

添 付 資 料

目 次

添付資料 1	審議の経緯
添付資料 2	原子力分野の研究開発に関する委員会 構成員
添付資料 3	原子力研究開発作業部会 構成員
添付資料 4	2015 年までの研究開発計画 －主概念：ナトリウム冷却炉－
添付資料 5	2015 年までの研究開発計画 －主概念：先進湿式法再処理＋簡素化ペレット法燃料製造－
添付資料 6	GIF と実用化戦略調査研究の設計要求の比較

審議の経緯

1. 原子力分野の研究開発に関する委員会

第 14 回	平成 18 年 3 月 30 日
第 15 回	平成 18 年 4 月 26 日
第 16 回	平成 18 年 5 月 25 日
第 18 回	平成 18 年 6 月 23 日
第 19 回	平成 18 年 7 月 21 日
第 20 回	平成 18 年 8 月 25 日

2. 原子力研究開発作業部会

第 5 回	平成 18 年 4 月 14 日
第 6 回	平成 18 年 4 月 27 日
第 7 回	平成 18 年 5 月 12 日
第 8 回	平成 18 年 5 月 24 日
第 9 回	平成 18 年 6 月 2 日
第 10 回	平成 18 年 6 月 14 日
第 11 回	平成 18 年 6 月 19 日
第 12 回	平成 18 年 7 月 3 日
第 13 回	平成 18 年 7 月 19 日
第 14 回	平成 18 年 8 月 4 日
第 15 回	平成 18 年 8 月 17 日

原子力分野の研究開発に関する委員会 構成員

- 石田 寛人 金沢学院大学長
- 伊藤 範久 電気事業連合会専務理事
- 井上 信 京都大学名誉教授
- 榎田 洋一 名古屋大学エコトピア科学研究所部門長
- 岡崎 俊雄 独立行政法人原子力機構副理事長
- 加藤 正進 財団法人電力中央研究所常務理事
- 木下 富雄 財団法人国際高等研究所フェロー
- 小林 英男 横浜国立大学安心・安全の科学研究教育センター教授
- (主査) 田中 知 東京大学大学院工学系研究科教授
- 知野 恵子 読売新聞東京本社編集局解説部次長
- 中西 友子 東京大学大学院農学生命科学研究科教授
- 早野 敏美 社団法人電機工業会専務理事 (第18回より)
- 藤本 弘次 社団法人日本電機工業会専務理事 (第17回まで)
- 松田 美夜子 富士常葉大学環境防災学部教授、
生活環境評論家 (廃棄物とリサイクル)
- 本島 修 自然科学研究機構核融合科学研究所長
- 和気 洋子 慶應義塾大学商学部教授

原子力研究開発作業部会 構成員

- 榎田 洋一 名古屋大学 エコトピア科学研究所
環境システムリサイクル科学研究部門長
- 柴田 洋二 社団法人日本電機工業会 原子力部長
- 代谷 誠治 京都大学原子炉実験所長
- (主査)田中 知 東京大学大学院工学系研究科 教授
- 田中 治邦 電気事業連合会 原子力部長
- 前川 治 株式会社東芝 電力システム社 原子力技師長
(第8回より)
- 山中 伸介 大阪大学フロンティア研究機構 副機構長

2015年までの研究開発計画

－ 主概念：ナトリウム冷却炉 －

2015年までの原子炉システム設計研究の進め方

2006

2010

2015頃

H22

H27頃

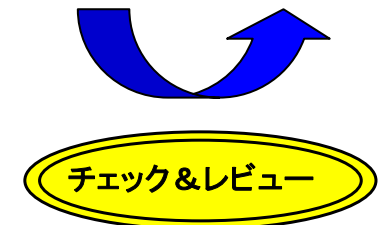
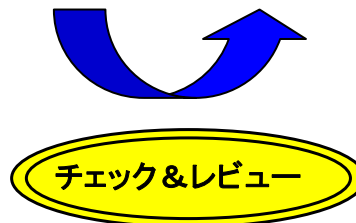
高速増殖炉サイクル実用化研究開発

期待する成果

- ・採用する革新技术の決定
- ・実用炉の概念設計
- ・大型試験施設を用いた実証試験計画の立案
- ・実証炉の予備的概念検討

期待する成果

- ・実用炉の概念設計と成立根拠となるデータ類
- ・大型試験施設の設計・建設、及び試験
- ・実証炉の概念設計
- ・実用化までの研究開発計画の提示



ナトリウム冷却炉における技術開発課題

経済性に係る課題

○建屋容積・物量の削減

- ①配管短縮のための高クロム鋼の開発
- ②システム簡素化のための冷却系2ループ化
- ③1次冷却系簡素化のためのポンプ組込型中間熱交換器開発
- ④原子炉容器のコンパクト化
- ⑤システム簡素化のための燃料取扱系の開発
- ⑥物量削減と工期短縮のための格納容器のSC造化

○高燃焼度化による長期運転サイクルの実現

- ⑦高燃焼度化に対応した炉心燃料の開発

信頼性向上に係る課題

○ナトリウムの取扱技術

- ⑧配管2重化によるナトリウム漏洩対策強化
- ⑨直管2重伝熱管蒸気発生器の開発
- ⑩保守、補修性を考慮したプラント設計

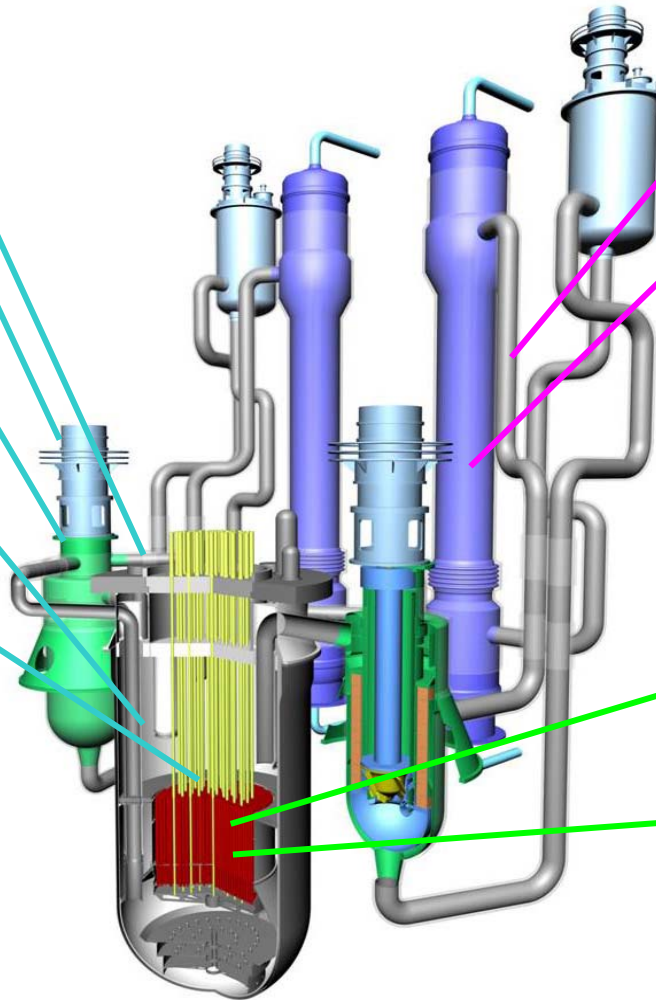
安全性向上に係る課題

○炉心安全性の向上

- ⑪受動的炉心停止と自然循環による炉心冷却
- ⑫炉心損傷時の再臨界回避技術

○建屋の免震技術

- ⑬建屋の3次元免震技術



ナトリウム冷却炉に採用する革新技術の研究開発全体計画

		2005	2010	2015		判断のポイント	代替技術
設計研究	実用炉の概念構築	概念設計研究				—	—
	実証炉の概念構築	予備的概念検討		概念設計研究		—	—
技術開発	①配管短縮のための高クロム鋼の開発	設計用データ取得(強度、溶接性等)		長時間評価データ取得/交換補修法整備	1, 2	1. クリープ疲労強度、長時間延性・靱性、溶接施工性の確認 2. 長時間データの成立見通し	改良9Cr鋼
	②システム簡素化のための冷却系2ループ化	流力振動試験(水)/Na中エロージョン試験(エルボ等配管要素試験/浸食発生条件試験)			3, 4, 5	3. 流力振動問題の成立性確認 4. 高速流配管の耐エロージョン性の成立見通し 5. 高速流配管の耐エロージョン性成立性の確認	ループ数増加
	③1次冷却系簡素化のためのポンプ組込型中間熱交換器開発	振動・伝熱管の磨耗量確認試験		入口プレナム流動試験	6, 7	6. 振動抑制対策及び寿命中の伝熱管磨耗量の確認 7. 同機器の流動成立性の確認	従来型(分離配置)
	④原子炉容器のコンパクト化	切り欠き型による熱衝撃評価試験(Na)		設計方針策定/適用性確認試験	8, 9, 10	8. 実機熱流動条件での材料・構造の健全性確認 9. モデル試験と高温構造設計方針との整合見通し 10. 高温構造設計方針の策定と設計の整合性確認	原子炉容器拡大
	⑤システム簡素化のための燃料取扱系の開発	除熱性能、交換機性能確認		ガス中落下試験 出入機、EVST内移送機性能確認	11, 12	11. 燃料交換機、燃料出入機、燃料洗浄概念成立性見通し 12. 燃料交換設備の操作性や冷却設備の有効性確認	—
	⑥物量削減と工期短縮のための格納容器のSC造化	SC造の技術開発		基準整備	13, 14	13. SC造格納容器成立性の見通し 14. 設計基準との整合性確認	—
	⑦炉心燃料の開発[照射試験]	照射試験・照射後試験			15, 16	15. 実用燃料への適用性見通し 16. 設計基準整備	既存材料(低温化)
	⑧配管2重化によるナトリウム漏洩対策強化	漏洩検出器開発		2重配管検査・補修技術開発	17, 18	17. 漏洩検出器成立性見通し 18. 2重配管の保守方法の確認	—
	⑨直管2重伝熱管蒸気発生器の開発	実機長の2重伝熱管及び球形管板の制作、センサ開発		水リーク、高温ラプチャー試験、モデル構築/高度化	19, 20	19. 2重伝熱管の製作性や大型球形管板の成立見通し 20. 総合的な機能確認による成立性の確認	ヘリカルコイル型SG
	⑩保守、補修性を考慮したプラント設計	革新的検査装置の開発(Na中目視試験装置、Na中体積試験装置)			21, 22	21. 目視センサー、体積検査機器の実用性見通し 22. 同機器の分解能、処理能力と実機への適合性確認	—
	⑪受動的炉停止と自然循環による炉心冷却	受動的炉停止装置要素照射(常陽)		受動的炉停止装置開発	23, 24	23. 受動的炉停止装置の機能確認 24. 自然循環による炉心冷却システムの成立性確認	—
	⑫炉心損傷時の再臨界回避技術	S-FAIDUS有効性確認 炉内・炉外試験		「もんじゅ」自然循環試験 デブリの安定冷却 炉内・炉外試験	25, 26, 27	25. S-FAIDUSの熔融燃料排出能力の実証 26. 炉心損傷影響を炉内終息できる概略見通し 27. 炉心損傷影響を炉内終息できることの実証	—
	⑬建屋の3次元免震技術	要素試験・特性試験		技術確認試験	28, 29	28. 技術成立性の見通し 29. 設計基準整備	水平免震
大型試験施設	計画立案、概念検討		設計	建設	運転	革新技術の成立性見通し	—
発電プラントとしての信頼性実証/ナトリウム取扱技術の確立	「もんじゅ」の運転経験					30. 設計手法の妥当性検証 31. 発電プラントとしての信頼性実証(稼働率60~70%)Na取扱技術の確立	—

主概念・ナトリウム冷却炉

▼ 革新的な技術の決定 ◆ 各課題のマイルストーン

実用炉の設計研究

これまでの設計研究成果

- 開発目標を高いレベルで満足する可能性を有する実用炉概念を構築した。
- 構築したプラント概念の技術的成立性を評価し、成立性を概略見通すことができた。

今後の設計研究の課題

- ①実用炉の概念設計と概念最適化
実用炉の概念設計として、プラント設計、炉心・燃料設計、機器設計、構造設計、システム設計、安全設計、等を実施し、その技術的成立性を見通しを得る。
- ②代替技術を適用したプラントの概念設計(～2010年)
革新技術を代替する技術と設定している技術(改良9Cr鋼、3～4ループ冷却系、大型原子炉容器、従来型IHX、既存燃料被覆管材料、ヘリカルコイルSG、水平免震)を適用したプラント概念を構築する。
- ③研究開発成果のプラント設計への反映
2009年頃以降には実用化研究開発で実施されている要素技術研究開発の成果が得られる。これらの成果を反映したプラント概念を構築し、2010年に実施される革新技術採否の判断に供する。

技術開発の概要

- ・プラント設計: 主要目設定、系統設計、計装設計、配置設計を実施。更に設計データに基づいてプラント経済性を評価する。
- ・炉心・燃料設計: 設計要求に適合する炉心及び燃料設計を実施し、サイクル全体評価のためのデータを供する。
- ・機器設計:
各主要機器の設計を実施する。更に、製作性に課題のある機器は部分的に詳細設計を実施し、製作手順を明確にする。
- ・構造設計: 構造熱過渡に対する健全性を評価し、健全性確保を見通す。
- ・システム設計: システム動特性、運転・制御性を評価し、システム成立性を見通す。
- ・安全設計: 設計基準事象、設計基準外事象等に対する安全評価を実施し、安全成立性を見通す。
- ・研究開発成果の反映: 原子炉容器コンパクト化、大口径1次配管、ポンプ組込型IHX、直管2重管型蒸気発生器等
- ・代替技術を適用したプラント設計: 代替技術を適用したプラント概念を構築し、技術的成立性と経済性を評価する。

実証試験計画の立案・大型試験施設及び実証炉の概念構築(1/3)

これまでの設計研究成果

- 要素技術及び機器レベルで研究開発をすすめ、技術実証方策を立案した。
- 実用炉の観点で75万kWeの中型炉の設計研究を実施し、技術的成立性を見通した。

今後の設計研究の課題

- ①実証試験計画の立案
各革新技术の技術実証項目を摘出し、実証ステップと実証スケールを検討する。
それらの検討結果を総合し、大型試験施設の概念を構築する。
- ②大型試験施設の概念検討
上記の実証試験計画に基づき、大型試験施設の概念を構築する。
- ③実証炉の予備的概念設計
2010年に実証炉プラント候補概念を提示することを目的として、プラント概念を検討する。
- ④実証炉の概念設計(2011年～)
選定された実証炉概念について設計研究を実施し、設置許可申請書:添付八(プラント機器設計)及び添付十(安全評価)を記載できる技術レベルを達成。

技術開発の概要

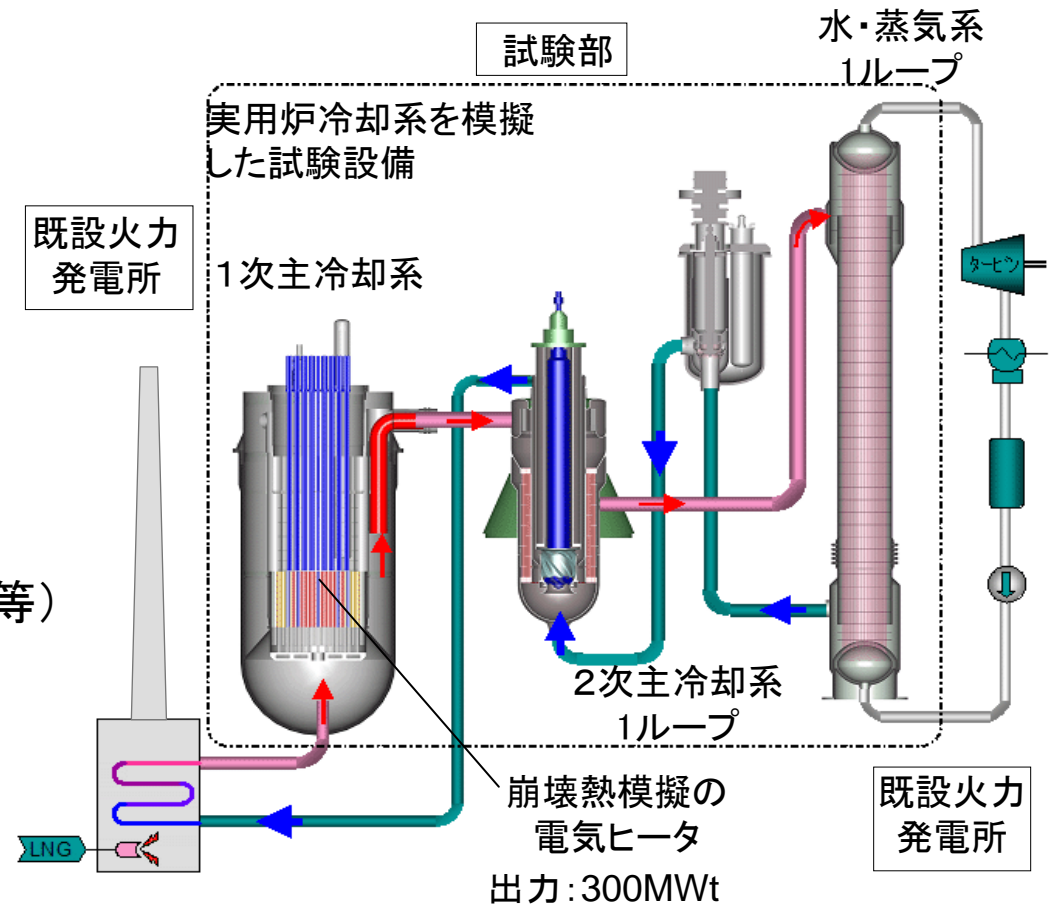
- ①実証試験計画の立案
 - 実証試験項目の選定: 各革新技术について、最適な技術実証方策を選定する。
 - ・水流動試験 ・ナトリウム試験 ・モックアップ試験 ・大型試験施設による実証試験 ・実証炉を用いた技術実証
 - 試験スケールの検討: 各革新技术について、試験スケールを含む実証ステップを検討する
 - ・大型試験施設 ・実証炉
- ②大型試験施設の概念検討
 - 大型試験施設の主要目選定: 実証試験計画に基づき、大型試験施設への要求条件を整理し、主要目を選定する。
 - 大型試験施設の概念構築: 設定した主要目に基づき、施設概念を検討する。

実証試験計画の立案・大型試験施設及び実証炉の概念構築(2/3)

大型試験施設による実証試験構想(案)

(試験項目の例)

- ・主循環ポンプ
- ・直管型二重伝熱管蒸気発生器
- ・水蒸気系再循環運転による崩壊熱除去
- ・計装(超音波流量計、水素計、ISI機器、等)
- ・配管・機器内温度成層化現象、等



大型試験施設概念の一例

実証試験計画の立案・大型試験施設及び実証炉の概念構築(3/3)

技術開発の概要(つづき)

③実証炉の予備的概念検討

○プラント主要目の選定

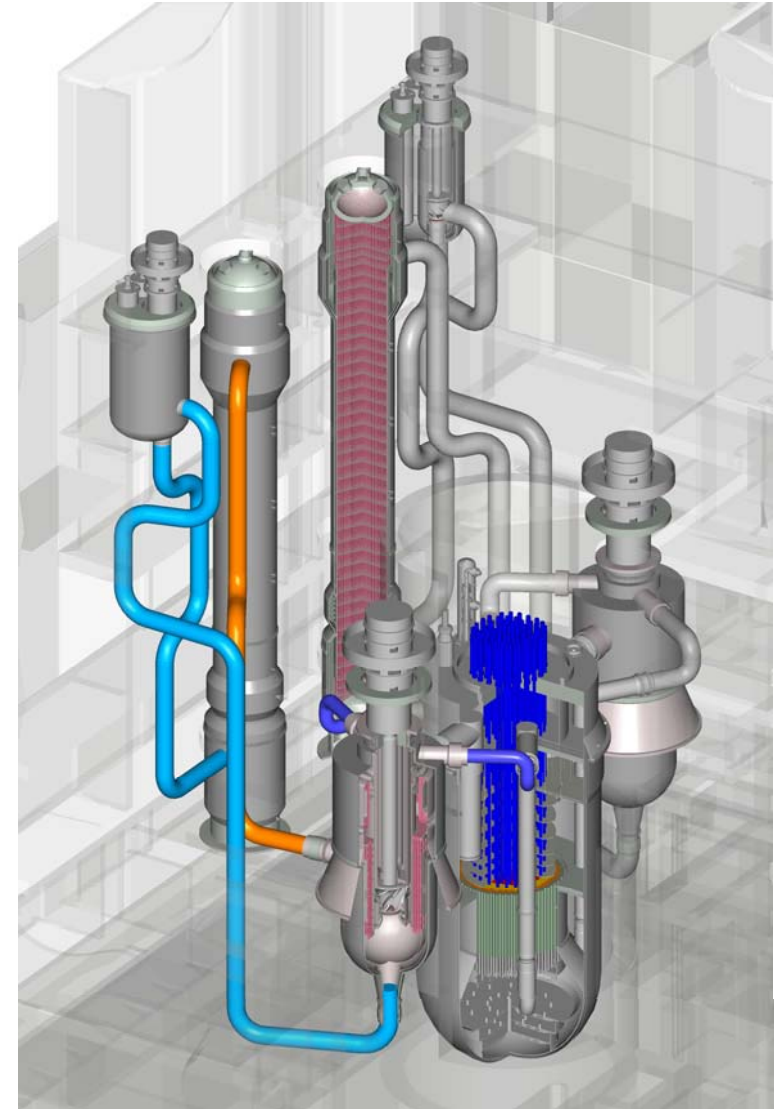
- ・革新技術の実証試験内容を考慮し、実証炉プラントに必要なスケール、性能、システム等を検討
- ・製作・建設に関する技術実証項目を考慮し、機器スケールを検討

○プラント概念検討

- ・各種設計及び評価により、プラント概念の技術的成立性を見通す
- ・革新技術の研究開発成果を反映しプラント概念を最適化
- ・建設コスト・運転コストを評価する。

④実証炉の概念設計

2010年の革新技術採否判断と予備的概念設計の成果を踏まえてプラント概念の概念設計を実施し、設置許可申請書、添付書類八及び十に相当するプラント設計及び安全評価書類を作成する。



実証炉の概念図

設計研究に関する2010年の成果

●採用する革新技術の決定

革新技術の研究成果を実用炉設計に反映し、その技術的実現性と代替技術を用いた実用炉設計への影響を比較評価し、採用する革新技術を決定する。

- 冷却系2ループ化、ポンプ組込型IHX、原子炉容器コンパクト化、直管二重管型蒸気発生器、高燃焼度化炉心燃料、等

●実用炉の概念設計

実用ナトリウム冷却炉の概念設計として、以下を実施しその技術的成立性を見極める。

- プラント設計、炉心・燃料設計、機器設計、構造設計、システム設計、安全設計

●大型試験施設を用いた実証試験計画の立案

革新技術の技術実証方策を検討し、技術実証計画を立案する。

- 実証試験項目の選定
- 試験スケールの検討
- 技術実証計画のとりまとめ

●実証炉の予備的概念検討

技術実証計画と整合した実証炉プラント概念を提示する。

- プラント主要目の選定
- プラント概念検討

(革新技術)

- ✓高クロム鋼
- ✓冷却系2ループ化
- ✓ポンプ組込型IHX
- ✓原子炉容器コンパクト化
- ✓簡素化燃料取扱系
- ✓SC造格納容器
- ✓高燃焼度化炉心燃料
- ✓Na漏えい対策
- ✓直管2重管型SG
- ✓保守・補修性
- ✓受動的炉停止+自然循環
- ✓再臨界回避技術
- ✓3次元免震

設計研究に関する2015年の成果

- **実用炉の概念設計とその成立根拠となるデータの提示**
 - 2010年の革新技术の採否を反映した設計
 - 実用化研究開発での要素研究成果を反映した設計
 - プラント概念を最適化とその成立根拠となるデータ類(炉心性能評価、構造健全性評価、安全評価、経済性評価、等)
- **大型試験施設の設計・建設及び試験**
 - 大型試験施設の設計・建設を行う(2011～2014年)
 - 大型試験施設を用いた技術実証試験を開始する(2015年)
- **実証炉の概念設計**
 - 2010年の革新技术の採否を反映した設計
 - プラント概念を最適化した設計
 - 設置許可申請書:添付八(安全・プラント設計)及び添付十(安全評価)を記載できる技術レベルの達成
- **実用化までの研究開発計画の提示**

設計研究の工程

分類	2010	2015	実施内容
「実用炉概念設計」 ・プラント設計 ・炉心・燃料設計 ・機器設計 ・構造設計 ・システム設計 ・安全設計 ・研究開発成果の反映 ・代替設計	概念設計 代替設計	概念最適化	<ul style="list-style-type: none"> プラント設計： 主要目設定、系統設計、計装設計、配置設計を実施。更に経済性を評価する。 炉心・燃料設計： 設計要求に適合する炉心及び燃料設計を実施し、サイクル全体評価のためのデータを供する。 機器設計： 機器の設計を実施する。更に、製作性に課題を有する機器は部分的に詳細設計を実施し製作手順を確認する。 構造設計： 構造熱過渡に対する健全性を評価し、健全性を確認する。 システム設計：システム動特性、運転・制御性を評価し、システム成立性を見通す 安全設計： 設計基準事象、設計基準外事象等に対する評価を実施し、安全成立性を見通す。 研究開発成果の反映： 原子炉容器コンパクト化、大口径1次配管、ポンプ組込型IHX、直管2重管型蒸気発生器等 代替技術を適用したプラント設計： 代替技術を適用したプラント概念を構築し、技術的成立性と経済性を評価する。
「革新技術の実証」 ・実証試験計画 ・大型試験施設 ・実証炉	実証試験計画立案 概念検討 予備的概念検討	設計 製作・建設 試験 概念設計	<ul style="list-style-type: none"> 実証試験計画の立案 <ul style="list-style-type: none"> ○実証試験項目の選定 ○試験スケールの検討 大型試験施設の概念検討 <ul style="list-style-type: none"> ○大型試験施設の主要目選定 ○大型試験施設の概念構築 実証炉の予備的概念検討 <ul style="list-style-type: none"> ○プラント主要目の選定 ○プラント概念検討 実証炉の概念設計 <ul style="list-style-type: none"> 設置許可申請書添付書類八及び十に相当するプラント設計及び安全評価書類を作成する。

①配管短縮のための高クロム構造材料開発(1/2)

「もんじゅ」の現状

- 「もんじゅ」では、冷却系配管にステンレス鋼（SUS304）を使用。
- 事故等による急停止時には、冷却系において一時的に炉心と熱交換器付近の温度差が大きくなるが、こうした状況下での配管に加わる熱応力による破損を避けるため、エルボを多数設置したことで配管が長くなり、これが建屋の容積拡大、機器量の増大を招いている。


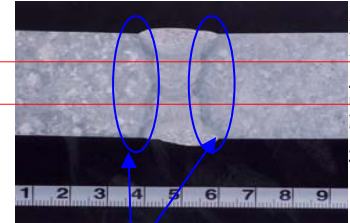
技術開発の概要

- 実用炉では、特に高い強度が求められる蒸気発生器管板および伝熱管に、高熱伝導・低熱膨張でかつ高温強度にも優れる高クロム構造材（12クロム系鋼）を採用することにより、機器コンパクト化と安全性の向上を図る。
- 冷却配管系には、万一配管が破損した場合に一気に大きな破断に至らないよう、特に高い延性（ねばり）が必要とされる。このため、従来のステンレス鋼に比べ熱膨張率が小さく、かつ適度な延性を有する高クロム構造材（9クロム系鋼）を使用することにより、配管の短縮を図り、建設・保守コスト低減を図る。
- なお、これらの高クロム構造材は、最新鋭の火力発電所等で使用実績あり。

