JNC TN9440 2002-004

R & D報告会資料

〔平成14年度　第1回～第5回〕

（業務報告）

2002年10月

技術情報
No.
2003. 5. 19
サイクル機構大洗工学センター

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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）
2002

JNC TN9440 2002-004
２００２年10月

Ｒ＆Ｄ報告会資料

〔平成14年度 第1回～第5回〕
(業務報告)

開発調整室*

要　旨

大洗工学センターにおけるＲ＆Ｄ報告会は、海外出張における成果およびＲ＆Ｄの成果を報告し、それに対する討議を行い、今後実施していく大洗工学センターにおけるＲ＆Ｄへの反映を図ること並びに発表者の発表能力の向上を目的として、毎月第２金曜日に実施されている。

本資料は、Ｒ＆Ｄ報告会において報告された資料を事務局が取りまとめたものであり、詳細報告についてはＲ＆Ｄ担当課室・Gr より海外出張報告書あるいは成果報告書として発行される予定である。本報告書は平成14年4月から平成14年9月にかけて報告された成果をまとめたものである。

なお、本資料は報告会で使用した公開資料のみを記載した。

＊編集事務局

目　次

[第1回　R＆D報告会]　平成14年4月25日～4月26日開催

1.実用化戦略調査研究フェーズIIの概要 1
システム部　部長　可児　吉男

2.H13年度炉心検討の着眼点 9
システム部　炉燃Gr.　GL　林　秀行

3. Na炉の炉心検討（大型・中型金属燃料炉心） 17
システム部　炉燃Gr.　副主研　杉野　和輝

4.大型Na炉主要構造の構造成立性検討 25
技開部　構造Gr.　研究主幹　笠原　直人

5.LLFP核変換を行うNa大型炉心の予備的設計検討 37
システム部　炉燃Gr.　高木　直行

6.鉛ビスマス冷却中型炉の炉心検討 45
システム部　炉燃Gr.　山口　浩之

7. 小型炉の炉心検討 53
システム部　炉燃Gr.　副主研　宇都　成昭

8. 多様な炉心の炉心安全性の検討 65
技開部　リスクGr.　副主研　飛田　吉春

9.3次元免震開発の現状 73
技開部　構造Gr.　副主研　北村　誠司

10.ODS鋼被覆管の実用化技術開発 83
システム部　核燃料Gr.　皆藤　威二

11.LLFP核変換解析手法の検討 91
システム部　中性子Gr.　副主研　大木　繁夫

12.不要元素除去による新リサイクル概念　―ORIENTサイクル― 99
システム部　炉燃Gr.　高木　直行

13.ペレット燃料製造システムの主要機器概念設計 107
システム部　燃料製造Gr.　GL　田中　健哉

14.金属燃料製造システムの概念設計（サイクル機構/電中研共同研究） 115
システム部　燃料製造Gr.　星野　康史

15.湿式対応振動充填燃料製造システムの概念設計
（ゲル化設備機器の概念設計） 125
システム部　燃料製造Gr.研究員　川口　浩一

16. 湿式対応振動充填燃料製造システムの概念設計
（振動充填機器の概念設計） 133
システム部　燃料製造Gr.　新開　康夫

17.FBRサイクルの総合的安全評価　―湿式施設のリスク分析― 143
システム部　安全設計Gr.副主研　栗坂　健一

18.先進湿式再処理システムの設計研究成果.....153
ｼｽﾃﾑ部　再処理Gr.　副主研　高田　岳
19.バーチャルリアリティ技術を用いた乾式再処理設計支援システムの開発.....165
ｼｽﾃﾑ部　再処理Gr.　研究員　米澤　重晃
20.多面的評価指標の検討　―他電源との比較、社会的受容性―.....173
ｼｽﾃﾑ部　ｻｲｸﾙGr.　副主研　篠田　佳彦
21.水素利用社会を想定した戦略的回収元素の需給シナリオ.....181
ｼｽﾃﾑ部　ｻｲｸﾙGr.　副主研　大滝　明
22.プロジェクト評価手法の開発　―投資対効果及びリアルオプション法―.....189
ｼｽﾃﾑ部　ｻｲｸﾙGr.　副主技　塩谷　洋樹
23.報告会議事内容(Ｑ＆Ａ).....199

[第２回　Ｒ＆Ｄ報告会]　平成14年5月17日開催

1.再臨界排除可視化基礎試験の進捗.....219
技開部　ﾘｽｸGr.　研究員　松場　賢一
2.Ｔ字配管内温度変動に関する実験研究.....227
技開部　開発Gr.　副主研　五十嵐　実
3.反応性混相流の数値実験研究（ＳＥＲＡＰＨＩＭコードの開発）
―ナトリウム―水反応と界面現象をシミュレーションする―.....239
技開部　流体Gr.　副主研　高田　孝
4.報告会議事内容(Ｑ＆Ａ).....247

[第３回　Ｒ＆Ｄ報告会] 平成14年6月14日開催

1.「常陽」ＭＫ－Ⅲ改造工事における冷却系の不純物管理.....251
照射ｾﾝﾀｰ　実験炉部　原二課　副主研　住野　公造
2.「常陽」炉内サーベイランス試験の現状と中性子照射量評価.....259
照射ｾﾝﾀｰ　実験炉部　技術課　石田　公一
3.「常陽」ＭＫ－Ⅱ炉心特性データベースのＪＥＮＤＬ－３．２への改訂.....271
照射ｾﾝﾀｰ　実験炉部　技術課　研究員　大川内　靖
4.「常陽」ＭＫ－Ⅲ総合機能試験（その１）の結果.....283
照射ｾﾝﾀｰ　実験炉部　原一課　副主技　則次　明広
5.報告会議事内容(Ｑ＆Ａ).....295

[第4回　R＆D報告会] 平成14年7月12日開催
1.「もんじゅ」の安全審査の状況について.....301
敦賀本部　もんじゅ建設所　技術主席　前田　清彦
2.報告会議事内容(Q＆A).....313

[第5回　R＆D報告会]　平成14年9月20日開催
1.「常陽」照射ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料の照射挙動.....315
照射ｾﾝﾀｰ　燃材部　FMS　研究員　田中　康介
2.オーステナイト系ステンレス鋼の照射促進拡散能の評価について.....325
照射ｾﾝﾀｰ　燃材部　MMS　副主研　赤坂　尚昭
3.報告会議事内容(Q＆A).....333

JNC TN9440 2002-004

第１回　Ｒ＆Ｄ報告会

〔平成 14 年 4 月 25 日～26 日〕

JNC

大洗工学センター研究開発報告会資料

実用化戦略調査研究フェーズⅡの概要

JNC

平成14年4月25日

大洗工学センター システム技術開発部

可児 吉男

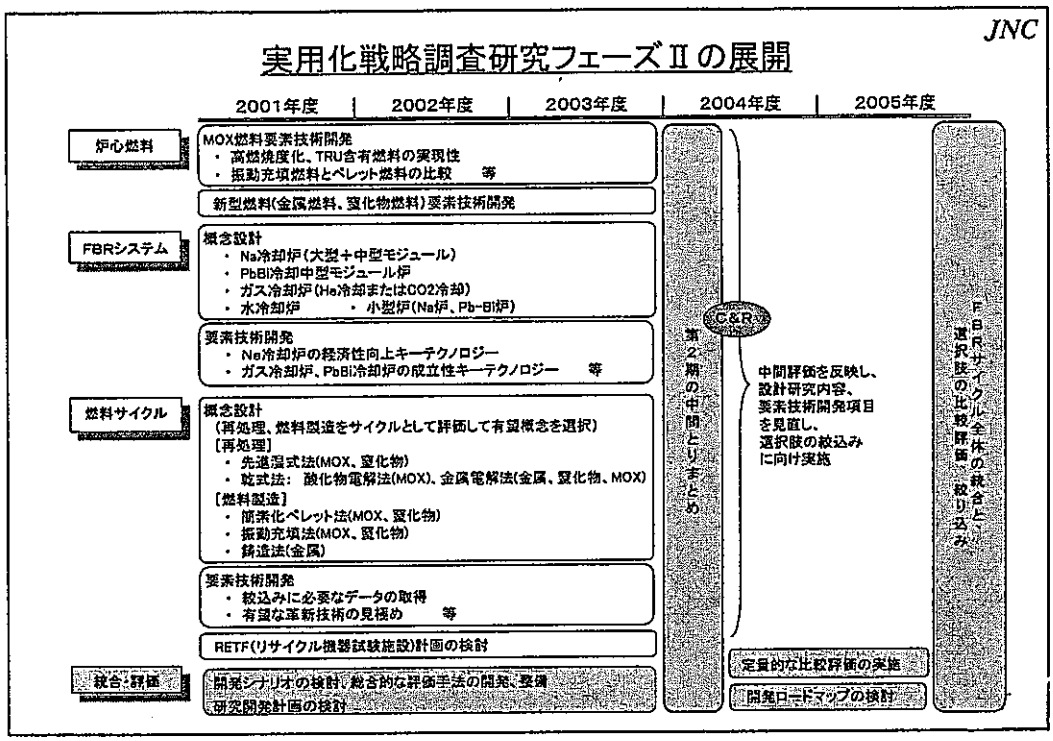
JNC

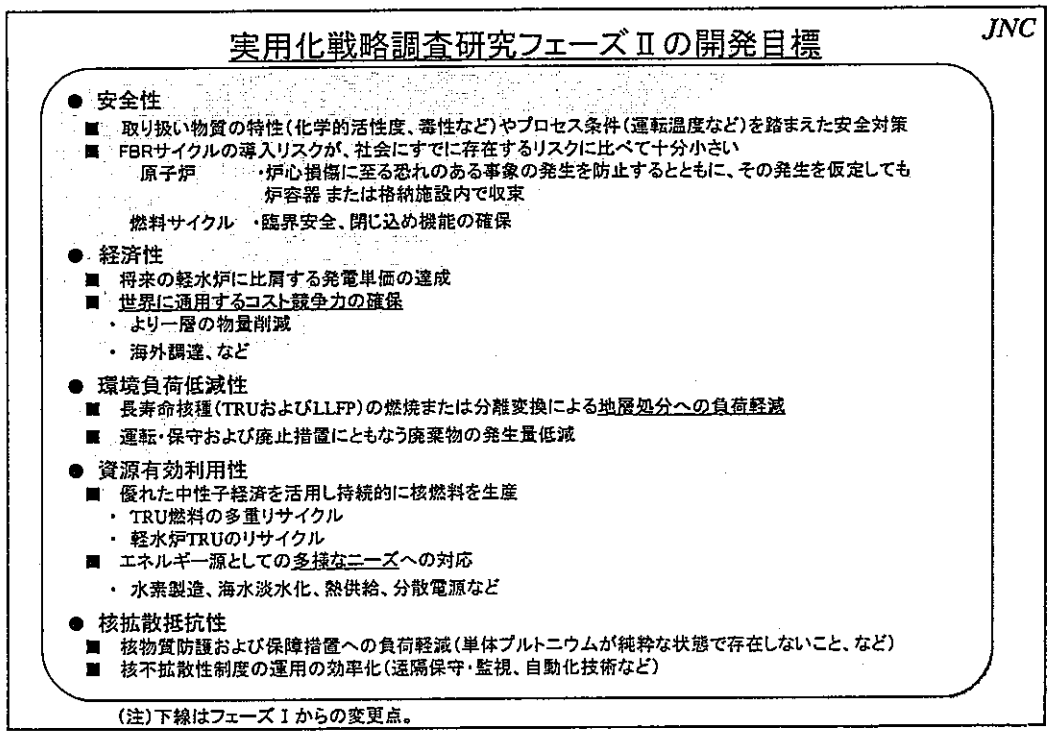
実用化戦略調査研究フェーズⅡの目的

フェーズⅡの目的

- 革新技術の導入
- 設計研究や要素技術の基礎試験の実施
- 研究開発計画の整備
- 複数の実用化候補概念に絞り込む

- ステップごとにチェック・アンド・レビューを受けつつ、社会的状況の変化に応じ柔軟に進める
- 実用化候補概念として、有望な2～3の候補に絞り込む
  - ・要素技術開発と概念設計を進め、定量的な評価を行う
  - ・FBRと燃料サイクルとの整合性、及び放射性廃棄物の処理処分との整合性を図る
- 競争力あるFBRサイクルの技術体系整備（目標：2015年頃）に向け、すでに作成済みの開発計画（ロードマップ）を精査していく


JNC
実用化戦略調査研究フェーズⅡの展開
2001年度
2002年度
2003年度
2004年度
2005年度
炉心燃料
MOX燃料要素技術開発
・高燃焼度化、TRU含有燃料の実現性
・振動充填燃料とペレット燃料の比較　等
新型燃料(金属燃料、窒化物燃料)要素技術開発
FBRシステム
概念設計
・Na冷却炉(大型＋中型モジュール)
・PbBi冷却中型モジュール炉
・ガス冷却炉(He冷却またはCO2冷却)
・水冷却炉　・小型炉(Na炉、Pb-Bi炉)
要素技術開発
・Na冷却炉の経済性向上キーテクノロジー
・ガス冷却炉、PbBi冷却炉の成立性キーテクノロジー　等
燃料サイクル
概念設計
(再処理、燃料製造をサイクルとして評価して有望概念を選択)
[再処理]
・先進湿式法(MOX、窒化物)
・乾式法：酸化物電解法(MOX)、金属電解法(金属、窒化物、MOX)
[燃料製造]
・簡素化ペレット法(MOX、窒化物)
・振動充填法(MOX、窒化物)
・鋳造法(金属)
要素技術開発
・絞込みに必要なデータの取得
・有望な革新技術の見極め　等
RETF(リサイクル機器試験施設)計画の検討
統合・評価
開発シナリオの検討、総合的な評価手法の開発、整備
研究開発計画の検討
第2期の中間とりまとめ
C&R
中間評価を反映し、
設計研究内容、
要素技術開発項目
を見直し、
選択肢の絞込み
に向け実施
定量的な比較評価の実施
開発ロードマップの検討
FBRサイクル全体の統合と
選択肢の比較評価、絞り込み


JNC
実用化戦略調査研究フェーズⅡの開発目標
● 安全性
■ 取り扱い物質の特性(化学的活性度、毒性など)やプロセス条件(運転温度など)を踏まえた安全対策
■ FBRサイクルの導入リスクが、社会にすでに存在するリスクに比べて十分小さい
原子炉　・炉心損傷に至る恐れのある事象の発生を防止するとともに、その発生を仮定しても炉容器 または格納施設内で収束
燃料サイクル　・臨界安全、閉じ込め機能の確保
● 経済性
■ 将来の軽水炉に比肩する発電単価の達成
■ 世界に通用するコスト競争力の確保
・より一層の物量削減
・海外調達、など
● 環境負荷低減性
■ 長寿命核種(TRUおよびLLFP)の燃焼または分離変換による地層処分への負荷軽減
■ 運転・保守および廃止措置にともなう廃棄物の発生量低減
● 資源有効利用性
■ 優れた中性子経済を活用し持続的に核燃料を生産
・TRU燃料の多重リサイクル
・軽水炉TRUのリサイクル
■ エネルギー源としての多様なニーズへの対応
・水素製造、海水淡水化、熱供給、分散電源など
● 核拡散抵抗性
■ 核物質防護および保障措置への負荷軽減(単体プルトニウムが純粋な状態で存在しないこと、など)
■ 核不拡散性制度の運用の効率化(遠隔保守・監視、自動化技術など)
(注)下線はフェーズⅠからの変更点。

JNC

実用化戦略調査研究フェーズⅡの主な設計要求(1/3)

FBRシステム(基幹電源)

発電単価	：4.0円/kWh(要求値。さらに第二段階として、海外の発電単価を視野に入れ、国際水準の達成見通しを得ること)
連続運転期間	：13ヶ月以上(要求値。目標値として18ヶ月以上)
プラント寿命	：60年(要求値)
建設工期	：目標値として、大型炉42ヶ月、中型モジュール炉36ヶ月
増殖性能	：低除染TRU燃料を前提に、FP核変換を行なう場合、増殖比1.0以上 目標値として、増殖比1.2以上、複利システム倍増時間30年以下
TRU燃焼	：低除染TRU燃料を前提に、FBRマルチリサイクル及び長期貯蔵LWR-SFを視野に入れたサイクルを考慮
FP核変換	：当面、Se-79,Zr-93,Tc-99,Pd-107,Sn-126,I-129及びCs-135を検討対象
放出放射能	：現行軽水炉の申請書記載値と同等以下
廃棄物発生量	：運転・保守に伴う固体廃棄物発生量の目標値として現行軽水炉の1/10以下(廃止措置時)極力低減
安全性	：受動安全機能、再臨界回避　炉心損傷頻度10^{-6}/炉年未満

(注)下線はフェーズⅠからの変更点。

JNC

実用化戦略調査研究フェーズⅡの主な設計要求(2/3)

燃料サイクルシステム

燃料サイクル費	：0.8円/kWh以下(別途輸送費として0.3円/kWhを考慮)
稼働率	：200日/年、100%
プラント寿命	：建屋40年
放出放射能	：現行軽水炉燃料サイクル施設の申請書記載値と同等以下
廃棄物発生量	：(通常運転時)現行軽水炉燃料サイクル施設と同等以下、目標値として1/10(廃止措置時)極力低減
廃棄物への移行率	：(U,TRU)　1%以下、目標値として0.1% (I,Tc)　目標値として、1～0.1% (Cs,Sr)　目標値として、1%
安全性	：軽水炉燃料サイクルと同等大規模放出事象の発生頻度の目標値として10^{-6}/年・プラント以下

(注)下線はフェーズⅠからの変更点。

JNC

実用化戦略調査研究フェーズⅡの主な設計要求(3/3)

FBRシステム(小型炉)

発電単価	：5.5円/kWh(要求値)
燃料交換間隔	：10年以上(要求値)、目標値として30年
ﾌﾟﾗﾝﾄ寿命	：60年(要求値)
建設工期	：目標値として、20ヶ月以内
増殖性能	：高い内部転換機能を利用し、炉心の長寿命化を優先
TRU燃焼	：低除染TRU燃料を前提に、FBRﾏﾙﾁﾘｻｲｸﾙ及び長期貯蔵LWR-SFを視野に入れたｻｲｸﾙを考慮
FP核変換	：余剰中性子は炉心の長寿命化に活用し、FP核変換は要求しない
放出放射能	：現行軽水炉の申請書記載値と同等以下
廃棄物発生量	：基幹電源と同じ目標値として現行軽水炉の1/10以下(廃止措置時)極力低減
安全性	：受動安全機能、再臨界回避、炉心損傷頻度10^{-6}/炉年未満

(注)下線は基幹電源との相違点。

JNC

検討の視点ーFBRシステムー

Na炉：魅力を引出す、Naの欠点克服

- フェーズⅠで構築した概念は開発目標を凌駕した。一方、成立限界に近づいていると危惧された。
- フェーズⅡ：成立性に係る要点を吟味→試験研究(水流動試験等)
- 中型炉：プラント概念構築、魅力ある炉心

JNC

検討の視点ーFBRシステムー

重金属炉

- フェーズⅠ概念(完全自然循環方式)
  Pufインベントリが過大、導入シナリオに不適
- フェーズⅡ:
  炉心性能を改善
  強制循環方式も再検討

JNC

検討の視点ーFBRシステムー

ガス炉

- フェーズⅠ:冷却材の選定を見送る。
  炭酸ガス炉:送電端25万円/kWe
  He被覆粒子炉:システム倍増時間=116y
- フェーズⅡ初年度:冷却材の選定を行う
  炭酸ガス炉:建設コスト低減化の見込み?
  He炉/炉心性能の改善、固有安全性の見通し→
  高温化ポテンシャルを発揮できるか?

JNC

検討の視点ー小型炉ー

ナトリウム小型炉、重金属小型炉

- フェーズⅠ
  4Sを出発点として、長寿命、受動安全性を具えた概念を構築。
  建設コスト～58万円/kWe→建設コスト削減要
- フェーズⅡ
  開発目標・設計要求を明示。
  主要仕様を再検討。

JNC

検討の視点ー燃料サイクルー

再処理システム

- フェーズⅡ中間期：湿式代替・補完技術選定（H13年度：超臨界直接抽出法、アミン抽出法/H14年度：イオン交換法予定）
- 乾式再処理(酸化物電解法、金属電解法)のプロセス合理化によるコスト削減
- 湿式施設のリスク源分析
- FP（I、Tc、Cs、Sr）の分離技術の調査

JNC

検討の視点ー燃料サイクルー

燃料製造システム

- 経済性向上→低除染燃料システムの構築
- 環境負荷低減→MA含有燃料製造システムの構築
  →セル対応燃料製造システム

- 技術的成立性/安定操業の観点
- 経済性目標(燃料製造＋再処理システムにおける償却＋操業)を設定:0.8円/kWh
- 発生廃棄物評価(TRUの深地層処分低減の観点)

JNC

検討の視点ー基盤技術ー

- 高速炉による長寿命FPの核変換
- ODS鋼被覆管の実用化

- 分離変換技術/基盤技術として展開
  目標策定(当面, 中間, 究極)、分離技術高度化、同位体分離のフィージビリティ

JNC

検討の視点ー総合評価技術ー

- 長期的サイクル諸量解析：ワンススルー、プルサーマル（多重サイクルを含む）、FBR（水冷却高速炉を含む）の比較
- 水素製造シナリオ
- 多面的評価：社会的受容性、評価指標
- 投資対効果評価

H13年度炉心検討の着眼点

— 実用化戦略調査研究 —

システム部 炉燃Gr
林 秀行

2002.4.25 R&D報告会

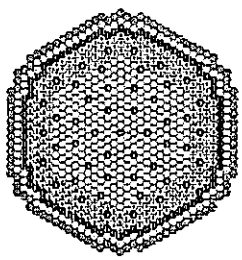
H13年度FS炉心検討の目標

- フェーズⅠで抽出された各冷却材毎の炉心概念について、統合評価で指摘された課題に対する改善策を検討し、炉心基本仕様を固める。
- ヘリウムガス冷却炉については、被覆粒子燃料炉心と密封ピン型燃料炉心を再度比較検討して、絞り込みを図る。

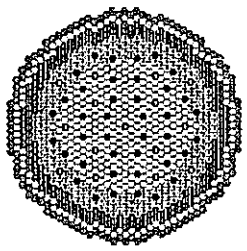
2002.4.25 R&D報告会

大型・中型ナトリウム炉心（フェーズⅠでの検討）

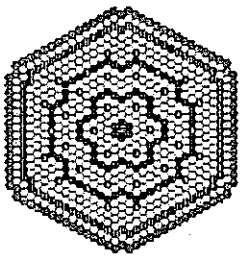
- 再臨界回避を満足する炉心概念の検討
- ABLE型燃料と内部ダクト型燃料
- 均質炉心と径非均質炉心



内部ダクト型均質炉心



ABLE均質炉心



ABLE径非均質炉心

2002.4.25 R&D報告会

大型・中型ナトリウム炉心（フェーズⅠの結果）

- ABLE均質炉心：BR=1.17、CSDT=41yr
  初期Puf = 4.1 ton/GWe、サイクル長さ：17ヶ月
- ABLE径非均質炉心：BR=1.24、CSDT=33yr
  初期Puf = 5.0 ton/GWe、サイクル長さ：19ヶ月
- 内部ダクト型均質炉心：BR=1.13、CSDT=56yr
  初期Puf = 4.5 ton/GWe、サイクル長さ：18ヶ月

↓

- 実効平均燃焼度:5.6～6.3万MWd/t
- 径非均質炉心：被覆管最高温度～710℃

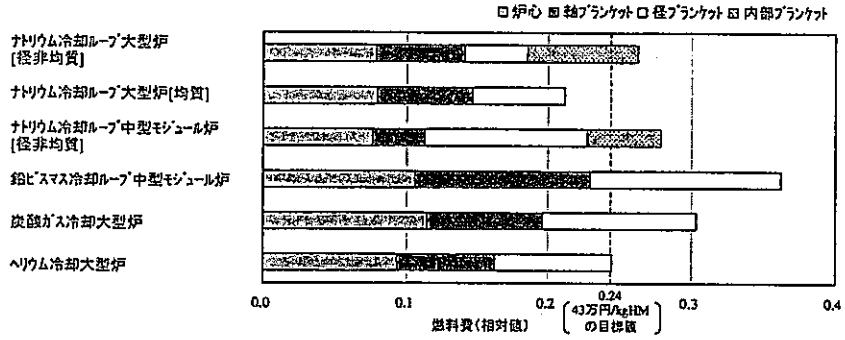
2002.4.25 R&D報告会

大型・中型ナトリウム炉心（フェーズⅠの検討結果）

・燃料費におけるブランケット燃料の占める割合が非常に大きい。

・径非均質炉心では内部ブランケットがコスト増要因となっている。

・炉心とブランケットを平均した実効燃焼度を高めることが経済性に重要。



2002.4.25 R&D報告会

大型・中型ナトリウム炉心（H13年度における検討のポイント）

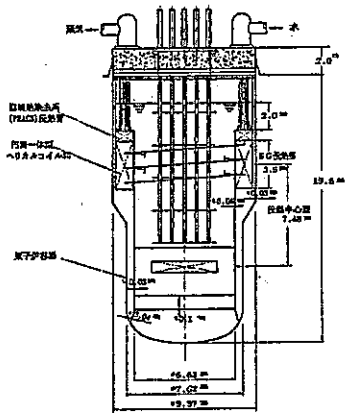
- ブランケット燃料の削減による経済性の改善
- 径非均質炉心の熱設計成立性の見通し

↓

- 比較検討し、基準とする炉心概念を選定
- 中型炉心検討の場で、魅力ある炉心・燃料仕様を検討し、フェーズⅡの炉心設計の方向性を探る。
- 金属燃料炉心について、プラント設計と整合し、その長所を生かした炉心仕様の方向性を探る。

2002.4.25 R&D報告会

重金属冷却炉心
（中型鉛ビスマス冷却炉心：フェーズⅠ）



- システム簡素化の追求、鉛ビスマス冷却材を活かした全自然循環冷却炉心

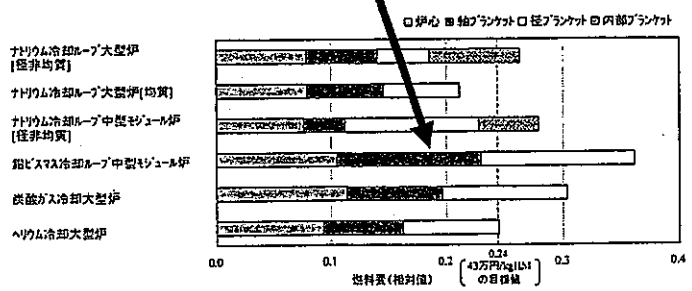
↓

- 窒化物燃料炉心
- 炉心出力密度：～80W/cc
- 扁平炉心：炉心高さ70cm

2002.4.25 R&D報告会

中型鉛ビスマス冷却炉心
（フェーズⅠの検討結果）

- 電気出力：400MWe、サイクル長さ：19ヶ月、10バッチ
- BR =1.19、CSDT=65yr、初期Puf =12.7ton/GWe
- 実効平均燃焼度 = 3.9万MWd/t



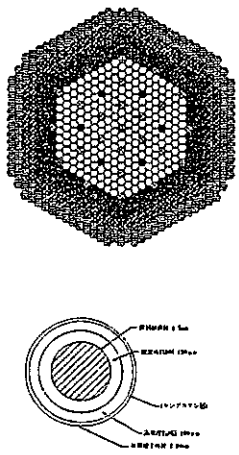
2002.4.25 R&D報告会

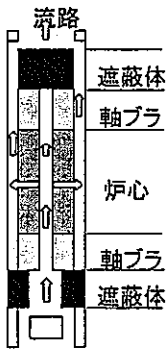
中型鉛ビスマス冷却炉心（H13年度における検討のポイント）

- 初期Pufインベントリの低減を図る。
- ブランケット燃料の大幅削減を図る。
- 強制循環方式炉心についても再検討。
- 受動的安全性の見通しをつける。

2002.4.25 R&D報告会

ヘリウムガス冷却炉心（被覆粒子燃料）（フェーズＩの検討結果）

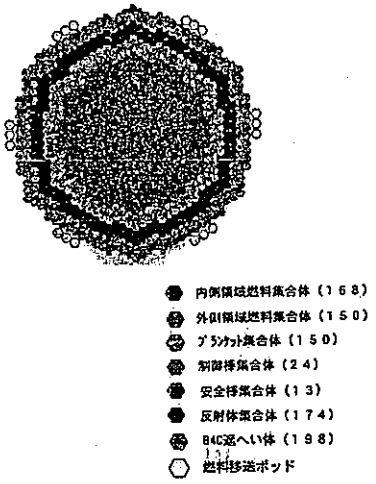




- 電気出力:1124MWe
- 炉心等価直径:5.6m
- 炉心高さ:3.2m
- サイクル長さ～19ヶ月
- 炉心燃焼度:9.5万MWd/t
- BR =1.09, CSDT =116 yr
- 初期Puf = 10.8 ton/GWe
- 実効燃焼度= 3.4万MWd/t

2002.4.25 R&D報告会

ヘリウムガス冷却炉心（密封ピン型燃料）（フェーズⅠの検討結果）



- 電気出力：1080 MWe
- 炉心等価直径：4.1 m
- 炉心高さ：1.2 m
- サイクル長さ～23ヶ月
- 炉心燃焼度：13.7万MWd/t
- BR =1.20, CSDT =68 yr
- 初期Puf = 7.0 ton/GWe
- 実効燃焼度= 4.8 万MWd/t

2002.4.25 R&D報告会

ヘリウムガス冷却炉心（フェーズⅠの検討結果）

＜安全性の検討結果＞

- 被覆粒子燃料炉心：ドップラー係数が大きく、「減圧事故＋スクラム失敗＋自然循環除熱」を想定しても、破損面積の制限（50cm^2）等の方策により、CDAを回避できる可能性がある。

- 密封ピン型燃料：ドップラー係数が小さく、「減圧事故＋強制循環除熱」条件では、判断基準を満足するために、破損面積の制限（100cm^2）、及び、30秒以内のSASSでのスクラムが必要となる。

2002.4.25 R&D報告会

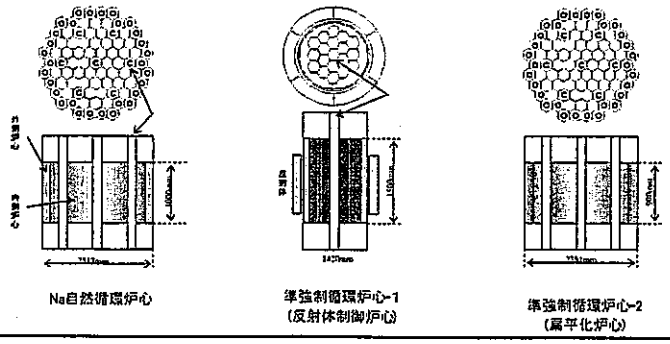
ヘリウムガス冷却炉心
（H13年度における検討のポイント）

- 被覆粒子燃料炉心：燃料体積比を増加することにより、増殖性を改善すると共に減圧反応度の低減を目指す。
  →熱設計成立性を条件としたサーベイを実施
- 密封ピン型燃料炉心：減圧事故時に自然循環で除熱可能な炉心を目指す。
  →受動的フィードバック機構の設置、P/Dの増加等を検討

2002.4.25 R&D報告会

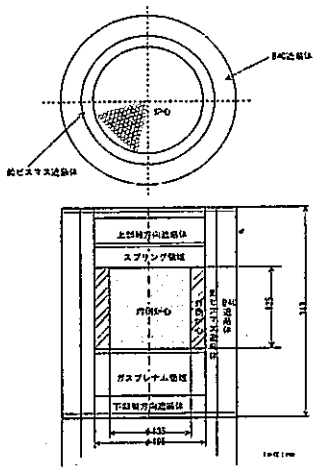
ナトリウム冷却小型炉心
（フェーズＩの検討結果）

- 金属燃料により、50MWe、30年寿命の小型炉心
- 燃焼反応度を極小化した自然循環炉心の可能性
- ﾌﾞﾗﾝｹｯﾄなしでBR～1.0、燃焼度6～9万MWd/t



2002.4.25 R&D報告会

鉛ビスマス冷却小型炉心
（フェーズＩの検討結果）



- 窒化物燃料により、50MWe、30年寿命の小型炉心を検討
- 高富化度差2領域炉心による燃焼反応度極小化と自然循環炉心の整合性
- 一体型炉心燃料による1バッチ炉心、燃焼度～8万MWd/t
- 増殖比～1.0

2002.4.25 R&D報告会

小型炉心
（**H13**年度における検討のポイント）

＜経済性の抜本的改善＞

ナトリウム小型炉

- フェーズＩ ～60→35万円／kWe
- 炉心のコンパクト化、現実的炉心寿命～10年

鉛ビスマス小型炉

- フェーズＩ ～80万円／kWe
- 燃料集合体構造具体化、炉心上部構造簡素化

2002.4.25 R&D報告会

平成14年度第1回研究開発報告会　平成14年4月25、26日

ナトリウム炉の炉心検討
(大型・中型金属燃料炉心)

システム技術開発部
炉心・燃料システムグループ
杉野　和輝

発表内容

1. 平成13年度の着眼点
2. 大型炉に関する検討
   ・燃料設計　・炉心核設計
3. 中型炉に関する検討
   ・炉心核設計　・炉心熱設計
4. まとめと今後の課題

金属燃料炉心の特徴と影響
(対MOX燃料炉心)

(燃料特性)

高温下での液相形成 (650℃以上)	→	<u>炉心出入口温度低下</u> 新たな設計制限因子

(核特性)

重金属密度高		<u>内部転換比の上昇</u>
中性子束スペクトル硬 中性子減速効果少	→	<u>高速中性子照射量の増加</u> (同一取出燃焼度条件)

(熱特性)

高熱伝導率	→	最大線出力制限の緩和
スラグ型燃料の使用	→	工学的安全係数の見直し

[<u>下線部</u>は本発表と直接関連する影響を表す。]

1. 平成13年度の着眼点

①大型金属燃料炉心の設計

大型MOX燃料炉心（均質ABLE型仕様）と同じ径方向炉心配置、集合体ピッチ、炉心部取出燃焼度条件となる大型金属燃料炉心について、MOX燃料と同一の設計手法により燃料集合体仕様を設定し、その仕様の燃料集合体により構成される炉心の核熱特性評価を行い、大型金属燃料炉心概念を構築する。

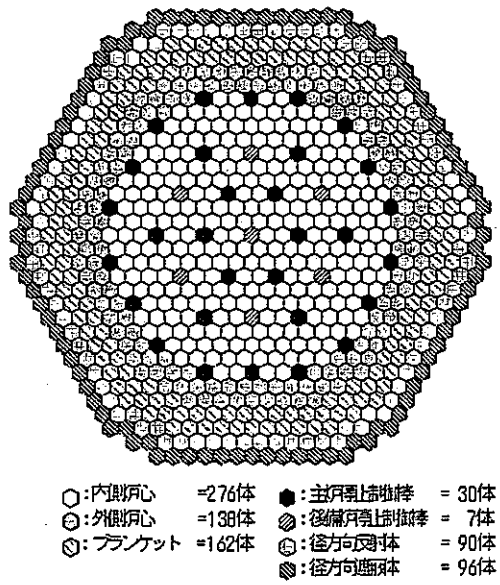
②魅力ある中型金属燃料炉心概念の構築

運転サイクル期間中の出力分布変動が小さく、燃料被覆管最高温度の低減が期待できる高内部転換比BREST型中型金属燃料炉心について、より炉心性能の向上を図り、魅力ある中型金属燃料炉心概念を構築する。

2. 大型炉に関する検討

2.1 平成12年度までの主な成果と課題

- 主に電力中央研究所による成果
- 大型／小型炉、均質／径非均質炉心を対象に、設計要求を満足する炉心概念を構築
- 標準的なMOX燃料炉心設計の考え方が反映されていない。
  → MOX燃料炉心設計に適用された材料物性及び燃料設計の考え方を反映する必要性
- 切り込み付き炉上部機構（UIS）非対応の制御棒配置
  →上記UIS対応の制御棒配置



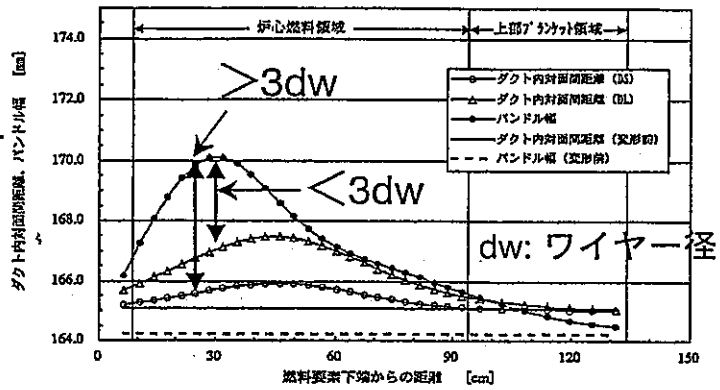
H12年度大型金属燃料炉心配置
（均質2領域）

2.2 燃料設計（設計条件）

- 大型MOX燃料炉心（ABLE型仕様）と同一の集合体ピッチを有する燃料集合体を対象に設計
  （最新のPNC-FMS鋼のスエリング式、クリープ歪式を使用）
- 取出燃焼度150GWd/tに相当する高速中性子照射量増加
  （$5.0\times10^{23}\rightarrow6.5\times10^{23}$n/cm^2）を考慮
- DDI制限よりラッパー管肉厚を設定し、BDI制限と圧力損失制限より、ピン径、被覆管肉厚、ガスプレナム長さを設定

↓

- ラッパー管のスエリングによる膨れのみでは満足できないが、クリープによる膨れも考慮した場合にはBDIを満足する仕様を設定



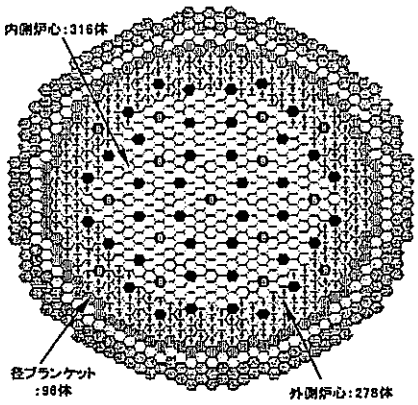
2.2 燃料設計（設計の結果）

項目	MOX燃料	金属燃料	備考
集合体配列ピッチ	181.9 mm	←	-
ピン本数	271本	←	-
ダクト肉厚	5.0 mm	5.4 mm	DDI対策
集合体間ギャップ	4.0 mm	6.0 mm	
燃料ピン外径	8.6 mm	8.3 mm	BDI対策
燃料ピン配列ピッチ	10.04 mm	9.86 mm	
被覆管肉厚	0.51 mm	0.55 mm	
燃料体積率	42.7 %	38.5 %	（燃料体積率の減少）
材料体積率	22.7 %	25.5 %	
冷却材体積率	34.6 %	36.0 %	

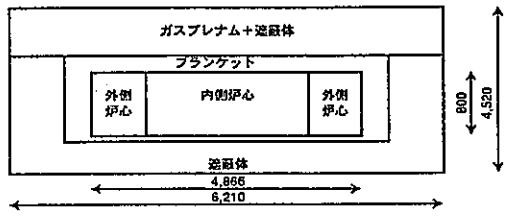
- 高高速中性子束照射量条件下のDDI、BDI対策に伴う材料体積率比の増加
  →燃料体積率の低下

2.3 炉心核設計

- 大型MOX燃料炉心（ABLE型仕様）と径方向配置が同一な炉心を設定（ただし、燃料体積比は39%に低下）
- 設計要求を満足する仕様
- 再臨界回避策として、下部軸ブランケットを短尺化（5cm厚）
- 使用炉定数：統合炉定数ADJ2000



径方向炉心配置図
（大型MOX燃料炉心と同等）



軸方向炉心配置図

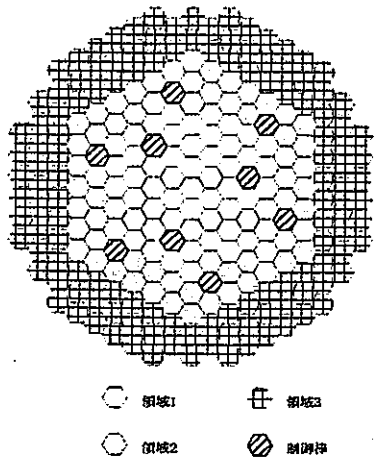
2.3 炉心核設計（続き）

- 燃料体積率が標準より約10%低下したことに起因して、高重金属密度という金属燃料炉心特有の長所が生かされていない炉心となった。

核特性	金属燃料炉心	MOX燃料炉心
Pu富化度 (内側炉心 / 外側炉心)	14.5 / 17.8 wt%	21.0 / 23.6 wt%
取出平均燃焼度 (炉心部 / 全平均)	146 / 84 GWd/t	152 / 77 GWd/t
燃焼反応度	2.0 %Δk/kk'	2.8 %Δk/kk'
増殖比	1.15	1.17
最大線出力 (内側炉心 / 外側炉心)	411 / 394 W/cm	406 / 335 W/cm
最大高速中性子照射量	6.2×10^{23} n/cm^2	4.6×10^{23} n/cm^2
Naボイド反応度(EOEC)	7.2 $	6.4 $
ドップラー係数(EOEC)	-0.0037 Tdk/dT	-0.0051 Tdk/dT

3. 中型炉に関する検討
3.1 平成12年度までの主な成果と課題

- ロシアのBREST炉心（鉛冷却窒化物燃料炉心）の基本概念（同一Pu富化度ピン径3種類）をNa冷却金属燃料炉心へ適用
- 高内部転換比型とすることにより、制御反応度収支の低減が可能（長期運転サイクル化）であり、更に、ブランケット削減により取出平均燃焼度の増加による燃料サイクルコストが低減できる見込み
- 出入口温度高温化（MOX燃料炉心並）の見通し
- 取出燃焼度70GWd/t
  →高燃焼度化が必要
- 熱出力980MWth
  →1,190MWth



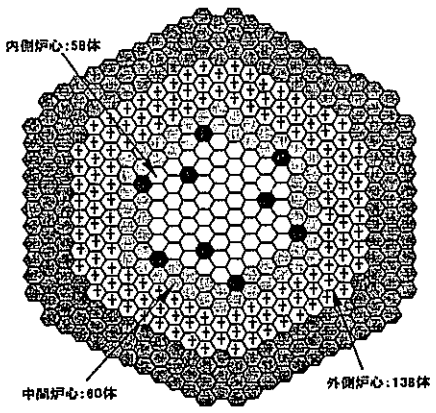
H12年度中型BREST型金属燃料炉心配置図

3.2 炉心核設計（検討条件）

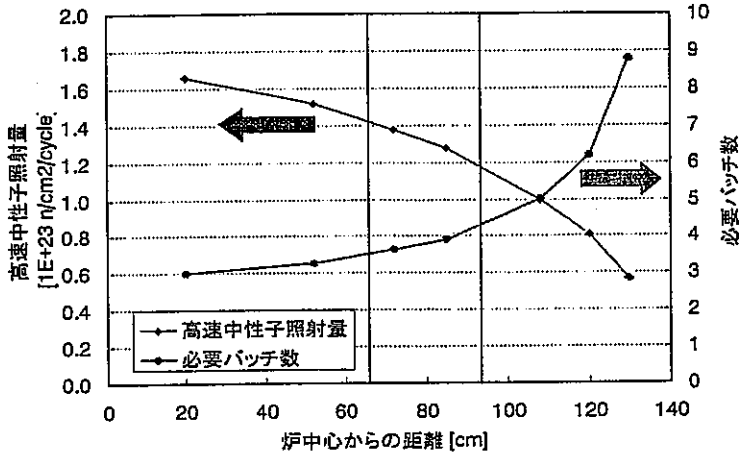
- 昨年度炉心に対して高出力化、高燃焼度化を図り、高速中性子照射量5.0×10^{23}n/cm^{2}を満足する仕様　→　変則バッチ化
- 増殖比について、FBR導入期は軸ブランケット設置により1.2程度、FBR本格運用期には軸ブランケット削除により1.0程度
- 炉心径（遮蔽体外接円径）、炉心高さ、燃料ピン径等の様々なパラメータサーベイにより炉心の最適化を実施
- 最大線出力の目安：450W/cm
- CDA起因課程における過剰エネルギー放出回避の観点から、Naボイド反応度を8$程度以下に設定
- 使用炉定数：統合炉定数ADJ2000

3.2 炉心核設計（検討結果）

- 高出力化を想定して炉心配置を決定
- 変則バッチ化（内側／中間／外側炉心：3・4／4／5・6・10）
  →変則バッチ採用による燃焼度の平坦化を図っても高速中性子照射量の制限(5×10^{23}n/cm^2)により、取出平均燃焼度は120GWd/t程度が上限となる。



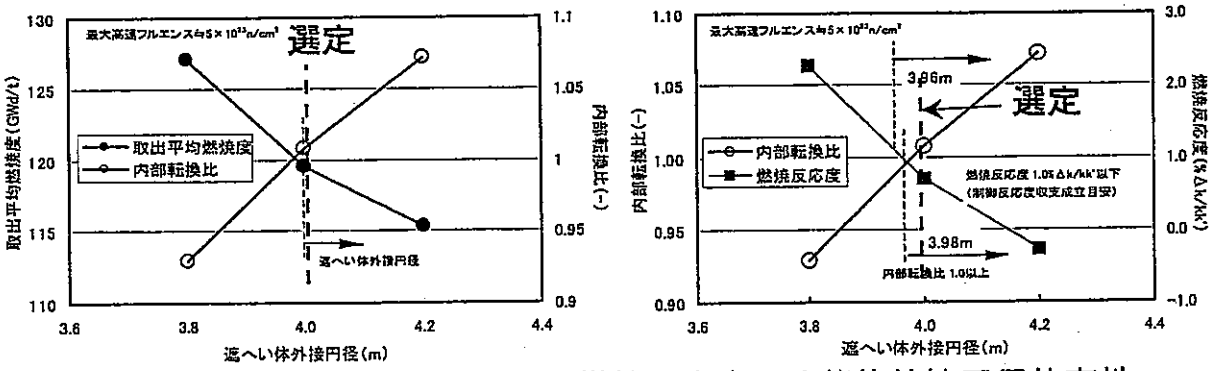
径方向炉心配置図



高速中性子照射量の径方向依存性

3.2 炉心核設計（検討結果、続き）

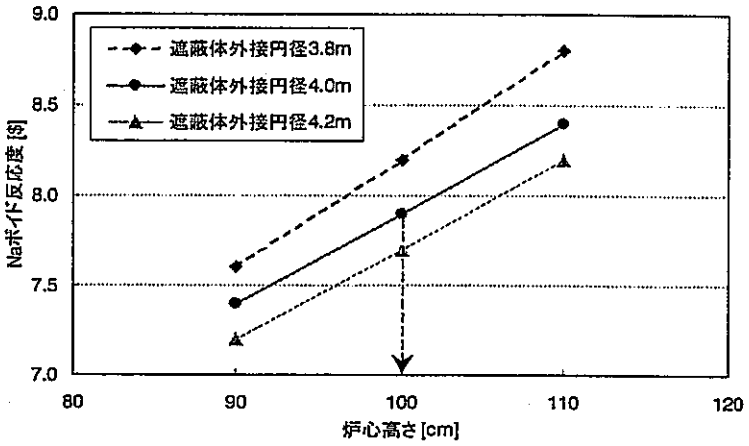
- 炉心径の拡大により燃焼反応度は小さくなる関係にあり、燃焼反応度を零近傍とすることが可能
  →燃焼反応度：0.8%Δk/kk、遮蔽体外接円径：約4.0m
- 更に、出力分布の平坦化を意図して各領域のピン径を決定
  （内側／中間／外側炉心：9.2／9.7／10.3 mm）
- 最大線出力は440W/cmと目安を満足



取出平均燃焼度、内部転換比、燃焼反応度の遮蔽体外接円径依存性
（最大高速中性子照射量固定条件）

3.2 炉心核設計（検討結果、続き）

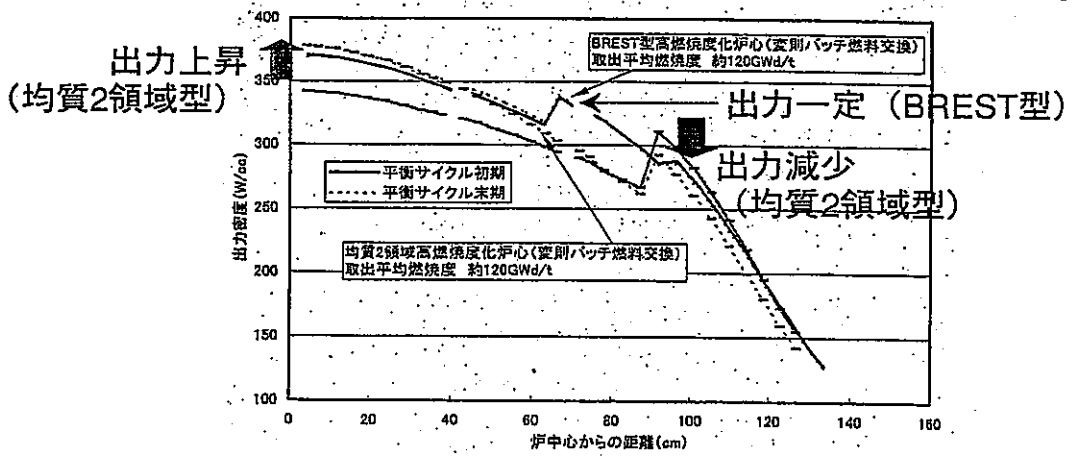
- Naボイド反応度が約8$以下となるよう炉心高さを設定
  →炉心高さ：100cm
- Pu富化度は14.3wt%となり、均質2領域炉心に対して、液相形成制限緩和の可能性
- 増殖比について、軸ブランケットなしで1.0、軸ブランケットの設置により1.2が達成可能な見込み



Naボイド反応度の炉心寸法依存性

3.3 炉心熱設計

- BREST型は、同一Pu富化度炉心であり、サイクルを通じての出力変動がほとんどないため、無駄流量が少ない。
  →MOX燃料炉心と同等の出入口温度条件（550／395℃）達成の見通し（均質2領域炉心では困難）
  →P/Fが均一な炉心であり、CDA評価における「同時性」を通じた影響の大きさが懸念され、今後検討が必要である。



BREST型及び均質2領域炉心の燃焼による出力変動の比較

4. まとめ

①大型MOX燃料炉心と同じ径方向配置を有し、炉心平均取出燃焼度150GWd/tを満たし健全性を有する燃料集合体仕様の炉心では、MOX燃料炉心に対する長所が見出せず、今後、高重金属体積率と言った金属燃料固有の長所を生かすための設計が不可欠であることが分かった。

②高内部転換比BREST型中型金属燃料炉心の高性能化を図り、MOX燃料炉心と同等の出入口温度が達成できる見込みが得られた。

○液相形成に関する制限許容限界を設定した。

○強制循環により崩壊熱除去を担保するプラント設計条件下での異常時の燃料の健全性評価を行い、金属燃料炉心プラントが成立するとの見通しを得た。

4. 今後の課題

（短期的課題）

- 金属燃料炉心のプラント設計の実施（自然循環による十分な崩壊熱除去の可能性検討）
- 設計要求を満足し、健全性を有し、燃料体積比を高めた燃料設計（大型高転換比BREST型燃料炉心の検討）
- 再臨界回避要求への対応確認
- CDA評価（BREST型／均質2領域型）

（長期的課題）

- 金属燃料照射挙動データの拡充
- 高速中性子フルエンス6.5×10^{23}n/cm^{2}においても、スエリング及び照射クリープ量が十分に低減でき、健全性を有するラッパー管、被覆管用の超高性能材料の開発
- ライナー付き被覆管の使用に関する検討（燃料設計・安全設計）

平成14年度第1回
研究開発成果報告会
(実用化戦略調査研究)

平成13年4月25日

大型Na炉主要構造の構造成立性検討

要素技術開発部
構造信頼性研究グループ

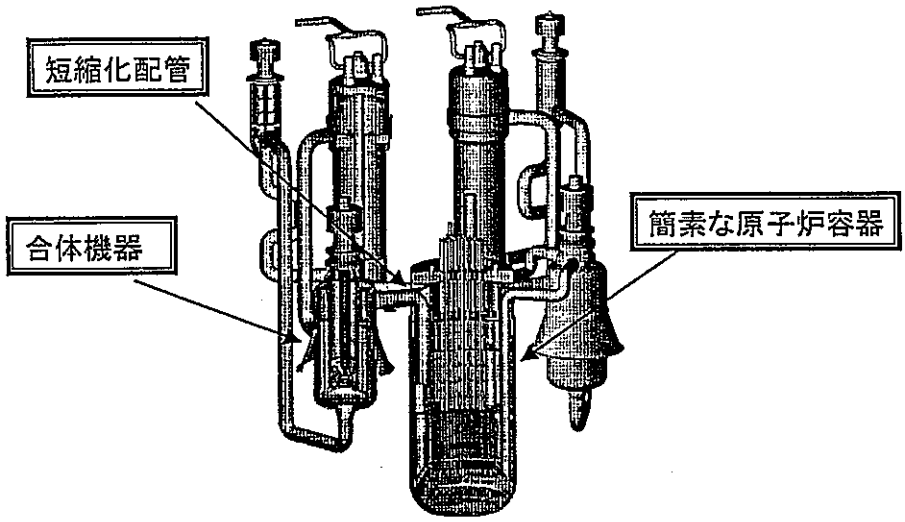
笠原　直人

報告内容

- 主要部位の構造成立性検討
  - 簡素な原子炉容器
  - 短縮化配管
  - IHX/ポンプ合体機器
- 物量増を招かない熱荷重緩和設計の提案
  - アクティブ温度制御による原子炉容器の熱荷重緩和
  - 熱流動-構造統合設計による系統熱過渡緩和
- まとめ

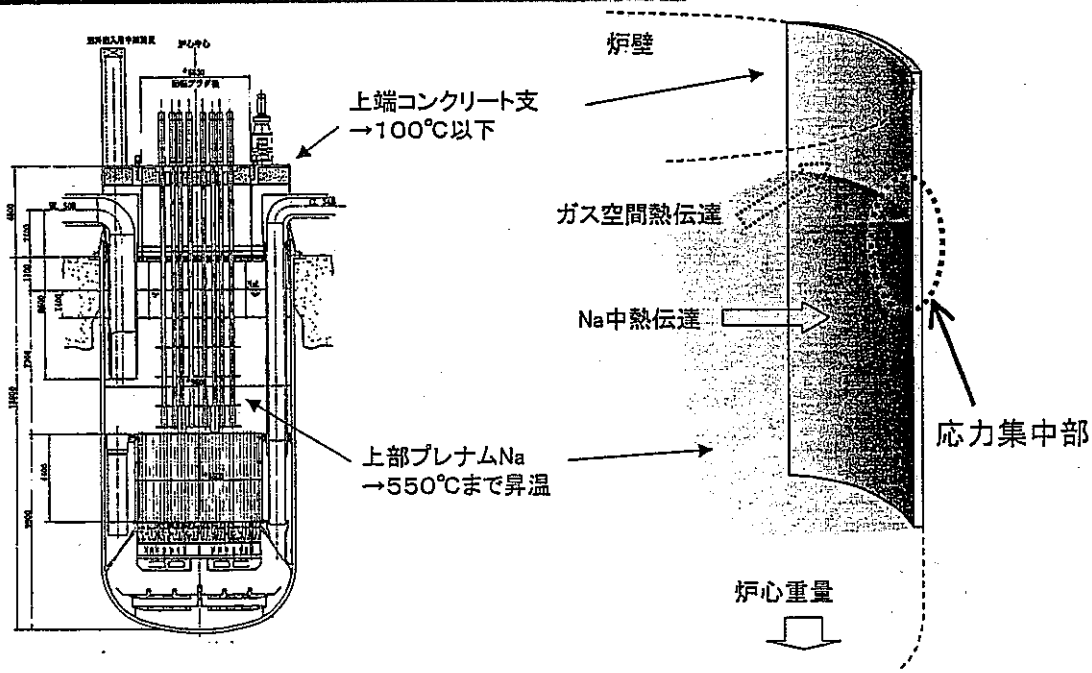
主要部位の構造成立性検討

アドバンスループ炉概念はPhase Ⅰにおいて技術の先取りにより成立するとした。その実現性を見極めるため、プラント概念に係る主要部位に関して、構造力学上の特徴を明らかにした上で設計成立に必要な条件を示した。



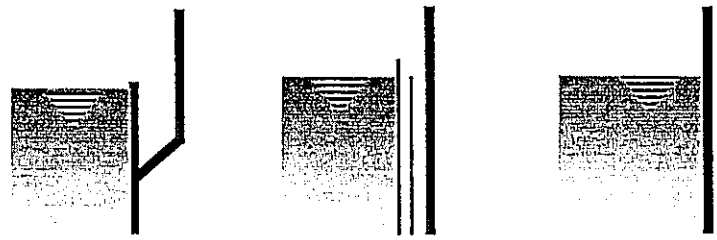
研究開発成果報告会 H14.4.25　　OEC/JNC/ATD

原子炉容器液面近傍の応力発生機構



研究開発成果報告会 H14.4.25　　OEC/JNC/ATD

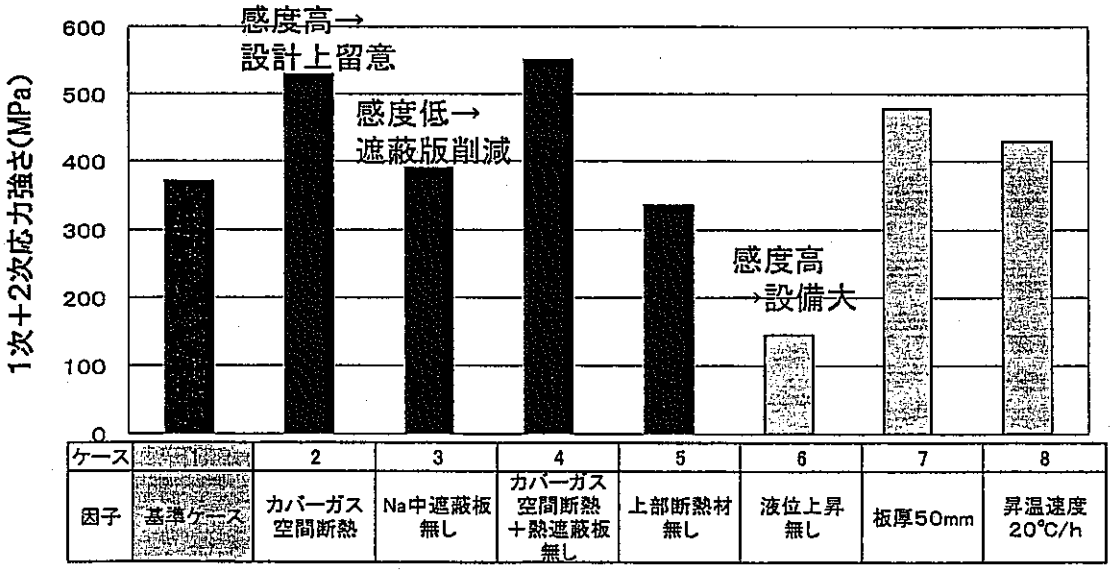
原子炉容器液面近傍熱応力対策の変遷



	もんじゅ	実証炉	アドバンスループ炉
原子炉出口温度 ℃	529	550	550
原子炉容器温度 ℃	529	450	550
原子炉容器材料	SUS304	316FR	316FR
原子炉容器構造	高温容器+Y型構造	炉壁冷却構造	高温容器
液位制御	2液位制御	なし	なし
液面近傍応力 Mpa	270	390	370
長期1次応力 Mpa	17	20	30

研究開発成果報告会 H14.4.25 OEC/JNC/ATD

設計因子が液面近傍熱応力に与える影響



基準ケース:カバーガス伝熱、Na中遮蔽板有、液位上昇有、板厚30mm、昇温速度15℃/h

研究開発成果報告会 H14.4.25 OEC/JNC/ATD

1次応力増大に伴う影響

- 実証炉以前の設計では周方向累積非弾性ひずみが支配的

- ｱﾄﾞﾊﾞﾝｽﾄﾙｰﾌﾟ型炉では、1次応力の増加により軸方向累積非弾性ひずみに注意を払う必要がある。

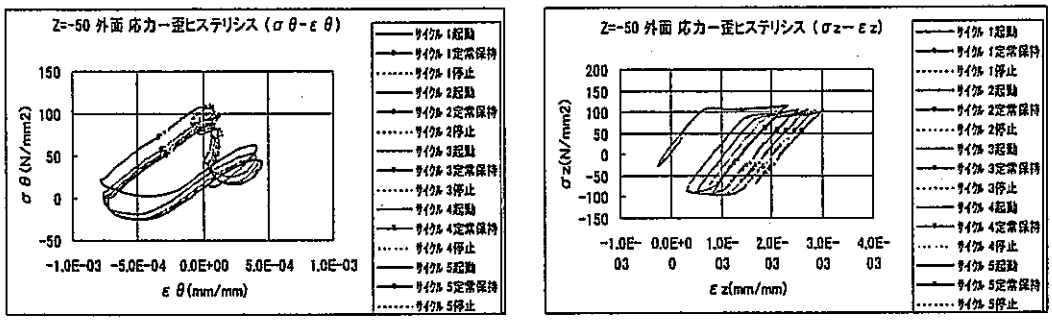


図 ｱﾄﾞﾊﾞﾝｽﾄﾙｰﾌﾟ型炉原子炉容器液面近傍のラチェット挙動

原子炉容器のまとめ

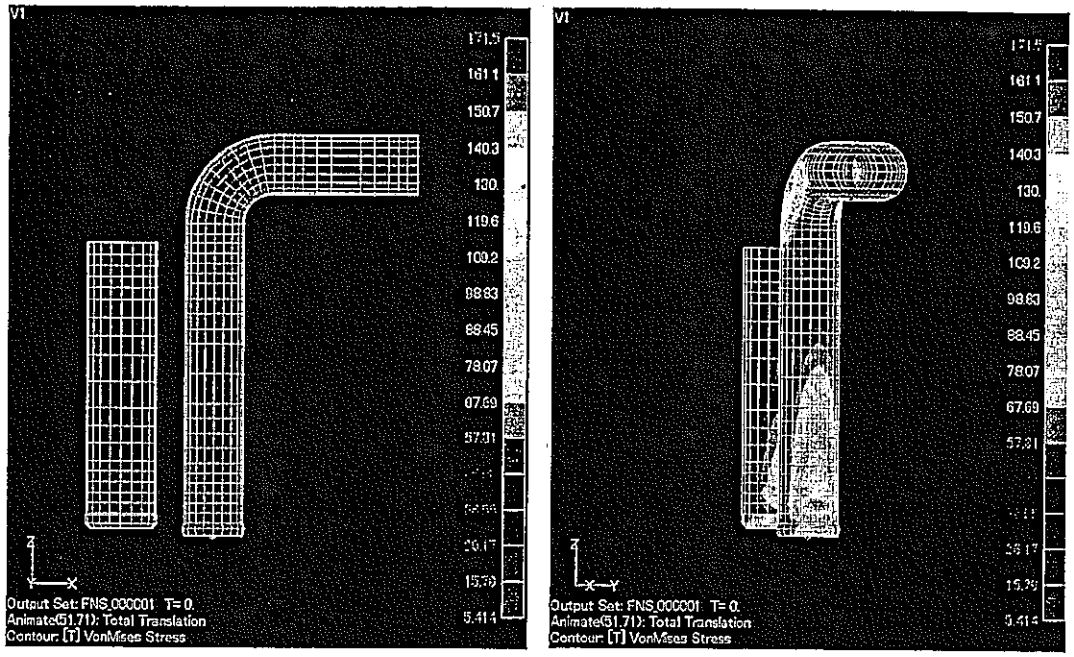
構造力学上の特徴

1. 熱応力はカバーガス空間熱伝達とに液面の移動に敏感である。
2. 炉心重量増と炉壁薄肉化は軸方向累積非弾性ひずみの要因となる。

設計成立に必要な条件

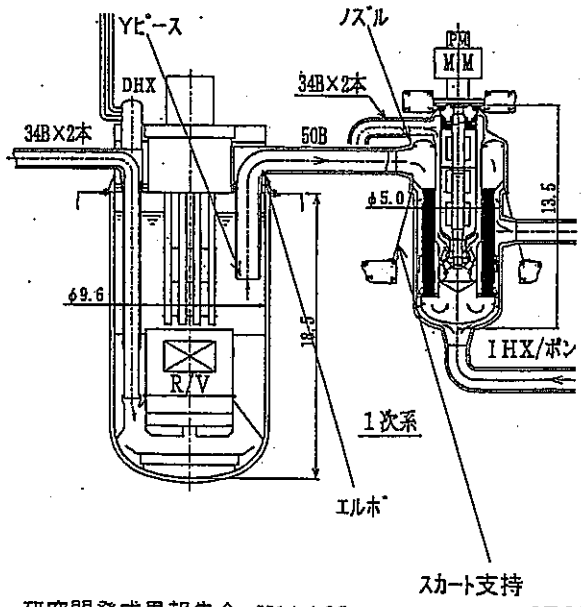
1. カバーガス空間熱的境界条件の適切な設定法の開発
2. 非弾性ひずみの合理的評価法（非弾性解析指針）の開発
3. 累積非弾性ひずみの適切な制限方法（ラチェット疲労限界等）の整備

ホットレグ配管の熱応力解析



研究開発成果報告会 H14.4.25 OEC/JNC/ATD

配管系の特徴と熱応力へ影響するパラメータ

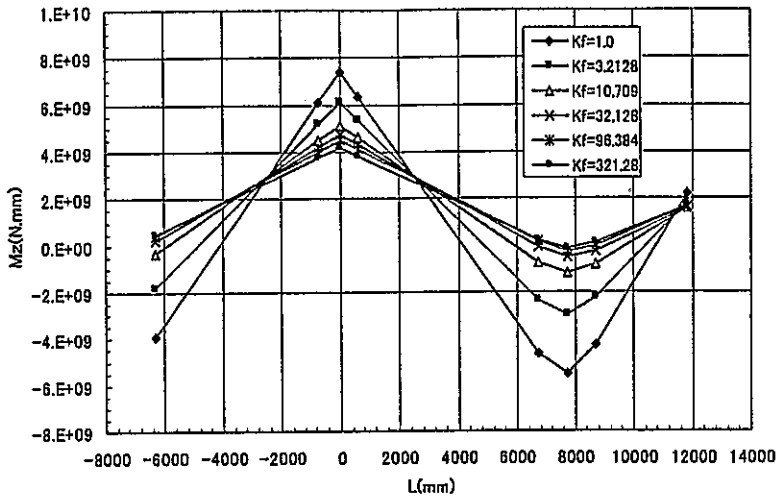


配管系の特徴
1. 単純形状:L字型＋外管(鉛直部)
2. 不連続部位はYピース、エルボ、ノズル

熱膨張応力へ影響するパラメータ
①エルボ撓性係数
②Yピース剛性
③IHXノズル剛性
④鉛直相対変位量
⑤エルボ曲げ半径

研究開発成果報告会 H14.4.25 OEC/JNC/ATD

エルボ撓性係数と配管系のモーメント分布



横軸：原子炉容器からIHXに向かう配管に沿った距離（Yピース部を0mm）
縦軸：モーメント

エルボは十分に柔でありヒンジに近い挙動を示す。
→ エルボ部へのひずみ集中に注意が必要

配管のまとめ

構造上の特徴（熱応力の感度）

（1）エルボ撓性係数には鈍感（2）Yピース剛性は当該部応力には敏感だが他部への影響は小（3）IHXノズル剛性には鈍感（4）鉛直相対変位量には敏感（5）エルボ曲げ半径には鈍感

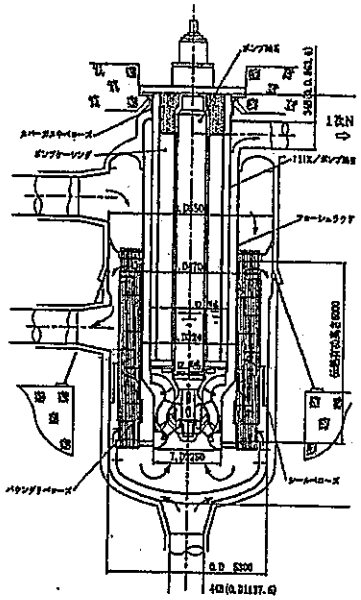
設計成立に必要な条件

エルボ部のラチェットとクリープ疲労評価法の確立
12Cr鋼の熱処理等による延性改善とLBB評価法の確立

設計への提案

(1)Yピースを剛体とした設計が成立(2)鉛直変位相殺によりIHXノズルを剛体とした設計が成立(4)ショートエルボが成立

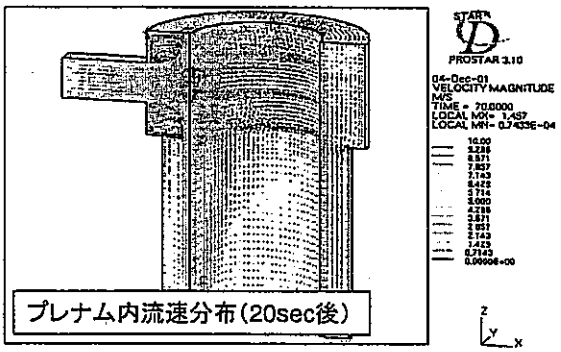
合体機器の非軸対称熱荷重

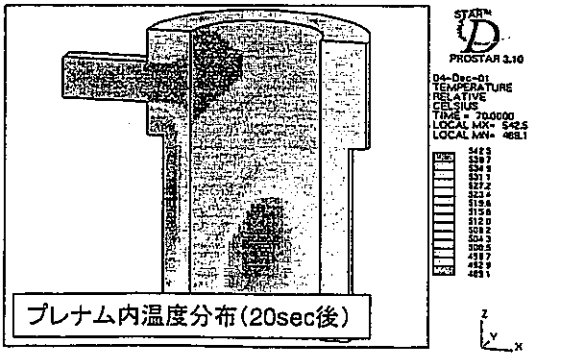


- IHX上部プレナム内の流れが強い3次元性を示す
- 流れの3次元性により構造に非軸対称の強い温度分布が発生
  →構造健全性に大きな影響を及ぼす可能性
- 実機における流れの3次元性把握のため3次元熱流動解析を実施

研究開発成果報告会 H14.4.25　　OEC/JNC/ATD

IHX上部プレナム3次元非定常熱流動解析





- 入り口ノズル直下，反対方向プレナムの流速・温度が相対的に低くなる。
- 構造に顕著な3次元的温度分布が生じ得る。
  →構造健全性評価で考慮する必要がある。

OEC/JNC/ATD

合体機器非軸対称熱荷重のまとめ

構造上の特徴

IHX上部プレナムは、流速・温度ともに3次元性の強い流れにより，構造に顕著な3次元的(非軸対称)温度分布が生じ得る。

設計成立に必要な条件

流動・構造温度分布の3次元性の緩和が必要
→伝熱管流入部での流速不均一の緩和
→プレナム内流体ミキシングの向上

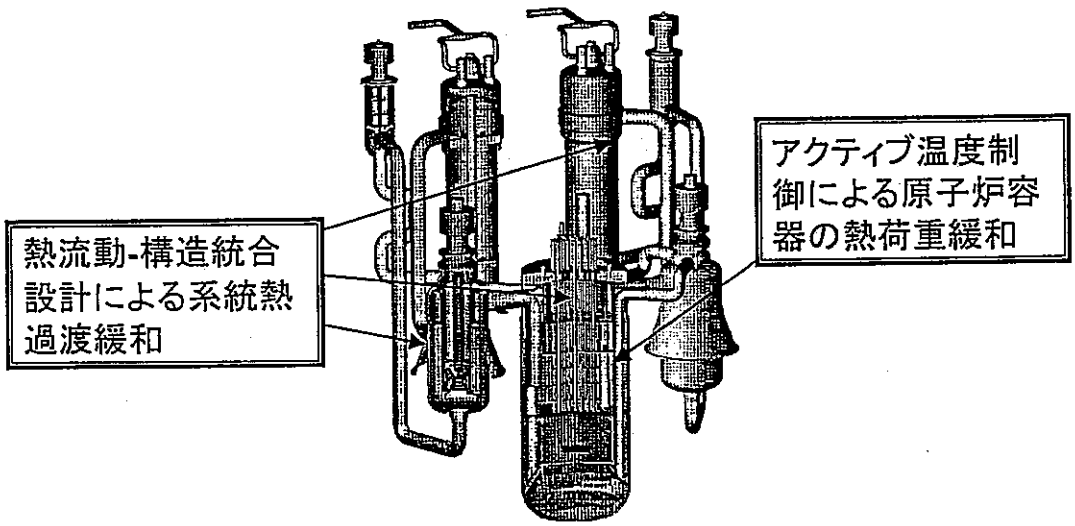
今後の研究課題

多次元熱流動解析結果から多次元構造解析へのインターフェースの確立が必要(熱伝達率の設定等)

研究開発成果報告会 H14.4.25 OEC/JNC/ATD

物量増を招かない熱荷重緩和設計の提案

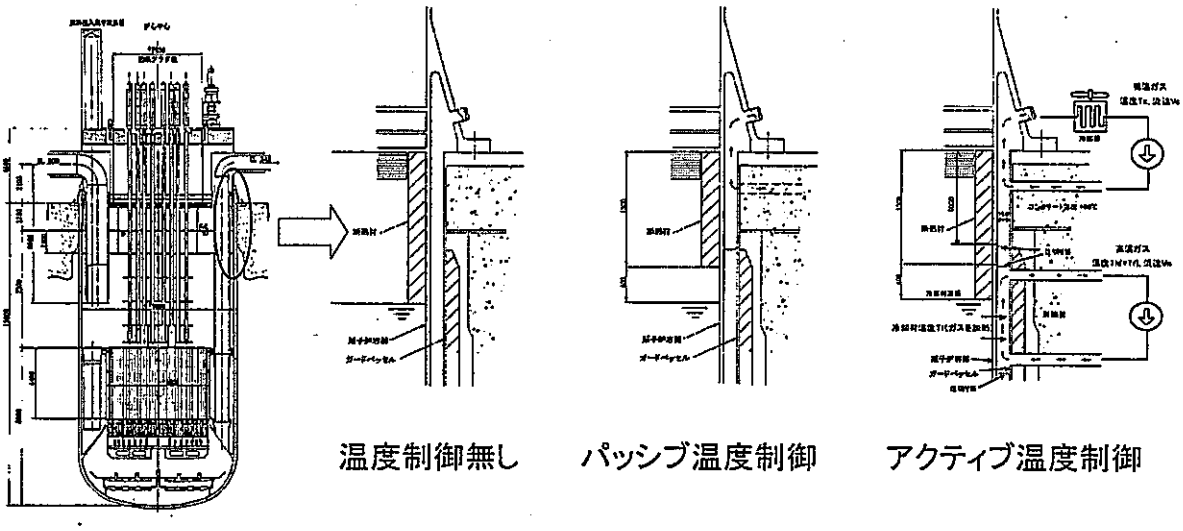
経済性と安全性を両立させる先進技術として、物量増を招かない熱荷重緩和設計を提案した。



研究開発成果報告会 H14.4.25 OEC/JNC/ATD

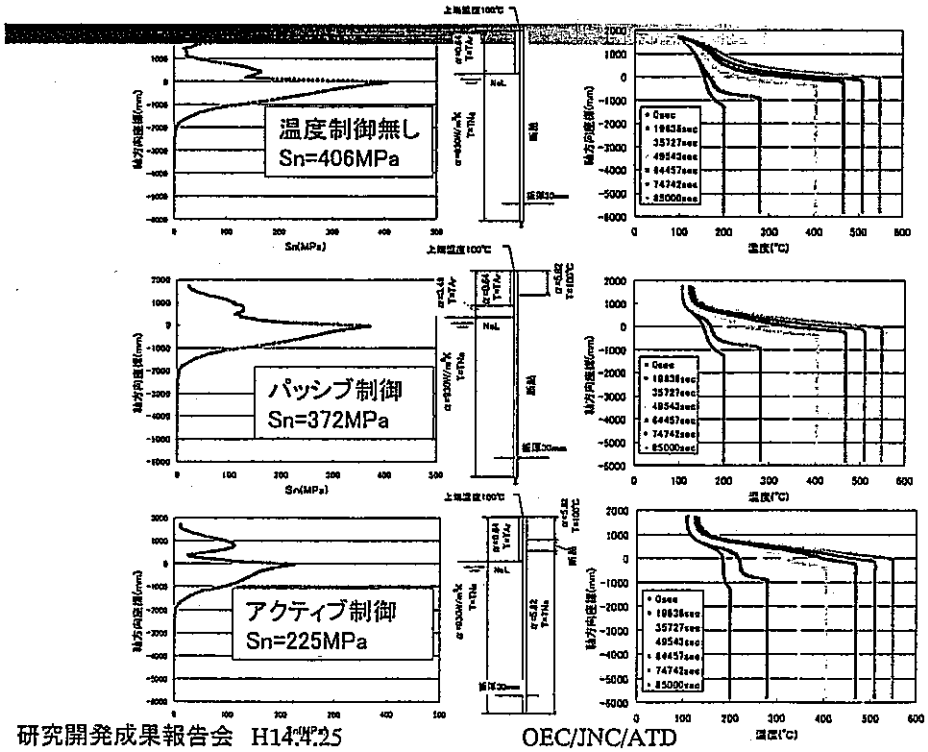
アクティブ温度制御による原子炉容器の熱荷重緩和

僅かなガス循環措置を炉外に付加



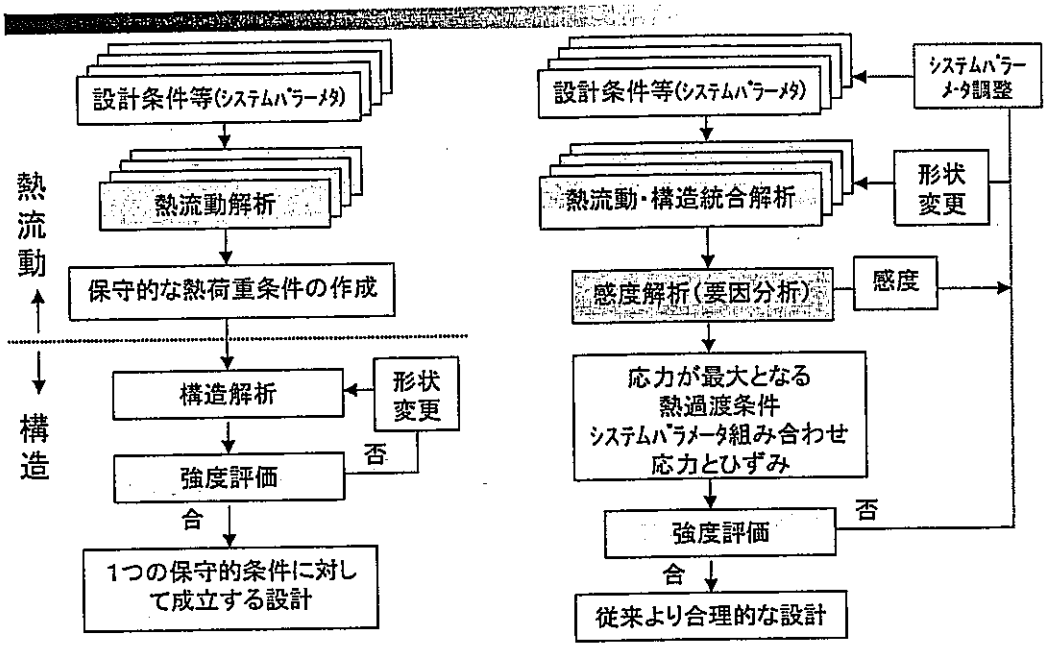
研究開発成果報告会 H14.4.25 OEC/JNC/ATD

数値実験による効果の確認



研究開発成果報告会 H14.4.25 OEC/JNC/ATD

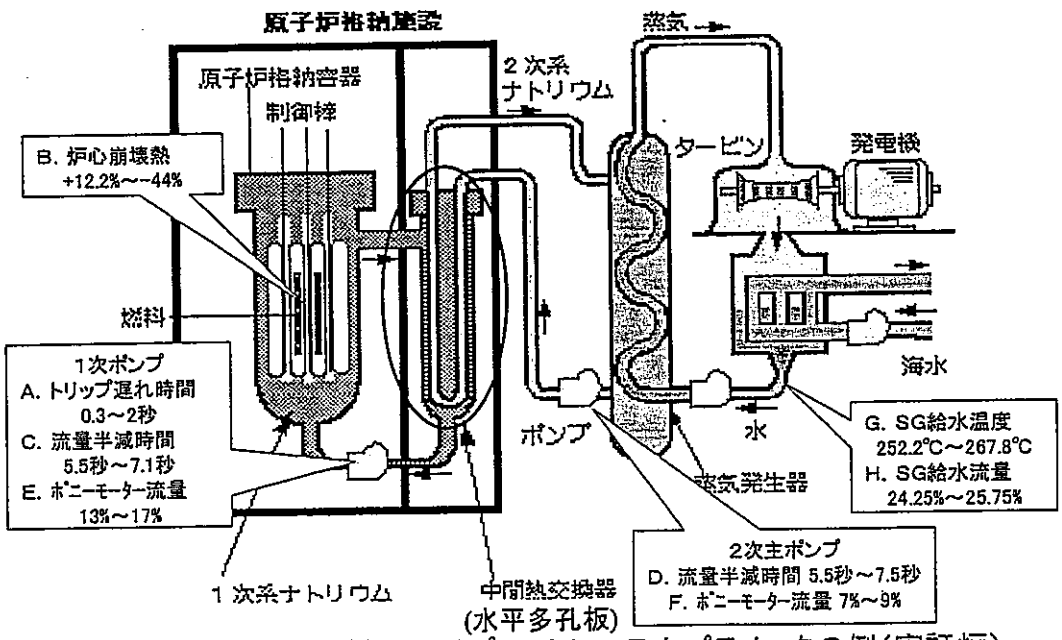
熱流動-構造統合設計による系統熱過渡緩和



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

研究開発成果報告会　H14.4.25　　OEC/JNC/ATD

系統熱過渡荷重に影響する設計条件



系統熱過渡荷重に影響を与えるプラントシステムパラメータの例(実証炉)

研究開発成果報告会　H14.4.25　　OEC/JNC/ATD

実験計画法(田口メソッド)による解析ケースの絞込み

設計因子	パラメータ(水準)		
	MIN	NOM	MAX
A. ポンプトリップ遅れ時間		0.3秒	2秒
B. 炉心崩壊熱	−44%	NOM	+12%
C. 1次ポンプ流量半減時間	5.5秒	6.5秒	7.1秒
D. 2次ポンプ流量半減時間	5.5秒	6.5秒	7.5秒
E. 1次ポンプポニーモータ流量	13%	15%	17%
F. 2次ポンプポニーモータ流量	7%	8%	9%
G. トリップ後のSG給水流量	22%	25%	28%
H. トリップ後のSG給水温度	−3℃	トリップ時温度	+3℃

全組合せ数:4374 ⇒ 18ケース

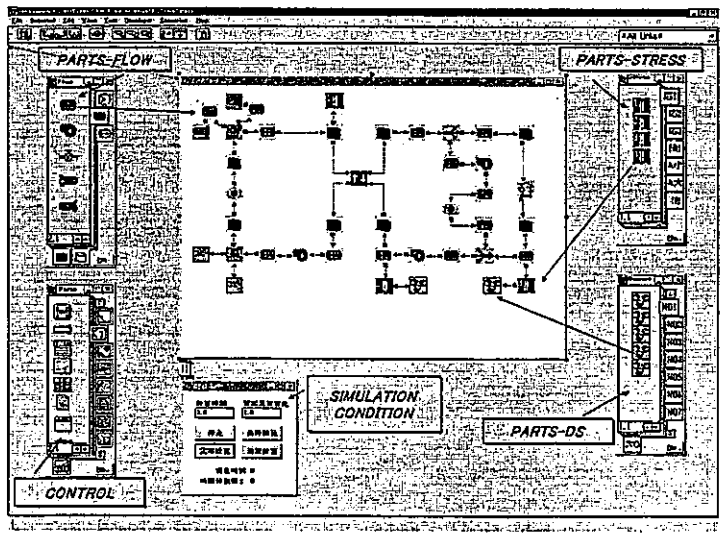
熱流動・構造統合解析コードPARTSへ入力

PARTSコードの特徴

プラント動特性と熱応力の統合解析

オブジェクト指向による容易なプラントデータ入力と機能追加

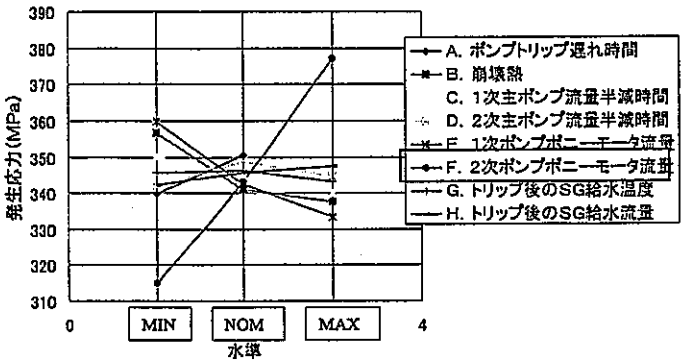
NNとGreen関数法による高速計算



PARTSコード入力画面

システムパラメータ調整による熱過渡荷重緩和

システムパラメータに対する感度解析



その1:熱応力の感度が高いシステムパラメータを調整することにより系統熱荷重を緩和できる。

応力が最大となるシステムパラメータ組合せ

	最良	最悪
ポンプトリップ遅れ時間	MIN	NOM
崩壊熱	MAX	MIN
1次ポンプ流量半減時間	MAX	MIN
2次ポンプ流量半減時間	MIN	NOM
1次ポンプポニーモータ流量	MAX	MIN
2次ポンプポニーモータ流量	MIN	MAX
トリップ後のSG給水温度	MAX	NOM
トリップ後のSG給水流量	MIN	MAX
実験計画法による予想応力	277.8	420.9
パラメータ入力計算による確認	298.1	413.6
従来法によって評価した応力	-	462.0

(単位 MPa)

その2:従来の設計法に比べて熱応力を合理的に評価できる。

まとめ

- アドバンスループ炉概念成立に係る「簡素な原子炉容器」、「短縮化配管」、「IHX/ポンプ合体機器」の構造力学上の特徴と設計成立に必要な条件を明らかにした。
- 物量増を招かない熱荷重緩和設計として「アクティブ温度制御による原子炉容器の熱荷重緩和装置」と「熱流動-構造統合解析設計法」を提案した。
- 今後は、「炉心支持構造物」、「球形管板」等の他の主要構造も含めた設計成立性を評価するための構造設計基準暫定案をPhase2期間内に提案すると共に、熱荷重緩和設計法に長期課題として取り組む。

Feasibility Study

LLFP核変換を行うNa大型炉心の予備的設計検討

R&D報告会
2002年4月25日（木）

炉心燃料システムGr.　高木直行

Feasibility Study

- 背景 -

FSにおける核変換対象LLFP:　I-129, Tc-99, Cs-135

フェーズＩでの検討項目:
1) 回収ロス率及び核変換率と廃棄物低減利得の相関
2) 元素分離Cs核変換の可能性検討
3) LLFP核変換特性（変換率・量、減速材比依存性）
4) 炉心特性への影響
5) 再処理に伴う不純物の影響
6) 放射化生成物の有無
7) LLFPピンの発熱と健全性
8) 核変換率改善のための高効率核変換集合体概念

核的検討が中心

フェーズＩの主要結論:
Na冷却MOX燃料大型炉では、
・減速材の利用により、I-129、Tc-99は効率的な核変換の可能性あり
・一方、Cs-135については有意な核変換は難
・回収ロスを考慮すると「核変換率」向上が重要
　廃棄物1/100には、変換率>10[%/cycle]、ロス率<0.3[%/再処理]以下が必要

Feasibility Study

- H13年度検討の目的 -

フェーズIでの検討で核的成立性ありと評価された、I, Tcの二元素を対象として*、

- LLFP集合体及びそれを装荷した炉心の工学的設計検討に着手し、
- LLFP核変換炉心の成立性を評価するとともに、今後の設計課題を明らかにする。

核熱＋熱流力＋材料健全性の観点より

検討項目
- LLFP集合体設定の考え方
- LLFP化合物の選定
- 非均質効果の検討
- LLFP集合体と炉心構成の設計検討
  基準炉心： JSFR-1500
  自己生成分以上のLLFPを変換する炉心

*注
Csについては、核変換の可能性検討を別途実施

Feasibility Study

- LLFP集合体設定の考え方 -

- ターゲットピン構成： 粉体・ペレットまたは金属スラグ形態に加工したLLFPをステンレス鋼製の被覆管に内封。
- 集合体構成： ターゲットピンと減速材ピンを適切な配置にてラッパ管内に収納。
- 燃料と同様、多重防護の考え方に基づき「溶融防止」を基本。
- LLFP集合体設計には以下の諸データが必要だが、現時点で十分整備されていない。
  → 現知見の範囲で物性値、制限条件等を暫定して実施。

項目	データ整備状況	項目	データ整備状況
FP化合物の蒸気圧	部分的にあり	被覆管との相互作用	部分的にあり
熱伝導度	部分的にあり	照射挙動	部分的にあり
スウェリング速度	部分的にあり	核変換生成ガス保持率	部分的にあり
クリープ速度	なし	被覆管内面腐食データ	なし
ヤング率	なし	溶融時、再固化時挙動	なし

Feasibility Study

- LLFP化合物の選定 -

選定の考え方

核変換特性(変換率)、化学的安定性(融点、共存性等)、製造性(気体発生無、沈殿回収可)、リサイクル性(再回収・保管容易性)、二次廃棄物(放射化物無)、物性データ(有無)等の観点

既往知見の整理

1. ヨウ素化合物候補: NaI、CeI_3、NiI_2、MgI_2、CuI、AgI、CsI 、CaI_2等(多機関)
2. 核変換率: {NaI, CeI_3, MgI_2, CuI} > NiI_2 >> CsI >> AgIの順(JNC)
3. AgIは二次廃棄物の観点からも不適当(JNC)
4. NiI_2は被覆材をかなり腐食させる(NRG, 東電原研)
5. CuI、MgI_2のスウェリング顕著。NaIはスウェリング小(NRG, 東電原研)
6. NaIは、IがXeに変換後、単体Naの液化の可能性あり(NRG, 東電原研)
7. 被覆材との共存性はMgI_2、CaI_2、CuI、NaIの中で、CaI_2とNaIが相対的に良く、CuIは悪い(NRG, 東電原研)
8. 照射環境温度600℃での選定結果: CuI、NiI_2、MgI_2、BaI_2(東芝、東電原研)
9. MgI_2、BaI_2は、ステンレス被覆管を用いる場合、金属単体がFe, Ni, Crと溶融状態をつくる可能性あり(東芝、東電原研)

Feasibility Study

ヨウ素化合物の選定

- □ 東電のスクリーニング調査で選定されたCuI、NiI_2、MgI_2、BaI_2についても、被覆管共存性やステンレス被覆管元素との溶融の点で懸念あり
  → 現時点で優劣をつけることは困難
- □ これらの内、CuIペレットについては、NRGのGlobal論文に熱伝導率の値あり

集合体設計・解析中心の本研究では、**CuI** を選定

テクネシウム化合物の選定

- □ 候補: TcO_2、Tc(金属)(多機関)
- □ HFR(Petten)でのTc金属照射試験では問題は生じていない(NRG)

本検討では、**Tc**(金属)を選定

減速材物質の選定

減速能、物性データの豊富さ、化学的安定性、二次廃棄物、価格等の観点

本検討では、**ZrH**を選定

Feasibility Study

- 非均質効果の検討 -

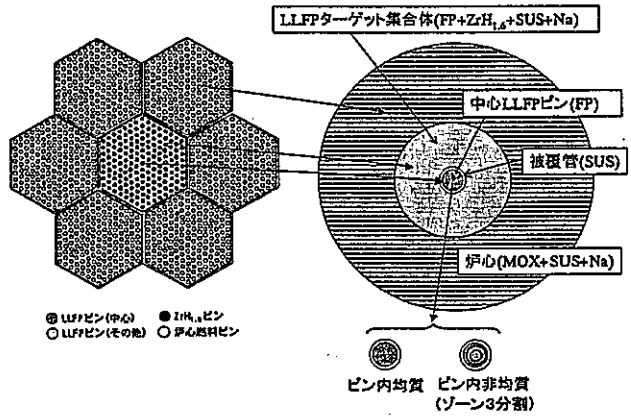
HFR(Petten)でのTc−99照射試験:

- 変換後のRu濃度はサンプル表面から50μmで急激に減少
  → 熱外領域共鳴による自己遮蔽効果

ピン径の違い、解析ゾーンの詳細化が
核変換特性に及ぼす影響を評価

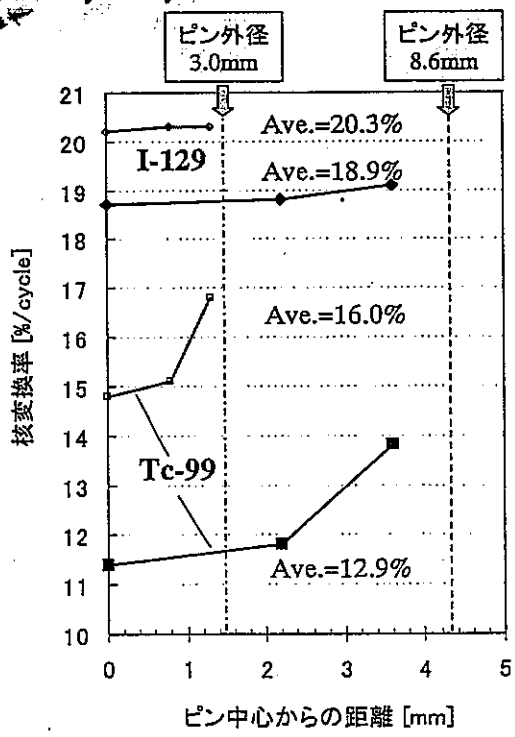
解析条件:

I-129 :	CuI, 密度5.62g/cc, スミア密度80%TD
Tc-99 :	Tc金属, 密度11.5g/cc, スミア密度80%TD
$ZrH_{1.6}$:	密度5.6g/cc,スミア密度90%TD
対象炉心:	1500MWe MOX-Na炉
FP集合体:	燃料と同一寸法。271本の内45本をFPピン、残り226本をZrHピン（減速材比率: 83.3%）
FPピン径:	8.6mm, 3.0mm
計算方法:	SRAC95の衝突確率法燃焼計算（107群）



非均質効果評価モデル概念図

Feasibility Study

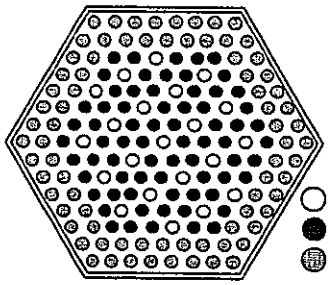


ピン径と核変換率の関係

- 変換率の位置依存性
  I-129:小 → 自己遮蔽:小
  Tc-99:大 → 自己遮蔽:大
- Tc変換率のピン太さ依存性
  ピン内変換率差:
  3.0mmピン (17-15)/15=13%
  8.6mmピン (14-11.5)/11.5=22%
  → 太径ピンで大
- 細径化による核変換率改善
  I-129: 18.9%→20.3%
  Tc-99: 12.9%→16.0%
  → Tcで効果大
- 均質計算と非均質計算の補正
  I-129: ほぼ不要
  Tc-99: 均質で過大評価、補正係数〜0.7

Feasibility Study

- LLFP集合体の検討 -



	内側領域			外側領域 Tcピン [本]	隣接燃料線出力* [W/cm]
	LLFPピン [本]	ZrHピン [本]	ZrHピン 比率 [%]		
I集合体	174	43	20	54	402
Tc集合体	87	130	60	54	363

I集合体:隣接集合体線出力の制限より、減速材20%に
Tc集合体:吸収大でフラックスくぼむため60%OK

- □ 核変換率最大化よりも製造性・成立性に配慮し、燃料集合体の仕様を基本
- □ 炉内装荷時のサーマルピーク回避のため、外側2層にTc、その内側にFPピンとZrHピンを混合配置

□ZrHの水素解離・被覆管透過

水素透過率を(数%以下に)低く保つには、
ZrHペレット温度 <500℃
被覆管温度 <400℃(オーステナイト鋼)
尚、マルテンサイト鋼では同条件で透過率9倍大

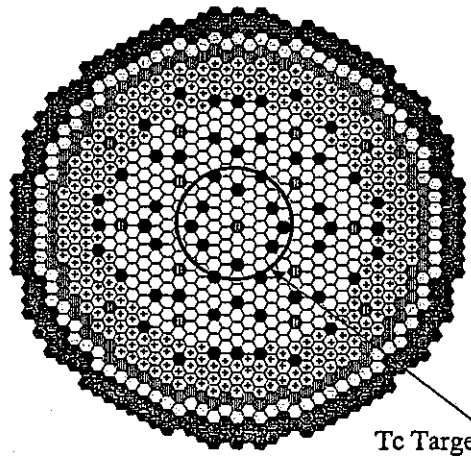
□ピン発熱量概略評価(炉内装荷時)

