



JAEA-Evaluation

2008-003

平成 20 年度 研究開発・評価報告書
評価課題「原子力基礎工学研究—高温ガス炉と
これによる水素製造技術の研究開発」
(中間評価)

Assessment Report of Research and Development Activities
Activity: "Nuclear Science and Engineering - Research and Development on
High-Temperature Gas Reactor and Hydrogen Manufacturing Technology
Incorporating Them" (Interim Report)

核熱応用工学ユニット
Nuclear Applied Heat Technology Division

原子力基礎工学研究部門
Nuclear Science and Engineering Directorate

March 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Evaluation

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

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

平成 20 年度 研究開発・評価報告書
評価課題「原子力基礎工学研究
—高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発」
(中間評価)

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門
核熱応用工学ユニット[#]

(2008 年 12 月 19 日受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という)は、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」(平成 17 年 3 月 29 日内閣総理大臣決定)及びこの大綱的指針を受けて作成された「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 17 年 9 月 26 日文部科学大臣決定)、並びに原子力機構の「研究開発課題評価実施規程」(平成 17 年 10 月 1 日制定、平成 18 年 1 月 1 日改訂)等に基づき、原子力基礎工学研究部門に関する中間評価を原子力基礎工学研究・評価委員会に諮問した。

原子力基礎工学研究・評価委員会に代わって、高温ガス炉システム研究委員会により、原子力機構における平成 17 年 10 月から平成 22 年 3 月まで(4 年半)の高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発に関する中期計画に対して、平成 17 年 10 月から約 2 年 9 ヶ月が過ぎた現時点で、中間評価が行われた。原子力機構 原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニットが提出した資料に基づき、評価が行われた。その後、評価結果は、「高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発に関する中間評価報告書」(以下、中間評価報告書)としてまとめられた。本評価結果は、原子力基礎工学研究・評価委員会にて審議・了承された。

本報告書では、高温ガス炉システム研究委員会の構成、審議概要、評価方法について記載し、同委員会より提出された「中間評価報告書」を 6 ページ以降に添付したものである。

[#]本報告書は、研究開発・評価委員会(原子力基礎工学研究・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うち、高温ガス炉システム研究委員会が代行して実施した外部評価の評価報告書を記載したものである。
日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニット(事務局)
大洗研究開発センター(駐在): 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

Assessment Report of Research and Development Activities

Activity: “Nuclear Science and Engineering -Research and Development on High-Temperature Gas Reactor and Hydrogen Manufacturing Technology Incorporating Them”
(Interim Report)

Nuclear Applied Heat Technology Division

Nuclear Science and Engineering Directorate[#]

Japan Atomic Energy Agency

Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 19, 2008)

Japan Atomic Energy Agency (hereinafter referred to as “JAEA”) consults an assessment committee, “Evaluation Committee of Research Activities for Nuclear Science and Engineering” (hereinafter referred to as “Evaluation Committee”) for interim assessment of “Nuclear Science and Engineering,” in accordance with “General Guideline for the Evaluation of Government Research and Development (R&D) Activities” by Cabinet Office, Government of Japan, “Guideline for Evaluation of R&D in Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology” and “Regulation on Conduct for Evaluation of R&D Activities” by JAEA.

An interim assessment of R&D activities in accordance with the midterm plan “R&D on High-Temperature Gas Reactor and Hydrogen Manufacturing Technology Incorporating Them” by JAEA during the period of two years and nine months from October 2005 was carried out by “Committee for Promoting R&D on High-Temperature Gas-Cooled Reactor System” (hereinafter referred to as “Committee”) for the Evaluation Committee. The assessment was carried out based on the explanatory documents submitted by Nuclear Applied Heat Technology Division, Nuclear Science and Engineering Directorate, JAEA. An interim assessment report “R&D on High-Temperature Gas Reactor and Hydrogen Manufacturing Technology Incorporating Them” was finalized by the Committee. The result of assessment was discussed and accepted by the Evaluation Committee.

Keywords: Midterm Goal, Midterm Plan, Interim Assessment, High-Temperature Gas Reactor, Hydrogen Manufacturing Technology

This evaluation report presents the results of third-party evaluation conducted by “Committee for Promoting R&D on High-Temperature Gas-Cooled Reactor System” for “Evaluation Committee of Research Activities for Nuclear Science and Engineering” based on “General Guideline for Evaluation of Government R&D Activities” by Japanese Cabinet Office, etc.

目 次

1. 概 要	-----	1
2. 高温ガス炉システム研究委員会の構成	-----	2
3. 審議概要	-----	2
4. 評価方法	-----	3
5. 評価結果(中間評価報告書)	-----	3

Contents

1. Outline	-----	1
2. Committee for Promoting R&D on High-Temperature Gas-Cooled Reactor System	-----	2
3. Status of assessment	-----	2
4. Procedure of assessment	-----	3
5. Results of assessment (Interim Assessment Report)	-----	3

This is a blank page.

1. 概 要

独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という)は、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」(平成17年3月29日内閣総理大臣決定)及びこの大綱的指針を受けて作成された「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17年9月26日文部科学大臣決定)、並びに原子力機構の「研究開発課題評価実施規程」(平成17年10月1日制定、平成18年1月1日改訂)等に基づき、原子力基礎工学研究部門に関する中間評価を原子力基礎工学研究・評価委員会に諮問した。

原子力基礎工学研究・評価委員会に代わって、高温ガス炉システム研究委員会により、原子力機構における平成17年10月から平成22年3月まで(4年半)の高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発に関する中期計画に対して、平成17年10月から約2年9ヶ月が過ぎた現時点で、中間評価が行われた。原子力機構 原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニットが提出した資料に基づき、評価が行われた。

この結果、原子力委員会の原子力政策大綱に基づき、文部科学省(文科省)、経済産業省(経産省)が平成17年10月に原子力機構に提示した中期目標を受け、原子力機構が作成した「高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発」に関する中期計画(平成17年10月から平成22年3月まで)に対して、原子力機構が定めた、高温ガス炉の技術基盤の確立を目指した研究開発、および、核熱による水素製造の技術開発に関する、具体的な課題は、技術的知見及び原子力機構で得られているこれまでの成果から妥当であると評価された。また、実施に当たっては、高温ガス炉システムの実用化像や実用化プロセスを考慮し、国内外の協力を効率的に進めつつ、外部資金の獲得に努めたことは、有意義と認められた。

これら中期計画を順調に進捗させ、着実に研究成果を上げており、平成20年6月末時点での目標達成度は高いと評価された。また、現時点でまだ目標を達成していない研究開発課題に関しても、技術的に達成が見込めると判断された。

本評価結果は、平成20年9月26日に、高温ガス炉システム研究委員会により、「高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発に関する中間評価報告書」(以下、中間評価報告書)としてまとめられた。本評価結果は、平成20年9月30日に実施された原子力基礎工学研究・評価委員会において審議され、了承された。

本報告書では、高温ガス炉システム研究委員会の構成、審議概要、評価方法について記載し、同委員会より提出された「中間評価報告書」を6ページ以降に添付したものである。

2. 高温ガス炉システム研究委員会の構成

高温ガス炉システム研究委員会は以下の 11 名により構成される。

委員長：岡 芳明	東京大学大学院 工学系研究科 原子力専攻 教授
委員：魚谷 正樹	(財)電力中央研究所 原子力技術研究所 副所長
西郷 正雄	(社)日本原子力産業協会 政策本部
坂田 興	(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長
澤田 隆	三菱重工業(株) 原子力技術センター 原子炉安全技術部 担当部長
塩沢 周策	日本原子力研究開発機構 特別研究員
数土 幸夫	(財)原子力安全技術センター 理事
田中 崇	東京ガス(株) 技術開発本部 技術戦略グループマネージャー
班目 春樹	東京大学大学院 工学系研究科 原子力専攻 教授
松井 恒雄	名古屋大学大学院 エコトピア科学研究所 所長 工学研究科 教授
八木 秀樹	東京電力(株) 原子力設備管理部 原子炉安全技術グループ 課長

(委員氏名は五十音順)

3. 審議概要

(1) 高温ガス炉システム研究委員会開催：平成 20 年 7 月 29 日

- 原子力機構 原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニットが提出した資料に基づき、評価が行われた。
- 委員会開催後、委員の意見が集約され、報告書案が作成された。

(2) 中間評価報告書のまとめ：平成 20 年 9 月 26 日

- 報告書案に対する委員全員のレビューが行われ、これらを踏まえて、本報告書が完成した。

(3) 原子力基礎工学研究・評価委員会での審議：平成 20 年 9 月 30 日

- 中間評価結果を原子力基礎工学研究・評価委員会にて審議・了承された。

4. 評価方法

中間評価の対象は、高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発分野であり、中期計画を以下の領域に分けて評価が行われた。

- (1) 高温ガス炉水素製造システムの設計に関する研究開発
- (2) 炉特性・安全性に関する研究開発
- (3) 燃料・材料に関する研究開発
- (4) 熱利用技術開発に関する研究開発
- (5) IS プロセス水素製造に関する技術開発

中間評価の対象期間は、平成 17 年 10 月から、平成 20 年 6 月末までとされた。

5. 評価結果(中間評価報告書)

高温ガス炉システム研究委員会報告書

「高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発に関する中間評価報告書」

This is a blank page.

高温ガス炉とこれによる水素製造技術の 研究開発に関する中間評価報告書

平成 20 年 9 月 26 日

高温ガス炉システム研究委員会

This is a blank page.

平成20年度 高温ガス炉システム研究委員会委員

	氏名	所属・職位
委員長	岡 芳明	東京大学大学院 工学系研究科 原子力専攻 教授
委員	魚谷 正樹	(財)電力中央研究所 原子力技術研究所 副所長
〃	西郷 正雄	(社)日本原子力産業協会 政策本部
〃	坂田 興	(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長
〃	澤田 隆	三菱重工業(株) 原子力技術センター 原子炉安全技術部 担当部長
〃	塩沢 周策	日本原子力研究開発機構 特別研究員
〃	数土 幸夫	(財)原子力安全技術センター 理事
〃	田中 崇	東京ガス(株) 技術開発本部 技術戦略グループマネージャー
〃	班目 春樹	東京大学大学院 工学系研究科 原子力専攻 教授
〃	松井 恒雄	名古屋大学大学院 エコトピア科学研究所 所長 工学研究科 教授
〃	八木 秀樹	東京電力(株) 原子力設備管理部 原子炉安全技術グループ 課長

(委員氏名は五十音順)

This is a blank page.

