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.....3.3-57
5 感度解析と評価.....3.3-70
6 まとめ.....3.3-112
添付 3-1 溶融炉心の水中での拡がり評価について.....3.3-113

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、溶融炉心と原子炉下部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、炉心損傷検知後に、原子炉下部キャビティへの水張りを行うことにより、溶融炉心が原子炉下部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 の防止及び緩和を行っている。原子炉下部キャビティに落下した溶融炉心は、原子炉下部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、残りは原子炉下部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。

原子炉下部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、原子炉下部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、米国サンデ

ィア国立研究所（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、水中に溶融炉心を落下させた実験としては、スウェーデン王立工科大学（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、原子炉下部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、米国アルゴンヌ国立研究所（ANL）にて不均質に堆積させた粒子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、コンクリートーベースマット、コンクリートーメタル挿入物、溶融炉心が入っている。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溶融炉心頂部付近に接続されて、溶融炉心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及び排気口用のポートが１つと、溶融炉心監視用ポート（光学温度計とビデオカメラ付き）が３つ付いている。溶融炉心組成はUO_2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

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

L6 の溶融炉心組成及びコンクリート成分を表 3.1-1 に示す。実験中、溶融炉心はタングステンの電極で加熱され溶融プールを形成する。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。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 燃料の溶融炉心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コード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 2,400 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溶融炉心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コード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）は米国サンディア国立研究所（SNL）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原子炉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 %）と模擬核分裂生成物（FP）（Te: 0.5 kg、La_2O_3: 1.17 kg、CeO_2 : 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コード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]

[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,”

SWISS 実験は、米国サンディア国立研究所（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 挙動に及ぼす水プ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約１桁大きかったこと、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/m^2 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、米国サンディア国立研究所（SNL）で実施された MCCI 実験であり、溶融物として、Al_2O_3、CaO、SiO_2 の混合物を直接通電加熱したものを用い、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。

WETCORE-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/m^2、入熱を停止し全体が固化した以降の熱流束は 0.25±0.08MW/m^2 及び 0.20±0.08MW/m^2 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/m^2、582.4 分での熱流束が 0.25±0.08MW/m^2、589.0 分での熱流束が 0.20±0.08MW/m^2 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。

コンクリート侵食推移及び温度履歴を図 3.1-11～14 に示す。コンクリートの半径方向の中心部では試験開始後約 470 分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

NUREG/CR-4727, SAND85-1576

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

周部では局所的には 410 分から侵食が開始し、注水時点で約 2cm になっている。溶融物温度を図 3.1-15 に示す。約 560 分までは約 1800K で一定となっているが、その後は緩やかに低下し、580 分頃には約 1500K まで低下している。

実験後の溶融物の固化状態及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約 5cm 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±1cm、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 4.2cm±0.4cm 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、溶融炉心が完全固化し、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）が主催する原子炉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 30cm×30cm のテスト部に 130kg の溶融物、M1b 実験では 50cm×50cm 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 製るつぼを用いており、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 分は約 0.7MW/m^2 で推移し、さら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

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

化クラストはタング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約 30 分後と推定されており、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 4MW/m^2 あり、30 分間で徐々に約 0.5MW/m^2 まで低下している。この期間に約 90kg 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 分間で約 0.4MW/m^2 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、クラスト厚さは約 6cm 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。クラストはるつぼ壁に固着し、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、0.5MW/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 0.2MW/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 及び C）[6]

COTELS 計画は（財）原子力発電技術機構（NUPEC）が圧力容器外の溶融炉心冷却特性を調べる試験であり、この計画のテスト B 及び 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。コンクリートートラップの内径は 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 0.02～0.2kg/s の質量流量で試験開始 6～15 分後に行っている。

ケース 5a は、溶融炉心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溶融炉心の粒子化が生じたと分析されている。粒子の径

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

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、溶融炉心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、アスペクト比が大きいケース 5 では、溶融炉心の全体量に対する上面の面積が小さいため、初期に溶融炉心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も、水による冷却効果が確認できる。

固化した溶融炉心表面から水への熱流束は、SWISS、WETCOR、MACE の結果に近い 200～700 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、水が更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 0.2MW/m^2 時における溶融炉心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、溶融炉心冷却が促進され、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 に固化した溶融炉心の断面図を示す。溶融炉心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、溶融炉心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、アスペクト比が小さく水による冷却の効果があったこと、塊状溶融炉心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、コンクリート壁と溶融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）のイスプラ研究所における実験であり、圧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、圧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（80wt%UO_2 + 20wt%ZrO_2 あるいは 77wt%UO_2 + 19wt%ZrO_2 + 4wt%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 18～176kg、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

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 2～5.8MPa、低圧条件として 0.2～0.5MPa 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）が圧力容器外の溶融炉心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、LOCA を起因とするシーケンスが支配的であることから、原子炉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、下部プレナム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約 6mm 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粒子ベッドが、内部の沸騰により拡散する様子を確認した実験である。

---

[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

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 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。

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約２～３分であると報告されている。

（１０）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、即ちデブリジェット径は可変となっている（以下、実機に対しても、炉心あるいは下部プレナムから落下する溶融炉心の意味で「デブリジェット」を使用する）。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、溶融炉心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、溶融物の過熱度が小さく、定性的にケーキ状溶融炉心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溶融炉心の様相を図 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溶融炉心が少なくなる。ここで、塊状溶融炉心の概念図を図 3.1-33 に示す。デブリ

[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.

ジェットがすべて粒子化及び固化された状態で溶融炉心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溶融炉心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、約 1.5m の水深があればほぼすべ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%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 あれば、デブリ粒子をすべ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溶融炉心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約 200mm 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、原子炉下部キャビティ水深は 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、ほぼすべての溶融炉心がケーキ状に堆積する。ケーキ状に堆積した場合、ＭＡＡＰコード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ー溶融炉心間の熱伝達係数として取り扱うことができる。

（１１）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溶融炉心冷却性として、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、クラストのひび及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 × 50cm、高さ 55cm のるつぼがあり、その底部にコンクリートー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

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

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で約1MW/m²、CCI-2では3MW/m²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（約5分）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 0.65MW/m²、ガス発生の少ない玄武岩系コンクリートの場合(CCI-1,3)には0.25MW/m²及び0.5MW/m²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、割れ目及び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、クラスト厚さは約3mm～7mm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3MW/m²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0.25MW/m²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。

（１２）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、約 15%で約 125kW/m^2 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約二桁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。

（１３）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/cm^3、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%及び 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。

①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。

[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.

②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。

③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。

（１４）PULiMS 試験[13]

スウェーデン王立工科大学（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 Bi_2O_3-WO_3 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、

① 溶融炉心の原子炉下部キャビティへの堆積過程

② 溶融炉心の冷却過程

③ 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。

①溶融炉心の原子炉下部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、溶融炉心の原子炉下部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下部キャビティに落下するとき、次の３通りの状態、即ち、溶融炉心がすべ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、空隙なく溶融炉心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%）。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

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

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、原子炉下部キャビティの水深が 1～2m 確保されていれば、大部分が細粒化及び固化した溶融炉心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溶融炉心はわずかであり、相当量の溶融炉心が連続相として原子炉下部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、原子炉下部キャビティ床面での溶融炉心の拡がりに関しては、凝集した溶融炉心あるいは塊状の溶融炉心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、細粒化した溶融炉心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粒子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。

②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 3～4 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/m^2 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、水が更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/m^2 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、水への熱流束が約 0.2MW/m^2 となるのは、溶融炉心が完全固化し、温度も低下し概ね約 1,500K となった時点である。

○CCI 実験では、注水初期には約 1MW/m^2 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/m^2 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/m^2 の熱流束となっ

ている。なお、約 250kW/m² 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、溶融炉心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。

③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 3～4 分で、コンクリート温度が抑制された。この要因として、粒子化した溶融炉心への浸水、側面コンクリートと溶融炉心の間への浸水、塊状溶融炉心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、溶融炉心が細粒化し、塊状溶融炉心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。

溶融炉心の細粒化の挙動は水深とジェット径に依存するが、スウェーデン王立工科大学（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、溶融物と原子炉下部キャビ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、冷却過程は以下のとお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 及び図 3.3-2 に示す。

【溶融炉心落下時】

溶融炉心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ー溶融炉心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砕していく（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、溶融炉心全体が固化する。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 実験より約 0.5MW/m^2 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浸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)

溶融炉心が固化し安定化クラストが形成され、溶融炉心温度が約 1500K まで下がった場合の熱流束は約 0.2MW/m^2 と考えられる（WETCOR 試験、MACE 試験より）。

表 3.1-1　ACE 実験：溶融炉心組成及びコンクリート組成

Constituent (kg)	L2	L6
UO_2	216	219
ZrO_2	42.5	18.5
Zr	13.4	21.1
Zirc-4	-	1.8
Fe_2O_3	-	-
NiO	-	-
Cr_2O_3	-	-
SS-304	-	9.1
CaO	3.0	7.3
MgO	-	-
SiO_2	20.9	16.9
BaO	0.8	0.79
La_2O_3	0.6	0.6
SrO	0.5	0.5
CeO2	1.3	1.3
MoO2	0.9	0.94
SnTe	0.2	-
$ZrTe_2$	-	0.2
Ru	-	0.38
B_4C	-	-
Ag	-	1.19
In	-	0.22

Constituent (kg)	L2	L6
SiO_2	69	69
CaO	13.5	13.5
Al_2O_3	4	4
K_2O	1.4	1.4
Fe_2O_3	1.0	1.0
TiO_2	0.8	0.8
MgO	0.7	0.7
Na_2O	0.7	0.7
MnO	0.03	0.03
BaO	0.02	0.02
SrO	0.02	0.02
Cr_2O_3	0.01	0.01
$H_2O + CO_2$	7.9	7.9
Concrete Type	S^1	S^1
TOTALS	99.1	99.08

