

平成14年度研究開発課題評価(中間評価)報告書

評価課題「高速増殖炉の機器構造材料研究開発」

2003年3月

核燃料サイクル開発機構
研究開発課題評価委員会
(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2003

平成14年度研究開発課題評価（中間評価）報告書
評価課題「高速増殖の機器構造材料研究開発」

核燃料サイクル開発機構
研究開発課題評価委員会
(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)

要 旨

核燃料サイクル開発機構(以下、「サイクル機構」という。)は、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」(平成13年11月28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14年6月20日文部科学大臣決定)、並びにサイクル機構の「研究開発外部評価規程」(平成10年10月1日制定)等に基づき、「高速増殖炉の機器構造材料研究開発」に関する中間評価を研究開発課題評価委員会(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)に諮問した。

これを受けて、高速炉・燃料サイクル課題評価委員会は、本委員会によって定めた評価方法に従い、サイクル機構から提出された課題説明資料、補足説明資料及び委員会における議論に基づき、本課題の評価を行った。

本報告書は、その評価結果をサイクル機構の関係資料とともに取りまとめたものである。

目 次

1. 概要	1
2. 高速炉・燃料サイクル課題評価委員会の構成	1
3. 審議経過	2
4. 評価方法	2
5. 評価結果（答申書）	5

参考資料（核燃料サイクル開発機構）

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 評価結果に対する措置

参考資料 3 課題評価委員会委員の評価意見に対する

サイクル機構の見解（補足説明資料）

参考資料 4 高速増殖炉の機器構造材料研究開発（課題説明資料）

[研究開発課題説明資料(本文)]

[研究開発課題補足説明資料]

[用語の説明]

参考資料 5 高速増殖炉の機器構造材料研究開発（OHP 資料）

1. 概要

核燃料サイクル開発機構(以下、「サイクル機構」という。)は、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」(平成13年11月28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14年6月20日文部科学大臣決定)、並びにサイクル機構の「研究開発外部評価規程」(平成10年10月1日制定)等に基づき、「高速増殖炉の機器構造材料研究開発」に関する中間評価を研究開発課題評価委員会(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)に諮問した。

これを受けて、高速炉・燃料サイクル課題評価委員会は、本委員会によって定めた評価方法に従い、サイクル機構から提出された課題説明資料、補足説明資料及び委員会における議論に基づき、本課題の評価を行った。

本報告書は、その評価結果をサイクル機構の関係資料とともに取りまとめたものである。

2. 高速炉・燃料サイクル課題評価委員会の構成

本委員会は、平成11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	岡 芳明	東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設教授
委員	井上 正	電力中央研究所狛江研究所研究参事
	大杉 俊隆	日本原子力研究所エネルギーシステム研究部次長
(平成14年9月30日まで)		
末次	克彦	アジア・太平洋エネルギーフォーラム代表幹事
鈴木	潤	未来工学研究所R&D戦略研究グループリーダー
高杉	正博	関西電力(株)原燃サイクルグループチーフマネージャー
		原子燃料部長
東嶋	和子	ジャーナリスト
戸田	三朗	東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻教授
二ノ方	壽	東京工業大学原子炉工学研究所教授
古田	一雄	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
モリス・ブレン		駐日欧州委員会一等参事官(科学技術担当)
松井	恒雄	名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻教授
松本	史朗	埼玉大学工学部応用化学科教授
吉井	良介	東京電力(株)原子力技術部サイクル技術センター
		将来構想グループマネージャー

3. 審議経過

(1)第1回目の委員会開催： 平成14年8月27日

- ・評価方法の決定
- ・課題内容の説明・検討

(2)第2回目の委員会開催： 平成14年11月12日

- ・補足説明、質問への回答
- ・評価内容の検討

(3)評価結果(答申書)のまとめ

上記の審議結果に基づき、委員長が評価結果をまとめ、各委員の了承を得て答申書とした。

(4)答 申： 平成14年12月27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)第1回目の課題評価委員会における審議

- ①評価方法を定める。
- ②サイクル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。なお、欠席した委員に対しては、別途、対応させる。

2)各委員の評価作業

- ①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。
- ②事務局は、第1回目の委員会での質問及び委員からの追加質問に対するサイクル機構の回答を委員に送付する。
- ③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、評価項目に従って評価を行い、評価意見を書面で事務局に提出する。
- ④事務局は、委員から提出のあった評価意見を整理して、次回の課題評価委員会の検討資料を作成する。

3)第2回目の課題評価委員会における審議

- ・各委員が行った評価、サイクル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、課題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

- ・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

- ・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、課題評価委員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

評価項目及び評価の視点（○印）は次のとおりとする。

また、研究開発を進めていく上での提言、留意点があれば、コメントする。

1)研究開発の目的・意義

○ 目的・意義は明確かつ的確か。

○ 重要性、緊急性が高いか。

（長期的に見て重要性が高いものか、将来に備えて今から対応しておくべき課題か、という視点を含む。）

○ 社会的・経済的ニーズ、民間ニーズはあるか。

○ 国の計画・方針との整合性

○ サイクル機構が実施すべき課題か。

○ 関連技術動向が的確に把握されているか。

2)研究開発目標

○ 目標の設定・水準は適切か。

○ 目的・意義達成のために十分な目標設定となっているか。

○ ブレークスルーすべき点が明確か。

○ 状況に応じて適切に見直しが行われているか。

○ 関連技術動向が的確に反映されているか。

3)研究開発計画

○ 研究開発項目の設定・内容、スケジュール、項目相互間の関連性等は具体的で妥当なものか。

○ 資金計画（予算の規模・配分）は妥当であるか。

○ 計画見直しの機動性(状況に応じて計画の見直しを適切に行っているか。)

○ 使用する施設・設備は適当か。

○ 関連技術動向が的確に反映されているか。

○ 研究内容は独創性、創造性に富んだものになっているか。

4)研究実施体制

- 組織、人員・人材の配置、研究グループ間の連携、委員会の活用、運営等は妥当なものか。
- 他機関との協力・連携（国際協力を含む）は適切か。

5)研究成果

①得られた成果の内容

- 達成された具体的な成果について、水準、質、意義、当該分野への寄与の程度等の評価
- 計画と比較した達成度（要因分析を含む）
- 費用対効果（投入した費用に見合った成果が得られているか。）

②実用化との関係

- 実用化への技術的見通し
- 実用化のために必要な技術開発課題は何か。
- 「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」（実用化戦略調査研究）における技術的成立性判断、実用化候補概念の絞り込み等に効果的に反映できるか。
- 実用化戦略調査研究を支援するために必要な研究開発課題が適切にカバーされているか。

③得られた成果の普及、公開

- 成果の活用は期待できるか。
- 波及効果は期待できるか。
- 成果発表、特許出願・取得等の実績
- 広報は積極的、効果的に行われているか。

6)今後の展開

- 今後の展開、進め方等に関するコメント

7)その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

8)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、進捗状況の妥当性や、目的・目標、進め方などの見直しの必要性等を総合的に判断する。

5. 評価結果（答申書）

平成14年12月27日

核燃料サイクル開発機構

理事長 都甲 泰正 殿

研究開発課題評価委員会

（高速炉・燃料サイクル課題評価委員会）

委員長 岡 芳明

研究開発課題の評価結果について（答申）

当委員会に諮問[14 サイクル機構（企）034]のあった下記の研究開発課題の中間評価について、その評価結果を別紙のとおり答申します。

記

研究開発課題「高速増殖炉の機器構造材料研究開発」

以上

高速炉・燃料サイクル課題評価委員会報告書 「高速増殖炉の機器構造材料研究開発」の評価結果（中間評価）

核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」という。）が実施している高速増殖炉（以下、「FBR」という。）の機器構造材料研究開発は、FBRの基盤技術開発分野の一部であり、FBR構造設計上の特徴と課題を踏まえ、新材料の開発や構造設計技術の高度化によって、建設コストの低減とプラントの熱効率の向上・長寿命化、並びに運転信頼性の向上を通じたFBRの経済性向上を目指すものである。本研究開発の成果は、機器構造材料の面からFBRプラントの安全性向上へ寄与することはいうまでもない。

過去においては、「もんじゅ」の建設と運転保守への反映や実証炉計画推進への貢献を目的とした研究開発を実施し、その成果は指針・基準類に反映されている。また、平成7年12月の「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故に関連して、漏えいナトリウムによる鋼材腐食評価、ライナーの機械的健全性評価などに取り組んだ。

FBRサイクルの実用化戦略調査研究（以下、「実用化戦略調査研究」という。）が平成11年度に開始され、これを契機に研究開発計画を見直し、現在は、種々のプラント概念に関する設計ニーズに応え、構造設計の成立性の判断や概念の絞込み、経済性向上を目指した設計の成立性拡大に貢献するなど、実用化戦略調査研究の第2期への直接的反映を主眼とした研究開発を行っている。

今回の中間評価においては、主として過去5年間の成果と、実用化戦略調査研究の第2期への反映を目的とした平成17年までの計画を対象に評価を実施した。

評価結果は、以下のとおりである。

1. 研究開発の目的・意義

機器構造材料は原子炉をハードウェアとして実現し、原子炉プラントの安全性を下支えするための炉型によらない枢要技術であり、その研究はFBR開発において極めて重要である。実用化戦略調査研究におけるプラントシステム改善方策の大部分が機器・構造分野の技術であることから本研究開発の意義の大きいことが判断される。一方、現在、FBR導入を妨げている要因の一つとして挙げられているのが、コストである。従って、新材料の開発や構造設計技術の高度化によって建設コストの低減とプラントの熱効率の向上、長寿命化ならびに運転信頼性の向上を通じたFBRの経済性の向上を目標とし、その成果は安全性向上にも寄与するとの研究開発の目的・意義は十分明確かつ的確に設定されていると判断する。

十分な安全性と信頼性を有し、かつ経済的に競争力のあるFBRを実現するためには、機器構造材料の分野において従来技術を超える技術レベルの達成が不可欠である。これらの研究開発は、短期的な目標設定ではなしえない長期的な基盤技術開発であり、燃料サイクル技術の確立を目指す国の計画・方針に沿うものであると考えられる。したがって、国策として行われているFBR開発研究の一環として、サイクル機構が中心的に実施すべきである。

2. 研究開発目標

研究開発分野として材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術が挙げられているのは適切である。FBRは高温プラントであるため材料のクリープ特性を考慮すべきこと、定常及び過渡時の熱応力が構造設計の支配因子であるため熱荷重の検討を行うこと、薄肉構造であるため地震荷重に関する対策に焦点をあてた研究開発を行うとしているのは適切である。

特に、材料評価技術における強度データベースの継続的整備・強度および寿命評価法開発・強度基準の整備、新材料開発、損傷定量化技術の確立など、高温構造設計技術における溶接部・構造不連続部に対する弾性解析による高温強度評価法の確立とFINASコードの継続的改良、耐震設計技術における地震時の衝突振動解析手法の確立と3次元免震構造の概念創出と成立性の確認などの目標の設定・水準は概ね適切と考えられる。

なお、一般的に機器構造材料研究開発の性格から、長期的目標と中期的目標に明確な線を引きにくい側面もあるが、長期目標を達成していく上で、各段階の中期目標を設定しておき、今回の目標設定が全体のどの部分に当たるのか目に見える形で示しておけば、より分かり易くなると考える。

また、定性的目標設定については概ね妥当と考えられるが、可能な限り定量的目標の設定や研究のロードマップを明示することが重要である。なお、状況に応じて適切な見直しを図る柔軟な対応を行うべきであることはいうまでもない。

さらに、各開発目標の費用対効果（課題の達成によって得られる経済性向上の見通し）を定量的に説明できれば、より開発目標設定の説得性が増すと考える。

3. 研究開発計画

研究開発そのものは将来のFBR設計建設にとって普遍的な基盤となる技術を高度化するものである。設定された研究開発項目・内容、スケジュールや項目相互間の関連性は十分具体的で妥当なものであると評価する。

もんじゅ事故によって当初の研究計画は変更されたが、計画見直しは適切に行われたと判断される。また、実用化戦略調査研究に対応した計画の転換もそれ相応の

対応がなされているといえる。

研究開発計画を進めるための資金は、設定されている項目を達成する上ではやや厳しい印象を受ける。そのため、FBR実現に最低限必要な達成目標、その上の達成目標のようにレベル分けした優先順位の明確化、期間途中での適切な研究計画の見直し、計算機シミュレーションや小規模試験での代替など、開発費を削減する方策について検討を進めることが必要と考える。その際、とにかく要素技術開発中心となりがちであるが、統合化、規格化などのシステム化技術の開発にも十分に注意されたい。

研究内容は、FBRの新技术、技術改良で一般的に従来手法の延長線上にあるものが主流であり、関連分野を研究開発している多くの機関が考えている課題であるが、材料損傷定量化技術開発などにおいてミクロな現象に着目したものや3次元免震構造の概念の創出など独創性、創造性に富んだ研究内容も見出される。

なお、本研究開発課題の3つの分野それぞれに対する評価は、以下のとおりであり、いずれの研究内容も世界の最先端と考えられ優れている。

- ①材料評価技術：FBR用高クロムフェライト鋼はFBR設計の合理化に大きく寄与する事が期待されており、その研究開発を延性・じん性の改善、溶接性、LBB（破断前漏えい）の成立可能性を念頭において行うのは妥当である。
- ②高温構造設計技術：高温構造設計の課題を構造解析技術、高温強度評価技術、熱荷重評価技術、システム化技術としているのは適切である。なお、システム化技術については、今後4年間という短期的視野ではなく長期に着実に成果が積み上げられることを期待したい。
- ③耐震設計技術：3次元免震技術はプラント設計の標準化、簡素化を実現すると期待されている。これまでの研究成果をふまえて、上下免震の基本構成要素である皿バネに関する力学データを取得し、強度設計手法を整備しようとする計画は適切である。

4. 研究実施体制

実施体制(組織、人員等)、他機関との協力・連携、運営は、概ね妥当なものである。設備・機器についても同様である。

なお、過去5年間に比べ今後の4年間の研究開発は質・量共に増し、資金不足が心配される。少ない資金の有効活用を図る方策も必要であろう。国内外の機関との研究協力ではメーカとの役割分担とそれぞれの機関の特徴を生かした連携が特に重要であろう。また、新しい人材の育成についても配慮すべきである。耐震・免震技術開発については、関連学協会との協力を密にすべきであろう。

今後は外国を含めてFBR開発における機器構造材料技術研究開発のセンター

として機能して欲しい。

5. 研究成果

①得られた成果の内容

材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術とも、実証炉材料の 316FR の開発、溶接部評価法の整備により原子炉容器製作に板材を用いることを可能としたこと、サーマルストライピングの評価法、耐震解析技術の高度化、材料損傷定量化技術開発のための基礎的知見など、着実な成果が挙げられていると評価できる。

今回特筆すべき点は、熱流動と構造の研究開発がこれまで以上に密接な連携をもって行われたことである。今後とも、材料劣化、腐食機構や腐食物堆積機構などの分野との連携も含めて充実した研究開発の展開を引き続き期待したい。

また、もんじゅ事故対応については、ハードの現象面のみならず設計における品質管理などのソフト面での教訓をよく整理し、手続き規格などの形にしておく必要がある。

②実用化との関係

実用化との関連では機器構造材料研究開発は F B R の設計合理化に寄与する程度が最も大きいと期待される。また、基盤的知見の充実も合理化を支えることが期待される。したがって、実用化戦略調査研究との連携を十分に図って計画立案、研究実施を図ることが重要である。

F B R 用フェライト鋼など新材料の適用性判断に必要な材料データの取得、非弾性解析の実用化など今後継続すべき課題が具体的になっており、かつこれらの課題の解決方策も明らかにされている。今後の計画は、実用化戦略調査研究の課題を適切にカバーするとともに、技術的成立性判断、実用化候補概念の絞り込み等に効果的に反映できるものと判断する。なお、実用化戦略調査研究への反映に際しては、炉型・概念ごとの具体的技術課題と、現状での達成度を整理し、どの程度の成果をいつ頃までに反映すべきかを明確化する必要がある。

また、高温構造設計技術や 3 次元免震構造は、広く一般産業への応用も期待される。そのための他の産業分野との幅広い技術交流も必要であろう。

③得られた成果の普及、公開

得られた成果の普及としては、汎用非線型構造解析システム F I N A S、高温構造設計基準、サーマルストライピング評価法があり、適切になされている。特に高温構造設計基準を含め学会等における基準の整備に貢献していることは大いに賞賛されることである。今後も積極的に研究成果を報告し、原子力産業にとどまらず

広く一般産業への貢献にもつなげて欲しい。

研究発表や特許出願は十分に行われているが、成果に基いて合理的基準を作成し、規制に反映させる努力が極めて重要である。

また、サイクル機構がおこなっている研究が原子炉の安全性向上にも役立つのみならず一般産業にも広く応用できる研究であるという点を知ってもらうためにも、一般紙の科学面や雑誌等を介してもっと広く研究成果を報告すべきである。

6. 今後の展開

実用化戦略調査研究から求められる研究成果を、適切なタイミングで提供できるように研究を進めることが必要と考える。したがって、実用化戦略調査研究第2期への反映を意図している課題については、計画通り遂行されることが望まれる。一方、材料損傷定量化技術やシステム化規格等の基盤技術として長期的展開を図る課題については、適宜実用化候補概念の設計合理化への寄与度を見極めながら優先順位をつけて効率的に進めることが望まれる。

なお、構造材料関係の研究開発は長期的視点に立ち、地道な努力を要求される分野であるので、長期的な目標とその重要性が明確に伝わるようにする必要がある。当面は実用化戦略調査研究への反映が主たる研究課題であるが、技術基盤の長期的展開として着実に進めて欲しい。

7. その他

世界的にみて、FBRを積極的に推進しているのはわが国とロシアのみであり、とくに高温材料開発と評価技術においては、日本が世界のリーダーシップを取れる分野であると考ええる。

高温での構造健全性はナトリウム冷却炉に限らず各国共通の課題であり、国際協力を推進し海外から研究を受注するなど国際的にリードをすることの視点がもっとあっても良いのではないか。それを奨励する仕組みも必要かもしれない。

我が国の技術基準には、設備の使用中に当該設備にひび割れやその兆候が発見された場合に工学的な手法を用いて安全性の評価を行う手法が規格基準として整備されていないことが指摘されている。FBRについては、寿命を通して合理的に健全性を維持できる基準を整備することを念頭において必要な知見を蓄積することが必要と考える。

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

機器構造材料研究開発はFBR開発の枢要な課題である。大型ナトリウム冷却炉の経済的な成立可能性に、現実的な見通しを得る上で当研究テーマの果たしてきた

役割および今後期待される役割は、大変大きいと考えられる。これまでの成果は高く評価できる。今後の計画も適切である。

成果は普遍性があり、軽水炉やその他の高温炉、さらには広く一般産業にも貢献することが期待される。

なお、今後、本研究開発を進めていくにあたり、指摘事項、留意すべき点などについては、各評価項目に記載のとおりであり、計画等に反映し、適切な成果が得られることを期待したい。

以上

評 価 意 見

(高速増殖炉の機器構造材料研究開発)

1. 研究開発の目的・意義

- (1) 機器構造材料は原子炉をハードウェアとして実現するための枢要技術であり、その研究は高速増殖炉開発において極めて重要である。実用化戦略調査研究におけるシステム改善方策の大部分が機器・構造分野の技術であることから本研究開発の意義は大きい。

新材料の開発や構造設計技術の高度化によって建設コストの低減とプラントの高温化、長寿命化ならびに運転信頼性の向上を通じた FBR の経済性の向上を目標とし、その成果は安全性向上にも寄与するとの研究開発の目標は的確である。FBR の経済性の向上は必要性が高い。原子力長期計画など国の計画や方針との整合性も高く、サイクル機構が実施すべき課題である。関連技術の動向も的確に把握されている。

- (2) 機器構造材料を高度化することによる FBR の経済性向上を図るという目的は明確である。

但し、本課題を達成することによりどれだけの経済性向上が達成できるか見通しを持って進める必要がある。

FBR を実用化していく上では重要な課題と考える。その観点からは国の計画・方針と整合性はあると考える。

- (3) 基本的には、FBR 実用化に向けて必要となる機器構造材料の研究開発を実用化戦略調査研究と連携して進めており、適切と考えられる。

- (4) 高速増殖炉の機器構造材料の研究は、過去の「もんじゅ」への反映を目的とした研究から実証炉への貢献を主目的とした研究へ移行し、それらの目的、意義は明確であり、それらの成果は指針、基準に反映されている。しかし「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故があり、鋼材腐食などの事故対応の研究へと目的が移され、さらに電気事業者による実証炉計画の中止という大きな変化があり、研究目的そのものの根本的な変更が行われたと理解する。すなわち高速増殖炉を FBR サイクルの実用化から見直す戦略調査研究が平成 11 年度より開始され、特にその経済性、安全性に重点をおく実用化戦略調査研究第 1 期への貢献を、さらに 14 年度からの第 2 期への直接寄与を目的とする研究計画としたことは、国の計画、社会のニーズに適切に対応できたものと評価する。機器構造材料は炉の成立性を左右するものであり実用化戦略調査研究第 2 期における高クロムフェライト鋼 (12Cr 鋼) をベースとする研究は、先行する他分野の技術との融合でもあり、炉のコンパクト化による経済性の向上に寄与する研究として、今後の進展を見守りたい。

- (5) わが国における高速増殖炉導入計画がなし崩し的に遅延していく状況に依ら

ず、平素から長期的な視点に立って継続的な努力が求められるものの一つとして、機器構造材料研究開発がある。構造材料の問題は炉型によらず極めて重要であり、その健全性は原子炉プラントの安全性を下支えするものとして、常に完璧に近いものが要求されると考えてよい。一方、現在、高速増殖炉導入を妨げている要因の一つとして挙げられているのが、コストである。そのコスト低減に貢献する課題としては、構造・配管系の簡素化、コンパクト化、プラントの高温化、超寿命化などが挙げられている。これらの課題を解決するために、より厳しい運転環境と荷重条件に耐えうる新材料の開発、長期間にわたる構造健全性を保証できる材料技術と構造設計技術の高度化と合理化を追求する本研究開発の重要性、目的・意義は十分明確かつ的確に設定されていたと判断する。なお、ステンレス構造材と極めて共存性のよいナトリウムを冷却材として用いるシステムに的を絞っていることは正しい方向であると考ええる。

本課題は、短期的な目標設定ではなしえない長期的な基礎基盤技術開発で、わが国においてはサイクル機構のみが実施できるものであり、燃料サイクル技術の確立を目指す国の計画・方針に沿うものであると考えられる。

(6) 現在の原子力を取りまく社会情勢から考え、高速増殖炉開発を従来の計画通りに進めることは不可能と考えられるが、もし国策としての高速増殖炉開発が不変であると仮定した場合には、機器構造材料研究開発の目的および意義は明らかである。すなわち、十分な安全性と信頼性を有し、かつ経済的に競争力のある高速増殖炉を実現するためには、機器構造材料の分野において従来技術を超える技術レベルの達成が不可欠である。材料評価技術の確立、新材料開発によるプラントのコンパクト化、高温構造設計の体系化と基準作成、免震技術の確立などは何れも高速増殖炉実用化にとって解決が必須の課題である。また、実用化戦略調査研究第2期への貢献も当然目的に含められるべきである。これらの研究は、国策として行われている高速増殖炉開発研究の一貫として、サイクル機構が中心的に実施することが当然である。同様の高温構造材料が使われる関連分野としては新鋭火力発電所等が考えられるが、これらの領域における材料開発、設計技術の動向を基礎とすることは妥当である。

(7) 目的・意義は明確である。

(8) 機器構造材料技術は FBR 研究開発における極めて重要な基盤技術である。FBR の構造設計上の特徴と課題をふまえて、新材料の開発や構造設計技術の高度化によって、建設コストの低減化ならびに運転信頼性の向上、さらにプラントの安全性向上に寄与することから、機器構造材料研究開発の FBR 研究開発における位置づけは明確である。同時に、研究開発の成果は種々の設計手法として体系化されることによって、構造設計基準や材料基準などの規格基準に貢献できることから、その意義

は十分高いと判断できる。

- (9) 実用化戦略調査研究では、経済性について、「将来の軽水炉に比肩する発電原価の達成」を目標としている。これを達成するためには、高温・低圧システム、熱荷重が主体、薄肉構造という高速増殖炉の特徴を考慮した構造設計手法・基準の整備が必要であり、本研究開発の目的・意義は明確と考える。

2. 研究開発目標

- (1) 研究開発分野として材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術が挙げられているのは適切である。高速炉は高温プラントであり、材料のクリープ特性を考慮すべきこと、定常及び過渡時の熱応力が構造設計の支配因子であることより、熱荷重の検討を行うこと、薄肉構造であるため地震荷重に関する対策に焦点をあてた研究開発を行うとしているのは適切である。
- (2) 今回の評価でどここの区切りをつけ、どこを見直して平成 14 年度からの計画が作られているか明確に分からない。
- (3) 原子炉プラントのコンパクト化を基本とする合理化設計を目指す研究開発は、基本的な短配管と熱応力許容設計を可能とする技術開発は、機器構造材料の研究開発をリード技術と位置づける設定で計画されており、目標設定、水準、およびブレークスルーについても具体的な課題の抽出と開発項目、および今後の計画はそれぞれについて適切になされていると評価する。システム化規格の研究は今後のあるべき設計を切り開くものとして期待する。

3次元免震の開発研究はそのコストと上記の開発研究による経済性寄与との関連からも検討されて最終的なニーズが評価されるものと思われる。総合的な研究も期待する。

- (4) 本研究開発の目標は主に実証炉、実用炉を対象としており、材料評価技術における強度データベースの継続的整備・強度および寿命評価法開発・強度基準の整備、新材料開発、損傷定量化技術の確立など、高温構造設計技術における溶接部・構造不連続部に対する弾性解析による高温強度評価法の確立と FINAS コードの継続的改良、耐震設計技術における地震時の衝突振動解析手法の確立と 3次元免震構造の概念創出と成立性の確認などであり、概ね目標の設定・水準は適切と考えられる。

しかしながら、一般的に当該研究開発の性格から、長期的目標と本研究開発の関連に明確な線を引きにくい側面がある。例えば 9 年度から 13 年度、14 年度から 17 年度にまたがる項目が多数あり、本期間での達成目標設定がある程度曖昧にならざるを得ない。そのため、少なくとも長期的な材料強度評価技術の確立に対し本研究開発における強度評価法の整備がどのような位置づけにあり、今後の展開にどのように繋がっていくのか、どこまでやればよいのかが分かり難い。すなわち、長期目

標を達成していく上で、各段階の中期目標を設定しておき、今回の目標設定が全体のどの部分に当たるのか目に見える形で示しておけば、より分かり易かったと考える。

(5) 定性的目標設定については概ね妥当と考えられるが、一部に目標の定量性がいまい、あるいは終りなき研究となる可能性のあるものがあるので、定量的目標の設定や研究のロードマップの提示を検討されたい。たとえば、次のような点があげられる。

- ・12Cr 鋼についてはどの程度のパフォーマンスが達成されたら既存の構造材料に取って替りうると考えてよいのか。
- ・材料損傷定量化技術では、材料健全性維持管理におけるどんな評価項目をどの程度の信頼度で評価できれば十分と考えるのか。
- ・構造解析技術では、現状に加えてなさらにどのような機能を必要としているのか。
- ・熱流動－構造統合解析手法では、具体的にどんな解析機能を実現しようとしているのか。
- ・3次元免震が成立すると判断できるための定量目標。
- ・実用化戦略調査研究第2期に対して、どの時期までに具体的にどんな成果を提供する必要があるのか。

(6) 目標の設定・水準は適切である。しかしながら、今後は状況に応じて適切な見直しを図る柔軟な対応を期待する。

(7) 実証炉設計基準への反映を目的とした基盤的研究開発がもんじゅ事故後、事故対応さらには実用化戦略調査研究への反映と変化してきているが、研究開発目標として、基本的には材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術を中心に据えて、FBRの構造設計上の特徴と課題をふまえた目標設定となっていると判断される。

(8) 実用化戦略調査研究の開発目標を、機器構造材料の研究開発という分野でブレークダウンすると、例えば、「高速増殖炉条件に適した12Cr系フェライト鋼の開発」という項目が出てくるわけであるが、各開発目標の費用対効果を定量的に説明できれば、より開発目標設定の説得性が増すと考える。

(「鉛ビスマス炉の成立性、設計評価に必要な材料腐食問題の解決」のように、費用対効果という観点になじまないものもある)

3. 研究開発計画

(1)

1) 材料評価技術

FBR用12Crフェライト鋼はFBR設計の合理化に大きく寄与する事が期待されており、その研究開発を延性じん性の改善、溶接性、LBBの成立可能性を念頭におい

て行うのは妥当である。研究開発計画は適切と考える。

2) 高温構造設計技術

高温構造設計の課題を構造解析技術、高温強度評価技術、熱荷重評価技術、システム技術としているのは適切である。

高温強度評価の研究開発計画は適切である。研究内容は世界的にみても優れたものとなっており成果に期待したい。

熱荷重評価技術の研究開発計画も適切である。実際はプラントの構造設計から与えられるパラメータ（寸法）によって解析結果が変わると考えられる。プラントの温度や流量などのシステムパラメータ以外のこれらの設計パラメータについても感度解析の中に取り入れる必要があるのではないかと。単相流解析は実用レベルまで達しており、成果が期待される。熱流動挙動は圧損や局所の形状など詳細な構造に依存する可能性があるのではないかと。

これらの成果をシステム化した規格としてまとめようとしていることも評価できる。システム化には長期かかると予想され、今後4年間という短期的視野ではなく長期に着実に成果が積み上げられることを期待したい。実験結果と比較した検討、例えば過去の大型実験装置やプラントシステムの試験結果との比較による検討については計画の中では述べられていないが、これらの過去の実験データなどを活用することも将来的には必要ではないかという気がする。特に熱流動解析による構造物の温度分布とその時間変化の予測精度についてはそうではなかろうか。

3) 耐震設計技術

3次元免震技術はプラント設計の標準化、簡素化を実現すると期待されている。

これまでの研究成果をふまえて、上下免震の基本構成要素である皿バネに関する力学データを取得し、強度設計手法を整備しようとする計画は適切である。

- 1) 2) 3) いずれの研究内容も世界の最先端と考えられ優れている。
- (2) 研究内容について、FBRの新技术、技術改良であるが、関連分野を研究開発している多くの機関が考えている課題であり特に独創性、創造性がある課題とは感じられない(あるならその点がアピールされていない)。
- (3) 実用化戦略調査研究第2期のプラント設計研究への対応を重視する重点課題の設定は、ブレークスルーを目指す中長期的視点も加え、研究スケジュールとその期間内での研究目標も適切になされている。平成9～13年度の成果と問題点の指摘とともに平成14年度以降の計画が実用化戦略調査研究第2期の研究に向けて内容、計画設定が検討され、期待される具体的成果の目標が示されている。研究開発計画を進めるための資金は、設定されている項目を達成する上ではやや厳しい印象を受けるが、期間途中での成果の評価と適切な研究実施計画の見直しをおこない、国の

内外の機関との研究協力を有効に進め、計画で予定した成果を出せるよう期待したい。

- (4) 将来が不透明であるとはいえ電気事業者による実証炉計画や、もんじゅ事故対応、実用化戦略調査研究などへの反映先も含め、研究開発そのものは将来の高速増殖炉設計建設にとって普遍的な基礎基盤となる技術を高度化するものである。設定された研究開発項目・内容、スケジュールや項目相互間の関連性は十分具体的で妥当なものであったと評価する。さらに資金計画、施設・設備は適当であると判断する。また、もんじゅのナトリウムリークに関連した腐食機構の解明と腐食速度評価法の確立など、状況に応じた計画の見直しも適切に行われている。研究内容は、一般的に従来手法の延長線上にあるものが主流であるが、材料損傷定量化技術開発などにおいてミクロな現象に着目した独創性、創造性に富んだ研究内容が垣間見られる。
- (5) 開発項目としては必要なものが網羅されていると考えるが、時間、資金ともに制約があることが常である。特に研究予算は、計画ではかなり厳しくまた今後さらに厳しくなることが予想される。したがって、高速増殖炉実現に最低限必要な達成目標、さらにその上の達成目標というようにレベル別けして優先順位を明確にされたい。その際、とかく要素技術開発中心となりがちであるが、統合化、規格化などのシステム化技術の開発にも十分に注意されたい。たとえば最近の東電の件でも問題になったように、設計基準ばかりでなく維持基準を作成するために必要な知見の蓄積なども重要である。また、原子力を取り巻く社会情勢が厳しい折から、国の開発計画の大幅見直しがないとも限らないので、そのような事態にも対応できるような計画にしておく必要がある。
- (6) 高温構造設計技術に関する研究について、各種破損様式に対する構造物の限界強度を見極めて、それを防止する設計評価技術を開発する計画が主体となっているが、むしろ破損は生じるものと考えて（破損防止は実験条件と解析コードの最適化（裕度確保）だけでは防ぎきれないケースも多いと考えて）、破損後の損傷進行の予測の為に基盤実験を重視して欲しい。その意味で磁気特性評価は大切であり、それ以外にも手法を開発する計画を積極的にして欲しい。
- (7) もんじゅ事故によって当初の研究計画は変更されたが、計画見直しは適切に行われたと判断される。また、実用化戦略調査研究への転換も基盤技術であることから、それ相応の対応がなされていると言える。なお、材料技術は原子力システムの開発および維持管理において極めて重要な基盤技術であることから、データベースとして必要なものを確実に蓄積されるような研究開発体制を維持し、継続的な研究を行って欲しい。
- (8) 高速増殖炉の研究開発については、平成 12 年に大きな転換（実用化戦略調査研

究の開始)をしたわけであるが、それに合わせて研究内容を見直している。

将来にわたって資金が十分に確保できる保証はなく、メカニズムの解明により計算機シミュレーションで材料試験を代替する、実規模試験を小規模試験で代替するなど、開発費を削減する方策について検討を進めることが必要と考える。

- (9) 耐震設計技術に関する研究で、地震荷重を緩和する技術としての三次元免震構造の概念を創出した点は、独創性、創造性に富んだ研究開発と評価できます。

4. 研究実施体制

- (1) 平成 9～13 年度の資金実績に比して今後 4 年間の資金は約 75%である。過去 5 年間よりも今後の 4 年間の研究開発は質量とともに多く、資金不足が心配される。少ない資金の有効活用を図る方策も必要であろう。国の内外との研究協力ではメーカーとの役割分担とそれぞれの特徴を生かした連携が特に重要であろう。

- (2) 原研、電中研、大学等との協力については記述されているが、メーカーとの協力は無いのか。メーカーに業務を分担している場合には、JNC との役割分担はどのようになっているのか。

共同研究については、両機関で適切に役割分担がなされているか。(実質的な共同研究と情報交換的なものとは軽重が違ふ。そこを明確にしておいたほうがよい。)

委託研究については、その課題がなぜ JNC で出来ないのか。重要ならできるようにすることが必要ではないか。(世界に他に類を見ない貴重で高価な設備、施設を使用する場合は除く。)

- (3) 所定の計画に沿って基盤技術開発の立場から実用化戦略調査研究での絞り込みに適切に貢献できるよう、所内の円滑な交流が不可欠であり、また国の内外の機関との協力研究を活発に進められるよう期待したい。全体として妥当であると評価する。

- (4) 実施体制(組織、人員等)、他機関との協力・連携、運営は、概ね妥当なものと認める。設備・機器についても同様である。ただし、本来オールジャパン的な性格であるにもかかわらず、鋼材メーカーや原子炉メーカー、ソフトウェアハウスなどとの協力連携などやや不明確なところがある。

- (5) 現在の組織・人員の制約の下で実施することは致し方ないとして、新しい人材の育成についても配慮すべきである。外部機関との関係では、原研と統合する際の組織・役割分担の見直し、メーカーとの協力関係、鉛ビスマス炉以外の炉型に関する海外機関、特にロシアとの協力体制についてより明確にする必要がある。それ以外の点については概ね妥当であると思われる。

- (6) 組織・要員は概ね妥当である。

耐震・免震技術開発については、土木学会等との協力を密にすべきであろう。

国内外との研究協力は十分な実績がある。しかしながら原子力分野の我が国の人材育成の観点から、国内の民間会社、大学との協力が乏しい。費用対効果の観点も重要ではあるが、我が国が原子力開発体制を維持していくという観点から、大所高所から考えることも必要であろう。

- (7) プラント設計研究グループとの課題の共有化がなされていることが示されている。また、電力を含め外部との研究協力も積極的に展開されていることも伺える。今後は外国を含めて FBR 開発における機器構造材料開発のセンターとし機能して欲しい。
- (8) 原研、日本原電、電中研など、多くの機関と協力して研究を進めていると考える。
- (9) フランスの CEA との共同研究によって、高速炉の炉心の地震応答挙動を解析する手法を確立した点が評価できます。

5. 研究成果

①得られた成果の内容

- (1) 材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術とも着実な成果が挙げられていると評価できる。特筆すべき成果としては次が挙げられる。
 - 実証炉材料の 316FR の開発
 - 溶接部評価法の整備により原子炉容器製作に板材を用いることを可能としたこと。
 - サーマルストライピングの評価法
 - 耐震解析技術の高度化
 - もんじゅ 2 次系ライナの健全性評価解析への寄与
 - 材料損傷定量化技術開発のための基礎的知見
- (2) 達成された成果は水準、質とも当該分野に寄与していると考ええる。

計画と達成度については、当初の具体的、定量的目標が明確でないため、評価できない。しかし、貴重な成果は上げたと考える。
- (3) 材料評価技術、高温構造設計技術の 2 項目については、プラントのコンパクト化を目指す合理化設計に向けて、これまでに得られている成果をまとめ、計画目標との達成度について具体的に明らかにされており、水準、質、実用化戦略調査研究第 1 期への貢献については妥当のレベルにあると評価する。耐震設計技術については適切に進められたと評価するが、今後、薄肉構造とコンパクト構造にとって必須の技術であるが、それゆえ先の 2 項目の研究との関連が重要と思われるので、研究の進展のなかでの対応を期待したい。
- (4) 変更も含め計画通りに研究が進行し、極めて高質な成果が得られており、ほぼ目標を達成したと考える。とくに、今回特筆すべきは熱流動と構造との間の研究開発がこれまで以上に密接な連携をもって行われたことで、今後とも、材料劣化、腐

食機構や腐食物堆積機構などの分野などとの連携も含めて充実した研究開発の展開を引き続き期待したい。

- (5) もんじゅ事故の影響で実証炉開発が仕切りなおしになった感があり、十分な成果をあげ得たかについては判断が難しい面もあるが、こうした情勢の変化を踏まえても当初の計画した一応のレベルは達成されたと考える。ただし、実用化戦略調査研究第1期に対する反映は具体的には見えない。もんじゅ事故対応については、ハードの現象面のみならず設計における品質管理などのソフト面での教訓をよく整理し、手続き規格などの形にしておく必要がある。
- (6) 平成13年度まで得られた成果はNa冷却高速増殖炉には十分有益であり意義深い。今後、実用化戦略調査研究との対応を十分加味して、例えば鉛ビスマス炉、ガス炉等の有望概念にも適用することを念頭に成果を出して欲しい。
- (7) 研究開発の成果は多方面に活用されているとのことであり、中でも高温構造設計基準を含め学会等における基準の整備に貢献していることは大いに賞賛されることである。今後も積極的に研究成果を報告し、原子力産業にとどまらず広く一般産業への貢献へにもつなげて欲しい。
- (8) 開発目標の設定及び成果の評価を行うに当たって、費用対効果をできるだけ定量的に説明できることが望ましいと考える。
- (9) 建屋全体は従来の水平免震とし、原子炉容器などを吊り下げるコモンデッキを大型皿ばねを用いた上下免震要素で支持する三次元免震構造によって、水平免震にくらべ大幅な免震効果が得られた。振動試験によって基本的な成立性と免震効果を確認し、皿ばねについても荷重・変位特性を評価する手法を開発したので、実際のプラントで実用化できると期待されます。

②実用化との関係

- (1) 実用化との関連では機器構造材料研究開発はFBRの設計合理化に寄与する程度が最も大きいと期待される。基盤的知見の充実も合理化を支えることが期待される。
- (2) 実用化戦略調査研究との連携を十分に図って計画立案、研究実施を図ることが重要である。
- (3) 特に、平成14年度からの研究計画は実用化戦略調査研究第2期への直接的貢献を主目的としており、研究計画もその目的に沿ったものであると評価する。その内容は先に述べたようにナトリウム冷却に対しては適切であるが、実用化戦略調査研究で対象とされている他種の流体に対してもどのような実用化技術の寄与があるのか、研究の進展の中で示されるよう期待したい。
- (4) もんじゅに適用した技術からの外挿が主な視点となる。高速炉用フェライト鋼など新材料の適用性判断に必要な材料データの取得、非弾性解析の実用化など今後継

続すべき課題が具体的にっており、かつこれらの課題の解決方策も明らかにされている。今後の計画によると、実用化戦略調査研究の課題を適切にカバーするとともに、技術的成立性判断、実用化候補概念の絞り込み等に効果的に反映できるものと判断する。

- (5) 実用化戦略調査研究への反映については、炉型・概念ごとにどんな具体的技術課題があるのかと、その現状での達成度を整理しておく必要がある。たとえば、ナトリウムと鉛ビスマス以外のガス炉や水蒸気炉での腐食の問題、被覆粒子燃料炉に対する耐震設計などは既に解決済か。まだであるとしたら、どの程度の成果をいつ頃までに実用化戦略調査研究へ反映すべきかを示す必要があるであろう。
- (6) 実用化への道筋を考えた研究成果を出しつつあるものと評価する。
- (7) プラント設計研究とのタイアップがスムーズに進んでいれば、機器構造材料研究は実用化への筋道を歩んでいると思われる。システムとして問題がなければ、最後は材料技術が実用化の鍵を握っていると言える。その意味で高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究における技術的成立性判断、実用化候補概念の絞り込み等に効果的に反映できるものと思われる。したがって、実用化戦略調査研究を支援するために欠かすことのできない分野であり、必要な研究開発課題を適切にカバーできていれば実用化との関係は達成されると判断される。
- (8) 材料強度評価法、構造強度評価法など、主としてナトリウム炉を対象とした開発となっている。技術的成熟度の観点から設計のフェーズが異なるため、致し方ないものとも考えるが、他の炉概念への適用も念頭において絞り込みに必要なデータを効率的に提供できるように研究を進めるのがよいと考える。
- (9) 高温構造設計技術や三次元免震構造は、原子炉はもちろんですが、広く一般産業への応用も考えられるのではないかと期待しますが、そのための異分野との幅広い技術交流もしていただきたい。

③得られた成果の普及、公開

- (1) 得られた成果の普及は適切になされている。具体的には次が挙げられる。
 - ・汎用非線型構造解析システム FINAS
 - ・高温構造設計基準
 - ・サーマルストライピング評価法
- (2) これまでの成果は今後の FBR の技術開発に活用できると考える。
- (3) 原子力プラントへの成果の活用はハード、ソフトの両面とも期待して当然のものと思うが、他分野への応用、適用をより活発にできる研究項目もあり、積極的な技術の一般化を図られるよう期待したい。
- (4) 成果発表、特許出願・取得に関しては、サイクル機構内他プロジェクトの例と比

較すると平均以上であり、努力のあとが伺える。

- (5) 研究発表や特許出願は十分に行われているが、東電の件で明らかになったように成果に基づいて合理的基準を作成し、規制に反映させる努力が極めて重要である。本格的な実用化までには他の組織が積極的に関与することはあまり考えられないので、サイクル機構が中心的に基準整備をリードする必要がある。

また、ハード技術だけでなく統合化技術やマネジメント技術などのソフト技術についても、成果を積極的に公表して行くことが望まれる。

- (6) 成果発表、情報開示、特許取得を積極的に行っていることは評価できる。しかしながら海外協力の実施の際も含めて国益を大切にしたい慎重な公開をして欲しい。
- (7) 学会等における基準の整備に貢献していることから成果は活用されていると判断できる。また、FINAS は軽水炉許認可や一般産業施設を含め広く活用されているとのことであるから、研究開発の公開、普及も十分行われていると言える。
- (8) 専門誌等への論文投稿、学会口頭発表など、成果の普及、公開を積極的に行っていると考える。

今後とも、原子力分野に限らず、「一般産業にも成果が活用できないか」という視点を持って研究を進めるのがよいと考える。

- (9) 材料評価技術や高温構造設計技術に比べ、耐震設計技術の論文、学会での発表が少ない。この点は仕方ないが、核燃料サイクル開発機構がおこなっている研究が原子炉の安全性向上にも役立つもので、一般産業にも広く応用できる研究であるという点を知ってもらうためにも、たとえば三次元免震構造などはしろうとにもわかりやすいテーマなので、一般紙の科学面や雑誌等を介してもっと広く研究成果を報告したほうがよいと思います。フェニックスの実大炉心模型の振動実験なども、一般向けの科学ニュースとしては面白いものです。論文や学会発表になりにくいものほど、一般へのニュースとしての切り口を考えてみてはいかがでしょうか。

6. 今後の展開

- (1) 今後の進めるにあたっては、
- できるだけ具体的な達成目標と達成時期を設定し、着実に実施すること
 - サイクル機構内に技術が根ざし、専門家が育っていくこと、
- が、望まれる
- (2) FBR実用化戦略調査研究第2期への反映を意図している課題については、計画通り遂行されることが望まれる。一方、材料損傷定量化技術やシステム化規格等の基盤技術として長期的展開を図る課題については、適宜実用化候補概念の設計合理化への寄与度を見極めながら優先順位をつけて効率的に進めることが望まれる。
- (3) 構造材料関係の研究開発は長期的視点に立ち、地道な努力を要求される分野であ

る。従って、外部のものに、研究が永劫に続くものと捉えられたり、狭い視野、短い焦点で判断したりされないよう、長期的な目標とその重要性が明確に伝わるようにする必要がある。常日頃から現在の達成度と将来の計画について、関係各機関や納税者たる国民に十分承知理解してもらう努力を怠らないでほしい。

- (4) 当面は実用化戦略調査研究への反映が主たる研究課題であるが、技術基盤の長期的展開としていくつかの課題を示されている。これらも着実に進めて欲しい。また、常陽、もんじゅを通しての保守の経験からプラントの保守管理技術体系の基礎を築いて行って欲しい。
- (5) 実用化戦略調査研究では、平成17年度に候補概念を絞り込む前に、平成15年度までの成果をもとに中間評価を行うこととしている。実用化戦略調査研究から求められる研究成果を、適切なタイミングで提供できるように研究を進めることが必要と考える。

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

- (1) 腐食関連技術において計画されている鉛ビスマスによる鋼材の腐食については腐食性が酸素濃度等に依存することを考えると、実プラント条件で目標濃度をいかに実現するかとの工夫に重点があるべきで、鉛ビスマス中での腐食そのものの研究は視野を広げる意味はあるもののプライオリティは他より低くても良いのではなかろうか。即ち鉛ビスマス冷却炉の技術開発における重要課題ではあろうが、今回得られる腐食データは炉そのものの成立性を判断するのに用いるには限定的な役割しか果たさないのではなかろうか。例えば、BWRの成立性について応力腐食割れ問題をBWR開発前に議論していれば、BWRは成立しないとの答えが出た可能性もあるのでは。PWRのSG問題についても同様であろう。これらの答えが“YES” and “NO”であるように。材料腐食の問題は材料、使用環境、冷却材化学の関係する複雑な問題であって、ある炉型を開発するべきと考えたらその解決策を求めて努力するべき課題である。

これに限らず問題点を議論するだけでは炉の開発は進まない。ナトリウム冷却炉の合理化のために解決を求めて構造材料面の努力しようとしているが、これが本来の炉の研究開発の姿ではなかろうか。設計ではいかに単純化して作れるかが問題の本質であって、自然の法則に逆らわない限り何でも実現できる可能性はあるのではないか。逆に言うと複雑な設計をせざる得ないものほどシステムとして劣っているということになるのでは。

高温での構造健全性はナトリウム冷却炉に限らず各国共通の課題であり、国際協力を推進し海外から研究を受注するなど国際的にリードをすると視点がもっとあっても良いのではないか。それを奨励する仕組みも必要かもしれない。

- (2) 高温構造設計手法開発の一環として非弾性解析による評価実用化の目標を明確に設定するとともに、損傷や亀裂の発生箇所、履歴がフォローできるような新たなシミュレーションによる評価手法の開発を検討してみたらどうであろうか。また構造材料の分野は、損傷定量化技術の開発に見られるように、今後、原子、分子レベルのミクロな現象の解明を要求されると考える。古典的な連続体力学に基づくのみでなく、様々な幅広いアプローチをもってより機構論的な現象の解明とモデル化に向けた研究開発を行われることを期待する。

世界的にみて、高速増殖炉を積極的に推進しているのはわが国とロシアのみであり、とくに高温材料開発と評価技術においては、日本が世界のリーダーシップを取れる分野であると信じている。また、韓国、中国など高速増殖炉開発に積極的であり、本研究開発による着実な成果がこれらの国々における開発に有効に反映されることを切望する。

- (3) まとめに記載のある軽水炉や核融合炉への貢献は本当か？書きすぎではないかと思う。
- (4) 東京電力(株)の原子力発電所において自主点検作業記録の不正等の問題が生じた背景の一つとして、我が国の技術基準には、設備の使用中に当該設備にひび割れやその兆候が発見された場合に工学的な手法を用いて安全性の評価を行う手法が規格基準として整備されていないことが指摘されている。高速増殖炉については、最初から欠陥を許容する基準(運転開始後に欠陥が見つかったも、即時に設計時点で考慮している範囲内なので運転継続可能と判断できる)を整備することを念頭において研究を進めるのがよいと考える。

8. 総合評価(上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断)

- (1) 機器構造材料研究開発は高速増殖炉開発の最も重要な課題である。これまでの成果は高く評価できる。今後の計画も適切である。

成果は普遍性があり、軽水炉やその他の高温炉、さらには広く一般産業にも貢献することが期待される。

- (2) 全体的には貴重な成果を上げてきたと評価する。今後の展開にあたっては、定量的な目標(期間、達成事項等)を計画に反映して進めることが必要と考える。適宜専門家による適切な評価を取り入れて進めることが必要である。
- (3) 大型ナトリウム冷却炉の経済的な成立可能性に、現実的な見通しを得る上で当研究テーマの果たしてきた役割および今後期待される役割は、大変大きいと考えられる。もんじゅ事故対応や実用化戦略調査研究第1期に対して、タイムリーな貢献が果たされたことも評価できる。

このような成果や期待される役割から見ると、本テーマに対する今後のリソース

配分（研究費及び要員）が、過小に提案されているのではないかという印象を受ける。今後、大型ナトリウム冷却炉以外の炉型も検討の視野に入ってくるであろうことを勘案すれば、本テーマにはより積極的な投資が必要なのではないか。さらに、セラミクス系複合材料などを含む 12Cr フェライト鋼以降の次々世代材料の探索や開発に対しても、サイクル機構はより積極的な貢献を果たすべきではないかと考える。

得られた成果の普及・公開に関連しては、今後は共同研究や業務委託の相手先である重工メーカー等民間企業への特許出願権の承継（バйдール条項の適用）なども積極的に進め、本テーマの成果として公開するべきであると考ええる。

- (4) 基本的には、FBR 実用化に向けて必要となる機器構造材料の研究開発を実用化戦略調査研究と連携して進めており、適切と考えられる。

尚、FBR 実用化戦略調査研究第 2 期への反映を意図している課題については、計画通り遂行されることが望まれる。一方、材料損傷定量化技術やシステム化規格等の基盤技術として長期的展開を図る課題については、適宜実用化候補概念の設計合理化への寄与度を見極めながら優先順位をつけて効率的に進めることが望まれる。

- (5) 「もんじゅ」事故による高速増殖炉を取り巻く環境の激変の中で、研究目的、内容も大きく変わったが、その成果を踏まえて、平成 14 年度からの実用化戦略調査研究第 2 期への直接貢献を研究計画の柱とする研究計画は、適切であり、全体として妥当と評価する。その成果を期待したい。

- (6) 本課題は高速増殖炉開発にとって必要な基礎基盤技術に関する研究開発である。もんじゅプラントの設計建設以来、新たな課題としてコスト低減、構造のより高い信頼性などが明らかにされてきており、本研究開発はこれらの課題解決に直結するものとして捉えられる。構造材料研究開発は、究極的な材料開発、構造材料の健全性評価手法の高度化、高温構造設計手法や耐震・免震技術の確立など長期的な視点で実施されるものであるが、この度の研究開発期間においては、電気事業者による実証炉設計、もんじゅナトリウム漏洩対策、実用化戦略調査研究などに対し、技術的な貢献を行うに必要かつ重要な知見や実証データを蓄積・提供することとなった。同時に、今後の高温構造設計技術の体系化、とくに規格基準の整備と成果の反映、新材料の開発など実施すべき項目や、非弾性評価手法など開発すべき評価手法、損傷機構など現象解明とモデル化など未だ数多くの課題が残っており、これらの課題を解決していくことは、高速増殖炉実用化の重要性・必要性はもちろんのこと、そのために本研究開発が必要不可欠であることの認識を内外に十分知らしめた上で、着実な実施を行っていただきたい。

- (7) 研究の目的・意義、これまでの成果、今後の計画ともに概ね妥当であると判断す

る。問題があるとすれば、実用化に至る研究開発全体のロードマップやマイルストーンがいま一つ明確でなく、意義は十分に認められるが終りなき研究になりかねないこと、研究目標の定量性がもう少し欲しいことなどがあげられる。また、実用化戦略調査研究に対して、具体的にどんな成果をいつ頃までに反映する必要があるのかを、実用化戦略調査研究からの要求の形で一覧できるような形で整理しておくことが必要と思われる。

- (8) 総合的に見て十分な研究計画・体制の下で着実な成果を挙げている。しかし、今後は Na 冷却以外の炉型も念頭に入れて、必ずしも本評価の研究計画にこだわらずより柔軟な研究実施を考えるべきであろう。
- (9) 基盤技術であることから、着実に開発を進めることが大切であり、その結果として材料開発、高温構造設計基準の確立、評価手法等の成果が出ていると判断される。今後も実用化戦略調査研究への研究課題をこなしつつ、基盤技術としての機器構造材料研究にとどまらずに保守管理技術への展開をも視野にいれて継続的な研究を続けて欲しい。
- (10) 高速増殖炉の特徴を考慮して、設計の合理化が期待できる技術に重点を置いた機器構造材料の研究開発になっていると考える。

以上

(参考) 高速炉・燃料サイクル課題評価委員会 各委員の評価意見 (高速増殖炉の機器構造材料研究開発)

【意見1】

1. 研究開発の目的・意義

機器構造材料は原子炉をハードウェアとして実現するための枢要技術であり、その研究は高速増殖炉開発において極めて重要である。実用化戦略調査研究におけるシステム改善方策の大部分が機器・構造分野の技術であることから本研究開発の意義は大きい。

新材料の開発や構造設計技術の高度化によって建設コストの低減とプラントの高温化、長寿命化ならびに運転信頼性の向上を通じたFBRの経済性の向上を目標とし、その成果は安全性向上にも寄与するとの研究開発の目標は的確である。FBRの経済性の向上は必要性が高い。原子力長期計画など国の計画や方針との整合性も高く、サイクル機構が実施すべき課題である。関連技術の動向も的確に把握されている。

2. 研究開発目標

研究開発分野として材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術が挙げられているのは適切である。高速炉は高温プラントであり、材料のクリープ特性を考慮すべきこと、定常及び過渡時の熱応力が構造設計の支配因子であることより、熱荷重の検討を行うこと、薄肉構造であるため地震荷重に関する対策に焦点をあてた研究開発を行うとしているのは適切である。

3. 研究開発計画

(1) 材料評価技術

FBR用12Crフェライト鋼はFBR設計の合理化に大きく寄与する事が期待されており、その研究開発を延性じん性の改善、溶接性、LBBの成立可能性を念頭において行うのは妥当である。研究開発計画は適切と考える。

(2) 高温構造設計技術

高温構造設計の課題を構造解析技術、高温強度評価技術、熱荷重評価技術、システム技術としているのは適切である。

高温強度評価の研究開発計画は適切である。研究内容は世界的にみても優れたものとなっており成果に期待したい。

熱荷重評価技術の研究開発計画も適切である。実際はプラントの構造設計から与えられるパラメータ（寸法）によって解析結果が変わると考えられる。プラントの温度や流量などのシステムパラメータ以外のこれらの設計パラメータについても感度解析の中に取り入れる必要があるのではないかと。単相流解析は実用レベルまで達しており、成果が期待される。熱流動挙動は圧損や局所の形状など詳細な構造に

依存する可能性があるのではないか。

これらの成果をシステム化した規格としてまとめようとしていることも評価できる。システム化には長期かかると予想され、今後4年間という短期的視野ではなく長期に着実に成果が積み上げられることを期待したい。実験結果と比較した検討、例えば過去の大型実験装置やプラントシステムの試験結果との比較による検討については計画の中では述べられていないが、これらの過去の実験データなどを活用することも将来的には必要ではないかという気がする。特に熱流動解析による構造物の温度分布とその時間変化の予測精度についてはそうではなからうか。

(3) 耐震設計技術

3次元免震技術はプラント設計の標準化、簡素化を実現すると期待されている。これまでの研究成果をふまえて、上下免震の基本構成要素である皿バネに関する力学データを取得し、強度設計手法を整備しようとする計画は適切である。

(1)(2)(3) いずれの研究内容も世界の最先端と考えられ優れている。

4. 研究実施体制

平成9～13年度の資金実績に比して今後4年間の資金は約75%である。過去5年間よりも今後の4年間の研究開発は質量とともに多く、資金不足が心配される。少ない資金の有効活用を図る方策も必要であろう。国の内外との研究協力ではメーカーとの役割分担とそれぞれの特徴を生かした連携が特に重要であろう。

5. 研究成果

①得られた成果の内容

材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術とも着実な成果が挙げられていると評価できる。特筆すべき成果としては次が挙げられる。

○実証炉材料の316FRの開発

○溶接部評価法の整備により原子炉容器製作に板材を用いることを可能としたこと。

○サーマルストライピングの評価法

○耐震解析技術の高度化

○もんじゅ2次系ライナの健全性評価解析への寄与

○材料損傷定量化技術開発のための基礎的知見

②実用化との関係

実用化との関連では機器構造材料研究開発はFBRの設計合理化に寄与する程度が最も大きいと期待される。基盤的知見の充実も合理化を支えることが期待される。

③得られた成果の普及、公開

得られた成果の普及は適切になされている。具体的には次が挙げられる。

・汎用非線型構造解析システム FINAS

- ・高温構造設計基準
- ・サーマルストライピング評価法

6. 今後の展開

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

腐食関連技術において計画されている鉛ビスマスによる鋼材の腐食については腐食性が酸素濃度等に依存することを考えると、実プラント条件で目標濃度をいかに実現するかとの工夫に重点があるべきで、鉛ビスマス中での腐食そのものの研究は視野を広げる意味はあるもののプライオリティは他より低くても良いのではなかろうか。即ち鉛ビスマス冷却炉の技術開発における重要課題ではあろうが、今回得られる腐食データは炉そのものの成立性を判断するのに用いるには限定的な役割しか果たさないのではなかろうか。例えば、BWR の成立性について応力腐食割れ問題を BWR 開発前に議論していれば、BWR は成立しないとの答えが出た可能性もあるのでは。PWR の SG 問題についても同様であろう。これらの答えが“YES” and “NO”であるように。材料腐食の問題は材料、使用環境、冷却材化学の関係する複雑な問題であって、ある炉型を開発するべきと考えたらその解決策を求めて努力すべき課題である。

これに限らず問題点を議論するだけでは炉の開発は進まない。ナトリウム冷却炉の合理化のために解決を求めて構造材料面の努力しようとしているが、これが本来の炉の研究開発の姿ではなかろうか。設計ではいかに単純化して作れるかが問題の本質であって、自然の法則に逆らわない限り何でも実現できる可能性はあるのではないか。逆に言うと複雑な設計をせざる得ないものほどシステムとして劣っているということになるのでは。

高温での構造健全性はナトリウム冷却炉に限らず各国共通の課題であり、国際協力を推進し海外から研究を受注するなど国際的にリードをすとの視点がもっとあっても良いのではないか。それを奨励する仕組みも必要かもしれない。

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

機器構造材料研究開発は高速増殖炉開発の最も重要な課題である。これまでの成果は高く評価できる。今後の計画も適切である。

成果は普遍性があり、軽水炉やその他の高温炉、さらには広く一般産業にも貢献することが期待される。

【意見2】

1. 研究開発の目的・意義

- 機器構造材料を高度化することによる FBR の経済性向上を図るという目的は明確である。

- 但し、本課題を達成することによりどれだけの経済性向上が達成できるか見通しを持って進める必要がある。
- FBR を実用化していく上では重要な課題と考える。その観点からは国の計画、方針と整合性はあると考える。

2. 研究開発目標

- 今回の評価でどこの区切りをつけ、どこを見直して平成 14 年度からの計画が作られているか明確に分からない。

3. 研究開発計画

- 研究内容について、FBR の新技術、技術改良であるが、関連分野を研究開発している多くの機関が考えている課題であり特に独創性、創造性がある課題とは感じられない(あるならその点がアピールされていない)

4. 研究実施体制

- 原研、電中研、大学等との協力については記述されているが、メーカーとの協力は無いのか。メーカーに業務を分担している場合には、JNC との役割分担はどのようなになっているのか。
- 共同研究については、両機関で適切に役割分担がなされているか。(実質的な共同研究と情報交換的なものとは軽重が違います。そこを明確にしておいたほうがよいと思います)
- 委託研究については、その課題がなぜ JNC で出来ないのか、重要ならできるようにすることが必要ではないか。(世界に他に類を見ない貴重で高価な設備、施設を使用する場合は除く)

5. 研究成果

①得られた成果の内容

- 達成された成果は水準、質とも当該分野に寄与していると考ええる。
- 計画と達成度については、当初の具体的、定量的目標が明確でないため、評価できない。しかし、貴重な成果は上げたと考える。

②実用化との関係

- 実用化戦略調査研究との連携を十分に図って計画立案、研究実施を図ることが重要である。

③得られた成果の普及、公開

- これまでの成果は今後の FBR の技術開発に活用できると考える。

6. 今後の展開

今後の進めるにあたっては、

- できるだけ具体的な達成目標と達成時期を設定し、着実に実施すること
- サイクル機構内に技術が根ざし、専門家が育っていくこと、

が、望まれる。

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

全体的には貴重な成果を上げてきたと評価する。今後の展開にあたっては、定量的な目標(期間、達成事項等)を計画に反映して進めることが必要と考える。

適宜専門家による適切な評価を取り入れて進めることが必要である。

【意見3】

1. 研究開発の目的・意義

2. 研究開発目標

3. 研究開発計画

4. 研究実施体制

5. 研究成果

①得られた成果の内容

②実用化との関係

③得られた成果の普及、公開

6. 今後の展開

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

大型ナトリウム冷却炉の経済的な成立可能性に、現実的な見通しを得る上で当研究テーマの果たしてきた役割および今後期待される役割は、大変大きいと考えられる。もんじゅ事故対応や実用化戦略調査研究第1期に対して、タイムリーな貢献が果たされたことも評価できる。

このような成果や期待される役割から見ると、本テーマに対する今後のリソース配分（研究費及び要員）が、過小に提案されているのではないかという印象を受ける。今後、大型ナトリウム冷却炉以外の炉型も検討の視野に入ってくるであろうことを勘案すれば、本テーマにはより積極的な投資が必要なのではないか。さらに、セラミクス系複合材料などを含む 12Cr フェライト鋼以降の次々世代材料の探索や開発に対しても、サイクル機構はより積極的な貢献を果たすべきではないかと考える。

得られた成果の普及・公開に関連しては、今後は共同研究や業務委託の相手先である重工メーカー等民間企業への特許出願権の承継（バイドール条項の適用）なども積極的に進め、本テーマの成果として公開するべきであると考ええる。

【意見4】

1. 研究開発の目的・意義

基本的には、F B R 実用化に向けて必要となる機器構造材料の研究開発を実用化戦略調査研究と連携して進めており、適切と考えられる。

2. 研究開発目標

3. 研究開発計画

4. 研究実施体制

5. 研究成果

①得られた成果の内容

②実用化との関係

③得られた成果の普及、公開

6. 今後の展開

F B R 実用化戦略調査研究第2期への反映を意図している課題については、計画通り遂行されることが望まれる。一方、材料損傷定量化技術やシステム化規格等の基盤技術として長期的展開を図る課題については、適宜実用化候補概念の設計合理化への寄与度を見極めながら優先順位をつけて効率的に進めることが望まれる。

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

基本的には、F B R 実用化に向けて必要となる機器構造材料の研究開発を実用化戦略調査研究と連携して進めており、適切と考えられる。

尚、F B R 実用化戦略調査研究第2期への反映を意図している課題については、計画通り遂行されることが望まれる。一方、材料損傷定量化技術やシステム化規格等の基盤技術として長期的展開を図る課題については、適宜実用化候補概念の設計合理化への寄与度を見極めながら優先順位をつけて効率的に進めることが望まれる。

