### 平成27年度

# 原子力施設等防災対策等委託費 (事故時燃料冷却性評価に関する研究)事業に関する

## 報告書

### 平成28年3月

(国研)日本原子力研究開発機構

安全研究センター

本事業は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託で実施したものです。

# 目 次

1章 緒言		1-1
2章 平成2	7 年度事業の概要	2-1
2.1 実燃	料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計	2-1
2.2 燃料	ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の準備	2-1
3章 平成2	7 年度事業の実施内容	3.1 <b>-</b> 1
3.1 実燃	料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計	3.1-1
3.1.1	実燃料入り LOCA 模擬試験の概要	3.1-1
3.1.2	実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計	3.1-1
3.1.3	既設の LOCA 模擬試験装置の再利用検討	3.1-13
3.1.4	実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計のまとめ	3.1-16
3.2 燃料-	ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の準備	3.2-1
3.2.1	燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験計画	3.2-1
3.2.2	燃料ペレット加熱装置の部材製作及び性能試験	3.2-1
4章 結言		4-1
(参考文献)		5-1

#### 1章 緒言

最近、海外では燃焼の進んだ燃料棒を対象とした冷却材喪失事故(LOCA) 模擬試験が実施されており、非常に高い燃焼度に到達した燃料の一部では被覆管の膨れ・破裂に伴うペレットの細片化、軸方向の再配置及び破裂開口部からのペレット細片の放出が生じた例が報告されている。高燃焼度燃料において LOCA 時に生じる可能性のあるこれらの現象(Fuel Fragmentation, Relocation and Dispersal : FFRD) は、以下の点で事故時の原子炉施設の安全性に影響を及ぼすと考えられる。

(1) ペレットの細片化 (Fragmentation)

細片化に伴って、ペレット内部に閉じ込められていた FP ガス等が放出される、あるいは ペレットの比表面積が増加することによって、燃料ペレット外へ放出される核分裂生成物 (Fission Products、FP)の量が増加する可能性がある。

(2) ペレットの燃料棒軸方向再配置(Relocation)

細片化したペレットが被覆管の膨れ部に集積することで、局所的に被覆管温度が上昇し、 酸化が進むことなどによって被覆管の脆化が進行し、LOCA 時あるいは LOCA 後に荷重が 負荷されることで燃料棒の冷却可能形状が失われる可能性がある。また、集積状態によっ ては再臨界の原因となる可能性がある。

(3) 破裂開口部からのペレット細片の放出 (Dispersal)

燃料棒から放出されたペレット片による冷却材流路閉塞により、炉心の冷却可能形状が 失われる可能性がある。また、放出されたペレット片が炉心の特定の箇所に集積すること で再臨界に至る可能性や、ペレット細片化に伴い FP 放出量が増加する可能性がある。さら に、放出されたペレット片が非常用炉心冷却系(ECCS)に流入することで、その稼働状態 に影響を及ぼすことも考えられる。

欧米において、規制の観点からこれらの現象をどう扱うかが課題となっており現在検討 が進められている<sup>(1)</sup>ことから、日本としても今後これらの現象への対応を考える上で LOCA 時の燃料棒内のペレット挙動に関するデータ及び知見が必要である。特に、LOCA 時及び LOCA 後の燃料挙動を解析し把握するために、被覆管膨れ部におけるペレット片の充填率、 燃料棒外に放出されるペレット片のサイズや総量、などに係る情報が必要である。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA)では、これまでに燃料被覆管のLOCA 時の破断限界を調べる試験を数多く実施してきているが、この試験ではLOCA 時の被覆管 の膨れ・破裂挙動は調べられるもののこれらの現象に伴って燃料棒内部のペレットにどの ような変化が生じるのかについての知見は得られない。また、これまでに報告されている 試験結果<sup>(1)(2)</sup>によると、ペレット細片化のしきい値は燃焼度 70 GWd/t 程度に存在するとさ れており、この燃焼度はペレットの高燃焼度組織の形成しきい値に近く、この燃焼度付近 では高燃焼度組織に類似した組織がペレットの最外周部だけでなく径方向内側の一部の領 域にも観察される場合があることから、燃焼の進行に伴うペレットの組織変化がこの細片 化と関係している可能性がある。しかしながら、ペレットの微細組織の状態と細片化発生の関係については明確になっていない。さらに、LOCA時に生じる被覆管の膨れの程度がペレットの軸方向移動及び再配置の程度にも影響を及ぼすと考えられるが、この影響についても現時点では十分に明らかになっていない。

以上の点に係るデータ及び知見を得るためには、燃料ペレットを除去しない状態の燃料 棒を対象とした LOCA 模擬試験、及び LOCA 時の温度履歴を模擬したペレット加熱試験が 極めて有効と考えられる。そこで、原子力規制委員会原子力規制庁からの受託事業「事故 時燃料冷却性評価に関する研究」において、これらの試験実施に向けて必要な準備を平成 27 年度から開始した。本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構安全研究セ ンターが原子力規制委員会原子力規制庁の委託を受け実施した、平成 27 年度原子力施設等 防災対策等委託費(事故時燃料冷却性評価に関する研究)事業で得た成果をとりまとめた ものである。

#### 2章 平成 27 年度事業の概要

事故時燃料挙動研究における新知見として、燃焼の進んだ発電用軽水炉燃料を対象とした LOCA 模擬試験時に、燃料被覆管が膨れ・破裂し、燃料棒内部のペレット片が燃料棒外に放出し得ることが報告されている。軽水炉の LOCA 時及び LOCA 後の燃料及び炉心冷却性に関して、この現象がもたらす影響を評価しておくことが必要であり、このために着目すべき重要な課題としては、 LOCA 時の燃料棒内で生じるペレットの微細化、軸方向の移動及び燃料棒外への放出が挙げられる。

本事業の目的は以下の通りである。

- ・燃焼の進んだ軽水炉燃料棒に対する LOCA 模擬試験を実施することにより、上記の現象のような LOCA 時の燃料挙動に関連するデータ及び知見を整備する。
- ・燃料ペレット単体での LOCA 時温度変化模擬加熱試験を実施することにより、燃料棒 を対象とした LOCA 模擬試験に必要な基礎データを取得するとともに、昇温時の燃料 ペレットの挙動に関連するデータ及び知見を整備する。

平成27年度事業の具体的内容を以下に述べる。

#### 2.1 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計

本事業では、軽水炉の LOCA 時及び LOCA 後における燃料挙動を把握するため LOCA 模擬試験を実施することにより、被覆管膨れ部の状態、膨れ部におけるペレット片の再配 置状態、膨れ・破裂部から燃料棒外に放出されるペレット片のサイズや放出量などに関す るデータ及び知見を取得する。これらのデータ及び知見の取得には、燃料ペレットを除去 しない状態の高燃焼度燃料棒を対象とした LOCA 模擬試験の実施が必要であることから、 平成 27 年度にはそのための試験装置の概念設計を実施した。具体的には、軽水炉の LOCA 時に燃料が経験すると考えられる温度履歴、雰囲気及び荷重を適切に模擬できる試験装置 に対して燃料ペレットを除去しない状態の高燃焼度の軽水炉燃料棒を対象とした LOCA 模擬試験が実施できるように汚染拡大防止設備を付加するなど、試験実施のために必要な 装置の概念設計を実施した。

2.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の準備

LOCA 時に高燃焼度の燃料ペレットに生じると考えられる種々の現象の把握を目的とした、LOCA 時の温度変化を模擬した高燃焼度ペレット単体の加熱試験の実施に必要な準備を実施した。具体的には、以下の2つである。

- (1) 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験計画を立案した。
- (2) 高燃焼度の燃料ペレット (製造時のペレット約1個分) を LOCA 時の燃料温度履歴 (最

