

平成28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29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 28 年度事業の概要	2-1
2.1 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の詳細設計	2-1
2.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の予備試験	2-1
3 章 平成 28 年度事業の実施内容	3.1-1
3.1 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の詳細設計	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 模擬試験装置の詳細設計	3.1-2
3.1.3 放射性物質の捕集装置	3.1-4
3.1.4 耐震評価	3.1-6
3.1.5 詳細設計の妥当性の確認	3.1-9
3.1.6 詳細設計のまとめ	3.1-10
3.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の予備試験	3.2-1
3.2.1 ペレット片の採取	3.2-1
3.2.2 ペレット片の外観観察	3.2-1
3.2.3 ペレット片の密度測定	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 ECCS 系に流入することで、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 70GWd/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た準備を平成 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 28 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 28 年度事業の概要

事故時燃料挙動研究における新知見の一つとして、燃焼の進んだ発電用軽水炉燃料を対象とした冷却材喪失事故（LOCA）模擬試験において燃料被覆管の膨れ・破裂に伴い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現象として、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 28 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 模擬試験装置の詳細設計

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 28 年度にはそのための試験装置の詳細設計を実施した。具体的には、平成 27 年度に本事業において実施した概念設計を基に、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詳細設計を実施した。

### 2.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の予備試験

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に関し、燃料ペレット試料の採取、並びにその性状等を把握する外観観察及び密度測定試験を実施した。

### 3 章 平成 28 年度事業の実施内容

#### 3.1 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の詳細設計

##### 3.1.1 実燃料入り LOCA 模擬試験の概要

実機の冷却材喪失事故（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。このような燃料挙動（FFRD 挙動）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 に示す温度履歴にて試験燃料棒を加熱、昇温し、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じ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率に基づき所定の被覆管酸化量に達する条件（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。

被覆管の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 模擬試験装置の詳細設計

#### (1) 試験装置の仕様

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下原子力機構と記す）は軽水炉の LOCA 時に燃料が経燃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 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及び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。従って、実燃料入り LOCA 模擬試験を実施するに当たり、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を検討する必要がある。

実燃料入り LOCA 模擬試験装置の基本的な仕様については、昨年度の概念設計<sup>(1)</sup>にて検討が行われている。昨年度実施した概念設計において当該装置全体の新規設計及び既設 LOCA 模擬試験装置<sup>(2)</sup>の流用設計の 2 パターンを比較検討した結果、後者は試験実施時の安全性及びコスト面で不利と判断されたことから、前者を採用することとした。今年度は、装置の新規設計に係る昨年度の検討結果に基づき、詳細設計を実施した。

#### (2) 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の詳細設計

昨年度実施した概念設計<sup>(1)</sup>に基づき、実燃料入り LOCA 模擬試験装置の詳細設計を実施した。詳細設計後の装置の構造図を図 3.1-3 に示す。

詳細設計に係る主な項目及び設計結果を以下にまとめる。

##### 1) 引張荷重負荷機構の詳細設計

試験燃料棒（長さ約 190 mm。図 3.1-4 参照）への引張荷重の負荷は、既設の LOCA 模擬試験装置<sup>(2)</sup>と同様に引張試験機を利用した設計としている。試験燃料棒への引張荷重負荷機構の設計に当たっては、昨年度の概念設計の結果<sup>(1)</sup>に基づき、装置のコンパクト化を重視する構造とした。具体的には、試験燃料棒の昇降機構（サーボモータ、ジャッキ、等から構成）、ロードセル、定加重バネ、等を利用した機構（図 3.1-5）で構成することとし、ロードセル出力及び定加重バネによって試験中に試験燃料棒の軸方向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した。

##### 2) 汚染拡大防止設備の詳細設計

実燃料入り LOCA 模擬試験中には、試験燃料棒の破裂、加熱及びクエンチ水による急冷の際に放出される放射性物質によってホットセル内部が汚染されることが予想される。ホットセル内部の汚染を可能な限り低減するため、図 3.1-6 に示す構造のフー

ドにて試験燃料棒装荷部周辺をカバーすることとした。このフードは、SUS 製角部に配置された 4 本の角型縦梁及び 3 本の横梁からなる構造とした。また、前方向については、天板部のモータ及びジャッキが一体構造のスライド式ベースになっており、このスライド式ベース関連の交換及びメンテナンス性を考慮して梁を設けないこととした。また、マニピュレータによるフード内機器の遠隔操作性を考慮し、前面パネルは容易に開放可能な扉方式とするとともに、メンテナンス時には蝶番部にて取り外しが可能な構造とした。

フードの材質は、内部の視認性及び試験燃料棒加熱時の火災に対する安全性を考慮して、難燃性ポリカーボネイトとした。

また、試験中に試験燃料棒から放出される放射性物質をフード内に可能な限り留めるため、フード内部を負圧とするための排気機構を設けた。試験中に試験燃料棒から放出された多量の放射性物質は、この排気機構を通過した後に捕集装置を経由しホットセル内に排出される。

なお、捕集装置の詳細については「3.1.3 放射性物質の捕集装置」にて述べる。

### 3) 試験燃料棒装荷部の詳細設計

試験燃料棒と加熱炉の位置関係（試験燃料棒の加熱範囲）は既設の装置と同等の設計とした。石英ガラス管近傍を含めた試験燃料棒装荷部の構造を図 3.1-7 に示す。

昨年度の概念設計の結果 (1) に基づき、石英ガラス管の長さを約 20 mm 短くして試験燃料棒上部に局所排気用ケースを設置するとともに、石英ガラス管の破損防止のため局所排気用ケースを受台にて保持することとした。局所排気ケースの開口部には可動式プレートを設け、熱電対連結線を繋げた状態で試験燃料棒を試験装置に装荷可能とするとともに、試験燃料棒の中心位置の製作誤差による芯ずれ及び試験燃料棒の転倒を防止する設計とした。また、局所排気用ケースは取り外さないものとし、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構造とした。局所排気用ケース内の排気については、試験燃料棒の装荷によるスライド作業（ケース部と排気管部にて分離可能）までを考慮した専用の脱着式排気管を接続して捕集装置へ送り出す構造とした。この排気管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、はめ込み型の接続構造とした。

下部フランジ部はクエンチ水の排水時に試験燃料棒から放出された燃料ペレット片の回収が可能な構造とした。

### 3.1.3 放射性物質の捕集装置

本装置は LOCA 模擬試験装置フード内からの排気进行处理するものであり、試験中に試験燃料棒から放出される放射性物質をフィルタ類により捕集する設計とした。この設計においては、操作室に設置される試験装置の制御盤から監視制御性、セル内での設置スペース、遠隔操作に係る制約、等の条件も考慮した。

#### (1) 放射性物質の捕集方法

試験中に試験燃料棒から放出される放射性物質は、HEPA フィルタ等を使用して捕集することとする。また、HEPA フィルタの形状等については、使用後に固体廃棄物として適切に処理できるよう考慮する。

#### (2) 核種毎の捕集処理

試験燃料棒から放出される主な核種の処理方法を以下に示す。表 3.1-1 に各捕集方法の除染係数を示す。

##### 1) ヨウ素 (I)

気体状ヨウ素については、銀イオンと反応させて AgI の形で固定化する方法が合理的である。装置をコンパクトにするためには試験装置から排出される排気との反応率を上げる必要があることから、銀ゼオライト（多孔質であるゼオライトに銀イオンを担持させたもの）に放射性ヨウ素を吸着させる設計とした。

なお、使用済みの銀ゼオライトは固体廃棄物として処理する。

##### 2) セシウム (Cs)

金属セシウム及びセシウムのハロゲン化合物の高温化学的な性質を考慮すると、放射性セシウムは固体状の微粒子として放出されると考えられる。従って、 $0.3 \mu\text{m}$  の微粒子を 99.97%以上除去できる HEPA フィルタを使用して物理的に捕集する方法が合理的である。

なお、使用済みの HEPA フィルタは固体廃棄物として処理する。

#### (3) 試験時に発生する放射エネルギーの評価

今後の試験対象となり得る代表的な燃料棒の燃焼計算より得られた核種及び放射エネルギーのデータに基づき、本捕集装置の設計において必要な核種及び放射エネルギーを評価した。

#### (4) 捕集装置の構成

##### 1) 装置構成の検討

セル内に設置する機器の構成及び配置については、マニピュレータによる遠隔操作性、及びその操作範囲内での設置スペースに制約があること等から、各装置に必要とされる構造等を踏まえて検討した。また、機器の選定では、上記検討結果より

装置設計、機器設計、その他の前提条件及び装置からの排気に含まれる FP ガスの制限値等をもとにセル内に配置できる捕集装置の再検討を行い、排気から水分を分離するミストセパレータ、ヨウ素及び粒子状固体物質を捕集するセシウム・ヨウ素吸着筒、排気ブロワ、及びその他の付属機器等による構成とした。

