

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に
属しますので公開できません。

重大事故等対策の有効性評価に係る シビアアクシデント解析コードについて

(第3部 MAAP)

添付3 溶融炉心とコンクリートの 相互作用について

第58回審査会合(平成25年12月17日)資料2-2-7 改訂2

目次

1 まえがき.....	3.3-3
2 現象の概要.....	3.3-3
3 知見の整理.....	3.3-3
3.1 MCCI 実験の概要	3.3-4
3.2 MCCI 実験の知見の整理.....	3.3-15
3.3 実機への適用性	3.3-17
4 不確かさに関する整理.....	3.3-56
5 感度解析と評価.....	3.3-69
6 まとめ	3.3-111
添付 3-1 溶融デブリの水中での拡がり評価について.....	3.3-112

1 まえがき

溶融炉心とコンクリートの相互作用（MCCI：Molten Core Concrete Interaction、以下、「MCCI」と称す。）に関しては、国内外において現象の解明や評価に関する多くの活動が行われてきているが、現在においても研究段階にあり、また、実機規模での現象についてほとんど経験がなく、有効なデータが得られていないのが現状であり、不確かさが大きい現象であると言える。

そこで、国内外で実施された実験等による知見を整理するとともに、解析モデルに関する不確かさの整理を行い、感度解析により有効性評価への影響を確認した。

2 現象の概要

重大事故時には、溶融炉心とキャビティ床コンクリートの接触によって、コンクリートが侵食され、ベースマット溶融貫通に至る可能性がある。このような溶融炉心とコンクリートの接触及びそれに伴って引き起こされる現象（コンクリートの侵食及び不揮発性ガスの発生）のことを、溶融炉心とコンクリートの相互作用（MCCI）と呼ぶ。

国内 PWR プラントでは、炉心損傷を検知した後に、原子炉キャビティへの水張りを行うことにより、溶融炉心がキャビティに落下した際の溶融炉心の冷却を促進することにより MCCI の防止 / 緩和を行っている。キャビティに落下した溶融炉心は、キャビティ水との接触により、一部は粒子化して水中にエントレインされ、残りはキャビティ床面に落下して堆積し溶融プールを形成する。エントレインされたデブリ粒子は、水と膜沸騰熱伝達し水中を浮遊するが、冷却が進むと膜沸騰状態が解消され、溶融プール上に堆積する。

キャビティ底に堆積した溶融炉心は、崩壊熱や化学反応熱により発熱しているが、キャビティ水及びコンクリートとの伝熱により冷却されるにつれて固化し、冷却が不足する場合には、中心に溶融プール（液相）外面にクラスト（固相）を形成する。

コンクリートは、溶融炉心との熱伝達により加熱され、その温度が融点を上回る場合に融解する。このとき、ガス（水蒸気及び二酸化炭素）及びスラグが発生し、溶融炉心に混入され化学反応する。

3 知見の整理

本章では、MCCI に関する実験の概要及びそこで得られた知見に関して整理を行う。

溶融物によるコンクリート侵食に関する実験としては、水による冷却を伴わない実験として米国アルゴンヌ国立研究所（ANL）で実施された ACE 実験及び米国サンディア国立研究所（SNL）で実施された SURC 実験（国際標準問題 ISP - 24）がある。

水による冷却を伴う実験（溶融物上に冷却水を注水した実験）としては、米国国立サンディア研究所（SNL）で実施された SWISS 実験及び WETCOR 実験、米国電力研究所（EPRI）の主催で実施された MACE 実験、原子力発電技術機構（NUPEC）により実施

された COTELS 実験、米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) により行われた CCI 実験がある。

また、水中に炉心デブリを落下させた実験としては、KTH で実施された DEFOR 実験がある。

このように、MCCI 実験としては、水プールに溶融物を落下させた条件での実験結果は DEFOR 実験のみでありサンプルが少ないため、FCI に関する実験的知見も加味して、知見を整理する。

一方、原子炉キャビティでの溶融物の拡がり実験としては、水による冷却を伴わないドライ条件での実験としては、国内 BWR を対象とした実験、EPR を対象とした実験が複数実施されているが、ウェット条件での実験については実施例が少ないが、ANL にて不均質に堆積させたデブリベッドの拡がりを確認したセルフレベリング実験がある。

さらに、OECD-MCCI プロジェクトで実施されたクラスト強度試験(SSWICS 試験)結果に基づき、クラストのヤング率と破損応力を解析的に求める研究が JNES によりなされている。

以下、各実験及び解析研究について概要を纏めるとともに、知見を整理する。

3.1 MCCI 実験の概要

(1) ACE 実験¹

ACE 実験は、MCCI における熱水力学的及び化学的プロセスを検証し関連コードのデータベースを拡充することを目的として、国際的に支援された ACE (Advanced Containment Experiments) プログラムの一部として米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) で実施されたものである。

実験装置を図 3.1-1 に示す。4 方向の壁 (水冷式パネル) で囲まれた中には、コンクリート・ベースマット、コンクリート・メタル挿入物、コリウム・インベントリが入っている。内側表面には 25 個のタングステン電極を備えた額縁型アセンブリがあり、それらは 4 つのタングステンコイルでコリウム頂部付近に接続されて、コリウムが熱伝導するまで加熱する。設備の大きさは 53.0cm × 50.2cm である。長方形の 2 枚式の蓋 (水冷式) があり主ガス管に繋がっている。蓋には、エアロゾル収集ならびにガスサンプリング・排気口用のポートが 1 つと、コリウム監視用ポート (光学温度計とビデオカメラ付き) が 3 つ付いている。コリウム組成は UO₂ を含み粉末状で均一にブレンドされた状態である。ACE 実験のうち、PWR 向けに実施されたケース L2 及び L6 のコリウム組成及びコンクリート成分を表 3.1-1 示す。実験中、コリウム・インベントリはタングステンの電極で加熱され溶融デブリプールを形成する。コンクリート侵食はベースマットの中にある熱電対によりモニターされる。

¹ OECD/NEA "Second OECD (NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions," NEA/CSNI/R(92)10.

なお、本実験は、冷却水の注水を行わない、ドライ条件で行われたものである。

ケース L2 は、一部分酸化した PWR 燃料のコリウム溶融物とケイ土系コンクリートとの相互作用に関する実験である。実験結果を図 3.1-2 に示す（本図では、MAAP によるベンチマーク解析結果も掲載している）。実験における伝熱量は平均 220 kW、側壁への熱損失は平均 120 kW で、これらを境界条件として与えており、約 100 kW がコンクリートの加熱に寄与しており、垂直方向へのコンクリート侵食率の平均は 7.8 mm/分であった。侵食開始時の溶融プール温度は 2400 K でその後もその温度を維持している。

ケース L6 は、制御棒の材質を含む一部分酸化したコリウム溶融物とケイ土系コンクリートとの相互作用に関する実験である。実験結果を図 3.1-3 に示す（本図では、MAAP によるベンチマーク解析結果も掲載している）。本ケースでは、実験開始時の侵食率は低めであったが、徐々に上昇し、最終的な侵食深さは 40 分の時点で 13 cm に至っており、実験とほぼ同等の侵食深さに到達している。

(2) SURC-4 実験²

SURC - 4 (Sustained Urania-Concrete Interaction-4) はサンディア国立研究所で行われた MCCI 実験の一つである。本実験は、コード比較のための国際標準問題 (ISP - 24) に選定されている。実験装置の概念図を図 3.1-4 に示す。円筒状の反応るつぼがアルミの格納容器内に設置されている。アニュラス部とるつぼの蓋は MgO でできている。るつぼの大きさは、直径 60cm × 高さ 100cm、MgO 製アニュラスと蓋の厚さは 10cm である。反応るつぼの床は厚さ 40cm の玄武岩系コンクリートであり、温度記録用の熱電対が設置されている。200kg のステンレス鋼 (約 Fe: 73 %、Cr: 19 %、Ni: 8 %) と模擬 FP (Te: 0.5 kg、La₂O₃: 1.17 kg、CeO₂ : 1.23 kg、BaO : 1.1 kg) は、コンクリート侵食が開始するまで加熱される。化学反応とガス放出の影響を観察するため、侵食開始後 14 分経ってから約 0.5 秒間に追加的に 20 kg のジルコニウムを溶融物に添加している。

実験結果を図 3.1-5 に示す（本図では、MAAP によるベンチマーク解析結果も掲載している）。観測されたコンクリート侵食深さは約 55 分の時点で 24.5 ~ 27.5cm である。

(3) SWISS 実験³

SWISS 実験は、米国国立サンディア研究所 (SNL) において実施された溶融物とコンクリートの相互作用及び溶融物冷却に関する実験で、MCCI 挙動に及ぼす水³

² "International standard problem No 24: ISP-24: SURC-4 experiment on core-concrete interactions," NEA/CSNI-155, 1988.

³ "SWISS: Sustained Heated Metallic Melt/Concrete Interactions with Overlying Water Pools," NUREG/CR-4727, SAND85-1576

ールの影響を調べることを目的として2回実施されている。

実験装置を図 3.1-6 に示す。コンクリートは、直径 20cm の石灰岩系コンクリート円板が使用されている。溶融物は 46kg のステンレス鋼 (SUS304) で、模擬 FP の量は 1.75kg である。これらは高周波加熱により加熱される(1.3 ~ 1.7W/g)。SWISS-1 実験では、コンクリート侵食が準定常となった時点(侵食量 12cm)で溶融物上に注水し、SWISS-2 実験では、溶融物がコンクリートと接触した直後に注水している。

SWISS-1 実験及び SWISS-2 実験におけるコンクリート侵食の推移を図 3.1-7 に示す。両実験では、注水タイミングが異なっているが、コンクリートの侵食状況は同等な結果となっている。これは、溶融物の上面(溶融物と水プールの界面)に強固なクラストが形成され溶融物の内部に水が浸入しにくくなっていたことと、溶融物の発熱が実機で想定されるよりも 1 桁程度大きかったこと、さらに、100%ステンレス鋼であったため金属 - 水反応による発熱が加わったことが要因であると分析されている。溶融物から水プールへの熱流束は、SWISS-2 の結果より、約 0.8MW/m² であり(図 3.1-8 参照)、この値は限界熱流束の計算値よりも小さく、核沸騰による計算値に近いと分析されている。

(4) WETCOR 実験⁴

WETCOR 実験は、米国サンディア研究所 (SNL) で実施された MCCI 実験であり、溶融物として、Al₂O₃、CaO、SiO₂ の混合物を直接通電加熱したものをを用い、直径 0.4m の石灰岩系コンクリートとの反応中に注水し、溶融物の冷却性を調べた実験である。実験装置の概要を図 3.1-9 に示す。

WETCOR-1 実験結果では、溶融状態の部分が存在する期間にクラストを通して水へ伝熱した熱流束は 0.52 ± 0.13MW/m²、入熱を停止し全体が固化した以降の熱流束は 0.25 ± 0.08MW/m² および 0.20 ± 0.08MW/m² であったことが報告されている。これらは表 3.1-2 に示すように、入熱期間の最後に相当する 557 分から 563 分での熱流束が 0.52 ± 0.13MW/m²、582.4 分での熱流束が 0.25 ± 0.08MW/m²、589.0 分での熱流束が 0.20 ± 0.08MW/m² である。図 3.1-10 に入熱履歴を示すが、入熱終了は正確には 554.9 分である。注水開始は 529.0 分である。

コンクリート温度履歴を図 3.1-12 ~ 14 に示す。コンクリートの半径方向の中心部では試験開始から 470 分程度から急速に侵食が早まり、注水開始までに 1-3cm 侵食されており、注水後も継続して、入熱終了の 555 分で 5-6cm となっている。中間部では 515 分までは侵食は起きていないが、555 分までは継続した。外周部では局所的には 410 分から侵食が開始し、注水時点で 2cm 程度になっている。溶融物温度を図 3.1-15 に示す。560 分程度までは 1800K 程度で一定となっているが、その後は

⁴ NUREG/CR-5907, "Core-Concrete Interactions with Overlying Water Pools," Sandia National Laboratories, November 1993.

緩やかに低下し、580分頃には1500K程度まで低下している。

実験後の溶融物の固化状態およびコンクリート侵食状態を図3.1-16に示す。半径方向には場所により侵食挙動に違いがあるが、最終的には全体的に5cm程度の侵食深さになっている。もとのコンクリート表面であった位置には空洞が形成されており、その上にはクラストがブリッジ状に形成されている。クラスト厚さは場所により異なるが、外周部では 10 ± 1 cm、中心部で3.8cmから4.5cmであった。上記熱流束は中心部でのクラスト厚さ平均値として $4.2 \text{cm} \pm 0.4 \text{cm}$ として算出されたものである。クラストにはひび割れは生じていなかったことが報告されている。空洞の形成過程については文献に記載されていないが、注水開始時には激しい沸騰が起き、水プールが出来てから40秒間、メルト球体が水中を浮上し沈降する挙動が観察されている。この現象はクラストのギャップから水が入り、その突沸によりメルトが一時的に噴出したものと推定されている。注水後早期に堅固なクラストが形成され、侵食とともに空洞部が成長したことが推測できる。

以上より、水への熱流束 0.2MW/m^2 は、デブリが完全固化し、温度も低下し、コンクリート侵食も進んでいない状態の値である。

(5) MACE 実験⁵

MACE 実験 (Melt Attack and Coolability Experiment) は、米国電力研究所 (EPRI) が主催する格納容器内溶融物冷却性に関する国際協力計画である。MACE 実験装置の概要を図3.1-17に示す。また、MACE 実験では規模の異なるM0、M1b、M3b、M4の4回の実験が実施されており、その主要条件は表3.1-3に示すとおりである。

MACE 実験では UO_2 、 ZrO_2 、 Zr といった実炉心模擬物に少量のコンクリート成分を付加した溶融物を使用している。M0 実験では $30 \text{cm} \times 30 \text{cm}$ のテスト部に130kgの溶融物、M1b 実験では $50 \text{cm} \times 50 \text{cm}$ のテスト部に480kgの溶融物を使っている。M0 実験では、テスト部の側壁にコンクリートを用い、横方向への侵食も可能としている。M1b 実験はMgO製のつぼを用いており、下方向のみの侵食になる。

M0 実験での水プールへの熱流束測定結果を図3.1-18に示す。注水は侵食が1.3cmとなった時点、中心部で侵食開始から4分後に開始された。最初の3分間は 4MW/m^2 あり、熱的には全体の融解熱に相当する程度の除熱が行われた。これにより、安定したクラストが形成され、その後30分は 0.7MW/m^2 程度で推移し、更にその後は徐々に低下して最後には 0.15MW/m^2 まで低下した。図3.1-19に示すように、安定化クラストはタンゲステン電極に固着しており、最初にクラストが形成された高さに留まっていた。クラストと溶融物の間に空間が形成されたのが30分後程度と推定

⁵ M.T.Farmer, et al., "Status of Large Scale MACE Core Coolability Experiments," OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, 1999.

されており、これにより 30 分以降の熱流束が低下したと考察されている。

M1b 実験での水プールへの熱流束測定結果を図 3.1-21 に示す。注水は侵食が 5.0cm となった時点、中心部で侵食開始から 14.7 分後に開始された。最初は $4\text{MW}/\text{m}^2$ あり、30 分間で徐々に $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ 程度まで低下している。この期間に 90kg 程度が固化し、クラストを形成したと見積もられている。その後の 30 分間で $0.4\text{MW}/\text{m}^2$ 程度に低下し、それ以降は入熱と同等の熱流束となっている。図 3.1-22 に示すように、クラスト厚さは 6cm 程度であり、熱伝導だけではこれだけの熱流束を得られないため、クラストは透水性があると考察されている。クラストはつば壁に固着し、9cm 高さの空洞が形成されている。空洞の形成は 50 分頃と推定されている。よって、 $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ より小さい熱流束はクラストが分離した形態での値である。図 3.1-23 に溶融物温度変化を示す。水への熱流束が $0.2\text{MW}/\text{m}^2$ で推移する期間は、おおむね溶融物温度が 1500K 前後となっている。

(6) COTELS 実験 (テスト B/C)⁶

COTELS 計画は (財) 原子力発電技術機構 (NUPEC) が压力容器外のデブリ冷却特性を調べる試験であり、この計画のテスト B/C は、溶融物上に注水した際の FCI (テスト B) と MCCI (テスト C) を検討するための実験であり、テスト B と C は引き続き実施された一連の実験である。

実験装置を図 3.1-24 に、試験条件及び結果の一覧を表 3.1-4 に示す。溶融物の重量は 60kg で UO_2 の融点より高い 3200K まで誘電加熱された。溶融物のタイプ A は TMI 事故の溶融物を模擬した組成、タイプ B は下部プレナムにより多くの金属が含まれることを想定し、金属の割合を増やした組成である。コンクリート・トラップの内径は 0.36m あるいは 0.26m である。ここで、0.26m は他の実験 (WETCOR、MACE-M0 及び MACE-M1b) との比較のためアスペクト比 (高さ と 直径 の 比) を 0.5 としたものである。コンクリートは国内プラントのセメント成分を模擬した玄武岩系コンクリートである。コンクリート内部には温度計測用の熱電対が配置されている。落下後の溶融物は、崩壊熱を模擬して誘電加熱され、75kW は崩壊熱の 11 倍に相当する。注水は、室温水を Jet もしくは Spray で $0.02 \sim 0.4\text{kg}/\text{s}$ の流量で試験開始 6.5 ~ 15 分後に行っている。

ケース 5a は、デブリ落下後の崩壊熱の模擬 (誘電加熱) を行わず、注水も行わなかったケースであるが、約 2 割が粒子化している。これは、コンクリート侵食に伴って発生した気体によりデブリの粒子化が生じたと分析されている。粒子の径については、ケース 5a とケース 5 で同等の粒子径分布が確認されており、デブリと水の相互作用ではなく、コンクリート侵食により発生した気体により粒子化が生じたも

⁶ Hideo Nagasaka, et al., "COTELS Project (3) : Ex-vessel Debris Cooling Tests," OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, 1999.

のであると考えられている。

アスペクト比の観点では、図 3.1-25 にケース 5 とケース 9 のコンクリート温度の時間変化を示すが、アスペクト比が高いケース 5 では、デブリの全体量に対する上面の面積が小さいため、初期にデブリの熱量がコンクリートに多く伝わっていることを示している。両ケースとも注水後 3-4 分でコンクリートの温度が低下に転じており、注水による冷却効果が確認でき、特に早めに注水したケース 9 では効果が高いことが分かる。さらに、注水が遅いケース 10 においてコンクリート侵食深さが最大となっていることから、水による冷却効果が確認できる。

固化デブリ表面から水への熱流束は、SWISS、WETCOR、MACE の結果に近い $200 \sim 700 \text{ kW/m}^2$ であった。この結果は容器内圧力がほぼ一定状態の時の値とされている。なお、これらの熱流束は限界熱流束よりも低く、水がさらに高い除熱能力を有する可能性があることを示唆している。実験レポートでは 0.2 MW/m^2 時におけるデブリ状態についての記述はないが、側壁コンクリートが侵食されてギャップが形成されたことで、デブリ冷却が促進され、コンクリート侵食が停止したと説明されている。図 3.1-26 に固化デブリの断面図を示す。デブリ下面にはコンクリートから分離した砂利がベッド状に堆積しており、デブリ底部からの冷却を促進したことが述べられている。また、その他に侵食が停止した要因としてさらに、アスペクト比が低く水による冷却の効果があつたこと、塊状デブリが侵食により落下する過程で生じたクレバスに水が入り込み冷却されたことなどが要因であると分析されている。

COTELS 実験の特徴は、側壁にクラストが固着しなかった点で他実験と比べて実機に近い状況となっており、コンクリート壁とデブリプールの境界に形成されたギャップが冷却を促進した点を実機解析への知見として参照できる。

(7) FARO 実験

欧州 JRC (Joint Research Center) のイスラ研究所における実験であり、压力容器内を対象に溶融物が水プールに落下した場合の水蒸気爆発の発生を調べることを目的として高圧条件での実験が行われてきたが、压力容器外を対象とした低圧条件での実験も行われている。

実験装置の概要を図 3.1-27 に示す。実験手順は、高圧条件と低圧条件とで同様であり、るつぼ内で UO_2 混合物 ($80\text{wt}\%\text{UO}_2 + 20\text{wt}\%\text{ZrO}_2$ あるいは $77\text{wt}\%\text{UO}_2 + 19\text{wt}\%\text{ZrO}_2 + 4\text{wt}\%\text{Zr}$) を溶融させ、るつぼ底部のフラップを開放することにより、水プールに落下させる。実験条件は、表 3.1-5 に示すとおりであり、 UO_2 混合物は $18 \sim 176 \text{ kg}$ 、水プールの水深は $0.87 \sim 2.05 \text{ m}$ 、水プールのサブクール度は飽和 $\sim 124 \text{ K}$ の範囲で変動させ複数のケースが行われている。また、高圧条件として $2 \sim 5.8 \text{ MPa}$ 、低圧条件として $0.2 \sim 0.5 \text{ MPa}$ である。

溶融物の粒子化量については、水プールの状態によりその割合が変化している。

原子炉容器内 FCI を模擬したケース（高圧条件かつ低サブクール度）では、水深 1m の場合で、溶融物の約半分が粒子化し、残りは溶融ジェットのまま水プール底に到達して堆積する結果となっている。一方、原子炉容器外 FCI を想定したケースとして、金属ジルコニウムを含む場合（L-11）や低圧で高サブクール度の場合（L-24～33）では、ほとんどが粒子化する結果が得られている。

また、観測された粒子の径は 3.2～4.8mm であり、初期圧力、水深、サブクール度、溶融物落下速度への依存性は低いと報告されている。

（ 8 ） COTELS 実験（テスト A）

COTELS 計画は（財）原子力発電技術機構（NUPEC）が圧力容器外のデブリ冷却特性を調べる試験であり、この計画の中で溶融物が水プールに落下したときの水蒸気爆発の発生有無を調べる実験として、カザフスタン国立原子力センター（NNC：National Nuclear Center）の施設を用いた実験が実施されている。

実験装置の概要を図 3.1-28 に、実験条件及び結果の一覧を表 3.1-6 に示す。この実験では、軽水炉のシビアアクシデント挙動解析結果に基づいて試験条件が設定され、具体的には、軽水炉のシビアアクシデントでは、原子炉容器内圧が低圧で破損するシーケンスが支配的であり、かつ、原子炉容器の破損として貫通部の破損を考慮している。また、冷却材喪失事故（LOCA）を起因とするシーケンスが支配的であることから、格納容器床面の水プールは飽和水（サブクール度 0～86K）とし、水深は 0.4～0.9m である。また、溶融物は、 UO_2 ：55wt%、Zr：25wt%、 ZrO_2 ：5wt%、SS：15wt%の混合物であり、下部ヘッド内の構造物も考慮して多くの金属成分を含むよう模擬したものである。この溶融物は、圧力ヘッド計装配管の径に相当する 5cm 径のジェットで水プールに落下させている。

粒子化量に関しては、水深 0.4m においても、ほとんど（90%以上）が粒子化しており、粒子径は多くのケースで 6mm 程度であったが、落下速度が速い場合には径が小さくなる傾向が確認されている。初期の圧力上昇幅と粒子径には相関があり、初期圧力上昇は粒子化した溶融物からの熱伝達が支配的であると報告されている。

（ 9 ） セルフレベリング実験⁷

この実験は、水プール中に不均質に堆積させたデブリベッドが、内部の沸騰により拡散する様子を確認した実験である。

実験条件の一覧を表 3.1-7 に示す。実験は、水プール中に UO_2 、SUS、Cu の 0.2～1mm 程度の粒子ベッドを非均一の厚さに堆積させ、誘導加熱により崩壊熱発生を模擬させたものである。

⁷ J. D. Gabor, L. Baker, Jr., and J. C. Cassulo, (ANL), “Studies on Heat Removal and Bed Leveling of Induction-heated Materials Simulating Fuel Debris”, SAND76-9008

図 3.1-29 に実験前後の粒子ベッド概念を示す。非均一の厚さに堆積された粒子ベッドは、誘導加熱により粒子ベッド内に沸騰が生じ、粒子が吹き上げられ再堆積する過程でベッドの厚さが均一化されている。ここで、均一化に要した時間は 2 , 3 分程度であると報告されている。

(1 0) DEFOR-A 実験^{8 9 10}

DEFOR (Debris Bed Formation) 計画は、スウェーデン王立工科大学で実施されており、種々の条件で水プールに模擬溶融物が投入された際の、溶融炉心の細粒化試験である。

なかでも DEFOR-A 試験は水深に応じた粒子化割合を調べることを目的にしたものである。試験装置を図 3.1-30 に示す。DEFOR-A 実験では、るつぼ型誘導炉により加熱された模擬溶融物を、ファンネル及びノズルを通じて大気圧条件の水タンクに注入する。ここでノズル径、すなわちデブリジェット径は可変となっている。水タンクのサイズは、断面が 0.5m×0.5m、高さが 2m であり、ノズル高さを差し引くと最大でタンクの床から放出口までの高さは 1.7m となっている。

次に、試験条件の一覧を表 3.1-8 に示す。ノズル高さは 1.7m (一部のケースは 1.62m) に設定され、模擬溶融物は深さ 1.5m 前後の水プールに注入される。また、デブリキャッチャーの高さが水面から 0.6m、0.9m、1.2m、1.5m と 4 段階に設定され、水面からの落下距離の影響も確認している。その他主要な試験条件として、模擬溶融物の過熱度は 78 ~ 206K、ジェット径は 10 ~ 25mm の範囲で設定している。ジェット径が太く、溶融物の過熱度が低く、定性的にケーキ状デブリが形成されやすいのは A8 試験である。

次に、試験結果について述べる。A8 試験で一番水深が浅いキャッチャー 1 に形成されたケーキ状デブリの様相を図 3.1-31 に示す。水深が浅いため、細粒化しても固化する前にキャッチャーに堆積することで、粒子化したものが結合した塊状になっている。水深が深いほど粒子の固化が進むため、図 3.1-32 に示すとおりケーキ状デブリが少なくなる。ここで、塊状デブリの概念図を図 3.1-33 に示す。デブリジェットが全て粒子化及び固化された状態でデブリキャッチャーまで到達した場合が(a)の状態であり、このとき固化した粒子間に空隙があるため、冷却性は阻害されない。(b)の状態は凝集を示しており、固化していないデブリ粒子が堆積することで凝集状態になる。また、(c)の状態はデブリジェットの一部分が直接床に堆積する場合であり、空隙の無い状態で溶融物が堆積した状態である。(b)及び(c)は冷却水が堆積した炉心

⁸ P. Kudinov and M. Davydov "PREDICTION OF MASS FRACTION OF AGGLOMERATED DEBRIS IN A LWR SEVERE ACCIDENT", NURETH14-543

⁹ Pavel Kudinov, et al., "Fraction of Agglomerated Debris as a Function of Water Pool Depth in DEFOR-A Experiments".

¹⁰ Pavel Kudinov, et al., "Development of Ex-Vessel Debris Agglomeration Mode Map for a LWR Severe Accident Conditions," ICONE-17, Brussels, 2009.

デブリの内部まで浸透しないため、冷却性が阻害される可能性がある。また、堆積形状として、山状に模擬溶融物が堆積した結果が得られている。試験結果からは、水深が深いほど、凝集物の発生割合は小さく、1.5m 程度の水深があればほぼ全ての模擬溶融物は固化した状態で堆積することが分かる（ケース A9 のみ、数%程度の凝集物が発生している）。水深が 1.5m よりも浅い場合に、ケース A7、A9 において他のケースよりも高い凝集割合が観測されているのは、ケース A7、A9 では模擬溶融物の過熱度が高いためである。結論としては、水深が数 m 程度あれば、デブリ粒子を全て固化できるとしている。

また、解析研究により図 3.1-34 に示すようなケーキ状デブリの生成される条件マップが作成されており、そのモデルを実機スケールのジェット径に展開した場合の、堆積モードマップ（ジェット径対水深の図上での、凝集、固化の領域図）が示されている。実機での破損口径に相当する 200mm 程度のジェット径では、水深が約 9m の位置に凝集と固化の分岐点が存在することが分かる。

実機条件では、キャピティ水深は 1～2m、破損口径は数 10cm であり、堆積モードマップに当てはめると、ほぼすべての炉心デブリがケーキ状に堆積する。ケーキ状に堆積した場合、M A A P でモデル化している平板状の発熱体とは、水の浸透、表面形状等の点で性質が異なるが、これらの性質の相違は、平板状の発熱体における水-炉心デブリ間の熱伝達係数として取り扱うことができる。

(1 1) CCI 実験¹¹

CCI (Core Concrete Interaction) 実験は、OECD MCCI プロジェクトの一環として米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) にて行われており、コンクリート侵食が進んだ状態で注水した場合の溶融物の挙動の調査を目的としたものである。CCI 実験では、MCCI 進展後後期の注水によるデブリ冷却性として、現象論的に 4 つのメカニズムに着目しており、それぞれバルク冷却、クラストのひび / 割れ目からの水浸入、溶融物の噴出、クラストの破損である。

CCI 実験装置を図 3.1-35 に示す。実験装置中に、断面 50cm x 50cm、高さ 55cm のつぼがあり、その底部にコンクリート・ベースマットが敷かれている。ベースマットの上部には、溶融物を直接電気加熱により加熱するタングステン電極があり、溶融物は 120kW～150kW で加熱される。また、溶融物の温度を測定するための熱電対がコンクリート中に多数設置されている。その他、溶融物に注水するための給水系、MCCI により発生したガスの換気系等がある。

次に、実験条件を表 3.1-9 に示す。実験は CCI1～3 の 3 回行われている。各実験について、溶融物の加熱後 5.5 時間が経過した時点、あるいはコンクリート侵食が 30cm 進んだ時点で注水を開始する。実験ケース間の主要な条件の違いとしては、コ

¹¹ M.T.Farmer, et al., "OECD MCCI Project Final Report," 2006

ンクリート組成（CCI-2 が石灰岩系、CCI-1, 3 が珪岩質系）、直接電気加熱による加熱量（CCI-1 が 150kW、CCI-2, 3 が 120kW）である。

図 3.1-36 に CCI-1,2,3 実験での水への熱流束を示す。最初の 5 分間は限界熱流束に近い値となっており、CCI-1,3 で $1\text{MW}/\text{m}^2$ 程度、CCI-2 では $3\text{MW}/\text{m}^2$ 近い値になっている。この違いとして、CCI-1,3 では注水時点でクラストが形成されており、CCI-2 では注水時点でクラストが形成されておらず、溶融物と水が直接接触（バルク冷却）したためと推測されている。CCI-2 も、バルク冷却期間（5 分程度）の後に安定クラストが形成されている。

注水後 15-20 分はクラストが熱流束を律速する期間であり、平均化した熱流束を表 3.1-10 に示す。コンクリート分解時にガス発生量が多い石灰岩系コンクリートの場合(CCI-2)には $0.65\text{MW}/\text{m}^2$ 、ガス発生が少ない玄武岩系コンクリートの場合(CCI-1,3)には $0.25\text{MW}/\text{m}^2$ および $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ となっている。この違いから、クラスト形成段階でコンクリート分解ガスが多いほど、クラストのひび／割れ目／空隙が大きくなると考察されている。これらの熱流束をクラスト熱伝導だけで伝えるには、クラスト厚さは 3mm-7mm 程度でなければならないが、測定結果ではクラスト厚さは 5cm-10cm となっており一桁厚い。よって、クラストからの水浸入が冷却を支配していること、水浸入パスとなるクラストの空隙はコンクリートからのガス発生が多いほど大きくなることが考察されている。

溶融物の噴出については、CCI-2 ではみられたが、CCI-1,3 ではみられなかった。溶融物の噴出は、コンクリート分解ガスが放出されるときに巻き込まれると考えられており、ガス放出の少ない玄武岩系コンクリートの場合には起きなかったと推測されている。また、CCI-1 では注水から 10 分で入熱が終了したこと、CCI-3 では部分的にクラストが壁に固着したことも影響していると考えられている。

クラストの破損については、クラスト強度を計測した結果から、クラストは非常に弱いことが判明している。そして、CCI-1 実験からクラスト破損時には $3\text{MW}/\text{m}^2$ を超える熱流束が発生している。

以上より、CCI 実験結果で得られた $0.25\text{MW}/\text{m}^2$ という熱流束は、溶融物上にクラストが形成された状態にあり、かつ、クラストの空隙が小さい場合の値である。

(1 2) SSWICS 試験¹¹

SSWICS (Small Scale Water Ingression and Crust Strength experiments) 試験は、OECD MCCI プロジェクトの一環として米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) にて行われた試験であり、溶融物に上部より注水した場合の冷却性を調査している。試験装置を図 3.1-38 に示す。

SSWICS 試験では、クラストが冷却される過程で内部への浸水性があり除熱量の増加に寄与するものの、溶融物のコンクリート含有率が増加するとドライアウト熱

流束が低下すると報告されている。溶融物とコンクリートの混合物のドライアウト熱流束の測定結果と、Lister/Epstein ドライアウト熱流束モデルの比較結果を図 3.1-39 に示す。試験結果と解析モデルの傾向はよく一致しており、コンクリート含有率が増加するにつれてドライアウト熱流束は減少し、15%程度で約 125kW/m² 程度となり、それ以降は概ね一定となる。

また、SSWICS 試験ではクラストの強度試験も行っている。試験装置図を図 3.1-40 に示す。結果を図 3.1-41 に示すが、上部水プールにより冷却されたクラストの強度は、溶融物の理論密度と比較して二桁程度弱いことが示されている。これは、クエンチの過程で形成されたクラストの亀裂のため、組成から考えられる強度より大幅に小さくなったものである。さらに、試験データから外挿すると、実機スケールではクラストは安定的には存在できないと推測されている。その結果、クラストの破損が断続的に繰り返され、クラストへの水の浸入及び溶融物の噴出による冷却が溶融物の冷却及びコンクリート侵食の停止に寄与するとされている。

(1 3) クラスト強度の JNES 解析研究¹²

OECD-MCCI プロジェクトで実施されたクラスト強度試験(SSWICS 試験)結果に基づき、クラストのヤング率と破損応力を解析的に求めており、図 3.1-42,43 に示す結果が得られている。

その値を実機サイズのクラストに適用し、実機スケールでのクラストの荷重を算出し、健全性を評価している。解析モデルは図 3.1-44 に示すものである。軸対象につき片持ち梁体系にて、クラストの直径と厚さはパラメータサーベイしている。熱応力解析では、クラスト内では崩壊熱 1W/cm³、クラスト温度は一様で、上面と下面で 2000K の温度差を仮定する。

その結果、クラスト直径 2m~6m、クラスト厚さ 20cm~30cm、コンクリート含有割合 23.6%および 41.9%の広い範囲において、クラストは自重と熱応力により、水圧が無くても破損するという結果が得られている。また、以下のように条件に応じた知見が整理されている。

クラストが壁に接着し、下面に空間ができた場合

クラストは自重と熱応力で破損する。

溶融物にクラストが浮いている場合

クラストは熱応力だけで破損する。

クラストが壁に接着し、かつ溶融物上に一部浸っている場合

クラストは浮力と自重が釣り合うことになり、図 3.1-45 に示すようにクラストのアスペクト比に応じた水頭圧により破損する。

¹² Hideo Nagasaka, et al., "Failure Strength and Young's Modulus Evaluation of Solidified Crust based on OECD-MCCI Test," MCCI Seminar 2010, Cadarache, 2010.

(1 4) PULiMS 試験¹³

スウェーデン KTH では、水中での溶融物拡がり挙動を調べる PULiMS 試験を実施している。この実験は、浅い水プールへ溶融した Bi₂O₃-WO₃ 合金を流入させており、その拡がり挙動を調べている。図 3.1-46 に示すように、水中へ流入した溶融物は、瞬時に固化することなく、床上を拡がる様子が観察されている。

3.2 MCCI 実験の知見の整理

本項では、前項に示した国内外の MCCI 実験で得られた知見に関する整理を行う。

PWR プラントでの MCCI 現象については、次の 3 つの段階、

溶融炉心のキャビティへの堆積過程

溶融炉心の冷却過程

コンクリートの侵食過程

で現象が進展していくことから、それぞれの段階ごとに知見を整理する。

溶融炉心のキャビティへの堆積過程

MCCI 実験としては、水プールに溶融物を落下させた条件での実験は DEFOR 実験等のみでありサンプルが少ないため、FCI に関する実験的知見も加味して、溶融炉心のキャビティへの堆積過程に関してまとめる。

○溶融炉心が冠水した原子炉キャビティに落下するとき、次の 3 通りの状態、すなわち、溶融炉心が全て細粒化及び固化されて床面に達する場合、液滴状の粒子が堆積して凝集物を形成する場合、溶融炉心がジェット状のまま床面に到達し、空隙なく溶融デブリが堆積する場合が考えられる。

○これらの現象について、DEFOR-A 実験では、水深が 1.5m の場合、1 ケースを除いて細粒化及び固化する結果が得られている（残りの 1 ケースも液滴のまま凝集する割合は数%程度）。また、FCI 実験（FARO 及び COTELS）においては、FARO 実験では水深 1～2m の場合に溶融物のほとんどが細粒化、COTELS 実験では水深 0.4m の場合に溶融物の 90%以上が細粒化したという、DEFOR 実験と類似した結果が得られている。したがって、実験条件では、溶融炉心の水プール内の堆積過程においては、キャビティの水深が 1～2m 程度確保されていれば、大部分が細粒化及び固化したデブリとして堆積すると考えられる。一方、実機条件では、原子炉容器破損モードは計装用案内管溶接部破損が支配的であり、その後、溶融炉心が破損口を侵食し、デブリジェット径は数十 cm に達する（例として 3 ループプラントの例を図 3.2-1 に示す）ため、水深が数 m 確保されていても細粒化する炉心デブリは僅かであり、

¹³ A.Konovalenko, et al., "Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-coolant Interaction," NUTHOS-9, Kaohsiung, Taiwan, 2012.

