

安全研究成果報告

使用済燃料等の貯蔵・輸送分野の 規制高度化研究

Research to advance the regulation of the fields of storage and transport
for spent nuclear fuel

菱田 政清 片山 二郎 奥田 泰久 後神 進史
八木橋 秀樹 広瀬 誠 丸岡 邦男

Masakiyo HISHIDA, Jiro KATAYAMA, Yasuhisa OKUDA, Shinji GOKO,
Hideki YAGIHASHI, Makoto HIROSE, and Kunio MARUOKA

核燃料廃棄物研究部門

Division of Research for Nuclear Fuel Cycle and Radioactive Waste

小澤 正明 廣瀬 勉

Masaaki OZAWA and Tsutomu HIROSE

システム安全研究部門

Division of Research for Reactor System Safety

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority(S/NRA/R)

平成 30 年 11 月

November 2018

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究プロジェクトの活動内容・成果をとりまとめたものです。

なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本レポートの内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 核燃料廃棄物研究部門
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電 話：03-5114-2225
ファックス：03-5114-2235

使用済燃料等の貯蔵・輸送分野の規制高度化研究

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ

核燃料廃棄物研究部門

菱田 政清 片山 二郎 奥田 泰久 後神 進史

八木橋 秀樹 広瀬 誠 丸岡 邦男

システム安全研究部門

小澤 正明 廣瀬 勉

要 旨

本安全研究プロジェクトは、使用済燃料の乾式中間貯蔵施設における貯蔵及び使用済燃料の輸送に係る規制の高度化を図るもので、下記の3つの研究を実施した。

(1) 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得

発電所敷地外における使用済燃料中間貯蔵施設は、今後ニーズが高くなる可能性があり、関連分野の科学的・技術的知見を取得する必要がある。

米国NRC (Nuclear Regulatory Commission) 文書の調査等により、乾式貯蔵に係る諸外国の規制動向、最新知見等について整理した。

材料試験、探傷検査検出性試験等を実施して溶接技術等に関する知見を得た。

高燃焼度燃料に対しては、動的荷重試験を実施し、貯蔵及び輸送時のキャスク落下事故時における燃料健全性評価のための知見を得た。

加圧水型原子炉 (PWR) について貯蔵中の使用済燃料被覆管の温度を評価するため

の温度評価解析ツールを作成し、試験容器を用いた伝熱試験から得られたデータを基に当該ツールによる評価結果の妥当性を確認した。

(2) 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価

使用済燃料輸送・貯蔵の安全性に係る解析及び評価を、諸外国の事情等に影響を受けることなく行うために国産コードを開発・整備する必要がある。

遮蔽解析に関して、国産の粒子・重イオン輸送統合コードシステム PHITS を導入し、コード改良及び検証解析を行った。

熱流動解析に関して、ふく射伝熱解析コード S-FOKS コードを開発し、適応性確認、他コードとの連成解析機能の実装等を実施した。また、解析対象領域の格子分割作業を自動化して解適合格子生成を可能とするために統合解析コード群を開発し、解析結果が理論解と良好に一致することを確認した。

(3) 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等

キャニスタを用いた中間貯蔵施設の長期健全性を評価するため、キャニスタの溶接部における応力腐食割れ (SCC) 等に係る知見を取得する必要がある。

コンクリートキャスクを用いる中間貯蔵設備の規制に必要となるキャニスタの溶接部における SCC 評価手法等について、課題を抽出し影響因子に係る解析コードの作成及び感度解析、諸外国の規制動向の調査等を実施し、将来的に規制に活用し得る情報を取得・整理した。

**Research to sophisticate the regulation of the fields of storage and transport for
spent nuclear fuels**

Masakiyo HISHIDA, Jiro KATAYAMA, Yasuhisa OKUDA, Shinji GOKO,
Hideki YAGIHASHI, Makoto HIROSE, and Kunio MARUOKA
Division of Research for Nuclear Fuel Cycle and Radioactive Waste
Masaaki OZAWA and Tsutomu HIROSE
Division of Research for Reactor System Safety

Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

This safety research project conducted the following three studies for the purpose of sophistication of regulations concerning storage of spent fuel at dry interim storage facilities and the spent fuel transport.

(1) Accumulation of scientific and technical knowledge for regulation standards on interim storage facilities

Spent fuel interim storage facilities outside the power plant site may have higher needs in the future and it is necessary to acquire scientific and technical knowledge of related fields.

We surveyed regulatory trends, latest knowledge, etc. concerning dry storage by investigation etc. of NRC (Nuclear Regulatory Commission) document in the United States including other country and we organized these materials.

Material testing, flaw detection inspection detectability test, etc. were conducted to obtain knowledge concerning welding technology and others.

For high burnup fuel, a dynamic load test was carried out to obtain knowledge for evaluating fuel integrity at the time of cask drop accident during storage and transport.

For the pressurized water nuclear reactor (PWR), a temperature evaluation analysis tool for evaluating the temperature of the spent fuel cladding tube

during storage was prepared and based on the data obtained from the heat transfer test using the test container, concerning the validity of the evaluation result, we confirmed them by the tool.

(2) Validity evaluation of safety analysis related to transport and storage of spent fuels

It is necessary to develop domestic calculation code to analyze and evaluate the safety of spent fuel transport and storage without being affected by circumstances of other countries.

We applied the Particle and Heavy Ion Transport code System, PHITS, as a domestic shielding analysis code. For PHITS, code improvement and benchmark calculation were carried out.

With regard to thermal flow analysis, we developed the radiation heat transfer analysis code S - FOKS, and implemented adaptability confirmation, implementation of coupled analysis function with other code, etc. In addition, we developed an integrated analysis code group to automate the grid division work of the analysis target area and enable generation of solution adaptive lattice, and confirmed that the analysis result agrees well with the theoretical solution.

(3) The investigation for interim storage facility long-term soundness etc.

In order to evaluate the long-term soundness of the interim storage facility using a canister, it is necessary to acquire knowledge concerning stress corrosion cracking (SCC) etc. at the welded part of the canister.

Concerning the SCC evaluation method etc. at the welded part of the canister required for regulating the interim storage facility using concrete casks, we carried out the extraction of issues, preparation of analysis codes relating to influence factors, sensitivity analysis and investigation of regulatory trends in other countries. Based on these results, we acquired and organized information that can be used for regulation in the future.

目次

| | |
|--|----|
| 1. 序論 | 1 |
| 1. 1 背景 | 1 |
| 1. 1. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得 | 1 |
| 1. 1. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価 | 1 |
| 1. 1. 3 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等 | 1 |
| 1. 2 研究の目的 | 2 |
| 1. 2. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得 | 2 |
| 1. 2. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価 | 2 |
| 1. 2. 3 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等 | 2 |
| 1. 3 研究の全体工程 | 3 |
| 1. 3. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得 | 3 |
| 1. 3. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価 | 3 |
| 1. 3. 3 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等 | 4 |
| 2. 本論 | 6 |
| 2. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得 | 6 |
| 2. 1. 1 乾式貯蔵に係る諸外国の規制動向、最新データ等の調査・収集・評価 | 6 |
| 2. 1. 2 規制基準整備のための調査 | 6 |
| 2. 1. 3 高燃焼度燃料の健全性に関する研究 | 10 |
| 2. 1. 4 温度評価解析ツールの作成 | 12 |
| 2. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価 | 13 |
| 2. 2. 1 国産遮蔽解析コードの導入 | 13 |
| 2. 2. 2 統合熱流動解析コード群の開発 | 14 |
| 2. 3 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等 | 17 |
| 2. 3. 1 キャニスタ SCC に係る影響因子に関する課題の抽出及びその対応 | 17 |
| 2. 3. 2 諸外国におけるキャニスタ SCC に対する規制等の調査 | 17 |
| 3. 結論 | 19 |
| 3. 1 成果の要点 | 19 |
| 3. 1. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得 | 19 |
| 3. 1. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価 | 19 |
| 3. 1. 3 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等 | 19 |
| 3. 2 目的の達成状況 | 20 |
| 3. 3 成果の活用等 | 20 |
| 3. 3. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得 | 20 |
| 3. 3. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価 | 20 |

表目次

| | | |
|-----------|---|---|
| 表 1. 3. 1 | 研究の全体工程 | 5 |
| 表 2. 1. 1 | 日本機械学会規格 (JSME S FB1-2003) に基づく UT 検査判定結果 | 8 |