【意見5】

1. 研究開発の目的・意義

2. 研究開発目標

3. 研究開発計画

耐震設計技術に関する研究で、地震荷重を緩和する技術としての三次元免震構造の概念を創出した点は、独創性、創造性に富んだ研究開発と評価できます。

4. 研究実施体制

フランスのC E Aとの共同研究によって、高速炉の炉心の地震応答挙動を解析する手法を確立した点が評価できます。

5. 研究成果

①得られた成果の内容

建屋全体は従来の水平免震とし、原子炉容器などを吊り下げるコモンデッキを大型皿ばねを用いた上下免震要素で支持する三次元免震構造によって、水平免震に比べ大幅な免震効果が得られた。振動試験によって基本的な成立性と免震効果を確認し、皿ばねについても荷重・変位特性を評価する手法を開発したので、実際のプラントで実用化できると期待されます。

②実用化との関係

高温構造設計技術や三次元免震構造は、原子炉はもちろんですが、広く一般産業への応用も考えられるのではないかと期待しますが、そのための異分野との幅広い技術交流もしていただきたい。

③得られた成果の普及、公開

材料評価技術や高温構造設計技術に比べ、耐震設計技術の論文、学会での発表が少ない。この点は仕方ないが、核燃料サイクル開発機構がおこなっている研究が原子炉の安全性向上にも役立つもので、一般産業にも広く応用できる研究であるという点を知ってもらうためにも、たとえば三次元免震構造などはしろうとにもわかりやすいテーマなので、一般紙の科学面や雑誌等を介してもっと広く研究成果を報告したほうがよいと思います。フェニックスの実大炉心模型の振動実験なども、一般向けの科学ニュースとしては面白いものです。論文や学会発表になりにくいものほど、一般へのニュースとしての切り口を考えてみてはいかがでしょうか。

6. 今後の展開

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

【意見6】

1. 研究開発の目的・意義

高速増殖炉の機器構造材料の研究は、過去の「もんじゅ」への反映を目的とした研究から実証炉への貢献を主目的とした研究へ移行し、それらの目的、意義は明確であり、それらの成果は指針、基準に反映されている。しかし「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故があり、鋼材腐食などの事故対応の研究へと目的が移され、さらに電気事業者による実証炉計画の中止という大きな変化があり、研究目的そのものの根本的な変更が行われたと理解する。すなわち高速増殖炉を FBR サイクルの実用化から見直す戦略調査研究が平成 11 年度より開始され、特にその経済性、安全性に重点をおく実用化戦略調査研究第 1 期への貢献を、さらに 14 年度からの第 2 期へ

の直接寄与を目的とする研究計画としたことは、国の計画、社会のニーズに適切に対応できたものと評価する。機器構造材料は炉の成立性を左右するものであり実用化戦略調査研究第2期における高クロムフェライト鋼（12Cr 鋼）をベースとする研究は、先行する他分野の技術との融合でもあり、炉のコンパクト化による経済性の向上に寄与する研究として、今後の進展を見守りたい。

2. 研究開発目標

原子炉プラントのコンパクト化を基本とする合理化設計を目指す研究開発は、基本的な短配管と熱応力許容設計を可能とする技術開発は、機器構造材料の研究開発をリード技術と位置づける設定で計画されており、目標設定、水準、およびブレイクスルー切についても具体的な課題の抽出と開発項目、および今後の計画はそれぞれについて適切になされていると評価する。システム化規格の研究は今後のあるべき設計を切り開くものとして期待する。

3次元免震の開発研究はそのコストと上記の開発研究による経済性寄与との関連からも検討されて最終的なニーズが評価されるものと思われる。総合的な研究も期待する。

3. 研究開発計画

実用化戦略調査研究第2期のプラント設計研究への対応を重視する重点課題の設定は、ブレイクスルーを目指す中長期的視点も加え、研究スケジュールとその期間内での研究目標も適切になされている。平成9～13年度の成果と問題点の指摘とともに平成14年度以降の計画が実用化戦略調査研究第2期の研究に向けて内容、計画設定が検討され、期待される具体的成果の目標が示されている。研究開発計画を進めるための資金は、設定されている項目を達成する上ではやや厳しい印象を受けるが、期間途中での成果の評価と適切な研究実施計画の見直しをおこない、国の内外の機関との研究協力を有効に進め、計画で予定した成果を出せるよう期待したい。

4. 研究実施体制

所定の計画に沿って基盤技術開発の立場から実用化戦略調査研究での絞り込みに適切に貢献できるよう、所内の円滑な交流が不可欠であり、また国の内外の機関との協力研究を活発に進められるよう期待したい。全体として妥当であると評価する。

5. 研究成果

①得られた成果の内容

材料評価技術、高温構造設計技術の2項目については、プラントのコンパクト化を目指す合理化設計に向けて、これまでに得られている成果をまとめ、計画目標との達成度について具体的に明らかにされており、水準、質、実用化戦略調査研究第1期への貢献については妥当のレベルにあると評価する。耐震設計技術については適切に進められたと評価するが、今後、薄肉構造とコンパクト構造にとって必須の

技術であるが、それゆえ先の 2 項目の研究との関連が重要と思われるので、研究の進展のなかでの対応を期待したい。

②実用化との関係

特に、平成 14 年度からの研究計画は実用化戦略調査研究第 2 期への直接的貢献を主目的としており、研究計画もその目的に沿ったものであると評価する。その内容は先に述べたようにナトリウム冷却に対しては適切であるが、実用化戦略調査研究で対象とされている他種の流体に対してもどのような実用化技術の寄与があるのか、研究の進展の中で示されるよう期待したい。

③得られた成果の普及、公開

原子力プラントへの成果の活用はハード、ソフトの両面とも期待して当然のものと思うが、他分野への応用、適用をより活発にできる研究項目もあり、積極的な技術の一般化を図られるよう期待したい。

6. 今後の展開

これまでの評価の中で、コメントしてきたので省略する。

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

特になし。

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

「もんじゅ」事故による高速増殖炉を取り巻く環境の激変の中で、研究目的、内容も大きく変わったが、その成果を踏まえて、平成 14 年度からの実用化戦略調査研究第 2 期への直接貢献を研究計画の柱とする研究計画は、適切であり、全体として妥当と評価する。その成果を期待したい。

【意見 7】

1. 研究開発の目的・意義

わが国における高速増殖炉導入計画がなし崩し的に遅延していく情況に依らず、平素から長期的な視点に立って継続的な努力が求められるものの一つとして、機器構造材料研究開発がある。構造材料の問題は炉型によらず極めて重要であり、その健全性は原子炉プラントの安全性を下支えするものとして、常に完璧に近いものが要求されると考えてよい。一方、現在、高速増殖炉導入を妨げている要因の一つとして挙げられているのが、コストである。そのコスト低減に貢献する課題としては、構造・配管系の簡素化、コンパクト化、プラントの高温化、超寿命化などが挙げられている。これらの課題を解決するために、より厳しい運転環境と荷重条件に耐えうる新材料の開発、長期間にわたる構造健全性を保証できる材料技術と構造設計技術の高度化と合理化を追求する本研究開発の重要性、目的・意義は十分明確かつ的確に設定されていたと判断する。なお、ステンレス構造材と極めて共存性のよいナ

トリウムを冷却材として用いるシステムに的を絞っていることは正しい方向であると考える。

本課題は、短期的な目標設定ではなしえない長期的な基礎基盤技術開発で、わが国においてはサイクル機構のみが実施できるものであり、燃料サイクル技術の確立を目指す国の計画・方針に沿うものであると考えられる。

2. 研究開発目標

本研究開発の目標は主に実証炉、実用炉を対象としており、材料評価技術における強度データベースの継続的整備・強度および寿命評価法開発・強度基準の整備、新材料開発、損傷定量化技術の確立など、高温構造設計技術における溶接部・構造不連続部に対する弾性解析による高温強度評価法の確立と FINAS コードの継続的改良、耐震設計技術における地震時の衝突振動解析手法の確立と 3 次元免震構造の概念創出と成立性の確認などであり、概ね目標の設定・水準は適切と考えられる。

しかしながら、一般的に当該研究開発の性格から、長期的目標と本研究開発の関連に明確な線を引きにくい側面がある。例えば 9 年度から 13 年度、14 年度から 17 年度にまたがる項目が多数あり、本期間での達成目標設定がある程度曖昧にならざるを得ない。そのため、少なくとも長期的な材料強度評価技術の確立に対し本研究開発における強度評価法の整備がどのような位置づけにあり、今後の展開にどのように繋がっていくのか、どこまでやればよいのかが分かり難い。すなわち、長期目標を達成していく上で、各段階の中期目標を設定しておき、今回の目標設定が全体のどの部分に当たるのか目に見える形で示しておけば、より分かり易かったと考える。

3. 研究開発計画

将来が不透明であるとはいえ電気事業者による実証炉計画や、もんじゅ事故対応、実用化戦略調査研究などへの反映先も含め、研究開発そのものは将来の高速増殖炉設計建設にとって普遍的な基礎基盤となる技術を高度化するものである。設定された研究開発項目・内容、スケジュールや項目相互間の関連性は十分具体的で妥当なものであったと評価する。さらに資金計画、施設・設備は適当であると判断する。また、もんじゅのナトリウムリークに関連した腐食機構の解明と腐食速度評価法の確立など、状況に応じた計画の見直しも適切に行われている。研究内容は、一般的に従来手法の延長線上にあるものが主流であるが、材料損傷定量化技術開発などにおいてミクロな現象に着目した独創性、創造性に富んだ研究内容が垣間見られる。

4. 研究実施体制

実施体制(組織、人員等)、他機関との協力・連携、運営は、概ね妥当なものと認める。設備・機器についても同様である。ただし、本来オールジャパン的な性格で

あるにもかかわらず、鋼材メーカーや原子炉メーカー、ソフトウェアハウスなどとの協力連携などやや不明確なところがある。

5. 研究成果

①得られた成果の内容

変更も含め計画通りに研究が進行し、極めて高質な成果が得られており、ほぼ目標を達成したと考える。とくに、今回特筆すべきは熱流動と構造との間の研究開発がこれまで以上に密接な連携をもって行われたことで、今後とも、材料劣化、腐食機構や腐食物堆積機構などの分野などとの連携も含めて充実した研究開発の展開を引き続き期待したい。

②実用化との関係

もんじゅに適用した技術からの外挿が主な視点となる。高速炉用フェライト鋼など新材料の適用性判断に必要な材料データの取得、非弾性解析の実用化など今後継続すべき課題が具体的になっており、かつこれらの課題の解決方策も明らかにされている。今後の計画によると、実用化戦略調査研究の課題を適切にカバーするとともに、技術的成立性判断、実用化候補概念の絞り込み等に効果的に反映できるものと判断する。

③得られた成果の普及、公開

成果発表、特許出願・取得に関しては、サイクル機構内他プロジェクトの例と比較すると平均以上であり、努力のあとが伺える。

6. 今後の展開

構造材料関係の研究開発は長期的視点に立ち、地道な努力を要求される分野である。従って、外部のものに、研究が永劫に続くものと捉えられたり、狭い視野、短い焦点で判断したりされないよう、長期的な目標とその重要性が明確に伝わるようにする必要がある。常日頃から現在の達成度と将来の計画について、関係各機関や納税者たる国民に十分承知理解してもらう努力を怠らないでほしい。

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

また高温構造設計手法開発の一環として非弾性解析による評価実用化の目標を明確に設定するとともに、損傷や亀裂の発生箇所、履歴がフォローできるような新たなシミュレーションによる評価手法の開発を検討してみたらどうであろうか。また構造材料の分野は、損傷定量化技術の開発に見られるように、今後、原子、分子レベルのミクロな現象の解明を要求されると考える。古典的な連続体力学に基づくのみでなく、様々な幅広いアプローチをもってより機構論的な現象の解明とモデル化に向けた研究開発を行われることを期待する。

世界的にみて、高速増殖炉を積極的に推進しているのはわが国とロシアのみであり、とくに高温材料開発と評価技術においては、日本が世界のリーダーシップを取

れる分野であると信じている。また、韓国、中国など高速増殖炉開発に積極的であり、本研究開発による着実な成果がこれらの国々における開発に有効に反映されることを切望する。

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

本課題は高速増殖炉開発にとって必要な基礎基盤技術に関する研究開発である。もんじゅプラントの設計建設以来、新たな課題としてコスト低減、構造のより高い信頼性などが明らかにされてきており、本研究開発はこれらの課題解決に直結するものとして捉えられる。構造材料研究開発は、究極的な材料開発、構造材料の健全性評価手法の高度化、高温構造設計手法や耐震・免震技術の確立など長期的な視点で実施されるものであるが、この度の研究開発期間においては、電気事業者による実証炉設計、もんじゅナトリウム漏洩対策、実用化戦略調査研究などに対し、技術的な貢献を行うに必要かつ重要な知見や実証データを蓄積・提供することとなった。同時に、今後の高温構造設計技術の体系化、とくに規格基準の整備と成果の反映、新材料の開発など実施すべき項目や、非弾性評価手法など開発すべき評価手法、損傷機構など現象解明とモデル化など未だ数多くの課題が残っており、これらの課題を解決していくことは、高速増殖炉実用化の重要性・必要性はもちろんのこと、そのために本研究開発が必要不可欠であることの認識を内外に十分知らしめた上で、着実な実施を行っていただきたい。

【意見8】

1. 研究開発の目的・意義

現在の原子力を取りまく社会情勢から考え、高速増殖炉開発を従来の計画通りに進めることは不可能と考えられるが、もし国策としての高速増殖炉開発が不変であると仮定した場合には、機器構造材料研究開発の目的および意義は明らかである。すなわち、十分な安全性と信頼性を有し、かつ経済的に競争力のある高速増殖炉を実現するためには、機器構造材料の分野において従来技術を超える技術レベルの達成が不可欠である。材料評価技術の確立、新材料開発によるプラントのコンパクト化、高温構造設計の体系化と基準作成、免震技術の確立などは何れも高速増殖炉実用化にとって解決が必須の課題である。また、実用化戦略調査研究第2期への貢献も当然目的に含められるべきである。これらの研究は、国策として行われている高速増殖炉開発研究の一貫として、サイクル機構が中心的に実施することが当然である。同様の高温構造材料が使われる関連分野としては新鋭火力発電所等が考えられるが、これらの領域における材料開発、設計技術の動向を基礎とすることは妥当である。

2. 研究開発目標

定性的目標設定については概ね妥当と考えられるが、一部に目標の定量性がいまい、あるいは終りなき研究となる可能性のあるものがあるので、定量的目標の設定や研究のロードマップの提示を検討されたい。たとえば、次のような点があげられる。

- 12Cr 鋼についてはどの程度のパフォーマンスが達成されたら既存の構造材料に取って替りうると考えてよいのか。
- 材料損傷定量化技術では、材料健全性維持管理におけるどんな評価項目をどの程度の信頼度で評価できれば十分と考えるのか。
- 構造解析技術では、現状に加えてなさらにどのような機能を必要としているのか。
- 熱流動－構造統合解析手法では、具体的にどんな解析機能を実現しようとしているのか。
- 3次元免震が成立すると判断できるための定量目標。
- 実用化戦略調査研究第2期に対して、どの時期までに具体的にどんな成果を提供する必要があるのか。

3. 研究開発計画

開発項目としては必要なものが網羅されていると考えるが、時間、資金ともに制約があることが常である。特に研究予算は、計画ではかなり厳しくまた今後さらに厳しくなることが予想される。したがって、高速増殖炉実現に最低限必要な達成目標、さらにその上の達成目標というようにレベル別けして優先順位を明確にされたい。その際、とかく要素技術開発中心となりがちであるが、統合化、規格化などのシステム化技術の開発にも十分に注意されたい。たとえば最近の東電の件でも問題になったように、設計基準ばかりでなく維持基準を作成するために必要な知見の蓄積なども重要である。また、原子力を取り巻く社会情勢が厳しい折から、国の開発計画の大幅見直しがないとも限らないので、そのような事態にも対応できるような計画にしておく必要がある。

4. 研究実施体制

現在の組織・人員の制約の下で実施することは致し方ないとして、新しい人材の育成についても配慮すべきである。外部機関との関係では、原研と統合する際の組織・役割分担の見直し、メーカとの協力関係、鉛ビスマス炉以外の炉型に関する海外機関、特にロシアとの協力体制についてより明確にする必要がある。それ以外の点については概ね妥当であると思われる。

5. 研究成果

①得られた成果の内容

もんじゅ事故の影響で実証炉開発が仕切りなおしになった感があり、十分な成果

をあげ得たかについては判断が難しい面もあるが、こうした情勢の変化を踏まえても当初の計画した一応のレベルは達成されたと考える。ただし、実用化戦略調査研究第1期に対する反映は具体的には見えない。もんじゅ事故対応については、ハードの現象面のみならず設計における品質管理などのソフト面での教訓をよく整理し、手続き規格などの形にしておく必要がある。

②実用化との関係

実用化戦略調査研究への反映については、炉型・概念ごとにどんな具体的技術課題があるのかと、その現状での達成度を整理しておく必要がある。たとえば、ナトリウムと鉛ビスマス以外のガス炉や水蒸気炉での腐食の問題、被覆粒子燃料炉に対する耐震設計などは既に解決済か。まだであるとしたら、どの程度の成果をいつ頃までに実用化戦略調査研究へ反映すべきかを示す必要があるであろう。

③得られた成果の普及、公開

研究発表や特許出願は十分に行われているが、東電の件で明らかになったように成果に基づいて合理的基準を作成し、規制に反映させる努力が極めて重要である。本格的な実用化までには他の組織が積極的に関与することはあまり考えられないので、サイクル機構が中心的に基準整備をリードする必要がある。

また、ハード技術だけでなく統合化技術やマネジメント技術などのソフト技術についても、成果を積極的に公表して行くことが望まれる。

6. 今後の展開

特になし。

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

特になし。

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

研究の目的・意義、これまでの成果、今後の計画ともに概ね妥当であると判断する。問題があるとすれば、実用化に至る研究開発全体のロードマップやマイルストーンがいま一つ明確でなく、意義は十分に認められるが終りなき研究になりかねないこと、研究目標の定量性がもう少し欲しいことなどがあげられる。また、実用化戦略調査研究に対して、具体的にどんな成果をいつ頃までに反映する必要があるのかを、実用化戦略調査研究からの要求の形で一覧できるような形で整理しておくことが必要と思われる。

【意見9】

1. 研究開発の目的・意義

(1)目的・意義は明確である。

2. 研究開発目標

(1)目標の設定・水準は適切である。しかしながら、今後は状況に応じて適切な見直しを図る柔軟な対応を期待する。

3. 研究開発計画

(1)高温構造設計技術に関する研究について、各種破損様式に対する構造物の限界強度を見極めて、それを防止する設計評価技術を開発する計画が主体となっているが、むしろ破損は生じるものと考えて（破損防止は実験条件と解析コードの最適化（裕度確保）だけでは防ぎきれないケースも多いと考えて）、破損後の損傷進行の予測の為の基盤実験を重視して欲しい。その意味で磁気特性評価は大切であり、それ以外にも手法を開発する計画を積極的にして欲しい。

4. 研究実施体制

(1)組織・要員は概ね妥当である。(2)耐震・免震技術開発については、土木学会等との協力を密にすべきであろう。(3)国内外との研究協力は十分な実績がある。しかしながら原子力分野の我が国の人材育成の観点から、国内の民間会社、大学との協力が乏しい。費用対効果の観点も重要ではあるが、我が国が原子力開発体制を維持していくという観点から、大所高所から考えることも必要であろう。

5. 研究成果

①得られた成果の内容

(1)平成13年度まで得られた成果はNa冷却高速増殖炉には十分有益であり意義深い。今後、実用化戦略調査研究との対応を十分加味して、例えば鉛ビスマス炉、ガス炉等の有望概念にも適用することを念頭に成果を出して欲しい。

②実用化との関係

(1)実用化への道筋を考えた研究成果を出しつつあるものと評価する。

③得られた成果の普及、公開

(1)成果発表、情報開示、特許取得を積極的に行っていることは評価できる。しかしながら海外協力の実施の際も含めて国益を大切にした慎重な公開をして欲しい。

6. 今後の展開

(1)特になし

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

(1)まとめに記載のある軽水炉や核融合炉への貢献は本当か？書きすぎではないかと思う。

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

(1)総合的に見て十分な研究計画・体制の下で着実な成果を挙げている。しかし、今後はNa冷却以外の炉型も念頭に入れて、必ずしも本評価の研究計画にこだわらずより柔軟な研究実施を考えるべきであろう。

【意見10】

1. 研究開発の目的・意義

機器構造材料技術は FBR 研究開発における極めて重要な基盤技術である。FBR の構造設計上の特徴と課題をふまえて、新材料の開発や構造設計技術の高度化によって、建設コストの低減化ならびに運転信頼性の向上、さらにプラントの安全性向上に寄与することから、機器構造材料研究開発の FBR 研究開発における位置づけは明確である。同時に、研究開発の成果は種々の設計手法として体系化されることによって、構造設計基準や材料基準などの規格基準に貢献できることから、その意義は十分高いと判断できる。

2. 研究開発目標

実証炉設計基準への反映を目的とした基盤的研究開発がもんじゅ事故後、事故対応さらには実用化戦略調査研究への反映と変化してきているが、研究開発目標として、基本的には材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術を中心に据えて、FBR の構造設計上の特徴と課題をふまえた目標設定となっていると判断される。

3. 研究開発計画

もんじゅ事故によって当初の研究計画は変更されたが、計画見直しは適切に行われたと判断される。また、実用化戦略調査研究への転換も基盤技術であることから、それ相応の対応がなされていると言える。なお、材料技術は原子力システムの開発および維持管理において極めて重要な基盤技術であることから、データベースとして必要なものを確実に蓄積されるような研究開発体制を維持し、継続的な研究を行って欲しい。

4. 研究実施体制

プラント設計研究グループとの課題の共有化がなされていることが示されている。また、電力を含め外部との研究協力も積極的に展開されていることも伺える。今後は外国を含めて FBR 開発における機器構造材料開発のセンターとし機能して欲しい。

5. 研究成果

①得られた成果の内容

研究開発の成果は多方面に活用されているとのことであり、中でも高温構造設計基準を含め学会等における基準の整備に貢献していることは大いに賞賛されることである。今後も積極的に研究成果を報告し、原子力産業にとどまらず広く一般産業への貢献へにもつなげて欲しい。

②実用化との関係

プラント設計研究とのタイアップがスムーズに進んでいれば、機器構造材料研究は実用化への筋道を歩んでいると思われる。システムとして問題がなければ、

最後は材料技術が実用化の鍵を握っていると言える。その意味で高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究における技術的成立性判断、実用化候補概念の絞り込み等に効果的に反映できるものと思われる。したがって、実用化戦略調査研究を支援するために欠かすことのできない分野であり、必要な研究開発課題を適切にカバーできていれば実用化との関係は達成されると判断される。

③得られた成果の普及、公開

学会等における基準の整備に貢献していることから成果は活用されていると判断できる。また、FINAS は軽水炉許認可や一般産業施設を含め広く活用されているとのことであるから、研究開発の公開、普及も十分行われていると言える。

6. 今後の展開

当面は実用化戦略調査研究への反映が主たる研究課題であるが、技術基盤の長期的展開としていくつかの課題を示されている。これらも着実に進めて欲しい。また、常陽、もんじゅを通しての保守の経験からプラントの保守管理技術体系の基礎を築いて欲しい。

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

特になし

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

基盤技術であることから、着実に開発を進めることが大切であり、その結果として材料開発、高温構造設計基準の確立、評価手法等の成果が出ていると判断される。今後も実用化戦略調査研究への研究課題をこなしつつ、基盤技術としての機器構造材料研究にとどまらずに保守管理技術への展開をも視野に置いて継続的な研究を続けて欲しい。

【意見11】

1. 研究開発の目的・意義

- ・実用化戦略調査研究では、経済性について、「将来の軽水炉に比肩する発電原価の達成」を目標としている。これを達成するためには、高温・低圧システム、熱荷重が主体、薄肉構造という高速増殖炉の特徴を考慮した構造設計手法・基準の整備が必要であり、本研究開発の目的・意義は明確と考える。

2. 研究開発目標

- ・実用化戦略調査研究の開発目標を、機器構造材料の研究開発という分野でブレークダウンすると、例えば、「高速増殖炉条件に適した 12Cr 系フェライト鋼の開発」という項目が出てくるわけであるが、各開発目標の費用対効果を定量的に説明できれば、より開発目標設定の説得性が増すと考える。（「鉛ビスマス炉の成立性、設計評価に必要な材料腐食問題の解決」のように、費用対効果とい

う観点になじまないものもある)

3. 研究開発計画

- ・高速増殖炉の研究開発については、平成 12 年に大きな転換（実用化戦略調査研究の開始）をしたわけであるが、それに合わせて研究内容を見直している。
- ・将来にわたって資金が十分に確保できる保証はなく、メカニズムの解明により計算機シミュレーションで材料試験を代替する、実規模試験を小規模試験で代替するなど、開発費を削減する方策について検討を進めることが必要と考える。

4. 研究実施体制

- ・原研、日本原電、電中研など、多くの機関と協力して研究を進めていると考える。

5. 研究成果

①得られた成果の内容

- ・2. 研究開発目標と重複するが、開発目標の設定及び成果の評価を行うに当たって、費用対効果をできるだけ定量的に説明できることが望ましいと考える。

②実用化との関係

- ・材料強度評価法、構造強度評価法など、主としてナトリウム炉を対象とした開発となっている。技術的成熟度の観点から設計のフェーズが異なるため、致し方ないものとも考えるが、他の炉概念への適用も念頭において絞込みに必要なデータを効率的に提供できるように研究を進めるのがよいと考える。

③得られた成果の普及、公開

- ・専門誌等への論文投稿、学会口頭発表など、成果の普及、公開を積極的に行っていると考ええる。
- ・今後とも、原子力分野に限らず、「一般産業にも成果が活用できないか」という視点を持って研究を進めるのがよいと考える。

6. 今後の展開

- ・実用化戦略調査研究では、平成 17 年度に候補概念を絞り込む前に、平成 15 年度までの成果をもとに中間評価を行うこととしている。実用化戦略調査研究から求められる研究成果を、適切なタイミングで提供できるように研究を進めることが必要と考える。

7. その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

- ・東京電力（株）の原子力発電所において自主点検作業記録の不正等の問題が生じた背景の一つとして、我が国の技術基準には、設備の使用中に当該設備にひび割れやその兆候が発見された場合に工学的な手法を用いて安全性の評価を行う手法が規格基準として整備されていないことが指摘されている。高速増殖炉については、最初から欠陥を許容する基準（運転開始後に欠陥が見つかったも、即時に設

計時点で考慮している範囲内なので運転継続可能と判断できる)を整備することを念頭において研究を進めるのがよいと考える。

8. 総合評価（上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断）

- ・高速増殖炉の特徴を考慮して、設計の合理化が期待できる技術に重点を置いた機器構造材料の研究開発になっていると考える。

以上

参 考 資 料

核燃料サイクル開発機構

参 考 資 料 目 次

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 評価結果に対する措置

参考資料 3 課題評価委員会の評価意見に対するサイクル機構の見解

参考資料 4 高速増殖炉の機器構造材料研究開発（課題説明資料）

〔研究開発課題説明資料（本文）〕

〔補足説明資料〕

〔用語の説明〕

参考資料 5 高速増殖炉の機器構造材料研究開発（OHP 資料）

参 考 資 料 1

研究開発課題の中間評価について（諮問）

14 サイクル機構(企)034

平成14年8月2日

研究開発課題評価委員会

(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)

委員長 岡 芳明 殿

核燃料サイクル開発機構

理事長 都甲 泰正

研究開発課題の中間評価について（諮問）

研究開発外部評価規程第7条第1項に基づき、次の事項について諮問致します。

なお、検討結果については、平成14年11月中旬までに答申を示されたく申し添えます。

・ 諮問事項

「高速増殖炉の機器構造材料研究開発」に関する中間評価

以上

参 考 資 料 2

評価結果に対する措置

研究開発課題評価委員会
「高速増殖炉の機器構造材料研究開発」の
評価結果(中間評価)に対する措置

平成 15 年 3 月 6 日
核燃料サイクル開発機構

「高速増殖炉の機器構造材料研究開発」に関わる今回の中間評価においては、核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」という。）における主として過去 5 年間の成果と、実用化戦略調査研究の第 2 期への反映を目的とした平成 17 年度までの計画を対象に評価を受け、本テーマの役割、これまでの成果、今後の計画について適切と評価されましたので、計画どおり研究開発を継続して実施することとします。

各評価項目に対するご指摘については、以下のような措置をとることとします。

(1) 研究開発の目的・意義

- 機器構造材料は原子炉をハードウェアとして実現し、FBR の経済性向上を追求する上での枢要技術である、との評価を頂き、特に措置を求められるご指摘はありませんでした。

(2) 研究開発目標

定性的目標設定については概ね妥当と考えられるが、可能な限り定量的目標の設定や研究のロードマップを明示することが重要である。なお、状況に応じて適切な見直しを図る柔軟な対応を行うべきであることはいうまでもない。

とのご指摘に対し、

- 研究開発計画の策定にあたっては、最終目標と、そこに至る過程における中間的な目標を可能な限り明確かつ定量的に設定することが重要と考えております。実用化戦略調査研究では、平成 15 年度の中間取りまとめにおいて長期を展望したロードマップの見直しを行います。その際、本研究開発のロードマップの明示に努めるとともに、これを受けて可能な限り定量的な目標設定を図ります。
- 今後、実用化戦略調査研究の第 3 期への展開や原研との統合など、本分野をとりまく状況の大きな変化が予想されますが、本分野の基本的な目標を見据えた上で、ニーズを見極めつつ柔軟に計画を見直していきます。

(3) 研究開発計画

研究開発計画を進めるための資金は、設定されている項目を達成する上ではやや厳しい印象を受ける。そのため、FBR 実現に最低限必要な達成目標、その上の達成目標のようにレベル分けして優先順位を明確化されたい。また、計算機シミュレーショ

ンや小規模試験での代替など、開発費を削減する方策について検討を進めることが必要と考える。

とのご指摘に対し、

- 限られた研究資源と時間のもとで成果を効率的に高速炉開発に反映するためには、優先順位の明確化は重要と認識しています。実用化戦略調査研究第2期への直接的反映を主眼とする研究を最優先とし、技術のブレークスルーに繋がる長期的展望のもとでの課題は、着実に取り組んでまいります。
- また、機構論に基づく計算機シミュレーションと現象解明に的を絞った小規模試験の組合せなどによって従来の実証試験的なアプローチを代替していくことは重要と考えております。例えば材料強度について、組織変化などのデータベース化と結びつけた微視的構造の解析技術の開発といった、従来の材料試験に替わる評価法開発に取り組んでおり、今後も継続発展させてまいります。

(4) 研究開発実施体制

国内外の機関との研究協力ではメーカーとの役割分担とそれぞれの機関の特徴を生かした連携が特に重要であろう。耐震・免震技術開発については、関連学協会との協力を密にすべきであろう。

とのご指摘に対し、

- 具体的課題毎にメーカーとの役割分担は異なりますが、機器構造材料の分野においては、メーカーには機器の設計・製造経験に基づく技術や知見などを期待しています。また、国内外の研究機関とも、シーズ型の研究機関とは双方の強みを活かして良質な成果を生み出すよう今後も積極的な連携を図って行きたいと考えます。
- さらに、耐震・免震分野については建築学会や主要建築会社など、また構造設計、材料の分野においては機械学会や材料学会など、関連学協会とは各種の委員会への参加などを通じた密接な協力関係にありますが、今後さらに実効的なものにすべく努力してまいります。

(5) 研究成果

もんじゅ事故対応については、ハードの現象面のみならず設計における品質管理などのソフト面での教訓をよく整理し、手続き規格などの形にしておく必要がある。

とのご指摘に対し、

- もんじゅにおいては、温度計破損の反省において設計管理の問題と最新知見の反映の2点が指摘されました。前者については、施設品質保証計画書において設計管理に関する運営要領を定め、改良型温度計をはじめとした種々の設計審

査にあたって適用してきています。また、後者については最新技術情報の反映機能の強化の改善策として、従来から運用してきた国内外の事故・故障事例の評価、検討を目的とした信頼性向上対策検討会に加え、研究開発成果情報の評価、検討を目的とした最新技術情報評価検討会をもんじゅ所内の原子炉安全審査会の下部組織として新たに設置し、大洗工学センター及び国際技術センターの研究者、技術者も含めて評価、検討ができる仕組みを構築したうえで運用を開始しており、これを機能させていきます。

高温構造設計技術や3次元免震構造は、広く一般産業への応用も期待される。その他の他の産業分野との幅広い技術交流も必要であろう。

また、サイクル機構がおこなっている研究が原子炉の安全性向上にも役立つのみならず一般産業にも広く応用できる研究であるという点を知ってもらうためにも、一般紙の科学面や雑誌等を介してもっと広く研究成果を報告すべきである。

とのご指摘に対し、

- この分野の研究開発成果は一般産業への応用性が高いと認識しております。成果を、高速炉の実用化にとどまらず広い分野に反映・普及することは重要な使命と考えますので、「成果普及」などの諸制度の利用を積極的に推進するとともに、幅広い産業分野との交流を心がけてまいります。
- また、専門学術誌以外の一般の媒体への情報発信も一層積極的に行ってまいります。

(6) 今後の展開

研究発表や特許出願は十分に行われているが、成果に基いて合理的基準を作成し、規制に反映させる努力が極めて重要である。また、とかく要素技術開発中心となりがちであるが、統合化、規格化などのシステム化技術の開発にも十分に注意されたい。

とのご指摘に対し、

- サイクル機構ではこれまで、もんじゅの構造設計方針や流力振動評価指針など、研究開発の成果を技術指針類に集大成することを行ってきました。
- 現在、国の基準は性能規定とし、詳細な仕様規定は機械学会などの民間規格に委ねられる方向で検討が進められています。今後のサイクル機構の機器構造材料分野における研究開発成果については、規格基準の原案として集大成し、これら学会規格の整備に貢献してまいります。
- さらに、個別の研究開発成果を統合、システム化して実際のプラント設計に適用可能なツールとして集大成することも重要と考えており、着実にとりくんでまいります。

(7) その他

高温での構造健全性はナトリウム冷却炉に限らず各国共通の課題であり、国際協力を推進し海外から研究を受注するなど国際的にリードをするとの視点がもっとあっても良いのではないか。それを奨励する仕組みも必要かもしれない。

今後は外国を含めてFBR開発における機器構造材料技術研究開発のセンターとして機能して欲しい。

とのご指摘に対し、

- 高温での構造健全性に係る国際協力に関しては、現在 CEA との密接な研究協力関係があります。今後、GENERATION IV など米国も含めた新しい枠組みが形成される中で、本分野はわが国が国際的にリードすべき分野と考え、積極的に取り組んでまいります。海外からの研究受託についても、研究施設の整備をはじめ、これを可能とする方策を検討してまいりたいと考えます。そのためにも、良質な成果を発信し、実績を重ねていくことが重要と考えます。
- また、国内外を問わずFBR開発の拠点として機能を発揮できるよう、体制、施設の整備などを含め努力してまいります。

我が国の技術基準には、設備の使用中に当該設備にひび割れやその兆候が発見された場合に工学的な手法を用いて安全性の評価を行う手法が規格基準として整備されていないことが指摘されている。FBRについては、寿命を通して合理的に健全性を維持できる基準を整備することを念頭において必要な知見を蓄積することが必要と考える。

とのご指摘に対し、

- 合理的な設備の信頼性確保に関する技術は、今後特に重要度を増していくものと考えております。高速炉では内圧は低く熱応力が支配的であり、検査が簡単ではない部位も存在する、という特徴があります。これらの点を踏まえ、軽水炉をはじめ他産業の維持基準の動向も十分に参酌しながら、科学的合理性をもった基準の整備に繋がる研究を進めてまいります。

(8) 総合評価

- 機器構造材料研究開発はFBR開発の重要な課題であり、過去及び今後期待される成果や役割は大変大きく、かつ普遍性を有しているとの評価を頂き、特に措置を求められるご指摘はありませんでした。

以 上

参 考 資 料 3

課題評価委員会の評価意見に対する

サイクル機構の見解

(補足説明資料)

本資料は、課題評価委員会での
意見などにより改訂したもので
ある。

中間評価課題：高速増殖炉の機器構造材料研究開発

課題評価委員会委員の評価意見に対する サイクル機構の見解 (補足説明資料)

平成14年11月
(平成15年3月改訂)

核燃料サイクル開発機構

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
1.研究開発の目的・意義	(1) 機器構造材料は原子炉をハードウェアとして実現するための枢要技術であり、その研究は高速増殖炉開発において極めて重要である。実用化戦略調査研究におけるシステム改善方策の大部分が機器・構造分野の技術であることから本研究開発の意義は大きい。 新材料の開発や構造設計技術の高度化によって建設コストの低減とプラントの高温化、長寿命化ならびに運転信頼性の向上を通じた FBR の経済性の向上を目標とし、その成果は安全性向上にも寄与するとの研究開発の目標は的確である。FBR の経済性の向上は必要性が高い。原子力長期計画など国の計画や方針との整合性も高く、サイクル機構が実施すべき課題である。関連技術の動向も的確に把握されている。	(1) 拝承します。
	(2) 機器構造材料を高度化することによる FBR の経済性向上を図るという目的は明確である。 但し、本課題を達成することによりどれだけの経済性向上が達成できるか見通しを持って進める必要がある。 FBR を実用化していく上では重要な課題と考える。その観点からは国の計画・方針と整合性はあると考える。	(2) 拝承します。 成果の反映としての、経済性向上に関する見通しを持つことは重要と考えています。実用化戦略調査研究における大型 Na 冷却炉の建設単価目標は実証炉の約 1/2 ですが、これを実現する主要なシステム技術として、本分野の課題(12Cr, 高温構造設計高度化, 3次元免震)が抽出されております。 (→ 補足①) 拝承します。
	(3) 基本的には、FBR 実用化に向けて必要となる機器構造材料の研究開発を実用化戦略調査研究と連携して進めており、適切と考えられる。	(3) 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(4) 高速増殖炉の機器構造材料の研究は、過去の「もんじゅ」への反映を目的とした研究から実証炉への貢献を主目的とした研究へ移行し、それらの目的、意義は明確であり、それらの成果は指針、基準に反映されている。しかし「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故があり、鋼材腐食などの事故対応の研究へと目的が移され、さらに電気事業者による実証炉計画の中止という大きな変化があり、研究目的そのものの根本的な変更が行われたと理解する。すなわち高速増殖炉を FBR サイクルの実用化から見直す戦略調査研究が平成 11 年より開始され、特にその経済性、安全性に重点をおく実用化戦略調査研究第 1 期への貢献を、さらに 14 年度からの第 2 期への直接寄与を目的とする研究計画としたことは、国の計画、社会のニーズに適切に対応できたものと評価する。機器構造材料は炉の成立性を左右するものであり実用化戦略調査研究第 2 期における高クロムフェライト鋼(12Cr 鋼)をベースとする研究は、先行する他分野の技術との融合でもあり、炉のコンパクト化による経済性の向上に寄与する研究として、今後の進展を見守りたい。	(4) 拝承します。
	(5) わが国における高速増殖炉導入計画がなし崩し的に遅延していく情況に依らず、平素から長期的な視点に立って継続的な努力が求められるものの一つとして、機器構造材料研究開発がある。構造材料の問題は炉型によらず極めて重要であり、その健全性は原子炉プラントの安全性を下支えするものとして、常に完璧に近いものが要求されと考えてよい。一方、現在、高速増殖炉導入を妨げている要因の一つとして挙げられているのが、コストである。そのコスト低減に貢献する課題としては、構造・配管系の簡素化、コンパクト化、プラントの高温化、超寿命化などが挙げられている。これらの課題を解決するために、より厳しい運転環境と荷重条件に耐えうる新材料の開発、長期間にわたる構造健全性を保証できる材料技術と構造設計技術の高度化と合理化を追求する本研究開発の重要性、目的・意義は十分明確かつ的確に設定されていたと判断する。なお、ステンレス構造材と極めて共存性のよいナトリウムを冷却材として用いるシステムに的を絞っていることは正しい方向であると考ええる。 本課題は、短期的な目標設定ではなしえない長期的な基礎基盤技術開発で、わが国においてはサイクル機構のみが実施できるものであり、燃料サイクル技術の確立を目指す国の計画・方針に沿うものであると考えられる。	(5) 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(6) 現在の原子力をとりまく社会情勢から考え、高速増殖炉開発を従来の計画通りに進めることは不可能と考えられるが、もし国策としての高速増殖炉開発が不変であると仮定した場合には、機器構造材料研究開発の目的および意義は明らかである。すなわち、十分な安全性と信頼性を有し、かつ経済的に競争力のある高速増殖炉を実現するためには、機器構造材料の分野において従来技術を超える技術レベルの達成が不可欠である。材料評価技術の確立、新材料開発によるプラントのコンパクト化、高温構造設計の体系化と基準作成、免震技術の確立などは何れも高速増殖炉実用化にとって解決が必須の課題である。また、実用化戦略調査研究第2期への貢献も当然目的に含められるべきである。これらの研究は、国策として行われている高速増殖炉開発研究の一貫として、サイクル機構が中心的に実施することが当然である。同様の高温構造材料が使われる関連分野としては新鋭火力発電所等が考えられるが、これらの領域における材料開発、設計技術の動向を基礎とすることは妥当である。	(6) 拝承します。
	(7) 目的・意義は明確である。	(7) 拝承します。
	(8) 機器構造材料技術は FBR 研究開発における極めて重要な基盤技術である。FBR の構造設計上の特徴と課題をふまえて、新材料の開発や構造設計技術の高度化によって、建設コストの低減化ならびに運転信頼性の向上、さらにプラントの安全性向上に寄与することから、機器構造材料研究開発の FBR 研究開発における位置づけは明確である。同時に、研究開発の成果は種々の設計手法として体系化されることによって、構造設計基準や材料基準などの規格基準に貢献できることから、その意義は十分高いと判断できる。	(8) 拝承します。
	(9) 実用化戦略調査研究では、経済性について、「将来の軽水炉に比肩する発電原価の達成」を目標としている。これを達成するためには、高温・低圧システム、熱荷重が主体、薄肉構造という高速増殖炉の特徴を考慮した構造設計手法・基準の整備が必要であり、本研究開発の目的・意義は明確と考える。	(9) 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
2.研究開発 目標	(1) 研究開発分野として材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術が挙げられているのは適切である。高速炉は高温プラントであり、材料のクリープ特性を考慮すべきこと、定常及び過渡時の熱応力が構造設計の支配因子であることより、熱荷重の検討を行うこと、薄肉構造であるため地震荷重に関する対策に焦点をあてた研究開発を行うとしているのは適切である。	(1) 拝承します。
	(2) 今回の評価でどこの区切りをつけ、どこを見直して平成 14 年度からの計画が作られているか明確に分からない。	(2) サイクル機構では、平成15年度までを目処に、すべての研究開発課題に対し中間評価を受ける計画で進めています。当課題については、実用化戦略調査研究がフェーズ1から2に移行した平成 13 年度に中間評価を受ける計画でしたが、平成13年度での評価課題数が多く、平成 14 年度にずれ込んだものです
	(3) 原子炉プラントのコンパクト化を基本とする合理化設計を目指す研究開発は、基本的な短配管と熱応力許容設計を可能とする技術開発は、機器構造材料の研究開発をリード技術と位置づける設定で計画されており、目標設定、水準、およびブレークスルー についても具体的な課題の抽出と開発項目、および今後の計画はそれぞれについて適切になされていると評価する。システム化規格の研究は今後のあるべき設計を切り開くものとして期待する。 3次元免震の開発研究はそのコストと上記の開発研究による経済性寄与との関連からも検討されて最終的なニーズが評価されるものと思われる。総合的な研究も期待する。	(3) 拝承します。 3次元免震については、ご指摘のとおり免震効果によるプラント機器の設計合理化効果と免震の導入によるコスト増（建設費の 5%が上限との試評価がある）のバランスに基づいた判断になるものと考え、このような観点からの検討も実施していきます。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(4) 本研究開発の目標は主に実証炉、実用炉を対象としており、材料評価技術における強度データベースの継続的整備・強度および寿命評価法開発・強度基準の整備、新材料開発、損傷定量化技術の確立など、高温構造設計技術における溶接部・構造不連続部に対する弾性解析による高温強度評価法の確立と FINAS コードの継続的改良、耐震設計技術における地震時の衝突振動解析手法の確立と 3 次元免震構造の概念創出と成立性の確認などであり、概ね目標の設定・水準は適切と考えられる。 しかしながら、一般的に当該研究開発の性格から、長期的目標と本研究開発の関連に明確な線を引きにくい側面がある。例えば 9 年度から 13 年度、14 年度から 17 年度にまたがる項目が多数あり、本期間での達成目標設定がある程度曖昧にならざるを得ない。そのため、少なくとも長期的な材料強度評価技術の確立に対し本研究開発における強度評価法の整備がどのような位置づけにあり、今後の展開にどのように繋がっていくのか、どこまでやればよいのかが分かり難い。すなわち、長期目標を達成していく上で、各段階の中期目標を設定しておき、今回の目標設定が全体のどの部分に当たるのか目に見える形で示しておけば、より分かり易かったと考える。	(4) 拝承します。 長期的な課題設定に際して、最終目標と、そこに至る段階での中間目標を設定してメリハリのある計画とすべき、とのご指摘と理解します。各課題について、最終目標と今後 4 年間の目標、ならびに各課題の開発段階について補足いたします。(→補足②)

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(5) 定性的目標設定については概ね妥当と考えられるが、一部に目標の定量性があいまい、あるいは終りなき研究となる可能性のあるものがあるので、定量的目標の設定や研究のロードマップの提示を検討されたい。たとえば、次のような点があげられる。 12Cr 鋼についてはどの程度のパフォーマンスが達成されたら既存の構造材料に取って替りうると考えてよいのか。 - 材料損傷定量化技術では、材料健全性維持管理におけるどんな評価項目をどの程度の信頼度で評価できれば十分と考えるのか。 - 構造解析技術では、現状に加えてさらにどのような機能を必要としているのか。 - 熱流動－構造統合解析手法では、具体的にどんな解析機能を実現しようとしているのか。 3次元免震が成立すると判断できるための定量目標。 - 実用化戦略調査研究第 2 期に対して、どの時期までに具体的にどんな成果を提供する必要があるのか。	(5) 課題の性質上、(例えば燃料材料開発における目標燃焼度のような)定量的な目標の表現が難しい課題もありますが、研究開発計画の策定に当たっては、最終目標と、そこに至る過程における中間的な目標を可能な限り明確に設定することは重要と考えます。また、各課題について、実用化戦略調査研究とリンクしたロードマップを作成しています。 例えば、改良 9Cr 鋼に劣らない延性靱性及びクリープ疲労強度の確保。 長寿命プラントの健全性評価、維持技術の基盤を創出することを目的としている。現段階では、まず材料損傷を統一的に表し得る指標開発、同時に当該指標に基づく損傷進行モニタリング技術開発の見通しを得ること目指しているため、磁気特性に基づく損傷検知適用範囲の見極め、モニタリング原理創出が目標である。 インフラ整備として位置づけている。当面は、大規模3次元非弾性解析を可能とする計算速度向上。 実プラントの系統構成において、システムパラメータと形状を入力条件として与えると、系統の冷却材温度変化とそれに対する構造の応答が計算され、熱応力の時刻歴が出力される機能 コスト及び免震要素の具体的構造設計手法。 終了時(2005 年)に、12Cr 鋼の適用性と3次元免震の工学的成立性を提示。また、プラント構造設計の成立性を裏付ける高温構造設計技術(非弾性解析設計、熱荷重評価法など)を提供。
	(6) 目標の設定・水準は適切である。しかしながら、今後は状況に応じて適切な見直しを図る柔軟な対応を期待する。	(6) 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(7) 実証炉設計基準への反映を目的とした基盤的研究開発がもんじゅ事故後、事故対応さらには実用化戦略調査研究への反映と変化してきているが、研究開発目標として、基本的には材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術を中心に据えて、FBRの構造設計上の特徴と課題をふまえた目標設定となっていると判断される。	(7) 拝承します。
	(8) 実用化戦略調査研究の開発目標を、機器構造材料の研究開発という分野でブレークダウンすると、例えば、「高速増殖炉条件に適した 12Cr 系フェライト鋼の開発」という項目が出てくるわけであるが、各開発目標の費用対効果を定量的に説明できれば、より開発目標設定の説得性が増すと考える。 (「鉛ビスマス炉の成立性、設計評価に必要な材料腐食問題の解決」のように、費用対効果という観点になじまないものもある)	(8) 「費用対効果の明示」が開発の課題と目標の設定に際して説得力のある材料となることはご指摘のとおりと考えます。 その意味で、実用化研究における大型Na炉の建設単価目標を実証炉の約 1/2 としていることかを、「効果」の定量的根拠とすることが可能です。これを達成する主要なシステム技術として 12Cr、高温構造設計技術高度化、及び3次元免震技術が抽出されており、これらの成果が総体としてもたらす効果、と考えられます。個々の成果がもたらす単独の効果についても、可能な範囲で説明性を高めていくこととします。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
3.研究開発計画	(1) 1) 材料評価技術 FBR 用 12Cr フェライト鋼は FBR 設計の合理化に大きく寄与する事が期待されており、その研究開発を延性じん性の改善、溶接性、LBB の成立可能性を念頭において行うのは妥当である。研究用開発計画は適切と考える。 2) 高温構造設計技術 高温構造設計の課題を構造解析技術、高温強度評価技術、熱荷重評価技術、システム技術としているのは適切である。 高温強度評価の研究開発計画は適切である。研究内容は世界的にみても優れたものとなっており成果に期待したい。 熱荷重評価技術の研究開発計画も適切である。実際はプラントの構造設計から与えられるパラメータ(寸法)によって解析結果が変わると考えられる。プラントの温度や流量などのシステムパラメータ以外のこれらの設計パラメータについても感度解析の中に取り入れる必要があるのではないか。単相流解析は実用レベルまで達しており、成果が期待される。熱流動挙動は圧損や局所の形状など詳細な構造に依存する可能性があるのではないか。 これらの成果をシステム化した規格としてまとめようとしていることも評価できる。システム化には長期かかると予想され、今後 4 年間という短期的視野ではなく長期に着実に成果が積み上げられることを期待したい。 実験結果と比較した検討、例えば過去の大型実験装置やプラントシステムの試験結果との比較による検討については計画の中では述べられていないが、これらの過去の実験データなどを活用することも将来的には必要ではないかという気がする。特に熱流動解析による構造物の温度分布とその時間変化の予測精度についてはそうではなかろうか。 3) 耐震設計技術 3 次元免震技術はプラント設計の標準化、簡素化を実現すると期待されている。これまでの研究成果をふまえて、上下免震の基本構成要素である皿パネに関する力学データを取得し、強度設計手法を整備しようとする計画は適切である。 1) 2) 3) いずれの研究内容も世界の最先端と考えられ優れている。	(1) 1) 拝承します。 拝承します。 拝承します。 ご指摘の通り、解析結果は構造の形状寸法に依存しますので、熱過渡統合解析コードにおいては感度解析に際してシステムパラメータと同時に形状パラメータも考慮出来るような機能を持たせております。 拝承します。 熱過渡統合解析コードの実験データなどによる検証は重要なご指摘と考えます。今後、もんじゅの総合機能試験データ等による検証を計画するとともに、当面は設計に使用されている詳細コード群を組みあわせて得られた結果との比較による検証を進めていく計画です。 拝承します。 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(2) 研究内容について、FBR の新技術、技術改良であるが、関連分野を研究開発している多くの機関が考えている課題であり特に独創性、創造性がある課題とは感じられない(あるならその点がアピールされていない)。	(2) 課題の設定そのものは、大半が実用化戦略調査研究におけるプラント開発、候補概念の絞り込みを進める上で摘出されたものであり、独創性というよりはむしろ必要性の観点から判断しています。一方、材料損傷定量化における「材料の高温長時間健全性の維持」、熱荷重評価法における「熱過渡・健全性統合評価」、並びに3次元免震における「皿ばねによる機器上下免震」などは、サイクル機構における独創的な発想に基づく課題と考えております。また、これらの課題について研究を進めるうえで、独創性、創造性を発揮することはもちろん重要であると考えております。
	(3) 実用化戦略調査研究第 2 期のプラント設計研究への対応を重視する重点課題の設定は、ブレークスルーを目指す中長期的視点も加え、研究スケジュールとその期間内での研究目標も適切になされている。平成 9-13 年度の成果と問題点の指摘とともに平成 14 年度以降の計画が実用化戦略調査研究第 2 期の研究に向けて内容、計画設定が検討され、期待される具体的成果の目標が示されている。研究開発計画を進めるための資金は、設定されている項目を達成する上ではやや厳しい印象を受けるが、期間途中での成果の評価と適切な研究実施計画の見直しをおこない、国の内外の機関との研究協力を有効に進め、計画で予定した成果を出せるよう期待したい。	(3) 拝承します。
	(4) 将来が不透明であるとはいえ電気事業者による実証炉計画や、もんじゅ事故対応、実用化戦略調査研究などへの反映先も含め、研究開発そのものは将来の高速増殖炉設計建設にとって普遍的な基礎基盤となる技術を高度化するものである。設定された研究開発項目・内容、スケジュールや項目相互間の関連性は十分具体的で妥当なものであったと評価する。さらに資金計画、施設・設備は適当であると判断する。また、もんじゅのナトリウムリークに関連した腐食機構の解明と腐食速度評価法の確立など、状況に応じた計画の見直しも適切に行われている。研究内容は、一般的に従来手法の延長線上にあるものが主流であるが、材料損傷定量化技術開発などにおいてミクロな現象に着目した独創性、創造性に富んだ研究内容が垣間見られる。	(4) 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(5) 開発項目としては必要なものが網羅されていると考えるが、時間、資金ともに制約があることが常である。特に研究予算は、計画ではかなり厳しくまた今後さらに厳しくなることが予想される。したがって、高速増殖炉実現に最低限必要な達成目標、さらにその上の達成目標というようにレベル別けて優先順位を明確にされたい。 その際、とかく要素技術開発中心となりがちであるが、統合化、規格化などのシステム化技術の開発にも十分に注意されたい。たとえば最近の東電の件でも問題になったように、設計基準ばかりでなく維持基準を作成するために必要な知見の蓄積なども重要である。 また、原子力を取り巻く社会情勢が厳しい折から、国の開発計画の大幅見直しがないとも限らないので、そのような事態にも対応できるような計画にしておく必要がある。	(5) ご指摘のとおり、限られた研究資源と時間のもとで成果を効率的に高速炉開発に反映するために、優先順位の明確化は重要と認識しています。実用化戦略調査研究第2期への直接的反映を主眼とする課題(12Cr, 高温構造健全性, 免震など)を最優先とし、長期的展望のもとでの課題は着実に取組んでいきます。(→補足③) 成果は、FBR機器の構造設計技術として体系化し、規格基準の整備に貢献します。なお、維持基準は、検査、欠陥評価、保守補修の3要素から構成されますが、高速炉に特有の課題を中心に取組んでいきます。そのうち、欠陥評価については、LBB関連で蓄積してきた、高温破壊力学に関するこれまでの成果が活用できます。また、検査などについては、もんじゅの経験や、実用化研究において始めているNa炉のISIに関する検討などを発展させていきます。 ご指摘の点については、原子力開発において、炉型式によらず必須の、この分野でのコアとなる技術をしっかりと抑えておくことが重要と考えます。
	(6) 高温構造設計技術に関する研究について、各種破損様式に対する構造物の限界強度を見極めて、それを防止する設計評価技術を開発する計画が主体となっているが、むしろ破損は生じるものと考えて(破損防止は実験条件と解析コードの最適化(裕度確保)だけでは防ぎきれないケースも多いと考えて)、破損後の損傷進行の予測の為に基盤実験を重視して欲しい。その意味で磁気特性評価は大切であり、それ以外にも手法を開発する計画を積極的にして欲しい。	(6) 内圧による瞬時破断などは別として、実際に生じる構造物の破損の多くは、材料の損傷劣化、き裂の発生、き裂の進展と貫通、冷却材漏えい、という過程を経ます。マクロなき裂発生の前段階における材料損傷について、現状最も有望と判断している磁気特性評価技術の開発を進めています。この技術の適用限界などを見極めた後、必要であれば補完あるいは信頼性を高めるために他の手法などへの展開を図りたいと考えています。また、後段のマクロなき裂に関しては、従来は主としてき裂の発生に焦点を当てた研究を実施してきましたが、今後は、維持規格への発展も視野に入れて、発生したき裂の進展まで一貫して評価する手法への展開も重視するようになりたいと考えています。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(7) もんじゅ事故によって当初の研究計画は変更されたが、計画見直しは適切に行われたと判断される。また、実用化戦略調査研究への転換も基盤技術であることから、それ相応の対応がなされていると言える。なお、材料技術は原子力システムの開発および維持管理において極めて重要な基盤技術であることから、データベースとして必要なものを確実に蓄積されるような研究開発体制を維持し、継続的な研究を行って欲しい。	(7) 拝承します。
	(8) 高速増殖炉の研究開発については、平成 12 年に大きな転換(実用化戦略調査研究の開始)をしたわけであるが、それに合わせて研究内容を見直している。 将来にわたって資金が十分に確保できる保証はなく、メカニズムの解明により計算機シミュレーションで材料試験を代替する、実規模試験を小規模試験で代替するなど、開発費を削減する方策について検討を進めることが必要と考える。	(8) 拝承します。 ご指摘のとおり、機構論に基づくシミュレーションと現象解明に的を絞った小規模試験の組合せなどによって従来の実証試験的なアプローチを代替していくことは重要と考えており、例えば以下のような取り組みを行っています。 材料強度について、材料特性総合データベース(強度特性のみではなく組織変化や基礎物理化学特性などの相関を含む)や、そうした微小材料特性データを反映できるマルチレベルモデリングなどの技術開発により、将来的には新規材料についても大規模(数量的に)な材料試験を行うことなく開発、基準化、適用ができることを目指しています。 熱過渡強度については、従来行われていた高低温ナトリウムの交互切り替え流入による大型モックアップ試験に替えて、温度を精密制御したナトリウムを流入させることにより小型試験体に大型試験体と同等の熱応力場を発生させる新しい試験を試みている。
	(9) 耐震設計技術に関する研究で、地震荷重を緩和する技術としての三次元免震構造の概念を創出した点は、独創性、創造性に富んだ研究開発と評価できます。	(9) 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
4.研究実施体制	(1) 平成9～13年度の資金実績に比して今後4年間の資金は約75%である。過去5年間よりも今後の4年間の研究開発は質量とともに多く、資金不足が心配される。少ない資金の有効活用を図る方策も必要であろう。 国の内外との研究協力ではメーカーとの役割分担とそれぞれの特徴を生かした連携が特に重要であろう。	(1) ご指摘のとおり今後の研究資金は厳しく、公募型研究などの制度利用、国内機関との連携強化、計算機技術利用の拡大など、種々の手段を駆使して有用な成果を生み出すことが重要と考えています。 具体的課題毎にメーカーとの役割分担は異なりますが、概して、メーカーには機器の設計・製造経験に基づく技術や知見などを期待しています。
	(2) 原研、電中研、大学等との協力については記述されているが、メーカーとの協力は無いのか。メーカーに業務を分担している場合には、JNCとの役割分担はどのようになっているのか。 共同研究については、両機関で適切に役割分担がなされているか。(実質的な共同研究と情報交換的なものとは軽重が違ふ。そこを明確にしておいたほうがよい。) 委託研究については、その課題がなぜ JNC で出来ないのか。重要ならできるようにすることが必要ではないか。(世界に他に類を見ない貴重で高価な設備、施設を使用する場合は除く。)	(2) 主要原子炉メーカーとは契約関係や各種委員会などを通じて、密接な協力関係があります。 共同研究の実施にあたっては、それぞれの機関の特徴に応じた適切な役割分担を行っています。(→補足④) いわゆる「委託研究」は、鉛ビスマスループを使用するような特殊な場合を除き、実施していません。
	(3) 所定の計画に沿って基盤技術開発の立場から実用化戦略調査研究での絞り込みに適切に貢献できるよう、所内の円滑な交流が不可欠であり、また国の内外の機関との協力研究を活発に進められるよう期待したい。全体として妥当であると評価する。	(3) 拝承します。
	(4) 実施体制(組織、人員等)、他機関との協力・連携、運営は、概ね妥当なものと認める。設備・機器についても同様である。 ただし、本来オールジャパン的な性格であるにもかかわらず、鋼材メーカーや原子炉メーカー、ソフトウェアハウスなどとの協力連携などやや不明確なところがある。	(4) 拝承します。 主要原子炉メーカーとは契約関係や各種委員会などを通じて、密接な協力関係があります。鋼材メーカーやソフト会社との連携は、これと比べるとやや限定的なのが現状です。これは、前者については原子炉メーカーを通じた間接的な関係になっていること、後者については大規模なソフト開発を主目的とした研究内容でないことによります。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(5) 現在の組織・人員の制約の下で実施することは致し方ないとして、新しい人材の育成についても配慮すべきである。 外部機関との関係では、原研と統合する際の組織・役割分担の見直し、メーカーとの協力関係、鉛ビスマス炉以外の炉型に関する海外機関、特にロシアとの協力体制についてより明確にする必要がある。それ以外の点については概ね妥当であると思われる。	(5) ご指摘のとおり、新しい人材の育成は極めて重要であると考えております。 原研との統合に関しては、まだ大きな枠組みでの議論の段階ですが、並行して大洗と東海地区の基盤技術の検討が始まっており、この中で本分野の在り方について検討していきます。 現在、本分野でのロシアとの協力は LBE 腐食を除いて実績はありませんが、例えば他分野のチャンネルを通じた情報収集や先方の構造基準の調査などにより、協力の可能性を検討していきます。
	(6) 組織・要員は概ね妥当である。 耐震・免震技術開発については、土木学会等との協力を密にすべきであろう。 国内外との研究協力は十分な実績がある。しかしながら原子力分野の我が国の人材育成の観点から、国内の民間会社、大学との協力が乏しい。費用対効果の観点も重要ではあるが、我が国が原子力開発体制を維持していくという観点から、大所高所から考えることも必要であろう。	(6) 拝承します。 免震技術に関して、建築学会や主要建築会社との協力・連携を図りながら研究開発を進めています。 ご指摘の、人材育成及び開発体制の維持は（本分野に限らず）重要な課題であると認識しております。
	(7) プラント設計研究グループとの課題の共有化がなされていることが示されている。また、電力を含め外部との研究協力も積極的に展開されていることも伺える。今後は外国を含めてFBR開発における機器構造材料開発のセンターとし機能して欲しい。	(7) 拝承します。
	(8) 原研、日本原電、電中研など、多くの機関と協力して研究を進めていると考える。	(8) 拝承します。
	(9) フランスのCEAとの共同研究によって、高速炉の炉心の地震応答挙動を解析する手法を確立した点が評価できます。	(9) 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
5.研究成果 ①得られた成果の内容	(1) 材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術とも着実な成果が挙げられていると評価できる。特筆すべき成果としては次が挙げられる。 ○実証炉材料の 316FR の開発 ○溶接部評価法の整備により原子炉容器製作に板材を用いることを可能としたこと。 ○サーマルストライピングの評価法 ○耐震解析技術の高度化 ○もんじゅ 2 次系ライナの健全性評価解析への寄与 ○材料損傷定量化技術開発のための基礎的知見	(1) 拝承します。
	(2) 達成された成果は水準、質とも当該分野に寄与していると考ええる。 計画と達成度については、当初の具体的、定量的目標が明確でないため、評価できない。 しかし、貴重な成果は上げたと考ええる。	(2) 拝承します。 これまでの研究開発に関して、例えば高温強度評価技術について、「溶接部の高温強度評価法と構造不連続部の高温強度評価法の確立を目標」といった記述により目標を示しております。 拝承します。
	(3) 材料評価技術、高温構造設計技術の 2 項目については、プラントのコンパクト化を目指す合理化設計に向けて、これまでに得られている成果をまとめ、計画目標との達成度について具体的に明らかにされており、水準、質、実用化戦略調査研究第 1 期への貢献については妥当のレベルにあると評価する。耐震設計技術については適切に進められたと評価するが、今後、薄肉構造とコンパクト構造にとって必須の技術であるが、それゆえ先の 2 項目の研究との関連が重要と思われるので、研究の進展のなかでの対応を期待したい。	(3) 拝承します。
	(4) 変更も含め計画通りに研究が進行し、極めて高質な成果が得られており、ほぼ目標を達成したと考える。とくに、今回特筆すべきは熱流動と構造との間の研究開発がこれまで以上に密接な連携をもって行われたことで、今後とも、材料劣化、腐食機構や腐食物堆積機構などの分野などとの連携も含めて充実した研究開発の展開を引き続き期待したい。	(4) 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(5) もんじゅ事故の影響で実証炉開発が仕切りなおしになった感があり、十分な成果をあげ得たかについては判断が難しい面もあるが、こうした情勢の変化を踏まえても当初の計画した一応のレベルは達成されたと考える。 ただし、実用化戦略調査研究第1期に対する反映は具体的には見えない。 もんじゅ事故対応については、ハードの現象面のみならず設計における品質管理などのソフト面での教訓をよく整理し、手続き規格などの形にしておく必要がある。	(5) 拝承します。 第1期の実用化戦略調査研究は、幅広い技術選択肢についての、主として机上検討による第1段階の絞り込みであり、その時点での本分野の総合的な知見が、必要に応じて反映されたものと理解しています。 もんじゅにおいては、温度計破損の反省(不適切な設計と新知見の見逃し)を踏まえ、施設品質保証計画書において設計管理に関する運営要領を定めるとともに、「最新技術情報の反映機能の強化」の改善策として、最新技術情報評価検討会をもんじゅ所内の原子炉安全審査会の下部組織として新たに設置し運用を開始しています。(→補足⑤)
	(6) 平成13年度まで得られた成果はNa冷却高速増殖炉には十分有益であり意義深い。今後、実用化戦略調査研究との対応を十分加味して、例えば鉛ビスマス炉、ガス炉等の有望概念にも適用することを念頭に成果を出して欲しい。	(6) 12Cr 開発、高温構造設計技術、3次元免震技術などは、基本的に炉型に共通の技術との認識です。現状では主としてNa炉の条件を念頭に進めています。実用化戦略調査研究第2期における候補選定を受けて、有望概念として選定された炉型式についての課題を含めるなど、今後の計画は柔軟に対処していきます。(→補足⑥)
	(7) 研究開発の成果は多方面に活用されているとのことであり、中でも高温構造設計基準を含め学会等における基準の整備に貢献していることは大いに賞賛されることである。今後も積極的に研究成果を報告し、原子力産業にとどまらず広く一般産業への貢献へにもつなげて欲しい。	(7) 拝承します。
	(8) 開発目標の設定及び成果の評価を行うに当たって、費用対効果をできるだけ定量的に説明できることが望ましいと考える。	(8) ご指摘のとおりと考えます。研究開発目標(8)の回答(7/26ページ)を参照。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(9) 建屋全体は従来の水平免震とし、原子炉容器などを吊り下げるコモンデッキを大型皿ばねを用いた上下免震要素で支持する三次元免震構造によって、水平免震に比べ大幅な免震効果が得られた。振動試験によって基本的な成立性と免震効果を確認し、皿ばねについても荷重・変位特性を評価する手法を開発したので、実際のプラントで実用化できると期待されます。	(9) 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
②実用化との関係	(1) 実用化との関連では機器構造材料研究開発は FBR の設計合理化に寄与する程度が最も大きいと期待される。基盤的知見の充実も合理化を支えることが期待される。	(1) 拝承します。
	(2) 実用化戦略調査研究との連携を十分に図って計画立案、研究実施を図ることが重要である。	(2) 拝承します。
	(3) 特に、平成 14 年度からの研究計画は実用化戦略調査研究第 2 期への直接的貢献を主目的としており、研究計画もその目的に沿ったものであると評価する。その内容は先に述べたようにナトリウム冷却に対しては適切であるが、実用化戦略調査研究で対象とされている他種の流体に対してもどのような実用化技術の寄与があるのか、研究の進展の中で示されるよう期待したい。	(3) 12Cr 開発、高温構造設計技術、3次元免震技術などは、基本的に炉型に共通の技術との認識です。これらの課題に関する研究開発は、現状では Na 炉の条件を念頭に勧めていますが、実用化戦略調査研究第 2 期における候補選定を受けて、有望概念として選定された炉型式についての条件を含めるなど、今後の計画は柔軟に対処していきます。 (→補足⑥)
	(4) もんじゅに適用した技術からの外挿が主な視点となる。高速炉用フェライト鋼など新材料の適用性判断に必要な材料データの取得、非弾性解析の実用化など今後継続すべき課題が具体的になっており、かつこれらの課題の解決方策も明らかにされている。今後の計画によると、実用化戦略調査研究の課題を適切にカバーするとともに、技術的成立性判断、実用化候補概念の絞り込み等に効果的に反映できるものと判断する。	(4) 拝承します。
	(5) 実用化戦略調査研究への反映については、炉型・概念ごとにどんな具体的な技術課題があるのかと、その現状での達成度を整理しておく必要がある。たとえば、ナトリウムと鉛ビスマス以外のガス炉や水蒸気炉での腐食の問題、被覆粒子燃料炉に対する耐震設計などは既に解決済か。まだであるとしたら、どの程度の成果をいつ頃までに実用化戦略調査研究へ反映すべきかを示す必要があるであろう。	(5) Na 炉以外の炉型については、LBE 腐食などを除き、機器構造材料の分野に関する課題が摘出整理される前段階にあります。例えば、ガス炉の被覆粒子燃料については、除熱性など、燃料としての基本的な特性の観点から成立性を検討している段階であり、耐震性などの問題は、成立性に見通しが得られた後に検討することになります。
	(6) 実用化への道筋を考えた研究成果を出しつつあるものと評価する。	(6) 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(7) プラント設計研究とのタイアップがスムーズに進んでいけば、機器構造材料研究は実用化への筋道を歩んでいると思われる。システムとして問題がなければ、最後は材料技術が実用化の鍵を握っていると言える。その意味で高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究における技術的成立性判断、実用化候補概念の絞込み等に効果的に反映できるものと思われる。したがって、実用化戦略調査研究を支援するために欠かすことのできない分野であり、必要な研究開発課題を適切にカバーできていけば実用化との関係は達成されると判断される。	(7) 拝承します。
	(8) 材料強度評価法、構造強度評価法など、主としてナトリウム炉を対象とした開発となっている。技術的成熟度の観点から設計のフェーズが異なるため、致し方ないものとも考えるが、他の炉概念への適用も念頭において絞込みに必要なデータを効率的に提供できるように研究を進めるのがよいと考える。	(8) 12Cr 開発、高温構造設計技術、3次元免震技術などは、基本的に炉型に共通の技術との認識です。これらの課題に関する研究開発は、現状ではNa炉の条件を念頭に働めていますが、実用化戦略調査研究第2期における候補選定を受けて、有望概念として選定された炉型式についての条件を含めるなど、今後の計画は柔軟に対処していきます。 (→補足⑥)
	(9) 高温構造設計技術や三次元免震構造は、原子炉はもちろんですが、広く一般産業への応用も考えられるのではないかと期待しますが、そのための異分野との幅広い技術交流もしていただきたい。	(9) ご指摘のように、成果の反映や普及のために、異分野との幅広い交流について心掛けていきます。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
③成果公開・普及	(1) 得られた成果の普及は適切になされている。具体的には次が挙げられる。 ・汎用非線型構造解析システム FINAS ・高温構造設計基準 ・サーマルスライピング評価法	(1) 拝承します。
	(2) これまでの成果は今後の FBR の技術開発に活用できると考える。	(2) 拝承します。
	(3) 原子力プラントへの成果の活用はハード、ソフトの両面とも期待して当然のものと思うが、他分野への応用、適用をより活発にできる研究項目もあり、積極的な技術の一般化を図られるよう期待したい。	(3) 拝承します。
	(4) 成果発表、特許出願・取得に関しては、サイクル機構内他プロジェクトの例と比較すると平均以上であり、努力のあとが伺える。	(4) 拝承します。
	(5) 研究発表や特許出願は十分に行われているが、東電の件で明らかになったように成果に基いて合理的基準を作成し、規制に反映させる努力が極めて重要である。本格的な実用化までには他の組織が積極的に関与することはあまり考えられないので、サイクル機構が中心的に基準整備をリードする必要がある。 また、ハード技術だけでなく統合化技術やマネジメント技術などのソフト技術についても、成果を積極的に公表して行くことが望まれる。	(5) 拝承します。 現在、国の基準は性能規定とし、詳細な仕様規定は機械学会などの民間規格に委ねられる方向で検討が進められています。FBRの基準整備についても、必要な時期に学会規格の整備に素材が提供できるよう、対応を進めていきます。 いわゆる品質管理やヒューマンファクタなどの分野に関する研究の必要性、というご指摘と理解しますが、もんじゅなどの現場での取り組みや他機関における研究動向の把握などを含め、検討していきます。
	(6) 成果発表、情報開示、特許取得を積極的に行っていることは評価できる。しかしながら海外協力の実施の際も含めて国益を大切にしたい慎重な公開をして欲しい。	(6) 国際協力に際しては、原則として特許による権利や論文によるプライオリティの確保を図ったうえで先方に情報を提示するなど、知的所有権の確保に留意して対応していきます。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(7) 学会等における基準の整備に貢献していることから成果は活用されていると判断できる。また、FINAS は軽水炉許認可や一般産業施設を含め広く活用されているとのことであるから、研究開発の公開、普及も十分行われていると言える。	(7) 拝承します。
	(8) 専門誌等への論文投稿、学会口頭発表など、成果の普及、公開を積極的に行っていると考え。 今後とも、原子力分野に限らず、「一般産業にも成果が活用できないか」という視点を持って研究を進めるのがよいと考える。	(8) 拝承します。 一般産業への活用については、このようなマインドを常に持つとともに、広くニーズを把握することも心掛けていきます。
	(9) 材料評価技術や高温構造設計技術に比べ、耐震設計技術の論文、学会での発表が少ない。この点は仕方ないが、核燃料サイクル開発機構がおこなっている研究が原子炉の安全性向上にも役立つもので、一般産業にも広く応用できる研究であるという点を知ってもらうためにも、たとえば三次元免震構造などはしろうともわかりやすいテーマなので、一般紙の科学面や雑誌等を介してもっと広く研究成果を報告したほうがよいと思います。フェニックスの実大炉心模型の振動実験なども、一般向けの科学ニュースとしては面白いものです。論文や学会発表になりにくいものほど、一般へのニュースとしての切り口を考えてみてはいかがでしょうか。	(9) 耐震分野の論文発表の量は、全体におけるこの課題に対する資源配分(人員、予算)を反映したものとなっています。 ご指摘のように、成果を学会や専門誌に報告することにとどまらず、一般向けに発信していくことが理解を得るために重要と考えますので、今後努力してまいります。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
(6) 今後の展開	(1) 今後の進めるにあたっては、 ○できるだけ具体的な達成目標と達成時期を設定し、着実に実施すること ○サイクル機構内に技術が根ざし、専門家が育っていくこと、 が、望まれる	(1) 拝承します。 ご指摘の点を踏まえ、今後の研究開発を進めていきます。
	(2) FBR実用化戦略調査研究第2期への反映を意図している課題については、計画通り遂行されることが望まれる。一方、材料損傷定量化技術やシステム化規格等の基盤技術として長期的展開を図る課題については、適宜実用化候補概念の設計合理化への寄与度を見極めながら優先順位をつけて効率的に進めることが望まれる。	(2) 拝承します。 ご指摘のとおり、実用化戦略調査第2期への反映を目的とした課題(12Cr など)への対応を最優先とし、長期的な視野に立ったブレークスルーを目指す研究は適切な規模で着実に進めるなど、優先順位を明確にした資源配分のもとで研究開発を進めていきます。(→補足③)
	(3) 構造材料関係の研究開発は長期的視点に立ち、地道な努力を要求される分野である。従って、外部のものに、研究が永劫に続くものと捉えられたり、狭い視野、短い焦点で判断したりされないよう、長期的な目標とその重要性が明確に伝わるようにする必要がある。常日頃から現在の達成度と将来の計画について、関係各機関や納税者たる国民に十分承知理解してもらう努力を怠らないでほしい。	(3) 拝承します。 ご指摘のとおり、関係機関のみならず一般国民の理解を得る努力は、国費による事業の推進の出発点であり、不可欠と認識しております。成果の一般への発信とあわせ、今後も一層努力していきます。
	(4) 当面は実用化戦略調査研究への反映が主たる研究課題であるが、技術基盤の長期的展開としていくつかの課題を示されている。これらも着実に進めて欲しい。 また、常陽、もんじゅを通しての保守の経験からプラントの保守管理技術体系の基礎を築いていって欲しい。	(4) 拝承します。 プラントの保守管理技術については、実用化研究において Na 炉の特徴に即した供用期間中検査と保守補修技術のあり方に関する検討に一部着手しております。将来的には、もんじゅ・常陽との連携を図りつつ必要な技術開発を展開していくこととします。
	(5) 実用化戦略調査研究では、平成17年度に候補概念を絞り込む前に、平成15年度までの成果をもとに中間評価を行うこととしている。実用化戦略調査研究から求められる研究成果を、適切なタイミングで提供できるように研究を進めることが必要と考える。	(5) ご指摘のとおり、実用化戦略調査研究の中間評価などへのタイムリーな反映は重要であり、この観点から、プロジェクト、設計と密接な連携をとりながら研究を進めていくこととします。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
7.その他	(1) 腐食関連技術において計画されている鉛ビスマスによる鋼材の腐食については腐食性が酸素濃度等に依存することを考えると、実プラント条件で目標濃度をいかに実現するかとの工夫に重点があるべきで、鉛ビスマス中での腐食そのものの研究は視野を広げる意味はあるもののプライオリティは他より低くても良いのではなかろうか。即ち鉛ビスマス冷却炉の技術開発における重要課題ではあるが、今回得られる腐食データは炉そのものの成立性を判断するのに用いるには限定的な役割しか果たさないのではなかろうか。例えば、BWR の成立性について応力腐食割れ問題を BWR 開発前に議論していれば、BWR は成立しないとの答えが出た可能性もあるのでは。PWR の SG 問題についても同様であろう。これらの答えが“YES” and “NO”であるように。材料腐食の問題は材料、使用環境、冷却材化学の関係する複雑な問題であって、ある炉型を開発するべきと考えたらその解決策を求めて努力するべき課題である。 これに限らず問題点を議論するだけでは炉の開発は進まない。ナトリウム冷却炉の合理化のために解決を求めて構造材料面の努力しようとしているが、これが本来の炉の研究開発の姿ではなかろうか。設計ではいかに単純化して作れるかが問題の本質であって、自然の法則に逆らわない限り何でも実現できる可能性はあるのではないか。逆に言うと複雑な設計をせざるを得ないものほどシステムとして劣っているということになるのでは。 高温での構造健全性はナトリウム冷却炉に限らず各国共通の課題であり、国際協力を推進し海外から研究を受注するなど国際的にリードをするとの視点がもっとあっても良いのではないか。それを奨励する仕組みも必要かもしれない。	(1) 『ある炉型を開発するべきと考えたらその解決策を求めて努力するべき』という基本的考え方は、ご指摘のとおりと考えます。一方で、実用化戦略調査研究の第2期は、その後の本格的開発に進める候補概念の絞り込みが主眼であり、鉛ビスマス炉についても、その判断を行う段階にあります。LBE 腐食に関する研究も、現段階ではこの観点から実施しております。ここでは、国産 FBR 材料の耐食性評価の他、流動 LBE 制御技術開発の課題抽出、高耐食性材の試設計などを行っています。このうち、耐食性評価試験はロシアの成果に基づき推奨される酸素濃度範囲での挙動確認を目的としており、結果により実機における酸素濃度範囲目標を決定、もしくは新たな耐食技術、耐食材料開発の必要性を判断します。残りの研究開発内容は後者における難易見通しを得るものです。第3期において、鉛ビスマス炉が選定された段階においては、ご指摘の視点に立った研究開発に取り組むべきものと考えております。 ご指摘の、『単純なシステムが優れている』、『自然法則に則ったシステムは実現可能』といった視点は、全面的に賛同いたします。現在検討中の候補概念の選定にあたっても、このような視点は重要と考えます。 国際協力については、現状は仏CEAとの協力が中心ですが、米国やロシアを含め、積極的に推進することが望ましいと考えております。

