

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

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
(平成 29 年度分)

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
平成 30 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目 次

1 章 緒言	1-1
2 章 平成 29 年度事業の概要	2-1
2.1 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の製作	2-1
2.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験	2-1
3 章 平成 29 年度事業の実施内容	3.1-1
3.1 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の製作	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 模擬試験装置の製作	3.1-2
3.1.3 装置製作のまとめ	3.1-4
3.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験	3.2-1
3.2.1 加熱試験	3.2-1
3.2.2 加熱試験後の分析	3.2-2
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⁽¹⁾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（以下、原子力機構）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^(1,2)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、原子力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 29 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 29 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 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 29 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 模擬試験装置の製作

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 29 年度にはそのための試験装置を製作した。具体的には、平成 28 年度に本事業において実施した詳細設計を基に、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を備えた実燃料入り LOCA 模擬試験装置を製作した。

2.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験

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及び試験後の分析を実施した。

3 章 平成 29 年度事業の実施内容

3.1 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の製作

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。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、急冷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 模擬試験装置の製作

(1) 試験装置の仕様

原子力機構は軽水炉の 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 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施した装置を製作することとした。

実燃料入り LOCA 模擬試験装置の基本的な仕様については、昨年度実施した詳細設計⁽¹⁾に基づき装置を製作した。

(2) 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の製作

装置の主な仕様、構成図、構造図、及び装置の外観写真を表 3.1-1、及び図 3.1-3～図 3.1-5 にそれぞれ示す。

1) 引張荷重負荷機構

試験燃料棒（長さ約 190 mm）への引張荷重の負荷は、既設の LOCA 模擬試験装置⁽²⁾と同様に引張試験機を利用した構造としている。試験燃料棒の引張荷重負荷機構は、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 3.1-6）から構成され、ロードセル出力及び定荷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構造とした。また、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昇降機構により自動追従させる制御方式を採用している。

2) 汚染拡大防止設備

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。これによるホットセル内部の汚染を可能な限り低減するため、図 3.1-7 に示す構造のフードにより試験燃料棒装荷部周辺をカバーする構造とした。このフードは、SUS 製の角部に配置された 4 本の角型縦梁及び背面側 2 本の横梁から構成される。

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、フード内部を負圧にする排気機構を設けており、試験中に試験燃料棒から放出される放射性物質はこの排気機構を通過した後、捕集装置を經由しホットセル内の

排気口に排出される。なお、捕集装置の詳細については4項の「放射性物質の捕集装置」にて述べる。

フード前方向は、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部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構造とした。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を採用した。

3) 試験燃料棒装荷部

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構造とした。試験燃料棒装荷部の構造を図 3.1-8 に示す。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、ケースの受台を設置し保持する構造とした。

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上部より装置に装荷するとともに、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。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（はめ込み型）を接続し捕集装置側へ送り出す構造とした。

また、下部フランジ部の内部へ取り外し交換可能なメッシュを設置することにより、排水時に試験燃料棒から放出された燃料ペレット片を回収する構造とした。

4) 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を処理するものであり、試験中に試験燃料棒から放出される放射性物質をセシウム・ヨウ素吸着筒内に設置したフィルタ類（HEPA、銀ゼオライト等）により捕集する構造とした。吸着筒の写真を図 3.1-9 に、表 3.1-2 に各捕集方法毎の除染係数を示す。

捕集処理の流れは、フードの排気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、吸着筒にてヨウ素及び粒子状固体物質を捕集した後、セル内の排気口へ放出する。

捕集装置の監視では、フィルタ差圧の増加による排気ラインの流量低下を防ぐため流量計測値とブロワ出力を連動させることにより自動調整を行う設計としている。

吸着筒は遠隔操作によるフィルタ交換、セル間の移動、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、排気ラインの切り離し時は閉止弁により吸着筒を密閉した後、遠隔操作により脱着式の継ぎ手部分にて分離する。また、使用済みの

フィルタ類は固体廃棄物として処理する。

5) 制御盤

制御盤には、試験装置全体の監視制御、データ収録、及び警報・安全回路、電源遮断器等を集約しており、異常時等には警報ランクと連動し安全に自動停止する構造としている。また、異常時等の対策として、盤面に誤操作防止カバー付の非常停止スイッチを設けている。

製作後の装置については動作確認を実施し、仕様を満足することを確認した。

3.1.3 装置製作のまとめ

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、昨年度実施した詳細設計の結果に基づく装置の製作及び動作確認を実施した。

表 3.1-1 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の主な仕様

試験条件	対象試料	高燃焼度燃料棒及び被覆管
	試料長	137 ～ 190 mm
	試料燃焼度	40 ～ 91 GWd/t (UO ₂ 及び MOX 燃料)
	最高試験温度	1473 K
引張試験機	定格荷重	2 kN
荷重一定保持装置	最大荷重	0 ～ 540 N
汚染拡大防止設備	フードパネル	ポリカーボネイト製 10 mm
	局所排気機構	局所排気ケース及び脱着式排気管
加熱炉	最高温度	1673 K (冷却水循環装置付)
酸化雰囲気容器	石英ガラス管	345 mmL×ID38 mmΦ×2.3 mm
蒸気発生装置	最高温度	723 K
	蒸気発生量	約 100 g/h
放射性物質の 捕集装置	ミストセパレータ	サイクロン式ドレン分離
	セシウム・ヨウ素吸着筒	HEPA フィルタ 4 層 銀ゼオライトフィルタ 2 層
	排気ブロワ	流量計測制御式
	排気流量	0.5 m ³ /s

表 3.1-2 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)
¹²⁹ I	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
¹³⁴ Cs	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。		10000
¹³⁵ Cs				
¹³⁷ Cs				