※　コンクリートタイプ
S^1　：ケイ土系

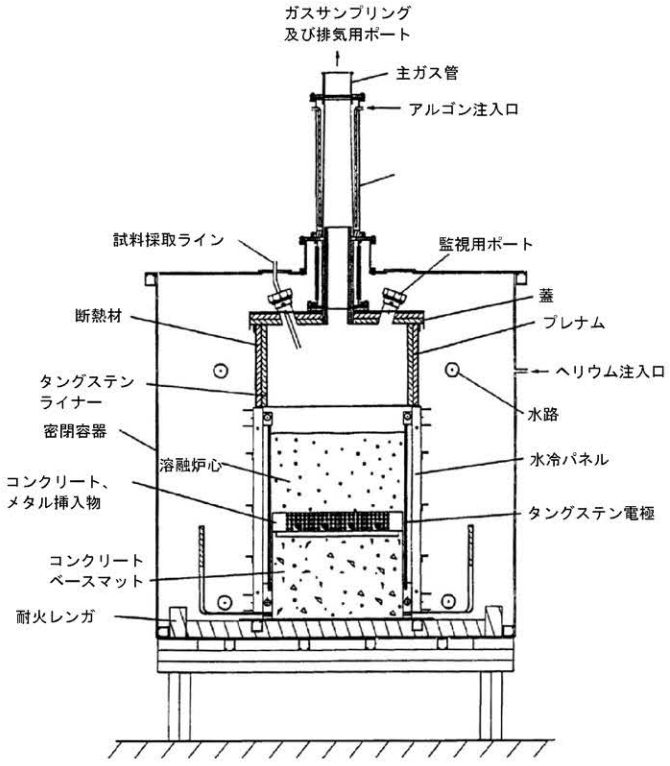
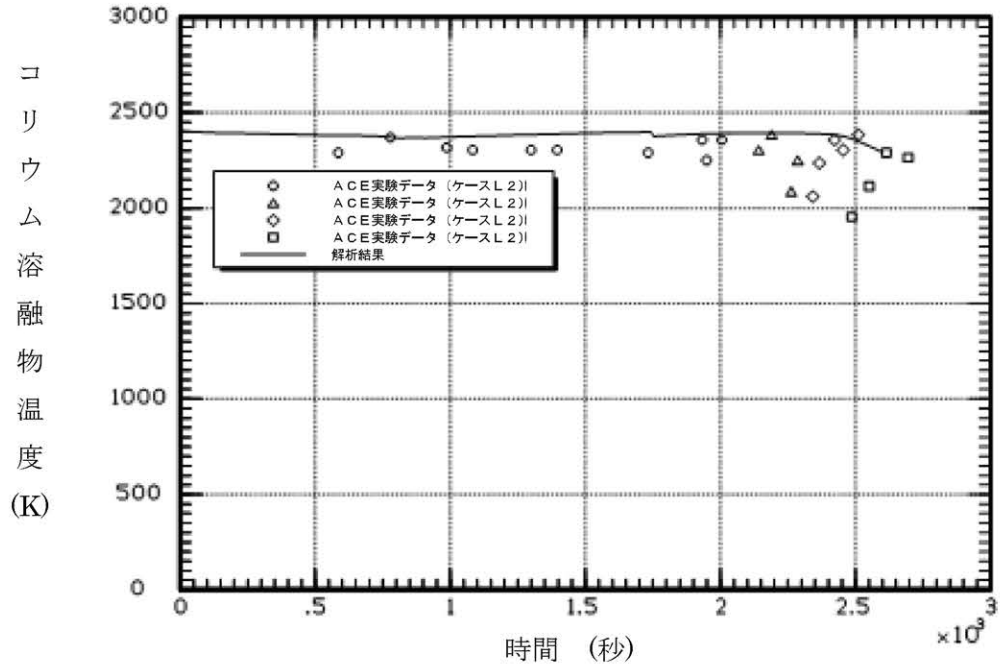
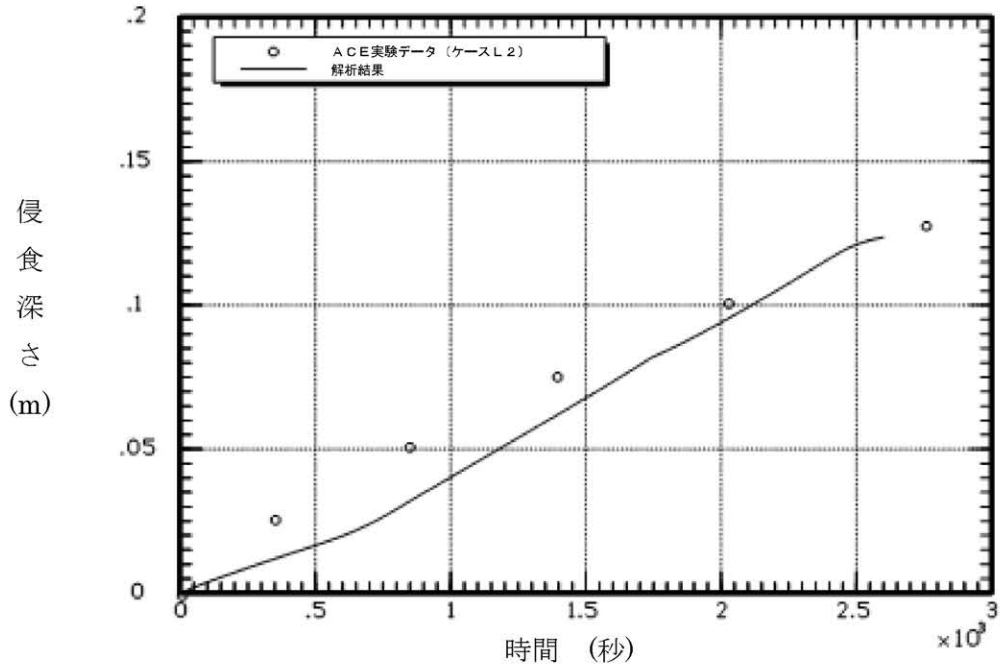


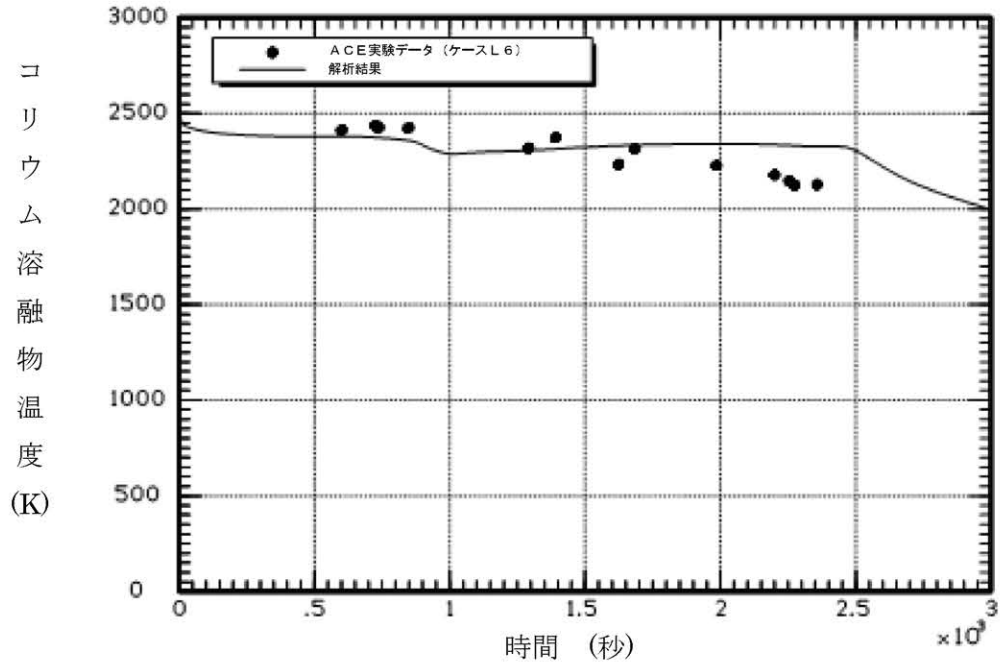
図 3.1-1　ACE 実験装置

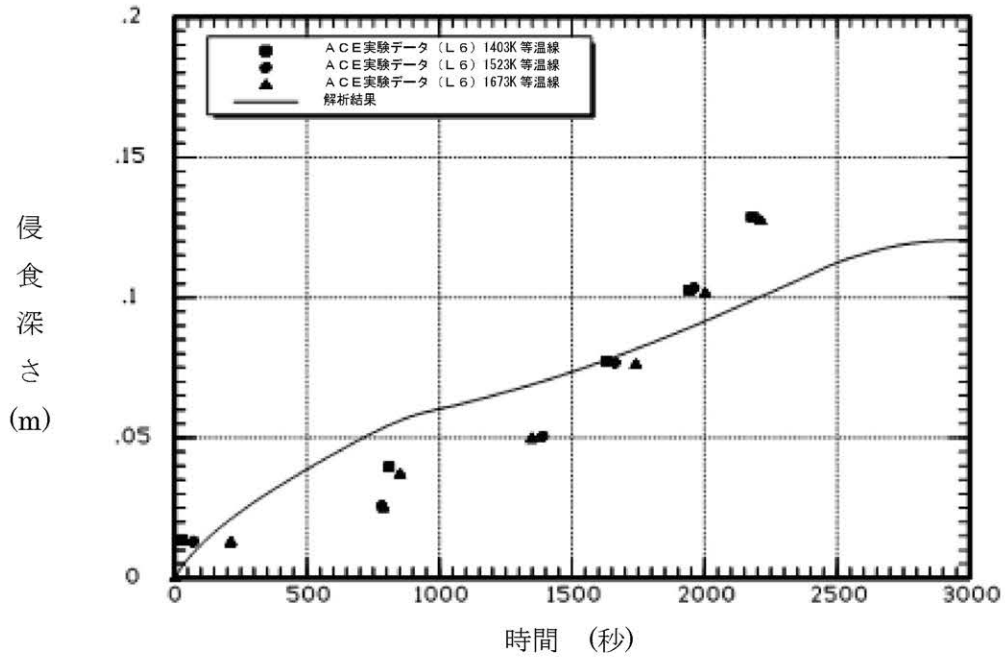




出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-2　ACE 実験（ケース L2）
溶融炉心：PWR 溶融物（部分酸化）
コンクリート：ケイ土系コンクリート