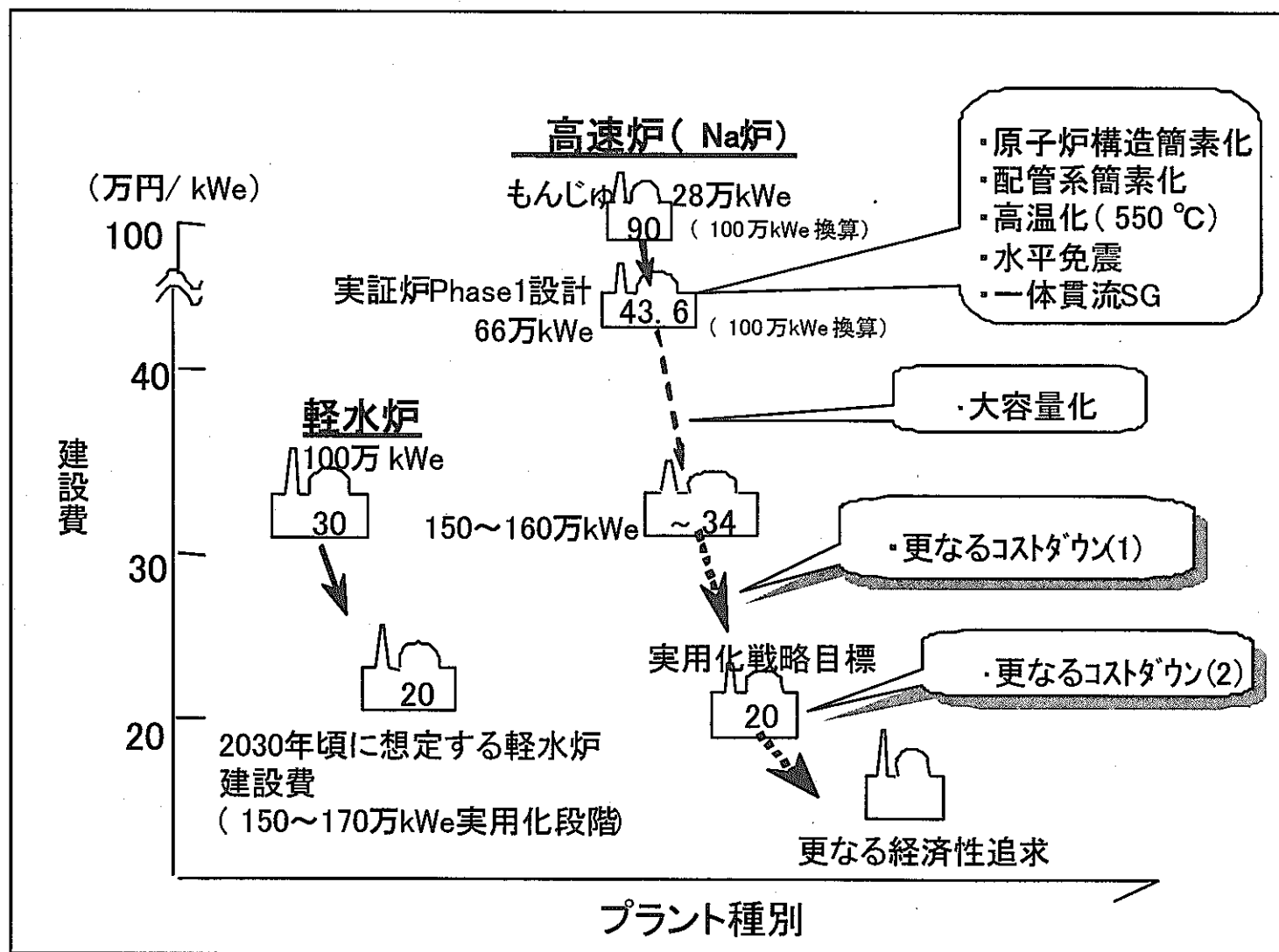
評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(2) 高温構造設計手法開発の一環として非弾性解析による評価実用化の目標を明確に設定するとともに、損傷やき裂の発生箇所、履歴がフォローできるような新たなシミュレーションによる評価手法の開発を検討してみたらどうであろうか。また構造材料の分野は、損傷定量化技術の開発に見られるように、今後、原子、分子レベルのミクロな現象の解明を要求されると考える。古典的な連続体力学に基づくのみでなく、様々な幅広いアプローチをもってより機構論的な現象の解明とモデル化に向けた研究開発を行われることを期待する。 世界的にみて、高速増殖炉を積極的に推進しているのはわが国とロシアのみであり、とくに高温材料開発と評価技術においては、日本が世界のリーダーシップを取れる分野であると信じている。 また、韓国、中国など高速増殖炉開発に積極的であり、本研究開発による着実な成果がこれらの国々における開発に有効に反映されることを切望する。	(2) ご指摘の視点は、今後のブレイクスルーを図るために重要と考えております。今後の方向性として、例えばメゾスコピックレベルの損傷解析とマクロなき裂解析を統合するマルチスケールモデリングや、連続体力学に局所破壊解析法を導入する手法などの研究に着手しています。 拝承します。 韓国については韓国原子力研究所(KAERI)との交流を通じて、中国については研修生の受入れ等を通じて、今後もこれらの諸国における高速炉開発を支援していきます。
	(3) まとめに記載のある軽水炉や核融合炉への貢献は本当か？書きすぎではないかと思う。	(3) 軽水炉については、例えば機械学会の原子力規格やサーマルストライピング評価基準に、高速炉の知見が具体的に反映されており、一定の貢献はあるものと考えております。核融合炉については、これまで材料に関する情報提供にとどまっております。今後の核融合炉の進展に応じて、ニーズに即した貢献を果たしていきます。
	(4) 東京電力(株)の原子力発電所において自主点検作業記録の不正等の問題が生じた背景の一つとして、我が国の技術基準には、設備の使用中に当該設備にひび割れやその兆候が発見された場合に工学的な手法を用いて安全性の評価を行う手法が規格基準として整備されていないことが指摘されている。高速増殖炉については、最初から欠陥を許容する基準(運転開始後に欠陥が見つかったも、即時に設計時点で考慮している範囲内なので運転継続可能と判断できる)を整備することを念頭において研究を進めるのがよいと考える。	(4) いわゆる「欠陥許容設計」に繋がる、重要なお指摘と考えます。特に高速炉(Na冷却炉)のように、内圧などの一次応力が無視できる程度の状態では、一般的にき裂の進展は極めて安定的であることが期待されます。一方、検査が軽水炉ほど簡単ではない部位も存在する、という特徴もあります。これらの点を踏まえ、かつ軽水炉の維持基準の動向も十分参酌しながら、十分な信頼性を確保しつつ、より合理的な基準の整備に繋がる研究を進めてまいります。 また、この考えを更に一步進めて、プラントのライフサイクル全般を包括的に捕らえた基準の体系(システム化規格)の具体化にも取り組んでいきます。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
8.総合評価	(1) 機器構造材料研究開発は高速増殖炉開発の最も重要な課題である。これまでの成果は高く評価できる。今後の計画も適切である。 成果は普遍性があり、軽水炉やその他の高温炉、さらには広く一般産業にも貢献することが期待される。	(1) 拝承します。 拝承します。
	(2) 全体的には貴重な成果を上げてきたと評価する。 今後の展開にあたっては、定量的な目標(期間、達成事項等)を計画に反映して進めることが必要と考える。 適宜専門家による適切な評価を取り入れて進めることが必要である。	(2) 拝承します。 ご指摘のとおり定量的な目標を明確にした研究開発計画を策定し、これに沿って研究開発を進めていきます。 専門家による評価については、構造・材料専門委員会を定期的に開催し、研究開発の進め方と成果に関するご意見、評価を頂き、これを十分参考にして進めております。
	(3) 大型ナトリウム冷却炉の経済的な成立可能性に、現実的な見通しを得る上で当研究テーマの果たしてきた役割および今後期待される役割は、大変大きいと考えられる。もんじゅ事故対応や実用化戦略調査研究第1期に対して、タイムリーな貢献が果たされたことも評価できる。 このような成果や期待される役割から見ると、本テーマに対する今後のリソース配分(研究費及び要員)が、過小に提案されているのではないかという印象を受ける。今後、大型ナトリウム冷却炉以外の炉型も検討の視野に入ってくるであろうことを勘案すれば、本テーマにはより積極的な投資が必要なのではないか。 さらに、セラミクス系複合材料などを含む 12Cr フェライト鋼以降の次々世代材料の探索や開発に対しても、サイクル機構はより積極的な貢献を果たすべきではないかと考える。 得られた成果の普及・公開に関連しては、今後は共同研究や業務委託の相手先である重工メーカー等民間企業への特許出願権の承継(バイドール条項の適用)なども積極的に進め、本テーマの成果として公開すべきであると考えます。	(3) 拝承します。 高速炉、ひいては原子力全体の開発予算が縮小傾向にある状況においては優先すべき課題への重点投資が必要ですが、有用な成果を挙げてそれをアピールし、実用化研究が進捗し、開発が具体化する過程での予算などの獲得に努めてまいります。(→補足⑦) ご指摘の点は技術的シーズとして関心を持っておりますが、当面は実用化戦略調査研究への対応を最優先とし、将来余裕が出来た段階での挑戦を考えます。 拝承します。

評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(4) 基本的には、FBR実用化に向けて必要となる機器構造材料の研究開発を実用化戦略調査研究と連携して進めており、適切と考えられる。 尚、FBR実用化戦略調査研究第2期への反映を意図している課題については、計画通り遂行されることが望まれる。一方、材料損傷定量化技術やシステム化規格等の基盤技術として長期的展開を図る課題については、適宜実用化候補概念の設計合理化への寄与度を見極めながら優先順位をつけて効率的に進めることが望まれる。	(4) 拝承します。 ご指摘のとおり、実用化戦略調査第2期への反映を目的とした課題(12Cr など)への対応を最優先とし、長期的な視野に立ったブレークスルーを目指す研究は適切な規模で着実に進めるなど、優先順位を明確にした資源配分のもとで研究開発を進めていきます。(→補足③)
	(5) 「もんじゅ」事故による高速増殖炉を取り巻く環境の激変の中で、研究目的、内容も大きく変わったが、その成果を踏まえて、平成14年度からの実用化戦略調査研究第2期への直接貢献を研究計画の柱とする研究計画は、適切であり、全体として妥当と評価する。その成果を期待したい。	(5) 拝承します。
	(6) 本課題は高速増殖炉開発にとって重要な基礎基盤技術に関する研究開発である。もんじゅプラントの設計建設以来、新たな課題としてコスト低減、構造のより高い信頼性などが明らかにされてきており、本研究開発はこれらの課題解決に直結するものとして捉えられる。構造材料研究開発は、究極的な材料開発、構造材料の健全性評価手法の高度化、高温構造設計手法や耐震・免震技術の確立など長期的な視点で実施されるものであるが、この度の研究開発期間においては、電気事業者による実証炉設計、もんじゅナトリウム漏洩対策、実用化戦略調査研究などに対し、技術的な貢献を行うに必要かつ重要な知見や実証データを蓄積・提供することとなった。同時に、今後の高温構造設計技術の体系化、とくに規格基準の整備と成果の反映、新材料の開発など実施すべき項目や、非弾性評価手法など開発すべき評価手法、損傷機構など現象解明とモデル化など未だ数多くの課題が残っており、これらの課題を解決していくことは、高速増殖炉実用化の重要性・必要性はもちろんのこと、そのために本研究開発が必要不可欠であることの認識を内外に十分知らしめた上で、着実な実施を行っていただきたい。	(6) 拝承します。 本分野の研究開発の必要性、重要性に関して、種々の機会を通じて内外の理解を得るための努力を払っていくこととします。

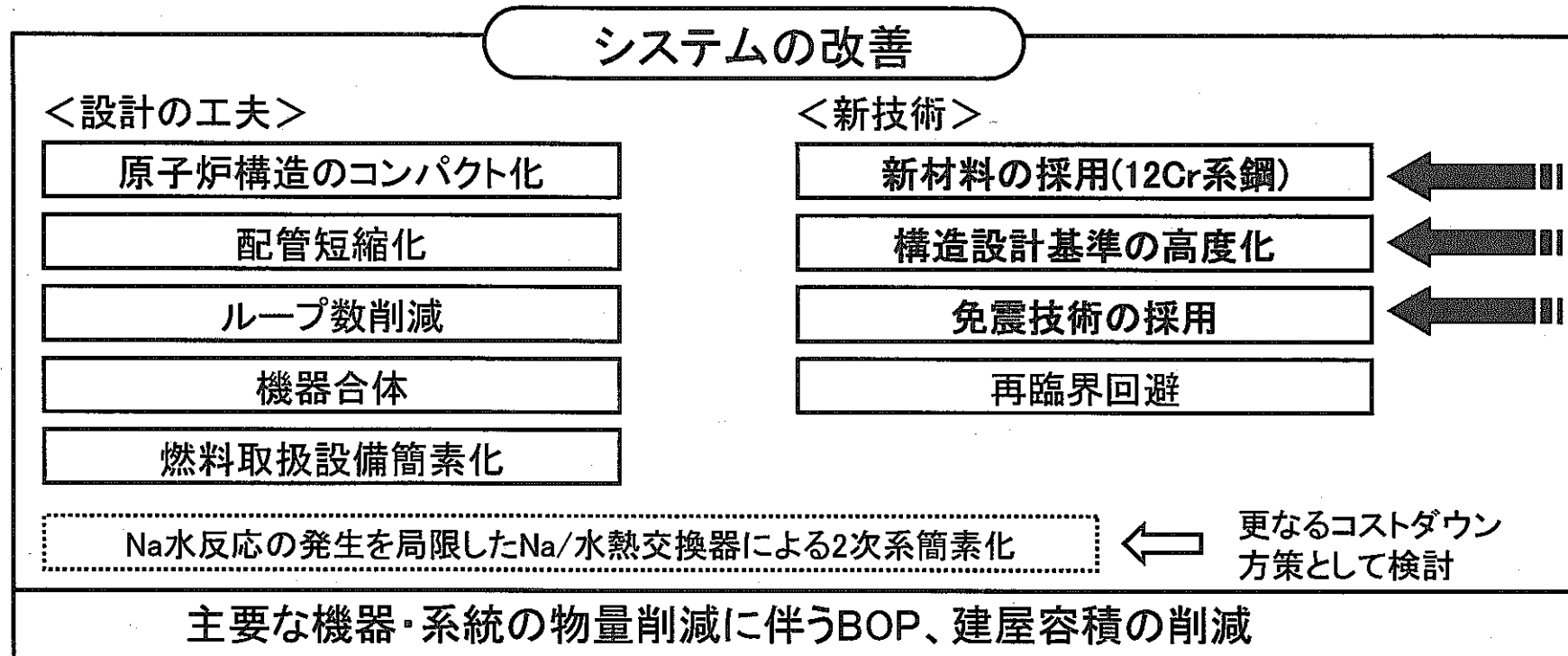
評価項目	評価意見	評価意見に対する JNC の見解
	(7) 研究の目的・意義、これまでの成果、今後の計画ともに概ね妥当であると判断する。 問題があるとすれば、実用化に至る研究開発全体のロードマップやマイルストーンがいま一つ明確でなく、意義は十分に認められるが終りなき研究になりかねないこと、研究目標の定量性がもう少し欲しいことなどがあげられる。 また、実用化戦略調査研究に対して、具体的にどんな成果をいつ頃までに反映する必要があるのかを、実用化戦略調査研究からの要求の形で一覧できるような形で整理しておくことが必要と思われる。	(7) 拝承します。 研究目標については、前出の回答(6/26)を参照ください。 実用化戦略調査研究からの要求について、ポイントを一覧にまとめました。(→補足⑦)
	(8) 総合的に見て十分な研究計画・体制の下で着実な成果を挙げている。 しかし、今後は Na 冷却以外の炉型も念頭に入れて、必ずしも本評価の研究計画にこだわらずより柔軟な研究実施を考えるべきであろう。	(8) 拝承します。 12Cr 開発、高温構造設計技術、3次元免震技術などは、基本的に炉型に共通の技術との認識です。これらの課題に関する研究開発は、現状では Na 炉の条件を念頭に勧めています。が、実用化戦略調査研究第2期における候補選定を受けて、有望概念として選定された炉型式についての条件を含めるなど、今後の計画は柔軟に対処していきます。(→補足⑥)
	(9) 基盤技術であることから、着実に開発を進めることが大切であり、その結果として材料開発、高温構造設計基準の確立、評価手法等の成果が出ていると判断される。今後も実用化戦略調査研究への研究課題をこなしつつ、基盤技術としての機器構造材料研究にとどまらずに保守管理技術への展開をも視野にいれて継続的な研究を続けて欲しい。	(9) 拝承します。 プラントの保守管理技術については、実用化研究において Na 炉の特徴に即した供用期間中検査と保守補修技術のあり方に関する検討に一部着手しております。将来的には、もんじゅ・常陽との連携を図りつつ必要な技術開発を展開していくこととします。
	(10) 高速増殖炉の特徴を考慮して、設計の合理化が期待できる技術に重点を置いた機器構造材料の研究開発になっていると考える。	(10) 拝承します。

補足① 経済性向上の達成見通し(1/3)



補足① 経済性向上の達成見通し(2/3)

(建設単価20万/kWeに向けてのコストダウンの考え方)



補足① 経済性向上の達成見通し (3/3:設計合理化への寄与)

課題	設計合理化への貢献
材料評価技術	
材料強度評価技術	実証炉材料の316FRは、もんじゅ材料のSUS304と比較して許容値が大幅に向上。設計合理化への寄与は大きい。
FBR用フェライト鋼開発	現在のNa冷却炉の設計(極めて短縮化されたNa配管による機器のコンパクト配置)は、フェライト鋼の適用性に左右される。その意味で設計合理化への寄与は極めて大きい。
材料損傷定量化技術	長期的な課題であり、実用化研究第2期での合理化への反映度合いは小さい。 第3期以降の設計において、長寿命設計を実現する鍵となる技術である点で、最終的には合理化への寄与は大きい。
腐食関連技術	Na腐食評価は、Na冷却炉における冷却材漏えいに対する設計対応(ライナの設置など)の合理化に寄与する可能性。 LBE腐食は、現段階では成立性判断のためのデータ取得であり設計合理化とは別の価値。
高温構造設計技術	
構造解析技術	解析コード開発は、これを活用する設計や構造強度評価の研究開発を通じて、間接的に設計合理化に寄与。
構造強度評価技術	溶接部評価法の整備により、実証炉の原子炉容器を板材で製作することが可能になった(もんじゅは液面に溶接部を設けないよう、高価なリング鍛造材を使用)。 実用化研究では原子炉容器の簡素化(炉壁保護や液位制御を使用しない)を指向しているが、このような設計は今後の非弾性解析の実用化などにより可能になる。その意味で、設計合理化への寄与は
熱荷重評価技術	熱荷重の評価精度向上は、(強度評価における許容値の合理化とともに)設計合理化に大きな効果を熱荷重-構造統合評価法により、熱荷重に対して最適化を実現することが可能となり、将来大きな合理化効果が期待される。
システム化規格	長期的な課題であり、実用化研究第2期での合理化への反映度合いは小。 第3期以降の設計において設計から運転維持までを包括した管理とすることによる合理化を期待。
耐震設計技術	
耐震解析技術	解析法の詳細化であり、設計合理化とは別の価値。
3次元免震構造開発	3次元免震によって、プラント機器への上下動を含む地震動の劇的な緩和が見込まれるので、 <u>合理化の寄与は極めて大きい。</u>

補足② 研究開発目標 (1/3: 各課題の研究開発の段階)

研究課題	
材料評価技術	
材料強度評価技術	実証炉材料に関しては、完成した技術である。
FBR用フェライト鋼開発	着手後2年目。実用化研究第2期において基本的な適用性判断。最終的な実用化(材料強度基準の整備)は、2015年を目途。
材料損傷評価技術	基礎的研究のフェーズ。
腐食関連技術	Na腐食についてはほぼ完成、若干の補強データ取得を予定。 LBE腐食については、着手後2年目。実用化研究第2期において基本的な適用性判断。
高温構造設計技術	
構造解析技術	基本的な解析機能の点では完成している。 今後、計算機技術の進歩にあわせて逐次高度化の予定。
構造強度評価技術	非弾性解析設計については、実用化第2期の期間内に完成させることを目途。
熱荷重評価技術	サーマルストライピングについては、ほぼ完成し、Na熱過渡試験での検証を残すのみ。 熱荷重－構造統合解析については、プロトタイプの段階。
システム化規格	基本的な概念を固めつつある段階。
耐震設計技術	
耐震解析技術	炉心の耐震解析については完成し、終結している。
機器上下免震開発	具体的構造概念と要素の基本的設計技術が整備された段階。 今後、種々の観点からの実機適用性を高めていく。

補足② 研究開発目標 (2/3: 長期目標と中間目標)

【FBR用フェライト鋼開発】

長期的には、FBRプラントにおける使用・要求条件に適する強度と延性・靱性のバランスに優れたFBR仕様12Cr鋼を開発し、その高温強度データベースの整備と強度評価法の開発を行ったうえで、これらをプラント設計と材料強度基準に反映できるよう集大成することを目標とする。

今後の4年間では、12Cr鋼のFBRへの適用性について判断を示すとともに、FBRプラント条件に適した材料仕様と最適な溶接施工法の開発を目標とする。また、その後の設計で必要となる材料強度や材料特性の暫定案を提示する。

【高温強度評価技術】

長期的には、非弾性解析による設計を可能とし、主たる荷重が熱荷重であることの特長を本質的に活かした構造設計技術の体系化を図ることによって実用化炉の構造設計基準策定に貢献することを目標とする。

今後4年間においては、大型ナトリウム炉の原子炉容器の設計への適用を念頭に、非弾性解析による挙動評価手法と、これと対をなす破損クライテリア(クリープ疲労及びラチェット疲労)の確立を目標とする。また、材料開発において12Cr鋼の仕様が確定した後に、12Cr鋼製機器配管の構造設計手法の整備に着手する。

【3次元免震技術】

長期的には、機器上下免震構造が実際のプラントに適用できることを確証するとともに、これを実現するための技術指針案を策定することを最終的な目標とする。

今後4年間において免震要素としての皿ばねに関する力学特性データを取得するとともに、強度設計手法を整備し、これを技術指針の骨子として集大成することを目標とする研究開発を行っていく。

補足② 研究開発目標 (3/3: 実用化戦略調査研究への反映)

研究課題	第2期(2005年度末)	第4期(2015年度末)
材料評価技術		
FBR用フェライト鋼開発	・ 高速炉機器配管への適用性判断 ・ 既存材料データに基づく材料強度特性式の暫定値 ・ " " 材料強度基準値の暫定値 ・ 溶接施工法と溶接部評価法の暫定案 ・ FBR用最適組成材料に関する見通し	・ FBR用最適組成材 ・ FBR用最適組成材の材料特性式 ・ " " 材料強度基準値 ・ 溶接施工法と溶接部評価法
腐食関連技術	・ LBE腐食の観点からの、鉛ビスマス炉の成立性判断 (酸素濃度制御, 耐食技術, 耐食材料開発等に関する技術的難易度評価を含む)	<< 第2期における概念選定に依存 >>
高温構造設計技術		
構造強度評価技術	・ 非弾性解析指針の骨子 ・ (非弾性解析と対をなす)高温破損のクライリア	・ 実用化炉高温構造設計基準
耐震設計技術		
機器上下免震開発	・ 機器上下免震構造概念のプラント適合性 ・ プラント側から要求される免震効果を発揮する免震要素 の設計見通し(基本的設計手法の開発を含む)	・ 機器上下免震構造・免震要素の設計指針 ・ 大型振動台試験等による確証

補足③ 今後の重点研究課題

- 実用化戦略調査研究第2期への反映(中期的)
 - － FBR用フェライト鋼の開発と適用性判断
 - － 非弾性解析設計の実用化と熱流動-構造統合解析手法
 - － 機器上下免震構造の開発
 - － LBE腐食

- 基盤技術としての長期的展開
 - － 現象論的アプローチから機構論的アプローチへ
 - 材料試験DBに基づく外挿→損傷機構に基づく長時間寿命予測
 - － 設計課題の解決から、最適設計技術の提供へ
 - 熱荷重に対する構造最適化技術
 - － 設計、運転の個別評価から、プラントの包括的健全性管理技術体系へ
 - リスクベース技術や構造信頼性技術の展開

補足④ 共同研究における役割分担(1/2:国内)

	内容	協力相手との具体的役割分担	
		JNC	先方
【国内機関との研究協力】			
原研	照射環境における原子炉構造材料の劣化現象に関する融合研究	高速炉構造材料経年化対象材料劣化、損傷進行非破壊評価	軽水炉環境経年化対象IASCC・極微小腐食量計測手法
原電	高温構造設計手法高度化及び免震技術開発に関する共同研究	構造設計に関する要素技術開発 機器上下免震システム開発	構造評価手法の設計適用性評価等 建屋3次元免震システム開発
電中研	12Cr系フェライト鋼開発及び高温構造健全性に関する情報交換	FBR仕様12Cr鋼の開発と材料特性評価	既存火力用12Cr鋼の材料特性評価
物材機構	FBR材料の高温強度に関する情報交換	FBR用鉄鋼材料に関する材料データを含む情報交換であり、JNC、物材機構に明確な役割分担はない	
東北大	最適FBR用Fe-Cr系合金開発に資する基礎データ(主要元素の効果)取得	高純度合金の高温強度評価	超高純度合金製作技術開発・材料基礎物性評価(先行基礎)
新潟大	液相Na化合物の分析技術開発	高純度NaFe複合酸化物合成技術開発、熱力学特性評価	腐食性高温融体のラマン分光分析技術開発(先行基礎)
東大	材料の劣化過程を考慮した構造解析/構造健全性予測コード開発	損傷組織データベース作成、数値解析モデル開発	マルチレベルプログラミング技術開発(JNC公募型)
東工大	流動鉛ビスマス共晶合金制御技術開発	東工大知見に基づく酸素制御を中心とした技術開発	流動LBE運転制御技術における課題抽出
静岡理工科大	低温作動アルカリメタル熱電変換システム開発	AMTECシステムのNa中耐久性試験	AMTECの低温化に向けた最適幾何学的配置設計・試作
名古屋大	液体LBE中の主要元素の溶解度評価	LBE中の液体金属腐食機構の詳細説明	LBE中の主要合金元素溶解度データ取得および信頼性評価
関西大学	LBE中の酸素濃度が溶解度に与える効果評価		LBE中の元素溶解度に与える環境因子評価

補足④ 共同研究における役割分担(2/2:国外)

	内容	協力相手との具体的役割分担	
		JNC	先方
[海外機関との研究協力]			
IAEA:	Phenix配管破損に関するベンチマーク研究	ベンチマーク解析を実施し、互いに手法及と結果を報告	
OECD/NEA	配管の熱疲労に関するベンチマーク研究	ベンチマーク解析を実施し、互いに手法及と結果を報告	
仏国CEA	高温構造健全性などに関する研究協力	双方の実験データを素材としたベンチマーク研究, 情報交換, 研究者の相互派遣など。定期的に情報交換会合を開催。	
米国DOE ^(注)	鉛ビスマスの利用技術に関する情報交換	鉛ビスマスの利用技術に関する情報交換であり, JNC、米国側参加機関に明確な役割分担はない	
米国MIT	鉛ビスマスの腐食に関する研究委託	腐食機構評価・耐食技術検討	高耐食性材設計に資する基礎データ取得
独国FZK	鉛ビスマスの腐食に関する共同研究	腐食試験片分析および耐食性評価	停留および流動LBE中浸漬試験および試験後の材料分析

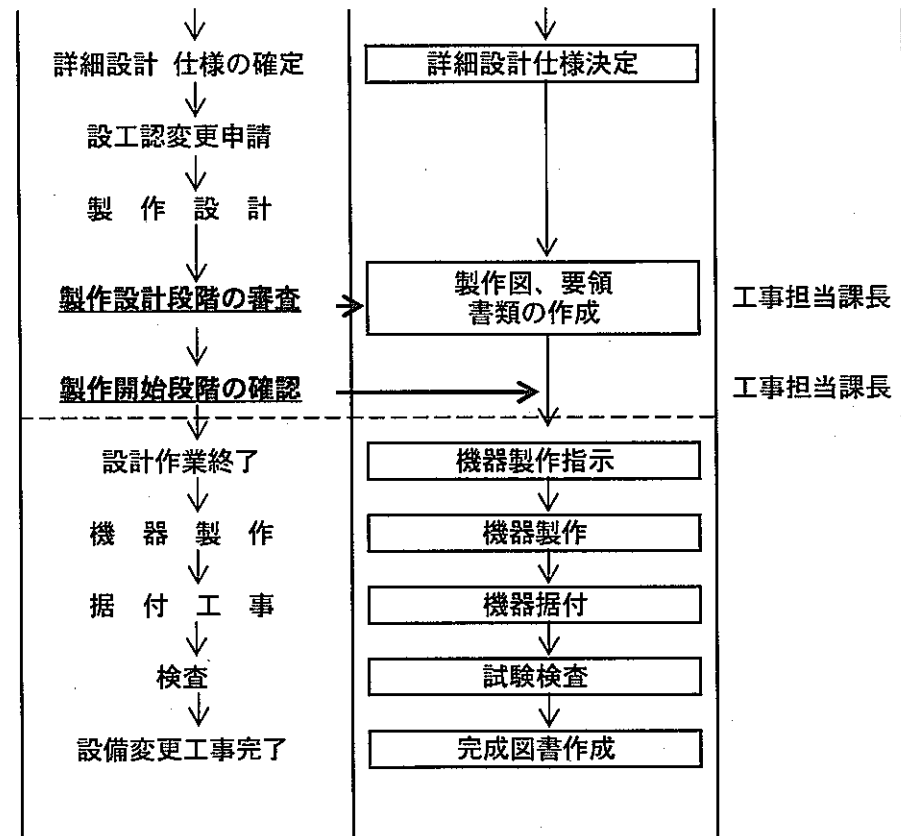
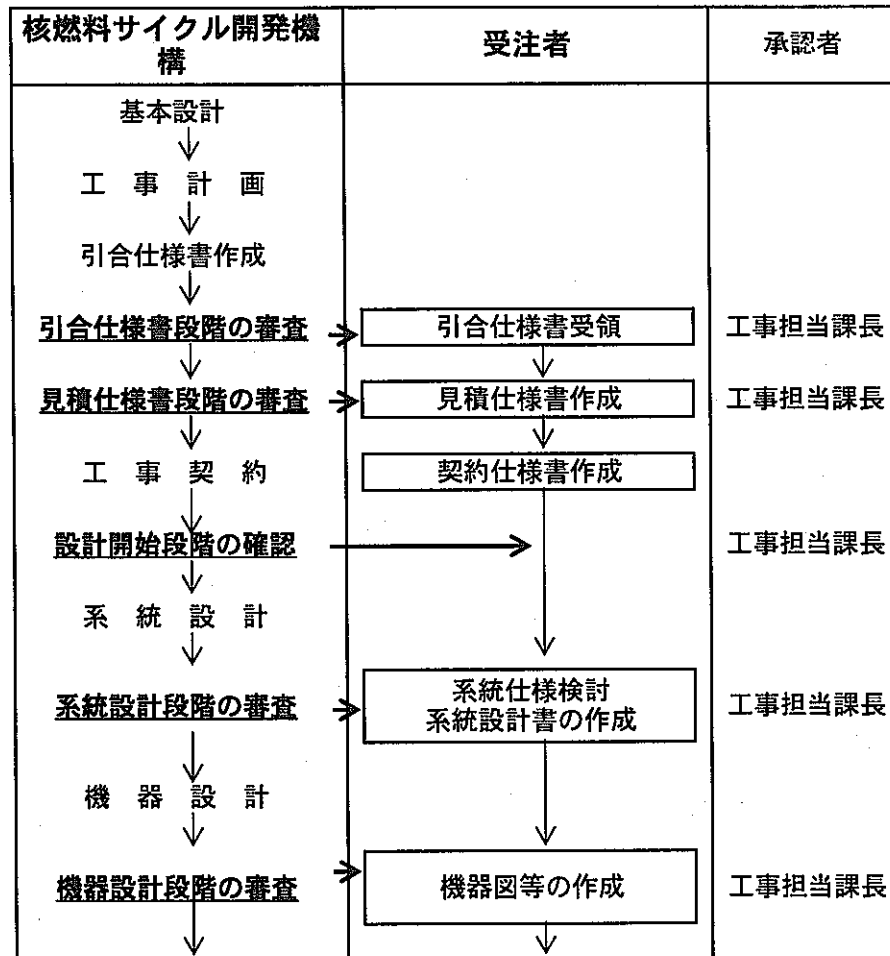
補足⑤ 品質管理(もんじゅ事故対応 1/3)

もんじゅにおける設計審査要領

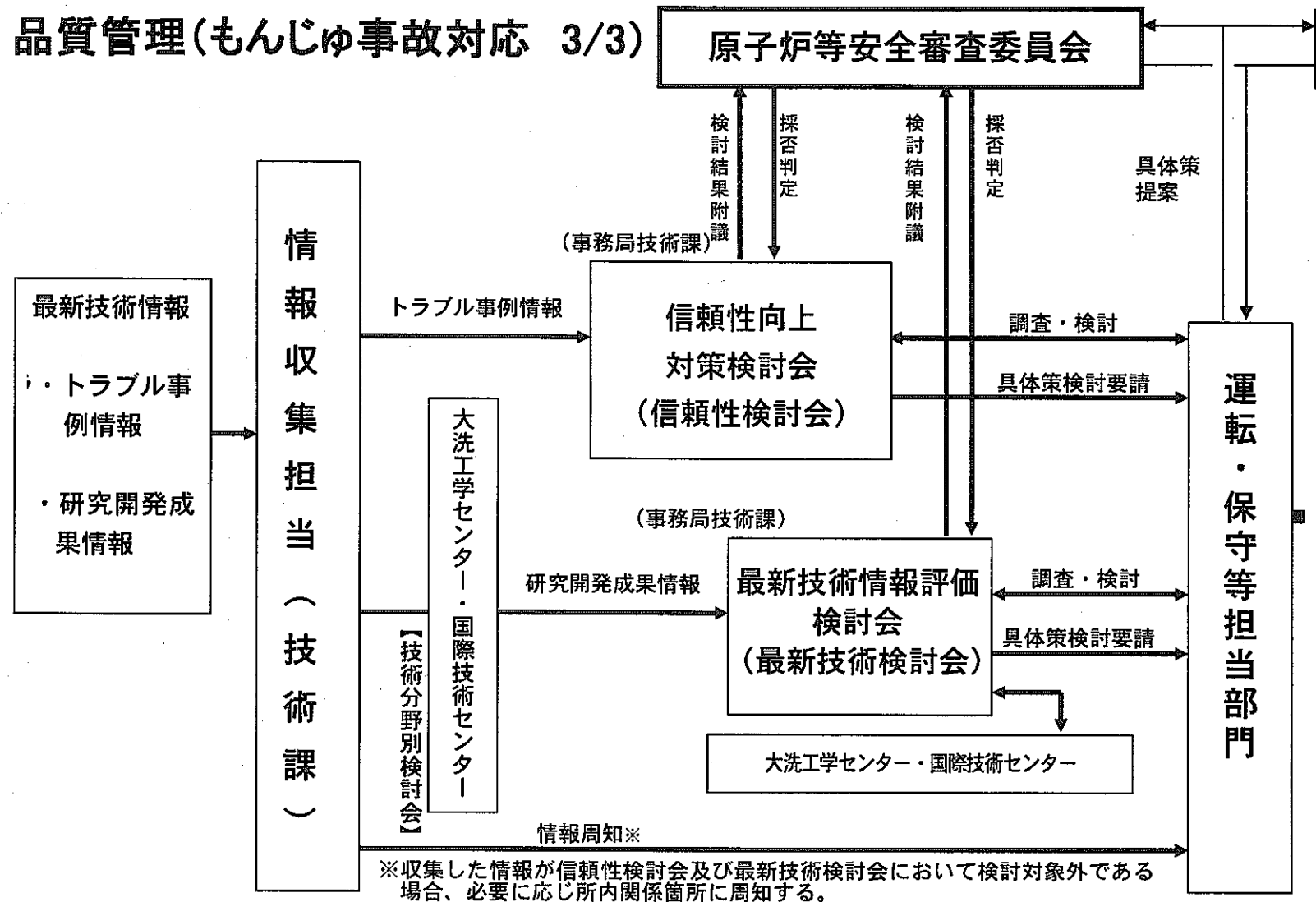
- (1) 品質保証活動の基本であるもんじゅ施設品質保証計画書の中で、設計管理に関する運営要領として位置付ける。
- (2) 設計関連図書の種類とサイクル機構の承認対象図書について定める。
- (3) 承認申請図書を中心とする設計審査について定める。
- (4) 設計審査における設計審査時期、設計審査項目及び着眼点について定める。
- (5) 設計審査の体制について定める。
- (6) 設計にかかわるもんじゅ建設所の品質保証推進組織の役割について定める。
- (7) 設計変更処理について定める。
- (8) 新設計の定義を定める。

補足⑤ 品質管理(もんじゅ事故対応

2/3)



補足⑤ 品質管理(もんじゅ事故対応 3/3)



注) 信頼性検討会及び最新技術検討会の他に、原子炉施設の運転、保守、研究開発における最新技術情報の相互反映を目的として、高速実験炉常陽、新型転換炉ふげん発電所及び高速増殖原型炉もんじゅ建設所において、運転保守技術検討会を原則3回/年開催している。

図-1 最新技術情報の反映システム体系

補足⑥ 各種の炉型式への対応

	Na冷却炉	重金属冷却炉	ガス冷却炉
設計のフェーズ	経済性向上に重点をおいた、 ある程度詳細な設計	概念設計の段階 設計成立性の判断が焦点	概念設計の段階 設計成立性の判断が焦点
材料評価技術			
材料強度評価法	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
新材料開発	各炉型に共通の技術		
材料損傷定量化	各炉型に共通の技術		
腐食関連技術	Na腐食	LBE腐食	
高温構造設計技術			
構造解析技術	FBR開発、基盤技術開発のインフラとして整備		
構造強度評価法	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
熱荷重評価法	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
システム化規格	各炉型に共通の技術		
耐震設計技術			
耐震解析技術	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
3次元免震開発	各炉型に共通の技術		

補足⑦ 予算規模

単位:億円

	合計 ²⁾	材料評価技術	構造設計技術	耐震技術
これまで ¹⁾	47	17	26	3
今後 ¹⁾	27	11	14	2

注 1: これまで = 平成 9 年度～13 年度(5 年間の実績)

今後 = 平成 14 年～17 年度(4 年間, 14 年度実績に基づく見込み)

注 2: 四捨五入により, 合計が一致しない場合がある。

(参考)

安全研究:

これまでの 5 年間(平成 8 年度～12 年度): 約 107 億円

今後の 5 年間 (平成 13 年度～17 年度): 約 75 億円

炉心・燃料及び常陽:

研究開発関連(内常陽 MKⅢ改造) 施設運転費

これまでの 5 年間(平成 8 年度～12 年度): 約 103 億円 (約 47 億円) 約 229 億円

今後の 5 年間 (平成 13 年度～17 年度): 約 118 億円 (約 56 億円) 約 211 億円

参 考 資 料 4

高速増殖炉の機器構造材料研究開発
(課題説明資料)

本資料は、課題評価委員会での
意見などにより改訂したもので
ある。

高速増殖炉の機器構造材料研究開発

平成 14 年 8 月
(平成 15 年 3 月改訂)

核燃料サイクル開発機構

目 次

1. 課題名 -----	1
2. 概 要 -----	1
3. 研究の背景と目的・意義 -----	1
3.1 研究の背景と経緯-----	1
3.2 研究の目的と意義-----	2
3.3 FBR 開発における機器構造材料技術の寄与 -----	3
4. これまでの研究成果と今後の計画 -----	4
4.1 材料評価技術 -----	5
4.2 高温構造設計技術 -----	9
4.3 耐震設計技術 -----	14
4.4 もんじゅ事故対応 -----	16
5. 今後の研究の進め方, 体制及び資金 -----	16
5.1 今後の研究の進め方と重点課題 -----	16
5.2 サイクル機構内実施体制 -----	17
5.3 国内外の研究協力の実績 -----	17
5.4 研究成果の公開・普及の実績 -----	18
5.5 資金及び要員計画 -----	19
6. まとめ -----	19

図表目次

表 1	機器構造材料分野の研究課題一覧	20
表 2	材料評価技術のまとめ(これまでの成果と今後の計画)	21
表 3	材料評価技術の研究開発工程	23
表 4	高温構造設計技術のまとめ(これまでの成果と今後の計画)	24
表 5	高温構造設計技術の研究開発工程	26
表 6	耐震設計技術のまとめ(これまでの成果と今後の計画)	27
表 7	耐震設計技術の研究開発工程	28
表 8	もんじゅ事故への対応	29
表 9	実用化戦略調査研究における代表的候補概念への開発成果の適用性	30
図 1	実用化戦略調査研究における設計ニーズ	31
図 2	1次系ホットレグ配管の設計の変遷と構造材料技術	32
図 3	原子炉容器の熱応力対策の変遷と構造材料技術	32
図 4	FBR 用構造材料データベースシステム SMAT	33
図 5	材料の高温強度評価手法の例	34
図 6	12Cr 系フェライト鋼の特長と課題	35
図 7	損傷による金属組織の変化(フェライトラス幅測定による損傷定量化の例)	36
図 8	損傷による磁気特性の変化	37
図 9	漏えいナトリウムによる腐食速度線図	38
図 10	鉛ビスマスによる腐食評価	38
図 11	FINAS:最近の主な機能拡張	39
図 12	溶接継手の強度評価と実験結果	40
図 13	一般化弾性追従概念による構造不連続評価の管板構造への適用	40
図 14	非弾性解析設計	41
図 15	周波数応答関数によるサーマルストライピング評価	42
図 16	TTS によるサーマルストライピング総合検証試験	42
図 17	熱荷重-構造統合解析手法	43
図 18	システム化規格の体系	44
図 19	確率論的手法による供用期間中検査の効果の評価	45
図 20	SYMPHONY 実験と FINAS による実験解析結果	46
図 21	コモンデッキ機器上下免震構造概念	47
図 22	ライナの機械的健全性評価	48
図 23	研究開発の実施体制	49

1 課題名

高速増殖炉の機器構造材料研究開発

2 概要

核燃料サイクル開発機構（サイクル機構）における高速増殖炉（FBR）の基盤技術開発分野のうち、機器構造材料に関する研究開発について中間評価を受ける。なお、安全研究、炉心・燃料及び「常陽」を用いた研究については既に中間評価を受けている。

サイクル機構における機器構造材料に関する研究開発は、・材料評価技術、・高温構造設計技術、並びに耐震設計技術の3分野から構成されているが、これらの研究開発について、

- 研究開発の目的と意義、
- 主として「もんじゅ」や実証炉計画への貢献を主眼としたこれまでの研究開発（平成9年度～13年度を中心）の成果と目標に対する達成度、並びに
- 実用化戦略調査研究第2期への反映を主目的とした今後の研究開発（平成14年度～17年度を中心）の目標、計画と進め方

の各観点から中間評価を受ける。重点課題に焦点を当てた報告を行い、評価の結果を今後の研究開発計画の具体化や予算要求に反映する。

3 研究の背景と目的・意義

3.1 研究の背景と経緯

サイクル機構におけるFBRの機器構造材料研究は、過去において「もんじゅ」の設計建設と運転保守への反映を目的として実施し、その成果は「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」及び「材料強度基準」として集大成された。これらの指針・基準類は「もんじゅ」の設計に適用されている。

その後は、電気事業者による実証炉計画の推進への貢献を主目的とした研究を行い、その成果は日本原子力発電㈱の「高速増殖実証炉の高温構造設計方針(案)」及び「材料強度基準等(案)」に反映された。

その後、平成7年12月に発生した「もんじゅ」の温度計破損によるナトリウム漏えい事故の原因究明、安全総点検、並びに再発防止対策への対応に集中し、この間、流力振動防止のための設計方針の策定、漏えいナトリウムによる鋼材の腐食評価、並びにナト

リウム漏えい時のライナの機械的健全性評価などに取組んだ。

FBR サイクルの実用化戦略調査研究(以下、実用化戦略調査研究という)は、サイクル機構と電気事業者等の密接な連携のもとに平成 11 年に開始されたが、これを契機として研究開発計画の見直しを行い、現在は種々のプラント概念に関する設計ニーズに応え、構造設計成立性の判断や概念の絞込み、並びに経済性向上を目指した設計の成立性拡大に効果的に貢献するなど、実用化戦略調査研究第2期への直接的反映を主眼とした研究を行っている。

3.2 研究の目的と意義

機器構造材料に関する分野の研究開発の目的は、後述の FBR の構造設計上の特徴と課題を踏まえて、新材料の開発や構造設計技術の高度化によって、建設コストの低減とプラントの高温化・長寿命化、並びに運転信頼性の向上を通じた FBR の経済性向上にある。勿論、このような技術開発は、より高度なレベルで機器の破損を防止するための設計技術を提供する、という意味でプラントの安全性向上に寄与することはいうまでもない。

建設コスト低減のためには、構造の簡素化や、配管短縮を通じた機器配置のコンパクト化が有効であるが、そのためには、より厳しい荷重条件を許容できる構造設計技術が求められる。プラントの高温化・長寿命化も、より厳しい環境と荷重条件のもとで長時間にわたる構造健全性を保障できる材料技術と構造設計技術によって初めて可能となる。また、運転信頼性の向上のためにも、実プラントで想定される種々の破損を防止するための、合理的で信頼性の高い構造設計技術が求められる。さらに、地震荷重や熱荷重など、実際に発生する荷重を緩和する方策を開発することも、設計の合理化を追求するうえで有効な手段である。

機器構造材料技術は、このように、経済性と信頼性の高いレベルでの両立を求められる FBR を実際に設計、建設、運転するために必須の基盤技術である。一方、FBR には、軽水炉とは異なる以下のような構造設計上の特徴と課題がある。

- ① 高温プラント：クリープ特性に代表される、材料の高温強度を考慮した設計が必要となる。
- ② 低圧システム：圧力荷重による応力は無視できる程度であり、耐圧設計の観点からは有利である。
- ③ 熱荷重： 炉心出入り口温度差の大きいシステム設計となり、定常時及び過渡時の熱荷重が構造設計の支配因子である。
- ④ 薄肉構造： 上記②、③により機器配管は比較的薄肉構造となり、地震荷重に対する構造健全性の確保に留意が必要である。

(上記は主としてナトリウム冷却炉を念頭に整理したものであり、この他、例えば鉛ビスマス冷却炉の場合には材料腐食の問題や冷却材重量が大きいことなど、個別の課題がある。)

サイクル機構では、FBR に特有のこのような課題に焦点をあてた研究開発を実施している。研究開発の成果は種々の設計手法として集大成し、実用化戦略調査研究におけるプラント設計に適用するとともに、最終的には構造設計基準や材料基準など、国や民間(機械学会など)における規格基準の整備に貢献する。

なお、これまでの研究開発と今後の研究開発を対比して本分野の研究開発の目的と意義を整理すると以下ようになる。

[これまでの研究開発 (平成9年度～13年度を中心)]

- ・ 実証炉の高温構造設計方針(案)等への反映を目的とした基盤的研究開発。
- ・ もんじゅ事故への対応。
- ・ 実用化戦略調査研究第1期への貢献

[今後の研究開発 (平成14年度～17年度を中心)]

- ・ 実用化戦略調査研究第2期への反映を目的とした基盤的研究開発。
 - －各炉型に共通の、設計合理化を目的とした基盤的技術開発
 - －ナトリウム冷却炉を念頭においた、経済性を極限まで追求した設計の成立を図る課題解決のための研究開発
 - －その他の炉型に関して、設計概念の成立性判断に資する基礎データや知見の提供を目的とした研究開発

3.3 FBR 開発における機器構造材料技術の寄与

本分野のこれまでの成果と今後の目標などに関する各論は次章に述べるが、ここでは、FBRプラントの設計合理化の観点から機器構造材料の技術開発に関してどのようなニーズが抽出されているか、という点について代表例を示しておく。なお、実用化戦略調査研究において、将来の軽水炉と競合できる経済性達成のためのコストダウン方策が整理されているが(図1)、ここで抽出されている新技術の大部分が機器構造材料分野の技術である。

3.3.1 1次主冷却系ホットレグ配管の設計

原子炉容器と主中間熱交換器を結ぶホットレグ配管の設計においては、プラントの起動・停止に伴なって繰返し負荷される熱膨張荷重によるクリープ疲労破損の防止が最も重要である。「もんじゅ」では、図2に示すように、配管の熱膨張変位を吸収するためにエルボを多用した引き回しが採用された。一方、実用化戦略調査研究において概念検討が行われているアドバンスド・ループ型ナトリウム冷却炉(以下、大型ナトリウム炉とい

う)のホットレグ配管は、エルボを一つしか持たない、逆L字型の極めてシンプルで短い配管である。大型ナトリウム冷却炉のコンパクトな機器配置は、この配管によって実現している。

このような配管の設計は、

- ・ 熱膨張係数が低く高温強度の高い新材料(12Cr系フェライト鋼)の採用
- ・ フェライト鋼の特性(降伏点が高く、延性が低い)を考慮した配管構造設計手法の高度化による設計マージンの適正化
- ・ 3次元免震の採用による地震荷重の大幅な緩和

など、構造材料分野における今後の技術開発によって実現可能となるものである。

3.3.2 原子炉構造の熱応力設計

ナトリウム冷却炉において、原子炉容器内の冷却材ナトリウムは自由液面を有しているので、図3に示すように原子炉容器胴の液面近傍部には急峻な温度勾配による熱応力が発生する。このため、「もんじゅ」では、Y型構造と液位制御という設計対応を採用した。実証炉では、系統の簡素化の観点から液位制御を排し、原子炉容器を保護するために、容器の内側に多重の円筒構造(炉壁保護構造)を設置し、その間隙にコールドブレンラムの低温ナトリウムを流すという設計対応が採られた(炉壁冷却方式)。一方、大型ナトリウム炉では、複雑な炉壁保護構造を一切削除し、原子炉容器を直接高温のナトリウムに曝す方式として構造の大幅な簡素化を図っている。

このような原子炉構造の設計は、

- ・ 非弾性解析による構造挙動(発生する応力とひずみ)の推定精度の向上、
 - ・ 流体からの熱伝達特性を考慮した液面近傍熱荷重の推定精度の向上、
 - ・ クリープ域での破損防止評価技術の高度化による設計許容値の拡大
- といった高温構造設計技術の高度化が前提となっている。これらはいずれも、従来の弾性解析ベースの設計が有している過剰なマージンを適正化するものである。