高到達温度として 1200°C 程度)を模擬した条件にて加熱する試験を実施するための燃料 ペレット加熱装置に関して、試料加熱用部材(ルツボ等)及び試料周りの耐熱部材等を製 作するとともに、試験時の試料部の到達温度、加熱時の昇温速度、試験時にペレットから 放出される希ガスの分析、などの性能確認等を実施した。 3章 平成27年度事業の実施内容

#### 3.1 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計

#### 3.1.1 実燃料入り LOCA 模擬試験の概要

実機のLOCA時には、原子炉圧力の低下と温度上昇に伴う被覆管内圧の上昇及び機械 強度の低下により燃料棒が破裂し、燃料棒内部のペレット片が燃料棒外に放出する可能 性がある。ペレット片の放出が生じた場合、その粒径や量によっては、LOCA時やLOCA 後における燃料集合体や炉心の冷却性の確保及び維持に影響を及ぼす恐れがある。また、 被覆管の膨れ部にペレット片が集積することでその領域の温度が上昇し被覆管の酸化が 局所的に進行した場合、ECCSからの冷却材注入時の急冷に伴う燃料棒の破断の発生に 影響を及ぼす可能性もある。このような被覆管膨れ部でのペレット片の集積状態(ペレ ット片の充填率など)、破裂時のペレット片放出挙動、などに関するデータ及び知見を得 るためには、燃料ペレットを除去しない状態の照射済燃料棒を対象としたLOCA模擬試 験(以下、実燃料入りLOCA模擬試験)を実施する必要がある。

本試験の具体的な内容は、次の通りである。本試験に供する試験燃料棒として、燃料 ペレットを除去しない状態の短尺の照射済燃料棒に不活性ガスを加圧封入しその被覆管 表面に試験中の温度制御及び測定を行うための熱電対を数箇所スポット溶接したものを 想定する。当該試験中には、例えば図 3.1.1-1 に示す温度履歴にて試験燃料棒を加熱、昇 温する。この際、燃料棒の内圧上昇と被覆管強度の低下によって試験燃料棒が膨れ破裂 し、場合によっては膨れに伴うペレットの燃料棒軸方向移動や破裂開口部を通した試験 燃料棒外へのペレット放出が生じる可能性がある。また、破裂の後、試験燃料棒の破裂 開口位置及び膨れ量に基づき所定の被覆管酸化量に達するまでの条件(酸化温度及び酸 化時間)を算出し、この酸化温度及び酸化時間にて被覆管を酸化させた後、水を注入し て試験燃料棒を急冷する。この急冷の際に試験燃料棒には熱衝撃が加わるため、被覆管 が著しく脆化している場合には燃料棒が破断し、これに伴って内部のペレットが放出さ れる可能性もある。

膨れ破裂に伴うペレットの細片化、軸方向移動及び試験燃料棒外放出の各挙動に関す るデータ及び知見は試験後分析により取得する。また、急冷時の破断の有無から急冷時 に破断に至る被覆管酸化量のしきい値に係る情報を得るとともに、破断が生じた場合に は、試験後分析により破断時のペレット放出挙動に関するデータ及び知見を取得する。

#### 3.1.2 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計

(1) 概念設計のための基本的な仕様

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(原子力機構)では、軽水炉の LOCA 時に 燃料が経験すると考えられる温度履歴、雰囲気及び荷重を適切に模擬できる試験装置(概 略を図 3.1.2-1 に示す)を既に有しているが、現在の試験装置はペレットを取り除いた状 態の試験燃料棒を想定した設計となっており、現状のままで実燃料入り LOCA 模擬試験 を実施することは、当該試験時に想定されるペレット放出等に伴う設備汚染、試験中の ペレットからの放射性物質放出への対処の点で極めて困難である。したがって、実燃料 入り LOCA 模擬試験を実施するに当たっては、LOCA 模擬試験装置に汚染拡大防止設備 を付加するなどの対策が必要である。

実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計における基本的な仕様は、以下の通りである。また、当該装置の概念設計にあたっては、新規設計及び既設の LOCA 試験装置流用設計の2パターンを検討比較し、適切な方を選択するものとする。

実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計を行う上での基本的な仕様を以下に示す。

- ・既設の LOCA 模擬試験装置<sup>(1)</sup>を用いて取得したデータとの整合性を図る観点で、以下の試験条件及び仕様を満足させるようにする。
  - a) 試験燃料棒の仕様 : 長さ 190 mm 程度 、最高燃焼度約 90 GWd/t の UO<sub>2</sub> 及び MOX 燃料
  - b) 試験実施温度:1200°C
  - c) 試験中の燃料棒周囲の雰囲気:水蒸気
  - d) 石英ガラス管及び加熱炉に関して、既設の LOCA 模擬試験装置と同一の仕様 とする。
- ・設置場所は、既設の装置と同じホットセル内とする。
- ・取扱対象物は、図 3.1.2-2 に示す実燃料入り LOCA 試験燃料棒とする。また、実燃料 入り LOCA 模擬試験の比較対照として、燃料ペレットを除去した状態の高燃焼度の被 覆管に対する LOCA 模擬試験も実施可能とする。
- ・ホットセル内の機器及び試験燃料棒の取り扱いは、最大2台のマニピュレータにて遠 隔で行えるようにする。
- ・試験燃料棒を囲む石英ガラス管内に水蒸気及びクエンチ水を供給できるようにする。
- ・石英ガラス管内の試験燃料棒の膨れ及び破裂開口部の位置を既設の LOCA 模擬試験 装置と同程度の時間(数分程度)で速やかに確認できるようにする。
- ・加熱炉及び石英ガラスは、既設の装置と同仕様とする。
- ・加熱された試験燃料棒の急冷時(クエンチ水給水時)には、試験燃料棒に 540 N(最大)を超える引張荷重が掛からないようにする。
- ・実燃料入り LOCA 模擬試験において想定される被覆管の破裂に伴うペレット片等の 飛散、被覆管急冷時の熱衝撃その他により、試験装置の主要部、汚染拡大防止設備等 が損傷しないようにする。ただし、石英ガラス及び加熱炉については試験中の破損可 能性を想定し、実燃料入り LOCA 模擬試験時のペレット飛散、試験燃料棒の急冷時の 熱衝撃による損傷防止対策の対象外とする。
- ・試験対象の照射済燃料棒は極めて高線量であり、また試験実施に伴い当該試験装置を 設置するホットセル内も高線量の環境となり得ることから、当該試験装置の設計に当

たっては耐放射線性や除染性を十分に考慮する。

- ・当該試験装置はホットセル内に設置されることから、遠隔での操作及び監視が可能な 設計とする。また、火災等に関し十分な安全性を有するようにする。
- ・当該試験装置の耐震重要度分類はBクラスを適用する。
- (2) 実燃料入り LOCA 模擬試験装置に求められる機器及び機能

実燃料入り LOCA 模擬試験を行う際に必要となる機器及び機能を以下に示す。

なお、既設の LOCA 模擬試験装置(写真と概略図)を図 3.1.2-3 に示す。

① 引張試験機

試験燃料棒の急冷時に所定の引張荷重を負荷するための装置であり、加熱炉に よる昇温時には常時5N程度の引張荷重により試験燃料棒上端把持部を自動追従 させることができるようにする。また、冷却開始時に試験燃料棒を固定し、試験 燃料棒の急冷時に軸方向の拘束力を負荷する機能をもたせるが、540N(最大)を 超える引張荷重が掛からないようにする。

2 加熱炉

試験燃料棒の加熱炉の定格使用温度は 1200℃(設計温度としては 1400℃)と する。また、図 3.1.1-1 に示す昇温速度が容易に得られるタイプの炉とする。

