



JAEA-Technology

2026-009

DOI:10.11484/jaea-technology-2026-009

未照射燃料粉末を用いた高温燃料・
水間熱的相互作用の挙動評価試験

Experimental Evaluation of High-temperature Fuel-Coolant Thermal Interaction
Behavior Using Unirradiated Fuel Powder

三原 武 浦野 建太 宇田川 豊 垣内 一雄

Takeshi MIHARA, Kenta URANO, Yutaka UDAGAWA and Kazuo KAKIUCHI

原子力安全・防災研究所

安全研究センター

Nuclear Safety Research Center

Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute

June 2026

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)
は、下記までお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所 プロモーション・オフィス 科学技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
Library, Institutional Repository and INIS Section, Promotion Office,
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

未照射燃料粉末を用いた高温燃料・水間熱的相互作用の挙動評価試験

日本原子力研究開発機構 原子力安全・防災研究所
安全研究センター
三原 武、浦野 建太、宇田川 豊、垣内 一雄

(2026年5月15日受理)

反応度事故（RIA）条件下で生じる照射済燃料の破損に伴って生じる機械的エネルギー（衝撃圧力や水撃力）は、燃料の細片化状態及び温度に強く依存する。低温で急速に破損するペレット／被覆管機械的相互作用（Pellet/Cladding Mechanical Interaction : PCMI）を原因とする破損では、FP ガスの放出に伴ってペレット細片が水中を高速で移動し、水との超高効率な熱伝達により急激な蒸気発生が生じ、衝撃的なエネルギーが発生する。このことから、粒子表面積及びペレット細片の高速移動による極めて高い効率での熱伝達が重要な影響因子と考えられる。264-2 実験及び 264-24 実験では、このような RIA 時に特有のペレット細片運動の駆動力が介在しない条件での燃料-水接触を模擬できるよう、試験条件を設計した。他方、264-24 実験では、ペレット粒子の比表面積（単位重量あたりの表面積）を、これまで最も高かった高燃焼度燃料よりもさらに大きくなるように設計した。さらに、燃料エンタルピー（単位質量あたりの熱エネルギー）についても、従来 of 観測結果を踏まえ、高い機械的エネルギーの発生が期待される条件に設定した。この結果、バースト的な FP ガス放出を駆動力としてペレット細片が急速に分散すると考えられる高燃焼度燃料の PCMI 破損ケースと比較して、衝撃圧力及び水撃力のエネルギーのいずれも大きく下回り、機械的エネルギーの発生におけるペレット細片運動の駆動力の重要性が明瞭に示された。

Experimental Evaluation of High-temperature Fuel-Coolant Thermal Interaction Behavior Using Unirradiated Fuel Powder

Takeshi MIHARA, Kenta URANO, Yutaka UDAGAWA and Kazuo KAKIUCHI

Nuclear Safety Research Center
Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 15, 2026)

Mechanical energy generated during fuel failure under reactivity-initiated accident (RIA) conditions, such as pressure pulse and water hammer, strongly depends on the fragmentation state and temperature of the fuel. When failure caused by pellet/cladding mechanical interaction (PCMI) occurs rapidly at low temperature, fission gas release drives pellet fragments to move at high velocity in water, leading to extremely efficient heat transfer between the fuel and coolant. This results in rapid vapor generation and the production of impulsive mechanical energy. These observations indicate that both the particle surface area and the highly efficient heat transfer associated with high-velocity fragment motion are key influencing factors. In the 264-2 and 264-24 experiments, test conditions were designed to simulate fuel-coolant interaction under conditions where the driving force for pellet fragment motion, which is characteristic of RIA events, is absent. In the 264-24 test, the specific surface area of the pellet particles (surface area per unit mass) was designed to exceed that of previously tested high-burnup fuels. In addition, the fuel enthalpy (thermal energy per unit mass) was set based on prior observations to conditions where significant mechanical energy generation is expected. As a result, both the pressure pulse and water hammer energies were significantly lower than those observed in high-burnup fuel failure cases, where the driving force for pellet fragment motion is considered to be present. This clearly demonstrates the critical importance of the driving force for pellet fragment motion in the generation of mechanical energy.

Keywords: Reactivity Initiated Accident, Mechanical Energy, Powder Fuel

目 次

1. 序論	1
2. 実験方法	1
2.1 燃料試料	1
2.2 NSRR 及びその実験体系	1
2.3 衝撃圧力及び水撃力の算出	2
3. 結果	3
3.1 過渡時データ	3
3.2 衝撃圧力及び水撃力	3
4. 考察	4
4.1 表面積の衝撃圧力及び水撃力への影響	4
4.2 高燃焼度燃料との比較	4
5. 結論	5
謝辞	6
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Methods	1
2.1 Fuel Specimens	1
2.2 NSRR and Experimental Setup	1
2.3 Evaluation of Pressure Pulse and Water Hammer	2
3. Results	3
3.1 Transient Data	3
3.2 Pressure Pulse and Water Hammer	3
4. Discussion	4
4.1 Effect of Surface Area on Pressure Pulse and Water Hammer	4
4.2 Comparison with High-Burnup Fuel	4
5. Conclusions	5
Acknowledgements	6
References	6

表リスト

Table 1 264-2 及び 264-24 実験の燃料試料並びに比較実験 (VA-5 及び VA-6) の仕様及び実験条件8

Table 2 264-2 及び 264-24 実験並びに比較実験 (VA-5 及び VA-6) の結果8

図リスト

Fig. 2.1 (a) 264-2 及び(b) 264-24 実験の計装9

Fig. 3.1 264-2 実験計装 (原子炉出力 2 系統) 10

Fig. 3.2 264-2 実験計装 (原子炉積分出力 2 系統) 10

Fig. 3.3 264-2 実験計装 ((a)水中圧力計及び(b)ガス中圧力計) 11

Fig. 3.4 264-2 実験計装 ((a)水温及び(b)水塊速度計) 11

Fig. 3.5 264-24 実験計装 (原子炉出力 2 系統) 12

Fig. 3.6 264-24 実験計装 (原子炉積分出力 2 系統) 12

Fig. 3.7 264-24 実験計装 ((a)水中圧力計及び(b)ガス中圧力計) 13

Fig. 3.8 264-24 実験計装 (水温(a)燃料下方及び(b)側部) 13

Fig. 3.9 264-24 実験計装 (水塊速度計) 14

Fig. 3.10 264-24 実験計装 (AE センサ 2 系統) 14

Fig. 4.1 最大燃料エンタルピー増分／発熱量と転換率の関係 : (a)衝撃圧力と(b)水撃力 15

Fig. 4.2 衝撃圧力の機械的エネルギーと衝撃圧力の関係 : (a)1-1.2MPa、(b)1-12 MPa ---- 15

This is a blank page.

