を開発する。
- 課題:** 燃料の高燃焼度化に伴う炉心Pu蓄積量の増加により、Ag-110mのインベントリは増加するが、従来提案されているフィルタ容量を増やすと系統圧力損失増加、コスト増となる。また、Ag-110mは被覆燃料粒子のSiC層を透過するため冷却材中への移行量を制限するのは困難である。
- 解決策:** ガスタービン翼候補合金(ニッケル基合金)粒内の化学組成及び結晶構造がFP同位体(Ag)の拡散挙動に与える影響を明らかにし、沈着量低減抑制法を検討する。シミュレーション(第一原理計算)によりNi中のAgに不純物が与える影響を明らかにし、さらに拡散試験により粒内化合物と候補合金母材部分の拡散挙動を検証する。
- 成果:** ① シミュレーションによりNi中での**Agと強固に結合する合金元素をサーベイ**し、Moなどの合金元素がAg拡散に影響し得ることを明らかにした。
- ② 拡散試験片のSEM/EDX分析結果から、**Moを含む粒内化合物にAgが選択的に捕獲**されることを見出し、シミュレーション結果を検証した。



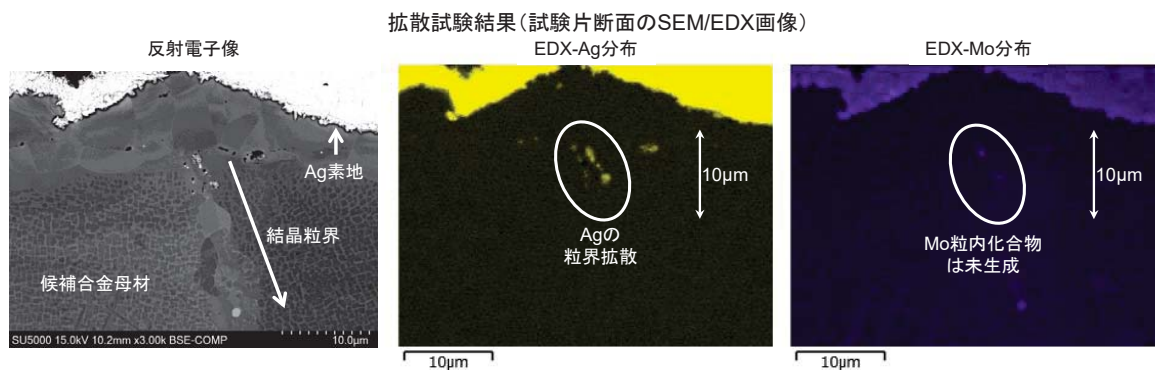
3. 核分裂生成物(FP)沈着低減技術(2/2)

35

- 成果:** 拡散試験片のSEM/EDX分析結果から、Moを含む粒内化合物が未生成の結晶粒界において、**Agが粒界に沿って拡散**していることを見出し、粒界がAgの高速拡散経路として機能することを明らかにした。

FP(Ag)沈着低減タービン翼開発方針の提案:

- ① 鋳造法の改良により、候補合金中の**結晶粒界の生成密度や方位差角等の特性を制御**し、Agの拡散挙動に与える影響を明らかにする。
- ② 熱処理法の改良により、候補合金表面の**Mo粒内化合物の生成量を制御**し、Agの拡散挙動に与える影響を明らかにするとともに、翼の化学除染等を併用してAg沈着量を低減する方法の検討を行う。





平成28年度研究実績の評価

4-3 人材育成



1. 平成28年度研究成果

平成28年度の年度計画

1. HTTRを活用した人材育成として、HTTRに研究者等を受け入れ、HTTRの燃焼解析等を実施し、高温ガス炉に関する知識を習得させる。

平成28年度成果

1. について

- 1-1 学生実習生1名、夏期実習生10名、博士研究員1名を受け入れて、HTTRの炉心解析、高温ガス炉の安全評価、事故時の燃料挙動及び黒鉛酸化特性評価等を実施し、高温ガス炉技術の知識を習得させ、若手研究者の育成に努めた。
- 1-2 JMTRオンサイト研修を通して、海外の若手研究者12名、国内の学生1名に対して、また、**放射線利用技術等国際交流(講師育成)事業**を通して、近隣アジア諸国等の研究者に対して、高温ガス炉に関する講義を行い、高温ガス炉の理解促進を図った。

自己評価: A 年度計画以上の成果を達成した。

平成29年度の計画

HTTRを活用した人材育成として、HTTRに研究者等を受け入れ、HTTRの燃焼解析等を実施し、高温ガス炉に関する知識を習得させる。



1-1 HTTRを活用した人材育成

38

目的

- 第4世代炉である高温ガス炉HTTRを人材育成の場として利用し、学生等に高温ガス炉技術を広めるとともに、HTTR試験を通して高温ガス炉の優れた安全性に関する知識を習得させる。
- 国際協力の下、国外の研究者等をHTTRに受け入れ、高温ガス炉技術の理解促進を図り、実用高温ガス炉の海外展開に貢献する。

対象者

国内：民間技術者・研究者、学生、等
 国外：高温ガス炉輸出相手国の研究者・技術者、ステークホルダー、等



1-1 HTTRを活用した人材育成

39

学生実習生

テーマ	高温ガス炉の安全解析(1名受入)
課題	妨害破壊行為に対する高温ガス炉の安全性評価
成果	RELAP5コード使用法を習得するとともに代表的な事象の評価により評価項目が判断基準を超過しないことを確認した。

夏期実習生

テーマ	受動的安全性を持つ原子炉圧力容器の冷却設備に関する研究(2名受入)
課題	新しい冷却設備を縮小した除熱試験装置の予備解析を実施し、熱流動特性を把握する必要がある。
成果	除熱試験装置の熱流動特性を把握した。これを元に実機の大きさに拡大しても除熱性能に問題がないことを確認した。
テーマ	高温ガス炉燃料要素の材料特性評価に関する研究(2名受入)
課題	高温ガス炉の燃料について、被覆層の酸化挙動に関する実験的な検証
成果	先に酸化処理を施した燃料被覆層について、高温・低酸素濃度雰囲気における挙動を確認した。
テーマ	プルトニウム燃料を装荷した高温ガス炉の反応度温度係数に関する研究(1名受入)
課題	プルトニウム燃焼高温ガス炉の反応度温度係数の燃焼特性評価
成果	MVP-BURNコードの使用方法を習得するとともに反応度温度係数が燃焼期間にわたり負であることを確認した
テーマ	高温ガス炉を用いたSi半導体製造に関する研究(1名受入)
課題	高温ガス炉を用いてSi半導体を製造する場合の照射均一性および照射時間の計算及び評価
成果	MVP-BURNコードの使用法の習得及び高温ガス炉を用いたSi半導体製造の有望性を確認



1-1 HTTRを活用した人材育成

40

夏期実習生

テーマ	高温ガス炉の事故時における燃料FP放出挙動に関する研究(2名受入)
課題1	フィックの法則に基づくFP放出量計算コードFORNAX-Aを用いて、被覆燃料粒子のFP放出挙動の最適解析を実施し、事故時FP追加放出量計算コードHTFPの保守的な設定の放出定数と比較し考察
成果1	Cs-137を対象とし、FORNAX-Aコードで計算した放出定数とHTFPコードの放出定数を比較して同コード保守性の有無を確認
課題2	黒鉛酸化解析コードTHYTANを用いて、原子炉級黒鉛IG-110の酸化解析を実施し、その化学反応について考察
成果2	IG-110試験片の800℃～1100℃における水蒸気酸化解析を行い、酸化挙動が化学反応律速であることを確認
テーマ	MVP-BURNコードによるHTTRの全炉心計算(1名受入)
課題	MVP-BURNコードを用いたHTTRの燃焼解析モデルの高度化
成果	MVP-BURNコードのHTTR全炉心のモデルを構築し、HTTRデータを用いて当該モデルの検証を行った。
テーマ	HTTR炉心冷却喪失試験に向けた炉容器冷却設備の温度解析モデルの構築(1名受入)
課題	HTTR炉容器冷却設備の伝熱特性に対する自然対流熱の影響を明らかにすること
成果	HTTR炉容器冷却設備の伝熱量に対する熱反射板間の空気の影響を定量的に明らかにした。

博士研究員

テーマ	高温ガス炉の燃焼を通じた核特性、炉内熱流動挙動、及び燃料温度挙動の解明(1名受入)
課題	MCNPコードを用いたHTTRの燃焼解析モデルの高度化
成果	MCNPコード用の被覆燃料粒子のランダム配列モデルを構築し、HTTRデータを用いて当該モデルの検証を行った。



1-2 海外研究者への講義

41

JMTRオンサイト研修	放射線利用技術等国際交流(講師育成)	
	第7回原子炉工学コース フォローアップ研修	講師育成研修 原子炉工学コース
平成28年7月25日～26日	平成28年5月18日	平成28年9月9日
原子力機構に参加者を受け入れ、高温ガス炉の講義及び施設見学を実施	インドネシア原子力庁において、高温ガス炉の講義を実施	原子力機構に参加者を受け入れ、高温ガス炉の講義及び施設見学を実施
インドネシア、カザフスタン、タイ、ベトナム、ポーランド、マレーシアからの若手研究者・技術者12名 国内の学生1名が参加	インドネシア若手研究員を中心として、講義に14名が参加	バングラデシュ、インドネシア、カザフスタン、マレーシア、モンゴル、フィリピン、タイ、トルコ、ベトナムから21名が参加