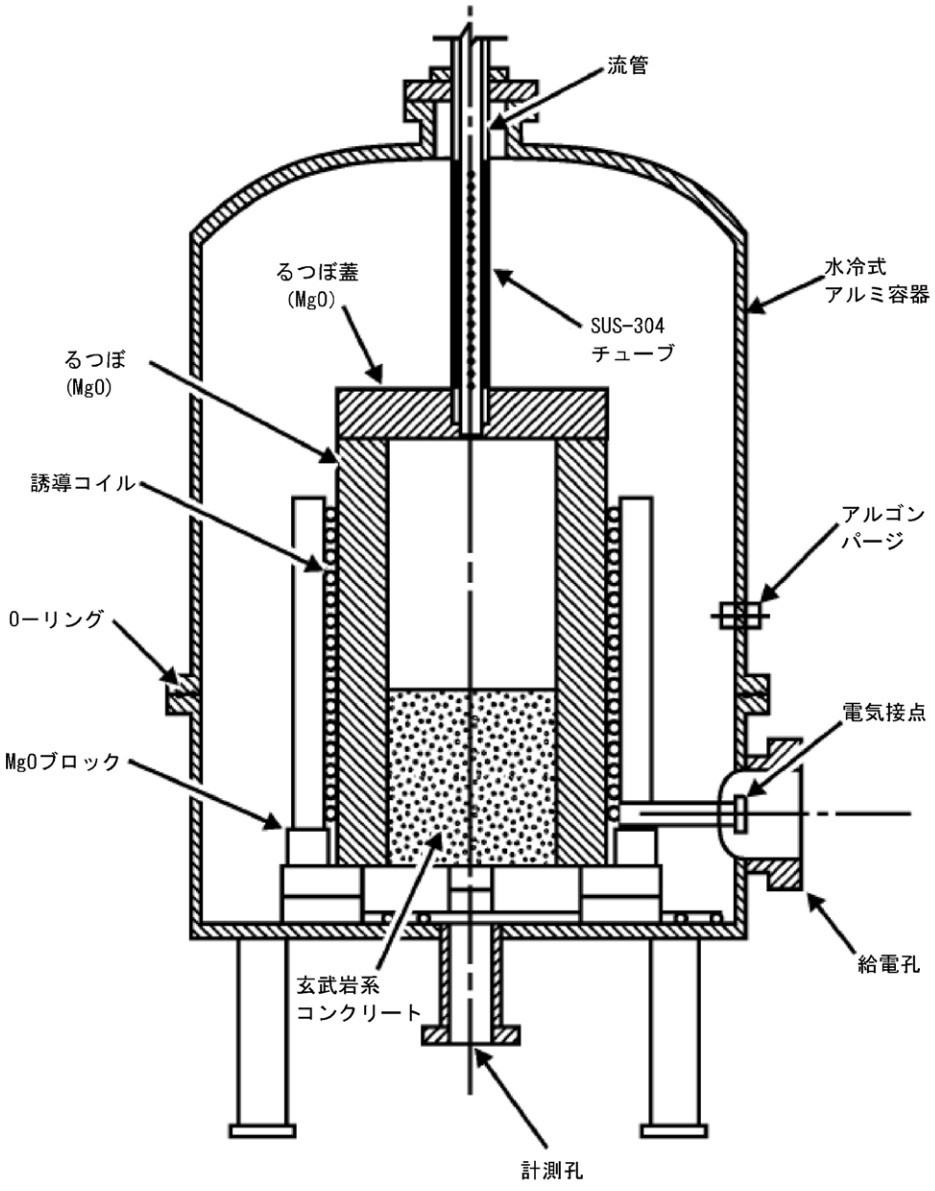


出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-3　ACE 実験（ケース L6）

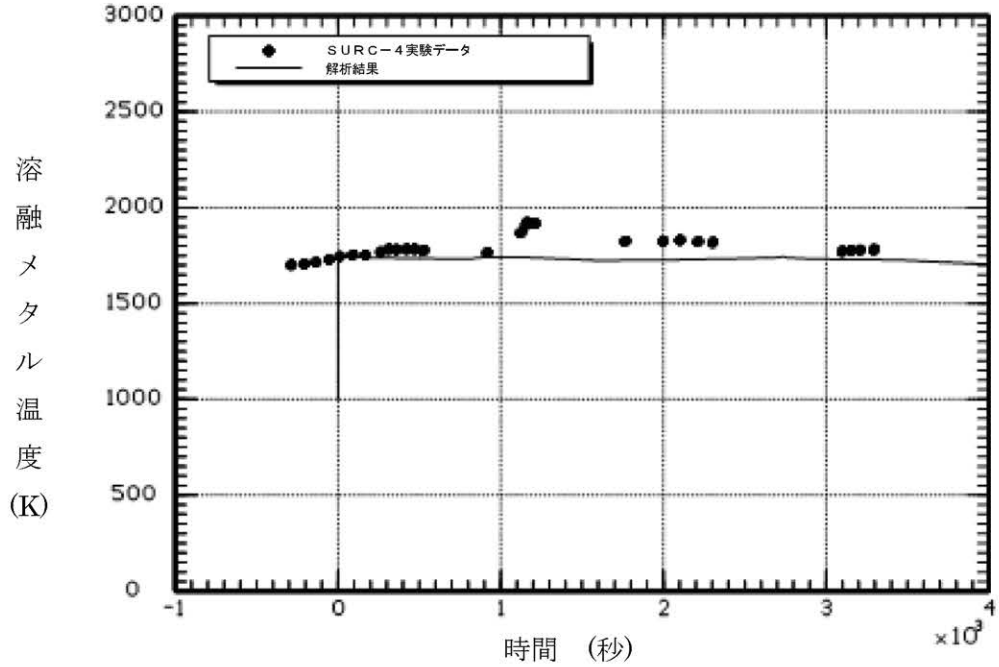
溶融炉心：PWR 溶融物（部分酸化、制御棒材質を含む）

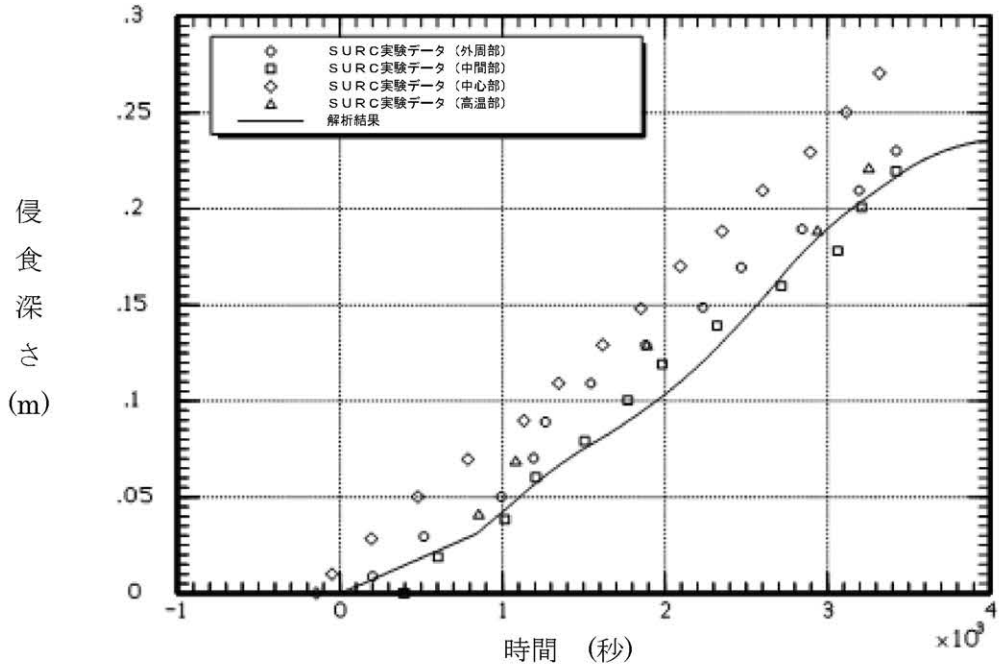
コンクリート：ケイ土系コンクリート



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-4　SURC-4 実験：実験装置





出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-5　SURC-4 実験

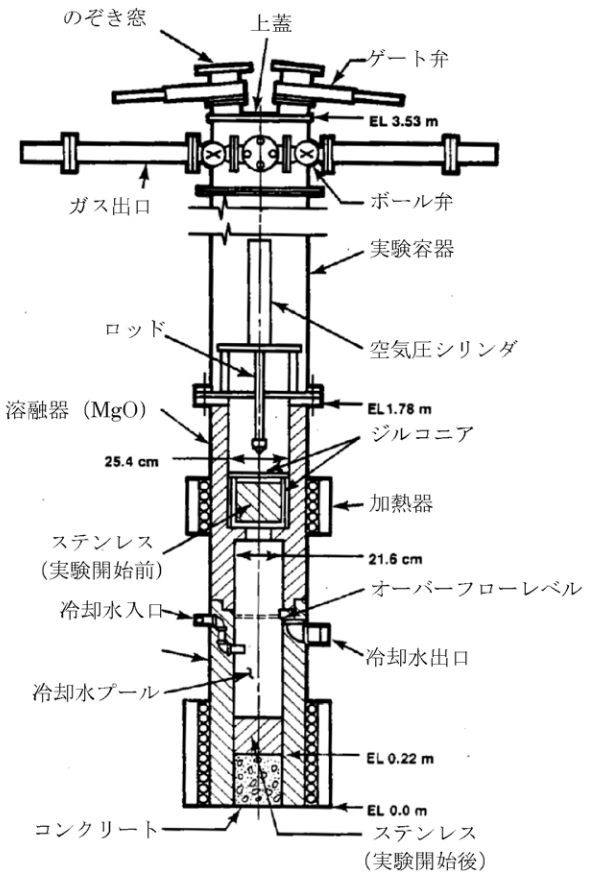


図 3.1-6　SWISS 実験装置概要

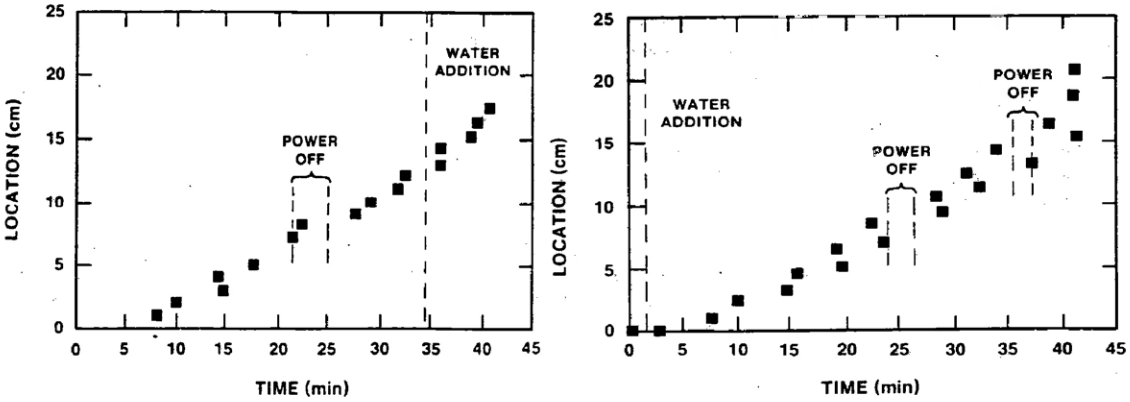


図 3.1-7 SWISS-1 及び SWISS-2 実験結果
