



2015年までの研究開発計画

— 主概念：ナトリウム冷却炉 —

(独)日本原子力研究開発機構

2006年5月24日

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

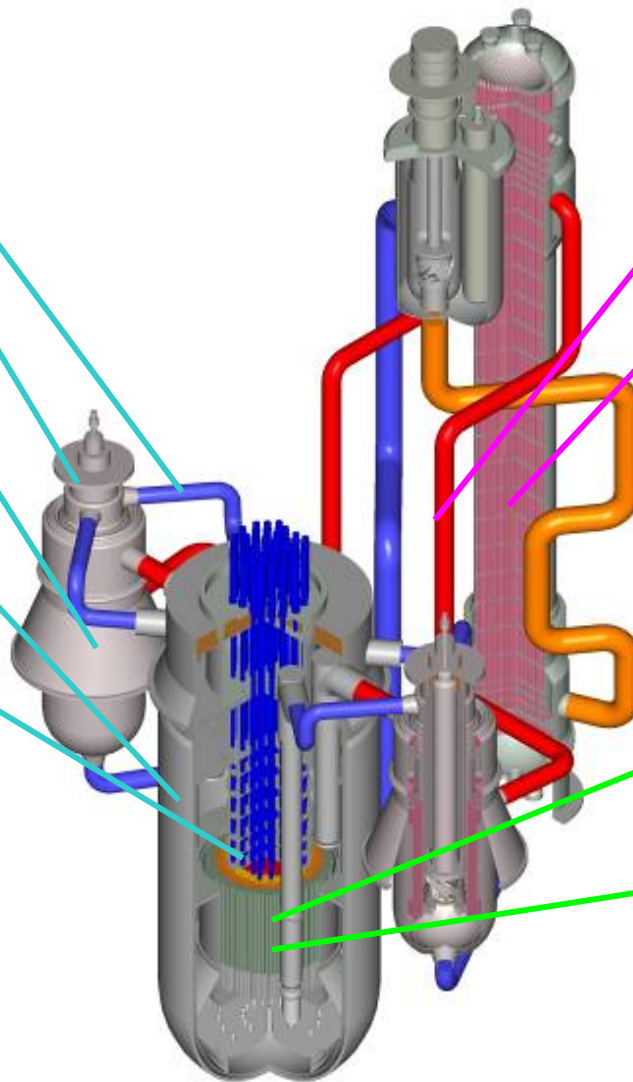
安全性向上に係る課題

○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				—	—		
	実証試験施設の概念構築		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		1	2	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・クリープ疲労強度、長時間延性・韌性、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		3	4	5	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・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		6	7	振動・伝熱管の磨耗量確認試験	入口プレナム流動試験	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		8	9	10	切り欠き型による熱衝撃評価試験(水、Na)	設計方針策定/適用性確認試験	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		11	12	13	除熱性能、交換機性能確認	ガス中落下試験 出入機、EVST内移送機能確認	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		13	14	SC造の技術開発	基準整備	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]		15	16	照射試験・照射後試験		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		17	18	漏洩検出器開発	2重配管検査・補修技術開発	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		19	20	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・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		21	22	23	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・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		23	24	25	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・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		25	26	27	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・S-FAIDUSの溶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		28	29	要素試験・特性試験	技術確認試験	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			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		30	31	「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

▼ 革新技術の決定

◆ 各課題のマイルストーン

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。


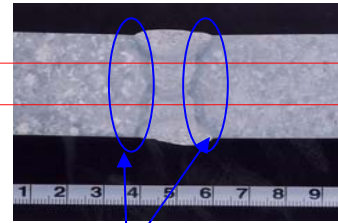
技術開発の概要

- 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	【管材・鍛造材】 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*	
	【板材】	ナトリウム環境効果試験*	
	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</p> <p>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。

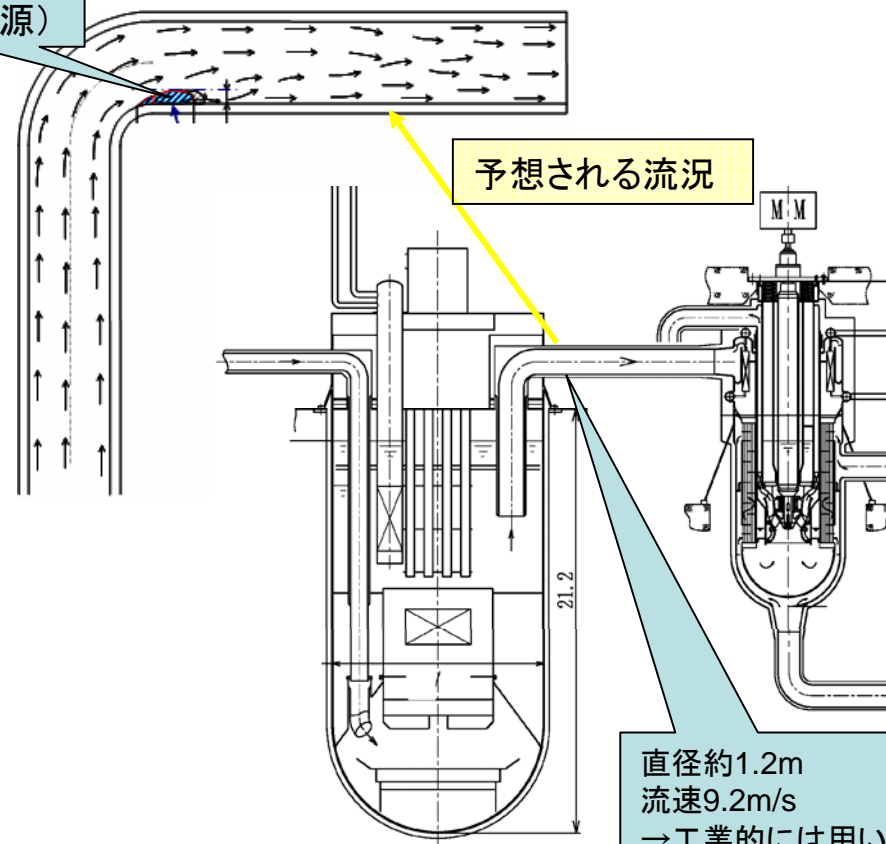
技術開発の概要

- 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。

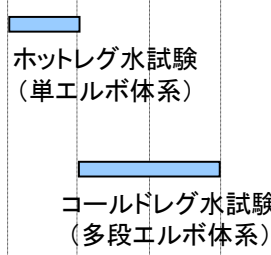
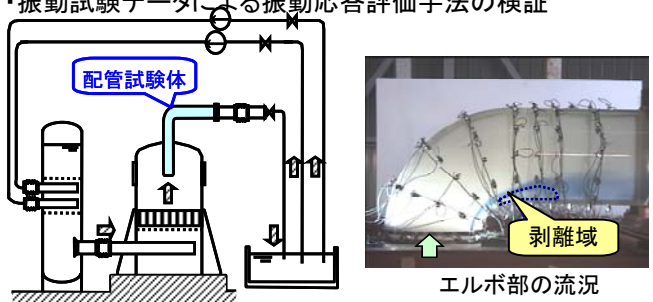
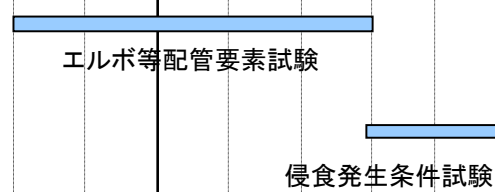
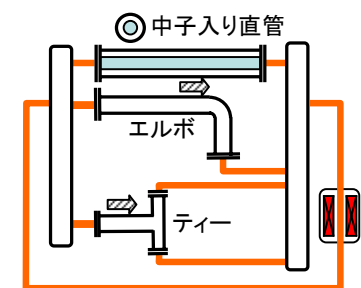
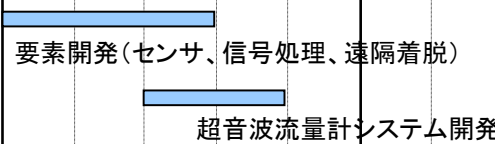