1. 序論

未照射 UO_2 燃料を対象として従来実施されてきた RIA 模擬実験で得られた知見によれば、反応度投入による燃料の断熱的な温度上昇に伴い、燃料が溶融に至った場合、あるいは燃料が溶融に足らずとも、初期状態で水に浸漬させていた条件の下では、衝撃圧力及び水撃力といった機械的エネルギーが発生することが知られている¹⁾⁻⁵⁾。一方、高燃焼度燃料を対象とした RIA 模擬実験では、高燃焼度燃料に特徴的な低温時の破損（PCMI 破損）に伴い、燃料溶融や水の浸漬状態を伴わなくとも機械的エネルギーが発生することが確認されている⁶⁾⁻⁸⁾。この機械的エネルギーの大きさには、実験中の核分裂生成物（FP）ガス放出量及び燃料ペレットの細片化（燃料ペレットが細かく砕けた状態）に伴う比表面積（単位質量あたりの全表面積）の増加が影響を与えることが指摘されている⁶⁾。

これらの知見から、PCMI 破損に伴い FP ガスが燃料被覆管外へ放出される際、燃料が細片化しつつ高速で水中に分散することで、水への極めて高効率な熱伝達が促進され、その結果として機械的エネルギーが発生する現象であると考えられている⁶⁾。本研究では、これら2つの重要因子、すなわち細片化に伴う表面積の増加及び FP ガス放出に伴う細片化燃料の水中分散挙動の効果を分離して評価することを目的に据え、燃料片の水中での高速移動に必要な駆動力が介在しない条件において、PCMI 破損時の高燃焼度燃料並みの表面積を有する燃料片からどの程度の破壊力が発生するのかを調べた。具体的には、高燃焼度燃料の PCMI 破損に伴う表面積の増加を模擬した粉末状燃料を用い、かつ当該燃料が水中へ分散しないよう条件を制御した RIA 模擬実験を設計し、断熱的な温度上昇の条件下で生じる機械的エネルギーを圧力波や水塊速度データに基づいて評価した。

2. 実験方法

2.1 燃料試料

燃料試料の仕様を Table 1 に示す。RIA 模擬実験は、燃料試料の粒径が異なる 2 実験（264-2 及び 264-24 実験）を実施した。264-2 及び 264-24 実験に用いた粉末状燃料の粒径は、それぞれ 250 μm 級及び 32 μm 以下である。比表面積は、それぞれ 21.9 cm^2/g 及び 348 cm^2/g であった。比表面積は、粒子を球状と仮定し、代表粒径として 264-2 実験では 250 μm 、264-24 実験では平均値に相当する 16 μm を用いて算出した。

高燃焼度燃料を用いた実験結果の評価から、破壊力は比表面積に依存することが報告されている⁶⁾。264-24 試験における比表面積は、高燃焼度燃料⁶⁾の比表面積（26.6–172 cm^2/g ）と比較して約 2 倍程度と大きく、高燃焼度燃料で想定される燃料細片化の効果を十分に模擬できている。

2.2 NSRR 及びその実験体系

パルス照射実験は、日本原子力研究開発機構（JAEA）の NSRR において実施された。NSRR は、急峻な中性子照射パルスによって生じる核加熱を利用し、供試燃料に対して多量のエネルギーを短時間で付与することが可能である⁸⁾⁻¹⁰⁾。実験条件を Table 1 に示す。264-2 実験及び

264-24 実験の燃料エンタルピーは、燃料が熔融せず、かつ NSRR でこれまでに実施された照射済燃料実験の中で最大の機械的エネルギーが観測された VA-5 実験⁶⁾を上回る条件とした。これは、断熱条件を仮定した燃料の最高到達温度にして 1600°C 超に相当する。Fig. 2.1 に 264-2 実験及び 264-24 実験の実験体系を示す。264-2 実験では、粉末状燃料を封入した 25 mm×40 mm の大きさのビニルバッグを実験カプセル内に配置し、支持具に固定したのに対し、264-24 実験では、実験カプセル内に SUS 製円筒容器（外径 82 mm Φ 、内径 74 mm Φ ）を設置し、その内部に粉末状燃料を封入した円筒形のプラスチック容器（内径 15 mm Φ ）を配置し、支持具に固定した。

これらの設計は、粉末状燃料を水と直接接触させないようにビニルまたはビニル膜で封止したプラスチック容器に封入し、パルス照射時の燃料加熱により当該容器を熔融・破断させることを狙いとしている。例えば初期状態において粉末状燃料に水が浸漬した条件では、粉末状燃料と水の接触面積は最初から最大限に確保されており、かつ粉末状燃料の温度上昇に伴う急速な水蒸気発生によって粉末状燃料が四方に飛散し、更に伝熱効率が上昇することとなるが、本実験条件であれば、粉末状燃料の温度上昇直後に生じる水蒸気発生とこれによる粉末状燃料飛散の駆動力は大きく抑制される。264-24 実験では、水との接触が水蒸気発生の重要な支配因子となると考えられることから、264-2 実験に対して幾何形状をペレットにより近づけることで、実際の燃料と水の接触条件に関し模擬性を高めることを狙いとして、粉末状燃料を円筒形プラスチック容器に封入した。さらに、264-2 実験では粉末状燃料バッグ周囲に水が存在しているのに対し、264-24 実験では粉末状燃料の飛散の駆動力を可能な限り抑制することを目的として、粉末状燃料を封入した領域の周囲をガス雰囲気とする配置を採用し、水による冷却の影響の排除を試みた。

計装として、水中に配置した圧力計（水中圧力計）、水塊速度計、ガス中に配置した圧力計（ガス中圧力計）、熱電対（水温）、及び AE センサ（264-24 実験のみ）を用いた。水中圧力計は、264-2 試験ではカプセル内、264-24 試験では円筒容器下部に設置し、最大 20 MPa まで測定可能な内圧計を用いた。水塊速度計は粉末状燃料上部に配置し、水塊が上方へ移動する際の水面変位に追従する浮子の移動速度を測定した。ガス中圧力計はカプセルまたは円筒容器上部に設置し、最大 1 MPa まで測定可能な内圧計を用いた。

2.3 衝撃圧力及び水撃力の算出

衝撃圧力は、燃料破損により発生し水中を伝播する圧力波として定義される。パルス照射に伴い発生した圧力波が水中に設置した圧力計に到達すると、圧力の急激な上昇として観測される。本研究では、この圧力上昇履歴に基づき、圧力信号の立ち上がり部分における増分を衝撃圧力として評価した。衝撃圧力のエネルギーは、燃料下方に設置した圧力計が捉えた圧力変動（圧縮・膨張）を時間積分することで求めた。一方、水撃力は、水塊の運動に起因して発生する力であり、本研究では水塊速度計により測定した水塊速度から評価した。水塊速度は、浮子の移動速度として差動トランス方式により計測される。得られた速度データに基づき、水撃力を算出した。衝撃圧力及びそのエネルギー、並びに水塊速度計のデータ処理方法及び水撃力とそのエネルギーの算出式の詳細については、参考文献^{6),11)}に記載されている。

3. 結果

3.1 過渡時データ

264-2 実験の原子炉出力 (2 系統)、原子炉積分出力 (2 系統)、水中圧力、ガス中圧力、水温及び水塊速度計信号 (水塊速度) の時刻履歴を Fig. 3.1~Fig. 3.4 に示す。264-24 実験の原子炉出力 (2 系統)、原子炉積分出力 (2 系統)、水中圧力、ガス中圧力、水温、水塊速度計信号 (水塊速度) 及び AE センサの時刻履歴を Fig. 3.5~Fig. 3.10 に示す。

原子炉出力及び原子炉積分出力は 264-2 実験と 264-24 実験で異なるが、これは両実験で同程度の燃料エンタルピー増分となるよう投入反応度を設定したものの、実際に投入された反応度に差異が生じたためである。264-2 実験では、水中圧力計に原子炉出力に同期したノイズが観測されたものの、有意な水中圧力の上昇は確認されなかった。また、ガス中圧力計では 0.02 MPa の圧力上昇がみられた。一方、水温はわずかに上昇し、最大で約 30°C に達した。Fig. 3.4(b) に示すように、水塊は最大 0.46 m/s の速度で移動した。ガス中圧力は水塊の上昇に伴うカバーガスの圧縮作用により上昇する可能性があるが、観測された圧力上昇は水塊の上昇挙動と明確な同期を示していない。このことから、当該圧力上昇は圧縮作用とは異なる要因によるものであり、例えば蒸気生成に伴う圧力が水塊を介してガス中に伝達された可能性が考えられる。