相当量の炉心デブリが連続相としてキャビティ床に堆積する。したがって、実機解析においては、エントレイン量、水深、デブリジェット径に関する不確かさを考慮して、評価する必要がある。

- 一方、キャビティ床面でのデブリの拡がりに関しては、凝集したデブリあるいは塊状のデブリが水中で拡がる状況に関する知見は得られていないものの、上記のように溶融炉心の大部分が細粒化及び固化する場合、セルフレベリング実験の結果が適用でき、細粒化デブリが不均一に堆積する場合でも、崩壊熱により粒子ベッド内に沸騰が生じ、粒子が吹き上げられ再堆積する過程でベッドの厚さが均一化される。溶融物組成、質量、温度等の点で実機条件とは異なるものの、PULiMS 試験より、水中へ流入した溶融物は瞬時に固化することなく、床上を拡がる様子が観察されている。

溶融炉心の冷却過程

- SWISS、MACE、WETCOR の各実験において、溶融物上に注水した結果、溶融物の上面に強固なクラストが形成され、これが、実験装置の壁面や電極などにより固定されることにより、水による溶融物の冷却効果を阻害し、溶融物が十分に冷却されない状態となった。これに対し、COTELS 実験では、上面クラストが壁に固定されることなく、注水後約 2 ~ 3 分で、コンクリート温度が抑制でき、水による冷却効果が高いことが示された。

- 溶融物から上面の水プールへの熱流束は、各実験で評価されており、その評価値は 200 ~ 800kW/m² 程度であった。この値は、限界熱流束よりも低い値であり、COTELS 実験では、水がさらに高い除熱能力を有する可能性があると結論付けている。また、MACE 実験では、注水初期に限られるが、1000kW/m² を超える高い熱流束が観測されている。なお、WETCOR 実験、MACE 実験より、水への熱流束が 0.2MW/m² 程度となるのは、デブリが完全固化し、温度も低下し概ね 1500K 程度となった時点である。

CCI 実験では、注水初期には 1MW/m² 程度の限界熱流束に近い除熱が得られている。また、クラストが無い状態での冷却では 3MW/m² の熱流束が観測された。ただし、それらの高い熱流束は初期に限定され、それ以降は 250 ~ 650kW/m² 程度の熱流束となっている。なお、250kW/m² 程度の熱流束となるのは、溶融物上にクラストが形成された状態にあり、かつ、クラストの空隙が小さい場合の値である。

DEFOR 実験より、堆積過程において粒子の凝集物、あるいは空隙の無い溶融物として堆積した場合、冷却性が悪化する可能性がある。また、堆積形状として山状に堆積した場合は、水との接触面積が減少することにより冷却性能が悪化する可能性がある。

SSWICS 試験より、コンクリート侵食が進み、溶融デブリ中のコンクリート含有率

が増加した場合、ドライアウト熱流束が低下する可能性がある。
JNES 研究解析より、実機スケールでは溶融物上面に安定なクラストが形成されることは無いという結論が得られている。

コンクリートの侵食過程

- 水による冷却を伴わない場合のコンクリート侵食速度は、ACE 実験（ケイ土系コンクリート）で 17～20cm/h、SURC 実験（玄武岩系コンクリート）で 26～30cm/h であった。
- SWISS、MACE、WETCOR の各実験において、溶融物の上面に強固なクラストが形成され、これが実験装置の壁面や電極などにより固定されることにより、水による溶融物の冷却効果を阻害したことから、コンクリートの侵食が継続する結果となっている。
- これに対し COTELS 実験では、上記実験のような上面クラストの固定は起こらず、注水後約 2～3 分で、コンクリート温度が抑制された。この要因として、粒子化デブリへの浸水、側面コンクリートとデブリの間への浸水、塊状デブリに生じたクレバスへの浸水などにより冷却が促進されたこと、コンクリート侵食により生じた砂礫が、溶融物とコンクリートの間に溜まり、これが熱抵抗となり、コンクリートへの伝熱を抑制したことによると分析されている。また、早期の注水によりコンクリート侵食深さが小さくなっている。
- また、COTELS 実験では、コンクリート分解に伴って発生する気体により、溶融物が細粒化し、塊状デブリの上に堆積する現象が確認されている。
DEFOR 実験より、堆積過程において粒子の凝集物、あるいは空隙の無い溶融物として堆積した場合、水による冷却性が悪化し、よりコンクリートへの伝熱が増加する可能性がある。また、堆積形状として山状に堆積した場合は、コンクリートとの接触面積が減少することにより侵食量が増加する可能性がある。

3.3 実機への適用性

小規模実験と実機では、スケールの違いによる安定化クラストの形成に違いがあると考えられているため、実験結果の実機への適用性について考察する。

溶融デブリの細粒化の挙動は水深とジェット径に依存するが、KTH で得られた粒子化マップを参考にすると、実機条件では、ジェット径に比べて水深が浅いため、ほとんど細粒化されずに溶融状態で床に到達すると考えられる。

また、小規模実験では溶融物上面に堅固なクラストが形成されると考えられている。さらに、クラストがるつぼに接着して溶融物の間に空間が形成されるため、溶融物からクラストへの直接的な対流伝熱もしくは熱伝導が低下する現象も観測されている。

実機スケールにおけるクラスト強度について JNES にて解析研究が実施されており(3.2 参照) 実機では溶融物上面に上記のような安定なクラストが形成されることは無いという結論が得られている。

よって、実機では溶融炉心が溶融状態で拡がり、一方、上面にできるクラストは安定化しないため、溶融物とキャピティ水の直接接触により除熱されると考えられる。以上を踏まえ、実機での溶融炉心の堆積、冷却過程は以下の通りになると考えられる。また、MCCI 実験での挙動、実機で想定される挙動の概念図を、図 3.3-1, 2, に示す。

【溶融炉心落下時】

溶融デブリは完全には粒子化せず、床上を溶融炉心が拡がり、床面との間にケーキが形成される。ジェットの一部は粒子化して溶融炉心上に降下する。クラストが形成されるまでは水-溶融デブリ間において比較的高い熱流束が維持される。(MACE 実験、CCI 実験より)

【溶融炉心落下後短期】

溶融炉心上面からクラストが形成されるが、自重あるいは熱応力によって破碎していく(JNES 解析研究より)ため、溶融物から水へ限界熱流束に近い伝熱となる。この時の現象は、小規模実験で溶融物へ注水を開始した時点と同等と考えられ、MACE 実験、CCI 実験では 1MW/m^2 以上の値が観測されている。

【長期冷却時】

時間の経過とともに亀裂の入ったクラストが成長し、炉心デブリ全体が固化する。下部のケーキの部分を除いて浸水性があり、その際の限界熱流束は、CCI 実験より 0.5MW/m^2 程度であると考えられる。溶融炉心全体が固化した後の挙動においては、溶融炉心固化物の熱伝導が律速となるが、ひび割れによる伝熱面積の増大と内部への水侵入により除熱が促進される。また、コンクリートと溶融炉心の境界にギャップが発生し、水がギャップへ浸入することで冷却が促進される。(COTELS 実験より)

デブリが固化し安定化クラストが形成され、デブリ温度が 1500K 程度まで下がった場合の熱流束は 0.2MW/m^2 程度と考えられる。(WETCOR 試験、MACE 試験より)

表 3.1-1 ACE 実験：コリウム組成・コンクリート組成

Constituent (kg)	L2	L6
UO ₂	216	219
ZrO ₂	42.5	18.5
Zr	13.4	21.1
Zirc-4	-	1.8
Fe ₂ O ₃	-	-
NiO	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-
SS-304	-	9.1
CaO	3.0	7.3
MgO	-	-
SiO ₂	20.9	16.9
BaO	0.8	0.79
La ₂ O ₃	0.6	0.6
SrO	0.5	0.5
CeO ₂	1.3	1.3
MoO ₂	0.9	0.94
SnTe	0.2	-
ZrTe ₂	-	0.2
Ru	-	0.38
B ₄ C	-	-
Ag	-	1.19
In	-	0.22

Constituent (kg)	L2	L6
SiO ₂	69	69
CaO	13.5	13.5
Al ₂ O ₃	4	4
K ₂ O	1.4	1.4
Fe ₂ O ₃	1.0	1.0
TiO ₂	0.8	0.8
MgO	0.7	0.7
Na ₂ O	0.7	0.7
MnO	0.03	0.03
BaO	0.02	0.02
SrO	0.02	0.02
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01
H ₂ O + CO ₂	7.9	7.9
Concrete Type	S ¹	S ¹
TOTALS	99.1	99.08

コンクリートタイプ
S¹ : ケイ土系

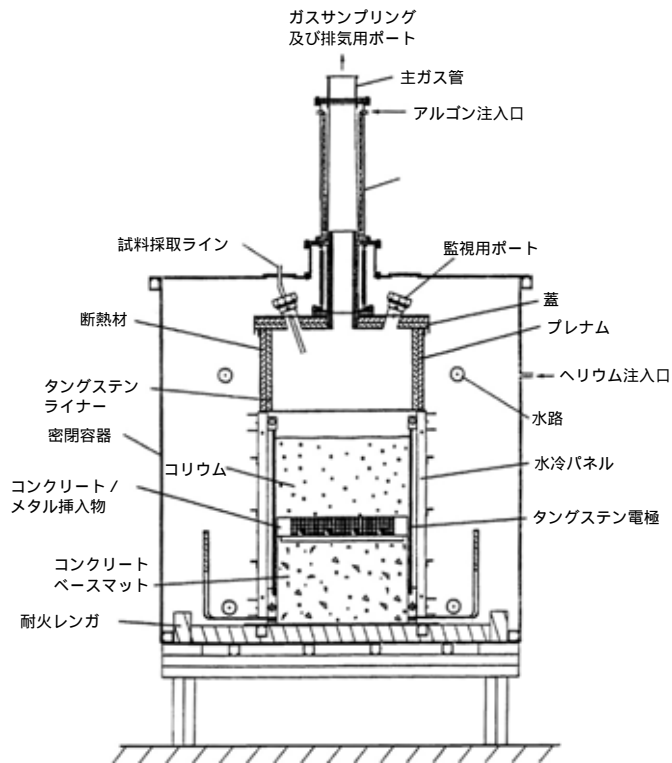
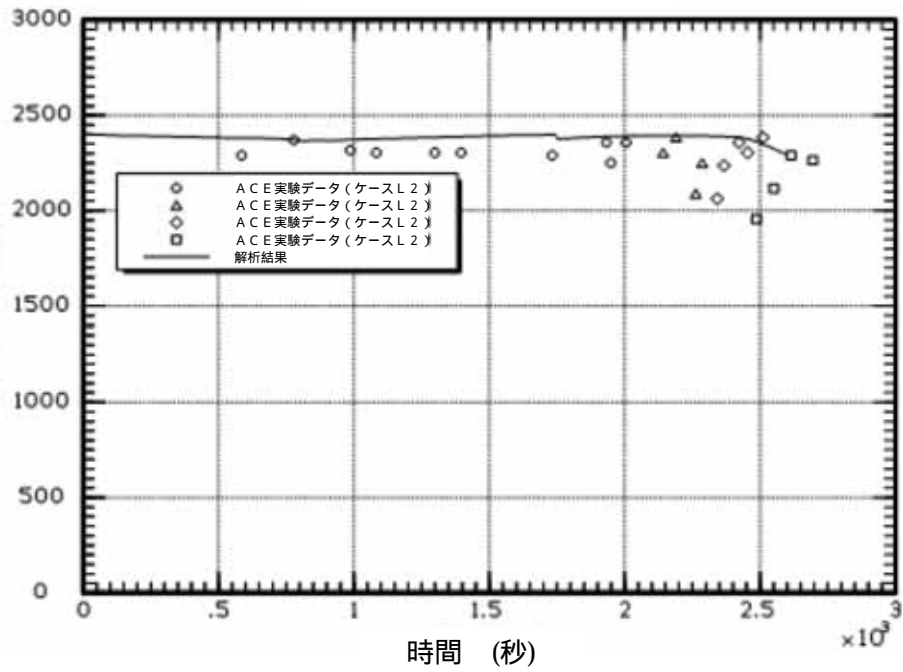
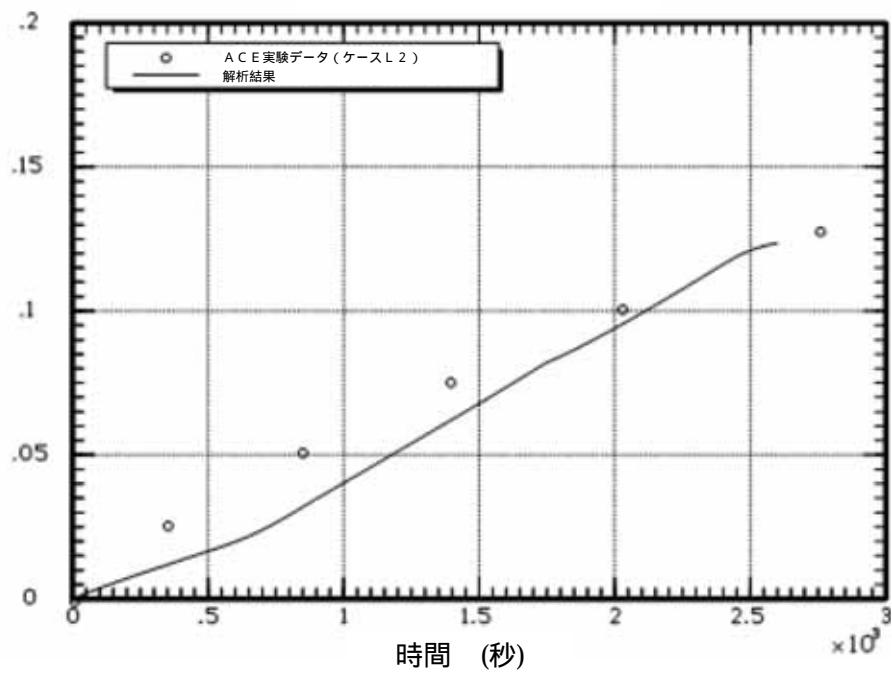


図 3.1-1 ACE 実験装置

コリウム
溶融物
温度 (K)



侵食
深さ
(m)



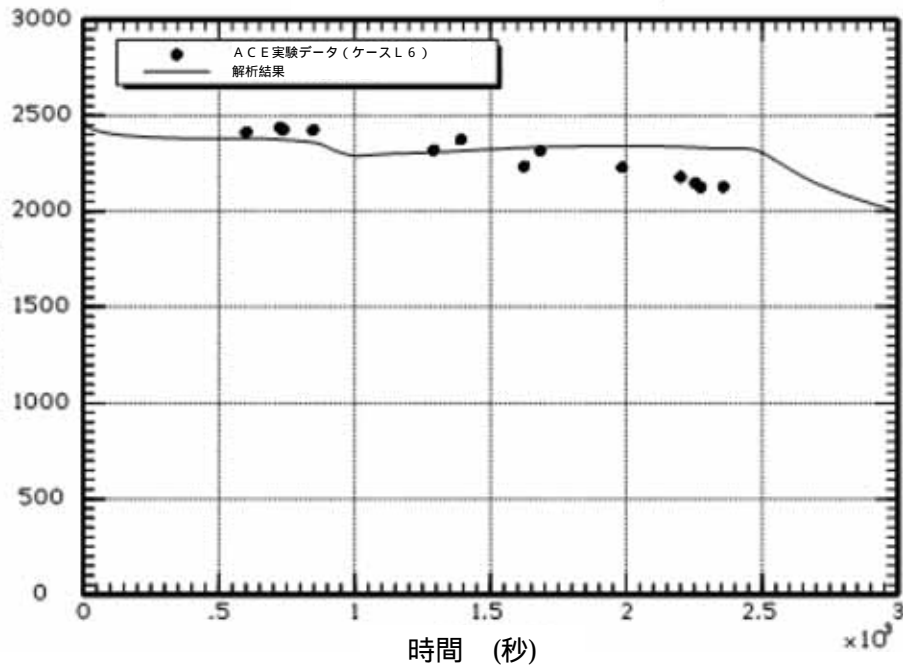
出典 : MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-2 ACE 実験 (ケース L2)

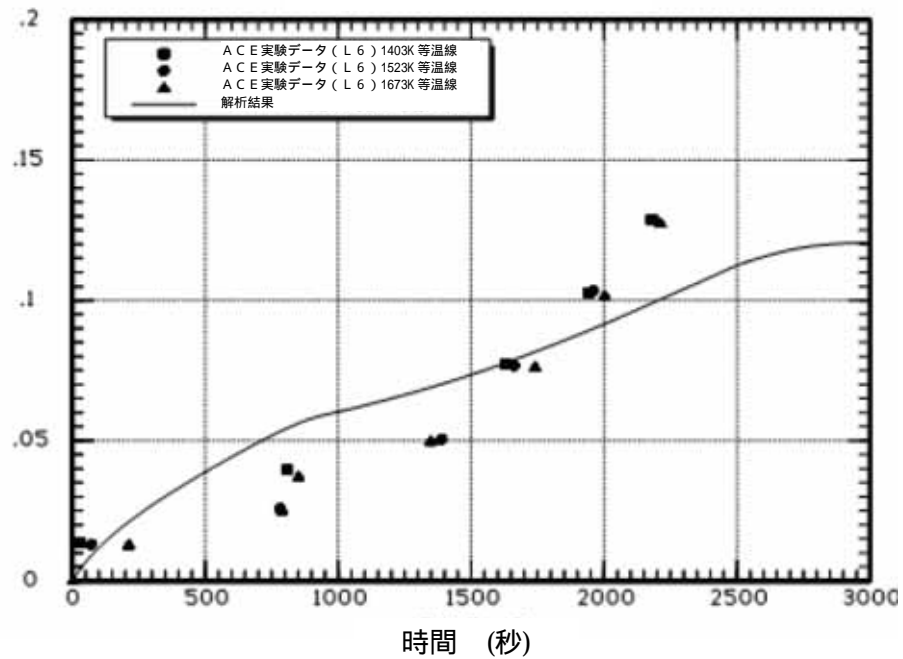
コリウム : PWR コリウム溶融物 (部分酸化)

コンクリート : ケイ土系コンクリート

コリウム
溶融物
温度
(K)



侵食
深さ
(m)

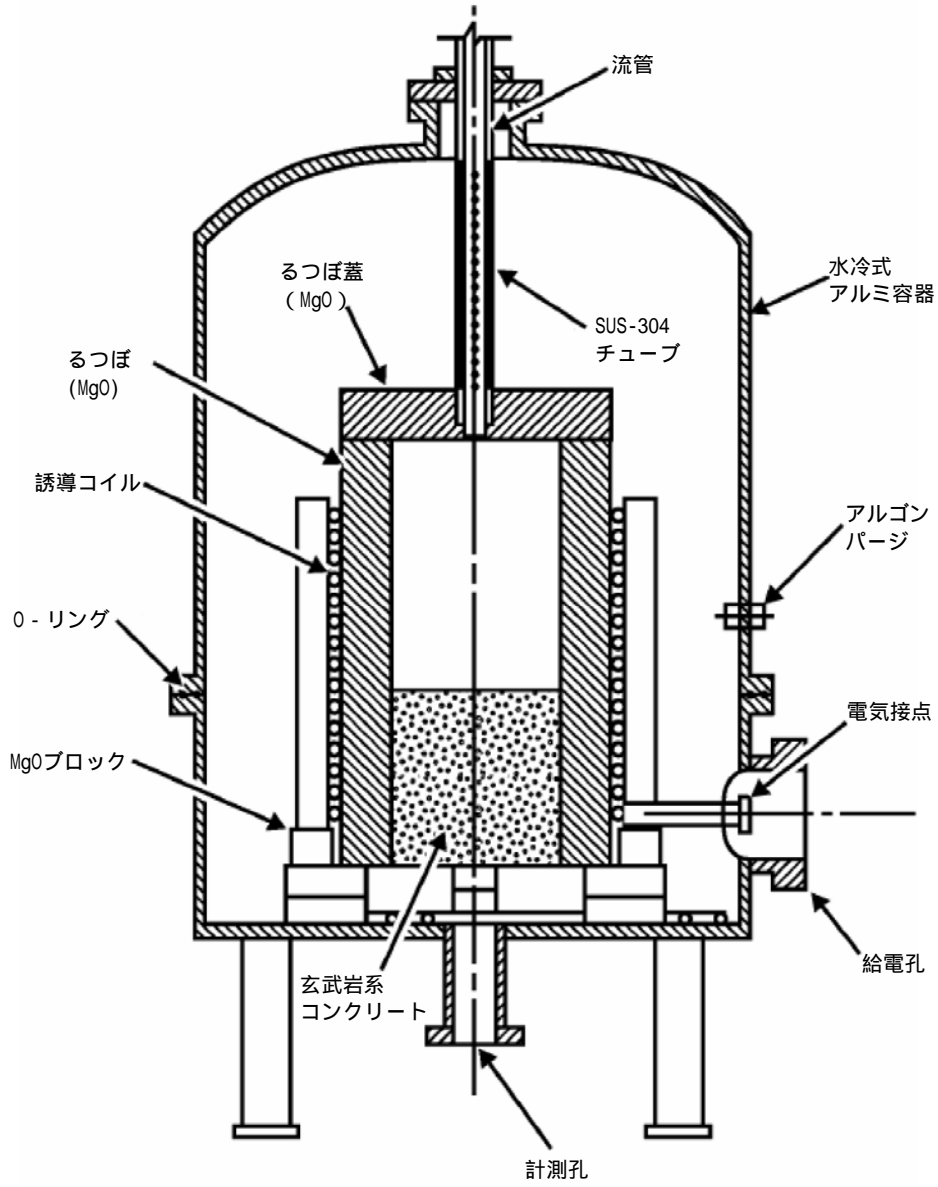


出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-3 ACE 実験 (ケース L6)

コリウム : PWR コリウム溶融物 (部分酸化、制御棒材質を含む)

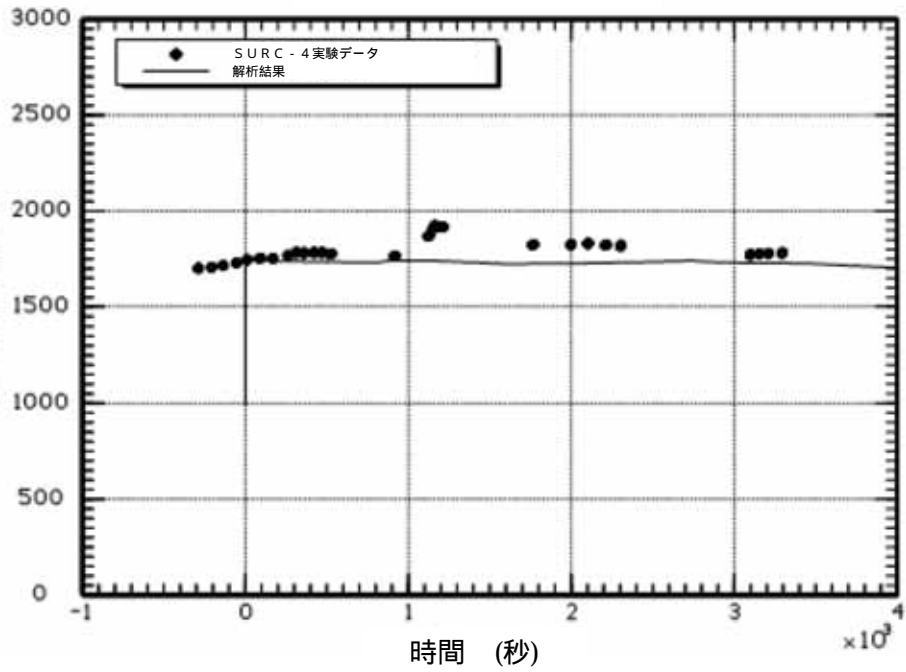
コンクリート : ケイ土系コンクリート



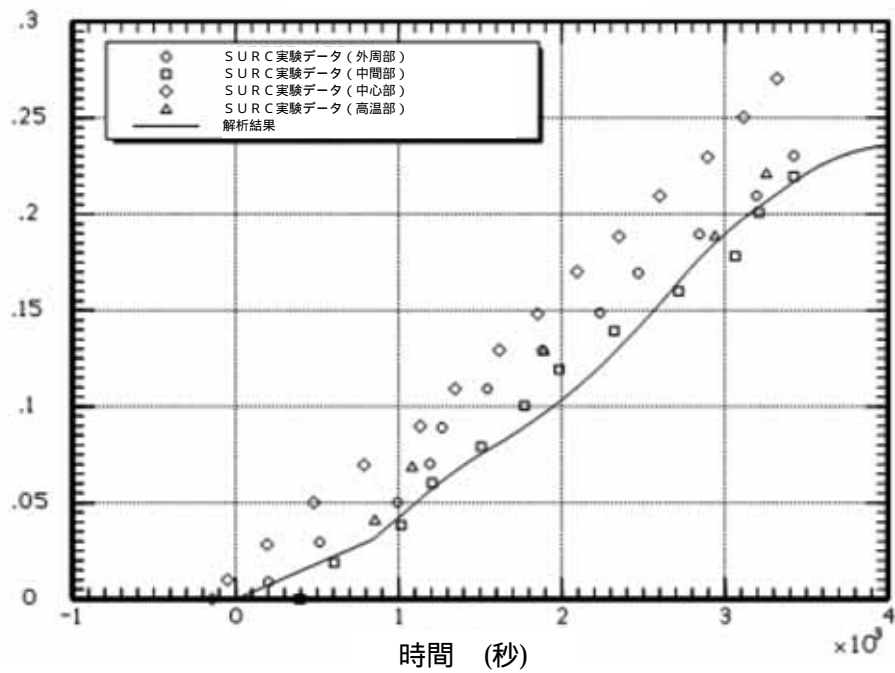
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-4 SURC - 4 実験：実験装置

溶融メタル温度 (K)



侵食深さ (m)



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-5 SURC - 4 実験

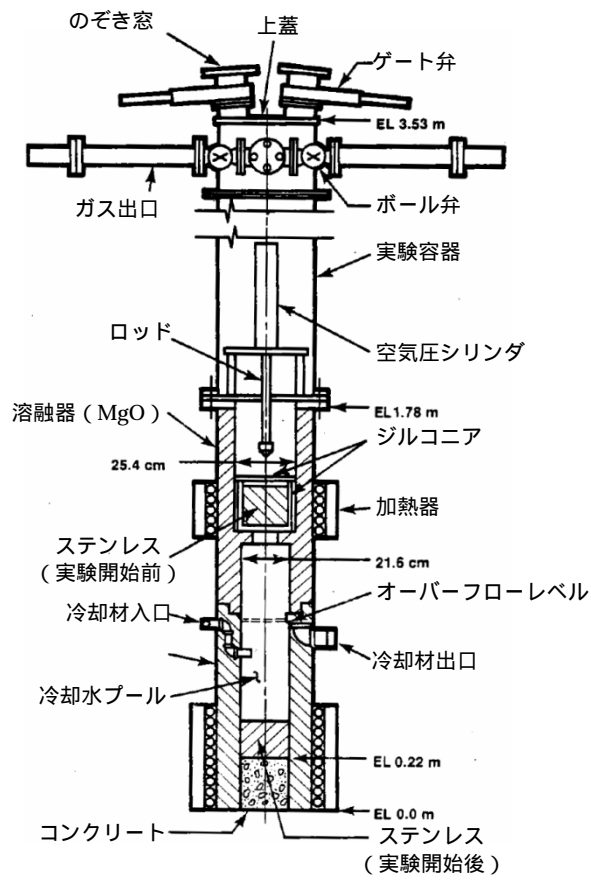


図 3.1-6 SWISS 実験装置概要

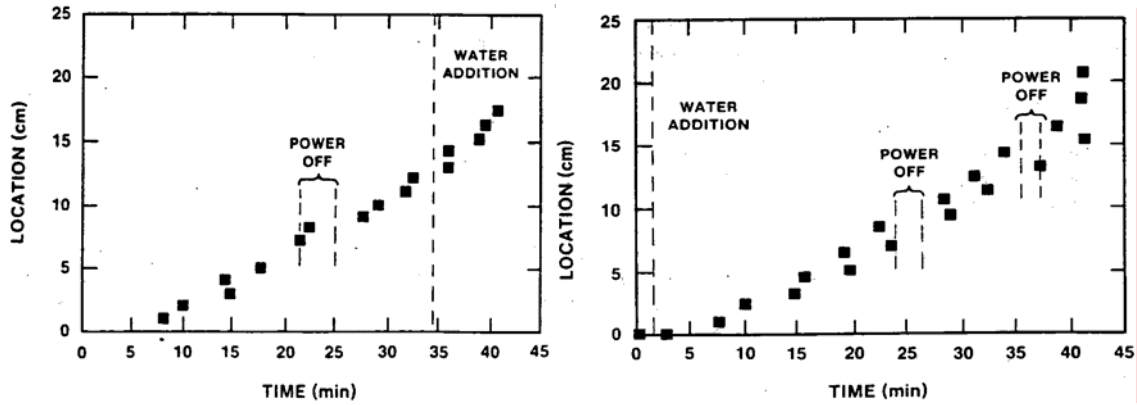


図 3.1-7 SWISS-1 及び SWISS-2 実験結果
(コンクリート温度が 1600K に到達した位置)

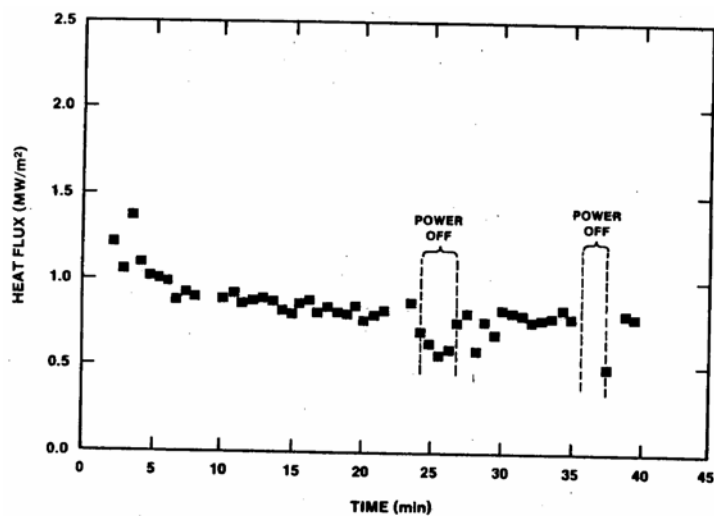


図 3.1-8 SWISS-2 実験結果 (溶融物から水プールへの熱流束)

表 3.1-2 WETCOR 実験 クラストから水への熱流束

Table 6.4 Heat fluxes to water through the thin portion of the crust

t (min)	Heat Transfer Rate (W)	Heat Flux Corrected for Varying Crust Thickness (MW/m^2)
557 to 563	22735 ± 4940	0.52 ± 0.13
582.4	10900 ± 3100	0.25 ± 0.08
589.0	8600 ± 3200	0.20 ± 0.08

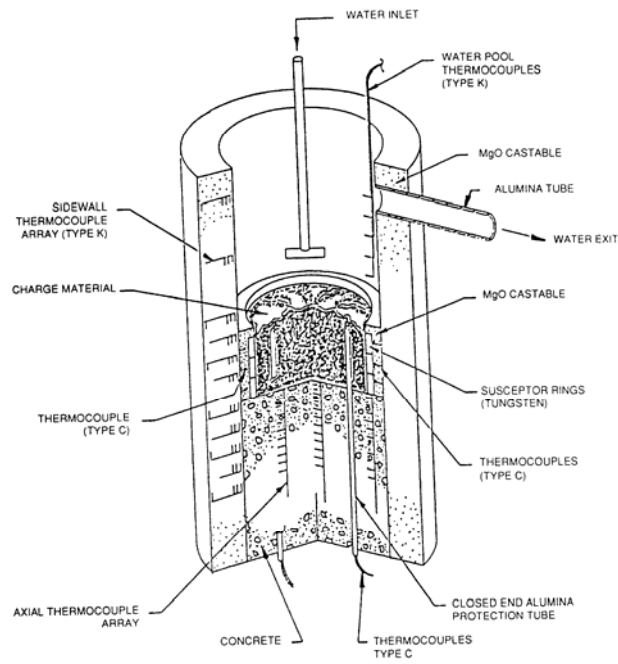


図 3.1-9 WETCOR 実験装置

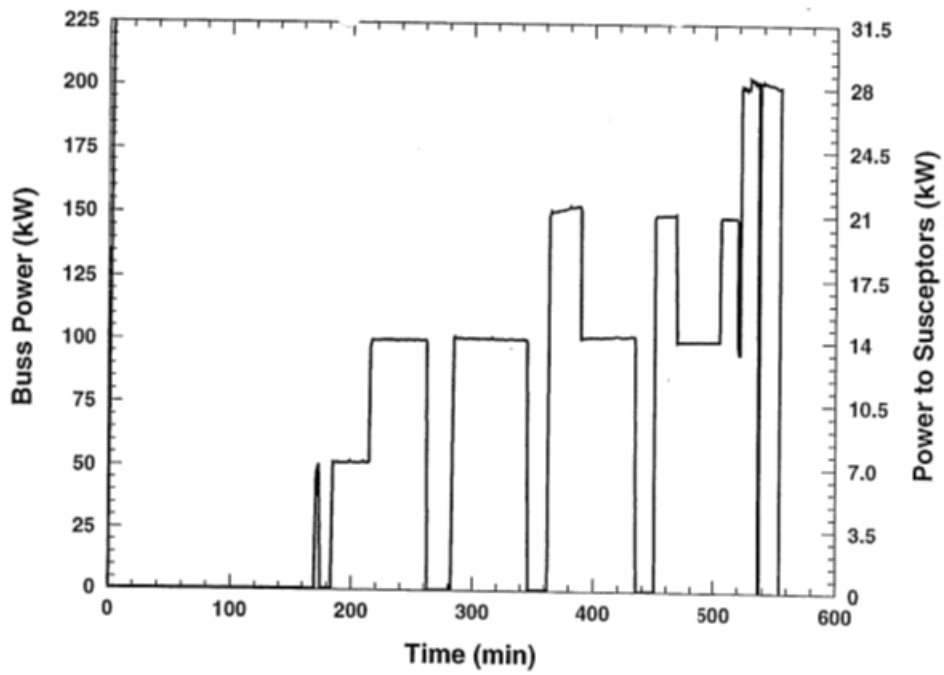


図 3.1-10 WETCOR 実験 メルト加熱履歴

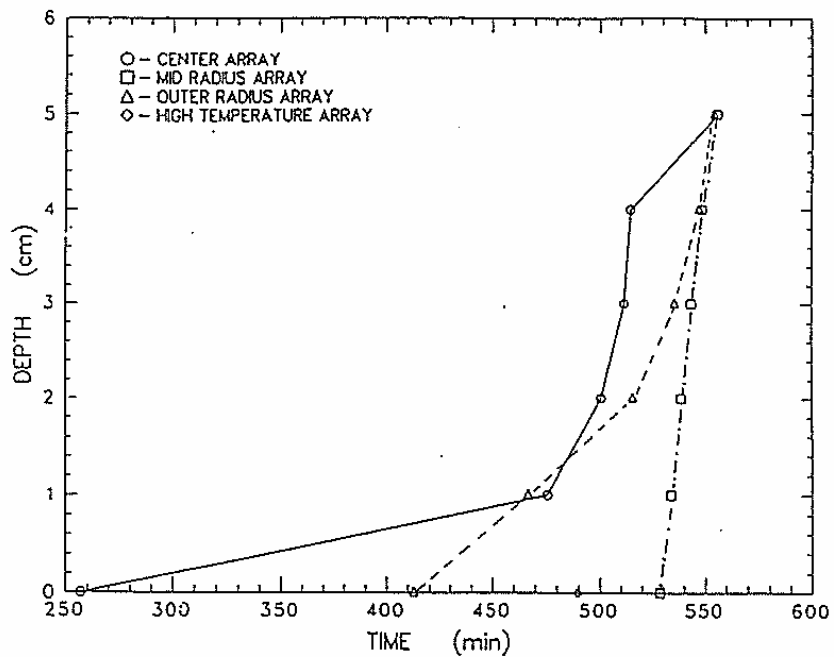


図 3.1-11 WETCOR 実験結果 (コンクリート侵食推移)

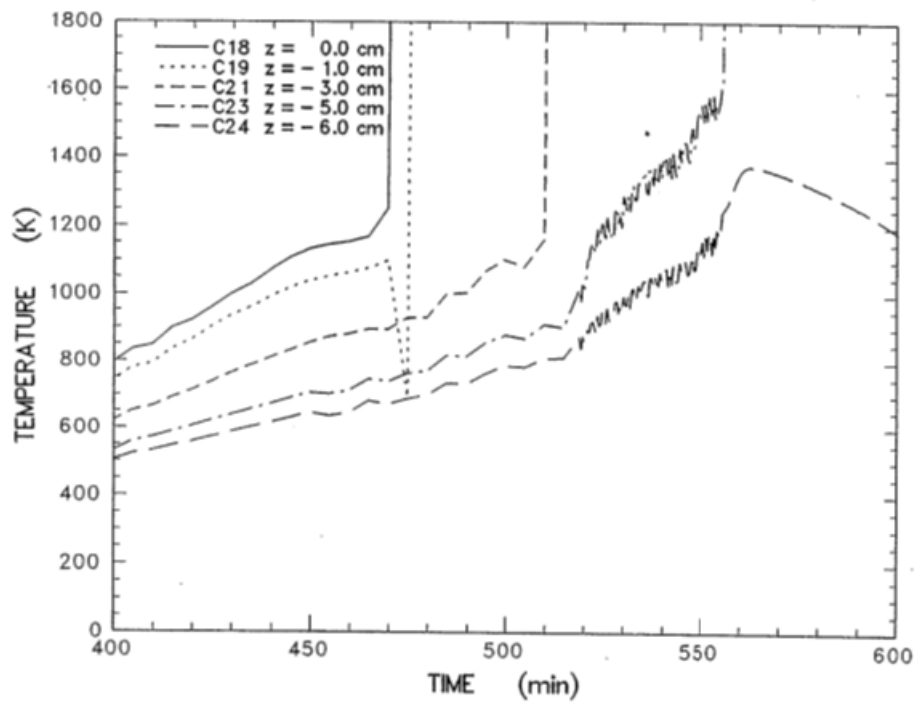


図 3.1-12 WETCOR 実験 コンクリート温度変化 (半径方向中心 $r=0\text{cm}$)

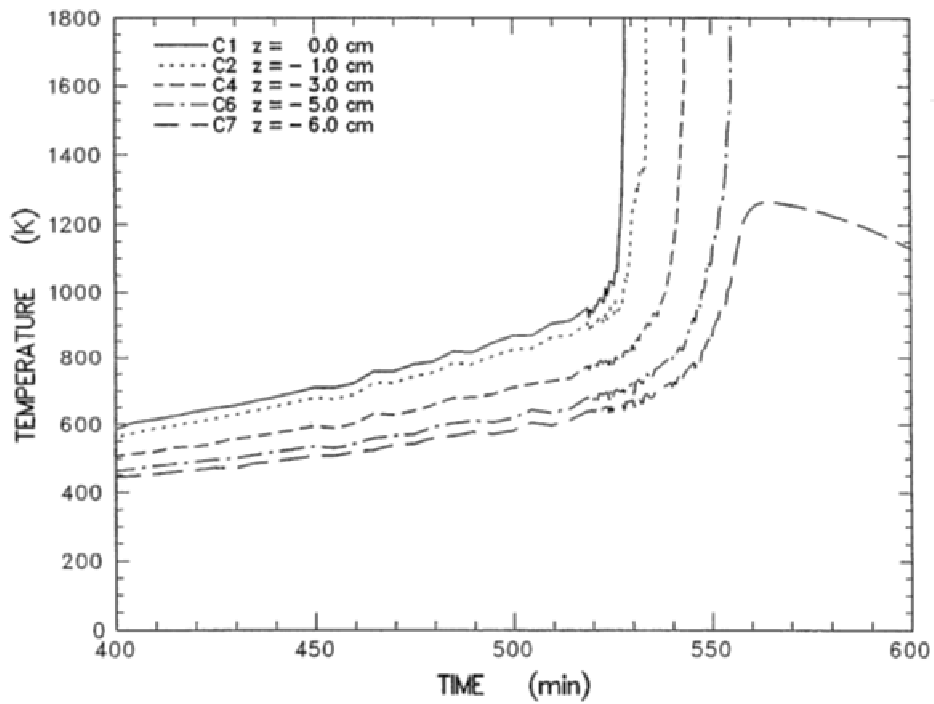


図 3.1-13 WETCOR 実験 コンクリート温度変化 (半径方向中間部 $r=10\text{cm}$)

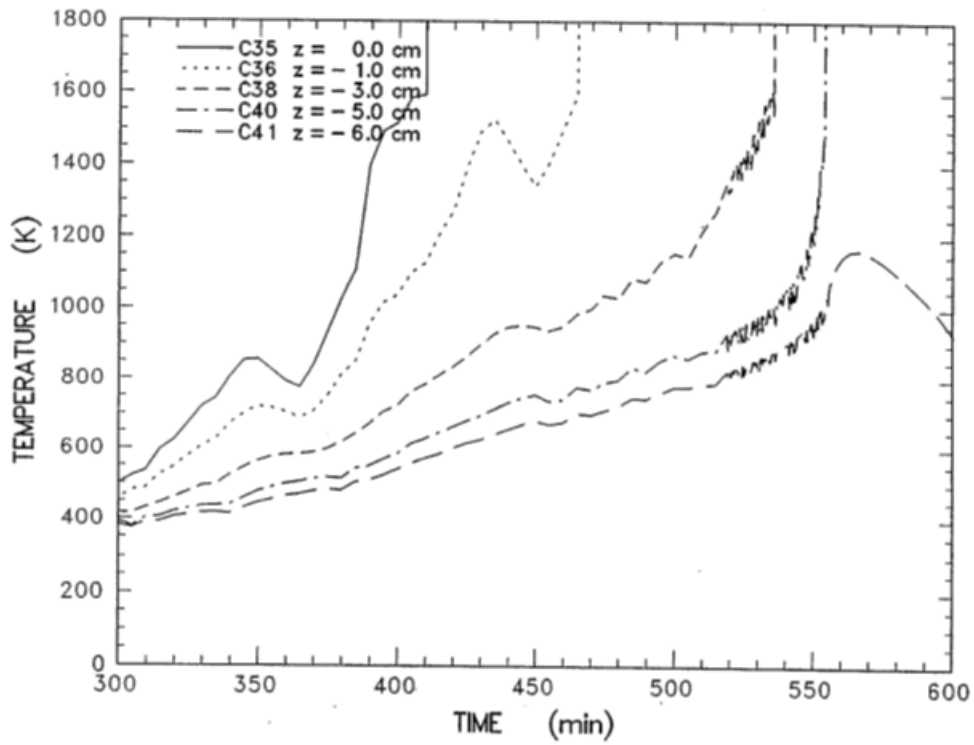


図 3.1-14 WETCOR 実験 コンクリート温度変化 (外周部 $r=15\text{cm}$)

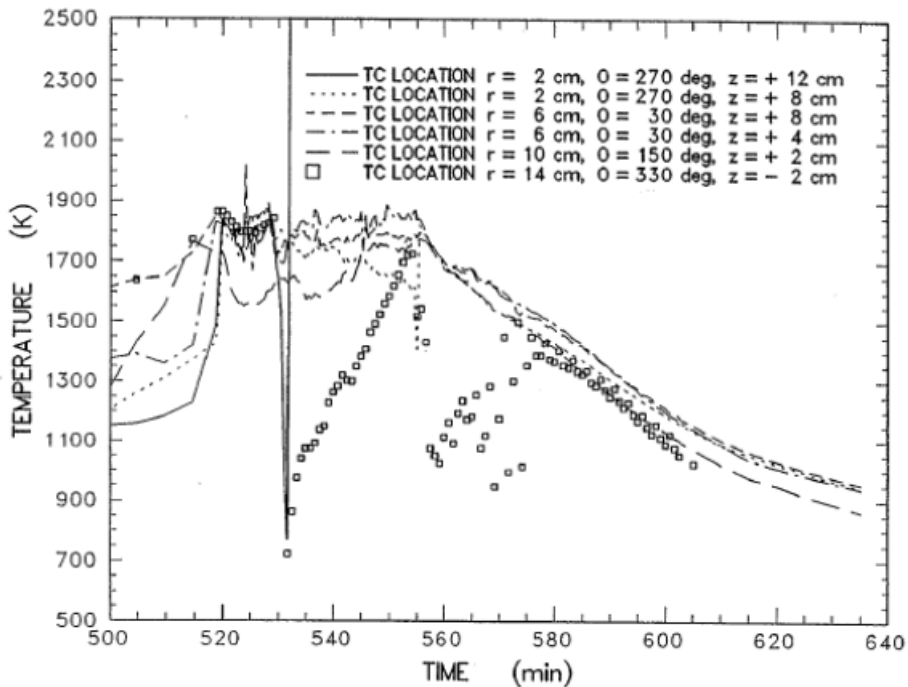


図 3.1-15 WETCOR 実験 メルト温度履歴

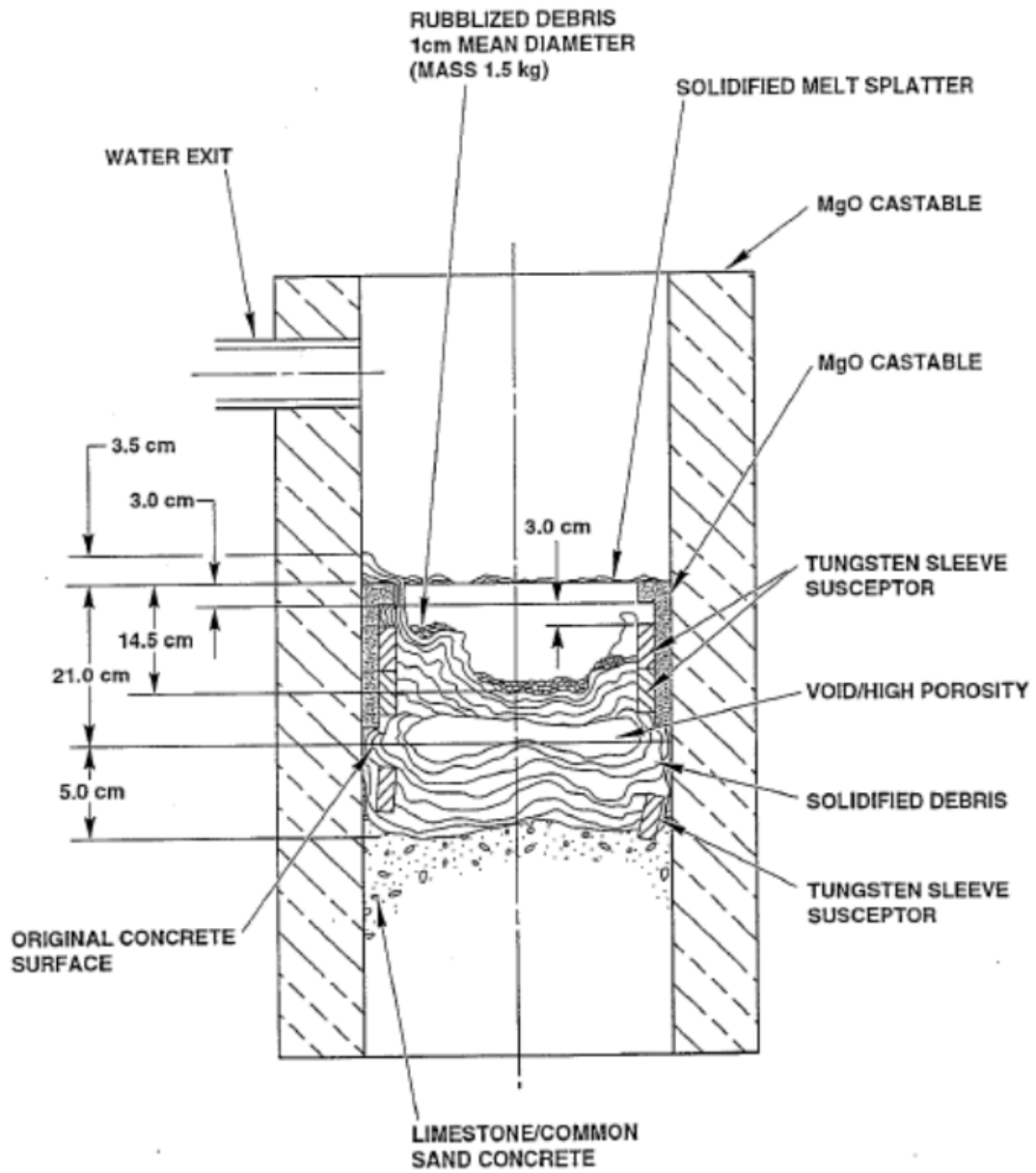


図 3.1-16 WETCOR 実験 試験後テスト部状態

表 3.1-3 MACE 実験条件一覧

	M0	M1b	M3	M4
熔融炉心模擬物重量 (kg)	130	480	1800	480
コンクリート床 浸食開始時熔融炉心 模擬物組成(%)	UO ₂	56	65	57
	ZrO ₂	11	13	29
	Zr	4	3	-
	その他 (コンクリート 成分等)	29	19	14
熔融炉心模擬物深さ (m)	0.15	0.25	0.2	0.3
熔融炉心模擬物初期温度 (K)	2000	2350	2250	2280
熔融炉心模擬物初期発熱量 (kW)	100	130	300	130
コンクリートの種類	石灰岩系	石灰岩系	石灰岩系	ケイ酸系
コンクリート床面積 (m ²)	0.3×0.3	0.5×0.5	1.2×1.2	0.5×0.5
コンクリート床の深さ (m)	0.35	0.55	0.55	0.55
水位 (m)	0.5	0.5	0.5	0.5