## 2) 捕集装置の構成

捕集装置の構成を図 3.1-8 に示す。捕集処理の流れは次のとおりである。LOCA 模擬試験装置のフード排気のラインを排気ブロワにより吸引させ、ミストセパレータにより水蒸気を含む排気から水分を分離し、セシウム・ヨウ素吸着筒にてヨウ素及び粒子状固体物質を捕集した後、セル内のフィルタ部へ放出する。

セシウム・ヨウ素吸着筒は遠隔操作によるフィルタ交換、セル間の移動等、及び放射性汚染除去性等を考慮した SUS 製円筒型の構造とした。また、排気ラインの接続には遠隔操作により脱着可能な配管ラインの継ぎ手を使用することとした。

### 3.1.4 耐震評価

一般に、セル内に装置を設置するにあたっては、設置に係る安全性を確保するため、その装置の耐震性について確認しておく必要があることから、今回設置する LOCA 模擬試験装置、放射性物質捕集装置（セシウム・ヨウ素吸着筒）、及びこれらの装置を配置するセル内作業テーブルについて、耐震評価を実施した。

捕集装置を含めた実燃料入り LOCA 模擬試験装置全体の配置図を図 3.1-9 に示す。

#### (1) 耐震評価条件

装置の耐震評価は、以下の条件に基づき実施した。

##### 【固有値評価】

- 固有値評価の対象は LOCA 模擬試験装置フード及びセル内作業テーブルとし、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601」に基づき、機器の 1 次固有振動数が 20 Hz 以上の剛構造であることを確認するものとする。
- LOCA 模擬試験装置フード及びセル内作業テーブルの固有値評価は梁の合成断面性能より 1 質点モデルにて評価を行うものとする。
- セル内作業テーブルの架台脚部はアジャスタ構造であるが、梁の鋼材がセル内床と締結されるものとし評価を行うものとする。

##### 【転倒評価】

- 転倒評価の対象は、LOCA 模擬試験装置フード、セシウム・ヨウ素吸着筒及びセル内作業テーブルとする。
- 転倒評価に使用する水平震度  $K$  は、「発電用原子力施設に関する耐震設計審査指針」に基づき、耐震重要度分類クラス B 相当を採用し、標準せん断係数を 0.2 として、これに割増係数 1.8 を乗じた 0.36 G とする。
- LOCA 模擬試験装置フード及びセシウム・ヨウ素吸着筒は架台とボルト締結されていない状態で評価を行うものとする。

##### 【滑り評価】

- 滑り評価の対象は、LOCA 模擬試験装置フード、セシウム・ヨウ素吸着筒、セル内作業テーブル、ミストセパレータ、及び排気ブロワとする。
- 滑り評価は各機器が架台とボルト締結されている場合及びされていない場合の両条件について実施するものとする。
- セル内作業テーブルはセル内床とボルト締結できるものとして、ボルトの評価のみを実施するものとする。
- 滑り評価に使用する水平震度  $K$  は「発電用原子力施設に関する耐震設計審査指針」に基づき、耐震重要度分類クラス B 相当を採用し、標準せん断係数を 0.2 として、

これに割増し係数 1.8 を乗じた 0.36 G とする。

## (2) 耐震評価結果

耐震評価の結果を以下に示す。

### 1) LOCA 模擬試験装置

#### ① 固有振動数

X 軸方向：127.9 Hz、Y 軸方向：236.1 Hz であり、20 Hz 以上であることを確認した。

#### ② 転倒評価

自立モーメントはX方向： $2.50 \times 10^6$  N・mm、Y方向： $1.83 \times 10^6$  N・mmであり、転倒モーメント： $1.28 \times 10^6$  N・mm以上であることを確認した。

#### ③ 滑り評価

- セル内作業テーブルにボルト締結した場合、ボルトに作用するせん断応力は  $5.0$  N/mm<sup>2</sup>であり、許容応力 $118.3$  N/mm<sup>2</sup>を超えないことを確認した。
- 位置決め用ストッパを使用した場合、ストッパ締結ボルトに作用するせん断応力は $17.93$  N/mm<sup>2</sup>であり、許容応力 $118.3$  N/mm<sup>2</sup>を超えないことを確認した。

### 2) セシウム・ヨウ素吸着筒

#### ① 固有振動数

円筒形のため、X 軸方向、Y 軸方向ともに 47597.2 Hz であり、20 Hz 以上であることを確認した。

#### ② 転倒評価

自立モーメントは X 方向： $5.31 \times 10^5$  N・mm、Y 方向： $1.86 \times 10^6$  N・mm であり、転倒モーメント： $2.97 \times 10^4$  N・mm 以上であることを確認した。

#### 3) 滑り評価

- セル内作業テーブルにボルト締結した場合、ボルトに作用するせん断応力は  $1.9$  N/mm<sup>2</sup>であり、許容応力  $118.3$  N/mm<sup>2</sup>を超えないことを確認した。
- 位置決め用ストッパを使用した場合、ストッパ締結ボルトに作用するせん断応力は  $27.1$  N/mm<sup>2</sup>であり、許容応力  $118.3$  N/mm<sup>2</sup>を超えないことを確認した。

### 3) セル内作業テーブル

#### ① 固有振動数

X 軸方向：327.8 Hz、Y 軸方向：220.3 Hz であり、20 Hz 以上であることを確認した。

#### ② 転倒評価

自立モーメントは X 方向： $2.46 \times 10^7$  N・mm、Y 方向： $3.00 \times 10^7$  N・mm であり、転倒モーメント： $8.35 \times 10^6$  N・mm 以上であることを確認した。

## ③ 滑り評価

セル内作業テーブルをセル内床とボルト締結した場合、ボルトに作用するせん断応力は  $7.1 \text{ N/mm}^2$  であり、許容応力  $118.3 \text{ N/mm}^2$  を超えないことを確認した。

## 4) ミストセパレータの滑り評価

- セル内作業テーブルにボルト締結した場合、ボルトに作用するせん断応力は  $1.0 \text{ N/mm}^2$  であり、許容応力  $118.3 \text{ N/mm}^2$  を超えないことを確認した。
- 位置決め用ストッパを使用した場合、ストッパ締結ボルトに作用するせん断応力は  $3.8 \text{ N/mm}^2$  であり、許容応力  $118.3 \text{ N/mm}^2$  を超えないことを確認した。

## 5) 排気ブロワの滑り評価

- セル内作業テーブルにボルト締結した場合、ボルトに作用するせん断応力は  $0.9 \text{ N/mm}^2$  であり、許容応力  $118.3 \text{ N/mm}^2$  を超えないことを確認した。
- 位置決め用ストッパを使用した場合、ストッパ締結ボルトに作用するせん断応力は  $3.2 \text{ N/mm}^2$  であり、許容応力  $118.3 \text{ N/mm}^2$  を超えないことを確認した。

### 3.1.5 詳細設計の妥当性の確認

モックアップ試験等により本詳細設計の妥当性確認を行った。以下にその結果を示す。

#### (1) 実燃料入り LOCA 模擬試験装置全体の機構及び機能

##### 1) 定荷重機構

試験燃料棒の冷却に伴う収縮の際にある一定の値 (540 N) を超えない引張荷重を物理的に加えることが可能かどうかについて、定荷重バネを用いた本機構の妥当性を確認した。その結果、荷重値は負荷する度に多少のばらつきはあるが、約 (525 ± 5) N の範囲となり所定の引張力を満足することを確認した。

##### 2) 引張り機構の自動追従性能

試験燃料棒の加熱時 (試験燃料棒膨張時) においては、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により自動追従させる制御方式を検証したところ、要求される引張力や応答性が満足され、本試験に採用可能なことを確認した。

##### 3) 放射性物質の回収性能

フード機構としての全体排気及び局所排気ケースの性能は実際の LOCA 模擬試験を模擬した条件にて確認した。具体的には、試験燃料棒の破裂時に放出される気体及び急冷時に発生する水蒸気等、排気ケース及び排気管等により局所排気ケース内へ回収されること、並びに試験中にフード内の負圧を維持するために必要な排気流量を確認した。負圧維持に必要な流量は約 0.5 - 1 m<sup>3</sup>/min の範囲であった。

#### (2) マニピュレータによる遠隔操作性

セル内における試験装置の操作は 2 台のマニピュレータによる遠隔操作が基本となる。試験を実施するための作業及び消耗部品交換等を行う非定常な作業における遠隔操作性に問題が無いことを確認した。

### 3.1.6 詳細設計のまとめ

セル内に設置する実燃料入り LOCA 模擬試験装置の構成及び構造に関して、昨年度実施した概念設計の結果に基づく詳細設計を実施し、耐震性を含めその妥当性を確認した。