（コンクリート温度が 1600K に到達した位置）

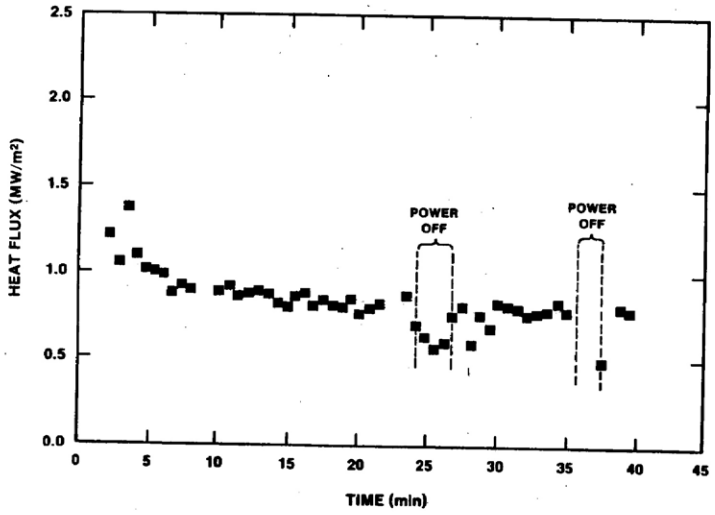


図 3.1-8 SWISS-2 実験結果（溶融物から水プールへの熱流束）

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

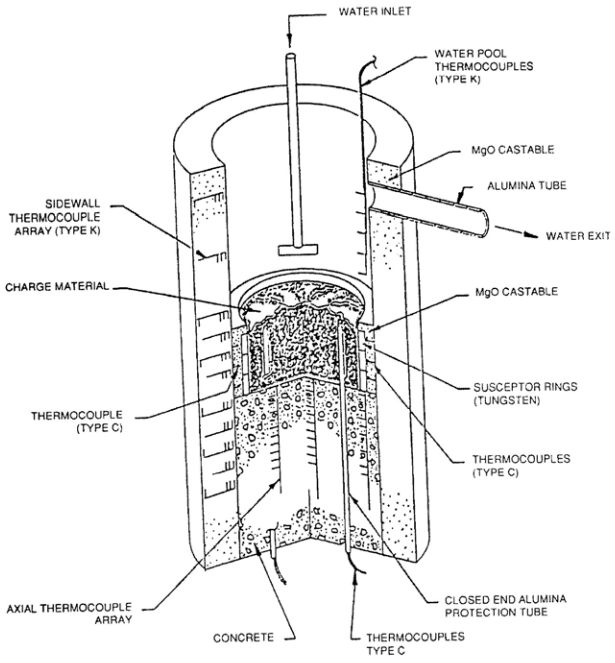


図 3.1-9 WETCOR 実験装置

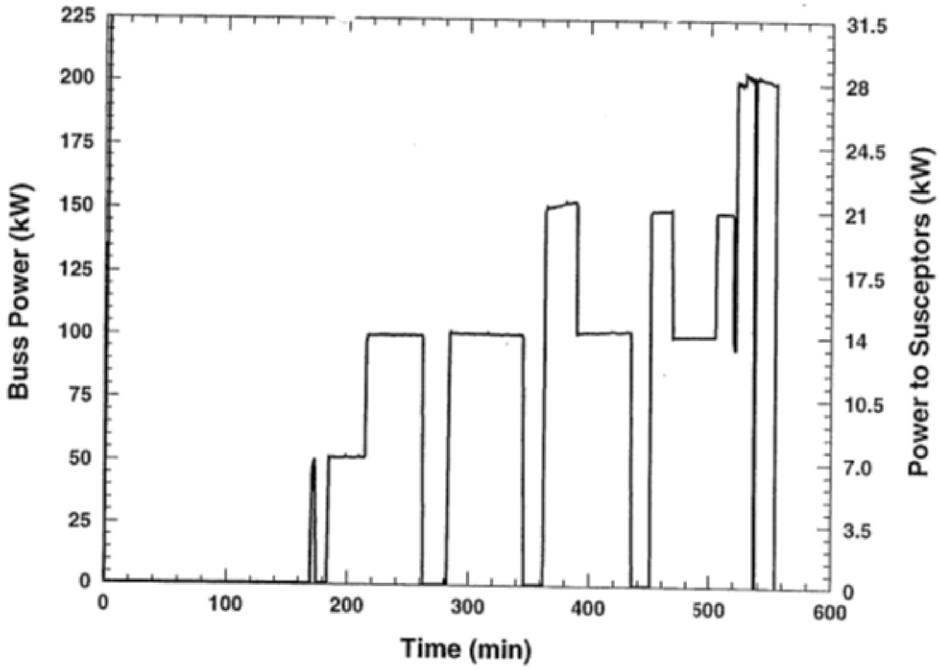


図 3.1-10　WETCOR 実験 メルト加熱履歴

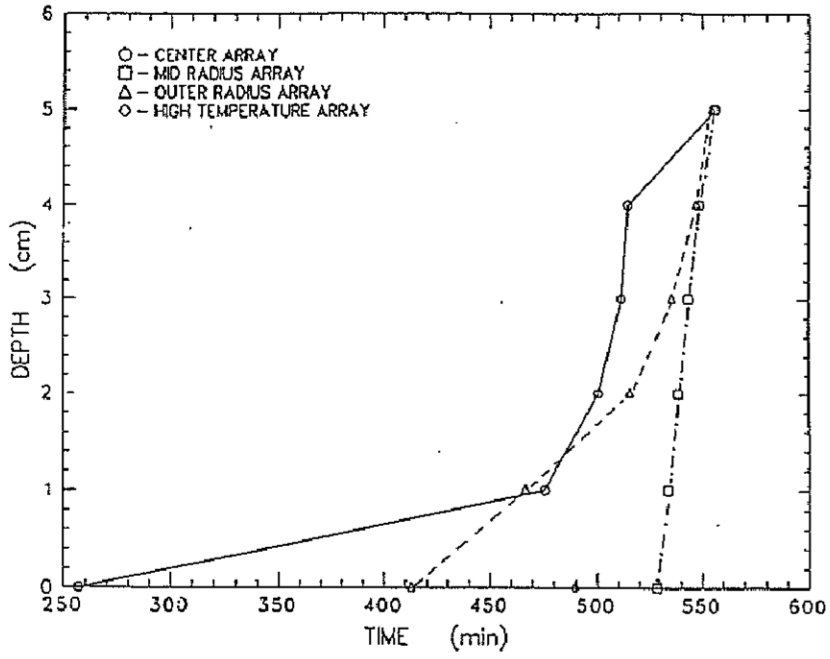


図 3.1-11 WETCOR 実験結果（コンクリート侵食推移）

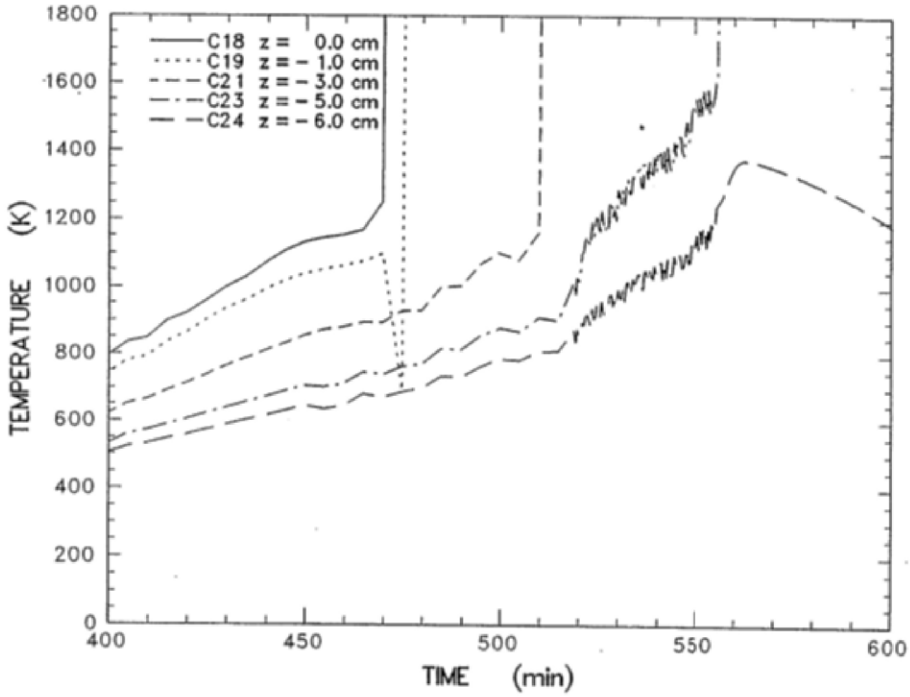


図 3.1-12　WETCOR 実験 コンクリート温度変化（半径方向中心 r=0cm）

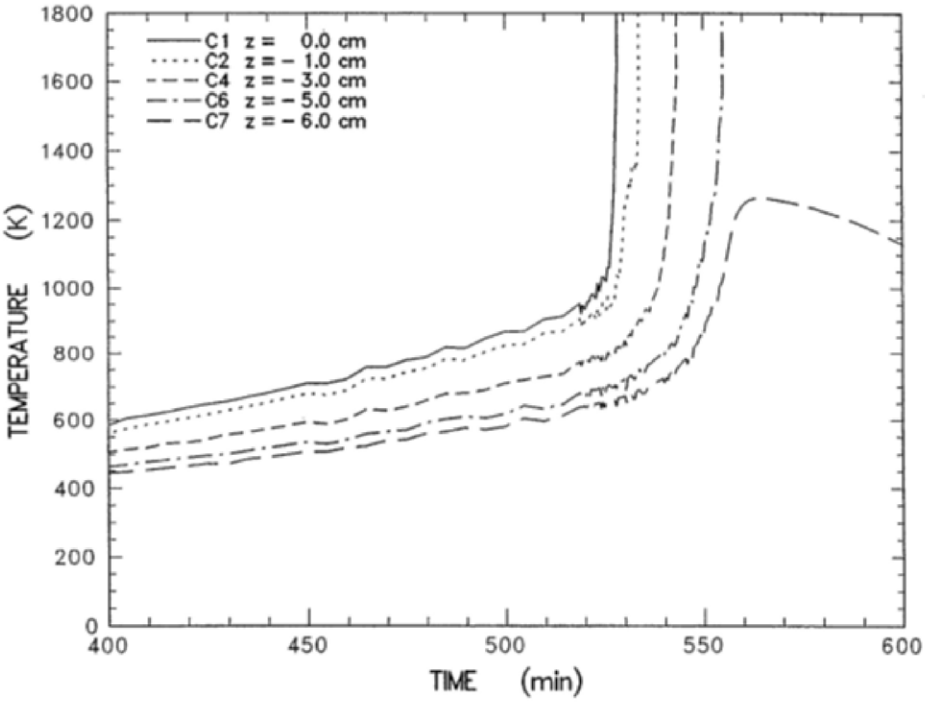


図 3.1-13　WETCOR 実験 コンクリート温度変化（半径方向中間部 r=10cm）