平成28年度研究実績の評価

4-4 産業界との連携



1. 平成28年度研究成果

平成28年度の年度計画

1. 国や産業界等との協議を継続し、高温ガス炉の意義、位置付け、高温ガス炉の研究開発ロードマップなどについて検討を進めるとともに、HTTR熱利用試験施設の建設に向けた検討結果について、外部専門家で構成される委員会にて評価を受ける。また、国際協力及び国際展開を着実に進める。

平成28年度成果

- 1-1 平成27年度に設立した高温ガス炉産学官協議会を継続的に開催した。平成28年度は2回の会合を開催し、高温ガス炉の意義、国際実証炉計画等について議論を行った。（現在、第5回会合を年度内に開催するため、文科省と調整中）
- 1-2 原子力メーカー、燃料・黒鉛メーカーと高温ガス炉の実用化に向けた研究協力を実施している。
- 1-3 米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用して研究開発を推進し、また、英国、ポーランドとの新たな協力を模索するなど、国際協力及び国際展開を着実に進めた。

自己評価:B 計画通り、年度計画を達成。

平成29年度の計画

国や産業界等との協議を継続し、高温ガス炉の意義、位置付け、高温ガス炉の研究開発ロードマップなどについて検討を進める。また、国際協力及び国際展開を着実に進める。



1-1 高温ガス炉産学官協議会

44

協議会メンバー

原子力メーカー： 三菱重工、東芝、日立製作所、富士電機

燃料・材料メーカー： 原子燃料工業、東洋炭素

水素・熱利用メーカー： 新日鐵住金、千代田化工建設、東洋エンジニアリング、日揮、トヨタ自動車、日産自動車、本田技研工業、日立造船、岩谷産業

シンクタンク・商社： キヤノングローバル戦略研究所、丸紅ユティリティ・サービス

大学： 東京大学、東京工業大学、東京農工大学、東京都市大学、九州大学

国等： 文部科学省、日本原子力研究開発機構

オブザーバー： 経済産業省、日本原子力発電、日本電機工業会、エネルギー総合工学研究所

第3回会合 平成28年4月26日

議題： 自動車メーカーから見た高温ガス炉の意義及び課題
高温ガス炉を巡る国内外の情勢

第4回会合 平成28年6月23日

議題： 国際実証炉計画について
(HTTR原子炉施設及びISプロセス連続水素製造試験装置の見学)



1-2 産業界との連携

45

三菱重工(連携センター*1) 2009年度～

- HTTRで培った技術を活かし、実用先行炉を想定した自社製の高温ガス炉システムMHRの概念設計を実施。原子力機構は、炉心設計を協力。
- 商用化に向け、実用先行炉の建設に集中することを提案。高温ガス炉の商用化に向けて自社技術で貢献すると表明。



遠山真(三菱重工)
"Expectations to HTGR",
HTR2012国際会議より

TOSHIBA東芝 2007年度～ (高温ガス炉に関する包括協定締結)

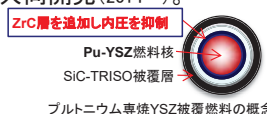
- 原子力機構が提案する小型高温ガス炉の概念構築に、他の国内企業6社をとりまとめ、協力。
- 小型高温ガス炉の技術課題抽出、導入シナリオ検討に係る研究を共同実施。



共同で開発した小型
高温ガス炉の概念

NFI 原子燃料工業 2010年度～

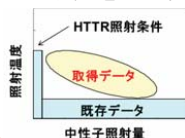
- 高燃焼度化被覆燃料を共同開発。(ISTCレギュラープロジェクト)
- SiC母材耐酸化燃料要素、プルトニウム専焼YSZ被覆燃料を共同開発(2014～)。



プルトニウム専焼YSZ被覆燃料の概念

TOYO TANSO 東洋炭素 (連携センター*1) 2007年度～

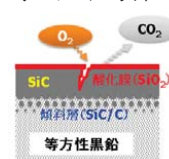
- 中国の実証炉HTR-PMから、炉心用黒鉛を受注。
- 高温・重照射挙動解明に係る研究を共同実施。



HTTRを超える条件での照射試験を実施

黒鉛4社 (東洋炭素、イビデン、東海カーボン、新日本テクノカーボン) 2012年度～

- 耐酸化性を向上させた各社黒鉛の共同照射試験中。(ISTC *2/パートナープロジェクト)

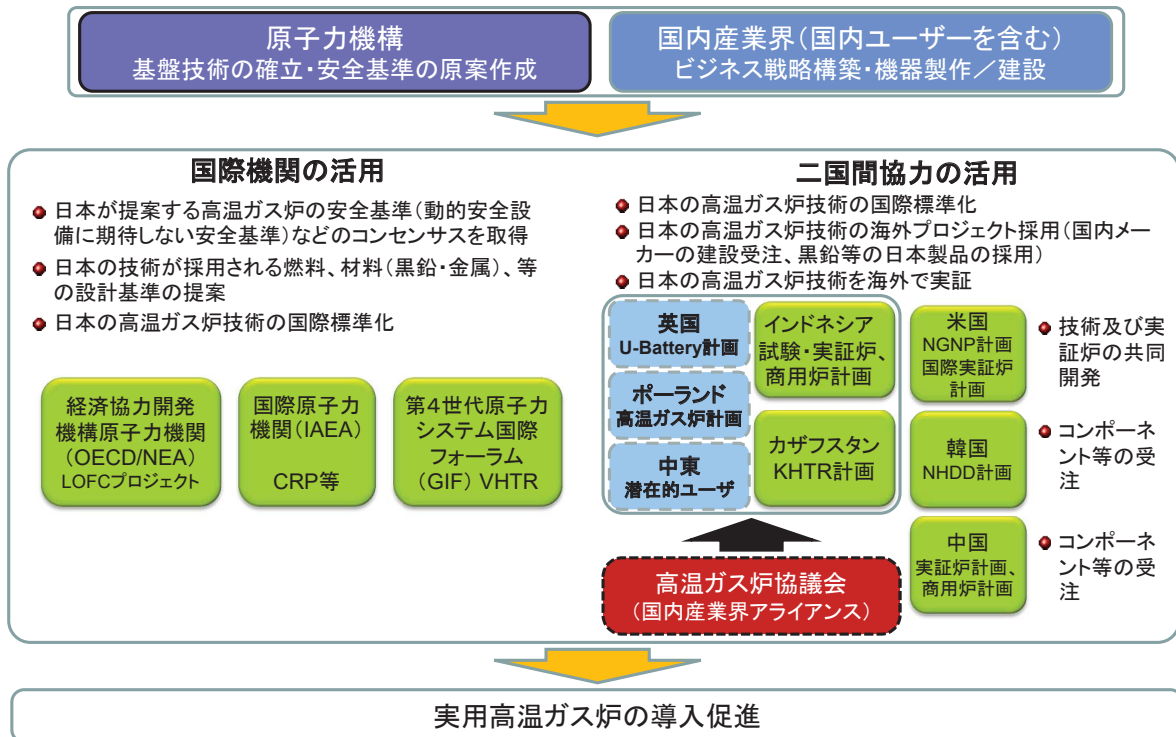


耐酸化性や機械強度の高い黒鉛被覆材の開発

*1 原子力機構の原子力エネルギー基盤連携センター *2 ISTC:国際科学技術センター

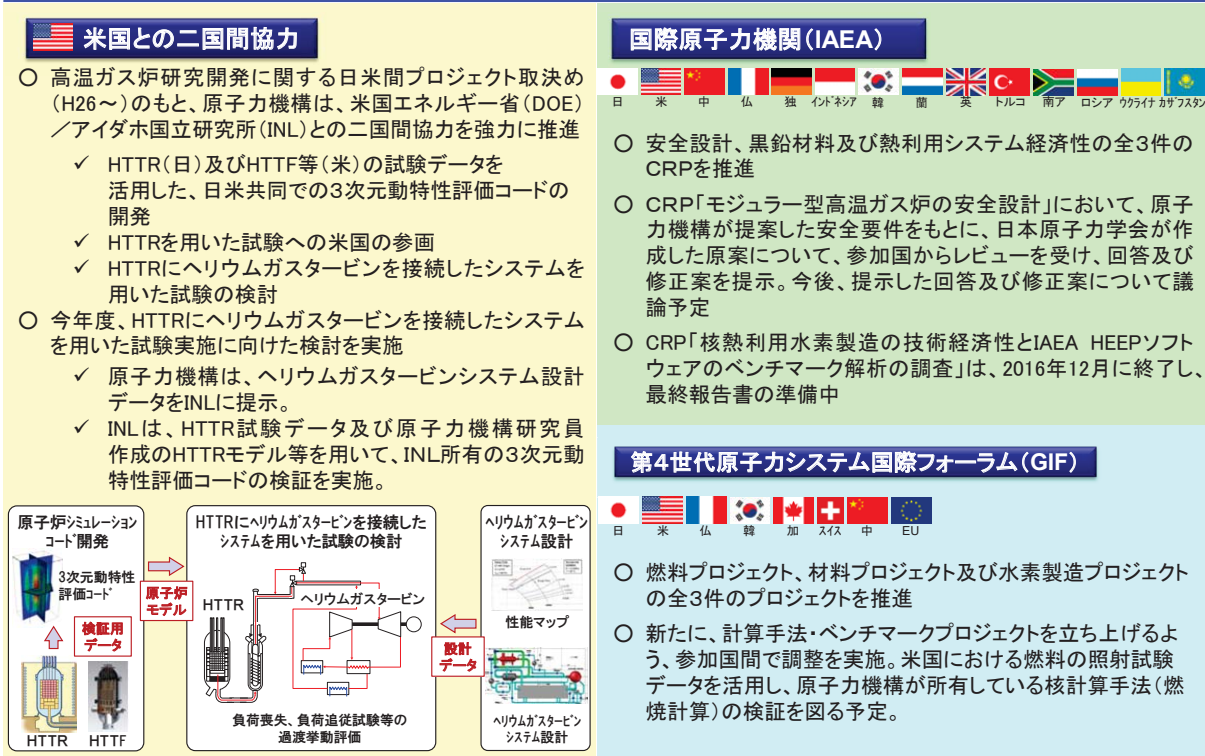
1-3 高温ガス炉技術の国際展開の考え方

46



1-3 国際協力 (平成28年度)