264-24 実験では、水中圧力は最大約 0.25 MPa まで上昇し、その上昇は 0.3176 s から開始した。本実験では、ビニル膜の熔融後、粉末状燃料は自由落下により円筒形容器下部の水面に到達し、水と接触することが想定されていた。しかしながら、圧力上昇は、燃料温度がビニル膜の融点(130-150°C)に到達したと想定される時刻 (0.3158-0.3169 s) よりわずかに遅いものの、その後自由落下により水面に到達すると見積られる時刻 (0.3777 s) よりも早い段階で開始している。このことから、燃料は単純な自由落下の結果としてではなく、密閉空間 (プラスチック容器) 内で加熱されたガスの膨張に伴う内圧上昇により、開封時に一定の速度を伴って下方へ押し出された可能性が考えられる。すなわち、燃料の水中移動は実験上の当初の企図よりも加速された条件であったと推定される。この条件で生じた水蒸気発生や機械的エネルギーについても、模擬を試みた条件、すなわち水中に静置された燃料が有意な飛散の駆動力の介在しない条件の下で高温となり、かつ冷却水と接触する場合に比して、定性的にはより大きいものと考えられる。また、ガス中圧力は 0.342 s 付近で最大約 0.67 MPa に達した。粉末状燃料下部の水温は上昇し、最大で約 70°C に達した一方、側方の水温には顕著な上昇は認められなかった。Fig. 3.9 に示すように、水塊は最大 4.44 m/s の速度で移動した。さらに、Fig. 3.10 に示すガス中圧力の上昇は、水塊の上昇挙動と明確な同期を示さず、より緩やかな変化を示していることから、異なる時定数を有する現象に起因するものと考えられる。また、Fig. 3.10 で検出された AE 信号は、機械的エネルギー発生に伴う衝撃圧や水塊の移動等の音響を捉えたものであると考えられる。

3.2 衝撃圧力及び水撃力

264-2 実験では、衝撃圧力の発生は認められず、衝撃圧力に起因するエネルギーは 0 J と評価された。一方、水塊は最大 0.46 m/s の速度で移動し、水蒸気が発生する粉末状燃料設置位置

より上部に存在する水塊の質量は 3.1 kg であった。これらの値を用い、参考文献⁶⁾に記載の算出式に基づいて、水蒸気発生に伴う水塊の運動エネルギーは 0.328 J と評価された。264-24 実験では、衝撃圧力は約 20 ms の時間幅を有するピークとして観測された。衝撃圧力のエネルギーは、燃料・水相互作用による衝撃圧力の発生位置から圧力計までの距離は 12.7 cm と置いた上で、参考文献⁶⁾に記載の算出式に基づき圧力履歴を積分することで約 91.7 J と評価された。また、水塊は最大 4.445 m/s の速度で移動し、粉末状燃料設置位置より上部の水塊質量は 0.773 kg であった。これらの値を用いて、同様に評価した結果、水塊の運動エネルギーは 7.64 J と算出された。ここで、転換率は、最大燃料エンタルピ増分に燃料重量を乗じて得られる燃料への総付与エネルギーに対する、各機械的エネルギー（衝撃圧力エネルギーおよび水塊運動エネルギー）の割合として定義する。264-2 実験及び 264-24 実験における転換率は、それぞれ 264-2 実験で衝撃圧力が 0%、水塊運動エネルギーが 0.00166%、264-24 実験で衝撃圧力が 0.449%、水塊運動エネルギーが 0.0374%であった。

4. 考察

4.1 表面積の衝撃圧力及び水撃力への影響

264-2 実験と 264-24 実験を比較すると、両者の主な違いは燃料の表面積にある。実験結果より、衝撃圧力及び水撃力はいずれも表面積の増加に伴い増大する傾向を示した。この傾向は、比表面積の増加により衝撃圧力及び水撃力が増大するという先行研究の知見⁶⁾と一致している。

4.2 高燃焼度燃料との比較

Table 2 に VA-5 及び VA-6 の結果を示す。これらと 264-24 実験の結果を比較すると、264-24 実験における衝撃圧力の転換率は、比表面積がより大きいにもかかわらず、高燃焼度燃料の最大値である VA-5 の 0.66%と比較して約 3 分の 2 程度にとどまった。さらに重要な点として、衝撃圧力の次元で見ると、VA-5 及び VA-6 でそれぞれ 10.8 MPa 及び 5.7 MPa であるのに対し、264-24 実験では 0.263 MPa と著しく小さい。この差は、燃料重量が約半分であることを考慮しても依然として大きい。すなわち、264-24 実験では衝撃圧力に起因するエネルギー自体は発生しているものの、それがピーク圧力水準の上昇に寄与する割合は高燃焼度燃料に比べて遥かに小さいことが示唆される。この要因として、264-24 実験では燃料の水中への分散を抑制していることが挙げられる。分散が抑制されることで、細片化燃料による水への超高効率な熱伝達が生じにくくなり、その結果として急峻な圧力上昇が抑えられた一方で、粉末状燃料の平均的な温度は下がりづらくなった結果として、圧力波の発生は相対的に長い時間継続し、結果として時間積分値としての機械的エネルギーや転換率の次元ではある程度の水準に達したものと解釈できる。さらに、264-24 実験における水撃力のエネルギー及び転換率は、VA-5 及び VA-6 と比較して 2 桁程度小さい値であった。この結果も、FP ガス放出に伴う細片化燃料の水中分散が生じない場合、超高効率な熱伝達が抑制され、水撃力の発生が大幅に低減されることを示している。

今回の 2 実験の結果を踏まえ、RIA 時に特有のペレット細片運動の駆動力が介在しない条件

下における燃料-水接触模擬を試みた実験条件に対し、衝撃圧力及び水撃力の転換率と燃料エンタルピー増分/発熱量の関係、並びに衝撃圧力の機械的エネルギーと衝撃圧力との関係を Fig. 4.1 及び Fig. 4.2 に示す。Fig. 4.1 には、両実験結果のうち比較的高い値を示し、上述の通り駆動力を実験体系から排除しきれておらず機械的エネルギーの上振れ影響を含むと考えられる 264-24 実験のデータに基づき、その値を一定とした線を上限を示すための参考線として併記した。これは、分散を伴わない条件に対しては保守的な転換率に相当する。なお、発熱量は、パルス中に燃料へ即発的に投入される燃料エンタルピー増分に、遅発核分裂に伴うエネルギーを加えた総エネルギーである^{12),13)}。また、衝撃圧力の形で発生した機械的エネルギーのうち、体系内のピーク圧力形成に対する寄与に着目し、転換率及びそれに基づき算出されるエネルギーと圧力との関係を Fig. 4.2 に整理した。Fig. 4.2(b)に示した高燃焼度燃料の結果との比較から、衝撃圧力ピークの形成に対する機械的エネルギーの寄与は、264 実験では遥かに小さいことが確認される。これは、衝撃圧力が機械的エネルギーの総量のみならず、そのエネルギーが水へ付与される時間的・空間的分布に強く依存するためである。燃料細片の飛散の駆動力を伴わない条件では熱伝達面積の増加が限定的となり、水蒸気の発生及び膨張が緩やかになる。その結果、水へのエネルギー付与が時間的に分散され、水の急激な圧縮が生じにくくなるため、圧力波の立ち上がりが緩慢となる。したがって、同程度の機械的エネルギー量であっても、衝撃圧力のピーク値は低下する。すなわち、燃料-水接触が緩やかな条件では、熱エネルギーの機械的エネルギーへの転換自体は発生するものの、それが衝撃圧力として現れる割合は限定的である。

5. 結論

本報告では、粉末状燃料を用いた RIA 模擬実験により、高燃焼度燃料に相当する比表面積を有しつつ、粉末燃料の水中への分散を抑制した条件における破壊エネルギー発生挙動を評価した。

その結果、比表面積の増加に伴い衝撃圧力及び水撃力は増大する傾向が確認され、表面積が機械的エネルギー発生に寄与する重要な因子であることが再確認された。一方で、実験ケースの一つでは、比表面積を高燃焼度燃料よりも有意に大きな水準に設定し、かつ燃料エンタルピーについても過去最大の機械的エネルギー発生が観測された VA-5 実験条件を上回る値に設定したにもかかわらず、衝撃圧力及び水撃力は高燃焼度燃料試験 (VA-5、VA-6) を大きく下回った。この結果は、機械的エネルギーの発生においては、表面積の大きさに加えて、燃料細片の水中への急速な分散挙動が本質的に重要であることを示している。すなわち、高燃焼度燃料の PCMI 破損時に見られるような、バースト的な FP ガス放出を駆動力として起こると考えられる燃料の急速分散と、それに起因する極めて高効率な熱伝達が、衝撃圧力及び水撃力の発生を支配していると考えられる。