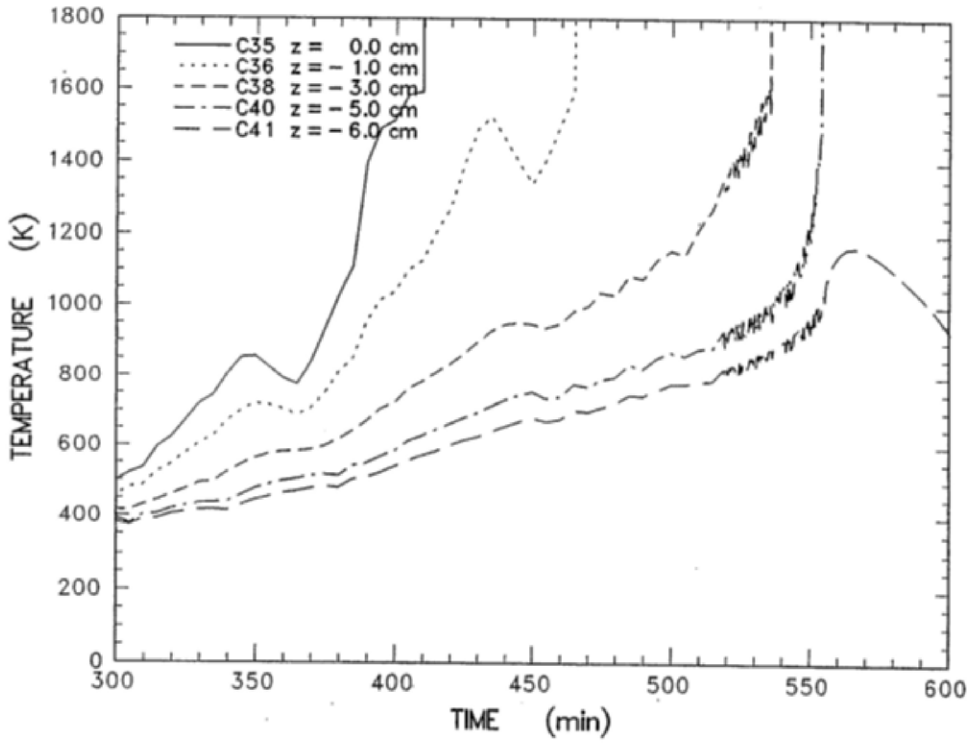


図 3.1-14　WETCOR 実験 コンクリート温度変化（外周部 r=15cm）

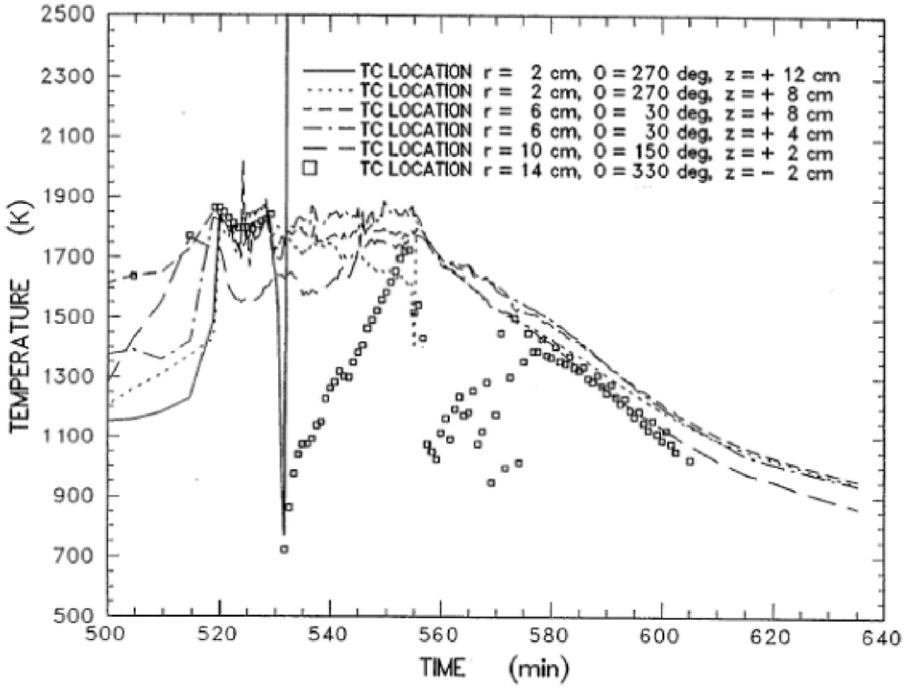


図 3.1-15　WETCOR 実験 メルト温度履歴

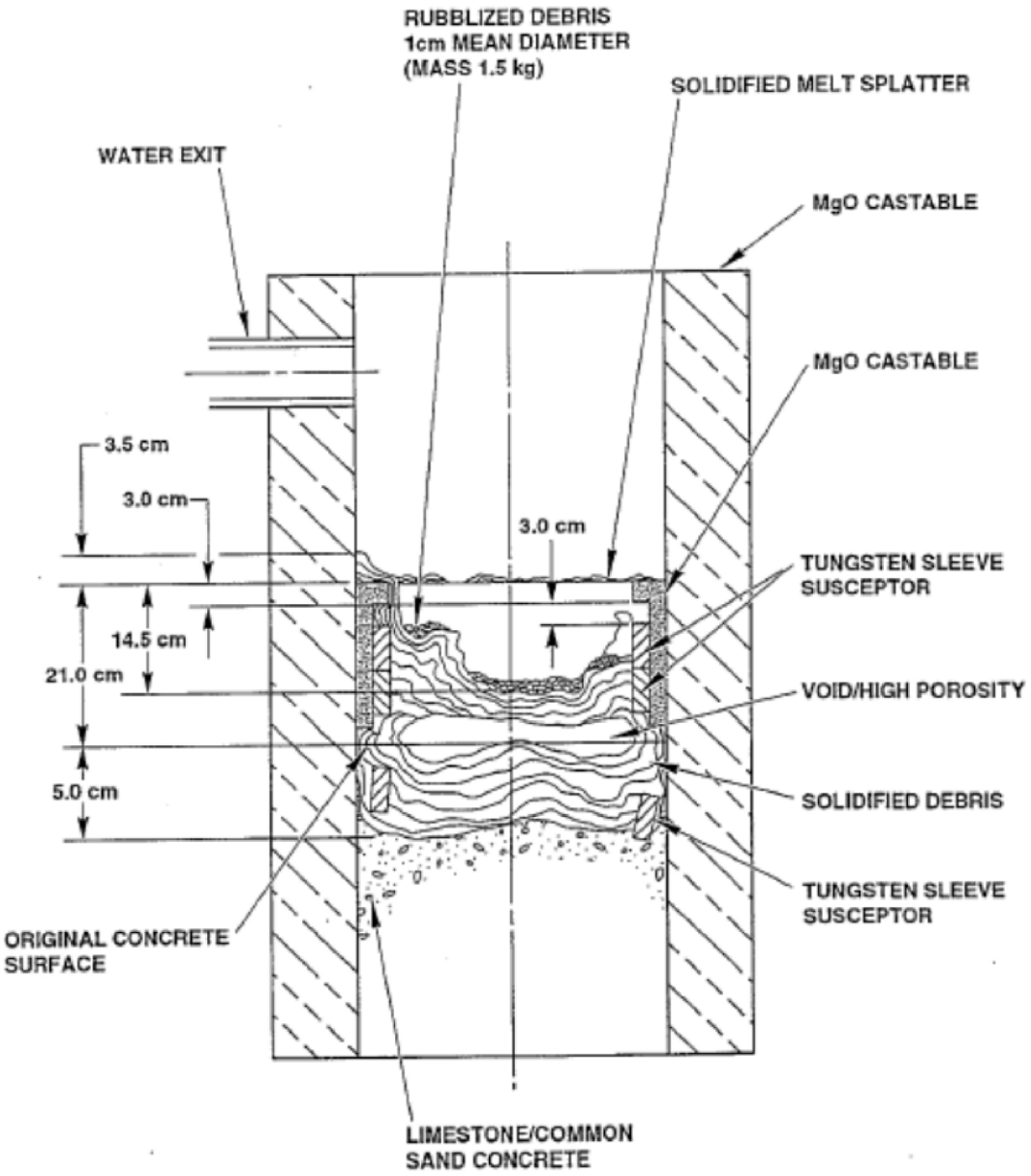


図 3.1-16　WETCOR 実験 試験後テスト部状態

表 3.1-3　MACE 実験条件一覧

		M0	M1b	M3	M4
溶融炉心模擬物重量 (kg)		130	480	1800	480
コンクリート床浸食開始時溶融炉心模擬物組成(%)	UO_2	56	65	57	57
	ZrO_2	11	13	29	29
	Zr	4	3	-	-
	その他（コンクリート成分等）	29	19	14	14
溶融炉心模擬物深さ (m)		0.15	0.25	0.2	0.3
溶融炉心模擬物初期温度 (K)		2000	2350	2250	2280
溶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

