JAEA-Research
2026-004
DOI:10.11484/jaea-research-2026-004

多相多成分詳細熱流動解析コードJUPITERによる制御棒溶融挙動実験解析

Numerical Analysis of Control Blade Melting Experiments Using the JUPITER Code

山下 晋
Susumu YAMASHITA

原子力科学研究所
軽水炉工学研究センター
Research Center for LWR Engineering
Nuclear Science Research Institute

September 2026
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja）
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。本レポートに関しては下記までお問合せください。

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.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2026

JAEA-Research 2026-004

多相多成分詳細熱流動解析コード JUPITER による制御棒溶融挙動実験解析

日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所　軽水炉工学研究センター
山下　晋

（2026 年 6 月 30 日受理）

原子炉シビアアクシデント（SA）初期の炉心溶融挙動において、制御棒から先行して溶融することが知られており、その挙動の把握は SA 初期以降の事故進展を評価するうえで重要である。本報告では、SA 時の炉心溶融挙動を機構論的に予測するために JAEA で開発された多相多成分詳細熱流動解析コード JUPITER の制御棒溶融挙動解析への適用性を確認することを目的として、LEISAN 試験装置を用いた制御棒溶融挙動試験解析を実施した。その結果、試験で確認された制御棒ブレード表面での水蒸気酸化の有無による制御棒破損の様相をおおむね再現できることが分かった。これにより、JUPITER は、SA 初期の制御棒溶融挙動に対して適用できる見通しを得た。

原子力科学研究所：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4

JAEA-Research 2026-004

Numerical Analysis of Control Blade Melting Experiments Using the JUPITER Code

Susumu YAMASHITA

Research Center for LWR Engineering
Nuclear Science Research Institute
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 30, 2026)

In the early phase of a nuclear reactor severe accident (SA), it is well known that control rods tend to melt first ahead of other core components, and understanding this behavior is essential for assessing accident progression beyond the initial SA phase. In this report, to confirm the applicability of JUPITER – developed by JAEA to mechanistically predict core melt behavior under SA conditions – to the analysis of control-rod melting behavior, we conducted an analysis of control-rod melting behavior tests performed using the LEISAN experimental facility. The results showed that oxidation and eutectic models can generally reproduce the observed modes of control-blade failure depending on whether steam oxidation occurs on the surface of the control-rod blade. These findings indicate that JUPITER is likely applicable to control-rod melting behavior in the early phase of an SA.

Keywords: CFD (Computational Fluid Dynamics), SA (Severe Accident), Melt Relocation Behavior, Steam Oxidation, Eutectic Reaction, VOF Method, LEISAN (Large-scale Equipment for Investigation of Severe Accidents in Nuclear Reactors), JUPITER

目　次

1.　序論 ----------1
2.　LEISAN による制御棒溶融試験 ----------1
2.1 水蒸気枯渇条件下での試験概要 ----------2
2.2 水蒸気潤沢条件下での試験概要 ----------3
3.　LEISAN 試験解析 ----------3
3.1 概要 ----------3
3.2 制御棒ブレード破損試験条件：CRFCBF-01 ----------4
3.3 制御棒ブレード破損試験条件：CRFCBF-03 ----------5
3.4 LEISAN 試験解析結果 ----------6
3.4.1 制御棒ブレード破損試験：CRFCBF-01 ----------6
3.4.2 制御棒ブレード破損試験：CRFCBF-03 ----------7
4.　結論 ----------8
謝辞 ----------9
参考文献 ----------9
付録 ----------9

Contents

1. Introduction ----------1
2. Control blade melting test using the LEISAN ----------1
2.1 Overview of the tests under steam-starved conditions ----------2
2.2 Overview of the tests under steam-rich conditions ----------3
3. Analyses of the LEISAN experiment ----------3
3.1 Overview ----------3
3.2 Numerical configurations for the control blade failure experimental analysis: CRFCBF-01 ----------4
3.3 Numerical configurations for the control blade experimental failure analysis: CRFCBF-03 ----------5
3.4 Results of the LEISAN experimental analysis ----------6
3.4.1 Control blade failure experimental analysis: CRFCBF-01 ----------6
3.4.2 Control blade failure experimental analysis: CRFCBF-03 ----------7
4. Concluding remarks ----------8
Acknowledgements ----------9
References ----------9
Appendix ----------9

1. 序論

福島第一原子力発電所事故後、炉内で形成された燃料デブリは多様な形状・組成を示すことが内部調査から示唆されている一方で、その形成メカニズムには依然として不確かさが残っている。BWR では、原子炉シビアアクシデント（以下、SA : Severe Accident）初期に制御棒ブレードの劣化・溶融が先行して発生することが分かっている。その開始時期や溶融物の移行・閉塞挙動が、後続する炉心損傷の進展や物質再配置を強く規定するため、機構論的理解とモデル化が重要な課題である。

この課題に対し JAEA は、SA 時の炉心内部溶融物移行挙動を数値流体力学（CFD）により機構論に基づき予測することを目的として、多相多成分詳細熱流動解析コード JAEA Utility Program for Interdisciplinary Thermal-hydraulics Engineering and Research（JUPITER）[1] を開発した。本報告では、JUPITER の SA 時溶融物移行挙動解析への適用性確認を目的として、JAEA で実施された LEISAN 試験装置による制御棒溶融挙動試験解析を行った結果を報告する。

2. LEISAN による制御棒溶融試験

JAEA は、炉心溶融、溶融物の移行、閉塞、さらには下部構造・圧力容器損傷へ至る一連の現象の理解を支える実験基盤として、制御棒ブレード破損試験装置 LEISAN（Large-scale Equipment for Investigation of Severe Accidents in Nuclear reactors）を整備し、事故時の炉内状況把握と燃料デブリ形成メカニズムの解明を進めている [2), 3)]。

LEISAN は、BWR 制御棒や模擬燃料集合体系の最大約 1.2 m 規模の試験体を対象とし、炉内で軸方向温度勾配を与えた状態で高温加熱できる大型試験設備である。また、Ar 雰囲気および水蒸気供給条件を制御しながら、観察窓・カメラによる三方向の in-situ 動画観察と、熱電対計測、排気ガス分析（質量分析）を組み合わせて、溶融・移行・閉塞挙動を時間履歴として取得できる点に特徴がある。このような「実機に近い寸法スケール」「温度勾配付与」「雰囲気（水蒸気量）制御」「その場可視化」を同時に満たすことで、制御棒溶融物の移行（relocation）やロウ垂れ状固化（candling）といった過程を、温度履歴・雰囲気条件と直接対応付けて検討可能にしている。

LEISAN を用いた代表的な BWR 模擬集合体試験では、制御棒ブレードの溶融滴形成、溶融物の急速な移行、低温域での固化・堆積による閉塞形成などが in-situ 動画で観察され、制御棒劣化の進展像が詳細に記述されている。さらに、固化した金属系生成物（metallic debris）については、EDS 等により溶融物の層状分離や Cr・ホウ化物富化層の形成、ホウ素、炭素を含む高融点化した領域が溶融物移行を抑制し得る可能性など、材料学的特徴が報告されている。加えて、チャンネルボックス等の酸化状態（事前酸化膜の有無・厚さ）が、溶融物の濡れ性や反応進展、局所的な共晶反応の成立可能性に影響し得ることが示されており、事故初期条件（蒸気供給の十分性／蒸気枯渇など）と破損様相の関連を議論する上で重要な示唆を与える。

以上のように、LEISAN 試験は、制御棒溶融の開始から移行・閉塞形成に至る現象連鎖を、

可視化と事後分析を通じて体系的に把握するための実験データを提供し、事故進展評価コードや機構論モデルの高度化に資する基盤として位置付けられる。本報告では、水蒸気枯渇条件および水蒸気潤沢条件下で行われた LESIAN による制御棒溶融挙動試験（以下、LEISAN 試験）について JUPITER により解析を行い、実験結果との比較を通じて JUPITER の制御棒溶融挙動把握に対する適用性を確認する。

2.1　水蒸気枯渇条件下での試験概要

表 2.1 に JAEA において、2014 年から 2021 年にかけて実施された LEISAN 試験の種類を示す。特にその中で、表 2.2 に制御棒ブレード破損試験に関する概要を示す。ここで、過年度解析では、水蒸気+Ar 環境での制御棒ブレード等の破損挙動を確認する CRFCBF を対象とした。試験体はチャンネルボックス 2 体で制御棒ブレードを挟み込んだ構造になっている。制御棒ブレードはステンレス製で、制御棒には B_4C が 70%充填されている。チャンネルボックスには燃料棒が各々10 本挿入されており、燃料棒はジルカロイ製の被覆管のみである。水蒸気のない条件では He を封入した 2 本を除いて上部を開放した管状のもので、水蒸気のある条件では全て He ガスを封入してある。この試験体を試験装置内部である炉内に設置し、カーボンヒーターで加熱する。試験装置下部は冷却されており、高さ方向に温度勾配が形成される。表 2.3 に CRFCBF の試験条件を示す。試験では Ar のみを試験体下部より流入して温度上昇率を変化させた 2 ケース、Ar および水蒸気を流入して水蒸気流量を変化させた 2 ケースを実施した。

水蒸気を流入させた 2 ケースに対する試験体の熱電対位置は、試験体の下から 325 mm、670 mm、958 mm、1245 mm の制御棒表面に 4 箇所、チャンネルボックス表面に 1 箇所の計 5 箇所である。それぞれの温度変化は、試験の手順では、常温から加熱し、ある一定の温度勾配を形成する（800℃程度）。その後水蒸気を流入し、一定時間加熱する（800℃から 1700℃程度）。その後水蒸気の流入を停止し、冷却する。以上の過程の中で、高温によるステンレス鋼と B_4C の拡散が起こり、融点が降下し共晶反応により制御棒ブレードが崩落する。制御棒の溶融体がチャンネルボックスや燃料棒と接触し、ジルカロイ - ステンレス鋼の共晶反応を引き起こす。チャンネルボックスと燃料棒の破損具合は、ジルカロイの水蒸気酸化での酸化膜生成量に依存するものと考えられる。

Ar のみを流入した CRFCBF-01 および CRFCBF-02 の試験後の損傷については、模擬燃料集合体に著しい損傷が生じていた。試験前には、燃料棒群、スペーサ、チャンネルボックスおよび制御棒模擬体が軸方向に整然と配置されていたが、加熱後には外周部の一部が破損し、集合体内部の構造物が露出していた。

CRFCBF-01 では、チャンネルボックスの一部に局所的な開口が形成され、その周辺に黒色から灰色の変色部および銀白色の凝固物が確認された。中間部では、溶融物が制御棒近傍または燃料棒群に沿って下方へ流下し、粗い塊状または粒状の形態で再凝固していた。下部領域にも白色から銀白色の凝固物が蓄積しており、溶融した構造材が集合体内部を下方へ移行したことが示唆される。

CRFCBF-02 では、外周部の破損がより顕著であり、チャンネルボックスに大きな開口が形成されていた。開口部周辺には黒色、灰色、銀白色の付着物が広く分布し、内部構造が大きく

露出していた。中間部から下部にかけては、溶融物が軸方向に流下した痕跡が連続的に認められ、銀白色の金属状凝固物が棒状または滴下状に残存していた。また、底部には流下または落下した凝固物が堆積しており、溶融物の一部が集合体下端まで移行したことを示している。

これらの観察結果から、両試験体ではチャンネルボックスおよび制御棒周辺構造の損傷、溶融物の下方移行、ならびに再凝固による凝固物の形成が生じたと考えられる。特に CRFCBF-02 では、開口部の大きさおよび凝固物の分布範囲が CRFCBF-01 よりも大きく、より進展した損傷状態を示していた。

2.2　水蒸気潤沢条件下での試験概要

Ar+水蒸気雰囲気中で加熱した CRFCBF-03 および CRFCBF-04 では、両試験体ともに模擬燃料集合体の損傷が確認されたが、損傷程度は水蒸気流入量の多い CRFCBF-03 でより顕著であった。CRFCBF-03 では、集合体全体に大きな変形が生じ、燃料棒群およびチャンネルボックスの直線性が失われていた。中間部から下部にかけてチャンネルボックスの破損および内部構造の露出が見られ、露出部周辺には灰白色から銀白色の凝固物が広範囲に付着していた。さらに、下部領域には多量の塊状または粒状の凝固物が堆積しており、溶融した構造材が集合体内部を下方へ移行し、下部で再凝固・蓄積したことを示している。

一方、CRFCBF-04 では、チャンネルボックスの局所的な開口や凝固物の付着は認められるものの、燃料棒群およびスペーサの形状は比較的保持されていた。中間部には白色から灰白色の酸化物状付着物および細長い凝固物が確認され、局所的な溶融物の流下が生じたことが分かる。しかし、CRFCBF-03 で見られたような大規模な集合体変形や下部への大量堆積は限定的であった。

このことから、水蒸気流入量の多い CRFCBF-03 では、酸化反応およびそれに伴う材料劣化が促進され、チャンネルボックス破損、溶融物の生成、下方移行および下部堆積がより激しく進行したと考えられる。CRFCBF-04 では損傷は局所的に発生したものの、集合体構造は CRFCBF-03 に比べて比較的残存しており、全体として損傷程度は小さかった。

3. LEISAN 試験解析

3.1　概要

JUPITER を用いて、既存の形状データによる大型計算機上で LEISAN 試験解析を実施した。JUPITER は、原子炉の過酷事故時に発生する燃料溶融現象などを高精度にシミュレーションすることを目的として開発された。特に、気体・液体・固体が混在し、さらに複数の成分が相互作用する「固気液多相多成分流」を対象としており、複雑な熱流動挙動や化学反応を統一的に扱える点が特徴である。また、固液相変化、化学反応、輻射伝熱、多孔質体流れ解析などの多様な機能を備え、3D-CAD 形状入力にも対応している。大規模計算性能については、MPI および OpenMP による超並列計算や GPGPU 対応により、大規模・高精細なシミュレーションが可能である。

本解析では制御棒ブレード破損試験を対象とし、表 3.1 の条件に対し、Ar のみを流入した

CRFCBF-01 および Ar+水蒸気を流入した CRFCBF-03 の 2 ケースを実施することとした。

3.2　制御棒ブレード破損試験条件：CRFCBF-01

図 3.1 に本解析体系を示す。本解析体系は対称性を仮定し 1/2 試験体系とした。図中の左側は本試験体の寸法を示す。ここで、制御ブレード寸法の厚みは 3.8 mm、B_4C 格納部については 1.4 mm であり、制御ブレードとチャンネルボックスの間隔は 5.8 mm であった。計算格子幅を検討した結果、水平方向の格子幅を 0.7 mm とした場合、制御ブレードの厚みは 6.3 mm、B_4C 格納部については 1.4 mm、チャンネルボックス間隔は 6.3 mm となったため、概ね制御ブレードを解像できることを確認した。一方、格子幅 0.7 mm では B_4C およびその被覆管は解像できないため、制御ブレードの B_4C 格納部に合わせた形状を作成し、制御材は被覆管 SUS と B_4C の混合物として設定した。したがって、解析体系の寸法は 44.8 mm (x) × 78.4 mm (y) × 1344 mm (z)とし、格子幅は$\Delta x = \Delta y = 0.7$ mm および$\Delta z = 1.4$ mm としたため、計算格子数は 64 (x) × 112 (y) × 960 (z) = 6,881,280 となった。

CRFCBF-01 の主な解析条件を以下に示す。

- 入口からの Ar 流入量を 20 g/min とした。出口は圧力流出境界とし、それ以外の境界条件は slip 条件とした。
- 初期圧力は 0.1 MPa とし、初期温度は試験データより、測定された熱電対温度履歴を軸方向に設定した。ここで、温度履歴はヒーター温度 600 °C に到達した時点以降を対象とし、図 3.2 のように、ヒーター側チャンネルボックス表面の TC3 (1180 mm)および TC5 (830 mm)、制御棒ブレード表面の TC1 (1180 mm)、TC4 (830 mm)、TC6 (500 mm)および TC7 (180 mm)の熱電対温度を基に線形補間により与えた。なお、180 mm 以下の温度は TC7 の温度に設定した。ここで試験では、TC3 が 793 K より加熱開始後、t = 1230 s で TC3 の最高温度が 1965 K に到達し、その後、ヒーターを停止して、t = 3619 s まで冷却する。
- 境界条件は x 方向および z 方向負側は温度一定、それ以外は断熱条件とする。ここで、x 方向温度は図 3.3 のように熱電対温度履歴による温度プロファイルを設定し、x 方向負側の温度プロファイルには制御棒ブレード表面の TC1，TC4，TC6 および TC7 の熱電対温度、x 方向正側の温度プロファイルにはヒーター側チャンネルボックス表面の TC3 および TC5 と制御棒ブレード表面の TC6 および TC7 の熱電対温度を設定した。ただし、x 方向温度は z 方向に温度勾配があり、また試験の温度履歴に合わせて時間的に変化させるため、各時刻に対する温度プロファイルを 3 次多項式で近似し、x 方向境界面に接する内側セル（x = 0 mm と x = 1344 mm）の壁面温度を CONTROL 機能により設定した。図 3.4 に初期（t = 0 s）、最大温度到達時（t = 1238 s）および冷却時（t = 3000 s）における軸方向温度プロファイルを示す。
- 解析は初期流動場を形成させるため、初期の軸方向プロファイルを用いて 10 s 間計算を行う。次いで、加熱時については計算時間短縮のため流動計算を OFF として、温度および共晶、溶融計算のみの解析を行い、制御棒ブレード表面にて溶融が生じるまで計算を行う。その後、溶融が確認された時点より、流動計算 ON とした解析に移行し、共晶や

溶融に伴うブレード崩落挙動を解析する。

- Ar の物性値について、密度は理想気体を仮定した状態式より設定する。
- 相変化時の VOF 値更新のタイミングは相変化完了時とする。

3.3 制御棒ブレード破損試験条件：CRFCBF-03

本解析体系は前述した CFRCBF-01 と同じく、図 3.1 とした。したがって、解析体系の寸法は 44.8 mm (x) × 78.4 mm (y) × 1344 mm (z)とし、格子幅は$\Delta x = \Delta y = 0.7$ mm および$\Delta z = 1.4$ mm としたため、計算格子数は 64 (x) × 112 (y) × 960 (z) = 6,881,280 である。

CRFCBF-03 の主な解析条件を以下に示す。

- 入口から Ar+水蒸気を流入した。ここで、Ar と水蒸気の流入割合は 1:3 とし、水蒸気の流量は 50 g/min（0.0417 g/s/rod）であり、水蒸気が潤沢な条件である。流入温度は、試験結果の水蒸気の流入が開始する 87 min 時点における下部の熱電対温度（TC1）である 478.5 °C を仮定したが、その後提供された試験データによれば炉前水蒸気温度は約 136°C 前後であるため、再検討が必要である。出口は圧力流出境界とし、それ以外の境界条件は slip 条件とした。また、本解析では、Zr-水蒸気反応による酸化膜形成や水素発生、発熱が生じるものとする。
- 初期圧力は 0.1 MPa とし、初期温度は試験データより、測定された熱電対温度履歴を軸方向に設定した。ここで、本解析では図 3.5 のように、試験において水蒸気が流入される 24 min（1440 s）間およびその後の冷却期間 35 min（2100 s）の約 3500 s 間の温度履歴を対象とした。具体的には図 3.6 のように、ヒーター側チャンネルボックス表面の TC5 (1245 mm)、TC3 (958 mm)、TC2 (670 mm)および TC1 (325 mm)の熱電対温度を基に線形補間により与えた。なお、325 mm 以下の温度は TC1 の温度に設定した。ここで試験では、水蒸気の流入を開始後、t = 1440 s（24 min）経過した時点において TC5 の最高温度が 1636.6 °C に到達し、その後、ヒーターを停止して冷却する。
- 境界条件は x 方向および z 方向負側は温度一定、それ以外は断熱条件とする。ここで、x 方向温度は図 3.7 のように熱電対温度履歴による温度プロファイルを設定し、x 方向負側および正側の温度プロファイル共に、ヒーター側チャンネルボックス表面の TC5、TC3、TC2 および TC1 の熱電対温度を設定した。ただし、x 方向温度は z 方向に温度勾配があり、また試験の温度履歴に合わせて時間的に変化させるため、各時刻に対する温度プロファイルを 3 次多項式で近似し、x 方向境界面に接する内側セル（x = 0 mm と x = 1344 mm）の壁面温度を CONTROL 機能により設定した。図 3.8 に初期（t = 0 s）、最大温度到達付近（t = 1440 s）および冷却時（t = 3500 s）における軸方向温度プロファイルを示す。
- 解析は初期流動場を形成させるため、初期の軸方向プロファイルを用いて、10 s 間計算を行う。次いで、加熱時については計算時間短縮のため、流動計算および水素発生を OFF として、温度および共晶、溶融計算のみの解析を行い、燃料棒およびチャンネルボックス表面にて Zr-水蒸気反応による酸化膜が形成されるまで計算を行う。その後、酸化膜形成が確認された時点より、流動計算および水素発生を ON とした解析に移行し、酸化

膜形成に伴う水素発生や発熱、および共晶や溶融に伴うブレード崩落挙動を解析する。

- Ar、水蒸気および水素の物性値について、密度は理想気体を仮定した状態式より設定する。
- 相変化時の VOF 値更新のタイミングは相変化完了時とする。

3.4 LEISAN 試験解析結果

3.4.1 制御棒ブレード破損試験：CRFCBF-01

CRFCBF-01 のケースによる試験解析を実施した。なお、本解析は JAEA のスーパーコンピュータ SGI8600 を用いて、8 ノード（32 MPI × 12 threads = 384 PE（Processing Element））の並列計算を実行した。本解析は 3000 s 以上の長時間の計算を必要とするため、計算時間の短縮のため、以下の手順により実施した。なお、時間刻み幅の CFL 条件は当初 0.8 とし、溶融が開始した後、0.3 として解析を進めたが、CFL = 0.8 では溶質拡散の計算精度が劣化し、拡散速度が過大となることから、当初より CFL = 0.3 として解析を進めることとした。