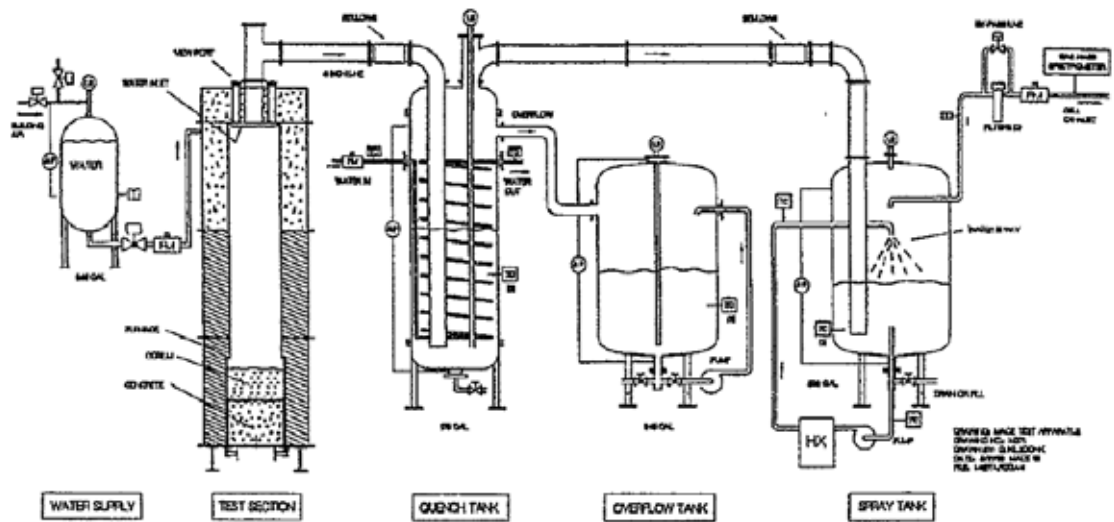


図 3.1-17 MACE 実験装置

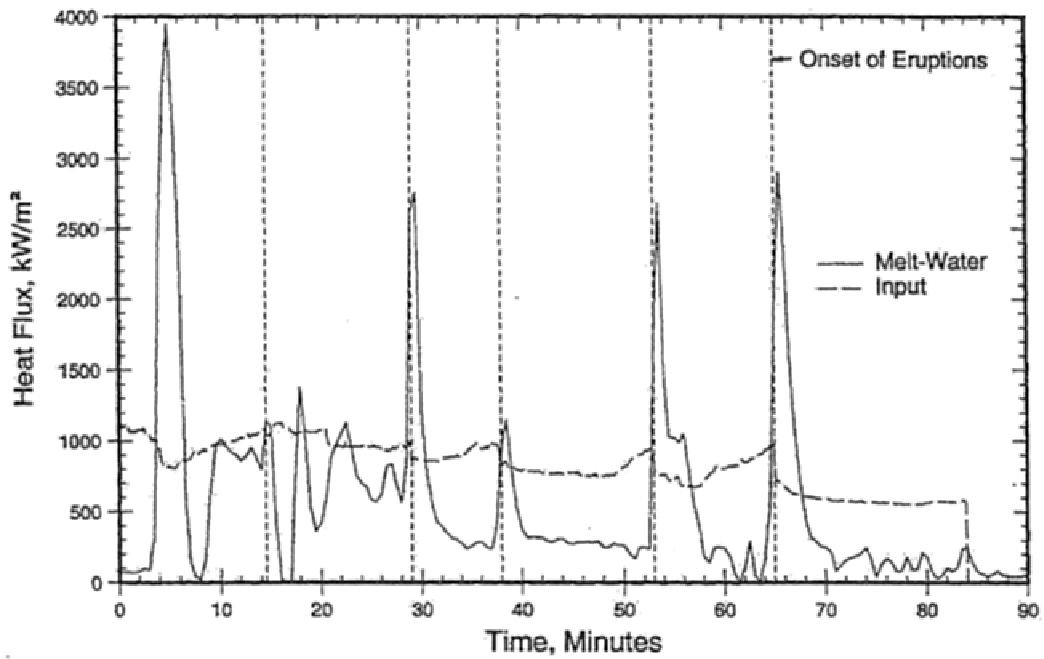


図 3.1-18 MACE-M0 実験での水への熱流束

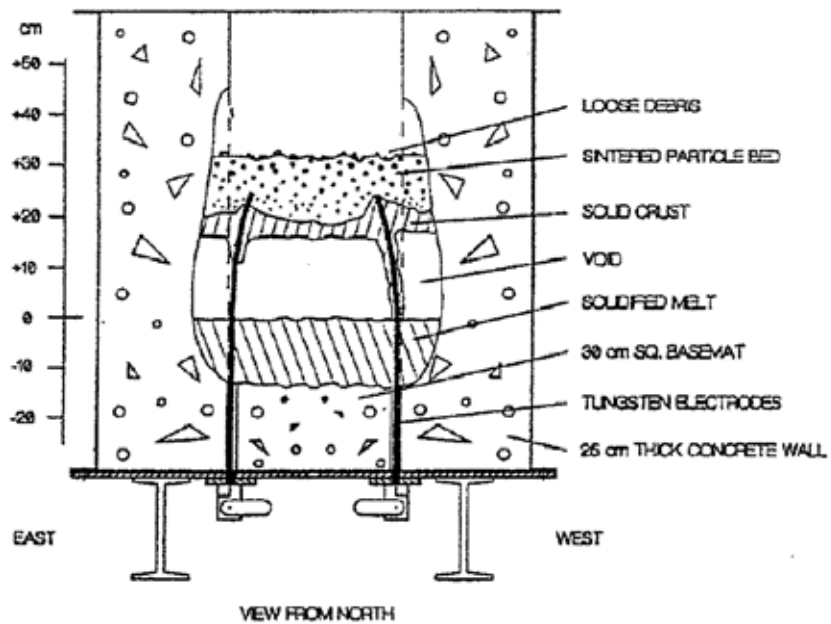


図 3.1- 19 MACE-M0 実験後の熔融炉心模擬物の状況

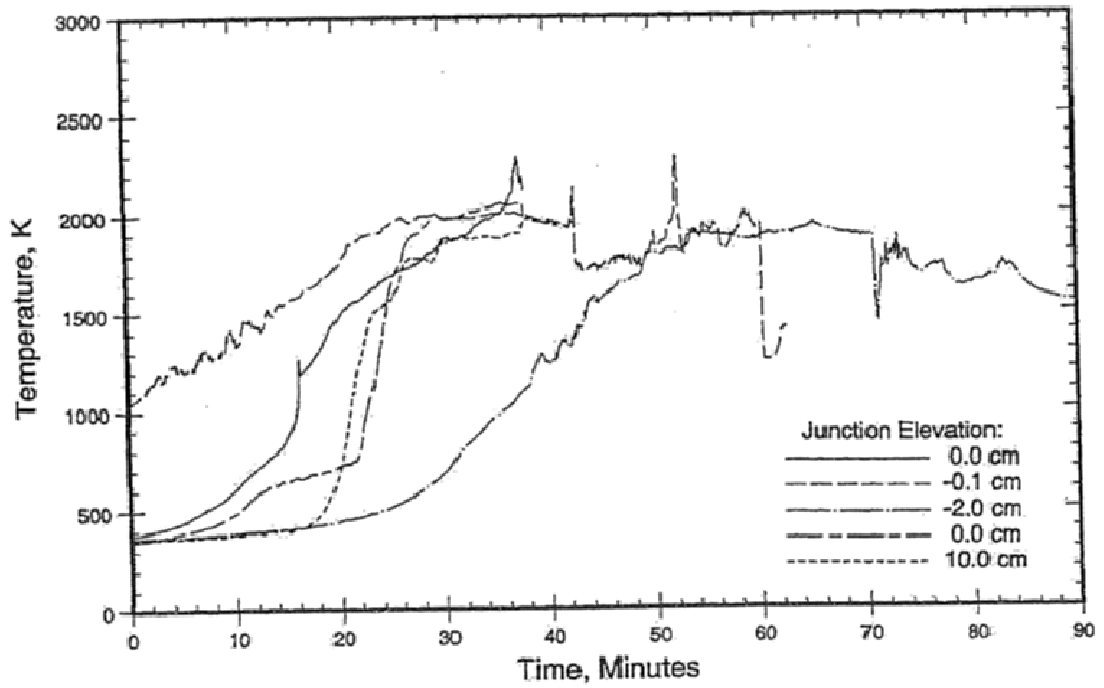


図 3.1-20 MACE-M0 実験での溶融物温度変化

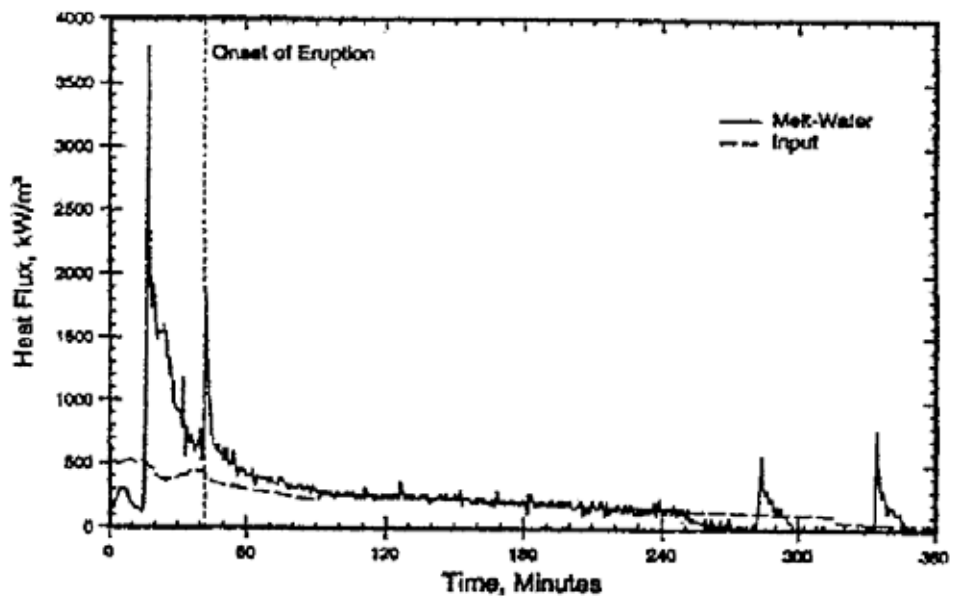


図 3.1-21 MACE-M1b 実験における溶融炉心模擬物から水プールへの熱流束

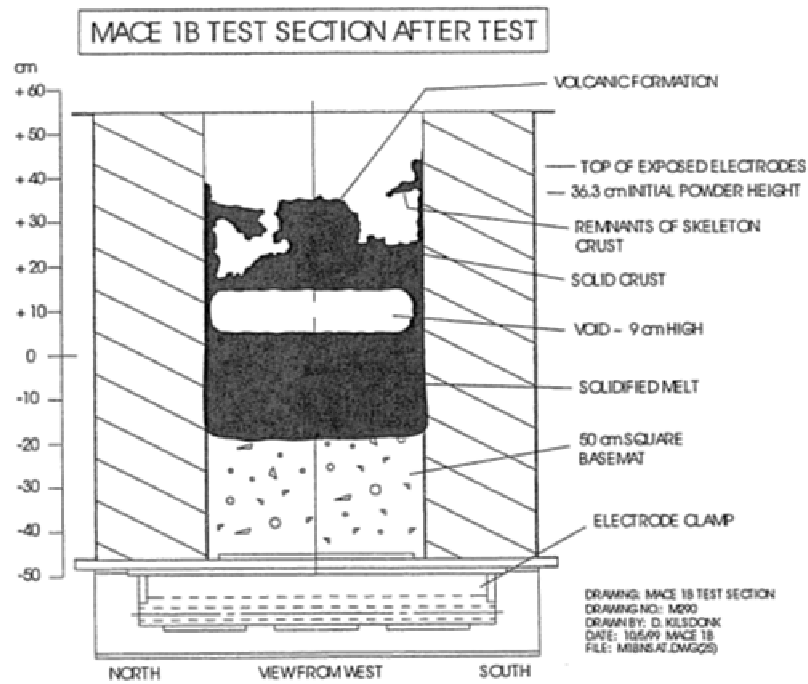


図 3.1-22 MACE-M1b 実験での実験後デブリ状態

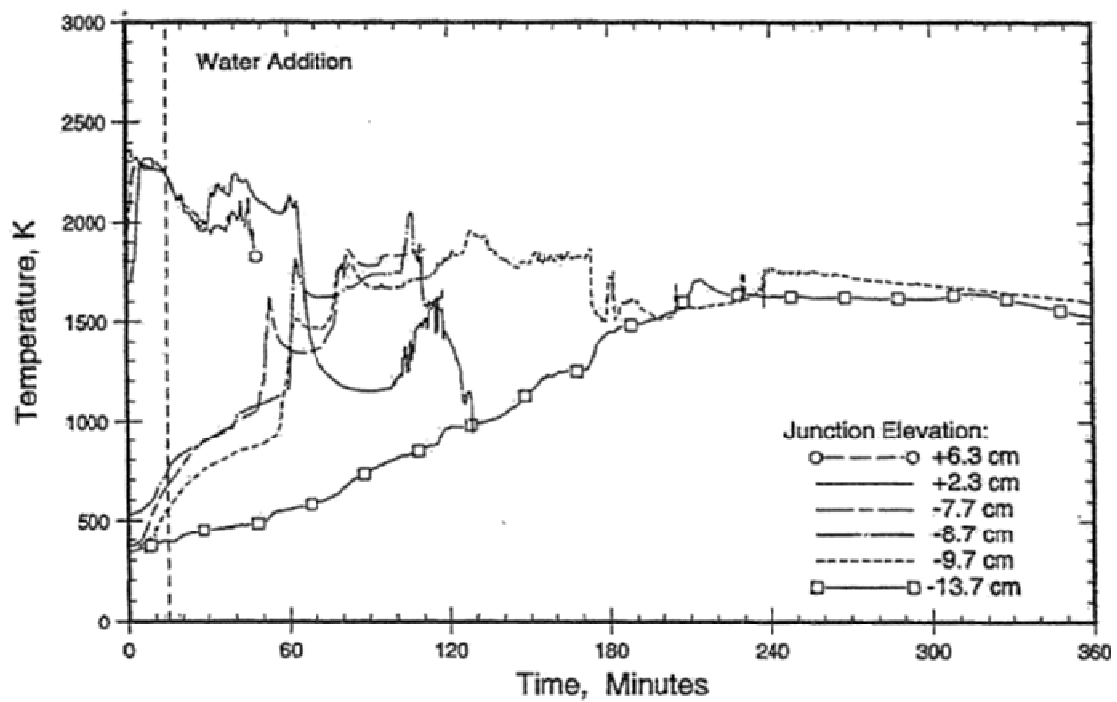


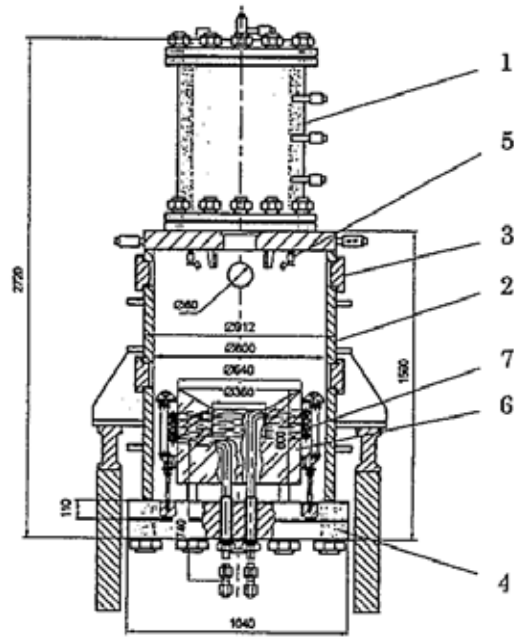
図 3.1-23 MACE-M1b 実験での溶融物温度変化

表 3.1-4 COTELS (B/C) 実験条件一覧

ケース (B/C-)	5a	5	4	2	3	10	6	7	8	9
溶融物タイプ	B			A	B					
溶融物重量 (kg)	47	56	53	45	46	58	56	52	42	51
溶融物出力 (kW)	0	150	170	155	150	150	150	150	110-140	150
コンクリート・トラップ径(m)	0.26			0.36						
注水条件	方式	-	Jet	Jet	Jet	Jet	Jet	Jet	Jet	Spray
	流量 (kg/s)	-	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
	開始時刻 (min)	-	8	8	8	8	15	9	10	10
実験後の溶融物状態										
粒子デブリ重量 (kg)	9	21.5	19	35	33	48	-	-	-	-
(粒子化割合)	(19%)	(38%)	(34%)	(78%)	(72%)	(83%)				
粒子径 16mm 以上 (kg)	0	0	6	0	0	18	-	-	-	-
粒子径 16mm 以下 (kg)	6	21.5	13	32	33	30	-	-	-	-
平均粒子径 (mm)	0.6	0.8	2.2	1.5	1.0	0.4	-	-	-	-
塊状デブリ重量 (kg)	38	34.5	37	10	13	10	53	52	42	51
実験後のコンクリート状態										
侵食量 (底面) (mm)	28	25	22	15	20	40	15	15	15	10
侵食量 (側面) (mm)	13	10	25	15	15	48	8	10	8	~0
砂礫深さ (mm)	12	15	21	18	15	15	10	12	12	5
変色深さ (mm)	40	55	65	40	34	35	32	35	30	20

溶融物タイプ： A : UO₂-78wt%, SUS-5wt%, ZrO₂-17wt%, Zr-0wt%

B : UO₂-55wt%, SUS-15wt%, ZrO₂-5wt%, Zr-25wt%



1:EMF, 2:Test vessel, 3:Instrumentation nozzle,
4:Removable bottom, 5:Water injection nozzle,
6:Concrete trap, 7:Induction heater

図 3.1-24 COTELS (B/C) 実験装置

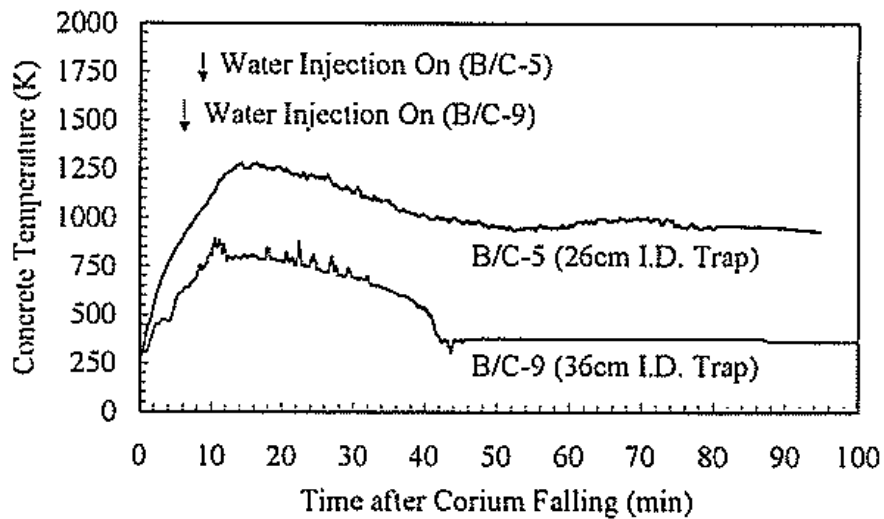


図 3.1-25 COTELS (B/C) 実験におけるコンクリート温度挙動

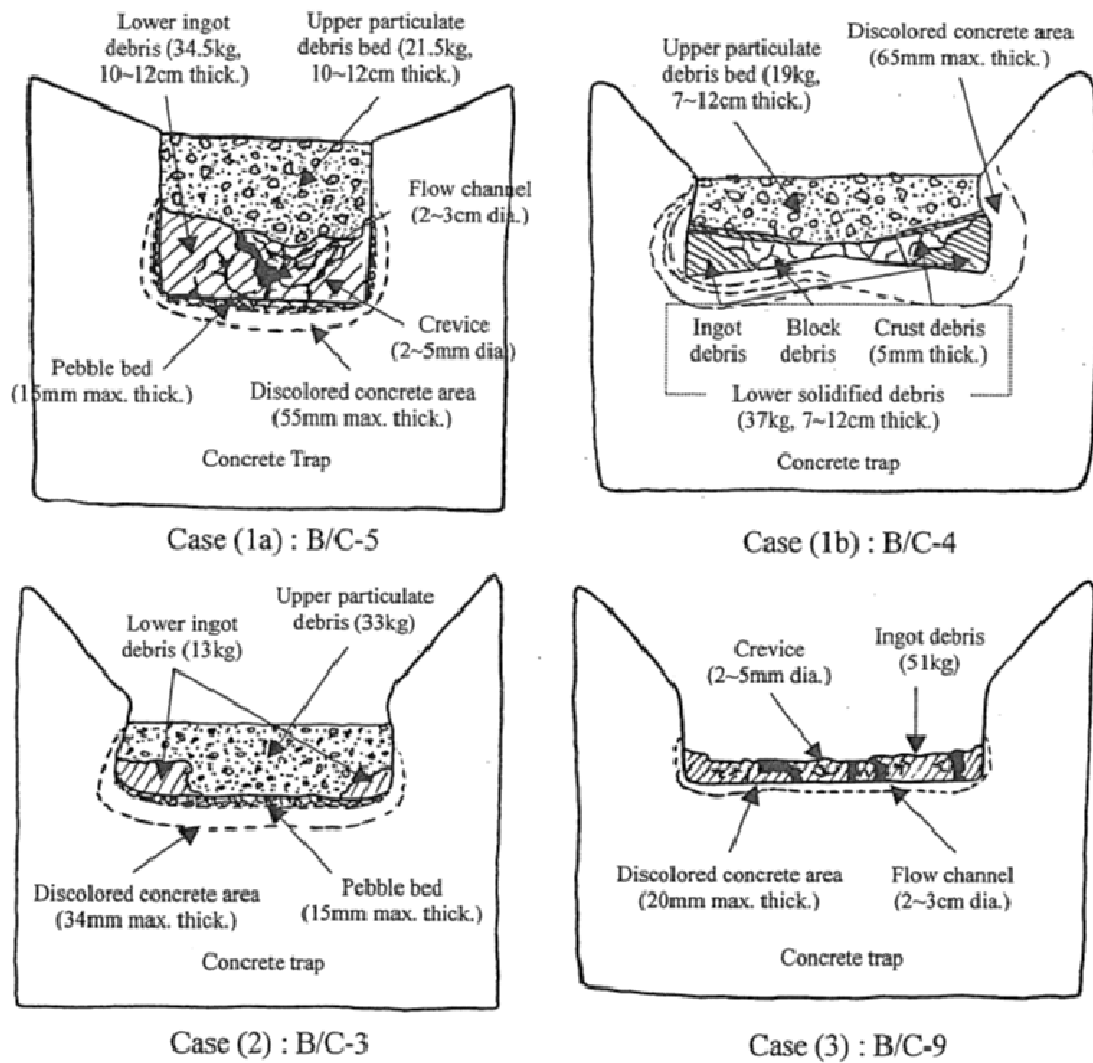


図 3.1-26 COTELS 実験での溶融物固化状態

表 3.1-5 FARO 実験条件及び結果一覧

実験 ID	UO ₂ 質量割合	溶融物質量 kg	溶融物温度 K	溶融物落下径 mm	雰囲気圧力 MPa	水深 m	サブクール度 K	水蒸気爆発
L-06	0.8	18	2923	100	5	0.87	0	なし
L-08	0.8	44	3023	100	5.8	1.00	12	なし
L-11	0.77	151	2823	100	5	2.00	2	なし
L-14	0.8	125	3123	100	5	2.05	0	なし
L-19	0.8	157	3073	100	5	1.10	1	なし
L-20	0.8	96	3173	100	2	1.97	0	なし
L-24	0.8	176	3023	100	0.5	2.02	0	なし
L-27	0.8	129	3023	100	0.5	1.47	1	なし
L-28	0.8	175	3052	50	0.5	1.44	1	なし
L-29	0.8	39	3070	50	0.2	1.48	97	なし
L-31	0.8	92	2990	50	0.2	1.45	104	なし
L-33	0.8	100	3070	50	0.2	1.60	124	なし

0.8 の場合の組成は 80%UO₂ + 20%ZrO₂、0.77 の場合の組成は 77%UO₂ + 19%ZrO₂ + 4%Zr。

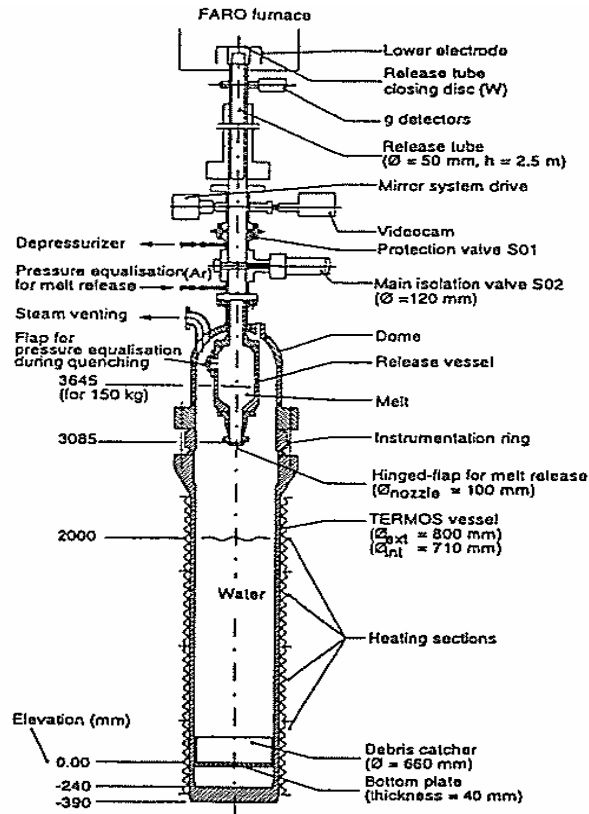
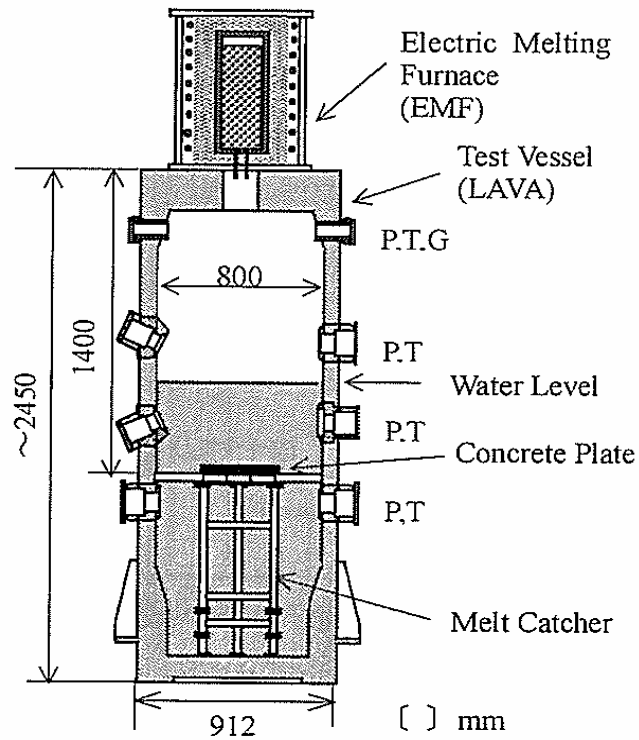


図 3.1-27 FARO 実験装置

表 3.1-6 COTELS (A) 実験条件及び結果一覧

実験 ID	UO ₂ 割合	溶融物質質量 kg	溶融物温度 K	雰囲気圧力 MPa	水深 m	サブクール度 K	水蒸気爆発
A-1	0.55	56.30	3050	0.20	0.4	0	-
A-4	0.55	27.00	3050	0.30	0.4	8	-
A-5	0.55	55.40	3050	0.25	0.4	12	-
A-6	0.55	53.10	3050	0.21	0.4	21	-
A-8	0.55	47.70	3050	0.45	0.4	24	-
A-9	0.55	57.10	3050	0.21	0.9	0	-
A-10	0.55	55.00	3050	0.47	0.4	21	-
A-11	0.55	53.00	3050	0.27	0.8	86	-

いずれも UO₂ : 55wt%、Zr : 25wt%、ZrO₂ : 5wt%、SS : 15wt%の混合物



P: Pressure, T: Temperature,
G: Gas sampling line

図 3.1-28 COTELS (A) 実験装置

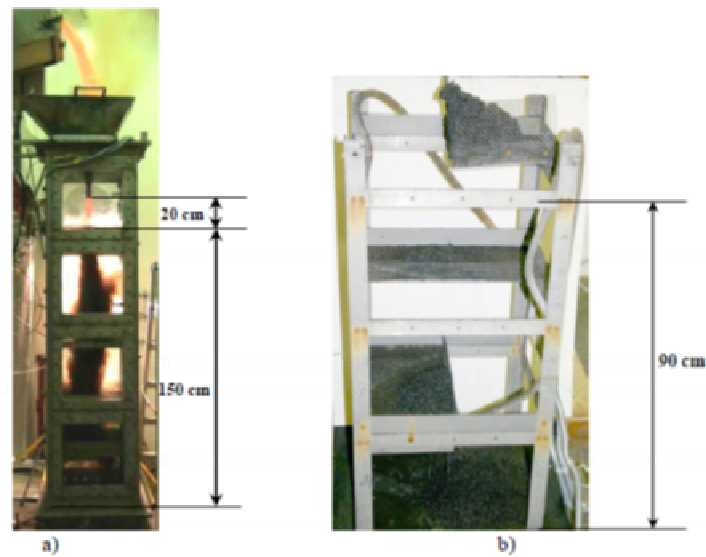


図 3.1-30 DEFOR 試験装置全体およびデブリキャッチャー

表 3.1-8 DEFOR-A 実験の実験条件

	単位	A1	A2	A4	A5	A6	A7	A8	A9
溶融物温度	K	1253	1246	1221	1245	1279	1349	1255	1343
溶融物過熱度	K	110	103	78	102	136	206	112	200
ジェット初期径	mm	10	20	20	10	12	25	25	20
溶融物の注入時間	s	38	11	11	38	20	10	10	11
溶融物注入高さ	m	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.62	1.62	1.7
水面までの距離	m	0.18	0.18	0.2	0.18	0.18	0.2	0.2	0.18
水プール深さ	m	1.52	1.52	1.5	1.52	1.52	1.42	1.42	1.52
水プール初期温度	K	346	367	346	364	346	356	355	355
水プールサブクール度	K	27	7	27	9	27	17	18	18

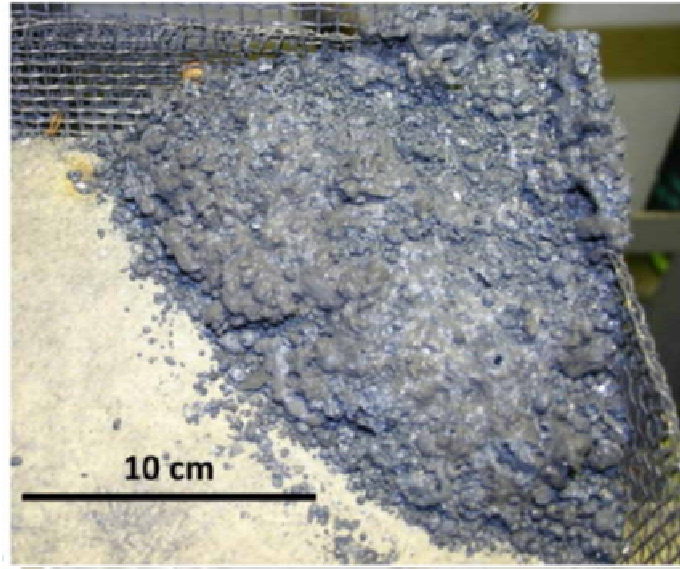


図 3.1-31 DEFOR-A8 キャッチャー 1 のケーキ状デブリ

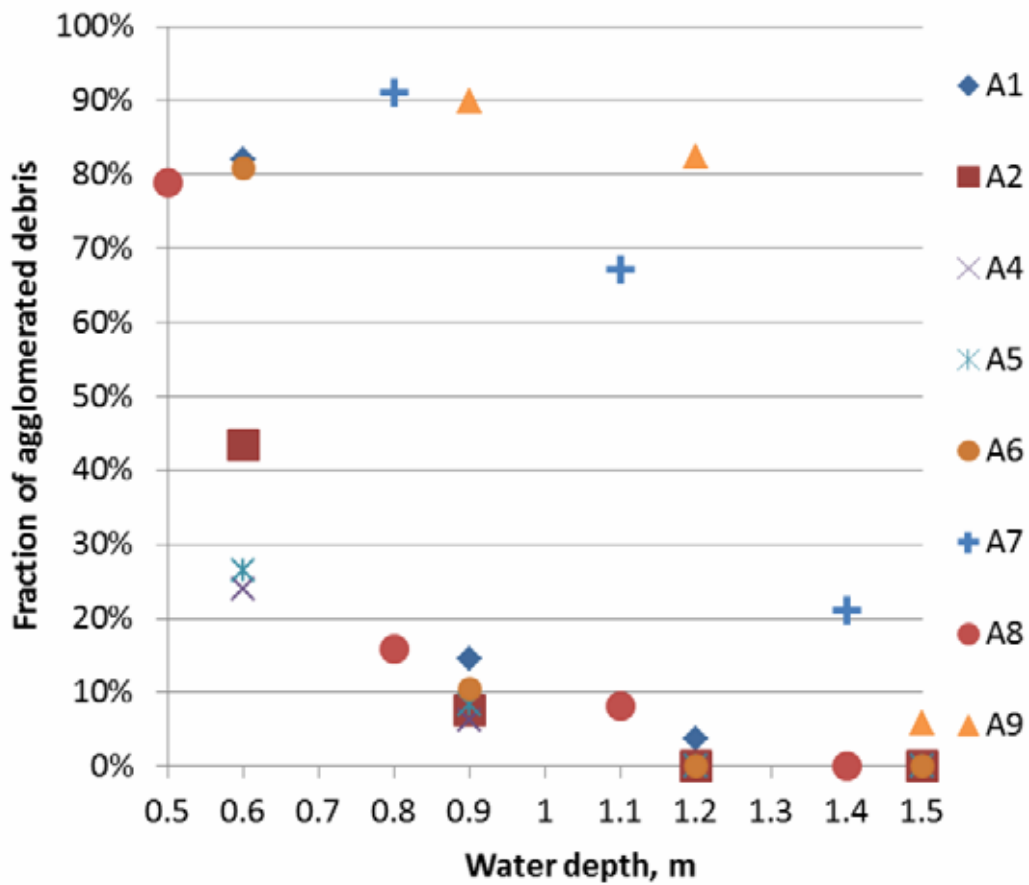


図 3.1-32 DEFOR-A 実験結果

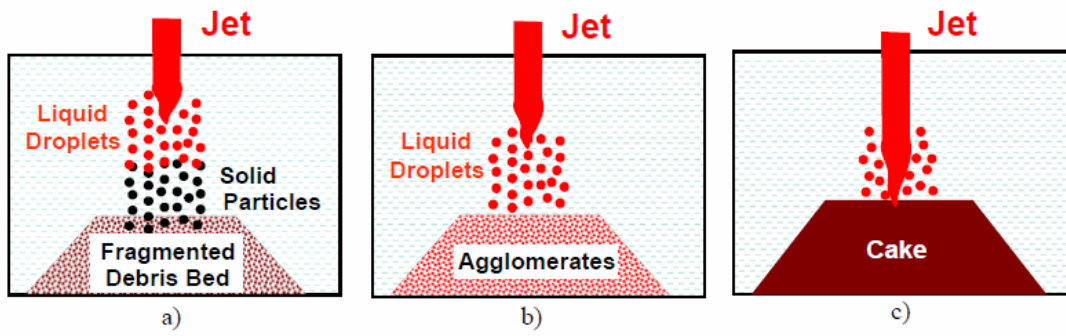


図 3.1-33 DEFOR 実験における溶融物凝集の概念図

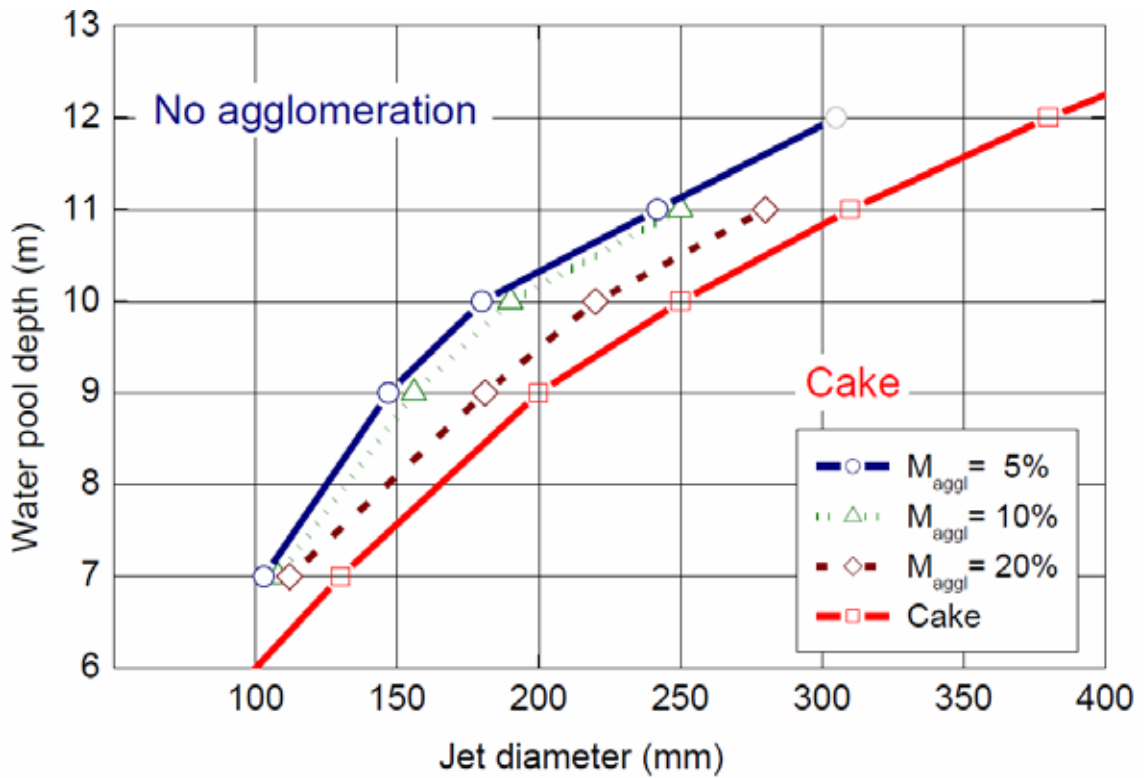


図 3.1-34 KTH による凝集モードマップ

表 3.1-9 CCI 実験の主要実験条件

	CCI-1	CCI-2	CCI-3
溶融物	PWR+8% concrete	同左	PWR+15% concrete
コンクリートタイプ	珪岩質系	石灰岩系	珪岩質系
溶融物重量	400kg	同左	375kg
圧力	大気圧	同左	同左
初期溶融物温度	1950	1880	1950
直接電気加熱量	150kW	120kW	120kW
注水条件	加熱後 5.5 時間ある いは 30cm 侵食	同左	同左
注水量、温度	2l/秒、20	同左	同左
注水停止条件	50cm ± 5cm	同左	同左

表 3.1-10 CCI 実験の 15-20 分における水への熱流束

Table 3-7. Debris-Water Heat Fluxes for CCI Tests Averaged Over the Time Interval 15-25 Minutes after Cavity Flooding.

Test	Concrete Type	Heat Flux (kW/m ²)	Concrete Gas Content (Wt %)	Crust Concrete Content (Wt %)	Note(s)
CCI-1	SIL (US)	250	4.6	22.3	Assumed heat transfer surface area: 0.25 m ² (PTE indicates that water did not penetrate sidewall crusts to cool the top surface of the corium interacting with the sidewalls).
CCI-2	LCS	650	34.1	69.4	Assumed surface heat transfer area: 0.50 m ² (PTE indicates that water was able to contact the entire melt upper surface area). Water ingress at the interface between the corium and concrete walls also contributed to cooling, but this effect has not been separated from the overall heat flux estimate.
CCI-3	SIL (EU)	500	13.5	47.8	See Note for Test CCI-1.