ZrH: ～5 [W/cm] → 低発熱＆熱伝導に優れ○
Tc: 285 [W/cm] → 熱伝導に優れ○
CuI: 130 [W/cm] → 溶融回避難

Feasibility Study

- LLFP集合体装荷炉心の検討 -

- □ 基準炉心: JSFR-1500(H13年度)
- □ Tc集合体4体、I集合体12体を燃料と置換
  - → 最大線出力430W/cm超過
  - → 炉心高さ増:80cm→90cm
  - → 上下ブランケット:35cm→30cm
- □ 炉心特性影響
  - 運転サイクル:547日→617日
  - Pu富化度:21.0/23.6→23.9/25.1%
  - 燃焼反応度:2.77→3.65%dk/kk'
  - 増殖比:1.17→1.08
  - 制御棒価値:増で停止余裕1.4→1.5%dk/kk'
  - 最大線出力:423→410W/cm
  - ドップラー(MOC):-0.0051→-0.0064Tdk/dT
  - ボイド反応度(EOC):6.4→5.9$



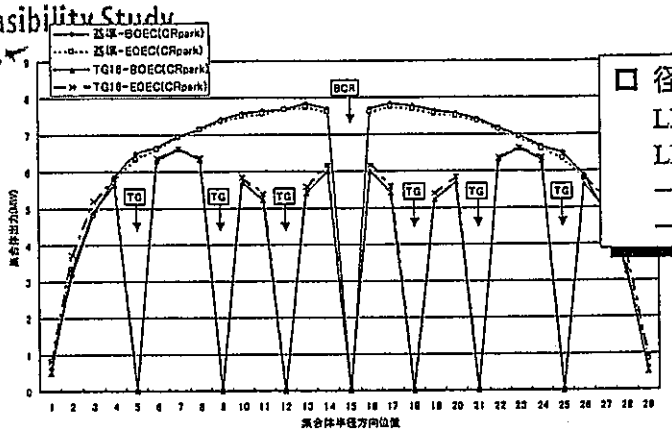
Tc Target: 4
I Target : 12
Total: 16

内側炉心燃料集合体	302体
外側炉心燃料集合体	276体
LLFPターゲット集合体	16体
径方向ブランケット	96体
SUS遮蔽体	102体
ZrH遮蔽体	210体
主系制御棒	40体
後備系制御棒	15体
合計	1057体

LLFP(Tc, I)ターゲット核変換炉心の炉心配置

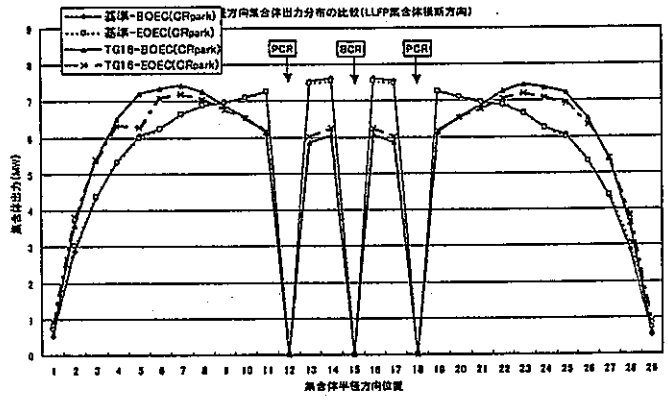
- □ スペクトル軟化により増殖・燃焼特性はやや悪化
- □ 一方、安全関連パラメータはやや改善

Feasibility Study



□ 径方向出力分布
LLFP集合体位置でくぼみ
LLFP集合体・制御棒の無い領域で増大
→ 出力分布はかなりいびつに
→ 流配検討継続中

□ 核変換率
I-129: 7.6%/cycle
Tc-99: 8.4%/cycle



□ 核変換量
I-129: 13.6kg/cycle
Tc-99: 31.3kg/cycle
各々の自己生成量14kg, 28kg
と同等以上を確保

□ LLFPピン健全性
IピンでXeガス発生: CDF評価中
CuI溶融: 炉内装荷では回避難

Feasibility Study

LLFP(CuI)ピン溶融回避方策

- 炉心領域装荷 → 径ブランケット領域装荷
- LLFPピンの細径化
- CuIスミア密度の低減

CuI線出力制限値
～10W/cm (暫定値)

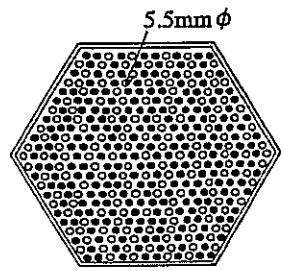
- Na温度: 473℃(入口出口平均)
- 融点: 605℃
- 熱伝導度: 0.34-0.60W/mK
- 熱伝達率: 0.3W/mK(He 100%), 0.03W/mK(Xe:He=6:1)

装荷位置	-	炉心領域	炉心領域	RB領域	RB領域
減速材割合	%	60	60	60	60
中性子束*2)	n/cm²/sec	2.76E+15	2.76E+15	3.78E+14	3.78E+14
ピン内径	mm	7.58	4.84	7.58	4.84
ターゲットスミヤ密度	%TD	80	50	80	50
発熱量合計*5)	W/cm	130.0	33.1	17.8	4.5

径ブラ位置装荷、ピン径約5mm(常陽Mk-II同等)、CuIスミア密度50%とすることで、CuI線出力<10W/cmとなり、溶融回避の見通し

- Tc集合体を炉内領域に6体程度
- CuI集合体を径ブラ領域に50体程度

装荷することにより、自己生成分以上のLLFPを核変換する炉心が成立する可能性あり



○ よう素化合物ピン
● $ZrH_{1.6}$ピン

径ブランケット位置装荷
^{129}I核変換用集合体

・熱ピーク緩和のTc層不要
・I-129変換率は5.3%/cycle程度

Feasibility Study

- まとめ -

- LLFP集合体及びそれを装荷した炉心の設計検討に着手した。
- LLFP集合体設計に必要な諸データは十分に整備されていないため、現知見の範囲で物性値、制限条件等を暫定して検討を実施した。
- FP化合物について既往研究を調査し、その成立性や設計に必要な物性値の有無を判断基準として、CuI, Tc(金属)を選定した。
- LLFPの自己遮蔽効果について検討した結果、Tcは自己遮蔽が強く、細径ピンで変換特性が改善されること、均質計算では誤差が大きいことが示された。
- 燃料集合体仕様をベースにLLFP集合体を具体化した。隣接燃料での出力ピークを回避するために外周にTc層を設け、内側に減速材とFPを混合した領域を設ける構成とした。
- LLFP集合体を炉内及び径ブラ領域に装荷した炉心を検討した結果、参照炉心の仕様調整を行うことにより、自己生成分以上のI, Tcを変換する炉心が成立する一次見通しが得られた。
- ヨウ素化合物の溶融回避するには、装荷位置や集合体仕様についてさらなる検討が必要。

Feasibility Study

- 今後の課題 -

- LLFPターゲット材の溶融可否の考え方整理
- LLFPターゲット材の内面腐食データ、照射データ、物性データ等の取得
- 工学的設計の観点からの、LLFP化合物の再選定
- 非均質かつ減速材を有するLLFP集合体の炉心解析手法の開発
- 製造性、健全性、再処理性、変換特性等に配慮した、総合的観点からのLLFP集合体設計検討
- Cs-135変換用集合体の検討
- 核熱・熱流力・材料健全性の観点からのLLFP集合体装荷炉心詳細設計検討

JNC TN9440 2002-004

JNC 大洗・研究開発報告会 (Apr., 25-26, 2002)

鉛ビスマス冷却中型炉の炉心検討

25, Apr., 2002

山口 浩之

核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター
システム技術開発部 炉心・燃料システムグループ

(1)H12 年度の検討結果および H13 年度の検討の目的

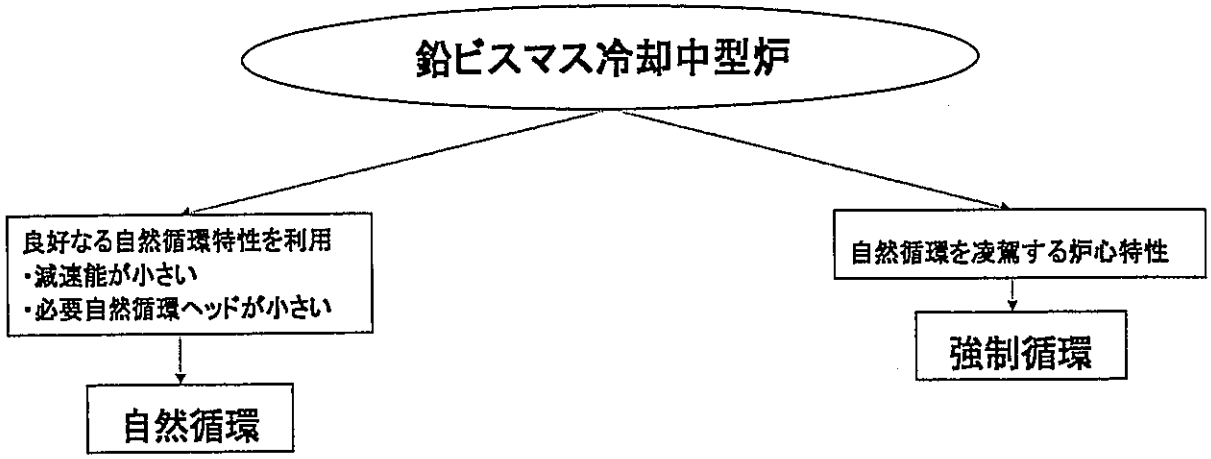
「1次系ポンプ不要、LOF 事象排除」などの利点と、鉛ビスマスの高い自然循環能力を考慮し、自然循環冷却方式にて、出力40万kWe炉心を検討した。

○H12度の結果 増殖比～1．2、炉心平均取出燃焼度～15万 MWd/t等の目標炉心特性は得られたが、炉心ブランケット平均取出燃焼度～4万 MWd/t、複合システム倍増時間～65年等のデメリットがあった。

○H13年度検討の目的

- 自然循環炉心の炉心特性改善
- 代替案として強制循環炉の検討
- 自然循環・強制循環それぞれの炉心・安全特性を比較し、鉛ビスマス冷却中型炉としての冷却材駆動方式を選定する。

(2)冷却材駆動方式



・低流速(P/D 増加→燃料体積比低下)
・ULOF 事象の排除(1 次ポンプ不要)

・高流速(P/D 減少→燃料体積比増加)
・燃料体積比向上により炉心特性向上

(3)両冷却材駆動方式共通の検討条件

・冷却材:鉛ビスマス
・燃料形態:窒化物燃料(N-15:100%)
・炉心形式:均質 Pu 富化度2領域炉心
・サイクル長さ:12～24ヶ月程度
・炉心部平均取出燃焼度:15万MWd/t
・増殖比:1．1程度
・被覆管最高温度制限目安:650℃(被覆管腐食減肉抑制)
・冷却材流量制限目安:2m/s以下(エロージョン防止)
・Pu-fis 装荷量を抑える(FBR 導入期を考慮)

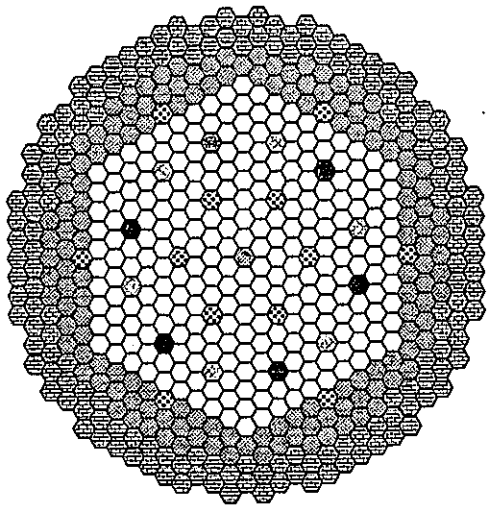
(4)H13 年度検討項目

自然循環炉心	強制循環炉心
・炉心出力 40 万 kWe→ ・炉心ブランケット平均取出燃焼度 4 万 MWd/t→ ・複合システム倍増時間 65 年→ ・Pu-fis 装荷量 約 13t/GWe→	・炉心出力 炉心径を自然循環と同等とする制限内で最適化 ・炉心ブランケット平均取出燃焼度、複合システム倍増時間、Pu-fis 装荷量等の特性を自然循環炉以上 ・安全性を考慮して、反応度係数に配慮

(5) 鉛ビスマス冷却中型炉炉心仕様

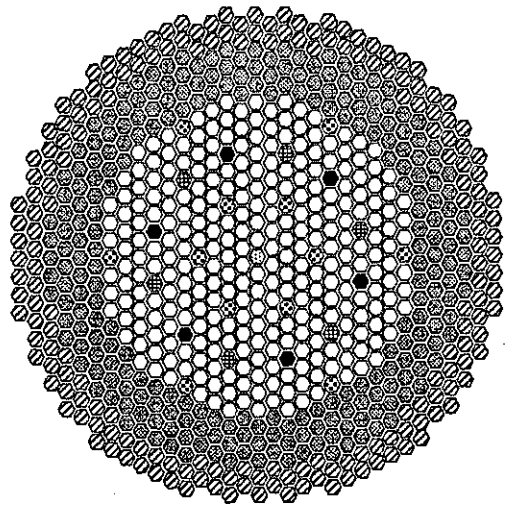
	自然循環炉心		強制循環炉心
項目	H13 年度仕様	H12 年度仕様	H13 年度仕様
電気出力	550MWe	400MWe	750MWe
熱出力	1450MWt	1053MWt	1875MWt
炉心出入口温度	465℃/258℃	492℃/312℃	520℃/352℃
炉心出入口温度差	180℃	←	168℃
熱効率	38%	←	40%
運転サイクル長さ	18 ヶ月	19 ヶ月	18 ヶ月
炉心型式	Pu富化度 2 領域均質炉心	←	←
炉心燃料	U-Pu混合窒化物燃料(N-15:100%)	←	←
ブランケット燃料	U窒化物燃料(N-15:100%)	←	←
炉心高さ	70cm	←	←
炉心等価直径	453cm	490cm	437cm
径方向ブランケット厚さ	なし	2 層	なし
軸方向ブランケット厚さ	上下各30cm	上下各35cm	上部なし、下部35cm
燃料交換バッチ数	8 バッチ	10 バッチ	7バッチ
集合体型式	ラッパ管封入型	←	←
ダクト厚さ	2.0mm	3.0mm	5.0mm
スペーサ型式	グリッド	←	←
集合体配列ピッチ	210.3mm	218.4mm	176.0mm
燃料ピン数/集合体	271	469	331
燃料ピン径	8.5mm	6.5mm	7.3mm
ピン配列ピッチ	12.5mm	9.62mm	8.9mm
被覆管肉厚	0.46mm	0.54mm	0.42mm
燃料体積比(実効)	32.0%(25.6%)	26.3%(21.0%)	40.6%(32.5%)
スミア密度	80%TD	←	←
燃料ボンド材	He	←	←

(6)鉛ビスマス冷却中型自然循環炉(H13年度)

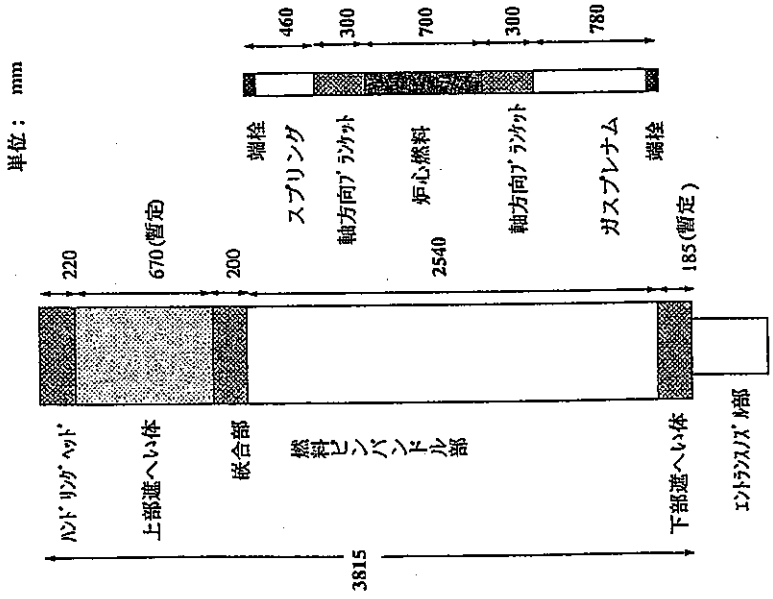


内側炉心燃料集合体	252体
外側炉心燃料集合体	144体
炉心中心スティール集合体	1体
制御棒（粗調整棒）	12体
制御棒（微調整棒）	6体
制御棒（後備炉停止棒）	6体
Pb-Bi遮蔽体	162体
計	583体

鉛ビスマス冷却中型強制循環炉(H13年度)



内側炉心燃料集合体	288体
外側炉心燃料集合体	246体
径ブランケット集合体	0体
炉中心スチール集合体	1体
制御棒(粗調整棒)	12体
制御棒(微調整棒)	6体
制御棒(後備炉停止系)	6体
Pb-Bi遮蔽体	186体
計	745体



(7) 鉛ビスマス冷却中型炉の燃料軸方向（自然循環炉の例）

強制循環炉心の場合

- 燃料集合体長:3465mm
- 燃料バンドル部長さ:2190mm
- 上部ブランケット:なし(燃料再処理負荷低減及び冷却材温度係数低減の為)
- 下部軸方向ブランケット:350mm

（8）鉛ビスマス冷却中型炉炉心特性

項目	単位	自然循環炉心 H13年度特性	自然循環炉心 H12年度特性	強制循環炉心 H13年度特性
Pu富化度	wt%	16.8/20.7	21.1/27.3	14.0/17.2
燃焼反応度	%ΔK/KK'	0.59	1.6	0.3
最大線出力密度	W/cm	約250	103	216
炉心部取出平均燃焼度	GWd/t	155	153	153
炉心ブランケット取出平均燃焼度		89	39	10.4
増殖比		1.22	1.19	1.19
炉心		0.79	0.65	0.91
径ブランケット		0	0.16	0
軸ブランケット		0.43	0.39	0.28
ピーク高速フラックス (E>0.1MeV)	$10^{15}/cm^2s$	1.66	1.08	1.9
ピーク高速フルエンス (E>0.1MeV)	$10^{23}/cm^2$	6.3	5.5	6.3
重金属インベントリ（炉心/軸ブラ/径ブラ）	t	36/35/-	35/42/44	43/26/-
原子炉倍増時間	年	36	71	33
複合システム倍増時間	年	36	65	34
Pu-fis装荷量	t/GWe	7.3	約13	5.4
ドップラー係数	Tdk/dT	-2.11×10^{-3}	-1.78×10^{-3}	注1 -2.58×10^{-3}
冷却材ボイド反応度	$	約9.9	約6.5	注1 約5.3

注1：径ブランケットあり炉心での値

(9)H13年度検討結果トピック

自然循環炉心	強制循環炉心
・構造材の量的見直し（削減）により燃料体積比（21.0%→25.6%）が向上し、内部転換比増加（0.65→0.79）	・炉心出力 75万kWe ・自然循環と比較して、燃料体積比向上。25.6%→32.5%
・炉心圧損を0.01 MPa→0.015MPaと増加させ、燃料ピン径増加（6.5mm→8.5mm）、線出力増加（103W／cm→約250W／cm）を許容	・冷却材温度係数改善のため上部ブランケット削除
・径方向ブランケット削除により炉心ブランケット平均取出燃焼度増加 約4万MWe→約8.9万MWe	・自然循環と比較して、炉心ブランケット平均取出燃焼度向上（径ブランケット削除） 約8.9万MWe→約10.4万MWe
・Pu富化度低減により複合システム倍増時間低減 約65年→約36年	・自然循環と比較して、複合システム倍増時間短縮 約36年→約34年
・Pu富化度低減、出力増加等により、Pu-fis装荷量/GWe減少 約13t/GWe→約7.8 t/GWe	・自然循環と比較して、Pu-fis装荷量減少 約7.8 t/GWe→約5.4 t/GWe

(10)ナトリウム炉心との特性比較

項目	単位	自然循環	強制循環	注1:Na 冷却炉(MOX)
原子炉熱出力	MW	1450	1875	1190
出口温度	℃	465	520	550
入口温度	℃	258	352	395
出入口温度差	℃	180	168	155
運転サイクル長さ	EFPM	18	18	18
燃料交換バッチ		8	7	4
Pu富化度	wt%	16.8/20.7	14.0/17.2	21.6/28.5
燃焼反応度	%ΔK/KK'	0.59	0.3	3.4
最大線出力密度	W/cm	約 250	216	約 430
炉心部取出平均燃焼度	GWd/t	155	153	約 150
炉心ブランケット取出平均燃焼度	GWd/t	89	104	56
増殖比		1.22	1.19	1.2
内側炉心		0.79	0.91	0.68
軸ブランケット		0.43	0.28	–
ピーク高速フラックス(E>0.1MeV)	$10^{15}/cm^2s$	1.66	1.9	2.8
ピーク高速フルエンス(E>0.1MeV)	$10^{23}/cm^2$	6.3	6.3	5.0
重金属インベントリ(炉心/軸ブラ/径ブラ)	t	36/35/–	43/26/–	14/11/23
原子炉倍増時間	年	36	33	31
複合システム倍増時間	年	36	34	40
Pu-fis装荷量	t/GWe	7.3	5.4	4.8
ドップラー係数	Tdk/dT	-2.11×10^{-3}	注2:-2.58×10^{-3}	-4.6×10^{-3}
冷却材ボイド反応度	$	炉心部 9.9	注2:炉心部 5.3	炉心部 6.0

注１：Na 冷却炉（MOX）：H13 年度中型レファレンス炉心
注２：径ブランケットあり炉心での値

(11)鉛ビスマス冷却中型炉の特徴

Na 冷却炉(中型)と比較して、

・被覆管腐食減肉対策のため被覆管最高温度を650℃に制限しているため、炉心出口温度を高くできず、熱効率が悪化する傾向にある。
・内部転換比が高く、燃焼反応度は小さくなる。(窒化物燃料の特性を含む)
・Pu 富化度を低くできる。(窒化物燃料の特性を含む)
・線出力が低い。(熱伝導度が低くいため、低線出力設計となる)
・炉内滞在時間が長い。(線出力が低い:同一燃焼度の場合)
・炉心等価直径が大きくなる。

等の差がある。

Na冷却(MOX)炉と比較すると、鉛ビスマス冷却(窒化物)炉は、低出力密度で、燃料の炉内滞在時間が長くなる傾向にある炉心。(取出し燃焼度同一)

(12)安全解析結果

項目	自然循環炉心		強制循環炉心	
	内　　容	評価	内　　容	評価
ULOF(SG 給水喪失, PRACS 起動)	自然循環のため、想定排除。	◎	SASS 作動に期待せず+CR 軸伸び考慮:被覆管最高温度が 811℃で事象終息。	○
UTOP(低温時)	SASS 作動に期待せず+CR 軸伸び考慮:被覆管最高温度が 311℃で事象終息。	○	SASS 作動に期待せず+CR 軸伸び考慮:被覆管最高温度が 477℃で事象終息。	○
UTOP(定格出力時)	SASS 作動に期待せず+CR 軸伸び考慮:被覆管最高温度が 764℃で事象終息。	○	SASS 作動に期待せず+CR 軸伸び考慮:被覆管最高温度が 654℃で事象終息。	○
ULOHS	SASS 作動に期待せず+CR 軸伸び考慮:被覆管最高温度が 668℃で事象収束。	○	未検討	

注:鉛ビスマス冷却中型炉は原子炉容器高さが高く、CR 駆動軸が長いことを考慮
UTOP 事象における反応度投入率は 0.02 ¢／s と設定している

自然循環、強制循環ともに炉心における受動的安全性は成立する見通し

(13)H13 年度検討のまとめ

- 自然循環炉心において、出力増加、構造材削減、圧損増加などの見直しにより、炉心ブランケット平均取出燃焼度、複合システム倍増時間、Pu-fis 装荷量などが大幅に改善された。
- 強制循環炉心においては、高圧損であるため、燃料体積比を高くでき、自然循環炉心と同等以上の特性をもつ強制循環炉心を設計できた。
- 自然循環・強制循環両炉心の安全解析は同等であるが、LOF 事象を排除できる自然循環炉心が比較的良好であるといえる。
- 自然循環・強制循環を選定する上で、決定的な炉心・安全特性の差は見出せなかった。

今後は、鉛ビスマスおよび窒化物燃料実用化のための開発課題を検討してゆくことになるが、炉心に関しては一応の結果が得られたと考えている。

小型炉の炉心検討

平成14年4月25日
システム技術開発部
炉心・燃料システムグループ
宇都 成昭

目的 ： H13年度のねらい

ナトリウム冷却炉、鉛ビスマス冷却炉について、ともにH12年度検討で課題となったプラント経済性に対する改善策に適応するべく、10年以上の長寿命と炉心固有の特性による高い安全性を達成する有望な炉心基本仕様を炉心制御方式も含めて検討し、今後の設計の方向性絞込みに資する。

検討の基本方針 ： ナトリウム炉

H12年度(結果)

・出力:50MWe
・循環方式:準強制，自然
・燃料:金属

↓

○長寿命の達成
・高富化度差2領域炉心
・30年燃料無交換

○固有安全による高い安全性の達成
・LOF事象の原理的排除(自然)
・SASSなしでATWS事象整定(自然，準強制)

●プラント経済性に課題
・初号機建設単価 ： >60万円/kWe

H13年度(方針)

○H12炉心の特性維持

●プラント経済性の改善

方策検討

H12自然循環炉サイズを大幅に変更せずに、
・出力を増大 → 150MWe
・準強制循環
・炉心寿命: ≧10年

↓

目標:35万円/kWe

検討の基本方針 ： 鉛ビスマス炉

H12年度(結果)

・出力:50MWe
・循環方式:自然
・燃料:窒化物

↓

○長寿命の達成
・高富化度差2領域炉心
・30年燃料無交換

○固有安全による高い安全性の達成
・LOF事象の原理的排除
・SASSなしでATWS事象整定

●経済性に課題
・一体型炉心 → 炉心吊り上げ重量大
→ 炉上部構造が長大

H13年度(方針)

○H12炉心の特性維持

●プラント経済性の改善

方策検討

・炉心構成を変更
一体型炉心
↓
集合体構成炉心
↓
炉上部物量の低減

ナトリウム炉／検討条件

○主要設計条件

- 出力 : 375MWt(150MWe)
- 冷却方式 : 準強制
- 炉心構成 : Pu富化度径方向or径軸方向 2領域炉心
- 炉心寿命 : 10年(1バッチ)
- 燃焼度 : 80GWd/t程度(目標)
- 増殖比 : 追及しない
- 炉心圧損 : 0.5kg/cm^{2}程度

ナトリウム炉／検討の流れ

○出力増大化の検討

↓

原子炉サイズを大きく変えずに出力を3倍

→ 最大線出力が大型炉並、安全性の面で難

○炉心仕様の調整

↓

- 細径化(15mm→9.5mm)
- 径軸方向2領域化(←被覆管最高温度≦650℃)
- 扁平炉心(H/D=80cm / 214cm), 燃焼反応度スウィング増大

→ 反射体価値小

強制循環の特性を生かしp/dを縮小
→ 炉心径縮小(2.5m→2.1m)
→ 制御方式として反射体制御

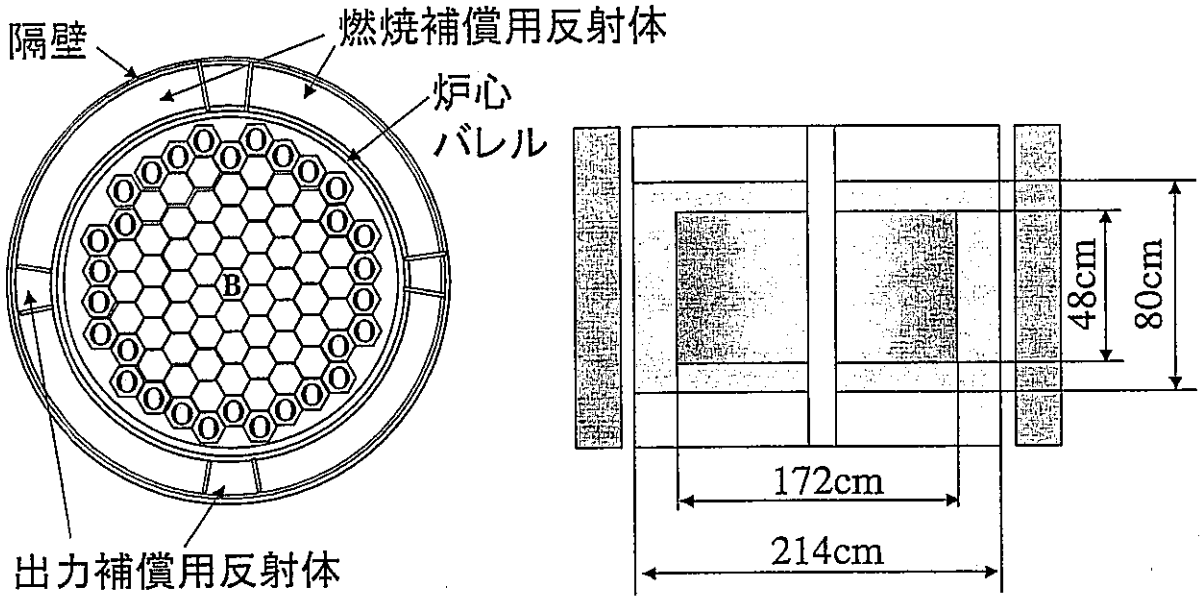
○炉心圧損の見直しによる炉心高性能化

- 炉心圧損増大を許容(0.5— p/d小 →0.75kg/cm^2)

→ 燃料体積比増大, 燃焼反応度スウィング低減

- 反射体価値＞燃焼反応度スウィング → 反応度収支成立の見通し

ナトリウム炉／炉心構成



⬡	内側炉心集合体	54体
Ⓞ	外側炉心集合体	30体
Ⓑ	炉停止棒	1体

ナトリウム炉／主要炉心特性

項目	単位	炉心仕様・主要特性
原子炉熱出力/電気出力	MWt/MWe	375/150
原子炉出口/入口温度	℃	510/355
炉心等価直径	cm	214
炉心高さ	cm	83.2 (4%伸び考慮)
運転サイクル長	年	10
炉心平均取出燃焼度	万MWd/t	8.0
Pu富化度(内/外)	%	10.1/18.0
転換比(MOC)		0.92
最大線出力密度	W/cm	279
冷却材ボイド反応度	$	約1.5 (炉心部+上部ﾌﾟﾚﾅﾑﾎﾞｲﾄﾞ)
燃焼反応度変化	%Δρ	1.7
反射体反応度価値	%Δρ	3.0
炉心圧損	kg/cm^2	0.75

項目	単位	燃料仕様
燃料棒本数		397
燃料棒直径	mm	9.5
被覆管肉厚	mm	0.56
燃料棒ｸﾘｱﾗﾝｽ	mm	1.15
燃料棒ﾋﾟｯﾁ	mm	10.65
p/d		1.121
ﾀﾞｸﾄ肉厚	mm	2
ﾀﾞｸﾄｷﾞｬｯﾌﾟ	mm	2
ﾊﾝﾄﾞﾙﾋﾟｯﾁ	mm	220.7

項目	単位	値
必要制御反応度	%Δρ	~~2.0~~ 2.5
反射体価値最小値	%Δρ	~~2.6~~ 2.9

反応度収支は成立
(余裕は小さい)

ナトリウム炉／安全特性評価(1)

○安全性目標条件

・ノミナルホッテスト条件の被覆管CDF: ≦ 0.5 (SRベース)

・燃料中心で燃料溶融が生じない

安全目標として、燃料中心最高温度: ≦ 1000℃

○設定パラメータ

・炉心圧損 : 0.75kg/cm^2

・反応度挿入量 : 15 ¢

・冷却材温度係数 : 1.9×10^{-6} Δk/kk'/℃(炉心部+ガスプレナム部)

・最大線出力 : 275W/cm

・流量半減時間 : 15秒(45秒以降は流量減少を緩和),20秒

↑ 冷却材沸騰防止

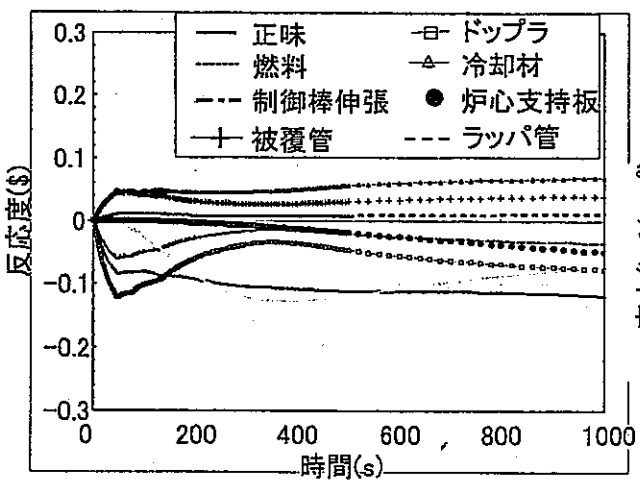
ナトリウム炉／安全特性評価(2)

ULOF

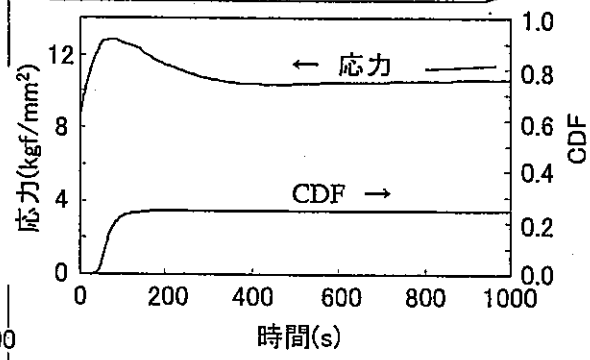
・流量半減時間 : 15秒

&45～200秒 : 線形減衰

・炉心圧損 : 0.75kg/cm^2



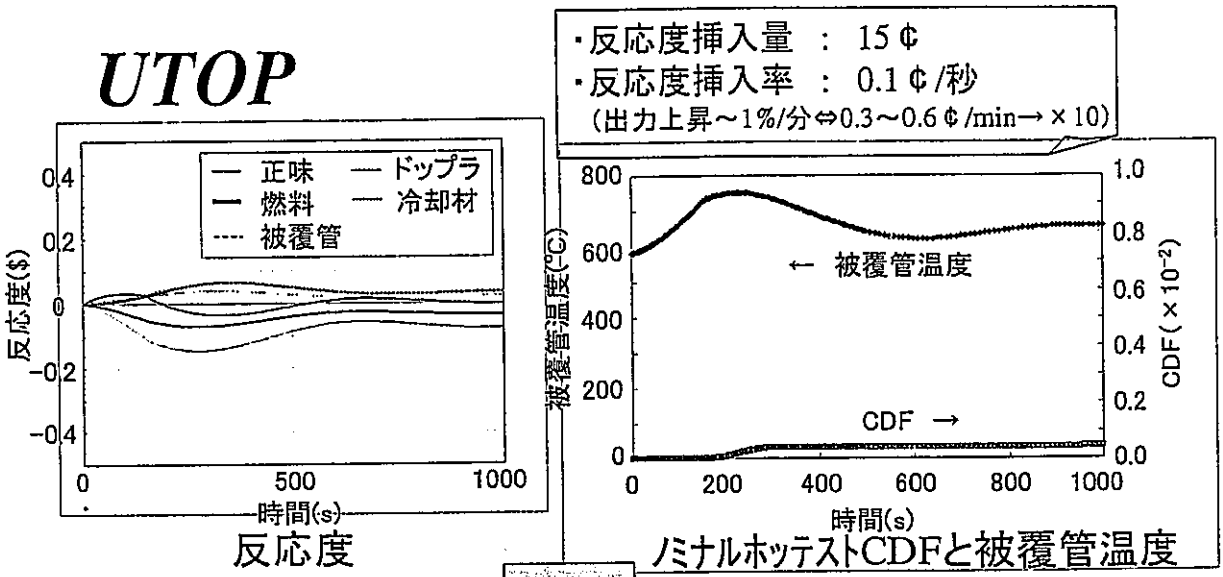
反応度



ノミナルホッテストCDFと被覆管温度

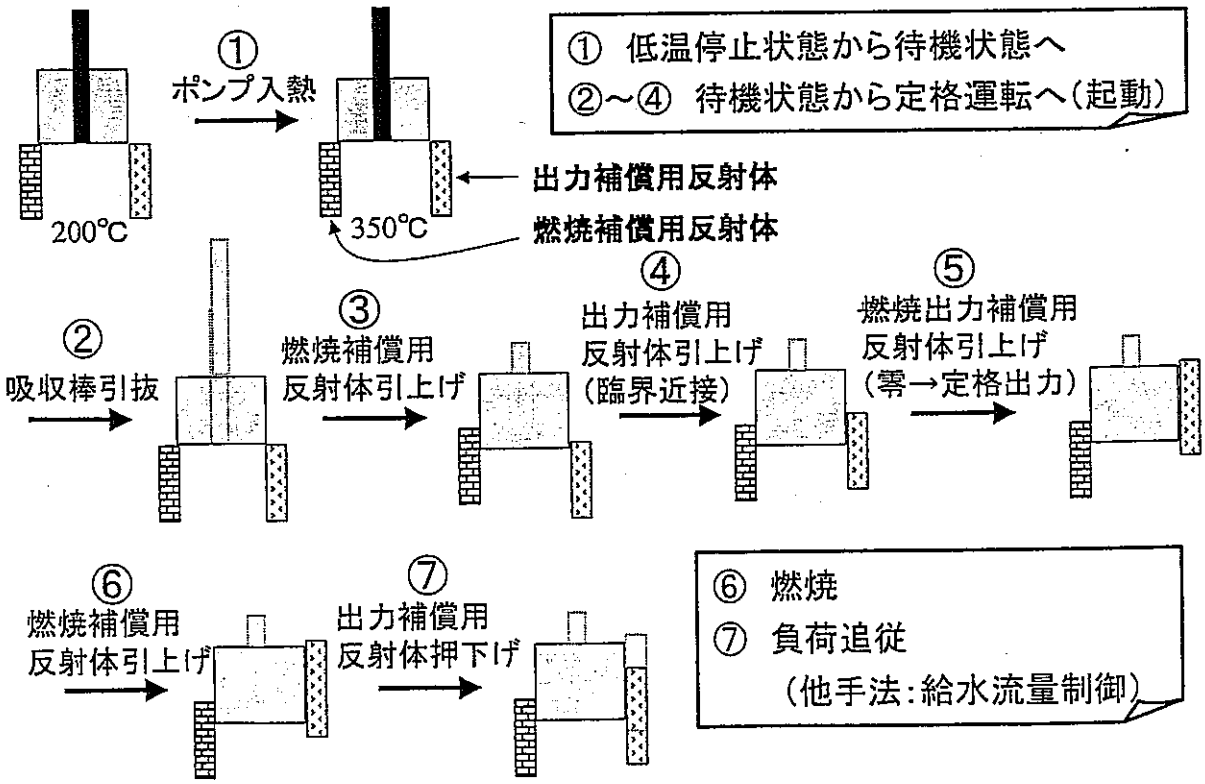
制御棒軸伸張、炉心支持板反応度による寄与で事象整定

ナトリウム炉／安全特性評価(3)



制御棒軸伸張、炉心支持板膨張反応度および径方向膨張反応度による寄与を含む固有の安全性のみで事象整定

ナトリウム炉／反射体の運用

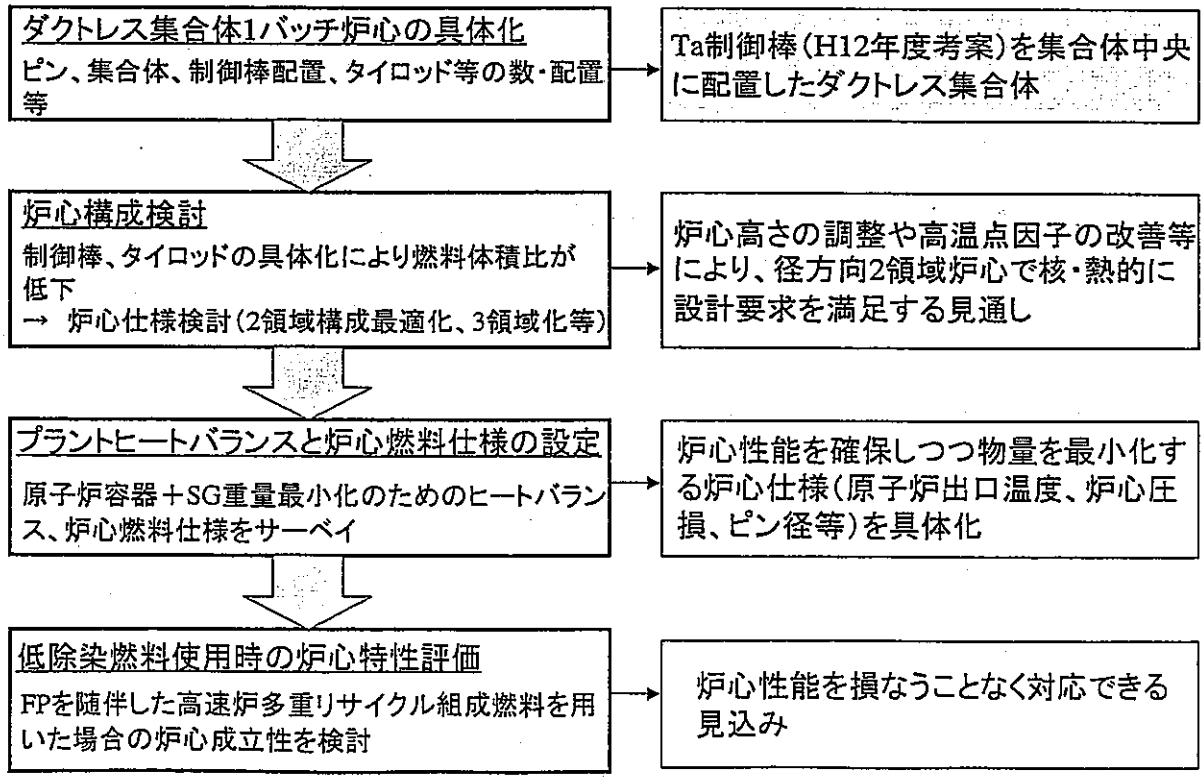


鉛ビスマス炉／検討条件

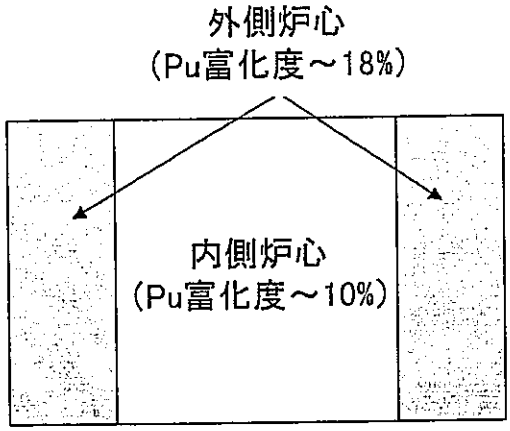
○主要設計条件

・出力	:	132MWt(50MWe)
・冷却方式	:	自然
・炉心構成	:	Pu富化度径方向2領域炉心
・炉心寿命	:	30年(1バッチ)
・燃焼度	:	80GWd/t程度(目標)
・増殖比	:	追及しない
・炉心圧損	:	0.125kg/cm^{2}以下

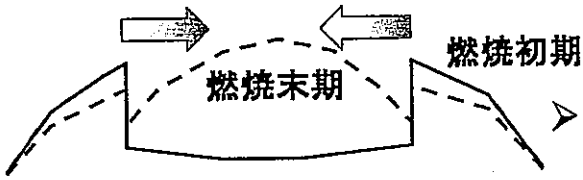
鉛ビスマス炉／検討の流れ



鉛ビスマス炉／高Pu富化度差



- 寿命初期は外側炉心で出力大
- 内側炉心は内部転換性能に優れ、燃焼に伴いPu量が増加
- 燃焼後期にはPu量の増加した内側炉心で出力大

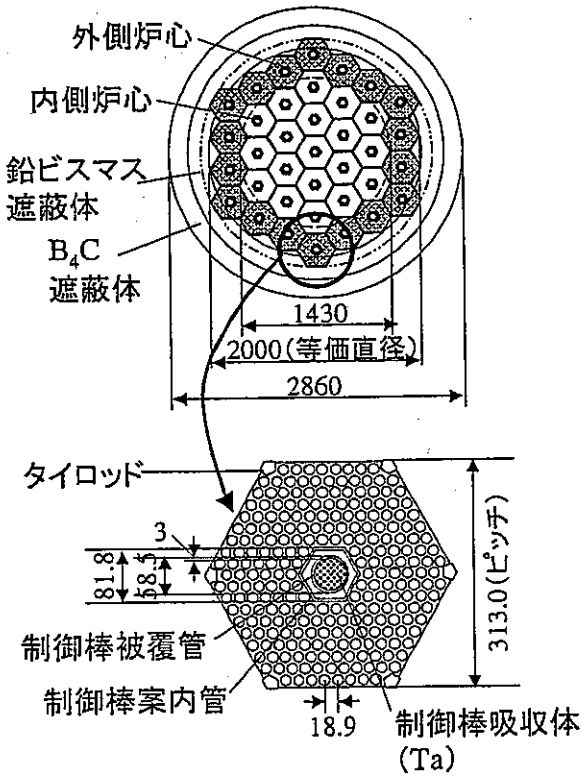


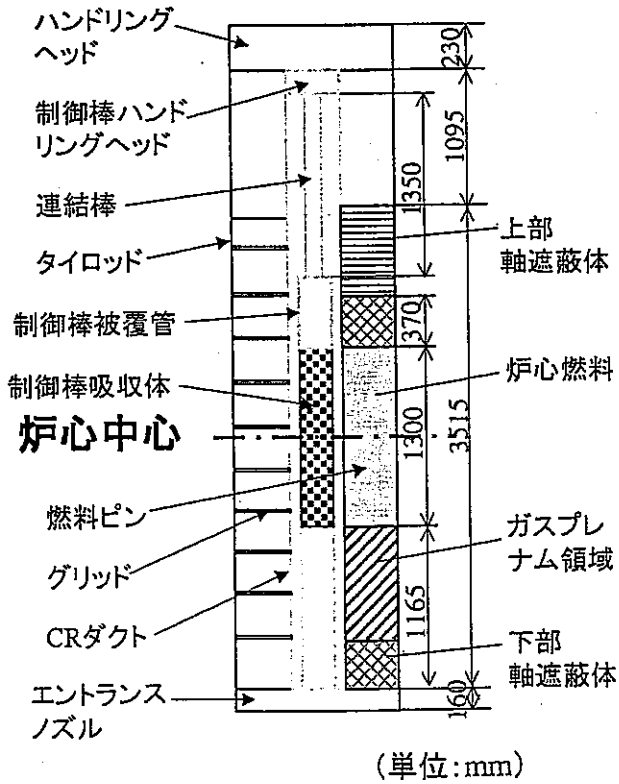
出力分布の変化
(炉周辺から中央へ自然移動)

- 流量再配分効果で出力分布の変動を自然に追従

(集合体発熱増→ΔT大→浮力増→流量増)

鉛ビスマス炉／炉心構成





鉛ビスマス炉／主要炉心特性

項　目	単位	炉心特性(軽水炉取出後30年後の燃料組成)*1	炉心特性(高速炉多重リサイクル時のTRU燃料組成)*2
原子炉熱出力	MWt	132	132
炉心出口／入口温度	℃	505／335	505／335
運転サイクル長さ	年	30	30
燃料交換バッチ数		1	1
Pu富化度(内側/外側)	w/o	9.8／19.6	10.7／21.0
燃焼反応度変化	%Δk/kk'	0.45	0.45
最大線出力(BOC／EOC)	W/cm	228／203	227／204
炉心部取出平均燃焼度	GWd/t	84.8	86.5
炉心部平均出力密度	W/cm^3	34.7	34.7
増殖比(BOC/EOC)		1.02／0.94	0.98／0.95
ピーク高速フラックス(0.1MeV以上)	$10^{15}/cm^2s$	0.52	0.52
ピーク高速フルエンス(0.1MeV以上)	$10^{15}/cm^2$	4.9	4.9
核分裂性Pu重量(BOC/EOC)	kg	1688／1677	1605／1591
年間核分裂性Pu利得(BOC→MOC／MOC→EOC)	kg/年	0.73／-1.46	0.07／-1.00
ドップラー係数(EOC)	10^{-3} T dk/dT	-3.59	-3.18
炉心冷却材ボイド反応度(EOC)	$	5.3	5.8

*1 $^{239}Pu/^{240}Pu/^{241}Pu/^{242}Pu/$ ＝ 66.0/27.0/2.0/5.0w/o

*2 $^{238}Pu/^{239}Pu/^{240}Pu/^{241}Pu/^{242}Pu/^{237}Np/^{241}Am/^{243}Am/^{244}Cm/^{245}Cm$ ＝ 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0/0.0w/o

鉛ビスマス炉／安全特性評価(1)

○安全性目標条件

- 被覆管最高温度 ： クリープ疲労損傷値により制限
- 燃料最高温度 ： 2750℃以下
- 冷却材バウンダリ制限温度 ： ホットレグ750℃
  但し、一定時間内(～100hr)の上昇に限定

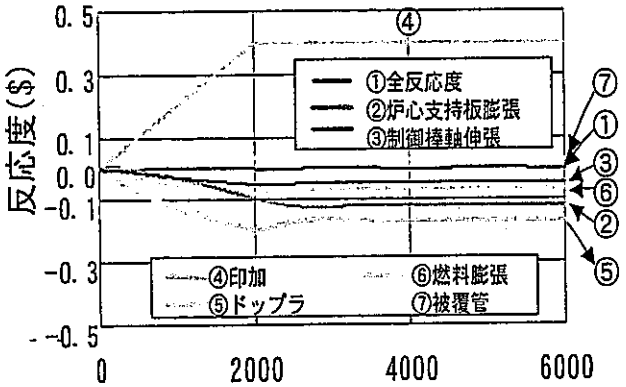
○設定パラメータ

- 制御棒誤引抜反応度 ： 40 ¢ , 0.02 ¢ /s
- 制御棒軸伸張反応度 ： 3.4 ¢ /cm
- 炉心支持板反応度 ： 考慮

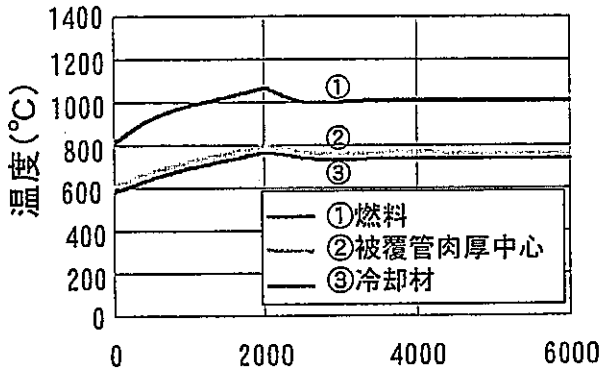
鉛ビスマス炉／安全特性評価(2)

UTOP

・反応度挿入量:40 ¢
・反応度挿入率:0.02 ¢/秒　・制御棒軸伸張反応度:3.4 ¢/cm
・100%定格運転



反応度



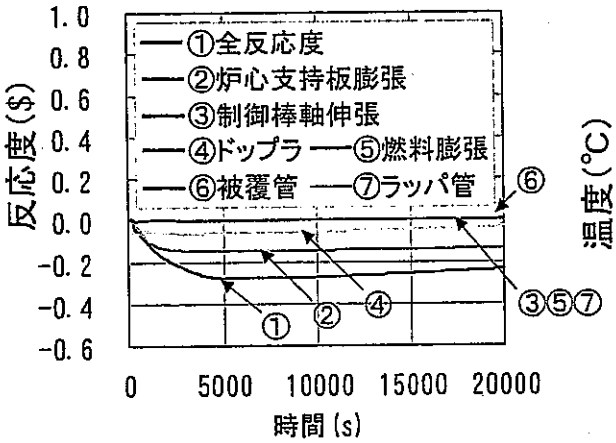
ホットチャンネル各部最高温度

制御棒軸伸張、炉心支持板膨張反応度による寄与を含む固有の安全性のみで事象整定

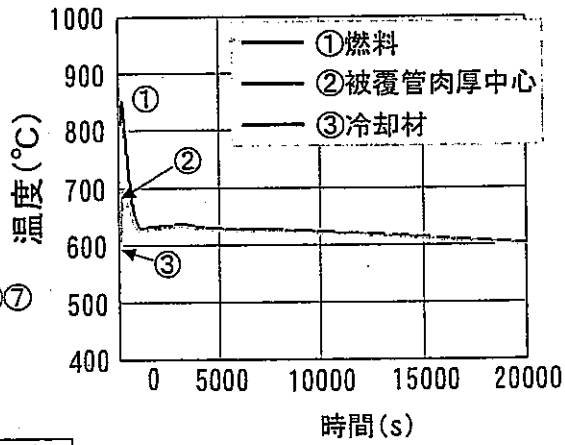
鉛ビスマス炉／安全特性評価(3)

ULOHS

・PRACS起動　：　する
・制御棒軸伸び反応度　：　3.4 ¢/cm



反応度



ホットチャンネル各部最高温度

炉心支持板膨張反応度による寄与を含む固有の安全性のみで事象整定

まとめ(1)

●H12年度プラントの経済性改善策として出力を3倍にしたプラントに適応する150MWeナトリウム冷却強制循環式金属燃料炉心について検討し、高い安全性と長寿命を両立する1つの候補概念を構築した。

・10年以上の長寿命化達成の見通しを得た。

・適切な電磁ポンプの流量半減時間を確保すれば、SASS等の受動的安全機構に頼らず、合理的なフィードバック反応度の考慮によりULOF, UTOP時の炉心整定を達成できる見通しがある。

・燃焼補償、出力補償を機能分離した反射体制御方式を考案し、反応度収支を成立させるとともに、UTOP時の印加反応度を制限できる見通しを得た。

まとめ(2)

●H12年度プラントの経済性改善策として集合体構成型にしたプラントに適応する50MWe鉛ビスマス冷却自然循環式窒化物燃料炉心について検討し、高い安全性と長寿命を両立する1つの候補概念を構築した。

・H12年度検討の一体型炉心の見直しに基づく構造の具体化により、制御材としてのタンタルを内包するダクトレス燃料集合体で燃料体積比をできるだけ確保しつつ、30年の長寿命化達成の見通しを得た。

・SASS等の受動的安全機構に頼らず、合理的なフィードバック反応度の考慮によりUTOP, ULOHS時の炉心整定を達成できる見通しがある。

・低除染燃料でも炉心成立性の見通しを得た。

平成１４年度第１回Ｒ＆Ｄ報告会　2002年４月25日

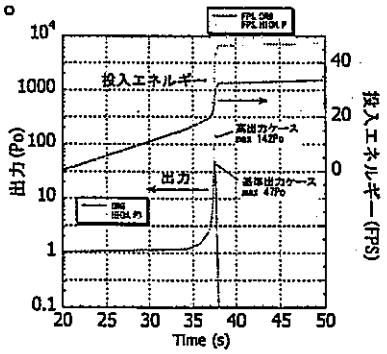
多様な炉心の炉心安全性の検討
平成13年度　評価結果報告

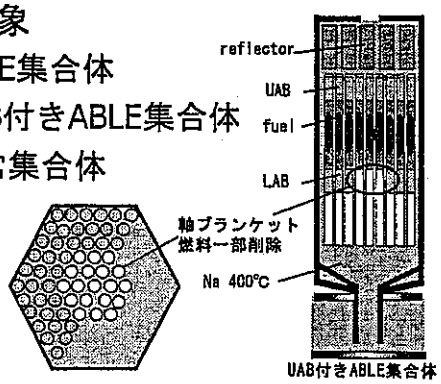
１．ABLE集合体による再臨界排除有効性評価
２．ガス冷却炉の検討
３．重金属冷却炉の検討
４．今後の課題

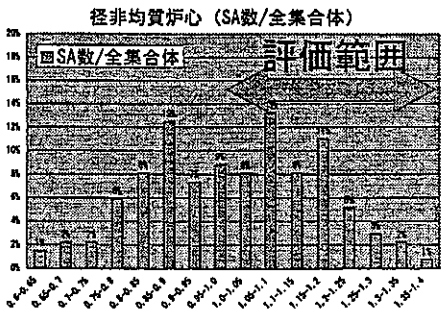
リスク評価研究グループ　飛田 吉春、藤田 朋子、
遠藤 寛、佐藤 一憲
安全設計グループ　久保 重信、丹羽　元

１．ABLE集合体による再臨界排除有効性評価
(1) 集合体単体の解析

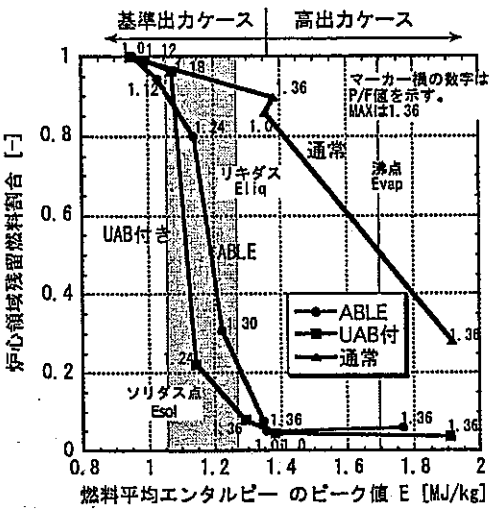
- EFM1試験解析にて検証された条件を適用。
- 集合体単体の燃料流出挙動解析を実施。
- ULOF事象を想定
- SAS4Aの出力履歴を投入
- パラメーター
  - 投入エネルギー
  - P/F値=1.0～1.36
- 評価対象
  - ABLE集合体
  - UAB付きABLE集合体
  - 通常集合体







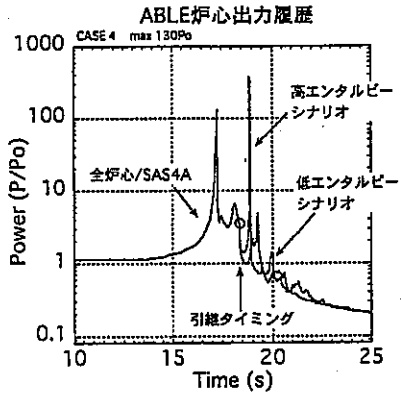
1．ABLE集合体による再臨界排除有効性評価
(2) 集合体単体における流出挙動解析結果



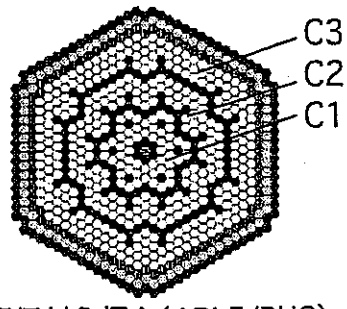
- 集合体毎の燃料平均エンタルピーのピーク値Eと炉心内燃料残留量に相関関係がある。
- E<Esolの場合
  - どの集合体でも殆ど流出しない。
- Esol<E<Eliqの場合
  - ABLE集合体及びUAB付きABLE集合体は通常集合体に比べて、燃料排出を促進する効果大。
  - UAB付きABLE集合体では、炉心上端の閉塞形成によって炉心圧力が維持され、通常ABLEよりも流出量が多くなる。但し、主として下方への流出となるため、後続過程で再臨界の可能性が浮上する。

1．ABLE集合体による再臨界排除有効性評価
(5) 全炉心解析の条件

- 解析条件
  - H12年度設計径非均質炉心を対象
  - ULOF事象（流量半減時間5.5秒）
  - 燃料粒子の流出挙動に関わるモデルは、EFM1試験で検証された条件を適用
  - SAS4Aの解析結果を引き継いだ一貫解析

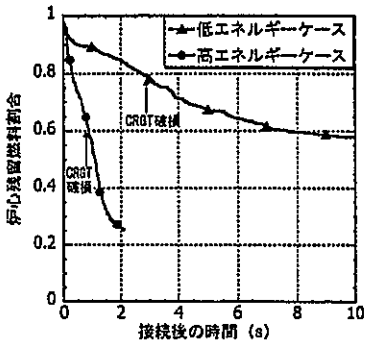


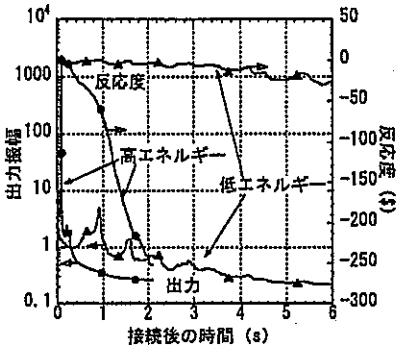
- 出力条件
  - 低エンタルピーケース
    - SAS4Aからの引継後そのまま解析を継続。引継後の発生エネルギー～0.24 MJ/kg。
  - 高エンタルピーケース
    - 引継直後に外部反応度10$(40$/s)を投入し、高燃料エンタルピーの炉心状態を作成する。引継後の発生エネルギー ～0.45 MJ/kg 。

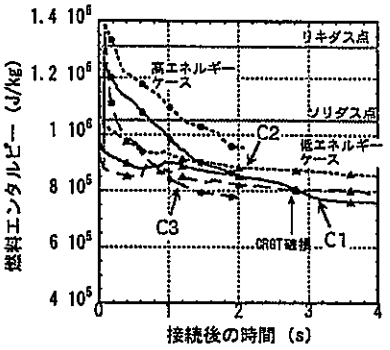


評価対象炉心(ABLE/RHC)

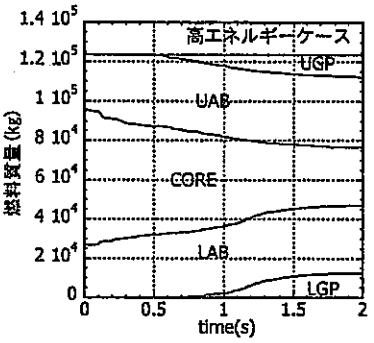
1．ABLE集合体による再臨界排除有効性評価 (6) 全炉心解析結果



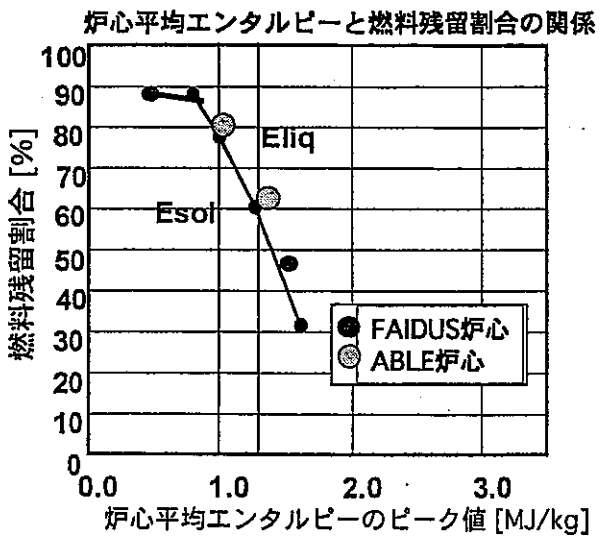


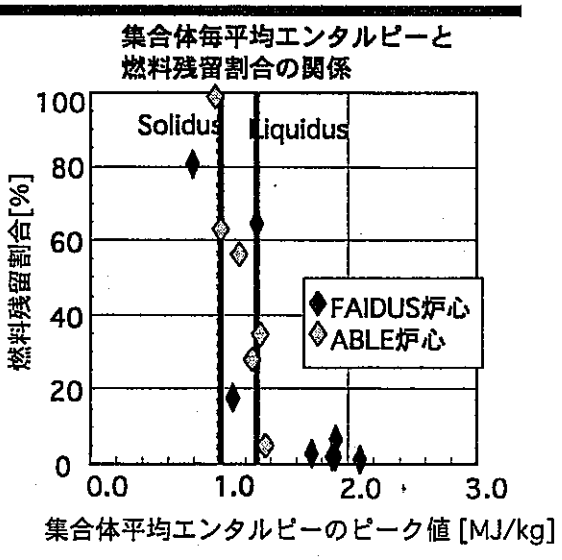


- 高エネルギーケース
  - CRGT破損時点で40%の燃料が流出し、出力・反応度が急激に低下。
- 低エネルギーケース
  - CRGT破損時点での燃料流出量は20%程度であるが、ABLEピンを通した燃料流出により厳しい再臨界が発生することなく、事象終息。
- 炉心から流出した燃料は炉心上下にほぼ対照的に分配されている。



1．ABLE集合体による再臨界排除有効性評価 (7) FAIDUS炉心との比較





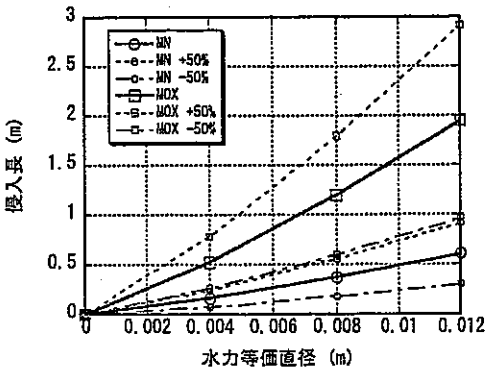
- 燃料流出挙動のエンタルピー依存性はFAIDUS炉心もほぼ同様である。

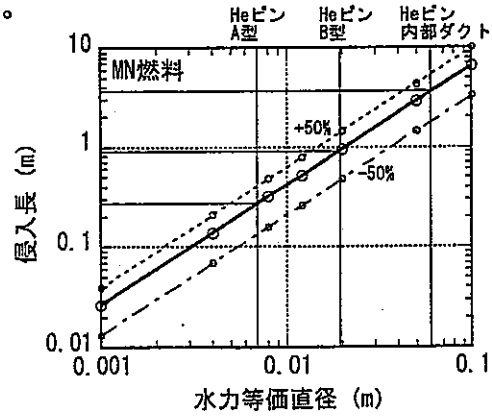
1．ABLE集合体による再臨界排除有効性評価
(8) 結論と今後の課題

- 集合体単体での解析
  - 従来の通常集合体と比較して、顕著な燃料排出促進効果があることを明らかにした。集合体平均燃料エネルギーのピーク値と流出量の相関関係を定量化した。
- ABLEによる再臨界排除の成立性を評価
  - 高エンタルピーケース（炉心燃料平均エンタルピーEav～Eliq）での有効性を確認。
  - 低エンタルピーケース（Eav～Esol）では損傷領域拡大開始までに必ずしも十分な燃料流出量を確保できていない。ただし、燃料のエネルギーはソリダス以下で流動性は低く、ABLEの燃料流出促進効果により厳しい再臨界は発生せずに崩壊熱レベルで炉心の溶融が徐々に進行する中長期的PAMR過程へ移行。
  - この特性は内部ダクト型（FAIDUS）炉心についても当てはまると考えられる。
- 今後の課題
  - ABLE径方向均質炉心の事象推移評価
  - 低エンタルピー燃料の燃料流出挙動の影響
  - 低エネルギーシナリオにおける中長期PAMR過程における臨界性の評価

2．ガス冷却炉の検討
(1) 出力ピーク後の燃料再配置挙動

- 出力ピーク直後の燃料分散挙動
  - 窒化物燃料のピン束への侵入長を評価し、酸化物燃料と比較。
  - 高い熱伝導度のために、酸化物燃料の侵入長は1/3程度となる。
  - HeピンA型（狭ピンピッチ+内部ダクト、MN）では、ピン束への侵入長は10cm程度であり、内部ダクト型の再臨界排除方策を採用する必要がある。内部ダクト内の侵入距離は、内径6cmに対して3m程度。
  - HeピンB型（ピンピッチ拡大、MN）では燃料侵入長は数10cm程度であり、炉心は一時的に未臨界状態となった後に、閉塞形成後に崩壊熱による長期的な溶融過程へ移行する可能性がある。

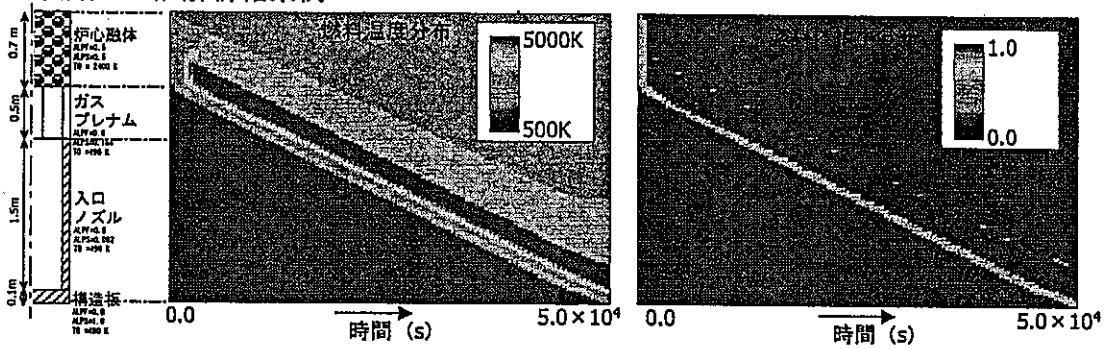




2．ガス冷却炉の検討
(2) 長期的な物質移行挙動

- 融体が下部ピン束へ侵入して固化閉塞を形成した後の崩壊熱による長期的な溶融浸食挙動を解析。
- 簡易解析コード（軸方向熱伝達＋溶融物質の移行）を使用。
- 炭酸ガス炉では、数十分後に融体が溶融し、表面が燃料クラストに覆われた状態で中心部温度5000K程度で下部ピン束を徐々に溶融浸食していく。約十数時間後に炉心支持板を溶融貫通し、コアキャッチャーへ落下。
- Heガスピン型炉では、構造材が高融点金属のため、表面が固化したNbに覆われたインゴット状態でコアキャッチャー上へ落下すると予想される。
- 窒化物燃料の熱解離によって低融点の金属燃料及び構造材との共晶物が生じる可能性について今後検討する必要がある。

炭酸ガス炉解析結果例



2．ガス冷却炉の検討
(3) ガス炉候補概念のCDA安全性比較評価

	炭酸ガスMOX炉	HeピンA型（内部ダクト、MN）	HeピンB型（ピンピッチ拡大、MN）	He粒子（MN）
燃料流出挙動	炉心からの燃料排出の観点では充分期待できる。その後の移行過程に不確かさが残る。	コアキャッチャーへの燃料排出を実現するための内部ダクト径と長さの関係を定量化。ダクトが高融点金属であるため、破損挙動の不確定性大。	炉心を一時的に未臨界にする燃料流出は確保できる可能性はある。	燃料と構造材の物性値の関係からエントランスノズルを抜けての流出可能性があると想像されるが、未評価である。
コアキャッチャー成立性	課題はあるものの、PCRV内平底CCにて未臨界性確保と冷却が可能な見込み。	CCへの燃料排出を実現できれば、マルチポット型CCの成立性あり。ただし、ガイド板上の燃料移行挙動に不確かさがある。	インゴット状態の融体落下に対してマルチポットCCの有効性は困難である見通し。炉内・炉外CCを含めて今後の検討が必要。	エントランスノズルを抜けての流出が可能であれば、マルチポットCCの成立の可能性あり。

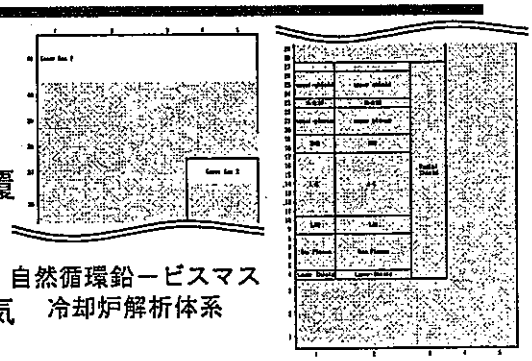
- 成立性見通しがつけやすくかつ開発課題が少ないものは炭酸ガスMOX炉である。
- Heガス冷却炉の中では、成立可能性が比較的高いと判断されるのは粒子型及びピン型の内部ダクト方式（A型）である。

３．重金属冷却炉の検討
(1) 自然循環冷却炉におけるガス放出挙動評価

- 重金属冷却炉
  - 冷却材沸点 ＞ 構造材沸点 → CDA初期の段階では冷却材沸騰によるボイド反応度印加なし。
  - 被覆管破損直後のＦＰガス放出によるボイド反応度印加
- 強制循環鉛冷却炉
  - H12年度にCDA事象推移解析を実施。
  - 炉心上部の被覆管破損位置、炉心圧損によってガス気泡は上方向に拡大。
    → 有意なボイド反応度印加無し。
- 自然循環冷却炉におけるガス放出挙動の影響を調べるため、SIMMER-IIIによる解析を実施。

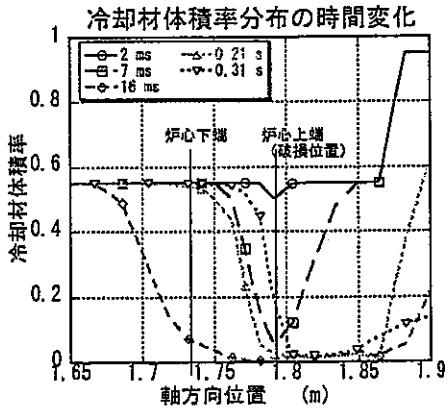
３．重金属冷却炉の検討
(2) 自然循環冷却炉におけるガス放出挙動評価

- 解析条件
  - H13年度設計自然循環中型炉
  - 流量：定格流量
  - 炉心中心１集合体の炉心上端で被覆管破損
- 解析結果
  - 炉心部の低圧損のため、放出ガス気泡は炉心部まで拡大。
  - 炉心内の気泡滞留時間は約0.3秒である。
  - 挿入反応度、反応度挿入率は破損の同時性に依存する。クリープ破損によるガス放出は全炉心で数秒程度の時間幅はあり、即発臨界は超過しないと考えられるが、ボイド反応度を補償するための燃料温度上昇（典型的なNa-MOX炉ではおおよそ200～300 ℃/$程度）が生じる。



自然循環鉛－ビスマス冷却炉解析体系

冷却材体積率分布の時間変化



3. 重金属冷却炉の検討
(3) 重金属冷却炉のCDA安全性比較評価

	流量減少(LOF)	過出力(TOP)	除熱喪失(LOHS)
強制循環	FPガス放出による反応度印加は無い。被覆管溶融移動によって炉心損傷開始。冷却材による燃料排出／炉心残存燃料による再臨界など、事象進展上の不確かさ大。 冷却材高温化による冷却系、炉容器、炉心支持板などの機械的健全性保持が課題。	事象推移全体が緩慢であることが予想され、事故影響としてはLOFに包絡されると考えられる。	事象推移全体が緩慢であることから、事故管理によって炉心損傷を回避できる可能性がLOF, TOPに比べて高い。 ナトリウム冷却炉ではLOHSに特有であった系統全体の高温化がLOFで現れるため、事故影響としてはLOFに包絡されると考えられる。
自然循環	極めて発生し難いと考えられる。	事象推移全体が緩慢であることが予想され、大規模破損は回避できる見込み。FPガス放出による破損拡大挙動についての評価は必要。	FPガス放出による反応度印加が生じる可能性がある。一方で、被覆管溶融移動による炉心損傷開始も考えられ、事象進展の不確かさが大きい。

4. 今後の課題

- ABLEによる再臨界排除有効性の判断
  - 径方向均質炉心の事象推移解析
  - 中長期PAMR過程における臨界性評価
  - ABLE有効性の判断と実証に向けた試験計画の提案
- 金属燃料炉の事象推移評価
  - 事象推移解析：金属燃料炉のCDAの特徴の把握
  - 再臨界排除方策の必要性、有効性の評価
- 重金属冷却炉の炉心安全性
  - CDA事象推移の検討、炉心安全上の留意点の摘出・整理
  - 炉心損傷影響緩和方策の検討

3次元免震開発の現状

要素技術開発部　構造信頼性研究Gr
北村　誠司、　梅木　克彦、　森下　正樹

研究開発報告会　2002年4月25-26日

報告内容

3次元免震技術開発の概要(前提条件)
- 3次元免震技術開発のねらい
- 装置開発用入力地震動（電共研）　位置付け
- 上下免震導入による応答低減効果
- 要求性能の設定（電共研）　装置の開発目標

3次元免震構造の開発状況
- 建屋3次元免震方式（METI）　免震要素の開発
- 機器上下免震方式（JNC）　設計の具体化

研究開発報告会　2002年4月25-26日

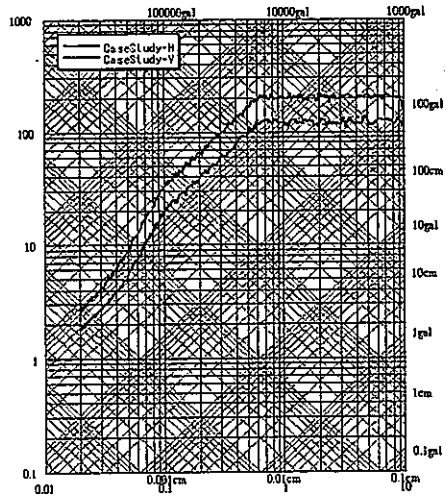
3次元免震技術開発のねらい

- FBR機器の構造設計：
  - 熱荷重(薄肉，柔構造) と 地震荷重(剛構造)
    免震による地震荷重の緩和が有効
- 地震に対する設計の動向：
  - 地震荷重　　入力地震荷重を引き上げる動き
  - 水平地震荷重　水平免震建屋の採用によって緩和できる
- 3次元免震による上下動地震荷重の緩和：
  - 炉心の問題(反応度投入，浮上り)　→ プラント成立性の拡大
  - 上下動に対する構造対応が不要　→ 経済性の向上
  - 設計の標準化、設計自由度の拡大

研究開発報告会　2002年4月25-26日

装置開発用入力地震動　(1) 設定

- 3次元免震装置開発用
- 短周期域：既往サイトの地震動を包絡
  長周期域：工学的判断　速度一定
  上下動　：水平動の0.6倍
- 開発する免震装置の性能、機能には相応の余裕を確保
- サイトフリー（サイト選定時には別途設計用地震動を策定）



研究開発報告会　2002年4月25-26日

装置開発用入力地震動　(2) 位置付け

ナトリウム冷却炉の耐震設計条件

ーPhase II における地震条件ー

・入力地震動の大きさは流動的

・設計用（形状設定）

実証炉レファレンスS2波 (70cm/s)

水平：建屋水平免震

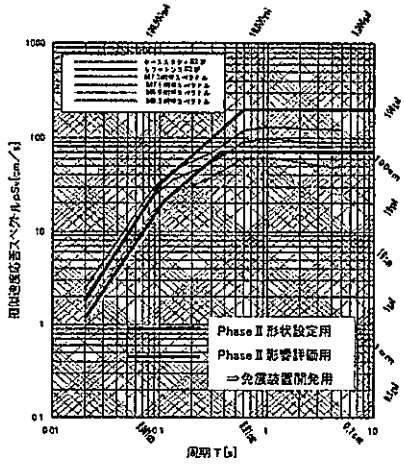
上下：耐震（マイルドな上下動）

・影響評価用（設備へのインパクト）

実証炉ケーススタディS2波 (200cm/s)

水平：建屋水平免震

上下：入力地震動確定後、上下免震

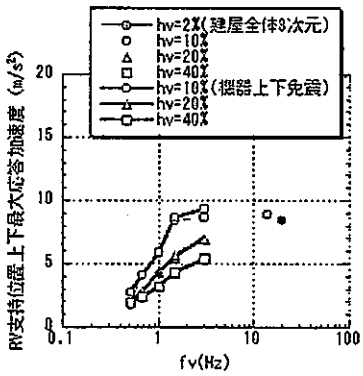


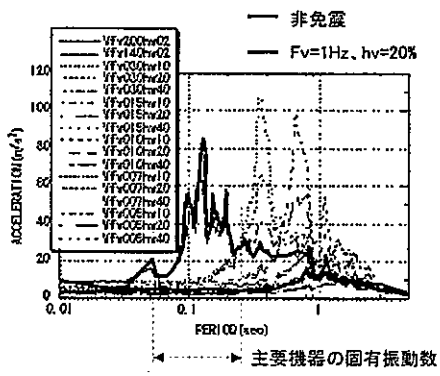
入力地震動の検討状況

研究開発報告会　2002年4月25-26日

上下免震の導入による応答低減効果

装置の性能（振動数、減衰）によって、免震効果が決まる





上下動に対する応答がクリティカルになりやすい項目に対し、

効果的な免震を実現する装置を開発する。⇒装置への要求性能

研究開発報告会　2002年4月25-26日

要求性能の設定 (1)機器成立のための条件

評価項目	評価指標	評価クライテリア	備考(厳し目の評価)	
燃料集合体浮き上がり	炉心支持板中央の上下応答加速度 (m/s2)	20Hz : 24 3Hz : 14 1.5Hz : 11 1.0Hz : 9 0.67Hz : 8 0.5Hz : 6	群振動解析 浮き上がり量:25mmに制限	
反応度投入	炉心支持板中央の上下応答変位 (mm)	6.5	群振動、反応度、構造解析 制御棒引抜き:35 ¢に制限 コンパクション:15 ¢に制限	
	炉心支持板中央の面外変形 (mm)	1.6		
原子炉容器座屈	DDSの評価式	安全率 1.35	地震応答解析	
渡り配管	水蒸気配管変位 (mm)	700	建屋3次元免震	配管引回し方式の検討
	2次系配管変位 (mm)	120	機器上下免震	

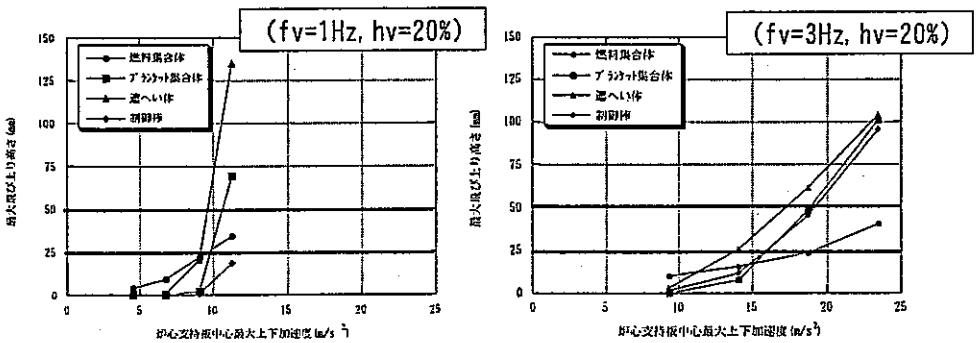
評価クライテリアの設定には、評価項目の重要度を考慮して、重み付けをした。

厳し目の評価とは、応答解析等の精度向上のためのR&Dが軽微と考えられる値。

研究開発報告会 2002年4月25-26日

要求性能の設定 (2)評価クライテリアの検討例

・集合体飛び上がり量と炉心支持板中心の最大上下加速度の関係



集合体飛び上がり量の制限 25mm に設定

・集合体パッド部の長さ50mm、エントランスノズル嵌合部の長さ50mmの半分に相当

・クライテリアを満たす上下免震装置を用いる場合、飛び上がりの対応は不要

研究開発報告会 2002年4月25-26日

要求性能の設定 (3)Na大型炉の成立範囲

免震方法	建屋全体3次元免震				建屋水平+機器上下		
免震層の上下剛性	減衰定数hv (%)				減衰定数hv (%)		
	2	10	20	40	10	20	40
fv=14Hz	0.32 0.26 0.20 0.28 1.79	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -
fv=3Hz		1.07 1.31 0.81 0.99 1.91	1.20 1.38 0.92 1.02 2.02	1.12 1.23 0.73 0.66 2.22	0.90 1.08 0.68 0.93 1.59	1.11 1.22 0.72 0.99 6.31	1.21 1.25 0.69 0.69 8.88
fv=1.5Hz		1.11 2.01 1.34 0.91 1.09	1.46 2.53 1.67 0.90 2.10	1.14 2.30 1.50 0.79 3.10	1.06 1.94 1.29 0.91 1.25	1.48 2.53 1.66 0.91 2.02	1.54 2.42 1.32 0.80 3.11
fv=1Hz		[illegible]	[illegible]	1.76 3.41 2.15 0.80 2.89	1.34 2.92 1.95 1.01 0.82	[illegible]	1.37 3.53 2.18 0.90 1.98
fv=0.667Hz		1.69 4.34 2.95 0.98 1.34	[illegible]	[illegible]	1.69 4.33 2.94 0.98 0.52	2.31 5.46 3.51 1.01 0.89	[illegible]
fv=0.5Hz		1.89 6.46 4.40 1.17 0.96	[illegible]	[illegible]	1.90 6.54 4.41 1.17 0.33	2.53 8.19 5.37 1.17 0.66	2.93 6.26 4.16 1.15 0.91

濃い網掛け:全項目が全て1.00以上

薄い網がけ:裕度が0.8より小さいものがなく、裕度が0.8以上のものを含んでいる

建屋全体３次元免震

上下振動数：1Hz以下

上下減衰率：20%程度

⇒免震要素の開発が必要

機器上下免震

上下振動数：1Hz程度

上下減衰率：20%以上

⇒皿ばね＋減衰開発で達成可能

裕度:制限値/発生値　評価項目　上より

炉心支持板中心の上下応答加速度

炉心支持板中心の上下応答変位

炉心支持板の面外変形

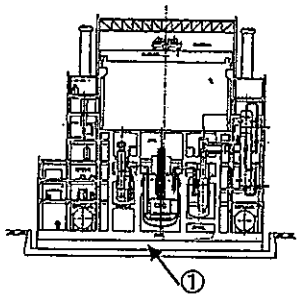
原子炉容器の座屈

建屋またはコモンデッキの上下応答変位

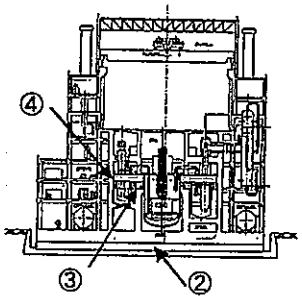
研究開発報告会　2002年4月25-26日

3次元免震方式

開発対象とする免震方式



建屋3次元免震



機器上下免震

□：①３次元免震装置⇒開発

□：②水平免震装置⇒積層ゴム

■：③上下免震装置⇒皿ばね

■：④コモンデッキ

研究開発報告会　2002年4月25-26日

建屋3次元免震装置の開発状況

有望概念の抽出

H12.10　1次募集に9案が提案され、審査の結果、6案を採用

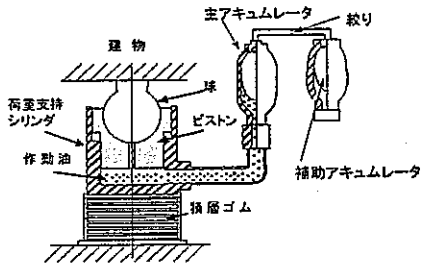
H13上期　6案につき、フィージビリティ試験を実施

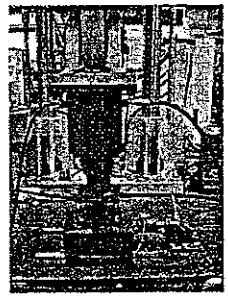
H13.11　2次募集に3案が提案され、審査の結果、採用なし
試験結果等を審査し、3案に絞込み

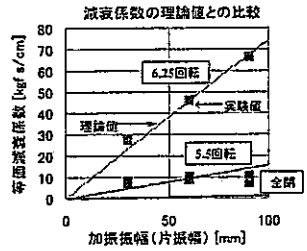
H13下期　3案につき、Phase Ⅱにおける開発(試験)計画を検討

研究開発報告会　2002年4月25-26日

有望概念　(1)油圧機構を用いた上下免震







水平免震:　積層ゴム

上下免震:　油圧＋空気　fv≒2秒

減衰機構:　絞り

ﾛｯｷﾝｸﾞ:　油圧(連結管)

フィージビリティ試験:

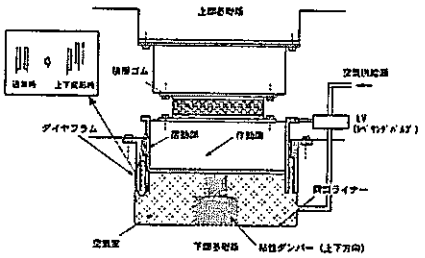
・水平／上下同時加振時のピストンの作動性及びシール性が良好であることを確認

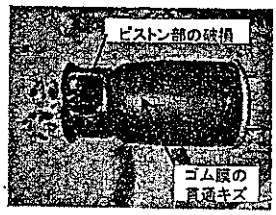
・絞りによる減衰効果を確認

検討課題:　コスト

研究開発報告会　2002年4月25-26日

有望概念 (2)空気ばねを用いた上下免震





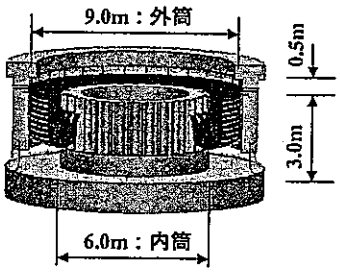
水平免震: 積層ゴム
上下免震: 空気ばね fv≒2秒
減衰機構: 検討中
ﾛｯｷﾝｸﾞ: 検討中

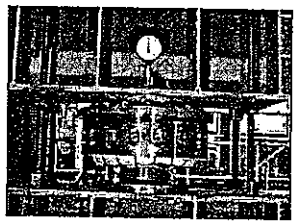
フィージビリティ試験:
- 水平／上下同時加振時の摺動部の作動性が良好であることを確認
- 空気ばねのゴム膜の耐圧強度が高いことを確認

検討課題: 減衰、ﾛｯｷﾝｸﾞ

研究開発報告会 2002年4月25-26日

有望概念 (3)空気ばねを用いた3次元免震





水平免震: 空気ばね
上下免震: 空気ばね fv＞2秒
減衰機構: 検討中
ﾛｯｷﾝｸﾞ: 検討中

フィージビリティ試験:
- 加圧試験によりゴムシート及びワイヤの耐圧性が十分あることを確認
- 3次元方向の円滑な作動性及び設計通りの免震性能を確認

検討課題: 減衰、ﾛｯｷﾝｸﾞ

研究開発報告会 2002年4月25-26日

機器免震の開発状況 (1)検討状況と課題

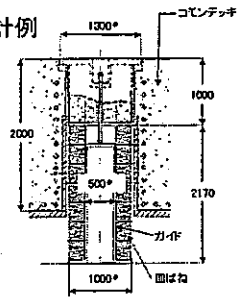
開発項目	検討状況	課題と解決方策
免震要素	製造方法・材料・最大寸法を検討 皿ばねの設計方法を検討 水平荷重支持構造(ガイド)を検討	実大皿ばねの試作 皿ばねの力学特性試験 ・設計式の適合性 ・摩擦の影響評価 ・耐久性・長期安定性 クリープ特性試験(材料) ユニットの機能確認試験
免震構造	コモンデッキの設計方法を検討	
減衰要素	構造案を検討	減衰特性確認試験
システム	1Hzを実現する免震要素の試設計 Na大型炉へのプラント適用性検討 地震応答解析にて免震効果を確認	縮小モデル振動試験 確証試験(PhaseⅢ以降)
技術指針	骨子を作成	指針案(本文・解説)作成

研究開発報告会 2002年4月25-26日

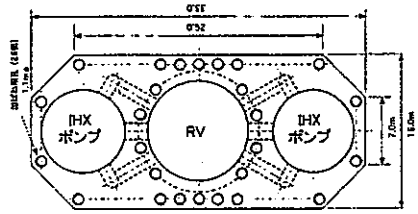
機器免震の開発状況 (2)免震要素の試設計

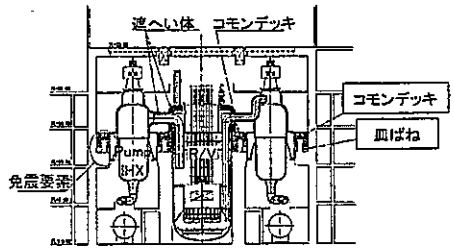
免震振動数1Hz要素の設計例

材料	SUP10
外径 mm	φ1000
板厚 mm	27
並列数×直列数	5×14
組立荷重 tonf	275
セット数	28
供用時高さ m	2.2
1枚当たり重量 kg	124



免震要素の配置例





機器上下免震採用時のプラントへのインパクト

1次系廻りの仕切り壁の切欠き

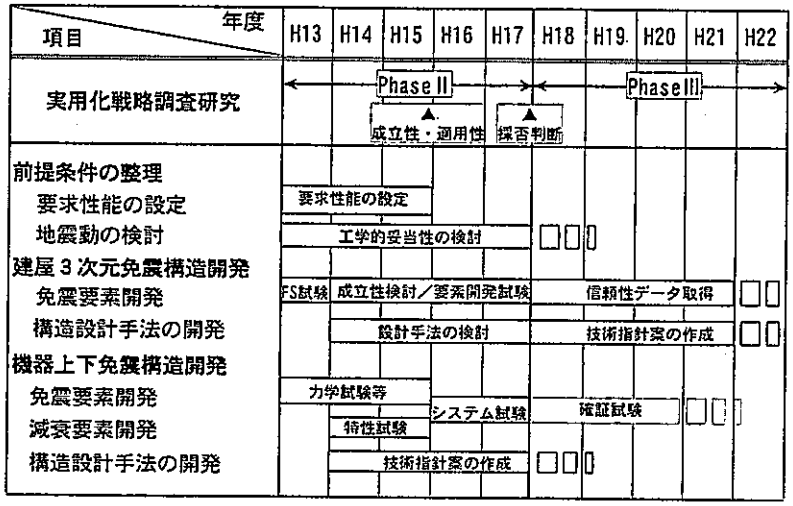
・放射線の防護 ⇒機器配管廻りに追加遮へい

・事故時の影響抑止 ⇒ポンプ類にカバー

・炉容器上部室の天井スラブの補強

研究開発報告会 2002年4月25-26日

全体開発工程



研究開発報告会　2002年4月25-26日

まとめ

前提条件の整理

- 装置開発用入力地震動の位置付けを示した。
- 要求性能（免震振動数と減衰）を設定した。

免震構造の開発状況

- 建屋3次元免震　：　有望概念3案を抽出した。
  要素開発に向けた試験を行う。
- 機器上下免震　：　構造概念の具体化を検討した。
  成立性確認に向けた試験を行う。

研究開発報告会　2002年4月25-26日

ODS鋼被覆管の実用化技術開発

平成14年4月26日

皆藤　威二

システム技術開発部
核燃料工学グループ

報告内容

□実用規模製造技術評価
- 大型素管製造技術評価 (中空粉末カプセル素管、海外HIP素管)
- 長尺被覆管製造技術評価

□材料強度基準の整備
- ﾘﾝｸﾞ引張試験結果、内圧ｸﾘｰﾌﾟ破断試験結果

□抵抗溶接技術開発
- 内圧ﾊﾞｰｽﾄ試験結果

□照射試験準備
- 「常陽」照射試験 (材料照射、燃料ﾋﾟﾝ照射、ﾊﾞﾝﾄﾞﾙ照射)
- BOR-60照射試験 (先行燃料ﾋﾟﾝ照射)

□まとめ

高速炉用ODSフェライト鋼被覆管の実用化開発ステップ

2001年度　2002年度　2003年度　2004年度　2005年度

中間まとめ　まとめ

■実用規模製造技術評価

実用化見通し　実用化製造技術の確立

大型素管、長尺被覆管の試作
品質保証、検査技術の開発

実用規模被覆管の試作

■材料強度基準の整備

材料強度基準の暫定整備　材料強度基準の整備

炉外大気中データ取得
炉外Na中データ取得 ⇒ Na環境効果
照射材(~20dpa)のPIE ⇒ 照射効果

炉外大気中データ取得(長時間)
炉外Na中データ取得(長時間)