今年度の詳細設計結果に基づき、来年度に装置の製作を実施する。

表 3.1-1 捕集方法毎の除染係数

核種	構成機器	捕集方法	廃棄方法	除染係数 (DF)
129I	ヨウ素フィルタ	ヨウ素フィルタ(銀ゼオライト)に吸着させる。	固体廃棄物として処理する。	100
134Cs	HEPAフィルタ(2段)	HEPAフィルタを使用して物理的に捕集する。	固体廃棄物として処理する。	10000
135Cs				
137Cs				

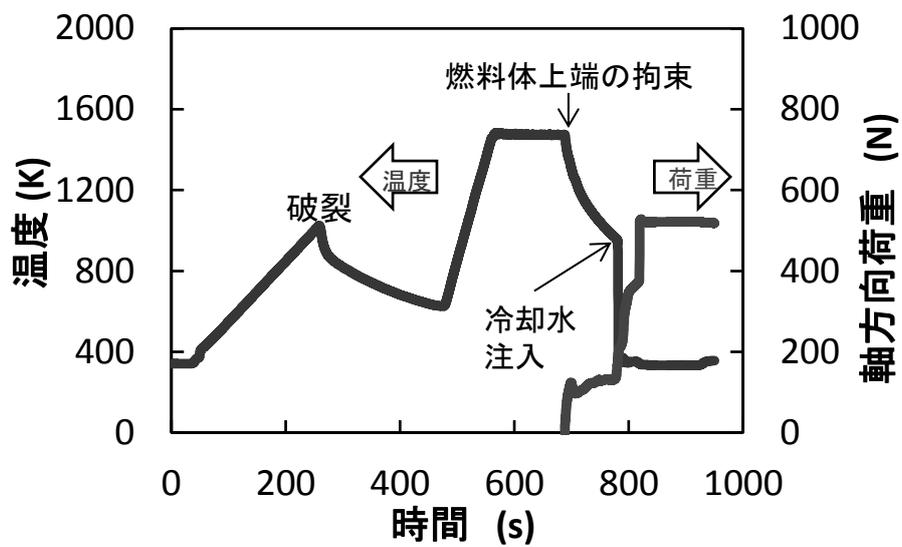


図 3.1-1 試験時の被覆管温度と荷重の履歴

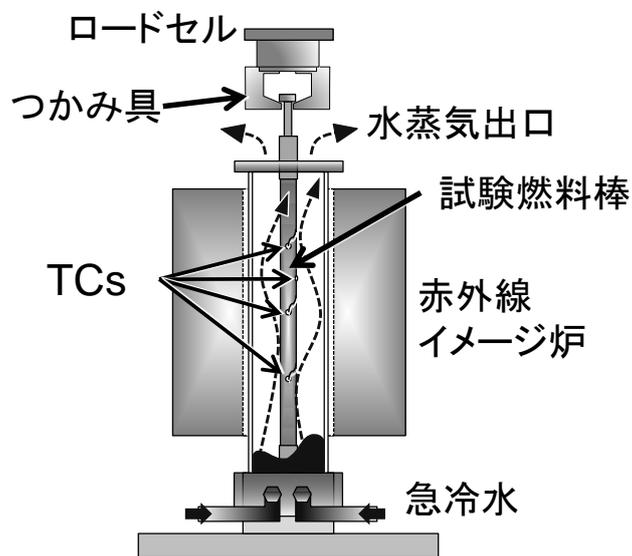


図 3.1-2 LOCA 模擬試験装置の概要



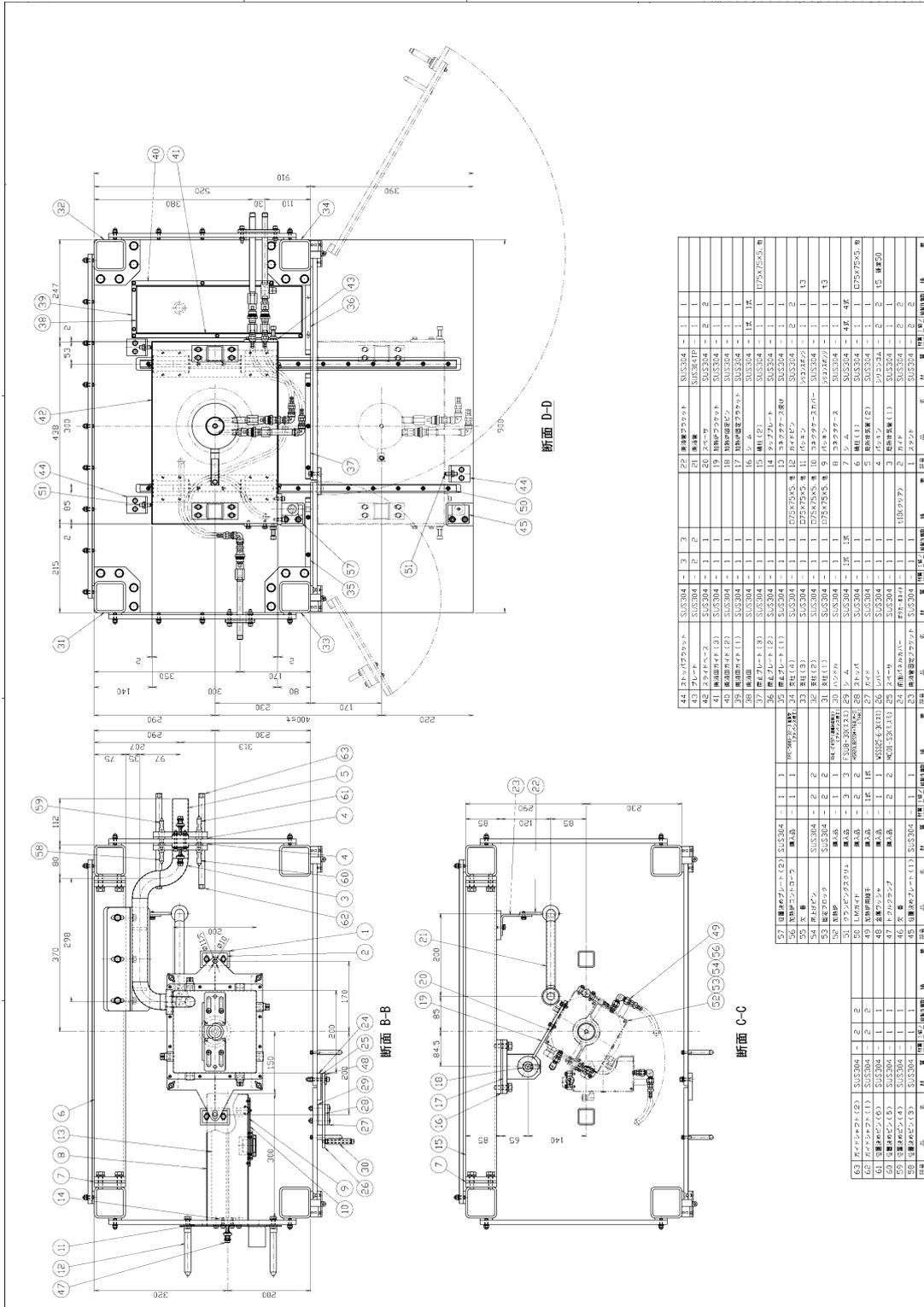


図 3.1-3 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の構造図 (2/3)