目 次

はじめに	11
総合所見	13
1. 中間評価	16
1.1 中間評価の方法	16
1.2 中間評価の対象	16
1.3 中間評価の対象期間	16
2. 中間評価対象の概要	16
2.1 研究開発計画	16
(1) 国の計画	17
(2) 中期目標及び中期計画	18
(3) 高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発計画	20
2.2 中間評価対象の概要	22
(1) 高温ガス炉水素製造システムの設計に関する研究開発	22
(2) 炉特性・安全性に関する研究開発	24
(3) 燃料・材料に関する研究開発	27
(4) 熱利用技術開発に関する研究開発	30
(5) IS プロセス水素製造に関する技術開発	33
3. 中間評価結果	36
3.1 目標達成度	36
(1) 高温ガス炉水素製造システムの設計に関する研究開発	37
(2) 炉特性・安全性に関する研究開発	37
(3) 燃料・材料に関する研究開発	38
(4) 熱利用技術開発に関する研究開発	39
(5) IS プロセス水素製造に関する技術開発	40
3.2 今後の進め方	41
3.3 その他の所見	41
参考文献	44

This is a blank page.

はじめに

高温ガス炉システム研究委員会は、日本原子力研究開発機構(原子力機構)と呼ぶ)における平成17年10月から平成22年3月まで(4年半)の高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発に関する中期計画に対して、平成17年10月から約2年9ヶ月が過ぎた現時点で、中間評価を行った。高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発について、研究開発等の実施経過、当初目標の達成度、平成22年3月末における当初目標の達成見込み度を、将来への研究開発の展開の観点から評価した。

原子力二法人統合により新設された原子力機構での事業開始に向け、旧日本原子力研究所の研究評価委員会の原子力エネルギー研究開発専門部会(岡専門部会長)は、平成17年に「原子力エネルギー研究開発専門部会 総括評価結果報告書」(JAERI-Review 2005-015 (2005))をまとめている。この報告書では、「原子力エネルギーを非電力分野に利用することは地球温暖化防止と、我が国のエネルギー安全保障のため必要である。そのために高温ガス炉システムの研究開発を行うとの目的意義は的確である。計画を進める上では、常に水素エネルギーの利用形態としてどのようなものが現実的であるかを検討し、その中で、高温ガス炉における水素製造の位置づけを明確にしつつ引き続き研究開発を進めることが重要である。今後、早急に水素製造への高温ガス炉適用の実用化像や実用化プロセスを明示し、その中での新法人の役割、目的とそれに基づく研究開発のマイルストーンを明確にすることが肝要である。」とまとめられている。なお、この報告書中で、設定されている主要な目標のうち、高温工学試験研究炉(HTR)試験及び熱化学水分解 IS プロセス法(IS プロセス)試験については、原子力機構設立時の予算の点から、以下に示すような変更がなされた、とされている。

- ・HTR 試験;「一次ヘリウムガス冷却材喪失等のさらに過酷な事象を模擬した試験、2次系除熱喪失試験」を平成22年以降に延期。
- ・IS プロセス試験;「IS パイロット試験として、…(中略)…実用条件での試験を水素製造能力 30m³/h 規模で行う。」に関し、IS パイロット試験に代わり、平成21年度までに「30m³/h 規模の水素製造技術の確証」と、平成22年以降の「高温反応機器・装置の信頼性の検証、及び、定常、過渡、異常時の制御性の検証」の遂行。

HTR 安全性試験に関して、革新的原子力システム技術開発公募事業のひとつとして、「高温ガス炉固有の安全性の定量的実証」が採択され、平成14年11月から平成19年3月まで受託研究が実施された。高温ガス炉安全性実証試験検討専門部会(班目部会長)⁽¹⁾は、「HTRの安全性実証試験は、高温ガス炉の固有の安全性を実証する観点から重要であり、平成19年度以降も継続して実施すべきである。」と評価した。また、革新的原子力システム技術開発において採択された課題に対する事後評価(岡委員長)⁽²⁾では、「高温ガス炉固有の安全性の定量的実証」に対して「各事業項目に関して貴重な研究成果が得られている。特に実機を用いて事故を模擬した安全性評価試験を行い、高温ガス炉固有の安全性を定量化した点が高く評価できる。」として、「想定通りの結果が得られ、今後期待

できる。」と評価した。

高温ガス炉システム研究委員会では、「高温ガス炉固有の安全性の定量的実証」のうち、中期計画に含まれる成果、目標達成度に関して、上記の評価結果を参考にした。

平成 20 年 7 月 29 日に高温ガス炉システム研究委員会を開催し、原子力機構 原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニットから提出された資料に基づき、評価を行った。委員会開催後、委員の意見を集約し、報告書案を作成した。その後、報告書案に対する委員全員のレビューを行い、これらを踏まえて、本報告書を完成させた。

本研究会による中間評価結果が、今後の高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発の更なる展開に役立てられることを切に願う。

本研究会の委員各位には、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 20 年 9 月 26 日
高温ガス炉システム研究委員会
委員長 岡 芳明

総合所見

原子力委員会の原子力政策大綱に基づき、文部科学省(文科省)、経済産業省(経産省)が平成17年10月に原子力機構に提示した中期目標を受け、原子力機構が作成した「高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発」に関する中期計画(平成17年10月から平成22年3月まで)において、

①高温ガス炉の技術基盤の確立を目指した研究開発分野では、

- i) HTTRにおいて、運転日数が50日以上的高温(950℃)連続運転を行い、高温ガス炉の実用化に必要なデータの蓄積を行う、
- ii) HTTRでの異常事象等を模擬した試験を行うことにより高い固有の安全性等、高温ガス炉の特性を実証する、
- iii) 特性評価手法の高度化を図る、
- iv) 燃料の高燃焼度化(約120GWd/tを目標)及び黒鉛構造物の長寿命化(約6年間を目標)及び耐熱セラミックス製構造物の開発を目指した研究開発を行う、

②核熱による水素製造の技術開発分野では、

- i) HTTR 接続 IS プロセス水素製造システム(HTTR-IS システム)における熱供給システムの設計を完了する、
- ii) IS プロセスによる水素製造システム(IS システム)による30m³/h規模の水素製造技術を確認する、
- iii) 熱利用に係わる高温隔離弁、タービン圧縮器等の要素技術開発を行う、

としている。

また、2008年原子力委員会は、原子力政策大綱において、高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発に関し長期的視野に立って決めるべき必要な取り組みについて、「原子力の革新的技術開発ロードマップ」報告書の中で、

・ ビジョン:

「原子力エネルギー供給技術が温室効果ガスを排出しない熱源として、海水脱塩、水素製造等における熱需要に応えていること。」

・ このビジョンを実現するための技術候補:

「原子力による革新的水素製造技術」

・ 取組の内容:

水素製造等の高温ガス炉を用いた熱供給システムの実用化を目指して、以下を行う。

1) 高温ガス炉高性能化技術

2) 水の熱分解による革新的水素製造技術

・ 研究開発の目標時期:

「当面、HTTR 等を活用して高温ガス炉及び原子炉熱を利用した水素製造技術を開発し、…(中略)…2020年頃に実用システムの原型を提示することを目指す。」

と記している。

加えて、2008年に総合科学技術会議の「革新的技術戦略」において、23の革新的技術のうちの一つとして、地球温暖化対策技術の国際競争力を強化するため、「水素製造エネルギーシステム」として高温ガス炉を用いたISプロセス水素製造技術が選ばれている。

これら国の計画に基づき、上記の中期計画に対して、

- ① i) :可燃性毒物の燃焼特性、1次ヘリウムガス冷却系中の水分濃度等の不純物制御特性、中間熱交換器、高温配管等の高温機器の熱流動特性、炉内構造物等の構造強度健全性等に関するデータを取得・評価し、高温ガス炉の実用化に必要なデータの蓄積、
- ① ii) :反応度印加、1次ヘリウムガス冷却材流量低下の異常事象を模擬したHTTR試験を行い、異常事象が生じたのち、原子炉出力が自然に低下して安定な状態になる固有の安全性の実証、
- ① iii) :動特性解析コードによる原子炉出力特性評価手法に関し、反応度印加、1次ヘリウムガス冷却材流量低下時の原子炉出力変化を3%以内の精度で再現し、特性評価手法の高度化、
- ① iv) :燃料高燃焼度化(約120GWd/tを目標)に向け、HTTR試験により希ガス放出率がこれまでの海外炉の値;約 10^{-7} 以下であることの確認、並びに、燃焼度確認のための照射試験の前段階として、改良燃料の試作(被覆層厚さを従来の約1.5倍)、黒鉛長寿命化(約6年間を目標)に向け、黒鉛の残留応力が基準値以下であることを示し、黒鉛構造物の長期利用を可能にするため、黒鉛の残留応力を測定する方法の開発及び黒鉛構造物の残留応力評価式の導出、解析コードによる照射条件下での耐熱セラミックス製制御棒被覆管の成立性の確認、
- ② i) :HTTR-ISシステムの基本構成、主要構成機器の構造概念、運転制御方法を決定し、HTTR-ISシステムにおける熱供給システムの設計の完了、
- ② ii) : (1) 実用材料を用いた装置技術を開発し、(2) 約40%の熱効率を見通せるヨウ化水素濃縮性能向上による効率向上に関する技術を開発し、(3) ブンゼン反応データ、蒸留データ、ガラスライニング適用可能範囲データ、 SO_3 分解触媒データ等の設計データを取得し、ISシステムによる $30\text{m}^3/\text{h}$ 規模の水素製造技術の確証、
- ② iii) :高温隔離弁では、弁座シート面の締め付け力が 35MPa で構造健全性を確保し、また、タービン圧縮器では、ガスタービンロータの磁気軸受の振動振幅を $75\mu\text{mp-p}$ 以下に抑制し、要素技術の開発、

を具体的な課題として定めたことは、技術的知見及び原子力機構で得られているこれまでの成果から妥当であると評価できる。また、実施に当たっては、高温ガス炉システムの実用化像や実用化プロセスを考慮し、国内外の協力を効率的に進めつつ、外部資金の獲得に努めたことは、有意義と認められる。

これら中期計画を順調に進捗させ、着実に研究成果を上げており、平成20年6月末時点

での目標達成度は高いと評価できる。また、現時点でまだ目標を達成していない研究開発課題に関しても、技術的に達成が見込めると判断できる。

今後、この分野において原子力機構が世界のリーダーシップを引き続き確保していくため、経費面の支援が望まれる。最初の高温ガス炉導入市場が外国である可能性を勘案し、米国、カザフスタン等の国外計画に積極的に注力すべきである。特に、商用高温ガス炉が世界でも建設・運転の経験がないこと、最初の商用高温ガス炉の導入が発展途上国になると予想されること、従来炉にはない高温ガス炉固有の安全上の特徴を活かした設計を行っていることを考慮すると、安全審査等規制のための技術提供、地域住民のための安全・安心方策を提供できることを計画的に準備しておくことが重要である。

また、HTTR が大きなトラブルなく良く動いていることを強調し、高温ガス炉技術がここまできていること、我が国の炭酸ガス排出量を削減するために高温ガス炉システムが有効であること等、常に情報を発信し、高温ガス炉実用化の意義を広く国内外に浸透させる必要がある。

研究計画については、高温ガス炉事業が長期にわたることから、事業実施中に環境変化や新規な達成目標が発生する可能性がある。そこで、課題の見直しや新たな課題の取り込みなど計画の見直しを可能とする枠組みを構築すること、次善の計画のみならず次々善の計画を用意しておくことなど、臨機応変にかつ柔軟な対応をとるべきであると考え。さらに今後は、実用化に向けて原子炉システムに関する研究開発だけではなく、現状の産官学連携の研究開発推進体制から、保守・補修、事故対応、防災システムなど名実ともに関連技術を網羅した実用化のための推進体制に移行することが望まれる。