(1) t = 0 s の温度プロファイルを用いて、初期熱流動場の解析を 10 s 間実施する。
(2) (1)の初期速度場を一定とし、流動場を解かずに温度プロファイルの時間履歴による加熱時の温度および共晶、溶融計算のみの解析を実施する。
(3) 時間進行に伴い、温度が上昇し、制御棒ブレード表面において共晶に伴う溶融が開始したら、その直前より流動場の計算を再開する。

まず、(1)の初期熱流動場の解析を 10 s 間実施した。図 3.9 に 10 s 経過後の速度ベクトルを示す。下部より流入した Ar ガスは試験体内の流路面積が広い制御棒ブレードとチャンネルボックスとの間に多く流れる速度場が形成される様子が確認できる。
次いで、(2) の流動計算を無効とし、加熱時の温度および共晶、溶融計算のみの解析を実施し、時刻 658 s まで進行させた。解析結果として、図 3.10 に上部付近の構造物温度、融点および SUS のモル分率分布の時間変化を示す。時間経過に伴い、試験体内の温度は徐々に上昇し、上部の制御棒ブレード温度は 1600 K 近傍まで到達した。ここで、温度が 1600 K を超えると、ブレード表面の SUS から中性子吸収材 B_4C への濃度拡散が生じて融点が低下し共晶反応が発生すると考えられることから、その時点より流動場計算を再開して解析を進めることとした。図 3.11 に解析が進行した時刻 1200 s までの解析結果を時系列に示す。時刻 720 s 時点より、制御棒ブレードの SUS と B_4C との間で濃度拡散が生じて融点が降下し、溶融が開始し、その後時間経過に伴って下方に溶融が拡大する様子が確認できる。 図 3.12 に時刻 1200 s 時点の構造物温度、融点、SUS モル分率分布の俯瞰図を示す。制御ブレード上部付近で溶融が進行している様子が確認できる。図 3.13 に 1200 s 時点までの制御棒ブレード溶融挙動の進展を示す。制御棒ブレードの中心方向に向かう SUS と B_4C の境界面で溶融に伴う亀裂が拡大する様子が確認できる。

3.4.2　制御棒ブレード破損試験：CRFCBF-03

CRFCBF-03 のケースによる試験解析を実施した。なお、本解析は JAEA のスーパーコンピュータ SGI8600 を用いて、8 ノード（32 MPI × 12 threads = 384 PE）の並列計算を実行した。本解析は 3000 s 以上の長時間の計算を必要とするため、計算時間の短縮のため、以下の手順により実施した。

(1) t = 0 s の温度プロファイルを用いて、初期熱流動場の解析を 10 s 間実施する。
(2) (1)の初期速度場を一定とし、流動場を解かずに温度プロファイルの時間履歴による加熱時の温度および共晶、溶融計算のみの解析を実施する。
(3) 時間進行に伴い、温度が上昇し、燃料棒やチャンネルボックス表面において、Zr-水蒸気反応に伴う酸化膜形成が開始したら、その直前より流動場の計算および酸化に伴う水素発生を開始する。

まず、(1)の初期熱流動場の解析を 10 s 間実施した。図 3.14 に 10 s 経過後の速度ベクトルを示す。下部より流入した Ar ガスおよび水蒸気は試験体内の流路面積が広い、制御棒ブレードとチャンネルボックスとの間に多く流れ込み、軸方向に正の温度勾配が形成されているため、温度上昇と共に流速は上部付近で約 6 m/s まで加速する様子が確認できる。

次いで、本解析における全体の傾向を確認するため、(1) の熱流動場を固定（流動計算を無効）して、加熱時の温度および共晶、溶融計算、さらには燃料棒およびチャンネルボックス表面における Zr-水蒸気の酸化反応を考慮した解析について、時刻 3500 s まで実施した。ここで、本解析で用いる Zr-水蒸気の酸化反応モデルでは温度 1100°C 以上から酸化が開始する。また、計算を加速させるため、CFL 条件を 100（最大速度 6 m/s）として、時間刻み幅を約 0.05 s に設定した。解析結果として、図 3.15 に上部付近の構造物温度、融点および酸化膜分布の時間変化を示す。時間経過に伴い、試験体内の温度は徐々に上昇し、時刻 900 s を経過して上部の制御棒ブレード温度は約 1600 K を超えると、SUS-B_4C 間の共晶によって融点が降下し溶融が開始した。一方、燃料棒やチャンネルボックスの Zr 表面温度は 1100°C を超えると水蒸気との酸化が発生し、酸化膜が形成される様子が確認できる。時刻 1440 s 以降にヒーターが停止した後も燃料棒は酸化反応熱によって温度は約 2000 K まで上昇し、酸化膜形成は継続した。

以上により、本解析における一連の傾向が確認されたため、加熱による温度上昇中の時刻 620 s 時点より、流動計算を有効とし、また、水素発生を考慮した解析を実施した。ここで、CFL 条件は 2 として、時間刻み幅は 0.0001 s に設定した。現時点において本解析は時刻 680 s まで進行した。解析結果として、図 3.16 に上部付近の構造物温度、水素モル分率および酸化膜厚分布の時間変化を示す。時刻 630 s 時点において、チャンネルボックスの境界付近の温度が 1100°C を超えると、酸化膜の形成と共に水素が発生し、時間経過に伴い、その範囲が周辺に拡大する様子が確認できる。図 3.17 は t = 900 s における図 3.16 の俯瞰図である。図 3.18 は流動 OFF、CFL = 100 の場合の上部付近の構造物温度、融点および酸化膜厚分布の時間変化を示す。図 3.19 は流動 ON、CFL = 0.8 の場合の上部付近の構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚分布である。図 3.20 に時刻 740 s 時点における構造物温度、水素モル分率、酸化膜厚および酸

化反応熱分布の俯瞰図を示す。水素発生は下部入口から上部出口にかけて分布している様子が確認できる。

4. 結論

本報告では、BWR における SA 初期に制御棒ブレードの劣化・溶融が先行して発生し、その開始時期や溶融物の移行・閉塞挙動が後続の炉心損傷進展を強く規定するという課題認識に基づき、炉心内部の溶融物移行挙動を機構論的に予測することを目的として開発された多相多成分詳細熱流動解析コード JUPITER の、制御棒溶融挙動解析への適用性を確認した。具体的には、LEISAN 試験装置による制御棒ブレード破損試験（CRFCBF）を対象に、水蒸気枯渇条件（Ar 雰囲気：CRFCBF-01）および水蒸気潤沢条件（Ar+水蒸気：CRFCBF-03）の 2 ケースについて解析を実施し、実験結果との比較を行った。

水蒸気枯渇条件（CRFCBF-01）の解析では、加熱に伴う温度上昇により制御棒ブレードの SUS と B_4C の界面近傍で成分拡散が進行し、共晶反応による融点降下を通じて溶融が開始する過程が得られた。さらに、溶融の発生・拡大が上部から下方へ進展し、亀裂の拡大を伴いながらブレード損傷が進むという劣化進展挙動が確認され、SA 初期に制御棒が先行溶融するという現象を機構論的に取り扱える見通しを得た。

一方、水蒸気潤沢条件（CRFCBF-03）の解析では、燃料棒およびチャンネルボックス表面における Zr-水蒸気反応により酸化膜が形成され、水素発生および酸化反応熱に伴う温度上昇が生じることが確認された。これにより、雰囲気中の水蒸気供給が構造材表面の酸化状態を変化させ、結果として制御棒・周辺構造物の破損様相に差異をもたらすという、試験で示唆される特徴を解析的に表現できることが分かった。

以上より、JUPITER は、制御棒ブレードの共晶反応に起因する溶融開始から損傷進展に至る主要過程に加え、水蒸気酸化（酸化膜形成・水素発生・反応熱）を含む連成現象を統合的に扱うことで、水蒸気酸化の有無によって異なる制御棒破損の様相を概ね再現できることが確認された。これにより、JUPITER は SA 初期の制御棒溶融挙動評価に対して適用できる見通しを得た。

一方で JUPITER の過酷事故時の溶融挙動解析に対する適用性については 2 つの課題があることが分かった。一つは、試験体の加熱による熱変形である。この変形により試験体内部の流路形状が変化し、さらには流路の閉塞が生じることで、試験体の破損挙動にも影響を及ぼす。しかし、JUPITER は流体解析コードであるため構造的な熱変形を取り扱うことができない。そのため、流体挙動のみについては妥当な解析結果が得られる一方で、熱変形を伴う複雑な流動挙動を再現できない点が課題である。もう一つは、水蒸気酸化反応を考慮した場合、局所的に温度が非物理的に高温となる場合があり、温度計算の安定性に問題があることである。

これらの課題に対して、熱変形については構造解析コードとの連成解析により対応することが考えられる。また、温度計算の不安定性については、JUPITER に導入されている水蒸気酸化反応モデルの改良が有効な対処方法となり得る。以上の対策を講じることにより、JUPITER による解析結果は実験結果をより忠実に再現できるようになることが期待される。

謝　辞

本研究における解析結果は、日本原子力研究開発機構のスーパーコンピュータ HPE SGI8600 を用いて得られたものである。ここに記して、計算資源の提供および運用支援にご協力いただいた関係各位に謝意を表する。

参考文献

1) Yamashita, S. et al., A numerical simulation method for molten material behavior in nuclear reactors, Nucl. Eng. Des., vol. 322, 2017, pp. 301-312.
2) Pshenichnikov, A. et al., Features of a Control Blade Degradation Observed In Situ during Severe Accidents in Boiling Water Reactors, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 56, issue 5, 2019, pp. 440-453.
3) Pshenichnikov, A. et al., On the degradation progression of a BWR control blade under high-temperature steam-starved conditions, Mech. Eng. J., vol. 7, no. 3, 2020, pp. 1-10.
4) Pshenichnikov, A. et al., Ten years of Fukushima Dai-Ichi post-accident research on the degradation phenomenology of the BWR core components, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 59, no. 3, 2022.
5) Shibata, H. et al., Control Blade Degradation Test under Temperature Gradient in Steam Atmosphere, Top Fuel 2016, Boise, ID, Sep. 11-15, 2016.

付録

本報告書で述べた 2 種類の解析（水蒸気枯渇条件および水蒸気潤沢条件）の入力ファイルを、付録として CD-ROM に収録した。CD-ROM には以下の構成で入力ファイルが格納されている。

[入力ファイル]

|_____[Steam starved]：水蒸気枯渇条件の入力ファイル

|_____[Steam rich]：水蒸気潤沢条件の入力ファイル

|_____[STL]：チャンネルボックス、燃料棒、制御棒の形状データ（STL 形式）

表 2.1　LEISAN 試験の種類

試験 ID	目的	試験概要	試験体	実施年度
CP-1	制御棒ブレード破損挙動の確認	試験体をヒーターで加熱し溶融	制御棒ブレード	2014
CRFCB	酸化膜の厚みによる融解挙動の変化の確認	酸化膜の厚みを変えた試験体を用意し、ヒーターで加熱し溶融	制御棒ブレード+チャンネルボックス	2014
CRFCBF	水蒸気+Ar 環境での制御棒ブレード等の破損挙動の確認	水蒸気+Ar ガスの流入条件を変化させ、試験体をヒーターで加熱し溶融	制御棒ブレード+チャンネルボックス+燃料棒	2014 ～ 2016
CLADS-MADE	1F 事故発生時の制御棒ブレード等の破損挙動の確認	福島第一での事故のシナリオに沿ってガスの流入条件を設定	制御棒ブレード+チャンネルボックス+燃料棒	2017 ～ 2021
CMMR	炉心構造材の溶融および移行挙動の確認	燃料集合体を模擬した試験体を加熱し溶融	制御棒ブレード+チャンネルボックス+燃料棒	2016 ～ 2019

表 2.2　制御棒ブレード破損試験の概要 [4)]

ID	Sample	Gas	Rate [K/s]	Max temp. [K]	Features
CRFCBF-01	1 Blade 2 Channel boxes 20 Claddings	Ar	≒2	1936	● Preoxidation < 1 μm ● Channel boxes melted through ● Zr-Fe and Fe-B eutectics ● Zr-Fe-B melt blockage formed and small amount reached the bottom
CRFCBF-02	1 Blade 2 Channel boxes 20 Claddings	Ar	≒2	1818	● Preoxidation < 1 μm ● Channel boxes melted through ● Zr-Fe and Fe-B eutectics ● Zr-Fe-B melt blockage formed and small amount reached the bottom
CRFCBF-03	1 Blade 2 Channel boxes 20 Claddings	Ar Steam	≒2	1907	● Preoxidation < 1 μm ● Channel boxes melted through ● Zr-Fe and Fe-B eutectics ● Zr-Fe-B melt stuck in a blockage
CRFCBF-04	1 Blade 2 Channel boxes 20 Claddings	Ar Steam	≒2	1910	● Preoxidation < 1 μm ● Channel boxes melted through ● Zr-Fe and Fe-B eutectics

表 2.3　制御棒ブレード破損試験（CRFCBF）条件 [5)]

試験 ID	雰囲気	水蒸気流量 [g/s/rod]	水蒸気流量 [g/min]	Ar 流量 [g/min]	温度上昇率 [K/s]	温度勾配 [K/m]	最高温度 [K]
CRFCBF-01	Ar	—	—	?	0.6	852	1936
CRFCBF-02	Ar	—	—	?	1.0	878	1818
CRFCBF-03	Ar+水蒸気	0.0417	50	16.667	1.0	807	1907
CRFCBF-04	Ar+水蒸気	0.0125	15	15	1.0	758	1910

表 3.1　LEISAN 試験解析に用いた制御棒ブレード破損試験（CRFCBF）条件 [5)]

試験 ID	雰囲気	水蒸気流量 [g/s/rod]	水蒸気流量 [g/min]	Ar 流量 [g/min]	温度上昇率 [K/s]	温度勾配 [K/m]	最高温度 [K]
CRFCBF-01	Ar	—	—	20	0.6	852	1936
CRFCBF-02	Ar	—	—	20	1.0	878	1818
CRFCBF-03	Ar+水蒸気	0.0417	50	16.667	1.0	807	1907
CRFCBF-04	Ar+水蒸気	0.0125	15	15	1.0	758	1900

