

「もんじゅ」における高速増殖炉の実用化のための中核的研究開発

(受託者) 国立大学法人福井大学

(研究代表者) 竹田敏一 附属国際原子力工学研究所

(再委託先) 国立大学法人京都大学、国立大学法人大阪大学、学校法人金井学園福井工業大学、
学校法人東京理科大学、独立行政法人産業技術総合研究所、国立大学法人大分大学、

国立大学法人東京大学、国立大学法人北海道大学

(研究開発期間) 平成21年度～24年度

1. 研究開発の背景とねらい

高速増殖炉の実用化に向けた研究開発は持続可能なエネルギーの多様性の観点から重要な技術開発課題であり、「もんじゅ」の設計データや性能試験データは今後の実用炉を目指すうえで貴重なデータとなる。本研究開発では、「もんじゅ」のデータを有効に活用するとともに国内外で得られた最新知見を反映し、「もんじゅ」の運転並びに高速増殖炉の実用化のために必要な、①炉心・燃料技術、②プラントの安全性に関する技術、③プラント保全技術、を総合的に開発することを目的としている。平成21年度に開始した本研究開発の主な成果を述べる。

2. 研究開発成果

2. 1 炉心・燃料技術に関する研究開発

(1) 炉心核設計手法に関する研究開発

太径・中空燃料を採用する実用炉に向けた核特性評価手法の確立を目指し、解析値が持つ不確かさ評価手法を確立し、過渡時における3次元動特性評価手法を構築し、「もんじゅ」データを利用した検証を行う。

平成21年度は国内外の核データ及び計算コードを調査し、核特性解析の基本システムの構築を行った。平成22年度は太径・中空ペレット及び3次元動特性に対する解析手法の開発と試計算を行うとともに、核特性解析システムの「もんじゅ」や実用炉への適用性評価を実施した。核特性解析システムの構成を図1に示す。

平成23年度は核特性解析システムの精度向上と検証を実施している。その成果の一つとして、太径・中空ペレットの実効断面積評価において、昨年度までBACHとMVPの無限増倍率に約0.3%の差が生じていたが、その補正方法が提案され、計算式に反映したところ、表1に示すように、その差が0.06%まで減少することが分かった。

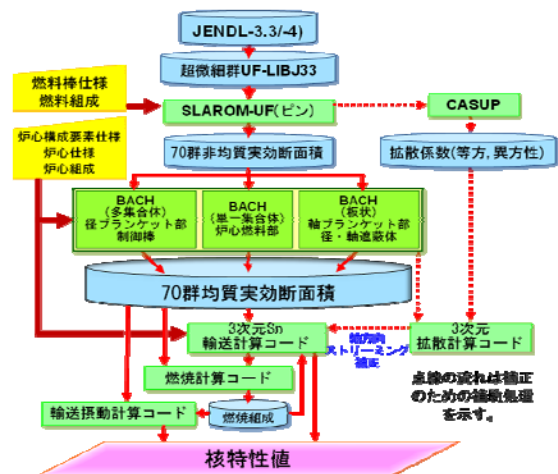


図1 核特性解析システム

表1 中空燃料格子の無限増倍率の比較

計算コード	断面積処理条件	無限増倍率*	他コードとの差 (% dk)	
			対 MVP	対 SLAROM-UF
SLAROM-UF	900 群+PEACO	1.33746	+0.07	—
SLAROM-UF	70 群+PEACO	1.33593	-0.08	-0.15
MVP	連続エネルギー	1.33681 ± 0.003%	—	-0.07
BACH	70 群+PEACO $\Sigma_a = \Sigma_a - \Sigma_{a,2h}$	1.33464	-0.22	-0.28
BACH	900 群+PEACO→70 群 $\Sigma_a = \Sigma_a - \Sigma_{a,2h}$	1.33617	-0.07	-0.14
BACH	900 群+PEACO→70 群 $\chi(g)$ 修正	1.33736	+0.06	-0.01
BACH	900 群+PEACO→70 群 $\Sigma_a = \Sigma_a + \Sigma_{a,2h}$, $\chi(g)$ 修正	1.33769	+0.09	+0.02