4 これまでの研究成果と今後の計画

ここでは、機器構造材料技術の3分野(材料評価技術、高温構造設計技術、耐震設計技術)について、それぞれこれまでの研究に関する目標、成果・達成度と課題、今後の研究に関する目標と計画の要約を述べる。また、もんじゅ事故対応に関する本分野の活動についても簡単に触れておく。また、3分野における研究課題の一覧を表1に示す。

4.1 材料評価技術

材料評価技術は、FBR の使用環境と荷重特性に適合する材料を開発し、材料の損傷機構の理解に立脚したうえで、高温における材料挙動と強度特性に関するデータと評価手法を整備し、設計に供することを目的とした研究開発である。FBRが高温システムであり、材料をクリープ温度域で使用することになるので、クリープ特性やクリープ疲労破損に関する強度評価が中心的な課題である。また、FBR に特有の環境における材料の腐食評価技術もここに含めている。

材料評価技術の具体的な研究開発課題は以下のように整理される。

- (1) 材料強度評価技術
- (2) FBR 用フェライト鋼開発
- (3) 材料損傷定量化技術
- (4) 腐食関連技術

4.1.1 材料強度評価技術

[これまでの研究開発]

実証炉では、主要な構造材料として 316FR(オーステナイト系ステンレス鋼であり、機器配管用)と改良9Cr 鋼(フェライト鋼であり、伝熱管用)の使用が計画されていた。これらの材料を対象として、設計に必要な材料特性に関する評価式と強度評価手法を確立し、実証炉の材料強度基準に反映することを目標とした研究開発を行ってきた。

これまでに、両鋼について、クリープ試験、クリープ疲労試験などの高温材料試験を大気中およびナトリウム中で行い、データベースとして整備した。データベース化には、これまでに開発してきた専用システム SMAT を使用している(図4)。これらのデータに基づいて基本材料特性式をひとつおり整備するとともに、ナトリウム環境効果を含む強度評価手法を開発した。316FR については照射環境効果評価手法も整備している。その一例を図5に示す。図5の上段は、改良 9Cr 鋼のクリープ疲労強度が圧縮ひずみ保持時間によって低下する現象を、き裂の酸化皮膜形成に伴う有効応力拡大係数の割増しによって説明し、評価法として確立したものである。下段は、316FR の照射材クリープデータに基づいて設定した強度低減係数を示している。これらの成果は実証炉高温構造設計方針(案)及び材料強度基準(案)に反映されており、目標は概ね達成した。

今後の課題としては、大型ナトリウム炉の原子炉容器においても使用が計画されている 316FR について、高温長時間強度データ(クリープ及びクリープ疲労)の拡充と、超高サイクル疲労評価法の整備がある。いずれも、今後のプラント設計が長寿命化を指向していることへの対応である。前者は、プラント寿命(例えば 60 年の場合約 50 万時間)への評価法の時間外挿の信頼性について裏付けを補強するものである。後者は、サーマ

ルストライピング(後述)や流力振動など、低振幅の荷重による高サイクル疲労損傷による破損の防止が重要になるので、その評価法が求められている(現在の高温構造設計基準で用意されている設計疲労線図は 10^6 サイクルに止まっている)。

[今後の研究開発]

上記の課題認識に基づいて、時間外挿の信頼性評価も含めた材料強度評価技術の確立と高サイクル疲労評価手法の整備を目標とした研究を進める。具体的には、FBRプラントでの長時間使用実績が無い316FRについて10万時間オーダーの高温長時間強度データの取得を進めるとともに、「もんじゅ」の主要構造材料と316FRについてサーマルストライピング評価などで必要となる高温ひずみ制御条件下での $10^6 \sim 10^8$ サイクル域疲労試験を実施する。

なお、本課題については限定的な規模で試験研究を継続する計画であり、当面は次に述べるフェライト鋼を対象とした研究に重点を置く。

4.1.2 FBR 用フェライト鋼開発

実用化戦略調査研究では、ナトリウム冷却炉を含むいくつかの炉型において12Cr系の高クロムフェライト鋼(以下、12Cr鋼という)の利用が計画されている。これは、この材料の熱膨張率がステンレス鋼の約半分程度であり(同じ温度条件に対して発生する熱応力が約半分になる)、かつステンレス鋼に劣らない高温強度を有していることから、熱応力が主体となるFBRにおいては設計合理化を図るうえで大きな利点を有している、との判断によっている(図6)。一方、この材料は元来火力プラントの伝熱管用への使用を念頭に置いて開発されたものであり、材料開発の対象温度域がFBR条件よりやや高く(FBRの約550℃に対して、新鋭火力は約600℃)、延性・靱性がやや劣る、などの課題がある。

[今後の研究開発] (平成12年度から新しく着手した研究課題である)

長期的には、FBRプラントにおける使用・要求条件に適する強度と延性・靱性のバランスに優れたFBR仕様12Cr鋼を開発し、その高温強度データベースの整備と強度評価法の開発を行ったうえで、これらをプラント設計と材料強度基準に反映できるよう集大成することを目指す。

今後の4年間では、12Cr鋼のFBRへの適用性について判断を示すとともに、FBRプラント条件に適した材料仕様と最適な溶接施工法の開発を目標とする。また、その後の設計で必要となる材料強度や材料特性の暫定案を提示する。

このため、まず、既存の12Cr鋼についてFBRへの適用性判断に必要なクリープ特性やクリープ疲労強度に関する基礎データを取得する。また、既存の12Cr鋼を基に、熱処理条件の変更と微量成分の調整によって延性・靱性の改善を図り、その効果をクリープ試験や熱時効後靱性評価試験などによって確認する。併せて、溶接継手の性能

試験を行う。従来、延性に富むオーステナイト系ステンレス鋼を念頭において開発してきた破断前漏えい(LBB, Leak Before Break)の論理がフェライト鋼配管についても適用可能かどうか、も重要な点であり、この点について基本的なデータをとって確認する。

4.1.3 材料損傷定量化技術

FBR プラントの長寿命化を追及する場合、時間依存の高温強度を材料試験によって実機寿命まで外挿するこれまでのアプローチには限界がある。このため、材料が環境や負荷の影響によって時間とともに劣化、損傷していく過程を機構論的に解明し、その程度を計測あるいは予測できる指標による寿命評価の技術体系を目指した研究開発に取り組んでいる。

[これまでの研究開発]

上記の観点に立つて、まず、材料の損傷進行に伴う金属組織の変化を定量的に記述できるパラメタ(例えば、結晶粒のアスペクト比、析出物の空間占有比率、あるいは変質相の成長など)の同定と、損傷の進行に敏感な基礎物性(電気的、化学的、物理的、熱的特性など)の探索、並びにその変化量を信号として計測するための非破壊検知技術の選択を目標とした研究を行ってきた。

その結果、高クロムフェライト(改良9Cr)鋼のクリープ損傷進行がマルテンサイトのラス幅の変化で記述できること(図7)、オーステナイト系ステンレス鋼のクリープ疲労損傷進行がキャビティの空間占有率で記述できることを示した。すなわち、冶金学的な見地から、材料の金属組織について損傷の程度を数値化(定量化)することに一定の見通しを得た。そこで、材料試験データとこれらの組織変化パラメタを定量的に相関付けるデータベースの構築に着手している。また、基礎物性の検出技術として電気化学的特性、超音波、磁気的特性などに着目した予備試験を行い、材料の磁化に基づく検出技術が有望であるとの結論に達した。これは、材料の漏えい磁束密度が塑性やクリープなどの典型的な損傷と対応して変化することを見出したこと、磁性の計測には外部からの入力信号が不要であること、などに基づいている。図8は、クリープ破断前の試験片と、これと同等の時間高温のみに(荷重なし)に曝した試験片の自然磁化の測定結果を比較したものであるが、クリープ試験片では、破断位置と磁束密度分布の急激な変化が認められる個所が一致しており、磁気による損傷検出の可能性を示すものである。

これらの成果によって当初の目標は達成した。

今後は磁気による損傷検出の研究に的を絞るが、課題は①知見の普遍性、及び外部からの測定技術開発と、②非磁性材への適用性、高温損傷(クリープ)への適用性であると考えている。

[今後の研究開発]

本研究の長期的な目標は、実際の環境と負荷の下で材料の損傷が進行する程度を

普遍的な指標によって表し、この指標によって材料の損傷を計測、あるいは予測できる技術を開発することにある。具体的には、磁気に着目した指標を考えている。これにより、プラントの実環境に適合した材料選択、強度評価、供用中の健全性管理、寿命予測に共通の技術基盤を提供する。

今後の4年間では、磁気特性の変化に基づく損傷定量化技術の工学的な成立性に見通しを得ることを目標とする。

このため、まず、実機の経年化材を含め、クリープ疲労や変動クリープなどの各種の負荷による損傷に関して、磁気特性変化に基づく手法の適用範囲を確認する。また、実機で想定すべき各種の環境(高温、照射、放射化、流動液体金属など)が、損傷による磁気特性変化に与える影響を評価する。

また、予損傷試料の解析に基づいて、損傷進行に伴う磁気特性の変化の機構を解明する。さらに、磁気特性の変化の機構に基づいて、材料損傷の進行を検出する原理を提示する。

4.1.4 腐食関連技術

[これまでの研究開発]

これまで、もんじゅ事故の原因究明と対策(安全審査)への直接的な対応を目的に、漏洩ナトリウムによる炭素鋼の腐食機構の解明と腐食速度評価手法の確立を目標とした試験研究を行ってきた。雰囲気、温度をパラメタとして広範な領域における炭素鋼の腐食試験を行って基礎データを蓄積するとともに、腐食形態や腐食生成物の成分分析などに基づいた検討を加えて、漏えいナトリウムによる腐食には基本的に2種類の機構(NaFe 複合酸化型と熔融塩型)が存在することを明らかにした。これらの腐食機構の発現条件と動的性質(腐食の経時変化)を把握したうえで、腐食速度評価式を提示した(図9)。もんじゅの2次系床ライナの健全性評価には、この評価式が用いられており、当初の目標は達成した。

なお、腐食機構の細部にわたる詳細な解明、特に今後の設計におけるナトリウム漏えい対策の合理化に向けた現実的な腐食速度評価のために、主要なナトリウム化合物の熱力学的基礎物性データの整備については平成15年度まで継続する予定である。

[今後の研究開発]

実用化戦略調査研究における候補概念のひとつである鉛ビスマス冷却炉の成立性を左右する重要ナトリウム課題のひとつに、鉛ビスマス(LBE, Lead Bismuth Eutectic)による鋼材の腐食の問題がある。このため、鉛ビスマス炉の成立性に関する判断材料の提供を目的として、LBE による材料腐食に関する研究に取り組んでいる。当面の4年間には、LBE に対する鋼材の腐食機構の把握と主要材料の耐食性評価を目標とした研究を行う。図10はロシアが研究成果に基づき示しているLBE 中における鉄鋼材料の使用条

件である。この図は、鉄鋼材の実データ、酸素濃度分析及び熱力学的な考察に基づき、材料表面に保護的な酸化被膜が安定に存在し、かつ流路を閉塞させないために冷却材成分である鉛が酸化しない酸素濃度条件を示したものである。LBE を冷却材として採用するプラント設計には、先行するロシアの知見をその信頼性を確認しつつ適切に反映させることが、研究開発を効率的に進めるうえでも重要である。また、複雑な流路から構成される実プラントで、こうした非常に低くかつ狭い領域に酸素濃度($10^{-8} \sim 10^{-6}$ wt%)レベルを維持するための技術開発が必要となる。

そのために、主要な国産材料について耐食性評価試験を実施するとともに、腐食評価の基礎データとなる LBE 中における主要合金元素の溶解度測定、流動 LBE 中の酸素濃度の制御技術に関する課題の抽出などを行う。

なお、実用化戦略調査研究の第2期の終了時点において鉛ビスマス冷却炉が実用化炉の有望候補として選択された場合には、最終的な目標を鉛ビスマス炉の材料腐食問題の解決においた研究を本格的に展開する予定である。

4.1.5 材料評価技術のまとめ

実証炉の構造材料を対象として実施してきたこれまでの材料の高温強度評価に関する研究については、成果を実証炉材料強度基準(案)に反映して当初の目標をほぼ達成し、長時間外挿性の確認と超高サイクル疲労評価法のための試験を限定的に継続する。今後は、12Cr 鋼を対象とした研究に重点を移し、FBR への適用性判断のための基礎データの取得と、FBR 条件に適した材料開発を行っていく。

材料損傷定量化に関しては、磁気特性の変化に着目した手法が有望であることを見出した。今後、その実用化に向けた基礎的技術開発を積み重ねていく。

腐食関連技術については、もんじゅ対策として行ってきた漏えいナトリウムによる腐食に関する研究はほぼ完了しており、今後は鉛ビスマス冷却炉の成立性判断の観点から、鉛ビスマスに対する主要材料の耐食性評価に重点を移す。

表2に本分野のこれまでの目標・成果と今後の目標・計画を対比して整理したものを示す。また、表3に本分野の研究開発工程を示す。

4.2 高温構造設計技術

高温構造設計技術は、高温・低圧システム、熱荷重が主体、薄肉構造、といった FBR の特徴と課題を念頭において、各種の破損様式に対する構造物の限界強度を見極め、これらを適切に防止する設計評価技術を提供することを目的とした研究開発である。

具体的な研究開発課題は、以下のように分類・整理される。

- (1) 構造解析技術
- (2) 高温強度評価技術

- (3) 熱荷重評価技術
- (4) システム化規格

4.2.1 構造解析技術

[これまでの研究開発]

FINAS は、我国唯一の有限要素法に基づく本格的汎用非線形解析システムであり、FBR の設計や研究開発はもとより、一般産業界においても幅広く活用されてきた実績を持つ。これまで、設計や研究開発におけるニーズに応える先進的解析機能を整備し、商用コードに対する競争力を維持する観点から、機能拡張と改良を積み重ねてきた。最近では、大規模問題の高速計算が可能なソルバの導入による飛躍的性能向上を実現するとともに(図 11 の上段)、最新の非弾性構成モデルや動的非線形要素の組込みなどの機能拡張を行っている。また、「もんじゅ」の2次系ライナの健全性評価に際して、腐食により材料が消失しながら熱応力を受ける、極めて複雑な現象の解析を可能とする機能拡張も行っている(図 11 の下段)。

[今後の研究開発]

構造解析コードは、いわばFBR開発(設計と研究開発)のインフラストラクチャであり、商用コードではなく自社開発のコードを保有することは、ニーズに即した改良や機能拡張が迅速に行えるなどの点で大きな意義を持つ。例えば、上述のライナの解析も、有限要素の拡張が自由に行えることで初めて可能になった。このため、FINAS について、限定的ではあるが今後も機能拡張を継続する予定である。

4.2.2 高温強度評価技術

FBR 機器の構造設計においては、高温における非弾性挙動の推定と熱荷重に対するクリープ域での破損の防止が中心的な課題である。このため、「もんじゅ」の高温構造設計方針では、弾性解析による設計を基本として非弾性挙動の推定のための各種の設計係数と破損防止のクライリアを与えている。実証炉の高温構造設計方針は弾性解析による設計の枠組みを踏襲したものであるが、「もんじゅ」の構造設計基準に含まれる過剰な裕度を合理化する観点から、種々の評価手法の改良を行ってこれに反映している。実用化戦略調査研究では、経済性追求のために設計の更なる合理化が求められており、前述のように、例えば原子炉容器の構造簡素化などを実現するための技術的基盤を提供していく。

[これまでの研究開発]

実証炉の高温構造設計方針への反映を目的として、溶接部の高温強度評価法と構造不連続部の高温強度評価法の確立を目標とした研究を行ってきた。前者は溶接構造の適用範囲拡大による設計の合理化(「もんじゅ」では、溶接継手を低応力部に配置

する設計対応がとられた), 後者は管板構造などの複雑な構造の弾性解析設計の合理化, といった実証炉設計のニーズによるものである。

溶接部については, 母材と溶接金属の間のひずみ再配分挙動に着目したクリープ疲労強度評価法を開発し, 構造物強度確性試験装置 (TTS) によるナトリウム熱過渡試験データや仏 CEA とのベンチマーク研究を通じて手法の妥当性を検証した (図 12)。構造不連続部については, 従来の弾性追従モデルを局所的非弾性挙動と総体的非弾性挙動の両者の重畳効果の予測ができるように拡張し, 管板構造への適用性と妥当性を確認した (図 13)。これらの手法は実証炉の高温構造設計方針 (案) に反映されており, 当初の目標は達成した。

[今後の研究開発]

長期的には, 非弾性解析による設計を可能とし, 主たる荷重が熱荷重であることの特長を本質的に活かした構造設計技術の体系化を図ることによって実用化炉の構造設計基準策定に貢献することを目標とする。

今後4年間においては, 大型ナトリウム炉の原子炉容器の設計への適用を念頭に, 非弾性解析による挙動評価手法と, これと対をなす破損クライテリア (クリープ疲労及びラチェット疲労) の確立を目標とする。また, 材料開発において 12Cr 鋼の仕様が確定した後に, 12Cr 鋼製機器配管の構造設計手法の整備に着手する。

具体的には, まず, 非弾性解析による設計手法を確立するために, 構成式の選定法, 負荷履歴の想定法, および解析の品質保証法を開発する。解析結果の構成式依存性は非弾性解析法を設計に適用する際の最大の課題であり, これを克服するためのアプローチとして, 設計条件に応じて保守的な解を与える古典的構成式を選定する方法を提案する (図 14)。また, 対象とする破損様式を保守的に評価するための負荷履歴想定法を開発する。さらに, 解析の品質保証を行うための, 例題やリファレンスデータを整備する。

次に, 設計主要箇所の中で荷重条件の厳しい箇所を対象として, 繰り返し熱荷重と機械荷重が重畳する場合の破損様式, 破損機構と破損限界を把握し, 破損限界から適正な裕度を持つ破損クライテリアを開発する。

原子炉容器液面近傍では, 機械荷重の割合が増加すると破損様式が疲労からラチェット疲労に移行する可能性があることから, ラチェット疲労の限界条件を明らかにする。また, 原子炉容器下部構造では, 長寿命化しても高温で使用される時間が比較的短いことから, クリープの強度に及ぼす影響を時間と温度に応じて合理的に評価する Negligible Creep 曲線を開発する。上記の成果を非弾性解析と組み合わせ可能なクライテリアとしてまとめる。

4.2.3 熱荷重評価技術

FBR 機器において考慮すべき主要な荷重は熱荷重であるが、構造の温度そのものではなく温度の時間的変化あるいは空間的な分布が熱荷重の発生要因であるため、圧力などの機械荷重と比べて正確な評価が難しい。このため、従来は極めて保守的な評価方法が設計に用いられていた。本研究は、サーマルストライピングや系統熱過渡荷重(後述)などの代表的な熱荷重について、解析技術や理論的考察を駆使して評価法の合理化を図り、設計の合理化、最適化に結び付けようとするものである。

[これまでの研究開発]

サーマルストライピングによる熱疲労破損の防止のための評価手法の体系を構築することを目標とした研究開発を行ってきた。サーマルストライピングは温度の異なる流体の混合過程で生じる温度ゆらぎ現象であり、これが構造に対する荷重源となって熱疲労を生じさせる場合があることから、配管合流部などでは注意が必要である。サーマルストライピングが原因の配管破損事例も FBR(フェニックス)や軽水炉で実際に生じている。このため、サイクル機構では熱流動分野と構造分野の境界領域問題として、両分野が協力してサーマルストライピング評価法の高度化に取り組んできた。構造の分野では、流体から構造への熱伝達過程で生じる減衰効果を考慮した合理的かつ実機の評価に適用可能な評価手法の開発を目標としてきた。

これまでに、流体温度ゆらぎの周波数と構造の応力応答との関係を理論的に解明し、流体温度ゆらぎに対する構造の周波数応答関数という新しい概念を生み出してこの性質を定量化した(図 15)。また、ホットスポットによる3次元的な熱応力場の問題に適用できるように、周波数応答関数を拡張した。これらより、熱応力の合理的な評価が可能となった。各種のベンチマークでこの手法の妥当性を検証し、当初の目的はほぼ達成した。今後、平成 15 年度末を目途にTTSによるナトリウム熱過渡高サイクル疲労試験を行って、これまでに構築した評価手法を総合的に検証し、完成させる(図 16)。

[今後の研究開発]

長期的には、系統熱過渡荷重に対する最適構造設計を可能とする技術体系を構築し、実用化戦略調査研究における候補概念のプラント設計に適用して熱荷重の緩和による設計合理化を実現することを長期的な目標とした研究開発を行っていく。

従来は、まず種々のシステムパラメタの変動の影響を包絡する保守的な熱過渡条件を多数の熱流動解析によって定め、これによって生じる熱応力が許容値を満足するかどうかの判定を構造解析によって行う、いわば一方向・独立の設計評価が行われていた。これに対して、本研究では熱流動－構造統合解析コードを開発し、システムパラメタと発生熱応力の関係を直接把握したうえで熱荷重の緩和と構造最適化を可能とする設計手法を開発するものである(図 17)。これにより、システムパラメタの変動を考慮しても、熱過渡条件の保守的設定という過程を経ずに、システムパラメタの組合せから客観的に

熱過渡条件を決定することができる。さらに、安全性や性能へ影響を及ぼさない範囲で、系統熱過渡荷重に感度が大きいシステムパラメタを調整することによって、系統熱過渡荷重を緩和することが可能となる。

今後の4年間では、熱流動－構造統合解析コードを開発し、大型ナトリウム炉等の設計例に試適用してその基本的性能を確認することを目標とする。

このため、これまでに開発した熱流動－構造統合解析プロトタイプコード PARTS を基本として、これを実際の設計評価への適用が可能となるよう、取り扱える系統構成について自由度を拡大するなどの機能拡張を行うとともに、詳細コードとの比較による検証を行う。また、水蒸気系の評価のために、既存のシステム解析コードである SuperCOPD に応力評価モジュールを組み込む改造を行う。さらに、大型ナトリウム炉等の設計例を対象として、実験計画法の援用によってシステムパラメタの変動が熱応力に及ぼす影響を把握する(図 17)。

4.2.4 システム化規格

構造健全性に関する現在の規格基準は、材料、設計、製作(溶接)、検査、維持、といったプラント機器の計画から設計、運転に至る各段階で生じる技術行為に関して、それぞれ独立かつ自己完結的に安全裕度を含んだ規則、規定を設けた体系となっている。このため、全体としては過剰な裕度が含まれた設計になることが多い。

システム化規格は、規格基準に含まれる幾つかの技術項目の間で余裕を相互交換可能にすることにより、余裕の重複を避け、過剰な余裕を適正な水準に合理的に設定することを目指す、柔軟かつ画期的な規格基準体系である。例えば、機器の使用条件や特性に応じて、設計裕度を大きくとることにより検査を簡略化する、あるいは、安価な材料を用いる代わりに検査を強化するなどの合理化方策を採用できるようにする。これにより、ライフサイクルを通じた信頼性管理が可能となるとともに、与えられた信頼度のもとで、コストミニマムでの設計・建設・維持を実現することができる。

[今後の研究開発] (新しく着手した研究課題である)

長期的には、上記の概念に基づくシステム化規格の骨格をなす要素技術を開発し、構造設計上の安全裕度の設定、材料、製作法などの選択、供用期間中検査の方法と頻度の設定などについて、コストミニマムとなる選択肢を与える道を拓くことを目標とする。

今後4年間には、システム化規格の構築に必要な要素技術を摘出し、研究開発計画を作成し、開発に着手する。その上でシステム化規格の概念の技術的な成立性について見通しを得ることを目標とする。

具体的には、管制基準(信頼度評価を受け持つ)と部分基準(荷重、材料、構造設計、検査などに係る技術的要求の細目を規定)からなる体系(図 18)を考え、管制基準につ

いては、信頼度評価法(確率論的強度評価法)の開発を行う。また、部分基準については、荷重、強度の統計的処理方法の開発、非破壊検査による破損確率低減効果の検討(図 19)などを行う。

4.2.5 高温構造設計技術のまとめ

汎用非線形解析システム FINAS については、FBR 開発のインフラストラクチャとして、限定的ではあるが継続的な機能拡張を継続していく。

高温強度評価技術については、溶接部と構造不連続部の評価法を開発して実証炉基準に反映した。今後は非弾性解析による設計を可能とするよう根本的な構造設計技術の高度化を行っていく。

熱荷重評価法については、サーマルスライピング評価法をひととおり整備した。今後は熱荷重緩和と構造最適化を実現するために、系統熱過渡に対する統合的な設計評価手法の体系を開発していく。

新しい課題として、規格基準に含まれる幾つかの技術項目の間に余裕を相互交換可能にすることにより、余裕の重複を避け、過剰な余裕を適正な水準に合理的に設定することを目標とする、システム化規格の骨格をなす要素技術の開発に取り組む。

表4に本分野のこれまでの目標・成果と今後の目標・計画を対比して整理したものを示す。また、表5に本分野の研究開発工程を示す。

4.3 耐震設計技術

耐震設計技術に関する研究開発は、地震時のプラントの安全性と構造健全性を確保・向上することを目的としており、厳しい地震条件の我国において FBR を実用化する上で必須の技術である。具体的に取り組んできた研究開発課題は、以下のふたつに分類される。

- (1) 耐震解析技術
- (2) 3次元免震技術

4.3.1 耐震解析技術

[これまでの研究開発]

炉心の地震応答解析手法の開発は、制御棒挿入性と関連して地震時のプラントの安全性を確保する上で最も重要な課題のひとつである。炉心は数百本の燃料集合体や遮蔽体から構成されており、地震時にはこれらが互いに衝突しながら複雑な振動挙動を呈する。このため、地震時における炉心構成要素の衝突振動の解析手法を確立して実機評価への適用を可能とすることを目標とした研究を行ってきた。

仏 CEA との、フェニックス炉心の実大模型を用いた振動実験を中心とする共同研究

(SYMPHONY 研究, (図 20))を行い, 炉心の地震応答挙動を解析する手法を確立した。従来の手法による解析では炉心の1列のみを取出してこれが列方向の地震入力を受けるという単純化した場合に限定されていた。本研究により, 全炉心体系を対象として, これが水平2方向の地震を受ける場合の解析, すなわち, 実際の炉心の挙動に即した解析を可能とした。図 20 には本手法と SYMPHONY データとの比較も示しているが, 解析結果が実験と良好な一致を示していることがわかる。この手法は, 「もんじゅ」の制御棒改造に伴う挿入性評価に適用され, 当初の目標を達成した。

なお, 耐震解析技術については, 今後実用化戦略調査研究におけるプラントの構造概念が具体化され, この分野での課題が顕在化した場合に研究計画を見直すこととし, 当面は, 次に述べる3次元免震技術の研究開発に集中することとしている。

4.3.2 3次元免震技術

「免震」は, 対象とする構造物を柔らかいばねで支持して系の固有周期を地震動の卓越周期領域よりも長周期化することによって, 構造物に作用する地震荷重を低減する技術である。冒頭に述べたように, FBR では機器配管が比較的薄肉構造となるので, 免震による地震荷重低減のメリットは極めて大きい。積層ゴムを用いた水平免震技術は完成の域にあり, 一般建築でも実績を重ねつつあるが, 上下方向も加えた3次元免震は軽量機器を対象としたものを除き, 実現していない。

一方, 実用化戦略調査研究においては, 図1にも示したように, 今後のプラント設計合理化における3次元免震技術へのニーズは高い。

[これまでの研究開発]

これまで, 実証炉を念頭において FBR プラントに適用可能な3次元免震の構造概念を創出し, その基本的な成立性を確認することを目標とした研究を行ってきた。

その成果として, 建物全体を水平免震しておき, 原子炉容器と一次系機器を支持する共通床(コモンデッキ)の下に皿ばねを用いた免震要素を配して上下方向に免震するオリジナルの構造概念を創出した(図 21)。この構造概念について, 免震効果(加速度の低減と変位の抑制)を発揮する適切な免震特性(免震周期と減衰)とこれを実現する免震要素の設計手法について検討するとともに, 縮小モデルによる振動試験を行って免震効果を確認した。例えば原子炉構造の固有周期である 0.1 秒程度の領域での地震荷重低減効果が極めて大きいことがわかる(図 21)。

[今後の研究開発]

今後は, 機器上下免震構造が実際のプラントに適用できることを確証するとともに, これを実現するための技術指針案を策定することを最終的な目標として, 今後4年間において免震要素としての皿ばねに関する力学特性データを取得するとともに, 強度設計手法を整備し, これを技術指針の骨子として集大成することを目標とする研究開発を行

っていく。

具体的には、まず、実大皿ばねの力学特性試験を行い、これに基づいて、クリープ効果や摩擦の影響等を適切に考慮できる皿ばねの設計式を開発する。また、機器上下免震に適用可能な減衰要素とコモンデッキの水平支持構造を開発する。その上で、免震要素、減衰要素、水平支持機構を総合した機器上下免震システムとしての特性を解析によって確認する。

4.3.3 耐震設計技術のまとめ

耐震設計技術の分野では、これまでに、仏CEAとの共同研究によって全炉心の2方向地震応答解析手法を確立し、もんじゅの改造制御棒の評価に適用して当初の目標を達成した。今後は、機器上下免震構造の実プラントへの適用を可能とするよう、免震要素の技術指針策定を目指した研究開発を集中的に実施していく。

表6に本分野のこれまでの目標・成果と今後の目標・計画を対比して整理したものを示す。また、表7に本分野の研究開発工程を示す。

4.4 もんじゅ事故対応

もんじゅ事故の後、原因究明と対策に関連して、温度計の破損原因究明と流力振動防止のための設計方針の策定、漏えいナトリウムによる腐食評価(4.1 節で述べたもの)、並びに2次系ライナの機械的健全性評価に関する試験(図 22)、解析等の対応を行った。これらの概要を表8に示す。

5 今後の研究の進め方、体制及び資金

5.1 今後の研究の進め方と重点課題

今後の4年間は、実用化戦略調査研究第2期におけるプラント設計研究のニーズの把握と課題への対応を最優先とし、12Cr 鋼の適用性判断、鉛ビスマスに対する耐食性評価、構造強度評価法の高度化(非弾性解析による設計と熱荷重評価法の高度化)、並びに機器上下免震構造開発を重点課題として進める。

また、中長期的には以下の観点から FBR 実用化のためのブレークスルーを目指した研究開発を指向していく。

- (1) 材料や構造の損傷、破損に関する機構論的な現象解明に立脚したうえで、最新の計算科学的手法等によって構成される設計手法の提供
- (2) 熱荷重に対する構造最適化などに代表される、設計への提案
- (3) リスクベース技術や構造信頼性技術を活用した、材料、設計、製作から運転、維

持までを包括的に管理する技術体系の構築

なお、上で述べた今後の重点課題と実用化戦略調査研究におけるプラント候補概念との関係は、表9のように整理することが出来る。

5.2 サイクル機構内実施体制

本研究は、サイクル機構大洗工学センターの要素技術開発部が中心となって、システム技術開発部が実施する実用化戦略調査研究のプラントシステム設計との密接な連携を図りながら進めることとしている(図 23)。

5.3 国内外の研究協力の実績

限られた研究資源を有効に活用し、効率的に FBR 実用化に必要な技術開発とデータベースの整備を図る必要がある、との観点から、国内外の機関との協力関係を積極的に構築し、成果を挙げてきた。また、海外にあっては FBR 技術の先進国の立場から、国内にあっては FBR 技術の反映の立場から、それぞれ積極的な技術貢献を行っている。

以下は、これまでの研究協力と貢献の実績であるが、これらの関係は今後も維持、発展させていく考えである。

[国内機関との研究協力と貢献]

原研： 現在、照射環境における原子炉構造材料の劣化現象に関する研究について、二法人間での融合研究の計画を進めている。また高温ガス炉の構造基準は高速炉の高温基準を全面的に採用しており、関連して 2.25Cr-1Mo 鋼のデータベースを開示提供している。最近では、ITER の設計基準に関連して 316FR のデータと評価法を提供している。

原電： 原電と共同研究契約を締結したうえで、原電が経済産業省から受託している新型炉技術確証試験(内容は構造設計手法と3次元免震)について、大洗工学センターにおいてサイクル機構と電力派遣者が協力して実施している。

電中研：12Cr 鋼の基礎的材料データの整備に関して、相互補完的な試験計画となるよう調整を図るとともに、データの共有化を図ることとしている。また、主として 316FR などのクリープ疲労に関する研究についても、実用化戦略調査研究への反映の観点から密接な情報交換を行っている。

大学： サイクル機構の種々の枠組み(先行基礎工学研究, 社外公募型研究, 博士研究員制度等)を活用して、平成 8 年度から現在にいたるまで、累計 15 件の共同研究を実施している。

物質・材料機構： 旧金属材料技術研究所の時代から、FBR 材料の高温強度に関する情報交換を行っている。

[海外機関との研究協力と貢献]

IAEA: Phenix 配管破損に関するベンチマーク研究に参加(終了)。

OECD/NEA: 配管の熱疲労に関するベンチマーク研究活動に参加している。

仏国: CEA との間で、構造健全性などの分野において共同研究、研究者の派遣(延べ5名)と受入れ(1名)を含む密接な協力関係を構築している。国際学会への共著論文投稿も多数の実績がある。

米国機械学会(ASME): 規格委員会に参加し、リスクベース技術などに関する意見交換を行っている。

米国 DOE: 鉛ビスマスの利用技術に関する情報交換を行っている。

米国 MIT: 鉛ビスマスの腐食に関する研究に関して協力関係を構築(委託研究)。

独国 FZK: 鉛ビスマスの腐食に関する研究に関して協力関係を構築(共同研究)。

韓国: 韓国原子力研究所において、材料、構造、耐震の各分野について、ほぼ毎年1、2名の割合で1週間程度の技術講習を行ってきた(延べ7名)。また、文科省の原子力研究交流制度による研修生の受入れ実績も多数である。

中国: 構造と耐震分野について1週間程度の技術講習を実施した。また、研修生受入れ実績も韓国と同様に多数である。

他のアジア諸国: 文科省の原子力研究交流制度による研修生の受入れ実績多数。

5.4 研究成果の公開・普及の実績

研究開発の成果は原則として全て公開しており、広く関係機関の利用に供している。平成8年度から平成13年度末までの成果の公開件数は以下のとおりである。

	材料評価	高温構造設計	耐震設計	合計
専門誌への論文投稿、 国際会議論文投稿	42	43	9	94
国内学会口頭発表	39	38	7	84
成果報告書、 サイクル機構技報	67	73	19	159
特許(国内外)	5	8	1	14

論文などによる成果の公開と並び、本分野の成果は以下のように軽水炉や広く一般産業界に普及、反映されている。

- (1) FINAS: 我が国唯一の有限要素法に基づく汎用非線形解析システムであり、原子力をはじめ、プラント・機械への適用をはじめとして種々の産業分野においてエンジニアリングソリューションツールとして長年にわたり使用実績を積み重ねてきた。現在、FINASは大学・研究機関、産業界を含め140社以上に導入されており、軽水

炉の許認可や一般産業施設の設計などに広く活用されている。

- (2) 高温構造設計基準・材料強度基準：原研高温ガス炉の基準には高速炉基準が全面的に採用されている。ITER 計画に関連して、同じく原研に 316FR の材料強度データと評価法を提供している。また、機械学会の設計建設規格において、簡易弾塑性解析のための設計係数として、高速炉の高温基準において開発された弾性追従概念に基づく非弾性ひずみ評価法が採用されている。
- (3) サーマルストライピング評価法：現在、機械学会において「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」策定のための検討が行われているが、サイクル機構におけるこれまでの研究成果（熱流動・構造解析コード群による詳細解析手法、周波数応答関数による簡易疲労評価手法など）がこの検討に反映されている。
- (4) SMAT：火力プラントの高温設計高度化を目指した研究に、SMAT を通じた高速炉データとクリープ疲労評価法、弾性追従モデルによる簡易非弾性評価法などの技術を提供している。
- (5) 委員会活動：日本機械学会や火力原子力発電技術協会などにおける、軽水炉関係の構造基準などに関連する各種委員会に参加し、基準の策定や改良に高速炉の知見を反映している。

5.5 資金及び要員計画

FBRの機器構造材料分野の研究開発について、今後4年間(平成 14 年度～17 年度)に総額約 27 億円程度の予算規模を予定している。このうち、実用化戦略調査研究費は約 6 億円である。過去5年間(平成 9 年度～13 年度)の予算規模は合計約 47 億円であった。このうち、実用化戦略調査研究費は約 2 億円(平成 12, 13 年度)であった。

研究開発要員としては、約 20 名(過去 5 年間にしても約 20 名であった)を予定している。

6 まとめ

FBR実用化のための基盤技術の一翼として、機器構造材料に関する研究開発を大洗工学センターにおいて着実に推進する。

その成果は、実用化戦略調査研究第2期における有望概念の成立性判断と絞込みに反映する。最終的にはFBR機器の構造設計技術として体系化し、構造設計基準、材料強度基準などの規格基準(国の基準や機械学会などの民間規格)の整備に貢献する。

また、これらの成果は普遍性を持ち、もんじゅの運転再開支援はもとより軽水炉や広く一般産業にも貢献するものである。

表1 機器構造材料分野の研究課題一覧

研究課題	平成9年～13年の成果	平成14年～17年の計画
材料評価技術		
材料強度評価技術	・ 実証炉材料の高温強度データ, 評価法	・ 長時間データと超高サイクル疲労評価法
FBR用フェライト鋼開発	・ 火力用材料の調査, 設計用特性暫定	・ 12Cr の適用性判断とFBR仕様の開発
材料損傷評価技術	・ 損傷による金属組織変化の定量化	・ 磁化特性による損傷検出技術
腐食関連技術	・ 漏えいナトリウムによる腐食の評価	・ 鉛ビスマスによる構造材の腐食評価
高温構造設計技術		
構造解析技術	・ 計算速度の向上と各種解析機能拡張	・ FBR 開発のインフラとして整備継続
構造強度評価技術	・ 弾性解析に基づく各種評価法の高度化	・ 非弾性解析による設計評価手法
熱荷重評価技術	・ サーマルストライピング評価法の高度化	・ 熱-構造統合解析コード開発と設計適用
システム化規格	<<新たに取組んでいるテーマ>>	・ 信頼度評価法の開発
耐震設計技術		
耐震解析技術	・ 炉心の詳細地震応答解析手法の開発	<<当面機器上下免震に集中>>
機器上下免震開発	・ 基本的構造概念の創出	・ 免震要素としての皿ばねの構造設計手法開発

表2 材料評価技術のまとめ(これまでの成果と今後の計画)

1/2

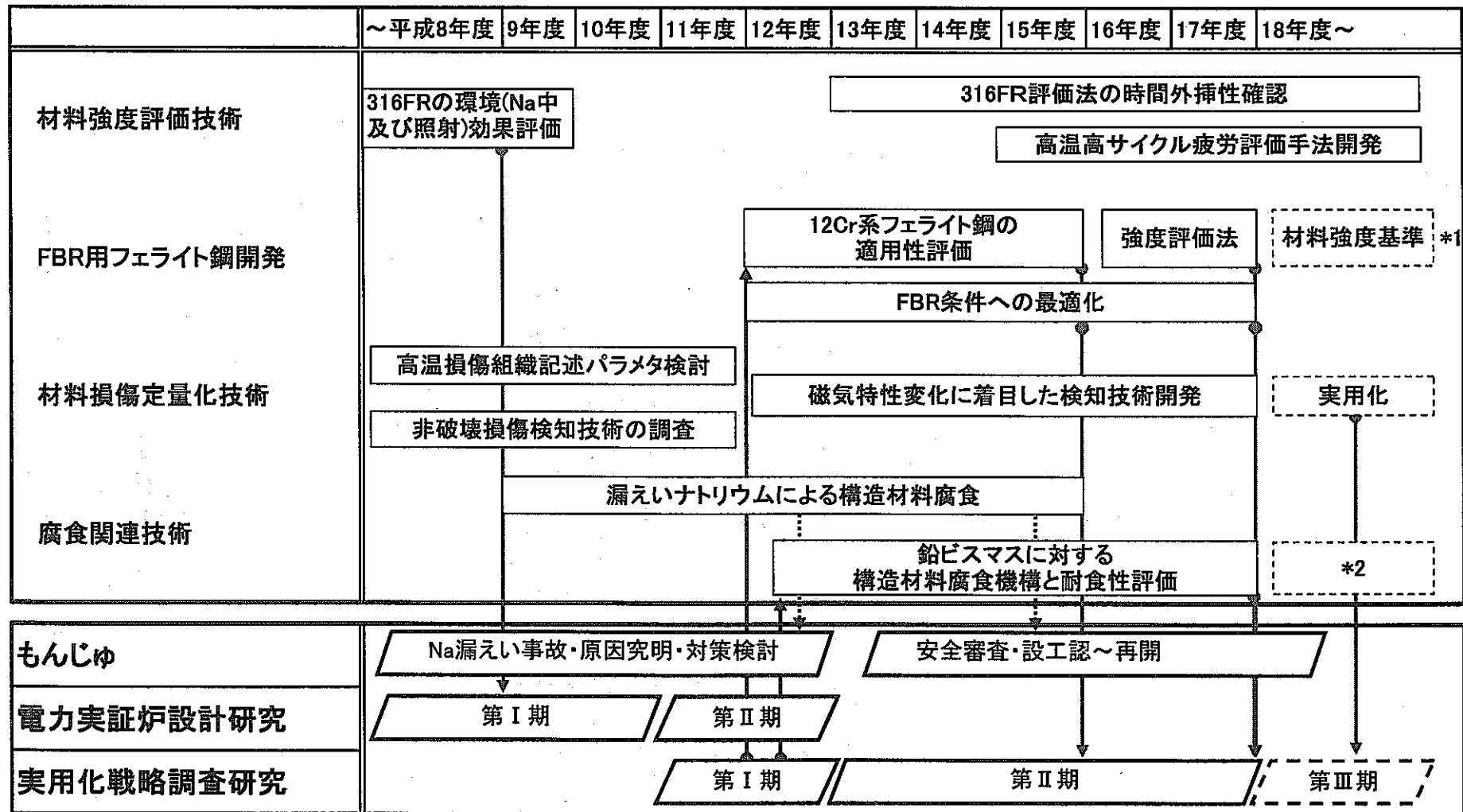
	これまでの目標と成果 (平成9年度～13年度を中心)	今後の目標と成果 (平成14年度～17年度を中心)
材料強度評価技術	【目標】 実証炉材料の高温材料特性式、強度評価法の整備。実証炉材料強度基準への反映。 【成果・達成度】 材料データベースを整備。材料特性式と強度評価法を一式整備。実証炉基準に反映。目標は概ね達成。 【課題】 外挿信頼性向上と超高サイクル疲労評価法整備。	【目標(長期)】 時間外挿信頼性評価も含めた材料強度評価技術の確立。超高サイクル疲労評価手法の整備。 【目標(4年間)】 316FR の高温長時間試験の継続。超高サイクル疲労試験に着手。 【計画】 高温長時間データと超高サイクル疲労について、限定的に試験研究を継続。
FBR用フェライト鋼の開発	(平成12年度に着手した課題) ・ 火力データの調査 ・ 材料特性の推定(設計研究に提示) ・ 開発課題の整理と計画策定 などを行ってきた。	【目標(長期)】 FBR 条件に適した 12Cr 系フェライト鋼の開発。高温強度データベースの整備と強度評価法の開発。材料強度基準への反映。 【目標(4年間)】 FBR への適用性判断。FBR プラント条件に適した材料仕様と最適な溶接施工法の開発。設計用材料強度等の暫定。 【計画】 クリープ疲労などの基礎データの取得。熱処理条件・微量成分調整による延性・靱性向上。各種溶接施工法による継手性能の確認。LBB 成立性の基礎データ取得。

表2 材料評価技術のまとめ(これまでの成果と今後の計画)

2/2

	これまでの目標と成果 (平成9年度～13年度を中心)	今後の目標と成果 (平成14年度～17年度を中心)
材料強度評価技術	【目標】 材料の損傷進行に伴う金属組織の変化を定量的に記述できるパラメタの同定と、損傷の進行に敏感な基礎物性の探索、並びにその変化量を計測する非破壊検知技術の選択。 【成果・達成度】 ステンレス鋼(キャビティ率)、フェライト鋼(ラス幅の変化)について損傷と関連するパラメタを見出した。材料の磁化に着目した検出技術が有望であることを確認。目標は概ね達成。 【課題】 上記の知見の一般性の確認、高温など実機条件への適用性。	【目標(長期)】 磁気特性の変化に基づく材料損傷の検知技術の確立。 【目標(4年間)】 磁気特性の変化に基づく損傷定量化技術の工学的な成立性に見通しを得る。 【計画】 種々の損傷形態に関する適用範囲の確認。各種の環境が損傷による磁気特性変化に与える影響を評価。損傷進行に伴う磁気特性の変化機構の解明と損傷進行の検出原理の提示。
FBRR用フェライト鋼の開発	【目標】 漏えいナトリウムによる炭素鋼の腐食機構解明と腐食速度評価法の確立(もんじゅ事故対応) 【成果・達成度】 2種類の腐食機構(NaFe 複合酸化型と熔融塩型の動的性質の把握と存在解明と腐食速度評価法の提示。もんじゅ評価に適用し、目標は概ね達成。	【目標(長期)】 実用化プラントの成立性、設計評価に重要な材料腐食課題の解決。 ※鉛ビスマス炉が選択された場合に本格展開。 【目標(4年間)】 鉛ビスマス冷却炉の成立性判断材料の提供を目的とした、鉛ビスマスに対する鋼材の腐食機構の把握と主要材料の耐食性評価 【計画】 耐食性評価試験、主要合金元素の LBE 中溶解度データ評価、流動 LBE 制御技術の課題抽出。

表3 材料評価技術の研究開発工程



*1: 国又は学会基準に反映

*2: 鉛ビスマス炉が選択された場合に本格展開

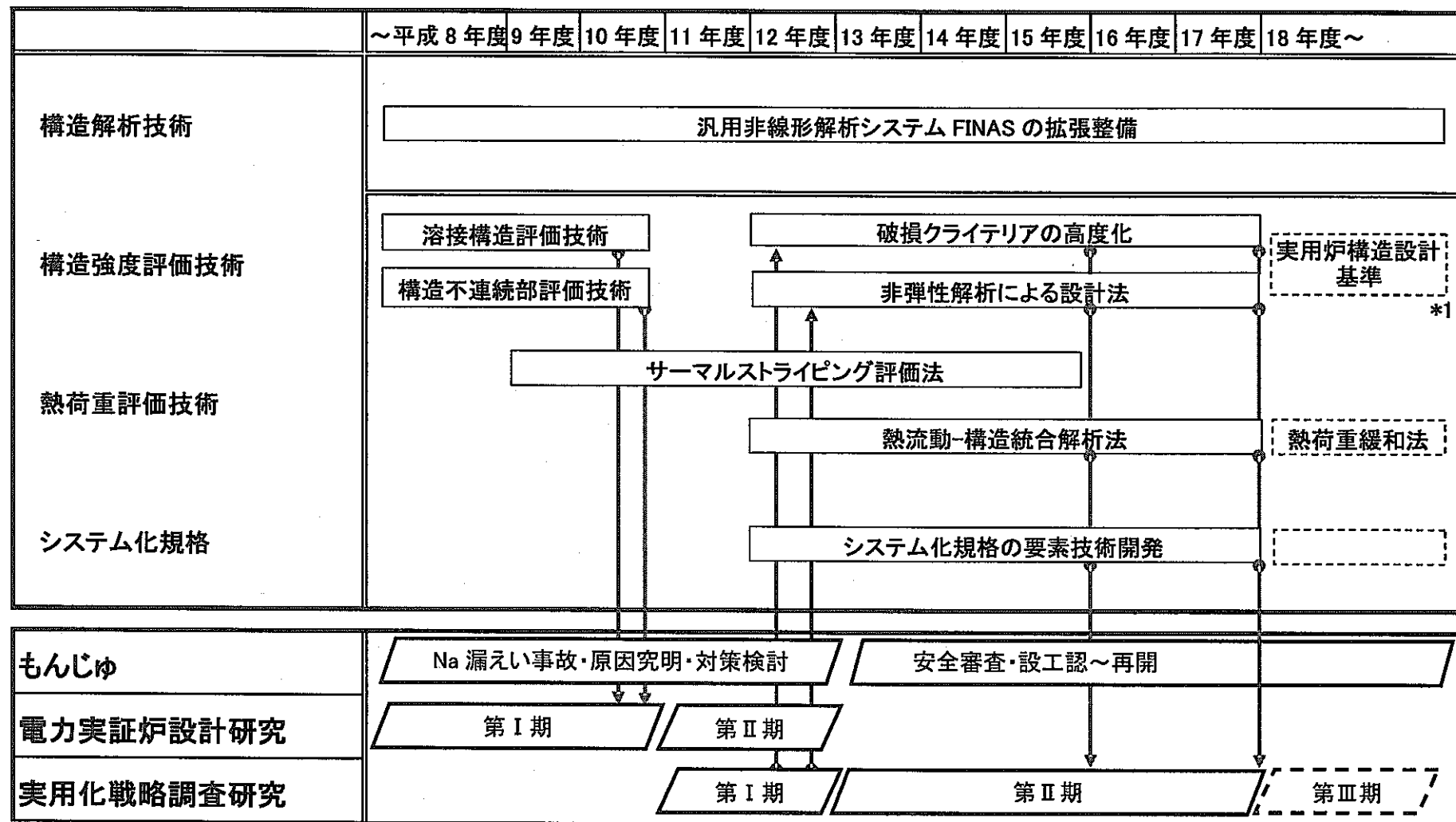
表4 高温構造設計技術のまとめ(これまでの成果と今後の計画) 1/2

	これまでの目標と成果 (平成9年度～13年度を中心)	今後の目標と成果 (平成14年度～17年度を中心)
構造解析技術	構造解析コードは、FBR開発のインフラであり、自社開発コードを保有することはニーズに即した改良や機能拡張が迅速に行えるなどの点で大きな意義を持つ。FINASは、我国唯一の本格的汎用非線形解析システムであり、先進的解析機能を整備し、商用コードに対する競争力を維持する。限定的規模で実施。 【成果・達成度】 大規模問題の高速計算が可能なソルバの導入による飛躍的性能向上を実現。その他種々の機能拡張。	
高温強度評価技術	【目標】 弾性解析に基づく設計の枠組みにおける課題として、溶接部及び構造不連続部の高温強度評価法の確立を目標。実証炉の構造設計方針に反映。 【成果・達成度】 溶接部の強度評価手法を開発、構造物試験によって検証。構造不連続について弾性追従モデルを拡張した手法を開発、構造物試験によって検証。 実証炉高温構造設計方針案に反映し、目標は達成した。 【課題】 弾性解析に基づく設計の枠組みでは合理化に限界との認識。更なる合理化のためのブレークスルーが求められるようになった。	【目標(長期)】 非弾性解析による設計を可能とし、熱荷重が主体であることの特長を本質的に活かした構造設計技術の体系を構築。 【目標(4年間)】 非弾性解析による挙動評価手法と、これと対をなす破損クライテリアを開発。フェライト鋼製機器配管の構造設計手法を整備。(材料開発においてフェライト鋼の仕様が確定した後に着手) 【計画】 構成式の選定法、負荷順序の取扱いなどを含む非弾性設計指針の技術的骨子を定める。 ラチェット疲労の限界条件を見極めるとともに、設計に適用可能な Negligible Creep 曲線を開発。

表4 高温構造設計技術のまとめ(これまでの成果と今後の計画) 2/2

	これまでの目標と成果 (平成9年度～13年度を中心)	今後の目標と成果 (平成14年度～17年度を中心)
熱荷重評価技術	【目標】 サーマルストライピングによる熱疲労破損防止の設計評価手法の体系構築。 【成果・達成度】 流体温度ゆらぎの周波数と構造の応力応答との関係に基づく熱応力の合理的な評価手法を開発。各種のベンチマークで検証し、当初の目的はほぼ達成。 平成 15 年度末を目途にナトリウム熱過渡高サイクル疲労試験による総合的検証。手法として完成させる。	【目標(長期)】 系統熱過渡荷重に対する最適構造設計を可能とする技術体系を構築し、設計に適用。 【目標(4年間)】 熱流動-構造統合解析コードを開発、設計例への試適用によって基本性能を確認。 【計画】 既往のプロトタイプコード PARTS をもとに適用範囲(系統構成)を拡張、詳細コードによる検証。大型ナトリウム炉の熱過渡設計への試用。
システム化規格	新規課題	【目標(長期)】 システム化規格の骨格をなす要素技術を開発し、例えば材料・製作法などの選択などについて、コストミニマムとなる選択肢を与える道を拓く。 【目標(4年間)】 システム化規格の構築に必要な要素技術開発に着手。システム化規格概念の技術的成立性に見通しをつける。 【計画】 管制基準と部分基準からなる体系を考え、管制基準については、信頼度評価法開発を、部分基準については、荷重、強度の統計的処理方法の開発などを行う。

表5 高温構造設計技術の研究開発工程



*1: 国又は学会基準に反映

表6 耐震設計技術のまとめ(これまでの成果と今後の計画)

	これまでの目標と成果 (平成9年度～13年度を中心)	今後の目標と成果 (平成14年度～17年度を中心)
耐震解析技術	【目標】 FBR 炉心の耐震安全性評価手法高度化のため、地震時における炉心の衝突振動解析手法を確立。 【成果・達成度】 仏 CEA との共同研究により、全炉心の水平2方向地震応答解析手法を確立、振動試験で検証。もんじゅの改良制御棒評価に反映。目標は達成。	当面、3次元免震構造開発に集中。
3次元免震構造開発	【目標】 FBR プラントに適用可能な3次元免震構造の概念の創出と基本的な成立性の確認。 【成果・達成度】 1次系機器を共通床で支持し、これを皿ばねによる上下免震装置で免震する構造概念を創出し、小型の振動試験で免震効果(加速度の低減)を確認。	【目標(長期)】 機器上下免震構造が実際のプラントに適用できることを確証するとともに、これを実現するための技術指針(案)を策定。 【目標(4年間)】 免震要素としての皿ばねに関する各種力学特性データを取得するとともに強度設計手法を整備し、これを技術指針の骨子として集大成する。 【計画】 摩擦やクリープを考慮した皿ばねの設計式を開発し、力学試験によって検証。機器上下免震に適用可能な減衰要素を開発、基本性状を確認。

表7 耐震設計技術の研究開発工程

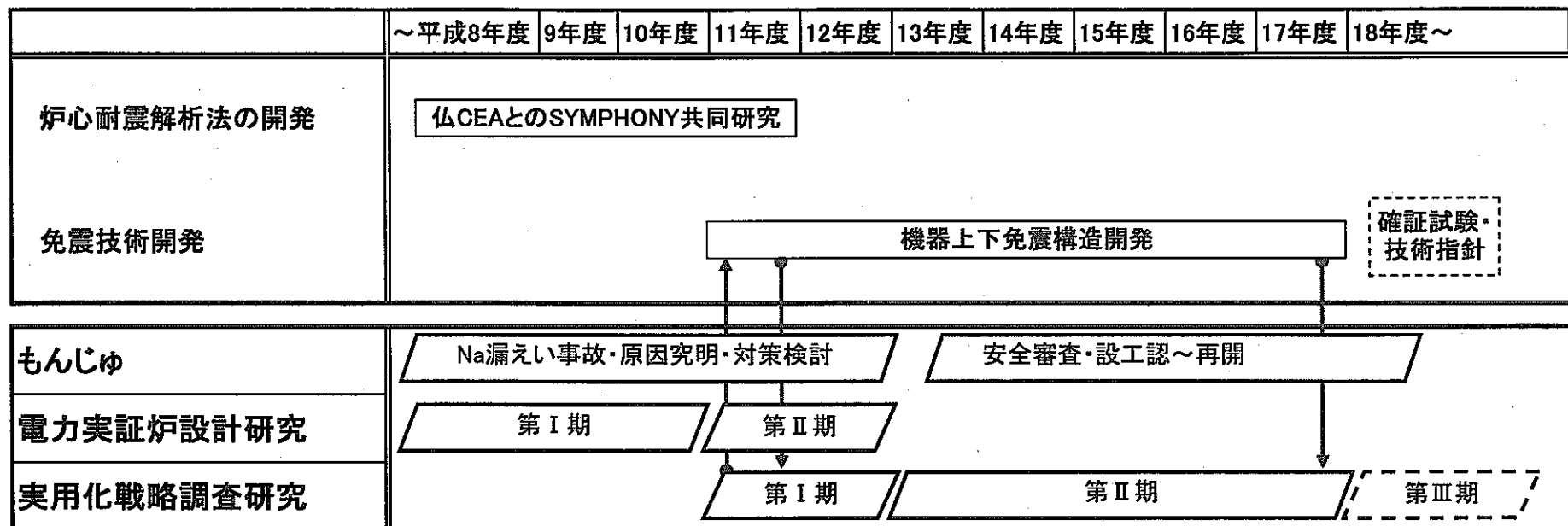


表8 もんじゅ事故への対応

温度計破損原因の究明	漏えいナトリウムによる腐食評価	2次系ライナの機械的健全性評価
もんじゅの温度計は流れ方向の流力振動によって疲労破損したが、原因究明において、応力解析、振動解析、疲労き裂の進展解析などを駆使して最終破断に至る過程を明らかにした。 また、流力振動の防止に関する設計方針を定めた。	漏えいナトリウムによる炭素鋼の腐食機構解明と腐食速度評価法の確立を目的。2種類の腐食機構(NaFe複合酸化型と熔融塩型)の存在解明とそれらの動的性質の把握、ならびに腐食速度評価法の提示。もんじゅの安全審査に適用された。	中小規模のナトリウム漏えい時に、ライナが腐食と熱応力の両方を受ける場合においてもライナに貫通性の損傷が生じず、その機能(建物コンクリートと漏えいナトリウムの接触防止)を保つことを、構造解析(減肉過程を模擬した詳細解析)や試験によって証明した。その結果は設置変更申請書の参考資料としてとりまとめており、今後設工認において用いられる。

表9 実用化戦略調査研究における代表的候補概念への開発成果の適用性

	Na冷却炉	重金属冷却炉	ガス冷却炉
設計のフェーズ	経済性向上に重点をおいた、 ある程度詳細な設計	概念設計の段階 設計成立性の判断が焦点	概念設計の段階 設計成立性の判断が焦点
材料評価技術			
材料強度評価法	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
新材料開発	各炉型に共通の技術		
材料損傷定量化	各炉型に共通の技術		
腐食関連技術	Na腐食	LBE腐食	
高温構造設計技術			
構造解析技術	FBR開発、基盤技術開発のインフラとして整備		
構造強度評価法	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
熱荷重評価法	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
システム化規格	各炉型に共通の技術		
耐震設計技術			
耐震解析技術	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
3次元免震開発	各炉型に共通の技術		

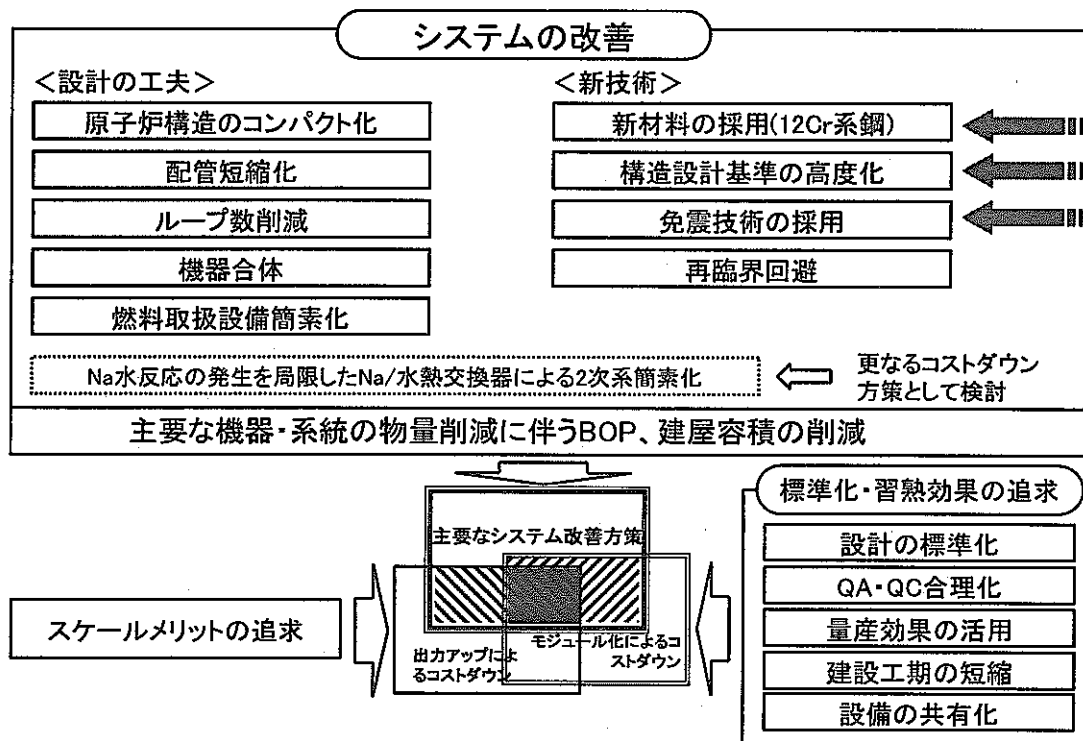
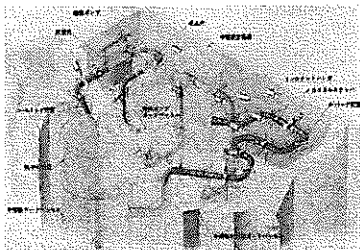


図1 実用化戦略調査研究における設計ニーズ

ホットレグ配管引回しの変遷

もんじゅの1次系配管と機器配置



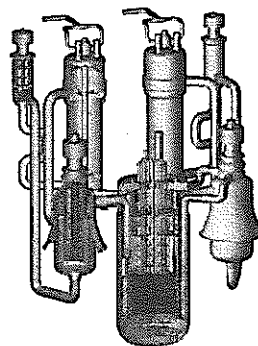
複数エルボによる
水平引き回し
で熱膨張を吸収

多数の耐震サ
ポートによる支持

→ 極限まで単純化、
短縮した配管設計

→ 耐震サポートの
削減

大型ナトリウム炉の1次系配管と機器配置



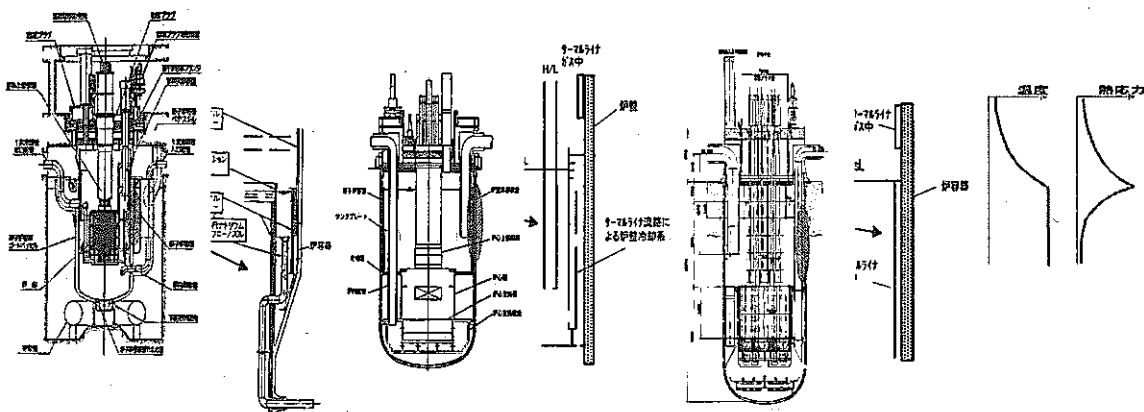
	もんじゅ	大型ナトリウム炉
配管全長	39 m	12 m
エルボ数	9個	1個

大型ナトリウム炉の配管短縮と配置コンパクト化は、

- ・ 低熱膨張、高強度のフェライト鋼の採用
- ・ 配管高温設計技術の高度化による設計マージンの適正化
- ・ 3次元免震採用による地震荷重の大幅な緩和

などによって可能となる。

図2 1次系ホットレグ配管の設計の変遷と構造材料技術



もんじゅ: 529°C / SUS304 高温容器 + Y型構造 液位制御あり	実証炉: 550°C / 316 FR 炉壁冷却構造 液位制御なし	大型ナトリウム炉: 550°C / 316 FR 高温容器 液位制御なし
--	--	---

原子炉容器液面近傍構造の簡素化は以下によって実現可能となる。
(従来の弾性解析ベースの設計評価が有する過剰な裕度の適正化)

