

平成26年度

燃料等安全高度化対策事業に関する

報告書

平成27年3月

(独) 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 全体計画	2-1
2.1 目的	2-1
2.2 実施内容	2-1
2.2.1 RIA 試験	2-2
2.2.2 LOCA 試験	2-4
2.2.3 改良型燃料被覆管の照射成長試験	2-6
3 章 平成 26 年度燃料等安全高度化対策事業の概要	3-1
3.1 RIA 試験	3-1
3.2 RIA 試験解析	3-2
3.3 LOCA 試験	3-2
3.4 改良型燃料被覆管の照射成長試験	3-2
4 章 平成 26 年度燃料等安全高度化対策事業の実施内容	4.1-1
4.1 燃料検査	4.1-1
4.1.1 燃料セグメントに対する非破壊試験	4.1-1
4.2 レファレンス試験	4.2-1
4.3 RIA 試験	4.3-1
4.3.1 GR-1 実験	4.3-1
4.3.2 VA-7 実験	4.3-28
4.3.3 VA-8 実験	4.3-52
4.3.4 VA-5 実験に関するパルス照射後試験	4.3-75
4.3.5 VA-6 実験に関するパルス照射後試験	4.3-108
4.3.6 RIA 試験のまとめ	4.3-115
4.3.7 被覆管機械特性試験	4.3-121
4.4 RIA 試験解析	4.4-1
4.4.1 解析の概要	4.4-1
4.4.2 解析方法とモデル	4.4-1
4.4.3 ベース照射解析結果	4.4-3
4.4.4 RIA 試験解析結果	4.4-4
4.4.5 RIA 試験解析のまとめ	4.4-8
4.5 LOCA 試験	4.5-1
4.5.1 急冷破断試験	4.5-1
4.5.2 酸化速度評価試験	4.5-7

4.5.3	LOCA 試験のまとめ	4.5-10
4.6	改良型燃料被覆管の照射成長試験	4.6-1
4.6.1	改良型燃料被覆管の照射成長試験の概要	4.6-1
4.6.2	照射成長試験に供する材料の選定、照射条件及び試験片の配置	4.6-1
4.6.3	試験片のハルデン炉照射及び冷却材ループ運転状況	4.6-3
4.6.4	試験片に係る中間検査	4.6-5
4.6.5	改良型燃料被覆管の照射成長試験のまとめ	4.6-6
5 章	結言	5-1
	(参考文献)	6-1
	(用語の解説)	7-1

## 1 章 緒言

民間事業者は、資源の有効利用や二酸化炭素の放出削減などの社会的要請に一層応えるため、原子力発電用軽水炉の安全性を確保しつつさらなる高燃焼度化をはじめとする高度利用を目指した燃料、いわゆる「改良型燃料」の研究開発を現在まで進めてきた。

改良型燃料は、従来の規格を大幅に超えて合金成分を変更した新合金被覆管や結晶組織を変更したペレットを採用することで、現行型の燃料に比べて発電用軽水炉で使用中の燃料被覆管の腐食や照射損傷等による劣化の抑制を図ったものであり、このような改良型燃料の発電用軽水炉への導入は、改良型燃料の有する特長から原子力発電の安全性をより高めるものと考えられている。また、さらに改良を進めた燃料の開発も民間事業者によって進められている。

一方、発電用軽水炉での使用中に発生する燃料被覆管の外面腐食や水素吸収などの現象や照射に伴う燃料材料の特性変化、事故時の燃料挙動に大きく影響することがこれまでの研究<sup>(1-3)</sup>によって明らかになってきている。また、燃料被覆管の合金組成や製造時条件の違いが事故時の燃料挙動に影響を及ぼす可能性<sup>(4)</sup>も報告されている。従って、原子炉施設に関する安全規制上の判断を行う上では、照射済燃料等を用いた事故模擬試験によって取得した事故時燃料挙動に関するデータ及び知見が極めて重要である。このため、国は、照射済燃料を含む軽水炉燃料の反応度事故（Reactivity Initiated Accident : RIA）時や冷却材喪失事故（Loss of Coolant Accident : LOCA）時の健全性評価試験を行い、原子炉の安全審査を行う上で必要なデータ及び判断材料を自ら準備してきている。

燃料の事故時健全性確認は、原子炉施設の安全審査に当たって不可欠なプロセスであり、かつ国民の関心も高い。従って、今後導入が検討されている改良型燃料の安全規制においては、その判断根拠となるデータや知見を国がタイムリーに取得する必要がある。具体的には、現行燃料に対して加えられた各種改良が原子炉の事故時安全性に及ぼす影響について、定量的に把握しておく必要がある。

燃料等安全高度化対策事業は、産業界が商用軽水炉等において照射した燃料（高燃焼度まで照射された現行型及び改良型燃料）を対象にその事故時挙動を調査するものであり、照射データ、照射後試験結果等、産業界の得た知見を有効に活用しつつ、規制のニーズに応えるものである。平成 14～19 年度までは現行型被覆管を使用し高い燃焼度まで照射されたウラン燃料やプルサーマル燃料（混合酸化物（MOX）燃料）を対象に RIA 及び LOCA 時挙動について調べ、RIA 時の燃料破損限界、核分裂ガス放出量、燃料破損時に発生する機械エネルギー、LOCA 時の被覆管酸化速度、被覆管の膨れ及び破裂挙動、酸化した被覆管の急冷時破断限界など、集合体最高燃焼度 55GWd/t を超える高燃焼度化及び MOX 燃料の利用に際して行われる安全審査で必要となる判断材料を得た<sup>(5-10)</sup>。また、改良型燃料の導入に係る事業者からの申請に対し、国として、安全審査における規制判断の根拠となる事故時燃料挙動に関するデータ及び知見が必要である。そのようなデータ及び知見を整備す

るために改良型燃料へ対象を広げた調査を平成 20 年度より開始し、平成 25 年度までに一部の改良型燃料の RIA 時及び LOCA 時挙動並びに使用中の燃料集合体の寸法安定性に影響を及ぼす改良合金の照射成長に関するデータ等を取得してきている<sup>(11-16)</sup>。平成 26 年度は、これらのデータ取得等を継続した。

本報告書は、(独) 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 26 年度燃料等安全高度化対策事業で得た成果をとりまとめたものである。

## 2 章 全体計画

本燃料等安全高度化対策事業は、平成 14 年度に開始した高度化軽水炉燃料安全技術調査と平成 17 年度に開始した高精度熱水力安全評価技術調査を統合し、平成 18 年度より開始したものである。高度化軽水炉燃料安全技術調査においては高燃焼度燃料の事故時挙動に関する調査を、高精度熱水力安全評価技術調査においては事故時及び異常な過渡変化時の燃料棒健全性評価に関連する熱水力挙動に関する調査を進めてきたが、後者については平成 21 年度の事業をもって終了したため、平成 22 年度以降の事業内容は燃料の事故時挙動等に関するもののみとなった。

### 2.1 目的

民間事業者は、従来の規格を超えて合金成分を変更した被覆管や結晶組織を変更したペレットを採用するなどした改良型燃料の開発を進めてきている。このような改良型燃料では、現行の燃料に比べ発電炉通常運転時の被覆管の腐食や水素吸収、ペレットからの核分裂生成ガス（FP ガス）放出の低減が図られていることから、民間事業者は、既存の発電炉のさらなる有効利用及び安全性向上の観点でその導入を目指している。

一方、このような改良型燃料の導入にあたっては、現行の燃料に対して加えられた種々の改良が通常運転時の燃料健全性や原子炉の事故時安全性に及ぼす影響を定量的に把握する必要がある。このような改良型燃料に対応した規制判断に必要なデータ及び技術的知見の取得を主な目的として、平成 20 年度から改良型燃料の事故時挙動等に関する試験を実施している。

### 2.2 実施内容

本事業では、欧州の原子力発電所等において高燃焼度まで照射された軽水炉燃料を（独）日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）へ輸送し、RIA 時の燃料の破損しきい値や燃料破損による影響を評価するためのデータを取得する。具体的には、原子力機構が有する NSRR（Nuclear Safety Research Reactor：原子炉安全性研究炉）を利用した RIA 試験や、LOCA 時の被覆管の耐破断特性や酸化特性に関するデータを取得する LOCA 試験を実施する。

事業の全体スケジュールを表 2.2-1 に示す。平成 20 年度以降の本事業のうち、事故時燃料挙動に係るものにおいては、産業界が欧州の発電炉において照射した改良型燃料試料を入手してそれらを対象とした RIA 試験、LOCA 試験を実施し、改良型燃料の事故時挙動等に関するデータを取得する。取得するデータは、

- －RIA 時の燃料挙動に関し、燃料破損限界、破損挙動及び破損影響（被覆管破損形態、核分裂ガス放出、燃料微粒子化など）、
- －LOCA 時の燃料挙動に関し、被覆管の酸化速度、急冷時破断限界、膨れ及び破裂挙動、

といった安全審査に反映できるものであり、事故時の破損燃料本数、炉心冷却性、圧力バウンダリ健全性など原子炉の安全評価の妥当性を確認するために必要なものである。また、試験で得られた結果の評価を行うために、計算コードを用いた解析的評価も行う。さらに、改良型燃料への採用が見込まれる改良合金材料を対象に、燃料集合体の変形等をもたらす原因となり得る照射成長挙動を調べる試験を実施する。

本事業で実施する具体的な内容を以下に示す。

### 2.2.1 RIA 試験

#### (1) 背景と目的

RIA は、原子炉設計時に想定する設計基準事象のひとつであり、制御棒の飛び出しましては落下により原子炉出力が局所的に急上昇し、燃料エンタルピが急激に増大する事故である。燃料エンタルピの増大によって燃料は破損に至る可能性があり、更には、燃料破損に伴い発生する水撃力及び衝撃圧力により炉内構造物や圧力容器が損傷を受ける恐れがあることから、「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針」（昭和 59 年 1 月）において、RIA 時における燃料破損しきい値や、燃料エンタルピの最大値が制限されている。原子力機構は、RIA 時の出力急上昇を模擬した NSRR パルス照射実験により、燃料の破損限界や、燃料破損に伴い発生する水撃力・衝撃圧力の大きさに関するデータを取得し、安全評価指針策定のためのデータベースを提供して来た。

高燃焼度ウラン燃料の RIA については、原子力機構 NSRR 及び仏 CABRI 炉におけるパルス照射試験等の結果を基に、旧原子力安全委員会原子炉安全基準部会報告書「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取り扱いについて」（平成 10 年 4 月）がまとめられた。同報告書では、PWR 燃料についてはナトリウム冷却条件（CABRI 炉）で実施された燃料セグメント燃焼度 64GWd/t の実験、水冷却条件（NSRR）では 50GWd/t の実験、BWR 燃料については水冷却条件（NSRR）の 45GWd/t の実験における結果などに基づき破損しきい値が決定された。燃料セグメント燃焼度 65GWd/t を超える領域については工学的判断に基づき暫定的な破損しきい値が設定され、この暫定しきい値については、今後の試験の進捗や燃料設計の改良等に応じて見直していくこととなっている。

軽水炉における MOX 燃料利用については、旧原子力安全委員会原子炉安全基準部会報告書「発電用軽水型原子炉施設に用いられる混合酸化物燃料について」（平成 7 年 6 月）により炉心装荷率 1/3 程度までの MOX 燃料では燃料集合体最高燃焼度 45GWd/t まで、また、同「改良型沸騰水型原子炉における混合酸化物燃料の全炉心装荷について」（平成 11 年 6 月）により改良型沸騰水型原子炉（ABWR : Advanced BWR）での全炉心装荷では燃料集合体最高燃焼度 40GWd/t までの範囲で安全評価における指標が検討された。しかしながら、これらの報告書の検討範囲を上回る燃焼度範囲については知見の拡大が求められている。

民間事業者によって開発が進められている改良型燃料では、既存の発電炉のさらなる有効利用及び安全性向上の観点で、合金成分や製造条件を変更して耐食性を向上させた被覆



管や、結晶組織を変化させることで FP ガス放出量を低減させた燃料ペレットの採用が見込まれている。これらの改良型燃料の導入においては、現行の燃料に対して加えられた改良が通常運転時の健全性や原子炉の事故時安全性に及ぼす影響など、規制判断を行う上で必要とされるデータの取得及び拡充が必要となっている。

以上より、本事業で行う RIA 試験では、改良型燃料を対象として、燃料棒の破損が生じる燃料エンタルピ（破損しきい値）、パルス照射による FP ガス放出、燃料棒破損が生じた場合の燃料微粒子化や機械的エネルギー発生量など事故時の影響評価に必要なデータ及び知見を取得する。

## (2) 試験の概要

欧州で高燃焼度まで照射された改良型ウラン及び MOX 燃料を用いて、RIA 時の燃料挙動調査に関する試験を NSRR において実施する。入手した燃料を原子力機構燃料試験施設のホットセルで短尺の試験燃料棒に加工し、NSRR パルス照射試験前の状態を調べるためのパルス前試験を実施した後、NSRR 施設に輸送する。試験燃料棒の構造を図 2.2.1-1 に示す。室温大気圧試験用燃料棒は全長約 300mm、燃料スタック長約 110mm で、高温高圧試験用燃料棒は全長約 120mm、燃料スタック長約 50mm の寸法である。両燃料棒ともエンドピークを抑える目的で燃料スタックの両端にハフニウム (Hf) ディスクを配置し、新品の端栓を装着した構造となっている。

NSRR 施設に輸送した試験燃料棒を実験カプセルに封入してパルス照射試験を実施する。実験カプセルの構造を図 2.2.1-2 に示す。本事業では、室温大気圧用及び高温高圧用の二種類のカプセルを用いる。両カプセル共、内容容器と外容器から構成される二重カプセル型の構造であるが、高温高圧用カプセルには、内容容器の安全性確保のため制限内圧を超えた場合の圧力逃がし用として圧力抑制用タンクが設けられている。

試験燃料棒を装填した実験カプセルを NSRR の炉心中央部の実験孔に装荷してパルス照射する。パルス照射試験では、RIA 時の出力暴走を模擬した条件での燃料の過渡挙動を、被覆管外面温度、被覆管変形量、燃料棒内圧等の測定により把握する。また、パルス照射試験後の燃料棒に対して、燃料試験施設にて照射後試験を実施する。この試験によって、燃料棒の破損が生じる燃料エンタルピ（破損しきい値）、パルス照射による FP ガス放出量、燃料棒破損が生じた場合の燃料微粒子化挙動や機械的エネルギー発生量など、事故の影響評価に必要なデータを取得する。NSRR 施設で行う作業の流れを図 2.2.1-3 に示す。

また、RIA 時の燃料挙動のうち、FP ガス放出の動的挙動の解明に特化した実験として、パルス照射中の FP ガス放出履歴を測定する試験を実施する。この試験は、被覆管の両端を開放した燃料棒または被覆管なしの燃料片を封入した小型容器を室温大気圧用の NSRR 実験カプセル内に設置してパルス照射を行うものである。この小型容器は高精度の圧力計と熱電対を備えており、圧力・温度の過渡計測によりパルス照射中の FP ガス放出挙動を調べる。この試験により、RIA 時燃料破損に対する FP ガスの寄与や、燃料棒表面で膜沸騰遷移

が起こった際に被覆管膨れの駆動力となる燃料棒内圧の評価に必要なデータを取得する。

欧州照射燃料を対象として NSRR において実施する試験に加えて、RIA 時に被覆管に作用する応力状態を忠実に模擬し、被覆管の変形及び破損挙動に関するデータを取得するための機械特性試験を実施する。RIA の早期に被覆管に作用する力は主としてペレットの熱膨張によるが、被覆管に発生する周方向と軸方向の応力比はペレットと被覆管の固着状態に依存して変化する。また、燃料棒の内圧を駆動力とする場合には、ペレットの熱膨張による場合と周方向と軸方向の応力比が異なる。これらの条件を模擬するため、被覆管に周方向応力と軸方向応力を独立に与えることができる多軸応力負荷試験機を用いて機械特性試験を実施する。なお、本試験では非照射材料を対象とする。

## 2.2.2 LOCA 試験

### (1) 背景と目的

LOCA は、原子炉設計時に想定する設計基準事象のひとつであり、1 次系配管の破断等により炉心の冷却材が喪失する事故である。LOCA が起こると原子炉は停止するが、崩壊熱により燃料棒の温度は上昇する。非常用炉心冷却系 (Emergency Core Cooling System : ECCS) が作動し数分程度で燃料棒は冷却されるが、高温に曝されている間に被覆管は水蒸気によって酸化され、酸化が著しい場合には燃料被覆管が脆化し、再冠水時の熱衝撃により破断する可能性がある。LOCA 時に炉心の冷却性を確保するためには、燃料棒の崩落につながる燃料被覆管の著しい脆化を防止すればよい、という考えに基づき、LOCA 時における燃料被覆管温度と酸化割合の上限 (1200°C、15%ECR : Equivalent Cladding Reacted) が「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) (ECCS 性能評価指針) において定められた。

原子炉運転中の被覆管外面腐食量やそれに伴う水素吸収量は、燃料の燃焼に伴い増加する。上記の ECCS 性能評価指針は、非照射被覆管を用いた実験で得られたデータに依拠して決められたものであるが、腐食量や水素吸収量が顕著となっていない現行許可燃焼度範囲においては、この指針の適用は可能である。しかし、燃料のさらなる炉内滞在時間の延伸 (燃焼度の延伸) や使用される被覆管材料によっては、外面酸化膜が厚く成長して被覆管の水素吸収量が多くなる (水素濃度が高くなる) ことにより LOCA 条件下における燃料被覆管の破断限界が低下する可能性がある。従って、既存の発電炉の安全性を更に高める観点で今後改良型燃料の導入等を行うに当たっては、現行指針の適用性を確認しながら慎重に進める必要がある。なお、平成 19 年度までに実施した試験においては、燃料の燃焼度延伸等による顕著な LOCA 時挙動の変化は見られていない。

上述のように、産業界は既存の発電炉のさらなる有効利用及び安全性向上を目的として改良型燃料を実用化する計画である。海外で行われた試験により、燃料被覆管のわずかな合金組成の変更や表面処理の違いにより LOCA 時の性能に大きな違いが生じることが報告されている<sup>(1)</sup>。したがって、従来知見のない照射した改良型燃料被覆管について、その LOCA

時挙動を慎重に調べ、原子炉の安全審査に必要な知見を取得することが重要である。

## (2) 試験の概要

上述のように、軽水炉燃料の LOCA 時挙動に関し、高温で酸化された後、非常用炉心冷却系の作動によって急冷される燃料棒が破断に至る条件を調べることで、安全評価上重要である。さらに、昇温に伴う燃料棒内圧の上昇と被覆管強度の低下によって被覆管は膨れ破裂する可能性がある。破裂開口から侵入した水蒸気は被覆管内面を酸化し、発生した水素は被覆管に吸収される。燃料集合体では、スパーサーグリッドにより多くの燃料棒と制御棒案内管が束ねられており、これらの相互作用により燃料棒の軸方向の収縮が拘束され、急冷時には熱衝撃だけでなく機械荷重が作用する可能性もある。このように、LOCA 時に予想される被覆管挙動及び置かれる環境は複雑であることから、出来るだけ LOCA を模擬した条件で試験を行い、燃料棒の破断条件を評価することが望ましい。従って、被覆管の膨れと破裂、高温での酸化、軸方向拘束を模擬した総合的な急冷破断試験を行う。

また、被覆管の脆化は主に酸化量と相関づけられることから、安全評価において被覆管の脆化を評価するためには、酸化速度を精度よく求めておく必要がある。また、ジルコニウム基合金被覆管を水蒸気雰囲気中 1000℃で長時間 (3,600 s 以上) 酸化させた場合に、急速に酸化が進む現象、いわゆるブレイクアウェイ酸化が発生し得ることが報告されている<sup>(2,3)</sup>。酸化速度は原子炉照射中の腐食や被覆管合金元素の変更の影響を受ける可能性があることから、欧州で照射された高燃焼度改良型被覆管などに対し高温酸化試験を行い、酸化速度やブレイクアウェイ酸化発生に及ぼす照射 (燃焼度) や材料組成の影響を調べる。

原子力機構は、非照射水素添加被覆管や照射済被覆管 (44~79GWd/t 燃料被覆管) を用いて高燃焼度燃料の LOCA 時挙動に関する試験を実施してきた<sup>(4-6)</sup>。これらの試験で用いた照射後試験施設等の既存施設と技術的経験を本調査においても活用する。

図 2.2.2-1 には、急冷破断試験に用いる短尺模擬燃料棒の製作方法を示す。まず、燃料棒から長さ 190mm の短尺燃料棒を切り出す。次に、切り出した短尺燃料棒から燃料ペレットを機械的に除去する (脱ミート)。脱ミート後には被覆管の内面観察を行い、脱ミートに起因する有害な傷がないことを確認した後、被覆管試料にアルミナペレットを装荷し、両端にジルカロイ製の端栓を溶接する。その後、5MPa のアルゴンガスを加圧封入する。これは、実機の LOCA 時に原子炉圧力の低下と温度上昇に伴う被覆管強度の低下によって生じる可能性のある燃料棒の破裂を模擬するためである。この端栓溶接後の被覆管試料にステンレス鋼製のコネクションロッドを取り付け、全長 688mm の模擬燃料棒とする (図 2.2.2-2)。模擬燃料棒の被覆管外表面には、軸方向及び径方向温度分布を測定するため、合計 4 対の R タイプ熱電対を溶接する。

急冷破断試験装置の模式図とホットセルに設置した装置の写真を図 2.2.2-3 に示す。本装置は、引張試験機、赤外線イメージ炉、蒸気発生器及び急冷のための注水装置から構成されている。試験においては、模擬燃料棒を水蒸気中で加熱し、一定の温度で所定の時間酸

化した後に、冠水により急冷する（図 2.2.2-4）。なお、模擬燃料棒は、内圧上昇と被覆管強度の低下により、昇温中、約 1050K で破裂する。破裂後、被覆管は内外両面から酸化される。また、軸方向に一定の拘束力を加え、急冷時の被覆管の収縮を拘束する。

酸化速度評価試験では、幅 10mm 程度のリング状に切り出した被覆管を水蒸気中で加熱し、酸化に伴う重量増加及び酸化膜の成長を測定し、酸化速度を評価する。

### 2.2.3 改良型燃料被覆管の照射成長試験

#### (1) 背景と目的

軽水炉燃料の安全性をより高めるために被覆管の外表面腐食量や水素吸収量を抑える目的で、従来と異なる組成を有する改良型燃料被覆管合金の開発が進められてきている。

燃料被覆管の主成分であるジルコニウムは高速中性子の照射を受けることによって変形を生じる。この変形は、ジルコニウムの結晶格子(六方晶)の  $a$  軸方向に伸び、 $c$  軸方向に縮むものであり、実際に使用されている燃料被覆管は通常  $c$  軸が肉厚方向を向く金属組織を有することから、高速中性子の照射によって燃料被覆管には軸方向の伸びが発生する。この現象を照射成長と呼ぶ。高燃焼度まで照射された燃料棒で 0.1~1%の照射成長が観測されている<sup>(7)</sup>ことから、高燃焼度まで燃料を使用する際には無視できない伸び量となる。但し、燃料集合体の設計においては通常この伸びが集合体の健全性に影響を及ぼさないよう考慮されている。

燃料被覆管の照射成長は、被覆管の金属組織や製造条件、照射条件、合金成分等の影響を受けることが知られている<sup>(8)</sup>。今後導入が見込まれる改良型燃料被覆管合金は従来の燃料被覆管材料と組成や製造条件が異なることから、これらの改良合金のみで構成された燃料集合体またはこれらの改良合金と従来合金が混在して構成されるような燃料集合体においては、その使用中の照射成長に伴う変形挙動が従来合金のみを用いたものと異なる可能性がある。従って、このような改良合金を使用した燃料集合体に係る事業者からの申請に備え、試験炉を用いた照射試験により改良合金の照射成長に関するデータを取得することとする。

具体的には、改良合金を含む種々の PWR 燃料被覆管合金を長期間にわたって PWR 冷却水条件下で照射し、軸方向の伸びを直接比較することによって、高速中性子の照射による影響だけでなく、合金成分や高燃焼度で顕著となる腐食や水素吸収等が照射成長に及ぼす影響を把握する。

#### (2) 試験の概要

高燃焼度化に伴う軽水炉燃料被覆管の外表面腐食量や水素吸収量を抑えるために開発された改良型被覆管合金の中で、近い将来国内の発電炉に導入される可能性の高いものについて入手し、試験に供する。また、PWR と異なる型式の発電炉で使用実績があり上記の改良合金と成分が似ている合金、ならびに製造条件の異なる被覆管についても試験に供し、上記の改良合金の結果と比較することにより、合金成分や被覆管の加工及び熱処理条件等が照射成長挙動に及ぼす影響を把握する。さらに、高燃焼度領域では燃料被覆管の水素吸収量が増加す

ることから、この水素吸収が照射成長に及ぼす影響を評価するため、一部の材料について水素を吸収させたものを作製し試験に供する。

改良型燃料被覆管の照射成長試験は、ノルウェー・エネルギー技術研究所（IFE）が所有するハルデン炉を利用して実施する。ハルデン炉での照射は、試験片を装荷した専用の照射試験容器（照射リグ）を炉内に配置して実施する。照射容器は、水質を調整した PWR の冷却水条件を模擬するための高温高圧水ループに接続され照射される。照射中の試験片の温度等については、高温高圧水ループの運転条件や試験片の配置位置等により調整する。

所定の照射期間毎に試験片を炉から取出し中間検査を行う。その項目は、外観観察、試験片伸び量測定及び重量測定である。また、所定の照射期間満了後には、照射後試験施設にて試験片の非破壊試験及び破壊試験を実施する計画である。具体的な試験項目としては、試験片外観観察、伸び量測定、重量測定、試験片断面金相観察等が考えられる。

試験の概要を図 2.2.3-1 に示す。

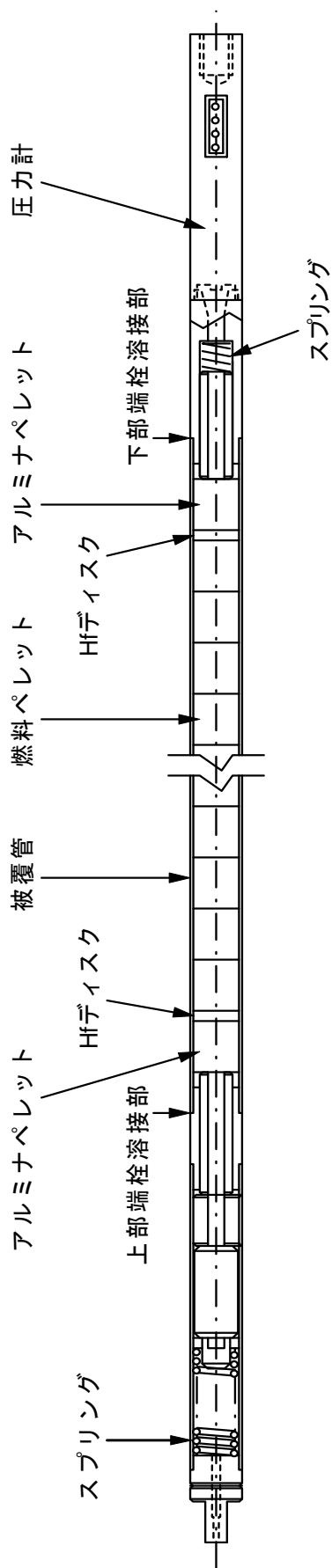
表 2.2-1 燃料等安全高度化対策事業の全体スケジュール

## 事故時燃料挙動試験

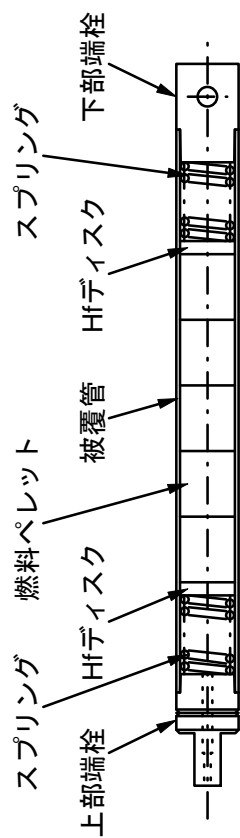
平成年度	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
燃料輸送	欧州内輸送・諸手続		欧日海上輸送							
RIA/LOCA試験	試験準備・予備試験			高燃焼度改良型燃料のRIA試験、LOCA試験等の実施						総合評価
解析評価				予測解析・実験解析						総合評価

## 改良合金の照射成長試験

平成年度	22	23	24	25	26	27	28	29	
照射成長試験	試験準備		試験研究炉を用いた照射試験及び中間検査						照射後試験
解析評価								総合評価	

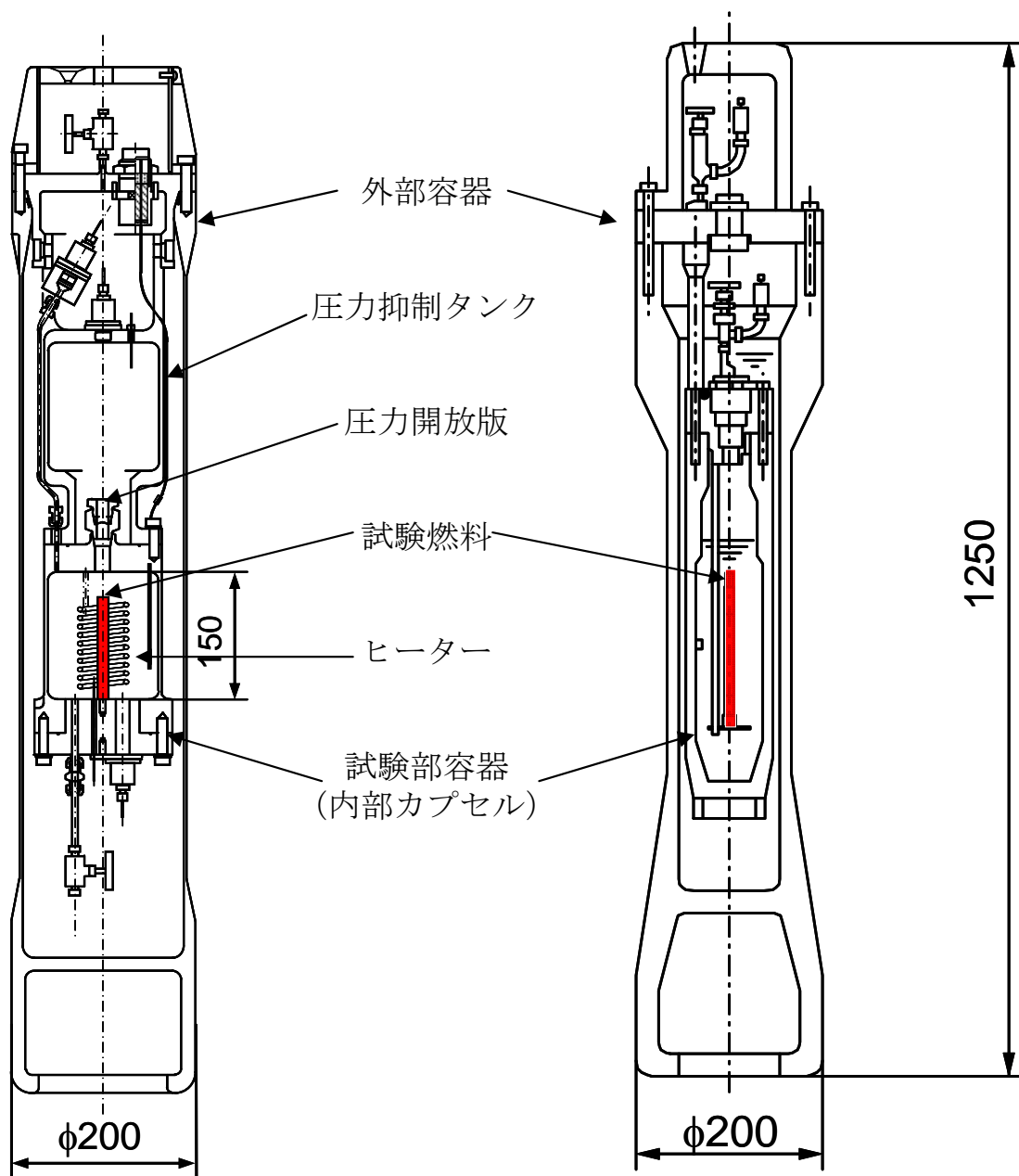


(1) 室温大気圧実験用燃料棒



(2) 高温高圧実験用燃料棒

図 2.2.1-1 NSRR 実験用燃料棒の概略構造



(単位: mm)

(1) 高温高压カプセル

(2) 室温大気圧カプセル

図 2.2.1-2 RIA 試験用の実験カプセルの概要



- ① 燃料試験施設より試験燃料棒の搬入
- ② セミホットケーブルにて輸送容器から試験燃料棒の取出し
- ③ セミホットセルにて試験燃料棒への計装取付
- ④ セミホットケーブルにて試験燃料棒のカプセルへの装荷
- ⑤ カプセル装荷装置へのカプセル収納
- ⑥ カプセル装荷装置によりカプセルをNSRR炉心内へ移動・装荷
- ⑦
- ⑧ パルス照射
- ⑨ カプセル装荷装置によりカプセルをNSRR炉心内より取出し、セミホットケーブルへ移動
- ⑩ セミホットケーブルにて内部カプセルの取出し
- ⑪ 燃料試験施設へ内部カプセルの搬出
- ⑫

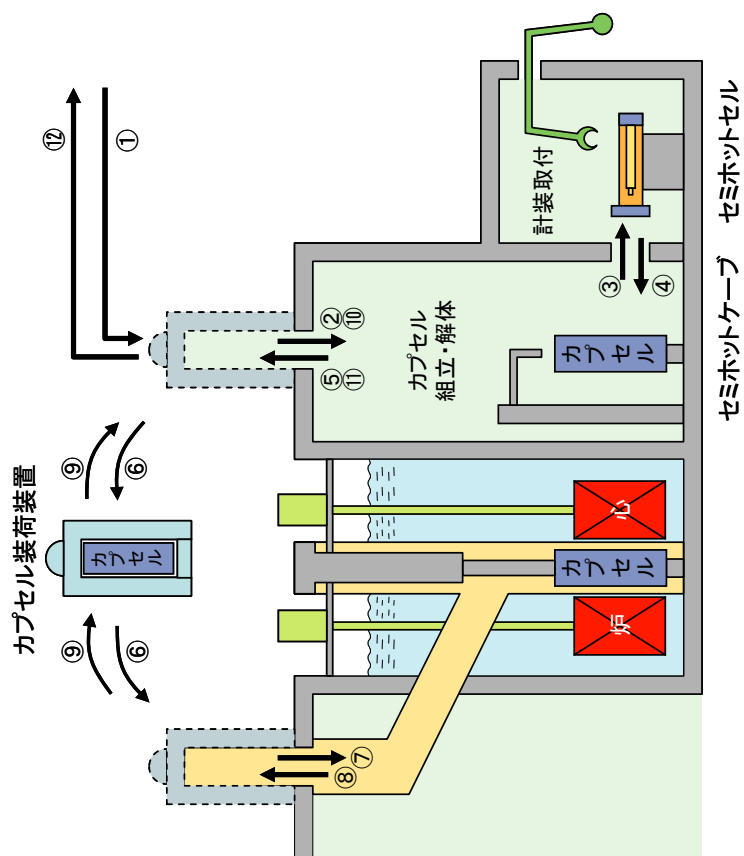


図 2.2.1-3 RIA 試験における NSRR 施設での試験燃料棒と実験カプセル取扱いの流れ

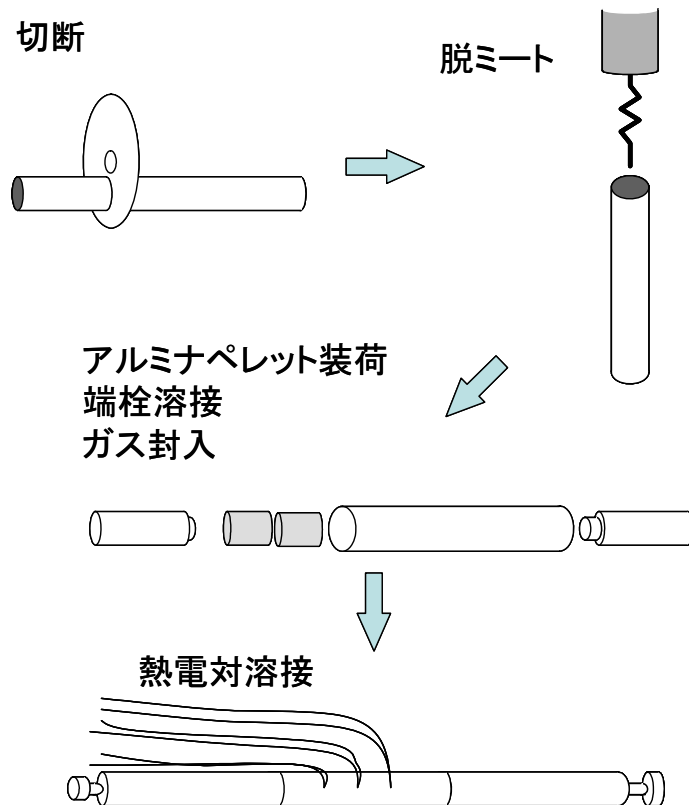


図 2.2.2-1 LOCA を模擬した急冷破断試験に用いる短尺模擬燃料棒の製作方法

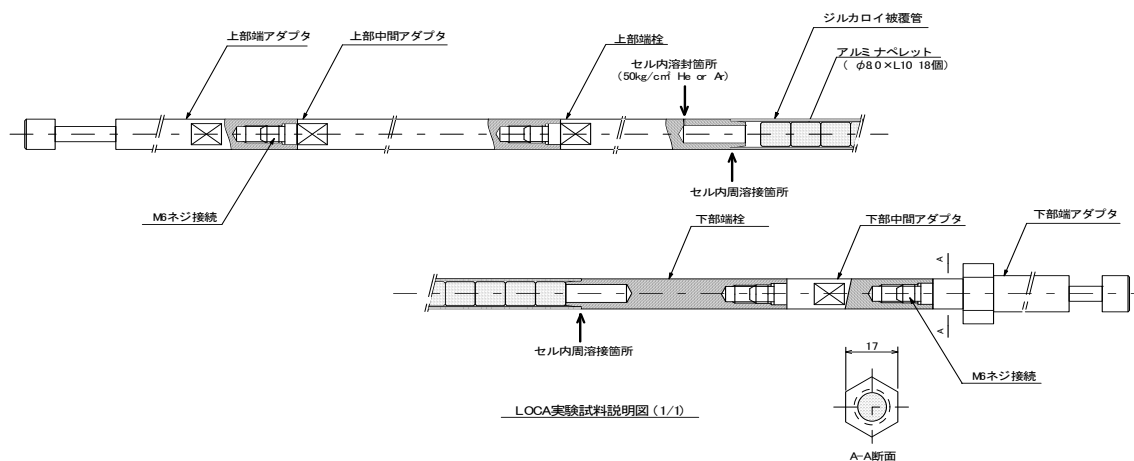


図 2.2.2-2 短尺模擬燃料棒

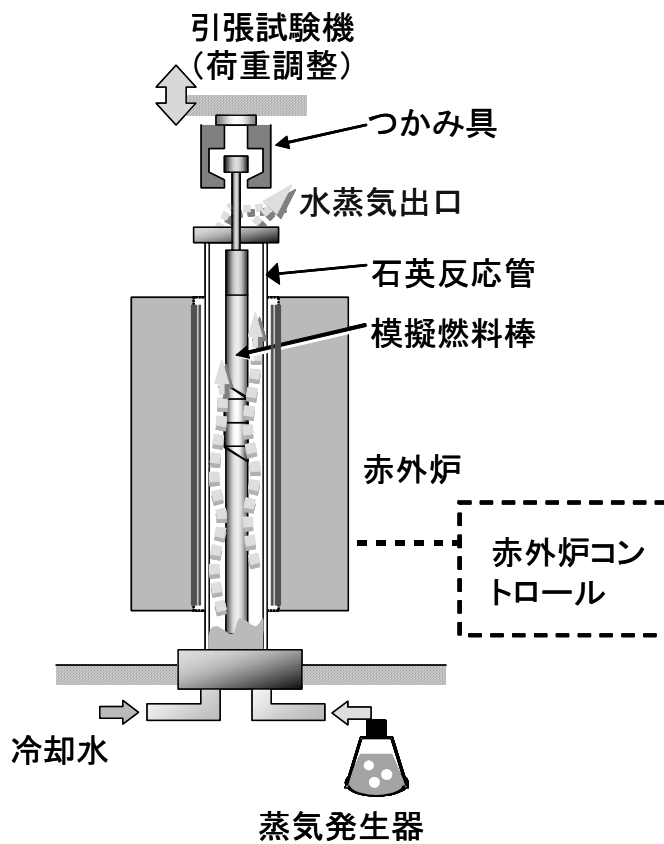


図 2.2.2-3 急冷破断試験装置 (模式図)

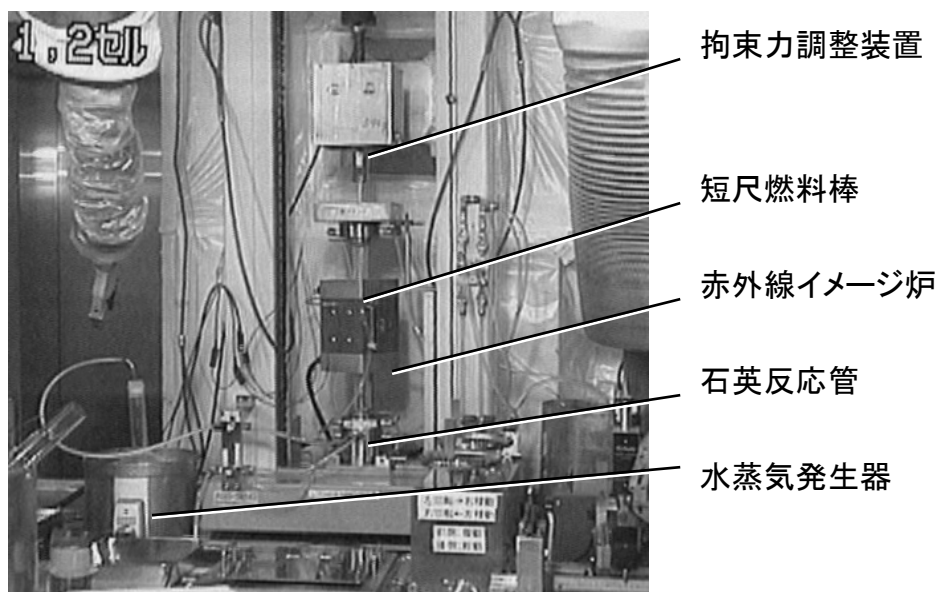


図 2.2.2-3 (つづき) 急冷破断試験装置 (写真)

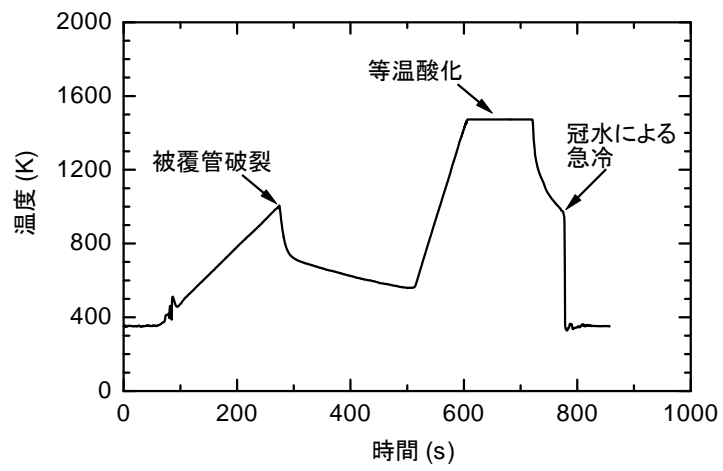


図 2.2.2-4 試験中の温度履歴の例

▶供試材

- 改良型燃料被覆管合金及び比較用合金
- 試験片長さ: 50、100mmの2種類

▶照射条件

- 照射温度: 240、300、320°C (目標)
- 照射環境: 高温高压水中(PWR模擬)

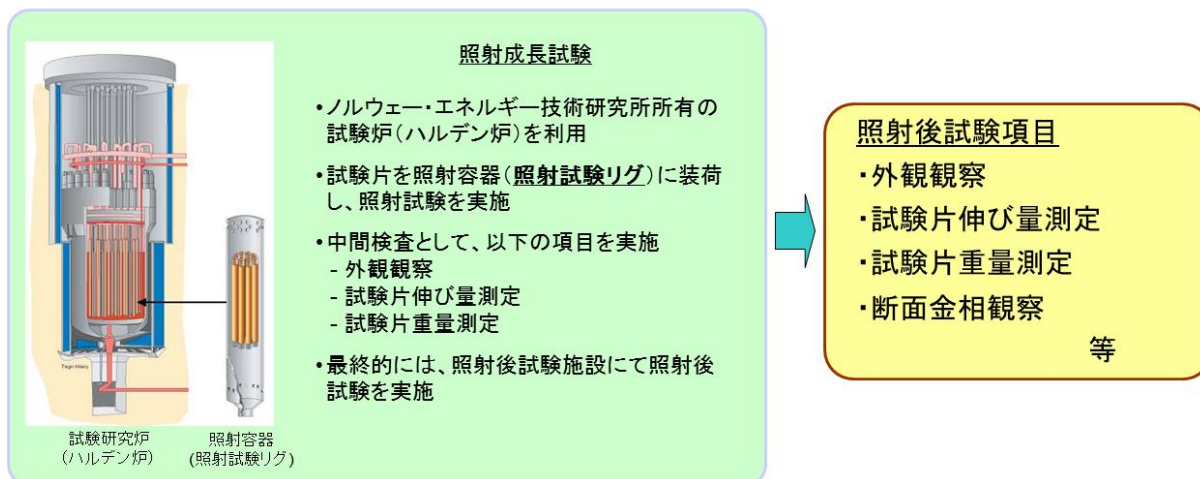


図 2.2.3-1 改良合金被覆管の照射成長試験の概要

### 3 章 平成 26 年度燃料等安全高度化対策事業の概要

既存の発電炉の安全性向上に有効なものとして国内への導入が見込まれている改良型燃料に関し、欧州の発電炉を用いた照射試験が行われている。本事業では、これらの照射試験により高燃焼度に至った燃料試料を入手し、反応度事故模擬実験（以下「RIA 試験」という）、冷却材喪失事故模擬実験（以下「LOCA 試験」という）を実施し、事故時の燃料挙動に関するデータを取得する。取得するデータは、

- ・ RIA 時の燃料挙動に関し、燃料破損限界、破損挙動及び破損影響（被覆管破損形態、核分裂ガス放出、燃料微粒子化など）
- ・ LOCA 燃料挙動に関し、被覆管の酸化速度、急冷時破断限界、膨れ及び破裂挙動といった安全審査に反映できるものであり、破損防止、事故時の被ばく評価、炉心冷却性や圧力バウンダリ健全性の確保に必要なものである。RIA 試験で得られた結果に関しては、計算コード等を用いた解析的評価を行い、改良型燃料の RIA 時の挙動を確認する。

また、改良型燃料にも採用される Zr-Nb 二元系合金被覆管の照射に伴う伸び（照射成長）が当該合金を使用した燃料集合体の変形に及ぼす影響を評価するために、Zr-Nb 二元系合金を含む被覆管合金をわが国の商用軽水炉条件を適切に模擬できる原子炉で照射し、照射成長に関するデータを取得する。

本事業では、高燃焼度まで照射された改良型燃料の欧州から日本への輸送及び改良型燃料の事故時挙動評価に必要な比較データの取得を平成 22 年度までに実施し、平成 23 年度に高燃焼度改良型燃料を対象とした LOCA 試験を、さらに、平成 24 年度に同燃料の RIA 試験を開始した。また、平成 23 年度から Zr-Nb 二元系合金を含む被覆管試験片の照射成長試験をハルデン炉（ノルウェー）にて開始した。平成 26 年度は、入手した高燃焼度改良型燃料に対する RIA 試験、RIA 試験結果等に関する解析及び LOCA 試験並びにハルデン炉における Zr-Nb 二元系合金を含む改良型燃料被覆管の照射成長試験等を引き続き実施した。得られたデータ等については、国による発電用軽水炉施設の安全審査時の判断材料に資するよう整理を行った。

#### 3.1 RIA 試験

- (1) 改良合金の M5 及び M-MDA を被覆材に用いた高燃焼度改良型燃料を対象に、原子力機構が保有する NSRR を使用して RIA 試験を実施し、同燃料の燃料破損限界等に関するデータを取得した。
- (2) 平成 25 年度までに RIA 試験を実施した燃料に対して、原子力機構燃料試験施設を利用した試験及び分析を継続実施し、RIA 試験前後の燃料の状態に関するデータを取得した。また、RIA 試験後の燃料に関する照射後試験を実施し、RIA 試験時の燃料破損挙動に関するデータを取得するとともに、これらの燃料挙動が RIA 時の原子炉の安全性に及ぼす影響を評価した。

平成 23 年 1 月に原子力機構の燃料試験施設に搬入された高燃焼度燃料について、受入時の燃料状態を調べる試験検査を実施した。

- (3)RIA 時に膨張したペレットから被覆管が受ける応力条件（多軸性）を適切に模擬できる多軸応力負荷試験装置を用いて未照射被覆管の機械特性試験を実施し、温度、応力の多軸性、被覆管の製造条件等が高燃焼度燃料の破損に及ぼす影響に関するデータを取得した。

### 3.2 RIA 試験解析

平成 26 年度に実施した高燃焼度改良型燃料の RIA 試験について、計算コードを用いた実験解析を実施した。また、試験実施予定の改良型燃料を対象とした RIA 試験条件の決定に資するため、燃料提供者から入手した燃料仕様、ベース照射履歴などに基づき、通常時燃料挙動解析コード（FEMAXI）、RIA 時燃料挙動解析コード（RANNS）等を用いた燃焼解析、ベース照射解析および RIA 試験解析を行い、改良型燃料の RIA 試験条件の決定に必要なデータおよび知見を得た。

### 3.3 LOCA 試験

高燃焼度改良型燃料に対し LOCA 試験を実施し、高温酸化後に急冷される際の被覆管の破断限界や高温水蒸気中での被覆管酸化速度など、改良型燃料の LOCA 時安全性を評価するために必要なデータを取得した。

### 3.4 改良型燃料被覆管の照射成長試験

改良型燃料に用いられる被覆管合金を含む試験片をノルウェー・エネルギー技術研究所が保有するハルデン炉に装荷して照射することにより、約  $4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  までの高速中性子フルエンス範囲においてそれらの照射に伴う伸び（照射成長）等に関するデータを取得した。

## 4 章 平成 26 年度燃料等安全高度化対策事業の実施内容

### 4.1 燃料検査

平成 22 年度に輸送した燃料の仕様、燃焼度等の概要を表 4.1-1 に示す。なお、燃料はセグメント毎に AP2-1 から AP2-24 と呼ぶ。

#### 4.1.1 燃料セグメントに対する非破壊試験

本年度は、仏・シノン B3 PWR で照射された MOX 燃料セグメント AP2-15 及びスイス・ライブシュタット BWR で照射された  $\text{UO}_2$  燃料セグメント AP2-19 について検査を実施した。AP2-15 及び-19 の被覆管はそれぞれ M5 合金製及び Zry-2 (LK3) 合金製である。

燃料セグメント AP2-15 及び-19 に関する試料採取計画を図 4.1-1 に示す。また今年度レファレンス試験試料を採取した AP2-3、-5 及び-8 の試料採取計画についても図 4.1-2 及び-3 に改めて示す。

##### (1) 燃料セグメントの外観写真

燃料セグメント AP2-15 及び-19 の外観写真をそれぞれ図 4.1-4～5 に示す。各セグメントの  $0^\circ$  方向の上端に見える白い印は方位と上下方向を示すマーキングである。

AP2-15 においては全体に擦過傷のようなものが観察された (図 4.1-4 中拡大図)。これらは照射終了後の燃料取扱中に生じたものと推測される。AP2-19 においては全体に白い斑点状のものが観察された (図 4.1-5 中拡大図)。これは照射中の水側腐食に伴って生じたものと推測され、酸化膜厚や水素吸収量への影響の有無を金相観察等により今後確認する予定である。

##### (2) 燃料セグメントの X 線透過写真

燃料セグメント AP2-15 及び-19 の X 線透過写真を図 4.1-6 に示す。実験において問題となり得る有害な欠陥等は見られなかった。

##### (3) 燃料セグメントの $\gamma$ スキャン

燃料セグメント AP2-15 及び-19 の軸方向  $\gamma$  線強度分布をそれぞれ図 4.1-7～8 に示す。それぞれの採取位置に応じた燃焼度の分布が反映されている。有意な勾配は見られない。

##### (4) 燃料セグメントの酸化膜厚さ測定

燃料セグメントの  $0^\circ$  及び  $180^\circ$  方位について、軸方向の 5 点で渦電流による酸化膜厚さ測定を行った。燃料セグメント AP2-5 及び-8 については昨年度報告書に結果を掲載したが、レファレンス試料の金相観察から得た酸化膜厚さで補正を行ったためその結果を図



4.1-9 及び-10 に示す。

燃料セグメント AP2-15 及び-19 の軸方向酸化膜厚さ分布をそれぞれ図 4.1-11～12 に示す。AP2-15 においては軸方向にはほぼ均一な酸化膜厚さ分布、AP2-19 においてはセグメント中央から下部にかけてやや酸化膜の厚い分布である。酸化膜厚さの絶対値については、今後レファレンス試料の金相観察から得た酸化膜厚さの値により補正を行う必要がある。

表 4.1-1 試験対象燃料一覧 (平成 22 年度輸送分)

燃料 セグメント 番号	燃焼度*1 (GWd/t)	燃料名	燃料 タイプ	照射炉	燃料棒 番号	試験採取位置 (下から .mm)	被覆管									ペレット				試験項目							
							材質 (-)	外径 (mm)	内径 (mm)	肉厚 (mm)	高さ (mm)	外径 (mm)	デイツ シユ	チャン ファ	理論 密度 (%TD)	U235 濃縮度 (%)	Pu/Pu 富化度 (HM%)	添加物									
AP2-1	73	バンデロス 燃料	PWR 17x17 UO <sub>2</sub>	Vandellios-2	EH48-A08	S2 (691 - 1141)	M-MDA (SR)	9.5	8.36	0.57	9.83	8.19	有	有	96.0	4.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
AP2-2	81				EH48-Q12	S4 (1807 - 2257)																					
AP2-3	81					S5 (2257 - 2707)																					
AP2-4	77				EH48-L17	S4 (1807 - 2258)	M-MDA (RX)	9.5	8.36	0.57	9.83	8.19	有	有	96.4	4.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AP2-5	78					S5 (2258 - 2709)																					
AP2-6	78				EH48-H01	S4 (1810 - 2259)	MDA	9.5	8.36	0.57	9.83	8.19	有	有	96.4	4.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AP2-7	78					S5 (2259 - 2709)																					
AP2-8	80	EH48-Q08	S3 (1249-1699)	ZIRLO (low-Sn)	9.5	8.36	0.57	9.60	8.19	有	有	96.4	4.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
AP2-9	80		S5 (2292-2743)																								
AP2-10	84	グラブリン 燃料	PWR 17x17 UO <sub>2</sub>	Gravelines-5	FXOGA1-A16	S3 (1230 - 1680)	M5	9.5	8.25	0.63	13.65	8.09	有	有	95.3	4.49	-	-	-	-	-	-	-	-			
AP2-11	84				S6 (2769.7 - 3219.7)																						
AP2-12	87				S3 (1279 - 1579)																						
AP2-13	68	リングハルス 燃料	PWR 15x15 UO <sub>2</sub>	Ringhals-2	AD23-D5	3-2 (2100-2520)	M5	10.72	9.48	0.62	11.15	9.29	有	有	96.2	3.7	-	-	-	-	-	-	-	-			
AP2-14	68				3-3 (2550-3000)																						
AP2-15	64	シノン燃料	PWR 17x17 MOX	Chinon B3	FXP2LA-D09	S4 (1749 - 2200)	M5	9.5	8.36	0.57	11.63	8.19	有	有	95.0	0.253	7.2/4.7	-	-	-	-	-	-	-			
AP2-16	63				S3 (1218 - 1592)																						
AP2-17	47	ライプシユ タツト燃料	BWR 10x10 UO <sub>2</sub>	Leibstadt	FBA004-a5	EA (699-900)	Zry-2 with liner (95 μm)	10.28	9.04	0.56	10.5	8.87	有	無	96.7	4.93	-	-	-	-	-	-	-	-			
AP2-18	49				FBA004-a6	F (702-1150)																					
AP2-19	91				AGB108-G6	D (1309-1729)																					
AP2-20	85	AP2-21	73	Oskarshamn-3	24565-C1	JKA (2372-2822)	Zry-2 with liner (70 μm)	9.62	8.36	0.63	8.7	8.19	有	有	95.8	4.46	-	-	-	-	-	-	-	-			
AP2-22	63					KKA (3051-3501)																					
AP2-23	64	オスカーシヤ ム燃料			24565-A2	I (439 - 889)	Zry-2 with liner (70 μm)	9.62	8.36	0.63	10	8.19	有	有	97.4	4.1	-	-	-	-	-	-	-	-			
AP2-24	61					2 (1345 - 1795)																					

\*1: セグメント平均燃焼度

\*2: RIA 条件下での FFP ガス動的放出挙動試験

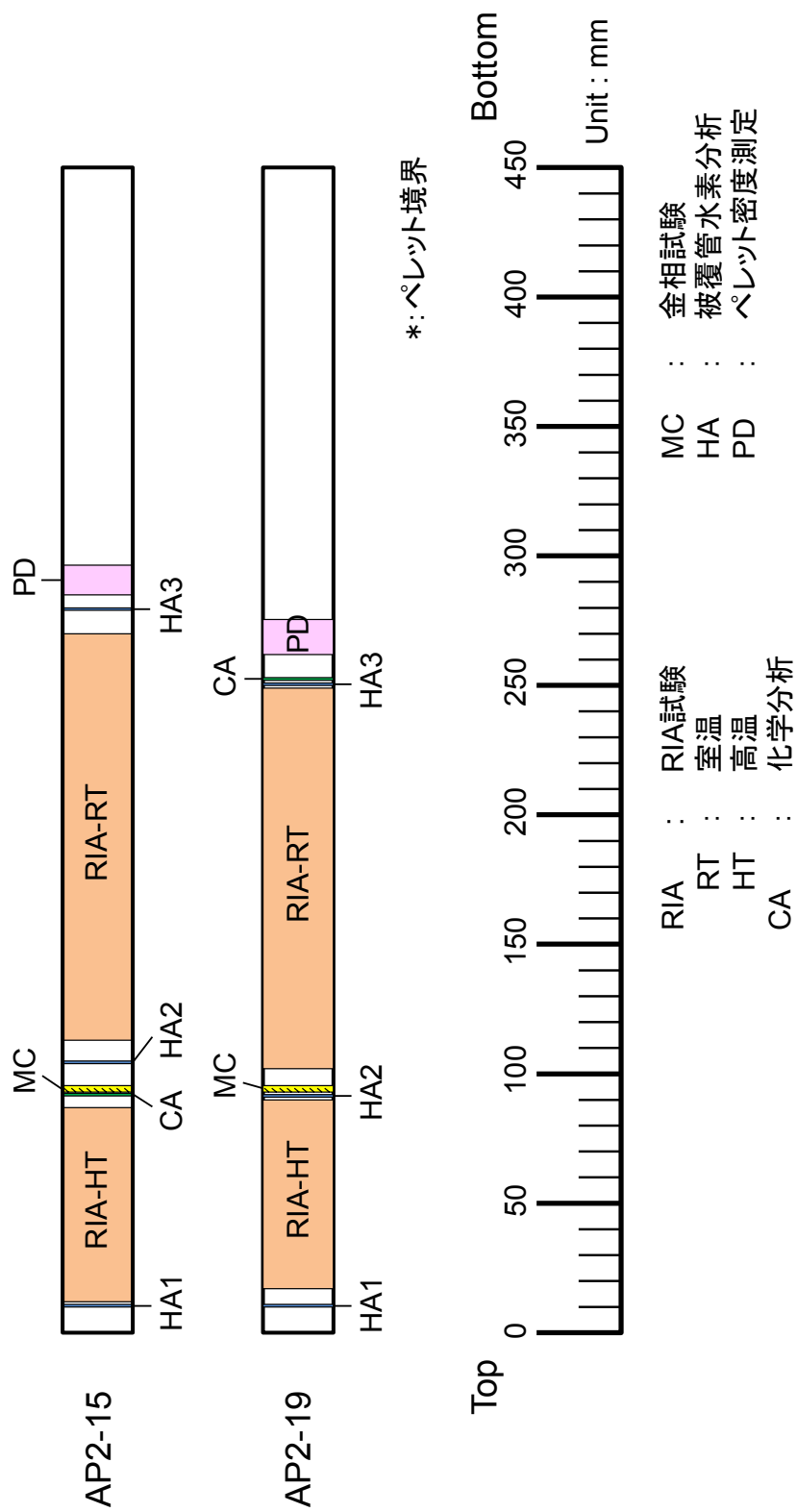


図 4.1-1 燃料セグメントからの試料採取計画

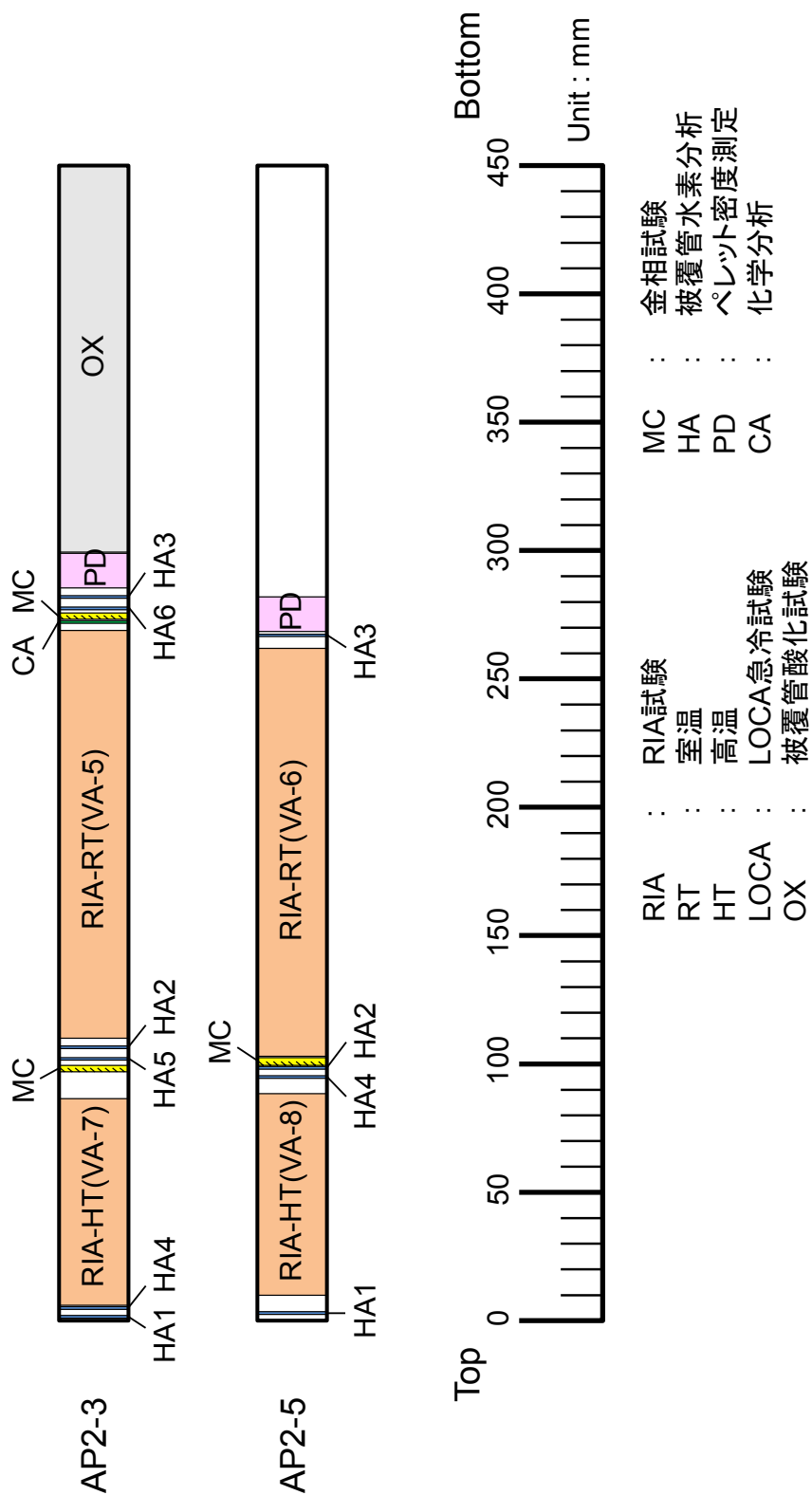


図 4.1-2 燃料セグメントからの試料採取計画

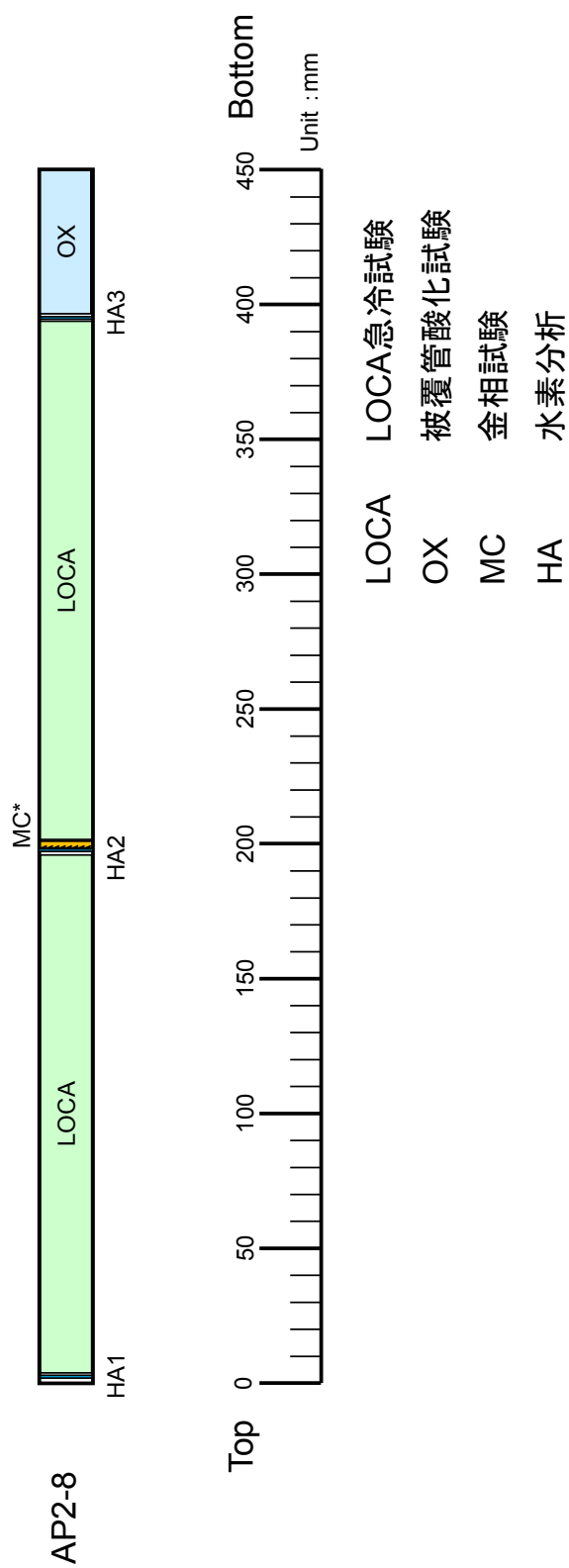


図 4.1-3 燃料セグメントからの試料採取計画

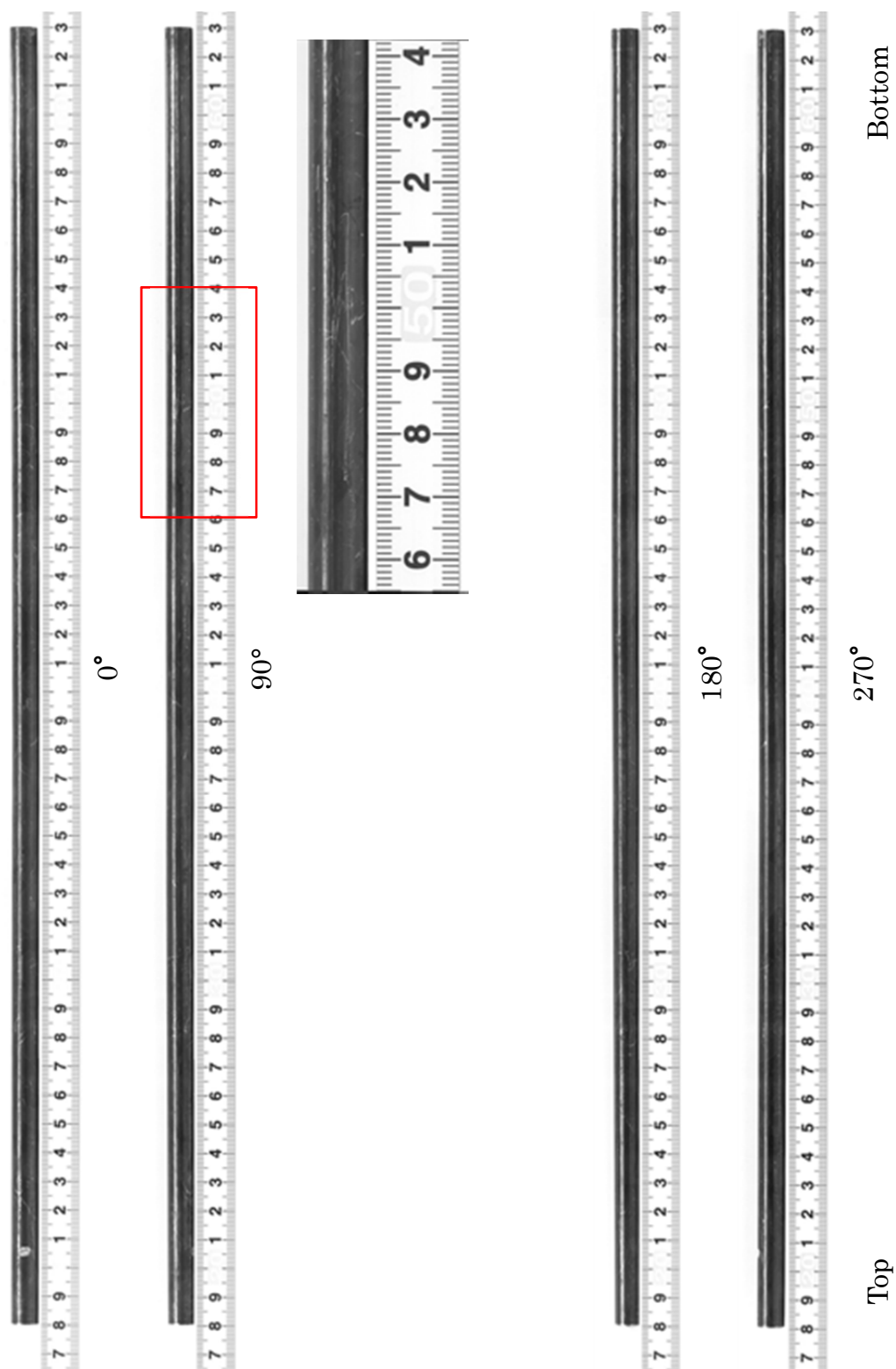


図 4.1-4 AP2-15 燃料セグメントの外観

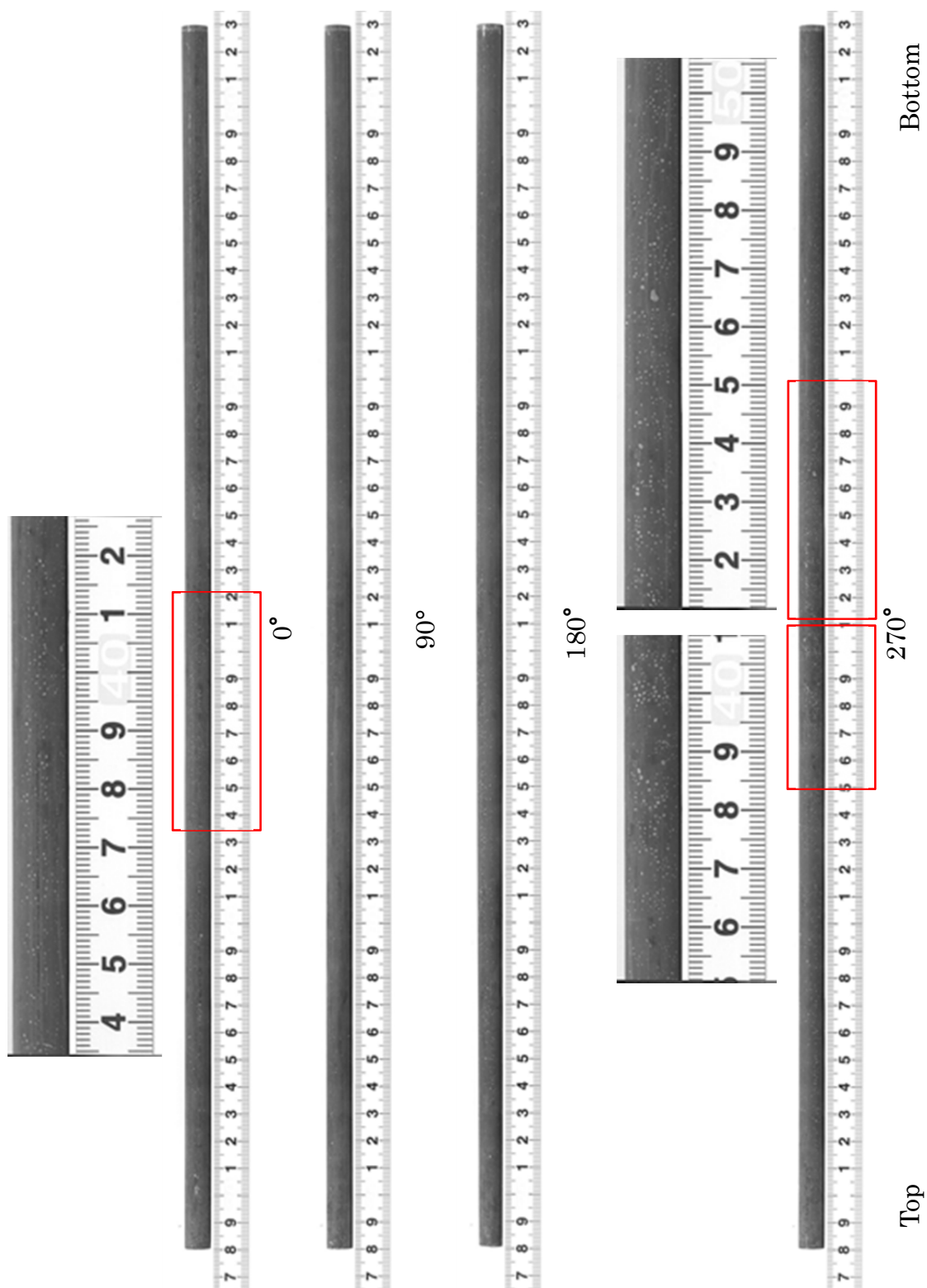


図 4.1-5 AP2-19 燃料セグメントの外観

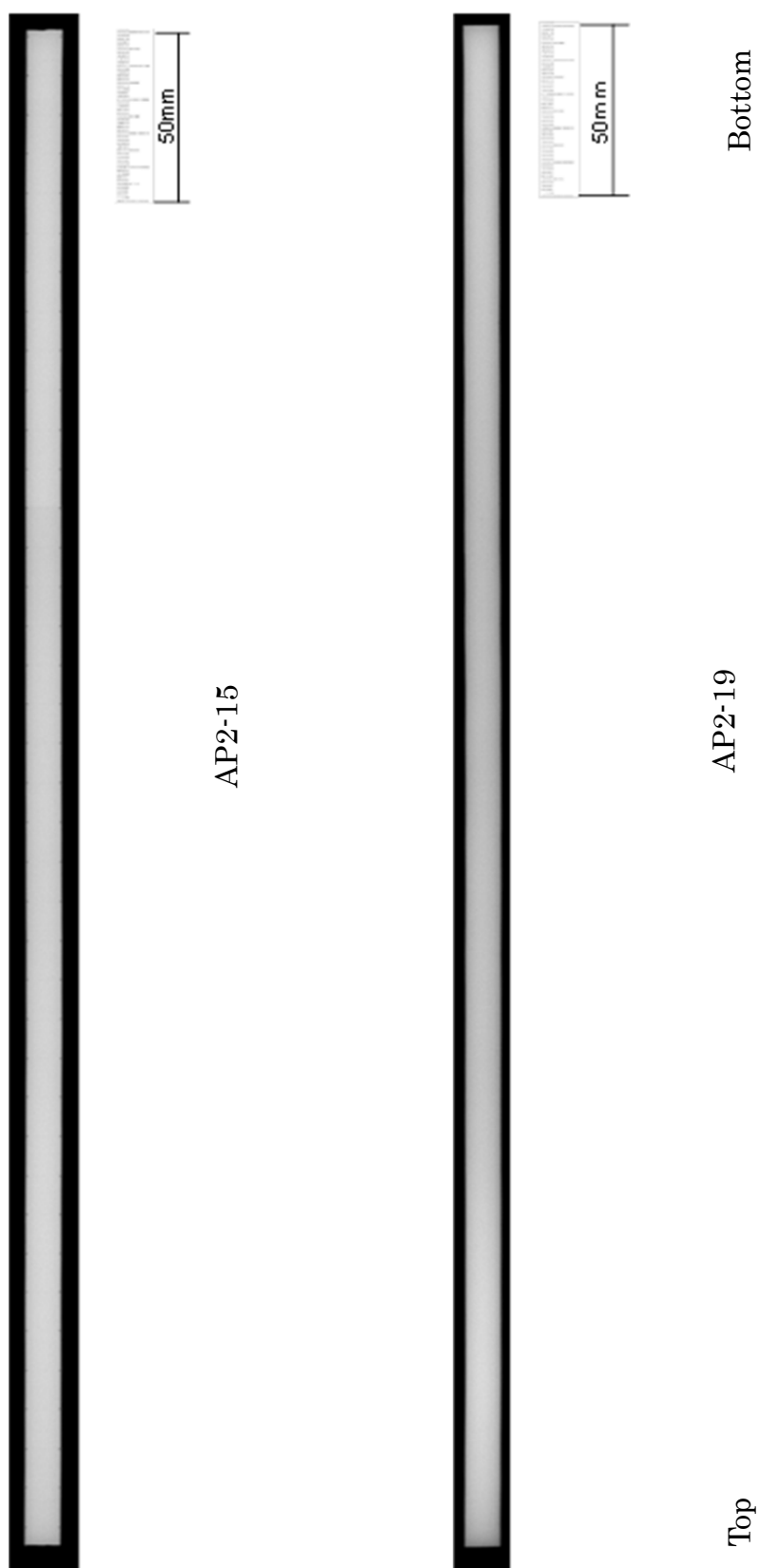
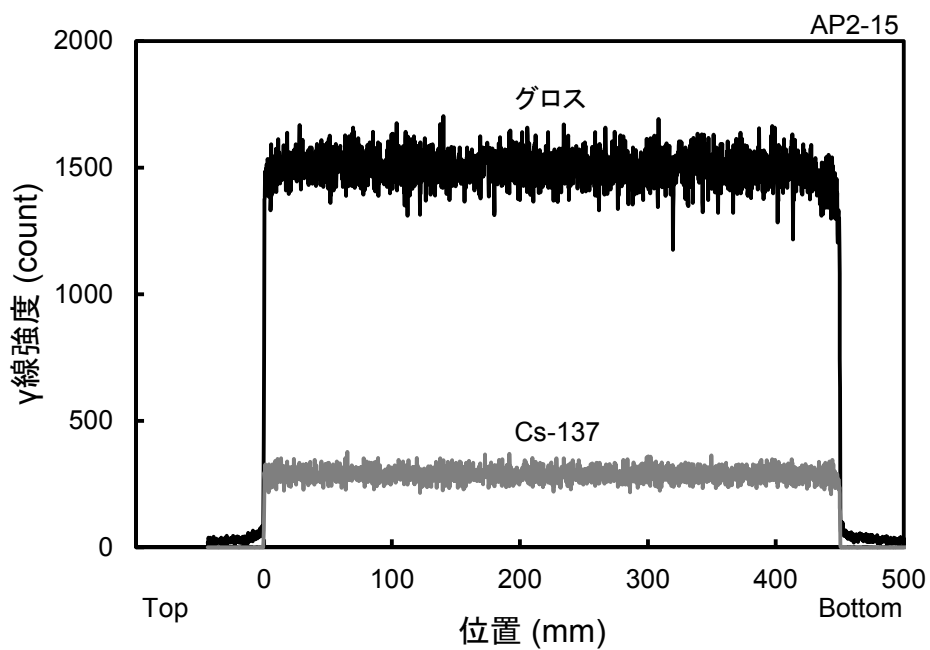
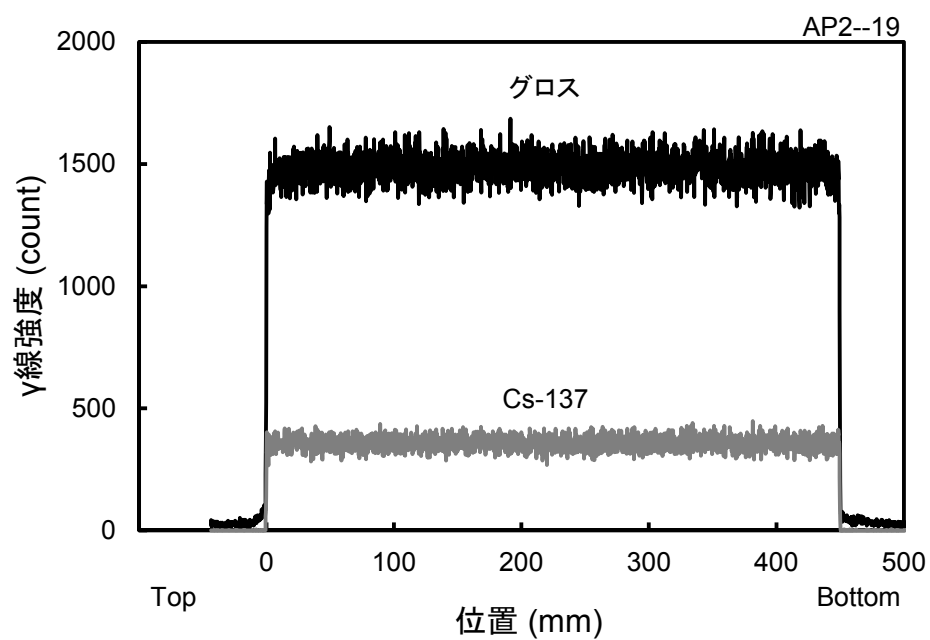


図 4.1-6 AP2-15、AP2-19 燃料セグメントの X 線透過写真



図 4.1-7 AP2-15 燃料セグメントの  $\gamma$  線強度分布図 4.1-8 AP2-19 燃料セグメントの  $\gamma$  線強度分布

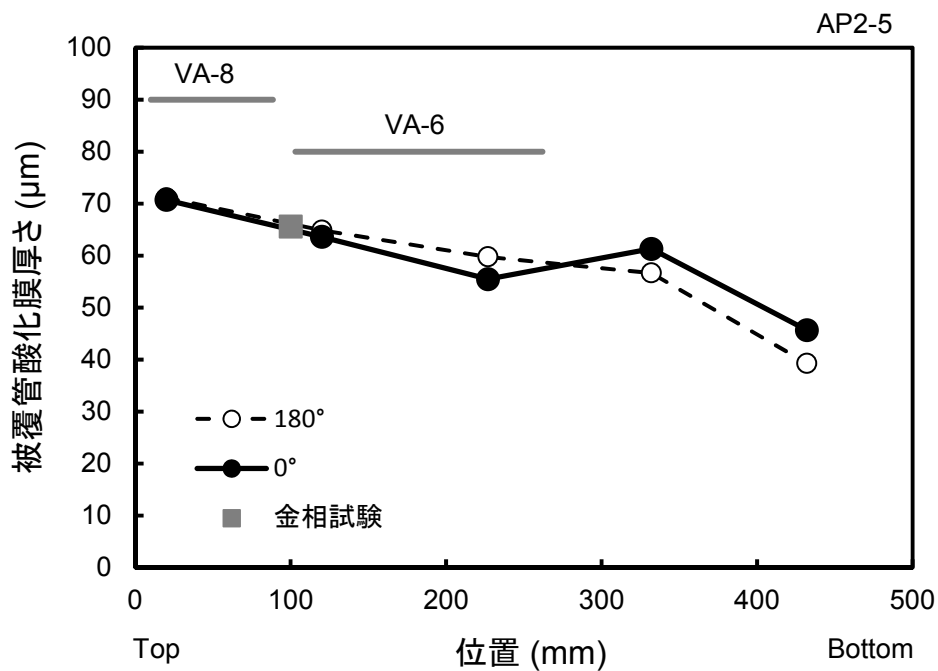


図 4.1-9 AP2-5 燃料セグメントの被覆管外面酸化膜厚さ分布 (補正後)

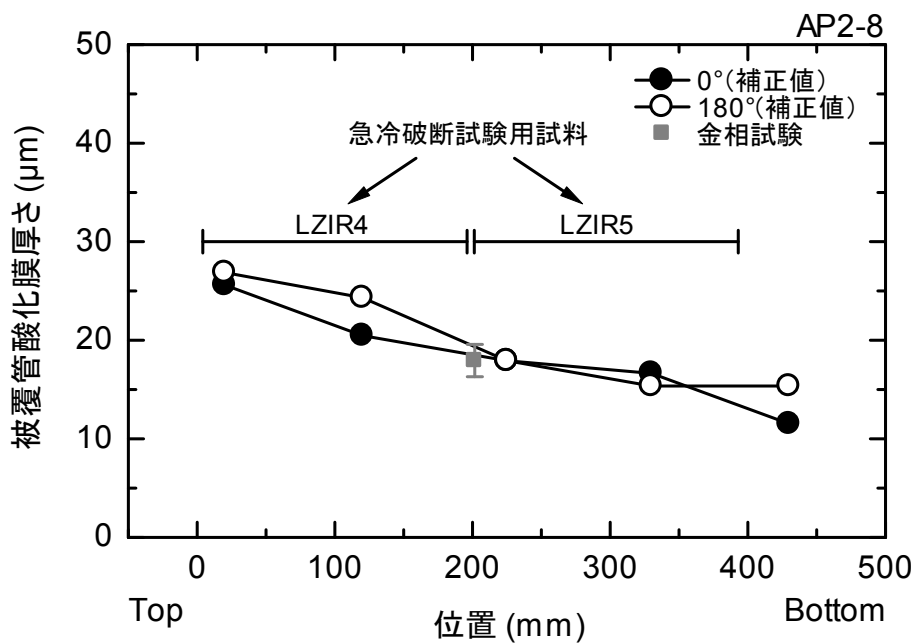


図 4.1-10 AP2-8 燃料セグメントの被覆管外面酸化膜厚さ分布 (補正後)

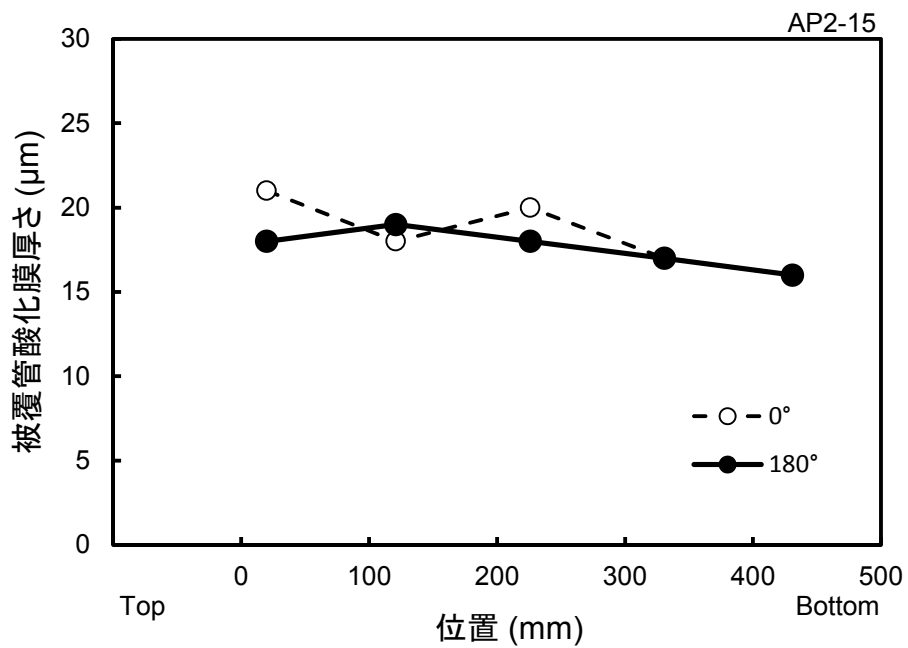


図 4.1-11 AP2-15 燃料セグメントの被覆管外面酸化膜厚さ分布

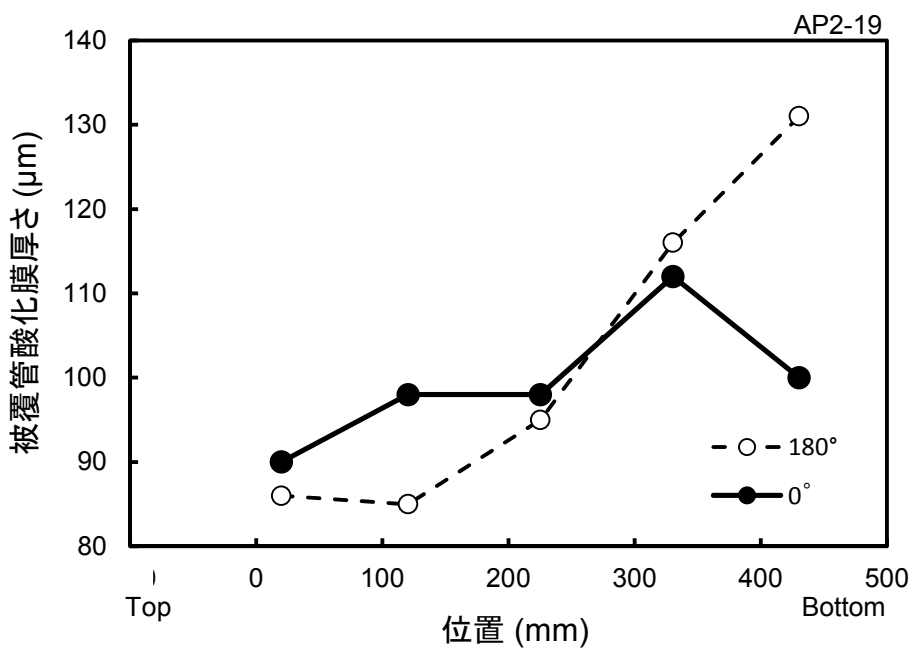


図 4.1-12 AP2-19 燃料セグメントの被覆管外面酸化膜厚さ分布

## 4.2 レファレンス試験

RIA 及び LOCA 試験に供する燃料の試験前の状態を把握するため、各燃料セグメントから採取したレファレンス試料に対する試験を実施した。

### (1) 被覆管水素分析

燃料セグメント AP2-3 に対して、図 4.1-2 の HA1、HA2、HA3、HA4、HA5 及び HA6 の位置から軸方向に約 1 mm の被覆管試料を採取し、水素濃度を測定した。この内 HA1～HA3 は燃料ペレット軸方向中央付近の位置から採取した試料、HA4～HA6 は燃料ペレット境界付近の位置から採取した試料である。それぞれの評価結果は以下の通りである。

