



平成 20 年度 研究開発・評価報告書
評価課題「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」
(中間評価)

Assessment Report of Research and Development Activities in JFY2008
Activity: "Fast Reactor Cycle Technology Development Project"
(Interim Report)

次世代原子力システム研究開発部門
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

August 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<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「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」(中間評価)

日本原子力研究開発機構

次世代原子力システム研究開発部門

(2009年7月13日 受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構は、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」及び「文部科学省における研究及び開発に関する評価指針」、並びに原子力機構の「研究開発課題評価実施規程」等に基づき、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCTプロジェクト)」に関する中間評価を研究開発・評価委員会 (次世代原子力システム/核燃料サイクル研究開発・評価委員会) に諮問した。

これを受けて、次世代原子力システム/核燃料サイクル研究開発・評価委員会は、本課題に係る2008年度までの研究開発成果と2010年度までの研究開発計画に係るプロジェクトレビュー (技術的評価)、研究開発体制等に係るマネジメントレビュー (大局的評価) を行った。この結果、2010年に予定されている革新技术の採否判断に向けて研究開発の進捗状況を確認するとともに、今後の研究開発の進め方や、研究開発体制等における改善・見直しを図るべき事項について提言を行った。

本報告書は、研究開発・評価委員会 (次世代原子力システム/核燃料サイクル研究開発・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。

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門 (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

JAEA-Evaluation 2009-004

Assessment Report of Research and Development Activities in JFY2008
Activity: “Fast Reactor Cycle Technology Development Project” (Interim Report)

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 13, 2009)

Japan Atomic Energy Agency (hereinafter referred to as “JAEA”) asked the advisory committee “Evaluation Committee of Research and Development Activities for Advanced Nuclear System / Nuclear Fuel Cycle Technology” (hereinafter referred to as “Committee”) to assess the interim report on “Fast Reactor Cycle Technology Development Project (FaCT project)” in JFY2008, in accordance with “General Guideline for the Evaluation of Government R&D Activities” by Japanese Cabinet Office, “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.

In response to JAEA’s request, the Committee assessed the 2006-2008 R&D results, the 2009-2010 R&D program and its R&D management.

The Committee confirmed the progress status of the R&D for the adoption judgment on innovative technologies scheduled in 2010. As a result of the review, the committee has made suggestions for the future R&D plan and the improvements of the R&D organization structure / management.

Keywords : Evaluation Committee, Fast Reactor Cycle, FR Cycle, FaCT, Sodium-cooled FR, Advanced Nuclear Fuel Cycle, Commercialized Fast Reactor Cycle Systems

This work has been performed based on “General Guideline for Evaluation of Government R&D Activities” by Japanese Cabinet Office, etc.

目次

1. 概要	1
2. 次世代原子力システム／核燃料サイクル研究開発・評価委員会の構成	2
3. 審議経過	4
4. 評価方法	6
5. 評価結果（答申書）	9
参考資料（日本原子力研究開発機構資料）	29

付録（CD-ROM）

Contents

1. Overview	1
2. The assessment committee for advanced nuclear system / nuclear fuel cycle technology	2
3. Status of assessment	4
4. Procedure of assessment	6
5. Result of assessment (Committee report)	9
References (documents owned by Japan Atomic Energy Agency)	29

Appendix (CD-ROM)

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「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、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」に関する中間評価を研究開発・評価委員会（次世代原子力システム／核燃料サイクル研究開発・評価委員会）に諮問した。

これを受けて、次世代原子力システム／核燃料サイクル研究開発・評価委員会は、本課題に係る2008年度までの研究開発成果と2010年度までの研究開発計画に係るプロジェクトレビュー（技術的評価）、研究開発体制等に係るマネジメントレビュー（大局的評価）を行った。本委員会では、2010年に予定されている革新技術の採否判断に向けて研究開発の進捗状況を確認するとともに、これに基づき今後の研究開発の進め方や、研究開発体制等における改善・見直しを図るべき事項について提言を行った。

2. 次世代原子力システム／核燃料サイクル研究開発・評価委員会の構成

本委員会は、平成18年1月に設置され、関連分野の専門家を中心として、ジャーナリスト、ユーザーなど、幅広い分野の委員から構成されている。

委員長	森山 裕丈	京都大学大学院工学研究科教授
委員長代理	二ノ方 壽	東京工業大学原子炉工学研究所教授
委員	石井 保	三菱マテリアル（株）原子力顧問
(五十音順)	井上 正	電力中央研究所首席研究員
	大熊 和彦	東京工業大学統合研究院 イノベーションシステム研究センター特任教授
	芝 剛史	ウィングパートナーズ（株）代表取締役
	東嶋 和子	科学ジャーナリスト
	戸田 三朗	東北放射線科学センター理事
	中村 裕行	日本原燃（株）再処理事業部再処理計画部長
	藤井 靖彦	東京工業大学原子炉工学研究所教授
	堀池 寛	大阪大学大学院工学研究科教授
	松井 恒雄	名古屋大学エコトピア科学研究所長・教授
	松本 史朗	独立行政法人原子力安全基盤機構 技術顧問
	八木 秀樹	東京電力(株) 原子炉安全技術グループ課長

当該研究開発の評価にあたっては、現在の評価委員の中でも特に高速増殖炉サイクル技術に専門知識を有する委員により、委員会活動の一環として作業会方式で特に技術的な観点からの詳細な審議を行うことを定めた。作業会は「炉システム」、「燃料サイクルシステム（再処理、燃料製造）」の2分野について設け、研究開発・評価委員より作業会の主査を選任するとともに、評価作業を効果的に進める観点から委員以外で高速増殖炉サイクル技術の研究開発経験などを有する外部有識者にも参加いただいた。

両作業会ともに以下に示す構成で平成18年12月26日に設置した。（順不同）

【炉システム作業会】

主査	二ノ方 壽	東京工業大学原子炉工学研究所教授
メンバー	戸田 三朗	東北放射線科学センター理事
	堀池 寛	大阪大学大学院工学研究科教授
	八木 秀樹	東京電力(株) 原子炉安全技術グループ
有識者メンバー	稲垣 達敏	元日本原子力発電株式会社 研究開発室 主席研究員
	前田 清彦	株式会社NESI 営業企画本部 副本部長

【燃料サイクルシステム作業会】

主査	松本 史朗	独立行政法人原子力安全基盤機構 技術顧問
メンバー	石井 保	三菱マテリアル（株）原子力顧問
	井上 正	電力中央研究所首席研究員
有識者メンバー	榎田 洋一	名古屋大学エコトピア科学研究所・教授
	山村 修	原子力安全委員会事務局 規制調査課技術参与
	木村 雅彦	株式会社神戸製鋼所 機械エンジニアリングカンパニー顧問

3. 審議経過

- (1) 第1回目の委員会開催：平成20年11月21日
- 諮問項目の説明
 - 評価委員会の経緯とFaCT中間取りまとめの反映先説明
 - 評価の視点及び評価方法の決定
(委員会全体によるマネージメントレビュー(大局的評価)及び作業会形式によるプロジェクトレビュー(技術的評価)の実施手順について)
 - 「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」の中間評価に係る諮問、課題内容の説明・検討
- (2) 第2回目の委員会開催：平成21年3月4日
- マネジメントレビュー(大局的評価)の内容説明
 - ・ 組織体制、部門間連携
 - ・ PDCAと意志決定
 - ・ 要員確保と人材育成
 - ・ 予算確保
 - ・ 国際協力
 - ・ 技術継承、技術移転
 - ・ 情報発信
 - ・ 知識基盤整備と品質保証
 - 炉システム作業会及び燃料サイクルシステム作業会によるプロジェクトレビュー結果報告
- (3) 第3回目の委員会開催：平成21年4月7日
- マネジメントレビュー説明資料の質問への回答
 - 答申書(案)の検討
- (4) 作業会形式によるプロジェクトレビューの開催
- 1) 炉システム作業会
- 第1回目の開催：平成20年12月4日
- ・ 課題内容「炉システムの研究開発実施状況(FaCTプロジェクト)」の説明・検討
- 第2回目の開催：平成21年1月22日
- ・ 補足説明、質問への回答
 - ・ 評価内容の検討

2) 燃料サイクルシステム作業会

第1回目の開催：平成20年12月22日

- ・課題内容「燃料サイクルシステムの研究開発実施状況(FaCTプロジェクト)」
の説明・検討

第2回目の開催：平成21年2月2日

- ・補足説明、質問への回答

第3回目の開催：平成21年2月23日

- ・評価内容の検討

(5) 評価結果(答申書)のまとめ

上記の審議結果に基づき、評価結果をまとめ各委員の了承を得て答申書とした。

(6) 答申：平成21年6月3日

4. 評価方法

以下の評価作業手順及び評価項目に従い、評価を行った。

(1) 評価作業手順

1) 研究開発・評価委員会における審議

- ① 評価方法を定める。
- ② 原子力機構から課題説明資料により課題内容の説明を受け、内容を把握・検討する。

2) 評価作業

2.1) プロジェクトレビュー（技術的評価）

- ① 研究開発計画について、現在の評価委員の中でも特にFBR サイクル技術に専門知識を有する委員により、委員会活動の一環として作業会方式で詳細な審議を行う。
- ② 作業会は「炉システム」、「燃料サイクルシステム（再処理、燃料製造）」の2分野について設け、作業性の観点から委員外の外部有識者も参加させる。研究開発・評価委員より作業会の主査を選任する。
- ③ 原子力機構は、作業会にて研究開発の詳細な内容を説明する。各作業会メンバーは、評価に際し、課題について追加質問がある場合には、質問事項を書面で事務局に提出する。
- ④ 事務局は、作業会での質問及びメンバーからの追加質問に対する原子力機構の回答を作業会メンバーに送付する。
- ⑤ 各作業会メンバーは、課題説明資料、作業会における説明及び質問に対する回答を基に評価項目に従い評価を行い、評価意見を書面で事務局に提出する。
- ⑥ 事務局は、作業会メンバーから提出のあった評価意見を整理して、最終作業会の検討資料を作成する。
- ⑦ 最終作業会において、各作業会メンバーが行った評価、原子力機構の課題説明資料及び補足説明、作業会における討論に基づき、作業会としての評価を行う。
- ⑧ なお、作業会の資料については、作業会メンバーとなっていない研究開発・評価委員にも送付する。

2.2) マネージメントレビュー（大局的評価）

- ① 研究開発・評価委員会において、当該研究開発計画に関する取組みが適切に推進されているかどうかを評価する
- ② 各委員は、評価に際し、課題について追加質問がある場合には、質問事項を書面で事務局に提出する。
- ③ 事務局は、研究開発・評価委員会での質問及び委員からの追加質問に対する原子力機構の回答を委員に送付する。
- ④ 各委員は、課題説明資料、委員会における説明及び質問に対する回答を基に評価項目に従い評価を行い、評価意見を書面で事務局に提出する。
- ⑤ 事務局は、委員から提出のあった評価意見を整理して、次回の評価委員会の検討資料を作成する。