図目次

| | | |
|-----------|---|----|
| 図 2. 1. 1 | 低合金鋼 GLF1 溶接継手の引張強さ | 9 |
| 図 2. 1. 2 | フェーズドアレイ法による UT 検査例 | 9 |
| 図 2. 1. 3 | 燃料棒軸方向動的圧縮荷重試験条件及び結果 (BWR) | 11 |
| 図 2. 1. 4 | 燃料棒軸方向動的圧縮荷重試験破損時の放出ペレット粒径分布 (BWR) (最大衝突荷重: 約 60 kN) | 11 |
| 図 2. 1. 5 | 伝熱試験 | 12 |
| 図 2. 1. 6 | 伝熱試験における試験容器内の温度分布解析結果と測定データの比較 | 12 |
| 図 2. 2. 1 | PHITS コードによる核燃料輸送物に対する検証解析 | 13 |
| 図 2. 2. 2 | S-FOKS コードと Fluent コードを用いた 使用済燃料中間貯蔵建屋内の温度分布解析例 | 14 |
| 図 2. 2. 3 | 二重円筒体系に施した格子生成の例 | 15 |
| 図 2. 2. 4 | 円柱内各断面における温度分布の比較 | 16 |
| 図 2. 3. 1 | SCC 影響因子の感度解析 (例) | 17 |

略語表

| | |
|----------|--|
| ASME | American Society of Mechanical Engineers アメリカ合衆国機械学会 |
| EPRI | Electric Power Research Institute アメリカ合衆国電力研究所 |
| FP | Fission Products 核分裂生成物 |
| IAEA | International Atomic Energy Agency 国際原子力機関 |
| JNES | Japan Nuclear Energy Safety Organization 旧独立行政法人原子力安全基盤機構 |
| MOX | Mixed Oxide 混合酸化物 |
| NISA | Nuclear and Industrial Safety Agency 旧原子力安全・保安院 |
| NRA | Nuclear Regulation Authority 原子力規制委員会 |
| NRC | Nuclear Regulatory Commission アメリカ合衆国原子力規制委員会 |
| OECD | Organization for Economic Co-operation and Development 経済協力開発機構 |
| OECD/NEA | OECD Nuclear Energy Agency 経済協力開発機構原子力機関 |
| PT | Penetrant Test 浸透探傷試験 |
| SCC | Stress Corrosion Cracking 応力腐食割れ |
| UT | Ultrasonic Test 超音波探傷試験 |

1. 序論

1. 1 背景

1. 1. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得

発電所敷地内及び再処理施設敷地内における使用済燃料貯蔵の残容量が減少している現在、発電所敷地外における使用済燃料中間貯蔵施設のニーズが今後高くなる可能性がある。

使用済燃料の乾式貯蔵として、沸騰水型原子炉（以下「BWR」という。）燃料については、東海第二発電所等において金属キャスクを用いた乾式貯蔵の実績があり、貯蔵中の燃料等の健全性確認が事業者により実施されている。一方、加圧水型原子炉（以下「PWR」という。）燃料についても事業者により試験用金属キャスクを用いた乾式貯蔵試験が実施され、試験用金属キャスク各部の温度やキャスク内部の圧力等が測定される計画である。

現状では、青森県むつ市に金属キャスクを用いる我が国初の使用済燃料中間貯蔵施設の建設が進められているが、将来は経済的に優位とされるコンクリートキャスクを用いる乾式貯蔵施設も導入される可能性がある。また、今後、乾式貯蔵施設では現状の許認可燃焼度を超える高燃焼度燃料も中間貯蔵される可能性がある。

そのため、関連分野の科学的・技術的知見を取得する必要がある。

1. 1. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価

核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）第五十九条第三項に基づき輸送容器について承認を受けようとする事業者は、核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則（昭和 53 年総理府令第 57 号）第二十一条に定める書類を原子力規制委員会に提出することが規定されている。このうち「核燃料輸送物の安全性に関する説明書」に記載のある構造強度、除熱性能、密封性能、臨界防止性能、遮蔽性能等に関する数値解析の結果に基づく説明に対し、原子力規制委員会はその妥当性を評価する必要がある。評価のためには数値解析に関する最新の知見が必要とされるが、近年の米国製コードの配布／公開制限の動きにより、我が国における海外製のコードへの依存度の高さが課題となっている。また、今後の廃炉プラントの増加を考慮すると、新しい構造や評価手法を用いた金属キャスク等の申請に対応するために、妥当性評価に資するための科学的・技術的知見の取得及び解析手法を拡充しておく必要がある。

1. 1. 3 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等

我が国では、貯蔵施設が塩害を受け得る沿岸部に立地される可能性があるが、コンクリートキャスクに用いるキャニスタは溶接構造のステンレス鋼製容器であることから、キャニスタの長期健全性を評価する必要がある。

1. 2 研究の目的

1. 2. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得

下記(1)及び(2)を実施するとともに、乾式貯蔵期間中の使用済燃料等の健全性に関する研究を実施し、知見を取得する必要がある。

使用済燃料の乾式貯蔵技術に関しては、将来申請が予想される PWR 使用済燃料乾式貯蔵に係る審査において、燃料被覆管の長期健全性評価を実施するためには温度評価解析ツールを整備しておく必要がある。

また、中間貯蔵期間が世界的に長期化する傾向にあることから、経年変化管理等に係る技術基準について諸外国の規制動向を調査し、把握する。高燃焼度燃料の貯蔵及び輸送時におけるキャスク落下事故時の燃料破損判断基準についても知見を取得しておく必要がある。

上記を達成するために、下記(1)～(4)を実施することにより科学的・技術的知見を取得することを目的とした。

- (1) 乾式貯蔵に係る諸外国の規制動向、最新データの調査・収集・評価
- (2) 規制基準整備のための調査
- (3) 高燃焼度燃料の健全性に関する研究
- (4) 温度評価解析ツールの作成

1. 2. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価

許認可申請に係る審査において、事業者が実施した数値解析の結果に基づく妥当性の説明に対して、規制当局として諸外国の事情等に影響を受けることなく妥当性評価を行うために国産コードを開発・整備する必要がある。また、金属キャスクに係る仮想事故時の最大損傷評価手法の拡充が必要である。

上記を達成するために、下記(1)～(2)を実施することにより妥当性評価のための解析技術を高度化することを目的とした。

- (1) 国産遮蔽解析コードの導入
- (2) 統合熱流動解析コード群の開発

1. 2. 3 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等

キャニスタを用いた中間貯蔵施設の長期健全性を評価するため、キャニスタの溶接部における応力腐食割れ（以下「キャニスタ SCC」という。）に係る調査として、下記(1)及び(2)を実施することにより将来的に規制に活用する情報を取得することを目的とした。

- (1) キャニスタ SCC に係る影響因子に関する課題の抽出及びその対応
- (2) 諸外国におけるキャニスタ SCC に対する規制等の調査

1. 3 研究の全体工程

本研究は、下記1. 3. 1から1. 3. 3に記載した項目について、表1. 3. 1に示すとおりので工程で実施した。

1. 3. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得

(1) 乾式貯蔵に係る諸外国の規制動向、最新データ等の調査・収集・評価

輸送貯蔵兼用金属キャスク及びコンクリートキャスクに代表される使用済燃料の乾式貯蔵システム全般について、中間貯蔵に関連する最新データ、実績のあるNRC等の規制機関の規制動向、IAEA、OECD/NEA等の国際機関の動向、関連する学協会規格及び評価手法並びにその他の研究動向の調査を行う。また、貯蔵される燃料についても、高燃焼度燃料の長期貯蔵等の今後規制課題と想定されるものも調査等の対象とする。

(2) 規制基準整備のための調査

学協会規格の技術評価等に資するために最新知見を取得する。特にコンクリートキャスク貯蔵で用いるキャニスタ蓋部溶接に関する溶接技術及び検査技術については、引張試験等を実施し、非破壊検査における欠陥の検出性等に係る知見を取得する。

(3) 高燃焼度燃料の健全性に関する研究

貯蔵及び輸送時のキャスク落下事故等における燃料の健全性に関し、国内のホットラボにおける試験を実施し、事故時の燃料挙動に関する知見を取得する。

(4) 温度評価解析ツールの作成

乾式貯蔵中の使用済燃料被覆管温度を貯蔵容器外表面から推定することを目的に温度評価解析ツールを作成する。貯蔵容器の伝熱試験を実施し、試験結果と温度評価解析ツールの計算結果を比較し、妥当性確認を行う。