1. 中間評価

1.1 中間評価の方法

表1に示す委員で構成される高温ガス炉システム研究委員会で中間評価を実施する。

表1 高温ガス炉システム研究委員会委員一覧表

委員長:岡 芳明	東京大学大学院 工学系研究科 原子力専攻 教授
委員 :魚谷 正樹	(財)電力中央研究所 原子力技術研究所 副所長
西郷 正雄	(社)日本原子力産業協会 政策本部
坂田 興	(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長
澤田 隆	三菱重工業(株) 原子力技術センター 原子炉安全技術部 担当部長
塩沢 周策	日本原子力研究開発機構 特別研究員
数土 幸夫	(財)原子力安全技術センター 理事
田中 崇	東京ガス(株) 技術開発本部 技術戦略グループマネージャー
班目 春樹	東京大学大学院 工学系研究科 原子力専攻 教授
松井 恒雄	名古屋大学大学院 エコトピア科学研究所 所長 工学研究科 教授
八木 秀樹	東京電力(株) 原子力設備管理部 原子炉安全技術グループ 課長

(委員氏名は五十音順)

1.2 中間評価の対象

中間評価の対象は、高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発分野であり、中期計画を以下の領域に分けて評価を行う。

- 1) 高温ガス炉水素製造システムの設計に関する研究開発
- 2) 炉特性・安全性に関する研究開発
- 3) 燃料・材料に関する研究開発
- 4) 熱利用技術開発に関する研究開発
- 5) ISプロセス水素製造に関する技術開発

1.3 中間評価の対象期間

中間評価の対象期間は、平成17年10月から、平成20年6月末までとする。

2. 中間評価対象の概要

2.1 研究開発計画

(1)国の計画

2005年、原子力委員会によって示された「原子力政策大綱」では、第2段階にある研究開発として、

「高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発等については、…(中略)…長期的視野に立って必要な取組を決め、推進していく」

と記載されている。

この原子力政策大綱に基づき、地球温暖化対策に関する内閣総理大臣演説(2007年5月24日)において、“美しい星へのいざない「Invitation to 『Cool Earth 50』”と題して、

「高温ガス炉、小型炉など先進的な原子力発電技術を開発し、安全で平和的な利用を拡大していきます。」

という政府の方針が示された。同年、これを具体化した2025年ごろまでの長期戦略指針「イノベーション25」が閣議決定され、その中には以下のように記載されている。「実効ある

温暖化対策の国際的取組の推進 …(中略)…高温ガス炉、中小型炉などの先進的な原子力発電、太陽光発電、燃料電池などの革新的技術、次世代自動車技術、水素を還元剤とした製鉄技術など超高効率な省エネルギー技術…」

これに加えて、原子力委員会は、2050年頃まで見据えた「地球環境保全・エネルギー安定供給のための原子力ビジョンを考える懇談会」(2008年)において、

「高温ガス炉による水素製造技術等の原子力エネルギーの多様化と高度化を図る革新的技術の開発、実証及び実用化」

が必要であると結論付けた。

2008年原子力委員会は、「原子力の革新的技術開発ロードマップ」報告書の中で、5つのビジョンを示した。「原子力政策大綱」の高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発等に関する記述を受け、4番目のビジョンに関する記述の中で、「必要な取組を決め」、高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発に関する以下のようなロードマップ(図1)を示している。

・ 4番目のビジョン:

「原子力エネルギー供給技術が温室効果ガスを排出しない熱源として、海水脱塩、水素製造等における熱需要に応えていること。」

・ このビジョンを実現するための技術候補:

「原子力による革新的水素製造技術」

・ 取組の内容:

水素製造等の高温ガス炉を用いた熱供給システムの実用化を目指して、以下を行う。

1) 高温ガス炉高性能化技術

2) 水の熱分解による革新的水素製造技術

・ 研究開発の目標時期:

「当面、HTTR等を活用して高温ガス炉及び原子炉熱を利用した水素製造技術

を開発し、…(中略)…**2020 年頃に実用システムの原型を提示することを目指す。**」

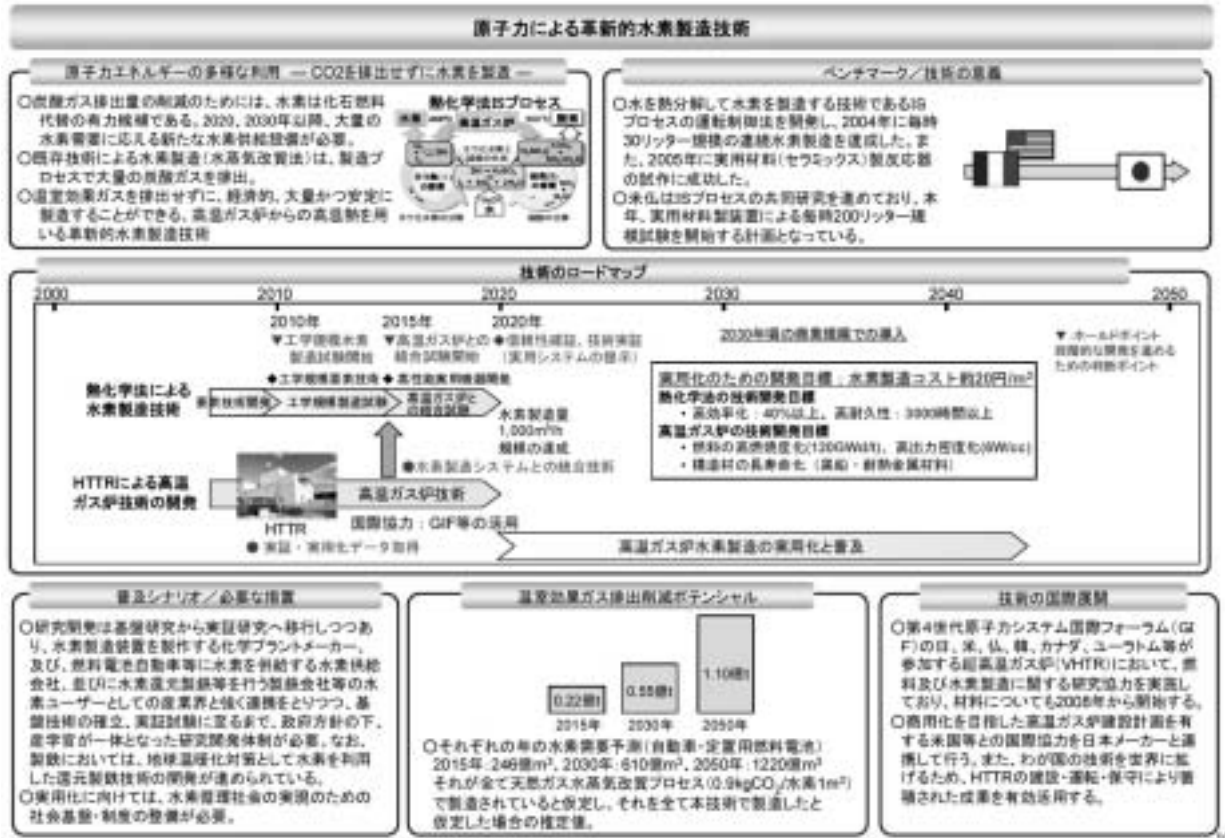


図1 原子力による革新的水素製造技術ロードマップ

総合科学技術会議の「革新的技術戦略」において、2008年に23の革新的技術が選ばれた。これら23技術のうち、地球温暖化対策技術の国際競争力を強化するため、「水素製造エネルギーシステム」として高温ガス炉を用いたISプロセス水素製造技術が選ばれた。「水素製造エネルギーシステム」の概要は以下の通りである。

「原子力を用いて、温室効果ガスを排出しない水素製造技術を確立することにより、地球温暖化対策とエネルギー安定供給を両立しつつ、将来水素を利用する還元製鉄、燃料電池自動車等の新たな環境エネルギー産業の創生を促すことで、日本の成長を支えることができる。…(中略)…高温ガス炉等からの高温熱を用いる新方法である熱化学法及び高温水蒸気電解は高温熱利用のため高効率期待され、なかでも、純熱化学法のISプロセスは、電解を併用する他方に比べ、大電力不要かつスケールメリットが期待できる非常に優れた方法であり、我が国は、本研究開発の先頭にある。」

(2) 中期目標及び中期計画

平成17年10月1日、「独立行政法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営

に関する目標」(以後、これを中期目標と呼ぶ。)が文科省及び経産省によって示された。高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発では、「(3) 原子力システムの新たな可能性を切り開くための研究開発」として、以下のように示されている。

2) 高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発

原子力利用の多様化の一環として、高温の熱源と経済性に優れた発電手段となり得る高温ガス炉とこれによる水素製造について、技術基盤の確立に向けて研究開発を進める。

前述の中期目標を達成するため、原子力機構は、平成17年10月から平成22年3月末までの高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発の中期計画を以下のように定めた。

2) 高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発

原子力エネルギー利用の多様化として、水素製造と発電の実現が可能な高温ガス炉技術基盤の確立を目指すとともに、高温の核熱利用を目指した地球温暖化ガスの発生を伴わない熱化学法による水素製造技術を開発する。

① 高温ガス炉の技術基盤の確立を目指した研究開発

高温ガス炉の技術基盤の確立を目指し、高温工学試験研究炉(HTR)において、運転日数が50日以上的高温(950℃)連続運転を行い、炉心の燃焼特性、ヘリウム純度管理、高温機器の性能、炉内構造物等の健全性等に関するデータを取得・評価することにより、高温ガス炉の実用化に必要なデータの蓄積を行う。

高温ガス炉の技術の高度化に向け高温ガス炉の特性評価に関する研究、燃料・材料の開発及び長寿命化を目指した研究等を行う。HTRにおいて、異常事象等を模擬した試験を行うことにより、高い固有の安全性等、高温ガス炉の特性を実証するとともに、特性評価手法の高度化を図る。また、燃料の高燃焼度化(約120GWd/tを目標)及び黒鉛構造物の長寿命化(約6年間を目標)及び耐熱セラミックス製構造物の開発を目指した研究開発を行う。これら高温ガス炉の技術の高度化に向けた研究開発の実施にあたっては、外部資金の獲得に努める。

② 核熱による水素製造の技術開発

- i 過渡時、事故時の動特性試験の成果を反映し、HTTR-IS システムにおける熱供給システムの設計を完了する。
- ii IS システムによる 30m³/h 規模の水素製造技術を確認する。なお、実施にあたっては、外部資金の獲得に努める。
- iii 熱利用に係わる高温隔離弁、タービン圧縮器等の要素技術開発においては、国内産業界との連携及び国際協力の活用を図るとともに、外部資金の獲得に努める。