HA1 : 304 ppm

HA2 : 332 ppm

HA3 : 292 ppm

HA4 : 318 ppm

HA5 : 323 ppm

HA6 : 291 ppm

これらの結果に基づき、VA-5 実験燃料の水素濃度は HA2 と HA3 の平均値 312 ppm、VA-7 実験燃料の水素濃度は HA1 と HA2 の平均値 318 ppm と評価した。

また燃料セグメント AP2-5 に対して、図 4.1-2 の HA1、HA2、HA3 及び HA4 の位置から軸方向に約 1 mm の被覆管試料を採取し、水素濃度を測定した。この内 HA1～HA3 は燃料ペレット軸方向中央付近の位置から採取した試料、HA4 は燃料ペレット境界付近の位置から採取した試料である。それぞれの評価結果は以下の通りである。

HA1 : 679 ppm

HA2 : 726 ppm

HA3 : 640 ppm

HA4 : 868 ppm

これらの結果に基づき、VA-6 実験燃料の水素濃度は HA2 と HA3 の平均値 683 ppm、VA-8 実験燃料の水素濃度は HA1 と HA2 の平均値 703 ppm と評価した。

燃料セグメント AP2-8 に対しても、図 4.1-3 の HA1、HA2 及び HA3 の位置から軸方向に約 1 mm の被覆管試料を採取し、水素濃度を測定した。それぞれの評価結果は以下の通りである。

HA1 : 142 ppm

HA2 : 147 ppm

HA3 : 99 ppm

なお、測定は高温抽出法により行ったが、加熱にあたっては、まず約 670℃の温度を一定時間保持し、次に約 2000℃を保持するという温度履歴とした。これは、酸化膜中に含まれる水素の放出が母材からの放出よりも低い温度で開始することを利用し、酸化膜と母材の

それぞれについて水素濃度を評価することを意図したためである。今年度は、酸化膜と母材の平均水素濃度（すなわち従来と同じ定義の値）の結果を示すが、高温抽出試験中の水素放出履歴データを詳しく調べることによって、酸化膜、母材それぞれが含有する水素量の評価も可能になると期待される。

## (2) 金相試験

燃料セグメント AP2-5 から採取した輪切り金相試料に対して断面観察を実施した。図 4.1-2 の MC の位置から試料を採取し、燃料ペレットと被覆管について、それぞれエッチングの前後の観察を行った。それぞれの結果に対する図番は以下の通りである。

図 4.2-1: AP2-5 MC 燃料被覆管エッチング前

図 4.2-2: AP2-5 MC 燃料被覆管エッチング後

図 4.2-3: AP2-5 MC ペレットエッチング前

図 4.2-4: AP2-5 MC ペレットエッチング後

被覆管観察においては、図 4.2-1 の Photo 1-1、2-1、3-1、4-1 に示すエッチング前の被断面写真から、MC 位置の周方向平均酸化膜厚さを約 66  $\mu\text{m}$  と評価した。また、方位 45° の外面酸化膜の様子が他と異なるように見えたことから Photo 5 を撮影したが、詳細観察の結果、この様子の違いは、酸化膜が研磨時に脱落したことによると判断された。

応力除去焼鈍材が用いられた高燃焼度 PWR 燃料被覆管の場合、水素化物が高密度で析出した領域（水素化物リム）が最外周部に観察されるが、AP2-5 の被覆管においては、最外周部での局所的な析出は顕著ではなく厚さ方向の広い範囲で水素化物が存在している（Photo 6～Photo 10）。また、水素化物の析出形態としては周方向に配向したものの割合が多いが、Photo 9 で顕著に見られるように、径方向に配向した水素化物も相当程度存在している。水素化物の析出状態に係るこれらの違いは、AP2-5 の被覆管が再結晶焼鈍材であることに起因すると考えられる。

図 4.2-3、4.2-4 に示すペレット断面では、最外周部におけるリム組織の形成、ダークリングの内側及び外側領域の結晶粒界における粗大化した気泡の形成、ダークリングの内側領域の結晶粒内における多数の気泡生成等が観察される。

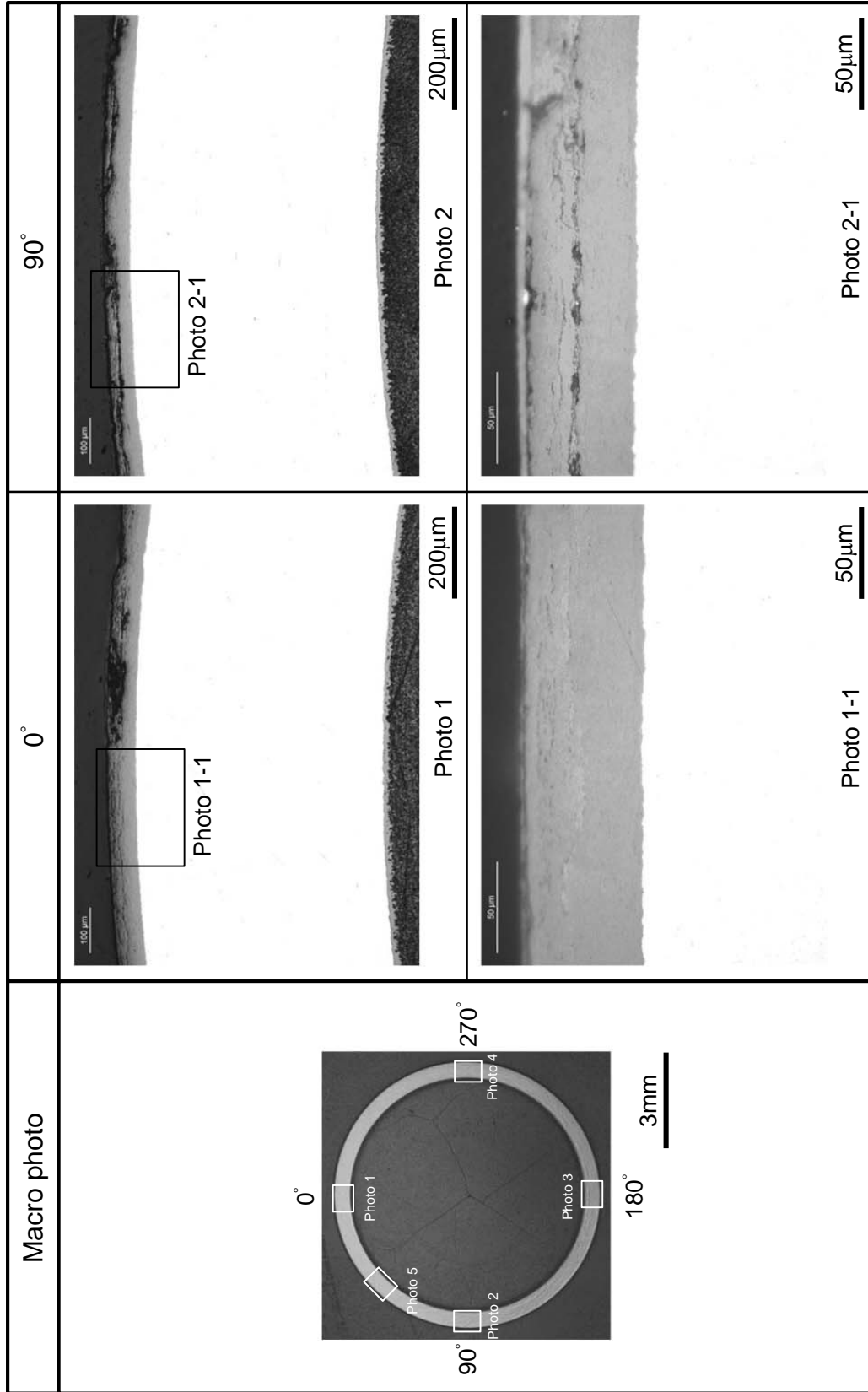


図 4-2-1(1) 燃料セグメント AP2-5 リファレンス試料の被覆管ミクロ写真 (エッチング前)

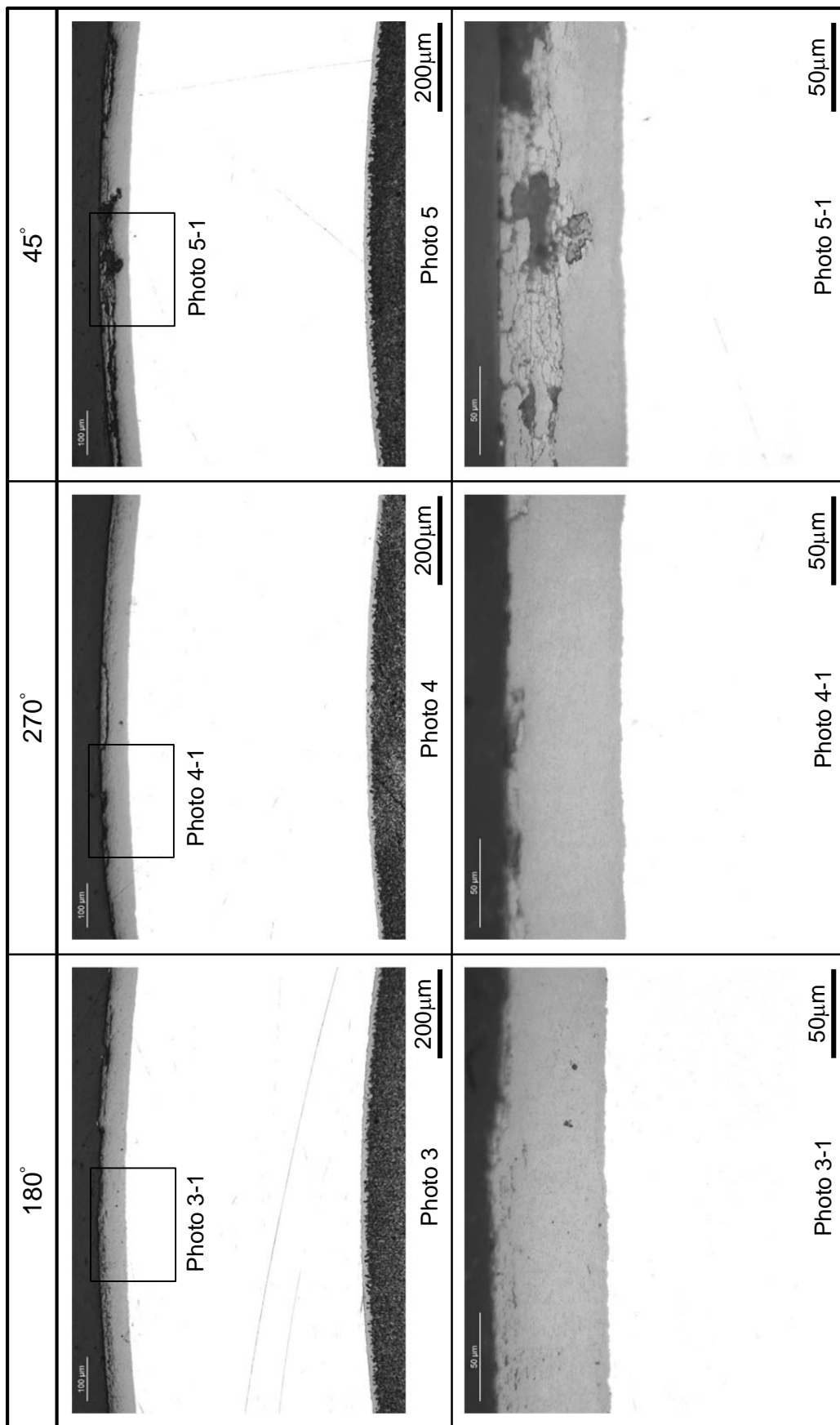


図 4-2-1(2) 燃料セグメント AP2-5 リファレンス試料の被覆管マイクロ写真 (エッチング前)

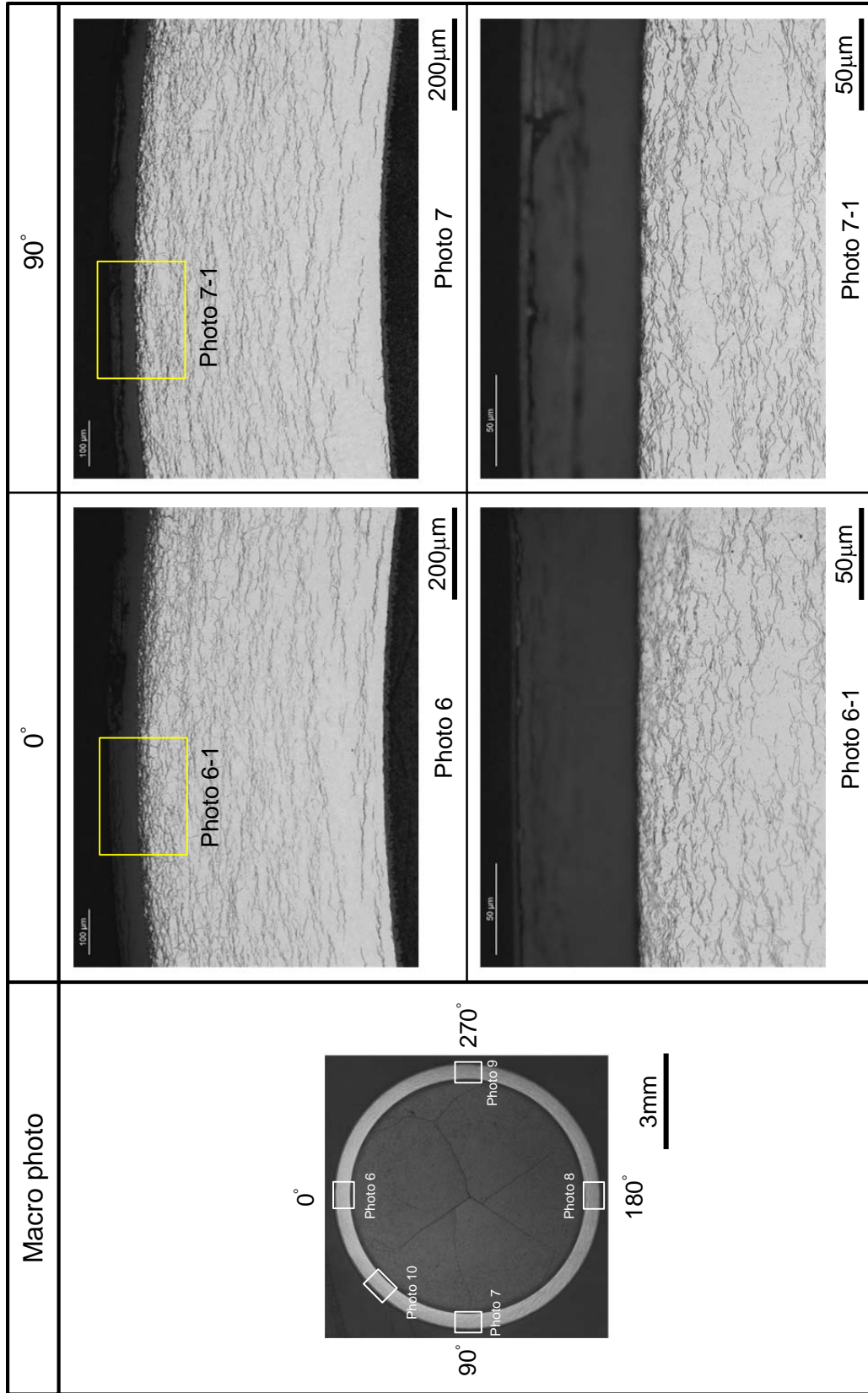


図 4-2-2(1) 燃料セグメント AP2-5 リファレンス試料の被覆管ミクロ写真 (エッチング後)



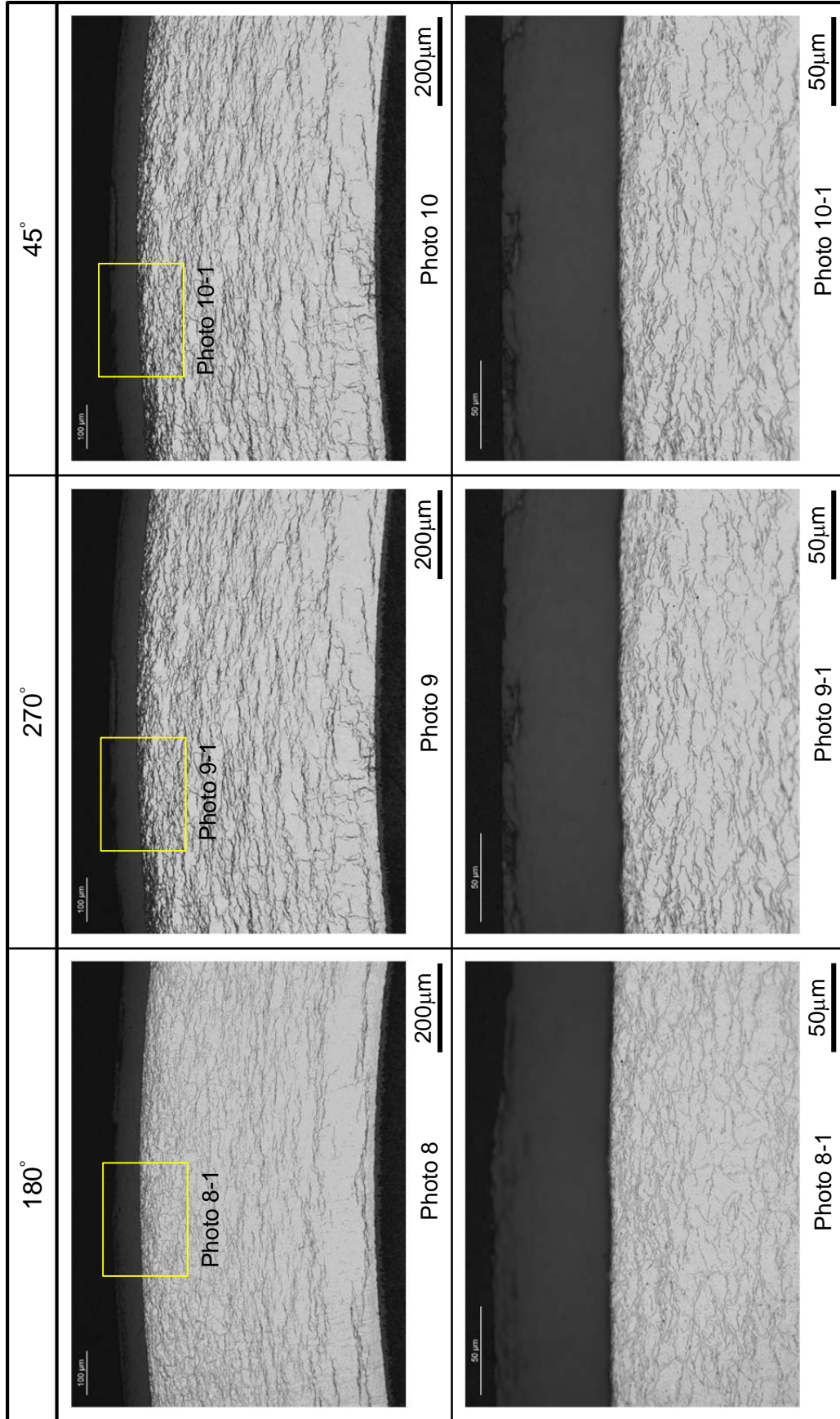


図 4-2-2(2) 燃料セグメント AP2-5 リファレンス試料の被覆管マイクロ写真 (エッチング後)

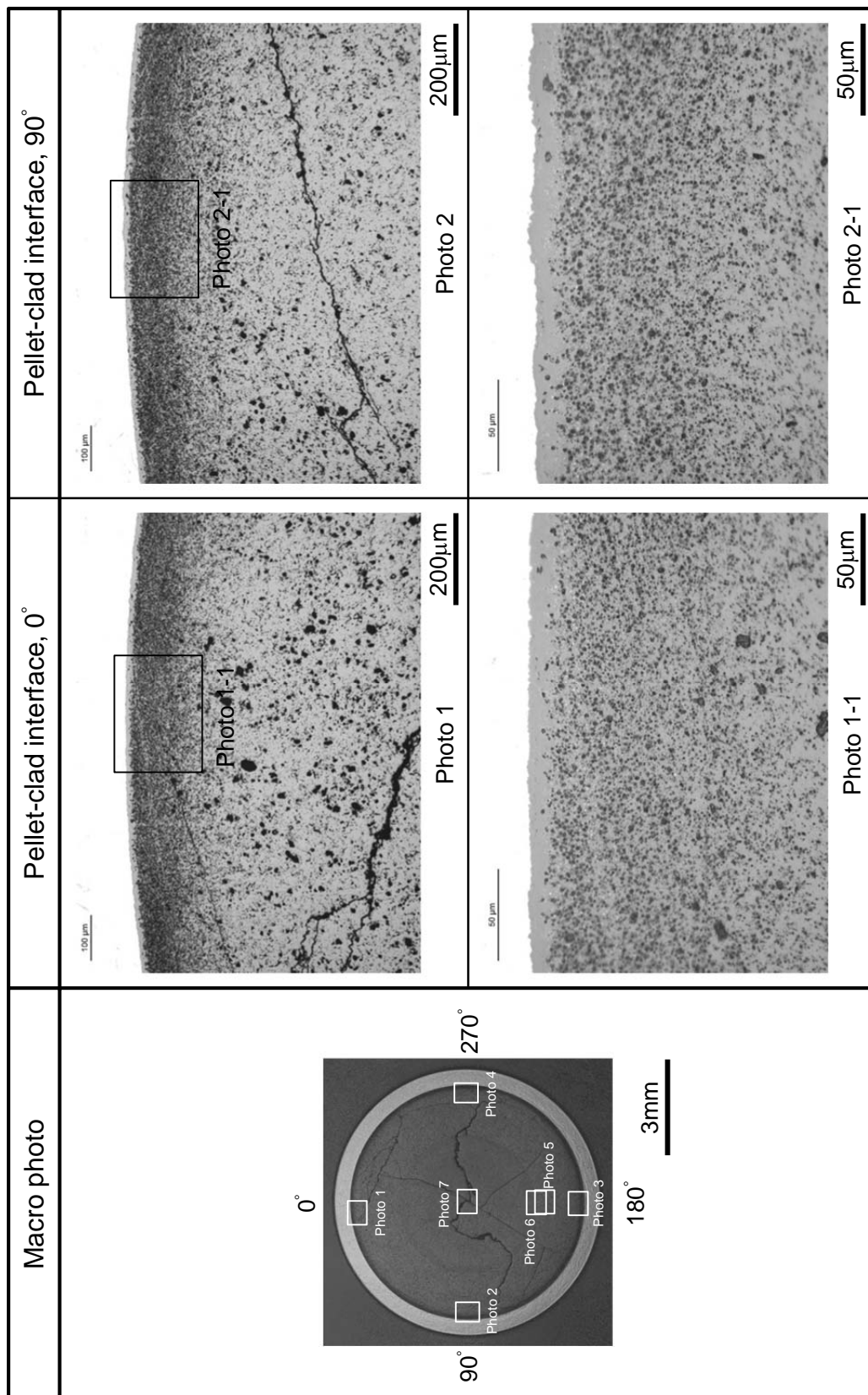


図 4-2-3(1) 燃料セグメント AP2-5 リファレンス試料のペレットマイクロ写真 (エッチング前)

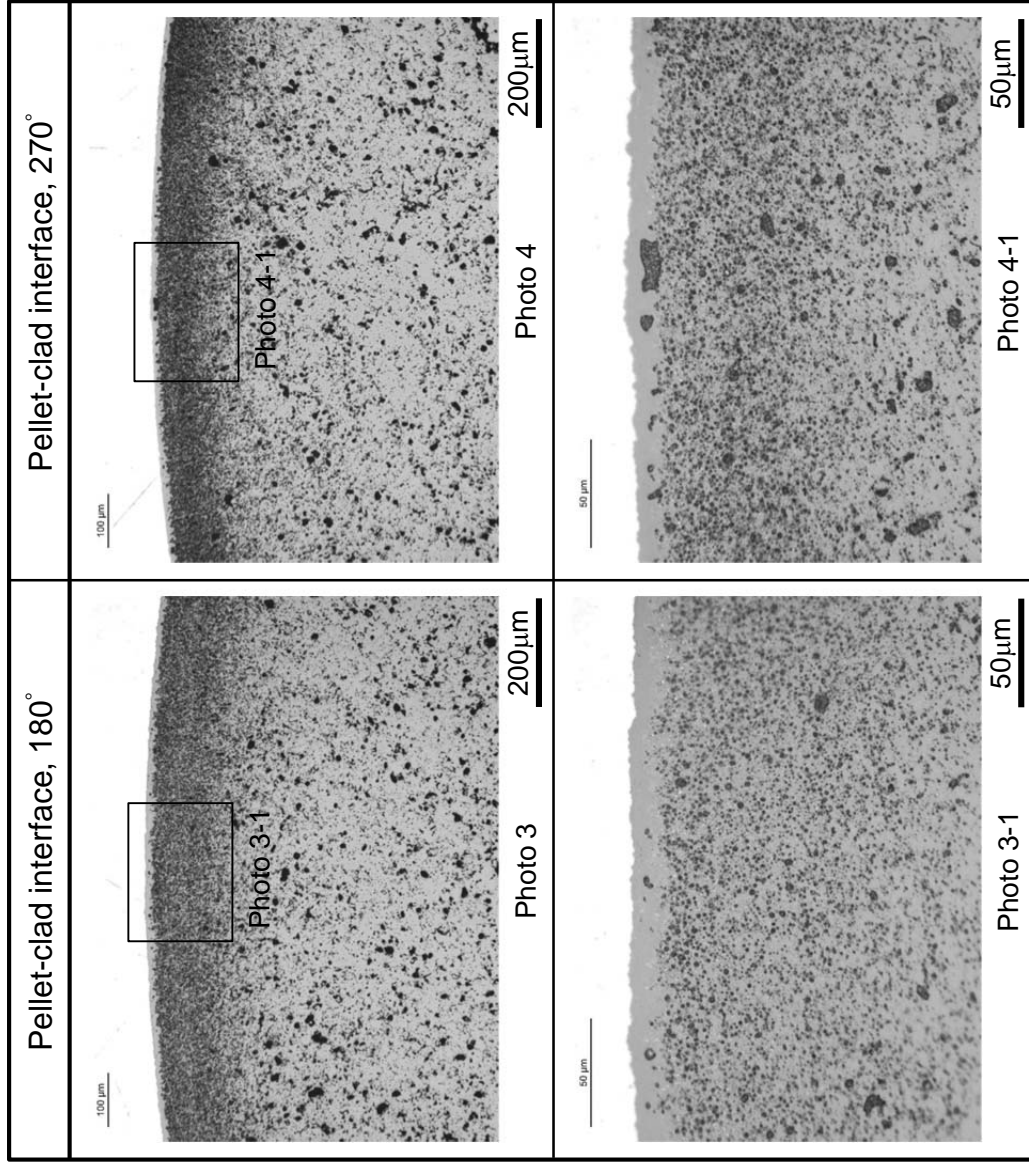


図 4-2-3(2) 燃料セグメント AP2-5 リファレンス試料のペレットマイクロ写真 (エッチング前)

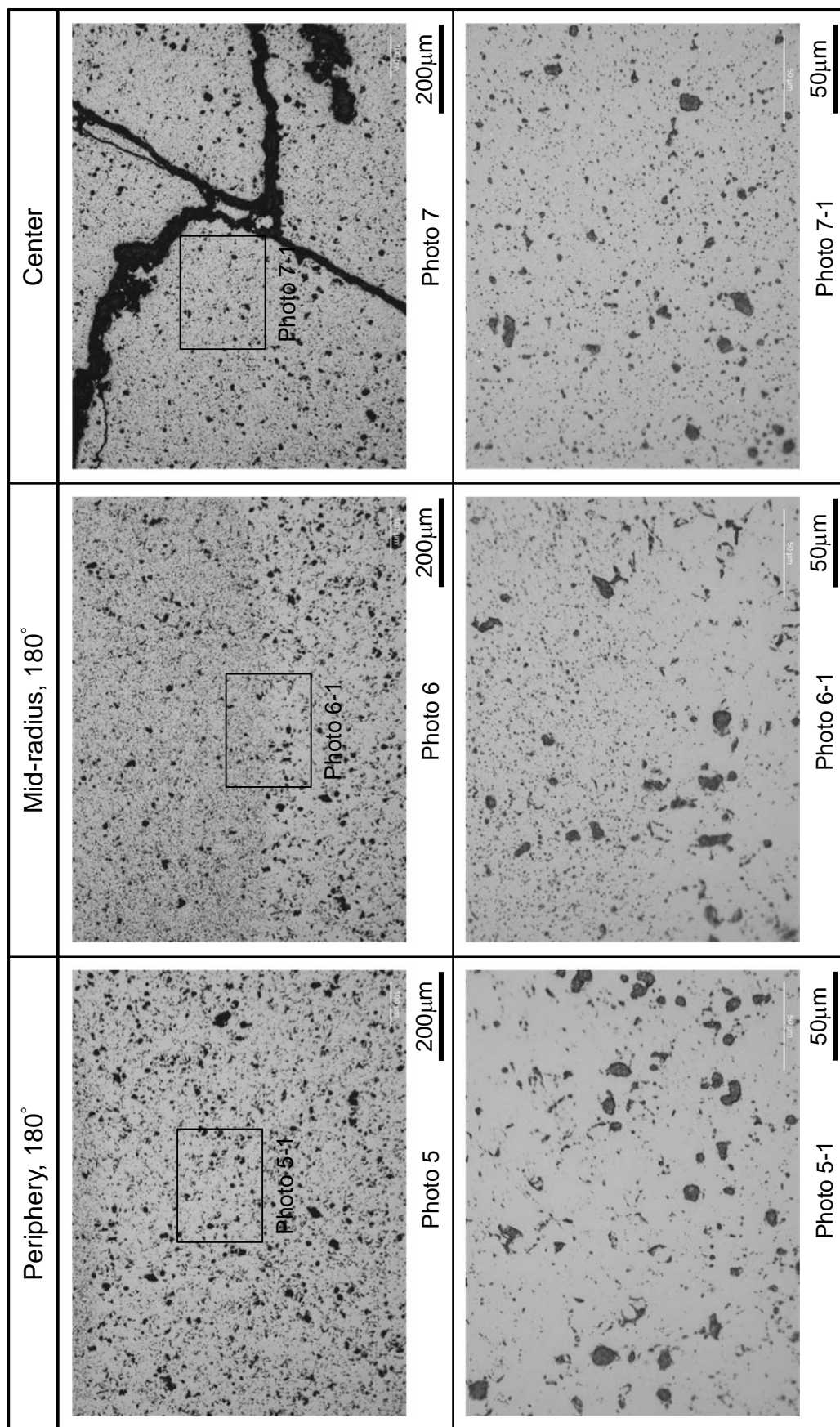


図 4-2-3(3) 燃料セグメント AP2-5 リファレンス試料のペレットマイクロ写真 (エッチング前)

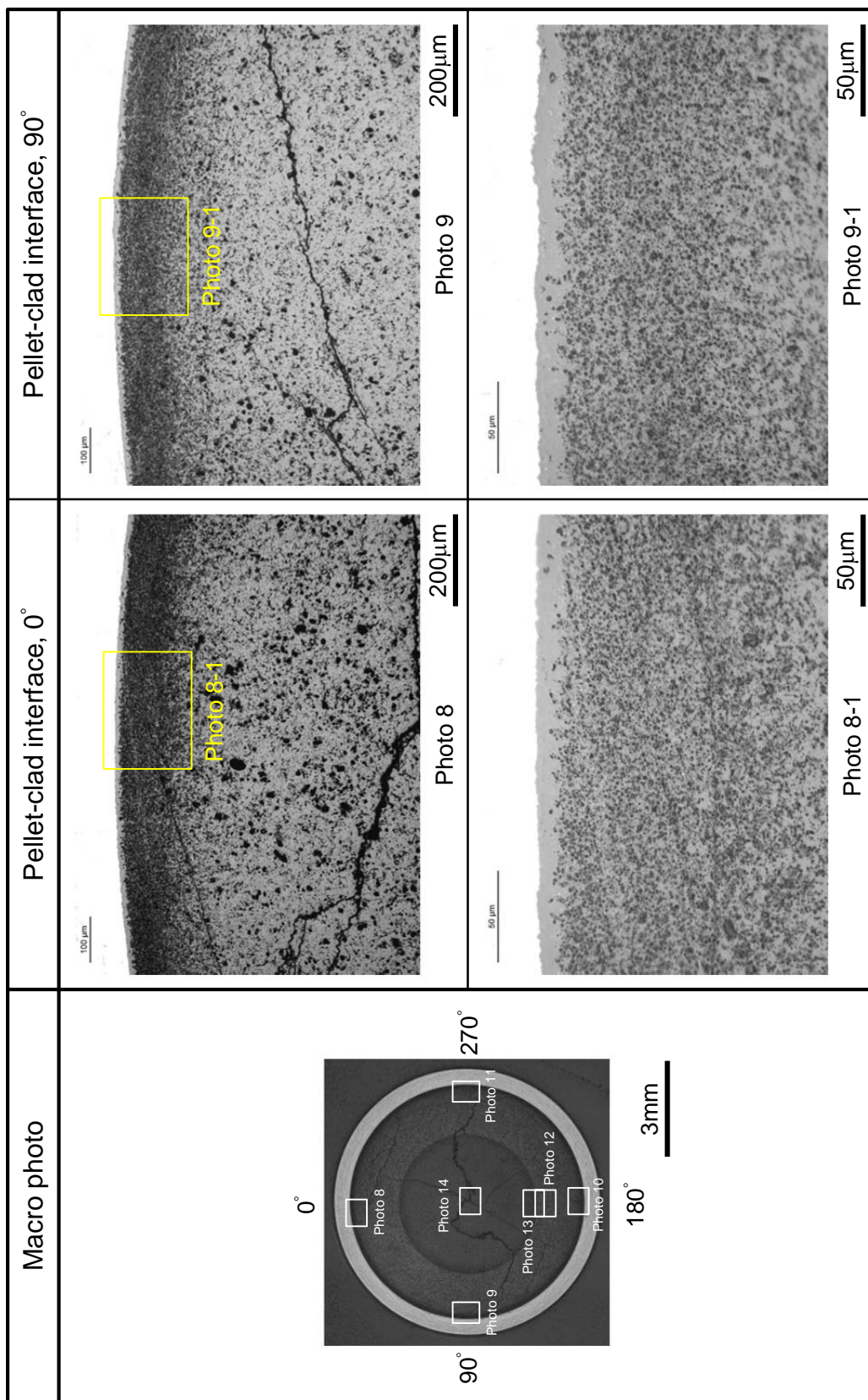


図 4-2-4(1) 燃料セグメント AP2-5 リファレンス試料のペレットミクロ写真 (エッチング後)

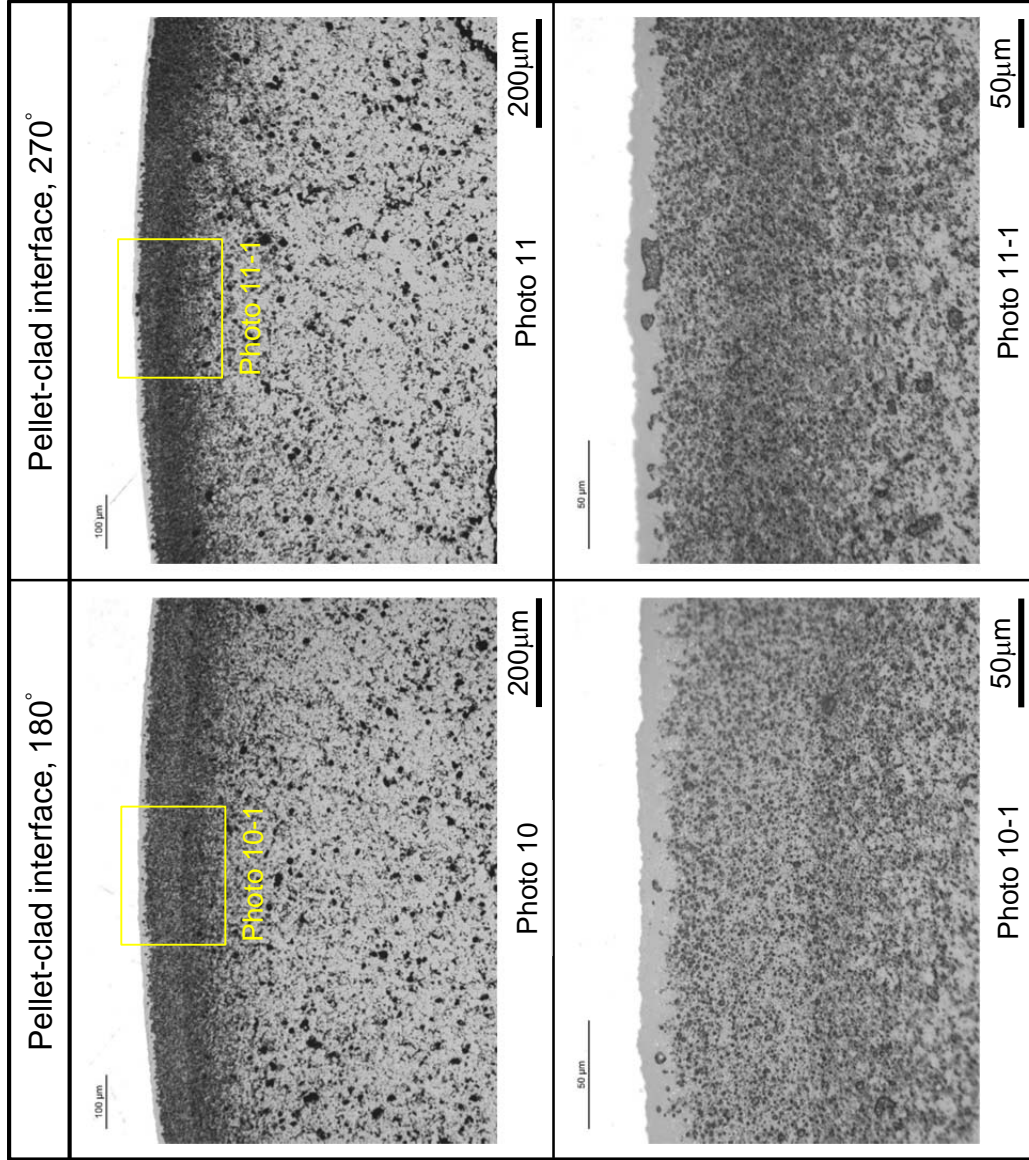


図 4-2-4(2) 燃料セグメント AP2-5 リファレンス試料のペレットミクロ写真 (エッチング後)

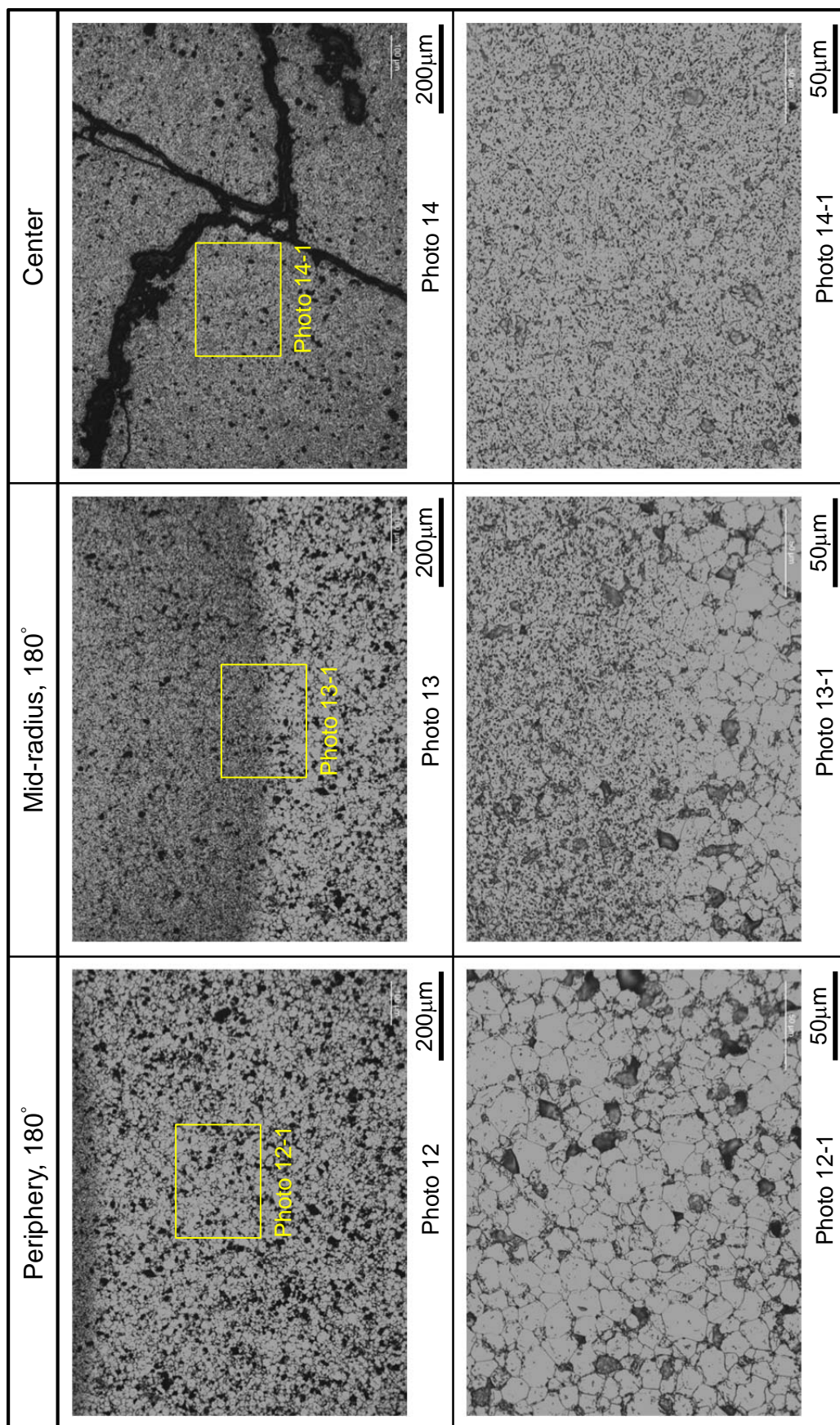


図 4-2-4(3) 燃料セグメント AP2-5 リファレンス試料のペレットミクロ写真 (エッチング後)

### 4.3 RIA 試験

RIA 時の燃料挙動及び破損限界についてデータを取得するため、室温条件下における RIA 模擬試験を 1 回 (GR-1 実験)、高温条件下における RIA 模擬試験を 2 回 (VA-7、VA-8 実験)、NSRR においてそれぞれ実施した。なお本事業においては、改良型燃料の導入時期等を考慮して PWR 用改良燃料被覆管を対象とした RIA 模擬試験を先行させて実施する計画としている。

また昨年度までに実施した VA-5 実験及び VA-6 実験<sup>(1,2)</sup>に関して、パルス照射後燃料の外観観察と SEM 観察を実施した。

さらに、RIA 時に被覆管に作用する荷重の多軸性が高燃焼度燃料の破損に及ぼす影響を明らかにするため、周方向と軸方向の応力を独立に与えることができる多軸応力負荷試験装置を用いた被覆管機械特性試験を実施した。

#### 4.3.1 GR-1 実験

GR-1 実験は、高燃焼度 PWR-UO<sub>2</sub> 燃料を対象とした室温実験として平成 26 年 7 月 30 日に実施した。燃料エンタルピー増分のピーク値 461 J/g (110 cal/g) の実験条件に対し、燃料は破損しなかった。

##### (1) 試験燃料棒

試験燃料は、表 4.1-1 に示す AP2-11 燃料セグメント (フランス・グラブリン 5 PWR 照射、M5 被覆 UO<sub>2</sub> 燃料) から採取した。図 4.3.1-1 に燃料セグメントからの採取位置及び上下端栓取付後の燃料棒の構造概略を示す。スタック長はペレット 8 個分で、X 線写真撮影に基づく測定によれば約 110 mm であった。ガンマ線強度分布がほぼフラットであることから、試験燃料の平均燃焼度はセグメント燃焼度と同じ約 84 GWd/t と評価した。試料採取範囲における被覆管外面酸化膜厚さの平均値は暫定的に約 15 μm と評価した。この値については、a) 渦電流測定の結果で 20 μm を超える値が得られているものの本試験で使用した渦電流測定機器は全体に過大評価した結果を与える傾向があること、及び b) 隣接する燃料セグメントである AP2-10 の酸化膜厚さは金相観察により約 10 μm と評価されていること、を考慮して決定した。この酸化膜厚さについては、今後実施する断面の金相観察により補正する予定である。被覆管水素吸収量の分析も未実施であるが、AP2-10 燃料セグメント燃料棒 (約 70 ppm) との比較から、100 ppm 前後の水素濃度と推定される。

パルス照射実験前の試験燃料棒に対して実施した外観観察、X 線写真撮影、寸法測定の結果をそれぞれ図 4.3.1-2 から図 4.3.1-4 に示す。いずれの結果においても、パルス照射実験において問題となり得る傷、欠陥、扁平化、曲がりなどは見られなかった。

##### (2) 実験条件および計装



パルス照射実験の条件を以下に示す。

実験カプセル：	X-IV 型 (室温・大気圧用)
パルス照射時冷却水条件：	24 °C、0.1 MPa の静止水
投入反応度：	\$4.6
燃料エンタルピー増分ピーク値：	461 J/g (110 cal/g)

計装項目を以下に示す。また、図 4.3.1-5 に計装取付けの概要を示す。

カプセル内圧計 2 箇所 (液相: #1, 気相: #2)  
 燃料棒内圧計 (スタック下部)  
 AE センサ 2 個 (燃料破損検出用)  
 カプセル外面歪みゲージ  
 被覆管表面温度表面熱電対 3 箇所  
 冷却水温度測定用シース熱電対 2 箇所

### (3) 過渡計測記録の概要

2 台の中性子検出器で測定した NSRR の炉出力履歴を図 4.3.1-6(1)及び(2)、積分出力履歴を図 4.3.1-6(3)及び(4)に示す。また、前節で示した計測項目に関する過渡記録を図 4.3.1-6(5)から(16)に示す。時刻 0 から 10 秒まで、0 から 1 秒まで及び 0.248 から 0.263 秒までの 3 区間について示す。過去に実施した NSRR 実験より、歪みゲージを使用したセンサ(圧力計等)や熱電対の出力には NSRR 出力の履歴によく似た波形のノイズや、パルス照射以後も継続するドリフトが発生し得ることが判明している。このノイズ及びドリフトの要因は、出力にほぼ比例した強度で発生するガンマ線が歪みゲージ素子や熱電対素子の電気的特性に与える影響、ガンマ発熱による素子自身の温度上昇による特性変化などと理解されるが、精度良く補正することは困難であるため本報告においては得られた過渡計測結果をそのまま示す。

#### (a) NSRR 出力・積分出力

図 4.3.1-6 (1), (2)及び(3), (4)に NSRR 出力履歴及び積分出力履歴をそれぞれ示す。いずれについても、中性子検出器#1 と#2 の平均値で評価を行った。NSRR 出力は時刻 0.255 秒においてピーク値約 21.8 GW に達し、半値幅は約 4.4 ms であった。なお、NSRR の計測システムは積分演算を 1 秒までしか行わないため、時刻 1 秒以降の積分出力は一定値として記録される(破線部)。炉物理計算による評価によれば、本実験における積分出力は時刻無限大で約 128 MJ に達した。

#### (b) カプセル内圧

図 4.3.1-6 (5)及び(6)に、それぞれカプセルの液相部及び気相部で計測した圧力の履歴を示す。液相部では時刻 0.25 秒過ぎから僅かな圧力の低下が見られるが、これは NSRR 出力パルスに同期したノイズである。気相部では有意な圧力の変動は見られない。

#### (c) 燃料棒内圧

図 4.3.1-6 (7)に燃料棒内圧の履歴を示す。時刻 0.25 秒以降に圧力上昇が見られるが、0.255 前後から下降していること、またこの時点では燃料のエンタルピは上昇を続けている段階であり、燃料棒内圧力が下降に向かうとは考えにくいことから、主として NSRR 出力パルスに同期したノイズであると解釈される。また 0.3 秒以降には急激な圧力増大が見られ、0.4 秒程度で計測限界値を超えカットされている。燃料エンタルピの上昇からやや遅れての圧力上昇であることから、ペレット／被覆管ギャップ空間への FP ガス放出の結果生じた燃料棒内圧の上昇を検出した可能性がある。

#### (d) AE センサ出力

図 4.2.1-6 (8)及び(9)に AE センサ#1 及び#2 の出力信号を示す。このセンサはカプセル構造材を伝わる音響波を計測するものであり、燃料破損の検出を目的として設置した。AE センサ#2 の出力において振幅の急激な増大が見られ、0.256 秒時点で測定レンジを超えている。一方、冷却水中で計測したカプセル内圧履歴においては、破損時に表れる特徴的なスパイク状の圧力波が観測されておらず、また実際に燃料は破損しなかったことから、AE センサ#2 の振幅増大は、PCMI 発生に伴う燃料ペレットと被覆管の摩擦等の機械的な振動が検出されたものと解釈できる。

なお、AE センサ#1 では出力信号に変化が見られなかった。この原因として、#1 のアンプゲインは#2 に対して 20 dB 分小さく設定したため、出力信号の振幅がノイズと同程度となった可能性の他、燃料支持具への設置または信号線の接続に不具合があった可能性が考えられる。

#### (e) 水塊速度計信号

図 4.3.1-6 (10)に水塊速度計の出力信号を示す。0.255 秒以降に NSRR 出力パルスに起因すると思われる揺らぎが生じている他、有意な水面の上下動を示す信号の変動は見られない。

#### (f) カプセル外面歪み

図 4.3.1-6 (11)にカプセル蓋の外表面に設置した歪みゲージの信号を示す。この歪みゲージは実験の安全確認のために設置したものである。カプセルへの過度の負荷を示す信号は見られなかった。圧力計の出力と同様、NSRR パルス出力に同期したノイズが記録された。

#### (g) 被覆管表面温度

図 4.3.1-6 (12)、(13)及び(14)に被覆管表面温度履歴を示す。被覆管表面温度は 0.255 から 0.26 秒にかけて飽和温度まで上昇し、#1 と#2 では 10 から 20 ms 程度の短いプラトー区間を経て沸騰遷移による過熱が生じたことを示している。被覆管表面温度が飽和温度を超えている時間区間は 0.1-0.2 秒程度と短く、安定な膜沸騰には至っていない。計測された最高到達温度は 520 °C (#2、0.29 秒) であった。

#### (h) 冷却水温度

図 4.3.1-6 (15)及び(16)に燃料スタック中心高さ (#1) 及び燃料棒上端付近 (#2) で測定した冷却水温度の履歴を示す。いずれの熱電対も燃料棒からの距離は約 10 mm である。0.25 秒前後で短時間だけ温度が低下しているが、これはパルス照射時のガンマ発熱により、カプセル蓋付近に設けられた冷接点 (温度基準点) 部分の温度が上昇したことで、見かけ上の温度低下が生じたと解釈される。

### (4) パルス照射後試験

実験後の燃料棒に対して以下の試験を実施した。

#### (a) 燃料棒外観観察

図 4.3.1-7 に、パルス照射後の燃料棒の外観を示す。燃料の破損は生じておらず、外観上の大きな変化も認められなかった。ただし被覆管については、照射前に比べてやや曲がりが増大している。

なお、同図では燃料支持具から外した状態の写真を示してあるが、カプセルを開封した時点において、被覆管表面熱電対が 3 箇所とも正常に付いた状態であることを確認した。

#### (b) X 線透過試験

パルス照射後の X 線透過写真を図 4.3.1-8 に示す。スタック上下端以外のペレットについては、ペレット境界の位置がパルス照射の前後ではほぼ同じであるが、上下端のペレットは、それぞれ約 1.5 mm ずつ軸方向に伸びていることがわかる。また、スタックの上下に配置してあるアルミナペレット部分に、パルス照射前には見られなかった影が見えるが、これは、燃料の一部と考えられる。被覆管については、照射前に比べてやや曲がりが増大している。

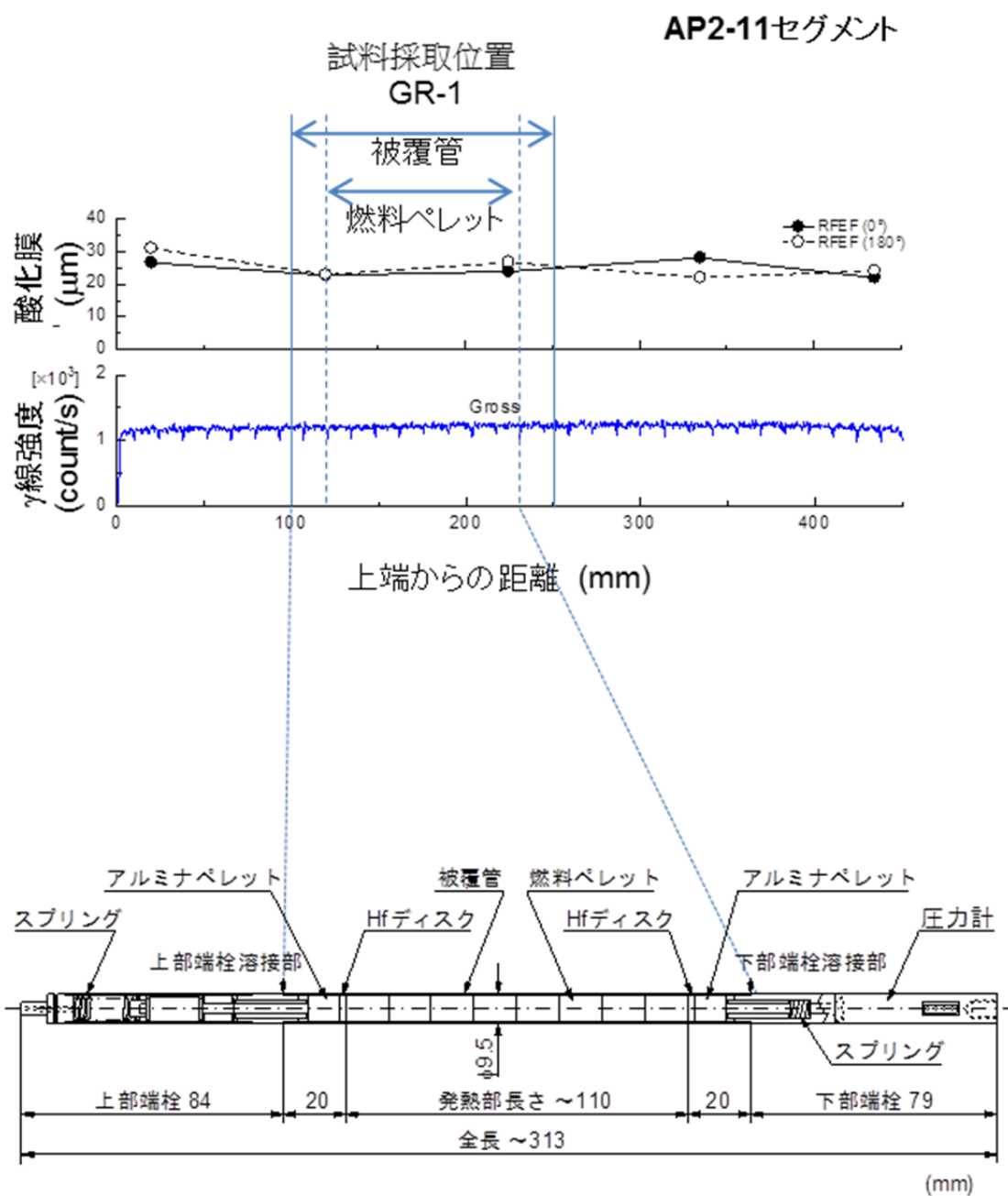


図 4.3.1-1 GR-1 試験燃料棒の構造概略

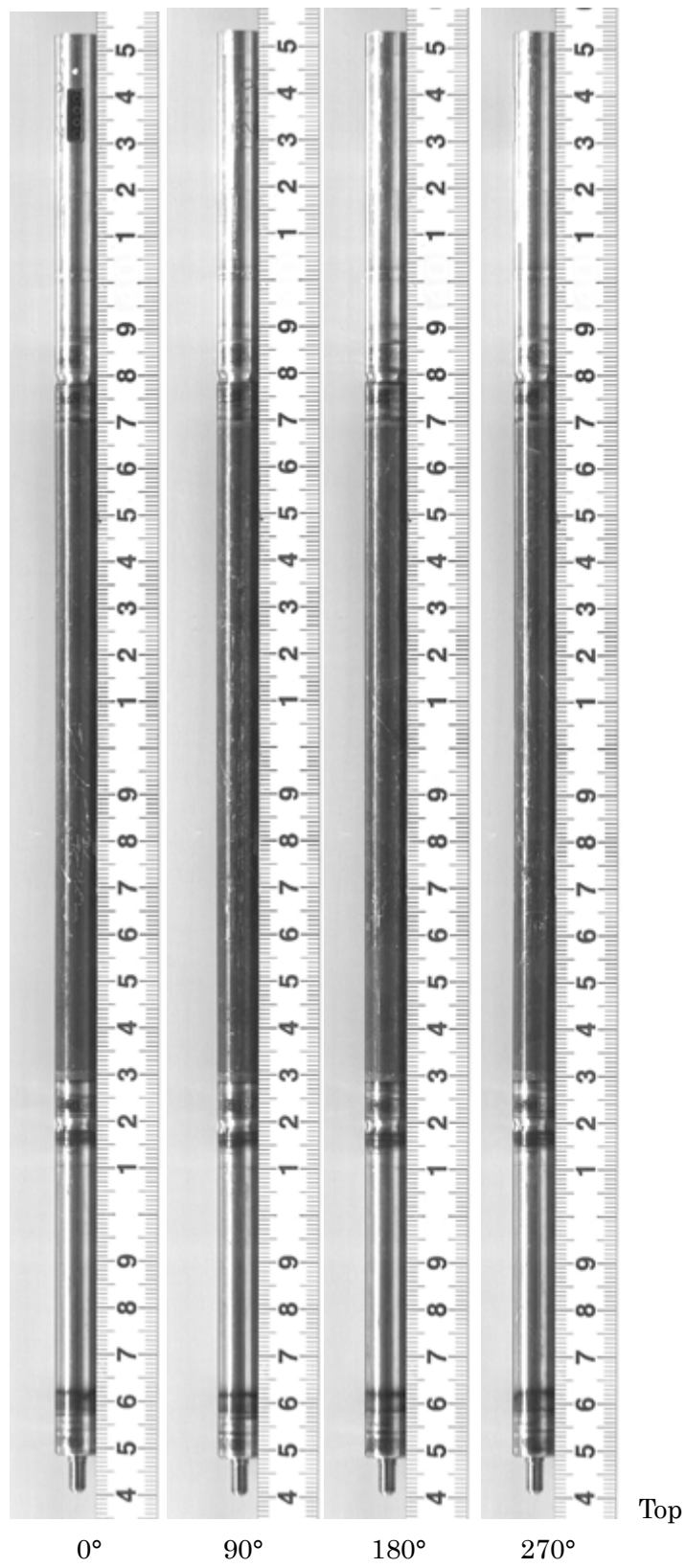


図 4.3.1-2 GR-1 試験燃料棒のパルス照射前外観写真

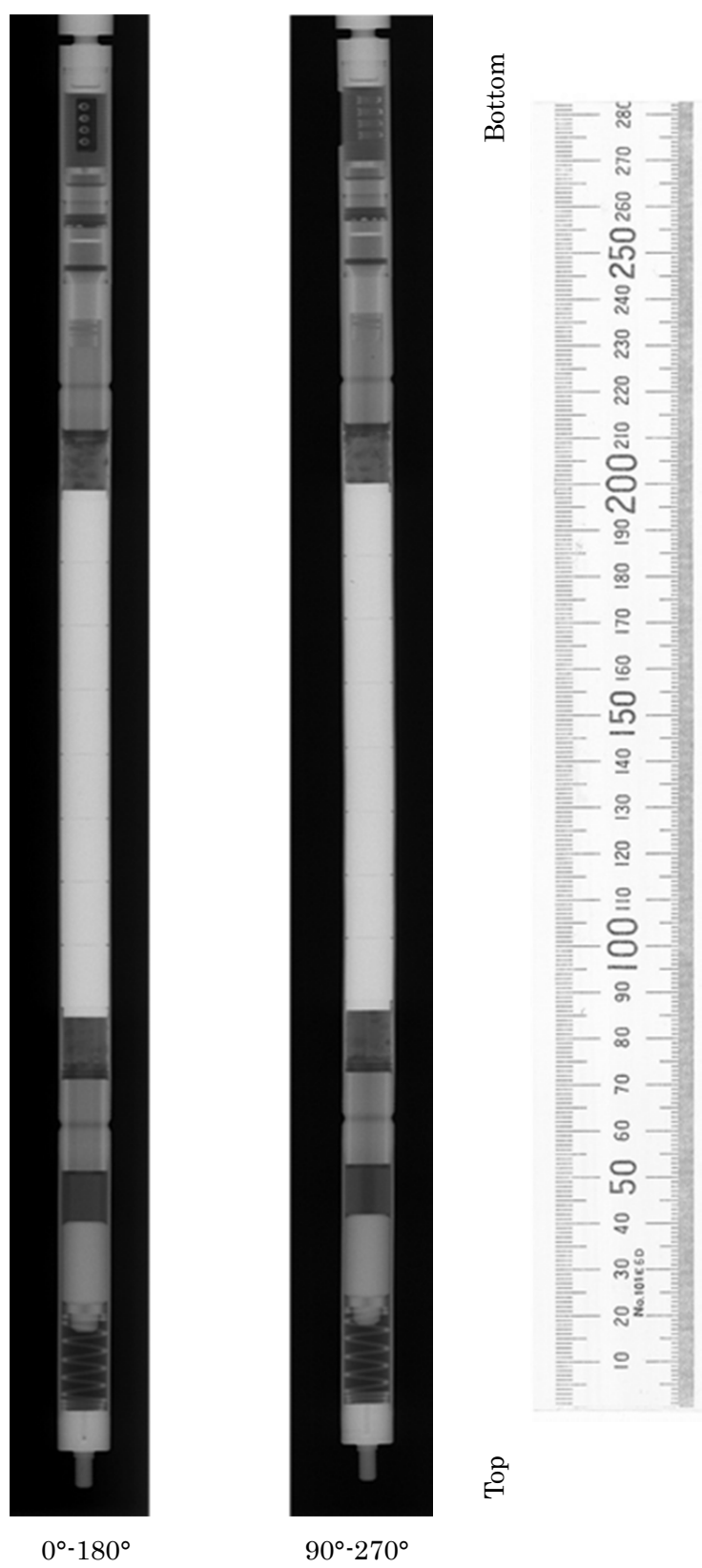


図 4.3.1-3 GR-1 試験燃料棒のパルス照射前 X 線写真

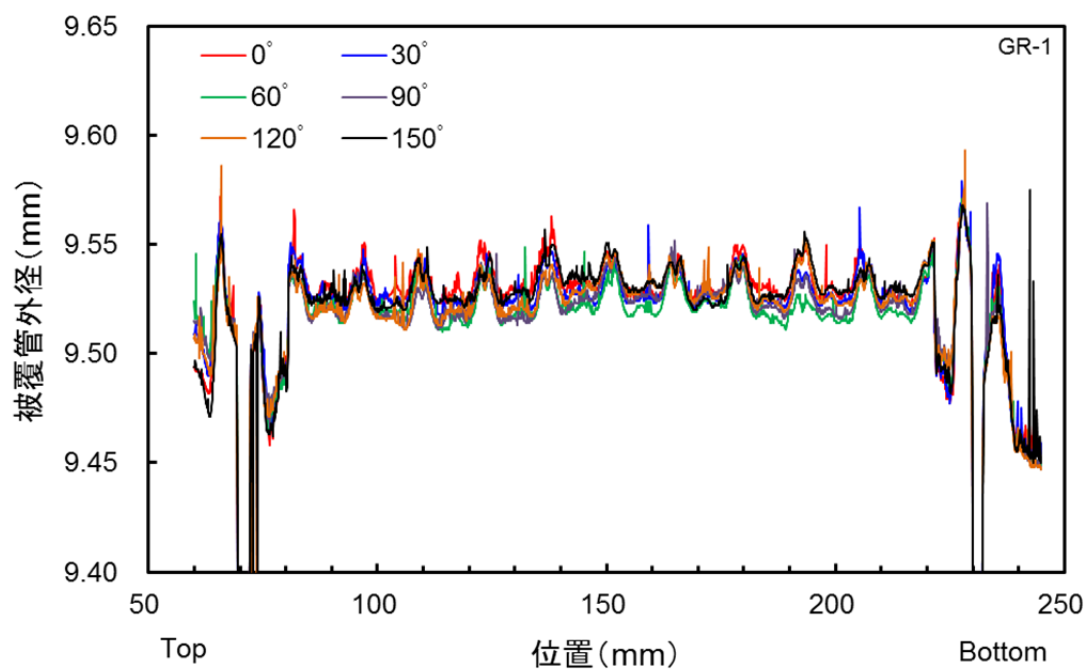


図 4.3.1-4 GR-1 試験燃料棒のパルス照射前寸法測定結果

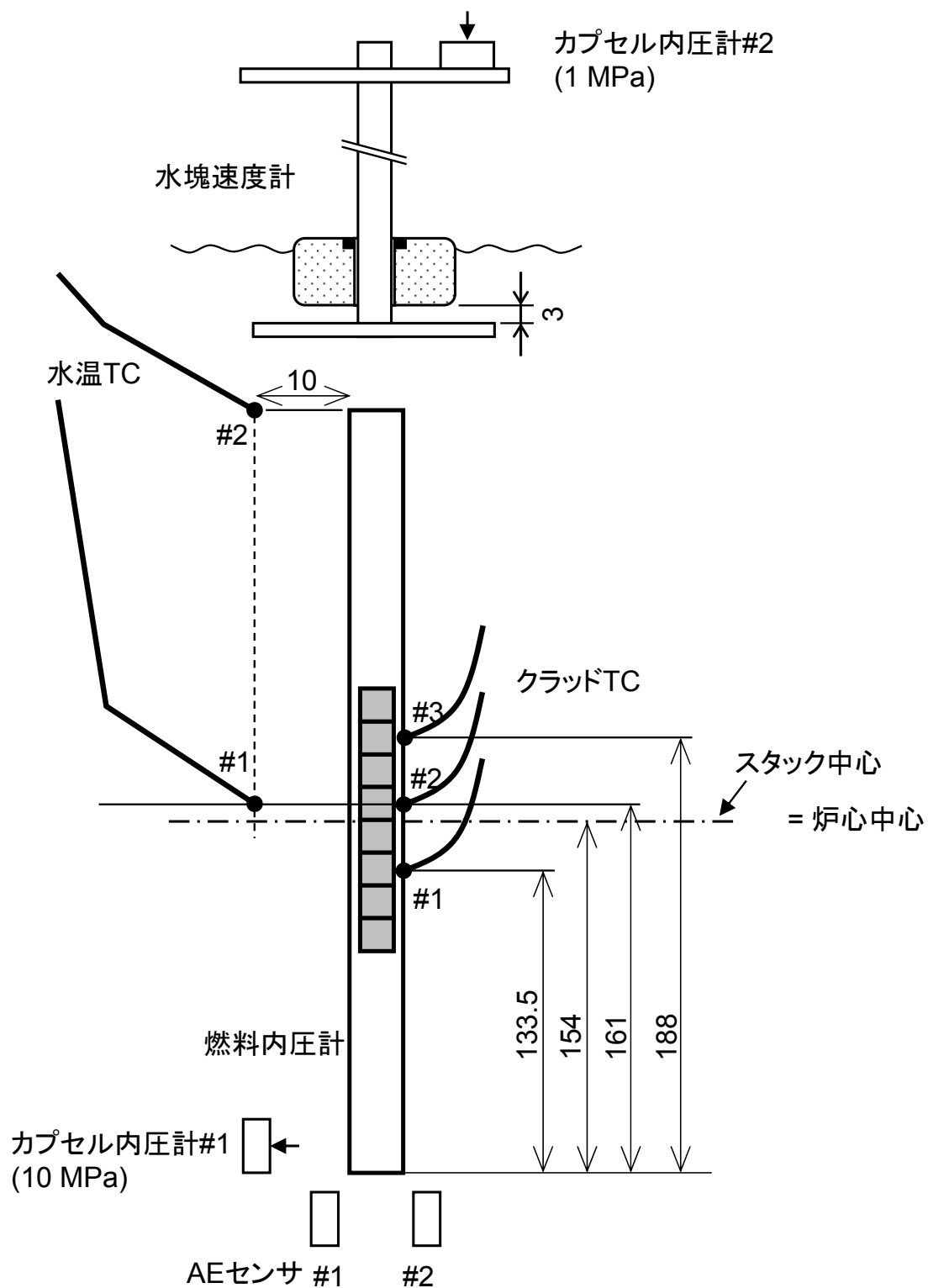


図 4.3.1-5 GR-1 実験における計装取付けの概要



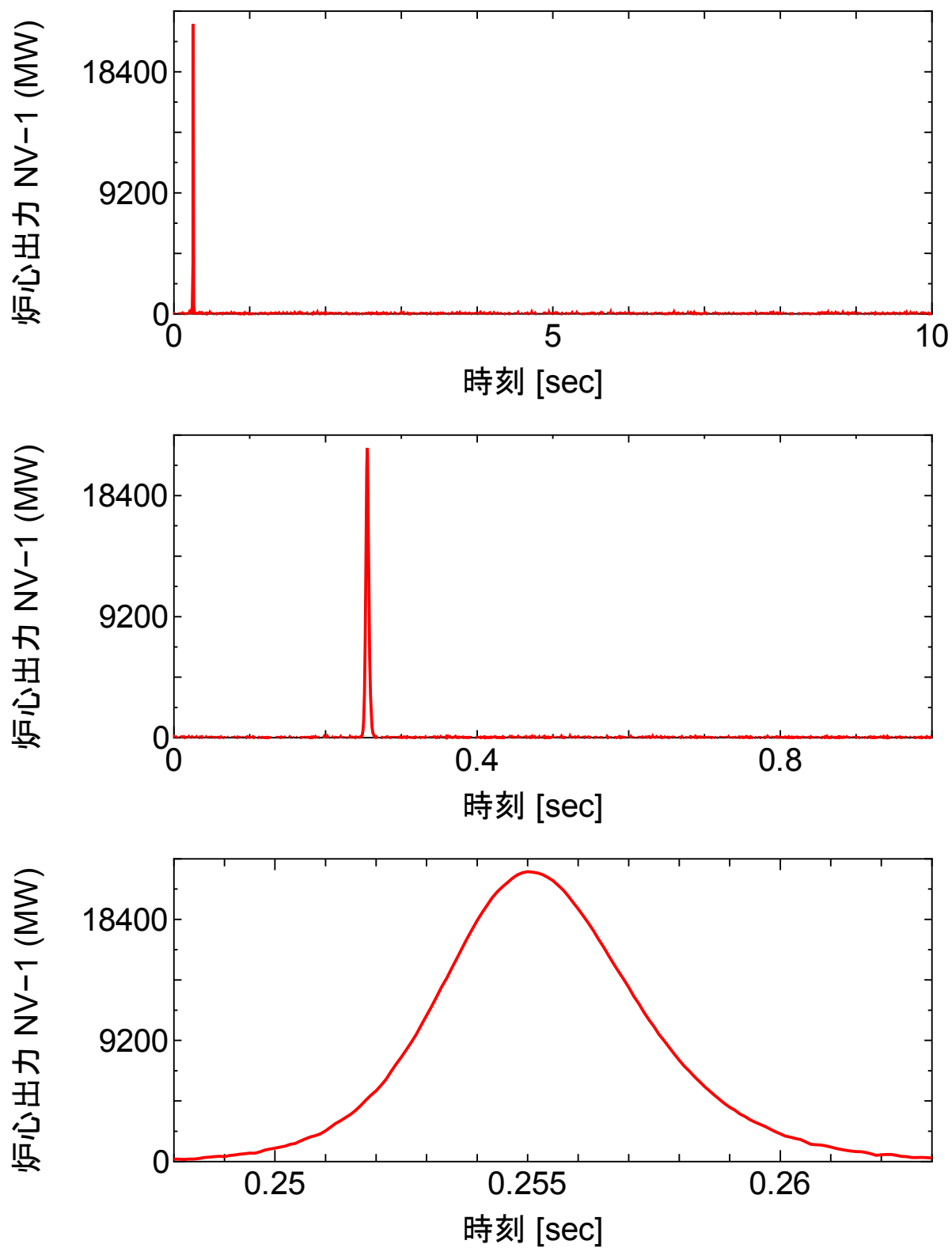


図 4.3.1-6 (1) GR-1 実験における原子炉出力履歴 (#1)

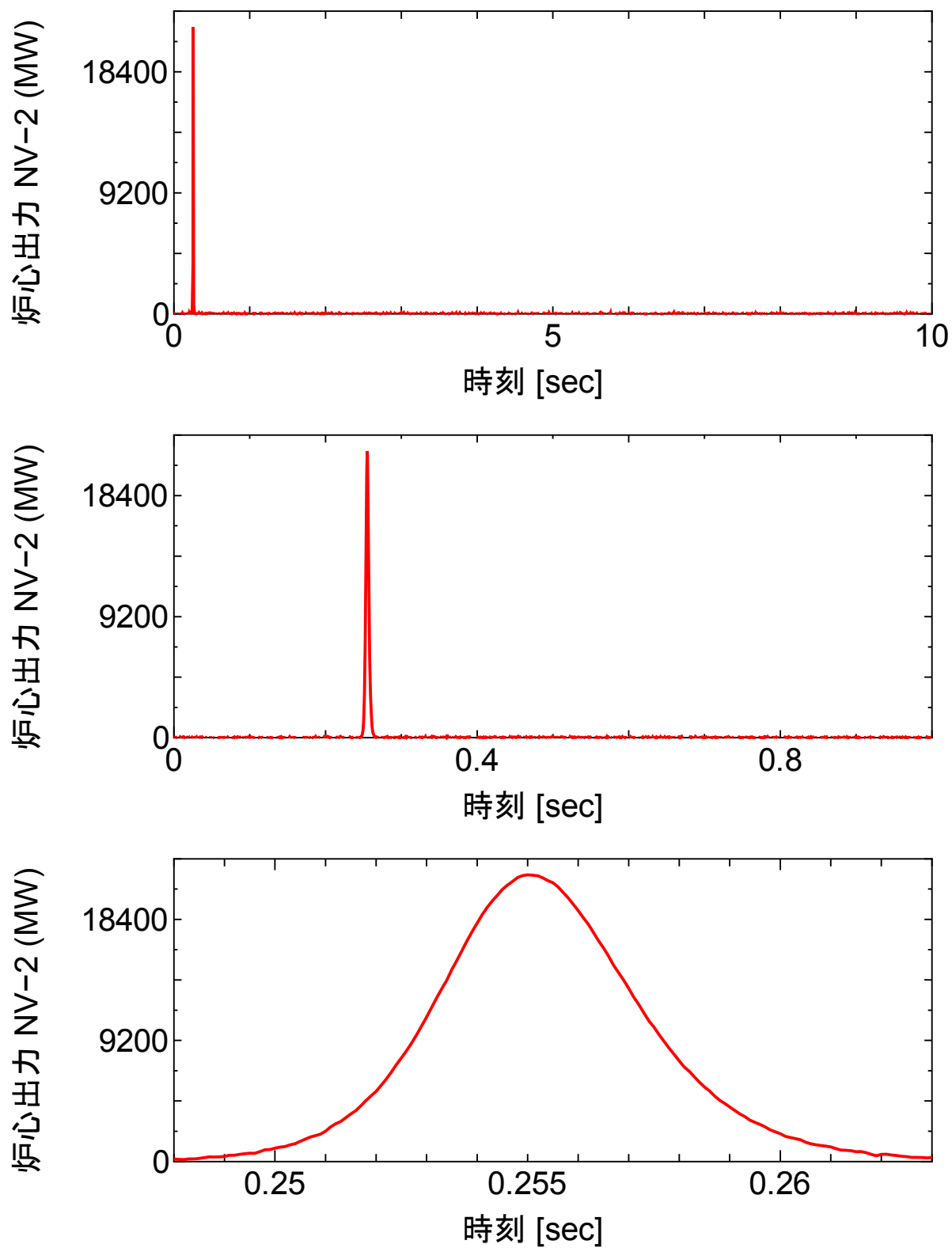


図 4.3.1-6 (2) GR-1 実験における原子炉出力履歴 (#2)

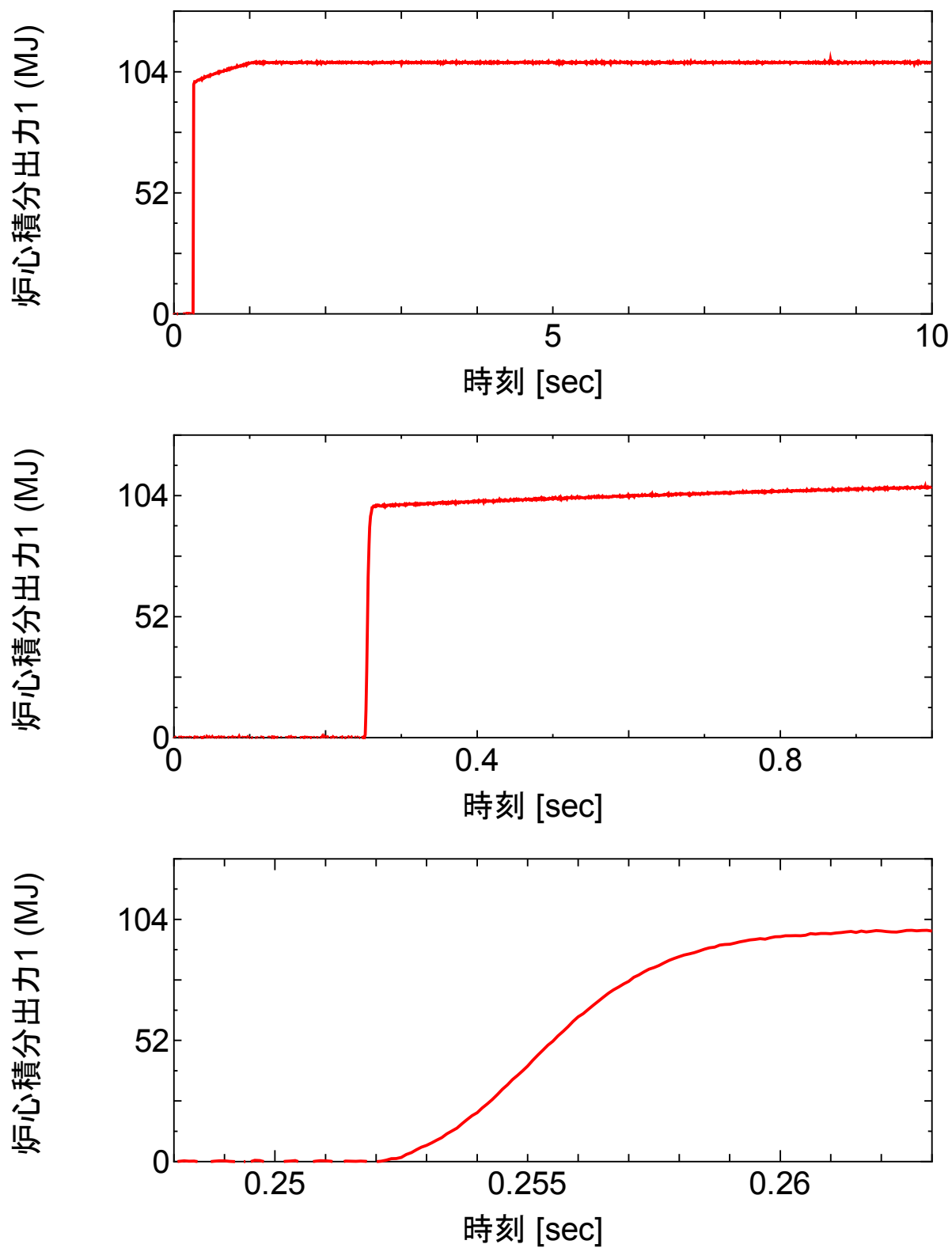


図 4.3.1-6 (3) GR-1 実験における原子炉積分出力 (#1)

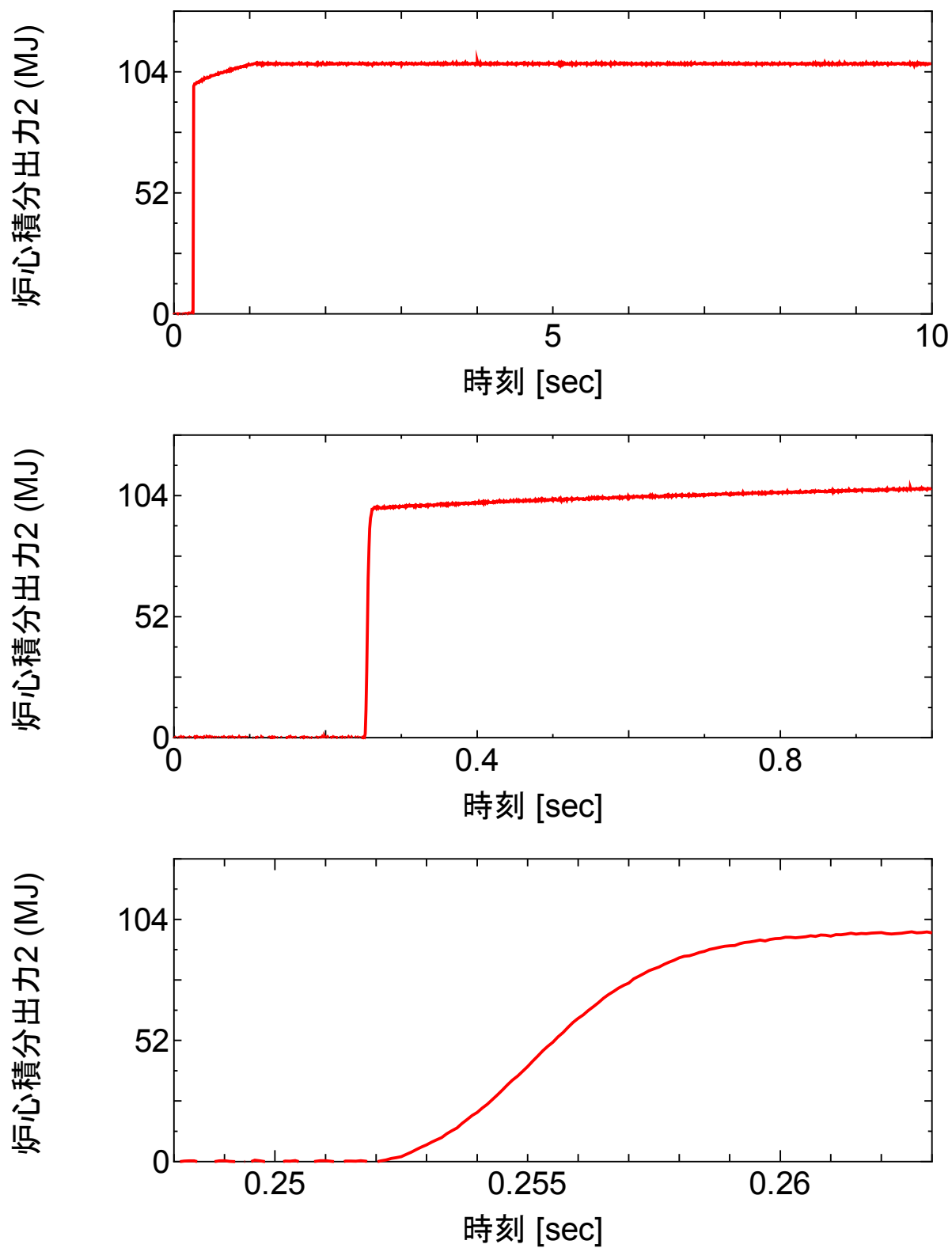


図 4.3.1-6 (4) GR-1 実験における原子炉積分出力 (#2)

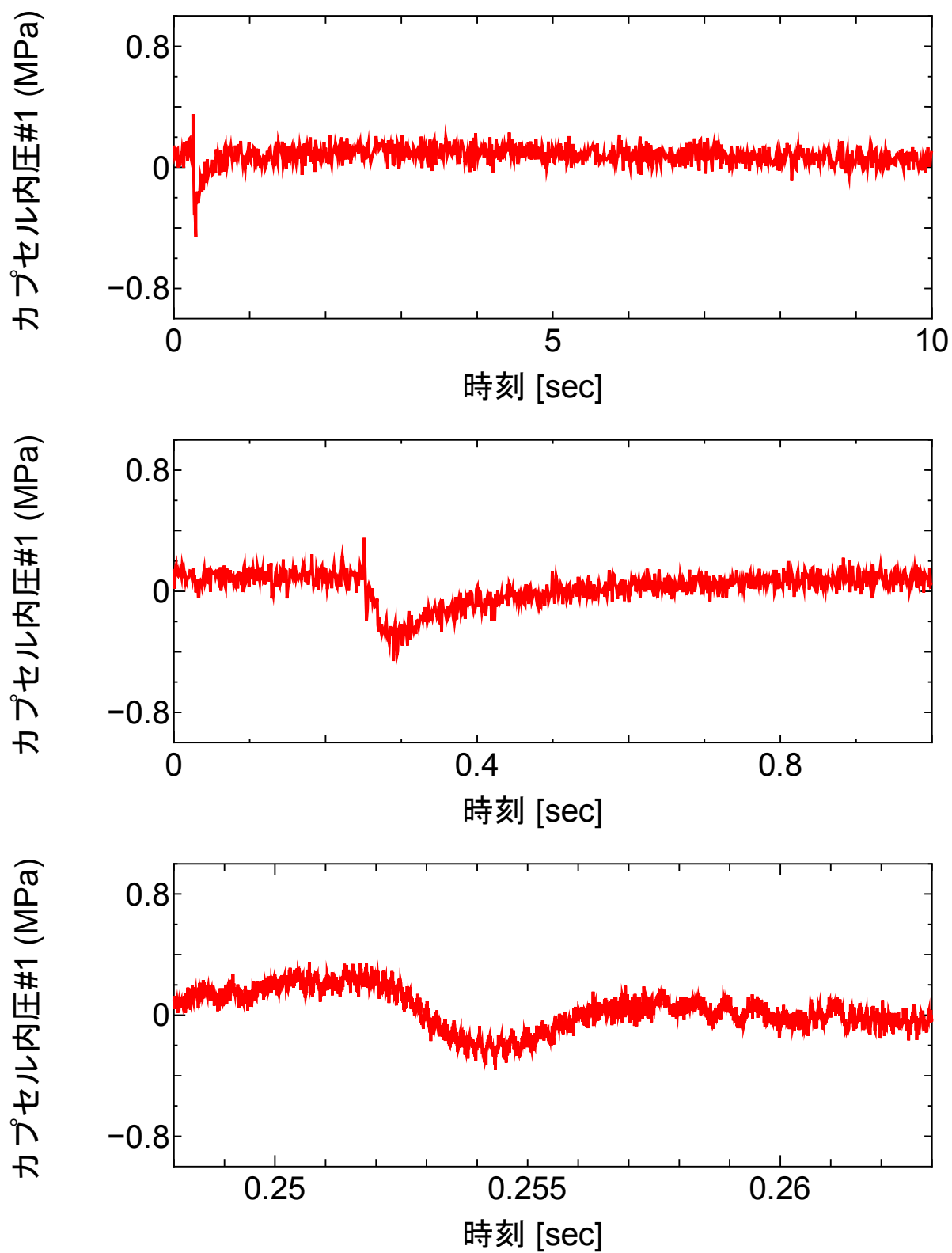


図 4.3.1-6 (5) GR-1 実験におけるカプセル内液相圧力履歴

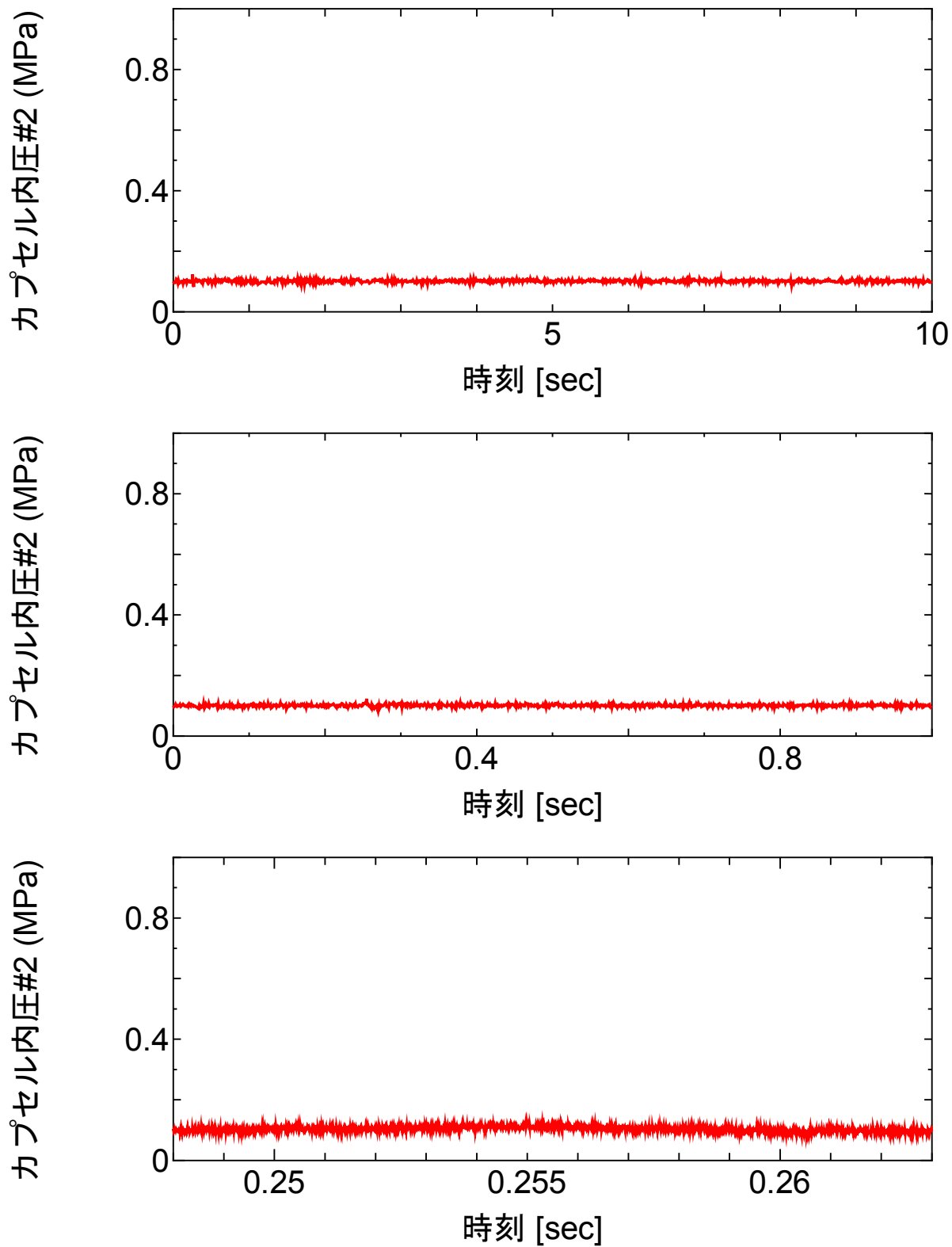


図 4.3.1-6 (6) GR-1 実験におけるカプセル内気相圧力履歴

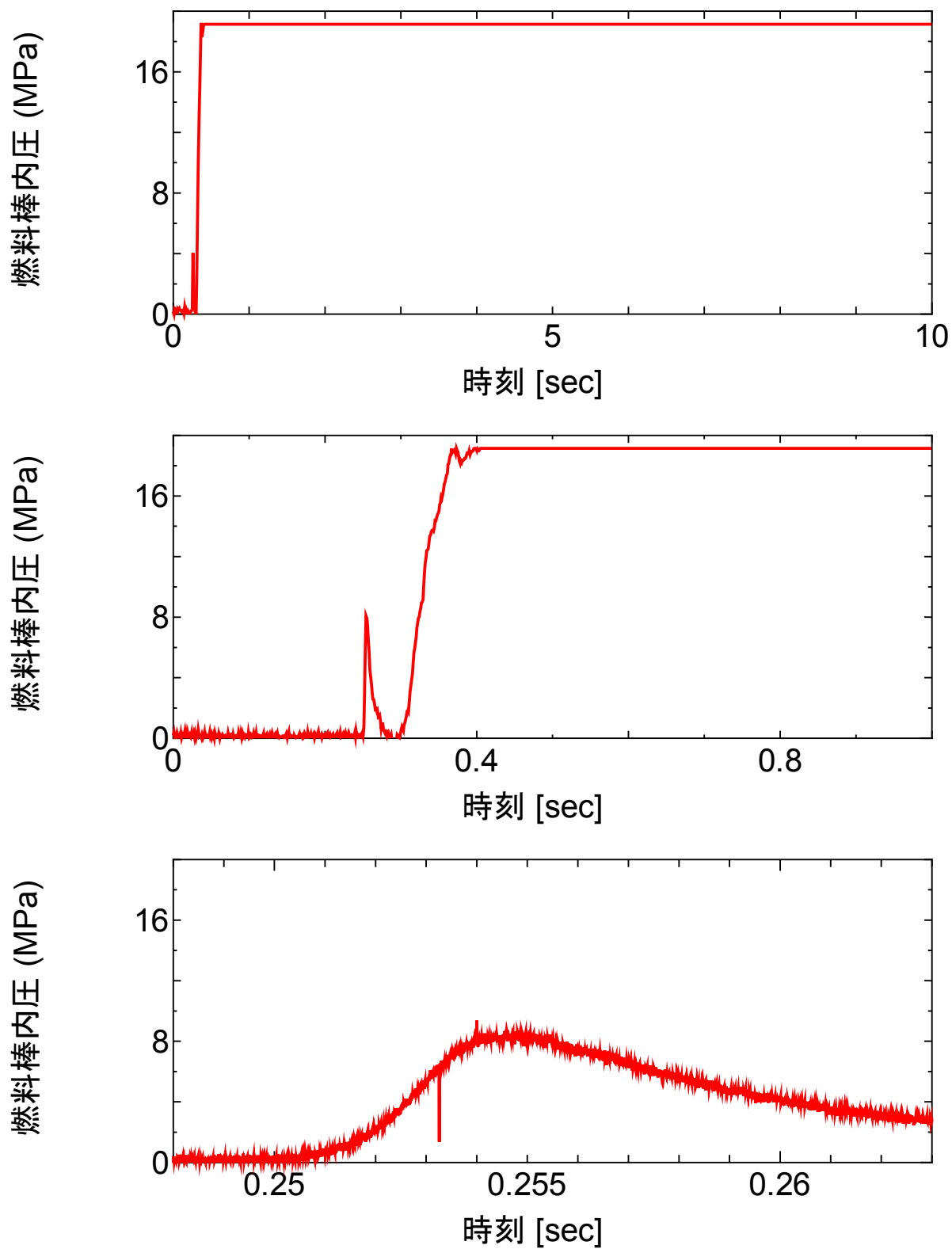


図 4.3.1-6 (7) GR-1 実験における燃料棒内圧履歴

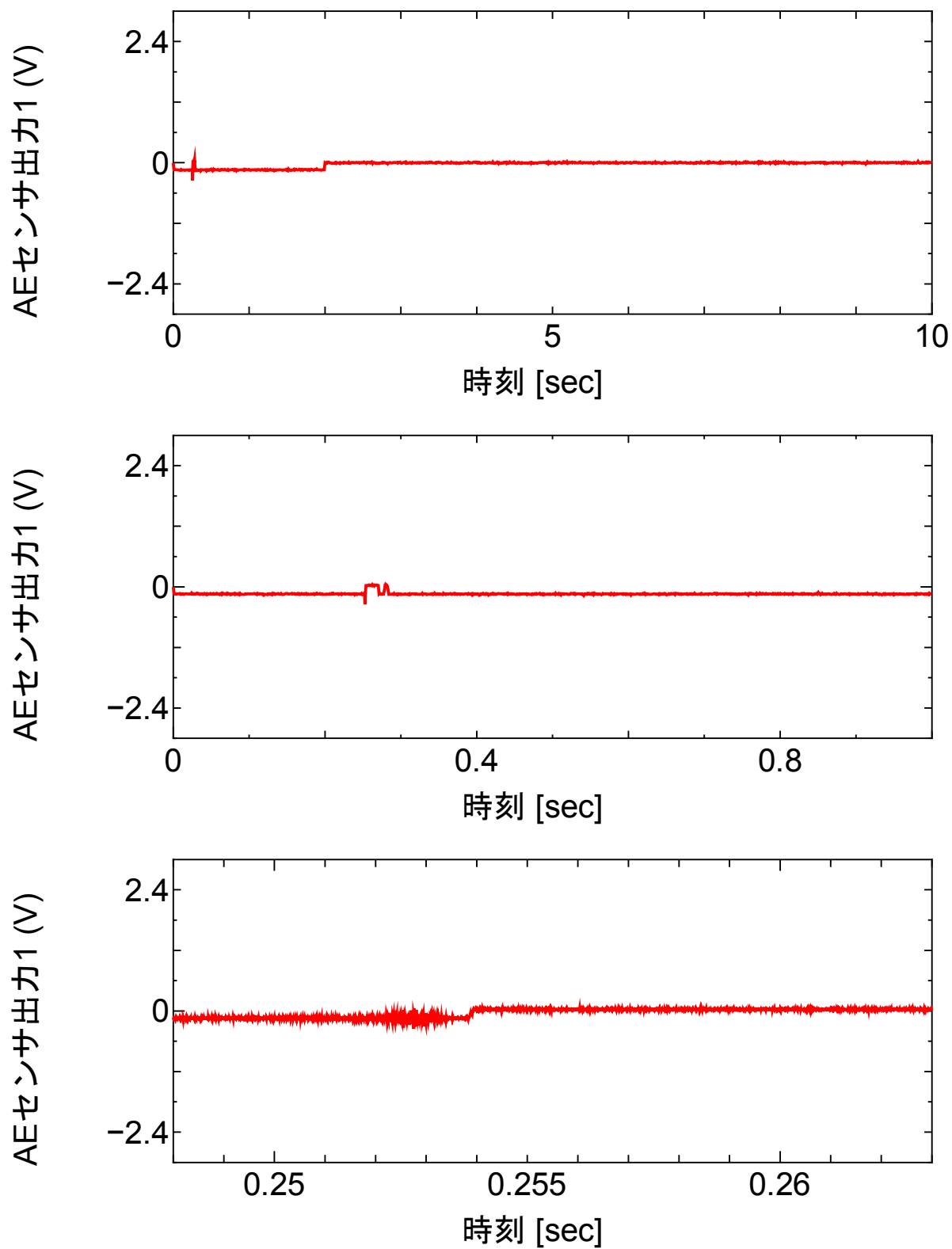


図 4.3.1-6 (8) GR-1 実験における AE センサ出力履歴 (#1)