- ・ 非弾性解析による構造挙動の推定精度向上
- ・ 液面近傍熱荷重の推定精度の向上
- ・ クリープ域での破損防止評価技術の高度化による許容値拡大

図3 原子炉容器の熱応力対策の変遷と構造材料技術

材料強度データベース

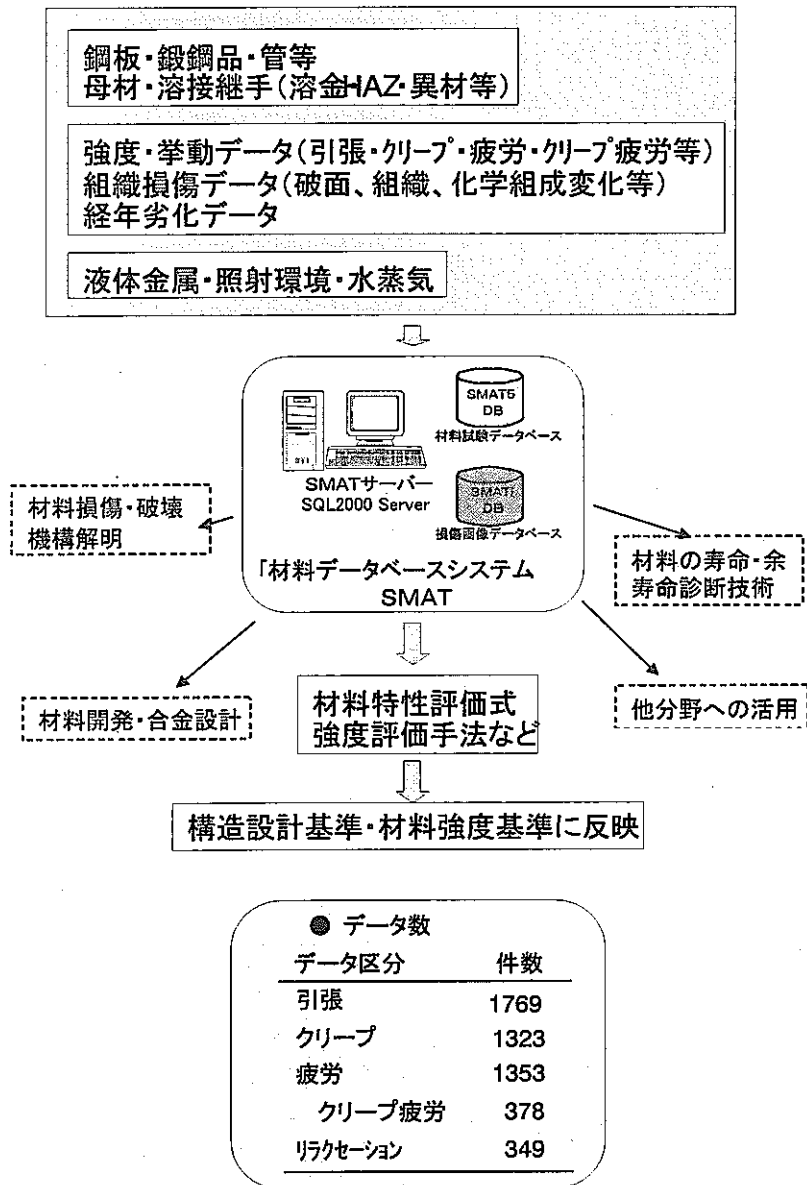
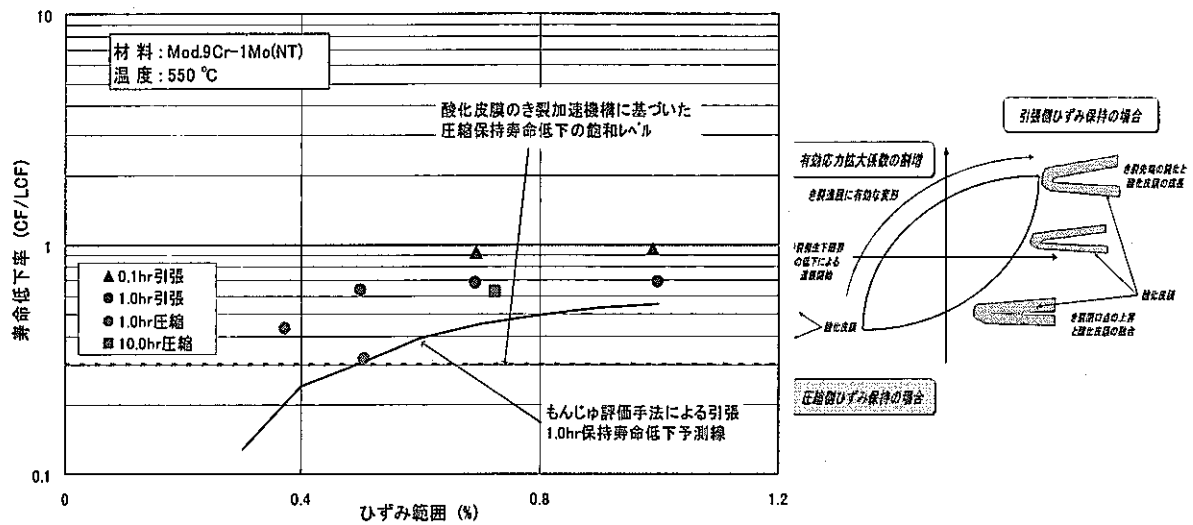
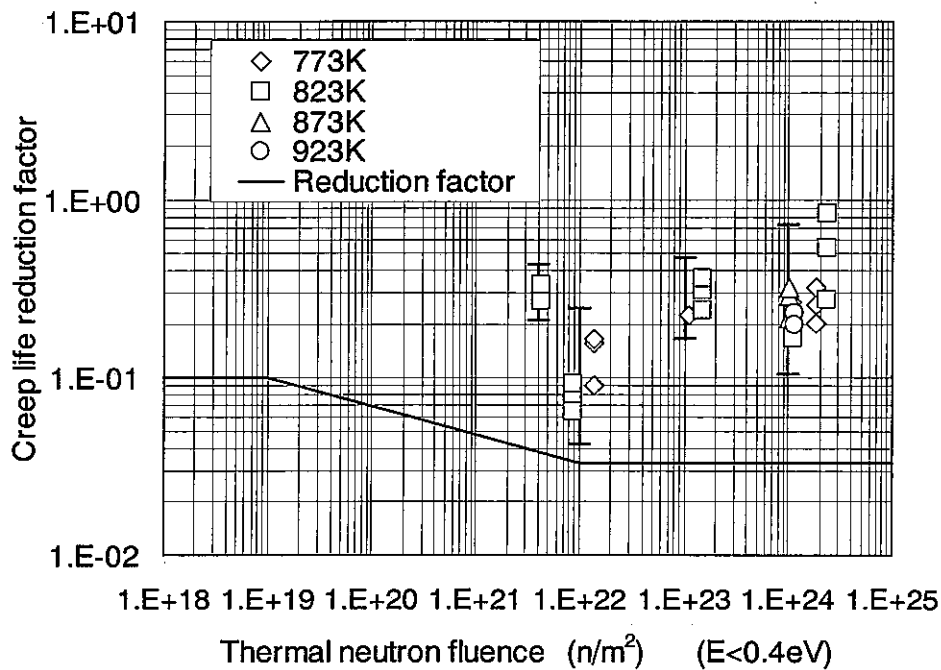


図4 FBR用構造材料データベースシステムSMAT

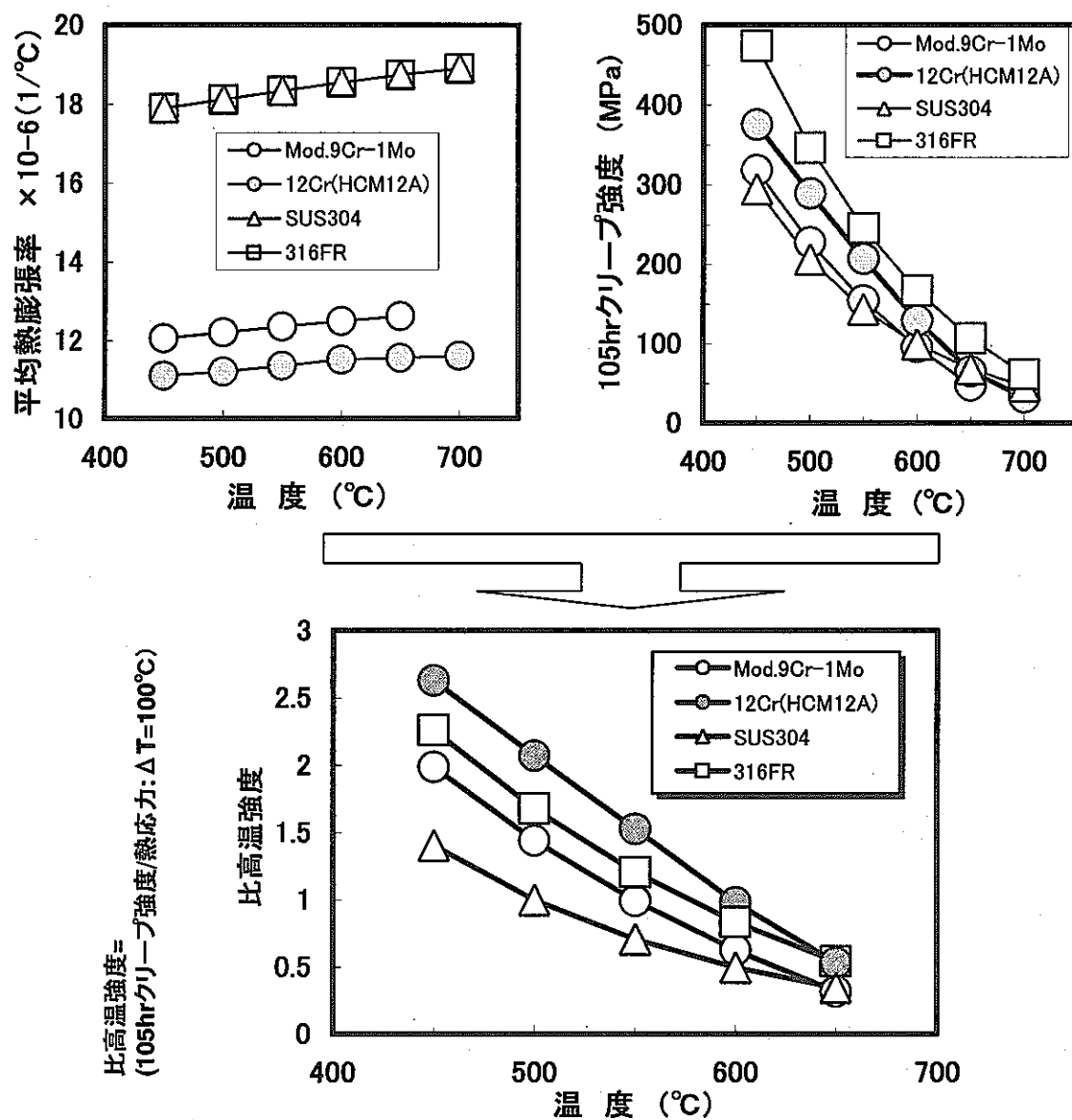


(A)改良9Crの圧縮保持時間効果の評価



(B)316FRの耐照射環境評価法(クリープ強度低減係数)

図5 材料の高温強度評価手法の例

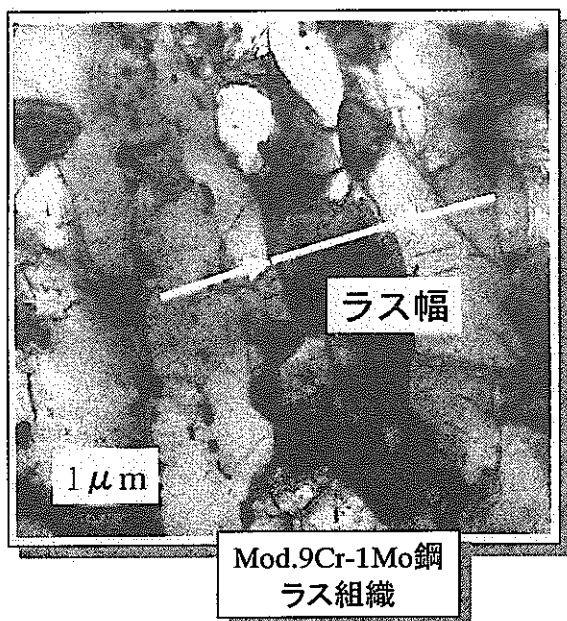


低熱膨張/高熱伝導/高強度材料の開発:
高Cr鋼の高性能化の追及



基本的な課題:
 • 長時間延性, 靱性の改善
 • 溶接施工法の確立
 • クリープ疲労強度の確認

図6 12Cr系フェライト鋼の特長と課題



Ref) 永江勇二、他、JNC TN9400 2000-103

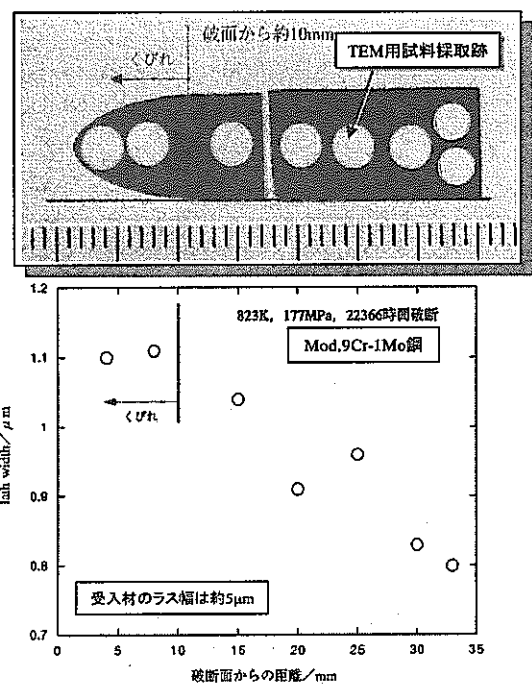
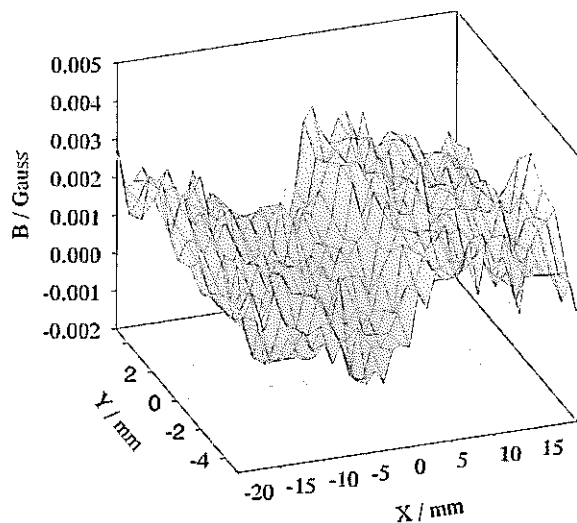
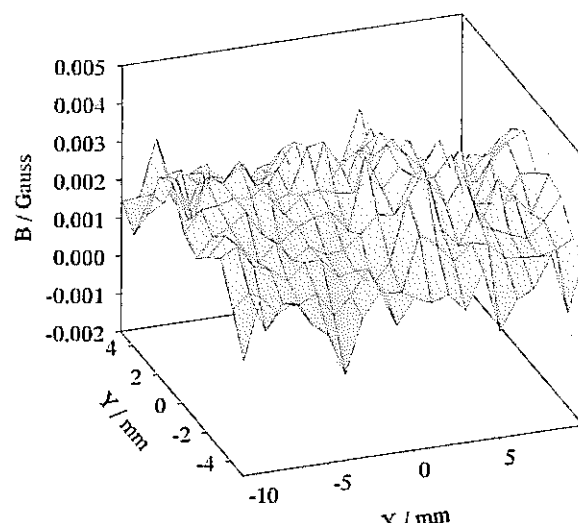


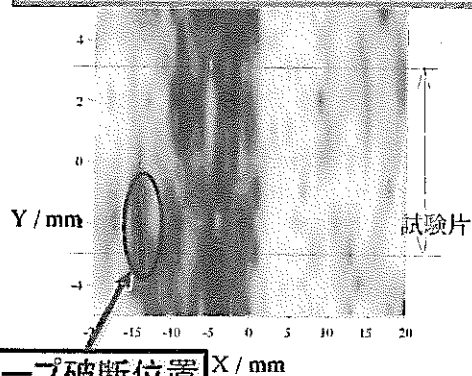
図7 損傷による金属組織の変化
(フェライトラス幅測定による損傷定量化の例)



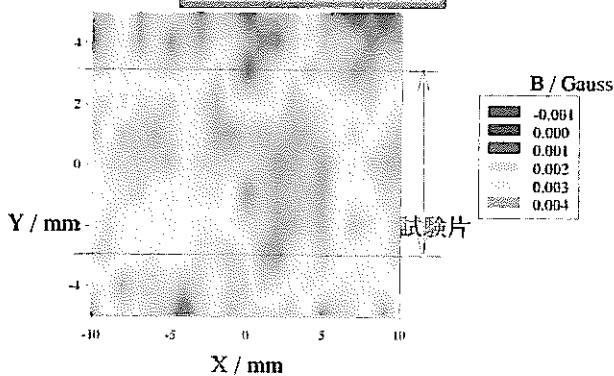
三次クリープ域での中断 (1269時間)



1579 時間熱時効材



クリープ破断位置



破断部近傍の磁気特性が激に変化
↓
破断位置を事前に検出可媒

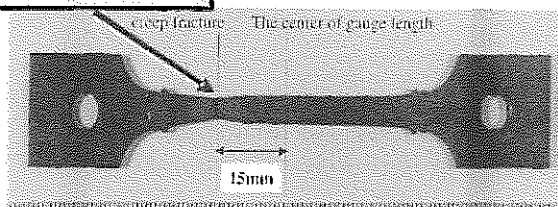


図8 損傷による磁気特性の変化

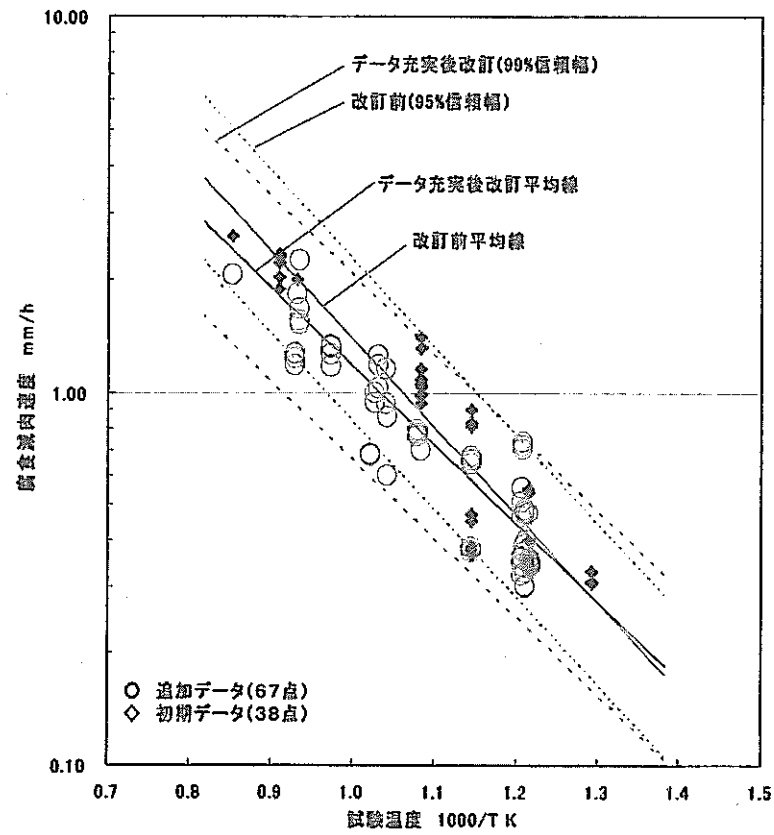


図9 漏えいナトリウムによる腐食速度線図

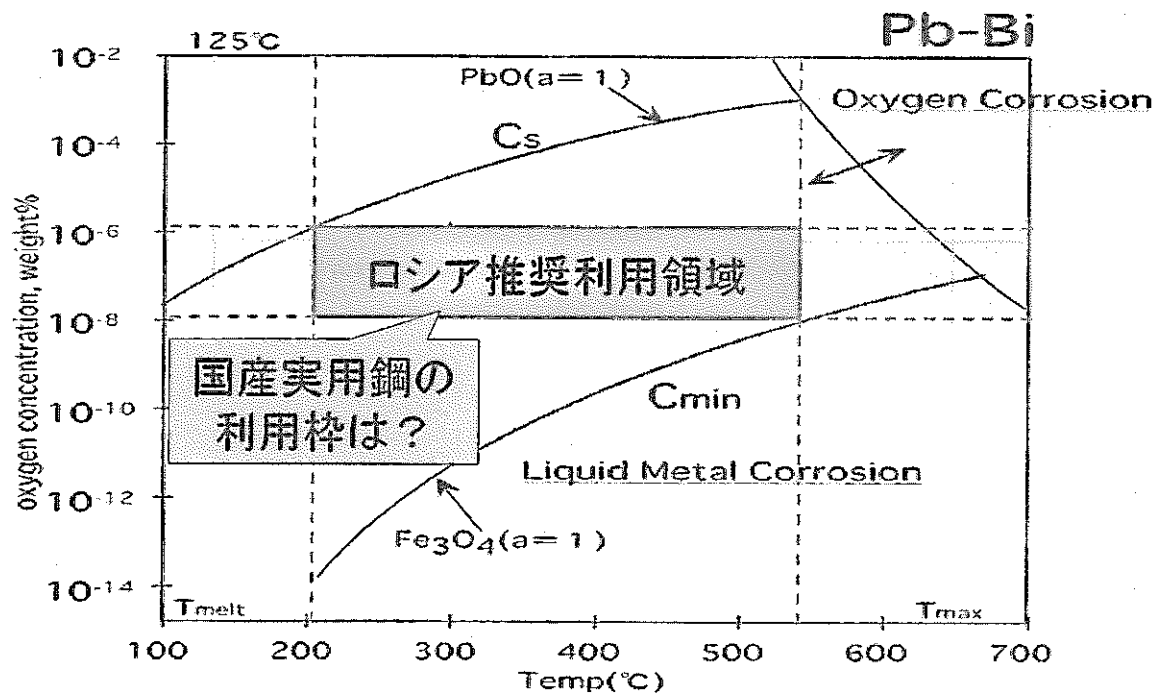
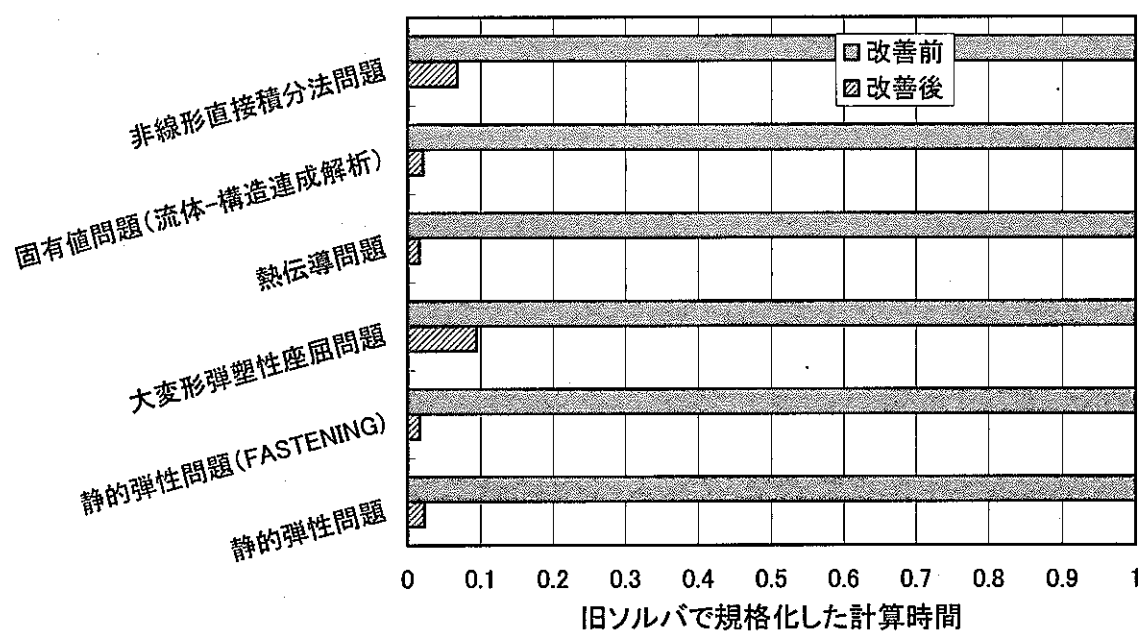
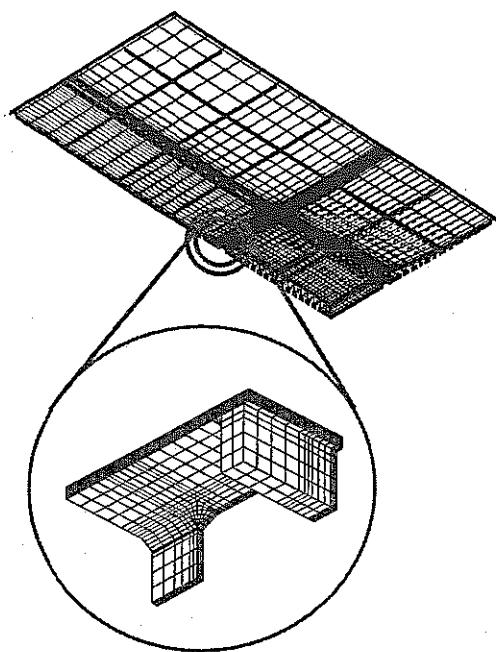


図10 鉛ビスマスによる腐食評価



(A) 新ソルバ導入によるFINASの計算速度向上測定値



腐食でライナが減肉(物質が部分的に消滅)しながら, 熱荷重を受ける現象の解析を, 有限要素の改良等によって可能とした。

(B) もんじゅライナのスクリュー漏洩時の健全性評価への適用例

図11 FINAS:最近の主な機能拡張

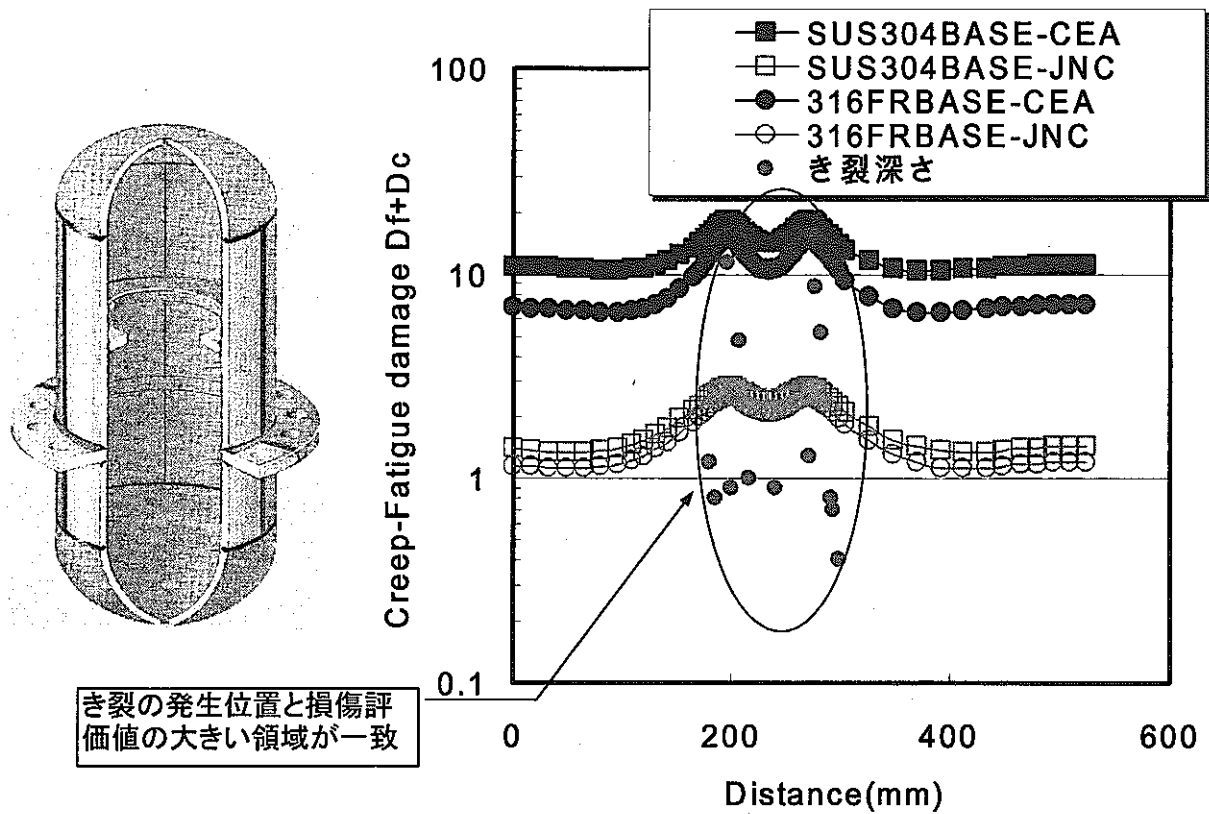
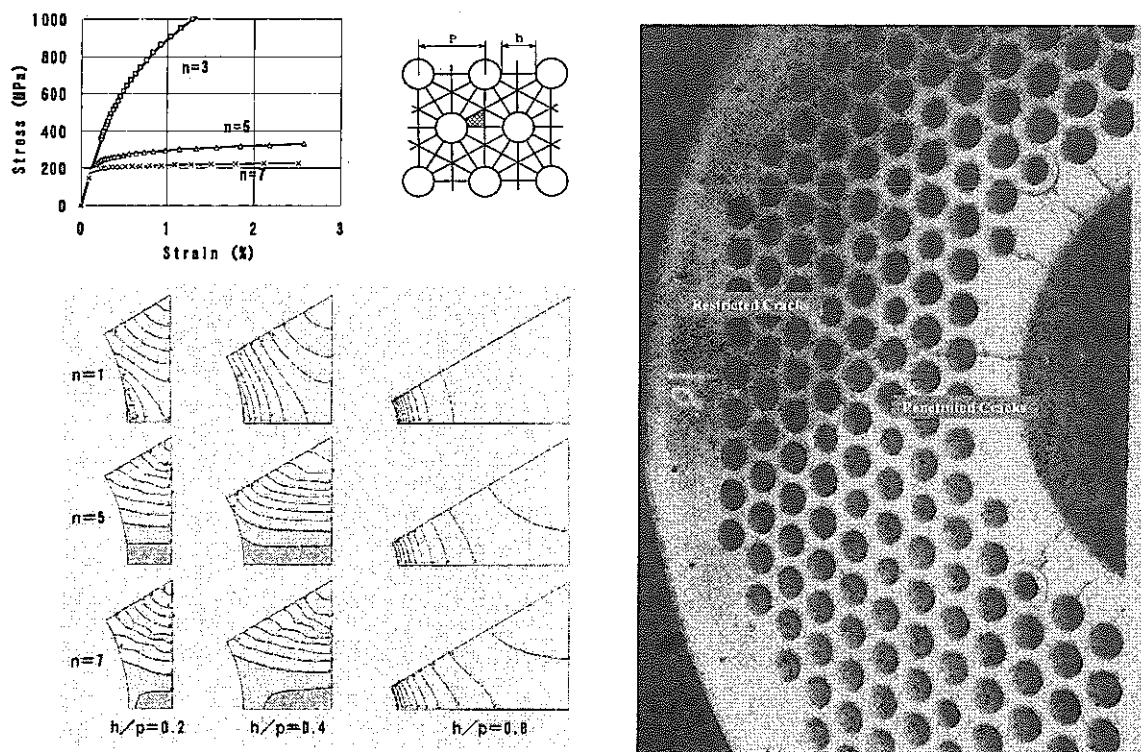


図12 溶接継手の強度評価と実験結果



ひずみ集中を孔径と材料特性に応じて予測する弾性追従モデルを開発

図13 一般化弾性追従概念による構造不連続評価の管板構造への適用

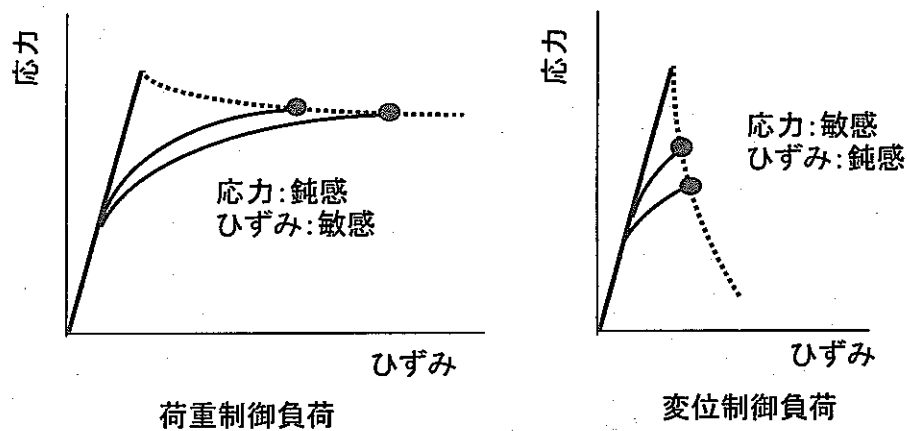
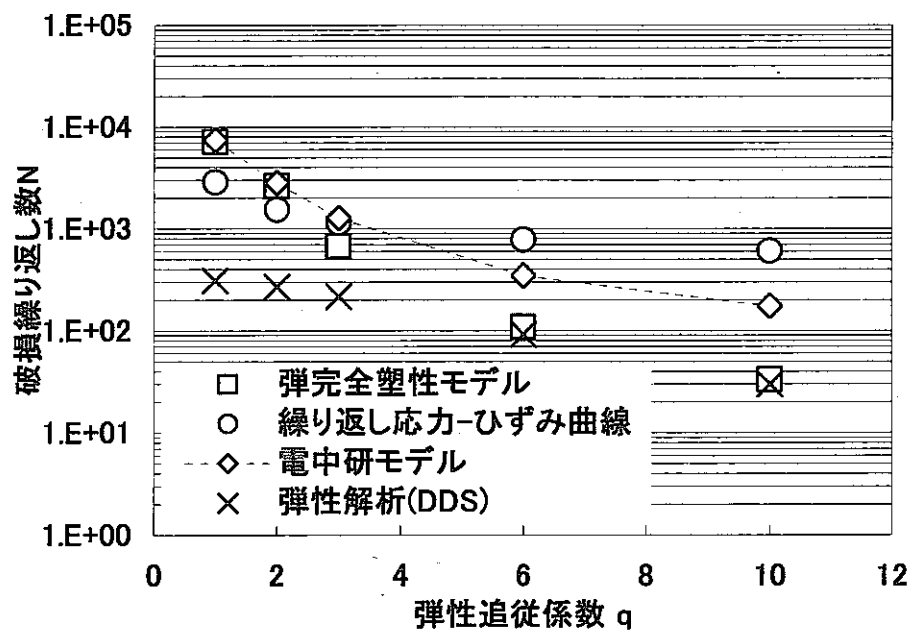
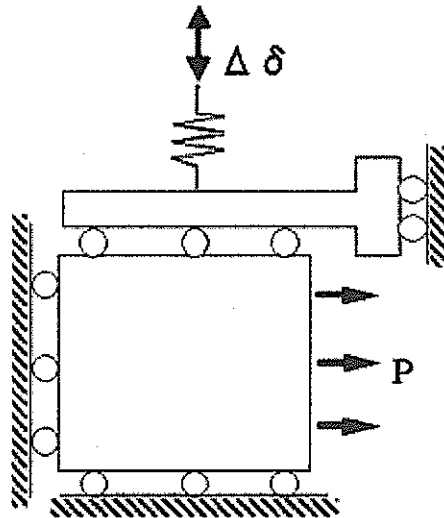


図14 非弾性解析設計

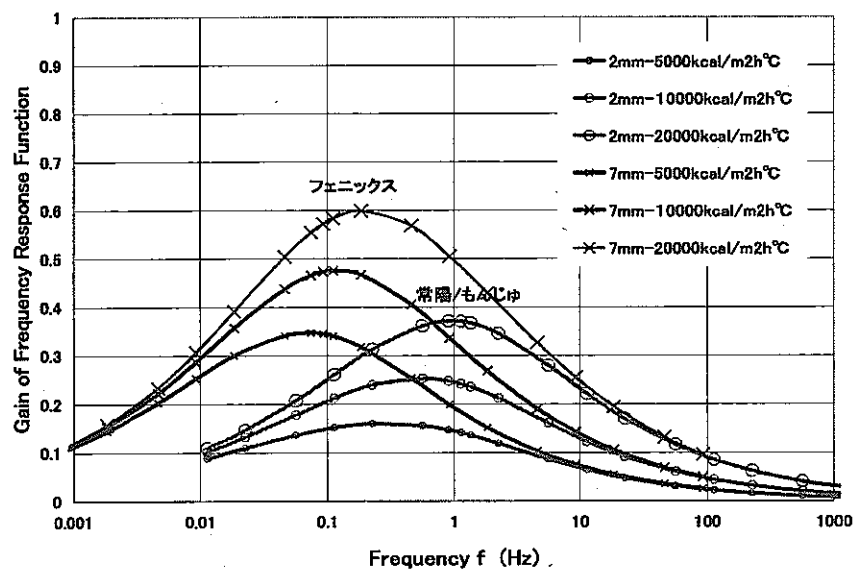
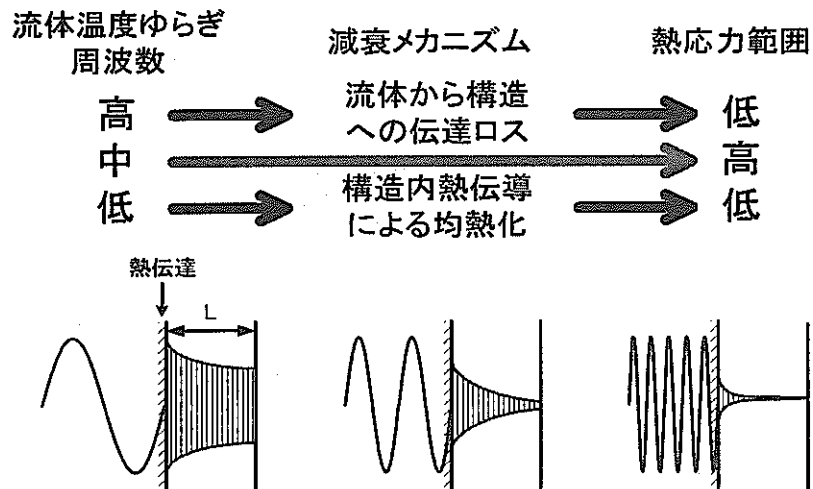
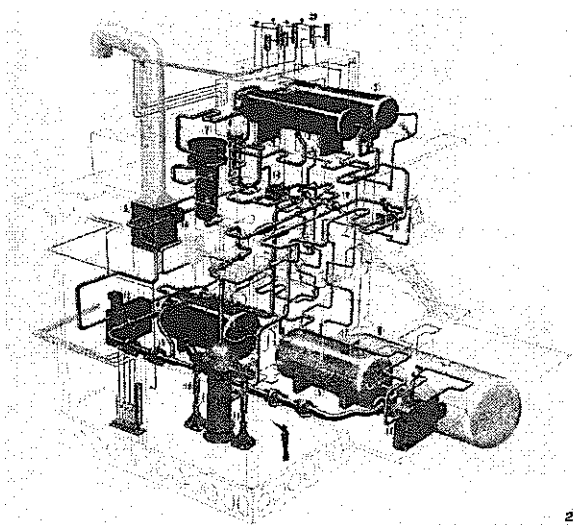


図15 周波数応答関数によるサーマルストライピング評価



周波数制御熱疲労試験

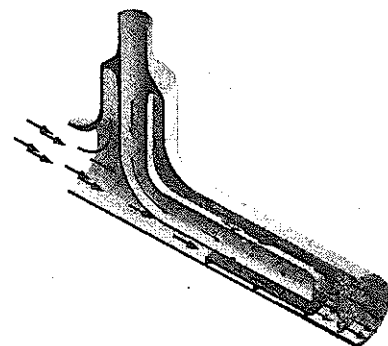
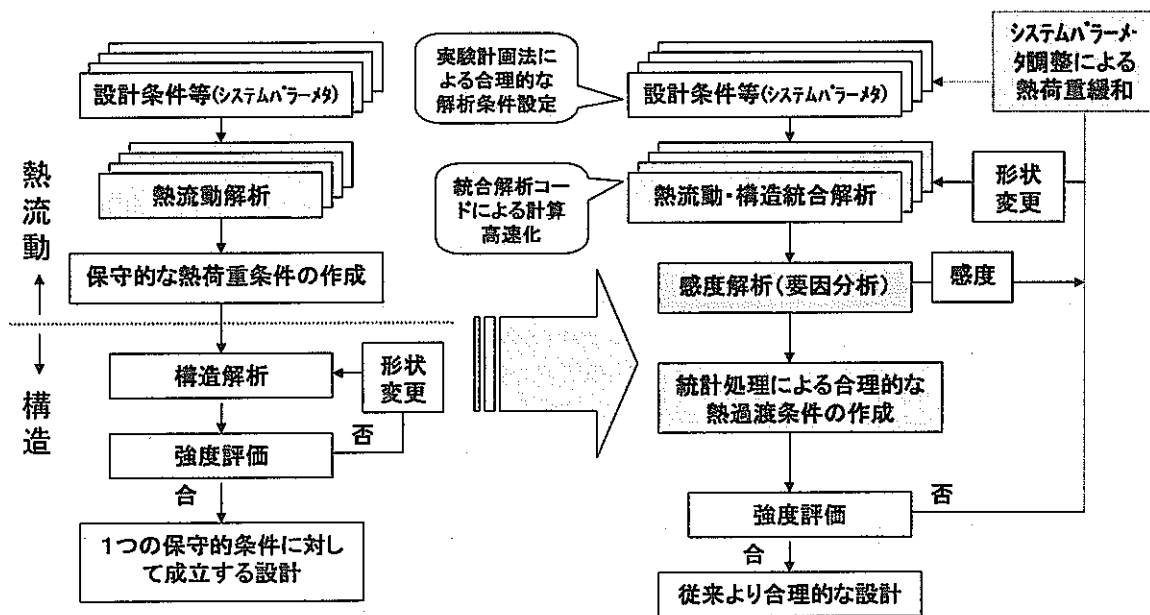


図16 TTSによるサーマルストライピング総合検証試験



従来（従来の熱流動・構造個別評価法）

ねらいとする（熱流動・構造統合評価法）

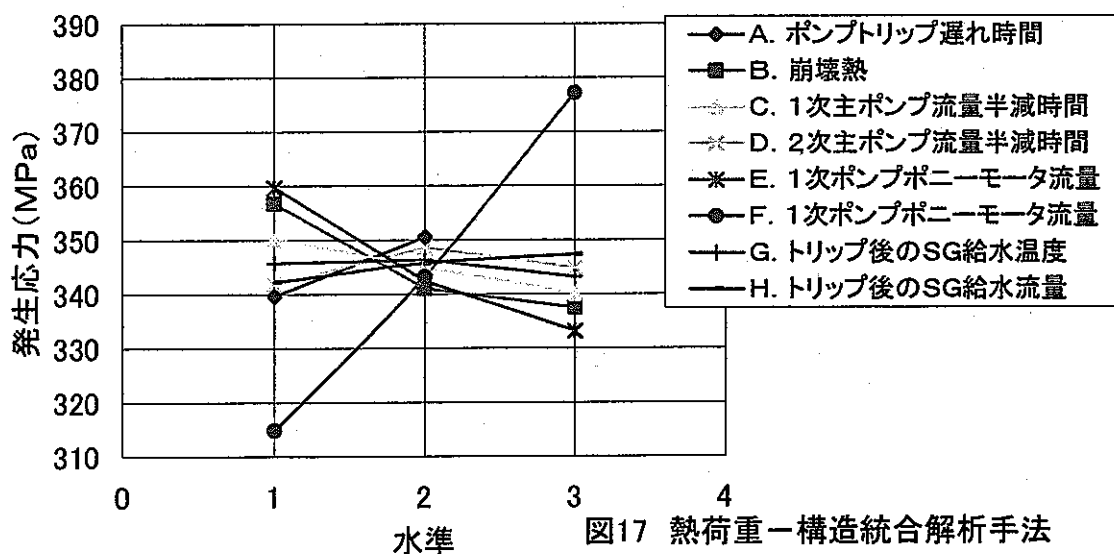
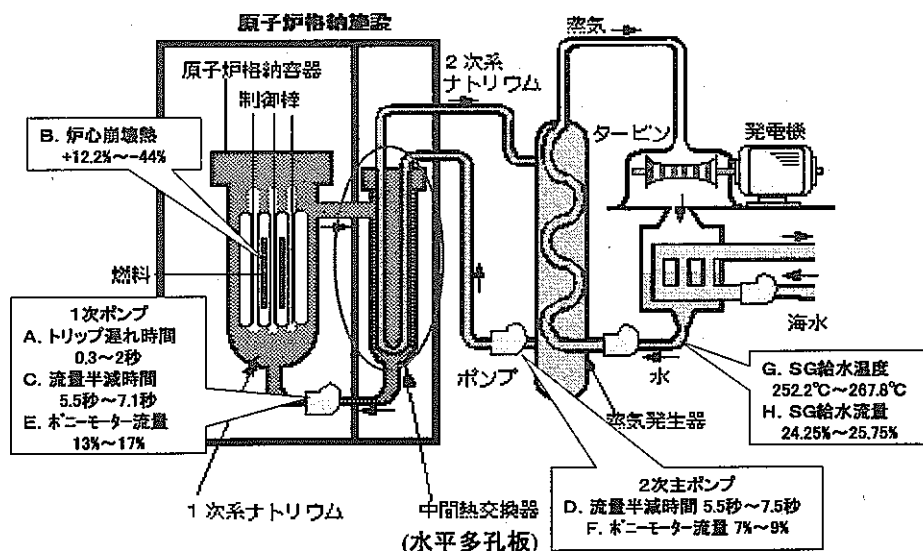


図17 熱荷重-構造統合解析手法

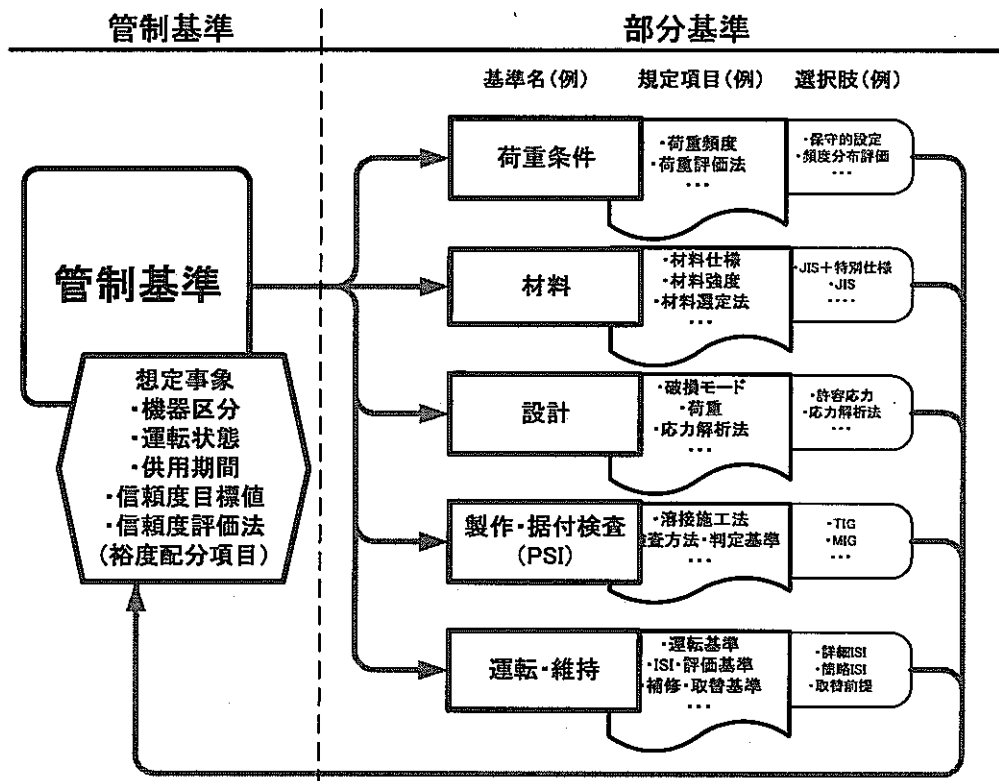
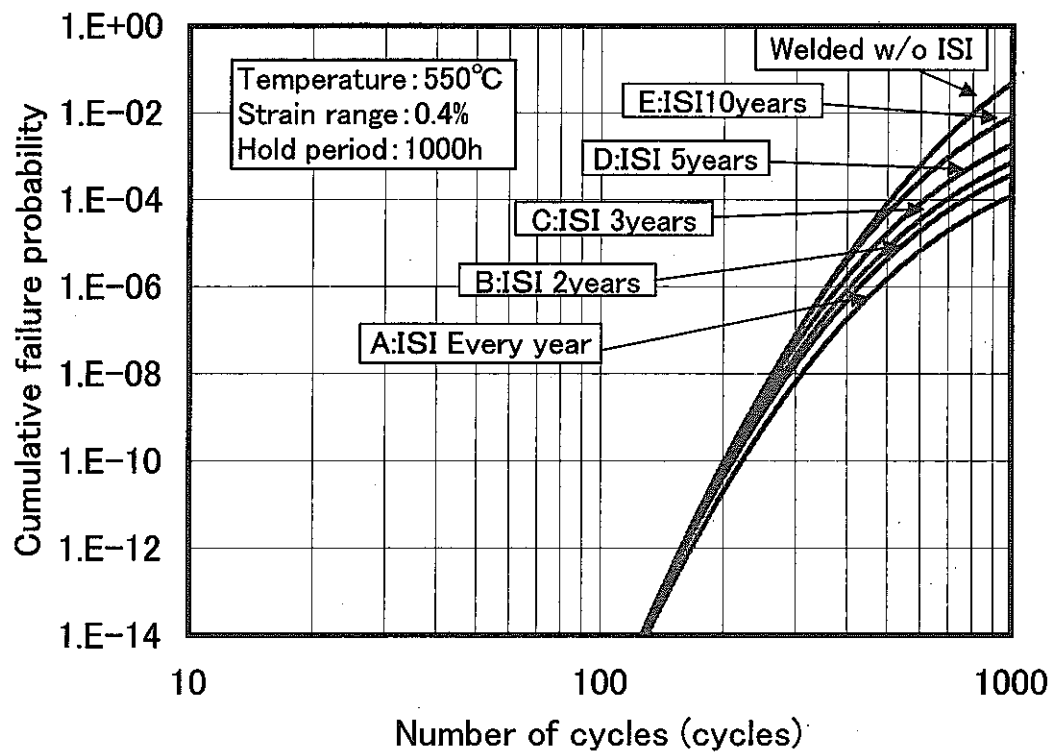


図18 システム化規格の体系

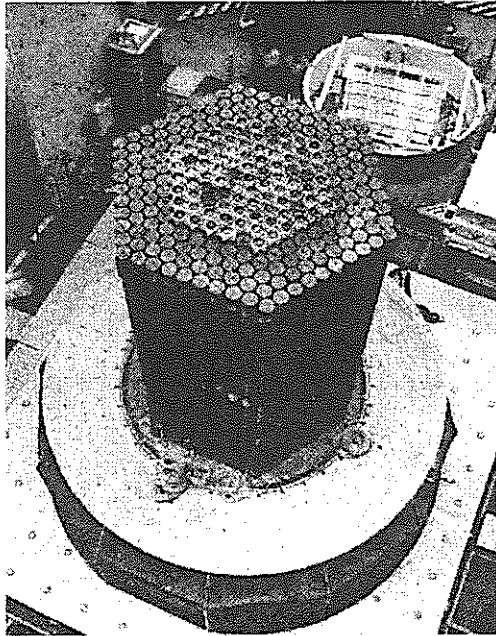


大型FBRの原子炉容器の縦溶接継手を想定し、疲労による累積破損確率を試算

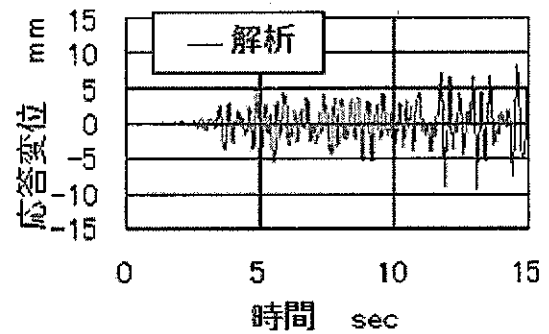
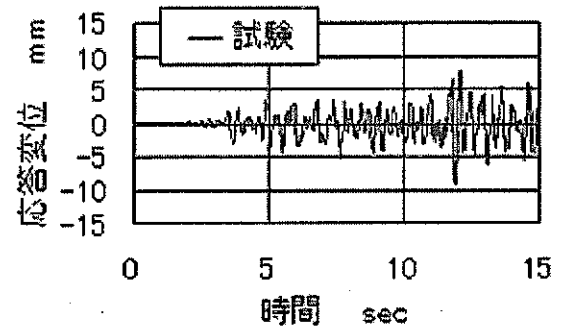


- ・供用期間中検査の実施により破損確率が有意に低減
- ・低減量は検査間隔が短いほど大きい

図19 確率論的手法による供用期間中検査の効果の評価

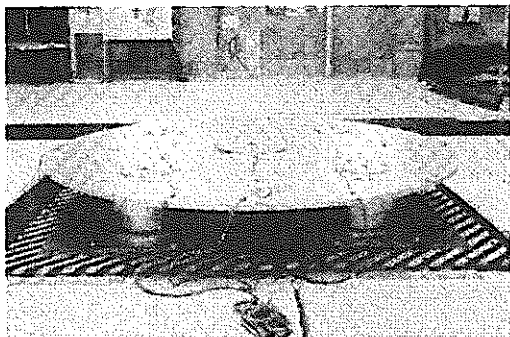


SYMPHONY 共同実験の様子
(仏 CEA サクレイ研究所にて)

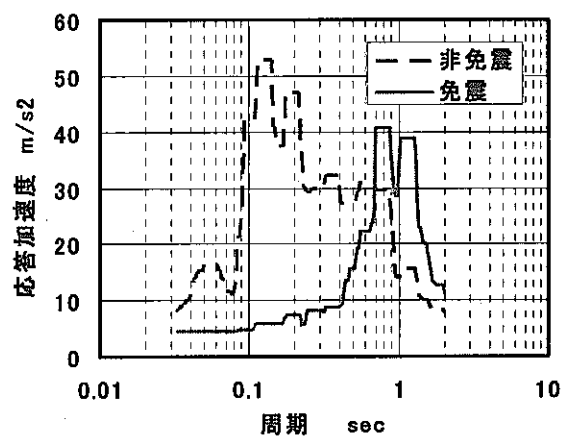


炉心中央の集合体頂部の応答変位
(6 角形試験体系、水中試験)

図20 SYMPHONY実験とFINASによる実験解析結果



縮小モデル試験の様子



機器上下免震の効果
 $f_v=1.0\text{Hz}$, $h=20\%$

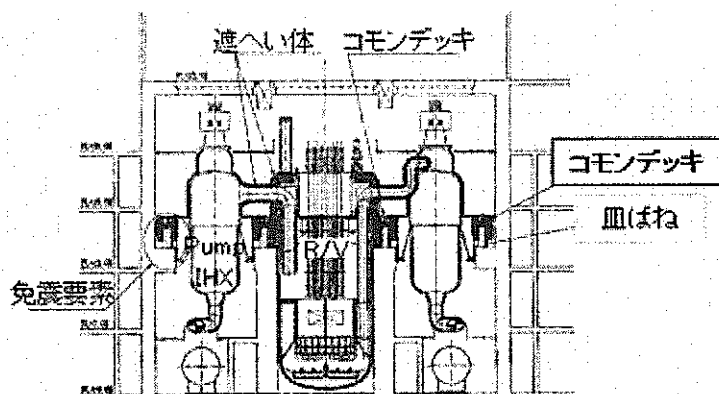
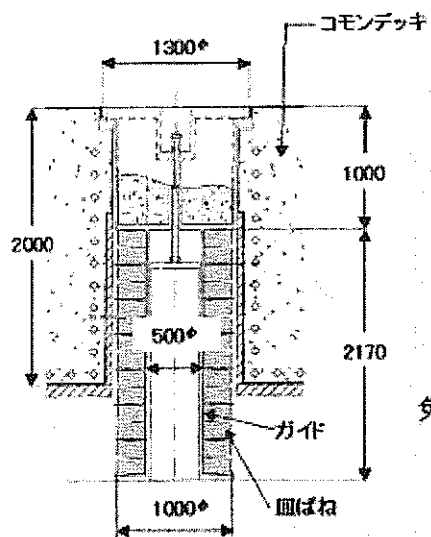


図21 コモンデッキ機器上下免震構造概念

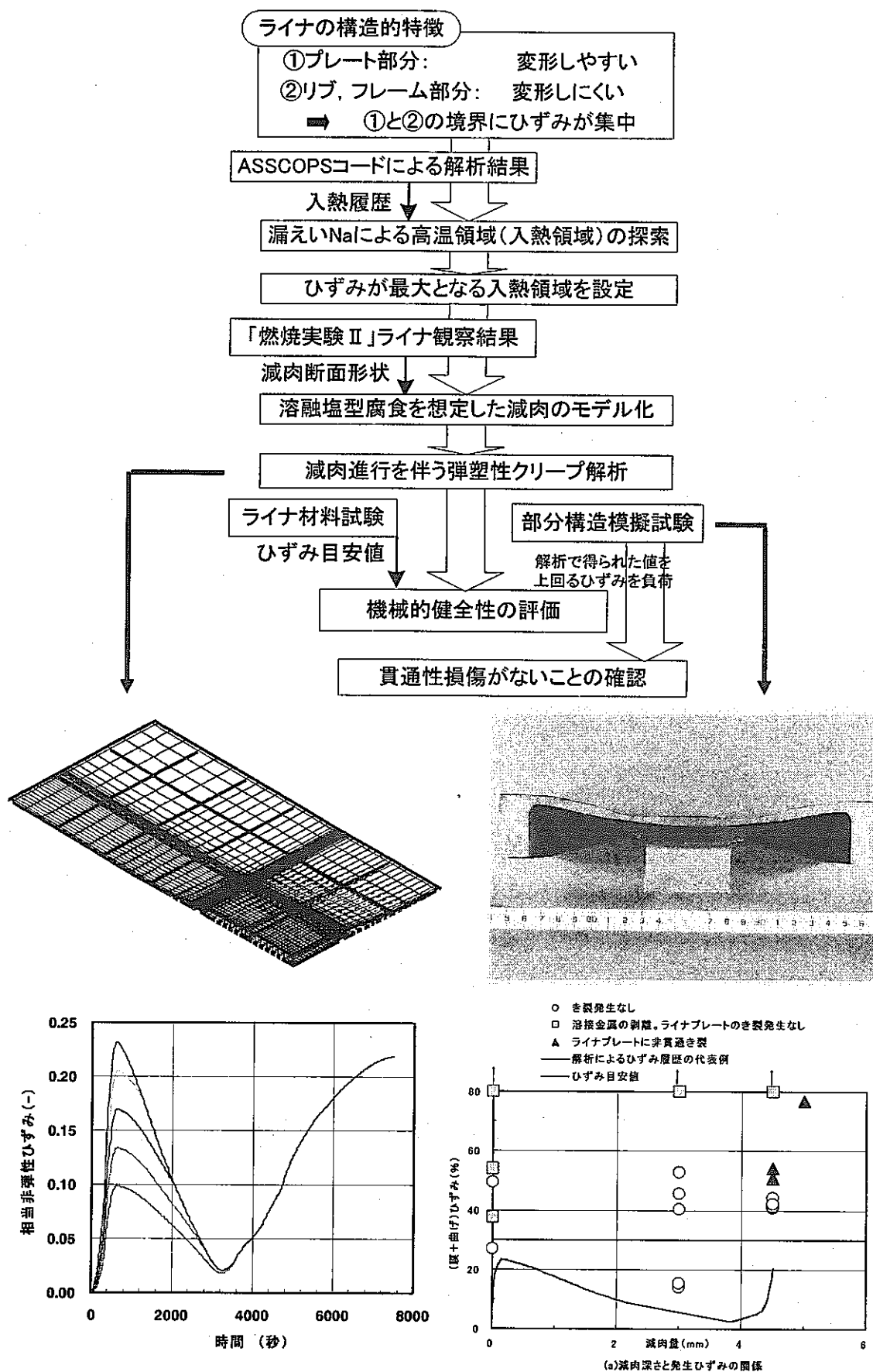


図22 ライナの機械的健全性評価

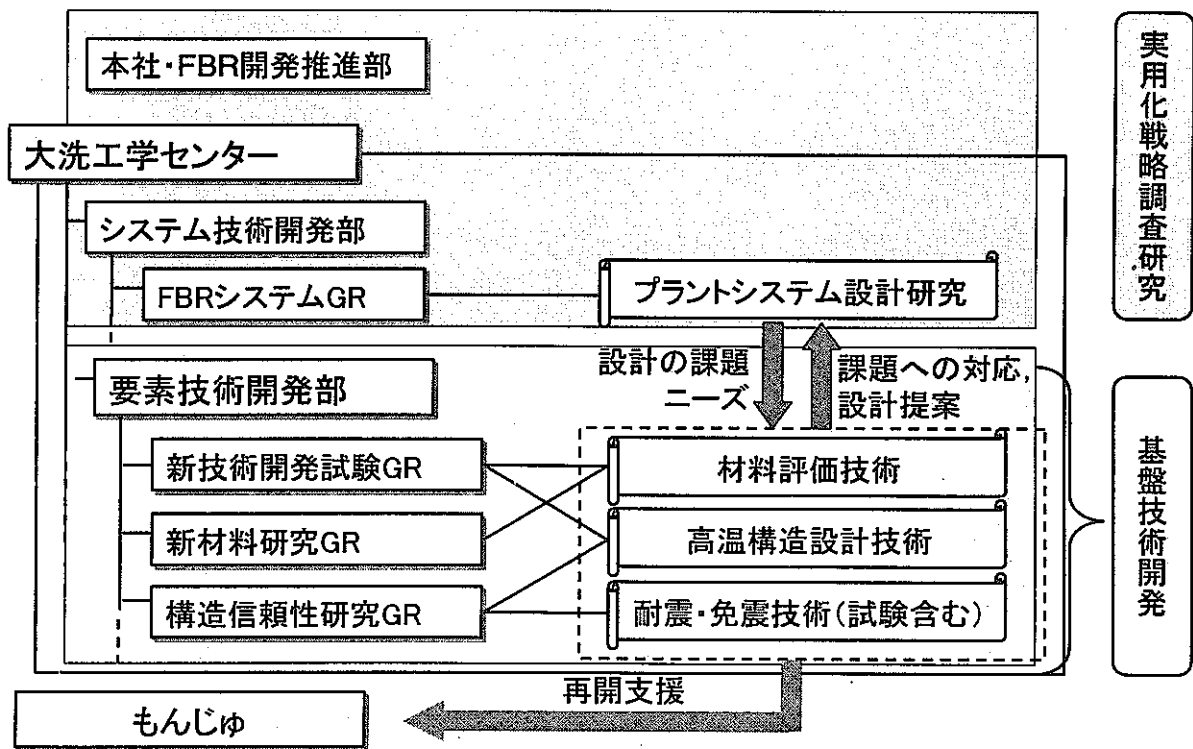


図23 研究開発の実施体制

本資料は、課題評価委員会での
意見などにより改訂したもので
ある。

中間評価課題：「高速増殖炉の機器構造材料研究開発」

課題評価委員会からの質問に対する回答

(補足説明資料)

**平成14年11月
(平成15年3月改訂)**

核燃料サイクル開発機構

1. 研究開発の目的・意義

Q1-1

OHP5頁 熱応力を許容する設計とすると熱のひずみ(周方向)による容器のシール性、ボルトの健全性などが気になってくる。これに限らず構造材料の分野とプラントの成立性、健全性、検査点検などとの関連する課題の検討はどうするのか。

【A1-1】

ご指摘のとおり、周方向温度分布による熱ひずみ(ゆがみ)は容器の設計に際して考慮すべき重要な事項のひとつです。周方向温度分布が生じる典型例は、例えば遮蔽プラグと原子炉容器の間の狭いアニュラス部で、カバーガスの自然対流によって温度分布が生じることがあります。大洗工学センターにおいて、過去にもんじゅの各種機器のナトリウム中確証試験を実施していた際に、このような現象が生じ、対策を検討しました。もんじゅでは、その経験を活かして、遮蔽プラグと容器の隙間に対流防止板を設置するなどの設計対応をとっています。ナトリウムポンプについても、同様の対処を行っています。このような設計対応は、当然、今後の大型ナトリウム冷却炉においても注意が必要と考えています。

なお、熱応力全般については、上記の例のように「設計対応などによって回避可能、あるいは回避すべき熱応力」と、次に述べますトリップ時の温度成層化や過渡時の熱応力のように「不可避免的に生じる熱応力」とがあります。後者については、形状の工夫によって熱応力を低減する設計努力は必要ですが、健全性の観点から正確な評価が重要と考えています。

プラントの成立性、検査点検などとの関連につきましては、例えば LBB(破断前漏えい)の評価において、限界き裂寸法と漏えい検出能力とが密接に関連するなどの例があります。また、溶接部の評価も検査における欠陥検出精度との関連において行うものと考えています。さらに、今後の方向性として、システム化規格のように設計、建設、検査、運転維持のライフサイクルを包括的に管理する体系の構築を目指しております。