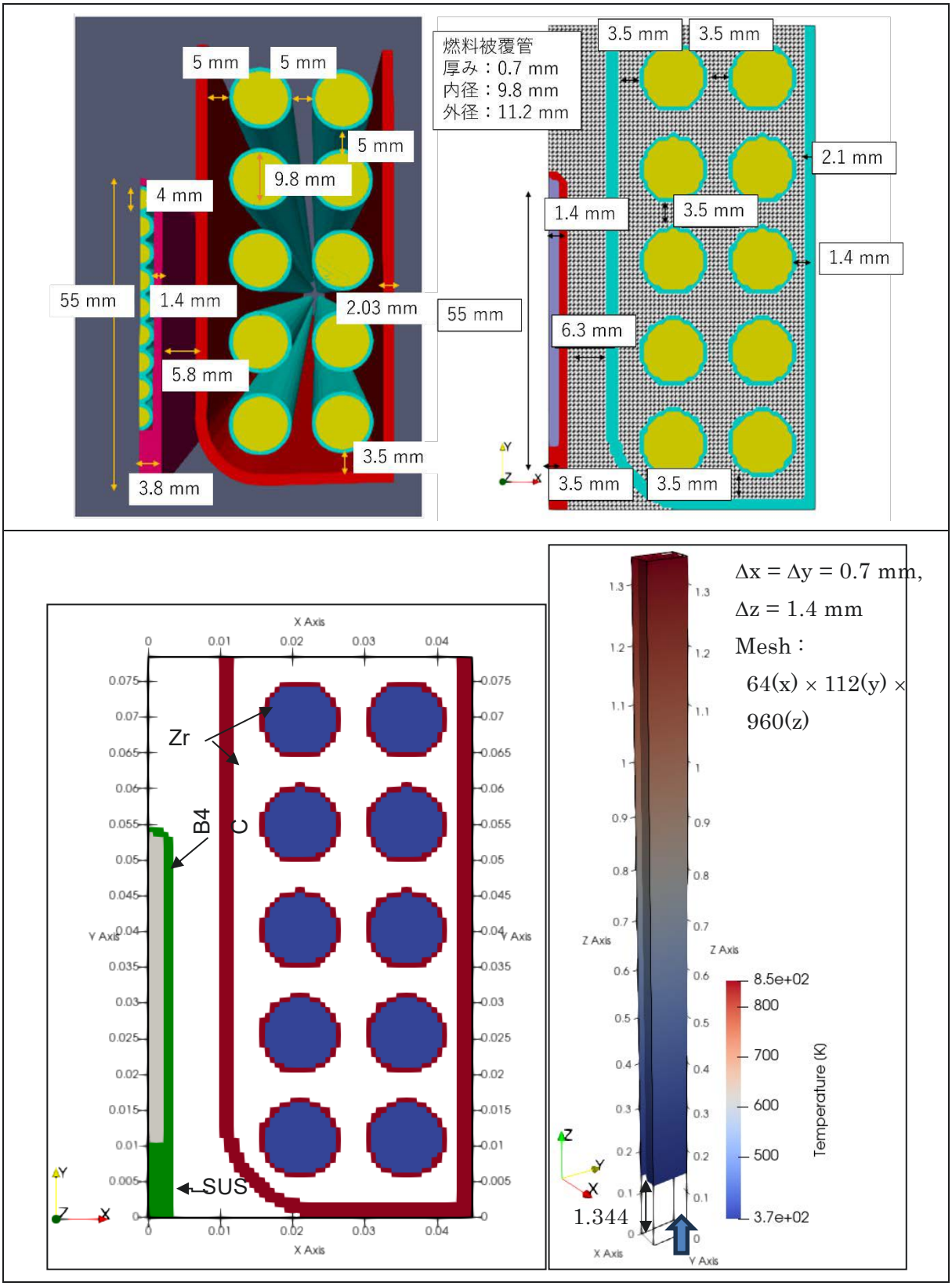

図 3.1　制御棒ブレード破損試験解析体系（CRFCBF）

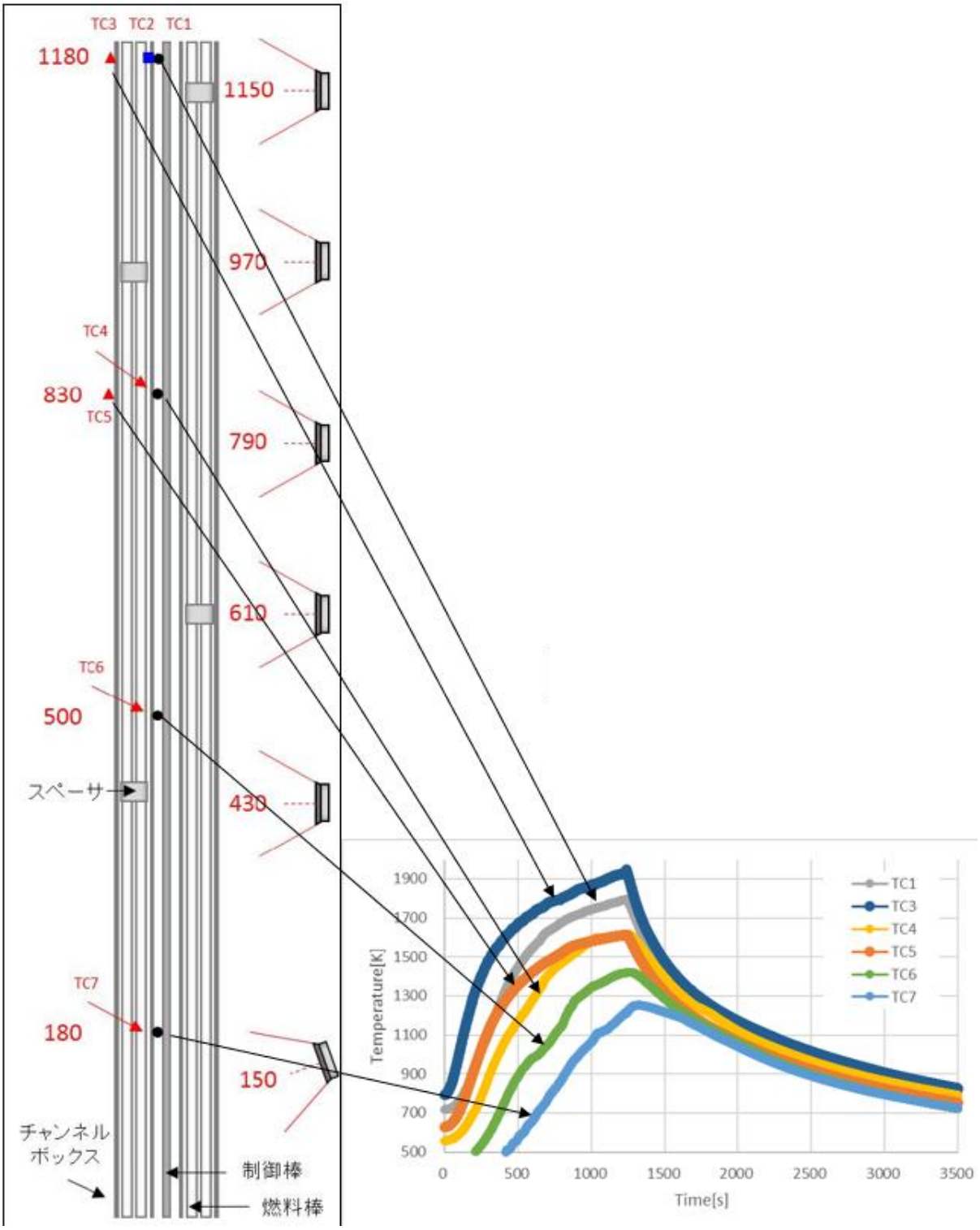

図 3.2　制御棒ブレード破損試験解析に用いた熱電対温度履歴（CRFCBF-01）

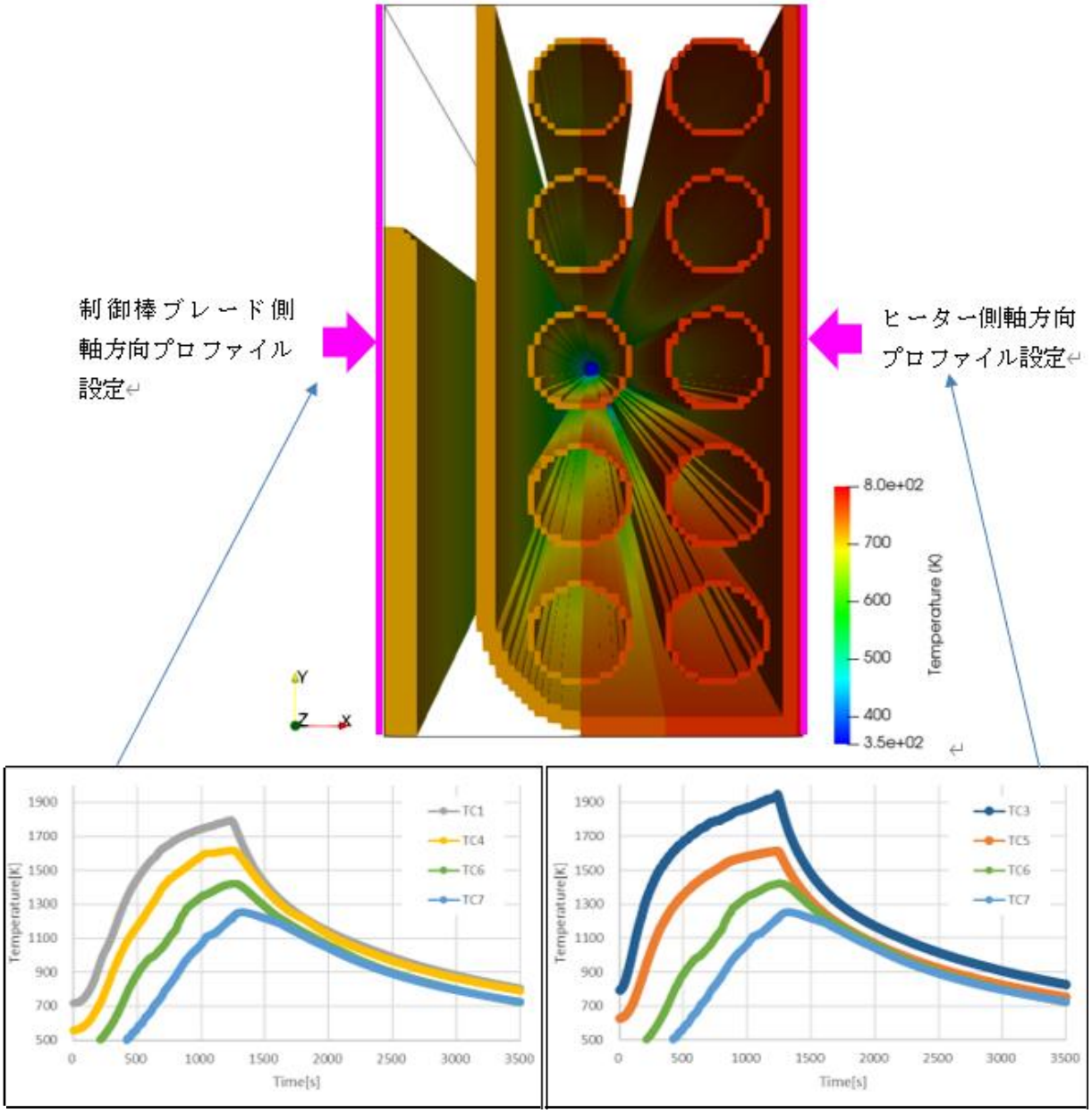

図 3.3　制御棒ブレード破損試験解析に用いた壁温設定条件（CRFCBF-01）

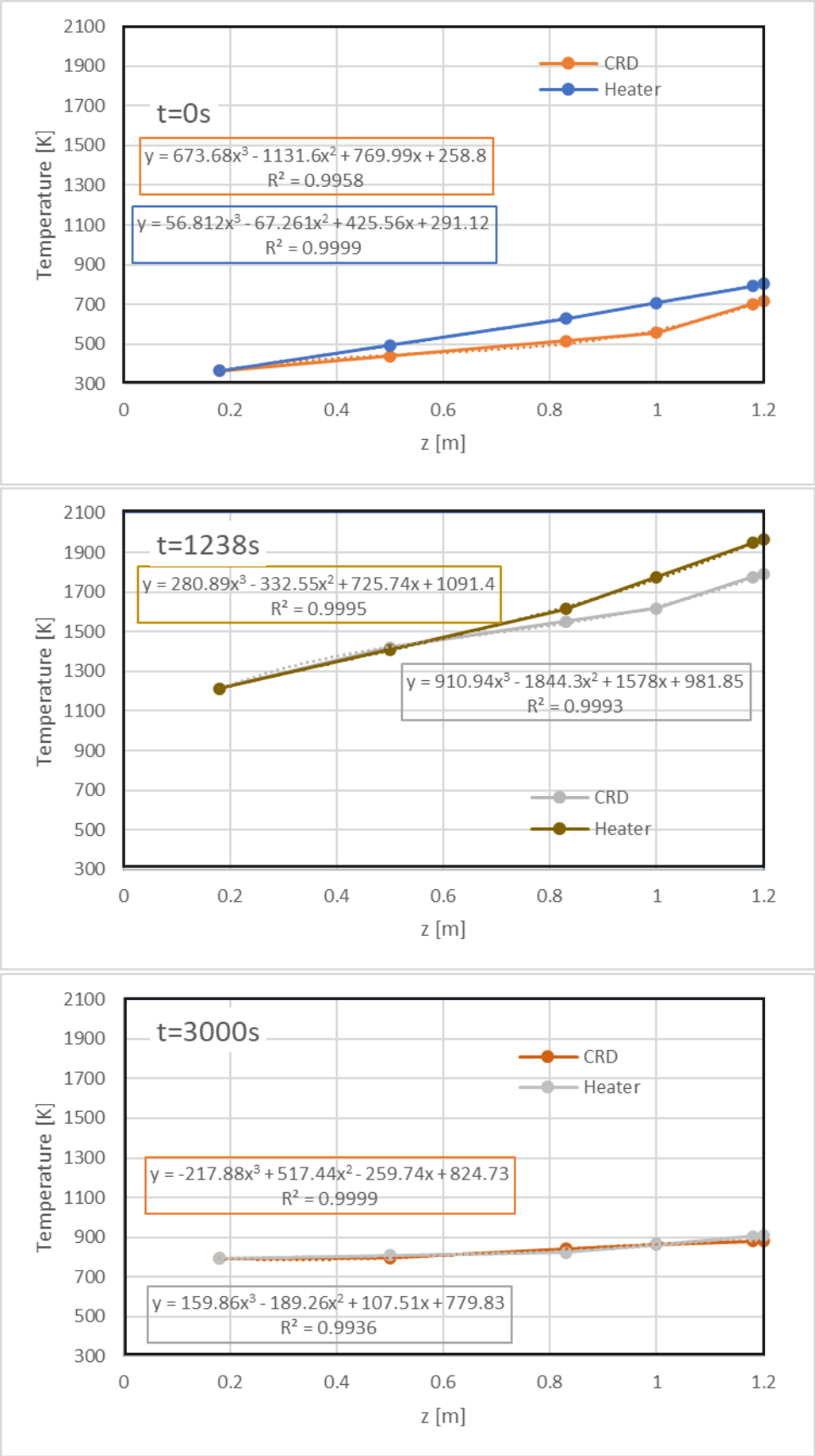

図 3.4　制御棒ブレード破損試験解析に用いた代表時刻における壁温軸方向プロファイル（CRFCBF-01）

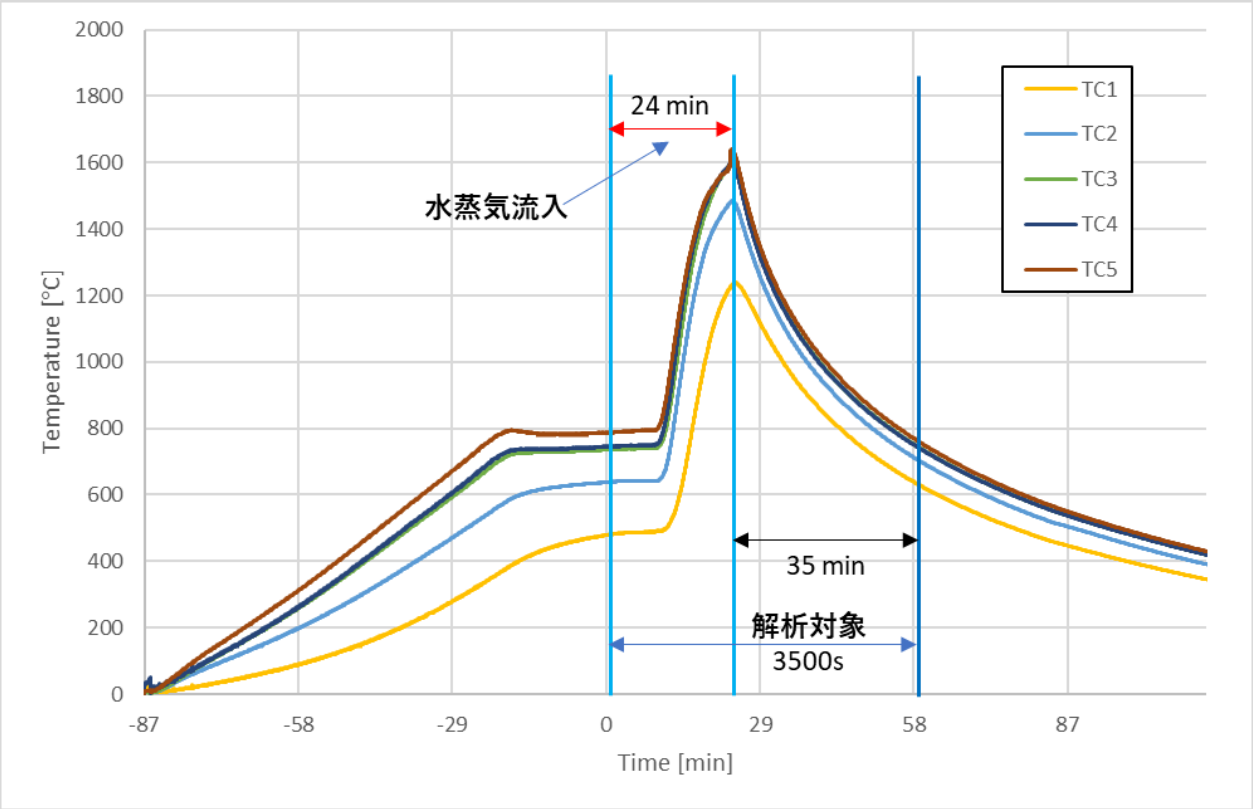

図 3.5　制御棒ブレード破損試験解析に用いた解析対象範囲（CRFCBF-03）

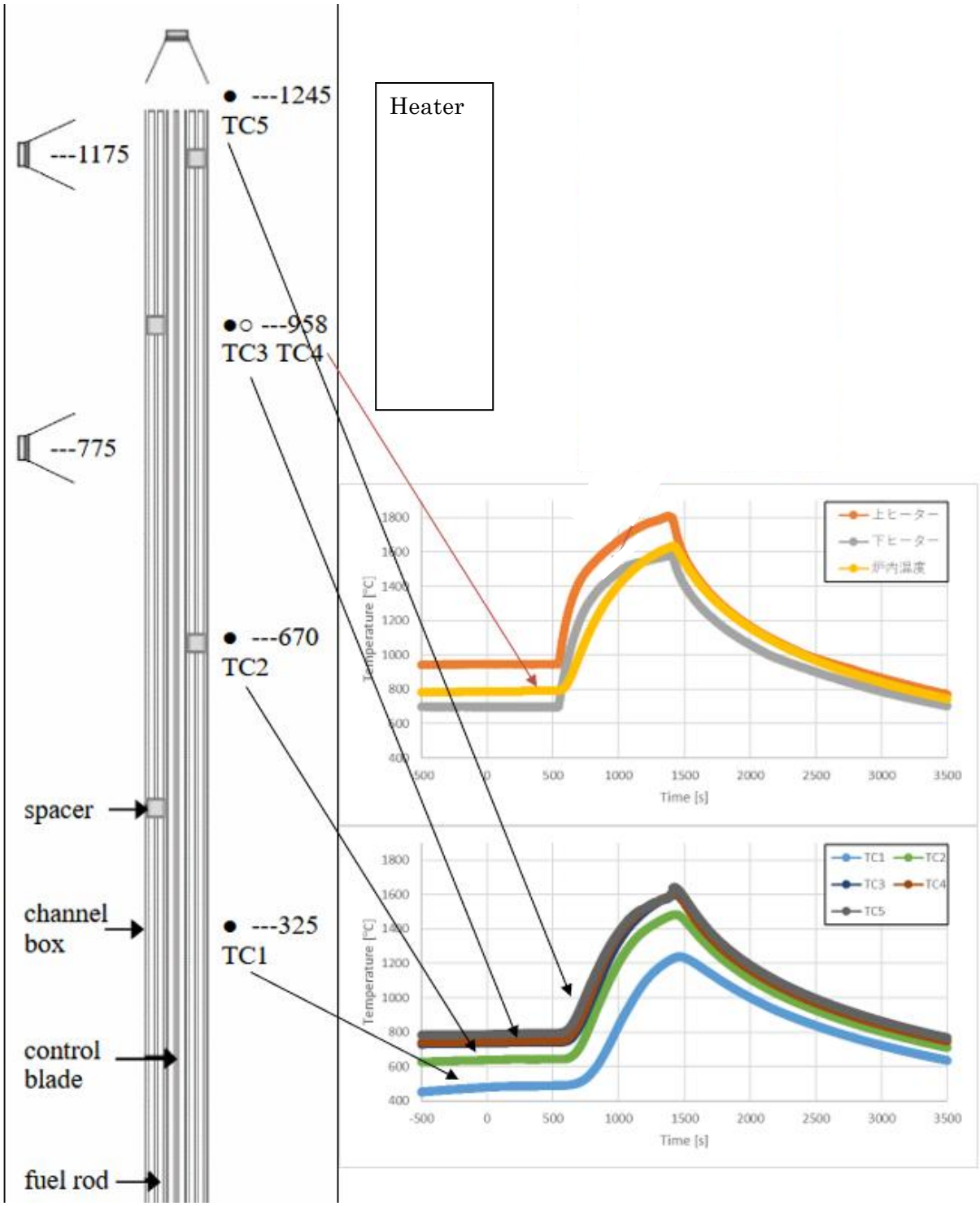

図 3.6　制御棒ブレード破損試験解析に用いた熱電対温度履歴（CRFCBF-03）

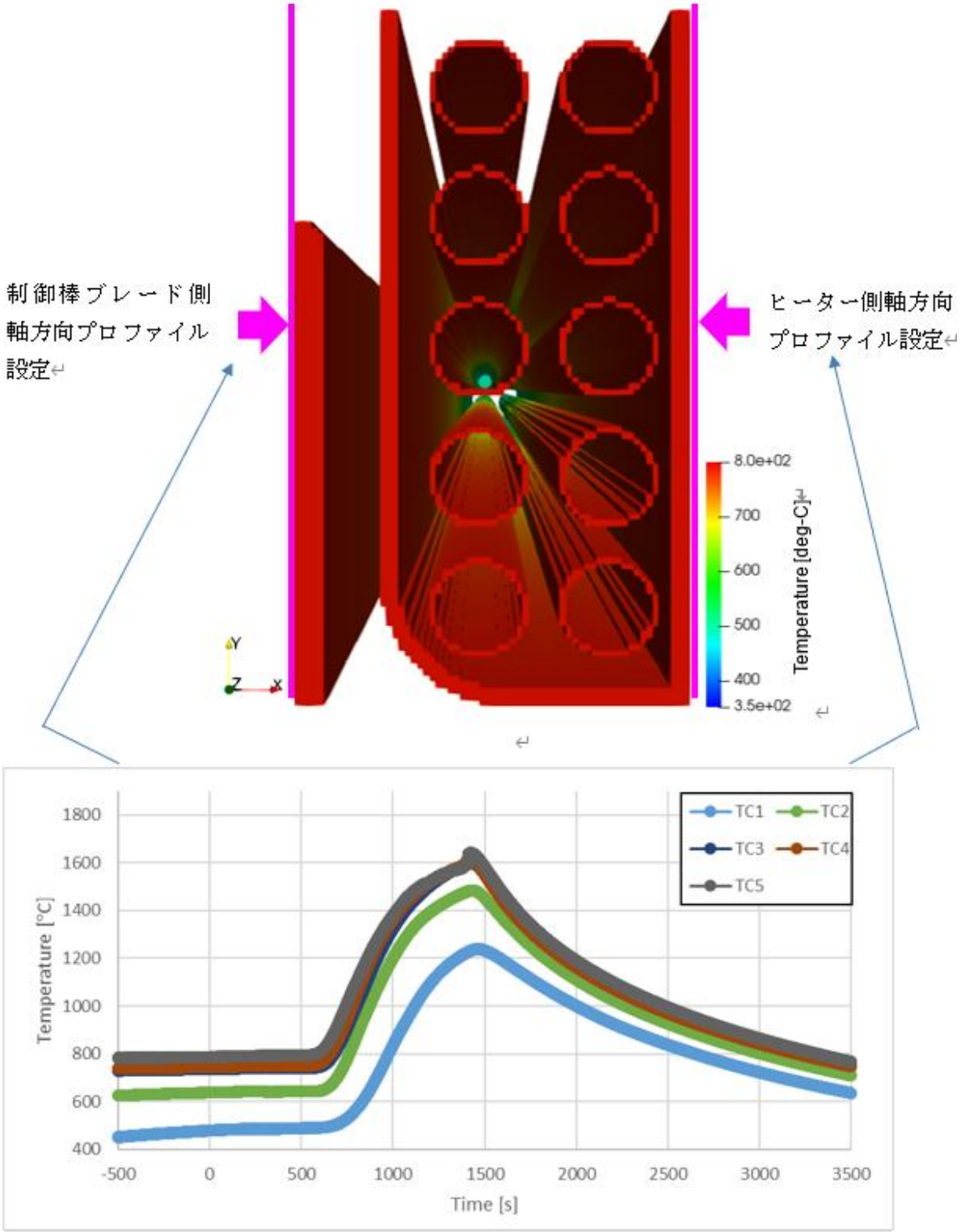

図 3.7　制御棒ブレード破損試験解析に用いた壁温設定条件（CRFCBF-03）

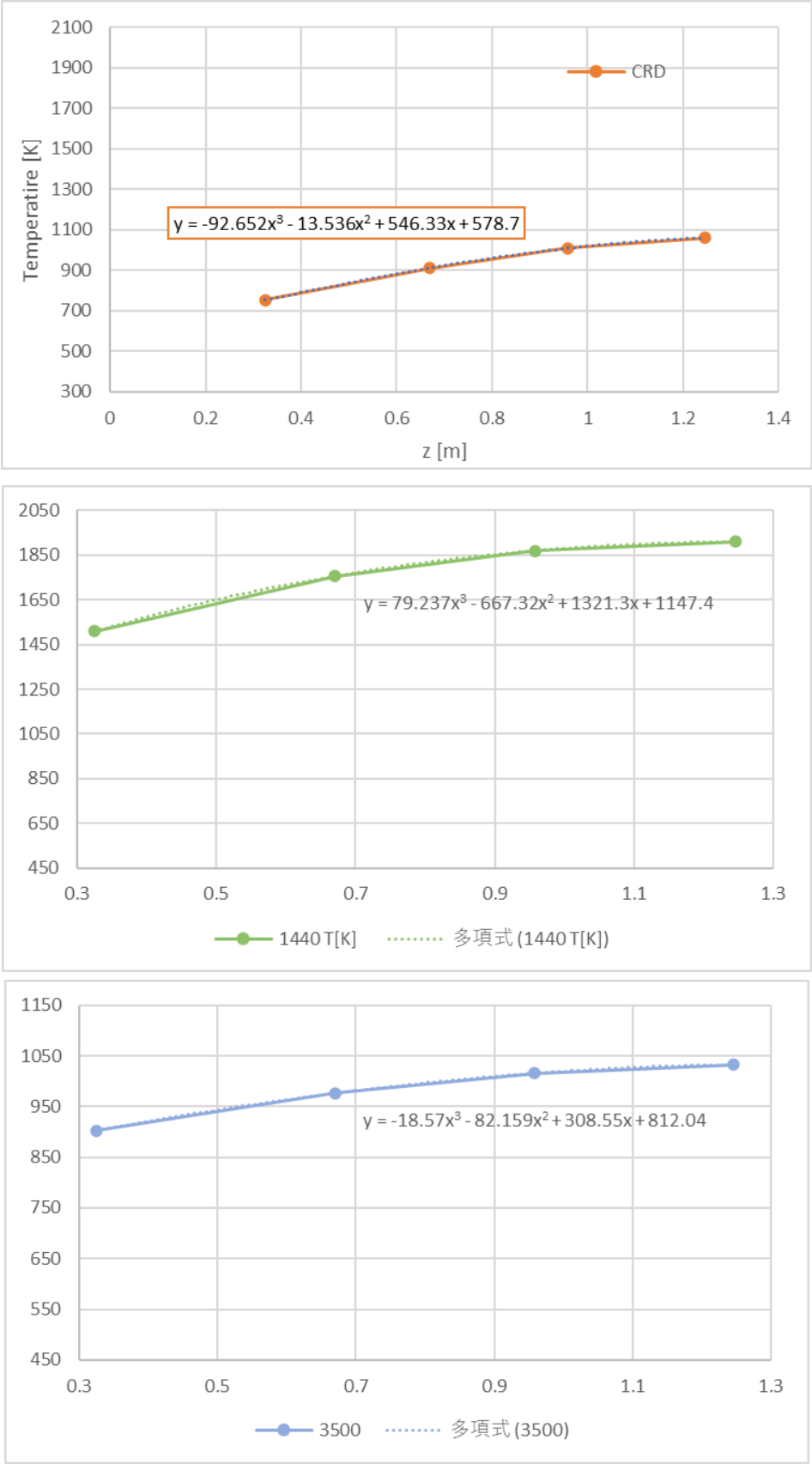

図 3.8　制御棒ブレード破損試験解析に用いた代表時刻における壁温軸方向プロファイル（CRFCBF-03）

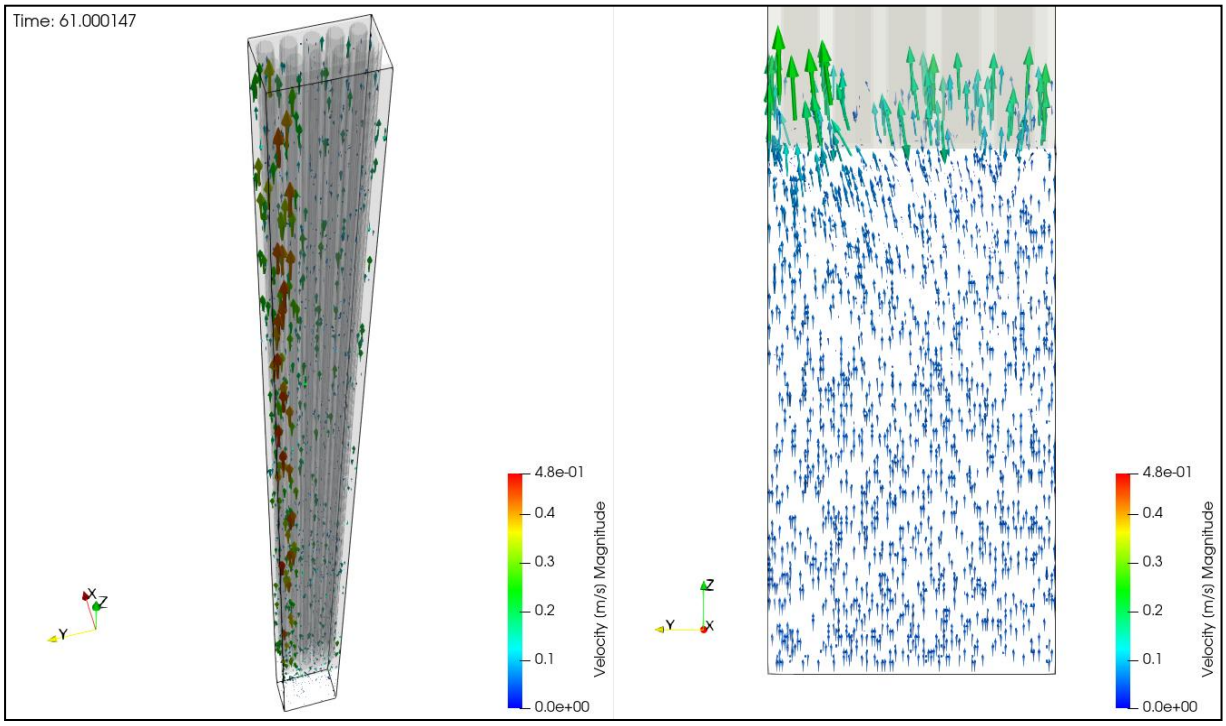

図 3.9　制御棒ブレード破損試験解析による初期熱流動場解析結果：速度ベクトル図（CRFCBF-01）

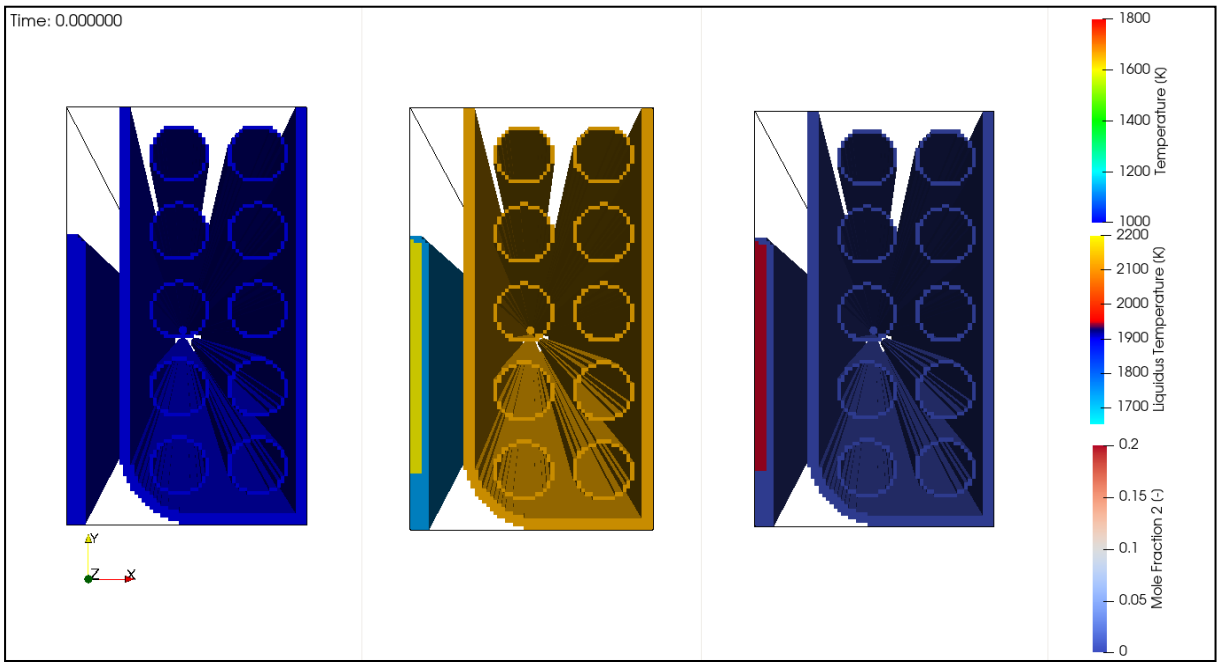

図 3.10　制御棒ブレード破損試験解析結果:上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布（CRFCBF-01、流動 OFF、CFL = 0.3）（1/4）、 t = 0 s