③ 冷却水循環装置

加熱炉本体を冷却する装置であり、本体は操作室に設置できるようにする。

④ 石英ガラス管アセンブリ

試験燃料棒周囲を発電用軽水炉の LOCA 時を模擬した高温水蒸気雰囲気に維持 するものであり、石英ガラス、ステンレス鋼 (SUS) 製アダプタ、フランジ等に より構成されるユニット品とする。

下部フランジには水蒸気、クエンチ水等の供給ライン等を設け、石英ガラスの 仕様及びアセンブリ構造は、既設と同仕様を採用する。

⑤ 局所排気装置

汚染拡大防止のため、上部トレイの開口部近傍を吸気ダクトにより吸引し、ホ ットセル内排気口へ放出するようにする。

⑥ 蒸気発生装置及び供給ライン

発電用軽水炉の LOCA 時を想定した高温水蒸気雰囲気を模擬するため、下部フ ランジの接続口から石英管容器内に一定量の水蒸気を供給するものである。水容器、煮 沸器具により水蒸気を発生させる装置・配管等で構成され、水蒸気発生用の精製水の 補給は、操作室高所に設置した補水用タンクから行えるようにする。

⑦ 廃液回収容器

蒸気ベント、上部トレイより溢れた水を回収する容器、及び結露水・クエンチ 水等を回収する容器の2系統を有するようにする。 ⑧ 制御盤

操作室に設置される LOCA 模擬試験装置の制御盤であり、引張試験機・加熱炉 等の操作パネルを含むようにする。

- (3) 実燃料入り LOCA 模擬試験装置特有の機器の設計
  - 実燃料入りLOCA 模擬試験装置特有の機器及び機能の検討 前項にて検討した実燃料入りLOCA 模擬試験に必要となる機器及び機能に基づき、 実燃料入りLOCA 模擬試験装置特有の機器及び機能について検討した。
    - 引張荷重負荷機構の検討

試験燃料棒への引張荷重の負荷は、既設の LOCA 模擬試験装置と同様に引張試 験機を利用し、試験燃料棒への引張荷重負荷機構の検討に当たっては、装置のコン パクト化を重視してサーボモータ、ジャッキ等を利用した機構とし、ロードセル出 カやメカニカルな機構によって、試験中に発生する引張荷重値が 540 N(最大)を 超えないよう適切に制御できるようにする。

②局所排気装置の検討

概念構成を検討する上で、試験燃料棒の破損時及びクエンチ水給水時に排出され る放射性物質を回収し、ホットセル内の汚染拡大防止を図ることを重視する。また、 実燃料入り LOCA 模擬試験時に試験燃料棒の破損のみならず、試験燃料棒を囲む 石英ガラス、その外側に設置する加熱炉までが破損してしまう可能性を考慮し、試 験燃料棒、石英ガラス管アセンブリ、加熱炉はフード等により囲み、給排気機能を 設けてセル内の汚染拡大防止を図る構造とする。

試験燃料棒装荷部の検討

試験燃料棒の装荷及び石英ガラス管アセンブリの保守等を容易にするため、試験 燃料棒装荷部は前方向へスライド可能となる機能を設けるようにする。

2) 実燃料入り LOCA 模擬試験装置特有の機器の設計

上記 1)に挙げた機器について、要求仕様及び機能を満たすための設計検討を行った。

(i) 試験燃料棒の引張荷重負荷機構

実燃料入り LOCA 模擬試験において、試験燃料棒に加える引張荷重の仕様は以下の 通りである。

①加熱時(試験燃料棒 膨張時):常時5N程度の引張荷重で試験燃料棒上端把持部 を自動追従させる

②冷却時(試験燃料棒 収縮時):540N(最大)を超える引張荷重が試験燃料棒に負荷されないようにする。

上記仕様に基づき、引張方式及び引張荷重制御について検討を行った。

a. 引張方式

a) 【モータ+ジャッキ(昇降) +ロードセル(秤量)】方式

試験燃料棒への引張荷重負荷及び引張荷重値の監視は、機構的にはモータと ジャッキを用いた昇降機構にロードセルを付加させることで対応することが可 能である。そこで、ロードセルの検知荷重値を制御盤に取り込みながら設定し た引張荷重値となるようサーボモータ及びジャッキで自動追従させる方式を採 用した場合について、本試験で要求される引張力や応答性が満足されるかどう かを検討した。図 3.1.2-4 にモータ、ジャッキ及びロードセルを組み合わせた機 構の例を示す。

この機器構成による制御では、①の加熱時には本構造で引張力を満足するこ とが可能である。一方、試験燃料棒の「冷却」時に発生する急速な収縮に伴い 発生する軸方向引張荷重の変化に対し、ロードセルとサーボモータ間のタイム ラグ等を考慮するとその応答性は十分とは言えず、また試験毎に収縮速度が変 化することから、②の冷却時の必要条件を満足できないことが分かった。

よって、冷却による試験燃料棒の収縮時に最大 540 N を超えない引張荷重を 一定に与え続けることは、この機器構成を用いた制御では極めて困難である。

b) 【モータ+ジャッキ(昇降) +ロードセル(秤量) +定荷重バネ】方式

本方式では、基本的に上記 a)項にて検討した【モータ+ジャッキ+ロードセル】の方式に加え、試験燃料棒の冷却に伴う収縮の際にある一定の値を超えない引張荷重を物理的に加えることが可能となるよう、「定荷重バネ」を用いた機構を採用する。この機構で、要求の引張力を満足するかどうかを検討した。

「定荷重バネ」は荷重制御に電気的及び電子的なフィードバックを一切用い ておらず、薄板を巻いたバネが引き出されることで、ある一定の荷重を超えな い状態を作り出す。この機能を利用することにより、定荷重バネが伸びる(バ ネが伸びても荷重値は一定)ことで試験燃料棒の冷却による収縮に即座に対応 できる。

c) 引張方式のまとめ

上記の検討結果から、引張方式は上記 b)の【モータ+ジャッキ+ロードセル +定荷重バネ】の組み合わせによる機構のみが、本装置で要求される引張力を 満足することが分かった。図 3.1.2-5 にモータ、ジャッキ、ロードセル及び定荷 重バネを組み合わせた機構の例を示す。 b. 引張荷重制御

試験燃料棒の冷却による収縮に対して一定荷重を加え続けることを可能とする 「定荷重バネ」は汎用品が販売されており、メーカからの購入品の場合、要求され る荷重値(出力)に対する製作精度は±10%程度である。

試験燃料棒に加える荷重を 540 N とし、試験燃料棒上部を保持する「掴み具」 の重量を 30 N で製作するとした場合、「掴み具」は定荷重バネに負荷されること になる。この場合、必要な定荷重バネの出力は 540 + 30 = 570 N となる。また、 汎用品を調査したところ、定荷重バネの1 個あたりの最大出力は 294 N であった。

定荷重バネ1個当たりの出力を超える出力が必要となった場合、等出力の定荷重 バネの数を増やして対応することが一般的である。したがって、570Nの出力を得 ようとした場合、1個当たり285Nの出力を有するものを2個使用して「定荷重 機構」を製作することが考えられる。これに加えて、1個当たりの定荷重バネの製 作精度±10%を考慮すると、

- ① 定荷重バネの出力 285 N/個×2個 = 570 N の場合
  - ・ 定荷重機構の最大引張荷重 = 570 × 1.1 = 627 N
    - → 試験燃料棒には 627 30 = 597 N の引張荷重がかかる。
  - ・ 定荷重機構の最小引張荷重 = 570 × 0.9 = 513 N
  - → 試験燃料棒には 513 -30 = 483 N の引張荷重がかかる。