Q1-2

実用化戦略調査研究とそれを支える基盤研究とがあるようですが、どの部分が実用化戦略調査研究で、相互の関係はどうなっているのでしょうか

【A1-2】

基本的に、評価の対象としてご報告した内容は、「基盤研究」として位置づけているものです。ただし、例えば 12Cr 鋼開発や鉛ビスマス腐食、並びに機器上下免震のように、実用化戦略調査研究第2期への直接的反映を意図した研究と、例えば材料損傷定量化のように基礎基盤的性格が強いものがあります。本分野の、実用化戦略調査研究との関係につきましては、OHPの4ページ、34ページをご参照下さい。

Q1-3

現時点で 13 年度までと 14 年度から 17 年度までに分けて課題評価を受けた理由を明示しておいて欲しい。

【A1-3】

サイクル機構では、平成15年度までを目処に、すべての研究開発課題に対し中間評価を受ける計画で進めています。当課題については、実用化戦略調査研究がフェーズ1から2に移行した平成 13 年度に中間評価を受けるべきでしたが、平成13年度での評価課題数が多く、平成 14 年度にずれ込みました。

2. 研究開発目標

Q2-1

流動に伴う熱応力分布の予測は複雑なので通常はなるべく等温になるよう、或いは熱応力が発生しないよう構造物を設計するが、大型の機器や配管の設計で流動に伴う熱応力分布の発生を許容し、それを解析で評価して実際に作った例は過去にどんなものがあるか(他分野も含めて、ないから駄目というわけではない)。

【A2-1】

高速炉における代表例とし原子炉容器が挙げられます。炉心の出入口温度差が 150℃以上と大きく、原子炉容器の炉心上部には大きなプレナム空間があることから、原子炉トリップ時等の低流速条件下では炉上部に浮力による温度成層界面が生じます。このため、もんじゅの原子炉容器の設計に際しては、熱流動試験と解析から温度分布を予測し、成層界面の温度勾配を保守的に見積もった熱荷重に対して健全性が保たれるようにしています。この点は、(ナトリウム漏えい事故で中断していますが)もんじゅの総合機能試験においても重要な試験項目として挙げられています。

また、実用化戦略調査研究におけるナトリウム冷却炉の設計では、原子炉容器及びホットレグ配管の水平部における温度成層化に対する健全性の検討も実施しています。

Q2-2

材料損傷定量化技術の開発対象は、316FR 鋼と 9Cr のように見えますが、今後の開発は 12Cr とするべきではありませんか。

【A2-2】

ご指摘のとおり、これまでは、316FR と改良 9Cr 鋼を対象として研究開発を行ってきましたが、今後の開発においては 12Cr 鋼も主要な対象としてまいります。その際、これまでに得られた 9Cr 鋼の知見は有効に反映できるものと考えております(後述の、得られた成果に関するご質問への回答も参照ください)。また、316FR については、ナトリウム冷却炉

の原子炉容器への使用が計画されており、今後も研究の対象とする計画です。

Q2-3

上記(Q2-2)技術開発は例えばどういう部位に適用すると、どういう御利益が得られると考えておられるのでしょうか。

【A2-3】

今後、プラントは長寿命設計が指向され、例えば実用化戦略調査研究では 60 年寿命を目指しています。その場合、高温での長時間健全性の確保が極めて重要な高速炉では、試験可能な時間(最も長いデータで、10 年程度)からこういった長時間の健全性を評価する必要がありますが、その際に、材料の損傷機構に基づく評価技術は、このような寿命の外挿評価に物理的な根拠を与えるものです。

Q2-4

終りのない研究にならないために、材料評価技術、材料開発、高温構造設計技術に関する研究開発のロードマップは示せないでしょうか。炉型ごとに成立に最低限必要な達成目標、さらにその上の達成目標というようにレベル別になっているといいと思います。

【A2-4】

評価意見と解しますので、別資料(サイクル機構の見解)において回答します。

Q2-5

平成 14 年度からの計画について、材料、高温構造設計、耐震の課題について、目的、17 年度までに達成する具体的目標、具体的研究計画を示して欲しい。(評価者に理解できるかどうかは別としてこれだけの資料を提出して評価を受けたものである、といえることが大切と考える)

最終目標とそれが達成されるのはいつ頃かが分かるようにして欲しい。

【A2-5】

平成14年度第2回委員会資料 3(研究開発課題説明資料)をご参照ください。

3. 研究開発計画

Q3-1

OHPP.33 上下免震構造の研究が挙げられているが既に多く実施例がある水平 免震と組み合わせた時の問題点の検討はどうなっているか。土木分野の成果との連携はどのようになされるのか。

【A3-1】

機器上下免震は、原子炉建物全体の水平免震との組合せを前提にしています。その際、原子炉容器等を支持するコモンデッキには(水平免震によって低減しているとはいえ)

水平荷重が作用するので、コモンデッキの上下変位を許容しながら、この水平荷重を支える構造の開発がポイントのひとつになります。

建築・土木分野との連携に関しては、一般建築で皿ばねを水平免震の減衰装置として利用している例があり、その設計などを十分参考にしています。

Q3-2

原子炉容器ではガンマヒーティングによる熱応力も出るがそれらも考慮するのか

【A3-2】

原子炉容器は遮蔽体を通してガンマ線等を受けるためガンマ線束密度は低く、ガンマヒーティングによる熱応力は通常無視できる程度であり、通常は考慮していません。原子炉容器の温度分布は、ナトリウムと原子炉容器間の熱伝達係数が高いため、冷却材ナトリウムの温度により支配されます。

Q3-3

材料強度評価技術で今後「超高サイクル疲労試験に着手する」となっていますが、どの部位のどういう材料を対象としたものでしょうか

【A3-3】

超高サイクル疲労の原因としては、サーマルストライピングなどの高サイクル熱疲労や、流力振動に代表される振動荷重が考えられます。構造部位としては、前者については配管合流部や炉心上部機構、後者については温度計や枝配管などが考えられます。材料としては、もんじゅ及び今後のプラントの代表的構造材料である、SUS304、316FR、及び12Cr 鋼などを対象としています。

Q3-4

オーステナイト鋼以外の材料候補としてフェライト鋼の選択は自明でしょうか。材料専門家にとって自明だったとしても、これだけに絞った選択の根拠を明確にすべきだと思います。

【A3-4】

高速炉用構造材料開発は、これまで、原子炉容器や主配管などの主要構造物を対象に高温強度特性に優れるオーステナイト鋼、および蒸気発生器(SG)を主たる対象に耐SCC 性に優れるクロモリ系フェライト鋼について行ってきました。実証炉を対象とした研究開発により、将来の大型炉の炉容器、1次系への適用を目途としたオーステナイト鋼開発は、高速炉構造用 SUS316(316FR)の実用見通しを得たことで、一部の長時間材料試験を除きほぼ収束しています。一方、SG 用材料についてはほぼ 20 年前広範な調査研究に基づき絞り込みを行った改良 9Cr 鋼に比較して、近年火力での使用実績を重ねた 12Cr 鋼が耐食性の他、高速炉構造物適用に有利な幾つかの特性を有していることが明

らかとなっており、予備的な設計評価でも主たる適用対象である SG 伝熱管以外への適用による経済性向上が期待できることが示されています。このため、経済性向上に高い効果が望みうる 12Cr 鋼の FBR 適用性の確認、課題(靱性の改善等)解決のための研究開発を行うこととしおります。

Q3-5

材料損傷定量化技術は、損傷機構を解明して第一原理に基く材料設計を目指しているのか、損傷検出技術を開発して保全高度化を目指しているのか、あるいは材料試験法の改良を目指しているのかあいまいな感じがします。磁気特性の変化を見るだけでは損傷機構の解明は難しいと思いますが、最終目的は何れでしょうか。

【A3-5】

本研究の最終目的は、最適材料選択、損傷評価、寿命予測/管理、損傷検出といった一連の材料健全性維持(管理)を単数もしくは複数のパラメータにより統一的総合的に行う基盤を整備することにあります。そのため、これまで負荷形態や破断様相の特徴などにより区分されてきた損傷(塑性変形、疲労、クリープなど)進行時の金属組織の変化を定量化できる指標の検討や進行を外部から知覚できる材料基礎特性変化を探索してきました。そうした研究結果を踏まえ、現状では形態によらず損傷進行を知覚できる1つの有力な基礎特性/損傷記述パラメータとして磁気特性に注目した研究開発を実施しています。

今後、磁気特性による損傷進行の記述性(寿命予測手法、加速試験技術、損傷検知/保全技術など開発基盤)を確認しつつ、実用に際して課題となる実機環境(高温、照射、冷却材)による影響評価を行い、有効性を明らかにする計画です。

Q3-6

熱流動－構造統合解析法はサーマルストライピングのように高サイクルの現象を対象とするものではなく、運転過渡時のサーマルショックや準静的な問題を対象とするように理解しましたが正しいでしょうか。正しいとすると統合解析でサーマルストライピングを扱うようにも見えますので、対象問題の区別を明確にした方がよいと思います。

【A3-6】

熱流動－構造統合解析法は、運転過渡時のサーマルショック(原子炉設計の分野における名称は系統熱過渡)を対象としているというご理解で正しいです。サーマルストライピングと系統熱過渡は、ご指摘のとおり異なる問題です。

Q3-7

システム化規格開発では、確率論的手法や(リスクインフォームド)メンテナンスとの関連も十分考慮するべきだと考えますが、具体的にどうなっているのでしょうか。

【A3-7】

ご指摘の通り、システム化規格を開発する上で、確率論的手法やリスクインフォームドメンテナンスとの関連を考慮することは、規格を合理的かつ実効あるものとする上で、大変重要であると考えております。

システム化規格では、まず、機器構造物ごとに、リスクに対応した目標信頼度を定めます。次に、この目標信頼度をコストミニマムで実現するための、設計オプションの組み合わせを決定するための方法論を与えます。この方法論は、荷重、材料、設計、製作・検査、運転、維持にわたるオプションの組み合わせをすべて考慮した上で、ライフサイクルを通じた構造物の破損の可能性を定量的に評価できるものでなければなりません。確率論的手法は、そのきわめて有力な候補です。具体的には、クリープ疲労破損を対象とした破損確率評価法の開発に、すでに着手しております。

システム化規格の設計オプションは、維持の手法を含みます。したがって、供用期間中検査の方法・頻度や補修・交換の可否・方法などのメンテナンスに関する手法も、リスクに対応した目標信頼度に応じて決定されます。つまり、システム化規格では、自然に、リスクインフォームドメンテナンスの考え方を採用することになります。

Q3-8

実用化戦略第2期に対してどの時期にどんな成果を反映する必要があるのかを、具体的に検討しておくことが必要と思われます。たとえば、PbBi 腐食のデータは成立性の判断に必要であるが、本格的検討は選択された後でよいとされています。では、どのレベルの判断材料をいつまでに用意する計画でしょうか。

【A3-8】

PbBi 腐食については、第2期末(2005 年度末)までを目途に、酸素濃度制御技術の成立性見通しを含め代表的な国産 FBR 用材料の耐食性評価を終えるとともに、高耐食性材/腐食抑制技術開発の方向(材料組成概要、表面処理技術案など)を、開発難度を含め提示する計画としています。実用化戦略調査研究において、LBE 冷却炉が選択されれば、プラントを対象とした酸素濃度制御技術開発、耐食材/腐食抑制技術開発を本格化することになります。

Q3-9

He ガス炉の燃料被覆材(高温材料)は、各炉型の共通技術というよりも、設計概念の成立性判断に資する基礎データとなると考えるが、研究対象とならないのか。

【A3-9】

被覆粒子型燃料の被覆材料は、ご指摘のとおりヘリウムガス冷却被覆粒子燃料型炉の設計概念の成立性判断に重要な課題であり、平成 13 年度中間評価課題である「高速増

殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」において、He ガス炉を対象とした燃料分野の要素技術開発として被覆材料の基礎試験を実施しています。今回の分野「機器構造材料」における材料は、容器や配管などの構造材料を対象としていることから、被覆材についてはご報告の中に含めておりません。

Q3-10

フェライト鋼開発について、12Cr の LBB を検討することになっているが、検知性能とのバランスを考慮した開発を行う計画となっているか。

【A3-10】

12Cr 鋼の LBB に関する検討においては、LBB 評価に必要な 12Cr 鋼の材料特性を試験により取得した上で、き裂開口量を評価し、不安定破壊が生じないことおよび漏洩検知が可能であることを確認することとしています。ここで、ご指摘のように、漏洩検出器の性能を踏まえて、漏洩挙動と検出可能範囲の関係を明らかにし、この結果を最終的な LBB 成立性評価に反映する計画としております。

Q3-11

実用化戦略調査研究において、機器構造材料研究開発の各課題により設計合理化にどう貢献したか(するか)について一覧表をまとめること。

【A3-11】

別表1をご参照ください。

Q3-12

実用化戦略調査研究の経済性向上のほとんどはこの分野の成果に基づく。構造材料の研究開発成果がどの程度寄与しているかが分かる資料を作成。

【A3-12】

同じく別表1をご参照ください。

Q3-14

「今後、実用化戦略調査研究の成立性判断と絞り込みに反映する」と書かれているが、一般論であり成立性判断基準が具体的でない。実用化戦略調査研究への反映が目的として重い研究計画が具体的でない。成立性判断基準にどう寄与するかを示すべきである。

【A3-14】

具体的研究計画については、本文資料を参照ください。また、成立性判断基準への寄与については、別表2をご参照ください。

4. 研究実施体制

Q4-1

OHP38 頁 プラントメーカーとの連携はどうなっているか。例えば製作性やプラントとしての総合的検討など。

【A4-1】

プラントメーカーとは、メーカーの設計部隊及び研究所を含め、密接な連携をとっており、試験研究などについて分担（JNC からの発注などで）もいただいています。また、例えば、実際の設計における構造健全性に係る課題の摘出や、JNC で開発した手法の設計への適用性や効果、などに関するメーカーの意見を研究計画に反映してしています。

Q4-2

OHP39 頁 ロシアとの LMFBR に関する設計情報交換はないのか（ロシアは LMFBR 設計や研究開発に永年の経験がある。交流も以前よりやりやすいのでは）国際協力は外国でやっているものを受身に研究するのではなく日本として進めたいものを軸に外国と協力するとの基本的視点必要ではないか。

【A4-2】

ロシアとは、高速炉 BN-600 を用いた解体プルトニウム処分協力を通じて炉心・燃料設計や安全評価に関する共同研究を行っております。また、燃料や伝熱流動分野、運転情報、漏洩ナトリウムによる腐食、炉心変形、鉛冷却炉及び鉛ビスマス冷却炉の設計研究及び腐食等に関して情報交換を実施しています。一方、機器構造材料の分野では、現在は活動はありません。今後、まずこの分野でのロシアの技術の現状、レベルの把握に努め、魅力のある技術があれば具体的な情報交換などを進めていきたいと考えます。

またご指摘のように、国際協力については我国の今後の FBR 開発において必要と考えられる研究を効率的に実施するために有効に活用することを基本としております。海外の研究機関と実施している研究協力についても、今後ともこれを基本的視点とします。

Q4-3

効率的な研究実施の観点から、特に 12Cr 鋼の材料データについては電中研と分担実施することが適切と思われますが、基本的にどういう分担で実施することとされておられるのでしょうか。

【A4-3】

電中研殿とは、実用化戦略調査研究全体に関して研究協力の枠組みが構築されており、その一環として、12Cr 鋼のデータ取得についても重複や欠落がないよう、試験計画の策定に際して協議をさせて頂いています。また、試験データの共有化をはかり、効率的な研究開発を進めることとしています。

Q4-4

計画全体に対して資金と要員は厳しいような印象を受けますが、内訳が出ていないので判断しかねます。

予算について、三つの分野毎に分けるとか、項目別に示す等工夫して出すこと。また過去の大きなテーマにどれくらい資金を費やしたかが分かれば比較が可能と思われることから、事例として出すこと。

【A4-4】

分野毎の資金の内訳は、概略以下のとおりです。

これまで(総額約 47 億): 材料(約 17 億), 構造(約 26 億), 耐震(約 3 億)

今後 (総額約 27 億): 材料(約 11 億), 構造(約 14 億), 耐震(約 2 億)

注;四捨五入の関係で内訳の和と総額は一致しません。

(参考)

安全研究:

これまでの 5 年間(平成 8 年度~12 年度): 約 107 億円

今後の 5 年間 (平成 13 年度~17 年度): 約 75 億円

炉心・燃料及び常陽:

	研究開発関連(内常陽 MKIII 改造)	施設運転費
これまでの 5 年間(平成 8 年度~12 年度):	約 103 億円(約 47 億円)	約 229 億円
今後の 5 年間 (平成 13 年度~17 年度):	約 118 億円(約 56 億円)	約 211 億円

5. 研究成果

①得られた成果の内容

Q5-①-1

外国より進んでいるところは何か、外国が取り入れた成果はあるか。

【回答】

以下、いくつかの代表例を示します。

(外国より進んでいること)

- ・ 高温構造設計に関してクリープ疲労評価法や、弾性解析に基づくラチェット評価法などは、ASME や RCC-MR(仏)の基準より合理性、精緻性の点でかなり進んでいる。
- ・ 設計基準に基本的に使用期間が重要となる環境効果評価を取り入れているところなどは先進的であって、かつ実用的である。
- ・ 3次元免震構造を具体的に開発しているのは、日本のみである。

(外国が取り入れた成果)

- ・ 高温構造の非弾性挙動を弾性解析結果から予測する方法は日本が最も進んでいる。具体例として、もんじゅの基準で提案され実証炉基準で高度化した、弾性追従係数を

用いて弾性解析の結果から簡易に弾塑性クリープ挙動を評価する方法は、フランスの構造設計基準 RCC—MR と英国の健全性評価基準 R5 に取り入れられた。

- ・ 流体分野と構造分野の境界領域である熱荷重評価法の研究は日本がはじめたもので先行している。初期の成果である周波数応答関数を利用したサーマルストライピングに対する熱応力の評価法は、フランスにおいて軽水炉の貫通き裂の評価に使用された。

Q5-①-2

材料損傷定量化技術の内、9Cr 鋼の結果は 12Cr に外挿できると考えられるのでしょうか

【A5-①-2】

12Cr 鋼, 改良 9Cr 鋼ともに高クロムフェライト鋼であり, 改良 9Cr 鋼に関するこれまでの知見, 成果は 12Cr を対象とした研究においても十分反映できるものと考えています。

Q5-①-3

開発された耐震解析技術は、稠密格子を使った炉心など実用化戦略で検討対象となる全てのアイディアに対応できるのでしょうか。

【A5-①-3】

ガス炉で検討されている被覆粒子燃料などの特殊な場合を除き、棒状の燃料集合体が密に配置される炉心体系については、基本的に適用可能な解析技術です。

Q5-①-4

三次元免震要素の皿バネについて、メンテナンス(不具合時の交換も含めて)の検討、耐放射線の検討(一次系の機器の傍に設置)が必要ではないか。

【A5-①-4】

メンテナンスの検討については、方法、頻度、交換期間などについて具体化していくこととしています。現時点では、必要に応じた監視・点検・交換が可能な構造(免震要素、減衰要素が原子炉容器据え付け床から引き抜ける)とすることを条件に構造の具体化の検討を進めています。

耐放射線については、設置位置の線量が比較的高いことを意識し、免震構造要素は金属製の材料だけで構成することとしています。原子炉容器の外であることから、線量は金属の強度特性に著しい影響を及ぼすレベルではないものの、免震要素の周りはメンテナンス時に人が立ち入りできるように遮へいすることを計画しています。耐放射線につきましては、次の PhaseⅢで詳細な検討をすることとします。

Q5-①-5

皿バネとはどういうものか図等で示すこと。

【A5-①-5】

別図1-1、2をご参照ください。

Q5-①-6

OHP 集 p21:図の CEA 評価と JNC 評価で違いがあるのは、またその違いに対する評価はどうか。

【A5-①-6】

CEA 評価と JNC 評価に違いがある理由は、疲労損傷評価に使用するひずみ範囲評価法と、クリープ損傷計算に使用する応力の評価法の違いによるものです。両者共 CEA に比べて JNC の方法が合理的な評価結果を与えることから、最終的なクリープ疲労損傷の評価結果も試験結果により近い合理的なものとなります。

違いに対する評価ですが、CEA に比べて JNC の方法が合理的である理由は破損現象のメカニズムをより忠実にモデル化しているためです。設計に対する影響ですが、JNC 法の方が設計の自由度が広く、プラントの経済性・信頼性向上に寄与できます。

②実用化との関係

Q5-②-1

成果は実用化にいたるまでのどの位置にあるかが分かるようにして欲しい。

【A5-②-1】

別表3をご参照ください。

③得られた成果の普及、公開

Q5-③-1

材料データベースの公開についてはどのようなお考えでしょうか。新材料では特許との関係もありますが、他機関との協力で行われている大規模材料データベース構築プロジェクトとの関係はどうでしょうか。

【A5-③-1】

基本的にはこれまで構築してきたデータベースは公開する方向で検討しています。これまでも FBR 開発関係機関とはデータベース共有を進めており、今後さらに対象機関を広げることを検討します。しかしながら、一般工業分野で使用される種々の鋼種に比べればかなり限定した、かつ特化した仕様を有する材料が少なくないことから、大規模材料データベース構築プロジェクトに関しては、プロバイダ(データ提供)としての参画に留まる

ものと予想しています。

Q5-③-2

成果の普及について、エネルギー産業以外に使えるという事例を示すべきである。

【A5-③-1】

現状では、エネルギー産業以外の分野への成果の反映はFINASを具体例として挙げる
ことができます。一般論として、熱応力に関するこれまでの研究の成果は、例えば半導体
の熱応力設計への応用が十分可能と考えますが、具体的事例はありません。また、Na腐
食に関しては、最近、染料の開発への応用の可能性を調査しているようです。

6. 今後の展開

Q6

OHP34頁の各種炉型への技術の適用性として、本技術開発を進める上でガス冷却炉特
有のものとして考慮すべき点はないのか。

【A6】

別図2をご参照ください。

7. その他

Q7-1

設計品質を含めたマネジメントの問題は今や技術の問題そのものですので、誰か(人文
系の人間)がやってくれるだろうなどと考えずに技術的研究課題として取り組んでください。
また、成果は学会等でちゃんと発表してください。これまで「技術的問題を中心に報告す
るので省略」が多すぎます。

【A7-1】

本件については、(質問ではなく意見、と理解しますので)後日評価結果に対する対処
とあわせて回答させていただきます。

Q7-2

実用化におけるコスト分析ではどのような結果か。

【A7-2】

別図3-1、2をご参照ください。

Q7-3

国内外の研究協力について、協力相手との具体的な役割分担、費用の発生の有無(発生
を伴う場合の額)を、協力毎に分かるようにして欲しい。

【A7-3】

別表4をご参照ください。

Q7-4

研究資金p37で、合計のうちの FS 研究費とは何を意味するのか。FS 研究費で実施する研究項目とその他の研究費で実施する項目に違いがあるのか。

【A7-4】

「FS 研究費」は、実用化戦略調査研究費として位置付けられている予算科目のうち、機器構造材料分野の研究開発のために執行している予算を指しています。その他の研究費は、従来の基盤研究の予算の流れをくむ予算です。材料、構造、耐震の各分野で示した研究細目のうち、実用化戦略調査研究における設計成立判断や有望概念絞込みに直接反映するものは「FS 研究費」を、基盤的性格をもち、実用化戦略調査研究には間接的、長期的に反映する研究細目と試験施設の維持運営費については「その他の研究費」を充当しています。

以上

別表1 各課題の設計合理化への貢献

※ 網掛けは特に合理化効果の大きい技術を示す。

課題	設計合理化への貢献
材料評価技術	
材料強度評価技術	実証炉材料の 316FR は、もんじゅ材料の SUS304 と比較して許容値が大幅に向上。設計合理化への寄与は大きい。
FBR用フェライト鋼開発	現在の Na 冷却炉の設計(極めて短縮化された Na 配管による機器のコンパクト配置)は、フェライト鋼の適用性に左右される。その意味で設計合理化への寄与は極めて大きい。
材料損傷定量化技術	- 長期的な課題であり、実用化研究第2期での合理化への反映度合いは小さい。 - 第3期以降の設計において、長寿命設計を実現する鍵となる技術である点で、最終的には合理化への寄与は大きい。
腐食関連技術	- Na 腐食評価は、Na 冷却炉における冷却材漏えいに対する設計対応(ライナの設置など)の合理化に寄与する可能性。 - LBE 腐食は、現段階では成立性判断のためのデータ取得であり設計合理化とは別の価値。
高温構造設計技術	
構造解析技術	解析コード開発は、これを活用する設計や構造強度評価の研究開発を通じて、間接的に設計合理化に寄与。
構造強度評価技術	- 溶接部評価法の整備により、実証炉の原子炉容器を板材で製作することが可能になった(もんじゅは液面に溶接部を設けないよう、高価なリング鍛造材を使用)。 - 実用化研究では原子炉容器の簡素化(炉壁保護や液位制御を使用しない)を指向しているが、このような設計は今後の非弾性解析の実用化などにより可能になる。その意味で、設計合理化への寄与は極めて大きい。
熱荷重評価技術	- 熱荷重の評価精度向上は、(強度評価における許容値の合理化とともに)設計合理化に大きな効果を持つ。 - 熱荷重一構造統合評価法により、熱荷重に対して最適化を実現することが可能となり、将来大きな合理化効果が期待される。
システム化規格	- 長期的な課題であり、実用化研究第2期での合理化への反映度合いは小。 - 第3期以降の設計において設計から運転維持までを包括した管理とすることによる合理化を期待。
耐震設計技術	
耐震解析技術	解析法の詳細化であり、設計合理化とは別の価値。
3次元免震構造開発	3次元免震によって、プラント機器への上下動を含む地震動の劇的な緩和が見込まれるので、合理化の寄与は極めて大きい。

別表2 成立性判断基準

課題	成立性判断への寄与
材料評価技術	
材料強度評価技術	・ 実証炉材料を対象とした研究開発であり、実用化研究における候補概念の成立性判断には直接関連しない。
FBR用フェライト鋼開発	・ 現在のNa冷却炉の設計(極めて短縮化されたNa配管による機器のコンパクト配置)成立性は、フェライト鋼の適用性に左右される。フェライト鋼の適用性は、改良 9Cr 程度の延性の確保が可能か否かによる。
材料損傷定量化技術	・ 長期的な課題であり、実用化研究第2期での成立性判断には直接関連しない。
腐食関連技術	・ Na 腐食評価は主としてもんじゅ対応であり、実用化候補概念の成立性には直接関連しない。 ・ LBE腐食は、鉛ビスマス炉の成立性判断に直接関係する。技術的見通しを有する防食技術の下で、構造材腐食が構造設計上許容し得る範囲に留まるかどうか、の判断に資するデータを取得する。
高温構造設計技術	
構造解析技術	・ 実用化候補概念の成立性には関係しない。
構造強度評価技術	・ Na 冷却炉の、合理化を極限まで追求した設計の成立性、という意味において非弾性解析設計などの技術開発はプラントの成立性を左右する技術である。
熱荷重評価技術	・ 更なる合理化を目指した開発であり、現段階での Na プラントの成立性を直接左右するものではない。
システム化規格	・ 長期的な課題であり、実用化候補概念の成立性判断には直接関係しない。
耐震設計技術	
耐震解析技術	・ 解析法の詳細化であり、実用化候補概念の成立性判断には直接関連しない。実用化研究第3期以降において各候補概念の炉心構造設計が具体化した時点で、炉心の耐震成立性判断に用いることになる。
3次元免震構造開発	・ 現時点では Na 冷却炉の耐震成立性に関連。大型炉は3次元免震を前提とした設計となっている。 ・ 他の候補概念については、免震の必要性はプラント構造概念が具体化した時点で判断することになるが、鉛ビスマス炉は3次元免震が必須、との見通し。

別表3 研究開発の段階について

研究課題	
材料評価技術	
材料強度評価技術	実証炉材料に関しては、完成した技術である。
FBR用フェライト鋼開発	着手後2年目。実用化研究第2期において基本的な適用性判断。 最終的な実用化(材料強度基準の整備)は、2015年を目途。
材料損傷評価技術	基礎的研究のフェーズ。
腐食関連技術	Na腐食についてはほぼ完成、若干の補強データ取得を予定。 LBE腐食については、着手後2年目。実用化研究第2期において基本的な適用性判断。
高温構造設計技術	
構造解析技術	基本的な解析機能の点では完成している。今後、計算機技術の進歩にあわせて逐次高度化の予定。
構造強度評価技術	非弾性解析設計については、実用化第2期の期間内に完成させることを目途。
熱荷重評価技術	サーマルストライピングについては、ほぼ完成し、Na熱過渡試験での検証を残すのみ。 熱荷重-構造統合解析については、プロトタイプ段階。
システム化規格	基本的な概念を固めつつある段階。
耐震設計技術	
耐震解析技術	炉心の耐震解析については完成し、終結している。
機器上下免震開発	具体的構造概念と要素の基本的設計技術が整備された段階。今後、種々の観点からの実機適用性を高めていく。

別表4 国内外研究協力(1/2)

	内容	協力相手との具体的役割分担		費用 (百万円／年)
		JNC	先方	
[国内機関との研究協力]				
原研	照射環境における原子炉構造材料の劣化現象に関する融合研究	高速炉構造材料経年化対象材料劣化、損傷進行非破壊評価	軽水炉環境経年化対象 IASCC・極微小腐食量計測手法	発生せず ^(注)
原電	高温構造設計手法高度化及び免震技術開発に関する共同研究	要素技術開発	プラント適合性評価と基準化	発生せず
電中研	12Cr 系フェライト鋼開発及び高温構造健全性に関する情報交換	FBR 仕様 12Cr 鋼の開発と材料特性評価	既存火力用 12Cr 鋼の材料特性評価	発生せず
物材機構	FBR 材料の高温強度に関する情報交換	FBR 用鉄鋼材料に関する材料データを含む情報交換であり、JNC、物材機構に明確な役割分担はない		発生せず
東北大	最適 FBR 用 Fe-Cr 系合金開発に資する基礎データ(主要元素の効果)取得	高純度合金の高温強度評価	超高純度合金製作技術開発・材料基礎物性評価(先行基礎)	1 客員研究員
新潟大	液相 Na 化合物の分析技術開発	高純度 NaFe 複合酸化物合成技術開発、熱力学特性評価	腐食性高温融体のラマン分光分析技術開発(先行基礎)	1 客員研究員
東大	材料の劣化過程を考慮した構造解析/構造健全性予測コード開発	損傷組織データベース作成、数値解析モデル開発	マルチレベルプログラミング技術開発(JNC 公募型)	5
東工大	流動鉛ビスマス共晶合金制御技術開発	東工大知見に基づく酸素制御を中心とした技術開発	流動 LBE 運転制御技術おける課題抽出	5
静岡理工科大	低温作動アルカリメタル熱電変換システム開発	AMTEC システムの Na 中耐久性試験	AMTEC の低温化に向けた最適幾何学的配置設計・試作	1 客員研究員
名古屋大	液体 LBE 中の主要元素の溶解度評価	LBE 中の液体金属腐食機構の詳細解明	LBE 中の主要合金元素溶解度データ取得および信頼性評価	2
関西大学	LBE 中の酸素濃度が溶解度に与える効果評価		LBE 中の元素溶解度に与える環境因子評価	1

注:費用は、研究協力のために発生するものを記入。本来業務の予算は計上していない。

国内外研究協力(2/2)

	内容	協力相手との具体的役割分担		費用 (百万円/年)
		JNC	先方	
[海外機関との研究協力]				
IAEA:	Phenix 配管破損に関するベンチマーク研究	ベンチマーク解析を実施し、互いに手法及と結果を報告		発生せず
OECD/NEA	配管の熱疲労に関するベンチマーク研究	ベンチマーク解析を実施し、互いに手法及と結果を報告		発生せず
仏国 CEA	高温構造健全性などに関する研究協力	双方の実験データを素材としたベンチマーク研究, 情報交換, 研究者の相互派遣など。定期的に情報交換会合を開催。		発生せず
米国 DOE ^(注)	鉛ビスマスの利用技術に関する情報交換	鉛ビスマスの利用技術に関する情報交換であり, JNC、米国側参加機関に明確な役割分担はない		発生せず
米国 MIT	鉛ビスマスの腐食に関する研究委託	腐食機構評価・耐食技術検討	高耐食性材設計に資する基礎データ取得	5
独国 FZK	鉛ビスマスの腐食に関する共同研究	腐食試験片分析および耐食性評価	停留および流動 LBE 中浸漬試験および試験後の材料分析	17

注: 米国側参加機関は INEEL, ANL, LANL

第1回委員会提出資料(本文)より転記

[国内機関との研究協力と貢献]

原研： 現在、照射環境における原子炉構造材料の劣化現象に関する研究について、二法人間での融合研究の計画を進めている。

原電： 原電と共同研究契約を締結したうえで、原電が経済産業省から受託している新型炉技術確証試験(内容は構造設計手法と3次元免震)について、大洗工学センターにおいてサイクル機構と電力派遣者が協力して実施している。

電中研：12Cr 鋼の基礎的材料データの整備に関して、相互補完的な試験計画となるよう調整を図るとともに、データの共有化を図ることとしている。また、主として316FRなどのクリープ疲労に関する研究についても、実用化戦略調査研究への反映の観点から密接な情報交換を行っている。

大学： サイクル機構の種々の枠組み(先行基礎工学研究, 社外公募型研究, 博士研究員制度等)を活用して、平成8年度から現在にいたるまで、累計15件の共同研究を実施している。

物質・材料機構： 旧金属材料技術研究所の時代から、FBR 材料の高温強度に関する情報交換を行っている。

[海外機関との研究協力と貢献]

IAEA: Phenix 配管破損に関するベンチマーク研究に参加(終了)。

OECD/NEA： 配管の熱疲労に関するベンチマーク研究活動に参加している。

仏国： CEA との間で、構造健全性などの分野において共同研究, 研究者の派遣(延べ5名)と受入れ(1名)を含む密接な協力関係を構築している。国際学会への共著論文投稿も多数の実績がある。

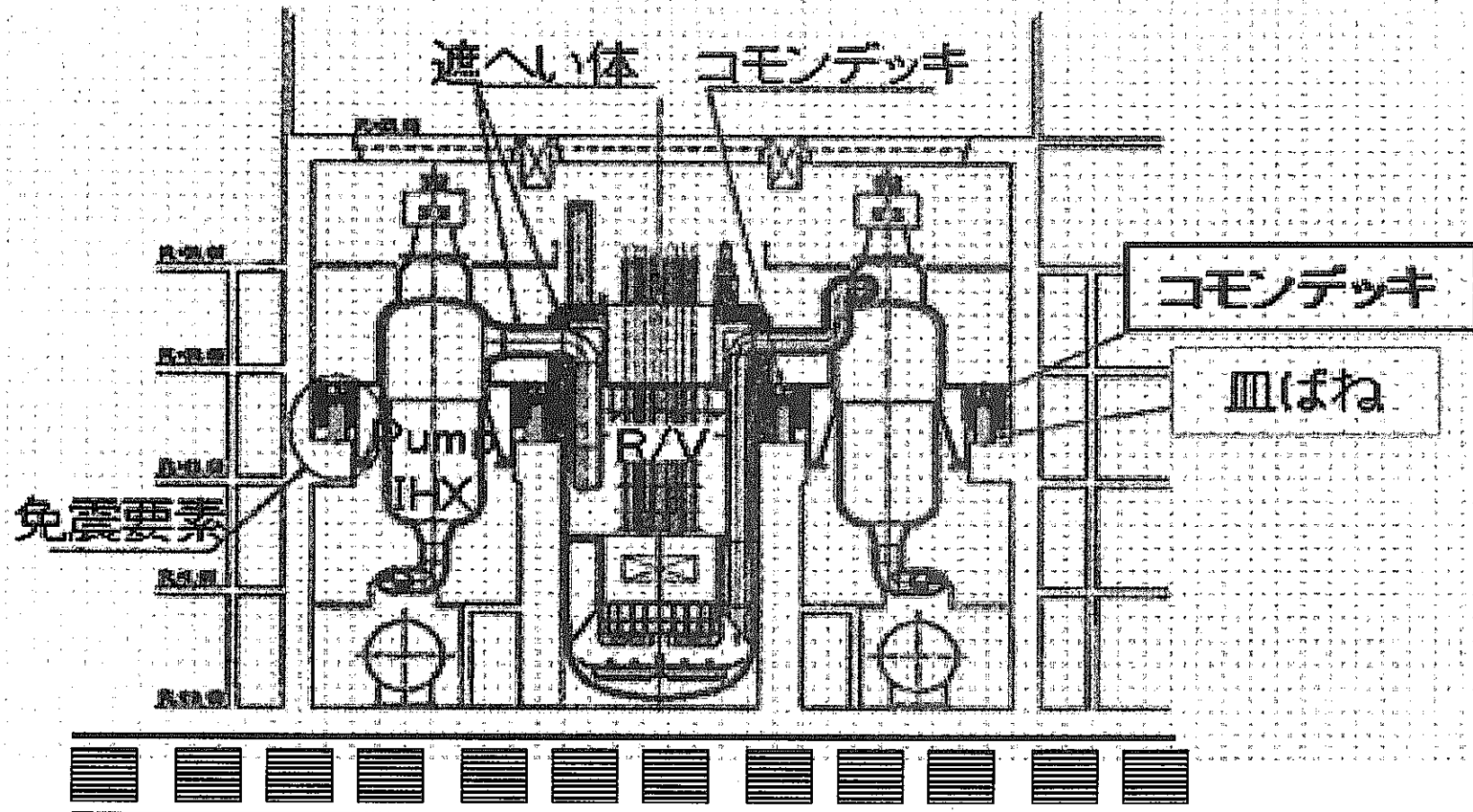
米国機械学会(ASME)： 規格委員会に参加し、リスクベース技術などに関する意見交換を行っている。

米国 DOE: 鉛ビスマスの利用技術に関する情報交換を行っている。

米国 MIT： 鉛ビスマスの腐食に関する研究に関して協力関係を構築(委託研究)。

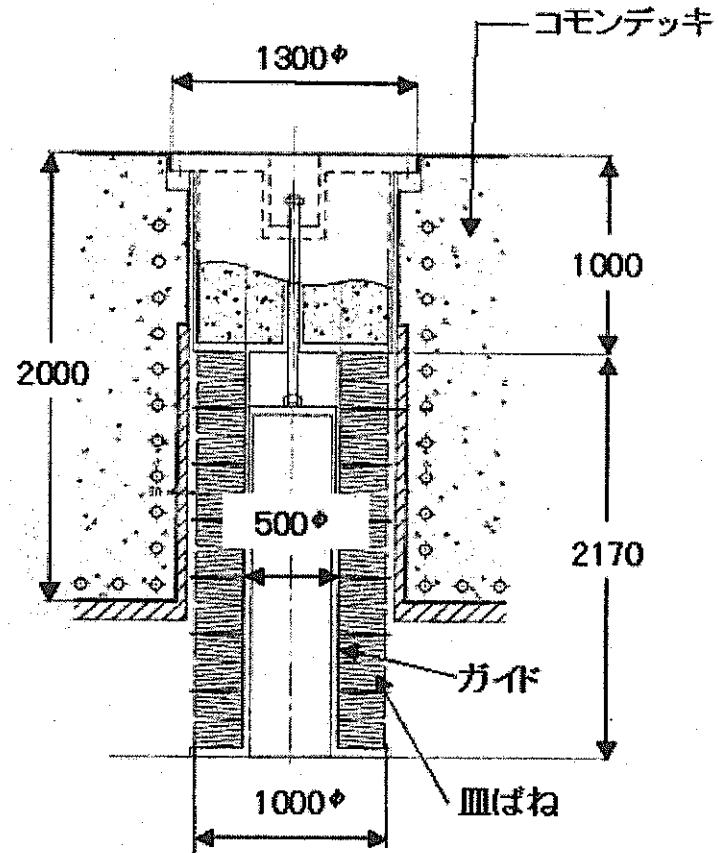
独国 FZK： 鉛ビスマスの腐食に関する研究に関して協力関係を構築(共同研究)。

別図1-1

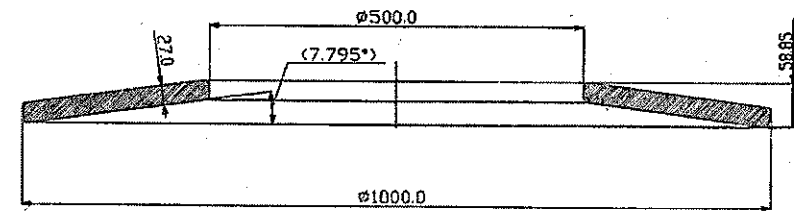


原子炉建物全体は水平免震(積層ゴム)。機器を支えるコモンデッキを、皿ばねを用いた上下免震要素で、上下に免震支持する構造。

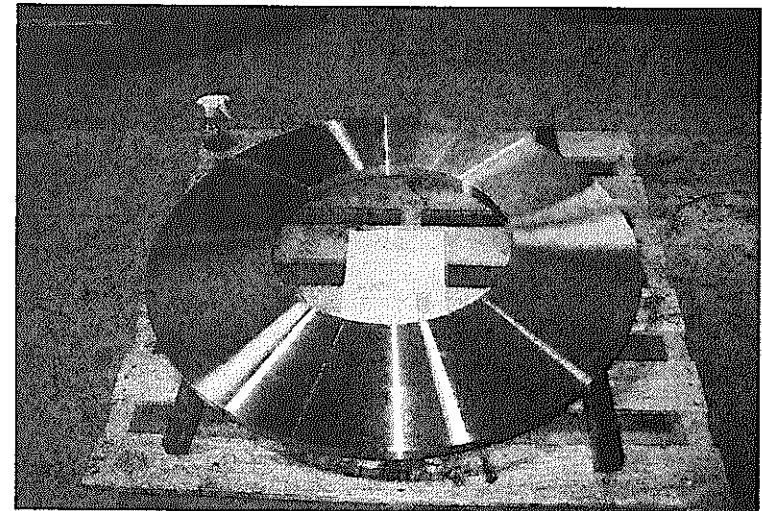
別図1-2



免震要素は、多数の皿ばねを直並列に重ねた構成とする。



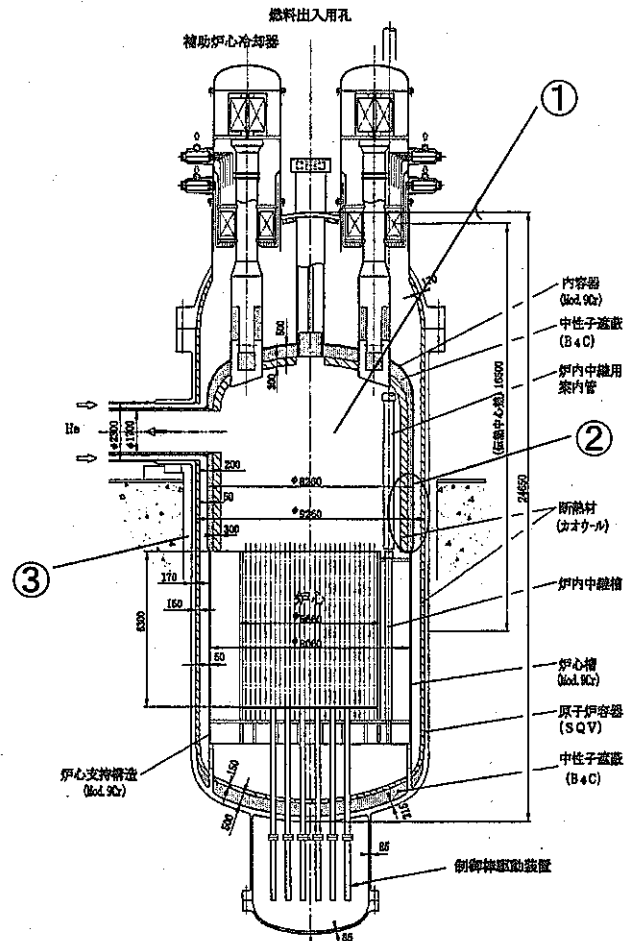
1枚の皿ばねの形状図



φ1mの皿ばねの試作状況

別図2

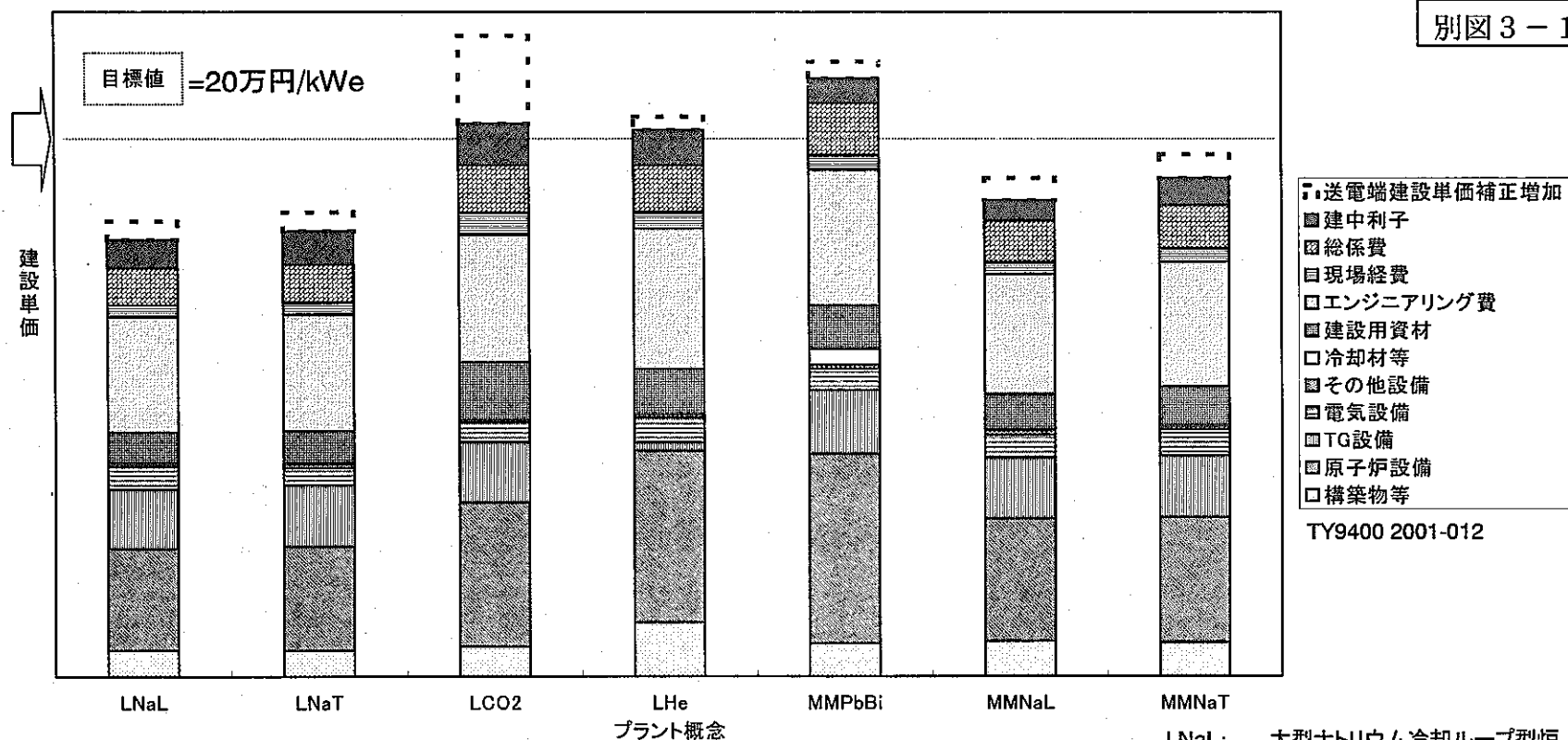
ガス炉



被覆粒子燃料He炉炉容器

- ①冷却材の原子炉出入口温度は850℃/460℃である。
- ②原子炉構造材は、内筒／断熱材／ラ付けが一体となった多層構造により、冷却材に接しない設計となっている。
- ③上記設計により定格運転時の構造材温度は375℃以下が想定されている。
- ④構造材候補である高クロム鋼および炭素鋼に対して上記温度範囲でのデータが存在することから、FS第2期の期間における新たなデータ取得は計画していない。

別図 3 - 1



○ LNaL: 大型ナトリウム冷却ループ型炉における建設単価の内訳

構築物等: 5.9、原子炉設備 23.2、TG設備 13.7、電気設備 5.1、
 建設用資材: 7.1、エンジニアリング費: 26.6、現場経費: 2.7、総係費: 8.5、建中利子: 6.5
 (原子炉設備 23.2 の主要内訳: 原子炉機器: 6.5、主冷却設備: 7.8、燃料設備: 3.1)

建設単価

LNaL: 大型ナトリウム冷却ループ型炉

LNaT: 大型ナトリウム冷却タンク型炉

LCO2: 大型炭酸ガス炉

LHe: 大型ヘリウムガス炉

MMPbBi: 中型モジュール鉛ビスマス冷却炉

MMNaL: 中型モジュールナトリウム冷却ループ型炉

MMNaT: 中型モジュールナトリウム冷却タンク型炉

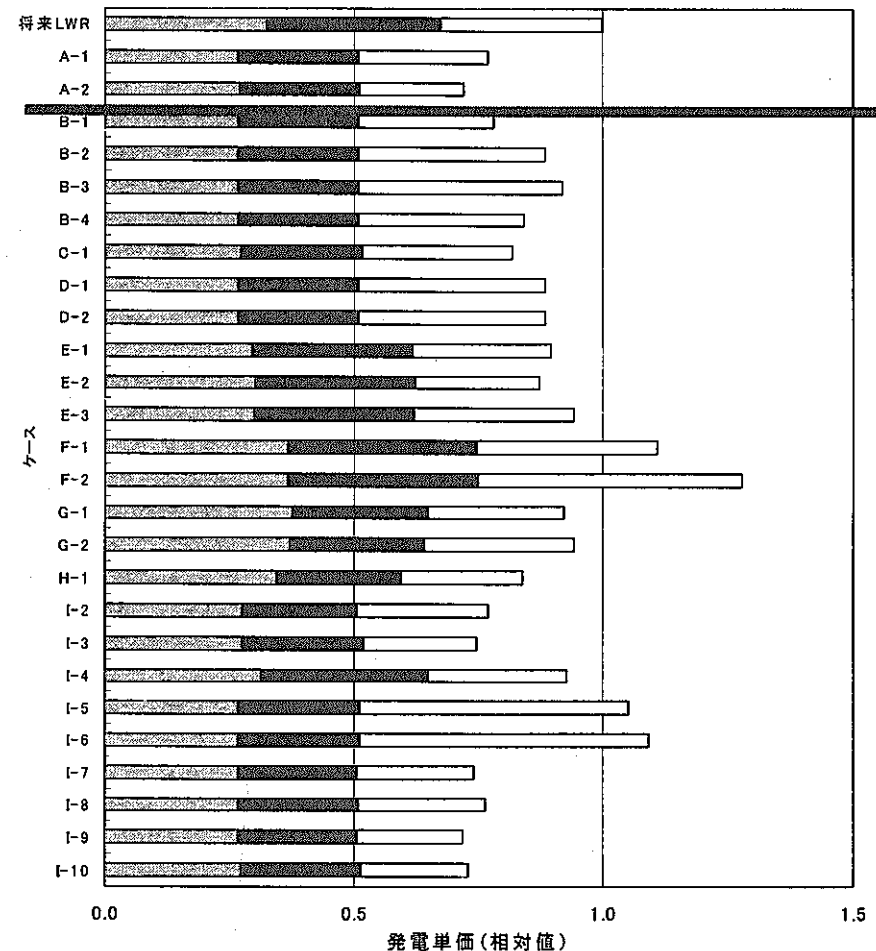
別図3-2

4.3円/kWh

ケース	FBRサイクル					FBR				再処理	
	炉型	燃料	炉心	再処理	燃料製造	炉心燃焼度 (MWd/t)	平均燃焼度 (MWd/t)	増殖比	HM(トン)	ロス率 (%)	ロス率 (%)
A-1	Na炉-プ大型	MOX	低非均質	先進型式法	酸素化ペレット法	148,800	56,300	1.24	139.3	0.2	0.1
A-2	Na炉-プ大型	MOX	均質	先進型式法	酸素化ペレット法	148,800	63,100	1.17	117.0	0.2	0.1
B-1	Na炉-プ大型	MOX	低非均質	先進型式法	外部ゲル化振動充填法	148,800	56,300	1.24	139.3	0.2	0.1
B-2	Na炉-プ大型	MOX	低非均質	酸化物電解法	振動充填法	148,800	56,300	1.24	139.3	0.2	0.1
B-3	Na炉-プ大型	MOX	低非均質	金属電解法	回転造粒振動充填法	148,800	56,300	1.24	139.3	0.8	0.1
B-4	Na炉-プ大型	MOX	低非均質	フッ化物揮発法	流動床振動充填法	148,800	56,300	1.24	139.3	0.1	0.1
C-1	Na炉-プ大型	金属	均質	金属電解法	射出成型法	150,000	68,000	1.29	131.3	0.5	0.5
D-1	Na炉-プ大型	MOX	低非均質 (MOX-LWR)	酸化物電解法	振動充填法	147,800	58,400	1.22	139.3	0.2	0.1
D-2	Na炉-プ大型	MOX	低非均質 (MOX-LWR)	酸化物電解法	振動充填法	147,300	58,400	1.27	139.3	0.2	0.1
E-1	Na炉-プ中型 モジュール	MOX	低非均質	先進型式法	酸素化ペレット法	150,000	50,000	1.23	184.2 (3モジュール)	0.2	0.1
E-2	Na炉-プ中型 モジュール	MOX	均質	先進型式法	酸素化ペレット法	143,000	52,000	1.2	141.0 (3モジュール)	0.2	0.1
E-3	Na炉-プ中型 モジュール	金属	均質	金属電解法	射出成型法	150,000	60,000	1.2	154.2 (3モジュール)	0.5	0.5
F-1	Pb-Bi炉 中型モジュール	MN	均質	先進型式法	酸素化ペレット法	153,000	39,200	1.19	483.7 (4モジュール)	0.2	0.1
F-2	Pb-Bi炉 中型モジュール	MN	均質	金属電解法	回転造粒振動充填法	153,000	39,200	1.19	483.7 (4モジュール)	0.8	0.1
G-1	炭酸ガス大型	MOX	均質	先進型式法	酸素化ペレット法	155,000	68,000	1.20	198.3	0.2	0.1
G-2	炭酸ガス大型	MN	均質	先進型式法	酸素化ペレット法	159,000	69,000	1.38	270.8	0.2	0.1
H-1	ペリウム大型	MN	均質	先進型式法	酸素化ペレット法	137,000	48,300	1.20	182.3	0.2	0.1
I-2	Na炉-プ大型	MOX	低非均質	先進型式法	酸素化ペレット法	148,800	56,300	1.24	139.3	0.2	0.1
I-3	Na炉-プ大型	MOX	低非均質 (低プラチナ)	先進型式法	酸素化ペレット法	148,800	65,900	(未詳)	111.0	0.2	0.1
I-4	Na炉-プ中型 モジュール	MOX	低非均質	先進型式法	酸素化ペレット法	150,000	50,000	1.23	184.2 (3モジュール)	0.2	0.1
I-5	Na炉-プ大型	MOX	低非均質	先進型式法	酸素化ペレット法	148,800	56,300	1.24	139.3	0.2	0.1
I-6	Na炉-プ大型	MOX	低非均質	先進型式法	外部ゲル化振動充填法	148,800	56,300	1.24	139.3	0.2	0.1
I-7	Na炉-プ大型	MOX	低非均質	酸化物電解法	振動充填法	148,800	56,300	1.24	139.3	0.2	0.1
I-8	Na炉-プ大型	MOX	低非均質	金属電解法	回転造粒振動充填法	148,800	56,300	1.24	139.3	0.8	0.1
I-9	Na炉-プ大型	MOX	低非均質	フッ化物揮発法	流動床振動充填法	148,800	56,300	1.24	139.3	0.1	0.1
I-10	Na炉-プ大型	金属	均質	金属電解法	射出成型法	150,000	68,000	1.29	131.3	0.5	0.5

(注) 図式法は200tHM/yを標準とし、比較ケースとしてI-5、I-8を50tHM/yとした。
乾式法は50tHM/yを標準とし、比較ケースとしてI-7～I-10を200tHM/yとした。

発電単価



高速増殖炉の機器構造材料研究開発

用語の説明

12Cr 系フェライト鋼、改良 9Cr 鋼

高温強度を高めるために、それぞれ約 12%、9% の Cr を添加した耐熱鋼。通常、高温運転環境では、18-8 系ステンレスと呼ばれる Cr18%Ni8% の材料が使用されることが多い。12Cr 系フェライト鋼、改良 9Cr 鋼は、18-8 系ステンレスよりも高温強度は低下するものの、熱膨張率が低く、熱伝導率が高いため、発生する熱膨張応力を低くすることができると期待されている。そのため、配管総長の短縮等の経済性メリットを得ることができる。改良 9Cr 鋼は、ニオブ (Nb)、バナジウム (V) 等微量元素の最適化により引張特性のような短時間強度とクリープ疲労特性のような長時間強度のバランスが取れた材料として開発を終了した。12Cr 系鋼は、火力用ボイラ材として開発されたため、高速炉条件での最適化を目的に現在改良が加えられている。

1 次応力

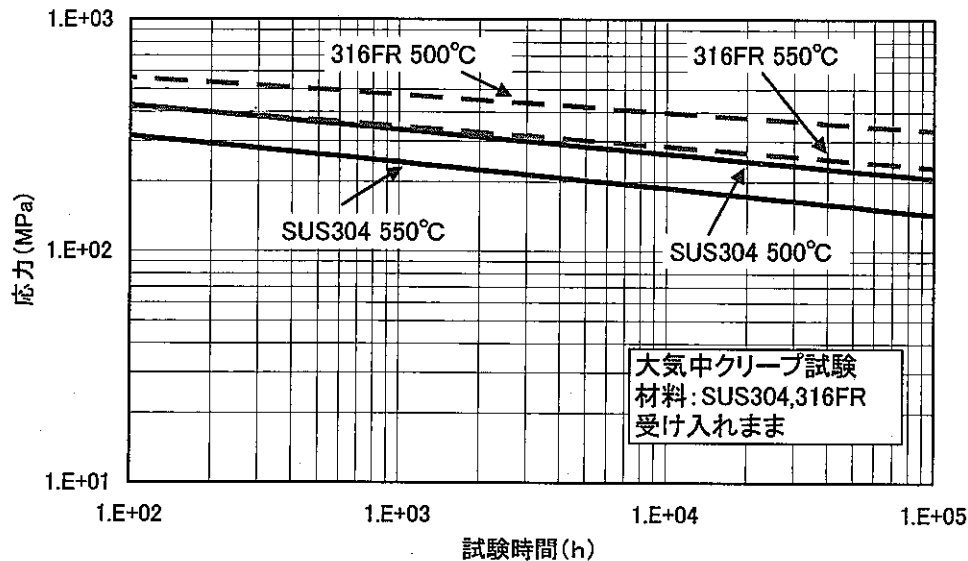
内圧や自重等の与えられた荷重に平衡するように配管や構造機器等に生じる応力。これに対して熱膨張変形等、与えられた変形によって生じる応力を 2 次応力という。2 次応力は、構造物の変形によって応力自体が低下するため、1 次応力と 2 次応力は異なる種類の応力として評価している。

1 次主冷却系ホットレグ配管

原子炉容器と中間熱交換器とを結ぶ配管のこと。原子炉内で熱せられた冷却材を、輸送することからホットレグ配管と呼ばれる。対して熱交換された低温の冷却材を炉内へ輸送する配管をコールドレグ配管と呼ぶ。

316FR

18-8系ステンレスの一種である SUS316 を高速炉向けに改良したもの。炭素を 0.02%以下、窒素を 0.06%~0.12%に最適化することで、通常の SUS316 や SUS304 といったステンレス鋼に比べ、延性および高温強度に優れた特性を持つ。



316FR と SUS304 のクリープ試験結果

3 次元免震

地震時に発生する地震波には上下動と水平動とがある。建屋、機器等を、上下、水平方向に柔性を有する装置（免震装置）で支持することで、地震荷重を低下させる概念のことを 3 次元免震という。

ABAQUS

アメリカ、HKS 社が開発した、有限要素法による汎用構造解析プログラム。構造物に発生する応力やひずみ等を予測するために使用される。

ASME

American Society of Mechanical Engineers の略。アメリカ機械学会

ASSCOPS コード

機器・配管等から液体ナトリウムが漏えいした場合の建物への熱的影響を評価するために、サイクル機構が開発したナトリウム燃焼解析コード。

BHN

バルクハウゼンノイズ (Barkhausen Noise : BHN) の略。鋼などの強磁性体は、磁区と呼ばれる磁気の小領域の集合体で、1つの磁区はその磁化方向をもち、お互いに磁壁によって分けられている。外部から磁界(磁場)を印加すると磁壁が動き、外部磁場に揃っていく。このとき、磁壁の移動は、材料中の障害物(粒界、介在物、転位等)によって不連続的となり、磁気ノイズを発生する。このノイズを BHN と呼ぶ。この原理から、BHN によって、材料中の組織変化を調べることができる。

CAE

Computer Aided Engineering の略。コンピュータを使用して設計を行うシステムのこと。コンピュータは、複雑な構造物の形状や応力といった設計者が必要とする情報を提供する。これにより構造の最適化検討が容易になる。

CEA

Commissariat a l'Energie Atomique の略。フランス原子力庁

DOE

U.S. Department of Energy の略。アメリカエネルギー省

FINAS

核燃料サイクル開発機構が開発し、現在も改良・整備が行われている有限要素法による国産初の汎用非線形構造解析プログラム。

FZK

Forschungszentrum Karlsruhe の略。ドイツカールスルーエ原子力研究センター

IAEA

International Atomic Energy Agency の略。 国際原子力エネルギー機関

ISI

In-Service Inspection の略。定期検査時などに、機器、配管のき裂発生や、腐食減肉の有無などを調べる検査のこと。

ITER

International Thermonuclear Experimental Reactor の略。国際熱核融合実験炉のこと。1987 年より米（1999 年 7 月まで）、EU、ロシアおよび日本が共同で研究開発を進めている。

LBB

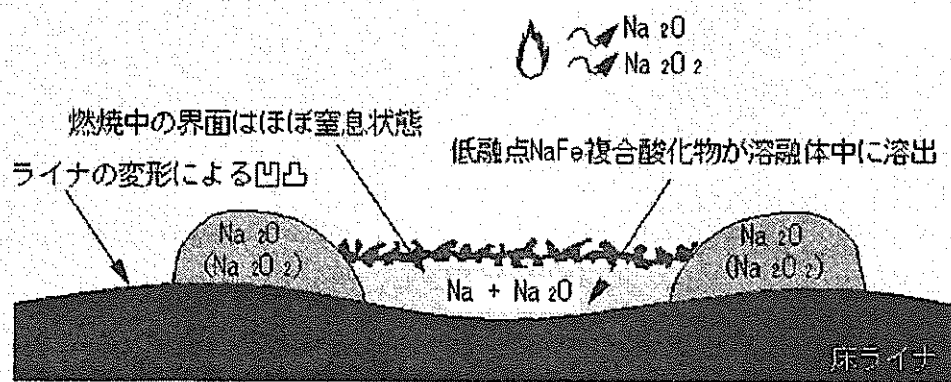
破断前漏えい（Leak-before-break）の略。圧力容器や配管の大破断の前には必ず小さい漏れがあるので、この漏れを何らかの方法で検知し、プラントを停止するなどの処置を取れば余裕を持って大破断を防ぐことができるという構造物の安全設計上の概念。

MIT

Massachusetts Institute of Technology の略。マサチューセッツ工科大学

NaFe 複合酸化型腐食

大気中で燃焼したナトリウムによって生じる鉄鋼材料の腐食機構の一つ。湿度の低い大気中環境下で生じる。燃焼によって生成した高温の燃焼生成物（液体）へ、材料表面から溶け出した鉄は、ナトリウムと酸素との化合物（NaFe 複合酸化物）を形成し腐食が進行する。溶融塩型腐食に比べて腐食速度が小さい。