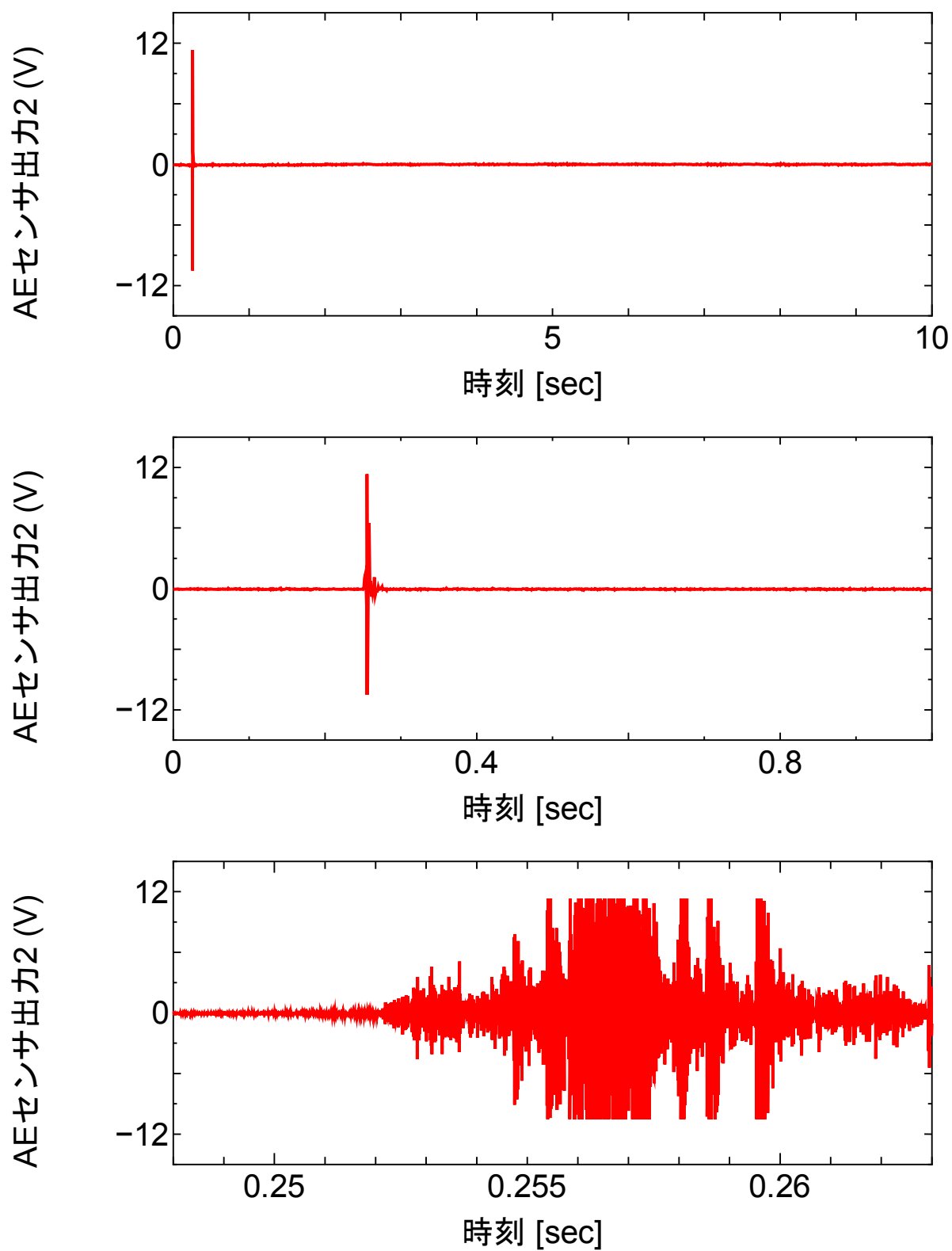


図 4.3.1-6 (9) GR-1 実験における AE センサ出力履歴 (#2)

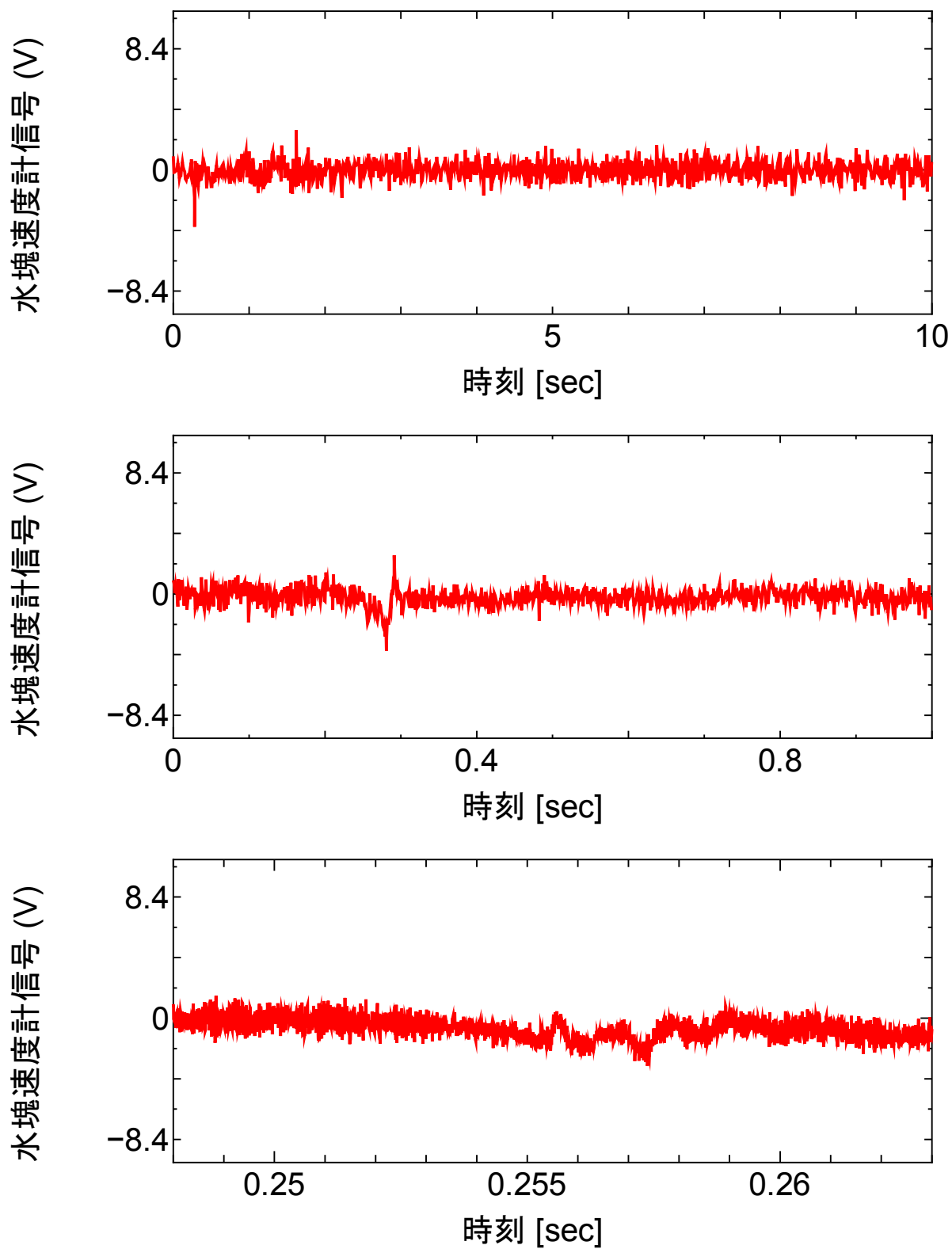


図 4.3.1-6 (10) GR-1 実験における水塊速度計出力履歴

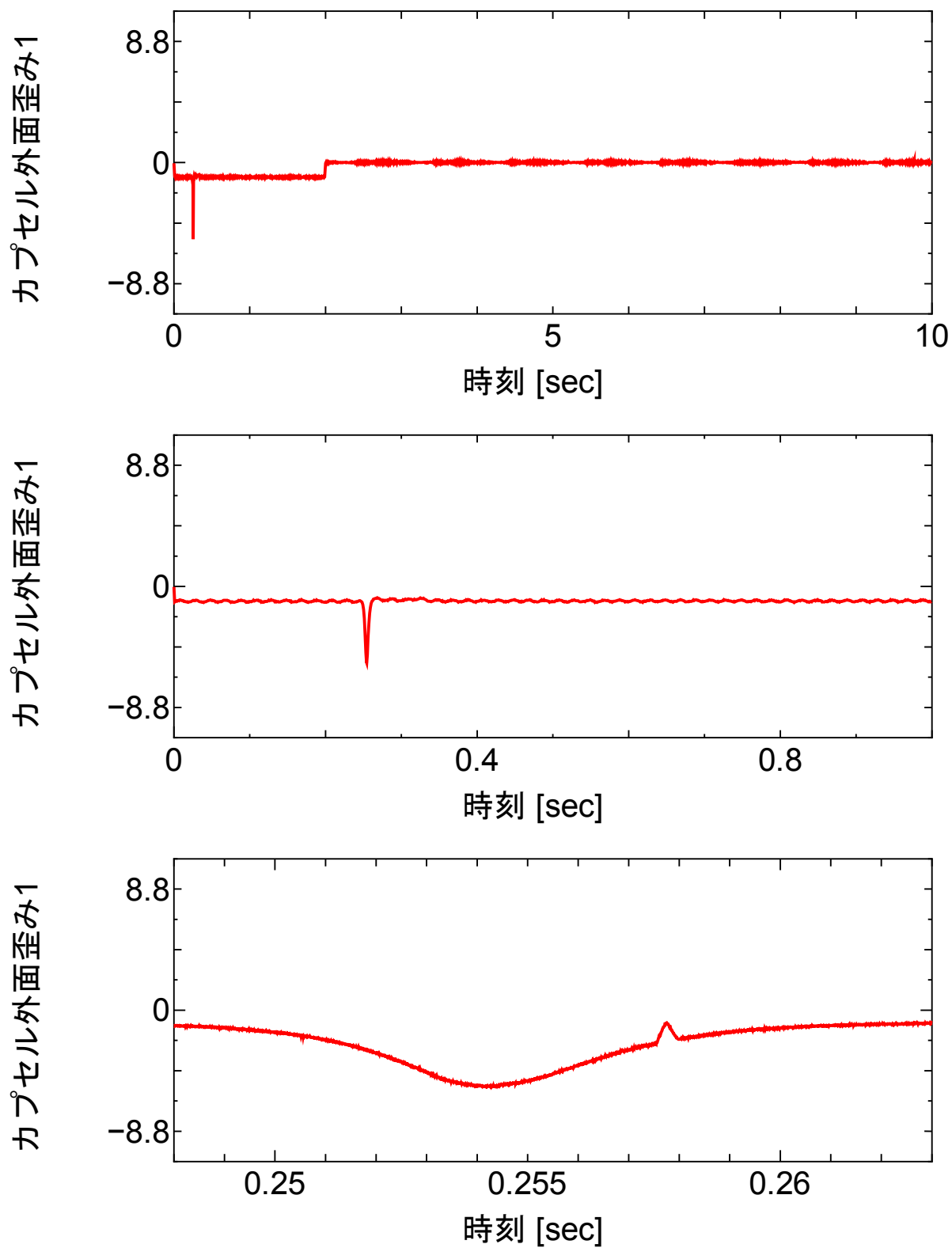


図 4.3.1-6 (11) GR-1 実験におけるカプセル外面歪み履歴

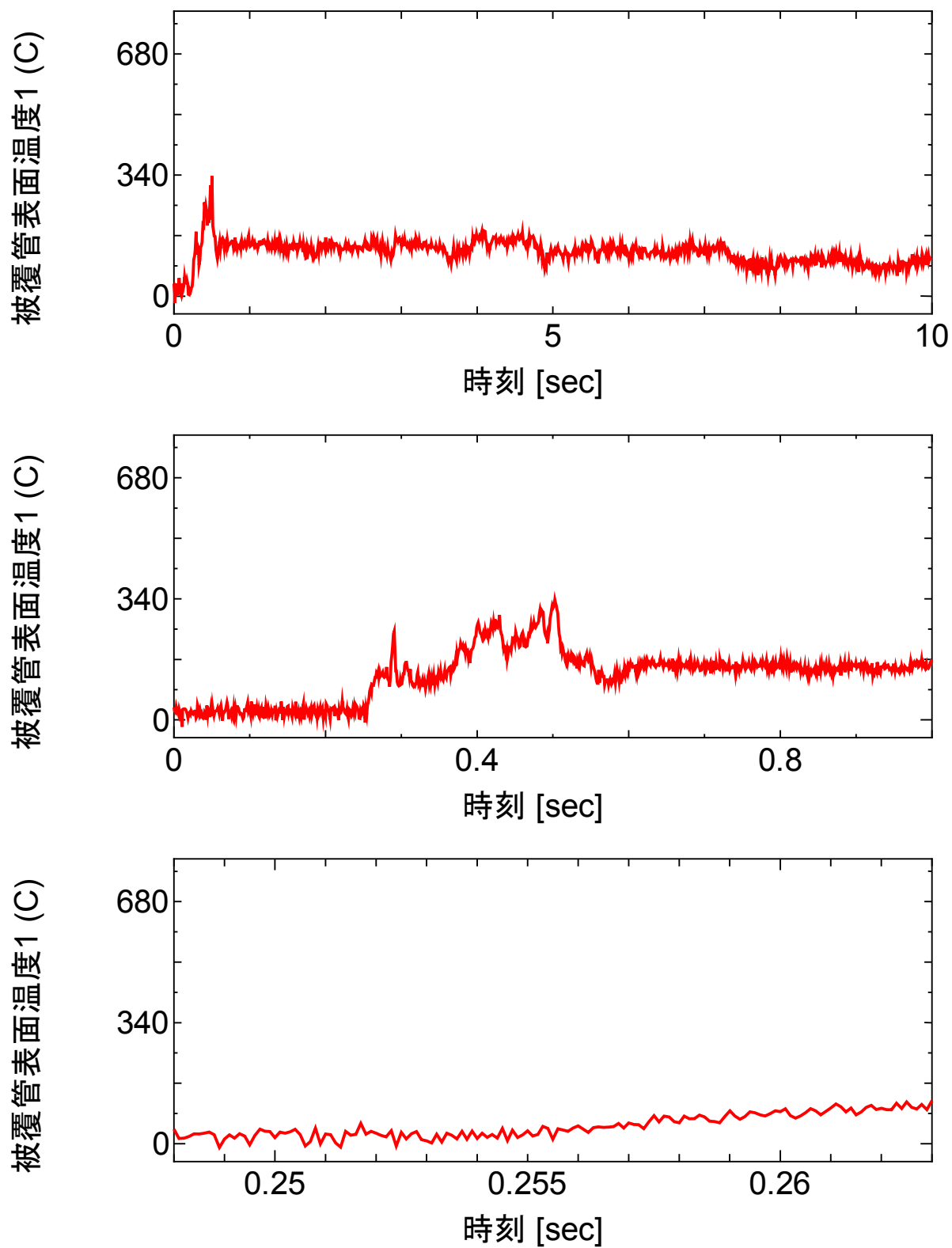


図 4.3.1-6 (12) GR-1 実験における被覆管表面温度履歴 (#1)

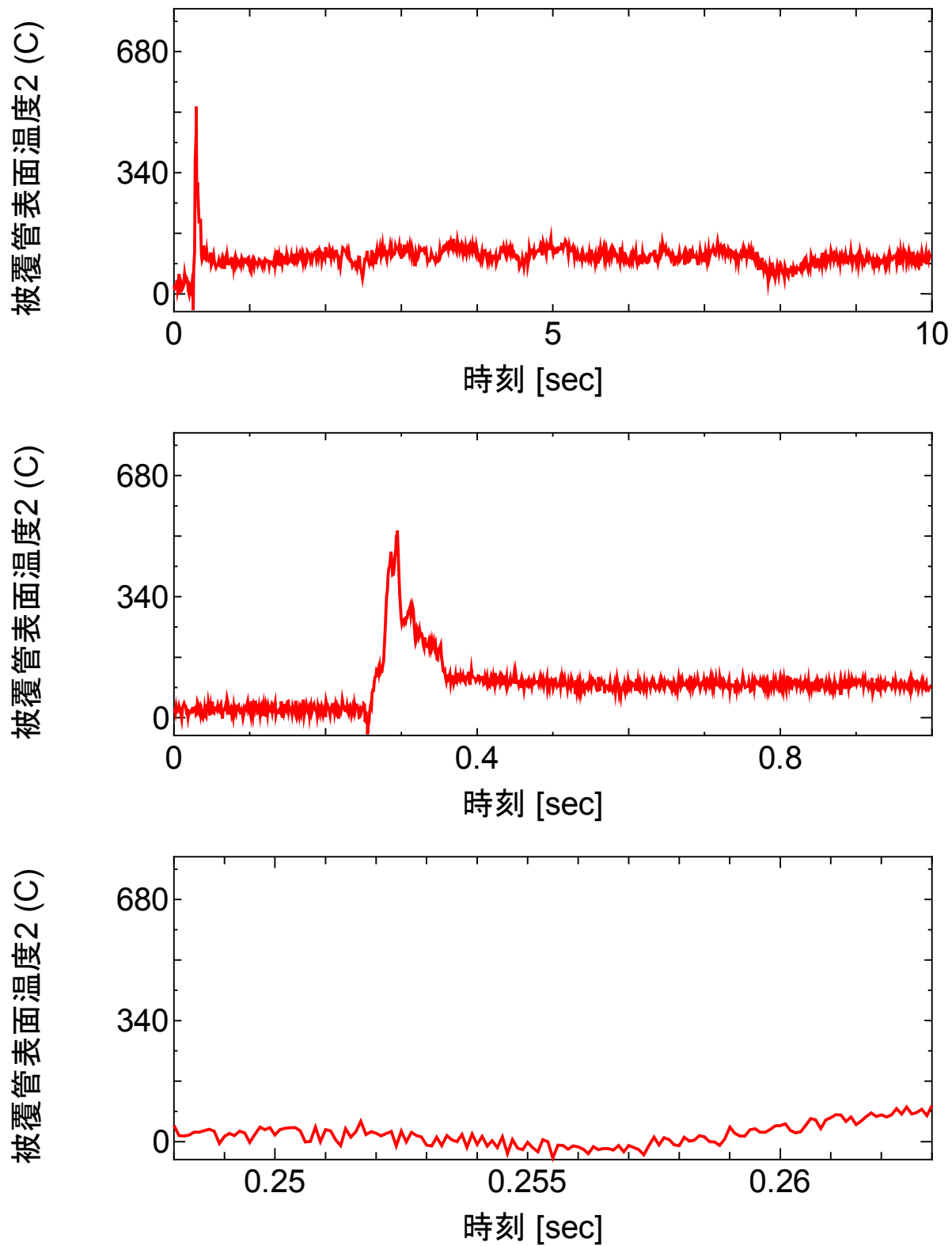
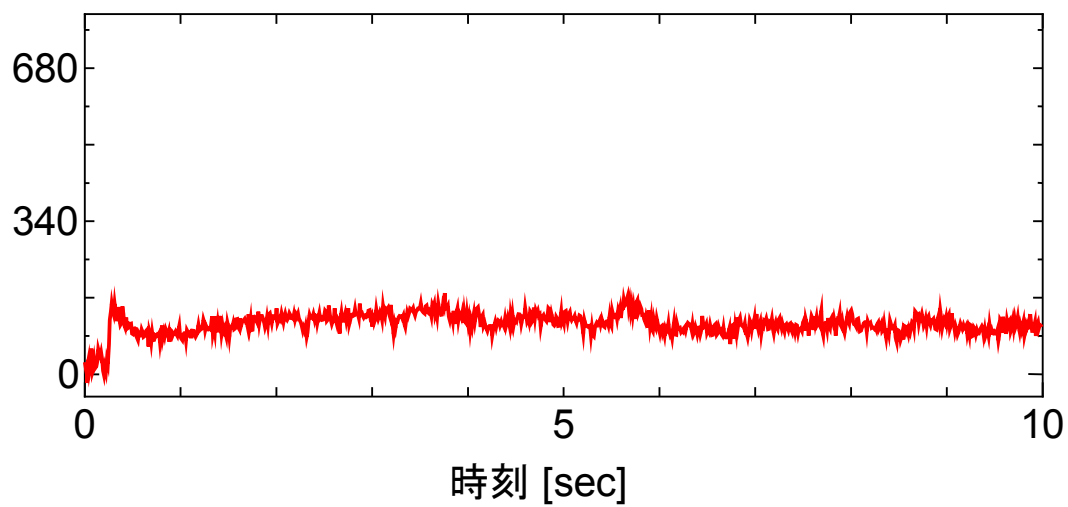
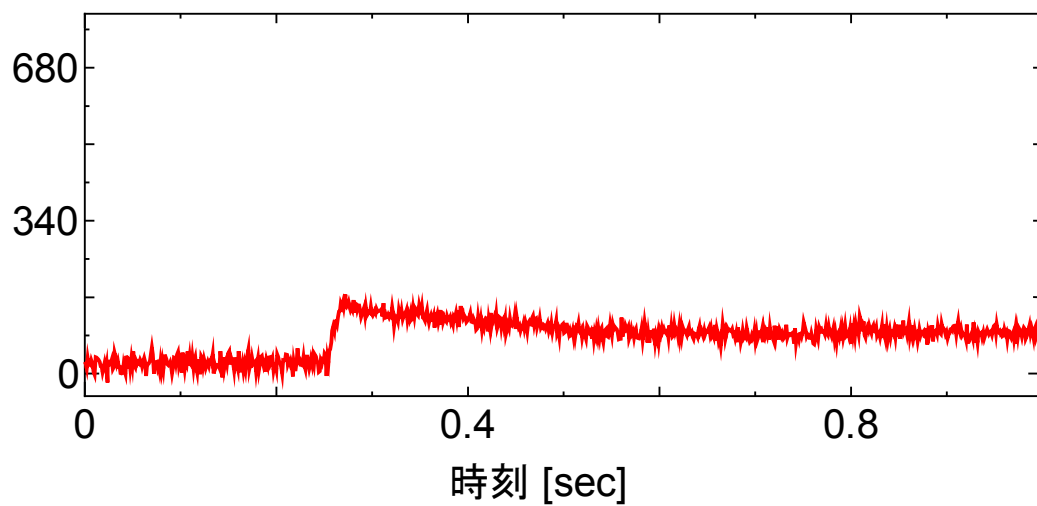


図 4.3.1-6 (13) GR-1 実験における被覆管表面温度履歴 (#2)

被覆管表面温度3 (C)



被覆管表面温度3 (C)



被覆管表面温度3 (C)

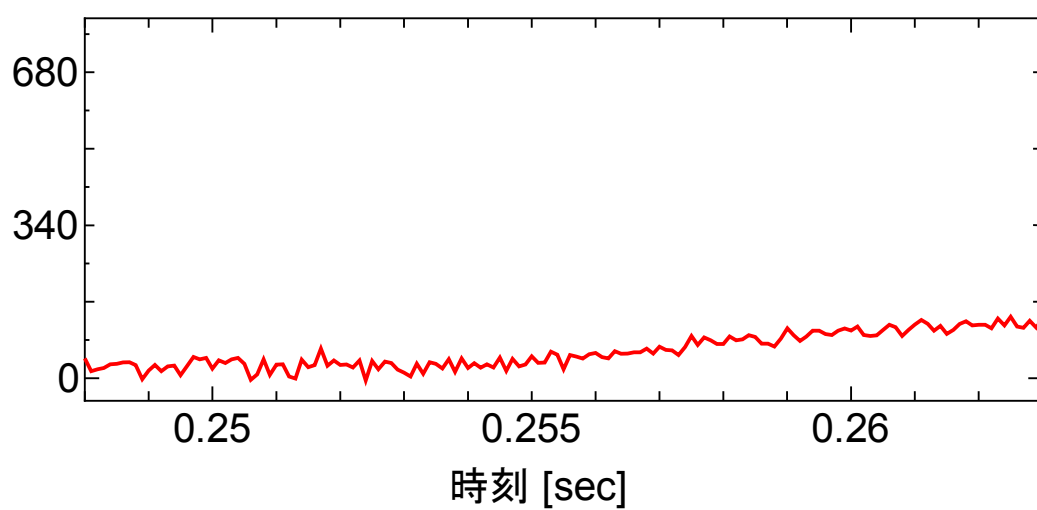


図 4.3.1-6 (14) GR-1 実験における被覆管表面温度履歴 (#3)

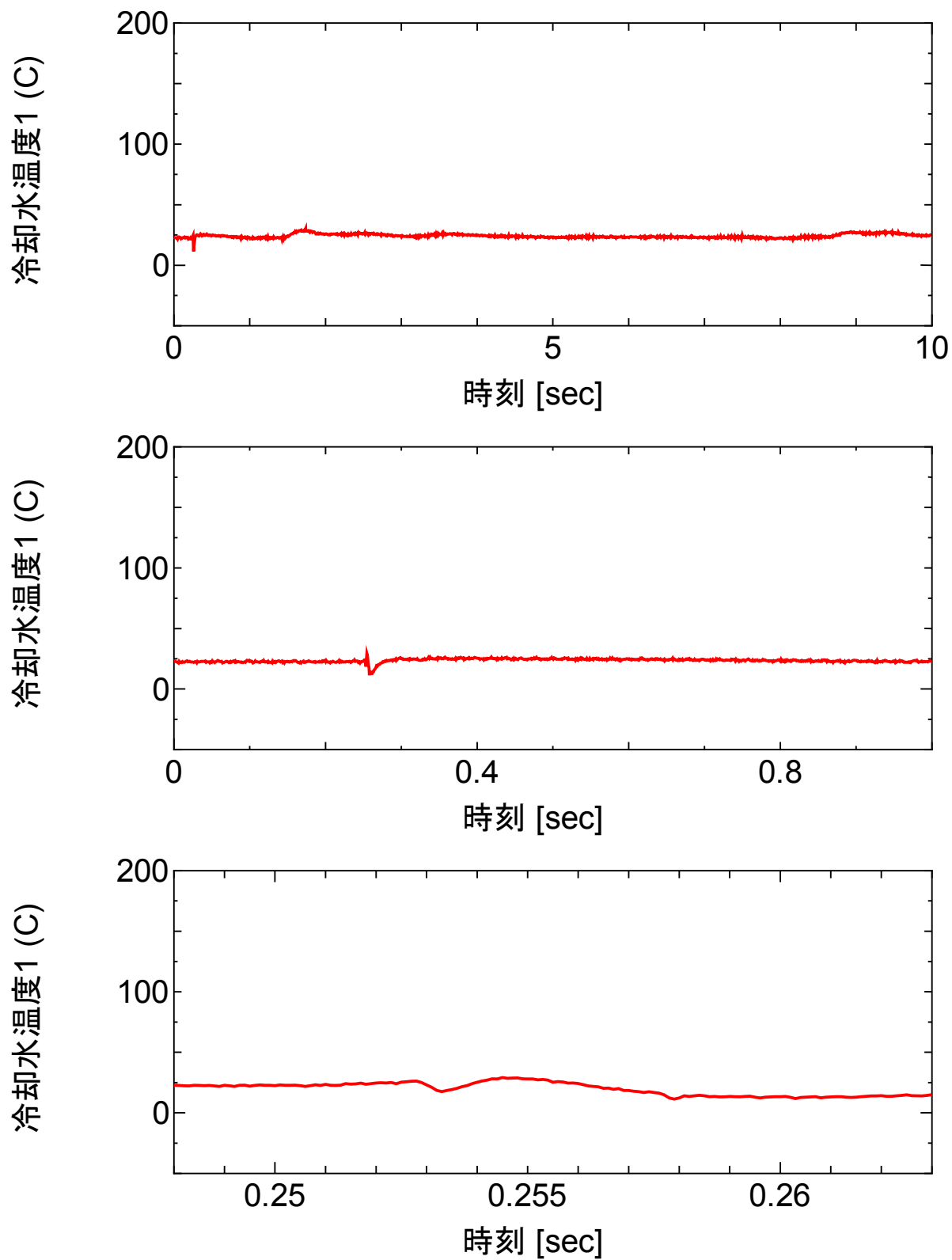


図 4.3.1-6 (15) GR-1 実験における冷却水温履歴 (#1)

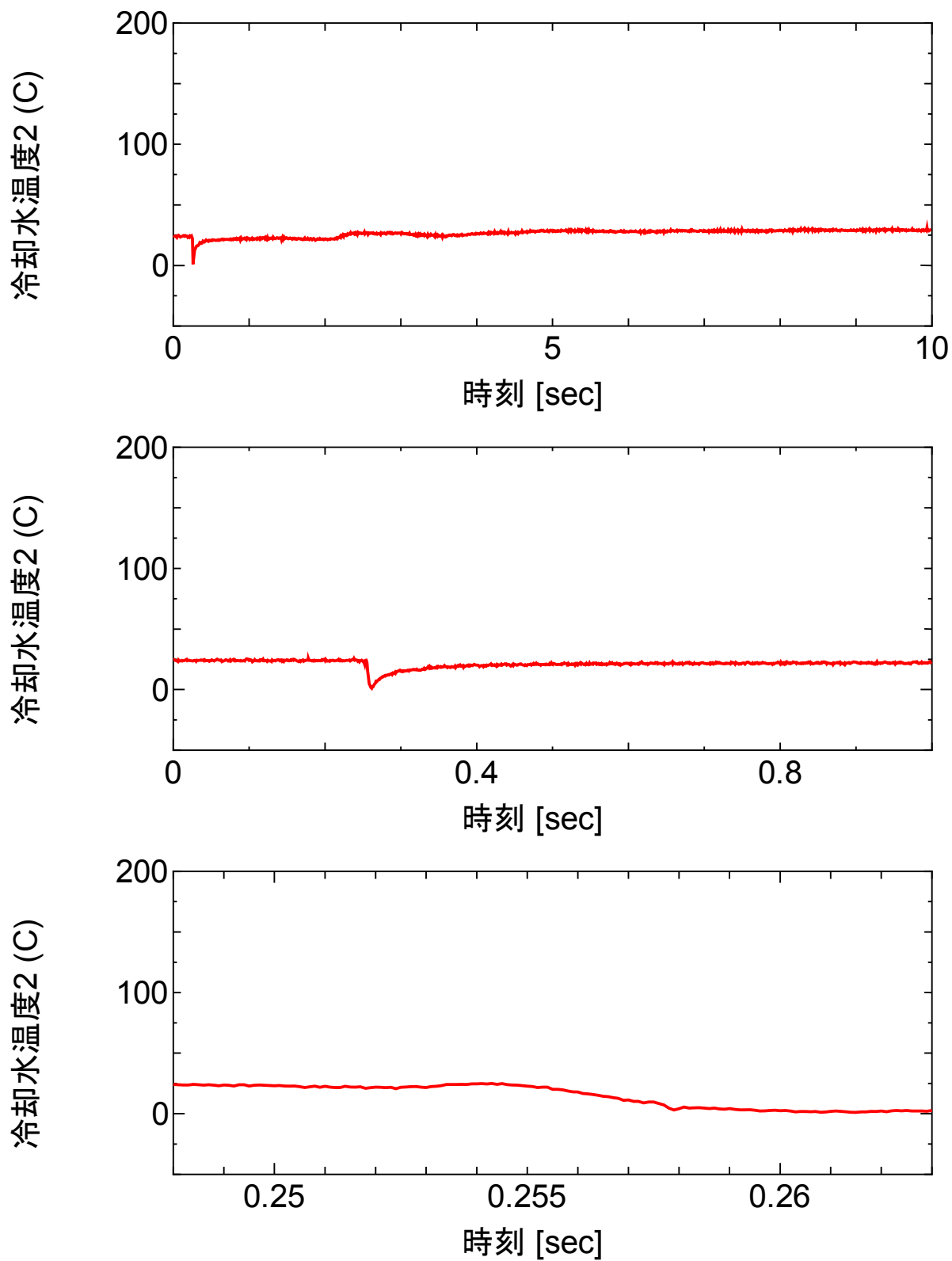


図 4.3.1-6 (16) GR-1 実験における冷却水温履歴 (#2)



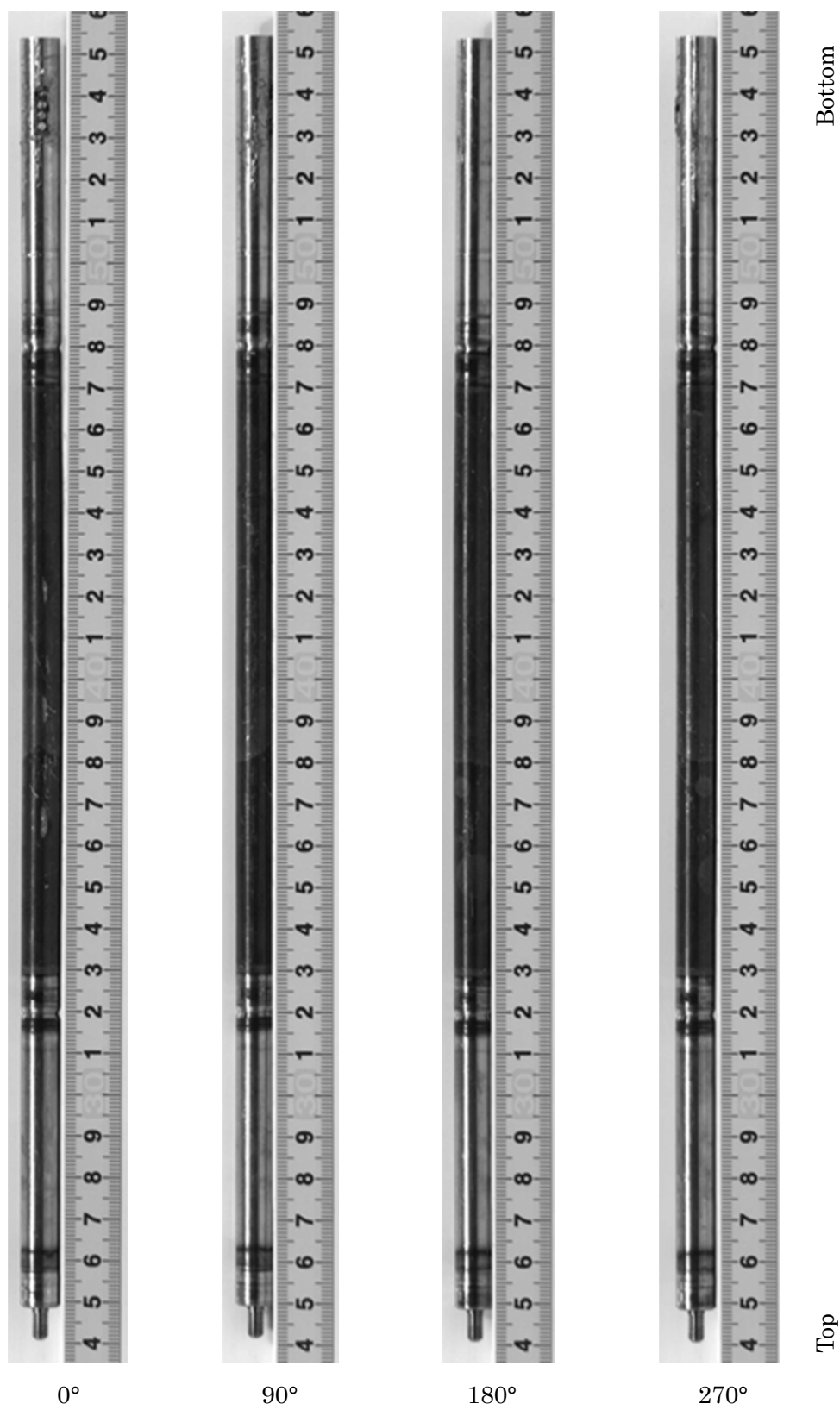


図 4.3.1-7 GR-1 試験燃料棒のパルス照射後外観写真

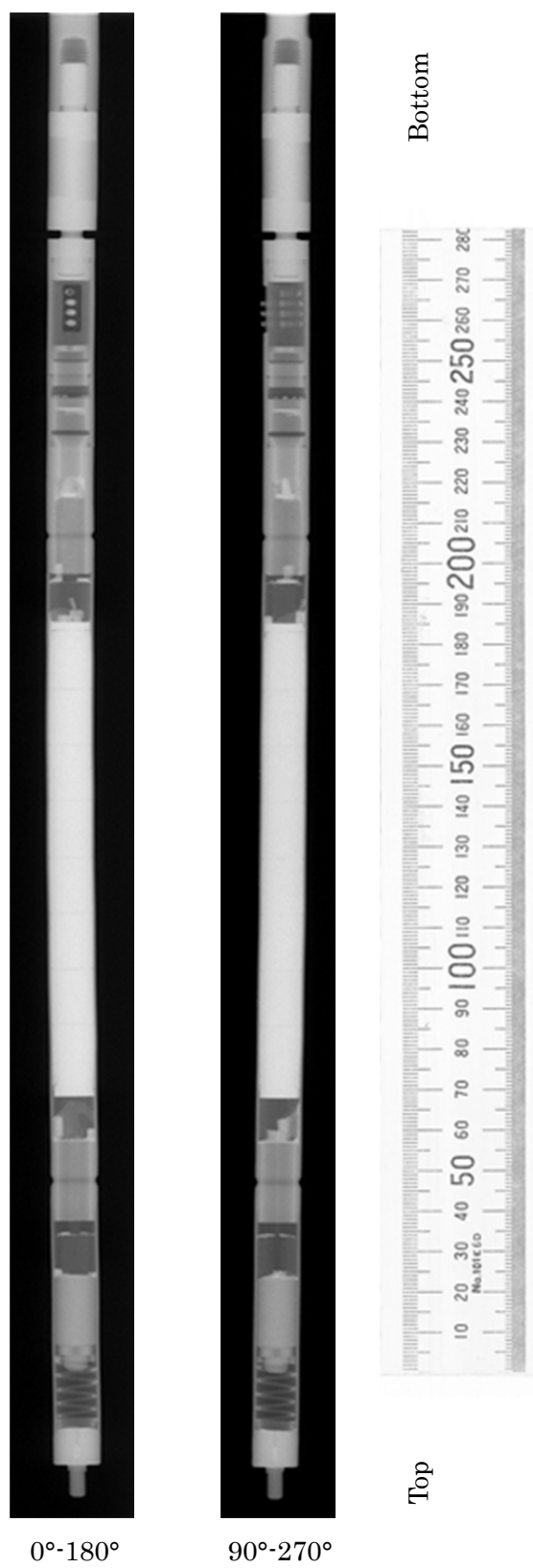


図 4.3.1-8 GR-1 試験燃料棒のパルス照射後 X 線写真

#### 4.3.2 VA-7 実験

VA-7 実験は、高燃焼度 PWR-UO<sub>2</sub> 燃料を対象とした高温実験として平成 26 年 9 月 24 日に実施した。燃料エンタルピ増分のピーク値 481 J/g (115 cal/g) の実験条件に対し、燃料は破損しなかった。

##### (1) 試験燃料棒

試験燃料は、表 4.1-1 に示す AP2-3 燃料セグメント（スペイン・バンデロス 2 PWR 照射、応力除去焼鈍 M-MDA 被覆 UO<sub>2</sub> 燃料）から採取した。

図 4.3.2-1 に燃料セグメントからの採取位置及び上下端栓取付後の燃料棒の構造概略を示す。スタック長はペレット 5 個分で、X 線写真撮影に基づく測定によれば約 49.5 mm であった。ガンマ線強度分布がほぼフラットであることから、試験燃料の平均燃焼度はセグメント燃焼度と同じ約 81 GWd/t と評価した。被覆管水素吸収量は、切出し位置近傍における水素分析結果に基づいて約 318 ppm と評価した。燃料棒内へのガス封入については、室温条件で行われた VA-5 実験と同条件とし、室温で 0.1 MPa の He を封入した。試料採取範囲における被覆管外面酸化膜厚さの平均値は暫定的に 33 μm と評価したが、今後実施する断面の金相観察により補正する予定である。

パルス照射前の試験燃料棒に対して実施した外観観察、X 線写真撮影、寸法測定の結果をそれぞれ図 4.3.2-2 から図 4.3.2-4 に示す。いずれの結果においても、パルス照射実験において問題となり得る傷、欠陥、扁平化、曲がりなどは見られなかった。

##### (2) 実験条件および計装

パルス照射実験の条件を以下に示す。

実験カプセル：	B-I 型（高温・高圧用）
パルス照射時冷却水条件：	281°C、6.7 MPa の静止水
投入反応度：	\$4.53
燃料エンタルピ初期値（基準温度 20°C）：	70 J/g (17 cal/g)
燃料エンタルピ増分ピーク値：	482 J/g (115 cal/g)

計装項目を以下に示す。また、図 4.3.2-5 に計装取付けの概要を示す。

カプセル内圧計 2 箇所（気相：#1, 液相：#2）
カプセル内熱電対 4 箇所（気相：#1, 液相：#2, #3, #4）
被覆管表面熱電対 1 箇所
AE センサ（燃料破損検出用）

##### (3) 冷却水昇温条件

パルス照射に先立ち、カプセル内の冷却水を電気ヒータにより昇温した。図 4.3.2-6 (1) 及び(2)に昇温中の温度及び圧力の履歴をそれぞれ示す。電気ヒータの通電はパルス照射時刻の約 3.3 時間前に開始し、通電開始から約 2 時間後に冷却水温度は目標温度に到達した。その後、電気ヒータ出力を制御して目標温度を約 1.2 時間維持した。

#### (a) カプセル内温度の履歴

昇温過程におけるカプセル内温度は位置及び液相／気相間で若干異なり、気相部は液相よりも温度が低い傾向、液相部ではカプセル下部（カプセル内温度#4）で温度が低い傾向が見られた。また、液相部では、カプセル内温度#3 が#2 に比べ僅かに高い状態で推移した。

なお、昇温開始時の水位はカプセル内熱電対#2 位置よりも下だが、冷却水の熱膨張により、最終的な水位は、図 4.3.2-5 に示すようにカプセル内熱電対#1 位置と#2 位置の間となる。

#### (b) カプセル内圧力の履歴

カプセル内の気相部と液相部において圧力を計測した。液相部圧力#2 は常に気相部圧力#1 よりも高い値となったが、冷却水温度に対応する飽和圧力との比較から、気相部圧力#1 が正確と判断した。

#### (c) パルス照射直前の冷却水状態

図 4.3.2-7 (1)に、カプセル内の気相部圧力#1 及び気相部温度#1 に対応する飽和圧力の履歴をパルス照射直前の 50 秒間について示す。電気ヒータの通電をパルス照射の約 90 秒前に停止した後、カプセル内の温度は約 1~2°C/分の割合で低下し、それに伴い圧力も低下した。気相部圧力#1 と、気相部温度#1 に対応する飽和圧力との間には約 0.4 MPa の差があるが、ここに、カプセルに冷却水とともに封入された空気の分圧と飽和圧力の和とを比較すると気相部圧力#1 は 0.1 MPa 低い関係となる。同様に、図 4.3.2-7 (2)では、カプセル内の液相部温度#2、#3 及び#4 のそれぞれに対応する飽和圧力を気相部圧力#1 と比較した。液相部温度#2 及び#3 に対する飽和圧力が気相部圧力#1 より 0.2 から 0.3MPa 程度高い。以上からカプセル内圧力は約 6.7 MPa と評価した。熱電対#2 及び#3 の位置はほぼ飽和状態にあると解釈される。一方、燃料棒下端部の熱電対#4 の位置については、14~18°C程度サブクールされた状態であると解釈される。

#### (4) パルス照射時の過渡計測記録

2 台の中性子検出器で測定した NSRR の炉出力履歴を図 4.3.2-8 (1)及び(2)、積分出力履歴を図 4.3.2-8 (3)及び(4)に示す。また、前節で示した計測項目に関する過渡記録を図 4.3.2-8 (5)から(12)に示す。時刻 0 から 10 秒まで、0 から 1 秒まで及び 0.252 から 0.267

秒までの3区間について示す。過去に実施したNSRR実験より、歪みゲージを使用したセンサ(圧力計等)や熱電対の出力にはNSRR出力の履歴によく似た波形のノイズや、パルス照射以後も継続するドリフトが発生し得ることが判明している。このノイズ及びドリフトの要因は、出力にほぼ比例した強度で発生するガンマ線が歪みゲージ素子や熱電対素子の電気的特性に与える影響、ガンマ発熱による素子自身の温度上昇による特性変化などと理解されるが、精度良く補正することは困難であるため本報告においては得られた過渡計測結果をそのまま示す。

#### (a) NSRR 出力・積分出力

図 4.3.2-8 (1), (2)及び(3), (4)に NSRR 出力履歴及び積分出力履歴をそれぞれ示す。いずれについても、中性子検出器#1 と#2 の平均値で評価を行った。NSRR 出力は時刻 0.2585 秒においてピーク値約 19.8 GW に達し、半値幅は約 4.4 ms であった。なお、NSRR の計測システムは積分演算を 1 秒までしか行わないため、時刻 1 秒以降の積分出力は一定値として記録される(破線部)。炉物理計算による評価によれば、本実験における積分出力は時刻無限大で 116.8 MJ に達した。

#### (b) カプセル内圧

図 4.3.2-8 (5)及び(6)に、それぞれカプセルの気相部及び液相部で計測した圧力の履歴を示す。気相部圧力(#1)では時刻 0.25 秒付近から圧力上昇が見られるが、これは燃料棒表面での沸騰により蒸気が発生したためと解釈され、高温条件下で行われた従来の NSRR 実験でも同様の傾向が得られている。液相部では時刻 0.255 から 0.265 秒に掛けて急激な圧力の上昇が見られ、0.257 秒程度で計測限界値を超えカットされている。この波形から NSRR 出力パルスに同期したノイズと考えられ、今回の計測では、カプセル内液相部圧力の評価に有効な情報を取得することができなかった。

#### (c) AE センサ出力

図 4.3.2-8 (7)に AE センサの出力信号を示す。このセンサはカプセル構造材を伝わる音響波を計測するものであり、燃料破損の検出を目的として設置した。信号の振幅は 0.255 秒以降増大し、0.259 秒にピークを示したが、実際には燃料の破損は生じなかったことから、AE センサ出力信号の振幅増大は、PCMI 発生に伴う燃料ペレットと被覆管の摩擦等の機械的な振動が検出されたものと解釈できる。なお高温条件下で行われた過去の NSRR 実験の内、燃料が破損した VA-3 実験でも類似の出力波形が得られており、信号の振幅(V)のピーク値についても同程度であった。

#### (d) カプセル内温度

図 4.3.2-8 (8)~(11)に、それぞれ、カプセル内温度#1~#4 の履歴を示す。このうち、#1

が気相部、その他は液相部である。パルス照射開始時刻（約 0.26 秒）付近で温度が急上昇しているのはガンマ発熱による熱電対自身の温度上昇によるものである。冷却水への熱の散逸により温度指示値は一旦低下するが、燃料の発熱による本来の冷却水温度上昇に伴い再び上昇した。

カプセル内温度#3 及び#4 の履歴においては、0.255 から 0.26 秒にかけて、短時間だけ僅かに温度が低下している。波形の比較から、他の計装と同様に NSRR パルス出力に同期したノイズである可能性がある。またパルス照射時のガンマ発熱による冷接点部分の温度上昇が熱電対側の温度上昇を上回った場合にも、見かけ上の温度低下が生じ得ることから、これらノイズと冷接点の温度上昇の影響が複合して計測値のゆらぎをもたらしたものと解釈される。

#### (e) 被覆管表面温度

図 4.3.2-8 (12)に被覆管表面温度履歴を示す。被覆管表面では膜沸騰への遷移 (DNB) が生じ、表面温度は約 680°Cに達した。また、膜沸騰は約 0.6 秒間続いた。0.259 秒に極めて短時間の温度上昇が見られるが、線出力のピーク時刻と一致していること、積分出力がピークに達する前の間欠的な増減であること、0.259 秒以降の温度挙動は過去の高温実験で観察された沸騰遷移発生時の温度履歴と類似していることなどを考慮すると、この時刻において被覆管表面温度の瞬間的な上昇と下降が生じたとは考えにくく、発熱に伴う燃料棒及び燃料棒に溶接された熱電対素線の機械的な振動の結果生じたノイズであると解釈される。

#### (5) パルス照射後試験

実験後の燃料棒に対して以下の試験を実施した。

##### (a) 燃料棒外観観察

図 4.3.2-9 に、パルス照射後の燃料棒の外観を示す。燃料の破損は生じておらず、また被覆管表面熱電対が正常に付いた状態であることを確認した。パルス前 (図 4.3.2-2) と比較すると、燃料棒に膨れが生じていることがわかる。

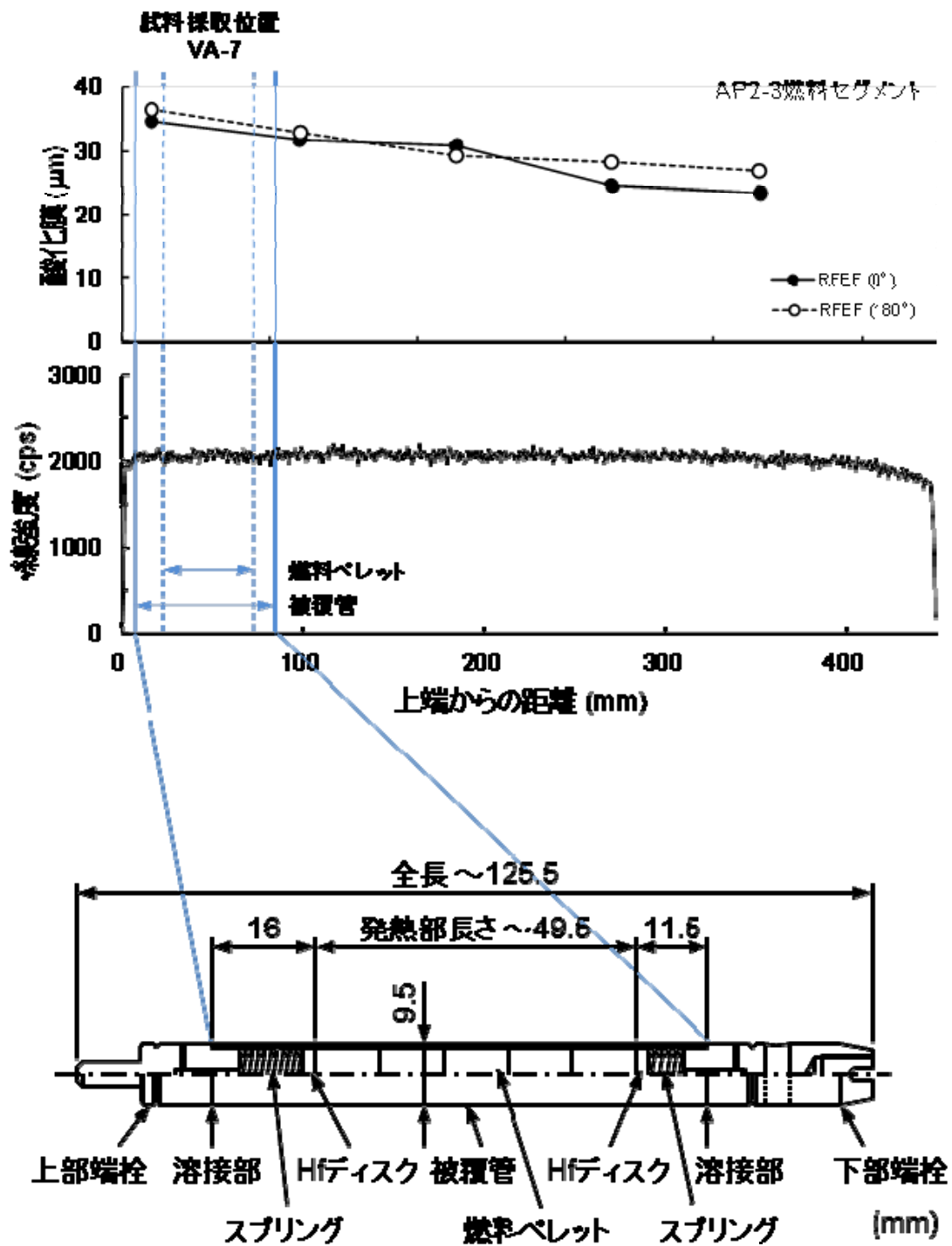


図 4.3.2-1 VA-7 試験燃料棒の構造概略

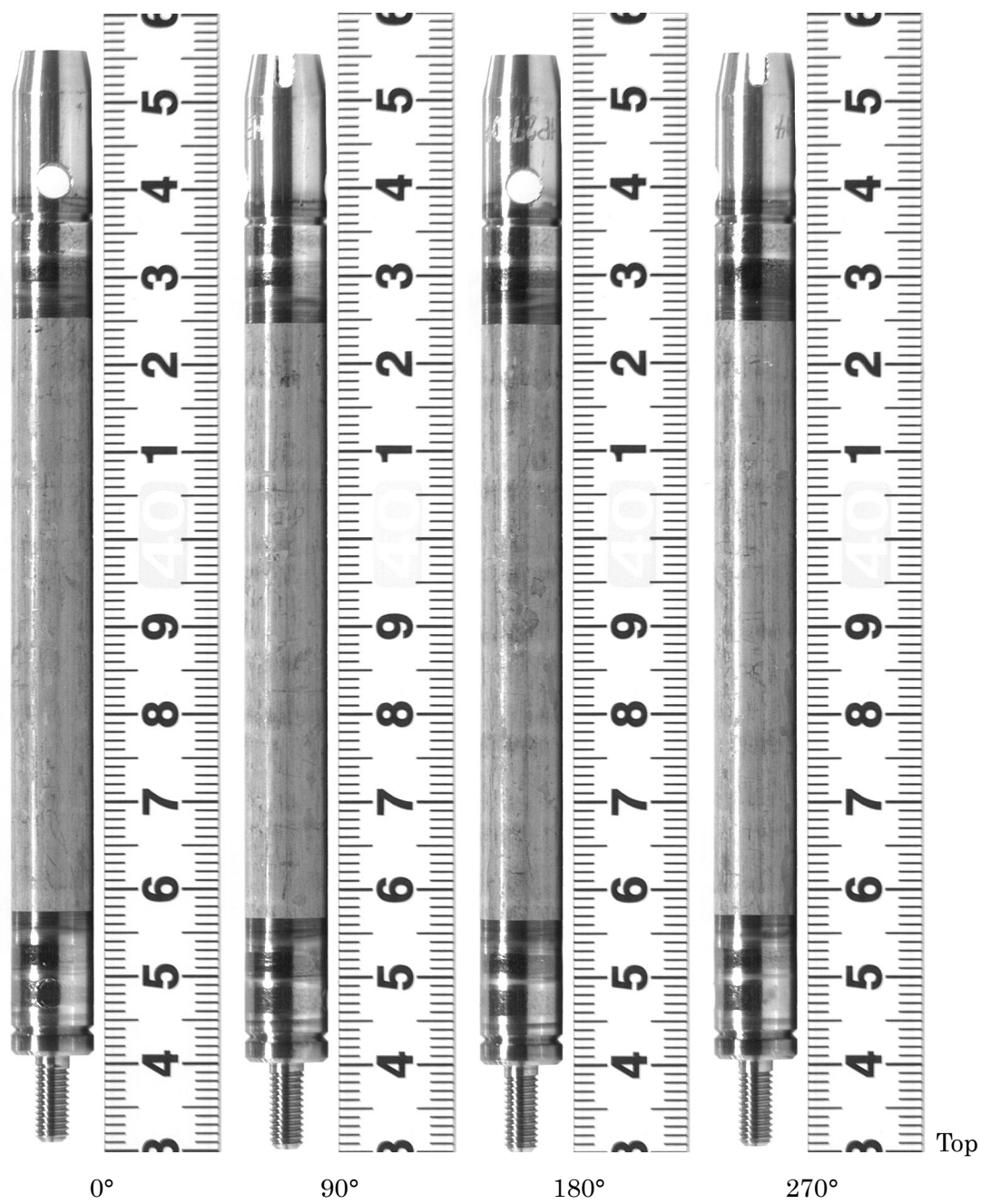


図 4.3.2-2 VA-7 試験燃料棒のパルス照射前外観写真



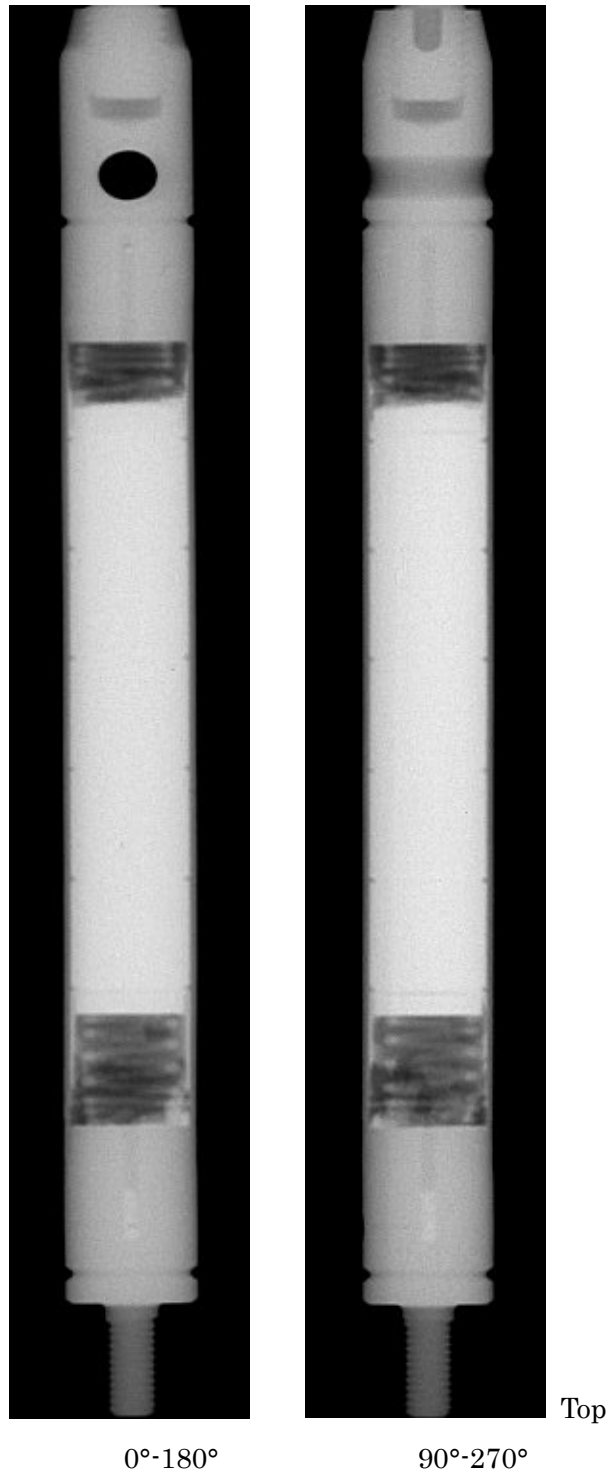


図 4.3.2-3 VA-7 試験燃料棒のパルス照射前 X 線写真

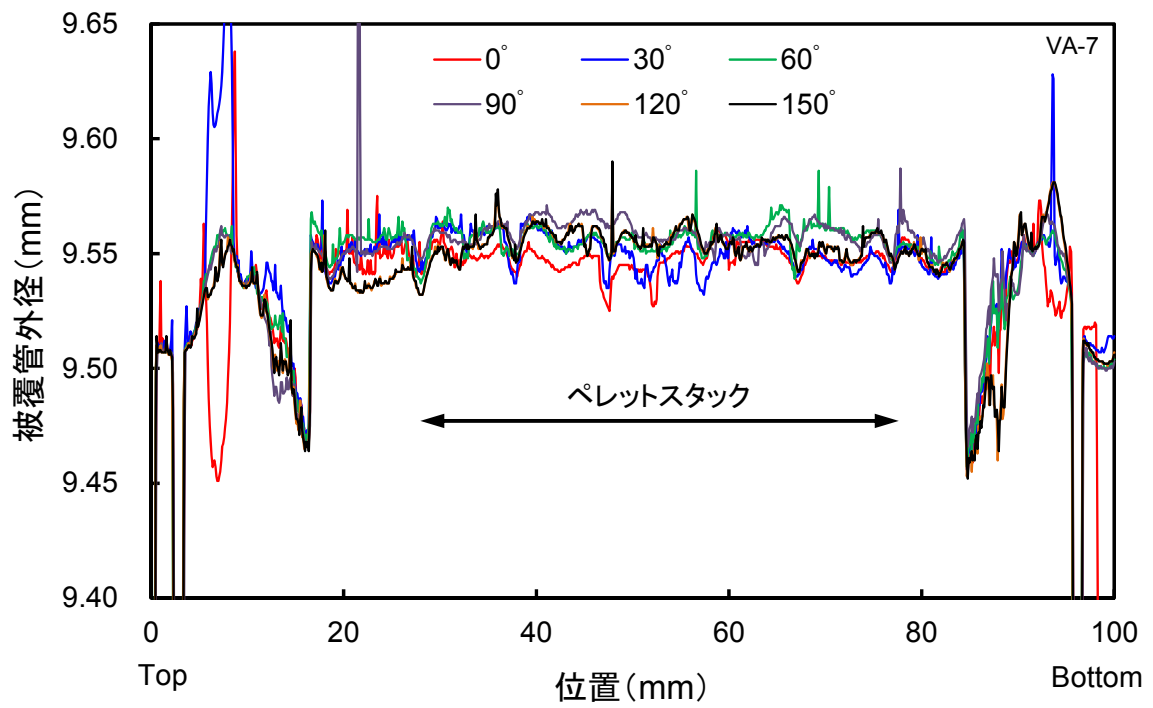


図 4.3.2-4 VA-7 試験燃料棒のパルス照射前寸法測定結果

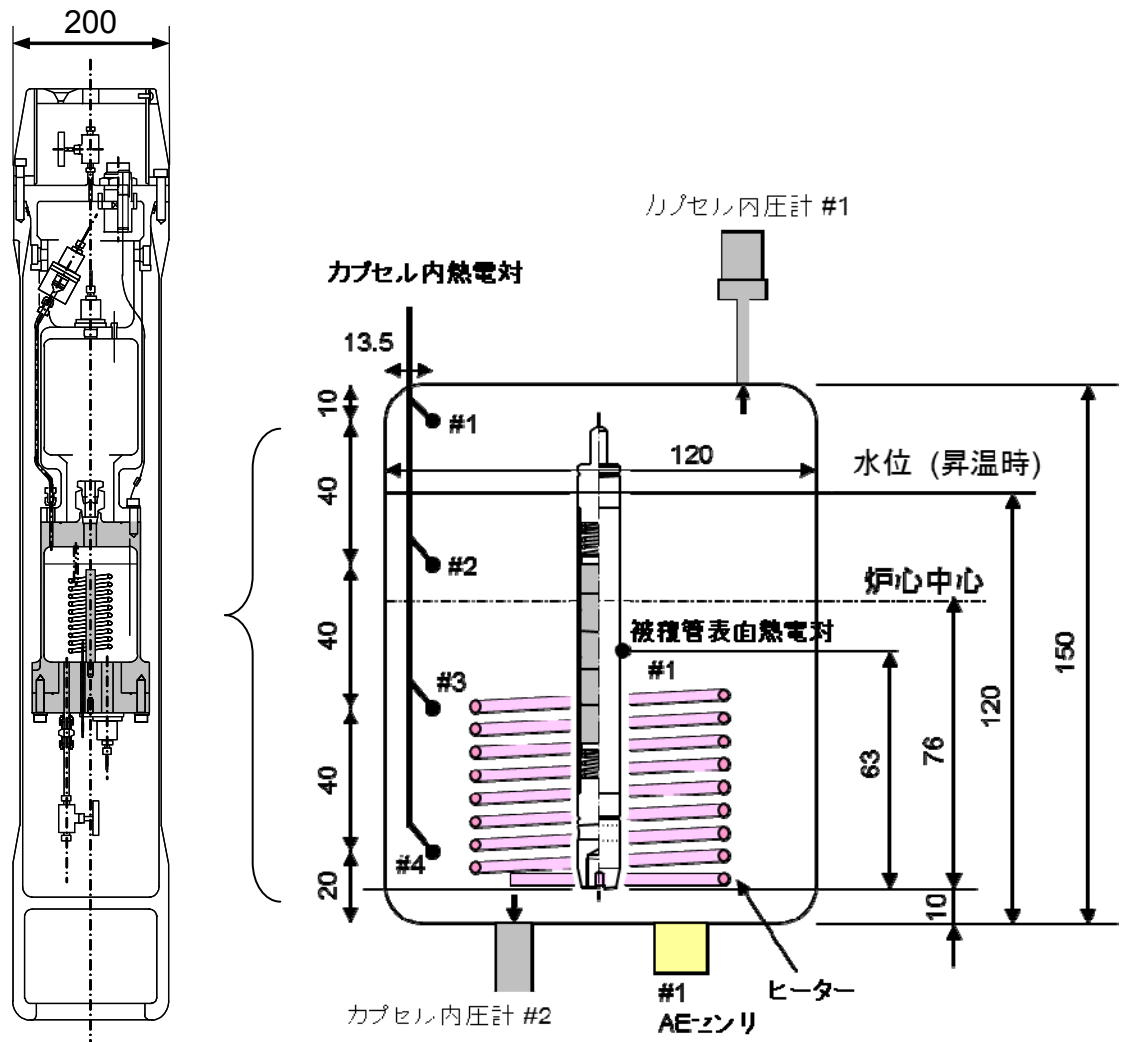
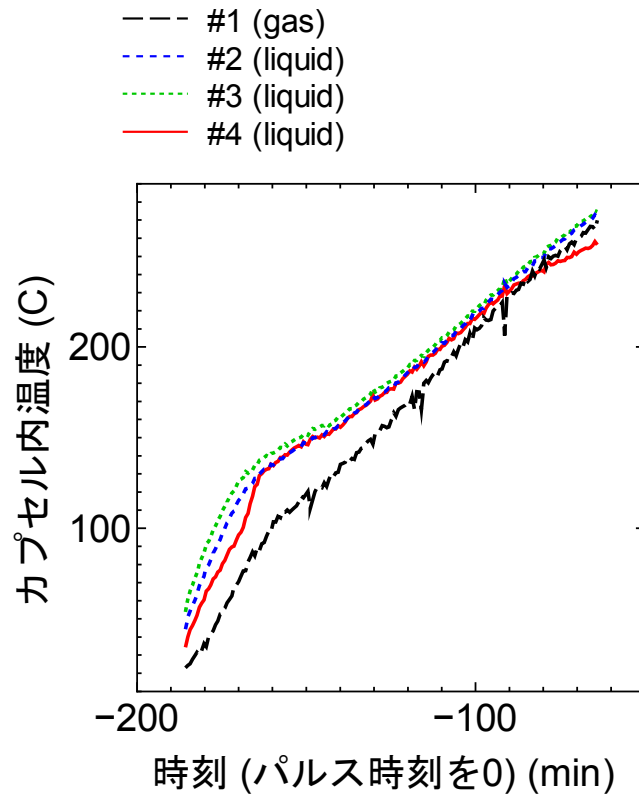
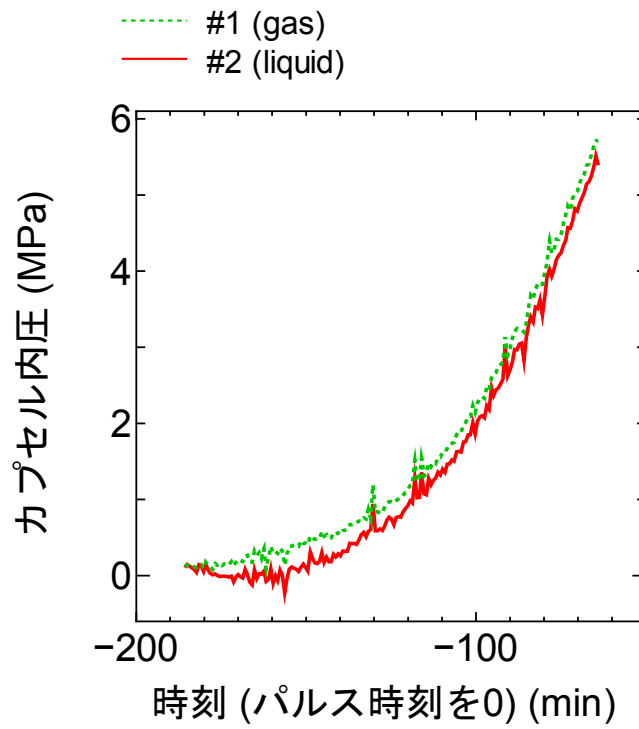


図 4.3.2-5 VA-7 実験における計装取付けの概要



(1) カプセル内温度履歴



(2) カプセル内圧力履歴

図 4.3.2-6 VA-7 昇温過程におけるカプセル内温度及び圧力の履歴

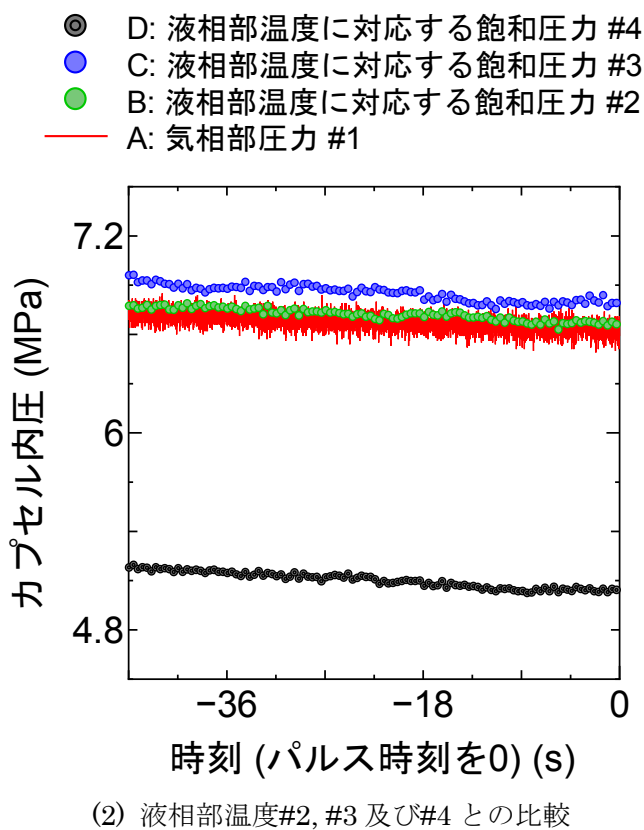
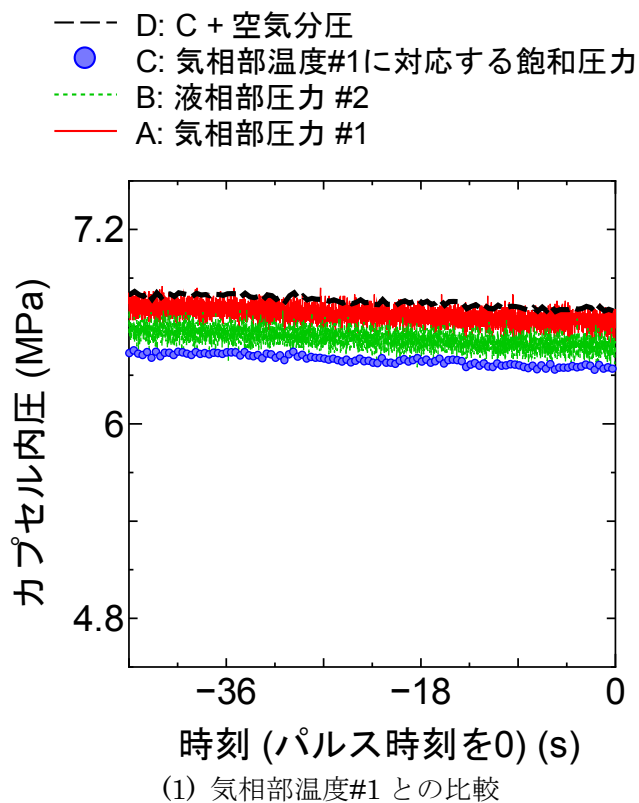


図 4.3.2-7 VA-7 パルス照射実験前のカプセル内温度と圧力の関係

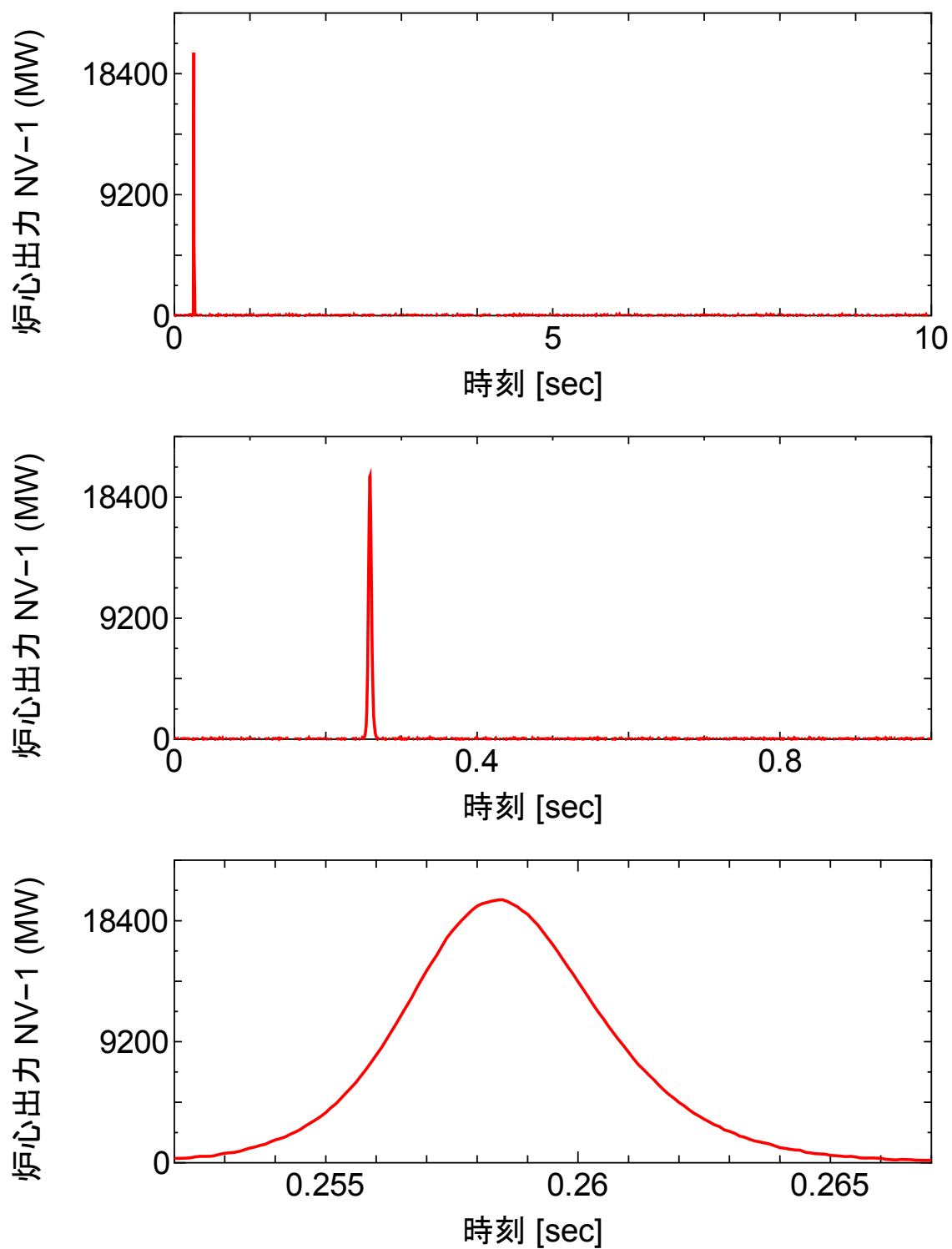


図 4.3.2-8 (1) VA-7 実験における原子炉出力履歴 (#1)

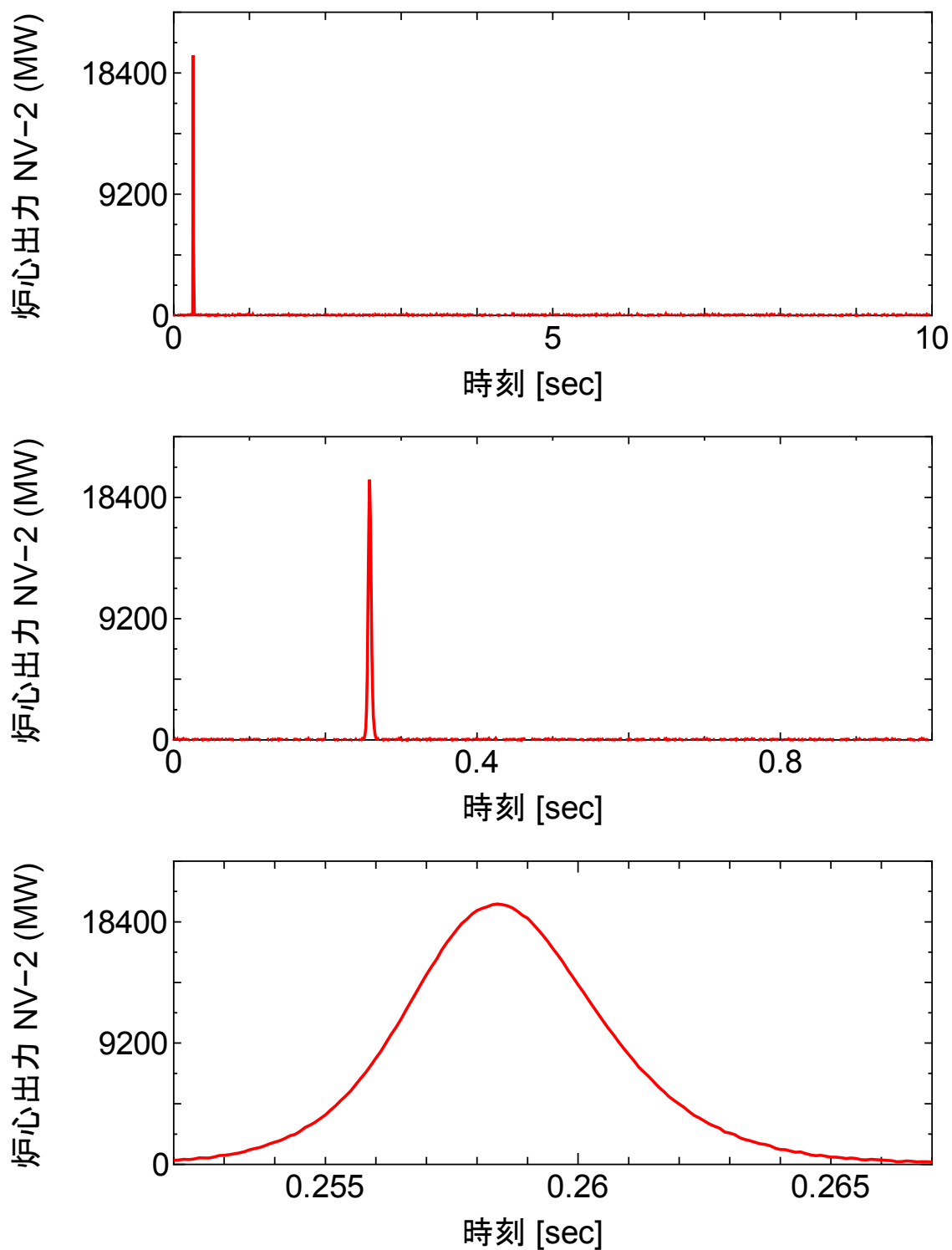


図 4.3.2-8 (2) VA-7 実験における原子炉出力履歴 (#2)

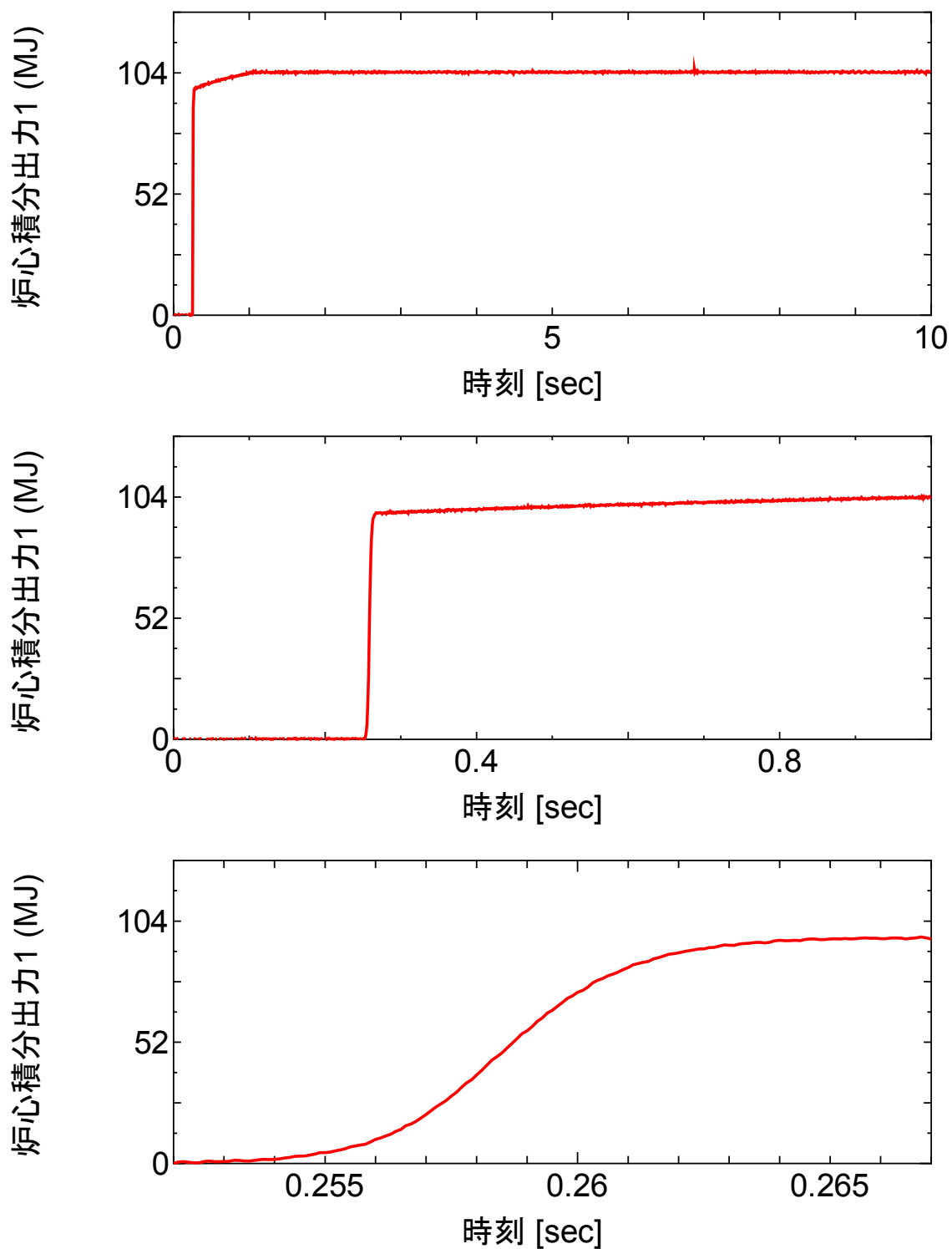


図 4.3.2-8 (3) VA-7 実験における原子炉積分出力 (#1)



