

「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は我が国のエネルギーセキュリティ戦略において枢軸となる重要な技術開発課題である。「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、炉心・燃料技術、プラントの安全性に関する技術、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技術開発

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、平成 22 年度までに構築した核特性解析システムを用いて「もんじゅ」の炉心性能試験データを解析し、核特性解析手法の妥当性を検証した。平成 23 年度成果の特記事項として「もんじゅ」反応度フィードバック試験の解析を

行った結果、図 2 に示すように燃料のギャップ熱伝達係数を低めに調整すると、実測の出力過渡変化を精度よく再現し、開発した 3 次元動特性解析コードは「もんじゅ」及び実用炉の炉心を精度よく解析できることが明らかとなった。

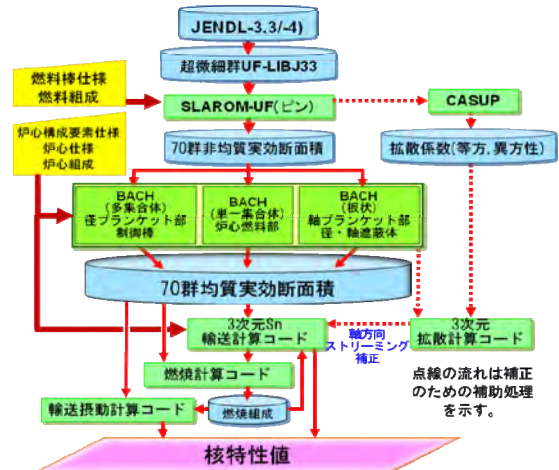


図 1 核特性解析システム

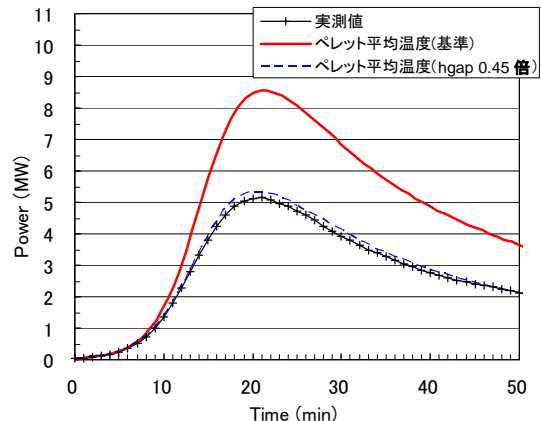


図 2 「もんじゅ」反応度フィードバック試験解析結果

(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、中空ペレットの熱伝導度を1次元熱伝達解析モデルに基づくホットディスク中空センサを用いて測定することに成功した。「高燃焼度燃料の燃料-被覆管相互作用挙動解明」では、CsとTeやIなどの模擬核分裂生成物を用いたPNC316鋼、PNC-FMS鋼及び9CrODS鋼のFCCI試験などを実施した。図3に示すように、Ce-Te中の熱時効試験では、PNC316鋼では腐食が殆ど観測されず、PNC-FMS鋼では粒界腐食がみられ、また熱時効温度の上昇とともに腐食の促進などが観察された。

「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、高温で長時間焼鈍した粒子分散燃料の寸法変化や粒子構成元素の燃料内への拡散挙動を観察し、それを熱伝導計算に反映させた。またFCCI抑制元素としてCrを選定した。「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、平成22年度に整理した照射済燃料の組織データとX線CTの測定精度から、高燃焼度燃料の組織変化や核分裂生成物の挙動に着目した検査方法を提案し、そのためのX線CTシステムの仕様をまとめた。

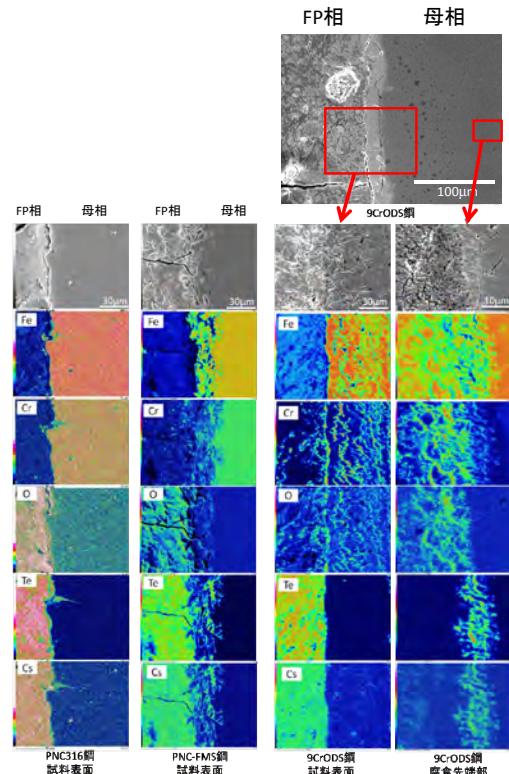


図3 セシウム-テルル熱時効試験における各鋼種のSEM-EDSによる結果

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・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に関する技術の開発を行う。

「熱交換器内部の流動・伝熱数値解析手法の開発」では、1次系と2次系の連成伝熱計算モデルを作成し、公開されている熱交換器の実験体系の計測結果を用いて検証した。小さな穴が多数設けられている「もんじゅ」中間熱交換器(IHX)胴側の整流板部分を詳細にモデル化した解析結果との比較により検証したポーラスモデルを用いて、図4に示すように1次系と2次系の伝熱連成解析が行えるようになった。

「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を、炉心上部機構を詳細にモデル化した1/3セクターモデルで解析し、平成22年度の同部を多孔質でモ