(3) 高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発計画

高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発計画については、以下の通りであるとしている。

上述の(1)国の計画に示したように、原子力委員会が策定した「原子力の革新的技術開発ロードマップ」に、「原子力エネルギー供給技術が温室効果ガスを排出しない熱源として、海水脱塩、水素製造等における熱需要に応えていること。」というビジョンを実現するために、「HTTR 等を活用して高温ガス炉及び原子炉熱を利用した水素製造技術を開発し、…(中略)…2020 年頃に実用システムの原型を提示することを目指す。」と記されている。

「2020 年頃に実用システムの原型を提示すること」に向け、必要最小限の研究開発を実施し実用化させることが可能な発電実用高温ガス炉システム; GTHTTR300 を設計し、原子力メーカーに発注し、GTHTTR300 での発電価格を試算⁽³⁾した。この結果、高温ガス炉は十分経済的競争性を有するものであることが示された。この試算では、技術課題の目標が達成されていることを前提としており、表 2 にそれらの主要技術課題の現状、目標等を示す。

表2 実用化のための主要技術課題と目標

現在		将来		
技術課題		現状	解決法	目標
HTTR 原子炉技術	燃料	出力密度: 2.5W/cc 燃焼度: 90Gwd/t	HTTR試験 照射試験	6W/cc 120GWd/t
	黒鉛	寿命: 3年	非破壊評価手法開発 HTTR、常陽等での照射試験	6年
	耐熱金属	寿命: 20年	HTTR試験 クリープデータ取得	30年
	制御棒被覆材	アロイ800H 事故時1回使用後交換	C/C複合被覆材試作 HTTR試験	事故時温度条件で繰り返し使用可能
熱利用技術	水素製造技術	水素製造技術確認中	工学試験 HTTR-IS試験	20円/m ³ 程度の水素製造価格 非原子力級施設
	ガスタービン	30MWe(常温、10気圧)	実証機試験	50~300MWe

高温ガス炉を用いた水素製造システムの実用化像について、発電実用高温ガス炉システム GTHTR300 をベースにした電力・水素併給の実用高温ガス炉システム GTHTR300C の検討⁽⁴⁾を行った。燃料電池自動車用の水素、製鉄における鉄の還元用の水素といった高温ガス炉で製造した水素の用途が前述の国の計画に示されている。

高温ガス炉システムの実用化のプロセスについては、産業部門、運輸部門、民生部門における中長期的な国内での利用に関し、産官学での検討⁽⁵⁾を行ってきた。また、鉄鋼メーカーとの共同研究、鉄鋼協会での産官学での検討などを進めている。加えて、高温ガス炉の導入に適した社会基盤・情勢にある発展途上国等での実用化を念頭に、発展途上国での初号機導入後、我が国の原子力メーカーが主となって日本を含めた世界に高温ガス炉システムを展開するシナリオを検討している。具体的なビジネスモデルとして、発展途上国の中でも積極的に技術開発を行おうとしているカザフスタンモデル国として、まず、超小型の熱（地域暖房用）・電力併給高温ガス炉システムについてカザフスタンとの協力の準備を進めている。

これらの実用化像、実用化のプロセスを念頭に置き、アメリカの高温ガス炉計画である NGNP(Next Generation Nuclear Plant)プログラム等の国外計画との協力、第四世代原子力システム国際フォーラム(GIF)等の国際協力の枠組みの利用を積極的かつ有効に実施しつつ、研究開発を進めている。

図 2 に高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発計画、並びに、カザフスタン、アメリカにおける高温ガス炉計画を示す。

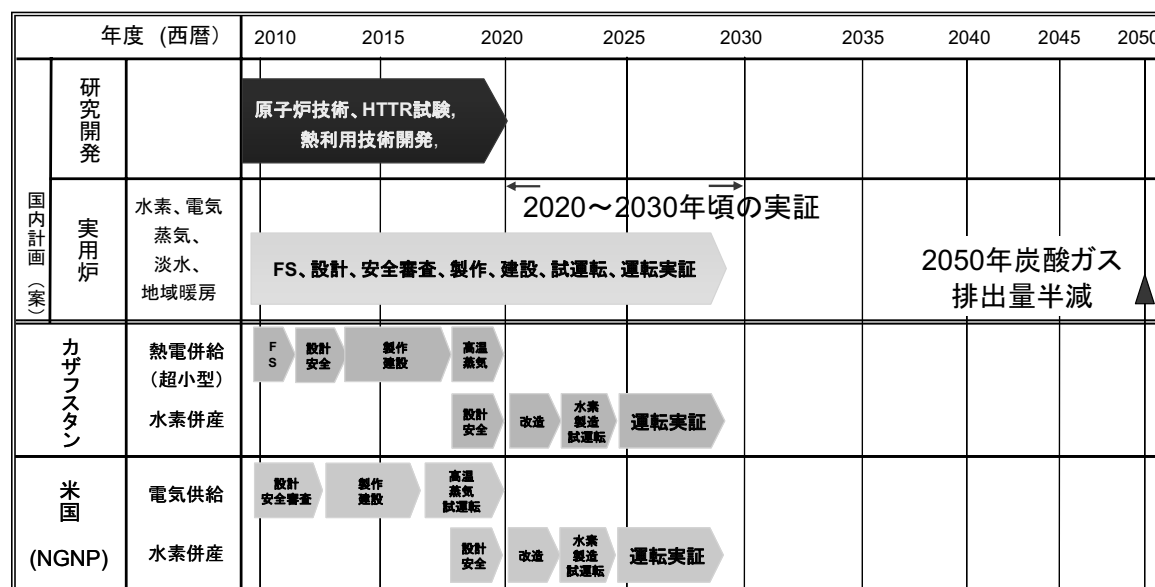


図 2 高温ガス炉とこれによる水素製造技術の研究開発計画

2. 2 中間評価対象の概要

中間評価の対象の概要については、以下の通りであるとしている。

(1) 高温ガス炉水素製造システムの設計に関する研究開発

1) 中期計画

中期計画は以下の通りである。

「過渡時、事故時の動特性試験の成果を反映し、HTTR-IS システムにおける熱供給システムの設計を完了する。」

2) 課題、研究計画、並びに、最終目標

2020 年頃に実用システムの原型を提示することを目指し、本中期計画、次期、次々期中期計画において、表 3-1-1 に示すように、HTTR-IS システムの詳細設計等及び実用高温ガス炉の設計研究を行う。

3) 本中期計画の目標と研究内容

本中期計画中の目標及び研究内容を表 3-1-2 に示す。

なお、HTTR-IS システムで水素製造試験を行うため、水素・電力併産用の商用高温ガス炉(GTHTR300C)、超小型高温ガス炉(HTR50C)の設計及び安全設計方針、安全評価手法等の検討を行い、HTTR-IS システムに要求される機能、HTTR-IS 水素製造試験内容等の検討に資する。

4) 成果及び残された課題の達成見込み

水素製造量が 1,000Nm³/h 規模となる HTTR-IS システムの機器の基本構成を決定し、また、供給ヘリウムガスの温度、圧力、流量を決定した。さらに、IS プロセスの主要機器の構造概念を提案するとともに、運転制御方法を決定した。

HTTR-IS システムの安全設計に必要な化学反応器内の流体の相変化を考慮した非定常解析コード(RELAP5 MOD3 コードをベース)を整備し、IS プロセスの異常時に HTTR の燃料温度、1 次冷却材圧力バウンダリ温度等を予測できるようにした。

また、HTTR-IS システムの安全設計において、水素製造施設を接続することに伴い新たに考慮すべき事象を明らかにし、安全設計方針を検討するとともに、水素製造設備で想定される水素爆発事故に対する安全評価手法として、水素爆発事故の事象推移を想定し、Multi-Energy 法を用いた評価手法を提案した。水素製造設備で想定されるガス漏えいに対する安全評価手法として、ガス漏えいの事象推移を想定し、原子炉制御室内濃度評価手法を提案した。

加えて、GTHTR300C、HTR50C の概念を提案し、上記提案をこれらの設計に反映させている。

以上のように、本中期計画の目標をほぼ達成しており、残された課題である非定常解析コードの整備については、平成 21 年度までに目標を達成する見込みである。

表 3-1-1-1 高温ガス炉水素製造システムに関する研究開発における課題、研究計画、並びに、最終目標

課題	本中期計画	次期中期計画	次次期中期計画	最終目標
実用高温ガス炉システムの設計	HTTR-IS システムにおける熱供給システムの設計(HTTR-IS システムの概念設計:水素電力併産用の実用高温ガス炉、並びに、超小型電力・熱併給用実用高温ガス炉、安全設計方針、安全評価手法等の検討を含む。)	HTTR-IS システムの詳細設計等 実用高温ガス炉設計	実用高温ガス炉設計	実用システムの原型を提示

表 3-1-1-2 高温ガス炉水素製造システムに関する研究開発における本中期計画中の目標及び研究内容

課題	本中期計画の目標	研究開発内容
実用高温ガス炉システムの設計	HTTR-IS システムにおける熱供給システムの設計の完了(HTTR-IS システムの概念設計の完了:基本構成の決定、主要構成機器の構造概念及び運転制御方法の決定)	<ul style="list-style-type: none"> ・1000m³/h 規模の系統構成の提案 ・主要機器概念の提案及び運転制御方法の決定 ・非定常解析コードの整備 ・安全設計方針の検討、水素爆発、ガス漏えい評価手法の提案

(2) 炉特性・安全性に関する研究開発

1) 中期計画

中期計画は以下の通りである。

「高温ガス炉の技術基盤の確立を目指し、高温工学試験研究炉(HTR)において、運転日数が 50 日以上的高温(950℃)連続運転を行い、炉心の燃焼特性、ヘリウムの純度管理、高温機器の性能、炉内構造物等の健全性等に関するデータを取得・評価することにより、高温ガス炉の実用化に必要なデータの蓄積を行う。

HTR において、異常事象等を模擬した試験を行うことにより、高い固有の安全性等、高温ガス炉の特性を実証するとともに、特性評価手法の高度化を図る。」

2) 課題、研究計画、並びに、最終目標

燃料・材料を除く炉工学等の原子炉基盤技術を確立するとともに、HTR を用いてデータベースを整備し、実用システムの設計に資することを目指し、表 3-2-1 に示すように、炉特性・安全性の実証、並びに、機器信頼性及び保守・補修技術の向上のため、HTRを用いて、基礎性能試験、限界性能試験、熱利用試験を行う。

なお、「原子力エネルギー研究開発専門部会 総括評価結果報告書」(JAERI-Review 2005-015 (2005))の中で設定されている HTR 試験の目標については、原子力機構設立時の予算の点から、並びに、革新的原子力システム技術開発公募事業のひとつとして受託した「高温ガス炉固有の安全性の定量的実証」の計画が途中で変更されたことに伴い、以下に示すように変更した。