なお、本研究は平成17年度から平成28年度にかけて実施した。

1. 3. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価

(1) 国産遮蔽解析コードの導入

遮蔽解析コードとして導入した粒子・重イオン輸送統合コードシステムPHITS^(参1、2)に対して、核燃料輸送物遮蔽解析作業に有効な機能を拡張するためのコード改良作業を行い、核燃料輸送物に対する線量当量率実測値及びMCNP解析結果との比較による検証解析を実施する。

(2) 統合熱流動解析コード群の開発

既存の市販コードの持つふく射伝熱モデルの欠点を補い、より汎用性が高く詳細な解析が可能なふく射伝熱解析コードを開発する。同コードには大規模解析を可能にするための並列処理機能を持たせ、データ通信の最適化等の必要な検討を

行う。また、安全解析の妥当性の評価解析作業に当たり、作業担当者の持つ技術及び判断に依存する要因を排除するとともに、人為的な誤りの発生を抑制することが可能な解析コードを開発する。

なお、本研究は平成 21 年度から平成 28 年度にかけて実施した。

1. 3. 3 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等

(1) キャニスタ SCC に係る影響因子に関する課題の抽出及びその対応

コンクリートキャスクでの使用を想定したキャニスタに関する文献調査を行い、SCC に係る影響因子に係る課題を抽出し、その課題について対応する。

(2) 諸外国におけるキャニスタ SCC に対する規制等の調査

既にコンクリートキャスクを用いた乾式使用済燃料貯蔵を実施している諸外国のキャニスタ SCC に係る規制動向及び研究開発動向について調査し、規制の適切な執行に貢献するため科学的・技術的知見等を取得する。

なお、本研究は平成 24 年度から平成 27 年度にかけて実施した。

表1. 3. 1 研究の全体工程

Table 1. 3. 1 Progress Schedule for this study

| | H17 | H18 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 | H26 | H27 | H28 |
|-----------------------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得 | 乾式貯蔵に係る諸外国の規制動向、最新データ等の調査・収集・評価 | | | | | | | | | | | |
| | 規制基準整備のための調査 | | | | | | | | | | | |
| | 高燃焼度燃料の健全性に関する研究 | | | | | | | | | | | |
| | 温度評価解析ツールの作成 | | | | | | | | | | | |
| | 国産遮蔽解析コードの導入 | | | | | | | | | | | |
| 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価 | 統合熱解析コード群の開発 | | | | | | | | | | | |
| | キャニスタ SCC に係る影響因子に関する課題の抽出及びその対応 | | | | | | | | | | | |
| 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等 | 諸外国におけるキャニスタ SCC に対する規制等の調査 | | | | | | | | | | | |

2. 本論

2. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得（平成 17 年度～平成 28 年度）

2. 1. 1 乾式貯蔵に係る諸外国の規制動向、最新データ等の調査・収集・評価

米国NRCのNUREG、Interim Staff Guidance等の調査、IAEAの金属キャスクに関するSafety Case作成のための手引き作成作業への参加（各国で多数採用されている金属キャスクに係る設計上・安全評価上の考え方を示すもので、二重蓋システムや貯蔵中燃料は健全であること等、日本の規制において採用されている考え方が多く取り入れられている。）等による情報収集を実施した。貯蔵キャスクの経年変化に係る規制動向、輸送・貯蔵キャスクに使用されている輸送架台に係る規制動向及びキャスクにおける燃焼度クレジットに係る動向を調査した。

貯蔵キャスクの経年変化に係る動向調査の結果は以下のとおりである。

- ・米国では今後の許認可取得を目指し、EPRI において実施している長期貯蔵に関する経年変化管理に関連したプログラムをはじめとして、国際協力を推進し、高燃焼度燃料の長期貯蔵のためのデモプログラムの実施等幅広く研究を実施している。
- ・独国では 40 年超の中間貯蔵における課題として、ボルト締めによるシステムの長期性能、中性子遮蔽材としてのポリマー部材の劣化、圧力モニタリング機器の信頼性が挙げられている。

輸送・貯蔵キャスクに使用されている輸送架台に係る規制動向調査から、英国、仏国、独国及び米国では輸送架台は基本的に輸送物の一部ではないとの位置付けで、国内法令・規則等で明確に規制していないことが明らかとなった。

キャスクにおける燃焼度クレジットに係る動向調査の結果は以下のとおりである。

- ・米国では、NRC のスタッフガイドである暫定指針 ISG-8 Rev. 3「PWR 使用済燃料の輸送・貯蔵キャスクの臨界安全における燃焼度クレジット」が発行され、アクチニドに加えて FP も考慮できるようになった。
- ・ISG-8 Rev. 2 から ISG-8 Rev. 3 への改訂では、燃焼度測定方法や計算コードの検証方法などが検討課題になっていた。
- ・独国では、PWR の UO_2/MOX については、アクチニド及び FP も考慮した燃焼度クレジットを、また、BWR についてはガドリニアククレジットを適用した申請がされている。
- ・仏国では、輸送においてアクチニドを考慮した燃焼度クレジットを適用した申請がされているが、貯蔵において輸送と同様の申請はされていない。

2. 1. 2 規制基準整備のための調査

金属キャスクやコンクリートキャスク貯蔵システムにおいて、閉じ込め境界を構成するステンレス製のキャニスタの候補材料とその使用に際しての確認項目を調査抽出し^(参3)、抽出された確認項目に係る試験を実施した。金属キャスクでは、金属キャスクの本体胴の

候補材料である低合金鋼のASME SA350Gr. LF5や日本機械学会規格の低合金鋼GLF1の母材及び溶接部の材料試験を実施した^(参5, 6, 7)その結果を図2. 1. 1^(参7)に示す。図2. 1. 1のとおり、溶接継ぎ手及び母材の引張試験結果は機械学会の規格値を上回る結果を示しており、また、溶接継ぎ手と母材の間に有意な差は認められなかった。

キャニスタ材料には、工業製品に使用実績の多いSUS304やSUS316に加え、耐環境性に優れるが使用実績が少ないGSUS329J4L及びASME S31254も日本機械学会規格で対象となっていることから、材料試験及び溶接試験（特に高温で水蒸気やほう酸にさらされる蓋溶接時の環境条件を考慮）^(参4, 6)や、溶接材料（S31254用）の選定試験^(参6)及び高温下（最高200℃を想定）で実施されることを考慮したPT（Penetrant Test：浸透探傷試験）検査検出性試験^(参6)を実施した。これらの試験の結果、上記確認項目については、大きな問題は見出されなかった。

同じく確認項目の一つであるキャニスタ蓋溶接部のUT（Ultrasonic Test：超音波探傷試験）検査検出性については、キャニスタ蓋溶接部を模擬した人工欠陥（切欠き部）を形成した試験片を準備し、日本機械学会のコンクリートキャスクに関する規格^(参8)に規定されたUT検査を実施した^(参6, 7, 10)。試験結果を表2. 1. 1に示す。表2. 1. 1より機械学会の判定基準を適用すると、検出できない欠陥が大半を占めた。これは、キャニスタの蓋部形状等から溶接部へのUT探触子の接近が制限されるため等の理由による。これに対して近年注目されているフェーズドアレイ法によるUT検査試験を行った。その結果を図2. 1. 2^(参9, 10)示す。図2. 1. 2のとおり全ての人工欠陥を検出できてはいないが、本方法によりビームの走査範囲が改善されるため欠陥検出性が向上するとの知見を得た。

表2. 1. 1 日本機械学会規格 (JSME S FB1-2003) に基づく UT 検査判定結果 (参10)