今後の課題

- 現在までに、材料組成のメド付けは完了。
- 今後、ナトリウム環境中試験を含む長期の実証試験を実施し、材料仕様の最適化のためのデータ、材料強度基準策定に必要なデータ、溶接特性等の設計に必要なデータ、長時間の耐久性評価に必要なデータ等を収集することが必要。

① 配管短縮のための高クロム鋼の開発 (2/2)

分類	2010	2015	開発内容	
材料（母材）開発 ・SG、IHX用伝熱管材料（管）及び管板用材料（鍛造材）開発 ・ナトリウム配管及び機器胴用材料（板材）への高クロム鋼の適用性検証	【SG伝熱管と管板材】 材料調整・試験		 <p>高温強度と靱性を併せ持つ材料の開発・試験 長時間のデータ収集が必要なクリープ試験を継続 試作材に続き商用材（商業生産用設備で製作）を製作し、強度試験、疲労試験等を実施</p> <p>クリープ試験装置</p>	
	既実施試作材に対する長時間試験継続（クリープ試験等） 商用ヒート製作と短時間試験	長時間試験* ナトリウム環境効果試験*		
	【配管材】 既存材料に対する長時間試験（継続を含む）*			
溶接継手施工法／強度評価法の開発 ・最適溶接施工法の開発 ・設計に必要な継手データの取得及び強度評価法の整備 ・Type-IV損傷評価技術の開発	溶接施工法開発		 <p>溶接継手の熱影響部分が軟化することが課題 試験研究により精度の高い強度及び寿命評価モデルを構築する</p> <p>溶接熱影響部 溶接継手 試験片</p>	
	既実施長時間試験継続（クリープ試験等） 商用ヒート材による溶接継手製作と短時間試験	長時間試験*		
	Type-IV損傷評価技術の開発*			

* : 2015年以降の試験では長時間のデータを拡充する。

②システム簡素化のための冷却系2ループ化 (1/3)

「もんじゅ」の現状

○「もんじゅ」では、電気出力28万kWで冷却系が3ループあり、これが冷却系配管の容積増大、機器量の増大、建屋容積の拡大を招いている。

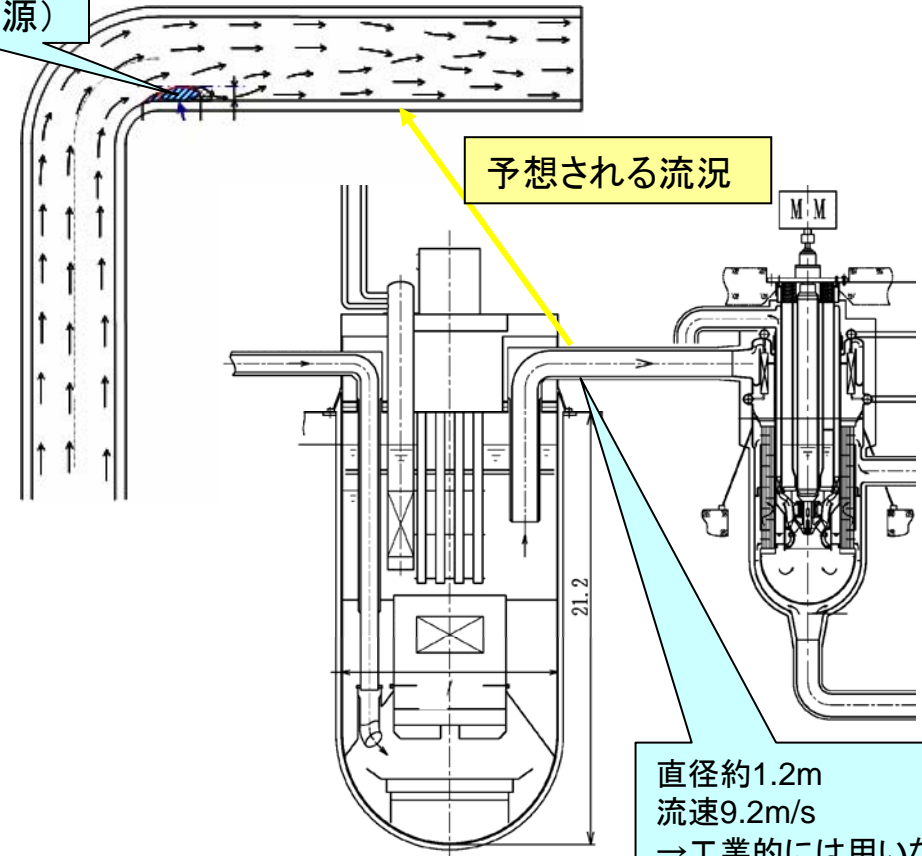
技術開発の概要

- 実用炉においては、電気出力150万kWで冷却系を2ループとし、ループ毎の機器を大型化することにより、システムを簡素化し、建設・保守コスト低減を図る。
- 2ループ化に伴い、配管が大型化し、冷却材の流速も大きくなるが、これにより配管系の破損につながる振動や材料損耗が発生しないことを、実証試験等により確認することが必要。

今後の課題

- 現在までに、水を用いた実証試験により、破損につながる振動が発生しない見通しを得た。
- 今後、ナトリウムを用いた実証試験を行い、材料損耗が発生しないことを確認することが必要。

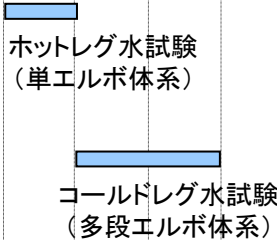
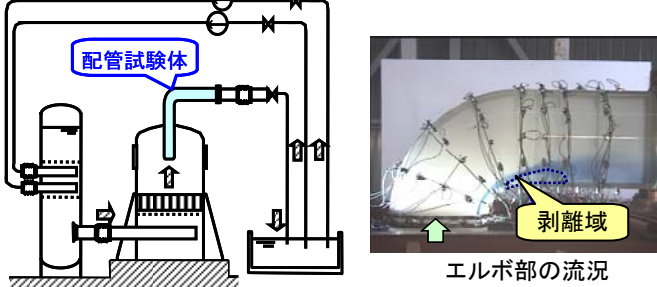
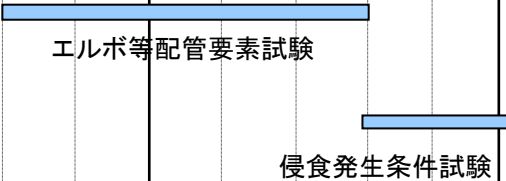
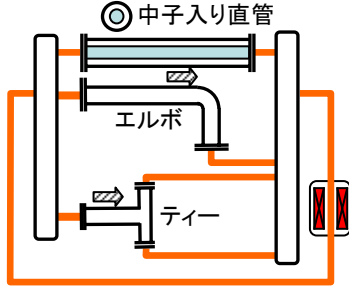
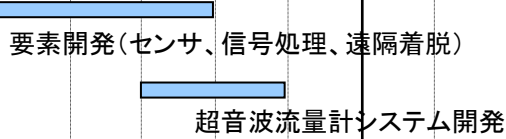

剥離域
(振動発生源)



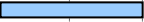
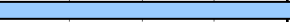
予想される流況

直径約1.2m
流速9.2m/s
→工業的には用いない領域

② システム簡素化のための冷却系2ループ化 (2/3)

分類	2010	2015	開発内容
流力振動試験 ・設計に必要な流体励振力データの取得 ・配管系の振動応答評価手法の確立	 <p>ホットレグ水試験 (単エルボ体系)</p> <p>コールドレグ水試験 (多段エルボ体系)</p>		<ul style="list-style-type: none"> 配管試験体内の流動特性(流速分布、剥離域の範囲)、配管壁上での圧力変動、配管系の振動特性の計測 振動試験データによる振動応答評価手法の検証  <p>配管試験体</p> <p>剥離域</p> <p>エルボ部の流況</p>
Na中エロージョン試験 ・配管損傷防止基準の策定		 <p>エルボ等配管要素試験</p> <p>侵食発生条件試験</p>	<ul style="list-style-type: none"> 12Cr鋼製の配管要素(エルボ、ティー、中子入り配管等)について、Na高速流による浸食試験を実施 高温Na(~550°C)を高流速で配管要素に流して、減肉量を計測し、エロージョンが発生する限界流速を把握  <p>◎中子入り直管</p> <p>エルボ</p> <p>ティー</p>
超音波流量計の開発	 <p>要素開発(センサ、信号処理、遠隔着脱)</p> <p>超音波流量計システム開発</p>	 <p>実証試験(大型試験施設)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 配管材料が磁性体であるフェライト鋼のため、従来の電磁流量計が使用できない。 大口径配管、助走距離が短く、乱れが大きい流れに適用可能な多測線式超音波流量計の開発を行う。

② システム簡素化のための冷却系2ループ化 (3/3)

分類	2010	2015	開発内容
高クロム鋼薄肉構造の製作試験	 <p data-bbox="770 391 1137 419">高クロム鋼薄肉構造の製作試験</p>		<ul data-bbox="1413 323 2031 416" style="list-style-type: none"> 配管及び冷却系機器に適用する高クロム鋼板材を用いた溶接による大規模構造について、その機械加工手法と溶接手法を開発する。
電磁流動特性評価手法の確立	 <p data-bbox="770 572 981 601">電磁流動特性評価</p>		<ul data-bbox="1413 504 2031 596" style="list-style-type: none"> ナトリウムの電磁流動特性を活用して集合体流量計測や電磁ポンプへ応用していくための解析評価手法の高度化を図る。

③1次冷却系簡素化のためのポンプ組込型熱交換器開発 (1/3)

「もんじゅ」の現状

○「もんじゅ」では、1次冷却系のポンプ及び熱交換器が別々に配置されており、これが冷却系配管の容積増大、機器量の増大を招いている。

技術開発の概要

○実用炉においては、1次冷却系の熱交換器にポンプを内蔵することにより、冷却系配管の簡素化、物量削減を行い、建設・保守コスト低減を図る。

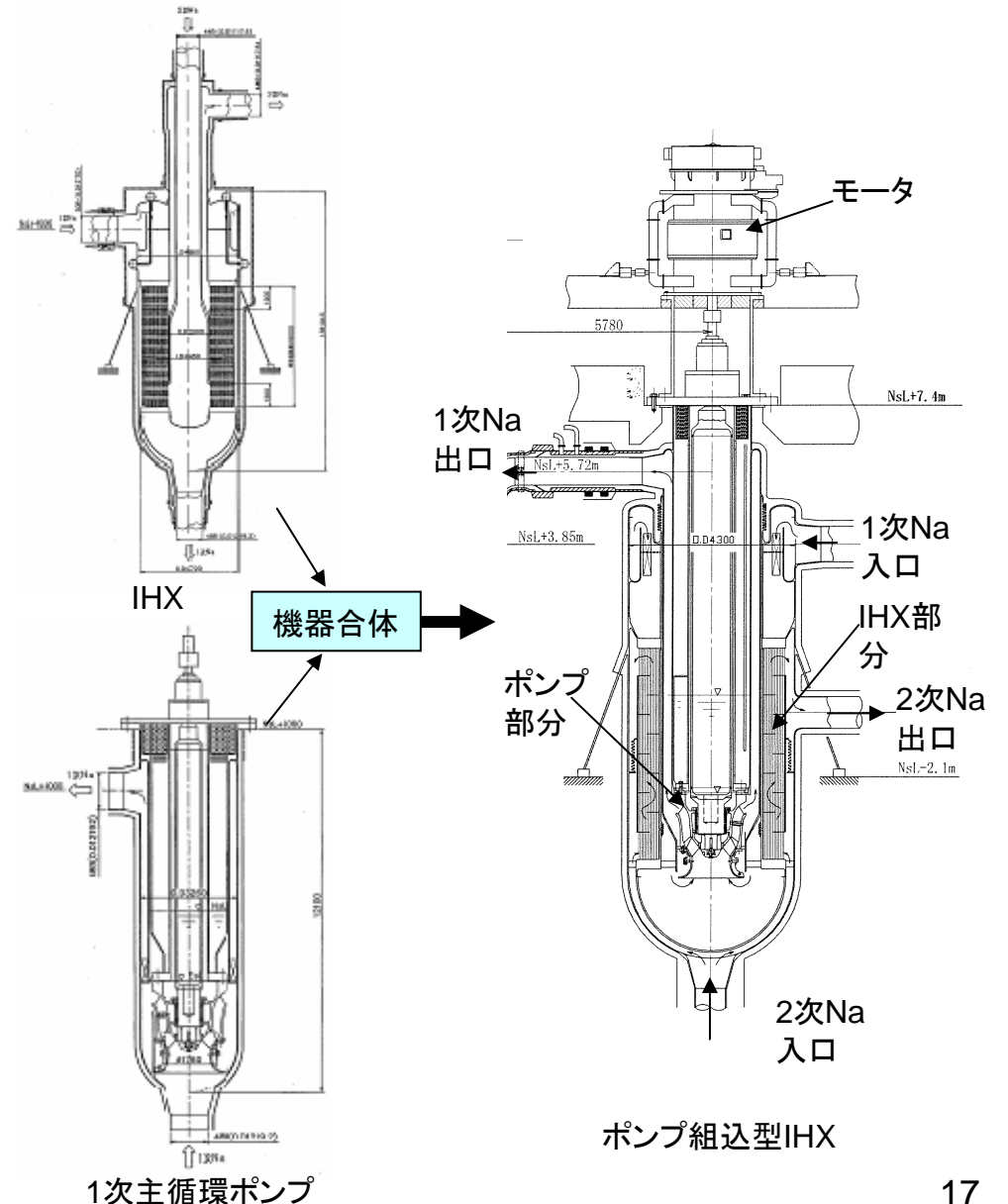
○ポンプの回転に伴う振動に熱交換器の伝熱管が耐えうる(伝熱管の磨耗量が規定値内に収まる)こと、また、原子炉からの流れが伝熱部に均等に流入する流動成立性があることを、解析及び実証試験により確認することが必要。

今後の課題

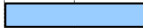
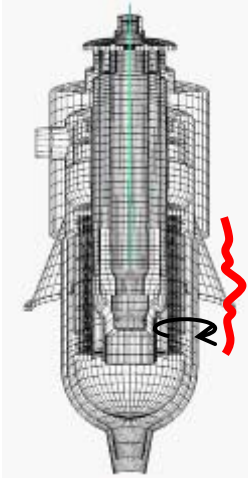

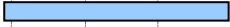

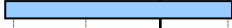
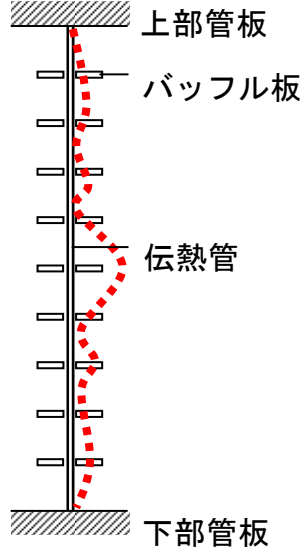
○現在までに、1/4スケールによる振動試験で伝達特性データを取得、解析モデルを構築。

○今後、実証試験により、伝熱管磨耗量の確認、流動成立性の確認を行うことが必要。

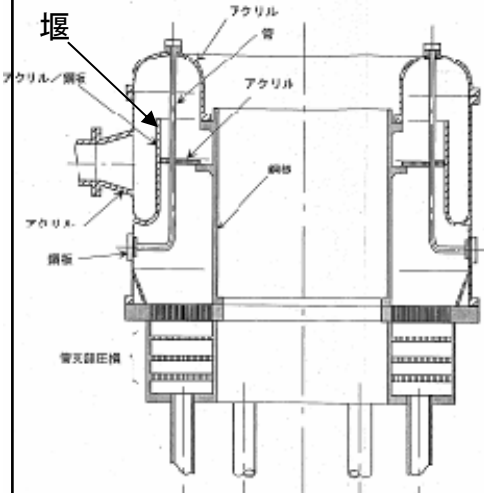
○「大型試験施設」で長軸ポンプの実証試験が必要



③ 1次冷却系簡素化のためのポンプ組込型熱交換器開発(2/3)

分類	2010	2015	開発内容
機器振動解析モデル開発 • 1/4スケール試験体を用いた振動伝達試験 • 実機の振動評価に用いる解析モデルを開発	 1/4スケール水中振動試験		 振動解析モデル <ul style="list-style-type: none"> • フェーズIIで実施した1/4スケール振動特性試験データの拡充 • 稠密伝熱管モデルの組込による振動試験 • 解析モデルの高度化  1/4スケール振動試験
伝熱管振動解析モデル開発 • 伝熱管群の冷却材中での振動特性を把握する	 管群水中振動試験		
高クロム鋼伝熱管磨耗特性の確認 • 高クロム鋼の実寸伝熱管の振動特性の把握 • バッフル板との接触摩擦による磨耗特性の把握	 水中磨耗試験  Na中磨耗試験		 伝熱管振動試験概念 <ul style="list-style-type: none"> • 実寸伝熱管の振動特性測定(水試験) • 伝熱管材料磨耗特性データ取得(Na試験)

③ 1次冷却系簡素化のためのポンプ組込型熱交換器開発(3/3)

分類	2010	2015	開発内容
IHX入口プレナム流動の最適化 <ul style="list-style-type: none"> 堰の設置による周方向流量配分の均一化 崩壊熱除去系伝熱管の振動抑制 		水流動試験	 <ul style="list-style-type: none"> 縮尺水流動試験体(一部アクリル製)により入口プレナム内の流況を測定 「堰」の効果により伝熱管へ均一な流量が分配されることを確認
長軸ポンプの開発 <ul style="list-style-type: none"> 軸安定性試験 Na中実証試験 	軸安定性試験	Na中実証試験 (大型試験施設)	<ul style="list-style-type: none"> 長軸かつ柔軟な構造を持つポンプの駆動軸の回転安定性を確保するために、有効な軸受けを開発する。

④原子炉容器のコンパクト化 (1/3)

「もんじゅ」の現状

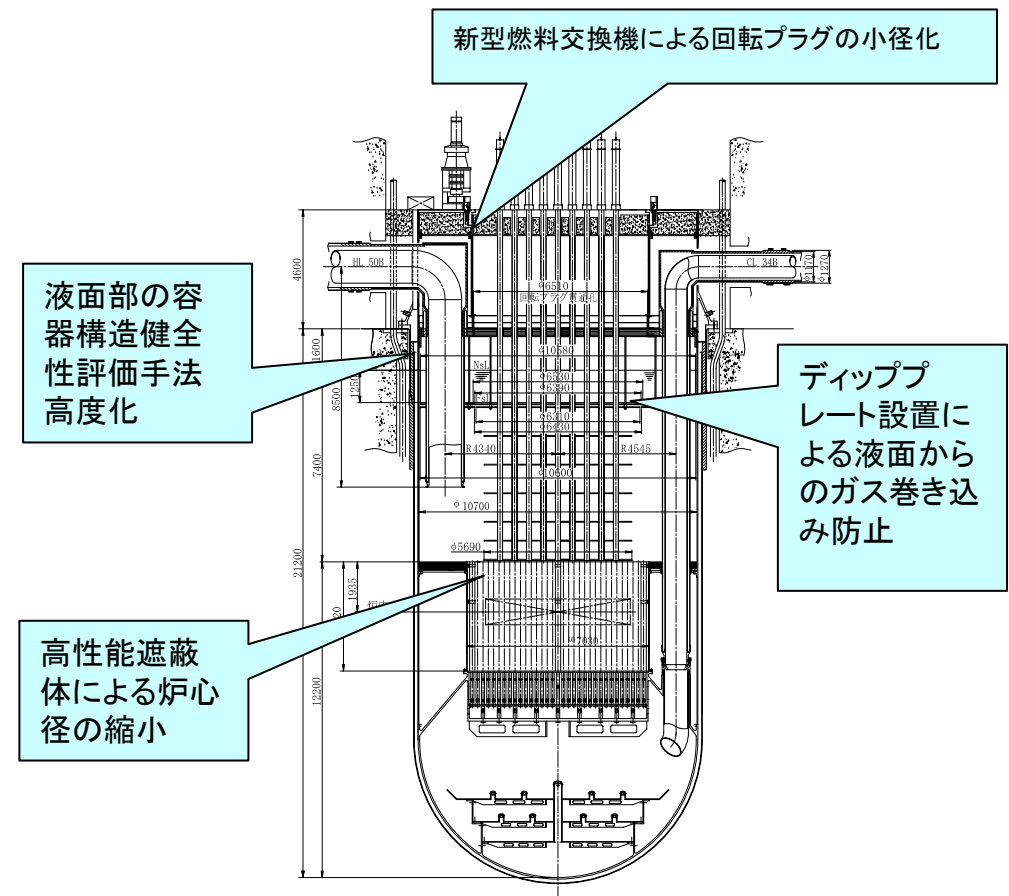
- 「もんじゅ」では、原子炉上部の燃料棒交換用機器が大きく、原子炉容器コンパクト化の障害となっている。
- また、原子炉容器をコンパクト化した場合、部分的に原子炉容器内のナトリウム流速が大きくなり、原子炉上部の気体を巻き込み原子炉内に気泡を発生させる等の悪影響が予測される。

技術開発の概要

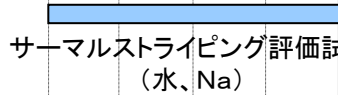
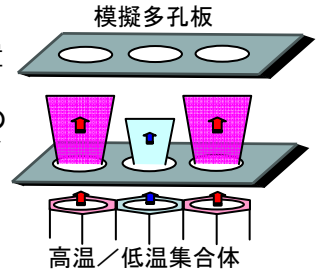
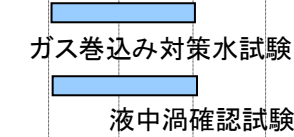
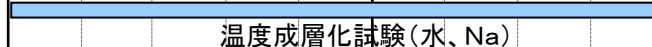

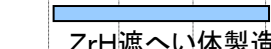
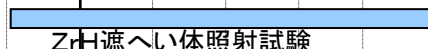
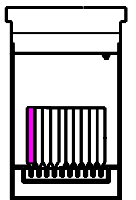

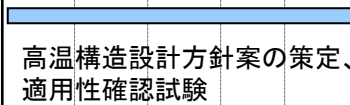
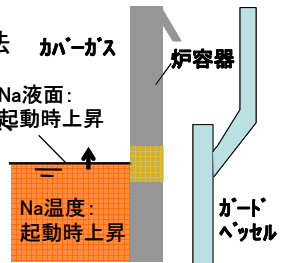
- 多数の機器類が配置されている原子炉上部に設置可能な、小型の燃料棒交換用機器を開発し、実用炉に適用することにより、原子炉容器をコンパクト化し、建設コストの削減を図る。
- あわせて、ナトリウムの流速が大きくなる箇所において、原子炉上部の気体を巻き込みを防止する装置の開発が必要。
- また、コンパクト化に伴い繰り返し熱応力による変形と疲労が増加するため、評価手法高度化が必要。

今後の課題

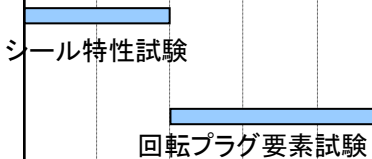
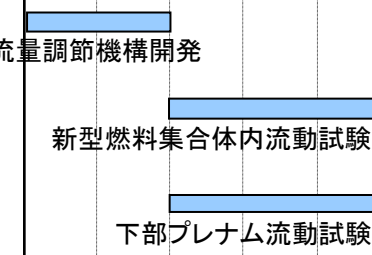
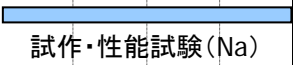
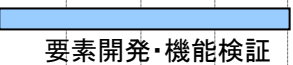
- 現在までに、1/10スケールによる水を用いた実証試験で、炉上部流動特性を取得している。
- 今後、ナトリウムを用いた実証試験を行い、高流速化に伴う原子炉容器内の流動特性把握、原子炉上部の装置の確認を行うことが必要。



④ 原子炉容器のコンパクト化 (2/3)

分類	2010	2015	開発内容
炉心上部機構の開発 ・構造設計に必要な温度ゆらぎデータの取得 ・高サイクル熱疲労に対する構造対応策の検討	 <p>サーマルストライピング評価試験 (水、Na)</p>		・制御棒集合体周りの集合体出口領域を模擬した試験装置を製作し、高温側/低温側の流体の混合特性や、構造材の熱疲労に影響する温度ゆらぎデータを計測  <p>模擬多孔板 高温/低温集合体</p>
炉内熱流動試験 ・ガス巻き込み判断基準の策定 ・上部プレナム流動状況の確認 ・構造設計に必要な温度成層化データの取得	 <p>ガス巻き込み対策水試験 液中渦確認試験</p>	 <p>温度成層化試験(水、Na)</p>	・水試験により、ガス巻き込み防止策の有効性を確認するとともに、流動解析に基づくガス巻き込み判断基準を策定 ・過渡時に形成される温度成層化現象を模擬した水/Na試験により成層界面の上昇挙動や温度分布を計測  <p>上部プレナム流動試験装置</p>
高性能遮へい体の開発 ・ZrH遮へい体の製造法の確立 ・設計に必要なZrH遮へい体の照射データの取得	 <p>ZrH遮へい体製造</p>	 <p>ZrH遮へい体照射試験</p>	・ZrH遮へい体の製造法を確立するとともに、実炉環境での照射試験による健全性評価と遮へい性能を確認 
高温構造設計評価技術の開発 ・高温強度評価技術の技術 ・非弾性設計解析技術の開発 ・熱荷重評価技術の開発 ・システム化規格に関する評価手法の開発	 <p>非弾性解析等の要素技術開発</p>	 <p>高温構造設計方針案の策定、適用性確認試験</p>	・実用炉向けの高温度構造設計基準の高度化に向けた評価法の検証試験を実施 (炉容器の液面近傍の健全性起動時上昇炉心上部機構のサーマルストライピング評価等)  <p>カバーガス 炉容器 Na液面: Na温度: 起動時上昇 ガードベッセル</p>

④ 原子炉容器のコンパクト化 (3/3)

分類	2010	2015	開発内容
新型炉上部構造の開発 ・回転プラグのシール機能、Naベーパー蒸着特性等の確認		 シール特性試験 回転プラグ要素試験	<ul style="list-style-type: none"> もんじゅではアルゴンガスブローダウンによるベーパー蒸着防止とフリーズメタルシールによりシールを確保。 実用炉ではより構造が簡素・コンパクトなエラストマシール等を採用する計画である。 これらのシール機構について試験・開発を行う。
炉内流量配分の検証 ・流量調節機構の開発 ・新型燃料集合体内流動の確認 ・原子炉容器下部プレナム流動データの取得		 流量調節機構開発 新型燃料集合体内流動試験 下部プレナム流動試験	<ul style="list-style-type: none"> 実用炉では炉心の圧力損失が小さいため、エントランスノズルでの炉心流量配分が高い精度が要求されるため、機能の確認が必要。 S-FAIDUS型燃料集合体は内部ダクトを有し従来と形状が異なるため、安全審査等のため集合体内部の流速分布を確認する必要がある。 下部プレナム内の流れの安定性を確認する必要がある。
容器内設置一体型純化系の開発 ・容器内設置一体型純化系の試作と性能確認	 試作・性能試験(Na)		<ul style="list-style-type: none"> ナトリウム純化系設備コンパクト化のため、一体型純化系システムを原子炉プラグから垂下・浸漬する構造。 性能を確認するために試作・試験を実施する。
破損燃料位置検出系(FFDL)の開発	 要素開発・機能検証		<ul style="list-style-type: none"> 回転プラグコンパクト化のため、スリット付き炉上部構造を採用。 もんじゅ(タグガス法)と異なるセレクトバルブ方式を採用予定。 スリット部では集合体出口直近にサンプリング管を設置できないため、検出方法の開発と性能の確認が必要。