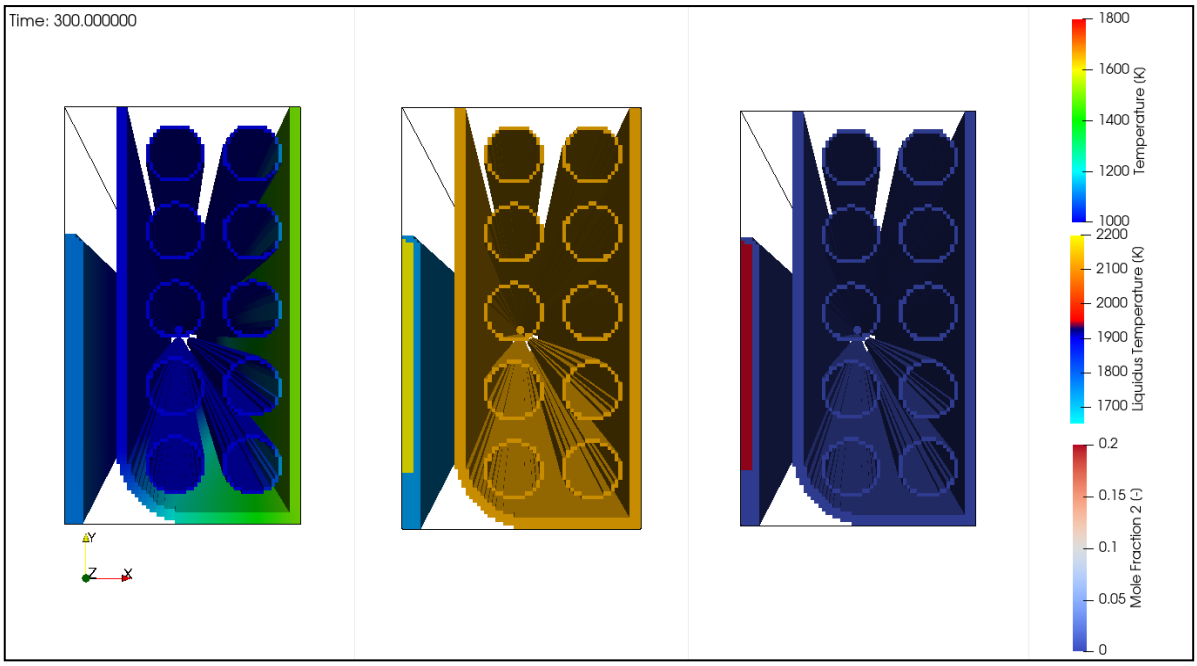

図 3.10　制御棒ブレード破損試験解析結果:上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布（CRFCBF-01、流動 OFF、CFL=0.3）（2/4)、t = 300 s

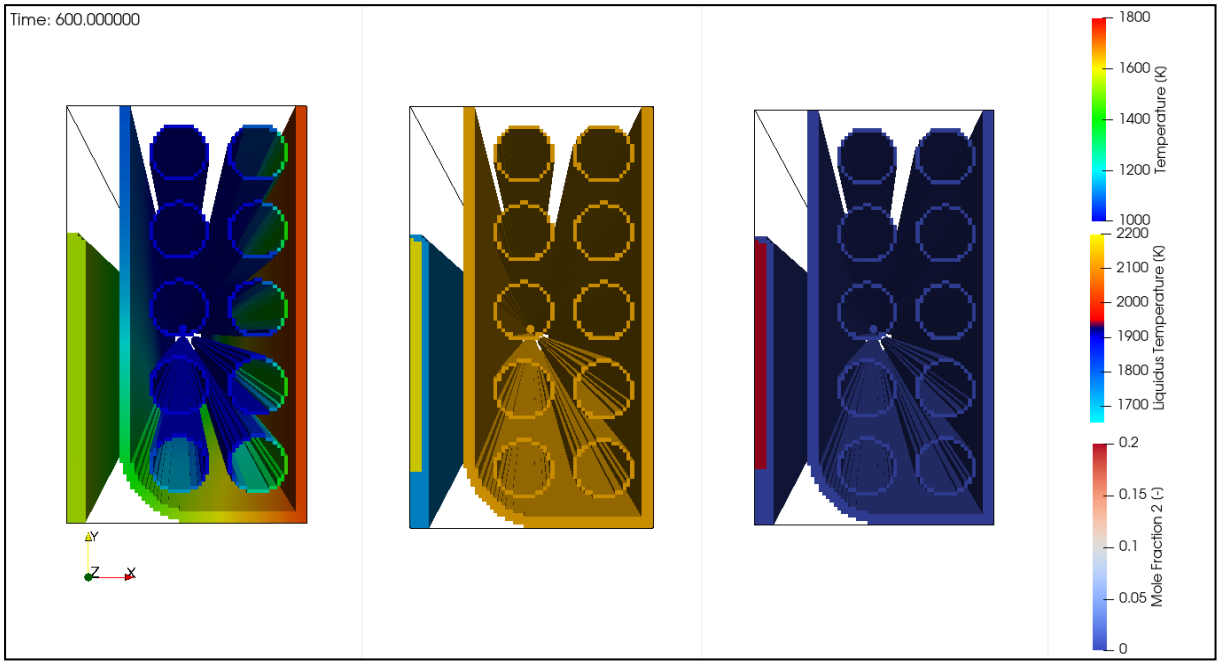

図 3.10　制御棒ブレード破損試験解析結果:上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布（CRFCBF-01、流動 OFF、CFL = 0.3）（3/4)、 t = 600 s

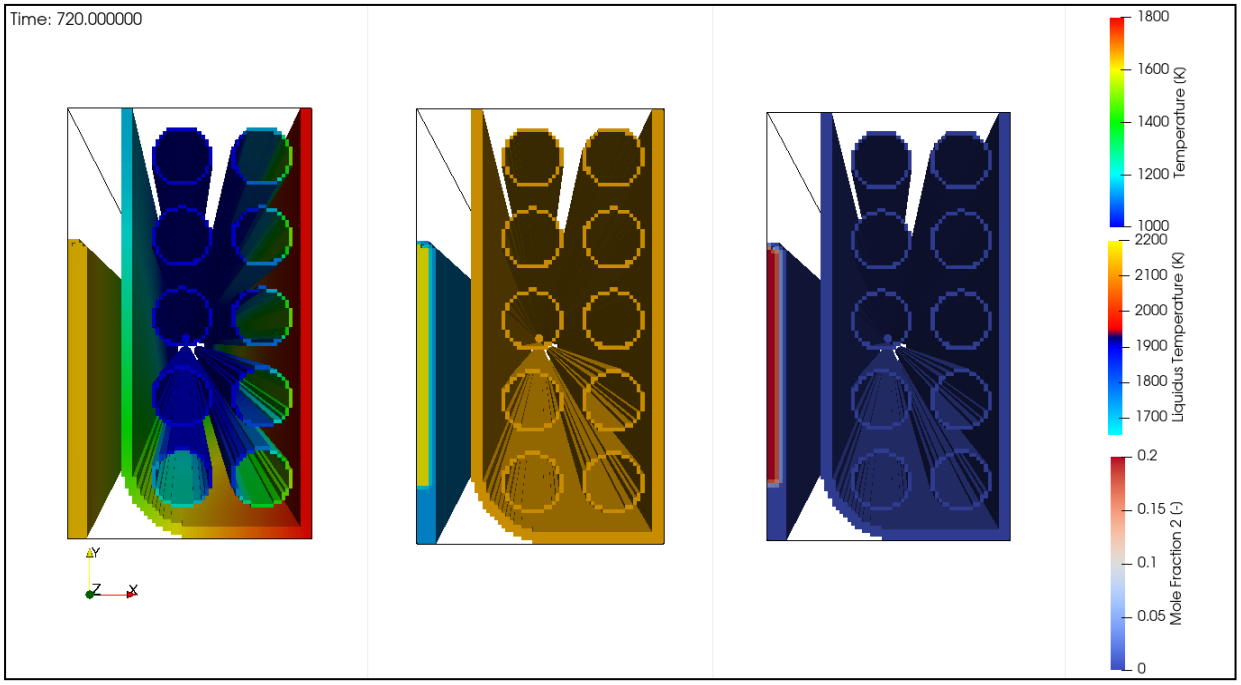

図 3.10　制御棒ブレード破損試験解析結果:上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布
（CRFCBF-01、流動 OFF、CFL = 0.3）（4/4）、t = 720 s
※制御棒ブレード SUS-B_4C 間における共晶により融点降下し、溶融開始

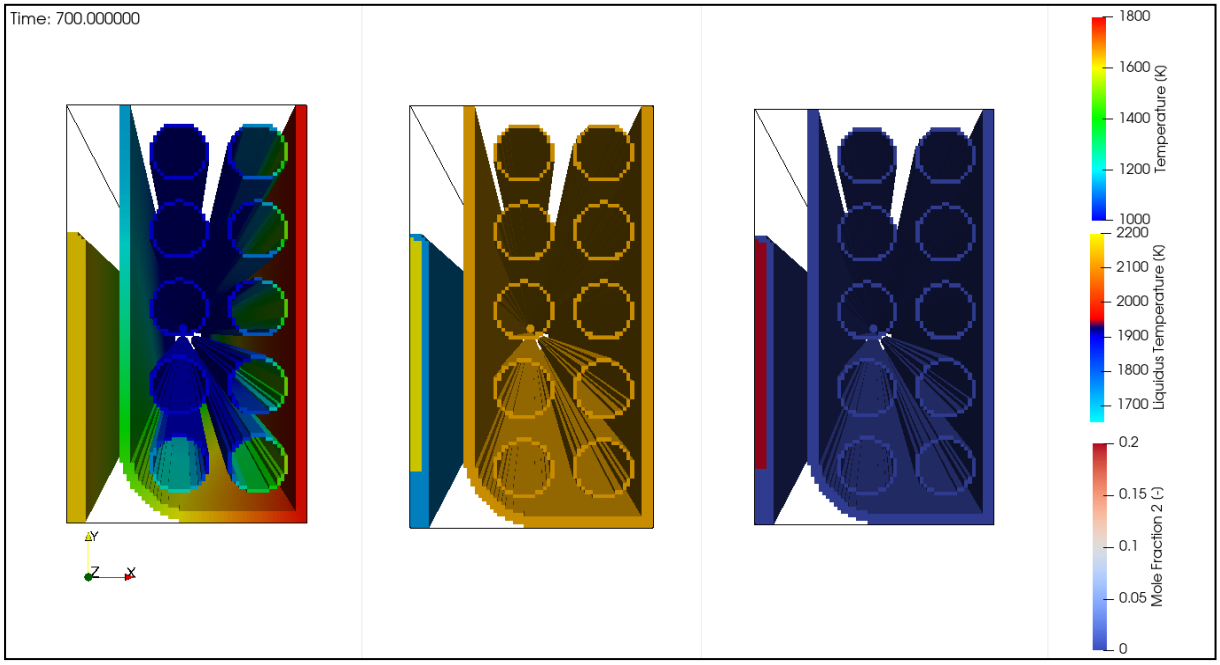

図 3.11　制御棒ブレード破損試験解析結果:上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布
（CRFCBF-01、流動 ON、CFL = 0.3）（1/8）、t = 700 s
※t = 658 s より、流動 ON

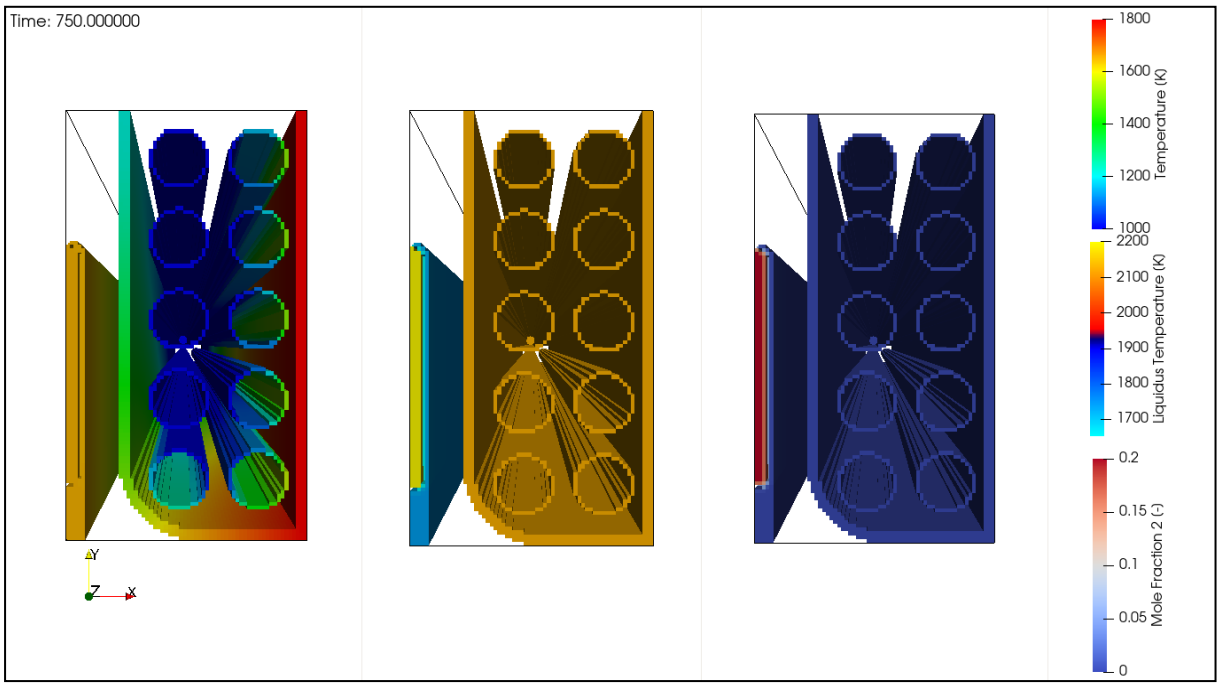

図 3.11　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布（CRFCBF-01、流動 ON、CFL = 0.3）（2/8）、t = 750 s