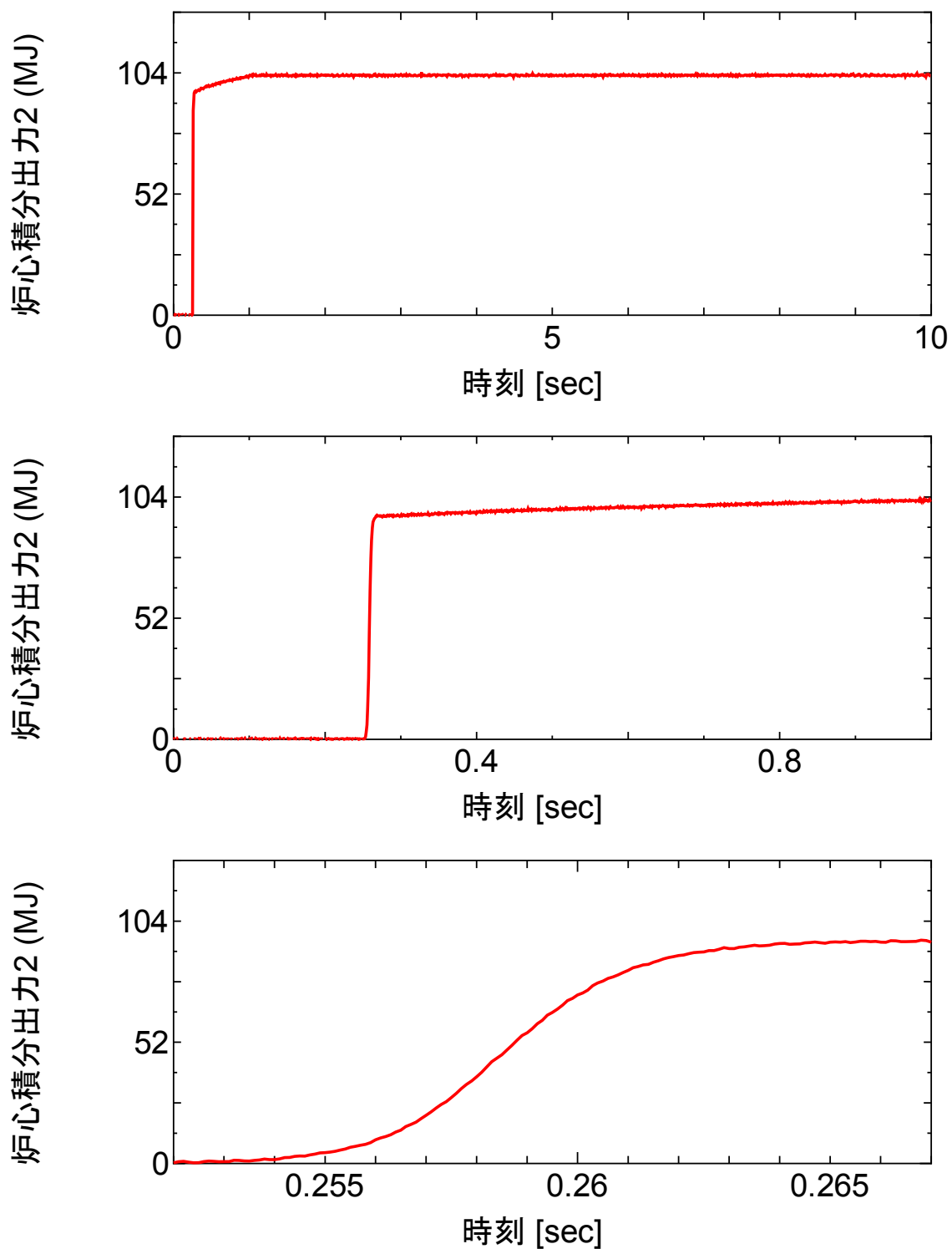


図 4.3.2-8 (4) VA-7 実験における原子炉積分出力 (#2)

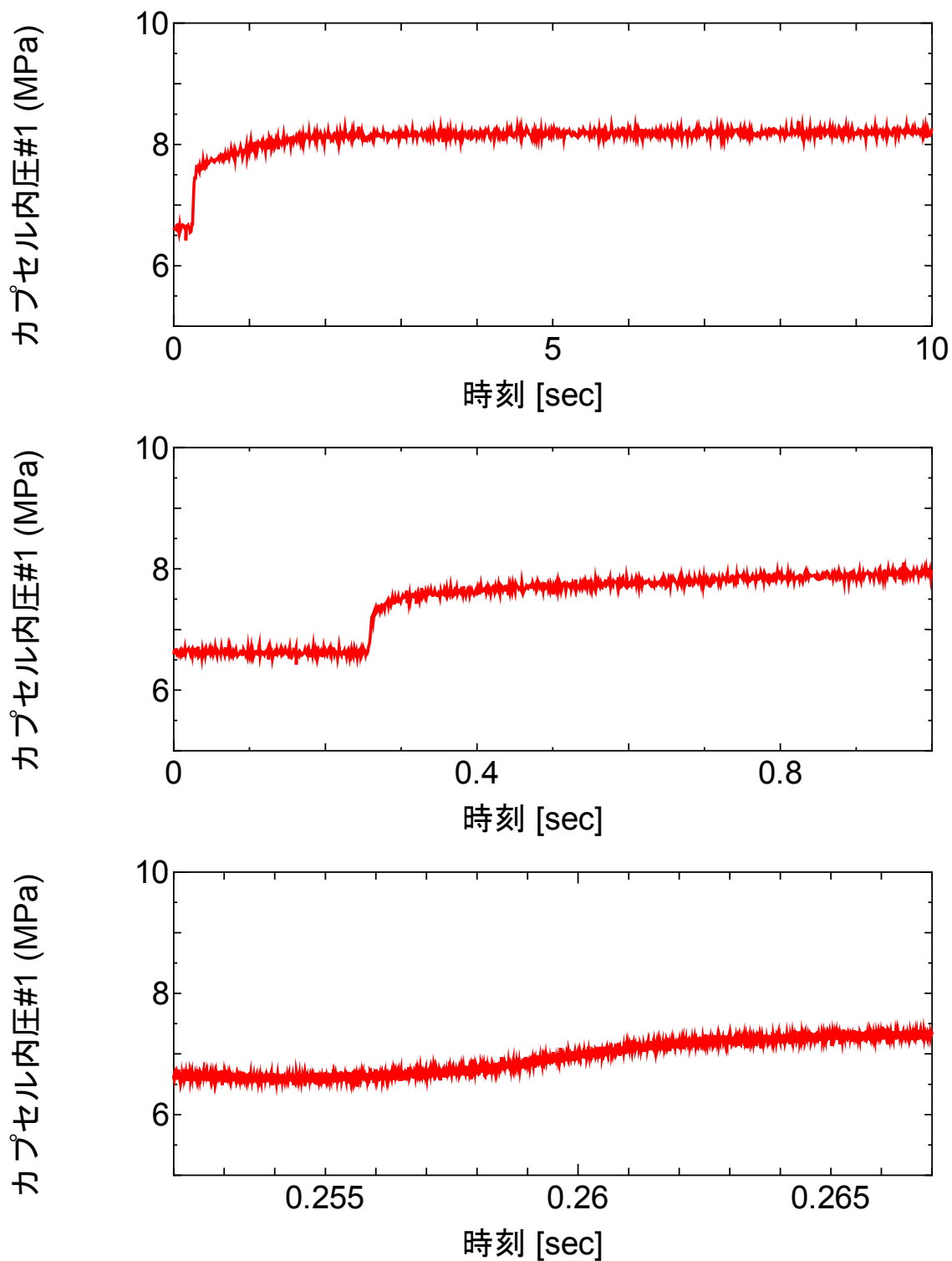


図 4.3.2-8 (5) VA-7 実験におけるカプセル内気相圧力履歴

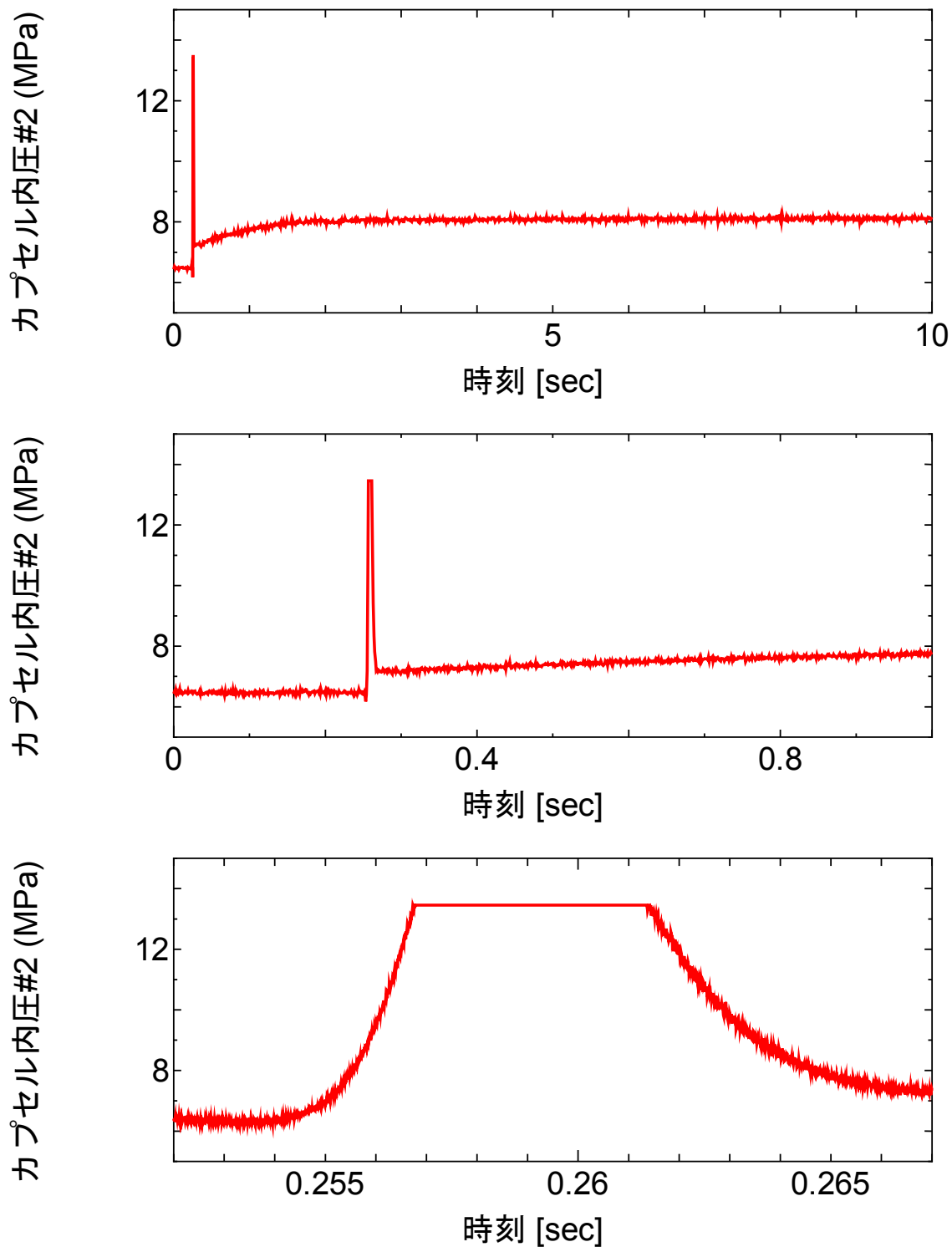


図 4.3.2-8 (6) VA-7 実験におけるカプセル内液相圧力履歴

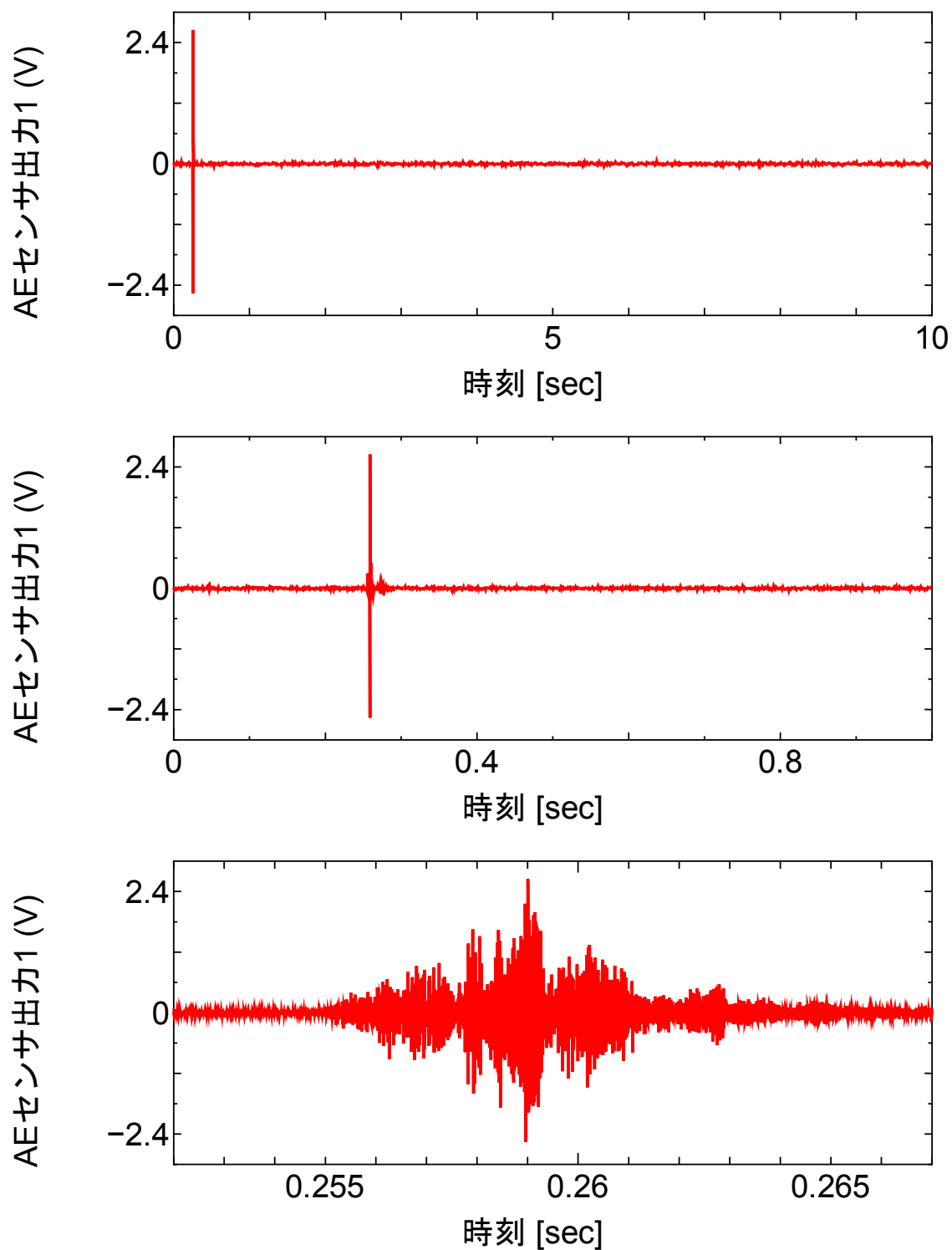


図 4.3.2-8 (7) VA-7 実験における AE センサ出力履歴

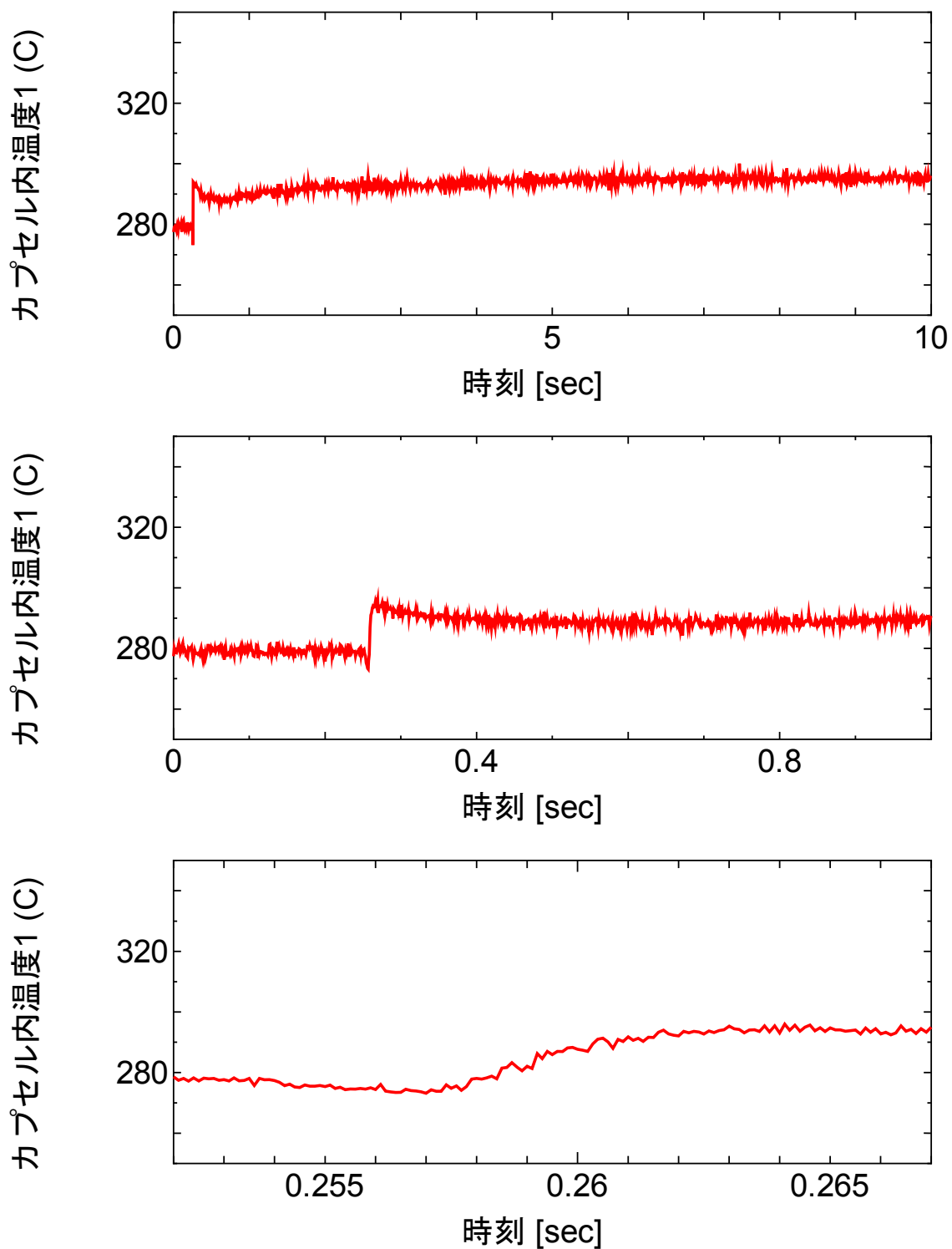


図 4.3.2-8 (8) VA-7 実験におけるカプセル内温度履歴(#1)

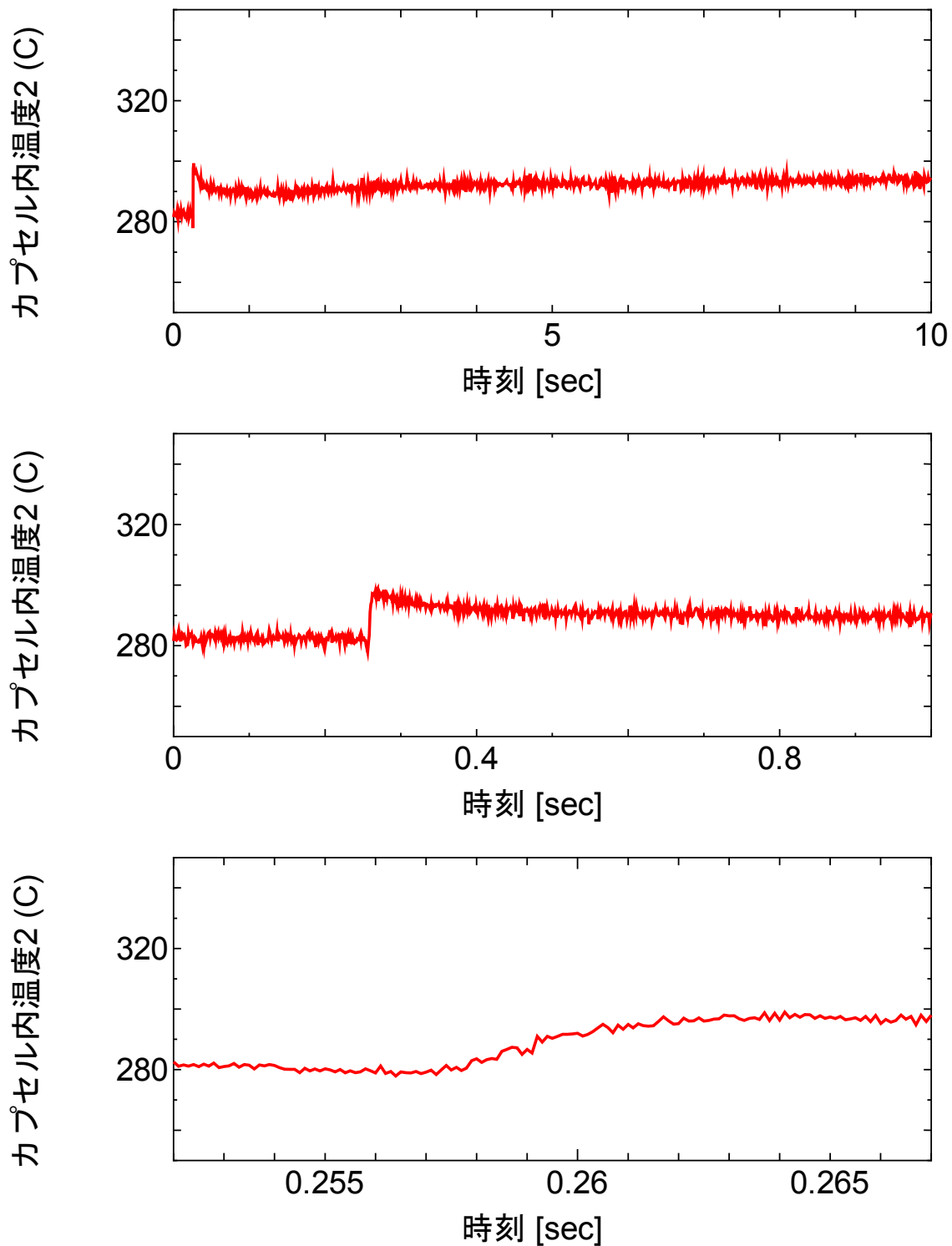


図 4.3.2-8 (9) VA-7 実験におけるカプセル内温度履歴(#2)

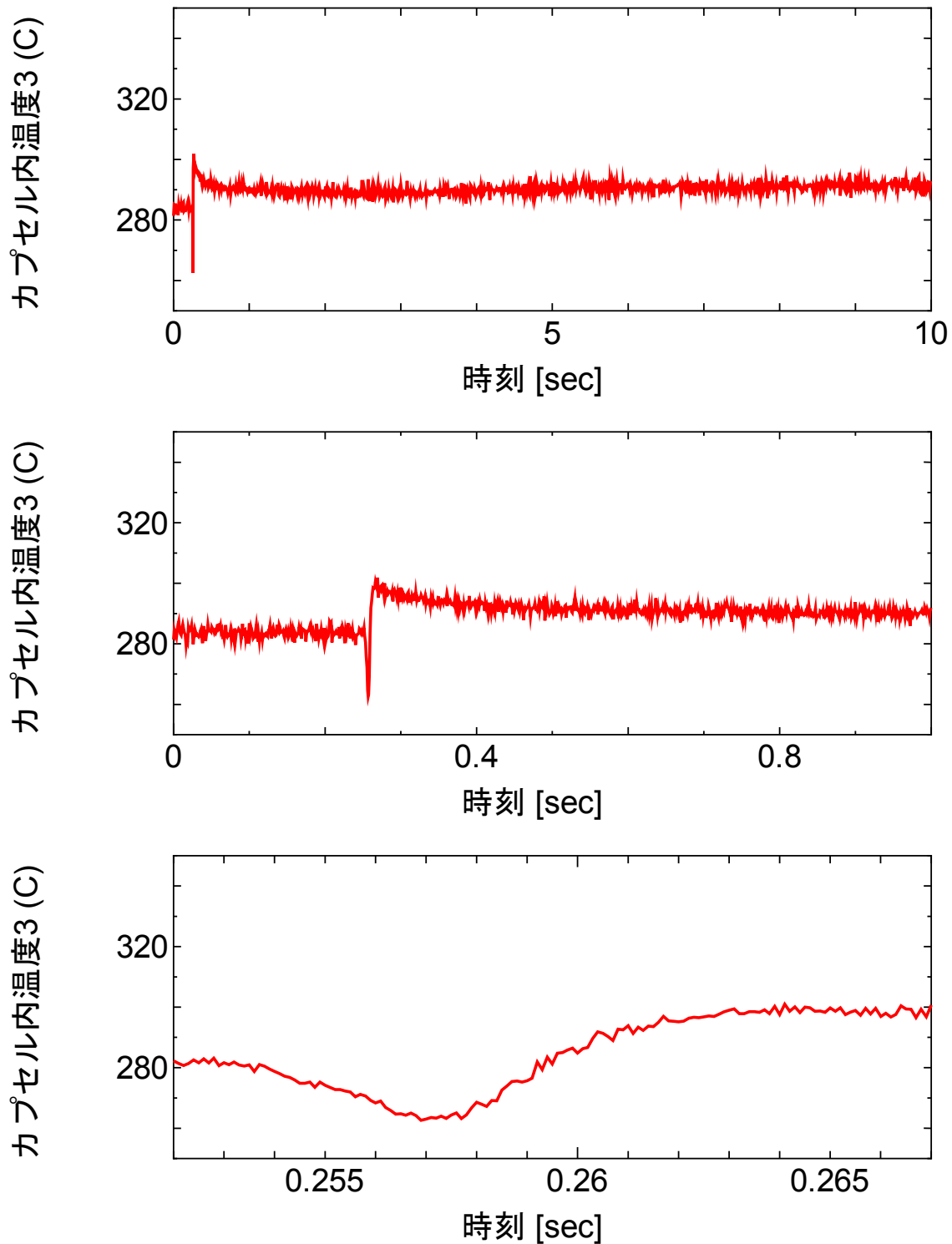


図 4.3.2-8 (10) VA-7 実験におけるカプセル内温度履歴(#3)

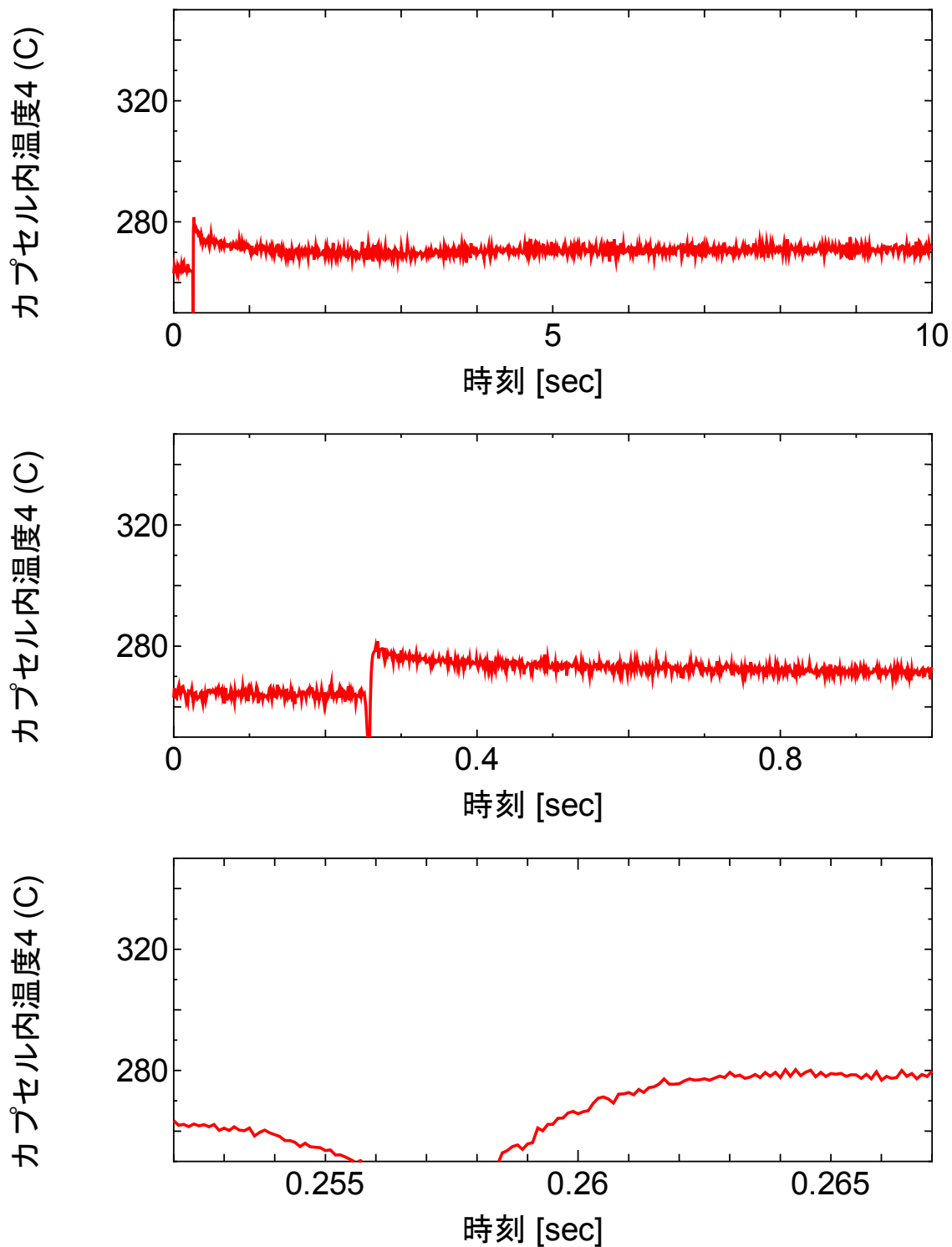


図 4.3.2-8 (11) VA-7 実験におけるカプセル内温度履歴(#4)



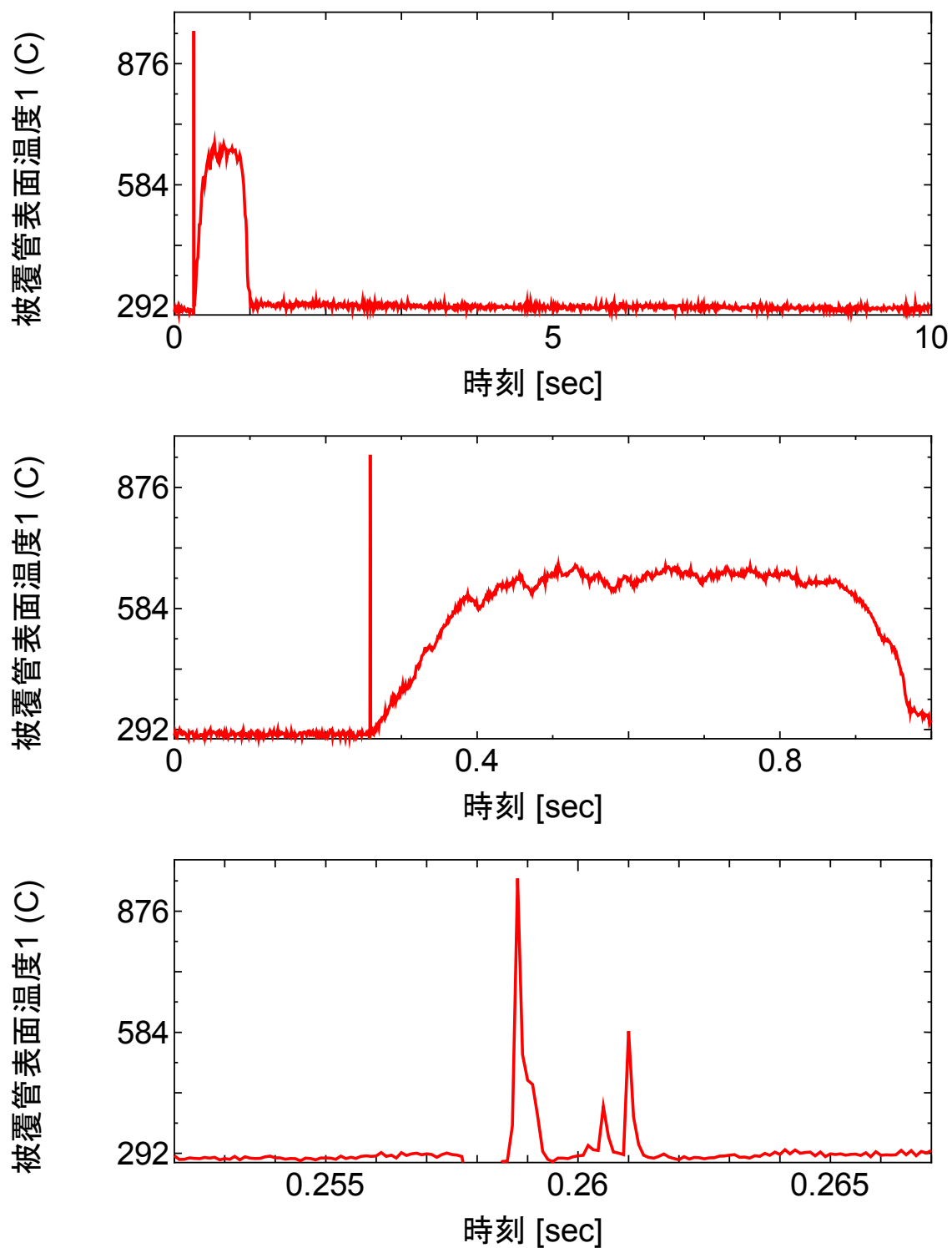


図 4.3.2-8 (12) VA-7 実験における被覆管表面温度履歴

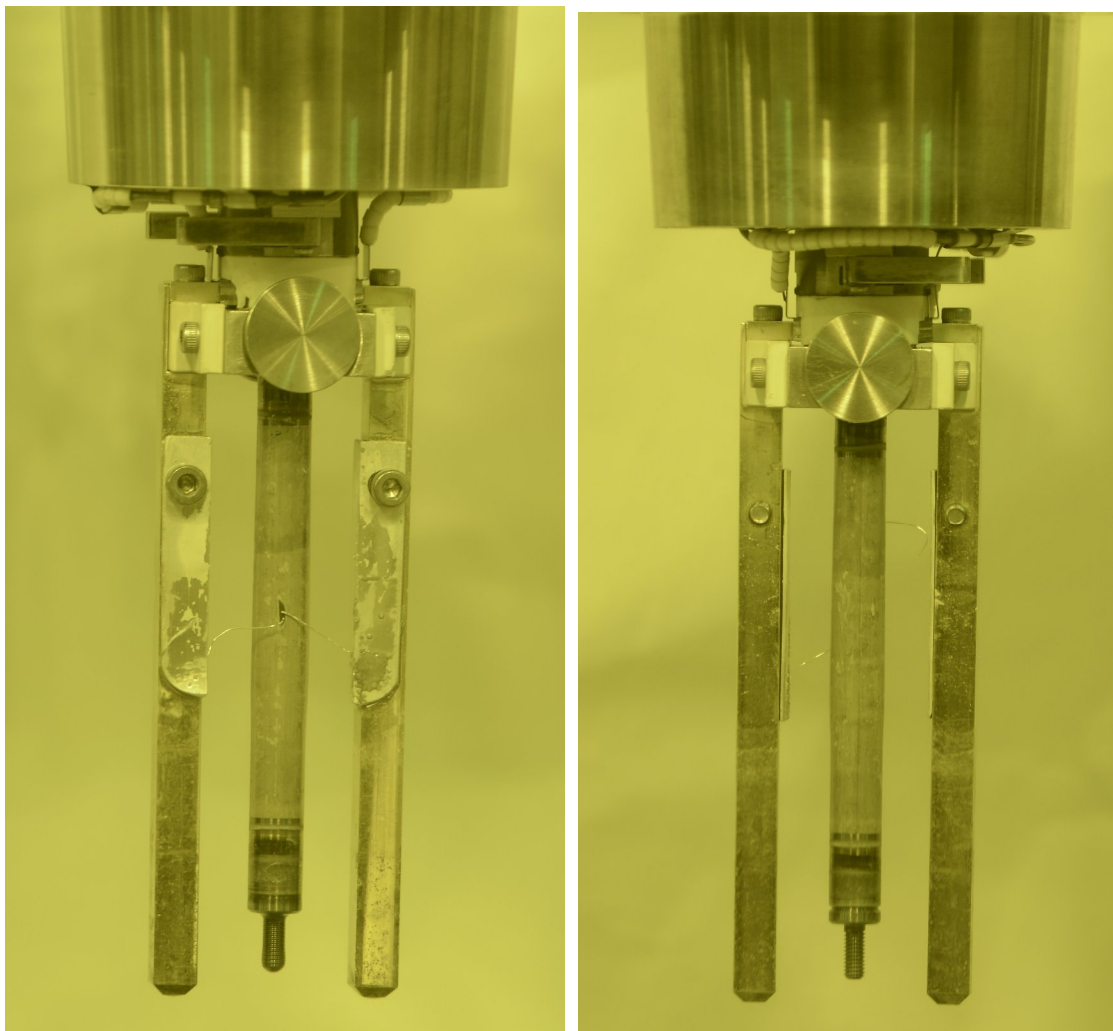


図 4.3.2-9 VA-7 試験燃料棒のパルス照射後外観写真 (支持具付き)

### 4.3.3 VA-8 実験

VA-8 実験は、高燃焼度 PWR-UO<sub>2</sub> 燃料を対象とした高温実験として平成 26 年 10 月 31 日に実施した。燃料エンタルピー増分のピーク値 496 J/g (118 cal/g)の実験条件に対し、燃料は破損した。

#### (1) 試験燃料棒

試験燃料は、表 4.1-1 に示す AP2-5 燃料セグメント (スペイン・バンデロス 2 PWR 照射、再結晶焼鈍 M-MDA 被覆 UO<sub>2</sub> 燃料) から採取した。M-MDA 被覆管は近い将来の実用化が計画されている新型被覆管であり、実用化に向けて応力除去焼鈍材 (SR 材) が開発されたが、開発の過程で被覆管結晶組織の違いによる影響を調べるために再結晶焼鈍材 (RX 材) も試作され、SR 材とともにバンデロス 2 における照射試験に供された。

図 4.3.3-1 に燃料セグメントからの採取位置及び上下端栓取付後の燃料棒の構造概略を示す。スタック長はペレット 5 個分で、X 線写真撮影に基づく測定によれば約 49 mm であった。ガンマ線強度分布がほぼフラットであることから、試験燃料の平均燃焼度はセグメント燃焼度と同じ約 78 GWd/t と評価した。試料採取範囲における被覆管外面酸化膜厚さの平均値は、報告済の渦電流測定と、今年度実施したリファレンス試料断面の金相観察とに基づき、68 μm と評価した。また被覆管水素吸収量は、切出し位置近傍における水素分析結果に基づいて 703 ppm と評価した。燃料棒内へのガス封入については、室温条件で行われた VA-6 実験と同条件とし、室温で 0.1 MPa の He を封入した。

パルス照射前の試験燃料棒に対して実施した外観観察、X 線写真撮影、寸法測定の結果をそれぞれ図 4.3.3-2 から図 4.3.3-4 に示す。いずれの結果においても、パルス照射実験において問題となり得る傷、欠陥、扁平化、曲がりなどは見られなかった。

#### (2) 実験条件および計装

パルス照射実験の条件を以下に示す。

実験カプセル：	B-I 型 (高温・高圧用)
パルス照射時冷却水条件：	282°C、6.7 MPa の静止水
投入反応度：	\$4.53
燃料エンタルピー初期値 (基準温度 20°C)：	70 J/g (17 cal/g)
燃料エンタルピー増分ピーク値：	496 J/g (118 cal/g)

計装項目を以下に示す。また、図 4.3.3-5 に計装取付けの概要を示す。

カプセル内圧計 2 箇所 (気相: #1, 液相: #2)  
AE センサ 1 個 (燃料破損検出用)  
カプセル外面歪みゲージ

## 冷却水温度測定用シース熱電対 4箇所

### (3) 冷却水昇温条件

パルス照射に先立ち、カプセル内の冷却水を電気ヒータにより昇温した。図 4.3.3-6 (1) 及び(2)に昇温中の温度及び圧力の履歴をそれぞれ示す。電気ヒータの通電はパルス照射時刻の約 4.5 時間前に開始し、通電開始から約 2.3 時間後に冷却水温度は目標温度に到達した。従来的高温実験では、この後電気ヒータ出力を制御して約 1 時間程度目標温度を維持した後にパルス照射を実施しており、VA-8 実験についても同様の手順を経る予定であったが、電気ヒータ出力制御による温度保持に移行して約 40 分後から 80 分後までの時間区間において、電気ヒータの断続的な出力低下が発生し、図 4.3.3-7 に示すように目標温度からの約 10 °C 程度の温度低下が生じた。またこれに伴い計装の一部でノイズの増大が生じたこと等から、アンプ機器の接続確認と電気ヒータの再起動に時間を要し、昇温終了から約 2 時間が経過した後のパルス照射実施となった。また 1 度目の再起動後も電気ヒータの挙動は安定せず、パルス照射までの間に繰り返し再起動を行う必要があった。

#### (a) カプセル内温度の履歴

昇温過程におけるカプセル内温度は位置及び液相／気相間で若干異なり、気相部は液相よりも温度が低い傾向、液相部ではカプセル下部（カプセル内温度#4）で温度が低い傾向が見られた。また、液相部では、カプセル内温度#3 が#2 に比べやや高い状態で推移したが、後述するように#3 の指示温度から計算した飽和圧力はカプセル内圧力指示値のいずれよりも高いことから、#2 の指示値が正確であると判断した。

なお、昇温開始時の水位はカプセル内熱電対#2 位置よりも下だが、冷却水の熱膨張により、最終的な水位は、図 4.3.3-5 に示すようにカプセル内熱電対#1 位置と#2 位置の間となる。

#### (b) カプセル内圧力の履歴

カプセル内の気相部と液相部において圧力を計測した。液相部圧力#2 は全体に気相部圧力#1 よりも高い値となったが、アンプゲイン設定の影響でノイズが大きく（後述）、また気相部圧力計はヒータから距離があり温度ドリフトの影響を受けづらいことから、通常は気相部圧力#1 がより正確な指示値を与えると判断される。

#### (c) パルス照射直前の冷却水状態

図 4.3.3-8 (1)に、カプセル内の気相部圧力#1 及び気相部温度#1 に対応する飽和圧力の履歴をパルス照射直前の 50 秒間について示す。電気ヒータの通電をパルス照射の約 90 秒前に停止した後、カプセル内の温度は約 1~2°C/分の割合で低下し、それに伴い圧力も低下した。気相部圧力#1 と、気相部温度#1 に対応する飽和圧力との間には約 1.5 MPa の差

があり、カプセルに冷却水とともに封入された空気の分圧を考慮してもなお有意な差があることから、気相部には若干の温度分布が生じ、飽和温度よりもやや温度の低い領域が生じていたと解釈される。同様に、図 4.3.3-8 (2)では、カプセル内の液相部温度#2、#3 及び #4 のそれぞれに対応する飽和圧力を気相部圧力#1 と比較した。液相部温度#2 に対する飽和圧力が気相部圧力#1 に近い一方、#3 に対する飽和圧力は気相部圧力#1 を上回り、また #4 に対する飽和圧力は気相部圧力#1 を下回っている。#2 に対する飽和圧力と#3 に対する飽和圧力の平均値は液相部圧力の指示値約 6.7 MPa にほぼ一致することから、パルス照射時のカプセル内圧力は 6.7 MPa、カプセル温度についても#2 と#3 を平均して 282℃と評価した。#4 の位置については、約 10 °Cサブクールされた状態であると解釈される。

#### (4) パルス照射時の過渡計測記録

2 台の中性子検出器で測定した NSRR の炉出力履歴を図 4.3.3-9(1)及び(2)、積分出力履歴を図 4.3.3-9(3)及び(4)に示す。また、前節で示した計測項目に関する過渡記録を図 4.3.3-9(5)から(11)に示す。時刻 0 から 10 秒まで、0 から 1 秒まで及び 0.253 から 0.264 秒までの 3 区間について示す。

過去に実施した NSRR 実験より、歪みゲージを使用したセンサ(圧力計等)や熱電対の出力には NSRR 出力の履歴によく似た波形のノイズや、パルス照射以後も継続するドリフトが発生し得ることが判明している。このノイズ及びドリフトの要因は、出力にほぼ比例した強度で発生するガンマ線が歪みゲージ素子や熱電対素子の電気的特性に与える影響、ガンマ発熱による素子自身の温度上昇による特性変化などと理解されるが、精度良く補正することは困難であるため本報告においては得られた過渡計測結果をそのまま示す。

#### (a) NSRR 出力・積分出力

図 4.3.3-9 (1), (2)及び(3), (4)に NSRR 出力履歴及び積分出力履歴をそれぞれ示す。いずれについても、中性子検出器#1 と#2 の平均値で評価を行った。NSRR 出力は時刻 0.2584 秒においてピーク値約 19.8 GW に達し、半値幅は約 4.4 ms であった。なお、NSRR の計測システムは積分演算を 1 秒までしか行わないため、時刻 1 秒以降の積分出力は一定値として記録される(破線部)。炉物理計算による評価によれば、本実験における積分出力は時刻無限大で 117.4 MJ に達した。

#### (b) カプセル内圧

図 4.3.3-9 (5)及び(6)に、それぞれカプセルの液相部及び気相部で計測した圧力の履歴を示す。気相部圧力 (#1) では時刻 0.25 秒付近から圧力上昇が見られるが、これは燃料棒表面での沸騰により蒸気が発生したためと解釈され、高温条件下で行われた従来の NSRR 実験でも同様の傾向が得られている。VA-8 実験では燃料が破損したが、VA-7 等、非破損ケースとの気相部圧力挙動の差は見られない。液相部圧力計については、VA-8 実験に先だ

って行った VA-7 実験等従来の高温実験において、NSRR 出力パルスに同期した大きなノイズによって計測限界を超えて有効なデータが取得できなかつた経験を踏まえ、アンプゲインを従来の約 10 分の 1 としている。これにより圧力変化に対するデータの分解能は低下し、また図 4.3.3-8(1)に見られるように圧力レベルが低い区間ではノイズの影響が大きくなる一方、計測限界値を大きく取ることが出来る。

図 4.3.3-9(6)に示すように、0.255 秒以降、NSRR 出力パルスに同期したノイズが、見かけ上 10 MPa 超の圧力変動をもたらしているものの、計測限界を十分に大きく取ったことにより、信号のピーク値を含めデータを取得することが出来ている。時刻 0.2585 秒付近において、ノイズによるオフセットとは異なる急峻な振幅の増大が見られた。これは、後述する AE センサ出力に見られた変化を考慮すると、燃料破損に伴い発生した圧力波が飽和状態の冷却水中を急速に減衰しながら通過した際に生じた液相圧力変動を検出したものと解釈される。但しこの時刻における内圧計出力からパルスノイズを除くと、零点を中心とした正負ほぼ対称な振幅を持っており、内圧計位置を通過した時点の圧力波のピーク圧力等について定量的な情報は得られていない。

#### (c) AE センサ出力

図 4.3.3-9 (7)に AE センサの出力信号を示す。このセンサはカプセル構造材を伝わる音響波を計測するものであり、燃料破損の検出を目的として設置した。AE センサの出力において振幅の急激な増大が見られており、この時刻がカプセル液相部圧力計で振幅の増大が観測された時刻とほぼ一致することから、この時に燃料が破損したと解釈した。破損時刻をより高い時間分解能で読み取り、破損時刻を 0.25852 秒と評価した。また、この時刻における燃料エンタルピ増分 174 J/g(42 cal/g)を破損時燃料エンタルピ増分とした。

#### (d) カプセル内温度

図 4.3.3-9 (8)～(11)に、実験中のカプセル内温度#1～#4 の履歴を示す。このうち、#1 が気相部、その他は液相部である。#2 ではパルス照射前の時刻 0.1 秒前後で指示値が不規則に上下し、その後も振動が続くなど、ノイズの影響が見られる。パルス照射開始時刻(約 0.26 秒)付近で各温度が急上昇しているのはガンマ発熱による熱電対自身の温度上昇によるものである。冷却水への熱の散逸により温度指示値は一旦低下するが、燃料の発熱による本来の冷却水温度上昇に伴い再び上昇した。また 0.255 から 0.26 秒にかけて、各温度履歴とも短時間だけ僅かな低下が見られる。波形の比較から、他の計装と同様に NSRR パルス出力に同期したノイズであると解釈される。

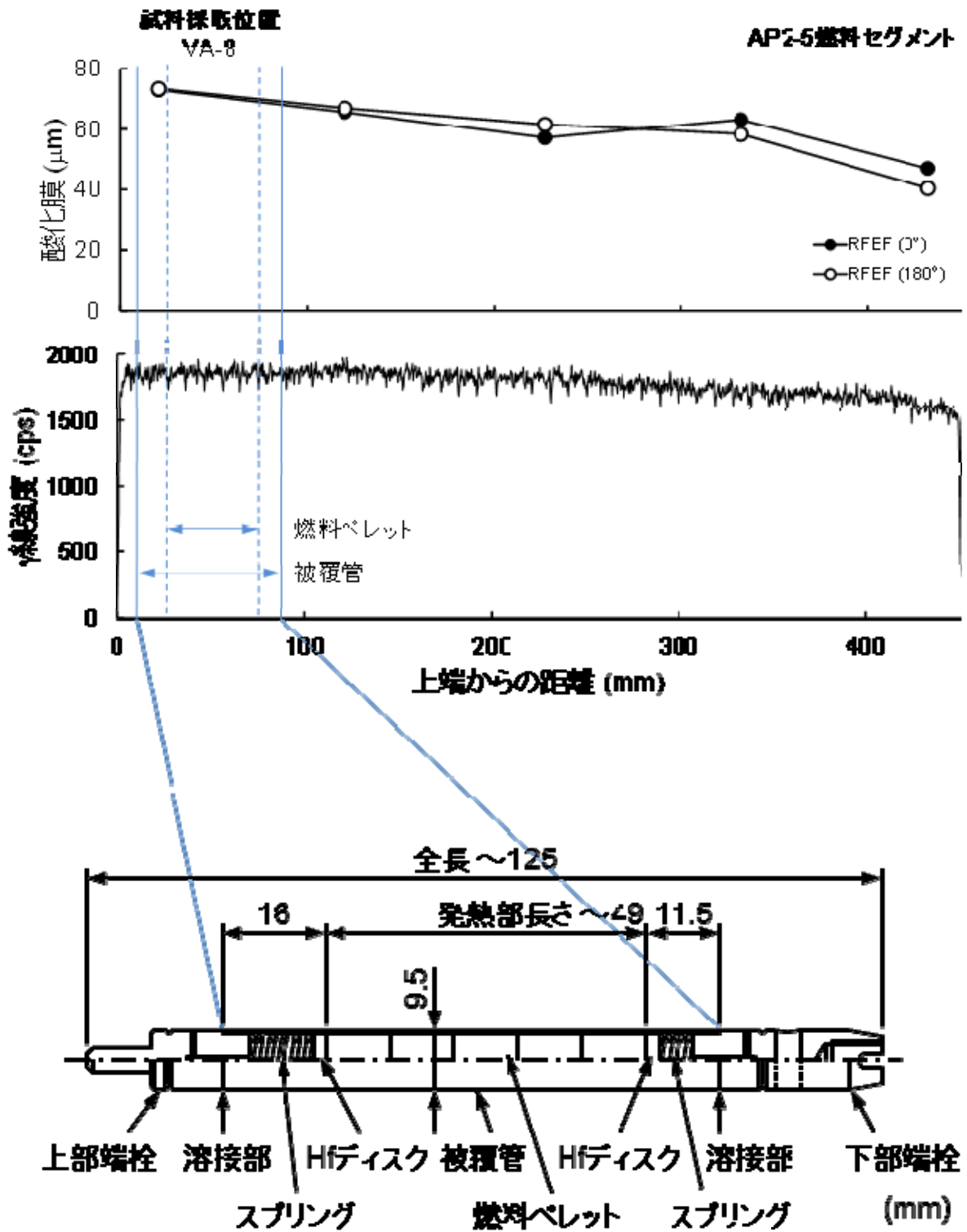


図 4.3.3-1 VA-8 試験燃料棒の構造概略

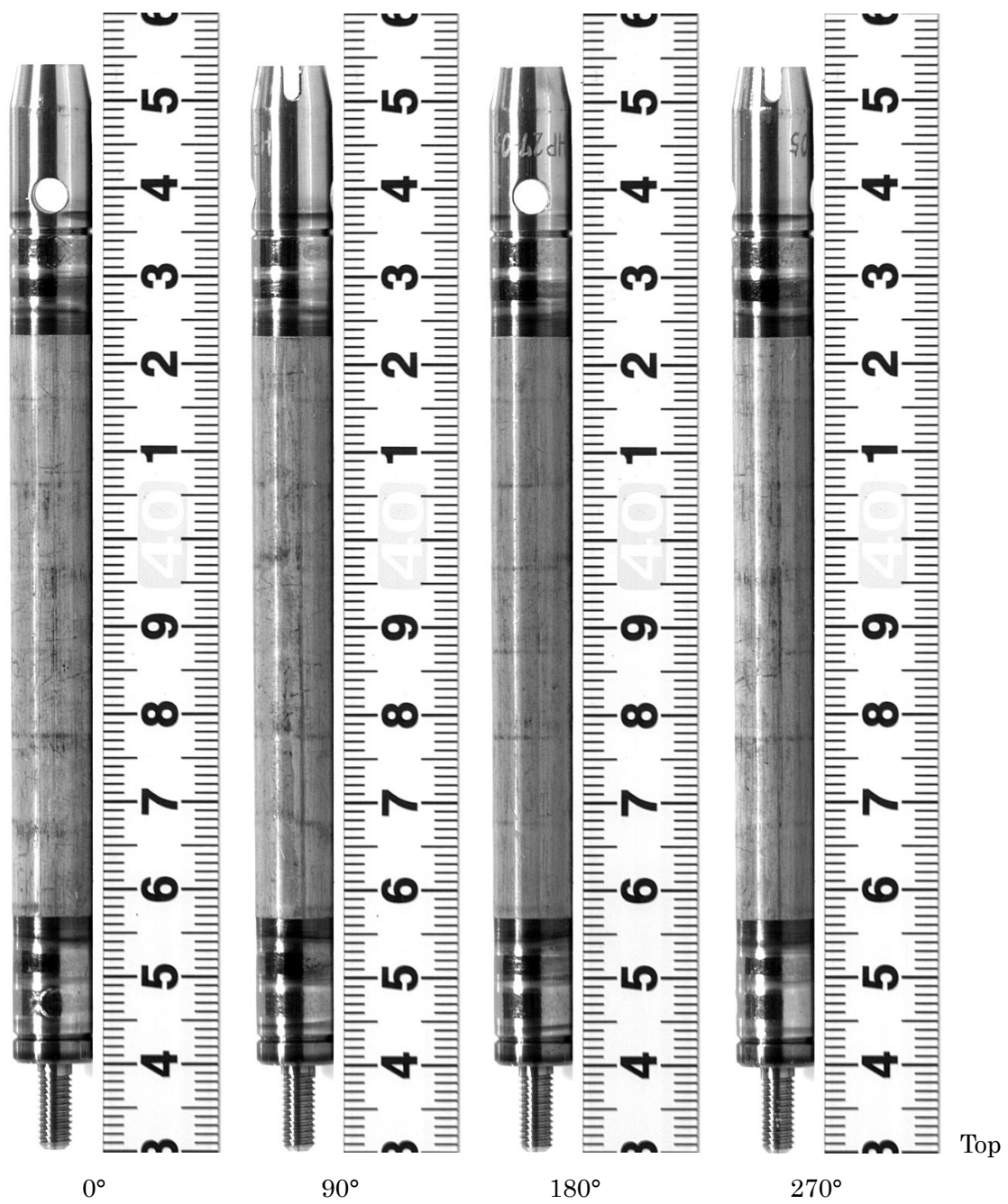


図 4.3.3-2 VA-8 試験燃料棒のパルス照射前外観写真



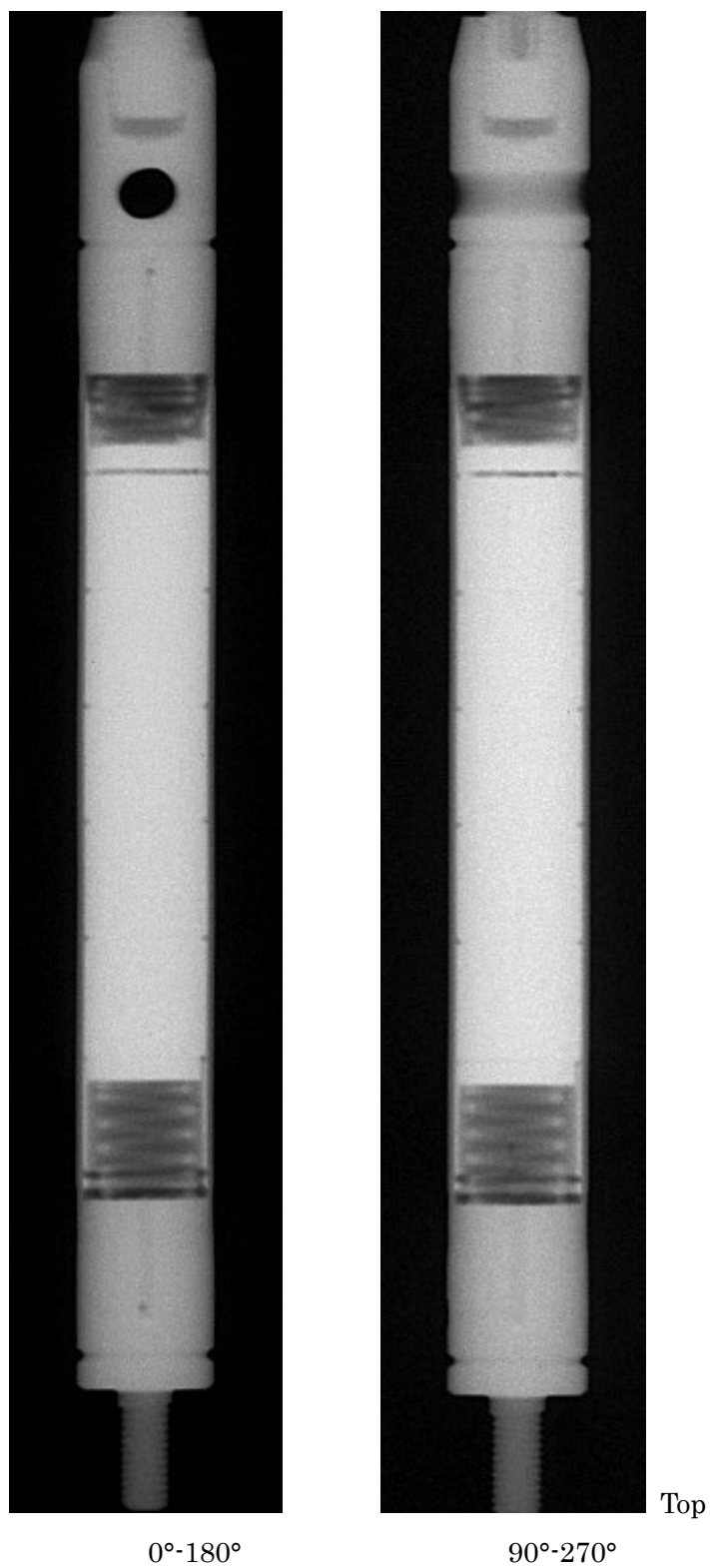


図 4.3.3-3 VA-8 試験燃料棒のパルス照射前 X 線写真

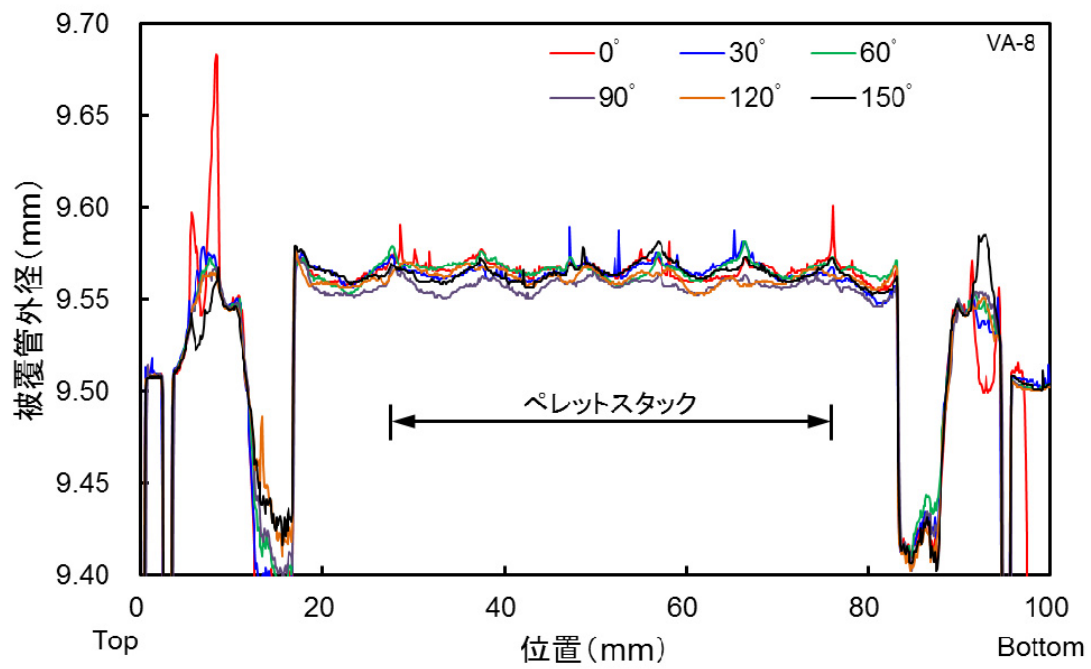


図 4.3.3-4 VA-8 試験燃料棒のパルス照射前寸法測定結果

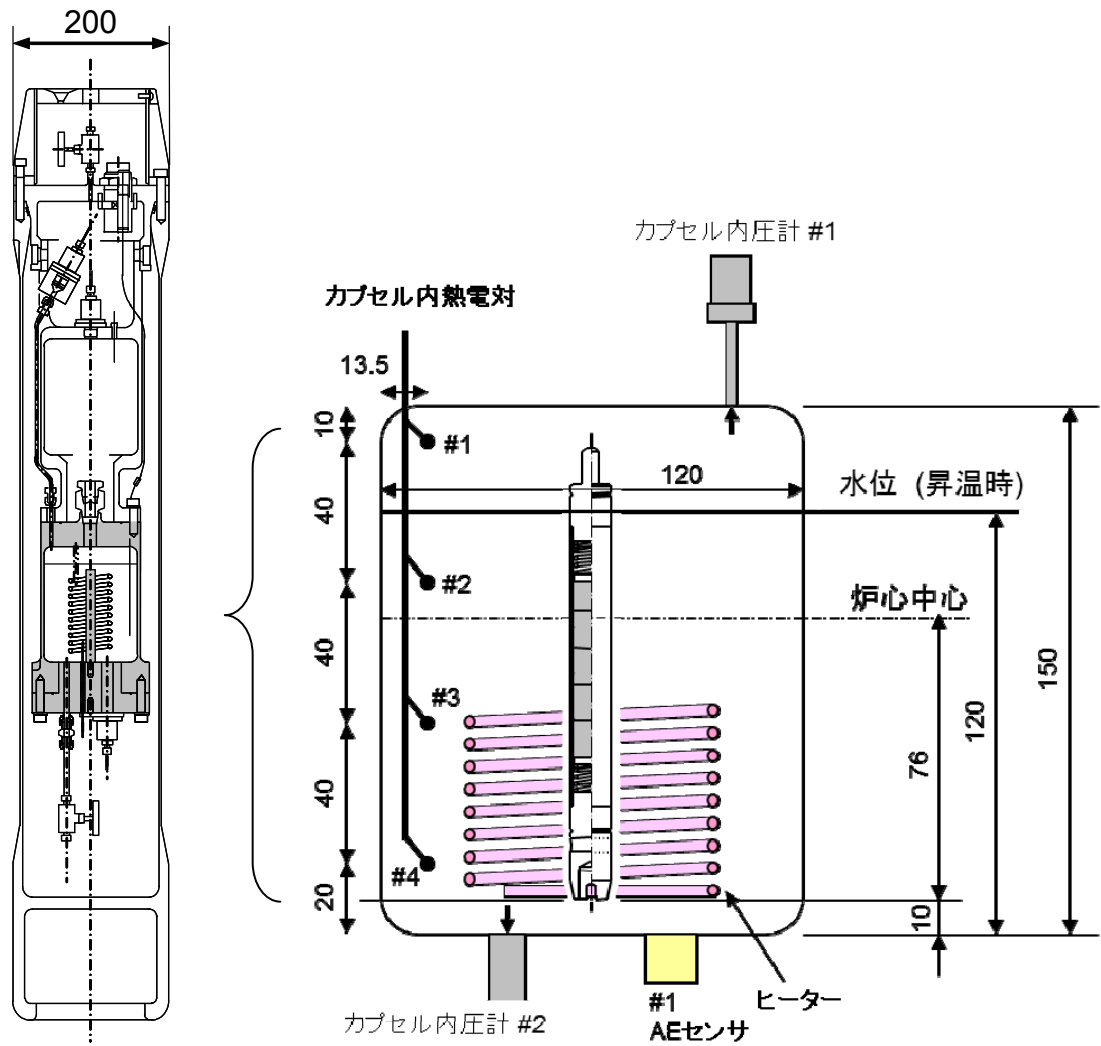
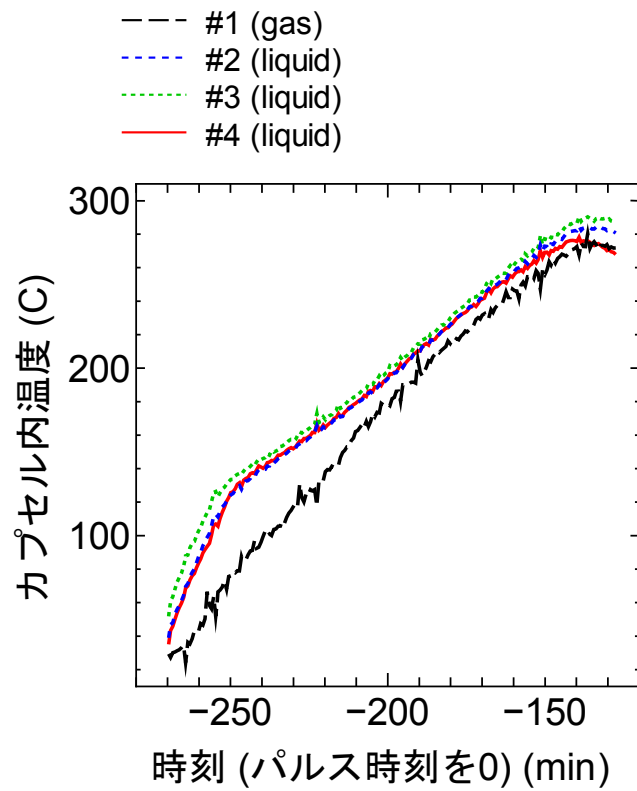
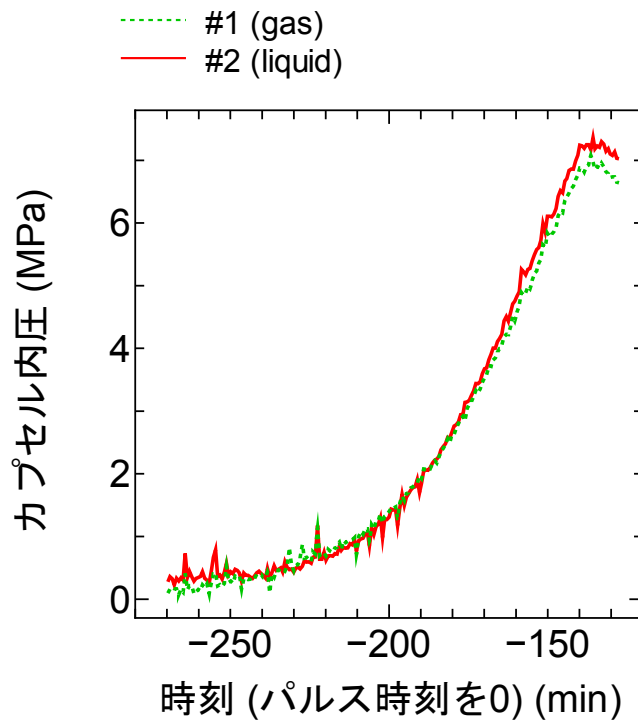


図 4.3.3-5 VA-8 実験における計装取付けの概要



(1) カプセル内温度履歴



(2) カプセル内圧力履歴

図 4.3.3-6 VA-8 昇温過程におけるカプセル内温度及び圧力の履歴

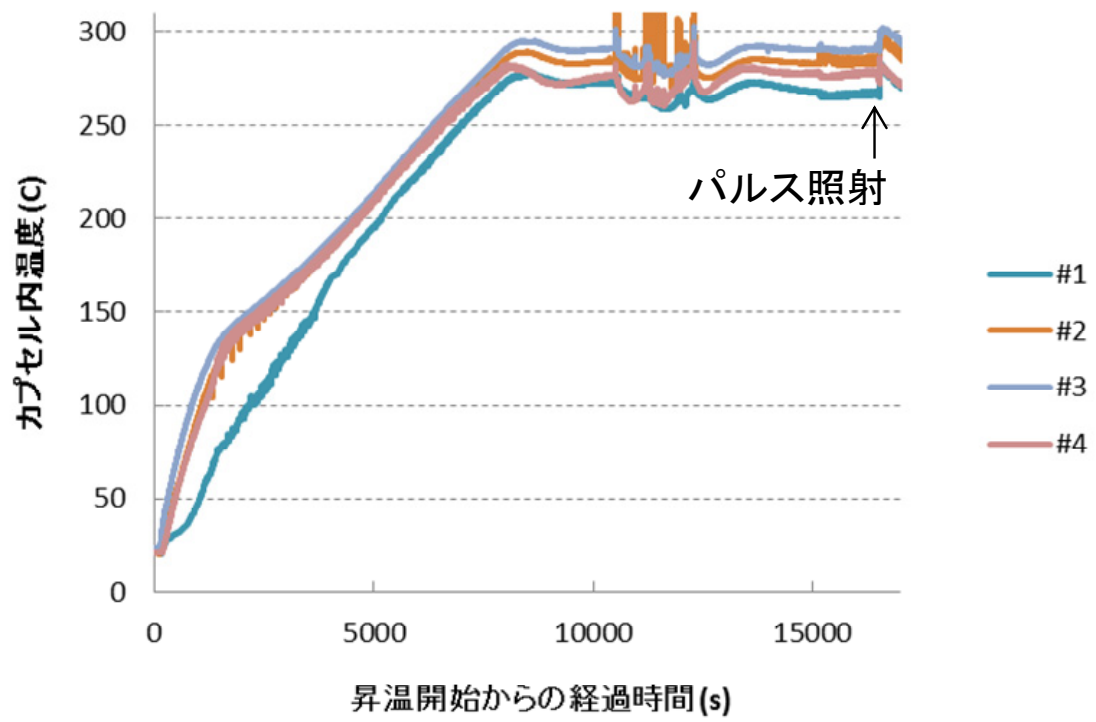
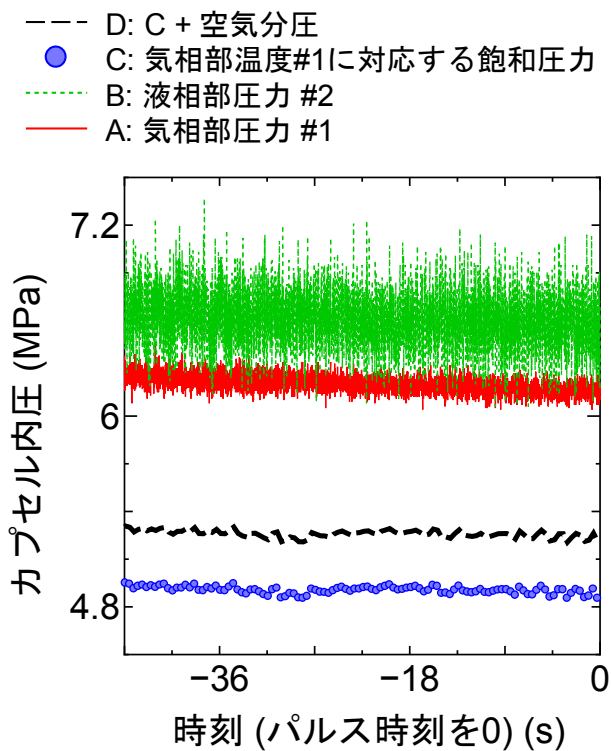
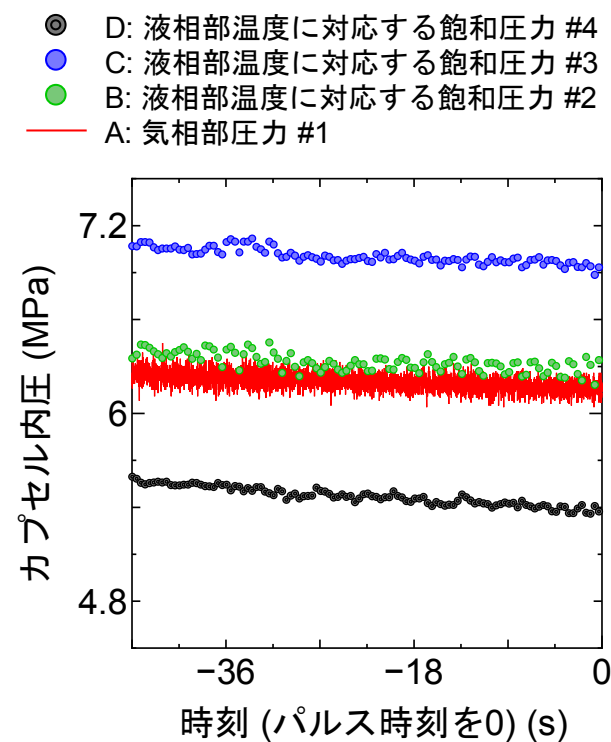


図 4.3.3-7 VA-8 昇温開始からパルス照射までのカプセル内温度の推移 (データロガーによる)



(1) 気相部温度#1 との比較



(2) 液相部温度#2, #3 及び#4 との比較

図 4.3.3-8 VA-8 パルス照射実験前のカプセル内温度と圧力の関係

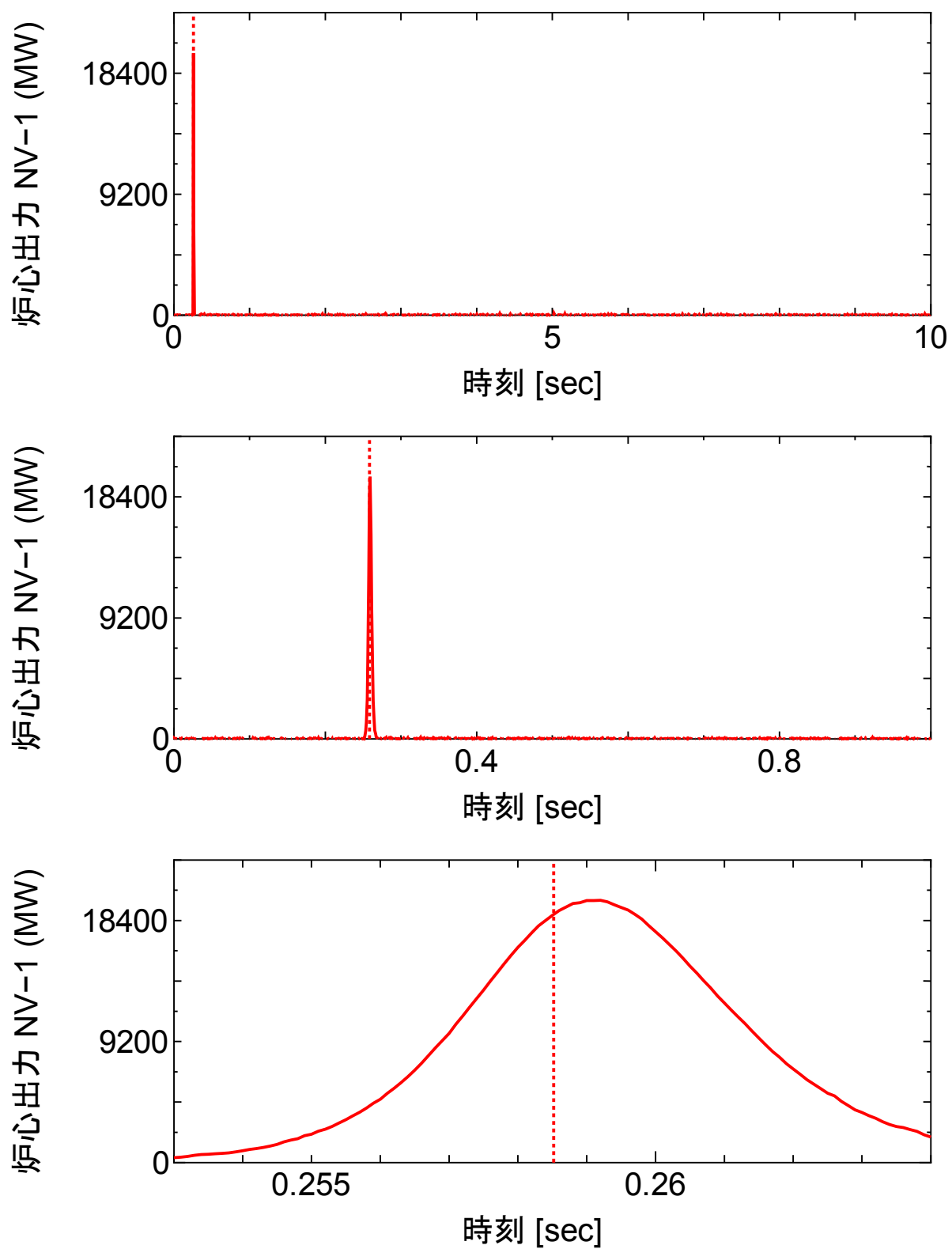


図 4.3.3-9 (1) VA-8 実験における原子炉出力履歴 (#1)

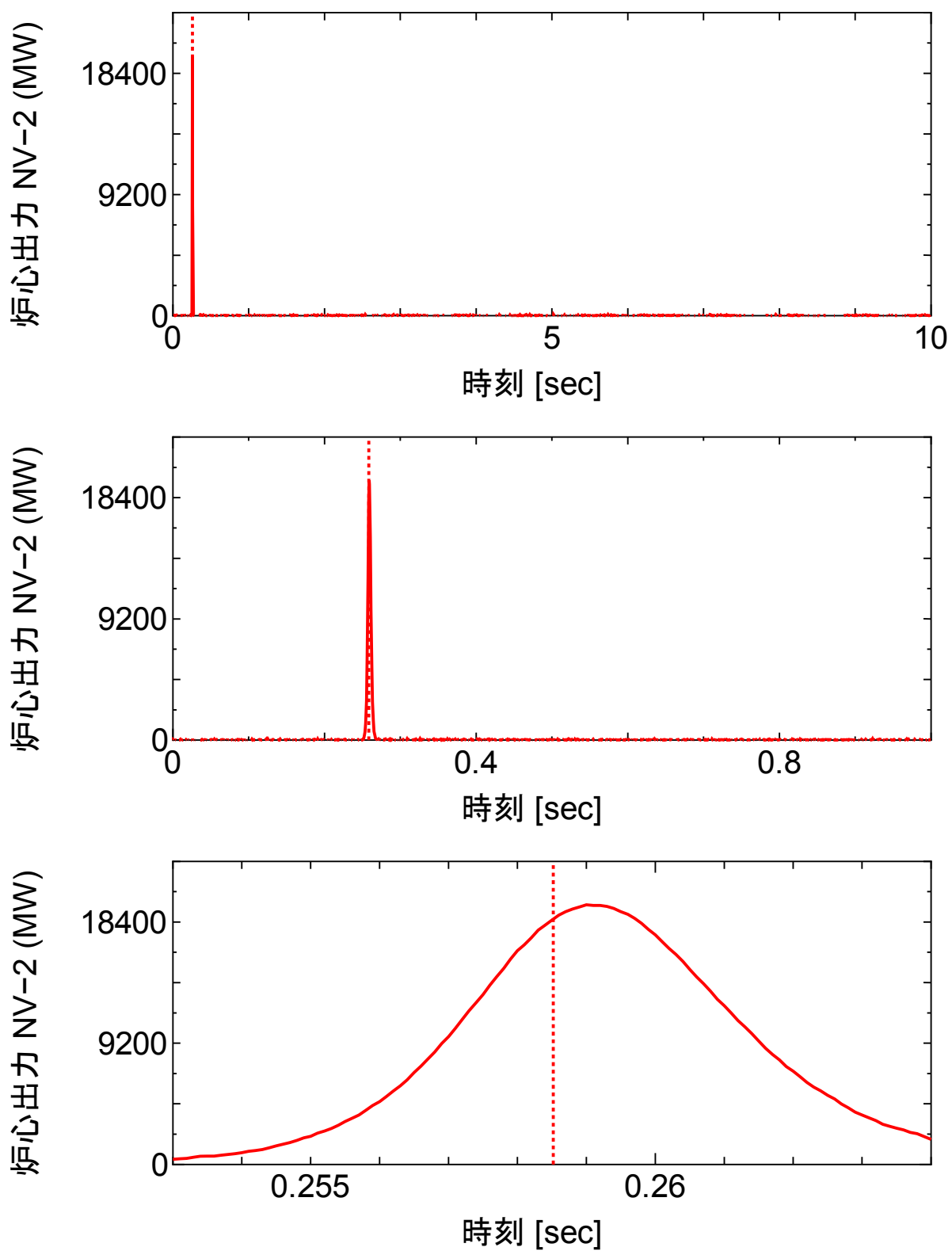


図 4.3.3-9 (2) VA-8 実験における原子炉出力履歴 (#2)



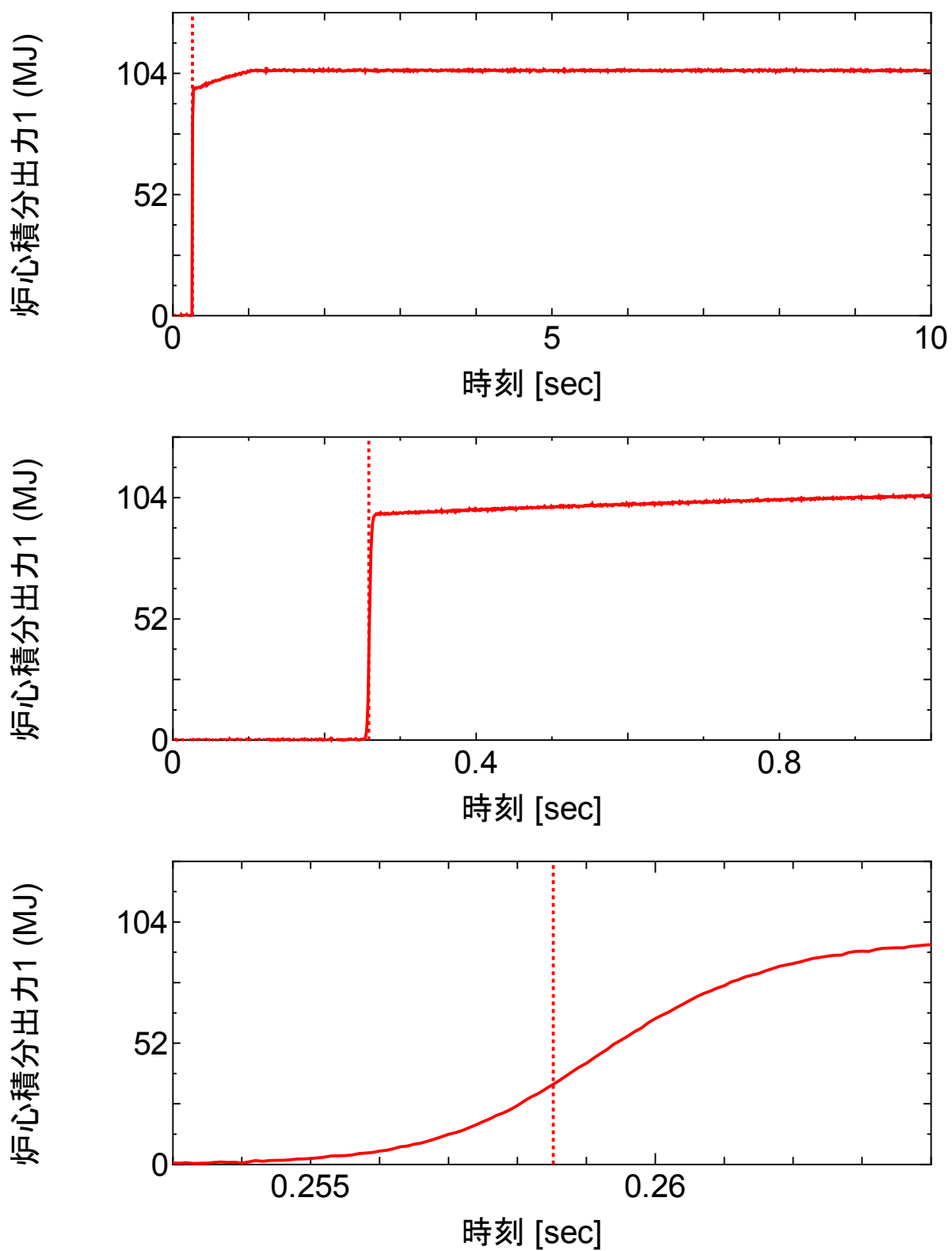


図 4.3.3-9 (3) VA-8 実験における原子炉積分出力 (#1)

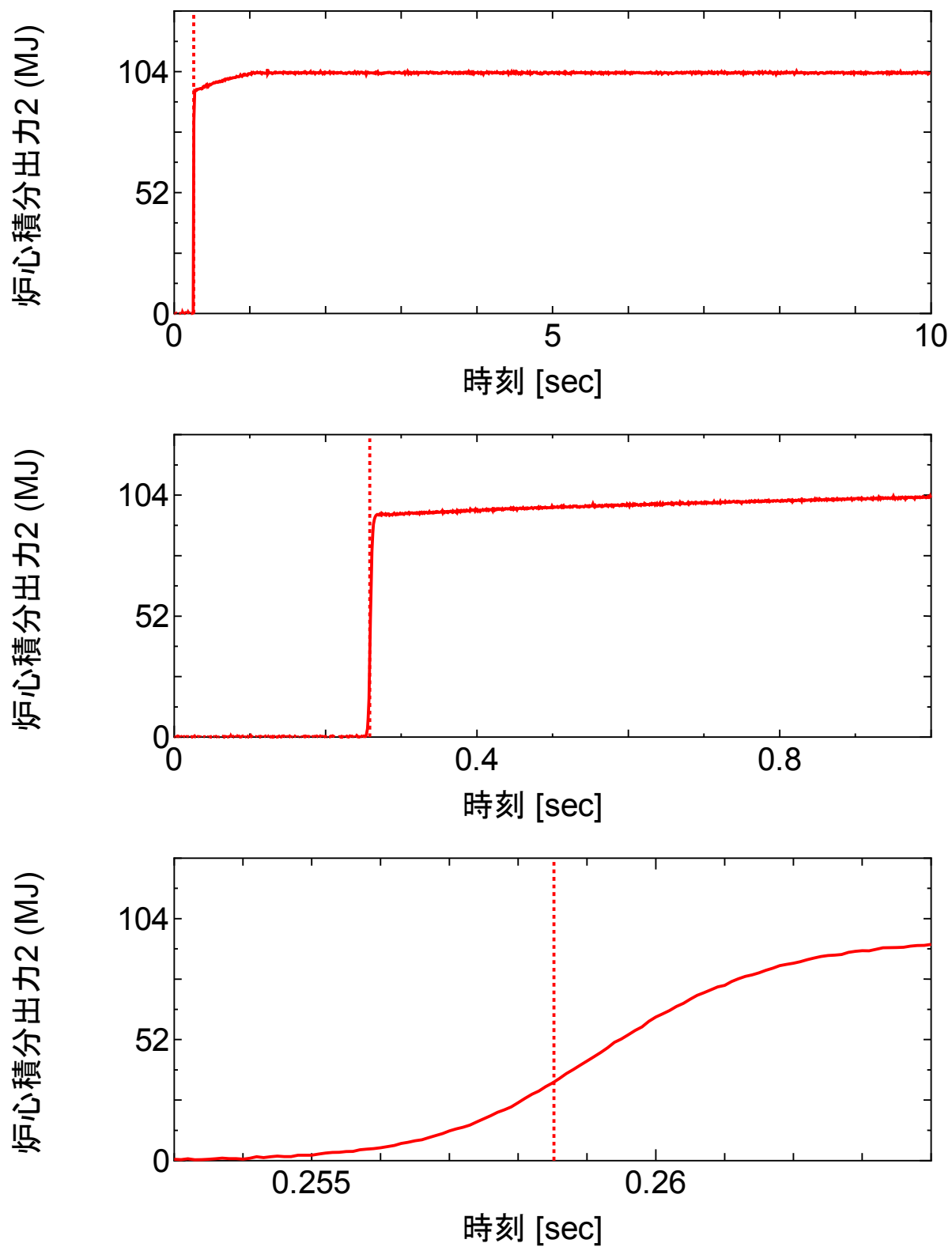


図 4.3.3-9 (4) VA-8 実験における原子炉積分出力 (#2)