* SLAROM-UF の値は MVP で計算した円筒格子と六角格子との差を補正 (+0.008% dk)

(2) 燃料・材料の評価手法に関する技術開発

高い燃料中心温度や高燃焼度を想定した高速炉燃料の高性能化とその照射挙動解析コードの構築に必要な物性値や照射済燃料の物性評価技術、燃料検査技術の開発を目的とする。

「中空ペレットの熱伝導度評価技術の開発」では、照射済ペレットの熱伝導度をホットディスク (HD) 法により測定するため、図 2 に示す HD 用中空センサを作成し、その温度変化から熱伝導度を算出する評価式の作成などを行った。

「高燃焼度燃料の燃料-被覆管相互作用 (FCCI) 挙動解明」では、Cs と Te や I など模擬核分裂生成物を蒸着した模擬ペレットと PNC316 などの加圧熱時効試験や、ODS フェライト鋼と Cs/Te との 2 種類の酸素ポテンシャル ($\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ 及び Fe/FeO) 下での FCCI 試験を実施し、9CrODS 鋼は PNC316 と比較し腐食量が大きいことが示された。(図 3)

「粒子分散による燃料特性向上の技術開発」では、熱伝導度の向上等を目指した粒子分散燃料の合成及び熱伝導度評価技術を確立するため、 CeO_2 を 85vol%、 Sc_2O_3 を 15vol%含む模擬燃料に安定化ジルコニア (YSZ) 粒子を 8vol%含む粒子分散燃料を合成し、その高温における微細構造及び固溶状態を評価し、熱伝導度を測定した。

「燃料検査・評価手法の検討」では、「もんじゅ」サイトでの X 線 CT を用いた非破壊検査法及び破壊検査の効率化を検討し、施設や設備の概念設計を行うため、燃料-被覆管ギャップを含む高燃焼度燃料組織を効率良く評価する方法を検討し、それに必要な X 線 CT システムや燃料再装荷リグの仕様等を検討した。

2. 2 プラントの安全性に関する研究開発

Na の流動・伝熱詳細解析や核分裂生成物及び腐食生成物の移行沈着挙動及び Na 漏洩早期検知手法の開発など、プラント安全性に係る課題の解決を目指した研究開発を行う。

「熱交換器内部の流動・伝熱数値解析手法の開発」では、実験装置で得られた結果を用いて中間熱交換器 (IHX) の胴側と管側の連成計算モデルを検証した。また、「もんじゅ」の IHX の計算モデルに関しては、小さな穴が多数設けられている整流板部分をポーラスモデルで近似し、図 4 に示すように、この部分を精度よく計算できる手順を明確にした。この計算手順を IHX 全体に適用して、「もんじゅ」IHX の 1/6 セクターを計算出来る解析モデルの研究開発を実施している。

「温度成層発生部位の温度分布及びその時間変化の予測手法の開発」では、45%出力からのタービントリップ時の炉心上部プレナム内で発生する温度成層化を、炉心上部機構をポーラスモデルにしてフルセクターに適用した場合とこれを詳細

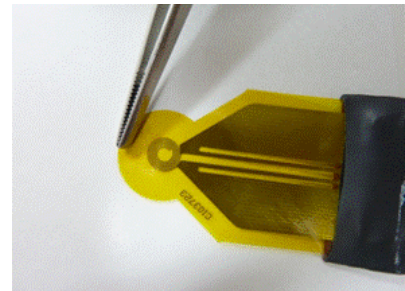


図 2 ホットディスク用中空センサ

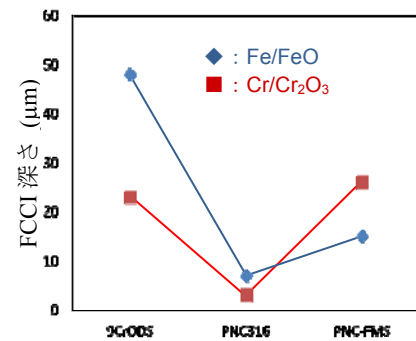
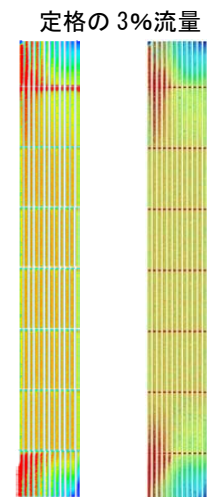