※制御棒ブレード SUS-B_4C 間における共晶により融点降下し、溶融拡大

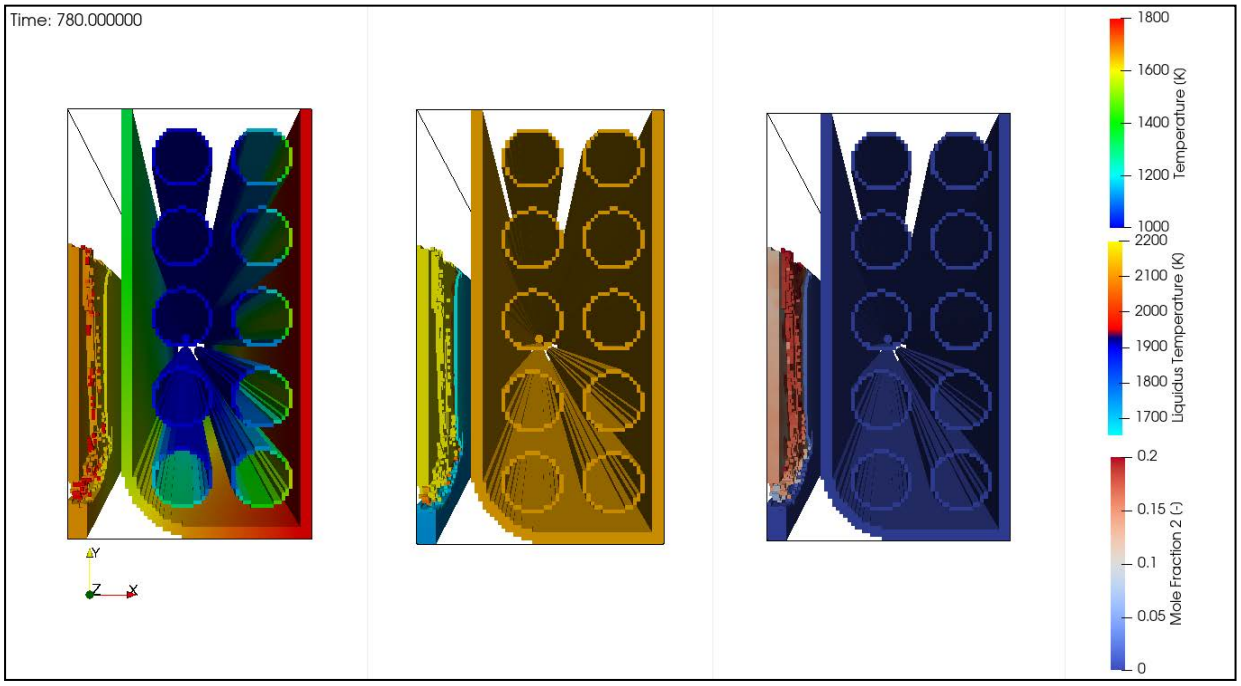

図 3.11　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布（CRFCBF-01、流動 ON、CFL = 0.3）（3/8）、t = 780 s

※制御棒ブレード SUS-B_4C 間における共晶により融点降下し、溶融進行

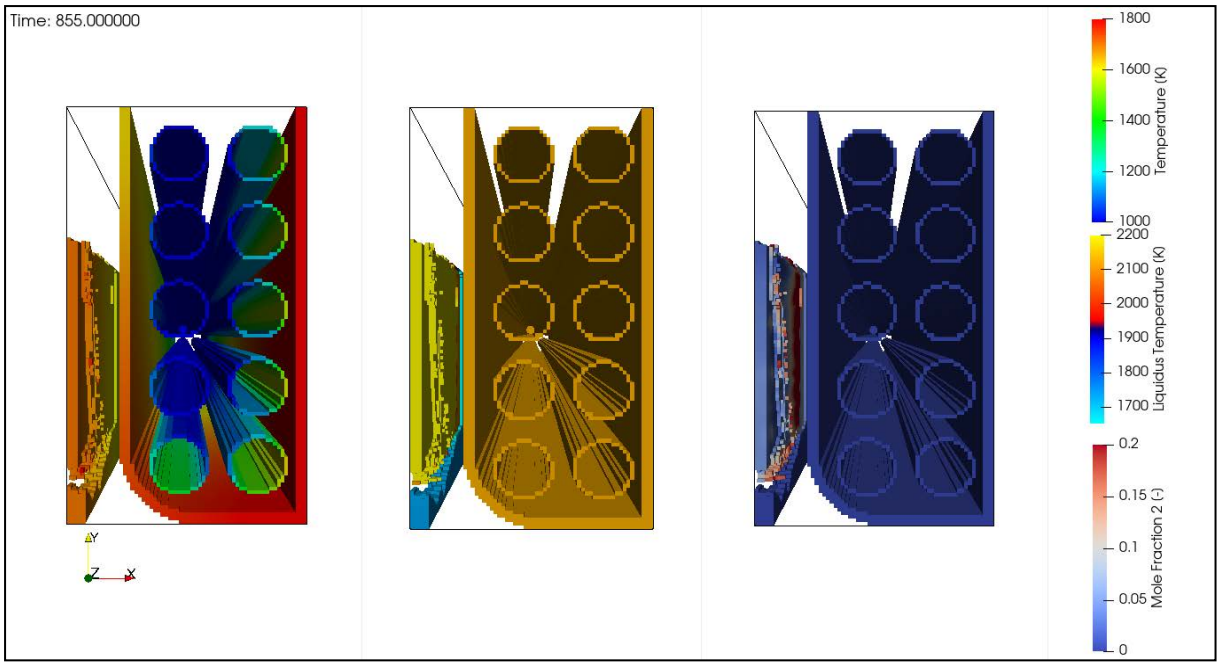

図 3.11　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布（CRFCBF-01、流動 ON、CFL = 0.3）（4/8)、t = 855 s

※制御棒ブレード SUS-B_4C 間における共晶により融点降下し、溶融が下方に拡大

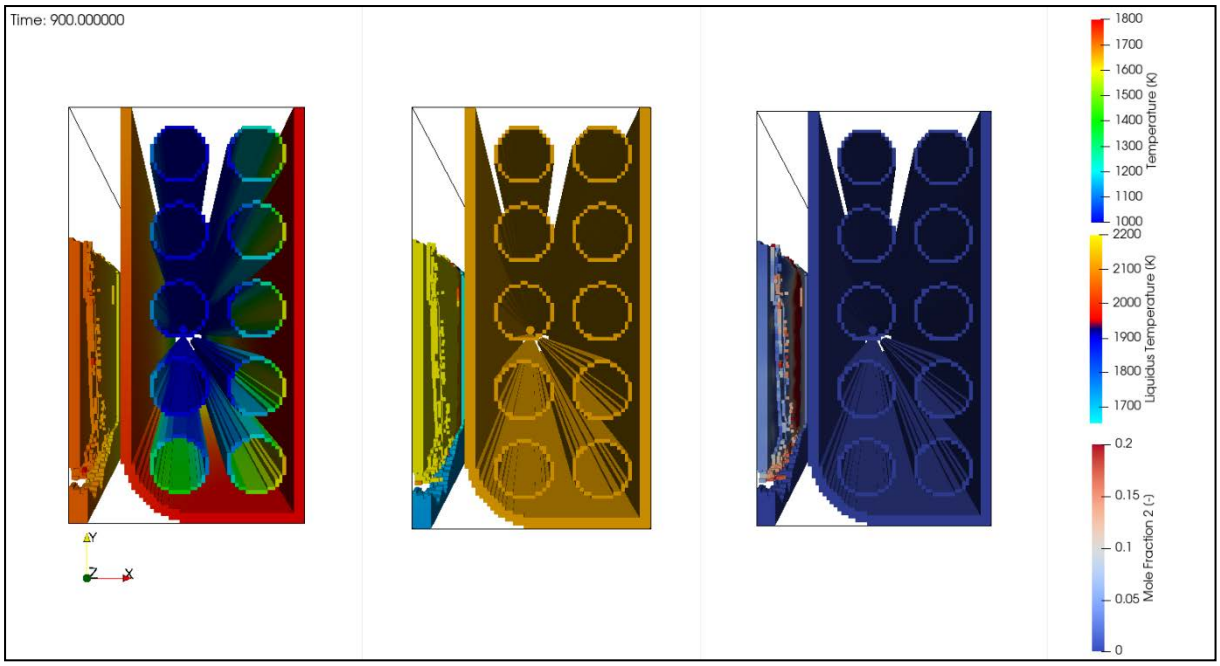

図 3.11　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布（CRFCBF-01、流動 ON、CFL = 0.3）（5/8)、t = 900 s

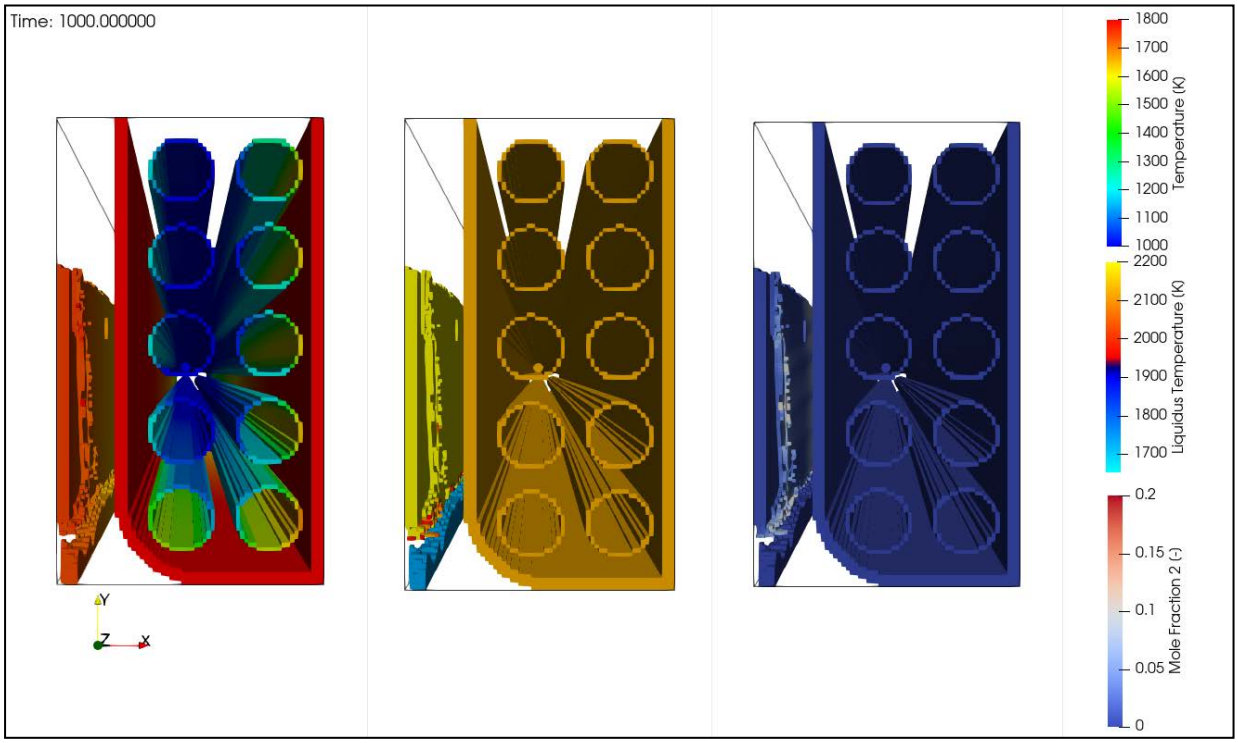

図 3.11　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布（CRFCBF-01、流動 ON、CFL = 0.3）（6/8）、t = 1000 s

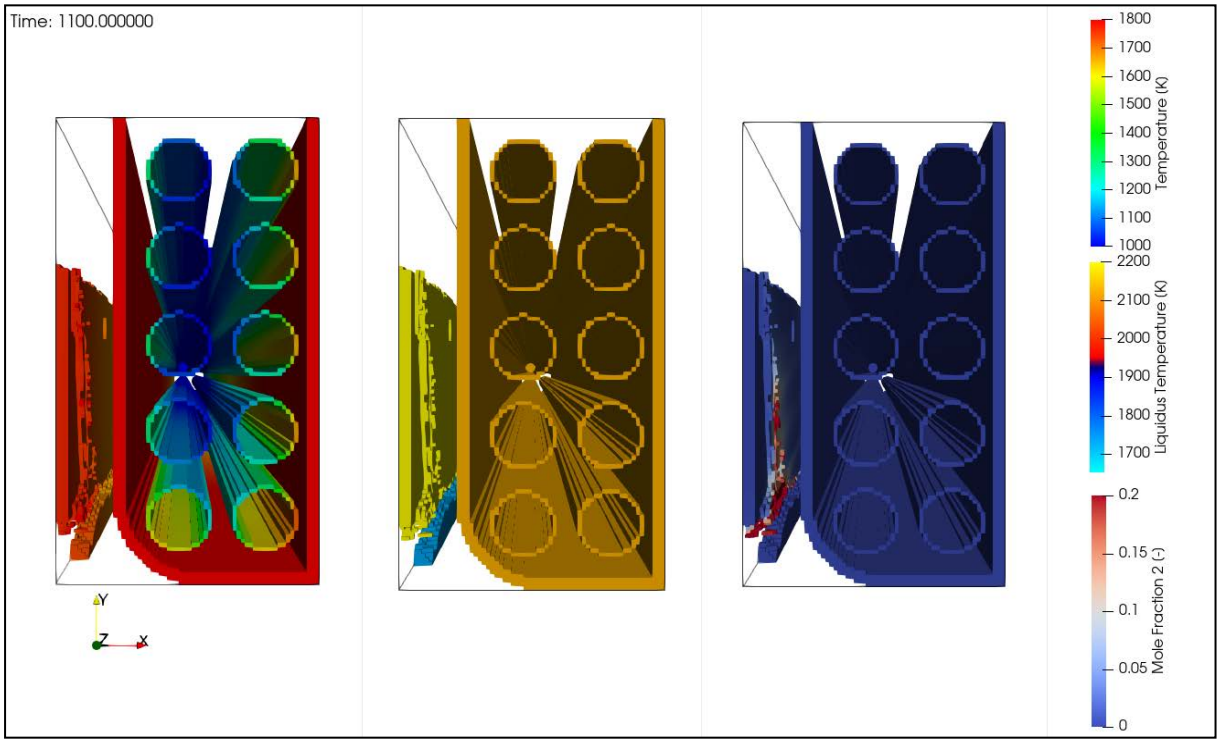

図 3.11　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布（CRFCBF-01、流動 ON、CFL = 0.3）（7/8）、t = 1100 s

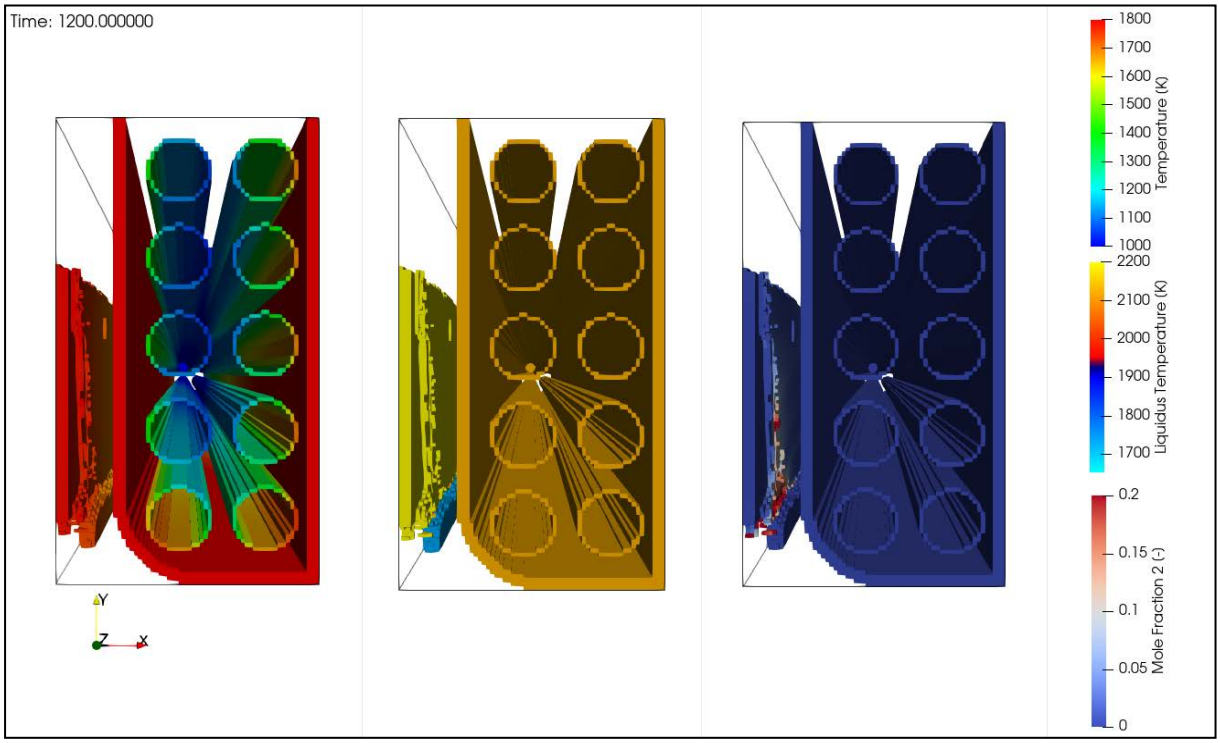

図 3.11　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、B_4C モル分率分布（CRFCBF-01、流動 ON、CFL = 0.3）（8/8）、t = 1200 s

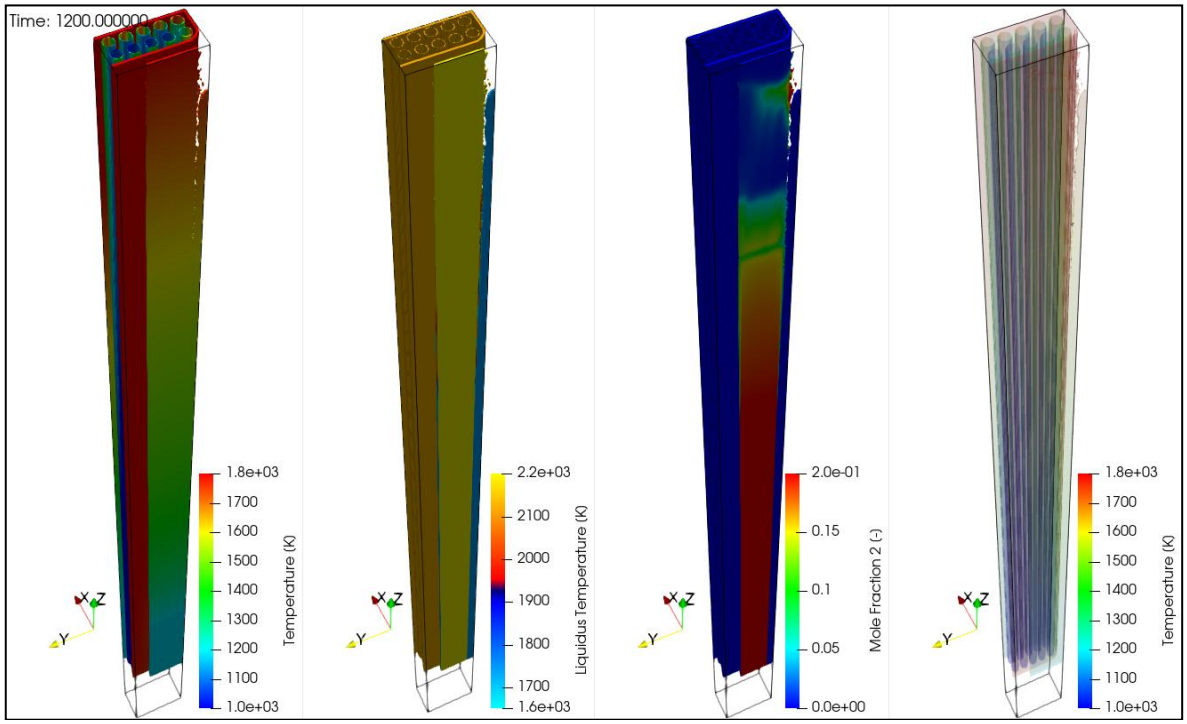

図 3.12　制御棒ブレード破損試験解析結果：構造物温度、融点、B_4C モル分率分布の俯瞰図（CRFCBF-01、流動 ON、CFL = 0.3）、 t = 1200 s