47





1-3 黒鉛材料の照射特性、酸化特性(国際協力)

48

目的

耐酸化性を向上させた黒鉛材料(耐酸化黒鉛)の照射特性及び酸化試験後の表面観察、成分分析等による特性データの取得

平成28年度の成果

○カザフスタン核物理研究所WWR-K炉を用いた耐酸化黒鉛の照射試験、キャプセル解体、試験片の寸法、重量、表面観察、炉外酸化試験を完了。試験片の日本への輸送に向けた手続きを開始。(ISTCパートナープロジェクト)

照射済試料を用いて1200°C、He+20%O₂雰囲気での酸化試験を実施。

- わずかな重量増加を確認
- 表面のSiC被覆層は中性子照射、酸化試験を通して健全

○アルファラビカザフ国立大学において、未照射耐酸化黒鉛の水蒸気による酸化試験(カザフスタン教育科学省出資)を継続

※ 耐酸化黒鉛試験片は、原子力機構と黒鉛メーカ(東洋炭素、イビデン、東海カーボン、新日本テクノカーボン)との個別の共同研究により各メーカが準備

平成29年度の計画

耐酸化黒鉛の酸化特性データ及び照射特性データ取得

○カザフスタン核物理研究所:照射済耐酸化黒鉛の日本への輸送を完了(ISTCパートナープロジェクト)

○アルファラビカザフ国立大学:耐酸化黒鉛の水蒸気酸化による酸化特性データ取得を継続



1-3 高燃焼度対応燃料に関する研究(国際協力)

49

目的

国産かつ商用規模の高温ガス炉燃料技術を基に製造した燃料について、照射済み(100GWd/t)の燃料の特性データを取得(ISTCレギュラープロジェクト)

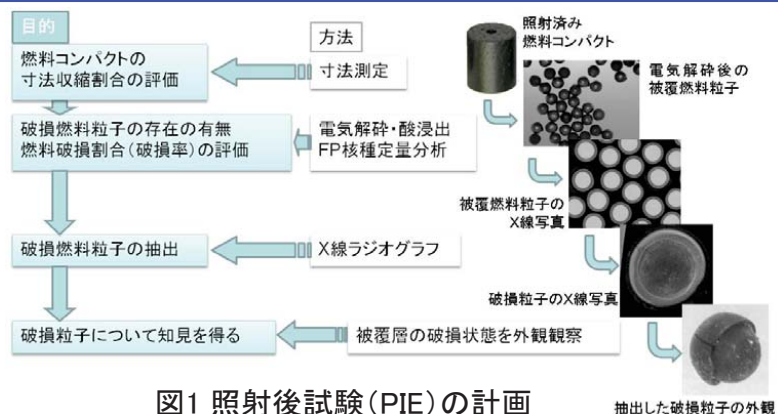


図1 照射後試験(PIE)の計画

平成28年度の成果

照射済燃料の照射後試験(PIE)プロジェクトが、新規ISTCレギュラープロジェクトとして、H27年度に採択(文部科学省出資)されたが、ISTC側の事情で契約が未締結のため、実質的な進展は無い。

次年度以降の計画

○平成29年度:照射キャプセルから照射済燃料試料を取出すための取扱い設備の整備、PIE装置の設計・製作

○平成30年度:PIEにより照射特性データを取得

1-3 優先的に取組む国際協力(平成29年度)

50

 米国:エネルギー省(DOE)

- HTTR及び米国エネルギー省／アイダホ国立研究所のコード・施設を相互利用し、高温ガス炉ガスタービンシステム設計等の協力
 - HTTR-GT接続試験を見据え、ガスタービン等の設計研究を行う。
- 国際実証炉計画への参加検討

国際原子力機関(IAEA)

ガス冷却炉技術ワーキンググループ(TWGGCR)

- 高温ガス炉の安全基準 (CRP)
 - HTTR試験データに基づく安全基準を、日本がイニシアチブを持って作成し、国際標準化を図る。

高温ガス炉の潜在的ユーザ国

- 高温ガス炉開発を国家計画に位置付けている国、または高温ガス炉開発を潜在的に有している国に対して、日本の高温ガス炉技術の海外実証を踏まえ、技術協力の可能性を探る。
 - 英国U-Battery計画、ポーランド高温ガス炉計画、中東の海水淡水化ニーズに対する高温ガス炉利用、インドネシア高温ガス炉実験・実証炉計画への日本技術の採用に向けた枠組みの探索



51

平成28年度研究実績の評価

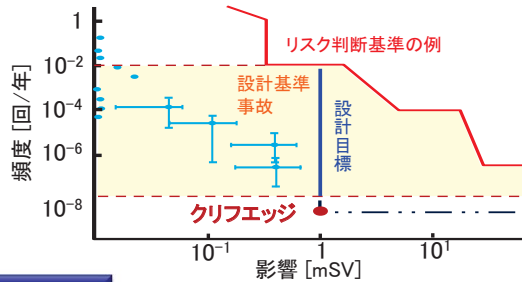
4-5 その他の成果

公募事業等



研究の目的

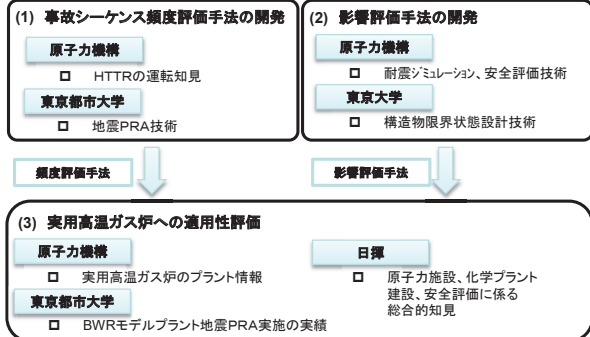
燃料溶融が想定し得ず、溶融燃料の格納系への影響がない高温ガス炉の安全上の特長を考慮した確率論的安全評価手法を開発し、高温ガス炉におけるクリフエッジの所在を特定する。



年次計画

研究開発項目	H27年度	H28年度	H29年度
(1)事故シーケンス頻度評価手法開発 (原子力機構) (再委託: 東京都市大学)	機器リスト作成 事故シーケンス分類手法検討	HTTR運転保守データ収集・分析 システム信頼性解析コード改良	
(2)影響評価手法の開発 (原子力機構) (再委託: 東京大学)	地震応答解析モデル整備、影響支配因子検討 損傷形態検討	地震応答解析、損傷形態モデル整備 フラジリティ試算	地震応答解析 不確実因子分析
(3)実用高温ガス炉への適用性評価 (原子力機構) (再委託: 東京都市大学) (再委託: 日揮)	評価手法選定、環境整備 代表事故イベントツリー設定 評価項目、評価方法設定	代表事故シーケンスソースタム試算 システム信頼性試算	ソースタム解析 システム信頼性解析 適用性評価

研究体制



HTTR運転経験の収集・分析

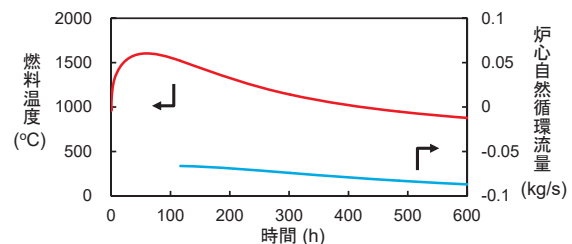
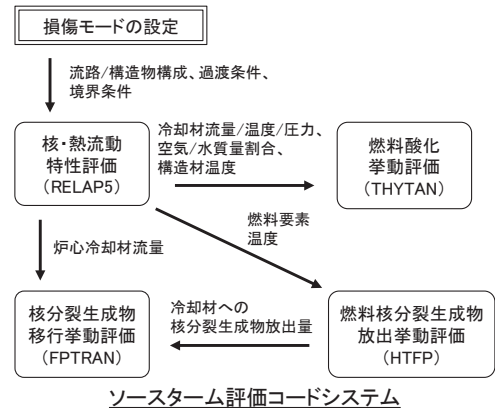
- HTTR運転経験の収集対象とする機器として、中性子検出器、制御棒系及び後備停止系を選定。
- 分析対象機器の機器バウンダリを設定するとともに、PRA用パラメータ推定必要情報の調査を完了。