■抵抗溶接技術開発・検査技術

溶接部の強度評価
溶接管理技術、溶接部検査技術の整備

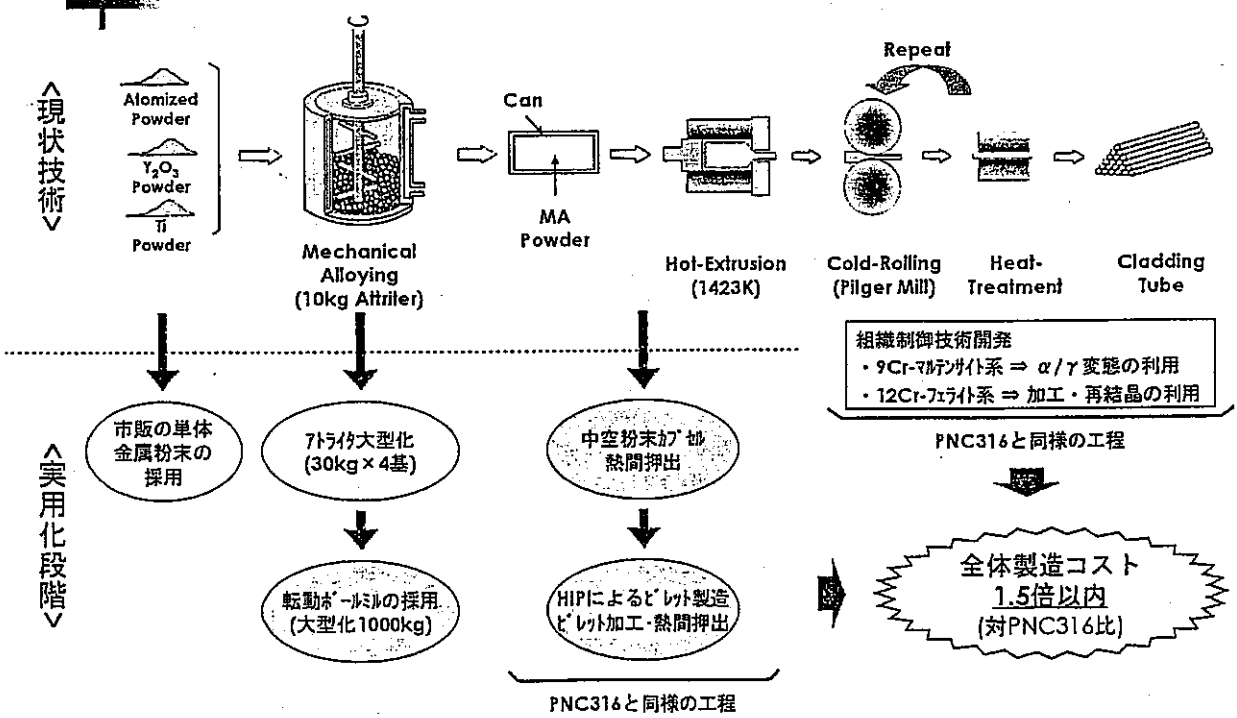
50GWd/tまでの健全性評価

■照射試験

中間取出ピン(50GWd/t)のPIE

照射準備　BOR-60照射試験
照射準備　「常陽」照射試験

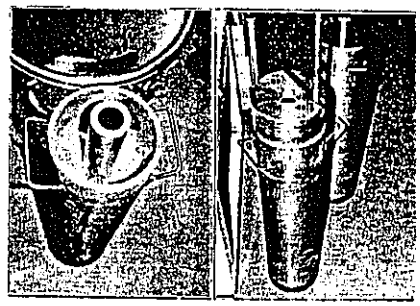
実用規模を想定した製造技術評価



大型素管製造技術評価(1) ~中空粉末ｶﾌﾟｾﾙ素管~

《大型中空粉末ｶﾌﾟｾﾙ押出試験(2000ﾄﾝﾌﾟﾚｽ)》

- 原料粉末準備、秤量、調合 — C、Cr、W、Ti、Y_2O_3
- ↓ メカニカルアロイング — 10D型転動ボールミル 10kg/ﾊﾞｯﾁ
- ↓ カプセル充填 — 大型中空充填カプセル 40kg/缶
- ↓ 熱間押出 — HIP固化せず、直接熱間押出実施
- ↓ 熱処理 — 1050℃、炉冷
- ↓ 寸法検査、評価試験



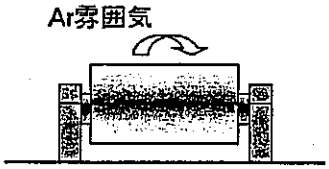
外径147mm×内径32mm

↓ 押出温度：1160℃
押出圧力：8500kgf/cm²
押出比　：14.7

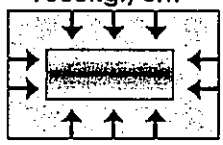
外径42.3mm×内径19.8mm

大型素管製造技術評価(2) ~海外HIP素管~

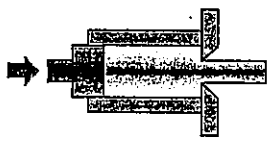
ﾒｶﾆｶﾙｱﾛｲﾝｸﾞ(MA)
1ﾄﾝ型転動ﾎﾞｰﾙﾐﾙ
Ar雰囲気



➡ **HIP固化**
1000℃×
1000kgf/cm²



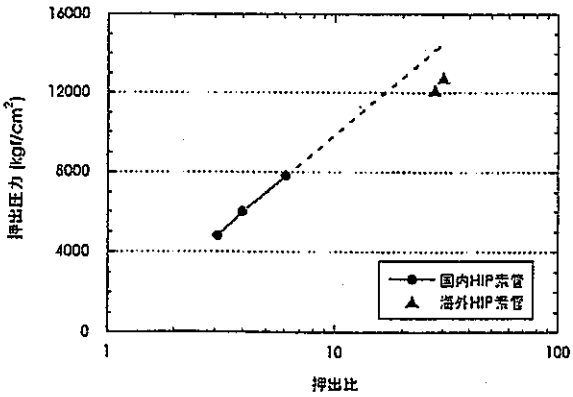
➡ **熱間押出**
5650ﾄﾝﾌﾟﾚｽ



加熱温度：1180℃
押出速度：30~50mm/sec
押出比　：30

↓

①棒; 34.5^{OD}×6000^{L}
②管; 63.5^{OD}×48.3^{ID}×4500^{L}



ODS鋼の押出圧力と押出比の関係

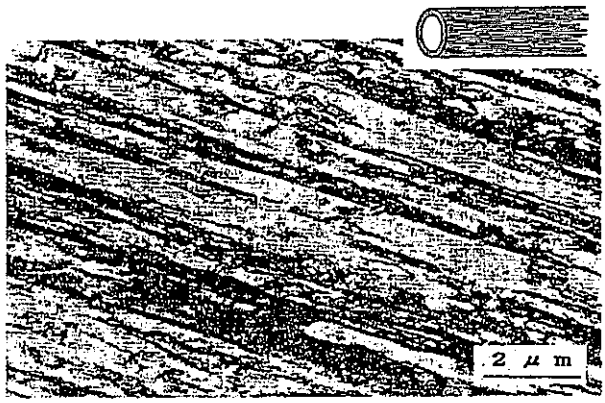
実用規模での大型素管製造技術を確認

今後の課題

Ⅰ．機械特性評価
　a) 目標値に対する達成度
　b) Y_2O_3の分散状態確認
　c) 組織観察
Ⅱ．表面状態（肌不良）の改善

長尺被覆管製造技術評価(1) ~製造実績~

■硬い組織 ⇒ 冷間圧延による製管不可能
■圧延方向に結晶粒が伸長した繊維上組織
⇒周方向の強度と延性の極端な低下



■9Cr-ﾏﾙﾃﾝｻｲﾄ系 (耐照射性重視)

9Cr-0.12C-2W-0.20Ti-0.35Y_2O_3

- α/γ変態の利用による改善

■12Cr-ﾌｪﾗｲﾄ系 (耐食性重視)

12Cr-0.03C-2W-0.30Ti-0.23Y_2O_3

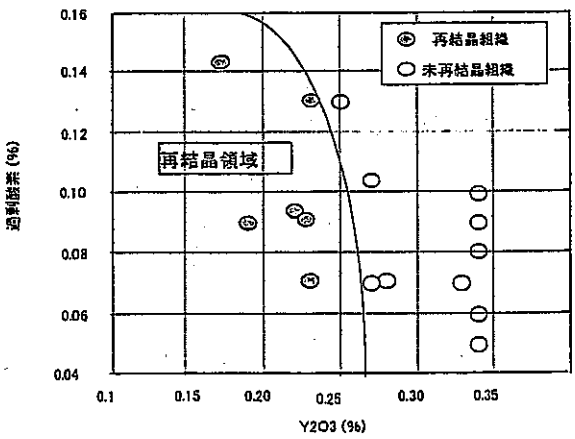
- 加工・再結晶の利用による改善

製造実績

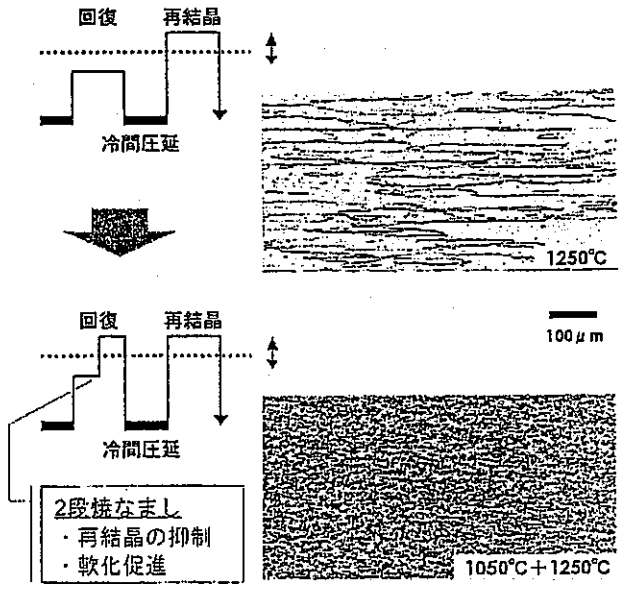
$9.3^{OD} \times 0.6^{WT} \times$ 約1000^{L} (mm) ⇒ 各30本
$8.5^{OD} \times 0.5^{WT} \times$ 約3000^{L} (mm) ⇒ 各20本
$6.9^{OD} \times 0.4^{WT} \times$ 約2000^{L} (mm) ⇒ 各50本
⬇
合計200本以上製造

長尺被覆管製造技術評価(2) ~加工・再結晶の利用による改善~

特許申



12Cr-ﾌｪﾗｲﾄ系ODS鋼の再結晶領域

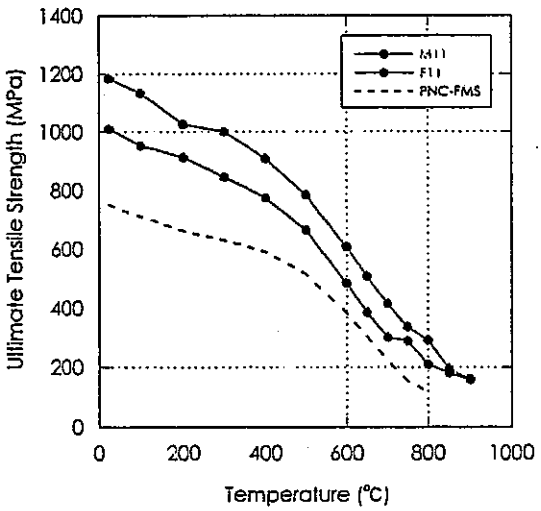


材料強度基準の整備(1)

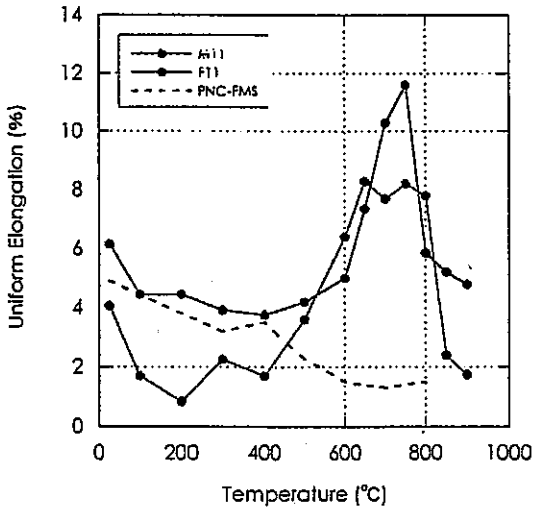
ODSﾌｪﾗｲﾄ鋼の「常陽」照射試験用許認可ﾃﾞｰﾀ取得項目(H14年度まで)

区　分	試験項目	データ取得状況
材料強度	ﾘﾝｸﾞ引張試験	取得済
	内圧ｸﾘｰﾌﾟ破断試験	一部済 ⇒ H14年度継続実施
	高温内圧ｸﾘｰﾌﾟ破断試験	↑
	ｸﾘｰﾌﾟ歪み	↑
	急速加熱ﾊﾞｰｽﾄ試験	↑
	内圧ﾊﾞｰｽﾄ試験	↑
	低ｻｲｸﾙ疲労試験	H14年度実施予定
材料物性	密度、比熱、熱伝導度、熱膨張率 等	取得済 (報告書作成済)
Na環境効果	Na浸漬試験(Na腐食)	実施中 <M93, F95>
	Na浸漬試験のﾘﾝｸﾞ引張試験	↑
	Na中内圧ｸﾘｰﾌﾟ破断試験	H14年度実施予定
	Ni拡散処理材のﾘﾝｸﾞ引張試験	↑
	Ni拡散処理材の内圧ｸﾘｰﾌﾟ破断試験	↑
照射効果	照射後ﾘﾝｸﾞ引張試験	取得済 <~20dpa / M93, F95, 1DS, 1DK>
	照射後急速加熱ﾊﾞｰｽﾄ試験	↑
	照射後内圧ﾊﾞｰｽﾄ試験	↑
	照射後溶接部引張試験	↑

材料強度基準の整備(2) ~ﾘﾝｸﾞ引張試験結果~

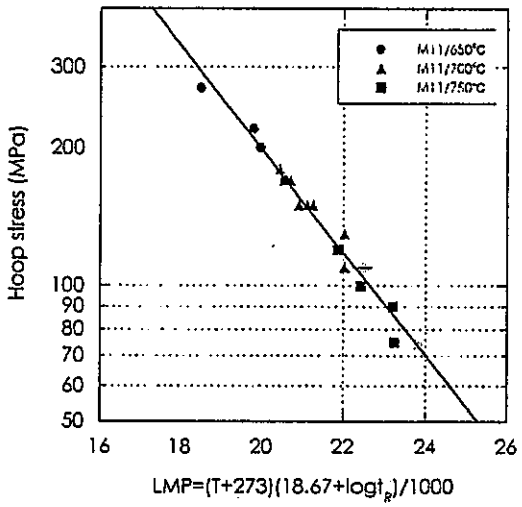


a) 引張強さ

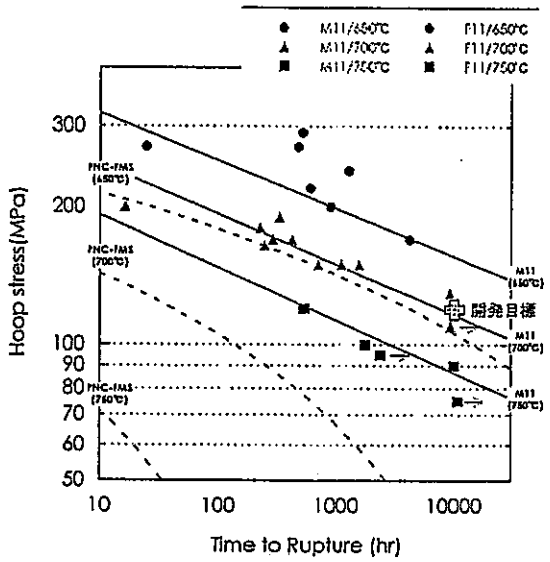


b) 均一伸び

材料強度基準の整備(3) ~内圧ｸﾘｰﾌﾟ破断試験結果~



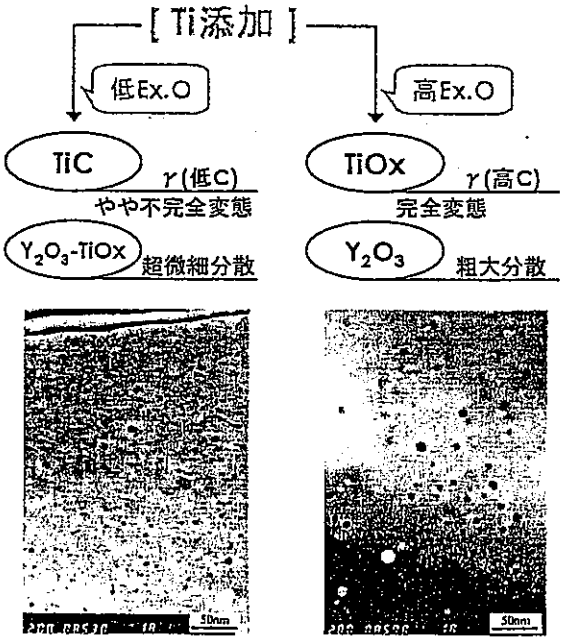
a) M11の内圧ｸﾘｰﾌﾟ破断強度



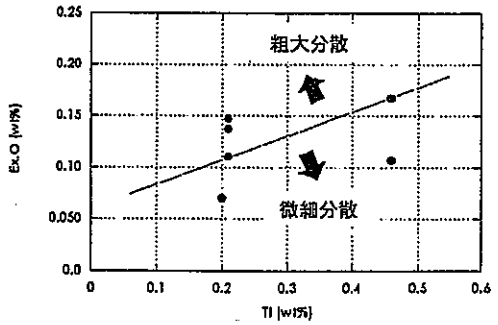
b) 内圧ｸﾘｰﾌﾟ破断強度の比較

材料強度基準の整備(4) ~9Cr-ﾏﾙﾃﾝｻｲﾄ系鋼の強度改善~

特許申請



0.11Ex.O-0.21Ti　　0.15Ex.O-0.21Ti



分散粒子微細化のためのTiおよびEx.O量の範囲

過剰酸素(Ex.O)量の低減
↓
酸化物分散粒子の微細高密度化

高温長時間強度の向上

抵抗溶接技術開発 ~内圧ﾊﾞｰｽﾄ試験結果~

抵抗溶接(PRW)技術開発の現状

これまでの実績	・溶接技術としてはほぼ確立 ・溶接後の単軸引張、内圧ﾊﾞｰｽﾄ試験により溶接部の健全性を確認
今後の予定	・内圧ｸﾘｰﾌﾟ破断試験による長時間側での強度確認

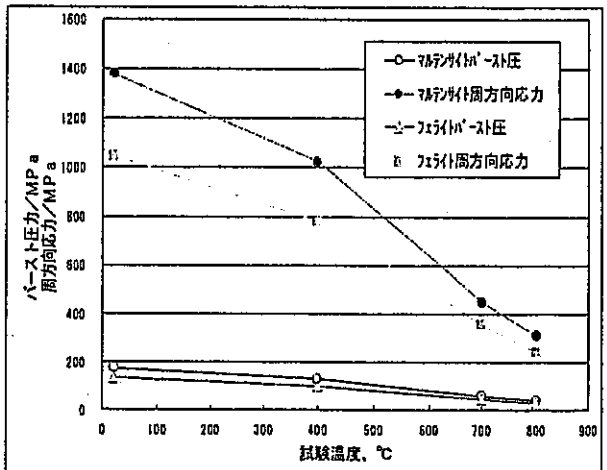
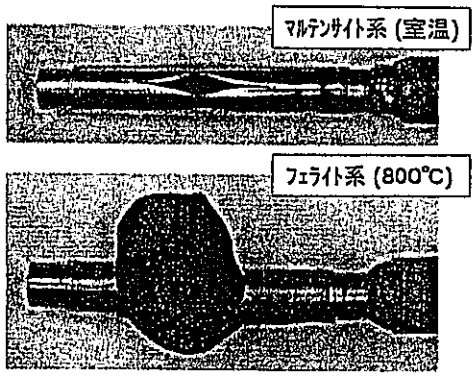
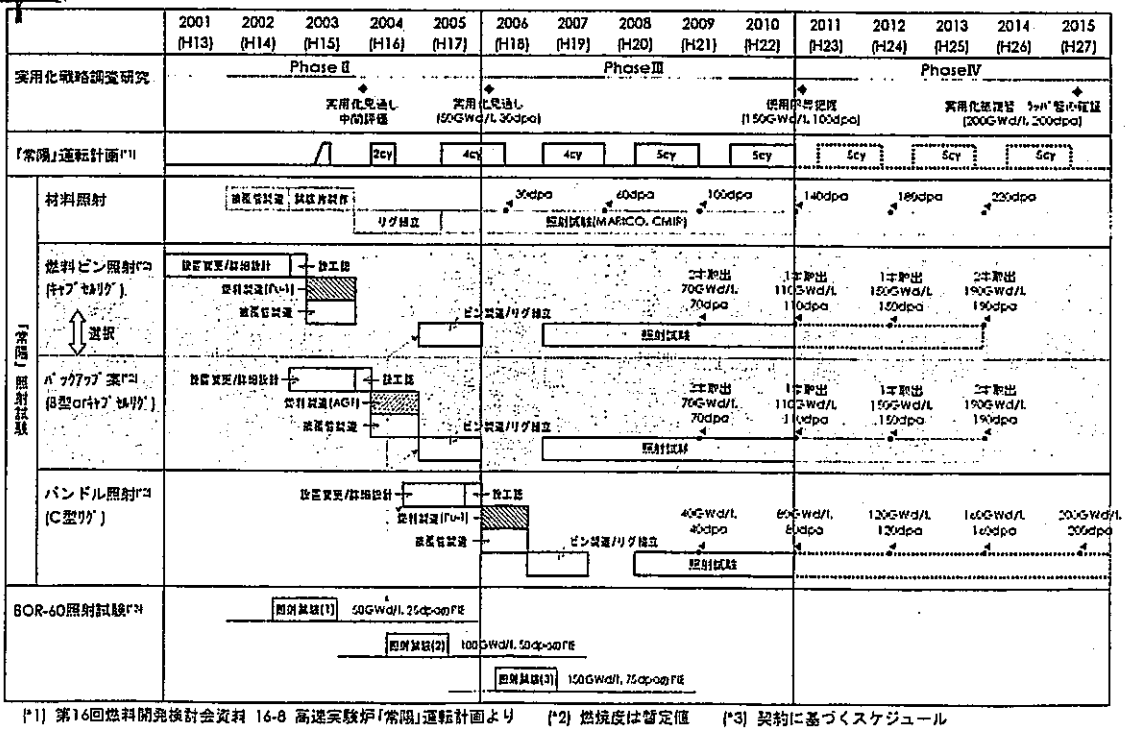


図6　ODS抵抗溶接試験体のバースト圧力と試験温度との関係



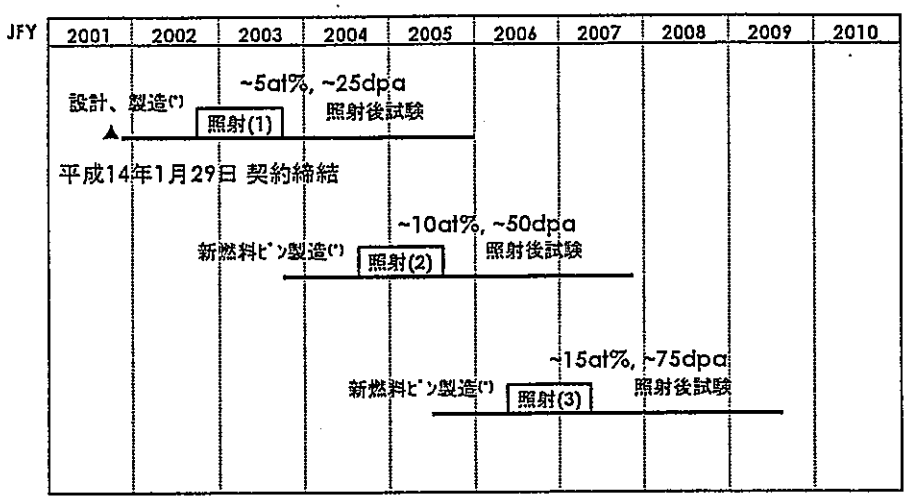
全て被覆管部で破断
抵抗溶接部は健全性を維持

照射試験(1) ~全体計画~



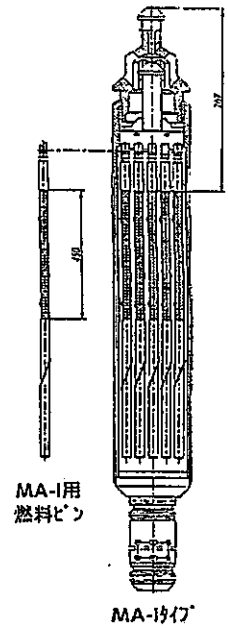
(*1) 第16回燃料開発検討会資料 16-8 高速実験炉「常陽」運転計画より　(*2) 燃焼度は暫定値　(*3) 契約に基づくスケジュール

照射試験(2) ~BOR-60照射試験~



(*) 燃料ﾋﾟﾝの設計、製造はRIARで実施 (ﾛｼｱ型ﾊﾞｲﾊﾟｯｸ燃料)

■被覆管組成：ﾏﾙﾃﾝｻｲﾄ系　0.13C-9Cr-2.0W-0.20Ti-0.35Y_2O_3
：ﾌｪﾗｲﾄ系　0.02C-12Cr-2.0W-0.26Ti-0.23Y_2O_3
■被覆管寸法：外径6.9mm×肉厚0.4mm×長さ1050mm



まとめ

□実用規模製造技術評価

■大型素管製造技術評価

・中空粉末カプセル素管および海外HIP素管の製造試験を実施

⇒ 実用規模での大型素管製造技術を確認

■長尺被覆管製造技術評価

・12Cr-ﾌｪﾗｲﾄ系では2段焼なましを適用 ⇒ 再結晶の抑制、軟化促進による加工性改善

□材料強度基準の整備

・ﾘﾝｸﾞ引張試験、内圧ｸﾘｰﾌﾟ破断試験を実施 ⇒ 目標強度を達成見込み

・H14年度末までに材料強度基準(暫定案)を策定

□抵抗溶接技術開発

・内圧ﾊﾞｰｽﾄ試験を実施 ⇒ 抵抗溶接部の健全性を確認

□照射試験準備

・「常陽」照射試験計画を作成 ⇒ 今後、燃料ﾋﾟﾝ製作について東海と調整が必要

・ BOR-60先行燃料ﾋﾟﾝ照射 ⇒ H14年1月契約締結

大洗工学センター 研究開発報告会(第1回)
平成14年4月25日～26日 Fセルボ5F

(16) LLFP核変換解析手法の検討

システム技術開発部 中性子工学グループ
○大木 繁夫、神 智之(原子力システム㈱)

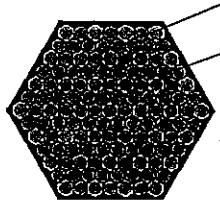
発表内容

- 現状の計算方法
- 改善すべき事項
- LLFPターゲット格子計算モデルの検討
- 今後の課題

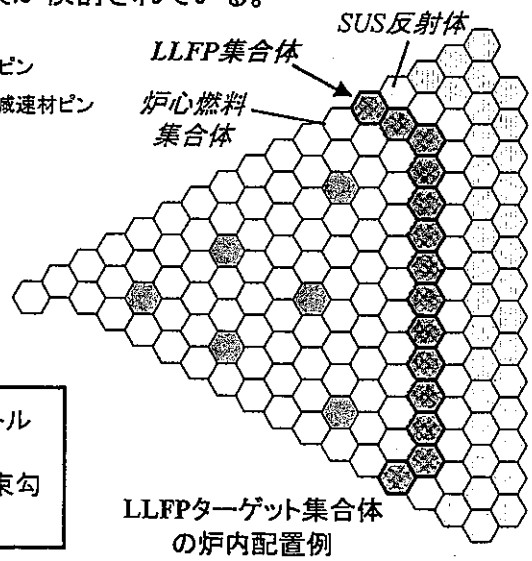
サイクル機構

概要

- FBRサイクル実用化戦略調査研究では、高速炉における長寿命核分裂生成物(LLFP)の核変換が検討されている。

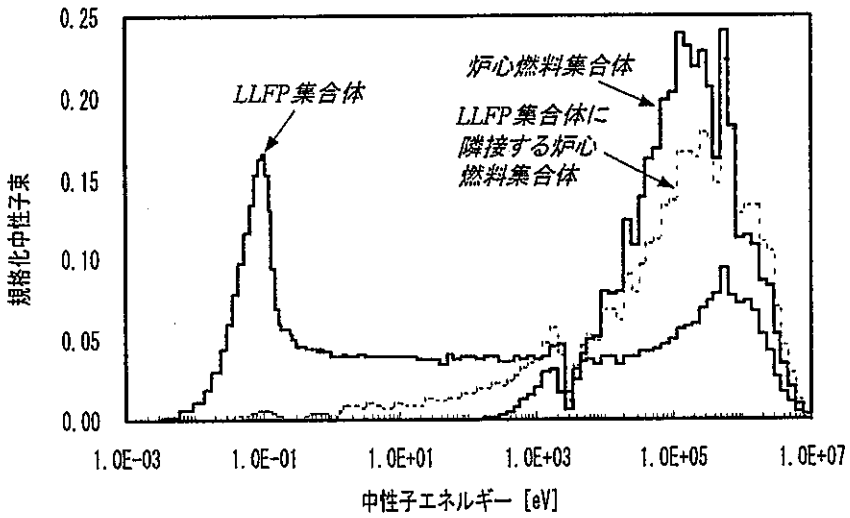


LLFPターゲット集合体



LLFPターゲット集合体の炉内配置例

減速材により中性子スペクトルが急激に変わる。
LLFPターゲットでは中性子束勾配も大きくなる。



LLFPターゲット装荷炉心における
中性子スペクトル軟化の様子

＜現在の解析方法＞

高速炉設計計算手法 ＋ モンテカルロ計算による補正

問題点として考えられる事柄

- LLFPターゲットを均質で取り扱う
- LLFPターゲット実効定数作成に中性子束勾配を考慮していない
- 高速炉用炉定数を用いているため、熱エネルギーへの適用不可
- LLFPの共鳴自己遮蔽効果未考慮
- 拡散近似
- メッシュ分割粗い
- 少数群

※ モンテカルロ計算コードにより詳細解析が可能。しかし、

モンテカルロ法は万能ではない

- 計算時間がかかる
  →設計計算には不向き
- 小さな摂動は統計誤差に埋もれる
  →感度分析ができない

決定論による計算コードを用いた計算方法が必要

検討方法

現状の高速炉設計計算手法がどの程度確からしいのか？

- 高速炉設計計算コード(CITATION)とモンテカルロ計算コード(MVP)との比較

今回はここまでを報告

熱中性子領域まで取扱い可能な汎用核計算コード(SRAC)による解析手法の構築

- STEP1 スーパーセルモデルの検討(LLFP: 均質)
- STEP2 スーパーセルモデルの検討(LLFP: 非均質)
- STEP3 炉心体系計算、燃焼計算モデルの検討

検討結果(高速炉設計計算手法とMVPの比較)

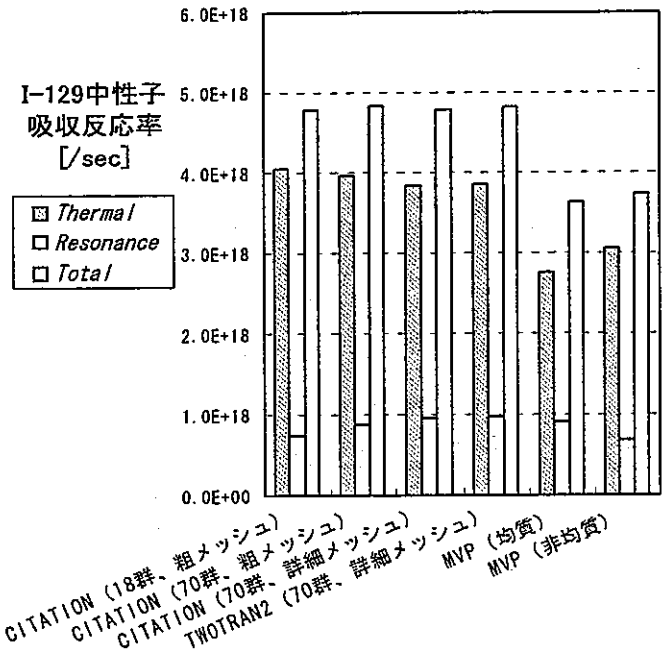
＜計算条件＞

- Na-MOX大型炉心の径方向ブランケット位置にLLFPターゲット集合体を装荷
- LLFP: I-129 (元素分離を仮定、化学形NaI)
- 減速材: $ZrH_{1.6}$ (減速材割合71%)
- 着目する核特性: ① I-129核変換率
  ② 隣接燃料における局所出力ピーク

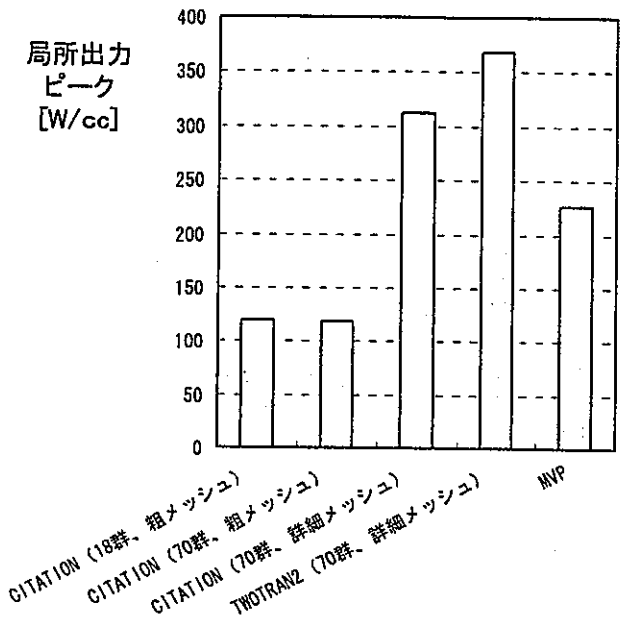
高速炉設計計算コード(CITATION)とモンテカルロ計算コード(MVP)を比較。相違の要因分析のための計算ケースを設定。

<計算ケース>

計算ケース	輸送/拡散	LLFPターゲットのモデル化	LLFPターゲット及び周辺領域のメッシュ分割	核定数
① CITATION(18群、粗メッシュ)	拡散	均質	粗(約5cm)	70群→18群(高速炉用)
② CITATION(70群、粗メッシュ)	〃	〃	〃	70群(高速炉用)
③ CITATION(70群、詳細メッシュ)	〃	〃	詳細(約1cm)	〃
④ TWOTRAN2(70群、詳細メッシュ)	輸送	〃	〃	〃
⑤ MVP(均質)	〃	〃	—	連続エネルギー
⑥ MVP(非均質)	〃	非均質	—	〃



- CITATIONはMVPに対し、約20%の過大評価
- 高速炉用核定数では熱エネルギー領域を適切に計算できない。
- 群縮約、メッシュ、輸送効果はいずれも小さい
- MVP(均質)とMVP(非均質)の比較
  →熱エネルギー領域と共鳴エネルギー領域の打ち消し合い有り

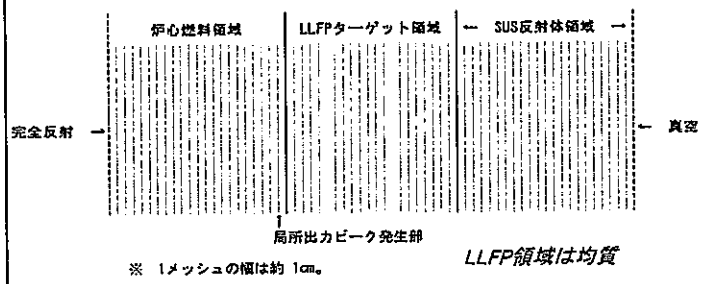


- 局所出力ピークの評価には詳細なメッシュ分割が必要
- 高速炉用核定数では、熱エネルギー領域の反応率を過大評価してしまう。
- 群縮約効果は小さい。輸送効果も二次的な寄与。

＜まとめ　ー高速炉設計計算手法とMVPの比較ー ＞

- 高速炉用核定数では、熱エネルギー領域の反応率を過大評価してしまう。
  →熱エネルギーまでを扱える核定数と計算コードが必要
- 局所出力ピークの評価には詳細なメッシュ分割が必要
- 核変換率の評価には、LLFPターゲットの非均質モデルを見い出さなければならない。

検討結果(SRACによるスーパーセルモデルの検討)



SRACを用いたスーパーセルモデル計算の妥当性を、MVPを参照解として確認する。

LLFP集合体とその周辺領域の1次元平板スーパーセル

＜計算条件＞

- Na-MOX大型炉心の径方向ブランケット位置にLLFP集合体を装荷
- LLFP: I-129 (元素分離、化学形NaI)
- 減速材: $ZrH_{1.6}$ (減速材割合71%)
- 着目する核特性: ① I-129核変換率、② 局所出力ピーク

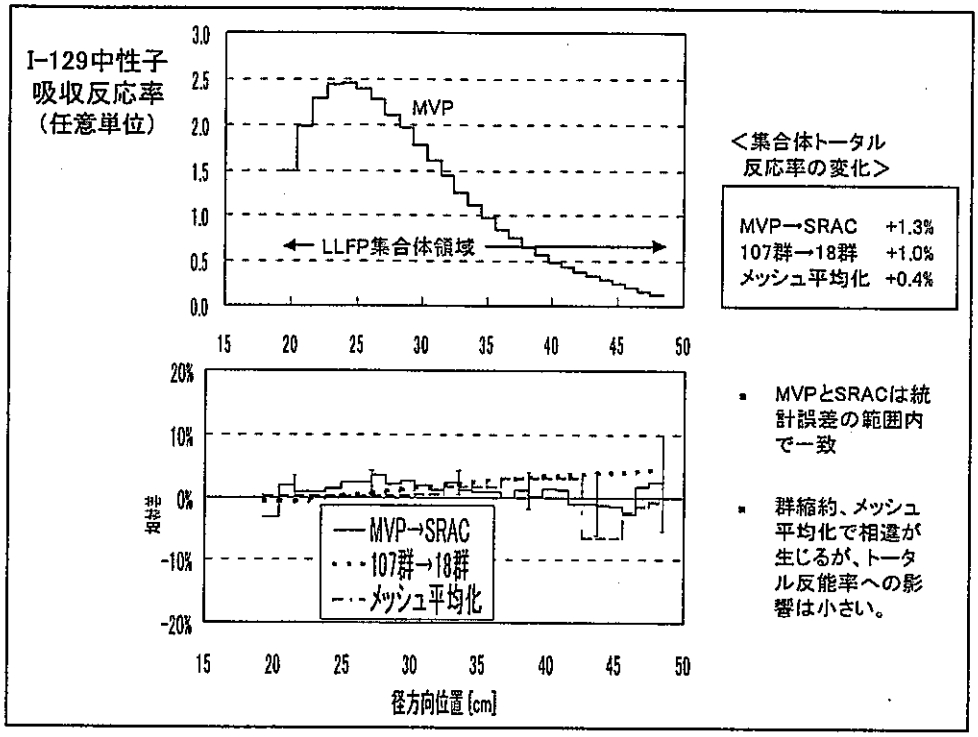
＜計算ケース＞

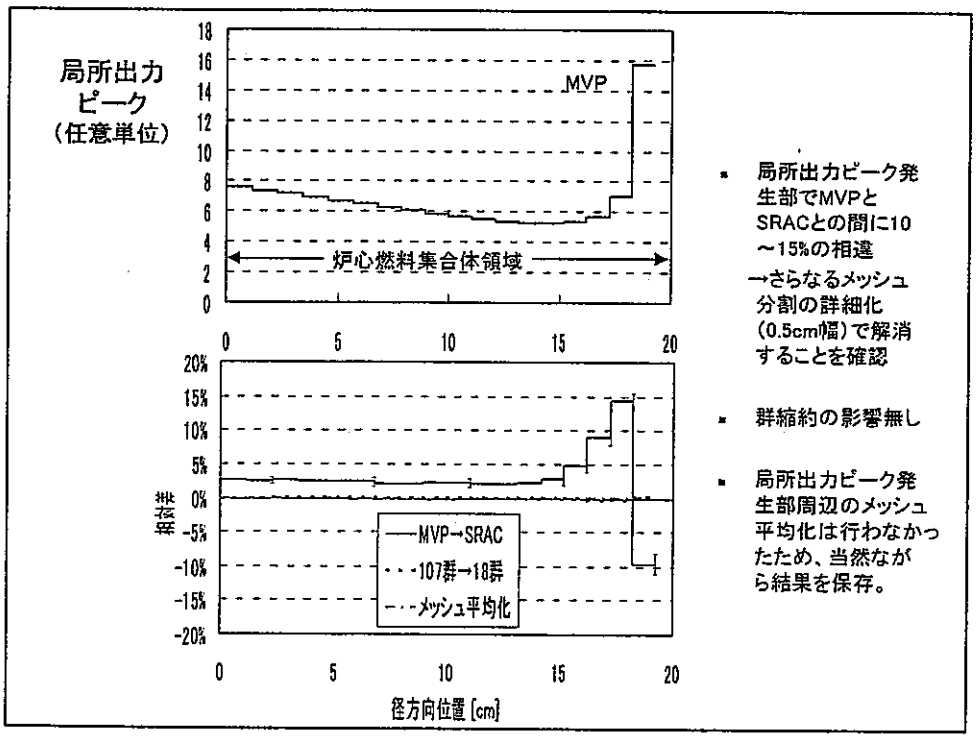
計算ケース	輸送/拡散	LLFPターゲットのモデル化	LLFPターゲット及び周辺領域のメッシュ分割	核定数
① MVP	輸送	均質	—	連続エネルギー
② SRAC(107群、詳細メッシュ)	〃	〃	詳細(約1cm)	107群
③ SRAC(18群、詳細メッシュ)	〃	〃	詳細(約1cm)	18群
④ SRAC(107群、メッシュ平均化)	〃	〃	一部メッシュの平均化	107群

局所出力ピーク発生部周辺を除き5cm程度に

※ スーパーセルモデルで実効定数を作成し、炉心体系計算に渡すために、少数群への縮約とメッシュ平均の検討ケースを設定。

＜SRAC計算オプション＞
- PIJ-ANISN使用(固有値問題、P1-S8)
- LLFPの共鳴自己遮蔽効果: NR近似


I-129中性子
吸収反応率
(任意単位)
MVP
LLFP集合体領域
<集合体トータル
反応率の変化>
MVP→SRAC +1.3%
107群→18群 +1.0%
メッシュ平均化 +0.4%
MVP→SRAC
107群→18群
メッシュ平均化
径方向位置 [cm]
MVPとSRACは統計誤差の範囲内で一致
群縮約、メッシュ平均化で相違が生じるが、トータル反能率への影響は小さい。


局所出力
ピーク
(任意単位)
MVP
炉心燃料集合体領域
MVP→SRAC
107群→18群
メッシュ平均化
径方向位置 [cm]
局所出力ピーク発生部でMVPとSRACとの間に10～15%の相違
→さらなるメッシュ分割の詳細化(0.5cm幅)で解消することを確認
群縮約の影響無し
局所出力ピーク発生部周辺のメッシュ平均化は行わなかったため、当然ながら結果を保存。

＜まとめ　－SRACによるスーパーセルモデルの検討－ ＞

- SRACを用いてLLFP集合体とその周辺領域のスーパーセルモデル(LLFP領域:均質、減速材割合71%)を検討した。
- I-129核変換率と局所出力ピークについてMVP相当の計算値を得ることを確認した。
- 局所出力ピークの評価には0.5cm程度の詳細なメッシュ分割が必要であることがわかった。
- 実効定数作成のための群縮約・体系均質化も、問題なくできる見通しが得られた。

＜今後の課題 ＞

- LLFP集合体の非均質性の考慮
- 炉心体系計算、燃焼計算への適用

Feasibility Study

不要元素除去による新リサイクル概念
- ORIENTサイクル -

R&D報告会
2002年4月26日（金）

炉心燃料システムGr.　高木直行

Feasibility Study

- 背景 -

従来のFBR サイクル開発は、使用済燃料から燃料として有用なU およびPu をできるだけ純粋に抽出し、リサイクルすることを目標に進められてきた。

これに対して、実用化戦略調査研究（FS）では、FBR 炉心が持つ中性子経済上の余裕に着目し、再処理の低除染化による経済性向上とTRU 燃焼による資源の有効利用や環境負荷低減を図ったサイクル概念を提案している。

しかしながら、FS フェーズ1 の段階では、従来開発されてきた再処理技術をベースとして低除染化、TRU 回収等の機能を付加するという検討が中心であり、リサイクルする上で何が炉心・燃料への障害であり、何が廃棄物処分への負荷となっているか、といった検討は必ずしも十分にはなされていなかった。

従来のサイクル概念
U, Puの高除染回収

⇒

FSのサイクル概念
低除染燃料
TRU燃焼

⇒

日本オリジナルの新リサイクル概念
?

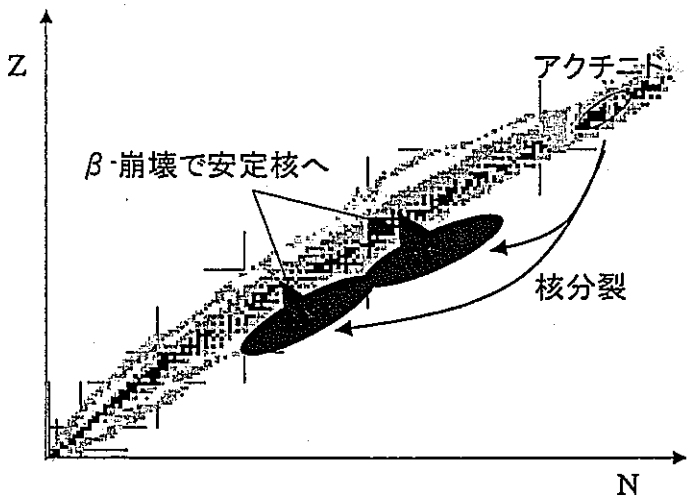
Feasibility Study

- リサイクル不適元素の抽出 -

炉心からみてリサイクルしてほしくない物質は？

中性子無駄吸収大の核種

では、どんな核種が
吸収断面積大か？



- β安定曲線より右にある核種は中性子過剰核
- 中性子過剰核は概して中性子捕獲反応のQ値が小で捕獲断面積小
- 逆に、β安定曲線上にある核種はQ値大で、捕獲断面積大

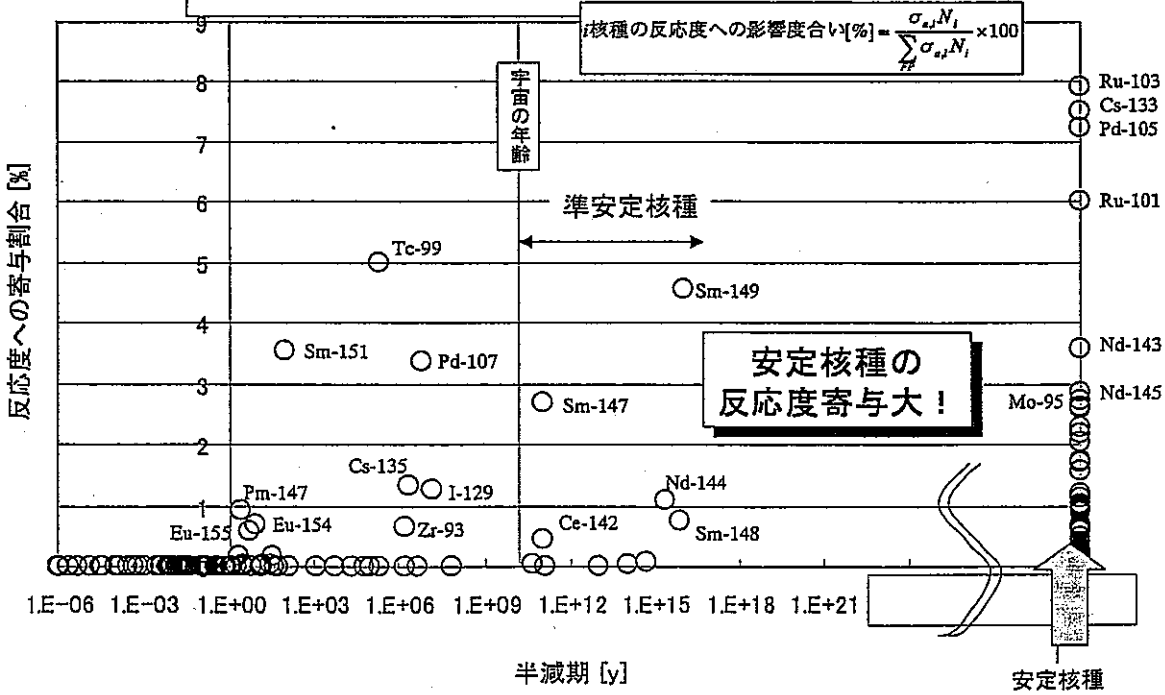
中性子吸収大の核種
≒
非放射性の安定核種！

Feasibility Study

FP核種の半減期と反応度への影響度

（4年冷却後組成）

$$i\text{核種の反応度への影響度合い}[\%] = \frac{\sigma_{a,i} N_i}{\sum_{FP} \sigma_{a,i} N_i} \times 100$$



Feasibility Study

- 目的 -

従来の「必要な燃料物質だけを純粋に回収する」という考え方から、「リサイクルの障害となる不要な物質を取り除く」という考え方に発想を転換し、従来の方法の延長線にとらわれない新しいリサイクル技術を提案することを目指した。

同時に、今後、放射性廃棄物の処分が社会的に大きな問題になることが予想されることから、処分場の負担軽減のために取り除くべき元素にも着目することとした。

すなわち、高速炉特有の優れた中性子経済を活用し、炉心で多重リサイクル可能な元素はできるだけリサイクルし、それ以外の元素についてはなるべく処分の負担の少ない形で回収し処分できるような、新しいリサイクル技術概念を構築することを目標とした。

Feasibility Study

- 検討の流れ -

2001/夏　「炉心へのリサイクル不適元素」を炉燃Grで予備検討

2001/10/1　検討会発足（主査：船坂GL）2001/10/1～12/20の3ヶ月間、全6回

2002/1/22　最終報告会

若手を中心に、炉心・燃料、再処理、燃料製造、廃棄物処理、処分、サイクル工学全般の各分野に従事するメンバーで検討。

第1回（10月1日）参加者15名
(1)検討会の進め方
(2)炉心にリサイクルしたくない元素
(3)環境負荷低減の観点からリサイクルしたい元素

第2回（10月12日）参加者14名
(1)安定または準安定元素として処分可能な元素
(2)燃料製造技術からの制約
(3)放射性廃棄物処分の観点から分離すべき元素
(4)シーズ技術の整理

第3回（10月24日）参加者13名
(1)ニーズのまとめ
(2)シーズ技術の整理
(3)新リサイクル技術の検討（フリーディスカッション）

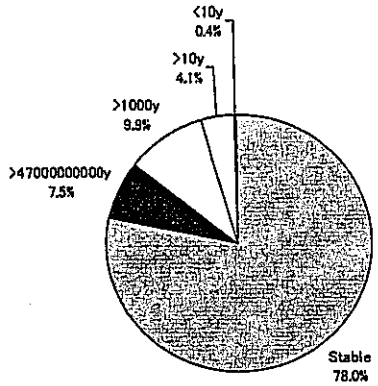
第4回（11月15日）参加者15名
(1)新リサイクル技術の検討
(2)関連技術調査
(3)炉心性能への影響評価方法

第5回（11月27日）参加者10名
(1)新リサイクル技術フローシートの検討
(2)炉心性能への影響評価
(3)報告書のまとめ方

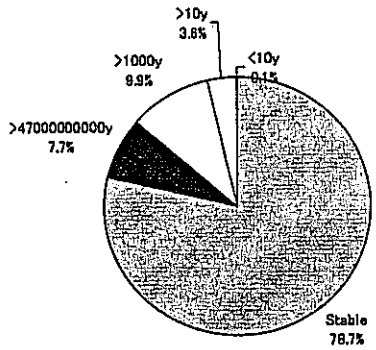
第6回（12月20日）参加者17名
(1)新リサイクル技術フローシートの検討
(2)炉心性能への影響評価
(3)燃料製造への影響評価
(4)報告書のまとめ方

Feasibility Study

高速炉使用済み燃料に含まれる FP核種(同位体)の半減期による分類



4年冷却後



10年冷却後

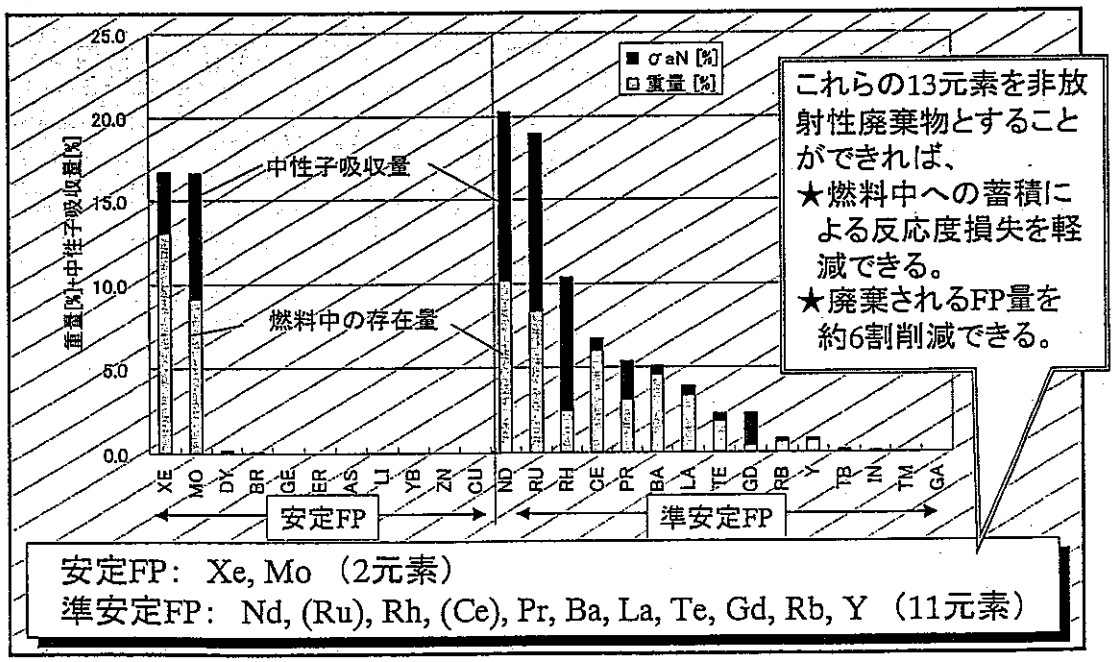
安定&準安定核種の占める割合

>85%

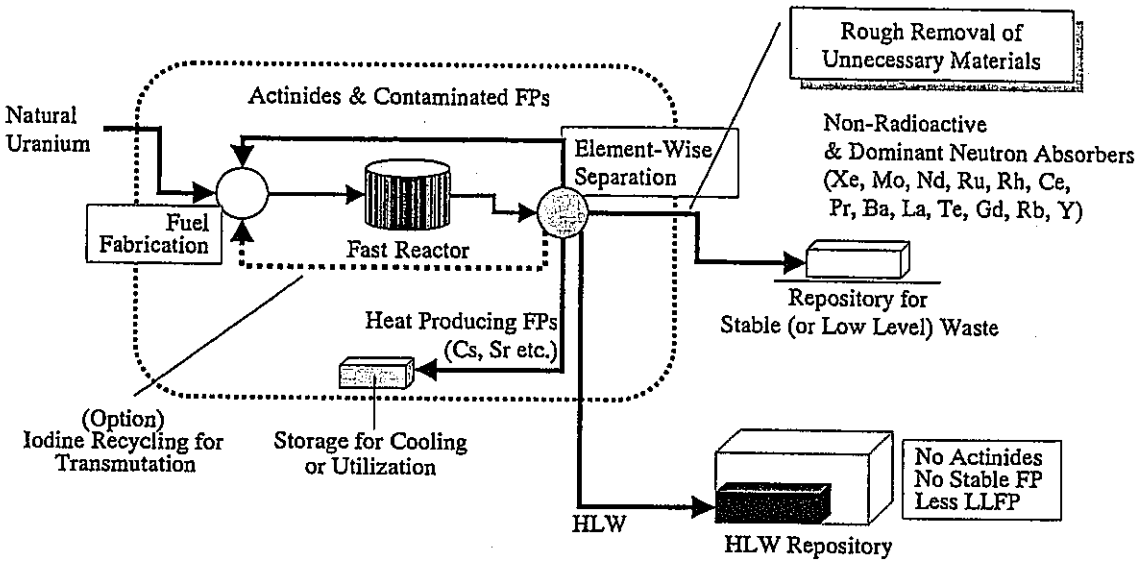
準安定: 宇宙の年齢の3倍以上
計算条件: 3.8GWt、MOX、150GWd/t

Feasibility Study

生成量大＋中性子吸収大＋非放射性であるFP元素



Feasibility Study



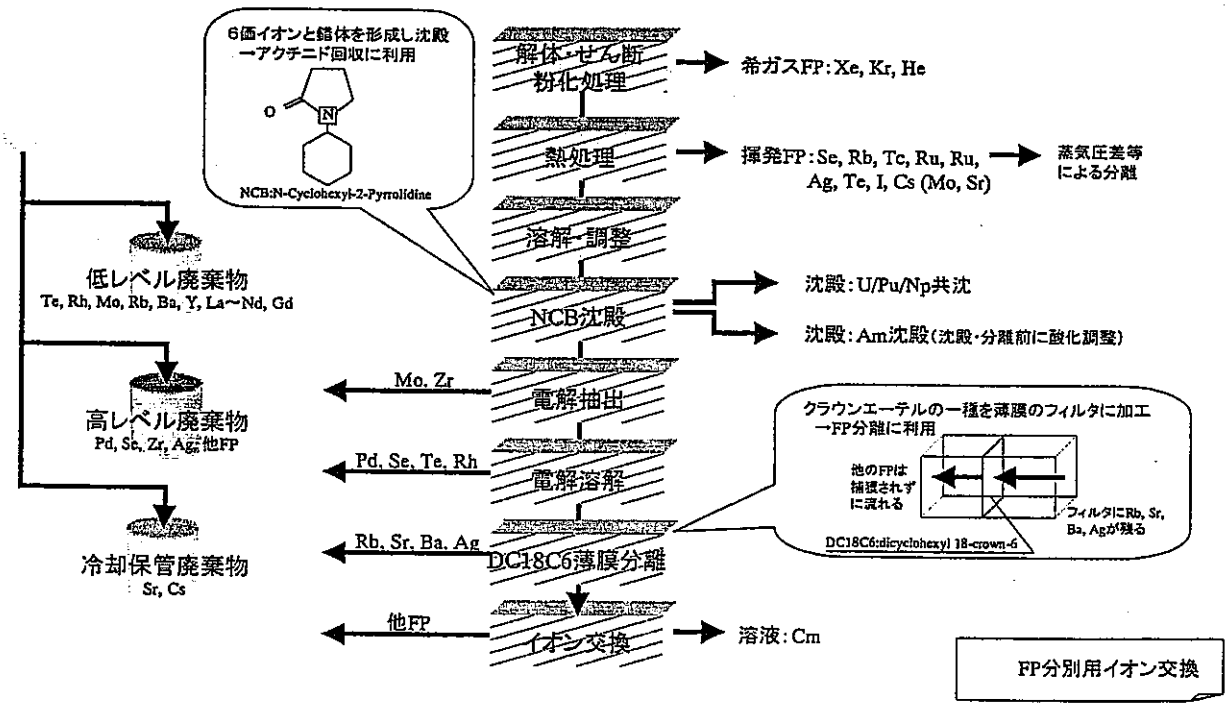
"ORIENT - Fuel Cycle"

(ORIENT : Optimization by Removing Impedimental Elements)

Feasibility Study

- MOX 燃料湿式分別プロセスの一例 -

（湿式NCB沈殿＋イオン交換法）



Feasibility Study

- マルチリサイクル時の核的成立性 -

「MOX炉-分別湿式」のケース

	全FP廃棄	基準ケース	FP随伴増加	Tc, I回収	Tc, I、Cs回収	熱処理のみ
臨界性指標	1.20914	1.20067	1.190730	1.1765	1.09665	0.54402
反応度への影響 [%dk/kk']	0	−0.58342	−1.27869	−2.29447	−8.48339	−101.11505
FP元素濃度 [wt%]	0	0.73	3.11	1.88	12.2	72.44
FP+HMインベントリ [ton]	52.67	53.06	54.36	53.68	59.99	191.3
廃棄物中の安定FP元素濃度 [wt%]	65.656	65.721	65.826	68.544	79.27	60.755
核的成立性	○	○	○	○	×	×

「金属燃料炉-分別乾式」のケース

	全FP廃棄	基準ケース	FP随伴増加	Tc, I回収	Tc, I、Cs回収
臨界性指標	1.28658	1.28185	1.28171	1.24659	1.16219
反応度への影響 [%dk/kk']	0	−0.28681	−0.29533	−2.49339	−8.31901
新燃料中のFP元素濃度 [wt%]	0	1.86	1.89	3.58	14.04
FP+HMインベントリ [ton]	61.74	62.91	62.93	64.03	71.83
廃棄物中の安定FP元素濃度 [wt%]	65.667	65.799	65.796	68.674	79.022
核的成立性	○	○	○	○	×

核的成立性の判断基準
反応度への影響度 < 3%

湿式法・乾式法ともに、増殖性能を大きく犠牲にすることなく
無限マルチリサイクルが成立。

Feasibility Study

- ORIENTサイクルの廃棄物低減効果 -

	高レベル廃棄物発生量		分離・分別による低減効果を期待する元素の含有量 [g/GWh]
	燃料重量あたり [kg/tHM]	発電量あたり [g/GWh]	
従来技術 (下北再処理想定)	44.1	120	Cs:9.62、Sr:3.19 Mo:12.4
ORIENTサイクル (酸化物燃料・湿式分離)	15.4	10.9	Cs:0.503、Sr:0.074 Mo:0.42
低減比	約1/3	約1/10	Cs:約1/20、Sr:約1/40 Mo:約1/30

ORIENTサイクルでは、

- 安定・準安定元素を高レベル廃棄物に移行させないこと、及び、
- 発熱元素(Sr, Cs)や、水溶性相生成元素(Mo)の除去によって
  ガラス固化体の含有FP上限を拡張することにより、

HLW発生量を従来技術より大幅に削減可能

Feasibility Study

- まとめ -

新リサイクル技術検討会では、「リサイクルや処分の障害となる不要な物質を取り除く」という発想に基づき、新たなサイクル概念を検討。

1. FP の6 割程度を占める安定元素・準安定元素を分離することの（炉心反応度や廃棄物量への）効果が大きいことを明らかにし、上記概念に基づく「ORIENTサイクル」を提案した。
2. その分離プロセスの一例として、MOX 燃料湿式分別プロセス（および金属燃料乾式分別プロセス分離）を具体化し、分離性能を概略評価した。
3. 多重リサイクルした場合の炉心特性への影響評価を行い、本サイクルが多重リサイクル時においても成立することを示した。
4. 廃棄物発生量の概略評価を行い、従来技術と比較して発電量当たりのHLW発生量を約1/10に低減できる可能性を示した。

"ORIENT-Cycle" (Optimization by Removing Impedimental Elements)

（訳： 不要元素除去による最適化燃料サイクル）

Feasibility Study

- 今後の課題 -

本検討会は限られた時間の中での活動であり、十分に議論・検討が尽くされとは言いがたい。今後、以下の観点からの検討を深めていくことが望まれる。

- □ 湿式・乾式各プロセスの特徴（得手不得手）を踏まえた分離元素の選択（再処理側と炉心側の負担配分の適正化）
- □ 経済性や2 次廃棄物も含めた廃棄物発生量の観点からの乾式・湿式各プロセスの最適化
- □ 熱処理のみのスキームによる数回のリサイクルの可能性など、より簡素な分離プロセスの検討

さらに今後、炉心－再処理－廃棄物処分の異なる分野の専門家双方が適切なリサイクルスキームを簡便に検討するためには、

- □ 炉・サイクル統合マスバランス解析ツールの整備（炉心での核変換、炉外での崩壊、再処理工程での元素分離フロー、新燃料および廃棄物への元素移行率等を考慮できるもの）

平成14年4月26日
R＆D報告会（第1回）

ペレット燃料製造システムの主要機器概念設計

システム技術開発部
燃料製造システムGr
田中　健哉

発表内容

1. 実用化戦略調査研究における
   燃料製造システム概念設計対象について
2. 燃料製造システム（フェーズⅡ）検討の視点
3. 燃料製造システム設計要求
4. 燃料製造システム概念設計の展開
5. 簡素化プロセスの概略フロー
6. ターンテーブル型脱硝転換設備概念設計
7. ターンテーブル型脱硝転換設備性能の検討
   /処理能力/遠隔メンテナンス性/信頼性/
8. まとめ

1. 実用化戦略調査研究における燃料製造システム概念設計対象について

サイクルシステムとしての経済性、環境負荷低減

【経済性向上】

再処理コストの低減 ⇒ 低除染燃料製造システム

【環境負荷低減】

MAリサイクル ⇒ MA含有燃料製造システム

⇓

セル対応燃料製造システム構築

セル対応の基本プロセスの選定

簡素化ペレット法、振動充填法、射出成型法

2. 燃料製造システム(フェーズⅡ)検討の視点

○技術的成立性(安定操業の見通し)の考え方

① システム安定性
- ・機器信頼性(高発熱、高放射線環境下での故障率)
- ・遠隔メンテナンスの実現性

② 生産能力の達成見通し
- ・プロセス毎の機器能力設定の妥当性

③ 製品収率確保
- ・各燃料製造システムにおける、低除染、MA添加燃料製品の仕様適合性

○燃料製造/再処理システム経済性目標(0.8円/KWh)

炉心特性依存(燃焼度)、再処理費との分担 → 燃料製造コスト目標の設定

○発生廃棄物評価

燃料製造工程からの廃棄物の放射能レベル/発生量の評価

深地層処分TRU廃棄物低減の見通し(除染技術調査)

3 燃料製造システム設計要求

- 安全性ーシステムの特徴を踏まえた安全性確保方策
  臨界 ： 物質の異常集積の可能性評価
  被曝 ： 放射能レベルと機器メンテナンス
- 経済性ープラント稼動率、製品収率を考慮したシステム設計に基づく目標加工コストの達成
- 環境負荷低減ーPu等の廃棄物へ移行低減(0.1%以下)
  TRU廃棄物量(地層処分)の低減
- 核拡散抵抗性ーセル内核物質滞留量の低減/把握

4. 燃料製造システム概念設計の展開

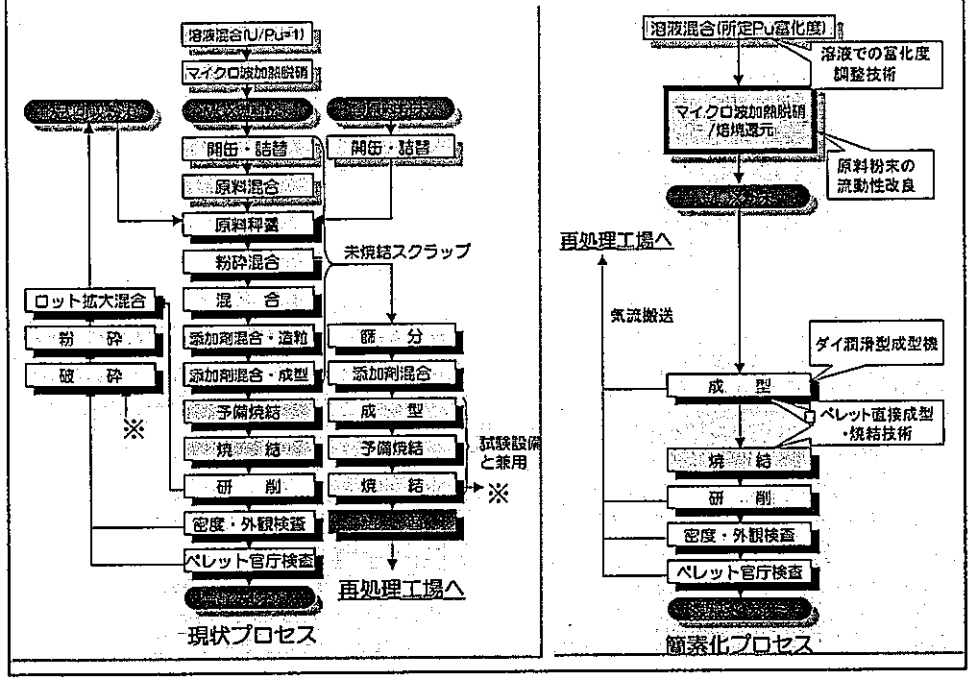
H13:機器概念設計

H14:製造ライン構成

H15:燃料製造/再処理一体(中間評価)

H16,H17 /合理化
/要素技術開発成果の反映
/システム評価

5. 簡素化プロセスの概略フロー



6. ターンテーブル型脱硝転換設備 機器概念設計

○量産対応及び設備のコンパクト化
- 臨界制限(形状管理)に基づく大型脱硝転換容器
- 合理的な核物質の移送機構

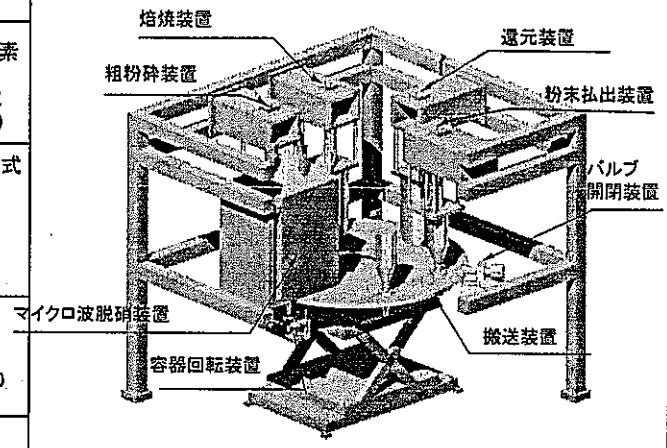
○核燃料物質のダスト等の廃棄物への移行低減
- 同一容器内での脱硝/粗粉砕/焙焼/還元

○設備機器の高信頼性(低故障率)
- シンプルな装置構成/移送機構

○自動化・遠隔保守対応
- 装置部品のユニット化
- 合理的ユニット交換機構

脱硝転換設備主要目(炉心燃料用)

装置名称	仕様
脱硝転換容器	材質:窒化ケイ素 有効容積:21ℓ (φ220×H700)
脱硝装置	マイクロ波脱硝式 出力:40KW L1000×W1000 ×H2000
焙焼/還元炉	電気炉 φ1000×H2000
脱硝転換設備(全体)	処理能力: 4.3Kg-HM/hr 4600×4300 ×H4300



ターンテーブル型脱硝・焙焼・還元設備

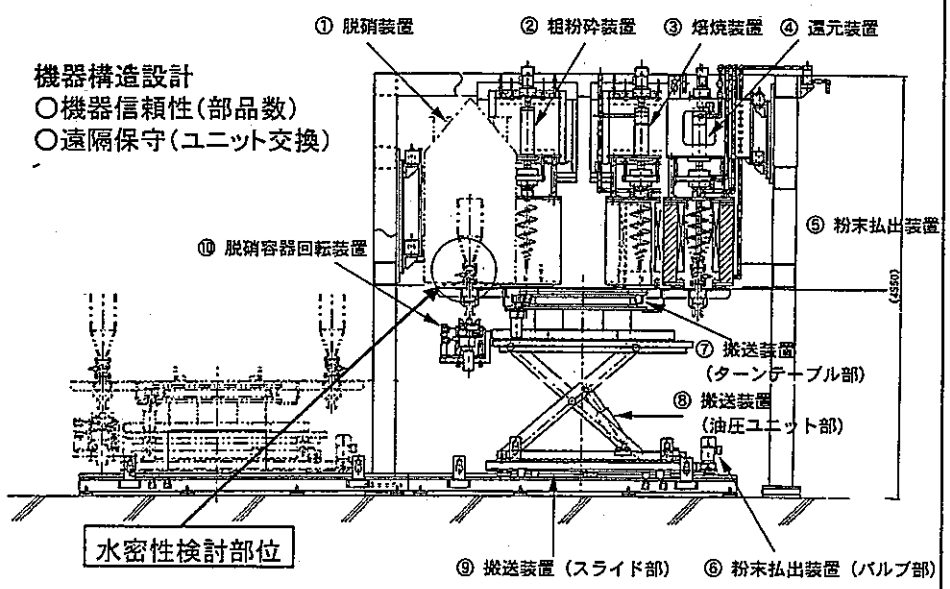


図 ターンテーブル型脱硝転換設備ユニット構成

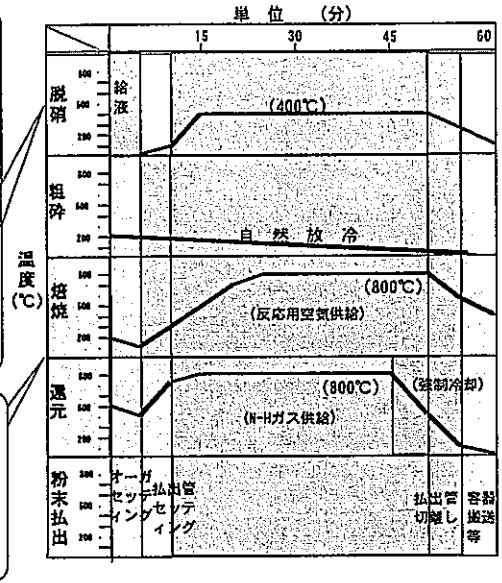
7. ターンテーブル型脱硝転換設備性能の検討

(1)処理能力

脱硝ステージ
・マイクロ波脱硝装置出力
：４０ kw 【実績 ２０ kw】

・脱硝条件
：４００℃ － ３５ min
(蒸発液量 １８ kg_1)
【実績 ３５０℃ －３５ min
(蒸発液量 ９ kg) 】
・１バッチの処理量（炉心燃料）
：４．３ kgHM / hr
：１３．３・ /バッチ / hr
【実績７・】

焙焼・還元ステージ
・焙焼工程
８００℃ － ２５ min
・還元工程
８００℃ － ３０ min
・強制冷却工程
８００℃ → 常温 (１０ min)



(2)遠隔メンテナンス性

①保守の基本的考え方

○保守対象ユニット/予備ユニットの交換(遠隔)
○保守対象ユニットは保守エリアで直接保守

②ユニット交換時間/保守時間

○ユニットの取外/組立手順の明確化
○保守機器の移動/操作の詳細化

③遠隔メンテナンスの見通し

○本設備概念設計の各ユニット構造に対し一般的保守機器による遠隔保守対応の可能性を保守時間(ユニット交換時間)に基づく、機器稼働率で評価

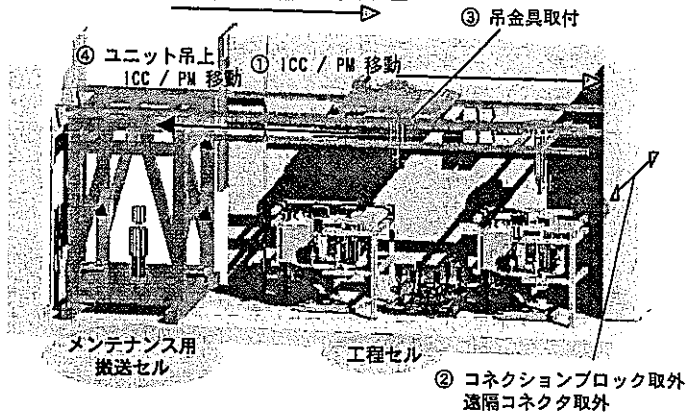


図 遠隔保守機器/手順に関する概念検討

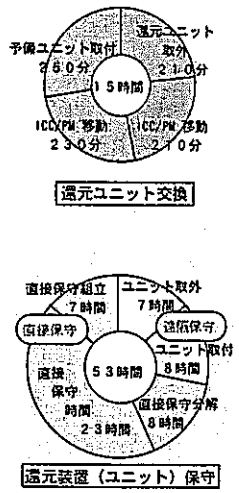


図 遠隔保守時間検討例
（ユニット交換/ユニット保守）

(3)信頼性(機器稼働率)

①機器稼動率の考え方

・部品故障と機器稼動率(η i)

η i=〔Y×250(年間稼働日数)×24(時間)−Tj〕
/〔Y×250(年間稼働日数)×24(時間)〕

・設備全体の稼働率　　Y:部品故障頻度(Y年/回)　Tj:ユニット交換時間

$\eta = \eta 1 \times \eta 2 \times \cdots \times \eta n$

②ユニット交換時間/部品数(モータ、オイルシール、パッキン、軸受け等)

ユニット名	ﾏｲｸﾛ波脱硝装置	粗粉砕装置	焙焼装置	還元装置	粉末払出装置	粉末払出装置(ﾊﾞﾙﾌﾞ部)	搬送装置(ﾀｰﾝﾃｰﾌﾞﾙ部)	搬送装置(油圧ユニット部)	搬送装置(ｽﾗｲﾄﾞ部)	脱硝容器回転装置(1個)
交換時間T	13	9	13	15	9	11	53	11	11	8
部品数 Y=2 (Y=5)	2 (0)	14 (2)	18 (3)	22 (3)	23 (2)	17 (2)	13 (3)	1 (0)	6 (1)	14 (3)

③ターンテーブル型脱硝転換設備機器稼働率

η = 81 %　(予防保全考慮なし)

(4)信頼性(接合構造部の健全性確認予備試験)

健全性(水密性)確認部位

○ボールバルブ(規格品)
○フランジ部
バルブ側;SCS13A/容器側;Si3N4)

確認部位の温度/歪予測結果

○ボールバルブ部　約600℃(最高)
○フランジ部　約700℃ (最高)

確認試験条件

○繰り返し加熱試験(空気雰囲気)
　600℃-100℃(200サイクル)
　800℃-100℃(24サイクル)

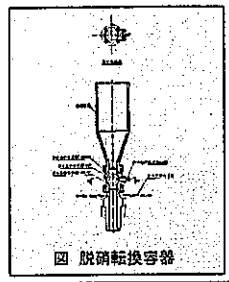


図 脱硝転換容器

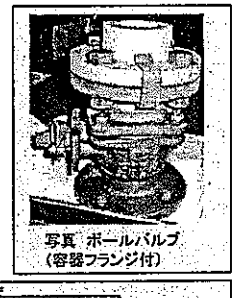


写真 ボールバルブ
(容器フランジ付)

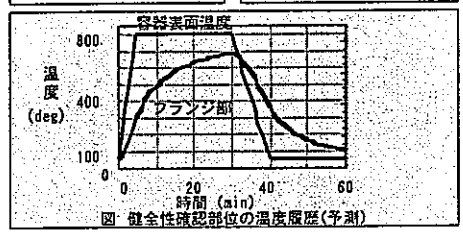


図 健全性確認部位の温度履歴(予測)

試験結果

○ボールバルブ部及びフランジ部の水密性を試験条件範囲で確認した。
○規格ボールバルブの本設備への適用可能性を示した。

8. まとめ

(1)セル対応ペレット燃料製造システムの主要機器である脱硝転換設備の要求事項(機器コンパクト化、ダスト対策、遠隔保守対応、高信頼性)をまとめた。

(2)機器概念設計要求事項を考慮したターンテーブル型脱硝転換設備機器を提案した。

(3)機器のユニット化に基づく稼動率の検討及びターンテーブル構造(容器/バルブ)健全性予備試験より本設備のセル対応簡素化ペレット燃料製造システムへの適用可能性を示した。

(4)システム設計の基本条件(MOX粉末特性のペレット成型加工工程への適合性等)の関し要素技術開発に基づく評価が重要である。

金属燃料製造システムの概念設計

平成14年4月26日

システム技術開発部
燃料製造システムGr.
星野康史

1．共同研究の概要

フェーズⅡの目的

フェーズⅠの金属燃料リサイクルプラント設計結果に対し、プロセスの一部見直しを行うとともに、運転/保守/補修、マテリアルハンドリング内容の詳細化、品質管理および計量管理方法の検討を行い、中間取りまとめの平成15年を目処に、システム特性評価を行うことを目的とする。

また、プラント性能を引き出すために必要となる要素技術開発および工学試験計画の策定も行う。

1．共同研究の概要

実施項目

- 設計条件の設定（燃料仕様、サイクル諸量）
- プロセス設計（検討プロセスの見直し）
- マテリアルハンドリングの検討
- 品質管理方法の検討（金属燃料製造上の特徴を考慮）
- 計量管理方法の検討（乾式法再処理の特徴を考慮）
- 保守・補修方法の検討
- 安全設計方針の検討
- 機器・施設設計（各検討結果に基づく設計）
- システム評価（経済性、環境負荷低減性ほか）
- 開発計画の策定（想定技術の開発計画策定）

1．共同研究の概要

実施スケジュール

■ サイクル機構の主担当、共同の担当
■ 電中研の主担当

システム検討の内容	平成13年度	平成14年度	平成15年度
設計条件の設定			
プロセス設計			
マテハンの検討			
品質管理方法の検討			
計量管理方法の検討			
保守・補修方法の検討			
安全設計方針の検討			
機器・施設設計			
システム評価			
開発計画の策定			

2．本日の報告内容

燃料製造の関連項目

＜設計条件の設定、プロセス設計＞
・フェーズⅠからの変更点と影響

＜品質管理方法の検討＞
・品質管理に係わる燃料製造上の特徴
・品質管理項目（分析の例）
・品質管理と主工程との関係（シミュレーション）

＜まとめと今後の課題＞
・まとめと今後の課題

3．フェーズⅠからの変更点と影響

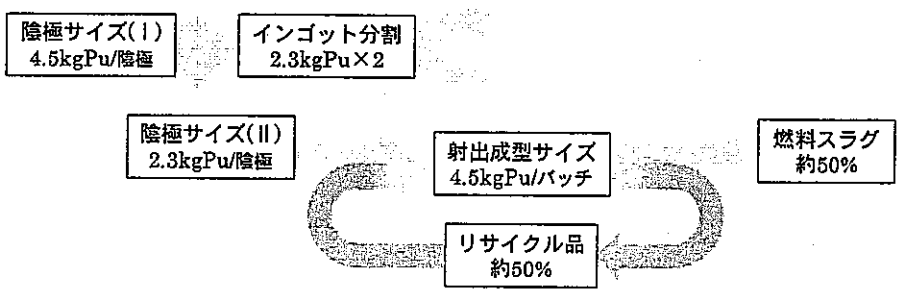
燃料製造に係わる変更点

＜年間処理量の変更＞

（フェーズⅠ）		（フェーズⅡ）
50トンHM/年	⇒	38トンHM/年

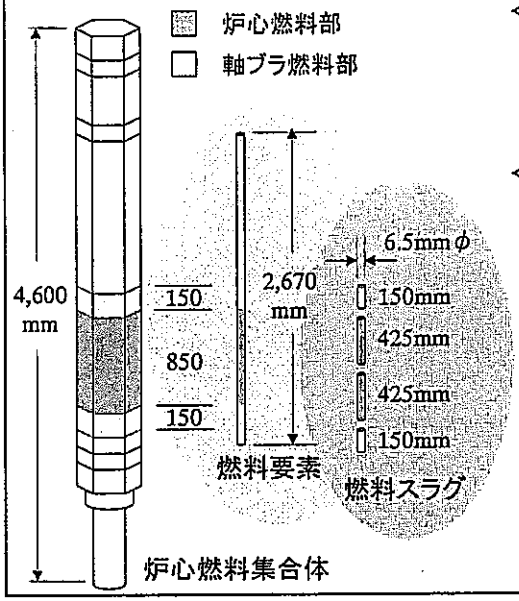
※　単位発電量当りで他システムと比較評価

＜電解精製工程の陰極サイズの変更＞



3．フェーズⅠからの変更点と影響

燃料仕様の設定



＜年間処理量の設定＞

- 集合体数： 199体/年（38トンHM/年）
  （炉心･167体、径ブラ･約32体）

※ フェーズⅠ：262体/年（50トンHM/年）

＜燃料仕様＞

- 燃料要素数/集合体
  炉心･331本、径ブラ･127本
- 燃料組成（wt%）
  IC U･11.1%Pu･0.4%MA･10%Zr
  OC U･15.6%Pu･0.5%MA･10%Zr
- 燃料の放射能（OC燃料1g当り）
  放射能： 約2×10^{10}Bq
  線量率： 150μSv/h（25cm位置）

3．フェーズⅠからの変更点と影響

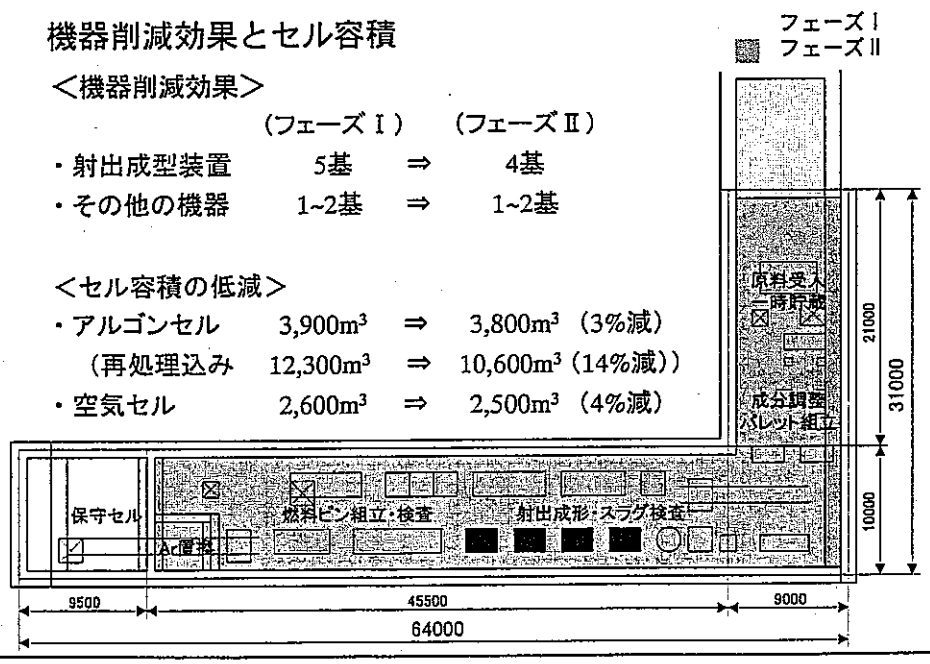
機器削減効果とセル容積

＜機器削減効果＞

	（フェーズⅠ）		（フェーズⅡ）
・射出成型装置	5基	⇒	4基
・その他の機器	1~2基	⇒	1~2基

＜セル容積の低減＞

・アルゴンセル	3,900m³	⇒	3,800m³ （3%減）
（再処理込み	12,300m³	⇒	10,600m³ （14%減））
・空気セル	2,600m³	⇒	2,500m³ （4%減）



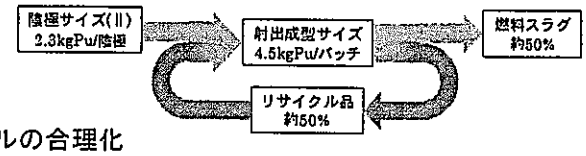
3．フェーズⅠからの変更点と影響

電解精製陰極サイズ変更の効果

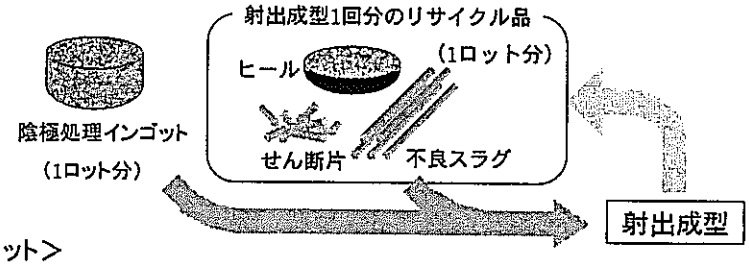
<メリット>

・陰極処理インゴットの分割不要

インゴット分割は難作業



・ヒール/スクラップリサイクルの合理化



<デメリット>

・陰極処理インゴットの分析数増加

4．金属燃料の品質管理に関する検討

品質管理に係わる燃料製造上の特徴

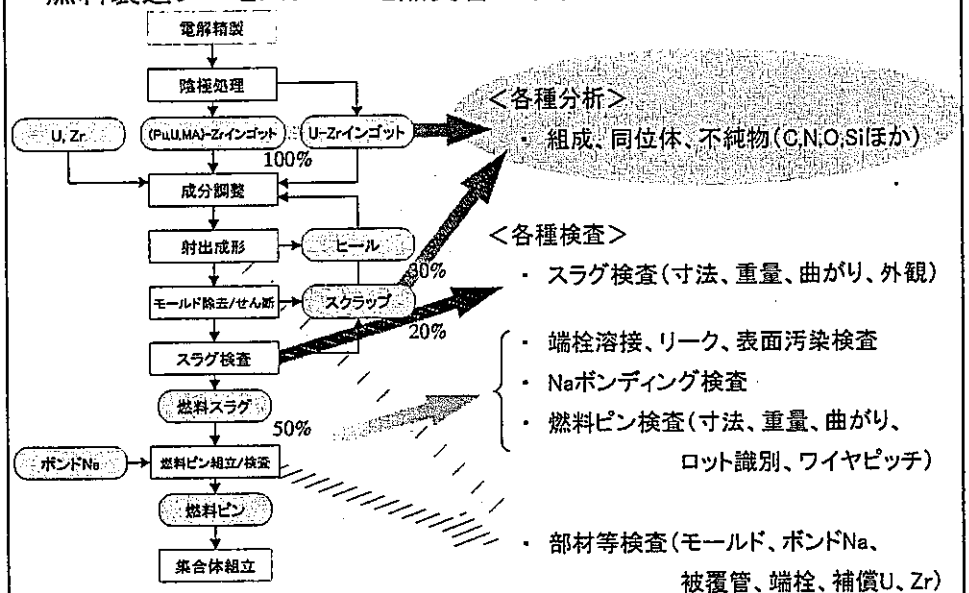
(1) バッチ処理を基本とするプロセスであり、臨界制限値が約5kgPuと小さいため分析ロット数が多くなる(一日の分析ロット数は陰極処理を含めると20ロット以上に上る)。

(2) 射出成型工程でヒール・スクラップなど有意量のリサイクル品が発生する。

(3) 取扱燃料が、金属電解法乾式再処理で得られるMA含有低除染燃料であり高線量である。

4．金属燃料の品質管理に関する検討

燃料製造プロセスフローと品質管理項目



4．金属燃料の品質管理に関する検討

分析方法とフロー

※ 搬送時間を含む

作業項目	分析項目と方法 (★はセル内、他はGB内)	分析スケジュール(時間) 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
試料採取	採取→冷却→解砕★	
前処理	酸溶解★	
	イオン交換	
組成分析	U,Pu分析　電位差滴定★	
	クーロメトリ★	
	Zr等分析　ICP-AES	
	MA分析　αスペクトロメトリ	
同位体分析	質量分析	
不純物分析	前処理、各種分析★	

4．金属燃料の品質管理に関する検討

品質管理と主工程の関係 （主工程との整合性の検討）

金属燃料製造における品質管理は、分析ロットが多いこと、リサイクル品の繰り返し処理が必要なことから、煩雑な処理となる。

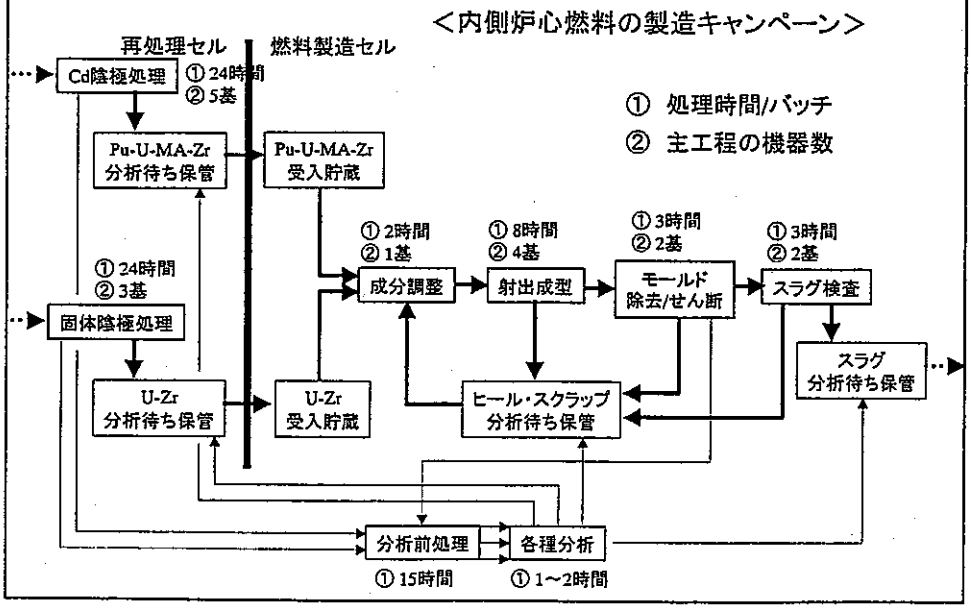
待ち時間が発生する分析に着目し、汎用シミュレータEX-TDを用いて、プラント設計における主工程の操業と整合する品質管理システムの検討を行った。

- 検討の範囲・・・ 陰極処理 ～ スラグ検査
- 入力データ・・・ 主工程各プロセスの処理時間、機器数等
- アウトプット・・・ ① 分析関連機器の必要数
  ② ロットアウト、工程機器トラブル停止の各貯蔵・保管容量への影響評価

4．金属燃料の品質管理に関する検討

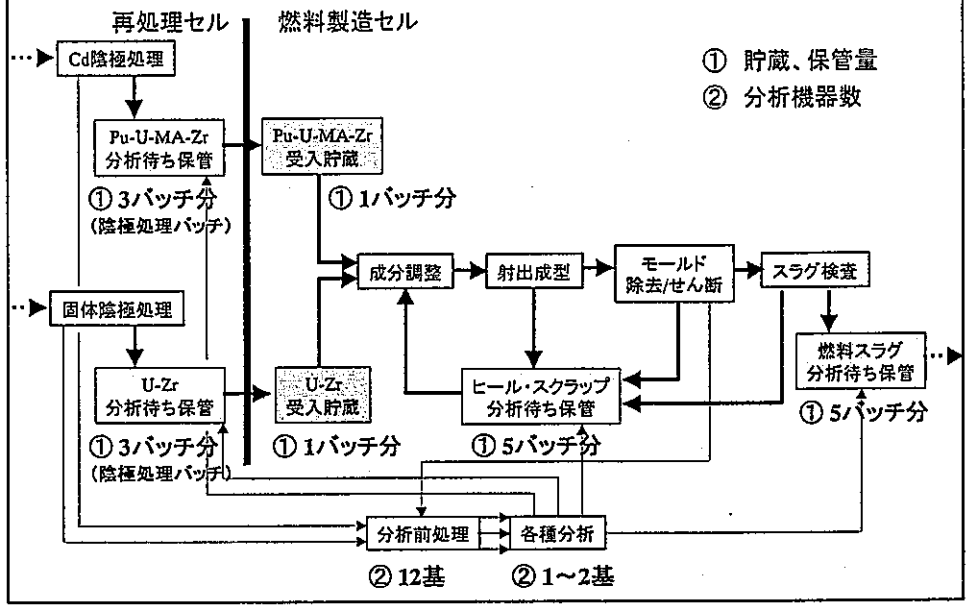
品質管理と主工程の関係 （シミュレーションモデル）

＜内側炉心燃料の製造キャンペーン＞



4．金属燃料の品質管理に関する検討

品質管理と主工程の関係（検討結果－安定操業時の貯蔵容量）



4．金属燃料の品質管理に関する検討

品質管理と主工程の関係（検討結果－貯蔵量の変動）

トラブル発生時のPu-U-MA-Zr合金の受入貯蔵庫（燃料製造セル）の貯蔵量を検討

（想定ケース）

① 30h 成分調整装置にトラブル発生

② 56h スラグ分析でロットアウト発生確認

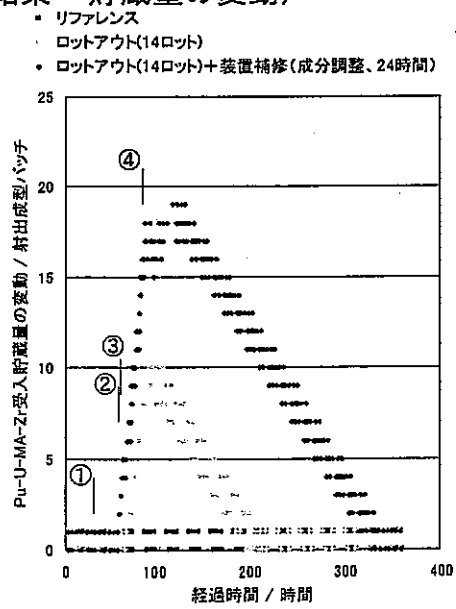
・・・ 補修までに14回のロットアウト発生

③ 58h 成分調整装置の停止・補修

（補修時間 24h）

④ 82h 成分調整装置の起動

※ ある程度ゆとりのある容量設計が必要



5．まとめと今後の課題

H13年度検討のまとめ

(1) フェーズⅠからの設計条件の見直しを行い、燃料仕様、サイクル諸量を設定した。また、プロセス設計の見直しを行った。

(2) 設計条件、プロセス設計の変更に伴う影響として、セル容積がわずかに削減されることを示した。

(3) 金属燃料製造上の特徴を考慮した上で、品質管理項目を抽出し、それぞれの方法およびフローを示した。

(4) 主工程を円滑に操業するために必要となる機器数、トラブルに対応可能な原料の貯蔵容量等を検討した。

5．まとめと今後の課題

今後の課題

＜燃料製造全般＞

- セル内でのマテハン、保守・補修までを考慮した遠隔自動機器の概念検討。
- 安全設計方針の検討と安全設計
- 経済性、環境負荷低減性等のシステム評価

＜品質管理関連＞

- MA含有低除染燃料に対する、機器の耐放射線性の検討。
- 分析サンプルの代表性の確認。
- 非破壊検査システムの検討。

湿式対応振動充填燃料製造システムの概念設計

（ゲル化設備機器の概念設計）

2002年4月26日

R&D報告会

システム部　燃料製造Gr.　川口　浩一

目次

1. はじめに
2. 実施スケジュール
3. 設計方針
4. ゲル化設備の設計検討フロー
5. 臨界による寸法制限
6. バッチサイズの検討
7. 機器概念設計
8. セル内配置設計
9. 保守補修に関する検討
10. まとめと課題