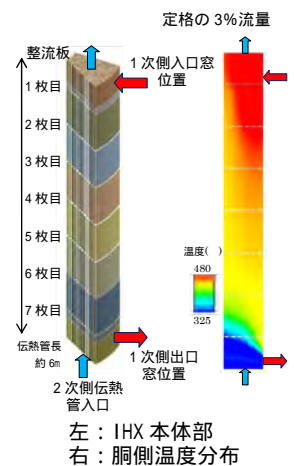


図4 「もんじゅ」IHXの1次系と2次系の伝熱連成計算結果

デル化したフルセクターモデル解析と比較して同等の結果を得た。また、IAEA ベンチマーク解析で設定されている炉心出口流量から流量計誤差に相当する一定流量を減じる感度解析を行い、実験に近い結果を得た。これらのモデル感度解析より、炉心上部機構が温度成層界面に及ぼす影響は小さいことを明らかにした。また、統計科学的手法を用いたモデル選定の評価指標により上部プレナム温度成層解析の定量評価を実施し、温度勾配及びその時間変化を適切に評価する新たな手法として、実験値と解析結果間の差と比の他に相互相関関数を用いた定量評価指標を提案した。

「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、平成 22 年度に作成した解析コードに 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組み込むとともに、「常陽」「もんじゅ」等の任意のループ型高速炉の体系での放射性物質の移行沈着挙動を解析可能とした。また、「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レーザ共鳴イオン化質量分析法 (RIMS) で測定し、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。「もんじゅ」現地調査により、RIMS 装置の設置と 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、これらの結果より「もんじゅ」に設置できる RIMS を設計した。

2.3 プラント保全技術に関する研究開発

「もんじゅ」と比較するとより長期の寿命を考慮して設計される実用炉ではその保全技術の確立が必要であり、経年劣化に伴う損傷を診断・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・向上させる技術が望まれる。そのため、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、高速増殖炉の保全技術評価手法の骨子を提案することを目的とする。

(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 における非比例多軸疲労試験を実施し、破損寿命が単軸の引張・圧縮負荷の結果と比べて約 10%にまで低下することを示し、破損寿命の低下のメカニズムをき裂や微視観察の結果から説明し得ることを示した。「高クロム鋼 / ナトリウム冷却材化学的反応による損傷評価」では、水素の固溶状態は、転位によるトラップ効果と炭素が転位芯に固着されるトラップ効果の低下とに大きな影響を受けることを明らかにした。「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、壊食速度の振幅が小さくなくても壊食速度はあまり低下しないこと、低振幅でも壊食が生じることを明らかにした。「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、SUS316FR 鋼の溶接部のクリープ・疲労損傷の生成は フェライトの減少と関係し、高クロム鋼の溶接部ではその磁区構造が変化することを見出した。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 FEM モデルを用いた計算機実験を実施し、負荷応力 - 破断時間の相関性が実験で得られたクリープ変形をよく再現することが分かった。クリープ・疲労劣化損傷評価に適用可能なセンサ技術として、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。高クロム鋼については保磁力、SUS316FR 鋼について保磁力と残留磁化が劣化損傷程度を示す適切な評価指標であることを見出した。劣化損傷部の再生・回復

技術の開発では、レーザピーニング法で高クロム鋼の劣化損傷の緩和・回復を行うことができ、クリープ寿命の延伸が認められた。SUS316FR 鋼では緩和・回復効果は小さくクリープ寿命延伸効果は小さいことが明らかとなった。溶接継手部における劣化損傷予測のため、高クロム鋼の母材及び溶接熱影響部のクリープ速度とクリープ寿命の Larson-Miller parameter を用いた推定式を提案し、その妥当性を示した。

(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、高バックグラウンド下での実験と解析により、開発したコンプトンカメラが角度分解能 3° 以内でガンマ線の飛来方向を同定できることを検証した。「FBG センサによる歪み・温度モニタリング技術の開発」では、定偏波型光ファイバ利用による歪み率と温度の同時測定は平成 22 年度の結果に比べて 2~6 倍の高精度化を達成した。従来の FBG センサは 300 が温度限界であるのに対して超短パルスレーザで作製した FBG センサでは 1000 の高温での安定動作が確認された。「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成膜条件を決定した。また多層構造の電流駆動回路をもつ電磁超音波センサを製作して、き裂・減肉モニタリング電磁超音波センサの動作特性試験を実施し、超音波伝播特性を検証した。

(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、SUS316L 鋼のレーザメルトラン溶接及びレーザビードオンプレート溶接試験を実施し、良好な溶接ビードが形成でき、レーザ溶接施工成立性が示唆された。「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 の 2 重管内に侵入して検査・補修するロボットの詳細設計・製作を実施し、常温での動作試験からレゾルバによる位置計測と検査兼位置検出用カメラの画像処理による位置計測を併用することにより $\pm 0.5\text{mm}$ 以内の位置決め誤差が実現できることを確認した。

(4) 高速増殖炉の保全評価手法の構築

「常陽」、「もんじゅ」の保全技術開発及び将来炉の保全技術開発の内容を調査し、海外の高速炉計画及びそれに係る保全技術について調査した。高速炉の代表的な機器重要度に応じた検査と補修の技術レベルについて評価しまとめた。本事業で得られた研究成果を保全技術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、研究内容を精査し、検討結果を各研究グループに伝達した。

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、研究開発のために整備された試験装置、解析コードを用いて総合的な技術開発及びとりまとめを実施している。最終年度として、保全技術評価手法の骨子を提案し、「もんじゅ」データを用いた試験装置・解析手法の総合評価及び実用炉への反映を展望に入れた研究開発をまとめる。