「一次ヘリウムガス冷却材喪失等のさらに過酷な事象を模擬した試験、2次系除熱喪失試験」を平成22年以降に延期。

3) 本中期計画の目標と研究(技術)開発内容

本中期計画中の目標及び研究内容を表 3-2-2 に示す。

4) 成果及び残された課題の達成見込み

HTR の試験では種々のトラブルを乗り越え、一次ヘリウムガス冷却材出口温度850℃で30日の連続運転、並びに、安全性試験を行った。

・ HTR 高温連続運転 (950℃/50 日)

出口温度 950℃での 50 日間の高温連続試験に先立ち、850℃での 30 日間の HTR 連続運転を実施した。主要な成果を以下に示す。

- 炉心の燃焼特性: HTR の設計燃焼度 22GWd/t に対し、その 50%までの燃焼を行った結果、制御棒位置が炉心上部のほぼ一定位置に維持されていることから、可燃性毒物が設計どおりに機能していることを確認した。

- ヘリウムの純度管理: 純化系への流量調節、低温での運転時間の調整等により、1次ヘリウムガス冷却系水分濃度を設計値より低く安定に制御できることを確認した。
- 高温機器の性能: 中間熱交換器について、伝熱性能(熱通過率)と温度分布が運転開始から変化なく、構造健全性が維持されていることを確認した。
- 炉内構造物等の健全性: 炉内構造物等の温度が、設計で予期した範囲内であることを確認した。

出口温度 950°Cでの 50 日間連続運転については、平成 21 年度に実施予定であり、更なるデータの蓄積、評価が期待でき、当初の目標を達成する見込みである。

・高い固有の安全性等、高温ガス炉特性の実証

反応度印加、1次ヘリウムガス冷却材流量低下の異常事象を模擬した HTTR 試験を行い、異常事象が生じたとしても、異常な核分裂生成物(FP)放出はなく、原子炉出力が自然に低下して安定な状態になる固有の安全性を実証し、当初の目標を達成した。また、解析コードを用い、燃料温度等が制限値以下の安全な範囲内であることを確認した。

・特性解析手法の高度化

原子炉出力変化を予測する動特性解析コードについて、反応度印加、1次ヘリウムガス冷却材流量低下時の原子炉出力変化を 3%以内の精度で再現可能とし、これにより当初の目標を達成した。この結果、1ドルの反応度が瞬時に印加されるような反応度事故においても、燃料最高温度が 1600°Cを下回ることが予測でき、安全設備を簡素化できる見通しが得られる成果を得た。

以上のように、本中期計画中における目標を一部達成しており、残された課題である出口温度 950°Cでの 50 日間連続運転については、平成 21 年度までに目標を達成する見込みである。

表 3-2-1 炉特性・安全性に関する研究開発における課題、研究計画、並びに、最終目標

課題	本中期計画	次期中期計画	次次期中期計画	最終目標
炉特性・安全性の実証、機器信頼性及び保守・補修技術の向上、	<ul style="list-style-type: none"> ＜基礎性能試験＞ ・HTTR 高温連続運転 ・安全性の実証 ・特性評価手法の高度化 	<ul style="list-style-type: none"> ＜熱利用試験＞ ・核熱供給特性試験 ＜限界性能試験＞ ・燃焼炉心試験 ・安全性実証試験 (全冷却喪失) ・環状炉心試験 ・燃料限界照射試験 	<ul style="list-style-type: none"> ＜熱利用試験＞ ・HTTR-IS 水素製造実証試験 ＜限界性能試験＞ ・環状炉心試験 ・燃料限界照射試験 	燃料・材料を除く炉工学等の原子炉基盤技術を確立するとともに、HTTR を用いてデータベースを整備し、実用システムの設計に資する。

表 3-2-2 炉特性・安全性に関する研究開発における本中期計画中の目標及び研究内容

課題	本中期計画の目標	研究開発内容
炉特性・安全性の実証、機器信頼性及び保守・補修技術の向上	<ul style="list-style-type: none"> ・950℃で、50 日間の HTTR 高温連続運転による高温ガス炉の実用化に必要なデータの蓄積 ・高い固有の安全性等、高温ガス炉の特性の実証 ・特性評価手法の高度化 (異常時の原子炉出力変化の予測精度：3%以内) 	<ul style="list-style-type: none"> ・HTTR で、850℃で 30 日間の試験及び 950℃で 50 日間の試験による、炉心の燃焼特性、ヘリウムの純度管理、高温機器の性能、炉内構造物等の健全性等に関するデータの取得・評価 ・HTTR 異常事象模擬試験の実施 ・異常時の原子炉出力を予測する動特性解析コードの検証及び改良

(3) 燃料・材料に関する研究開発

1) 中期計画

中期計画は以下の通りである。

「燃料の高燃焼度化(約 120GWd/t を目標)及び黒鉛構造物の長寿命化(約 6 年間の目標)及び耐熱セラミックス製構造物の開発を目指した研究開発を行う。」

2) 課題、研究計画、並びに、最終目標

表 3-3-1 に示すように、120GWd/t の燃焼度を目指して、燃料健全性・寿命評価を可能にするため、HTTR 試験による燃料の核分裂生成物閉じ込め機能の確認及び改良燃料の試作・照射試験・照射後試験を行い、6 年の寿命の黒鉛構造物を目指して、定検時に検残留応力が制限値以下である黒鉛構造物の長期利用を可能にするため、非破壊黒鉛残留応力評価手法の開発及び照射試験・照射後試験を行い、耐熱セラミックス製の制御棒被覆材の開発を目指して、制御棒の繰り返し使用を可能にするため、セラミックス照射データ取得・照射後試験・実証試験等を行う。

高温ガス炉の燃料については、実用化に向けた更なる高燃焼度化のため、改良燃料による燃焼度 120GWd/t での健全性を確認することが残されている。黒鉛構造材についても、実用化に向け更なる長期利用を可能にするため、炉内試用期間を 3 年から 6 年間に延長できることを確認する。制御棒被覆材については、HTTR では制御棒被覆材として金属材料(Alloy800H)を使用しており、耐熱性の点から、原子炉スクラム時に繰り返し使用が出来ない。このため、セラミックス製制御棒被覆材を開発する事が残されている。

3) 本中期計画の目標と研究(技術)開発内容

本中期計画中の目標及び研究内容を表 3-3-2 に示す。

4) 成果及び残された課題の達成見込み

・燃料の高燃焼度化:

850°C30 日間の HTTR 運転時の希ガス放出率を評価し、希ガス放出率が 10^{-8} と極めて低く、製造時の品質が世界最高であることを確認した。また、目標通りに被覆層を厚くした改良燃料の試作試験を完了し、目標の一部を達成した。950°C50 日間の HTTR 試験は、平成 21 年度に実施予定であり、これまでの試験結果から、希ガス放出率は 10^{-7} を下回ることが予測でき、目標を達成する見込みである。

・黒鉛構造物の長寿命化:

黒鉛の残留応力が基準値以下であることを示し、黒鉛構造材の長期利用を可能にするため、圧子の押し込み量から黒鉛の残留応力を評価する式を導出し、目標の一部を達成した。平成 21 年度までに、評価式の高精度化、大型構造物への適用性検証を

実施し、目標を達成する見込みである。

・耐熱セラミックス製構造物の開発：

照射後試験データを取得し、C/C 複合材と黒鉛との照射特性におけるアナロジーを確認し、黒鉛の照射特性の知見から C/C 複合材の照射特性を予測できることを明らかにした。平成 21 年度までに、異方性を考慮した設計用データベースを構築し、応力評価を完了し、目標を達成する見込みである。

以上のように、本中期計画中における目標を一部達成しており、残された課題である出口温度 950℃での 50 日間連続運転での燃料の健全性の確認、大型黒鉛構造物への適用性検証、セラミックス被覆材の応力評価については、平成 21 年度までに目標を達成する見込みである。

表 3-3-1 燃料・材料に関する研究開発における課題、研究計画、並びに、最終目標

課題	本中期計画	次期中期計画	次次期中期計画	最終目標
燃料の高燃焼度化	・HTTR 試験による燃料燃焼度の確認 ・改良燃料の試作	改良燃料の照射試験	改良燃料の照射後試験	燃焼度： 90GWd/t →120GWd/t
黒鉛構造物の長寿命化	非破壊評価手法開発	照射試験	照射後試験	寿命：3年→6年
耐熱セラミックス製構造物の開発	照射データ取得	照射試験及び構造物試作試験	構造物の成立性実証試験	制御棒被覆材： 金属→セラミックス

表 3-3-2 燃料・材料に関する研究開発における本中期計画中の目標及び研究内容

課題	本中期計画の目標	研究開発内容
燃料の高燃焼度化	・HTTR 燃料に関し、運転中の希ガス放出率がこれまでの海外炉の値(約 10^{-7})以下であること。 ・バッファ層平均厚さ、SiC 層平均厚さ $90 \mu\text{m}$ (HTTR60 μm)、 $35 \mu\text{m}$ (HTTR25 μm)の改良燃料の試作試験。	・ 850°C 30 日、 950°C 50 日のHTTR試験を行う。 ・被覆層を厚くした改良燃料の試作を行う。
黒鉛構造物の長寿命化	マイクロインデンテーション法等を用いて、圧子の押込み量と黒鉛構造物の約 20MPa(許容応力(圧縮))の残留応力を評価する式を導出する。	黒鉛試験片に荷重を加えた状態での圧子の押込み試験を行う。
耐熱セラミックス製構造物の開発	C/C 複合材の 1.2dpa までの中性子照射による寸法変化、熱伝導率等のデータを取得し、照射条件下での制御棒被覆管の成立性を解析で示す。	照射後試験により設計用データベースを構築し、応力評価を行う。

(4) 熱利用技術開発に関する研究開発

1) 中期計画

中期計画は以下の通りである。

「熱利用に係わる高温隔離弁、タービン圧縮器等の要素技術開発においては、国内産業界との連携及び国際協力の活用を図る。」

2) 課題、研究計画、並びに、最終目標

弁座直径 0.6m 程度 (熱出力 60MW 相当) の高温隔離弁、電気出力 30MW 以上のヘリウムガスタービンの開発を目指して、本中期計画、次期、次々期中期計画において、表 3-4-1 に示すように、要素技術を確立したのち、実証試験を行う。

高温ガス炉と熱利用系の接続に必要な高温隔離弁については、これまでに HTTR 規模 (10MWt 以下) の要素技術開発を完了している。これらのモックアップモデル試験結果を基に、熱応力解析により構造設計の妥当性を確認したのち、実用炉規模 (60MWt 以上) の高温隔離弁の実証を行う。なお、弁座直径 0.6m 以上大型の高温隔離弁を必要とする場合には、弁座直径 0.6m の複数個の高温隔離弁を用いることで、技術開発に必要な期間の最短化を図ることとしている。ガスタービンシステムの機器については、これまでに再生熱交換器のコンパクト化技術、高効率 (圧縮効率 90%) の圧縮機技術の開発を完了しており、ロータの磁気軸受振動抑制技術を開発したのち、実規模 (30MWe 以上) ヘリウムガスタービンの実証試験を行う。

3) 本中期計画の目標と研究 (技術) 開発内容

本中期計画中の目標及び研究内容を表 3-4-2 に示す。

4) 成果及び残された課題の達成見込み

・ 高温隔離弁の要素技術開発:

実用炉規模の高温隔離弁の構造設計において、高温 (900°C) 環境下での温度分布解析を行った。現在、応力解析、高温構造強度解析等の詳細解析を実施しており、弁座締め付け力 35MPa (HTTR 規模モックアップモデルの実績) に対して健全性を確保できる弁座及び弁座支持脚の構造を決定する計画である。なお、弁の構造の妥当性は既にモデル試験で確認している。

・ ガスタービンシステムの要素技術開発:

ロータ曲げ振動予測の簡易モデルについて、ロータの軸直径変化部の曲げ剛性を考慮した精度の高いモデルを構築するとともに、大規模制御演算式の低次元化技術について、Schur 分解によるモード分解法を適用できることを見出した。この成果を基に振動抑制の制御システムの設計を行い、発電機ロータの振動制御解析を行った結果、振動振幅が $75 \mu \text{mp-p}$ 以下であることを確認した。今後、代表的な事象に対して、

振動振幅を $75 \mu \text{ mp-p}$ 以下に抑制できることを振動制御解析で示し、目標を達成する見込みである。

以上のように、高温隔離弁については、残された課題である構造設計における詳細解析による弁座及び弁座支持脚の構造決定については、平成21年度までに目標を達成できる見込みである。また、ガスタービンシステムでは、一部目標を達成し、残された課題である代表的な事象に対する振動制御解析による振動振幅抑制の確認については、平成 21 年度までに目標を達成する見込みである。

表 3-4-1 熱利用技術開発に関する研究開発における課題、研究計画、並びに、最終目標

課題	本中期計画	次期、次々期中期計画	最終目標
高温隔離弁の要素技術開発	実用炉規模高温隔離弁の構造設計	実証試験	弁座直径 0.6m 程度(熱出力 60MW 相当)の高温隔離弁
ガスタービンシステムの要素技術開発	ロータの磁気軸受振動抑制技術の開発	実証試験	電気出力 30MW 以上のヘリウムガスタービン

表 3-4-2 熱利用技術開発に関する研究開発における本中期計画中の目標及び研究内容

課題	本中期計画の目標	研究開発内容
高温隔離弁の要素技術開発	高温(900℃)環境における構造健全性の確保 (弁座シート面の締め付け力 35MPa)	熱応力解析、高温構造強度評価に基づく構造の決定
ガスタービンシステムの要素技術開発	ロータの磁気軸受の振動振幅が 75 μ mp-p 以下	制御システムの設計に必要なロータ曲げ振動予測の簡易モデルの構築、並びに大規模制御演算式の低次元化技術の開発。

(5) IS プロセス水素製造に関する技術開発

1) 中期計画

中期計画は以下の通りである。

「IS システムによる 30m³/h 規模の水素製造技術を確認する。」

2) 課題、研究計画、並びに、最終目標

水素製造原価: 20 円/m³程度を目指し、本中期計画、次期、次々期中期計画において、表 3-5-1 に示すように、耐食材料・機器及び熱効率向上に関する要素技術開発、機器・装置の信頼性及びプロセス制御性の検証を行ったのち、HTTR-IS システムにおいて水素製造実証試験を行う。

なお、「原子力エネルギー研究開発専門部会 総括評価結果報告書」(JAERI-Review 2005-015 (2005))で設定されている IS プロセスの目標については、原子力機構設立時の予算の点から、平成17年10月に以下に示すように変更した。

「IS パイロット試験として、…(中略)…ヘリウムガス加熱、ガラス容器から実用材料、大気圧から30気圧とした実用条件での試験を水素製造能力 30m³/h 規模で行う。」に代えて、平成21年度までに「30m³/h 規模の水素製造技術の確認」と、平成22年以降の「高温反応機器・装置の信頼性の検証、及び、定常、過渡、異常時の制御性の検証」の遂行。

3) 本中期計画の目標と技術開発内容

本中期計画中の目標及び研究内容を表 3-5-2 に示す。

4) 成果及び残された課題の達成見込み

・ 実用材料を用いた装置の技術開発:

硫酸分解器については、円筒型 SiC 熱交換ブロックをタイロッド、皿バネ及び金シールで締結する構造を考案し、30m³/h 規模装置の製作性を実証するとともに、SiC/金属間の高温気密性及び耐震気密性を確認し、製作の見通しを得た。硫酸輸送ポンプについては、SiCを接液部材、金属を耐圧部材とする 30m³/h 規模装置用ポンプの試作に成功した。組成計測については、放射線密度計を用い、密度を測定物理量とする4成分2液相溶液の組成計測法を新たに開発し、実用に供する見通しを得た。

今後、試作ポンプの性能検証試験を予定しており、平成 21 年度までに目標を達成する見込みである。

・ 熱効率向上に関する技術開発:

放射線製膜技術により熱効率約 40%を見通せる分離膜性能を確認した。

・ 設計データの取得:

ブンゼン反応実験を行い、生成する HI 相溶液の HI 濃度の SO₂ 分圧依存データを取

得し、HI 濃度予測式を作成した。擬共沸組成以上の高濃度 HIx 溶液の蒸留実験を行い、純 HI 分離を確認した。ガラスライニング材の腐食試験、耐熱試験を行い、耐食性及び耐熱性を確認し、高温硫酸環境へのガラスライニング材の適用に目処を付けた。白金触媒を用いた SO₃ 分解反応実験を行い、分解率の経時変化データを取得した。

今後、SO₃ 分解反応実験において活性変化予測式を作成し、平成 21 年度までに目標を達成する見込みである。

以上のように、IS システムによる 30m³/h 規模の水素製造技術の確証に関し、実用材料を用いた装置の技術開発、熱効率向上に関する技術開発、並びに、30m³/h 規模の水素製造装置の設計データの取得に関し、目標の約 80% 達成しており、残された硫酸輸送ポンプの性能実証試験、SO₃ 分解反応実験については、平成 21 年度までに目標を達成する見込みである。

表 3-5-1 ISプロセス水素製造に関する技術開発における課題、研究計画、並びに、最終目標

課題	本中期計画	次中期計画	次次期中期計画	最終目標
耐食材料・機器	実用材料を用いた装置の要素技術開発	高温反応機器・装置の信頼性の検証	HTTRを用いた「核熱によるISプロセス水素製造」の実証	水素製造原価： 20円/m ³ 程度
熱効率	熱効率向上に関する要素技術開発			
プロセス制御		定常、過渡、異常時の制御性の検証		

表 3-5-2 ISプロセス水素製造に関する技術開発における本中期計画の目標と技術開発内容

課題	本中期計画の目標	技術開発内容
ISプロセス水素製造技術	30m ³ /h規模の水素製造技術の確証	要素技術開発試験を行う。
実用材料を用いた装置の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・30m³/h 規模硫酸分解器の製作性及び SiC/金属間の気密性の確保 ・～325℃、90%硫酸が輸送可能なポンプの開発 ・4成分2液相溶液組成の非接触・オンライン計測法 	<ul style="list-style-type: none"> ・円筒型 SiC 製熱交換器の案出及び30m³/h 規模機器の試作試験 ・ポンプの試作及び試験 ・放射線密度計の活用、及び、4成分系2液相溶液の密度と組成の関係の定式化
熱効率向上に関する技術開発	約40%の熱効率を見通せるヨウ化水素(HI)濃縮性能	放射線製膜技術の活用
設計データの取得	<ul style="list-style-type: none"> ・ブンゼン反応で生成する HI 相溶液の HI 濃度予測式 ・擬共沸組成以上の高濃度 HIx 溶液の蒸留による純 HI 分離の確認 ・高温硫酸環境におけるガラスライニング材の適用範囲の明確化 ・SO₃分解触媒の活性変化予測式 	<ul style="list-style-type: none"> ・ブンゼン反応実験 ・擬共沸組成以上の高濃度 HIx 溶液の蒸留実験 ・ガラスライニング材の腐食試験、耐熱試験 ・SO₃分解反応実験

3. 中間評価結果

3.1 目標達成度

原子力委員会の原子力政策大綱、原子力の革新的技術開発ロードマップ、総合科学技術会議の「革新的技術戦略」等の国の計画に基づき、2.1(2)の中期計画に対して、

① 高温ガス炉の技術基盤の確立を目指した研究開発

- ・ 可燃性毒物の燃焼特性、1次ヘリウムガス冷却系中の水分濃度等の不純物制御特性、中間熱交換器、高温配管等の高温機器の熱流動特性、炉内構造物等の構造強度健全性等に関するデータを取得・評価し、高温ガス炉の実用化に必要なデータの蓄積、
- ・ 反応度印加、1次ヘリウムガス冷却材流量低下の異常事象を模擬した HTTR 試験を行い、異常事象が生じたのち、原子炉出力が自然に低下して安定な状態になる固有の安全性の実証、
- ・ 動特性解析コードによる原子炉出力特性評価手法に関し、反応度印加、1次ヘリウムガス冷却材流量低下時の原子炉出力変化を 3%以内の精度で再現し、特性評価手法の高度化、
- ・ 燃料高燃焼度化(約 120GWd/t を目標)に向け、HTTR 試験により希ガス放出率がこれまでの海外炉の値;約 10^{-7} 以下であることの確認、並びに、燃焼度確認のための照射試験の前段階として、改良燃料の試作(被覆層厚さを従来の約 1.5 倍)、黒鉛長寿命化(約 6 年間を目標)に向け、黒鉛の残留応力が基準値以下であることを示し、黒鉛構造物の長期利用を可能にするため、黒鉛の残留応力を測定する方法の開発及び黒鉛構造物の残留応力評価式の導出、解析コードによる照射条件下での耐熱セラミックス製制御棒被覆管の成立性の確認、

② 核熱による水素製造の技術開発

- ・ HTTR-IS システムの基本構成、主要構成機器の構造概念、運転制御方法を決定し、HTTR-IS システムにおける熱供給システムの設計の完了、
- ・ (1) 実用材料を用いた装置技術を開発し、(2) 約 40%の熱効率を見通せるヨウ化水素濃縮性能向上による効率向上に関する技術を開発し、(3) ブンゼン反応データ、蒸留データ、ガラスライニング適用可能範囲データ、 SO_3 分解触媒データ等の設計データを取得し、IS システムによる 30m³/h 規模の水素製造技術の確証、
- ・ 高温隔離弁では、弁座シート面の締め付け力が 35MPa で構造健全性を確保し、また、タービン圧縮器では、ガスタービンロータの磁気軸受の振動振幅を 75 μ mp-p 以下に抑制し、要素技術の開発、

を具体的な課題及び目標として定めたことは、技術的知見及び原子力機構で得られているこれまでの成果から妥当であると評価できる。また、実施に当たっては、高温ガス炉システムの実用化像や実用化プロセスを考慮し、国内外の協力を効率的に進めつつ、外部資金の獲得に努めたことは、有意義と認められる。