1. はじめに

湿式ゲル化法の特徴

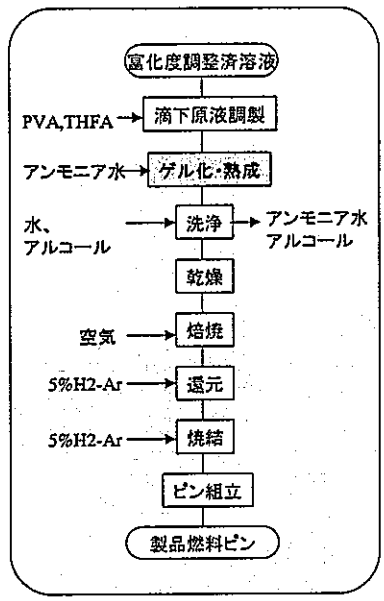
-溶液系での取り扱い
-研削不要
-粒子間摩擦小

⇩

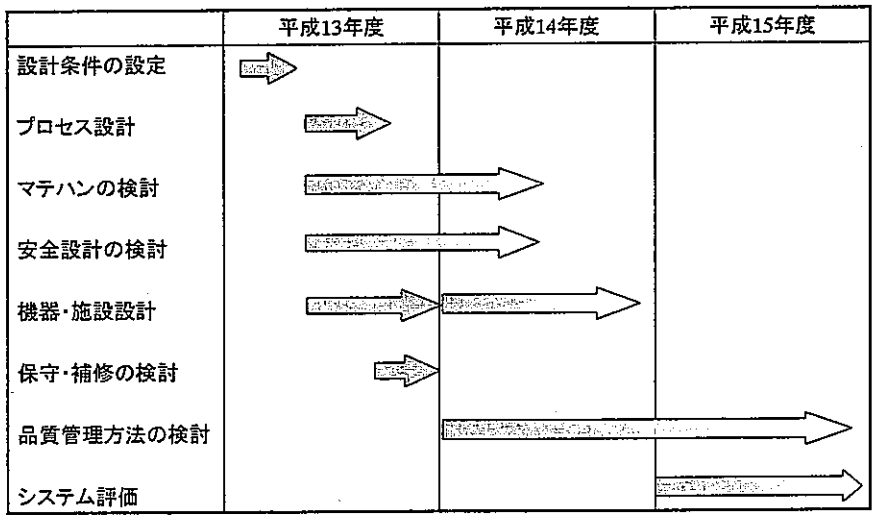
微粉発生量が非常に少ない。

低除染・MA含有燃料への対応
-高発熱・高放射線（MA5%で、13.5W/kgHM）
添加剤の分解
プロセス条件、機器への影響

-多成分系（MA、FP添加）
ゲル化挙動
焼結挙動
廃棄物への移行挙動



2. 実施スケジュール

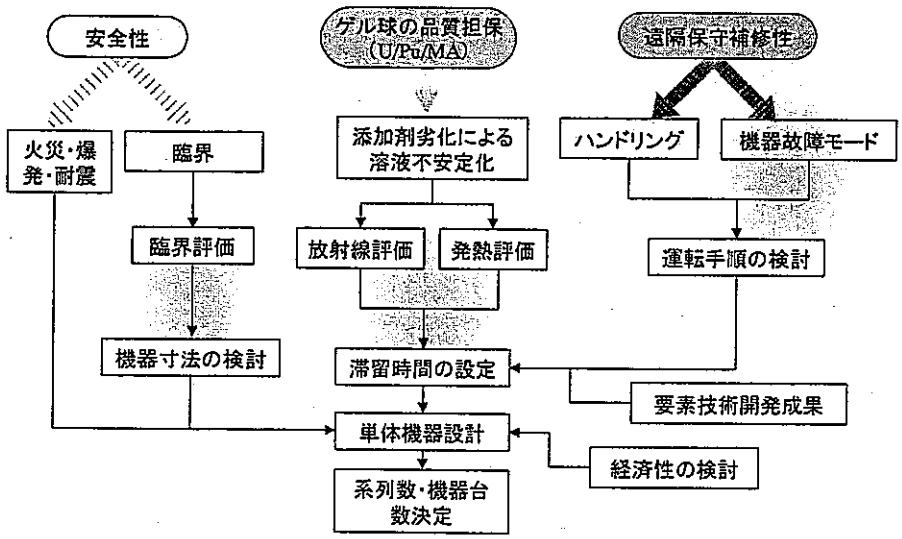


3. 設計方針

【設計方針】
・安全性を考慮した設計
・MA含有低除染燃料に対応した設計
・経済性に優れた機器設計
・物流(マテハン)を考慮した機器設計
・機器故障モードに基く保守補修方法の検討

【設計条件】
・年間燃料製造量　200tHM/y
・年間操業日数250日、稼働率80%とし、200日稼動。

4. ゲル化設備の設計検討フロー



5. 臨界による寸法制限(1)

形状管理とする
容器形状
溶液:円筒槽または円環槽
顆粒:円筒槽
必要に応じてCdをはる

取扱い物質

物質	概略組成	評価上の物質
富化度調整済みU・Pu溶液	約300gHM/l	富化度調整済みU・Pu溶液
滴下原液	約150gHM/l	
湿潤ゲル球	ADU+含水酸化物+間隙水	乾燥ゲル球
乾燥ゲル球	ADU+含水酸化物	
焙焼球	UO3/PuO2	還元球
還元球	(U,Pu)O2	

5. 臨界による寸法制限(2)

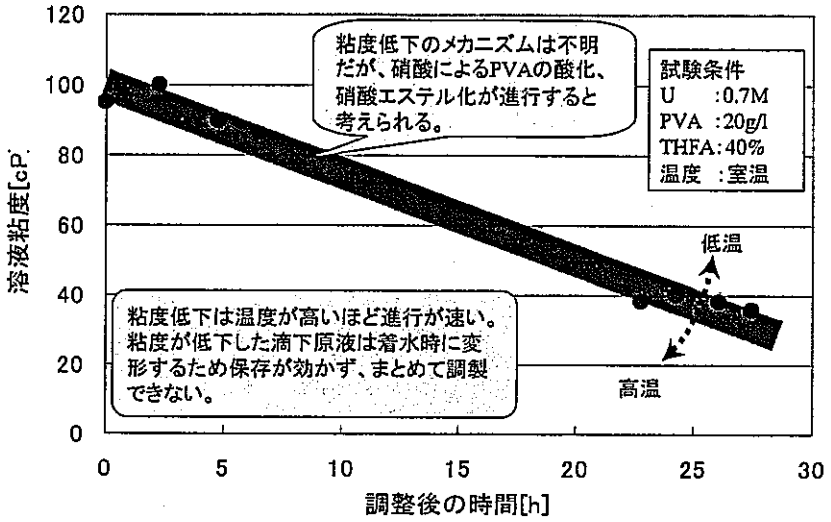
Pu富化度30%、Puフィッサイル80%、keff≦0.95　計算コードMCNP

機器類名	形状	取扱い形態	評価形態	臨界上の制限寸法 (cm)	採用寸法 (cm)	採用寸法におけるHM容量 (内側炉心大粒子) (kgHM)
滴下液混合槽	円環型(Cd付)	富化度調整済みU・Pu溶液 滴下原液	富化度調整済み U・Pu溶液	8.5	7.5	19.9
滴下・熟成槽	円環型(Cd付)	湿潤ゲル球+アンモニア水	富化度調整済み U・Pu溶液	8.5	7.5	6.6
洗浄槽	円筒型(Cd付)	湿潤ゲル球+洗浄液	富化度調整済み U・Pu溶液	26.1	25.1	6.6
乾燥装置	円筒型(Cd付)	湿潤ゲル球+洗浄液 乾燥ゲル球	乾燥ゲル球	16.3	15.3	3.3
乾燥ゲル球貯槽	円筒型(Cd付)	乾燥ゲル球	乾燥ゲル球	16.3	15.3	6.6
焙焼炉	円筒型	乾燥ゲル球 焙焼球	乾燥ゲル球	13.1	12.1	6.6
焙焼ゲル球貯槽	円筒型	焙焼球	還元球	27.9	20.0	19.9
還元炉	円筒型	焙焼球 還元球	還元球	27.9	12.1	19.9
還元ゲル球貯槽	円筒型	還元球	還元球	27.9	20.0	19.9

臨界評価は乾燥ゲル球が最も厳しい。その中でも湿潤ゲル球を洗浄液とともに受け入れる乾燥装置が、最もHM容量が小さくなる。

6. バッチサイズの検討(1)

滴下原液の劣化挙動



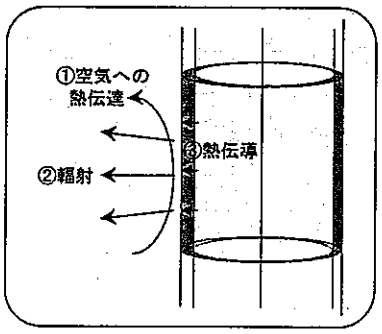
溶液粘度の経時変化の試験結果

6. バッチサイズの検討(2)

熱評価

燃料溶液の発熱量(MA5%)
外側炉心燃料用滴下原液　1.75W/l

供給槽(円筒型)の温度評価
溶液は均一になっているものと仮定
①空気への伝熱　$Q_T = h(T_w - T_\infty)$
②輻射　$Q_R = \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_\infty^4)$
③容器材料の熱伝導　$Q_c(r) = \lambda_v dT/dr$



h:熱伝達係数　T_w:容器外表面温度　T_∞:近接空気温度
σ:シュテファン-ボルツマン定数　ε:輻射率
r:容器中心からの距離　t:容器厚さ　λ_v:容器の熱伝導度

近接空気温度25℃における容器内面温度33℃

⇩

冷却が必要。

6. バッチサイズの検討(3)

バッチサイズの設定

滴下原液調製のバッチサイズの検討

バッチ毎の洗浄は行わない。
→器壁付着分、配管残留分は次バッチで滴下される。
滴下溶液の劣化を防ぐため、30℃で6時間以内に滴下完了する。

↓

滴下原液の一部が2バッチにわたることを考慮し、
調製から滴下完了までを1バッチ3時間、1日8バッチと設定する。
(調製1時間、滴下2時間)

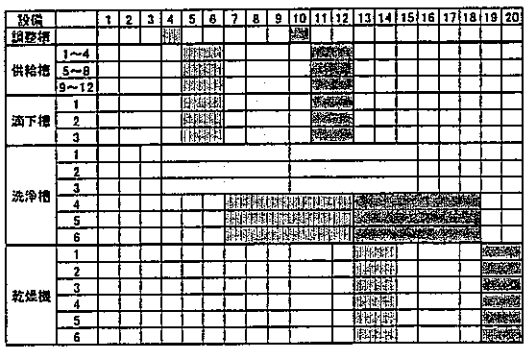
年間処理量に基く1バッチ処理量
内側炉心　大粒子：19.9kgHM　小粒子：8.5kgHM
外側炉心　大粒子：17.3kgHM　小粒子：7.4kgHM

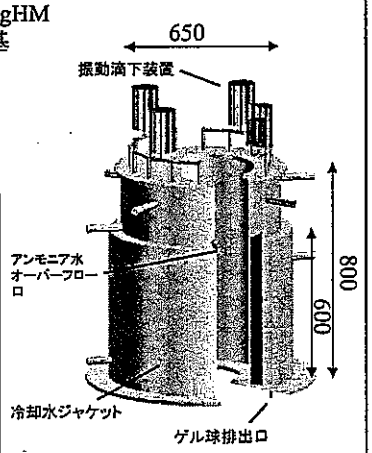
7. 機器概念設計

滴下溶液の性能担保のためのバッチサイズ→19.9kgHM
臨界評価による乾燥機の容量制限→3.3kgHM×6基

↓ 工程間の物流を考慮した
機器能力及び台数設定

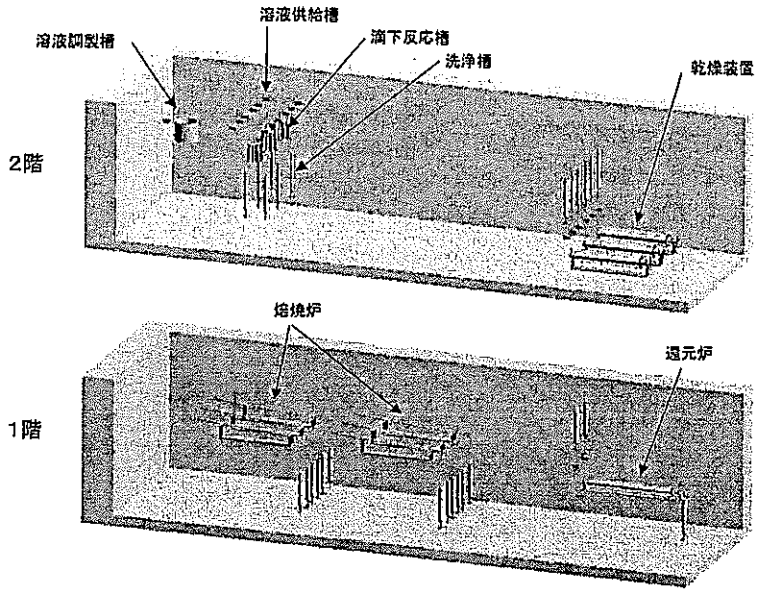
滴下・熟成槽の容量及び基数：6.6kgHM×3基





滴下・熟成槽設計例(大粒子用)

8. セル内配置設計



9. 保守補修に関する検討(1)

RCM(Reliability Centered Maintenance)法による故障解析

解析対象の明確化

⇩ 各機器をアセンブリ及びその構成部品まで分解

故障モードの抽出

⇩ 構成部品毎に想定される故障モードを抽出し、システムへの影響度等を評価

保全対策

故障に応じた措置(予防取替え、定期点検、二重化)

運転への影響度分類

影響度	運転への影響	修復期間	処理量への影響
A1	系列の停止または運転の全面停止	1週間以上	稼動日数尤度により回復する必要がある。120%処理速度では1ヶ月以上を要す。
A2		数日	120%処理速度で2週間程度で回復可能。
A3		数時間	120%処理速度で2、3日程度で回復可能。
B1	処理速度が低下した状態での運転継続可能	1週間以上	120%処理速度で2週間程度で回復可能。
B2		数日	120%処理速度で1週間程度で回復可能。
B3		数時間	120%処理速度で1日程度で回復可能。
C1	冗長系その他により定格運転可能	運転中の修理困難	処理速度への影響は無いが、他のトラブル時に処理速度増加による回復は困難。
C2		運転中の修理可能	なし

9. 保守補修に関する検討(2)

保守補修方法の検討

・定期点検及び異常監視
　プロセス計装、制御装置による運転記録、異常検知。

・機器・部品の定期交換または事後保全
　機器設置セル内での遠隔操作によるユニット交換を基本とする。
　ユニット交換のみで補修が困難な場合は装置を保守セルに搬送し、
　遠隔または除染後GBで直接補修。

RCM法による故障解析の検討例

機器を部品レベルに分解

故障モード抽出と影響度評価

故障に応じた保全対策

機器	機能	部品	現象	原因	影響度	確率	復旧時間	復旧作業	設備対策	保全対策	保全後の確率[/h]
滴下混合槽	本体	円筒槽本体	漏洩	材料劣化	－	0	－	－	設計で回避	－	－
	Pu/U供給	Pu/U水溶液供給配管	漏洩	材料劣化	－	0	－	－	設計で回避	－	－
		弁	作動失敗	電気・制御系異常	A2	1回/10年	2日	再起動/交換	なし	予防取替	1.1e-8
			誤開/誤閉	システム異常	A3	1回/10年	1/2日	リセット	なし	定期点検	7.6e-10
			閉塞	異物混入/弁破損	A1	1回/50年	1週間	交換	なし	予防取替	3.1e-9
			外部リーク	劣化/破損	A1	1回/20年	1ヶ月	除染/交換	なし	予防取替	7.6e-10

10. まとめと課題

・低除染MA含有燃料の発熱による溶液の劣化を考慮してバッチサイズを設定した。

・形状管理による臨界設計に基く機器設計を行った。

・バッチサイズと機器サイズから、前後の工程と整合のとれる機器台数を設定した。

・部費レベルでの故障モードの抽出を行い、保守方法を検討した。

・振動充填・ピン検査までを含む、装置の配置最適化設計

・品質保証システムの検討

・放射線の影響評価

湿式対応振動充填
燃料製造システムの概念設計
（振動充填機器の概念設計）

平成14年4月26日

システム技術開発部
燃料製造システムGr.
新開康夫

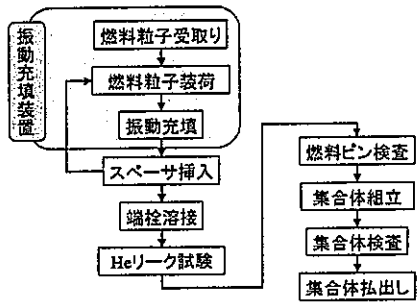
報告内容

1. 背景
2. 機器概念設計
   燃料マガジン、燃料供給部、ホッパー
3. 運転フロー
4. 機器信頼性の検討
5. 設備費の検討
6. まとめ

1. 背景

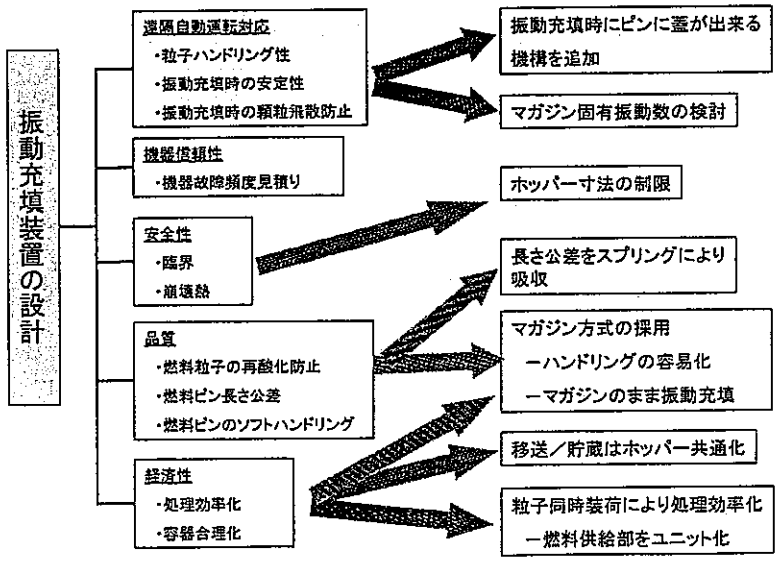
①遠隔自動運転
　ーU/Pu/MA含有低除染燃料
　　による発熱／高放射線
　➡セル内製造
②機器信頼性の向上
　ー設備構造の健全性
　ー故障頻度の見積り
③安全性(臨界、崩壊熱など)
④製品品質
⑤経済性(処理効率化など)

湿式振動充填燃料の工程(概要)

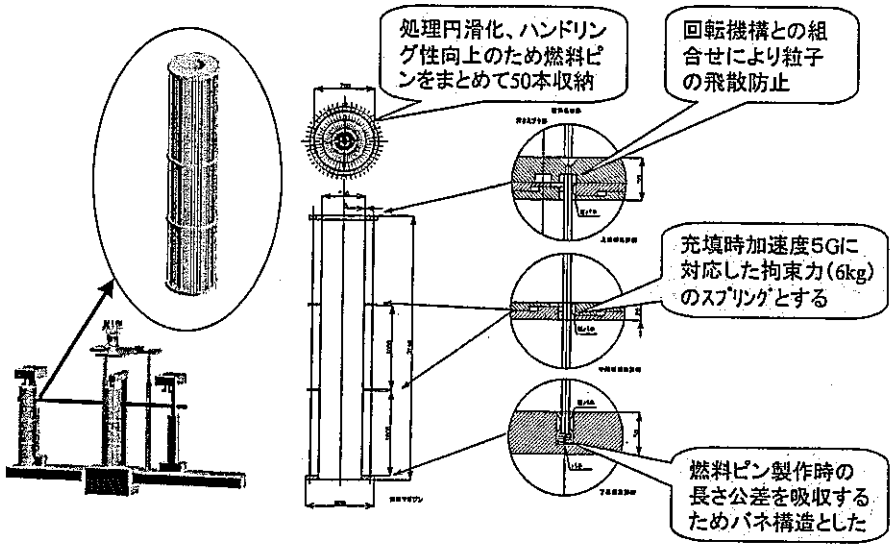


U/Pu/MA含有低除染燃料の取扱いに
対するセル内燃料製造の見通しを得る

2.1 機器概念設計
機器への要求と設計対応



2.2 燃料マガジンの設計

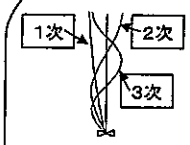


2.3 燃料マガジンの振動時安定性

•振動充填中にマガジンが共振しないこと

(振動充填時の周波数200～300Hz)

固有振動数の計算



振動モード

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi L^2}\sqrt{\frac{E \cdot I \cdot g}{\gamma \cdot A}}$$

$$I = \frac{\pi}{64}(d_2^4 - d_1^4)$$

$$A = \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)$$

f:横振動固有振動数

L:長さ、d_1:内径、d_2:外径

E:縦弾性係数、I:断面二次モーメント

γ:単位体積の重さ、A:断面積

固有振動数計算結果

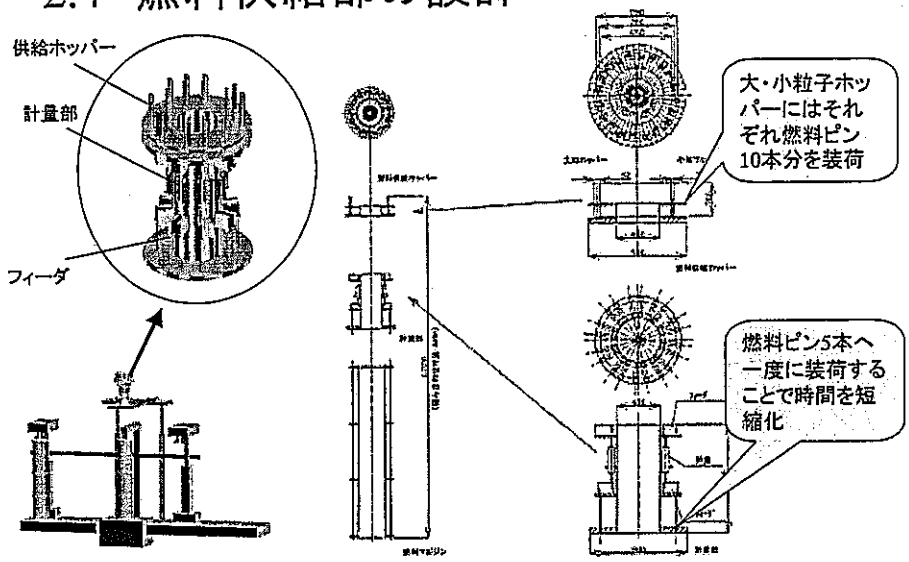
1次: 48Hz

2次: 301Hz

3次: 843Hz

振動充填周波数300Hzと共振する可能性あるが、実際には燃料ピン装荷とピン自体の固有振動数の違いにより振動充填には影響ないと考えられる

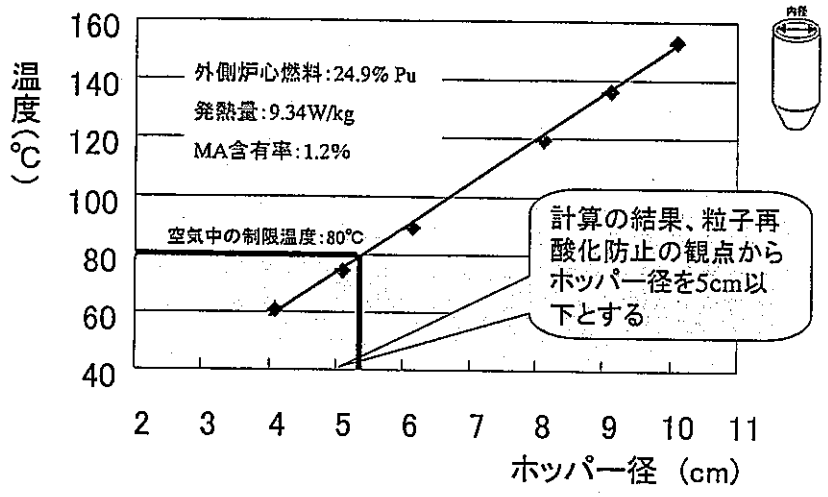
2.4 燃料供給部の設計



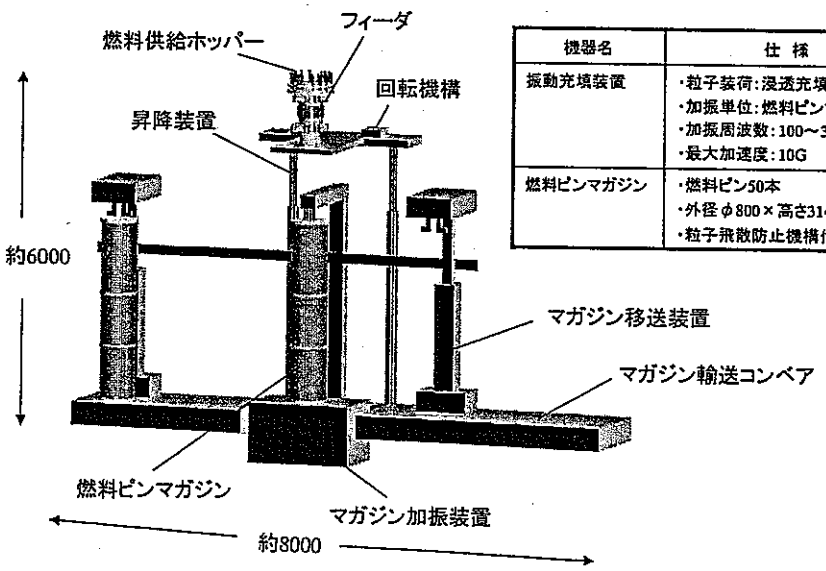
2.5 粒子取扱い容器設計の考え方

- 燃料粒子の再酸化防止（発熱の影響）
  - 粉末の取り扱い制限80℃以下（空気中）とするための容器寸法設定
- 粒子のハンドリング簡略化
  - 移送／保管用ホッパーは兼用（容器移し替え不要）

2.6 ホッパー内の発熱計算



2.7 振動充填装置の概念図

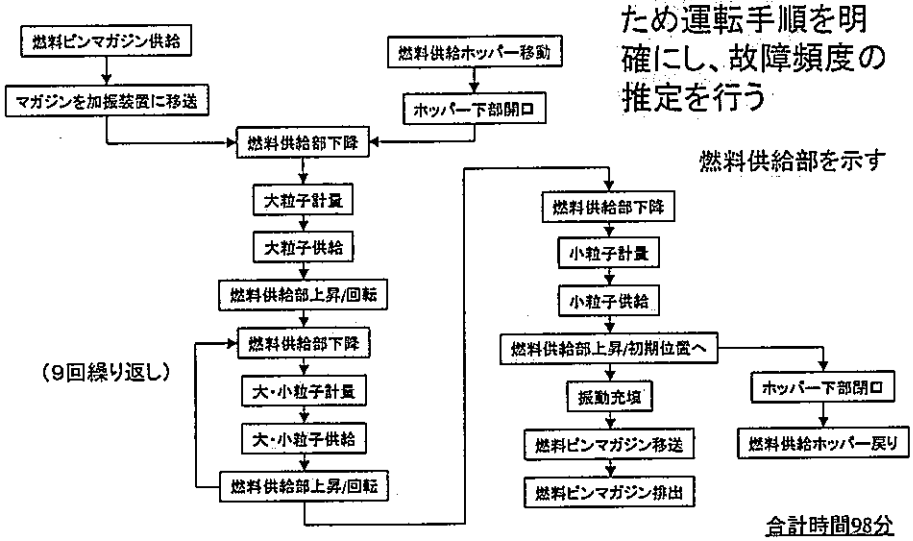


機器名	仕様
振動充填装置	・粒子装荷:浸透充填方式 ・加振単位:燃料ピンマガジン ・加振周波数:100～300Hz ・最大加速度:10G
燃料ピンマガジン	・燃料ピン50本 ・外径φ800×高さ3140 ・粒子飛散防止機構付

3. 運転フローの検討

機器信頼性検討のため運転手順を明確にし、故障頻度の推定を行う

燃料供給部を示す



合計時間98分

4.1 機器信頼性の検討

運転手順を分析した結果、最も動作回数が多いのは燃料供給部と周辺設備

（11回/マガジン計量）×（3.6マガジン/日）×2回(上昇下降）×3種（粒子）×200日＝47520回動作

セル内製造のため保守的に動作回数1万回、動作時間3千時間で故障するとした場合、燃料供給部の故障頻度4.752回/年

↓

5回/年の故障頻度とする

一般産業では
・動作回数10万回
・動作時間3万時間
で故障を見積もることが一般的

4.2 機器信頼性の検討

対象装置	故障頻度	故障要因(想定)
マガジン輸送コンベア	0.5回/年	モータ損傷
マガジン移送装置	0.5回/年	モータ損傷、ハンドリング部破損、スティック
燃料供給弁	0.5回/年	供給弁かじり
燃料供給部昇降装置	5回/年	モータ損傷
燃料供給部 計量用フィーダ 計量装置 燃料供給用フィーダ	5回/年	フィーダ詰り 計量部損傷
燃料供給部回転機構	5回/年	回転部かじり
ホッパーカセット移送装置	0.5回/年	ハンドリング部破損
加振装置	0.3回/年	加振部損傷

4.3 機器信頼性の検討

- 燃料供給部については、頻度が多いがユニット交換可能な設計により補修対応可能
- 周辺設備(昇降装置、回転機構部)についてはさらに故障モードの特定を行い、故障頻度を下げる方策を検討する
- 一般産業並みの故障頻度と出来る設計機器設計も求められる
- 今後は機器稼働率の評価の検討を行う

5.1 設備費の検討(スケールアップの影響)

現在の振動充填装置は50tHM/y規模

年間処理能力を増加(50→200tHM/y)する場合の振動充填装置の設備費に対する影響について検討した

対応①:機器容量の増大
0.8乗則:メーカ経験値

対応②:機器台数の追加
0.9倍:設計費削減など

但し、臨界上の制限から燃料ピンマガジンのピン収納本数は100本が限界

(1)設計費:10%
(2)製作費:50%
(3)検査費:10%
(4)据付費:20%
(5)一般管理費:10%

5.2 設備費の検討(算出式)

対応①:機器容量の増大
によるスケール効果
0.8乗則:メーカ経験値

対応②:機器台数の追加
0.9倍:設計費削減など

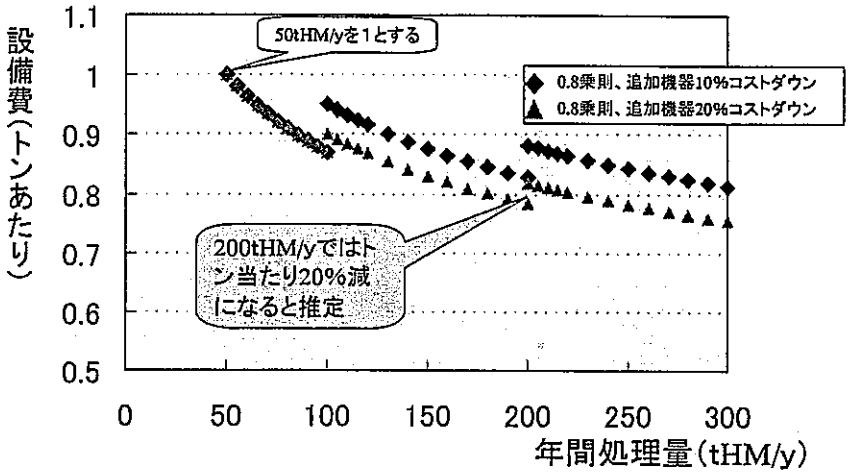
設備費(全体)=スケール効果×設計費等の削減×機器単体コスト

$$= \left(\frac{S/N}{50}\right)^{0.8} \times (0.1+0.9N) \times 1$$

年間処理能力:S、機器系列数:N

建屋費、ユーテリティ費は含めていない

5.3 設備費の検討(結果)



振動充填装置の経済性検討結果(トン当たり換算)

6. まとめ

- 低除染MA含有燃料を対象とした湿式ゲル化法による振動充填装置の概念設計例を示した。
- 機器信頼性について検討を行い、故障の発生が比較的高頻度の機器部分の特定を行った。
- 設備費の検討では、例えば200tHM/yとした場合、トンあたり約20%のコスト削減が見込まれる。

(今後の課題)

- マガジンによる同時充填の成立性確認が必要

R&D報告会第1回
2002年 4月 26日

FBRサイクルの総合的安全評価

―湿式施設のリスク分析―

システム技術開発部
FBRサイクル安全設計グループ
栗坂 健一

フェーズ2におけるリスク分析の位置づけ

燃料サイクルシステムに対する安全性の設計要求(抜粋)

確率論的安全要求
決定論的安全要求を補完する目的で、当面の要求を次のように定める。
「施設内での大規模放出事象」の発生頻度を適切に抑制する(目標値としてプラント当たり10^{-6}/年以下(暫定))とともに、本事象を想定しても、閉じ込め機能に対して非信頼度を十分低く(目標値として1/100以下(暫定))維持することを目指す。

作業要求

上述の安全要求への充足性を確認するために、以下を実施すること。
・プロセス各部における放射性物質のインベントリ、放射性物質の放出経路、関係する設備や運転員操作等の信頼性、大量の放射性物質の放出を引き起こしうるエネルギー発生要因(例えば、臨界、火災、爆発)等を考慮した安全評価及びリスク評価。

燃料サイクル施設のリスク分析

分析の目的:

●燃料サイクル施設が有する放射能放出リスクの中で、特に被害の大きなリスクの概略プロファイルを把握すること。

●これを基に、F/Sフェーズ2の開発目標を達成するための安全設計を検討し、その結果を概念設計への要求として整理すること。

実施計画

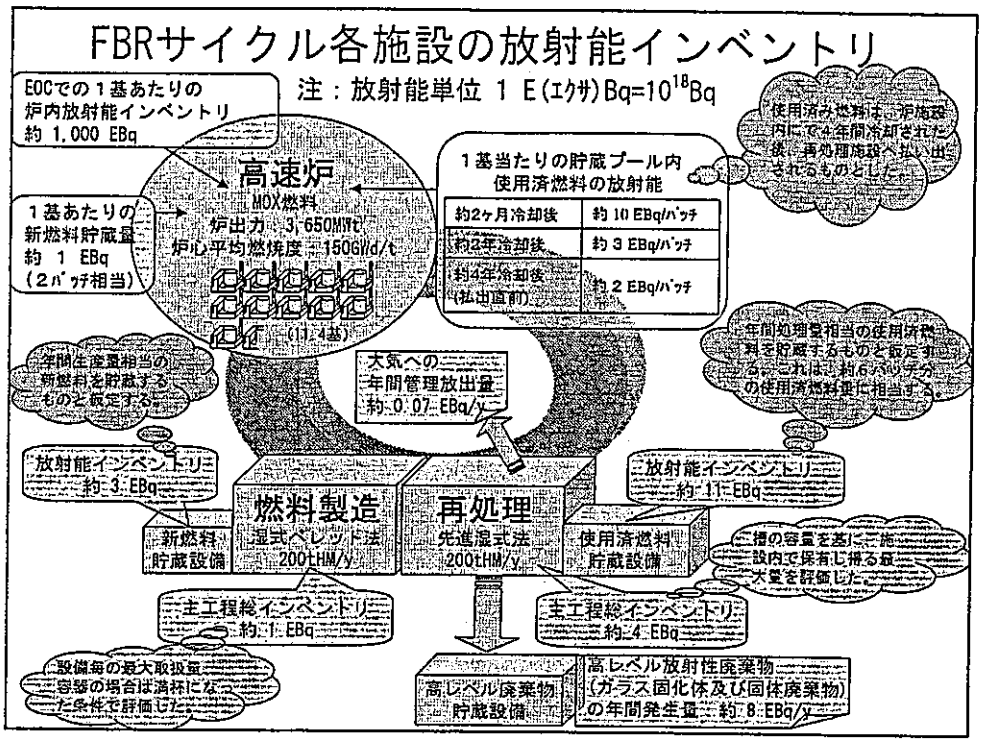
平成13年度:湿式施設(MOX燃料、処理能力:200tHM/y)
平成14年度:乾式施設(金属燃料、処理能力:50tHM/y)
放出放射能による健康影響リスクの分析・把握
平成15年度:課題整理、中間とりまとめ
平成16-17年度:課題検討、最終とりまとめ

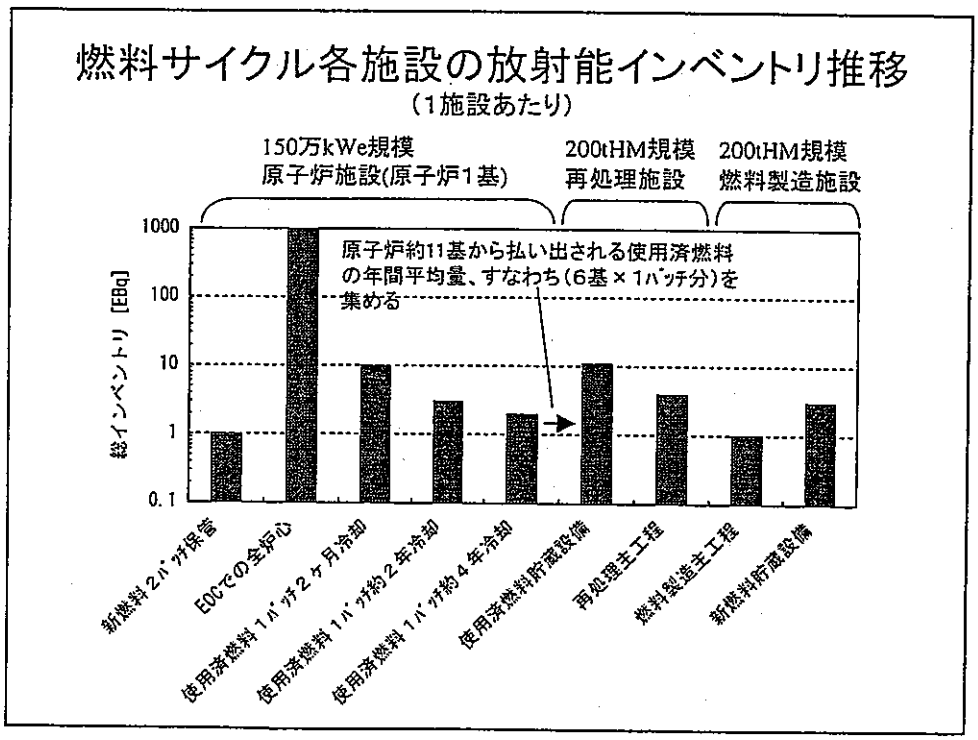
対象としたFBRサイクルシステム

FBR施設	大型ナトリウム冷却炉ツインプラント※1
※1：中央制御室、燃料取扱設備等幾つかの設備を2基の原子炉で共用。	
炉心燃料	MOX燃料
原子炉1基当たりの出力	3,650MWt（150万kWe級）
炉心平均燃焼度	150GWd/t
原子炉1基の運転サイクル	20ヶ月運転+2ヶ月定期検査（燃料交換含む）
原子炉1基の燃料交換	4バッチ
原子炉2基当たりの新燃料貯蔵設備容量	1炉心（燃料交換4バッチ）相当
原子炉2基当たりの使用済燃料貯蔵設備容量	4炉心（燃料交換16バッチ）相当

再処理施設	先進湿式リファレンスシステム（MA回収有り）
主工程の処理能力	200tHM/y
使用済燃料貯蔵設備容量	年間処理能力（約1.5炉心：燃料交換6バッチ）相当

燃料製造施設	低除染ペレット燃料製造システム
主工程の製造能力	200tHM/y
新燃料（製品集合体）貯蔵設備容量	年間製造能力（約1.5炉心：燃料交換6バッチ）相当


FBRサイクル各施設の放射能インベントリ
注：放射能単位 1 E(エクサ)Bq=10^18Bq
EOCでの1基あたりの炉内放射能インベントリ 約 1,000 EBq
高速炉
MOX燃料
炉出力 3,650MWt
炉心平均燃焼度 150GWd/t
(1/4基)
1基あたりの新燃料貯蔵量 約 1 EBq (2バッチ相当)
1基当たりの貯蔵プール内使用済燃料の放射能
約2ヶ月冷却後 約 10 EBq/バッチ
約2年冷却後 約 3 EBq/バッチ
約4年冷却後(払出直前) 約 2 EBq/バッチ
使用済み燃料は、炉施設内にて4年間冷却された後、再処理施設へ払い出されるものとした。
年間生産量相当の新燃料を貯蔵するものと仮定する。
年間処理量相当の使用済燃料を貯蔵するものと仮定する。これは、約6バッチ分の使用済燃料量に相当する。
大気への年間管理放出量 約 0.07 EBq/y
放射能インベントリ 約 3 EBq
放射能インベントリ 約 11 EBq
燃料製造
湿式ペレット法
200tHM/y
再処理
先進湿式法
200tHM/y
新燃料貯蔵設備
使用済燃料貯蔵設備
槽の容量を基に、施設内で保有し得る最大量を評価した。
主工程総インベントリ 約 1 EBq
主工程総インベントリ 約 4 EBq
設備毎の最大取扱量容器の場合は消滅になった条件で評価した。
高レベル廃棄物貯蔵設備
高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体及び固体廃棄物)の年間発生量 約 8 EBq/y


燃料サイクル各施設の放射能インベントリ推移
(1施設あたり)
150万kWe規模 原子炉施設(原子炉1基)
200tHM規模 再処理施設
200tHM規模 燃料製造施設
総インベントリ [EBq]
1000
100
10
1
0.1
原子炉約11基から払い出される使用済燃料の年間平均量、すなわち(6基×1バッチ分)を集める
新燃料2バッチ保管
EOCでの全炉心
使用済燃料1バッチ2ヶ月冷却
使用済燃料1バッチ約2年冷却
使用済燃料1バッチ約4年冷却
使用済燃料貯蔵設備
再処理主工程
燃料製造主工程
新燃料貯蔵設備

リスク分析の手順

主要工程(全141工程)を対象として以下を実施

(1)内包する放射性物質の形態を整理。核種別放射能インベントリを算定。

(2) 構成設備の故障原因・影響を検討して放射性物質の施設内放出シナリオを同定。

(3)上記シナリオについて発生原因と発生防止のための設備対策を検討。

(4)発生の原因となる主要な設備について既往研究を基に故障率、人的過誤率を設定することにより、原因事象の発生率を算定。

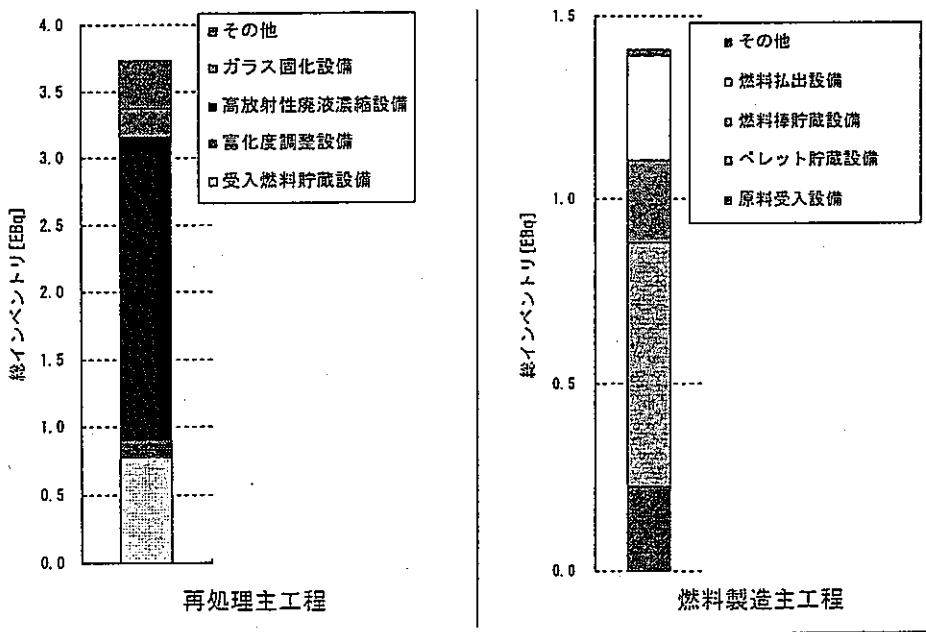
代表的なリスク源に絞って以下を実施

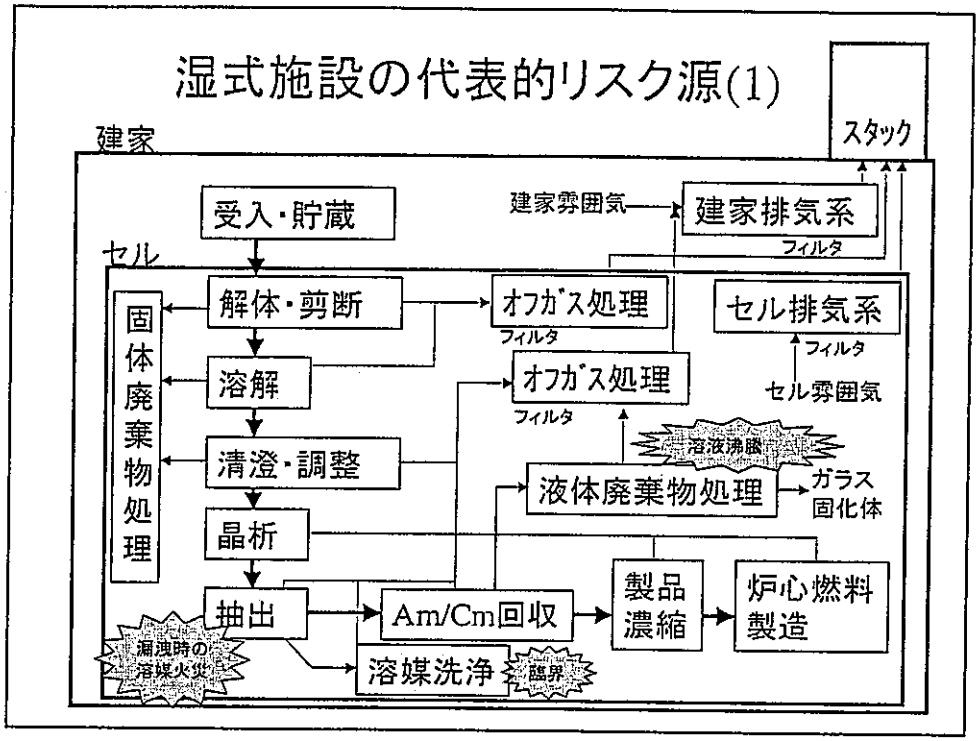
(5)放射性物質の施設内放出時の閉じ込め機能への影響を分析することにより、閉じ込め機能の成否を分岐としたイベントツリーを展開。

(6)イベントツリーで展開された施設外への放射性物質放出シーケンスについて、放射性物質の移行率や除染係数を設定。放出放射能を算定。

(7)閉じ込め機能のランダムな故障確率を設定することにより、上記イベントツリーの分岐確率を算定。上記(4) と合わせて施設外への放射能放出シーケンス発生率を算定。

再処理／燃料製造工程内放射能インベントリの積算





湿式施設の代表的リスク源(2)

大量の放射性ガスまたはエアロゾルの発生源を同定する。

(1)溶液系の沸騰による放射性エアロゾル発生
放射能が大きく、崩壊熱が相対的に高い設備を同定
→<u>液体廃棄物処理工程の高放射性廃液濃縮液貯槽での冷却機能喪失</u>

(2)溶媒火災による放射性エアロゾル発生
火災は沸騰より気相への放射性物質移行率大
放射能が大きく、可燃物質(溶媒)を有する設備を同定
→<u>抽出工程の第一抽出器からセルへの漏洩溶媒による火災</u>

(3)核分裂による短半減期核種(ガス、エアロゾル)の大量発生
燃料核種が流れる液体系の主工程では、全濃度臨界安全形状管理により臨界は防止される。
これ以外の場所で臨界事故の可能性が相対的に高い設備を同定
→<u>使用済溶媒受槽からの誤移送による溶媒洗浄工程の溶媒受槽での臨界事故</u>

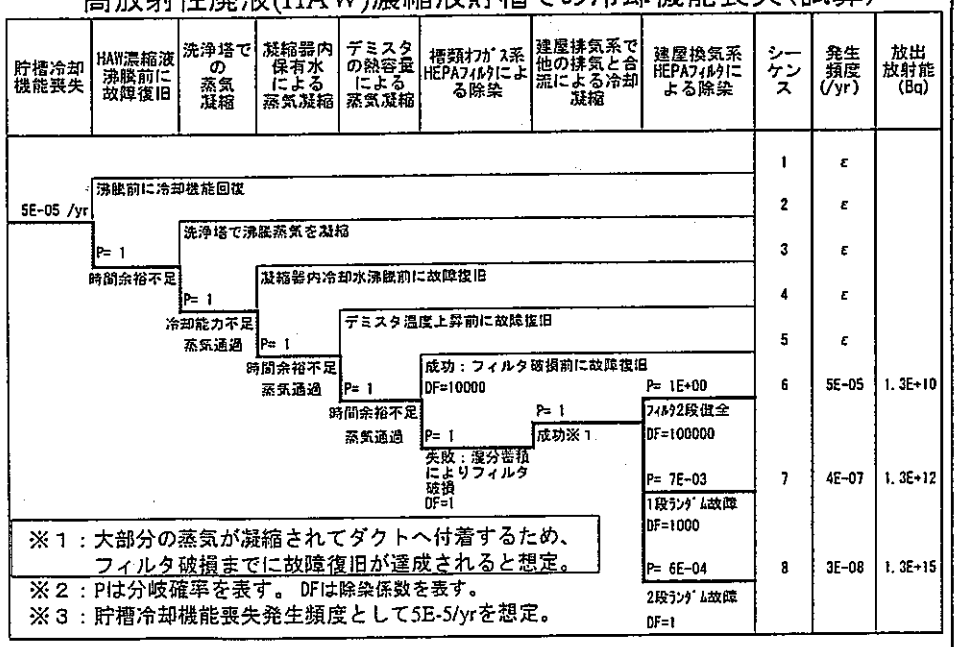
湿式施設の代表的リスク源(3)

その他の事象

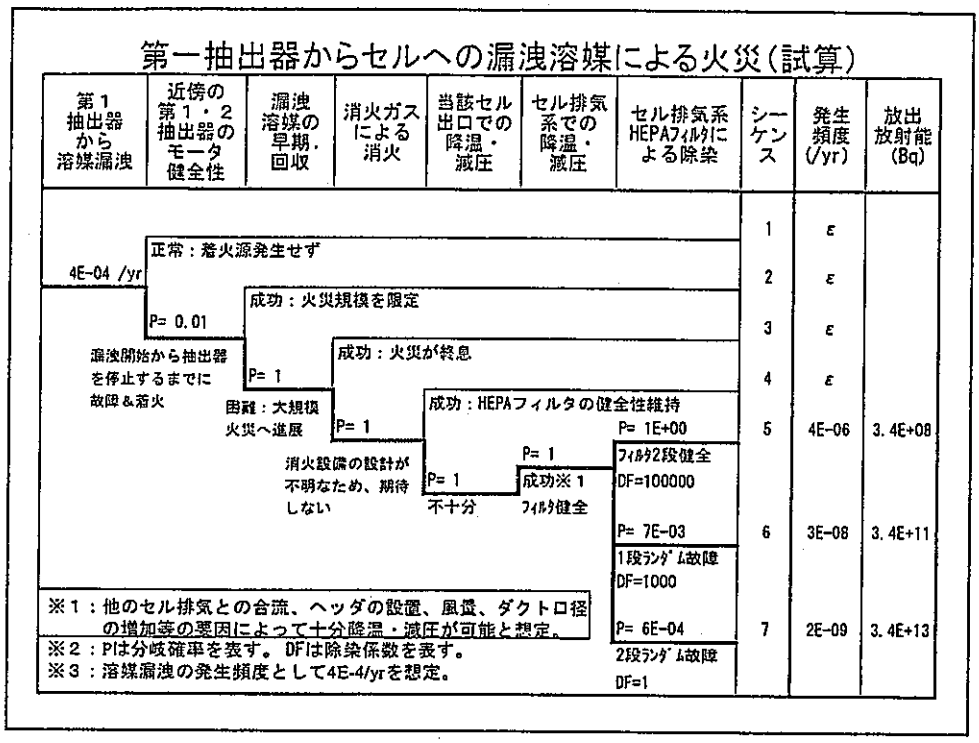
(1)溶液・溶媒系及び粉体系での爆発による放射性エアロゾル発生
圧力上昇・温度上昇による排気系への影響は火災の分析で包絡
放射性物質の気相への移行率は火災より小さく沸騰と同程度
爆発による容器の破損の影響は、溶媒の漏洩火災で包絡

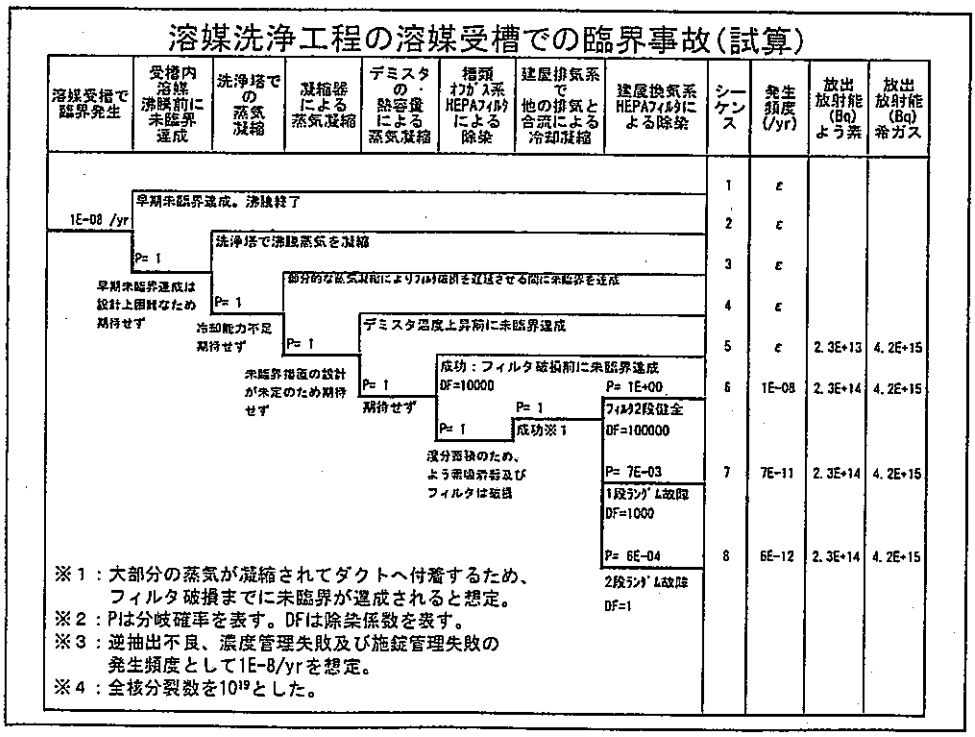
(2)固体塊(燃料集合体)系での異常
特に、使用済燃料及び新燃料貯蔵設備は、貯蔵量に応じて大量の放射能を保有するためリスク源としては重要である。
しかし、原子力発電所と燃料サイクル施設に共通のリスク源であるため、別途検討する。

高放射性廃液(HAW)濃縮液貯槽での冷却機能喪失(試算)

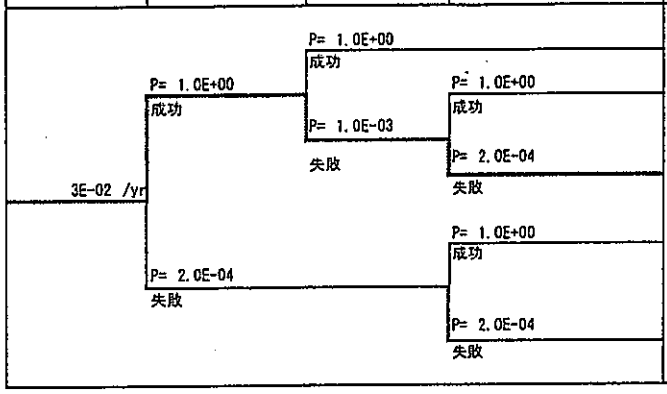


※１：大部分の蒸気が凝縮されてダクトへ付着するため、フィルタ破損までに故障復旧が達成されると想定。
※２：Pは分岐確率を表す。 DFは除染係数を表す。
※３：貯槽冷却機能喪失発生頻度として5E-5/yrを想定。


第一抽出器からセルへの漏洩溶媒による火災(試算)
第1抽出器から溶媒漏洩
近傍の第1・2抽出器のモータ健全性
漏洩溶媒の早期・回収
消火ガスによる消火
当該セル出口での降温・減圧
セル排気系での降温・減圧
セル排気系HEPAフィルタによる除染
シーケンス
発生頻度(/yr)
放出放射能(Bq)
4E-04 /yr
正常：着火源発生せず
P= 0.01
成功：火災規模を限定
漏洩開始から抽出器を停止するまでに故障＆着火
P= 1
成功：火災が終息
困難：大規模火災へ進展
P= 1
成功：HEPAフィルタの健全性維持
消火設備の設計が不明なため、期待しない
P= 1
不十分
P= 1
成功※1
フィルタ健全
P= 1E+00
フィルタ2段健全
DF=100000
P= 7E-03
1段ランダム故障
DF=1000
P= 6E-04
2段ランダム故障
DF=1
1 ε
2 ε
3 ε
4 ε
5 4E-06 3.4E+08
6 3E-08 3.4E+11
7 2E-09 3.4E+13
※1：他のセル排気との合流、ヘッダの設置、風量、ダクト口径の増加等の要因によって十分降温・減圧が可能と想定。
※2：Pは分岐確率を表す。DFは除染係数を表す。
※3：溶媒漏洩の発生頻度として4E-4/yrを想定。

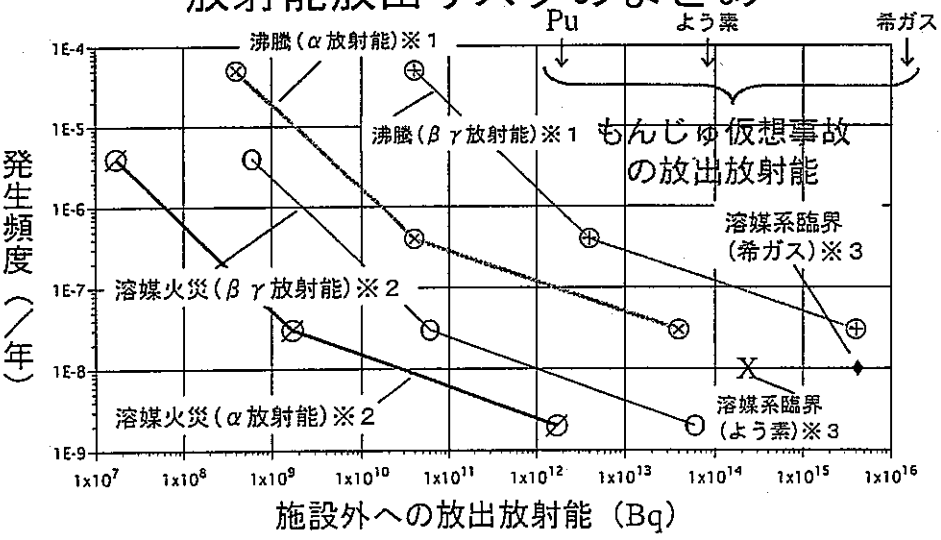

溶媒洗浄工程の溶媒受槽での臨界事故(試算)
溶媒受槽で臨界発生
受槽内溶媒沸騰前に未臨界達成
洗浄塔での蒸気凝縮
凝縮器による蒸気凝縮
デミスタの・熱容量による蒸気凝縮
槽頭オフガス系HEPAフィルタによる除染
建屋排気系で他の排気と合流による冷却凝縮
建屋換気系HEPAフィルタによる除染
シーケンス
発生頻度(/yr)
放出放射能(Bq)よう素
放出放射能(Bq)希ガス
1E-08 /yr
早期未臨界達成。沸騰終了
P= 1
洗浄塔で沸騰蒸気を凝縮
早期未臨界達成は設計上困難なため期待せず
P= 1
部分的な蒸気凝縮によりフィルタ破損を遅延させる間に未臨界を達成
冷却能力不足期待せず
P= 1
デミスタ温度上昇前に未臨界達成
未臨界形態の設計が未定のため期待せず
P= 1
期待せず
成功：フィルタ破損前に未臨界達成
DF=10000
P= 1
成功※1
P= 1
濃縮分離のため、よう素吸着剤及びフィルタは破損
P= 1E+00
フィルタ2段健全
DF=100000
P= 7E-03
1段ランダム故障
DF=1000
P= 6E-04
2段ランダム故障
DF=1
1 ε
2 ε
3 ε
4 ε
5 ε 2.3E+13 4.2E+15
6 1E-08 2.3E+14 4.2E+15
7 7E-11 2.3E+14 4.2E+15
8 6E-12 2.3E+14 4.2E+15
※1：大部分の蒸気が凝縮されてダクトへ付着するため、フィルタ破損までに未臨界が達成されると想定。
※2：Pは分岐確率を表す。DFは除染係数を表す。
※3：逆抽出不良、濃度管理失敗及び施錠管理失敗の発生頻度として1E-8/yrを想定。
※4：全核分裂数を10^19とした。

溶媒洗浄工程の溶媒受槽での臨界事故２（試算）



※１：供給逆抽出液濃度高、調整酸及びストリップ液の流量減少、同液の酸濃度低下、逆抽出器内２相混合不良
※２：２台以上の中性子検出器による異常検出を想定
※３：２人以上の運転員による警報認知及び操作を期待
※４：運転員と当直長による２重のチェックに期待、送液開始のために開錠が必要と想定
※５：Pは分岐確率を表す。
※６：必ず臨界になるという意味でない。核分裂性核種の濃度と量によっては臨界の可能性あり。

放射能放出リスクのまとめ



※１：溶液系の全槽の放射能の和をソースタームとした
※２：放射性溶媒を含む全ての抽出器の放射能の和をソースタームとした
※３：全核分裂数を10^{19}個とした。

結果のまとめ(1)

■施設外へ大量の放射能放出をもたらす事象

βγ放射能（希ガス、よう素以外）	→	溶液系での沸騰
α放射能	→	同上
希ガス	→	溶液系での臨界
よう素	→	同上

■事象発生頻度（試算値）

沸騰 ＞ 漏洩火災 ＞ 臨界

■リスク

施設外への大量の放射能放出をもたらす事象について、放出放射能量と発生頻度の関係を概略把握できた。

なお、上記発生頻度の評価精度向上のためには、事象発生時の排気系への影響（従属故障の有無）の正確な把握が必要であり、そのためには詳細設計に基づく詳細解析が必要

結果のまとめ(2)

■閉じ込め設計

(1)沸騰、(2)火災、(3)臨界による沸騰に起因する施設外への放射性物質放出リスク抑制の観点では、排気系における他セルからの排気との合流による排気の混合冷却及び圧力上昇抑制効果に十分期待できるような設計とすることが重要であり、負圧のレベルを多重（例えば、機器、セル、建屋の３重）とすることは寄与していない。

■臨界安全

臨界を防止する（その発生確率を十分低く抑える）ためには、設計のみならず、異常時における手動停止操作や濃度管理・施錠管理に表されるように人及び組織に依存するところが大きい。

運転性を低下させない範囲で、異常時対応の自動化（例：手動停止から自動停止へ）や異常時の開錠阻止インタロックの設置を検討する余地がある。

今後の予定

➢健康影響リスクの把握

被ばく線量（健康影響）評価を行うことによって、健康影響被害の大きさと発生頻度の関係を把握する。

➢設計要求への達成見通しの判断

社会に既存のリスクとの比較により、有意な増加に至るか否かを分析・判断する。

➢安全性についての設計要求の見直し

H13年度に設定した確率論的安全要求を上記リスク評価を基に、再度検討する。

➢乾式燃料サイクル施設の検討

乾式燃料サイクル施設について、同様の分析を実施し、リスク特性を把握する。

先進湿式再処理システムの設計研究成果(H13年度)

平成14年4月26日

システム技術開発部　再処理システムGr

高田　岳

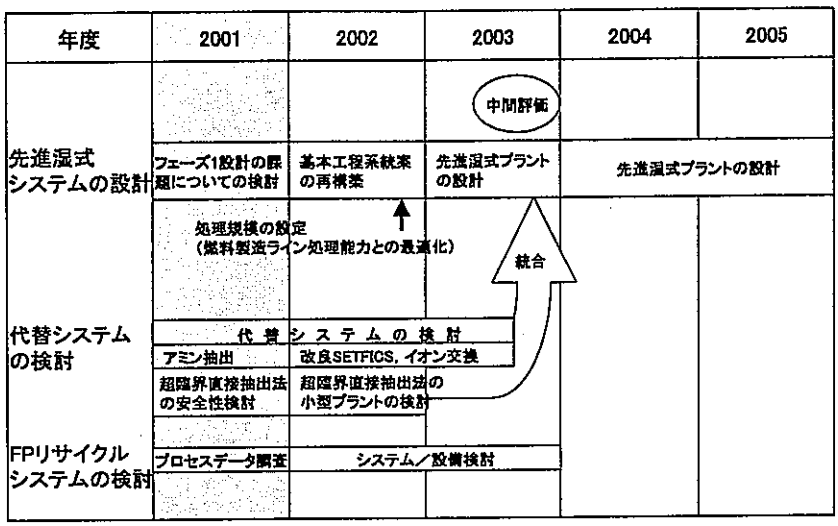
背景

○実用化戦略調査研究フェーズⅠまでの成果
- 実績あるPUREX法をベースに、晶析工程、MA回収工程を組み込んだ「先進湿式リファレンスシステム」を提案
- リファレンスシステムを代替・補完するプロセス候補として直接抽出法、アミン抽出法、改良SETFICS法等について検討
- FPリサイクル技術に関する情報収集

⇩

○フェーズⅡの目的
実用化候補概念としてあげたプロセスについて、安全性、経済性等の観点からさらに絞り込み、先進湿式システム基本案としてプラント設計を実施する。

フェーズⅡ実施スケジュール



大洗工学センター 研究開発報告会

平成13年度実施項目

○先進湿式再処理システム設計検討

・燃料組成変動の湿式システムへの影響調査

・腐食生成物の燃料製品・ガラス固化体への影響調査

・先進湿式プラント配置設計の課題整理

○代替システム/FPリサイクルシステム設計検討

・超臨界直接抽出法の安全性評価

・アミン抽出法の検討

・FPリサイクル技術のプロセスデータ収集

大洗工学センター 研究開発報告会

実施概要(燃料組成変動の影響調査)

フェーズⅠの物質収支検討:燃料組成変動なし、炉心/ブランケット燃料を平均化した値で検討

⇕

実際の運転:炉心/ブランケット燃料混合処理により燃料組成は変動し、Pu富化度調整が困難になるなどの後工程への影響が懸念される

⇓

現実的かつ後工程への影響を最小限にできる燃料処理モードの検討

大洗工学センター 研究開発報告会

処理モード検討

再処理工程の安定運転および燃料製造工程への負担軽減のため、処理モード検討にあたり
○システムを定常に運転する
○可能な限りPu富化度30%以上のU-Pu溶液として処理することを目標に処理モードを検討。

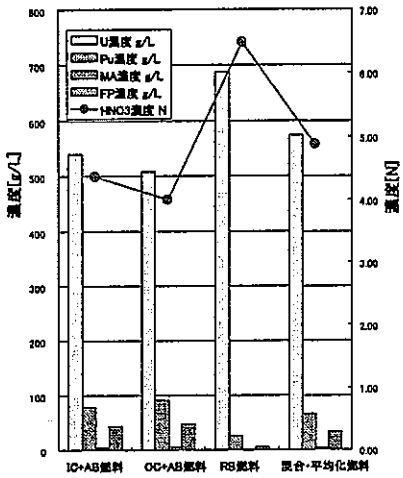
検討した処理モード

	処理モード	処理モードA		処理モードB		処理モードC		合計
		一回あたりの処理体数	処理回数	一回あたりの処理体数	処理回数	一回あたりの処理体数	処理回数	
燃料集合体	IC+AB	2	266	0	21	1	1	533
	OC+AB	1		2		0		308
	RB	1		1		2		289

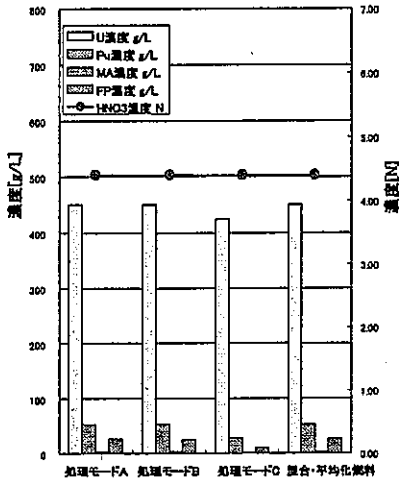
※IC+AB:内炉心燃料、OC+AB:外炉心燃料、RB:径ブランケット燃料

大洗工学センター 研究開発報告会

各燃料単独処理との比較



各燃料単独処理時の溶液組成変動



各処理モードにおける燃料溶液の組成変動

大洗工学センター 研究開発報告会

13年度成果(燃料組成変動の影響調査

○炉心・ブランケット燃料の混合処理を加味した現実的な処理モードを検討し、燃料組成変動の後工程への影響を調査した。

○外炉心:内炉心:径ブランケット=1:2:1、外炉心:径ブランケット=2:1、内炉心:径ブランケット=1:2の処理モードを組み合わせることにより燃料組成平滑化が可能なことがわかった。

○現設計で800Lとなっている調整工程の調整槽を1400Lとする他には、設備追加が必要ないことがわかった。

大洗工学センター 研究開発報告会

実施概要(腐食生成物の影響評価)

○湿式再処理システム:水相として使用される硝酸により機器が腐食され，腐食生成物(CP)が発生

○フェーズⅠで検討した先進湿式プラントでは蒸発濃縮を繰返すことによる廃液の二極化を検討中

⇩ 高放射性廃液へのCPの集約が懸念される

○先進湿式プラント概念設計をもとに各機器からのCP発生量を推定

○燃料製品およびガラス固化体への影響を評価

大洗工学センター 研究開発報告会

腐食量計算結果

腐食量の大きい機器(チタン合金製機器)

機器名称	温度 (℃)	酸濃度 (N)	接液面積 (m^2)	腐食速度 (kg/m^2 -y)	腐食量 (kg/y)
酸回収蒸発缶	135	7.9	93	2.4×10^{-1}	44.6
酸回収精留塔	135	12	78	2.4×10^{-1}	37.4
HAW蒸発缶	135	5.85	22	2.4×10^{-1}	10.6
溶解液受槽	90	5	13	2.4×10^{-1}	6.2
Pu濃縮缶	130	0.8	12	2.4×10^{-1}	5.8

チタン合金製機器から発生するCP量合計:約110kg/y

腐食量の大きい機器(ステンレス鋼製機器)

機器名称	温度 (℃)	酸濃度 (N)	接液面積 (m^2)	腐食速度 (kg/m^2 -y)	腐食量 (kg/y)
VLAW蒸発缶	135	0.055	105	2.6×10^{-1}	57.6
LAW蒸発缶	135	0.1	76	2.6×10^{-1}	40.3
調整液受槽	50	5	53	3.7×10^{-1}	39.4
U/Pu溶液供給槽	40	0.8	185	9.6×10^{-2}	35.5
清澄液受槽	50	5	45	3.7×10^{-1}	33.8

ステンレス鋼製機器から発生するCP量合計:約560kg/y

大洗工学センター 研究開発報告会

製品およびガラス固化体への移行量

製品への移行量

元素		炉心燃料	ブランケット燃料	高除染燃料製品の仕様
CP	Fe	400	36	≦1600
	Cr	100	9.1	≦500
	Ni	50	4.6	≦500
	他(Mo等)	17	1.5	
	Ti	78	-	
CP合計		645	51	
FP合計		85	540	
合計		730	590	≦4000

単位:ppm

ガラス固化体への移行量

	CP考慮無		CP考慮有		TVFの仕様
	MA回収有	MA回収無	MA回収有	MA回収無	
ガラス成分	84.6%	84.2%	84.3%	83.9%	75%
Na_2O	10%	10%	10%	10%	10%
FP	5.4%	5.4%	5.4%	5.4%	8.9%
MA	0.005%	0.4%	0.005%	0.4%	5.1% (MA+CP)
CP	-	-	0.3%	0.3%	
発生量(キャニスタ換算、400kg/本)	440本/y	440本/y	442本/y (0.5%増)	442本/y (0.5%増)	

※ガラス固化体組成に関する制限

・ガラスの性状維持のためNa_2O含有率は10%

・発熱量が2.3kW/本以下となるようFP含有率を制限

大洗工学センター 研究開発報告会

13年度成果(腐食生成物の影響調査)

○フェーズⅠで検討した先進湿式再処理プラント(処理能力200 tHM/y)について腐食生成物(CP)発生量を推定，製品およびガラス固化体への影響を評価した。

○Ti合金製機器からのCP発生量は約110kg/y，ステンレス鋼製機器からのCP発生量は約560kg/yであった。

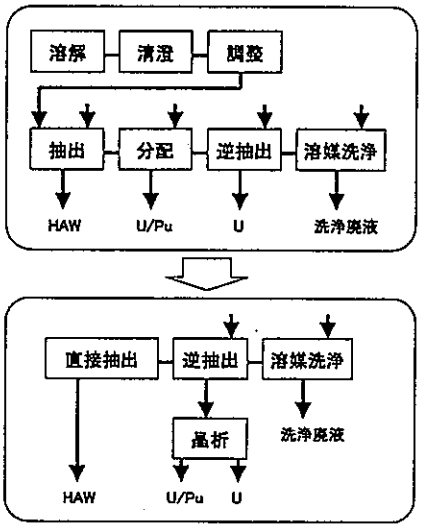
○算出された製品中のCP量は高除染燃料ペレットの金属不純物含有量の仕様を満足した。

○CPの混入を考慮したガラス固化体の増加は0.5%程度にとどまった。

○主要機器から発生するCPにより製品およびガラス固化体に悪影響を生じないことがわかった。

大洗工学センター 研究開発報告会

実施概要(超臨界直接抽出法)



特徴

○TBP/硝酸を含む超臨界CO2で燃料粉から直接U, Puを抽出する

○FP等はスラリ状で回収

○操作条件
圧力:12～18MPa, 温度:40～60°C

平成13年度実施項目
超臨界圧力が及ぶ範囲について、

○設計基準事象候補の選定

○安全対策の立案、課題点の摘出

大洗工学センター 研究開発報告会

設計基準事象の候補選定

設計基準事象:施設設計の基本方針に多重防護の考え方が適切に反映されていることを確認する目的で、その発生可能性に関連した各種安全設計の妥当性を確認するため選定される事象

物質の出入り、エネルギーの出入りおよび位置の変化に関する変動項目

変動項目の大分類	変動項目の小分類
工程内の液体及び固体に係る異常な変化	流量の変化 核燃料物質濃度の変動 核分裂生成物濃度の変動 試薬濃度の変動 保有量の変動 移送経路の変化、固体位置の変化
工程内の気体に係る異常な変化	流量(又は圧力)の変動 組成の変動 流路の変化
工程内の温度の異常な変化	加熱能力の変動 冷却能力の変動
換気設備での異常な変化	換気風量の変動 換気流路の変化
外部電源喪失	外部電源喪失

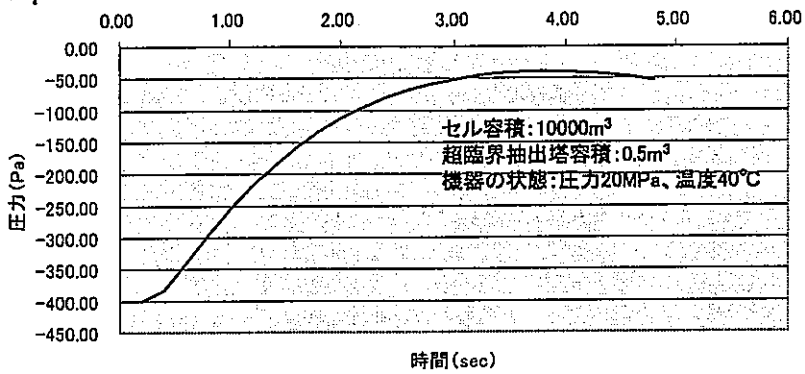
超臨界直接抽出法について左記変動項目を検討の結果、特に重要な事象として
○超臨界圧力機器からの漏洩

○TBP等錯体の急激な分解反応

があげられた。

大洗工学センター 研究開発報告会

安全対策・課題摘出(閉じ込め)



超臨界圧力機器集約設置セルにおける漏洩事象発生後の圧力変動

○セル負圧が400Pa(40mmAq)程度であれば負圧維持可能。
ただし、ブロア容量等、排気能力については検討が必要。

大洗工学センター 研究開発報告会

13年度成果(超臨界直接抽出法)

○超臨界直接抽出法を採用したプラントの安全性について、設計基準事象の候補を選定し、これに対する安全対策立案および課題点の摘出を実施。

○閉じ込めについては超臨界圧力の及ぶ範囲について通常時のセル負圧を-40mmAqとすることにより異常漏洩が発生してもセル内の負圧を維持できることを確認した。ただし、排気能力については検討が必要。

○火災、爆発については異常時に生成すると思われる可燃性ガスはすべて爆発限界に達しない。また、生成するオイルについても爆発組成を有するものはない。ただし、加圧化での実証データはなく、確認の必要有り。

大洗工学センター 研究開発報告会

実施概要(アミン抽出)

○トリオクチルアミン(TOA、$(C_8H_{17})_3N$)を使用した溶媒(フェーズⅠで選定)では4価のAm、Cmが還元され、抽出性が維持できない

↓

○TOAと同じくアミン系の抽出剤であるジオクチルアミン(DOA、$(C_8H_{17})_2NH$)、4価のAm、Cmの安定剤としてリンタングステン酸(PW、$H_{10}P_2W_{17}O_{61}$)を使用した溶媒を用いた系について検討

※溶媒の組成:10%DOA、60%n-ドデカン、30%イソオクチルアルコール、115g/Lリンタングステン酸

大洗工学センター 研究開発報告会

プロセス適用性検討

各抽出条件におけるU,Pu,MA(Am,Cm)の抽出性マトリックス

硝酸濃度	約0.5M			3~6M		
対象元素	U	Pu	Am,Cm	U	Pu	Am,Cm
TBP	×	×	×	○	○	×
TBP+DOA	×	×	×	○	◎	×
TBP+DOA+PW	×	○	○	○	×	×

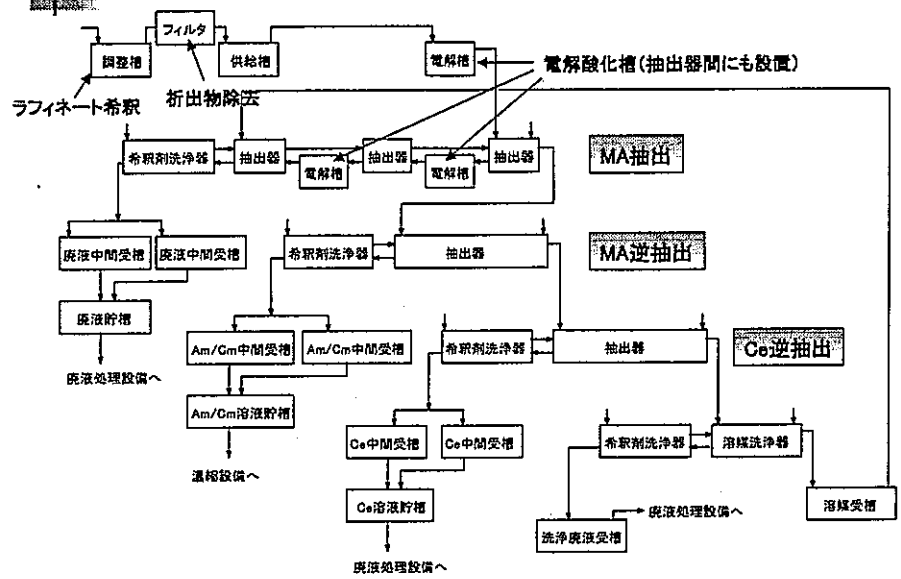
U/TRUを一括して共抽出する条件はなく、プロセスとしては従来同様主工程への追加プロセスとしてのMA回収工程を考える。

DOA+PW系における MAおよびCeの抽出・逆抽出特性

硝酸濃度	1M(MA抽出)		2M(MA逆抽出)		6M(Ce逆抽出)
対象元素	Am,Cm	Ce	Am,Cm	Ce	Ce
分配係数	20	10	0.002	2	0.2

大洗工学センター 研究開発報告会

アミン抽出法によるMA回収工程



大洗工学センター 研究開発報告会

13年度成果(アミン抽出)

○MA回収に適したアミン抽出剤としてフェーズⅠのTOAからDOAへの変更を行った。

○アミン抽出ではU/TRUの共抽出条件はなく、従来どおり主工程への追加プロセスとして適用する。

○プロセス検討の結果、SETFICS法に比べて抽出器数が大幅に削減される。

○リンタングステン酸は有機相の成分として振舞うことがわかり、廃棄物への影響は当初の見込みより小さい。

大洗工学センター 研究開発報告会

平成14年度の検討項目

○先進湿式再処理システム設計検討
・主工程系統基本案作成

○代替システム/FPリサイクルシステム設計検討
・直接抽出小型プラントの設計検討

・TRU回収（イオン交換、改良SETFICS）の検討

・FPリサイクルシステムのプロセス検討

大洗工学センター 研究開発報告会

JNC TN9440 2002-004

バーチャルリアリティ技術を用いた乾式再処理設計支援システムの開発

2002年4月26日

システム部再処理グループ　米澤　重晃　　津坂　康和

背景

ＦＢＲサイクルの実用化戦略調査研究において、再処理システムの候補概念の１つとして乾式再処理の概念設計研究を実施中。

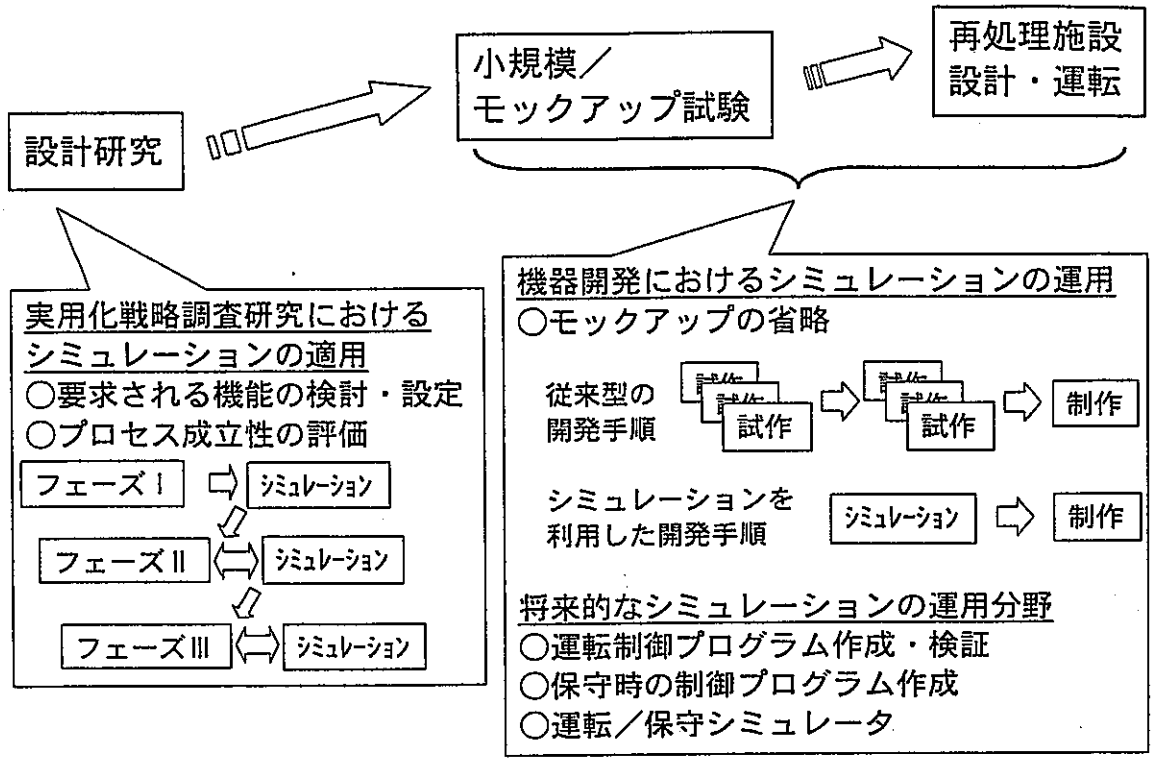
乾式再処理はバッチ処理を基本とし、マテリアルハンドリングが重要。

物流や機器動作の検討において、従来型の開発手法では開発資源が大。

目的

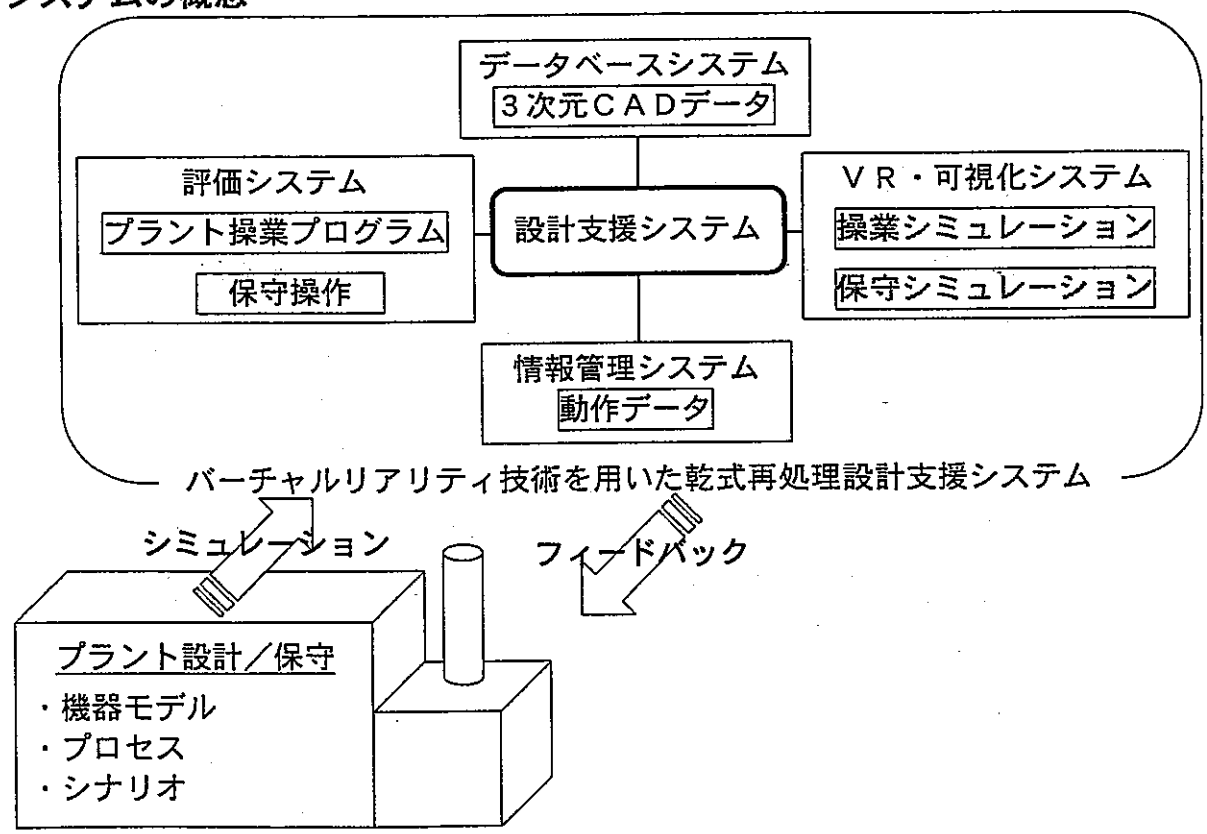
設計の各段階において、運転・保守をシミュレーションにより検討・評価し、フィードバックすることで、開発の効率化を図る。

工程 / 項目	フェーズⅠ 1999.7～2001.3	フェーズⅡ 2001.4～2006.3
再処理システム設計研究	概念設計検討	概念設計（設計の詳細化）
設計支援システム開発	システム構成検討 予備シミュレーション	操業シミュレーション



コンピュータシミュレーションによる設計支援スキーム

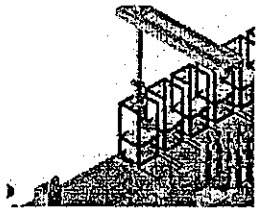
システムの概念



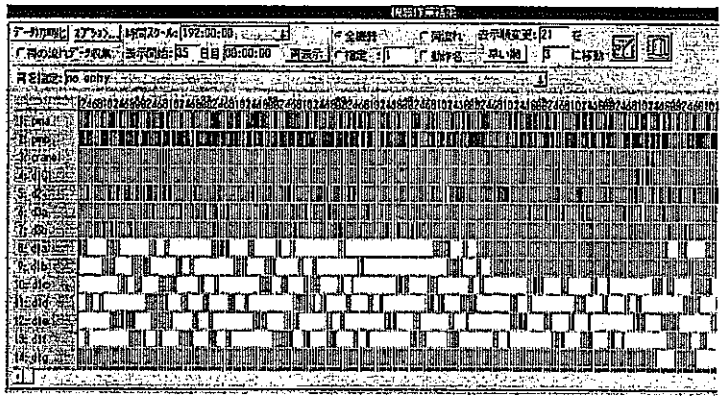
シミュレーションによる再処理システムの評価

<u>シミュレーション結果</u>

・稼働状況（３Ｄ画像）



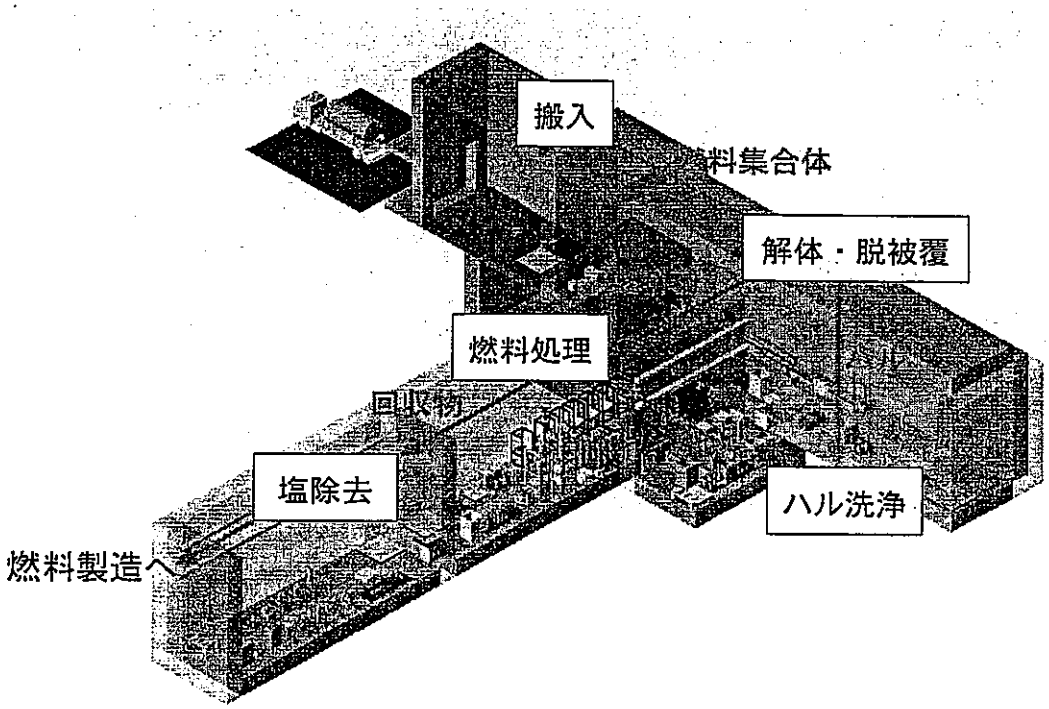
・機器の稼働状況／稼働率



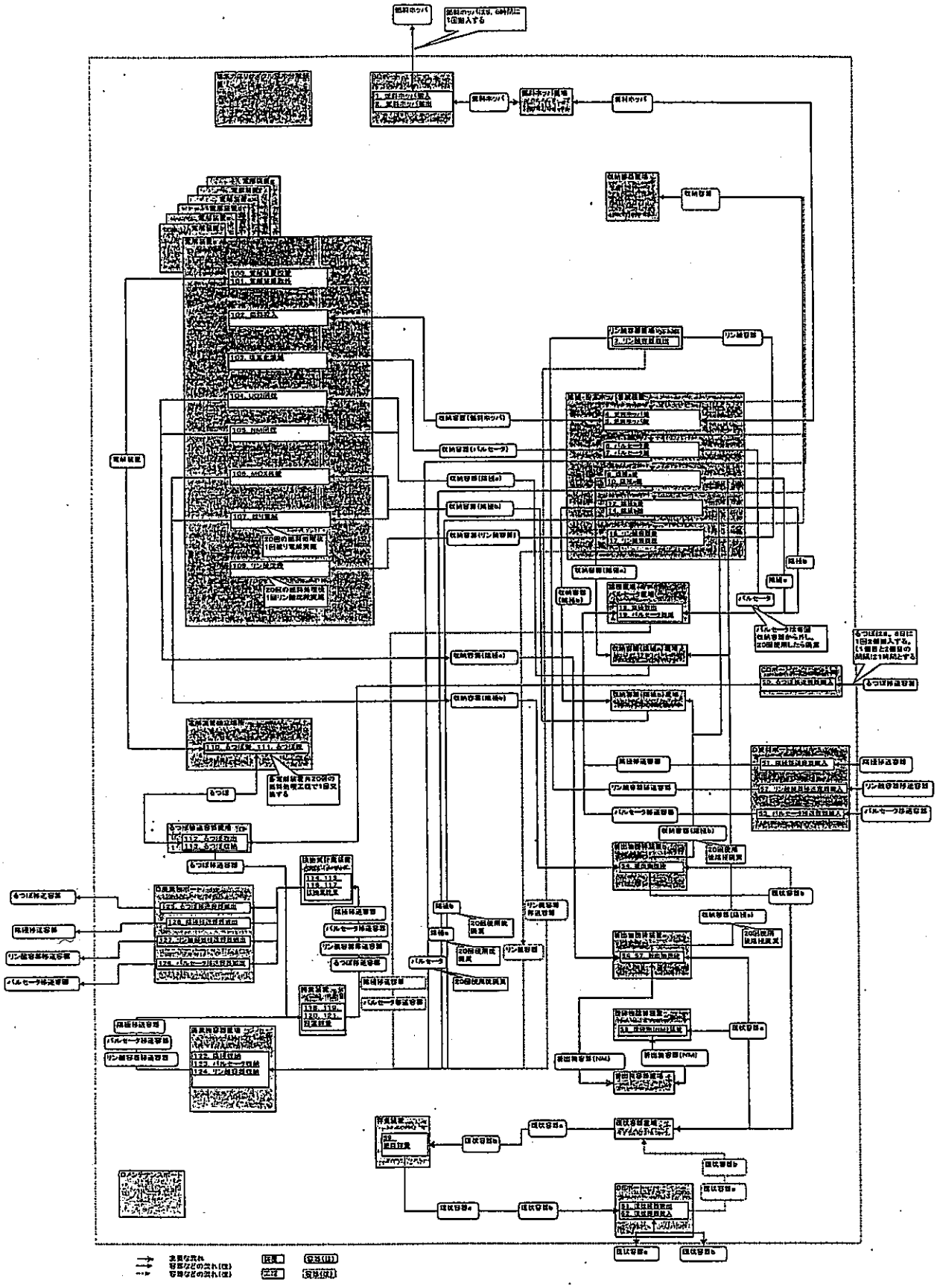
<u>設計評価</u>

・作業性／視認性
・治具，作業スペース
・作業用ロボットの機能
・処理能力
・システムの冗長性
・プラントレイアウト
・運転プログラム、等

再処理プラントの操業シミュレーション

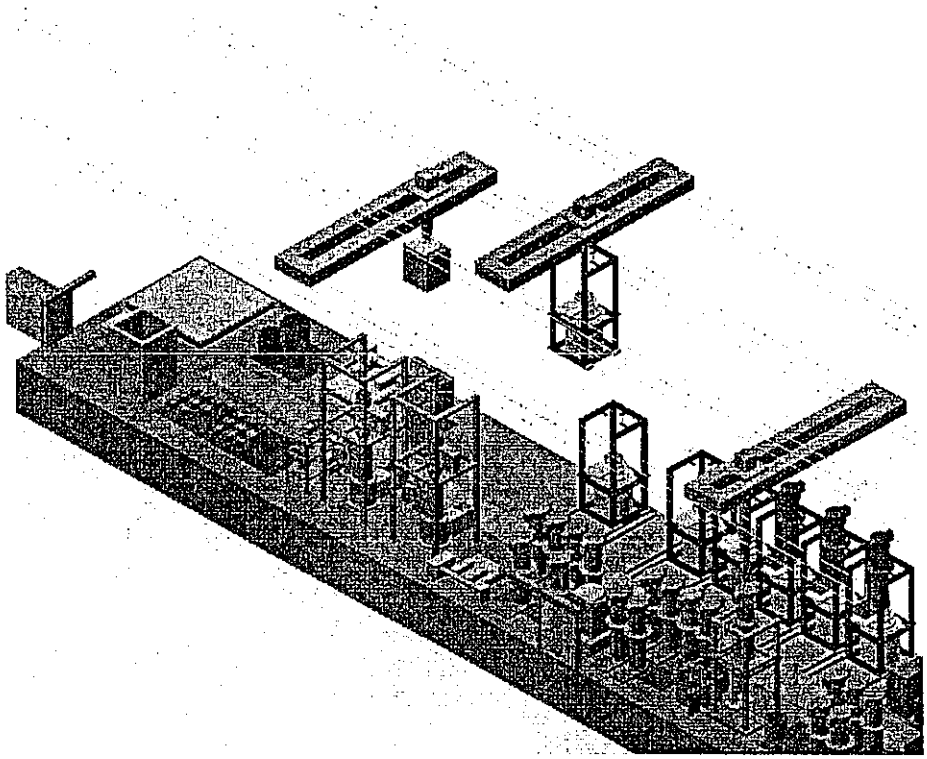


プラント概要；50ｔＨＭ/ｙの処理能力を有する再処理プラントを想定



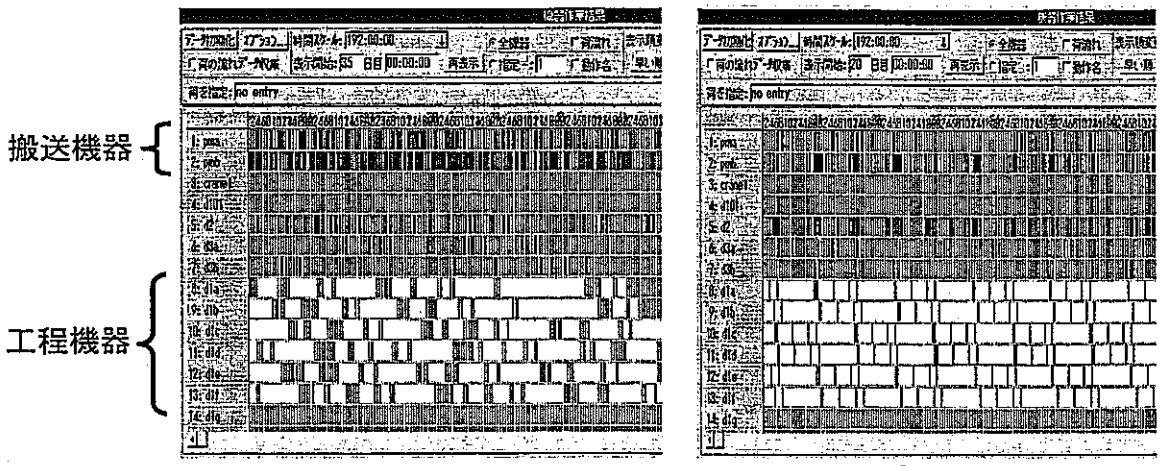
図？？ ブロックフロー(酸化物電解法 燃料処理工程)