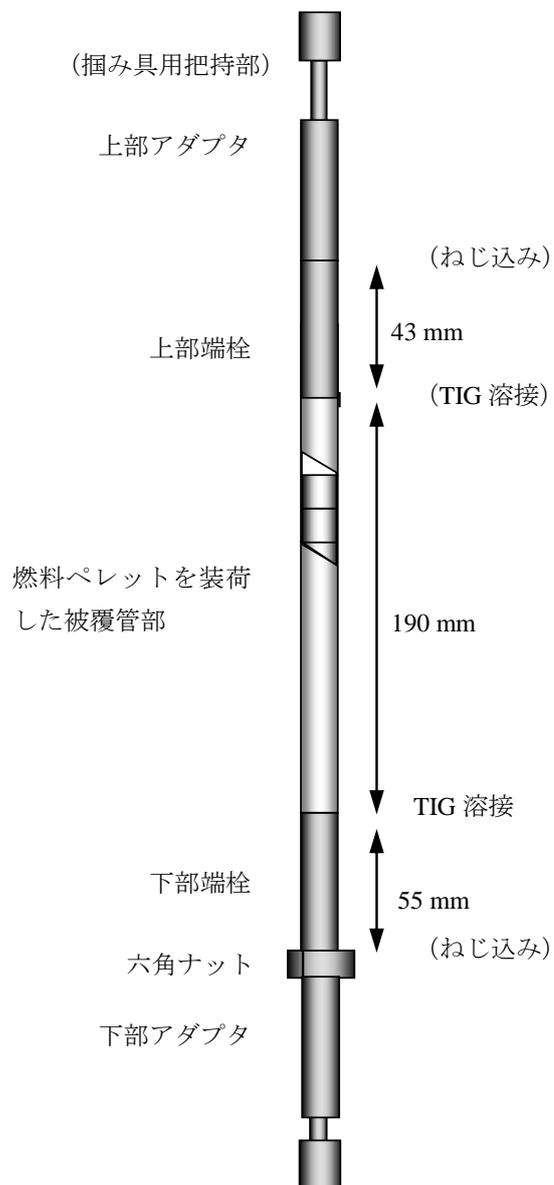
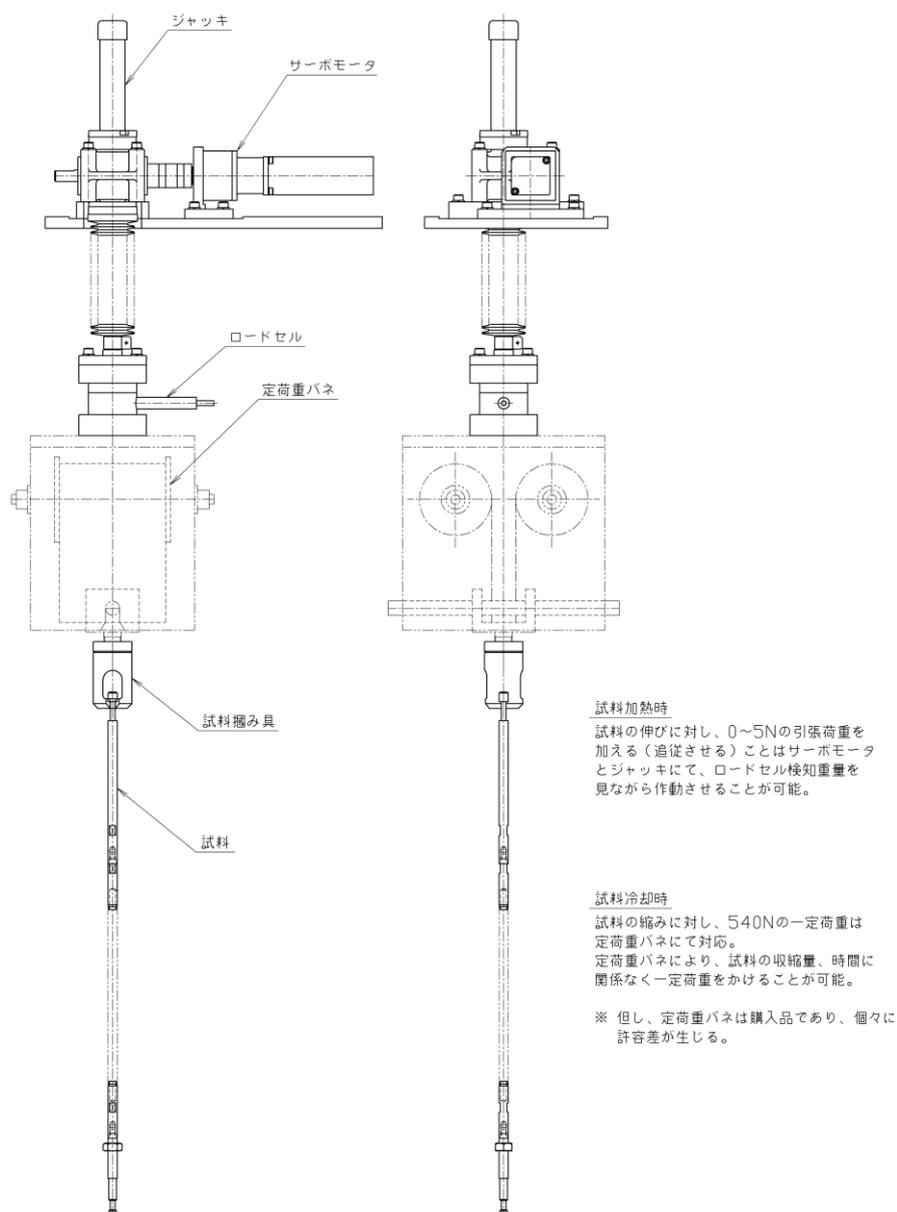


図 3.1-4 実燃料入り LOCA 模擬試験燃料棒の構造



「サーボモータ」+「ロードセル」+「定荷重バネ」方式

※ 試料加熱時は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。  
 試料収縮時は、一定荷重となる「定荷重バネ」による方式。