すなわち、定荷重バネの製作精度を考慮すると、定荷重機構によって試験燃料棒 に負荷される引張荷重の最小値は483Nであり、要求値の540Nに対して540 – 483 = 57N不足する。逆に、試験燃料棒に負荷される引張荷重の最大値は、要求 値の540Nに対して599 – 540 = 59N大きくなる。要求される引張荷重に到 達しない場合、定荷重バネの原理上、定荷重機構の出力を増加させることは不可能 であるが、要求される引張荷重より定荷重機構の出力が大きくなった場合は、錘を 定荷重機構に追加することで、要求される引張荷重に調整することが可能である。 したがって、要求される引張荷重より定荷重機構の出力を大きくする方向で検討す るほうが妥当である。そこで、定荷重バネの汎用品として最大出力294N/個を用 いた場合について検討を行った。

- ② 定荷重バネの出力 294 N/個 × 2 個 = 588 N の場合
  - ・ 定荷重機構の最大引張荷重 = 588 × 1.1 = 646.8 N
    - → 試験燃料棒には 646.8 30 = 616.8 N の引張荷重がかかる。
  - ・ 定荷重機構の最小引張荷重 = 588 × 0.9 = 529.2 N
    - → 試験燃料棒には 529.2 30 ≒ 500 N の引張荷重がかかる。

すなわち、定荷重バネの製作精度を考慮すると、定荷重機構によって試験燃料棒 に負荷される引張荷重の最小値は 500 N であり、要求値の 540 N に対して 540 -500 = 40 N 不足する。但し、引張荷重が 500 N になるのは定荷重バネ 2 個が共 に製作精度下限(-10%)の出力となった場合であり、定荷重バネ製品を複数個購 入し、その中から、製作仕様(0%)から製作精度上限(+10%)の出力を有するも の 2 個を選定し定荷重機構を製作することで、試験燃料棒の引張荷重が要求値を下 回らないようにすることは可能と考えられる。また、要求される引張荷重より定荷 重機構の出力が大きくなった場合は、錘を定荷重機構に追加することで、要求され る引張荷重に調整することが可能である。

③ 引張荷重制御のまとめ

定荷重バネの汎用品の製作精度(±10%)を考慮すると、汎用品として最大の出 カ(294 N/個)を有する製品を2個使用した場合、試験燃料棒に負荷可能な引張荷 重は、計算上500~540 Nとなる。

但し、定荷重機構の製作にあたり、使用する定荷重バネの出力を事前に確認し製 作仕様(0%)から製作精度上限(+10%)の出力を有するもの2個を選定すること 及び要求される引張荷重より定荷重機構の出力が大きくなった場合は錘を定荷重 機構に追加することで、試験燃料棒の引張荷重の要求値(540N)を満たすように することが可能である。

(ii) 実燃料入り LOCA 模擬試験中の汚染拡大防止

試験燃料棒の破損時及びクエンチ水による試験燃料棒の急冷を行った際に、ホッ トセル内部が試験燃料棒から放出された放射性物質によって汚染されることが想定 される。汚染が著しく広がった場合には除染が困難になり、試験の続行に支障を生 じる。このため、当該試験中の汚染拡大防止について検討しておく必要がある。

試験燃料棒の破損時において、石英ガラス管が破損に至った場合、加熱炉及びその周囲の汚染が想定されることから、図 3.1.2-6 に示すように、加熱炉までをカバー する範囲をフード構造とし、汚染の拡大を防止する方法が有効と考えられる。また、 ホットセル内への汚染拡大防止を図るとともに、汚染されるエリアを極力狭い範囲 に限定するため、当該試験装置のコンパクト化とともに当該試験装置を構成する機 器や部品の交換の容易さを図ることが望ましい。

上記の放射性物質回収の考え方を基に、当該試験中の汚染拡大防止について検討 した。

a.全体排気

汚染拡大防止のためには、放射性物質が放出される可能性がある部分をフード等

にて囲うことが有効と考えられる。囲うエリアは、汚染されるエリアを少なくする ため極力コンパクト化することが望ましいが、当該試験装置はホットセル内に設置 するため、マニピュレータによる試験準備や保守等の作業性も考慮する必要がある。 また試験燃料棒の上端は引張試験機に把持され、その把持部はロードセルにより荷 重を測定しているため、当該試験装置とフードとを接触させることは不可である。

上記検討条件を考慮した結果、加熱炉、石英ガラス管アセンブリ部をコンパクト に囲うことが出来ないと判断し、当該試験装置の引張試験機の周囲をフードにより 囲う構造とする。図 3.1.2-7 に当該試験装置の全体排気構造を示す。

#### b.局所排気

上記 a.に述べた全体排気(装置全体フード化)の検討結果より、放射性物質が放 出された際は、フード内全てが汚染されるほか、クエンチ水による試験燃料棒の急 冷時には、大量の水蒸気の発生が想定される。また、汚染拡大防止の観点から水蒸 気の放出部を局所的に排気できることが望ましい。この水蒸気は、試験燃料棒上部 を把持する部分(上部フランジ水受け容器)の狭い開口部から放出されるため、そ の上部に局所排気用のケースを新たに設置することにより、水蒸気を溜めるエリア を設け、ケース内を局所排気する構造とする。局所排気部構造を図 3.1.2-8 に示す。

排気方式(ケース内の吸引)は、ブロワ及びポンプにより行うものとし、発生す る放射性物質が含まれた水蒸気を回収できるよう、ケースに複数のエア吸い込み口 を設けることとする。なお、エア吸い込み口は、開度調整及びプラグによる閉止が 可能な構造とする。

c. 排気の処理

実燃料入り LOCA 模擬試験中には、試験燃料棒からの多量の放射性物質の放出 が想定される。放出された放射性物質は、上記で検討した局所及び全体排気機構 を通過した後ホットセル内に排出され、ホットセル内排気口から施設の換気系に 導かれる。

ホットセル内の汚染及び施設から排出される放射性物質の量を極力低減する ためには、試験装置の排気系からホットセル外への放出前にフィルタ等で捕集す ることが有効と考えられる。試験装置の詳細設計に当たっては、このために必要 な対策及び機器類についても具体的に検討を行うべきである。

d.汚染拡大防止のまとめ(全体排気+局所排気)

放射性物質が放出される部分を局所排気により回収することは、汚染拡大防止 のうえで効果的であるが、試験燃料棒の破損時に石英ガラス管が破損した場合を考 慮すると、局所排気の効果も薄れてしまうため、この局所排気とあわせて全体排気 も並行して行える構造を採用する。

図 3.1.2-9 に全体排気と局所排気とを組み合わせた構造の一例を示す。ホットセル内の汚染及び施設から排出される放射性物質の量を極力低減するために、排気機構にフィルタを配置する等の対策も必要と考えられる。

(iii) 試験燃料棒装荷部

実燃料入り LOCA 模擬試験装置において、試験燃料棒を加熱する加熱炉、試験燃料 棒を囲む石英ガラス管アセンブリは、既設の LOCA 模擬試験装置で得られた試験デー タとの整合性を考慮し、これらの仕様は変更しないこととする。また、これまでのマニ ピュレータによる作業性及び保守内容についても既設の LOCA 模擬試験装置での実績 に鑑み、基本的な構造変更は行わないものとする。

局所排気用ケースの取り付けによる構造検討結果を以下に示す。

a. 局所排気用ケース

既設のLOCA 模擬試験装置では、石英ガラス管の上側には上部フランジが接続さ れており、その水受け容器として上部トレイを設けているが、引張試験機の試験燃 料棒掴み具から上部トレイまでの空間が狭く、この寸法及び位置関係では局所排気 用ケースを設置することは非常に困難である。また、荷重を検知するロードセルに 影響を及ぼすことから、上部トレイ及び局所排気用ケースが引張試験機の試験燃料 棒掴み具に接触しないよう、ある大きさの空間を確保する必要がある。さらに、試 験燃料棒の組み込みでは、試験燃料棒の上部と引張試験機の試験燃料棒掴み具の取 り合いがあることから、局所排気用ケースは試験燃料棒掴み具のレベルより下方に 設ける必要がある。