剥離域
(振動発生源)



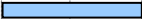
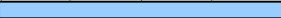
予想される流況

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	 高クロム鋼薄肉構造の製作試験		<ul 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	 電磁流動特性評価		<ul 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。

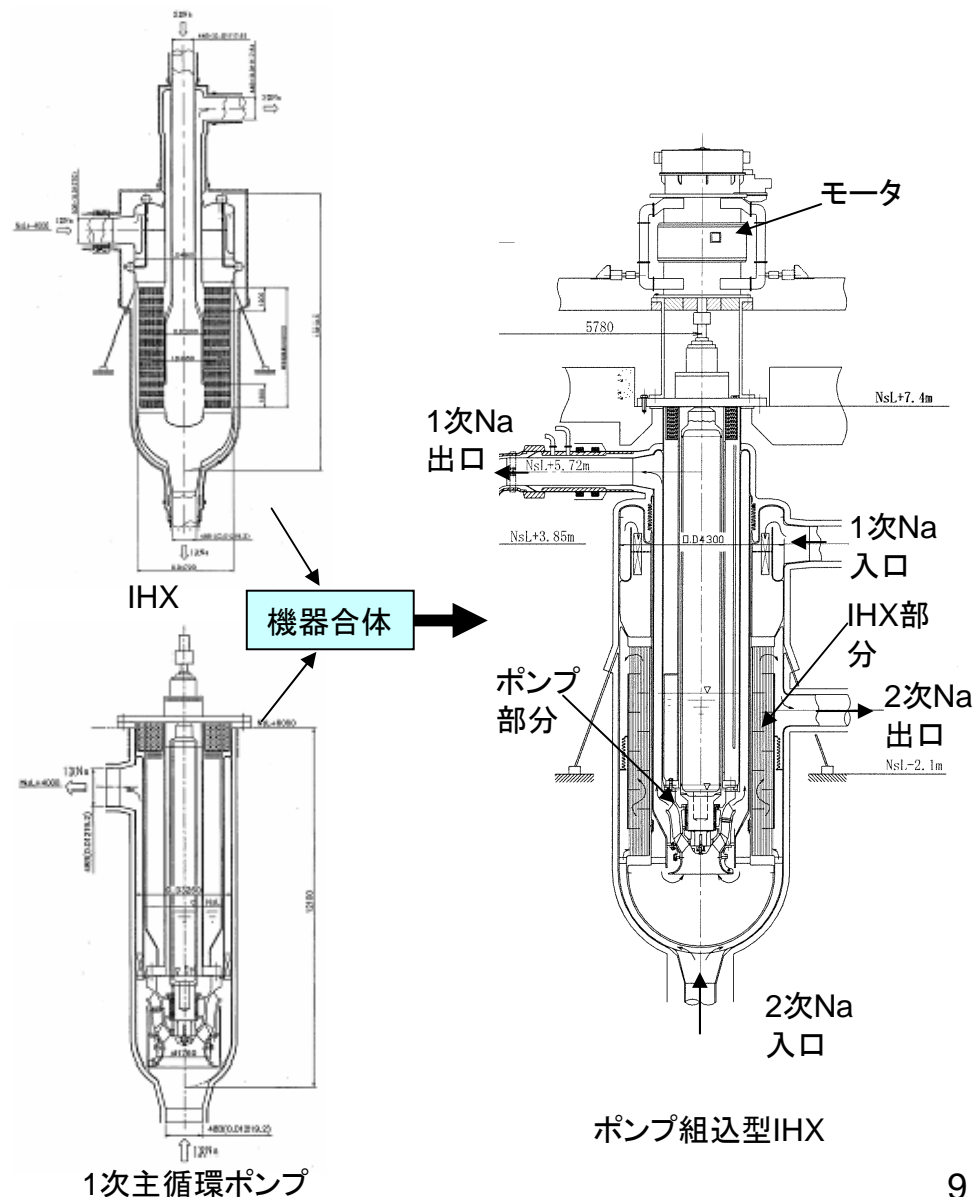
○ポンプの回転に伴う振動に熱交換器の伝熱管が耐える(伝熱管の磨耗量が規定値内に収まる)こと、また、原子炉からの流れが伝熱部に均等に流入する流動成立性があることを、解析及び実証試験により確認することが必要。

今後の課題


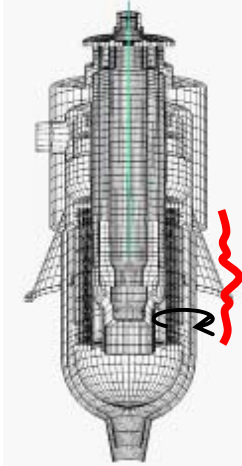


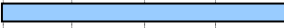

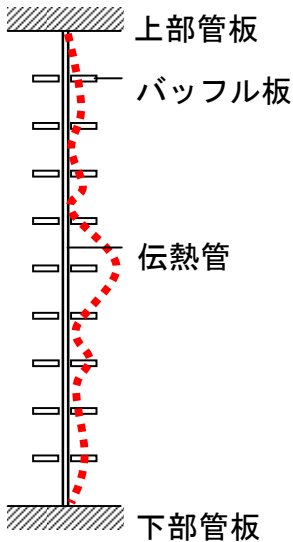
○現在までに、1/4スケールによる振動試験で伝達特性データを取得、解析モデルを構築。