以上より、燃料が破損し、水との接触が比較的緩やかに進行する条件では、たとえ比表面積が大きい場合であっても、機械的エネルギーの発生は抑制され、特に圧力ピーク発生については更に限定的となることが明らかとなった。本知見は、高燃焼度燃料の RIA 時挙動評価において、燃料分散挙動の有無・程度を考慮することの重要性を示すものである。

謝 辞

本研究の実施にあたり、NSRR の運転及び実験支援に携わられた関係各位に深く感謝の意を表す。また、本研究の遂行にあたり有益な助言をいただいた関係者各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) Fuketa, T.; Fujishiro, T., Generation of destructive forces during fuel/coolant interactions under severe reactivity initiated accident conditions, *Nucl. Eng. Des.* 2/1994, *146* (1-3), pp.181-194
- 2) Saito, S.; Ishijima, K.; Shiozawa, S.; Iwata, K., Effects of Rod Pre-Pressurization on Light Water Reactor Fuel Behavior during Reactivity Initiated Accident Conditions, *J. Nucl. Sci. Technol.* 1982, *19* (4), pp.289-306
- 3) 大西信秋, 落合政昭, 石島清見, 丹沢貞光, 738. 軽水動力炉の反応度事故条件下における浸水燃料の破損挙動, 日本原子力学会誌 1982, *24* (4), 289-300.
- 4) Tsuruta, T.; Ochiai, M.; Saito, S., Fuel Fragmentation and Mechanical Energy Conversion Ratio at Rapid Deposition of High Energy in LWR Fuels, *J. Nucl. Sci. Technol.* 1985, *22* (9), pp.742-754
- 5) 星蔦雄, 稲辺輝雄, 落合政昭, 丹沢富雄, 塩沢周策, 小林晋昇, 斎藤伸三, 石川迪夫, 668. 反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動, 日本原子力学会誌 1978, *20* (9), 651-661.
- 6) Mihara, T.; Udagawa, Y., Generation of pressure pulse and water hammer triggered by high-burnup fuel failure under reactivity-initiated accident conditions, *J. Nucl. Sci. Technol.* 2026, 17p.
- 7) Sugiyama, T.; Fuketa, T., Mechanical Energy Generation during High Burnup Fuel Failure under Reactivity Initiated Accident Conditions, *J. Nucl. Sci. Technol.* 2000, *37* (10), pp.877-886
- 8) Fuketa, T.; Sasajima, H.; Sugiyama, T., Behavior of High-Burnup PWR Fuels with Low-Tin Zircaloy-4 Cladding under Reactivity-Initiated-Accident Conditions, *Nucl. Technol.* 2001, *133* (1), pp.50-62
- 9) Fuketa, T.; Sasajima, H.; Mori, Y.; Ishijima, K., Fuel failure and fission gas release in high burnup PWR fuels under RIA conditions, *J. Nucl. Mater.* 9/1997, *248*, pp.249-256
- 10) Fuketa, T.; Sugiyama, T.; Nagase, F., Behavior of 60 to 78MWd/kgU PWR Fuels under Reactivity-Initiated Accident Conditions. *J. Nucl. Sci. Technol.* 2006, *43* (9), pp.1080-1088

- 11) 杉山智之, 更田豊志, NSRR 実験用水塊速度計 ; 特性及びデータ処理方法, JAERI-Tech 2000-067, 2000, 29p.
- 12) Udagawa, Y.; Sugiyama, T.; Amaya, M., Thresholds for failure of high-burnup LWR fuels by pellet cladding mechanical interaction under reactivity-initiated accident conditions, *J. Nucl. Sci. Technol.* 2019, *56*(12), pp.1063–1072
- 13) Ohnishi, N.; Inabe, T., Evaluation of Effective Energy Deposition in Test Fuel during Power Burst Experiment in NSRR. *J. Nucl. Sci. Technol.* 1982, *19*(7), pp.528–542

Table 1 264-2 及び 264-24 実験の燃料試料並びに比較実験 (VA-5 及び VA-6) の仕様及び実験条件

試験番号	燃料試料の仕様						実験条件	
	形態	濃縮度 (%)	重量 (g)	粒径 (μm)	表面積 (× 10 ² cm ²)	比表面積 (cm ² /g)	最大燃料エンタルピー増分 (J/g)	発熱量 (J/g)
264-2	未照射 粉末状燃料	10	30.3	250	0.66	21.9	654.5	990.8
264-24	未照射 粉末状燃料	10	29.5	<32	10.26	348	693.1	1027.1
VA-5	高燃焼度燃料 (81 GWd/t)	-	64.2	-	64	100	587	-
VA-6	高燃焼度燃料 (78 GWd/t)	-	65.1	-	120	184	617	-

Table 2 264-2 及び 264-24 実験並びに比較実験 (VA-5 及び VA-6) の結果

試験番号	衝撃圧力 (MPa)	衝撃圧力のエネルギー (J)	衝撃圧力の転換率 (%)	水撃力のエネルギー (J)	水撃力の転換率 (%)
264-2	0	0	0	0.328	0.00166
264-24	0.263	91.7	0.449	7.64	0.0374
VA-5	10.8	249	0.66	411	1.09
VA-6	5.7	72	0.18	370	0.92