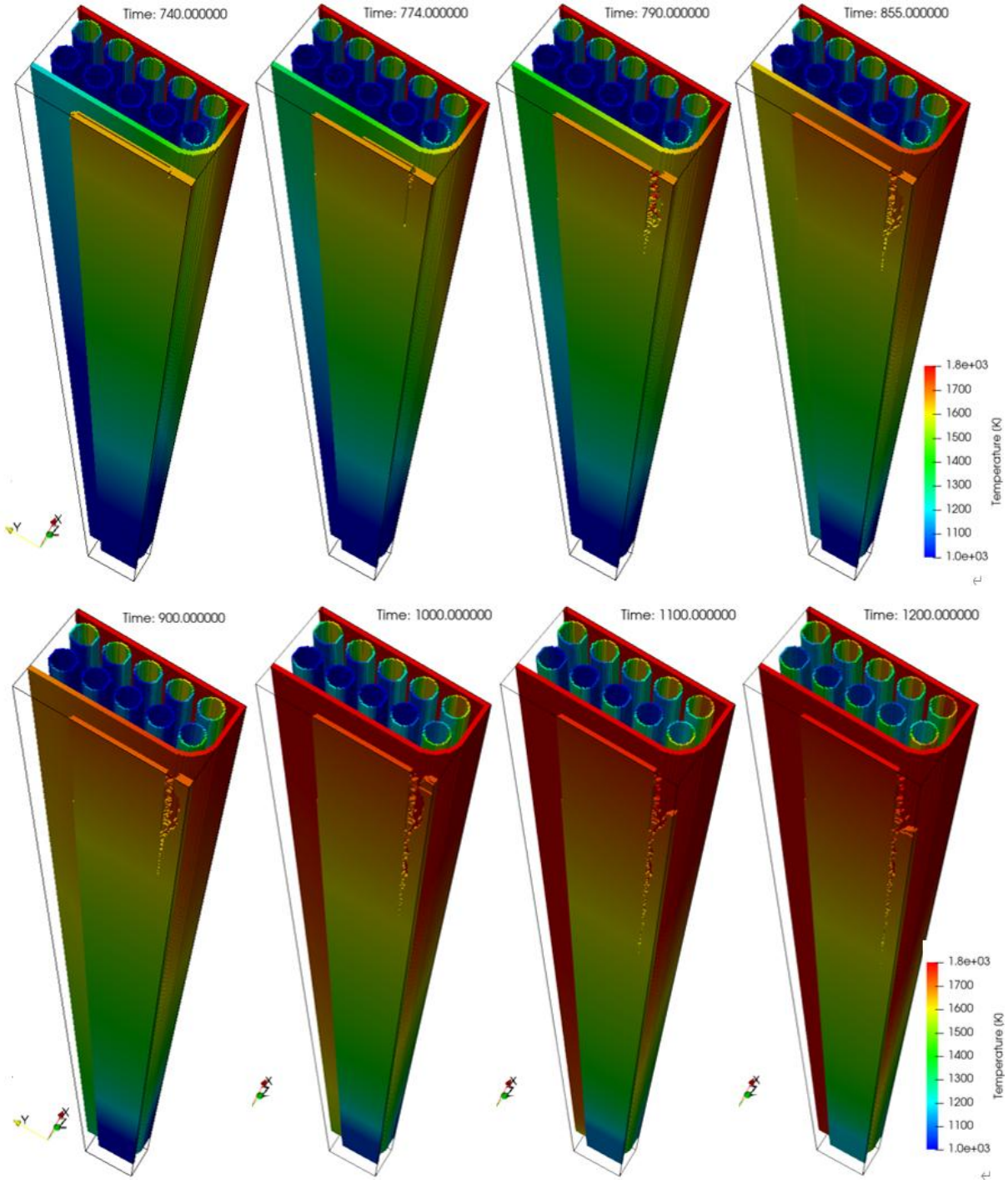

図 3.13　制御棒ブレード破損試験解析結果：制御棒ブレード溶融挙動の進展（CRFCBF-01、流動 ON、CFL = 0.3）

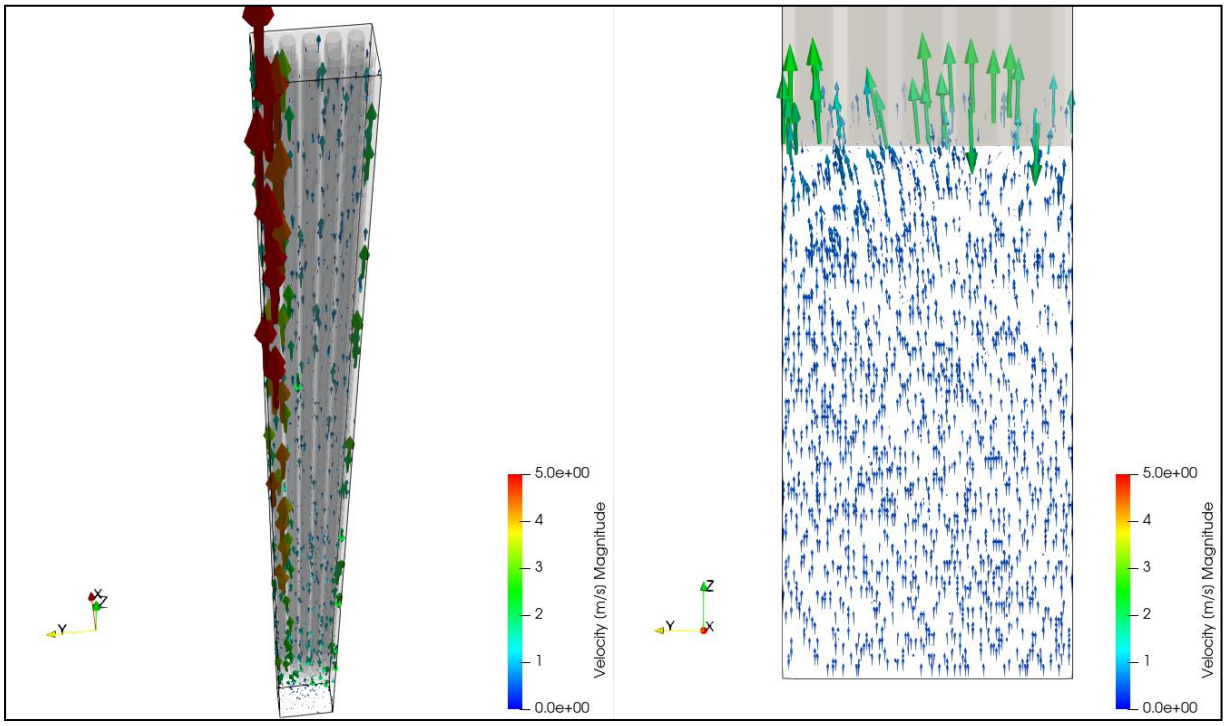

図 3.14　制御棒ブレード破損試験解析による初期熱流動場解析結果：速度ベクトル図（CRFCBF-03）

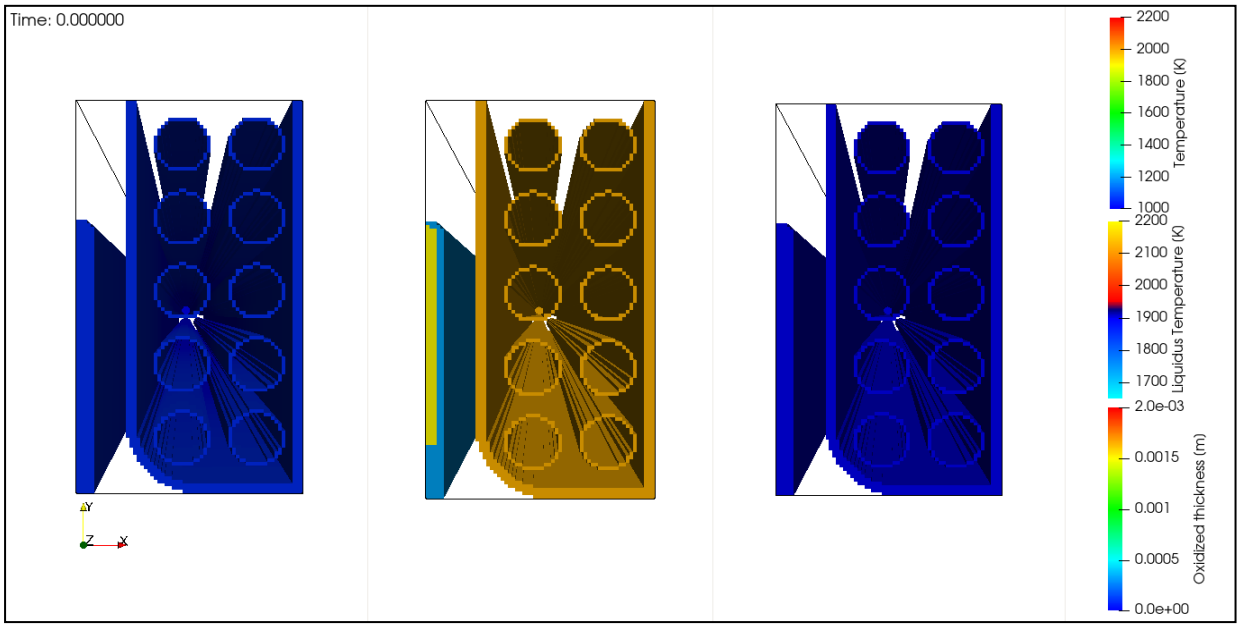

図 3.15　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、流動 OFF、CFL = 100）(1/5)、t = 0 s

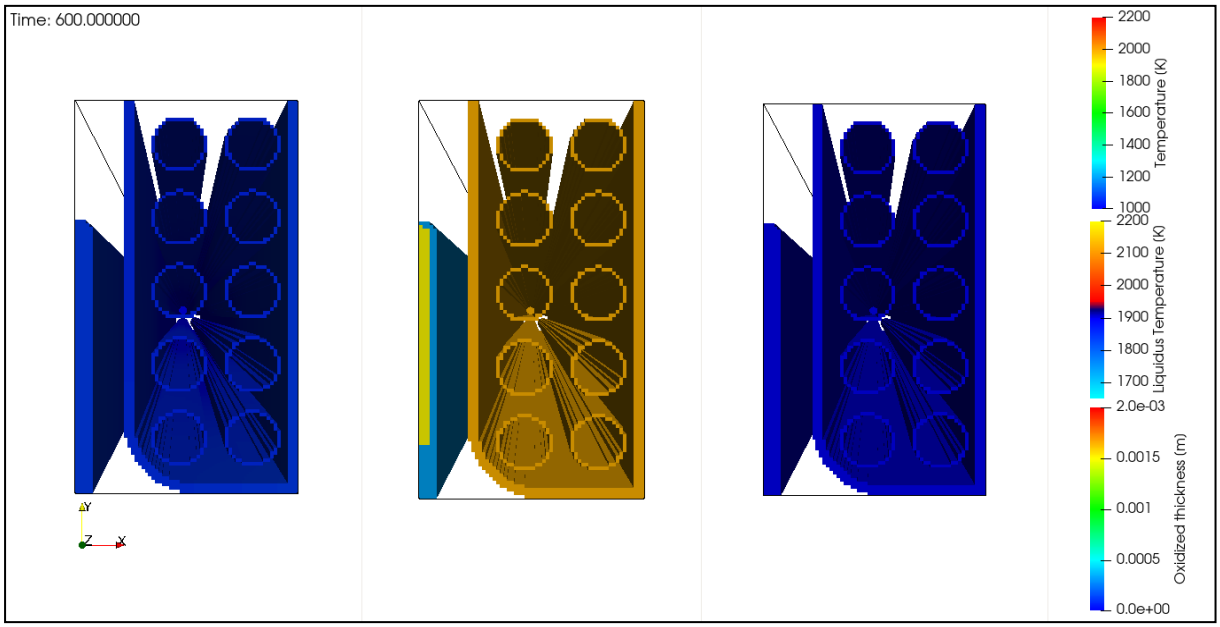

図 3.15　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、流動 OFF、CFL = 100）（2/5)、t = 600 s

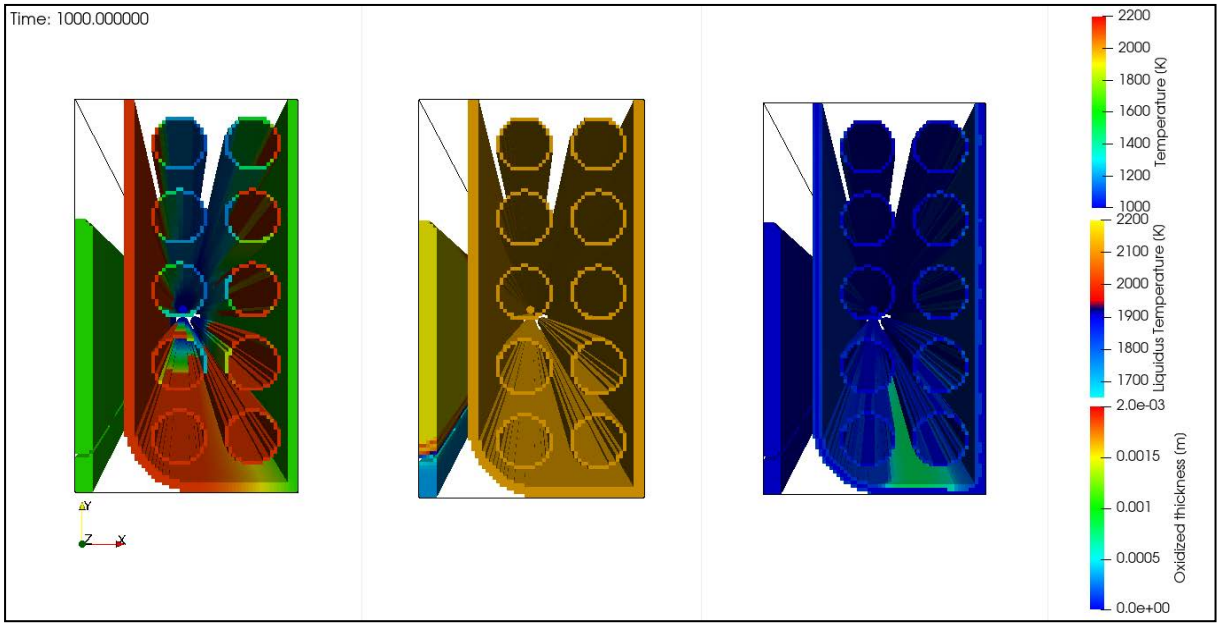

図 3.15　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、流動 OFF、CFL = 100）（3/5)、 t = 1000 s

※約 t=900s より燃料棒およびチャンネルボックス表面上に酸化膜形成し、反応熱により温度上昇．また、制御棒ブレードにおいて共晶に伴い溶融が生じる．

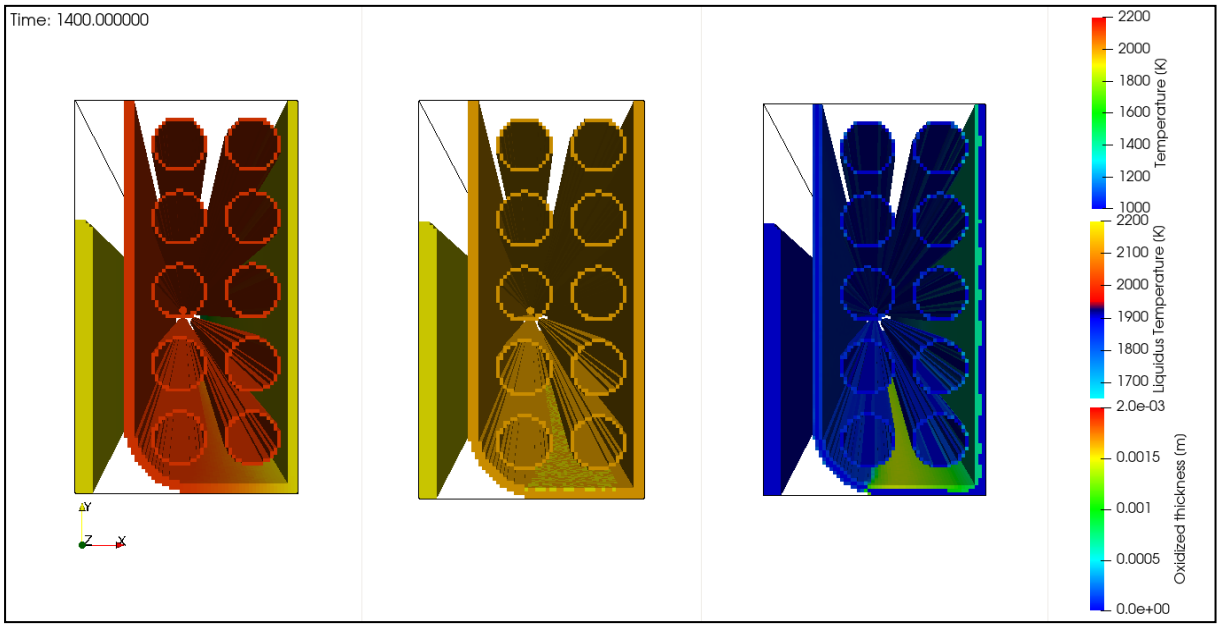

図 3.15　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、流動 OFF、CFL = 100）（4/5）、 t = 1400 s

※加熱温度がピークを迎える．Zr-水蒸気反応により、チャンネルボックスに酸化 Zr が形成され、融点が上昇.

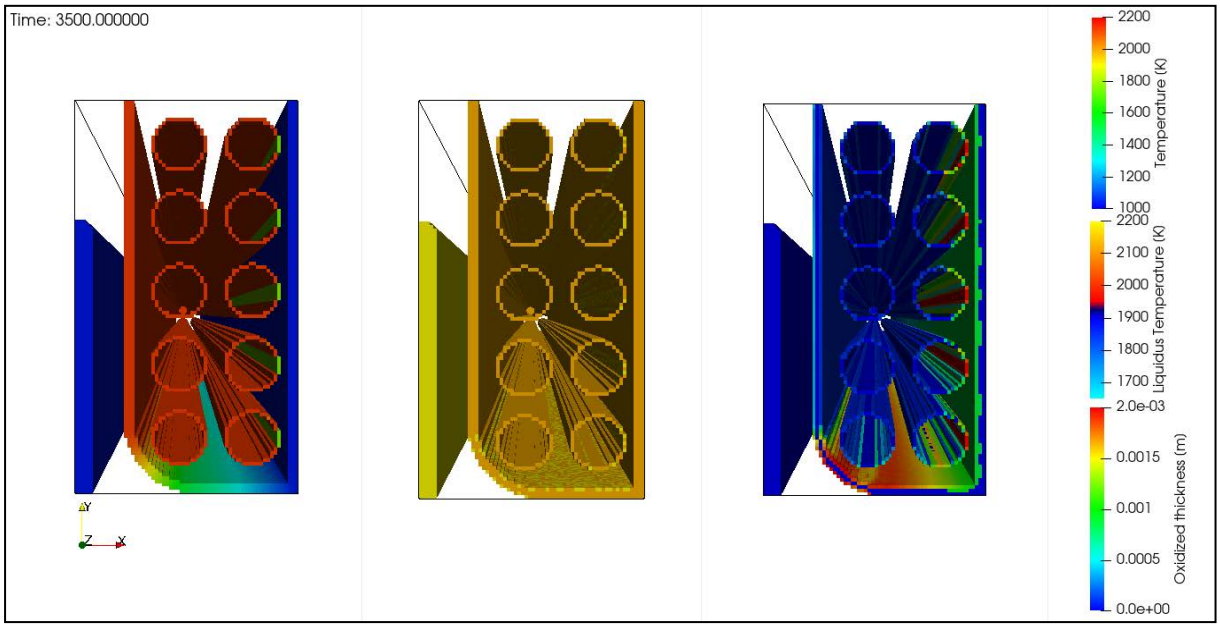

図 3.15　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、流動 OFF、CFL = 100）（5/5）、 t = 3500 s

※ヒーターの停止に伴い、制御棒ブレードおよびチャンネルボックス境界側温度は低下.
ただし、燃料棒およびチャンネルボックス表面では酸化反応が継続.

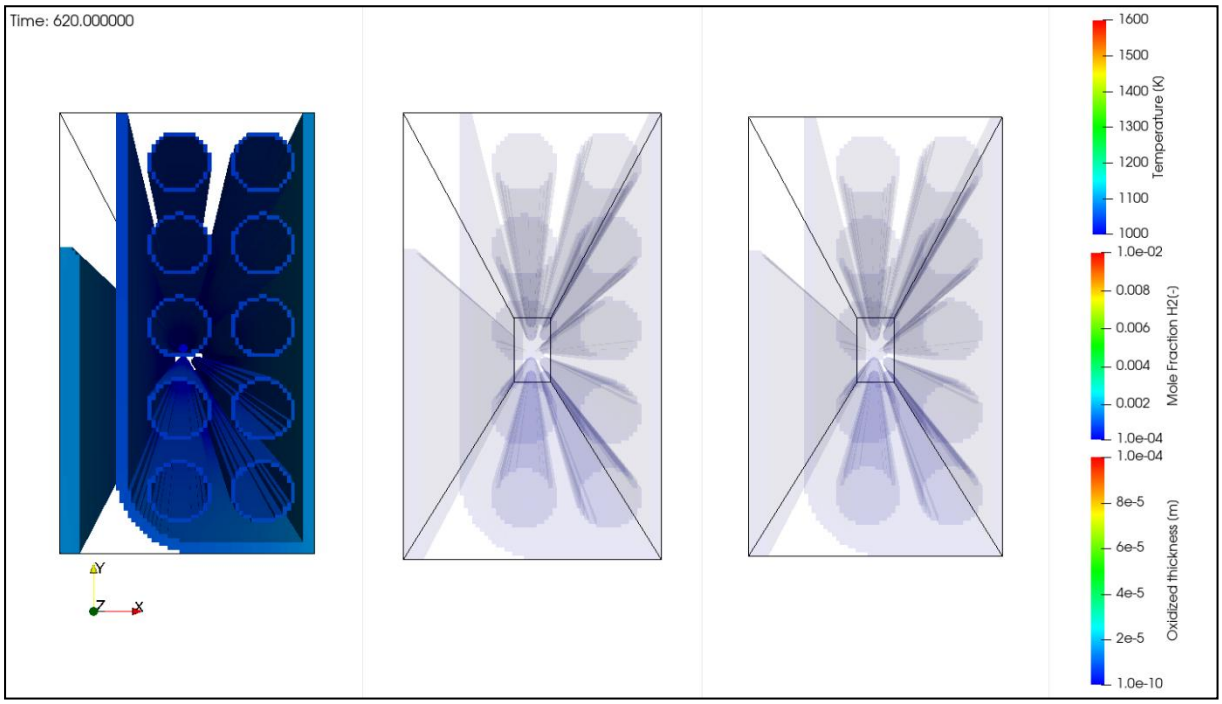

図 3.16　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、流動 ON、水素発生、CFL = 2）（1/6)、 t = 620 s
※t = 620 s より、流動 ON