Table 2. 1. 1 UT(Ultrasonic Tests) Results Following JSME S FB1-2003

| 探傷条件 | 材質 | 周波数 | ルート部欠陥(矩形) | | | ルート部欠陥(半楕円) | | | 表面欠陥(矩形) | | | | |
|-----------------------|-----------------------|---------------|---------------|-------|-------|-------------|--------|--------|----------|-------|---------|-------|---|
| | | | No7 | No6 | No5 | No10 | No9 | No8 | No4 | No2 | No3(封止) | No1 | |
| | | | 6d×6L | 4d×6L | 2d×6L | 6d×36L | 4d×24L | 2d×12L | 6d×6L | 4d×6L | 4d×6L | 2d×6L | |
| 胴部から 垂直探傷 | H21年度 実施結果 | 銅材:S31260 注1) | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| | | 蓋材:S31260 注1) | 5MHz | ○ | ○ | ○ | × | × | × | ○ | × | × | × |
| | 銅材:S31260 注1) | 2MHz | ○ | × | × | × | × | × | ○ | × | × | × | |
| | | 蓋材:SUS304 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | ○ | ○ | ○ | × |
| | 銅材:S31254 | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:S31254 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | H23年度 実施結果 | 銅材:SUS316 | 2MHz | ○ | ○ | × | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | × |
| | | 蓋材:SUS316 | 5MHz | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | × |
| | 蓋部から 斜角探傷 横波65° | H21年度 実施結果 | 銅材:S31260 注1) | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| | | | 蓋材:S31260 注1) | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 銅材:S31260 注1) | | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:SUS304 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| 銅材:S31254 | | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:S31254 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| H23年度 実施結果 | | 銅材:SUS316 | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:SUS316 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| 蓋部から 斜角探傷 縦波65° | | H21年度 実施結果 | 銅材:S31260 注1) | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| | | | 蓋材:S31260 注1) | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| | 銅材:S31260 注1) | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:SUS304 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | 銅材:S31254 | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:S31254 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | H23年度 実施結果 | 銅材:SUS316 | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:SUS316 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | 蓋部から 斜角探傷 縦波80° | H21年度 実施結果 | 銅材:S31260 注1) | 2MHz | × | × | × | × | × | × | △ | × | × |
| | | | 蓋材:S31260 注1) | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 銅材:S31260 注1) | | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:SUS304 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| 銅材:S31254 | | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:S31254 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| H23年度 実施結果 | | 銅材:SUS316 | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:SUS316 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| 蓋部から 斜角探傷 縦波90° | | H21年度 実施結果 | 銅材:S31260 注1) | 2MHz | × | × | × | × | × | × | △ | × | × |
| | | | 蓋材:S31260 注1) | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| | 銅材:S31260 注1) | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:SUS304 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | 銅材:S31254 | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | △ | × | × | |
| | | 蓋材:S31254 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | H23年度 実施結果 | 銅材:SUS316 | 2MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 蓋材:SUS316 | 5MHz | × | × | × | × | × | × | × | × | × | |

注1) S31260 :GSUS329J4Lの代替材
 注2) 判定基準 :きずからの反射波のエコー高さが、標準穴からのエコー高さを超えるもの(CCN-2330-2「判定基準」に従う)
 ○ :きずからの反射波のエコー高さが、標準穴からのエコー高さを超え、長さ6mm以上で検出されたもの
 △ :きずからの反射波のエコー高さが、標準穴からのエコー高さを超え、長さ6mm未満のもの
 × :きずからの反射波が識別不可、またはエコー高さが判定基準以下のもの

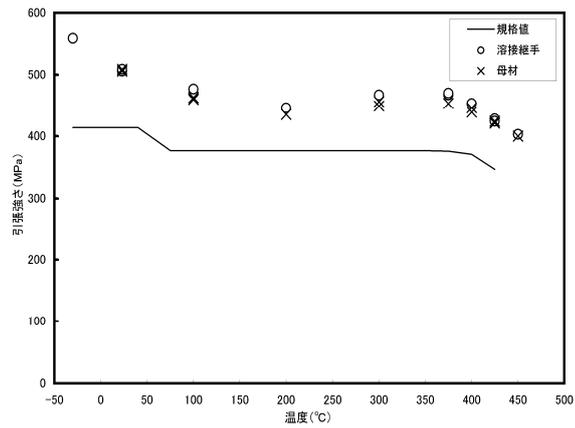


図2. 1. 1 低合金鋼 GLF1 溶接継手の引張強さ (参7)

Fig. 2. 1. 1 Tensile Strength of GLF1

注) 図中の実線は、機械学会規格の低合金鋼 GLF1 の設計引張強さ (Su 値) を示す。

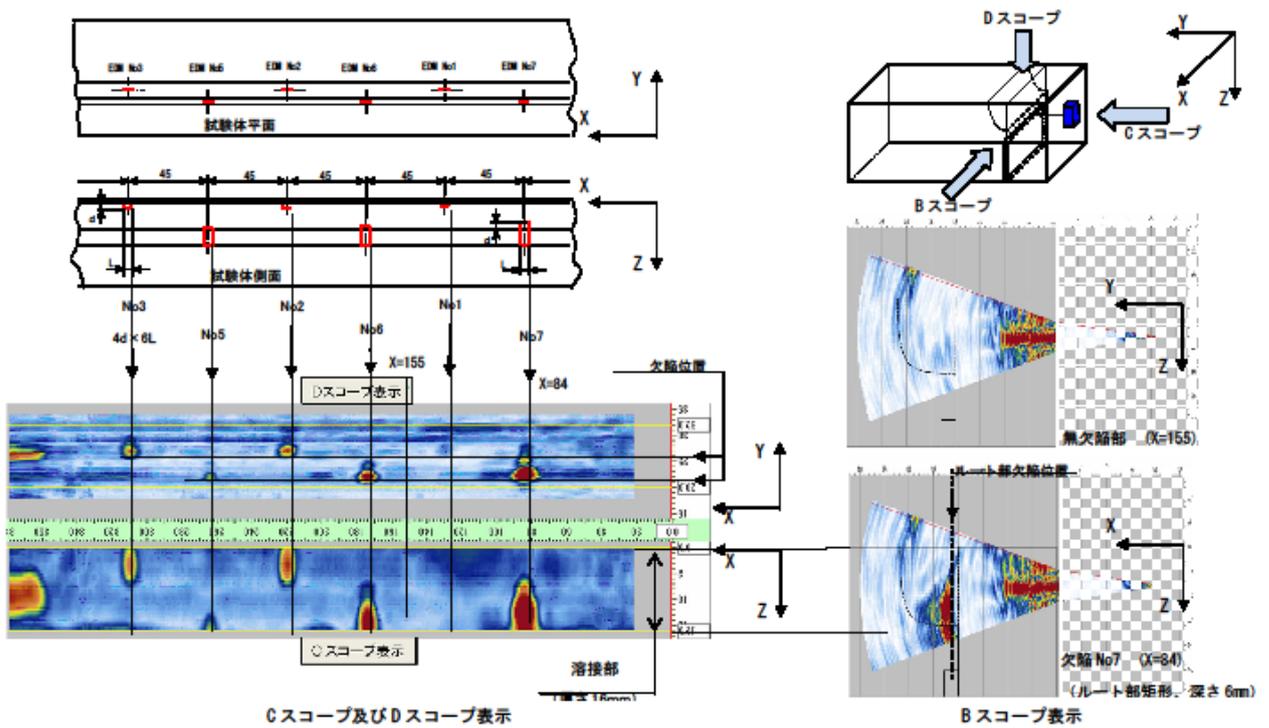


図2. 1. 2 フェーズドアレイ法による UT 検査例 (参10)

Fig. 2. 1. 2 UT Results with Phased Array Method (Example)

注) 図中の赤線は人工欠陥を示す。

2. 1. 3 高燃焼度燃料の健全性に関する研究

高燃焼度まで使用された燃料（高燃焼度燃料）における燃料被覆管の水素吸収量増加や乾式貯蔵中における水素化物の被覆管径方向再配向が増加した場合は、貯蔵及び輸送時のキャスク落下事故時における燃料健全性に影響を与えられと考えられる。

貯蔵及び輸送時のキャスク落下事故における高燃焼度燃料の健全性評価や安全評価用基礎情報（燃料棒破損時のペレット放出量、粒径分布等）の取得を目的として、商業炉で高燃焼度まで使用された BWR 燃料棒（燃焼度 56 GWd/t、ジルカロイ-2/ジルコニウムライナ被覆管）及び PWR 燃料棒（燃焼度 52-55 GWd/t、MDA^(注) 被覆管）から採取した試験片を使用して、動的荷重条件下における変形、破損及びペレット放出といった燃料棒の機械的挙動の評価試験を実施した。

BWR/PWR 被覆管の動的機械特性を取得するために、短冊状に加工した被覆管試験片を用いた動的引張試験（ひずみ速度：最大 10^2 s^{-1} ）を行い軸方向引張強度及び伸びの情報を得るとともに、被覆管動的リング圧縮試験（圧縮速度：最大 4000 mm/s）を行いリング圧縮強度及び破壊扁平率の情報を得た。また、BWR/PWR 燃料棒の動的挙動を評価するために、燃料棒試験片を用いた軸方向及び径方向の動的圧縮荷重試験を行い、破損圧縮荷重や破損モードに係る情報を取得した。また、燃料棒破損領域の目視観察、破面観察及び破損部の断面金相観察を実施するとともに、破損時に放出されたペレットの質量や粒径分布を測定した。