図 3.1-5 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



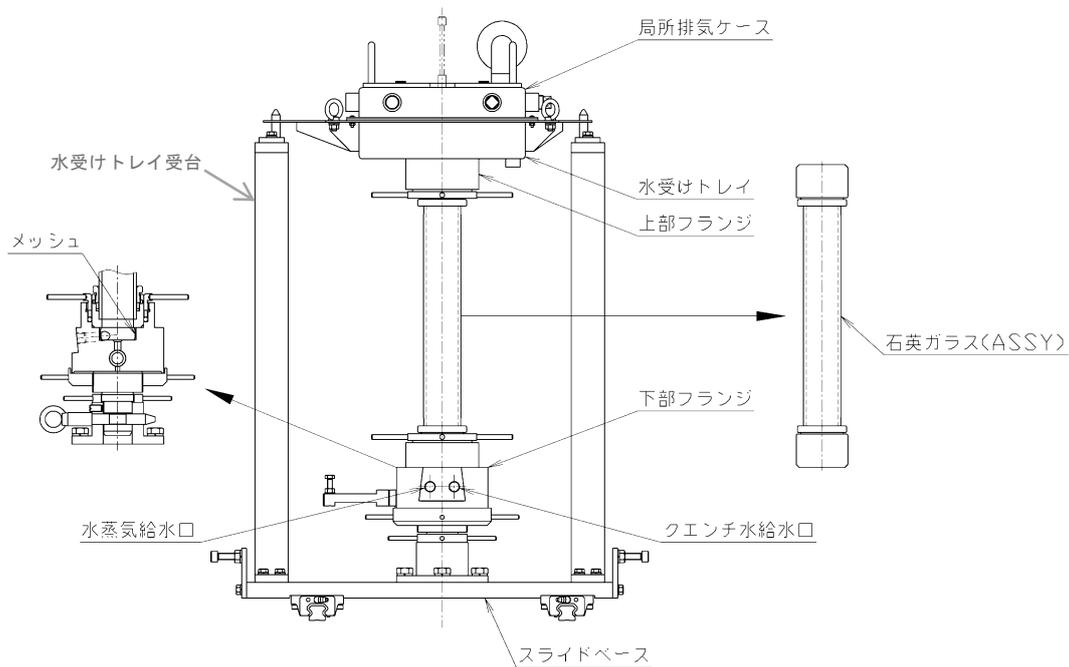


図 3.1-7 試験燃料棒配置部近傍の構造

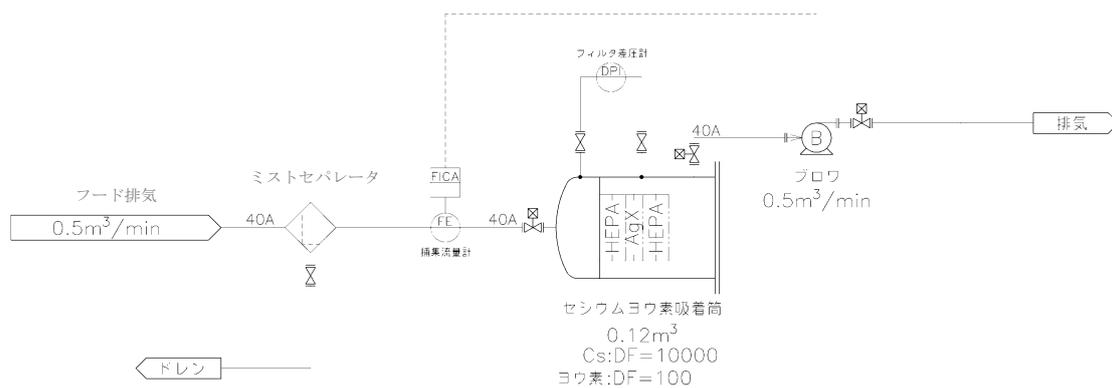


図 3.1-8 捕集装置の構成

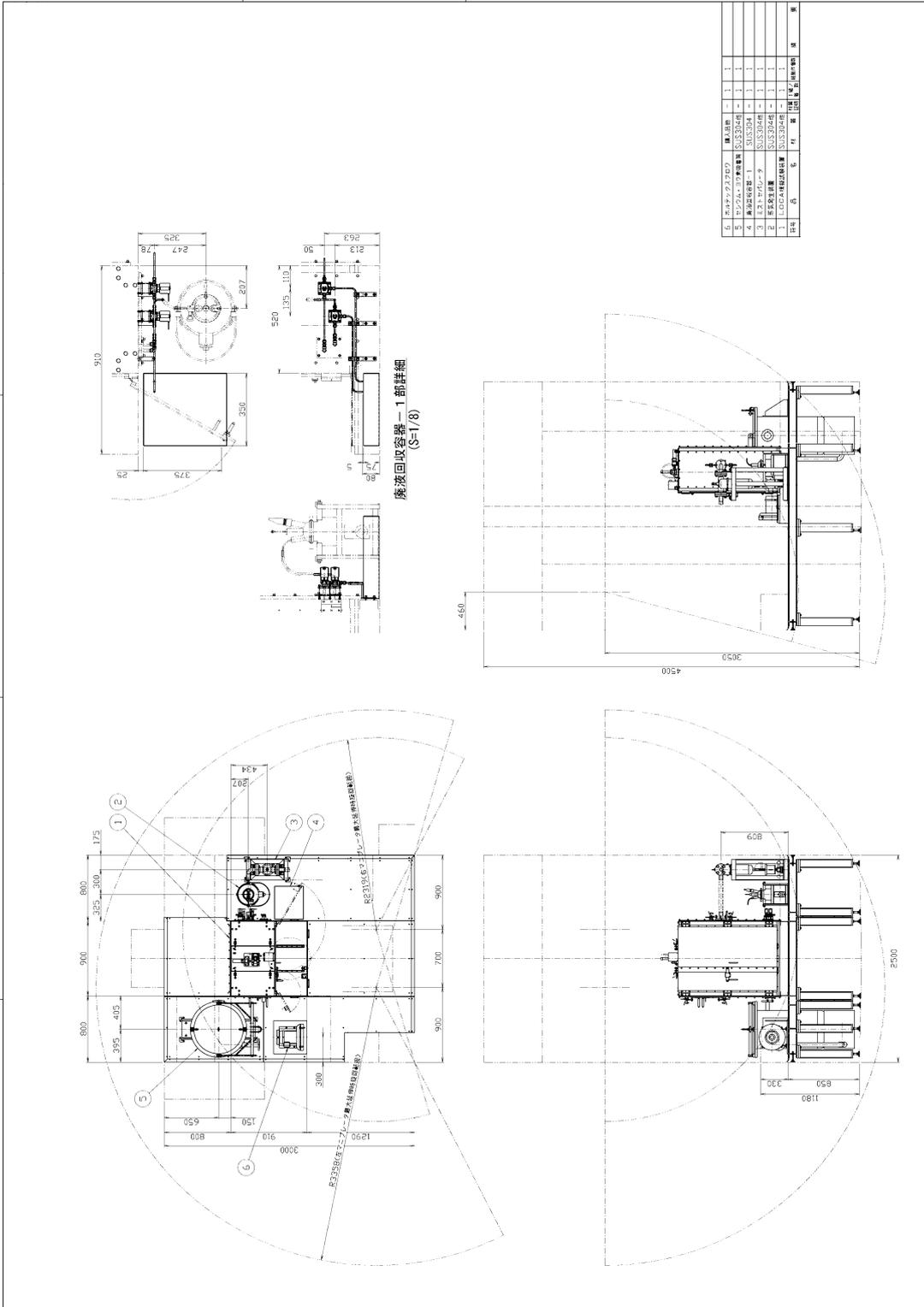


図 3.1-9 捕集装置を含めた実燃料入り LOCA 模擬試験装置全体の配置図

### 3.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の予備試験

スペイン・バンデロス炉において照射された PWR-ウラン燃料 (AP2-3) <sup>(1)</sup> から 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に供する燃料ペレット片を採取した。また、試験前の燃料状態を調べ、供試材の選定及び試験結果の評価に用いることを目的に、採取した燃料ペレット片の外観観察及び密度測定を実施した。

#### 3.2.1 ペレット片の採取

AP2-3 セグメント燃料の上端から約 286 - 299 mm の位置よりペレット約 1.5 個分の試料を切出し、切出した試料についてさらに被覆管の背割りにより燃料ペレット片を採取した。AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片の採取位置を図 3.2-1 に示す。同図には、AP2-3 セグメント燃料被覆管の酸化膜厚さの文献値 <sup>(2)</sup> を示している。採取した燃料ペレット片の内、比較的大きなペレット片 10 個を本年度の予備試験に供することとした。採取した燃料ペレット片の情報を表 3.2-1 に示す。

図 3.2-2(1) - (3) に、この燃料ペレット片の採取位置近傍から採取した試料に対し過去に実施した断面マイクロ組織観察結果を示す <sup>(2)</sup>。図から、ペレット径方向中心近傍にダークゾーンが、ペレット最外周においては高燃焼度組織 (リム組織) が確認でき、これらの組織においては、結晶粒内に製造時と異なる微小な気泡が高密度に形成されている様子が観察される。LOCA 時の急速なペレット温度上昇に伴いこれらの気泡の内圧が急速に上昇することで気泡周囲に割れが発生し、この割れがペレット細片化の駆動力となる可能性があることから、照射に伴うペレットの微細組織の変化とペレット細片化との関係を把握しておくことは、LOCA 時のペレット細片化の機構を知る上で重要と考えられる。

#### 3.2.2 ペレット片の外観観察

図 3.2-3(1) - (6) に採取した燃料ペレット片の外観画像を示す。各ペレット片の識別番号は図 3.2-3(1) に示す通り、No. 1 - No. 10 とした。ペレット片 No. 1 及び No. 10 については、外周部が滑らかな曲率を有していることから、ペレット最外周部近傍を含む位置から採取されたと推定される。この他のペレット片については、外観画像からはそのペレット径方向における採取位置を判断することは困難であった。しかしながら、選定した 10 個のペレットの直径はいずれも約 5 mm 程度であり、ダークゾーンを横断する位置から採取されたものと推測される。

#### 3.2.3 ペレット片の密度測定

3.2.1 において採取した個々のペレット片に対して密度測定試験を実施した。測定法は液浸法であり、置換液にはメタキシレンを使用した。密度の測定結果を表 3.2-2 に示す。採取したペレット片の密度は、 $\text{UO}_2$  の理論密度 ( $10.96 \text{ g/cm}^3$  が 100%TD) に対し 88.5 - 94.0% の範囲であった。バンデロス炉で照射された燃料ペレットの製造時密度は 96.0%T.D. <sup>(2)</sup> で

あることから、採取したペレット片は燃焼により 2.1 - 8.5%の体積膨張を生じたことが分かる。

今回測定した燃料ペレット片の体積変化率の燃焼度依存性を図 3.2-4 に示す。同図中の AP2-3 ペレット片のマーカーの面積の大小は、各ペレット片の重量の大小を表している。また、同図には MATPRO<sup>(3)</sup>の固体スウェリング率 (10 GWd/t 当たり 0.62 % $\Delta V/V_0$ ) を併せて示している。図から、今回密度測定を実施した大部分の燃料ペレット片の体積変化率は、固体スウェリング率の傾きより大きいことが分かる。この結果より、採取した燃料ペレット片の体積膨張には、固体スウェリングの影響に加えガス気泡スウェリングの影響が表れている可能性がある。

表 3.2-1 AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片

試験片番号	採取 セグメント 番号	照射炉	燃料 タイプ	試料燃焼度 (GWd/t)	被覆管材料
No. 1-10	AP2-3	Vandellos- 2	PWR 17×17 UO <sub>2</sub>	81	M-MDA (SR)

表 3.2-2 燃料ペレット片の密度測定結果

ペレット片番号	製造時データ <sup>(2)</sup>	照射後測定結果		
	理論密度比 (%TD)	試料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	理論密度比 (%TD)	体積変化率* (%)
No. 1	96.0	9.79	89.3	7.5
No. 2		9.72	88.7	8.3
No. 3		10.31	94.0	2.1
No. 4		9.91	90.4	6.2
No. 5		9.95	90.8	5.7
No. 6		9.74	88.8	8.1
No. 7		9.76	89.1	7.8
No. 8		9.83	89.7	7.0
No. 9		9.70	88.5	8.5
No. 10		9.76	89.0	7.8