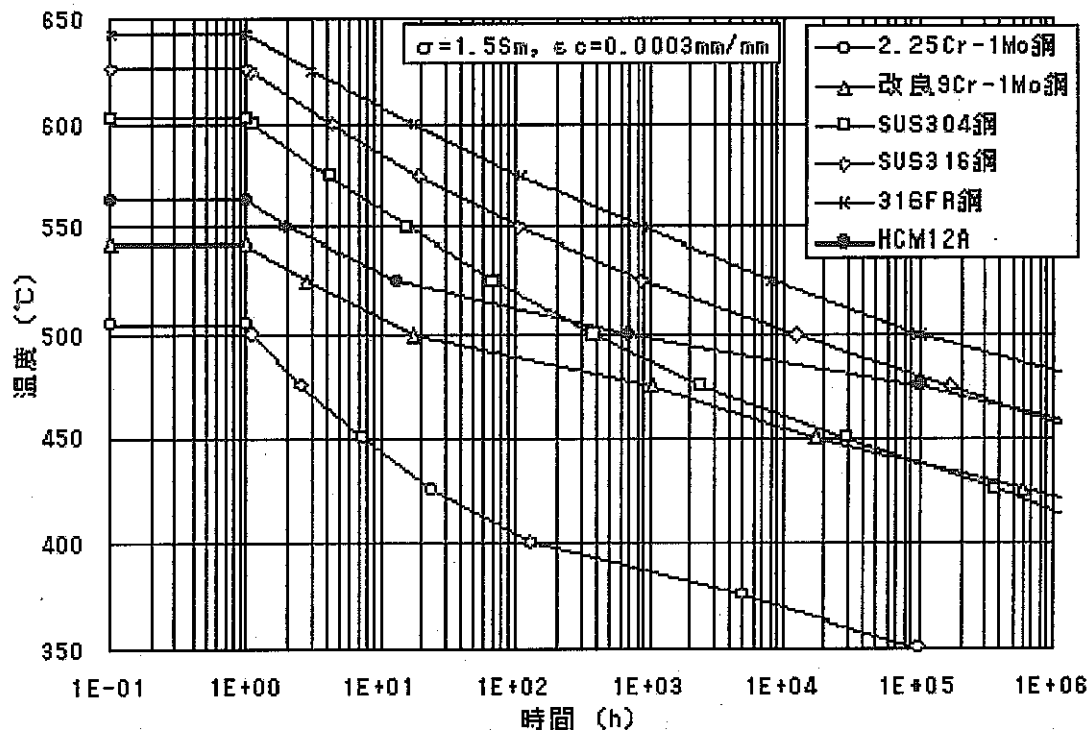
NaFe 複合酸化型腐食機構

NASTRAN

有限要素法による汎用構造解析プログラムで、世界的に使用頻度の高いプログラム。

Negligible Creep

構造物が高温で使用されると時間の経過と共に構造物にひずみが生じる。このような現象をクリープ（Creep）現象と呼ぶ。発生するひずみの量は、使用温度と関係があるため、クリープ現象が設計上有意となるかどうかを温度ごとに判定する方法のことを Negligible Creep という。構造物の使用時間と温度の関数となっており、この温度を下回る状態で構造物を使用する場合には、クリープ現象を考慮しなくても良い（Neglibible と見なす）。



各種鋼における Negligible Creep Line

OECD/NEA

Organization for Economic Cooperation and Development / Nuclear Energy Agency の略。経済協力開発機構原子力機関。加盟国政府間の協力を促進することにより、安全かつ環境的にも受け入れられる経済的なエネルギー資源としての原子力の開発を進めることを目的としている。加盟国は日本を含め、アメリカ、イギリス、ドイツ、フランス等 27 カ国。

PARTS

Program for Arbitrary Real Time Simulation の略。熱、流体、構造の複合現象である熱過渡現象を評価するために、熱流動解析コードと構造解析コードを統合したシステムの名称。これらのコード間に連携関係を持たせ冷却材の流動変化から構造物が受けるダメージ（損傷）を一貫して評価できると共に、ニューラルネットワーク等を使用し計算の高速化を図りシミュレーションを可能にしている。

SMAT

FBR 構造材料データ処理システム（FBR Structural Material Data Processing System）通称“SMAT”は、核燃料サイクル開発機構が開発を行っている材料データベースシステムで、高速増殖炉で使用される構造材料の各種材料強度試験結果を管理している。試験データの種類としては引張、疲労、クリープ等強度評価に必要なすべてを含んでいる。

Super-COPD

Super-Code on Plant Dynamics の略。FBR プラントの動特性解析コード。プラントの冷却系統における温度変化を予測するために用いられる。炉心から水蒸気系までの熱輸送系全体、ポンプ、弁等の動的機器といった幅広い系統を対象にシステムの動特性を予測することのできる詳細解析コード。

SUS304

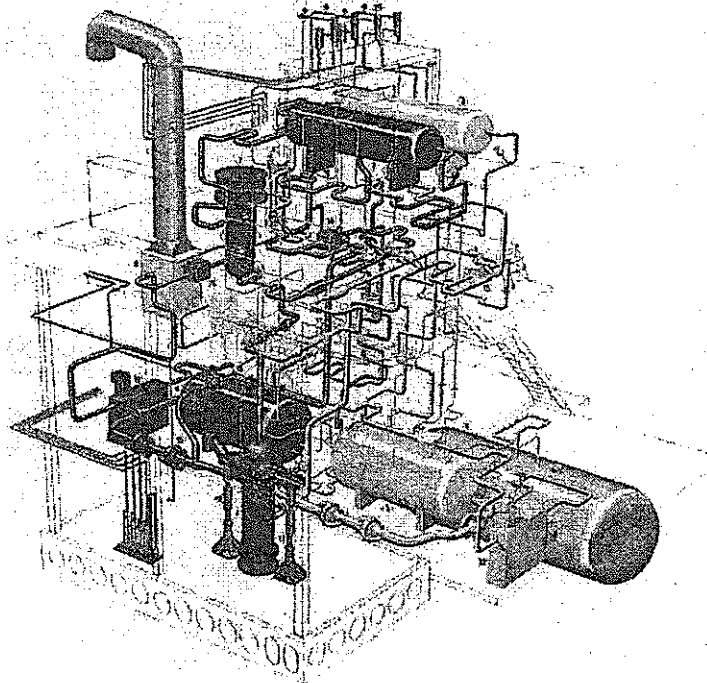
オーステナイト系ステンレス鋼の一種。鉄に約 18%の Cr と約 8%の Ni を含むことから、一般に 18-8 ステンレスとも呼ばれ、工業用品から家庭用品まで幅広く使用されている。SUS は JIS に定められた記号で、Super Use Stainless の略。低温から高温まで広い温度範囲で優れた機械的性質を有するほか、耐食性にも優れている。高温強度に優れ、Na との適合性も良好であることから「もんじゅ」の 1 次系配管や原子炉容器等にも使用された。

SYMPHONY

サイクル機構と CEA（フランス原子力庁）との間で実施した炉心耐震に関する共同研究。フェニックスの実大炉心燃料集合体を用いて、CEA の大型振動台で振動試験を行った。

TTS

Thermal Transient Test Facility For Structures の略。構造物熱過渡強度試験施設。試験体に高温と低温の Na を交互に流すことで熱応力を発生させ、試験体が破断にいたるまで試験を行うことの出来る施設。



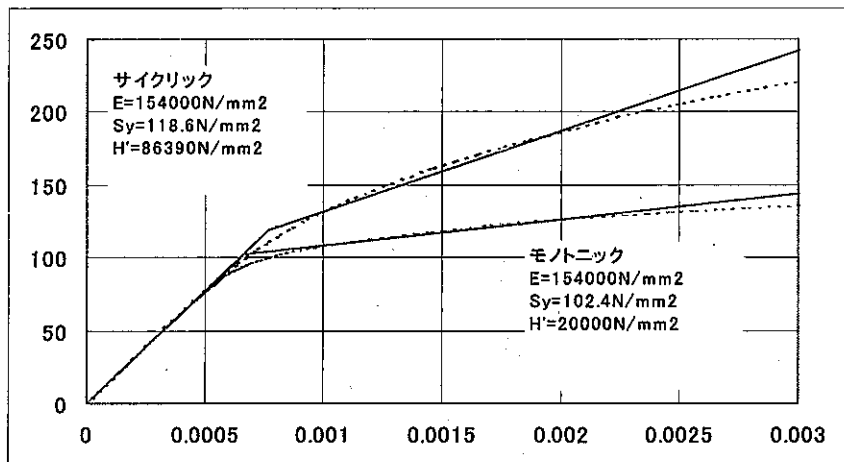
TTS の Na ループ（試験体は、ループ内に設置される）

Y 型構造

原子炉起動時及び停止時に、原子炉容器内の冷却材液位を制御するために「もんじゅ」で採用された一種の 2 重円筒構造のこと。2 重円筒の間の空間にある冷却材の液位を制御する。「液位制御」の項にある図のように 2 重円筒の下部でひとつの円筒となるため断面図が Y 型に見える。

αリセッターモノトニック／サイクリック

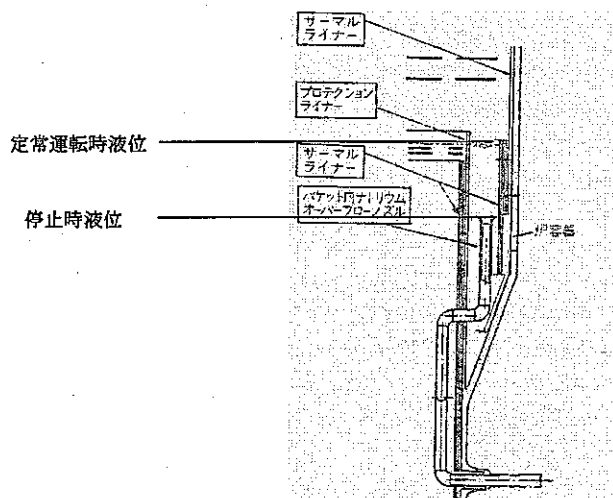
材料の非線形特性を近似した弾塑性構成則のこと。加工硬化を考慮し応力-ひずみ関係を傾きの異なる2つの直線で近似している。単調引張状態等の特性をモノトニックと、繰り返し荷重が加えられたひずみ硬化後の特性をサイクリックと呼んで使い分けている。荷重が反転した時に補正を加えるためαリセットと呼ばれる。他の簡易弾塑性構成則と比較してクリープ疲労損傷およびラチェットひずみを簡便に精度よく、かつ保守的に評価することができる。



αリセッターモノトニック／サイクリック

液位制御

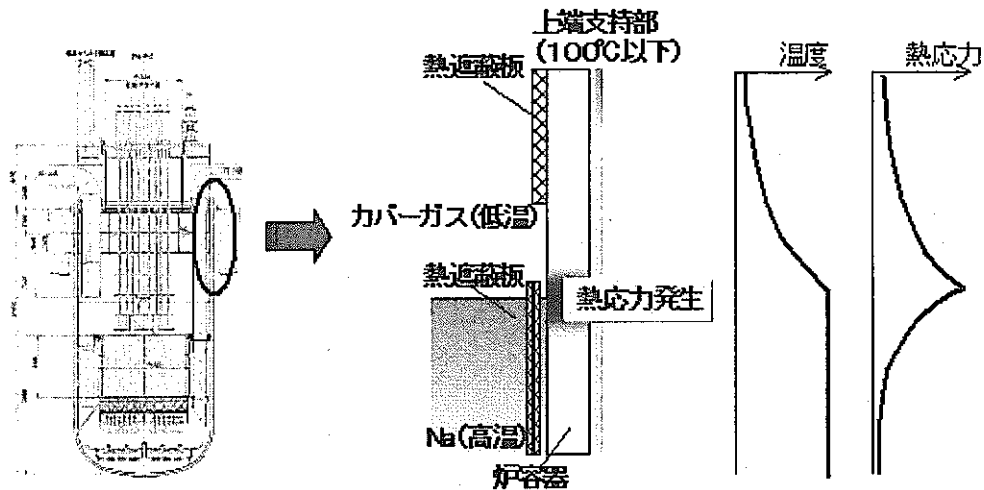
高速増殖炉の冷却材は高温となるため原子炉起動時及び停止時に、冷却材の液面が接する原子炉容器に熱応力が発生する。この原子炉容器に発生する熱応力を一箇所に集中させないように、冷却材の液位を制御する方法のこと。「もんじゅ」で実際に採用された。



「もんじゅ」原子炉容器における液位制御の様子

液面近傍

原子炉内、冷却材の自由液面付近の構造物を指す。原子炉容器は内部に高温のナトリウムを有する。その一方、建屋に支持された上端部は低温に保つ必要があることから、急峻な温度勾配が生じ、熱応力が発生する。そのため液面近傍部には、発生熱応力を低減させるための様々な方策がとられている。



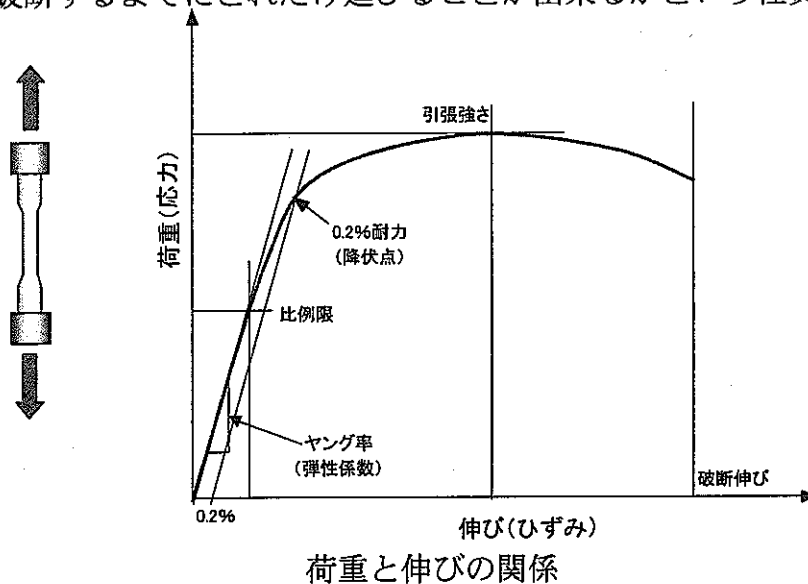
原子炉容器液面近傍部

エルボ

配管の方向を変えるために用いられる L 字型の配管要素。配管の熱膨張により生じるひずみや、機器同士の相対変位は、エルボを用いた配管の引き回しで吸収することができる。

延性

材料が破断するまでにどれだけ延びることが出来るかという性質。



応力拡大係数

き裂の進展や構造物の脆性破壊を評価する際に用いられる係数。き裂寸法と負荷応力をパラメータとする関数として表現される。通常弾性応力領域の解析に用いられ、き裂先端近傍の応力場を特徴づける係数である。

オーステナイト系ステンレス

オーステナイト系ステンレスは、金属組織がオーステナイト（フェライト鋼参照）であるステンレス。延性が高く、耐食性に優れている。SUS304 や SUS316（SUS304 及び 316FR 参照）などもこれに分類される。

大野一王モデル

材料の非線形特性を近似した詳細弾塑性構成則。大野一王モデルは、繰返し塑性変形、特にラチェット現象のシミュレーション精度向上のため開発された非線形移動硬化則のひとつ。

ガス炉

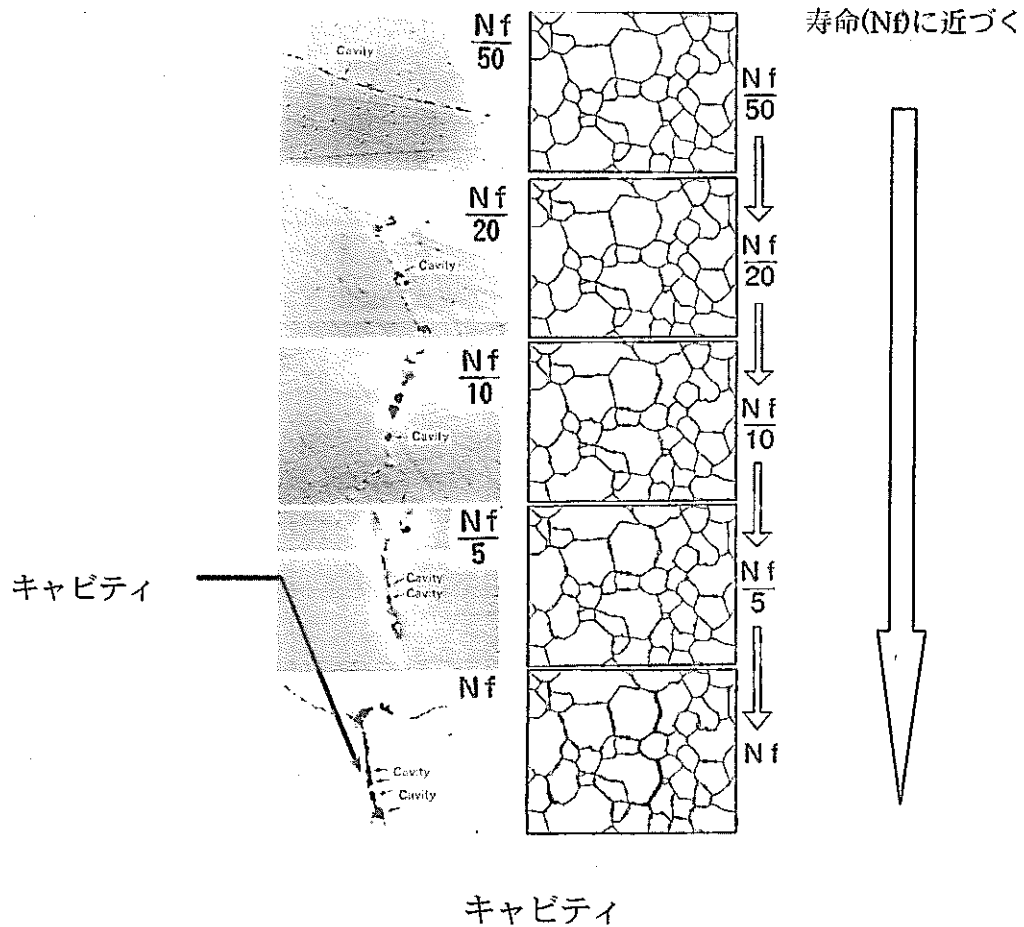
ガスを冷却材として用いる原子炉。冷却用のガスとして、 CO_2 や He が用いられている。

カバーガス

容器内の液面上部の空間に満たされた気体。Na 冷却炉の場合、原子炉容器内の Na 冷却材の上部の空間に、不活性気体の Ar が充てんされる。

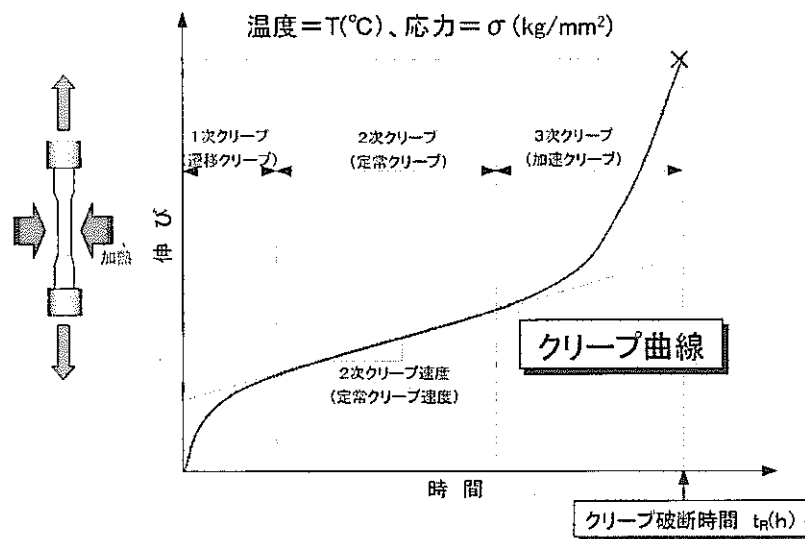
キャビティ

クリープやクリープ疲労などの長時間負荷が加わった材料中に生じる空孔のこと。ボイド(void)ともいう。主に結晶粒界に発生し、キャビティの連結等によってき裂へと成長し、材料が破損に至る。



クリープ

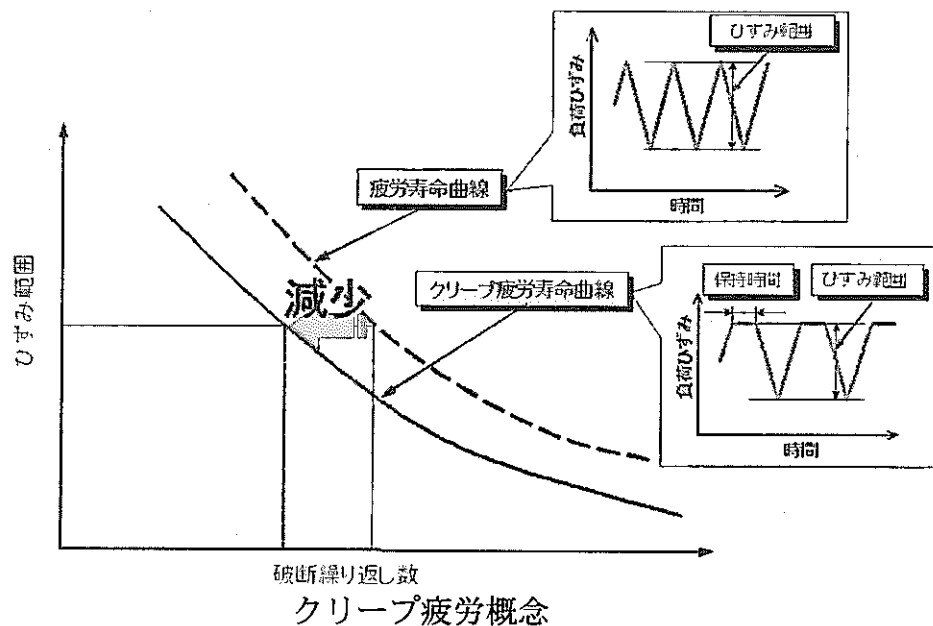
金属材料に高温下で一定の荷重を与えると、変形が時間とともに増加していく現象。



クリープ曲線

クリープ疲労

高温下でクリープと疲労が同時に負荷される荷重モードにおいて生じる現象をいう。疲労とクリープの重畳効果により、単純な疲労の場合に比べ、温度、ひずみ範囲が同じでも、破断繰返し数は低下する。例えば疲労サイクルに保持時間を加えると寿命が低下するが、これはクリープの効果が加わったためである。



結晶粒

原子が規則正しく配列してできた多面体を結晶という。金属はこの結晶の集合体からなる多結晶体であり、結晶粒とはそのひとつひとつの結晶のこと。

高サイクル疲労

材料に繰返し荷重を加えると、小さな荷重でもやがて材料に微小なき裂が発生し、それが進展して破損に至る。この現象を疲労と言う。破損繰返し数が数十万回以上の場合を高サイクル疲労と呼び、一般に荷重が比較的小さい条件で起こる。逆に荷重が大きく、破損繰返し数が小さい場合を低サイクル疲労という。

高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針(BDS)

「もんじゅ」の設計に際し、当時の動燃事業団が開発した設計指針。「もんじゅ」は軽水炉と異なり高温で運転されることから、材料のクリープ効果を考慮した設計が必要である。BDSはその設計指針を与えている。

高速実証炉の高温構造設計方針(案)(DDS)

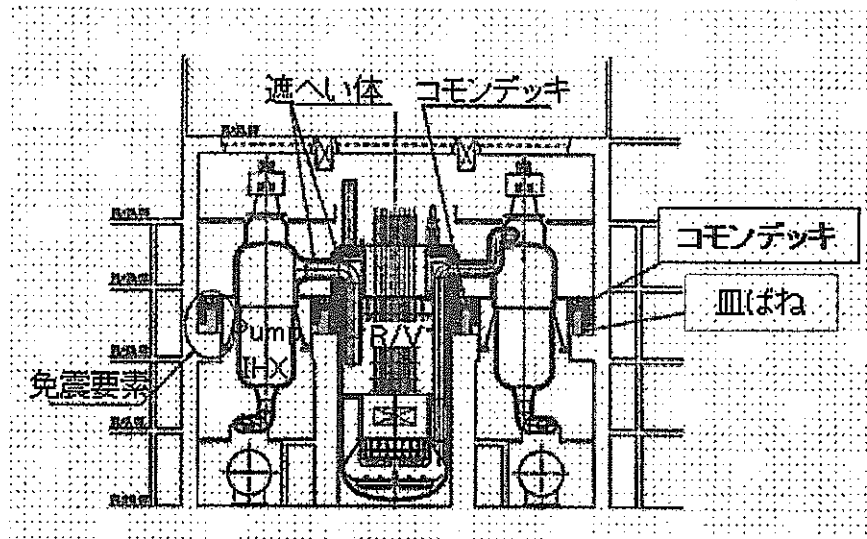
実証炉の設計に際して、BDSを高度化する形で日本原電が策定した設計方針。

コールドプレナム

内部に冷却材を有する機器の中で、熱交換された後の低温の冷却材を含む空間。

コモンデッキ方式

機器上下免震の方策として提案されている構造。共通床（コモンデッキ）に1次系機器類を吊り下げ、共通床を上下方向に免震支持する。相対変位が機器間で一様となるメリットがある。



コモンデッキ

サーマルストライピング

温度差のある流体が混合し、温度の均一化が起こるまでの過程で、流体温度の変動（温度ゆらぎ）が生じる現象。この温度変動が配管等の構造物に伝わると熱疲労を発生させ、破損の原因となりうる。

サーマルライナ

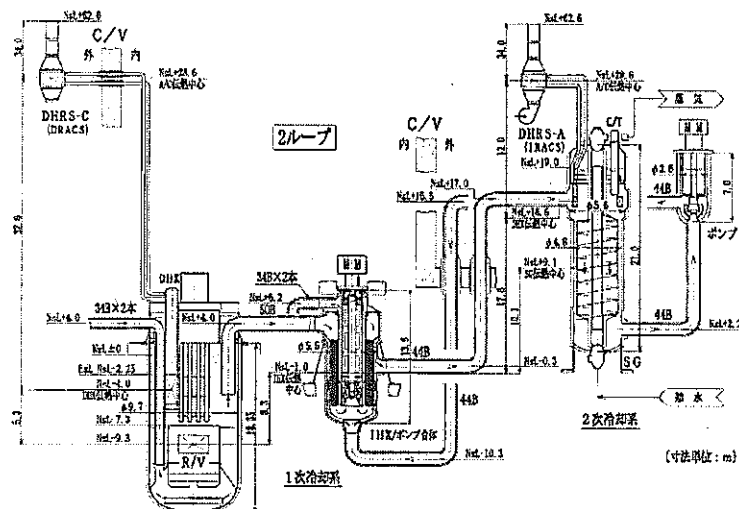
熱遮断板。構造物の内側に設置された熱遮蔽構造（ライナ）のこと。熱伝達を遅らせ熱過渡応力を低下させるためや降伏点の低い材料を保護するために用いられる。原子炉容器の場合、炉壁に大きな熱勾配が発生することを防ぐために設置することがある。

材料強度基準

高速増殖炉の機器の構造設計を行う場合に、使用すべき材料強度や物性等に関する設計許容値等を定めているもの。

主中間熱交換器(IHX)

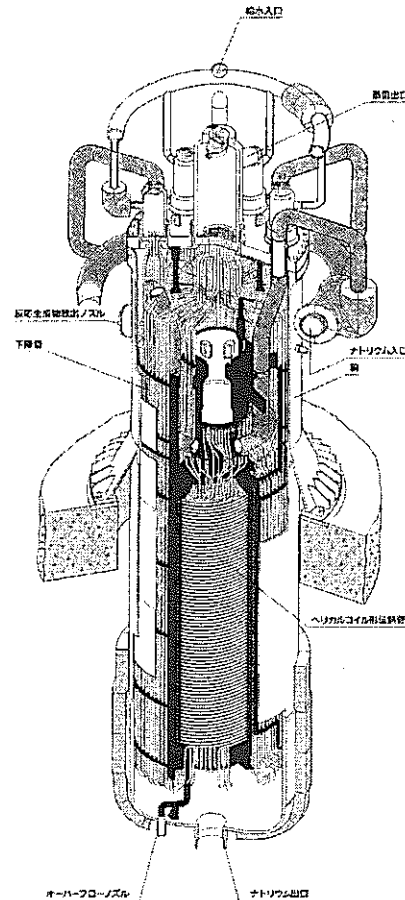
1次系の熱を2次系に伝える機器。Na炉では、万一の事故防止の観点から、通常中間熱交換器と蒸気発生器の二段階熱交換方式が採用されている。その場合、原子炉側からみて初段の熱交換器を中間熱交換器という。「もんじゅ」では、炉心で加熱された1次側Naの熱エネルギーを、初段の熱交換器である中間熱交換器で2次側Naに伝え、そのNaと水とを2段目の熱交換器である蒸気発生器で熱交換させることで、発電用蒸気を得る2段階熱交換方式が採られている。IHXはIntermediate Heat Exchangerの略



1次系および2次系冷却系統

蒸気発生器(SG)

蒸気による発電のために水から蒸気を発生させる機器のこと。水分を含んだ湿り蒸気状態と水分を含まない乾き蒸気状態では、材料へ与える影響が異なるため、もんじゅでは、蒸発器と過熱器という材料の異なる2種類の機器によって蒸気発生器を構成している。SGはSteam Generatorの略



蒸気発生器詳細図

靱性

材料の粘り強さのこと。金属材料が弾性限度を越えた力を加えられた際に、破壊するまでに吸収できるエネルギーの能力。靱性が高いほどき裂が進展しにくい。靱性が低い材料は一般的に脆い。

ソルバ

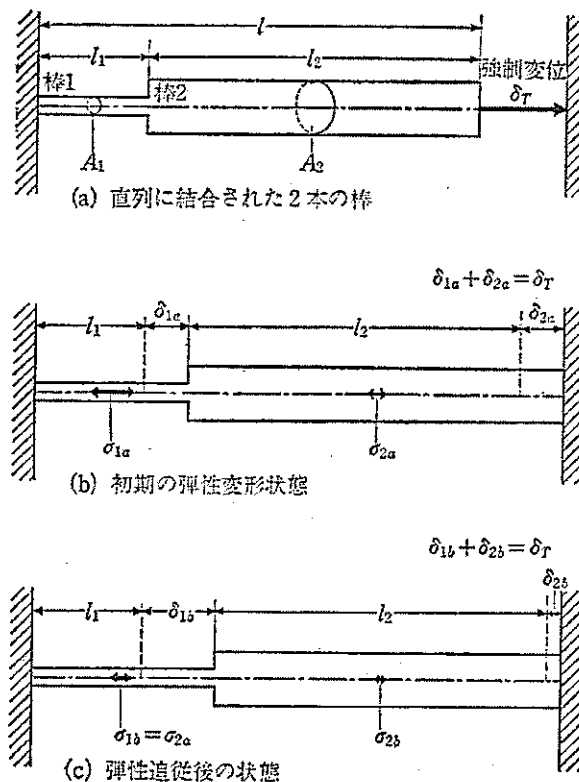
解析において、計算処理を実行する部分。行列計算処理部を意味することが多い。

弾完全塑性

材料の非線形特性を 2 本の直線で近似した弾塑性構成則のうち降伏点を越えた領域では無限にひずみが増加する特性を持つ構成則。つまり加工硬化を考慮しておらず、硬化係数がゼロである。

弾性追従

構造物中に高剛性低応力の部分と、低剛性高応力の部分が併存するとき、低剛性高応力部で生じたクリープ変形の結果として生じる応力緩和により、高剛性低応力部に除荷が生じ、高剛性低応力部の弾性回復分だけ低剛性高応力部の変形が増加する結果、この部分に弾性変形では生じない過大なひずみの集中が生じる。このような構造物の不連続部等において剛性の違いより、非弾性ひずみが蓄積する現象を弾性追従と呼ぶ。



弾性追従概念図

トリップ

運転中に何らかの原因で発生した事象により、安全回路が作動し、ポンプなどの機器の動作が停止すること。

動的非線形要素

振動解析などにおいて、ガタや弾塑性等の非線形特性を扱う際に用いられる解析要素（モデル）。

鉛ビスマス(LBE)

Pb と Bi の合金のこと。化学的に安定で水や空気と急激に反応しないことから、Na に代わる高速増殖炉の冷却材として注目されている。反面、Na に比べて比重が大きい、冷却能力が劣る、腐食性が高い。LBE は Lead Bismuth Eutectic の略

材料	密度 (g/cm ³)	融点 (°C)	沸点 (°C)	熱伝導率 (W/M/k)
Na	0.97	98.0	883.0	75.0
Pb-Bi	10.3	124.0	167.0	12.9

熱(膨張)荷重

物体が自由な熱膨張を拘束された際に、生じる荷重。

熱過渡

プラントの運転状態の変化に伴い、冷却材の温度や流量が過渡的に変化する状態。Na は比熱が小さく熱伝達性が良いため、熱過渡時の温度変化幅が大きく、その影響を構造材に伝えやすい。そのため、Na と接する構造材には、熱過渡時に比較的大きな温度変動が生じ、熱膨張が拘束されると熱応力の変動が生じることとなる。

熱時効

金属材料を高温に加熱したまま長時間保持すること。または長時間加熱することによって、組織の変化、機械的特性の変化が生じること。高温機器に用いられる材料の材質の経時変化(劣化)は、負荷荷重の他に熱時効によって起こる。

バウンダリ機器

原子炉容器や配管等のように冷却材を内包し、冷却材と雰囲気との境界を構成する各種機器。

破損クライテリア

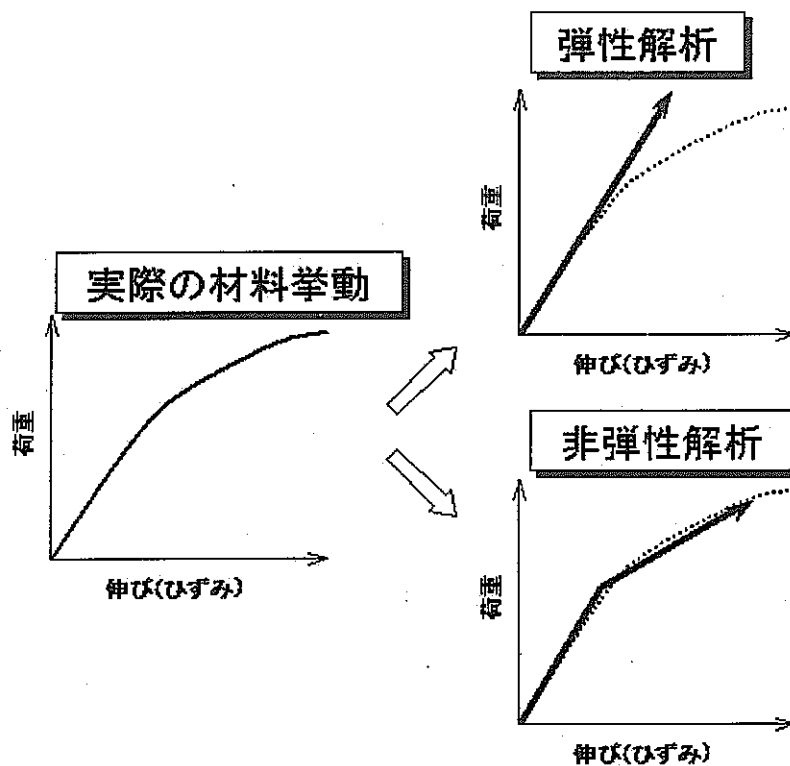
破損の判断基準。

ひずみ再配分

例えば、溶接継手の母材部と溶接金属のように、材料特性の異なる部位があると、クリープや塑性の効果によって全体のひずみは一定のまま、これらの部位のひずみの割合が変化する場合がある。そのような現象のこと。

非弾性解析

弾性解析では、応力とひずみが比例関係であるとして、線形解析を行う。それに対し、非弾性解析は、弾塑性やクリープなど非線形の効果を取り入れた解析。通常、有限要素法などの数値解析法による。



非弾性解析

フェニックス炉

フランスの高速増殖原型炉。Na 冷却タンク型であり、熱出力及び電気出力はそれぞれ 568MW 及び 250MW である。1973 年臨界。現在停止中。

フェライト鋼／高 Cr フェライト鋼(フェライト系鋼、高クロムフェライト系鋼)

フェライト鋼（一般にはフェライト系鋼と呼ぶ）は、フェライト組織を持つ鋼を指す。フェライトとは純鉄に微量の C を固溶した Fe のことで、金属組織学上の名称。 α -鉄、地鉄とも呼ばれる。体心立方格子の結晶構造を持ち、軟らかく延性に優れ、常温から 780℃までは強磁性体である。910℃以上に過熱するとオーステナイト（ γ -鉄）と呼ばれる面心立方格子に変態する。改良 9Cr 鋼や 12Cr 系鋼は、焼き戻しマルテンサイト組織（「マルテンサイト」の項参照）をもつフェライト系鋼である。Cr を 12%以上含む鋼は高 Cr 鋼と総称される。

変質相

金属材料が、高温熱時効、疲労やクリープ等の荷重負荷、腐食などを受けたときに、組織変化によって生成する相のこと。例として、熱時効によって生成する炭化物やシグマ相、フェライト相などが挙げられる。

ホットスポット

流体中に生じる温度の不均一領域。高温の配管と、低温の配管とが合流する部分等で見られ、低温流体中に一部高温の領域が移動することにより、接する構造物に熱応力を生じさせることがある。

ポニーモータ

高速炉の主循環ポンプの主モータに併設され、主循環ポンプ停止時のバックアップ用等にポンプを低速回転で運転する時に用いる馬力の小さいモータのこと。（ポニーは英語で「子馬」または「小型なもの」の意）

マルチレベルモデリング

複雑な高温変化現象を、構造体－組織との階層化、種々の物理現象の連成化で表現する理論モデル。

マルテンサイト

炭素を過飽和に固溶した高温の鋼を水などで急冷する「焼き入れ」によってできる組織のこと。結晶構造が面心立方格子から体心立方格子に変化するため、この変化をマルテンサイト変態という。マルテンサイトは針状のこまかな組織で、鋼の焼入組織としては最も硬く、強磁性体である。焼き入れままでは脆いため、延性を与えるために、通常、焼き入れよりも低い温度に加熱し冷却する「焼き戻し」を行い、焼き戻しマルテンサイト組織にして用いる。この組織を持つマルテンサイト系ステンレス鋼は、クロムを含有し、焼入れ硬化性に優れ、軸受け、ベアリング、刃物等に使用される。

モジュール化

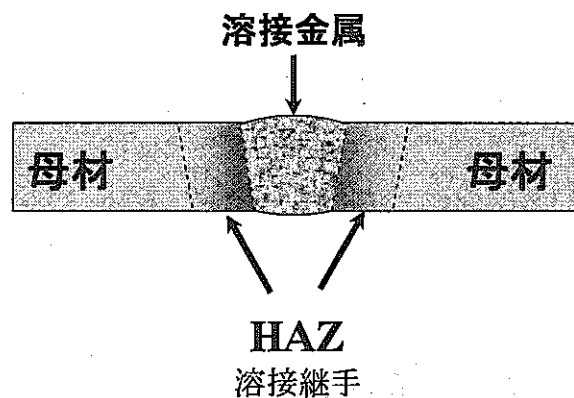
機能的にまとまった独立した単位の小規模の原子炉や補助システムを複数個組み合わせることによって、総体として大規模のプラントを構成する方法。

有限要素解析

解析対象を有限個の要素に分割し、各要素の力学的挙動を簡単な方程式で近似する。これらを重ね合わせることでにより得られる方程式を解くことにより、解析対象の力学的挙動を近似的に計算することができる。1950年代半ばに、航空力学の研究より提案され、現在広い分野で利用されている数値解析法。

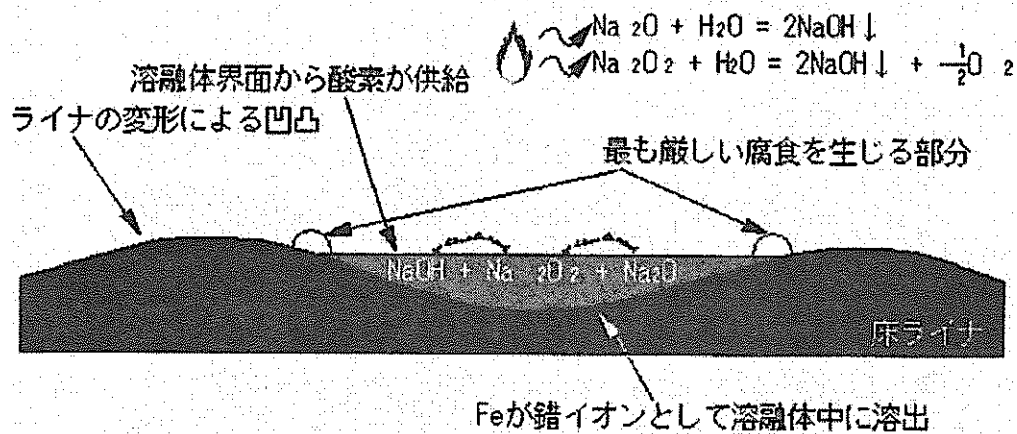
溶接継手(HAZ、母材)

溶接によってつないだ部分を溶接継手という。またこの溶接に用いた溶接材に対して、溶接により接続した材料を母材という。母材の中で、溶接による熱影響を受け、母材とは異なる性質となった部分を熱影響部、通称 HAZ 部 (Heat affected zone) という。即ち、溶接によって接続された2つの材料は、「母材－HAZ－溶接材－HAZ－母材」といった構成となる。



溶融塩型腐食

大気中で燃焼したナトリウムによって生じる鉄鋼材料の腐食機構の一つ。湿度の高い大気中環境下で生じる。燃焼によって生成した高温の燃焼生成物(液体)へ、材料表面から鉄が溶け出して錯イオンを形成し、腐食が進行する。湿度の低い場合には、材料表面から溶け出した鉄はナトリウムと酸素との化合物(NaFe 複合酸化物)を形成し腐食が進行する。NaFe 複合酸化型腐食に比べて腐食速度が大きい。



溶融塩型腐食機構

ライナ

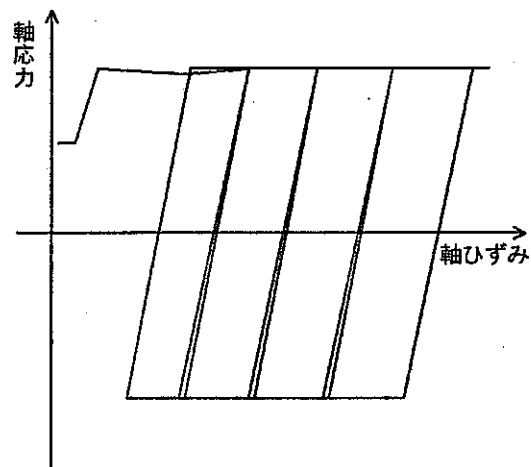
機器や配管等からナトリウムが漏えいした場合に建物のコンクリートとナトリウムが直接接触することを防ぐために、床などに敷いてある鉄板のこと。コンクリート中に含まれる水分とナトリウムが接触して反応することを防ぐことを目的としている。

ラス幅

鋼の代表的な組織であるマルテンサイトの組織形状の一つで、ラス (Lath) 状組織のことを指す。ラス幅は、この一つのラスの短径方向の長さのことをいう。

ラチェット疲労(クリープラチェット疲労)

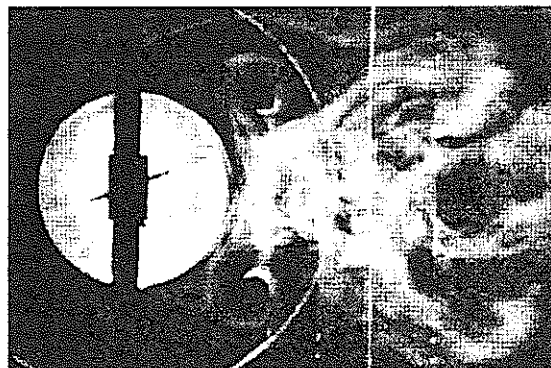
ラチェットとは、一定荷重を受ける構造物に別の繰り返し荷重が加えられた場合、一定荷重の方向にひずみが進行する現象。ラチェット疲労とは、ラチェットの効果で疲労寿命が低下する現象。クリープラチェット疲労とは、ラチェット疲労にクリープ現象が重畳したもの。原子力プラントでは、起動・定格・停止に伴う温度変動による疲労とクリープ現象に加え、内外圧力差や自重などによりクリープラチェット疲労が生じる場合がある。



直管の熱ラチェット挙動

流力振動

流体の流れの中に構造物が置かれた場合、構造物の下流に渦が発生し、構造物が振動する現象のこと。



流力振動

参 考 資 料 5

高速増殖炉の機器構造材料研究開発
(OHP資料)

研究開発課題評価委員会

説明用OHP集

本資料は、課題評価委員会での
意見などにより改訂したもので
ある。

課題名：
高速増殖炉の機器構造材料研究開発
(中間評価)

平成14年8月
(平成15年3月改訂)

核燃料サイクル開発機構

説明内容

- 評価の対象範囲と分野の概要
- 研究開発の目的と意義
- 研究開発の目標, 成果, 今後の計画
 - 材料評価技術
 - 高温構造設計技術
 - 耐震設計技術
- 今後の進め方と重点課題
- 実施体制及び資金計画
- 成果の公開, 普及
- まとめ

評価を受ける範囲

■ 評価の対象分野:

□ 高速増殖炉の機器構造材料に関する研究開発

- 材料評価技術
- 高温構造設計技術
- 耐震設計技術

■ 評価の対象期間:

□ 平成9年度～13年度を中心とした, これまでの研究成果

□ 平成14年度～17年度を中心とした, 今後の計画と研究の進め方

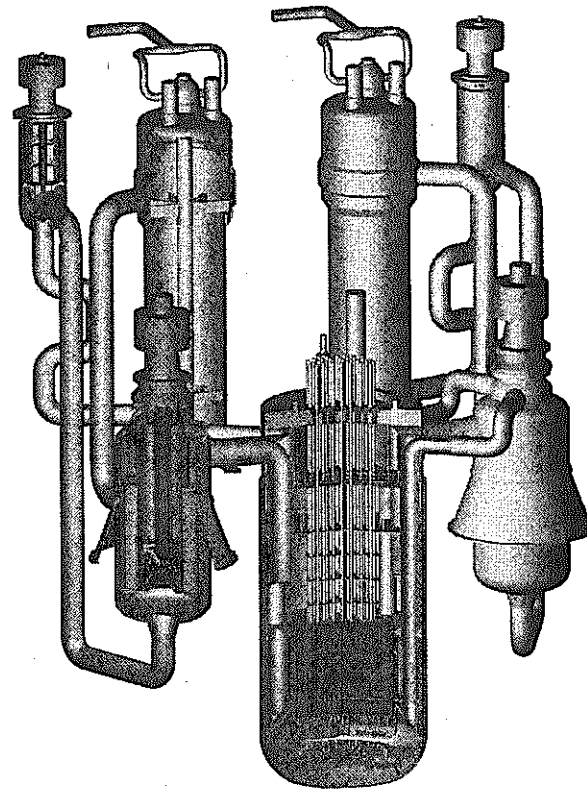
分野の概要

高温構造設計技術

高温低圧で熱荷重が主体という特徴の下で構造物の破損を合理的に防止する設計評価技術の開発

- 構造解析技術
- 高温強度評価技術
- 熱荷重評価技術

など



材料評価技術

高温におけるクリープ特性, 使用環境を考慮した材料の健全性評価や材料開発

- 材料強度評価技術
- FBR用高クロム鋼開発
- 材料損傷定量化技術

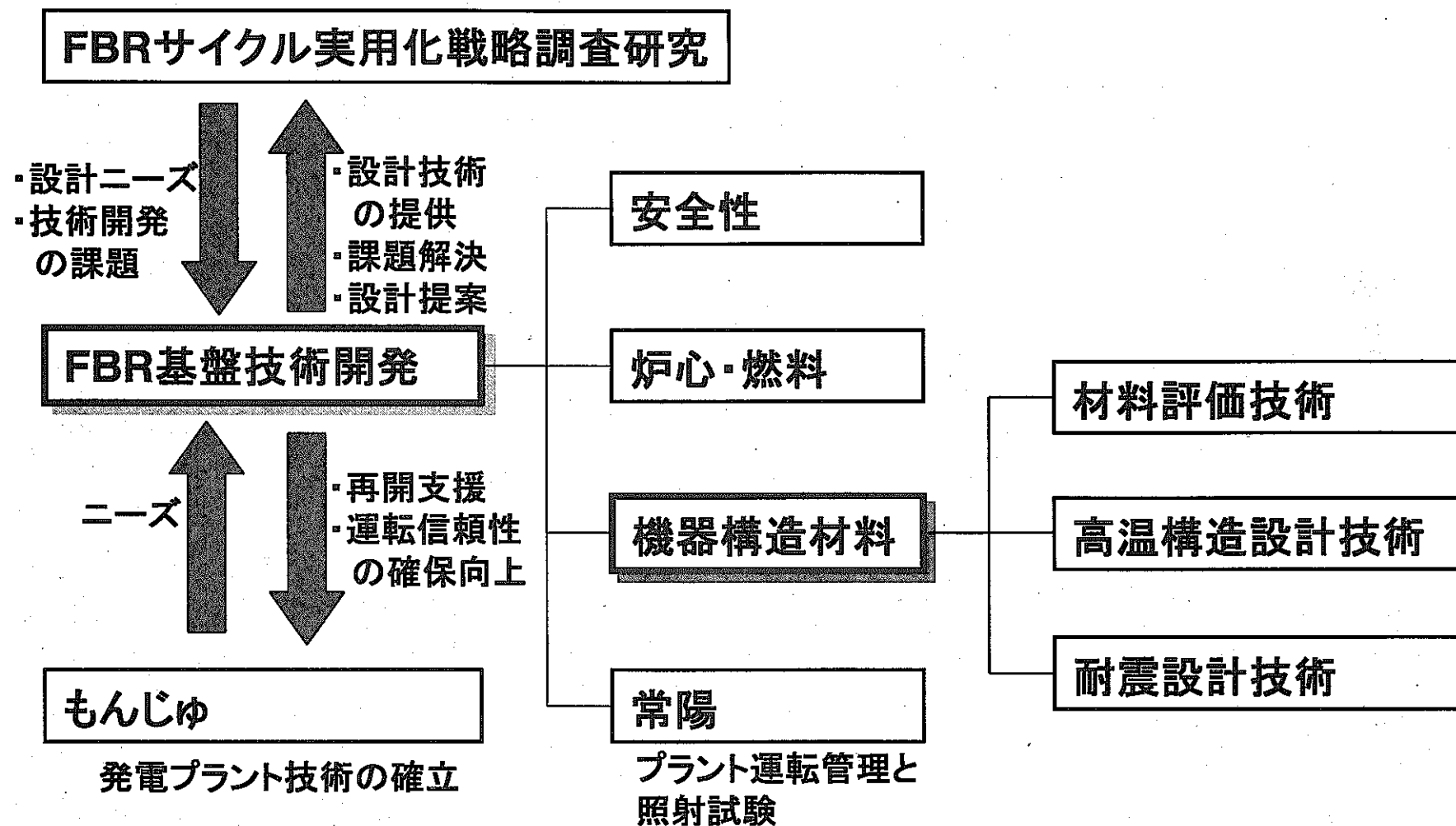
など

耐震設計技術

地震荷重に対する健全性, 安全性の確保

- 耐震解析技術
- 免震技術

FBR研究開発における位置付け



機器構造材料研究の目的と意義

(1) 総論:

- FBRの構造設計上の特徴(下記)を踏まえ、新材料の開発や構造設計技術の高度化によって、建設コストの低減とプラントの高温化・長寿命化、並びに運転信頼性の向上を通じたFBRの経済性向上を目的。技術開発成果は安全性向上にも寄与。
- 機器構造材料技術は、経済性と高い信頼性の両立を求められるFBRを実際に設計、建設するために必須の基盤技術。
- このため、高速炉に特有の課題に焦点を当てた研究開発を実施。
 - 高温プラント: 材料のクリープ特性の考慮が必要
 - 低圧システム: 耐圧設計の観点からは、有利。
 - 熱荷重: 定常及び過渡時の熱荷重(熱応力)が設計の支配因子
 - 薄肉構造: 地震荷重に対する構造健全性の確保に留意が必要
- 研究開発の成果は種々の設計手法として体系化し、最終的には構造設計基準や材料基準などの規格基準の整備に貢献。

機器構造材料研究開発の目的と意義

(2) これまでの研究開発(平成9年度～13年度を中心)

- 実証炉設計基準への反映を目的とした基盤的研究開発。
- もんじゅ事故対応
- 実用化戦略調査研究第1期への反映

この期間は、実証炉計画から実用化戦略調査研究への、過渡期であった……

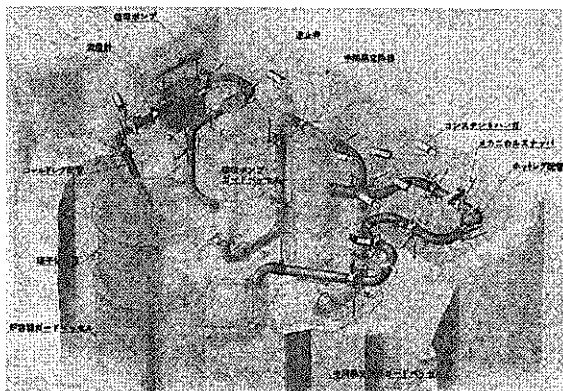
(3) 今後の研究開発(平成14年度～17年度を中心)

- 実用化戦略調査研究第2期への反映
 - 各炉型に共通の、設計合理化(経済性向上)を目指した基盤的技術開発
 - Na冷却炉: 経済性を極限まで追求した設計の成立性に関する課題解決を図る。
 - その他の炉型式: 設計概念の成立性判断に資する基礎的データ, 知見の提供。

機器構造材料技術の寄与(1)

ホットレグ配管引回しの変遷

もんじゅの1次系配管と機器配置



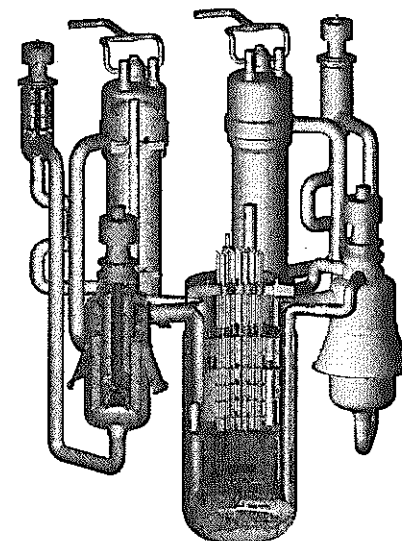
複数エルボによる水平引き回しで熱膨張を吸収

多数の耐震サポートによる支持

極限まで単純化, 短縮した配管設計

耐震サポートの削減

大型ナトリウム炉の1次系配管と機器配置



配管全長
エルボ数

もんじゅ
39 m
9個



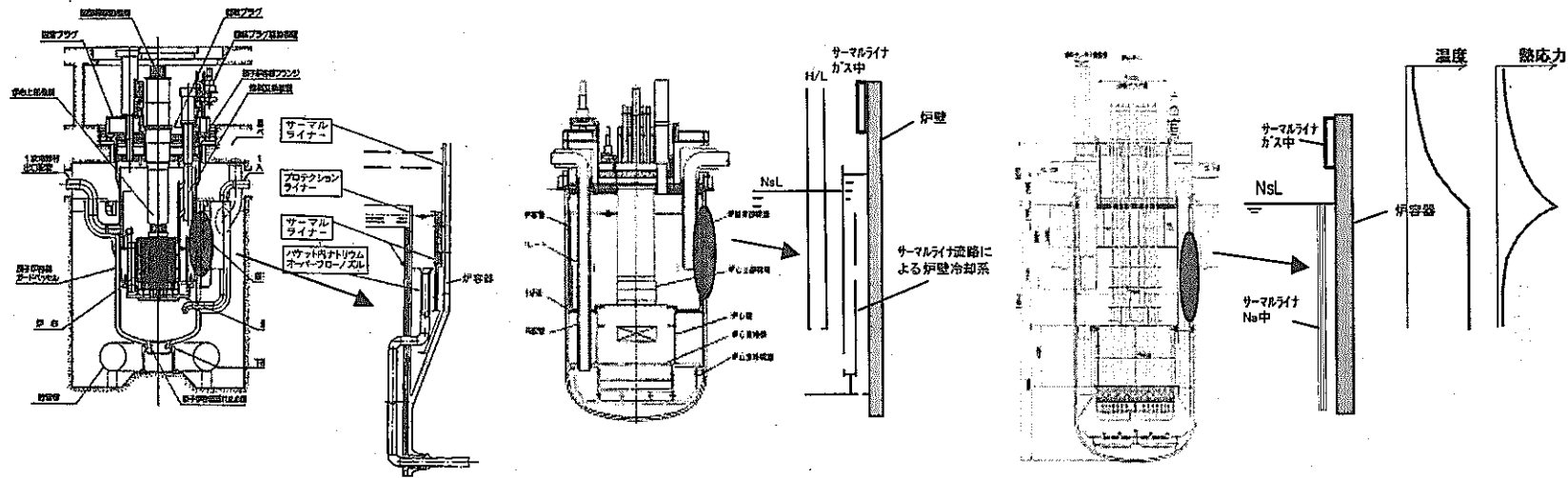
大型ナトリウム炉
12 m
1個

大型ナトリウム炉の配管短縮と配置コンパクト化は、

- ・ 低熱膨張, 高強度のフェライト鋼の採用
- ・ 3次元免震採用による地震荷重の大幅な緩和
- ・ 配管高温設計技術の高度化による熱膨張応力の許容値拡大などによって可能となる。

機器構造材料技術の寄与(2)

液面近傍熱応力対策の変遷



もんじゅ:

529°C / SUS304

高温容器 + Y型構造

2液位制御

実証炉:

550°C / 316 FR

炉壁冷却構造

液位制御なし

大型ナトリウム炉:

550°C / 316 FR

高温容器

液位制御なし

原子炉容器液面近傍構造の簡素化は以下によって実現可能となる。
(従来の弾性解析ベースの設計評価が有する過剰な裕度の適正化)

- ・ 非弾性解析による設計
- ・ 液面近傍熱荷重の評価技術の高度化
- ・ クリープ域での破損防止評価技術の高度化による許容値拡大

実用化戦略調査研究における設計ニーズ

(建設単価20万/kWeに向けてのコストダウンの考え方)

システムの改善

<設計の工夫>

原子炉構造のコンパクト化

配管短縮化

ループ数削減

機器合体

燃料取扱設備簡素化

<新技術>

新材料の採用(12Cr系鋼)

構造設計基準の高度化

免震技術の採用

再臨界回避

Na水反応の発生を局限したNa/水熱交換器による2次系簡素化

更なるコストダウン
方策として検討

主要な機器・系統の物量削減に伴うBOP、建屋容積の削減

スケールメリットの追求

主要なシステム改善方策

出力アップによる
コストダウン

モジュール化による
コストダウン

標準化・習熟効果の追求

設計の標準化

QA・QC合理化

量産効果の活用

建設工期の短縮

設備の共有化

核燃料サイクル開発機構

材料評価技術に関する研究：

FBRは高温システムであり、機器をクリープ温度域で使用する。また、熱応力が主体。このような条件に適合する材料を開発し、材料の損傷機構の理解に立脚したうえで、高温における材料挙動と強度特性に関する評価手法を整備し、材料強度基準として設計に供することを目的とした研究開発。FBRに特有の環境における材料の腐食評価技術もここに含めている。

- **材料強度評価技術：** 実証炉材料について、大気中及びナトリウム中における材料強度データベースの整備と高温強度・寿命評価法の開発、材料強度基準としての整備。主としてこれまでの成果。
- **高速炉用フェライト鋼開発：** 実用化炉の構造材料として有望視されている高クロムフェライト鋼の開発と適用性評価。実用化戦略調査研究への直接的反映。
- **材料損傷定量化技術：** 高温・長時間使用環境下における構造材料の損傷機構の解明と損傷検出技術の開発。従来の材料試験データに基づく評価から、損傷機構に基づく長時間(60年)寿命への外挿性に根拠を与える基盤的、長期的課題。
- **腐食関連技術：** ナトリウムや鉛ビスマスなどの冷却材に対する構造材料の耐食性評価と腐食機構の解明。前者はもんじゅ事故対策、後者は実用化戦略調査研究の鉛ビスマス炉の成立性判断。

材料強度評価技術(1/2)

鋼板・鍛鋼品・管等

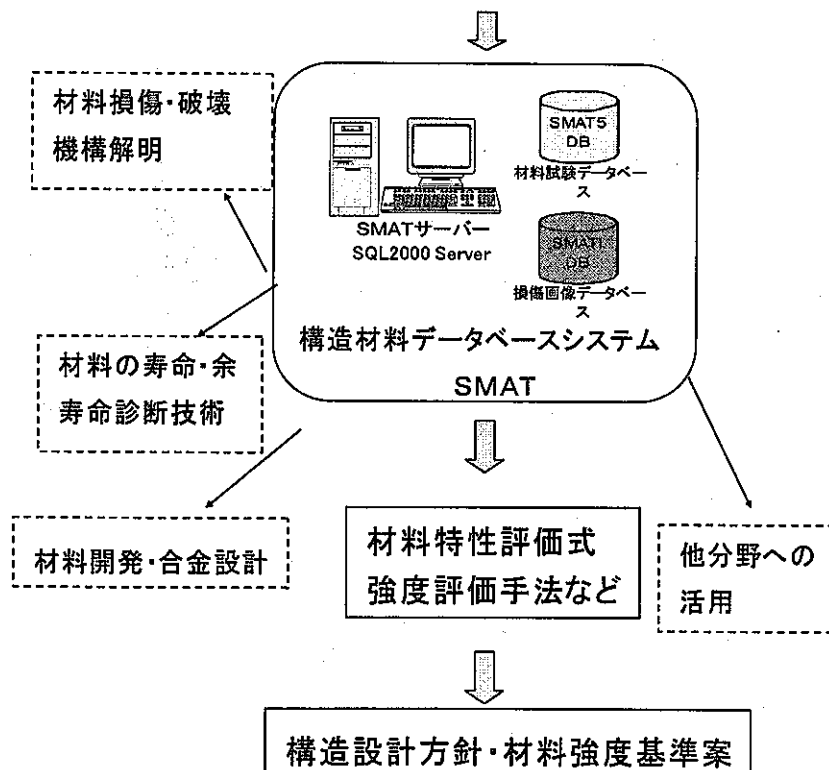
母材・溶接継手(溶金・HAZ・異材等)

強度・挙動データ(引張・クリープ・疲労・クリープ疲労等)
組織損傷データ(破面、組織、化学組成変化等)
経年劣化データ

液体金属・照射環境・水蒸気

- ・ 316FR, 改良9Crの材料特性データベースを整備
- ・ 基本材料特性式及び強度評価手法を開発
 - ・ クリープひずみ式, クリープ破断強度
 - ・ 疲労強度, クリープ疲労強度, 他
- ・ Na環境効果, 照射環境効果評価手法を開発

316FR, 改良9Cr: 実証炉に使用が計画されていた材料



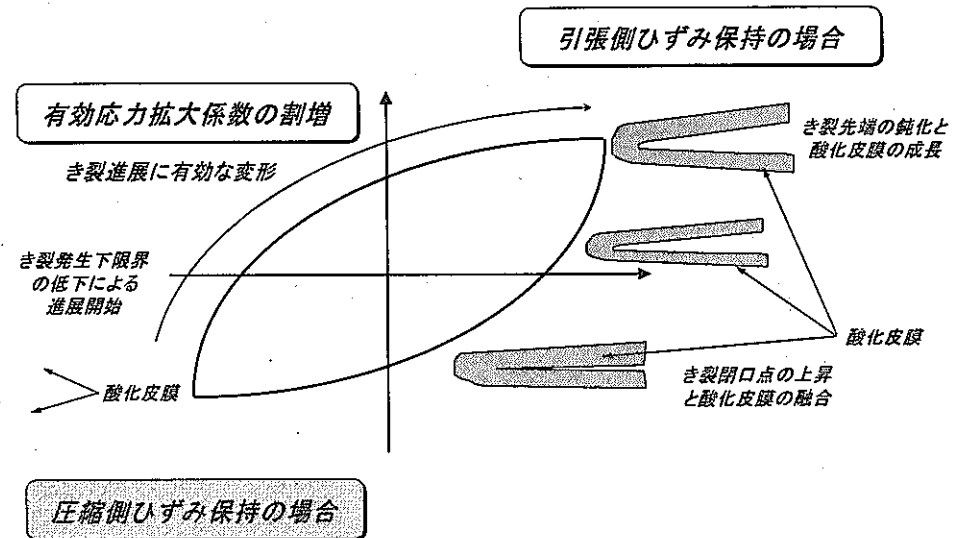
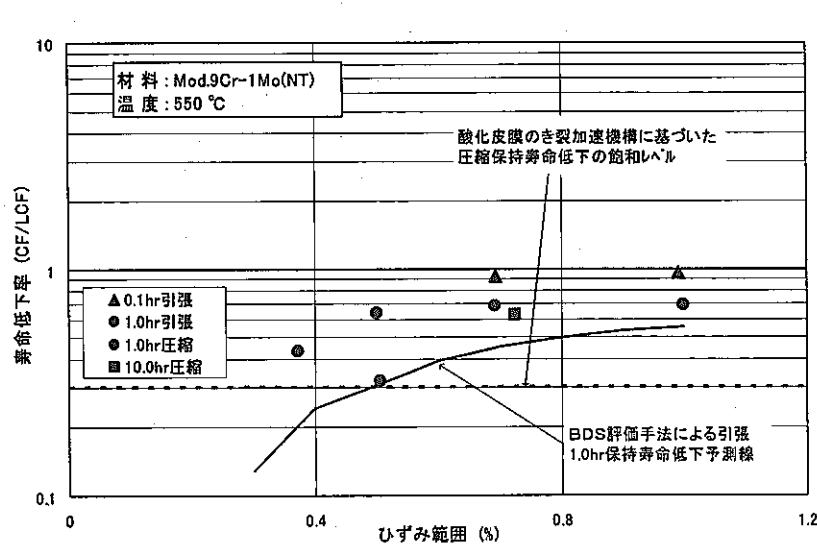
実証炉高温構造設計指針及び材料強度基準に反映。