図 3 9CrODS 鋼の腐食深さの PNC316、PNC-FMS との比較 (700°C、24 時間)



左: 詳細モデル
右: ポーラスモデル
図 4 整流板へのポーラスモデルの適用

にモデル化した 1/3 セクターモデルを用いた 3 次元伝熱流動評価を実施した。この結果、ポーラスモデルで十分にモデル化出来ることが分かった。また、統計科学的手法に基づくモデル選定の評価指標で種々の条件の上部プレナム温度成層解析結果の定量評価を実施すると共に、相互相関関数を用いた温度変化による構造への影響を評価する新たな指標を考案し、研究を進めている。

「放射性物質のナトリウム中移行挙動評価手法の開発」のうち、「放射性物質のナトリウム中移行沈着挙動評価手法の開発」では、常陽の 1 次系を詳細にモデル化し、放射性物質の移行沈着挙動が解析できるようにした。また、1 次系冷却配管のエルボ部における粒子状放射性物質の移行挙動モデルを開発し、解析コードに組み込む準備を行っている。「カバーガスに移行する希ガス測定手法の開発」では、Xe、Kr 標準ガスの同位体比を測定し、レーザー共鳴イオン化質量分析法 (RIMS) が、燃焼を考慮しても「もんじゅ」のタグガスを信頼度 68% で区別できることを確認した。また、「もんじゅ」現地調査により、RIMS 装置の設置スペースがあり、1 次カバーガス系統との接続が可能であることを確認した。これらの結果を本年度の研究に反映している。

2. 3 プラント保全技術に関する研究開発

「もんじゅ」の 2 倍の 60 年の寿命で設計される実用炉に対する保全技術の確立が必要であり、保全評価技術は図 5 に示すように、経年変化に伴う劣化損傷の度合いを診断・予測し、損傷部位を検査技術で確定して補修により安全を維持・向上させる技術である。高温時の機器配管の高応力部や溶接部で予想される、クリープ・疲労損傷や溶接割れ等の経年劣化を対象に、劣化診断技術、検査モニタリング技術、及び補修技術を開発し、これらを統合した高速増殖炉の保全評価手法を検討することを目的とする。

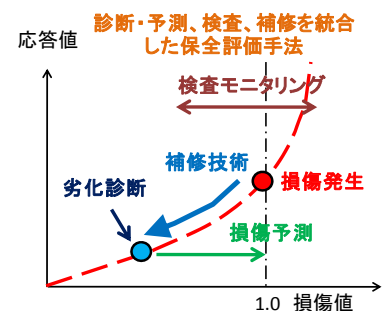


図 5 保全評価手法の概念

(1) 劣化診断技術開発

「高温多軸疲労損傷機構の解明と損傷評価」では室温及び 550°C における非比例多軸疲労試験を実施し、多軸疲労変形により単軸疲労より 1/2~1/10 の寿命低下が生じることが分かった。「高クロム/ナトリウム冷却材化学的反応による損傷評価」では、水素固溶状態・放出挙動から材料の内部応力緩和や転位密度変化などの組織変化を検出・予測するために高クロム鋼の組織変化と水素固溶・放出挙動の相関性を取得した。「液体金属中のキャビテーション壊食損傷挙動評価」では、Pb-Bi 系液体金属でキャビテーション壊食試験を実施し、相関則により液体 Na によるキャビテーション壊食速度予測を世界で初めて推定した。「劣化損傷に関する技術開発」では、SUS316FR 鋼及び高クロム鋼の母材と溶接材のクリープ・疲労試験を実施し、マイクロキャラクタリゼーションシステムによる磁気力顕微鏡からクリープ・疲労劣化過程の進展に伴う磁気特性の変化が観察された。高クロム鋼の溶接部材のクリープ・疲労劣化損傷評価のため、溶接部を模擬した多結晶体 FEM モデルを用いた計算機実験を実施し、クリープ破断線図を取得してクリープ寿命を予測した。クリープ・疲労劣化損傷評価に適用可能なセンサ技術を