これら中期計画を順調に進捗させ、着実に研究成果を上げており、平成 20 年 6 月末時点

での目標達成度は高いと評価できる。また、現時点でまだ目標を達成していない研究開発課題に関しても、技術的に十分達成が見込めると判断できる。

以下に、研究開発領域ごとの目標達成度について記す。

(1) 高温ガス炉水素製造システムの設計に関する研究開発

我が国における実用水素製造プラントの水素製造能力は、千 m^3/h から万 m^3/h 規模であり、熱出力 600MW の実用高温ガス炉で水素を生産した場合、約 85,000 m^3/h 規模となる。実用の前段階として、HTTRを用いた 1000 m^3/h 規模の水素製造試験は、最小規模での実証試験と考えられる。HTTR-IS システムにおける熱供給システムの設計において、基本構成の決定、主要構成機器の構造概念及び運転制御方法の決定という目標を達成するため、

- ・1000 m^3/h 規模の系統構成の提案
- ・主要機器概念の提案及び運転制御方法の決定
- ・非定常解析コードの整備
- ・安全設計方針の検討
- ・水素爆発、ガス漏えい評価手法の提案

が行われたのは妥当である。

各課題についての評価は以下の通りである。

- ・1000 m^3/h 規模の HTTR-IS システムの熱供給システムの設計、即ち、概念設計を完了しており、目標を達成している。
- ・コード開発として重要な非定常解析コードについては、必要な整備を終了していることから、当初の予定通り目標を達成できる見込みがあると判断できる。
- ・HTTR-IS システムで想定される評価事象について、設備変更に伴い新たに考慮すべき事象を明らかにするとともに、安全予備解析のための条件を整理していることから、目標を達成している。
- ・水素爆発、ガス漏えい評価手法を既に提案しており、目標を達成している。
- ・加えて、実用システム GTHTR300C、超小型炉 HTR50C の概念を提案しており、当初の計画を完了し、目標を達成している。
- ・HTTR-IS の水素製造量については、原子力で水素を作ったという社会的なインパクトの観点からはもっと少なくとも良いと考えられるが、原子炉との相互作用、さらには水素製造単価を評価するうえでは 1000 m^3/h の水素製造が望ましいと言える。

(2) 炉特性・安全性に関する研究開発

「2020 年頃に実用システムの原型を提示すること」に向け、HTTR を用いて、本中期計画、次期中期計画、次々期中期計画において、それぞれ、基礎性能試験、限界性能試験、熱利用試験を行うとしている。

本中期計画中には、高温ガス炉の技術基盤の確立を目指し、HTTR において、運転日数が50日以上的高温(950℃)連続運転を行い、炉心の燃焼特性、ヘリウムの純度管理、高温機器の性能、炉内構造物等の健全性等に関するデータを取得・評価することにより、高温ガス炉の実用化に必要なデータの蓄積を行い、HTTRにおいて異常事象等を模擬した試験を行うことにより、高い固有の安全性等、高温ガス炉の特性を実証するとともに、特性評価手法の高度化(異常時の原子炉出力変化の予測精度:3%以内)を図るという目標を達成するため、

- ・炉心の燃焼特性、ヘリウムの純度管理、高温機器の性能、炉内構造物等の健全性等に関するデータの取得・評価
- ・HTTR 異常事象模擬試験の実施
- ・異常時の原子炉出力を予測する動特性解析コードの検証及び改良

なる基礎性能試験が行われたのは、HTTR において本中期計画以前に得られた成果及び「2020 年頃に実用システムの原型を提示する」という最終目標に対する技術的観点から妥当である。

各課題についての評価は以下の通りである。

- ・炉特性・安全性については、HTTR 試験日程等の変更にもかかわらず、研究開発課題は予定通り実施され、高温ガス炉実用化に不可欠なデータを着実に蓄積し、HTTR 異常事象模擬試験により安全性が実証され、特性解析手法の高度化も着実に進めて研究成果を上げていることから、目標を十分に達成できるものと判断する。
- また、平成 21 年度に実施される HTTR950℃高温連続試験の結果に大いに期待できる。
- ・加えて、機器信頼性・メンテナンスについては、故障の分析や運転データの分析を積極的、かつ丹念に行い、貴重なノウハウを蓄積しているのは、世界に誇れることであり、大いに評価されるべきである。
- ・本中期計画における目標については、常により明確に示すことが望まれる。

(3) 燃料・材料に関する研究開発

高温ガス炉が十分経済的競合性を有するものであることを示した発電実用高温ガス炉システム;GTHTR300 における発電価格の試算⁽³⁾では、燃料の高燃焼度化(約 120GWd/t を目標)及び黒鉛構造物の長寿命化(約 6 年間を目標)及び耐熱セラミックス製構造物の開発等の技術課題が解決されていることを前提としている。

「2020 年頃に実用システムの原型を提示すること」に向け、必要最小限の研究開発を実施して高温ガス炉システムの実用化を図るために、本中期計画中に、HTTR 燃料に関しては、運転中の希ガス放出率がこれまでの海外炉の値(約 10^{-7})以下であること、バッファ層平均厚さ、SiC 層平均厚さ 90 μm (HTTR60 μm)、35 μm (HTTR25 μm)の改良燃料の製造、マイクロインデンテーション法等を用いた圧子の押込み量と黒鉛構造物の約 20MPa(許容応力(圧縮))の残留応力評価式の導出、解析コードによる照射条件下での制御棒被覆管の成立性確認という目標を達成するために、

- ・850℃30 日間のHTTR試験、被覆層を厚くした改良燃料の試作試験

- ・黒鉛試験片に荷重を加えた状態での圧子の押し込み試験
- ・照射後試験により設計用データベースの構築、応力評価が行われるのは技術的見地から妥当である。

各課題についての評価は以下の通りである。

- ・燃料の高燃焼度化については、850°C運転で世界最高品質の燃料であることが確認されており、また、目標通りに被覆層を厚くした改良燃料の試作試験を完了しており、目標を達成している。今後 950°C運転での確認が十分期待できる。
- ・黒鉛構造物の長寿命化については、残留応力の評価式をすでに導出しており、大型構造物への適用性の検証は十分達成が見込める。
- ・耐熱セラミックス製構造物の開発については、試験データを取得済みであり、応力評価を完了できると判断される。
- ・目標を設定した背景・理由を簡潔かつ明確に説明していくことが望まれる。

(4) 熱利用技術開発に関する研究開発

水素など核熱を非電力分野で利用する場合に必要な高温隔離弁に関しては、原子力製鉄において開発された高温弁座材料・構造に関する技術の改良が必要であると言われている。また、高温ガス炉が十分経済的競合性を有するものであることを示した発電実用高温ガス炉システム;GTHTR300 における発電価格の試算⁽³⁾では、ヘリウムガスタービンに関する技術課題が解決されていることを前提としている。ヘリウムガスタービンは、天然ガス燃焼ガスタービンに比べ、温度が高々950°Cと低いことから材料的課題は無いが、ブレイトンサイクルに特徴的な再生熱交換器の経済性(コンパクト化技術を本中期計画以前に開発完了とされている)、メタン燃焼ガスではなくヘリウムガスを用いるため、タービンプレイドと容器の隙間を出来る限り低減し効率を向上する技術(本中期計画以前に開発完了とされている)、一次ヘリウムガス冷却系にガスタービンを接続するため、磁気軸受けを用いることによる安定制御技術等の課題が存在する。これらのことから、熱利用に係わる高温隔離弁、タービン圧縮器等の要素技術開発においては、高温(900°C)環境における構造健全性の確保(弁座シート面の締め付け力 35MPa)、ガスタービンのロータの磁気軸受における振動振幅が 75 μ mp-p 以下という目標を達成するために、

- ・熱応力解析、高温構造強度評価に基づく高温隔離弁の構造の決定
- ・制御システムの設計に必要なロータ曲げ振動予測の簡易モデルの構築、並びに大規模制御演算式の低次元化技術の開発

が行われたのは、これまでの高温隔離弁及びヘリウムガスタービンに関する成果及び技術的知見から妥当である。

各課題についての評価は以下の通りである。

- ・ロータの磁気軸受振動抑制技術の要素技術開発については、ロータ曲げ振動予測簡易モデルを作成するとともに、大規模制御演算式の低次元化方法を見出している。これらにより、振動評価を行い、振動を抑制できることを示していることから、期間内に当初計

画を達成できるものと判断できる。

- ・高温隔離弁については、熱応力解析、構造高度評価を実施中であり、中期計画の期間内に高温隔離弁の構造を決定し、目標を達成できる見込みがあると判断できる。

(5) IS プロセス水素製造に関する技術開発

IS プロセスにおいて解決すべき課題が、経済的に競合可能な耐熱・耐食性の装置の開発、並びに、他の水素製造法に勝る熱効率向上技術の開発であることはこれまでから良く知られている、ということと、IS プロセスの原理の検証及び連続水素製造の成功を成し遂げ、耐熱・耐食材料及び熱効率向上方法を提案し、それらに関する基礎試験を終えている等の原子力機構におけるこれまでの成果から、平成 17 年下期以降の研究開発段階において、以下に示す 1)及び 2)の課題及び目標を設定したことは妥当であると判断する。また、中期計画に記載されたIS プロセスの「30m³/h 規模の水素製造技術の確証」を 30m³/h 規模の水素製造施設を研究開発なしにプラントメーカー等が製作できることと考えた時、3)の課題及び目標を設定したことは妥当であると判断する。

・IS システムによる 30m³/h 規模の水素製造技術の確証における課題：

- 1) 実用材料を用いた装置の技術開発
- 2) 熱効率向上に関する技術開発
- 3) 設計データの取得

・IS システムによる 30m³/h 規模の水素製造技術の確証における目標：

- 1) 30m³/h 規模硫酸分解器の製作性及び SiC/金属間の気密性の確保、～325℃、90%硫酸が輸送可能なポンプの開発、4成分2液相溶液組成の非接触・オンライン計測法
- 2) 約 40%の熱効率を見通せるヨウ化水素(HI)濃縮性能
- 3) ブンゼン反応で生成する HI 相溶液の HI 濃度予測式、擬共沸組成以上の高濃度 HIx 溶液の蒸留による純 HI 分離の確認、高温硫酸環境におけるガラスライニング材の適用範囲の明確化、SO₃分解触媒の活性変化予測式の作成

上記の課題及び目標に対して

- 1) ・円筒型 SiC 製熱交換器の案出及び 30m³/h 規模機器の試作試験
 - ・ポンプの試作及び試験
 - ・放射線密度計の活用及び 4 成分系 2 液相溶液も密度と組成の関係の定式化
- 2) ・放射線製膜技術の活用
- 3) ・ブンゼン反応実験
 - ・擬共沸組成以上の高濃度 HIx 溶液の蒸留実験
 - ・ガラスライニング材の腐食試験、耐熱試験
 - ・SO₃分解反応実験