○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。

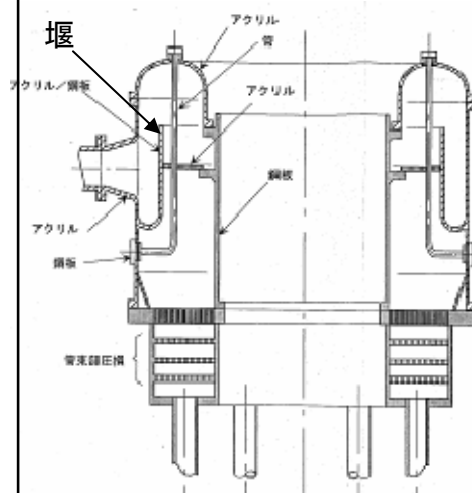
○「大型試験施設」で長軸ポンプの実証試験が必要



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

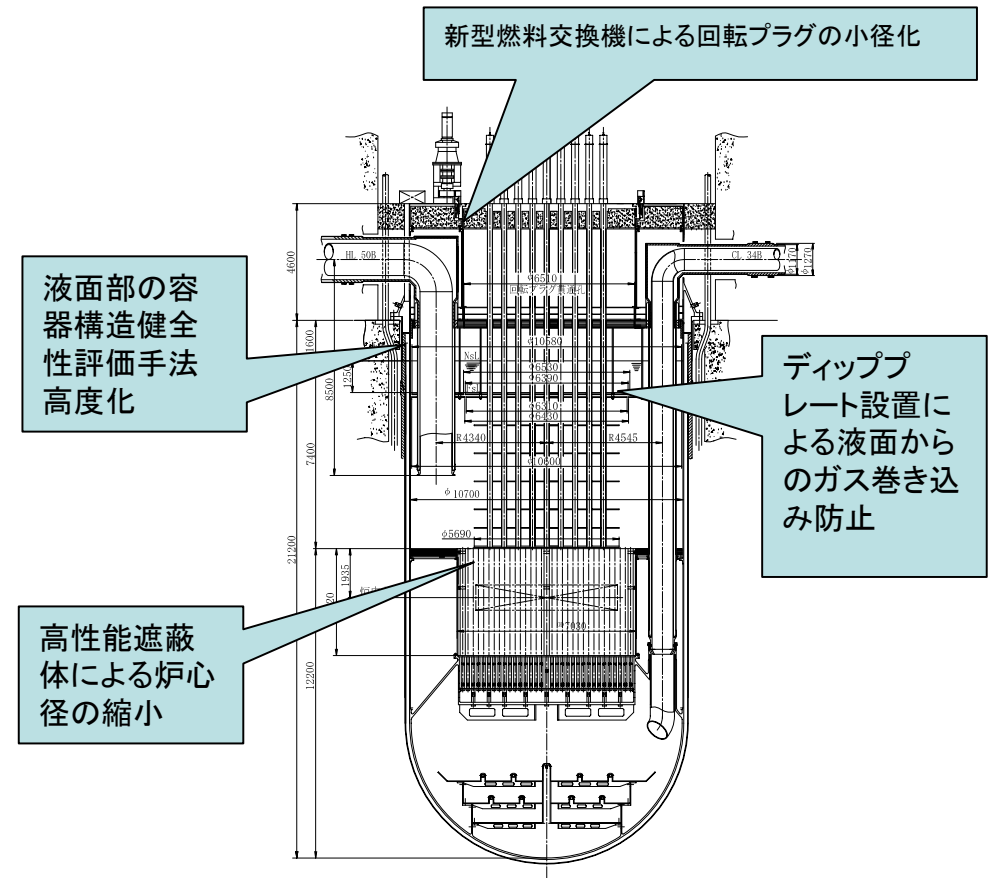
- 「もんじゅ」では、原子炉上部の燃料棒交換用機器が大きく、原子炉容器コンパクト化の障害となっている。
- また、原子炉容器をコンパクト化した場合、部分的に原子炉容器内のナトリウム流速が大きくなり、原子炉上部の気体を巻き込み原子炉内に気泡を発生させる等の悪影響が予測される。

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。

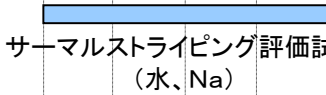
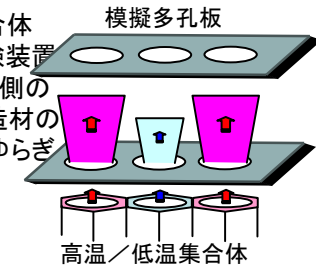
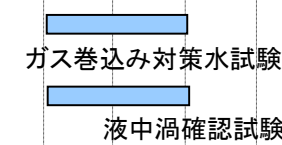
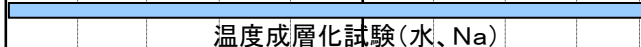

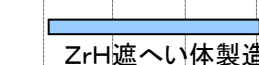
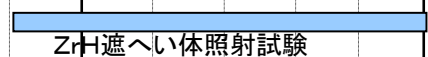
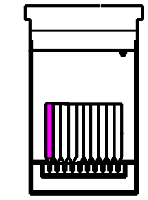
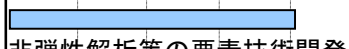
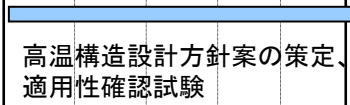
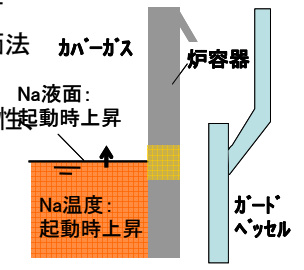
今後の課題

- 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。



原子炉容器コンパクト化を可能とする技術

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>炉容器 Na液面: Na温度: 起動時上昇 ガートベッセル</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									<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									<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に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									<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									<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。

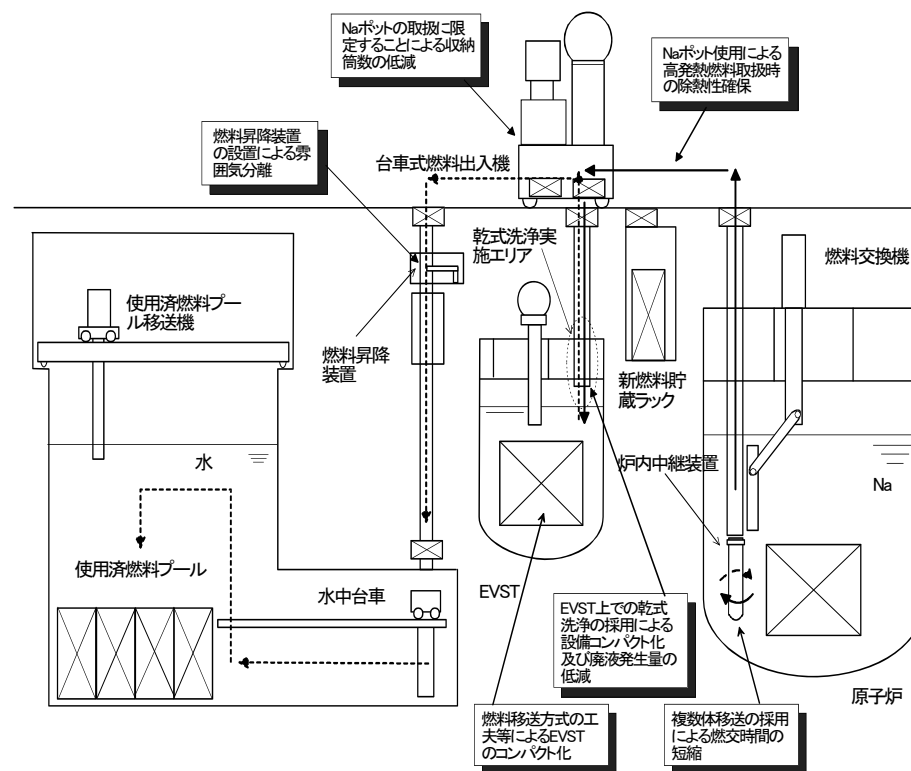
⑤システム簡素化のための燃料取扱系の開発(1/3)

「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

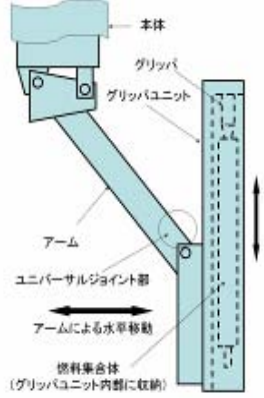
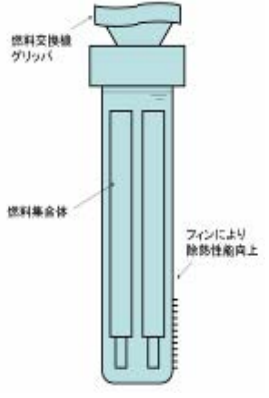
技術開発の概要

- 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


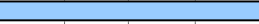

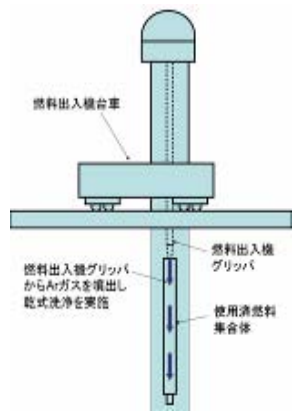
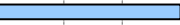