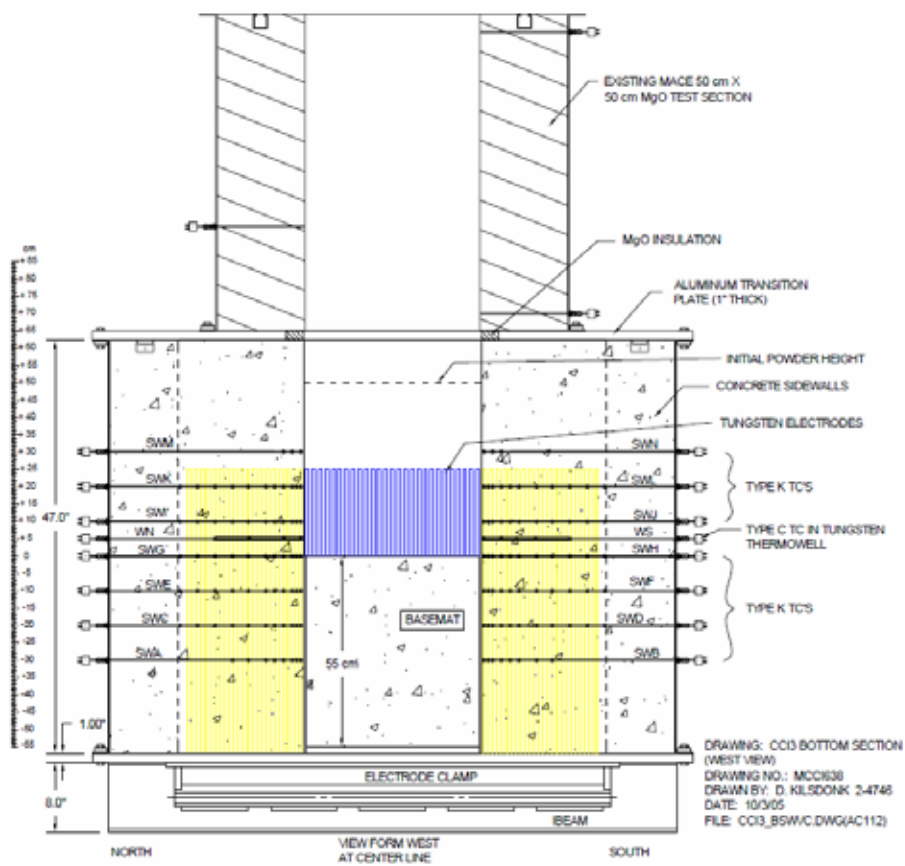


图 3.1-35 CCI 实验装置

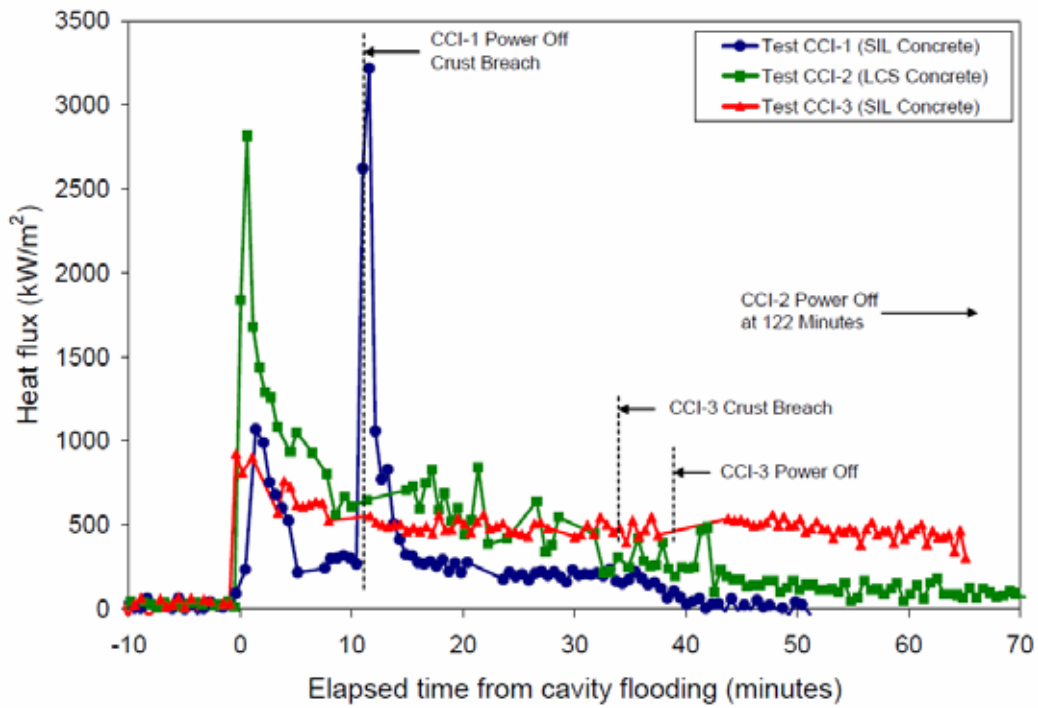


図 3.1-36 CCI 実験における水-デブリ間の熱流束

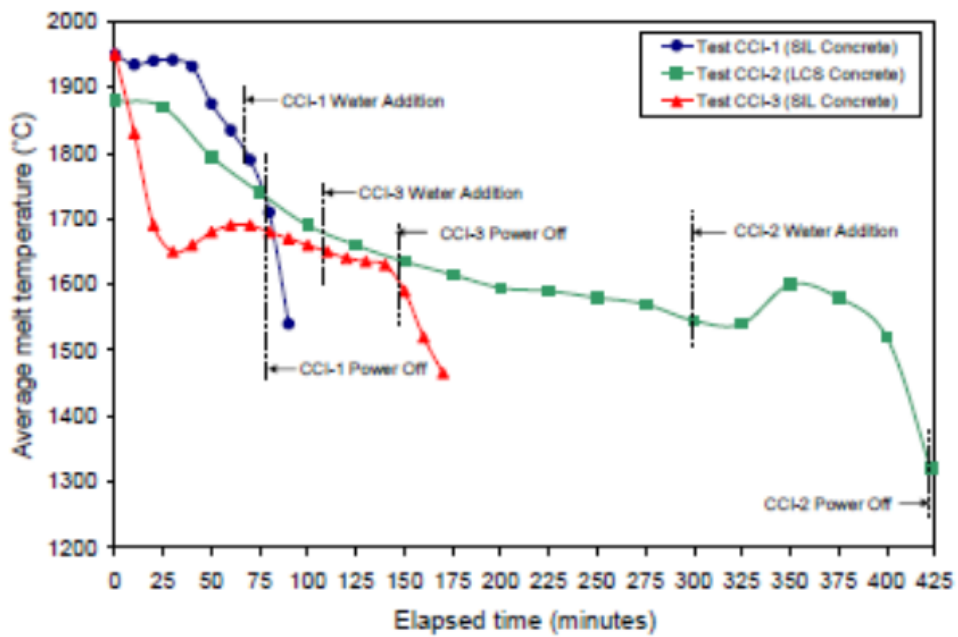


図 3.1-37 CCI 実験の溶融物平均温度変化

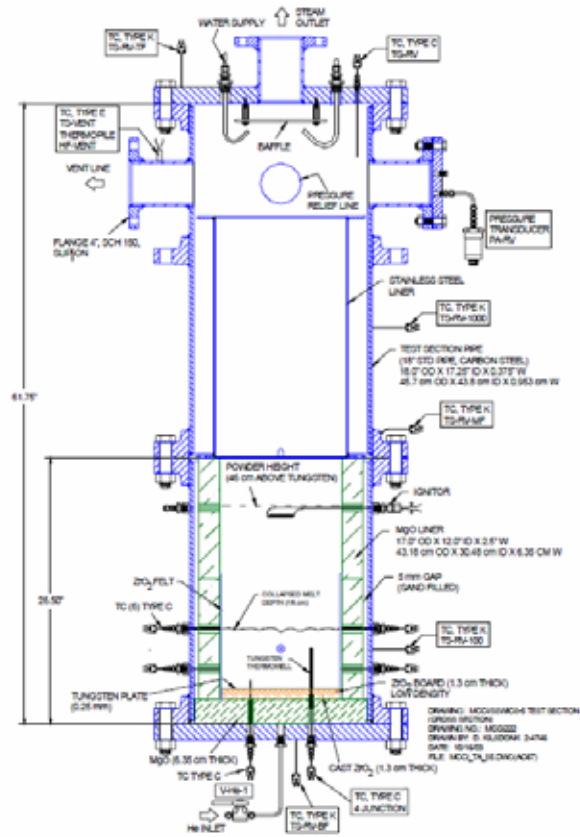


図 3.1-38 SSWICS 試験装置

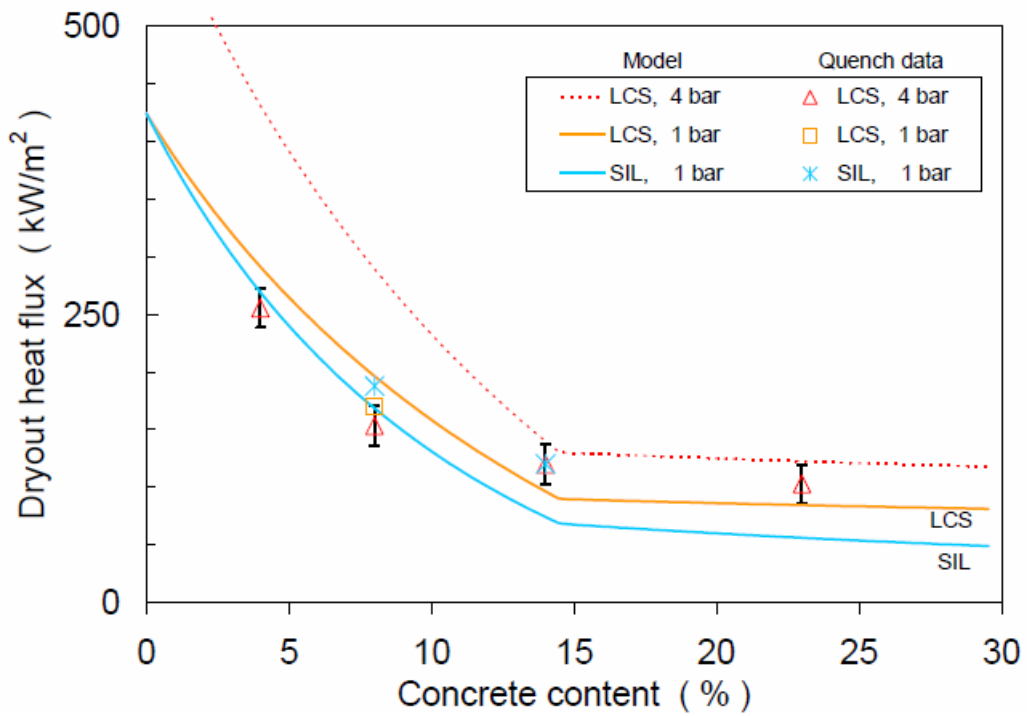


図 3.1-39 SSWICS 試験 ドライアウト熱流束の比較

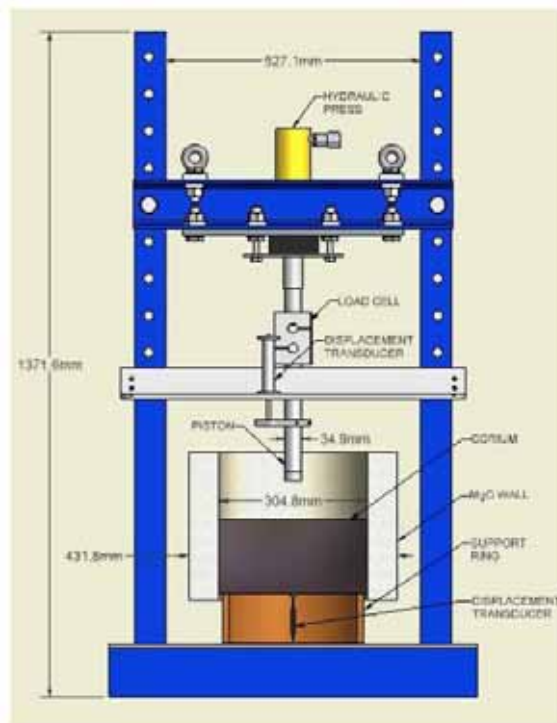


図 3.1-40 SSWICS 試験 強度試験の装置図

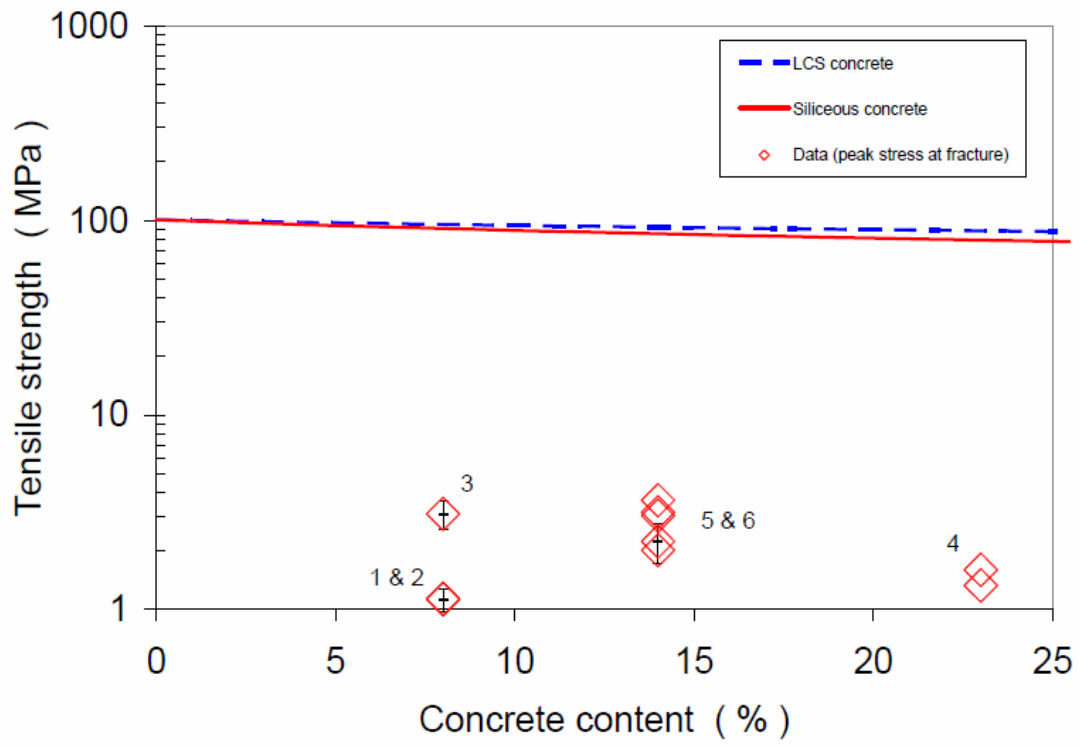


図 3.1-41 SSWICS 試験 強度試験結果

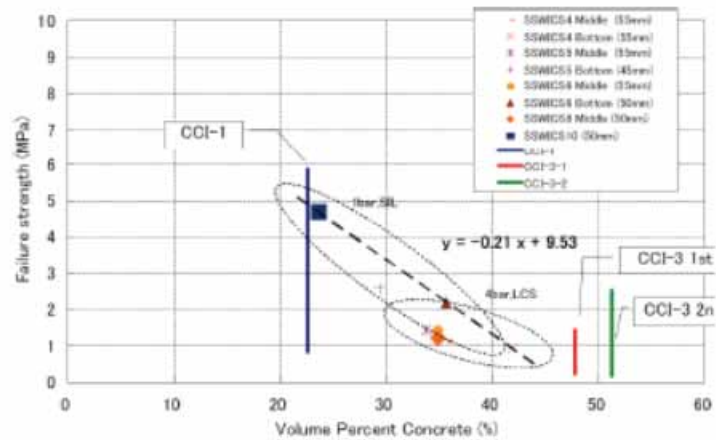


図 3.1-42 破損応力算出結果

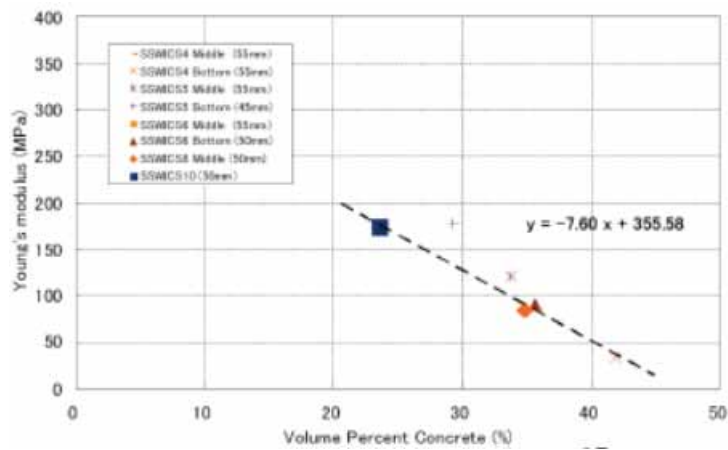


図 3.1-43 ヤング率算出結果

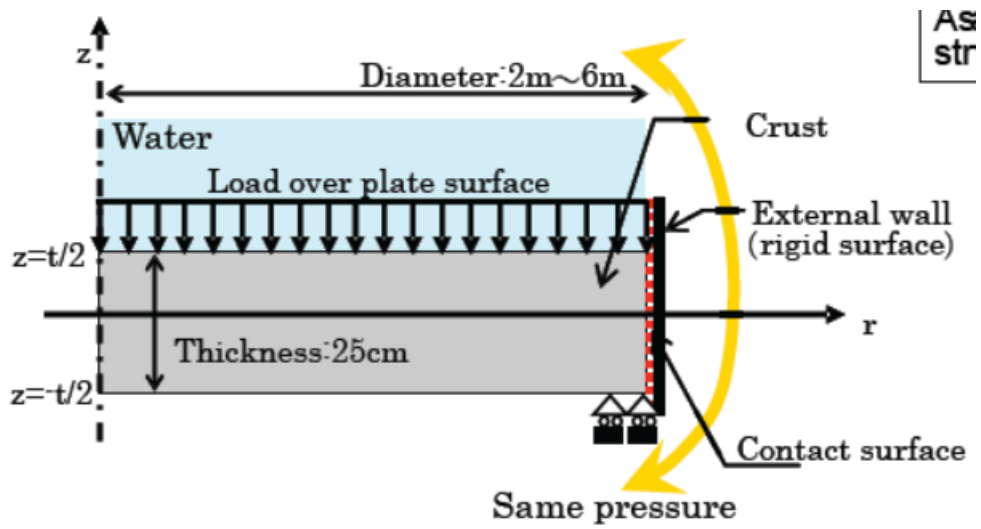


図 3.1-44 実機スケールのクラスト解析モデル

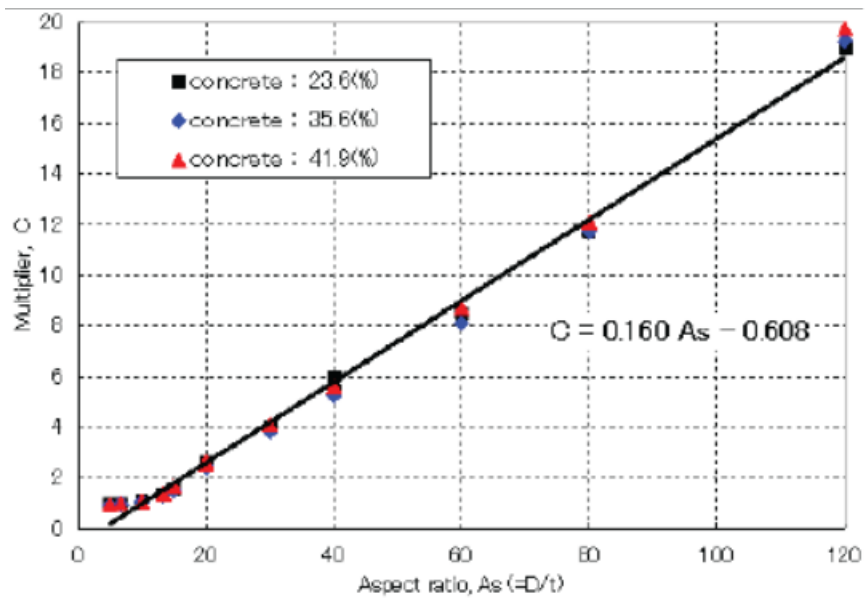


図 3.1-45 クラストの自重による応力分布



図 3.1-46 PULiMS-E4 試験での溶融物拡がり挙動

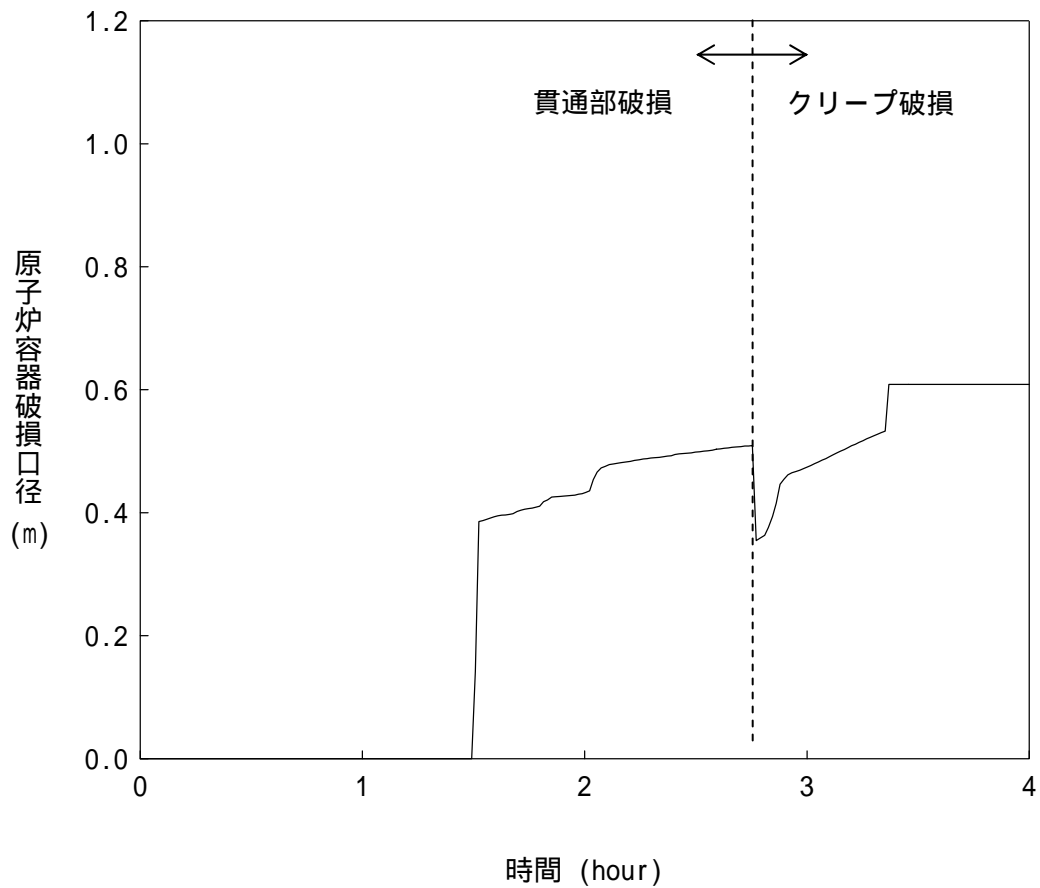
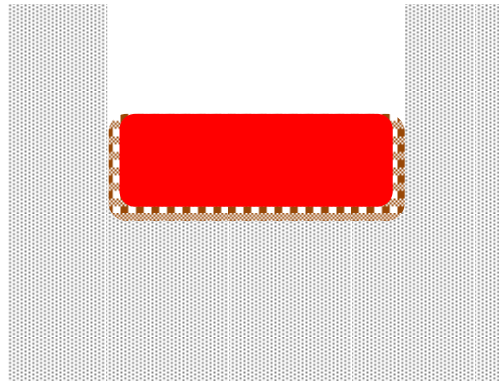


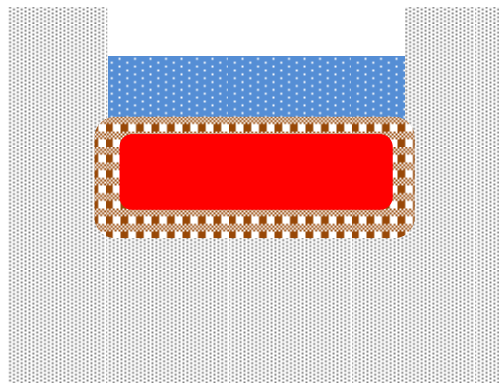
図 3.2-1 原子炉容器破損口径の拡がり (3 ループプラントの例)

注)

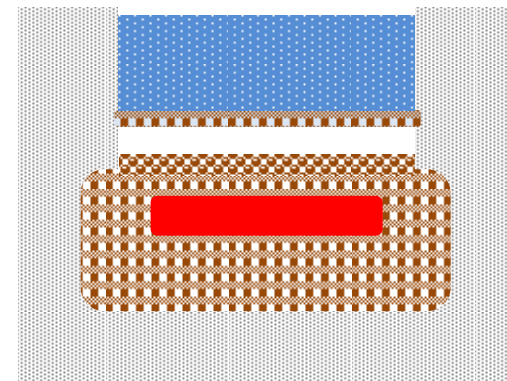
約 1.5 時間の時点で貫通部破損、約 2.8 時間の時点でクリープ破損が生じており、クリープ破損以前は貫通部破損口径を、クリープ破損後はクリープ破損口径をプロットしている。



注水前：
 溶融物とコンクリートの上にクラストの形成が始まる。
 クラストにはコンクリート分解ガスが通過することで空隙が出来ている。

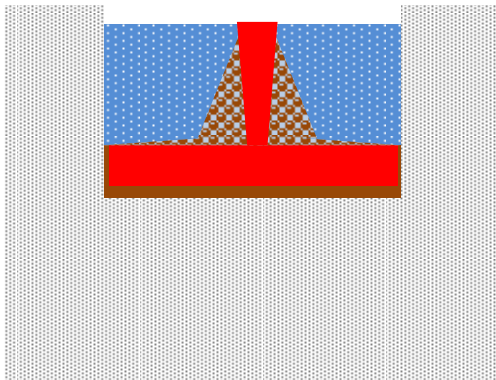


注水後短期：
 溶融物上面から水への激しい伝熱が起き、上面に厚いクラストが形成される。この期間の熱流束は最大 3MW/m^2 程度となり、その後急速に下し 1MW/m^2 程度となる。



注水後長期：
 溶融物上面のクラストが側壁に固着し、溶融物との間に空間が生じる。水への熱流束は 0.2MW/m^2 程度まで徐々に低下していく。
 クラストにはコンクリート分解ガスが通過することで空隙が出来、水やガスがある程度透過する。

図 3.3-1 MCCI 実験での挙動

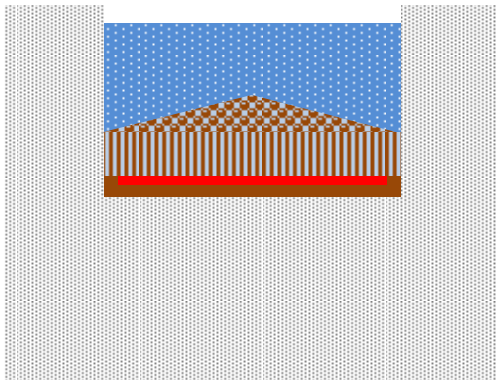


溶融炉心落下時：

溶融デブリは完全には粒子化せず、床上を溶融炉心が拡がり、床面との間にケーキが形成される。ジェットの一部は粒子化して溶融炉心上に降下する。クラストが形成されるまでは比較的高い熱流束が維持される。

< 3層状態 >

- ・デブリベッド
- ・溶融炉心
- ・ケーキ

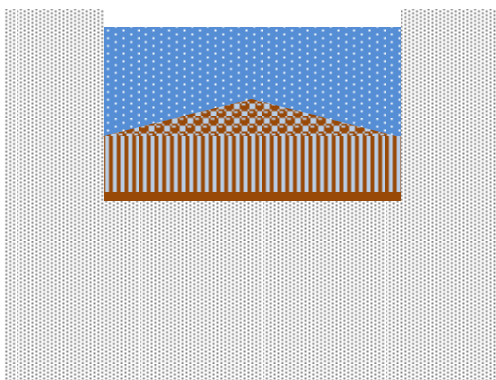


落下後短期：

溶融炉心上面からクラストが形成されるが、自重あるいは熱応力によって破碎していく。このため溶融炉心は急激に冷却されていく。

< 4層状態 >

- ・デブリベッド
- ・破碎クラスト
- ・溶融炉心
- ・ケーキ



長期冷却時：

溶融物は破碎クラストとなって固化し、上下にデブリベッドとケーキが存在する。破碎クラストは浸水性があることから、長期的にも冷却を維持できる。

< 3層状態 >

- ・デブリベッド
- ・破碎クラスト
- ・ケーキ

図 3.3-2 実機で想定される挙動

4 不確かさに関する整理

炉心溶融後、原子炉容器内の冷却水がドライアウトすることにより、原子炉容器下部プレナムに堆積している炉心デブリを冷却できない状態が継続すると、原子炉容器壁は炉心デブリからの伝熱によって温度が上昇し、計装用案内管の溶接部が破損する。その後、破損口より下部に残存している炉心デブリからの伝熱によって、原子炉容器底部がクリーブ破損に至る。破損口から溶融デブリが流出する過程では、破損口が溶融拡大することによりデブリジェット径が拡大する。また、デブリジェットは落下過程でエントレインされ部分的に粒子化する。

MCCI は、原子炉キャビティ底に堆積した溶融炉心が周囲のコンクリートやキャビティ水と伝熱する過程でコンクリートが加熱され侵食を引き起こす現象である。国内 PWR プラントでは、コンクリート侵食を防止するために、炉心損傷検知後速やかにキャビティに水を張り、高温の溶融炉心デブリを水中に落下させることによって細粒化及び固化を促進させる方策を採っている。図 4-1 に炉心デブリ伝熱の想定される現象と解析上の取り扱いとの比較概念図を示す。

コンクリート侵食に至る過程は、
溶融炉心のキャビティへの堆積過程
溶融炉心の冷却過程
コンクリートの侵食過程

のように段階的に進展する。

以下、各過程での物理現象及び解析モデルに関し、不確かさの観点で整理する。また、表 4-1 に MCCI の不確かさに関する整理結果を、図 4-2 に以下について整理したフロー図を示す。

(1) 溶融炉心のキャビティへの堆積過程

原子炉容器が破損し、溶融炉心がキャビティへの落下し、キャビティ底に堆積するが、堆積のプロセスとしては、

- ・エントレインされない溶融炉心がキャビティ底に堆積（溶融プール）
- ・エントレインされたデブリ粒子が冷却されたのち溶融プール上に堆積

がある。これらの過程に関して不確かさを整理する。

エントレイン量（溶融炉心の細粒化量）

エントレインされたデブリ粒子は、水中に拡散しており、かつ、水との接触面積が大きいことから、塊状の溶融炉心に比べ、冷却が促進された状態であり、MCCI 現象においてコンクリートの侵食を促進する観点からは、エントレイン量が少ない方が、厳しいと言えるが、溶融プール上に堆積した状態では、溶融プール上面の伝熱を低下させる要因となる。

一方、キャビティ水量に関しては、水深が浅い方が、溶融炉心の細粒化量が小さくなる傾向がある。MAAP の解析モデルでは、格納容器内の流動は、ノード - ジャンクションモデルによって、ブローダウン水、スプレイ水等のキャビティへの流入量を計算し、キャビティの幾何形状に基づき、水位（水深）を計算している。すなわち、格納容器形状とスプレイ開始のタイミング（事故シーケンス）で決まる。格納容器形状に関してはプラント設計データにより設定されることから不確かさは小さい。一方で、溶融炉心の落下時にもキャビティへの注水が継続した状態であることから、キャビティへの注水や溶融炉心の落下のタイミングによっては、キャビティ水深が変化し得ることから、事故シーケンスに基づく不確かさは存在すると考えられる。キャビティ水深が浅い場合には、細粒化量が少なくなる傾向になり、キャビティ床に堆積する炉心デブリのうち、十分に冷却されないまま液滴が凝集するかあるいは連続相として堆積する割合が増大する。水深が深い場合には、細粒化及び固化する量が多くなり、デブリベッドとして堆積する割合が増大する。定性的には、前者の状態では、炉心デブリは冷却されにくくなるといえる。また、炉心デブリが段階的にキャビティに落下する場合、溶融デブリが落下するたびに、一部が細粒化し、残りが連続相としてキャビティ床に堆積し、キャビティ内の水が蒸発してキャビティ水深が浅くなることを繰り返す。炉心デブリが段階的にキャビティに落下することによるキャビティ水深の減少は、炉心デブリ冷却の観点で厳しくなる。このように、キャビティ水深については不確かさが存在するため、代替格納容器スプレイの作動タイミングの感度を確認することによって、水深の不確かさの影響を把握する。

また、エントレイン量について、MAAP では、Ricou-Spalding の式に基づき細粒化量を計算している。Ricou-Spalding モデルは、エントレインメント量（細粒化量）を流入流体の速度（ジェット速度）と両流体の密度比に関連させたモデルであり、液液混合問題において広く利用されている相関式である。Ricou-Spalding のエントレインメント則は、

$$m_{ent} = E_0 \cdot u_{jet} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_{jet}}}$$

で表され、 m_{ent} はエントレインメント速度、 E_0 はエントレインメント係数、 u_{jet} はジェット速度、 ρ_w は静止側の流体密度、 ρ_{jet} は噴出側の流体密度である。上記エントレインメント則に示すように融体がエントレインする速度は、エントレインメント係数と落下速度に比例する。

エントレインメント係数 E_0 について、MAAP では FCI の大規模実験に対するベンチマーク解析によって、その範囲を設定しており、有効性評価の解析ではその中間的な値（最確値）を設定している。ここで、エントレインメント係数の最小値是最確値よ

りも□割程度小さく設定されているため、不確かさとしては□割程度を見込む。

一方、デブリ落下速度は、原子炉容器内外圧力差と炉心デブリの水頭から計算される。大破断 LOCA シーケンスでは、原子炉容器内外圧力差は小さく、不確かさも小さいと考えられるが、炉心デブリ水頭については、原子炉容器の破損位置により不確かさがある。原子炉容器の破損位置は、原子炉容器下部プレナムのノード代表点で表されるため、炉心デブリ上面から破損口までの高さとして 0.8m～1.2m、すなわち 3 割程度の不確かさ幅がある。デブリ落下速度は炉心デブリ水頭の平方根に比例することから、落下速度の不確かさ幅は 2 割程度となる。

次に、デブリジェット径は、Ricou-Spalding のエントレインメント則で使用されるパラメータではないものの、後述の通り実機スケールではデブリジェット全体が細粒化するわけではなく、ジェット径の増加はエントレインメント割合の減少と等価であることから、エントレインメント量の不確かさの一部として取り扱う。デブリジェット径は原子炉容器の破損口径と等価として扱われており、溶融炉心が破損口を通過する際に原子炉容器壁が侵食されて破損口が拡大するとデブリジェット径も大きくなる。デブリジェット径と細粒化量との関係を図 4-3 に示す。デブリジェットが円柱状態で水中に落下すると、水面下でデブリジェットの細粒化が進み、デブリジェットの先端が逆円錐の形状となる。デブリジェット径が相対的に小さく、デブリジェットの先端が床に達しない状況では、すべてのデブリが細粒化される（図 4-3 (a)）。一方、実機においては原子炉容器の破損口が侵食によって拡大するため、デブリジェット径が相対的に大きく、全ての溶融炉心が細粒化されるわけではなく、デブリジェットの先端が床に達する（図 4-3 (b)）。実機では、最終的な破損口径は、初期径及び侵食の拡大幅によって決まり、侵食の拡大幅は破損口を通過する溶融デブリの量に依存する。

まず、初期径の不確かさとして、「重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第 3 部 M A A P） 添付 2 溶融炉心と冷却水の相互作用について」の「5 感度解析と評価」において約 3 倍の不確かさを想定した場合、侵食後の原子炉容器貫通部の破損口径は、ベースケースと比較して約 1%拡大している。また、侵食の拡大幅の不確かさとして、「重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第 3 部 M A A P）」の「4.3.5 リロケーション」の結果から、リロケーションが早く進むことを想定した場合、原子炉容器貫通部の破損口径は、ベースケースと比較して約 3 割増加している。

以上より、エントレインメント係数、破損口径及び落下速度の不確かさはエントレインメント量の不確かさとしてまとめて考えることができ、不確かさの大きいエントレインメント係数を代表して感度を確認する。また、エントレインメント係数、落下速度、破損口径の不確かさを重畳させると、不確かさ幅は約 5 割となり、これについては「5 感度解析と評価（2） Ricou-Spalding のエントレインメント係数」にて考察する。

一方、堆積した状態のデブリ粒子に関しては、物理現象としては溶融プールとデブリ粒子が成層化した状態となるが、MAAP の解析モデルでは、キャビティ底の堆積デブリは均一に混合する仮定であり、溶融プールとデブリ粒子が成層化した状態としては取り扱っておらず、クラストと溶融プールから構成される平板状の発熱体として模擬しており、そのモデルの不確かさについては「溶融炉心の冷却過程」で取り扱う。溶融プールとデブリ粒子が成層化した状態では、溶融プールからキャビティ水への伝熱の点で影響があり、不確かさが存在する（感度解析に関しては、後述の「溶融炉心とキャビティ水の伝熱」にて整理する）。

溶融炉心のキャビティ床面への拡がり

溶融炉心のキャビティ床面への拡がりについては、水がないドライ状態では、溶融させたステンレス鋼により溶融炉心を模擬した実験より均一に拡がるという知見が得られている。国内 PWR プラントでは、炉心損傷を検知した後に、原子炉キャビティへの水張りを行うことから、溶融炉心は冷却され表面にクラストを形成しつつ拡がることとなる。クラストは、溶融炉心の相変化時（固化時）の収縮によりクラックが生じ、溶融炉心の自重によってクラストは崩壊して、拡がっていくが、ドライの状態に比べて、拡がりが抑制されることも報告されており、今後、知見の拡充が必要である。

MAAP の解析モデルでは、キャビティ底に落下した溶融炉心は均一に混合された状態を仮定し、キャビティ床面への拡がりについては、拡がり面積を入力条件として与えている。重大事故の緩和策の有効性評価では、キャビティ床全面に均一に拡がることを前提として評価している。これは、米国の新設炉に対する電力要求では炉心出力からキャビティ床面積を求める要求があり、そこでは溶融炉心が床全面に均一に拡がることを前提にした考え方が採用されており、本有効性評価においても同様の考え方に則っている。しかしながら、上述のとおり、ウェットな状態での溶融炉心のキャビティ床面への拡がり面積については、DEFOR 実験において堆積形状が山状になるという結果が得られているものの拡がりの観点で詳細に研究がなされているものではなく、知見の拡充が必要であり、現象として不確かさがある。よって、キャビティ床面への拡がりについての感度を確認する。

(2) 溶融炉心の冷却過程

キャビティ底に堆積した溶融炉心は、高温かつ崩壊熱による発熱状態であるが、周囲のコンクリート及びキャビティ水との伝熱により冷却される。前述のとおり、溶融炉心は一部が細粒化し、残りは連続相としてキャビティ床に堆積するが、MAAP では、キャビティに堆積した炉心デブリは、クラストと溶融プールから構成される平板状の発熱体として模擬される。

溶融炉心とキャビティ水の伝熱

溶融炉心からキャビティ水への伝熱は、溶融プールの表面に形成されるクラストに、キャビティ水によって亀裂が入り、その中にキャビティ水が侵入することによって行われる。

MAAP の解析モデルでは、クラストから水への伝熱は沸騰熱伝達として扱っており、その熱流束は Kutateladze の式を用いて計算される。Kutateladze の式は、水平面から飽和水へのプール沸騰（自然対流条件下の沸騰）における限界熱流束に関する整理式で、溶融炉心により加熱されることにより発生する水蒸気の上昇速度とプール水の落下速度のつり合う伝熱量を限界熱流束とする式である。Kutateladze の式は、

$$\frac{q}{L\rho_v} = C_K \left[\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4}$$

で表される。 q は熱流束、 L は蒸発の潜熱、 σ は表面張力、 g は重力加速度、 ρ_L 及び ρ_v は液体及び蒸気の密度である。ここで、 C_K は係数であり、Kutateladze は 0.16 を、Zuber は 0.12 ~ 0.16 の範囲、あるいは、 $1/24$ (=0.131) を与えている。係数 C_K については、経験的に決定する必要があることから、有効性評価の解析では、米国国立サンディア研究所 (SNL) で実施された溶融物とコンクリートの相互作用及び溶融物冷却に関する実験である SWISS 実験において報告されている溶融体から水プールへの熱流束が 0.8 MW/m^2 であることに基づき $C_K = 0.1$ としている。また、実機条件においては、強度評価によってクラストは破損すると評価されており、上面水プールと溶融炉心デブリが直接接触することによって、高い熱流束が維持されるといえる。

Kutateladze の式をキャビティ床に堆積した炉心デブリに対する限界熱流束の式として用いる場合、本来平板に適用する相関式を山状に堆積するクラストや粒子ベッドに適用することになるため、MAAP モデルには不確かさが存在する。クラストと水の界面は、諸外国での実験で示されているように、クラストに亀裂を生じており、そこに水が浸水することが考えられ、解析モデル上はその影響を考慮していないことから、不確かさを有すると言えるが、その場合、クラストと水の接触面が大きくなり、溶融炉心の冷却は促進されることから、クラストの亀裂に関しては、不確かさの観点では問題とならない。また、クラストの表面形状に凹凸が生じる可能性については、伝熱面積が大きくなるから、不確かさの観点では問題とならない。また、上面クラストの温度低下については、溶融炉心が冷却される方向であり、これについても不確かさの観点では問題とならない。一方、前述のとおり、溶融プール上にデブリ粒子が堆積することにより、クラストと水の接触が障害され、溶融炉心の冷却が悪くなることも考えられる。解析モデルでは、このプロセスは模擬されず、熱伝達が悪化することから、不確かさが存在する。これらの不確かさとは、溶融炉心の冷却の悪化（熱伝達係数の低下）であるから、熱伝達係数の感度を確認する。

また、細粒化時の熱伝達については、デブリ粒子の顕熱及び潜熱から水プールへの

伝熱が計算され、その伝熱量は膜沸騰及び輻射熱伝達によって計算される。デブリ粒子からの熱量は水蒸気生成と水の温度上昇に変換される。デブリ粒子から水への熱伝達については、細粒化割合と相関があることから、この不確かさについては「エントレインメント係数」の中で整理する。

溶融炉心とコンクリートの伝熱

キャビティ底に堆積した溶融炉心は、下側のコンクリート床と側面のコンクリート壁と伝熱する。溶融炉心からコンクリートへの伝熱は、溶融プールからクラストへの伝熱とコンクリートへの伝熱に分けられる。

溶融プールとクラストとの間は、対流熱伝達によって伝熱される。対流熱伝達は、溶融プールのバルク温度と融点温度の差及び溶融プールと炉心クラストとの間の熱伝達係数から計算される。また、クラスト内の温度分布は、溶融炉心とクラストの境界からコンクリート表面への熱流束を用いて、準定常の1次元熱伝導方程式を解くことで計算される。溶融炉心からコンクリート床及び側壁に対する熱流束は、溶融炉心プールから下部及び側部クラストへの伝熱と、クラスト内での発熱によるものである。

溶融プールとクラストとの間の熱伝達については、溶融プール内の状態（固化燃料の割合）に関する不確かさや対流の不確かさが存在する。溶融プールとクラストとの間の熱伝達が大きい場合には、クラストが溶融し、コンクリートへの伝熱量が増大するため、コンクリート侵食がしやすくなる傾向となる。ただし、有効性評価の状態、すなわち、原子炉キャビティへ注水した状態においては、溶融炉心からの除熱は、溶融炉心と温度差が大きい、冷却水側（上面）が支配的になることから、不確かさは存在するものの、影響としては小さいものとする。

クラストとコンクリートの間の熱伝達については、ACE 実験及び SURC 実験に対するベンチマーク解析の結果から実験データと同等の侵食深さが M A A P により模擬できていることから、溶融炉心からコンクリートへの伝熱は、適切に模擬できていると判断する。しかしながら、溶融炉心とコンクリートの接触に関しては M A A P では、理想的な平板で密着した状態で取り扱っていることから、接触面積に不確かさが存在する。接触面積が小さいとコンクリートへの伝熱量が小さくなることが考えられ、解析モデル上はその影響を考慮していないことから、不確かさを有すると言えるが、その場合、クラストとコンクリートの接触面が小さくなり、コンクリート侵食が抑制されることから、接触面積に関しては、不確かさの観点で問題とならない。

(3) コンクリートの侵食過程

前項で述べたとおり、溶融炉心の冷却過程において、溶融炉心からクラストへの伝熱があり、クラスト内部の1次元の熱伝導方程式を解き、コンクリート表面温度を計算している。コンクリートへの熱流束が十分大きく、コンクリート温度が融解温度を

上回る場合に侵食が発生する。コンクリートが融解すると、ガス（水蒸気及び二酸化炭素）が発生し、溶融プールに侵入して金属との化学反応が発生し、反応熱が発生するとともに、生成された非凝縮性ガスが格納容器内に放出され、格納容器内を加圧する要因となる。また、コンクリートのスラグも溶融プールに侵入し、ウラン・ジルコニウム等との混合物となる。スラグが混入することにより、溶融炉心の融点が低下する傾向となる。

コンクリートの組成

コンクリートには主に玄武岩系のコンクリートと石灰岩系のコンクリートがある。コンクリート組成が異なると、コンクリート侵食挙動にも違いが生じる。玄武岩系のコンクリートの特徴は Si の含有量が多い。一方、石灰岩系のコンクリートの特徴は Ca、CO₂ が比較的多く含まれていることである。しかしながら、コンクリート組成については、物性値が把握できており、不確かさに対する感度解析は不要である。

表 4-1 MCCI の不確かさに関する整理結果 (1/2)

影響因子	実機での実現象	解析上の取扱い	感度解析条件
キャビティへの注入量	ブローダウン水、スプレイ水等がキャビティに回り込み、キャビティ水深が決まる。	ノード・ジャンクションモデルに従い、キャビティに流れ込む水量が評価される。	キャビティ水深 (5 .(1)にて感度解析実施)
エントレイン量	デブリジェット径が大きいと、水中に落下する炉心デブリの内、エントレインされる部分はジェットの表面近傍に限られると想定される。	逆円錐型のデブリジェットに対して、Ricou-Spalding 相関式によって評価される。	エントレインメント係数 (5 .(2)にて感度解析実施)
デブリジェット径	破損口を侵食しながらデブリジェットが流出すると想定される。	ジェット径は初期破損口径から破損口の侵食を考慮して評価される。	エントレインメント係数 (5 .(2)にて感度解析実施)
デブリ落下速度	破損口径、原子炉容器内外圧力差、重力から決まると想定される。	落下速度は、破損口径、原子炉容器内外圧力差、重力から評価される。	エントレインメント係数 (5 .(2)にて感度解析実施)
堆積したデブリ粒子	連続層としてキャビティ床面に堆積した炉心デブリの上に粒子状ベッドが堆積すると想定される。あるいは、連続層の炉心デブリの中に巻き込まれると想定される。	連続層の炉心デブリと区別なく、平板状の発熱体として評価される。	水 - 炉心デブリ間の熱伝達係数 (5 .(4)にて感度解析実施)
溶融炉心の拡がり・堆積形状	炉心デブリが過熱度を持ち断続的にキャビティ床に落下すること等から、キャビティ床面積相当に拡がると想定される。	床面積全面に一樣に拡がるとして、キャビティ床面積設計値を入力する。	炉心デブリの拡がり面積 (5 .(3)にて感度解析実施)

表 4-1 MCCI の不確かさに関する整理結果 (2/2)