BWR 燃料の燃料棒軸方向動的圧縮荷重試験においては、動的試験装置（スプリングにより重錘の落下速度を加速させ、鉛直に置いた燃料棒試験片の上端に衝撃力を負荷する装置）を用い、重錘質量 M : 3.5 kg（燃料棒 1 本分に相当）及び衝突速度 V : 最高 12 m/s（キャスク落下時の衝突速度を考慮の上、破損発生を狙う。）の条件において試験を実施した。その結果、図 2. 1. 3 に示すとおり、衝突速度 12 m/s の試験において最大衝突荷重約 60 kN を示し、圧縮により被覆管にせん断破損が生じるとともに亀裂がらせん状に進展した。破損時には亀裂部からの発光が認められた。この発光は、せん断により亀裂が進展する際に微少なジルカロイ-2 粉末が発生し、せん断による摩擦熱によりそれらの粉末が発火したと推定された。また、破損部からは約 2 個分の燃料ペレットが放出され、その一部は微粉末として飛散した。放出された燃料ペレットの粒径分布測定結果は図 2. 1. 4 に示すとおり、微粉末として飛散したことにより回収されなかったペレットは試験前後の試験片質量変化の 60% 以上であり、回収されたペレットの粒径分布範囲は、75 μm 以下から 2000 μm 以上にわたり、それらのうち、粒径が 850~2000 μm の範囲のものが 20% 程度で最大であった。なお、PWR 燃料の燃料棒軸方向動的圧縮荷重試験においては被覆管のせん断及び座屈による破損が観察され、破損部からのペレット放出は BWR 燃料の場合と同様に約 2 個分相当であった。キャスク落下事故時に想定される燃料棒軸方向圧縮荷重は今回の試験で観察された破損荷重に比較して十分小さく燃料棒破損が生じる可能性は低いこと、破損した場合においても燃料棒から放出されるペレットは燃料棒破損領域にあるペレットに限定
(注) Mitsubishi Developed Alloy 改良ジルコニウム合金、
組成 : Zr-0.8Sn-0.5Nb-0.2Fe-0.1Cr

されることが分かった。

これらの試験結果を基に、燃料棒破損しきい値（破損限界荷重、ひずみ等）を評価するとともに、貯蔵及び輸送時のキャスク落下事故時における臨界、被ばく等の安全評価に資するペレット放出量、粒径分布等の知見を拡充した。

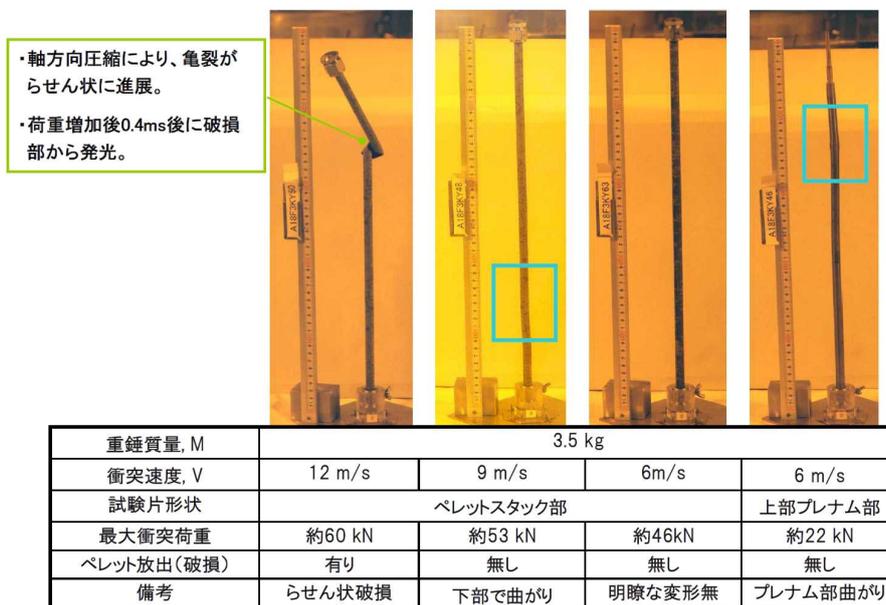


図2. 1. 3 燃料棒軸方向動的圧縮荷重試験条件及び結果 (BWR)

Fig. 2. 1. 3 Test Condition and Results of Fuel Rod Dynamic Axial Load Impact Tests (BWR)

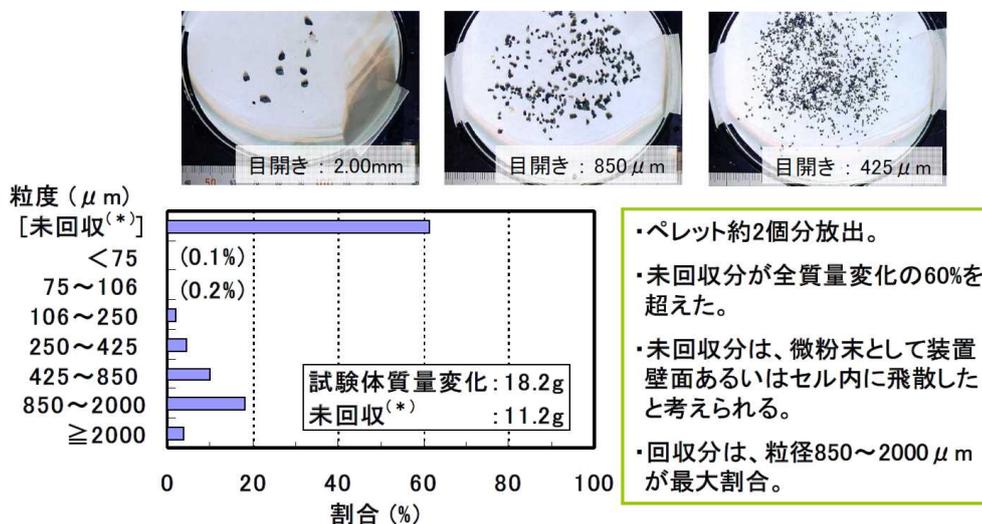


図2. 1. 4 燃料棒軸方向動的圧縮荷重試験破損時の放出ペレット粒径分布 (BWR) (最大衝突荷重：約60 kN)

Fig. 2. 1. 4 Particle Size Distribution of Dispersed Pellet in Fuel Rod Dynamic Axial Load Impact Test (BWR) (Maximum impact load : about 60 kN)

2. 1. 4 温度評価解析ツールの作成

本安全研究では、PWR の使用済燃料の貯蔵中における使用済燃料被覆管温度を貯蔵容器の外表面から評価するために、使用済燃料被覆管温度評価解析ツールを作成した。また、併せて、電気ヒータを用いた模擬使用済燃料を収納した試験容器の伝熱試験（図2. 1. 5参照）を実施して各部の温度データを取得した。当該データのうち、容器の外表面温度分布を境界条件として温度評価解析を実施し、容器内部における各部測定データと解析結果との比較により解析結果の妥当性確認を実施した。温度評価解析結果と測定データとの比較を図2. 1. 6に示す。図2. 1. 6より、試験容器外表面の温度データから燃料集合体中心部の燃料棒被覆管温度をおおむね10℃以下の不確かさで推測できる見通しを得た。