3) 各委員の評価結果に基づく研究開発・評価委員会における審議

- ① プロジェクトレビューについて、各作業会の主査より作業会の評価結果を報告し、これを踏まえて評価委員会としての総括を行う。
- ② マネージメントレビューについて、各委員が行った評価、原子力機構の課題説明資料及び補足説明、委員会における討論に基づき、評価委員会としての評価を行う。

4) 評価結果（答申書）のまとめ及び答申

- ① 委員長は、上記の審議結果に基づき、委員会としての評価結果をまとめ、理事長に答申する。なお、答申書には、次項に示す各評価項目及び総合評価について、委員会としての評価結果を記述する。

5) その他

- ① 評価をよりの確なものとし、また評価に対する被評価者の理解を深めるため、評価委員会および作業会には研究実施責任者及び担当者を出席させ、議論に参加させるものとする。

(2) 評価項目

2006年の高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCTプロジェクト)開始時において、本研究開発・評価委員会は2010年までの計画及びその進め方について評価を行っている。今回は前回の評価を踏まえ、2008年までの研究開発成果と2008年以降(2010年まで)の進め方及び計画について評価して頂く。

評価項目及び評価の視点(○印)を次のとおりとする。

1) 研究開発計画(プロジェクトレビュー)

- 革新的な技術の採用判断基準は適切か
- 目標の実現可能性(革新的な技術の採用決定が可能か)
- 研究開発の手段やアプローチ(課題への取り組みは妥当か)
- 今後の計画の妥当性

2) 研究開発実施体制(マネージメントレビュー)

- 実施体制(評価体制、目標達成管理、効率的開発)
- 国際協力体制
- 研究開発資源(予算、要員)
- 品質保証と知識基盤整備
- 人材育成(技術継承)

3) 総合評価

- 上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断

(3) 評価基準

各評価項目について評価を行い、これまでの研究成果と今後の進め方を総合的に判断する。

5. 評価結果(答申書)

平成21年6月3日

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
理事長 岡崎 俊雄 殿

研究開発・評価委員会
(次世代原子力システム/核燃料サイクル研究開発・評価委員会)
委員長 森山 裕丈

研究開発課題の評価結果について (答申)

当委員会に諮問 [20原機(次)037] のあった下記の研究開発課題の中間評価について、その評価結果をのとおりに答申します。

記

研究開発課題「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」

以上

次世代原子力システム／核燃料サイクル研究開発・評価委員会報告書
「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」の評価結果（中間評価）
（答申書）

当研究開発・評価委員会は、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT プロジェクト）」の開始時（2006 年度）において、革新技术の採否判断が行われる 2010 年度までの研究開発計画と研究開発実施体制等について確認するとともに、研究開発を進めるに当たっては、判断基準の具体化・定量化及び優先度の明確化、並びに研究開発体制の継続的検討、経営資源の継続的確保努力等を行うべきと指摘した（2007 年 5 月 18 日答申）。

FaCT プロジェクトのような実施期間が長期にわたる研究開発については、定期的に情勢の変化や進捗状況を把握し、計画変更の要否の確認等を行うことが必要との認識の下、前回評価時の指摘事項のフォローも含め 2008 年度までの研究開発成果と 2010 年度までの研究開発計画、及びプロジェクト管理に係る対応状況等について中間評価を実施した。今回の中間評価も前回と同様に、プロジェクトレビューとして研究開発成果や開発計画に係る技術的評価を、マネジメントレビューとして研究開発実施体制やプロジェクト管理方策等の大局的評価を実施した。

評価結果を総括すると以下の通りである。

これまでのところ、研究開発全般は、前回評価の指摘事項を踏まえ、概ねプロジェクト開始時の計画に従って進められている。研究開発の進展に伴い、一部の革新技术においてプラント設計に影響を及ぼす恐れのある新たな課題も見いだされてきているが、これらの課題に対しては、適宜対応方策を検討しながら研究開発が進められている。2010 年に予定されている革新技术の採否判断に向けて、新たな課題への対応方策の検討は必要であり、この検討を含めた研究開発計画は概ね妥当と評価する。

ただし、実用化に向け工学的に技術の成立性を見極めていく大型プロジェクト本来の困難さから、マネジメントの面で多くの改善すべき点が存在するのも事実であり、今後のプロジェクト遂行にあたり、いくつかの重要なポイントを指摘しておく。

前述のプラント設計に影響を及ぼす恐れのある課題については、その対応がプロジェクトの成否を決することになるので、今後とも、状況に応じた注意深い対応が必要である。また、2010年の判断において、いくつかの革新技術が採用できず、代替技術を採用することも想定されるので、その場合でもプラントとして総合的にバランスのとれたものとし、かつ開発目標を達成することが不可欠である。

実用化を目指した FaCT プロジェクトにおいては、各革新技術について、工学的な成立性を判断するに足る十分なデータベースを揃える必要がある。また、設計成立性の判断は、基盤的な知見に裏打ちされたものである必要がある。このような観点に立ち、引き続き適切なマネジメントが行われることが重要である。

第二再処理工場に関する議論が 2010 年頃から開始されることを踏まえ、その予備的な調査・検討に着手されたという、昨今の外部情勢の変化を勘案し、硬直的にプロジェクトを進めるのではなく、関係者の合意の下、必要に応じ計画を変更することも考えるべきである。「高速増殖炉サイクル実証プロセスへの円滑移行に関する五者協議会」等とも連携を図り研究開発が進められることを期待する。

プロジェクト管理については、多くの改善すべき点が見受けられた。このため、今後の修正の方向性や具体的な方策について提言を示すこととした。本評価委員会の提言を受け、また、昨今原子力機構のマネジメントに対して外部から出されている指摘事項にも真摯に耳を傾け、今後、継続的に改善が図られていくことが望まれる。その際、目標を明確に設定して改善を図っていくことが重要である。

プロジェクトレビューとマネジメントレビューの結果をそれぞれ次ページ以降に示す。

I. プロジェクトレビュー

A. 炉システム

炉システムについては、以下に示す 13 課題の革新技术の研究開発と、革新技术の成果を反映、統合したプラント設計研究が進められている。これらについて、2008 年までの研究開発成果及び 2009 年以降（2010 年まで）の計画及び進め方についての評価を実施した。

- ① 配管短縮のための高クロム鋼の開発
- ② システム簡素化のための冷却系の 2 ループ化
- ③ 1 次冷却系簡素化のためのポンプ組込型中間熱交換器開発
- ④ 原子炉容器のコンパクト化
- ⑤ システム簡素化のための燃料取扱系の開発
- ⑥ 物量削減と工期短縮のための格納容器の S C 造化
- ⑦ 高燃焼度化に対応した炉心燃料の開発
- ⑧ 配管 2 重化によるナトリウム漏洩対策と技術開発
- ⑨ 直管 2 重伝熱管蒸気発生器の開発
- ⑩ 保守・補修性を考慮したプラント設計と技術開発
- ⑪ 受動的炉停止と自然循環による炉心冷却
- ⑫ 炉心損傷時の再臨界回避技術
- ⑬ 大型炉の炉心耐震技術

2008 年までについては、上記①～⑬に示す革新技术の研究開発は全般的に計画通りに進捗しているが、一方で革新技术の新たな課題が存在していることも明らかになってきた。これらの課題については、既に、解決のための方策や、革新技术の採用が困難と判断された場合に備えた代替技術についても、検討されている。このような研究開発の進め方や成果は妥当であり、実証炉・実用炉の概念設計を計画通りに進める上で重要なことである。今後はこれまでの成果や検討に基づき研究開発計画を修正していくことで、2010 年における革新技术の採否判断は可能であると考えられる。

1. 2008年までの研究開発成果

(1) 各革新技術の進捗状況

2006年からFaCTプロジェクトの研究開発を進めたことにより、前述の13の革新技術のうち、①配管短縮のための高クロム鋼の開発、④原子炉容器のコンパクト化、及び⑨直管2重伝熱管蒸気発生器の開発について課題の存在が明らかになってきた。それぞれの革新技術における課題の具体的な内容を以下に示す。

①配管短縮のための高クロム鋼の開発

- ・大口径シームレス配管の製造
- ・改良9Cr鋼配管の溶接継ぎ手部でのTYPE-IVき裂発生懸念

④原子炉容器のコンパクト化

- ・316FR製大型リング鍛造品の製造
- ・耐震条件の見直しに伴うプラント設計への影響

(上記2点に伴い、炉容器の板厚や溶接箇所を変更した場合の構造健全性への影響や、炉壁冷却方式の変更によるコンパクト構造への影響)

⑨直管2重伝熱管蒸気発生器の開発

- ・管板用極厚鍛鋼品と長尺密着2重伝熱管の製造
- ・管板の熱過渡構造健全性

これらの課題については、プラント設計に影響する可能性があることから、その解決の方針を定め、鋼材メーカーとの議論や設計検討などを行っている。課題への対応としては、現状設備で製作見通しを得るための検討、新たな製造設備への投資規模の見積もり、評価手法・評価基準の高度化や合理化、及び評価のための材料データの充足方法の検討などであり、既にこれに基づいた開発にも着手している。さらに、2010年の判断において革新技術の採用が困難となった場合に備えて、代替技術の検討も併せて実施している。この様に課題に対しては対策を進めており、上記以外の革新技術の研究開発は計画通りに進捗していることから、2008年までの研究開発の進め方と成果は妥当であると考ええる。

(2) 各革新技術に共通の事項

FaCT プロジェクトを3年間進めてきたことにより、革新技術の抱える課題が抽出されたが、これにより設計検討へ反映すべき事項や革新技術の開発の中で対応すべき事項が明確になってきたことは成果の一つであると考えられる。

2、2009年以降（2010年まで）の計画及び進め方

(1) 各革新技術の開発計画

主要構造物の製作に関して、既述のように原子力機構としても対応策を明らかにしているところではあるが、委員会としても同様の視点から留意点を示す。

①配管短縮のための高クロム鋼の開発及び⑨直管2重管蒸気発生器の開発

製作技術と密接に関係している革新技術である。鋼材メーカーの製造設備規模の観点から実現可能となるようにメーカー等ともよく調整し、目標を達成するために策定した対応策を着実に実施していくことが必要である。

④原子炉容器のコンパクト化

316FR 鋼の大型リング鍛造品の製造の可否は、その成立性を左右するものであることからできるだけ早期に見通しを示すことが必要である。リング鍛造品が製造できない場合に備えて、炉容器概念の設計変更も具体化しておかなければならない。

また、⑨直管2重伝熱管蒸気発生器の開発、⑩保守・補修性を考慮したプラント設計と技術開発、及び⑫炉心損傷時の再臨界回避技術の革新技術については今後以下の観点到留意して研究開発を進めていくことを期待する。

⑨直管2重伝熱管蒸気発生器の開発

SG 伝熱管からの水漏洩検出は、事象拡大防止の上で非常に重要であり、高速で高感度の計測を目指した研究を今後とも継続すること。

⑩保守・補修性を考慮したプラント設計と技術開発

検査精度の目標については、設計との整合性を図りつつ、合理的に柔軟に設定していくこと。

⑫炉心損傷時の再臨界回避技術

仮想的な炉心損傷事故時の再臨界を回避する炉心の考え方とその実証、及び、その後の事故影響を確実に原子炉容器内に留めること（原子炉容器内終息）は、合理的な格納施設を実現する上でのキーであり、プラントシステムのコスト低減へ大きな貢献をする。よって、再臨界回避を構成する各要素技術開発と技術の実証を継続して行うこと。