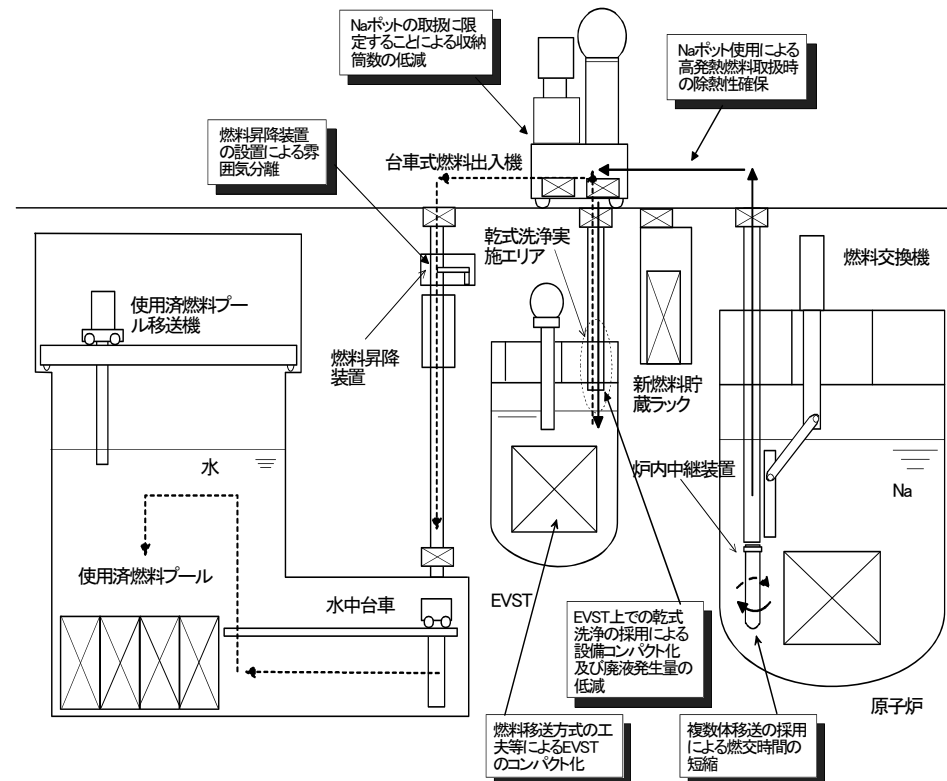
⑤システム簡素化のための燃料取扱系の開発(1/3)

「もんじゅ」の現状

- 燃料交換時にUIS(炉心上部構造)を炉心上部から完全に移動させる必要があるため原子炉容器径は炉心槽径の3倍以上
- 集合体1体当りの燃料交換時間が比較的長い
- ポット収納型EVSTのため集合体収納体数の割りにEVST容積が増大
- EVSTで減衰貯蔵後は湿式洗浄、水缶詰ののち水プール貯蔵

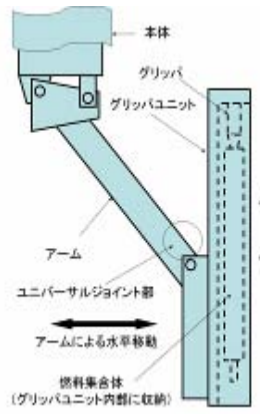
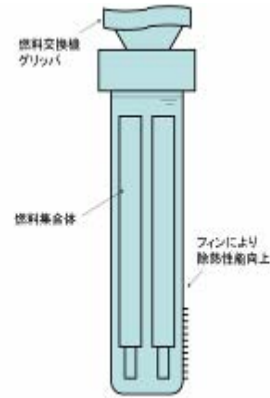
技術開発の概要

- 切込付UISと可変アーム型燃料交換機の組合せにより原子炉容器径を大幅に低減
- 燃料交換機動作の高速化および2集合体ポットを用いた複数体移送により燃料交換時間を短縮
- 鋼製プラグおよび液位制御型槽内移送機を採用しEVSTの収納方式を合理化
- 乾式洗浄後に水プールに直接浸漬するシステムを採用して洗浄・缶詰設備を合理化。また、これにより缶詰、湿式洗浄廃液等の廃棄物を低減

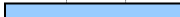


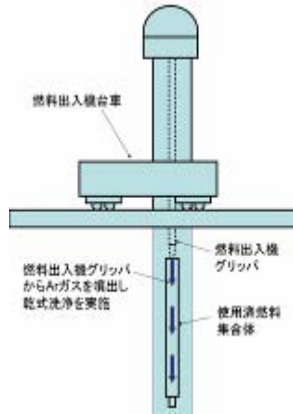




燃料取扱系全体システム

⑤ システム簡素化のための燃料取扱系の開発(2/3)

分類	2010	2015	開発内容
<p>新型燃料交換機の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スリム型燃料交換機の位置決め精度方式の開発 ・グリッパ作動性の確認 ・切込付炉心上部機構との干渉回避に関する耐震性評価 	<p>位置決め精度確保機構の開発</p> <p>グリッパユニット作動試験</p> <p>耐震性評価</p>		 <p>切込付炉心上部機構との整合性を考慮したスリム型マニプレータ燃料交換機開発の一環として位置決め精度確保のための機構開発、グリッパ作動性確認を行う。また、地震時の切込付炉心上部機構との干渉回避を確認する。</p> <p>スリム型マニプレータ式燃料交換機概念図</p>
<p>燃料移送系の成立性確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ・複数体移送成立性確認 ・改良内部ダクト型集合体の除熱性確認 ・集合体ガス中落下試験 ・燃料出入機の開発 	<p>複数体移送ポット除熱評価</p>	<p>改良内部ダクト集合体除熱確認</p> <p>集合体ガス中落下試験</p> <p>燃料出入機開発</p>	 <ul style="list-style-type: none"> ・燃料交換時間短縮を目的とした複数体移送の成立性を確認する。 ・改良内部ダクト集合体採用に伴い、内部ダクトの除熱への影響を把握する。 ・燃料取扱時の事故の評価として集合体の落下試験を実施する。 ・実用炉に適合した高度化された燃料出入機を開発する。 <p>2集合体ポット図</p>

⑤ システム簡素化のための燃料取扱系の開発(3/3)

分類	2010	2015	開発内容
コンパクトEVSTの開発		 EVST槽内移送機 作動性確認試験	EVSTコンパクト化のための鋼製プラグおよび液位制御型槽内移送機の成立性を確認する。
燃料水浸漬システムの開発	 燃料洗浄試験  燃料水浸漬試験		EVSTから取出し後のナトリウムが付着した状態の裸の使用済燃料を直接水プールに浸漬するシステムを開発する。 ・アルゴンガスによる乾式洗浄および蒸気によるナトリウム不活性化の確認 ・ナトリウムが付着した状況における使用済燃料の水浸漬挙動の把握 
使用済燃料水中貯蔵成立性評価		 ODS鋼水中腐食試験	使用済燃料の水プールにおける長期貯蔵の成立性を評価するために、照射済みのODS鋼による水中腐食試験を実施する。
新燃料輸送時の除熱性評価	 模擬集合体による除熱試験		低除染燃料採用により新燃料発熱量が大きくなっていることを考慮して、新燃料輸送時におけるガス中除熱を試験により評価する。

⑥物量削減と工期短縮のための格納容器のSC造化(1/2)

「もんじゅ」の現状

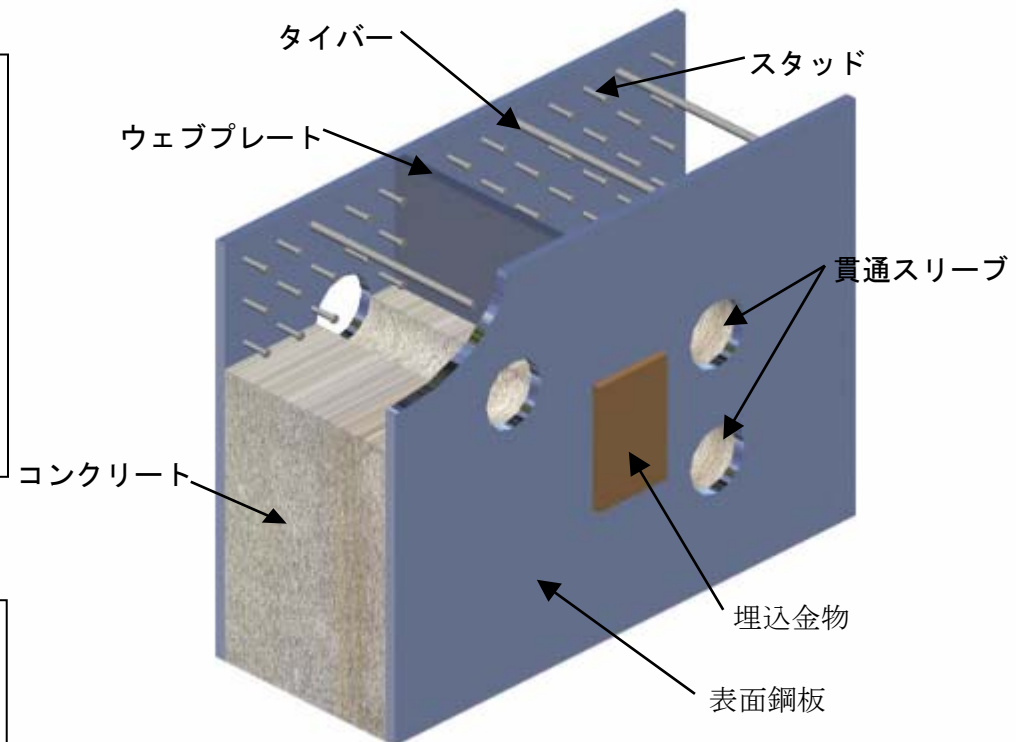
- 格納容器は従来原子炉と同じ鋼製円筒型であり容積、物量とも大きい
- 建設工期が長い

技術開発の概要

- 表面鋼板のモノコックとしての強度+コンクリートによる補強、により従来構造(RC構造)より高い強度を実現
- 高い強度を活かし、矩形形状の格納容器を構成可能(建屋容積20%削減目標)
- 鋼板構造部は工場生産可能、コンクリート型枠不要の特徴を持ち、建設工期が短縮可能(建設工期4年→3年へ短縮)

今後の課題

- 部分モデルによる事故時温度における、壁一壁(スラブ)接合部、壁脚部接合部、開口部、ライナ部の強度や熱ひずみなどの特性把握
- 全体モデルによる事故時、地震時確証試験
- 構造特性評価法および要求性能確認評価法の開発



SC(鋼板コンクリート)構造

⑥ 物量削減と工期短縮のための格納容器のSC造化(2/2)

分類	2010	2015	開発内容
<p>自由形状スチールコンクリート製格納容器の設計基準整備</p>	<p>設計、製作上の課題検討</p> <p>部材特性把握試験</p>	<p>特定部位特性把握試験</p> <p>全体特性把握試験</p>	<div data-bbox="1500 319 1960 766"> </div> <p>SC造(スチールコンクリート構造)概念図</p> <ul style="list-style-type: none"> 自由形状SC造試作部材の加熱試験、面外荷重試験、引張試験、疲労試験による材料特性変化、鋼板の座屈挙動や構造挙動の把握 建屋機密性や強度上クリティカルとなる部位の部分縮尺試験体を用いた加熱加圧試験および水平加力試験による限界耐圧および耐震性の確認 試設計による物量削減および工期短縮建設効果の評価
	<p>解析手法整備</p>		
	<p>基準整備(評価委員会を含む)</p>		

⑦炉心燃料の開発 [照射試験] (1/2)

「もんじゅ」の現状

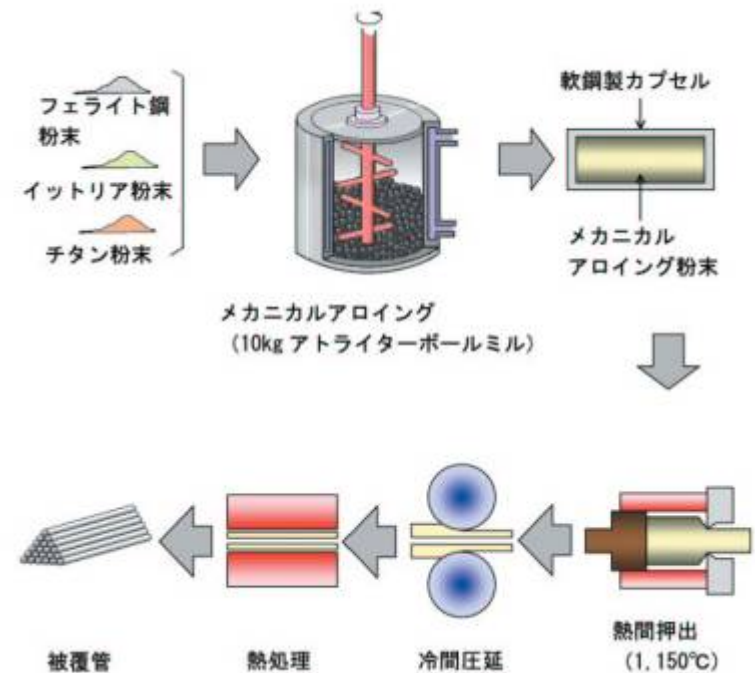
- 「もんじゅ」では、PNC316被覆管、(U,Pu)酸化物中実ペレット燃料、燃料ピン六角バンドル集合体を採用。
- 被覆管のスエリングによるピン外径増加が燃焼度の制約因子であり、炉心燃料の取出平均燃焼度設計値は8万MWd/t。MAは意図的には含有させていない。

技術開発の概要

- 耐スエリング性と高温強度を両立させたODS被覆管を開発し、高燃焼度(取出平均15万MWd/t)を達成する。
- 実用化燃料サイクル技術開発に合わせ低除染TRU燃料・簡素化プロセス中空燃料の照射性能を評価する。
- 燃料集合体は、実用化プラント概念の安全設計論理に適合する改良型内部ダクト付集合体を開発。

今後の課題

- 現在までに、ODS被覆管について一部の照射試験に着手し、MA含有燃料の照射試験準備を完了した。
- 今後、高燃焼度・高中性子照射量までの燃料・材料照射試験、過渡試験を進め性能評価を行う。
- 改良型内部ダクト付集合体は、構造開発・炉外試験などを進め、照射試験により健全性を確認する。



ODS被覆管の製造工程

⑦ 炉心燃料の開発 [照射試験] (2/2)

分類	2010	2015	2015~	試験内容
高燃焼度燃料・材料研究開発	燃料ピン照射試験 (BOR-60, 「常陽」) 材料照射試験 (「常陽」) 炉外・炉内過渡試験 バンドル照射試験 (「常陽」)		バンドル実証照射 (「もんじゅ」)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ ODS燃料ピンの250dpa, 25万MWd/t (※)相当までの健全性確認 ◆ ODS被覆管の250dpaまでの材料照射特性評価 ◆ ODSバンドルの15万MWd/t程度までの健全性確認および25万MWd/tまでの健全性外挿評価・性能実証 ◆ 燃料ピンの破損しきい値などの評価 
低除染TRU酸化物燃料の照射健全性	TRU酸化物燃料ピン照射試験 (「常陽」) ショートプロセス中空ペレット燃料ピン照射試験 (「常陽」) Cm含有酸化物燃料ピン照射試験 (「常陽」)		低除染TRU酸化物燃料バンドル実証照射 (「もんじゅ」)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ TRU酸化物燃料ピン、ショートプロセス中空燃料ピン、低除染TRU酸化物燃料ピン、低除染TRU酸化物燃料バンドルの25万MWd/tまでの性能評価 
再臨界回避集合体研究開発		再臨界回避集合体構造開発		<ul style="list-style-type: none"> ◆ 改良型内部ダクト付き集合体の詳細構造決定 ◆ 試作試験、照射試験による性能評価 ダクト照射・集合体照射試験 (「常陽」)

⑧配管2重化によるナトリウム漏洩対策強化(1/3)

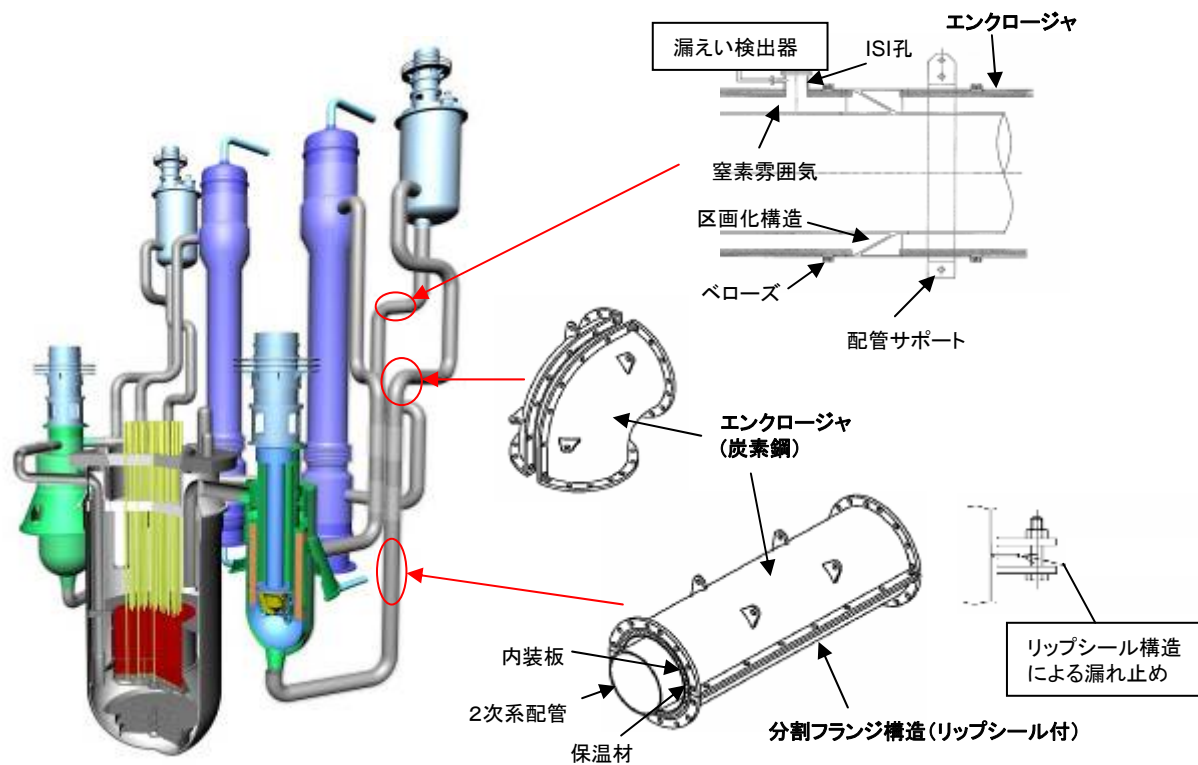
「もんじゅ」の現状

○「もんじゅ」では、主冷却系の配管は一重。このため、配管が破損すれば、ナトリウムが建屋内に流出し、特に二次系では空気と反応し燃焼する。

技術開発の概要

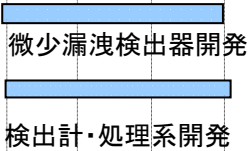

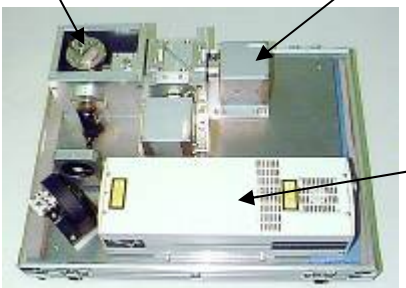
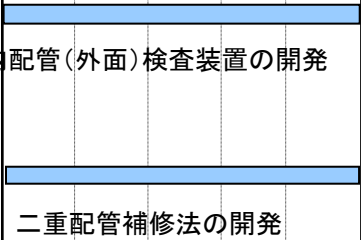
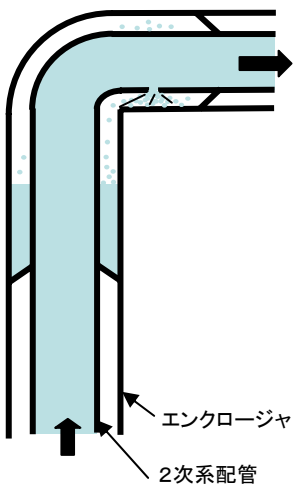
○冷却系配管が破損しナトリウムが空气中に漏洩した場合、激しく燃焼を起こし、反応生成物が建屋内に飛散するため、復旧作業に多くの時間・労力を必要とする。

○このため、冷却系配管を二重化し、二重配管の間隙は区画化するとともに、窒素を充填しておくことにより、仮に内管が破損した場合でもナトリウムの漏れ量を限定でき、かつ、燃焼、飛散を防止し、復旧作業を容易にすることが可能。





2次ナトリウム系の2重化概念

⑧ 配管2重化によるナトリウム漏洩対策強化(2/3)

分類	2010	2015	開発内容
微量Na漏洩検出計の開発 ・不活性ガス雰囲気でのNa漏洩検出装置の開発			<ul style="list-style-type: none"> 不活性ガス雰囲気下でのNa漏洩検出性能確認 検出速度確認 <p>ナトリウムエアロゾル分析セル 光電子増倍管</p>  <p>レーザー発生機</p> <p>レーザー誘起ブレイクダウン分光法 検出器の例</p>
2重配管検査・補修技術の開発 ・2重配管のISI装置開発 ・2重配管の補修技術開発			<ul style="list-style-type: none"> 設計課題としてISI装置の挿入方法、及び補修・交換方法を検討  <p>2次系配管のモックアップを作成し、ナトリウム漏洩後の復旧作業のシミュレーションを実施</p> <pre> graph TD A[主配管Naドレン] --> B[エンクロージャNaドレン] B --> C[エンクロージャ開放] C --> D[破損部清掃] D --> E[配管補修] E --> F[エンクロージャ再設置] </pre>

⑧ 配管2重化によるナトリウム漏洩対策強化(3/3)

分類	2010	2015	開発内容
高クロム鋼に対するLBB評価手法の整備	 高クロム鋼 溶接部破壊靱性試験	 高クロム鋼 溶接部LBB評価手法構築	<ul style="list-style-type: none"> 配管構造は溶接(特に縦シーム溶接)で構成されるため、溶接部が高応力部となることを避けられず、不安定破壊を防止するためのLeak Before Break特性を活用した基準が必要。 高クロム鋼(現在の想定材料; Mod.9Cr-1Mo)の溶接部のLBB論理を構築するため、溶接継手の靱性試験と試験データに基づくLBB評価手法を構築する。

⑨直管2重伝熱管蒸気発生器の開発 (1/4)

「もんじゅ」の現状

○「もんじゅ」では、蒸気発生器内の伝熱管は一重、ヘリカルコイル状。

技術開発の概要

○伝熱管を密着二重構造にすることにより、伝熱管の破断によるナトリウム—水の接触を防止し、プラントの信頼性向上を図る。

○二重の伝熱管はヘリカルコイル状に加工できないため、蒸気発生器は「もんじゅ」に比べ大型化するものの、稼働率の向上により総合的なプラントの経済性向上に資する。

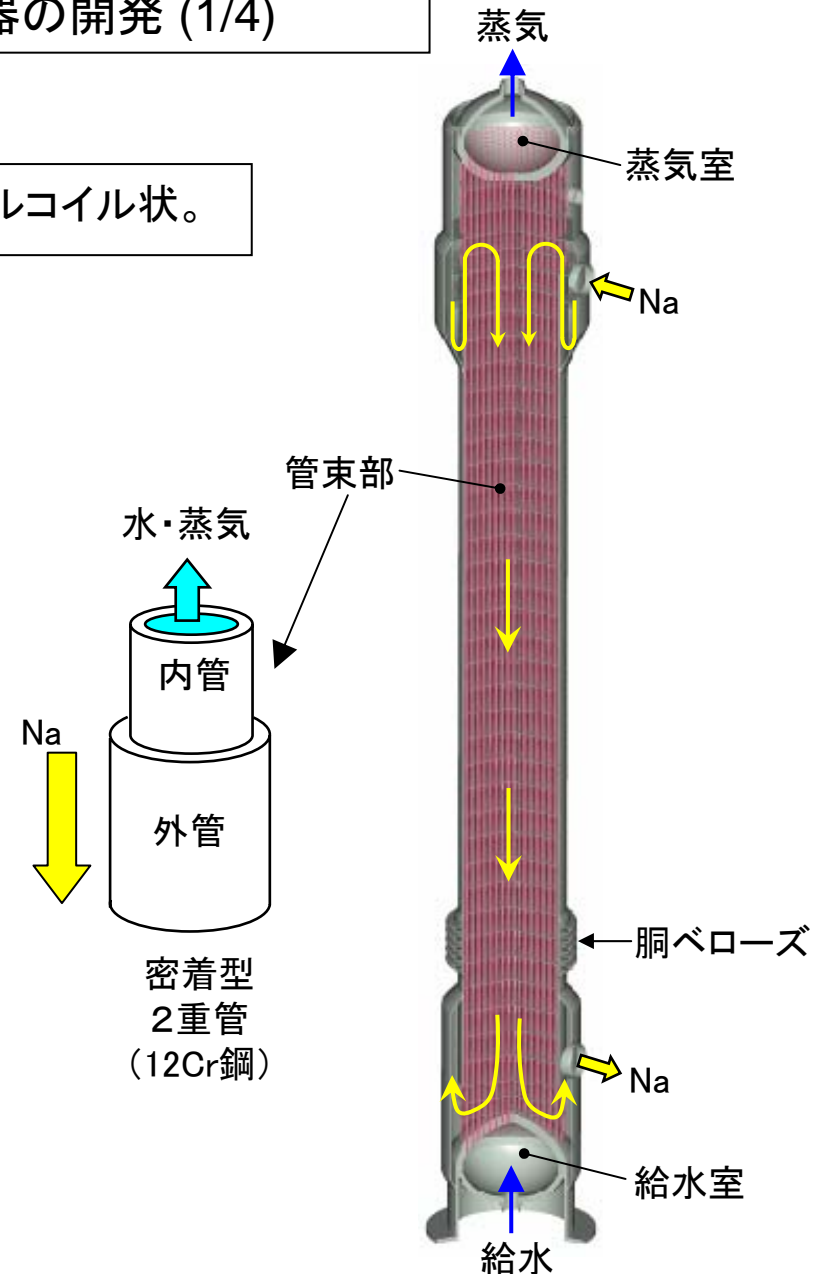
今後の課題

○現在までに、小規模伝熱管の試作は実施。

○今後の課題は、

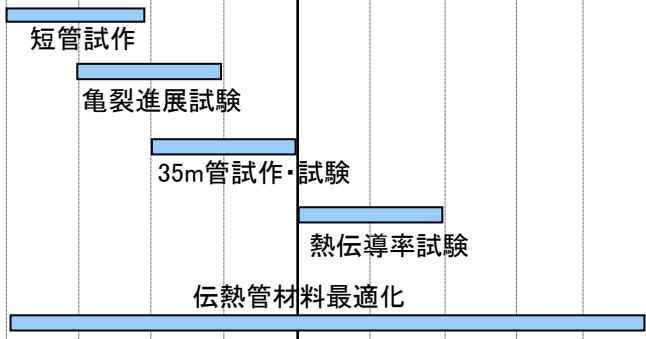

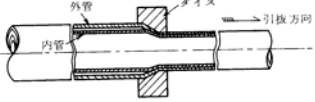
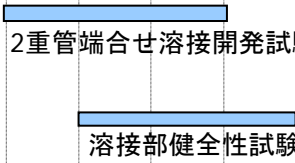
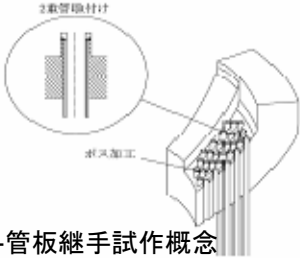
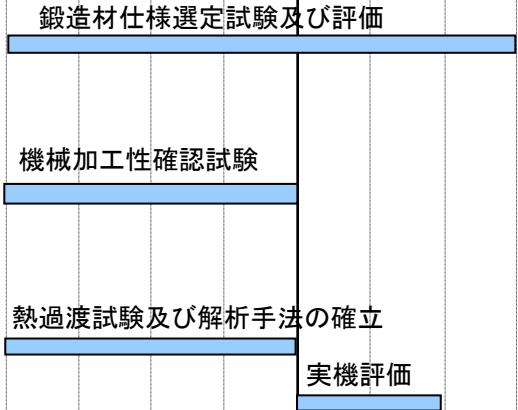
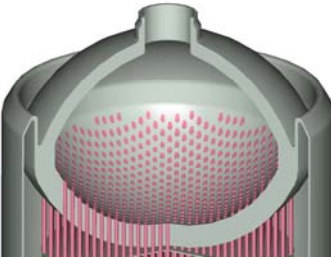
①実規模の二重管の試作による製造容易性を確認、流動試験