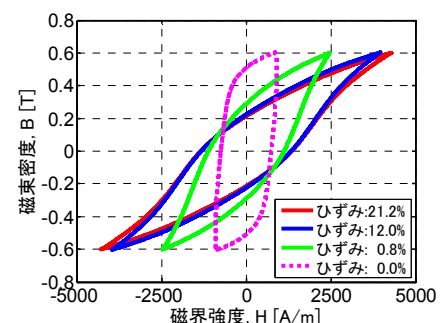


図 6 高クロム鋼の引張試験材の磁気特性測定結果

開発するため、磁気センサを用いた劣化損傷非破壊計測解析システムを製作し、劣化損傷と磁気特性変化の相関性を取得した。図 6 に引張試験による高クロム鋼の歪み量変化と磁気特性測定による B-H ヒステリシス変化の相関性を示す。劣化損傷部の再生・回復技術の開発では、SUS316FR 鋼及び高クロム鋼母材のレーザ・ピーニング回復試験と、様々なモニタリング装置を用いた均一熱処理材の組織再生回復評価試験を実施した。溶接部における劣化損傷予測のため、結晶粒内におけるクリープ変形・滑りを考慮した力学モデルによるクリープ予測計算を実施し、クリープ粒界滑りによる応力集中状態の評価から溶接部劣化損傷予測モデリングを提案した。

(2) 検査モニタリング技術開発

「ガンマ線コンプトンカメラの開発」では、二重配管内の Na 漏洩位置を検出するため、LaBr₃ シンチレータを用いたコンプトンカメラ構成を決定し、標準線源を用いた高バックグラウンド模擬実験を実施して性能を検討した。「FBG センサによる歪み・温度モニタリング技術の開発」では、機器・配管の歪みと温度をオンラインで高精度に同時計測するため、高温用ファイバブラッググレーティング (FBG) センサによる歪み率と温度の同時測定法を実施し、高精密特性、高速測定、超多点測定、耐照射損傷特性について所定の要求条件を達成、良好な耐熱性を確認した。「高温用き裂・減肉モニタリング電磁超音波センサの開発」では、高温で動作可能な電磁超音波センサを開発するため、大気圧プラズマ装置を用いて絶縁性の高い窒化アルミ膜作製法を確立した。

(3) 補修技術開発

「表面損傷部に対するレーザ補修溶接技術の開発とその適用性評価」では、レーザ補修溶接装置の製作を行い平成 23 年 12 月に完成予定である。予備溶接施工試験で SUS316FR 鋼溶接部のアーケ溶接部組織観察を行い、健全性を確認した。「ロボットを用いた遠隔操作溶接補修技術の高度化」では、周囲温度 200°C の二重配管内に侵入し、検査、補修装置を所定の精度 (±1mm) で停止させるロボットの詳細設計を実施し、一部を試作して小型化を検討し精度を確認した。

(4) 高速増殖炉の保全評価手法の構築

高速増殖炉保全技術に関する調査として軽水炉、世界の高速炉、高速実用炉における保全技術・計画等についてまとめた。本事業で得られた研究成果を保全評価手法へ反映させ、研究開発の方向性を評価・判断するために、検討ワーキンググループを設置して進捗状況及び研究内容を精査し、その検討結果をプラント保全技術開発の各研究実施担当者に伝達した。

その他、本研究開発の各種試験に用いる SUS316FR 鋼及び高クロム鋼の共通試料を作製し、硬度のばらつきを評価したのち、同一条件の試験材を各研究グループへ供給した。

3. 今後の展望

本研究開発の各課題の進捗状況については、適切な研究開発マネジメントの下、達成目標をクリアしていることが確かめられた。全体的には、研究開発のための試験装置、解析コードの整備をほぼ完了し、次の段階として「もんじゅ」への適用が求められている。「もんじゅ」データを用いた試験装置・解析手法の妥当性評価及びそれによる実用炉への反映を展望に入れた研究開発を進め、炉心・燃料、プラント安全性、プラント保全技術を総合化した研究成果としてまとめる。