\*体積変化率(%) = (製造時密度 - 照射後密度) / 照射後密度 × 100

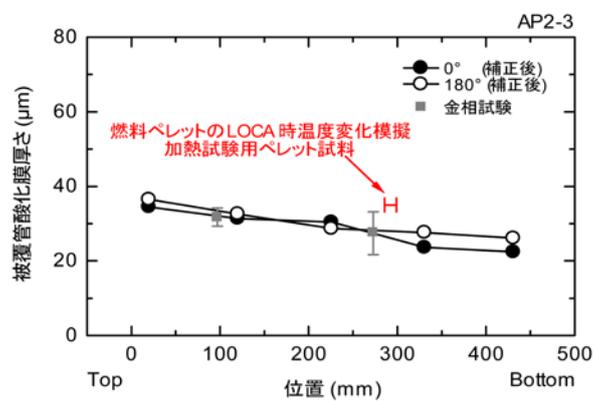


図 3.2-1 燃料ペレット片の採取位置

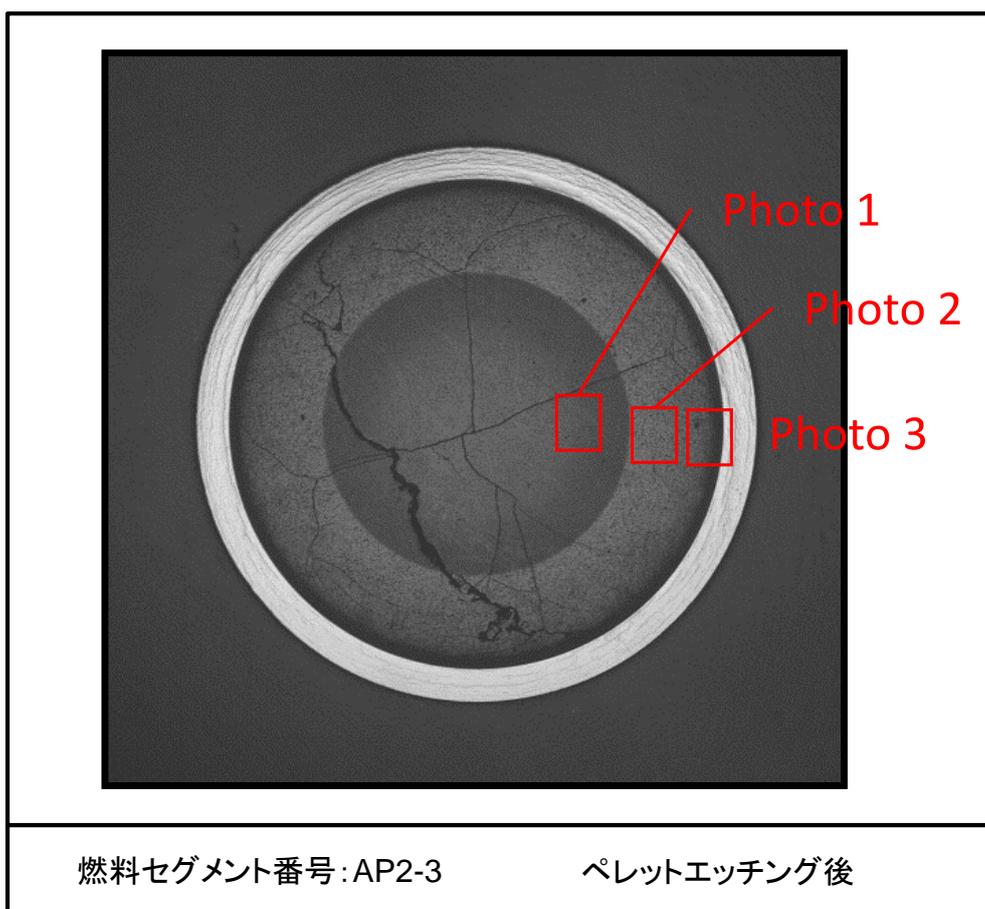


図 3.2-2(1) AP2-3 燃料ペレットの断面画像 (ペレットエッチング後) (2)

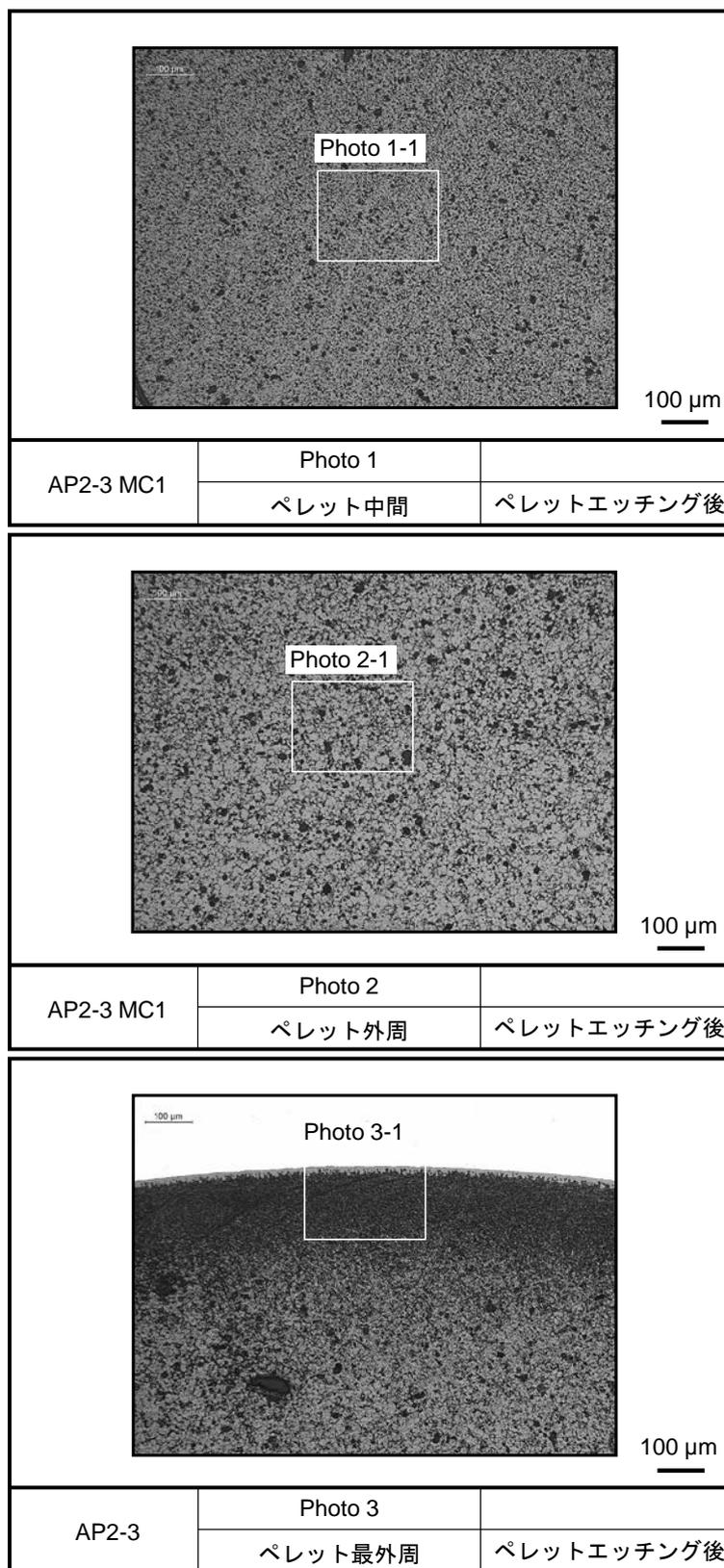


図 3.2-2(2) AP2-3 燃料ペレットの断面画像 (ペレットエッチング後) (2)