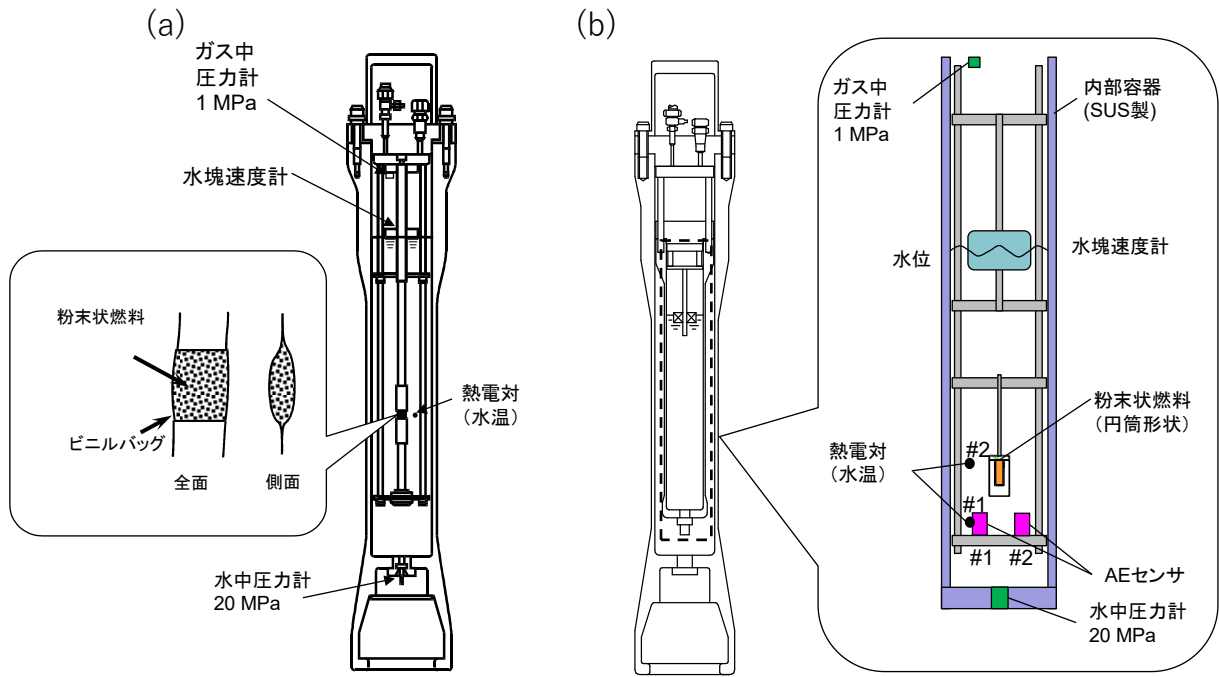


Fig. 2.1 (a) 264-2 及び(b) 264-24 実験の計装

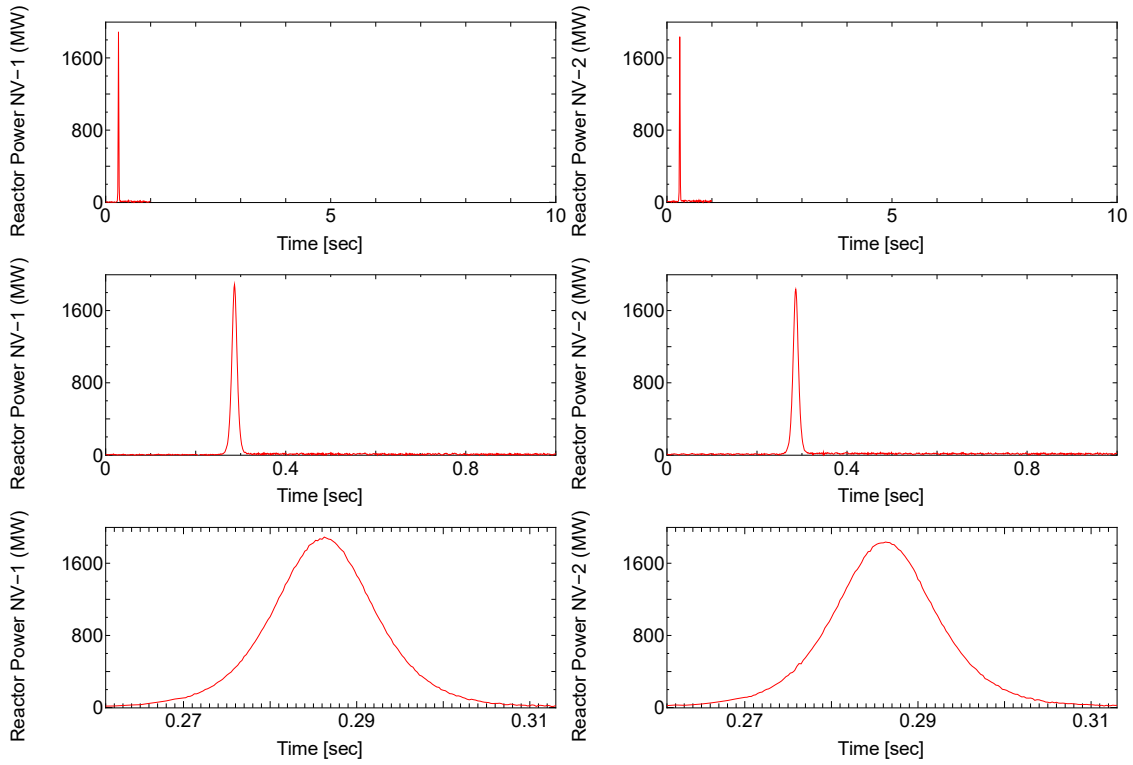


Fig. 3.1 264-2 実験計装 (原子炉出力 2 系統)

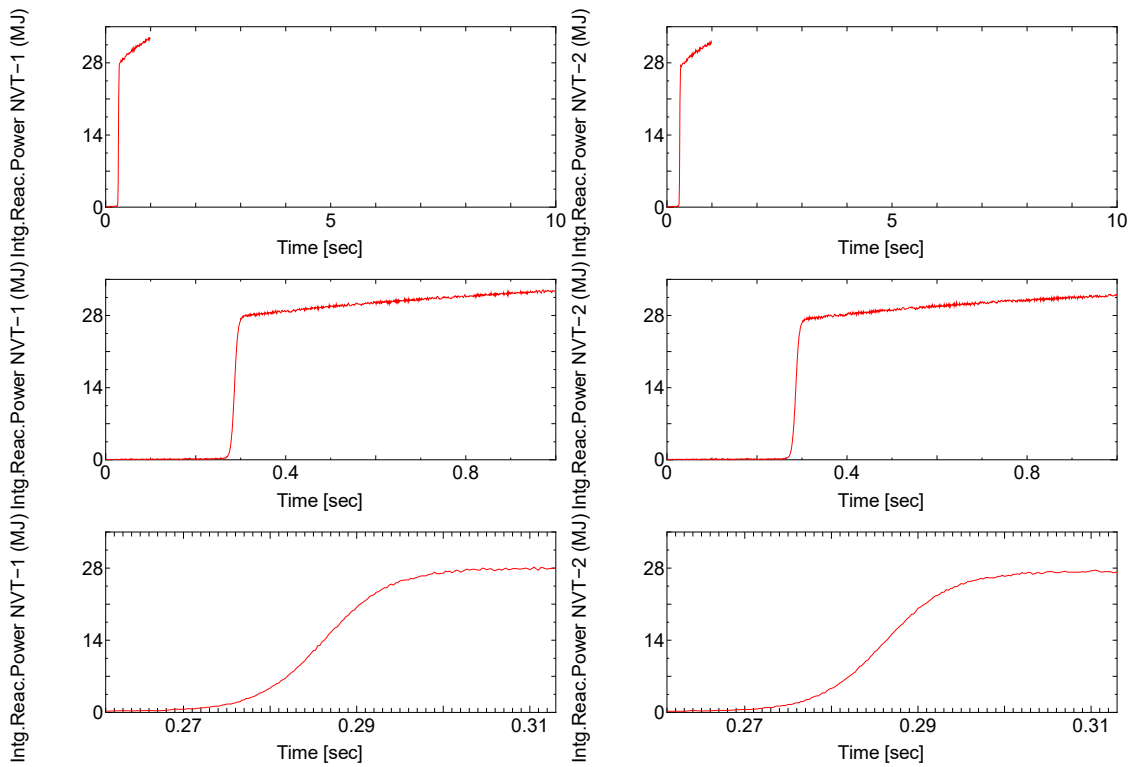


Fig. 3.2 264-2 実験計装 (原子炉積分出力 2 系統)