②部分モデルによる伝熱流動試験による性能確認(試験は「大型試験施設」を使用予定)


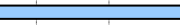
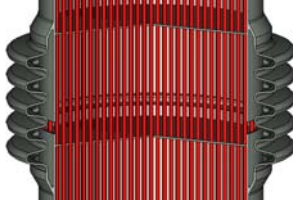

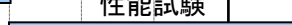
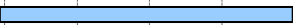
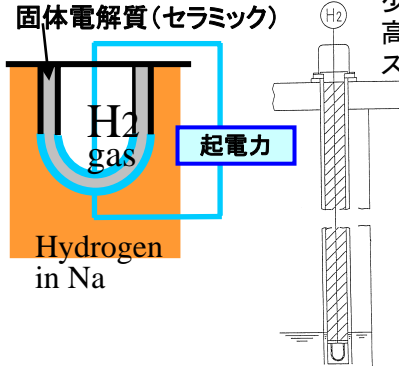


直管2重伝熱管蒸気発生器 概念

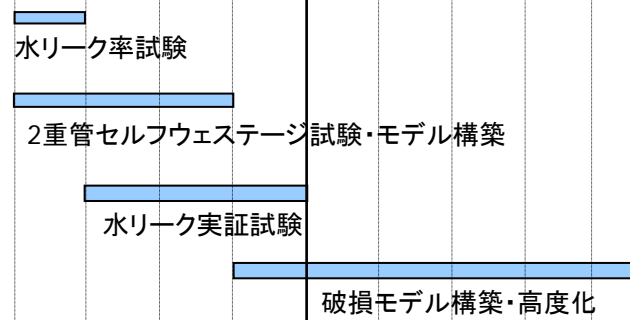
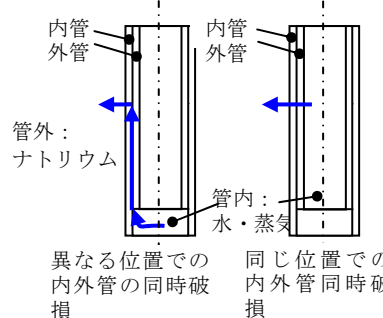
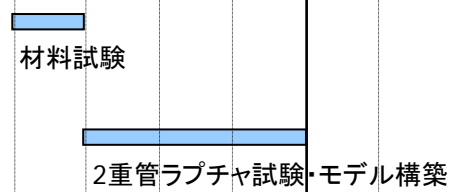
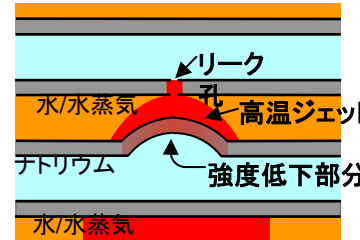
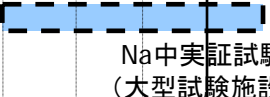
⑨ 直管2重伝熱管蒸気発生器の開発 (2/4)

分類	2010	2015	開発内容
2重伝熱管製作手法の開発 ・伝熱管の製作方法を開発 ・伝熱管の基礎的な特性を把握		  <ul style="list-style-type: none"> ・長尺高クロム鋼製2重管の試作 ・き裂進展が内外管ギャップで止まることを確認 ・熱伝導率測定 <p>伝熱管製作 概念</p>	
管-管板溶接手法の確立 ・製作性、検査性、を有する管-管板溶接手法の開発		 <ul style="list-style-type: none"> ・機械加工及び溶接加工性を確認 ・継手部リラクセーション試験 <p>管-管板継手試作概念</p>	
球形管板の開発 ・厚肉鍛造材製作 ・管板加工性確認試験 ・構造健全性評価		 <ul style="list-style-type: none"> ・高クロム鋼の厚肉鍛造材製作性、強度を確認 ・管板の3次元加工精度の確認 ・熱過渡強度評価試験 	

⑨ 直管2重伝熱管蒸気発生器の開発 (3/4)

分類	2010	2015	開発内容
胴ベローズの開発	胴ベローズ試作  胴ベローズ試験 		 <ul style="list-style-type: none"> ・高温圧縮クリープ疲労試験 ・疲労耐久性試験 ・Na中漬浸試験
管板-SG胴溶接継手	継手試作  性能試験 		<ul style="list-style-type: none"> ・高温強度評価試験 ・疲労耐久性試験
SG漏洩検出系の開発(固体電解質水素計の開発) ・高性能漏洩検出器及び検出システムの開発	センサ開発とNa中耐久性確認試験 		 <ul style="list-style-type: none"> ・水リークの検出能力(微小リークの早期検出)が高いセンサー及び検出システムの開発 <p>固体電解質水素系模式図</p>

⑨ 直管2重伝熱管蒸気発生器の開発 (4/4)

分類	2010	2015	開発内容
水リーク挙動試験・評価技術開発 ・安全ロジックの構築に必要なウェステージの特性データを取得 ・破損モデルの開発			 <p>異なる位置での内外管の同時破損 同じ位置での内外管同時破損</p> <p>伝熱管セルフウェステージ試験概念</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ウェステージ現象について試験研究 ・水リーク事故時の隣接伝熱管の破損挙動を評価するモデルを構築する。
2重管高温ラプチャー試験・評価技術開発 ・安全ロジックの構築に必要なウェステージの特性データを取得 ・破損モデルの開発			 <p>隣接管の高温ラプチャー破損模式図</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水リーク事故時に高温ジェットに晒される隣接伝熱管の強度低下挙動について試験 ・ラプチャ破損モデルを構築する
流動伝熱試験及び技術実証			

⑩プラント保全技術の開発(1/4)

「もんじゅ」の現状

- ナトリウムは空気・水と反応するため、容易に配管を取り外すことができない。また温度が低下すると固形化するため、配管系の温度を維持する必要がある。また、ナトリウムは水と異なり不透明なため、既存の目視検査用カメラでは、配管あるいは容器内構造物の検査に対応できない。
- このため、現在の保守・補修技術では、冷却系配管から加熱状態のナトリウムを全て抜く必要がある等、極めて手間がかかる。

技術開発の概要

- 配管内部の保守については、超音波を用いた探傷技術を開発し、配管取り外し検査の手間を削減。配管表面の保守については、放射能を帯びたナトリウム内でも撮影可能なカメラを開発し、検査の手間を削減。
- あわせて、保守・補修をしやすいプラント設計を実施。

今後の課題

- 現在までに、超音波探傷技術、ナトリウム内で撮影可能なカメラの技術開発見通しを得た。
- 今後、実証試験による性能確認、実用性の見直し確認が必要。
- (○保守・補修しやすいプラント設計については、設計上の問題であり、技術開発要素なし。)

⑩プラント保全技術の開発(2/4) ナトリウム炉における枢要検査技術

③原子炉容器廻り検査装置



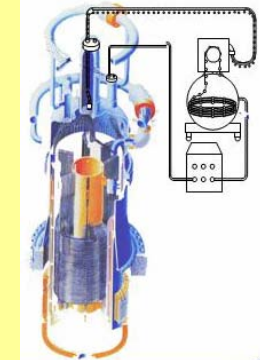
(もんじゅ、実証炉)

③1次主冷却系配管検査装置



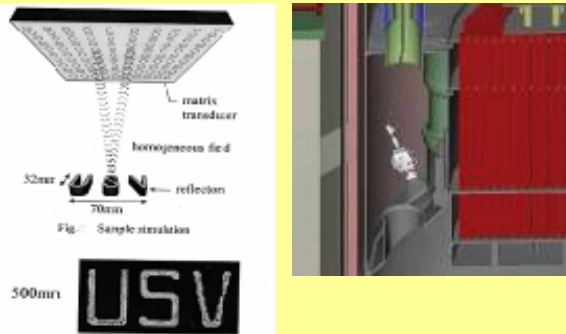
(もんじゅ)

②蒸気発生器伝熱管検査装置



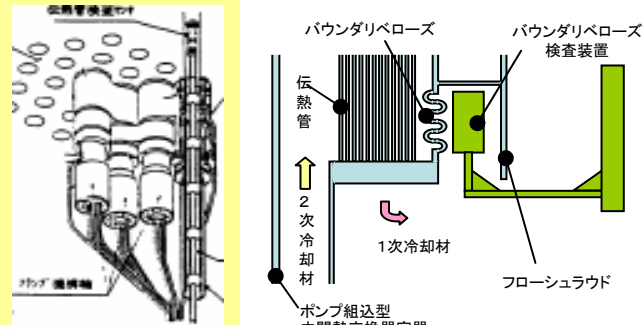
(もんじゅ、実用炉)

①ナトリウム中検査装置



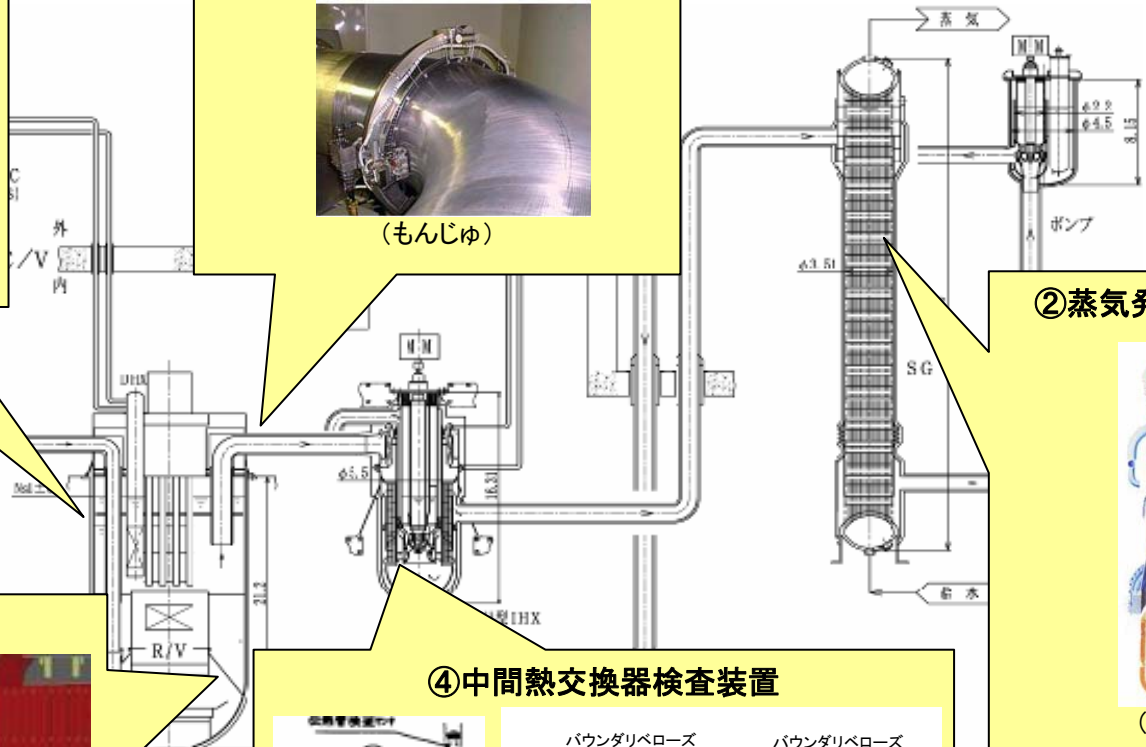
(実証炉、実用炉)

④中間熱交換器検査装置



伝熱管検査

バウンダリペローズ検査
(実証炉、実用炉)



⑩プラント保全技術の開発(3/4)

分類	2010	2015	開発内容
ナトリウム中検査装置・補修法の開発	<p>ナトリウム中目視センサの開発</p> <p>ナトリウム中目視検査装置の開発</p> <p>ナトリウム中搬送装置の開発</p> <p>ナトリウム中補修技術の開発</p>		<ul style="list-style-type: none"> ・ ナトリウム中可視化および体積検査装置の小型化、処理高速化をめざした機器開発(付図①) ・ センサのナトリウム中搬送、位置決め装置の開発(前頁図①) ・ ナトリウム除去、溶接等の基盤技術を発展させたナトリウム中補修技術開発
二重管蒸気発生器伝熱管検査・補修装置の開発	<p>二重伝熱管検査技術の開発</p>	<p>検査機器高速化技術の開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 検査機器の精度、効率向上と2重伝熱管への適用性確保のための機器開発(前頁図②) ・ 不具合伝熱管のプラグ施工と抜管技術の開発
IHX伝熱管、バウンダリベローズ検査・補修装置の開発		<p>検査装置の開発</p> <p>補修装置の開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ IHX伝熱管とバウンダリベローズへアクセスするためのロボティクス技術の開発(前頁図④)

⑩ プラント保全技術の開発(4/4)

分類	2010	2015	開発内容
自己放出ガンマ線を用いたNa透視技術の開発	<p>要素開発(検出系、走査系等)</p>		<ul style="list-style-type: none"> 炉心及び放射化した冷却材から発生するγ線を線源とした冷却材中可視化技術を開発する。
構造物の欠陥検査技術の開発	<p>欠陥技術の開発</p>		<p>以下の検査用センサの開発を行う</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子炉容器や配管の検査・モニタリングに適用する高温用電磁超音波探傷器(EMAT) き裂やピンホールなどの微小欠陥の検出性能に優れた磁気センサ
高速炉用維持基準の策定	<p>維持基準案検討</p> <p>維持基準案の具体化、適用性検討</p>		<ul style="list-style-type: none"> 高速炉は内圧が低く熱応力が支配的であり、構造に欠陥を生じた場合でも破損にはつながりにくい。この特徴を踏まえ検査・補修を含めた維持基準を確立する。

⑪受動的炉停止と自然循環による炉心冷却(1/3)

「もんじゅ」の現状

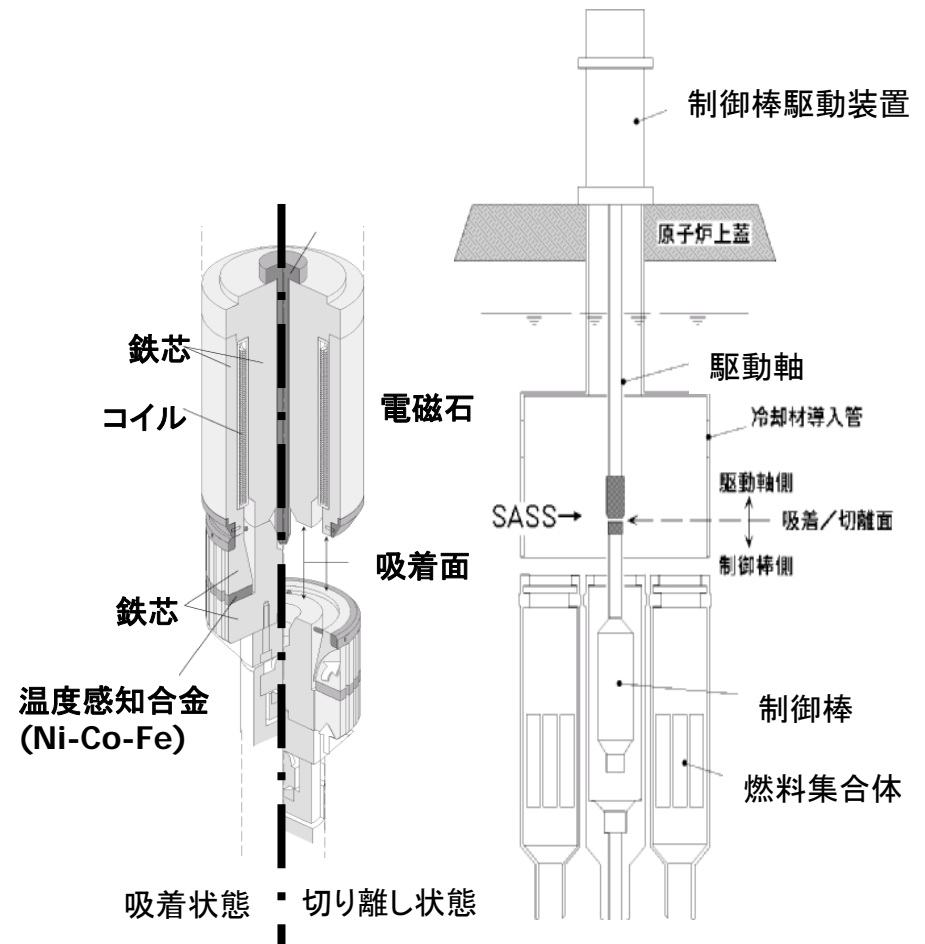
○「もんじゅ」では、非常時における炉停止のための制御棒操作は、電気信号によっている。(なお、炉停止後の自然循環能力は保有しているが、強制循環での除熱が必須)

技術開発の概要

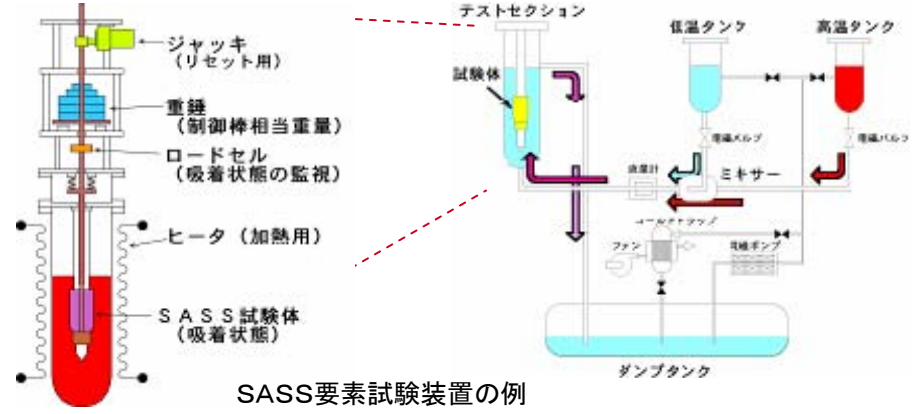
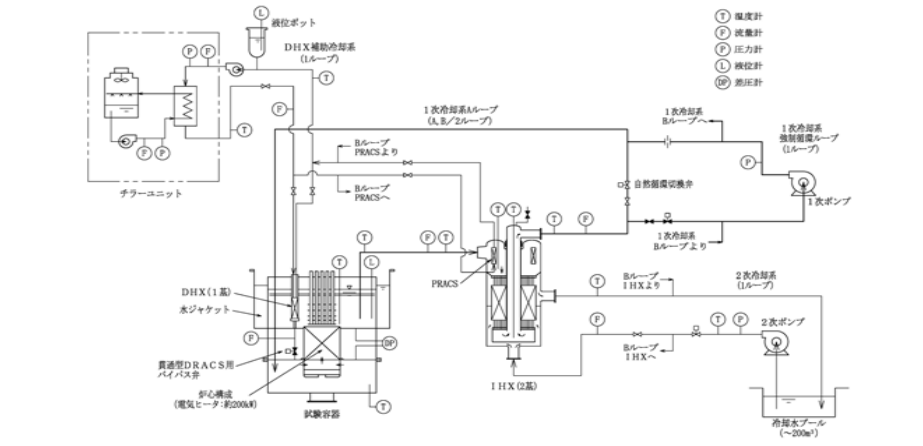
- 非常時における炉停止のための制御棒操作を、受動的(パッシブ式)システムとし、すでに「もんじゅ」でも採用している自然循環能力と併せ、電気停止(外部電源喪失)時にも確実に炉停止・冷却を行えるシステムを開発し、非常時の安全性をさらに向上。
- 受動的炉停止システムとして、磁石が一定以上の温度(キュリー点)に達すると磁力を失う性質を利用し、制御棒操作に磁石を用い、炉心過熱時には制御棒が自動的に炉内に挿入されるシステム(SASS)を構築。

今後の課題



- 現在までに、SASS炉外試験及び「常陽」を用いた実証試験は終了。
- 今後、材料の照射試験により信頼性を確認。
- 自然循環による崩壊熱除去性能の確認、評価手法の確立が必要。



⑪ 受動的炉停止と自然循環による炉心冷却(2/3)

分類	2010	2015	開発内容
<p>受動的炉停止系の開発</p>	<p>要素試験体照射試験(常陽)</p>	<p>実機仕様SASSの機能確認試験</p> <p>モックアップ試験体製作</p> <p>機能試験(気中)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 受動的な制御棒切り離し機構(SASS)が通常運転時に誤切離しを生じないことの実証のための常陽炉内試験 SASSを含めた原子炉停止系の機能確認のためのモックアップ試験(制御棒駆動、スクラム、燃料交換動作、地震時挿入性を確認)  <p>SASS要素試験装置の例</p>
<p>自然循環流動試験</p>	<p>水流動試験</p> <p>部分ナトリウム流動試験</p> <p>評価手法開発</p> <p>「もんじゅ」自然循環特性試験</p>		<ul style="list-style-type: none"> 水流動試験体(アクリル製)を製作し、定常運転時の主要部位での流況と崩壊熱除去を含めた過渡時の自然循環による除熱特性に関するデータを取得し、解析手法の検証整備を行う。  <p>水流動試験装置概念の例</p>

⑪ 受動的炉停止と自然循環による炉心冷却(3/3)

分類	2010	2015	開発内容
長寿命制御棒の開発	 <p data-bbox="539 389 784 418">長寿命制御棒の製作</p>	 <p data-bbox="887 496 999 525">照射試験</p>	<ul style="list-style-type: none"> 炉心の燃料交換サイクルより長い寿命が達成可能な、ナトリウムボンド方式2重シュラウド型制御棒を開発する。

⑫炉心損傷時の再臨界回避技術(1/3)

「もんじゅ」の現状

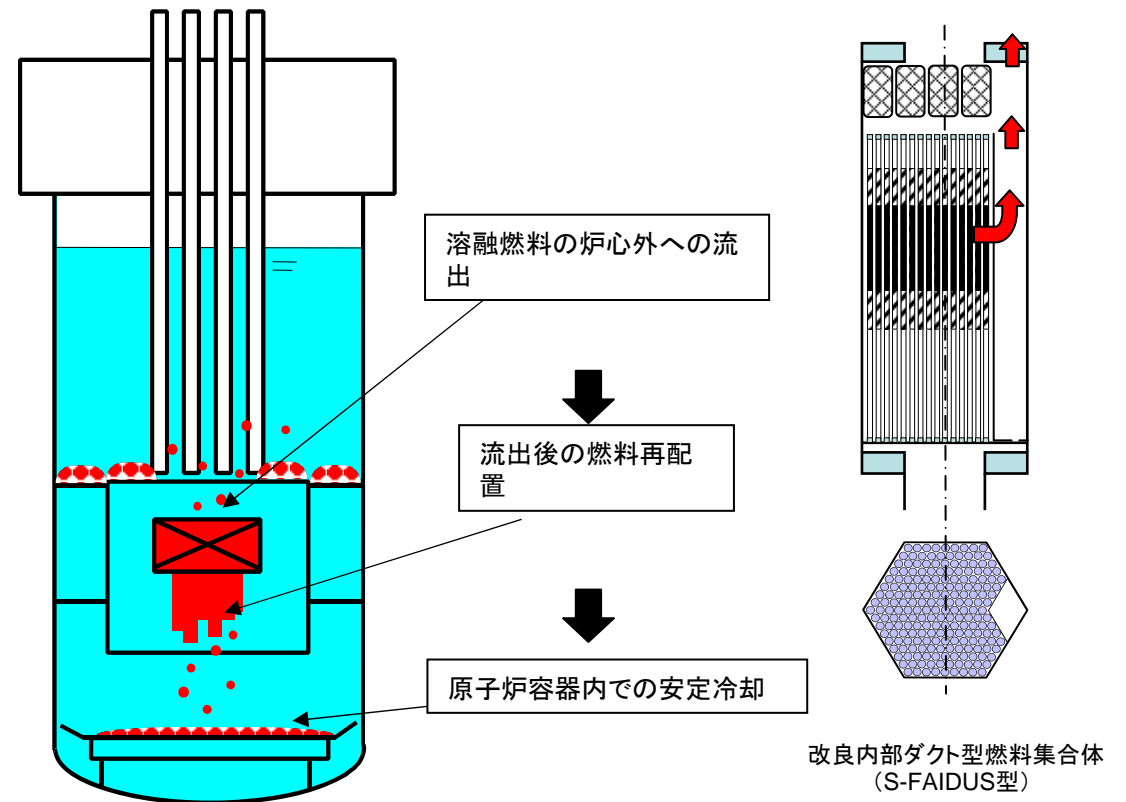
- 炉心損傷事故の際、溶融した燃料が集中すると、再臨界を起こす可能性がある。
- 「もんじゅ」では、運転実績が僅少であることから、炉心崩壊事故を想定した保守的な条件の評価を実施し、発生する機械的エネルギーによって噴出するナトリウムの燃焼に対して、原子炉の安全余裕(格納容器の健全性)が保たれていることを確認している。

技術開発の概要


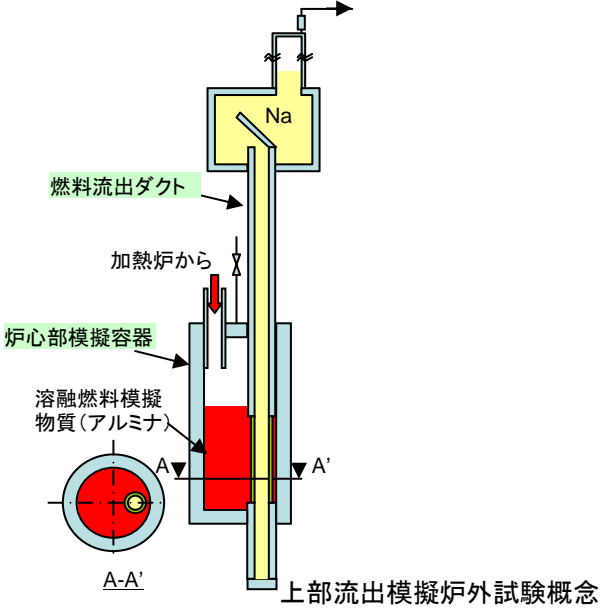
- 炉心損傷事故時に、溶融燃料を炉心外に排出する経路を取り付けた集合体により、炉心損傷事故時に溶融燃料の再臨界を回避しつつ冷却するシステムを確立し、事故時の安全性向上を図る。

今後の課題

- 現在までに、カザフスタンの安全研究炉IGRにて、安全容器内での燃料溶融状態試験を行い、基礎的データ取得済み。
- 今後、燃料の流出挙動を把握するとともに流出させた燃料を安定的に冷却できることを確認する。



⑫ 炉心損傷時の再臨界回避技術(2/3)

分類	2010	2015	開発内容
炉心損傷挙動 評価試験	S-FAIDUS型集合体 溶融燃料排出挙動試験	燃料デブリ安定冷却試験	①改良内部ダクト型燃料集合体における溶融燃料上方流出の原理確認 ⇒カザフスタン炉外試験施設、IGR試験炉等を用いた試験研究 ②燃料流出後に原子炉容器内での安定冷却が可能であることを試験データに基づいた評価で示す。 ⇒カザフスタン炉外試験施設、IGR試験炉等を用いた試験研究
	 <p>カザフスタンIGR試験炉</p>	 <p>上部流出模擬炉外試験概念</p>	

⑫ 炉心損傷時の再臨界回避技術(3/3)