●データ数

データ区分	件数
引張	1769
クリープ	1323
疲労	1353
クリープ疲労	378
リラクセーション	349

材料強度評価技術(2/2)

材料の高温強度評価法: 改良9Crの圧縮保持効果の評価

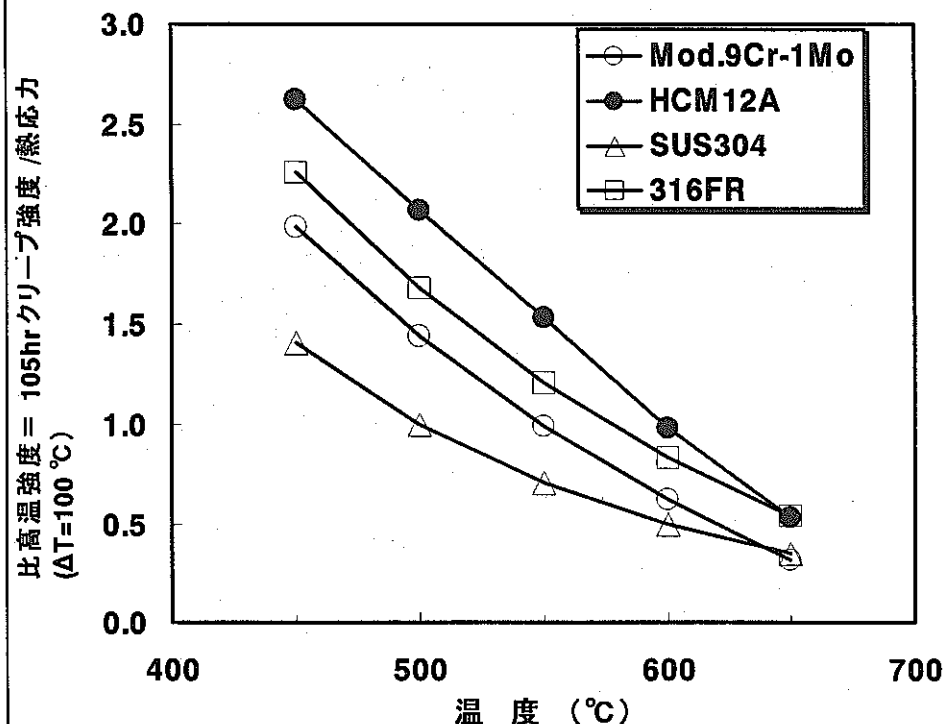


オーステナイト鋼のクリープ疲労強度が引張保持で低下するのに対し、改良9Cr鋼は圧縮保持で強度低下。

これを、き裂の酸化皮膜形成に伴う有効応力拡大係数の割増の概念導入によって説明し、評価法を確立。

高速炉用フェライト鋼開発

低熱膨張/高熱伝導/高強度材料の開発:
高Cr鋼の高性能化の追及



基本的な課題:

- ・ 長時間延性, 靱性の改善
- ・ 溶接施工法の確立
- ・ クリープ疲労強度の確認

実用化戦略調査研究第1期において:

- ・ 火力用12Cr鋼データの調査
- ・ 設計用材料特性の推定(工学的判断)
→ 実用化戦略調査研究第1期の設計研究に提供

実用化戦略調査研究第2期へ反映:

FBRへの適用性判断に必要なデータ取得

- ・ 延性・靱性, クリープ疲労強度
- ・ 冷却材との適合性
→ FBRへの適用性判断
- ・ FBRの使用条件に適した材料開発
 - ・ 延性向上のための熱処理条件最適化
 - ・ 微量元素構成による延性向上の追及
- ・ 溶接材料と施工法の開発・確立
→ FBR用12Cr鋼開発

実用化戦略第3期以降の展開:

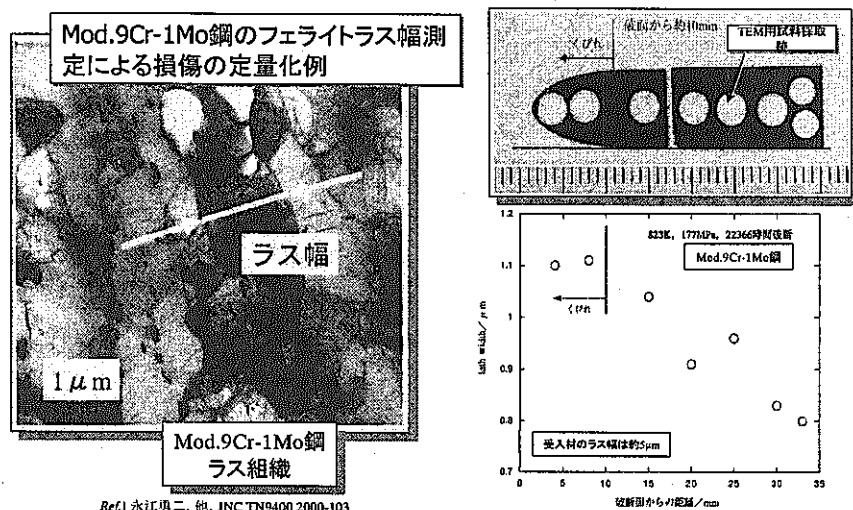
- ・ 材料強度基準策定のためのデータ取得
- ・ 12Cr用高温強度評価法開発

材料損傷定量化技術開発

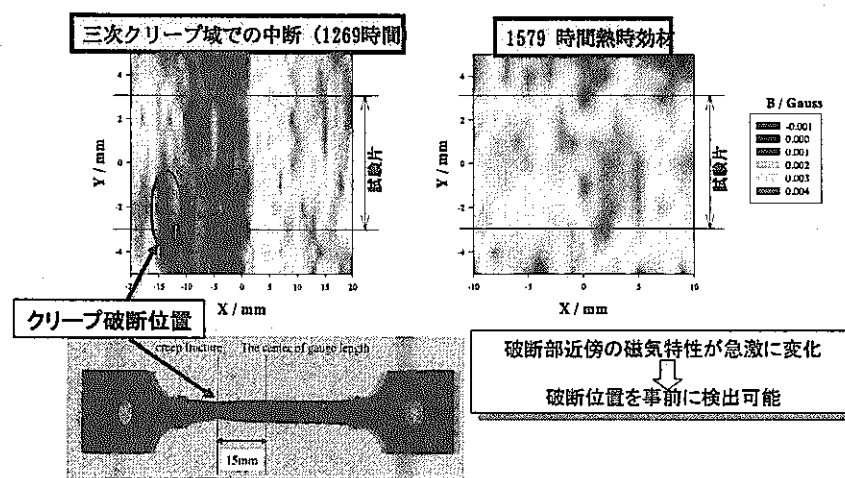
高温・長時間使用環境下における構造材料の損傷機構の解明と損傷検出技術の開発

損傷による金属組織の変化を記述できる 量(パラメタ)の探索

損傷検出技術



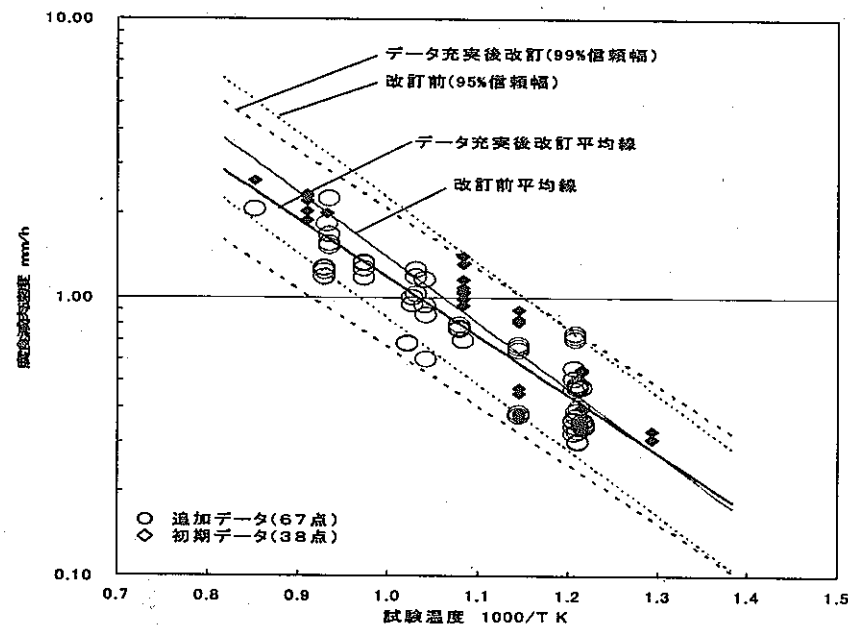
高クロムフェライト(改良9Cr)鋼のクリープ損傷進行がマルテンサイトのラス幅の変化で記述できること(上図),
オーステナイトステンレス鋼のクリープ疲労損傷進行がキャビティ空間占有率で記述できることを示した。



クリープ試験片の自然磁化変化の検出例

電気化学的特性、超音波、磁気的特性などに着目した予備試験を行い、磁化に着目した検出技術が有望であることを見出した。

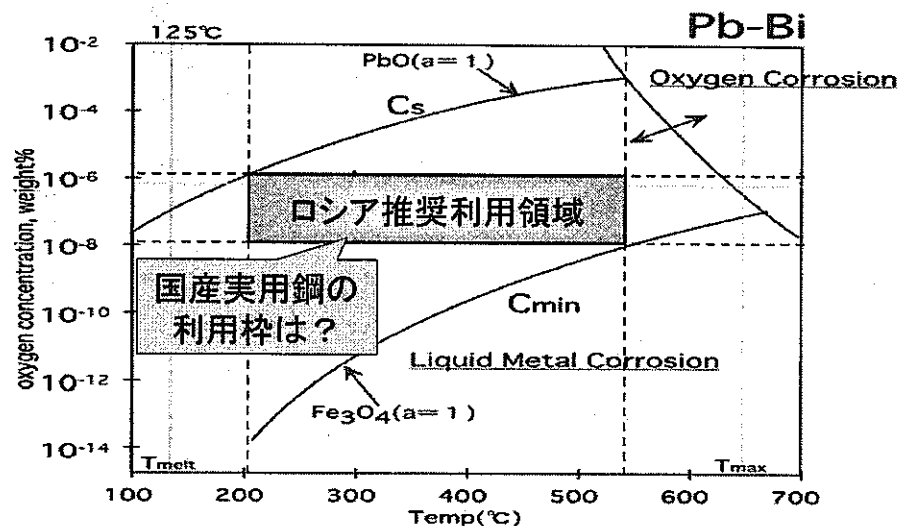
腐食関連技術



Naによる腐食

- ナトリウム漏えい・燃焼時の構造材料腐食
 - 二つの腐食メカニズムの解明
 - Na-Fe複合酸化物腐食
 - 溶融塩型腐食
 - 炭素鋼の腐食速度評価式
- これらの成果はもんじゅ原因究明と対策工事(安全審査)に反映

鉛ビスマス(LBE)による腐食



実用化戦略第2期へ反映:

- 鉛ビスマスに対する鋼材の腐食機構把握
- 国産主要FBR用鋼材の耐食性評価
 - ➔ 鉛ビスマス炉の成立性判断材料を提供

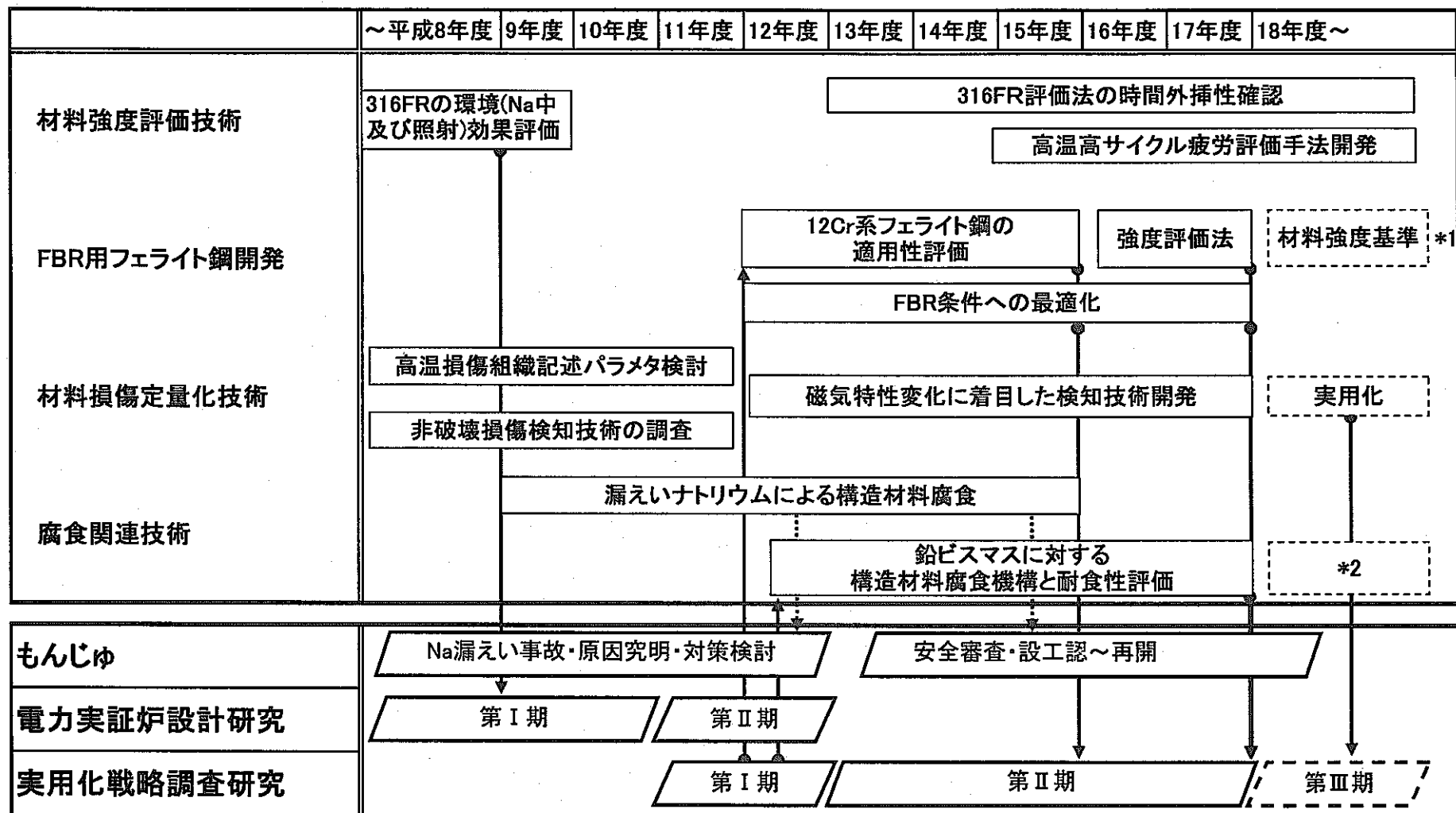
材料評価技術のまとめ(1/2)

	これまでの目標と成果 (平成9年度～13年度を中心)	今後の目標と計画 (平成14年度～17年度を中心)
材料強度評価技術	【目標】 実証炉材料の高温材料特性式、強度評価法の整備。実証炉材料強度基準への反映。 【成果・達成度】 材料データベースを整備。材料特性式と強度評価法を一式整備。実証炉基準に反映。実験炉常陽改造に際して使用。目標は概ね達成。 【課題】 外挿信頼性向上と超高サイクル疲労評価法整備。	【目標(長期)】 時間外挿信頼性評価も含めた材料強度評価技術の確立。超高サイクル疲労評価手法の整備。 【目標(4年間)】 316FRの高温長時間試験の継続。超高サイクル疲労試験に着手。 【計画】 高温長時間データと超高サイクル疲労について、限定的に試験研究を継続。
FBR用フェライト鋼開発	(平成12年度に着手した課題) ・ 火力データの調査 ・ 材料特性の推定(設計研究に提示) ・ 開発課題の整理と計画策定 などを行ってきた。	【目標(長期)】 FBR条件に適した12Cr系フェライト鋼の開発。高温強度データベースの整備と強度評価法の開発。材料強度基準への反映。 【目標(4年間)】 FBRへの適用性判断。FBRプラント条件に適した材料仕様と最適な溶接施工法の開発。設計用材料強度等の暫定。 【計画】 クリープ疲労などの基礎データの取得。熱処理条件・微量成分調整による延性・靱性向上。各種溶接施工法による継手性能の確認。LBB成立性の基礎データ取得。

材料評価技術のまとめ(2/2)

	これまでの目標と成果 (平成9年度～13年度を中心)	今後の目標と計画 (平成14年度～17年度を中心)
材料損傷定量化技術	【目標】 材料の損傷進行に伴う金属組織の変化を定量的に記述できるパラメタの同定と、損傷の進行に敏感な基礎物性の探索、並びにその変化量を計測する非破壊検知技術の選択。 【成果・達成度】 ステンレス鋼(キャビティ率)、フェライト鋼(ラス幅の変化)について損傷と相関するパラメタを見出した。材料の磁化に着目した検出技術が有望であることを確認。 目標は概ね達成。 【課題】 上記の知見の一般性の確認、高温など実機条件への適用性。	【目標(長期)】 磁気特性の変化に基づく材料損傷の検知技術の確立。 【目標(4年間)】 磁気特性の変化に基づく損傷定量化技術の工学的な成立性に見通しを得る。 【計画】 種々の損傷形態に関する適用範囲の確認。各種の環境が損傷による磁気特性変化に与える影響を評価。損傷進行に伴う磁気特性の変化機構の解明と損傷進行の検出原理の提示。
腐食関連技術	【目標】 漏えいナトリウムによる炭素鋼の腐食機構解明と腐食速度評価法の確立(もんじゅ事故対応) 【成果・達成度】 2種類の腐食機構(NaFe複合酸化型と熔融塩型の動的性質の把握と存在解明と腐食速度評価法の提示。 もんじゅ評価に適用し、目標は概ね達成。	【目標(長期)】 実用化プラントの成立性、設計評価に必要な材料腐食課題の解決。 ※ 鉛ビスマス炉が選択された場合に本格展開。 【目標(4年間)】 鉛ビスマス冷却炉の成立性判断材料の提供を目的とした、鉛ビスマスに対する鋼材の腐食機構の把握と主要材料の耐食性評価 【計画】 耐食性評価試験、主要合金元素のLBE中溶解度データ評価、流動LBE制御技術の課題抽出。

材料評価技術の研究開発計画



*1: 国又は学会基準に反映

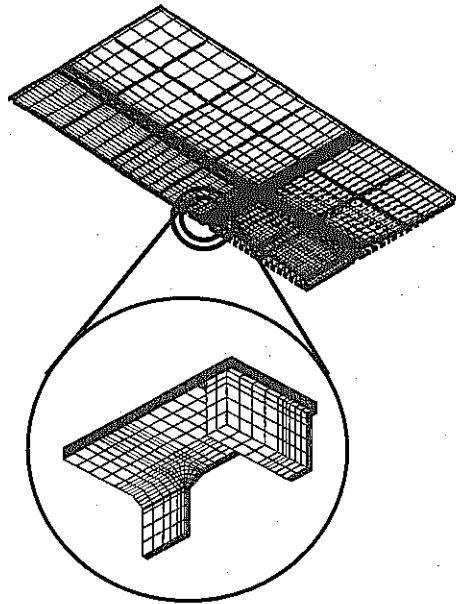
*2: 鉛ビスマス炉が選択された場合に本格展開

高温構造設計技術に関する研究

高温・低圧システム，熱荷重が主体，薄肉構造，といったFBRの特徴と課題を念頭において，各種の破損様式に対する構造物の限界強度を見極め，これらを適切に防止する設計評価技術を提供することを目的とした研究開発。

- **構造解析技術：** 有限要素法に基づく汎用非線形解析コードFINASに代表される，設計と研究開発の基盤ツールとしての各種構造解析コード開発。
- **高温強度評価技術：** クリープ疲労損傷の防止に重点を置いた，高温構造物の強度評価手法の高度化と，実用化高速炉構造設計基準としての整備。
- **熱荷重評価技術：** サーマルストライピング評価法と，熱過渡荷重評価から構造健全性までの統合解析技術の開発とその機器構造の最適設計への適用。実用化戦略調査研究第2期の設計への反映を目的。
- **システム化規格：** 設計，製作，運転・保守を包括的に捕らえた健全性確保の方法論（システム化規格）のための要素技術開発。構造設計の抜本的合理化を狙った長期的課題。

構造解析技術



もんじゅライナのナトリウム漏洩時の健全性評価への適用例:

腐食でライナが減肉(物質が部分的に消滅)しながら、熱荷重を受ける現象の解析を、有限要素の改良等によって可能とした。

FINAS: 有限要素法に基づく汎用非線形解析システム

✓ ABAQUS, NASTRANなどの商用コードに匹敵する、国産唯一の汎用有限要素法解析コード。

✓ 最近の主な改良, 機能拡張:

- ✓ ソルバ更新による大規模問題の計算効率改善
- ✓ 汎用プリ・ポストとの連結によるCAE機能拡充
- ✓ 高精度非弾性構成式や非線形ばね要素の組込み

非線形直接積分法問題
固有値問題(流体-構造連成解析)
熱伝導問題
大変形弾塑性座屈問題
静的弾性問題(FASTENING)
静的弾性問題

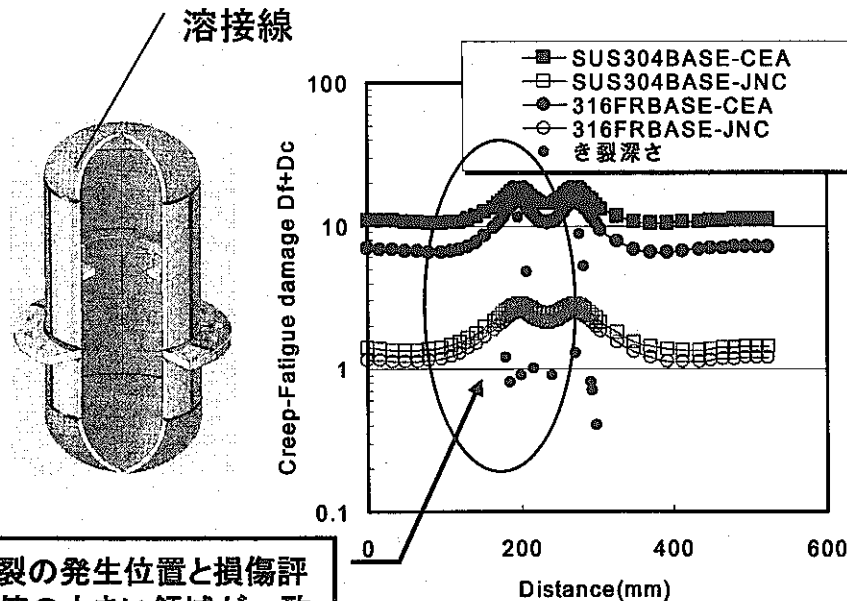


構造解析コードは、FBR開発のインフラであり、自社開発コードを保有することは、ニーズに即した改良や機能拡張が迅速に行えるなどの点で大きな意義を持つ。このため、FINASについて、限定的ではあるが今後も機能拡張を継続する予定

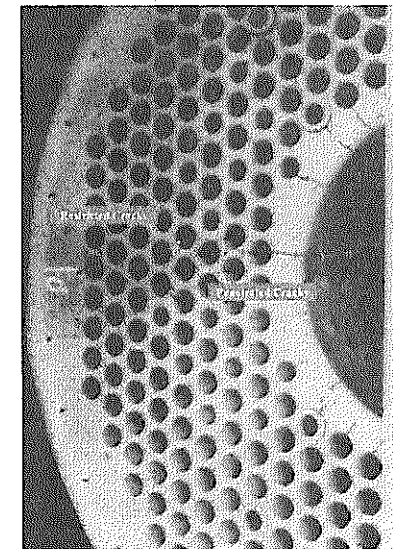
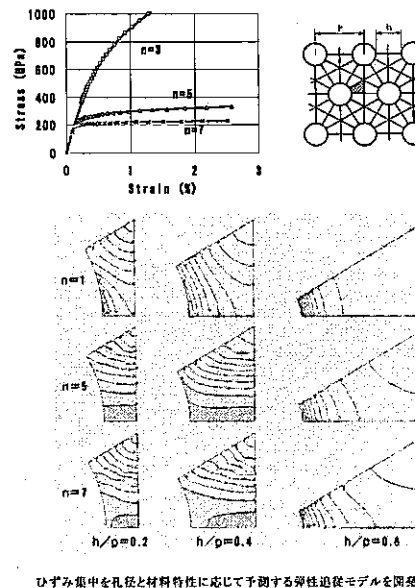
高温強度評価技術

実証炉の構造基準への反映：弾性解析ベースの設計評価法の高度化

溶接継手のクリープ疲労強度評価法



構造不連続部評価：管板構造への適用

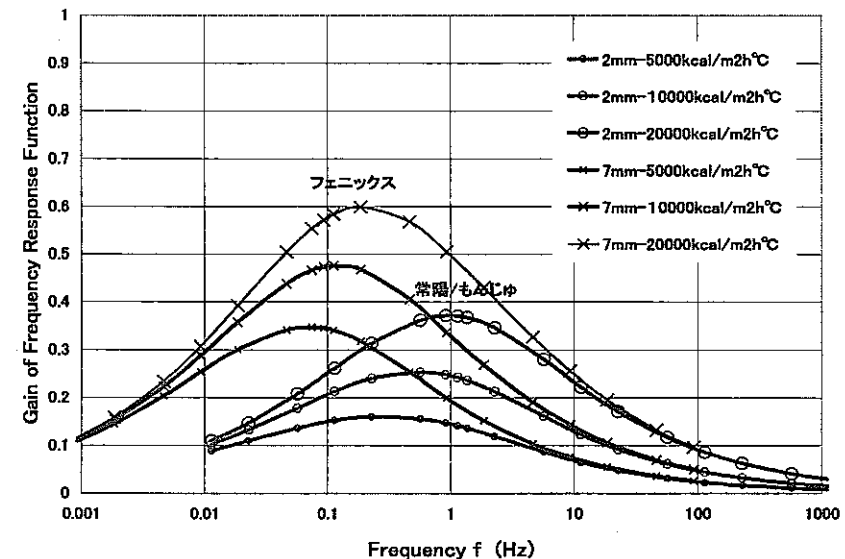
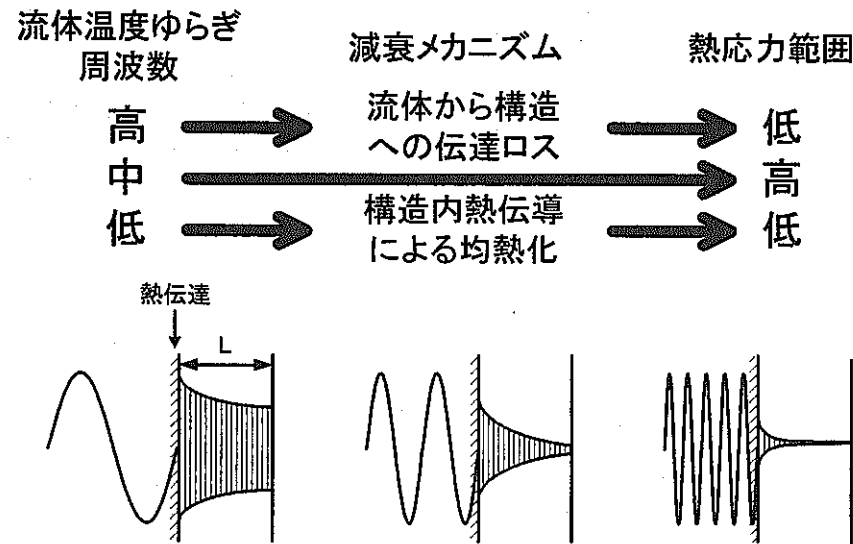


- 材料不連続によるひずみ再配分と、溶接金属の微視的劣化機構のモデル化に基づいた、弾性解析に基づく溶接部の強度評価法
- 従来は低応力部に限定されていた継手の使用自由度を拡大し、設計合理化に寄与。

- 弾性追従モデルを局所的非弾性挙動と総体的非弾性挙動の両者の予測ができるように拡張、構造不連続部の合理的評価法を開発。

熱荷重評価技術

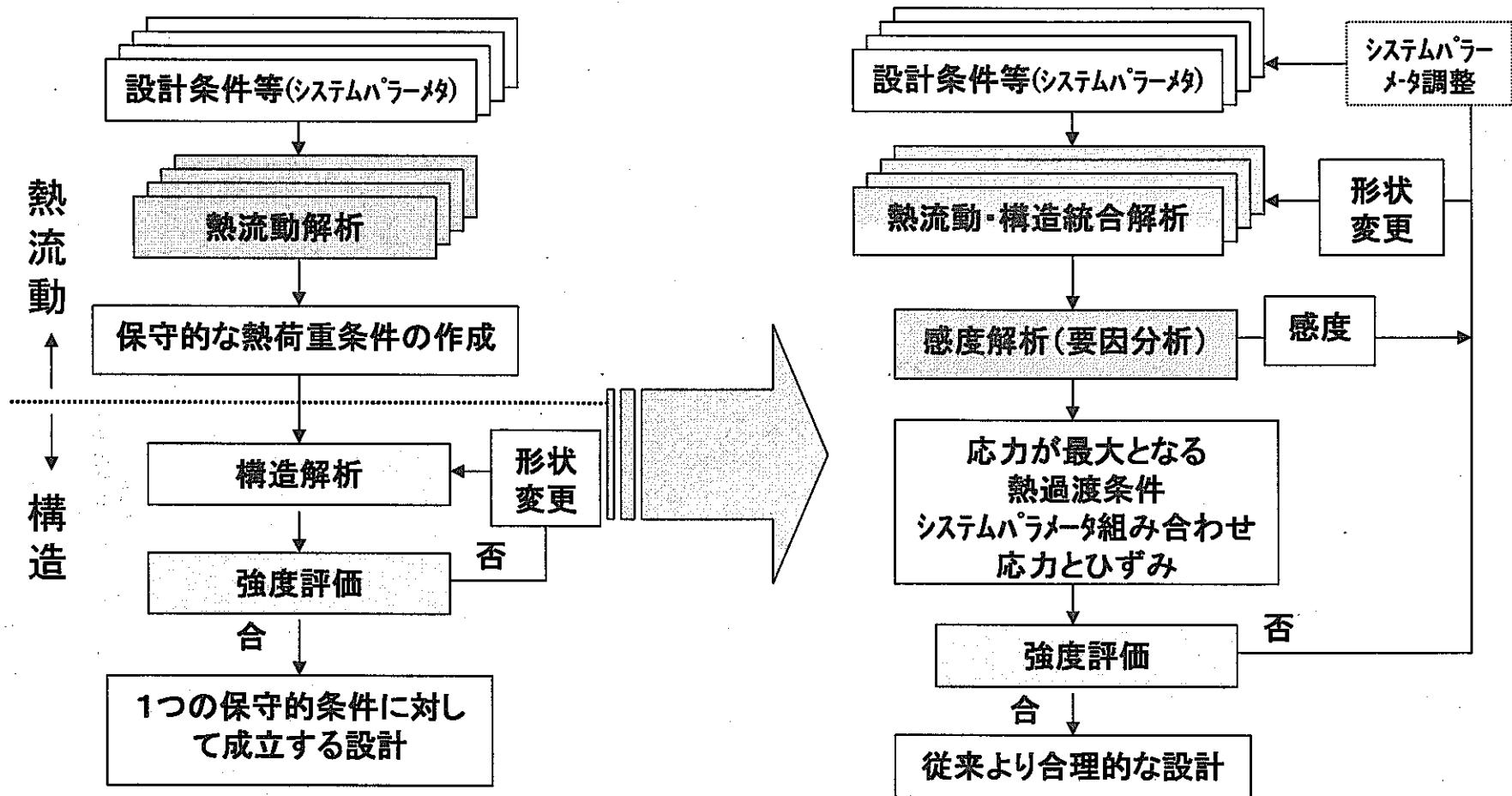
サーマルストライピング：周波数伝達関数による評価



- 流体温度ゆらぎの周波数と構造の応力応答との関係を解明，この性質を定量化した流体温度ゆらぎに対する構造の周波数応答関数によって熱応力を合理的に評価できるようにし，各種のベンチマークで妥当性を検証した。
- 今後，周波数制御の熱疲労試験によって総合的な妥当性を検証し，評価法として完成させる。

熱荷重評価技術(1/2)

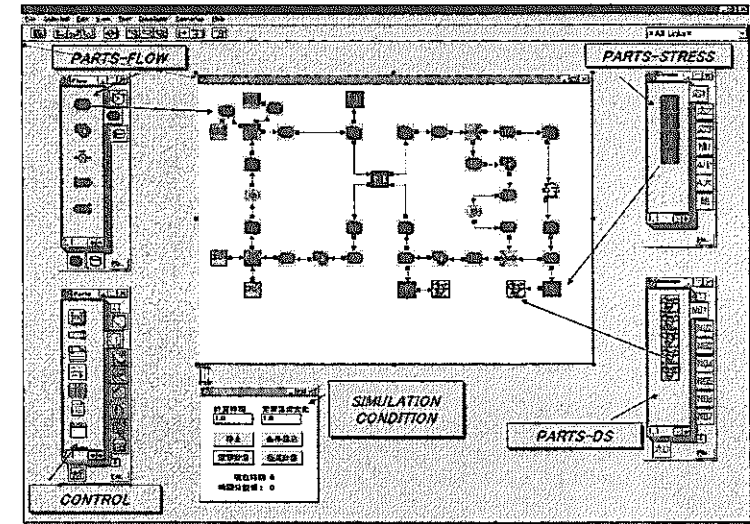
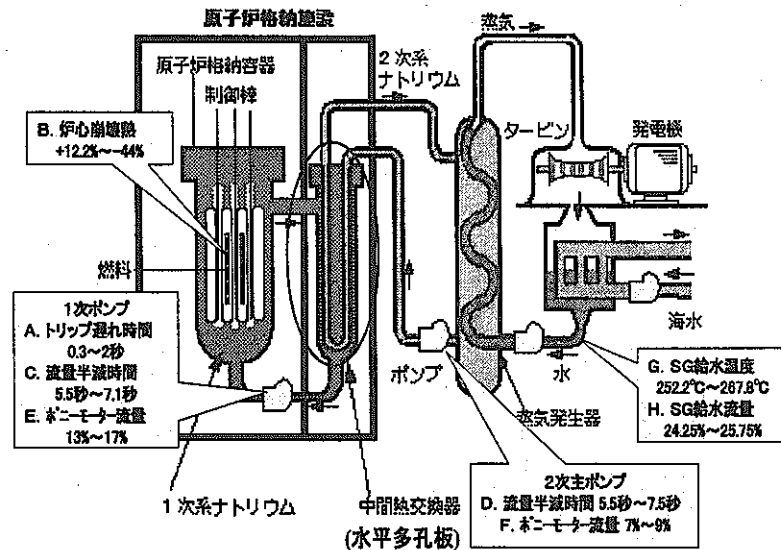
熱流動-構造統合解析による、熱過渡荷重の合理的評価と構造最適化



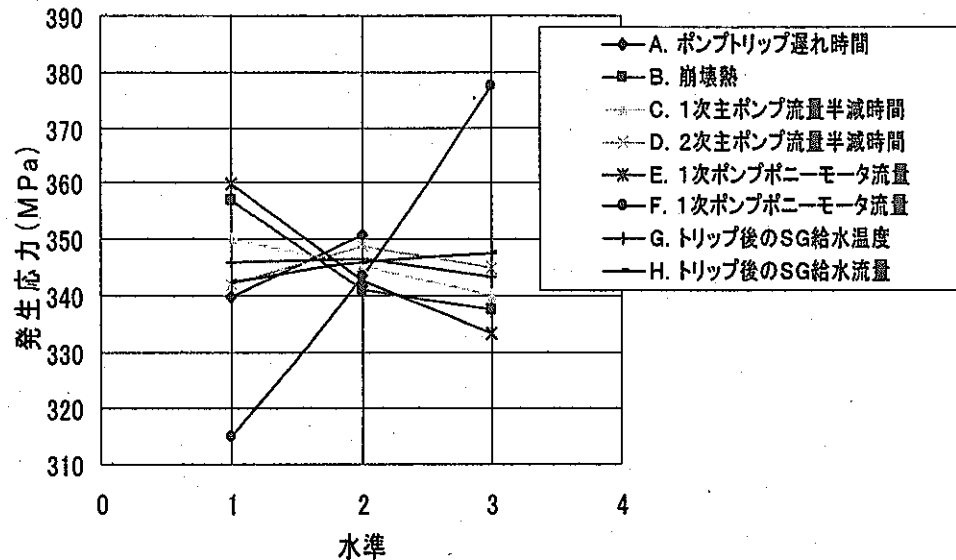
従来の熱流動・構造個別評価法

ねらいとする熱流動・構造統合評価法

熱荷重評価技術(2/2)



熱流動-構造統合解析コードPARTS(プロトタイプ)



ポンプトリップ遅れなどのシステムパラメタ変動(組み合わせ)

実験計画法による
解析ケース削減

PARTSによる統合解析で感度評価

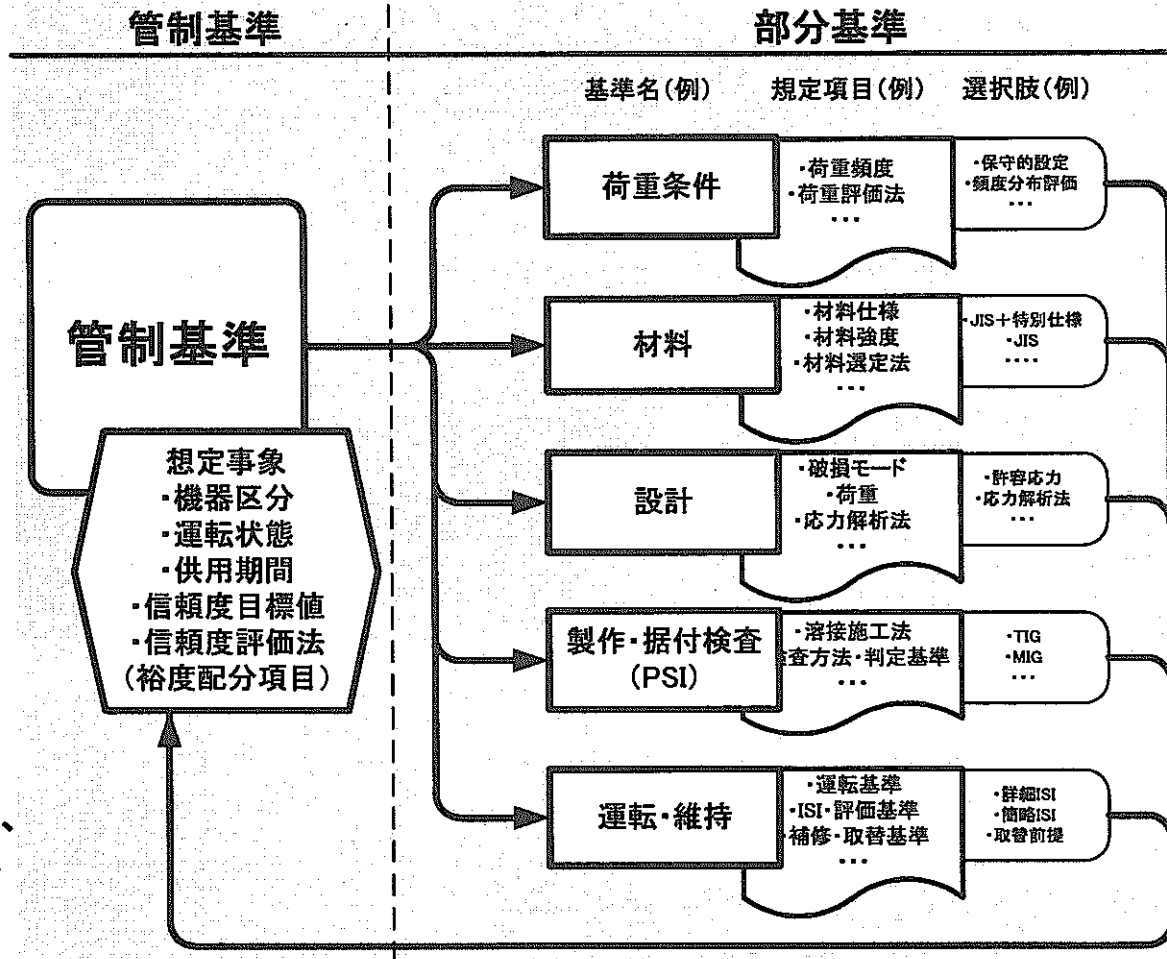
構造応答(熱応力)の観点から
望ましいシステムパラメタを探索

システム化規格開発

- システム化規格：規格基準に含まれる幾つかの技術項目の間で裕度を相互交換可能にすることにより、裕度の重複を避け、過剰な裕度を適正な水準に合理的に設定することを目標とする、柔軟かつ画期的な規格基準体系。

- 例えば、機器の使用条件や特性に応じて、設計裕度を大きくとることにより検査を簡略化する、あるいは、安価な材料を用いる代わりに検査を強化するなどの合理化方策を採用できるようにする。

- これにより、ライフサイクルを通じた信頼性管理が可能となるとともに、与えられた信頼度のもとで、コストミナマムでの設計・建設・維持を実現することができる。



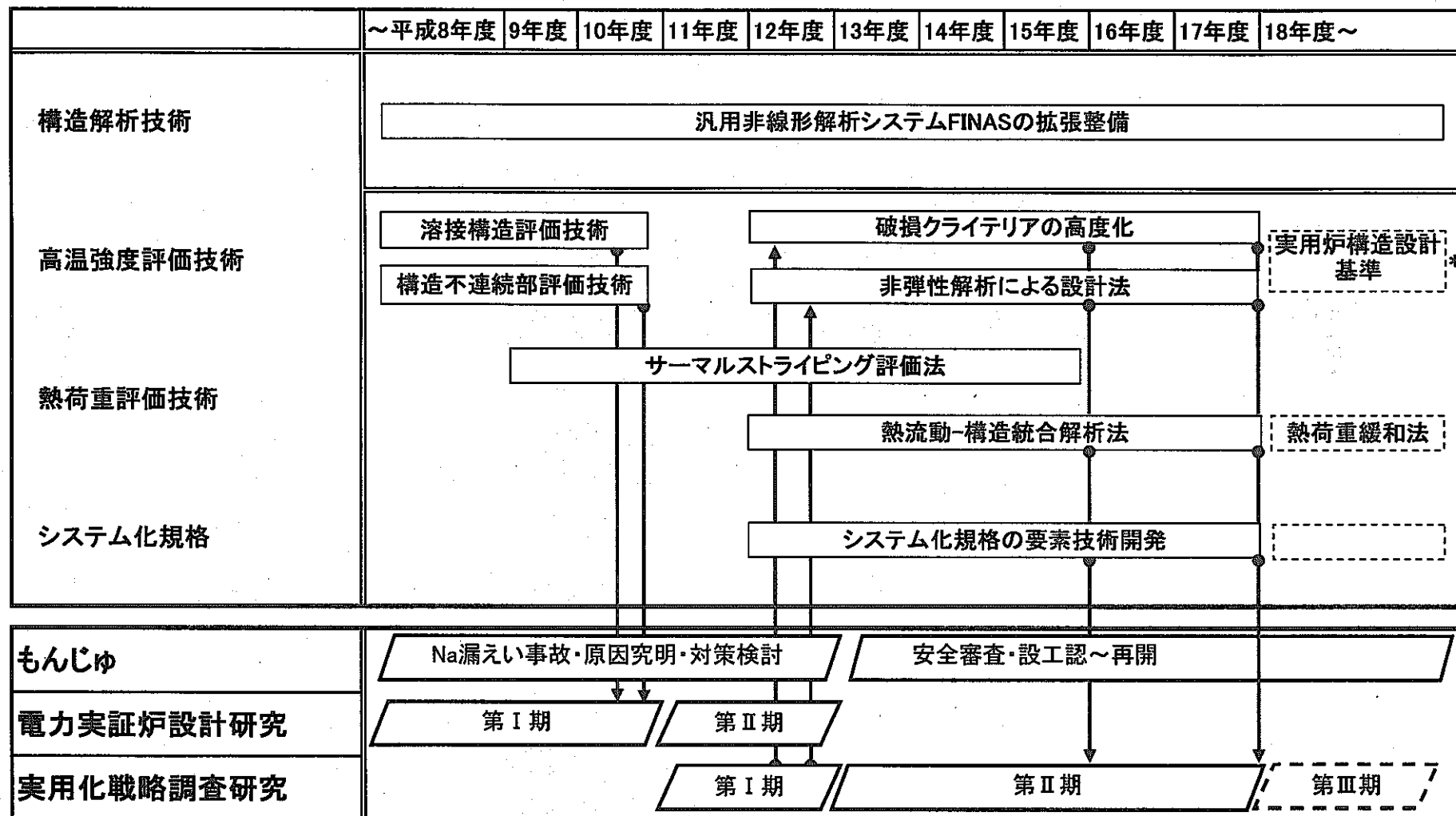
高温構造設計技術のまとめ(1/2)

	これまでの目標と成果 (平成9年度～13年度を中心)	今後の目標と計画 (平成14年度～17年度を中心)
構造解析技術	構造解析コードは、FBR開発のインフラであり、自社開発コードを保有することはニーズに即した改良や機能拡張が迅速に行えるなどの点で大きな意義を持つ。FINASは、我国唯一の本格的汎用非線形解析システムであり、先進的解析機能を整備し、商用コードに対する競争力を維持する。限定的規模で実施。	
	【成果・達成度】 大規模問題の高速計算が可能なソルバの導入による飛躍的性能向上を実現。その他種々の機能拡張。	
高温強度評価技術	【目標】 弾性解析に基づく設計の枠組みにおける課題として、溶接部及び構造不連続部の高温強度評価法の確立を目標。実証炉の構造設計方針に反映。 【成果・達成度】 溶接部の強度評価手法を開発、構造物試験によって検証。構造不連続について弾性追従モデルを拡張した手法を開発、構造物試験によって検証。実証炉高温構造設計方針案に反映し、目標は達成した。 【課題】 弾性解析に基づく設計の枠組みでは合理化に限界との認識。更なる合理化のためのブレークスルーが求められるようになった。	【目標(長期)】 非弾性解析による設計を可能とし、熱荷重が主体であることの特長を本質的に活かした構造設計技術の体系を構築。 【目標(4年間)】 非弾性解析による挙動評価手法と、これと対をなす破損クライテリアを開発。フェライト鋼製機器配管の構造設計手法を整備。(材料開発においてフェライト鋼の仕様が確定した後に着手) 【計画】 構成式の選定法、負荷順序の取扱いなどを含む非弾性設計指針の技術的骨子を定める。 ラチェット疲労の限界条件を見極めるとともに、設計に適用可能なNegligible Creep曲線を開発。

高温構造設計技術のまとめ(2/2)

	これまでの目標と成果 (平成9年度～13年度を中心)	今後の目標と計画 (平成14年度～17年度を中心)
熱荷重評価技術	【目標】 サーマルストライピングによる熱疲労破損防止の設計評価手法の体系構築。 【成果・達成度】 流体温度ゆらぎの周波数と構造の応力応答との関係に基づく熱応力の合理的な評価手法を開発。各種のベンチマークで検証し、当初の目的はほぼ達成。 平成15年度末を目途にナトリウム熱過渡高サイクル疲労試験による総合的検証。手法として完成させる。	【目標(長期)】 系統熱過渡荷重に対する最適構造設計を可能とする技術体系を構築し、設計に適用。 【目標(4年間)】 熱流動-構造統合解析コードを開発、設計例への試適用によって基本性能を確認。 【計画】 既往のプロトタイプコードPARTSをもとに適用範囲(系統構成)を拡張、詳細コードによる検証。大型ナトリウム炉の熱過渡設計への試用。
システム化規格	新規課題	【目標(長期)】 システム化規格の骨格をなす要素技術を開発し、例えば材料・製作法などの選択などについて、コストミニマムとなる選択肢を与える道を拓く。 【目標(4年間)】 システム化規格の構築に必要な要素技術開発に着手。システム化規格概念の技術的成立性に見通しをつける。 【計画】 管制基準と部分基準からなる体系を考え、管制基準については、信頼度評価法開発を、部分基準については、荷重、強度の統計的処理方法の開発などを行う。

高温構造設計技術の研究開発計画



*1: 国又は学会基準に反映

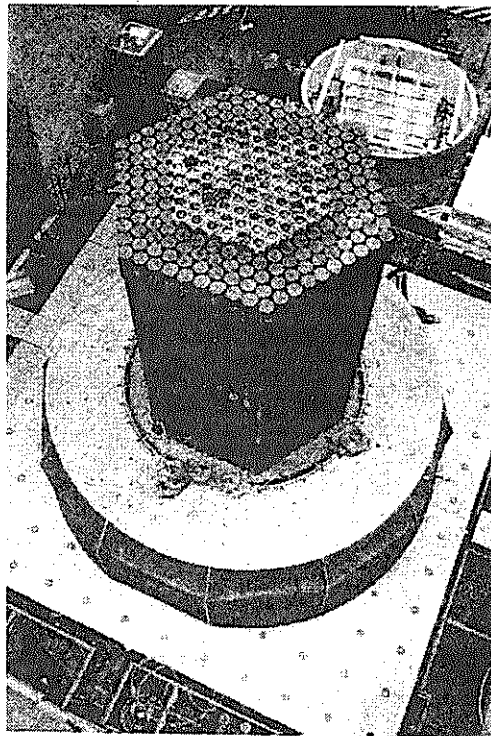
耐震設計技術に関する研究：

耐震設計技術に関する研究開発は、地震時のプラントの安全性と構造健全性を確保・向上することを目的としており、厳しい地震条件の我国においてFBRを実用化する上で必須の技術である。

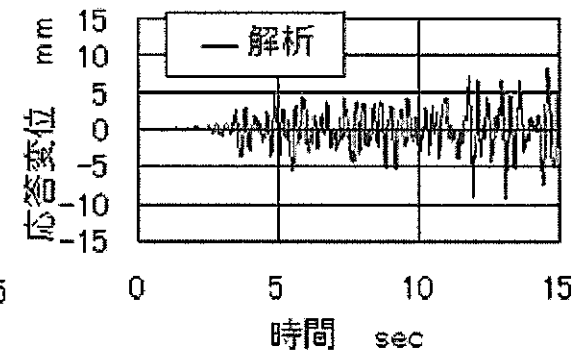
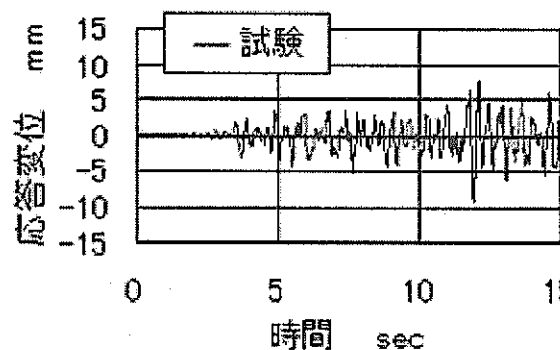
- 耐震解析技術： 地震時の炉心の衝突振動解析手法、高温ナトリウム配管の耐震強度評価法など、FBRに特有の課題に関するこれまでの研究。
- 3次元免震構造開発： 地震荷重を根本的に緩和する技術としての3次元免震構造（水平と上下の両方を免震）の研究開発。実用化戦略調査研究におけるプラント候補概念への適用。

耐震解析技術

CEA/JNC SYMPHONY共同研究 フェニックスの実大炉心模型の振動実験



- 高速炉の炉心は地震時に衝突振動。その評価は安全性(制御棒挿入性など)の評価に直結。
 - 仏CEAとのSYMPHONY共同研究を活用し、炉心の地震応答挙動を解析する手法を確立。
- 従来の手法による解析では炉心の1列のみを取出してこれが列方向の地震入力を受ける場合に限定。
- 本研究により、全炉心体系を対象として水平2方向の地震を受ける場合の解析を可能とした。また、流体の影響を評価する手法を確立。

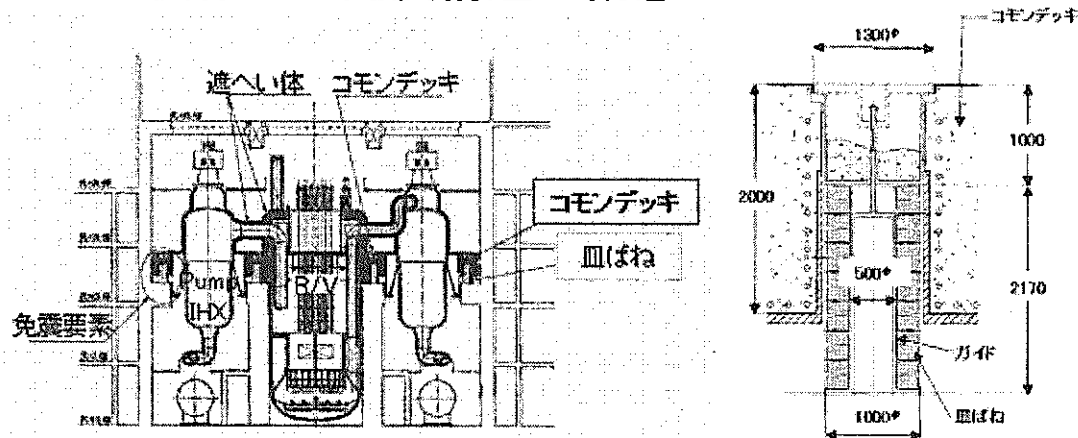


解析と実験は
良く一致



3次元免震構造開発

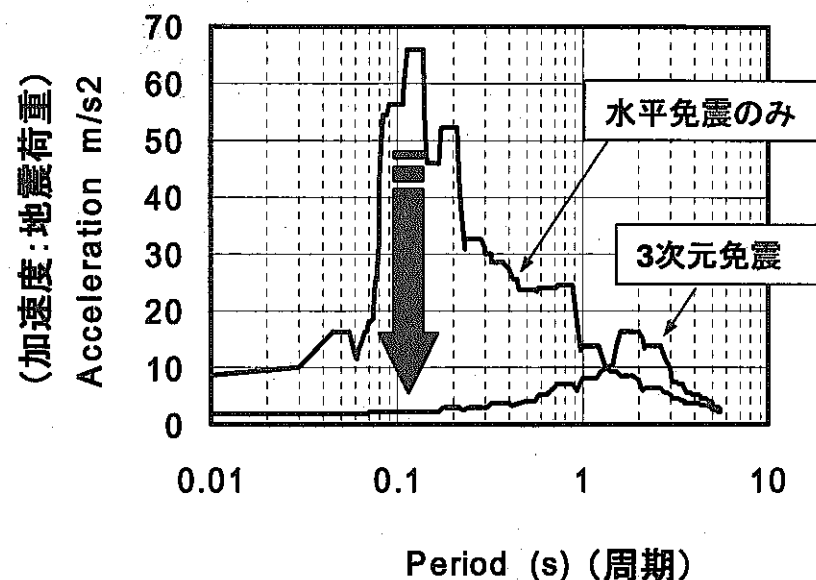
機器上下免震構造の概念



- 3次元免震の適用によって、地震荷重の抜本的な緩和が期待できる。
- コモンデッキ方式による機器上下免震構造の概念を創出した。

建屋全体は水平免震とし、原子炉容器などを吊下げる共通床(コモンデッキ)を、大型皿ばねを用いた上下免震要素で支持する構造。

機器上下免震の効果

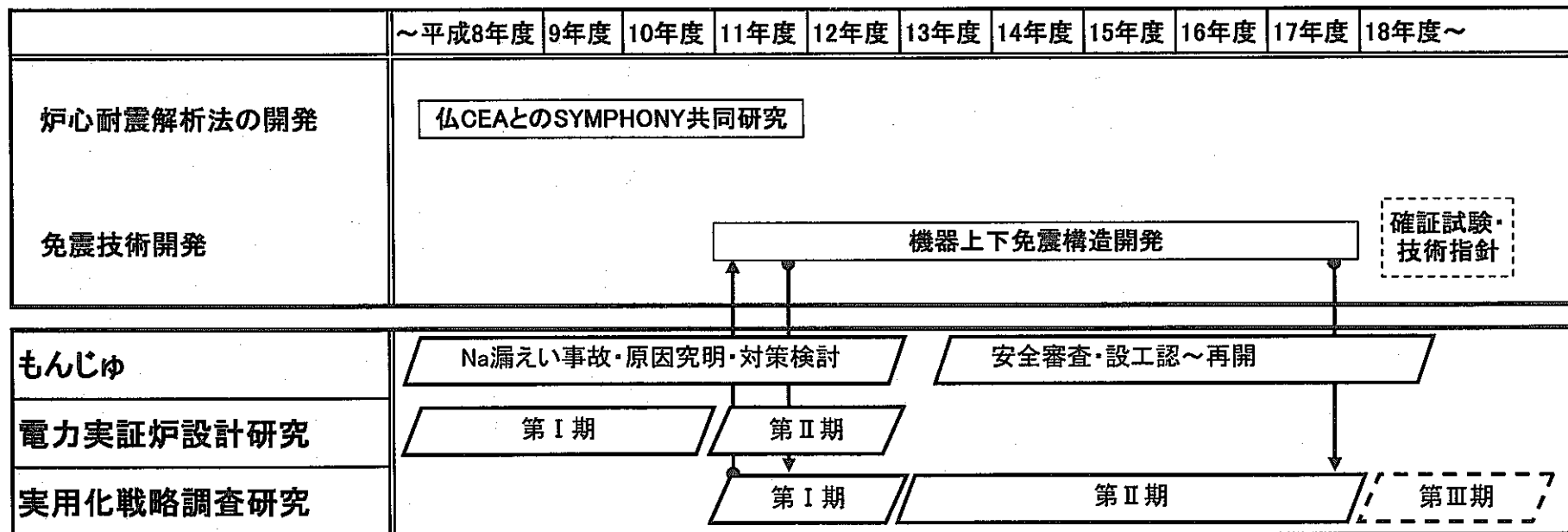


- 機器上下免震に適切な免震特性(免震振動数と減衰性能)の領域を明らかにした。
- 本概念について、振動試験によってその基本的な成立性と免震効果を確認した。
- 免震要素としての大型の皿ばねについて、基本的な荷重-変位特性を評価する手法を開発した。

耐震・免震技術のまとめ

	これまでの目標と成果 (平成9年度～13年度を中心)	今後の目標と計画 (平成14年度～17年度を中心)
耐震解析技術	【目標】 FBR炉心の耐震安全性評価手法高度化のため、地震時における炉心の衝突振動解析手法を確立。 【成果・達成度】 仏CEAとの共同研究により、全炉心の水平2方向地震応答解析手法を確立、振動試験で検証。もんじゅの改良制御棒評価に反映。目標は達成。	当面、3次元免震構造開発に集中。
3次元免震構造開発	【目標】 FBRプラントに適用可能な3次元免震構造の概念の創出と基本的な成立性の確認。 【成果・達成度】 1次系機器を共通床で支持し、これを皿ばねによる上下免震装置で免震する構造概念を創出し、小型の振動試験で免震効果(加速度の低減)を確認。	【目標(長期)】 機器上下免震構造が実際のプラントに適用できることを確認するとともに、これを実現するための技術指針(案)を策定。 【目標(4年間)】 免震要素としての皿ばねに関する各種力学特性データを取得するとともに強度設計手法を整備し、これを技術指針の骨子として集大成する。 【計画】 摩擦やクリープを考慮した皿ばねの設計式を開発し、力学試験によって検証。機器上下免震に適用可能な減衰要素を開発、基本性状を確認。

耐震・免震技術の研究開発計画



各種炉型への技術の適用性

	Na冷却炉	重金属冷却炉	ガス冷却炉
設計のフェーズ	経済性向上に重点をおいた、 ある程度詳細な設計	概念設計の段階 設計成立性の判断が焦点	概念設計の段階 設計成立性の判断が焦点
材料評価技術			
材料強度評価法	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
新材料開発	各炉型に共通の技術		
材料損傷定量化	各炉型に共通の技術		
腐食関連技術	Na腐食	LBE腐食	
高温構造設計技術			
構造解析技術	FBR開発、基盤技術開発のインフラとして整備		
構造強度評価法	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
熱荷重評価法	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
システム化規格	各炉型に共通の技術		
耐震設計技術			
耐震解析技術	主としてNa炉を対象	Na炉の技術の転用可能、必要に応じて第3期以降に展開	
3次元免震開発	各炉型に共通の技術		

今後の重点研究課題

■ 実用化戦略調査研究第2期への反映(中期的)

- FBR用フェライト鋼の開発と適用性判断
- 非弾性解析設計の実用化と熱流動-構造統合解析手法
- 機器上下免震構造の開発
- LBE腐食

■ 基盤技術としての長期的展開

- 現象論的アプローチから機構論的アプローチへ
 - 材料試験DBに基づく外挿→損傷機構に基づく長時間寿命予測
- 設計課題の解決から、最適設計技術の提供へ
 - 熱荷重に対する構造最適化技術
- 設計、運転の個別評価から、プラントの包括的健全性管理技術体系へ
 - リスクベース技術や構造信頼性技術の展開

研究開発の実施体制(JNC内)

実用化戦略調査研究

基盤技術開発

本社・FBR開発推進部

大洗工学センター

システム技術開発部

FBRシステムGR

プラントシステム設計研究

設計の課題
ニーズ

課題への対応,
設計提案

要素技術開発部

新技術開発試験GR

新材料研究GR

構造信頼性研究GR

材料評価技術

高温構造設計技術

耐震・免震技術(試験含む)

再開支援

もんじゅ

今後の資金計画と要員計画

- 高速増殖炉の機器構造材料研究関連予算の推移（実績と見込み）は以下のとおりである。

	合計	この内, 実用化戦略調査研究費
平成9年度～13年度(5年間)の実績	約47億円*	約2億円 (H12, 13年度の合計)
平成14年度～17年度(4年間)の実績と見込み	約27億円*	約6億円

分野毎の内訳:	材料	構造	耐震
これまで (47億)	17	26	3
今後 (27億)	11	14	2

四捨五入の関係で合計は一致しない。

- 研究開発要員は、約20名で推移する予定。

国内外の研究協力(1/2)

■ 国内協力

□ 原研との融合研究の計画

(照射環境下での材料劣化に関する研究)

□ 日本原電との共同研究

(構造設計手法, 3次元免震)

□ 電力中央研究所との協力

(12Cr試験での協力, 構造健全性の情報交換)

□ 物質・材料機構

(FBR材料高温強度に関する情報交換)

□ 大学との協力 15件

(先行基礎工学, 公募型などの枠組み利用)

□ 軽水炉への協力

(学会などの各種委員会で軽水炉基準にFBR知見を反映)

国内外の研究協力(2/2)

■ 国際協力

- IAEA: Phenix配管破損に関するベンチマークに参加(終了)
- OECD/NEA: 配管熱疲労国際ベンチマークへの参加
- CEA(仏) : 構造健全性, 耐震, 材料分野の協力
(共同研究, 研究者の相互派遣)
- DOE(米) : 鉛ビスマス利用技術に関する情報交換
- MIT(米) : 鉛ビスマス腐食研究(委託)
- FZK(独) : 鉛ビスマス腐食研究(共同研究)

■ 国際貢献

- 中国, 韓国: 文科省原子力研究交流制度による講師派遣
(延べ7人)
- アジア諸国: 文科省原子力研究交流制度による研修生の
受入(2, 3人/年)

研究開発成果の公開・普及 (1)

平成8年度～13年度の実績

	材料評価 技術	高温構造 設計技術	耐震設計 技術	合計
専門誌等への論文投稿, 国際会議論文投稿	42	43	9	94
学会口頭発表	39	38	7	84
成果報告書, サイクル機構技報	67	73	19	159
特許(国内, 海外)	5	8	1	14

研究開発成果の公開・普及 (2)

■ FINAS:

FINASは我国唯一の有限要素法に基づく汎用非線形解析システムであり、現在、大学・研究機関、産業界を含め140社以上に導入されており、軽水炉許認可や一般産業施設の設計に活用されている。

■ 高温構造設計基準:

- 原研高温ガス炉の基準には高速炉基準が全面的に採用されている。
- ITER計画に関連して、同じく原研に316FRの材料強度データと評価法を提供。
- 機械学会の設計建設規格において、簡易弾塑性解析のための設計係数として、サイクル機構において開発された手法が採用されている。

■ サーマルストライピング評価法:

機械学会においてサーマルストライピング評価指針を策定中であるが、JNCにおけるこれまでの研究成果がこの検討に反映されている。

■ SMAT:

火力プラントの高温設計高度化を目指した研究へ、SMATを通じた高速炉データとクリープ疲労評価法、弾性追従モデルによる簡易非弾性評価法などの技術を提供。

まとめ

- FBR実用化のための基盤技術の一翼として、機器構造材料に関する研究開発を大洗工学センターにおいて着実に推進する。
- その成果は、実用化戦略調査研究第2期における有望概念の成立性判断と絞込みに反映する。
- 最終的にはFBR機器の構造設計技術として体系化し、構造設計基準、材料強度基準などの規格基準（国、機械学会など）の整備に貢献する。
- これらの成果は普遍性を持ち、もんじゅの運転再開支援はもとより、軽水炉や核融合炉、並びに広く一般産業にも貢献するものである。