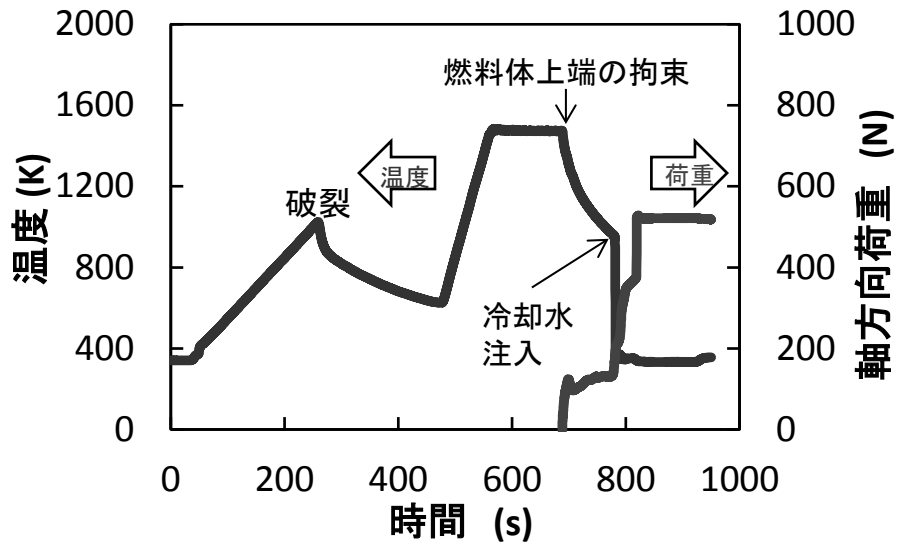


図 3.1-1 試験時の被覆管温度と荷重履歴の例

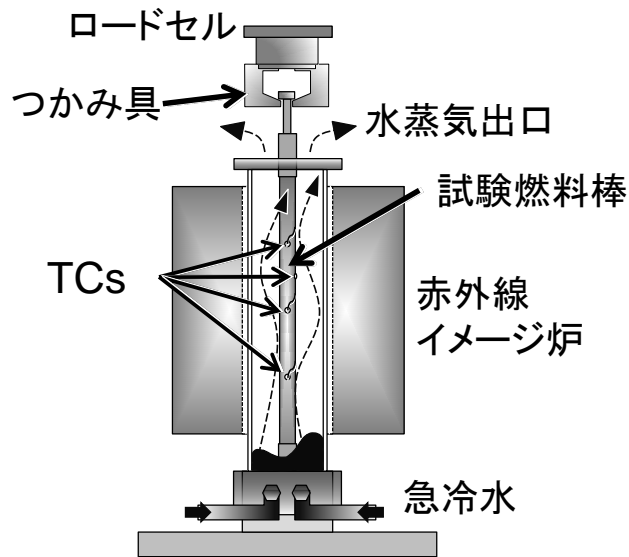


図 3.1-2 LOCA 模擬試験装置の概要

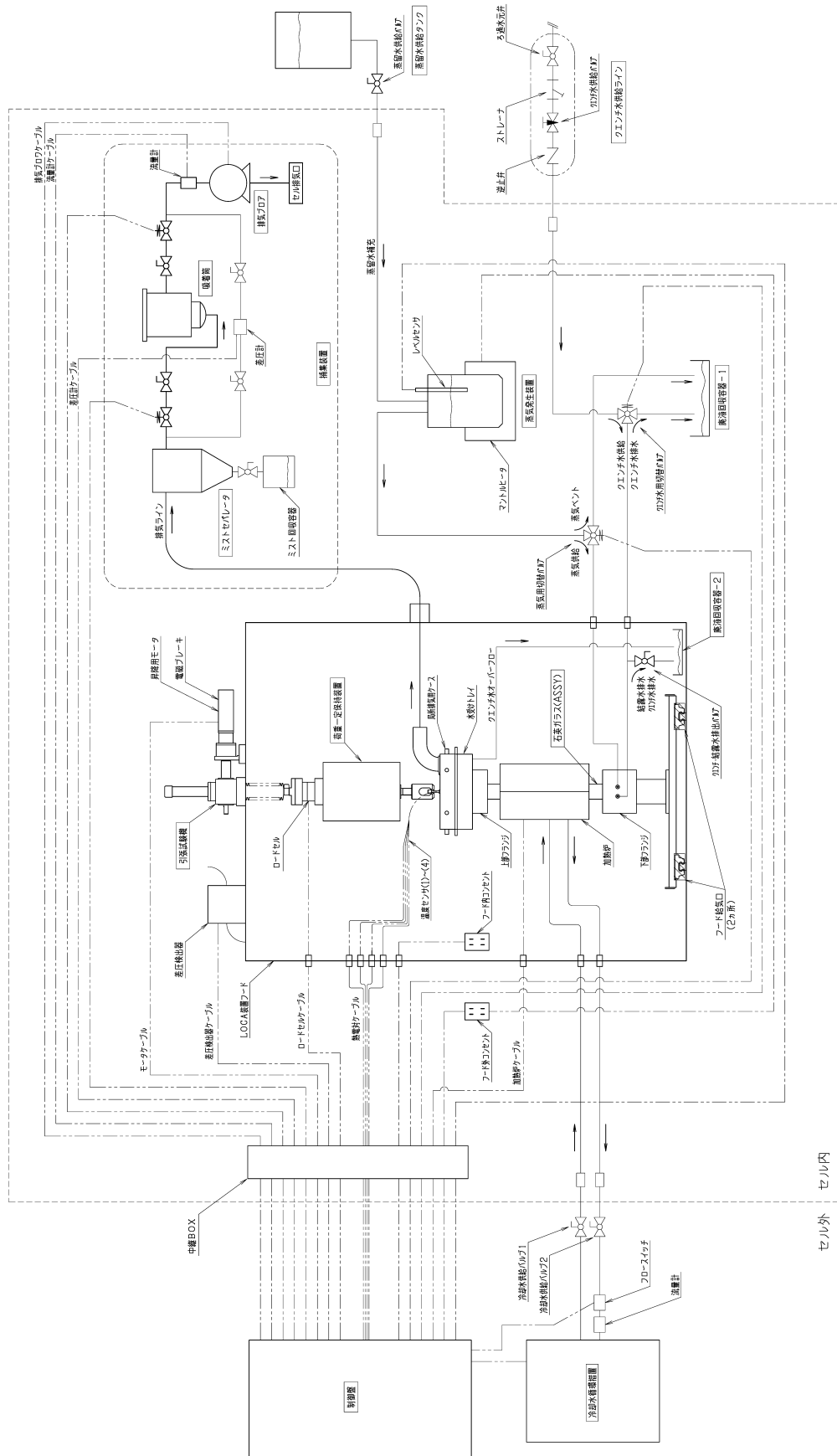


図 3.1-3 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の構成図

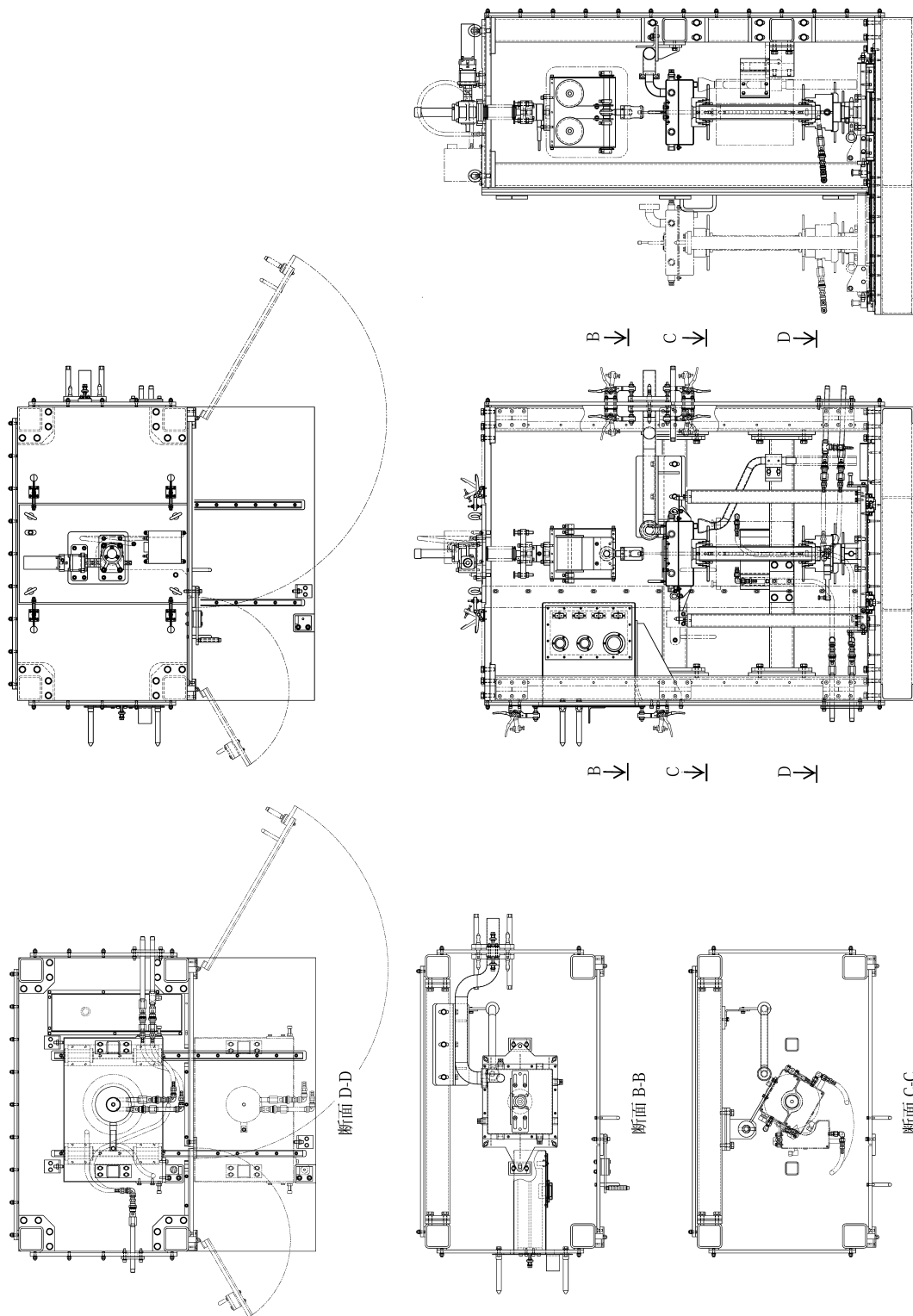
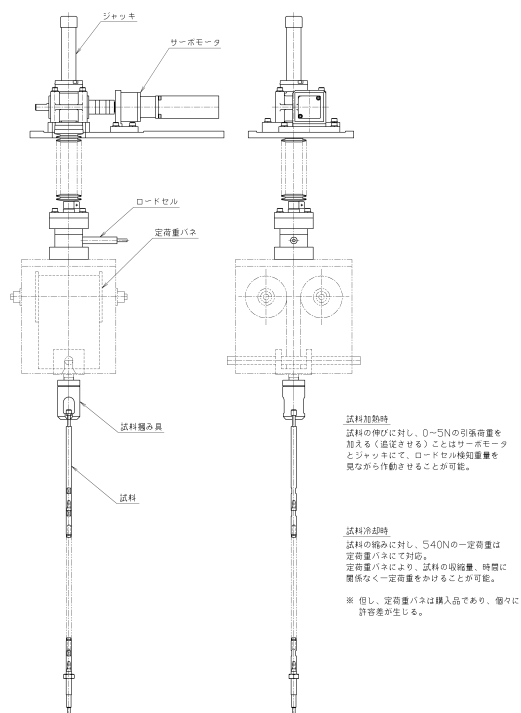


図 3.1-4 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の構造図



図 3.1-5 装置の外観写真 (フード部)