上記の検討結果より、局所排気用ケースの取り付けスペースを確保するため、既 設の LOCA 模擬試験装置よりも石英ガラス管の長さを短くし(具体的には、既設の 装置で使用されているものより 20 mm 程度短くし)、これによって局所排気用ケー スの設置に必要な空間を確保することとする。また、局所排気用ケースの取り外し は行わないものとし、試験燃料棒を試験装置に装荷する際は、局所排気用ケース上 面の開口部から挿入するようにする。

なお、石英ガラス管の外径及び内径は既設の LOCA 模擬試験装置と同一とする。 また、試験燃料棒と加熱炉の位置関係(試験燃料棒の加熱範囲)は既設の装置と同 じになるようにする。さらに、試験燃料棒は熱電対連結線を繋げた状態で試験装置 に装荷することを考慮し、熱電対連結線も挿入可能な長穴の切り欠き状開口部(カ バー付)を設けることとする。

図 3.1.2-10 に熱電対連結線取り出し部の構造を示す。また、図 3.1.2-11 に局所排 気用ケースの設置図を示す。 LOCA 模擬試験において試験燃料棒を急冷する際には、石英ガラス管内が極力満 水となるよう、クエンチ水の供給バルブを手動で開閉し水位を調節する必要がある。 この操作において石英ガラス管の上端よりクエンチ水が溢れた場合を想定し、既設 のLOCA 模擬試験装置では溢れた水が上部トレイに溜まるようになっている。溜ま った水は排水ラインを通して排出されるようになっているが、クエンチ水の供給量 によっては、多量の放射性物質を含む水が上部トレイから溢れて試験装置の汚染等 を招く可能性がある。このため、既設の装置よりも上部トレイ容積を拡大させて溢 水防止を図るようにする。

また、上部トレイのケースはステンレス製であり、トレイ内の水位が目視で確認 できないことから、前面及び背面を透明な材料の窓とする。

図 3.1.2-12 に容積を拡大した上部トレイの構造を示す。

c. 上部トレイの容積拡大に伴う補強用受台の追加

既設の LOCA 模擬試験装置では、上部トレイは石英ガラス管のみで支持されてい る構造となっている。上部トレイの容積拡大、荷重増加による石英ガラスの破損が 考えられるため、上部トレイには別途受台を設けることとする。

図 3.1.2-13 に上部トレイ容積拡大に伴い追加した受台の構造を示す。

(4) 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の配置検討

上記で検討を行った個別の機器について、試験実施後の汚染、放射線劣化等による 交換を考慮し、実燃料入り LOCA 模擬試験装置としてフード内に収納するための配置 検討を行った。この配置検討では、マニピュレータによる保守・作業性を考慮しフー ドの大きさ(装置外形)の検討も行った。

1) 引張試験機とフードの取り合い

引張試験機は、モータ、ジャッキ、ロードセル、荷重一定保持装置等により構成 されている。このうち電装品であるモータ、ロードセル等は部品交換が想定される ことから、モータ及びジャッキ部についてはベースを基準とした一体物の構造とす る。

また、ホットセルに設置されている天井クレーンは揚程が低く、フード上部から のアクセスが困難である点を考慮し、フード天井の中央、前面側に切り欠きを設け、 スライドさせることにより交換可能な構造とする。図 3.1.2-14 に引張試験機とフー ドの取り合い関係を示す。

石英ガラス管アセンブリは、マニピュレータ操作により試験燃料棒組み込み及び 取り外し等を行うことから、スライドベースによりフード内から手前(フード外) に引き出し可能な構造とする。

2) 石英ガラス管アセンブリ

本機構は、既設の LOCA 模擬試験装置と同様であるが、新たに局所排気用ケース が追加され、排気用のホースが接続される。このホースはマニピュレータによる操 作及び汚染による交換等を考慮し、はめ込む形の接続構造とする。

3) 加熱炉

加熱炉の取り付け方法は、フード内に設置した取付けシャフト(固定)に差し込 む形とする。交換の際は、石英ガラス管アセンブリ等を取り外し後、マニピュレー タにて加熱炉専用治具を掴み、加熱炉に引っ掛けた後、上下方向への抜き差しする ことで交換可能な構造とする。

4) フード構成及び機器の配置

フードは角型の4本の縦梁により構成され、4辺の縦梁中心近傍の横梁を3ヵ所 繋ぎ合わせる構造とする。また、前方向については一体構造のベースによる移動を 考慮し梁無しとする。天井面は板のみとし、手前方向にベース(モータ及びジャッ キ)設置用の切り欠きを設ける。

前面、左右側面、背面の4面には、装置内部の目視確認を行えるよう透明パネル を設置する。また、前面パネルはマニピュレータによるフード内機器の操作等のた め、容易に取り外し可能な扉方式の構造とする。図 3.1.2-15 に全体フードの構造図 を示す。なお、透明パネルの材質については、試験燃料棒加熱時の安全性を考慮し て今後検討を進めることとする。

実燃料入り LOCA 模擬試験装置の構成機器について、フード内への配置検討を行った結果を図 3.1.2-16 に示す。

(5) 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の電気計装設計

実燃料入り LOCA 模擬試験装置における電気計装設計の概念検討では、電気設備の 基本構成に主眼を置き、電気計装配線等について検討した。

1) 検討項目の概要

電気計装検討項目は以下の通りとする。

遠隔コネクタの検討

実燃料入り LOCA 模擬試験装置のフード内機器は、その特異性から容易に取り 外し交換可能な状態を有する必要があるため、電気計装配線は遠隔コネクタによ りフード壁面と取り合う必要性がある。 ② 耐放射線性を有するケーブル類の検討

ホットセル及びフード内で使用する電気計装配線は、十分な耐放射線性を有す る必要がある。

2) 検討結果

上記の1)の項目に関する検討結果を以下に示す。

a. 遠隔コネクタの検討結果

ホットセル内の機器及び試験燃料棒の取り扱いはマニピュレータにて行うため、 接続する電気計装配線の接続コネクタとして遠隔コネクタを選定することが必須 である。

① 遠隔コネクタの構成

遠隔コネクタは、耐放射線性及び絶縁性能を担保する上で、コネクタ内部の 絶縁体の材質も考慮が必要となる。

コネクタ部材は以下にて構成されるため、それぞれに耐放射線性が要求され る。

- ・シェル材 : コネクタ外装面
- ・ 絶縁体 : 導体接続部の周囲部(芯線間絶縁部分)
- Oリング材 : コネクタ嵌合部
- ・コネクタピン : 導体接続部
- ② コネクタ各部材の検討

各部材の調査結果を以下に示す。

a) シェル材及び絶縁体

原子力施設のように、放射能や硝酸の蒸気に曝される環境で使用する場合、 アウターシェルは AISI304 ステンレススチールが適している。また絶縁体と なる部分は、耐放射性能の観点から PEEK 材が絶縁体・温度特性も含めて適 している。

b) O リング材

Oリング等の気密部分は基本的に各種のゴム材が用いられるが、その中で も最も耐放射線性に優れた EPDM 材を用いることが望ましい。

c) コネクタピン

コネクタピンに関しては、特にハンダ付け不良による故障の低減を考慮し、 施工性の良い圧着式(クリプトンコンタクト)が適している。 b. 耐放射線性を有するケーブル類の検討結果

検討において最も注意すべき点は、放射線による絶縁劣化及び絶縁破壊の影響が 最も少ない絶縁材料を選定することである。

本調査時点において、最も絶縁性の高い高分子材料はポリイミドであり、最も高 い耐放射線性能を有する。しかしポリイミドは可塑性が低く、ケーブル製作時の押 し出し成型ができないため、テープ状にして巻き付けることとなるが、この場合は 接着剤等の材質が問題となるため実用的ではない。