操業シミュレーション映像（約３分）



操業シミュレーションによる評価例１

燃料処理工程における機器稼働状況



リファレンス
（搬送機器位置決め時間１０分）

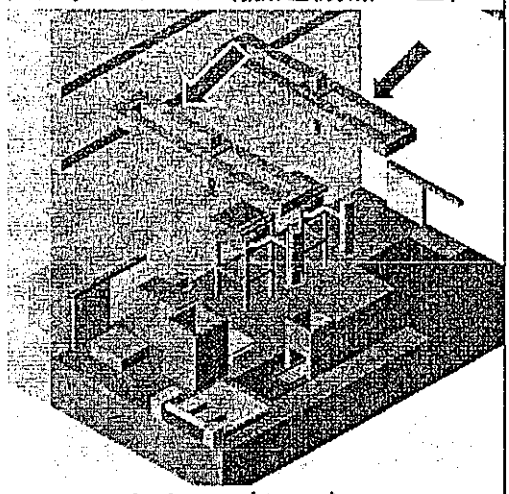
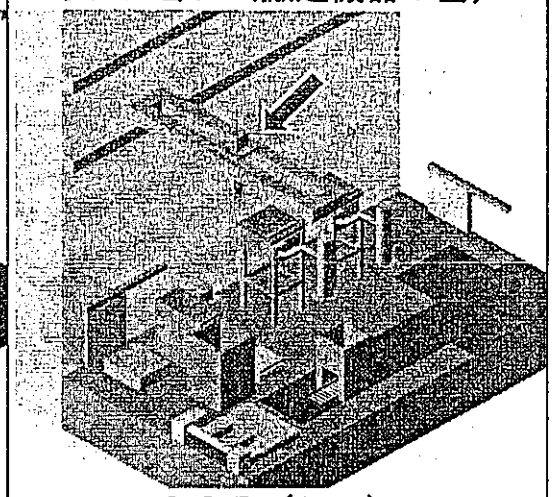
オプション
（搬送機器位置決め時間０分）

結果；リファレンスは工程機器の稼働率が低い。→工程処理能力が低い。

搬送機器の位置決め時間が、工程の処理能力に影響を与える。

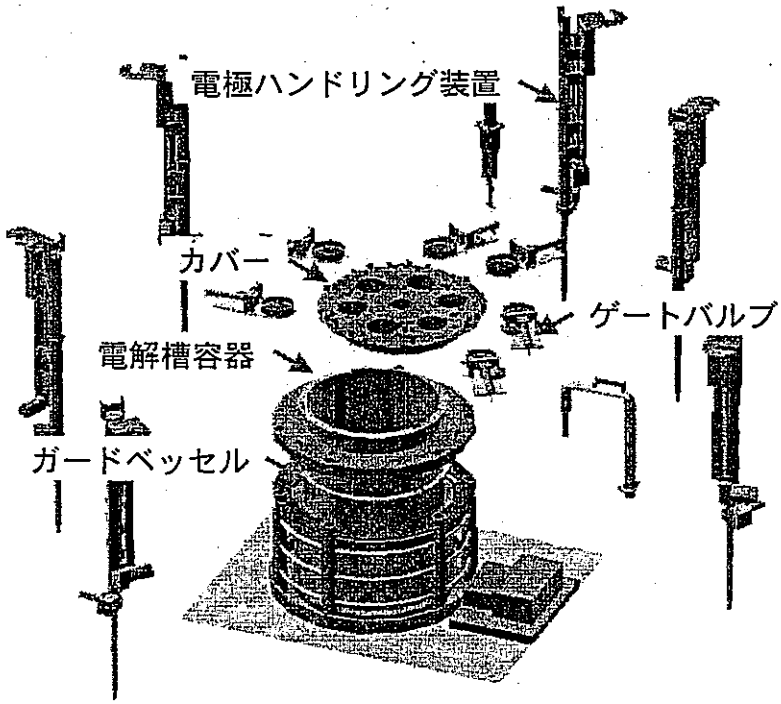
操業シミュレーションによる評価例２

ハル洗浄における搬送機器数が工程時間に与える影響

	リファレンス（搬送機器２基）	オプション（搬送機器１基）
１サイクルの所要時間	 ２６４（ｈｒ）	 ２６５（ｈｒ）

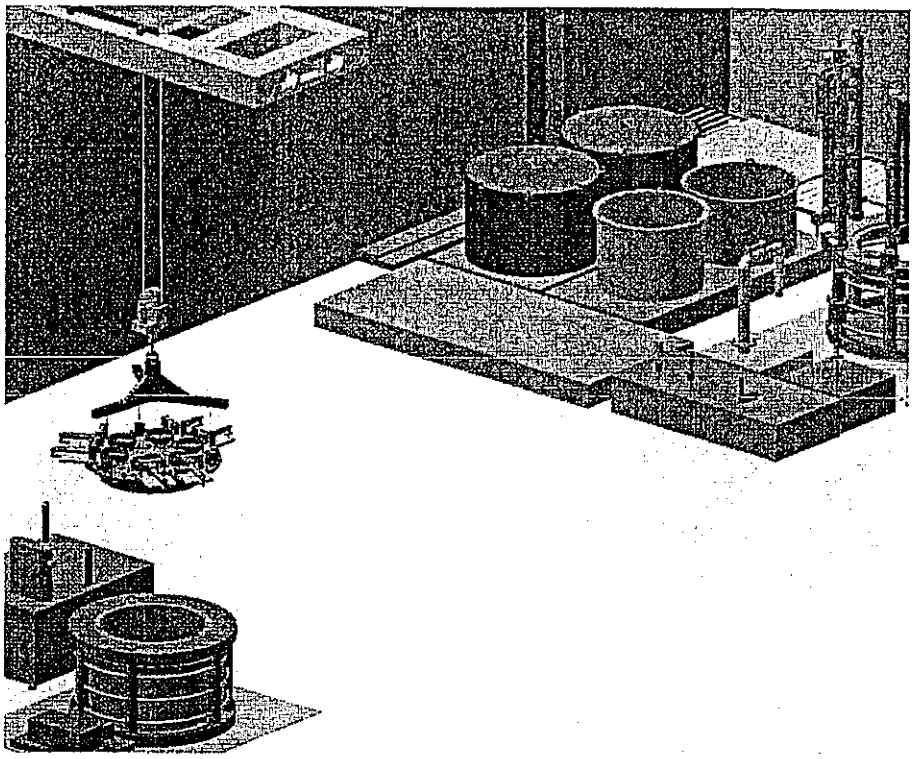
結果；ハル洗浄では、搬送機器数を減らしても、処理能力に与える影響は小さい。

保守シミュレーション



装置概要；米国アルゴンヌ国立研究所の電解装置を参考に設計

保守シミュレーション映像（約４分）



まとめ

○３Ｄ可視化により、再処理プラントの操業状態や保守作業についての、具体的イメージをつかむことができるようになり、システム設計における問題の顕在化が可能になることが示された。

○評価システムは、システム設計の最適化に資することが示された。

○データベースシステムおよび情報管理システムを利用して、設計変更に柔軟に対応できることが確認された。

今後の予定

◎設計の進捗にあわせて適宜操業シミュレーションを行い、評価結果を設計に反映する。

◎既存設備の保守作業データを用い、シミュレーション手法の妥当性を検討する。

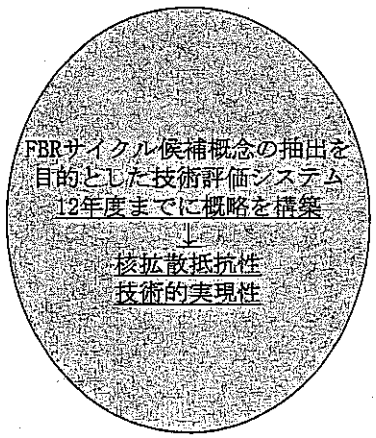
(29) 多面的評価指標の検討
-他電源との比較、社会的受容性-

内容
・Phase- I までの検討結果の概要
(FRサイクル候補技術間比較評価、試評価実施)
↓
・他電源とFRサイクルの比較評価に拡張
→基幹電源システムとしての競合システムとの比較
→小型炉用途に対応した競合システムとの比較
☆社会的受容性の観点からの評価を検討
→社会的受容性を定める因子分析の実施

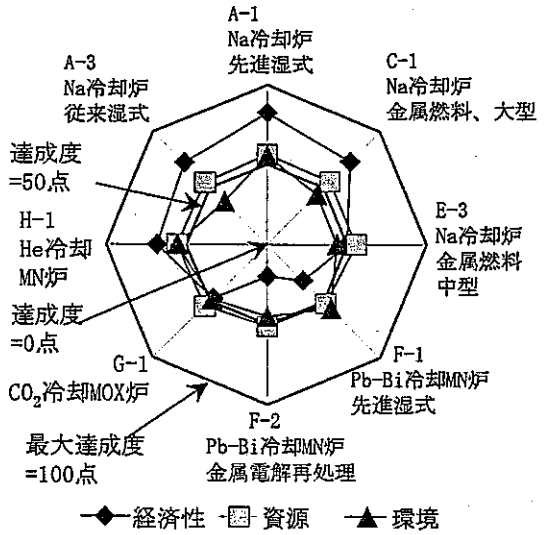
システム技術開発部 FBRサイクル解析Gr. 篠田 佳彦

Phase- I までの検討結果の概要

(FRサイクル候補技術間比較評価、試評価実施) →精緻化



多属性効用分析、
階層分析法の活用



Phase-Ⅱに向けての検討結果の概要

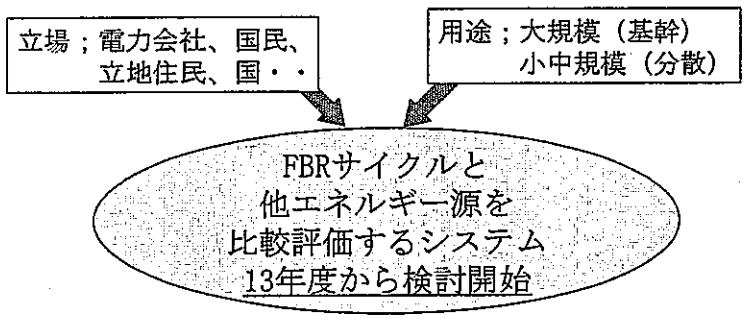
他電源とFRサイクルの比較評価に拡張

→基幹電源システムとしての競合システムとの比較

→小型炉用途に対応した競合システムとの比較

☆社会的受容性の観点からの評価を検討

→社会的受容性を定める因子分析の実施



競合発電システムの規模

①大規模：50～100GWe（100万kW級発電所50～100基を～200年間稼働と想定）

→資源量、供給能力も評価（発電容量、累積量の指定）

競合システム	主たる想定システム
1．LNG火力	ガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）
2．石炭火力	石炭ガス化複合発電（IGCC）
3．軽水炉	ABWR、APWR（次世代型炉型も視野に入れる）

②小中規模：50～200MWe（現在開発対象としている小型炉を想定）5万kWe～20万kWe規模

→用途　①僻地・離島での利用

②地域熱源、または地域電源として利用（電力網活用分散電源）

③工場等での大規模産業用自家発利用

→次年度以降（発展途上国導入、淡水化など）

競合システム	燃料	用途
ガスタービン発電機	天然ガスまたは重油	離島・僻地　産業用自家発利用
風力発電	—	地域電源供給用　離島・僻地
燃料電池	天然ガス	産業用自家発利用
廃棄物発電	廃棄物	地域電源供給用

評価指標の拡張（高速炉間から他電源間比較へ）

	評価対象をFBRに限定	評価対象を全電源に拡張	
評価視点	12年度	13年度	備考
経済性	FBRの発電原価(耐用年平均)	初期投資なども別に考慮?	耐用年平均での発電原価には、初期投資額も含まれている
資源有効利用性	ウラン資源のみ	全発電に寄与する資源を全般的に扱う	資源の存続性、価値、備蓄性などを検討
環境負荷低減性	放射性廃棄物のみに着目	化学物質(CO2なども含む) やその他の環境阻害因子をライフサイクルで考慮	原料、材料供給から廃止時までを全般的に考慮
核拡散抵抗性	定性的評価	原子力以外では、関係のない項目。類似の副作用的損失も考慮	リスクを増大する因子を分析
安全性	基準達成の判断	ある程度の定量評価が必要	PSAなどの実施?
技術的実現性	開発投資、リスクなど	完成されたシステム、これからも性能向上があるシステムなどを区別	潜在能力とそれを引き出すために必要な投資とリスク、期間
社会的受容性	定性的評価	社会の意向を考慮し、社会が望むエネルギー源,受け入れの容易性など	

他電源間比較の評価指標

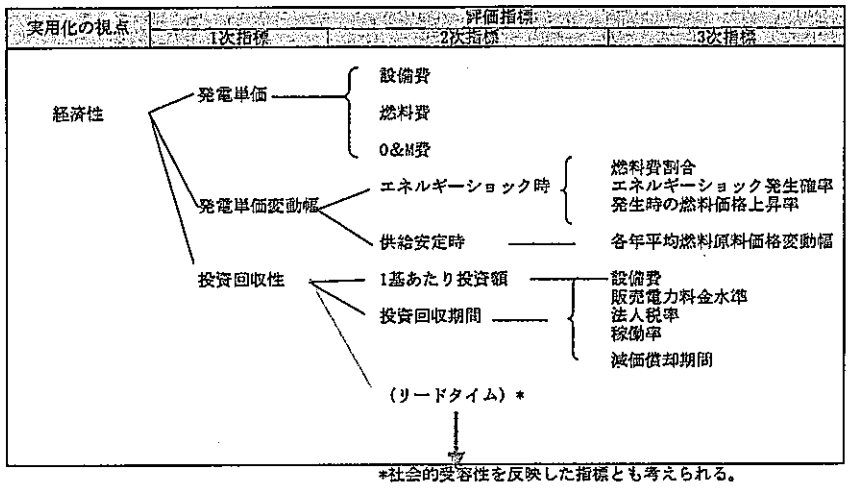
- 経済性；発電原価、投資回収期間、燃料費変動
- 持続可能性
  - 資源；必要量/埋蔵量、用途、備蓄性
  - 環境；放射性・化学的有害排出物、CO_2
    大気・生態系等への影響、景観
  - 社会不安；核拡散、エネルギー安全保障
- 安全性；リスクの対比（死亡、障害発生率）
- 簡便性、品質
- 社会的受容性；安全と安心（心理的、個人差）
  有益性（ニーズ・恩恵）
- 技術的可能性；性能向上見通し

→

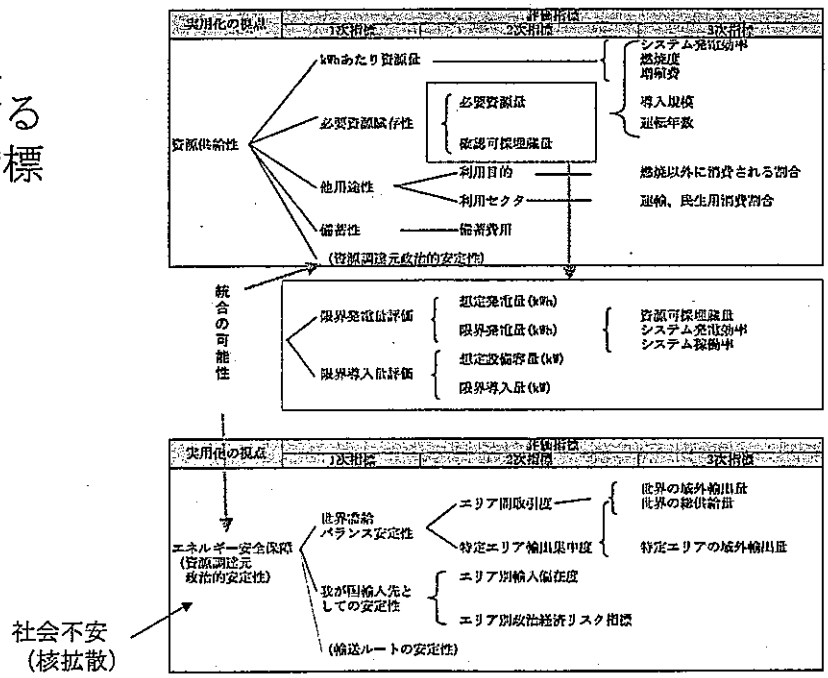
それぞれの価値（恩恵、損失）を効用（0～1）として評価し、重みをかけ合わせた和で比較

価値は、目標（要求）に対する達成度で決まる

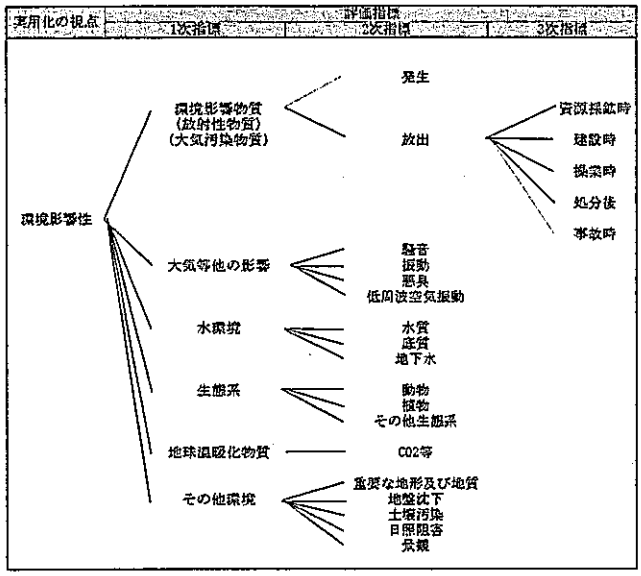
経済性に関する評価指標



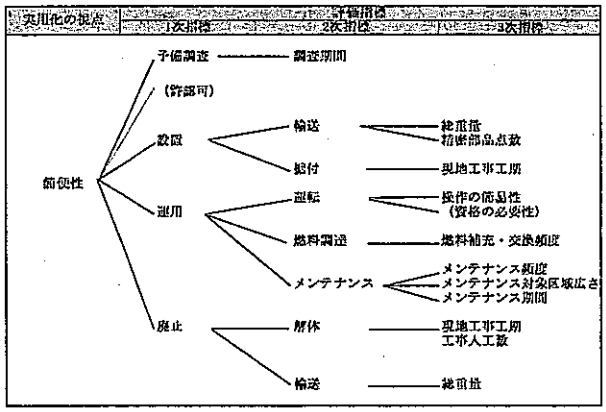
資源性に関する評価指標

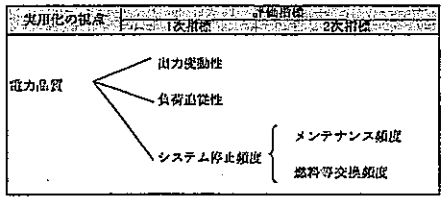


環境影響性に関する評価指標



小型炉評価に特徴的な評価指標





社会的受容性に影響を及ぼす因子分析

個人、地域的恩恵
雇用、経済波及など

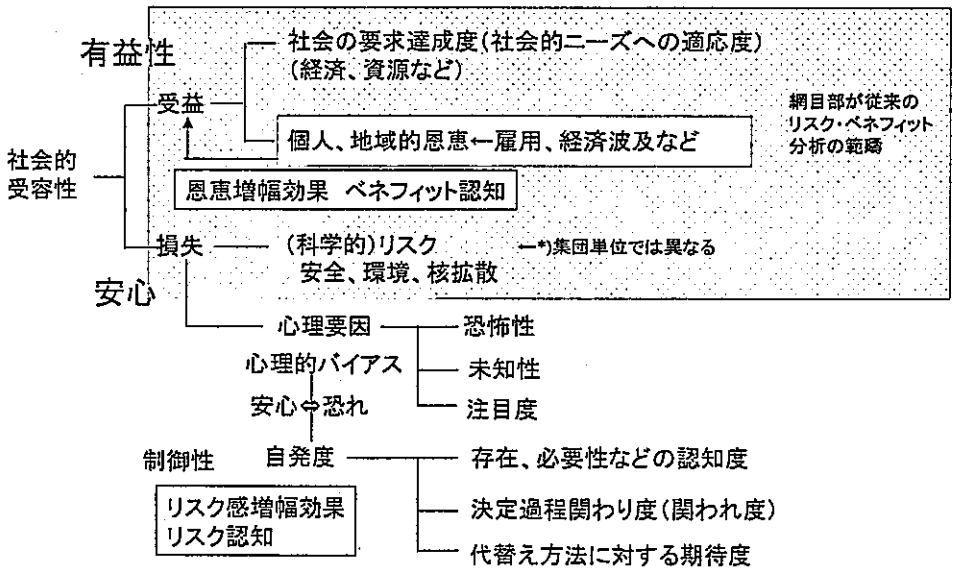
心理的リスク増幅要因

社会的受容性評価構造

指標1	指標2	指標3	さらに下位指標（一例比較の際の視点）
発電所資源	発電による生成資源	蒸気	利用温度、利用可能時間
		温排水	利用温度、利用可能時間
		石炭	生成量
		石油原	生成量
		LNG冷熱	利用温度、利用可能時間
		放射線	線量、利用可能時間
	発電施設や空間資源	建設用鉄道	(有無)
		港湾	(有無)
		廃棄残土	生成量
		敷地空間	面積
	ソフト資源	雇用	地元利用者数
		関連産業育成	地元経済波及効果
		技術や技能	(評価者によって有効な技術や技能であるか)
		人材活用	(評価者によって有効に活用し得るかどうか)

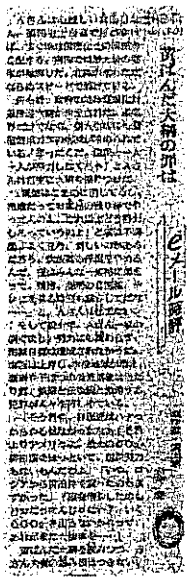
指標1	指標2	指標3	さらに下位指標（一例比較の際の視点）
心理的バイアス低減性	恐怖性	大災害の可能性	1事故あたりの最大被害面積
		個人による制御可能性	リスクに対する個人の意思の影響力 リスクに対する個人の能力の影響力
		暴露任意性	同一便益を得る代替手段の有無 リスクテイク非選択性の有無
		子供・子孫への影響	遺伝的影響の有無 廃棄物等管理期間 事故時処理期間
		事故歴	評価時点までの事故数 事故頻度
		公平さ	受益者とリスクテイク者が同一か否か
		可逆性	影響が出た場合に取り返しがつくか否か
	未知性	周知度	同一原理の既生用製品の有無
		理解度	仕組みやプロセスが理解容易か否か
		影響発現遅延性	影響がすぐに現れるか遅れて現れるか
		被害者身元判別可否	被害者が見分けられるか否か
	その他事項	報道機関の注目度	報道機関が取り上げる程度・量
		便益の直接性	個人的便益か、公共の便益か
		便益の明瞭性	便益が定量化可能か 費の単位の周知度・理解度
	不利益性	大きさ	事故や不祥事により被る不利益の程度
		制御可能性	事業主体に対する影響力有無
	事業主体の特性	政治的カテゴリー	評価者と同一か否か
		メディアでの評判	評価者が支持するメディアでの評判の良し悪し
		経営理念(方針)	評価者と同一か否か

社会的受容の観点からの評価の一例



*) 科学的に評価されたリスクは、個人差ではなく、施設近辺、地方などの集団で異なる

原子力に抱いているイメージ（新聞記事などから抽出）



概要　温暖化とCO2対策に関するエッセー
劇作家・演出家　永井　愛氏

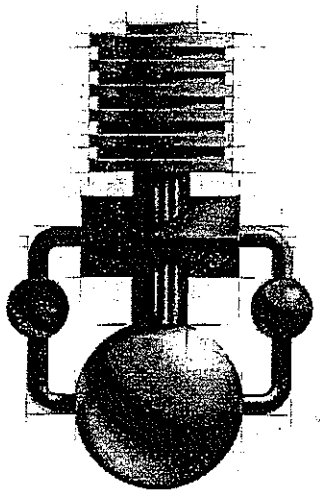
・温暖化対策のための努力について

・10年後、CO2削減目標達成されず
その要因想定

→経団連の対応の消極性
→アメリカの不参加
→ロシアからの排出権購入
→原発増やしたら、また大惨事・・・

朝日新聞　2001年3月31日

原子力技術の驚異と脅威



・技術文明は、驚異を持って迎えられるが
政治闘争に利用されれば、脅威→恐怖に

・その極限が原子力

・原子力に対するトラウマ的恐怖感

・「恐怖」のイメージがつきまとう
脅威と恐怖の対象

・役割、効果の正当評価への妨げ

・国民的トラウマからの解放

・安心できる安全性を手にいれるには？

・知的、感性的に原子力技術の本当の
すばらしさを表現する方法を模索すべし

Mac Power 2002 5月号　　川崎　和男
インダストリアル・デザイナー、名古屋市立大学院教授

社会的受容性 ➡ 確保に向けた取組

適切な情報提供

・化石燃料に依存するリスクとの比較

・他代替エネルギー源とのコスト比較、環境負荷比較など

「客観的かつ定量的なデータに基づく、電源間比較を実施し、原子力、高速炉サイクルの特長、利点、欠点を示すことで理解を得る」

⬇

定量的な高速炉特性評価法開発

①外部コスト評価→環境影響、社会的費用の定量化

②他電源間比較　→経済、資源、環境などの多面的な電源間の比較評価

③投資対効果　→高速炉の導入効果と開発費用との比率（効果比）を評価

④導入効果解析　→発電量時間推移を想定し、必資源量、廃棄物量など評価

まとめ

・実用化候補概念抽出に向けた評価システムを他電源比較評価への拡張をめざしている。

・高速炉と他電源を比較評価する指標を検討。

・15年度に中間評価結果を示す
（14年度は、試中間評価を行い、結果判断から精緻化）

・「社会的受容性」そのものを分析・評価し、解析・評価手法に取り入れるとともに分析結果から、受容性を得るための方策も。

・社会的受容性を得るために適切な情報を示しうる解析・評価手法を開発している。

(30) 水素利用社会を想定した戦略的回収元素の需給シナリオ

第1回 研究開発報告会

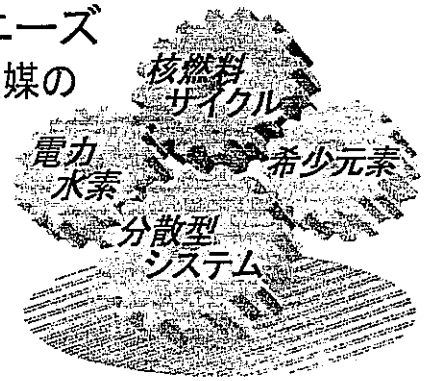
平成14年4月26日

システム技術開発部

FBRサイクル解析Gr. 大滝 明

報告内容

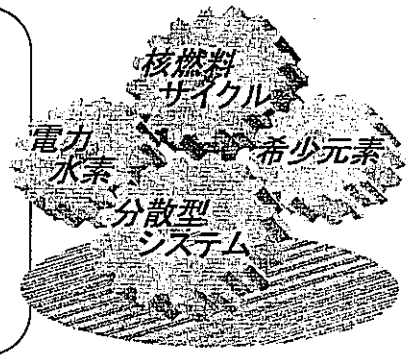
- 検討の背景と目的
- 前回の報告概要
- ハード・パスとソフト・パスの協調概念
- Pd需給の現状と回収Pdのニーズ
  - ▶ 回収Pd需給量の計算条件
  - ▶ 回収Pdの需給バランス
- Ru需給の現状と回収Ruのニーズ
  - ▶ Ru回収量とアンモニア合成触媒の供給規模
- 回収希少元素の比放射能について
- まとめ



検討の背景と目的

- FBRの多目的利用策として、水素製造シナリオについて検討（H13研究開発報告会、JNC TN9400 2001-061）
- 燃料電池等に利用可能な、希少元素FPの分離とリサイクル方法を提案（小澤他、2001年秋の大会M62）

- 水素利用を中核とした環境循環型社会の中で、ハード・パス（核燃料サイクル）と、ソフト・パス（分散型システム）との協調概念をイメージ化する。



大洗工学センター　研究開発報告会（第1回）

前回の報告概要（1/2）

- *FBR水素製造シナリオ*；今世紀の燃料電池自動車導入数を推計し、水素消費量、CO_2低減効果、水素製造原子力設備容量（水電気分解法、低温水蒸気改質法）等の試算結果を報告した。

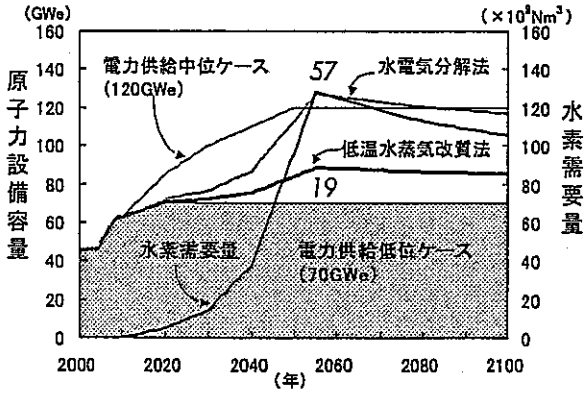
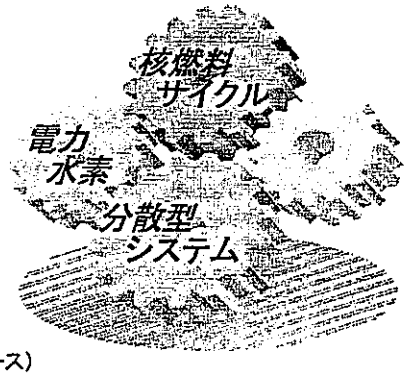


図1. 水素需要と原子力設備容量の試算例（運輸部門ベース）



大洗工学センター　研究開発報告会（第1回）

前回の報告概要(2/2)

- *電解採取法FP分離とリサイクル*； 高レベル廃液を模擬した高濃度硝酸溶液中のPd、Ru等の白金族系希少元素を、Fe^{2+}やPd^{2+}の添加により効率的に電解採取し得ることを実験的に確認した。

表1. FBR使用済み燃料中の希少元素FP量(ORIGEN解析値)

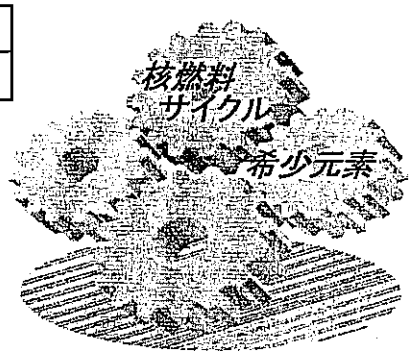
元素名	Ru	Rh	Pd	Tc	Te	Se
kg/HMt	12.5	3.6	11.1	3.3	2.7	0.2

(備考) FBR-SF; 150,000 MWd/t、4年冷却

表2. FR使用済み燃料の溶解データ例(8時間溶解)

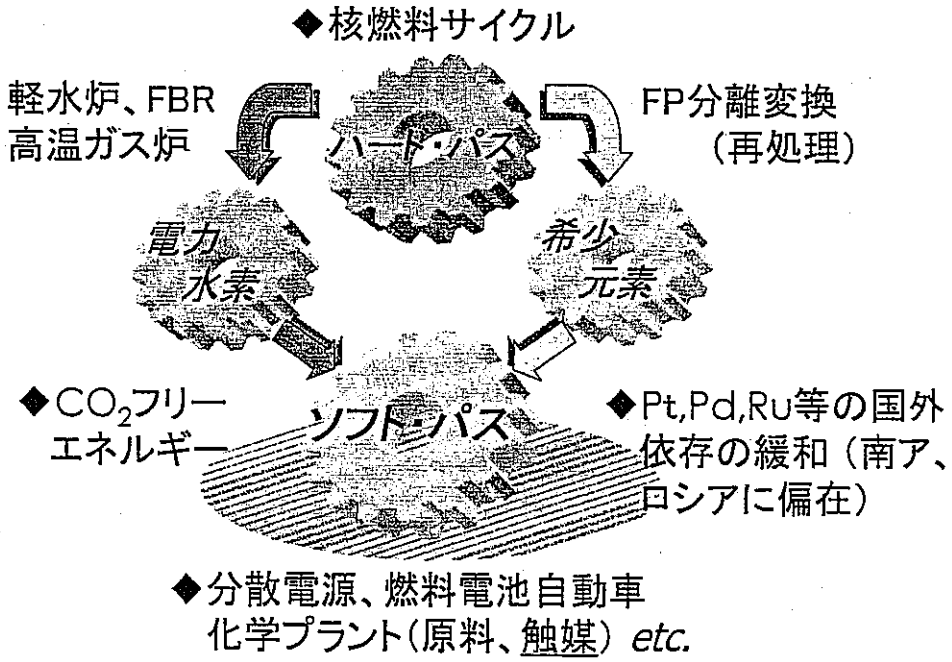
元素名	Ru	Rh	Pd	Tc
溶解率 %	78-86	80-91	91-94	77-90

(備考) FR-SF; 54,000 MWd/t、2年冷却
94,000 MWd/t、4年冷却



大洗工学センター 研究開発報告会(第1回)

ハード・パスとソフト・パスの協調概念



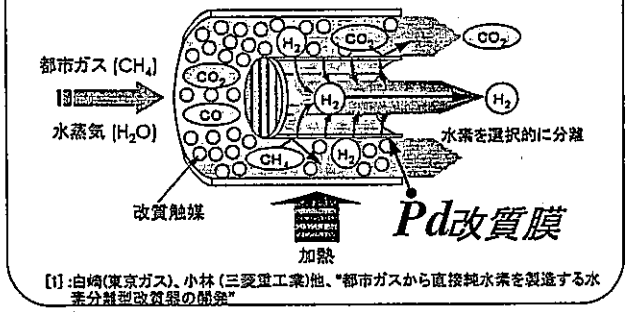
大洗工学センター 研究開発報告会(第1回)

Pd需給の現状と回収Pdのニーズ

- *Pdの主な用途*； 電子・電気材料、触媒、歯科材等
- *需給状況（1999年実績）*
  - ▶国別供給；露国 168 t、南ア 58 t、北米他 25 t、計 251 t
  - ▶国別需要；北米 132 t、日本 69 t、欧州 65 t、 他 25 t
  - ▶国内需給；総供給量 89 t（2次回収、輸出品を含む）

（需要内訳） 電子・電気 30 t、自動車19 t、歯科医 17 t

- Pd薄膜型水素改質器[1]



[1]：白崎(東京ガス)、小林（三菱重工業)他、"都市ガスから直接純水素を製造する水素分離型改質器の開発"

回収Pd需給量の計算条件

- *需要量*；2030年以降の低温水蒸気改質型水素製造設備容量と、改質器構造より算出。
- *回収量*；LWR再処理でFP分離を行う仮定

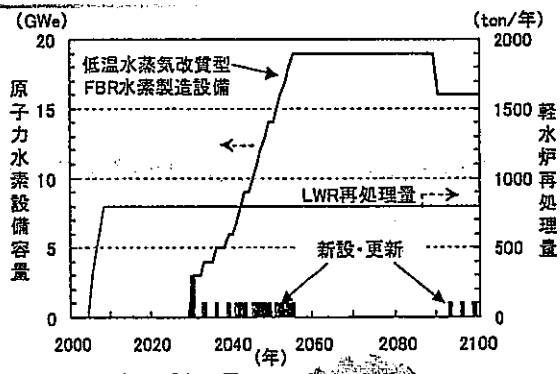
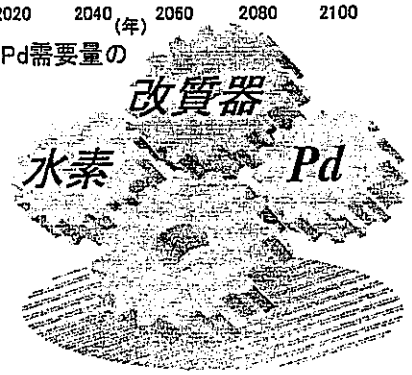


図2. 回収Pd需要量の計算条件

表3. LWR再処理条件に関する仮定

LWR再処理量	2005年運開（320t/年） 2008年以降 800t/年 一定
LWR-SF燃焼度（4年冷却）	～2009年 30,000 MWd/t 2010～2029年 40,000 MWd/t 2030年～ 60,000 MWd/t
FP回収の仮定	回収開始2005年、回収率 80%



回収Pdの需給バランス

- *需給状況*
  - ▶ 累積需要量;2100年までの累計で約180 tが見込まれる（1999年総供給量の2倍程度）
  - ▶ 累積回収量;需要量相当の約180 tが見込まれる

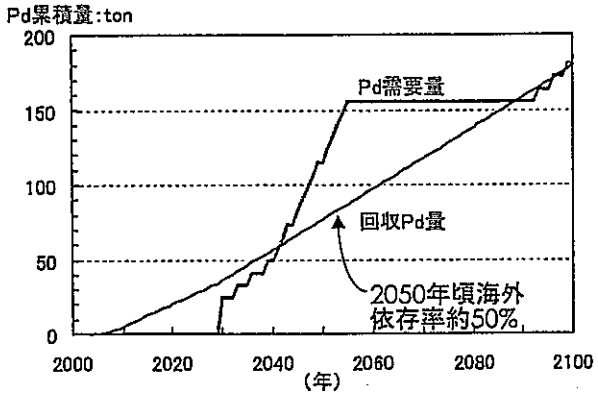


図3. 回収Pd需給量の計算例（LWR再処理）

大洗工学センター 研究開発報告会（第1回）

Ru需給の現状と回収Ruのニーズ

- *Ruの主な用途*;電気抵抗器、チタンパイプの合金元素、ハードデスクの多層磁気コーティング、触媒等
- *需給状況*
  - ▶ 世界の需要量; 1999年 約12 ton
  - ▶ 主な産出国; 南アフリカ（87年シェア75%）、カナダ（同4%）

- アンモニア・NH_3合成用Ru触媒
  - ▶ 東京工業大学にて発明[2]
  - ▶ Ru系触媒を用いたプラントが、米国Kelogg Brawn&Rooth, Inc.にて建設され、試運転中。
  - ▶ プラント全体の省エネ率約15%、低圧設計によりコスト低減[3]。

[2]:秋鹿 "アンモニア合成用ルテニウム触媒における担体及び促進剤効果",触媒 Vol.38 No.4(1996)、[3]:R.B.Strait, "First Two 1,850MTPD Grassrots Ammonia Plants",Ammonia Technical Manual (2000)

大洗工学センター 研究開発報告会（第1回）

Ru回収量とNH$_3$合成触媒の供給規模

- *Ru回収量*
  - ▶ 2100年までの累計； 約280 t(年平均回収量 約2.4 t)
  - ▶ NH$_3$合成触媒の供給規模；約70基(日産1000t級で規格化)
  - ▶ 1998年のNH$_3$生産量に基づくプラント数； 国内　6基(〃)
    世界360基(〃)
    〔稼働率の仮定 約80%〕

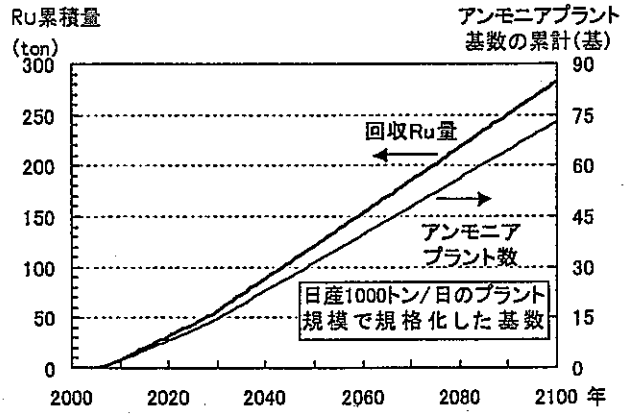
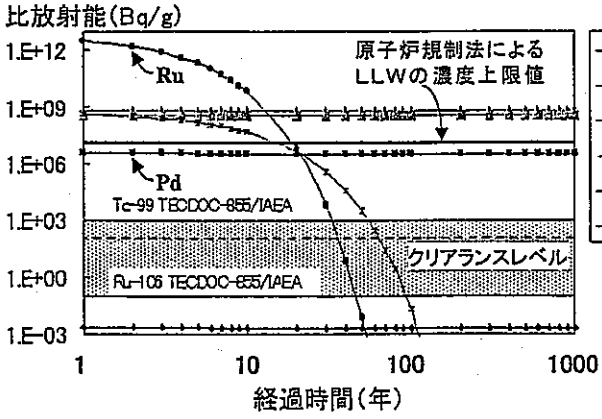


図4. 回収Pd需給量の計算例(LWR再処理)

大洗工学センター 研究開発報告会(第1回)

回収希少元素の比放射能について

- *回収元素の比放射能レベル*
  - ▶ Pdは、LLWと同等な管理下での加工や運用が望ましい。
  - ▶ Ruは、LLWの政令濃度上限まで約20年要するが、分離後40年程度でクリアランスレベル以下になると見られる。



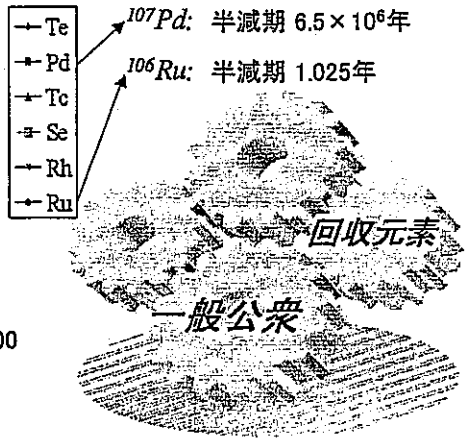


図5. 希少元素FPの比放射能の経時特性

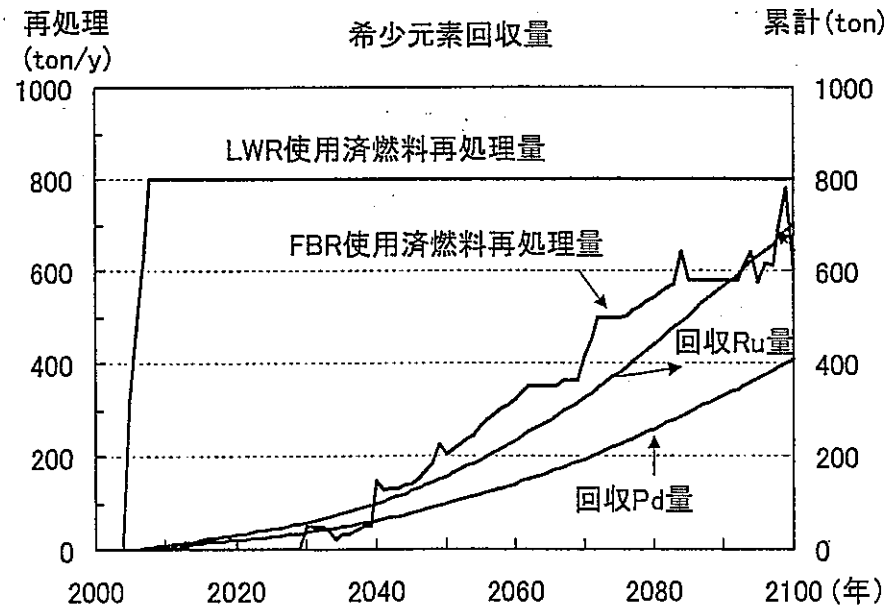
大洗工学センター 研究開発報告会(第1回)

まとめ

- 将来の水素利用社会を想定し、ハード・パスとソフト・パスとの協調概念を検討した。
  - ▶ 運輸部門の水素消費を原子力製造で賄う場合、改質用Pdの海外依存は、回収Pdの使用で概ね半減すると予想される。
  - ▶ 回収PdはLLWと同等な管理を要するため、原子力施設における利用が相応しいものと考える。
  - ▶ 合成ガスに水素を用いるアンモニア製造では、触媒として回収Ruの需要が期待される。
- 回収希少元素の利用課題
  - ▶ 回収元素の利用促進に向け、被放射化の影響評価や、安定同位体と半減期が長い同位体との分離技術の開発が必要。

大洗工学センター 研究開発報告会(第1回)

参考資料(FBR導入低位ケース)



大洗工学センター 研究開発報告会(第1回)

(31)プロジェクト評価手法の開発
-投資対効果及びリアルオプション法-

平成14年4月26日
第1回研究開発報告会

大洗工学センター システム技術開発部
FBRサイクル解析Gr. 塩谷洋樹

発表項目

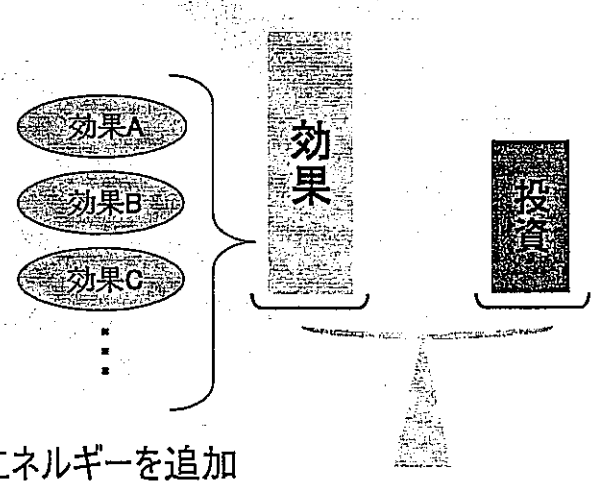
- FBRサイクル研究開発の投資対効果評価
  - ▸投資対効果評価の考え方
  - ▸FBR導入による各効果の金銭価値換算手法
  - ▸リファレンスケースと感度分析
  - ▸実用化戦略調査研究の各種候補概念の投資対効果
- リアルオプション法の紹介
  - ▸リアルオプションとは？
  - ▸オプションを考慮した評価

1. FBRサイクル研究開発の投資対効果

平成14年4月26日 R&D報告会資料

投資対効果評価の考え方

- FBR導入による国民への効果を導入しない場合と比べて金銭価値換算し、研究開発投資（実績等から推定）と比較
- 効果
  - 発電コスト削減効果
  - 環境負荷低減効果
  - 安全性向上効果
  - ｴﾈﾙｷﾞｰｾｷｭﾘﾃｨ効果
  - 燃料輸入削減効果
  - 資源枯渇抑制効果
- 利益指数（効果／投資）
- 改良点
  - FBRを代替する電源に新エネルギーを追加
  - 計算可能期間の延長、入出力処理の合理化等



平成14年4月26日 R&D報告会資料

各効果の金銭価値換算手法

- 発電コスト削減効果

  FBRが代替する電源の発電コスト ― FBRの発電コスト

- 環境負荷低減効果

  CO2、NOx、SOxの単位排出量あたり削減効果額

  ×

  (代替電源からの排出量 ― FBRからの排出量)

- 安全性向上効果

  単位電力量あたりの死亡リスク × 1人あたりの統計的生命価値

  ⇒ 代替電源とFBRとの差をとる

平成14年4月26日 R&D報告会資料

各効果の金銭価値換算手法

- エネルギーセキュリティ効果

  (エネルギーショックによる燃料価格上昇分を回避できる効果)

  エネルギーショックの発生回数 × エネルギーショック時の燃料価格上昇

- 燃料輸入削減効果

  燃料価格(石油・石炭・LNG・天然ウラン) × 燃料輸入削減量

- 資源枯渇抑制効果

  (A ― B) × C

  A: FBRが導入されない時の潜在的な燃料(石油等)価格

  B: FBR導入時の燃料価格

  C: FBR導入時の燃料輸入量

平成14年4月26日 R&D報告会資料

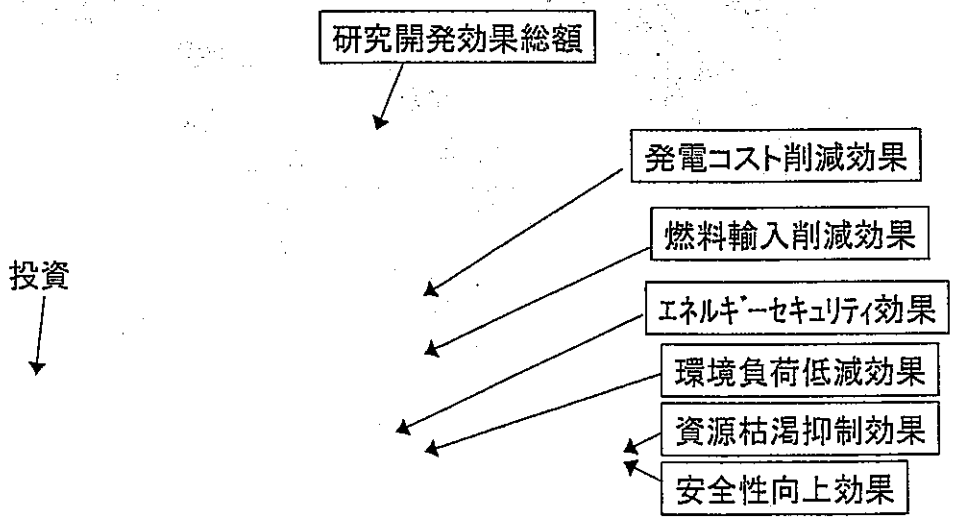
主なパラメータの設定と評価ケース

項目	リファレンスケース設定	感度解析
FBR導入開始年	2040年	2030年、2050年
計算期間	2001年～2200年	←
割引率	2%	1%、3%
研究開発費	500億円/年	300億円/年
代替電源	石炭、LNG、LWR	太陽光、風力
CO2削減価値	$ 21/t C	環境プレミアム(価値上昇)
統計的生命価値	3.1億円	←
エネルギー危機	0.1回/年 燃料価格2.1倍	←
燃料価格 ( )内は上昇率	石炭： 5.4円/kg (0.30%) LNG：23.6円/kg (0.61%) ウラン:5500円/kg U (1.85% 最高24,000円/kg Uまで)	
サイクルシステム	実用化戦略調査研究の候補概念6ケース	

平成14年4月26日 R&D報告会資料

リファレンスケース解析結果

- 投資500億円/年、FBR導入開始2040年、割引率2%
- 利益指数(効果/投資)＝約13
- 効果の内訳(各年)



平成14年4月26日 R&D報告会資料

感度解析結果

- 発電コスト削減効果及び燃料輸入削減効果が大
- 割引率及びFBR導入時期の影響も大
- 環境プレミアムがある場合、環境負荷低減効果も増大

平成14年4月26日 R&D報告会資料

実用化戦略調査研究の候補概念(評価ケース)

原子炉	再処理	燃料製造	特徴
Na冷却大型MOX (感度解析リファレンス)	先進湿式法	低除染簡素化 ペレット法	導入ペースが速い 発電コストが最も安い
Na冷却大型MOX MA装荷	酸化物電解法	振動充填法	導入ペースが速い 発電コストがやや安い
Na冷却中型金属	金属電解法	射出成型法	導入ペースが遅い 発電コストが高い
鉛ビスマス冷却 中型窒化物	先進湿式法	低除染簡素化 ペレット法	導入ペースが最も遅い 発電コストが最も高い
炭酸ガス冷却 大型MOX	先進湿式法	低除染簡素化 ペレット法	導入ペースが遅い 発電コストが高い
ヘリウム冷却 大型窒化物	先進湿式法	低除染簡素化 ペレット法	導入ペースがやや遅い 発電コストが安い

平成14年4月26日 R&D報告会資料

実用化戦略調査研究候補概念の解析結果

- 評価結果は導入ペースに比例
- 発電コストの差が評価結果に影響

Na大型MOX、湿式、ペレット

Na大型MOX(MA)、
酸化物電解、振動充填

Na中型金属、
金属電解、射出成型

鉛ビスマス中型窒化物、
湿式、ペレット

炭酸ガス大型MOX、
湿式、ペレット

ヘリウム大型窒化物、
湿式、ペレット

平成14年4月26日 R&D報告会資料

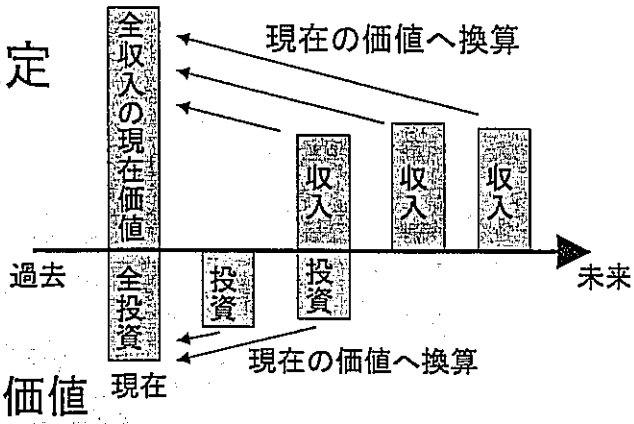
---

2. リアルオプション法の紹介

平成14年4月26日 R&D報告会資料

プロジェクト実施の判断(NPV法の場合)

- 投資に関する意思決定
  - ▸異なる時間の金銭価値を比較
- NPV*とは？
  - ▸将来得られる全てのキャッシュフローの現在価値(DCF:割引キャッシュフロー)と全ての投資の現在価値の差
- NPVルール
  - ▸NPVが正のプロジェクトに投資し、負のものに投資しない



*Net Present Value
(正味現在価値)

平成14年4月26日 R&D報告会資料

NPV法の問題点

- しかし、現実のプロジェクト実施にあたっては…
  - ▸本来は有望なプロジェクトだが、現時点では状況がよくない

    ↓

    「様子を見て状況が良くなればプロジェクトを実施」
  - ▸面白そうなアイデアだが、いきなり本格実施するのは危険

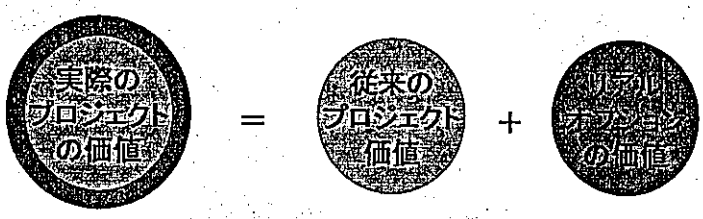
    ↓

    「実験室で試験→チェック＆レヴュー→大型施設を建設して実施」
- プロジェクト実施においては、環境変化に対応するため、途中で計画変更が必要な場合がある。
- NPV法では、プロジェクト実施用のシナリオを前もって決めており、途中の計画変更を考慮できない(場合が普通)

平成14年4月26日 R&D報告会資料

リアルオプション法

- リアルオプション法
  - 将来の環境変化に対応して、経営が用意できる選択肢(オプション)の価値も評価する手法



- 特徴
  - プロジェクト実施時のオプション(柔軟度)を金融工学の手法(ブラック・ショールズ式etc.)で評価
- プロジェクト価値の変化
  - 従来NPV法から得られる価値＋オプションの価値

平成14年4月26日 R&D報告会資料

例題「研究開発すべきか否か？」

- 検討ケース(オプションの意義を示すため簡略化)
  - 研究開発費15億円を支払うべきかを意思決定する
  - 研究開発費投資→設備投資→収入(すぐに得られる)
- 費用
- 収入

(注:費用や収入は現在価値換算後の値)

平成14年4月26日 R&D報告会資料

従来手法による評価

- 従来手法で評価(オプションを考慮しない)
  - 収入の期待値

    $50 \times 1/2 + 130 \times 1/2 = 90$
  - プロジェクトの現在価値(NPV)

    $NPV = -15 + (90-40) \times 1/3 + (90-80) \times 1/3 + (90-120) \times 1/3$

    $= -5 < 0$
- 結論
  - 研究開発投資すべきでない

平成14年4月26日 R&D報告会資料

オプションを考慮した評価

- プロジェクトの持つオプション
  - 研究開発の結果、設備投資額が判明する
  - 設備投資額が低コスト、中コストと判明したときは設備投資するが、高コストでは設備投資しない
- オプションを考慮した評価
  - 設備投資したときの収入の期待値

    $50 \times 1/2 + 130 \times 1/2 = 90$
  - プロジェクトの価値(NPV)

    $NPV = -15 + (90-40) \times 1/3 + (90-80) \times 1/3 + 0 \times 1/3$

    $= 5 > 0$
- 結論:研究開発投資すべき

平成14年4月26日 R&D報告会資料

まとめ

- 改良した投資対効果評価システムを用いた解析結果は妥当
  - 導入ペース、割引率の影響が大
  - 発電コスト削減効果と輸入削減効果が大
  - 環境プレミアムがある場合、環境負荷低減効果も増大
  - 実用化戦略調査研究の候補概念の評価にも利用可能
- リアルオプション法について紹介
  - 現実のプロジェクト実施にはオプションが存在
  - 将来環境の不確実性とオプション価値の評価は有意義

平成14年4月26日 R&D報告会資料

今後の課題

- 投資対効果評価
  - 各効果の金銭価値換算ロジックの改良
  - より妥当な入力データ及び入力シナリオの作成
- リアルオプション法
  - リアルオプションの評価ツールの作成
  - サイクル機構の研究開発におけるリアルオプションの評価

平成14年4月26日 R&D報告会資料

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕H13 年度炉心検討の着眼点

部課室：ｼｽﾃﾑ部 炉燃 Gr
報告者：林　秀行

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
C) 実効平均燃焼度という指標を用いて燃料サイクルコストを論ずることが本当に妥当か否かを再検討する必要はないか。 燃料費は、HM 以外に部材、加工費等が大きく占めており、それらとの割合がどのようなものになっているかを分析する必要がある。 また、燃料開発（製造）としては、燃料費におけるＨＭ以外の割合を低減させる努力が重要である。 （山下照射センター長） C) 燃料加工コスト（建設費＋操業費＋部材費）に占める部材費の割合は重要であり、特に建設費及び操業費の合理化に見合った、部材費の合理化を図る必要がある。FS フェーズＩでの検討では、200 t 製造プラントで、加工コストの約 1/3 が部材費となる。この部材費を達成するためには現状の「もんじゅ」各部材に対し 3 ～5 割の削減が目標となる。 （燃料製造 Gr・田中 GL）	A) フェーズＩの統合評価は、ブランケット燃料のコスト単価について、リサイクルした劣化ウランを使うという前提でなされており、燃料費の内訳におけるブランケット燃料の割合が目立つ結果となっている。 （実効平均燃焼度が評価指標になり得る）ブランケット燃料のコスト単価によっては、グラフの様子はかなり変化すると思われる。 （炉燃 Gr・林）

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕ナトリウム炉の炉心検討（大型・中型金属燃料炉心）　　部課室：ｼｽﾃﾑ部 炉燃 Gr
報告者：杉野　和輝

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）MOX 燃料炉心と比較して、燃料体積比が減少したために、金属燃料炉心の長所が生かされていない設計となった旨、報告されていたが、それでも Pu 富化度や燃焼反応度の差に見られるように、MOX 燃料炉心と比べるとより優れている点が見られるが、その理由を教えてほしい。（中性子 Gr・石川 GL）	A1）解析に用いた Pu 同位体組成が異なるためであり、金属燃料炉心の解析で用いた Pu は核分裂性のものの割合が 10%分高い。核分裂性 Pu 富化度の差で見るとあまり差は見られておらず、若干、金属燃料炉心の方が低いので、その分に起因して、金属燃料炉心の方が核特性上優れている点が見られた。（炉燃 Gr・水野主幹）
Q2）金属燃料の長所を生かすには、燃料体積率を MOX 燃料並に維持する必要があるとの結論が導き出されていたので、今後は、炉心部取出燃焼度の条件を 12 万 MWd/t に緩和するなどの方策を採り、金属燃料の長所を生かした炉心概念を構築していってほしい。（分離核変換 Gr・池上 GL）	A2）今年度はその方針で検討を進めていく予定である。（炉燃 Gr・水野主幹）

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕実用化戦略調査研究
大型 Na 炉主要構造の構造成立性検討

部課室：技開部　構造 Gr
報告者：笠原　直人

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）短縮化配管の設計に関して、構造設計上の課題はほぼ解決したと理解してよいのか（田村）	A1）熱応力に対する構造力学上の課題を明らかにした上でその解決策も示した。12Cr 鋼の強度が従来材と同じ方法で評価可能であるとすれば、現状の設計は成立すると考える。 しかしながら、12Cr 鋼の強度は今回の検討とは別の材料の問題であり、具体的には延性の改善が課題としてあがっている。以上から今後は配管の設計成立には材料開発の重要性が想定的に増すことになる（笠原）。
Q２）原子炉容器の熱荷重緩和設計法が提案されたが、その背景は何か？ 原子炉容器に関しては、フェーズＩまでの簡素な高温容器が成立したと理解していたが、異なるのか。（田村）	A２）フェーズＩまでの簡素な高温容器の成立には２つの課題がある。一つは、構造設計の入力にとなる熱荷重想定に誤差が大きく、荷重が少しでも変わると設計が成立しないことである。もう一つは軸方向にラチェットひずみが生じる可能性があることから、非弾性解析によってひずみを評価した上で、それを新たな破損様式も考慮した上で適切に制限することである。これらを解決する努力をしているが、フェーズ１中にうまくいかなかった場合に備えて、代替案を考案した。（笠原）。
Q３）代替案について、設計側からコメントはないか（池上）。	A３）現状は、簡素な高温容器を正として進めたい。今後、問題があった場合には構造グループと協力を進めたい（島川）。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕鉛ビスマス冷却中型炉の炉心設計

部課室：ｼｽﾃﾑ部
報告者：炉燃 Gr 山口

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q）流量が２m/ｓとなっているが、流速の間違いでしょう。また、流量２m/ｓはどうしようもないのか。（照射センター　山下センター長）	A）流量との記載はまちがいで、流速です。 流量２m/ｓは今後の調査検討を待たなければならないが、現状はロシアの文献値を用い、制限としている。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕（12）小型炉の炉心検討

部課室：システム部炉燃 Gr
報告者：宇都　成昭

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1)OHP 資料 P.9 の安全特性評価における設定パラメータで、反応度挿入量が 15¢ と設定されているが、その根拠は何か。（中性子 Gr.：石川 GL）	A1）反射体制御方式であるゆえ、反射体の誤挿入を想定したものである。ただし、今回の報告では、その反射体の機能を出力制御、燃焼補償制御に分離し、燃焼補償制御分は単一動作引抜長さが制限できるようにすることを想定して反応度挿入量を暫定設定している。今後、この考え方の可否を含めてどの機能にどの程度の反応度挿入を想定するか、といった具体的な議論を深めていく必要があると認識している。
Q2）OHP 資料 P.17 で、鉛ビスマス炉の燃料に窒化物を用いているが、増殖比が 1 を切っており、高速炉の核特性としてはあまり好ましくないと思われる。この出口温度設定であれば金属燃料も適用可能と思われるが、どうか。（客員研究員：常盤井氏）	A2）まず、増殖比が 1 を下回ったのは、ブランケットを削除していることが大きく寄与しており、ブランケットを設けると恐らく 1 を超えると考えている。 ところで、今回の検討において、そもそも転換比が 1 を下回るものは、同位体組成変更の影響を感度解析的に見たものであって、概念最適化を検討したのではないので着眼点が異なる。また、小型炉は 1 を超える増殖比を目指しているわけではなく、高速炉の長期運転サイクル実現ポテンシャルを活用しようとしているものである。 金属燃料の適用性についてであるが、今回の窒化物燃料での検討では被覆管内面温度が 650℃を上回っている。このことから、電中研と意見調整してきている金属燃料を適用する場合には、被覆管内面温度最大値を 650℃に暫定することで、出口温度をさらに 10℃程度下げる必要がある。なお、窒化物燃料を金属燃料に置換したとしても、増殖比は恐らくほとんど差がないと考えている。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕多様な炉心の安全性

部課室：技開部 ﾘｽｸ Gr.
報告者：飛田 吉春

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）今回の ABLE 炉心と同様の条件で通常集合体の解析を実施するとどうなるのか？（中性子 Gr ・石川 GL）	A1）燃料の流出が不十分であり、厳しい再臨界が発生する。外側炉心での２次元的な燃料移動によって生じており、燃料のエネルギーがソリダス近傍にある低エネルギー状態での流動性の低下と３次元的流動を考慮すればこのような再臨界が発生する可能性は低いと考えられる。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕３次元免震開発の現状

部課室：技開部　構造 Gr
報告者：北村　誠司

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）プラント寿命 60 年間のメンテナンスについてどう考えているのか。（石川）	A1）メンテナンス方法については、免震要素候補概念を絞り込む際に必要となるひとつの重要な項目であると認識している。それぞれの候補概念について、要素を構成する部材の寿命調査、検査方法、交換の要否・方法・時期等について検討を進めている。（北村）
Q2）機器免震方式によって成立すると認識していた。なぜ、並行して建屋全体３次元免震の開発を行っているのか。（林）	A2）３次元免震の開発当初、発電プラントに適した免震方法について検討した。幅広く技術開発を進めることで、各種炉型に適用可能な選択肢を広げておく必要があると判断した。建屋全体免震の場合、免震要素開発から進める必要があるので難易度は高いものの免震効果が建屋全体に及ぶ等の有利な点があるので中長期的に開発する必要がある。機器免震の場合、免震要素の開発の難易度は相対的に低いが、機器配置に影響を及ぼすことになるため適用範囲が限定される恐れがあるので短中期的に開発を進める。（北村）
Q3）現在開発を進めている免震要素候補の中で、どれが最も有望と考えているか。（田村）	A3）候補を絞り込むための条件は多数ある。各候補の条件への適合性を考えると一長一短があるので、現段階で判断するのは時期尚早と考えている。Phase Ⅱの期間中に判断できるように情報を揃える計画である。（北村）
Q4）渡り配管への強制変位が機器成立のための条件となるのか。（田村）	A4）免震／非免震間の地震応答特性の相違によって生じる相対変位は、免震／非免震間を渡る配管にとって強制変位荷重となる。この大きさは免震性能に依存する。現実的な配管引回しにより相対変位を吸収できるように免震性能を設定する必要がある。（北村）

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕ODS 鋼被覆管の実用化技術開発

部課室：ｼｽﾃﾑ部 核燃料 Gr.
報告者：皆藤　威二

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1) まとめで「実用規模での大型素管製造技術を確認」とあるが、性能も含め、確認したものか。	A1) 現段階では、実規模で製造できたということであり、MA 粉末の評価、性能評価はまだである。
Q2) 過剰酸素量の低減による強度改善の R&D は今年度実施するのか。	A2) 過剰酸素量の低減方策については、昨年度から実施しており、ほぼ見通しが得られている。今年度は、実際に製造した素管の強度評価を継続して実施する。
Q3) 溶接部の強度そのものの強度評価は実施するのか。	A3) 今年度も引き続き実施する。
Q4) ODS 鋼被覆管の開発はほぼ終了したという理解で良いか。	A4) 製造技術開発という観点からは、ほぼ完了したと考えられる。ただし、目標とする性能を有した被覆管を再現性良く製造するための技術開発が必要である。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕 LLFP 核変換解析手法の検討

部課室：ｼｽﾃﾑ部 中性子 Gr
報告者：大木繁夫

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）群数およびメッシュ分割を詳細にすれば、現状の解析手法でも計算できるという結論でよいか。（ｼｽﾃﾑ部炉燃 Gr　林 GL）	A1）炉心体系計算でスーパーセル計算レベルの細かい群数とメッシュ分割を行わずに、スーパーセル計算をもとに適当な少数群と体系分割の実効定数を作成し、炉心体系計算に渡すことを考えている。なお、熱群までを扱うため、現状の高速炉解析手法をそのまま使うことはできず、SRAC のようなシステムを用いる必要がある。
Q2）（更問）熱エネルギー領域の上方散乱も考慮する必要があるということか。（ｼｽﾃﾑ部炉燃 Gr　林 GL）	A2）そうである。
Q3）サーマルピークの計算精度はどのくらいを目標にしているのか。別途サーマルピークの発生を防ぐ対策を行うのだから、計算精度は高くなくても良いのではないか。（推進部燃料 Gr 長沖氏）	A3）現状解析手法では、あまりにも合いが悪いため、計算精度向上は必要である。私見ではあるが、2～3割以内を目標精度としている。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕不要元素除去による新リサイクル概念　- ORIENT サイクル -

部課室：ｼｽﾃﾑ部

報告者：炉燃 Gr 高木

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）熱処理法のみを用いる場合、マルチサイクルでなく、数回の適用の成立性はみなかったのか？（座長：佐藤氏）	A1）実施しなかった。その点については、関係者自身検討が必要と考えていたので、課題にも記した。
Q2）ORIENT サイクルの今後の検討計画はどのようになっているのか？（座長：佐藤氏）	A２）現在、「新リサイクル技術検討会」の主査を務められた船坂 GL が、計画・方針を検討中。必要に応じて、ORIENT サイクル概念の FS への取り込みも視野にあるとのこと。
Q3)今後の課題として二次廃棄物のことに触れられていたが、どのような見通しか？	A３）二次廃棄物も HLW も少ない方が良いのは当然なので、今後の検討方針が決まれば、そこで二次廃棄物量の評価が実施できる。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕ペレット燃料製造システムの主要機器概念設計
（振動充填機器の概念設計）　　部課室：ｼｽﾃﾑ部 燃料製造 Gr.
報告者：田中　健哉

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q）今回は稼働率に対する検討をされて、その結果を設計に反映するのが今後の課題ということでしたが、システム設計を考えた時、こういった検討が具体的にどのような所に反映されるのか、またどの程度設計目標（例えば経済性向上）に対する適合性を検討する際に寄与するのか？ （佐藤システム統合 GL）	A）セルの中で機械を動かすことが可能かということが低除染の問題の１つであり、例えば機械を入れてもセルの中で故障が起きやすく止まってしまうのではそもそもシステムが成立しないわけで、そういうことをある程度定量的に評価できないかということが今後の試みで、フェーズ II では何がしかの裏付けをもって評価を行う必要があり、このようなことも１つの方法であろうと考えている。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕

部課室：ｼｽﾃﾑ部 燃料製造
報告者：星野康史

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）Na ボンディングおよび同検査ではどのようなことをするのか。（田村）	A1）Na ボンディングでは、被覆管に Na 顆粒、燃料スラグの順で装荷し端栓溶接をした後、ボンディング装置（加振機構付加熱炉）で～500℃に加熱し、加振することで燃料スラグをボンド Na 中に沈めて気泡を追い出して冷却する。 一方、Na ボンディング検査では、Na 液面レベル、燃料スラグ浮上り、ボンド欠陥検査を行うが、ボンド欠陥検査は省略できる可能性がある。
Q2）年間処理量を 38tonHM/年としているが、他のシステムと同じ 50tonHM/年としない理由は。50tonHM/年で比較するべきでは。（野中）	A2）50tHM/年で比較した場合、金属燃料の高変換効率のメリット、即ち同じ発電量を得るために HM 量が少なくて済む点が考慮されない。そこで、MOX 燃料と発電量当りのコストで比較しようとすると年間処理量が 38tonHM となることによる。 H13 年度の設計は 38tonHM/年で行ったが、50tonHM/年で比較するべきとの意見も多く、年間処理量に関して再考する可能性はある。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕湿式対応振動充填燃料製造システムの検討

部課室：ｼｽﾃﾑ部 燃料製造 Gr.
報告者：川口　浩一

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）FP の添加について問題は無いのか。	A1）ゲル化における FP 添加の影響の評価は現時点では得られていない。FP 添加量は炉心との取り合いに基づいて設計をしている。
Q2）溶液の粘度のグラフで、測定が粗過ぎないか。また、２点目のデータは粘度が増大しているように見えるが。	A2）データは東海事業所で研究の初期に予備的にとったものである。現在、東海で詳細なデータが取られつつあり、設計に反映していく。図で示したデータでは、厳密な温度管理をしていないため、液温の変化によっても粘度が変動している。
Q3）放射線の影響についてはどうなのか。	A3）放射線についても東海で照射試験を進めており、まとまり次第設計に反映する。
Q４）内部ゲル化についての検討はどうなのか。	A４）内部ゲル化については PSI との共同研究で進めている。こちらについても MA・FP 添加の影響評価が必要である。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕湿式対応振動充填燃料製造システムの概念設計
（振動充填機器の概念設計）　　部課室：ｼｽﾃﾑ部 燃料製造 Gr.
報告者：新開　康夫

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）今後の燃料製造における品質担保の方法や計画はどのようにして検討することになるのか？（野中主幹）	A1）今回報告した湿式振動充填燃料製造システムの内容では、品質担保の設計反映例として粒子取扱い時に O/M 比変化が起きないようなホッパーの寸法制限を設けている。振動充填工程以外ではゲル化工程における溶液温度を管理することで考えている。燃料棒組立以降の工程は今後のフェーズ２での検討範囲として行く。
Q2）燃料マガジンに収納出来る燃料ピンは 100 本を最大とした理由は何か？（水野主幹）	A2）燃料ピン 100 本は 100tHM/y 規模のプラントに対応しており、これ以上収納本数を大きくする場合は装置取り合いや臨界上の制限が関係してくるために本数に上限をおいた。
Q3）ホッパーの燃料中心温度が MA1.2％では 80℃となるが、MA5％の場合ではどうなるのか？また、その場合の設計対応はどうするのか？（佐藤和 GL）	A3）MA5％のケースでも同様の温度計算をしており、中心温度が約 100℃となる結果が得られている。この場合の設計対応としてはホッパー径を細くすると共に、ホッパー長さを長くすることによって中心温度を下げて収納量を維持する設計が考えられる。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕FBR サイクルの総合的安全評価

部課室：ｼｽﾃﾑ部 安全設計 Gr.
報告者：栗坂　健一

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）フェーズ２の初年度として大被害リスクの概要を把握したのはよい。通常時における放射性物質の放出について、国外の動向として、規制を強化する動きが見られるので、将来の導入を考えているFBRサイクルシステムの安全設計にあたって、どのような思想を拠り所に、どの程度までの放出を許容するか、その考え方を設計サイドへ打ち出してほしい。（推進部　野中氏）	A1）まず、放射性物質放出による一般公衆の健康影響リスクの観点から、通常放出と事故時放出の管理または抑制のあり方を検討し、設計方針の案を打ち出していきたい。
Q2）16 枚目のスライドにおけるグラフについて、沸騰のプロットと火災のプロットの形は同じになるはずだが、なぜ異なっているのか？（推進部　佐藤 GL）	A2）火災の場合のプロットが誤りであった。図を訂正する。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕先進湿式再処理システムの
設計研究成果（平成１３年度）

部課室：ｼｽﾃﾑ部 再処理 Gr
報告者：高田　岳

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）湿式再処理システムについて、より実際の運転に即した細かい検討を実施いただいている。平成１４年度は代替システムである超臨界直接法の 50 t HM/y プラントを設計されるとのことで、今後の取り組みに期待しています。 （佐藤（和）GL）	A1）拝承。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕バーチャルリアリティ技術を用いた
乾式再処理設計支援システムの開発

部課室：ｼｽﾃﾑ部 再処理 Gr.
報告者：米澤　重晃

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）事故・トラブル発生時における運転への影響をシミュレーションすることは可能か？（長沖）	A1）現在のシステムにはその機能はない。今後の開発課題と考えている。
C1）湿式再処理の保守にも適用できると考えられるので、開発に期待している。（長沖）	
Q2）本システムで、化学反応プロセスのシミュレーションはできるのか？（佐賀山）	A2）できない。本システムが対象とするのは物流プロセスである。
Q3）具体的な開発予定は？（佐賀山）	A3）今年度は酸化物電解法の電解槽の保守シミュレーションを予定している。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕多面的評価指標の検討
-他電源との比較、社会的受容性-

部課室：ｼｽﾃﾑ部 FBR サイクル Gr
報告者：篠田　佳彦

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）自然循環の採用など「安心感」を評価尺度にしなければ、判断できない項目があり、今後の展開に期待したい。（炉燃　高木氏）	A1）自然循環や固有安全性などの採用効果を判断していきたいが、現時点では、高速炉サイクル候補概念比較においては、「安全性」については、基準達成型であり、自然循環の是非などをこの観点では、評価することはできない。また、候補概念比較においては、技術的判断を前提とし、ここの社会的受容性=安心感の尺度を考慮するか否かは、まだ判断していない。 非常に難しい問題であり、多くの方々の御協力のもとに判断していきたい。
Q2)社会的受容性において、「安全」とは異なる切り口での判断を考えているか？（推進部　長沖氏）	リスクを認知する際に心理的な要因を考慮していきたい。同じ量のリスクでも「恐ろしさ」、「未知性」などの違いにより、過大にも過小にも認知される。社会的心理を考慮した評価としたい。
Q3)OHP の中で触れられた「川崎和男氏」は、サイクル機構の嘱託をされている。デザイナーの目を通して、様々な発言、提言をされており、今後もこのような方々の意見を取り入れていけばと思う。（座長　推進部　佐藤和氏）	川崎和男氏が、嘱託をされていることは、認識していなかった。原子力関係以外の方の意見、発言に着目して、社会の感情を推し量りたい。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕水素利用社会を想定した戦略的回収元素の需給　　シナリオ部課室：ｼｽﾃﾑ部 ｻｲｸﾙ Gr.
報告者：大滝　明

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）Pd 薄膜型水素改質器の運転温度はどれぐらいか（システム部炉燃 Gr.宇都副主研）	A1）東京ガスの実証試験では 500℃～550℃で性能確認が行われている。
Q2）運転温度は 500℃～550℃より低くても、高くてもダメか（同上）	A2）運転温度が低くなると一般的に改質効率が低下する。極端に高い場合には、改質性能よりも構造や寿命などの点に配慮が必要になると思われる。
Q3）白金族系元素の回収コストはどれぐらいか。Pd 等の価格がどれぐらいであれば採算が取れるのか。（燃材部永井技術主幹）	A3）コスト試算は未だ行っていない。基礎実験に用いた電解採取装置はシンプルな仕組みで機能したことから、実際の回収システムを考え場合の建設コスト等は然程高くないと思われる。採算については、例えば 5 年程前の Pd 単価は約 500 円/g であったが、つい 1～2 年程前は約 4000 円/g に高騰し、現在は 1200 円/g 程度であり、価格変動が激しいため目標設定が難しいと思われる。
Q4）Pd を回収するために何故 Pd や鉄を添加するのか。（常盤井客員研究員）	A4）Pd 添加すると回収率が良くなる傾向は実験的に確認されているが、そのメカニズムについては充分に理解していないため御説明できない（大滝）。 Pd を添加すると、それに Ru や Rh 等が誘引されて回収されるようである（サイクル Gr.篠田）。
Q5）Pd 薄膜型改質器を用いた場合の CO_2 は回収するのか。また、水素製造時に CO_2 を排出しないシステムを提案してはどうか。希少元素の回収利用の提案もユニークでなかなか面白かった。（常盤井客員研究員）	A5）改質器で分離した CO_2 は回収し、固定化する方向で検討している。メタノール等の炭化物燃料を直接燃料電池自動車に用いると CO_2 の排出に繋がるが、一旦、水素製造施設で改質すれば CO_2 を集中的に回収、固定化できるため環境影響効果は大きいと考える。 溶融鉛にメタンを直接注入して、水素と炭素に分離する方法も検討されており、どの様なシステムが有効か今後検討していきたい。
Q6）白金族系元素の回収プロセスは、六ヶ所再処理工場にも簡単に取り付けられるのか（大森特任参事）	A6）容易に付加できると思われる（大滝）。本電解採取法は高木さんが報告した ORIENT プロセスにも採用されており、現実的な方法である（篠田）。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕プロジェクト評価手法の開発
-投資対効果及びリアルオプション法-

部課室：ｼｽﾃﾑ部 FBR サイクル Gr
報告者：塩谷　洋樹

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
会場からの質問なし	
C1)投資対効果は実用化戦略調査研究の成果が特殊法人改革等に用いられた例である。今後、個別の大型プロジェクトの評価にも用いられるだろう。リアルオプション法については、これまで評価してきた効果以外の効果を評価できるとよいと考えている。（座長　推進部　佐藤和氏）	拝承。

JNC TN9440 2002-004

第２回　Ｒ＆Ｄ報告会

〔平成 14 年 5 月 17 日〕

JNC TN9440 2002-004

平成14年度第2回R＆D報告会
平成14年5月17日

再臨界排除可視化基礎試験の進捗

－ 冷却材逆流型FCIによる圧力発生挙動 －

要素技術開発部 リスク評価研究Gr.
松場 賢一

背景

➢ 高速炉の再臨界問題の排除

- 「炉心損傷の進展過程において有意なエネルギー放出を伴う再臨界が発生する可能性」自体を排除することが高速炉の実用化に向けた要件。

➢ そのためのアプローチ

- 炉心損傷の早期段階で溶融燃料が炉心外へ流出すること（早期燃料排出）によって再臨界の可能性は排除され得る。
- 制御棒案内管スペースなどの経路を用いて早期燃料排出を達成できることの根拠を示すことが重要。
- 実験事実に基づく根拠の取得、及び評価手法の整備が不可欠。

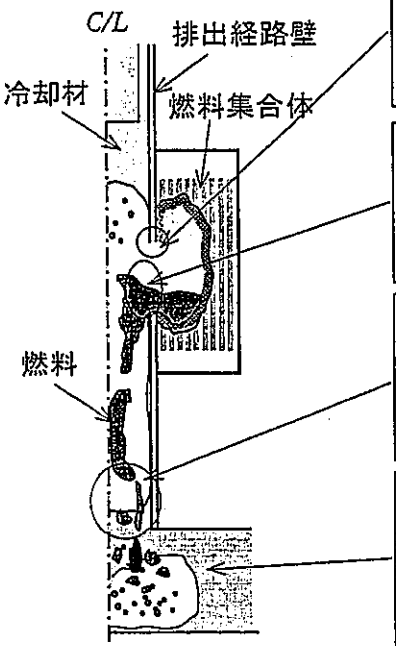
試験の目的

➢ 燃料排出に関連する主要現象のメカニズムの把握

➢ 模擬物質（低融点金属/水など）を用いたパラメータ試験による現象の一般化

➢ 評価手法（解析コードSIMMER）の検証及び改良

燃料排出に関連する主要現象



1. 排出経路の壁破損
- ➢ 壁破損モード、破損時間の評価
  - ↑冷却材沸騰、燃料クラストの安定性

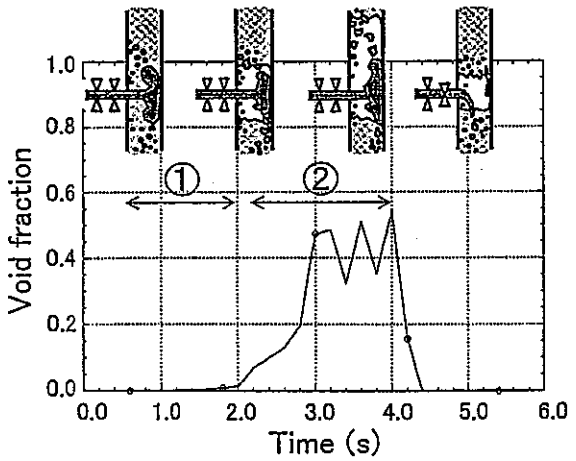
2. 燃料の初期放出
- ➢ 冷却材ボイド拡大による燃料流出の促進
  - ↑流路内・燃料プール内でのFCI挙動

3. 排出経路を通じての燃料移行
- ➢ 燃料侵入挙動(侵入距離)の評価
  - ↑燃料固化挙動、未ボイド化冷却材とのFCI挙動

4. 排出先での燃料の安定保持
- ➢ 燃料のクエンチ達成条件の評価
  - ↑FCIによる燃料クエンチ挙動、周辺構造への冷却材凝縮伝熱挙動

燃料の初期放出時におけるFCIの影響

(FCI: 溶融燃料-冷却材熱的相互作用)

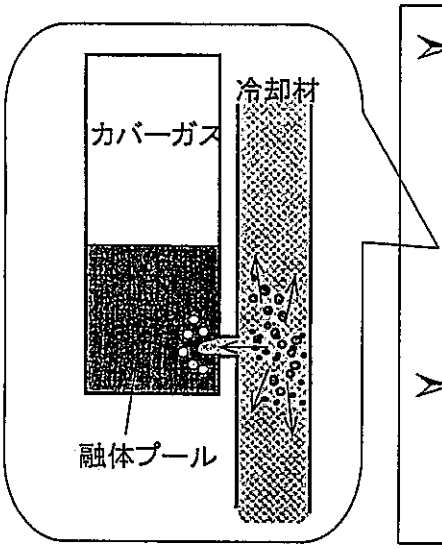


ボイド拡大挙動の一例
(融体:Wood's Metal400℃、冷却材:水60℃)

- ➢「融体と冷却材の混合過程①」で小規模FCIを繰り返しながら冷却材が加熱され、冷却材サブクール度が消失して初めて「ボイド拡大②」。
- ➢ 融体エンタルピーの増加に伴い、混合過程①が短縮され、ボイド拡大が早期化。

➢ 実機(UO_2/Na)条件では混合過程①が極めて短くなる一方で、FCIに起因する大きな圧力差(冷却材圧力 > 融体圧力)の発生により冷却材が燃料プール側へ逆流する可能性が考えられる。

冷却材逆流型FCIの解明



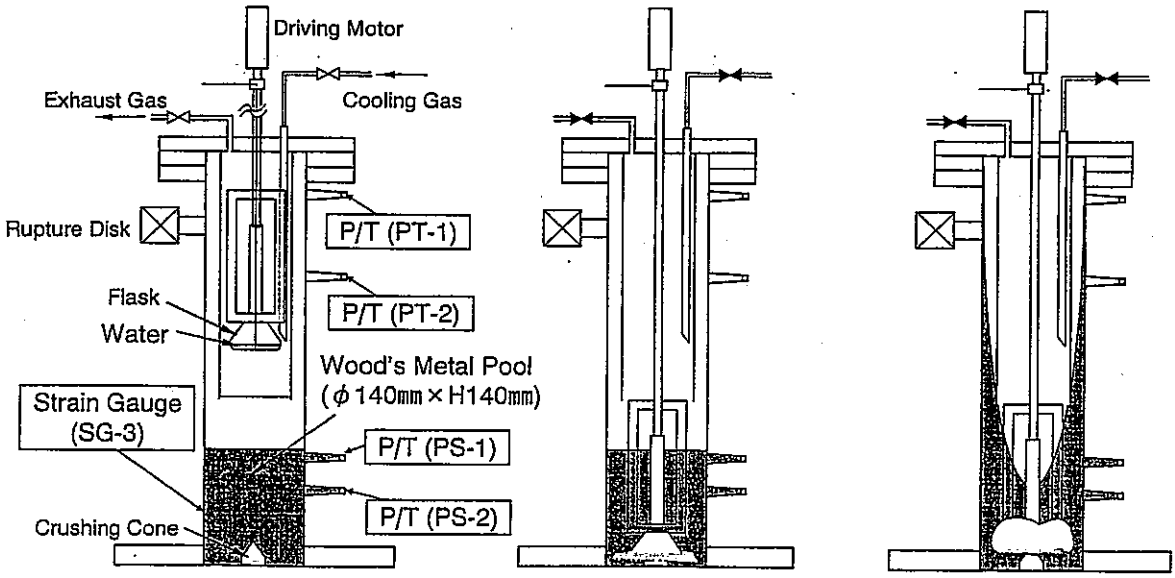
実機条件を模擬した試験体系
（融体プールと冷却材流路が隣接）

➢ 冷却材の逆流に伴うFCI挙動の解明
- 燃料中に冷却材が取り込まれた場合（冷却材エントラップ）の圧力発生挙動
- 試験容器(融体プール槽)への機械的影響

➢ 燃料流出の応答特性の解明
- 冷却材の逆流が燃料流出に及ぼす影響

試験方法と試験条件

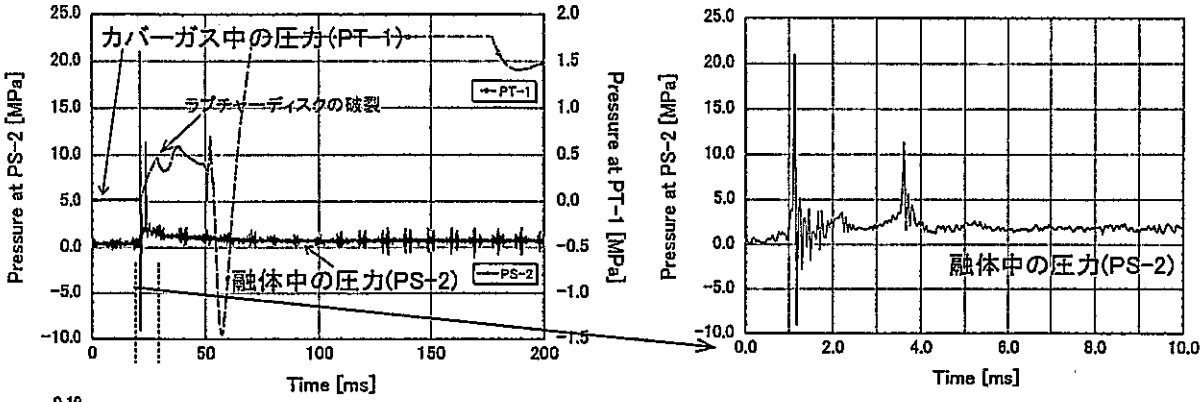
試験条件： 融体Wood's Metal、 融体容積 2000cc、 融体温度 200～400℃
注水温度 60℃、 注水量 5～40cc

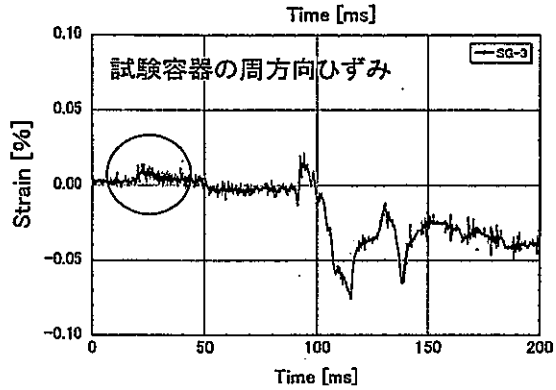


1. 注水前　　2. 注水開始　　3. FCIによる圧力発生

冷却材逆流型FCIIによる圧力発生挙動

（試験条件： 融体温度 400℃、注水量 20cc、水温60℃）





周方向ひずみの最大値 ε_{max}～0.012%
（応力換算 σ_{θ}～21MPa）

▽ SUS304の弾性限度～205MPa (400℃)

静圧力換算ΔP～1.5MPa （薄肉円筒内）

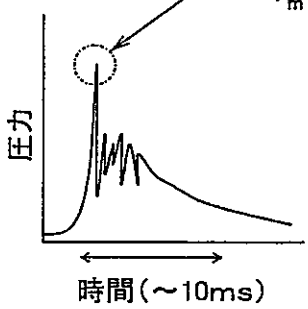
▽

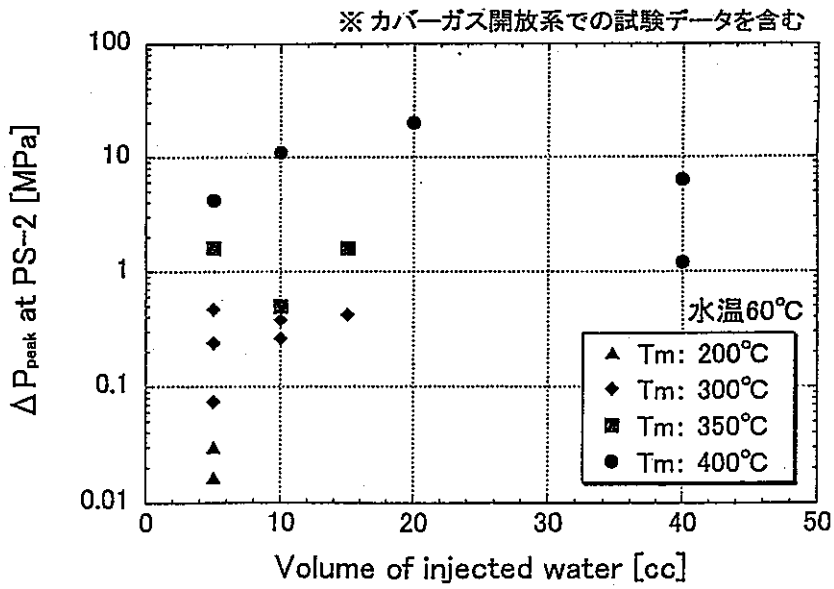
融体中(PS-2)に生じた時間幅の広い(～10ms)圧力に対応

圧力発生挙動に対する融体温度と注水量の影響

ΔPpeak：融体中(PS-2)に生じた圧力ピーク値

T_m：融体温度

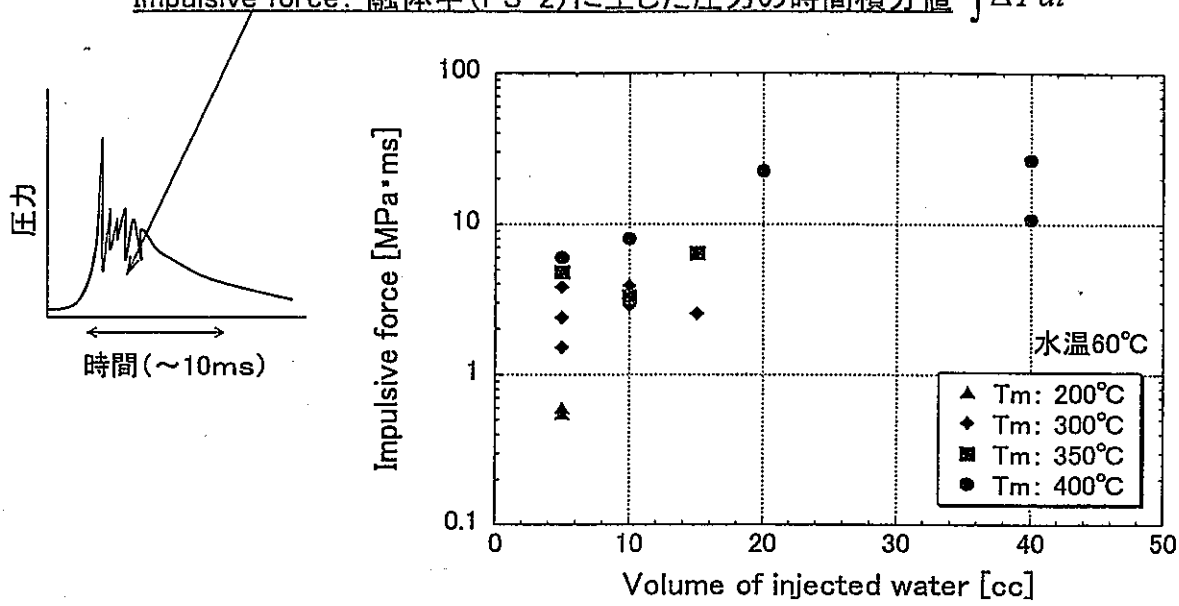




圧力発生挙動に対する融体温度と注水量の影響(2)