影響因子	実機での実現象	解析上の取扱い	感度解析条件
水と熔融炉心の伝熱	実機スケールでは、熔融炉心デブリの上面に形成されるクラストには亀裂が生じ、熔融プールと水が直接接触することで冷却が促進すると想定される。	平板状の発熱体に対して、Kutateladze の相関式によって評価される。	水 - 炉心デブリ間の熱伝達係数 (5 .(4)にて感度解析実施)
上面クラストの亀裂・表面形状・温度低下	実機スケールでは、熔融炉心デブリの上面に形成されるクラストには亀裂が生じ、クラスト温度が低下すると想定される。クラスト表面で凹凸も生じると想定される。	平板状の発熱体に対して、Kutateladze の相関式によって評価される。	MCCI を促進する取扱いのため、感度解析不要
熔融プールと下面・側面クラスト間の伝熱	熔融プール内の対流によって下面及び側面クラストへ伝熱すると想定される。	対流熱伝達相関式によって評価される。	キャビティ注水あり条件では MCCI への影響が小さいため、感度解析不要
下面クラストとコンクリートの接触面積	下面クラスト内の熱伝導によってコンクリートへ伝熱すると想定される。	境界温度と熱伝導方程式によって評価される。	MCCI を促進する取扱いのため、感度解析不要
コンクリート組成	コンクリートが分解温度に達すると吸熱量に応じて侵食を開始し、その過程で組成に応じて非凝縮性ガスが放出されると想定される。	コンクリートが分解温度に達すると吸熱量に応じて侵食を開始し、その過程で組成に応じて非凝縮性ガスが放出されるものとして評価される。	物性値が把握できており、感度解析不要

実機で想定される現象

計算モデルの扱い

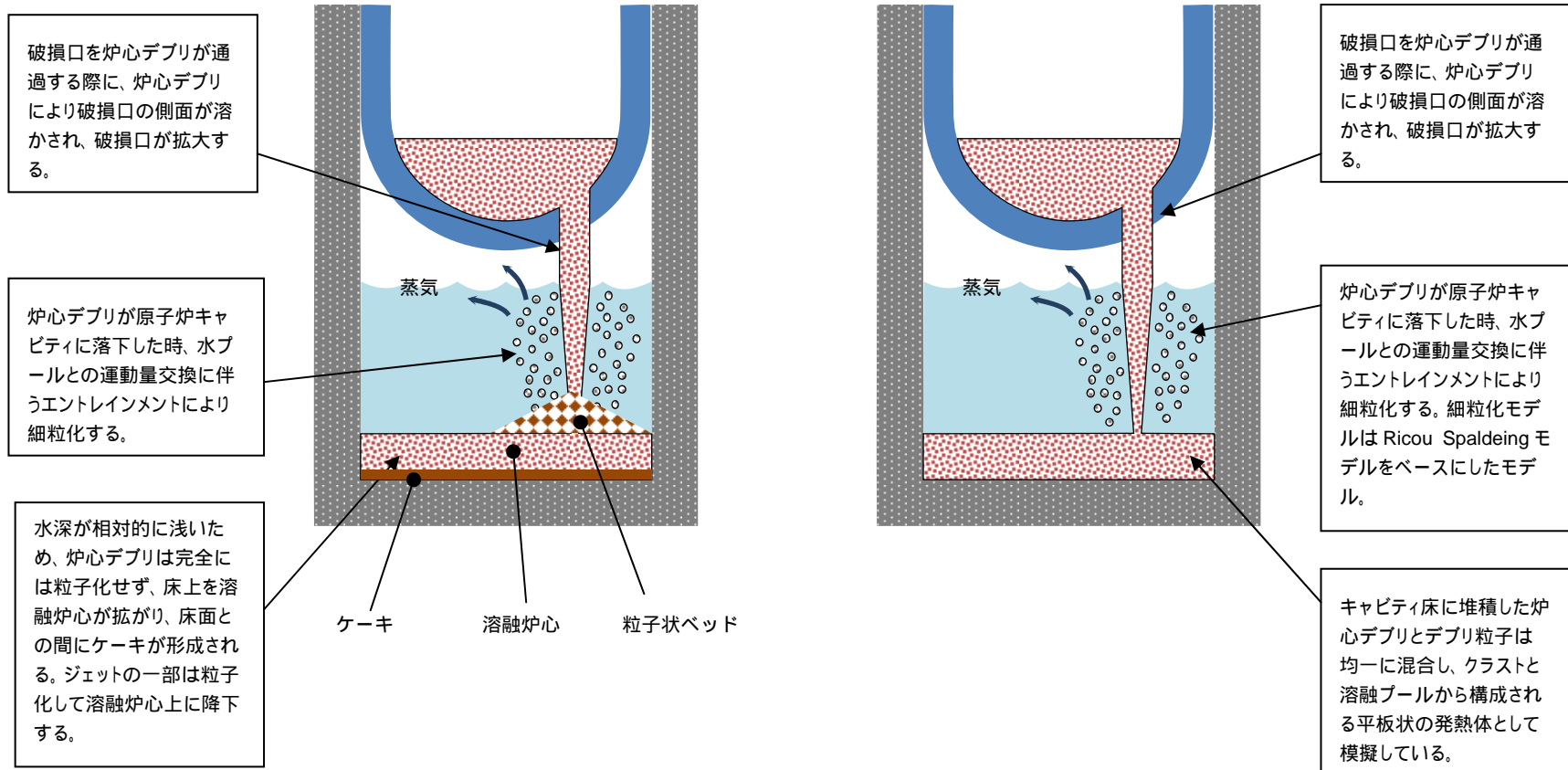


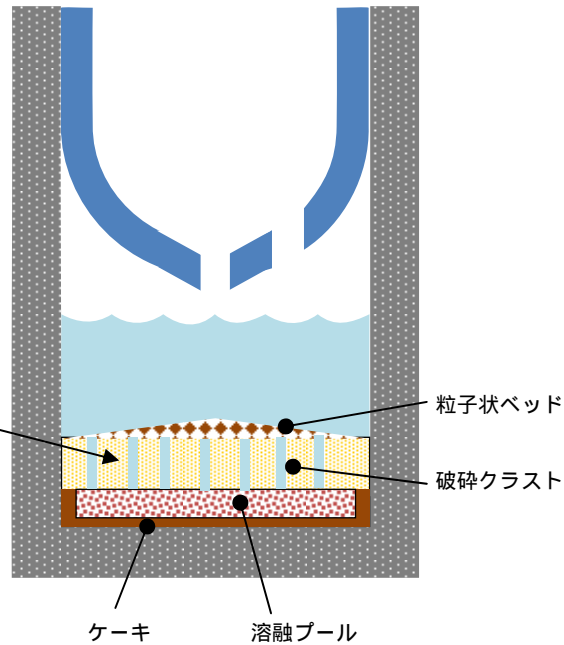
図 4-1 炉心デブリ伝熱の想定される現象と解析上の取り扱いとの比較概念図 (1/2)

原子炉キャビティでのデブリ挙動

実機で想定される現象

熔融炉心上面からクラストが形成されるが、自重あるいは熱応力によって破碎していく。このため熔融炉心は急激に冷却されていく。

その後、熔融物は破碎クラストとなって固化し、上下にデブリベッドとケーキが存在する。



計算モデルの扱い

上部クラストから上部水プールへはKutateladzeの熱伝達相関式を考慮。

熔融プールの状態は、その温度に応じて、液層と固層の割合が計算され、液層は内部の熔融プール、固層は外側のクラストとして取り扱っている。

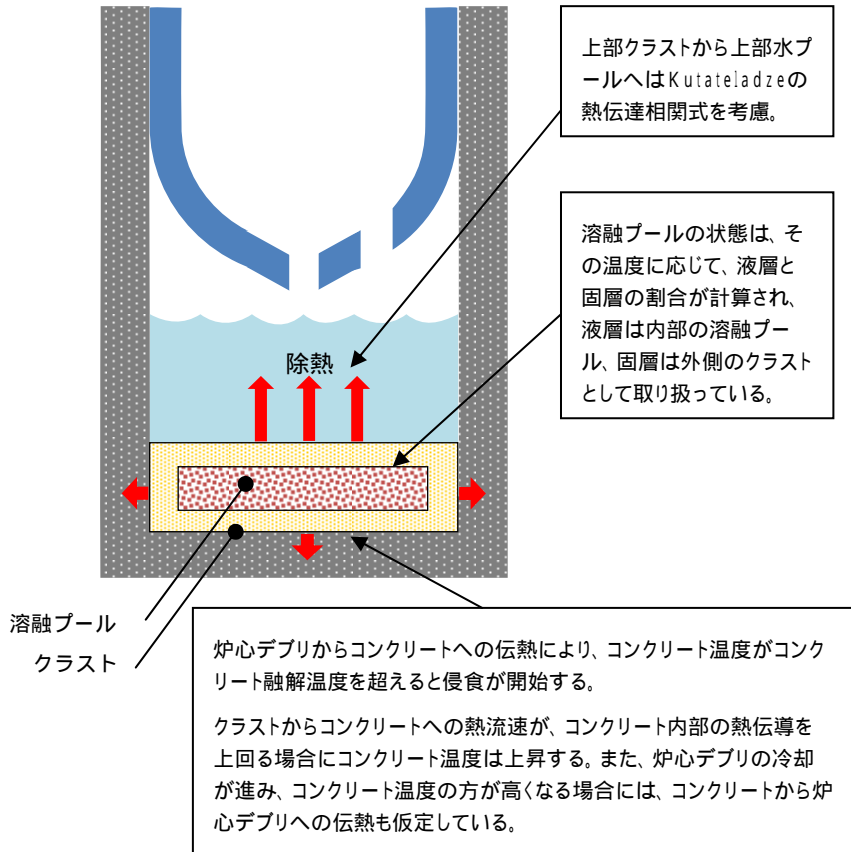


図 4-1 炉心デブリ伝熱の想定される現象と解析上の取り扱いとの比較概念図 (2/2)

熔融炉心と冷却水及びコンクリートとの相互作用

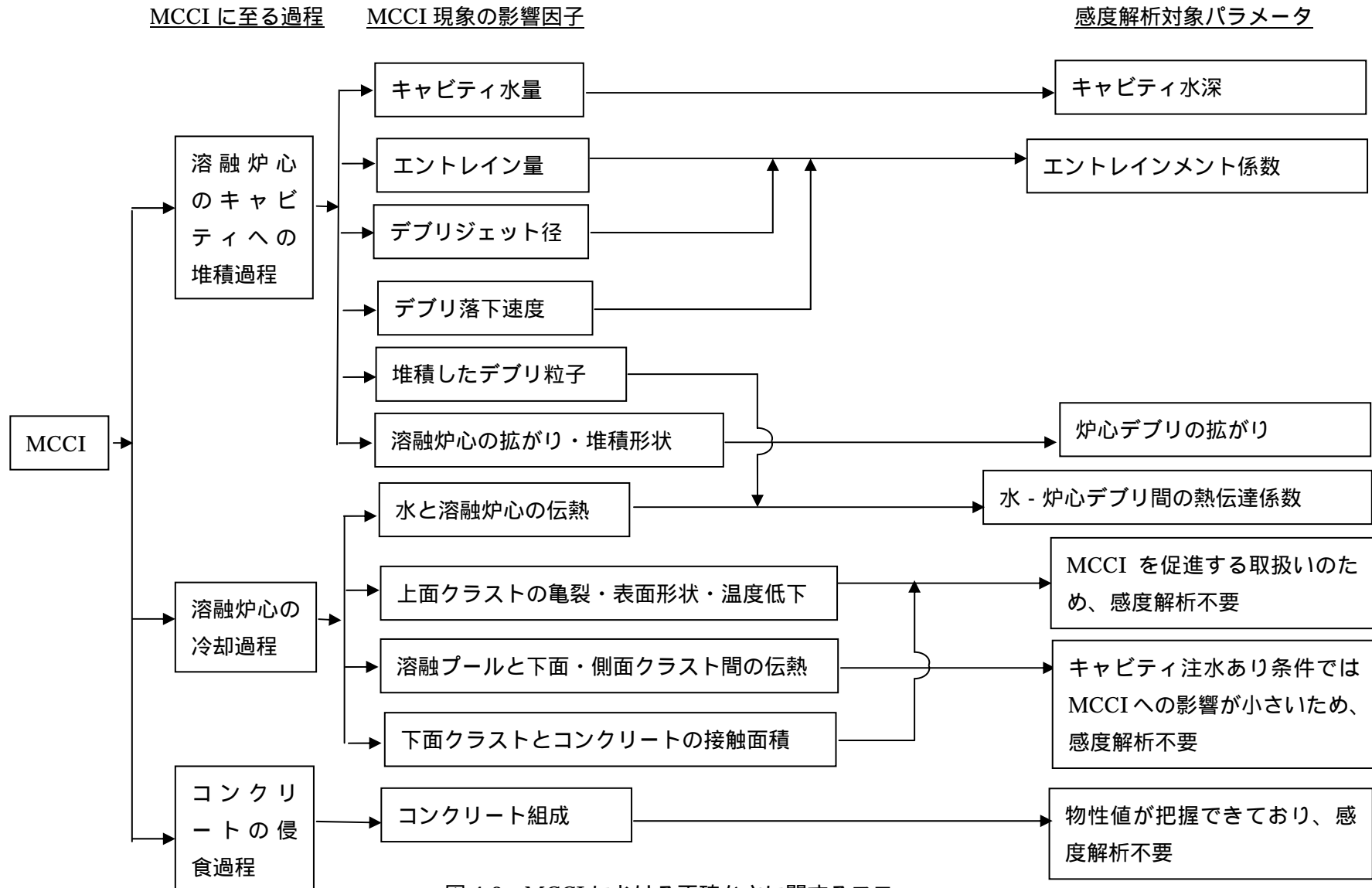
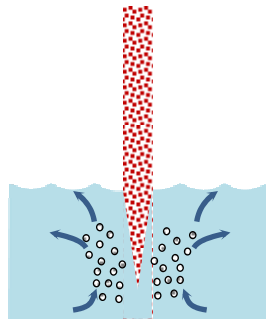
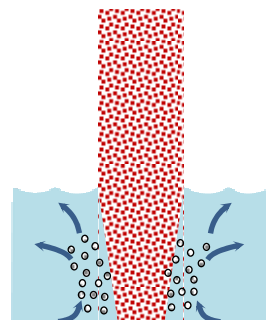


図 4-2 MCCIにおける不確かさに関するフロー



(a) デブリジェット径が
小さい場合



(b) デブリジェット径が
大きい場合

水中に落下したデブリジェットは細粒化し、逆円錐状となる。ジェット径が大きい場合、細粒化されずに床に到達する割合が増大する。一方、ジェット径が小さい場合、ジェットは床に到達するまでに全量が細粒化する。

図 4-3 デブリジェット径と細粒化量の関係

5 感度解析と評価

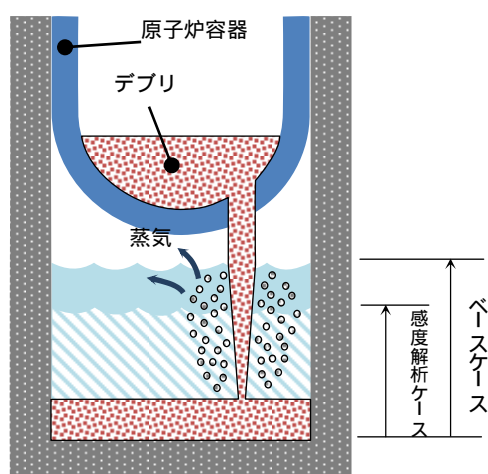
前章において抽出したパラメータに関して感度解析によりその影響程度を把握した。感度解析のベースケースは、3ループプラントの「大破断 LOCA + ECCS 注入失敗 + CV スプレイ注入失敗」である。

(1) キャビティ水深

解析条件

ベースケースでは、炉心溶融を検知した後 30 分で代替格納容器スプレイを実施することとしている。感度解析ケースでは、代替格納容器スプレイ作動のタイミングがベースケースよりも 30 分遅くなることを想定する。この場合、キャビティへの注水も遅れ、キャビティ内での炉心デブリ冷却に影響を与える可能性がある。

項目	代替格納容器スプレイ作動	設定根拠
ベースケース	炉心溶融後 30 分	運転員操作余裕時間として設定
感度解析ケース	ベースケース + 30 分	ベースケースより更に 30 分遅くなることを想定



解析結果

図 5-1-1 ~ 5-1-9 に、キャビティ水深の感度解析結果を示す。

ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は炉心溶融後 30 分以降に現れる。代替格納容器スプレイ作動のタイミングがベースケースに比べて 30 分遅くなったことにより、原子炉容器破損時点のキャビティ水深がベースケースに比べて半分程度に減少する。しかしながら、原子炉容器が破損し、炉心デブリがキャビティに落下して以降は、ベースケースと感度解析ケースで大きな違いはなく、コンクリート侵食深さはベースケースが約 3mm、感度解析ケースが約 4mm となった。

デブリジェット径は原子炉容器破損口径に相当し、原子炉容器破損後に炉心デブリがキャビティに落下するのに対応して、原子炉容器下部ヘッドが侵食して破損口径が拡大していく。事故発生後約 2.8 時間には原子炉容器の 2 回目の破損が生じ、その破損口から炉心デブリがキャビティに落下し、破損口径が拡大していく。この現象については、ベースケースと感度解析ケースで大きな違いはない。破損口径は、熔融炉心による侵食により 40～60cm まで早期に拡大する。また、原子炉キャビティ水位は、原子炉容器破損以降、1.5～2m の範囲にある。この水位及びジェット径を DEFOR 実験の知見（図 3.1-34）に適用する。キャビティ水位が図の範囲外であるものの、外挿すると、実機ではデブリジェットはほぼケーキ状に堆積することが分かる。

評価

キャビティ水深のコンクリート侵食に対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

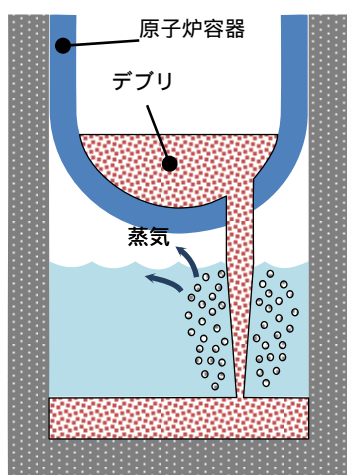
(2) Ricou-Spalding のエントレインメント係数

解析条件

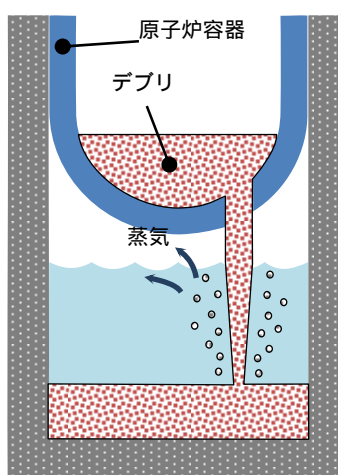
エントレインメント係数はベースケースでは□を設定しているが、感度解析ケースでは、キャビティ底に直接落下する塊状の熔融炉心を多くして、コンクリートが加熱されやすくなるよう、MAAP コードの当該変数の推奨範囲（□～□）のうち最も小さい値、すなわち、細粒化割合が小さく評価される値である□を設定する。なお、推奨範囲とは、FCI の大規模実験に対するベンチマーク解析において検討された範囲のことである。FCI の大規模実験の条件として、水プールの水深は 0.87～2.05m、水プールのサブクール度は飽和～124K、雰囲気圧力条件は 2～5.8MPa（高圧条件）、0.2～0.5MPa（低圧条件）を考慮している。一方、熔融炉心がキャビティへ落下する時点の特徴的な条件では、キャビティの水位は 1～2m 程度、キャビティ内の冷却材のサブクール度は数十、雰囲気圧力は 0.2～0.3MPa（abs）程度であり、実験条件は有効性解析の特徴的な条件を包絡する。したがって、実験で検討された範囲に対して感度を確認すれば十分といえる。なお、デブリジェット径については、実験条件と実機条件に差があり、実機条件の方が、径が大きい。このため、実機条件では細粒化される熔融炉心は一部であり、残りの大部分は連続相のままキャビティ床に堆積すると考えられる。実験ではジェット径に対して水深が深いため、ジェットの先端が床に到達せず、ほとんどすべての炉心デブリが細粒化されており、この条件に対してエントレインメント係数の幅が評価されている。したがって、実機条件のように、ジェット径に対する水深が浅い場合には、エントレインメント係数はより小さく評価されると考えられるが、デブリジェット径が大きいこととエントレインメント係数が小さいことは等価といえるため、デブリジェット径の不確かさはエントレインメント

係数の不確かさとして評価する。また、炉心デブリの過熱度が高い場合には、冷却されずにキャビティ床に堆積し、凝集状態になるが、このような状況についてもエントレインメント係数が小さい場合に相当し、炉心デブリの過熱度の不確かさもエントレインメント係数の不確かさとして評価することができる。

項目	エントレインメント係数	設定根拠
ベースケース	<input type="text"/>	当該変数推奨範囲の最確値
感度解析ケース	<input type="text"/>	当該変数推奨範囲の最小値



ベースケース



感度解析ケース

エントレインメント係数を小さく設定し、キャビティ底に直接落下する塊状の溶融炉心を多くする。

解析結果

図 5-2-1～5-2-10 に、エントレインメント係数の感度解析結果を示す。

ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は原子炉容器破損以降に現れる。溶融炉心がキャビティに落下する時点(1.5 時間)での格納容器圧力の上昇は、感度解析ケースの方が僅かに低いことから、溶融炉心の細粒化量が少なく、塊状のままキャビティに落下する溶融炉心の量が増加していることが分かる。炉心デブリのエントレインメント割合を比較すると、ベースケースでは 0.2 程度であるのに対して、感度解析ケースでは、0.1 程度となっている。したがって、炉心デブリのうち、大半は連続相としてキャビティ床に堆積し、落下中に細粒化する炉心デブリは一部であると言える。また、図 5-2-10 に表示しているエントレインメント割合は炉心デブリの落下中の値であり、床面に堆積する粒子状ベッドの割合は、DEFOR 試験の結果から、さらに小さくなると考えられる。なお、MAAP では、細粒化された炉心デブリは連

続相の炉心デブリと混合された状態でキャビティ床に堆積し、熔融炉心とクラストからなる平板上の発熱体として模擬している。

炉心デブリと水の熱流束を比較すると、約 1.5 時間以降は、ベースケースと感度解析ケースとでピーク値は同等であるが、感度解析ケースでは、高い熱流束の継続時間が僅かに長く、炉心デブリの冷却に要している結果となっている。次のピークについては、ベースケースと感度解析ケースとで大きく異なり、感度解析ケースにおいて高いピークが表れているが、これは、エントレインメント係数を小さくすることで、細粒化されずに塊状のままキャビティ床に到達した熔融炉心が多くなっていることによる。以下、同様の傾向となっている。なお、水と炉心デブリ間の熱流束が 1.3MW/m^2 程度の時間帯と 0.5MW/m^2 程度の時間帯に分かれているのは、時間帯によってキャビティに落下した炉心デブリの保有熱が異なるためである。熱流束が大きい (1.3MW/m^2 程度) 時間帯は、炉心デブリが多量に落下した後であり、その時間帯では、炉心デブリの保有熱は大きく、限界熱流束相当の熱流束が発生する。その後、炉心デブリが冷却、固化したクラストの状態になると、温度が周辺の水プールと同程度まで低下するため、除熱量は崩壊熱に制限され、熱流束は 0.5MW/m^2 程度まで小さくなる。MAAP の解析モデルでは、クラストから水への伝熱は沸騰熱伝達として扱っており、熱流束は Kutateladze の式を用いて計算され、その係数として 0.1 を使用している。炉心デブリと水との間の熱伝達の不確かさ、あるいは熱伝達相関式の不確かさが存在し、熱伝達が悪化する場合には、大きい保有熱を持つ炉心デブリは冷却されにくくなり、コンクリート温度が高く維持されることが予想される。熱伝達の不確かさについては、「(4) 水-炉心デブリ間の熱伝達係数」において考察する。

一方、炉心デブリとコンクリートの熱流束についても、水との熱伝達の場合と同様であり、炉心デブリの冷却に時間を要することから、コンクリートへの熱流束が僅かに大きい、長時間継続することはないため、コンクリートの侵食深さへの影響は僅かであり、継続的なコンクリート侵食が発生する状況ではない。コンクリート侵食深さはベースケースが約 3mm、感度解析ケースが約 4mm となった。なお、炉心デブリとコンクリートとの間の熱伝達については、基本的には炉心デブリ側からコンクリート側に熱が流れるが、熱が逆向きに流れることもある。これは、コンクリート表面温度は炉心デブリが落下した後に急激に上昇し、その後、炉心デブリが上面の水に冷却されるためコンクリート表面温度も低下するが、その際一時的にコンクリート表面温度と炉心デブリの温度が逆転する場合があり、そのときに炉心デブリとコンクリートとの熱流束が負の値となるためである。MAAP の解析モデルでは、熔融プールとクラストの界面は対流熱伝達を仮定する。クラスト内部は 2 次関数の温度勾配を持つと仮定し、クラストとコンクリートの界面がコンクリート表面温度となる。コンクリート内では、深さ方向に 1 次元の熱伝導方程式により温度分布を持つ仮定としている。炉心デブリとコンクリートとの間の熱伝達には不確かさが存在するが、接触面積が小さ

くなる場合には、コンクリートへの伝熱量が小さくなり、コンクリート侵食は抑制される方向となるため、不確かさの観点では問題とならない。

また、ジェット径及び落下速度の不確かさについては、「4. 不確かさに関する整理」に記載したとおり、エントレインメント係数の不確かさと重畳させると約5割の不確かさがあり結果を厳しくする方向である。これについて、約□割の不確かさ幅で感度を確認した結果、炉心デブリのエントレインメント割合については感度が出ているものの、他のパラメータについては、水-炉心デブリ間の限界熱流束の継続時間が若干長くなっている以外は、感度はほとんど現れない。これは、本事故シナリオでは、炉心デブリに対するエントレイン割合が比較的小さいことにより、粒子状の炉心デブリからの除熱量が小さくなるためである。したがって、水-炉心デブリ間の限界熱流束の感度としては僅かであることから考察すると、約5割の不確かさを考慮した場合にも、その不確かさが有効性評価に与える影響は小さいと言える。

評価

エントレインメント割合のコンクリート侵食に対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

(3) 炉心デブリの拡がり面積

解析条件

炉心デブリの拡がり面積には不確かさがあり、拡がり面積が小さい場合にコンクリートへの熱流束が大きくなる。炉心デブリの落下過程において、冷却が進むと、拡がり面積が小さくなり、冷却されないと拡がり面積が大きくなる傾向となる(添付3-1)。

したがって、拡がりの形態として、以下の2ケースを考える。

ただし、水中での溶融物の拡がりの挙動については、これまで実験による知見も少なく、複雑であることから、以下の2ケースについては、実現象の不確かさを網羅するという観点で条件を設定した。したがって、本ケースの条件設定は、極端な条件として設定したものであり、現実的に起こりうるものではないと考える。

- ・ 落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース
- ・ 落下時に細粒化などにより冷却が進むケース

まず、落下時に冷却されずに高温のまま床に到達するケースでは、評価上、最初の原子炉容器破損による炉心デブリの落下により、キャビティ床面に約47 m²の広さで拡がり、キャビティ床面積とほぼ同等となる。その後、断続的に炉心デブリが落下するため、炉心デブリは床全面を超えて拡がると考えられるが、実際はキャビティ壁により拡がりは制限されるため、炉心デブリの拡がり面積としてはキャビティ床一面を

設定する。これは、ベースケースの設定と同等である。炉心デブリが床全面に広がる場合、炉心デブリはキャビティ側面と接触する。炉心デブリは外周部にクラストを形成し、内部に溶融プールが存在する形態として扱う。溶融プールから側面クラスト内面へは対流熱伝達により伝熱し、側面クラストへは厚さ方向に2次関数の温度勾配を持つものとし、側面クラスト外面にてコンクリートへ熱伝導により伝熱する。コンクリート内部でも側面深さ方向に1次元の熱伝導方程式による温度分布を持つ。そして、コンクリート表面温度がコンクリートの融点を超えると侵食が開始する。

一方、落下時に細粒化などにより冷却が進むケースでは、炉心デブリはキャビティ床全面に拡がらずに、局所的に堆積する結果が得られている。このケースでは、落下過程において炉心デブリが冷却されやすくなるよう設定しており、固化による流動抵抗の増加によって、拡がり小さくなっている。

本ケースは以下の点から極端な条件で局所的に炉心デブリが堆積するよう想定しており、実機条件よりも厳しい条件を与えるものである。

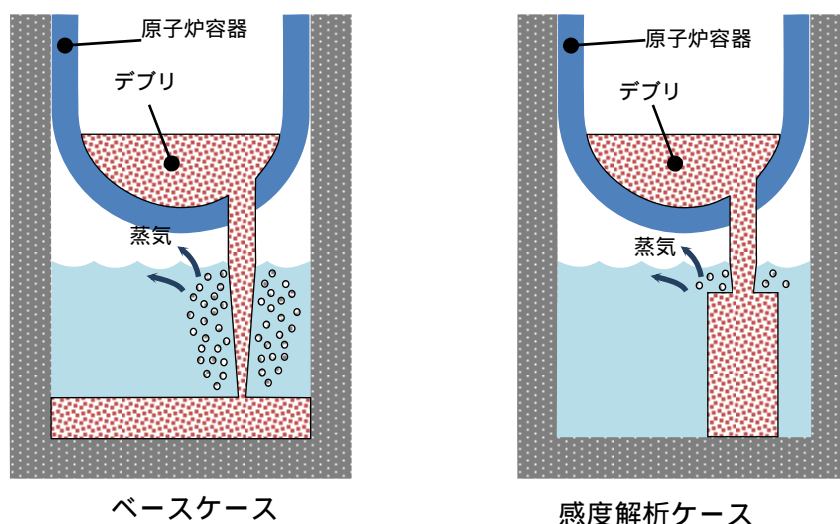
デブリジェットがキャビティ床に到達するまでの落下過程において、炉心デブリとキャビティ水との接触により、炉心デブリからキャビティ水への伝熱が発生する。本ケースにおいては、デブリの過熱度分が全て伝熱されると仮定し、デブリの融点まで冷却するよう条件を与えているが、実際は、溶融ジェット径が0.5m程度と大きいいため、落下過程で冷却されずに過熱度を保ったままキャビティ床に到達する溶融ジェットの割合が大きいと考えられる。

落下時に細粒化などにより冷却が進むケースにおいては、落下時に冷却されずに高温のまま床に到達するケースと同様、デブリの質量を約50ton(MAAPコードにおける1回目の原子炉容器破損による炉心デブリ落下量相当)で、拡がり面積を算出しており、キャビティ床上に落下した溶融デブリは、この拡がり面積で堆積するよう仮定している。しかし、実際は原子炉容器破損以降、溶融デブリは断続的にキャビティへ落下することから、拡がりに寄与する炉心デブリ量はさらに大きくなり、拡がり面積は大きくなると考えられる。なお、本ケースでは炉心デブリの堆積高さがキャビティ水面より高くなった場合は、キャビティ水面より高い部分については、キャビティ水による冷却がないことから溶融状態のままであり、固化しないと考えられることから、炉心デブリの堆積の高さとしてはキャビティ水深までとし、それ以降の堆積は横に広がる設定とし、具体的には、炉心デブリの拡がり面積の初期値として、キャビティ床面積の約1/10を与えた。

MAAPでは、水-炉心デブリ間の伝熱は炉心デブリの上面のみ計算する。しかし、炉心デブリが局所的に堆積する場合には、その側面も水と接触するため、側面からの除熱にも期待できる。そこで、上面に加えて側面からの除熱効果を考慮するため、炉心デブリ形状として円柱を想定し、側面を伝熱面積に加える。計算上の取扱いとして

は、局所的に堆積した床面積を水への伝熱計算に使われる上面の面積とし、デブリの落下量に応じて側面分の伝熱面積が増える分を上面の伝熱量の増分として考慮する。すなわち、上面に側面を加算した面積に相当する比率を、上面から水への伝熱量の比率として設定する。

項目	炉心デブリの拡がり面積	設定根拠
ベースケース	キャビティ床面積の 1/1	キャビティ区画床全面とする
感度解析ケース	キャビティ床面積の約 1/10 から落下量に応じて拡大	落下時に細粒化などにより冷却が進む



解析結果

図 5-3-1 ~ 5-3-9 に、炉心デブリの拡がり面積の感度解析結果を示す。

ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は原子炉容器破損以降に現れる。炉心デブリと水の熱流束については、感度解析ケースの方が、 $1\text{MW}/\text{m}^2$ を超える高い値が継続する結果となっている。これは、炉心デブリの拡がり面積を制限したことで、炉心デブリと水の接触面積が小さくなり、その結果炉心デブリの単位時間当たりの除熱量が小さくなったことで、炉心デブリの冷却に時間を要しているためである。

また、感度解析ケースの方が、炉心デブリの冷却が遅くなっていることから、炉心デブリとコンクリートの熱流束については、高い値が継続しているため、コンクリート侵食が進み、コンクリート侵食深さはベースケースが約 3mm であるのに対して、感度解析ケースでは約 18cm となった。

評価

炉心デブリの拡がり面積が制限された場合の解析を実施し、コンクリート侵食に対する感度を確認した。炉心デブリの拡がり面積が制限された場合、コンクリート侵食が約 18cm となった。ただし、本感度解析は、極端な条件で局所的に炉心デブリが堆積するよう設定しており、実機条件よりも厳しい条件を与えるものである。

水 - 炉心デブリ間の熱流束の上限値として設定している 0.8MW/m^2 は大気圧下での条件であり、格納容器内圧力は大気圧より大きいことから、熱流束も大きくなる。

(4) 水-炉心デブリ間の熱伝達係数

解析条件

水と炉心デブリの熱伝達には、Kutateladze 相関式型の限界熱流束モデルを使用しており、ベースケースでは、水による冷却を伴ったデブリとコンクリートの相互作用に関する実験に基づき大気圧条件で 0.8MW/m^2 に相当する値を使用している。

なお、溶融炉心がキャビティ水に落下する際は、溶融炉心とキャビティ水の間で熱伝達が行われ、それにより溶融炉心が冷却されるとともに、キャビティ床に堆積する際に炉心デブリ表面にクラストが形成されると考えられている。したがって、溶融炉心落下直後は熱流束が比較的高い状態が持続され、この間に溶融炉心の保有する熱はキャビティ水によって除熱される。その後、炉心デブリ表面にクラストが形成された状態になると、熱流束は低下してくる。

また、CCI 実験においても、溶融物への注水直後は高い熱流束が確認され、その後クラストが冷却されて熱流束も低下する結果が得られているとともに、クラストが自重及びキャビティ水の水頭などによる破損により、キャビティ水と直接接触することで再び高い熱流束が得られている。さらに、実機スケールの現象ではクラストにひび割れが生じることが文献¹⁴で示されており、高温の溶融炉心デブリと上面水プールが再度直接接触して、高い熱流束が生じる現象が継続的に発生すると判断できる。

本パラメータについては、実験で観測された最大の熱流束を考慮したケース、実験で観測されたクラスト形成時の熱流束を考慮したケース、バルク冷却時、クラスト全体固化時、コンクリート混入時の各フェーズを考慮したケース、実験で観測された安定クラスト形成後にさらに温度が低下した時点を考慮した実機条件としては仮想的なケースの 4 ケースの感度解析を実施する。

感度解析ケース 1 では、CCI 実験において観測されている初期のバルク冷却期間

¹⁴ M. T. Farmer et al., "Status of the Melt Coolability and Concrete Interaction (MCCI) Program at Argonne National Laboratory", Proc. of ICAPP'05, Korea, (2005)

中の熱流束である $3\text{MW}/\text{m}^2$ を適用する。なお、常に高い熱流束が維持されるのではなく、炉心デブリの温度が低下した場合には、熱流束は崩壊熱を除去できる熱流束に制限される。

感度解析ケース 2 では、上記のキャビティへの落下直後の高い熱流束や、クラストの破損による内部の溶融炉心とキャビティ水との直接接触を考慮せず、CCI-2 及び CCI-3 実験において初期のピークを除外した熱流束である $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ を選定する。

ここで、以下の理由により CCI-1 実験については、感度解析の条件設定の際の検討対象から除外することとした。

CCI 実験では、コンクリート侵食開始後に注水しており、クラストと溶融物の間に空洞が形成されている。これは、実験のような小スケールでは壁と壁の間でクラストが強固につながり、クラストブリッジが形成され、その下でコンクリート侵食により溶融物の液位が低下するためである。一方、実機スケールではクラストの自重及び水の水頭によりクラストが破損し、本実験のような空洞は生じないと考えられる。CCI-1 実験はクラストの形成後、約 10 分の時点でクラスト破損が生じ、熱流束が $3\text{MW}/\text{m}^2$ 程度まで再上昇しているが、これはクラストと溶融物の間に形成された空洞の影響が大きく現れたケースであり、クラストが破損するまでは空洞の形成により熱流束が小さく、クラストが破損した後に破損箇所から水が流入し、高温の溶融物と水が直接接触することによって熱流束が大きくなったものである。実機スケールでは、このような空洞は形成されないと考えられるため、感度解析の条件設定の際の検討対象から除外することとした。

感度解析ケース 3 では、次のように熱流束を設定する。

まず、炉心デブリ内部に溶融状態のデブリがある状態について、炉心デブリ内部に溶融状態のデブリがあると、クラストは破損、浸水を繰り返し、安定したクラストは形成されないと考えられる。したがって、部分的にも溶融物から水へ、高い熱流束での伝熱となると考えられる。この時の現象は、小規模実験で溶融物へ注水を開始した時点と同等と考えられ、MACE 実験、CCI 実験では $1\text{MW}/\text{m}^2$ 以上の値が観測されている。炉心デブリの落下直後は、高温の炉心デブリとキャビティ水の直接接触により、さらに高い熱流束が得られると考えられるが、本感度解析では、内部に溶融部が存在する間の熱流束として、一律に $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ を適用する。

次に、炉心デブリ全体が固化した後の挙動においては、キャビティへの落下直後の高い熱流束や、クラストの破損による内部の溶融炉心とキャビティ水との直接接触を考慮せず、CCI-2 及び CCI-3 実験において初期のピークを除外した熱流束である $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ を選定する。

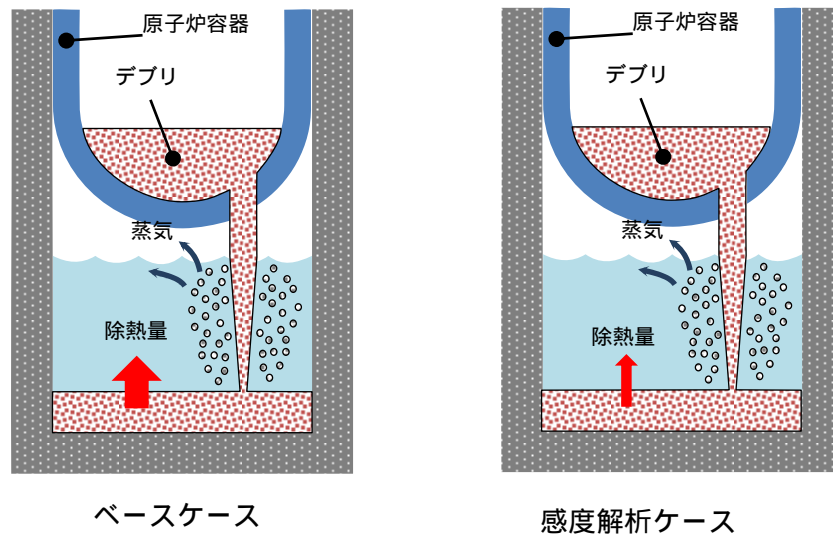
次に、コンクリート混入がある場合のドライアウト熱流束については、SSWICS 実験において確認されており、コンクリートの混入割合が 15%程度に達した場合にドライアウト熱流束は $0.125\text{MW}/\text{m}^2$ 程度となっている。15%までの間は、ドライア

ウト熱流束はほぼ直線的に低下しており、コンクリート混入割合が 15%程度以上の場合には、ドライアウト熱流束はほぼ一定となっている。本感度解析では、コンクリート侵食量に応じて、上記の SSWICS 実験において確認された熱流束を使用する。

感度解析ケース 4 では、WETCOR、MACE、CCI 実験においてクラスト全体が固化して温度が低下した状態の熱流束である 0.2MW/m^2 を適用する。これについて、炉心デブリは、熔融状態でキャビティ水と直接接触するため、炉心デブリ落下直後は高い熱流束が得られると考えられるが、本感度解析は熔融デブリ落下直後から、安定化クラスト形成後の熱流束を仮定しているという点で、仮想的なケースであると言える。

項目	Kutateladze 係数	設定根拠
ベースケース	0.1 (0.8MW/m^2 相当 ^(注))	水による冷却を伴ったデブリとコンクリートの相互作用に関する実験に基づく値
感度解析ケース 1	0.375 (3MW/m^2 相当 ^(注))	CCI-2 実験で初期ピークを模擬した熱流束
感度解析ケース 2	0.0625 (0.5MW/m^2 相当 ^(注))	CCI-2,3 実験で初期ピーク値を除外した熱流束値
感度解析ケース 3	熔融物存在時 0.1 (0.8MW/m^2 相当 ^(注)) 全体固化時 0.0625 (0.5MW/m^2 相当 ^(注)) コンクリート 15%混入時 0.015625 (0.125MW/m^2 相当 ^(注))	熔融物存在時はベースケースと同様。全体固化時は感度解析ケース 2 と同様。コンクリート混入時は SSWICS 実験での熱流束値
感度解析ケース 4	0.025 (0.2MW/m^2 相当 ^(注))	WETCOR、MACE、CCI 実験においてクラスト全体が固化して温度が低下した状態の熱流束

(注) 大気圧条件



解析結果

図 5-4-1～5-4-10 に、水-炉心デブリ間の熱伝達係数の感度解析結果を示す。

ベースケースと感度解析ケースで、本パラメータの影響は原子炉容器破損以降に現れる。

まず感度解析ケース 1 について考察する。感度解析ケース 1 では、炉心デブリと水の熱流束について、瞬間的に $2\text{MW}/\text{m}^2$ 以上となる場合があり、ベースケースの限界熱流束（約 $1.3\text{MW}/\text{m}^2$ ）に比べて高く、限界熱流束の継続時間はベースケースよりも短くなっている。感度解析ケースでは、炉心デブリ落下時の高い熱流束を考慮しているため、炉心デブリ温度の低下が顕著であり、コンクリートの侵食深さは 0mm となった。

感度解析ケース 2 では、炉心デブリと水の熱流束について、感度解析ケースでは限界熱流束の値は $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ 程度（大気圧で $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ 相当）とベースケースより低く、限界熱流束の持続時間はベースケースより若干長く、約 20 分となっている。感度解析ケースでは、炉心デブリ落下直後の高い熱流束を考慮していないことから、炉心デブリ温度の低下が緩やかになっており、コンクリートと炉心デブリ間の熱伝達もより長時間継続したため、コンクリートの侵食深さはベースケースに比べて増加したものの有意ではなく、約 7mm となった。

感度解析ケース 3 では、炉心デブリと水の熱流束について、初期はベースケースと同様であるが、全体固化後は $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ 程度（大気圧で $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ 相当）とベースケースより低く、限界熱流束の持続時間はベースケースより長くなっている。感度解析ケースでは、炉心デブリ落下直後の高い熱流束を考慮していないことから、炉心デブリ温度の低下が緩やかになっており、コンクリートと炉心デブリ間の熱伝達もより長時間継続したため、コンクリートの侵食深さはベースケースに比べて若干増加したものの有意ではなく、約 3mm となった。

感度解析ケース4では、炉心デブリと水の熱流束について、 0.3MW/m^2 程度で推移しており、ベースケースの限界熱流束（約 1.3MW/m^2 ）に比べて低い値となっている。これは、Kutateladze 係数を小さくしたことで、炉心デブリから水への熱流束が小さく評価された結果であり、感度解析ケースでは概ね一定の熱流束が継続している。炉心デブリとコンクリートの熱流束については、最初のピーク値が最も高く、この時点で最もコンクリートが熱せられており、感度解析ケースでは、 0.1MW/m^2 前後の熱流束が継続している。その結果、コンクリートの侵食深さはベースケースの解析結果である 3mm に比べて増加し、約 20cm 程度となった。崩壊熱は時間の経過に伴い減衰し、水による除熱量は前述のとおり概ね一定の値が維持されるため、その結果、約 8 時間の時点でコンクリート表面温度は融点を下回りコンクリート侵食は停止する。