燃料取扱系全体システム

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

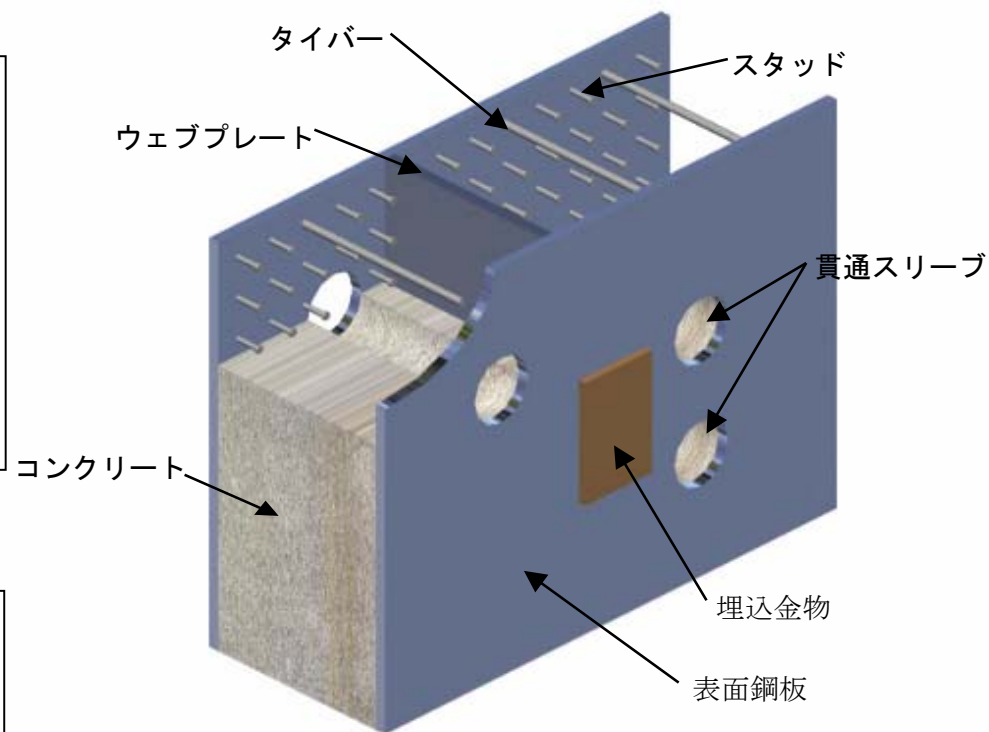
- 格納容器は従来原子炉と同じ鋼製円筒型であり容積、物量とも大きい
- 建設工期が長い

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)

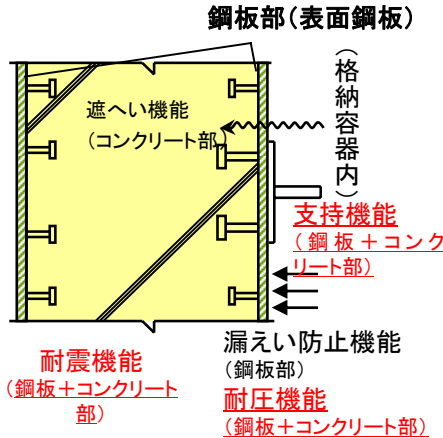
今後の課題

- 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>解析手法整備</p> <p>基準整備(評価委員会を含む)</p>	<p>全体特性把握試験</p>	 <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そ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 得られた基準からの試設計による物量削減および工期短縮建設基準を確認

⑦炉心燃料の開発 [照射試験] (1/2)

「もんじゅ」の現状

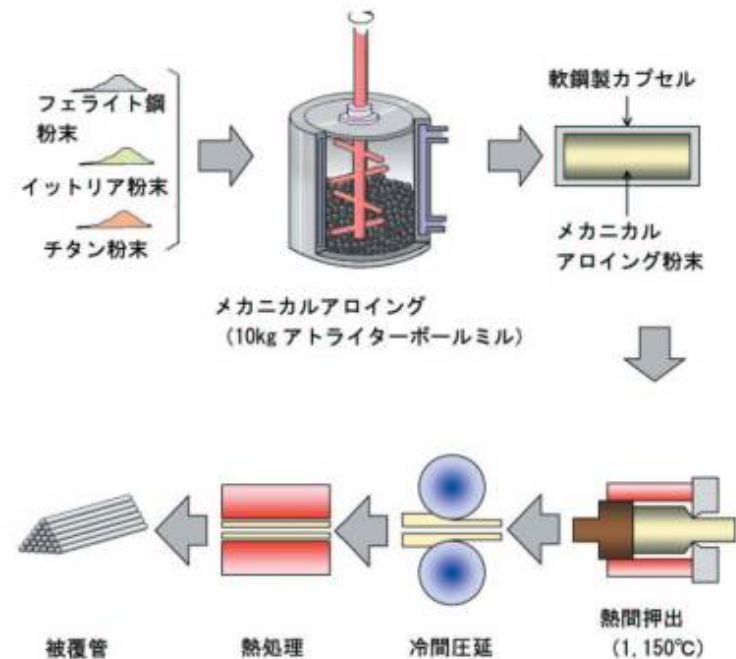
- 「もんじゅ」では、PNC316被覆管、(U,Pu)酸化物中実ペレット燃料、燃料ピン六角バンドル集合体を採用。
- 被覆管のスエリングによるピン外径増加が燃焼度の制約因子であり、炉心燃料の取出平均燃焼度設計値は8万MWd/t。MAは意図的には含有させていない。

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」, 目標: 250dpa, 25万MWd/t) 材料照射試験 (「常陽」) 炉外・炉内過渡試験 15万MWd/tバンドル照射試験 (「常陽」) 25万MWd/t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  <p>ODS燃料ピン</p>
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」) 低除染TRU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  <p>TRU燃料製造装置</p>
再臨界回避集合体研究開発	再臨界回避集合体構造開発 ダクト照射・集合体照射試験 (「常陽」)			<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