「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。
試料冷却時は、一定重量となる「定荷重バネ」による方式。

図 3.1-6 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

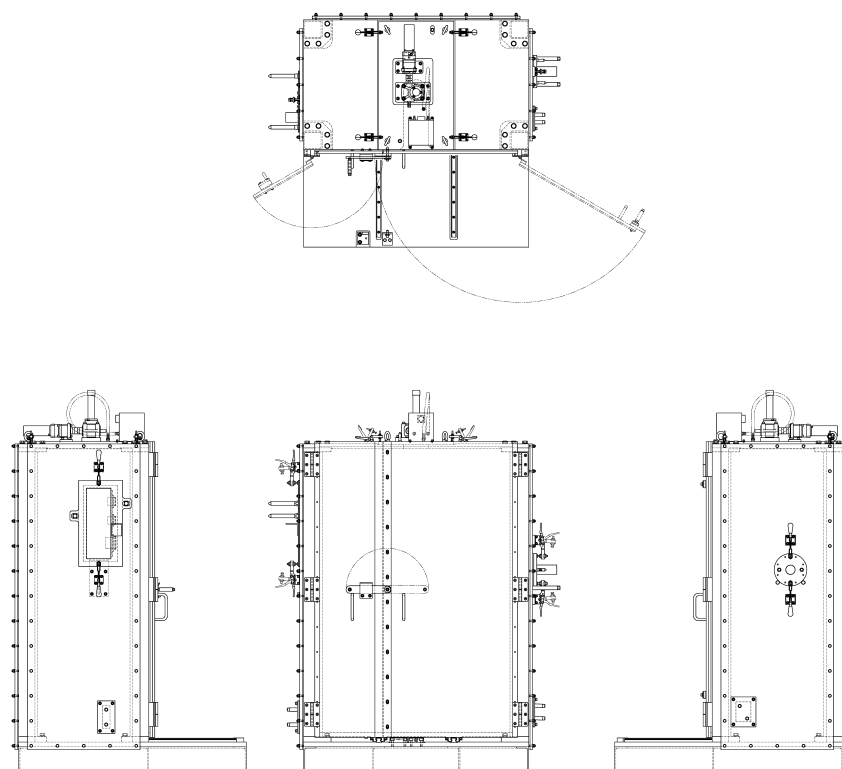


図 3.1-7 実燃料入り LOCA 模擬試験装置全体フードの構造図

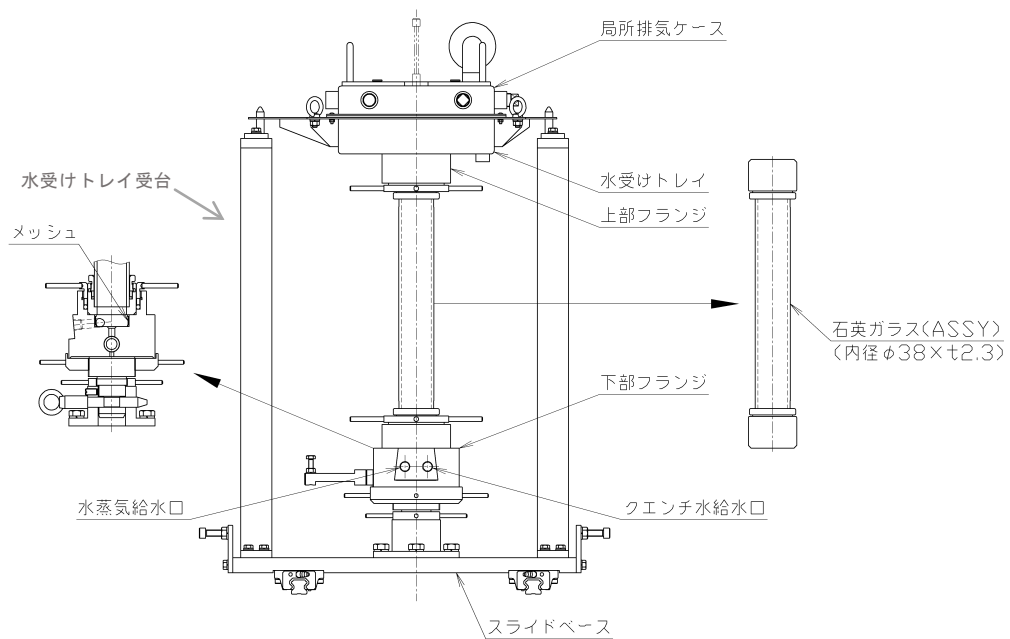


図 3.1-8 試験燃料棒配置部近傍の構造



図 3.1-9 セシウム・ヨウ素吸着筒の外観写真

3.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験

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)⁽¹⁾ から平成 28 年度に採取した燃料ペレット片に対し、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を実施し、加熱時のペレット片の核分裂生成ガス (FP ガス) の放出挙動及び放出された FP ガスの同位体比に関するデータを取得した。また、試験後の燃料ペレット片の外観観察及びマイクロ組織観察を実施した。

3.2.1 加熱試験

(1) 加熱試験用試料採取

平成 28 年度に AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片に対してアウトガス分析装置 (OGA)⁽²⁾ を用いた加熱試験を実施した。平成 28 年度に採取した燃料ペレット片の情報を表 3.2-1 に示す。これらの燃料ペレット片の内、本年度はペレット片 No. 9 を加熱試験に供した。平成 28 年度に取得したペレット片 No. 9 の重量及び密度測定結果、並びに外観画像を表 3.2-2 及び図 3.2-1 にそれぞれ示す。ペレット片 No. 9 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、ペレット片 No. 9 の直径は約 5 mm 程度であることから、この中にはペレット細片化の原因及びメカニズムを解明する上で重要な「ダークゾーン 1」が含まれていると推測される⁽³⁾。

(2) 加熱試験

本年度は燃料ペレット片の細片化が発生するしきい値となる温度を評価するための加熱試験を 1 試験実施した。また、OGA を用いて加熱時に燃料ペレット片から放出される FP ガスの放出量を定量的に評価するためには、燃料ペレット片から放出される FP ガスの同位体比を評価する必要があることから、本年度の加熱試験では、燃料ペレット片から放出される FP ガスの同位体比を得るための定性分析を併せて実施した。

タングステン製のるつぼに入れた燃料ペレット片を真空中、LOCA 時の燃料棒の昇温速度^(5,6) に近い約 5 K/s の速さで加熱した。保持温度は先行研究において報告されている燃料ペレットの細片化しきい温度である 1023 K⁽⁷⁾ を超える 1073 K とし、この温度で約 600 s 保持した。この後、FP ガスの定性分析を実施するため、さらに 5 K/s の速さで試験装置の最高使用温度 (2273 K) に近い 1973 K まで加熱し、3600 s 保持した。このような高い温度で長時間加熱するのは、燃料ペレット片中の FP ガスを全量放出させ、定性分析の精

¹ ダークゾーンにおいては、製造時と異なる微小な気泡が結晶粒内に高密度に形成されている様子が観察されている⁽³⁾。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に繋がる可能性があることから、燃焼の進展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。

度を高めるためである。以上の試験条件を表 3.2-3 に示す。

図 3.2-2 に加熱試験時に燃料ペレット片から放出された FP ガス (^{86}Kr 及び ^{136}Xe) の分圧及び同試験時のるつぼの温度の時刻歴を示す。OGA ではペレット片から放出される FP ガスの分圧を計測しており、別途、標準ガスを用いて実施する予備試験により求めた分圧とガス流量に関する検量線、及び FP ガスの同位体比を用いて FP ガスの放出量を評価する。今年度は平成 27 年度に本事業において作成した図 3.2-3 に示す検量線⁽²⁾を用いて加熱試験時に燃料ペレット片から放出された FP ガスの放出量を評価した。加熱試験時に燃料ペレット片から放出されたキセノンの放出率及びるつぼ温度の時刻歴、並びに加熱試験時に燃料ペレット片から放出されたキセノンの放出割合及びるつぼ温度の時刻歴を図 3.2-4 及び図 3.2-5 にそれぞれ示す。これらの図から、燃料ペレット細片化しきい値として報告されている 1073 K⁽⁷⁾ までの加熱及びこの温度保持過程においてキセノンの放出は確認されず、また、るつぼ温度が約 1500 K に到達した際にキセノンの放出が顕著となり、1973 K 到達後、約 700 s の間に今回の試験で燃料ペレット片から放出されたキセノンのほぼ全量が放出されたことが確認された。今回試験に供した燃料ペレット片の重量は 0.2 g と小さく、約 1500 K 未満の温度域では装置の検出限界を超える量のキセノンが放出されなかった可能性がある。もう一つの着目 FP ガスであるクリプトンについては、全てのるつぼ温度範囲で放出率が $0 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{g/s}$ と評価された。