現状の押し出し成型で製作可能なケーブルは PEEK 材を使用したケーブルであ り、現時点では PEEK 材のケーブルを採用するものとする。また、γ線照射(10 MGy)の照射後においてもケーブルの電気性能(絶縁性能)、難燃性を保持する等 の結果が得られている。

以上のような検討・調査結果より、電気計装配線に使用する電線・ケーブル類と して、PEEK 絶縁電線・ケーブルや耐放射線性ノンハロゲン難燃性ケーブルが考え られる。

なお、ロードセル等の専用ケーブルに関してはインピーダンス特性等の影響を考 慮する必要があるため、メーカとの十分な協議が必要である。

c. 電気計装設計のまとめ

遠隔コネクタは、耐放射線性及びホットセル内のマニピュレータでの作業性を 考慮した物を採用することで対応可能となる。

電線・ケーブルについては、現時点で他の原子力施設でも難燃性等の観点で協 議となっている状態である。今後の他の原子力施設の動向も考慮しながら最終決定 するものとする。

- 3.1.3 既設の LOCA 模擬試験装置の再利用検討 既設の LOCA 模擬試験装置に関して、再利用の可否を調査・検討した。
  - ① 既設のLOCA 模擬試験装置の構成

既設の LOCA 模擬試験装置は以下に示す機器で構成される。

a) 引張試験機

試験燃料棒に引張荷重を加える装置である。

- b) 荷重一定保持装置(引張試験機に取り付けられた状態で使用) 試験燃料棒に一定値までの引張力を加える装置である。
- c) 加熱炉

試験燃料棒を加熱する炉である。

3章

d) 冷却水循環装置

加熱炉本体を冷却する装置である。

- e) 石英ガラス管アセンブリ 試験燃料棒を包むガラス管である。
- f) 局所排気装置

試験時に発生する放射性物質を回収する装置である。

g) 蒸気発生装置

試験にて使用する水蒸気を発生させる装置である。

- h) 蒸留水供給タンク及び供給ライン 蒸気発生装置に供給する蒸留水を溜めるタンク及び供給ラインである。
- i) クエンチ水供給ライン 石英ガラス管アセンブリ内にクエンチ水を供給するラインである。
- j) 廃液回収容器-1

蒸気発生装置の蒸気ベントラインより発生する水、クエンチ水のオーバーフロー 水を回収する容器である。

k) 廃液回収容器-2

クエンチ水及び配管内結露水を回収する容器である。

制御盤

当該試験装置の制御盤である。

② 既設の LOCA 模擬試験装置及び付属機器類の再利用可否検討結果

ホットセル内に既設の LOCA 模擬試験装置及び付属機器類には、長年にわたる試験 の実施に伴う汚染があり、再利用するために改造工事等を行うとしても、その除染及 び搬出等が著しく困難と想定される。また、既設の試験装置類は平成17年度<sup>(1)</sup>に現在 のホットセルに移設・整備されたものであり、その後の経年劣化等が生じている可能 性がある。これらの点を踏まえると、既設の試験装置及び付属機器を再利用するメリ ットは少なく、試験実施に係る安全性を確保する観点からは試験装置全体を更新する 方が望ましいと考える。

以下に、既設の試験装置類の再利用可否検討結果の詳細を示す。

a) 引張試験機

実燃料入り LOCA 模擬試験を行う場合、引張試験機には、試験燃料棒の破損に 伴う汚染拡大を防止するための十分な能力を有する局所排気機構を取り付ける 必要がある。また、試験燃料棒の破損時に石英ガラス管アセンブリや加熱炉が破 損した場合を想定し、実燃料入り LOCA 模擬試験装置全体をフードで囲むことが 必要である。既設の LOCA 模擬試験装置には、現状、試験燃料棒上端付近に局所 排気機構を取り付ける空間的な余裕がなく、また引張試験機のサイズが大きく、 除染を含めたメンテナンス性に優れたフードで試験装置全体を囲むことが困難 である。これらの観点から既設の引張試験機に改造等を加え再利用するメリット は少ない。すなわち、引張試験機については、局所排気機構に全体排気のための フードを加えた新規設計、新規製作にて対応する方が望ましい。

b) 荷重一定保持装置

一定荷重を保持するための定荷重バネは、引張荷重値の確認及び調整作業を必要とするが、荷重一定保持装置はホットセル内に設置されているため状態確認が困難である。長期間使用されてきたものであり、引張荷重値の精確度を確保する上では、除染、搬出して調整し再利用するよりも、新たに製作し交換する方が望ましい。

c) 加熱炉

既設の装置に付属する加熱炉は赤外線イメージ炉である。セル内に設置されて いるため状態確認が困難であり、また試験燃料棒から放出された放射性物質によ る汚染があり、遠隔対応等改造のために除染して搬出することが困難である。ま た、長期間使用されてきたものであり経年劣化を生じている可能性が高い。これ らを考慮すると、既存のものを再利用するよりも新品を利用する方が望ましい。

d) 冷却水循環装置

既設の冷却水循環装置はホットセル外の設置機器である。約 10 年間使用して おり、配管等に経年劣化が想定されるため、新品を利用する方が望ましい。

e) 石英ガラス管アセンブリ

試験燃料棒上端付近に汚染拡大防止のための局所排気機構を取り付ける空間 を設けるためには石英ガラス管を 20 mm 程度短くする必要があり、新規に設計 及び製作が必要である。

f) 局所排気装置

既設の LOCA 模擬試験装置にも局所排気装置が設置されているが、あくまで簡 易的なものであり、実燃料入り LOCA 模擬試験時の汚染防止に必要な排気性能を 有しているとは言えないことから、再利用は不可である。

g) 蒸気発生装置

蒸気発生装置は、ホットセル内に設置されている。試験燃料棒から放出された 放射性物質による汚染があり、遠隔対応等改造のために除染して搬出することは 困難である。新規に設計製作等を行う方が望ましい。

h) 蒸留水供給タンク及び供給ライン

蒸留水供給タンクはホットセル外に設置、供給ラインはホットセル内外を結ん でいる。現状では本タンク及びラインについては再利用できると判断される。但 し、実燃料入り LOCA 模擬試験装置の全体フードとの取り合い等により、ホット セル内の供給ラインの取り回しについては適宜見直す必要がある。

i) クエンチ水供給ライン

ホットセル外のクエンチ水供給ラインについては再利用できると判断される。 但し、実燃料入り LOCA 模擬試験装置の全体フードとの取り合い等により、ホッ トセル内の供給ラインの取り回しについては適宜見直す必要がある。

j) 廃液回収容器-1

既設容器は市販の樹脂(ポリカーボネイト製等)の容器である。放射性物質に よる汚染のレベルが高く、現状でも定期的な交換を行っている。除染を行い再利 用するメリットがないことから、新品を利用する方が望ましい。

k) 廃液回収容器-2

上記 j)と同様である。

制御盤

既設の制御盤は、既設のLOCA 模擬試験装置専用に設計及び製作されたもので ある。装置の仕様及び構成が変更となった場合に再利用できる可能性は殆どなく、 新規に設計及び製作する方が妥当である。

3.1.4 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計のまとめ

実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計結果を以下にまとめる。

(1) 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計の要点

【試験燃料棒の引張荷重負荷機構】

試験燃料棒の加熱時には、ロードセルの荷重値に基づきサーボモータで試験燃料棒上 端把持部を試験燃料棒の伸びに自動追従させる構造とした。また、冷却時及び急冷時の 試験燃料棒に負荷される引張荷重が 540 N を超えないようにするため、定荷重バネを 用いた定荷重機構を採用した。

【実燃料入り LOCA 模擬試験装置】

試験燃料棒破損時に放出される放射性物質の飛散を防止するため、石英ガラス管アセ ンブリ上部にケースを設けて回収すると共に局所排気装置により排気する構造とした。 また、試験中の放射性物質の飛散や石英ガラス管の破損等を考慮して、試験装置全体を 包むフード(またはボックス)を設け、その内部を排気する構造とした。なお、試験装 置はフードごとホットセル内に設置し、局所排気装置からの排気はホットセル内の汚染 拡大防止のためフィルタを通過させた後、ホットセル内に排出する構造とした。