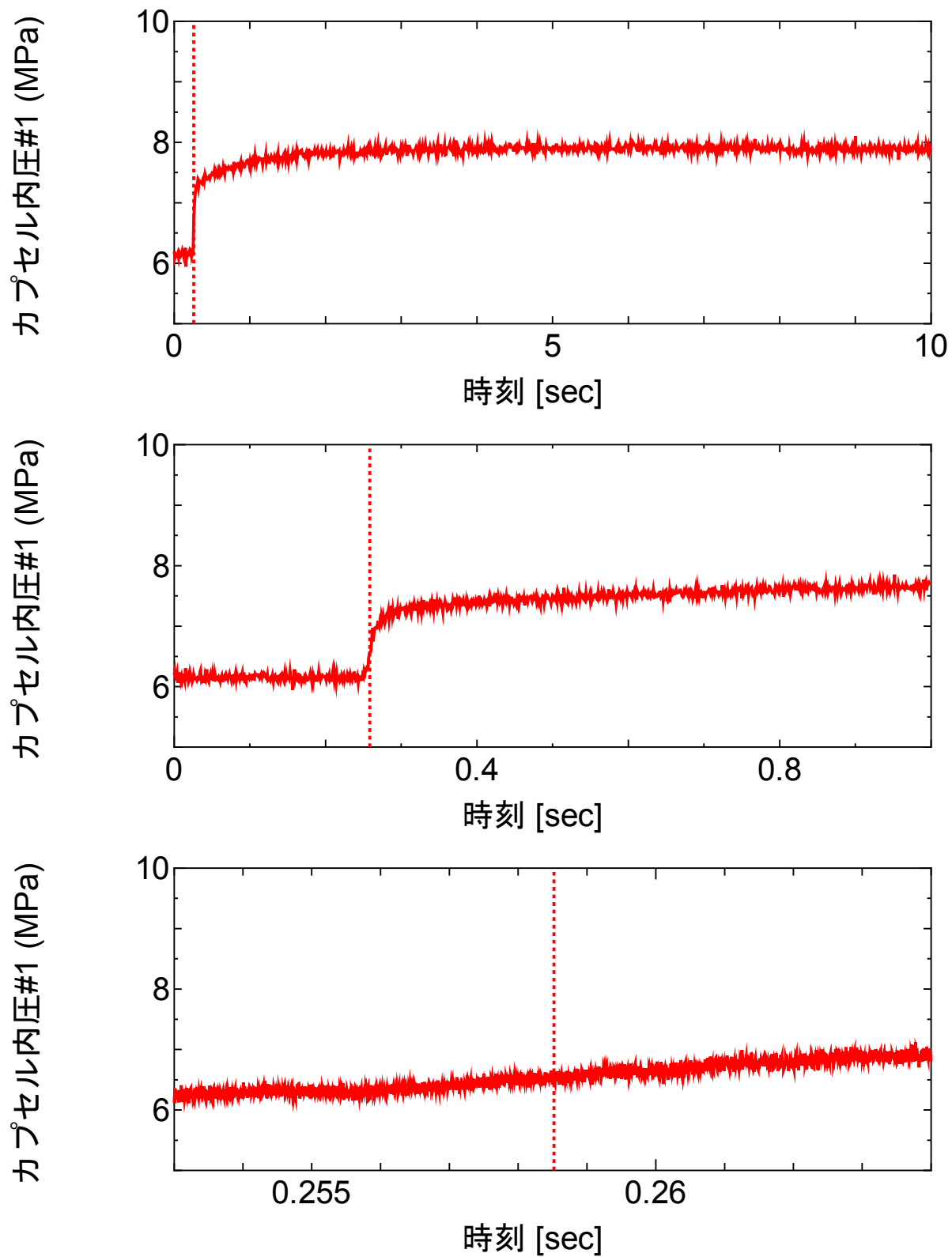


図 4.3.3-9 (5) VA-8 実験におけるカプセル内気相圧力履歴

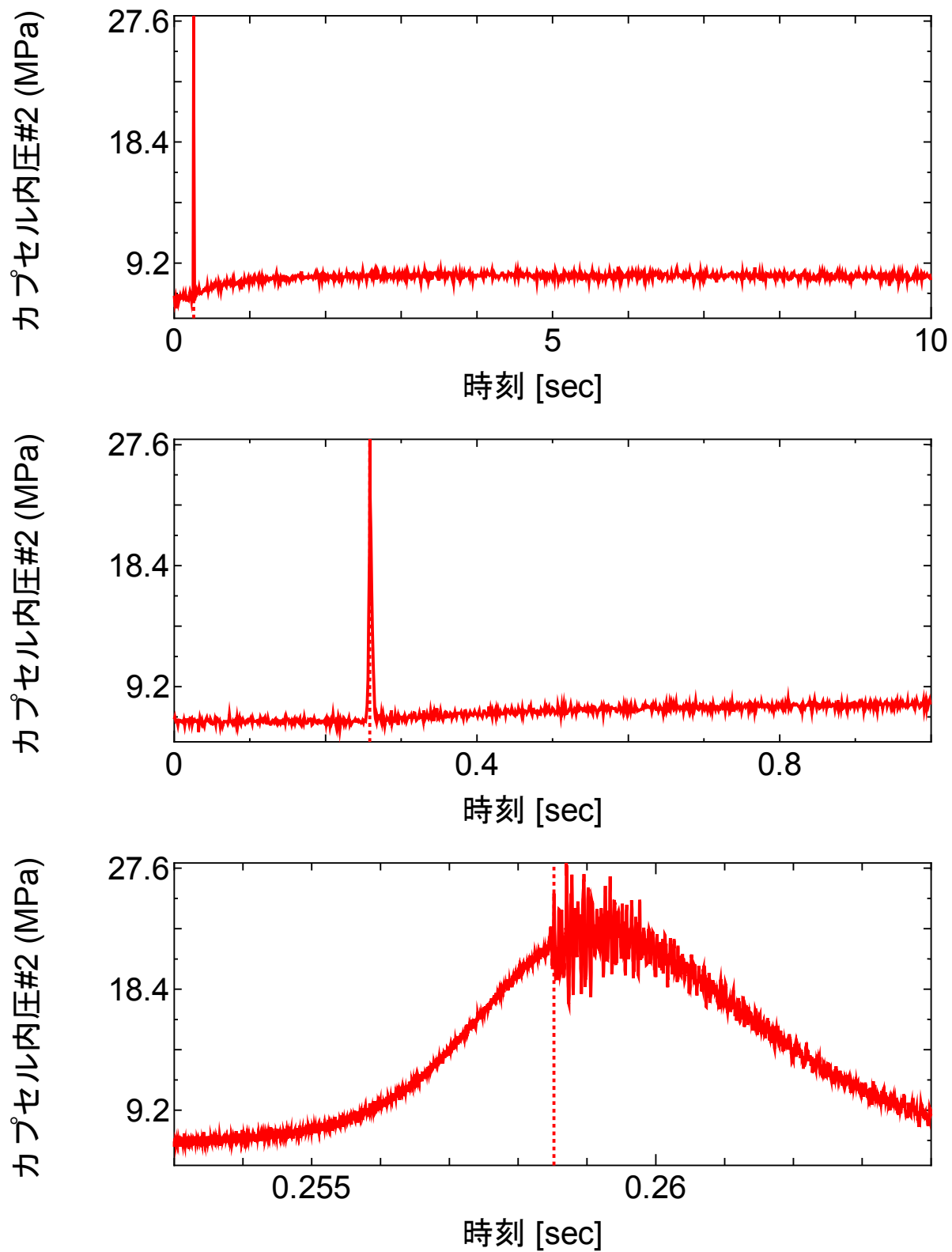


図 4.3.3-9 (6) VA-8 実験におけるカプセル内液相圧力履歴

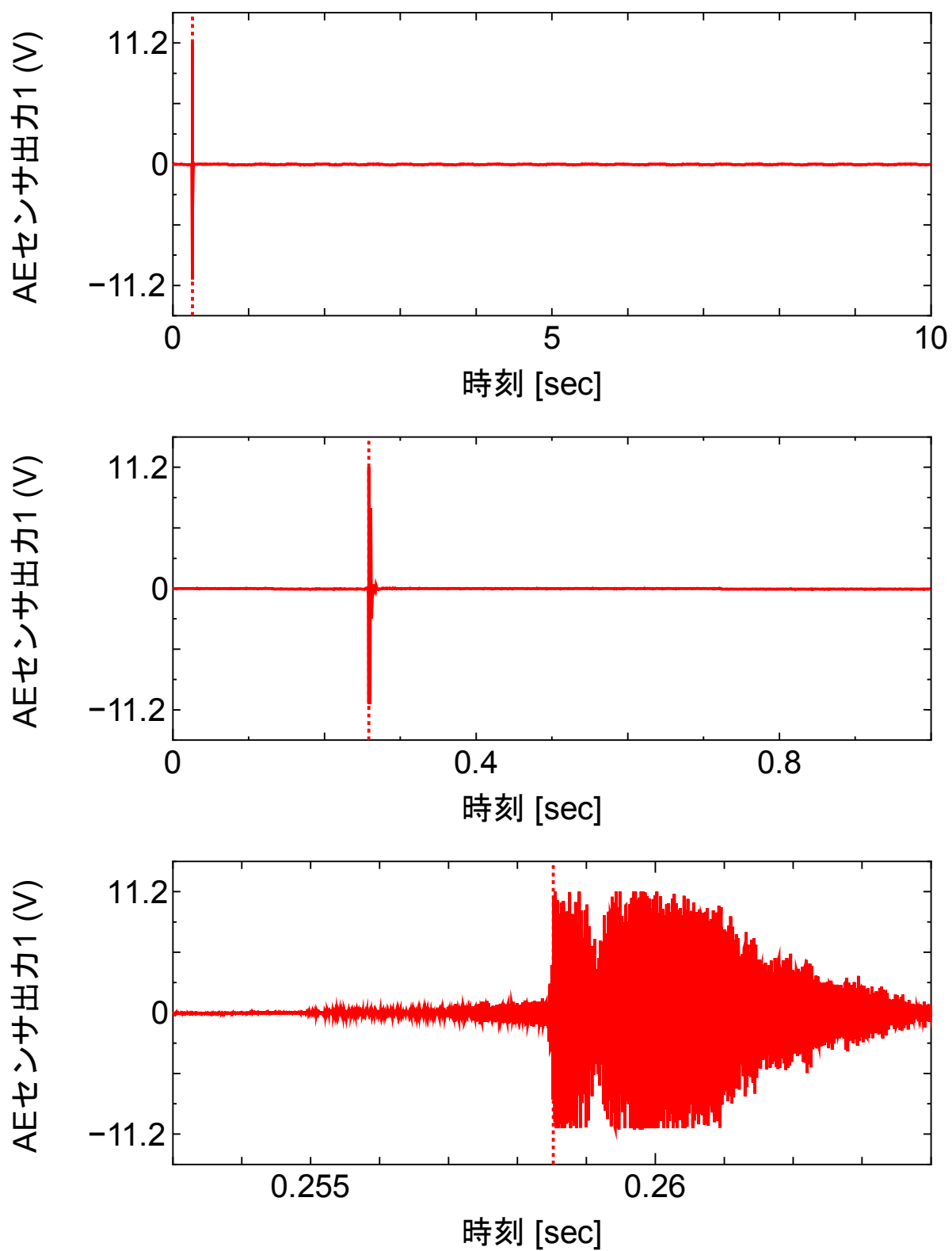


図 4.3.3-9 (7) VA-8 実験における AE センサ出力履歴

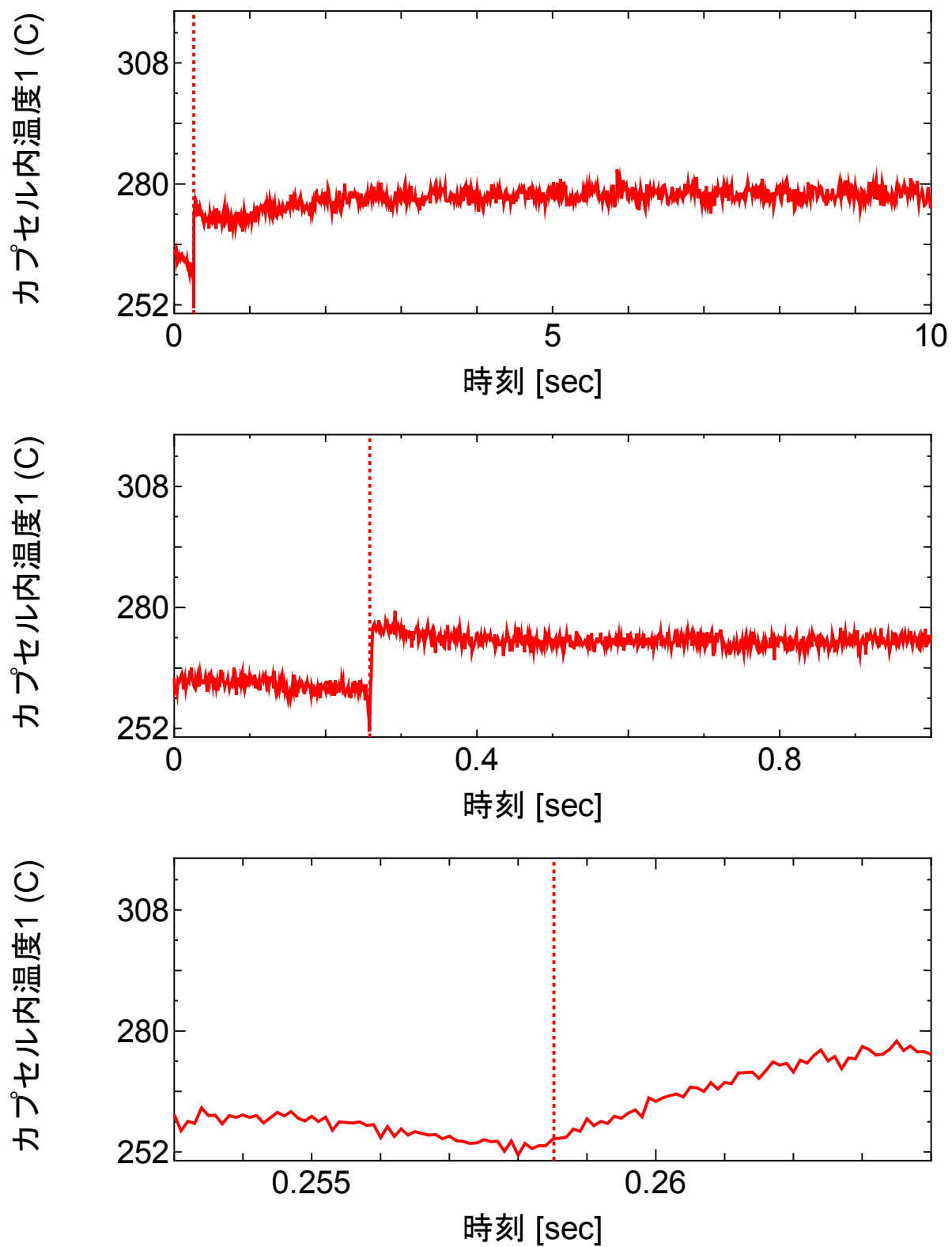


図 4.3.3-9 (8) VA-8 実験におけるカプセル内温度履歴(#1)

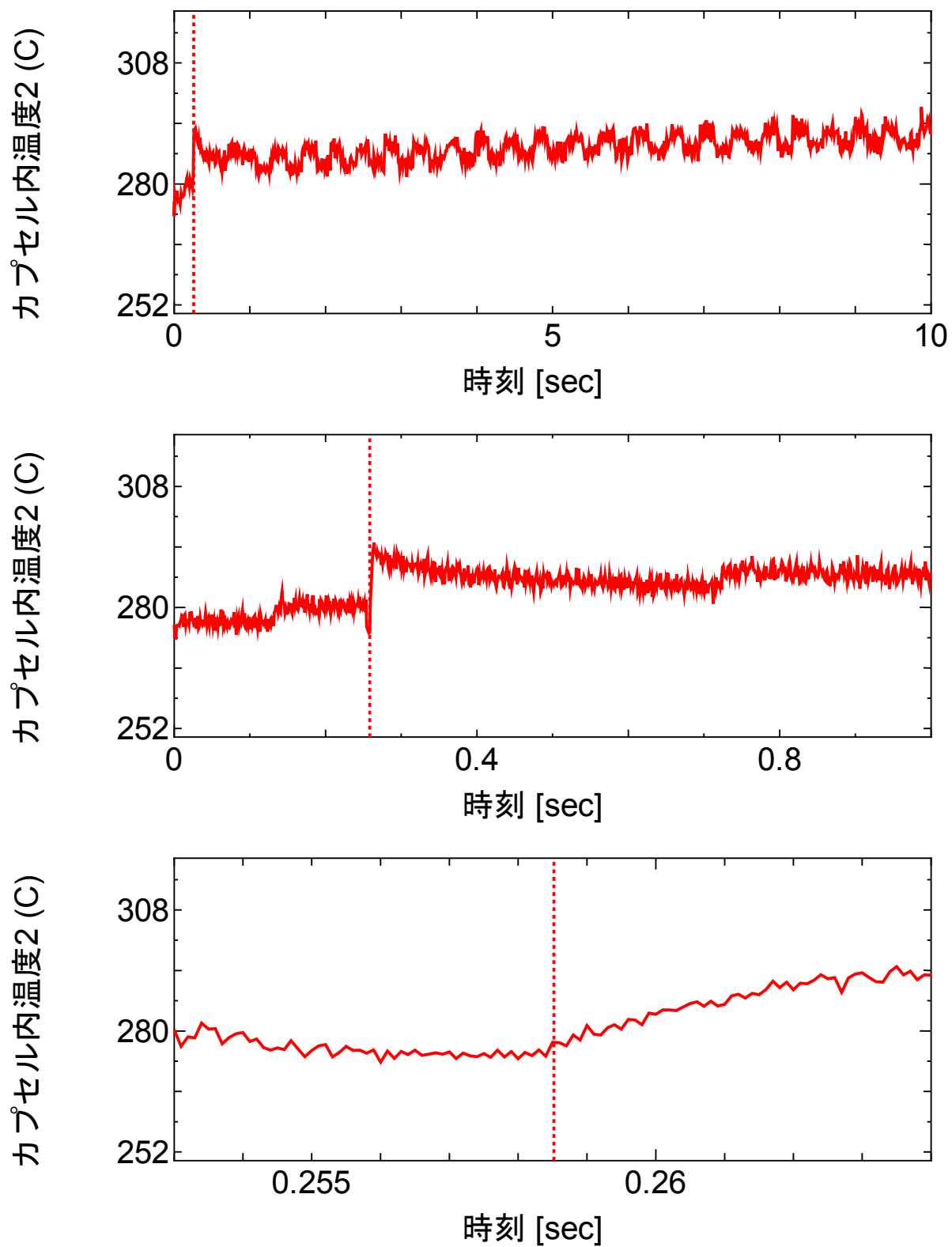


図 4.3.3-9 (9) VA-8 実験におけるカプセル内温度履歴(#2)

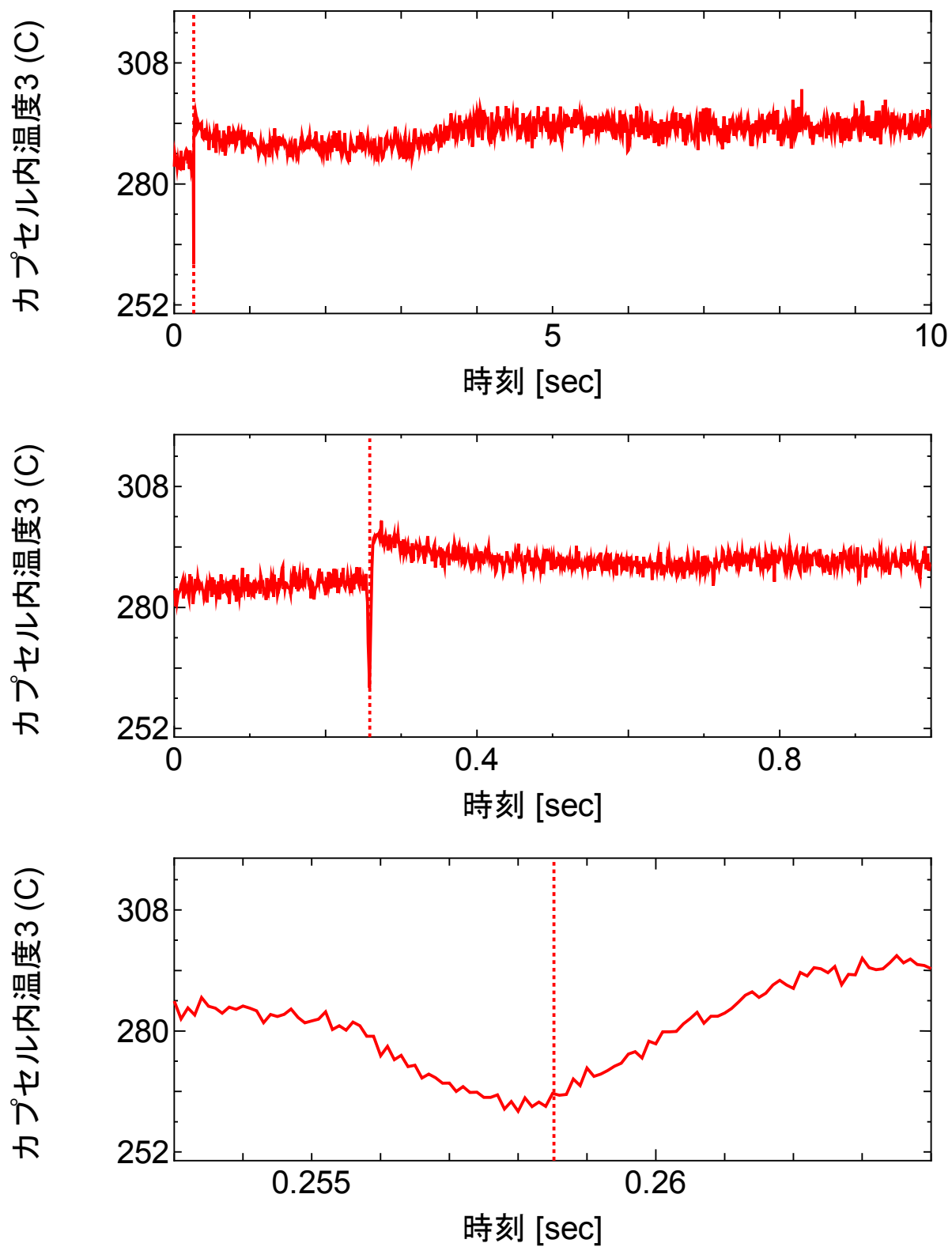


図 4.3.3-9 (10) VA-8 実験におけるカプセル内温度履歴(#3)



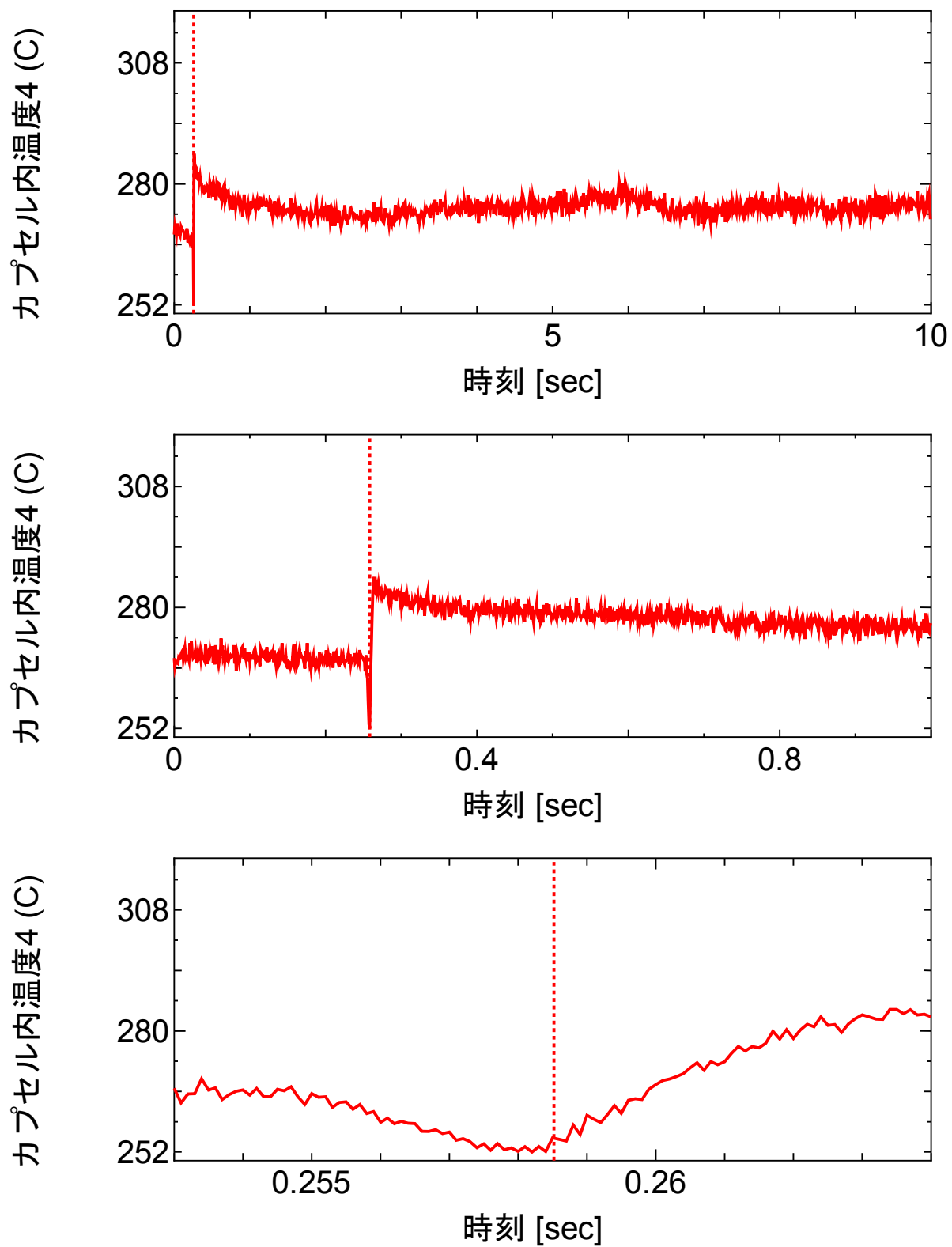


図 4.3.3-9 (11) VA-8 実験におけるカプセル内温度履歴(#4)

#### 4.3.4 VA-5 実験に関するパルス照射後試験

VA-5 実験は、高燃焼度 PWR-UO<sub>2</sub> 燃料を対象とした室温実験として平成 26 年 2 月 20 日に実施し、パルス照射中の過渡記録については既に報告した<sup>(1)</sup>。本報告では、新たな照射後試験で得られた結果を示す。

##### (1) 燃料棒外観観察

実験カプセルから取り出した燃料棒の外観を観察した。燃料棒外観写真を図 4.3.4-1 に示す。被覆管の約 90° 方向において軸方向割れが生じており、カプセルから取り出した時点で被覆管の内には燃料ペレットが残っておらず、すべて冷却材中に放出されていた。

##### (2) 燃料微粒子の粒径分布測定

破損した燃料棒からカプセル冷却水中に放出されたペレットを回収・乾燥した後に篩分し、重量を測定した。表 4.3.4-1 に、粒径別の重量測定結果を示す。

##### (3) 燃料ペレット粒子の SEM 観察

燃料棒から放出された燃料ペレット粒子の SEM 観察結果を得た。破損した燃料棒からカプセル冷却水中に放出されたペレットを回収・乾燥し、メッシュサイズ 4000、2000、1000、500、250、125、63、32 μm のふるいにより分級した。これらのうち、微粒子サイズ 500~1000 μm、125~250 μm 及び 32 μm 以下の試料に対して、SEM による観察を行った。それぞれ、図 4.3.4-2、図 4.3.4-3 及び 4.3.4-4 に示す。

拡大写真からわかるように、微粒子には、ほぼ製造時サイズの結晶粒(一般に 10 μm 程度)から成るもの(例：図 4.3.4-2(4)の Photo 4-5 及び図 4.3.4-3(5)の Photo 8-5)と 1 μm 以下に微細化した組織を持つもの(例：図 4.3.4-3(2)の Photo 6-2-3 及び図 4.3.4-4(2)の Photo 10-5-3)の 2 種類が存在する。後者についてはペレット周辺部の高燃焼度組織(リム組織)が微粒子化したものと解釈されるが、このような微細化組織はいずれのサイズの微粒子においても観察されることから、組織の微細化とペレット微粒子化時のサイズの間に関係はないと考えられる。図 4.3.4-2(4)の Photo 4-1 に光沢を有する粒子は、圧力センサ等の防水処理に使用した樹脂の破片である。

##### (4) 被覆管の SEM 観察

被覆管外面及び SEM による破面観察用試料の採取位置を図 4.3.4-5(既出)に示す。切出した試料の長さは約 15~20 mm である。Top 側試料の観察結果を図 4.3.4-6 から-9 に、Bottom 側試料の観察結果を図 4.3.4-10 から-14 に示す。図 4.3.4-6 の Photo 1 領域両端付近に見えるグレーのラインはペレット-ペレット境界位置に対応している。

破損した同燃料被覆管についてパルス照射後の金相観察は未実施であるが、図 4.3.4-7 の Photo 1 では、殆どの位置で被覆管外面から内面に向かって肉厚の 4 分の 3 程度はほぼ周方向に垂直な平面上に破損が進展し、内面側の残り 4 分の 1 程度の位置で、破損の進行方向が同平面に対し斜

め方向に変化する様子が観察される。また、図 4.3.4-11 の Photo 3 では、全体的に、より肉厚中央に近い位置で破損の進行方向が変化している。破面の拡大写真を比較すると、水素化物が殆ど存在しない内周部 (Photo 1-1-3-1-1、Photo 1-2-3-1-1) だけでなく、肉厚中央部 (Photo 1-1-2-1-1、Photo 1-2-2-1-1)、外周部 (Photo 1-1-1-1-1、Photo 1-2-1-1-1) でもディンプルが観察されること、また肉厚中央部と外周部で破面は平坦ではなく、短いせん断破壊が連続して起こっている様に見えること、等から、破面の多くの領域は延性破断によって形成されたことがわかる。一方で、マクロに見た場合に、図 4.3.4-7 の Photo 1 に見られるような周方向に垂直な破面が形成されるのは、脆い性質を有するジルコニウム水素化物 (以下、水素化物) の析出が肉厚中央部、外周部へと向かうにつれて密になり、水素化物の存在によってせん断破壊の内面側への進展が中断され別の方向へのせん断破壊となって進展する繰り返しの頻度が高くなるためと解釈される。これらの観察結果は、VA-5 実験燃料のリファレンス試料である AP2-3MC1 の金相 (H24 年度報告済) において、水素化物が被覆管径方向に広く分散していた観察結果と対応している。

なお、過去の VA シリーズ実験 (VA-1、VA-2) を含む従来の破損ケースにおいて取得された破面と比較すると、全体にディンプルの伸び、大きさ共に小さい傾向が見られた。

VA-5 実験燃料では、パルス照射実験前の段階で部分的な外面酸化膜の剥離が生じていることが確認されている。SEM 観察を実施したパルス後の試料でも破損開口部付近に剥離が観察され (図 4.3.4-7)、パルス照射により新たに生じたものと判断される。剥離箇所を拡大すると、層状の表面構造が観察された (図 4.3.4-9)。また MDA 被覆燃料の破損ケースである VA-2 実験を含む<sup>(3)</sup>従来の実験結果では、しばしば外面酸化膜表面に多数の細かいき裂が約 100  $\mu\text{m}$  程度の間隔で生じている様子が観察されていたが、VA-5 実験ではこのようなき裂の発生は見られていない。

表 4.3.4-1 VA-5 実験で燃料棒外に放出されたペレットの粒径分布測定結果

粒径	篩分後重量 (g)	重量比 (%)
4000 $\mu\text{m}$ 以上	—	—
2000 $\mu\text{m}$ – 4000 $\mu\text{m}$	—	—
1000 $\mu\text{m}$ – 2000 $\mu\text{m}$	0.4339	0.72
500 $\mu\text{m}$ – 1000 $\mu\text{m}$	2.6298	4.36
250 $\mu\text{m}$ – 500 $\mu\text{m}$	7.1282	11.81
125 $\mu\text{m}$ – 250 $\mu\text{m}$	14.3283	23.75
63 $\mu\text{m}$ – 125 $\mu\text{m}$	13.7878	22.85
32 $\mu\text{m}$ – 63 $\mu\text{m}$	12.6194	20.92
32 $\mu\text{m}$ 未満	9.4045	15.59
計	60.3319	100
計 (篩分前)	60.9871	—

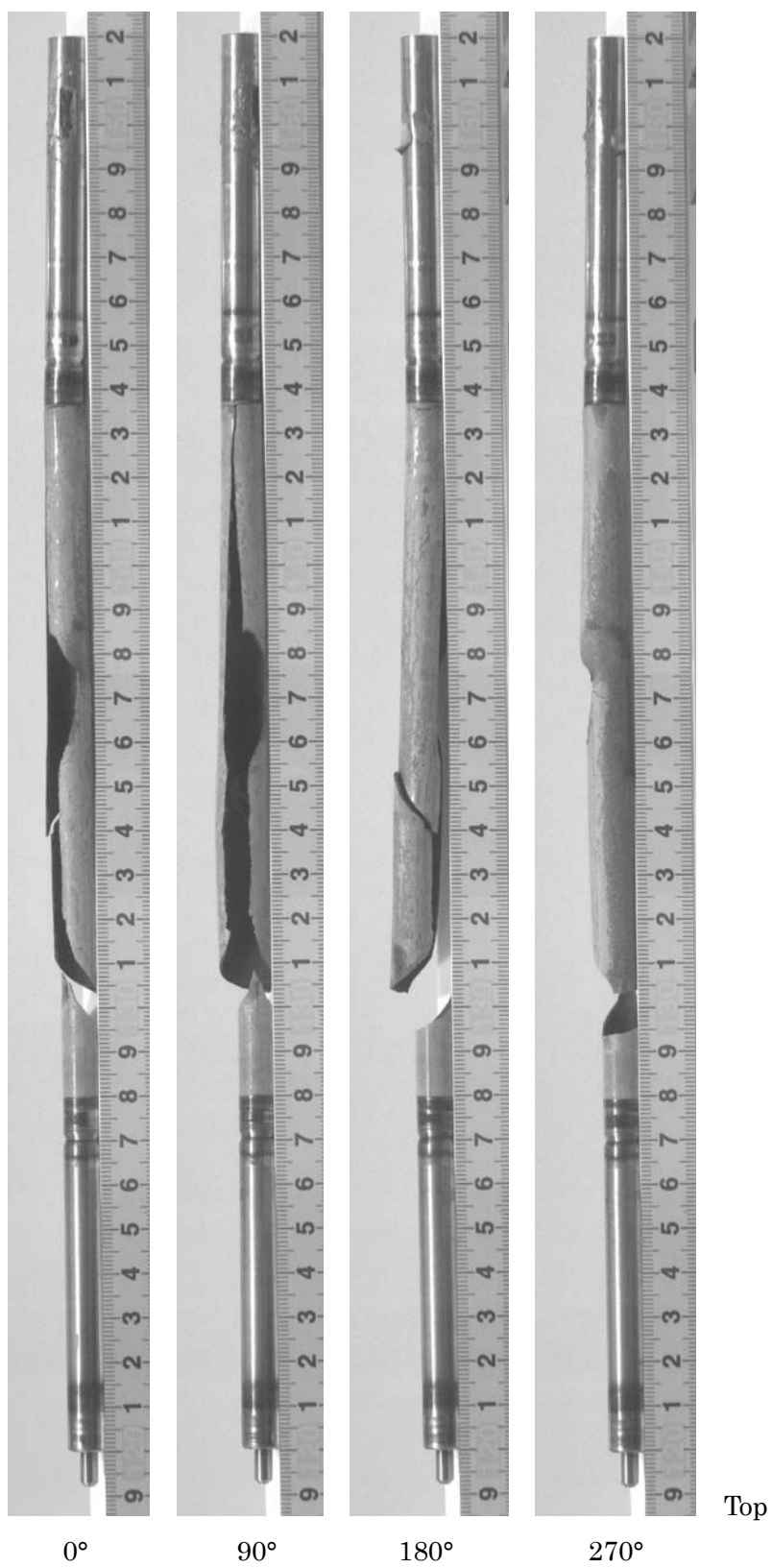


図 4.3.4-1 VA-5 試験燃料棒のパルス照射後外観写真

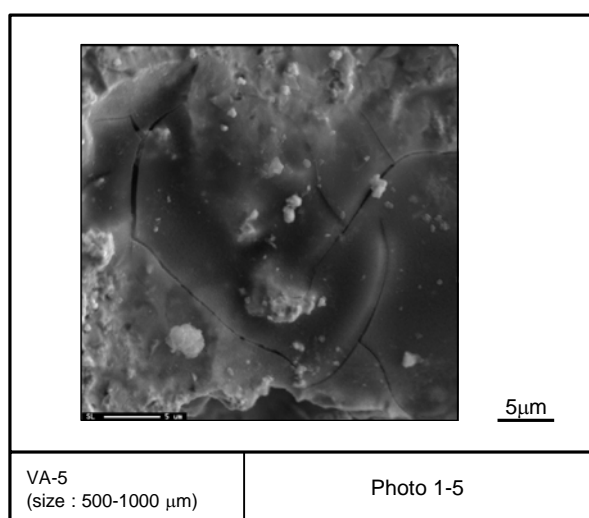
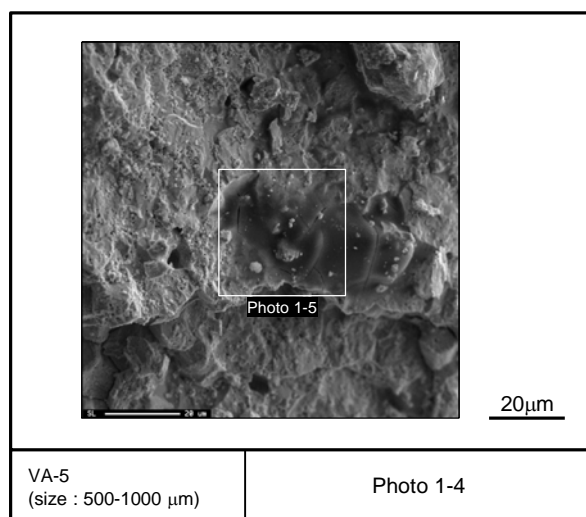
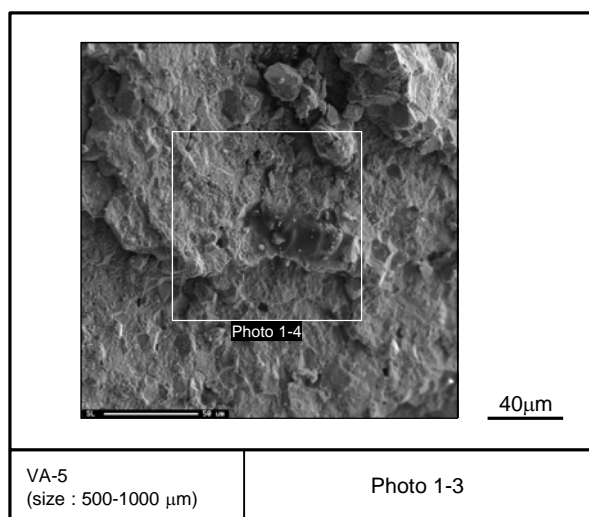
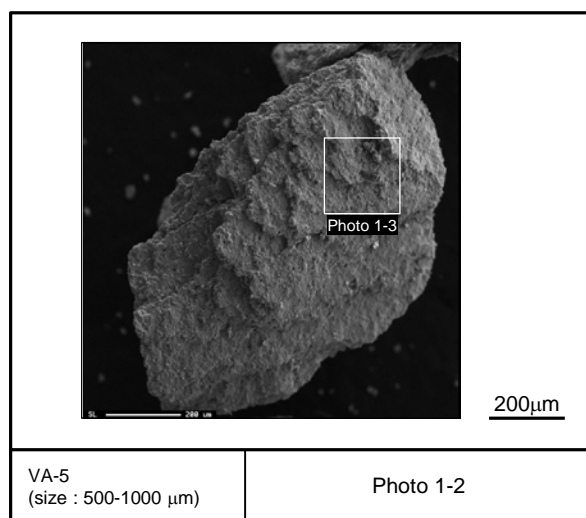
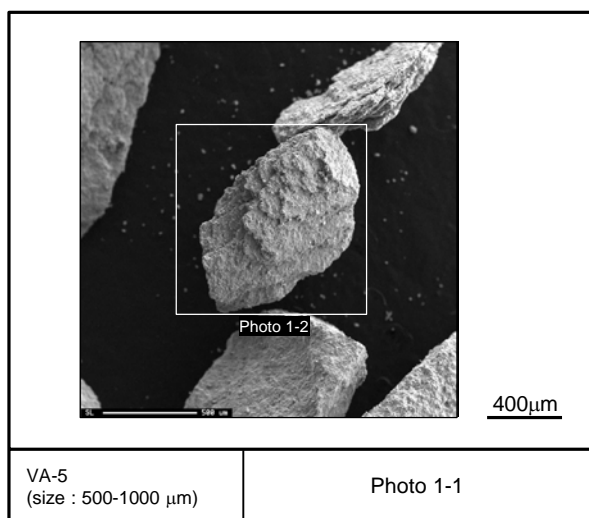


図 4.3.4-2(1) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

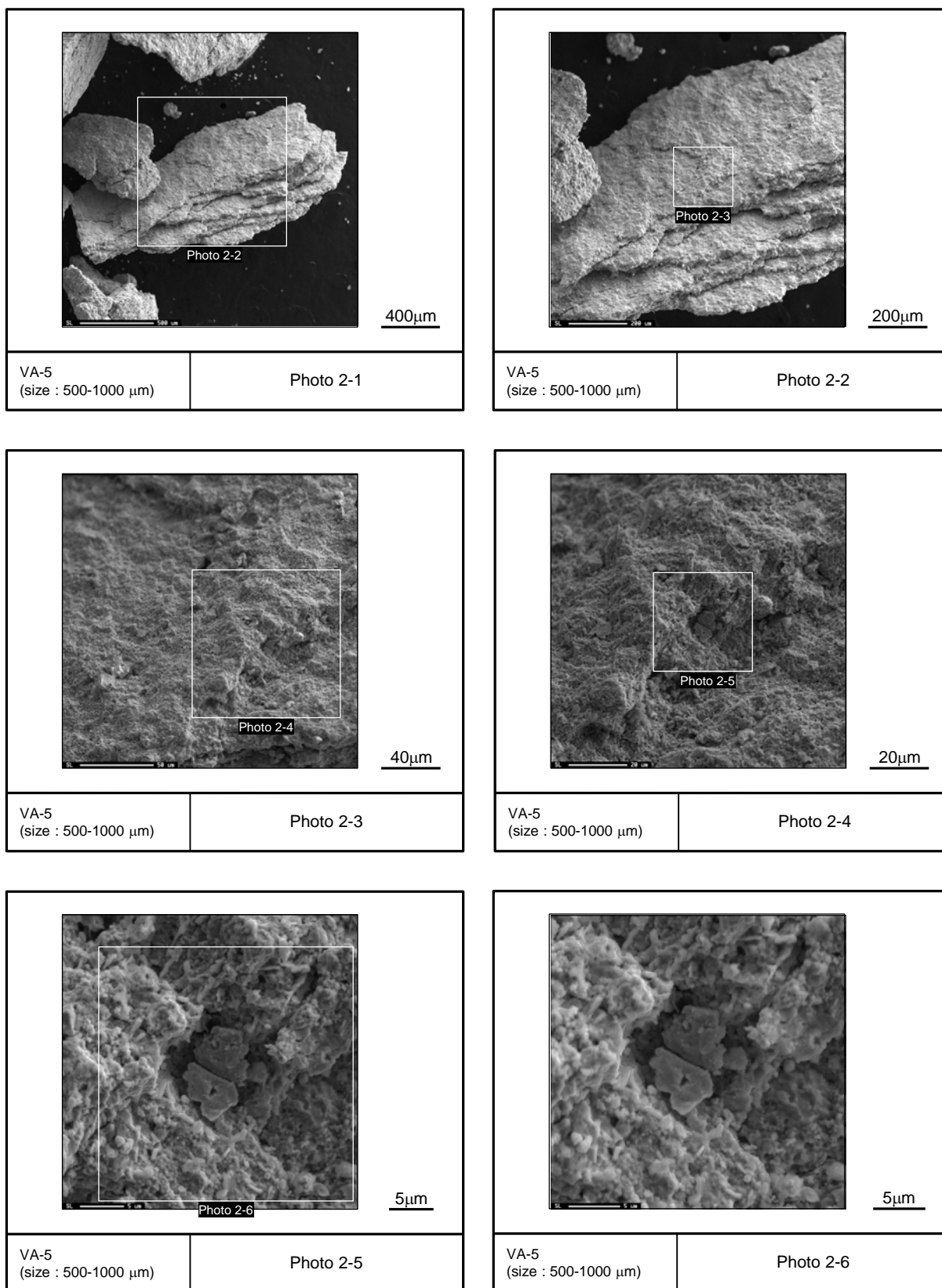


図 4.3.4-2(2) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

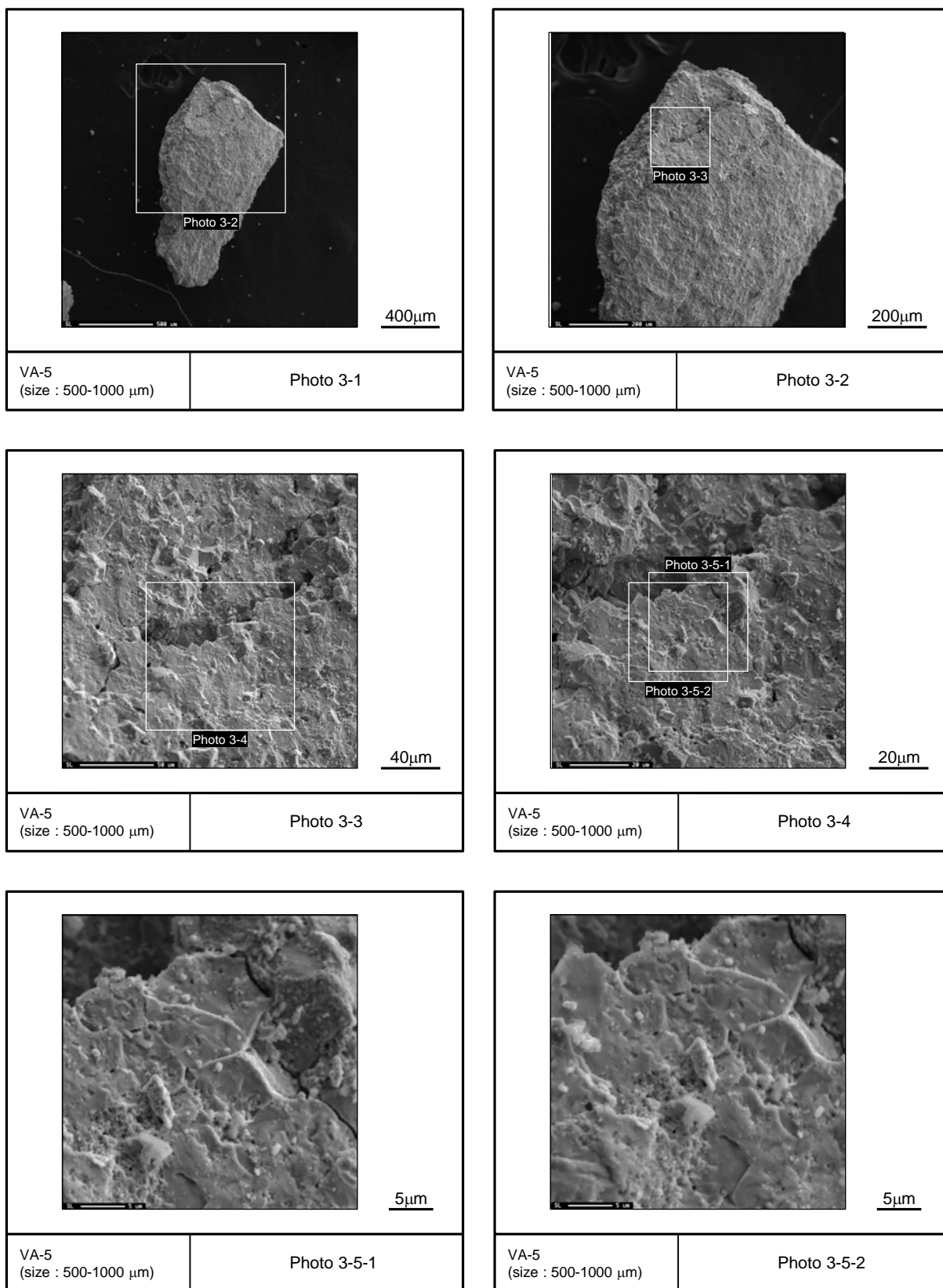


図 4.3.4-2(3) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真



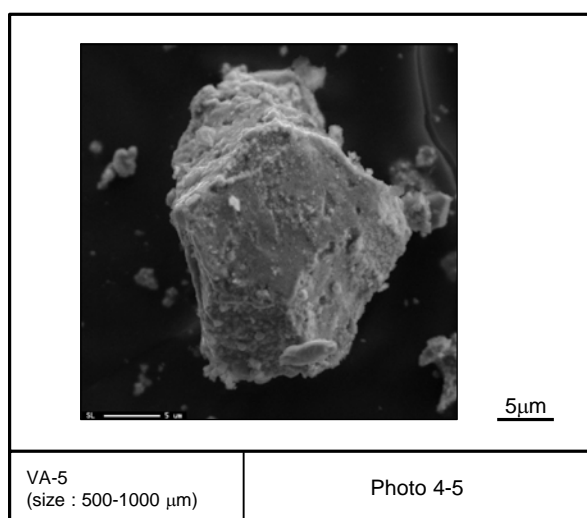
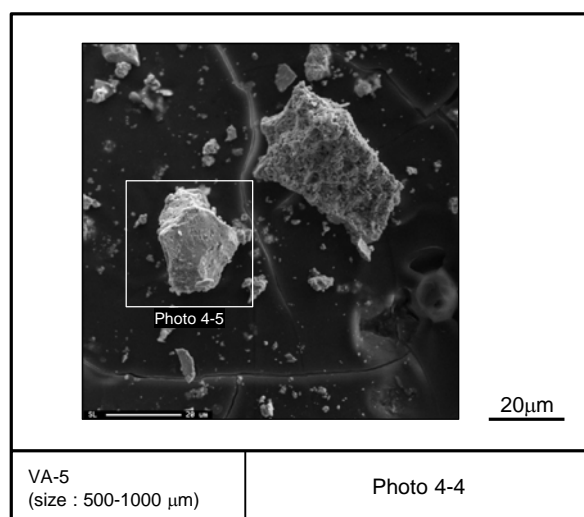
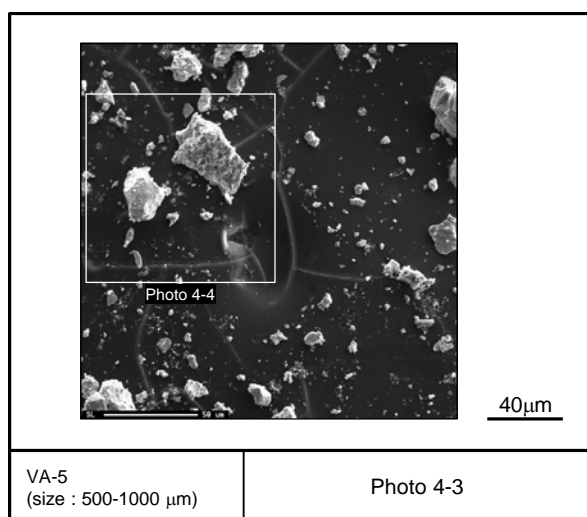
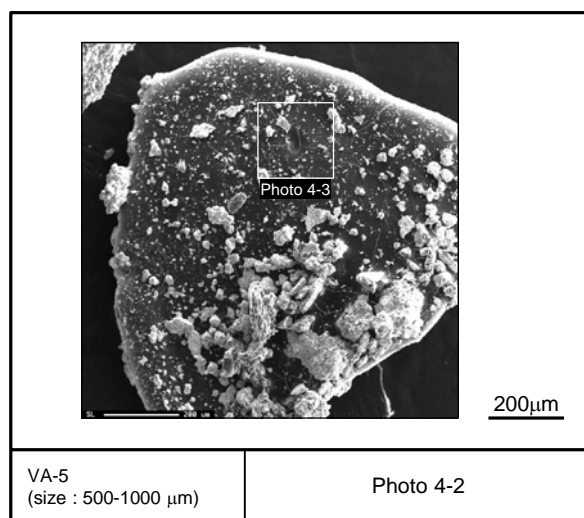
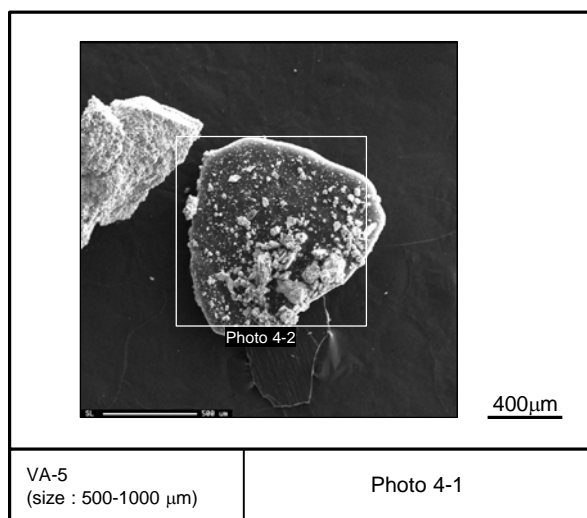


図 4.3.4-2(4) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

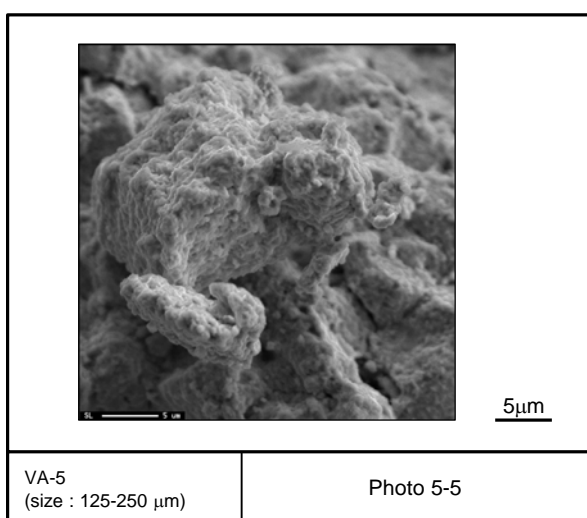
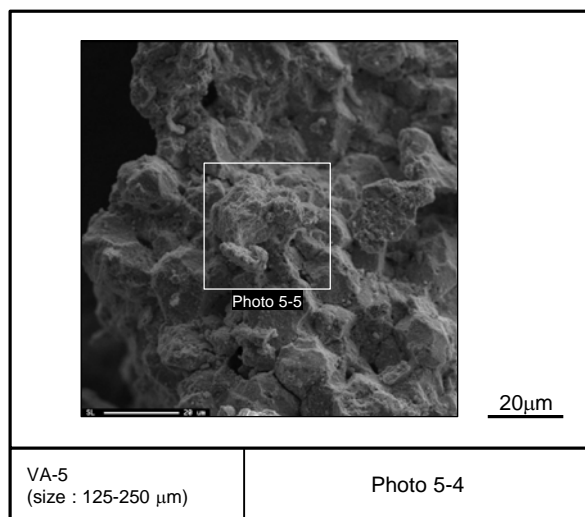
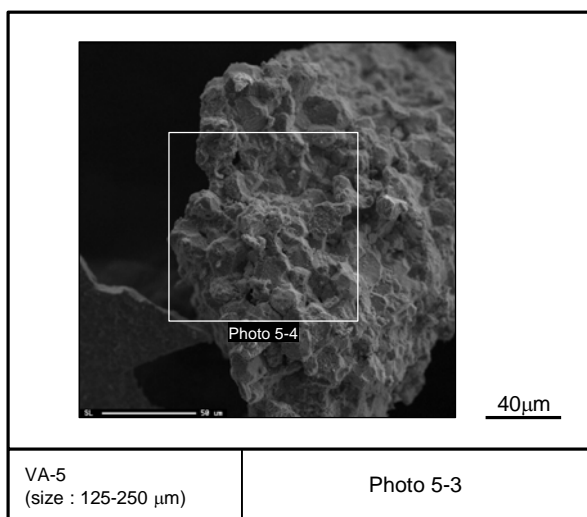
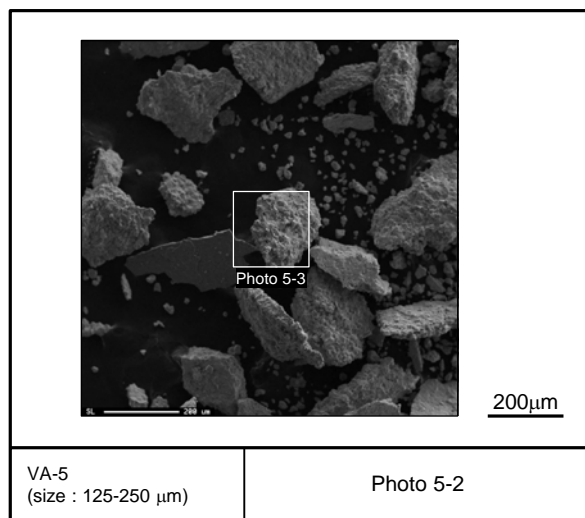
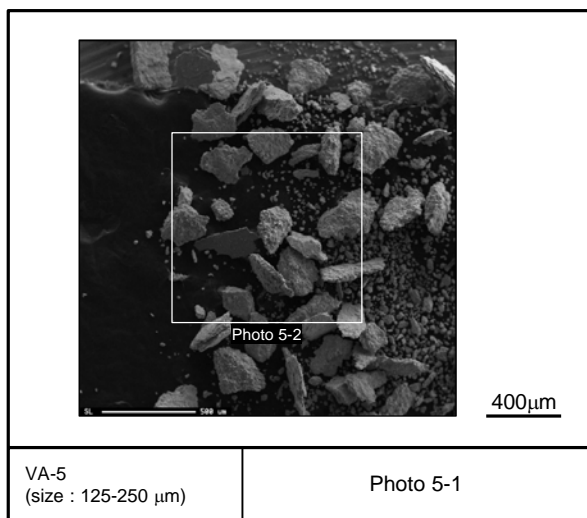


図 4.3.4-3(1) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

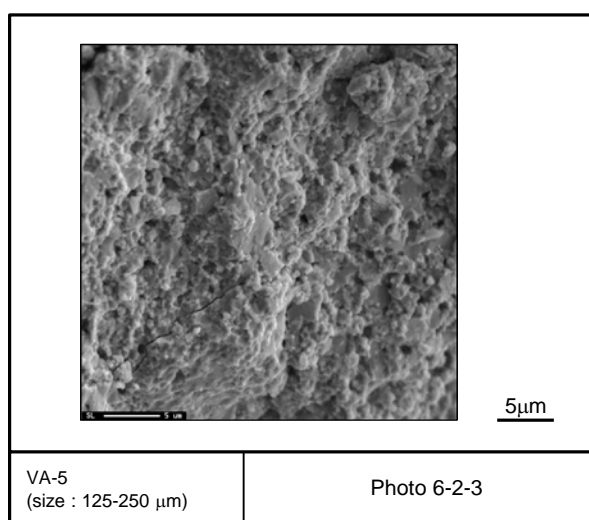
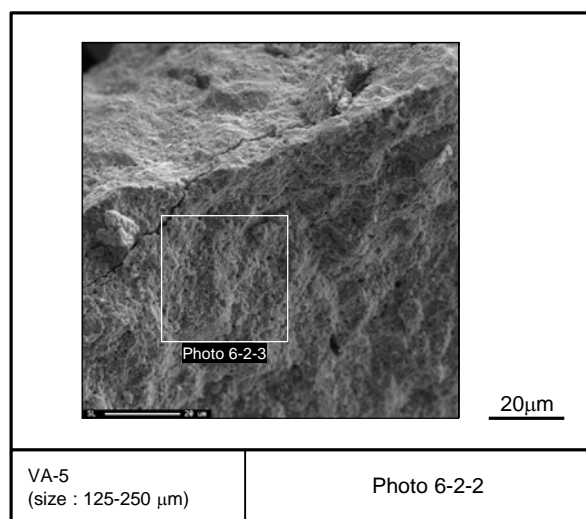
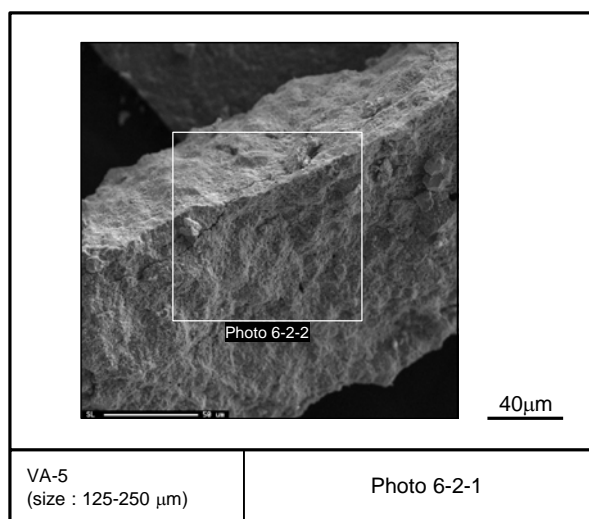
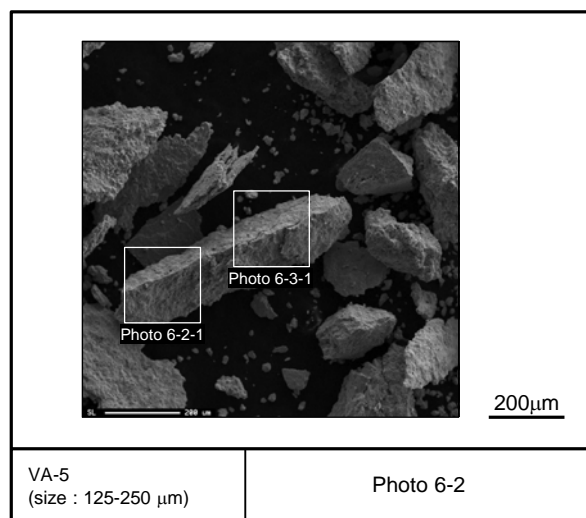
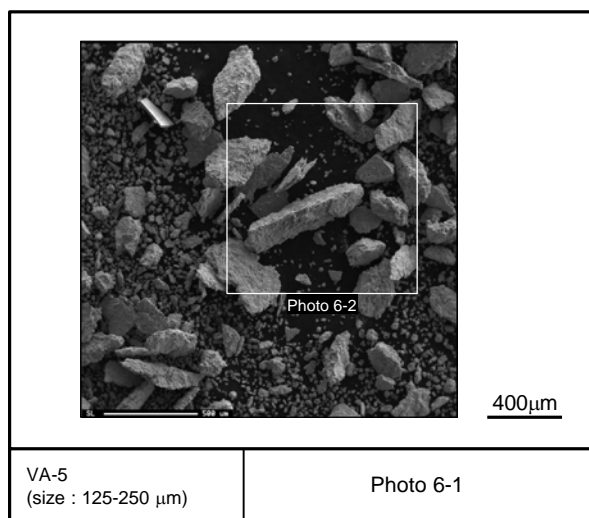


図 4.3.4-3(2) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

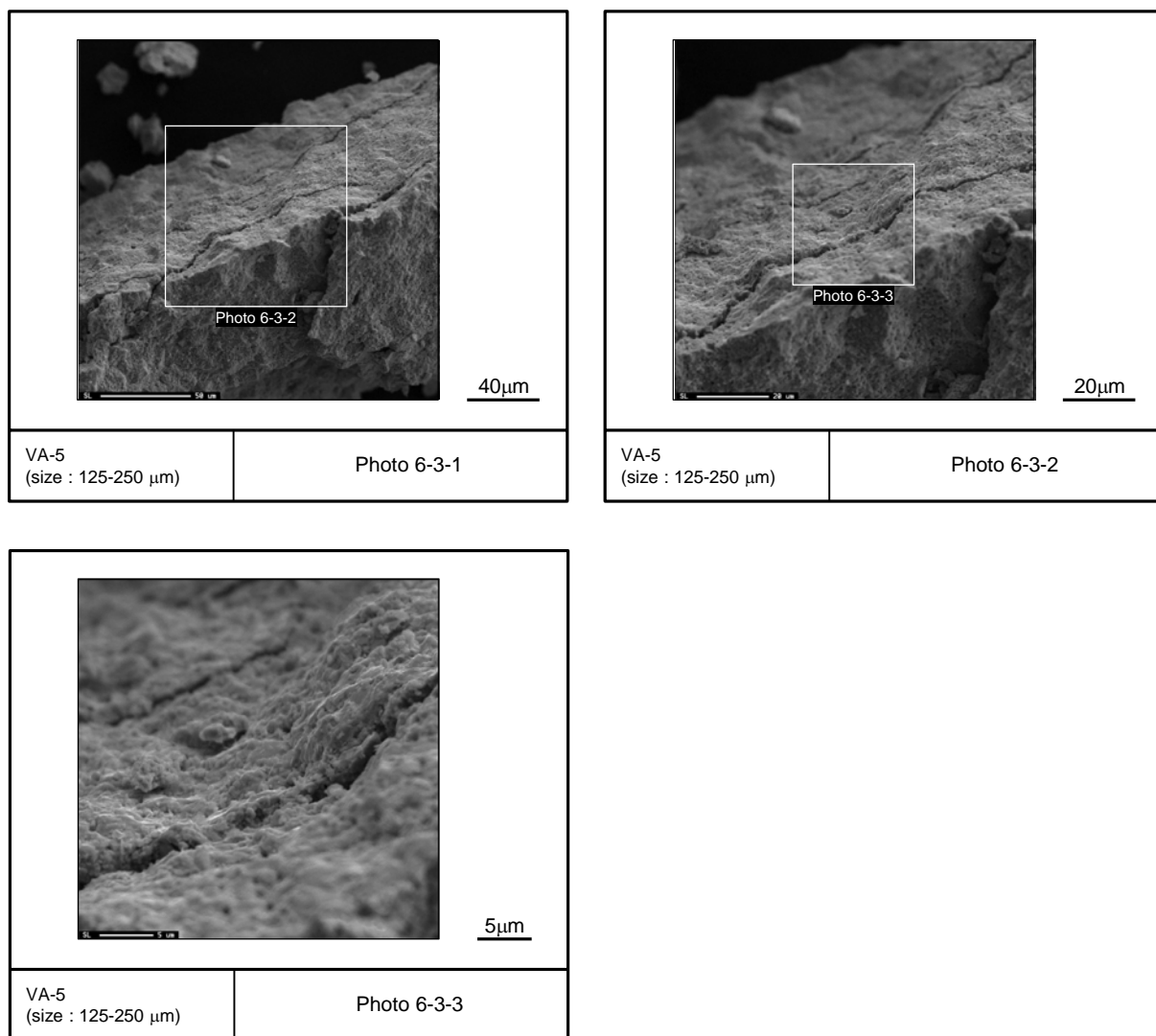


図 4.3.4-3(3) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

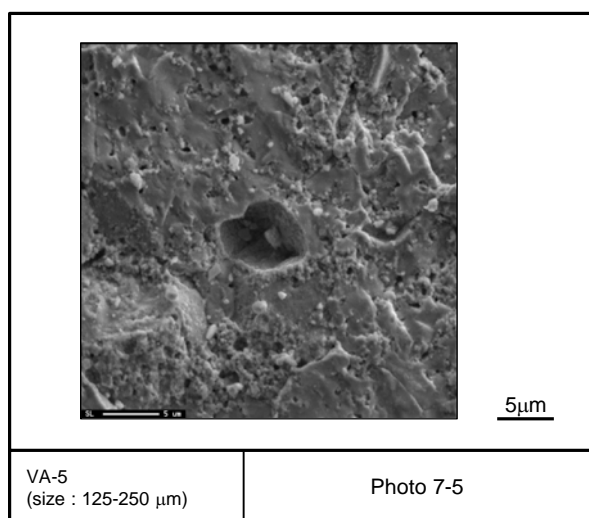
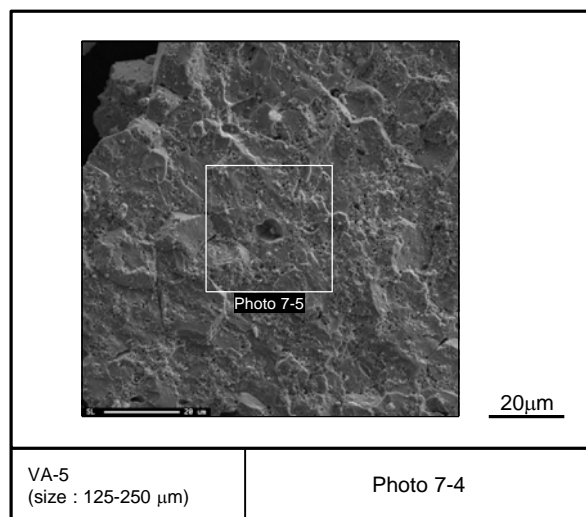
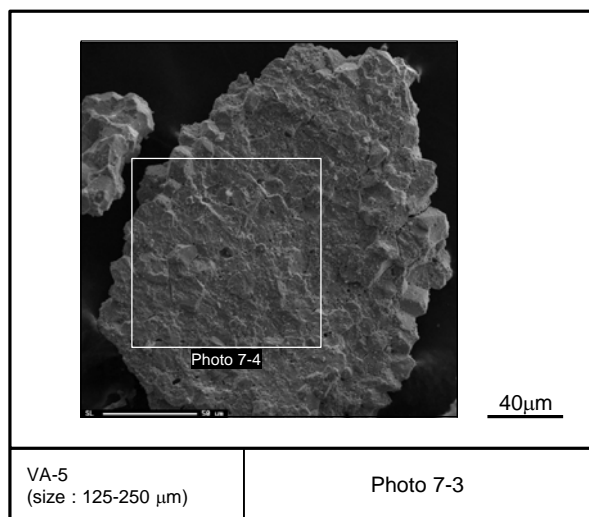
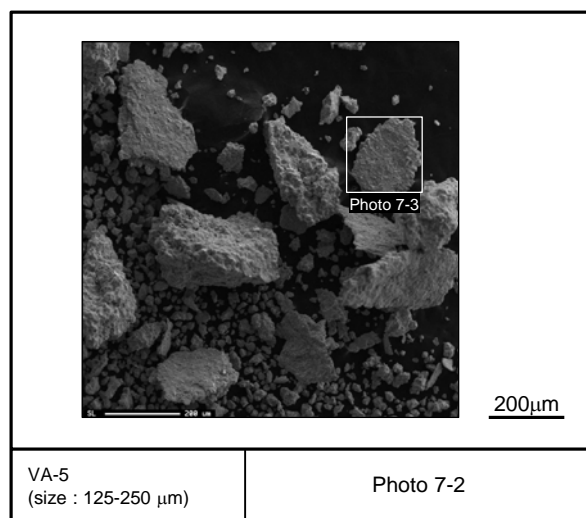
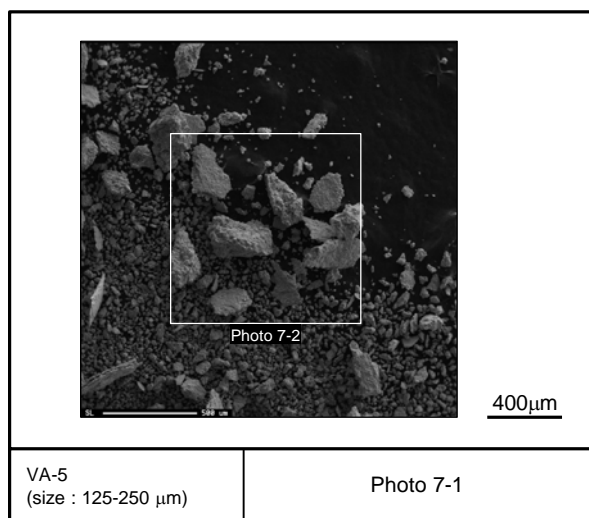


図 4.3.4-3(4) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

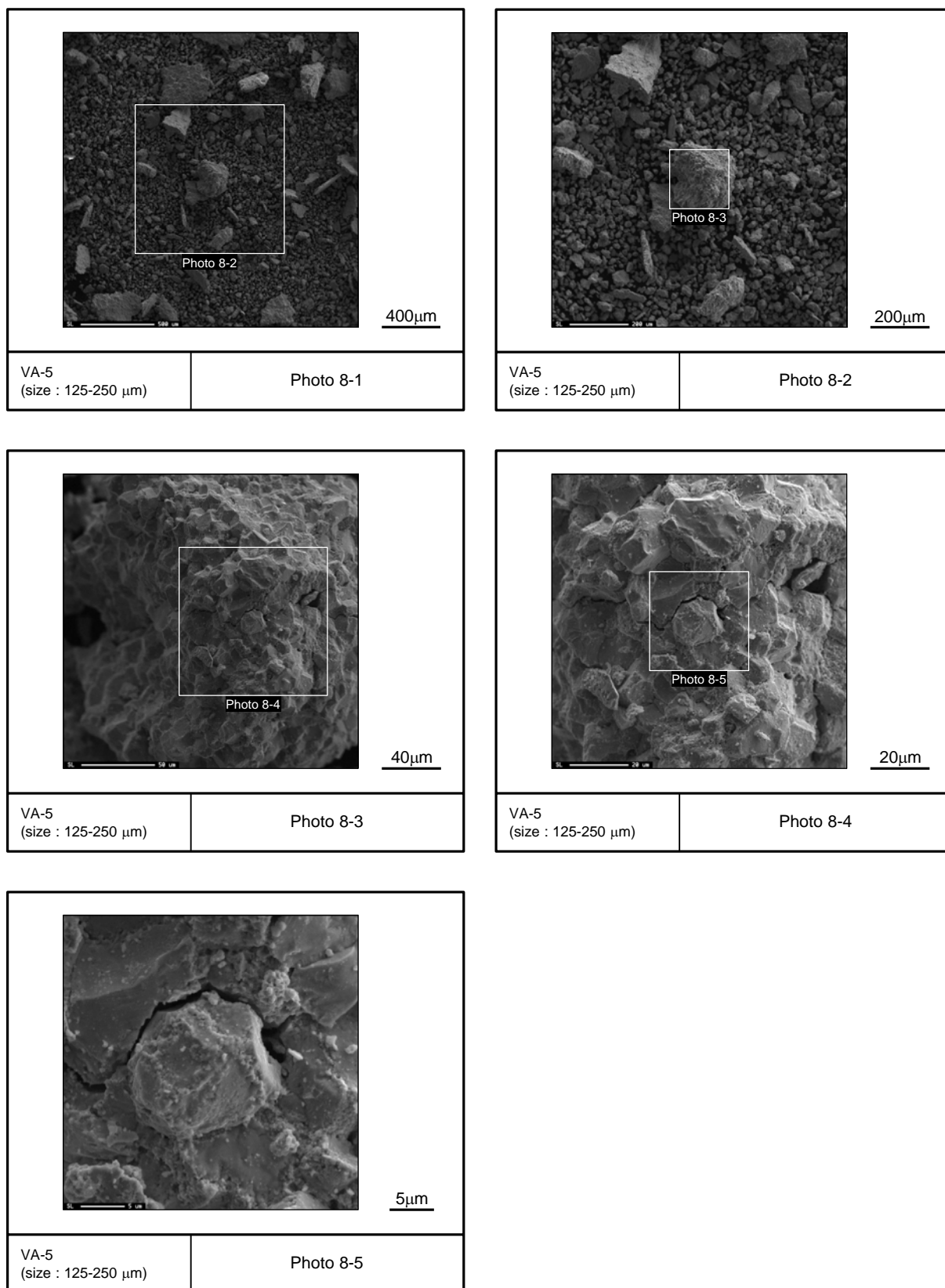


図 4.3.4-3(5) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

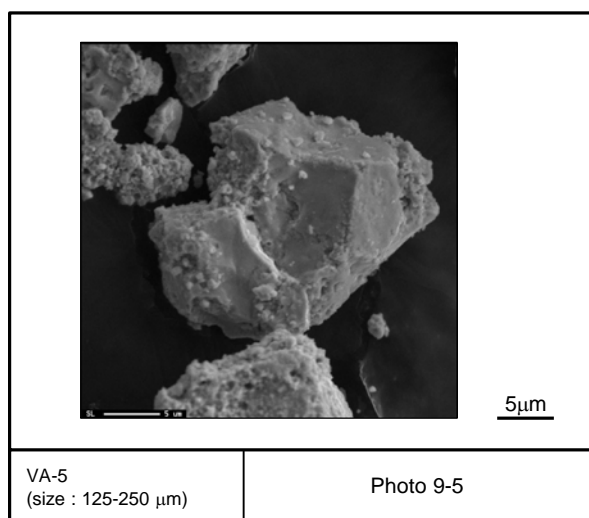
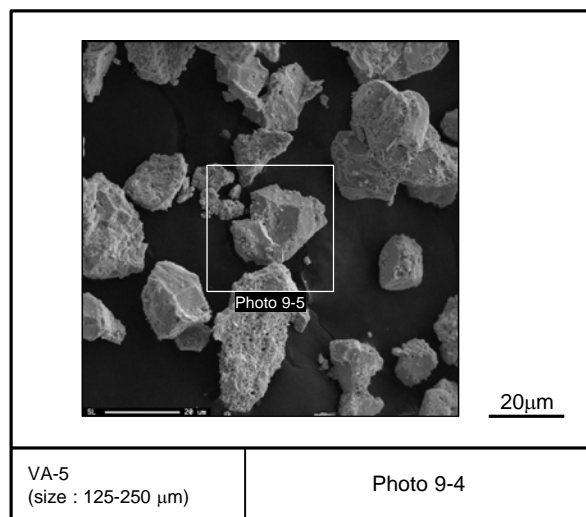
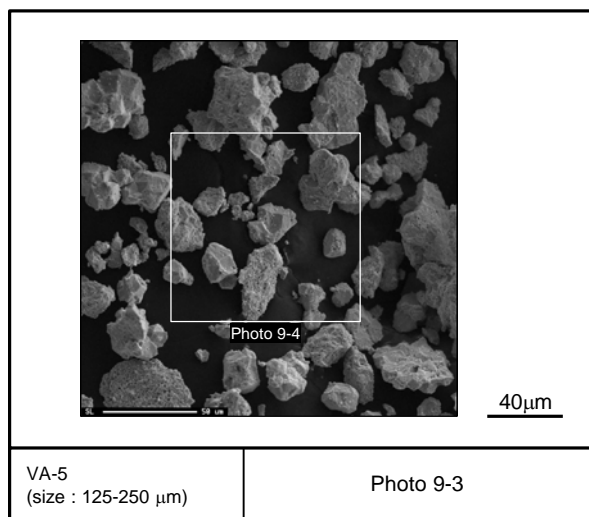
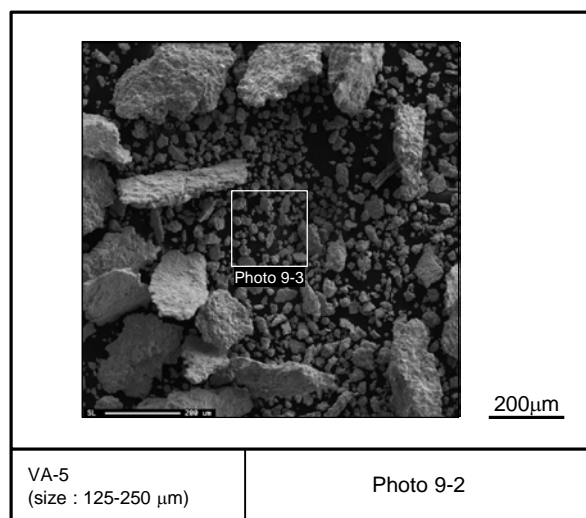
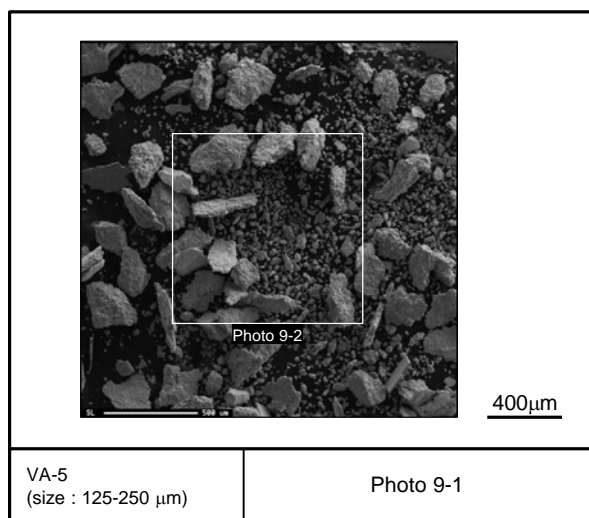


図 4.3.4-3(6) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

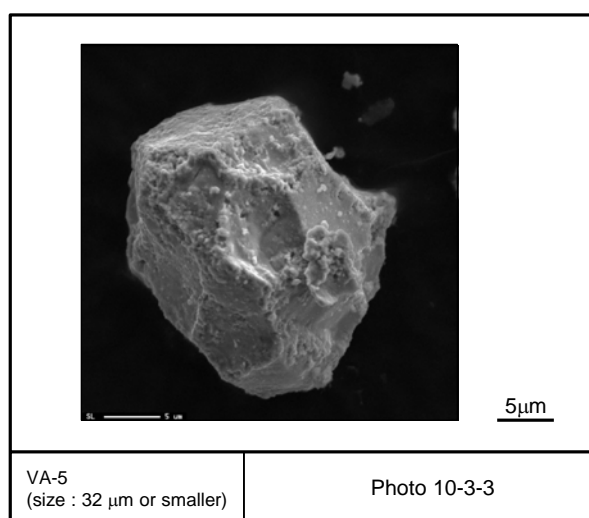
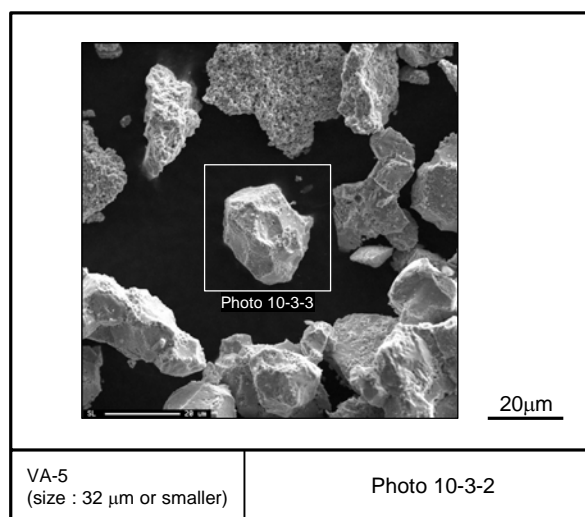
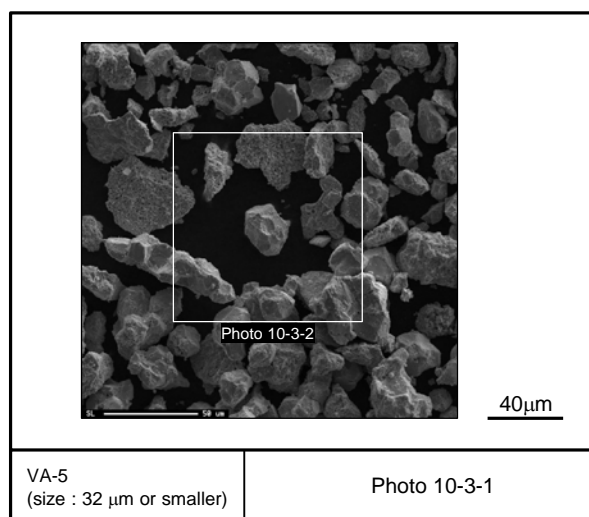
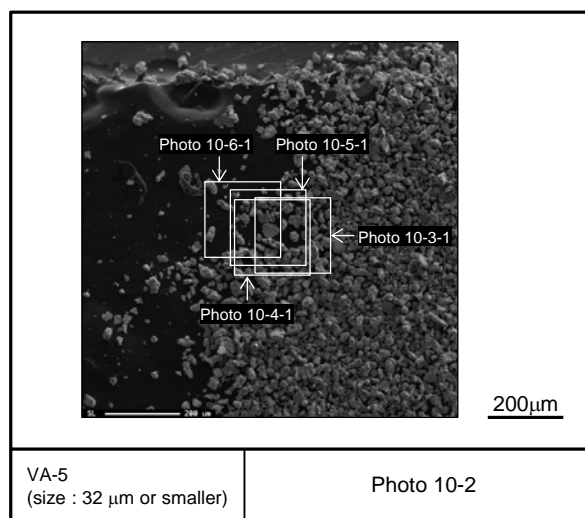
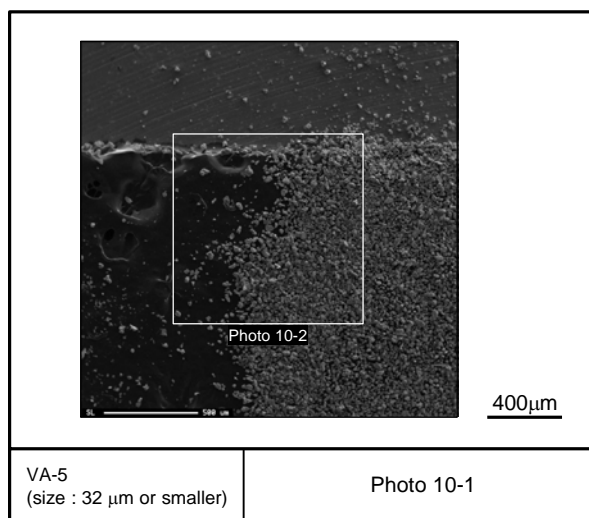


図 4.3.4-4(1) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真



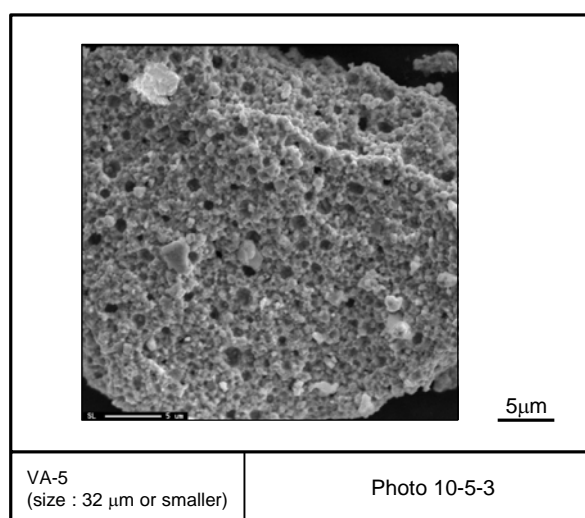
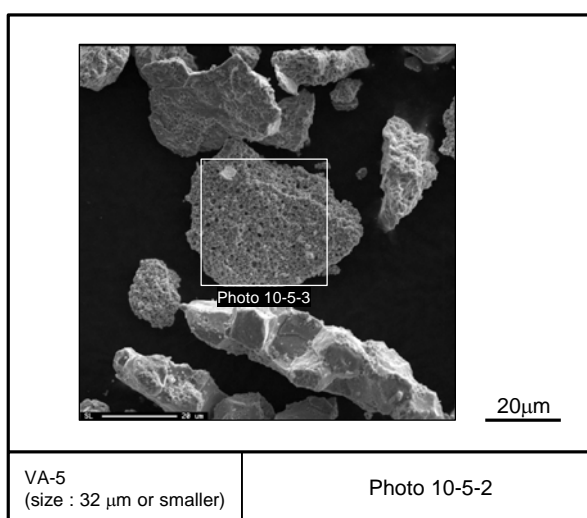
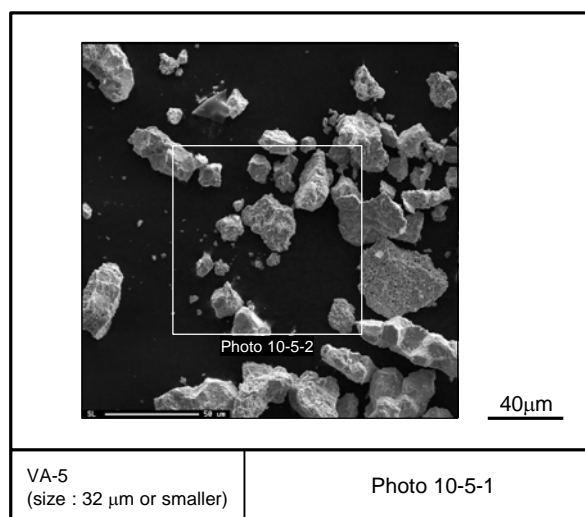
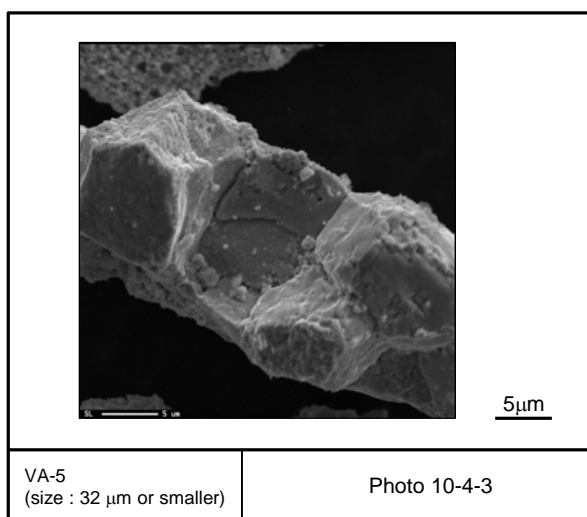
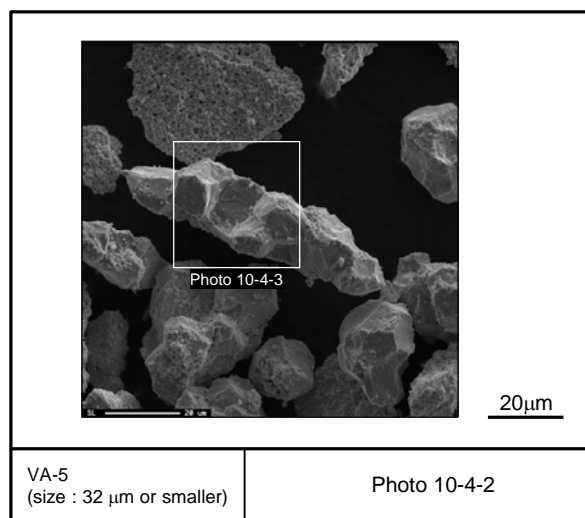
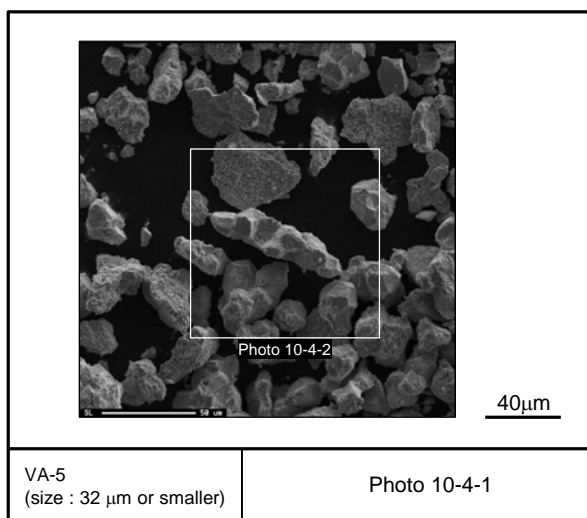