なお、「⑦高燃焼度化に対応した炉心燃料の開発」については、これまで計画通りに進捗して所定の成果は得られており、技術的な課題が存在しているわけではないが、「常陽」の停止により照射試験の着手が遅れる。このため「常陽」の再起動スケジュールが明確になった時点で照射データ取得スケジュールを検討し、実機適用への影響について検討・整理することとしている。「常陽」が再起動すれば所定のデータは得られると考えられるが、予想しない不慮のトラブル発生はもとより、再起動の遅れにより、今後の試験計画への影響が懸念されることから、予定通りの再起動が望まれる。

(2) 各革新技術に共通の事項

実用炉・実証炉の設計概念に影響する可能性がある課題については、対応方針が検討されている。これらの対応策に基づいて研究開発計画を一部見直していくことで、2010年に革新技術の採否判断を行うことは可能であると考えられる。

革新技術の幾つかについては、例えば、35m長の蒸気発生器伝熱管に対して15m長の試作で製作性を見通しを得るなど、現状の成果情報に基づく外挿評価により採否判断する必要が生じることも想定されるが、この外挿評価の妥当性をチェックする基準を明確にしておかなければならない。

また、これまで革新技術を補うための代替技術の検討も行われているが、より確実な代替技術の検討も進めて、2010年の革新技術の採否判断に対処できるようにしておくことが必要である。本案と代替案は、安全性、構造成立性、経済性、開発コスト、開発リスクなどの観点でメリット、デメリットを定量化し、判断することになる。

以上に基づくことにより、2010年以降では革新技術と、必要な場合にはその代替

技術を用いて実証炉・実用炉の研究開発を進めることが期待される。

耐震検討条件の変更による原子炉容器の板厚増加、炉上部構造(UIS)下部の高サイクル熱疲労対策のための制御棒上部案内管構造変更等の炉内流動適正化、及び熱過渡応力緩和のためのSG管板構造の見直しなどの設計変更が行われている。この様に変更を行ったケースについてはその理由となった事象だけでなく、変更が他に及ぼすと考えられる影響についてあらゆる視点から評価し、新たな課題が生じないことを確認しておく必要がある。変更した結果についても、適切に技術開発計画に反映することが重要である。

革新技術の採否判断を行った後、2011年からはプラントの概念設計が本格化されるが、これに先だって熱流動や安全などにおける設計・評価手法の充実・高度化にも着手しておくべきである。これらの設計・評価手法の充実・高度化に不可欠である解析コードの開発・整備における留意点を以下に述べる。

- ・安全設計・評価に用いる解析コードの開発検証は重要であり、適用対象に応じて求められる解析精度、及び現象の適切なモデリングを考慮したコードシステムとして完成させていくことが求められる。
- ・流力振動や流動に関する試験実施(ハード分野)に当たっては、数値シミュレーションによる実験の最適化、コード検証に必要なデータの取得、流れのモデル化に必要な情報の取得など、より研究現場(ソフト分野)との密接な連携を行い、実験によりモデルの妥当性が確認されていることが必要である。
- ・機器の形状最適化や熱流動評価における数値シミュレーションを設計手法に活用する方向性の確立、設計に採用されるために必要なシミュレーションの品質保証、及び長期的継続的な研究実施体制を確実なものにしておくべきである。

B. 燃料サイクルシステム

燃料サイクルについては、以下の先進湿式法再処理に係わる 6 課題、簡素化ペレット法燃料製造に係わる 6 課題、合わせて 12 課題の革新技術の開発及びプラントの設計研究が進められている。これらについて、2008 年までの研究開発成果及び 2009 年以降（2010 年まで）の計画及び進め方についての評価を実施した。

（先進湿式法再処理）

- ① 解体・せん断技術の開発
- ② 高効率溶解技術の開発
- ③ 晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発
- ④ ウラン、プルトニウム、ネプツニウム一括回収する高効率抽出システムの開発
- ⑤ 抽出クロマト法によるマイナーアクチニド回収技術の開発
- ⑥ 廃棄物低減化（廃液 2 極化）技術の開発

（簡素化ペレット法燃料製造）

- ⑦ 脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発
- ⑧ ダイ潤滑成型技術の開発
- ⑨ 焼結・O/M比調整技術の開発
- ⑩ 燃料基礎物性研究
- ⑪ セル内遠隔設備開発
- ⑫ TRU燃料取扱い技術

2008 年までのところ、上記①～⑫に示す革新技術の研究開発は概ね計画通りに進められてきたといえる。その過程において、新たな技術的課題が幾つか明らかになっており、2010 年までにこれらの課題を克服するためには集中的な取り組みがなされているものと判断される。

FaCT プロジェクト開始当初の計画は 2010 年の革新技術の採否判断のためには必要なものであり、今後も予定された試験データを取得出来るよう着実に進める必要があるが、一方で、環境変化に伴う社会のニーズの変化に適切に対応できる柔軟性・適応性も必要である。特に、FBR 実証炉計画における燃料製造技術の早期確立に向けたシ

ナリオ検討や、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期に向けた具体的検討が急がれる。

1. 2008年までの研究開発成果

(1) 各革新技术開発の進捗状況

再処理技術開発の①～⑥の革新技术の開発について、これまでのところ当初計画に従った研究開発が進められてきている。その過程において、特に新規性の高い技術である、③晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発、⑤抽出クロマト法によるマイナーアクチニド回収技術の開発については、プロセス開発上の課題が見いだされた。したがって、今後はこれらの課題克服のために適切な計画の調整が必要である。

③晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発

- FaCTプロジェクト開始以降にCPFで実施された基礎試験の結果、FPに対する除染係数が目標値を下回っている例が複数存在する。しかし、最近実施された試験結果から除染係数を改善するプロセス条件が見つかる可能性が示唆されており、それに基づく解決方針を有していることは評価できる。

⑤抽出クロマト法によるマイナーアクチニド回収技術の開発

- 抽出クロマト法を実用施設に適用するにあたっての採否判断基準としては、プロセス成立上の基準と、工業規模機器成立性上の基準が考えられる。2010年までにこれら両方の成立性を示す必要があることからプロセス開発と機器開発を並行して進めていくという原子力機構の考え方については理解できる点があるものの、新規性が高い本技術の技術開発の方法としてはプロセス開発の優先度がより高いと判断する。

燃料製造技術開発の⑦～⑫の革新技术開発については、簡素化ペレット法のPu富化度調整から焼結・O/M調整までを一貫して試験する小規模MOX試験設備の整備が進められ、2008年度末から2009年度末までに完了する。量産設備開発としてウラン試験、模擬試料試験、コールドモックアップ試験が進捗している。今後の試験データ等の取得等、着実な進捗を期待したい。また、当初計画に加えFBR実証炉計画における

燃料製造技術の早期確立に向けた取組みとして、プルトニウム第三開発室のFBR燃料製造ラインを利用した技術開発試験に既に着手した点は妥当である。それに伴い、優先順位を考慮した開発計画を展開するとしているが、今後の進捗管理で以下の点に留意する必要がある。

⑦脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発、⑧ダイ潤滑成型技術の開発、及び⑨焼結・O/M調整技術の開発

- ・ 優先順位に考慮した開発を行い2010年の採否判断材料を多角化するとしているが、必要な試験データを入手すべく技術開発を加速する必要がある。

なお、再処理及び燃料製造の技術開発で革新技術毎に設定されている採用に係わる成果目標については、一部の設定根拠に曖昧さが見られるものの、実用化の第一段階として2010年に提示する成果目標としては概ね妥当と言える。今後も、研究開発の進捗によって新たに得られた知見や異なる視点からの考察を取り入れて継続的に目標の具体化に取り組み、より包括的、論理的、定量的なものとするよう望まれる。

(2) 各革新技術に共通の事項

研究開発の手段やアプローチ

プロセス開発と機器開発は合理的な連携をとりつつ進めるという基本的アプローチが採られているが、これは妥当な考え方である。そのアプローチを進めるにあたって重要なのは、プロセス開発上の成立性や他の技術オプションに対する総合的優位性の確認であり、プロセス開発の進捗度に合わせた機器開発やプロセスシステムの構築への展開はその確認の上で進められるべきものと思われる。

FBR実証炉計画の進展に対応して、現在開発を進めている低除染簡素化ペレット法をFBR実証炉燃料製造技術へ適用していく際の課題解決に向けた集中的な検討がなされており、現実的な対応の考え方が早急に提示されることが期待できる。

2. 2009年以降（2010年まで）の計画及び進め方

（1）各革新技术の開発計画

前述の①～⑫の革新技术について、提示された開発計画は概ね妥当であるが、以下の点に留意して進める必要がある。今後これらに対する具体的考え方を明確化していくことが望まれる。

①解体・せん断技術の開発

- 成果目標の内、「短尺せん断」における粉化率目標値について、後工程での粉体の取扱いにも配慮した検討を行うこと。

③晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発、及び、④ウラン、プルトニウム、ネプツニウム一括回収する高効率抽出システムの開発

- 成果目標の除染係数目標値について、設定根拠の更なる具体化をはかること。
- プロセス開発、機器開発、プロセスシステムの構築をバランス良く進め、研究開発の後戻りが無いようにする必要がある。今後も、プロセス開発上の成立性に立脚し、プロセス開発の進捗度に合わせて機器開発やプロセスシステムの構築を進めていくアプローチとすることが重要である。

⑤抽出クロマト法によるマイナーアクチニド回収技術の開発

- 担体の基礎特性なども視野に入れたプロセス開発を重点的に進めて、プロセス開発上の成立性の可否を判断すること。

⑦脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発

- 再処理と燃料製造間の原料及びリワーク品の受け渡しについて、プラントの裕度・操業性の観点からの検討を行うこと。

⑨焼結・O/M調整技術の開発

- 2010年の採否判断に際し十分な根拠を提示すること。特に、O/M調整は、収率データが十分揃わない場合は採否判断時期を見直すなどの柔軟な対応を図ること。

（2）各革新技术に共通の事項

研究開発の手段やアプローチ

研究開発にあたっては、原子力機構に技術的知見が着実に蓄積されるような進め方とすると共に、将来の技術移転を視野に入れた長期的な開発戦略を構築することが必要である。

FaCTプロジェクトで実用化を目指すFBRサイクルシステムは、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期に段階的に導入されることが考えられる。FaCTプロジェクトを進めるに際しては、導入時期を勘案しながら研究開発の取り組みを調整し、社会のニーズに応じていく姿勢が望まれる。

このため、MAリサイクルと低除染化概念の技術展開については、今後具体化されていく軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期検討や実証炉燃料製造技術開発計画と整合を採りつつ、現実的な計画を早急に詰めていくことが求められている。

なお、その中であって、簡素化ペレット法のFBR実証炉燃料製造への適用のための研究開発は加速する必要がある。

革新技術成果の設計研究への集約

中間取りまとめ以降2010年までは実用施設を対象とした設計研究を重点的に進める計画となっており、その考え方は概ね妥当である。ただし、以下の点に留意して進めること。