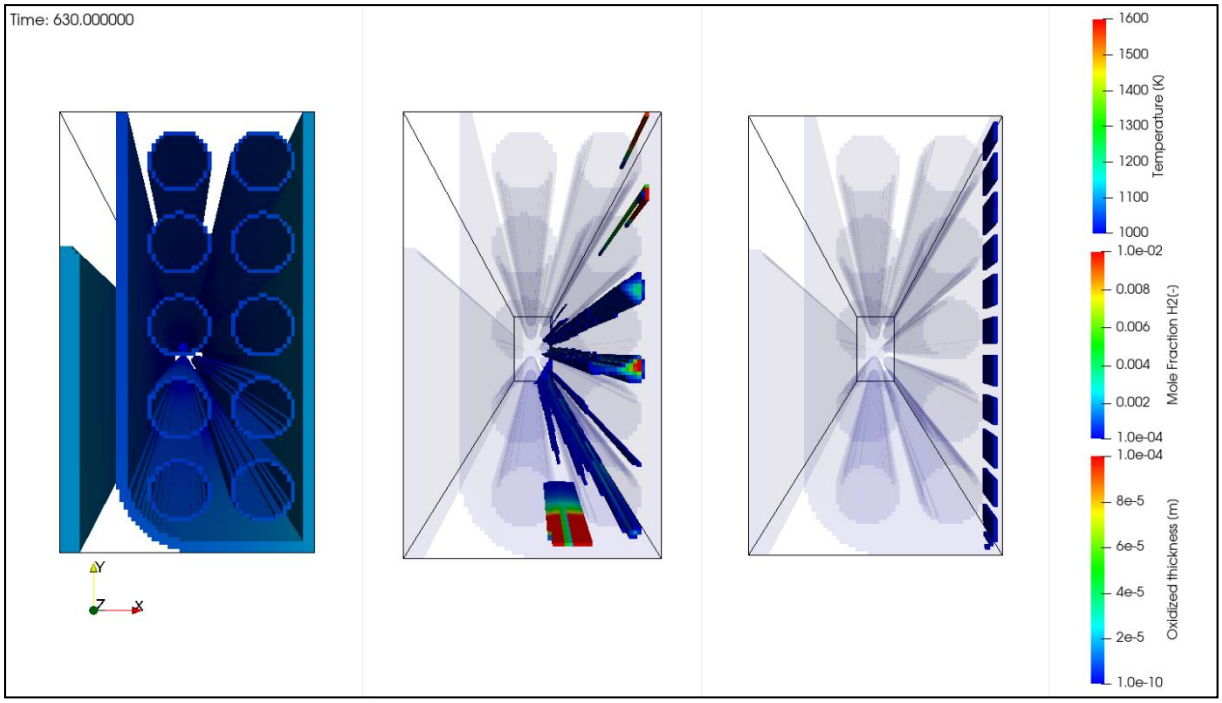

図 3.16　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、流動 ON、水素発生、CFL = 2）（2/6)、t = 630 s
※チャンネルボックス境界面において酸化膜形成と水素発生

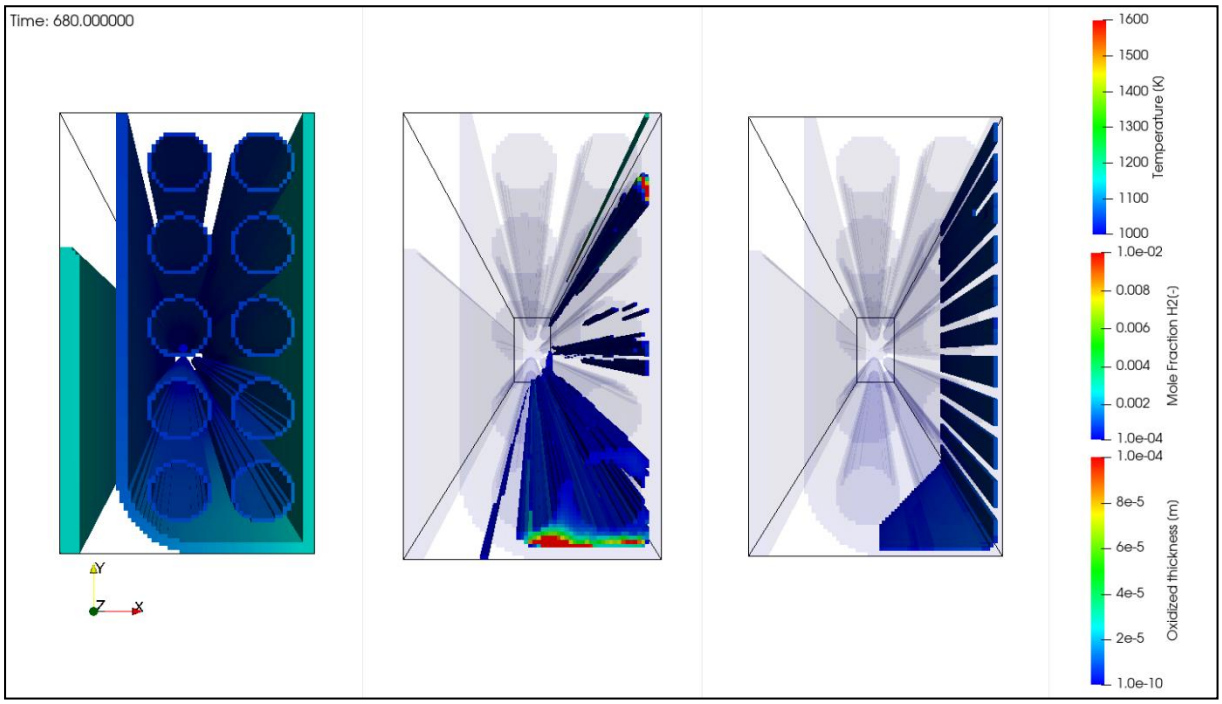

図 3.16　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、流動 ON、水素発生、CFL = 2）（3/6）、t = 680 s

※チャンネルボックス境界面において形成された酸化膜と水素発生は下方に拡大

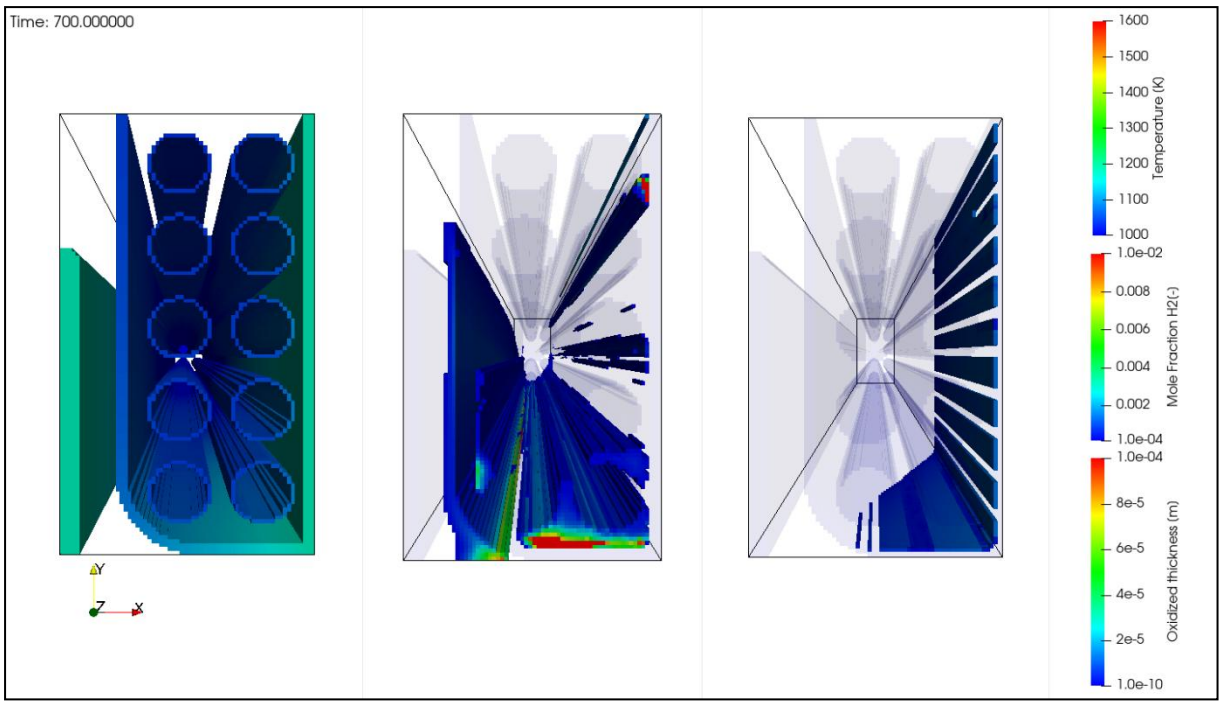

図 3.16　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、流動 ON、水素発生、CFL = 2）（4/6）、t = 700 s

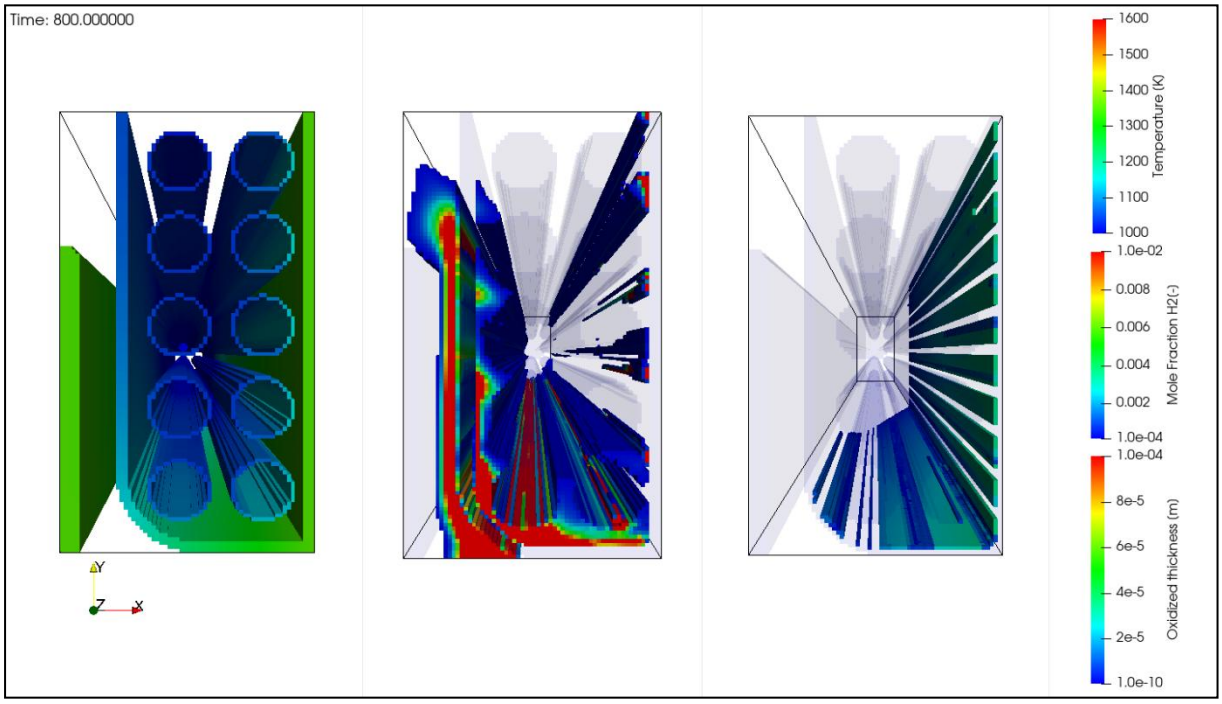

図 3.16　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、流動 ON、水素発生、CFL = 2）（5/6）、t = 800 s

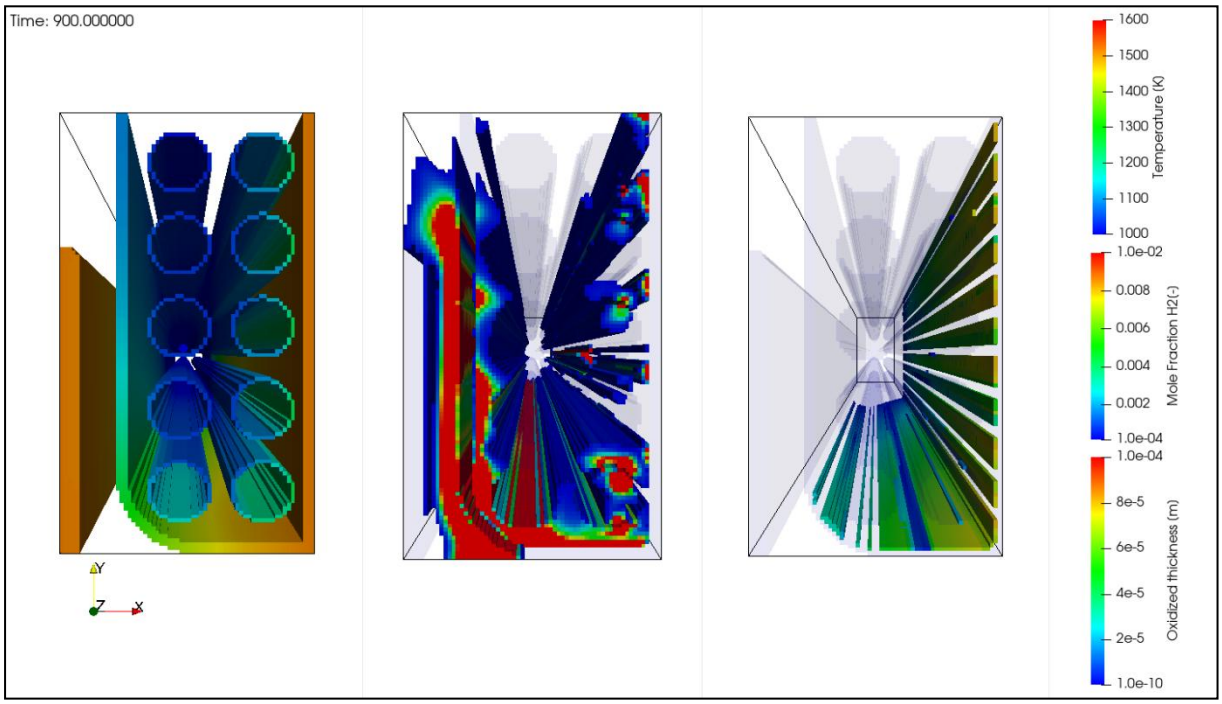

図 3.16　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、流動 ON、水素発生、CFL = 2）（6/6）、t = 900 s

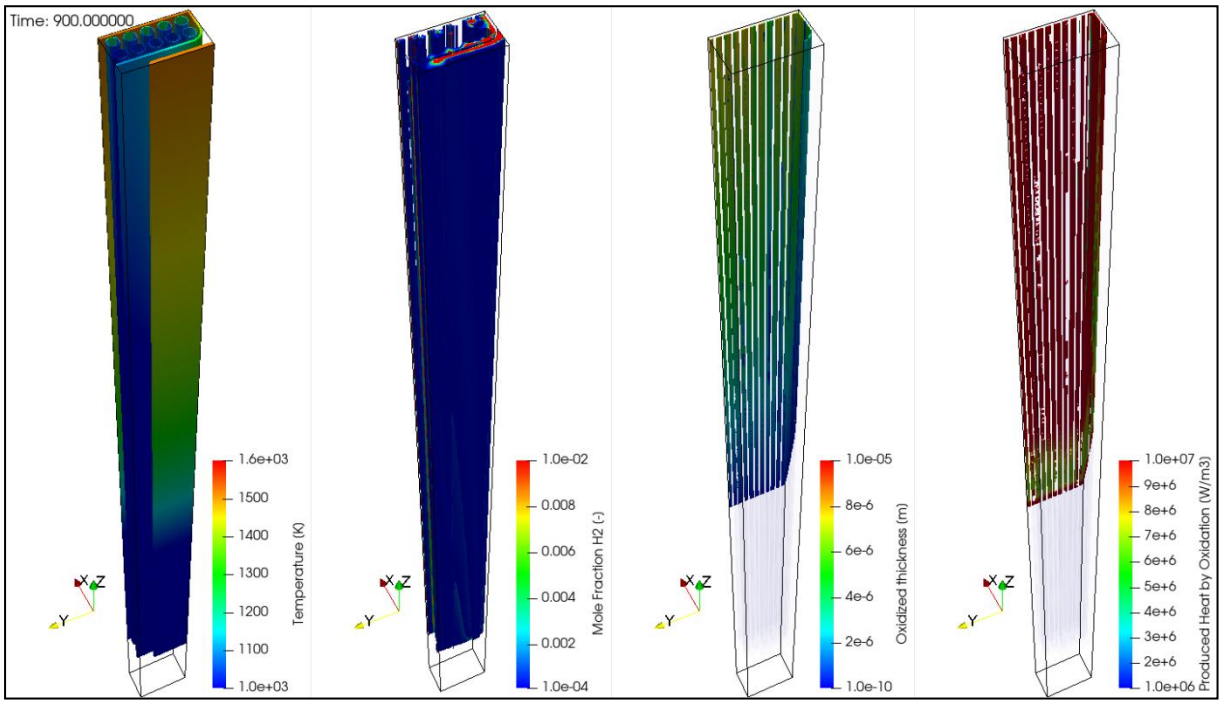

図 3.17　制御棒ブレード破損試験解析結果：構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚、酸化反応熱分布の俯瞰図（CRFCBF-03、流動 ON、CFL = 2）、 t = 900 s

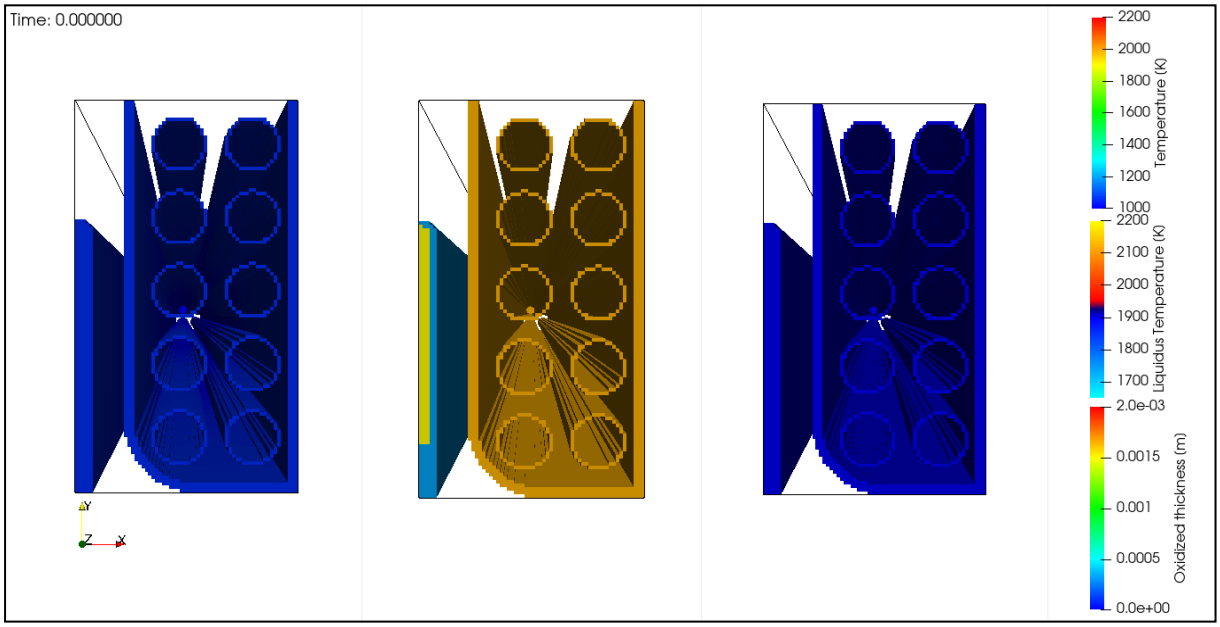

図 3.18　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、水蒸気流入温度履歴考慮、流動 OFF、CFL = 100）（1/5）、t = 0 s

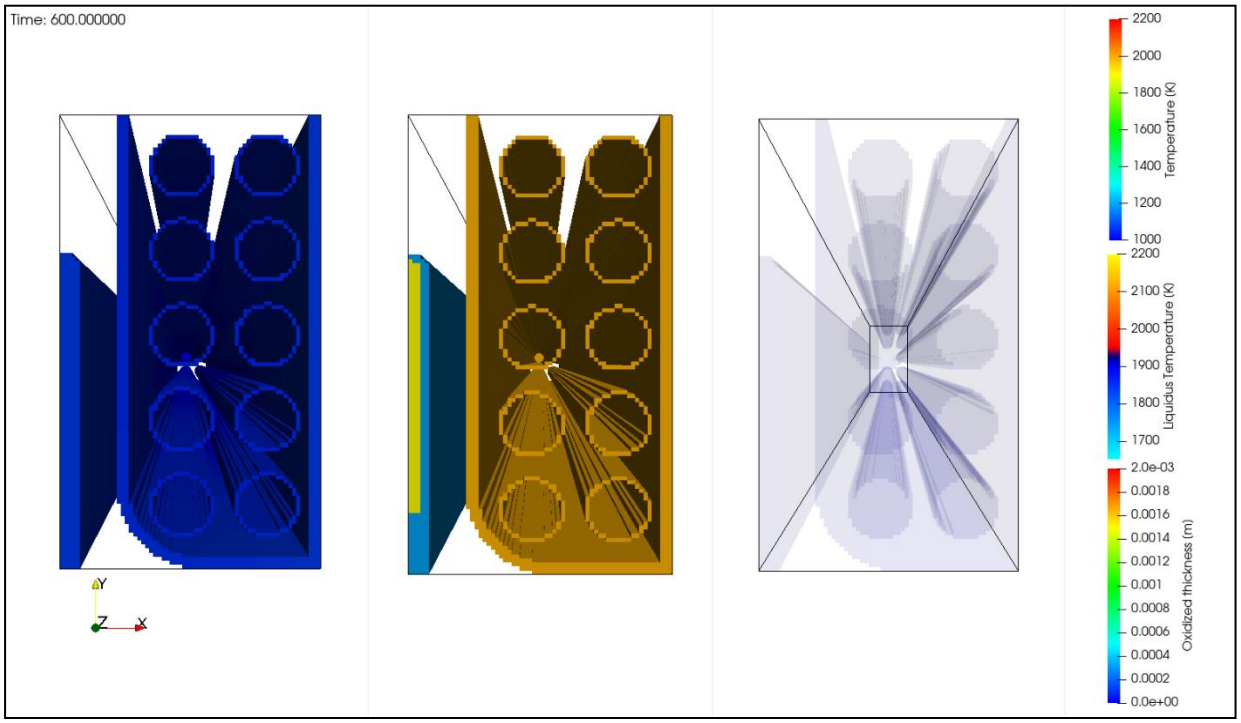

図 3.18　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、水蒸気流入温度履歴考慮、流動 OFF、CFL = 100）（2/5)、t = 600 s