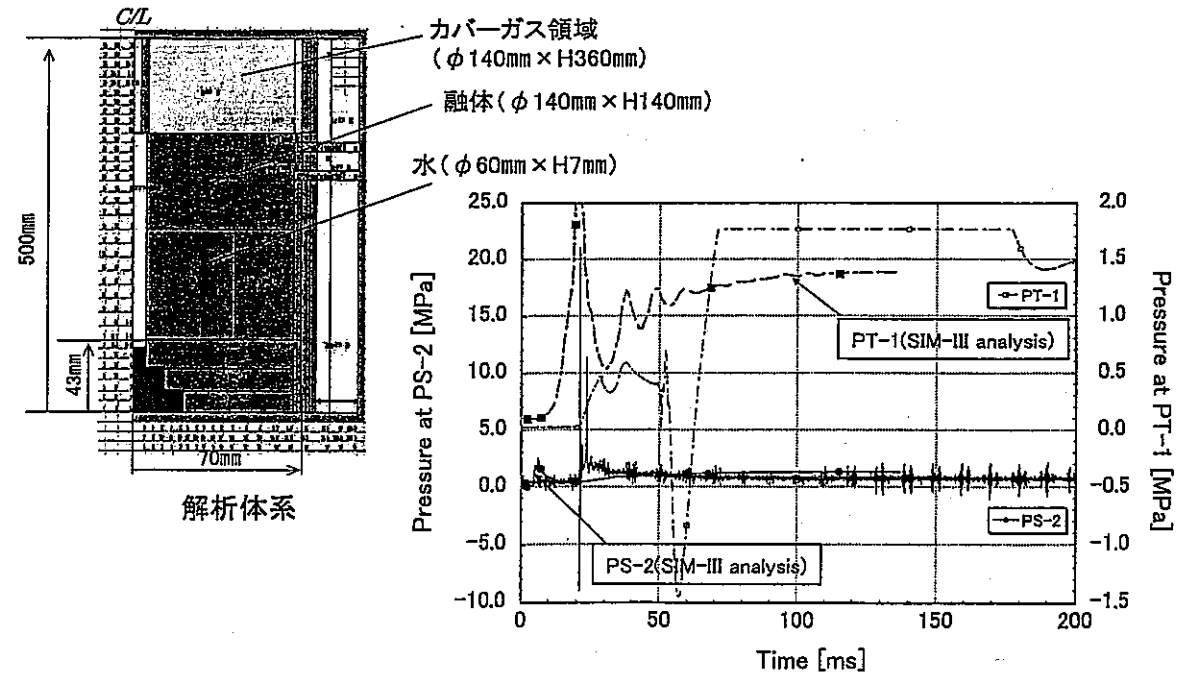
- 融体温度と注水量の増加とともに圧力ピーク及び衝撃圧力が増加。
- 注水量の増加に対して圧力増加が飽和する傾向が顕在化。
  (冷却材逆流型FCIの特徴)

Impulsive force: 融体中(PS-2)に生じた圧力の時間積分値 $\int \Delta P dt$



SIMMER-IIIコードによる試験解析

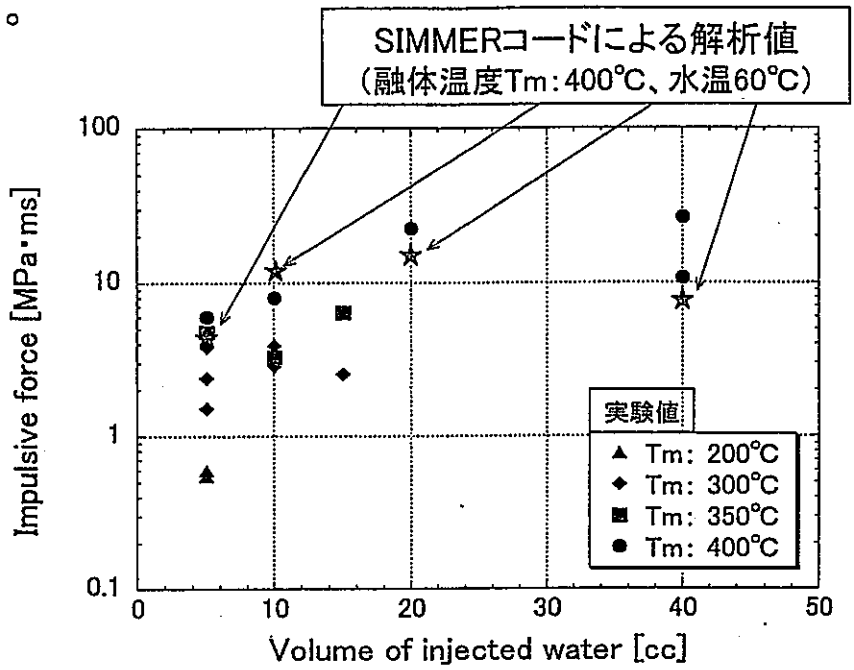
解析条件の一例: 融体温度 400℃、注水量 20cc、注水温度 60℃



試験データ(圧力履歴)との比較

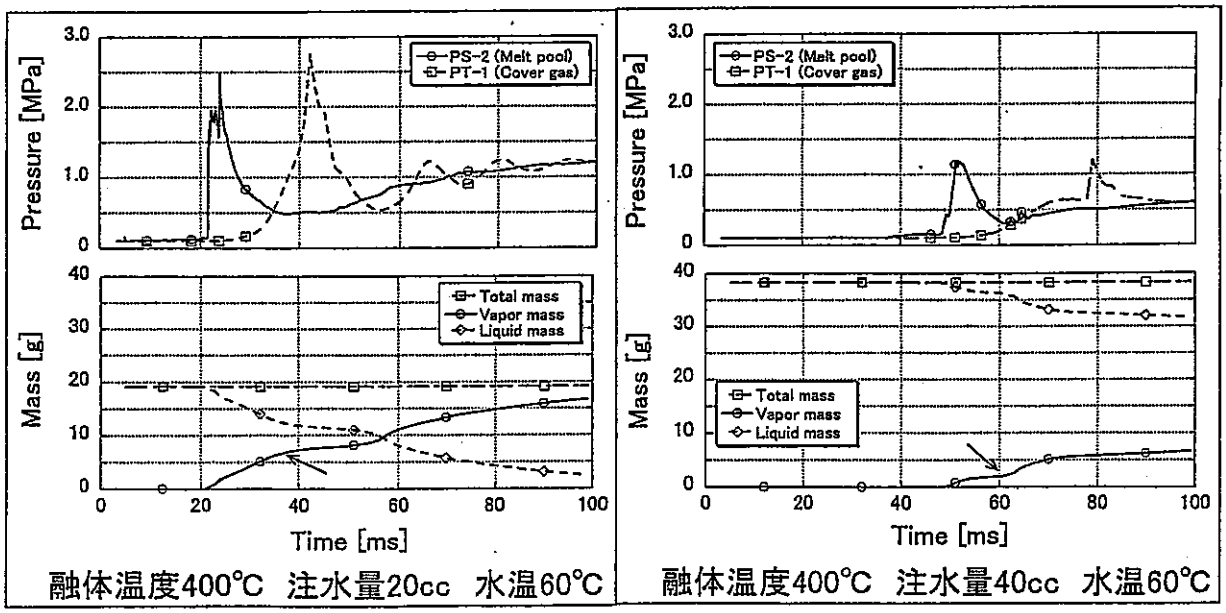
解析結果と試験結果の比較

・ 機械的影響として重要な衝撃圧力(圧力の時間積分値)を比較。



圧力発生時における冷却材の蒸発量

・ 圧力増加傾向の飽和領域(注水量40cc)では、圧力の減衰時間(～10ms)までの蒸発量(図中の矢印部)が減少。
・ 蒸発量の減少は未蒸発冷却材の熱容量により蒸気が凝縮される効果が原因と考えられる。



まとめ

➢ 冷却材逆流型FCIによる圧力発生挙動を把握した。
- 融体温度と注水量の増加にともない発生圧力が増加。
- 発生圧力の増加が飽和する傾向が顕在化。
- ただし、現象のばらつきが大きい。

➢ 次期試験で使用する試験容器(融体プール槽)の健全性に十分な余裕があるとの見通しを得た。
- 融体中に冷却材が取り込まれた場合でも、容器の健全性に有意な影響はない。
- 容器の健全性評価においては発生圧力の飽和傾向を考慮することが妥当である。

➢ SIMMERコードを用いて冷却材逆流型FCI挙動を適切に模擬できる見通しが得られた。

今後の予定

➢ 冷却材逆流型FCI挙動に対する融体と冷却材の物性値の影響評価のためパラメータ試験の実施

➢ 融体プール/冷却材流路隣接条件での試験の実施

[2] 研究開発成果報告

(2) T字配管内温度変動に関する実験研究

五十嵐 実、 田中 正暁、 林 謙二、 飛田 昭、 上出 英樹

要素技術開発部 新技術開発試験グループ

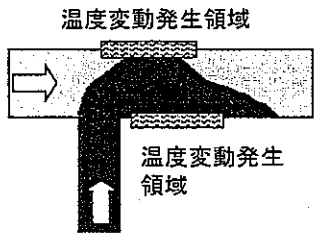
第2回 研究開発報告会

2002年5月17日

背景・目的

温度差のある流体の混合
↓
温度変動の発生
↓
構造材に伝播
↓
高サイクル熱疲労の発生

サーマルストライピング現象



配管合流部におけるサーマルストライピング評価手法を確立する

⇒ 把握すべき項目(流体側)

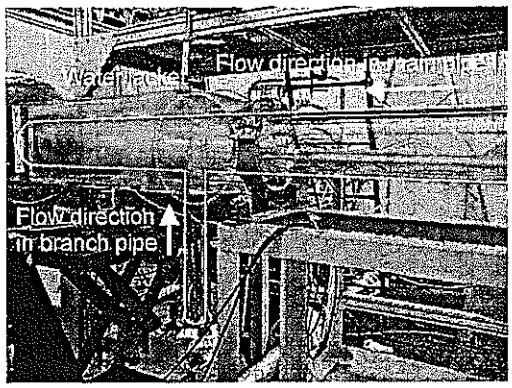
- 主配管・枝配管の流入条件によるフローパターンの違い
- 各フローパターンにおける壁面近傍での温度変動挙動
- 温度変動の構造材への伝達挙動

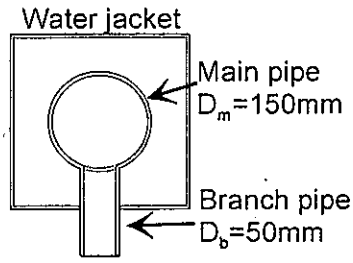
⇓

- 可視化試験によるフローパターンの把握
- 熱電対ツリーでの詳細な流体内温度分布計測による、温度変動挙動の把握

テスト部概要

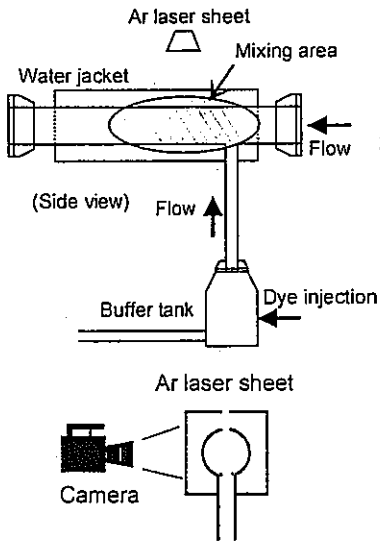
	― 主配管 ―	― 枝配管 ―
○配管口径:	150[mm]	50[mm]
○最高使用温度(アクリル部):	55 [℃]	55 [℃]
○最高使用圧力(アクリル部):	0.3 [Mpa]	0.3 [Mpa]
○ポンプ吐出量:	～240[m^3/hr]	～18[m^3/hr]
○平均流速:	～3.8[m/s]	～2.5[m/s]
○レイノルズ数:	～1.0×10^6	～2.0×10^5





噴流挙動可視化試験

○染料注入法により枝配管噴流の挙動を調べ、流動形態を分類する



＜試験条件＞

1)断面平均流速: U/W=0.025～6.0

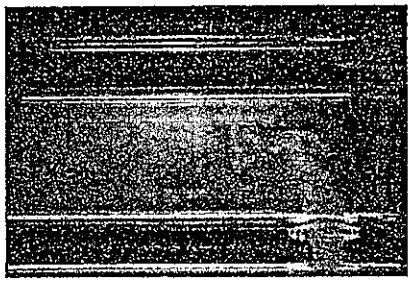
(主) U=0.05～3.0[m/s], (枝) W=0.5～2.0[m/s]

2)流体温度: ΔT=0, 15 [℃]

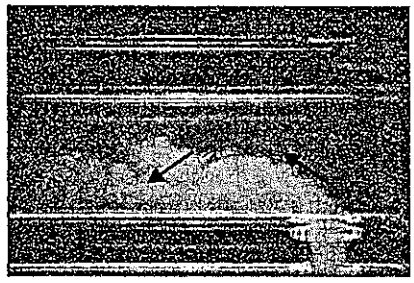
(主) Tm=25, 40 [℃], (枝) Tb=25 [℃]

●Digital Video Camera
- ○ 30 [Frame/sec]
- ○ Shutter speed: 1/250 [sec]

可視化試験結果

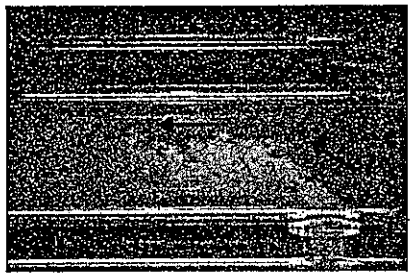


衝突噴流(Impinging jet)



再付着噴流(Re-attachment jet)

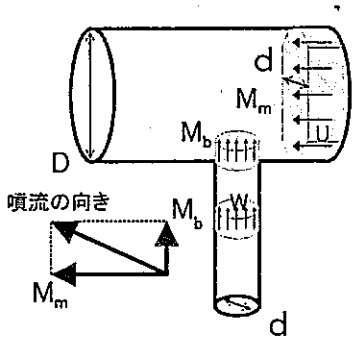
主流速
(小)
(大)



偏向噴流(Deflecting jet)

壁面噴流(Wall jet)

噴流挙動マップ

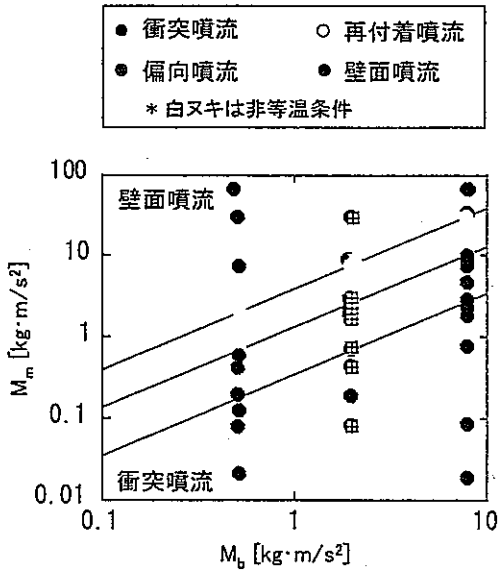


$M_b = \rho_b \times (\pi d^2/4) \times W^2$

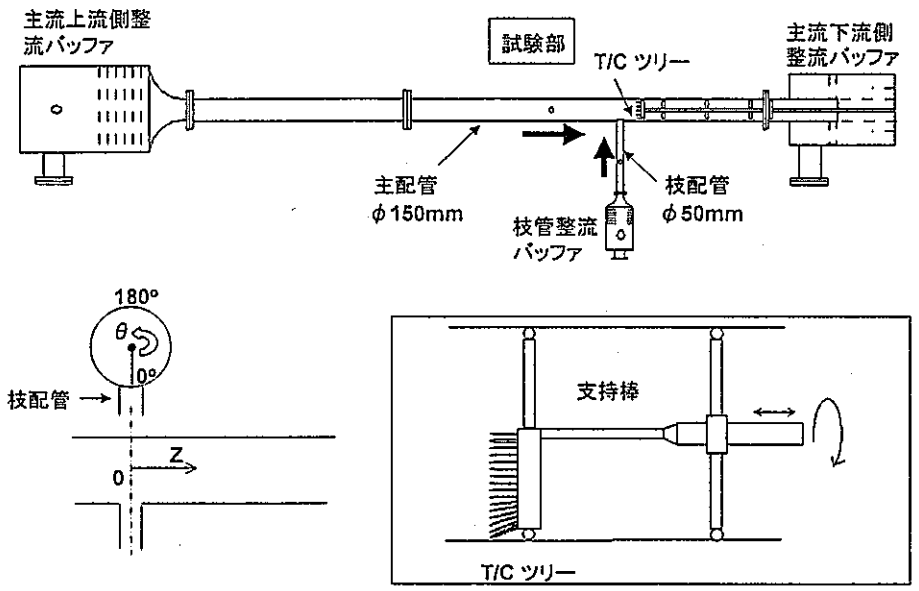
$M_m = \rho_m \times (D \times d) \times U^2$

噴流の衝突→噴流の向き

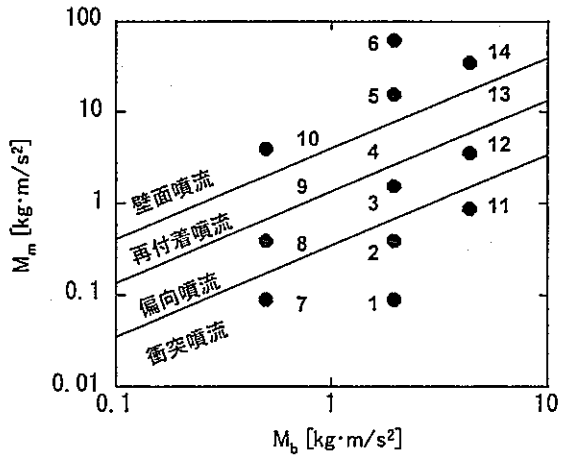
枝配管/主配管の運動量比
によって噴流の流動形態を
4領域に分類できる



流体内温度計測試験部概要



流体内温度計測試験条件



＜試験条件＞

1)断面平均流速:

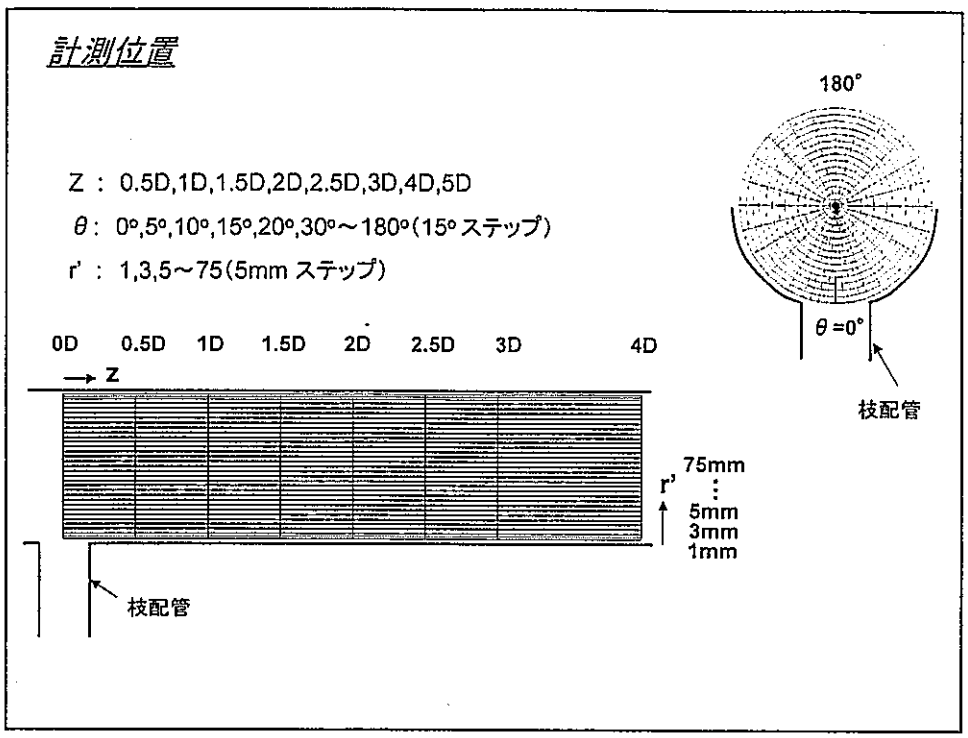
(主) U=0.1～2.9[m/s], (枝) W=0.5～1.5[m/s]

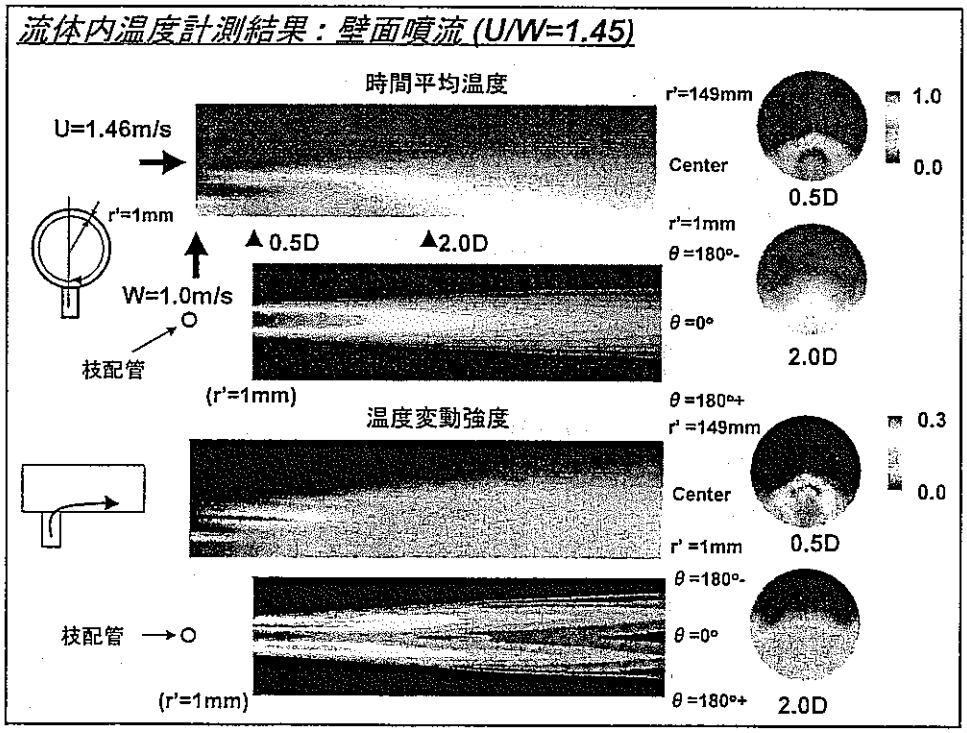
2)流体温度: ΔT=15 [℃]

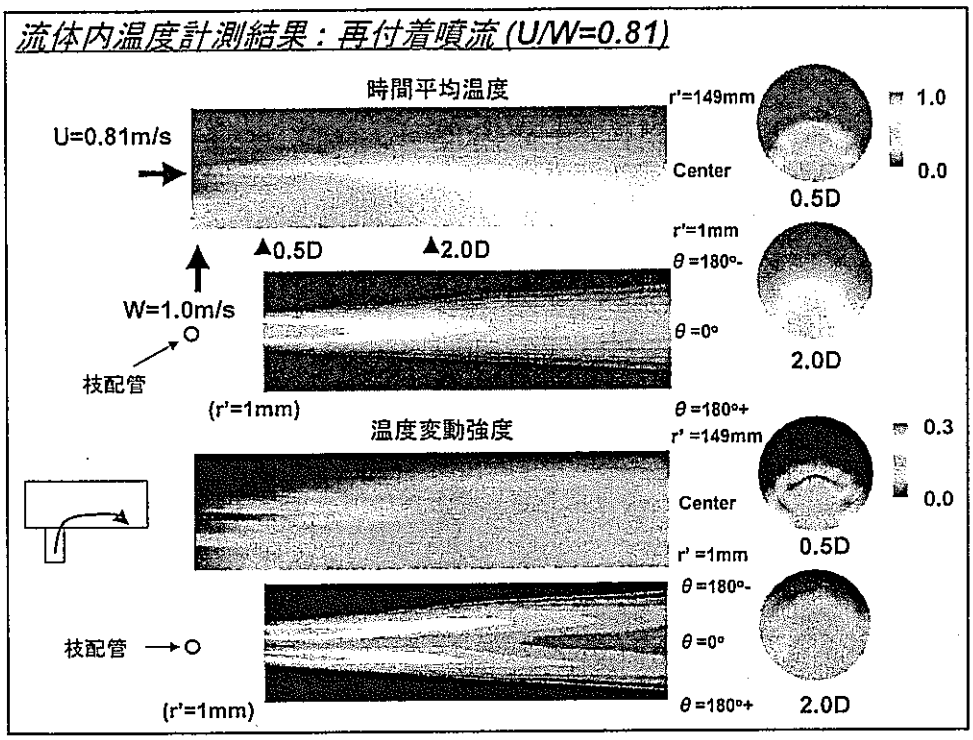
(主) Tm=45 [℃], (枝) Tb=30 [℃]

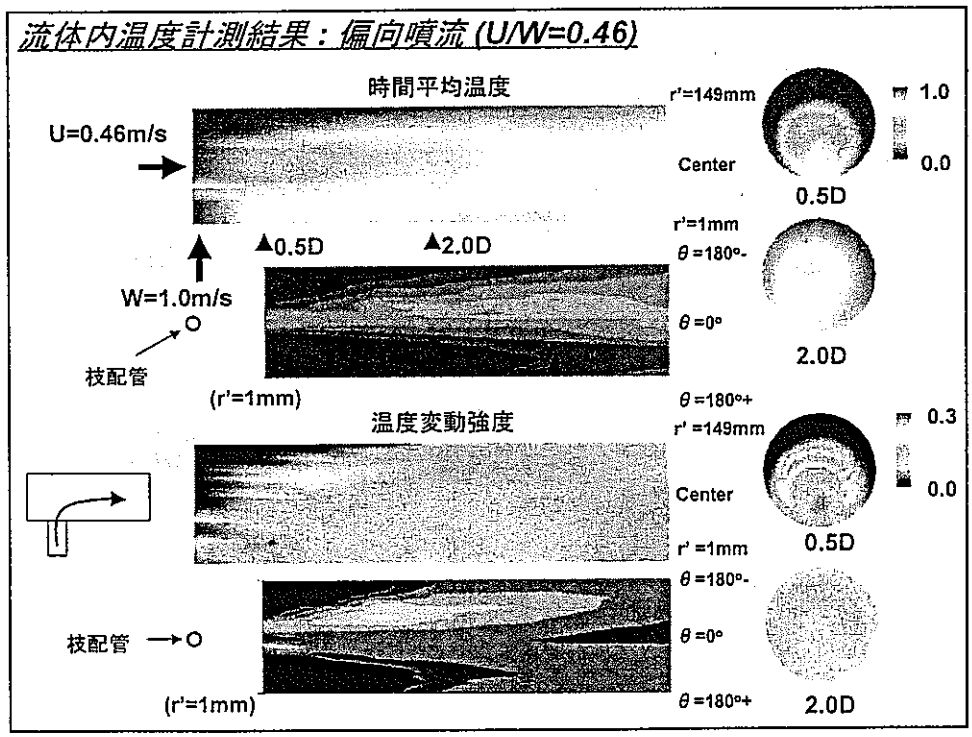
・計測時間:120s

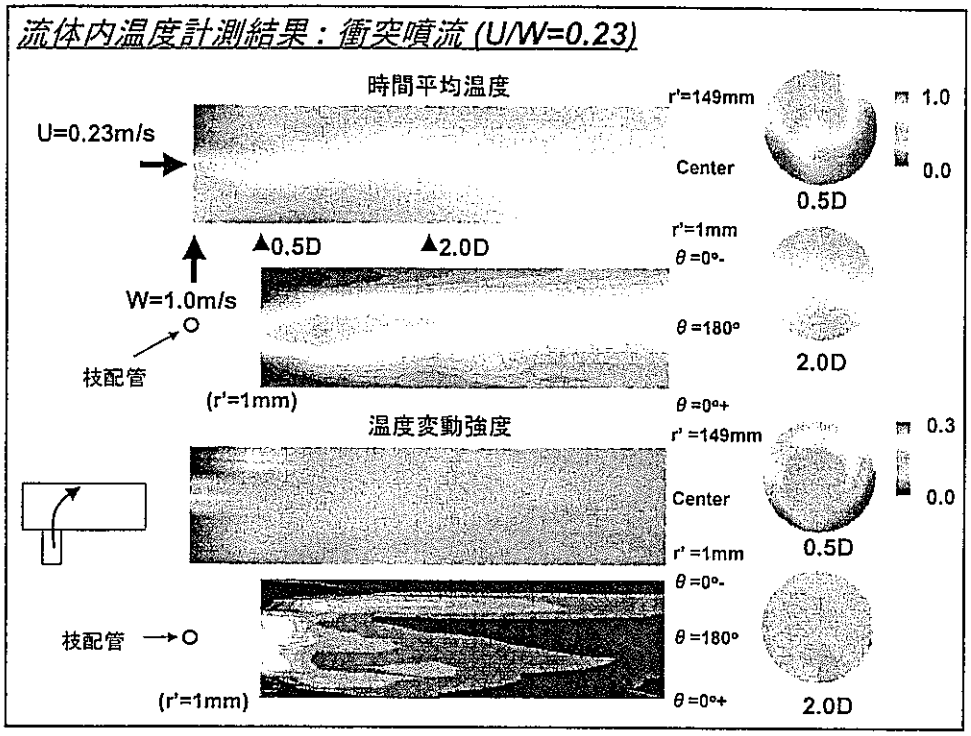
・サンプリング周波数:50Hz (0.02s)

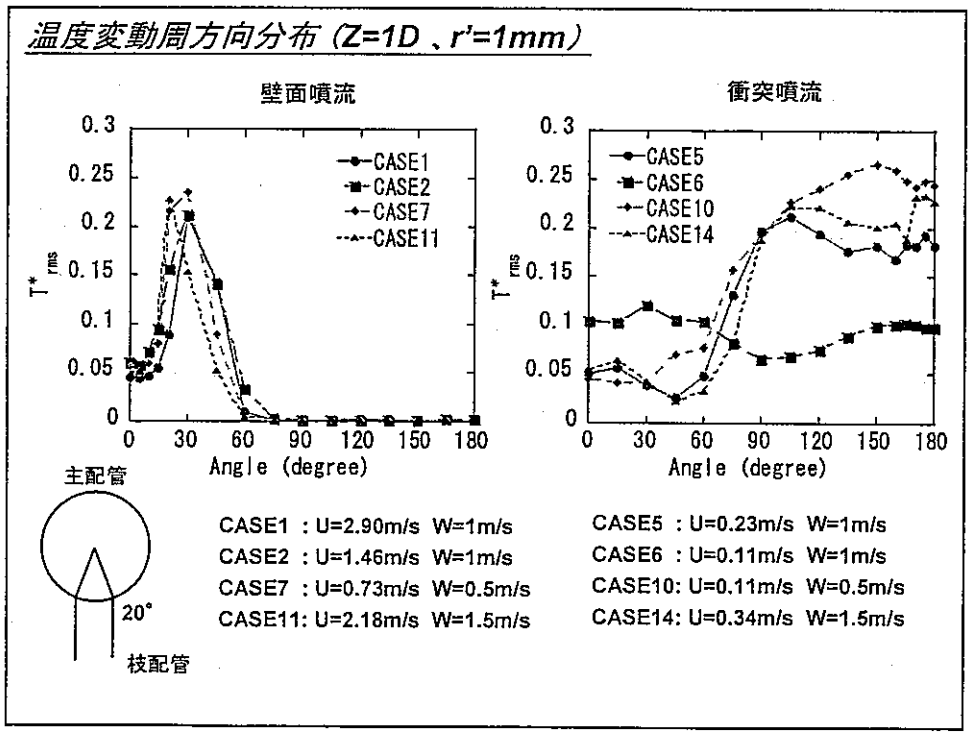

計測位置
Z : 0.5D,1D,1.5D,2D,2.5D,3D,4D,5D
θ: 0°,5°,10°,15°,20°,30°～180°(15°ステップ)
r' : 1,3,5～75(5mm ステップ)
0D 0.5D 1D 1.5D 2D 2.5D 3D 4D
Z
75mm
r'
5mm
3mm
1mm
枝配管
180°
θ=0°
枝配管


流体内温度計測結果：壁面噴流 (U/W=1.45)
時間平均温度
U=1.46m/s
r'=1mm
0.5D
2.0D
W=1.0m/s
枝配管
(r'=1mm)
r'=149mm
Center
0.5D
r'=1mm
θ=180°-
θ=0°
2.0D
θ=180°+
1.0
0.0
温度変動強度
r'=149mm
Center
r'=1mm
0.5D
θ=180°-
θ=0°
θ=180°+
2.0D
0.3
0.0
枝配管
(r'=1mm)


流体内温度計測結果：再付着噴流 (U/W=0.81)
時間平均温度
U=0.81m/s
r'=149mm
Center
0.5D
1.0
0.0
▲0.5D
▲2.0D
r'=1mm
θ=180°-
θ=0°
2.0D
W=1.0m/s
枝配管
(r'=1mm)
θ=180°+
温度変動強度
r' =149mm
Center
0.5D
0.3
0.0
r' =1mm
θ=180°-
θ=0°
枝配管
(r'=1mm)
θ=180°+
2.0D

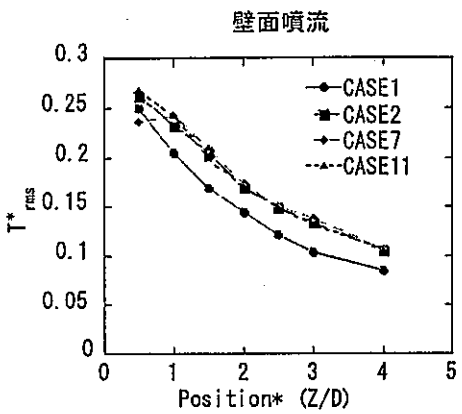

流体内温度計測結果：偏向噴流 (U/W=0.46)
時間平均温度
U=0.46m/s
r'=149mm
Center
0.5D
1.0
0.0
▲0.5D
▲2.0D
r'=1mm
θ=180°-
θ=0°
2.0D
W=1.0m/s
枝配管
(r'=1mm)
θ=180°+
温度変動強度
r' =149mm
Center
0.5D
0.3
0.0
r' =1mm
θ=180°-
θ=0°
枝配管
(r'=1mm)
θ=180°+
2.0D

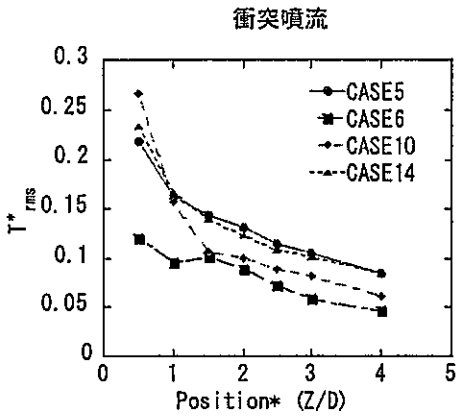

流体内温度計測結果：衝突噴流 (U/W=0.23)
時間平均温度
U=0.23m/s
r'=149mm
Center
0.5D
1.0
0.0
▲0.5D
▲2.0D
r'=1mm
θ=0°-
θ=180°
2.0D
W=1.0m/s
枝配管
(r'=1mm)
θ=0°+
温度変動強度
r'=149mm
Center
0.5D
0.3
0.0
r'=1mm
θ=0°-
θ=180°
枝配管
(r'=1mm)
θ=0°+
2.0D


温度変動周方向分布 (Z=1D 、r'=1mm)
壁面噴流
衝突噴流
CASE1
CASE2
CASE7
CASE11
CASE5
CASE6
CASE10
CASE14
T*rms
Angle (degree)
主配管
20°
枝配管
CASE1 : U=2.90m/s W=1m/s
CASE2 : U=1.46m/s W=1m/s
CASE7 : U=0.73m/s W=0.5m/s
CASE11: U=2.18m/s W=1.5m/s
CASE5 : U=0.23m/s W=1m/s
CASE6 : U=0.11m/s W=1m/s
CASE10: U=0.11m/s W=0.5m/s
CASE14: U=0.34m/s W=1.5m/s

温度変動軸方向分布（r'=1mm）

＊各軸方向位置のT_{rms}は周方向最大値



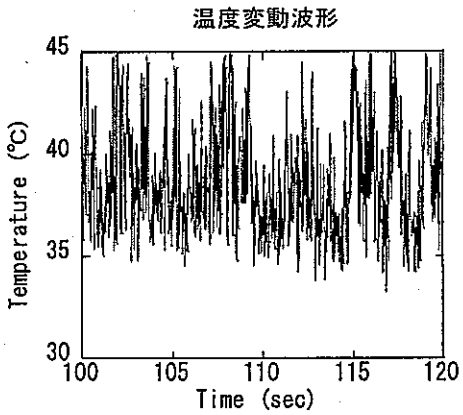


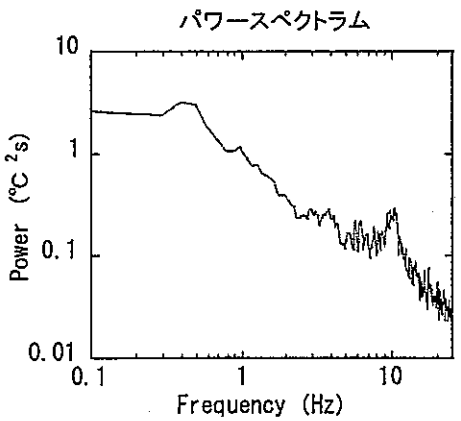
CASE1 : U=2.90m/s W=1m/s
CASE2 : U=1.46m/s W=1m/s
CASE7 : U=0.73m/s W=0.5m/s
CASE11: U=2.18m/s W=1.5m/s

CASE5 : U=0.23m/s W=1m/s
CASE6 : U=0.11m/s W=1m/s
CASE10: U=0.11m/s W=0.5m/s
CASE14: U=0.34m/s W=1.5m/s

温度変動波形

壁面噴流:CASE1 (Z=1D θ=30° r'=1mm)

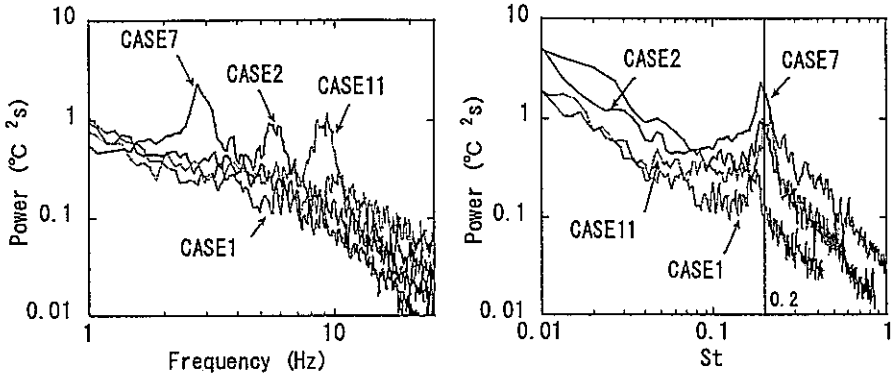


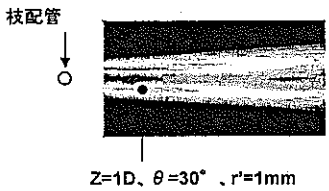


(T_m=45℃、T_b=30℃)

温度変動スペクトラム分布

壁面噴流 (Z=1D θ=30° r'=1mm)



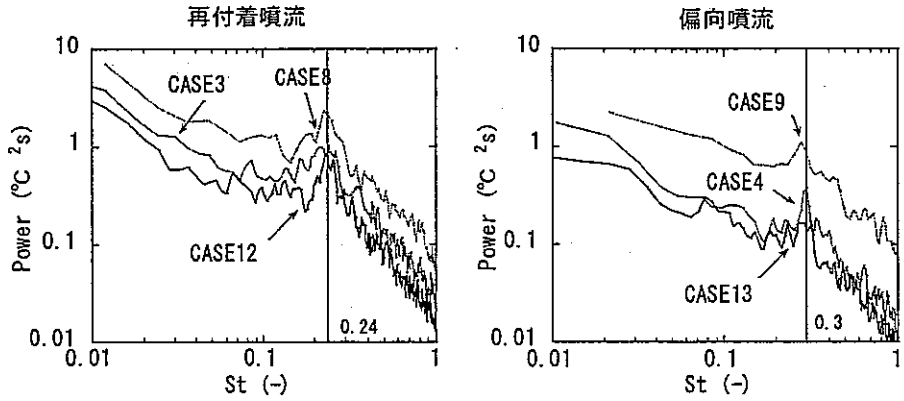


CASE1 : U=2.90m/s W=1m/s
CASE2 : U=1.46m/s W=1m/s
CASE7 : U=0.73m/s W=0.5m/s
CASE11: U=2.18m/s W=1.5m/s

$$St = f \cdot \frac{D_b}{U}$$

温度変動スペクトラム分布:St数による整理

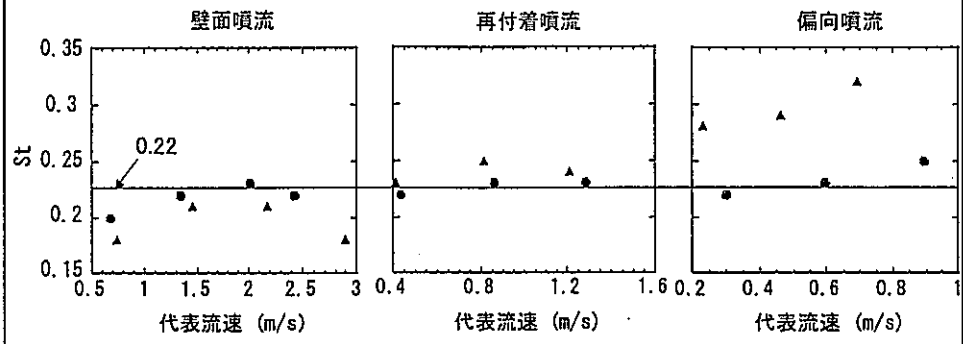
(Z=1D θ=30° r'=1mm)

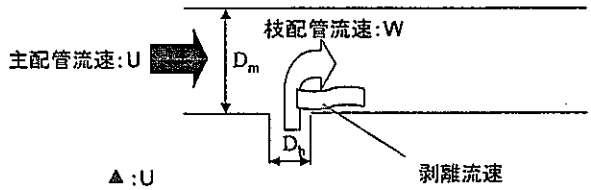


CASE3 : U=0.81m/s W=1m/s
CASE8 : U=0.41m/s W=0.5m/s
CASE12: U=1.21m/s W=1.5m/s

CASE4 : U=0.46m/s W=1m/s
CASE9 : U=0.23m/s W=0.5m/s
CASE13: U=0.69m/s W=1.5m/s

St数に対する枝配管流速の影響





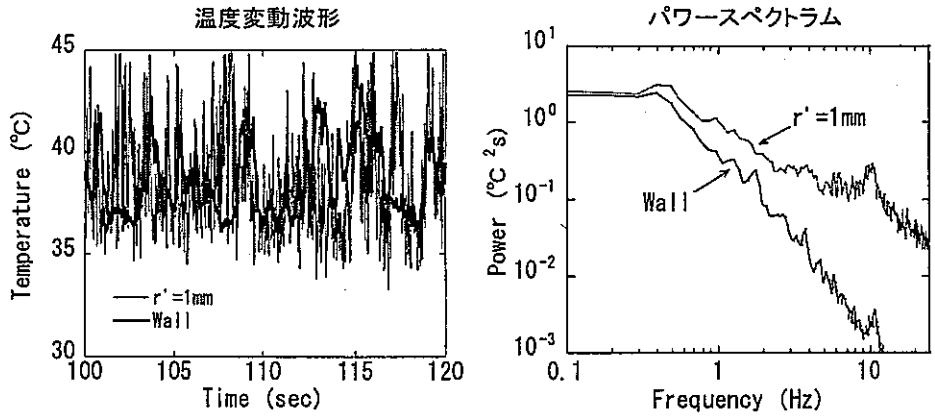
$$St = f \cdot \frac{D_b}{U \text{ or } V}$$

▲:U

●: $V = U \cdot \frac{D_m}{D_m + D_b} + W \cdot \frac{D_b}{D_m + D_b}$ （口径比にて重み付けした流速）

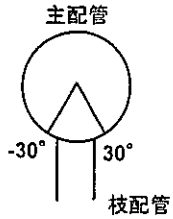
主配管壁面温度変動

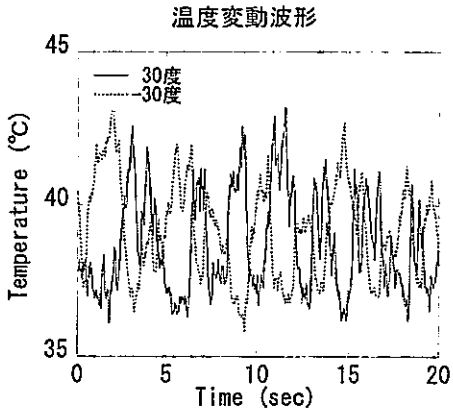
壁面噴流:CASE1 (Z=1D θ=30°)

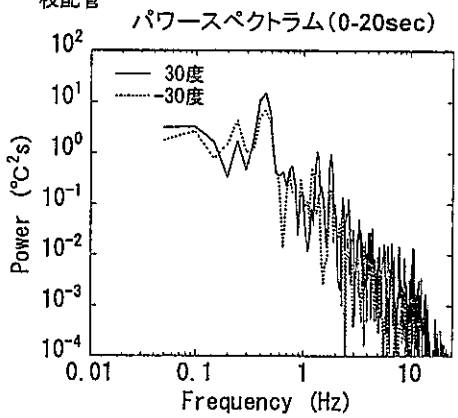


主配管壁面温度分布

CASE1:壁面噴流 (Z=1D)







まとめ

可視化試験

・T字合流部での噴流形態は壁面噴流、再付着噴流、偏向噴流、衝突噴流の4パターンに分類ができ、主/枝配管の運動量比で整理できることがわかった。

流体内温度計測試験

・各フローパターンにおける温度変動強度の空間分布特性を把握した。温度変動強度は主/枝配管の運動量比が同じであれば同様の分布を示すことがわかった。

・温度変動強度の高い位置は、壁面・再付着噴流では枝配管中心から30度～45度、 衝突噴流では主配管上面の広い範囲となった。また、軸方向分布に関しては各噴流形態とも主配管下流に向かって低くなる。

・温度変動強度の高い位置では卓越周波数が存在しており、その渦は枝管噴流を柔な構造物とした剥離渦であると考えられる。

・壁面噴流ではコールドスポットが生成され、そのコールドスポットが左右に振動しているためとみられる、位相の反転した温度変動が見られた。

第２回研究開発報告会　配付資料
平成 14 年 5 月 17 日

[平成14年度]
第２回研究開発報告会

反応性混相流の数値実験研究(SERAPHIMコードの開発)

～ナトリウム－水反応と界面現象をシミュレーションする～

要素技術開発部
流体計算工学研究Gr.

高田　孝

JNC

第２回研究開発報告会　平成14年5月17日

発表内容

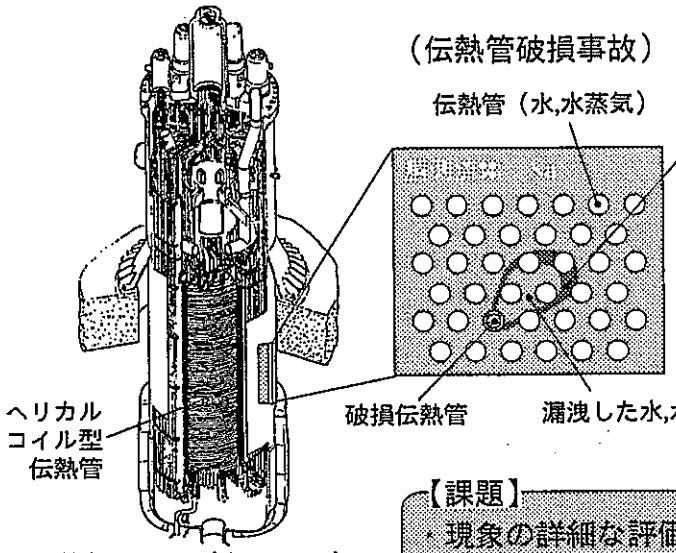
１．背景及び目的
２．多次元ナトリウム－水反応解析コードSERAPHIM
３．ナトリウム－水反応モデル
　3.1 表面反応モデル
　3.2 気相反応モデル
４．試解析
　4.1 破損伝熱管単管での解析(2次元)
　4.2 複数伝熱管での解析(2次元)
　4.3 破損伝熱管単管での解析(3次元)
５．まとめ

JNC

第２回研究開発報告会　平成14年5月17日

1．背景及び目的

研究対象：蒸気発生器でのナトリウム－水反応



【課題】
・現象の詳細な評価
・各種設計条件での健全性（安全性）評価

JNC

第２回研究開発報告会　平成14年5月17日

1．背景及び目的

研究目的：機構論的モデル化に基づくナトリウム－水反応現象の定量評価及び健全性評価

・微視的シミュレーション手法等を用いた機構論的モデル化
・ナトリウム－水反応現象の評価ツールの開発（SERAPHIMコード）
・ナトリウム－水反応現象の定量評価、健全性評価

【定量,健全性評価】

蒸気発生器体系での定量評価,健全性評価

【評価ツールの開発】

ナトリウム－水反応評価ツール（SERAPHIMコード）

【機構論的モデル化】

化学反応モデル
・分子軌道法
・分子動力学
・反応速度測定実験

混相流モデル
・粒子法
・分子動力学
・可視化計測実験

JNC

第２回研究開発報告会　平成14年5月17日

2．多次元ナトリウム－水反応解析コードSERAPHIM

SERAPHIMコード　Sodium-watEr Reaction Analysis
：PHysics of Interdisciplinary Multi-phase flow

○基本モデル
- ・流体モデル　：３流体モデル（液相２種【 Na,H_2O 】，気相１種【多成分】）
- ・圧力モデル　：１圧力モデル
- ・状態方程式　：修正Benedict-Webb-Rubin式（臨界状態を考慮）

○ナトリウム－水反応モデル
- ・表面反応モデル
- ・気相反応モデル

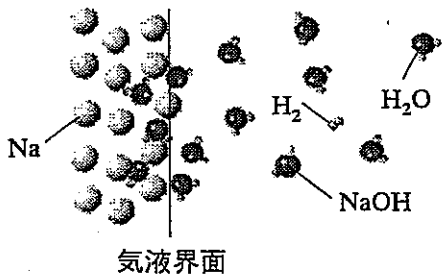
○数値解法
- ・差分精度　：時間発展項（１次），移流項（１次風上，２次中心差分）
  拡散項（２次中心差分）
- ・数値解法　：HSMAC法
- ・座標系　：デカルト座標系（３次元）

JNC　第２回研究開発報告会　平成14年5月17日

3．ナトリウム－水反応モデル

表面反応モデル

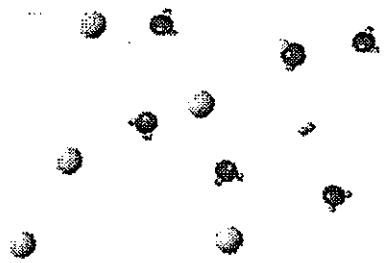
○液体ナトリウム表面で水蒸気が反応
ナトリウム温度＜沸点（反応初期～）



・典型的な強アルカリと水との反応
↓
モデル化に関する従来知見有
（反応速度無限大，H_2O輸送速度律則）

気相反応モデル

○ナトリウムガスが気相状態で反応
ナトリウム温度≒沸点（反応中期～）



・アレニウス型反応速度モデル
↓
反応速度に関する知見無
↑
分子軌道法を用いた解析的検討
反応管を用いた実験的検討

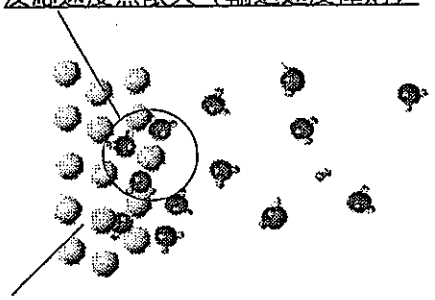
JNC　第２回研究開発報告会　平成14年5月17日

3.1 表面反応モデル

○ 従来知見と仮定

・ナトリウムが引き剥がされる
→ 反応生成物は全て気相側へ

・H_2Oの表面への輸送速度に比べ反応速度は十分に早い
→ 反応速度無限大（輸送速度律則）



・液体中へのエネルギ伝達は非効率
単原子分子（運動エネルギ）
電子励起状態は細分化されかつ連続的
→ 反応エネルギは全て気相側へ

○ 反応速度($\dot{m}$: kg_H_2O/s/m^3)

$$\dot{m} = Sh \times \frac{\rho D}{l}(Y_{H_2O} - 0) \times A/V$$

Sh:Sherwood数，D:拡散係数，ρ:密度
l:代表寸法，Y:質量分率，A:接触面積
V:体積

物質伝達と熱伝達のアナロジ

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{\alpha}{D} = \frac{\lambda}{C_p \rho D} = 1$$

$$Sh = Nu = \frac{h}{\lambda/l} = \frac{h \times l}{\lambda}$$

$$\dot{m} = a\frac{h}{C_p}Y_{H_2O}$$

Le:Leiws数，α:温度拡散係数，C_p:定圧比熱
a:界面積濃度[1/m]，h:相間熱伝達率

JNC

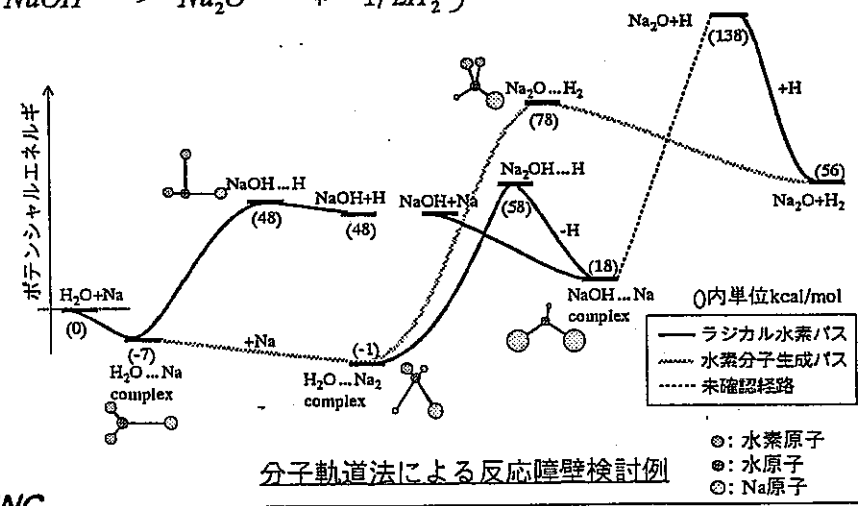
第2回研究開発報告会　平成14年5月17日

3.2 気相反応モデル

○ 分子軌道法の知見によるモデル化（継続中）

$$\left.\begin{array}{lllll} Na & + & H_2O & \rightarrow & NaOH + 1/2H_2 \\ 2Na & + & 2H_2O & \rightarrow & 2NaOH + H_2 \\ 2Na & + & H_2O & \rightarrow & Na_2O + H_2 \\ Na & + & NaOH & \rightarrow & Na_2O + 1/2H_2 \end{array}\right\}$$

総括反応速度(アレニウス型)を各成分種の移流・拡散方程式及びエネルギ方程式に組み込む

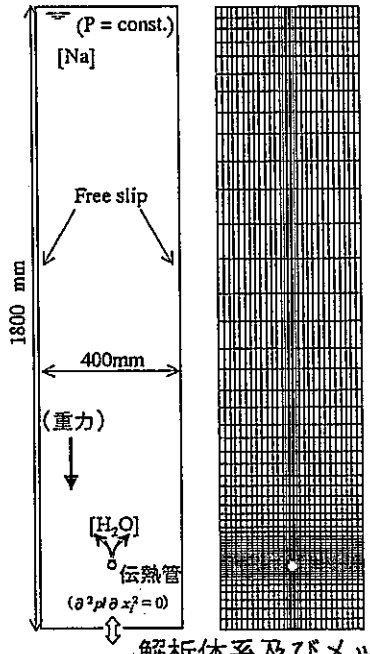


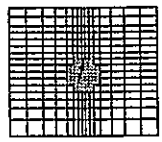
分子軌道法による反応障壁検討例

JNC

第2回研究開発報告会　平成14年5月17日

4．試解析（SWAT－1R，RUN－HT1を模擬）
4.1 破損伝熱管単管での解析(2次元)





解析体系及びメッシュ

(矢印：水ブロー位置[1メッシュ])
メッシュ分割：33×55×1

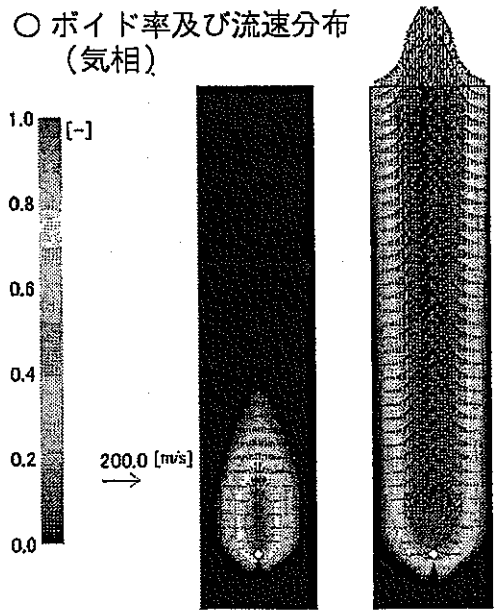
○ 解析条件
- 水蒸気側圧力　：1.4×10^{7} [Pa]
- 蒸気温度　：352 [℃]
- 噴出口　：3.28×3.28 [mm]
- 初期Na温度　：470 [℃]
- カバーガス圧　：2.0×10^{5} [Pa]
- 相間熱伝達率　：1.0×10^{4} [W/m²/K]
- Δt　：1.0×10^{-6} [sec]
- 解析時間　：50～100 [msec]
- 反応生成割合（表面反応）　：100% NaOH(l)

○ 構成方程式
- 界面積濃度　：Nigmatulin model
- 相間摩擦　：Autruffe model
- 状態方程式　：修正Benedict-Webb-Rubin式

JNC

4.1 破損伝熱管単管での解析(2次元)

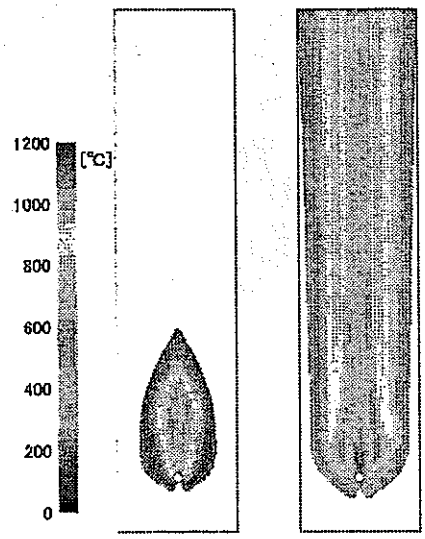
○ ボイド率及び流速分布（気相）



(10msec)　(50msec)

○ 気相温度分布

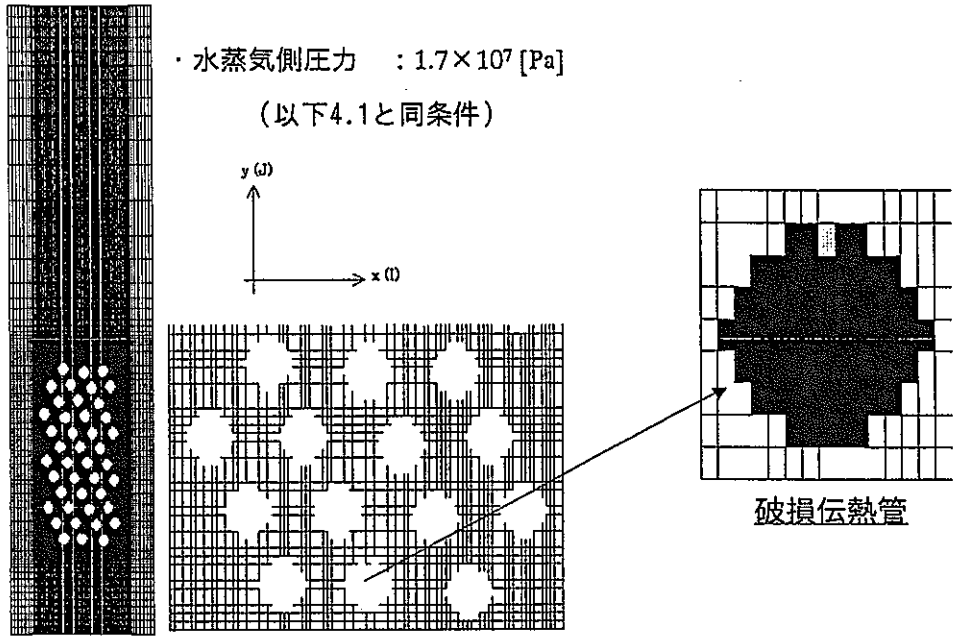
注）気相ボイド率10%以上領域のみ着色



(10msec)　(50msec)

JNC

4.2 複数伝熱管での解析(2次元)



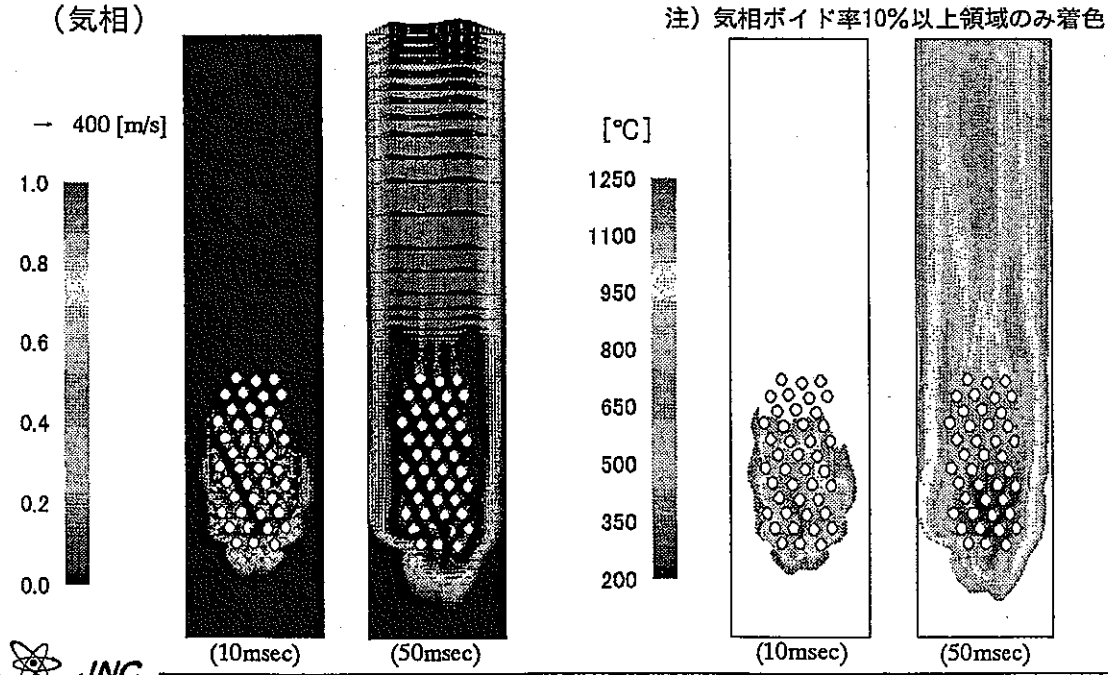
JNC

第2回研究開発報告会　平成14年5月17日

4.2 複数伝熱管での解析(2次元)

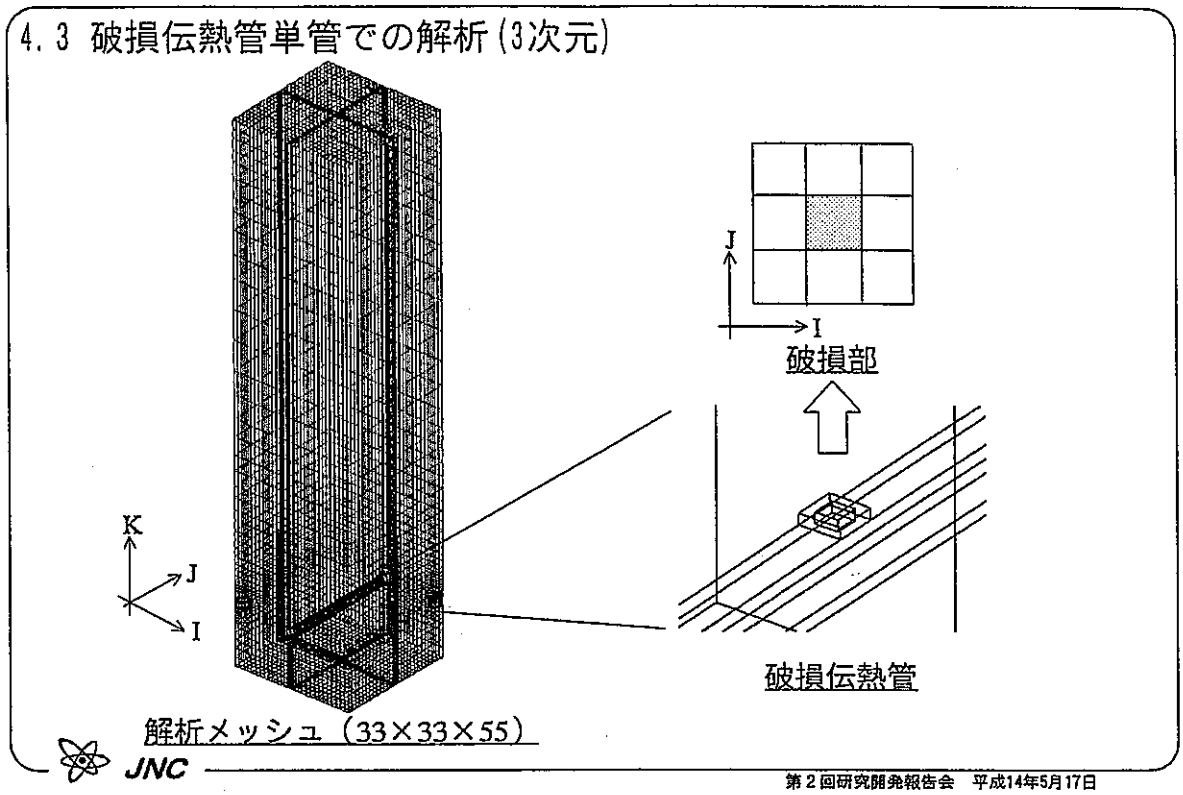
○ ボイド率及び流速分布
（気相）

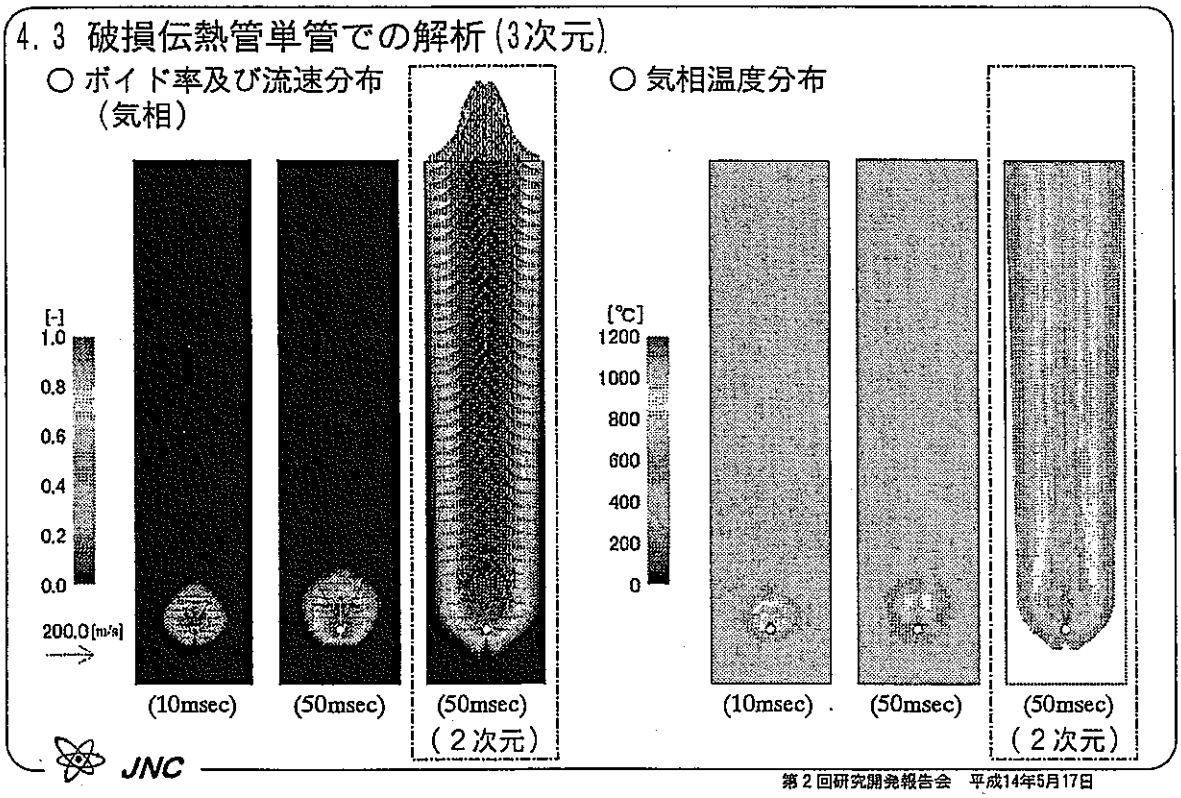
○ 気相温度分布
注）気相ボイド率10%以上領域のみ着色



JNC

第2回研究開発報告会　平成14年5月17日


4. 3 破損伝熱管単管での解析 (3次元)
J
I
破損部
K
J
I
破損伝熱管
解析メッシュ (33×33×55)
JNC
第2回研究開発報告会 平成14年5月17日


4. 3 破損伝熱管単管での解析 (3次元)
○ ボイド率及び流速分布
(気相)
○ 気相温度分布
[-]
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
200.0 [m/s]
(10msec)
(50msec)
(50msec)
(2次元)
[℃]
1200
1000
800
600
400
200
0
(10msec)
(50msec)
(50msec)
(2次元)
JNC
第2回研究開発報告会 平成14年5月17日

5．まとめ

研究目的：機構論的モデル化に基づくナトリウム－水反応現象の定量評価及び健全性評価

・微視的シミュレーション手法等を用いた機構論的モデル化

⇒ ・ナトリウム－水反応現象の評価ツールの開発（SERAPHIMコード）

・ナトリウム－水反応現象の定量評価、健全性評価

SERAPHIMコードによる試解析(SWAT-1R RUN HT-1)

⇒ ・解析結果はこれまでの実験的知見と概ね整合（継続して妥当性を確認中）
・3次元を含めた実機規模の解析が可能

今後の予定

・化学反応モデルの高度化
・構成方程式（相関摩擦等）の高度化
・妥当性確認及び健全性評価の実施

JNC

第2回研究開発報告会　平成14年5月17日

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕　再臨界排除可視化基礎試験の進捗　　部課室：技開部リスク Gr
・冷却材逆流型 FCI による圧力発生挙動・　　報告者：松場 賢一

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）面白い実験と思う。40cc の注水量では蒸気が冷やされる効果が現れたとのことだが、別々の場所に 20cc ずつ注水してトータル 40cc とした場合でも、結果は同様になると思うか。 水は融体より軽いから時間が経てば界面の不安定現象によって分割されるだろうし、水の熱容量効果とは一概には言えないかもしれない。検討されたほうがよい。（安全設計 Gr 丹羽 GL）	A1）ある塊状の水が存在することが重要なので、水を分割したら熱容量の効果は現れなくなると考えられるが、指摘のとおり、融体と水の混ざり方によって現象が影響されることについては検討していく必要があると思う。（発表者） 解析評価にも現れているが、初期の蒸発によって融体が上方に押し上げられ、水と融体が分離する状況を生じていると思われる。このような分離挙動については、２０ｃｃを２つ置いても４０ｃｃと同様の傾向が出ると予測している。（リスク Gr 佐藤 GL）
Q2）試験結果を圧力で整理しているが、安全評価上重要なのは発生エネルギーあるいはその変換効率であって、それは実験でも計測しているカバーガスの圧力上昇などから求められるはずである。（リスク Gr 遠藤氏）	A2）圧力自体はエネルギー量ではないので、FCI による発生エネルギーは、融体の運動エネルギー、カバーガスの圧力上昇によるエネルギー、容器の変形エネルギーのトータルのエネルギー量で評価される必要がある。今後、そのような評価を行うつもりである。（発表者）
Q3）冷却材が逆流して大きな圧力が発生することを心配することは当然であると思うが、その前に逆流自体を想定する必要が本当にあるのか検討しておくことも必要ではないか。FAUSKE 氏のように界面安定性の観点から実機条件では逆流は考えなくてもよいと言う人もいるし、今の実験はそれ（FAUSKE 氏の主張）とは真っ向から対峙するものと思う。どのように考えているか？（リスク Gr 遠藤氏）	A3）実験事実として冷却材の逆流を把握している。例えば、集合体規模の炉心溶融を模擬した SCARABBE 試験のデータに燃料中にナトリウムが逆流した証拠がある。ただし、圧力差が付いただけで本当に燃料中に冷却材が逆流できるかどうかという点については、今後の予定にある融体/冷却材隣接試験の中で検討する。（発表者） 融体をパイプで注入した試験では実際に冷却材が逆流している。（リスク Gr 佐藤 GL）

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q4)　今回のような模擬試験の結果をどのように炉の設計に反映していくかがよく見えない。 （安 成弘 東大名誉教授）	A4) 模擬試験によって現象を一般化すること、すなわち実験式を導き、あるいは解析モデルに反映することが重要で、それは概念設計に役立てる。　（発表者） カザフスタンで実炉条件を模擬した EAGLE 試験を実施しており、今回の模擬試験の結果は EAGLE 試験の成果と組み合わせて設計に反映していく。 （リスク Gr 佐藤 GL）
Q5)　次期試験の準備状況はどうか？試験はうまくいきそうか？　（技開部 和田部長）	試験装置の組み込みが終了したところで、現在は準備試験を行っている。準備を進めてく中で、解決すべき課題もいくつか出てきている。　（発表者）

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕T 字配管内温度変動に関する実験研究

部課室：技開部 開発 Gr.
報告者：五十嵐　実

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）壁面に見られた長周期の温度変動は、口径が大きくなる実機でも同様の周期で発生すると考えられるのか？（構造 Gr.笠原主幹）	A1）枝配管噴流の挙動は運動量比によって整理できることが確認できたので、運動量比に依存した周期になることが予想される。しかし、St 数で整理ができた枝配管後流の渦との関連を考慮すると、枝配管口径の影響も考えられるので、今後検討していく予定である。
Q2）主/枝配管の運動量比が変化すると、壁面での温度変動周期も変化するのか？（構造 Gr.笠原主幹）	A2）まだ整理は行っていないが、主配管の流速が遅くなると壁面での温度変動周期も遅くなる傾向が見られている。
Q3）サーマルストライピングの評価ルールを策定するのが目的となっているが、今回発表した実験は評価ルールのどの部分を担っているのか？（安全設計 Gr.丹羽 GL）	A3）評価ルールでは段階的にスクリーニングを実施する予定になっている。今回の実験は、流体側での温度変動減衰挙動を把握して、スクリーニングに使用するチャート（温度変動強度の空間分布、周波数特性等）を作成する部分に相当する。また、現象を解明するための、流体混合挙動を把握する目的も含まれている。
Q4）温度計測に使用した熱電対の仕様はどのようなものか？（FBRGr.西口主幹）	A4）熱電対にはシースタイプのφ0.25mm を使用した。今回評価している 10Hz 程度の温度変動に対しての応答性は十分である。
Q5）実機では Na が対象になると思われるが、今回の水試験の結果から実機をどのように評価するのか？（FBRGr.西口主幹）	A5）開発 Gr.では、三噴流体系の基礎試験で水と Na の比較を実施しており、この試験から温度変動に対する物性値の影響を把握する予定である。
Q6）評価ルールの具体案は決まっているのか？また、機械学会の評価ルールにはどのように取り込まれるのか？（技開部和田部長）	A6）JNC としての評価ルール案は示しているが、現在は試験結果を考慮に入れ見直しを実施している。今回の結果は ICONE10 でも発表しており、機械学会の評価指針における解説の一部として取り上げられる予定である。

第2回R&D報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕　反応性混相流の数値実験研究（SERAPHIMコードの開発）～ナトリウム－水反応と界面現象をシミュレーションする～

部課室：要素技術開発部
流体計算工学研究Gr.
報告者：高田　孝

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）伝熱管内部の冷却効果，圧力伝播はどの時期にモデル化するのか？SG 全体評価とはどの程度まで考えているのか（熱化学・宮原）	A1）圧力伝播については、1次精度であるため減衰が大きいものの、現状コードで評価可能である。伝熱管内部の冷却水による冷却効果の組み込み自体は難しくない。SG 全体の健全性評価に関しては、本コードでSG全てを解析領域とすることは難しく、現時点では2次破損の有無でSG全体の健全性評価を考えている。
Q2）3次元で解析を行っているが、異方性などは見られていないのか（流体・堺）	A2）単一伝熱管の場合、計算空間自体に異方性がほとんど無いので、顕著な異方性は見られていない。若干最高温度が異なる程度である。
Q3）SWATシリーズの3次元検証解析はいつからやるのか（和田部長）	A3）2次元解析体系自体は実験を模擬した構造であるので、3次元化は容易である。ネックになるのは計算時間であり、なるべく早い時期に3次元計算を実施したいと考えている。
Q4）実験結果が2次元解析と3次元解析との中間にこないか？また3次元解析では非保守側の結果とならないか（和田部長）	A4）2次元解析では、流出量及び反応領域が線で表現されるため、漏えい領域を大きくとる傾向が強い。今回の結果からではむしろ3次元解析の方が実験との整合性は良い。3次元解析が非保守側となることについては、指摘の通りである。健全性の観点では何らかの留意も必要と考えられる。
Q5）コード名（SERAPHIM）は既に決定済みか？コード名として少し長いと思われる（和田部長）	A5）基本的には決定済みであるが、更によい名称があれば検討してみたい。

JNC TN9440 2002-004

第３回　Ｒ＆Ｄ報告会

〔平成 14 年 6 月 14 日〕

JNC TN9440 2002-004

第3回R＆D報告会資料

「常陽」MK－Ⅲ改造工事における冷却系の不純物管理

平成14年 6月14日

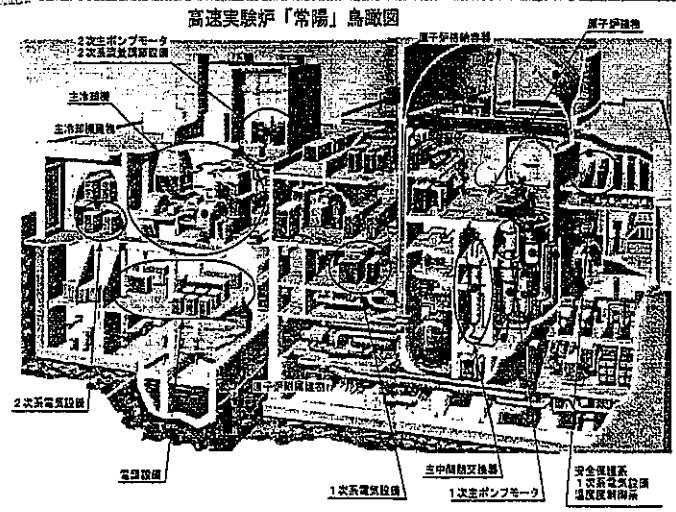
実験炉部　原子炉第二課
住野　公造

MK－Ⅲ冷却系改造工事の概要

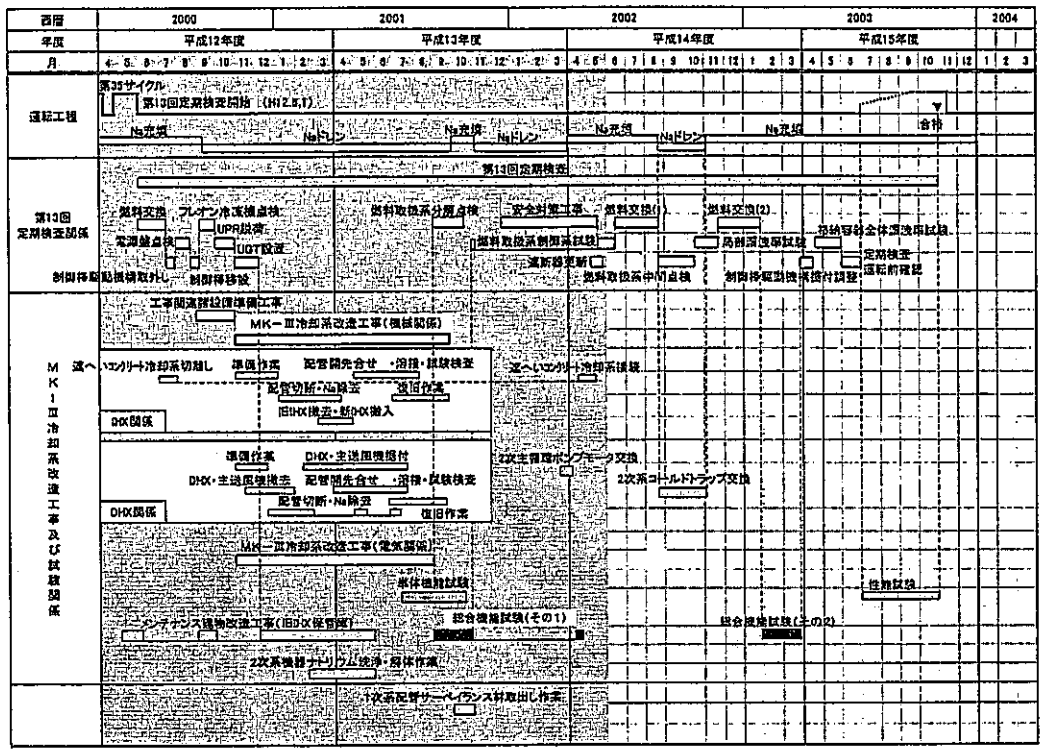
MK－Ⅱ炉心とMK－Ⅲ炉心の基本仕様

項目	MK－Ⅱ	MK－Ⅲ
原子炉定格熱出力 MWt	100	140
最大高速中性子束 n／cm²・s	3.2×10¹⁵	4.0×10¹⁵
1次系冷却材流量（1ループ当り） t／h	1100	約1350
2次系冷却材流量（1ループ当り） t／h	1100	約1200
原子炉出入口冷却材温度 ℃	370／500	350／500

高速実験炉「常陽」鳥瞰図



MK－Ⅲ改造工事のスケジュール



改造工事期間中の不純物管理手法

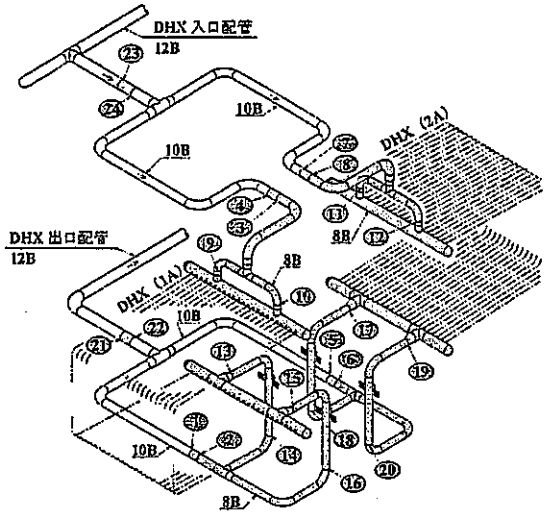
- 冷却系配管の切断・溶接順序の最適化
- シールバッグ、グローブボックスの使用
- シールバッグと系統内の低圧での均圧制御
- オンラインによる不純物監視（濃度管理値の設定）
  - *カバーガス系：ガスクロマトグラフ*
  - *シールバッグ内：酸素濃度計*

不純物混入防止対策

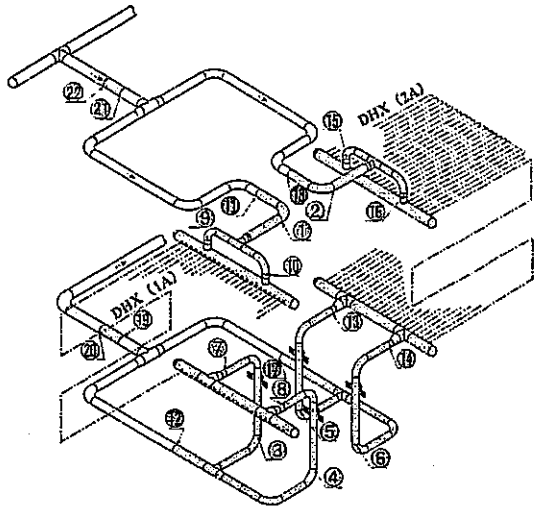
- 不純物混入量の評価
  - *酸素：ナトリウム純化前後のプラギング温度の差*
  - *酸素及びその他成分：ナトリウムサンプリング*

DHX(A) 接続配管の切断・溶接順序

□ ：更新範囲

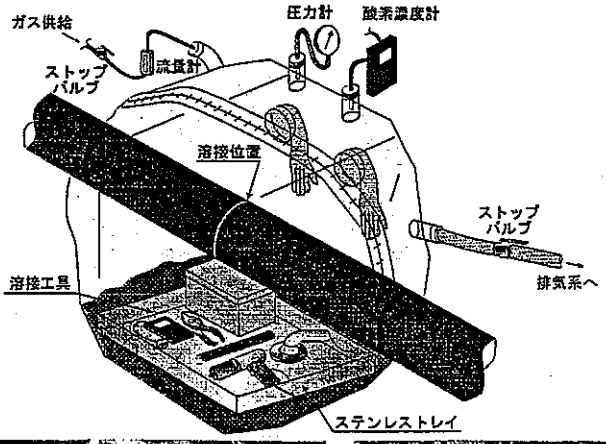


切断位置



溶接位置

シールバック（又はグローブボックス）の使用



濃度管理値

シールバック内：

O_2 ⇒1,000ppm以下

系統内カバーガス中：

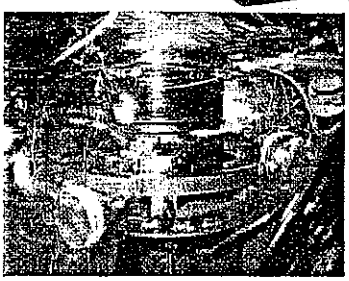
O_2 ⇒ 300ppm以下

N_2 ⇒1,200ppm以下

圧力制御

切断 ⇒ 約150～250Pa

溶接 ⇒ 約 50～100Pa

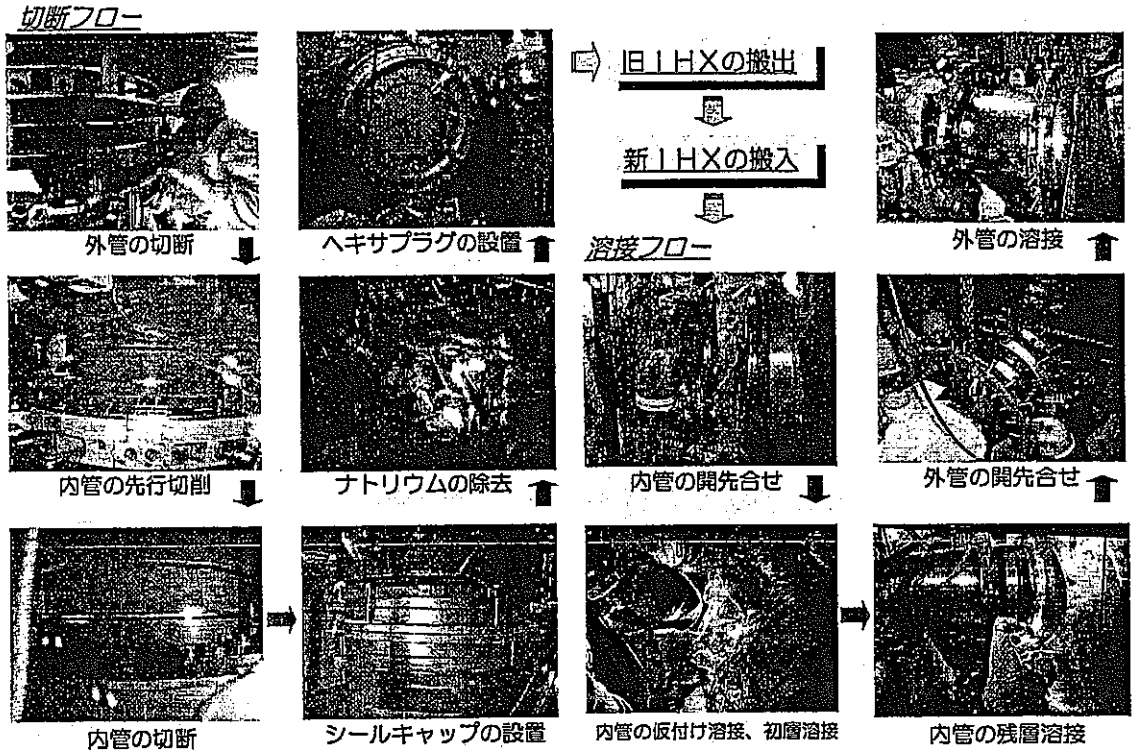


1次系改造工事用シールバック

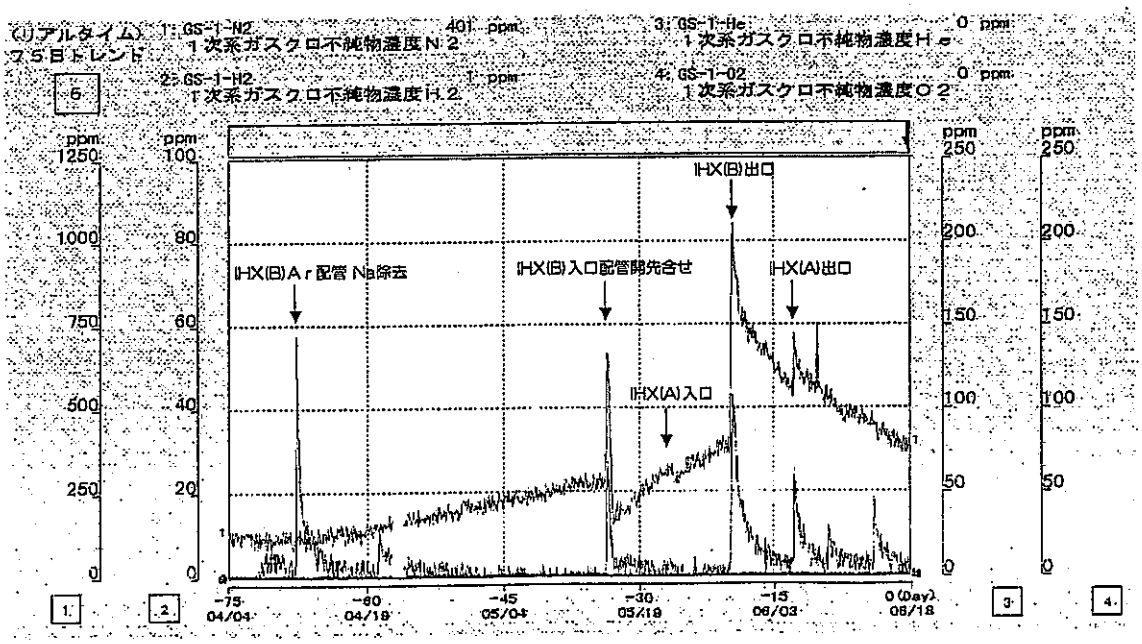
2次系改造工事用グローブボックス（切断及び自動溶接用）

2次系改造工事用シールバック（開先合せ及び手動溶接用）

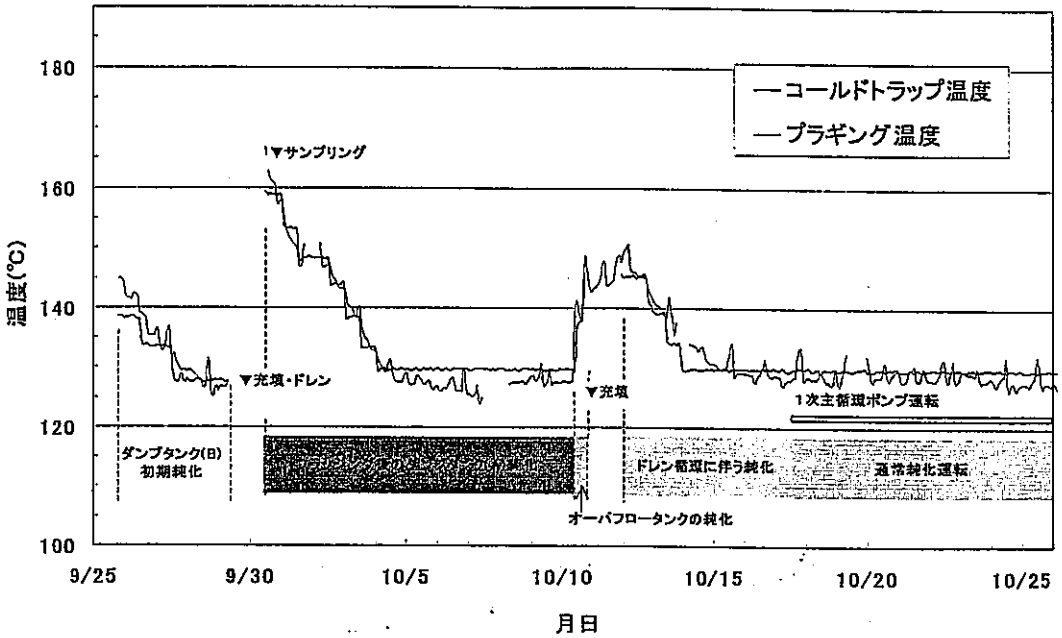
１次系二重配管の切断・溶接フロー



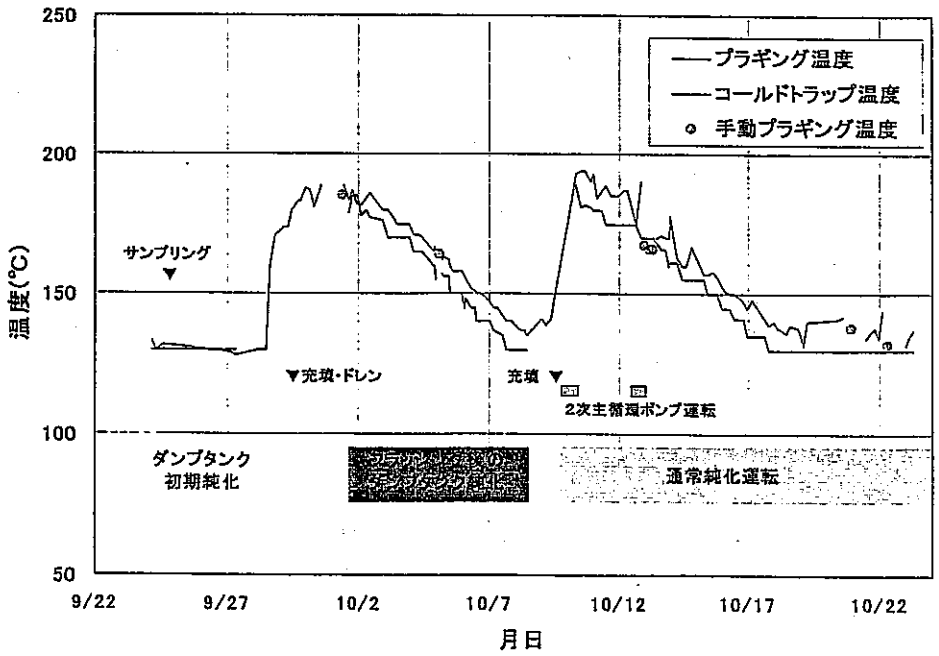
１次系配管溶接時のカバーガス中の不純物濃度変化



１次系純度測定試験時のプラギング温度変化



２次系純度測定試験時のプラギング温度変化



冷却材中に混入した酸素量の評価

1次系ナトリウム

単位：kg-O

項　目	予測値		評価値
カバーガスに供給される清浄アルゴン中の酸素	0.002	1.948 (0.624*)	0.383
更新された冷却系機器内面に付着した酸素	0.441		
冷却系バウンダリー開放に伴い混入した酸素	1.505 (0.181*)		

2次系ナトリウム

項　目	予測値		評価値
カバーガスに供給される清浄アルゴン中の酸素	0.002	7.155 (2.497*)	1.100
更新された冷却系機器内面に付着した酸素	2.423		
冷却系バウンダリー開放に伴い混入した酸素	4.730 (0.072*)		

＊実際のシールバッグ中の酸素濃度、冷却系バウンダリー開放時間等から評価した値

ナトリウムサンプリングの分析結果

1次系ナトリウム

分析成分	純度管理目標値	測定値	MK-Ⅱ以降平均値
O	10	2.8	2.7
H	5	0.17	0.12
C	30	4.1	3.1
N	50	0.44	0.36
Cl	30	0.44	0.43
Fe	10	0.067	0.09
Cr	5	0.019	0.013
Ni	5	<0.04	0.04