実燃料入り LOCA 模擬試験はホットセル内で実施されることから、上記の構造設計 に当たってはマニピュレータによる作業性及び除染等の保守性を考慮した。 (2) 既設 LOCA 模擬試験装置の再利用に係る検討

実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計の検討に基づき、既設 LOCA 模擬試験装置の再利用について検討した。その結果、既設の試験装置に対して本概念設計による構造変更に係る改造を行うためには、特にセル内に設置された試験装置及び付属機器の除染及び搬出が必要であるが、その作業の困難さ等を考慮すると現実的でなく、また、既設の試験装置及び付属機器は平成 17 年度<sup>(1)</sup>にセル間の移設・整備等がされたものであり、経年劣化等に伴う今後の不具合発生を考慮すると再利用は避けるべき時期に来ている。これらの検討結果に基づき、既設の試験装置の更新を原則として、実燃料入りLOCA 模擬試験装置の整備を進めることとする。



図 3.1.1-1 試験時の被覆管温度と荷重の履歴



図 3.1.2-1 LOCA 模擬試験装置の概要



図 3.1.2-2 実燃料入り LOCA 模擬試験燃料棒の構造





図 3.1.2-3 既設の LOCA 模擬試験装置の概要



「サーボモータ」+「ロードセル」方式 \*ロードセルの値を検知しながら、全てモータにて 制御を行う方式。

図 3.1.2・4 モータ、ジャッキ及びロードセルを組み合わせた機構の例



図 3.1.2-5 モータ、ジャッキ、ロードセル及び定荷重バネを組み合わせた機構の例



図 3.1.2-6 フード範囲のイメージ



図 3.1.2-7 装置の全体排気構造



矢印は排気の流れを示す

図 3.1.2-8 試験燃料棒上端近傍の局所排気部の構造



図 3.1.2-9 全体排気と局所排気とを組み合わせた構造



図 3.1.2-10 熱電対連結線取り出し部の構造



図 3.1.2-11 局所排気用ケースの設置図



図 3.1.2-12 容積を拡大した上部トレイの構造



図 3.1.2-13 上部トレイ容積拡大に伴い追加した受台の構造



図 3.1.2-14 引張試験機とフードの取り合い関係



図 3.1.2-15 全体フードの構造図



図 3.1.2-16 全体フード内の機器配置図

3.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の準備

LOCA 時の温度変化を模擬した高燃焼度ペレット単体の加熱試験の実施に必要な準備 として、燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験計画の立案、並びに燃料ペレット 加熱装置の部材製作及び性能試験を実施した。

3.2.1 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験計画

LOCA 時の燃料ペレットの細片化現象については、先行研究により推定されている発生 の燃焼度しきい値(約 70~75 GWd/t)<sup>(1)</sup>及び燃焼の進展に伴う微細組織変化が生じ始め るとされる燃焼度(約 70 GWd/t)<sup>(2)</sup>の比較から、燃焼の進展に伴う燃料ペレット微細組織 変化(高燃焼度組織の形成、粗大化した FP ガス気泡の高密度析出、等)が大きく関係し ていると考えられる。この微細組織変化が細片化現象に及ぼす影響を明らかにするため、 LOCA 時の温度変化を模擬した条件下で燃料ペレットを加熱しその内部の微細組織変化 状態と細片化発生の有無に着目した試験を実施する。

この試験において最も重要な点は、燃焼の進展に伴う微細組織変化を生じた燃料ペレット ト試料を用いることである。使用する燃料ペレットの量としては、細片化現象をマクロな 観点で調べるためには、製造時の燃料ペレット1個分(長さ約10mm)程度があれば十分 と考えられる。また、JAEA が現在有している高燃焼度燃料として、PWR 照射済ウラン 燃料については 68~73 GWd/t、BWR 照射済ウラン燃料については 41~91 GWd/t のもの があり、これらの燃焼度範囲は、先行研究<sup>(1)</sup>により推定されている燃料ペレット細片化の 燃焼度しきい値をカバーしているとともに、燃焼の進展に伴う微細組織変化が生じ始める とされる燃焼度<sup>(2)</sup>にも到達しており、本試験の目的に適しているといえる。

今後、燃料ペレットの残存量、燃料ペレットの微細組織状態の確認、等を行い、加熱試 験に適した試料の具体的な選定を進める必要がある。

3.2.2 燃料ペレット加熱装置の部材製作及び性能試験

アウトガス分析装置の概要

燃料ペレット加熱装置として、アウトガス分析装置(Out Gas Analyzer: OGA)<sup>(3)</sup>を採用した。OGA は燃料ペレットを真空中で加熱しながら、四重極質量分析計を用いて燃料 ペレットからの放出ガスをリアルタイムに連続的に分析する装置であり、燃料ペレットから核分裂性ガス(FP ガス)が放出される温度を特定することが可能である。LOCA 時の 燃料ペレットの細片化に伴って、ペレットの結晶粒内又は粒界から FP ガスが放出される ことが予想されることから、OGA は燃料ペレットの細片化現象が起こる温度しきい値を 評価する試験に適していると考えられる。また、OGA は試料の加熱に高周波誘導加熱方 式を採用し、短時間に目的温度まで昇温可能であり、LOCA 時の温度履歴を模擬するのに 適している。OGA の主な仕様を表 3.2-1 に、加熱炉の外観を図 3.2-1 に示す。 (2) 部材製作

高燃焼度の燃料ペレット(製造時のペレット約1個分相当)をLOCA時の燃料温度履歴 (最高到達温度として1200°C程度)を模擬した条件にて加熱する試験を実施するための 燃料ペレット加熱装置(OGA)に関して、試料加熱用部材(ルツボ等)及び試料周りの耐 熱部材等を製作した。製作した部材を表 3.2-2 にまとめる。

試料用ルツボはタングステン製とした。これは、照射済み燃料から放出される FP ガス を吸着しないこと、及び約 1200℃ の温度条件においても十分な耐熱性を有していること を考慮し決定した。

(3) 性能試験

(a) 昇温試験

燃料ペレット加熱装置である OGA の性能試験として、試料を投入しない状態のるつぼ の昇温試験を実施した。試験条件は、目標到達温度を 1250°C とし、この温度にて 5 分間 保持(等温酸化)した。昇温はワンステップ昇温とし、昇温速度を 5 及び 10°C/s とした。 これは、「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」(ECCS 性能評価指針)(4)に おいて規定される被覆管最高温度が 1200°C 以下であること、及び典型的な LOCA 解析に おける燃料棒の昇温速度<sup>(5,6)</sup>を考慮し決定した。試験条件を表 3.2-3 に示す。

昇温試験結果を表 3.2-4 及び図 3.2-2(1)~(2)に示す。等温酸化中のルツボの温度は安定し ており、その平均値は約 1250°C、標準偏差は約 1%であった。目標到達温度である 1250°C に到達する際にオーバーシュートが見られ、この時のルツボ温度の目標到達温度からのず れは 5 及び 10 °C/s の昇温速度のケースについて、それぞれ最大で約 20°C 及び 60°C であ った。今後、PID のパラメタの調整等により、昇温時のオーバーシュートを改善する予定 である。