ソースタム評価手法の開発

- 公衆被ばくリスク上の重要因子を同定し、これら因子と建屋、黒鉛構造物の損傷形態の相関関係のモデル化を完了。
- HTTR安全評価解析コードをベースとして、ソースタム評価システムを構築。

実用高温ガス炉への適用性評価

- 二重管両端破断及びピストンパイプ破損を起因事象に緩和設備の機能喪失が重畳する事象を代表事故シーケンスに選定。
- モデルプラントにおける代表事故シーケンスの核熱流動特性評価を完了。燃料酸化挙動、炉心核分裂生成物放出挙動及び核分裂生成物移行挙動評価を実施中。

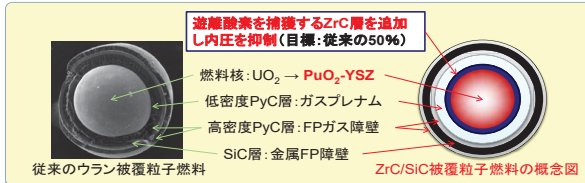


二重管両端破断及びピストンパイプ破損時の
燃料最高温度及び炉心自然循環流量挙動



研究の目的

プルトニウム燃焼高温ガス炉の安全性向上を目的として、核拡散抵抗性に優れたYSZ母材と内圧上昇を抑制するZrC被覆を採用した燃料の研究開発、核熱設計、安全評価、原子炉システム成立性評価を行う。



年次計画

研究開発項目	H26年度	H27年度	H28年度	H29年度
①燃料の成立性評価と炉心核熱設計 (原子力機構)	燃料内圧破損コード整備 核熱特性解析コード整備	YSZに特徴的な燃料内圧破損挙動の解析評価 核熱特性解析	燃料設計仕様決定 システム評価	
②安全評価(富士電機)	崩壊熱の検討	温度挙動解析手法整備と予備解析	炉心動特性解析手法整備と予備解析	安全解析
③セキュリティと安全性 (東京大学)	セキュリティ分析とデータベース	シナリオ分析と評価	シビアアクシデント	とりまとめ 定量評価
④模擬燃料の試作と製造の検討 (原子燃料工業・原子力機構)	試験準備 予備試験	粒子製造試験 粒子被覆予備試験 検査物性測定検討	粒子製造試験 粒子被覆試験 検査物性測定	粒子被覆試験 模擬燃料コンパクト製造試験 検査物性測定
	ZrC被覆試験装置の整備	ZrC被覆試験及び特性評価		

研究体制

(3) セキュリティと安全の定量的な評価

東京大学 □ リスク評価技術

試作した燃料の成立性や核拡散抵抗性等を定量的に評価

プルトニウム燃焼高温ガス炉のリスクと安全性を定量的に評価

(1) 燃料成立性評価と炉心核熱設計
(4) 模擬燃料の試作と製造の検討

原子力機構 (再委託)

□ 炉心核熱設計技術
□ YSZ燃料製造・ZrC被覆技術

原子燃料工業 (再委託)

□ 世界最高品質のHTTR燃料製造技術

(2) プルトニウム燃焼高温ガス炉の安全評価

富士電機 (再委託)

□ HTTR安全評価・設計技術



燃料成立性評価

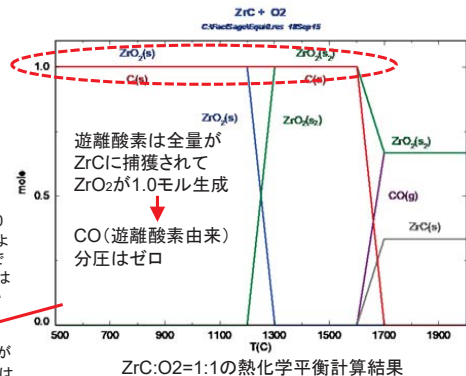
- Pu燃焼高温ガス炉燃料の成立性の予備評価を実施
- 500GWd/tの高燃焼度でも内圧破損を起こさないことからPu燃焼高温ガス炉燃料の内圧破損に対する成立性に目処を得た

取出し燃焼度での内圧計算結果

項目	Pu燃焼高温ガス炉燃料	GTHT300燃料
取出し燃焼度	500 GWd/t	139 GWd/t
ZrC被覆	あり	なし
全内圧	57 MPa	60 MPa
CO分圧	0 MPa	42 MPa
FP分圧	57 MPa	18 MPa

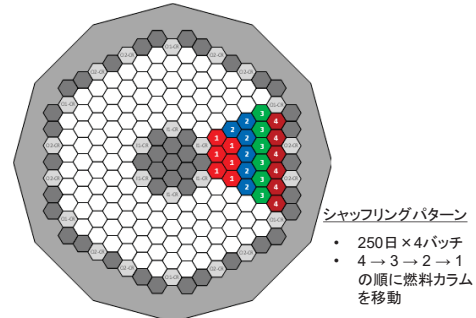
GTHT300の全内圧より低いので内圧破損は起こさない

ZrC被覆がない場合は220MPa



炉心核熱設計

- 径方向燃料シャッフリングを採用したPu燃焼高温ガス炉の核的成立性の予備評価を実施
- 反応度温度係数が負、炉停止余裕が確保できることからPu燃焼高温ガス炉の核的成立性に目処を得た
- 現在、詳細計算を実施中



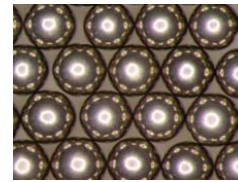


模擬燃料の試作と製造の検討

- 直径0.7mmの粒子(YSZ粒子)への、臭化物ZrC化学蒸着法にもとづくZrC被覆試験を実施し、平均厚さ約18～21μmのZrC層の被覆に成功
- 粒子流動試験により、従来のシングルノズル流動床では小径粒子への被覆が困難(安定な流動状態が得られない)なことが判明 → マルチノズル流動床を設計・製作
- 現在、マルチノズル流動床を用いた流動試験を実施し、小径粒子への被覆に最適な操作条件(ガス流量など)を検討中
- 今後、小径粒子へのZrC被覆試験を実施(H29.2～)

平成29年度の計画

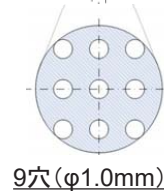
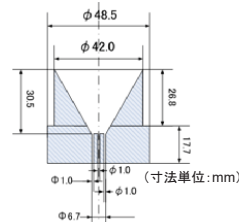
- Pu燃焼高温ガス炉の被覆燃料粒子の仕様を決定
- Pu燃焼高温ガス炉の炉心仕様を決定
- Pu燃焼高温ガス炉の導入シナリオを策定
- 直径0.3mm～0.5mmへのCeO₂-YSZ模擬燃料核(原燃工製)への、臭化物ZrC化学蒸着法にもとづくZrC被覆試験を実施



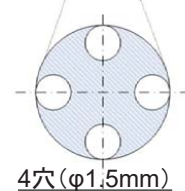
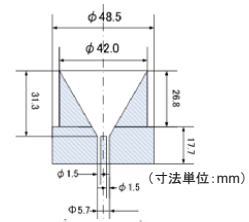
ZrC被覆粒子の外観



ZrC被覆粒子の断面



9穴(φ1.0mm)



4穴(φ1.5mm)

マルチノズル流動床



平成29年度の研究計画(案)



国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画 (中長期計画)

60

(平成27年4月1日～平成34年3月31日)

認可:平成27年4月1日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

II. 研究開発の成果の最大化その他の業務の質の向上に関する目標を達成するためとすべき措置

4. 原子力の基礎基盤研究と人材育成

(2) 高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発

エネルギー基本計画を受けて、発電、水素製造など多様な産業利用が見込まれ、高い安全性を有する高温ガス炉の実用化に資する研究開発を通じて、原子力利用の更なる多様化・高度化に貢献するため、目標や開発期間を明らかにし、国の方針を踏まえ以下に示す高温ガス炉の安全性の確証、固有の技術の確立、並びに熱利用系の接続に関する技術の確立に資する研究開発や国際協力を優先的に実施する。

高温工学試験研究炉(HTR)について、安全の確保を最優先とした上で再稼働するまでの間における維持管理費の削減に努め、新規規制基準への適合性確認を受けて速やかに再稼働を果たす。

高温ガス炉の安全性の確証及び固有の技術の確立については、炉心冷却喪失試験、熱負荷変動試験等の異常時を模擬した試験を実施し、高温ガス炉の固有の安全性を検証する。また、HTRを用いて運転データを取得し、国際協力の下、実用高温ガス炉システムの安全基準の整備を進めるとともに、将来の実用化に向けた高燃焼度化・高出力密度化のための燃料要素開発を進める。

熱利用系の接続に関する技術の確立については、HTRと熱利用施設を接続して総合性能を検証するためのHTR-熱利用試験施設のシステム設計、安全評価等を進める。なお、当該施設の建設段階に進むに当たり、平成28年度を目安に、研究開発の進捗状況について、外部委員会の評価を受け、その建設に向けての判断を得る。

これらの取組に加えて、水の熱分解による革新的水素製造技術(熱化学法ISプロセス)については、耐食性を有する工業材料製の連続水素製造試験装置による運転制御技術及び信頼性等を目標期間半ばを目途に確証し、セラミックス製機器の高圧運転に必要なセラミックス構造体の強度評価法を作成することにより、工学的な研究開発を完了する。これに加えて、経済性の観点も踏まえつつ将来の実用化や技術の民間移転等に向けた研究目標を早期に明確化し、これらの成果を取りまとめて、水素社会の実現に貢献する。