- エンジニアリングの観点から何が必要とされる重要なデータかを検討して研究開発を進めることが重要である。
- プラントの操業性（施設の裕度を考慮した工程間のバッファやリワークの考え方）、保守設計方針の明確化（遠隔保守採用範囲の同定等）や具体的な核不拡散性の検討などを進めることが望まれる。
- 既存の技術を発展・応用させた革新技術については、東海再処理工場やPu燃料製造センターなどの先行施設で培われた技術的知見や研究開発経験を継承して有効活用することが望まれる。

Ⅱ. マネジメントレビュー

プロジェクトの管理面について、前回の中間評価（平成 18 年度実施）における指摘（組織・体制の継続的検討、経営資源の確保努力、人材育成・技術継承の検討）への対応状況の確認を含め、「組織体制」、「PDCA」、「要員」、「予算」、「人材育成」等の観点で評価を実施した。

その結果、前回評価の指摘事項への対応を図るなど、プロジェクト管理の面で一定の努力がなされていると認められた。

特に、今回の原子力機構からの説明では、プロジェクト管理に係わるそれぞれの項目毎に、プロジェクト開始時の考え方、期中での改善事項、並びに、自己評価（良好点及び現状の課題と今後の改善方向）が示され、自ら反省を加えながら進めようとしている点は評価できる。

しかし、FBR サイクルの実用化に向けた大型プロジェクトを遂行するという点では、多くの改善すべき点も見受けられ、評価委員会では、様々な視点からの意見が出された。本答申書ではこれらを指摘すると共に、今後の修正の方向性や具体的な方策について提言を行った。本評価委員会の指摘や提言を受け、また、昨今原子力機構のマネジメントに対して外部から出されている指摘事項にも真摯に耳を傾け、今後、継続的に改善が図られていることが望まれる。その際、目標を明確に設定して改善を図っていくことが重要である。

以下、個別の評価結果を記す。

1. 組織体制

国内の組織体制については、五者協議会をはじめとする検討体制が構築され、着実にロードマップに沿って進行している。

今後はこの体制を機能させることが焦点となるため、その機能化環境・基盤や関係主体のインセンティブのあり方などを明らかにしつつ、体制の機能水準などに係る目標とモニタリングのあり方を提示し、自己評価する体制に進んでいくことが望まれる。

また、機構内についていえば、全体を強力に統率できるプロジェクト・マネジメント体制を構築すべきであり、構成組織の権限と責任を明確にした上で、その体制の中

心ともなるべき副部門長、研究開発推進室の役割が重要となることから、それらの機能強化を図ることが必要である。既に着手され始めているが、各種会議体の位置付けや役割を見直し、より連携性・機動性を高めるために再整理して運営することが急務である。

組織体制を再編した場合に忘れてならないことは、それによってどれだけの成果と課題が生まれてきたかを自らが追跡評価し、さらに改善する仕組みと姿勢をもつことである。

2. PDCA と意志決定

PDCA サイクルについては FaCT プロジェクト開始時より注意深く導入されており、プロジェクトの遂行にあたって、経営トップから現場まで繰り返し PDCA を廻す中で問題意識が生まれ、例えば炉システムについては重要な技術判断を伴う意志決定のための会議体プロセスを期中に改善したり、他部門の専門家の助言を適切に反映させるためのアドバイザー会議を設置するなど、研究開発に対する組織的管理の仕組みが根付いてきていることが確認された。これは、PDCA サイクルが有効に機能している一面として評価に値する。

PDCA サイクルをより一層確実に廻していくための前提として、計画とその目標を構成員全員が等しく理解することが極めて重要であり、その PDCA サイクルによるモニタリングと見直しは、プロジェクトの達成、ひいては経営の向上につながることを認識するよう浸透に努めるべきである。外部要因によってこれら計画や目標が変更となった場合でも変更内容を迅速に徹底して PDCA サイクルの再構築をすることが欠かせない。なお、PDCA サイクルでは、研究開発の成果を実体的に創出する「Do」パートに焦点をあて、この「Do」パートのモチベーションを高める PDCA サイクルとなるべきである。

炉システムについて重要な技術判断を伴う意志決定のための会議体プロセスが期中に改善されたことなど、これまでに学んだことを燃料サイクルを含めた全体のマネジメントに効率よく反映することが必要となってくる。

さらに意志決定の妥当性と正当性を確保するには、その過程と責任の所在の明示が

重要であることから、実施責任・評価責任・評価結果の反映責任といった各主体の分離・明確化を図ることが求められる。とくに 2010 年の革新技术の採否判断においては、意志決定に関連した合理性判断情報が特に重要になると思われ、業務品質確保の観点からも透明性の高い意志決定プロセスの構築を行うことが不可欠である。また、今後の課題としても認識されている決定事項の管理不足に対応するため、決定事項の有形化と関連部署への整合的な徹底により適切な進捗管理が可能となるよう進めてほしい。

なかでもトップレベルにおける意志決定の妥当性を高めるためには、戦略的視点を持ち、加速・推進機能を有する諮問・助言組織を設けることもその手段の一つといえる。

なお、マネジメント評価をより実効的なものとするために、組織・体制の整備に加え、運営水準目標を設定することが望ましい。マネジメントの評価項目毎に取り組みの内容・体制・運営などに関わる指標を目に見えるかたちで表すことが可能であればより効果的である。また、既存の様々な内部評価・第三者評価・外部評価が混在する中で、作業の重複や評価の形骸化・過剰さを排するような枠組みで再編することも望まれる。

3. 要員確保と人材育成

要員の確保について、多くの努力がなされていることは評価できるが、原子力機構外との連携を含め、どの分野にどういう形でどの技術を蓄積し発展させていくのか、という基本構想が無い限りは妥当な要員確保計画は望めない。これに対応するためには、年代、専門分野等も考慮にいれ、いつ、どんな人材がどれだけ必要になるか、それを確保するのにどうするか、について WBS などにより検討し、ロードマップを描いておくことが必要である。合わせて人材の効率的な配置・流用・維持も視野に入れた組織・運営マネジメントが求められる。

その際、これまでの要員が減ることなく維持されるという他部門と比べて恵まれた環境が見込めなくなった場合にも備え、先手を打った計画としておくとともに、長いプロジェクト期間を考えたとき、今後も優れた若い人材を確保することは極めて困難

になることから、プロジェクトの持つ科学技術的魅力を大学等に伝えたり、公募事業などの実施にあたって産業界・大学との協力を密にし、人材育成にも貢献していくという地道な努力も大切である。

また、その一方で管理関係の人員を極力低減し、実質的に技術開発を行う人員を増やしたり、OBの活用やITの利用などの内部でのあらゆる取組も重要となってくる。

研究開発機関においては、まず専門家の育成が第一義的に重要であるが、系統的なOJT/OffJT体制の充実を図るとともに、「仕事のやりがい・誇り、必要性理解、日常管理の充実、是正措置、表彰制度」などの人材育成に向けたアクションの総合運用を図る必要がある。加えて、プロジェクトを円滑に進めていくためにはそのリーダーを継続的に輩出していかなければならず、そのためにも部門としての明確な育成方針を持っておくべきである。

以上のように人材育成の基本的考え方を整理した上でキャリアパスのモデルを作成するなど、能力・キャリア開発プログラムの整備に向けて検討を開始すべきである。

4. 予算確保

これまでは、限られた運営費交付金に加えて外部資金を獲得するなど、研究費を確保する努力がなされ、特に大きな問題もなくプロジェクトを進めてきていると評価する。また、必要となる資金を明確にし、予算効率化の事例提示など、内部のマネジメント評価としても前進したものと言える。

しかしながら、今後の予算推移を見ても、現状の予算確保見込額を超過することは明らかであるため、プロジェクト計画を所定の計画に乗せられるか、つまり不足資金を確保できるかどうか大きな課題となってくる。これまでも増して「常陽」や関連施設の有効活用を図ることも重要な視点の一つであるが、その他の解決策の模索、あるいはより効率を高めてプロジェクトを遂行できるような知恵が求められる。

予算や成果の管理体制の拡充を図り、さらには、予算確保・運用に関わる様々な不確実性やリスクに対応するマネジメントの導入を検討することも望まれる。

5. その他

技術移転については、2015年頃を見通した実施主体への円滑な移転を考えると、MFBR との人事交流を積極的に行うことがその具体策の一つであるが、先ず機構内の専門家にどのレベルまでの技術を確認し、どのような状態(蓄積を経て)で技術移転するかの基本戦略を持っておくことが大切である。

国際協力については、協力体制が整備され、協調できる分野において日本がリードしながら効率的に協力がなされていると評価できる。

米国の原子力政策が不透明な中、リード役としての我が国の役割は重要となっているが、様々な制約がある中で我が国の国益が最大となることが国際協力を進める上での大前提であり、目標の設定、対応する戦略がまずあるべきである。そのためには、我が国原子力関連産業界の強み・弱み・特性を見据えた上で、比較優位論に基づいた国際戦略の検討が必要である。ただ、国家基幹技術であることを考慮すれば、国際協力の枠組みに関わらず、いずれの技術についても国内の技術力を高めておく必要があると思われる。

また、協力の成果についても内部において適切に評価していくことが大切である。

情報発信については、セミナーの開催など種々の努力が目に見える形でなされており評価できる。

原子力に関しては市民レベル、地域レベルでの理解が重要であり、そのためには戦略的な取組みが必要であり、その前提として推進主体の一人ひとりが社会に説明できることが要請されてきている。社会コミュニケーションの重要性の理解を研究者全員が深めるとともに、これを支援し対社会関係の前線で働く現場がわかる広報専門家を育成・確保し、また広報と研究現場の密な連携を図ることが大切である。

さらに、アジアでのエネルギーセキュリティまで対象を拡げて、原子力機構としてのビジョン、そして産業戦略のベースを作り、関係主体に問いかける試みも必要と思われる。

知識基盤整備と品質保証については、知識管理システムと品質保証システムの構築に向けた取組に着手しており高く評価できる。

これらのシステム構築を進めていくにあたっては、国益（知的情報の管理）や安全性、説明責任、技術集積・継承、活用インターフェースといった幅広い観点に配慮する必要があることから、統合的な情報管理と品質保証を目指した実効的・先進的なシステムの創出を期待する。

部門間の連携については、プロジェクト開始当初から協力態勢を意識し、連携強化が図られつつあると考える。しかし、基礎研究部門、開発研究部門、エンジニアリング部門のそれぞれが得意とする分野を考慮して、お互いに補完的な役割を果たすことができるような有機的な連携がまだ十分とはいえない印象も受ける。プロジェクト推進の観点からは、部門の役割責任を明確にしつつ、必要な補完・連携関係を分析・設計し、これを担う機会・体制や情報・交流プラットフォームを整備・運用して連携目標を追求するなど効果的・実質的な連携を目指すことが重要である。

なお、上記のような意見・評価が出された一方で、「部門間連携を図らなければ効率的なプロジェクト推進が望めないような体制は好ましくなく、プロジェクトのための組織とすべき」との意見も出された。

最後に、プロジェクトレビューとマネジメントレビューに跨る事項について指摘する。

幅広い戦略的調査を実施する FBR サイクルの実用化戦略調査研究から、実用化に集中した FaCT プロジェクトの段階へ移行していることから、本プロジェクトにおいては、各革新技術について、学術的には評価されにくいデータも含め、工学的な成立性を判断するに足る十分なデータベースを揃える必要がある。また、設計成立性に関わる自然現象の理解も重要で、そのためには基礎・基盤研究を充実する必要がある。

このような観点に立ち、開発計画の策定、研究開発資源の配分、研究者・技術者へのインセンティブ付与などの面で、引き続き適切なマネジメントが行われることが重要である。

以上

This is a blank page.