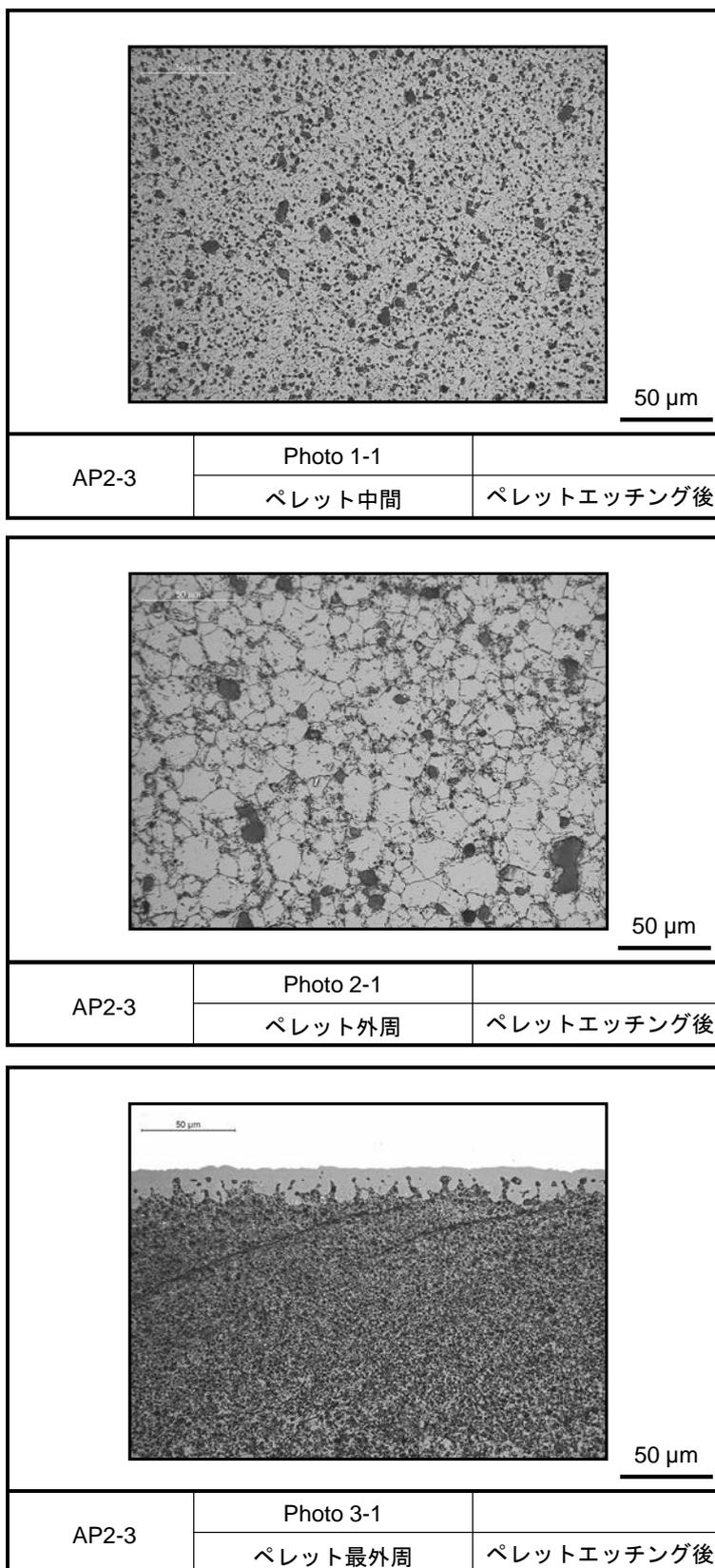


図 3.2-2(3) AP2-3 燃料ペレットの断面画像 (ペレットエッチング後) (2)



図 3.2-3(1) 採取した燃料ペレット片の外観  
(図中数値はペレット片番号)