また、ガスタービン高効率発電システムにおける核分裂生成物の沈着低減技術等の要素技術開発を完了する。

さらに、HTRを人材育成の場として活用し、国内外の研究者等に高温ガス炉の安全性に関する知識を習得させ、高温ガス炉に関する優秀な人材を育成し、技術の継承を図る。

実施に当たっては、国の方針等に基づき、産学官と協議して、具体的な実用化像、高温ガス炉及び熱利用技術の将来的な実用化に向けた課題や得られる成果、実用化の可能性、研究開発の方向性、産業界との協力、産業界への技術移転の項目及び時期等を明確にしつつ研究開発や国際協力を進める。



平成29年度の業務運営に関する計画(年度計画)

61

平成28年度の年度計画

1) 高温ガス炉技術研究開発

高温工学試験研究炉(HTR)については、安全の確保を最優先とした上で再稼働するまでの間における維持管理経費の削減に努め、速やかな再稼働に向けて新規規制基準への適合性確認対応を進め、設置変更許可の取得を目指す。実用高温ガス炉システムの安全基準の整備に向けて、安全指針の原案として、安全要件を達成するために炉心及び燃料の安全設計において評価すべき設計事項を定める。また、高温ガス炉燃料の高出力密度化に向けて、充填率を向上させた燃料要素の性能評価を実施し、製作性を確認する。さらに、HTRに接続する熱利用システムの機器仕様を定めるとともに、HTR熱利用システムに係る安全評価を実施する。

2) 熱利用技術研究開発

熱化学水素製造法であるISプロセスについて、連続水素製造試験装置を用いて定常かつ安定な水素製造を達成する。また、プラント運転制御特性データを取得することにより、ヨウ化水素溶液の状態変化を明らかにして、長期間安定な運転を可能とするヨウ化水素溶液移送技術を開発する。ISプロセスに用いるセラミックス製機器の構造体の強度評価法作成に向けて、セラミックス試験片を製作し、強度データを取得する。また、実用水素製造システムの経済性評価を行い、産業界へ技術移転を行う上での研究目標を明確化する。

ガスタービンへの核分裂生成物の沈着低減技術について、翼候補合金と核分裂生成物同位体の拡散試験及びシミュレーションを実施し、化学組成と拡散挙動の相関を評価する。

3) 人材育成

HTRを活用した人材育成として、HTRに研究者等を受け入れ、HTRの燃焼解析等を実施し、高温ガス炉に関する知識を習得させる。

4) 産業界等との連携

国や産業界等との協議を継続し、高温ガス炉の意義、位置付け、高温ガス炉の研究開発ロードマップなどについて検討を進めるとともに、HTR熱利用試験施設の建設に向けた検討結果について、外部専門家で構成される委員会にて評価を受ける。また、国際協力及び国際展開を着実に進める。

平成29年度の年度計画

1) 高温ガス炉技術研究開発

高温工学試験研究炉(HTR)については、安全の確保を最優先とした上で再稼働するまでの間における維持管理経費の削減に努め、速やかな再稼働に向けて新規規制基準への適合性確認対応を進め、設置変更許可取得及び設工認申請を目指す。

また、実用高温ガス炉システムの安全基準の整備に向けて、安全指針の原案として、安全要件を達成するために原子炉冷却設備及び格納施設の安全設計において評価すべき設計事項を定める。

また、高温ガス炉燃料について、更なる高充填率化による燃料要素の性能向上を図るとともに、被覆粒子のFP保持能力に関する解析評価手法の開発を行う。

ヘリウムガスタービン軸封システムの基本設計を行うとともに、性能確認に向けた要素試験計画を定める。

2) 熱利用技術研究開発

熱化学水素製造法であるISプロセス連続水素製造試験装置について、HI溶液等の漏えい対策を施し、反応器等の高度化を図るとともに、プロセス溶液濃度安定化のため水の蒸発量適正化技術を開発する。ISプロセス材料としてのセラミックス試験片の強度データにおける体積効果データを取得する。経済性向上に有効な研究課題として、ISプロセス硫酸分解器の最適化を図る技術等、民間企業の知見も取り入れながら技術概念を検討する。また、ガスタービンへの核分裂生成物の沈着低減技術について、長期拡散試験を行い、拡散試験結果に基づく候補合金を選定する。

3) 人材育成

HTRを活用した人材育成として、HTRに研究者等を受け入れ、HTRの燃焼解析等を実施し、高温ガス炉に関する知識を習得させる。

4) 産業界等との連携

国や産業界等との協議を継続し、高温ガス炉の意義、位置付け、高温ガス炉の研究開発ロードマップなどについて検討を進める。また、国際協力及び国際展開を着実に進める。



HTTR-熱利用試験施設の建設段階 へ進むに当たっての判断及び 第3期中長期計画の中間評価

平成29年1月19日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門
高温ガス炉水素・熱利用研究センター
高温工学試験研究炉部



目 次

1

HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに当たっての判断

- 1) HTTR-熱利用試験に向けた実施項目の進捗状況
- 2) 建設段階へ進むに当たっての判断について
- 3) HTTR再稼働の遅延による試験計画の見直し案

第3期中長期計画の中間評価

これまでの評価結果と今後の年度展開

- 1) 高温ガス炉技術の研究開発
- 2) 熱利用技術の研究開発
- 3) 人材育成及び産業界との連携等



HTTR-熱利用試験施設の建設段階へ進むに 当たっての判断



1) HTTR-熱利用試験に向けた実施項目の進捗状況

項目	内容(H27~H28)	当初目標	達成度
HTTRを用いた試験	新規制基準への適合性確認対応 HTTRを用いた熱利用系異常模擬試験のコールド試験の実施	H28年度中の再稼働 高温ガス炉の固有の安全性を検証する。	部分達成 : H30年度中の再稼働を目指す。 試験データでHTTRの冷却設備全体を含めた解析コードを検証し、高温ガス炉の固有の安全性を確認した。
熱利用系の接続に関する技術の確立	HTTRに接続する熱利用システムの全ての機器仕様を設定を完了 HTTR熱利用システムの安全評価を実施し、技術的成立性を確認	HTTR に接続する熱利用システムの機器仕様を定めるとともに、HTTR 熱利用システムに係る安全評価を実施する。	達成
ISプロセス技術開発	①連続水素製造(31h、20L/h) ②Hi濃縮器について、電流制御におけるヨウ素濃度変化データを取得、濃縮操作に伴うヨウ素析出温度の明確化 ③ヨウ化水素溶液ポンプ用軸封システム開発 ④強度データ(破壊応力とワイブル係数)取得完了見込	①連続水素製造試験装置によって定常かつ安定な水素製造の達成 ②プラントの運転制御特性データを取得することにより、ヨウ化水素溶液の状態変化挙動を明らかにする。 ③ヨウ化水素溶液移送技術開発 ④セラミックス試験片製作。強度データ取得	① 達成 : 年度計画は達成。今後、接続に向けて、長時間の安定性を確認する。 ② 達成 ③ 達成 ④ 達成見込



2) 建設段階へ進むに当たっての判断について

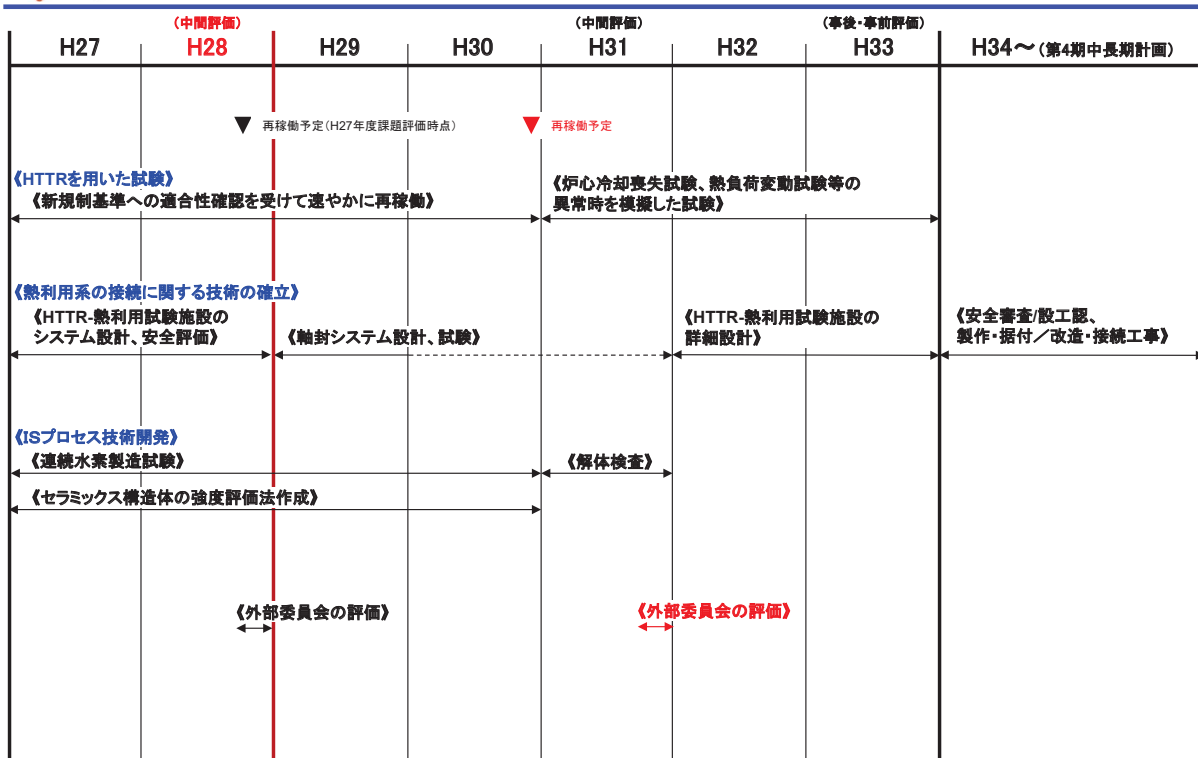
4

- HTTR-熱利用試験の建設段階に進むに当たり、研究開発の進捗状況を確認した結果、熱負荷変動試験等が、HTTR再稼働の遅延により、非核加熱による試験の実施に留まり、試験計画が先送りになったことが確認された。
- HTTRの再稼働が明確になった時点で、すなわちH31年度に予定されている中間評価において、再度研究開発の進捗状況を確認し、改めて建設段階へ進む可否を問うことを提案する。