分類	2010	2015	開発内容
確立論的安全性評価(PSA)適用検討	レベル2 PSA評価手法整備 PSA概略評価 地震リスク概略評価 停止時リスク概略評価 機器・系統信頼性データベース整備	概念設計レベル1PSA フルスコープPSA レベル2 PSA詳細評価	<ul style="list-style-type: none"> PSAを適用して安全設計の妥当性を評価 設計概念の妥当性を評価する観点から、以下を先行して実施(評価手法整備を含む。レベル1PSA(炉心損傷発生頻度評価)については、フェーズⅡで見通しを得ている。) <ul style="list-style-type: none"> レベル2PSA(炉心損傷進展過程の現象論と放射性物質移行挙動評価) 地震時PSA 停止時PSA 設計概念が固まりつつある段階で詳細評価を実施 「常陽」「もんじゅ」の運転経験データの収集とデータベース整備を継続的に実施
放射性物質移行挙動評価	燃料からのFP/Pu放出挙動試験 炉内ソースターム挙動模擬試験		<ul style="list-style-type: none"> 過熱状態にある高速炉燃料からのFPとPuの放出率を測定 燃料から放出された放射性物質の1次冷却系内での移行挙動(移行率)を試験により評価
安全設計・評価方針の整備	安全技術情報データベースの構築	安全技術体系の整備	<ul style="list-style-type: none"> 実用化炉の安全設計方針と安全評価方針を整備 安全設計・評価の妥当性を裏付ける技術基準、技術的知見の整理 評価事象選定論理構築 評価ツールと評価条件整備

⑬耐震性向上技術の開発(1/2)

「もんじゅ」の現状

○一般軽水炉は耐震設計、「もんじゅ」でも耐震設計を採用。

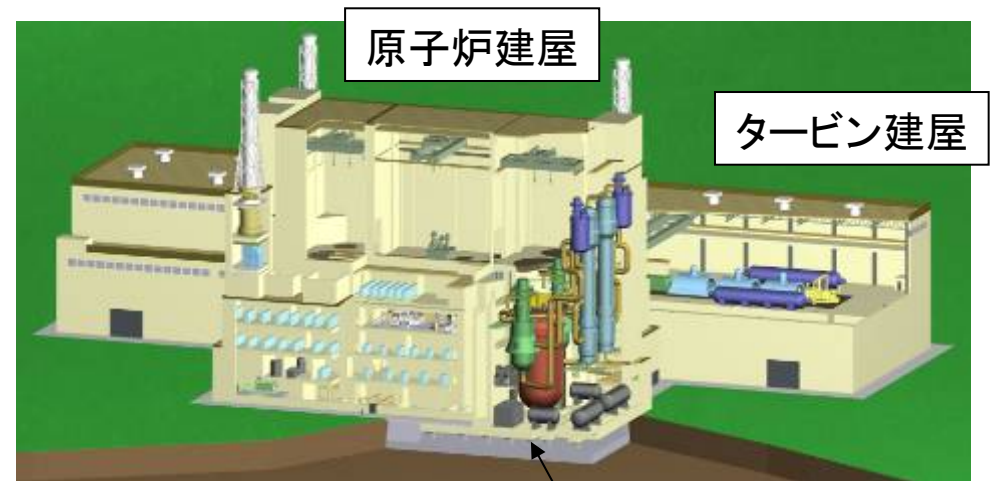
技術開発の概要

- 3次元免震を採用した場合、地震荷重の制約から解放されることから、高速炉特有の熱応力に対して最適の設計が可能となる。また、想定内であればいかなる地震動にも対応可能であるため、従来の耐震設計と異なり立地条件にかかわらず建屋設計を標準化することが可能。さらに、今後予想される耐震基準強化への対応にも有効。
- 炉心の耐震性として地震時に集合体飛びだし等を抑制する設計が必要である。地震発生時に炉心は燃料集合体同士が摩擦・衝突しながら振動するために、複雑な挙動を示す。安全裕度を確認するために集合体の群振動を明らかとする。

今後の課題

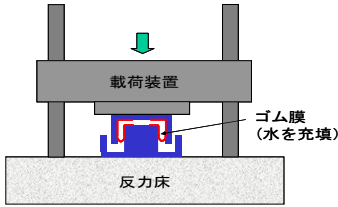
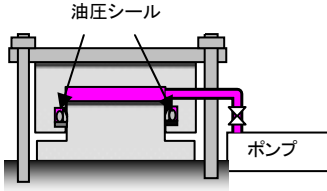
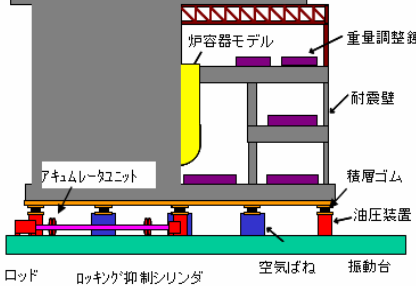

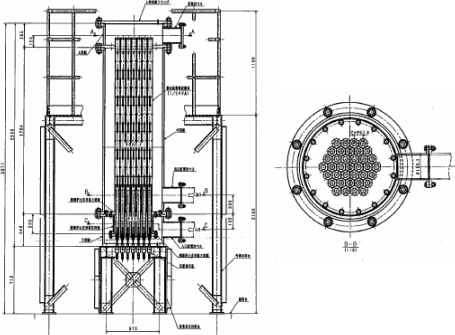
- 今後、3次元免震構造の開発・試作を行い、基準化のための確認試験を実施する必要がある。
- 燃料集合体の群振動試験を実施し、炉心の耐震性評価手法を開発する必要がある。

実用炉プラント鳥瞰図



建屋免震技術を採用

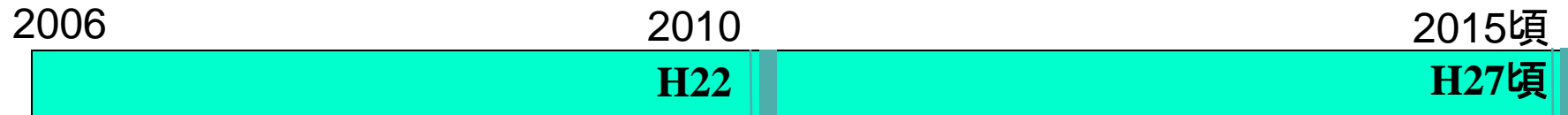
⑬ 耐震性向上技術の開発(2/2)

分類	2010	2015	開発内容
3次元免震技術の開発	<p>免震要素試作・開発</p> <p>3次元免震設計方針案の策定</p>	<p>システム確証試験 (大型振動台試験)</p> <p>実機設計方針策定</p>	<p>高機能化した免震要素（空気ばね試験、油圧機構等）の耐荷重、作動健全性を確認する</p>  <p>ゴム部材の耐圧強度試験</p>  <p>シール部終局試験</p> <p>建屋、蔽壁、炉容器、配管等の機器を模擬した上屋を持つ実規模システムにより、実機免震特性を確認する。</p>  <p>建屋全体3次元免震システム試験</p>  <p>実大3次元震動破壊実験施設 (E-Defence)</p>
炉心耐震性評価手法の開発	<p>3次元群振動試験</p> <p>3次元群振動解析コードの開発</p> <p>炉容器・炉心槽の耐震性評価</p>		<p>模擬燃料集合体群を加振台で3次元加振し、群振動挙動を測定する。</p>  <p>試験体概念図</p>

2015年までの研究開発計画

－ 主概念：先進湿式法再処理＋簡素化ペレット法燃料製造－

2015年までの燃料サイクルシステム研究開発の進め方



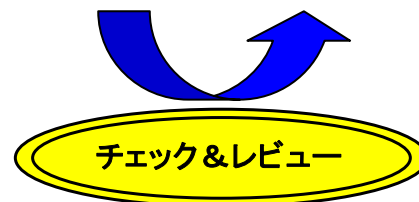
高速増殖炉サイクル実用化研究開発

期待する成果

- 採用する各革新技术の決定
- 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行期に考慮すべき課題の整理

期待する成果

- 実証燃料サイクル施設の概念設計
- 実用燃料サイクル施設の概念設計
- 実用化までの研究開発計画の提示



燃料サイクルシステムに関する2015年までの技術開発課題

(先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造)

先進湿式法再処理

簡素化ペレット法燃料製造

①解体・せん断技術の開発

②高効率溶解技術の開発

③晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発

④U,Pu,Npを一括回収する高効率抽出システムの開発

⑤抽出クロマト法によるMA回収技術の開発

⑥廃棄物低減化(廃液2極化)技術の開発

⑦脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発

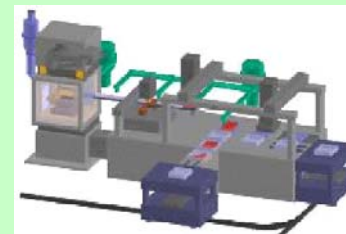
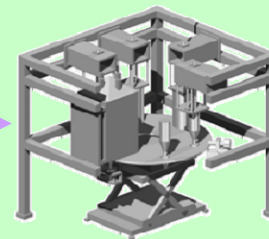
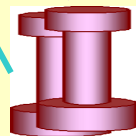
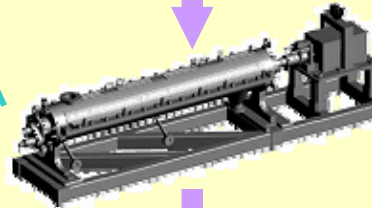
⑧ダイ潤滑成型技術の開発

⑨焼結・O/M調整技術の開発

⑩燃料基礎物性研究

⑪セル内遠隔設備開発

⑫TRU燃料取扱い技術



燃料サイクルシステムの2015年までの研究開発計画(再処理)

項目		2010	2015	評価・判断のポイント	代替技術
先進 湿式 法	設計研究	概念設計研究(安全設計、周辺工程の設計) シナリオ解析、プラント概略仕様及び設備検討	最適化設計研究(要素技術開発の進展を考慮したシステムの最適化)		-
	①解体・せん断技術の開発	要素機での基本性能確認、実燃料せん断データ把握 システム試験機的设计・製作・コールド試験・評価、遠隔保守性検討		⑩ 工学規模ホット試験施設(総合システム実証試験設備)の設計へのプロセスデータ反映 ⑫ 工学規模ホット試験施設(革新技術試験装置)の設計へのプロセスデータ反映	従来型Purexベース技術
	②高効率溶解技術の開発	各種溶解条件の影響評価 溶解計算コード改良 基本構造の検討 部分モックアップ試験機的设计・製作・試験(コールド、ウラン)	工学規模ホット試験に向けた溶解データ拡充 工学規模ホット試験に向けたコード拡張	② 工学規模ホット試験施設(総合システム実証試験設備)の設計への機器性能データの反映 ③ プロセス開発及び装置システム開発の成果に基づく革新技術の決定、操業条件提示、実用化見直し判断	従来型Purexベース技術
	③晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発	FP同伴メカニズム解明、結晶洗浄技術の検討(ウラン、ネプト) 工学規模ホット試験に向けたプロセスデータ拡充整備(操業条件最適化) 基本構造、計測制御システム、遠隔保守構造の検討 工学規模試験機的设计・製作・試験(コールド、ウラン) 結晶分離機の成立性評価、高濃度溶液の移送技術の確立		④ プロセス開発成果及び装置システム開発成果に基づく工学規模ホット試験施設の施設整備開始の判断	従来型Purexベース技術
	④U,Pu,Npを一括回収する高効率抽出システムの開発	Np(U,Pu)抽出挙動の確認、一括回収プロセス条件の最適化 抽出計算コード改良 工学規模システム試験(耐久性、インライン計装技術、システム制御性、遠隔保守性検討)(コールド、ウラン) 基本性能確認、システム特性把握、遠隔保守構造検討(コールド、ウラン)	工学規模ホット試験に向けた抽出データ拡充 工学規模ホット試験に向けたコード拡張	⑤ 実用機器の性能(処理速度、除染性能等)の確認、実用化見直し判断 ⑥ 工学規模ホット試験施設の製作性や施工費等に係るデータの設計研究への反映	従来型Purexベース技術
	⑤抽出クロマト法によるMA回収技術の開発	吸着材(抽出剤)の分離性能比較評価・安全性評価、使用済吸着材処理方法検討、回収フローシート構築、MA、FP元素挙動評価(コールド、ホット) 要素試験(カラム内流動性、安全性・耐久性評価)、遠隔操作性及び計装・制御法検討 工学規模プロセス試験用機器的设计・製作・試験(コールド→RI)	回収フローシート改良	⑦ 革新技術試験及び総合システム実証試験結果に基づく先進湿式再処理技術の実用化見直し判断	従来型溶媒抽出技術
	⑥廃棄物低減化(廃液2極化)技術の開発	周辺工程でのソルトフリー化検討、濃縮妨害試薬排除・硝酸分解技術検討 ソルトフリーオフガス洗浄装置、硝酸分解装置の要素試験、モックアップ装置による試験			従来型Purexベース技術
	工学規模ホット試験	設計支援データ、試験条件 基本設計 安全審査、詳細設計、設工認	施設整備 革新技術試験、総合システム実証試験		-

▼ 革新的な技術の採否の判断

◆ 各課題の主要なチェックポイント

燃料サイクルシステムの2015年までの研究開発計画(燃料製造)

項目		2010	2015	評価・判断のポイント	代替技術
簡素化ペレット法	設計研究	概念設計研究	最適化設計研究		—
	⑦脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発	原料粉末調整プロセス開発 (Pu富化度調整・転換・造粒) 遠隔保守対応量産技術開発	小規模試験設備整備 製造性評価試験 品質向上試験 条件最適化試験	1 2 4	・従来型ペレット法ベース技術 ・高除染体系でのグローブボックス内製造システム
	⑧ダイ潤滑成型技術の開発	ダイ潤滑型プロセス開発 遠隔保守対応量産技術開発	小規模試験設備整備 製造性評価試験 品質向上試験 条件最適化試験	1 2	・従来型ペレット法ベース技術 ・高除染体系でのグローブボックス内製造システム
	⑨焼結・O/M調整技術の開発	焼結・O/M調整プロセスの開発 遠隔保守対応量産技術開発	小規模試験設備整備 製造性評価試験 品質向上試験 条件最適化試験	1 2 5	・従来型ペレット法ベース技術 ・高除染体系でのグローブボックス内製造システム
	⑩燃料基礎物性研究	基礎物性と燃料設計コードの開発 基礎物性と燃料製造	実験的研究(物性データ測定) 理論研究(計算化学による物性データ予測手法の開発) 照射データ評価/挙動解析コードの開発 初期焼結挙動の速度論的評価、O/M変化の測定・調整技術評価 焼結挙動のモデル化	3 1 2 7	・—
	⑪セル内遠隔設備開発	セル内遠隔設備開発	遠隔対応設備、遠隔ハンドリング設備、機器監視異常診断技術、分析、検査迅速化の開発	2	・高除染体系でのグローブボックス内製造システム
	⑫TRU燃料取扱い技術	原料発熱影響評価	熱流動シミュレータによる計算モデルの開発、コールドモックアップ試験	2 7	・高除染体系でのグローブボックス内製造システム
	工学規模ホット試験	設備システムを選択 試験施設の設計・建設	試験施設の検討 セル設備を主体とした工学規模ホット試験施設の設計、許認可 Pu第3開発室を利用した工学規模ホット試験施設の設計、許認可	6	・—

▼ 革新的な技術の採否の判断

◆ 各課題の主要なチェックポイント

燃料サイクルシステムの設計研究

これまでの設計研究成果

- 主工程の最小化に着目して検討を実施し、開発目標を高いレベルで満足する可能性を有する処理規模200t/yの燃料サイクルプラント概念を構築した。
- 高速増殖炉サイクル導入期に関する想定シナリオ設定と関連する諸量評価を実施し、プラント規模や軽水炉燃料再処理に必要な新たなプロセス、機器などを検討した。



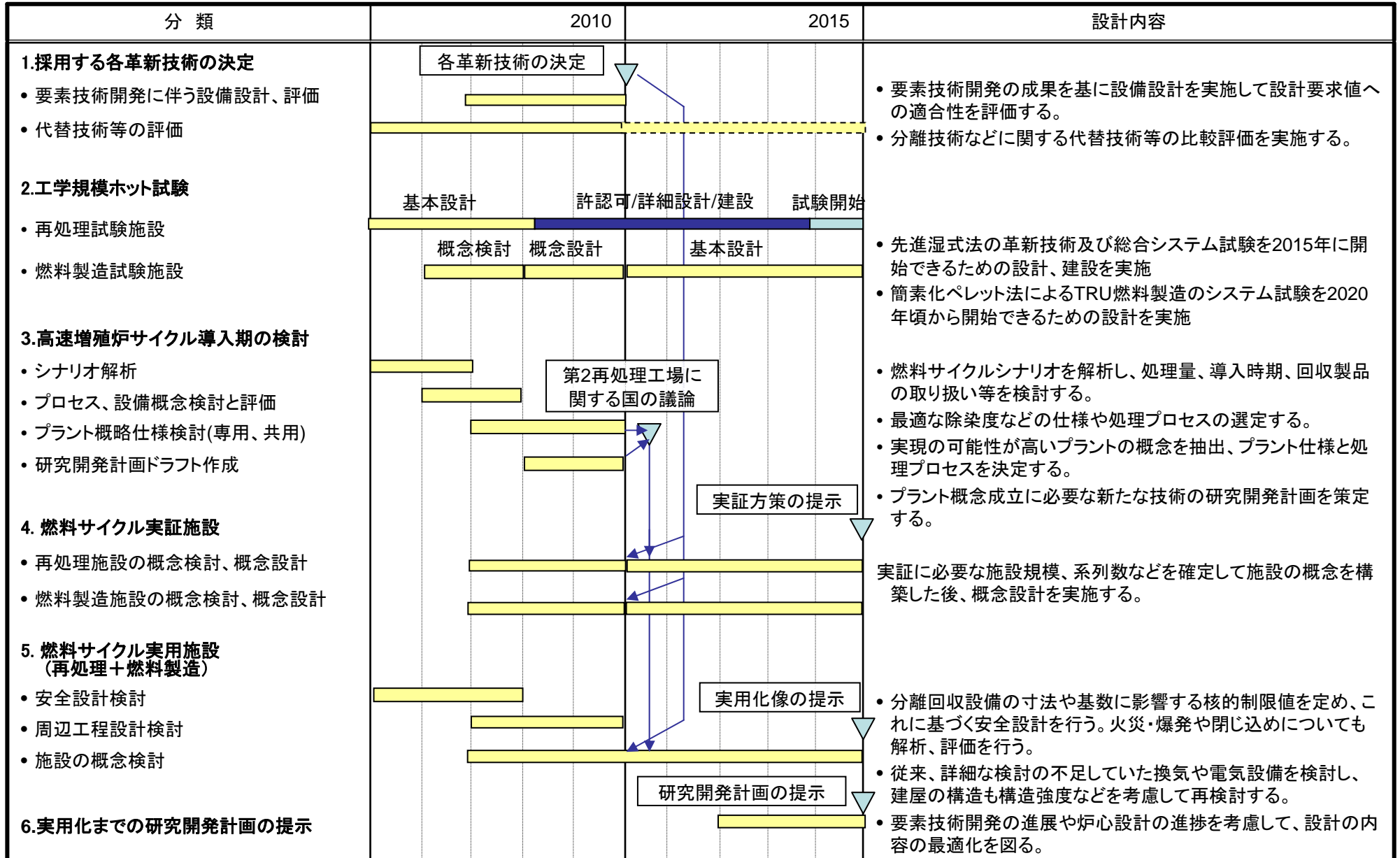
- 軽水炉燃料の処理に必要な機器
 - ・集合体反転機を追加
 - ・グリッド/スパーサ部を処理する成形機を追加
 - ・エンドピース洗浄槽を追加
 - ・第二晶析設備を追加
- シナリオ整合する設備の変更をさらに検討

移行期プラントの前処理設備セル断面図

今後の設計研究の課題

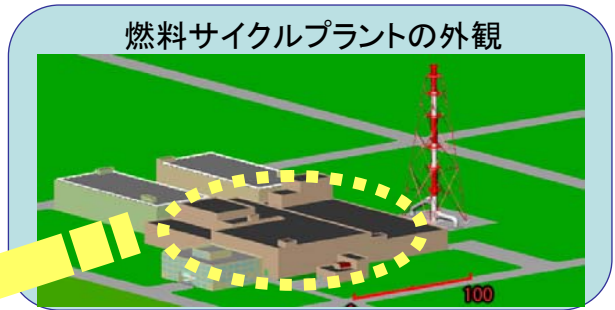
- 工学規模ホット試験
 - －燃料サイクル実証施設の設計に反映させる為に、要素技術開発の進捗状況を考慮して再処理及び燃料製造の工学規模のホット試験とその準備をそれぞれ早期に実施
 - －その為に、試験施設として安全審査を受けられる内容の基本設計を実施
 - －将来の新たな技術に関する試験も実施可能な、柔軟な対応の取れる施設、設備の構築
- 燃料サイクル実証施設
 - －フェーズⅢ以降で実施する基本設計のベースとなるよう、実証に必要なプロセス及びプラントの規模、系統構成などを具体的に定めて施設の概念を構築
- 2050年頃の実用化を目指した燃料サイクル実用施設
 - －安全設計、周辺工程の設計、要素技術成果を取り込んだプロセスやシステムの最適化
 - －国内の政策・技術動向を踏まえ、高速増殖炉サイクルへの移行期の適切なシナリオを抽出
 - －シナリオ解析を基に、軽水炉、高速炉、プルサーマル燃料を合理的に処理できるプラントの仕様検討
 - －代替技術等の評価とプラントへの適用可能性の検討

燃料サイクルシステムの設計研究計画



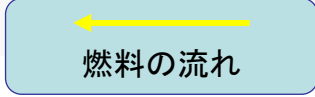
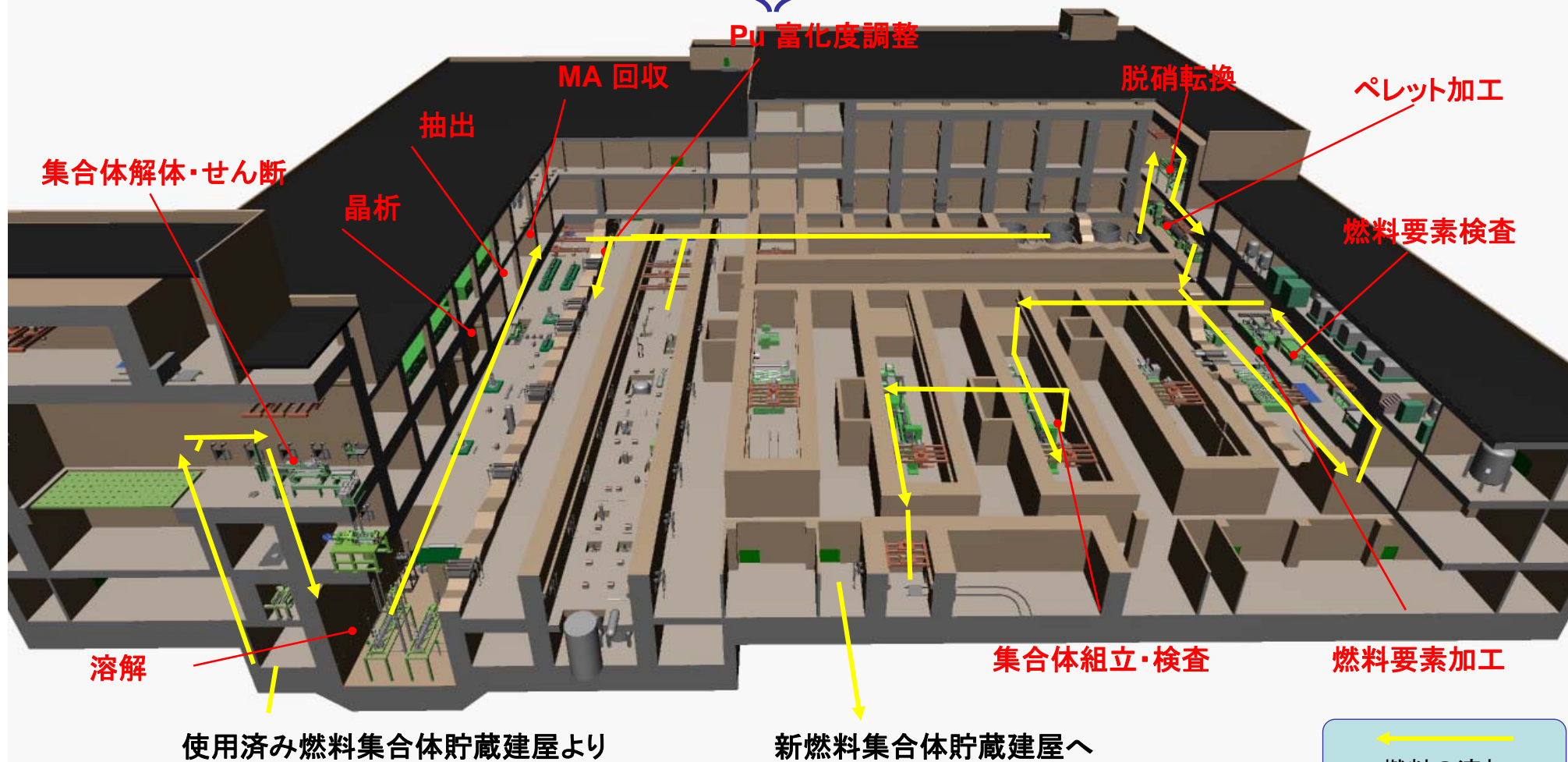
2005年までの設計研究の成果

— 処理規模200t/yの燃料サイクルプラントの概念図 —



再処理

燃料製造



再処理工学規模ホット試験施設

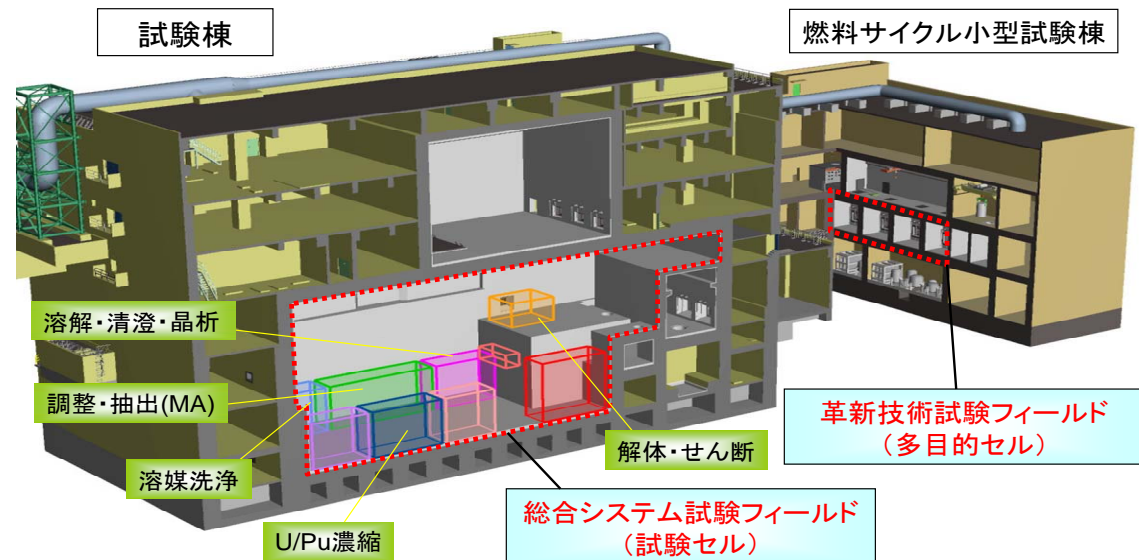
再処理に関して、先進湿式再処理法の革新技術及び総合システムに関する工学規模での試験を2015年から実施する。そのために、試験施設の基本設計、安全審査、詳細設計、建設を実施する。ホット試験では、先進湿式法の革新技術やシステム、プラントに関する性能や運転、保守に関する実証データを順次提示して、実証燃料サイクル施設の設計に反映する。

(役割)

- 実験室規模(～0.1kg/h)より核物質取扱量を増やし、革新技術(晶析、抽出クロマト等)について設備単位でのホット試験(革新技術ホット試験)を行い、装置挙動や製作性を考慮した最小限の工学規模での性能データを把握する。
- 解体・せん断から溶解、抽出等の一連の先進湿式再処理プロセス全体をシステムとして連結したホット試験(総合システムホット実証試験)を行い、実用化に向けた実証データを把握するとともに、技術確立を目指す。