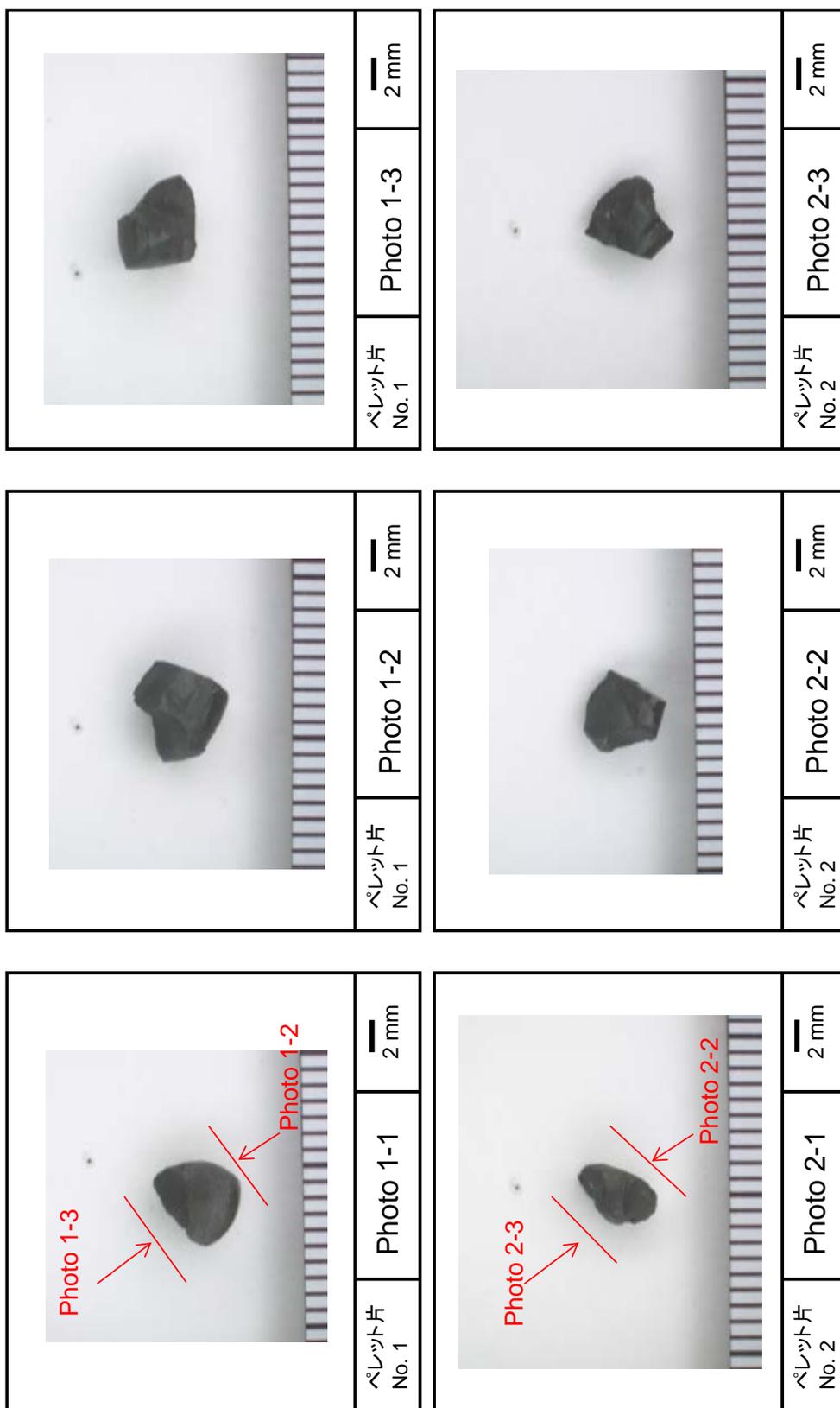


図 3.2-3(2) 採取した燃料ペレット片の外観

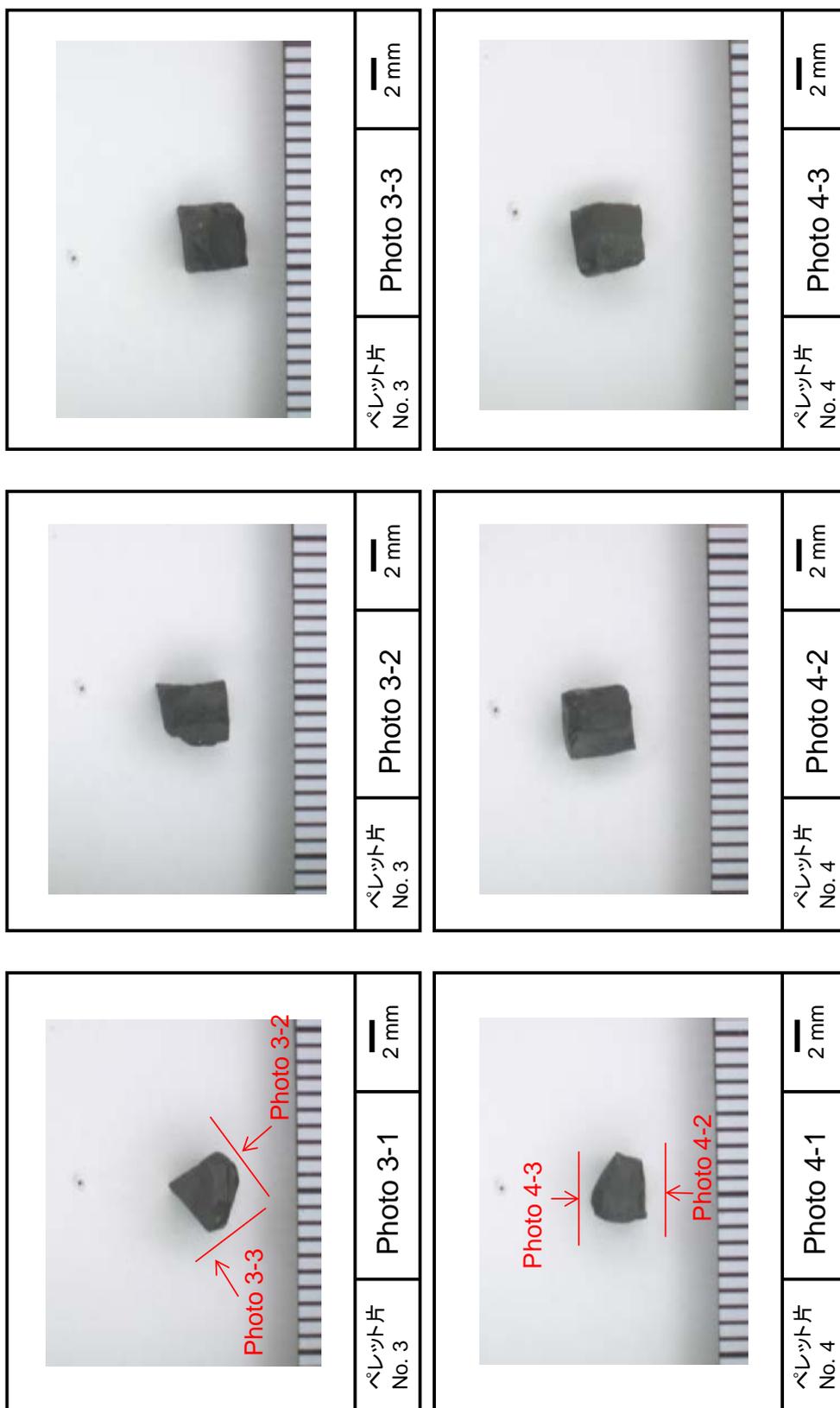


図 3.2-3(3) 採取した燃料ペレット片の外観

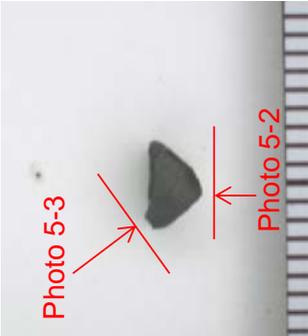
	ペレット片 No. 5 Photo 5-1 2 mm		ペレット片 No. 5 Photo 5-2 2 mm		ペレット片 No. 5 Photo 5-3 2 mm
	ペレット片 No. 6 Photo 6-1 2 mm	<p style="text-align: center;">撮影不可</p>	<p style="text-align: center;">撮影不可</p>	ペレット片 No. 6 Photo 6-3 2 mm	

図 3.2-3(4) 採取した燃料ペレット片の外観

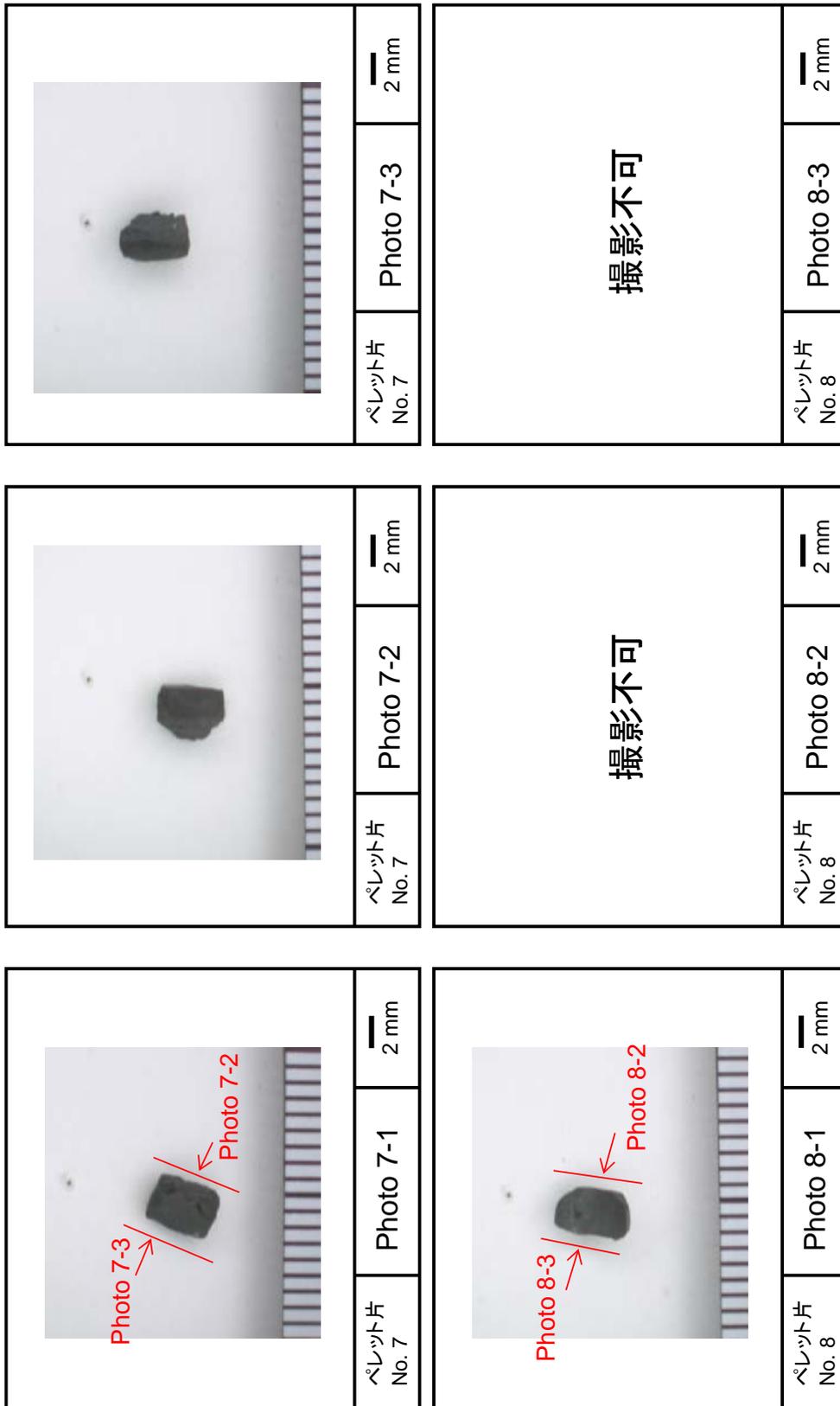


図 3.2-3(5) 採取した燃料ペレット片の外観

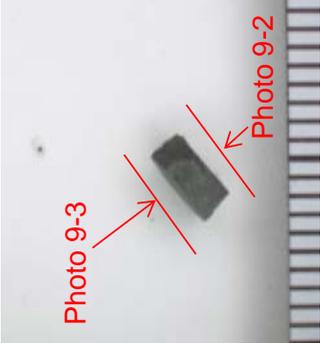
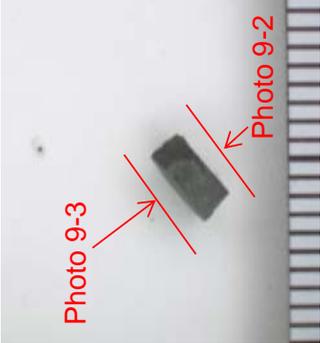
	ペレット片 No. 9	Photo 9-1	2 mm
	ペレット片 No. 9	Photo 9-2	2 mm
	ペレット片 No. 9	Photo 9-3	2 mm
撮影不可			
撮影不可			
撮影不可			
	ペレット片 No. 10	Photo 10-1	2 mm
撮影不可			
撮影不可			
撮影不可			

図 3.2-3(6) 採取した燃料ペレット片の外観

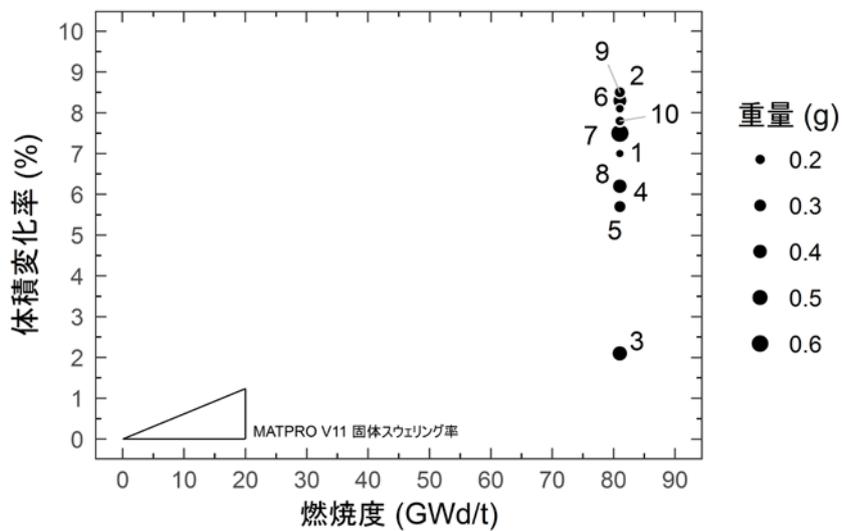


図 3.2-4 燃料ペレット片の体積変化率の燃焼度依存性  
(図中数値はペレット片番号)

## 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 28 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）の詳細設計、並びに燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の予備試験を実施した。

(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 模擬試験装置の詳細設計

- (1) 平成 27 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(国研) 日本原子力研究開発機構、平成 28 年 3 月
- (2) 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予備試験

- (1) 平成 27 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(国研) 日本原子力研究開発機構、平成 28 年 3 月。
- (2) 平成 24 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構、平成 26 年 3 月。
- (3) D. L. Hagrman and G. A. Reymann (eds.), “MATPRO-Version 11 A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior”, NUREG/CR-0497, TREE-1280, February (1979).