3) HTTR再稼働の遅延による試験計画の見直し案

5





第3期中長期計画の中間評価

これまでの評価結果と今後の年度展開



1) 高温ガス炉技術の研究開発 1/2

第3期中長期計画

高温工学試験研究炉（HTTR）について、安全の確保を最優先とした上で再稼働するまでの間における維持管理費の削減に努め、**新規制基準への適合性確認を受けて速やかに再稼働を果たす。**

高温ガス炉の安全性の確証及び固有の技術の確立については、**炉心冷却喪失試験、熱負荷変動試験等の異常時を模擬した試験を実施し、高温ガス炉の固有の安全性を検証する。**また、HTTRを用いて運転データを取得し、国際協力の下、**実用高温ガス炉システムの安全基準の整備を進めるとともに、将来の実用化に向けた高燃焼度化・高出力密度化のための燃料要素開発を進める。**

H27 (総合評価B)	H28 中間評価	H29	H30	H31 中間評価	H32	H33 事後・事前評価	達成度、懸念事項等
《新規制基準への適合性確認を受けて速やかに再稼働》			《炉心冷却喪失試験、熱負荷変動試験等の異常時を模擬した試験》			《新規制基準対応》	
・適合性確認審査対応 ・起動用中性子源交換を完遂 ・HTTRを用いた熱利用系異常模擬試験（コールド試験）を実施 評価:B	・適合性確認審査対応 ・ガス循環機用ガスケット交換を完遂 ・HTTRを用いた崩壊熱評価の適用性確認試験（コールド試験）を実施 自己評価:B	・適合性確認審査及び ・設計認対応 ・再稼働を着実に実施するための安全確保対策 ・HTTRを用いたコールド試験による機能維持・運転員の技術能力の維持	・設計認審査対応 ・再稼働を着実に実施するための安全確保対策	・炉心冷却喪失試験、熱負荷変動試験等を実施	・安全性実証試験、熱負荷変動試験等を実施	・安全性実証試験、熱負荷変動試験等を実施	・《新規制基準対応》 自己評価:B ・達成見込: 基準地震動以外の審査が終了した。HTTRを用いたコールド試験を実施し、運転員の技術能力の維持向上を図りつつ、高温ガス炉の熱負荷変動に対する固有の安全性を把握した。
《実用高温ガス炉システムの安全基準の整備》			・IAEA CRPIにおいて、安全要件の国際標準案を策定	・安全要件の適用性評価（通常運転時）	・安全要件の適用性評価（過渡変化時）	・安全要件の適用性評価（事故時）	《安全基準の整備》
・設計基準事象選定の基本的な考え方を提案 ・実用高温ガス炉の設計基準事象選定を完了 評価:B	・安全要件を達成するために炉心及び燃料の安全設計において評価すべき設計事項を設定 自己評価:A	・安全要件を達成するために原子炉炉冷却設備及び格納施設の安全設計において評価すべき設計事項を定める					自己評価:A ・達成: 設計基準事象の選定、炉心及び燃料の安全設計評価事項を設定した。
《高燃焼度化・高出力密度化のための燃料要素開発》							・海外データ等を活用した燃料要素の成立性評価
・高燃焼度SiC-TRISO燃料粒子の設計手法の妥当性を確認 ・オーバーコート法の改良、燃料要素の試作に成功 評価:A	・高燃焼度化・高出力密度化のため充填率を高めた燃料コンパクトを試作し、性能評価を完了 自己評価:A	・更なる高充填率化による燃料要素の性能向上 ・被覆粒子のFP保持能力に関する解析評価手法開発					



1) 高温ガス炉技術の研究開発 2/2

8

第3期中長期計画

熱利用系の接続に関する技術の確立については、HTTRと熱利用施設を接続して総合性能を検証するためのHTTR-熱利用試験施設のシステム設計、安全評価等を進める。なお、当該施設の建設段階に進むに当たり、平成28年度を目安に、研究開発の進捗状況について、外部委員会の評価を受け、その建設に向けての判断を得る。

H27(総合評価B)	H28 中間評価	H29	H30	H31 中間評価	H32	H33 事後・事前評価	達成度、懸案事項等
《HTTR-熱利用試験施設のシステム設計、安全評価》 ・実用高温ガス炉の運転制御方式確立に必要な試験を実施可能な全体系統構成及び熱物質収支を定めた。 ・実用高温ガス炉において建設コストを20%削減しつつ、HTTR熱利用システムの熱供給配管温度低下量を系統設計要求15°C以下に抑制可能な熱供給配管仕様を決定した。 評価:A 《外部委員会の評価》							
《軸封システム設計、試験》 ・実用高温ガス炉において目標冷却材漏えい量達成を見通せるヘリウムガスタービン軸封システムの概念を考案するとともにHTTR熱利用システム適用時の仕様を定めた。 ・実用高温ガス炉において大型化を実現可能及び建設コストを25%削減が見通せる水平型中間熱交換器(IHX)の構造概念を提案するとともにHTTR熱利用システム適用時の仕様を定めた。 ・安全評価により、実用高温ガス炉と同じ緩和設備や運転方法を適用した場合のHTTR熱利用システムの技術的成立性を確認 自己評価:S							
《軸封システム設計、試験》 ・基本設計(構造、システム) ・要素試験装置の設計							
《要素試験装置の製作》 ・要素試験装置の製作							
《要素試験(性能確認、耐久、軸振動影響確認、タービントリップ模擬等)》 ・要素試験(性能確認、耐久、軸振動影響確認、タービントリップ模擬等) ・総合評価 《外部委員会の評価》 ・建設段階に進むか技術的な判断を受ける							
注記:破線部分の計画については、予算を獲得できない場合は、H32以降に実施 《HTTR-熱利用試験施設の詳細設計》 ・基本設計(構造、制御システム) ・安全設計 ・詳細設計 ・配置設計							
《HTTR-熱利用試験施設のシステム設計、安全評価》 自己評価:S 《システム設計》 ・達成:HTTRに接続する熱利用システムの全ての機器仕様の設定を完了 《安全評価》 ・達成見込み:HTTR熱利用システムの安全評価を完了した。							



懸案事項(高温ガス炉技術開発)

9

1. HTTR再稼働

- 基準地震動については、断層モデル等の変更が求められ、地震動が大きく増大したため、モデルのメッシュ変更等を検討中であり、基準地震動の策定期間は現状未定の状況である。
- 耐震補強工事が不要の場合、平成31年1月の再稼働となるが、その場合の基準地震動の策定期間は平成29年1月中と想定されていた。
- なお、耐震補強工事が必要となる場合にはさらに遅れる。

2. 燃料要素開発

JMTRにおける高燃焼度燃料要素の照射試験の実施が困難な状況となった。そのため、海外で取得された高燃焼度燃料要素データ等の活用と解析評価により、当初の目標を達成し、計画から前倒して燃料要素開発を完了する。次期中長期計画以降、実用高温ガス炉のスケジュールが明確化した時点で、実機燃料を用いた照射試験を実施する。



2) 熱利用技術の研究開発

10

第3期中長期計画

水の熱分解による革新的水素製造技術(熱化学法ISプロセス)については、耐食性を有する工業材料製の連続水素製造試験装置による運転制御技術及び信頼性等を目標期間半ばを目途に確証し、セラミックス製機器の高圧運転に必要なセラミックス構造体の強度評価法を作成することにより、工学的な研究開発を完了する。これに加えて、経済性の観点も踏まえつつ将来の実用化や技術の民間移転等に向けた研究目標を早期に明確化し、これらの成果を取りまとめて、水素社会の実現に貢献する。