なお、今回実施した加熱試験時の FP ガスの分圧は、平成 27 年度に本事業において作成した検量線⁽²⁾の作成範囲を超える値を計測した。従って、FP ガスの分圧をより正確に評価するためには、今後分圧の評価範囲を広げた上で改めて分圧とガス流量に関する検量線を作成し、今年度取得した FP ガスの放出量評価値の妥当性を確認する必要がある。

表 3.2-4 及び図 3.2-6 に加熱試験時に燃料ペレット片から放出された FP ガスに対する定性分析から得られたクリプトン及びキセノンの同位体比を示す。クリプトン及びキセノンのそれぞれの同位体比は先行研究で報告されている値とほぼ同等⁽⁸⁾であった。

3.2.2 加熱試験後の分析

図 3.2-7 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観画像を示す。ペレット片は細片化し、粉末状であった。

図 3.2-8(1)-(5)に加熱試験後の燃料ペレット片の走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像を示す。拡大画像から分かるように、細片化したペレット片の組織は大別して次の 3 種類、すなわち、(a) 表面に製造時の結晶粒 (約 $10 \mu\text{m}$) と同等の大きさの結晶粒が見られ、かつその表面に粒径 $1 \mu\text{m}$ 以下の微細粒が見られるもの (図 3.2-8(2)及び(3))、(b) 表面に $1 \mu\text{m}$ 以下の微細粒のみが見られるもの (図 3.2-8(4))、及び(c) 表面に平滑な面と $1 \mu\text{m}$ 以下の微細粒が見られるもの (図 3.2-8(5))、が観察された。(a)については製造時の結晶粒界に沿った割れ (結晶粒界割れ) による細片化、(c)については平滑な面が観察されていることから主に製造時の結晶粒内を通過する割れ (結晶粒内割れ) による細片化が示唆される。い

れも、燃料ペレットの微細組織が製造時から大きく変化していない領域（ペレットの径方向中間部）で生じた細片と考えられる。(b)については、表面に $1\ \mu\text{m}$ 以下の微細粒のみが見られ、また製造時の結晶粒に相当する組織が見られないことから、いわゆる高燃焼度組織（リム組織）を有する領域（ペレット最外周部近傍）またはこの組織に類似した組織を有する領域（ダークゾーン）で生じた細片であることが示唆される。

今年度の加熱試験後に撮影したペレット細片の SEM 写真に基づき、ペレット細片の粒径とその表面に見られる組織の違いとの関係についても簡易的に調べたが、両者の間に明確な関係は認められなかった。但し、今年度のペレット加熱試験における最高到達温度が $1973\ \text{K}$ であり、図 3.2-8(1)~(3)において結晶粒界に FP ガス放出に伴う粒界トンネルが観察されていることから、燃料ペレットの細片化しきい温度である $1023\ \text{K}$ ⁽⁷⁾ では生じない FP ガスのバースト放出^(9,10) が試験後のペレット細片化の程度に影響を及ぼしている可能性もある。今後ペレット加熱試験データを蓄積してこの傾向を確認する必要がある。

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⁽³⁾

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 ₂	81	M-MDA (SR)

表 3.2-2 燃料ペレット片の密度測定結果⁽³⁾

ペレット片番号	製造時データ ⁽⁴⁾	照射後測定結果		
	理論密度比 (%TD)	試料密度 (g/cm ³)	理論密度比 (%TD)	体積変化率* (%)
No. 9	96.0	9.70	88.5	8.5

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

表 3.2-3 燃料ペレット片の加熱試験条件

昇温速度 (K/s)	保持温度 (K)	保持時間 (s)	雰囲気
5	1073	600	真空 (測定開始時真空度： 約 3.4×10 ⁻³ Pa)
	1973	3600	

表 3.2-4 定性分析結果

Kr				Xe			
天然ガス ⁽⁸⁾		FP ガス		天然ガス ⁽⁸⁾		FP ガス	
質量数	存在比 (%)	質量数	存在比 (%)	質量数	存在比 (%)	質量数	存在比 (%)
82	11.3	82	0.0	129	26.4	129	0.0
83	11.4	83	7.6	131	21.2	131	6.0
84	56.2	84	32.6	132	26.9	132	27.0
85	0.0	85	2.6	134	10.2	134	28.8
86	16.9	86	50.2	136	8.9	136	38.1



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

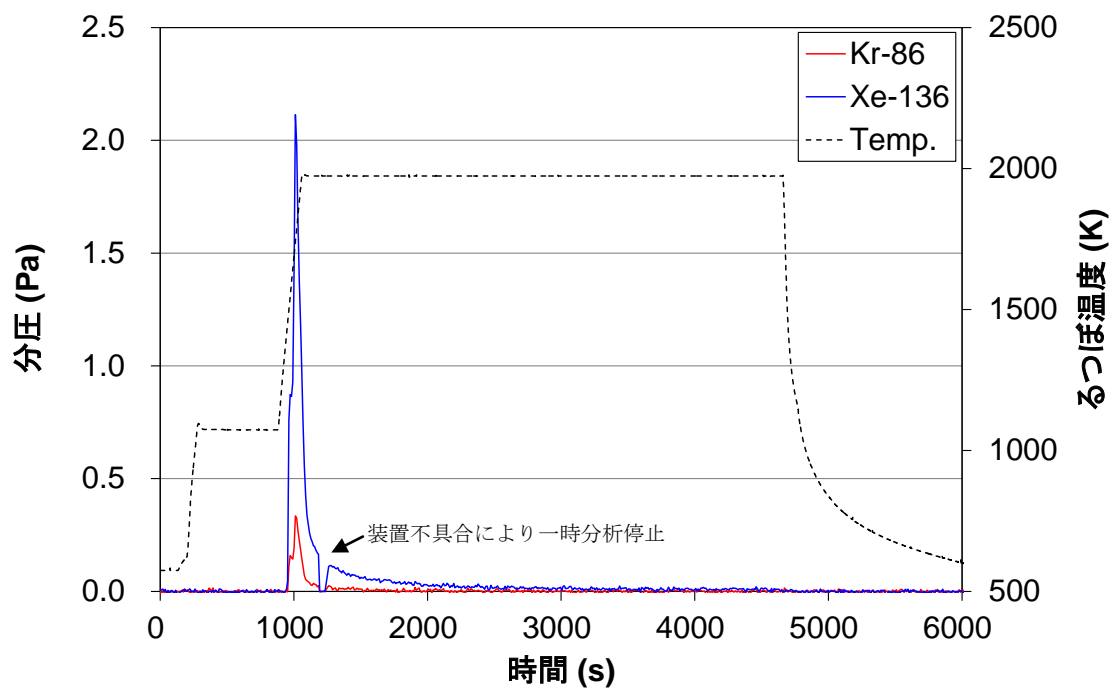
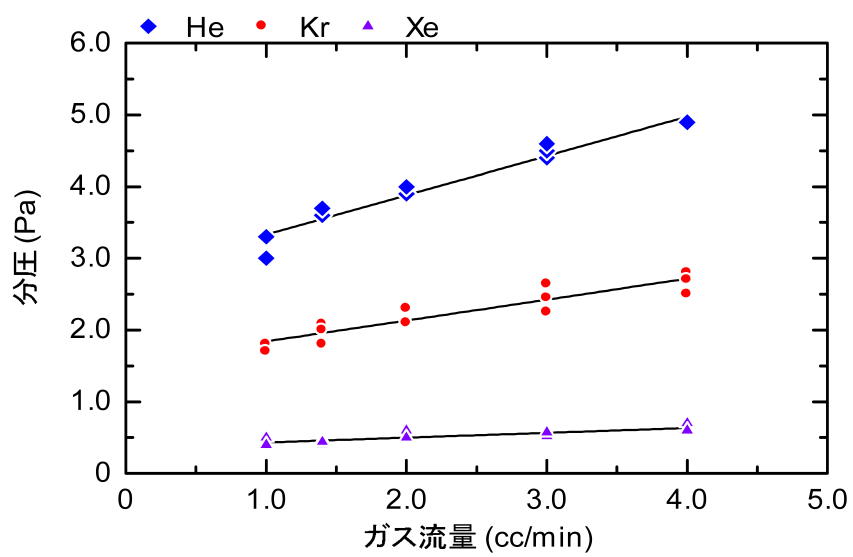