参考資料

- 参考資料 1 研究開発課題の中間評価について（諮問）
- 参考資料 2 評価結果に対する原子力機構の措置
- 参考資料 3 研究開発・課題評価委員会説明資料（CD-ROMに記載）
- 資料3-1 研究開発・評価委員会の経緯とFaCT中間取りまとめの反映先
 - 資料3-2 高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCTプロジェクト）に関する中間評価における評価方法（案）
 - 資料3-3 研究開発・評価委員会のスケジュール（FaCT中間取りまとめ）
 - 資料3-4 高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCTプロジェクト）2008年中間取りまとめ（要約版）
 - 資料3-5 高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCTプロジェクト）2008年中間取りまとめ -炉システムの概要-
 - 資料3-6 高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCTプロジェクト）2008年中間取りまとめ -燃料サイクルシステムの概要-
 - 資料3-7 高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCTプロジェクト）マネジメントレビュー説明資料
 - 資料3-8 FaCTプロジェクトに係るマネジメントレビュー説明資料

This is a blank page.

参考資料 1

研究開発課題の中間評価について（諮問）

This is a blank page.

20原機（次）037
平成20年11月7日

研究開発・評価委員会
（次世代原子力システム／核燃料サイクル研究開発・評価委員会）
委員長 森山 裕丈 殿

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
理事長 岡崎 俊雄

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。

[諮問事項]

「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」に関する中間評価

以上

This is a blank page.

参考資料 2

評価結果に対する原子力機構の措置

This is a blank page.

次世代原子力システム／核燃料サイクル研究開発・評価委員会
「高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCTプロジェクト)」の評価結果 (中間評価)
に対する措置

平成21年6月
独立行政法人 日本原子力研究開発機構

独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」とする)は、国家基幹技術である高速増殖炉サイクルの研究開発を行っています。本研究は2006年3月に終了した高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究(FS)に引続いて、研究名称を高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCTプロジェクト)と改め、主概念として選定したナトリウム冷却炉(MOX燃料)、先進湿式法再処理及び簡素化ペレット法燃料製造の組合せを中心に、革新的技術の開発とその成果を反映した設計研究等を実施してきました。

今回の研究開発・評価委員会では、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT)」を評価対象とし、FaCT開始から2008年までの研究開発成果と、2010年までの研究開発の進め方について、技術的評価についてプロジェクトレビューを、また研究開発の体制や管理等にかかる大局的評価についてはマネージメントレビューを実施して頂きました。

本評価結果において頂戴したご指摘・ご意見については、今後の研究開発に反映し、以下の措置を講ずることとします。

【革新技術に係わる課題と開発目標の達成について】

【答申】 プラント設計に影響を及ぼす恐れのある課題については、その対応がプロジェクトの成否を決することになるので、今後とも、状況に応じた注意深い対応が必要である。

2010年の判断において、いくつかの革新技術が採用できず、代替技術を採用することも想定されるので、その場合でもプラントとして総合的にバランスのとれたものとし、かつ開発目標を達成することが不可欠である。

中間取りまとめ及びその評価で摘出された課題に対して引き続き注意深く対応をしていくとともに、状況変化により発生する新たな課題にも見落としがないよう注意を払います。

革新技術の採否判断を進めるにあたって代替技術を採用する場合には、それを採用することによる他への影響についても評価することとします。また、性能目標の達成度を評価する方法を検討し、これに基づきシステム全体としての達成度を評価します。代替技術を採用した場合などにおいても、性能目標をバランスよく達成できるプラント概念とするよう検討します。

【革新技術の採否と設計成立性の判断について】

【答申】 実用化を目指したFaCTプロジェクトにおいては、各革新技術について、工学的な成立性を判断するに足る十分なデータベースを揃える必要がある。設計成立性の判断は、基盤的な知見に裏打ちされたものである必要がある。このような観点に立ち、引き続き適切なマネジメントが行われることが重要である。

2010年に革新技術の採否判断及びプラント仕様の暫定、2015年に革新技術の成立性提示とプラント仕様の決定を行うため、十分なデータベースを揃えられるよう努めます。また、モックアップ的な試験で実証データを取得するのみでなく、現象を把握するための要素試験、現象をシミュレーションするための解析コードの開発とそれに必要な基礎データの取得などの基盤的研究を進めるよう、適切なマネジメントにも努めます。

【燃料サイクルシステムの開発の進め方について】

【答申】 第二再処理工場に関する議論が2010年頃から開始されることを踏まえ、その予備的な調査・検討に着手されたという、昨今の外部情勢の変化を勘案し、硬直的にプロジェクトを進めるのではなく、関係者の合意の下、必要に応じ計画を変更することも考えるべきである。「高速増殖炉サイクル実証プロセスへの円滑移行に関する五者協議会」等とも連携を図り研究開発が進められることを期待する。

軽水炉サイクルからFBRサイクルへの円滑な移行や実証炉初装荷燃料の確実な供給など移行期特有の検討課題については、原子力機構内の関連する部門、拠点等と協力しながら予備的な検討を実施しているところです。その検討結果を踏まえた燃料サイクル全体のロードマップを、五者協議会等の場に提案し、関係者間での認識を共有しながら早急に具体化していきたいと考えています。

【研究開発の管理について】

【答申】 プロジェクト管理については、多くの改善すべき点が見受けられた。このため、今後の修正の方向性や具体的な方策について提言を示すこととした。本評価委員会の提言を受け、また、昨今原子力機構のマネジメントに対して外部から出されている指摘事項にも真摯に耳を傾け、今後、継続的に改善が図られていくことが望まれる。その際、目標を明確に設定して改善を図っていくことが重要である。

プロジェクト管理については、委員会から多くの示唆に富む提言を頂いた。提言を一度に実行に移すことは難しいが、年度毎の目標を定めて、継続的にプロジェクト管理の改善に努めます。その際には、FaCTのみならず機構全体に寄せられる外部からの指摘に対しても配慮し、真摯に改善に努めます。

次ページ以降に、プロジェクトレビュー(炉システムと燃料サイクルシステム)とマネジメントレビューに関する個別の指摘事項について機構の措置を示します。

【プロジェクト・レビュー（炉システム）】

	委員会の答申	機構の措置
R-1	<p>①配管短縮のための高クロム鋼の開発、及び⑨直管2重管蒸気発生器の開発</p> <p>製作技術と密接に関係している革新技術である。鋼材メーカーの製造設備規模の観点から実現可能となるようにメーカー等ともよく調整し、目標を達成するために策定した対応策を着実に実施していくことが必要である。</p>	<p>プラントメーカー、材料メーカー等と引き続き調整を図りながら進めております。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・長尺2重伝熱管の製作については、製作技術の開発と製造設備への投資をするか否かの判断が課題となっております。これらの開発・検討はミルメーカーと共にを行うこととし、前者については15m長の2重伝熱管の試作試験に基づき実機長（35m）の製作性を見通す方法について検討を行い、後者については必要な設備規模などについて検討し、採否判断の材料に資することと致します。 ・薄肉大口径直管・エルボのシーメンスによる製作についてはミルメーカー、プラントメーカー、JAEAが参加するW/Gにおいて各製作方法における技術課題の摘出や製作コストに係わる議論を行いながら、実機配管の製作性に係わる検討を進めて参ります。 ・SG用大型管板の製作見通しに係わる検討では、当該物量の半分程度の銅塊を用いた試作試験や雰囲気制御に係わる研究によって実規模極厚鍛鋼品の製作性を見通せることから、この方法で実規模の製作性に係わる検討を進めます。
R-2	<p>④原子炉容器のコンパクト化</p> <p>316FR鋼の大型リング鍛造品の製造の可否は、その成立性を左右するものであることからできるだけ早期に見通しを示すことが必要である。リング鍛造品が製造できない場合に備えて、炉容器概念の設計変更も具体化しておかなければならない。</p>	<p>ホットベッセル構造の成立に向けて今後も316FR鋼の大型リング鍛鋼品の研究開発を推進していきたいと考えています。</p> <p>大型リング鍛鋼品の製作性については、製造上の課題および課題解決方を提示するとともに、実規模に近い試作による製作性確認も検討しています。</p> <p>一方、ホットベッセルの代替技術についても並行して検討を進めます。</p> <p>大型リング鍛鋼品の製作が不可能な場合には、原子炉容器を板曲げ溶接構造</p>

		<p>で製作することになります。この場合にはナトリウム液面部に縦溶接を設けることとなります。この溶接部に発生する熱応力を低減するため、炉心入口の低温ナトリウムの一部を炉壁の冷却に用いる炉壁冷却構造(コールドベッセルという)も検討しています。</p>
<p>R-3</p>	<p>⑨直管2重伝熱管蒸気発生器の開発 SG 伝熱管からの水漏洩検出は、事象拡大防止の上で非常に重要であり、高速で高感度の計測を目的とした研究を今後とも継続すること。</p>	<p>ご指摘のとおり、Na 中水素計装の高速化・高感度化は、事象拡大防止及び伝熱管設計の合理化に有効です。FS において各種の Na 中水素計概念について比較検討を実施し、改良型ニッケル膜水素計を候補概念として抽出しました。これらの改良について現在要素技術開発を実施しています。これに加え、将来の更なる高度化方策として、音響計、固体電解質水素計等の技術についても基礎的レベルでの研究を幅広く検討していくことにしています。</p>
<p>R-4</p>	<p>⑩保守・補修性を考慮したプラント設計と技術開発 検査精度の目標については、設計との整合性を図りつつ、合理的に柔軟に設定していくこと。</p>	<p>ナトリウム中検査装置及び蒸気発生器伝熱管検査装置の精度については、設備の裕度等設計サイドと整合を図り、適切に設定していきます。</p>
<p>R-5</p>	<p>⑪炉心損傷時の再臨界回避技術 仮想的な炉心損傷事故時の再臨界を回避する炉心の考え方とその実証、及び、その後の事故影響を確実に原子炉容器内に留めること(原子炉容器内終息)は、合理的な格納施設を実現する上でのキーであり、プラントシステムのコスト低減へ大きな貢献をする。よって、再臨界回避を構成する各要素技術開発と技術の実証を継続して行うこと。</p>	<p>EAGLE-2 プログラムにおける改良内部ダクト型燃料集合体設計の有効性をより直接的に確認する炉内外試験の実施、模擬物質を用いた基礎試験に基づくメカニズム解明、及び SIMMER-III コードによる実機解析を総合して再臨界回避技術の実証を行います。さらに厳しい再臨界が回避された後の事故後過程における炉心物質再配置と長期冷却性に関わる試験データを取得し、それを用いて解析コードの検証を行い、実機解析により事故の影響を原子炉容器内にとどめられることを示します。</p>