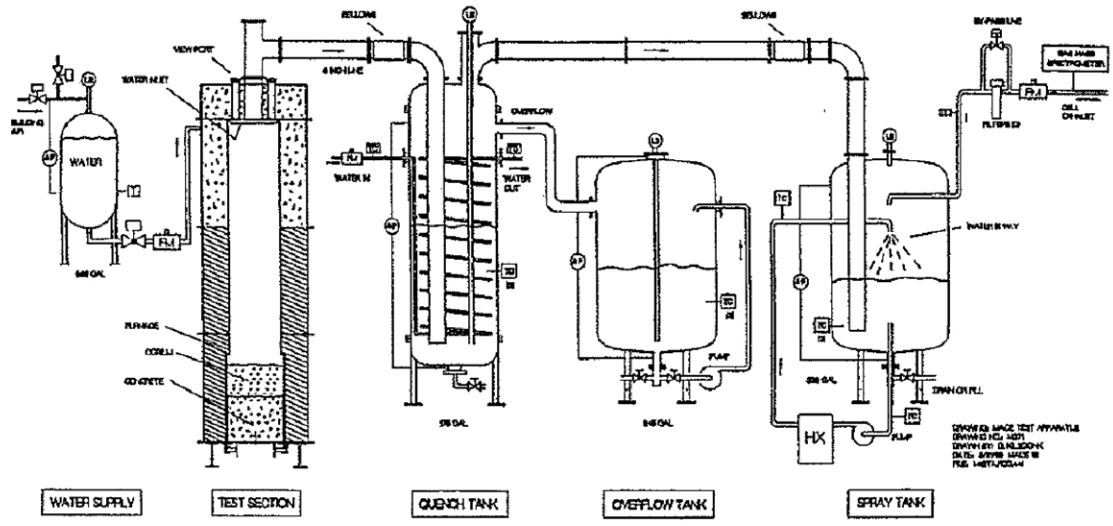


図 3.1-17 MACE 実験装置

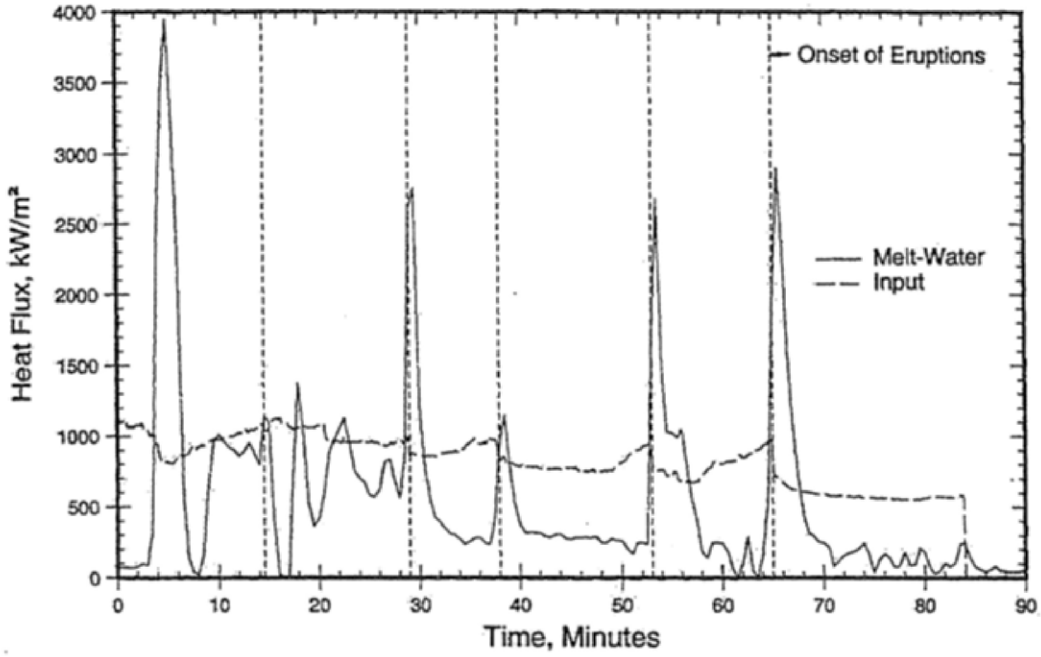


図 3.1-18　MACE-M0 実験での水への熱流束

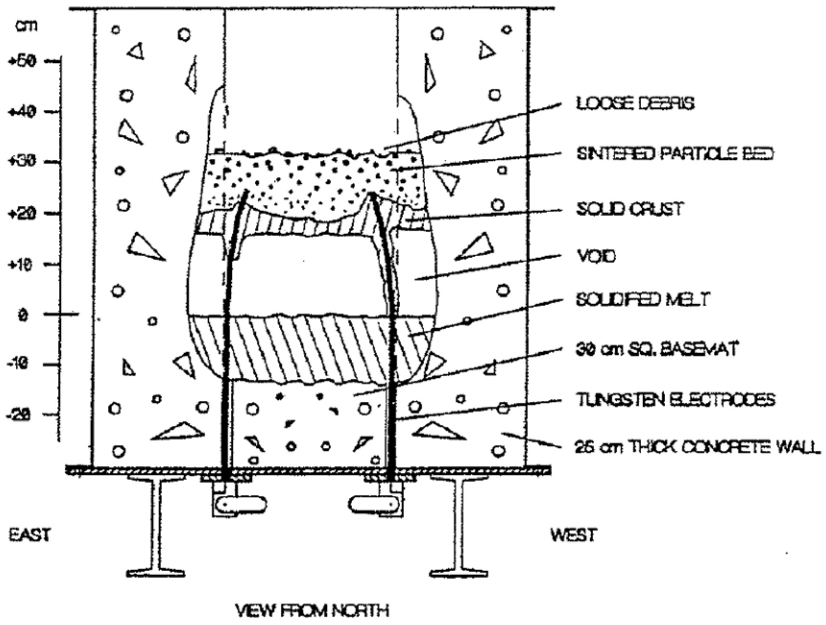


図 3.1- 19 MACE-M0 実験後の溶融炉心模擬物の状況

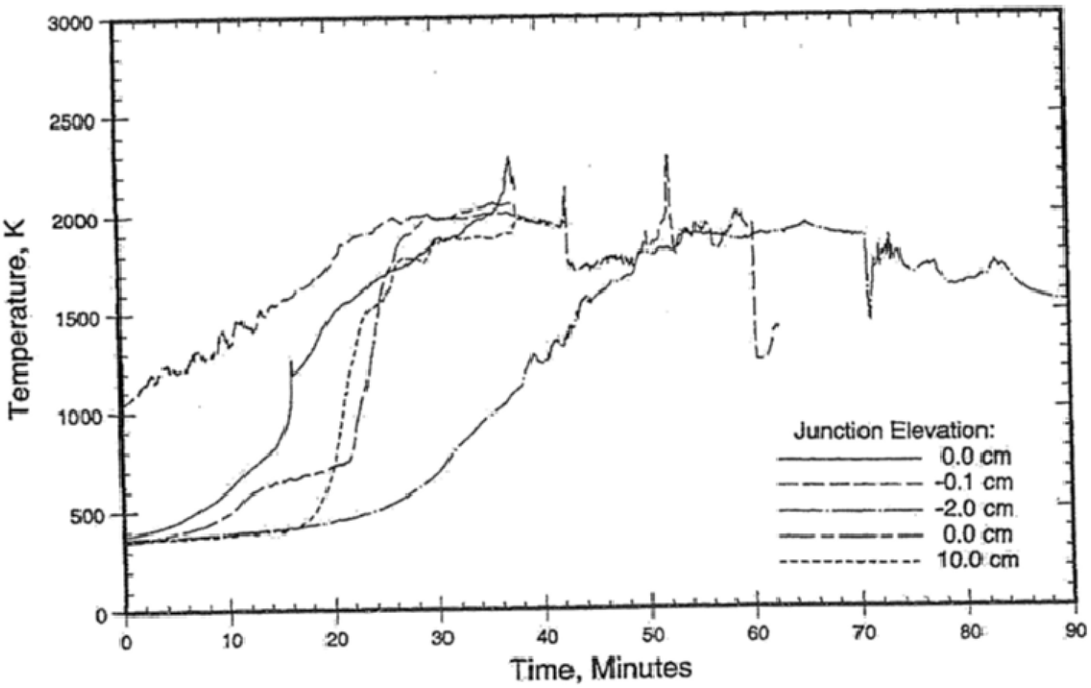


図 3.1-20　MACE-M0 実験での溶融物温度変化

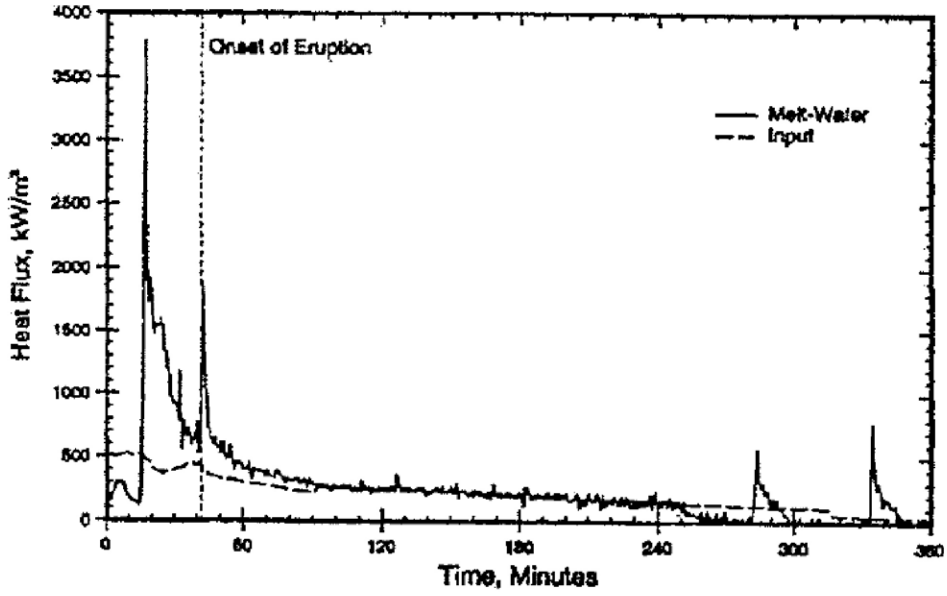


図 3.1-21 MACE-M1b 実験における溶融炉心模擬物から水プールへの熱流束

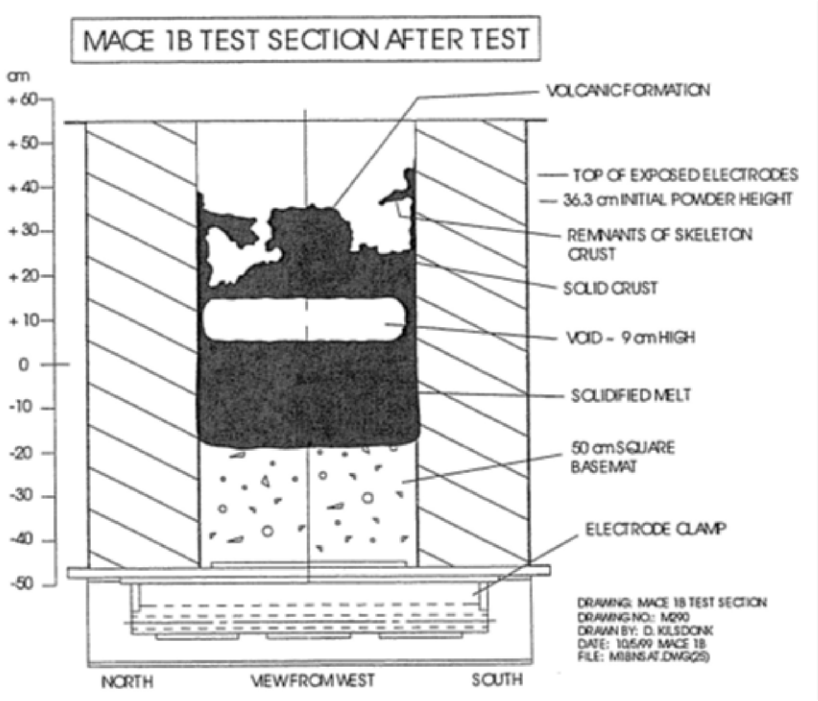


図 3.1-22　MACE-M1b 実験での実験後の溶融炉心の状態

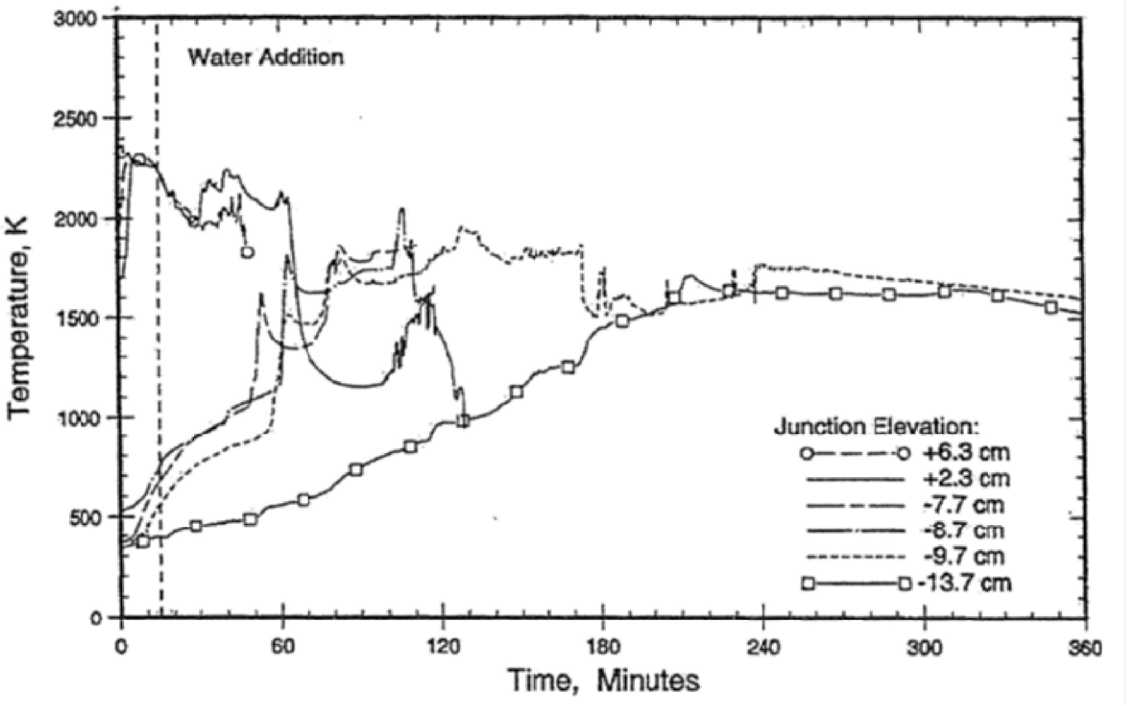


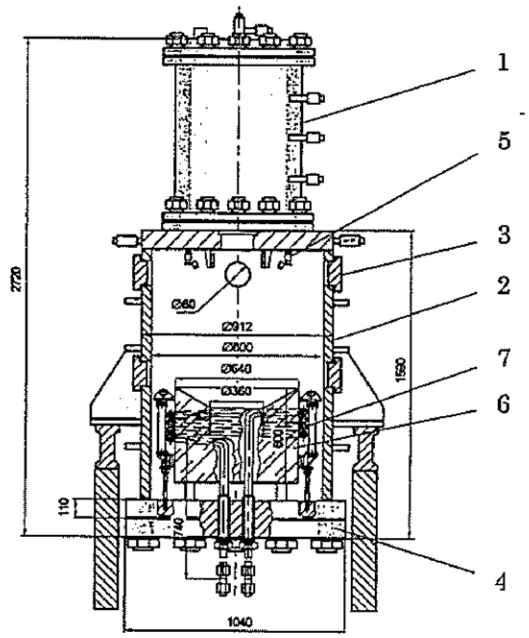
図 3.1-23　MACE-M1b 実験での溶融物温度変化

表 3.1-4 COTELS（B 及び C）実験条件一覧

ケース（B 及び 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	Jet	Spray
	質量流量（kg/s）	－	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04
	開始時刻（min）	－	8	8	8	8	15	9	10	10	6.5
実験後の溶融物状態											
デブリ粒子重量（kg） （粒子化割合）		9 (19%)	21.5 (38%)	19 (34%)	35 (78%)	33 (72%)	48 (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	－	－	－	－
溶融炉心重量（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：UO_2-78wt%, SUS-5wt%, ZrO_2-17wt%, Zr-0wt%

B：UO_2-55wt%, SUS-15wt%, ZrO_2-5wt%, 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 及び C）実験装置