図 3.2-2 加熱試験時の FP ガス分圧及び炉温度の時刻歴

図 3.2-3 標準ガスの定量分析結果⁽²⁾

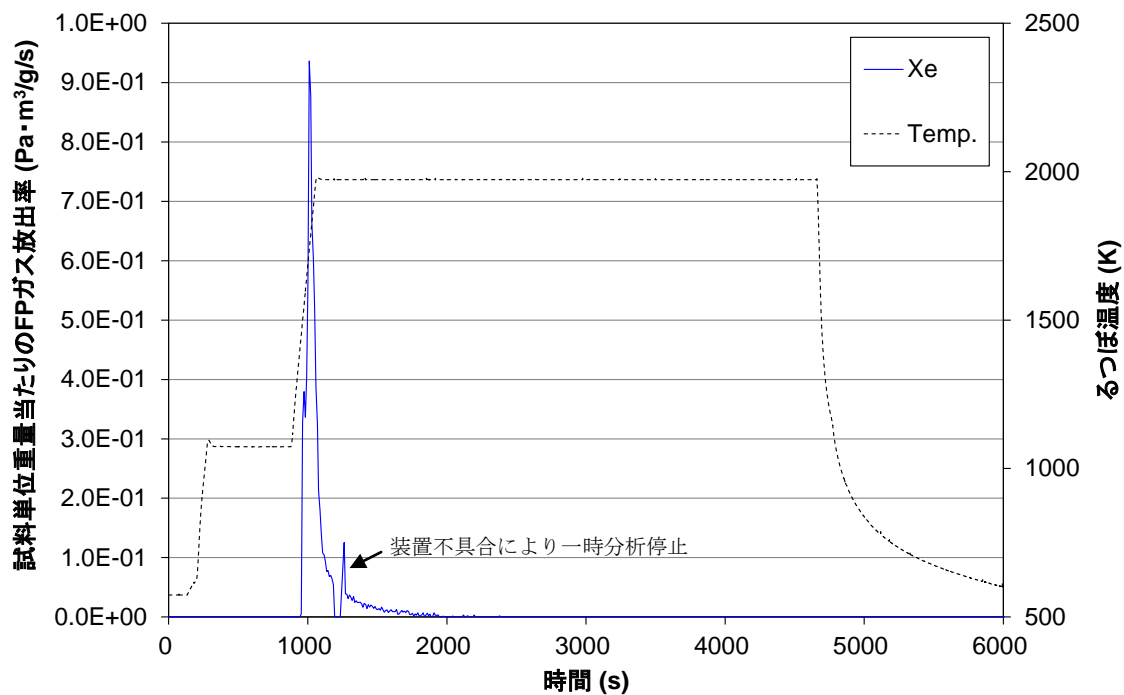


図 3.2-4 加熱試験時のキセノン放出率及び炉温度の時刻歴

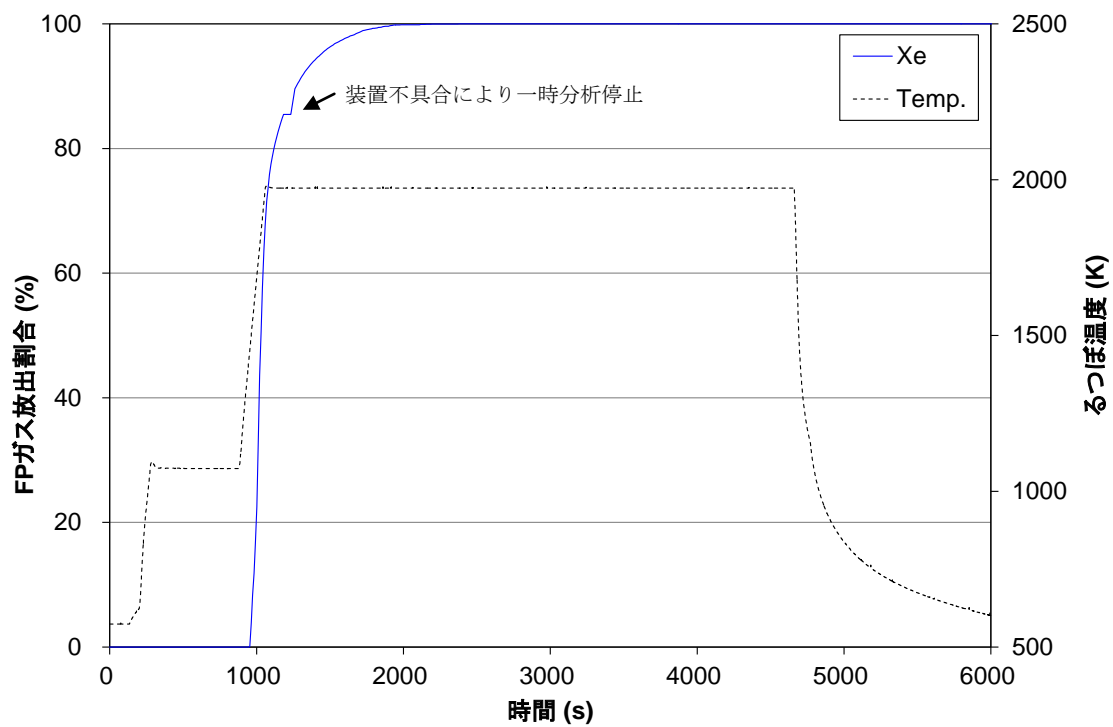
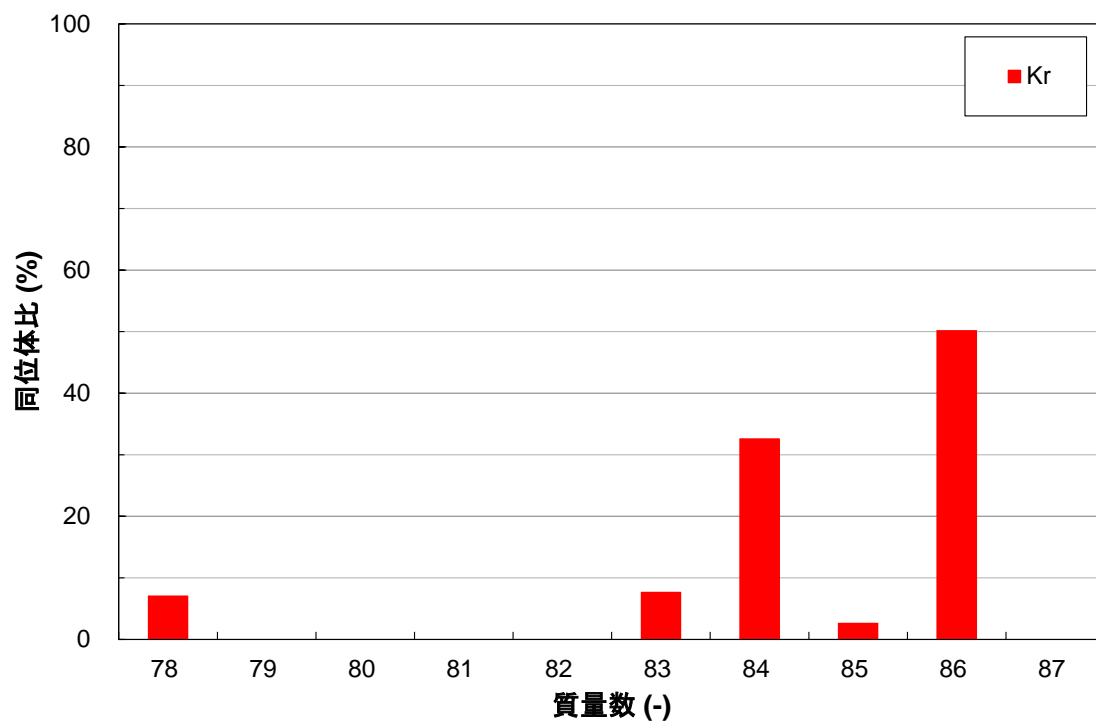
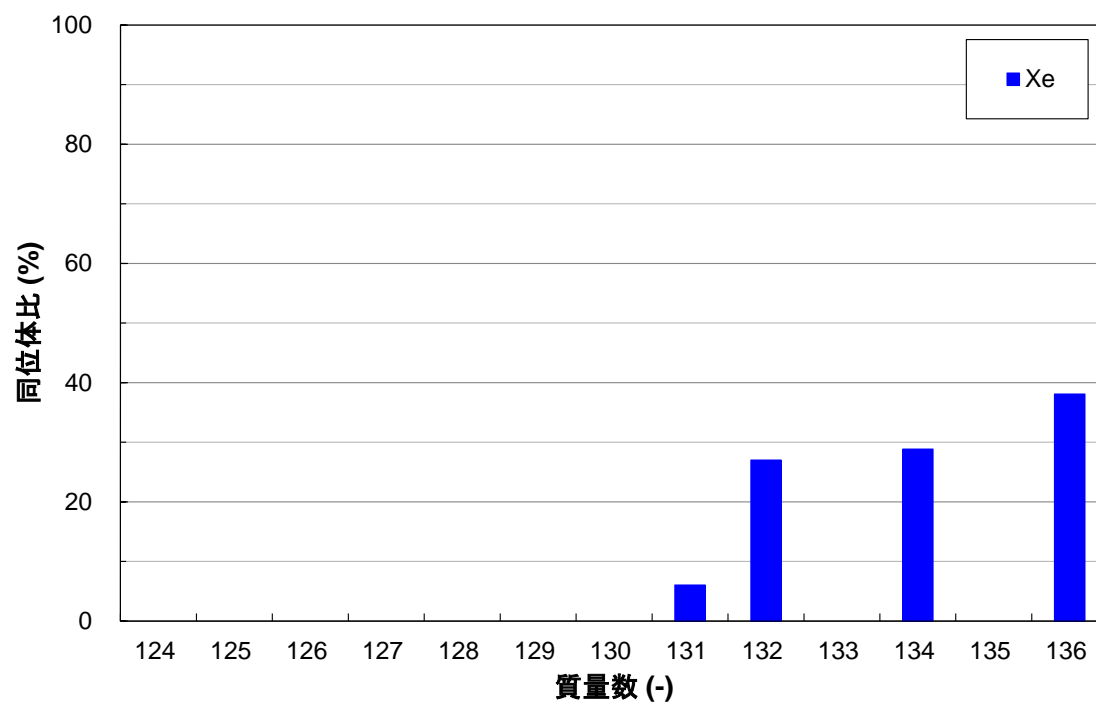