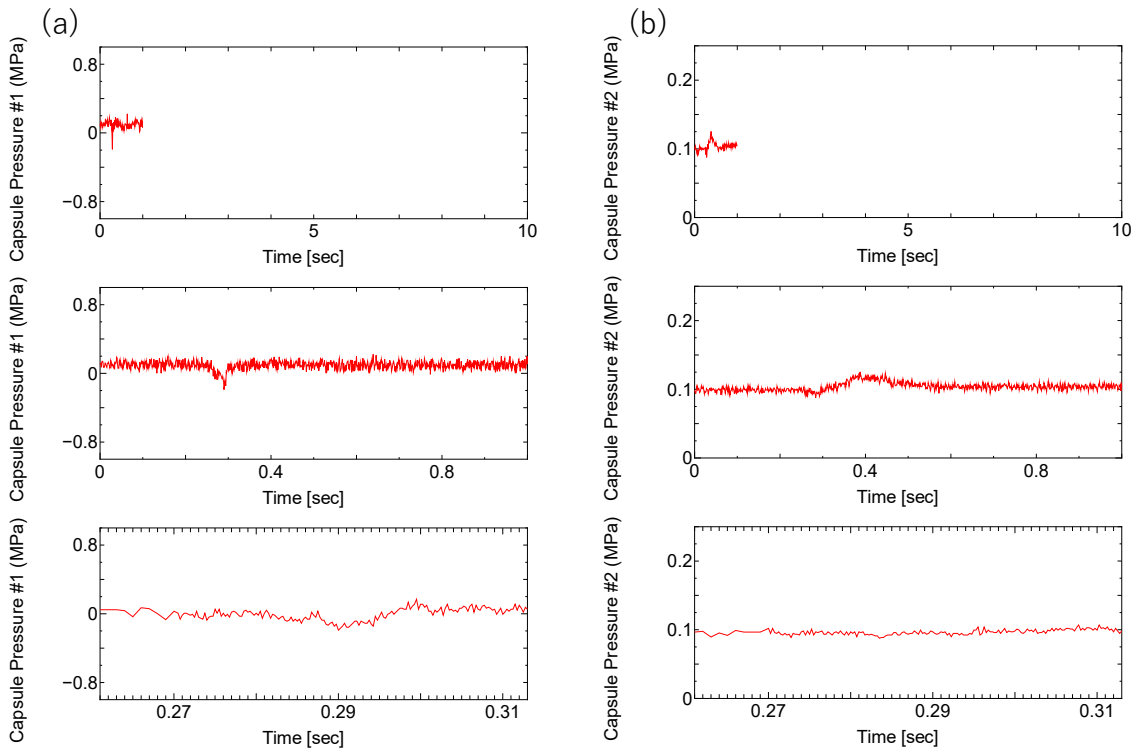


Fig. 3.3 264-2 実験計装 ((a)水中圧力計及び(b)ガス中圧力計)

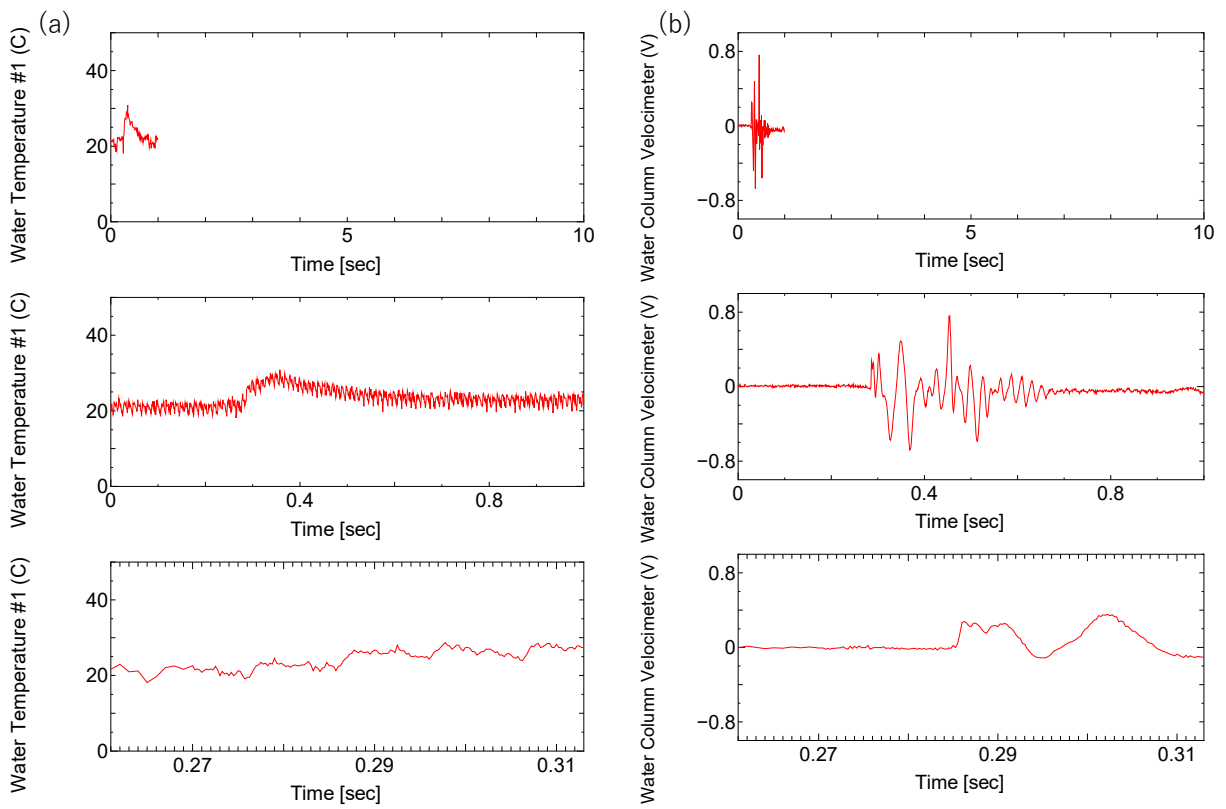


Fig. 3.4 264-2 実験計装 ((a)水温及び(b)水塊速度計)

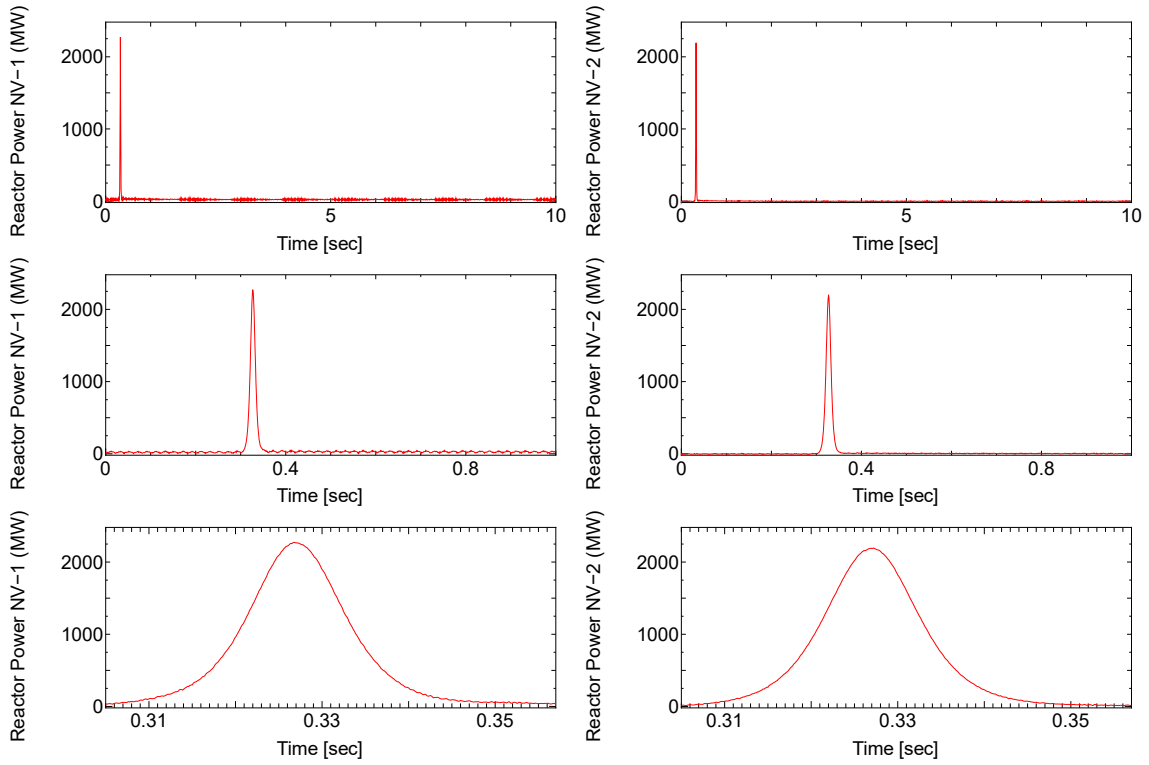


Fig. 3.5 264-24 実験計装 (原子炉出力 2 系統)