<p>R-6</p>	<p>「⑦高燃焼度化に対応した炉心燃料の開発」については、これまで計画通りに進捗して所定の成果は得られており、技術的な課題が存在しているわけではないが、「常陽」の停止により照射試験の着手が遅れる。このため「常陽」の再起動スケジュールが明確になった時点で照射データ取得スケジュールを検討し、実機適用への影響について検討・整理することとしている。「常陽」が再起動すれば所定のデータは得られると考えられるが、予想しない不慮のトラブル発生はもとより、再起動の遅れにより、今後の試験計画への影響が懸念されることから、予定通りの再起動が望まれる。</p>	<p>「常陽」の再起動に関しては、昨年度はファイバースコープにより炉容器内の状況を詳細に観察しました。今後は、対策案の策定及び干渉物の回収等に係る詳細設計を進めるとともに、できる限り早期に再起動を図るよう努力して参ります。</p> <p>なお、現時点では常陽は停止していることを踏まえ、2010年、2015年での程度の照射データがあれば適切な判断ができるのか、データ取得計画で想定しているデータの質・量と判断の考え方、必要な場合は代替手段のとり方等についても整理していきまます。</p>
<p>R-7</p>	<p>革新技術の幾つかについては、例えば、35m長の蒸気発生器伝熱管に対して15m長の試作で製作性の見通しを得るなど、現状の成果情報に基づくと外挿評価により採否判断する必要が生じることも想定されるが、この外挿評価の妥当性をチェックする基準を明確にしておかなければならない。</p>	<p>ご指摘のとおり、外挿評価ではその妥当性を明示することが極めて重要と考え、その基準を明示するよう努めています。例えばSGに適用する2重伝熱管の製作性については、35m長の2重伝熱管を工業生産する際の技術的課題を抽出した上で、課題に関する要素試験を実施し外挿性を担保しています。具体的には、35m長2重管製作では縮管加工時の焼付きと管の曲がり課題となりませんが、焼付きに関しては加工速度を工業生産レベルに設定した上で温度変化を精密に計測すること、曲がりに関しては加工曲がりが発生することを想定した上で品質を確保したまま矯正する技術を確立することによって評価可能としていきます。この他の外挿評価が必要となる革新技術についても同様に検討を進めていく考えです。</p>

R-8	<p>また、これまで革新技術を補うための代替技術の検討も行われているが、より確実な代替技術の検討も進めて、2010年の革新技術の採否判断に対処できるようにしておくことが必要である。</p> <p>本案と代替案は、安全性、構造成立性、経済性、開発コスト、開発リスクなどの観点でメリット、デメリットを定量化し、判断することになる。</p>	<p>2010年の革新技術の採否判断時に向けて、本案と代替案について並行して研究開発や設計検討を進め、安全性、構造成立性、経済性、保守・補修性などの観点から総合的評価を実施し、革新技術の採否判断をする計画としています。</p> <p>従来に無い新しい新たな技術開発要素を含む革新技術に関しては、その開発が期限内に完了しないことも想定して代替技術の検討を並行して進めています。さらに、代替技術の検討成果については、革新技術採否判断の際に主概念と各種の判断要素を定量的に比較評価できるように準備を進めています。</p>
R-9	<p>耐震検討条件の変更による原子炉容器の板厚増加、炉上部構造(UIS)下部の高サイクル熱疲労対策のための制御棒上部案内管構造変更等の炉内流動適正化、及び熱過渡応力緩和のためのSG管板構造の見直しなどの設計変更が行われている。この様に変更を行ったケースについてはその理由となった事象だけでなく、変更が他に及ぼされる影響についても、確認しておく必要がある。変更した結果についても、適切に技術開発計画に反映することが重要である。</p>	<p>ご指摘の様に設計条件等の見直しなどにより設計変更を行ったケースについては、その理由となった事象だけでなく、変更が他に及ぼすと考えられる影響について、安全性、構造成立性、経済性、保守・補修性などの観点から総合的評価を実施し、新たな課題が生じないことを確認する予定です。</p>
R-10	<p>革新技術の採否判断を行った後、2011年からはブラントの概念設計が本格化されるが、これに先だって熱流動や安全などにおける設計・評価手法の充実・高度化にも着手しておくべきである。</p>	<p>2010年度より直ちに上部プレナム及びびホットレグ配管内の流れと構造の連成現象を考慮した高精度の流動解析設計・評価手法の構築に着手するとともに、安全裕度を適正化するための統合化した設計評価ツール群の整備に着手し、概念設計に反映できるように準備します。</p>

R-11	<p>安全設計・評価に用いる解析コードの開発検証は重要であり、適用対象に応じて求められる解析精度、及び現象の適切なモデリングを考慮したコードシステムとして完成させていくことが求められる。</p>	<p>JSFR (Japanese Sodium Fast Reactor)では崩壊熱除去に完全自然循環方式を採用していることが従来の高速増殖炉と異なる点であり、その設計・評価手法の開発が重要と認識しております。このため、現在実施している 1/10 縮尺自然循環水試験、1/5 縮尺ナトリウム試験、及び今後実施される冷却系機器開発試験の結果を活用して、必要とされる解析精度に留意しながら、安全設計・評価に用いる解析コードの検証や適切なモデリングの構築を行います。また実機データとしては「もんじゅ」性能試験結果も用いて、解析コードの検証を行います。</p>
R-12	<p>流力振動や流動に関する試験実施(ハード分野)に当たっては、数値シミュレーションによる実験の最適化、コード検証に必要なデータの取得、流れのモデル化に必要な情報の取得など、より研究現場(ソフト分野)との密接な連携を行い、実験によりモデルの妥当性が確認されていることが必要である。</p>	<p>流力振動や流動の数値シミュレーション開発に関しては、WGを組織して設計者、試験技術者、数値解析技術者が連携して議論しながら、進めています。WGでの議論を踏まえ、例えば水試験で実際の流れ場が再現できるような試験条件(スケールなど)設定の下で、適切な試験データを取得し、数値解析の妥当性を確認しながら行っています。今後もご指摘の点に留意して開発を進めます。</p>
R-13	<p>機器の形状最適化や熱流動評価における数値シミュレーションを設計手法に活用する方向性の確立、設計に採用されるために必要なシミュレーションの品質保証、及び長期的継続的な研究実施体制を確実なものにしておくべきである。</p>	<p>特に設計に利用する際は、数値解析手法の品質保証に留意した開発を進めることとし、基本検証(システムが正しい解を出すこと: verification)及び精度検証(実機実現象適用性確認: validation)を実施し、高品位な数値シミュレーションシステムとしていきます。また、今後も、現在と同様に産官学で連携した研究実施体制を適切に維持するように努めてまいります。</p>

【プロジェクト・レビュー（燃料サイクルシステム）】

		委員会の答申	機構の措置
F-1	<p>FaCTプロジェクト開始当初の計画は2010年の革新技術の採否判断のためには必要なものであり、今後も予定された試験データを取得出来るよう着実に進める必要があるが、一方で、環境変化に伴う社会のニーズの変化に適切に対応できる柔軟性・適応性も必要である。特に、FBR実証炉計画における燃料製造技術の早期確立に向けたシナリオ検討や、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期に向けた具体的な検討が急がれる。</p>	<p>FaCTの2010年の成果目標達成に向けて、今後も必要な研究開発を計画通り実施していく努力を続けて参ります。</p> <p>燃料製造技術の早期確立に向けて、現在、機構内の関係箇所が協力した作業組織を立ち上げ、技術的課題の検討に加えて原料調達や施設利用のフィードバックなどの広範囲の検討を実施している所であり、H21年度中には検討結果をまとめて、今後の具体的活動を早期に開始する計画であります。</p> <p>軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期の検討については、機構内で関係箇所が緊密に連携していく体制としており、そこでの検討成果を2010年頃に開始される国での議論に提供していきたいと考えております。</p>	
F-2	<p>⑦脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発、⑧ダイ潤滑成型技術の開発及び⑨焼結・O/M調整技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 優先順位に考慮した開発を行い2010年の採否判断材料を多角化するとしているが、必要な試験データを入力すべく技術開発を加速する必要がある。 	<p>実証炉燃料製造や導入期燃料製造施設に対する革新技術の段階的な適用など、実用化に至るシナリオ展開を考慮した優先順位を踏まえて柔軟な開発を進めるとともに、ご指摘されている必要なデータの取得のために最大限努力して参る所存です。また、2010年の採否判断においてはFaCTで行った試験データに加え、先行施設（プルトニウム燃料第三開発室）で得られた知見等も加えて総合的な評価を行う予定です。</p>	

F-3	<p>今後、研究開発の進捗によって新たに得られた知見や異なる視点からの考察を取り入れて継続的に目標の具体化に取り組む、より包括的、論理的、定量的なものとすよう望まれる。</p>	<p>プロセス研究による基礎データの拡充、要素機器開発の進展、設計研究による全体システム概念の詳細化といった研究開発の進捗に基づき、今後目標の具体化を継続的に進めて参ります。</p>
F-4	<p>プロセス開発と機器開発は合理的な連携をとりつつ進めるという基本的アプローチが採られているが、これは妥当な考え方である。そのアプローチを進めるにあたって重要なのは、プロセス開発上の成立性や他の技術オプションに対する総合的優位性の確認であり、プロセス開発の進捗度に合わせた機器開発やプロセスシステムの構築への展開はその確認の上で進められるべきものと思われる。</p>	<p>実施している研究開発計画はご指摘のアプローチに基づき立案・実施されており、今後この考え方を基本として進めて参ります。</p> <p>また、革新技術における採否判断を行うための技術開発においても、研究開発の進展に伴う状況変化に合わせてプロセス開発上の成立性や他の技術オプションに対する総合的優位性の確認を行いつつ、柔軟に進めていくこととします。</p>
F-5	<p>①解体・せん断技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> • 成果目標の内、「短尺せん断」における粉化率目標値について、後工程での粉体の取扱いにも配慮した検討を行うこと。 	<p>粉化率目標値については性能向上（溶解速度向上）の観点から検討してきましたが、オフガス工程への粉体の移行や溶解槽内の粉体挙動など粉体を取扱うことで懸念される課題に対応するためのデータの蓄積についても実施し、それらの知見を合わせてより最適なせん断・溶解条件の追求に努めて参ります。</p>
F-6	<p>③晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発、及び、④ウラン、プルトニウム、ネプツニウム一括回収する高効率抽出システムの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> • 成果目標の除染係数目標値について、設定根拠の更なる具体化をはかること。 • プロセス開発、機器開発、プロセスシステムの構築をバランズ良く進め、研究開発の後戻りが無いようにする必要がある。今後、プロセス開発上の成立性に立脚し、 	<p>燃料サイクルシステムにおける除染係数目標値は燃料を取り合う高速炉システムとの関係から定められるもので、両方の研究開発・設計研究の進展を反映して、設定根拠の具体化・合理化を進めてまいります。</p> <p>特に晶析技術開発においては、除染係数に影響を与える化学種の挙動評価（結晶への溶液の付着、再析出、複塩の生成などの除染係数を悪化させうる原因現象の解明と、それらの現象と温度・ウラン濃度・酸濃度などのプロセス制御因子との関係の定性的・定量的</p>