(研究開発実施内容(案))

- 革新技術ホット試験(1kg/h程度の機器能力)
 - 晶析設備のR&D
 - MA回収用抽出クロマトグラフィー設備のR&D
 - その他革新技術に関するR&D
- 総合システムホット実証試験(10kg/h程度機器能力)
 - 解体・せん断から抽出等、一連の先進湿式プロセスの工学規模における総合システムを実証。
 - 機器、設備の運転経験、プロセス制御性等のプラント運用技術に関する知見や開発目標達成を見通すための評価データの取得、および技術の確立。
 - MA燃料の原料供給
 - 試験により得られるMA(Np、Am、Cm)を回収し、燃料製造工学規模ホット試験施設へ供給。



【再処理工学規模ホット試験施設の概念】

燃料製造工学規模ホット試験施設

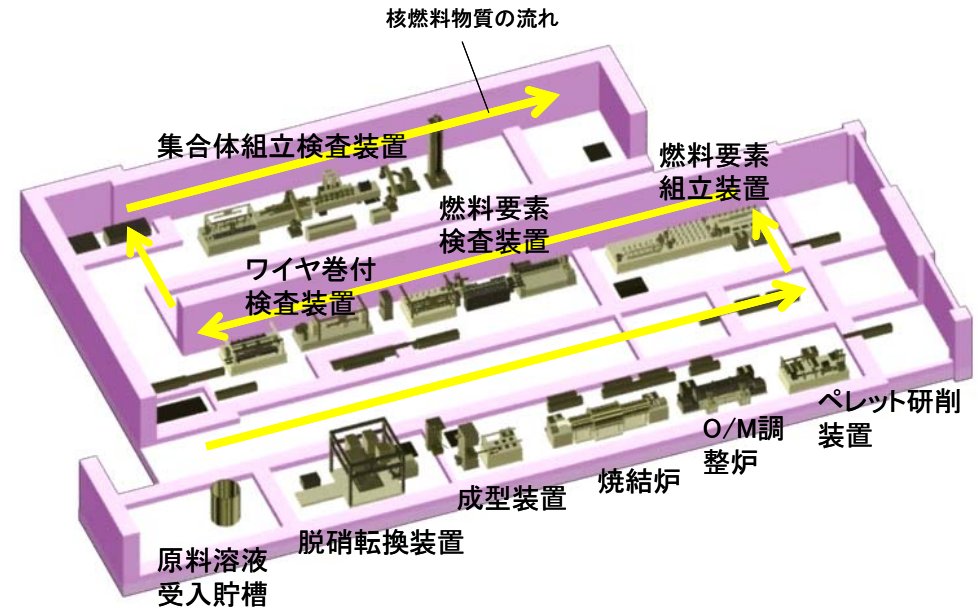
燃料製造に関して、TRU燃料を扱う簡素化ペレット法の自動燃料製造システムや遠隔保守・補修に関して2020年頃から工学規模で試験を実施する。そのために、セル構造を主とした試験施設の概念設計、基本設計を実施する。

(役割)

- 低除染TRU燃料を対象とした製造設備の自動操作性及び遠隔保守補修性の実証
- 低除染TRU試験燃料集合体の製造(1t HM/年程度)

(研究開発実施内容(案))

- 低除染TRU燃料によるセル内遠隔製造の実証
 - 遠隔対応製造設備の実証
 - 保守・補修技術の実証
 - 新たな検査技術を用いた品質管理の実証
 - 発熱影響の確認



ホット工学試験設備(セル構造設備)配置概念の一例

設計研究に関する2010年の成果

1. 採用する各革新技術の決定

要素技術開発において実施するホット試験による原理の確認やコールド試験による工学規模へのスケールアップ見通しの確認などの成果を基に、実用燃料サイクル施設に適用する革新技術の成立性を見極める。具体的には、革新技術を含む設備設計を実施して、設計要求への適合の可否を判断する。なお、代替技術等についても比較評価し、その適用性を検討する。

- 運転管理方法(運転手順、制御などを含む)
- 安全設計(溶媒、試薬の物性データなどを含む)
- 保守、補修方法(遠隔ハンドリング技術の適用などを含む)
- 設計要求への適合と代替技術等との比較評価

2. 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行期の検討

移行期に必要な軽水炉再処理技術に関する検討を実施し、2010年からの国の議論にデータを提供する。

- シナリオ解析、評価
- 軽水炉再処理に関するプロセス候補概念の抽出と評価
- 高速増殖炉燃料再処理との共用の検討
- 次世代軽水炉再処理技術に関する2010年以降の研究開発計画

【革新技術】

(先進湿式再処理法)

- ✓機械式解体
- ✓短尺せん断
- ✓高効率溶解
- ✓晶析、結晶分離
- ✓U-Pu-Np共抽出
- ✓抽出クロマト
- (簡素化ペレット燃料製造法)
- ✓脱硝、転換、造粒
- ✓ダイ潤滑成型
- ✓焼結、O/M調整等

設計研究に関する2015年の成果

1. 実証燃料サイクル施設(再処理+燃料製造)の概念設計

2030年頃から運開する実証燃料サイクル施設のプロセス及びプラント概念について検討する。

再処理に関しては、施設の概念設計で以下の設計情報を整備し、2015年以降に実施する基本設計に反映させる。

- プロセスフロー図（分離などの原理や造粒のプロセス条件確認などの成果を反映）
- 物質収支、放射能収支（分離などの原理や造粒のプロセス条件確認などの成果を反映）
- 主要機器仕様、機器図（機器開発、機器設計の成果を反映）
- 建屋図、機器配置図（機器の仕様、保守・補修方法の検討結果を反映）
- 主要プロセスの制御フロー図（機器の運転管理方法の検討結果を反映）
- 安全評価 など

燃料製造に関しては、プロセス開発は進むものの、主な工学規模の機器開発がそれに続く計画として
いることから、プロセスに関するフロー図や物質収支などに関して設計し、施設概念を構築する。

2. 実用燃料サイクル施設(再処理+燃料製造)の概念設計

革新技術の決定を含めてプラント全体の概念に関して検討し、2050年頃の高速増殖炉サイクル導
入時期に必要な実用燃料サイクル施設の主要な設備、建屋の概念を提示する。また、ウラン粗分離技
術などに関して海外の技術を含めた代替技術等との比較検討を行い、適用可能性について検討する。

- 主要なプロセス概略フロー図（分離などの原理や造粒のプロセス条件確認などの成果を反映）
- 主要物質の物質収支（分離などの原理や造粒のプロセス条件確認などの成果を反映）
- 主要機器仕様、機器概略図（機器開発の成果を反映）
- 建屋図、機器配置図（機器の仕様、保守・補修方法の検討結果を反映）
- 代替技術等の適用可能性の検討

3. 実用化までの研究開発計画の提示

① 解体・せん断技術の開発 (1/2)

技術の現状

- レーザーを用いた解体方法では、燃料ピン損傷、切断不良等の発生の可能性が高い。一方、機械式切断法の基本要素技術の成立性は見込まれ、解体手順も合理化可能。
- 従来の燃料ピンせん断長(約3cm)では、連続溶解で高効率に高濃度溶解液を得ることは困難。

要求される技術仕様

- 解体システムは燃料ピン損傷等の発生が少なく、所定の処理能力を有し、操作性・保守性の点でも優れていること
- せん断システムは所定の高粉化率のせん断片が得られ、処理能力、操作性・保守性の点でも優れていること。
- 両システムを合わせて、機器配置が合理化すること。

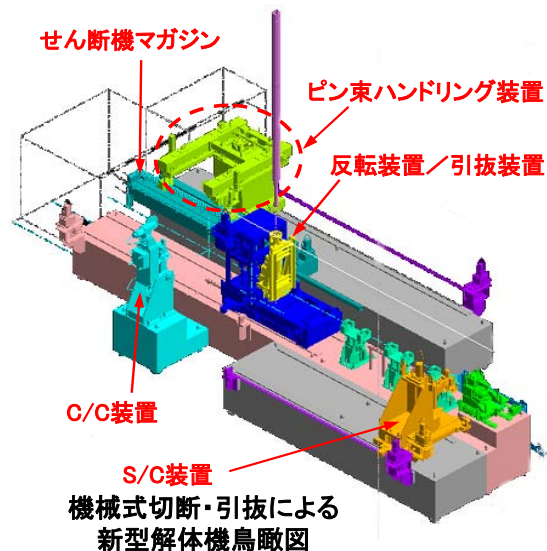
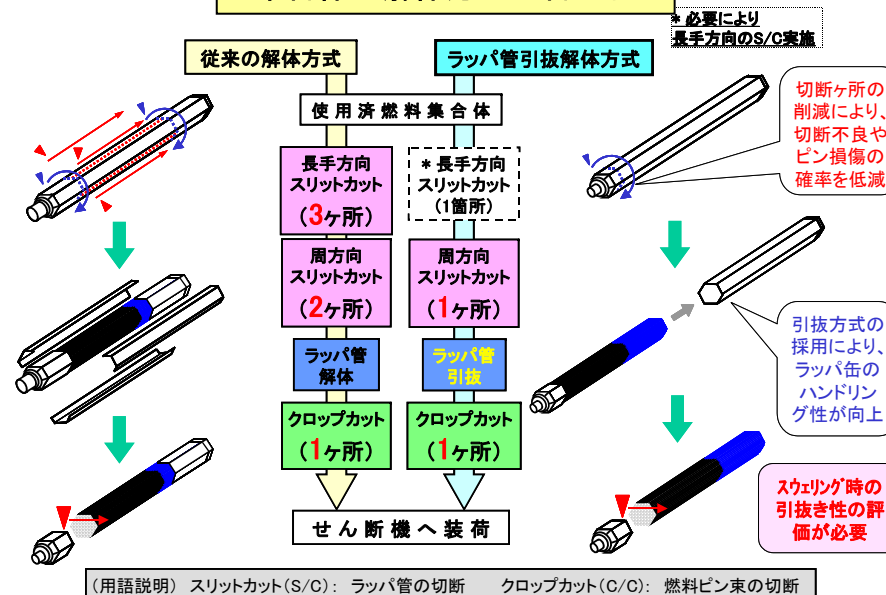
技術開発の概要

- 要素試験機及びシステム試験機により、機械式切断と燃料ピン引き抜き方式を組合わせた解体システムを実証。
- 要素試験機及びシステム試験機により、所定の高粉化率のせん断片が得られるせん断システムを実証。

主要開発課題

- 解体切断刃の制御・遠隔交換等の実証、高粉化率せん断用の刃・ギャグ等の仕様最適化
- 実使用済燃料のピン束形状、せん断時のピン性状の把握

集合体の解体方式の合理化



機械式切断治具による切断状況 (キュービトロン砥石)
(Cutting status using mechanical cutting fixture (Cubicron abrasive stone))

① 解体・せん断技術の開発 (2/2)

分類	2010	2015	試験内容
<p>機械式解体システムの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 要素機による基本機能確認試験 システム試験機 <ul style="list-style-type: none"> 設計 製作 試験(コールド)、評価 試験データの蓄積 遠隔保守性検討 実機 (工学規模ホット試験用≒実用機) <ul style="list-style-type: none"> 設計 製作 			<ul style="list-style-type: none"> 要素試験機によるラッパ管切断、燃料ピン引抜等の主要要素部分の機能を確認。 システム試験機による燃料集合体ハンドリング、操作性を含めた解体システム性能の実証 遠隔保守性の検討、実機設計・製作
<p>短尺せん断技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 要素機による基本機能確認試験 実燃料せん断ピンのデータ把握 システム試験機 <ul style="list-style-type: none"> 設計 製作 試験(コールド)、評価 試験データの蓄積 遠隔保守性検討 実機(位置づけは解体機と同じ) <ul style="list-style-type: none"> 設計 製作 			<ul style="list-style-type: none"> 要素試験機(既存のものを改良し活用)により模擬燃料集合体のせん断試験、せん断刃・ギャグ等の構造の改良 システム試験機による燃料集合体ハンドリング、操作性を含めたせん断システム性能の実証 遠隔保守設計の見直しを経て、実機設計・製作

② 高効率溶解技術の開発 (1/2)

技術の現状

- 従来長さのせん断片溶解では、晶析工程供給に対応する高金属濃度溶解液の調製が困難。高粉体化燃料溶解の有効性を確認。
- 回転ドラム型連続溶解槽は工学規模ウラン試験で基本性能確認。

要求される技術仕様

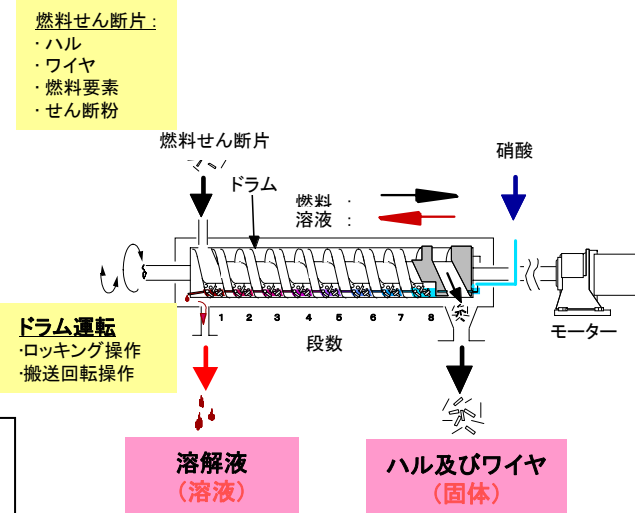
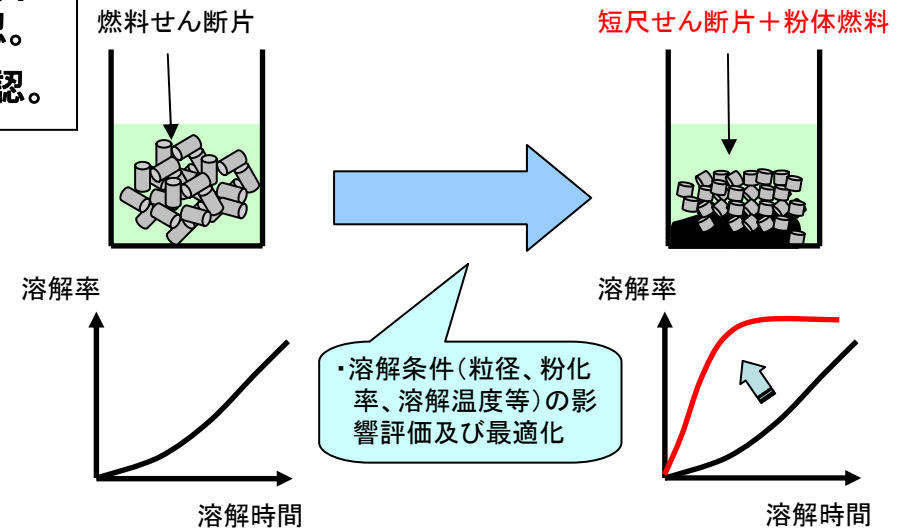
- 所定の高金属濃度溶解液を効率的に(硝酸濃度や溶解温度の運転条件を厳しくせずに、短時間で)得られること。
- 溶解槽は実用プラント規模(200t/y)に対応する処理能力を見込めること。

技術開発の概要

- 高粉化燃料の装荷に対応し、高金属濃度溶解液が得られる溶解プロセスについて、燃料粉化率や粒径等をパラメータとしたプロセス試験を実施し、溶解条件を最適化。
- 高粉化燃料のハンドリング性に優れ、処理容量の増大が図れる連続溶解槽の基本構造を構築、部分モックアップ機にて性能を実証。

主要開発課題

- ホット試験による溶解プロセスデータ拡充。解析コード改良。
- 大型化と運転安定性、攪拌性が両立する溶解槽内部構造の確立。



連続溶解槽構造図

連続溶解槽の改良点

- ・粉体化燃料対応:
ドラム内における溶液攪拌性の向上
- ・処理能力の向上:
ドラム径, ドラム長さの拡大

② 高効率溶解技術の開発 (2/2)

分類	2010	2015	試験内容
<p>高効率溶解プロセス開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 各種溶解条件の影響評価 工学規模ホット試験に向けたデータ整備拡充 溶解計算コードの改良 試験結果の反映、溶解条件最適化 <p>工学規模ホット試験に向けた拡張</p>			<p>短尺せん断片 + 粉体燃料</p> <p>・せん断片長さ ・粉化率 ・粒径</p> <p>・溶解温度 ・硝酸濃度 ・溶解槽形状</p> <p>高金属濃度溶解条件における</p> <ul style="list-style-type: none"> せん断、粉碎条件の影響評価 温度(低温下)及び硝酸濃度(低濃度下)の影響評価 不溶解残渣発生量及び残渣成分評価 溶解計算コード改良と拡張 <p>溶解率</p> <p>— : 実測値 ... : 計算値</p> <p>・不溶解残渣発生量及び成分 ・計算コード改良・拡張</p> <p>溶解時間</p>
<p>高効率溶解装置開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 基本構造の検討 部分モックアップ試験機 設計 製作 試験(コールド→ウラン) 実用機の基本設計 実機(工学規模ホット試験用) 設計 製作 			<p>従来ドラム構造(10kg/h) → 大型溶解槽ドラム構造(40kg/h)</p> <ul style="list-style-type: none"> 要素試験機により高粉体化燃料装荷に対応した高攪拌性ドラム構造を検討 部分モックアップ試験機により大型溶解槽の基本構造(臨界安全性等)及び基本性能を実証(せん断燃料片の攪拌・移送性、溶液の流動等) 実機設計・製作

③ 晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発 (1/2)

技術の現状

- 晶析方法の化学的成立性及び連続晶析装置の基本的成立性を確認。

要求される技術仕様

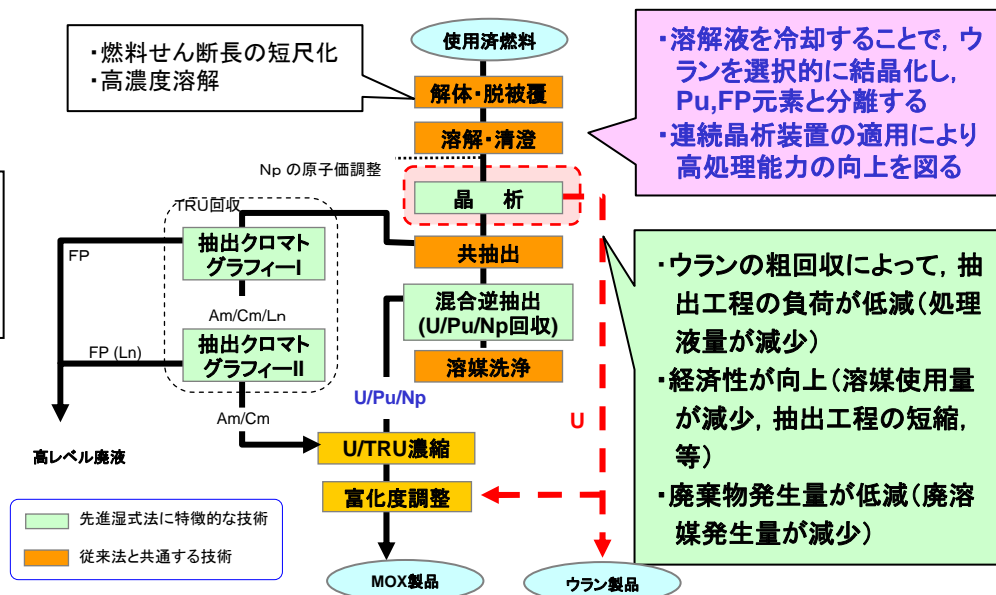
- 所定のDFと回収率にて回収ウランを安定して得られること。
- 晶析装置は実用プラント規模(200t/y)に対応する処理能力を見込めること。

技術開発の概要

- FP等のウラン結晶への同伴核種の挙動評価及びこれを踏まえた晶析・結晶洗浄精製手法及び操作条件最適化。
- 工学規模試験機による高処理能力, 安定性, 操作性に優れた連続晶析装置の実証。高濃度溶液・ウラン結晶のハンドリング技術等の実証。

主要開発課題

- Cs等、低除染元素に対するDFの向上方策の確立。
- 晶析装置の運転制御方策(計装制御技術等), 溶液及び結晶の安定的移送方策等の確立。
- 大型化を見通した内部構造、安全性検討(臨界安全等)。



U 結晶中における Pu の存在比

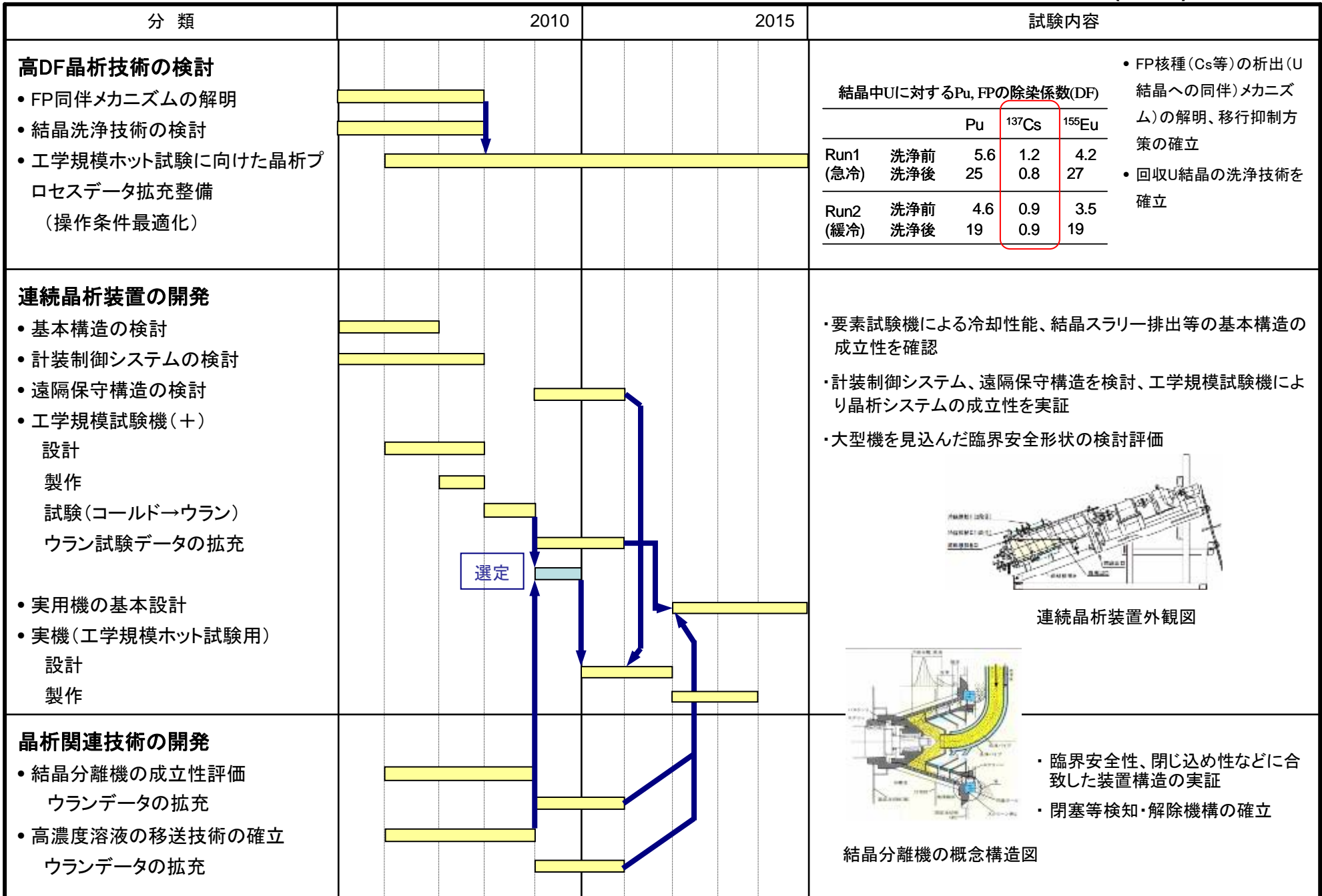
	U結晶の外観	Pu 比
Run1		100 : 0.3 (U) (Pu)
Run2		100 : 5 (U) (Pu)
Run3		100 : 1.5 (U) (Pu)

Pu(IV) のみの場合には母液に付着する
Pu(VI) の場合には結晶に取り込まれる



連続晶析装置概念(基礎試験装置)

③ 晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発(2/2)



④ U,Pu,Npを一括回収する高効率抽出システムの開発 (1/2)

技術の現状

- ホットラボスケール試験にてU-Pu-Np一括回収フローシートの有効性を確認。
- 工学規模遠心抽出器システム試験により基本性能を確認

要求される技術仕様

- 所定の回収率及び精製度を満足するU-Pu-Np一括回収フローシートの最適化。
- 大容量化・高耐久性遠心抽出器による、安定した抽出システムの実証

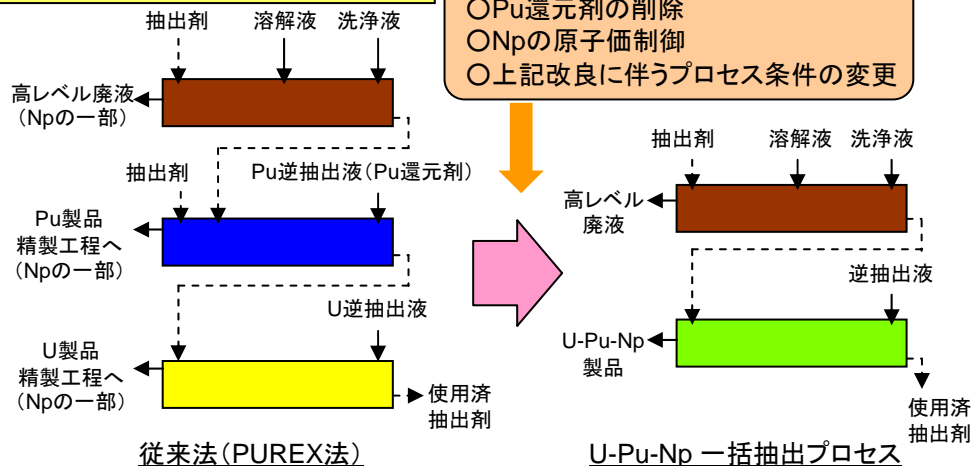
技術開発の概要

- プロセス試験によるU-Pu-Np一括回収フローシートの最適化 (Np 抽出挙動への亜硝酸濃度等の影響評価、各元素の低濃度領域におけるプロフィールデータ取得等)。
- 大容量遠心抽出器(40kg/h)の基本性能、新型駆動機構の高耐久性実証、工学規模ウラン試験によるシステムの成立性の確証(遠隔保守性、インライン計装技術等)。

主要開発課題

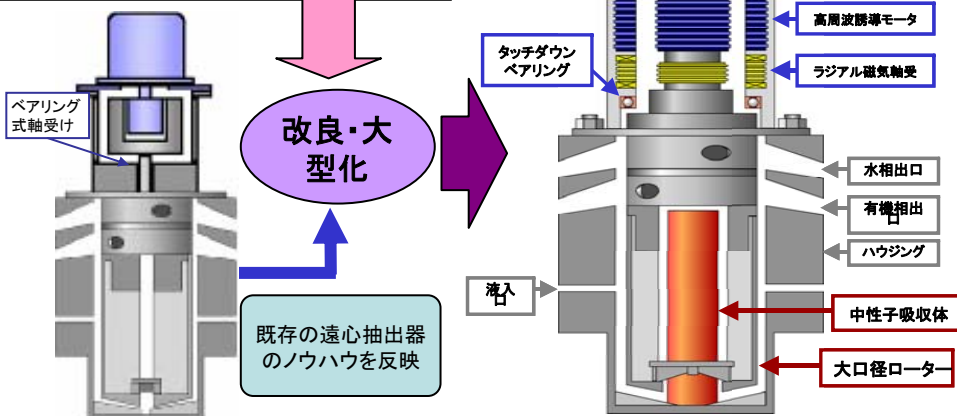
- ホット試験による抽出プロセスデータ拡充。解析コード改良。
- 円環型ローターの攪拌・分離機能の実証、新型駆動機構の各要素の信頼性確立
- 高速の分離システムに対応するインライン計装技術の確立