が行われたのは、妥当であると判断する。

高温反応機器装置の信頼性、定常、過渡、異常時の制御性の検証に関しては次期中期計画で確認するとしており、技術開発の進め方は妥当である。

各課題についての評価は以下の通りである。

- ・実用材料を用いた装置の技術開発では、目標の性能を有する硫酸分解器の構造を確定するとともに、ブンゼン溶液組成計測法を開発している。高温硫酸輸送技術については、目標とする性能を有するポンプの試作を終了しており、中期計画中には目標達成が可能と判断できる。
- ・熱効率向上に関する技術開発として重要な分離膜に関し、放射線を利用して、熱効率40%が達成可能な分離膜を開発しており、所定の成果を上げ、目標を達成していると評価する。なお、熱効率に関しては、今後、30m³/h 規模の水素製造技術の確証とは別個に、更なるブレークスルーをめざし長期的視野で革新的技術開発を進めることを考えたほうが良いであろう。
- ・設計データの取得については、ブンゼン反応特性・ヨウ化水素蒸留特性・SO₃ 分解触媒特性について、それぞれ、予測式の導出、分離の確認、経時変化データの取得等の成果を挙げており、今年度中には目標達成が可能と考える。

3.2 今後の進め方

今後、この分野において原子力機構が世界のリーダーシップを引き続き確保していくため、経費面の支援が望まれる。最初の高温ガス炉導入市場が外国である可能性を勘案し、米国、カザフスタン等の国外計画に積極的に注力すべきである。特に、商用高温ガス炉が世界でも建設・運転の経験がないこと、最初の商用高温ガス炉の導入が発展途上国になると予想されること、従来炉にはない高温ガス炉固有の安全上の特徴を活かした設計を行っていることを考慮すると、安全審査等規制のための技術提供、地域住民のための安全・安心方策を提供できることを計画的に準備しておくことが重要である。

また、HTTR が大きなトラブルなく良く動いていることを強調し、高温ガス炉技術がここまできていること、我が国の炭酸ガス排出量を削減するために高温ガス炉システムが有効であること等、常に情報を発信し、高温ガス炉実用化の意義を広く国内外に浸透させる必要がある。

研究計画については、高温ガス炉事業が長期にわたることから、事業実施中に環境変化や新規な達成目標が発生する可能性がある。そこで、課題の見直しや新たな課題の取り込みなど計画の見直しを可能とする枠組みを構築すること、次善の計画のみならず次々善の計画を用意しておくことなど、臨機応変にかつ柔軟な対応をとるべきであると考えられる。さらに今後は、実用化に向けて原子炉システムに関する研究開発だけでなく、現状の産官学連携の研究開発推進体制から、保守・補修、事故対応、防災システムなど名実ともに関連技術を網羅した実用化のための推進体制に移行することが望まれる。

3.3 その他の所見

各委員からのコメント等を以下に列挙する。

- ・全体計画に関して、「カザフスタン」、「NGNP」への積極的な注力を期待したい。
- ・技術面および市場面で、極めて不確実性の高い超長期技術開発事業と考えられるので、それに対処するため、原子力機構内に産業界と連携した特別チームを設けるなど、特別

- な取り組みがあってもよいのではないかと感じる。
- ・世界および我が国の直面するエネルギー課題に対応する諸技術のポートフォリオを作成し、高温ガス炉技術がエネルギー課題の解決に資するポテンシャルを有することを、(半定量的に)明らかにする必要があると考える。
 - ・技術のポテンシャルと市場性のポテンシャルを勘案した実効性のあるロードマップを作成し、達成目標を明確にして、研究時期や資源配分の最適化をできるとよいと考える。特に、不確実性の高い初期技術や不透明な市場に関しては、ロードマップが有効であると考えられる。
 - ・技術の不確実性が低くなった段階では、高温ガス炉に対する投資価値のあることを、DCFなどを用いて政府・産業界にアピールする必要が生じると考える。
 - ・長期事業であるため、事業実施中に環境変化や新規な達成目標が発生する可能性がある。そのために、新規・追加の取り組みを可能とする枠組みを、あらかじめセットができれば素晴らしいと感じる。
 - ・この研究分野は原子力機構が世界のリーダーシップを引き続いて確保していく経費面の支援が望ましい。
 - ・研究開発の進め方として、原子炉システムの経済性向上を第一目標とすることは妥当であるが、実際の導入に当たっては、原子炉システムだけでなく保守・補修、事故対応、防災システムなどを網羅した one package 方式でなければ採用不可能と考えられる。その意味で、名実ともに関連技術を網羅した All Japan として推進体制を早急に構築することが肝要である。
 - ・期待される最初の導入市場が日本でなく外国である可能性がある場合、特にいわゆる先進国でない場合に対し、商用高温ガス炉が世界でも建設・運転の経験がないこと、最初の商用高温ガス炉の導入が発展途上国になると予想されること、従来炉にはない高温ガス炉固有の安全上の特徴を活かした設計を行っていることを考慮すると、安全審査等規制のための技術提供、地域住民のための安全・安心方策を提供できることを計画的に準備しておくことが重要である。
 - ・本評価は、初期に個々の課題を実現性(材料、安全性、製作の可能性、コストなど)の視点で設定して、課題をクリアすることで作業を実施しているように思う。課題設定の際には、実用化(規模の違い、保守・補修の容易性、製作の容易性など)に向けた課題設定も合わせて、取り上げては如何かと思う。また、初期の段階で、実用化に向けた課題設定を引き出すことが困難な場合には、検討段階(作業実施中)に実用化する場合の問題点を常に意識した PDCA を実施して、新に課題を取り上げることも必要であると思う。
 - ・実用化に向けた戦略については、直接関わらないのかも知れないが、現状の厳しい環境(軽水炉、高速炉、核融合炉路線)の中で、高温ガス炉を実用化するためには、政治的判断として、実用化の意義を国の政策として見出すことが必要である。そのための戦略を検討することが、今最も重要であると思う。
 - ・高温ガス炉開発の環境は激変している。したがって何年も前に立てた計画を着実に達成してだけでなく、計画をもっとダイナミックに見直していくことも必要である。自分たちとして一番好ましい計画は何か、それが予算等の制約で厳しいなら次善の計画は何か、

- 次々善、次々々善の計画くらいまで用意しておくべきではないだろうか。
- ・我が国の炭酸ガス排出量を削減するのに、HTGR 導入が削減量にどの程度貢献するのかを明示する方が良い。ちなみに、クールアース 50 で選定した 21 の技術でも半減は難しく、せいぜい 60%程度である。22 番目の技術として高温ガス炉を入れれば良い。
 - ・日本の電力のためだけではなく、産業界のためにやるのが重要である。また、カザフは現状技術で対応し、日本は将来技術を開発する。HTTR については、研究炉としては大きなトラブルもなく良く動いていることを強調すべきである。
 - ・HTTR が良く動いていることを換算稼働率などでうまく広報していくことを考えてはどうだろうか。
 - ・マスタースケジュールを守るために公募研究と交付金で良く頑張ったと主張し、また、本分野については、本来的に交付金の機構枠内予算で実施すべきである。
 - ・炉特性・安全性について、「高温ガス炉の実用化に必要なデータ」の全体像(技術マッピング)を諸外国の先行炉の例を参照して明確化することが望まれる。
 - ・格納容器なしなどの原子炉の規制に関する課題を取り上げ、その活動を明確にしておくことよい。
 - ・トラブルで運転計画が変更されたことを説明すべきである。それにより、トラブルを乗り越えてよくやったと言える。
 - ・燃料・材料について、今後は、製造コスト低減も視野に入れた研究も期待したい。
 - ・沈着 FP の量は測定限界以下で有意な量が検出できていないという成果は、保守・補修が容易であるという高温ガス炉の特徴を証明する重要なデータであり、長期運転後には、格納容器が必要・不要の議論の根拠となり得る可能性があるものであり、もっと宣伝すべきである。
 - ・建設するときには、国、第3者が認定した評価指針を持っていないが、既に黒鉛材料については、JSME、原子力学会で評価指針の検討を始めており、燃料についても今後着手するという計画があることから、それらを明記すべきである。
 - ・接続技術について、今後は、的確にメーカーに技術移転を図って欲しい。
 - ・ガスタービン技術開発については、閉サイクルと再生サイクルガスタービンということで、一般に使われているガスタービンとは違ったものであり、そのために必要な R&D であると考えられる。
 - ・IS プロセスについて、世界のトップのポジションを、今後も維持していただきたい。
 - ・IS プロセスの非原子力化という言葉について、もともと原子力施設であるべきものを非原子力化するという意味に取られないよう言い回しを工夫した方がよい。併せて、亜硫酸ガスを毒性ガスと表記していることについて、PA 上、もっと良い表現を工夫して欲しい。
 - ・化学プロセスを実験室規模からスケールアップしていくときの問題については、化学プラントメーカーは失敗データを集める努力をして、スケールアップ時の経験的対策を整備している。原子力機構の蓄積してきた情報に加えてメーカーからの情報を得られるように、共同特許取得等を含めて協力体制をさらに強く構築して欲しい。
 - ・次期中期計画中に 30m³/h 規模の炉外水素製造、次次期で HTTR-IS システムによる 1000m³/h 規模の水素製造を目指したステップについては、次期中期計画の炉外

水素製造に向けた準備はできていると言える。ただし、次次期の HTTR-IS システムの水素製造量については、原子力で水素を作ったという社会的なインパクトの観点からはもっと少なくとも良いと考えられるが、原子炉との相互作用、さらには水素製造単価を評価するうえでは 1000m³/h の水素製造が望ましいと言える。

参考文献

- (1) 平成 18 年度 文部科学省 革新的原子力システム技術開発公募事業「高温ガス炉固有の安全性の定量的実証」に関する技術開発 最終報告書, 平成 19 年 3 月, 日本原子力研究開発機構 (CD-ROM) (原子力公開資料センター所蔵資料)
- (2) 「革新的原子力システム技術開発(核燃料サイクルシステム技術)」平成 19 年度事後評価対象課題「高温ガス炉固有の安全性の定量的実証」, (インターネットで以下のサイトにおいて閲覧可能。閲覧日時;平成 20 年 8 月 20 日)
<http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/20/03/08032519/001.htm>
- (3) 武井正信, 他, “高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の経済性評価,” 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 5, No. 2, p. 109-117 (2006).
- (4) K. Kunitomi et al., “JAEA’s VHTR for Hydrogen and Electricity Cogeneration: GTHTR300C,” Nuclear Engineering and Technology of Korean Nuclear Society, Vol.39 No.1, p. 9-20, 2007.
- (5) 関本博他, “原子力カルネッサンス(復興)の中での新興 —高温ガス炉で原子力に新たな地平を—”, 原子力eye, Vol.53, No.4, p.5-36 (2007).

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
物質質量	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基本単位	
	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
質量濃度 ^(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
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。
 (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		他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
	名称	記号		
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	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m kg s ⁻²	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	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	K
光照度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射線量, 比エネルギー分与, カーマ	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	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み、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ用いられる。
 (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		SI基本単位による表し方
	名称	記号	
粘り	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m s ⁻¹ s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m s ⁻¹ s ⁻² s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² 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	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	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	エクソ	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=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で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	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm 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。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _{SI} =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

- (c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 \equiv 」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=1cGy=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=200 mg=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	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