	プロセス開発の進捗度に合わせて機器開発やプロセスシステムの構築を進めていくアプローチとすることが重要である。	把握)を中心としたプロセス開発(追加的なホット試験の実施と、試験データに基づく基礎化学的現象モデルの検討)を重点的に進めていく計画と致します。
F-7	⑤抽出クロマト法によるマイナーアクチノイド回収技術の開発 <ul style="list-style-type: none"> • 担体の基礎特性なども視野に入れたプロセス開発を重点的に進めて、プロセス開発上の成立性の可否を判断すること。 	ご指摘頂いた基礎的研究分野においては、吸着材粒子径や内部孔構造などの構造因子についても検討していくことと致します。
F-8	⑦脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発 <ul style="list-style-type: none"> • 再処理と燃料製造間の原料及びリワーク品の受け渡しについて、プラントの裕度・操作性の観点からの検討を行うこと。 	ご指摘頂いた点について、再処理・燃料製造間のスクラップなどのリワーク方法の設計検討や、トラブル発生時の施設稼働率に及ぼす影響を考慮した原料の受け渡し方法の検討を実施致します。 特に、実証炉燃料製造施設の検討においては、原料Puの調達先やその物理的性状、製造施設の立地などについてケーススタディを行い、考えられるケース毎にどのように対応すべきか・技術開発の展開をどうすべきかについて幅広く検討致します。
F-9	⑨焼結・O/M調整技術の開発 <ul style="list-style-type: none"> • 2010年の採否判断に際し十分な根拠を提示すること。特に、O/M調整は、収率データが十分揃わない場合は採否判断時期をずらすなどの柔軟な対応を図ること。 	ご指摘されている必要なデータの取得のために最大限努力して参る所存ですが、実証炉燃料製造技術などの段階的な技術展開シナリオを考慮した上で、他に優先すべき計画がある場合は本技術開発についての計画を2015年までの長期的な視点から修正していくことといたします。
F-10	研究開発にあたっては、原子力機構に技術的知見が着実に蓄積されるような進め方とすると共に、将来の技術移転を視野に入れた長期的な開発戦略を構築することが必要である。	将来の技術移転や研究開発の合理的な進め方について留意しつつ、技術的知見が着実に原子力機構内に蓄積されるように努めていきます。

		<p>具体的には、プロセス開発の鍵となるウラン試験・ホット試験や、機器開発の成立性を判断する重要な試験は、原則、機構内で実施することとします。また、試験の効率的な実施のために機構外（大学、メーカー等）で実施していく場合には、そこで得られた技術的情報も含めて、一連のデータを機構が一元的に評価、管理することにより、技術の蓄積を図って参ります。さらに、システム設計研究においても、機構が内外の技術開発の成果を集約して施設の技術仕様及び各種設計条件を決定し、それらの技術的根拠を管理することとしていきます。</p>
<p>F-11</p>	<p>FaCTプロジェクトで実用化を目指すFBRサイクルシステムは、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期に段階的に導入されることが考えられる。FaCTプロジェクトを進めるに際しては、導入時期を勘案しながら研究開発の取り組みを調整し、社会のニーズに応えていく姿勢が望まれる。</p> <p>このため、MAリサイクルと低除染化概念の技術展開については、今後具体化されていく軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期検討や実証炉燃料製造技術開発計画と整合を採りつつ、現実的な計画を早急に詰めていくことが求められている。</p>	<p>軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期の検討については、機構内で関係箇所が緊密に連携して検討を行う体制としており、ここでの検討成果を2010年頃に開始される国での議論に提供していきたいと考えております。</p> <p>MAリサイクルと低除染化概念の技術展開の考え方についても第二再処理工場や実証炉計画・実証炉燃料製造との関係を整理した上で、2010年までに検討結果を提示できるように進めて参ります。</p>
<p>F-12</p>	<p>簡素化ペレット法の FBR 実証炉燃料製造への適用のための研究開発は加速する必要がある。</p>	<p>簡素化ペレット法の研究開発は FBR 実証炉燃料製造への適用にむけて開発を促進させる計画といたします。特に、実証炉燃料製造技術としても有望なダイ潤滑成型技術や焼結・O/M 調整技術及び燃料基礎物性研究については、小規模 MOX 試験データの早期取得、プルトニウム燃料第三開発室の量産ラインにおける試験的適用などに優先的に取り組んでいく計画としております。</p>

<p>F-13</p>	<p><u>革新技術成果の設計研究への集約</u></p> <p>中間取りまとめ以降2010年までは実用施設を対象とした設計研究を重点的に進める計画となっており、その考え方は概ね妥当である。ただし、以下の点に留意して進めること。</p> <ul style="list-style-type: none"> • エンジニアリングの観点から何が必要とされる重要なデータかを検討して研究開発を進めることが重要である。 • プラントの操作性（施設の裕度を考慮した工程間のバッファやリワークの考え方）、保守設計方針の明確化（遠隔保守採用範囲の同定等）や具体的な核不拡散性の検討などを進めることが望まれる。 • 既存の技術を発展・応用させた革新技術については、東海再処理工場やPu燃料製造センターなどの先行施設で培われた技術的知見や研究開発経験を継承して有効活用することが望まれる。 	<ul style="list-style-type: none"> • 研究開発との相互フィードバックに基づく実用施設の設計研究を通じて各々のデータの重要性を明らかにし、継続的に研究開発計画の改善に努めて参ります。 • 技術的内容を深めて、より説得力のある実用施設概念を提示するため、ご指摘の事項についての具体化を設計研究の重要項目として取り組んで参ります。 • これまでも先行施設の知見・経験の活用に取り組んでまいりましたが、今後は軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期の検討や実証炉燃料製造技術開発を通じて知見・経験の活用を加速していく所存です。
-------------	---	---

【マネジメント・レビュー】

	答申書	機構の措置
M-1	<p>国内の組織体制については、五者協議会をはじめとする検討体制が構築され、着実にロードマップに沿って進行している。</p> <p>今後はこの体制を機能させることが焦点となるため、その機能化環境・基盤や関係主体のインセンティブのあり方などを明らかにしつつ、体制の機能水準などに係る目標とモニタリングのあり方を提示し、自己評価する体制に進んでいくことが望まれる。</p>	<p>五者協議会をはじめとする検討体制の機能化については、目指す水準や環境・条件の整備などの目標に関し、五者による協議の場において検討が進むよう、働きかけていきます。</p>
M-2	<p>全体を強力で統率できるプロジェクト・マネジメント体制を構築すべきであり、構成組織の権限と責任を明確にした上で、その体制の中心ともなるべき副部門長、研究開発推進室の役割が重要となることから、それらの機能強化を図ることが必要である。既に着手され始めているが、各種会議体の位置付けや役割を見直し、より連携性・機動性を高めるために再整理して効果的に運営することが急務である。</p>	<p>プロジェクトの進展に合わせた各種会議体の構成・役割等についての見直しを今年度中に行い、プロジェクト関係者に周知します。</p> <p>プロジェクト・マネジメント体制の中で研究開発推進室の役割が大きいと認識しており、プロジェクトの進展に合わせて、その時重要な事項に対応できるよう推進室内のライン構成・要員配置等を見直しを図ります。</p> <p>副部門長の役割についても同様に見直しを図ります。</p>
M-3	<p>組織体制を再編した場合に忘れてならないことは、それによってどれだけの成果と課題が生まれきたかを自らが追跡評価し、さらに改善する仕組みと姿勢をもつことである。</p>	<p>組織再編に関しては、年度毎のPDCA（理事長ヒアリング）や本評価委員会での外部評価の場に、自己評価した結果を提示する等して、更なる改善に結び付けていきます。</p>
M-4	<p>PDCA サイクルをより一層確実に廻していくための前提として、計画とその目標を構成員全員が等しく理解することが極めて重要であり、そのPDCAサイクルによるモニタリングと見直し、プロジェクトの達成、ひいては経営の向上につながることを認識するよう浸透に努めるべきである。外部要因によってこれら計画や目標が変更とな</p>	<p>目標設定などの基本方針、プロジェクトを進める上でのその時々々の判断事項などは、部門会議等で議論し、方向性を決めていくことが基本となっている。部門会議等で出された情報や決定事項等のプロジェクト構成員への周知は、ラインの中での情報共有が基本となるが、更に情報共有を徹底するよう努めま</p>

	<p>った場合でも変更内容を迅速に徹底してPDCAサイクルの再構築をすることが欠かせない。</p>	<p>す。 また、本指摘を踏まえ、部門内の円滑なコミュニケーションを図る上で効果的なKMSなどの仕組み作りにも努めます。</p>
<p>M-5</p>	<p>なお、PDCAサイクルでは、研究開発の成果を実体的に創出する「Do」パートに焦点をあて、この「Do」パートのモチベーションを高めるPDCAサイクルとなるべきである。 炉システムにおいて重要な技術判断を伴う意志決定のための会議体プロセスが期中に改善されたことなど、これまでに学んだことを燃料サイクルを含めた全体のマネジメントに効率よく反映することが必要となってくる。 さらに意志決定の妥当性と正当性を確保するには、その過程と責任の所在の明示が重要であることから、実施責任・評価責任・評価結果の反映責任といった各主体の分離・明確化を図ることが求められる。</p>	<p>FaCT プロジェクトにおいては、当面、2010年の革新技術の採否判断が最も重要な「Do」である。プロジェクトの幹部が、判断に必要な情報を担当箇所から入手、判断して、担当箇所がアクションに移していくこと、それをプロジェクト内で見える形で実施していくことがモチベーションの向上に繋がると考えます。それが炉システムの導入した判断のプロセスと考えます。 炉システムで構築した仕組みをしっかりと運用するとともに、その経験を、燃料サイクルを含めた全体のマネジメントに反映します。 また、技術的判断プロセスを明確化するとともに承認書等による決定事項の有形化を進めます。</p>
<p>M-6</p>	<p>2010年の革新技術の採否判断においては、意志決定に関連した合理性判断情報が特に重要になると思われ、業務品質確保の観点からも透明性の高い意志決定プロセスの構築を行うことが不可欠である。また、今後の課題としても認識されている決定事項の管理不足に対応するため、決定事項の有形化と関連部署への整合的な徹底により適切な進捗管理が可能となるよう進めてほしい。</p>	<p>革新技術の採否判断に向けて、決定事項の適切な管理を目指した明文化と関連箇所への周知に加え、品質管理システム(QMS)及び知識管理システム(KMS)の今年度中の運用開始を目指します。</p>