U,Pu,Npの一括回収プロセスの開発



大型プラント向け遠心抽出器の開発


- 磁気軸受による耐久性向上
- 中性子吸収体を内包した円環型新型ローターの開発



10kg/h 規模の遠心抽出器

40kg/h 規模の大容量遠心抽出器概念

④ U,Pu,Npを一括回収する高効率抽出システムの開発 (2/2)

分類	2010	2015	試験内容
<p>U,Pu, Np一括回収プロセスの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> • Np(U,Pu)抽出挙動の確認 • 一括回収プロセス条件の最適化 • 工学規模ホット試験に向けたデータ整備 • 抽出計算コードの改良 試験結果の反映、抽出条件最適化 • 工学規模ホット試験に向けた拡張 			<ul style="list-style-type: none"> • 溶解液や洗浄液中の硝酸濃度や亜硝酸濃度がNpの抽出挙動に及ぼす影響を評価 • 抽出器内の濃度プロファイルデータの蓄積及び上記評価と併せたプロセス条件の最適化 • 各供給液の流量変動が及ぼす影響評価(マルオペ条件下への対応)によるホット工学規模試験に向けたデータ整備
<p>遠心抽出器システムの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> • 工学規模システム試験 等 • 耐久性の確認 • インライン計装技術の開発 • システム制御性の確認 • 遠隔保守性の検討 • 大容量遠心抽出器(実用機) • 基本性能確認 • システム特性把握 • 遠隔保守構造検討 • 実機(工学規模ホット試験用) • 設計 • 製作 			<p>工学規模システム試験機によりシステム成立性を把握</p> <ul style="list-style-type: none"> • 遠心抽出システムの抽出・逆抽出・溶媒洗浄システムの特 性データの取得 • 抽出システムにおけるインライン計測システムを確立 • 異常時の抽出システム挙動の把握と対策の確立 <p>大容量遠心抽出器の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> • 円環型ロータ構造+中性子吸収材により、臨界安全性を確保した新型ロータの抽出性能を評価 • 磁気軸受け駆動部の 耐久性・耐放射線性能評価 • 多段システム性能を確認 • 遠隔保守構造を検討 <p>実機の基本設計を実施</p>  <p>工学規模システム試験機抽出ステージの外観</p>

⑤ 抽出クロマト法によるMA回収技術の開発 (1/2)

技術の現状

- 抽出クロマト法のMA回収工程への適用に関し、その基本性能を確認。

要求される技術仕様

- 所定の分離回収機能を有する安定した抽出剤・吸着材の選定、MA回収フローシート最適化。
- 大幅な廃液低減につながる抽出クロマト法の工学規模プロセス機器による成立性実証。実用規模の処理能力が見込めること。

技術開発の概要

- プロセス試験により、各種吸着材(抽出剤)を比較・評価(分離性能及び安全性)し、最適なものを選定、フローシート確立、MA及びFP元素の挙動確認。
- 工学規模(10kg/h)試験により、プロセス機器(分離塔、回収塔等)の遠隔運転性・計装機器等の成立性を確認。

主要開発課題

- 吸着材の安定性・安全性評価データの拡充
- 工学規模プロセス装置(10kg/h)の安定運転技術、吸着材等の遠隔保守(交換)技術の確立。

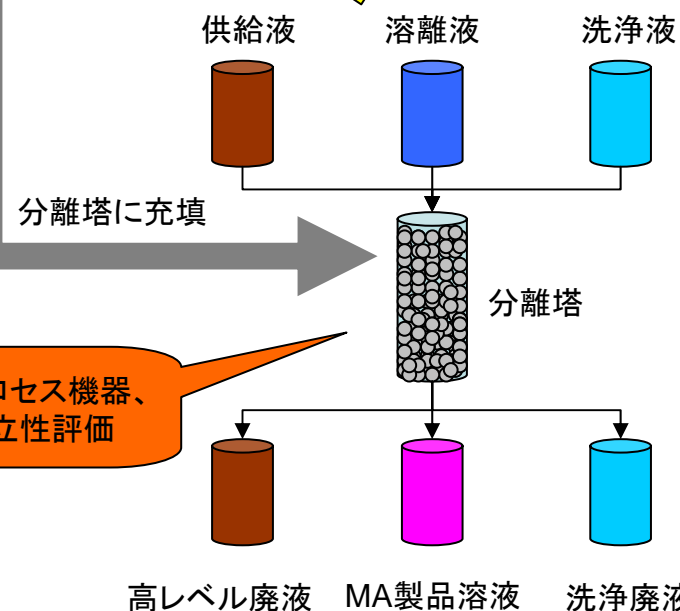
- 多孔質SiO₂ 粒子の表面にポリマー(スチレンジベニルベンゼン)を被覆(SiO₂-P)
- SiO₂-Pの表面に抽出剤(CMPO、TODGA、BTP等)を固定化



CMPO/SiO₂-P吸着材外観

抽出剤の比較・評価・選定

・フローシートの作成
・MA及びFP元素の挙動確認



・工学規模のプロセス機器、計装機器の成立性評価

⑤ 抽出クロマト法によるMA回収技術の開発 (2/2)

分類	2010	2015	試験内容
<p>抽出クロマト法によるMA回収プロセス開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 吸着材(抽出剤)分離性能比較評価 吸着材(抽出剤)安全性評価 使用済吸着材処理方法検討 回収フローシート構築 MA, FP元素挙動評価 回収フローシート改良 			<p>供給液、溶離液等</p> <p>・フローシート条件 (流量、試薬種類、濃度、運転温度等)</p> <p>・抽出剤種類 ・耐放射性 ・耐酸性 ・耐熱性 ・再生及び処理方法</p> <p>濃度</p> <p>MA FP</p> <p>溶離液量</p> <ul style="list-style-type: none"> 各種吸着材(抽出剤)の性能比較・評価 各種吸着材(抽出剤)の耐放射線性等、安全性評価 使用済吸着材の処理方法評価 上記各試験結果を基にした抽出剤の選定及びMA回収フローシート構築、高レベル廃液等を用いたMA、FP元素挙動評価 上記試験結果等を基にしたフローシート改良
<p>抽出クロマトプロセス機器開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 要素試験 カラム内流動性把握 安全性評価 耐久性評価 遠隔操作性検討 計装・制御法検討 工学規模プロセス機器試験(+) 設計 製作 試験(コールド→RI) RI試験データの拡充 実機(工学規模ホット試験用) 設計、製作 			<p>・分離性能(MA, FP元素挙動)</p> <p>供給液 溶離液 洗浄液</p> <p>抽出カラム</p> <p>高レベル廃液 MA含有製品 洗浄廃液</p> <ul style="list-style-type: none"> 種々の条件におけるカラム内流動性、熱的安全性、耐久性評価 吸着材交換等の遠隔操作性の確認 溶出液区画のための計装・制御方法評価 工学規模プロセス機器による各種安全性(臨界、熱的等)評価、運転性確認、異常時における発熱、気体発生等の挙動評価 実機的设计製作

⑥ 廃棄物低減化(廃液2極化)技術の開発 (1/2)

技術の現状

○オフガス処理工程等における金属イオン(主にNa)を含む試薬の使用に伴い、塩廃棄物が発生。

要求される技術仕様

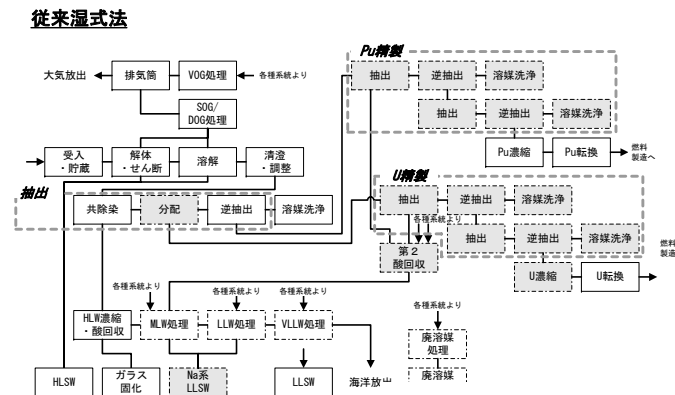
- 塩廃棄物の大幅削減。
- 廃液を高レベルと極低レベルに限定することによる廃液処理・処分の合理化。

技術開発の概要

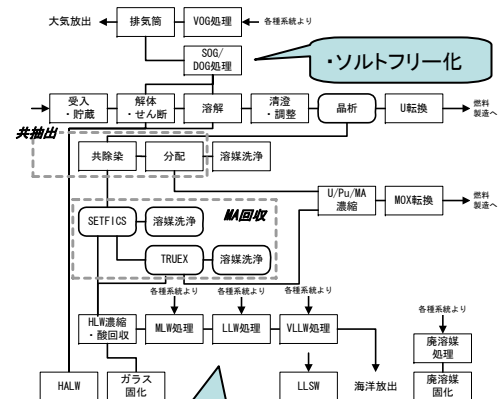
- オフガス処理工程等におけるソルトフリー化(濃縮妨害試薬の排除を含む)を、種々の試薬を対象にプロセス試験にて実証。
- 触媒等を利用した硝酸の分解技術について、その適用性を確認。
- ソルトフリープロセス条件に対応した工学規模装置の実証。

主要開発課題

○ソルトフリー化に伴う濃縮処理高効率化に向けた濃縮操作条件最適化及び機器開発。



先進湿式リファレンスシステム (Advanced Wet Reference System)



HLW : 高レベル放射性廃液
 MLW : 中レベル放射性廃液
 LLW : 低レベル放射性廃液
 VLLW : 極低レベル放射性廃液
 HLW : 高レベル放射性固体廃棄物
 LLSW : 低レベル放射性固体廃棄物
 SOG : せん断オフガス
 DOG : 溶解オフガス
 VOG : 槽類オフガス

・余剰硝酸の低減・分解

・主工程及び周辺工程のソルトフリー化(金属イオンを含む試薬の排除)及び濃縮妨害試薬の排除による濃縮処理の高効率化

⑥ 廃棄物低減化(廃液2極化)技術の開発 (2/2)

分類	2010	2015	試験内容
<p>ソルトフリープロセス技術開発</p> <ul style="list-style-type: none"> • 周辺工程におけるソルトフリー化検討 • 濃縮妨害試薬排除検討 • 硝酸分解技術検討 			<p>試験内容</p> <ul style="list-style-type: none"> • 水スクラブ等による洗浄効率評価 • 自己反応性物質の代替検討 (分析試薬、除染試薬、消泡剤等を対象) • 触媒等を利用した硝酸分解技術評価
<p>ソルトフリー機器開発</p> <p>1) ソルトフリーオフガス洗浄装置</p> <ul style="list-style-type: none"> • 要素試験 • モックアップ装置 • 実機設計・製作 <p>2) 硝酸分解装置</p> <ul style="list-style-type: none"> • 要素試験 • モックアップ装置 • 実機設計・製作 			<p>(オフガス洗浄装置)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 要素機・モックアップ機による洗浄性能の確認 • 実機設計・製作 <p>オフガス洗浄装置</p> <p>(硝酸分解装置)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 要素機による基本構造(触媒形状、電極配置構造)の確認 • モックアップ試験機による分解性能、耐久性の確認 • 実機設計・製作 <p>硝酸分解装置</p>

⑦ 脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発(1/2)

技術の現状

- 所定のPu富化度調整精度の達成見通しを得た。
- MOXへの転換工程において、ビーカスケールでの転動造粒試験を行い、流動性を改質してペレット成型ダイスへ円滑に充てんできることを確認した。

要求される技術仕様

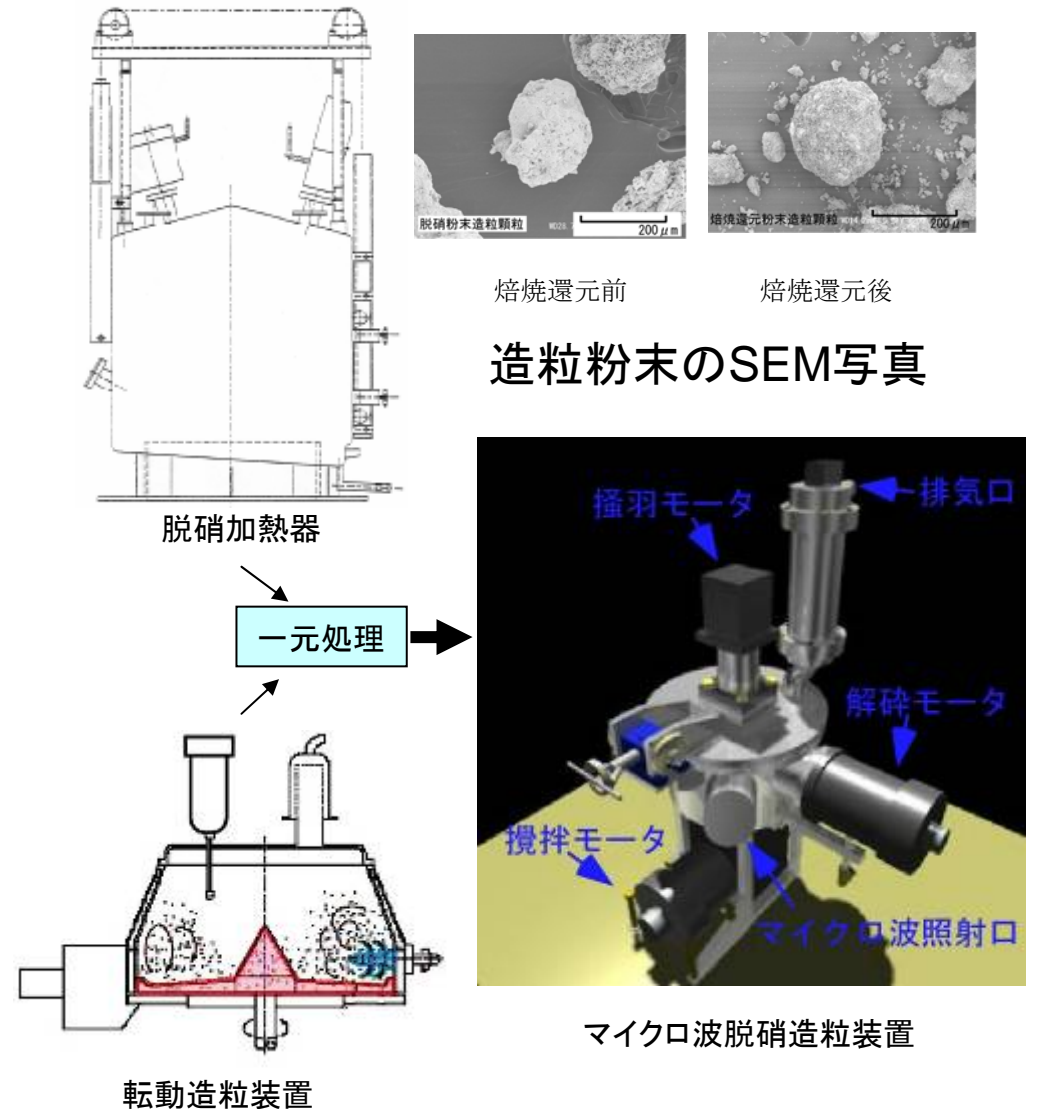
- 流動性の良い造粒粉末を安定して調製できること。
- 転換工程で得られる粉末の流動性を成型ダイスへ直接充てんできるものとし、従来実施していた転換工程後の粉末混合工程、造粒工程を削減

技術開発の概要

- 脱硝加熱器などの転換装置に造粒機能を組み込み、転換工程で流動性の良い顆粒粉末を直接得られる技術を開発する。

今後の課題

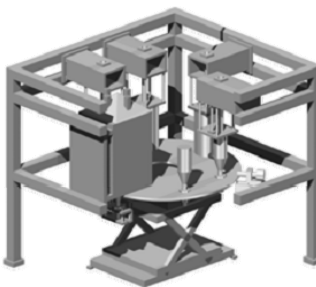
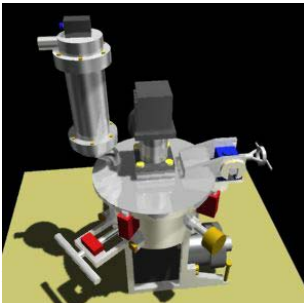
- プロセスの工学規模成立性評価
- 遠隔保守型脱硝転換造粒装置(量産型)の開発。



焙焼還元前 焙焼還元後
造粒粉末のSEM写真

マイクロ波脱硝造粒装置

⑦ 脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発(2/2)

分類	2010	2015	実施内容
<p>原料粉末調整プロセスの開発 (1)Pu富化度調整・転換・造粒プロセスの開発</p> <p>(2)プロセスの最適化</p>	<p>小規模試験設備整備</p> <p>製造性評価試験</p>	<p>品質向上試験</p> <p>条件最適化試験</p>	<ul style="list-style-type: none"> 再処理製品硝酸溶液を酸化物に転換する工程において、ペレット成型に適した流動性を有する粉末を得るプロセス試験 溶液混合段階でPuの濃度をに所定の濃度範囲に調整する技術の確認 得られる原料粉末を評価し、本プロセスの工学規模での成立性に見通しを得る。 造粒ステップの最適化 製造性評価(品質、処理時間など) MA/FPの影響評価 <p>・原料粉末調整工程一連のプロセスの最適化を図る。</p>
<p>遠隔保守量産技術開発 (1)量産設備採用プロセスの選定</p> <p>(2)遠隔保守対応設備開発</p>	<p>プロセス選定試験</p> <p>選定</p> <p>遠隔保守対応装置開発</p>	<p>工学規模ホット試験設備製作の一部として、遠隔対応量産設備の設計製作</p>	<ul style="list-style-type: none"> 量産用円筒型脱硝容器が有する課題解決及び浅皿型脱硝容器の大型化のための開発試験を実施する。 上記プロセス開発試験成果を含め、脱硝転換焙焼還元及び造粒プロセスの組合せに最適な方式を選定する。 装置のモジュール化を図ることにより、遠隔保守可能な脱硝転換・造粒装置及びPu富化度調整装置を開発する。 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p>左図: 円筒型脱硝容器採用脱硝転換焙焼還元装置 右図: 転動造粒一体型脱硝転換装置(小規模試験機)</p>

⑧ ダイ潤滑成型技術の開発(1/2)

技術の現状

- ダイ潤滑機構を組み込んだ6連パンチレシプロプレス機を用いた模擬粉末 (Mo) の成型試験を行い、現行法(潤滑剤添加混合法)と同等の品質のペレットを成型できることを確認したが、MOX粉末による確認が必要である。
- 手作業でのダイ潤滑により、流動性を改良したMOX粉末を用いた成型試験を行い、現行法(潤滑剤添加混合法)と同等の品質のペレットを成型できることを確認した。

要求される技術仕様

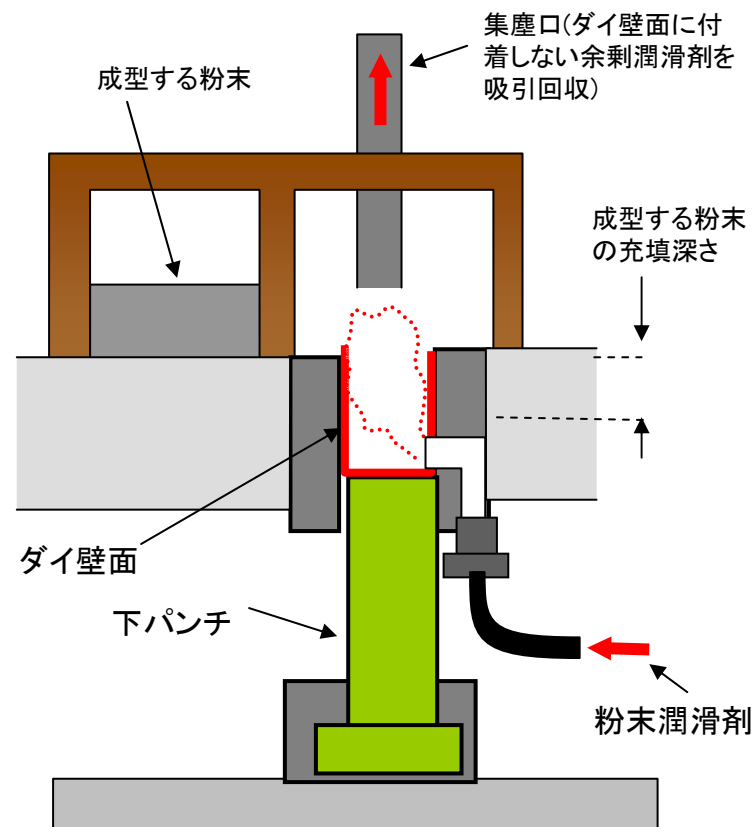
- 保守性に配慮したMOX用ダイ潤滑成型機的设计・製作。
- 潤滑剤添加混合工程、予備焼結工程、脱ガス工程の3つが削減できること。

技術開発の概要

- 小規模のMOX用ダイ潤滑成型機(レシプロプレス)を設計・製作し、MOX粉末、MA含有MOX粉末でのダイ潤滑成型の最適運転条件の把握と安定運転できることを確認する。

今後の課題

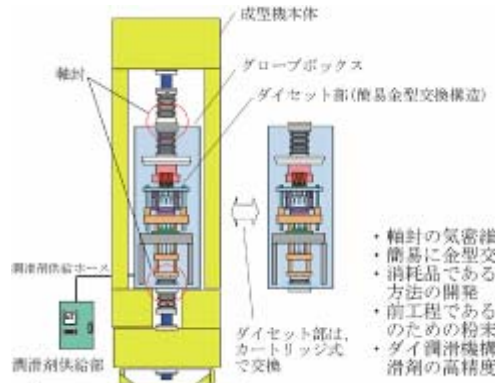
- プロセスの工学規模成立性評価
- 遠隔保守対応型ダイ潤滑成型装置(量産型)の開発



粉末潤滑剤(エアゾル状)をダイ下方から噴霧してダイ壁面に塗布する

実証していくダイ潤滑機構

⑧ ダイ潤滑成型技術の開発(2/2)

分類	2010	2015	実施内容
ダイ潤滑成型プロセスの開発	<p>小規模試験設備整備</p> <p>製造性評価試験</p> <p>品質向上試験</p> <p>選定</p>	<p>条件最適化試験</p>	<ul style="list-style-type: none"> 流動性を改良した原料粉末を用い、ダイ潤滑成型機を用いてペレット成型試験を実施し、潤滑剤添加混合工程、予備焼結工程、脱ガス工程の3つが削減できることを確認する。 成型体の品質評価 製造時間の評価 <p>・成型条件の最適化を図る。</p> 
遠隔保守量産技術開発 ・遠隔保守対応量産設備開発	<p>→開発したダイ潤滑機構を含めた全体システムとまとめ</p>	<p>ホット工学試験設備製作の一部として、遠隔対応量産設備の設計製作</p>	<ul style="list-style-type: none"> 設備のモジュール化による遠隔保守可能な量産対応のダイ潤滑成型装置の開発

⑨ 焼結・O/M調整技術の開発(1/2)

技術の現状

- 1700°C以下の焼結温度で高密度ペレットを得るために雰囲気ガス中の酸素分圧を高めて焼結しているが、ヒータ材、リフレクタ材の酸化による劣化の加速が懸念される。
- 将来的な最適化技術開発課題として、焼結炉・O/M調整炉の一体化及び低O/M調整に際し最高温度から室温までの急冷処理等の開発が必要である。

要求される技術仕様

- 高燃焼度用MA燃料ペレット(低O/M、高密度)の実証。
- 保守性に配慮したO/M調整・焼結炉の設計・製作。
- ペレット密度、O/M値がリアルタイムに測定できる炉。

技術開発の概要

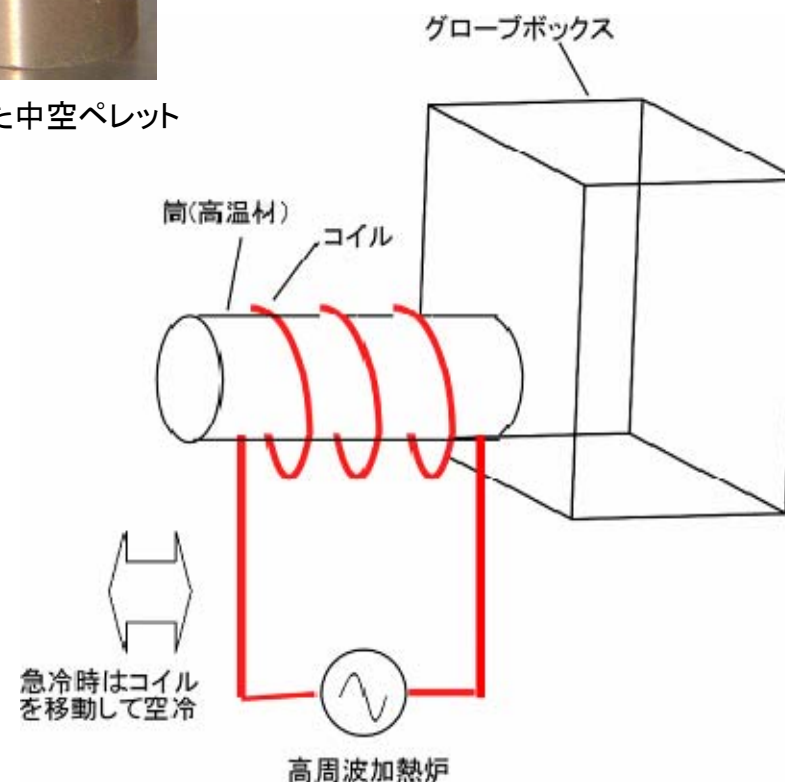
- MOXペレット、MA/FP含有MOXペレットの小規模焼結試験を実施し、品質を評価する。
- 保守性を配慮したO/M調整・焼結炉の熱処理方式などの調査を行い、選定した方式に基づき設計・製作し、ペレットの製造試験及び量産型の炉の開発を行う。

今後の課題

- 熱処理条件の最適化
- 遠隔保守型O/M調整・焼結炉(量産型)の開発。



焼結した中空ペレット



O/M 調整・焼結炉の概念

⑨ 焼結・O/M調整技術の開発(2/2)

分類	2010	2015	実施内容
焼結・O/M調整プロセスの開発			<ul style="list-style-type: none"> 原料粉末やペレット成型を評価するための焼結、O/M調整試験を実施する。 小規模の焼結・O/M調整設備を整備し、ペレットの焼結・O/M調整条件の最適化を図る。 <ul style="list-style-type: none"> 焼結体の品質評価 製造時間の評価 MA/FPの影響評価 成型条件の最適化を図る。
遠隔保守量産技術開発 ・遠隔保守対応設備開発			<ul style="list-style-type: none"> 基本構成モジュール化による遠隔保守可能な遠隔対応の炉の開発 上記、焼結-O/M一体型炉技術開発成果を評価し、方式を選定し、設備の最適化を図る。

⑩ 燃料基礎物性研究(1/3)

技術の現状

○基礎物性データが十分に整備されていないため、燃料設計上のマイナーアクチド元素の影響が精度良く評価できない。

要求される技術仕様

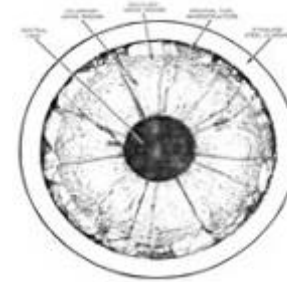
○マイナーアクチド元素を含むMOX燃料の照射挙動を精度良く評価でき、合理的、経済的な燃料設計が可能なこと。