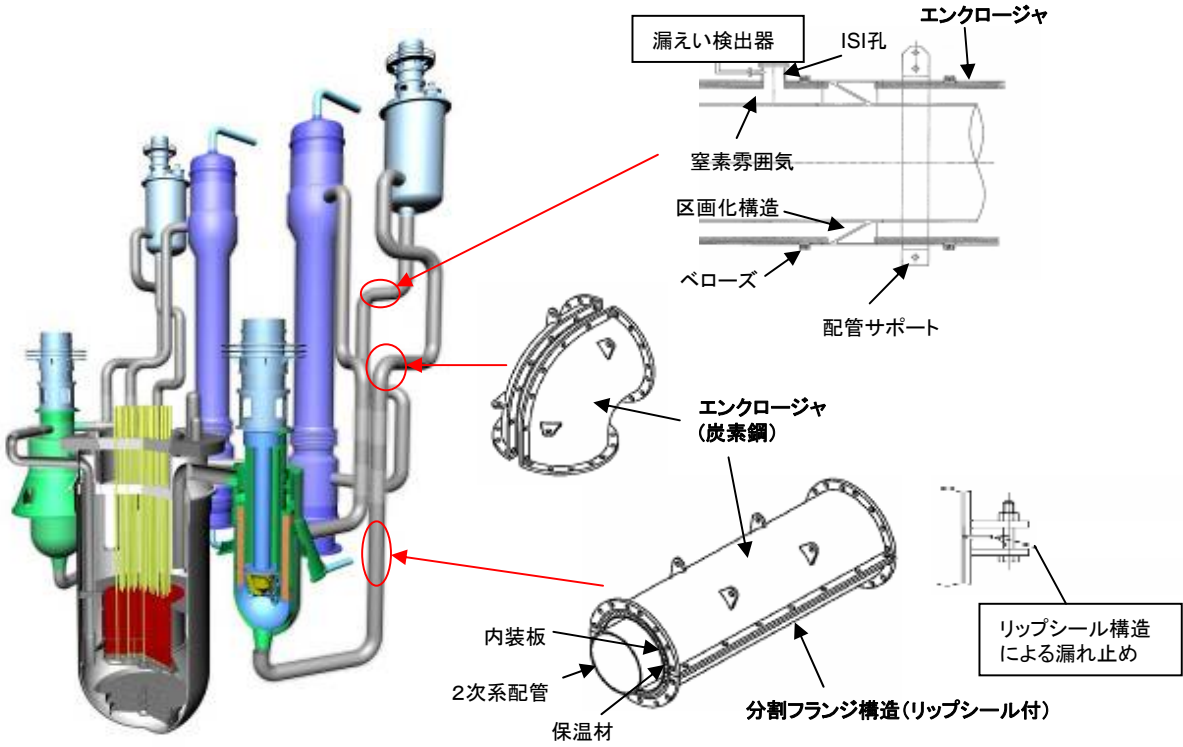
⑧配管2重化によるナトリウム漏洩対策強化(1/3)

「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。

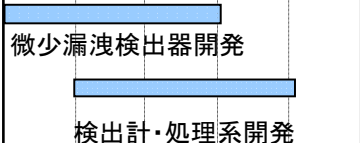

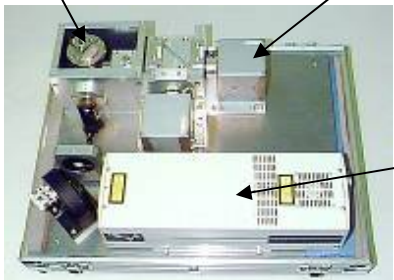
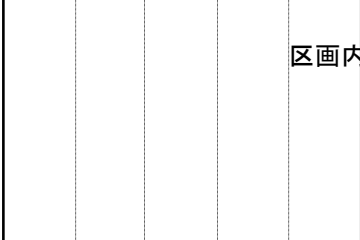
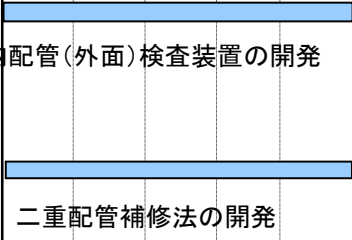
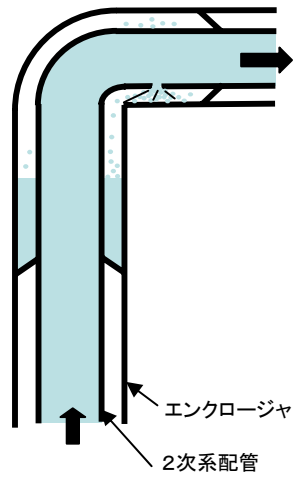
技術開発の概要

- 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、二重配管の隙間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えい量を限定でき、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。


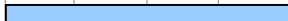


2次ナトリウム系の2重化概念

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>レーザー誘起ブレークダウン分光法 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	 <p data-bbox="730 403 1111 432">高クロム鋼 溶接部破壊靱性試験</p>  <p data-bbox="730 536 1155 564">高クロム鋼 溶接部LBB評価手法構築</p>		<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