M-7	<p>トップレベルにおける意志決定の妥当性を高めるためには、戦略的視点をもち、加速・推進機能を有する諮問・助言組織を設けることもその手段の一つといえる。</p>	<p>戦略的事項については、検討すべき対象に応じて、その都度適材を集めた検討チームをアドホック的に設け、検討を進めます。 既存の各会議体について、その役割を、意志決定、助言（トップの意志決定支援組織）、情報周知に分類・整理して、明確にした上で、諮問・助言のための会議体を活用して戦略検討チームの検討結果を諮っていきます。</p>
M-8-1	<p>マネジメント評価をより実効的なものとするために、組織・体制の整備に加え、運営水準目標を設定することが望ましい。マネジメントの評価項目毎に取り組みの内容・体制・運営などに関わる指標を目に見えるかたちで表すことが可能であればより効果的である。</p>	<p>マネジメントについても、年度毎の具体的な目標を定めて実施し、その進捗状況が確認できるようにします。</p>
M-8-2	<p>既存の様々な内部評価・第三者評価・外部評価が混在する中で、作業の重複や評価の形骸化・過剰さを排するような枠組みで再編することが望ましい。</p>	<p>機構が設定して実施している評価については、それ以外の視点・役割を整理・明確にし、効率化を図る。それ以外の評価に関しては、効率化を図っていただけるよう、働きかけていきます。</p>
M-9	<p>要員の確保について、多くの努力がなされていることは評価できるが、機構外との連携を含めどの分野にどのような形で技術を蓄積し発展させていくのか、という基本構想が無い限りは妥当な要員確保計画は望めない。これに対応するためには、年代、専門分野等も考慮にいれ、いつ、どんな人材がどれだけ必要になるか、それを確保するのにどうするか、についてWBSなどにより検討し、ロードマップを描いておくことが必要である。合わせて人材の効率的な配置・流用・維持も視野に入れた組織・運営マネジメントが求められる。</p>	<p>人材マネジメントの基本構想の検討を開始します。 炉については、2015年頃に実証炉の基本設計が開始される時点で、どこにどのような人材が必要か、その人材をどこでどのように育成し、移転していくかという視点が重要と考えています。プロジェクトの進捗に合わせた基本構想を検討します。 サイクルについては、軽水炉サイクルからFBRサイクルへの円滑な移行を考慮したロードマップの検討がまず必要であり、それを踏まえて人材マネジメント計画の検討を行って行く必要があると認識しています。</p>

<p>M-10</p>	<p>これまでの要員が減ることなく維持されるところという他部門と比べて恵まれた環境が見込めなくなった場合にも備え、先手を打った計画としておくとともに、長いプロジェクト期間を考えたとき、今後も優れた若い人材を確保することは極めて困難になることから、プロジェクトの持つ科学技術的魅力を大学等に伝えたり、公募事業などの実施にあたって産業界・大学との協力を密にし、人材育成にも貢献していくという地道な努力も大切である。</p>	<p>国の施策として実施されている公募型研究等の場を活用し、大学・産業界との連携を密にした形での研究開発の展開を行い、これを人材育成につなげていきます。</p>
<p>M-11</p>	<p>管理関係の人員を極力低減し、実質的に技術開発を行う人員を増やしたり、OBの活用やITの利用などの内部でのあらゆる取組も重要となってくる。</p>	<p>プロジェクト・マネジメントの効率化を図りながら、極力最小限の人員で実施していきます。 原子力機構のFBR・サイクルの関係者の多くがリタイアの時期にさしかかっていることから、これらの技術者の知識・経験を有効に活用できるようにしていきます。また、KMSの導入を含めて、ITの活用は、業務の効率化により要員不足を補い、人材育成にも寄与することから活用を図っていきます。</p>
<p>M-12</p>	<p>研究開発機関においては、まず専門家の育成が第一義的に重要であるが、系統的なOJT/Off-JT体制の充実を図るとともに、「仕事のやりがい・誇り、必要性理解、日常管理の充実、是正措置、表彰制度」などの人材育成に向けたアクションの総合運用を図る必要がある。加えて、プロジェクトを円滑に進めていくためにはそのリーダーを継続的に輩出していかなければならず、そのためにも部門としての明確な育成方針を持つておくべきである。 以上のように人材育成の基本的考え方を整理した上でキャリアパスのモデルを作成するなど、能力・キャリア開発プログラムの整備に向けて検討を開始すべきである。</p>	<p>(M-9に同じ。) 部門として将来必要となる要員の質・量、両面での分析を行い、その要員の確保と育成を図っていきます。</p>

<p>M-13</p>	<p>今後の予算推移を見ても、現状の予算確保見込額を超過することは明らかであるため、プロジェクト計画を所定の計画に乗せられるか、つまり不足資金を確保できるかどうか大きな課題となってくる。これまでにも増して「常陽」や関連施設の有効活用を図ることも重要な視点の一つであるが、その他の解決策の模索、あるいはより効率を高め、プロジェクトを遂行できるような知恵が求められる。</p>	<p>プロジェクトの進捗を見ながら、適切な開発計画となるように逐次フィードバックをかけていきます。 既存施設の有効利用は、今後とも進めていきます。また、国際協力による合理化にも着手していきます。 加えて、これまでの FaCT プロジェクトの成果を次期「原子力政策大綱」等の国の方針・政策の議論の場に反映し、必要な予算の確保に努めていきます。</p>
<p>M-14</p>	<p>予算や成果の管理体制の拡充を図り、さらには、予算確保・運用に関わる様々な不確実性やリスクに対応するマネジメントの導入を検討することも望まれる。</p>	<p>WBS、年度実施計画等を活用した予算や成果の管理を今後とも的確に実施します。 環境変化に係わるリスク情報を常に収集し、想定される変化を予測して、予算獲得方針の見直しや開発計画の見直しを行い、早めにリスクへ対応できるように努めます。</p>
<p>M-15</p>	<p>技術移転については、2015 年頃を見通した実施主体への円滑な移転を考えるとき、MFBR との人事交流を積極的に行うことがその具体策の一つであるが、先ず機構内の専門家にどのレベルまでの技術を確保し、どのような状態(蓄積を経て)で技術移転するかの基本戦略を持つておくことが大切である。</p>	<p>炉に関する人事交流や技術移転については、三菱との間で検討を開始しています。このため、それぞれの分野に状況に応じた対応となる。例えば、プラント設計に関して、機構と三菱が共同で作業できる場を設け、技術的な交流を深め両者のポテンシャルを高めます。機構から MFBR へ技術移転すべき、安全設計や炉心・燃料設計の一部については、MFBR から機構へ要員を派遣し人材育成に努めます。</p>

<p>M-16</p>	<p>米国の原子力政策が不透明な中、リーダー役としての我が国の役割は重要となってきたが、様々な制約がある中で我が国の国益が最大となることから国際協力を進める上での大前提であり、目標の設定、対応する戦略がまずあるべきである。そのためには、我が国原子力関連産業界の強み・弱み・特性を見据えた上で、比較優位論に基づいた国際戦略の検討が必要である。ただ、国家基幹技術であることを考慮すれば、国際協力の枠組みに関わらず、いずれの技術についても国内の技術力を高めておく必要があると思われる。</p> <p>協力の成果についても内部において適切に評価していくことが大切である。</p>	<p>日本の技術の国際標準化と合理的な開発を目標に国際協力を展開します。</p> <p>具体的な国際協力の実施に当たっては、国内の連携に基づき戦略的取り組みが必要であることから、産官学の連携も考慮した五者の場を活用して、評価と戦略調整を実施します。</p>
<p>M-17</p>	<p>原子力に関しては市民レベル、地域レベルでの理解が重要であり、そのためには戦略的な取り組みが必要であり、その前提として推進主体の一人ひとりが社会に説明できることが要請されてきている。社会コミュニケーションの重要性の理解を研究者全員が深めるとともに、これを支援し対社会関係の前線で働く現場がわかる広報専門家を育成・確保し、また、広報と研究現場の密な連携を図ることが大切である。</p>	<p>市民や地域の目線に立った原子力広報を目指し、部門の一人ひとりが広報・広聴の重要性を認識することで広報員として活動できるよう、アウトリーチ活動等に取り組んでいきます。</p> <p>また、広報部と密に連携を図り、適切な広報活動に取り組んでいきます。</p>
<p>M-18</p>	<p>アジアでのエネルギーセキュリテイまで対象を拡げて、原子力機構としてのビジョン、そして産業戦略のベースを作り、関係主体に問いつける試みも必要と思われる。</p>	<p>機構としてのビジョンなどを検討するために、まずはFBR導入シナリオや、FBR サイクル技術が日本や世界のエネルギーセキュリテイに及ぼす影響などについての検討を進めます。</p>

M-19	<p>これらのシステム構築を進めていくにあたっては、国益（知的情報の管理）や安全性、説明責任、技術集積・継承、活用インタフェースといった幅広い観点に配慮する必要があることから、統合的な情報管理と品質保証を旨とした実効的・先進的なシステムの創出を期待する。</p>	<p>まずは、KMS、QMS のより高度な導入を進め、定着化を図ることとし、将来的には更に先進的なシステムへの発展を目指していきます。</p>
M-20	<p>基礎研究部門、開発研究部門、エンジニアリング部門のそれぞれが得意とする分野を考慮して、お互いに補完的な役割を果たすことができるとする有機的な連携がまだ十分とはいえない印象も受ける。プロジェクト推進の観点からは、部門の役割責任を明確にしつつ、必要な補完・連携関係を分析・設計し、これを担う機会・体制や情報・交流プラットフォームを整備・運用して連携目標を追求するなど、効果的・実質的な連携を目指すことが重要である。</p> <p>「部門間連携を図らなければ効率的なプロジェクト推進が望めないような体制は好ましくなく、プロジェクトのための組織とすべき」との意見も出された。</p>	<p>プロジェクトの効率的な推進のため、機構の有する基礎・基盤研究資源を積極的に活用し、達成目標を明確にした連携研究を進めます。</p> <p>プロジェクトのリスク管理の観点から、代替的なプロセス技術開発、先進的なコード、データベース、手法の開発についても基礎・基盤部門と連携し継続的に進めます。</p> <p>機構全体の研究開発の効率の推進のためには、プロジェクト部門と、基礎・基盤部門を設置することが有効であり、両部門の緊密な連携のもとに事業を進めます。</p>
M-21	<p>幅広い戦略的調査を実施する FBR サイクルの実用化戦略調査研究から、実用化に集中した FaCT プロジェクトの段階へ移行していることから、本プロジェクトにおいては、各革新技術について、学術的には評価されにくいデータも含め、工学的な成立ち性を判断するに十分なデータベースを揃える必要がある。</p> <p>設計成立ち性に関わる自然現象の理解も重要で、そのためには基礎基盤研究を充実する必要がある。このような観点に立ち、開発計画の策定、研究開発資源の配分、研究者・技術者へのインセンティブ付与などの面で、引き続き適切なマネジメントが行われることが重要である。</p>	<p>2010 年に革新技術の採否判断及びプラント仕様の暫定、2015 年に革新技術の成立ち性提示とプラント仕様の決定を行うため、十分なデータベースを揃えられるよう努めます。また、モックアップ的な試験で実証データを取得するのみでなく、現象を把握するための要素試験、現象をシミュレーションするための解析コードの開発とそれに必要な基礎データの取得などの基盤的研究を進めるよう、適切なマネジメントにも努めます。</p>

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
物質の量	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
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	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
光照度	ルーメン	lm	cd sr ^(f)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射線種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s ⁻¹	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー当量, 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	s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号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、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみに使用される。
 (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	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷密度	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	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	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=60s
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/10800) rad
秒	''	1''=(1/60)′=(π/648000) 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)/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=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
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² m s ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ⁻² =10 ⁻³ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≙」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
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 f=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	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)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