図 3.2-5 加熱試験時のキセノン放出割合及びるつぼ温度の時刻歴



(1) クリプトンの同位体比



(2) キセノンの同位体比

図 3.2-6 FP ガスの同位体比

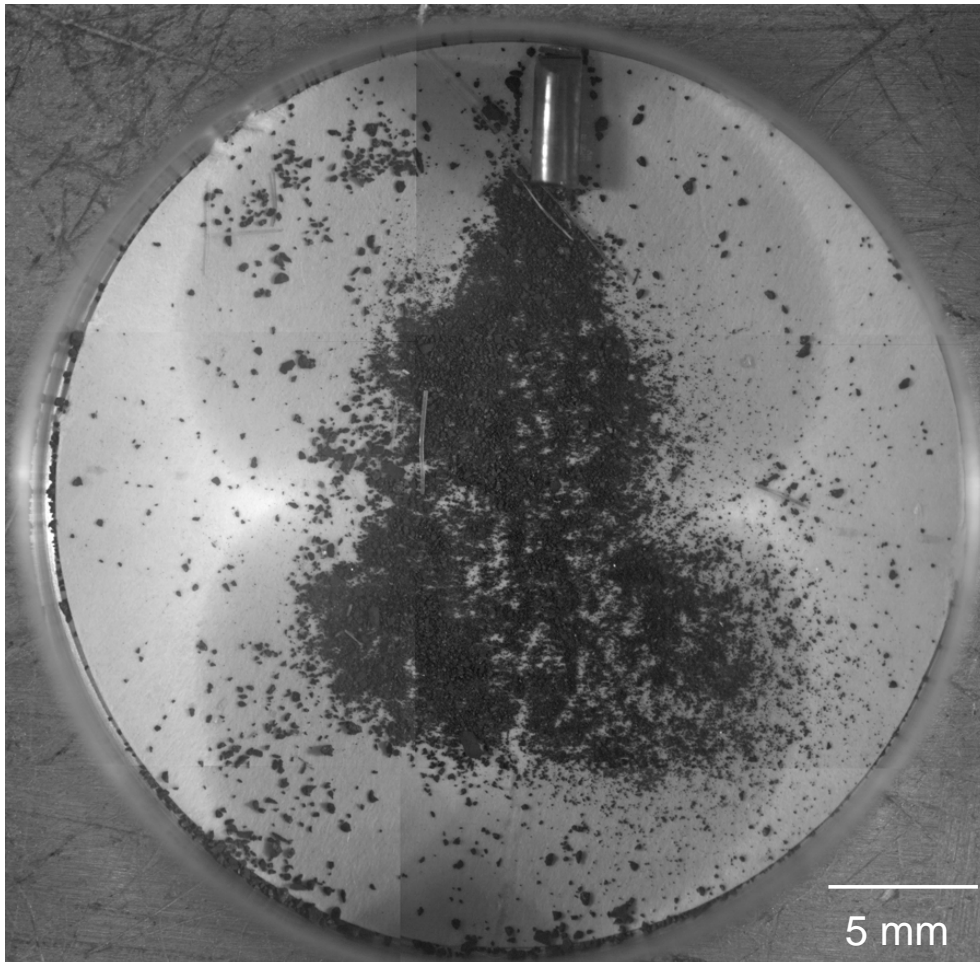


図 3.2-7 加熱試験後の試料外観

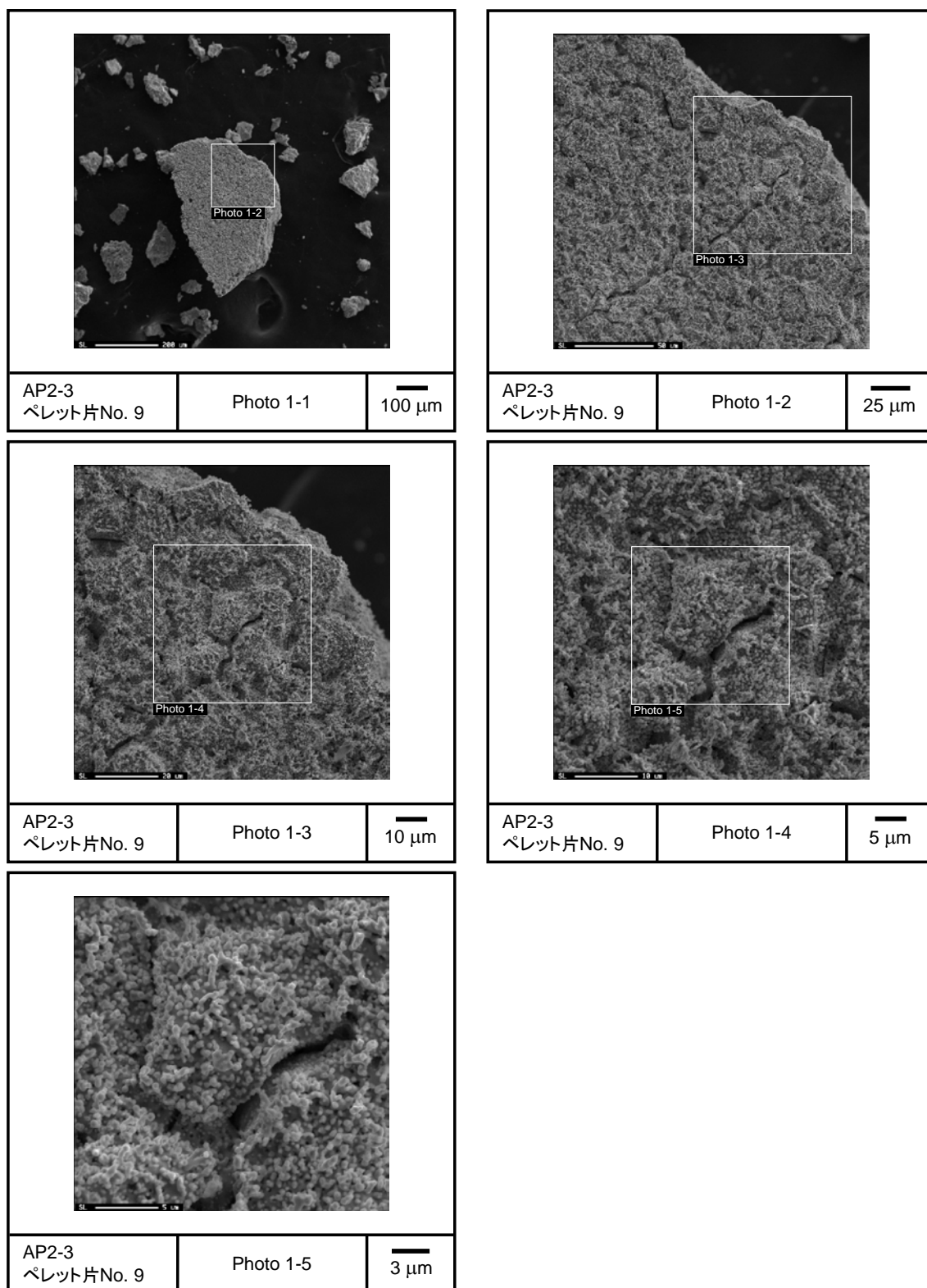


図 3.2-8(1) 加熱試験後の燃料ペレット片 SEM 画像

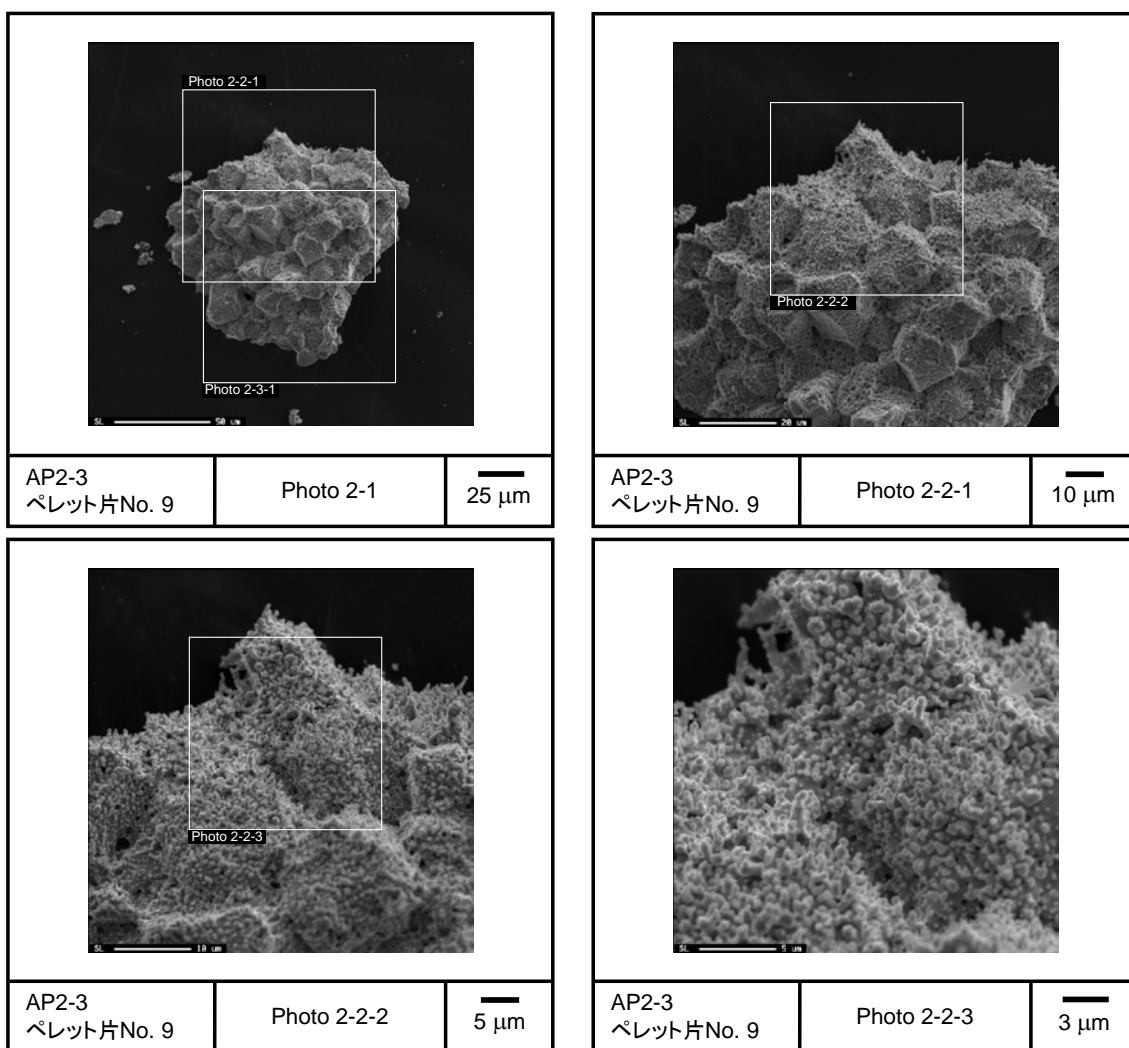


図 3.2-8(2) 加熱試験後の燃料ペレット片 SEM 画像

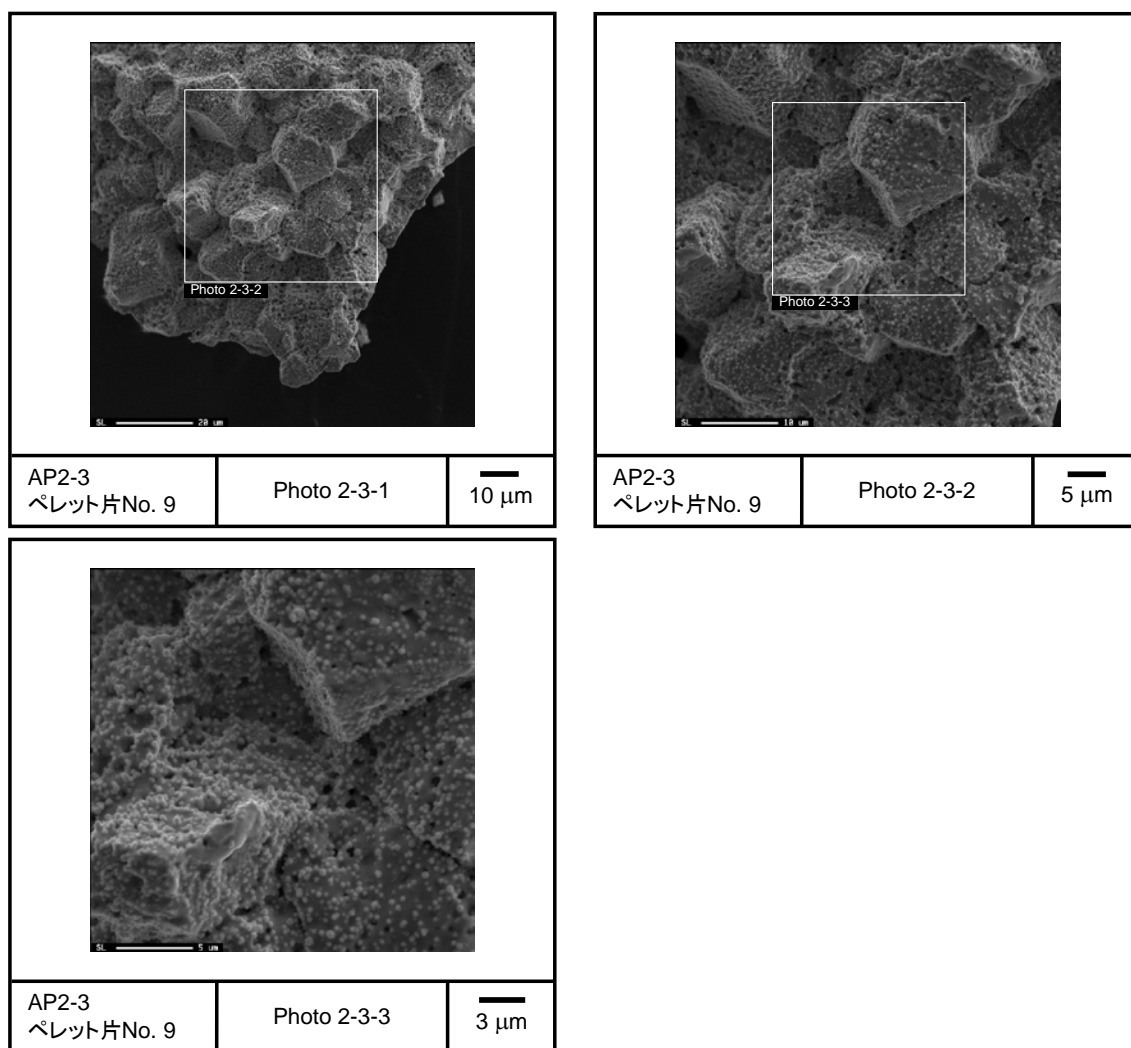


図 3.2-8(3) 加熱試験後の燃料ペレット片 SEM 画像

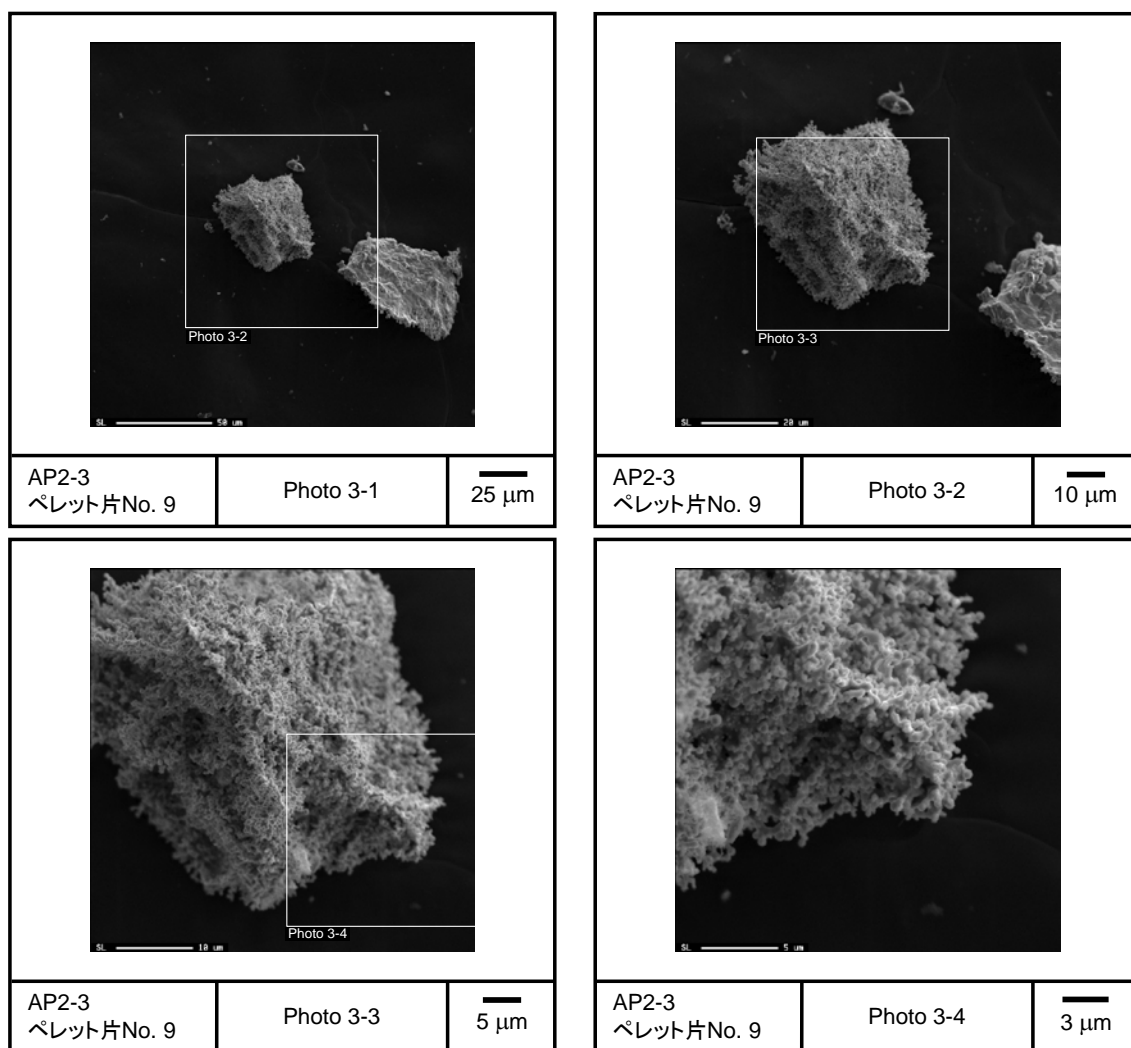


図 3.2-8(4) 加熱試験後の燃料ペレット片 SEM 画像

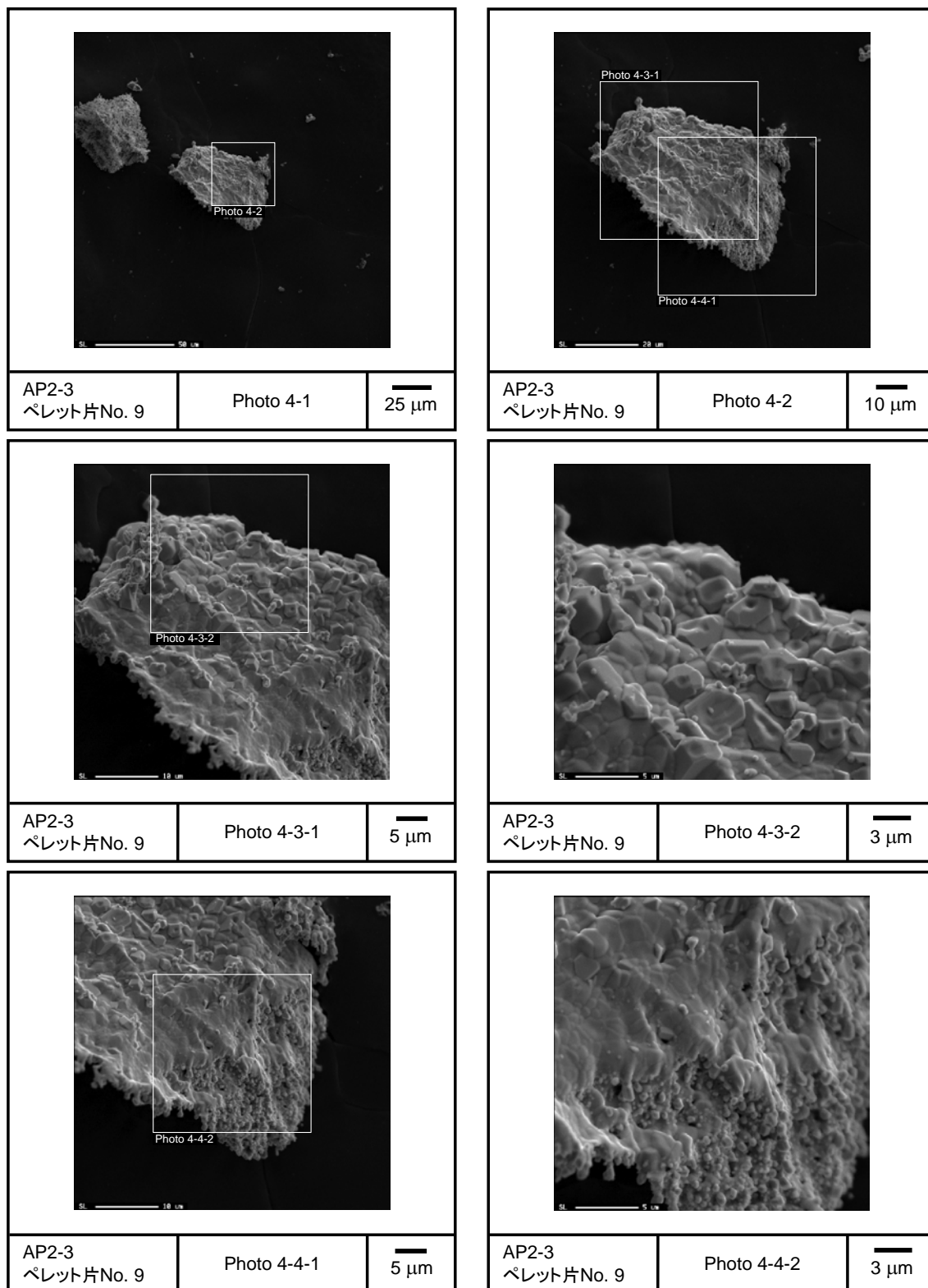


図 3.2-8(5) 加熱試験後の燃料ペレット片 SEM 画像

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 29 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）の製作、並びに燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験を実施した。

(参考文献)

1 章

- (1) 例えば、Flanagan M, “Summary of Public Meeting”, NRC Public Mtg, Mar. 13-14, (2014).