2次系ナトリウム

分析成分	純度管理目標値	測定値	MK-Ⅱ以降平均値
O	20	1.9	2.5
H	10	0.13	0.13
C	50	<2	2.7
N	-	<0.2	0.34
Cl	50	0.26	0.48
Fe	10	0.044	0.08
Cr	5	0.014	0.017
Ni	5	<0.02	0.04

単位：wt. ppm

2次系コールドトラップの酸素捕獲量

既存CT

単位: kg-O

期間	項目		酸素量	
1976.4 ～2000.9	供用開始～MK-Ⅲ改造工事前	MK－Ⅰ出力上昇時に溶出した酸素	1.761	9.524
		カバーガスに供給される清浄アルゴン中の酸素	0.020	
		ナトリウムサンプリングに伴い混入した酸素	0.005	
		2次系メンテナンス作業に伴い混入した酸素	7.738	
2000.10 ～2002.8	MK-Ⅲ改造工事	カバーガスに供給される清浄アルゴン中の酸素	0.002	2.497
		更新された冷却系機器内面に付着した酸素	2.423	
		冷却系バウンダリー開放に伴い混入した酸素	0.072	
既存CTの捕獲酸素量の合計			12.021	

新CT

2002.11～	MK-Ⅲ改造工事後	新CT内面に付着した酸素	0.958
		CT更新工事に伴い混入する酸素	0.430
		カバーガスに供給される清浄アルゴン中の酸素	0.029
		ナトリウムサンプリングに伴い混入する酸素	0.002
		2次系メンテナンス作業に伴い混入する酸素	7.738
新CTの予測捕獲酸素量の合計			9.157

まとめ

1. 系統内への不純物混入防止対策を施したことにより、MK－Ⅲ冷却系改造工事期間において冷却材及びカバーガスとも管理値（純度管理目標値）を超えることなく管理することができた。
2. 対策により、系統内への酸素の混入を予測より大幅に少ない1次系0．6ｋｇ、2次系2．5ｋｇ程度に抑えることができた。
3. 不純物管理を含めたMK－Ⅲ冷却系改造工事の経験は、今後の「もんじゅ」の冷却系改造工事等に活かされるものと期待される。
4. 2次系コールドトラップについては、製作を今年の3月に完了しており、更新工事を8月から9月にかけて実施する予定である。

第3回R＆D報告会資料

「常陽」炉内サーベイランス試験の現状と中性子照射量評価

平成14年6月14日

実験炉部　技術課
石田　公一

「常陽」原子炉構造材サーベイランス試験の概要〔1〕

■目的

原子炉構造材の環境効果（中性子照射）に対する健全性を確認する。

(1) 設計寿命中*の原子炉構造材の健全性の確認
(2) 原子炉構造材の照射による特性変化の把握

* 131,500時間 (稼働率75%で20年)

■監視（試験）対象

炉容器材(SUS304)
炉心支持板材(SUS316)
炉心バレル材(SUS316)

「常陽」原子炉構造材のサーベイランス試験の概要〔2〕

■試験方法

実機部材と同等もしくはそれより健全性上厳しい環境（加速照射環境）となる位置に試験片を装荷し、供用期間中を通して定期的に取り出して、引張試験等の機械試験を行って、材料特性を確認する。

■評価方法

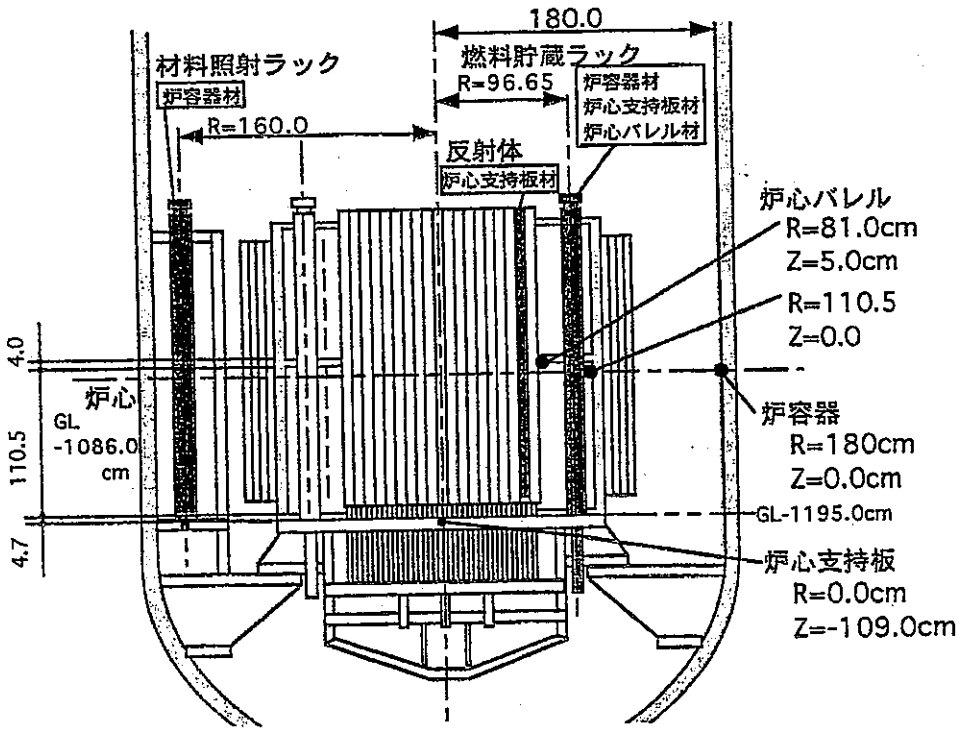
取り出した試験片の高速中性子照射量(E≥0.1MeV)の評価を行い、機械試験結果との関係を把握するとともに、実位置の中性子照射量と試験片のデータから、以後のプラント運転期間中の健全性を評価する。

〔材料の健全性評価基準〕

高速原型炉高温構造設計指針 材料強度基準等（BDS）

「常陽」原子炉構造材のサーベイランス試験

サーベイランス材装荷位置



「常陽」原子炉構造材サーベイランス試験 ④

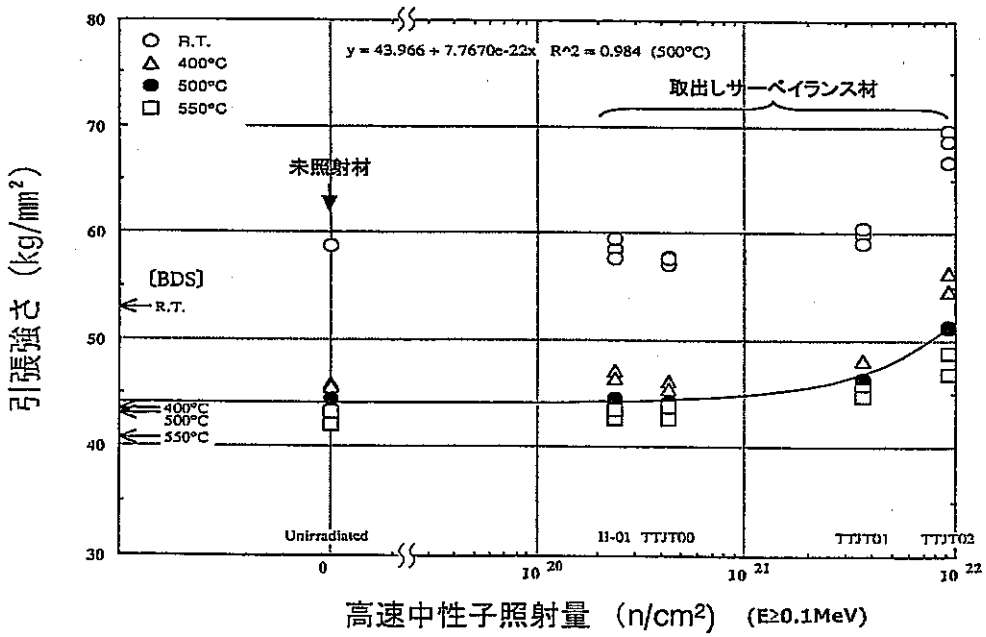
試験片取り出し計画と実績

表中の数値は試験片取出し時に評価した高速中性子照射量(E≥0.1MeV) (単位:n/cm²)

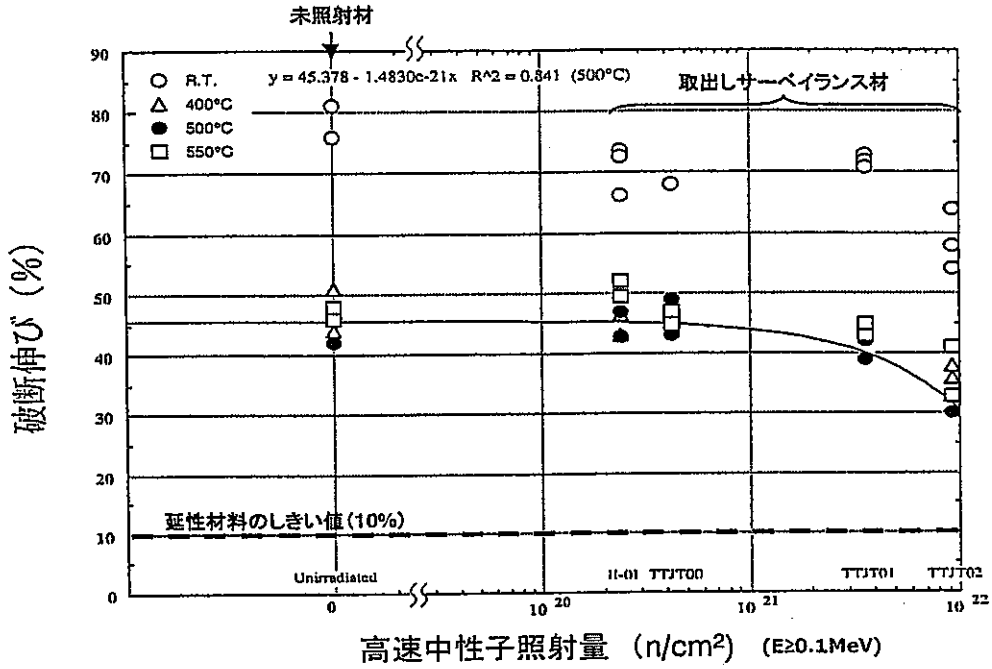
「常陽」フェーズ		MK-II									MK-III		
取り出し時期		1サイクル後	8サイクル後	6サイクル後	9サイクル後	12サイクル後	18サイクル後	24サイクル後	29サイクル後	35サイクル後	今後検討		
装荷年数	100MW	0.43 *	1.02 *	2.11	2.60	3.09	4.40	5.70	6.33	7.78	—	—	—
	140MW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.50	10.00	20.00
反射体位置 炉心支持板材		TTJT00 (S55.4) 4.34×10^{20}		TTJT01 (S60.1) 3.64×10^{21}			TTJT02 (H1.7) 9.16×10^{21}			TTJT03	TTJT04		
燃料貯蔵ラック位置 炉容器材 炉心支持板材 バレル材			II-01 S57.2 2.37×10^{20}		II-02 (S61.4) 8.19×10^{20} (炉容器材のみ)			II-04 (H4.5) 2.01×10^{21} (炉容器材のみ)			II-03		II-05
材料照射ラック位置 炉容器材			I-01 (S57.6) 8.27×10^{19}			I-02 (S62.5) 1.87×10^{19}			I-03 (H7.6) 3.01×10^{19}			I-04	I-05

*:100MWt出力換算の値　　実施済 ⟸

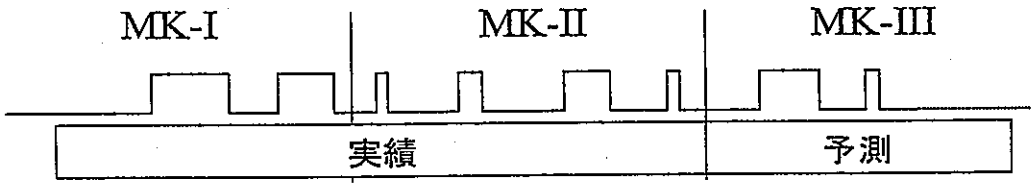
「常陽」原子炉構造材サーベイランス試験結果の一例
【炉心支持板材】引張強さと高速中性子照射量の関係



「常陽」原子炉構造材サーベイランス試験結果の一例
【炉心支持板材】破断伸びと高速中性子照射量の関係



中性子照射量評価方法



$$\Phi_{E\geq 0.1MeV} = \int dt \int_{0.1MeV}^{\infty} dE\phi(E)$$

$$= \sum_{運転サイクル} \phi T$$

$$= \sum_{MK-I} \phi(E/C)T + \sum_{MK-II} \phi\underline{(E/C)}T + \sum_{MK-III} \phi\underline{(E/C)}T$$

中性子束は輸送計算により評価

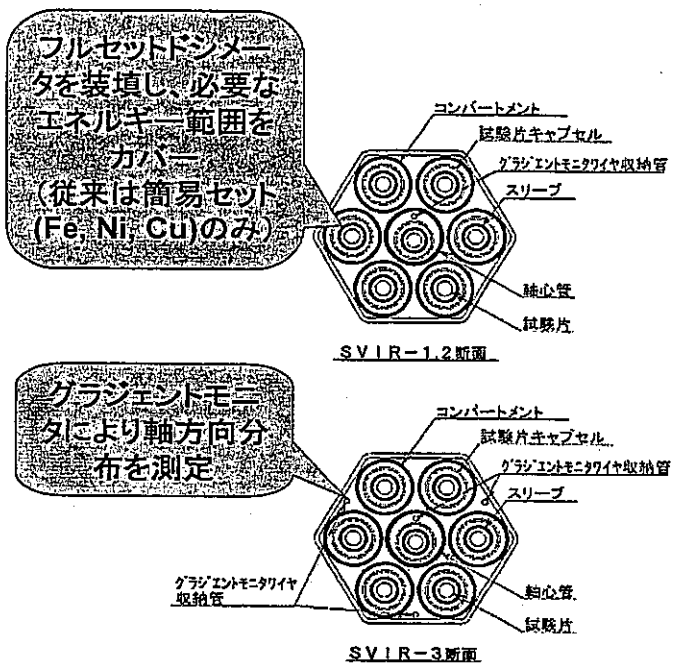
ドシメトリー試験結果で補正

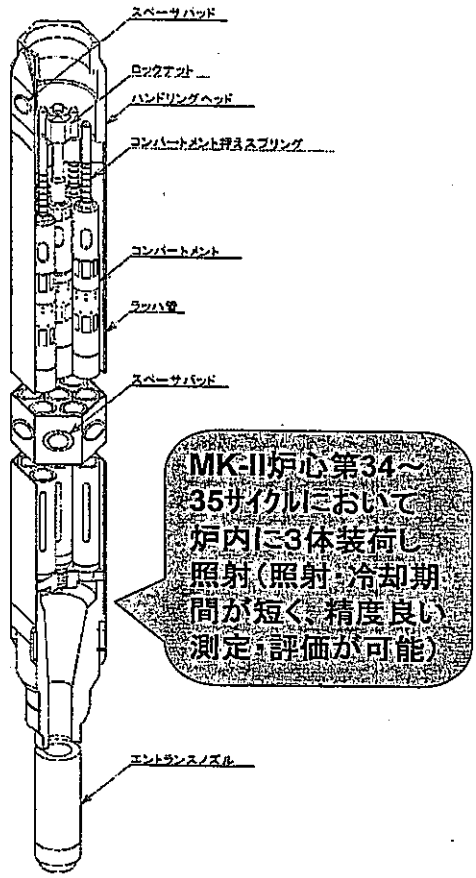
今回"SVIR"結果に基づき評価

暫定的にMK-IIと同じとして評価。MK-III炉心でのドシメトリ試験結果を反映して今後再評価予定

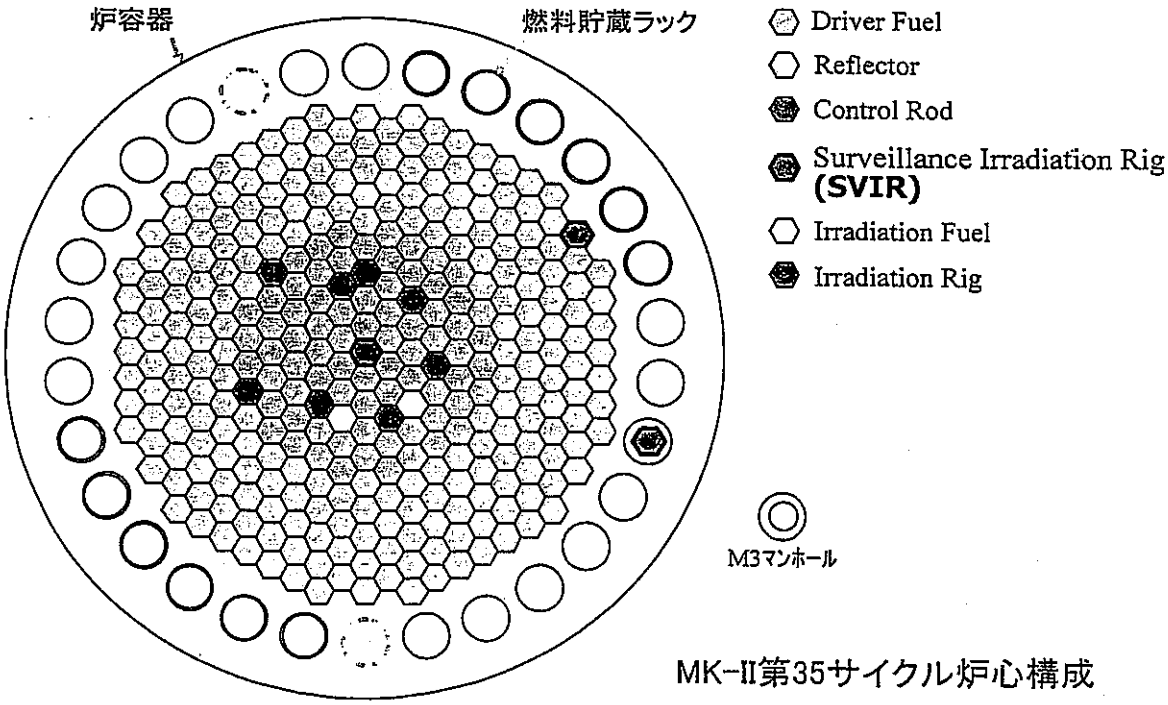
ここで、
ϕ: 高速中性子束(E≥0.1MeV)
T: 積算運転時間

サーベイランス試験条件評価集合体 "SVIR" の概要

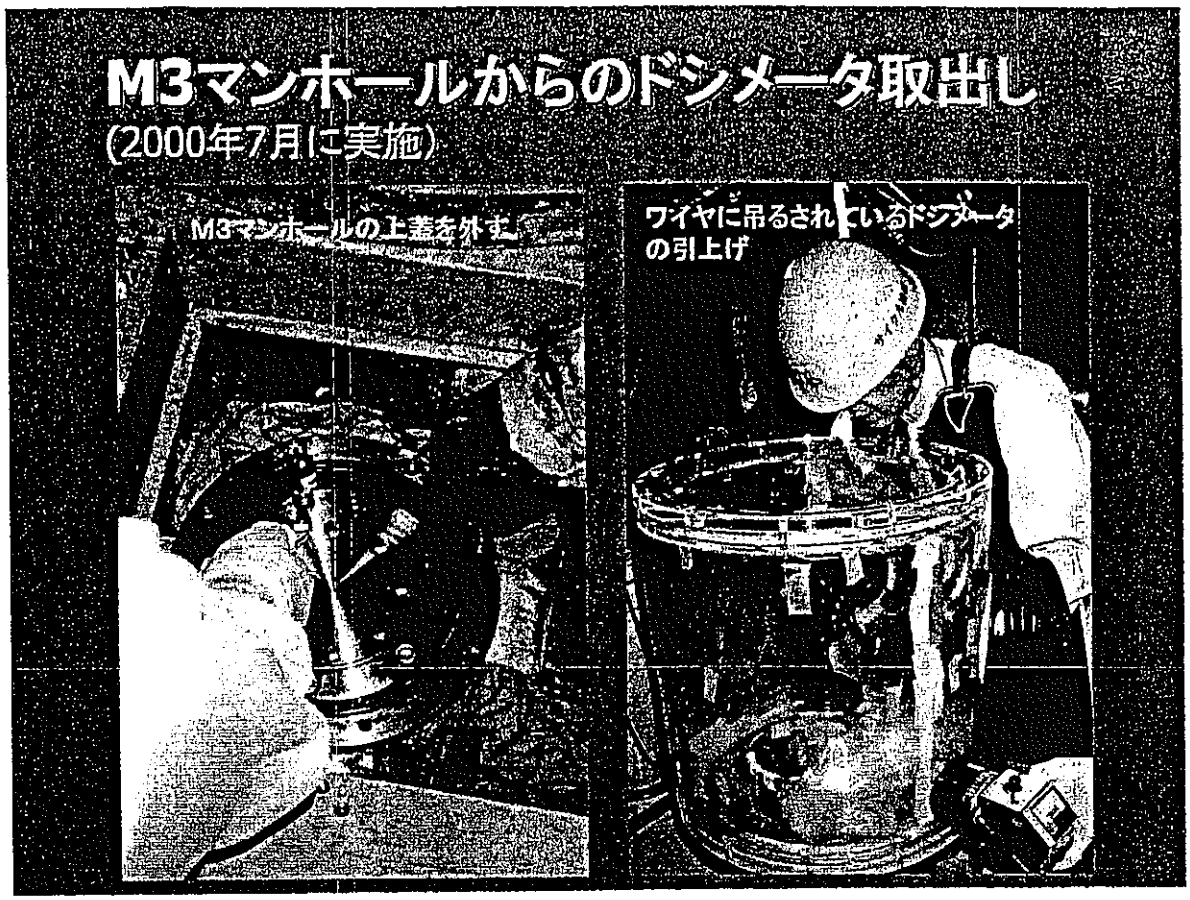


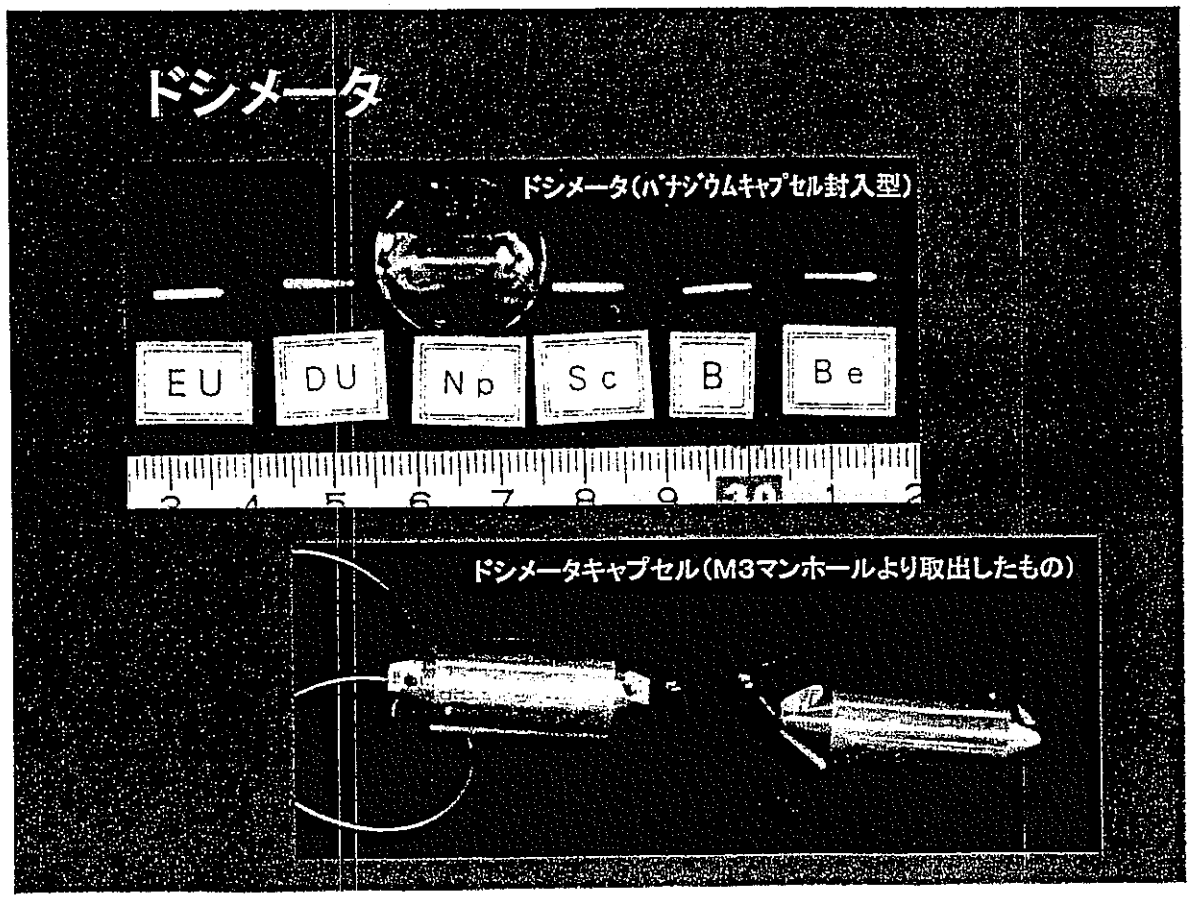


サーベイランス試験条件評価集合体 "SVIR"の装荷位置

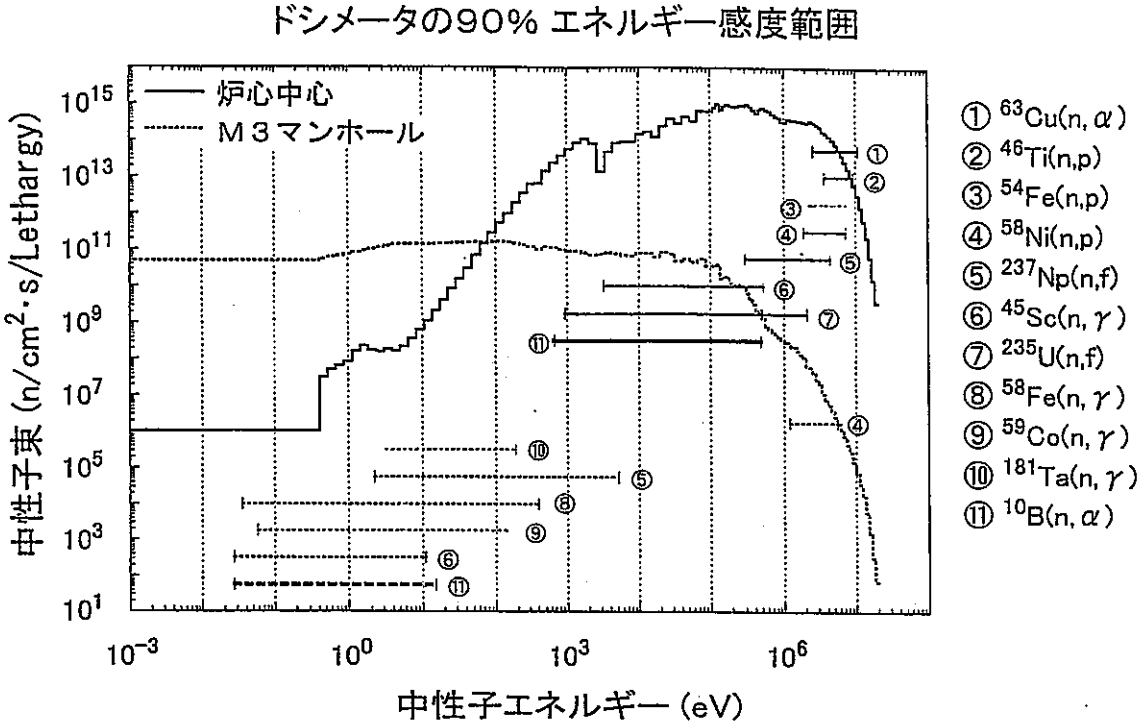


MK−II第35サイクル炉心構成

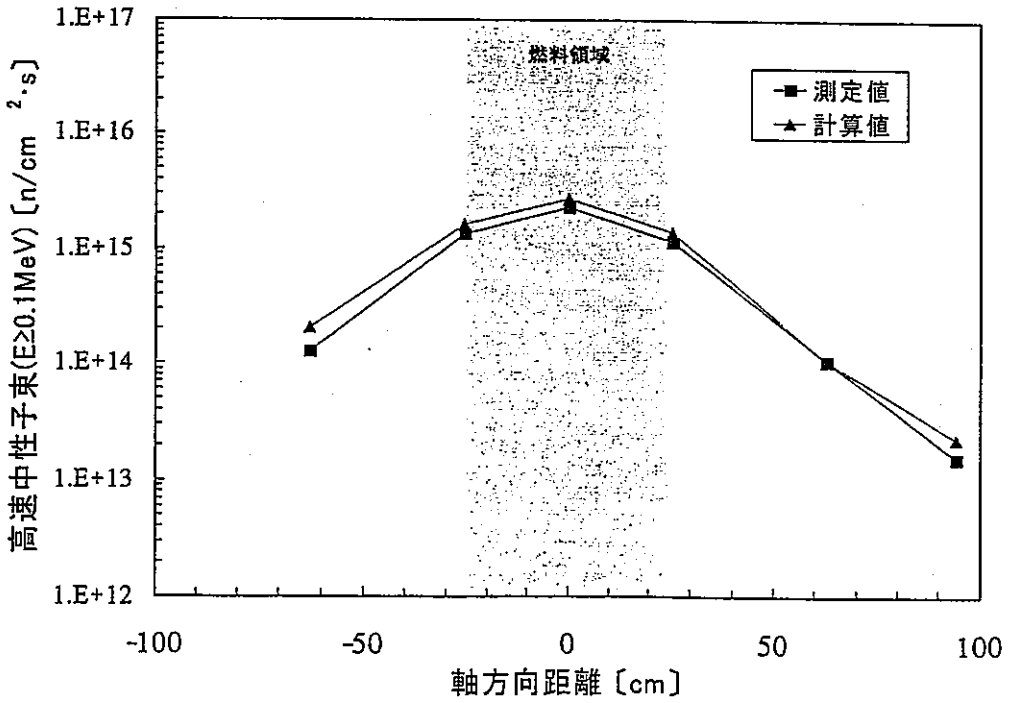

M3マンホールからのドシメータ取出し
(2000年7月に実施)
M3マンホールの上蓋を外す
ワイヤに吊るされているドシメータの引上げ


ドシメータ
ドシメータ(パナジウムキャプセル封入型)
EU
DU
Np
Sc
B
Be
ドシメータキャプセル(M3マンホールより取出したもの)

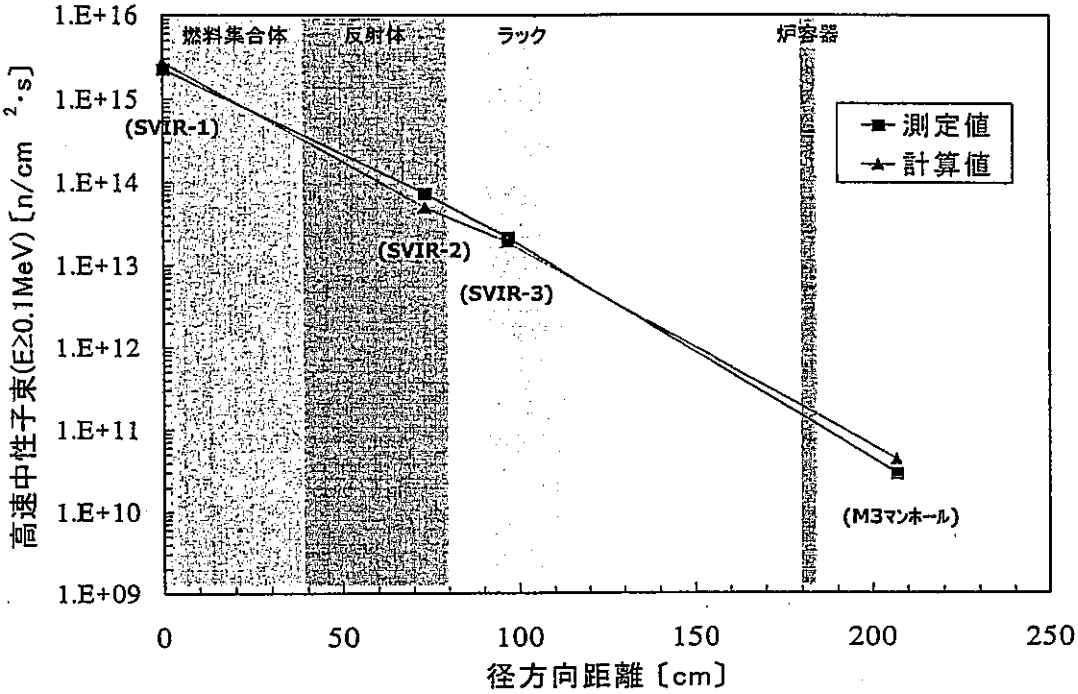
<測定結果の例>



"SVIR"による中性子照射量の評価
中性子束軸方向分布
(炉中心位置での軸方向分布測定値と計算値の比較)



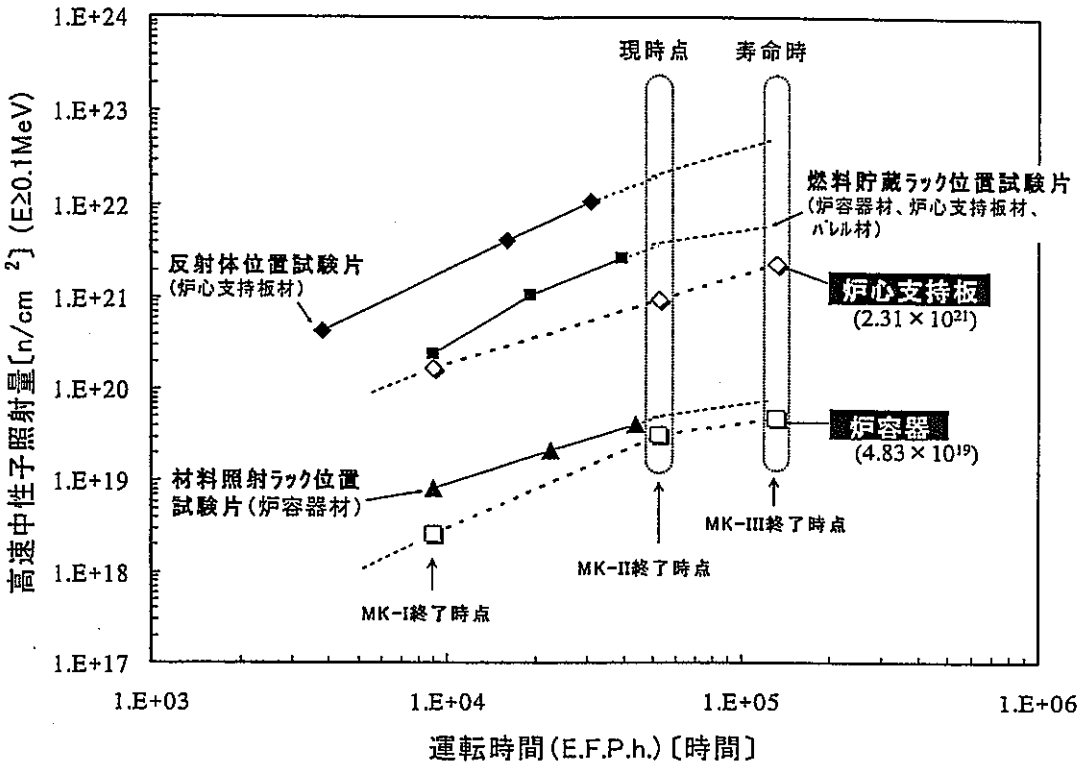
"SVIR"による中性子照射量の評価
中性子束径方向分布
(燃料領域中心高さの径方向分布測定値と計算値の比較)



炉内各位置の中性子照射量評価
輸送計算結果補正のためのC/E

対　象		位　置	C/E
サーベイランス試験片	反射体位置	R=73.35cm Z=0.0	**0.7**
	燃料貯蔵ラック位置	R=96.65cm Z=0.0cm	**0.9**
	材料照射ラック位置	R=160.0cm Z=0.0cm	**1.3**
実機構造材	炉容器	R=180cm Z=0.0cm	**1.4**
	炉心支持板	R=0.0cm Z=-109.0cm	**2.0**

高速中性子照射量(E≥0.1MeV) 評価結果



炉容器、炉心支持板の中性子照射量と健全性

(E≥0.1MeV)

監視対象	MK-I～MK-II累積高速中性子照射量〔n/cm²〕	「常陽」寿命時*累積高速中性子照射量〔n/cm²〕	備　考
炉容器	**3.12×10^{19}**	**4.83×10^{19}** (取出材の最大照射量 2.67×10^{21})	寿命時累積照射量を超える既取出サーベイランス材の機械試験の結果、健全性に問題がないことが確認されている。
炉心支持板	**9.38×10^{20}**	**2.31×10^{21}** (取出材の最大照射量 1.08×10^{22})	

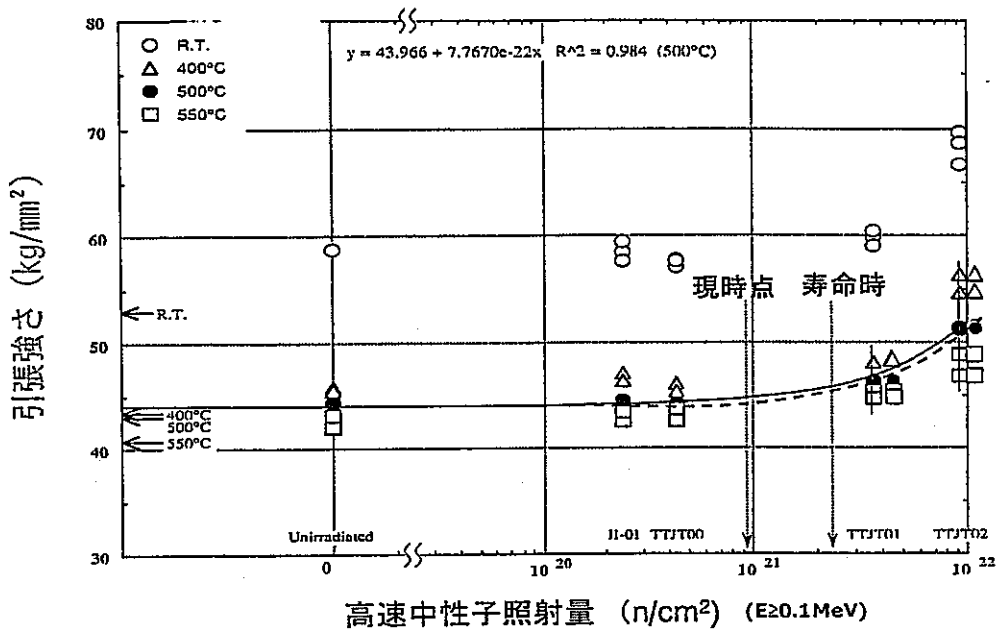
*「常陽」設計寿命までの残りの運転時間78,642時間をMK-III炉心で運転するとした

⇩

“炉容器”, “炉心支持板”は、設計寿命到達時において健全である

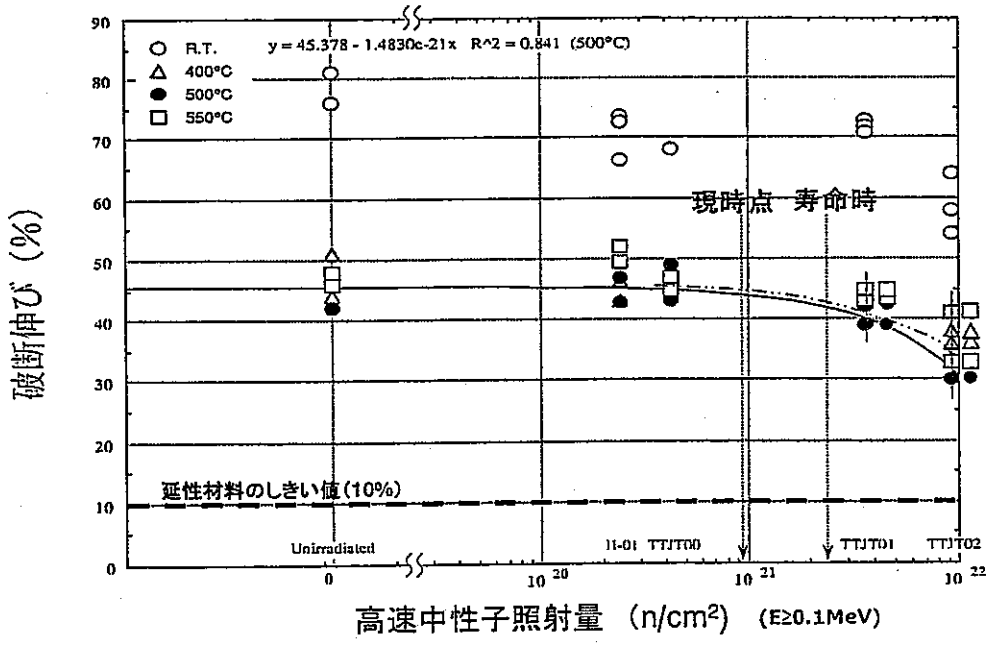
今回の中性子照射量評価結果を反映した

【炉心支持板材】引張強さと高速中性子照射量の関係



今回の中性子照射量評価結果を反映した

【炉心支持板材】破断伸びと高速中性子照射量の関係



まとめ

■ サーベイランス試験における中性子照射量の評価精度の向上のため、MK-II炉心第34～35サイクルにて照射した“SVIR”集合体等のドシメータ、グラジェントモニタの測定結果に基づき、試験片及び実機評価位置の中性子照射量を評価した。

■ 原子炉構造材サーベイランス試験片の試験結果より、「常陽」設計寿命到達時において炉容器、炉心支持板の健全性に問題ないことを確認した。

今後の予定

■ MK-III炉心において、中性子束計算精度を確認し（核特性測定試験等）、実機構造材等の中性子照射量を再評価する予定である。

■ 上記の予測照射量に基づき、現行のサーベイランス試験片の取り出し計画の見直しを行い、構造材の健全性を確認・監視していく。

JNC TN9440 2002-004

「常陽」MK-Ⅱ炉心特性データベースのJENDL-3.2への改訂

平成14年6月14日
実験炉部　技術課
大川内　靖

発表内容

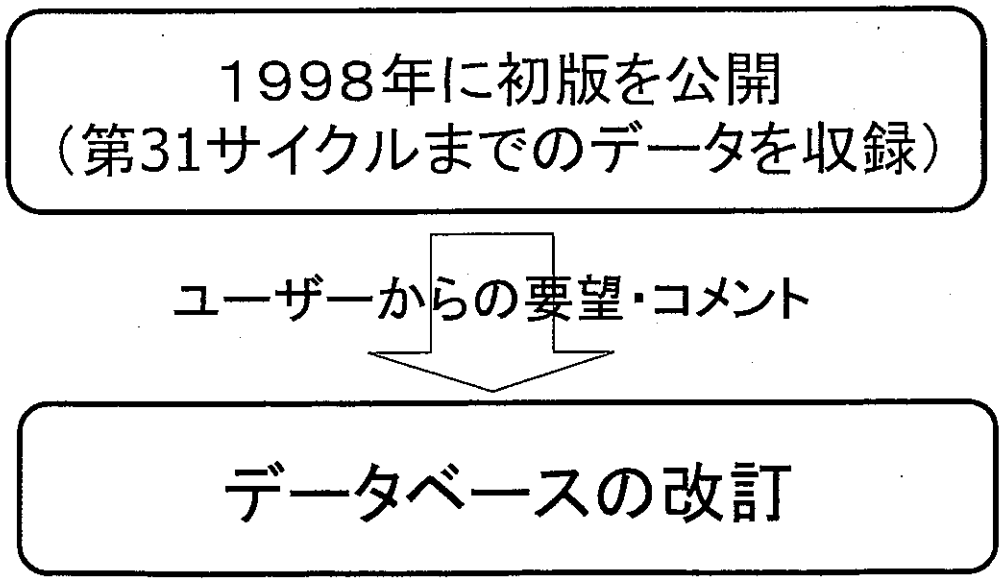
- はじめに
- 改訂の目的と改訂点
- データベースの構成
- 「常陽」における炉心管理計算と運転特性試験
- JENDL-2とJENDL-3.2の比較
- JFS-3-J3.2の重み関数誤りの影響
- まとめ
- 今後の予定

はじめに

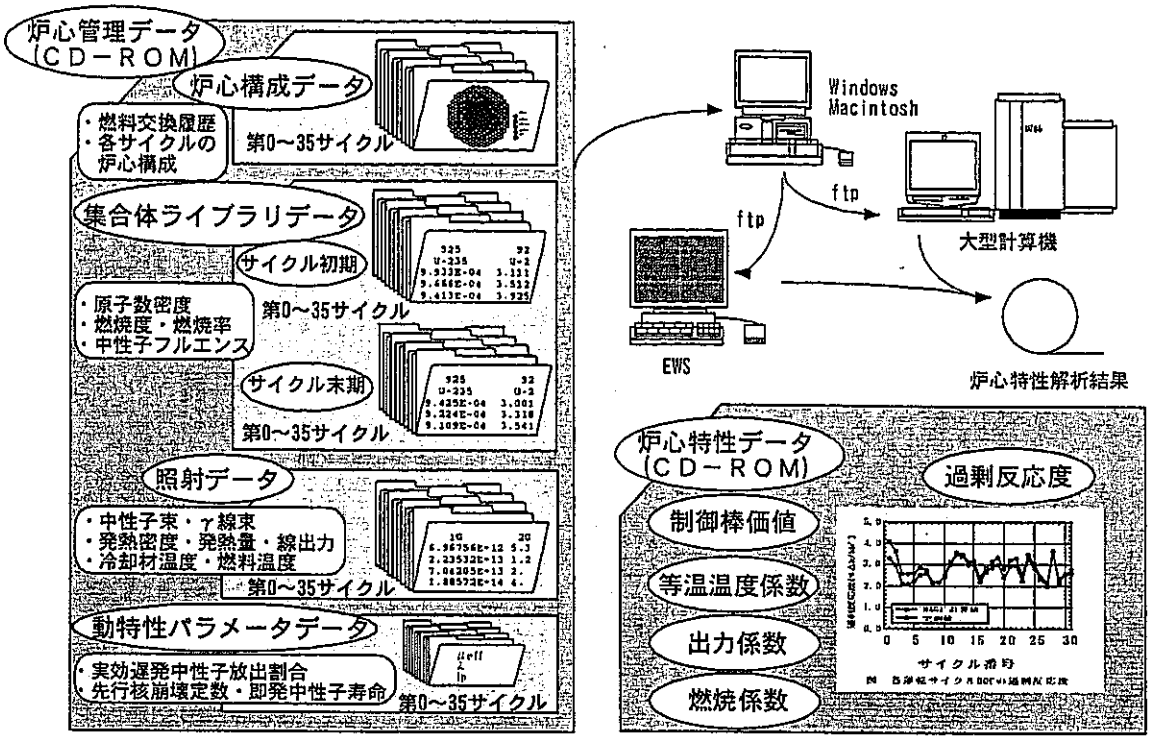
世界の高速炉開発の現状をふまえると、「常陽」のデータは数少ない実機データであり、炉心特性に関するデータは大変貴重である。

「常陽」では炉心特性データベースを広く公開し、高速炉の炉心解析法の検証や照射後試験解析等に使用されてきた。

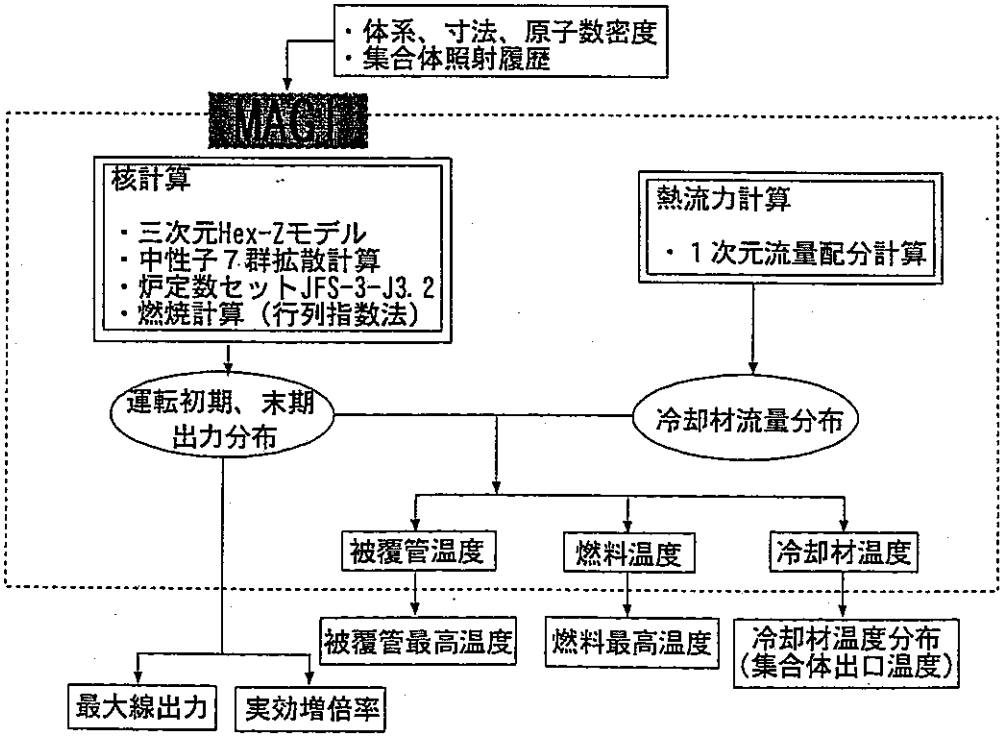
改訂の目的



データベースの構成



炉心管理計算



MK-Ⅱ炉心管理コードシステム“MAGI”の概念

運転特性試験（1）

■過剰反応度

制御棒位置から当該運転サイクルの制御棒校正曲線を用いて算出

■制御棒価値

BOCの低出力状態において、ペリオド法、差替法、により測定

■等温温度係数

起動時零出力状態で1次冷却系の核加熱による系統昇温前後（250℃と370℃）の過剰反応度の差より算出

運転特性試験（2）

■出力係数

起動時及び停止時に出力を5MWtずつ上昇あるいは下降させた時の過剰反応度から算出

■燃焼係数

定格出力運転中における過剰反応度の変化と積算熱出力差から算出

過剰反応度は、反応度補償のため1日3回行っている出力調整時の制御棒位置と制御棒校正曲線から算出

改訂点

■新しい炉定数セットの適用

核計算に使用する炉定数セットをJENDL-2ベースのJFS-3-J2からJENDL-3.2ベースのJFS-3-J3.2へ更新。

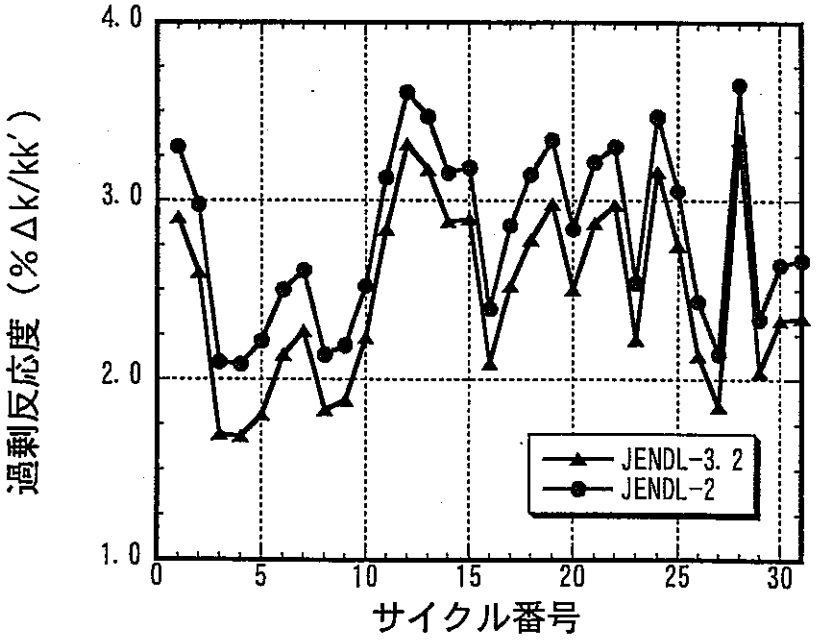
■動特性パラメータの追加

単位変換(ドル→Δk/k)に必要な動特性パラメータの追加。

■データの拡充

MK-Ⅱ性能試験データ、第32～35サイクルの運転特性試験データ 、全制御棒価値の追加。

炉定数更新による各運転サイクル燃焼初期の過剰反応度の比較



JENDL-3.2は平均で約0.3%Δk/kk'低下

炉定数更新による計算値の変化

第1サイクル、炉中心		JFS-3-J2	JFS-3-J3.2	J3.2/J2
全中性子束 ($n/cm^2 \cdot s$)	BOC	4.00E+15	4.02E+15	1.005
	EOC	4.03E+15	4.05E+15	1.005
集合体出力 (MW)	BOC	2.14	2.10	0.984
	EOC	2.11	2.08	0.984
径方向出力ピーキング係数	BOC	1.45	1.40	0.966
	EOC	1.43	1.40	0.979

炉定数更新による計算値の変化

■全中性子束は0.5%増加

⇨JFS-3-J3.2ではU-235及びPu-239の$\nu\sigma_f$が低下するが、炉出力を100MWtに保持するため全中性子束は増加する。

■炉中心の集合体出力は1.6%減少

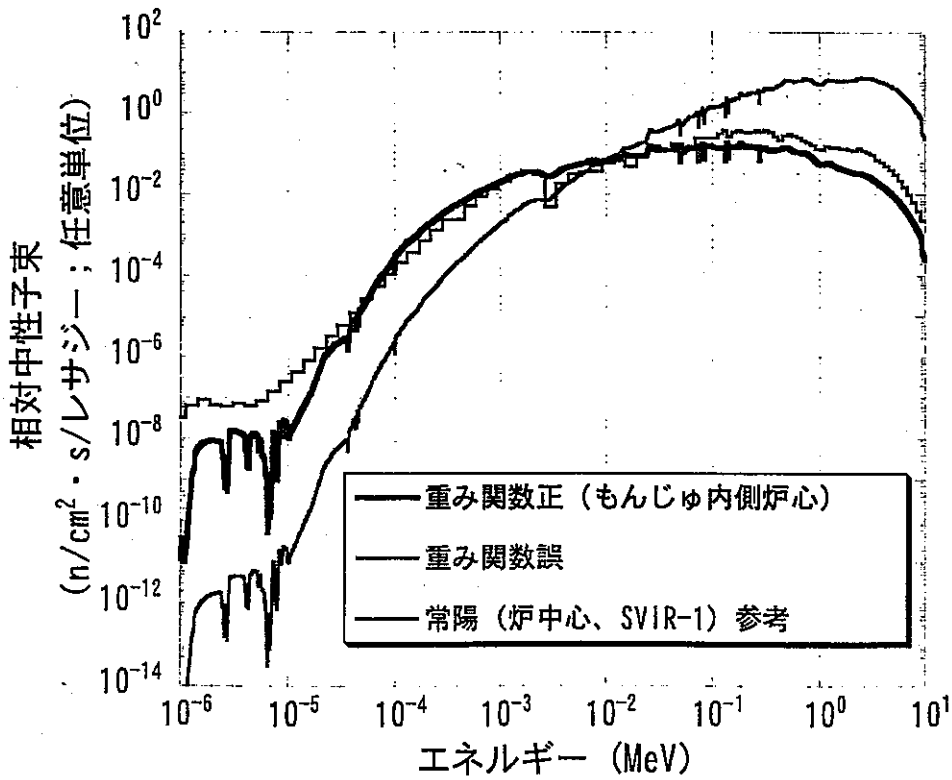
⇨JFS-3-J3.2では拡散係数が炉中心で増加し、径方向外側で低下する。このため、中性子の漏れが増大し、出力分布が平坦化し、炉中心の集合体出力は低下する。

JFS-3-J2とJFS-3-J3.2による燃焼組成の変化

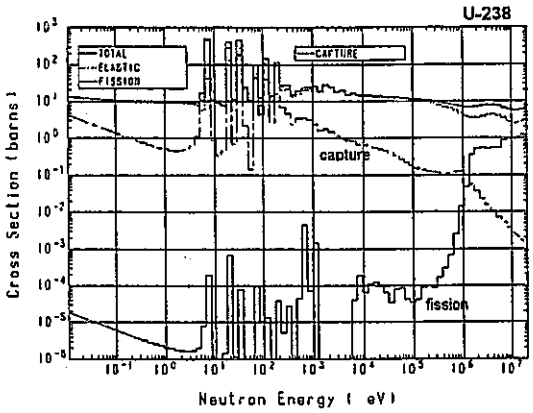
核種	J2 原子数密度 (×10^{24}atom/cm^3)	J3.2 原子数密度 (×10^{24}atom/cm^3)	J3.2/J2
U-235	1.058E-03	1.061E-03	1.00
U-238	4.897E-03	4.898E-03	1.00
Pu-238	2.790E-05	2.804E-05	1.01
Pu-239	1.472E-03	1.473E-03	1.00
Pu-240	6.051E-04	6.040E-04	1.00
Pu-241	1.656E-04	1.660E-04	1.00
Pu-242	1.054E-04	1.053E-04	1.00

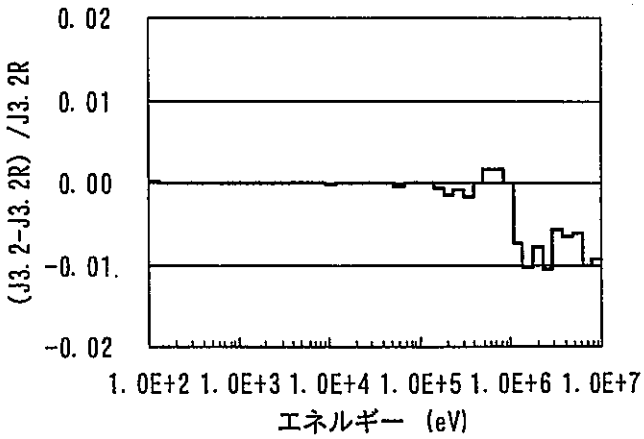
集合体平均燃焼度;23,000MWd/t

JFS-3-J3.2の重み関数に用いたスペクトルの比較



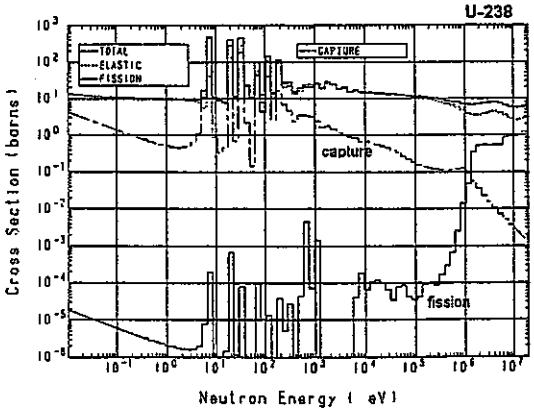
JFS-3-J3.2の重み関数誤りの影響（1）

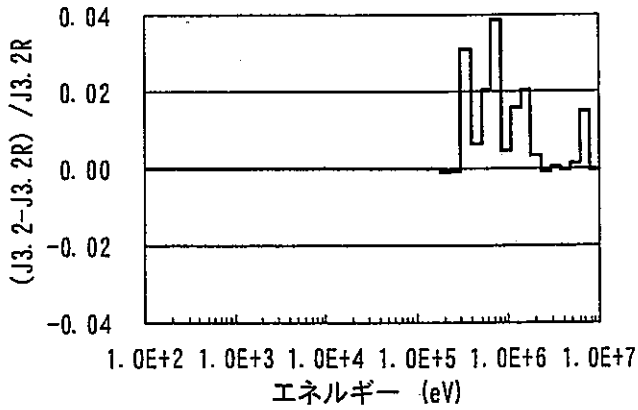




U-238捕獲断面積の相違

JFS-3-J3.2の重み関数誤りの影響（2）





U-238核分裂断面積の相違

JFS-3-J3.2とJFS-3-J3.2Rによる核特性の変化

核特性		J3. 2	J3. 2R	J3. 2R-J3. 2	
過剰反応度 (%Δk/kk′)	BOC	2. 07	1. 93	-0. 14	
	EOC	0. 59	0. 44	-0. 15	
集合体出力 (MW)	BOC	2. 47	2. 46	-0. 01	(-0. 36%)
	EOC	2. 44	2. 44	-0. 01	(-0. 36%)
炉内最大中性子束 (n/cm^2・s)		5. 49E+15	5. 45E+15	-3. 86E+13	(-0. 71%)
最高燃焼度（集合体平均） (MWd/t)		1. 34E+04	1. 33E+04	-4. 80E+01	(-0. 36%)
制御棒反応度価値 (%Δk/kk′)		1. 99	1. 99	0. 00	
燃焼反応度損失 (%Δk/kk′/day)		-0. 028	-0. 028	0. 00	

対象炉心はMK-Ⅲ性能試験炉心

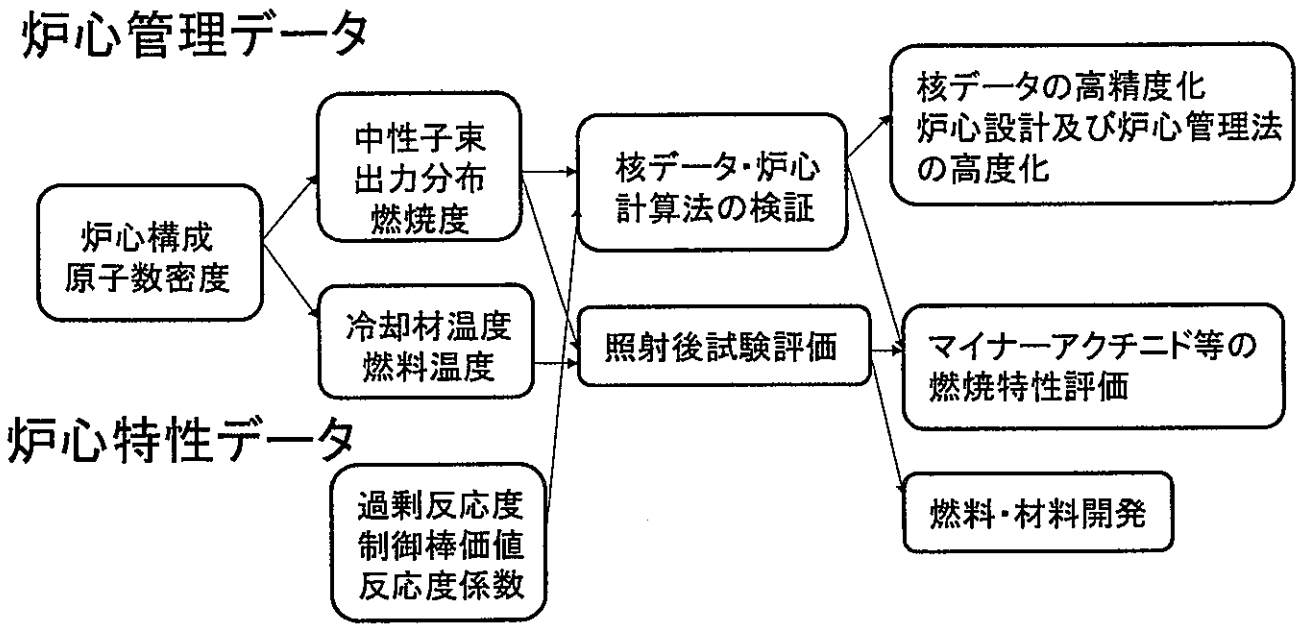
(　)内は相対変化を表す

JFS-3-J3.2とJFS-3-J3.2Rによる燃焼組成の変化

核種	J3.2 原子数密度 (×10^{24}atom/cm^3)	J3.2R 原子数密度 (×10^{24}atom/cm^3)	J3.2/J3.2R
U-235	6.547E-04	6.545E-04	1.00
U-238	5.313E-03	5.313E-03	1.00
Pu-238	3.151E-06	3.154E-06	1.00
Pu-239	1.661E-03	1.661E-03	1.00
Pu-240	5.088E-04	5.094E-04	1.00
Pu-241	6.840E-05	6.851E-05	1.00
Pu-242	1.775E-05	1.777E-05	1.00

集合体平均燃焼度;39,300MWd/t

データベースの反映先



まとめ(1)

- 主に以下の5点について改訂を行った
  - 炉定数セットの更新
  - 動特性パラメータの追加
  - MK-Ⅱ性能試験データの追加
  - 第32～35サイクルの運転特性試験データの追加
  - 全制御棒価値の追加

まとめ(2)

- 炉定数セット更新の影響
  - 過剰反応度は平均で約0.3%Δk/kk'低下。
    ⇨ JUPITER等の臨界実験解析と同様の傾向
  - 全中性子束は0.5%増加。
  - 出力分布は平坦化し、径方向出力ピーキング係数が小さくなる。

まとめ(3)

- 重み関数誤りの影響
  - 過剰反応度は約0.15%Δk/kk'低下。
  - 集合体出力、炉内最大中性子束、最高燃焼度は低下するが、その差は0.7%以下。
  - 制御棒反応度価値、燃焼反応度損失及び核特性に影響を与える主な核種の燃焼組成は影響なし。

今後の予定

■MK-Ⅱ炉心特性データベースの改訂
修正版炉定数セット「JFS-3-J3.2R」を用いたデータベースの作成

■MK-Ⅲ炉心特性データベースの作成
MK-Ⅲ性能試験データ等をデータベースとしてまとめ、公開する。

ユーザーからの要求に柔軟に対応し、更なる充実を図る。

JNC TN9440 2002-004

第3回R＆D報告会資料

MK-Ⅲ総合機能試験（その1）の結果

平成１４年6月14日

実験炉部　原子炉第一課
則次　明広

機能試験の目的

- 単体機能試験(TKS)

  機器単体の作動、特性試験を行い機器単体の健全性、機能、性能を確認する。

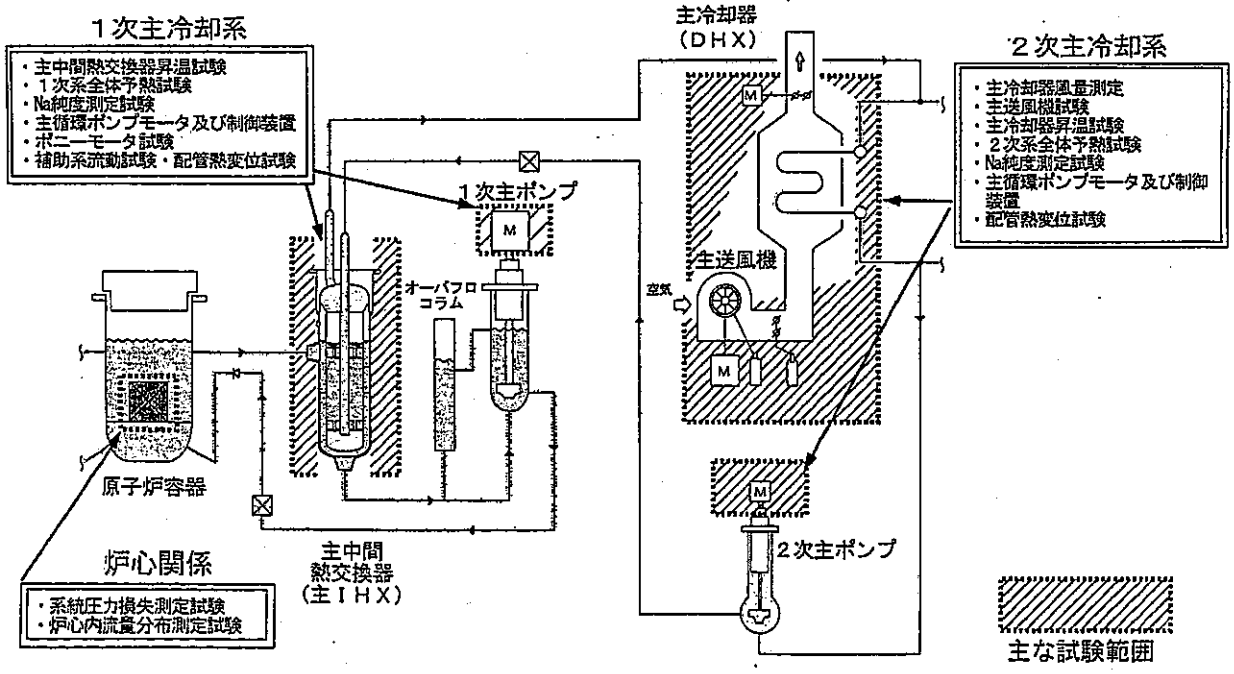
- 総合機能試験(SKS)

  機器、設備を総合的に組み合わせて作動させ、系統としての機能、特性、性能を確認する。

- 性能試験

  原子炉を運転して低出力から定格出力までのプラント全体の性能を確認する。

総合機能試験の主要な対象機器



総合機能試験（その1）の項目と手順

常温中試験
- 配管熱変位試験
- 主冷却器空気流量測定試験
- 主送風機停止試験
- 主送風機騒音測定

⇩

昇温試験
- 配管熱変位試験
- 冷却系全体予熱試験
- 主中間熱交換器、主冷却器昇温試験

⇩ ～200℃

Na純化試験
- Na純度測定試験及びNa純化運転
- 主中間熱交換器Na液位計校正

⇩ 200℃

温態待機試験
- 配管熱変位試験
- 主冷却器昇温試験
- 2次主循環ポンプ流量制御試験、連続運転試験
- 1次主循環ポンプ速度制御試験（予備試験）
- 燃料取扱設備自動運転試験

200～250℃

⇩

炉心構成

総合機能試験（その2）の項目と手順

炉心構成

MK－Ⅲ炉心構成完了

⇩ 250℃

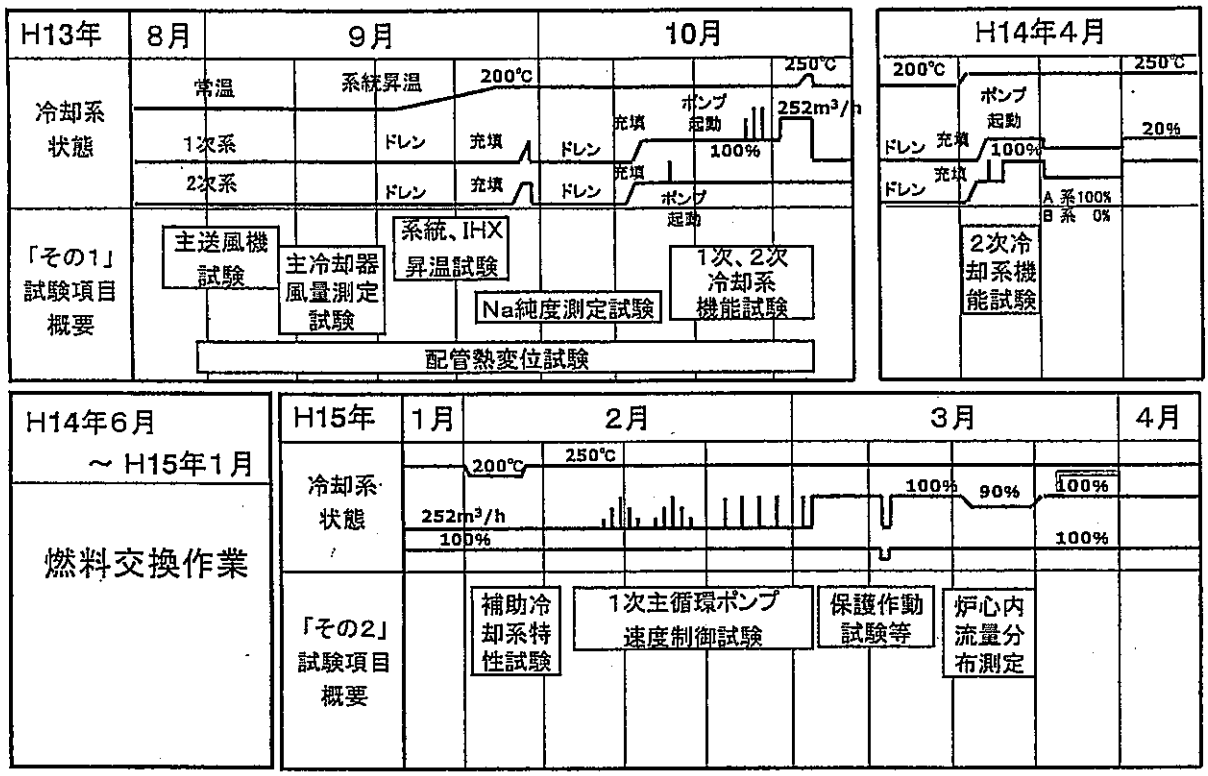
温態待機試験
- 補助冷却系流動特性試験
- 1次主循環ポンプ速度制御試験、ランバック試験
- 1次系統圧力損失測定試験
- 1次系フローコーストダウン試験
- ポニーモータ試験
- 1次主循環ポンプ連続運転試験
- インターロック、保護作動試験
- 電源喪失試験
- 炉心内流量分布測定試験

200～250℃

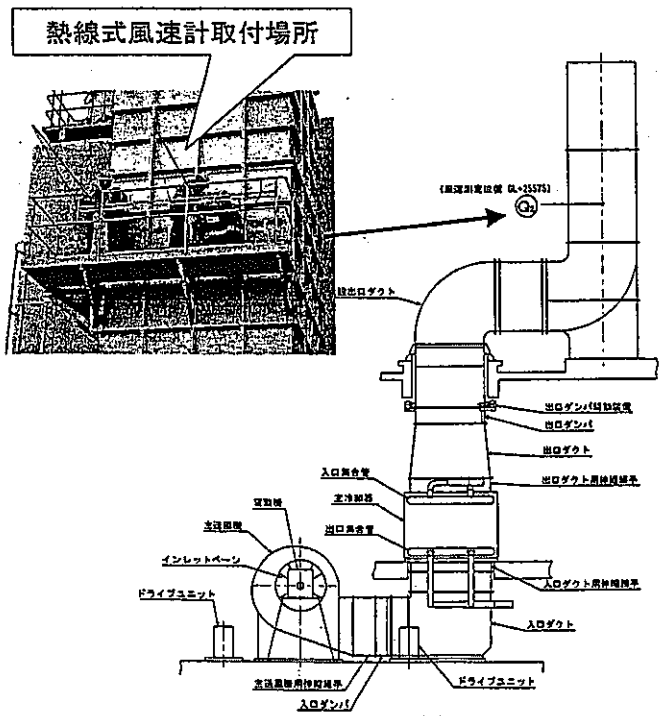
⇩

性能試験

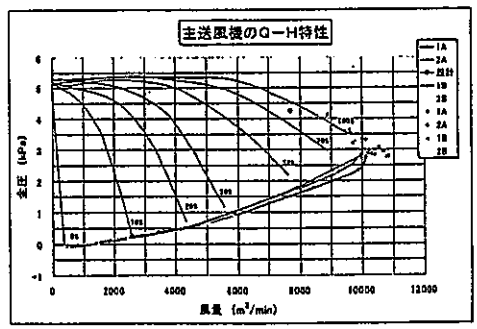
MK－Ⅲ総合機能試験概略工程

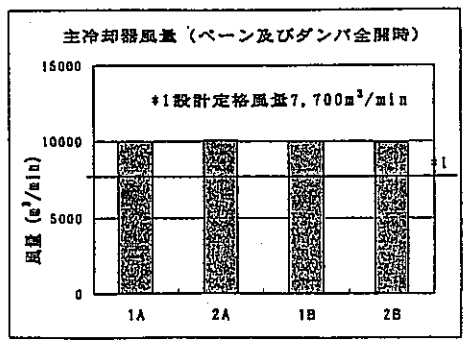


主冷却器空気流量測定試験

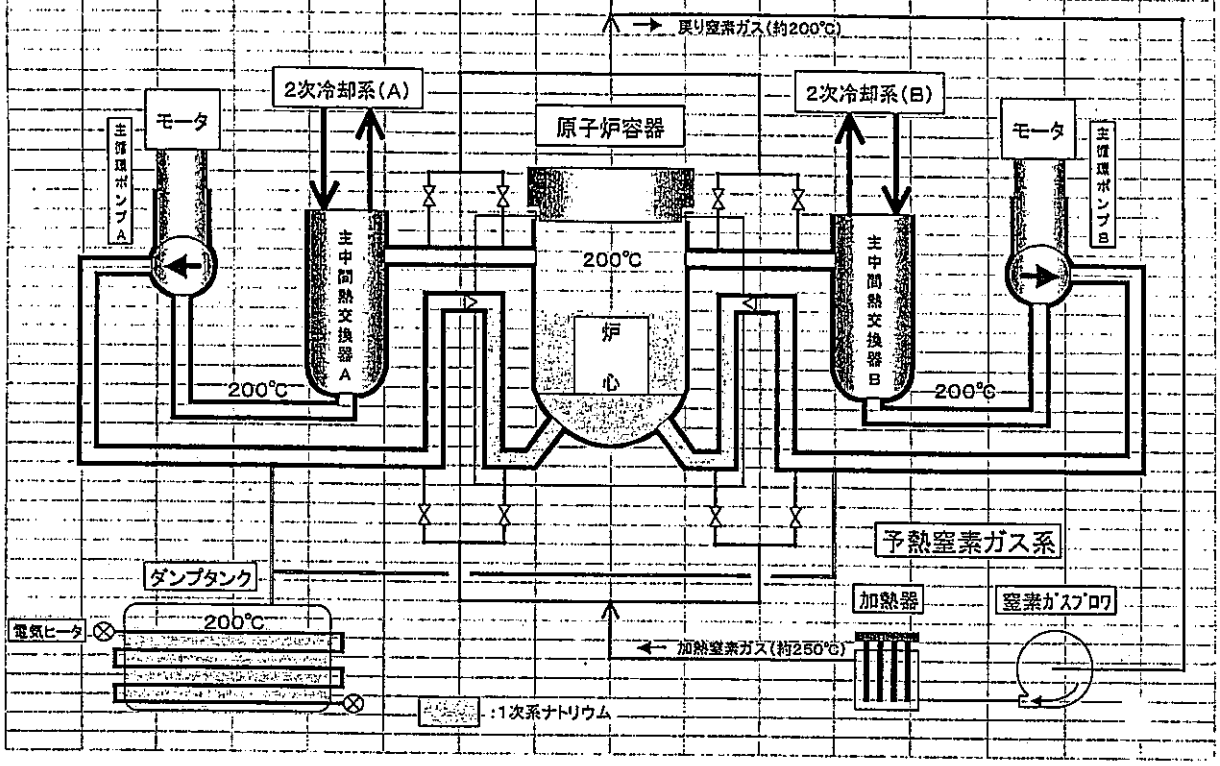


主冷却機空気流路の定常性能試験測定位置図

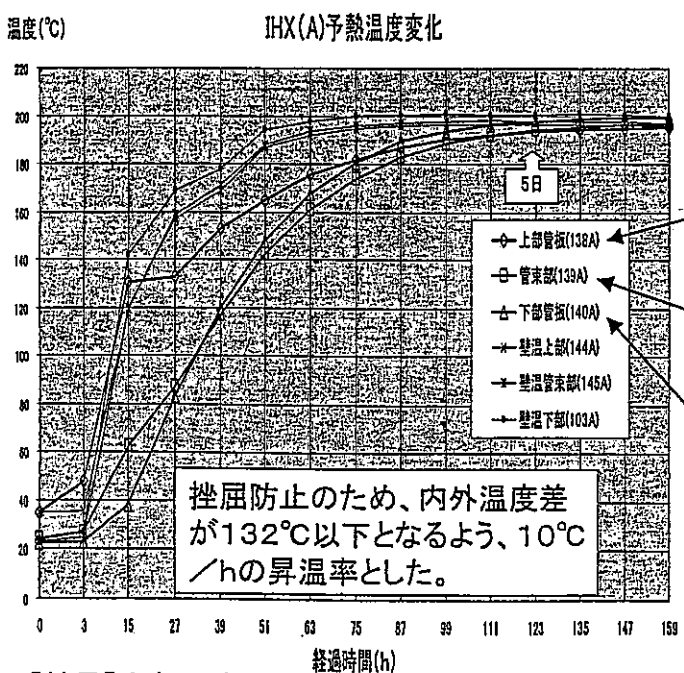




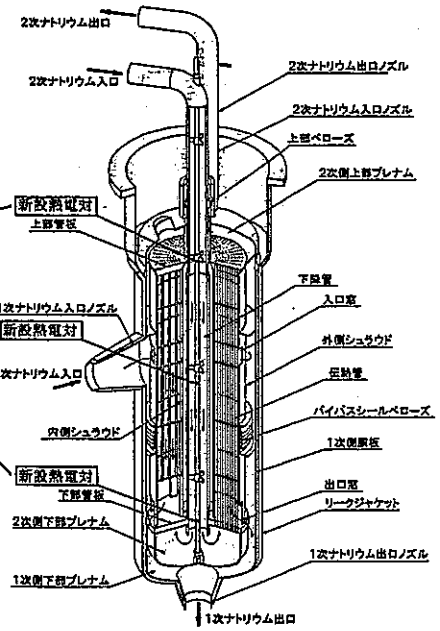
「常陽」1次冷却系ナトリウム充填前温度状況



主中間熱交換器予熱試験結果

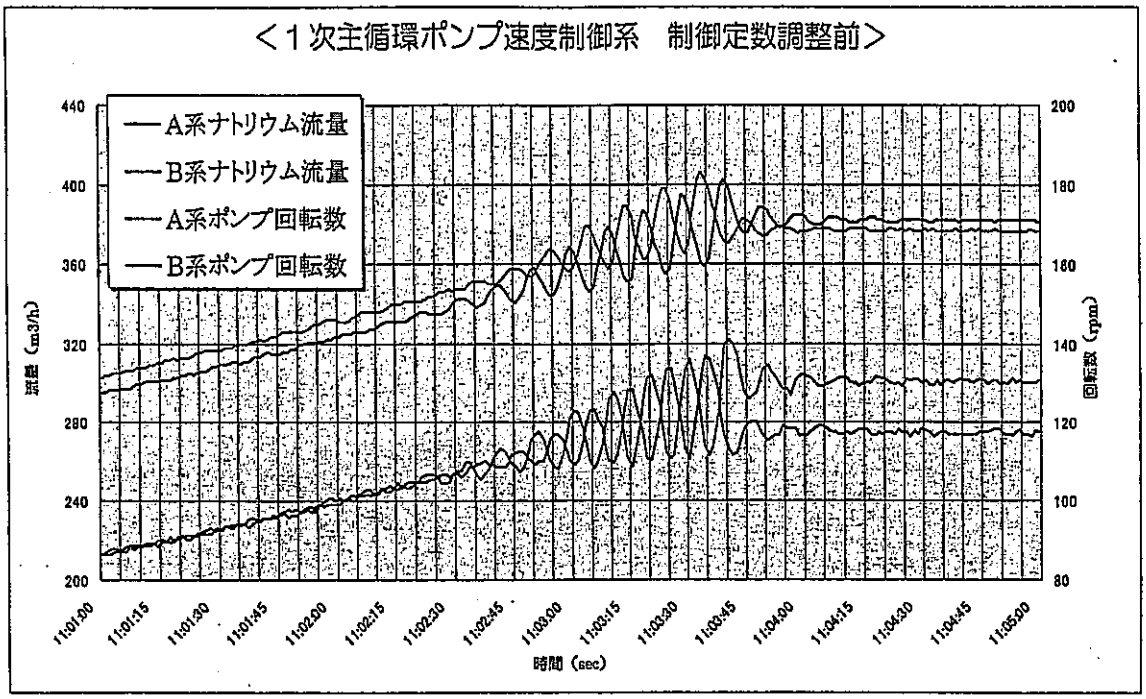


【結果】内部温度を新たに設けた温度計により実測し、予熱時間を従来の14日から5日に短縮

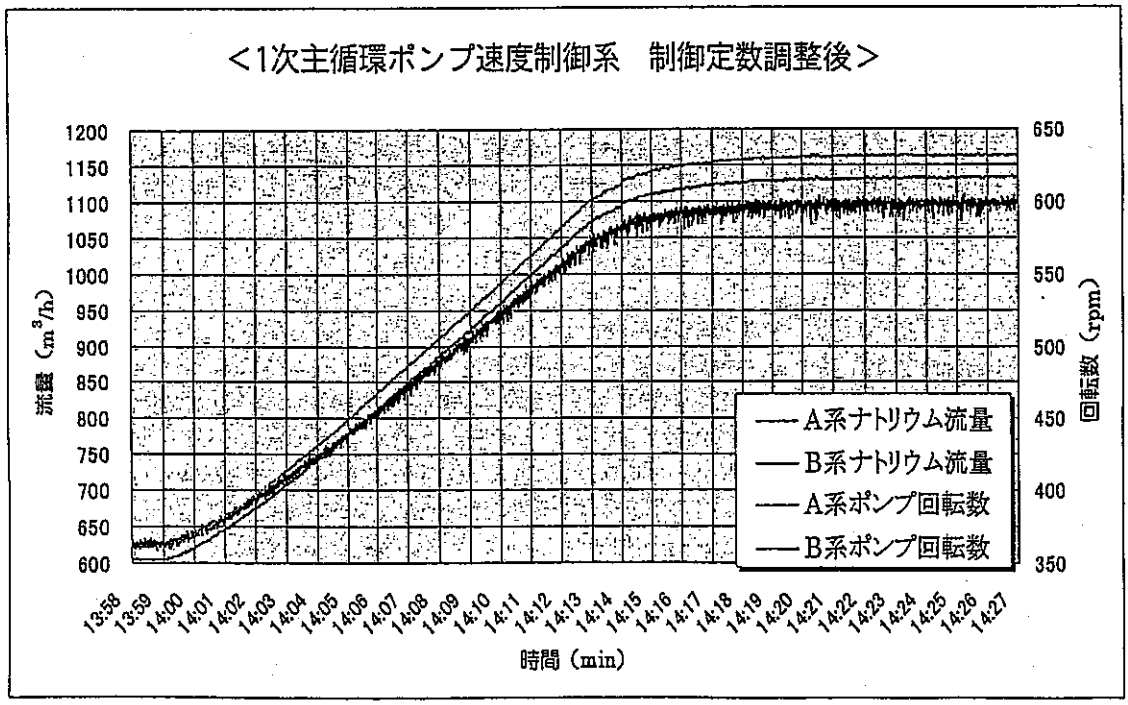


主中間熱交換器構造図

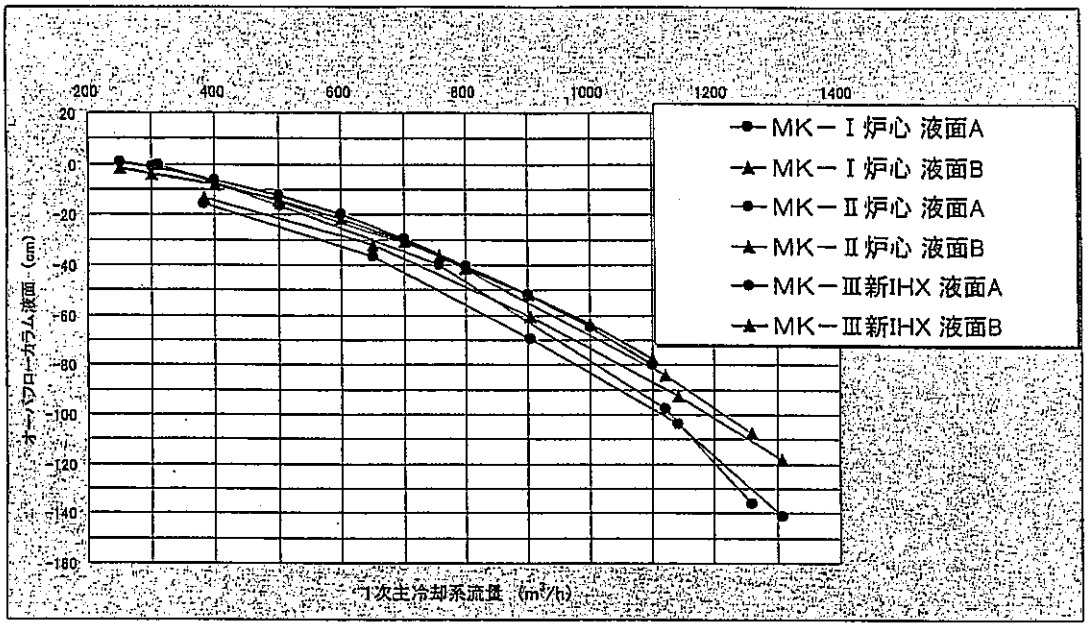
1次主循環ポンプ速度制御試験



1次主循環ポンプ速度制御試験

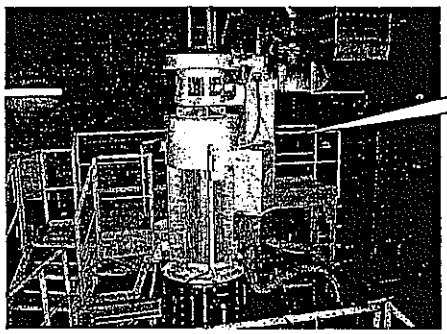


1次主冷却系流量とオーバフローカラム液面との関係



＊ MK－Ⅲ定格の約70%までの流量で、主中間熱交換器1次側の圧力損失が所期のとおり低減されることを確認した。

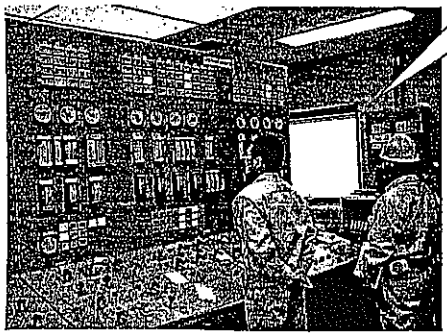
2次主循環ポンプ連続運転試験

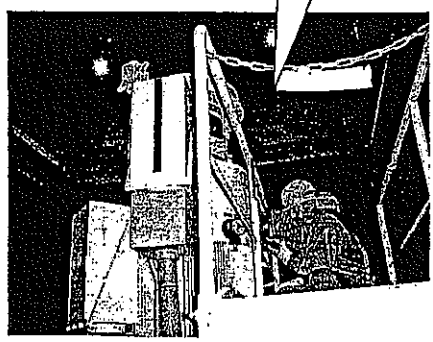


モータ温度上昇対策後の2次主循環ポンプ

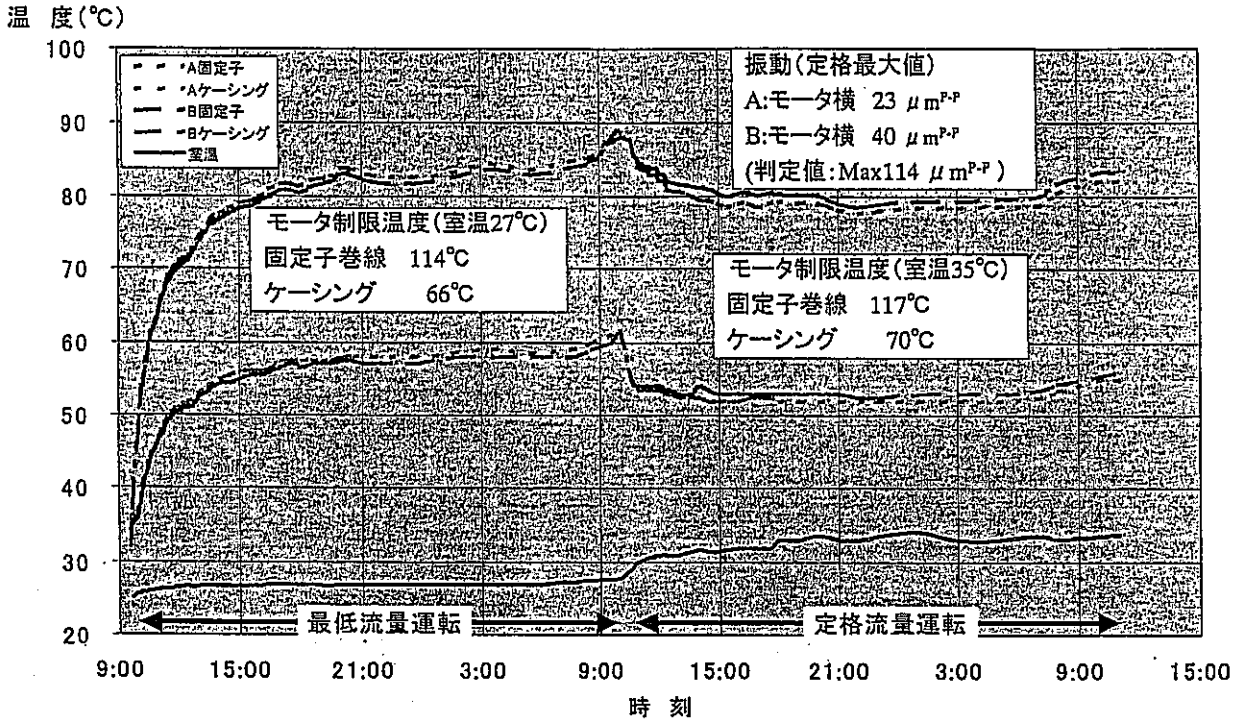
現場での監視（モータ温度・振動値）

中央制御室での監視（モータ電流、Na流量）

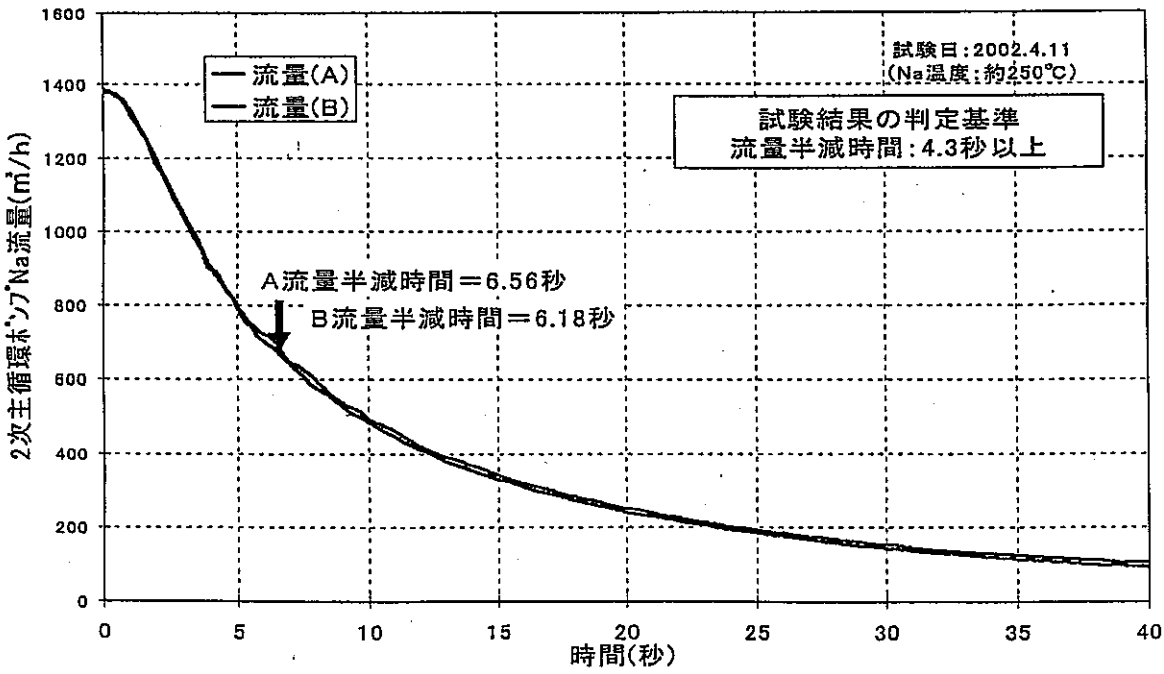




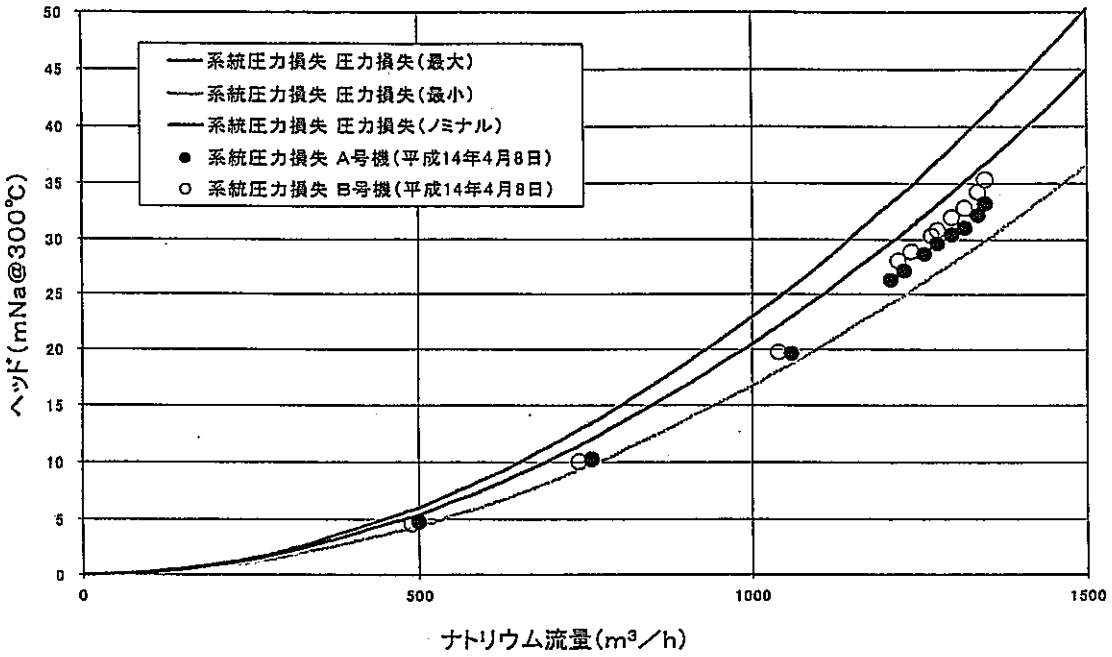
2次主循環ポンプ連続運転試験



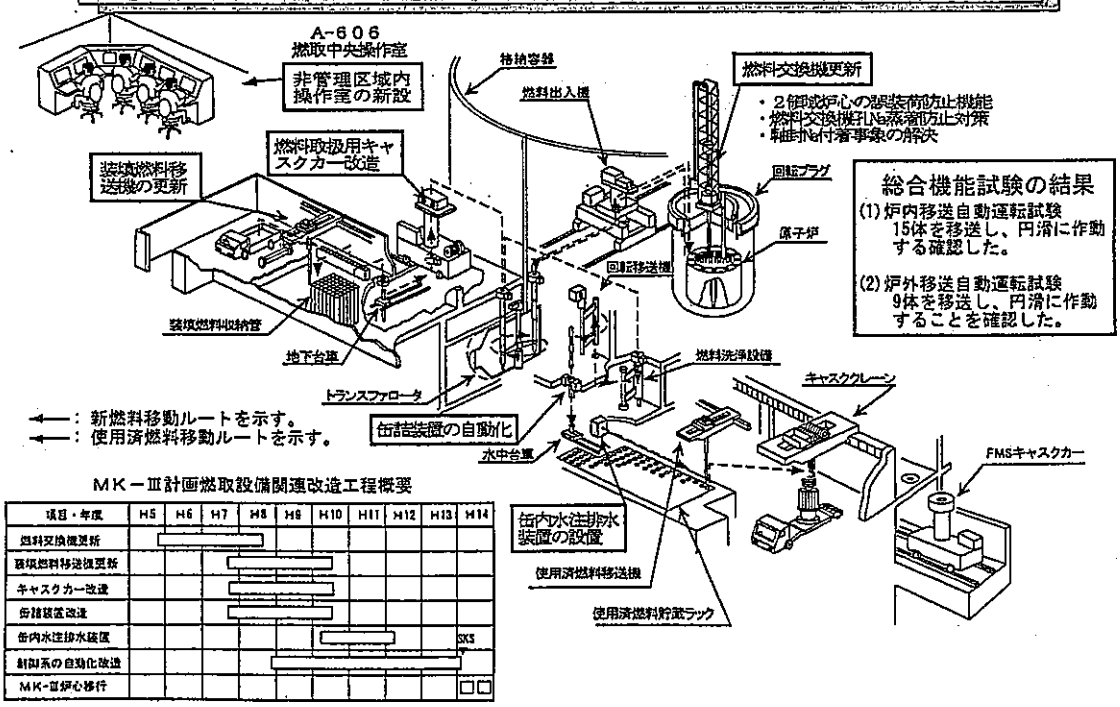
2次主循環ポンプフローコースト



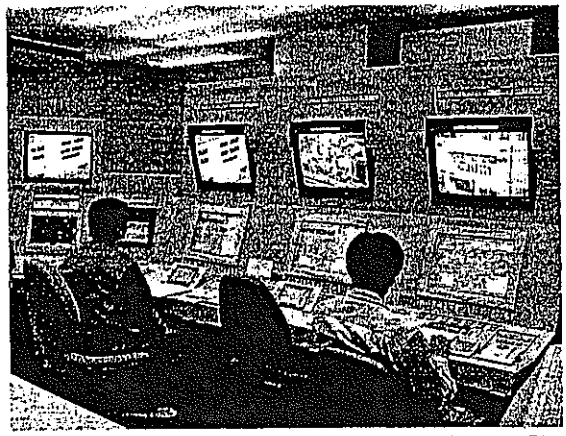
2次主循環ポンプQ－H特性

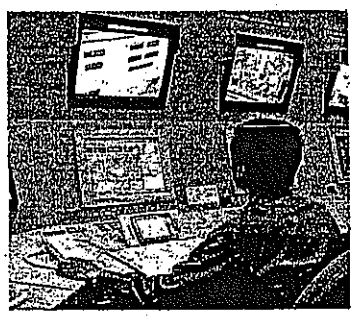


燃料取扱設備自動化改造の概要



燃取中央操作室での試験状況





総合機能試験（その1）主要結果

- 1次主冷却系の昇温期間は、これまで2週間確保していたものが、5日程度に短縮できることを確認した。
- 改造工事によって混入したナトリウム中の不純物は、純度維持規準を十分満足する範囲で純化された。
- 1次系及び2次系の主循環ポンプ運転特性等を確認し、ナトリウムループとしての健全性が確認できた。
- 燃料取扱設備の自動運転による炉内及び炉外移送が円滑に作動することを確認し、燃料交換作業期間が約1/3に短縮可能となる見通しを得た。