図 4.3.4-4(2) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

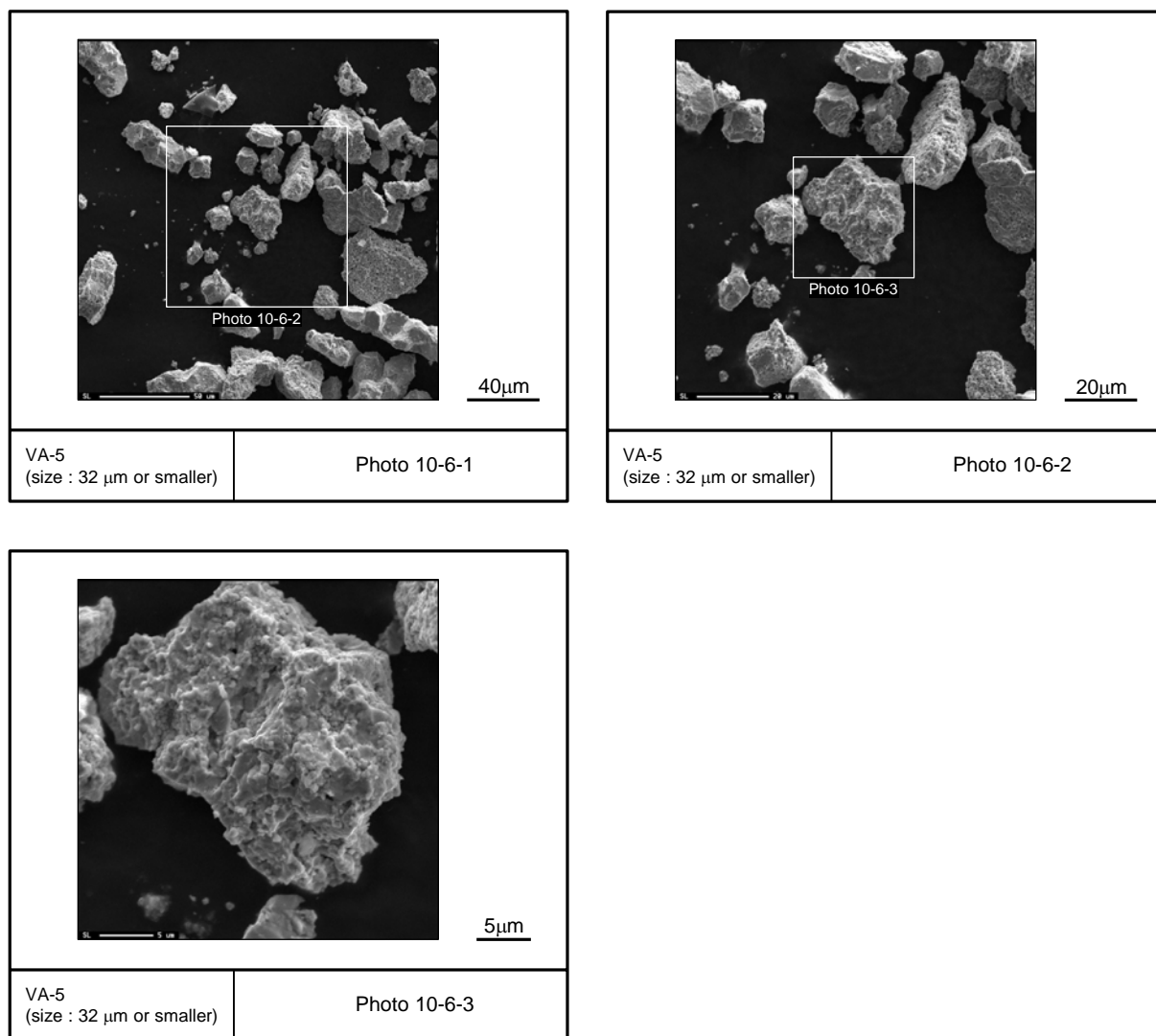


図 4.3.4-4(3) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

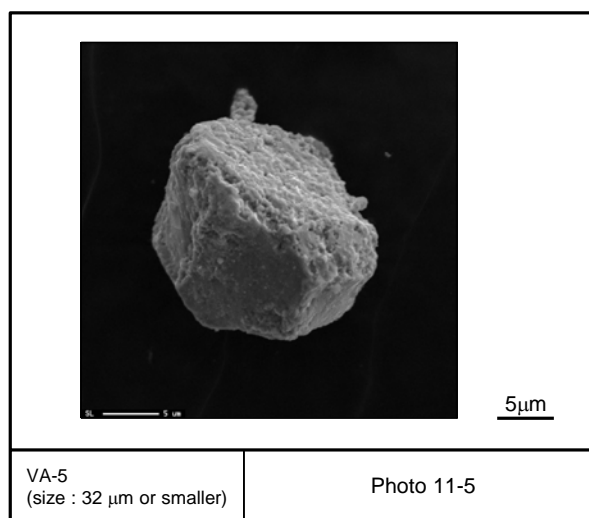
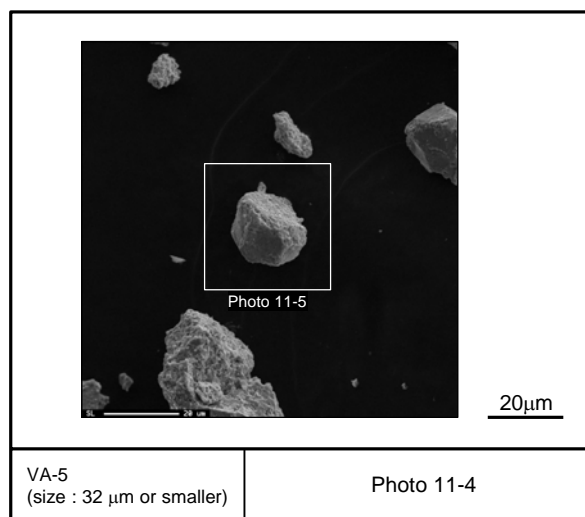
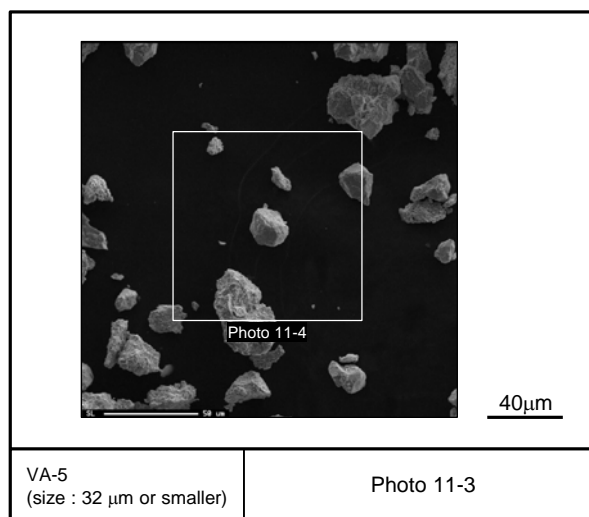
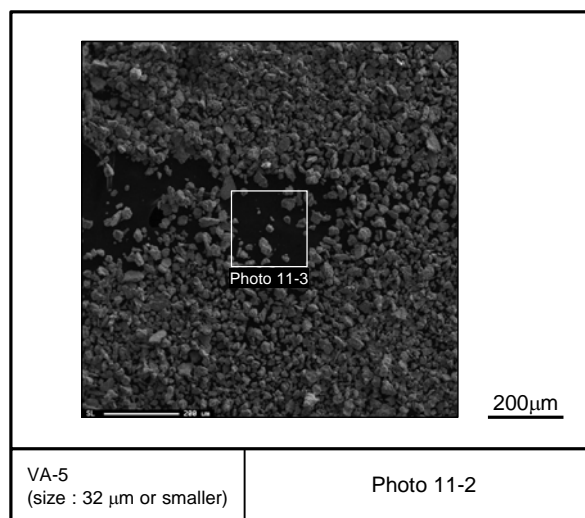
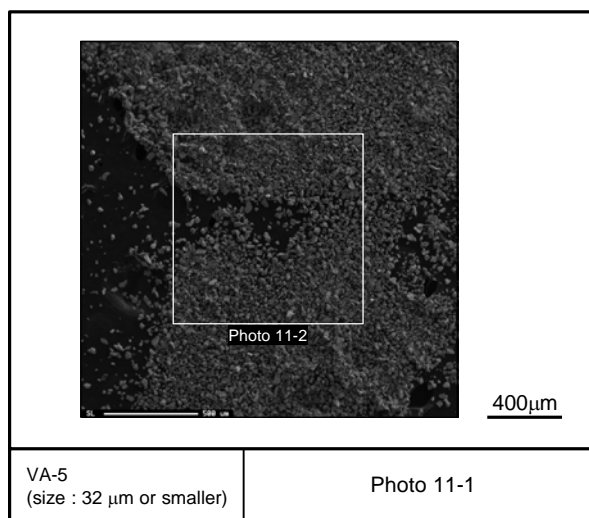
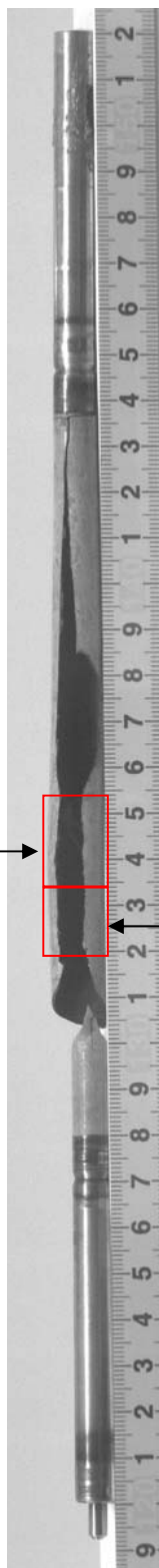


図 4.3.4-4(4) VA-5 実験で破損した燃料のペレット SEM 写真

外面及び破面の SEM 観察 (図 4.3.4-9)



外面及び破面の SEM 観察 (図 4.3.4-6)

図 4.3.4-5 VA-5 実験で破損した被覆管の観察位置

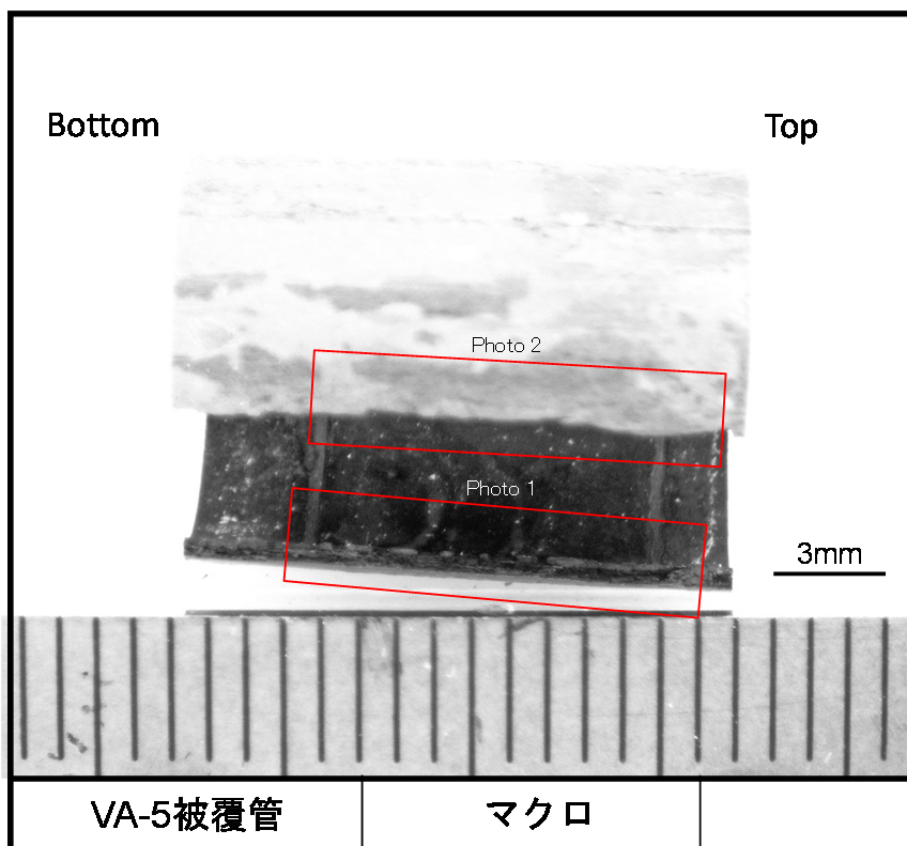
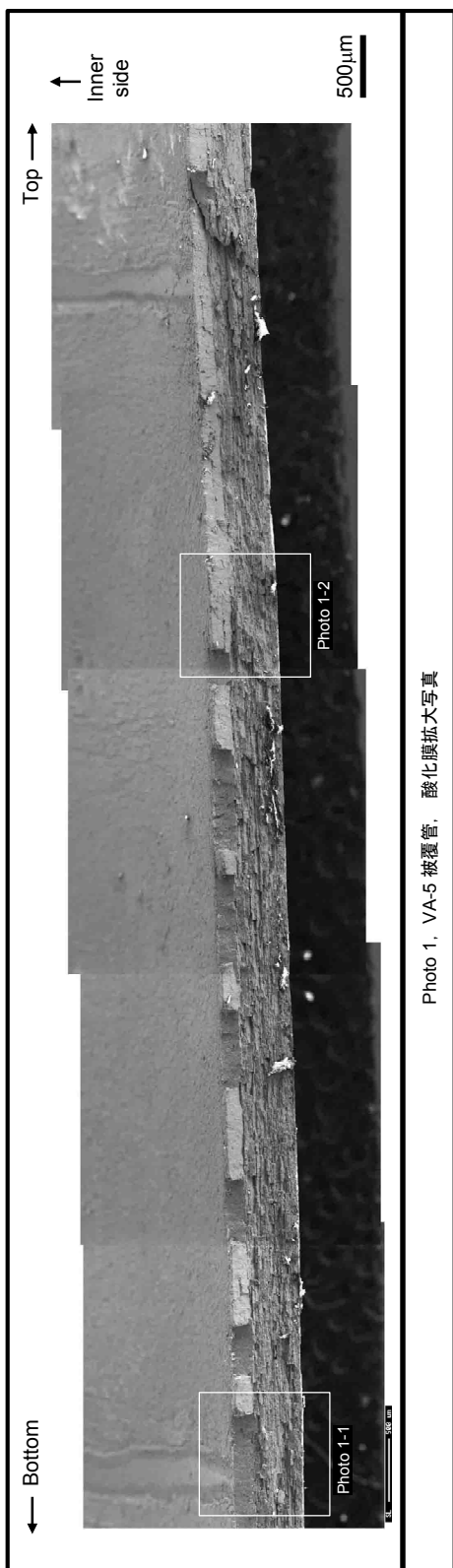


図 4.3.4-6 VA-5 実験で破損した被覆管のマクロ写真 (試料 1)



4.3-95

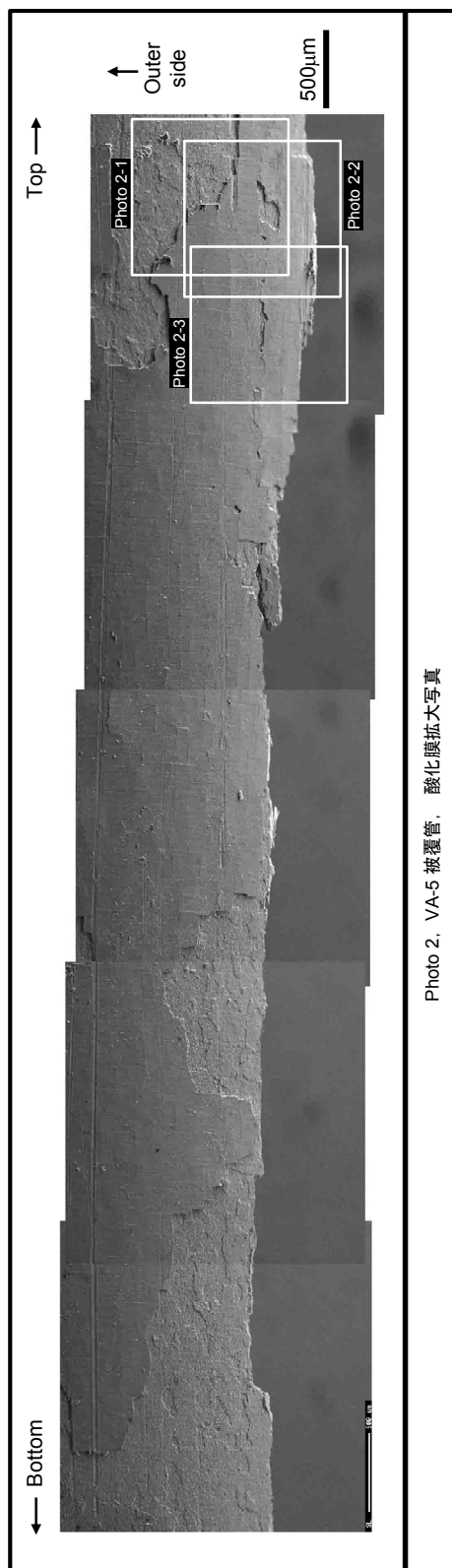


図 4.3.4-7 VA-5 実験で破損した被覆管の破面及び酸化膜

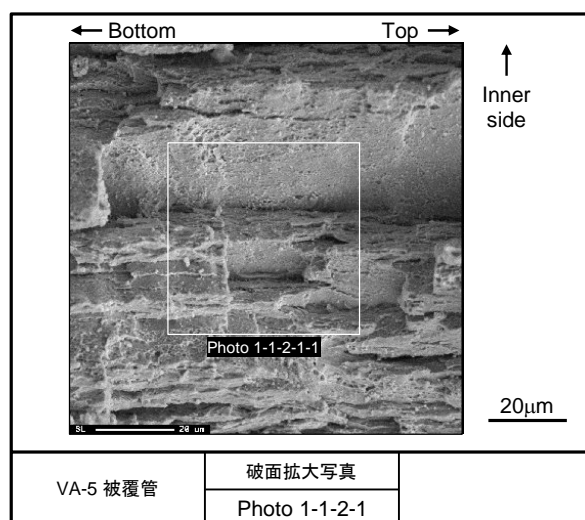
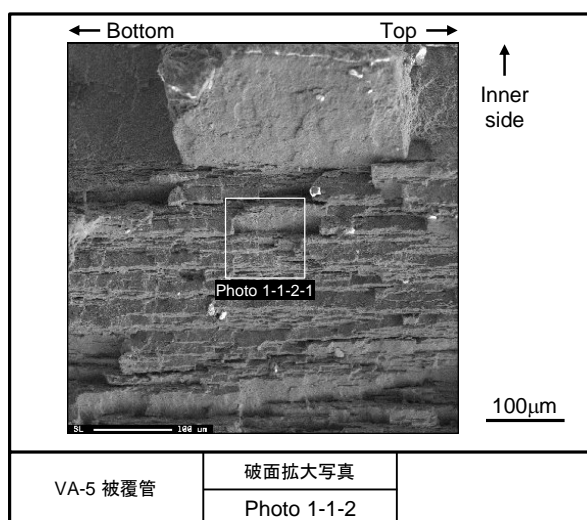
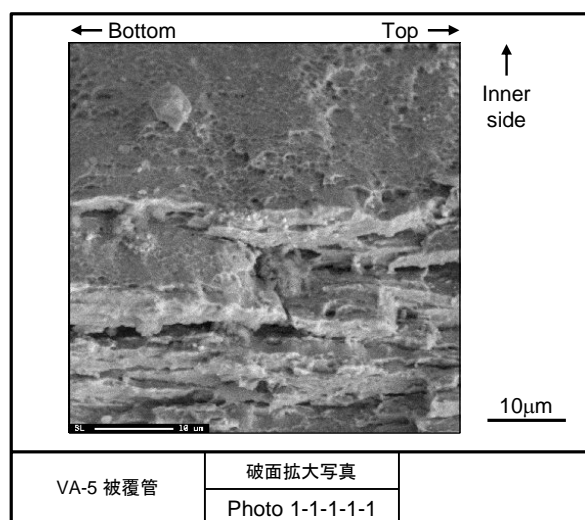
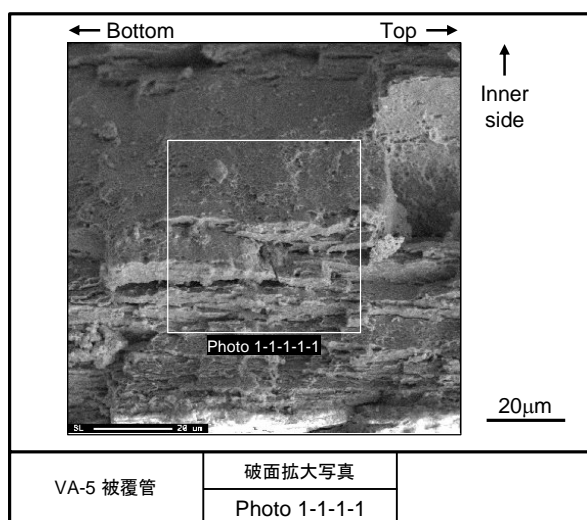
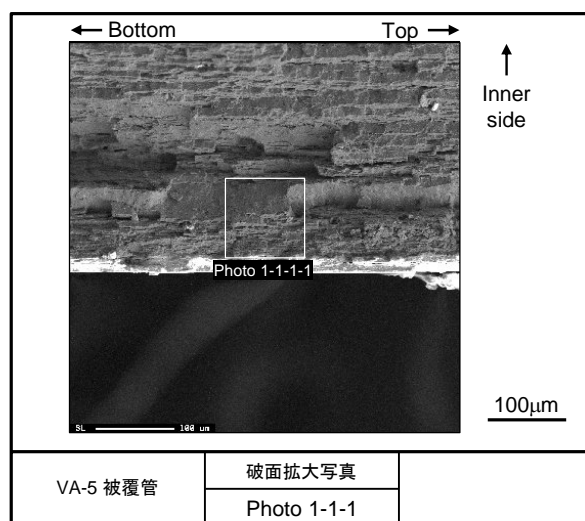
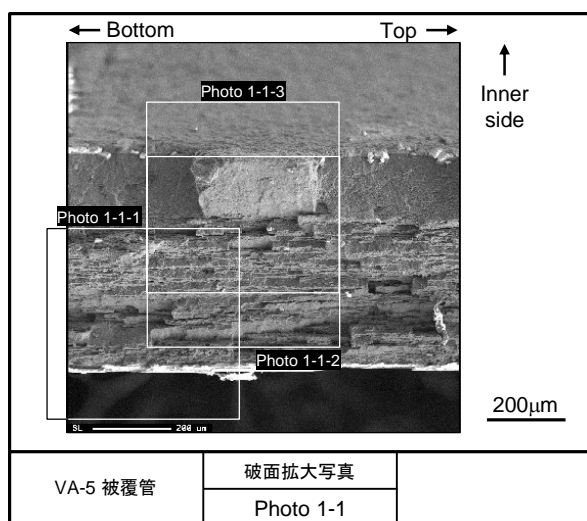


図 4.3.4-8(1) VA-5 実験で破損した被覆管の破面拡大写真 (試料 1)

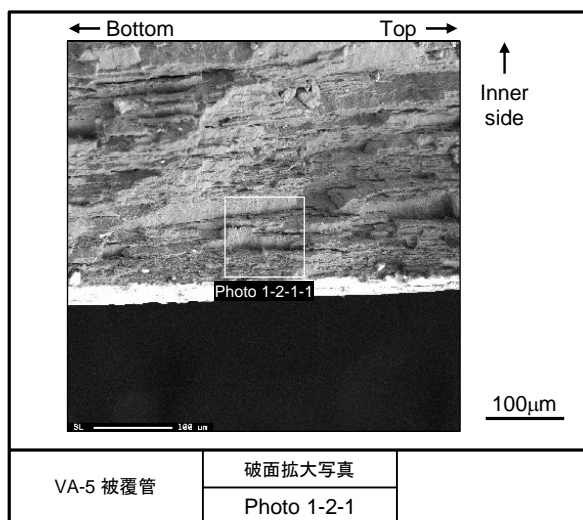
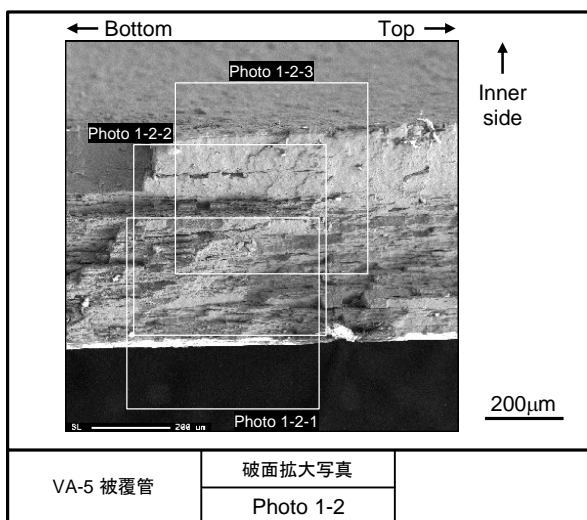
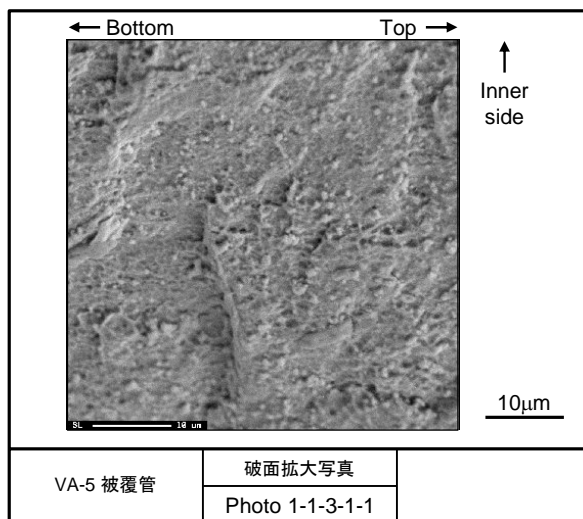
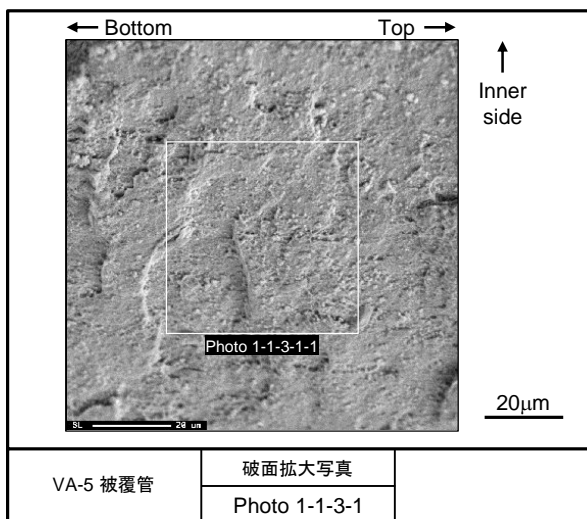
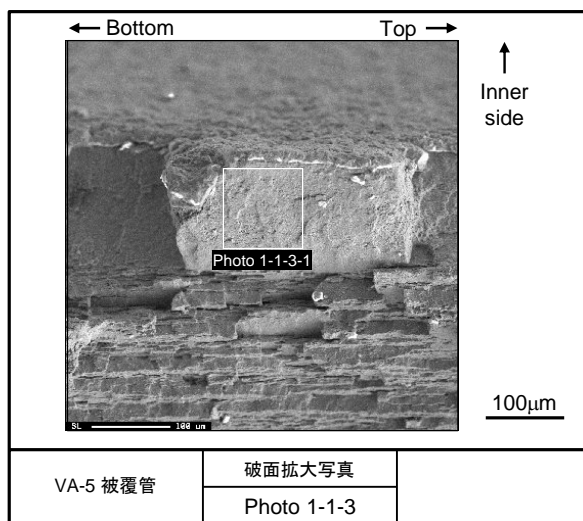
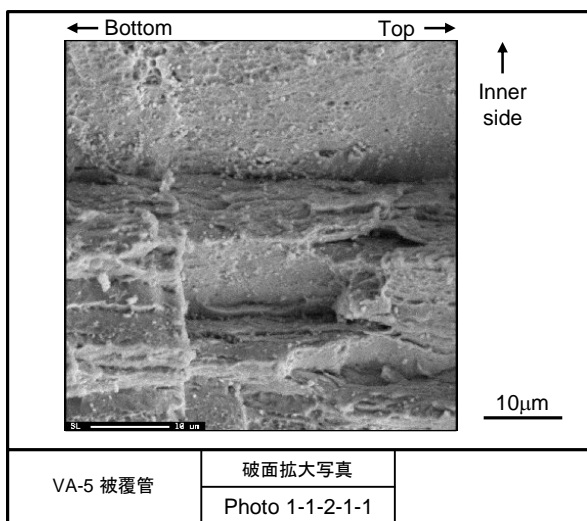


図 4.3.4-8(2) VA-5 実験で破損した被覆管の破面拡大写真 (試料 1)



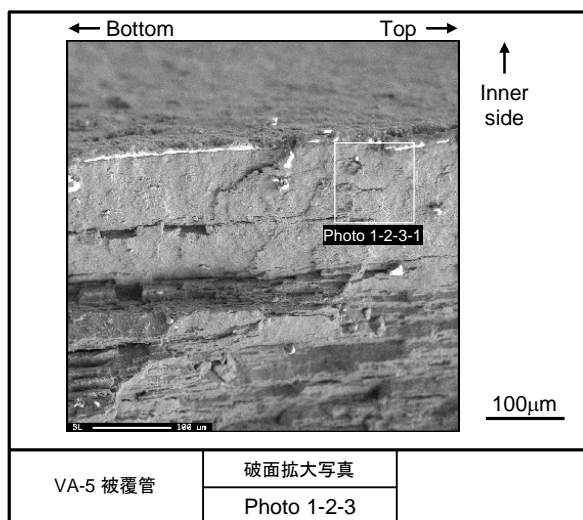
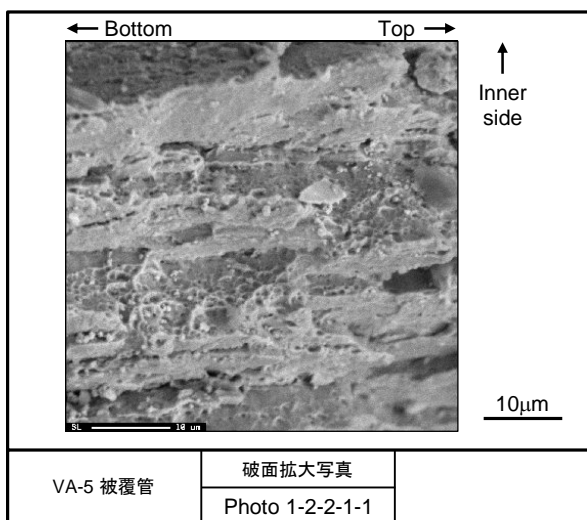
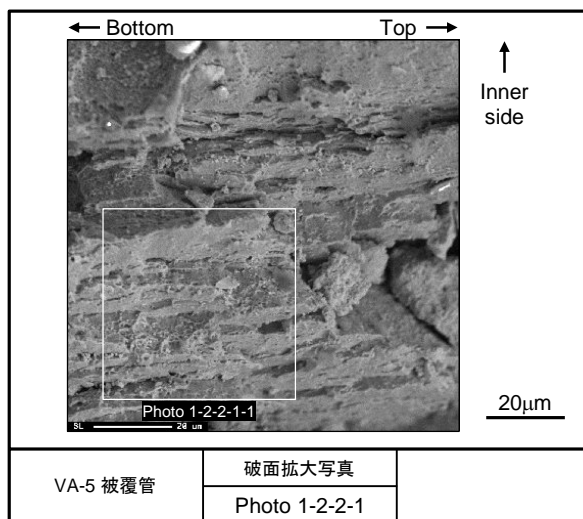
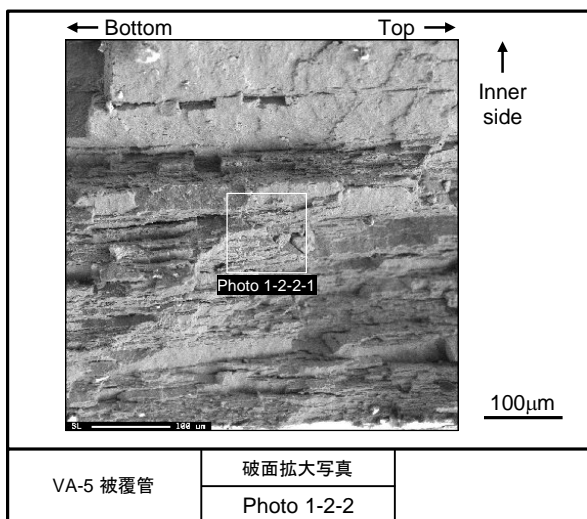
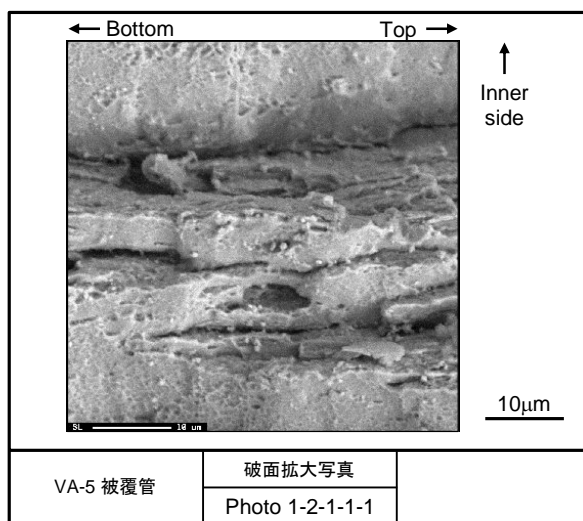
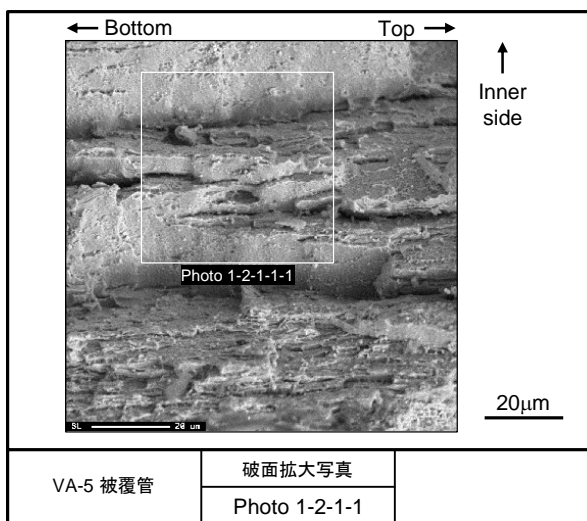


図 4.3.4-8(3) VA-5 実験で破損した被覆管の破面拡大写真 (試料 1)

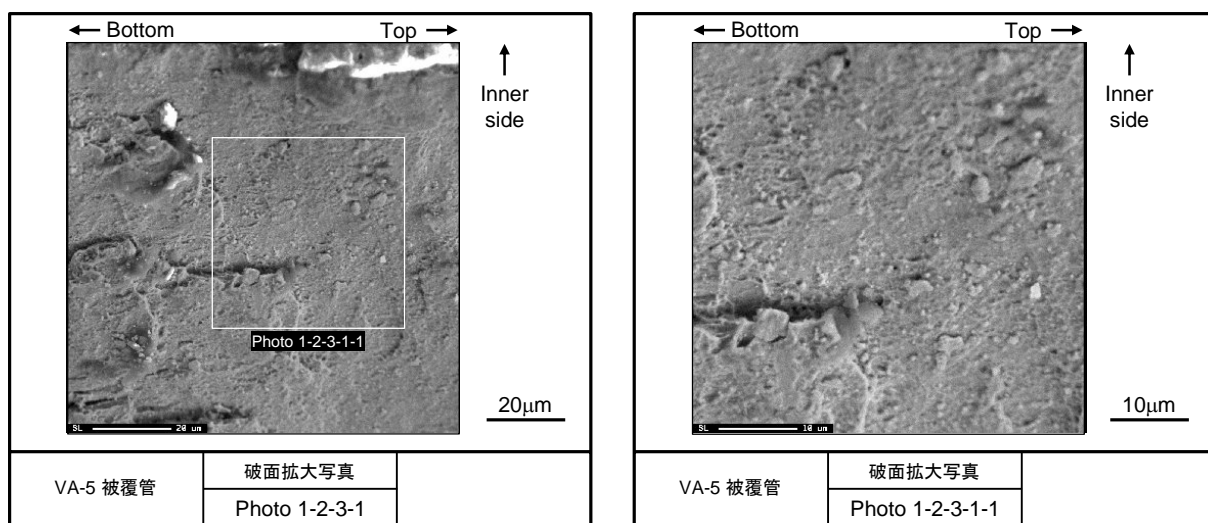


図 4.3.4-8(4) VA-5 実験で破損した被覆管の破面拡大写真 (試料 1)

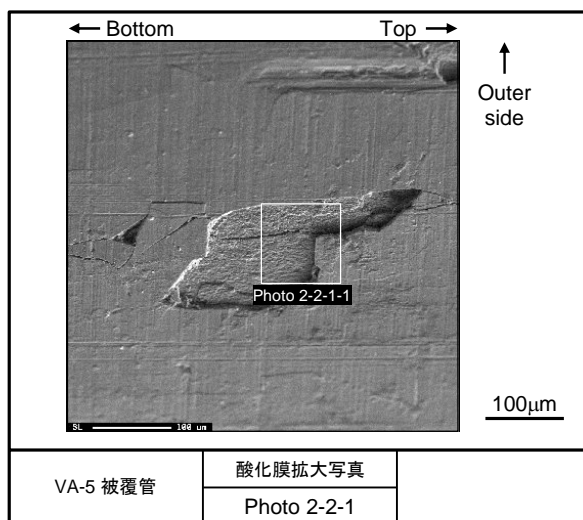
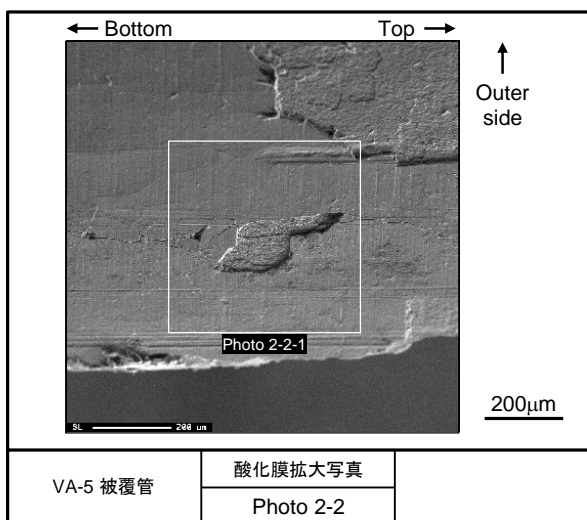
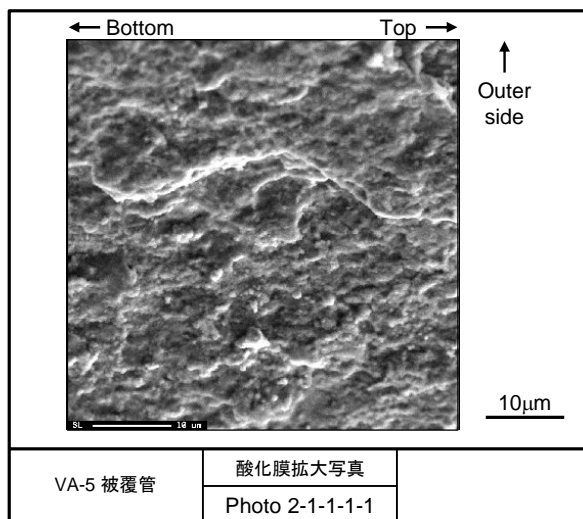
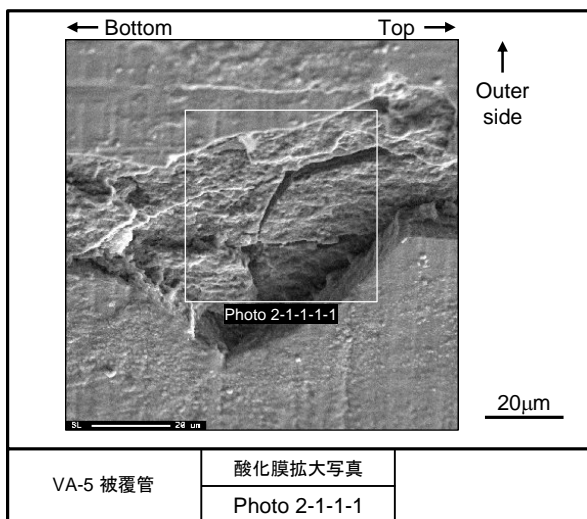
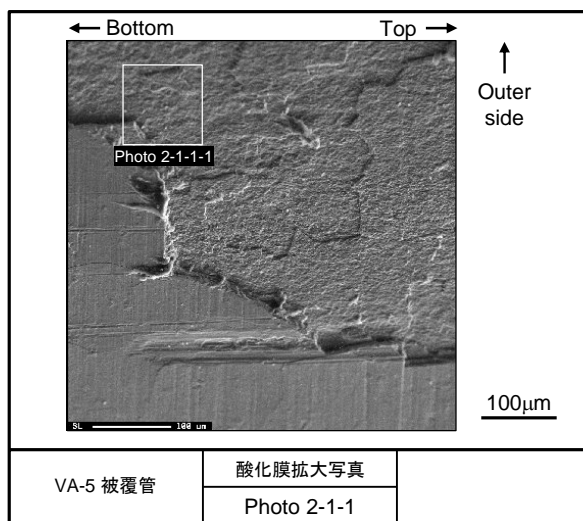
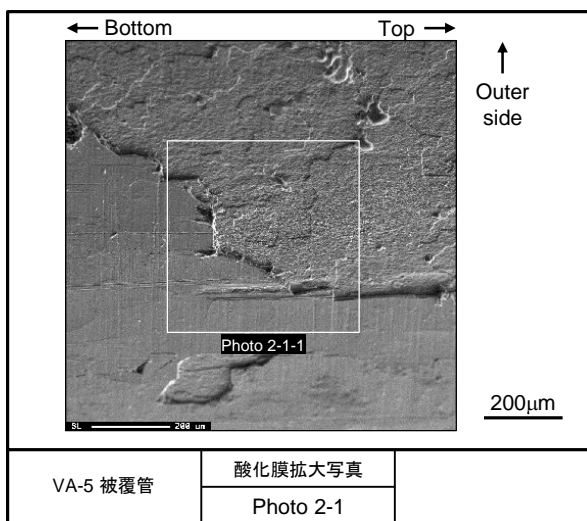


図 4.3.4-9(1) VA-5 実験で破損した被覆管の酸化膜拡大写真 (試料 1)

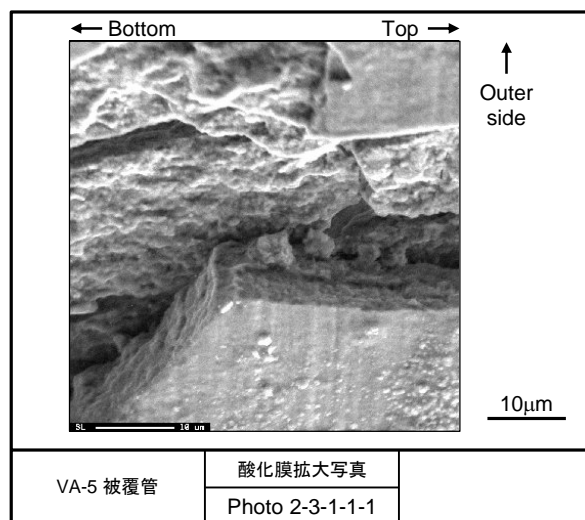
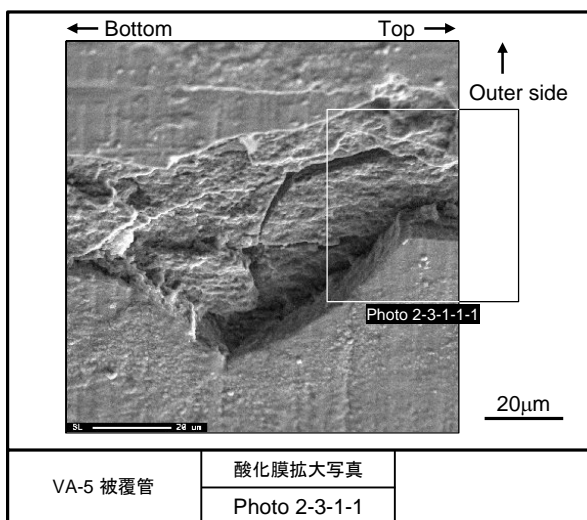
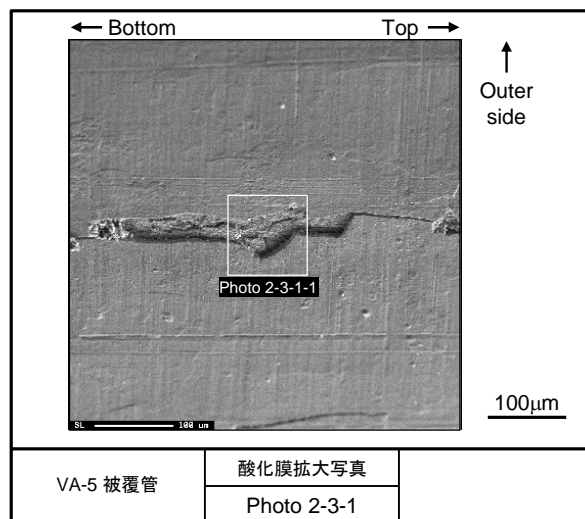
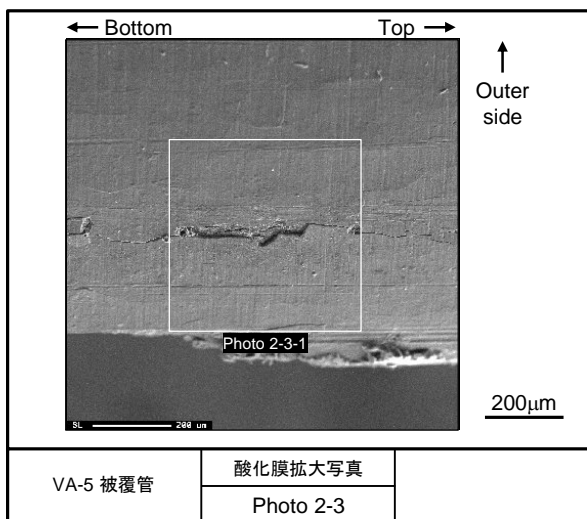
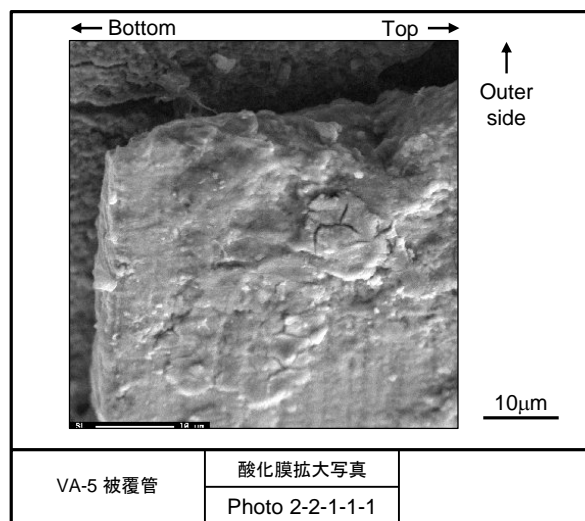
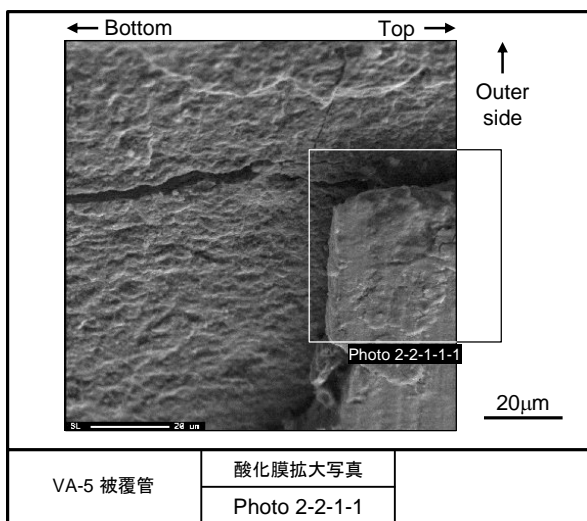


図 4.3.4-9(2) VA-5 実験で破損した被覆管の酸化膜拡大写真 (試料 1)

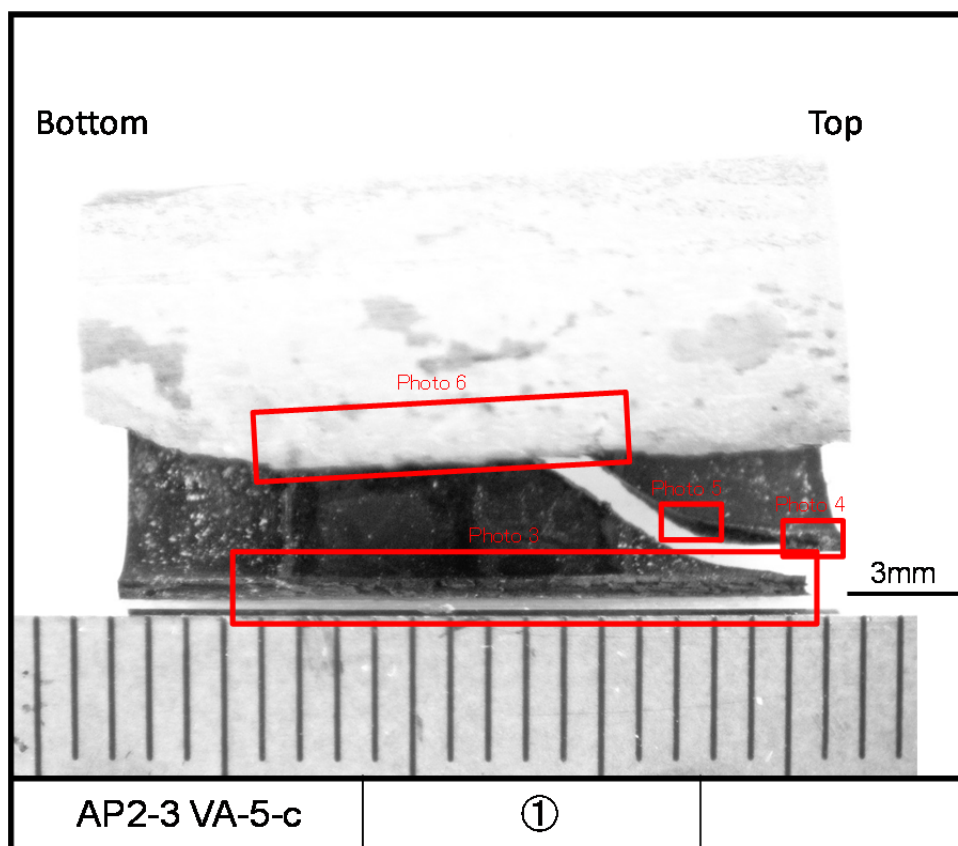


図 4.3.4-10 VA-5 実験で破損した被覆管のマクロ写真 (試料 2)

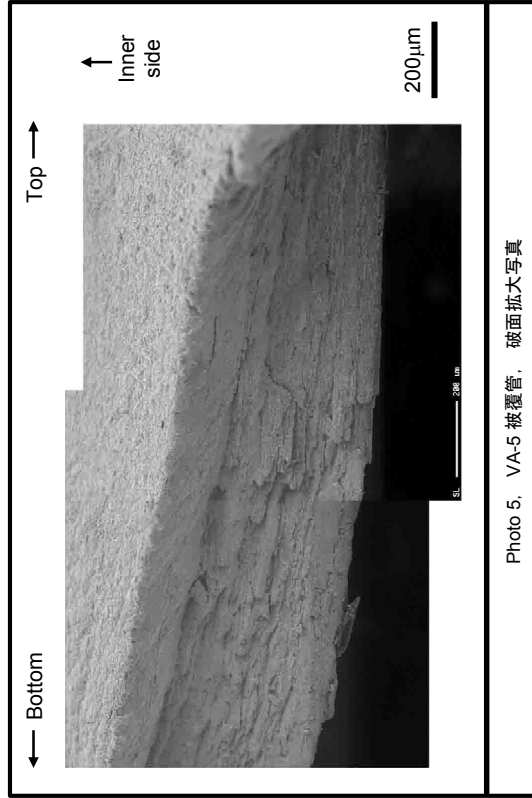
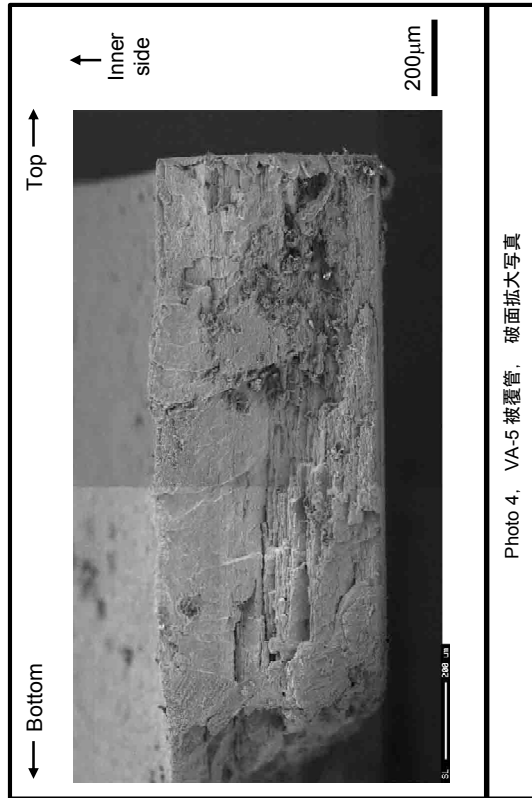
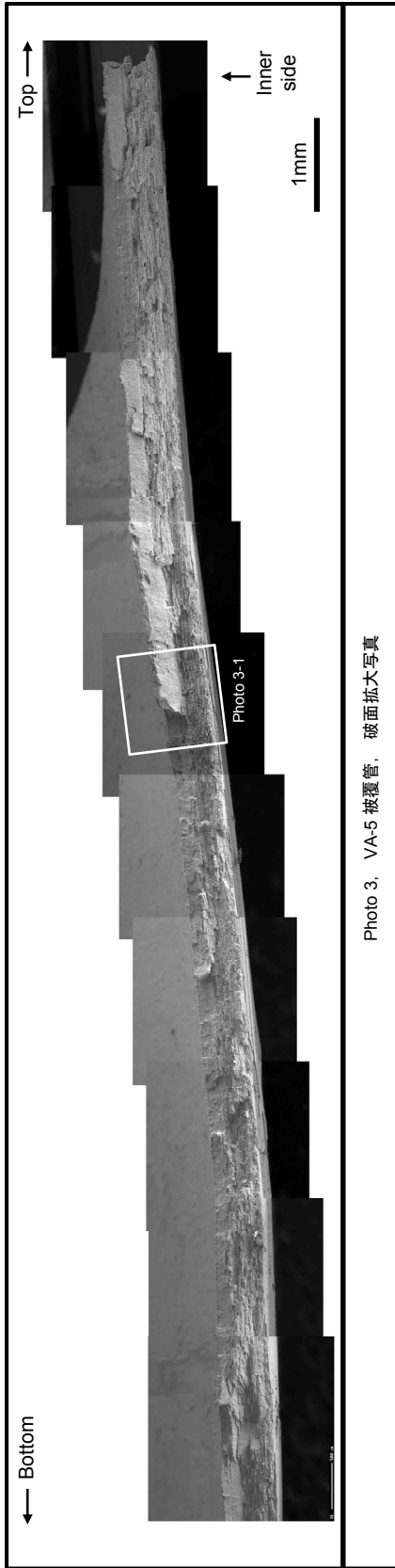


図 4.3.4-11 VA-5 実験で破損した被覆管の破面

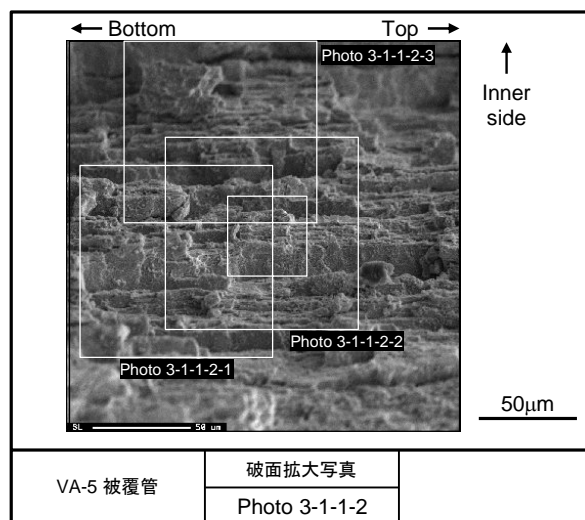
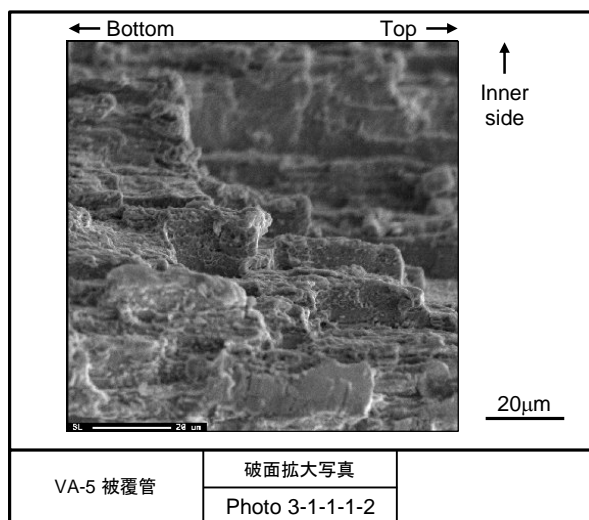
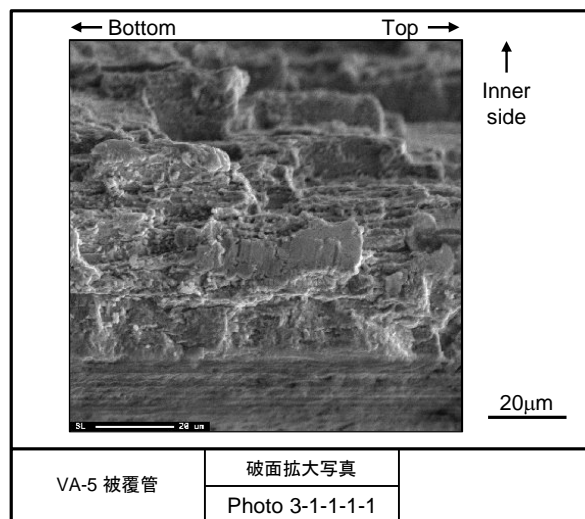
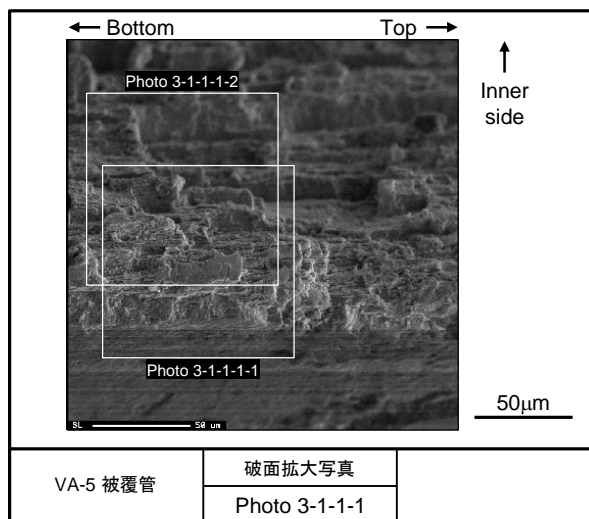
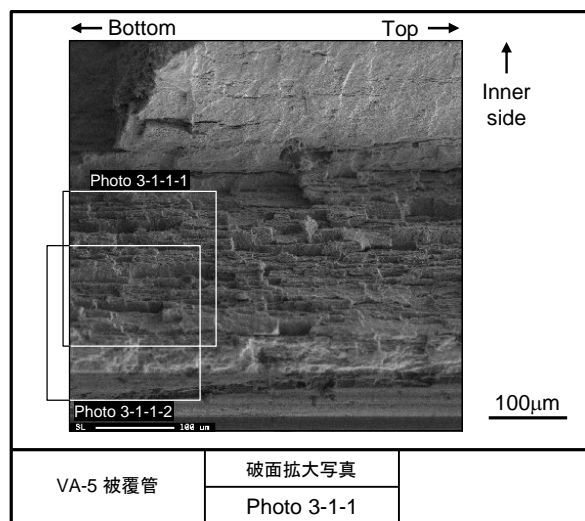
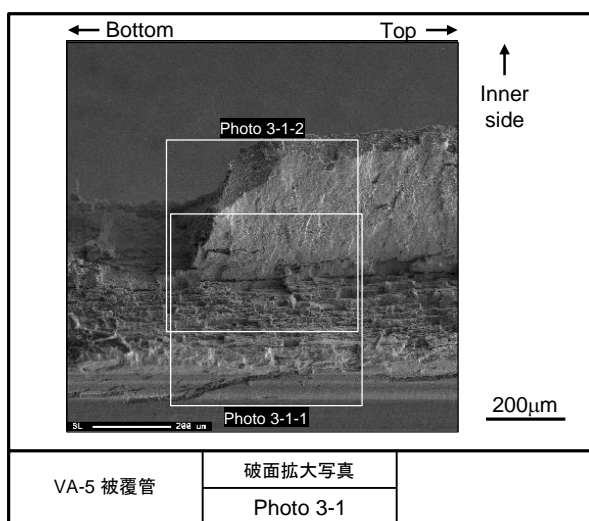


図 4.3.4-12(1) VA-5 実験で破損した被覆管の破面拡大写真 (試料 2)

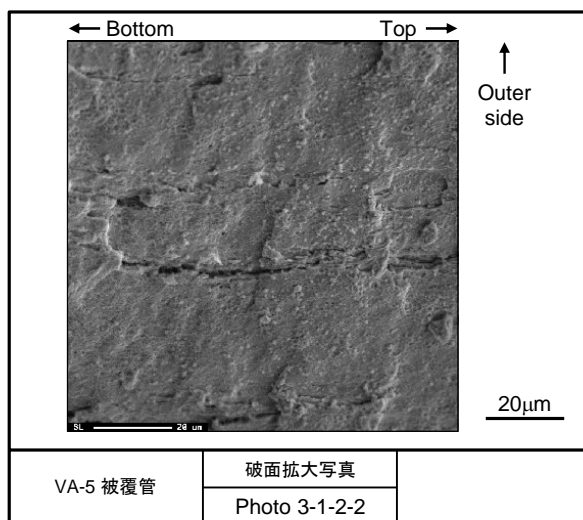
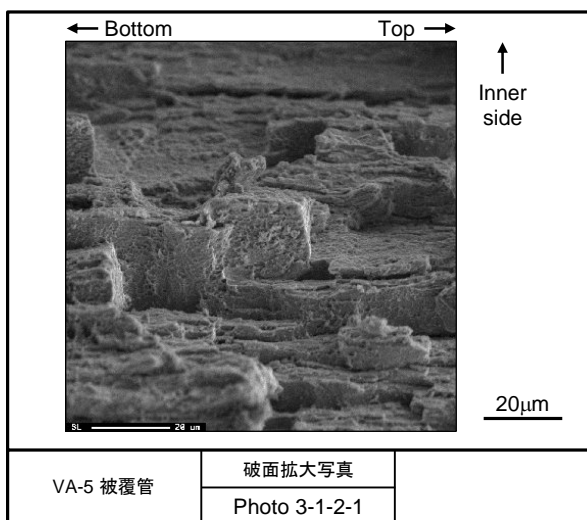
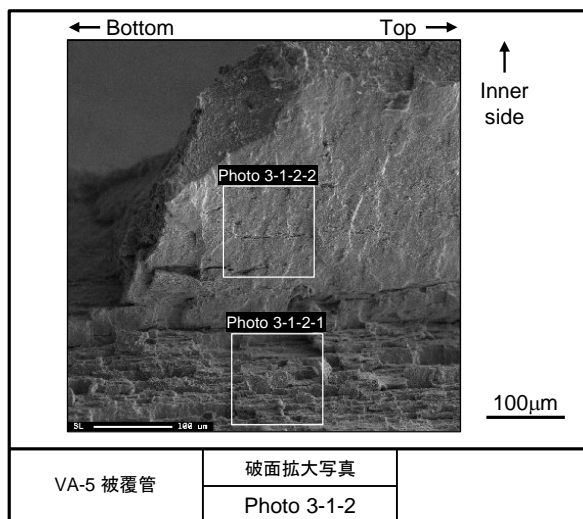
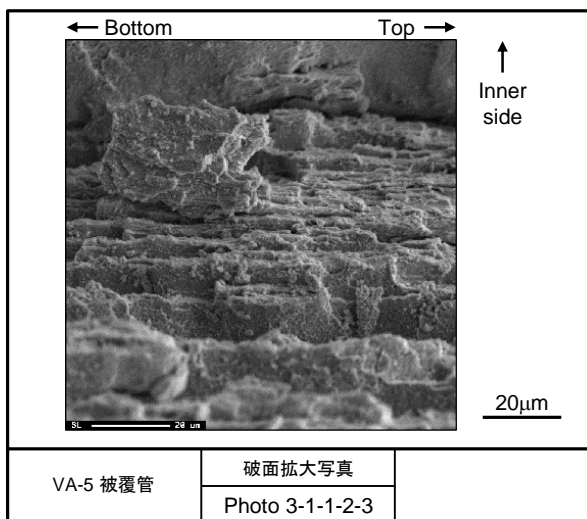
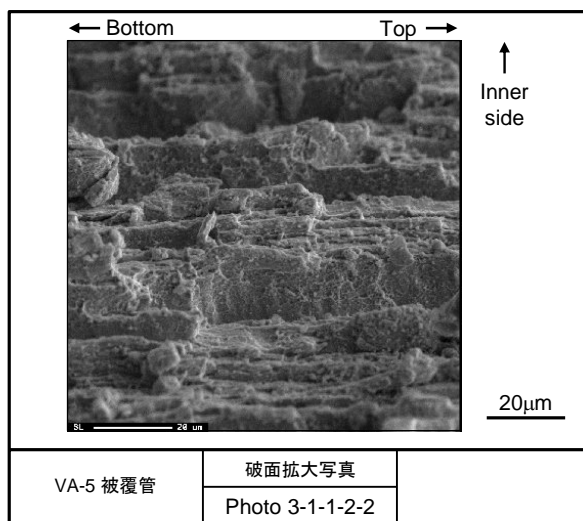
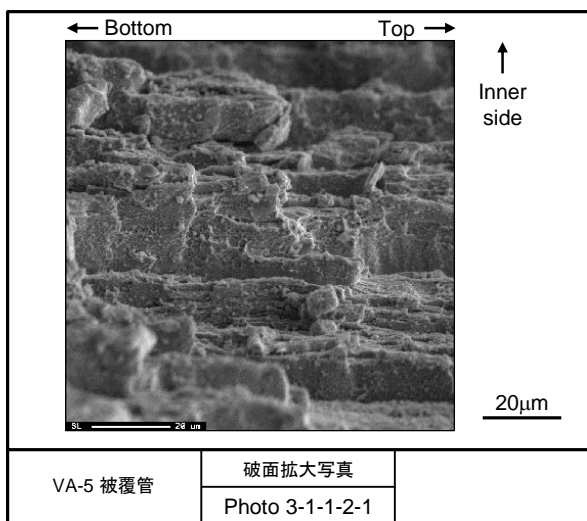


図 4.3.4-12(2) VA-5 実験で破損した被覆管の破面拡大写真 (試料 2)



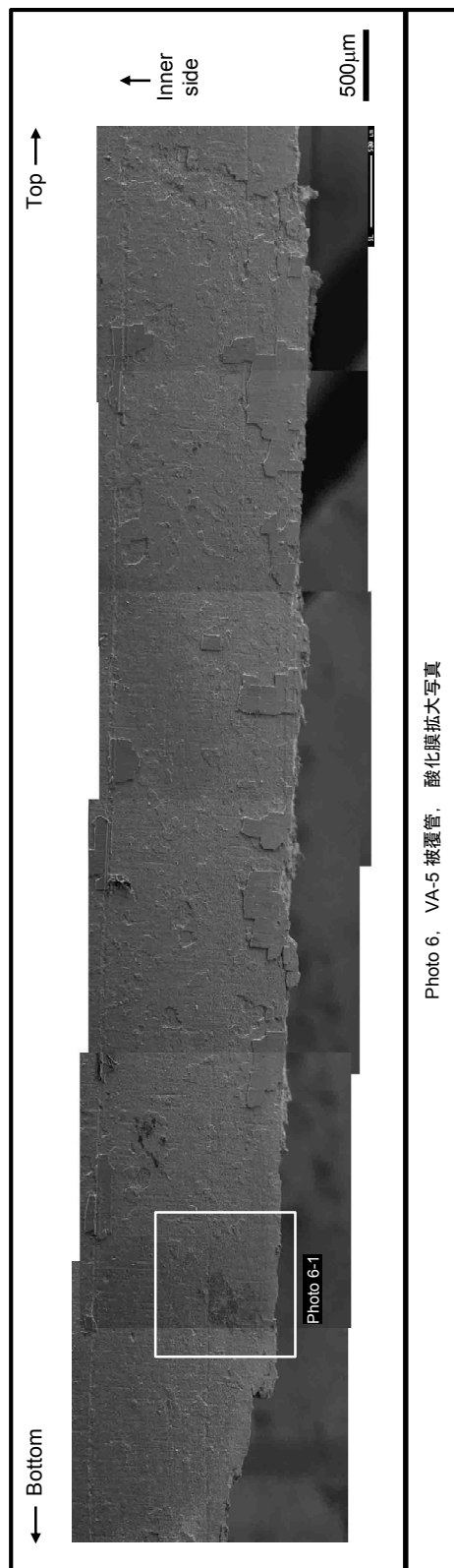


図 4.3.4-13 VA-5 実験で破損した被覆管の外表面 (試料 2)

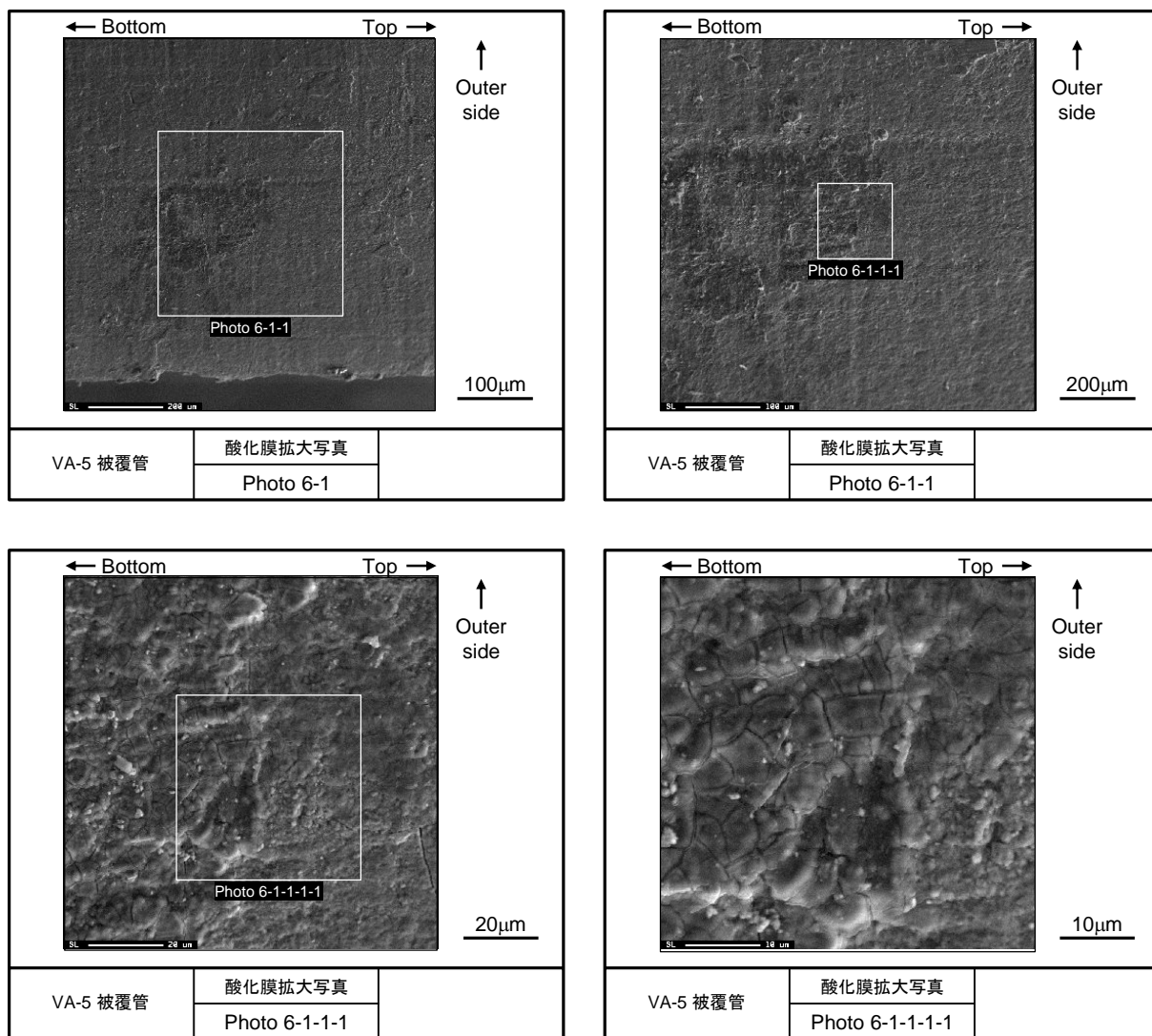


図 4.3.4-14 VA-5 実験で破損した被覆管の酸化膜拡大写真 (試料 2)

#### 4.3.5 VA-6 実験に関するパルス照射後試験

VA-6 実験は、高燃焼度 PWR-UO<sub>2</sub> 燃料を対象とした室温実験として平成 26 年 3 月 18 日に実施し、パルス照射中の過渡記録については既に報告した<sup>(2)</sup>。本報告では、新たな照射後試験で得られた結果を示す。

##### (1) 燃料棒外観観察

実験カプセルから取り出した燃料棒の外観を観察した。燃料棒外観写真を図 4.3.5-1 及び図 4.3.5-2 に示す。カプセルから取り出した時点で燃料棒は下部約 30 mm 程度を残して燃料支持具から脱落しており、また被覆管の内部には燃料ペレットが残っておらず、すべて冷却材中に放出されていることもこの時点で確認された (図 4.3.5-1)。

図 4.3.5-2(1)は、実験カプセル下部に堆積した燃料棒被覆管の破片を回収し、各破片の割れの形状に基づいて推定した破損前の配置に並べ直したものである。このうち、

- Photo 1-1、2-1、3-1、4-1
- Photo 5-1、5-2
- Photo 6-1、6-2
- Photo 7-1、7-2
- Photo 8-1、8-2
- Photo 9-1、9-2
- Photo 10-1、10-2
- Photo 11-1、11-2
- Photo 1-2、2-2、3-2、4-2

はそれぞれ同一の破片について異なる角度から観察した結果である。PCMI 破損を生じた高燃焼度燃料の試験後外観観察では、従来、燃料被覆管の軸方向に平行な割れが燃料スタック長に渡って生じ、ケースによってはある軸方向位置で周方向に割れが回り込む形で燃料被覆管が上下に分断するものの、そのような場合でも 2~3 片に分断するのみであった。これに対して VA-6 試験燃料棒の被覆管は 9 片に分断しており、従来の RIA 試験に供した燃料棒とは大きく異なる破損形態となった。このことは、既に報告したように、過度計測データに基づき評価した破損時エンタルピ増分が従来取得されてきた破損限界データに比べ有意に低かった結果と対応する可能性がある。一方、破片の形状に着目すると、分断数は多いものの、Photo 5-2、7-2、8-2 及び 9-2 に見られるように軸方向に平行な割れの燃料スタック長に占める割合が大きい。このことから、この燃料破損は、PCMI (ペレット-被覆管機械的相互作用) の負荷を受けて被覆管に生じた縦割れが起点と考えられ、その破損モードは、従来報告されている高燃焼度燃料の破損モードである「PCMI 破損」と解釈される。

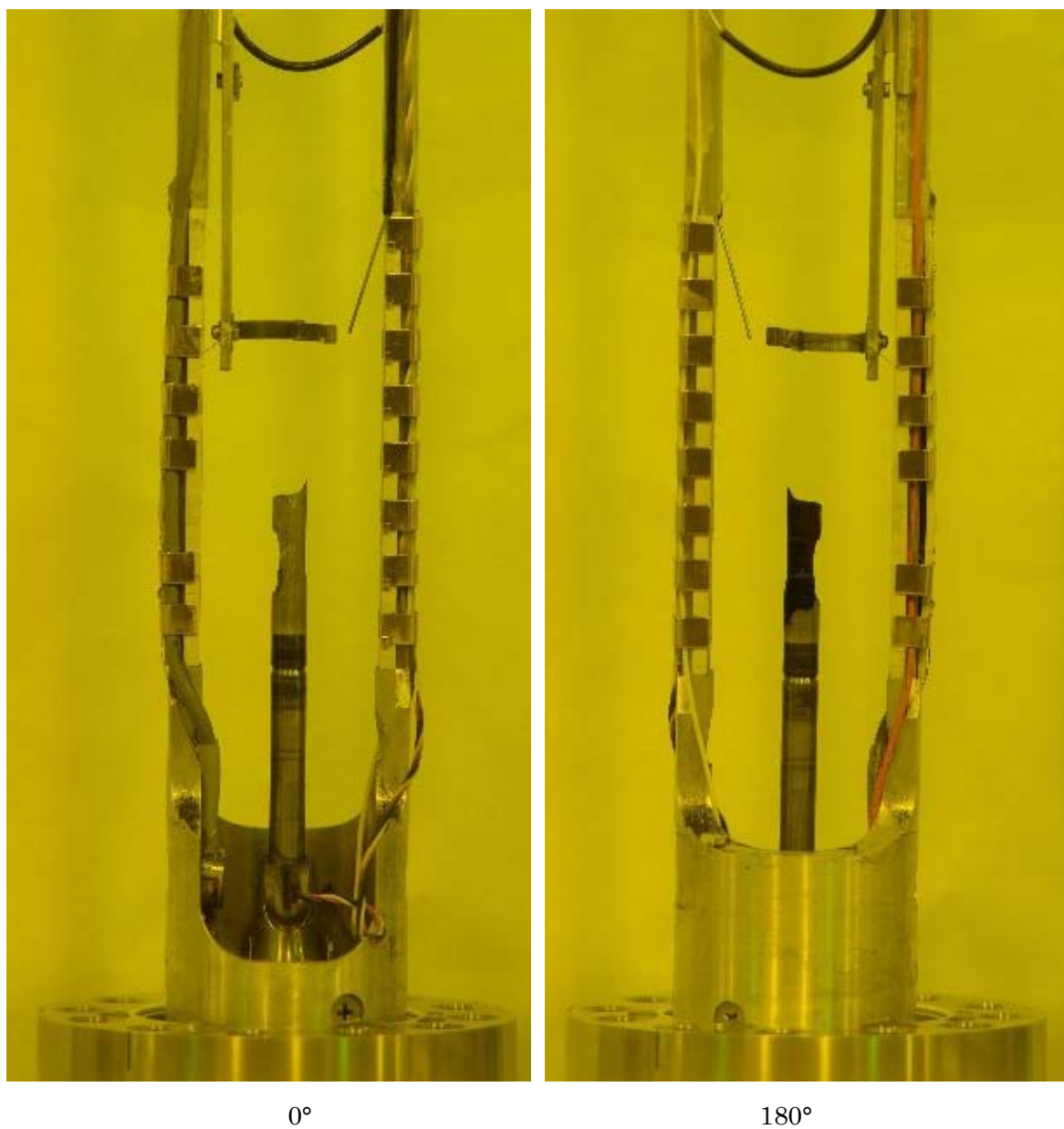


図 4.3.5-1 VA-6 試験燃料棒のパルス照射後外観写真（燃料支持具からの取り外し前）

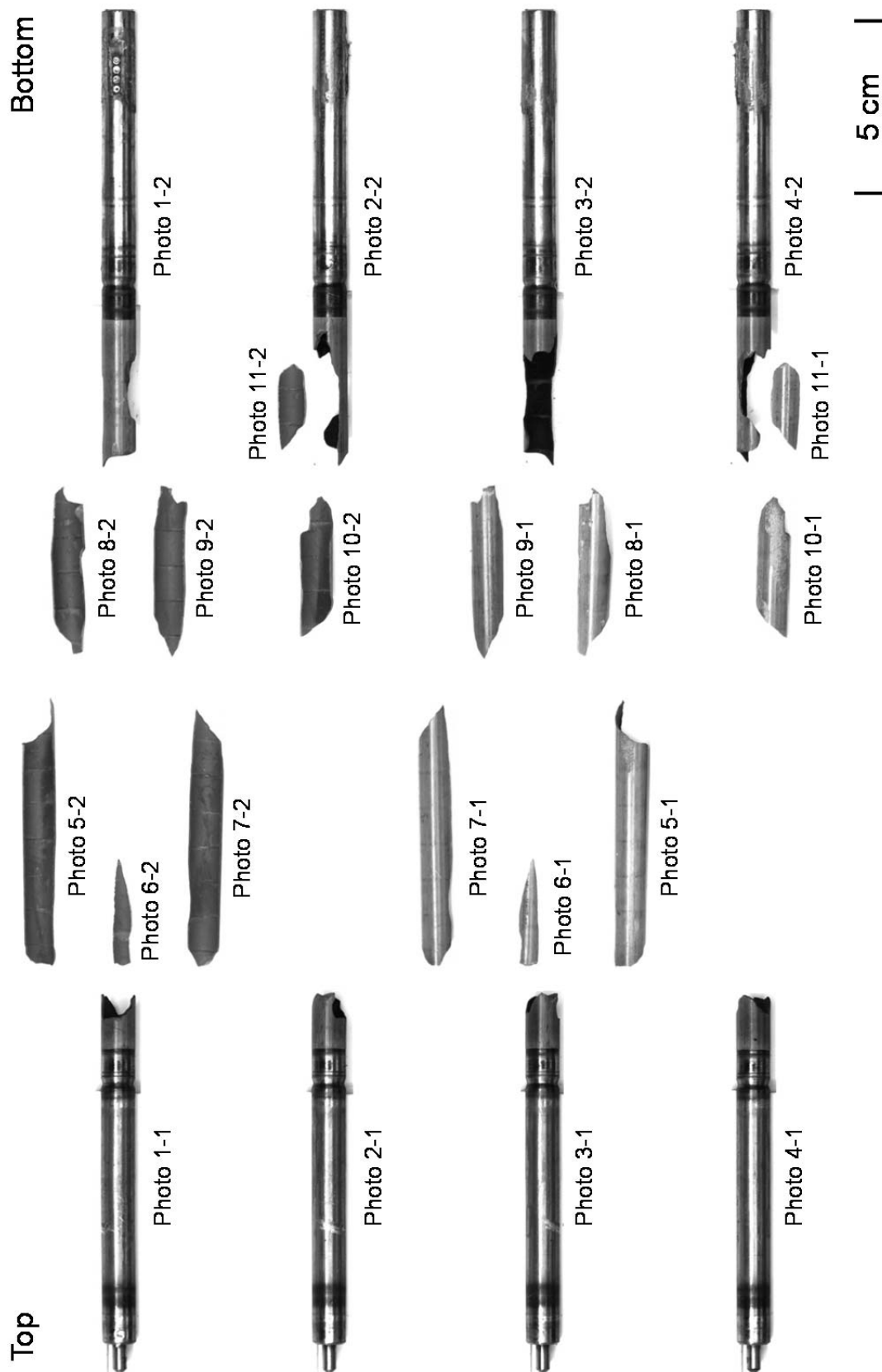


図 4.3.5-2(1) VA-6 試験燃料棒のパルス照射後外観写真

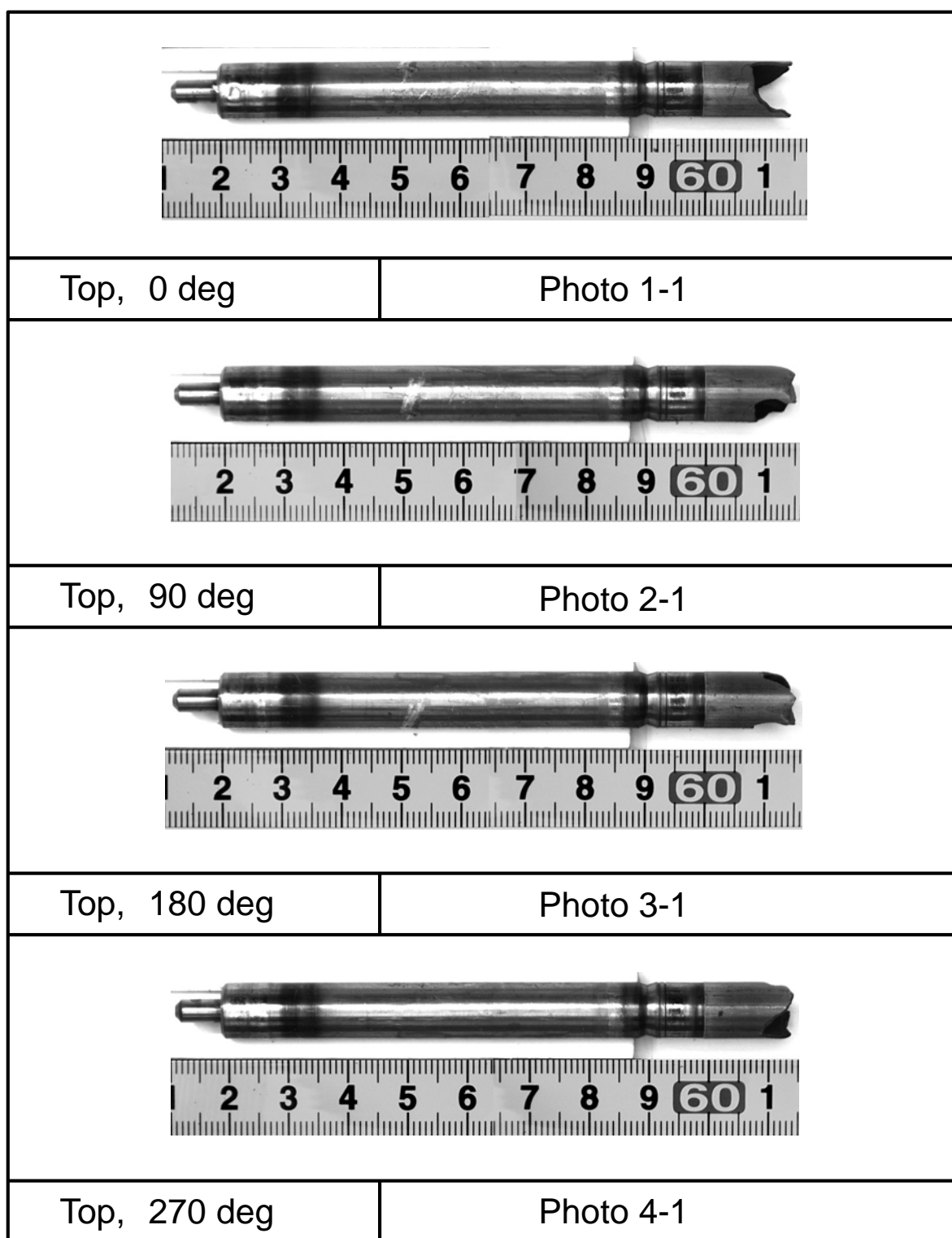


図 4.3.5-2(2) VA-6 試験燃料棒のパルス照射後外観写真

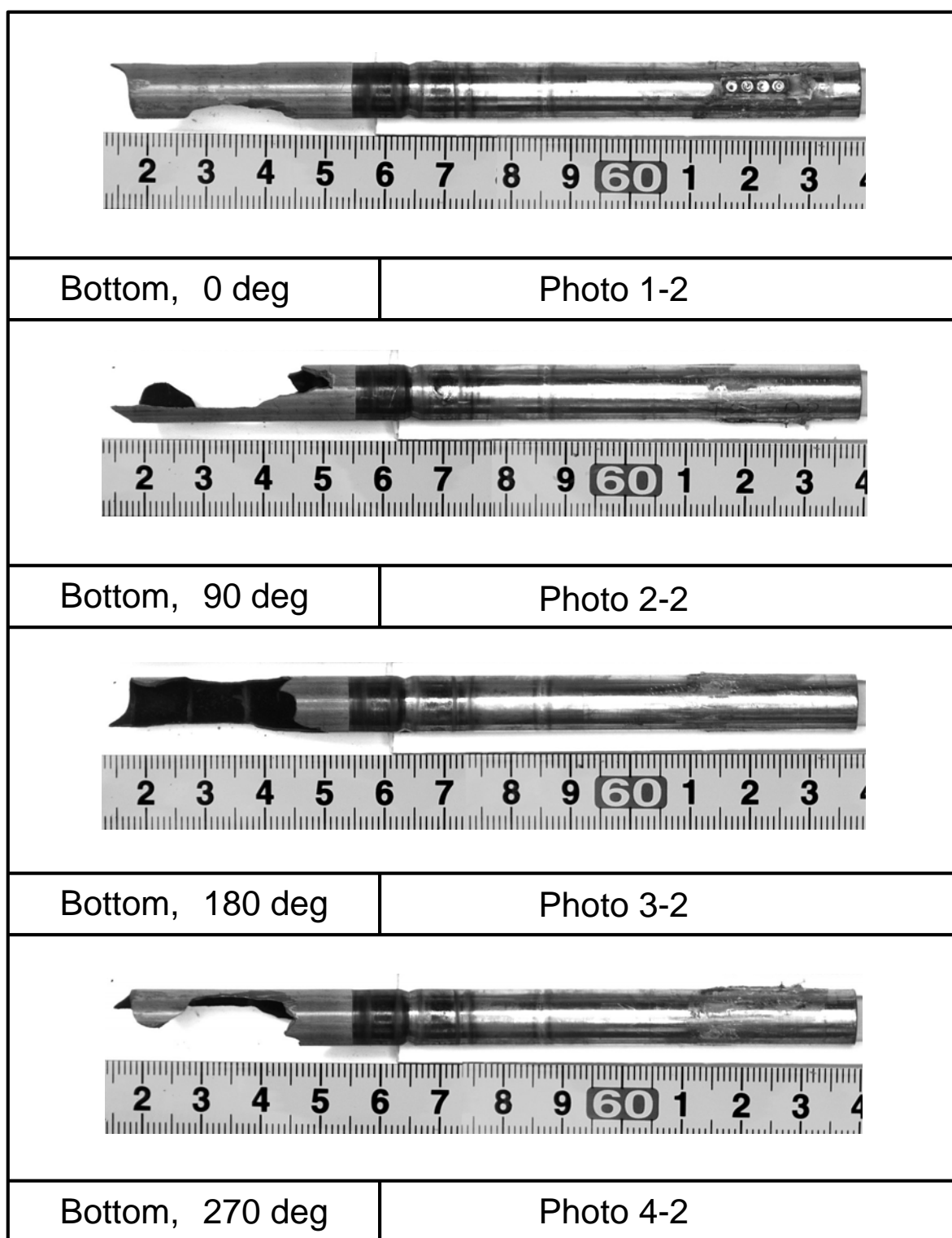


図 4.3.5-2(3) VA-6 試験燃料棒のパルス照射後外観写真

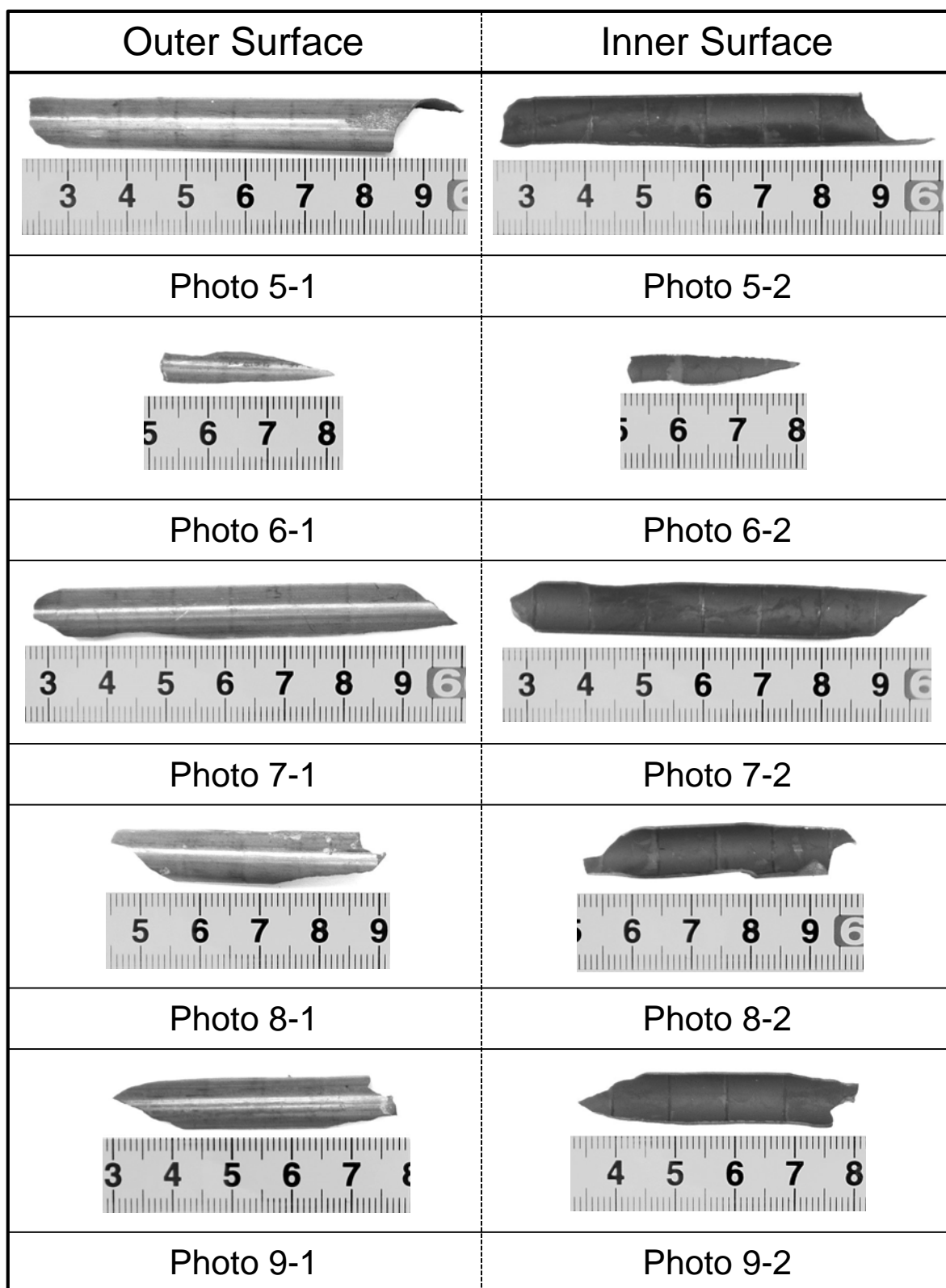


図 4.3.5-2(4) VA-6 試験燃料棒のパルス照射後外観写真



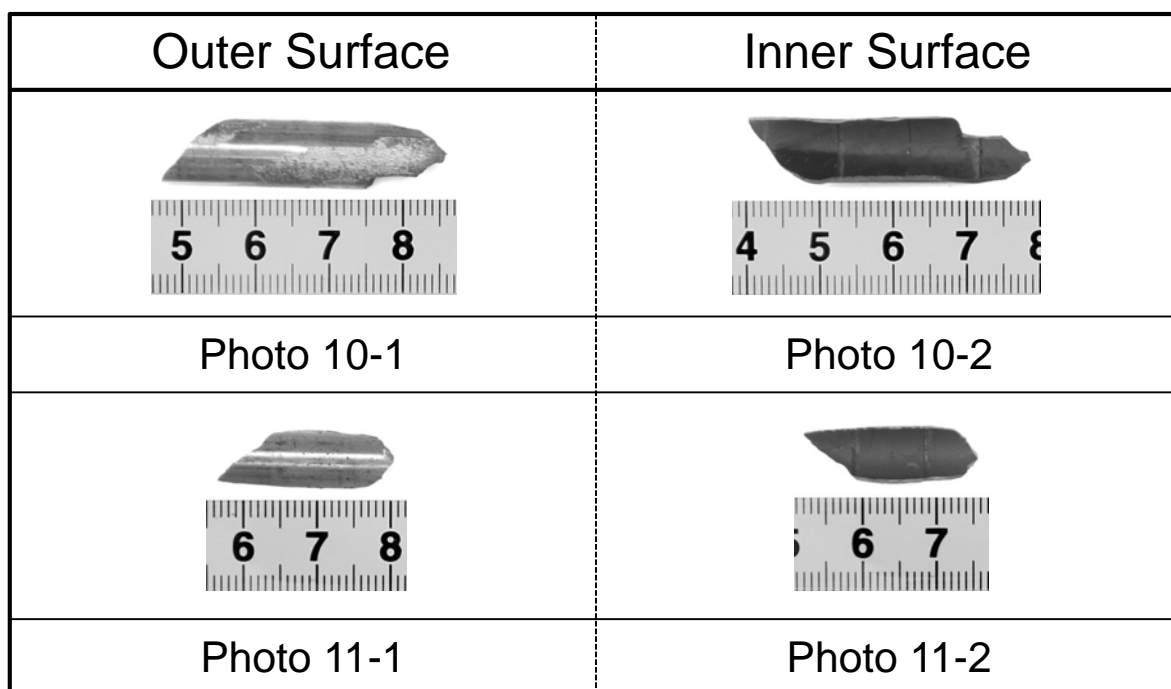


図 4.3.5-2(5) VA-6 試験燃料棒のパルス照射後外観写真

#### 4.3.6 RIA 試験のまとめ

本事業でこれまでに実施した RIA 試験の試験条件及び破損時燃料エンタルピ増分を、平成 16 年度輸送燃料及び平成 22 年輸送燃料のそれぞれについて、表 4.3.6-1 及び 2 にまとめる。本年度は表 4.3.6-2 の GR-1、VA-7 及び VA-8 実験データを新たに得た。