また、ガスタービン高効率発電システムにおける核分裂生成物の沈着低減技術等の要素技術開発を完了する。

H27 (総合評価B)	H28 中間評価	H29	H30	H31 中間評価	H32	H33 事後・事前評価	達成度、懸念事項等
《連続水素製造試験装置による運転制御技術及び信頼性等の確証》							
・反応器の処理速度を調整するための物質収支データを取得 ・処理速度調整方法の確証を完了し、工程統合試験へ移行 評価:B	・連続水素製造31h達成(20NL/h) ・HI濃縮器について、電流制御における I_2 濃度データ取得。 I_2 析出温度の明確化 ・HI溶液ポンプ用軸封システム開発 自己評価:B	・プロセス溶液濃度安定化のため循環する水の蒸発量適正化技術の開発 ・HI溶液の漏えい対策 ・連続水素製造試験	・起動停止などプラント運転手順の確立 ・運転安定性確証	・設備の解体・検査 ・腐食、劣化等データ取得			《連続水素製造試験装置による運転制御技術及び信頼性等の確証》 自己評価:B ・達成: 連続水素製造31hを達成。ヨウ化水素溶液用ポンプ用軸封システムを開発。 《セラミックス構造体の強度評価法の作成》 自己評価:B ・達成見込み: セラミックス構造体の強度データ取得試験装置整備完了。強度データ取得見込み。 《将来の実用化や技術の民間移転等に向けた研究目標の明確化》 自己評価:A ・達成: 競争力のある水素製造を示し、さらにコスト削減につながる研究課題を提示。 《核分裂生成物の沈着低減技術等の要素技術開発》 自己評価:A ・達成: FP拡散に寄与する粒内化合物を見出した。
《セラミックス構造体の強度評価法の作成》							
・試験方法を選定し、破壊試験の準備完了 評価:B	・強度データ(破壊応力とワイプル係数)の取得 自己評価:B	・強度データにおける体積効果データの取得	・セラミック構造体の強度評価法作成				
《将来の実用化や技術の民間移転等に向けた研究目標の明確化》							
・約10%効率改善した実用システム概念を提案 評価:B	・水素製造コスト25円/Nm ³ に対し、研究目標を明確化 自己評価:A	・研究目標について民間知見も取り入れ、技術概念検討	・研究目標達成に必要な技術の具体化	・技術開発時期の明確化、実用化・民間移転の道筋取りまとめ			
《核分裂生成物の沈着低減技術等の要素技術開発》							
・拡散試験を実施(2,000h) ・結晶構造と拡散挙動のデータ取得 評価:B	・拡散試験結果の解析・シミュレーション ・化学組成と拡散挙動データ取得 自己評価:A	・長期拡散試験の実施及び解析 ・粒界拡散シミュレーション	・長期拡散試験の実施・解析 ・FP沈着低減材料の選定	・選定材料によるガスタービンブレードの設計			



3) 人材育成及び産業界との連携等

11

第3期中長期計画

さらに、HTTRを人材育成の場として活用し、国内外の研究者等に高温ガス炉の安全性に関する知識を習得させ、高温ガス炉に関する優秀な人材を育成し、技術の継承を図る。

実施に当たっては、国の方針等に基づき、産学官と協議して、具体的な実用化像、高温ガス炉及び熱利用技術の将来的な実用化に向けた課題や得られる成果、実用化の可能性、研究開発の方向性、産業界との協力、産業界への技術移転の項目及び時期等を明確にしつつ研究開発や国際協力を進める。

H27 (総合評価B)	H28 中間評価	H29	H30	H31 中間評価	H32	H33 事後・事前評価	達成度、懸念事項等
《HTTRを活用した人材育成》							
・特別研究生1名、夏期実習生4名を受け入れた。 ・海外若手研究者15名、国内学生2名に対して高温ガス炉の基盤技術に関する講義を行った。 評価:B	・学生実習生1名、夏期実習生10名を受け入れた。 自己評価:A	・学生等を受け入れ、研究開発現場における実習を通じて、高温ガス炉研究者の裾野拡大に努める。	・学生等を受け入れ、研究開発現場における実習を通じて、高温ガス炉研究者の裾野拡大に努める。	・学生等を受け入れ、研究開発現場における実習を通じて、高温ガス炉研究者の裾野拡大に努める。	・学生等を受け入れ、研究開発現場における実習を通じて、高温ガス炉研究者の裾野拡大に努める。	・学生等を受け入れ、研究開発現場における実習を通じて、高温ガス炉研究者の裾野拡大に努める。	《人材育成》 自己評価:A ・達成: 多数の学生を受け入れ、計画的に人材育成を実施した。
《産業界との連携及び国際協力》							
・高温ガス炉産学官協議会を設立し、会合を2回実施 評価:B	・高温ガス炉産学官協議会の会合を2回実施 自己評価:B	・協議会の定期的な開催 ・産業界と連携の継続	・協議会の定期的な開催 ・産業界と連携の継続	・協議会の定期的な開催 ・産業界と連携の継続 ・中間とりまとめ作成	・協議会の定期的な開催 ・産業界と連携の継続	・協議会の定期的な開催 ・産業界と連携の継続	《産業界との連携及び国際協力》 自己評価:B ・達成: 産学官協議会を定期的に開催し、産業界との連携を着実に進めた。 ・達成: 既存の国際協力を着実に進めるとともに、新たな国際協力の開始に向けた調整を的確に進めた。
・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進 ・英国等との新たな協力を調整	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進	・米国等との二国間協力、IAEA、GIFにおける多国間協力を活用し、研究開発を推進	



参 考 資 料

平成29年1月19日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門
高温ガス炉水素・熱利用研究センター
高温工学試験研究炉部



目 次

1

1. 成果の発信等
2. 国内の委員会
3. 共同研究
4. 国際協定／取決め等に基づく活動



1. 成果の発信等(1/2)

2

○ 成果の発信

	第2期中期計画期間の平均			平成27年度			平成28年度		
	査読付き論文	査読無し論文	報告書	査読付き論文	査読無し論文	報告書	査読付き論文	査読無し論文	報告書
高温ガス炉水素・熱利用研究センター	25	7	6	12	3	7	17	1	5
高温工学試験研究炉部	5	2	5	9	0	1	8	2	1
合計	30	9	11	21	3	8	25	3	6

○ 特許(28.4.1~28.12.31)

登録 0件
出願 2件

※特許登録実績
H27年度：0件 H26年度：3件

H28年度 特許出願 内訳
出願番号2016-170771 ヨウ化水素分解触媒及び水素製造方法
出願番号2016-179950 熱交換器

○ 外部資金の獲得

単位：百万円

	平成26年度	平成27年度	平成28年度
外部資金(受託)	72(6件)	95(4件)	93(4件)
外部資金(科研費)	2(1件)	4(2件)	3(2件)

平成28年度受託

・膜分離新ISプロセスの開発【SIP】(JST)
・高温ガス炉の安全性向上のための革新的燃料要素に関する研究(文科省)
・セキュリティ強化型安全燃料の成立性評価と炉心核熱設計、ZrC層被覆試験特性評価(東大)
・高温ガス炉の確率論的安全評価手法の開発(文科省)

平成28年度科研費

・核融合炉用トリチウム燃料供給源としての高温ガス炉の研究(学振)
・受動的安全性を持つ原子炉圧力容器の冷却設備(学振)



1. 成果の発信等(2/2)

3

○ プレス発表 (1件)

・プレス発表(平成28年3月18日): 工業材料で製作した熱化学法ISプロセス水素製造試験装置による水素製造に成功

○ 新聞等掲載 (3件)

水素プラント試運転に成功	平成28年3月21日	日本経済新聞
原子力機構 金属製装置で水素製造 高温ガス炉向け、実用化へ前進	平成28年3月24日	電気新聞
高温ガス炉の試験炉 再稼働計画提示	平成28年6月14日	毎日新聞、他

○ Web掲載 (1件)

アンナよもやま 荻野アンナ「水を使わない原子炉って……」	平成28年11月2日	読売プレミアム
------------------------------	------------	---------

○ テレビ (1件)

虎ノ門ニュース 8時入り!「元時事通信 解説委員長で現在フリーの政治評論家 加藤清隆氏がHTTRを紹介」	平成28年6月20日	CS放送チャンネルDHCシアター
--	------------	------------------

○ 取材 (1件)

高温ガス炉水素研究開発の現状	平成28年10月21日	毎日新聞
----------------	-------------	------



2. 国内の委員会(1/2)

4

委員会等の名称	構成	実施期間	概要
茨城県水素戦略会議 (茨城県)	委員長: 石田政義(筑波大学教授) 委員: トヨタ自動車、日産自動車、本田技研、新日鐵住金、日立製作所、パナソニック、岩谷産業、JX日鉱日石、東京ガス、日本エア・リキード、関彰商事、筑波大、茨城大、経産省関東産業経済局、環境研、産総研、原子力機構、自動車研 事務局: 茨城県	平成27年度～	水素エネルギーを活用した産業の振興及び県民生活の向上に資するため、水素エネルギーの普及に向けた機運の醸成及び茨城県の水素エネルギーに係る取り組みの指針となる戦略を策定した。この成果を受けて平成28年度にいばらき水素利用促進協議会が設立され、新産業の創生、広報などの活動を開始している。
「プリズマティック型高温ガス炉の安全設計プロセス」研究専門委員会(日本原子力学会)	主査: 植田伸幸(電中研) 幹事: (財)エネルギー総合工学研究所 委員: 東大、東工大、湘南工科大、京大、大林組、原燃工、東芝、東洋炭素、日立、富士電機、三菱重工、原子力機構	平成27年度～	発電及び水素製造等の熱利用に用いる実用高温ガス炉の安全基準の策定に向けて、性能水準要求を規定する安全指針を検討する。
スマート製鉄システム研究会 (日本鉄鋼協会)	主査: 加藤之貴(東京工業大学教授) 副主査: 埜上 洋(東北大学教授) 幹事: 阪大、早大、九大、JFEスチール、新日鐵住金、コベルコ科研 委員: 東大、京大、阪大、東工大、室蘭工業大、神戸製鋼所、日鉄住金テクノロジー、原子力機構他	平成27年3月～平成30年2月	炭素循環機能、スクラップ対応機能を備え生産弾力性を有した「物質リサイクル型の持続可能な製鉄システム」(SMART)の構築研究を行う。CO ₂ 電解セルの大量積化、SMART炉研究を進め、スマート製鉄システムとしての価値を検討する。
グリーンエネルギーフォーラム (日本鉄鋼協会)	座長: 粕谷悦章(京都大学准教授) 幹事: 新日鐵住金、JFEスチール、東工大、東北大、北大他 委員: 神戸製鋼、原子力機構、東北大、東大、阪大、九大他	平成24年度～	高温ガス炉等を用いた水素還元製鉄プロセスにおける要素技術、システムに関する検討を行う。