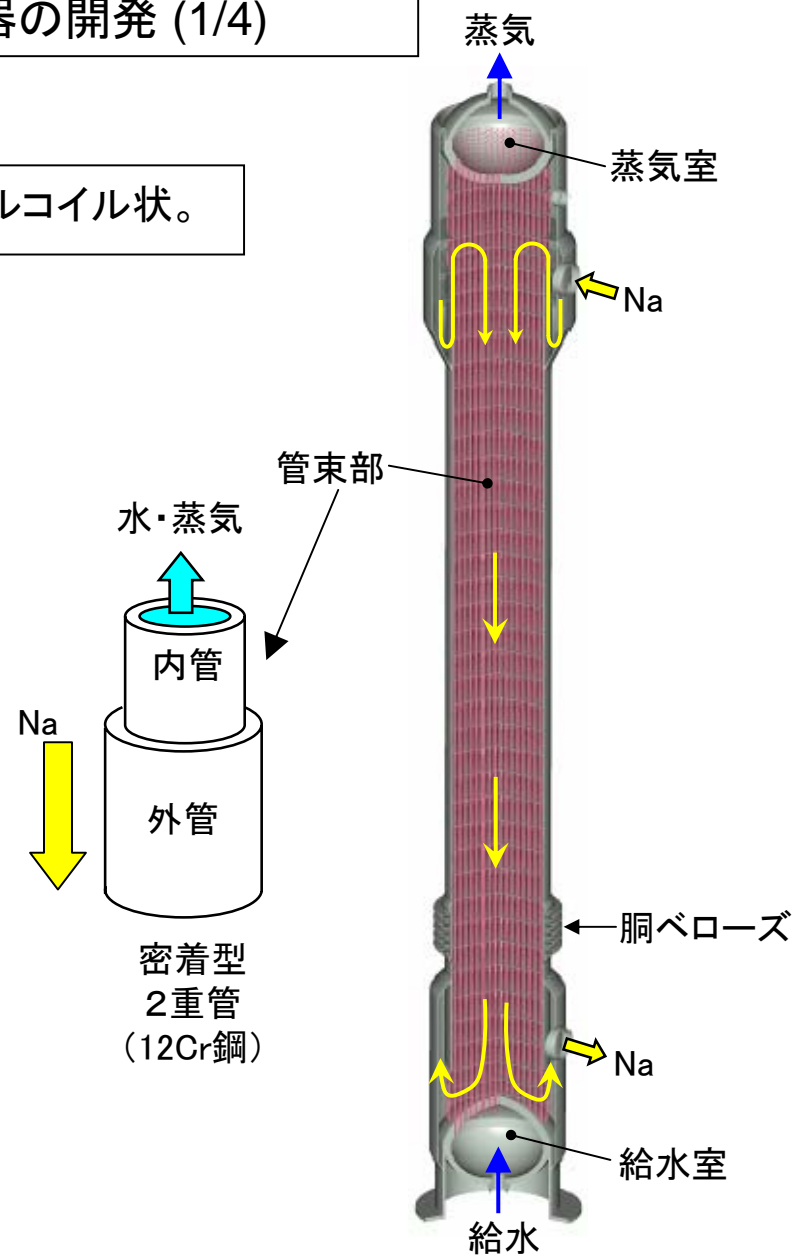
○「もんじゅ」では、蒸気発生器内の伝熱管は一重、ヘリカルコイル状。

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。

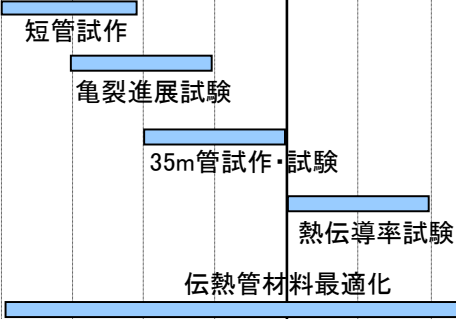

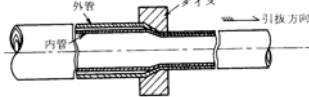
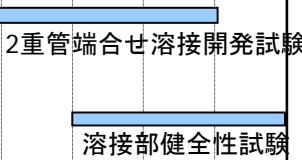
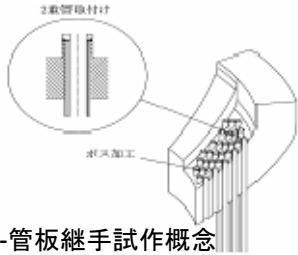
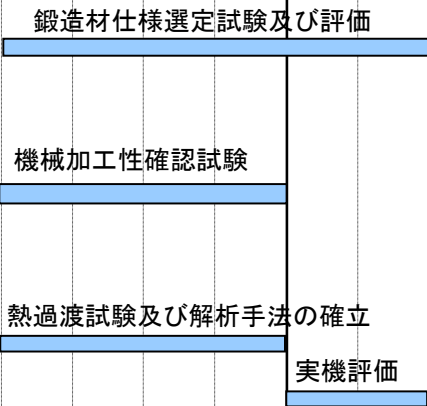
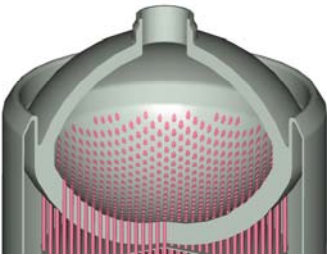
今後の課題

- 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)


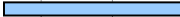
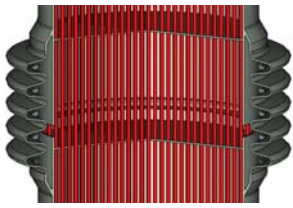

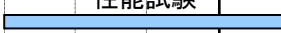

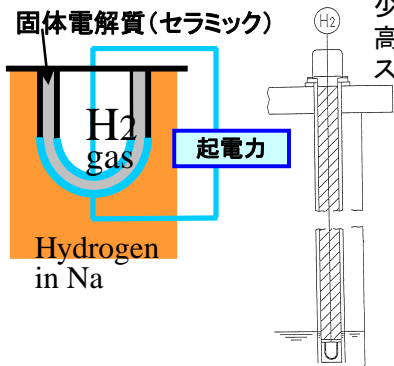


直管2重伝熱管蒸気発生器 概念

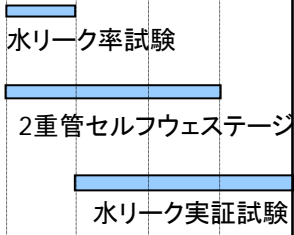
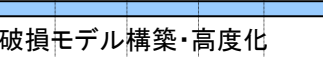
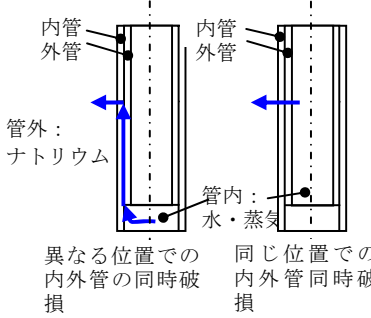
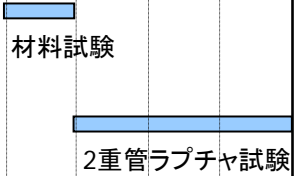
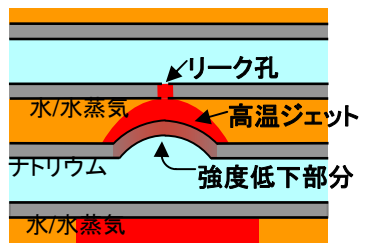
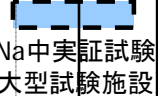
⑨ 直管2重伝熱管蒸気発生器の開発 (2/4)

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	 <p>短管試作 亀裂進展試験 35m管試作・試験 熱伝導率試験 伝熱管材料最適化</p>		<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	 <p>2重管端合せ溶接開発試験 溶接部健全性試験</p>		 <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	 <p>鍛造材仕様選定試験及び評価 機械加工性確認試験 熱過渡試験及び解析手法の確立 実機評価</p>		 <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
胴ペローズの開発	胴ペローズ試作  胴ペローズ試験 		 <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(微量リークの早期検出)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



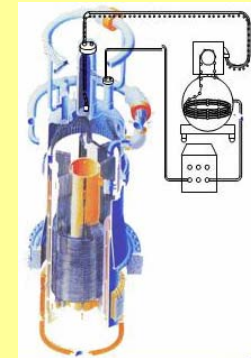
(もんじゅ、実証炉)

③1次主冷却系配管検査装置



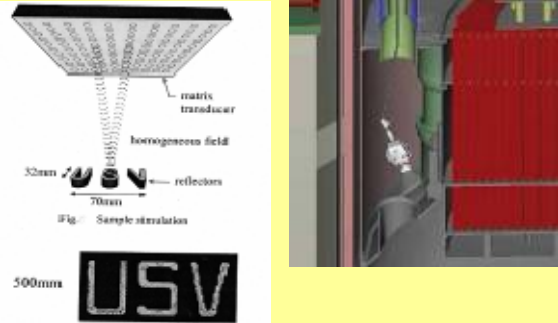
(もんじゅ)

②蒸気発生器伝熱管検査装置



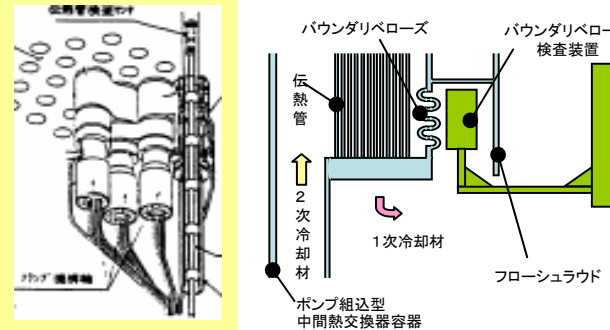
(もんじゅ、実用炉)

①ナトリウム中検査装置



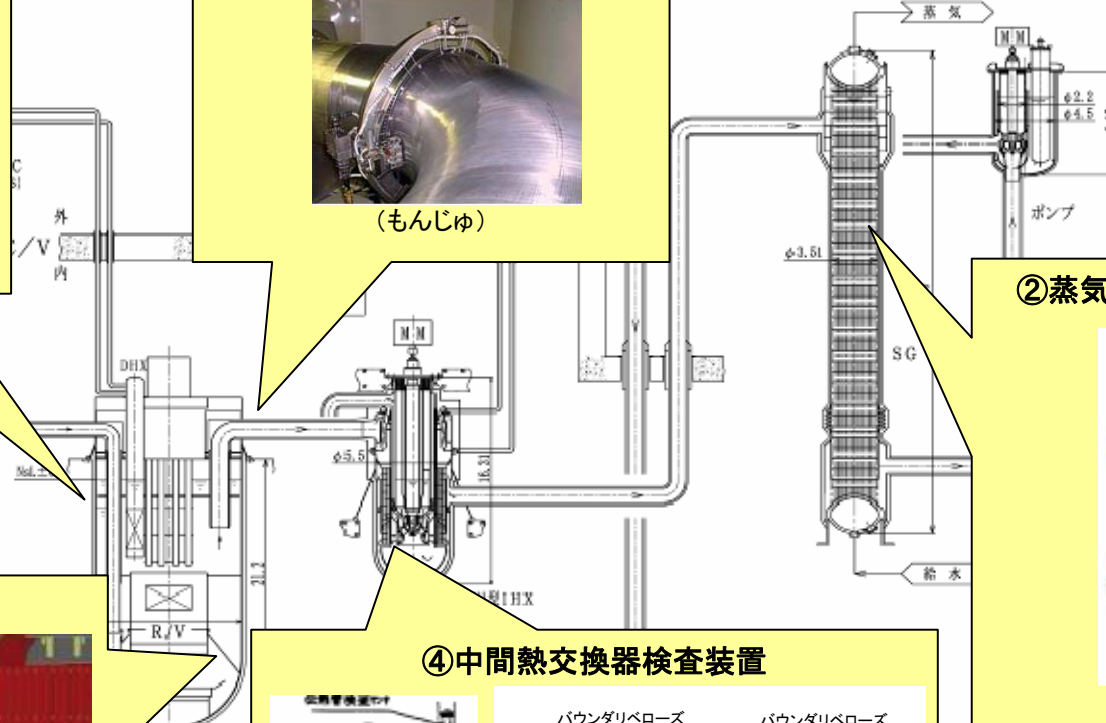
(実証炉、実用炉)