電気ヒータの装荷

試験容器上部、熱電対配線及びデータ記録

図2. 1. 5 伝熱試験

Fig. 2. 1. 5 Heat transfer test

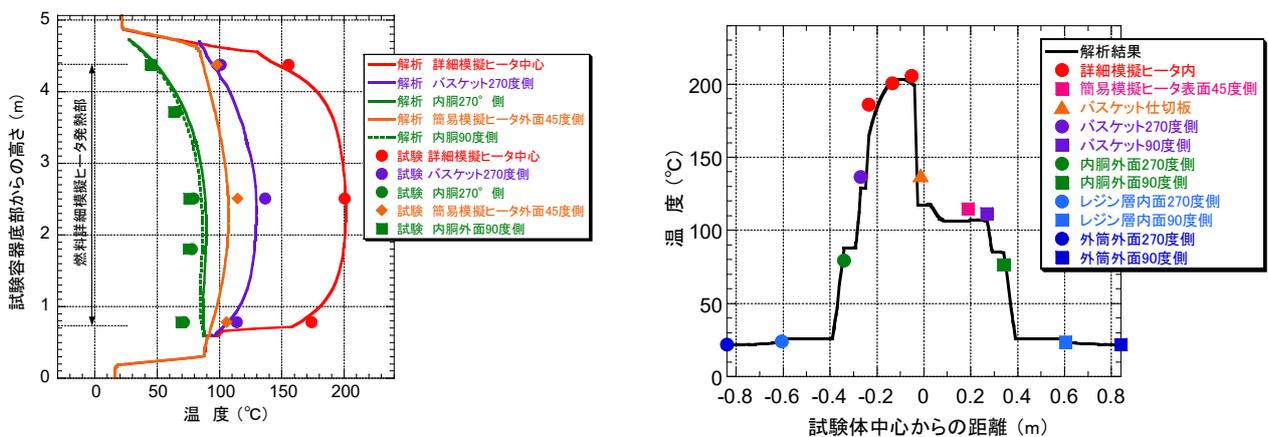


図2. 1. 6 伝熱試験における試験容器内の温度分布解析結果と測定データの比較

Fig. 2. 1. 6 Comparison between analytical and measured temperature distribution in test vessel of preliminary heat-transfer test

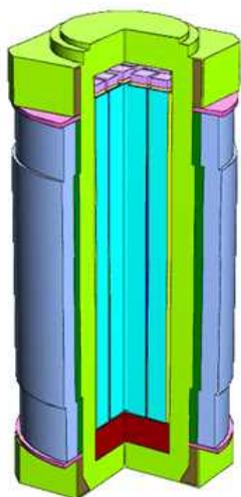
2. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価（平成 21 年度～平成 28 年度）

2. 2. 1 国産遮蔽解析コードの導入

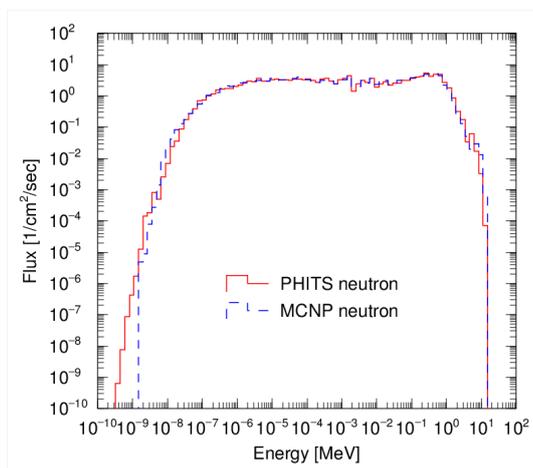
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、一般財団法人高度情報科学技術研究機構及び大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構が共同で開発した粒子・重イオン輸送統合コードシステム PHITS を導入し、限られた計算時間で統計精度を向上させる分散低減法に基づく機能を中心に、核燃料輸送物に対する遮蔽解析を効率的に行う上で有効な以下の機能の開発を行い、各機能により数倍から十倍程度の計算速度向上が可能であることを確認した。

- 分散低減法に基づいて線束などを評価する仮想検出器機能 (Tally)
- 計算体系及びエネルギーに対して設定する分散低減法である Weight Window 法のための入力パラメータを自動生成する機能
- 計算体系内で計算者が着目する領域に限定して分散低減法 (Weight Window 法) を有効に作用させることで計算時間を短縮し、計算効率を向上させる機能
- 核燃料物質による中性子増倍効果を制御する機能

また、TN-12 型核燃料輸送物に対する線量当量率実測データと比較する検証解析を行い、実測データの測定条件と PHITS での解析条件との違い（輸送架台の有無等）を考慮すれば PHITS が十分な再現性を持つことを確認した。また、図 2. 2. 1 に示すように米国製コード MCNP の解析結果との比較を行い、線量率評価に寄与が大きい高エネルギー側の領域において MCNP の解析結果によく一致することを確認した。



検証解析モデルの 3D 外観図
(TN-12 型核燃料輸送物)



側部中央表面から 15.5cm 地点における
中性子束スペクトル

図 2. 2. 1 PHITS コードによる核燃料輸送物に対する検証解析 (参 11)

Fig. 2. 2. 1 Verification of PHITS Code for Spent Fuel Package

2. 2. 2 統合熱流動解析コード群の開発

使用済燃料中間貯蔵建屋では、貯蔵された金属キャスクからの放熱にふく射伝熱の寄与が大きく、また、金属キャスクから離れた建屋壁面及び柱面のコンクリート温度評価が重要と考えられたため、既存の計算機資源で詳細な計算モデルの利用が可能で、かつ短時間で解析を完了できるよう、ふく射伝熱解析コードS-FOKSを開発した。当該ふく射伝熱解析コードS-FOKSと市販の熱流動解析コードFluentを用いた連成解析を行う機能を開発し実装した。

ふく射伝熱解析コードS-FOKSは前処理として形態係数の設定が必要であり、実規模の使用済燃料中間貯蔵建屋を対象としたモデル（表面格子数約37万個）では形態係数の設定に約50日を要していた。形態係数の設定の並列化、分割した格子のクラスタ化等の高速化を図り、12コアを持つ並列計算機でおおむね100倍の高速化を実現した。図2. 2. 2に実規模の使用済燃料中間貯蔵建屋内にキャスクを配置した場合の解析例を示す。Fluentコードのみを用いた場合約142時間を要した計算時間が、ふく射伝熱モデルとしてS-FOKSを用いることで、12時間以下で完了し、おおむね12倍の高速化を実現した。

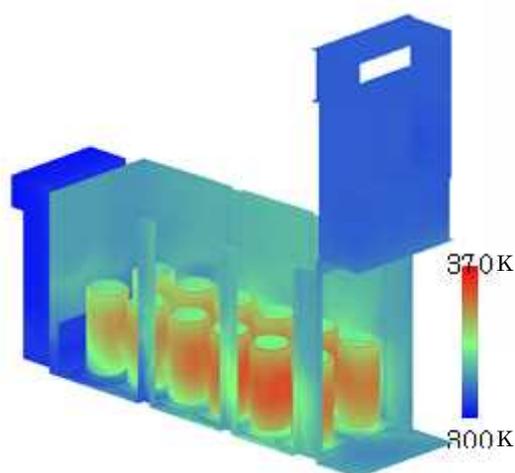


図2. 2. 2 S-FOKSコードとFluentコードを用いた使用済燃料中間貯蔵建屋内の温度分布解析例

Fig. 2. 2. 2 Calculation Results of Temperature Distribution in Spent Fuel Interim Storage Facility by using S-FOKS code and Fluent code

熱流動解析や構造解析のように、解析対象領域に対し格子分割を施して離散化する場合、数値解析で得られる結果の質は、用いる格子の良否に強く依存する。良好な格子の生成は作業者の経験と技量によるところが大きく、長い時間と多くの作業が必要である。また、計算過程で格子の最適化を逐次行うためには、格子の自動生成及び境界条件の自動再設定といった機能が必須である。こうした格子生成と最適化の工程を自動化することで、作業者の判断や技術に左右されず、また境界条件設定等での人為的な誤りの発生を避けることが可能となる。

格子生成を自動化し解適合格子生成を可能とするために、統合解析コード群の開発を行った。離散化に規則的な直行格子を用いることで、各格子位置及び寸法といった情報が不要となるとともに、これらの情報へのアクセス時間が不要となる。その結果、必要記憶容量の低減と計算時間の短縮が実現でき、大規模な解析が可能となった。

自動化した格子生成機能により解析対象物の形状が正しく捉えられることが必要である。対象物の表面の状態として凸面、凹面、平面及びこれらの交差部分が考えられる。そこで、二重円筒体系（土管形状）を対象に格子分割を行い、得られた格子の妥当性を確認した。図2. 2. 3に得られた格子を示す。格子の分割には、①界面を含む格子とその1つ内側の格子は最も細かくする、②界面から離れた格子は可能な限り大きくする、③隣接する格子の大きさは同じか、8倍（辺の長さ2倍）とする、という方針を用いた。