2. 国内の委員会(2/2)

5

委員会等の名称	構成	実施期間	概要
高温ガス炉プラント研究会 (産業界の有志)	会長: 岡本孝司(東京大学教授) 会員: 東芝、三菱重工、富士電機、原燃工、大林組 オブザーバー: 原子力機構等、原電 事務局: (財)エネルギー総合工学研究所	平成12年度～	高温ガス炉プラントの実用化に関する技術調査・研究・評価(経済性、市場性、開発戦略等を含む)を行う。



3. 共同研究

6

平成28年12月現在

No.	テーマ	相手方	実施期間
1	耐酸化性を向上させた黒鉛の研究開発	東海カーボン(株)	H25.3.15～H29.3.31
2	耐酸化性を向上させた黒鉛の研究開発	イビデン(株)	H25.3.15～H29.3.31
3	耐酸化性を向上させた黒鉛の研究開発	新日本テクノカーボン(株)	H25.3.15～H29.3.31
4	耐酸化性を向上させた黒鉛の研究開発	東洋炭素(株)	H25.3.15～H29.3.31
5	高温ガス炉用黒鉛の照射効果に関する研究(その2)	東海カーボン(株)	H27.4.1～H30.3.31
6	高温ガス炉用黒鉛の照射効果に関する研究(その2)	イビデン(株)	H27.4.1～H30.3.31
7	高温ガス炉用黒鉛の照射効果に関する研究(その2)	新日本テクノカーボン(株)	H27.4.1～H30.3.31
8	実用高温ガス炉の基盤要素技術に関する研究(その3)	三菱重工(株)	H27.4.1～H28.3.31
9	原子炉用黒鉛・炭素材料の高温・重照射挙動解明に係る研究(その4)	東洋炭素(株)	H27.7.1～H29.3.31
10	高温ガス炉燃料要素の酸化挙動に関する研究	熊本大学	H27.10.1～H29.3.31
11	高温ガス炉冷却能力向上のための直接数値シミュレーション(DNS)による乱流遷移に関する研究	東京理科大学	H27.11.6～H30.3.31
12	受動的安全性を持つ炉容器冷却設備の検討(その2)	九州大学	H28.4.1～H30.3.31
13	高温ガス炉の核不拡散性及び安全性の定量化に関する研究	東京工業大学	H28.4.1～H30.3.31
14	熱化学水素製造法ISプロセス用ヨウ化水素濃縮器用イオン交換膜の開発	量子科学技術研究開発機構	H28.4.1～H30.3.31
15	ISプロセス環境における耐食合金開発に関する研究	新日鐵住金(株)	H28.10.1～H31.3.31



4. 国際協定／取決め等に基づく活動(1/3)

7

機関／国等	協定／取決め等の名称	相手方	実施期間	実施内容	担当
IAEA	CRP「原子炉級黒鉛の照射クリープ挙動理解の向上」	国際原子力機関(IAEA)	2009.11.6～2017.12.31	高温ガス炉用黒鉛の照射クリープに関する①メカニズムの理解、②必要な照射試験データの検討、③モデルの検討を行う。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター国際共同試験G
	CRP「モジュラー型高温ガス炉の安全設計」	国際原子力機関(IAEA)	2014.12.12～2017.12.11	モジュラー型高温ガス炉の安全設計基準に関する調査と提案を行う。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター安全設計G
	CRP「核熱利用水素製造の技術経済性及びIAEA HEEDソフトウェアのベンチマーク解析の調査」	国際原子力機関(IAEA)	2012.9.12～2016.12.31	様々な水素製造システム技術の評価、原子力を用いた水素製造技術の可能性及び経済性の評価、核熱水素製造におけるIAEA参加国間の連携に関する活動を行う。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター熱利用システム設計G
Generation-IV (GIF)	超高温ガス炉システムの国際研究開発のためのシステム取決め	米国エネルギー省、仏国原子力庁、スイスポールシェラー研究所、韓国原子力研究所、EURATOM欧州委員会共同研究センター	2006.11.30～2026.11.29	超高温ガス炉に対し、①材料の開発と基準化、②水素製造技術の開発と原子炉接続技術の開発、③被覆燃料粒子の仕様決定、基準化、性能向上、④超高温ガス炉に関する数値解析手法の開発と検証、⑤主冷却系機器に関する主要技術と実験施設の開発、⑥発電、熱利用及びコジェネレーションシステムに適した発電システムの主要機器の開発を進める。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター
	超高温ガス炉システムの国際研究開発に係る水素製造に関するプロジェクト取決め	米国エネルギー省、仏国原子力庁、カナダ天然資源省、韓国原子力研究所、EURATOM欧州委員会共同研究センター	2008.3.19～2018.3.18	国際協力により高温ガス炉による水素製造技術開発を促進する観点から、①ISプロセス、②他の熱化学プロセス、③原子炉接続技術の各分野において共同研究を進める。	高温ガス炉水素・熱利用研究センターISプロセス信頼性確認試験G



4. 国際協定／取決め等に基づく活動(2/3)

8

機関／国等	協定／取決め等の名称	相手方	実施期間	実施内容	担当
Generation-IV (GIF)	超高温ガス炉システムの国際研究開発に係る燃料・燃料サイクルに関するプロジェクト取決め	米国エネルギー省、仏国原子力庁、韓国原子力研究所、EURATOM欧州委員会共同研究センター、中国	2008.1.30～2018.1.29	超高温ガス炉燃料に関し、①照射試験、照射後試験、②燃料物性試験、③安全性試験、④新型燃料、⑤廃棄物処理の協力研究を進める。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター国際共同試験G
	超高温ガス炉システムの国際研究開発に係る材料に関するプロジェクト取決め	米国エネルギー省、仏国原子力庁、スイスポールシェラー研究所、韓国原子力研究所、EURATOM欧州委員会共同研究センター	2010.4.30～2020.4.29	超高温ガス炉材料に関し、①黒鉛、②金属材料、③複合材料の分野において、照射試験、材料挙動モデリング、材料データベース等の協力研究を進める。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター国際共同試験G
インドネシア	原子力の平和利用分野における取決め(2014.8付属書締結)	インドネシア原子力庁	2014.8.4～2017.5.24	当面は公開情報に基づく情報交換を行い、原子力庁の高温ガス炉(試験炉・実証炉)計画の進捗に応じて、概念検討等への協力を実施する。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター
米国	高温ガス炉研究開発に関する協力のためのプロジェクト取決め	米国エネルギー省	2014.6.12～2020.6.11	2014年から3年間、HTTR及びエネルギー省/アイダホ国立研究所のコード施設を相互に利用し、NGNP計画へ協力する。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター安全設計G
カザフスタン	原子力科学分野における研究開発協力のための実施取決め	カザフスタン共和国国立原子力センター	2009.2.2～2019.6.3	高温ガス炉技術、試験研究炉技術に関する情報交換を実施中。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター
カザフスタン	原子力科学分野における研究開発協力のための実施取決め	カザフスタン共和国核物理研究所	2013.9.1～2018.8.31	高温ガス炉技術、試験研究炉技術に関する情報交換を実施中。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター



4. 国際協定／取決め等に基づく活動(3/3)

9

機関／国等	協定／取決め等の名称	相手方	実施期間	実施内容	担当
カザフスタン	高温ガス炉の安全研究協力に関する取決め	カザフスタン原子力技術安全センター	2012.6.8～2018.6.7	高温ガス炉の安全研究に関する情報交換、研究協力を実施中。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター
カザフスタン	原子力エネルギー技術に係る研究協力に関する取決め	アルファラビカザフ国立大学	2012.12.4～2017.12.3	高温ガス炉技術、試験研究炉技術、人材育成に関する情報交換を実施中。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター
韓国	原子力の平和利用分野における研究協力のための取決め	韓国原子力研究所	1994.6.10～2018.9.3	本取決めの中で高温ガス炉及び水素製造技術に関する情報交換を実施中。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター国際共同試験G
中国	高温ガス炉技術情報交換協力に関する覚書	中国清華大学核能及び新能源技術研究院	1986.06.20～2020.06.19	高温ガス炉及び水素製造技術に関する情報交換を実施中。	高温ガス炉水素・熱利用研究センター国際共同試験G

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
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 ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	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) ともよばれる。

(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

組立量	SI 組立単位			
	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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	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	N		m kg s ⁻²
圧力, 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	C		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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	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
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	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 ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ 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コ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。

(c) 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。

(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e) セル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。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 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勧告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

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

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=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	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	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe Δ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 Δ 」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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