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

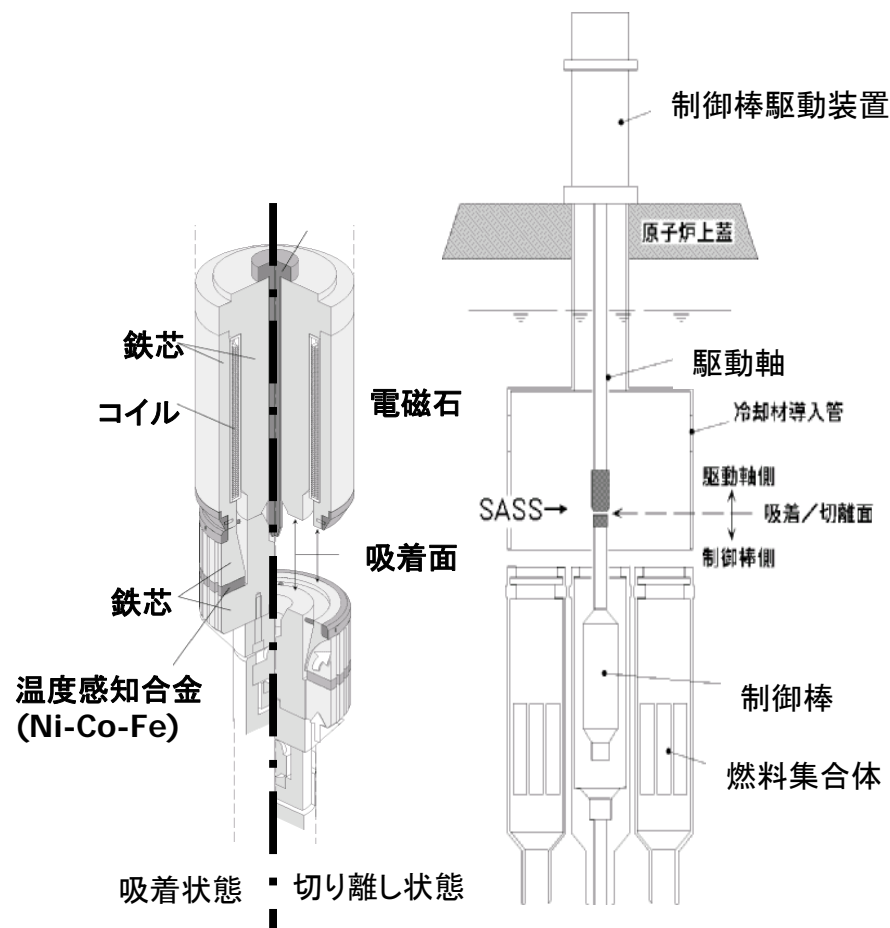
○「もんじゅ」では、非常時における炉停止のための制御棒操作は、電気信号によっている。(なお、炉停止後の自然循環能力は保有しているが、強制循環での除熱が必須)

技術開発の概要

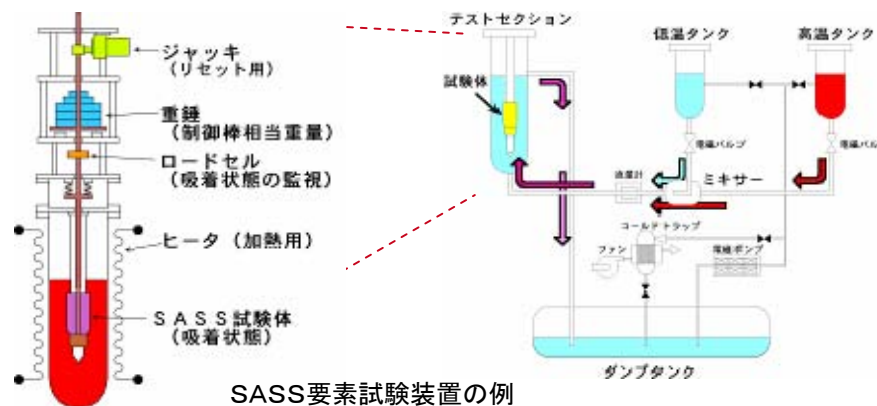
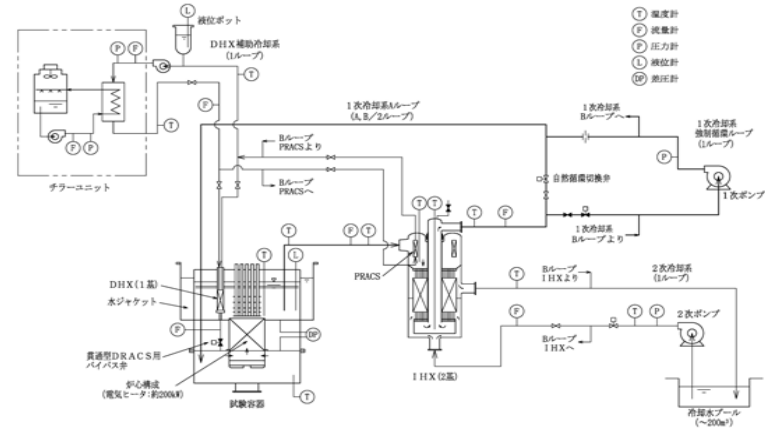
- 非常時における炉停止のための制御棒操作を、受動的(パッシブ式)システムとし、すでに「もんじゅ」でも採用している自然循環能力と併せ、電気停止(外部電源喪失)時にも確実に炉停止・冷却を行えるシステムを開発し、非常時の安全性をさらに向上。
- 受動的炉停止システムとして、磁石が一定以上の温度(キュリー点)に達すると磁力を失う性質を利用し、制御棒操作に磁石を用い、炉心過熱時には制御棒が自動的に炉内に挿入されるシステム(SASS)を構築。

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り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>長寿命制御棒の製作</p>	 <p>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