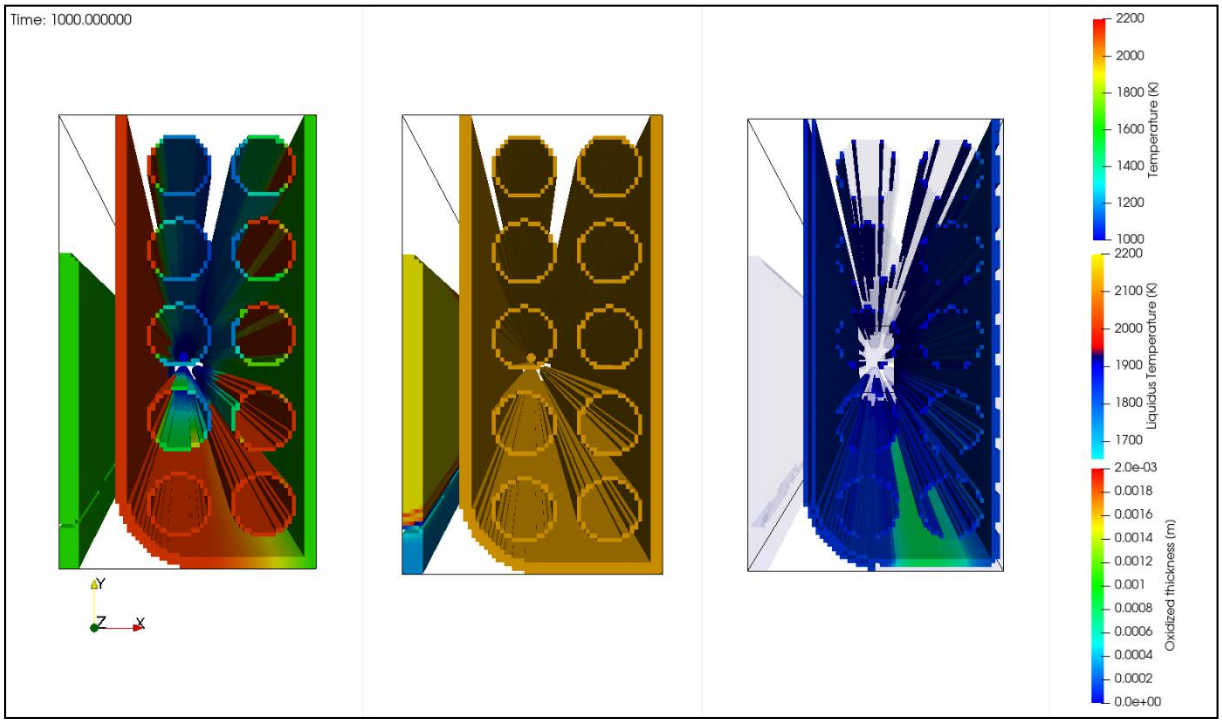

図 3.18　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、水蒸気流入温度履歴考慮、流動 OFF、CFL = 100）（3/5)、 t = 1000 s

※約 t = 900 s より燃料棒およびチャンネルボックス表面上に酸化膜形成し、反応熱により温度上昇．また、制御棒ブレードにおいて共晶に伴い溶融が生じる．

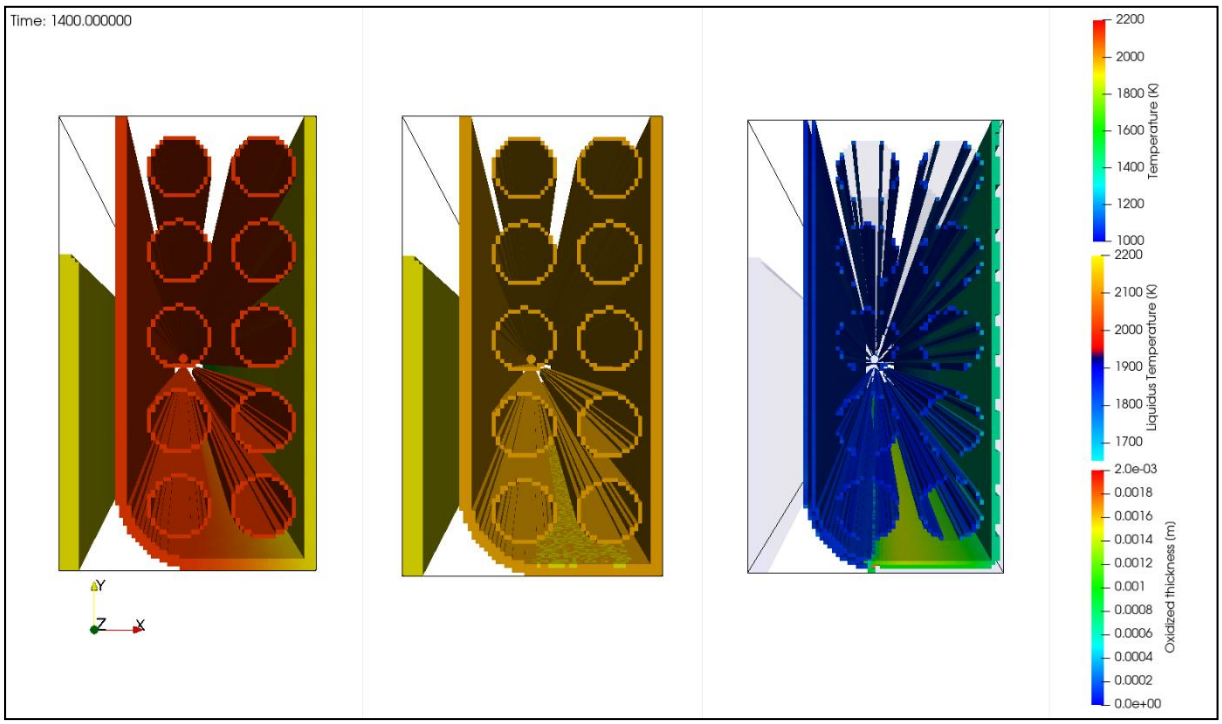

図 3.18　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、水蒸気流入温度履歴考慮、流動 OFF、CFL = 100）（4/5）、 t = 1400 s

※加熱温度がピークを迎える．Zr-水蒸気反応により、チャンネルボックスに酸化 Zr が形成され、融点が上昇．

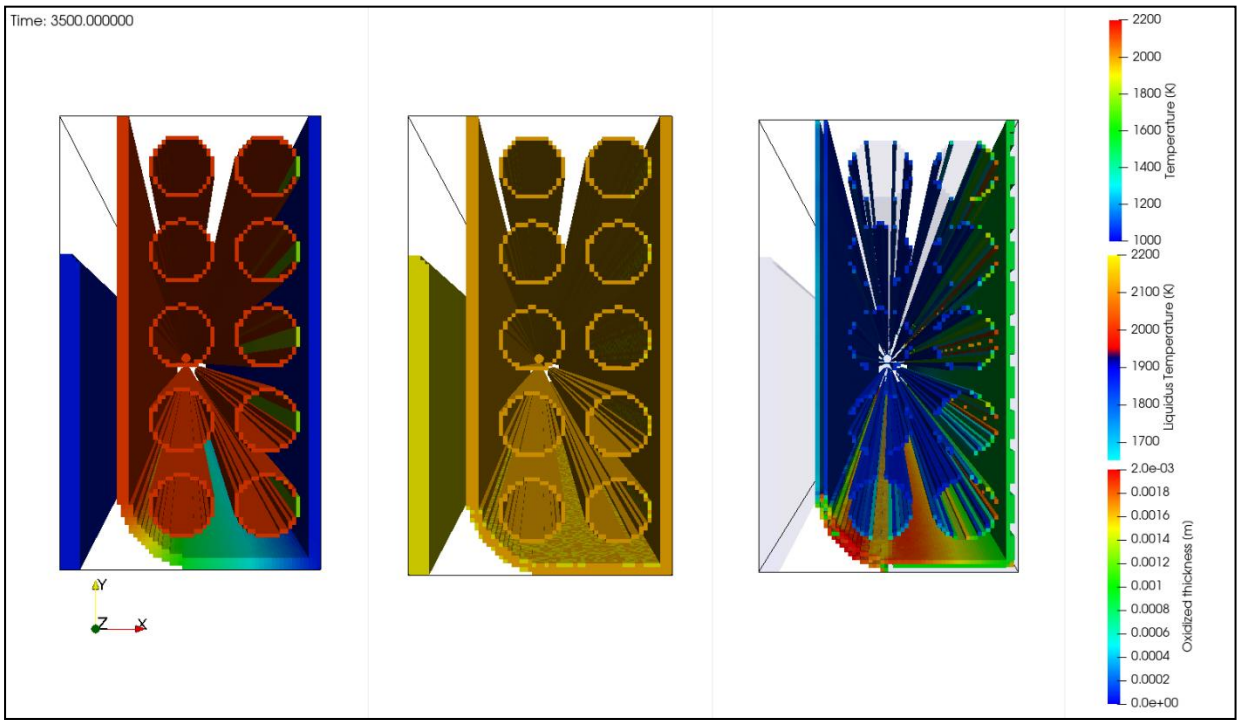

図 3.18　制御棒ブレード破損試験解析結果：上部付近の構造物温度、融点、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、水蒸気流入温度履歴考慮、流動 OFF、CFL = 100）（5/5）、 t = 3500 s

※ヒーターの停止に伴い、制御棒ブレードおよびチャンネルボックス境界側温度は低下．ただし、燃料棒およびチャンネルボックス表面では酸化反応が継続．

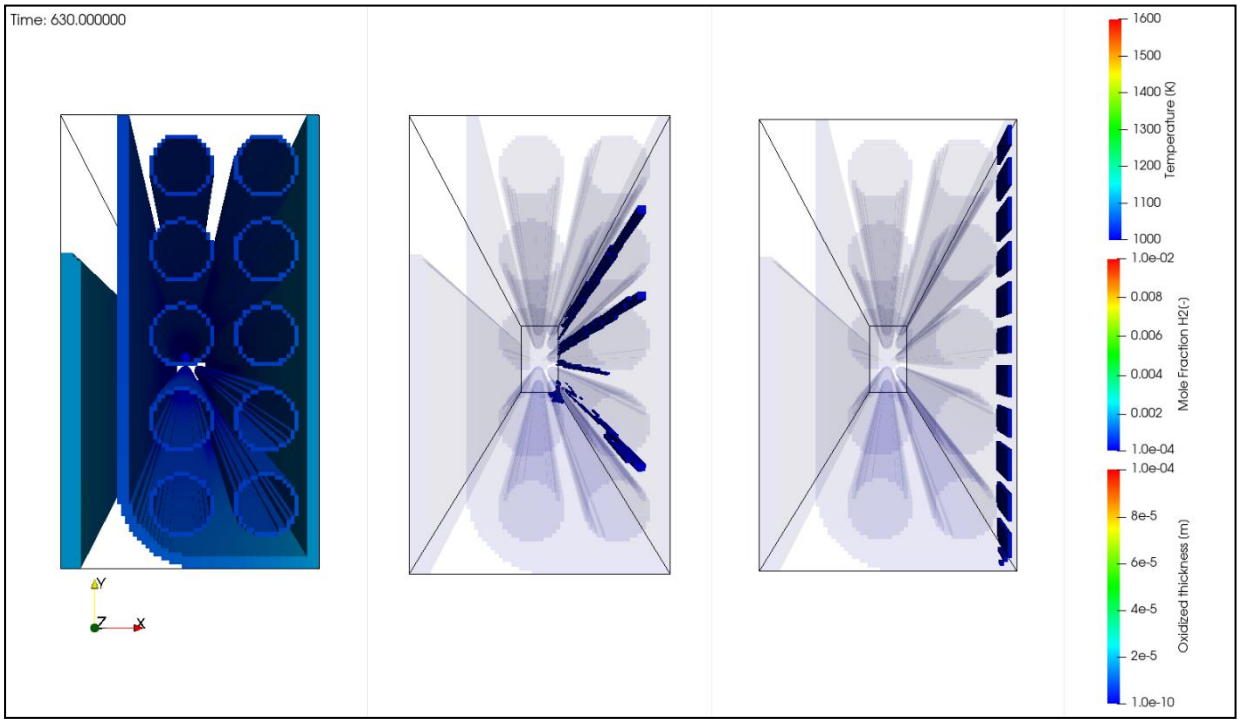

図 3.19　制御棒ブレード破損試験解析結果上部付近の構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、水蒸気流入温度履歴考慮、流動 ON、水素発生、CFL＝0.8）（1/3）、 t＝630s
※チャンネルボックス境界面において酸化膜形成と水素発生

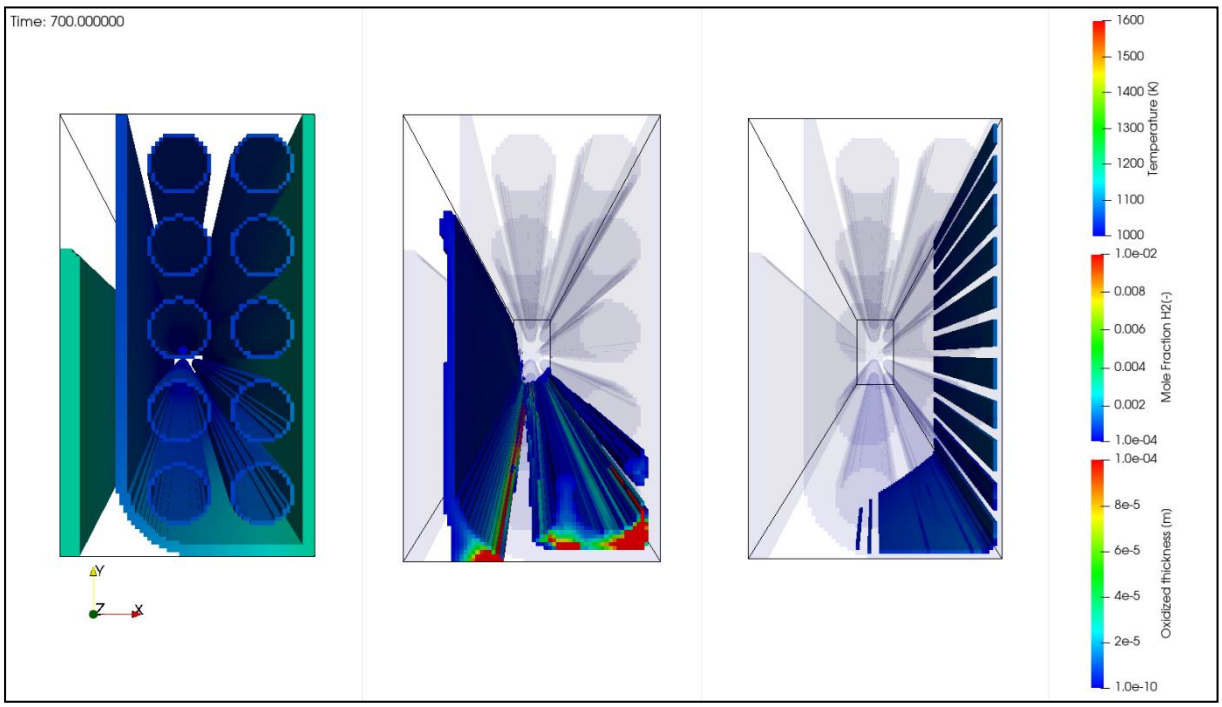

図 3.19　制御棒ブレード破損試験解析結果:上部付近の構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、水蒸気流入温度履歴考慮、流動 ON、水素発生、CFL＝0.8）(2/3)、t＝700 s
※チャンネルボックス境界面において形成された酸化膜と水素発生は下方に拡大

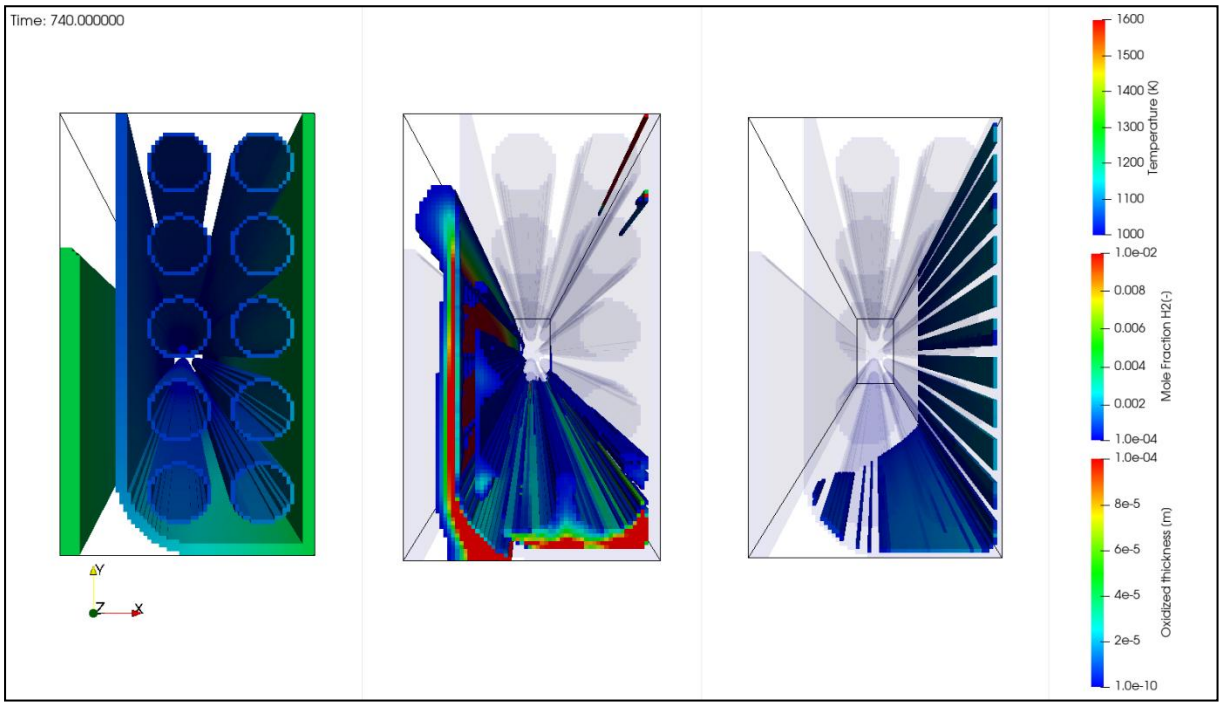

図 3.19　制御棒ブレード破損試験解析結果:上部付近の構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚分布（CRFCBF-03、水蒸気流入温度履歴考慮、流動 ON、水素発生、CFL = 0.8）(3/3)、t = 740 s

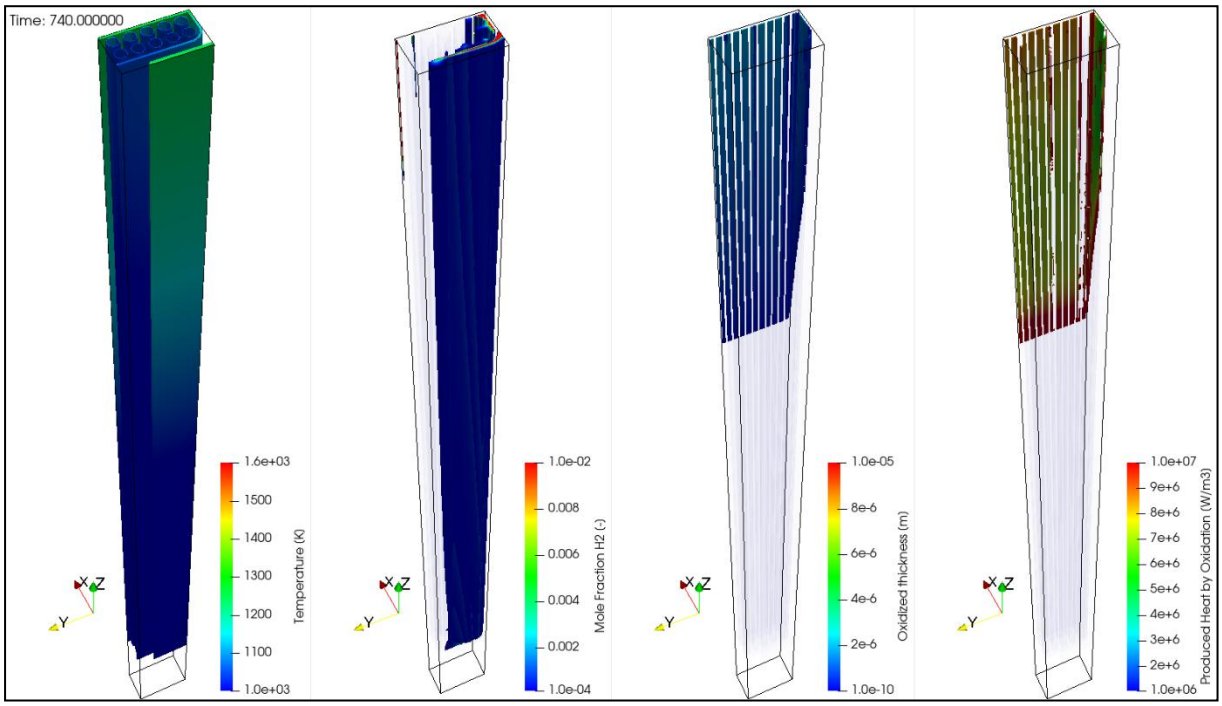

図 3.20　制御棒ブレード破損試験解析結果：構造物温度、H_2 モル分率、酸化膜厚、酸化反応熱分布の俯瞰図（CRFCBF-03、水蒸気流入温度履歴考慮、流動 ON、CFL = 0.8）、 t = 740 s