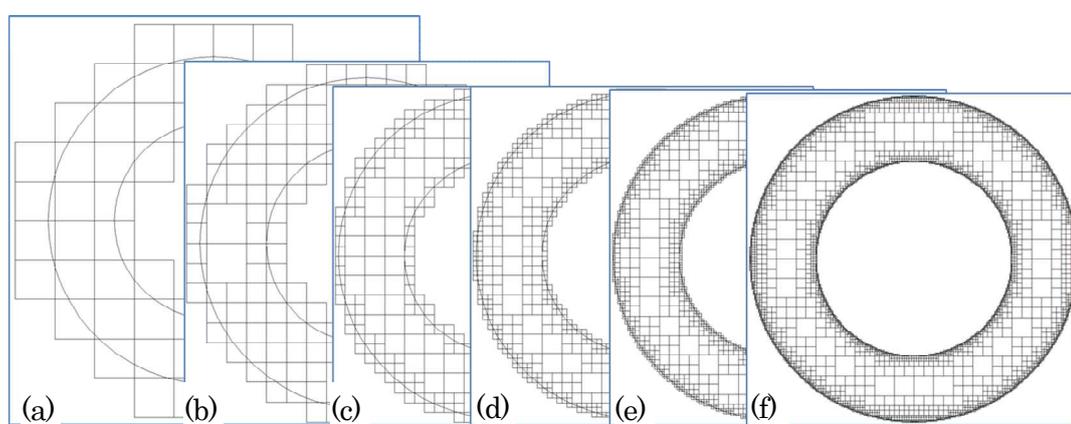


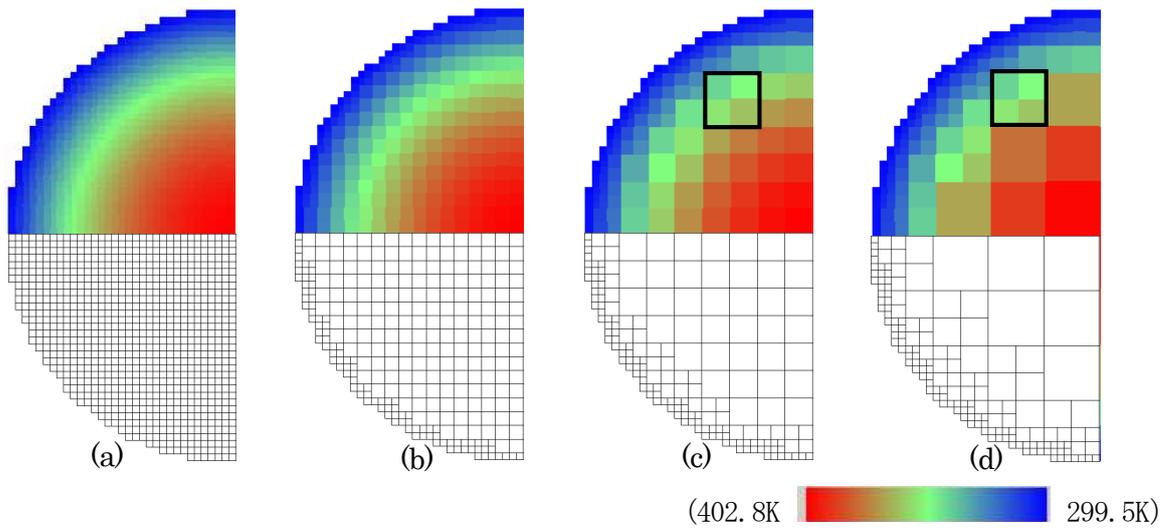
図2. 2. 3 二重円筒体系に施した格子生成の例

(a)から(f)まで順次境界に存在する格子を半分に分割し、同時に隣接する格子の大きさに2倍以上の差が生じないように調整した。

Fig. 2. 2. 3 Sample mesh generation. Boundary grid was divide into 2 from (a) to (f), and the difference of two neighboring grid size set less than 2 times.

隣接する格子の大きさが異なる箇所には、単純な差分法等とは異なった離散化手法が必要となる。ここでは、格子界面法線方向の変数の勾配が連続となるように設定することで、拡散による連続性を保証できるモデルを用いた。

モデルの妥当性を確認するため、円柱側面の温度を一様に保ち、円柱端面を断熱とし、単純な体系で拡散問題（熱伝導問題）を計算した。前述した格子分割法を用いているため、側面及び端面近傍には最も細かい格子が並び、円柱の中心付近に比較的粗い格子が作成される。図2. 2. 4 (a)から(d)に示す4つの図は、端面近傍の断面(a)から順に円柱の軸方向中央(d)に至る部分の断面図であり、各図の上半分に温度分布を、下半分に断面内の格子を示している。断面(c)及び(d)の同じ位置における温度を比較すると、(d)では隣接する格子中の温度勾配が模擬できない分、四角で示す4つの格子で大きな温度勾配が現れる結果となった。全体の熱バランスは正しく保たれ、温度分布は理論解とよく一致した。



黒枠内4点の温度 (c)
Temperature in Square

| | |
|--------|--------|
| 342.2K | 351.0K |
| 356.1K | 362.7K |

(d)

| | |
|--------|--------|
| 342.8K | 351.7K |
| 357.1K | 365.4K |

図 2. 2. 4 円柱内各断面における温度分布の比較
Fig. 2. 2. 4 Calculation Results in Cross Section of Each Elevation.

2. 3 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等（平成 24 年度～平成 27 年度）

2. 3. 1 キャニスタ SCC に係る影響因子に関する課題の抽出及びその対応

キャニスタに関する文献調査を実施するとともにこれまで調査・試験が行われていない新たな視点からの課題(SCC発生における γ 線の影響、影響因子の感度解析等)を抽出した。抽出された課題のうち、SCC発生における影響因子について、この課題の対応として、着目すべき因子を抽出することを目的に実環境下でキャニスタにSCCが発生するまでの期間を評価するコードを作成した。当該コードを用いてSCCの発生期間について、種々のパラメータが与える影響について感度解析を実施した。その結果の一例を図2. 3. 1に示す。図2. 3. 1のとおり、SCC発生までの期間に与える影響の程度を把握した。特に、塩分付着速度及び気中塩分濃度の距離依存成分の境界値がSCCの発生期間を短くすることが明らかとなった。

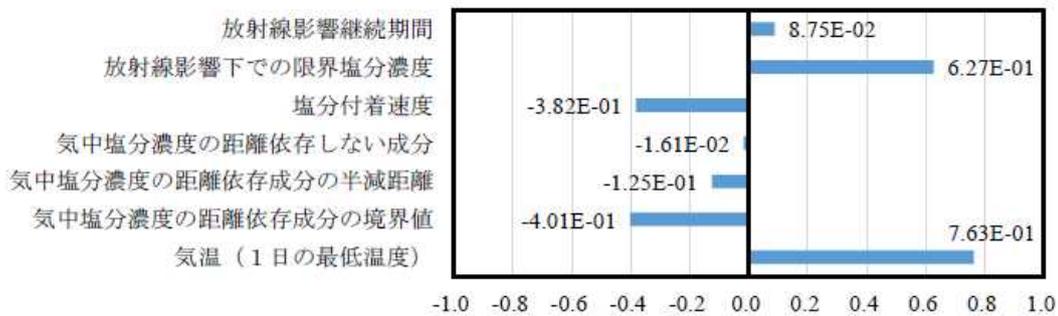


図2. 3. 1 SCC 影響因子の感度解析 (例) (参¹⁶)

Fig2. 3. 1 Sensitivity Analysis of Factors Effecting on SCC (Example)

2. 3. 2 諸外国におけるキャニスタ SCC に対する規制等の調査

NUREG-1927 (使用済燃料貯蔵施設の認可及び適合証明の更新のための標準審査指針) (参¹²)に基づく初のライセンス更新が行われたカルバートクリフス発電所の貯蔵施設における貯蔵中のキャニスタの経年変化調査概要及び NUREG/CR-7116 (使用済燃料の延長貯蔵及び輸送のための物質経年変化課題及び経年変化管理) (参¹³)の内容を調査した。ここでは、以下の4点が主要課題と指摘されていた。その中でも下記②については、特にオーステナイト系ステンレス鋼で造られたキャニスタ表面に観られる SCC のような劣化について課題であり、亀裂感受性における時間と温度の関係などの情報は不十分であるとともに、遠隔でキャニスタの亀裂検査を行う技術については開発されていない状況との情報を得た。なお、経年劣化に係る許認可手続きは、ライセンス更新時に NUREG-1927 (使用済燃料貯蔵施設の認可及び適合証明の更新のための標準審査指針) (参¹²)に従って申請者が経年劣化に係る評価を行い、その結果を規制当局が審査する流れとなっていた。