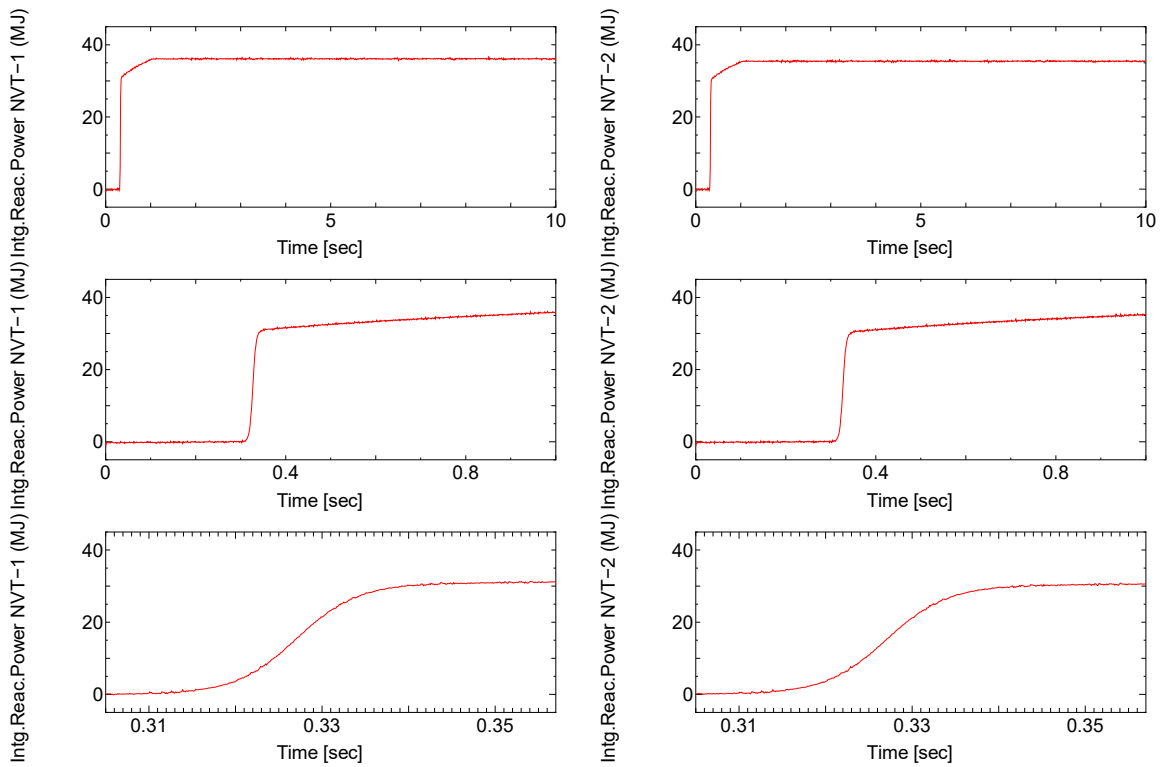


Fig. 3.6 264-24 実験計装 (原子炉積分出力 2 系統)

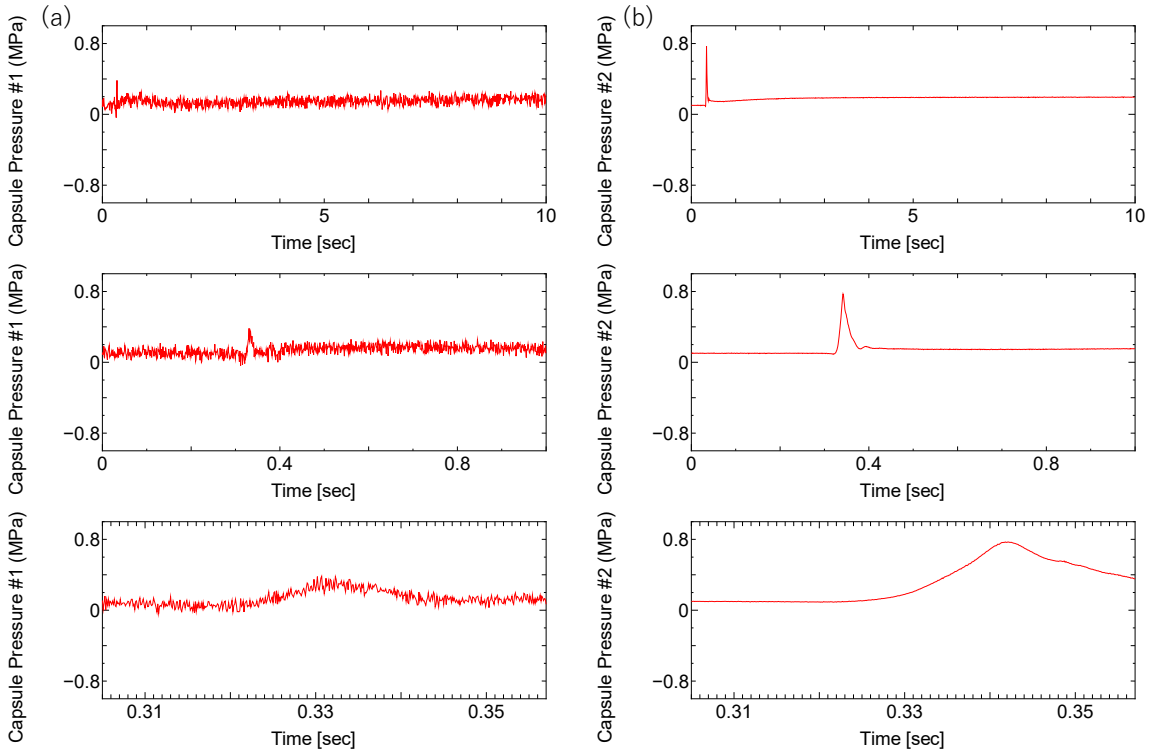


Fig. 3.7 264-24 実験計装 ((a)水中圧力計及び(b)ガス中圧力計)

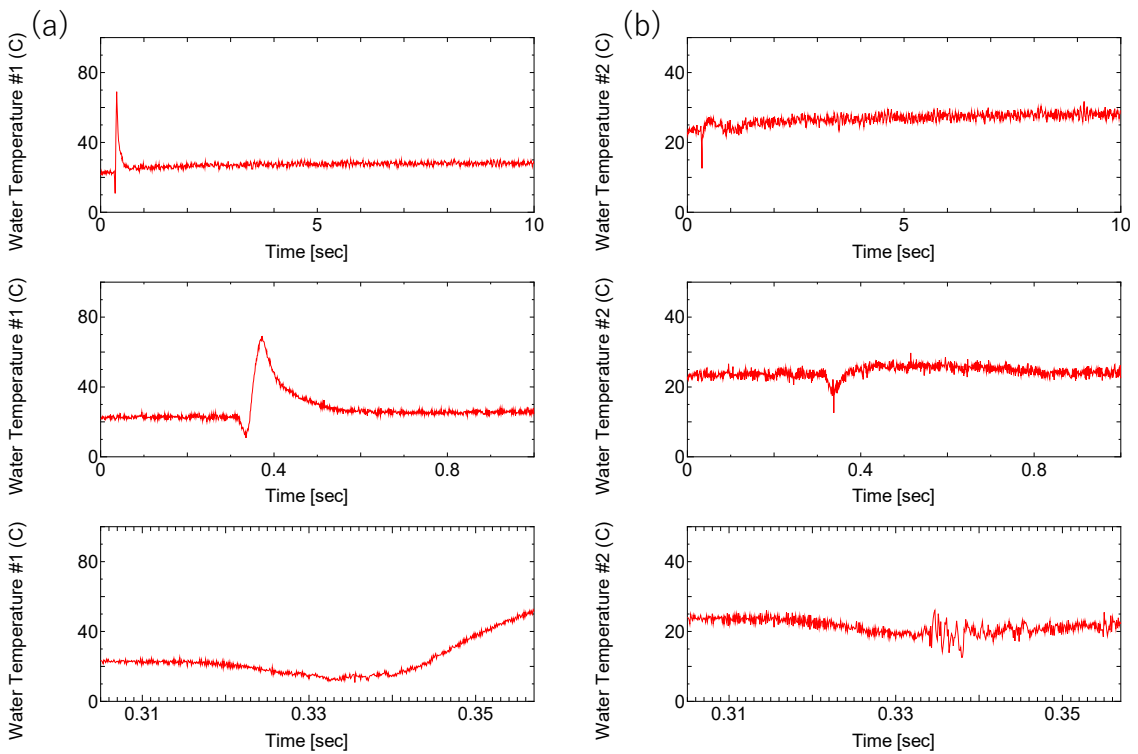


Fig. 3.8 264-24 実験計装 (水温(a)燃料下方及び(b)側部)