評価

水 - 炉心デブリ間の熱流束に対する感度解析を実施し、コンクリート侵食に対する感度を確認した。感度解析ケース 1、2、3 においては、有意なコンクリート侵食には至らず、その不確かさが有効性評価の結果へ与える影響は小さい。一方、炉心デブリ落下直後から、安定化クラスト形成後の熱流束を仮定した条件のケース4では、コンクリート侵食が有意に進む結果となった。ただし、本ケースは、前述のとおり、炉心デブリ落下直後の高い熱流束の状態を無視した仮想的なケースであり、現実的に起こり得るものではないと考える。

(5) 感度解析パラメータの組み合わせ

MCCI は、原子炉キャビティ底に堆積した溶融炉心が周囲のコンクリートやキャビティ水と伝熱する過程でさまざまなパターンの不確かさが考えられること、また直接的な実験例が少なく知見が不十分であることから「4. 不確かさに関する整理」にて抽出したパラメータの組み合わせを考慮し、感度解析を実施する。

解析条件

解析条件の設定に当たっては、「5 感度解析と評価(3) 炉心デブリの拡がり面積」において設定した条件に則り、炉心デブリの拡がりの形態に着目し、拡がりのケースとして以下の2ケースとなるよう各パラメータを組み合わせた感度解析を実施した。

- ・ 落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース
- ・ 落下時に細粒化などにより冷却が進むケース

感度解析の組み合わせとして、「落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース」では、細粒化が進みにくくなるよう設定するため、エントレインメント係数を推

奨範囲の最小値とし、炉心デブリの拡がり面積としては、キャビティ床面積を設定した。

一方、「落下時に細粒化などにより冷却が進むケース」では、細粒化が進みやすくなるよう設定するため、エントレインメント係数は推奨範囲の最大値とし、炉心デブリの拡がり面積としては、「5 感度解析と評価（3）炉心デブリの拡がり面積」で設定した面積とした。

なお、水深については不確かさの範囲では結果への影響が小さいため、ベースケースの値を使用する。また、水 - 炉心デブリ間の熱流束については、両ケースとも不確かさとして重畳させることとし、現実的な不確かさの幅を確認する観点から、「5 感度解析と評価（4）水-炉心デブリ間の熱伝達係数」の感度解析ケース3の熱流束を使用する。

以上から、パラメータの組み合わせとして次表の2ケースを考える。

項目	パラメータ	設定値	設定根拠
ベース ケース	代替格納容器 スプレイ作動	炉心溶融後 30 分	運転員操作余裕時間として設定
	エントレイン メント係数	□	当該変数推奨範囲の最確値
	炉心デブリの 拡がり面積	キャビティ 床面積の 1/1	キャビティ区画床全面とする
	Kutateladze 係数	0.1 (0.8 MW/m ² 相当 ^(注))	水による冷却を伴ったデブリ とコンクリートの相互作用に 関する実験に基づく値
感度解析 ケース 1	代替格納容器 スプレイ作動	炉心溶融後 30 分	運転員操作余裕時間として設定
	エントレイン メント係数	□	当該変数推奨範囲の最小値
	炉心デブリの 拡がり面積	キャビティ 床面積の 1/1	キャビティ区画床全面とする
	Kutateladze 係数	溶融物存在時 0.1 (0.8 MW/m ² 相当 ^(注)) 全体固化時 0.0625 (0.5 MW/m ² 相当 ^(注)) コンクリート 15%混入時 0.015625 (0.125 MW/m ² 相当 ^(注))	CCI 実験、SSWICS 実験に基 づく熱流束を設定
感度解析 ケース 2	代替格納容器 スプレイ作動	炉心溶融後 30 分	運転員操作余裕時間として設定
	エントレイン メント係数	□	当該変数推奨範囲の最大値
	炉心デブリの 拡がり面積	キャビティ床面積の約 1/10 から 落下量に応じて拡大	落下時に細粒化などにより冷 却が進む
	Kutateladze 係数	溶融物存在時 0.1 (0.8 MW/m ² 相当 ^(注)) 全体固化時 0.0625 (0.5 MW/m ² 相当 ^(注)) コンクリート 15%混入時 0.015625 (0.125 MW/m ² 相当 ^(注))	CCI 実験、SSWICS 実験に基 づく熱流束を設定

(注) 大気圧条件

解析結果

図 5-5-1～5-5-9 に、本感度解析の結果を示す。

感度解析ケース 1 は、炉心デブリ落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケースであり、水 - 炉心デブリ間の熱流束は、ベースケースでは、炉心デブリがキャビティに落下する毎に、大気圧条件相当で 0.8MW/m^2 であるのに対して、感度解析ケース 1 では、最初の落下時に大気圧条件相当で 0.8MW/m^2 に達するものの、その後は瞬時に全体が固化するため、大気圧条件相当で 0.5MW/m^2 となる。このため、炉心デブリ温度、コンクリート表面温度はベースケースよりも高温の期間が若干長く維持される。その結果、コンクリート侵食深さは僅かに増加する程度であり、ベースケースが約 3mm、感度解析ケース 1 が約 4mm となった。なお、感度解析ケース 1 では、原子炉キャビティでの水素生成量がベースケースに比べて僅かながら減少した。具体的には、ベースケースでは MCCI による水素発生量が約 3kg、細粒化による Zr-水反応による水素発生量が約 18kg であるのに対して、感度解析ケース 1 では、MCCI による水素発生量が約 4kg、細粒化による Zr-水反応量による水素発生量が約 10kg となった。これは、感度解析ケース 1 においてエントレインメント係数を小さくしたことから、細粒化による Zr-水反応量が少なくなったためである。

感度解析ケース 2 は、炉心デブリ落下時に細粒化などにより冷却が進むケースであり、水 - 炉心デブリ間の熱流束について、ベースケースに比べて、炉心デブリの拡がり面積を制限したことで、炉心デブリと水の接触面積が小さくなり、その結果炉心デブリの単位時間当たりの除熱量が小さくなったことで、熱流束が高く維持される時間が長くなっている。また、炉心デブリ温度、コンクリート表面温度もベースケースに比べて高温の期間が長く維持され、特にコンクリート表面は融点温度に達している期間が長く、この間にコンクリート侵食が継続する。その後、コンクリート表面温度の低下に伴い、コンクリート侵食は停止する。その結果、コンクリート侵食深さは約 19cm となったが、キャビティ底面からのコンクリート厚さは数メートルあり、侵食深さは十分小さいことを確認した。最終的な格納容器内の水素濃度は 6%程度（ドライ条件換算）にとどまり、水素処理装置（PAR 及びイグナイタ）による処理が可能なレベルに収まっている結果となっている。感度解析ケース 2 においては、コンクリート侵食深さが増加したことにより水素発生量は約 53 kg となり、また、エントレインメント係数を大きくしたことにより、細粒化による Zr-水反応量が大きくなり、水素発生量は約 24 kg となった。表 5 に水素発生量の内訳を示す。表 5 に示すとおり、MCCI による水素発生は RV 破損後 30 分に顕著であり、その後、コンクリート侵食の停止に伴い水素発生も停止する。その結果、水素発生量としては、MCCI により約 6%増加しており、原子炉容器内及び原子炉容器外で反応するジルコニウム量を足すと、全炉心内のジルコニウム量の約 37.9%が水と反応する結果となっている。これについて、MCCI により発生する水素は、全てジルコニウムに起因するものであ

ることを確認した。また、追加発生となる水素については、水素処理装置（PAR 及びイグナイタ）を使用することで処理が可能である。

表5 水素発生量の内訳

PDS		RV 破損前	RV 破損後 30 分	RV 破損後後期
時刻		1.5 時間	2.0 時間	10 時間
原子炉 容器内	Zr	257.6kg (29.2%)	257.6kg (29.2%)	257.6kg (29.2%)
	ステンレス	21.4kg (2.4%)	21.6kg (2.5%)	22.9kg (2.6%)
	小 計	279.0kg (31.6%)	279.3kg (31.6%)	280.5kg (31.8%)
原子炉 容器外	Zr	0.0kg (0.0%)	11.9kg (1.3%)	23.5kg (2.7%)
	ステンレス	0.0kg (0.0%)	0.0kg (0.0%)	0.0kg (0.0%)
	小 計	0.0kg (0.0%)	11.9kg (1.3%)	23.5kg (2.7%)
MCCI	Zr	0.0kg (0.0%)	47.5kg (5.4%)	53.0kg (6.0%)
	ステンレス	0.0kg (0.0%)	0.0kg (0.0%)	0.0kg (0.0%)
	小 計	0.0kg (0.0%)	47.5kg (5.4%)	53.0kg (6.0%)
合 計	Zr	257.6kg (29.2%)	317.1kg (35.9%)	334.1kg (37.9%)
	ステンレス	21.4kg (2.4%)	21.6kg (2.5%)	22.9kg (2.6%)
	小 計	279.0kg (31.6%)	338.7kg (38.4%)	356.9kg (40.4%)

() 内は全炉心 Zr 量の 100%が反応した場合の水素発生量 (約 882.6kg) に対する割合を示す。

評価

感度解析パラメータの組み合わせを考慮した場合、炉心デブリ落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケースでは、コンクリート侵食に対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価へ与える影響は小さい。炉心デブリ落下時に細粒化などにより冷却が進むケースでは、コンクリート侵食は約 19cm となった。ただし、本感度解析は、炉心デブリの拡がり面積として、極端な条件で局所的に炉心デブリが堆積するよう設定していることから、実機条件よりも厳しい条件を与えたものである。

「本製品（又はサービス）には、米国電力研究所（the Electric Power Research Institute）の出資により電力産業用に開発された技術が取り入れられています。」

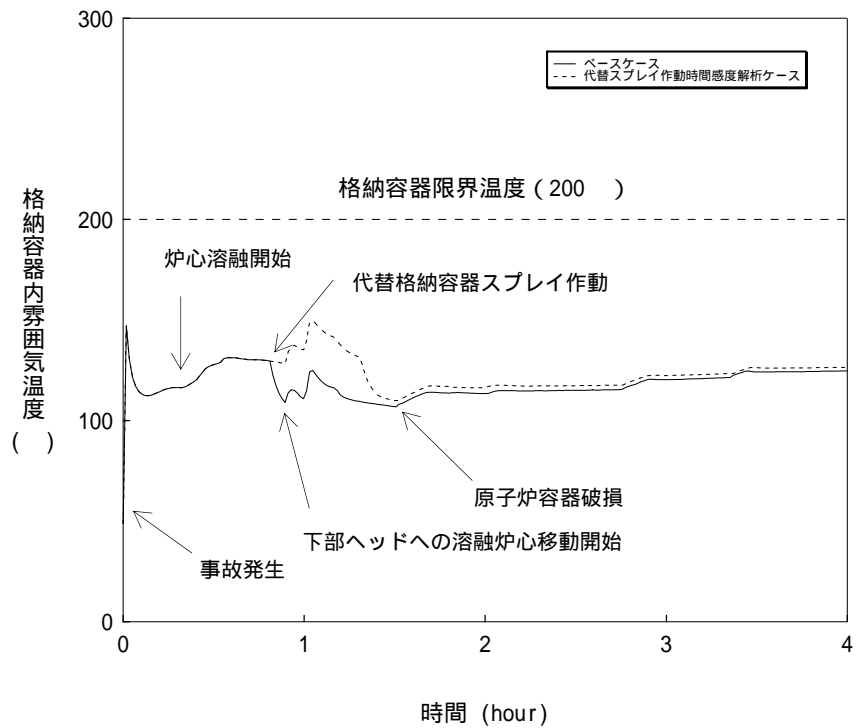


図 5-1-1 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（1）

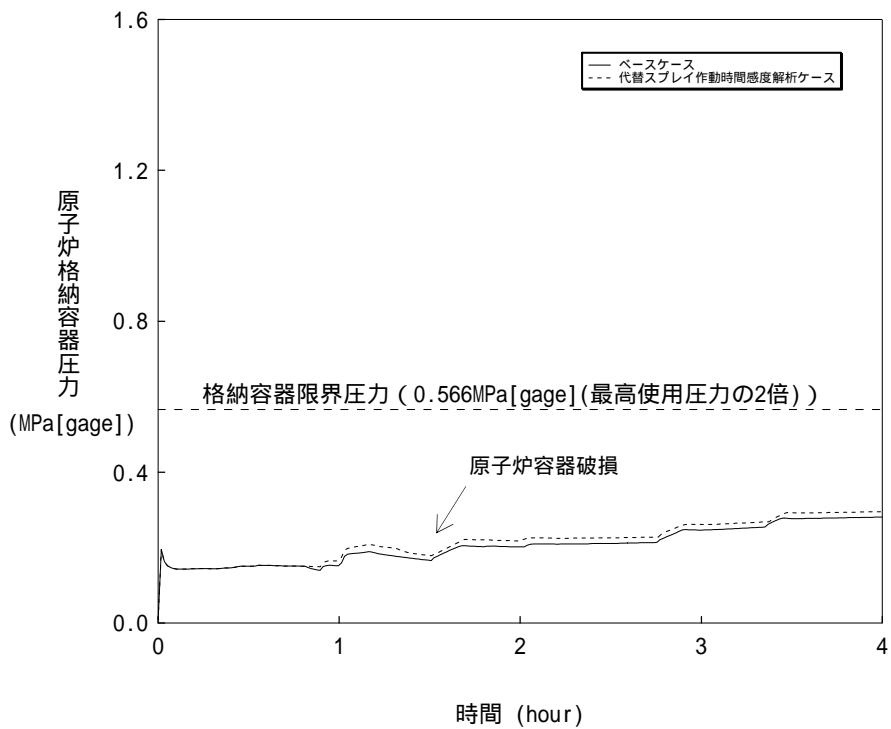


図 5-1-2 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（2）

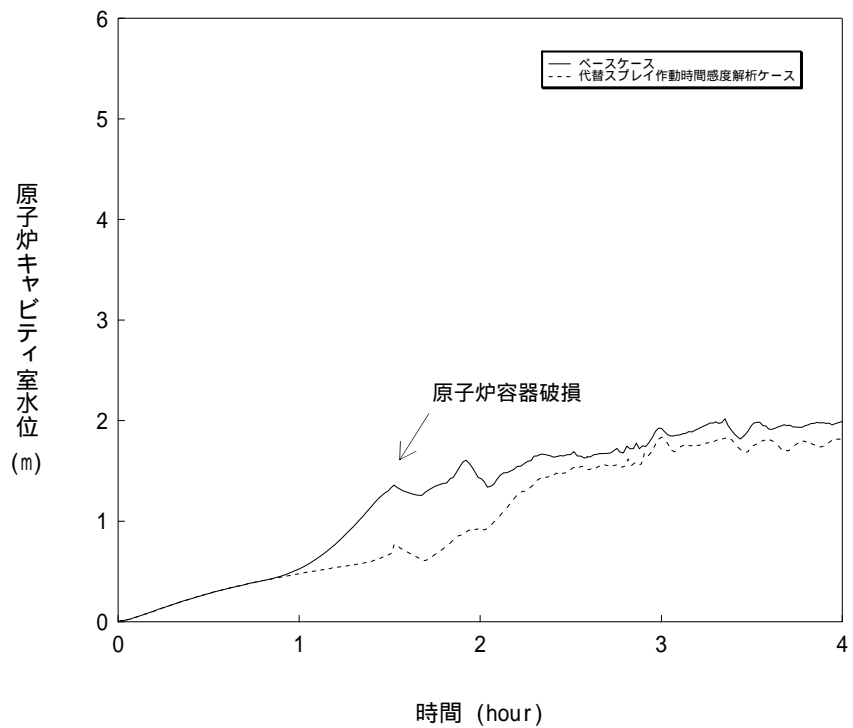


図 5-1-3 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (3)

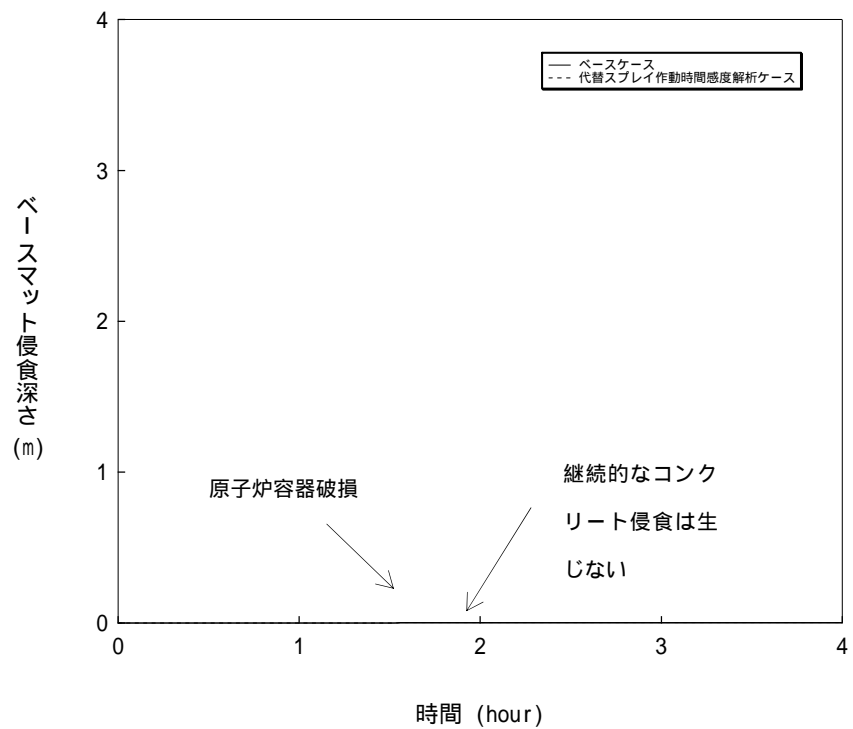


図 5-1-4 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (4)

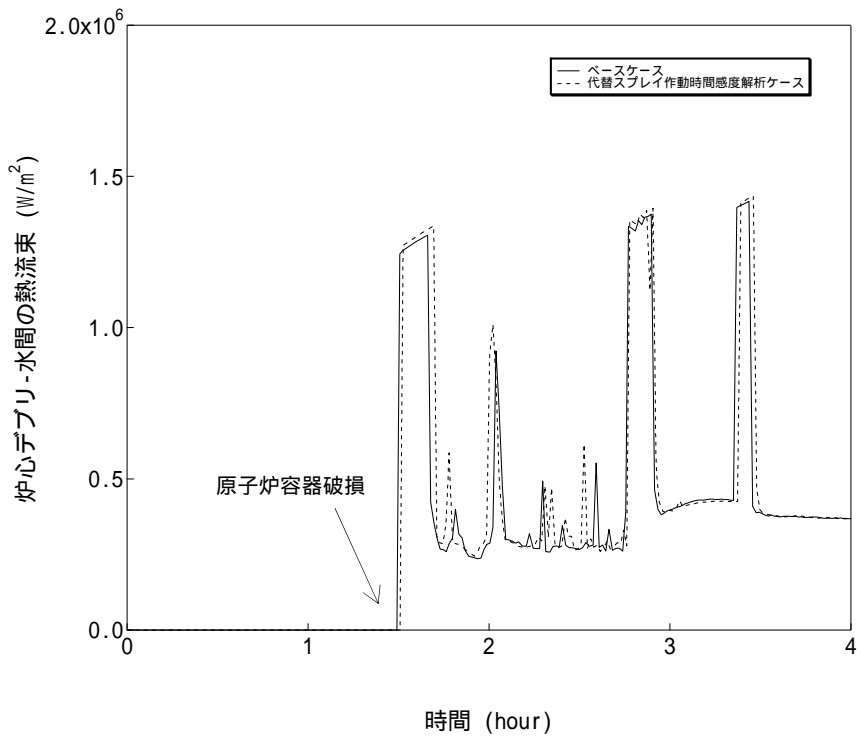


図 5-1-5 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (5)

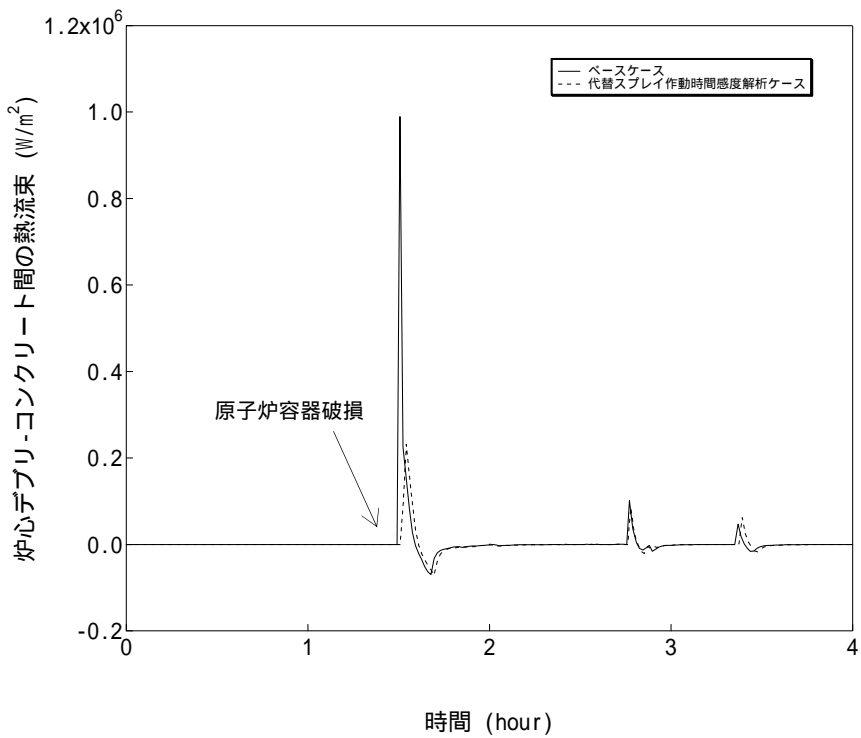


図 5-1-6 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (6)

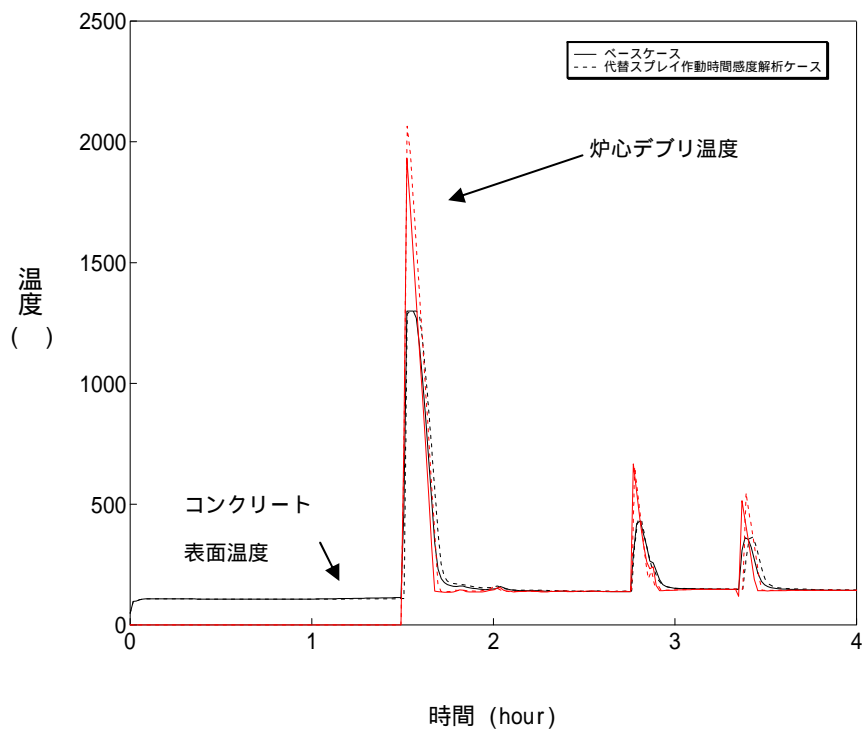


図 5-1-7 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (7)

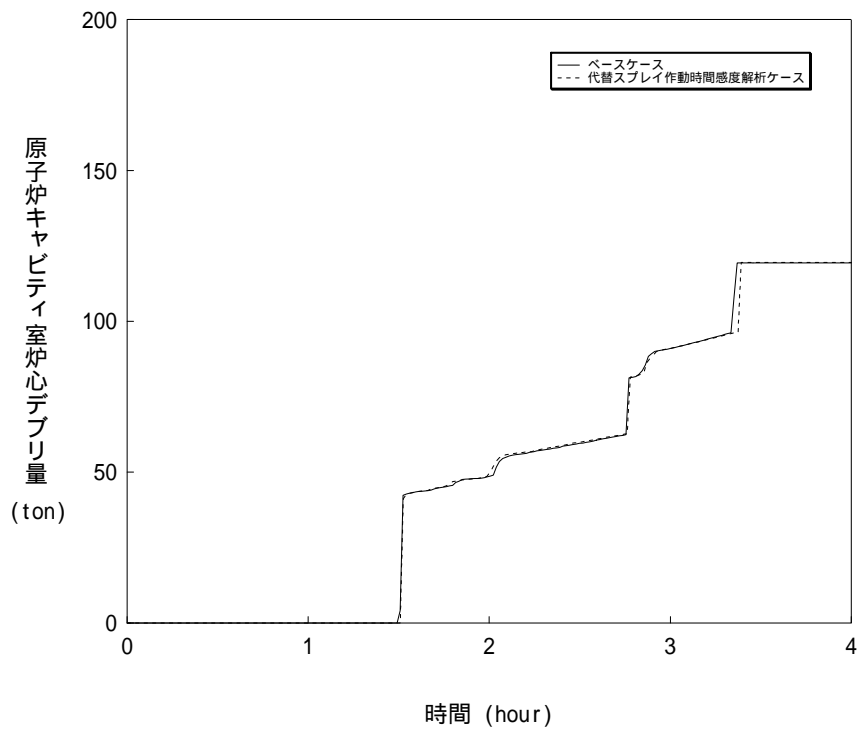


図 5-1-8 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (8)

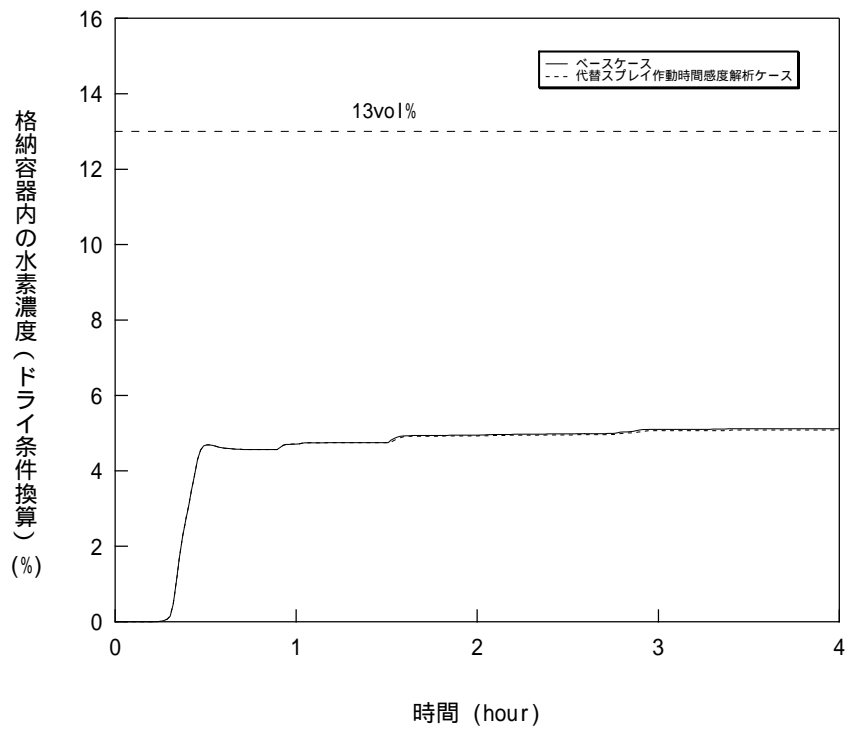


図 5-1-9 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (9)

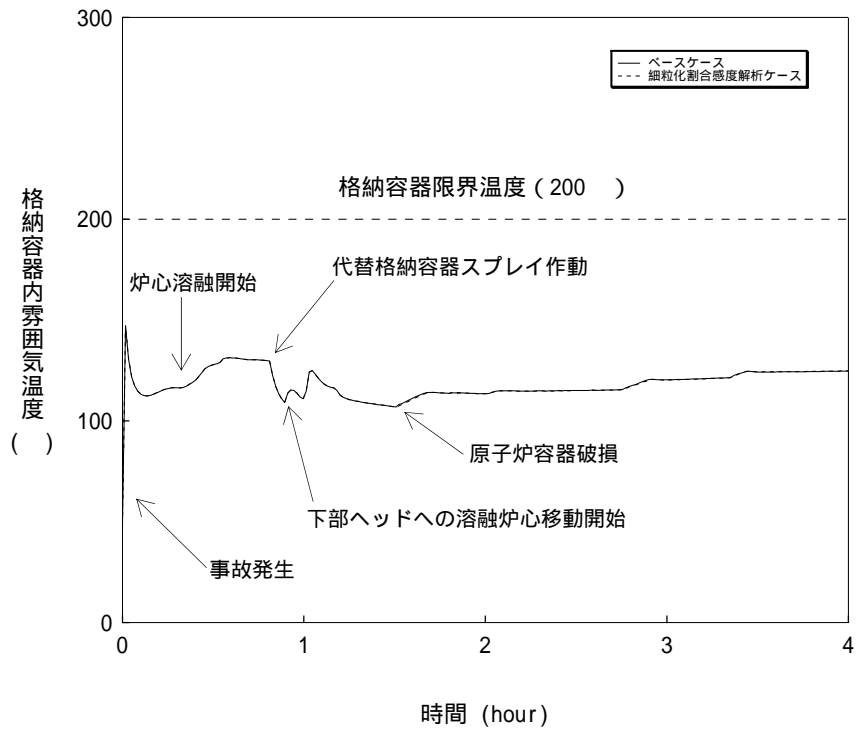


図 5-2-1 溶融デブリの細粒化割合感度解析 (1)

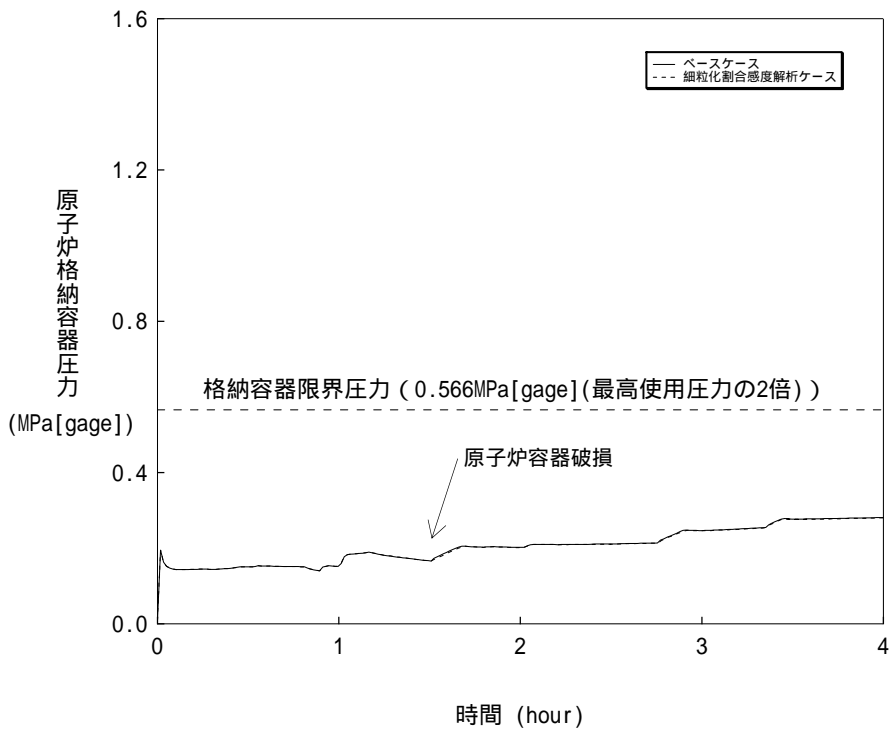


図 5-2-2 溶融デブリの細粒化割合感度解析 (2)

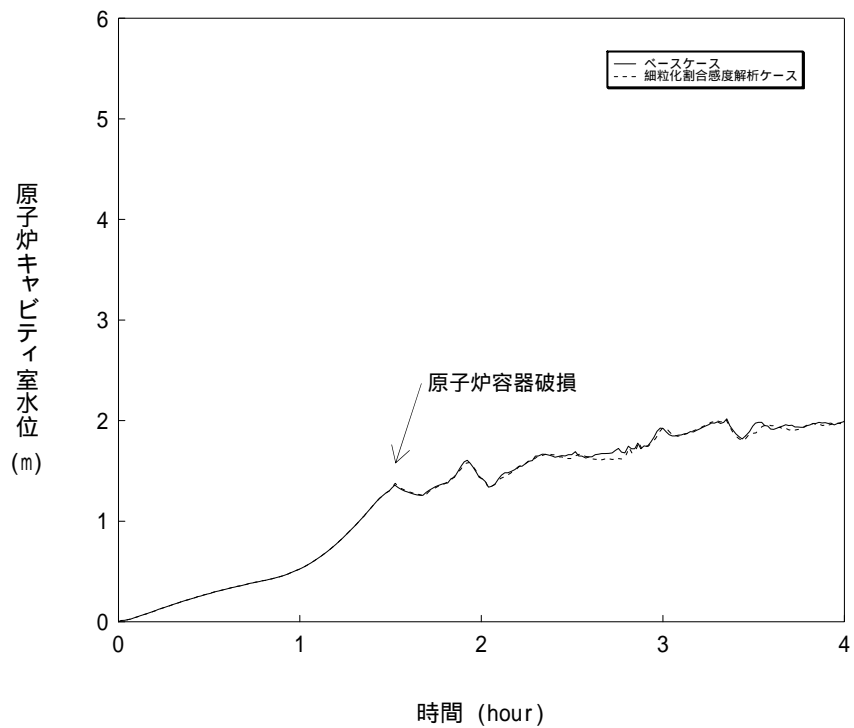


図 5-2-3 溶融デブリの細粒化割合感度解析 (3)

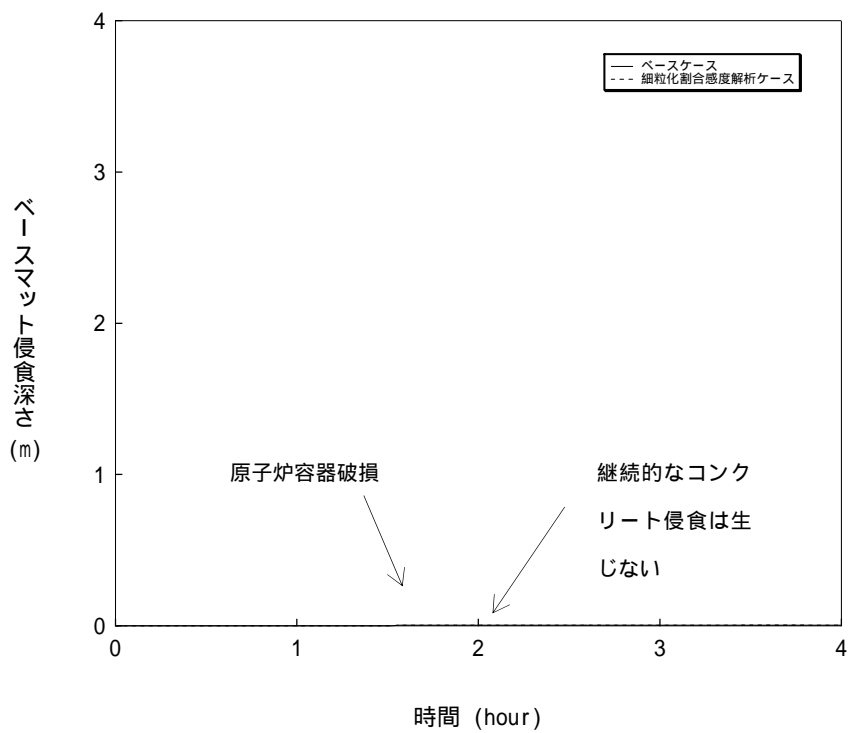


図 5-2-4 溶融デブリの細粒化割合感度解析 (4)

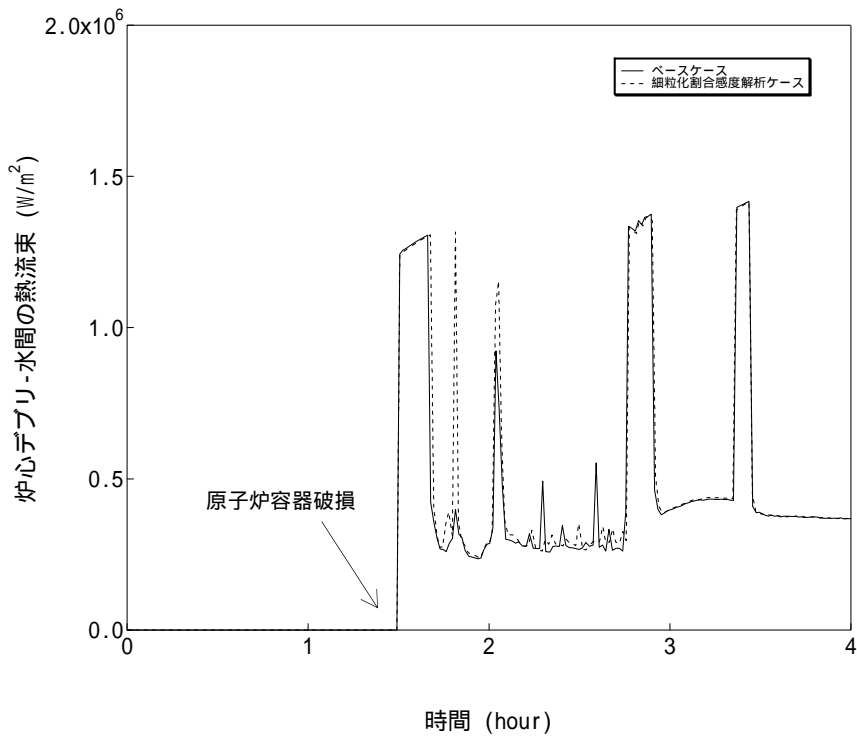


図 5-2-5 溶融デブリの細粒化割合感度解析 (5)

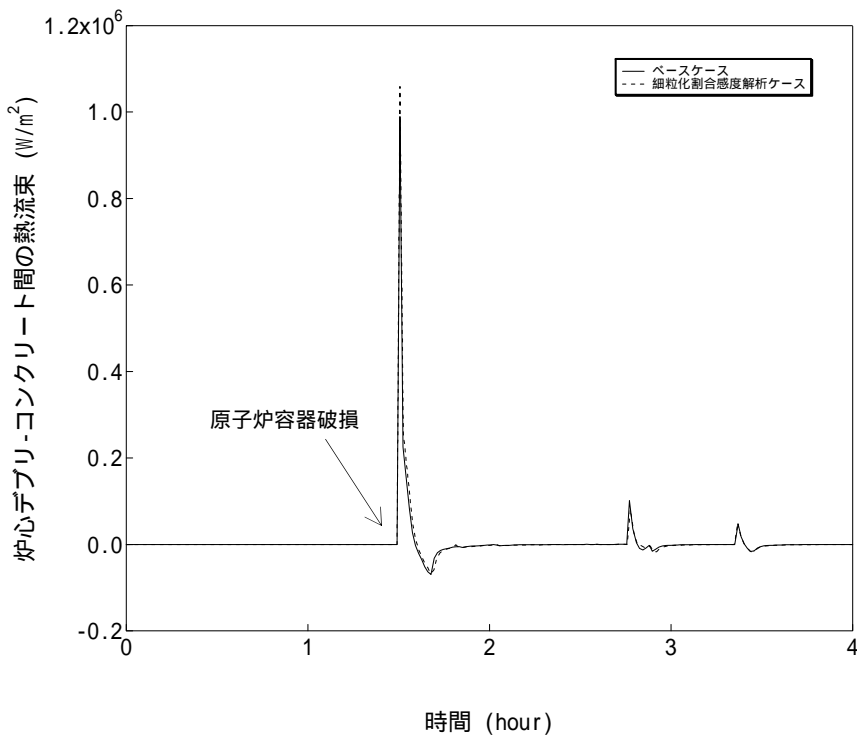


図 5-2-6 溶融デブリの細粒化割合感度解析 (6)

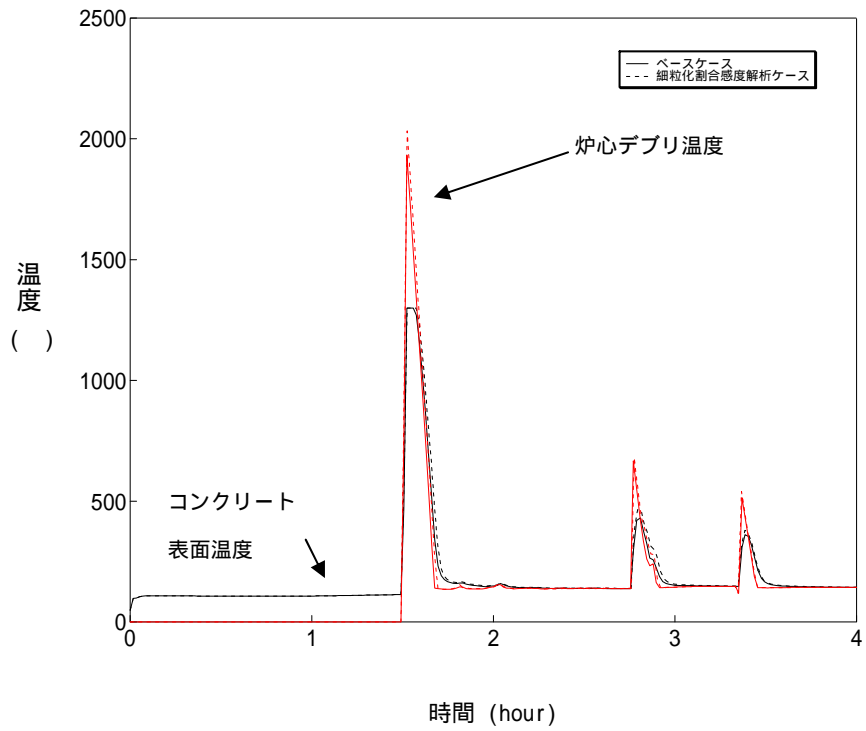


図 5-2-7 溶融デブリの細粒化割合感度解析 (7)

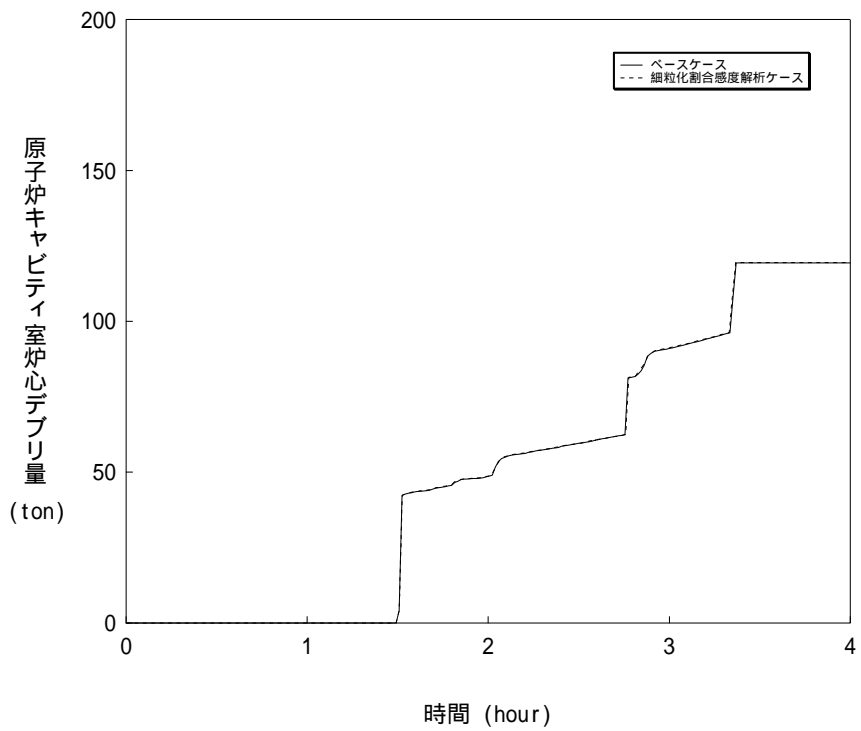


図 5-2-8 溶融デブリの細粒化割合感度解析 (8)