①個々の燃料被覆管のデータ

②キャニスタの SCC (亀裂感受性に係る時間と温度の関係等及び遠隔による検査技術)

③被覆管の水素ぜい化 (燃料の再取出し性)

④ボルト密封システムの長期貯蔵及び貯蔵後輸送時における密封システムの健全性

また、日本（「コンクリートキャスクを用いる使用済燃料貯蔵施設（中間貯蔵施設）に係る技術要件について」（平成 18 年 4 月 10 日旧原子力安全・保安院）^(参14)）と米国（NUREG-1567（乾式キャスク貯蔵施設の標準審査指針）^(参15)）の規制要件の比較を行った。両者の主要な相違点又は注目点として、キャニスタの蓋溶接部検査について米国では多層 PT あるいは UT のいずれかを課すのに対し、日本では両方の検査を課している点に相違が認められた。また、両国の共通的な課題としてはオーステナイト系ステンレス鋼で造られたキャニスタ表面に観られる SCC のような劣化が挙げられる。

さらに、米国以外における貯蔵施設を建設又は計画中のカナダ、スペイン、イギリス、韓国及び台湾についても調査を実施したが、SCC を特定した規制に関する情報は見いだせなかった。

3. 結論

3. 1 成果の要点

3. 1. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得

- 諸外国の動向調査により、貯蔵キャスクの経年変化、燃焼度クレジット等に係る情報を得た。
- 溶接に係る規制基準整備のため、材料試験、探傷検査検出性試験等を実施して溶接技術等の知見を得た。
- 高燃焼度燃料の健全性に対しては、動的機械特性評価試験を実施し、貯蔵及び輸送時のキャスク落下事故時における燃料健全性評価のための破損圧縮荷重や破損モードに係る知見を取得した。また、貯蔵及び輸送時のキャスク落下事故時における臨界、被ばく等の安全評価に資するペレット放出量、粒径分布等の知見を拡充した。キャスク落下事故時に想定される燃料棒軸方向圧縮荷重は今回の試験で観察された破損荷重に比較して十分小さく燃料棒破損が生じる可能性は低いこと、破損した場合においても燃料棒から放出されるペレットは燃料棒破損領域にあるペレットに限定されることが分かった。
- PWR 燃料先行貯蔵試験においては、貯蔵容器の外表面から燃料被覆管の温度を評価するためのツールを作成し、試験容器を用いた伝熱試験にて得たデータを基に妥当性確認を行った。

3. 1. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価

- 国産遮蔽解析コードとして、粒子・重イオン輸送統合コードシステム PHITS を導入し、分散低減法に基づく機能を中心にコード改良を行い、各機能により数倍から十倍程度の計算速度向上が可能であることを確認した。また、核燃料輸送物に対する線量当量率実測データ及び核燃料輸送物遮蔽解析に対する実績が豊富な MCNP の解析結果と比較する検証解析を行い、PHITS の解析結果がよく一致することを確認した。
- ふく射伝熱解析コード S-FOKS の開発、適応性確認、他コードとの連成解析機能の実装等を実施し、ふく射伝熱の影響が大きい熱流動問題の解析を 10 倍以上高速に実施可能となった。また、解析対象領域の格子分割作業を自動化して解適合格子生成を可能とするために統合解析コード群の開発し、解析結果が理論解と良好に一致することを確認した。

3. 1. 3 中間貯蔵設備長期健全性等に関する調査等

- コンクリートキャスクを用いる中間貯蔵設備の規制に必要なキャニスタ SCC 評価手法等について、影響因子に係る感度解析、諸外国（主に米国）の規制動向の調査等を実施し、将来的に規制に活用し得る情報を取得・整理した。

3. 2 目的の達成状況

平成 17 年度から平成 28 年度までに計画された各研究項目について、3. 1 に示すとおり計画どおり遂行し、本安全研究プロジェクトの目的を達成した。

3. 3 成果の活用等

3. 3. 1 中間貯蔵施設の規制基準のための科学的・技術的知見の取得

研究成果は以下の文書の作成に係る検討に活用された。

- NISA 内規「使用済燃料貯蔵施設の溶接に関する技術基準を定める省令の解釈（内規）の制定について」（平成 21. 02. 26 原院第 7 号）
- NISA 内規「使用済燃料貯蔵施設の溶接の方法の認可について（内規）」（平成 21. 02. 26 原院第 9 号）
- （社）日本機械学会「金属キャスク構造規格」の技術評価書
- 日本原子力学会「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2010」の技術評価書

3. 3. 2 使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価

使用済燃料輸送・貯蔵に係る安全解析の妥当性評価に資するために、研究成果は以下に活用された。

- コード改良された PHITS は、9975 型核燃料輸送物等の設計承認申請にて事業者が実施した遮蔽安全評価の妥当性確認に活用された。
- ふく射伝熱解析コード S-FOKS は使用済燃料貯蔵施設の各種申請における安全解析の妥当性確認に活用した。

参考文献一覧

- (参 1) K. Niita, et al., PHITS—a particle and heavy ion transport code system, Radiat. Meas., 41, pp.1080, 2006
- (参 2) H. Iwase, K. Niita and T. Nakamura, Development of General-Purpose Particle and Heavy Ion Transport Monte Carlo Code, J. Nucl. Sci. Technol., 39, pp.1142, 2002
- (参 3) 独立行政法人原子力安全基盤機構、平成 17 年度 中間貯蔵施設基準体系整備事業報告書、06 基シ報 - 0004、2006 年 8 月
- (参 4) 独立行政法人原子力安全基盤機構、平成 18 年度 中間貯蔵施設基準体系整備事業報告書、07 基シ報 - 0005、2007 年 3 月
- (参 5) 独立行政法人原子力安全基盤機構、平成 19 年度 中間貯蔵施設基準体系整備事業報告書、08 基シ報 - 0005、2008 年 12 月
- (参 6) 独立行政法人原子力安全基盤機構、平成 20 年度 中間貯蔵施設基準体系整備事業報告書(中間貯蔵施設基準体系整備)、09 廃輸報-0006、2010 年 3 月
- (参 7) 独立行政法人原子力安全基盤機構、平成 21 年度 中間貯蔵施設基準体系整備事業報告書(中間貯蔵施設基準体系整備)、10 廃輸報-0011、2011 年 3 月
- (参 8) 一般社団法人日本機械学会、使用済燃料貯蔵施設規格 コンクリートキャスク、キャニスタ詰替装置およびキャニスタ輸送キャスク構造規格、JSME S FB1-2003、2003 年 12 月
- (参 9) 独立行政法人原子力安全基盤機構、平成 22 年度 中間貯蔵施設基準体系整備事業報告書(中間貯蔵施設基準体系整備)、11 廃輸報-0010、2011 年 12 月
- (参 10) 独立行政法人原子力安全基盤機構、使用済燃料貯蔵施設用コンクリートキャスクのキャニスタ蓋溶接部の UT 検査方法の検討、JNES-RE-2013-2030、2014 年 2 月
- (参 11) 一般財団法人高度情報科学技術研究機構、平成 27 年度 遮蔽解析の高度化を目的とした PHITS の改良 成果報告書、2016 年 2 月
- (参 12) NRC、Standard Review Plan for Renewal of Spent Fuel Dry Cask Storage System Licenses and Certificates of Compliance、NUREG-1927、2011 年 3 月
- (参 13) NRC、Materials Aging Issues and Aging Management for Extended Storage and Transportation of Spent Nuclear Fuel、NUREG/CR-7116、2011 年 11 月
- (参 14) 原子力安全・保安院、コンクリートキャスクを用いる使用済燃料貯蔵施設(中間貯蔵施設)に係る技術要件について、2006 年 4 月
- (参 15) NRC、Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities、NUREG-1567、2000 年 3 月
- (参 16) 独立行政法人日本原子力研究開発機構、平成 26 年度中間貯蔵設備長期健全性等試験委託費(実環境下でのキャニスタの腐食試験等)事業報告書、2015 年 3 月

「使用済燃料等の貯蔵・輸送分野の規制高度化研究」の執筆者

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ

核燃料廃棄物研究部門

菱田政清 上席技術研究調査官

片山二郎 上席技術研究調査官

奥田泰久 主任技術研究調査官

後神進史 技術研究調査官

八木橋秀樹 技術研究調査官

広瀬誠 技術参与

丸岡邦男 技術参与

システム安全研究部門

小澤正明 技術研究調査官

廣瀬勉 技術参与