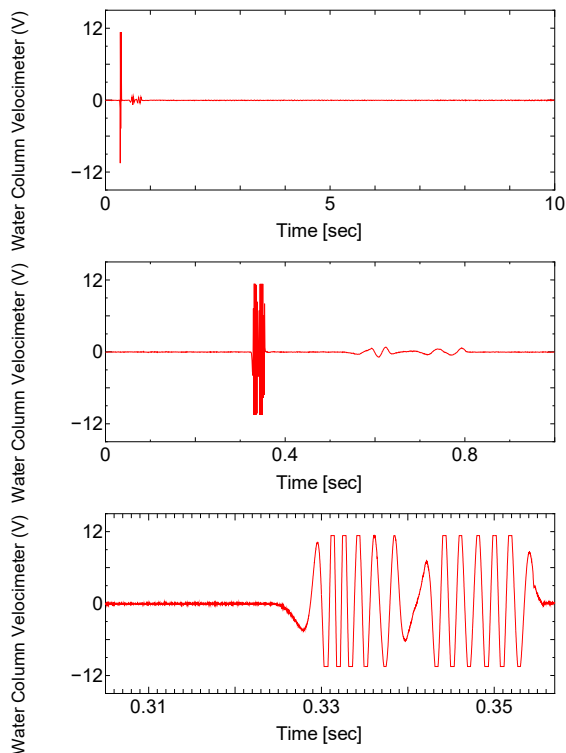


Fig. 3.9 264-24 実験計装 (水塊速度計)

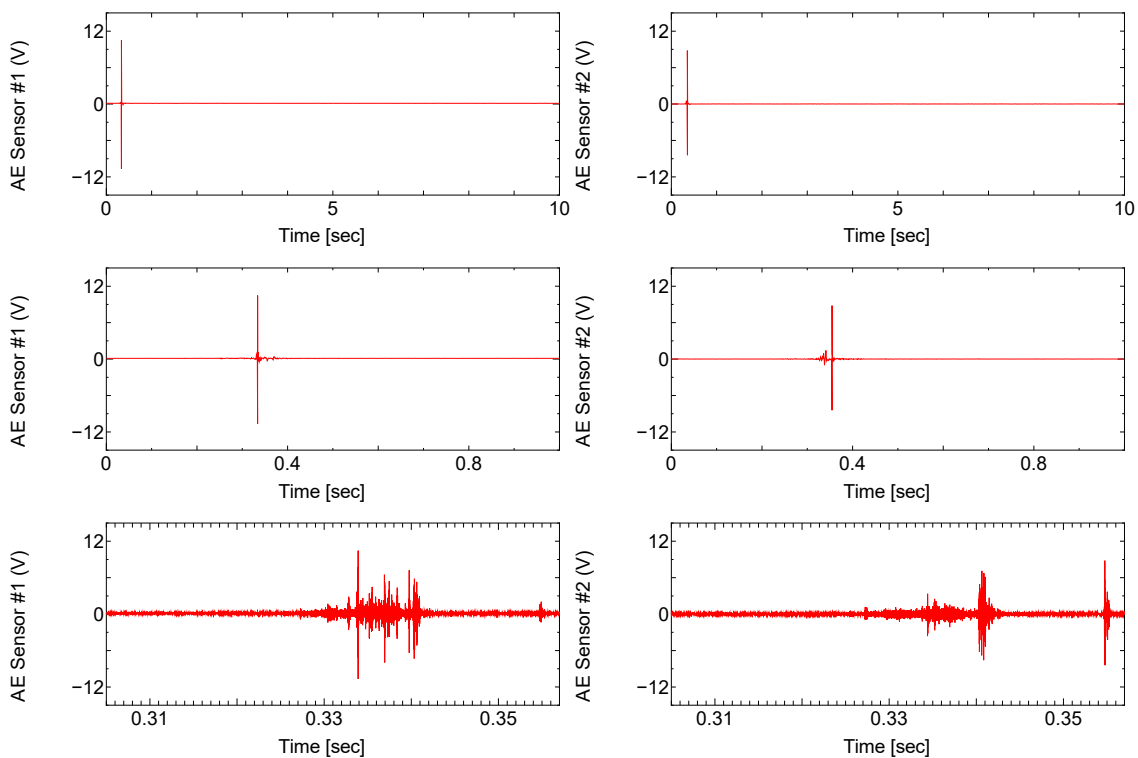


Fig. 3.10 264-24 実験計装 (AE センサ 2 系統)

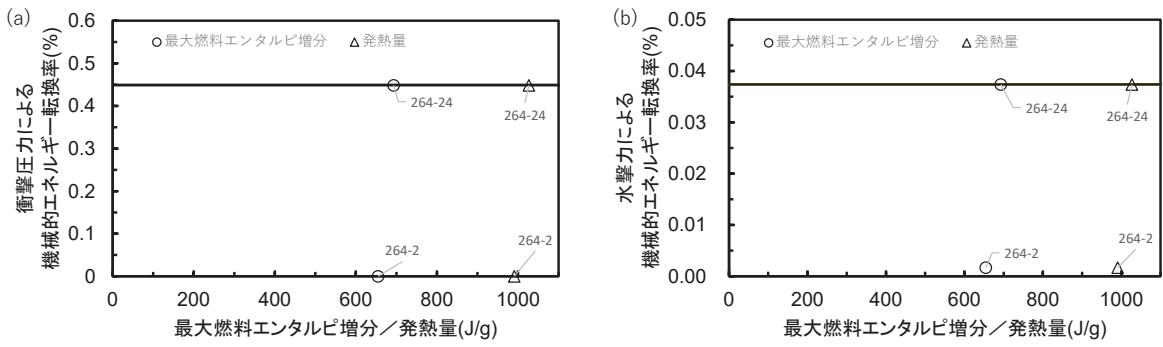


Fig. 4.1 最大燃料エンタルピ増分／発熱量と転換率の関係
(a)衝撃圧力と(b)水撃力

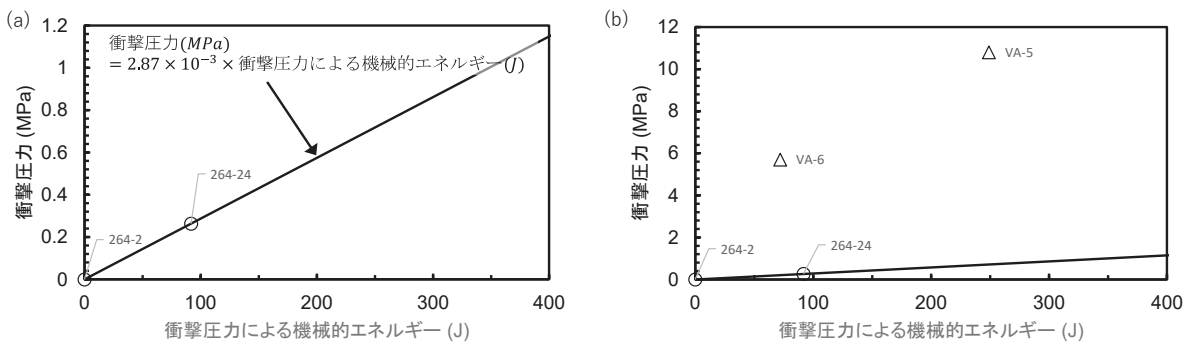


Fig. 4.2 衝撃圧力の機械的エネルギーと衝撃圧力の関係
(a)1-1.2MPa、(b)1-12 MPa

This is a blank page.