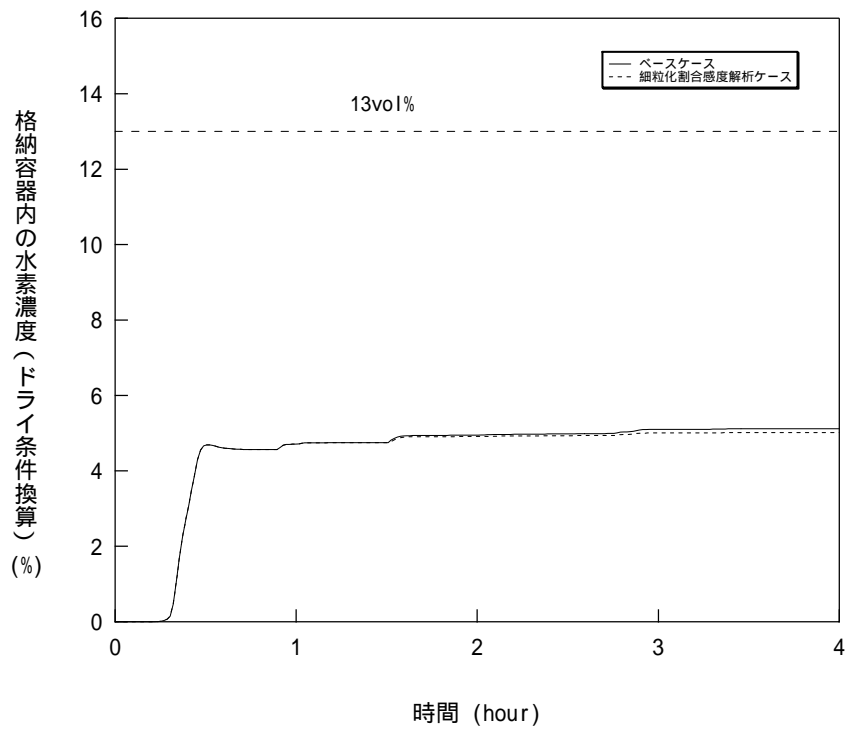


図 5-2-9 溶融デブリの細粒化割合感度解析 (9)

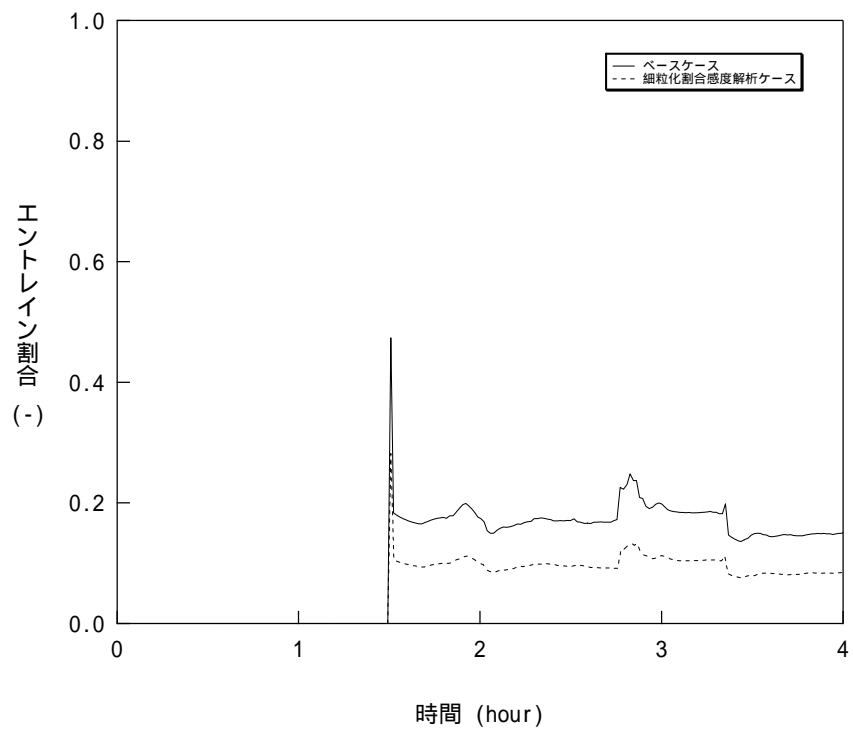


図 5-2-10 溶融デブリの細粒化割合感度解析 (10)

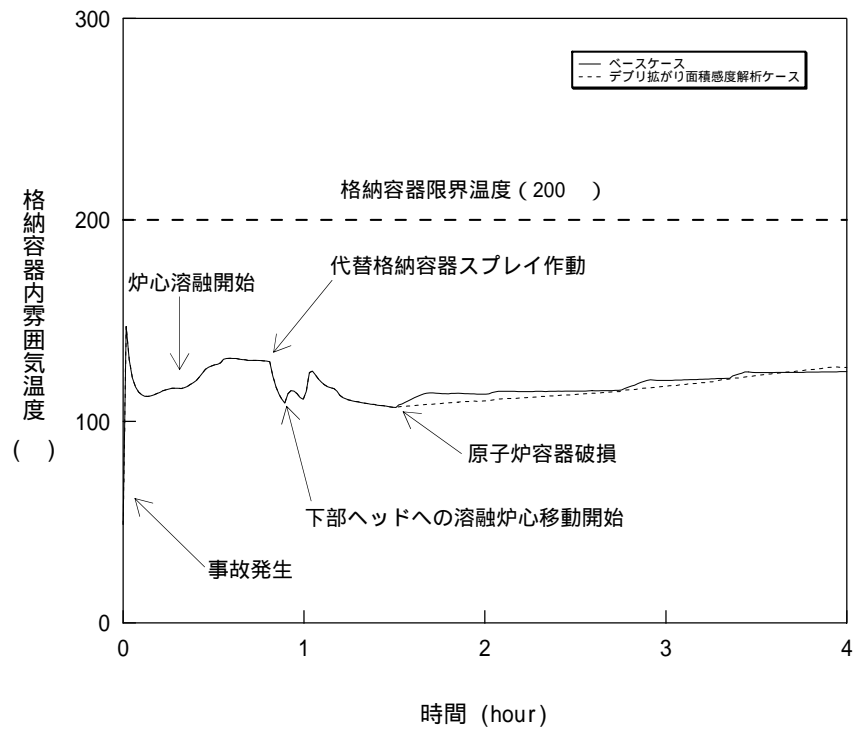


図 5-3-1 炉心デブリの拡がり面積感度解析 (1)

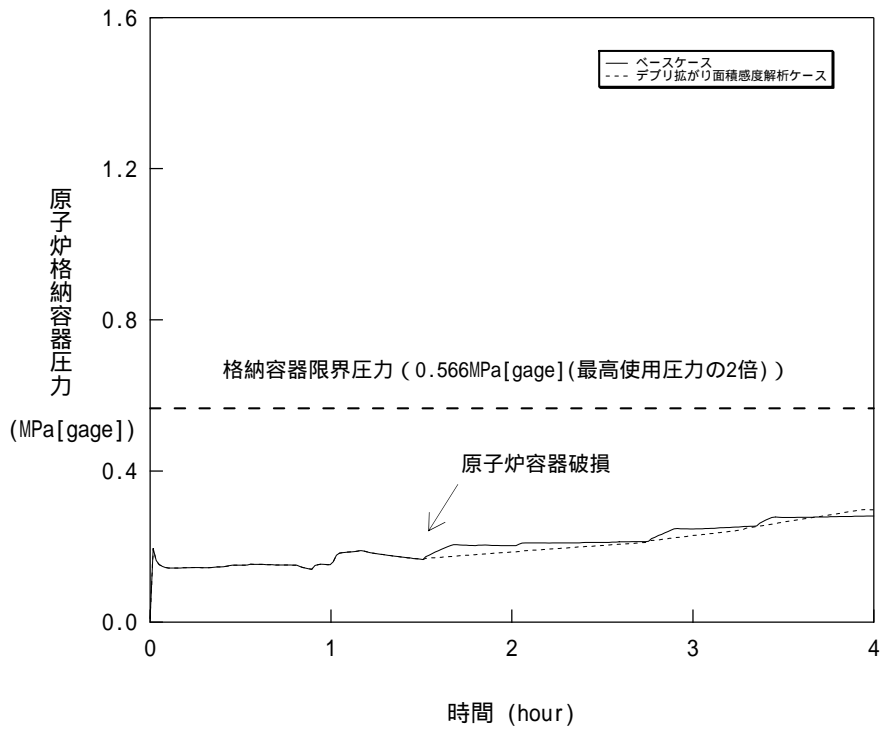


図 5-3-2 炉心デブリの拡がり面積感度解析 (2)

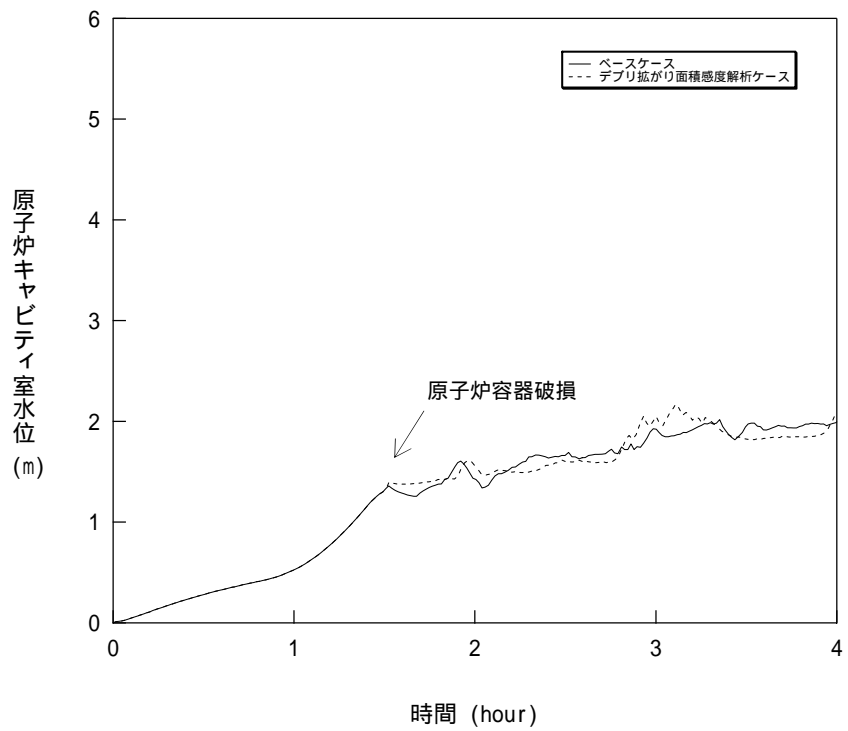


図 5-3-3 炉心デブリの拡がり面積感度解析 (3)

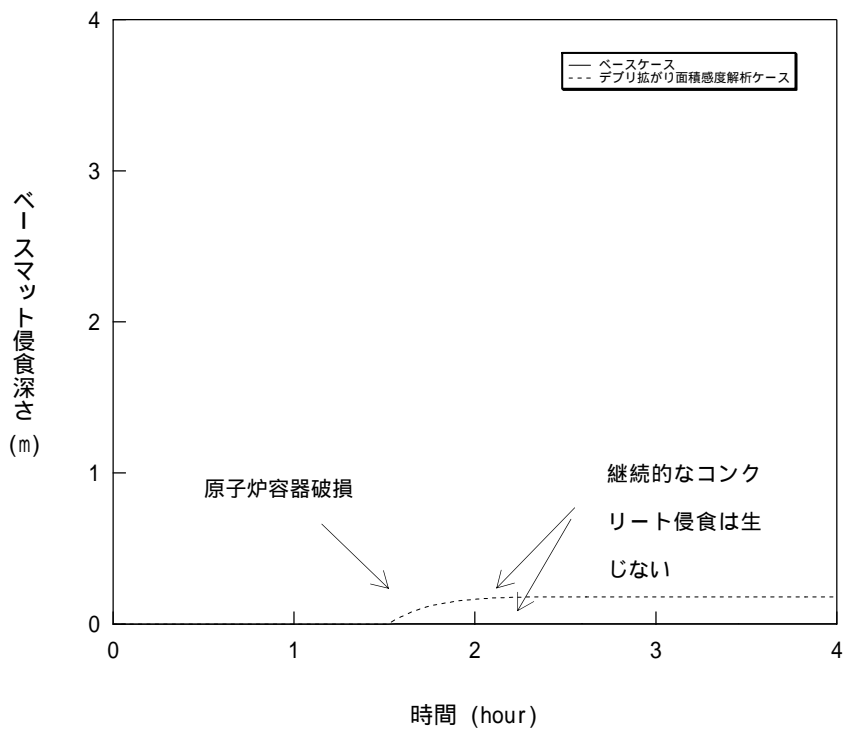


図 5-3-4 炉心デブリの拡がり面積感度解析 (4)

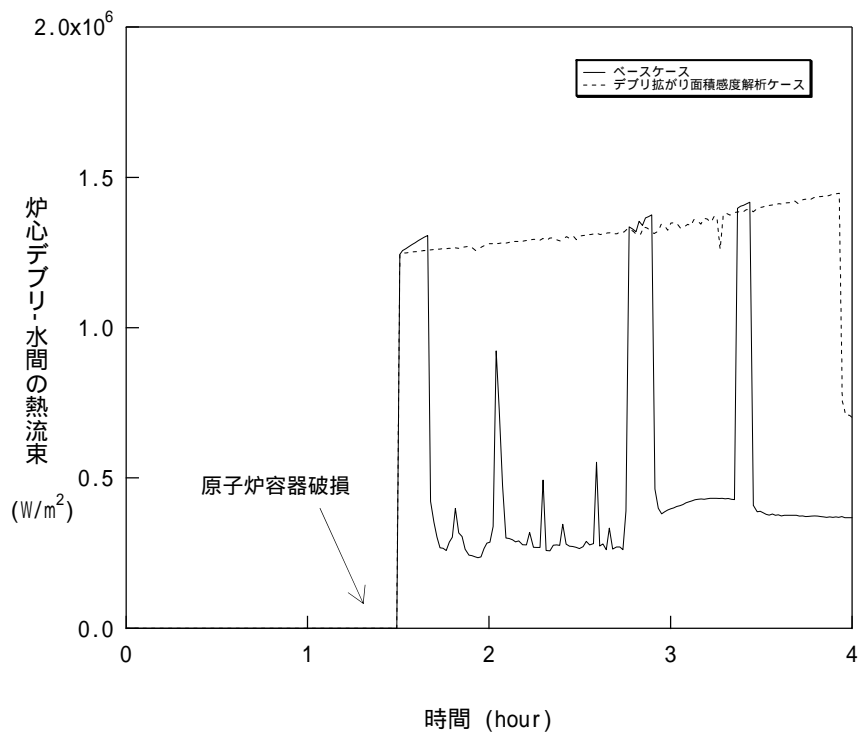


図 5-3-5 炉心デブリの拡がり面積感度解析 (5)

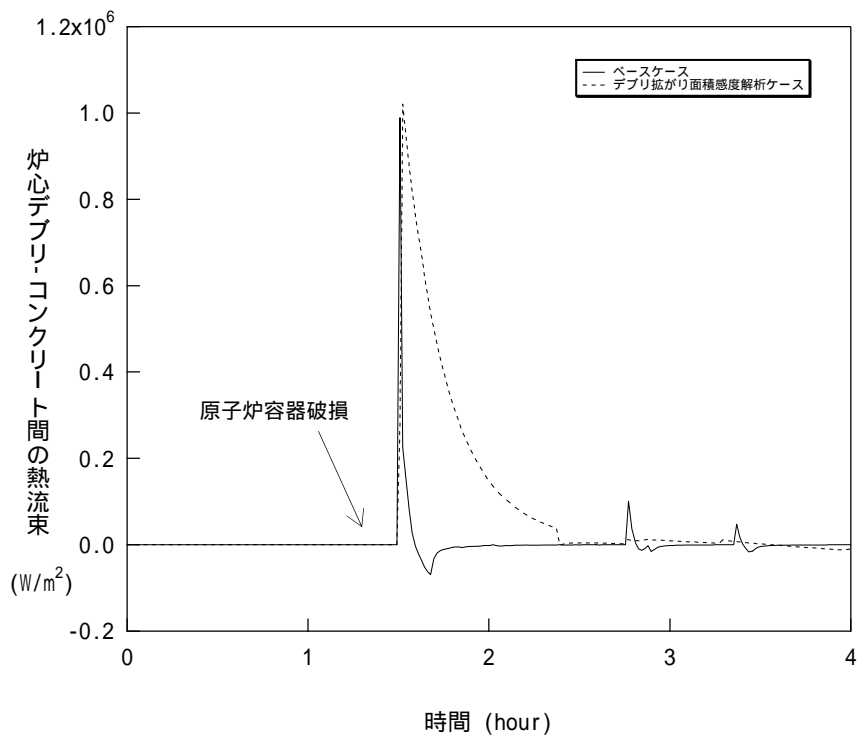


図 5-3-6 炉心デブリの拡がり面積感度解析 (6)

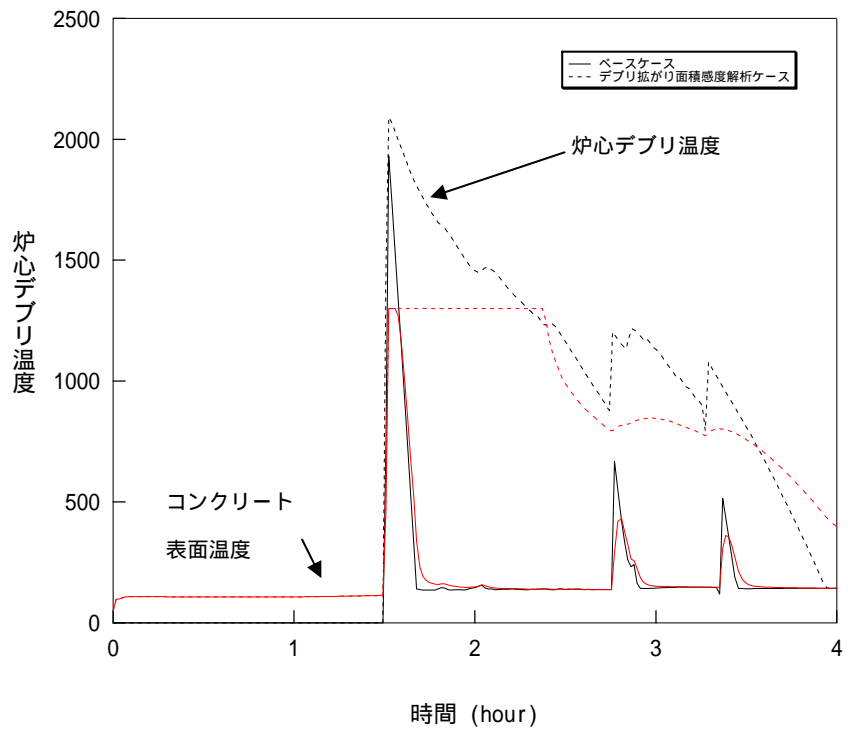


図 5-3-7 炉心デブリの拡がり面積感度解析 (7)

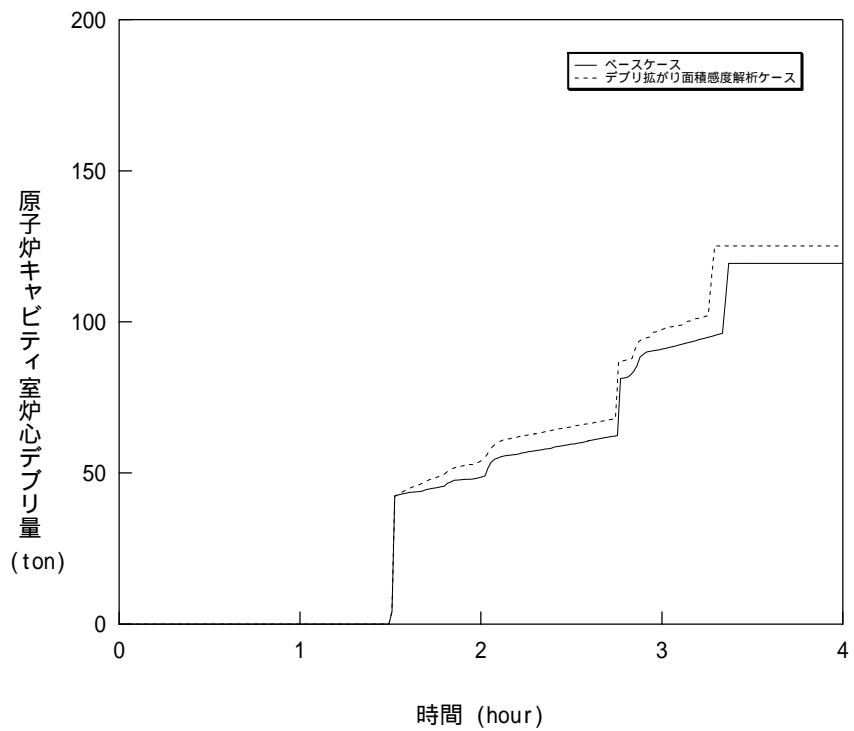


図 5-3-8 炉心デブリの拡がり面積感度解析 (8)

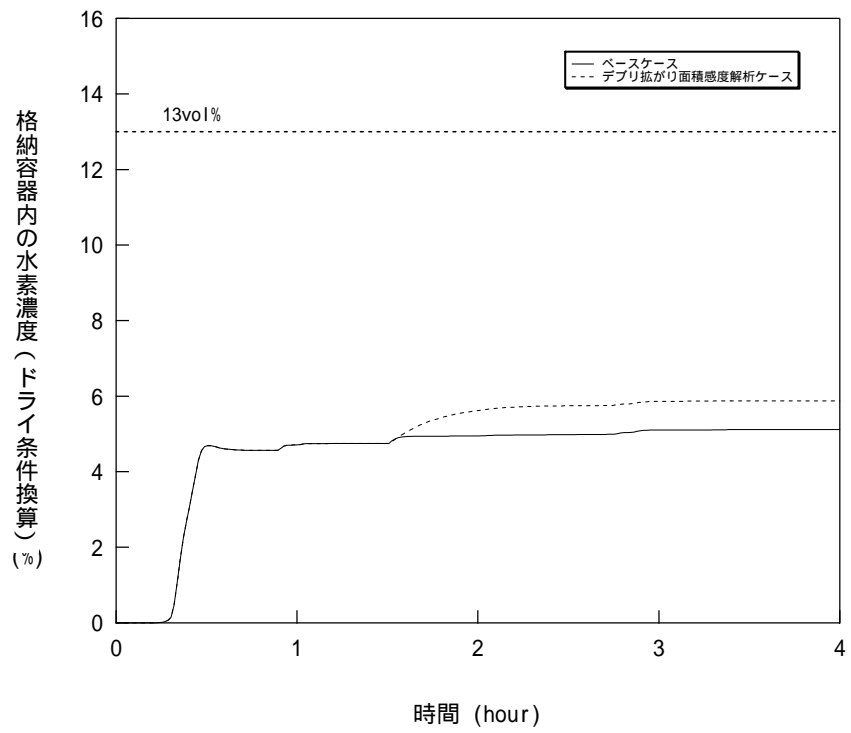


図 5-3-9 炉心デブリの拡がり面積感度解析 (9)

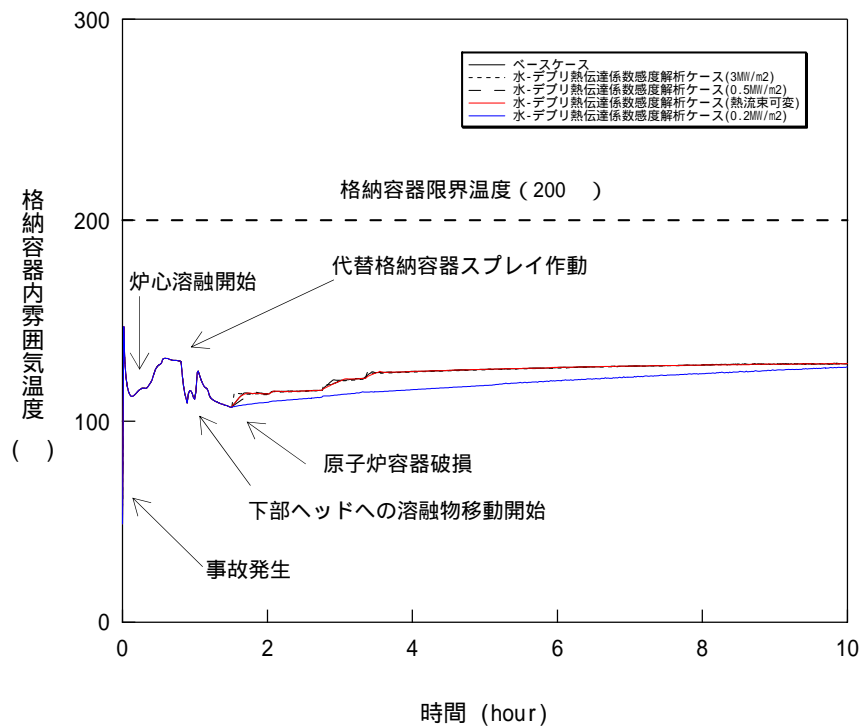


図 5-4-1 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析 (1)

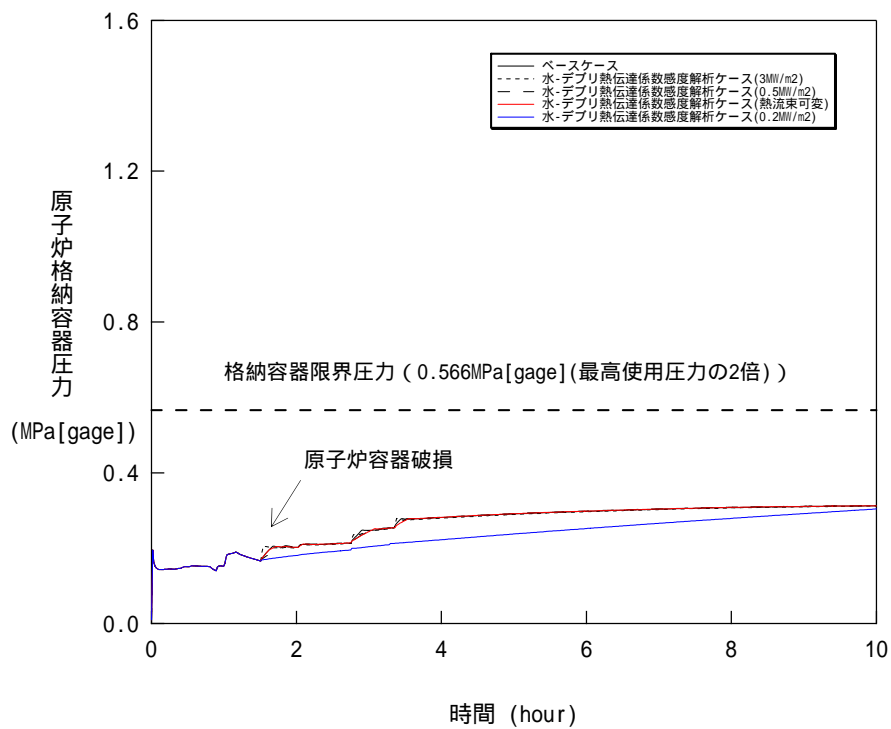


図 5-4-2 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析 (2)

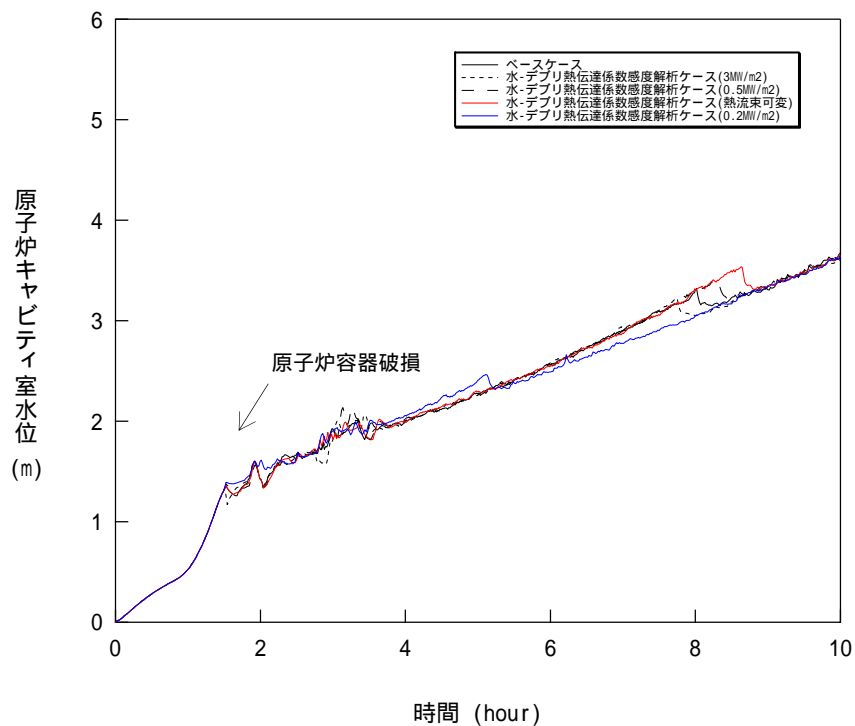


図 5-4-3 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析 (3)

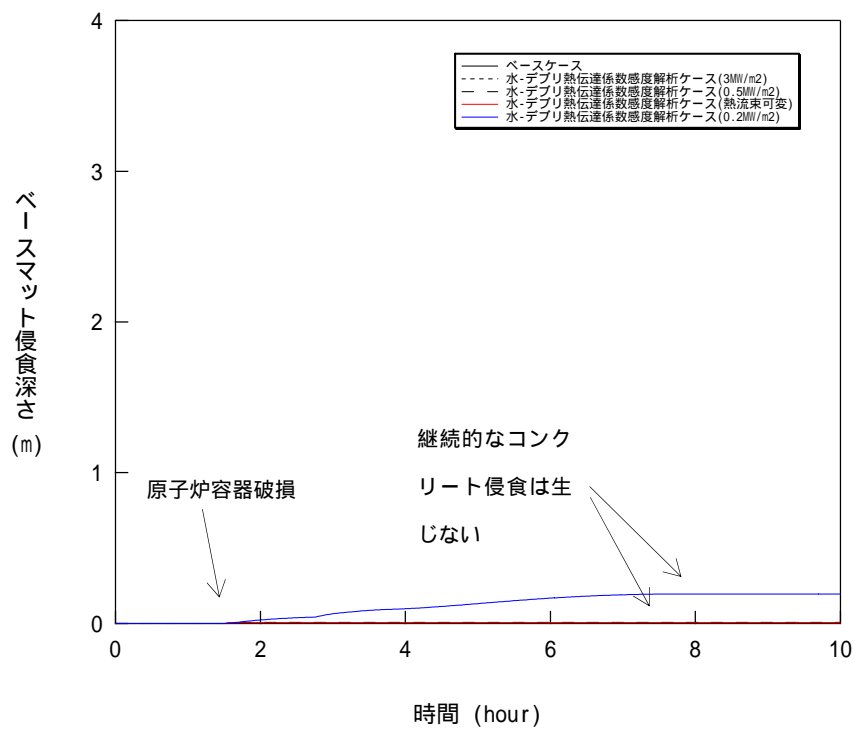


図 5-4-4 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析 (4)

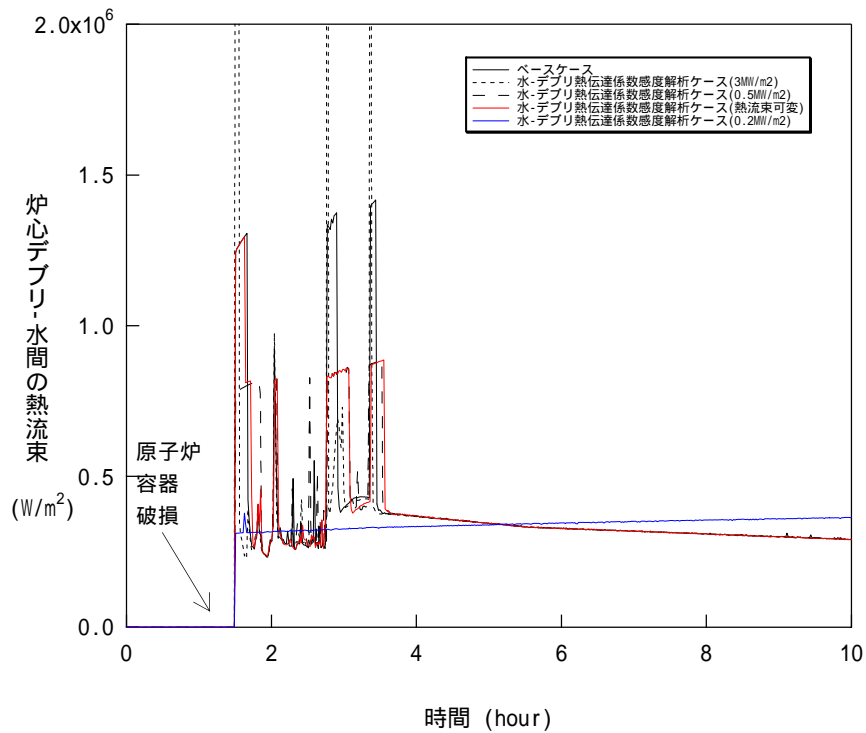


図 5-4-5 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析 (5)

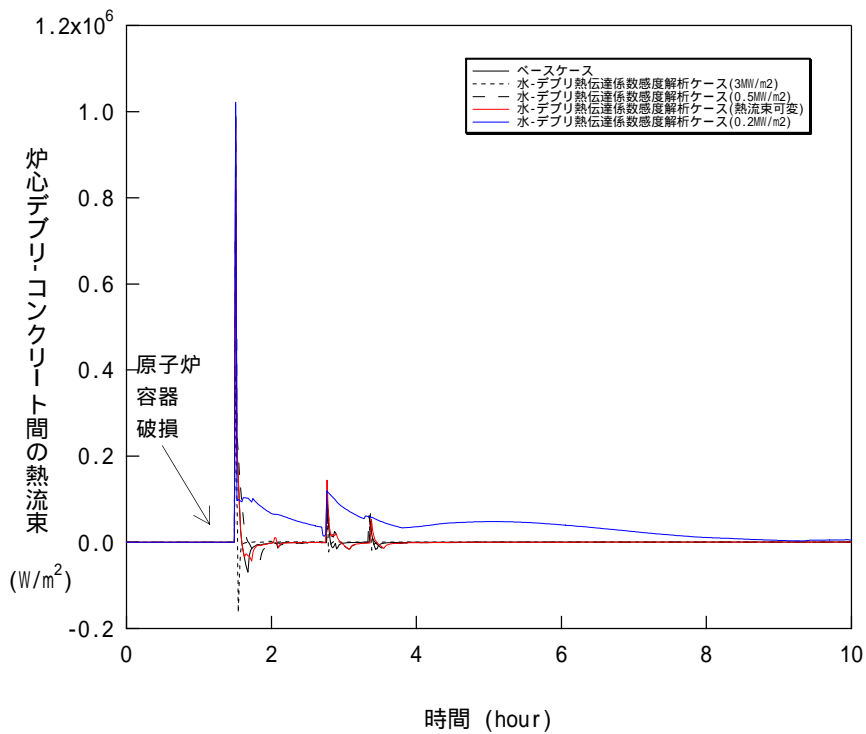


図 5-4-6 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析 (6)

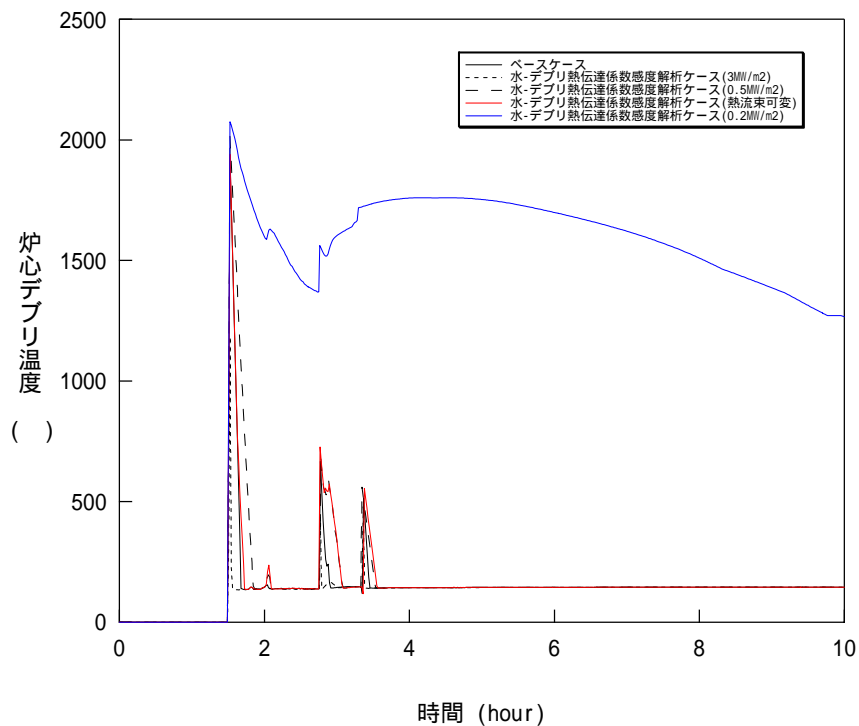


図 5-4-7 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析 (7)

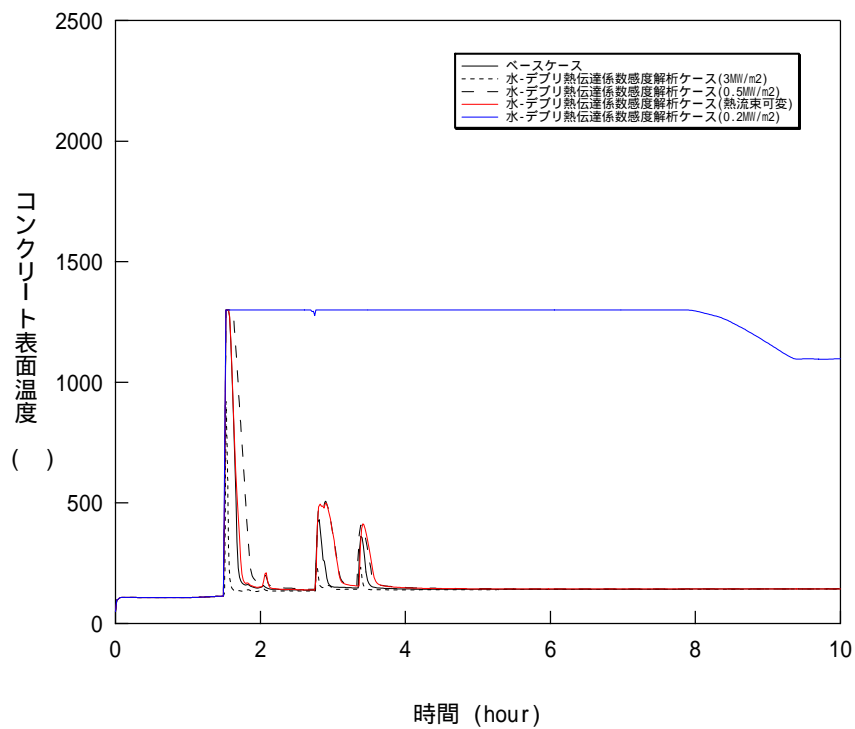


図 5-4-8 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析 (8)

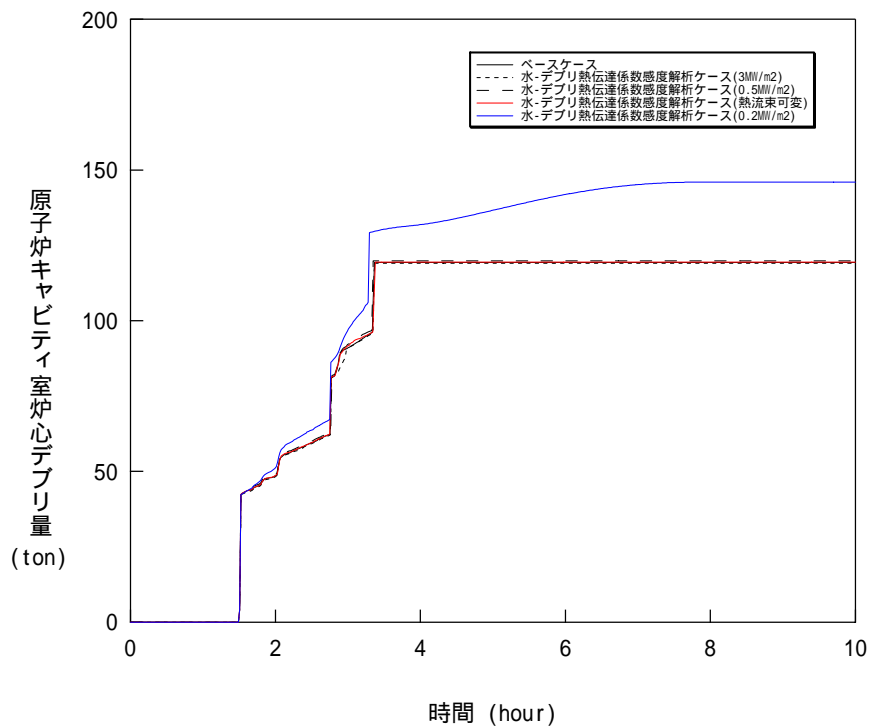


図 5-4-9 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析 (9)

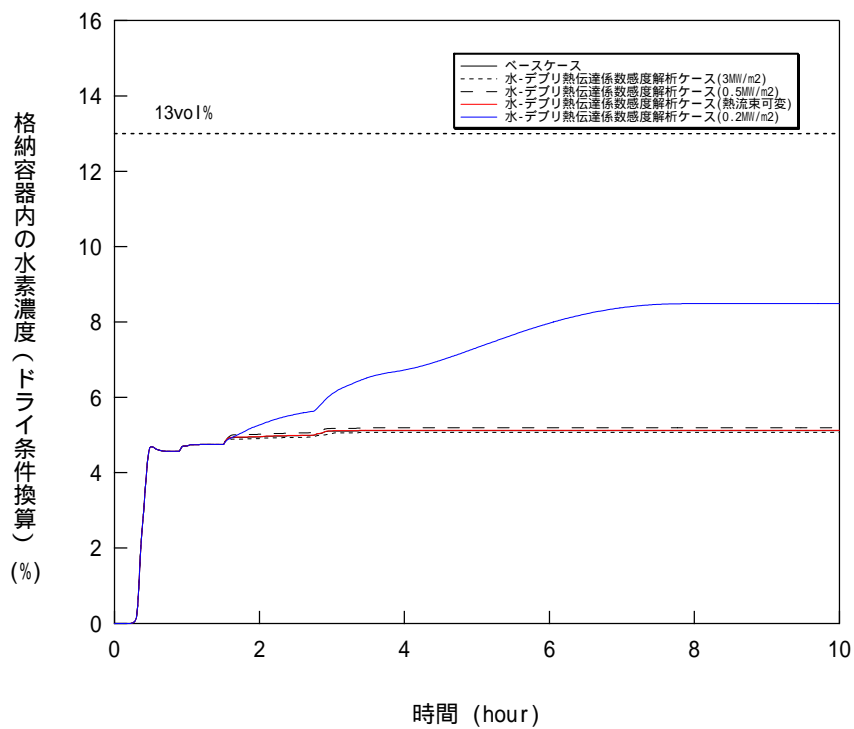


図 5-4-10 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析 (10)