- (2) Yueh K, “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 模擬試験装置の製作

- (1) 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、(国研) 日本原子力研究開発機構安全研究センター、平成 29 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

- (1) 平成 28 年度原子力規制庁委託成果報告書原子力施設等防災対策等委託費（燃料等安全高度化対策）事業(平成 28 年度分)、(国研) 日本原子力研究開発機構安全研究センター、平成 30 年 1 月.
- (2) 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、(国研) 日本原子力研究開発機構安全研究センター、平成 28 年 3 月.
- (3) 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、(国研) 日本原子力研究開発機構安全研究センター、平成 29 年 3 月.
- (4) 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安全研究センター、平成 26 年 3 月.
- (5) Nissley ME, Frepoli C, Ohkawa K, “Realistic assessment of fuel rod behavior under large-break LOCA conditions”, Proceedings of the Nuclear Fuels Sessions of the 2004 Nuclear Safety Research Conference (NUREG/CP-0192), October 22–27, 2004, Washington (DC), pp. 258-273 (2005).
- (6) Chung HM, “Fuel behavior under loss-of-coolant accident situations”, Nucl Eng Technol., Vol. 37, pp. 327-362 (2005).
- (7) Yueh KH, Snis N, Mitchell D, and Munoz-Reja C, “Fuel Fragmentation Data Review and Separate Effects Testing”, Proceedings of WRFPM 2014, Sendai, Japan,

September 14-17, 2014, paper no. 100117 (2014).

- (8) 畠山 祐一、須藤 健次、金澤 浩之、照射済燃料ペレット内 FP ガス分析技術の開発、JAERI-Tech 2004-033、日本原子力研究所、(2004) .
- (9) Une K, and Kashibe S, “Fission Gas Release during Post Irradiation Annealing of BWR Fuels”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 27, pp. 1002-1016 (1990).
- (10) Une K, and Kashibe S, “Fission gas release during postirradiation annealing of UO_2 -2 wt% Gd_2O_3 fuels”, J. Nucl. Mater., Vol. 189, pp. 210-216 (1992).