今後の予定

- MK－Ⅲ炉心構成　H14. 6～H15. 1
- 2次純化系C／T交換　H14. 8～H14. 9
- 総合機能試験(その2)　H15. 1～H15. 3
- 格納容器漏洩率試験　H15. 4～H15. 5
- 性能試験　H15. 7～H15.10
- MK－Ⅲ完成(合格)　H15.10末

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕　「常陽」MK－Ⅲ改造工事における冷却系の不純物管理

部課室：実験炉部　原子炉第二課
報告者：住野　公造

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）１次系カバーガス中の作業時の不純物濃度は１次系ガスクロの測定データに示されているが、２次系はどうだったか？窒素はどの程度混入したか？ 「もんじゅ」の２次系改造工事の作業方法が、先の理事会でも話題となった。良く「もんじゅ」の動きもウォッチし、「常陽」の成果を反映すること。（山下副所長）	A1）１次系と同様、窒素と水素が検出された。窒素濃度については、１次系では作業に伴い数時間1000ppm を超えることがあったが、２次系では作業を通して 100～200ppm 程度であった（補足の２次系ガスクロの測定データを用いて説明）。 来週の MK－Ⅲ冷却系改造工事に係る「もんじゅ」との打合せでは、その件が焦点になると思う。「常陽」の成果を反映していきたいと考える。
Q2）純度測定試験時のプラギング温度差による冷却系内への酸素混入量の評価では、更新した配管・機器内面に付着した酸素の評価が不十分ではないか？（梶谷副センター長）	A2）純度測定試験時の系統温度は約 200℃であり、この温度で溶出する酸素については、プラギング温度差として現れていると考える。ただし、原子炉の出力上昇に伴う配管・機器の昇温によりさらに酸素は溶出されるため、この量は含まれていない。 MK－Ⅰ炉心の運転経験を基に、初期の出力上昇時のヒートアップに伴い全酸素混入量の３～４割が配管・機器内面から溶出される（言い換えれば初期純化で約６～７割が捕獲される）ことを考慮すると、予測値に示す括弧内の値は、プラギング温度差による評価値（初期純化時の捕獲量）との関係からこのロジックで説明がつく。このことから、括弧内の値が出力上昇に伴い溶出する酸素量を含んでおり、最終的な混入量は括弧内の値程度になると考えられる。 なお、MK－Ⅲの出力上昇時にはプラギング温度から酸素溶出量を評価する予定である。
Q3）ガスクロの測定結果は、不純物の混入量の評価に使えるか？（小澤技術主席）	A3）ガスクロの設置位置は、作業場所と離れておりカバーガスの濃度の代表位置とは言い難い。ガスクロはあくまで不純物の混入の監視用であり、絶対量の評価には向かない。やはり、絶対量はプラギング温度から求めなければならないと考える。

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q4）１次系と２次系のガスクロの測定データにおいて、混入後の不純物挙動に違い（１次系では徐々に減少、２次系ではほぼ平衡）が見られるが、その理由は？（小澤技術主席）	A4）カバーガスの呼吸頻度の違いによる。２次系カバーガス圧は安定しており呼吸回数が少ないため、混入した不純物の減少はほとんど見られない。一方、１次系カバーガスはガス圧変動による呼吸回数が比較的多いため、パージ効果により不純物は徐々に減少する。
Q5）１次系のナトリウムサンプリングの分析結果に比べ、２次系のサンプリング分析結果の方が不純物量は少ないが、その理由は？ （餘吾実験炉部長）	A5）１次系と２次系のナトリウムサンプリングのタイミングが異なっており、この影響と考えられる。１次系は系統をフラッシングした直後の最も汚れたナトリウムをサンプリングしているのに対し、２次系は更新した２次系プラギング計の校正の目的もあり、系統フラッシング前の比較的きれいな貯留ナトリウムをサンプリングしている。ただし、２次系のサンプリングナトリウムも配管を切断・溶接した位置とはカバーガスで通気しており、分析結果は不純物の混入評価としては十分参考になると考える。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕「常陽」炉内サーベイランス試験の現状と中性子照射量評価

部課室：実験炉部 技術課
報告者：石田　公一

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）サーベイランス試験片は、実機構造材のように荷重がかかった状態で照射されていないが、この違いは評価でどのように考慮されるのか。評価のための試験計画や知見はあるのか。（ｼｽﾃﾑ部ｻｲｸﾙ Gr. 平尾 GL）	C1）被覆管材ではあるが、荷重条件下での照射試験として、MARICO のデータが参考になる。（実験炉部 鈴木次長）
Q2）軽水炉で寿命延長の動きがあり、サーベイランス材をどのように使うか議論になっている。「常陽」ではどう考えているのか。（燃材部 伊藤部長）	A2）炉内各位置にはサーベイランス材を装填した照射リグが２体ずつ残っており、今後取出し計画の見直しの中で議論していく。 C2）軽水炉での議論のようにサーベイランス材の残りが少ないような場合はミニチュア試験片を使って監視試験を継続することも考えられるが、「常陽」がそこまで寿命延長するかどうかは現時点では未定である。（鈴木次長）
Q3）照射計画の表中に運転年数 20 年と記載されているが、MK-III になって炉出力が増加しても、MK-I～MK-III 通算で 20 年運転するという理解で良いか。（平尾 GL）	A3）そのとおりである。
Q4）サーベイランス材の照射温度と実機構造材の温度の関係は評価されているか。（鈴木次長）	A4）サーベイランス材の照射温度は、実機条件を包絡している。（補足：サーベイランス材の温度は、温度モニタの測定等により確認している。しかし、測定精度がよくない、測定値は再校温度のみで温度履歴が記録できない等の問題があり、今後計算等による評価が必要と考える。）

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕「常陽」MK-Ⅱ炉心特性データベースの JENDL-3.2 への改訂

部課室：実験炉部　技術課

報告者：大川内　靖

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）等温温度係数の測定において、核加熱終了後の 370℃の測定では、核加熱の影響（出力係数に相当する反応度）は確認済みか？（山下センター長）	A1）核加熱終了後、一度未臨界にし、再度ゼロ出力臨界状態で過剰反応度を測定しており、核加熱の影響を排除している。
C1）フェニックスの炉心管理の報告とも関連するが、MK-Ⅲ性能試験時には、等温温度係数の試験方法を再検討してみてはどうか？（山下センター長）	拝承。
Q2）重み関数の誤りはデータベース改訂版の公開後にわかったのか？（山下センター長）	A2）そのとおりである。本改訂版データベースは、2001 年 12 月に公開したが、その後、重み関数の誤りを修正した JFS-3-J3.2R が、2002 年 2 月に公開された。
Q3）重み関数の誤りとは、具体的に何か？（山下センター長）	A3）断面積処理コードで、重み関数（縮約スペクトル）を、エネルギー単位で入力すべきところを誤ってレサジー単位で入力していた点である。
Q4）JENDL-3.2 を用いた場合に、炉心中心の集合体発熱が低下した原因は、炉心領域から反射体領域への中性子の漏れが減ったことが原因であり、反射体から炉外への漏れは少ないということか？（山下センター長）	A4）そのとおり。説明が不十分であった。
C2）JFS-3-J3.2作成時の重み関数の誤りの炉心核特性への影響について、炉物理的な考察まで踏み込んでまとめてほしい。（山下センター長）	拝承。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕ＭＫ－Ⅲ総合機能試験（その１）の結果

部課室：実験炉部 原子炉第一課
報告者：則次　明広

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）燃料交換期間が従来の１／３となるのは、どのような効果によるものか。 Ｃ１）燃料交換作業のスピードが１／３になるのではなく、１日の作業時間を多くすることで作業期間が短縮されているので、一概に１／３になったとする表現は注意が必要である。	A1）自動化により一連の作業が従来の１／２の人数で可能となり、従来の人数を２班に分けて２交替することにより所要期間が半減し、さらに燃料移送工程における個々の改良による効率化により、合わせて１／３となる。
Ｑ２）主送風機の風量は、温度換算されているのか。	Ａ２）試験時に空気温度データも採取して、設計温度 40℃に換算した値を示している。
Ｑ３）主送風機を定格風量とした際、伝熱管などに異常な振動が発生するなどはなかったか。	Ａ３）運転中の監視では異常な挙動は確認されなかった。
Ｑ４）更新したＩＨＸの圧損は、ＭＫ－Ⅲ定格流量条件でＭＫ－Ⅱ定格流量時の従来のＩＨＸ圧損を上回らないように設計したということか。	Ａ４）その通りである。
Ｑ５）ＩＨＸの昇温の際、座屈防止上の温度制限は、どの部分に対してのものか。	Ａ５）ＩＨＸ伝熱管部分である。
Ｑ６）ＩＨＸの昇温の制限に対してまだ余裕があるということか。	Ａ６）若干余裕があるので、昇温スピードを上げて昇温に要する時間をさらに短縮することは可能である。
Ｑ７）２次主循環ポンプの温度制限値が室温によって異なるのはなぜか。	Ａ７）温度制限値は、最高温度部が規定値を下回るよう熱電対設置場所の温度に対して定めているため、室温によって制限値が変わる。OHP の表現がわかり難いので、今後改めたい。
Ｑ８）更新したＩＨＸの圧損は、Ａ／Ｂとも同じであるのに同一流量時に１次主循環ポンプの回転数に差が生じるのはなぜか。	Ａ８）炉心構成の影響や流量計の誤差等が考えられるが、ＭＫ－Ⅲ炉心構成後の総合機能試験において確認する。

JNC TN9440 2002-004

第４回　Ｒ＆Ｄ報告会

〔平成 14 年 7 月 12 日〕

「もんじゅ」の安全審査の状況について

平成14年7月12日

もんじゅ建設所

前田 清彦

もんじゅの経緯(許認可関係)

平成 6年(1994年) 4月　初臨界

平成 7年(1995年)12月　ナトリウム漏えい事故

平成13年(2001年) 6月 6日　原子炉設置変更許可申請書提出

平成13年6月18日　経産省通達文書受理

① 大臣通達：温度計設工認申請に際し健全性評価書を添付すること

② 保安院長通達：安全性総点検での指摘に対処し報告すること

平成13年6月29日　温度計交換等設工認申請書提出

安全性総点検対応計画を提出

平成13年7月27日　安全性総点検対応報告(1)提出

1) 品質保証体系･活動の改善、

2) ナトリウム漏えい対策設備の改善、

3) R&D成果反映(SG伝熱管破損評価手法検証)

平成13年11月22日	高温ラプチャに係る再解析結果を報告
平成13年12月11日	行政庁指導文書受理
	設置変更許可申請書にカバーガス圧力計を明記すること
平成13年12月13日	原子炉設置変更許可申請書補正
	(SG伝熱管破損対策記載の明確化等)
平成14年 4月12日	原子炉設置変更許可申請書補正（参考文献の更新等）
平成14年 5月 8日	経産大臣から原子力委員会、原子力安全委員会に諮問
平成14年 5月 9日	原子力安全委員会(炉安審に審査指示)
平成14年 5月14日	原子炉安全専門審査会(103部会設置)
平成14年 5月21日	原子力委員会
平成14年 5月31日	温度計設工認申請書の補正書提出、6月28日認可
	安全性総点検対応報告(1)改訂版提出
平成14年6月19日	安全性装点検対応報告(2)提出

今後

103部会による審査終了

炉安審から原子力安全委員会に審査結果を報告

原子力委員会、原子力安全委員会から経産大臣に答申

設置変更許可

設置変更許可に係る工事の設工認申請、認可

安全性総点検指摘事項(着工前に確認すべき事項)の対応状況確認

(安全協定に基づく工事事前了解 ← 福井県、敦賀市)

設備改善工事着工

もんじゅの経緯(地元関係)

平成12年12月 8日　設備改善工事の事前了解願い提出

平成13年 6月 5日　県及び市が安全審査入りを了承

(平成13年6月6日　JNCが国に設備改善工事に係る設置変更許可申請)

平成13年 8月 1日　もんじゅ安全性調査検討専門委員会(もんじゅ委員会)を設置

平成13年8月7日～平成13年9月6日　もんじゅ委員会が県民の意見を公募

平成13年 9月22日　もんじゅ委員会が県民の意見を聴く会を開催

平成13年11月28日　もんじゅ委員会が大洗のR&D施設を視察

平成14年 4月26日　もんじゅ委員会が中間取りまとめを行い、安全性に係る要請として福井県が行政庁、原子力安全委員会、サイクル機構等に提出

平成14年 5月21日　行政庁がもんじゅの審査状況をもんじゅ委員会に説明

平成14年7月26日　もんじゅ委員会第10回を開催。

安全審査入り了承に際しての条件

1. 国においてもんじゅ全体の安全性を確認すること
2. もんじゅの安全性を調査するため県独自の委員会を設置するので、積極的に協力すること
3. 事前了解願い受理は工事着工や運転再開を前提にしていないので、了解前に着工できないことを踏まえること
4. 原子力長計に示されたFBRサイクル技術開発の意義やもんじゅの位置付け等について、国民や県民の理解が得られるよう継続的に取り組むこと

今後（末尾を除き順番は不明）

もんじゅ委員会が原子力安全委員会の審査結果を聴取

もんじゅ委員会最終報告書まとめ

もんじゅに係るシンポジウム開催

安全協定に基づく県及び市の工事事前了解

設備改善工事着工

図１　もんじゅ安全性確認の流れ

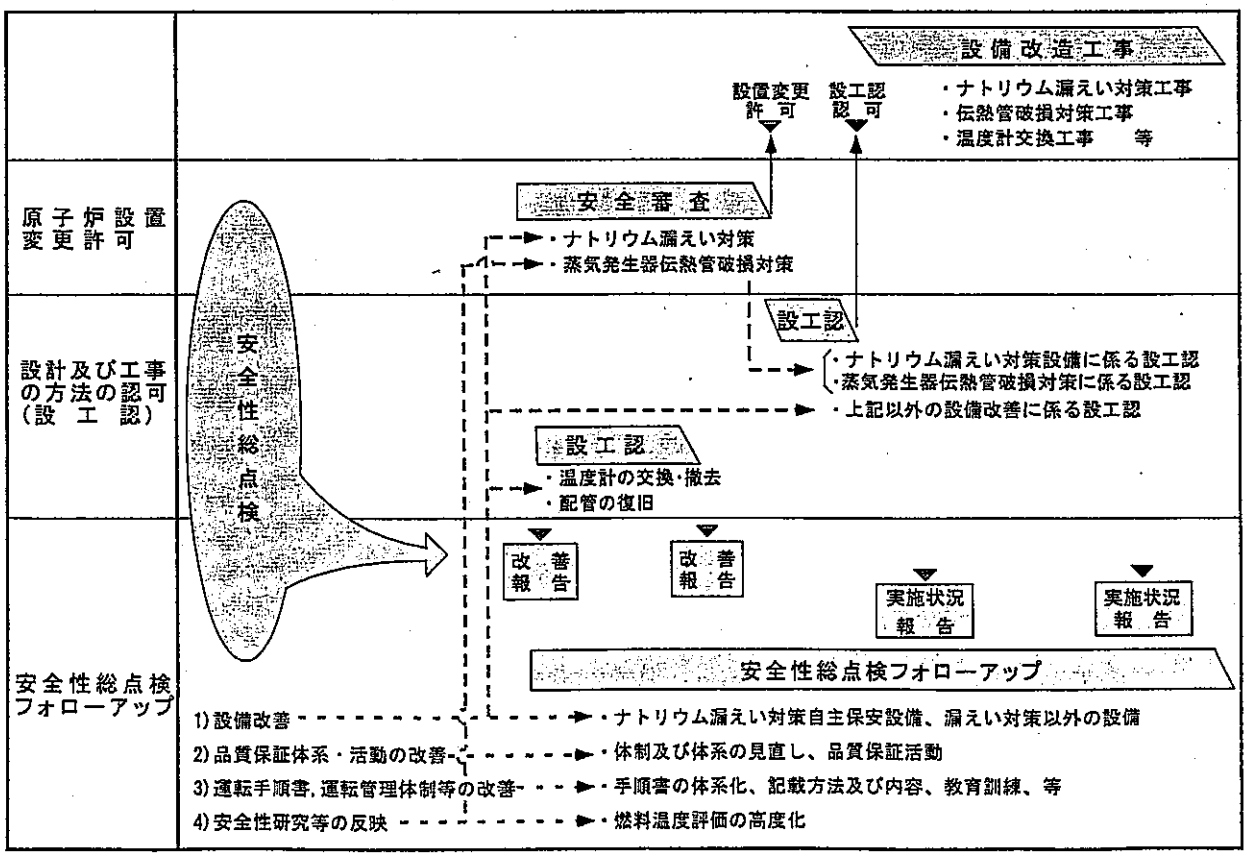


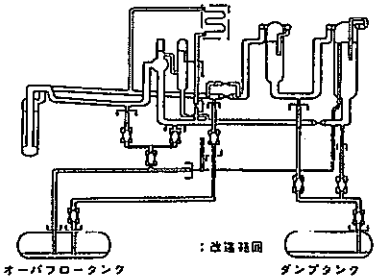
図2　もんじゅ安全性確認概要図

（参考）

I. 安全審査

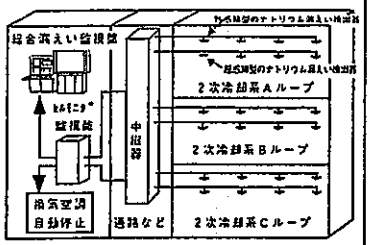
1. 空気雰囲気下でのナトリウム漏えいに対する設計

2次ナトリウム充填・ドレン系の改造



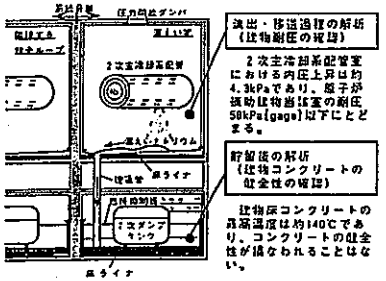
ナトリウム抜き取り（ドレン）時間を短縮するため、ドレン配管等を改造する。

煙感知型及び熱感知型のナトリウム漏えい検出器の追加



煙感知型及び熱感知型ナトリウム漏えい検出器を設置して、漏えいを早期・確実に検出し、換気空調設備を自動停止する。

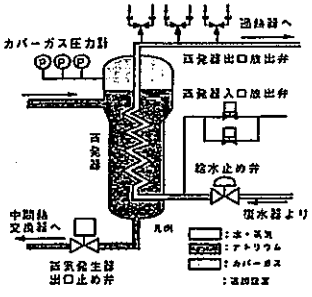
安全評価（熱的影響の解析）



漏えいナトリウムによる影響によっても建物の健全性は損なわれず、漏えいループ以外のループによって炉心の十分な冷却機能が保持される。

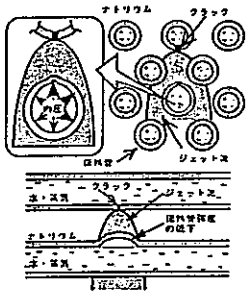
2. 蒸気発生器伝熱管破損対策

圧力計及び出入口放出弁の追加設置



蒸気発生器伝熱管破損に対する設計

漏えいを早期かつ確実に検出するため、カバーガス圧力計を追加設置し、伝熱管内の水・蒸気を急速にブローするため、放出弁を追加設置する。

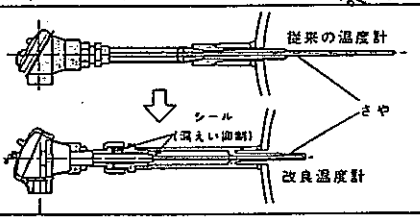


高温ラプチャ型破損の発生防止

評価の結果、高温ラプチャ型の破損伝播の発生が防止されることを確認。したがって、蒸気発生器伝熱管破損事故の解析において、高温ラプチャ型破損による破損伝播の発生が防止されることを前提としていることは妥当。

II. 設計及び工事の方法の認可（審査中）

2次冷却系温度計の交換・撤去工事

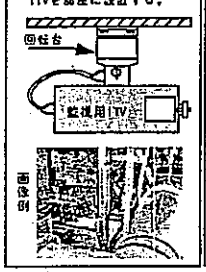


ナトリウムの流れによる振動を防止するため、温度計さやを短く、テーパ形状にした改良型温度計に交換する。

III. 安全性総点検フォローアップ（確認中）

1. 自主保安設備
（例）ナトリウム漏えい監視用ITVの設置

ナトリウム漏えい監視用ITVを新規に設置する。



2. 最新評価手法
（例）燃料温度評価の高度化（最新評価手法を用いた燃料温度評価）

燃料特性に係る最新知見（海外、JNC）
・UO2燃料の熱伝導
・MOX燃料の溶融線出力

↓

・燃料の健全性再評価

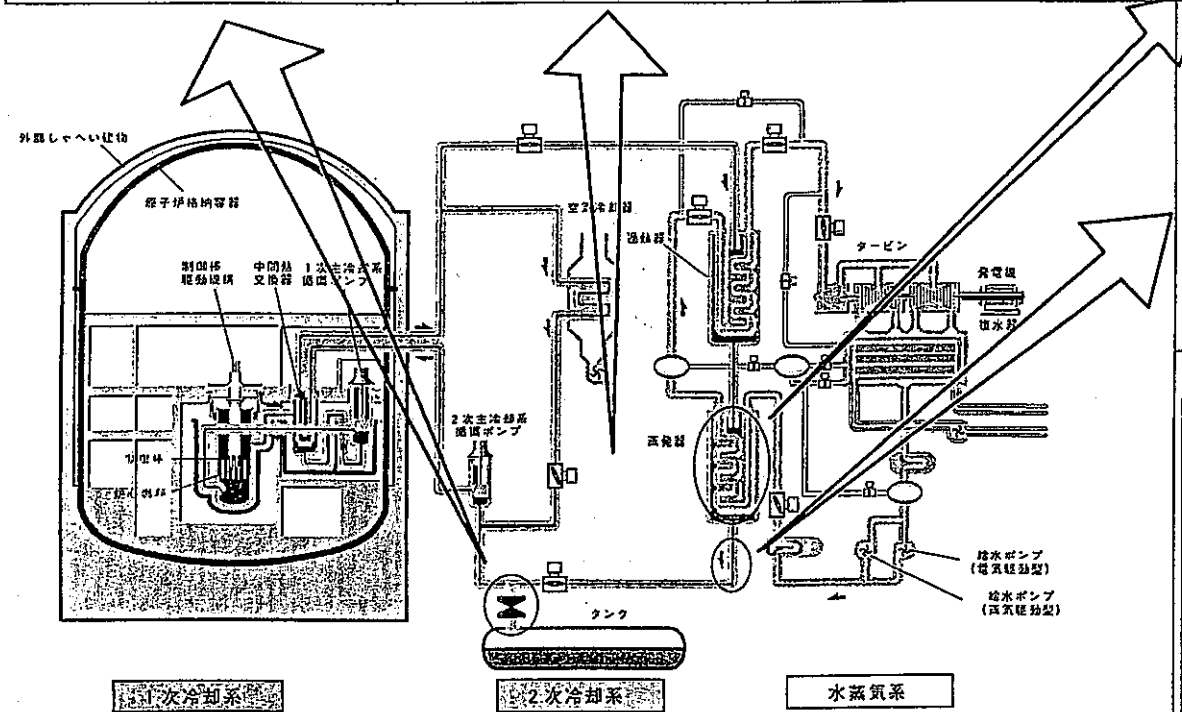
↓

・燃料の健全性が確保されることを確認

3. 品質保証

(1) 品質保証体系、体系の見直し
・品質保証体系の強化
・品質保証体系の見直し、整備

(2) 品質保証活動の改善
・設計要求の明確
・最新技術情報の収集機能の強化
・品質保証関係者教育の徹底
・不適合管理の適正化
・内部監査等の充実
・メーカ品質保証監査の実施
・確実な保守の実施



設置変更許可申請書補正の概要

1．蒸気発生器伝熱管最大破損規模の想定

(1) 原申請書では、事故解析において、ウェステージ型破損による破損伝播評価に基づく最大破損規模を保守的に包絡する伝熱管破損規模（４本両端完全破断相当）を想定していた。

(2) この際、実験的に確認した結果に基づき、高温ラプチャ型破損による破損伝播は発生しないとしていた。しかし、1987 年に英国の PFR で、特殊な条件下ではあったが、高温ラプチャ型破損が発生した。また、最近、実証炉を念頭に、高温ラプチャ型破損の解析的評価手法の開発が進んだ。

(3) もんじゅ事故後の安全性総点検に際し、設置許可後の研究成果の反映確認として、開発中の高温ラプチャ型破損の評価手法を用いて安全裕度を確認してみた。その結果、高温ラプチャは発生しないが、その裕度は小さいという結果が得られ、評価手法等を更に検証すること等の指摘を受けた。

(4) 漏えい対策に係る設置変更許可の審査と並行して進められた、行政庁による安全性総点検指摘事項対応状況確認において、SG 高温ラプチャ評価手法検証とその適用評価を報告した。その確認の過程で、Na･水反応域付近の沸騰伝熱につき、行政庁から類似の解析を行う軽水炉の評価手法を参考にするよう指導があった。また、解析入力として、伝熱管肉厚を JNC の計測実績に余裕を見たもの（4.0mm）ではなく、検査判断基準(3.5mm)を用いることも指導された。

(5) そこで、軽水炉で実績のあるコードのモデルを適用し、入力データを修正した。併せて、解析モデルで不合理な保守性を改めた。その結果、現状設備で高温ラプチャは発生しないことが示されたが、Na･水反応の検出の想定によっては、高温ラプチャの発生が否定しきれないとの結論を得た。

2. 許認可上の対応

(1) SGでのNa･水反応の検出器としては、蒸気発生器計装として水素計、カバーガス圧力計、圧力開放板開放検出器を設けるとしている。

(2) 高温ラプチャの発生の可能性が最も高くなるリーク率付近では、カバーガス圧力計が最も早く水リークを検出できる。新たな評価手法によると、カバーガス圧力計以外の検出手段では高温ラプチャの発生を否定しきれない。

(3) そこで、行政庁から、カバーガス圧力計の重要性にかんがみ、設置許可申請書においてその記述を明確化するよう平成13年12月11日に指導文書が発せられ、12月13日に行政庁の指導に従い、申請中の設置変更許可申請書を補正する申請を行った。

(4) 補正では、カバーガス圧力計を申請書本文に記載するとともに、高温ラプチャに対する裕度を拡大するため、カバーガス圧力計の数を増やす、放出弁の数を増やす等の対策を添付書類八に追記することとした。

3. 解析モデルと解析結果

(1) 解析モデルの変更

・従来は蒸気発生器試験施設で得られた伝熱特性データに基づく熱伝達モデルを用いていたが、軽水炉用モデルの導入により、Na･水反応時に伝熱管内面(水側)でCHF判定を行い、膜沸騰による熱伝達率の低下を想定する。

・Na･水反応によるNa側から水・蒸気側への入熱量増加(水温上昇)は反応ジェット吹きつけ部位外でも考慮する。ただし、従来はヘリカルコイルの全周で仮定していたが、SG構造を考慮し、水リークセクタのみで考慮する。

・Na側の反応域温度分布(局所加熱モデル)を、より実験データに忠実な想定とする。

・伝熱管肉厚の想定は、溶接部の開先加工を考慮し、局所最小肉厚を下回るよう、検査判定基準(3.5mm)を用いる。

(2) 解析結果

4．1次審査の結果

(1) Na漏えい対策

・対策設計：漏えいしたナトリウムの影響によっても建物の健全性は損なわれないことから、空気雰囲気下でのナトリウム漏えいに対する設計は妥当

・安全評価：漏えいナトリウムによる熱的影響によって原子炉補助建物の健全性が損なわれることはなく、系統分離は保持されることから、漏えいループ以外のループによって炉心の十分な冷却能力が保持される

(2) SG伝熱管破損対策

・対策設計：伝熱管の破損伝播による2次主冷却系の過度の圧力上昇は防止されることから、SG伝熱管の破損に対する設計は妥当

・安全評価：水漏えいを検出し、一連のプラント自動停止操作が行われる。この設計に基づき解析により定量的に評価した結果、高温ラプチャ型の破損伝播の発生は防止されることを確認。原申請書の安全評価は妥当

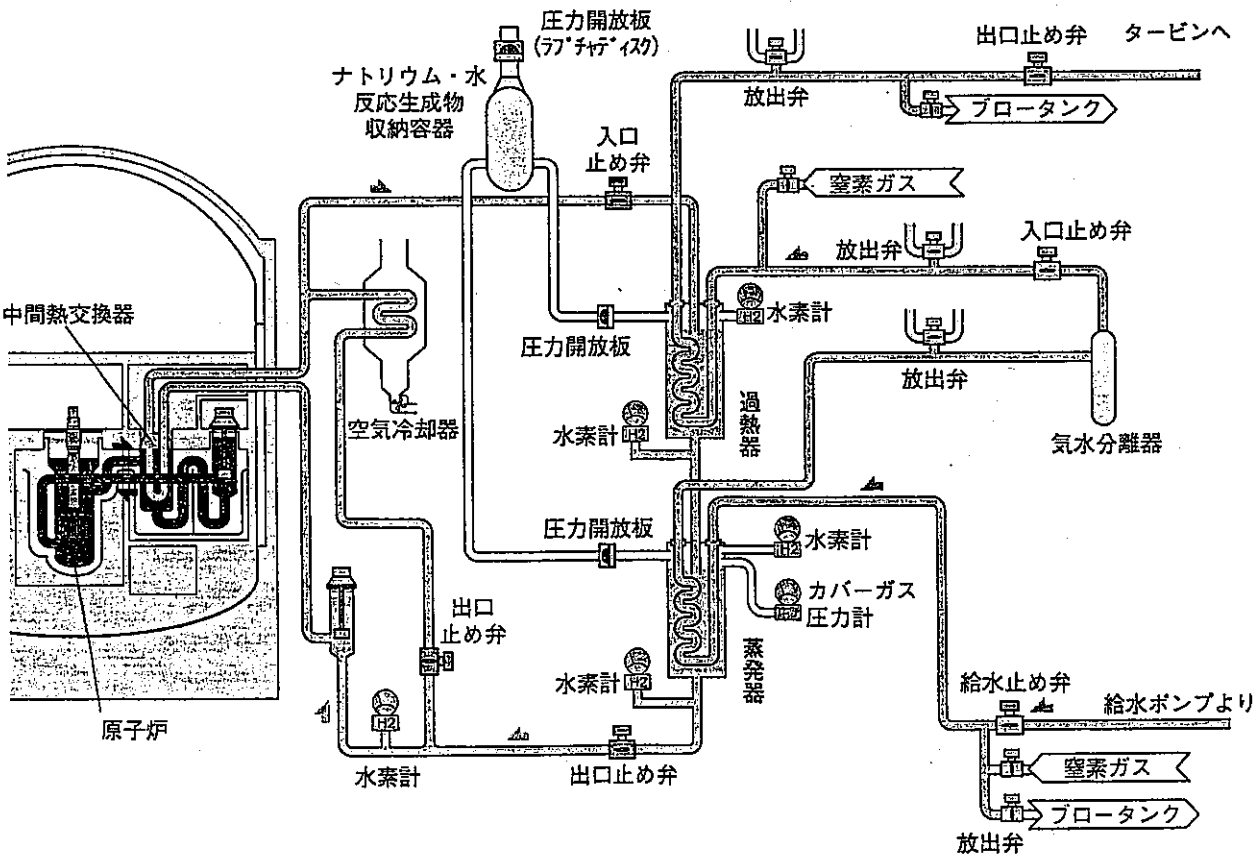
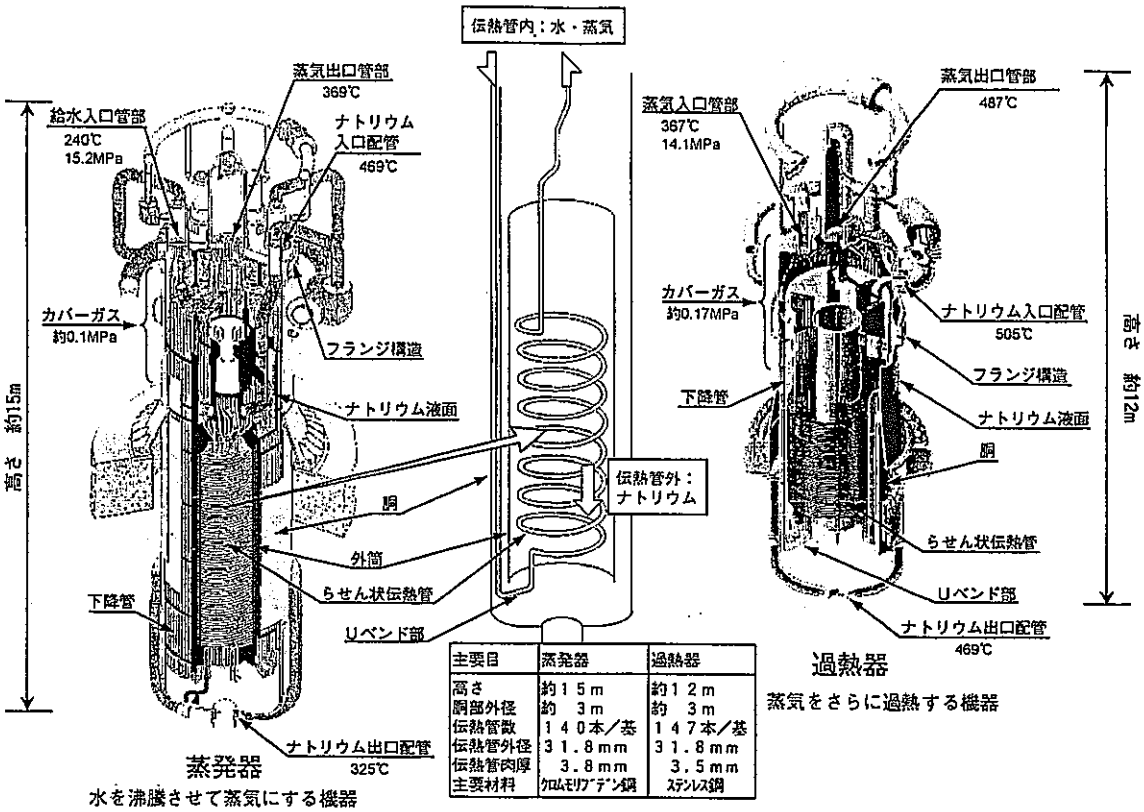


図3 「もんじゅ」蒸気発生器まわり系統図



主要目	蒸発器	過熱器
高さ	約１５ｍ	約１２ｍ
胴部外径	約　３ｍ	約　３ｍ
伝熱管数	１４０本／基	１４７本／基
伝熱管外径	３１．８ｍｍ	３１．８ｍｍ
伝熱管肉厚	３．８ｍｍ	３．５ｍｍ
主要材料	クロムモリブデン鋼	ステンレス鋼

図４　蒸気発生器の概要

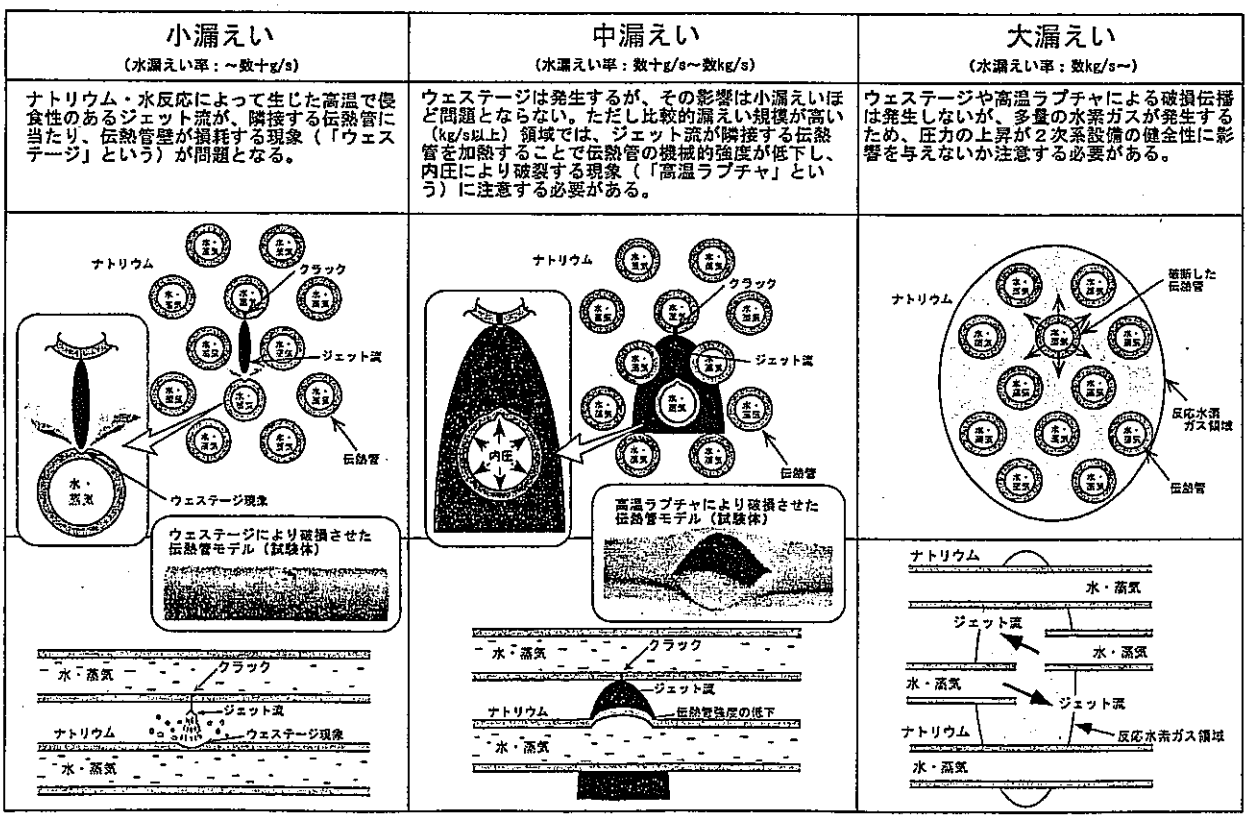
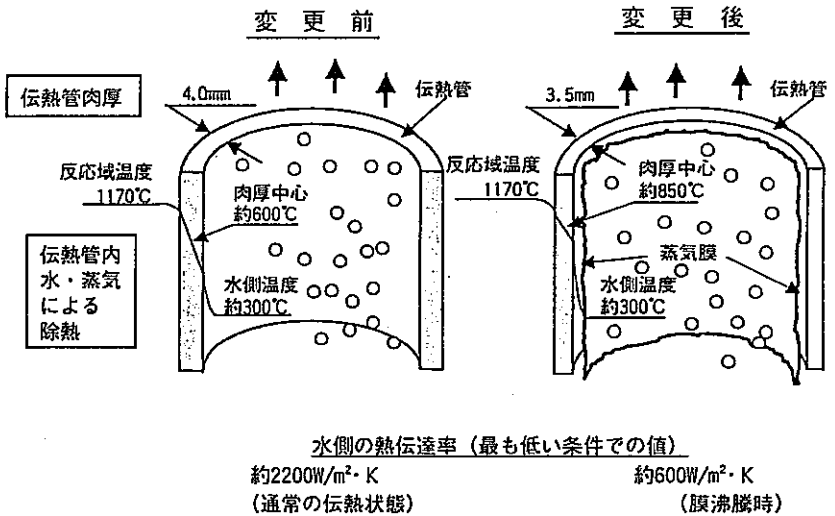


図５　蒸気発生器伝熱管破損時の水漏えい率と主要な現象

図6　高温ラプチャ評価の変更概要1



〈解 説〉

1．膜沸騰が起こらないという前提で解析すると、熱伝達率が大きく評価され、水・蒸気による伝熱管の冷却作用が大きく評価されるので、伝熱管の温度は低く評価される。
2．伝熱管の温度上昇が小さいと、高温ラプチャ発生の直接要因となる伝熱管材料の強度が落ちないので、高温ラプチャが発生しにくい結果となる。
3．したがって、膜沸騰が起こるという前提で評価した方が、安全側の評価となる。

図7　高温ラプチャ評価の変更概要2

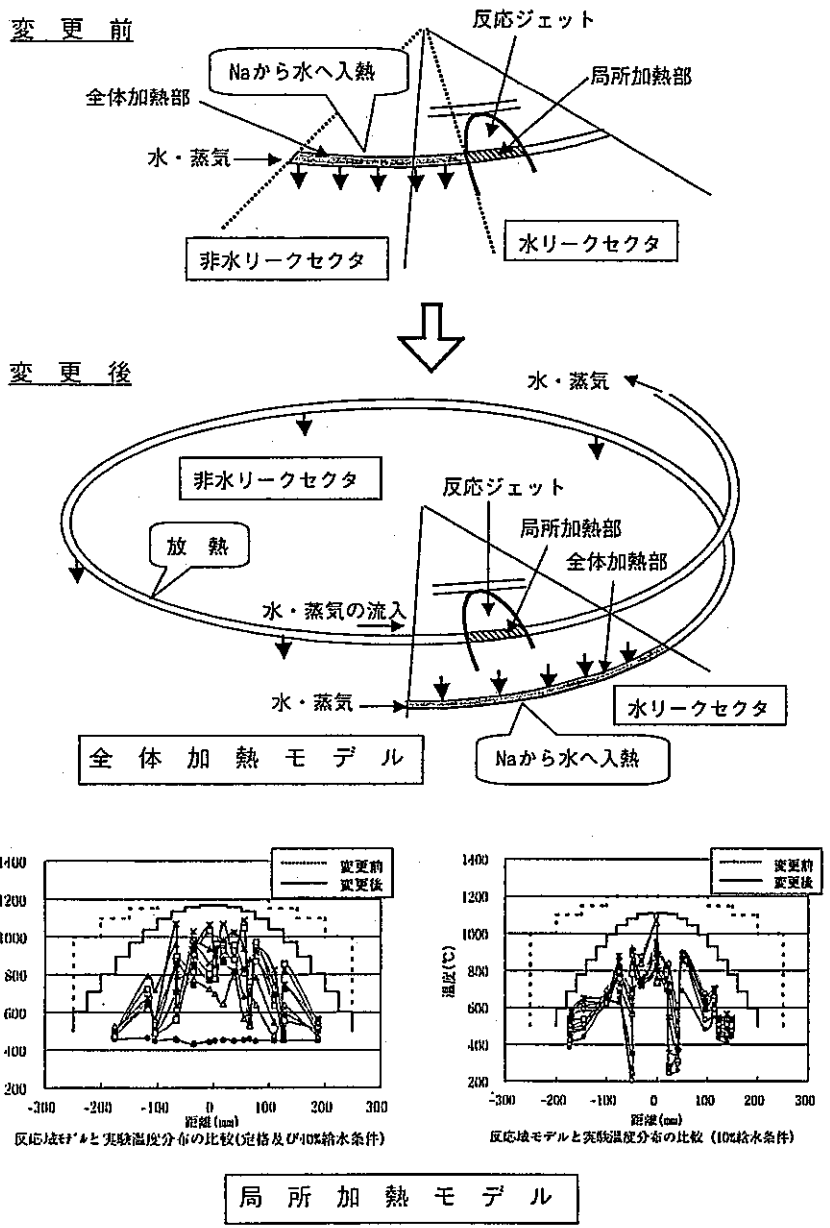


表1　新旧評価手法による「もんじゅ」蒸発器高温ラプチャ解析結果のまとめ（平成１３年１２月時点）

評価手法		旧評価手法			新評価手法								
(パラメータ)	-	現状設備			現状設備						改造設備		
伝熱管肉厚	mm	4.0			4.0			3.5			3.5		
検出器	-	圧力開放板			圧力開放板			カバーガス圧力計			カバーガス圧力計		
運転状態	-	定格	40%給水	10%給水	定格	40%給水	10%給水	定格	40%給水	10%給水	定格	40%給水	10%給水
水リーク位置*	-	管束下部	管束下部	管束中部	管束中部	管束中部	管束中部	管束中部	管束中部	管束中部	管束中部	管束下部	管束上部
水ブロー開始時間	秒	43	43	54	43	43	54	14	15	18	11	12	14
(Na側条件)													
反応域最高温度	℃	1,170	1,170	1,110	1,170	1,170	1,110	1,170	1,170	1,110	1,170	1,170	1,110
(解析結果)													
応力/引張強さ☆	-	0.83	0.77	0.82	0.81	0.83	0.88	0.87	0.94	0.80	0.86	0.79	0.73
累積損傷和☆	-	0.40	0.15	0.99	>1	>1	>1	0.70	0.88	0.93	0.34	0.31	0.44

＊ ：水リーク位置は結果が最も厳しくなる位置

☆ ：判断基準、この数値が1を超えると解析上、高温ラプチャが発生すると判断される。

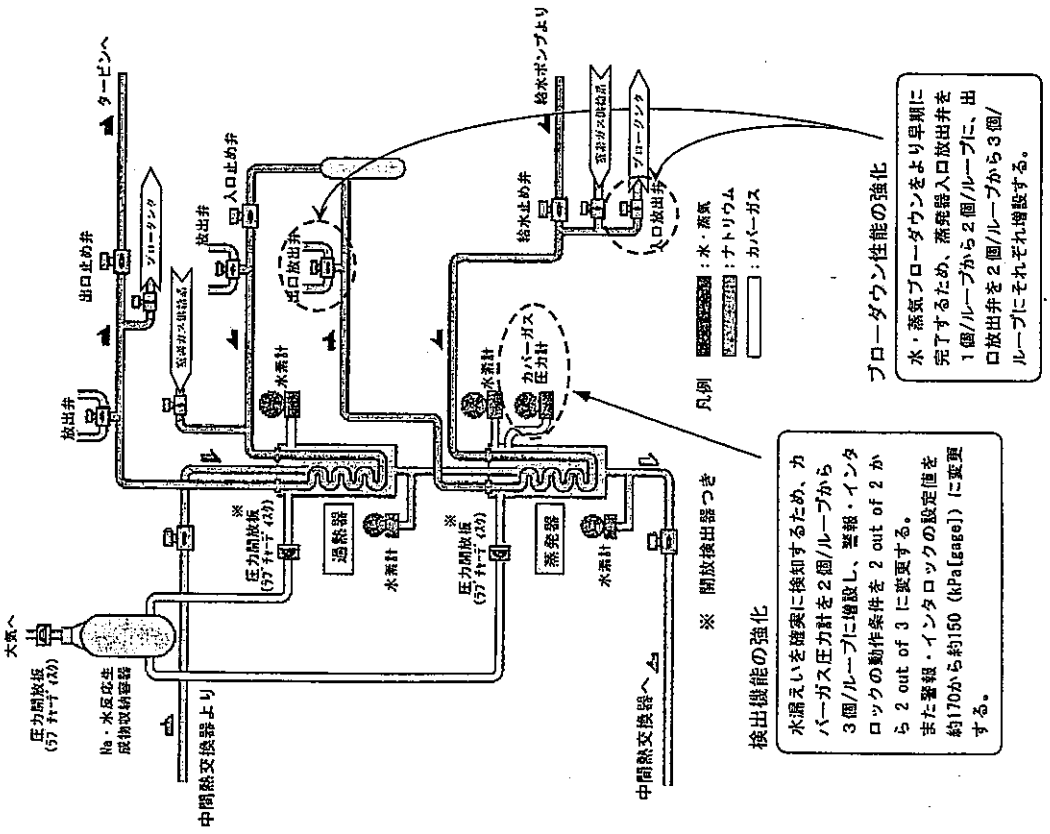


図6-1　蒸発器ブローダウン性能の改善に係る設備の改造等

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕「もんじゅ」の安全審査の状況について

部課室：もんじゅ建設所
報告者：前田 清彦

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）高温ラプチャの評価結果の意味するところは何か。（FBR ｻｲｸﾙｼｽﾃﾑ統合 Gr 野中主幹）	A1）実態に即した評価をしたところ、高温ラプチャは発生しないことが確認できたということである。
Q2）設置許可申請書上の意味は何か。（FBR ｻｲｸﾙｼｽﾃﾑ統合 Gr 野中主幹）	A2）原申請書の安全評価の前提条件として高温ラプチャは起こらないとしていることを念のため再確認したということである。
Q3）温度計交換等に係る設工認とＮａ漏えい対策に係る設置変更許可との関係如何。設置変更許可申請と設工認申請は同時にできるのか。（システム部？）	A3）設置変更許可申請は漏えい対策の基本的考え方に抵触する部分を対象にしている。すなわち、ドレン系に緊急ドレンという機能を持たせることである。一方、温度計については、基本的考え方に変更はなく、単に構造変更であるので、法手続き上は設工認という手続きの対象に当たる。相互に関連がないことから行政庁が並行して審査してくれた。
Q4）総点検の範囲内で設備を改善するものにはどんなものがあるのか。（東海事業所？）	A4）自主保安の対象であるが、Na 漏えい対策では、運転員が漏えい状況を把握しやすいように、TV カメラを多数設置する。これらは総点検で説明し、自主保安で設置する。その他、水蒸気系などで制御性を改善すべきとの指摘に対応する改善なども行う。

JNC TN9440 2002-004

第５回　Ｒ＆Ｄ報告会

〔平成 14 年 9 月 20 日〕

「常陽」照射ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料の照射挙動

照射施設運転管理センター
燃料材料試験部
照射燃料集合体試験室

田 中 康 介

背景・目的

ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料

・高い核物質密度
・優れた熱伝導特性　等

→ 次世代高速炉燃料候補の一つ
（重金属冷却炉，ガス冷却炉，小型炉）

・酸化物，金属燃料に比べ照射データが少ない

日本国内の実績：JMTR照射４キャプセル

・照射試験データの拡充が必要

サイクル機構ー原研共同研究
「高速炉用炭・窒化物燃料の基礎照射試験」

新型燃料（窒化物燃料，炭化物燃料）の照射挙動評価に資する

共同研究(高速炉用炭・窒化物燃料の基礎照射試験)の概要

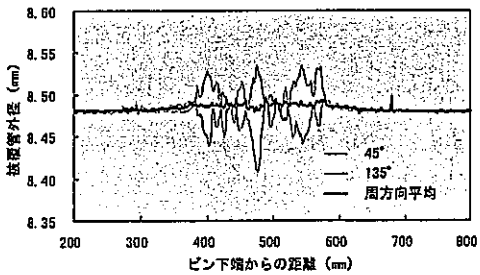
試験概要

○燃料：ウラン・プルトニウム混合炭・窒化物ペレット燃料
○ピン：Heボンド型燃料ピン
・炭化物：1本
・窒化物：2本［燃料ペレット－被覆管ギャップ幅を2種類設定］
○照射：「常陽」における高速中性子照射

分担

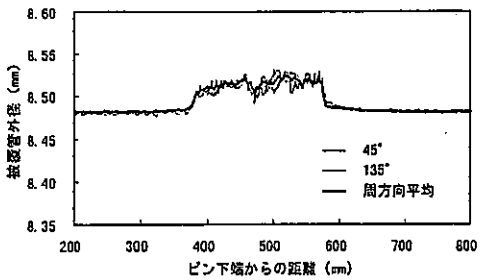
項　目	サイクル機構	原研
燃料ピン設計	○	○
燃料製造，短尺燃料ピン製作		○
燃料ピン長尺化，集合体組立，照射	○	
照射後試験（非破壊試験）	○	
（炭化物燃料破壊試験）		○
（窒化物燃料破壊試験）	○	○

窒化物燃料ピンの外径変化［平成13年度第5回研究開発報告会にて発表］



MN-1（ギャップ幅：大）
・周方向平均の外径変化は少ない
・顕著なオーバリティが発生
→金相観察によりオーバリティ長径方向のギャップ消失及びオーバリティ短径方向のギャップ残存を確認

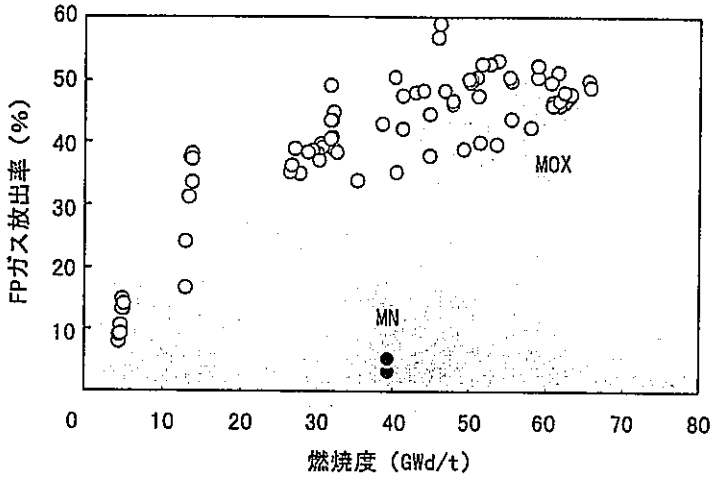
オーバリティの発現
⇒クラック・リロケーションに起因



MN-2（ギャップ幅：小）
・炉心燃料部で外径が増加
・周方向にほぼ均等に変形（等方変形）
→金相観察によりほぼ全周でのギャップの消失を確認

外径増加
⇒FCMIにより発生

FPガス放出率[平成13年度第5回研究開発報告会にて発表]



窒化物燃料のFPガス放出率　MN－1：3.3%　MN－2：5.2%

本報告の内容

○炭・窒化物燃料の非破壊試験（及び一部の破壊試験）結果
（平成13年度第5回研究開発報告会['01.9.25]）
・燃料ピン外径変化，FPガス放出率

◎本報告：窒化物燃料の照射挙動
・燃料組織変化挙動
・燃料中のFPガス及びPu分布挙動
[サイクル機構実施破壊試験結果の評価]

（項　目）
光学顕微鏡及びSEMによる燃料組織観察
・燃料組織の形態
・結晶粒径測定
・気孔分布測定
EPMAによる元素分析
・Pu及びXe等の分布

燃料仕様・照射条件

燃料製造仕様（ノミナル値）

	被覆管		燃料ペレット※				直径ギャップ幅 (mm)	スミア密度 (%T.D.)	スタック長さ (mm)
	材質	外径 (mm)	外径 (mm)	高さ (mm)	密度 (%T.D.)	Pu富化度 (wt%)			
MN-1	15Cr-20Ni	8.5	7.28	8	84.8	18.62	0.32	77.8	200.1
MN-2			7.43		86.0		0.17	82.2	198.8

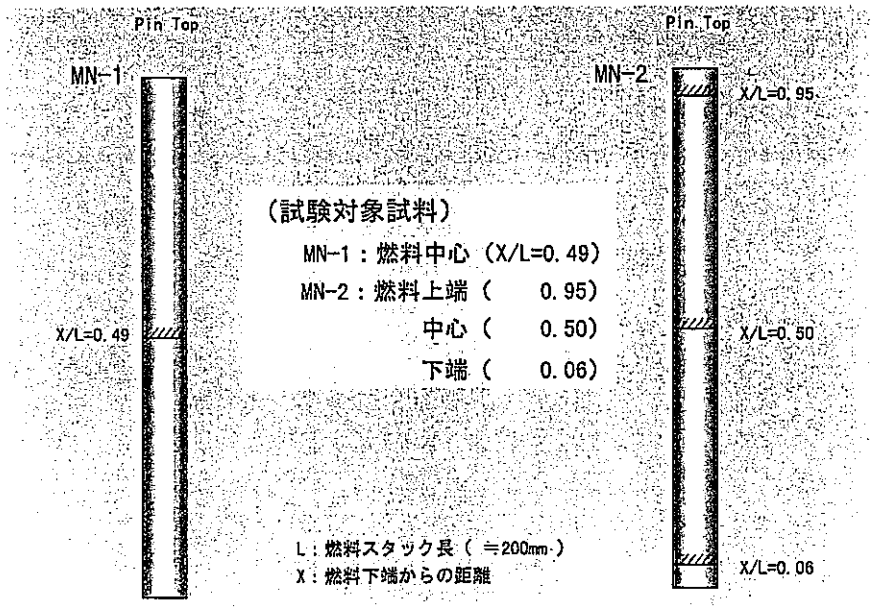
※熱安定型ペレット

照射条件

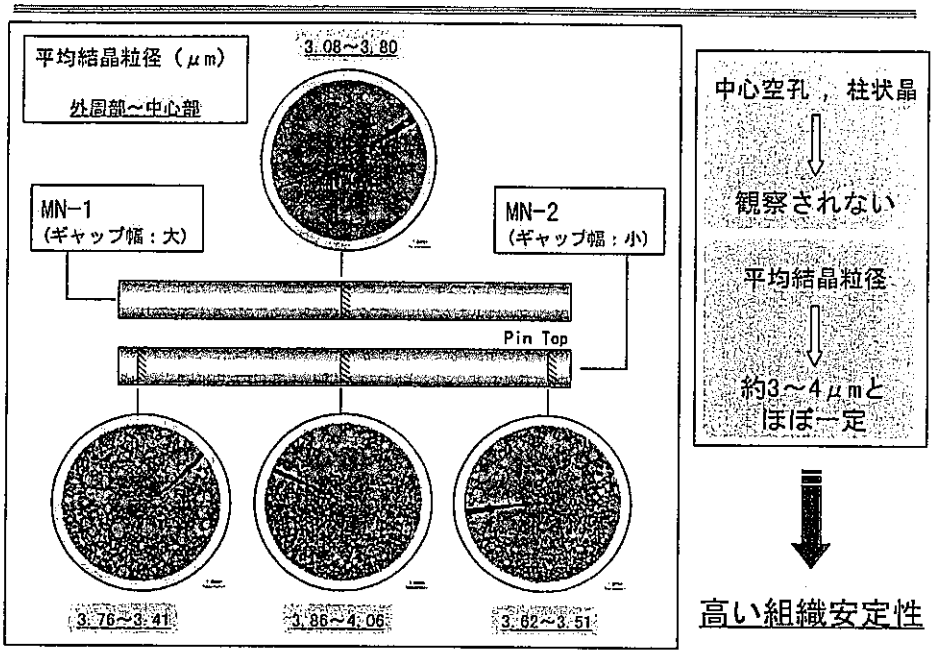
照射期間　：　高速実験炉「常陽」MK-II炉心　第29～33サイクル（約276 E.F.P.D.）
照射リグ　：　B型特殊燃料集合体（PFB090）
照射位置　：　3B2

	最大線出力(kW/m)	最高燃焼度(GWd/t)	最大中性子照射量(n/m²)(E>0.1MeV)
MN-1	72	40	5.3×10^{26}
MN-2	76	39	5.3×10^{26}

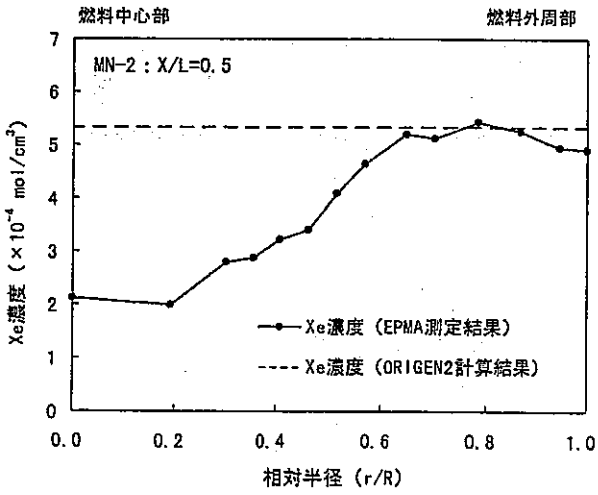
試料採取位置



燃料組織と結晶粒径



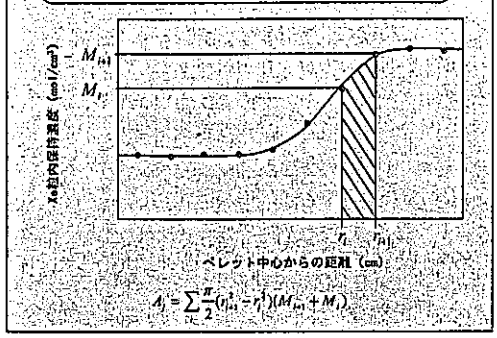
燃料径方向のXe濃度分布[EPMA定量分析結果]



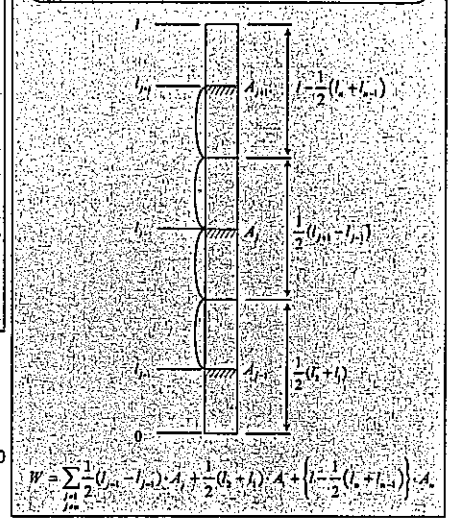
EPMAで検出されるXe ⇒ 結晶粒内に保持されているXe

FPガス保持率評価[MN-2]

断面あたりのXe粒内保持量 A_j(mol/cm)



ピンあたりのXe粒内保持量 W (mol/pin)



燃料ピンあたりの
生成量に対するXe粒内保持率

$$= \frac{\text{粒内保持量（EPMA測定値）}}{\text{理論生成量（ORIGEN2計算値）}} \times 100$$

≒80%

燃料径方向のXe濃度と気孔面積率分布

- Xeの粒内保持濃度
  ⇒燃料中心部で低下

↓

- ポーラスな組織
  （気孔面積率：25～35%）
- 気孔は結晶粒界に存在
  （二次電子像観察結果）

↓

生成したFPガスの一部が
バブルとして粒界に析出

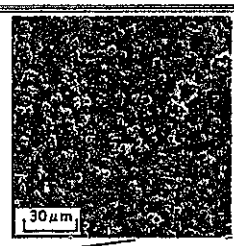
- 閉気孔率が高い組織

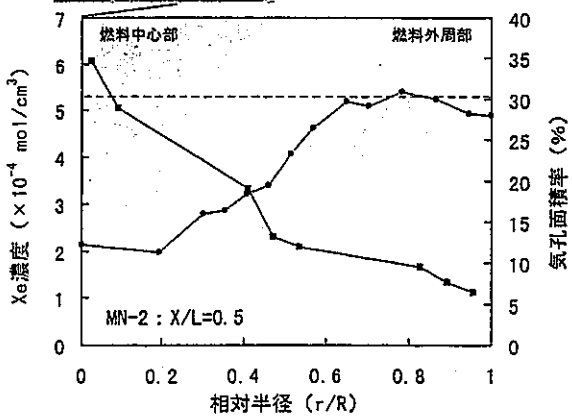
↓

粒界に析出したFPガス
⇒そのまま粒界に保持

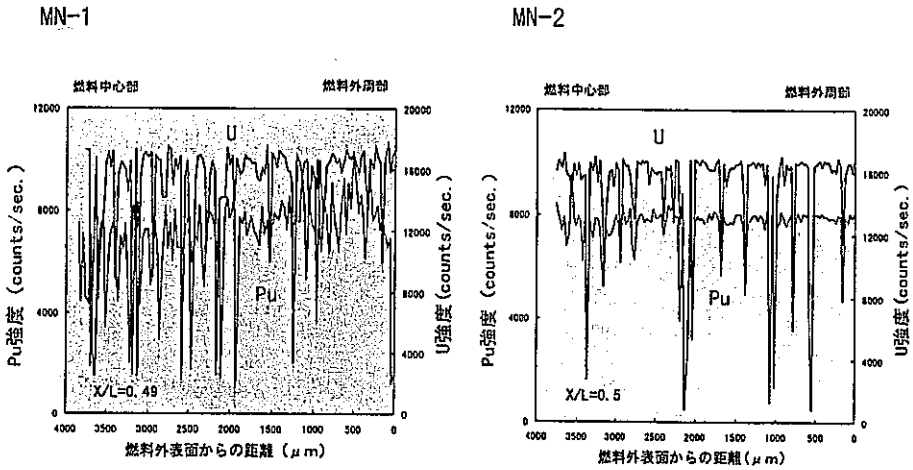
↓ パンクチャ試験結果
MN-1：3.3%
MN-2：5.2%

低FPガス放出率

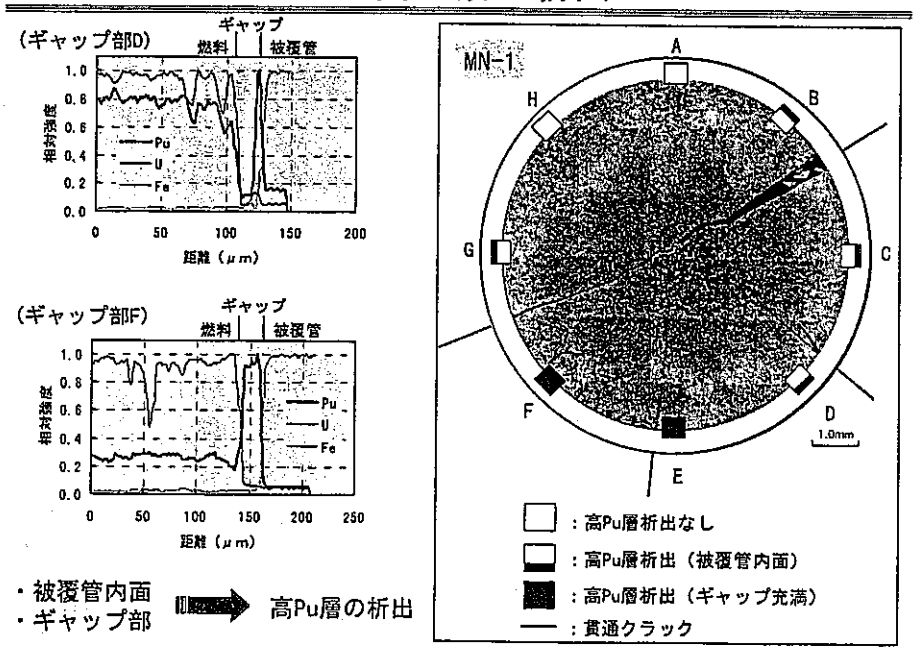




Puの径方向分布[EPMA線分析結果]

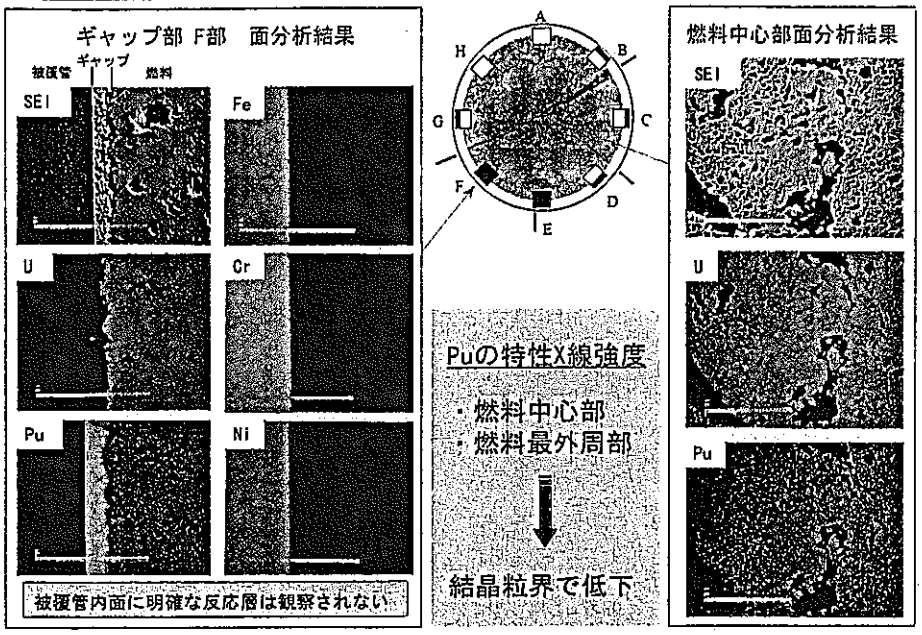


ギャップ部における高Pu層の析出



・被覆管内面
・ギャップ部 → 高Pu層の析出

燃料外周部と中心部の特性X線像[EPMA面分析結果]



窒化物燃料[MN-1]におけるPuの挙動

窒化物燃料 ⇒ Puの蒸気圧が高い

○燃料表面の気孔及び結晶粒界から蒸発

○Pu移動現象（燃料外周部への再分布　等）

高Pu層の析出

⇒ ギャップ幅の大きいMN-1で発生

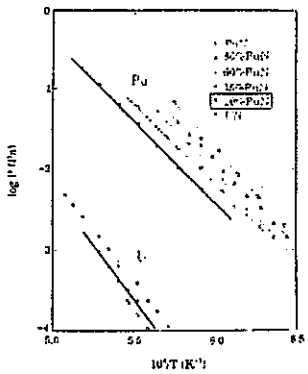
⇒ MN-1は相対的に照射温度が高い

照射初期の燃料温度簡易計算結果

（MN-1：X/L=0.49）　中心：約1800℃，表面：約1500℃

（MN-2：X/L=0.50）　中心：約1500℃，表面：約1200℃

⇒ Puの蒸発現象が原因である可能性



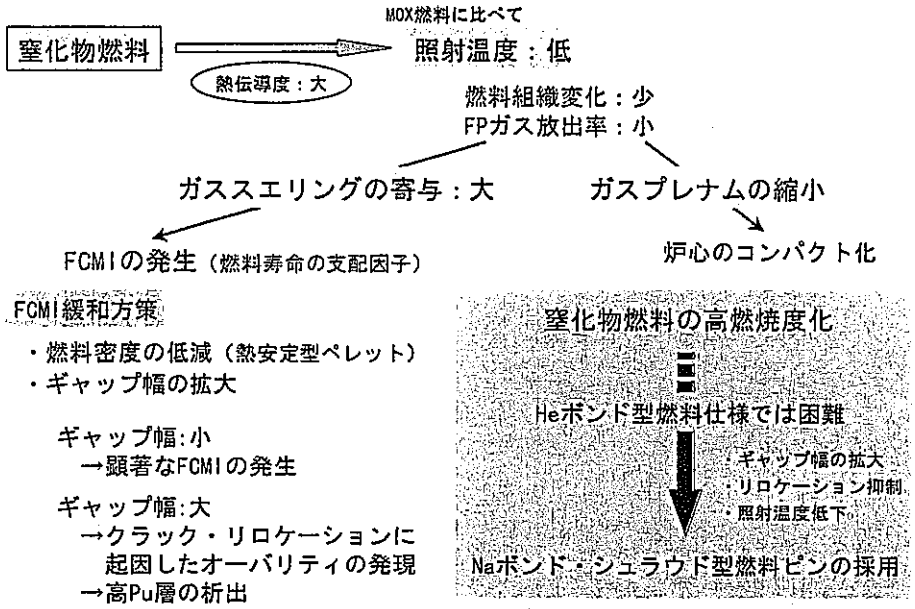
Partial pressures of U and Pu over UN,PuN and mixed nitride as a function of temperature.
(Y.Suzuki et al.[1992])

高温部での蒸発 ⟶ 低温部での凝縮・堆積

燃料ペレット中心部 ——クラック経由——⟶ 被覆管内面

燃料ペレット外表面 ⟶ 被覆管内面
（ペレットの偏心等により生じた局所高温部）

窒化物燃料の照射挙動



まとめ

「常陽」において最大線出力約76kW/m，最高燃焼度約40GWd/tを達成した窒化物燃料ピンの組織観察および元素分析を実施し，照射挙動を検討した。

（１）顕著な組織変化（中心空孔や柱状晶の形成）は認められず，明確な粒成長は観察されなかった。

（２）ペレット内（結晶粒内，粒界）ではFPガスの保持量が高い状態にあることがわかった。この結果は，低いFPガス放出率を示したパンクチャー試験の結果と整合した。

（３）組織安定性とFPガス保持率が高い結果は，窒化物燃料の熱伝導特性が優れていることに起因して，照射時の燃料温度レベルが低かったことを示唆するものと考えられる。

（４）ギャップ幅の大きいピンにおいて，燃料ー被覆管ギャップの一部に，高Pu層の析出が確認された。しかし，それによる被覆管との明確な反応は観察されなかった。

第5回研究成果報告会
2002/9/20

オーステナイト系ステンレス鋼の照射促進拡散能の評価

照射施設運転管理センター　燃料材料試験部
照射材料試験室

赤坂　尚昭

第5回研究開発報告会
2002/9/20

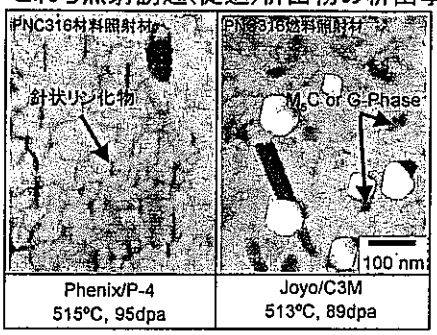
報告内容

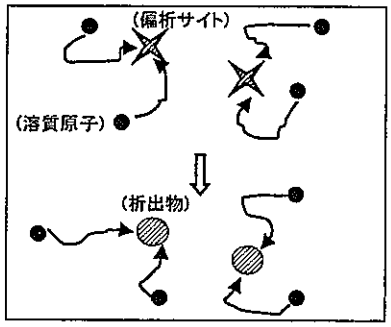
- 純鉄、オーステナイト系モデル合金およびPNC316鋼中におけるCrおよびNiの中性子照射下平均相互拡散係数の決定ならびに、これら材料の照射下拡散機構の考察
  - 背景
  - 実験方法
  - 実験結果
  - 考察
  - まとめ

第5回研究開発報告会
2002/9/20

背景(1/4)

- 中性子照射下でのオーステナイト系炉心材料のスエリング挙動と析出物形成挙動は密接に関連
  - 針状リン化物はボイド形成を抑制
  - M_6C、G-Phase、γ'の形成によりボイドが形成しやすい環境に移行
  - これら照射誘起(促進)析出物の析出挙動は照射誘起偏析挙動に依存

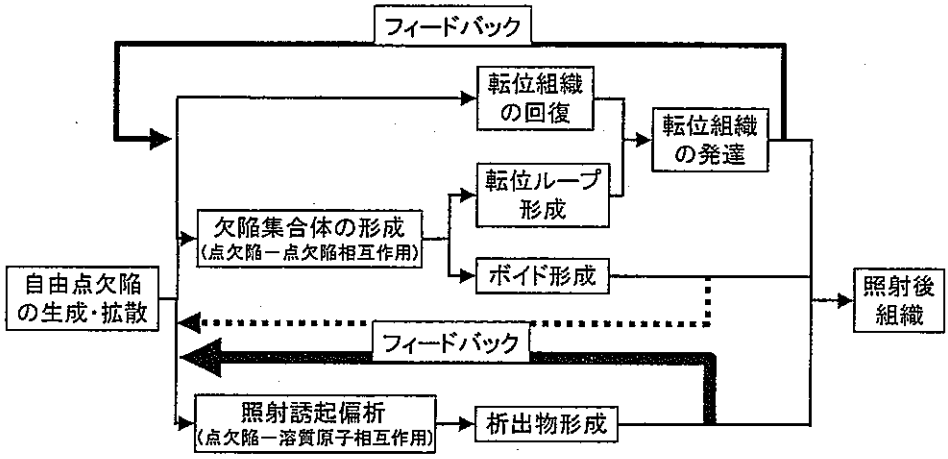




→<u>照射誘起偏析挙動</u>の評価、モデリング等の実施がスエリング挙動を検討していく上で非常に重要

第5回研究開発報告会
2002/9/20

背景(2/4)

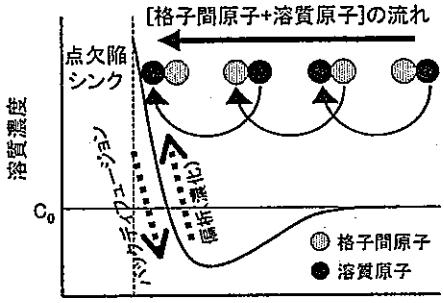


実用鋼における照射組織発達機構模式図

第5回研究開発報告会
2002/9/20

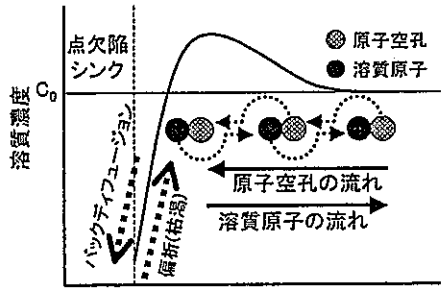
背景(3/4)

- 照射誘起偏析現象の基本メカニズム
  - 点欠陥と溶質原子との弾性相互作用により、点欠陥の移動に伴い溶質原子の移動が生じる
  - 溶質原子の大きさにより相互作用する点欠陥が決定
  - 偏析量は点欠陥の移動に伴う溶質原子の濃縮・枯渇量と、逆方向に生じるバックディフュージョン量とのバランスで決定



点欠陥シンクからの距離

アンダーサイズ原子(Ni)の場合



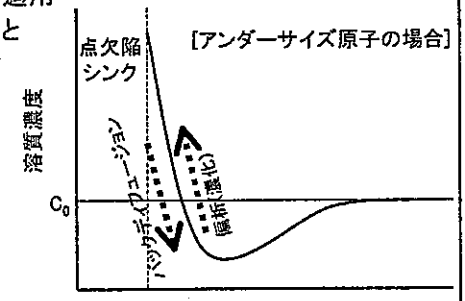
点欠陥シンクからの距離

オーバーサイズ原子(Cr)の場合

第5回研究開発報告会
2002/9/20

背景(4/4)

- 照射誘起偏析挙動を評価していく上での問題点
  - 偏析量は点欠陥の移動に伴う溶質原子の濃縮・枯渇量と、<u>逆方向に生じるバックディフュージョン量</u>とのバランスで決定
    - —バックディフュージョンのドライビングフォースは溶質の濃度勾配
    - —照射環境下における拡散係数データはほとんどなく、非照射熱拡散実験より得られた拡散係数を適用
    - —バックディフュージョンは熱拡散と同等と見なして良いか？
      - ・拡散機構は同じ？
      - ・照射による促進の有無は？
  - <u>→中性子照射下拡散係数が必要</u>



点欠陥シンクからの距離

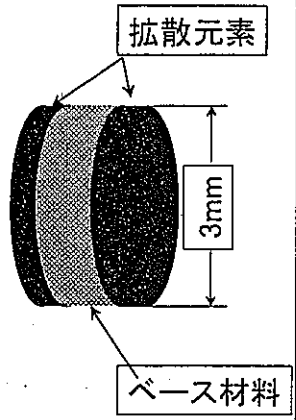
- 目的
  - 純鉄、オーステナイト系モデル合金およびPNC316鋼中におけるCrおよびNiの中性子照射下平均相互拡散係数の決定ならびに、これら材料の照射下拡散機構の考察

第5回研究開発報告会
2002/9/20

実験方法(1/2)

- 供試材
  - ミニ拡散対試料

ベース材料(溶体化処理材)	拡散元素(電着)
純 Fe	Cr or Ni
Fe-15Cr-15Ni モデル合金	
PNC316	



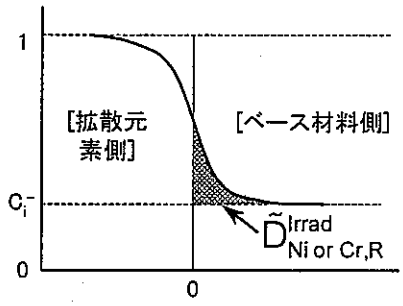
- 中性子照射
  - ステンレスキャプセルにHe封入し、「常陽」/CMIRに装荷

照射温度(℃)	370	460	540
照射損傷量(dpa)	1.4	14	2.1
照射時間(hr)	4220		

第5回研究開発報告会
2002/9/20

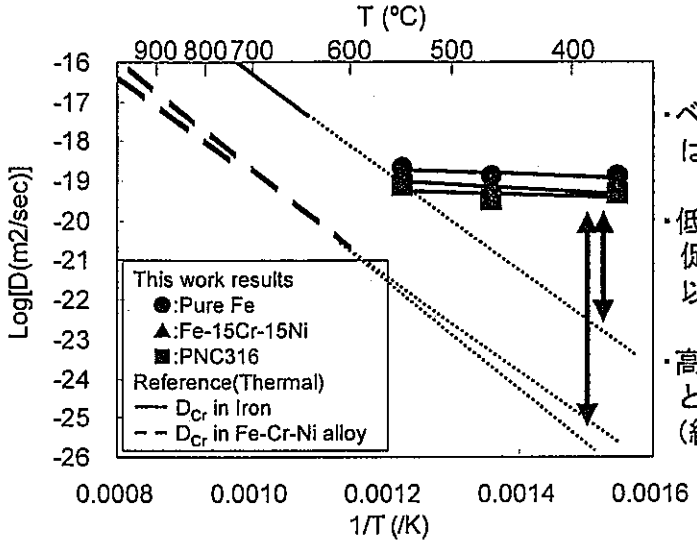
実験方法(2/2)

- 濃度プロファイルの取得(FMSへ依頼)
  - ミニ拡散対の断面を研磨後、ベース材料/拡散元素界面近傍の元素濃度分析を行い、各元素の濃度プロファイルを取得
    加速電圧　　：20kV
    プローブ径　　：1μm
- 平均実効相互拡散係数の決定
  - 取得した濃度プロファイルから着目元素のベース材料側における平均実効相互拡散係数を決定
  - 平均実効相互拡散係数の決定方法として、マタノの解法を発展させたDayanandaの手法を選択



第5回研究開発報告会
2002/9/20

実験結果(1/4 ; Cr)



・ベース材料の依存性は小さい

・低温側において拡散の促進が顕著(3オーダー以上)

・高温側において熱拡散との差が小さくなる(純鉄で顕著)

平均実効相互拡散係数の温度依存性(Cr)

第5回研究開発報告会
2002/9/20

実験結果(2/4 ; Cr)

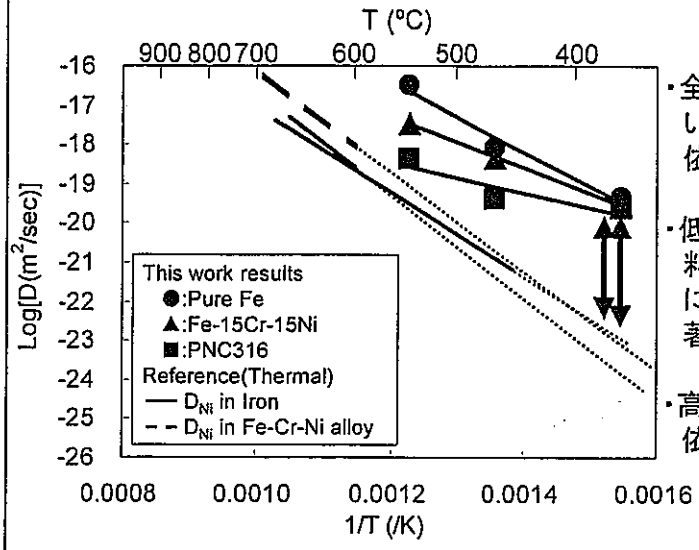
Crの平均実効相互拡散係数評価値

ベース材料	照射温度 (°C)	損傷量 (dpa)	$\tilde{D}^{Irrad}_{Cr}$ ($\times10^{-20}$ m^2/sec)	$\tilde{D}^{Irrad}_{Cr,0}$ (m^2/sec)	$\tilde{Q}^{Irrad}_{Cr}$ (kJ/mol)
純鉄	370	1.4	13.4	1.17×10^{-18}	12.02
	460	14	13.9		
	540	2.1	22.0		
Fe-15Cr-15Ni モデル合金	370	1.4	4.36	1.70×10^{-18}	19.15
	460	14	9.47		
	540	2.1	8.75		
PNC316	370	1.4	4.92	2.38×10^{-19}	9.49
	460	14	3.18		
	540	2.1	7.72		

・全てのベース材料において拡散の活性化エネルギーは小さい
・PNC316中のCrの拡散係数は純鉄中と比較して僅かに小さい

第5回研究開発報告会
2002/9/20

実験結果(3/4 ; Ni)



- 全てのベース材料において拡散係数の温度依存性が明確
- 低温側では、ベース材料依存性が小さいと共に、拡散の　促進が顕著(2オーダー程度)
- 高温側ではベース材料依存性が明確

平均実効相互拡散係数の温度依存性(Ni)

第5回研究開発報告会
2002/9/20

実験結果(4/4 ; Ni)

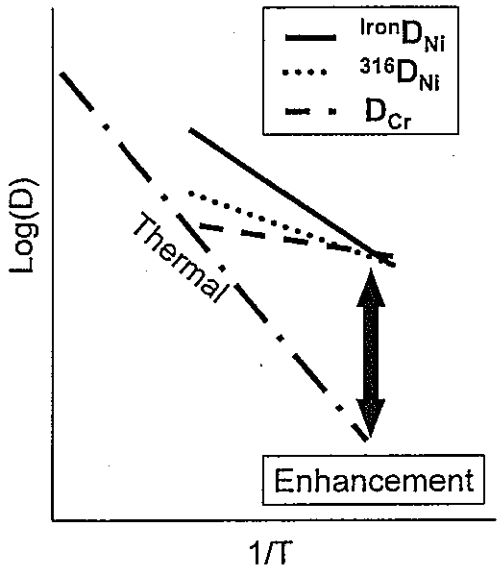
Niの平均実効相互拡散係数評価値

ベース材料	照射温度 (°C)	損傷量 (dpa)	$\tilde{D}_{Ni}^{Irrad}$ ($\times10^{-20}$ m²/sec)	$\tilde{D}_{Ni,0}^{Irrad}$ (m²/sec)	$\tilde{Q}_{Ni}^{Irrad}$ (kJ/mol)
純鉄	370	1.4	4.53	1.02×10^{-6}	166.49
	460	14	83.7		
	540	2.1	3130		
Fe-15Cr-15Ni モデル合金	370	1.4	3.02	2.29×10^{-10}	122.15
	460	14	50.0		
	540	2.1	337		
PNC316	370	1.4	2.33	1.26×10^{-14}	72.62
	460	14	4.06		
	540	2.1	44.3		

- 拡散の活性化エネルギーがCrよりも大きい
- 低温側では平均実効相互拡散係数がCrよりも小さい

第5回研究開発報告会
2002/9/20

実験結果のまとめ



1. $D^{Irrad} > D^{Therm}$
2. $D_{Ni} > D_{Cr}$ (低温側除く)
   $D_{Cr} > D_{ni}$ (低温側)
3. D_{Ni} :
   $^{Iron}D > ^{Model}D > ^{316}D$
   $^{High\ T}D > ^{Low\ T}D$
4. D_{Cr} :
   ベース材料依存性および照射温度依存性は小さい

第5回研究開発報告会
2002/9/20

考察(1/2)

[Crの平均実効相互拡散]
- ● ベース材料依存性および温度依存性が小さい
- ➢ Cr原子は原子空孔とのみ相互作用
  →Crの拡散は原子空孔フラックスに依存
- ➢ 今回行った試験条件の範囲では原子空孔フラックスは同程度

[Niの平均実効相互拡散]
- ● 温度依存性が明確
- ● 低温側ではベース材料依存が小さく、Crよりも拡散速度が小さい
- ➢ Ni原子は格子間原子、原子空孔の双方と相互作用し、かつ低温側では原子空孔拡散機構が優勢
- ➢ 温度依存性は格子間原子拡散機構が寄与率が増大するため
  →格子間原子フラックスは温度上昇に伴い増加

第5回研究開発報告会
2002/9/20

考察(2/2)

[ベース材料の影響(合金元素の効果)]

- 平均実効相互拡散係数は概ね$^{Pure\ Fe}D > {}^{Model}D > {}^{316}D$
- ➢ 中性子照射下における拡散現象の促進は点欠陥フラックスに依存
- ➢ 多元系合金および実用材料では点欠陥、特に格子間原子のフラックスが減少する。

→合金元素および不純物元素等が点欠陥と相互作用

第5回研究開発報告会
2002/9/20

まとめ

純鉄、オーステナイト系モデル合金およびPNC316鋼中におけるCrおよびNiの中性子照射下平均相互拡散係数の実験値を決定した。またこれら材料の照射下拡散機構を考察し、以下の点を明らかとした。

- CrおよびNiの相互拡散は、熱時効条件下と比較して促進し、特に低温側で顕著である。
- 濃度勾配を平坦化する方向の溶質原子の拡散は基本的に熱拡散と同様の空孔機構により生じる。ただしアンダーサイズのNiの場合は高温になるにつれ格子間原子機構の寄与率が大きくなる。
- 平均実効相互拡散係数は点欠陥フラックスに依存する。そのフラックスに対し合金元素および合金中の不純物が影響を与え、特に格子間原子に対してその効果が大きい。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕「常陽」照射ウラン・プルトニウム混合窒化物の照射挙動　　部課室：燃材部　FMS
報告者：田中康介

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）窒化物燃料ピンの外径変化挙動は，MOX と比べてどう違うのか（開調室：小井氏）。	A1）ギャップ幅がほぼ同じ窒化物と MOX の燃料ピンを比較すると，同程度の燃焼度では，窒化物の方が明らかに大きな外径増加が見られる。また，MOX では燃料ペレットのクラック・リロケーションに起因する明確なオーバリティの発現は認められない。
Q2）この試験では，He ボンド型の燃料ピンがダメであるという結果が出たという事か（同上）。	A2）He ボンド型燃料ピンの採用が直ちに否定されるとは考えていないが，本試験の結果から，He ボンド型の燃料ピンでは，FCMI 対策が必要であり，窒化物燃料で高い燃焼度を狙うという観点からは，Na ボンド・シュラウド型の燃料ピンの採用が必要であると考えられる。
Q3）EBR-Ⅱで照射実績のある Na ボンド・シュラウド型燃料ピンでの照射をしなかったのはなぜか（同上）。	A3）窒化物燃料は照射実績が少なく，その PIE 結果も詳しいデータはあまり報告されていないのが現状である。したがって，まずは，燃料ピン製作上の課題が少ない He ボンド型の燃料ピンを照射することで，試験データの拡充を図ることを目的としたものである。
C1）窒化物燃料のメリットについては，報告の最後にまとめた内容の通りだと認識しているが，さらに線出力を上げて照射することで，FP ガス放出を促進させ，燃料ガススエリングの寄与を低減させる方策もあると考えている。今後照射をする際には，より高い線出力での照射を期待したい（システム部：池上主席）。	
Q4）新型燃料の適用性評価の中で，顆粒窒化物を燃料候補から落とす方向で検討しているが，本試験結果は，その検討結果を支持するものと考えていいのか（再処理 Gr.佐藤 GL）。	A4）照射温度によっては，顆粒燃料の照射中における焼結により，ペレット的な挙動を示す可能性はある。顆粒燃料の照射挙動については，詳細な PIE 結果は報告されていないため，本試験結果との類似性の検討はできていない。したがって，本試験結果から，直ちに顆粒燃料の適用性を否定するものではないと考える。

R&D 報告会　議事内容（Q&A）

〔題目〕オーステナイト系ステンレス鋼の照射促進拡散能の評価　部課室：燃材部 MMS
報告者：赤坂　尚昭

質問、意見、要望等（発言者）	回答、対応策等
Q1）この評価により材料照射の場合と燃料照射の場合で析出物挙動に違いがある原因は分かったのか？(開調室　小井)	A1）燃料照射でも低照射量ではリン化物が出来ていて、高照射量になるとリン化物が再固溶し細かい炭化物やG相の形成とボイドが発生している。このような析出物の形成・再固溶は照射誘起偏析現象に依存しているため、材料の内部組織全体を考慮して照射誘起偏析現象を評価するとにより、材料照射と燃料照射の組織変化挙動差を説明することは可能になると考えている。 今回評価し報告した内容は、その照射誘起偏析現象そのものを検討する上において必要不可欠かつこれまで報告例がない中性子照射下での平均実効相互拡散係数についてである。そのため得られた結果から照射環境の違いによる組織変化挙動差の原因は直接導くことは出来ないが、照射誘起偏析現象の方へ取り込んで評価していくことにより、上述のように原因解明が可能になると考えている。
Q2）照射温度と照射量が同じであれば材料照射試料と燃料照射試料の組織は同じになると思われるが、両者で差異が生じるのは照射時間の影響なのではないか？(開調室　小井)	A2）たとえ同じ照射量であっても照射時間の長短により照射組織が異なる可能性は否定できず、組織変化挙動を検討する上でも考慮する必要はあると考える。ただ「常陽」/C3M 照射試料と「常陽」/CMIR 照射試料および Phenix での材料照射材を比較しても照射時間の影響は明確ではなく、現状では燃料照射での照射温度変動の影響により照射組織発達のバランスが両者で異なることが、照射組織の差異の主要因であると考えている。