技術開発の概要

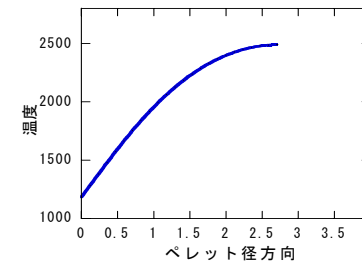
○燃料設計に必要とする基礎物性データについて実験及び理論的に整備し、モデル化を行う。得られた物性モデルを用いて挙動解析コードを開発する。

今後の課題

○照射実績が無い広範囲の燃料組成、照射条件でも評価可能となるよう、理論的に裏づけのある挙動解析コードを開発する。

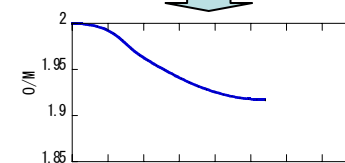


照射済燃料の断面

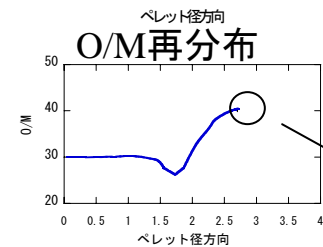


・熱伝導率

ペレット内温度分布



・酸素ポテンシャル
・熱拡散



・拡散係数
・蒸気圧

中心部の組成の融点

Pu再分布

許容線出力の決定

⑩ 燃料基礎物性研究 (2/3)

技術の現状

○製造条件からO/M、密度、寸法などの燃料仕様をシミュレーションできる技術は無く、経験的な手法により製造条件を決定している。

要求される技術仕様

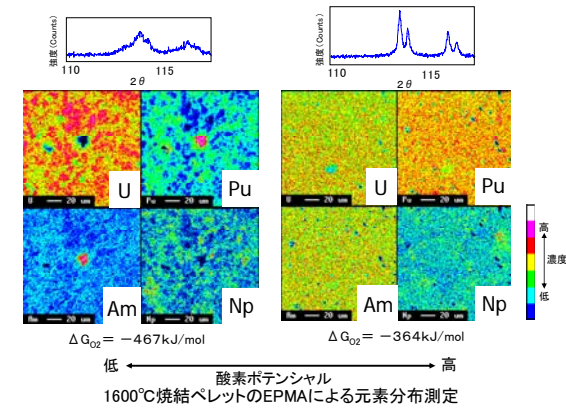
○グリーンペレット特性及び焼結条件と製造したペレットの微細組織、O/M、密度、寸法、均質性を評価することによって効率的、経済的な燃料製造技術を開発する。

技術開発の概要

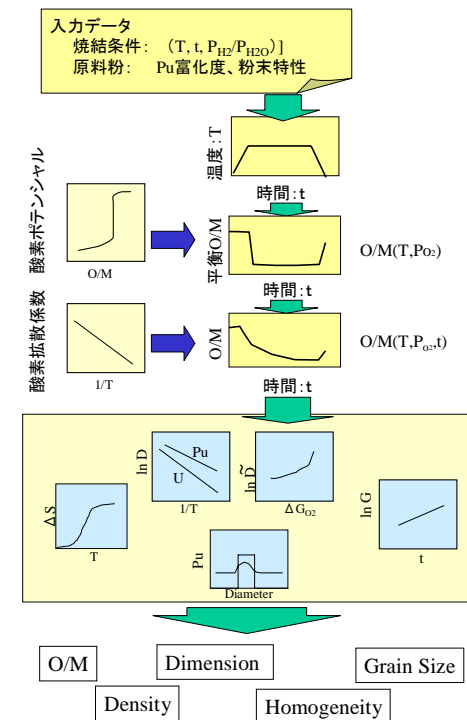
○熱処理中のペレット内の様々な変化を温度、時間、雰囲気を開数として速度論的評価を可能とするため、基礎物性データを幅広く取得する。

今後の課題

○グリーンペレットから焼結が進む過程と焼結が進んだ過程の挙動を分けてデータ取得及びモデル化を行い、基礎物性データと合わせて体系化する。



熱処理条件によって均質性が大きく異なる



焼結挙動解析手法の概念図

⑩ 燃料基礎物性研究 (3/3)

分類	2010	2015	実施内容
<p>基礎物性と燃料設計コードの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> • 実験的研究 • 理論研究 • 設計・挙動コードの開発 	<p>物性データ測定</p> <hr style="border: 1px solid black;"/> <p>装置製作</p> <hr style="border: 1px solid black;"/> <p>計算化学による物性データ予測 手法の開発</p> <hr style="border: 1px solid black;"/> <p>照射データ評価/挙動解析コードの開発</p> <hr style="border: 1px solid black;"/>		<ul style="list-style-type: none"> • 融点、熱伝導率、拡散係数などの物性値を評価する。 • 蒸気圧測定装置を整備し、蒸気圧の測定を行う。 • 計算化学に基づく物性データ評価技術を確立する。 • MAを含有したMOX燃料の挙動解析コードを、取得したデータを用いて取得する。
<p>基礎物性と燃料製造</p> <ul style="list-style-type: none"> • 初期焼結挙動の評価 • O/M調整技術の評価 • 焼結挙動のモデル化 	<p>速度論的評価</p> <hr style="border: 1px solid black;"/> <p>装置製作</p> <hr style="border: 1px solid black;"/> <p>O/M変化の測定</p> <hr style="border: 1px solid black;"/> <p>焼結挙動モデルの作成</p> <hr style="border: 1px solid black;"/>		<ul style="list-style-type: none"> • 様々な挙動が混在する初期の焼結メカニズムについて、焼結速度を測定し、焼結挙動の速度論的評価を行う。 • 熱膨張計(ディラトメータ)を整備し、様々な雰囲気での焼結挙動を評価する。 • 熱処理中のO/M変化挙動、組織変化を評価する。 • 得られたデータをもとに焼結挙動解析コードを開発する。

⑪ セル内遠隔設備開発 (1/2)

技術の現状

- 低除染TRU燃料の製造は、遠隔運転のセル構造施設が必要となるが、JAEAプルトニウム燃料第三開発施設及び日本原燃(株)MOX燃料工場等既存の施設はグローブボックス設備であるため、完全な遠隔保守補修対応の設備にはなっていない。利用可能な技術としては、再処理施設、照射後燃料試験施設等の既存技術があるが、精密機械が多い製造設備の遠隔保守対応に開発課題が存在する。
- 量産対応のための分析、検査技術開発が必要である。
- 照射試験燃料ピンを数本製造可能。

要求される技術仕様

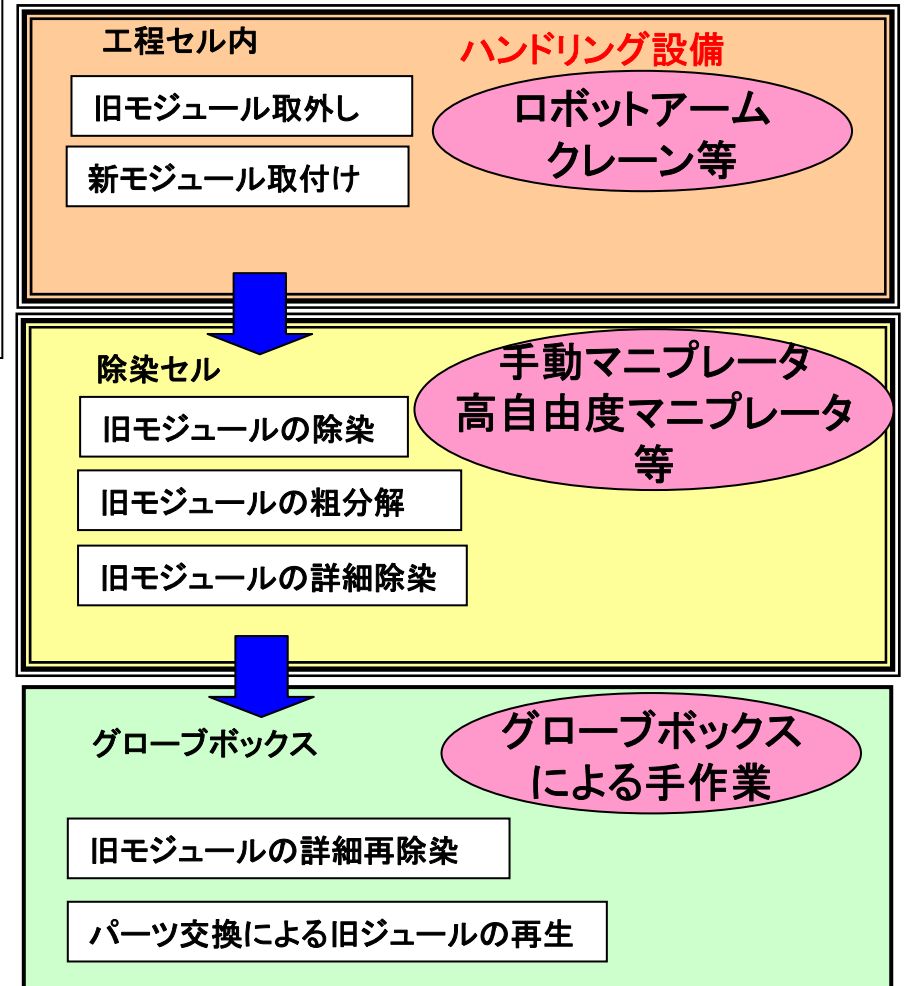
- セル内遠隔保守対応モジュール開発、モジュール交換に最適化したロボットアーム。故障モジュールを分解除染する高自由度マニプレータの開発。
- 量産対応のための粉末分析、ペレット検査技術開発。

技術開発の概要

- コールドモックアップ試験を中心に、製造設備のモジュール開発、モジュール開発に連動した遠隔ハンドリング機器開発。
- インライン粉末分析、ペレット検査迅速化技術開発。
- 量産型のODS端栓溶接機器、フェライト集合体部材等の開発

今後の課題

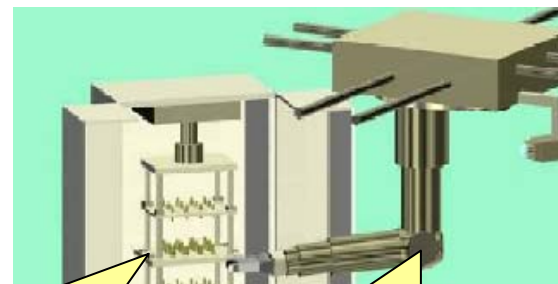
- 遠隔ハンドリング機器開発の実施、ホット試験施設による実証



遠隔による保守・補修の概念

⑪ セル内遠隔設備開発 (2/2)

項目	2010	2015	実施内容
1. 遠隔対応設備開発 ・成型設備	[Yellow bar from 2010 to mid-2010]		・成型設備を代表例としたモジュール化設備の開発、遠隔保守補修の共通システムの開発
・その他設備、全体システムとりまとめ	[Yellow bar from mid-2010 to end-2010]		・燃料要素加工設備、燃料要素検査設備、集合体組立設備のモジュール化設備の開発、全体システムとりまとめ
2. 遠隔ハンドリング設備開発	[Yellow bar from 2010 to mid-2010]		・遠隔ハンドリング設備開発、モジュール化設備との最適化、全体システムとりまとめ →各工程設備との最適化確認、調整、全体とりまとめ
3. 機器監視異常診断技術の開発	[Yellow bar from 2010 to mid-2010]		
4. 分析、検査迅速化技術開発	[Yellow bar from 2010 to mid-2010]		・音響センシング等による機器運転状況監視、異常診断技術を開発する。 ・ペレット検査の迅速化技術、粉末のインライン分析を開発する。その他工程における検査分析設備のシステム開発を行う。 →その他の検査、分析設備システムのとりまとめ
5. ODS被覆管燃料ピン集合体の量産技術開発	[Yellow bar from 2010 to end-2010]		



・各種センサーで故障を検知する。
・ロボットアームにより故障したモジュールを交換する。

・所定位置まで自動的に移動し、モジュール交換作業の所定動作を半自動で実施する。

遠隔保守概念(ペレット成型設備の例)

⑫ TRU燃料取扱い技術 (1/2)

評価の現状

- FS燃料集合体の温度評価についてはこれまでに、もんじゅ燃料でのモックアップ試験からの外挿、計算コードを用いた熱流動解析を行った。
- 2百数十本の被覆管と螺旋状に巻かれたラッピングワイヤで仕切られた流路は形状が複雑で、詳細なモデル化が難しく、今後の詳細評価が必要である。

要求される技術仕様

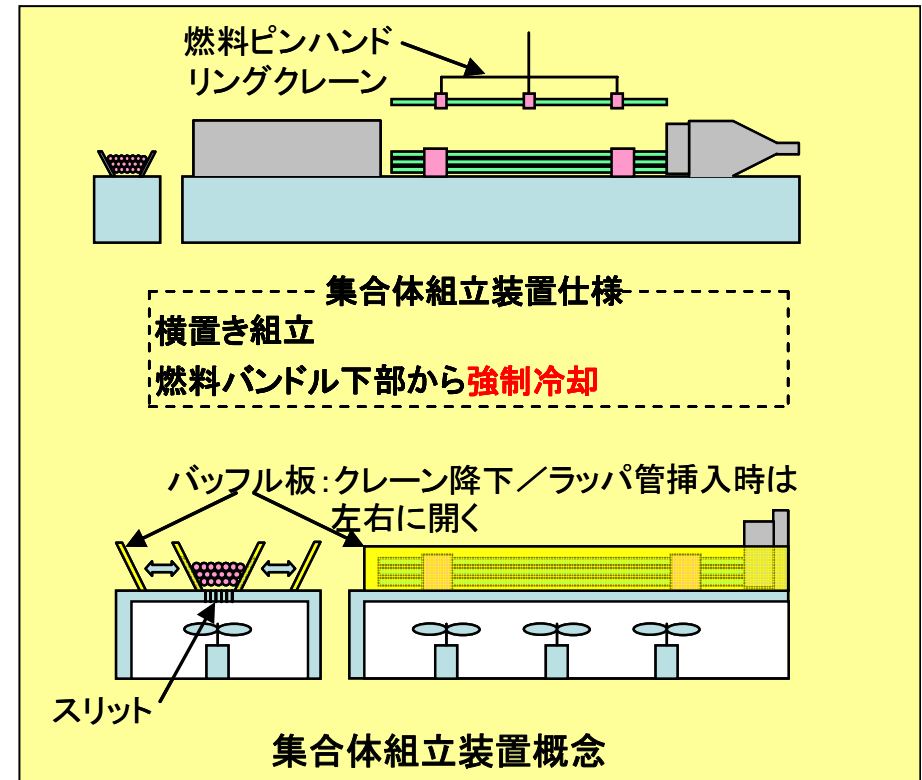
- 擬似体系での実測データによる計算モデルの構築。
- モックアップによる除熱機能の確認。

技術開発の概要

- 燃料集合体内流路の典型的な形状に対し詳細な流速分布や温度分布を計測できる試験機を製作し、試験結果から詳細なモデルを構築する。
- 集合体組立装置および燃料バンドルを模したコールドモックアップ試験装置を作成し、除熱効果を確認する。

今後の課題

- 燃料サイクルシナリオに応じて多様な発熱の燃料に対する、改良モデルによる温度分布評価。
- 高発熱燃料に対応した集合体組立装置の設計への反映。



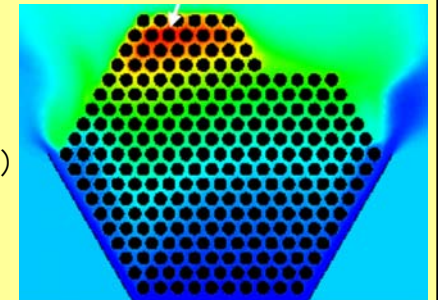
集合体組立時温度解析例

強制冷却、セル内気温: 25°C

集合体設計: フェーズ2最終設計

HM重量: 127.9kgHM(軸ブラ除く)

三次元熱流動解析コード
AQUA および Fluent 使用

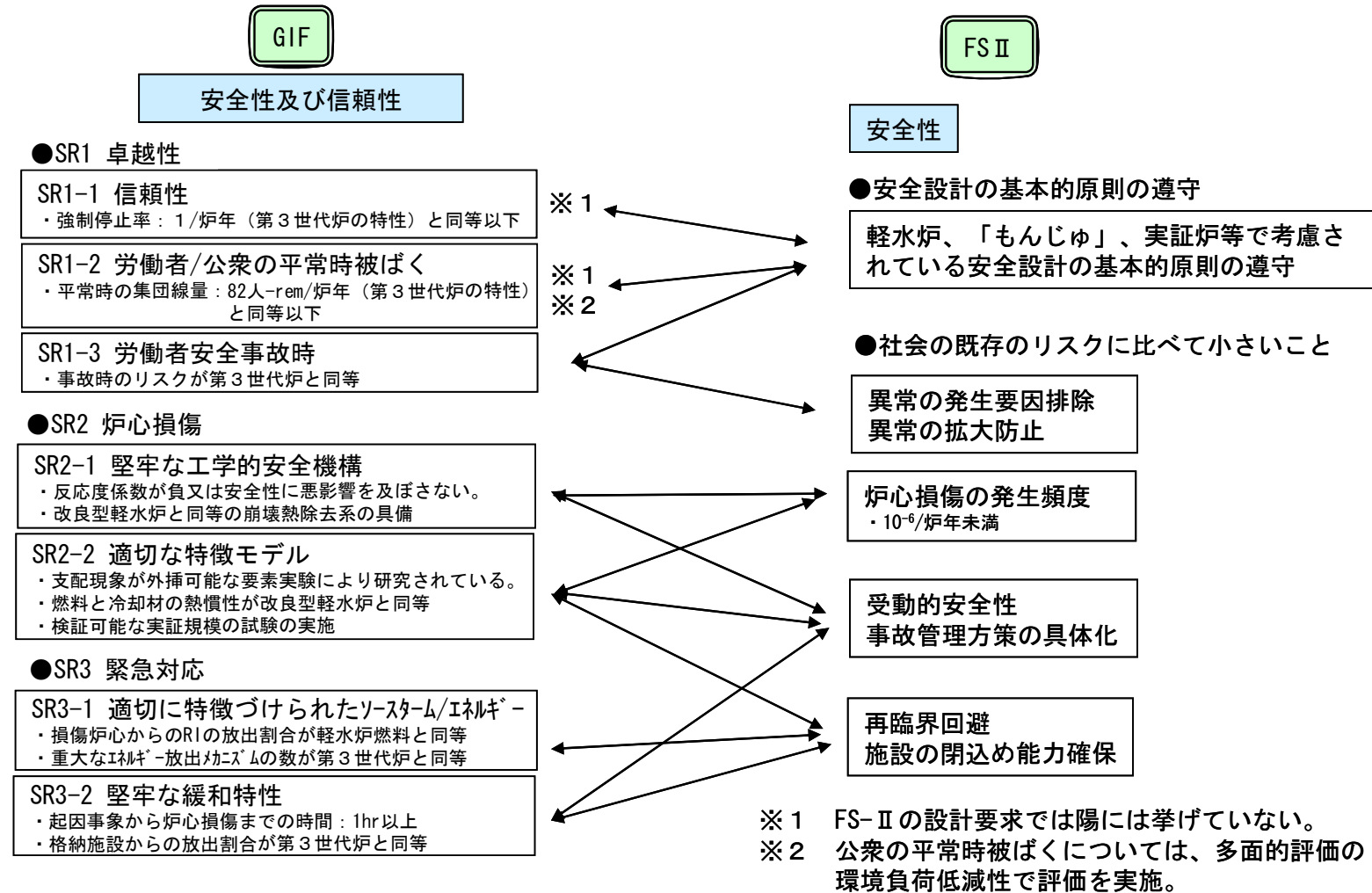


⑫ TRU燃料取扱い技術 (2/2)

分類	2010	2015	実施内容
<ul style="list-style-type: none"> ・熱流動シミュレータによる計算モデル開発 ・コールドモックアップ試験 	<div style="background-color: yellow; height: 15px; width: 100%;"></div>	<div style="background-color: yellow; height: 15px; width: 100%;"></div>	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体内流路の典型的な形状に対し詳細な流速分布や温度分布を計測できる試験機を製作し、試験結果から詳細なモデルを構築する。 ・集合体組立装置および燃料バンドルを模したコールドモックアップ試験装置を作成し、除熱効果を確認する。

GIFと実用化戦略調査研究の設計要求の比較

①設計要求レベルの比較【安全性】



* GIFの要求レベルとしては、下記報告書において5レベルで設定されている要求値の表からreference valueとされている第3レベルの値を示した。これは第3世代炉であるALWRの評価値に相当している。（出典：GIF-012-00 Generation IV Roadmap: Final Screening Evaluation Methodology Report）

②設計要求レベルの比較【経済性】

GIF

FS II

経済性

経済性

●EC-1 他エネルギー源のリサイクルコストより有利であること

・電力市場価格～\$32/MWhに比肩する

EC1-1 オーバーナイト建設費
・ALWRの建設費～\$1,500/kWに比肩する

EC1-2 生産コスト(運転費+燃料費)
・ALWRの生産コスト～\$15/MWh に比肩する

●EC-2 他エネルギープロジェクトと同程度の資本リスクであること ※

・ALWRの資本リスク\$1,800Mに比肩する

EC2-1 建設期間
・ABWRの建設期間48ヶ月に比肩する

※ FS-IIの設計要求では挙げていないが、別途、多面的評価の経済性で実施。

●将来の軽水炉の発電単価に比肩すること

・発電原価4円/kWh以下

・炉建設費(建中利子含む)
20万円/kWe
建設期間 46ヶ月

・燃料費削減
炉心燃料の平均焼度 15万MWd/t
全体平均6万MWd/t以上

・再処理・燃料製造費
0.8円/kWh

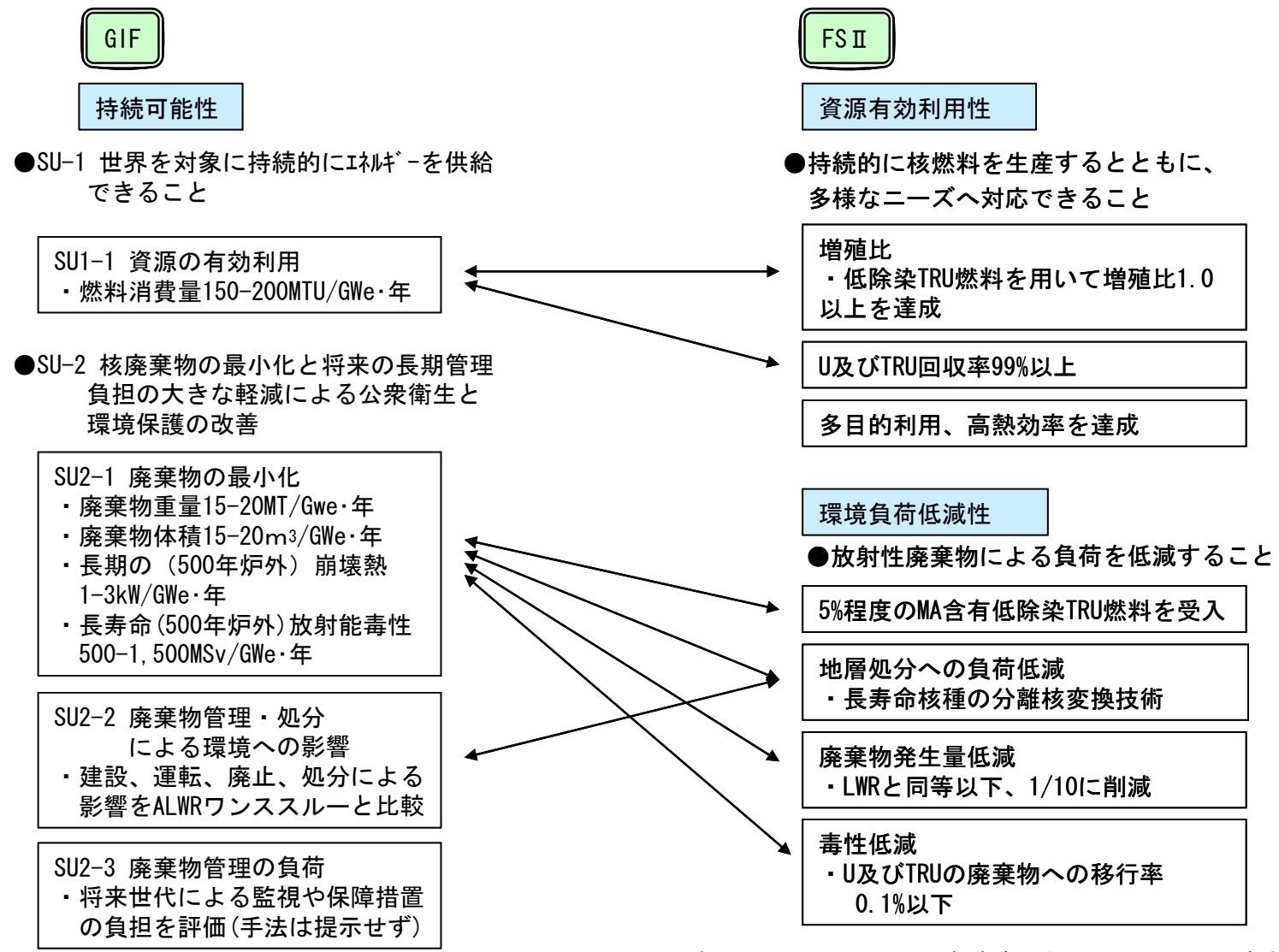
・処分費などを含む燃料サイクル費
1.1円/kWh

・運転費
連続運転期間 18カ月以上
稼働率 90%以上

・熱効率向上
出口温度、熱効率/所内負荷率

* GIFの要求レベルとしては、下記報告書において5レベルで設定されている要求値の表からreference valueとされている第3レベルの値を示した。これは第3世代炉であるALWRの評価値に相当している。(出典: GIF-012-00 Generation IV Roadmap: Final Screening Evaluation Methodology Report)

③設計要求レベルの比較【資源有効利用性・環境負荷低減性】



* GIFの要求レベルとしては、下記報告書において5レベルで設定されている要求値の表からreference valueとされている第3レベルの値を示した。これは第3世代炉であるALWRの評価値に相当している。(出典: GIF-012-00 Generation IV Roadmap: Final Screening Evaluation Methodology Report)

④設計要求レベルの比較【核拡散抵抗性】

GIF

核拡散抵抗性と核物質防護

- PR&PP-1 兵器利用物質の転用と未申告製造の容易性をライフサイクル全体で最小化、効果的なIAEA保障措置の実施促進

【分離された(核)物質】

・LWRワンスルーと比肩すること
(LEU燃料、天然ウラン、Thを含む燃料、強力な放射線障壁を持つHEU,Pu,Np燃料)

【使用済燃料の特性】

・LWRワンスルーと比肩すること
(燃焼度が5万MWd/MTHMより高いこと)

- PR&PP-2 兵器利用物質あるいは有害な放射性物質の盗取への脆弱性の最小化、テロや破壊行為に対する施設や輸送システムの脆弱性の最小化

【破壊行為に対する受動的な抵抗性】

・LWRワンスルーと比肩すること
(安全系に適した交流電源と外部冷却水源を用いた緊急冷却システムを有すること)

FS II

核拡散抵抗性

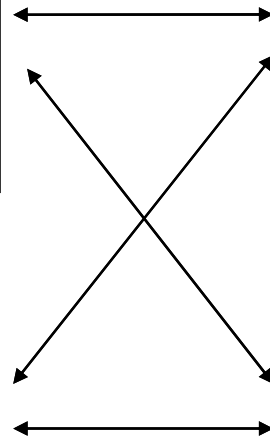
- 核物質防護及び保障措置への負荷軽減

(物質の魅力度)

・核物質防護、保障措置への対応を考慮した設計プルトニウムが単体の状態で存在しないこと

(難接近性)

・低除染TRU燃料を輸送・取扱い、高線量化により接近性を制限



* GIFの要求レベルとしては、下記報告書において5レベルで設定されている要求値の表からreference valueとされている第3レベルの値を示した。これは第3世代炉であるALWRの評価値に相当している。(出典：GIF-012-00 Generation IV Roadmap: Final Screening Evaluation Methodology Report)