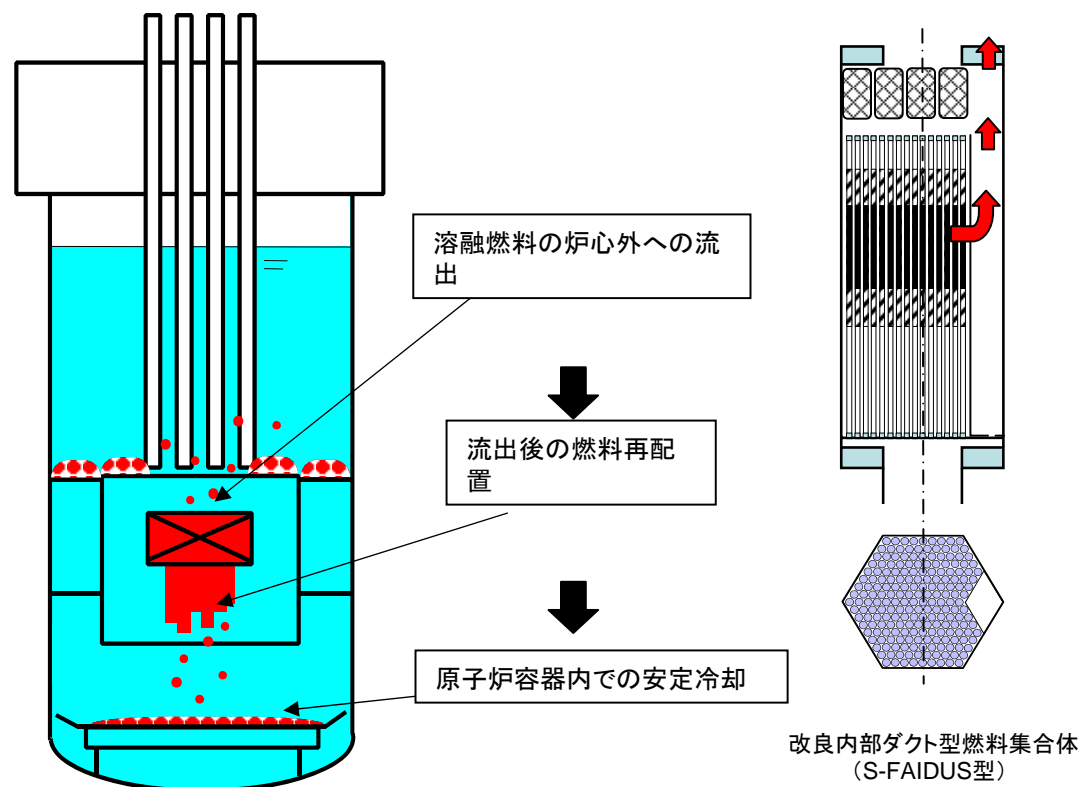
- 炉心損傷事故の際、溶融した燃料が集中すると、再臨界を起こす可能性がある。
- 「もんじゅ」では、運転実績が僅少であることから、炉心崩壊事故を想定した保守的な条件の評価を実施し、発生する機械的エネルギーによって噴出するナトリウムの燃焼に対して、原子炉の安全余裕(格納容器の健全性)が保たれていることを確認している。

技術開発の概要


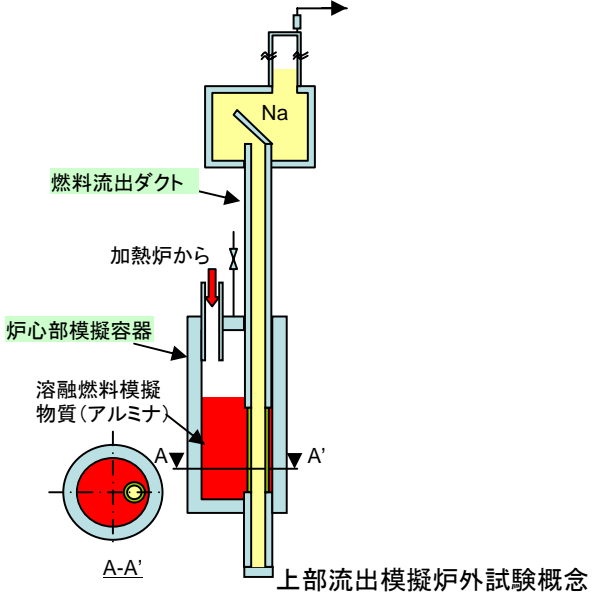
- 炉心損傷事故時に、溶融燃料を炉心外に排出する経路を取り付けた集合体により、炉心損傷事故時に溶融燃料の再臨界を回避しつつ冷却するシステムを確立し、事故時の安全性向上を図る。

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 (酸化物燃料)	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  カザフスタンIGR試験炉	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  上部流出模擬炉外試験概念
炉心損傷挙動 評価試験 (金属燃料)		破損・流出挙動炉内試験 事故後再配置冷却性炉外試験	

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	<p>概念設計レベル1PSA フルスコープPSA レベル2 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</p>	<p>レベル2 PSA詳細評価</p>	<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	<p>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</p>		<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	<p>安全技術情報データベースの構築 安全技術体系の整備</p>		<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。

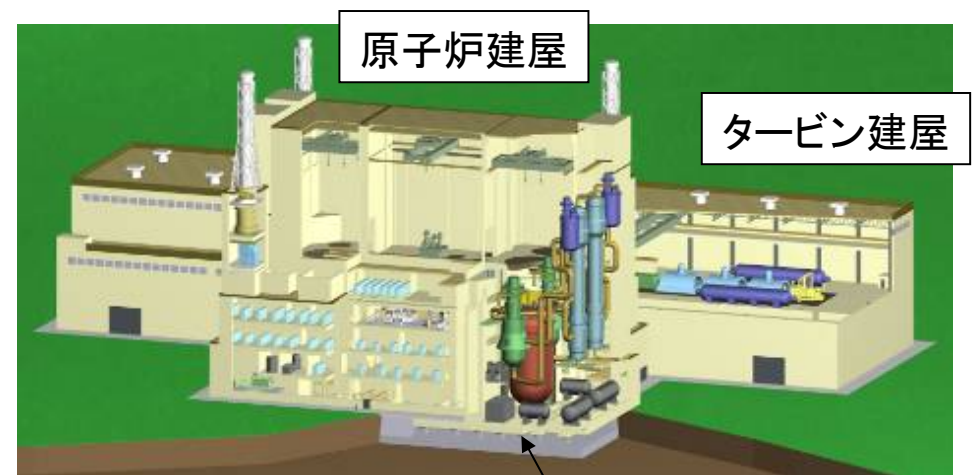
技術開発の概要

- 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、標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 data-bbox="611 331 898 400">免震要素試作・開発</p> <p data-bbox="680 639 981 719">3次元免震設計方針案の策定</p>	<p data-bbox="898 427 1173 528">システム確証試験 (大型振動台試験)</p> <p data-bbox="1016 842 1240 911">実機設計方針策定</p>	<p data-bbox="1256 276 1809 336">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> <div data-bbox="1317 363 1644 564"> <p data-bbox="1323 580 1554 608">ゴム部材の耐圧強度試験</p> </div> <div data-bbox="1697 363 2024 544"> <p data-bbox="1742 571 1912 598">シール部終局試験</p> </div> <p data-bbox="1256 624 1995 684">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> <div data-bbox="1285 692 1688 975"> <p data-bbox="1339 1011 1659 1038">建屋全体3次元免震システム試験</p> </div> <div data-bbox="1711 708 2002 1018"> <p data-bbox="1778 708 1928 783">実大3次元震動破壊実験施設 (E-Defence)</p> </div>
炉心耐震性評価手法の開発	<p data-bbox="611 1086 831 1155">3次元群振動試験</p> <p data-bbox="555 1203 898 1230">3次元群振動解析コードの開発</p> <p data-bbox="562 1305 898 1332">炉容器・炉心槽の耐震性評価</p>		<p data-bbox="1749 1043 2011 1166">模擬燃料集合体群(37体程度を想定)を加振台で3次元加振し、群振動挙動を測定する。</p> <div data-bbox="1285 1059 1733 1378"> <p data-bbox="1406 1390 1570 1417">試験体概念図</p> </div>