図 4.3.6-1 は、これまでに NSRR で実施したすべての照射済燃料実験の結果を燃焼度と PCMI (ペレット被覆管機械的相互作用) 破損限界の観点からまとめたものである。現行の PCMI 破損しきい値は燃焼度 75 GWd/t までの範囲で定義されており、燃焼度 65~75 GWd/t における暫定的なしきい値は 40 cal/g である。

新たに追加された VA-8 実験では、燃焼度 78 GWd/t の燃料棒が 42 cal/g において破損に至った。ここで、VA-8 実験燃料棒は M-MDA 被覆管を備えているが、実用化に向けて開発された応力除去焼鈍材 (SR 材) ではなく、再結晶焼鈍材 (RX 材) である\*。一方、SR 材の M-MDA 被覆管を備えた燃焼度 81 GWd/t の実験燃料棒を供した VA-7 実験、M5 被覆管を備えた燃焼度 84 GWd/t の実験燃料棒を供した GR-1 実験では、それぞれ当該燃焼度における現行の PCMI 破損しきい値を上回るエンタルピ増分を経験したが、いずれも破損は生じなかった。

VA-7 及び VA-8 実験の結果を被覆管結晶組織の違いという観点で比較するため、図 4.3.6-2 に、PCMI 破損時燃料エンタルピ増分 (以下、破損限界と記す) を被覆管外面酸化膜厚さで整理した結果を示す。従来の実験結果より、SR 材の破損限界は酸化膜厚さの増大とともに低下する傾向を持つこと、また SR 材と RX 材における水素化物析出形態の違いから (図 4.3.6-3)、等しい酸化膜厚さまたは水素吸収量で比較した場合には RX 材の破損限界が SR 材よりも低いことが予想されていた。RX 材と SR 材で破損限界が異なるのは、SR 材では析出物が周方向に成長するのに対し、RX 材では様々な向きの析出物が生じるため一定割合で存在する被覆管径方向 (厚さ方向) の析出物に沿って破損に直結する割れが生じる可能性があるためである。H25 年度までに実施した VA-5 及び 6 実験では、それぞれ VA-7 及び 8 実験と同一の燃料セグメントから切り出した試験燃料棒について、室温条件でのパルス照射を行い、これらの予想を裏付ける結果が得られていた。今回得られた高温実験 VA-7 及び 8 の結果を VA-5 及び 6 実験の結果と比較することで、ほぼ同一条件の SR 及び RX 材被覆燃料それぞれについて、初期温度条件のみが異なる場合の破損限界の変化を見積もることができる。従来の実験データベース中でこのような直接的な比較が可能であったのは、室温、高温条件でそれぞれ破損した VA-1 及び 3 実験の組み合わせのみであるため、VA-5、6、7 及び 8 実験によって取得されたデータは、破損限界に及ぼす温度の効果に関して極めて重要なものである。破損した VA-5 と非破損であった VA-7 の比較から、酸化膜厚さ約 30  $\mu\text{m}$ 、水素濃度約 300 ppm の SR 材被覆管において、破損限界は初期温度の違いにより約 180 J/g 上昇したことになる。一方、共に破損した VA-6 と VA-8 の比較から、酸化膜厚さ約 60-68  $\mu\text{m}$ 、水素濃度約 700 ppm の RX 材被覆管において、初期温度の違いによる破損限界の上昇は約 30 J/g であったことになる。また VA-1 と VA-3 の比較で得られていた破損限界上昇は約 80 J/g である。以上の比較から、SR 材、RX 材共に、また酸化膜厚さや水素濃度の大小を問わず温度上昇による破損限界上昇の効果が見られるが、その程度はある一定温度における破損限界が高い程大きいこと

を示す傾向が得られたと言える。

\* この被覆管（M-MDA の RX 材）の実用化は計画されていない。

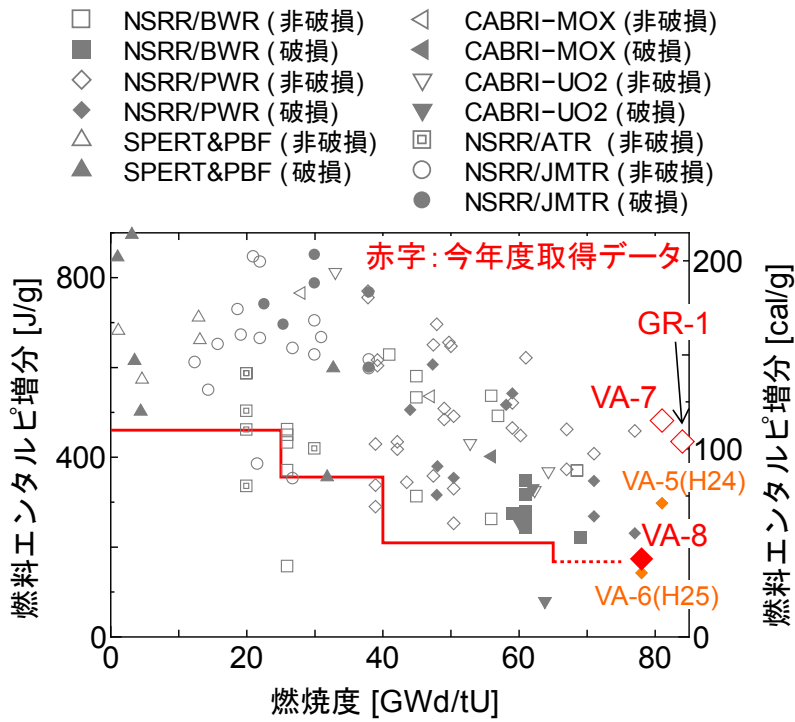
表 4.3.6-1 RIA 試験の一覧 (平成 16 年度輸送燃料)

実験 番号	燃料型式	燃料	燃焼度 (GWd/t)	被覆管	被覆管 酸化膜 ( $\mu\text{m}$ )	被覆管 水素吸収 (ppm)	初期 冷却水 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	初期 冷却水 圧力 (MPa)	初期 燃料エンタルピ (基準温度 $20^{\circ}\text{C}$ ) J/g (cal/g)	エンタルピ増分 の最大値 J/g (cal/g)	破損時の エンタルピ増分 J/g (cal/g)
VA-1	PWR 17x17	UO <sub>2</sub>	71	ZIRLO	73	660	18	0.1	0 (0)	556 (133)	268 (64)
VA-3					82	670	285	6.8	71 (17)	454 (108)	344 (82)
VA-2	PWR 17x17	UO <sub>2</sub>	77	MDA	70	760	28	0.1	0 (0)	546 (130)	231 (55)
VA-4					80	760	249	4.0	61 (14)	457 (109)	非破損
MR-1	PWR 17x17	UO <sub>2</sub>	71	NDA	39	210	22	0.1	0 (0)	408 (97)	非破損
RH-1	PWR 17x17	UO <sub>2</sub>	67	M5	6	70	16	0.1	0 (0)	462 (110)	非破損
RH-2					6	70	278	6.4	69 (16)	378 (90)	非破損
LS-1	BWR 10x10	UO <sub>2</sub>	69	Zircaloy-2 (LK3)	25	300	17	0.1	0 (0)	469 (112)	222 (53)
LS-2					25	290	283	6.6	70 (17)	371 (89)	非破損
LS-3					25	300	281	6.6	70 (17)	390 (93)	非破損
BZ-1	PWR 14x14	MOX	48	Zircaloy-4	30	340	17	0.1	0 (0)	688 (164)	318 (76)
BZ-2	PWR 14x14	MOX	59	Zircaloy-4	20	160	18	0.1	0 (0)	644 (154)	545 (130)
BZ-3					20	160	281	6.6	70 (17)	528 (126)	非破損
BZ-4					20	140	22	0.1	0 (0)	451 (108)	非破損
DW-1	BWR 8x8	MOX	45	Zircaloy-2	10	50	17	0.1	0 (0)	505 (121)	非破損

表 4.3.6\*2 RIA 試験の一覧 (平成 22 年度輸送燃料)

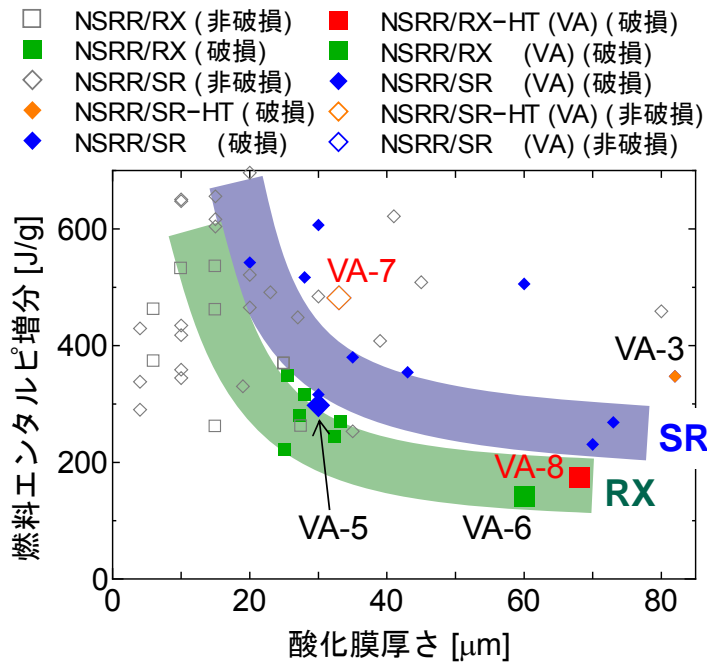
実験 番号	燃料型式	燃料	燃焼度 (GWd/t)	被覆管	被覆管 酸化膜 ( $\mu\text{m}$ )	被覆管 水素吸収 (ppm)	初期 冷却水 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	初期 冷却水 圧力 (MPa)	初期 燃料エンタルピー (基準温度 $20^{\circ}\text{C}$ ) J/g (cal/g)	エンタルピー増分 の最大値 J/g (cal/g)	破損時の エンタルピー増分 J/g (cal/g)
VA-5	PWR 17x17	UO <sub>2</sub>	81	M-MDA (SR)	30	312	15	0.1	0 (0)	580 (139)	298 (71)
VA-6	PWR 17x17	UO <sub>2</sub>	78	M-MDA (RX)	60	683	17	0.1	0 (0)	601 (144)	142 (34)
VA-7	PWR 17x17	UO <sub>2</sub>	81	M-MDA (SR)	33	318	281	6.7	70 (17)	482 (115)	非破損
VA-8	PWR 17x17	UO <sub>2</sub>	78	M-MDA (RX)	68	703	282	6.7	70 (17)	496 (118)	174 (42)
GR-1	PWR 17x17	UO <sub>2</sub>	84	M5	15*	—**	24	0.1	0 (0)	461 (110)	非破損

\*\* 測定未実施



\* VA-6,8 燃料に使われている被覆管 (M-MDA の RX 材) の実用化は計画されていない。

図 4.3.6-1 NSRR 実験で得られた PCMI 破損マップ



\* VA-6,8 燃料に使われている被覆管 (M-MDA の RX 材) の実用化は計画されていない。

図 4.3.6-2 PCMI 破損限界と被覆管酸化膜厚さの関係

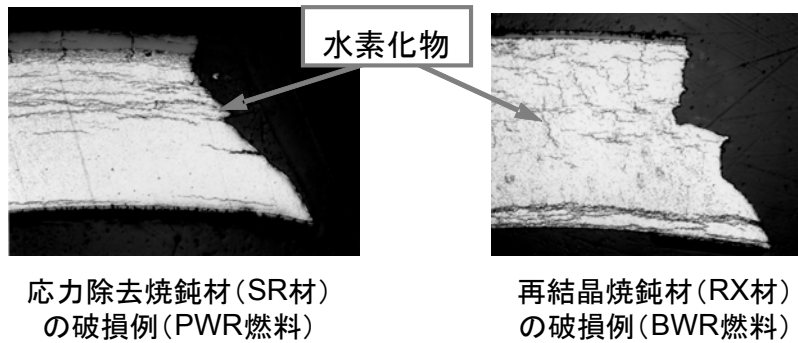


図 4.3.6-3 結晶組織と水素化物析出形態の関係

#### 4.3.7 被覆管機械特性試験

RIA 時に膨張したペレットから被覆管が受ける応力は周方向及び軸方向の二軸性を有しており、RIA 時の燃料破損挙動を解析及び評価するためには、この応力二軸性が被覆管の変形・破損挙動に及ぼす影響を把握する必要がある。このため、平成 22 年度の本事業において二軸応力条件下での被覆管機械特性試験が可能な試験機を開発した<sup>(4)</sup>。

この試験装置を用い、平成 23 年度には、Zry-4 被覆管のうち、PWR で使用されている被覆管の熱処理条件を施した応力除去焼鈍材(SR\*材)及び主に BWR で使用されている被覆管の熱処理条件を施した再結晶焼鈍材(RX\*\*材)について、公称応力及び真応力制御により被覆管機械特性試験を実施した<sup>(5)</sup>。平成 24 年度には、平成 23 年度に実施した材料の比較対照として冷間加工材 (CW\*\*\*) を対象とした試験を実施した。さらに、製造条件 (3 種類) を変更させた被覆管 (SR 材) を対象とした試験を実施した<sup>(1)</sup>。平成 25 年度には、平成 24 年度に実施した材料の熱処理を変えた、製造条件 (3 種類) を変更させた被覆管 (RX 材) を対象とした試験を実施した<sup>(2)</sup>。

平成 26 年度は、平成 23 年度に試験を実施した SR 材を用いて、高温条件 (100℃、150℃及び 200℃) で二軸応力条件被覆管機械特性試験を実施した。また、高温条件との比較対照データを取得するため、室温 (Room Temperature) における試験も実施した。さらに、平成 24 及び 25 年度に実施した試験の追加試験を実施した。

(\* SR: stress-relieved、\*\* RX: re-crystallized、\*\*\*CW: cold-worked)

##### (1) 試験方法

二軸応力条件下での被覆管機械特性試験は、CNC サーボ型二軸応力負荷制御試験機<sup>(6)</sup>により実施した。この試験機では、指定された被覆管内圧及び軸方向荷重に設定することができる。

試験中の応力制御は、公称応力または真応力に基づき実施した。公称応力制御は、試験前の被覆管形状に基づき、試験片に発生する応力を計算して制御するのに対し、真応力制御は、試験中の被覆管形状に基づき、試験片に発生する応力及びひずみを計算して制御するものであり、試験中の応力比を常に一定に保つことができる利点を有する。また、真応力制御では試験中に応力を計算する必要があるため、ひずみゲージなどを用いて試験中に発生する試験片のひずみを測定している。

今年度初めて実施する高温条件 (100℃、150℃及び 200℃) では、5%以上のひずみに対応できるひずみゲージがないため、公称応力制御による試験によりデータを取得した。公称応力制御では、試験前の被覆管形状から応力を計算し、試験中の周方向及び軸方向の応力がある一定の割合になるよう、試験片に内圧及び軸方向荷重を負荷した。試験中には、接触型の変位計によって外径変位すなわち周ひずみを測定した。ここで、最大外径位置 (破損位置) で外径変位を測定できるよう、変位計の軸方向位置を調整し試験を実施した。なお、測定位置が明確に最大外径位置と異なった場合の試験結果は除外することとした。本



年度は表 4.3.7-1 に示す 3 条件下での被覆管変形挙動データを取得した。ここで、(軸方向応力/周方向応力) を応力比  $\alpha$  と定義する。用いた試料を表 4.3.7-2 に示す。試験片の長さは 170 mm で、標点距離は約 58 mm であった。

高温条件を対象とした試験では、試験片表面に熱電対を接触させて表面の温度を測定した。測定場所は、試験片中央部及び上下約 15 mm の位置であった。試験中の典型的な温度履歴を図 4.3.7-1 に示す。熱電対の番号は、試験機の上から順に 1、2、3 とした。昇温速度は、100℃、150℃の場合、約 0.06 °C/s であった。また、200℃の場合は、150℃まで約 0.06 °C/s で昇温し、150℃以上では約 0.01 °C/s で昇温した。機械試験の開始前には、設定温度で 30 分以上保持した。全ての温度条件において、3つの熱電対位置における温度差は 10℃以内であった。機械試験時の破損では、測定温度に大きなぶれが生じた。これは破損の衝撃で熱電対が被覆管表面から外れるためである。その後一部の熱電対は被覆管表面に接触し測定できるようになるが、接触せず測定できなくなった熱電対もあった。破損後は直ちに室温まで空冷した。

また、平成 24 及び 25 年度に実施した試験の追加分として、表 4.3.7-1 に示す 9 条件下での試験を実施し、被覆管変形挙動データを取得した。用いた試料を表 4.3.7-2 に示す。これらの追加試験は、真応力制御で実施した。真応力制御では、試験中のひずみゲージ出力をフィードバックさせ、試験中の周方向及び軸方向の応力比が常に一定となるよう、試験片に内圧及び軸方向荷重を負荷した。ひずみゲージは、測定されるひずみが引張ひずみである場合は 2 mm、圧縮ひずみである場合は 1 mm のゲージ長さのものを用いた。これは、引張ひずみの測定範囲についてはゲージ長さ 2mm のひずみゲージの方が広いのに対し、圧縮ひずみの測定範囲についてはゲージ長さ 1mm のひずみゲージが広いためである。これらのひずみゲージの有効計測範囲は、圧縮方向で 10% 程度まで、引張方向で 20% 程度までであるが、応力比によってはその範囲内でも測定不能になった試験もあった。試験片の長さは 180 mm であり、標点距離は約 55 mm であった。被覆管の集合組織(結晶配向)は機械的特性の異方性に影響を与える可能性があることから、追加試験の試料として Q 値を変更することで結晶方位の配向状態を変化させた被覆管を用いた。

なお、Q 値は以下の式で定義される<sup>(7)</sup>。

$$Q \text{ 値} : Q = \frac{(t_0 - t)/t_0}{(d_0 - d)/d_0} \dots \dots \dots (4.3.7-1)$$

ここで  $t_0$ =加工前肉厚、 $t$ =加工後肉厚、 $d_0$ =加工前直径、 $d$ =加工後直径

## (2) 試験結果

Zry-4 被覆管(SR 材)の高温での機械特性試験結果を以下に示す。

図 4.3.7-2 に試験後の試験片外観を示す。破損時のき裂の形状及び変形状態に着目すると、高温では室温に比べ軸方向にき裂が進展せず、また径方向に膨らむ傾向が見られる。また、この傾向は応力比に依存しないように見える。これは、温度の上昇に伴う被覆管の機械特性の変化に起因するものと考えられる。すなわち、温度の上昇に伴い被覆管の機械的特性が変化して膨らみやすくなり、この機械的特性の変化の影響で破損時に軸方向のき裂が進展しにくくなる結果、このような傾向を示すと考えられる。また、破損形態の応力比依存性については、高温条件においても、室温での結果と同様、周方向応力が増加するに従って周方向破損ひずみが大きくなる傾向を示している。

図 4.3.7-3 に Zry-4 被覆管(SR 材)の周方向の公称応力-公称ひずみ曲線を示すが、今年度は 100℃、(軸方向応力):(周方向応力)=3:4 での実験では、十分に信頼性のある周方向ひずみの測定ができなかった。これらの結果から、全ての応力比及び温度で、周方向ひずみの増加に伴い急激に周方向応力は上昇し、ある値で一定となることが分かる。また、周方向の公称応力-公称歪み曲線は、同じ温度では試験を実施した応力比の範囲(軸:周=1:1, 3:4, 1:2)において大きな差は見られなかった。また、図中に×印で示す破損点における周方向応力(破損時周方向応力)もほぼ同等であった。

図 4.3.7-4 に破損時の周及び軸方向応力の温度依存性を示す。図 4.3.7-4 (a)-(c)によると、温度上昇に伴い破損時の周及び軸方向応力はほぼ線形的に減少する。図 4.3.7-4 (d)に破損時周方向応力のみ温度依存性を示す。この図より、実験を行った応力比範囲では、破損時周方向応力は温度上昇に伴い線形的に低下していることが分かる。

図 4.3.7-5 に破損時周方向ひずみの温度依存性を示す。図 4.3.7-5 によると、全ての応力比で、温度上昇に伴い破損時周ひずみは単調に増加し、200℃で増加の程度が小さくなる傾向が見られる。過去のバースト応力条件( $\alpha = 0.5$ )での結果<sup>(8)</sup>によると、室温では 0.06-0.09 のひずみの範囲、350℃では約 0.13 のひずみで破損したと報告されている。この報告例と比較すると、今回の結果は、室温でのひずみは同等であったのに対し、200℃でのひずみはやや小さかった。試験直後に変位計と被覆管の接触部分を観察したところ、200℃での実験では、変位計は被覆管の膨れた位置より低い位置の外径を測定していることが確認されたことから、200℃での実験では、変位計が外径の最大変位位置を測定していなかったものと考えられる。つまり、実際の破損時周ひずみは、測定された値よりも大きかった可能性がある。従来報告例及び今回の結果から、応力比 $\alpha = 0.5$ における破損時周方向ひずみは 150℃までは温度上昇に伴い単調に増加し、150℃以上 200℃までの範囲でも増加する可能性があるが、現時点では明らかでない。また、異なる応力比で比較すると、応力比 $\alpha$ が大きくなるに従い、破損時周方向ひずみは低下することが分かる。

次に、室温での Q 値変更 Zry-4 被覆管(RX 材)の真応力制御による機械特性試験結果を図 4.3.7-6 から-8 に、室温での Q 値変更 Zry-4 被覆管(SR 材)の真応力制御による機械特性試

験結果を図 4.3.7-9 から-11 に示す。これらの実験条件は昨年度までに実施したものと同様であり、得られた試験結果も昨年度までに得られた結果と同様の傾向を示した。すなわち、1) SR 材、RX 材ともに、周方向の真応力-真ひずみ曲線は Q 値の増加とともにあまり変化しない、2) SR 材では $\alpha = 1$  及び 2 において軸方向の真応力-真ひずみ曲線が大きく変化するのに対し、RX 材では $\alpha = 0.5$  及び 1 において軸方向の真応力-真ひずみ曲線が大きく変化する、傾向が認められた。

### (3) 被覆管機械的特性試験のまとめ

- ・ Zry-4 被覆管(17x17 型、SR 材)を対象に、公称応力制御によって高温(100 °C、150 °C 及び 200 °C )での二軸応力負荷試験を実施した。今回実施した応力比範囲 ( $\alpha = 1$ 、 $\alpha = 0.75$  及び $\alpha = 0.5$ ) では、破損時の周及び軸方向応力は温度上昇に伴いほぼ線形に低下し、破損時周方向応力は応力比に殆ど依存しなかった。
- ・ 3 種類の集合組織条件(Q=2, 3 及び 4)の SR 及び RX 材 Zry-4 被覆管 (14x14 型) を対象に機械特性試験を実施し、二軸応力条件下での真応力-真ひずみ曲線のデータを拡充した。

表 4.3.7-1 データを取得した応力比条件

応力制御条件	応力比 (軸方向：周方向)	応力比 $\alpha$	備考
公称応力制御	1 : 1	1	ペレットと被覆管の間にボンディングが発生した場合に想定される応力比
	3 : 4	0.75	
	1 : 2	0.5	クローズドエンドバースト条件
真応力制御	1 : 0	$\infty$	
	4 : 1	4	
	2 : 1	2	
	4 : 3	1.33	
	1 : 1	1	ペレットと被覆管の間にボンディングが発生した場合に想定される応力比
	3 : 4	0.75	
	1 : 2	0.5	クローズドエンドバースト条件
	1 : 4	0.25	
	0 : 1	0	オープンエンドバースト条件

表 4.3.7-2 本試験に供した試料

応力制御条件	試料名称	タイプ	最終処理条件	Q 値
公称応力制御	SR	17x17 型	SR	-
真応力制御	RX Q=2	14x14 型	RX	2
	RX Q=3			3
	RX Q=4			4
	SR Q=2	14x14 型	SR	2
	SR Q=3			3
	SR Q=4			4

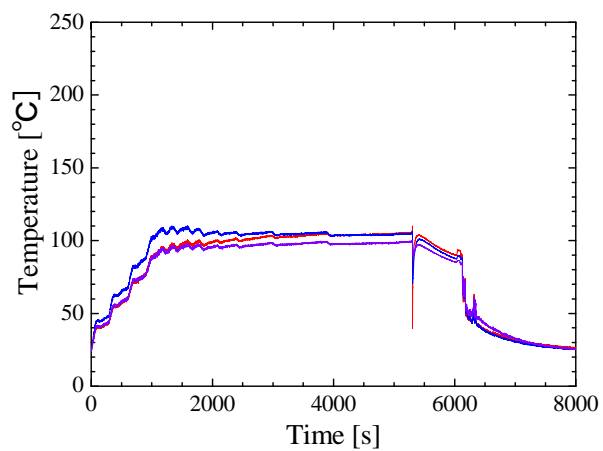


図 4.3.7-1(a) 試験温度 100°Cの温度履歴

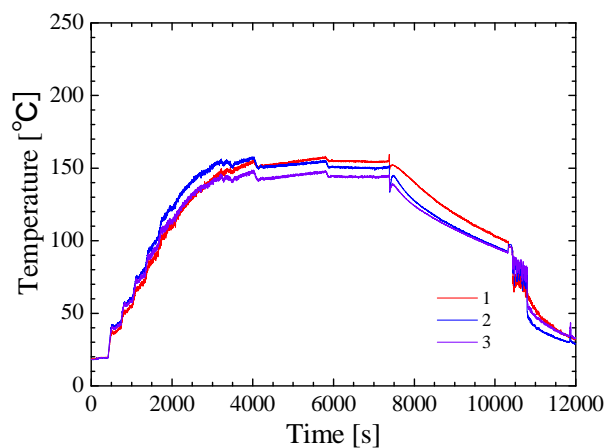


図 4.3.7-1(b) 試験温度 150°Cの温度履歴

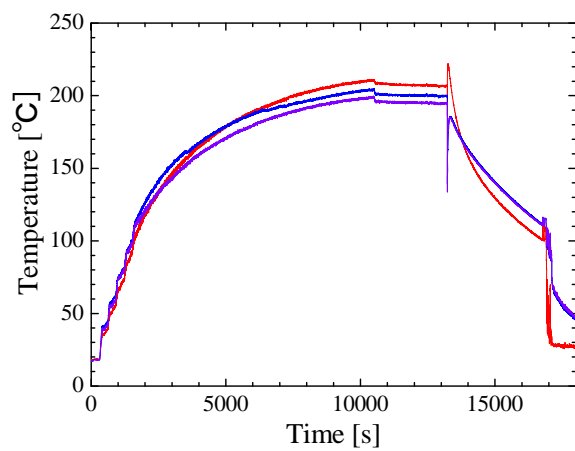


図 4.3.7-1(c) 試験温度 200°Cの温度履歴

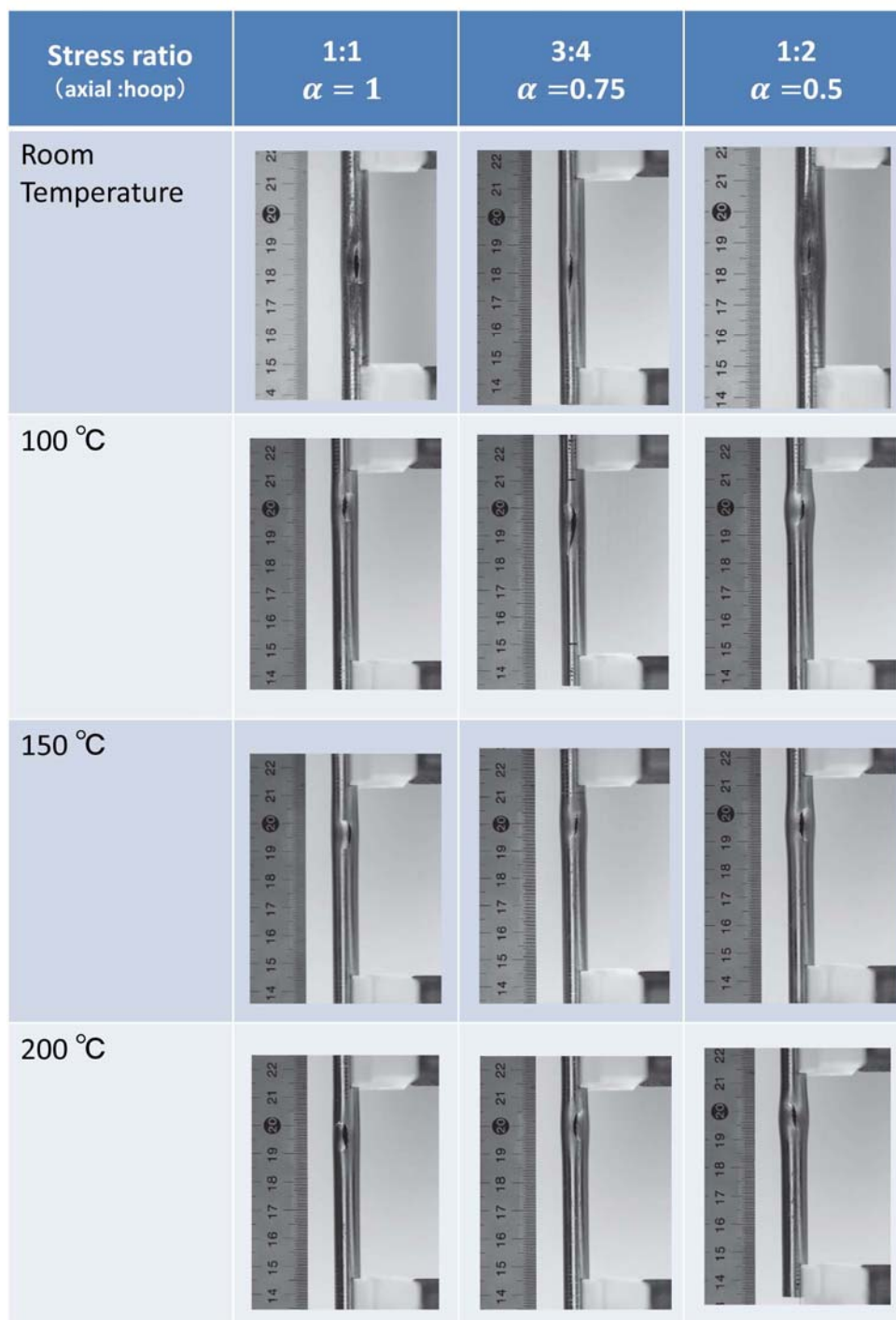


図 4.3.7-2 異なる温度及び異なる応力比で破損した試験後試験片の外観  
(Zry-4 被覆管(SR 材))

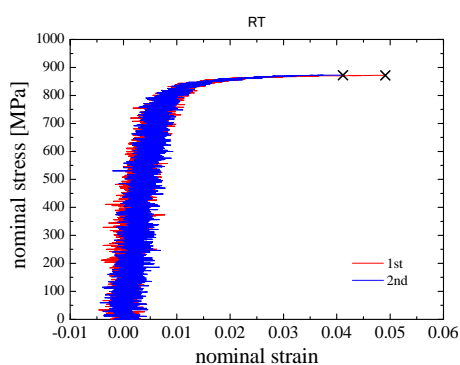


図 4.3.7-3(a) 周方向の公称応力-公称ひずみ  
曲線 (RT、 $\alpha=1$ ) (× : 破損点)

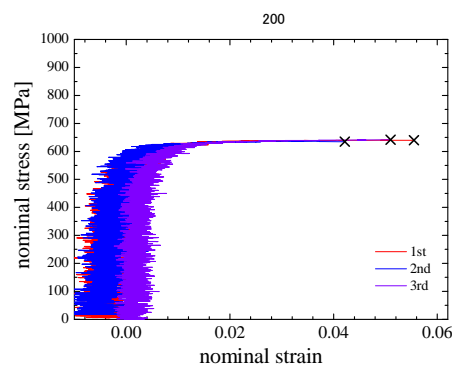


図 4.3.7-3(d) 周方向の公称応力-公称ひずみ  
曲線 (200 °C、 $\alpha=1$ ) (× : 破損点)

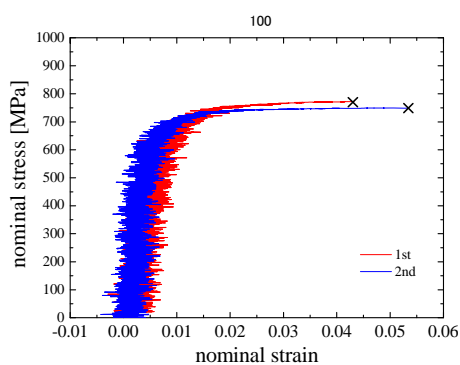


図 4.3.7-3(b) 周方向の公称応力-公称ひずみ  
曲線 (100 °C、 $\alpha=1$ ) (× : 破損点)

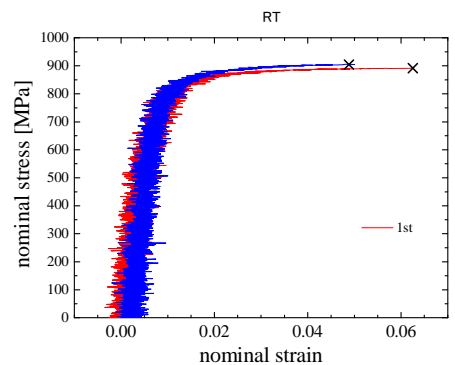


図 4.3.7-3(e) 周方向の公称応力-公称ひずみ  
曲線 (RT、 $\alpha=0.75$ ) (× : 破損点)

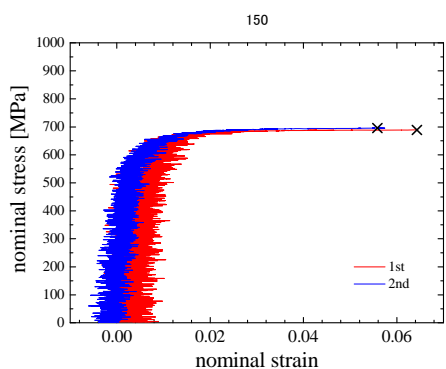


図 4.3.7-3(c) 周方向の公称応力-公称ひずみ  
曲線 (150 °C、 $\alpha=1$ ) (× : 破損点)

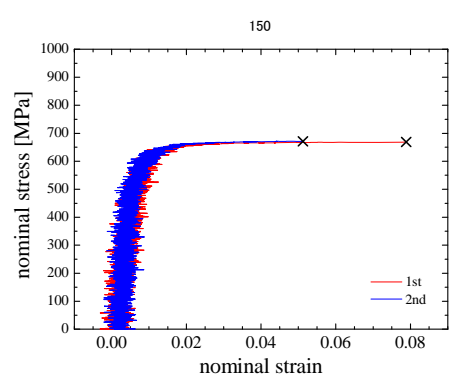


図 4.3.7-3(f) 周方向の公称応力-公称ひずみ  
曲線 (150 °C、 $\alpha=0.75$ ) (× : 破損点)

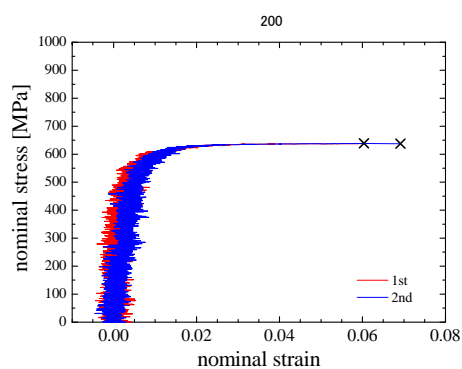


図 4.3.7-3 (g) 周方向の公称応力-公称ひずみ曲線 (200 °C、 $\alpha=0.75$ ) (× : 破損点)

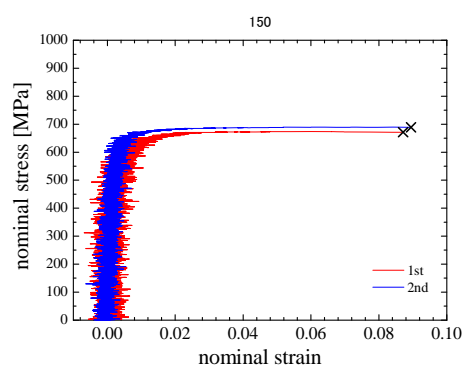


図 4.3.7-3 (j) 周方向の公称応力-公称ひずみ曲線 (150 °C、 $\alpha=0.5$ ) (× : 破損点)

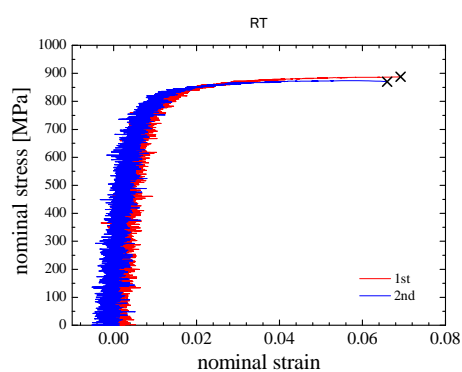


図 4.3.7-3 (h) 周方向の公称応力-公称ひずみ曲線 (RT、 $\alpha=0.5$ ) (× : 破損点)

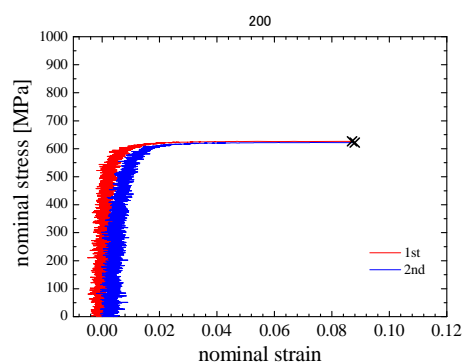


図 4.3.7-3 (k) 周方向の公称応力-公称ひずみ曲線 (200 °C、 $\alpha=0.5$ ) (× : 破損点)

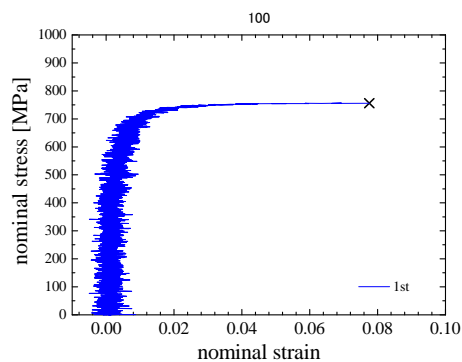


図 4.3.7-3 (i) 周方向の公称応力-公称ひずみ曲線 (100 °C、 $\alpha=0.5$ ) (× : 破損点)



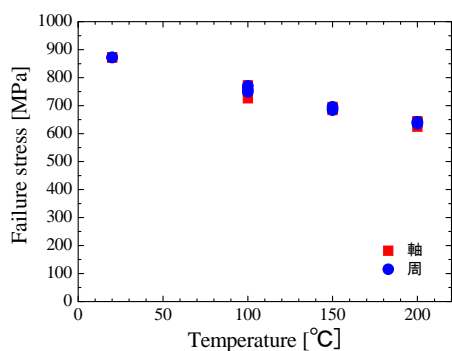


図 4.3.7-4(a) 破損時周及び軸方向応力の温度依存性 ( $\alpha = 1$ )

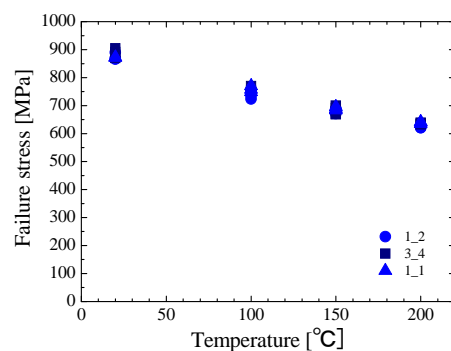


図 4.3.7-4(d) 破損時周方向応力の温度依存性

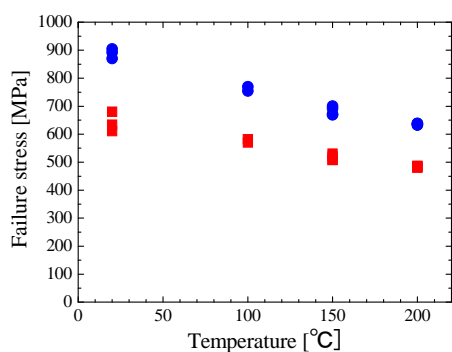


図 4.3.7-4(b) 破損時周及び軸方向応力の温度依存性 ( $\alpha = 0.75$ )

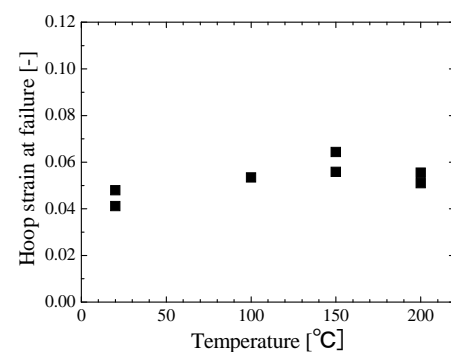


図 4.3.7-5(a) 破損時周方向ひずみの温度依存性 ( $\alpha = 1$ )

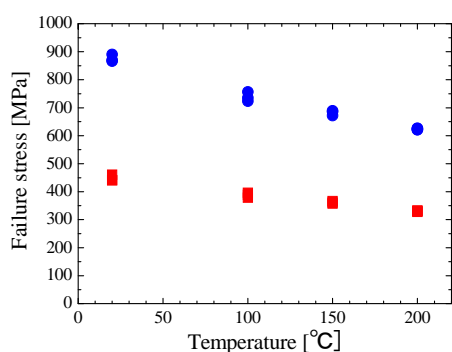


図 4.3.7-4(c) 破損時周及び軸方向応力の温度依存性 ( $\alpha = 0.5$ )

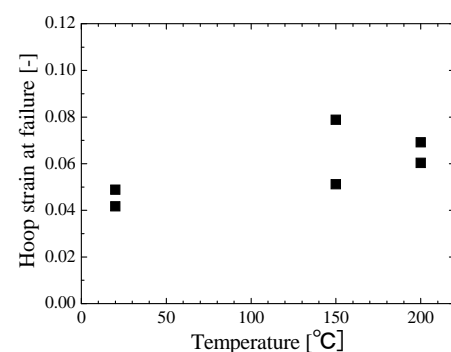


図 4.3.7-5(b) 破損時周方向ひずみの温度依存性 ( $\alpha = 0.75$ )

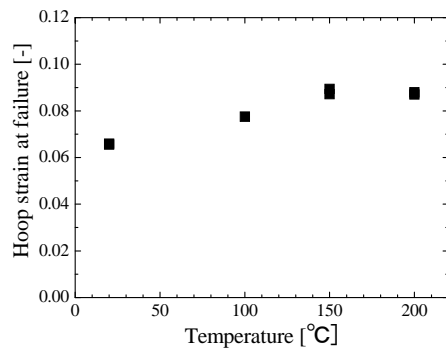


図 4.3.7-5(c) 破損時周方向ひずみの温度依存性  
( $\alpha = 0.5$ )

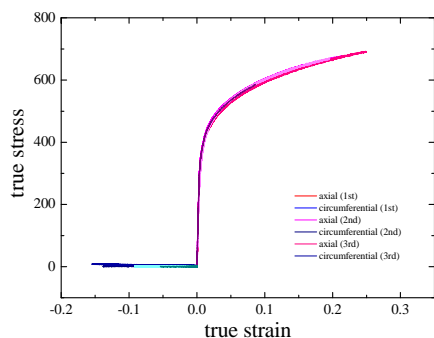


図 4.3.7-6(a) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=2,  $\alpha = \infty$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

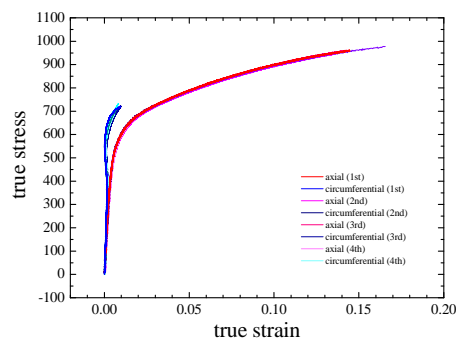


図 4.3.7-6(d) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=2,  $\alpha = 1.33$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

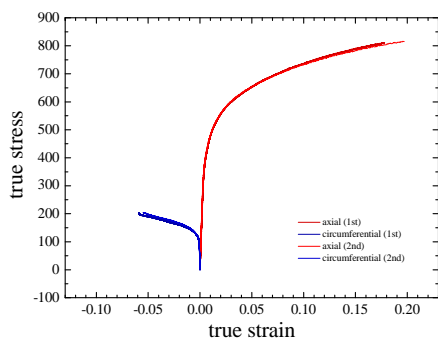


図 4.3.7-6(b) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=2,  $\alpha = 4$ )

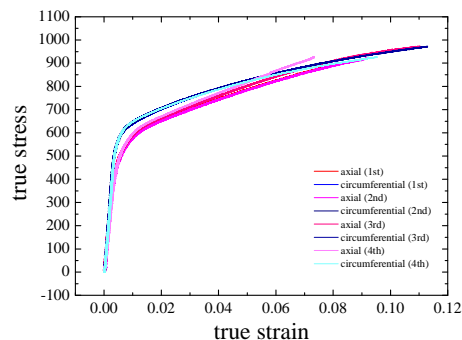


図 4.3.7-6(e) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=2,  $\alpha = 1$ )

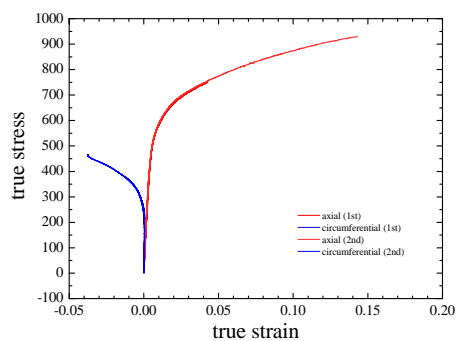


図 4.3.7-6(c) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=2,  $\alpha = 2$ )

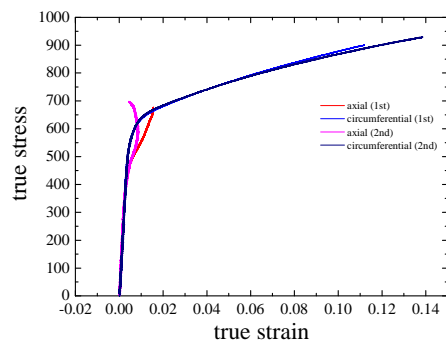


図 4.3.7-6 (f) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=2,  $\alpha = 0.75$ )

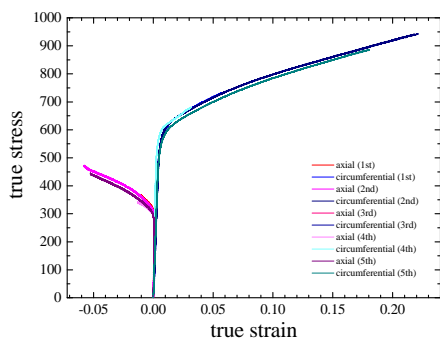


図 4.3.7-6 (g) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=2,  $\alpha = 0.5$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

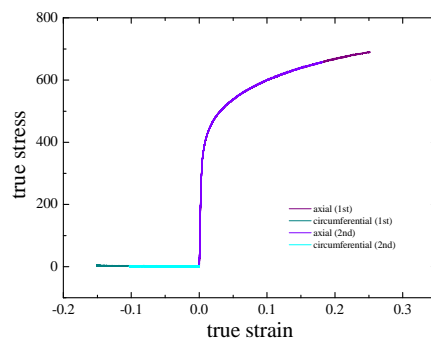


図 4.3.7-7 (a) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=3,  $\alpha = \infty$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

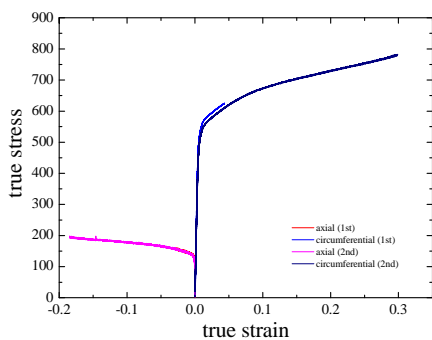


図 4.3.7-6 (h) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=2,  $\alpha = 0.25$ )

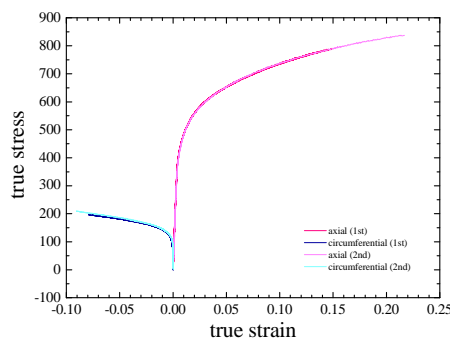


図 4.3.7-7 (b) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=3,  $\alpha = 4$ )

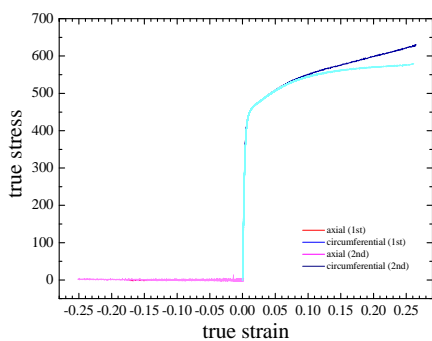


図 4.3.7-6 (i) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=2,  $\alpha = 0$ )

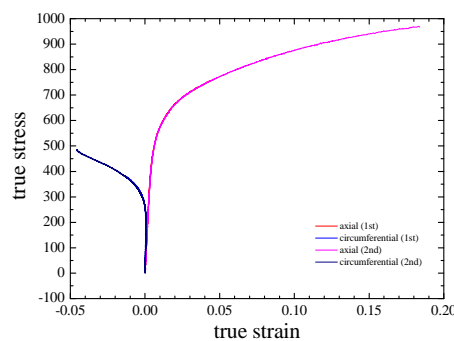


図 4.3.7-7 (c) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=3,  $\alpha = 2$ )

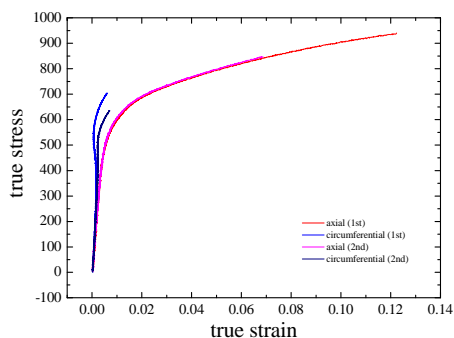


図 4.3.7-7 (d) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=3,  $\alpha = 1.33$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

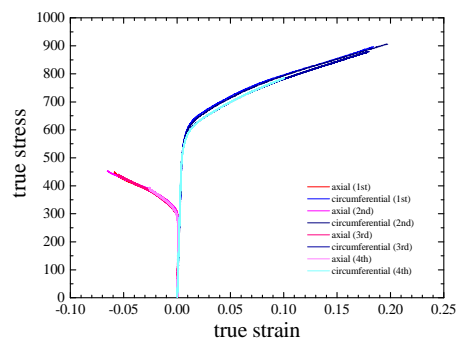


図 4.3.7-7 (g) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=3,  $\alpha = 0.5$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

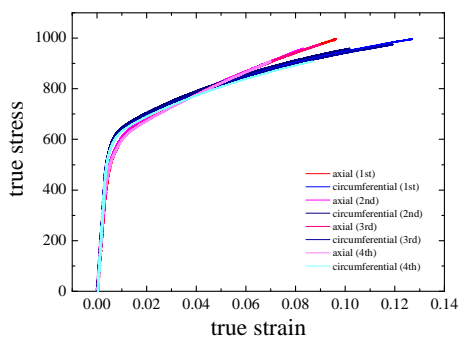


図 4.3.7-7 (e) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=3,  $\alpha = 1$ )

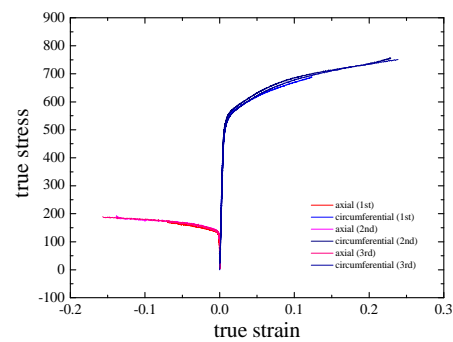


図 4.3.7-7 (h) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=3,  $\alpha = 0.25$ )

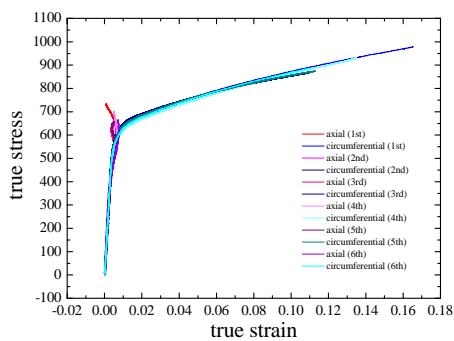


図 4.3.7-7 (f) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=3,  $\alpha = 0.75$ )

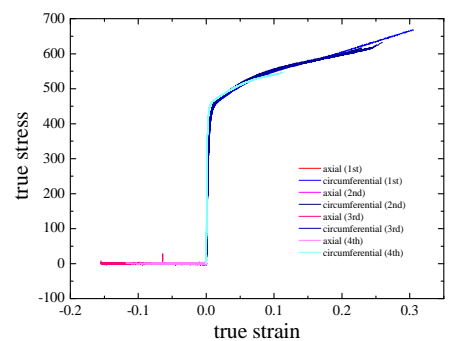


図 4.3.7-7 (i) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=3,  $\alpha = 0$ )

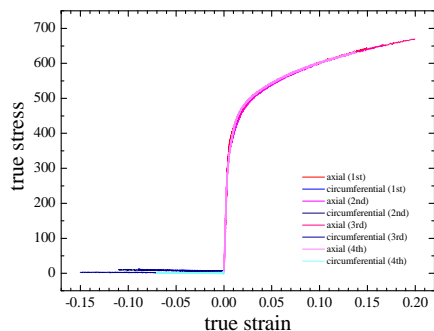


図 4.3.7-8(a) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=4,  $\alpha = \infty$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

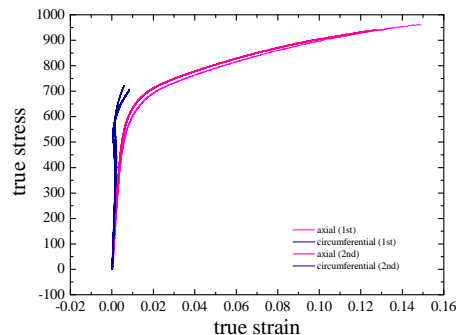


図 4.3.7-8 (d) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=4,  $\alpha = 1.33$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

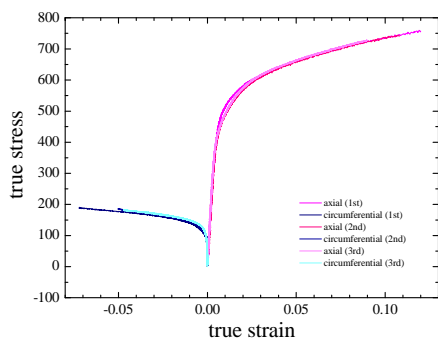


図 4.3.7-8 (b) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=4,  $\alpha = 4$ )

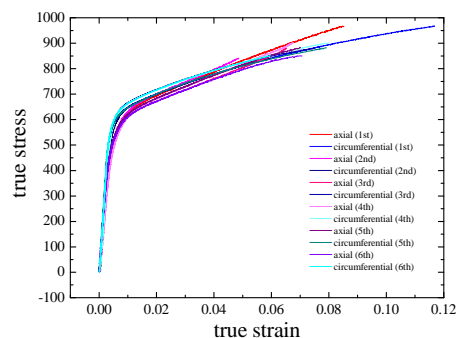


図 4.3.7-8 (e) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=4,  $\alpha = 1$ )

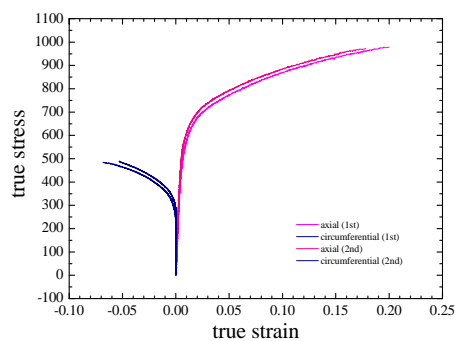


図 4.3.7-8 (c) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=4,  $\alpha = 2$ )

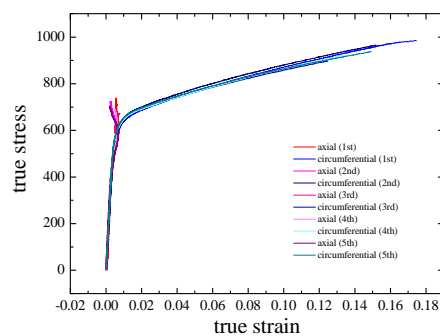


図 4.3.7-8 (f) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=4,  $\alpha = 0.75$ )

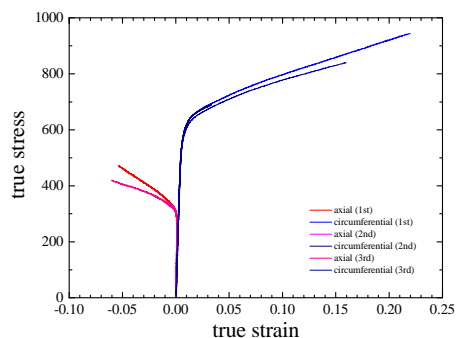


図 4.3.7-8 (g) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=4,  $\alpha = 0.5$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

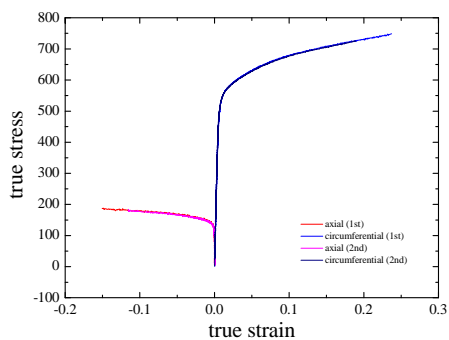


図 4.3.7-8 (h) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=4,  $\alpha = 0.25$ )

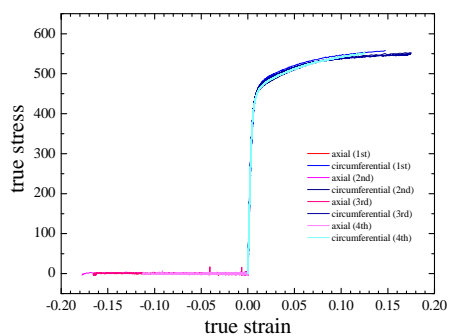


図 4.3.7-8 (i) 真応力-真ひずみ曲線  
(RX, Q=4,  $\alpha = 0$ )

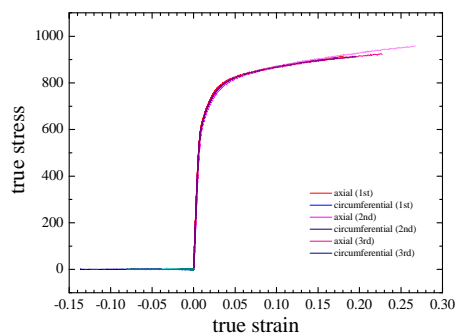


図 4.3.7-9(a) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR,  $Q=2$ ,  $\alpha = \infty$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

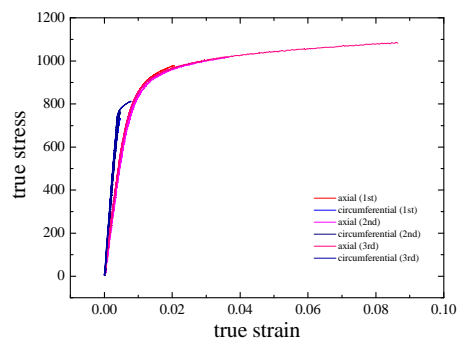


図 4.3.7-9(d) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR,  $Q=2$ ,  $\alpha = 1.33$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

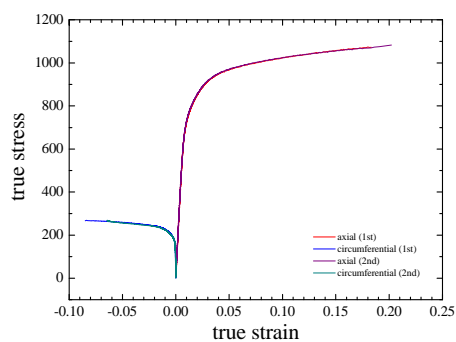


図 4.3.7-9(b) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR,  $Q=2$ ,  $\alpha = 4$ )

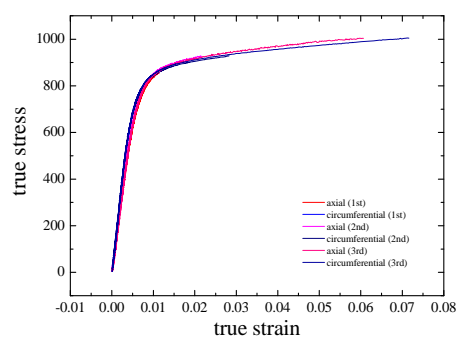


図 4.3.7-9(e) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR,  $Q=2$ ,  $\alpha = 1$ )

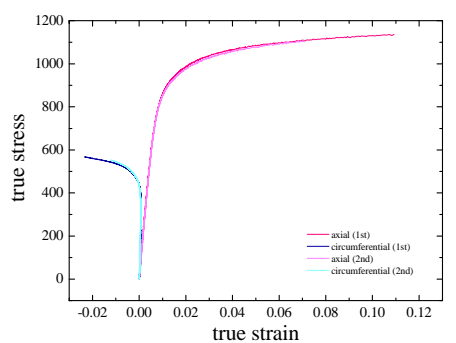


図 4.3.7-9(c) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR,  $Q=2$ ,  $\alpha = 2$ )

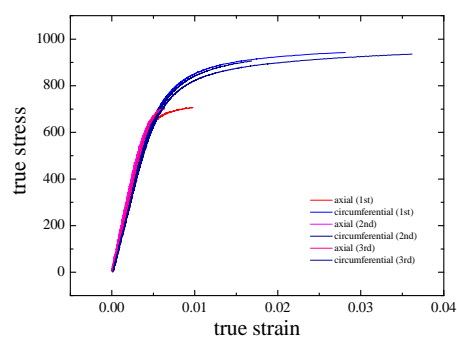


図 4.3.7-9 (f) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR,  $Q=2$ ,  $\alpha = 0.75$ )



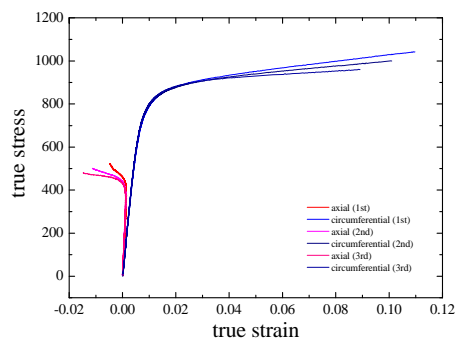


図 4.3.7-9 (g) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=2,  $\alpha = 0.5$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

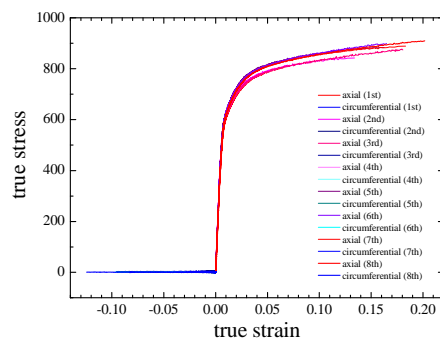


図 4.3.7-10(a) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=3,  $\alpha = \infty$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

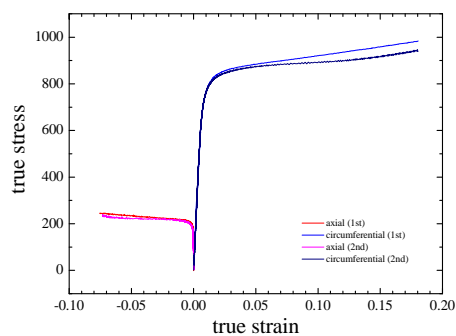


図 4.3.7-9 (h) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=2,  $\alpha = 0.25$ )

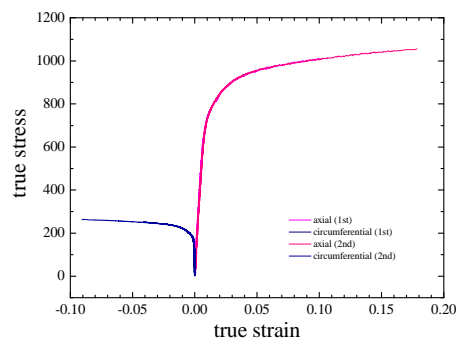


図 4.3.7-10 (b) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=3,  $\alpha = 4$ )

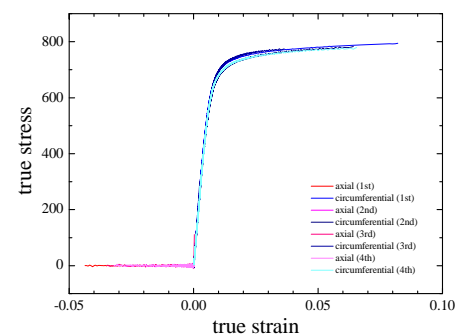


図 4.3.7-9 (i) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=2,  $\alpha = 0$ )

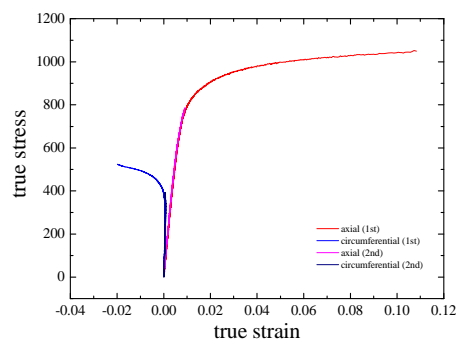


図 4.3.7-10 (c) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=3,  $\alpha = 2$ )

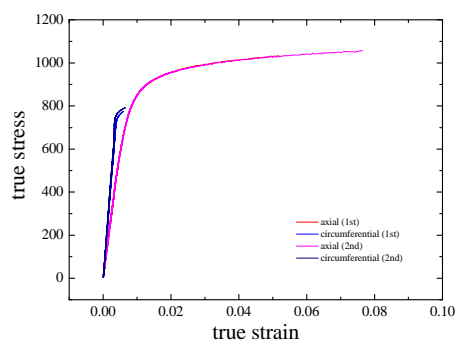


図 4.3.7-10 (d) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=3,  $\alpha = 1.33$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

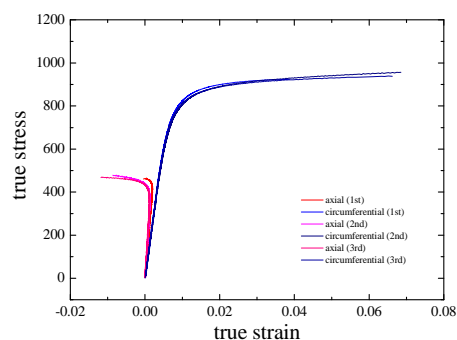


図 4.3.7-10 (g) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=3,  $\alpha = 0.5$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

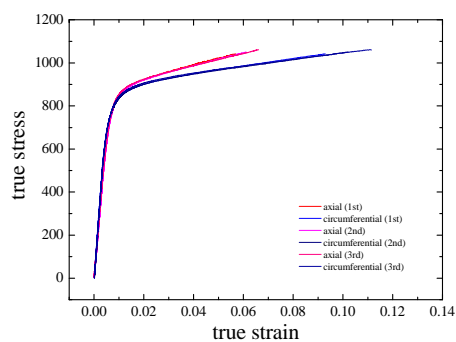


図 4.3.7-10 (e) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=3,  $\alpha = 1$ )

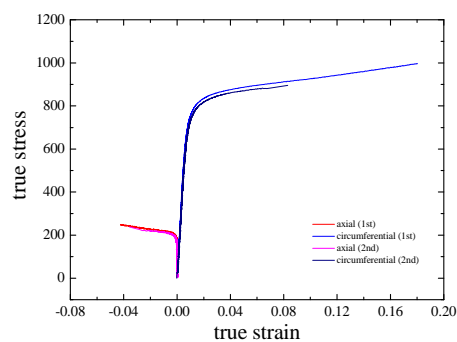


図 4.3.7-10 (h) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=3,  $\alpha = 0.25$ )

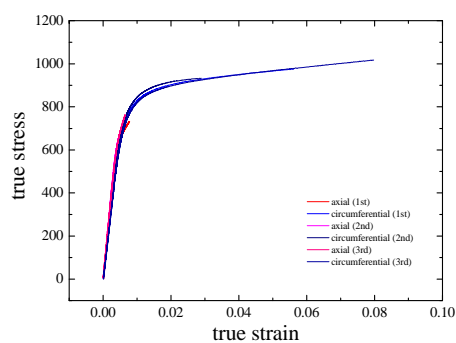


図 4.3.7-10 (f) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=3,  $\alpha = 0.75$ )

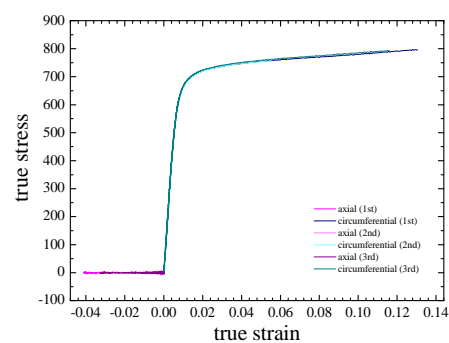


図 4.3.7-10 (i) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=3,  $\alpha = 0$ )

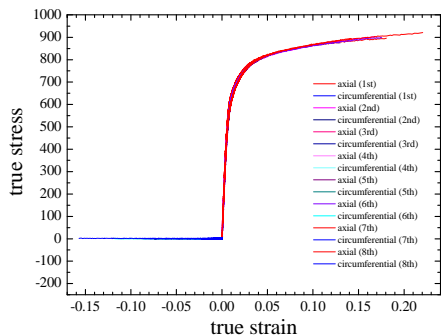


図 4.3.7-11(a) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=4,  $\alpha = \infty$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

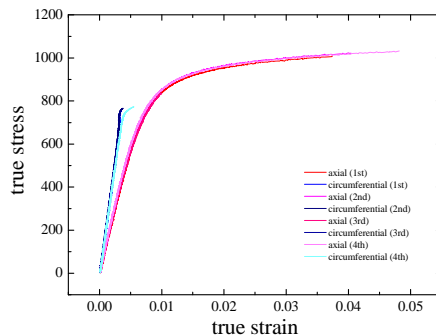


図 4.3.7-11 (d) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=4,  $\alpha = 1.33$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

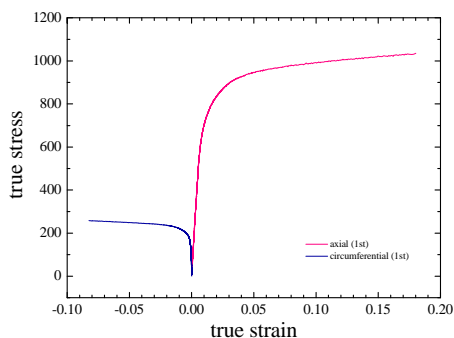


図 4.3.7-11 (b) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=4,  $\alpha = 4$ )

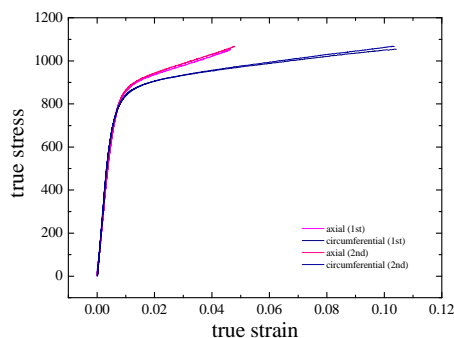


図 4.3.7-11 (e) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=4,  $\alpha = 1$ )

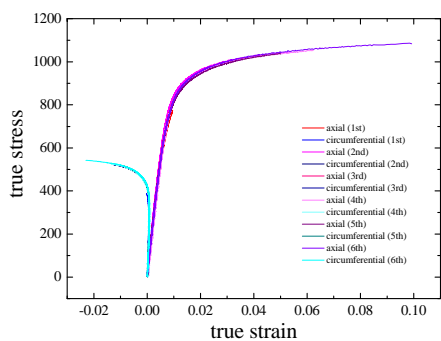


図 4.3.7-11 (c) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=4,  $\alpha = 2$ )

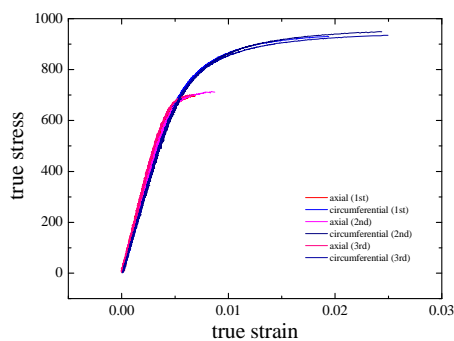


図 4.3.7-11 (f) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=4,  $\alpha = 0.75$ )

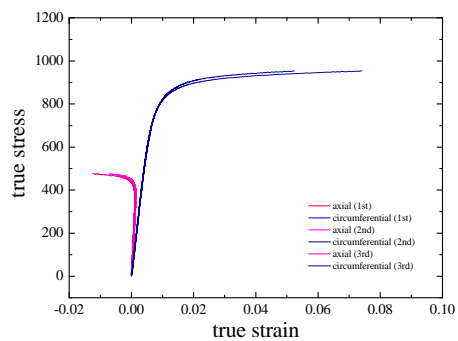


図 4.3.7-11 (g) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=4,  $\alpha = 0.5$ )

赤系：軸方向ひずみ、青系：周方向ひずみ

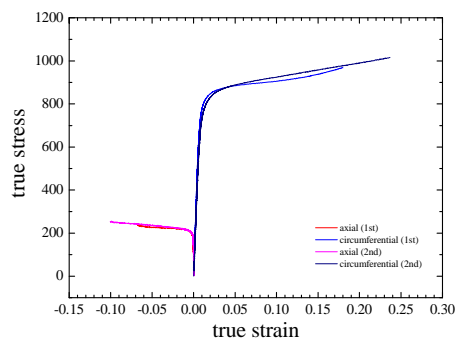


図 4.3.7-11 (h) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=4,  $\alpha = 0.25$ )

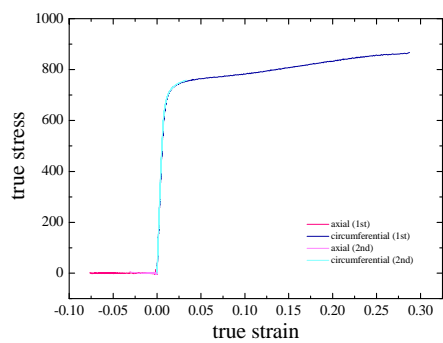


図 4.3.7-11 (i) 真応力-真ひずみ曲線  
(SR, Q=4,  $\alpha = 0$ )

## 4.4 RIA 試験解析

### 4.4.1 解析の概要

改良型燃料の RIA 模擬実験条件下における伝熱、変形挙動特性を把握するため、事故時燃料挙動解析コード RANNS<sup>(1,2)</sup>による解析を行った。RANNS コードは、平成 14 年に最初のバージョンが開発され、NSRR 実験の解析に用いられている。同コードにおいては、ペレットスタック及び被覆管に対して円筒座標系で一次元の熱解析（伝熱及び内圧変化計算）を行い、得られた温度分布を用いて、有限要素法による一次元及び二次元の力学解析、すなわち PCMI (Pellet-Cladding Mechanical Interaction) や被覆管の高温クリープ変形などの解析を行うことが可能である。但し、これらの解析は全て、燃料棒が棒状の試験前形状を維持することを前提としており、燃料破損が生じて初期形状が大きく損なわれた後の燃料挙動については取り扱っていない点に注意する必要がある。本年度は新たに実施した GR-1 実験及び現在計画中の 2 実験を解析の対象とした。解析対象実験の主要な条件を表 4.4-1 に示す。

GR-1 実験の予備解析については、昨年度までに実施・報告済であるが<sup>(3)</sup>、前回の解析以降 RANNS コードや FEMAXI-7 コードにバグフィックス、パラメータセットの修正が行われていること、ベース照射終了時の酸化膜厚さ推定値を修正したこと、実験で得られた NSRR 炉心出力履歴データに基づいて試験燃料棒内線出力履歴を再評価したこと等を受け、本年度再解析を実施した。全体としては前回解析に近い結果が得られたため、GR-1 実験については前回から有意に変化した出力項目についてのみ述べる。

CN-1 実験は、BZ-4 実験<sup>(4)</sup>に続く MOX-BWR 燃料の室温大気圧条件実験となる。NSRR でこれまでに実施された MOX 燃料実験の最高燃焼度は BZ-2～4 実験の 59 GWd/t であり、CN-1 実験の 64 GWd/t はこれを上回る最も高い燃焼度であることから、燃焼度増大に伴うパルス照射時 FP ガス放出挙動の変化及びこれに付随する燃料変形挙動の変化が注目される。

VA-9 実験は、高温高圧条件で行う ZIRLO（低スズ）合金被覆 PWR 燃料実験として計画されている。被覆管材質以外の燃料仕様、照射条件が VA-9 燃料とほぼ共通である VA-7（M-MDA 合金、SR 材）燃料及び VA-8（M-MDA 合金、RX 材）燃料については今年度実験が実施され、VA-7 燃料は非破損、VA-8 燃料は破損という結果が得られており、これらの燃料と被覆管材質のみが異なる VA-9 燃料の破損挙動が注目される。

### 4.4.2 解析方法とモデル

#### (1) GR-1、CN-1、VA-9 実験燃料の FEMAXI-7/RANNS 解析モデル

図 4.4-1 に本解析で用いた FEMAXI-7/RANNS の燃料棒一次元円筒体系モデルを示す。ペレットスタックは 36 等体積リング要素によりモデル化される。また被覆管のジルコニウム合金金属層は 8 等厚みリング要素、外面酸化膜層は 2 リング要素によりモデル化される。Zr ライナー付き被覆管の場合は金属層の内側に Zr ライナー層リング要素が設けられ

るが、本年度の解析は該当しない。また内面酸化膜もリング要素としては取り扱わない。

ベース照射解析においては、4 m 近い燃料棒軸方向の線出力履歴の分布を考慮するため、燃料棒を軸方向に 6 分割した解析を実施した。一方 NSRR 実験において試験燃料棒軸方向の出力分布はほぼ平坦とみなせることから、軸方向セグメントの分割は行っていない。即ち 1 本の試験燃料棒を軸方向 1 要素のみの一次元円筒モデルにより取り扱った。

ベース照射時の FP ガス放出モデルについては、表 4.4-3 に示すパラメータ<sup>⑤</sup>を指定した。また反応度事故条件下における FP ガス放出モデルについては、表 4.4-4 に示すパラメータを指定した。本解析では MOX 燃料特有の FP 移行評価を行うモデルは用いていない。反応度事故条件下における被覆管表面熱伝達モデル、燃料被覆管の破損予測モデルや等その他の主要モデルの設定については、RANNS の標準的なモデルパラメータセット<sup>②</sup>を用いて解析を行った。

## (2) 解析手順

まずそれぞれの燃料棒の初期仕様及びベース照射が行われた各原子炉における照射履歴等を入力として、高燃焼度燃料解析コード FEMAXI-7<sup>⑤</sup>による解析を行った。この解析により、照射によって燃料の各要素に生じる変化（被覆管、燃料ペレットの寸法変化、FP ガスの移行、被覆管水側酸化など）が得られた。これらベース照射後の燃料状態に関する情報をファイル化し、RANNS コードへ入力の一部として与えることにより、NSRR 実験解析の初期条件の設定に用いた。

RANNS によるパルス実験解析では、ベース照射解析の結果に加えて試験燃料棒仕様、パルス出力（線出力）履歴、冷却材初期条件（温度、圧力）、燃料スタックの半径方向発熱密度分布を入力として与え、パルス照射による燃料温度上昇、熱膨張、それに伴う PCMI 接触圧、被覆管の温度と歪み、PCMI 破損の有無、FP ガス放出等の挙動を計算した。

FEMAXI-7/RANNS で必要となるペレット半径方向発熱密度分布及び被覆管高速中性子フルエンスは、ペレットを 36 等体積リング要素でモデル化し、MVP-burn<sup>⑥</sup>コードを用いて計算した。

#### 4.4.3 ベース照射解析結果

各燃料の燃料仕様及び、線出力履歴、高速中性子束履歴等の照射条件を入力として、FEMAXI-7によるベース照射期間の燃料挙動解析を行った。ベース照射解析の主要な計算条件を表 4.4-2 及び-3 に、各燃料の線出力履歴、高速中性子束を図 4.4-2、図 4.4-3 に示す。同表に示していない燃料仕様の内、ペレットや被覆管の寸法等については表 4.1-1 に示す情報を用いた。被覆管腐食速度については、CN-1、VA-9 についてそれぞれ ICORRO=7、8 (それぞれ M5 合金、ZIRLO 合金向けのモデル)、RCORRO = 1.0、0.7 (ICORRO で指定した腐食モデルで決まる腐食速度に対する補正係数) とした。ここで VA-9 について RCORRO=0.7 としているのは、FEMAXI-7 は低スズ ZIRLO 合金向けの腐食速度モデルを備えていないこと、また低スズ ZIRLO 合金の腐食速度は ZIRLO 合金に対して約 7 割程度であると報告されている事による<sup>(7)</sup>。GR-1 については、今年度新たに得られた実験燃料棒の外径測定結果と酸化膜厚さ推定値を再現するよう、RCORRO と SWSLD (照射に伴う燃料ペレットの固体スエリング速度に対する補正係数) を調整した。照射条件については、CN-1 では照射期間に亘り比較的低い線出力レベルで推移しているのに対し、VA-9 照射前半に線出力レベルが高く、後半に低くなっている特徴がある。

ベース照射解析の結果得られたペレット温度、被覆管酸化膜厚、被覆管水素吸収量、ペレット/被覆管 (PC) ギャップ幅、PC ギャップコンダクタンス、PCMI 圧力、被覆管酸化膜表面外径変位、FP ガス放出率、ペレット結晶粒内 FP ガス比率、ペレット結晶粒界 FP ガス比率、リムポア内 FP ガス比率の履歴を図 4.4-4~14 に示す。以下の図で、凡例の径方向メッシュ番号 ("R=01" 等) は図 4.4-2 に示したペレット及び被覆管それぞれの Ring element No.に対応する。

燃料挙動全体を決定づけるペレット温度については、線出力履歴を反映したふるまいとなっている。照射期間に亘り比較的線出力の低い CN-1 では、照射初期に約 1000 °C に達するものの、ほぼ 1000 °C 未満で推移している。これに対して VA-9 では、特に線出力レベルの高い照射初期にはペレット中心温度が約 1200 °C 前後と比較的高いレベルで推移する一方、線出力レベルの小さくなる後半では 900 °C を下回る。ベース照射終了時における被覆管外面酸化膜厚さ及び水素吸収量は、CN-1 でそれぞれ 12  $\mu\text{m}$  及び 60 wtppm、VA-9 でそれぞれ 45  $\mu\text{m}$  及び 300 wtppm 程度と評価された。

ペレットのスエリングと被覆管のクリープによるギャップ閉塞挙動については両ケースで大きな差はなく、約 15 GWd/t までにギャップが閉塞し、この状態が照射終了まで続く (図 4.4-7)。ギャップ閉塞に伴うペレット-被覆管ボンディングの形成は 40 GWd/t までには終了し、ギャップコンダクタンスが飽和している (図 4.4-8)。ペレットと被覆管の間には、RIA 試験直前まで継続的に線出力レベルに応じた PCMI 応力が生じている (図 4.4-9)。これらの燃料がベース照射を終え、RIA 条件下に置かれた場合には、熱膨張したペレットが直ちに被覆管に接触し、被覆管に機械的負荷 (PCMI) を与える事が予想される。但し CN-1 については照射終了時点で若干 (10  $\mu\text{m}$  未満) のギャップが残存しており、VA-9 燃

料に比べ PCMI の発生がやや遅れることが予想される (図 4.4-7)。照射期間後半に拡大する被覆管外径変位の差 (図 4.4-10) は、主として酸化膜成長速度の差 (図 4.4-5) による。

FP ガス放出率については、CN-1 で約 2%、VA-9 で約 5%と評価された (図 4.4-11)。CN-1 は比較的粒径が小さく燃焼度は 64 GWd/t に達しているが、全体に線出力が低く、ペレット温度が低いレベルで推移した結果、FP ガス放出率は 2%に留まっている。VA-9 では特に線出力レベルが高い第 1 サイクルの後半と、FP ガスの粒界への蓄積後に温度が上昇する第 4 サイクルでそれぞれ FP ガス放出が生じている (図 4.4-4、11、13)。燃焼度の違いを反映し、ベース照射終了時点で CN-1 では約 10%、VA-9 では約 20%の FP ガスがリムポアへ移行していると評価された (図 4.4-14)。RIA 試験時に最も放出されやすいと考えられる燃料ペレット粒界の FP ガスインベントリについては、CN-1 では約 15%、VA-9 では約 10%と評価された。これらの値は高燃焼度燃料を対象とした最近の RIA 試験時における平均的な FP ガス放出率に比べて小さいことから、本解析で採用した FGR モデルによる粒界への FP ガス移行量が過小評価となっている可能性がある。

#### 4.4.4 RIA 試験解析結果

前節のベース照射解析により得られた RIA 試験直前の燃料状態を入力として、RIA 模擬実験 GR-1、CN-1、VA-9 の RANNS コードによる解析を行った。RIA 試験解析に反映した RIA 試験条件を表 4.4-5 に示す。表に示していない条件、燃焼に伴う燃料ペレットや被覆管の熱的及び機械的特性、実験直前の応力及びひずみ条件、ペレット内径方向出力密度分布等については、FEMAXI-7 の入力条件及び計算結果を読み込んで使用している。各パルス照射実験における試験燃料棒の線出力履歴を図 4.4-15 に示す。CN-1、VA-9 の線出力は、4.53\$の投入反応度の下で行うパルス照射実験時に想定される NSRR 原子炉出力履歴に、炉出力と試験燃料棒発熱密度の換算係数を乗じることにより算出している。一方 GR-1 については、実験時の原子炉出力履歴に基づいて再評価された線出力履歴である。換算係数の評価は以下の方法により行っている。CN-1 については、ベース照射中の中性子スペクトル効果を補正するための質量分析データ取得が現時点で完了していないため、ORIGEN2 コードによる燃焼計算を行い<sup>(8)</sup>、RIA 試験燃料直前の燃料組成を評価した (ライブラリ ID : PWRM0205J33.LIB による)。VA-9 については、照射環境が等しい VA-5 実験燃料の質量分析で得られた U 及び Pu 中に占める核分裂性同位体 (U-235、Pu-239、Pu-241) の割合 (fissile 比) 0.0137 を用いて、中性子スペクトルを調整した燃焼計算 (SWAT コード<sup>(9)</sup>) を行い、RIA 試験直前の燃料組成を評価した。これらの燃料組成を入力情報として、TWO-DANT コード<sup>(10)</sup>による NSRR 炉心の中性子輸送計算解析を行うことで、RIA 試験時の炉出力と試験燃料棒発熱密度の換算係数が得られた。また GR-1 については、前回解析時に ORIGEN2 コードを用いた燃焼計算による暫定評価を行っているが、その後質量分析により取得した同位体組成データを用いて、VA-9 同様に SWAT コードを用いた再評価を行っている。CN-1 実験と VA-9 実験では、VA-9 実験の線出力レベルが CN-1 実験