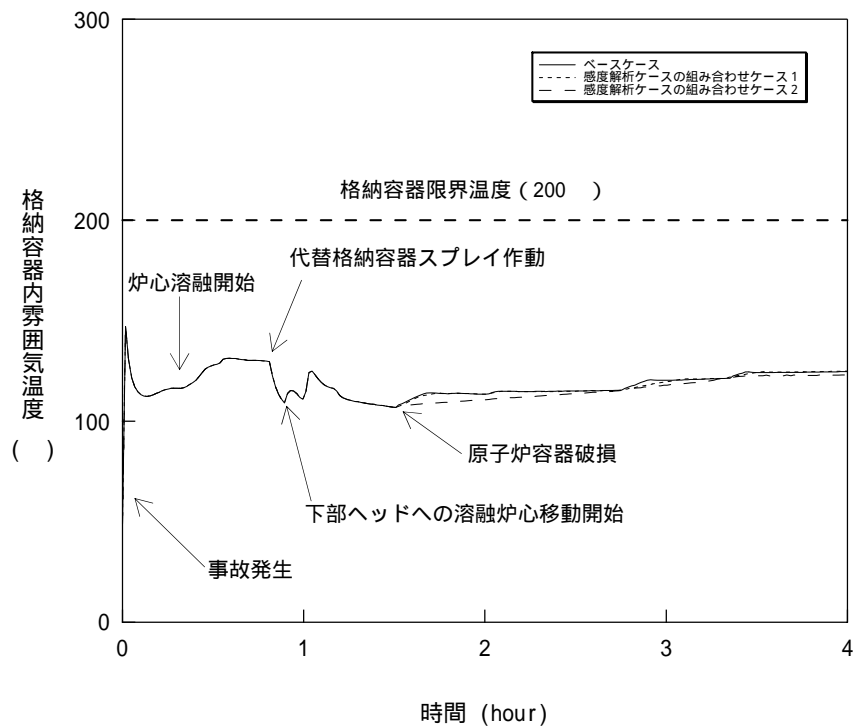


図 5-5-1 感度解析ケースの組み合わせ (1)

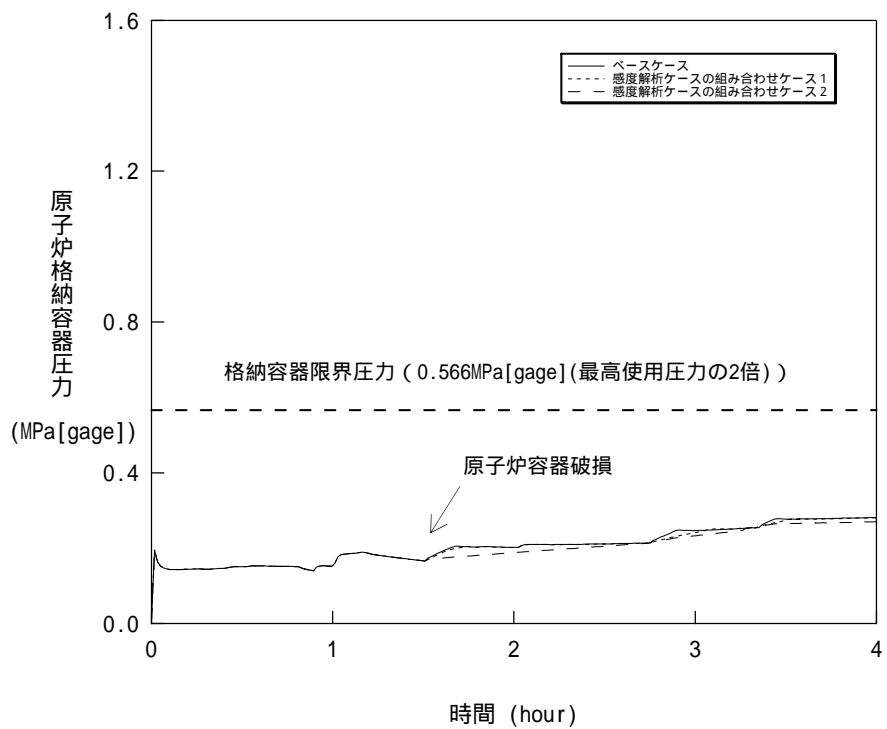


図 5-5-2 感度解析ケースの組み合わせ (2)

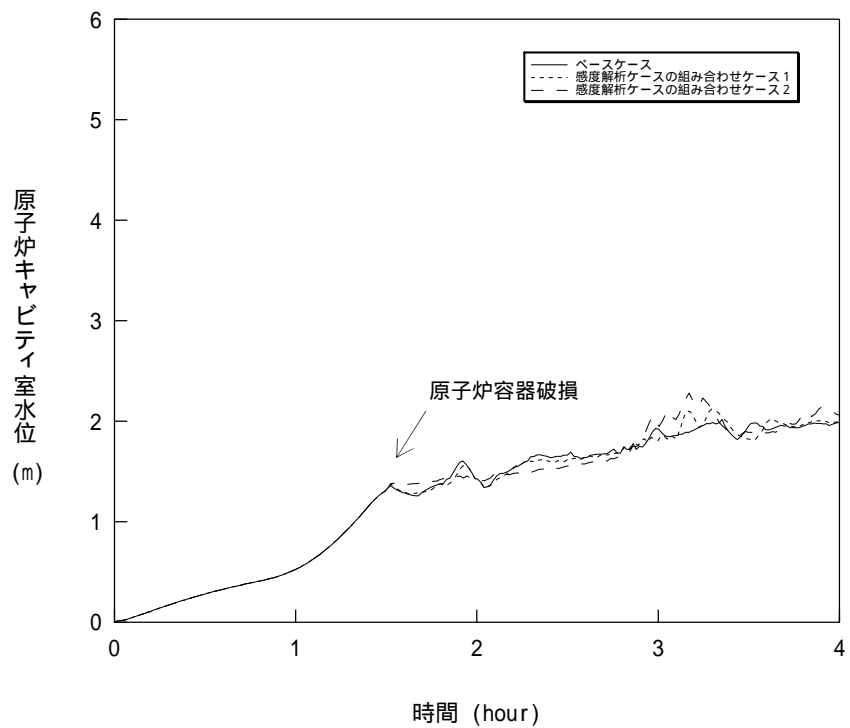


図 5-5-3 感度解析ケースの組み合わせ (3)

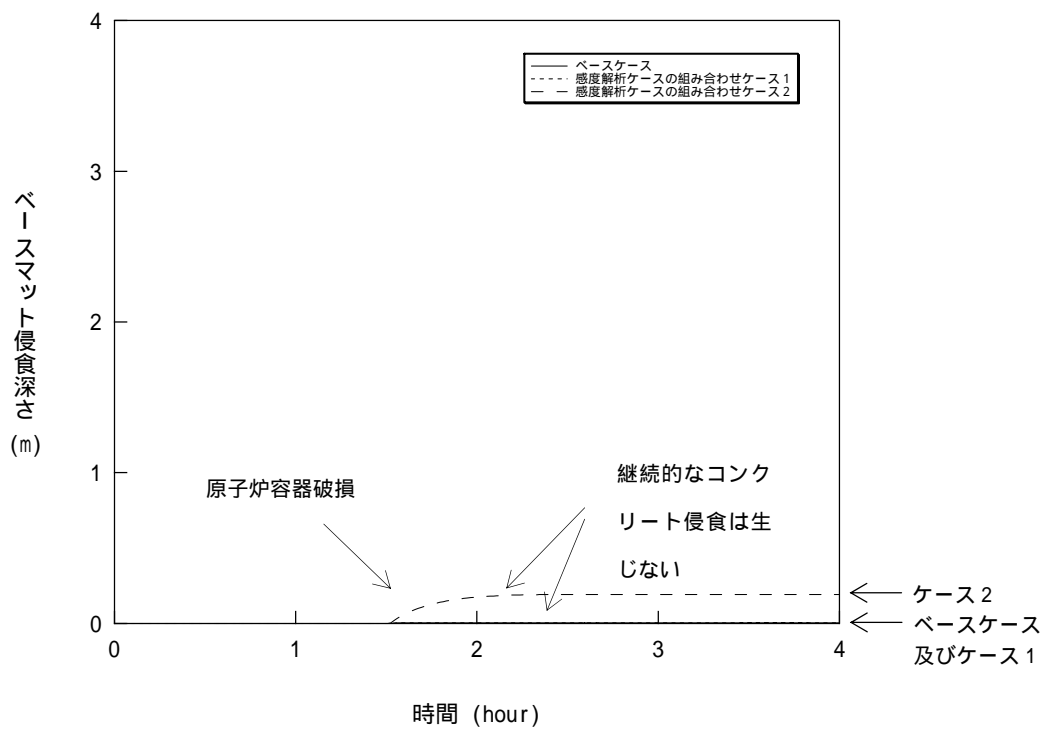


図 5-5-4 感度解析ケースの組み合わせ (4)

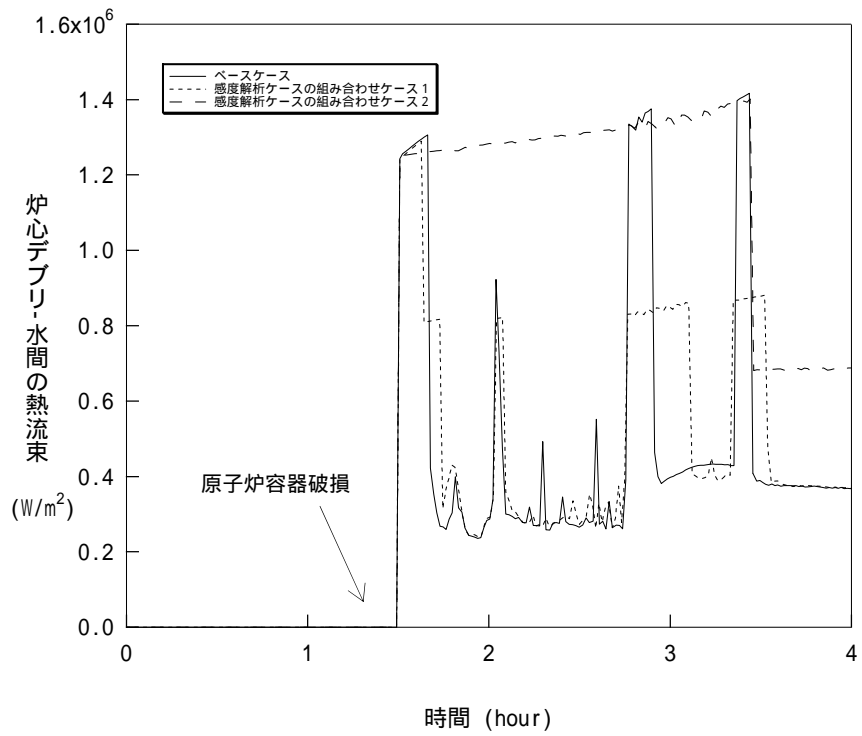


図 5-5-5 感度解析ケースの組み合わせ (5)

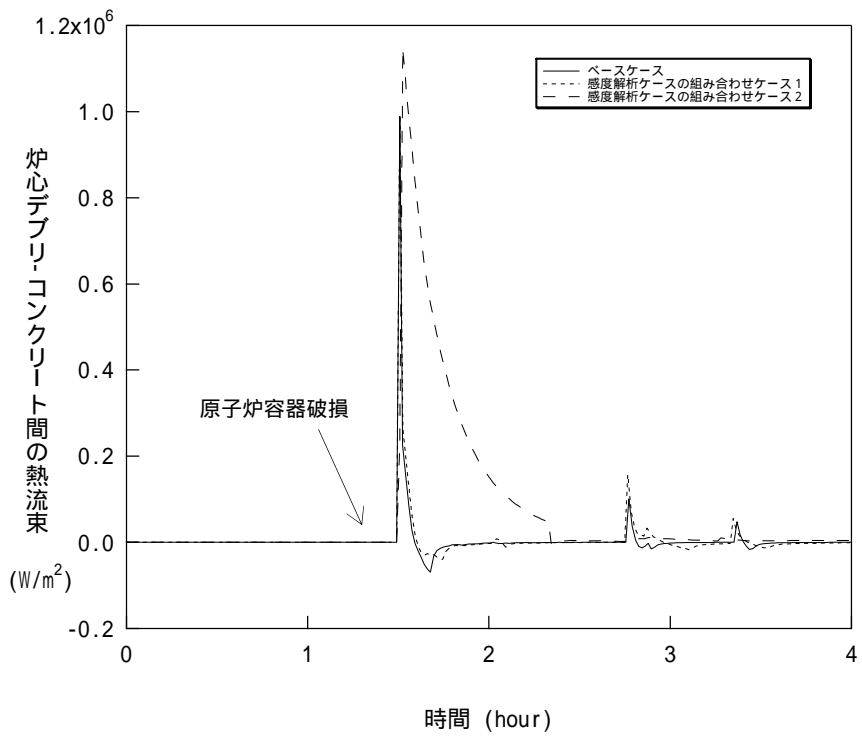


図 5-5-6 感度解析ケースの組み合わせ (6)

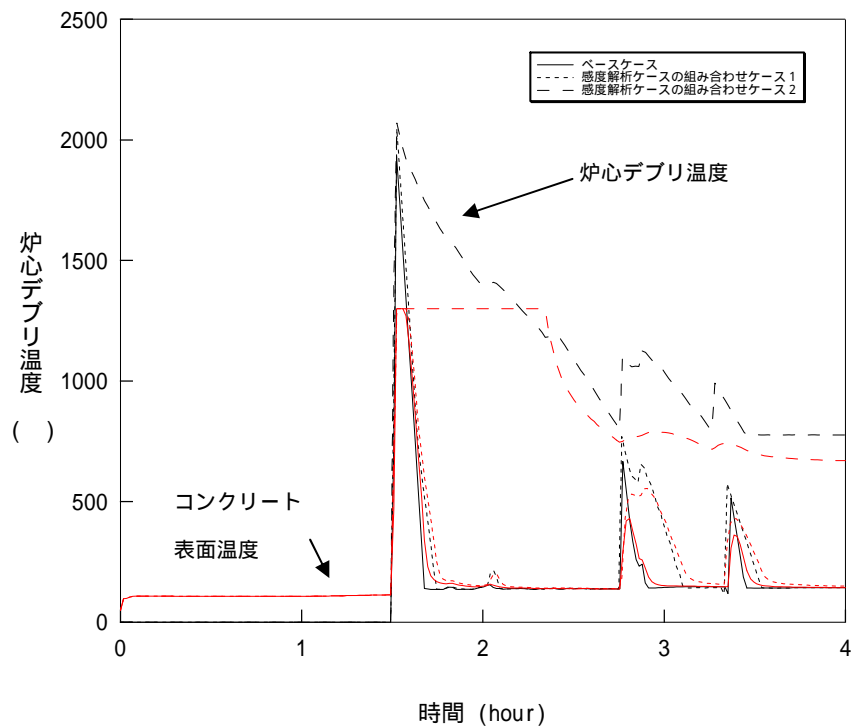


図 5-5-7 感度解析ケースの組み合わせ (7)

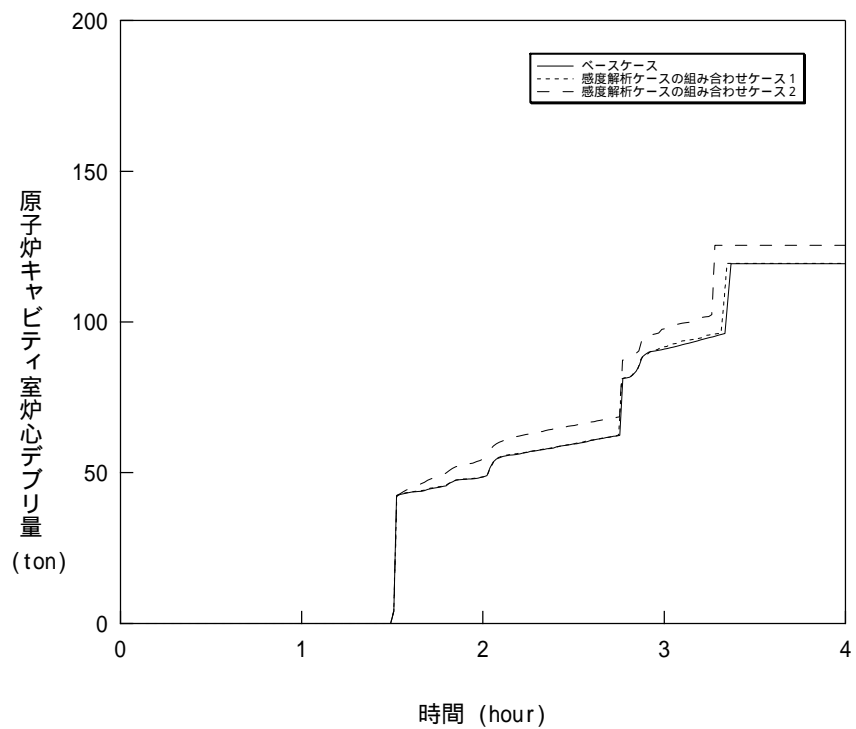


図 5-5-8 感度解析ケースの組み合わせ (8)

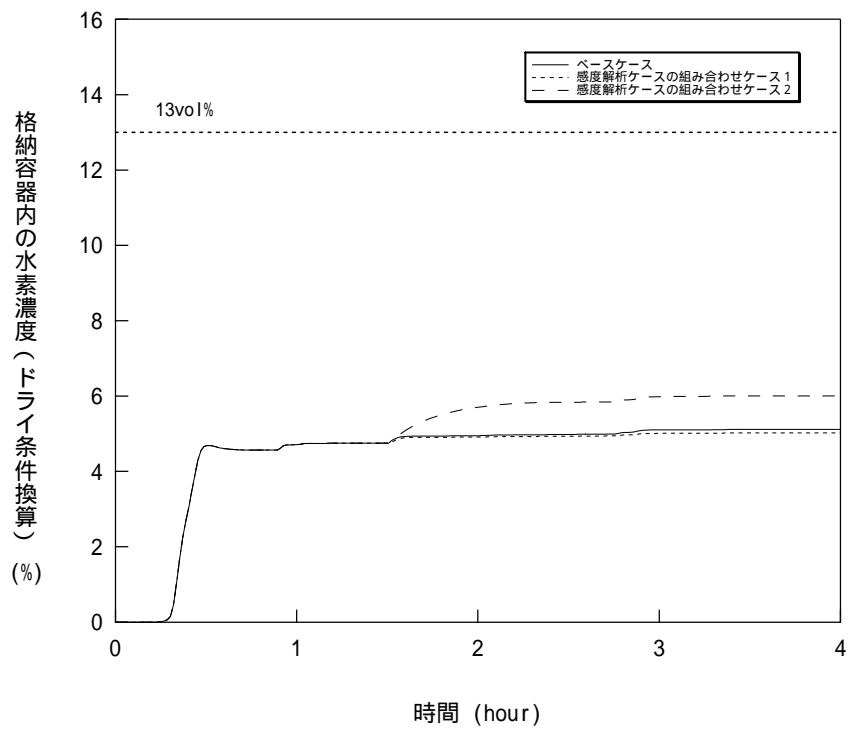


図 5-5-9 感度解析ケースの組み合わせ (9)

6 まとめ

MCCIに関する種々の実験から得られた知見等に基づき不確かさの要因の分析を行い、不確かさへの影響する項目を抽出した。これらの項目を対象に感度解析を行いコンクリート侵食への影響を確認した。

- ・キャビティ水深
- ・Ricou-Spalding のエントレインメント係数
- ・炉心デブリの拡がり
- ・水 - 炉心デブリ間の熱伝達係数

感度解析の結果、キャビティ水深、Ricou-Spalding のエントレインメント係数及び水 - 炉心デブリ間の熱伝達係数については、コンクリート侵食深さへの感度は小さく、重大事故対策の有効性評価の結果に影響は与えないことを確認した。

炉心デブリの拡がりについては、炉心デブリが過熱度を持ち連続的にキャビティ床へ落下すること等から、キャビティ床面積相当に拡がると考えられるが、炉心デブリがキャビティ水中に落下した際に冷却が進み局所的に堆積するよう仮定して解析を行った場合でも、コンクリート侵食は約 18cm にとどまる結果となった。

感度解析パラメータを組み合わせた場合の感度解析でもコンクリート侵食は約 19cm となったが、キャビティ底面のコンクリート厚さは数メートルであり、侵食深さは十分小さいことが確認できた。この規模のコンクリート侵食が発生する場合でも、格納容器内の水素濃度は 6%程度（ドライ条件換算）にとどまり、水素処理装置（PAR 及びイグナイタ）による処理が可能なレベルに収まっている結果となっている。また、MCCI により発生する水素は、全てジルコニウムに起因するものであることを確認した。

以上のことから、物理現象を踏まえた不確かさを考慮すると、コンクリート侵食については、炉心デブリの拡がりが影響を与えることが明らかとなった。一方、厳しい条件を組み合わせた場合においても、最終的にコンクリート侵食が停止し得ることから、キャビティ水による炉心デブリの冷却の効果も確認できた。しかしながら、この分野は複雑な多成分・多相熱伝達現象であり知見が不十分であること、また直接的な実験例が少ないことから、今後も継続して検討を進め、知見の拡充に努めることが重要であると考えられる。

添付 3-1 溶融デブリの水中での拡がり評価について

1.はじめに

溶融デブリがキャビティ水中に落下した場合、実機条件では水深に対するジェット径が相対的に大きいため、落下過程において溶融デブリの一部は細粒化するものの、その大部分が連続層として水中に堆積すると考えられる。本資料では、水中での溶融デブリの拡がり挙動について説明し、実機に適用した場合の評価について説明する。

2.水中での拡がり挙動に関する実験的知見と考察

スウェーデン KTH では、水中での溶融物拡がり挙動を調べる PULiMS 試験^[1]を実施している。この実験では、浅い水プールへ溶融した $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ 合金を流入させ、その拡がり挙動を観察した。水中へ流入した溶融物は、水との熱伝達により徐々に固化し、ある程度床を拡がる結果となった。固化したデブリ層は3層を形成し、デブリ層下面とコンクリートは密着せずギャップが存在しており(図 2.1)、水または蒸気が存在していた可能性がある。3層の最下層は薄い 1.5-2mm のケーキ(クラスト)層で空隙無し、中間層は割れ目や細長い孔を含む。最上部は不規則な構造で高多孔性である。

スウェーデン KTH において実施された S3E 実験^[2]では、溶融物が冷却される過程において、低密度の多孔質の層が形成される結果が得られている。溶融物の流れにより、この多孔質層が持ち上げられ、流量(慣性力)によって決定される距離まで拡がる挙動を示した。

米国 Brookhaven National Laboratory において実施された BNL 実験^[3]においては、溶融物の過熱度と水深が、デブリ拡がり挙動において重要であると結論付けられている。溶融物の拡がり、水への熱伝達による溶融物の温度の挙動と、溶融物の流体力学的挙動により制限されると結論付けられている。

日立製作所において実施された SPREAD 実験^[4]では、固化割合が 55%程度になった場合に溶融物の拡がりは停止しており、溶融物の拡がりは落下流量と溶融物の過熱度に影響されるとされている。

ドイツのカーlsruエ研究センター(FZK)において実施された KATS 実験^[5]では、溶融物の放出速度が比較的高い場合は、拡がり挙動は大きな影響を受けない(冷却材が無い場合と同様な拡がりになる)とされている。

CEA/DRN/DTP で行われた CORINE 実験^[6]では、低融点合金を模擬物質として使用して、底部でのクラスト形成を防止するために底部を熱くした試験が実施された。その結果、先端

が著しく速く進展したことが示され、底部クラストによる減速効果が示された。

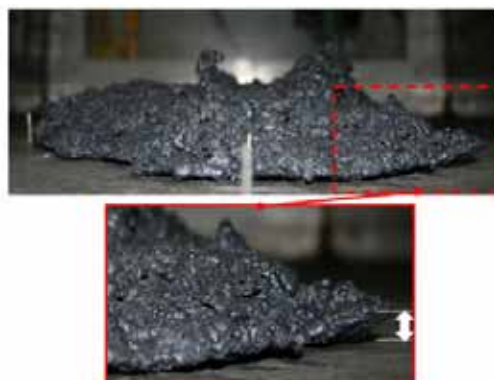


Figure 40: The melt spread in PULiMS-E1 experiment (side view). The volatile particle debris have been removed while solidified core of the melt remained intact.

図 2.1 PULiMS 試験において水中に落下させた溶融物

上記の水中での拡がり実験に対する実験条件を表 2.1 に整理する。

上記知見等により、実機における水中におけるデブリ拡がり挙動及び形状は以下のとおりと考えられる。

キャビティでの溶融デブリの拡がり挙動について

キャビティ水中での溶融デブリの拡がり挙動は、溶融デブリの過熱状態および溶融デブリの落下流量に影響される。キャビティ水中への溶融デブリ落下後、溶融デブリの温度が高い状態では、固化割合が小さいため粘度が低く、拡がる速度は速くなる。その後、キャビティ水との熱交換により、溶融デブリの固化割合が増加するに従って、粘度が高くなることにより流動性が低くなり、溶融デブリの拡がりは減速され、その後停止する。

キャビティでの溶融デブリの形状について

キャビティ床に堆積した溶融デブリについては、キャビティ水に落下する過程において、細粒化した溶融デブリが固化せずに接着すること、あるいはクラストが破砕することなどにより、多孔質層のクラストを形成する。溶融デブリは多孔質層を持ち上げそれと共に移動する場合や、上部クラストの下を移動する場合がある。デブリ層とコンクリートの間は、全面が密着しているわけではなく、部分的に密着せずにギャップが形成されている。これにより、側方から溶融物の下面へ水が浸入することによる冷却の可能性はある。

表 2.1 実験条件の整理

	PULiMS 実験 (Sweden)	S3E 実験 (Sweden)	BNL 実験 (USA)	SPREAD 実験 (Japan)	CORINE 実験 (France)	KATS 実験 (Germany)
実験装置の特徴	2D	1D/2D	1D/2D	1D/2D	2D (19 ° 円分)	1D/2D
溶融物材	Bi ₂ O ₃ -WO ₃ /水 B ₂ O ₃ -CaO/水	ウッドメタル/水 NaNO ₃ -KNO ₃ / オイル	鉛/水	Steel/水	低融点合金/水	Iron/水 oxide/水
溶融物体積/質量	2.7 ~ 3 m ³	3 ~ 19 liters	~ 1 liters	1 ~ 15 liters	~ 50 litres	140 ~ 160kg
溶融物融点	870 ~ 1027	80 ~ 120 280 ~ 364	不明 (鉛の融点 : 327.46)	1584 ~ 1625K	不明	2450K
溶融物の流入方法	ジェット 直径 20mm	底部流入口*	底部流入口*	底部流入口* 入口幅 0.05m	底部流入口*	底部流入口*
水深	0.2m	4.5 ~ 7.5cm	不明	不明	不明	1cm

*) 非ジェット形状の底部からの流入

3.水中での拡がり挙動の概要及び相関式

(1) 水中でのデブリ拡がり挙動の概要

下部プレナムから流出した溶融デブリは、水中に落下する過程において一部が細粒化し、大部分は液体の状態でキャビティ床に堆積する。キャビティ床に堆積した溶融デブリは、重力の影響で拡がるが、キャビティ水及び床面で除熱されることで固化が進み、やがて拡がりは停止する。

PULiMS 実験により得られた知見より、キャビティ内での最終的な溶融デブリの拡がりの大きさは、以下のパラメータにより決定されると考えられる。

- ・ 拡がり駆動力

溶融デブリと水との密度差により、溶融デブリには水中を拡がる駆動力が生じる。

- ・ 拡がり抑制力

床面上に形成されたクラストによる減速効果が働くこと、および溶融デブリの固化が進むことにより、溶融デブリの粘度が増加し、溶融デブリの拡がりを抑制する力が生じる。

上記の通り、溶融デブリの拡がりの大きさは、溶融デブリと水の密度差による拡がりの駆動力の時間スケールと、溶融デブリの固化の時間スケールとの競合によって決まり、固化が早ければ拡がりが抑制され、あまり拡がらずに固化してしまい、固化が遅くなれば、拡がりは大きくなる傾向となる。図 3.1 及び図 3.2 に以上の挙動の模式図を示す。

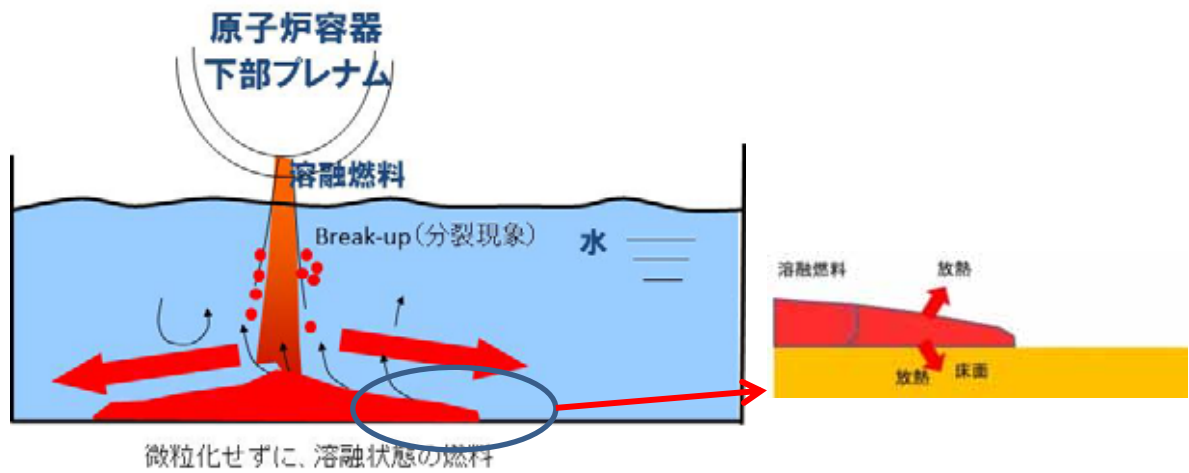


図 3.1 溶融デブリの落下から拡がりに至る挙動

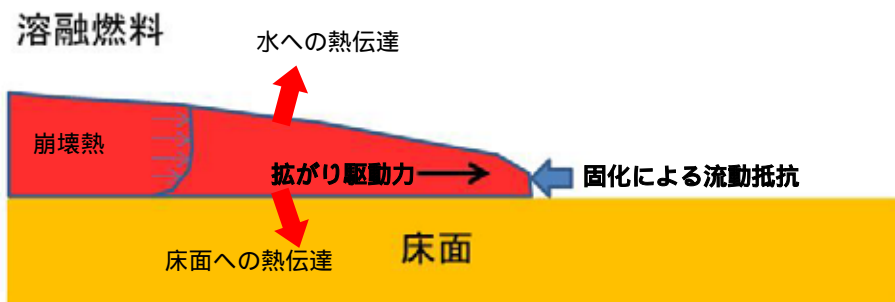


図 3.2 溶融デブリの拡がりに係る熱伝達及び流体力学的挙動

(2) 水中でのデブリ拡がり長さや時間の相関式^{[7][8][9]}

文献[7]では、溶融デブリの水中での拡がり挙動を以下のとおり定式化している。

液相として床に堆積した溶融デブリが拡がる際の最終的な厚さ δ_{sp} はデブリ拡がり無次元時間 T から (1) の相関式で表される。

$$\frac{\delta_{sp}}{\delta_{cap}} = CT^{0.5} N^{0.5} \quad (1)$$

δ_{sp} : 溶融デブリの最終厚さ

δ_{cap} : 表面張力による最小厚さ(= $2\sqrt{\sigma/\rho_m g}$)

C : 比例定数

T : デブリ拡がり無次元時間(= τ_{conv}/τ_{solid})

N : 重力・慣性力支配流れの時 1、重力・粘性力支配流れの場合 = $\left(\frac{V_{tot}}{\pi\delta_{cap}}\right)^{1/3} \frac{\beta_1^{4/3}}{\beta_2}$

τ_{conv} : デブリ拡がり特性時間(s) = $\left(\frac{\tau_{sp}}{\beta_v}\right)$

τ_{solid} : デブリ固化特性時間(s) = $\delta_{cap} \rho_m \frac{C_{p,m} \Delta T_{sup} + \eta H_f}{q_{up} + q_{dn} - q_v \delta_{cap}}$

(1) 式より、溶融デブリの拡がる際の最終的な厚さが算出され、この値と溶融デブリの落下量から、溶融デブリの拡がり長さ(拡がりの直径)が算出できる。

また、拡がり長さ $r_v(t)$ と拡がり時間 t の関係は(2)式より表されるため、拡がり時間は(2)式で算出することができる。

$$r_v(t) = \beta_v t^{0.5} \quad (2)$$

β_{tv} : デブリ広がり係数 $\beta_v = \left(\frac{gG^2}{v}\right)^{0.125} \beta_1 = 0.84(gG)^{0.25}$

r_{sp} : 幾何的に可能な最大デブリ拡がり径(m)

ΔT_{sup} : デブリ過熱度(K)

$C_{p,m}$: デブリ比熱(J/kg/K)

q_{up} : デブリ上面の熱流束(放射および対流熱伝達) (W/m²)

q_{dn} : デブリ下面の熱流束(対流熱伝達) (W/m²)

q_v : 単位体積当たりの崩壊熱(W/m³)

H_f : デブリの溶融潜熱(J/kg)

η : 有効潜熱割合(-)

σ : デブリ表面張力(N/m)

ρ_m : デブリ密度(kg/m³)

ρ_w : 水の密度(kg/m³)

\hat{g} : 水中における重力加速度の補正(= $g(\rho_m - \rho_w)/\rho_m$) (m/s²)

g : 重力加速度(m/s²)

ν : デブリの動粘性係数 (m²/s)

V_{tot} : デブリ体積(m³) = $\frac{m(1-f_m)}{\rho_m}$

m : デブリ質量(kg)

G : エントレインされなかった連続体デブリの体積流量(m³/s) = $\frac{V_{tot}}{t_{rel}}$

t_{rel} : 原子炉容器からのデブリ放出時間(s)

f_m : デブリ落下時のエントレイン割合(-)

$\hat{\rho}_m$: 有効デブリ密度(kg/m³) = $\rho_m(1 - \varepsilon_m)$

ε_m : デブリボイド分率(-)

この相関式は、最終的な溶融燃料の拡がり時の厚さ δ_{sp} が、無次元時間(溶融デブリの拡がり時間÷溶融デブリが固化するまでの時間)の平方根に比例することを意味している。溶融デブリの拡がりが遅い、または固化するまでの時間が短い場合には、無次元時間 T は大きくなり、結果として、拡がり時の最終的な厚さ δ_{sp} が大きく、結果として拡がり面積は小さくなる。逆に、溶融デブリの拡がり早い、または固化までの時間が長い場合には、無次元時間 T は小さくなり、溶融デブリの厚さが薄くなるため、拡散が進む方向となる。

さらに、上記の拡がりモデルについては、PULiMS 試験との比較により、その妥当性が示されており、図 3.3 に示すとおり、実験で得られたデータと評価モデルとの比較が実施され、概ね一致している。

実機評価においては、各入力パラメータに対する実機での条件を適切に与えることにより、拡がり挙動について解析を実施する。

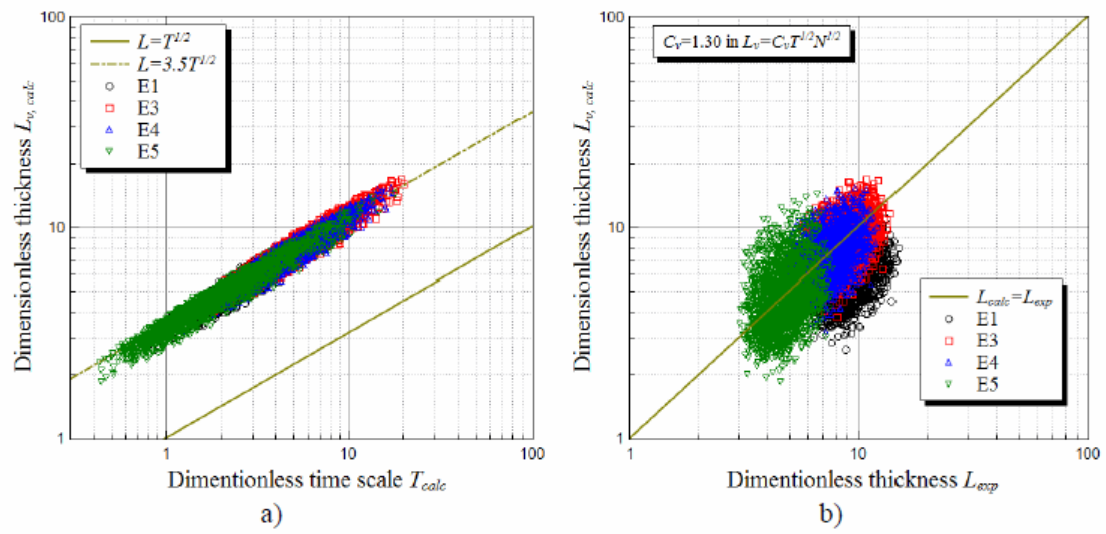


図 3.3 拡がりモデルと PULiMS 試験結果との比較

4.実機評価

これまでの実験の知見から、デブリジェットがキャビティ床に到達するまでの落下過程において冷却されず高温のまま床に到達する場合には、炉心デブリの拡がりは大きくなり、反対に、炉心デブリが落下時に細粒化などによりによって冷却が進む場合には、炉心デブリの拡がりは小さくなると考えられる。図 4.1 及び図 4.2 にそれぞれの場合の模式図を示す。感度解析では、これらのケースに対する炉心デブリの拡がり面積を算出し、M A A P 解析の入力条件とする。

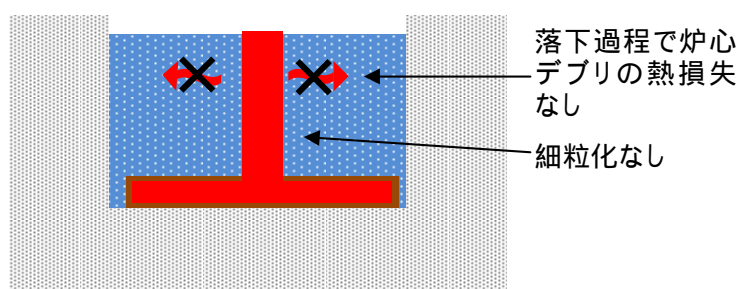


図 4.1 落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース
(溶融デブリからの除熱が進まず、固化割合が小さいため拡がりが大きくなる。)

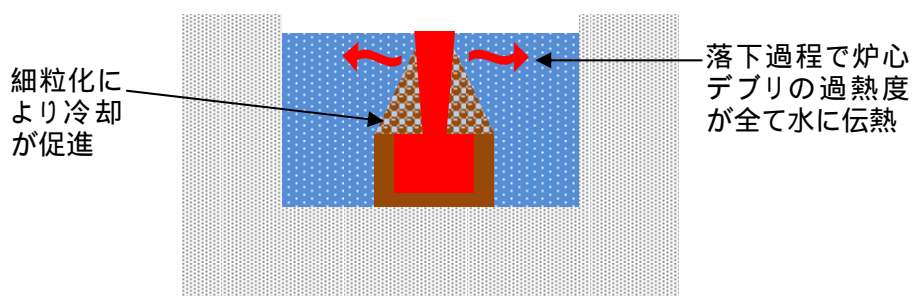


図 4.2 落下時に細粒化などにより冷却が進むケース
(溶融デブリからの除熱が進み、固化割合が大きくなるため拡がりが抑制される。)

表 4.1 に 1 回目の原子炉容器破損時の炉心デブリ落下条件について示す。また、表 4.2 に落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケースと落下時に細粒化などにより冷却が進むケースの細粒化割合と過熱度の熱損失をまとめたものである。

前者のケースでは、デブリジェットがキャビティ床に到達するまでの落下過程において、炉心デブリの冷却が進まないような条件として、細粒化無しとし、また、落下過程におけるデブリ - キャビティ水間の熱伝達によるデブリの熱損失も無しとしている。

一方、後者のケースでは、デブリジェットがキャビティ床に到達するまでの落下過程において、炉心デブリの冷却が進むような条件として、細粒化割合はSaitoの相関式を用い、

また、溶融炉心の熱損失については、デブリの過熱度分がすべて水と熱交換するとしている。

評価結果を表 4.3 に示す。拡がり直径については、前者のケースで約 7.7m、後者のケースで約 1.5m となった。

表 4.1 溶融炉心放出時のパラメータ

項目	値
メルト質量 [kg]	48600
放出時間 [s]	100
メルト温度 [K]	2554.05
冷却材温度 [K]	408.05
メルト密度 [kg/m ³]	8463.1
冷却材密度 [kg/m ³]	931
ジェット径 [m]	0.4
ジェット粘性係数 [Pa*s]	10.5
ジェット表面張力 [N/m]	1
メルト比熱 [J/kg/K]	484.6
冷却材比熱 [J/kg/K]	4280
単位質量あたりの崩壊熱 [W/kg]	264.2
固化温度 (Tsol) [K]	2308.25
液化温度 (Tliq) [K]	2308.25
メルト融解熱 [J/kg]	326415

表 4.2 各ケースに対する主な入力パラメータ

	落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース	落下時に細粒化などにより冷却が進むケース
メルト細粒化割合 [-]	0.00	0.66
ジェット冷却による過熱度の熱損失 [K]	0	245.8

表 4.3 溶融炉心の拡がり評価結果

	落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース	落下時に細粒化などにより冷却が進むケース
拡がり直径 [m]	約 7.7	約 1.5
拡がり面積 [m ²]	約 47	約 1.8

5.参考文献

- [1] Pavel Kudinov, et al., "Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-Coolant Interaction," The 9th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-9), Kaohsiung, Taiwan, September 9-13, 2012.
- [2] Sehgal, B.R., Dinh, T.N., Green, J.A., Konovalikhin, M.J., Paladino, D., Leung, W.H., Gubaidulin, A.A., "Experimental Investigation of Melt Spreading in One-Dimensional Channel", RIT/NPS Research Report for European Union EU-CSC-1D1-97, 86p., 1997.
- [3] Greene, G.A., Finrock, C., Klages, J., and Schwarz, C.E., "Experimental Studies on Melt Spreading, Bubbling Heat Transfer and Coolant Layer Boiling," Proceedings of 16th Water Reactor Safety Meeting, NUREG/CP-0096, pp.341-358, (1988).
- [4] Suzuki, H., et al., "Fundamental Experiment and Analysis for Melt Spreading on Concrete Floor," Proceedings of 2nd ASME/JSME Nuclear Engineering Conference, Vol. 1, pp. 403-407, (1993).
- [5] Fieg, G., et al., "Simulation Experiments on the Spreading Behavior of Molten Core Debris", Proceedings of the 1996 National Heat Transfer Conference, in the session "Fundamental Phenomena in Severe Accidents", Houston, Texas, August 3-6, 1996, HTC-Vol.9, pp.121-129.
- [6] Alsmeyer H., et al., "Overview on the Results of the RCA Project on Molten Core - Concrete Interactions", FISA-95 Proceedings, Luxemburg, EUR 16896 EN, pp.231-255 (1996).
- [7] Konovalenko A. and Kudinov P., "Development of Scaling Approach for Prediction of Terminal Spread Thickness of Melt Poured into a Pool of Water," Proceedings of The 9th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-9), Kaohsiung, Taiwan, September 9-13, N9P0302, 2012.
- [8] Dinh, T.N., Konovalikhin, M.J., Sehgal, B.R., "Core melt spreading on a reactor containment floor", Progress in Nuclear Energy, 36(4), pp.405-468, (2000).
- [9] Maxim J.K., Investigations on Melt Spreading and Coolability in a LWR Severe Accident, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology Stockholm, 2001.