(b)標準ガスの定量分析

OGA のガス分析装置の性能試験として、標準ガスの定量分析を行った。標準ガスとして、Xe、Kr、He、及びArがそれぞれ10%:10%:10%:70%の体積割合で混合された標準ガスを用いた。この標準ガスを分析装置に直接流すことで標準ガスの定量分析を行い、 測定結果であるガスの分圧値と実際のガス流量の関係を得た。得られた結果を図 3.2-3 に示す。なお、燃料ペレットのLOCA時温度変化模擬加熱試験において試料から放出されることが予想される FP ガスは、今回分析に用いた標準ガスとは同位体存在比が異なる。同位体存在比が異なる場合、ガス量の補正が必要であることから、FP ガスの定量分析に際しては、定性分析を同時に実施し、FP ガスの同位体存在比を確認することが必要である。

	加熱方法     高周波誘導加熱方式(間接加熱		
高周波加熱炉	最高加熱温度	2300°C	
	到達真空度	10 <sup>-4</sup> Pa	
	定格出力	30 kW	
古田沭季酒	電源入力	AC 3 <b>q</b> 200 V 36 kVA	
向问仪电你	発信周波数	10~30 kHz	
	冷却方式	水冷式	
	定格出力	30 kW	
高周波発信機	発信周波数	15~25 kHz	
	制御方式	PID 制御	
	測定範囲	300~2500°C	
₩₩月中計		800°C 未満:±4°C	
放射温度計 (ファイバー式)	测学样中	800~1500°C:測定值±0.5%	
	側足相及	1500~2000°C:測定值±1.0%	
		2000°C以上:測定值±2.0%	
	マスレンジ	1~200 amu	
四重场质县公托社	検出器	ファラディ/ SEM	
凹里極負重分析計	最大使用圧力 1.3×10 <sup>-1</sup> Pa		
	最小検出分圧	2.0×10 <sup>-9</sup> Pa	

表 3.2-1 燃料ペレット加熱装置(OGA)の主な仕様

表 3.2-2 製作部材一覧

No.	品名	材 質、型 式、品 番	数量
1	加熱るつぼ		5
2	サセプタ		1
3	下部反射板		4
4	上部反射板		7
5	上部反射板(支持板)		1
6	下部反射板支持台取付けネジ		4
7	上部反射板支持台取付けネジ		4
8	下部反射板支持台取付けカラー	カンガマニン	4
9	上部反射板支持台取付けカラー	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	4
10	反射板取付け長ネジ		6
11	反射板取付けナット		6
12	反射板取付けカラー (L5)		36
13	反射板取付けカラー (L10)		6
14	るつぼガイド反射板取付け長ネジ		2
15	るつぼガイド反射板		3
16	るつぼガイド反射板取付けカラー		2
17	温度測定ポート石英	法田工士	4
18	保護石英	透明有央	2
19	るつぼガイドフィルタ	QUIC 陸江 A 尾 マ レンシント	4
20	チャンバー内フィルタ	505 焼稻金属エレグント	1
21	ドライ真空ポンプ ACP15 電源ケーブル付き	V5SATSMFJF	1
22	NW50 SUS フレキチューブ	NW50-800	4
23	NW25 SUS フレキチューブ	NW25-500	3
24	NW25 センターO リング	NW25	4
25	NW50 センターO リング	NW50	4
26	NW25 クランプ	NW25	4
27	NW50 クランプ	NW50	4
28	バイトン 0 リング	P18	4
29	バイトン 0 リング	V24	4
30	バイトン 0 リング	V34	6
31	バイトン0リング	V40	10
32	バイトン0リング	V175	10
33	バイトンOリング	V225	5

表 3.2-3 昇温試験条件

試験番号	昇温速度 (°C/s)	目標到達温度 (°C)	保持時間 (s)
1	5	1950	5
2	10	1200	5

表 3.2-4 昇温試験結果

試験番号	日泊,半年*1	等温酸化時*2のルツボ温度		
	并温速度*1 - (℃/s)	平均温度 (°C)	標準偏差 (°C)	最高温度 (°C)
1	5	1253	7	1274
2	11	1253	12	1307

\*1:400~1195°Cの昇温過程について、昇温速度を評価。

\*2:目標到達温度-5℃以上の温度範囲と定義。







(1) 昇温速度:5°C/s



(2) 昇温速度: 10°C/s

図 3.2-2 昇温試験時のルツボの温度履歴



図 3.2-3 標準ガスの定量分析結果

#### 4章 結言

最近、海外では燃焼の進んだ燃料棒を対象とした冷却材喪失事故(LOCA) 模擬試験が実施されており、非常に高い燃焼度に到達した燃料の一部では被覆管の膨れ・破裂に伴うペレットの細片化、軸方向の再配置及び破裂開口部からのペレット細片の放出が生じた例が報告されている。高燃焼度燃料において LOCA 時に生じる可能性のあるこれらの現象は、事故時の原子炉施設の安全性に影響を及ぼすと考えられる。

上記のペレットの微細組織の状態と細片化発生の関係や LOCA 時に生じる被覆管の膨れ の程度がペレットの軸方向移動及び再配置の程度に及ぼす影響についてデータ及び知見を 得るためには、燃料ペレットを除去しない状態の燃料棒を対象とした LOCA 模擬試験、及 び LOCA 時の温度履歴を模擬したペレット加熱試験が極めて有効と考えられる。これらの 試験実施及び知見取得のため、原子力施設等防災対策等委託費(事故時燃料冷却性評価に 関する研究)事業が平成 27 年度より開始された。

平成 27 年度には、燃料ペレットを除去しない状態の燃料棒を対象とした LOCA 模擬試験の実施に向けて必要な装置(実燃料入り LOCA 模擬試験装置)の概念設計、並びに燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の準備を実施した。

本事業では、LOCA 時のペレット細片化の発生条件やペレット細片の燃料棒からの放出 状況等に関するデータ及び知見の取得が見込まれる。LOCA 時の炉心の冷却可能形状維持 に関して、我が国における現行の安全審査では、非常用炉心冷却系からの冷却材注入に伴 う急冷時の被覆管の破断を防止するための基準に基づき評価が行われている。本事業で得 られる成果はこの評価の妥当性の確認に資するものであり、特に、燃焼の進んだ燃料を含 む炉心の LOCA 時及び LOCA 後の冷却性維持について、ペレット挙動の観点を加えて評価 する上で必要かつ重要な情報になると期待される。

#### (参考文献)

1章

- (1) 例えば、M. Flanagan, "Summary of Public Meeting", NRC Public Mtg, Mar. 13-14, (2014).
- (2) K. Yueh, "Fuel Fragmentation, Relocation & Dispersal Current Understanding and Test Results", NRC Public Mtg, Mar. 13-14 (2014).

#### 3章

- 3.1 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概念設計
- (1) 平成 17 年度高度化軽水炉燃料安全技術調査に関する報告書、(独)日本原子力研究開発機構、平成 18 年 3 月.
- 3.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の準備
- K. Yueh, et al., "Fuel Fragmentation Data Review and Separate Effects Testing", Proc. WRFPM2014, Paper No. 100117, 14-17 September, Sendai, Japan (2014).
- (2) M. Kinoshita, et al., "High Burn-up Rim Project: (III) Properties of Rim-Structure Fuel", Proc. 2004 International Meeting on LWR Fuel Performance, 19-22 September, Orlando, Florida (2004).
- (3) 畠山、須藤、金澤、「照射済み燃料ペレット内 FP ガス分析技術の開発」、JAERI-Tech 2004-033、日本原子力研究所 (2004).
- (4) 「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」、昭和56年7月20日、原子力安 全委員会決定(一部改訂 平成4年6月11日).
- (5) M. E. Nissley, C. Frepoli, K. Ohkawa, "Realistic Assessment of Fuel Rod Behavior under Large-Break LOCA Conditions", Proc. Nuclear Fuels Sessions of the 2004 Nuclear Safety Research Conference, Washington DC, 25-27 October, 2005, NUREG/CP-0192, 258–273.
- (6) H. M. Chung, "Fuel Behavior under Loss-of-Coolant Accident Situations", Nucl. Eng. Technol., 37, 327-362 (2005).