にくらべ 30%程度低い (図 4.4-15)。これは CN-1 燃料の到達燃焼度が VA-9 実験よりも低いことに加え、VA-9 実験は室温実験に比べて平均して 1 割程度線出力が小さくなる傾向がある高温条件での実験であることによる。但し CN-1 については RIA 試験燃料直前の燃料組成を ORIGEN2 コードに依っているため、現段階では比較的誤差の大きい評価である点に留意する必要がある。

解析により得られた燃料ペレットエンタルピ、ペレット温度、PC ギャップ、PCMI 圧力、被覆管内温度、被覆管外面温度、被覆管周方向全ひずみ、被覆管軸方向全ひずみ、被覆管周方向塑性ひずみ、試験燃料棒全体の FP ガス放出率、試験燃料棒内圧、被覆管 J 積分値、Jc 値、J 積分値/Jc 比、被覆管平均温度、FRAPTRAN1.4 モデルによる被覆管破損限界の履歴を図 4.4-16～31 に示す。CN-1、VA-9 実験における燃料ペレットエンタルピ (径方向平均値) の到達最大値は、それぞれ約 680 J/g、520 J/g となった (図 4.4-16)。GR-1 での最大値は約 450 J/g であり、前回解析時から大きな変化はなかった。高温実験である VA-9 は、パルス照射前の予加熱段階で約 70 J/g の燃料ペレットエンタルピ上昇を生じるため、パルス照射によるエンタルピ増分としては約 450 J/g 程度と CN-1 に比べ更に小さい。各実験のペレット温度推移は燃料エンタルピの大小関係に沿ったものとなっており (図 4.4-17)、到達最大値は CN-1 の中心部で 1900 °C 程度、VA-9 の中心部で 1500 °C、CN-1 の外周部で 2200 °C、VA-9 の外周部で 2300 °C 程度である。CN-1 で中心温度と外周部温度の差が小さいのは、燃焼度が比較的低いことに加え、燃焼計算を ORIGEN2 コードに依っているため、燃焼に伴い重金属核種のペレット径方向分布に生じる変化 (ペレットの外周部における高 Pu 比の領域形成) を再現できていないことによる。一方燃焼度が高く、SWAT コードにより詳細な燃焼計算を行った VA-9 では、強い出力ピーキングが生じ、ペレット中心部の温度が低くなると共に、ペレット外周の一部では燃料エンタルピ (径方向平均値) で有意に上回る CN-1 よりも高い到達温度となっている。

被覆管表面温度については、VA-9 でそれぞれ 1000 °C 程度まで、CN-1 では 550 °C 程度まで上昇している (図 4.4-21)。GR-1 での最高温度は約 400 °C で、前回解析時の約 170 °C から有意に大きな値となった。これは最近 RANNS コードに実装された被覆管表面熱伝達モデル<sup>(2)</sup>による解析精度向上の結果であり、実測された最高温度である約 520 °C により近い値となっている。高温実験である VA-9 では、初期温度が高いことに加え、冷却水のサブクール度が 10 K 程度と小さく、沸騰挙動に及ぼす照射の効果が表れにくい条件であるため、室温実験に比べて膜沸騰時の被覆管表面熱伝達率が小さくなる。結果として、エンタルピの点では有意に大きい CN-1 に比べても、大幅に高い被覆管表面温度となっている。PCMI 破損挙動に影響を与えるパルス直後の被覆管内温度推移についても、初期温度の影響が大きい (図 4.4-20)。被覆管表面温度は PC ギャップの推移に大きく影響しており、いずれも膜沸騰から核沸騰に移行した時刻 (CN-1、VA-9 でそれぞれ 1.2 sec、3.5 sec) 付近から再びギャップが開いている (図 4.4-18)。これは被覆管表面熱伝達のレベルが回復した結果、ペレット部では温度が下がり熱的に収縮する一方、被覆管部には PCMI 負荷

により生じた塑性変形が残るため、ギャップが広がったものである。PCMI 負荷時に生じる被覆管の塑性変形(図 4.4-24)の大きい CN-1 で PC ギャップの開きが大きい。また PCMI 負荷による応力は初期温度の影響を強く受けており、VA-9 で小さく、CN-1 で大きい(図 4.4-19)。

被覆管外周部に生じる周方向ひずみの大きさは全ひずみにして CN-1 で約 2.5%、VA-9 で約 1.7%、塑性ひずみにして CN-1 で約 2.0%、VA-9 で 1.4%程度と予測される(図 4.4-22、24)。軸方向ひずみの大きさは全ひずみにして CN-1 で約 1.3%、VA-9 で約 1.3%と予測され(図 4.4-23)、周ひずみで見られた大小関係が見られない。これは本解析では被覆管とペレットの機械的なボンディングを想定しており、被覆管の軸方向変形量はペレットの軸方向への膨張量で決定していることによる。ペレットは一定の応力・温度条件を満足した時点で降伏を生じ、このとき軸方向への膨張量は降伏が生じない場合に比べて抑制される。ペレットに作用する応力は被覆管の機械特性に依存するため、初期温度、従って PCMI 時の被覆管温度も高い VA-9 では、室温実験の CN-1 に比べペレットに対する拘束力が大幅に小さく(図 4.4-19)、結果としてペレットの降伏が遅れ、ペレットの軸方向膨張量が CN-1 に比べ相対的に大きくなったものと理解できる。

RIA 模擬実験時の FP ガス放出率は CN-1、VA-9 でそれぞれ約 22%、19%と予測された(図 4.4-25)。VA-9 ではプレナム圧力が 7 MPa に達し、安定な膜沸騰の発生も予測されている(図 4.4-26)が、燃料棒内ガス圧上昇はひずみに有意な影響を及ぼしていない。

J 積分に基づく破損限界評価式により PCMI 破損発生の可能性を検討した(図 4.4-27～29)。これによれば、PCMI フェーズにおける J 積分値の破損しきい値  $J_C$  に対する比が VA-9 で 0.9 と、破損発生の基準となる 1.0 を下回っており、PCMI 破損が発生する可能性は小さいものと予測される。CN-1 では 1.0 に近い値となっているが、同燃料の被覆管は再結晶焼鈍材であるため、水素化物の配向挙動がモデルの想定と異なる可能性が大きく、J 積分値の評価は参考値として考えるべきである。これらの再結晶材被覆管については、被覆管に破損が生じる塑性ひずみと被覆管水素濃度及び被覆管平均温度の関係をまとめた経験式である FRAPTRAN1.4 モデルを用いて破損の可能性を検討した。このモデルでは、計算された被覆管の平均的な周方向塑性ひずみが、経験式から得られる破損しきい値(破損時塑性ひずみ)を上回った場合に、破損が生じると判断する。図 4.4-31 は同モデルにより評価した、被覆管に破損が生じる塑性ひずみの時間推移である。負の値は同モデルによる破損限界が無効であり、破損が生じる可能性は無い状態を意味する。また被覆管の平均的な塑性ひずみ(計算値)については、被覆管肉厚中央の塑性ひずみ計算値(図 4.4-24)により近似した。VA-9 では、233 ms を超えた時点で被覆管平均温度が 700 K に到達しており(図 4.4-30)、同モデルの適用上限を超えた結果、図 4.4-31 に負の値が表れた。一方、被覆管の塑性ひずみは 233 ms までに平均で 1.2%に達しておらず(図 4.4-24)、同モデルにおいてもやはり非破損が予測される。CN-1 は塑性ひずみが肉厚中央部で 2%と大きい(図 4.4-24)ものの、水素吸収量が小さいことから、破損に至る塑性ひずみは 2%をやや

上回っており、同モデルによれば破損が生じる可能性は小さいと考えられる。GR-1 についても、平均的な塑性ひずみは高々1%程度であり（図 4.4-24）、破損しきい値となる 1.8%（図 4.4-31）より有意に小さいことから、解析による判定は非破損となる。この予測は、実験結果に一致した。

図 4.4-22～24 には主として PCMI 発生時のひずみを示したが、上述の通り燃料が非破損であった場合には、FP ガス放出に伴う内圧増を駆動力とする追加的な変形が生じる可能性がある。この様な変形の可能性を調べるため、FP ガス放出率をパラメータとして行った感度解析で得られた被覆管外面の永久ひずみの変化を図 4.4-32 に示す。ここでは、放出されたガスの温度がペレットの平均温度に等しいものとして扱うモデルを採用しているが、これは次のような理由による。すなわち、燃料棒内ガスは、固体であるペレットに比べて熱容量が小さく、且つ燃料部に比べ温度の低い被覆管内壁、プレナム内壁に接触していることから、現実のガス温度はペレットの平均温度よりは低くなると考えられるものの、FEMAXI-7 の様な燃料コードの標準的な取扱である、放出ガスの温度をペレット外面と被覆管内面の平均温度として扱うモデルでは、RIA 実験時の圧力上昇を過小評価する傾向が従来の解析から明らかであったため、得られた結果を比較して今回採用したモデルの方がより適切と考えられたためである。

感度解析の結果から、高温実験である VA-9 では、FP ガス放出率が 25%程度を超えて以降に有意なひずみの増加が生じる可能性が大きいこと、室温実験である CN-1 では相当程度の FP ガス放出率を想定してもガス圧に起因する有意なひずみ増が生じる可能性は小さいことがわかる。室温実験で CN-1 よりもエンタルピの小さい GR-1 ではさらにひずみ増が小さい結果となっている。GR-1 のパルス実験後寸法測定は未実施であるが、外観観察で有意な変形は認められておらず、本感度解析の結論は観察結果と一致している。

#### 4.4.5 RIA 試験解析のまとめ

FEMAXI-7 コード及び RANS コードにより GR-1、CN-1、VA-9 実験のシミュレーションを行い、以下の解析結果を得た。

- GR-1、CN-1、VA-9 の燃料エンタルピー最大値はそれぞれ約 450、680、520 J/g となる（エンタルピー増分はそれぞれ約 450、680、450 J/g）。
- GR-1 実験での被覆管表面温度到達実測値約 520 °C に対し、予測値は約 400 °C であった。CN-1、VA-9 では 1 sec を超える膜沸騰を生じる。被覆管表面温度は CN-1 で約 500 °C、VA-9 では約 1000 °C に達する。
- 被覆管に生じる周方向ひずみの大きさは全ひずみにして CN-1 で約 2.5%、VA-9 で約 1.7%、塑性ひずみにして CN-1 で約 2.0%、VA-9 で約 1.4% 程度となる。
- FP ガス放出率は CN-1、VA-9 でそれぞれ約 22%、19% となる。
- CN-1、VA-9 実験共に PCMI 破損が生じる可能性は小さい。GR-1 実験についても解析は非破損を予測し、この予測は実験結果と一致した。
- CN-1 では、FP ガス圧に起因する被覆管変形が生じる可能性は小さい。VA-9 では、25% 以上の FP ガス放出が生じた場合に、ガス圧を駆動力とする被覆管変形が生じる可能性がある。

表 4.4-1 解析対象実験

照射炉型	試験 No.	試験部 燃焼度 GWd/t	被覆管および ペレット材料	実験の条件及び位置付け
PWR	GR-1	84	UO <sub>2</sub> 燃料 グラブリン炉照射 外面酸化膜約 15* μm 17×17type M5	室温大気圧条件、 M5 被覆高燃焼度 PWR 燃料の FP ガス放出挙動、被覆管伝熱、 変形挙動に関する知見の取得
PWR	CN-1	64	MOX 燃料 シノン炉照射 外面酸化膜約 20** μm 17×17type M5	室温大気圧条件、 高燃焼度 PWR-MOX 燃料の FP ガス放出挙動に関する知見の取 得
PWR	VA-9	80	UO <sub>2</sub> 燃料 バンデロス炉照射 外面酸化膜：- 17×17type ZIRLO(low-Sn)	高温高圧条件、 低スズ ZIRLO 被覆高燃焼度 PWR 燃料の破損限界の把握

\* 渦電流による酸化膜厚さ測定結果と別セグメントである AP2-10 金相観察で得た酸化膜厚さからの推定値。今後金相観察で得た酸化膜厚さの値により補正を行う必要がある。

\*\* 渦電流による酸化膜厚さ測定結果。今後金相観察で得た酸化膜厚さの値により補正を行う必要がある。

表 4.4-2 ベース照射解析の主要な計算条件（概略値）

項 目	単位	GR-1	CN-1	VA-9
試験部燃焼度	(MWd/t)	84000	64000	80000
燃料棒				
燃料有効長	(cm)	3600	3600	3600
上部プレナム容積	(cm <sup>3</sup> )	10	10	10
下部プレナム容積	(cm <sup>3</sup> )	0.0	0.0	0.0
初期ガス圧力	(MPa)	2	2	2
初期ガス組成	—	He	He	He
冷却材				
入口温度	(K)	550	550	560
圧力	(MPa)	15.5	15.5	15.5
流速	(m/s)	4.5	4.5	4.5
流路断面積	(cm <sup>2</sup> )	1	1	1
燃焼後冷却期間				
冷却期間	(day)	3000	3000	3000

表 4.4-3 FEMAXI-7 の FP ガス放出モデルパラメータ

パラメータ (fortran namelist)名		パラメータの意味 <sup>(7)</sup>
IGASP	2	粒界ガスバブルの成長、放出挙動について速度論モデルを適用
IFIS	0	核分裂密度は線出力から逐次評価する
APORE	1.0	粒内ガスバブル半径初期値
IDCNST	5	粒内ガス原子拡散係数は Kogai のモデルを用いる
IGRAIN	0	粒成長速度は Itoh のモデルを用いる
ADDF	0.1	粒界ガスの粒内への再溶解率を調整するパラメータ
IPEXT	14	ペレット静水圧が粒界ガスバブルに作用する
FBCOV	0.25	粒界ガスバブルの放出開始条件を調整するパラメータ
RF	0.00005	同上
MGB	1	同上
NGB	1	同上
HP	0.4	粒界ガスバブルの放出速度を調整するパラメータ
HN	0.2	同上
NFC	1	同上
FGCND	10	同上
SIG0	400	同上
HBS	2	リムポアへのガス移行は Lassmann モデルに JAEA 実効燃焼度モデルを適用して評価
FPINF	0.25	Lassmann モデルのパラメータ
GEN1	0.0146	同上
GEN2	0.0584	同上
BURMXE	68.493	同上
RMPST	1	リムのポロシティは Une の報告に基づく相関式を用いる
RMOGR	2	リムポア内ガスの放出は Spino らの報告に基づく相関式を用いる
TSTD	750	実効燃焼度を計算する基準となる温度
KON1	2e-11	実効燃焼度の温度依存項にかかる定数

表 4.4-4 RANNS の FP ガス放出モデルパラメータ

パラメータ名 (fortran namelist)		パラメータの意味(7)
GRSEP	1	粒界分離モデルにより FP ガス放出を評価する
ISFTN	1	粒界の自由表面エネルギーは Hall の式により評価する
LAP	$10^{-7}$ cm	UO <sub>2</sub> 結晶格子面間隔
CTUNE	0.001	粒界結合力の調整パラメータ
TBREK	900°C	粒界分離は TBREK を超えた温度領域でのみ発生
GSGAP	1.0 $\mu$ m	ペレット最外周リング要素で粒界分離が生じた場合、半径 PC ギャップを 1.0 $\mu$ m としてギャップ熱伝達率を評価
KGAS	$3 \times 10^{22}$ atoms/(s MPa <sup>0.5</sup> )	PC ギャップに放出された FP ガスが燃料棒軸方向に移動する際の速度定数
HBSGP	50.0	あるリング要素で粒界分離が生じた場合、同要素のリムポア内ガスの 50% が放出される

表 4.4-5 解析に反映した RIA 試験条件

項 目	単 位	GR-1	CN-1	VA-9
燃料棒				
初期ガス圧力	(MPa)	0.1	0.1	0.1
初期ガス組成	—	He 100%	He 100%	He 100%
冷却材				
入口温度	(°C)	293.150	293.150	558.150
圧力	(MPa)	0.1	0.1	6.8
流速	(m/s)	0.01	0.01	0.01
流路断面積	(cm <sup>2</sup> )	112.0	112.0	112.0

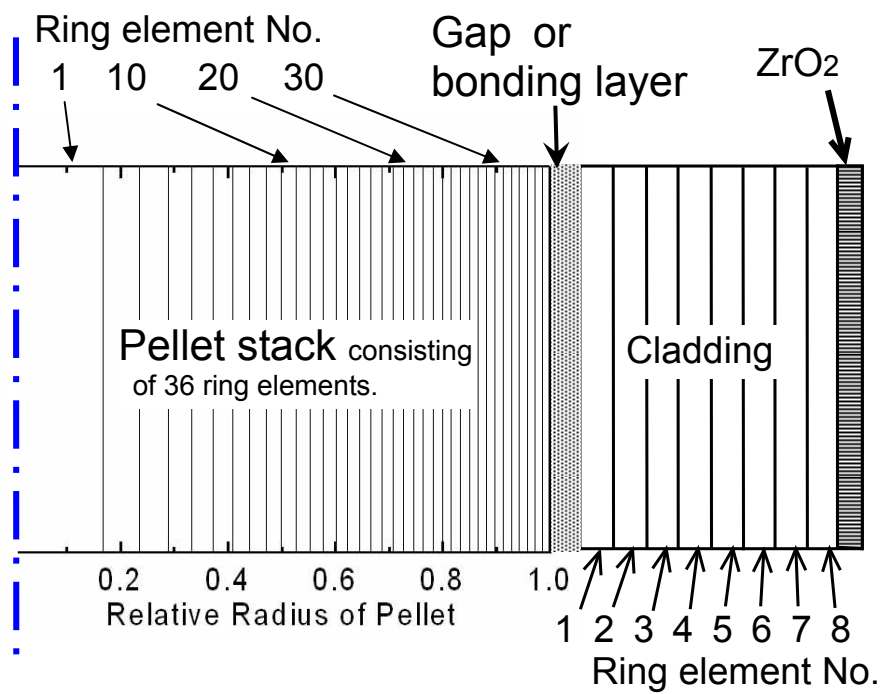


図 4.4-1 FEMAXI/RANNS における一次元モデルのペレットと被覆管の要素体系



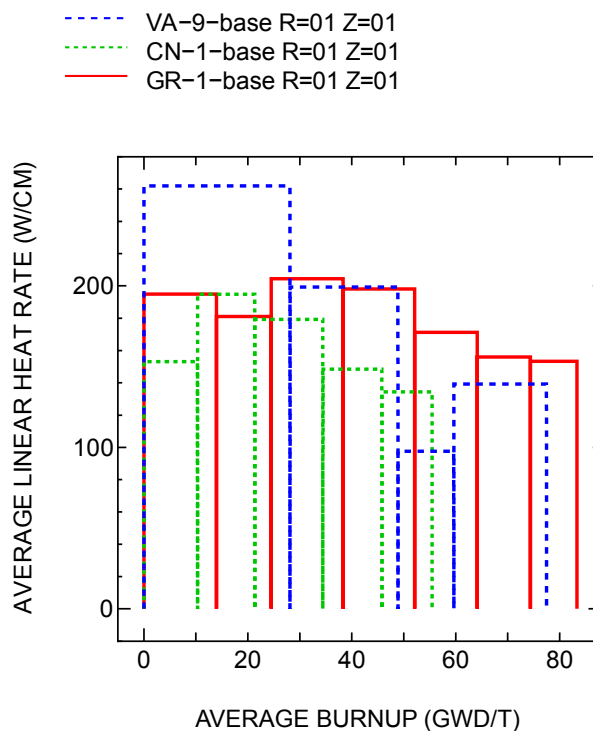


図 4.4-2 ベース照射時線出力履歴

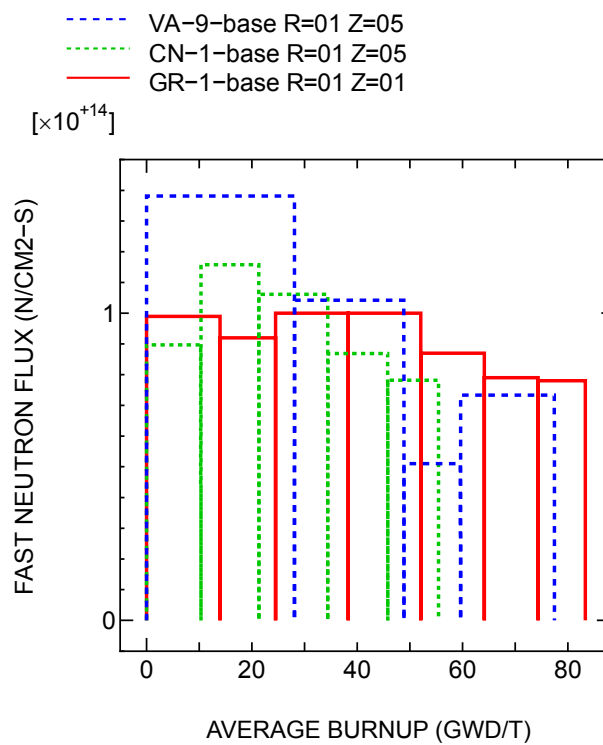


図 4.4-3 ベース照射時高速中性子束履歴

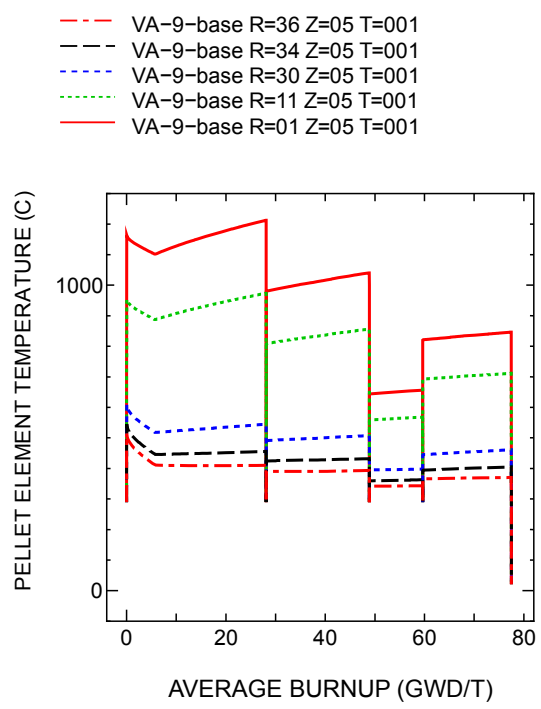
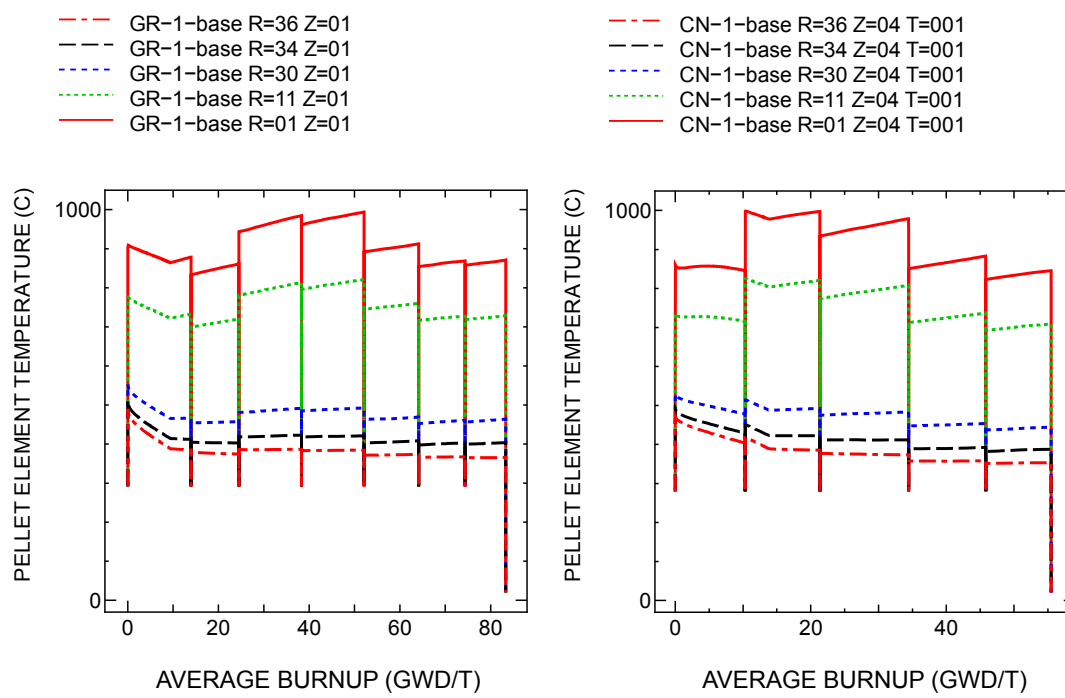


図 4.4-4 ベース照射時ペレット温度履歴

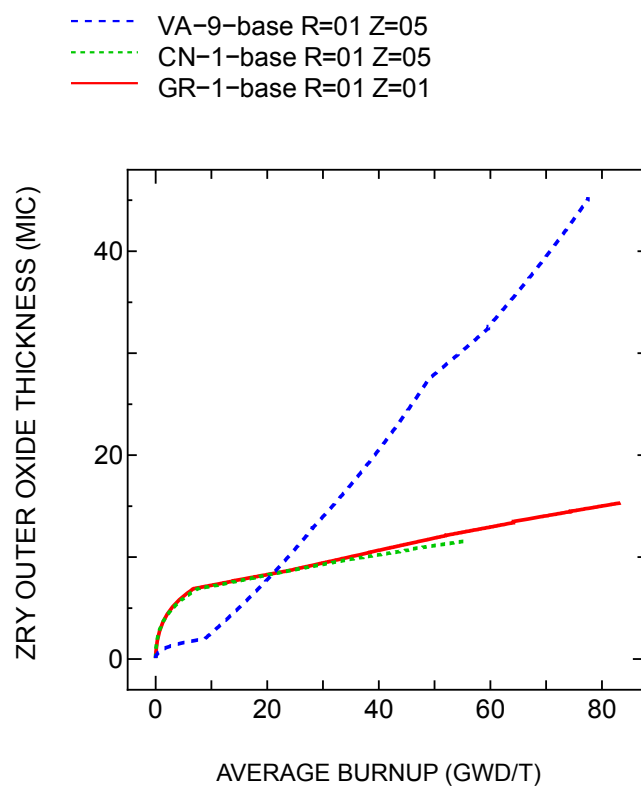


図 4.4-5 ベース照射時被覆管表面酸化膜厚履歴 (解析結果)

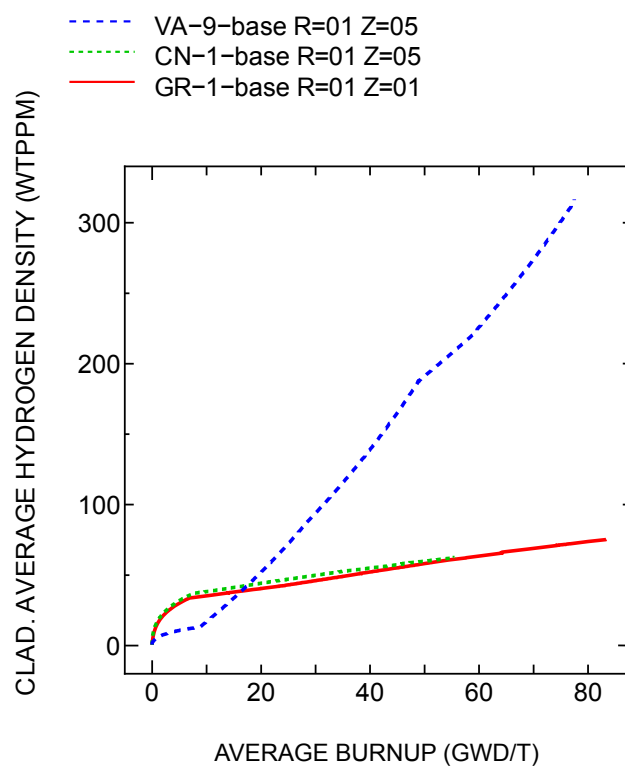


図 4.4-6 ベース照射時被覆管水素吸収量履歴 (解析結果)

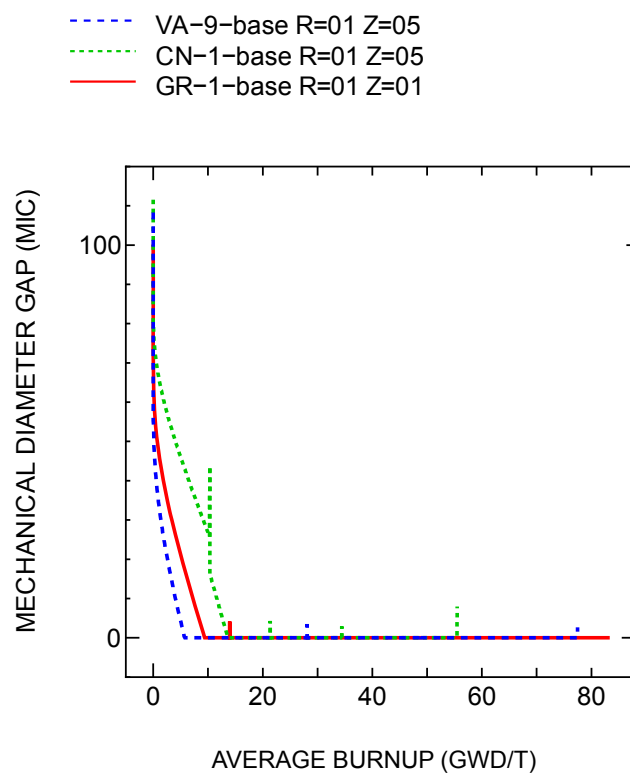


図 4.4-7 ベース照射時 PC ギャップ幅履歴 (解析結果)

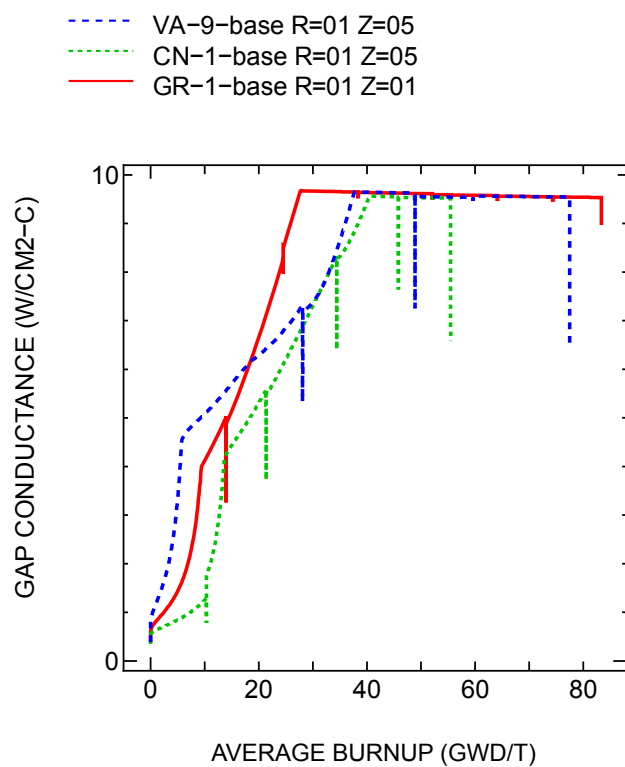


図 4.4-8 ベース照射時 PC ギャップコンダクタンス履歴 (解析結果)

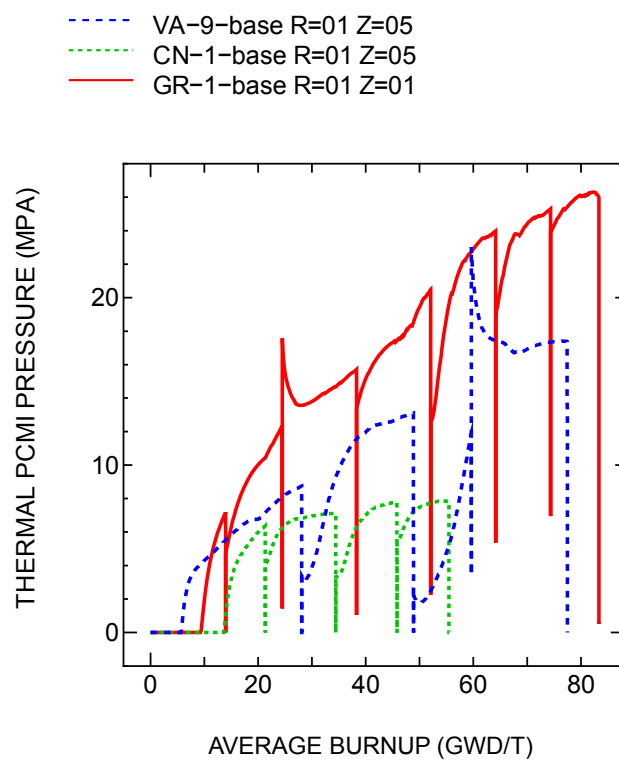


図 4.4-9 ベース照射時 PCMI 圧力履歴 (解析結果)

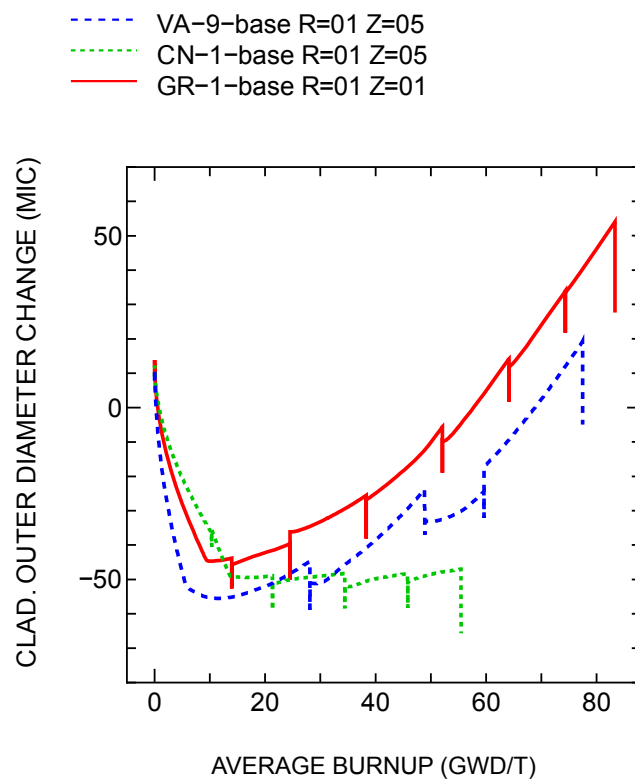


図 4.4-10 ベース照射時被覆管酸化表面外径変位履歴 (解析結果)

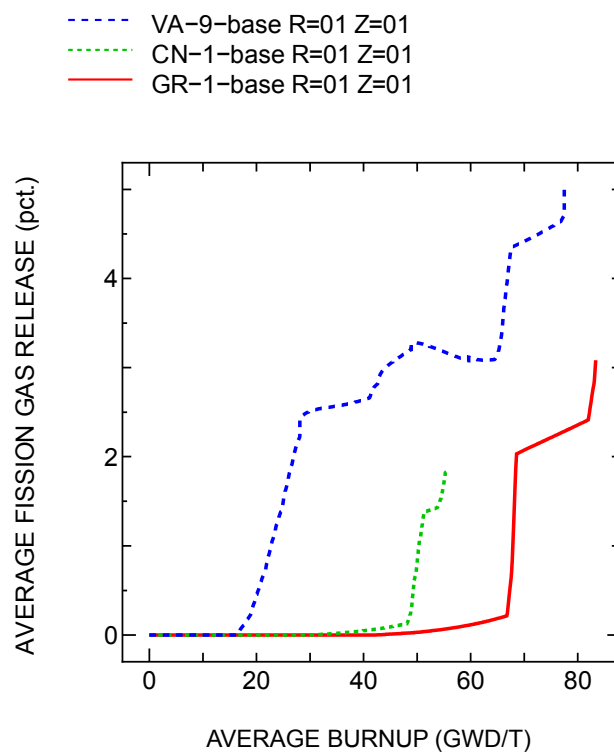


図 4.4-11 ベース照射時 FP ガス放出率履歴 (解析結果)

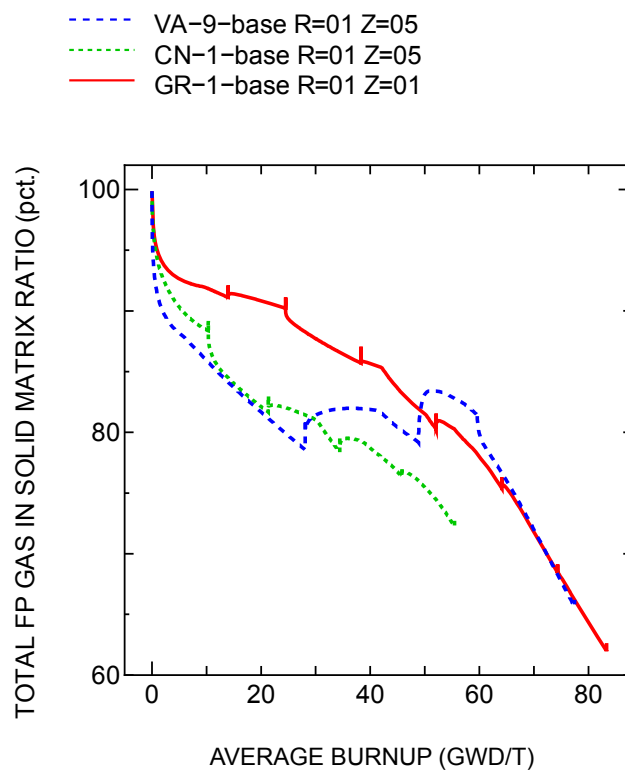


図 4.4-12 ベース照射時ペレット結晶粒内 FP ガス比率の履歴 (解析結果)

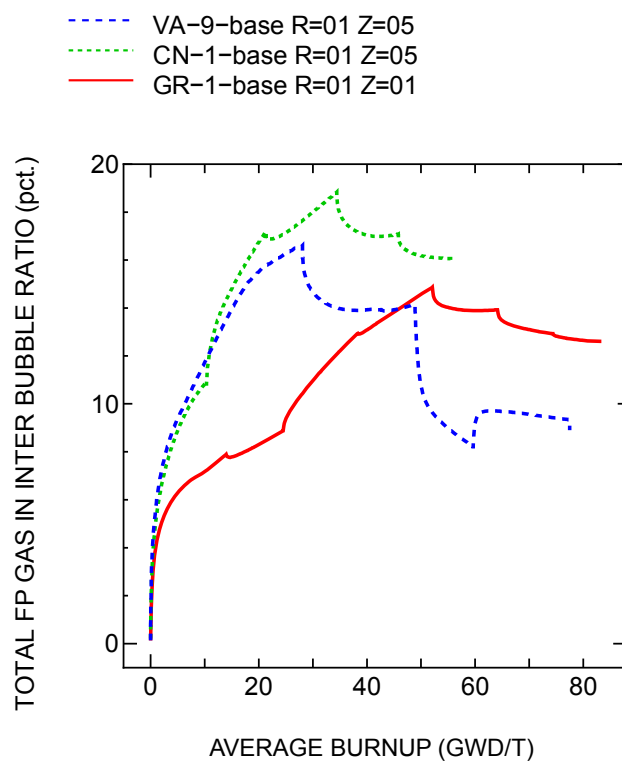


図 4.4-13 ベース照射時ペレット結晶粒界 FP ガス比率の履歴 (解析結果)

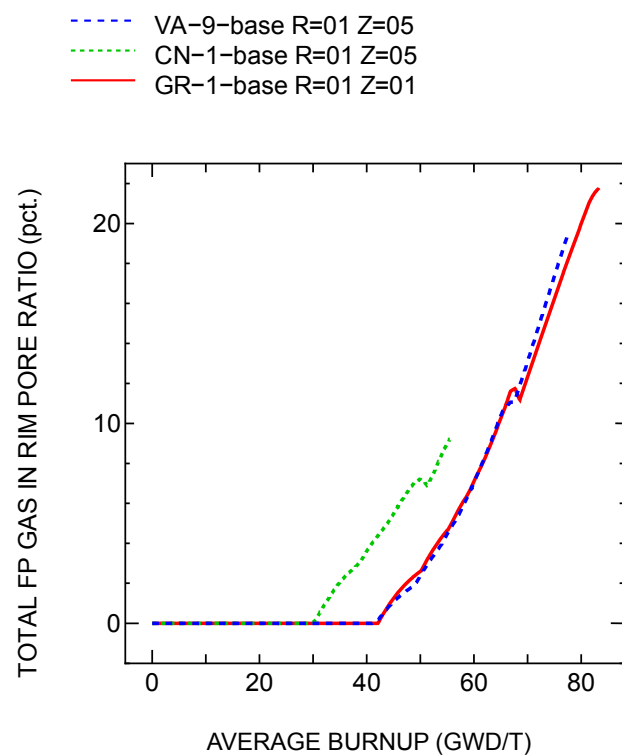


図 4.4-14 ベース照射時リムポア内 FP ガス比率の履歴 (解析結果)

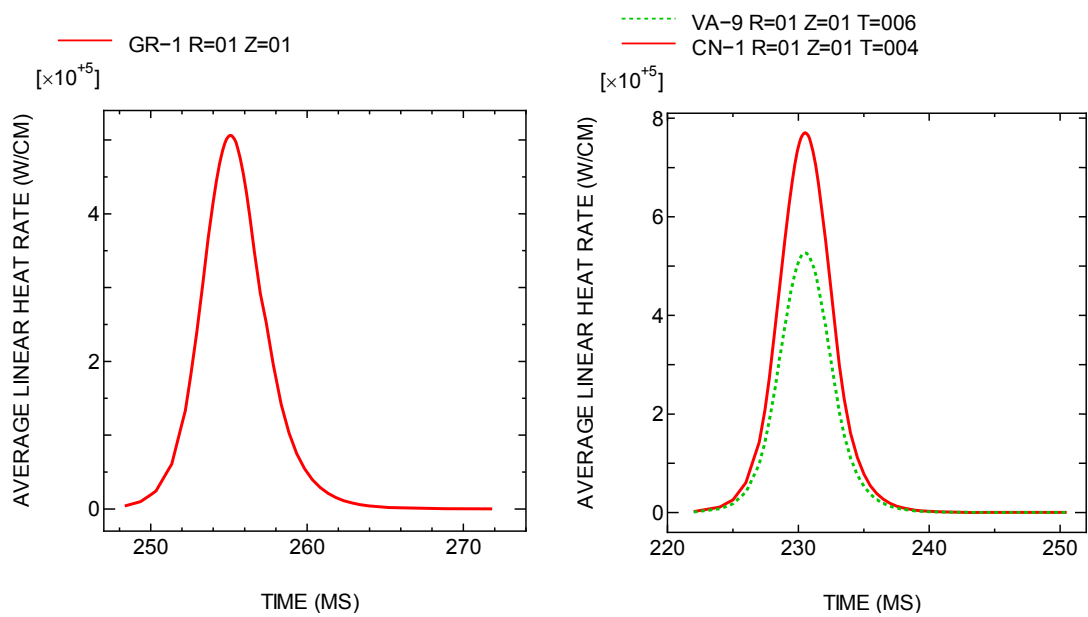


図 4.4-15 RIA 実験時線出力履歴 (解析結果)

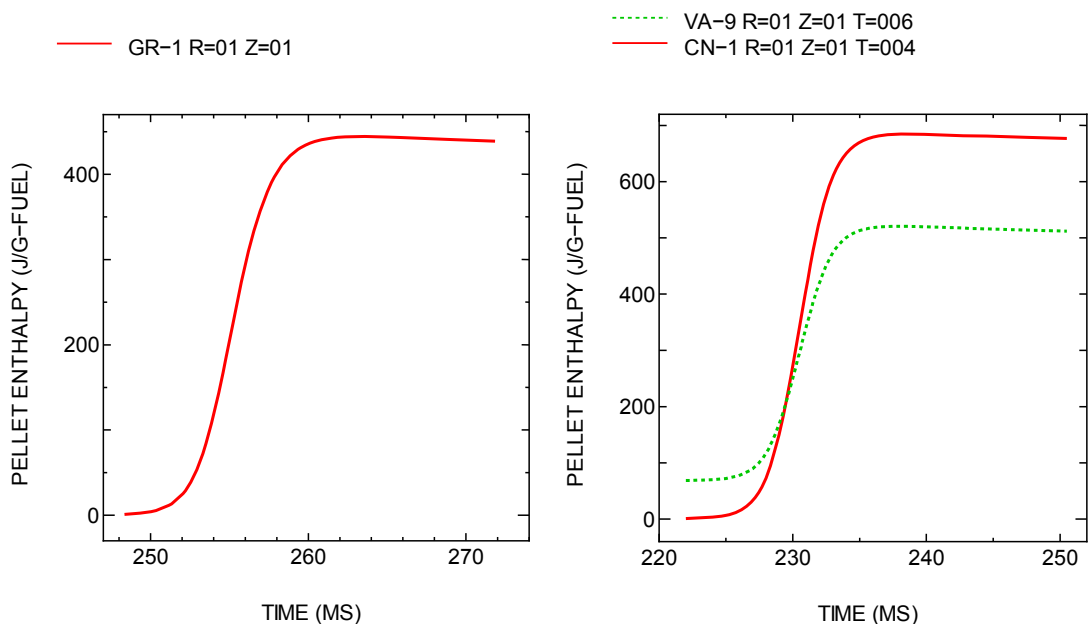


図 4.4-16 RIA 実験時燃料ペレットエンタルピ履歴 (解析結果)



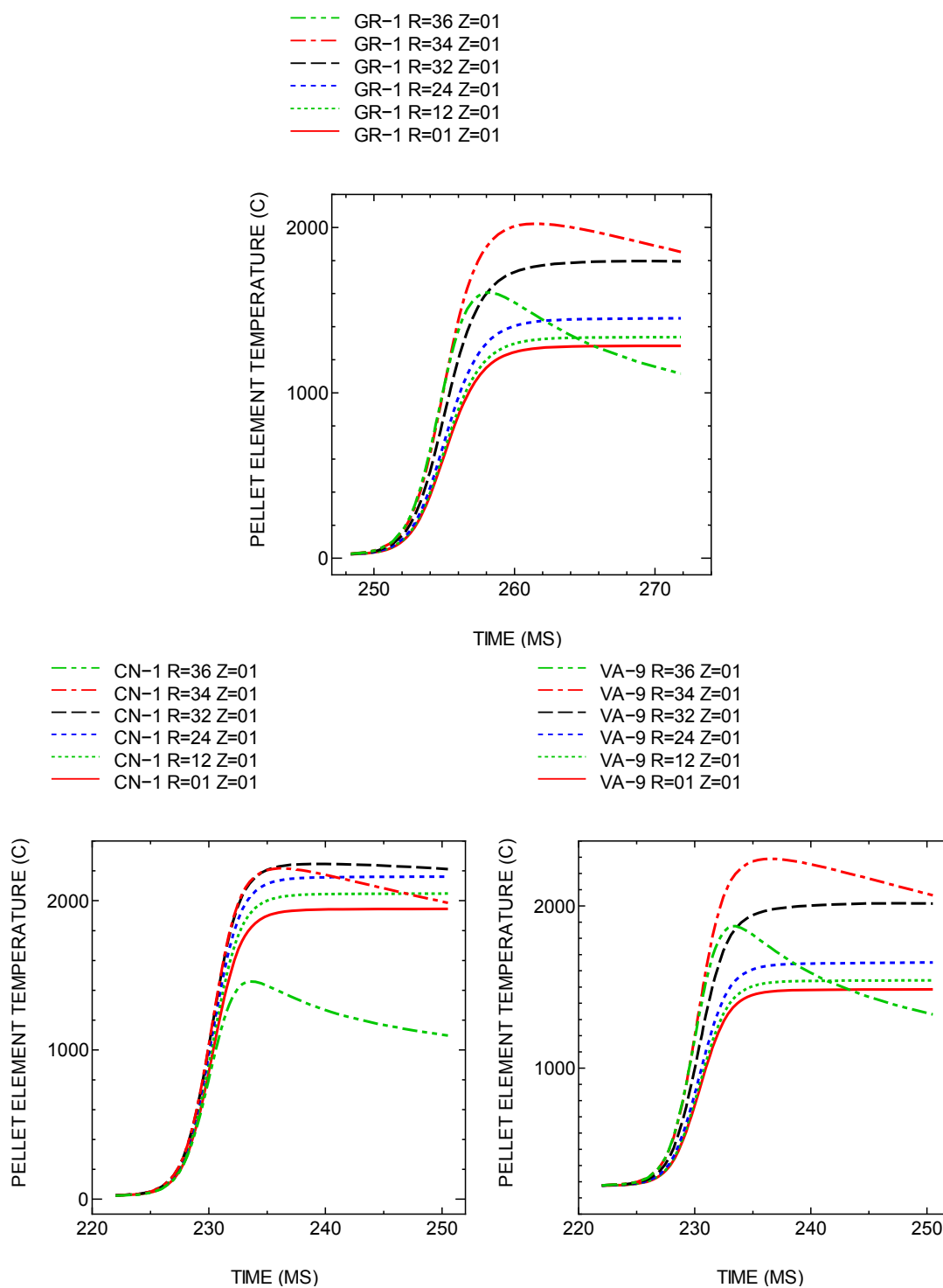


図 4.4-17 RIA 実験時ペレット温度履歴 (解析結果)

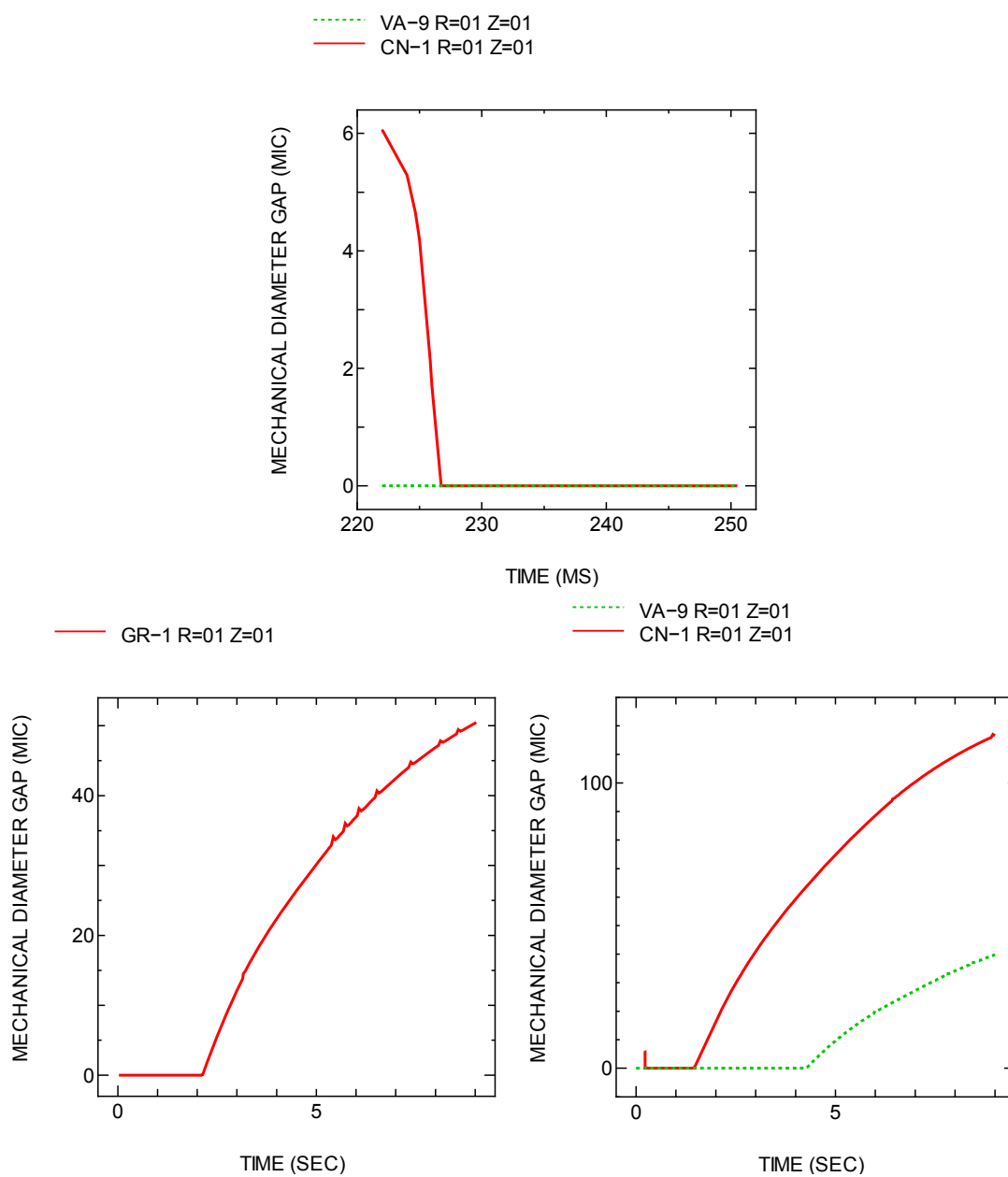


図 4.4-18 RIA 実験時 PC ギャップ履歴 (解析結果)

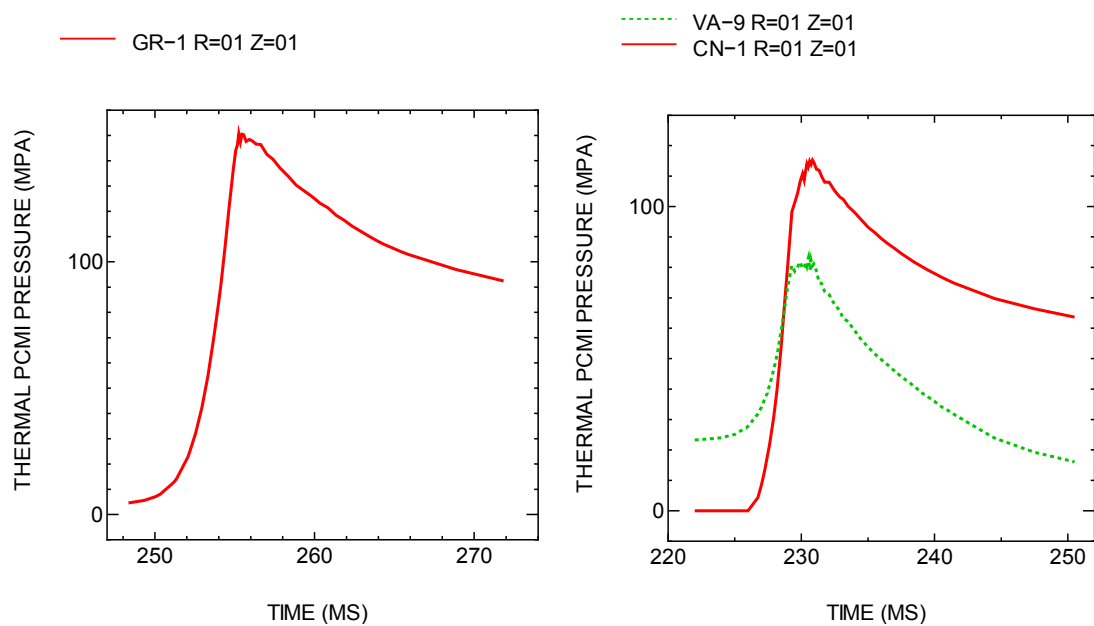


図 4.4-19 RIA 実験時 PCMI 圧力履歴 (解析結果)

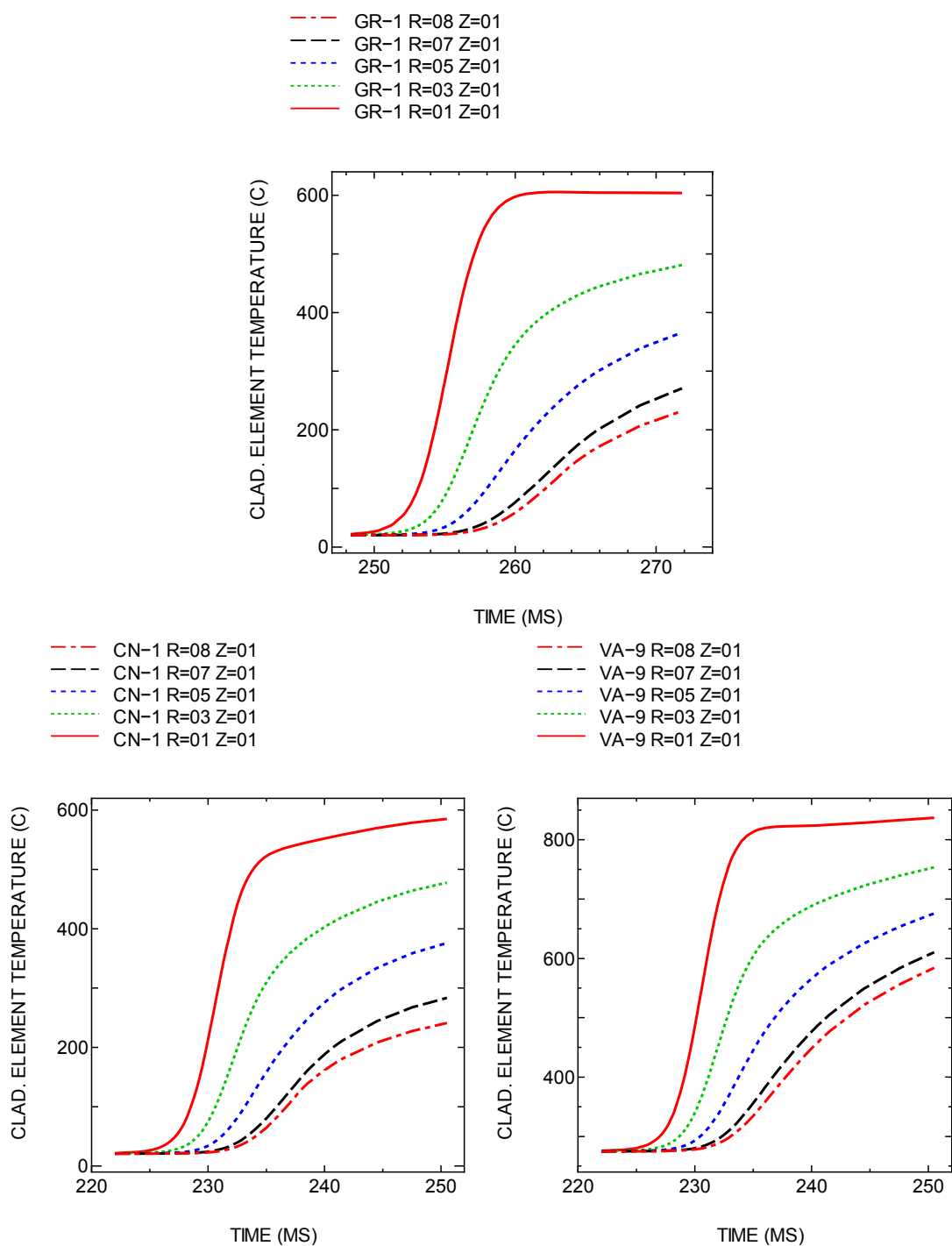


図 4.4-20 RIA 実験時被覆管内温度履歴 (解析結果)

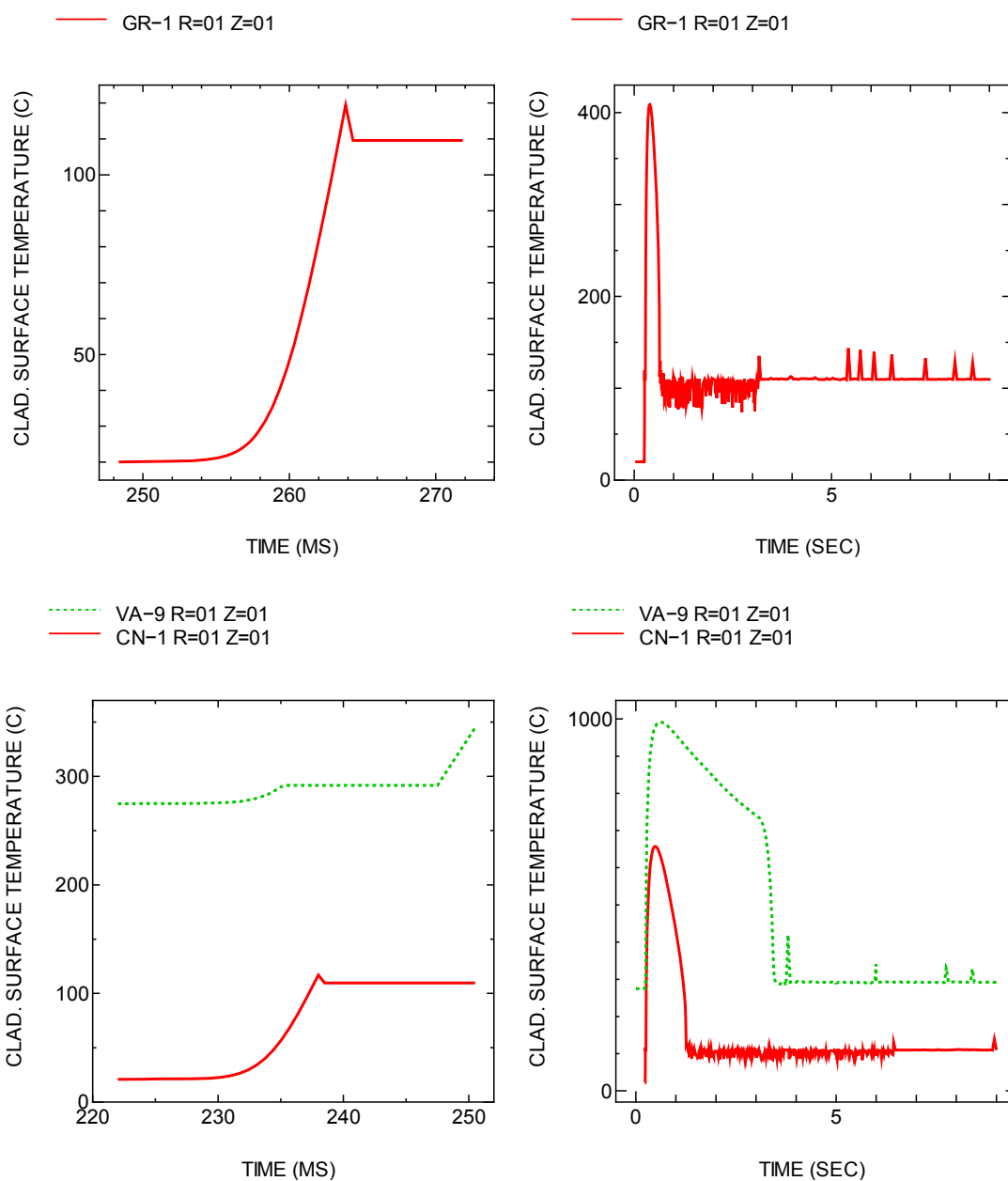


図 4.4-21 RIA 実験時被覆管表面温度履歴 (解析結果)

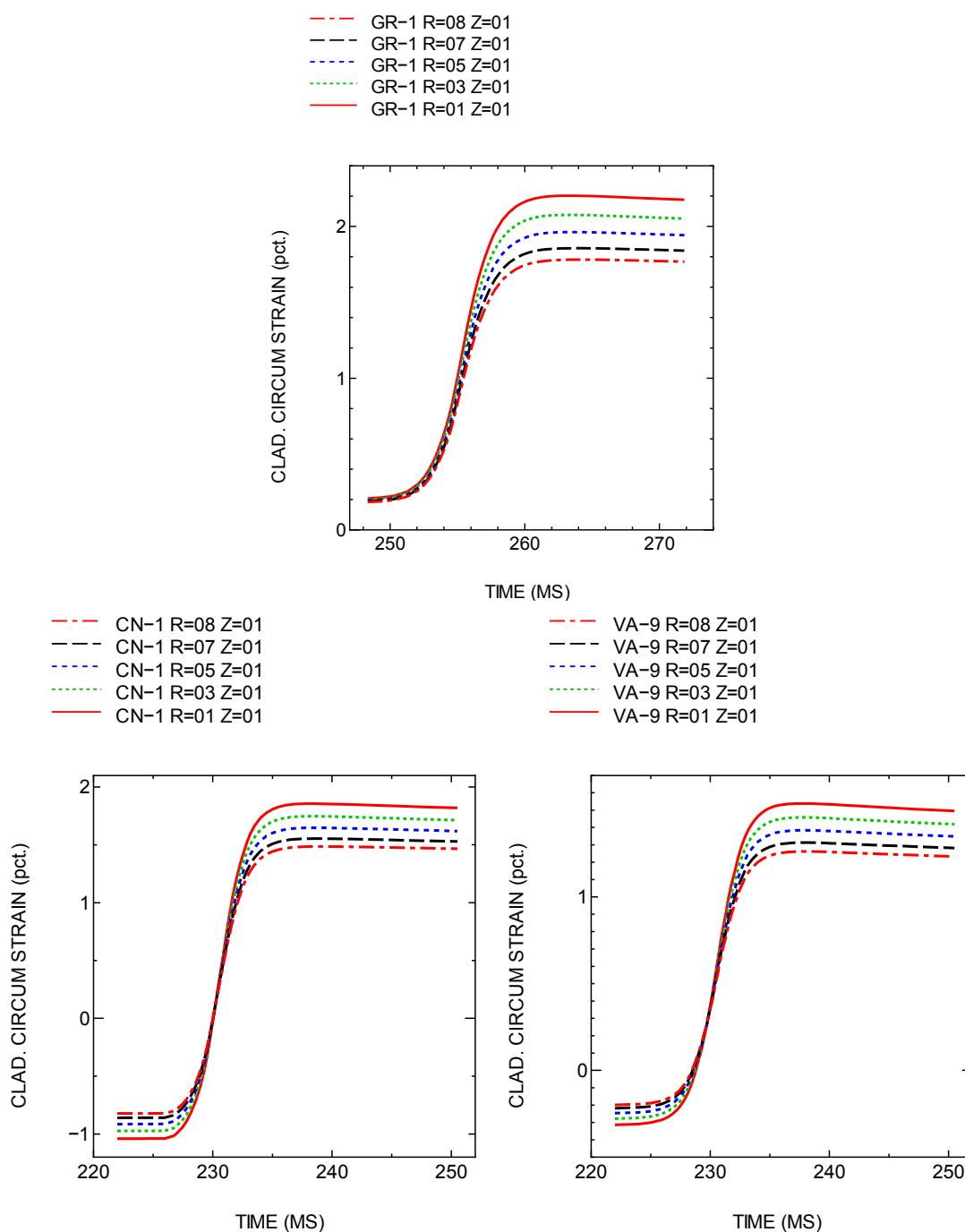


図 4.4-22 RIA 実験時被覆管周方向全ひずみ履歴 (解析結果)

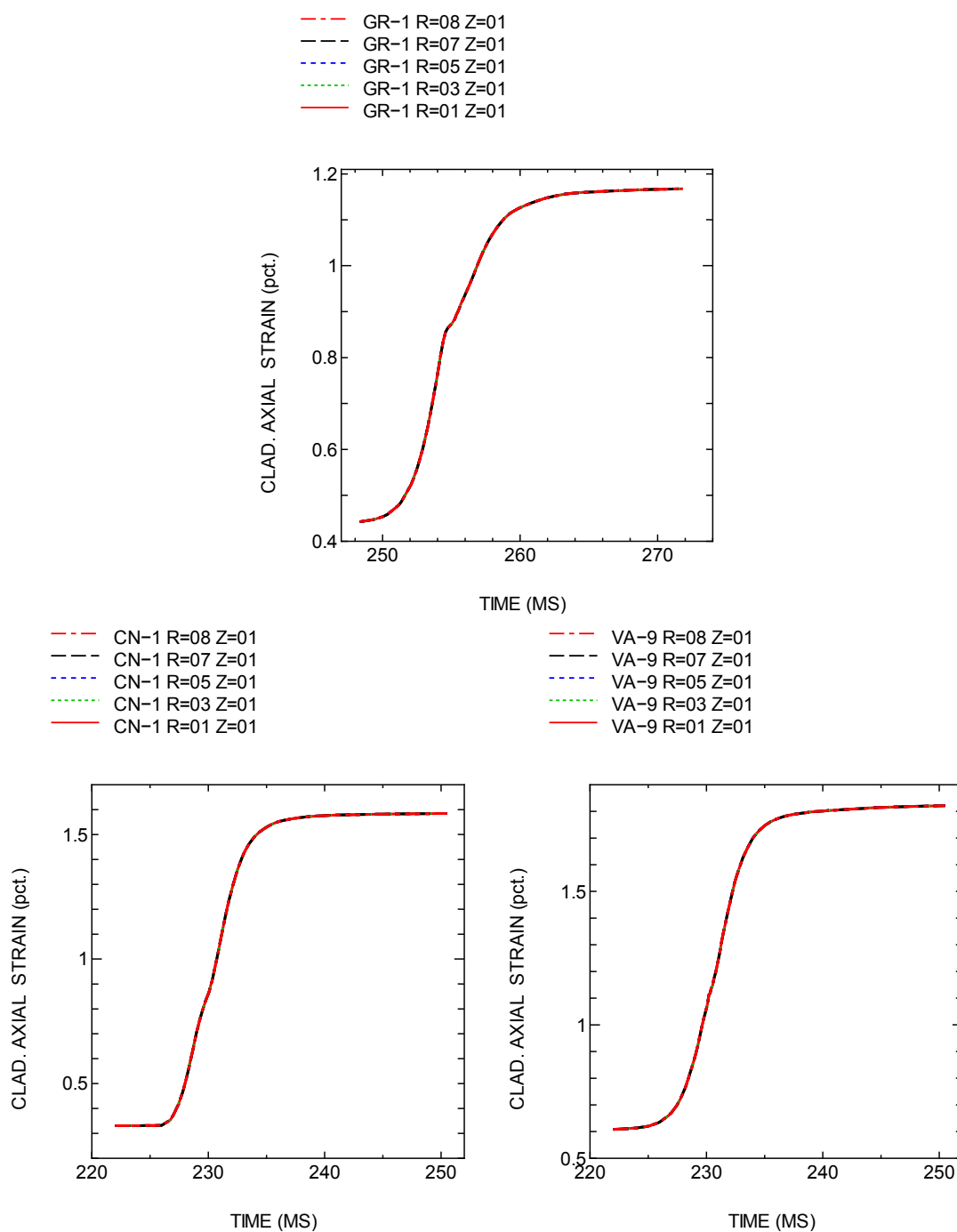


図 4.4-23 RIA 実験時被覆管軸方向全ひずみ履歴 (解析結果)

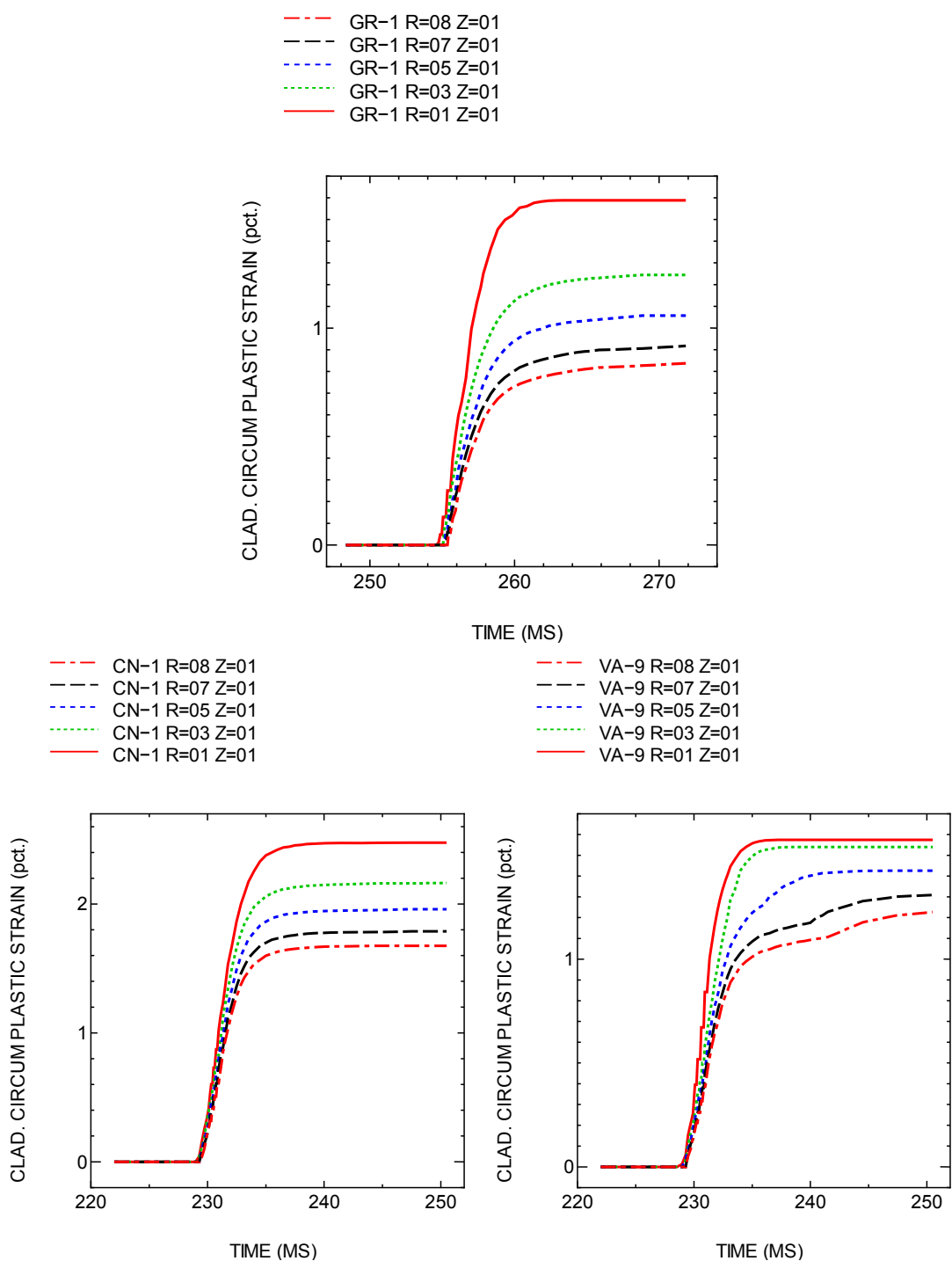


図 4.4-24 RIA 実験時被覆管周方向塑性ひずみ履歴 (解析結果)



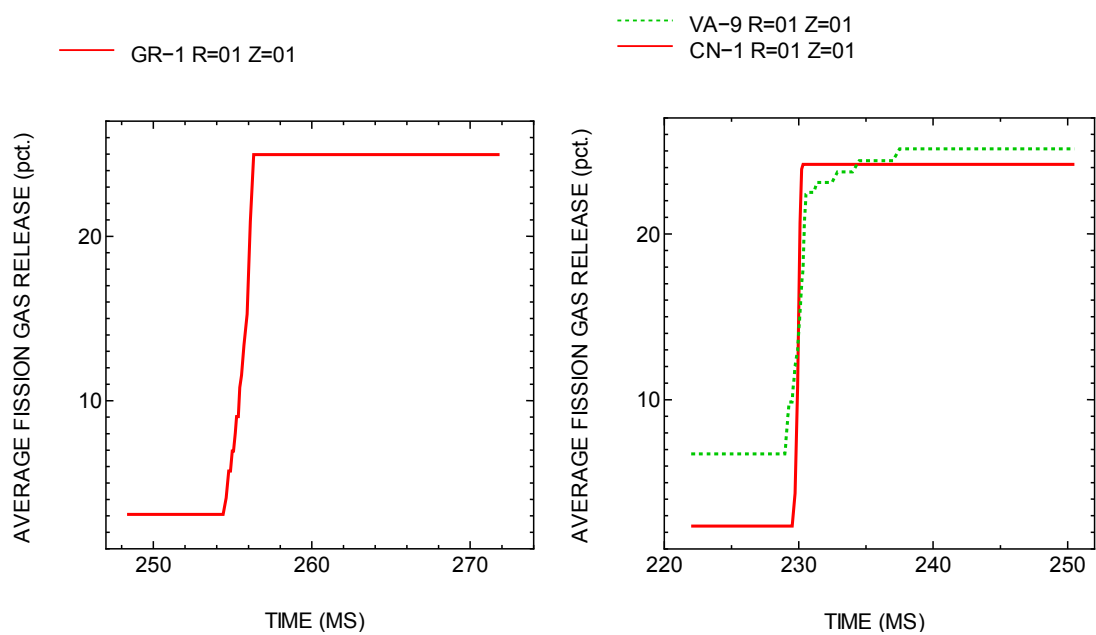


図 4.4-25 RIA 実験時 FP ガス放出率履歴 (解析結果)

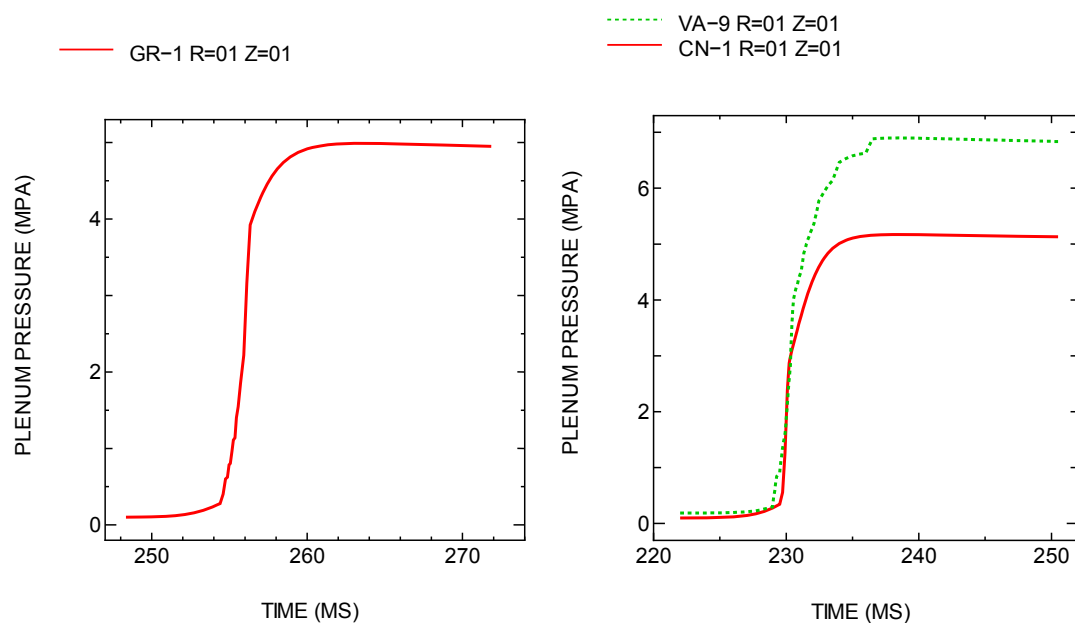


図 4.4-26 RIA 実験時燃料棒内圧 (解析結果)

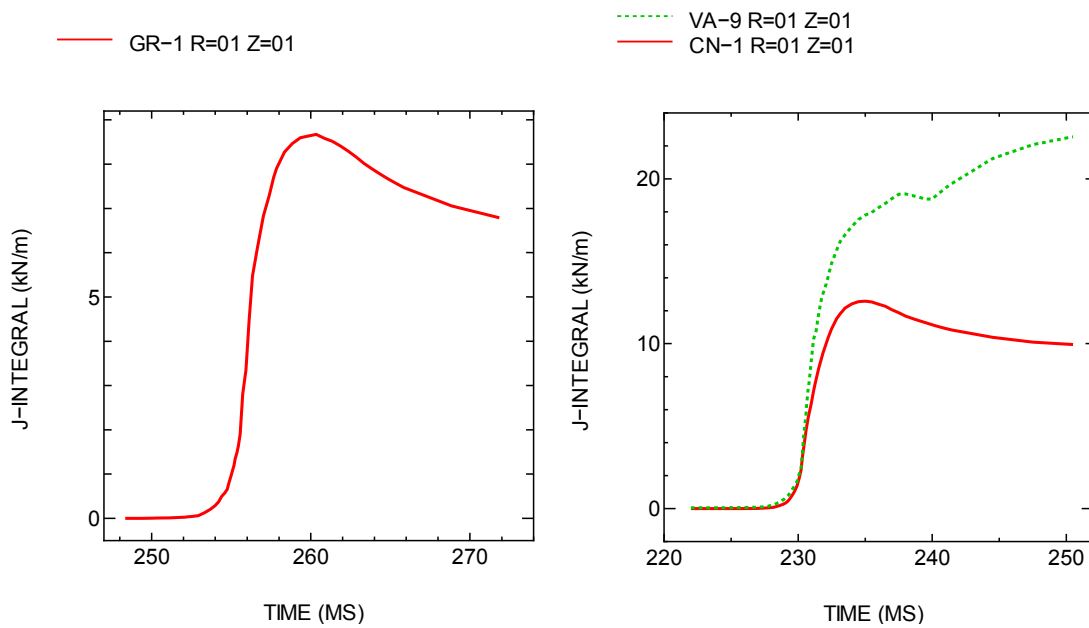


図 4.4-27 RIA 実験時 J 積分値履歴 (解析結果)

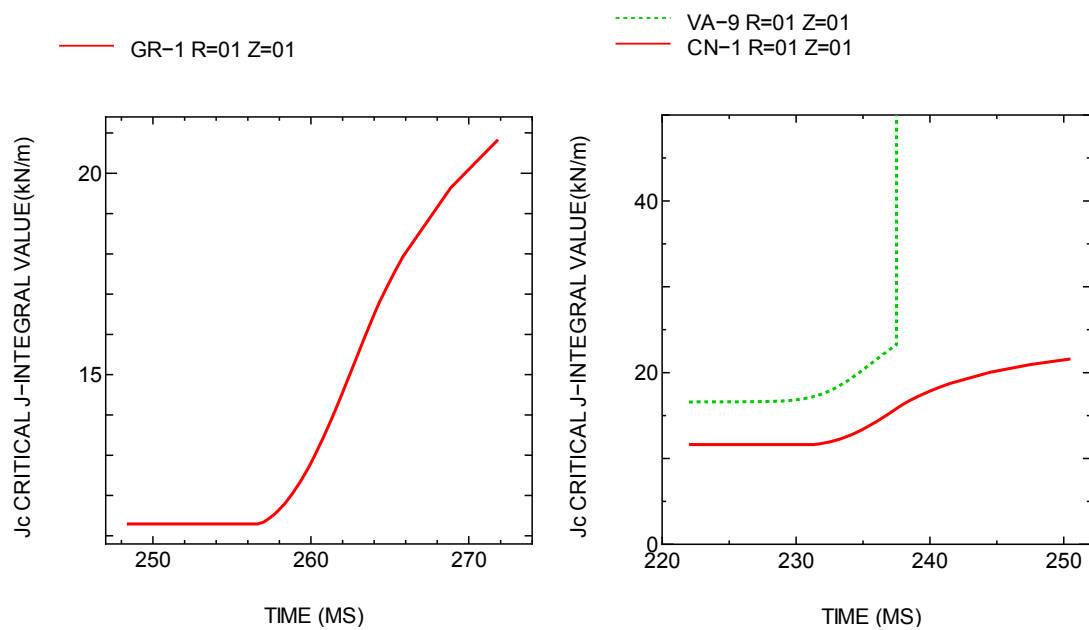


図 4.4-28 RIA 実験時  $J_c$  値履歴 (解析結果)

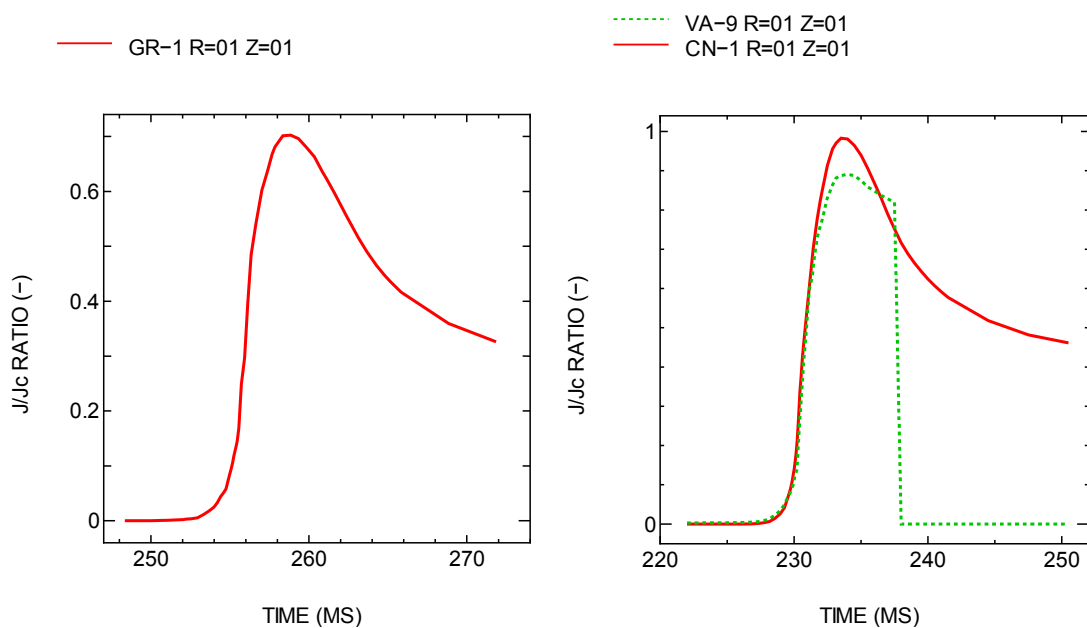


図 4.4-29 RIA 実験時 J 積分値/Jc 比履歴 (解析結果)

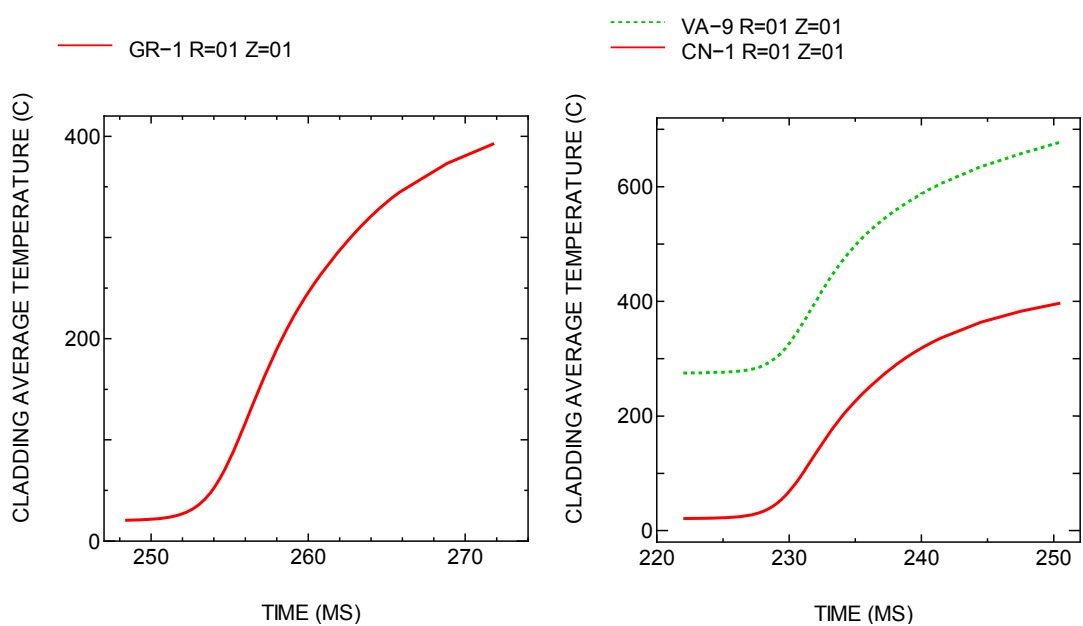


図 4.4-30 RIA 実験時被覆管平均温度履歴 (解析結果)

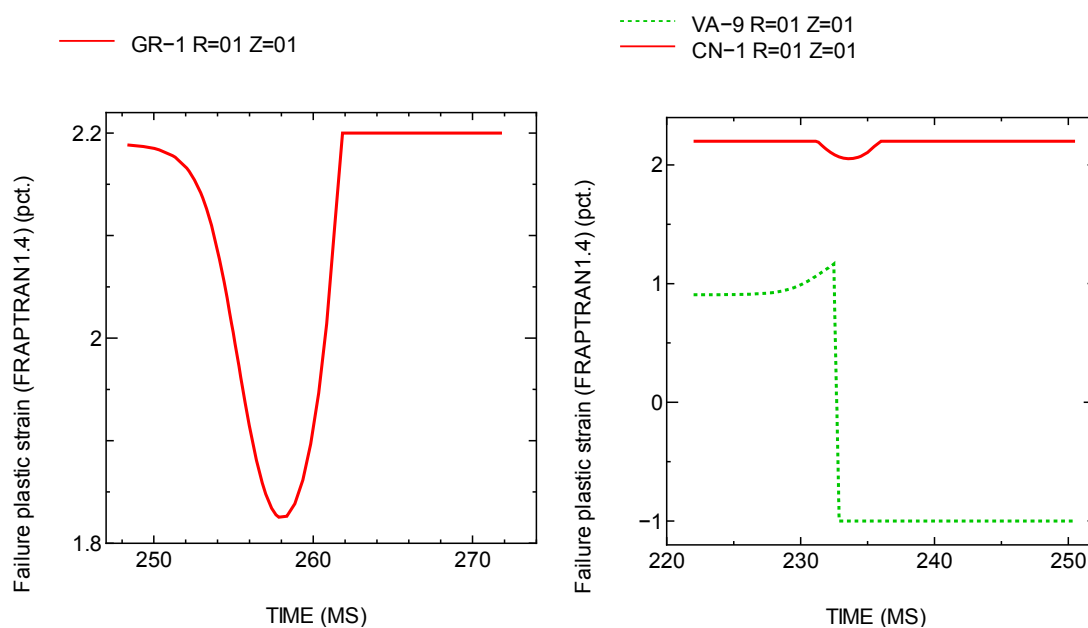


図 4.4-31 FRAPTRAN1.4 モデルによる被覆管破損限界履歴 (解析結果)

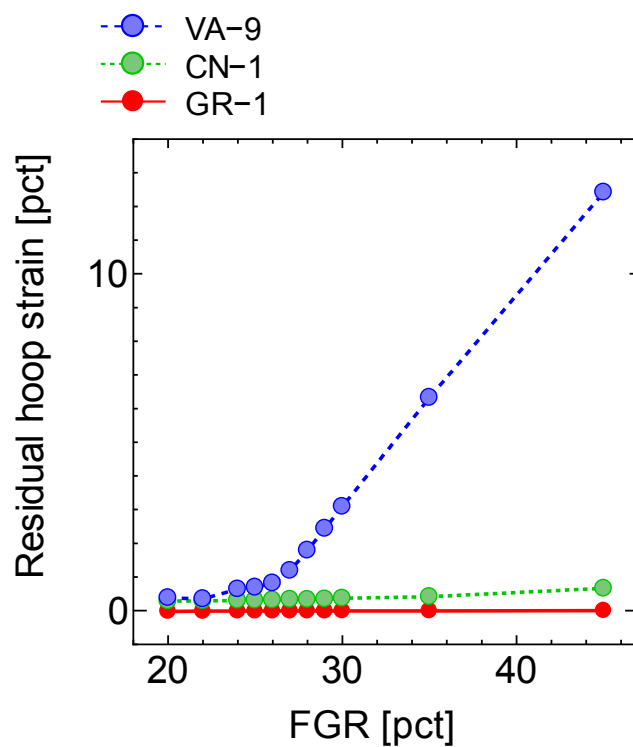


図 4.4-32 被覆管外面の永久変形量に及ぼす FP ガス放出率の影響 (解析結果)