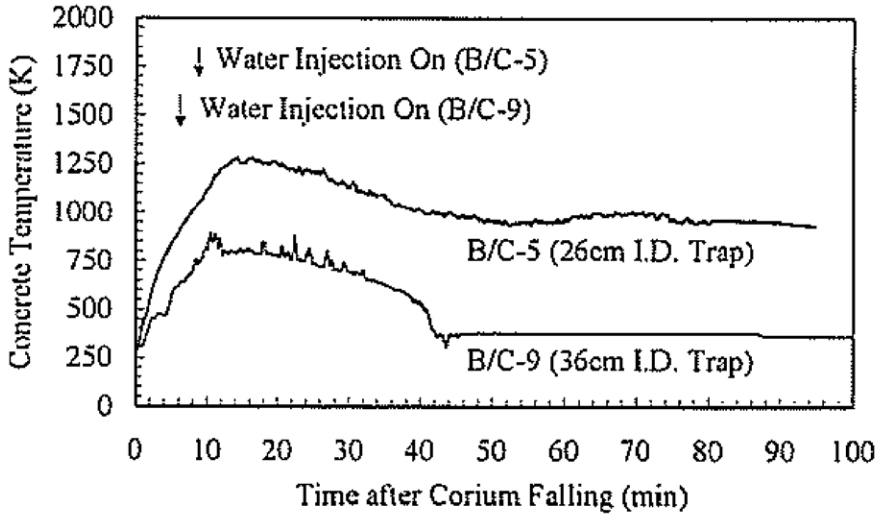


図 3.1-25　COTELS（B 及び C）実験におけるコンクリート温度挙動

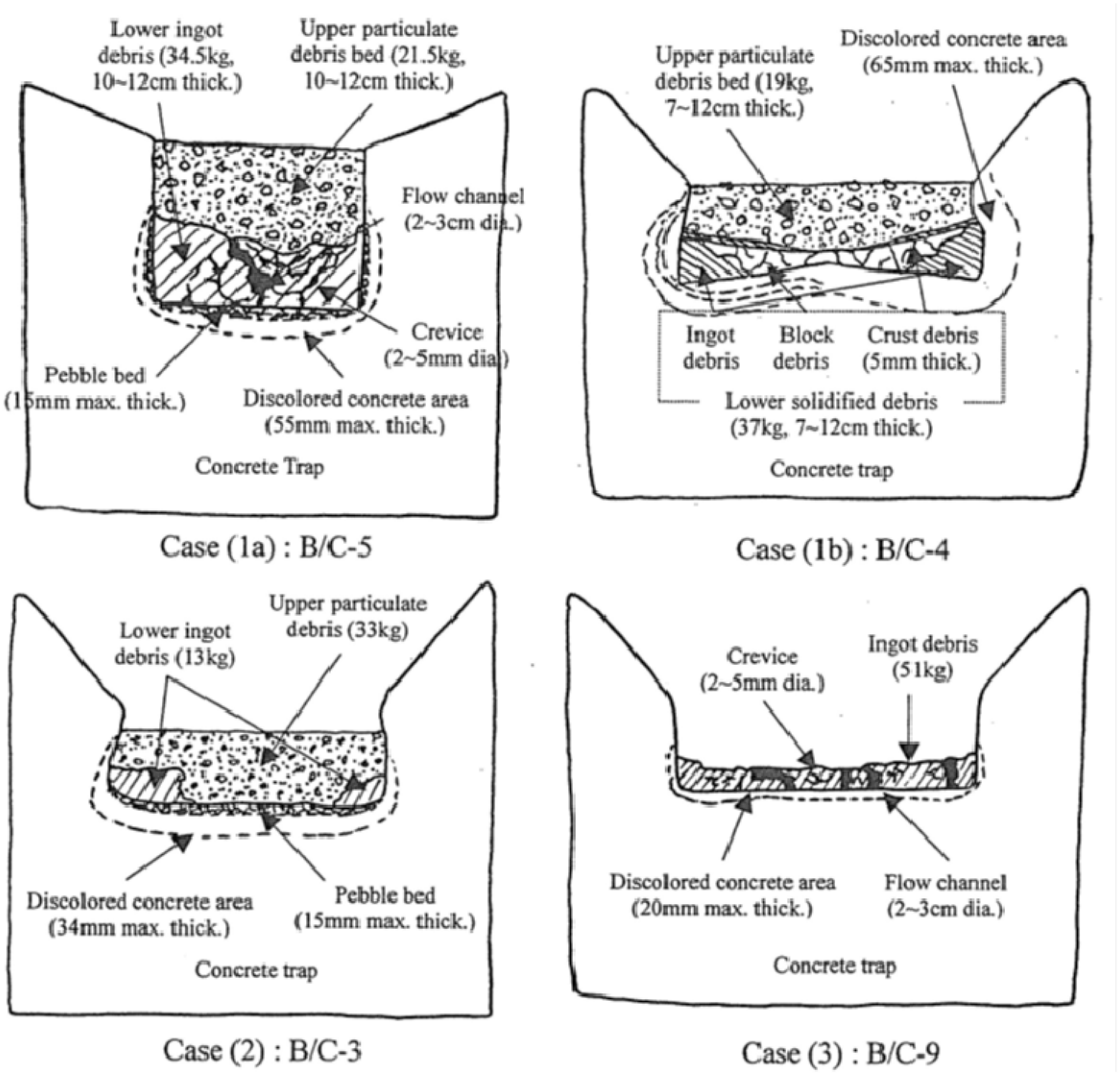


図 3.1-26　COTELS 実験での溶融物固化状態

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	2,923	100	5	0.87	0	なし
L-08	0.8	44	3,023	100	5.8	1.00	12	なし
L-11	0.77	151	2,823	100	5	2.00	2	なし
L-14	0.8	125	3,123	100	5	2.05	0	なし
L-19	0.8	157	3,073	100	5	1.10	1	なし
L-20	0.8	96	3,173	100	2	1.97	0	なし
L-24	0.8	176	3,023	100	0.5	2.02	0	なし
L-27	0.8	129	3,023	100	0.5	1.47	1	なし
L-28	0.8	175	3,052	50	0.5	1.44	1	なし
L-29	0.8	39	3,070	50	0.2	1.48	97	なし
L-31	0.8	92	2,990	50	0.2	1.45	104	なし
L-33	0.8	100	3,070	50	0.2	1.60	124	なし

※　0.8 の場合の組成は 80%UO_2＋20%ZrO_2、0.77 の場合の組成は 77%UO_2＋19%ZrO_2＋4%Zr。

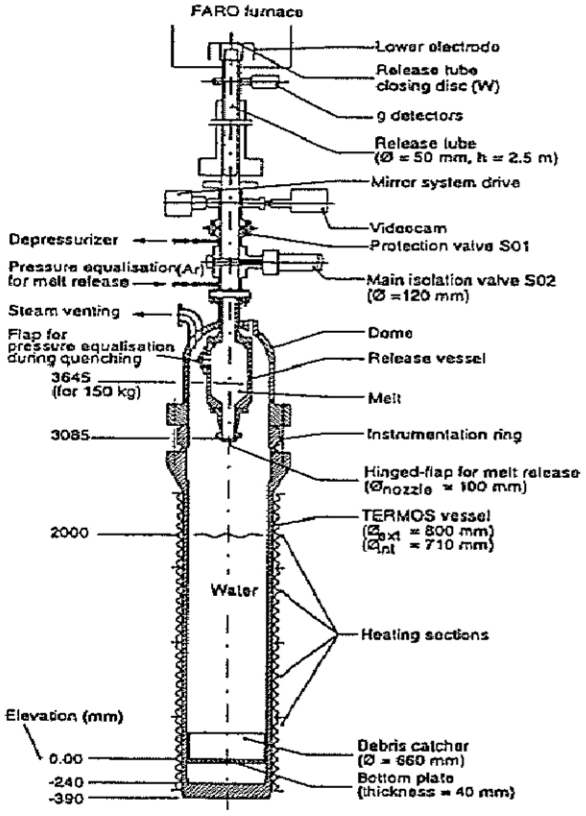


図 3.1-27　FARO 実験装置

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	3,050	0.20	0.4	0	－
A-4	0.55	27.00	3,050	0.30	0.4	8	－
A-5	0.55	55.40	3,050	0.25	0.4	12	－
A-6	0.55	53.10	3,050	0.21	0.4	21	－
A-8	0.55	47.70	3,050	0.45	0.4	24	－
A-9	0.55	57.10	3,050	0.21	0.9	0	－
A-10	0.55	55.00	3,050	0.47	0.4	21	－
A-11	0.55	53.00	3,050	0.27	0.8	86	－

※　いずれも UO_2：55wt%、Zr：25wt%、ZrO_2：5wt%、SS：15wt%の混合物

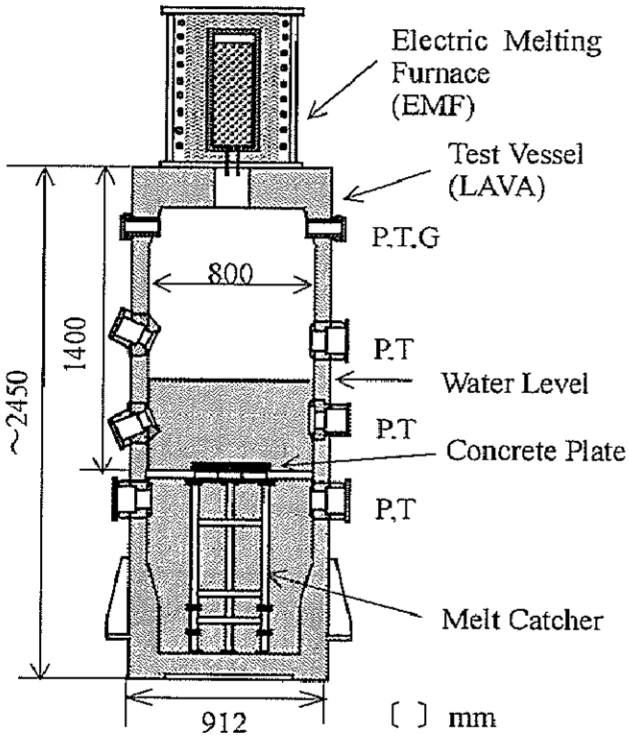


図 3.1-28　COTELS（A）実験装置

表 3.1-7　セルフレベリング実験条件一覧

Run	Container ID, cm	Bed Material	Generator, kw	Initial Height at Center, cm	Initial Height at Wall, cm	Final Height at Center, cm	Final Height at Wall, cm	Boiling Heat Flux, cal/sec·cm²
1	11.4	590-840 μ SS	15	6.4	3.8	5.1	4.4	…
2	11.4	210-1000 + μ Cu	15	7.6	4.4	6.0	5.7	…
3 *	11.4	50-50 vol.%UO_2-SS	15	7.6	5.1	6.0	6.0	0.55
4	16.2	210-1000 + μCu	15	9.2	6.0	7.6	7.4	…
5	29.2	210-1000 + μCu	100	12.1	3.2	7.6	5.7	0.79
6 **	29.2	50-50 vol.%UO_2-SS	100	8.9	3.8	6.4	6.2	1.20

〔註〕

	Run 3 (*)	Run 6 (**)
傾斜角の変化（初期）	23.7°	19.3°
（2～3分後）	0.0°	0.8°

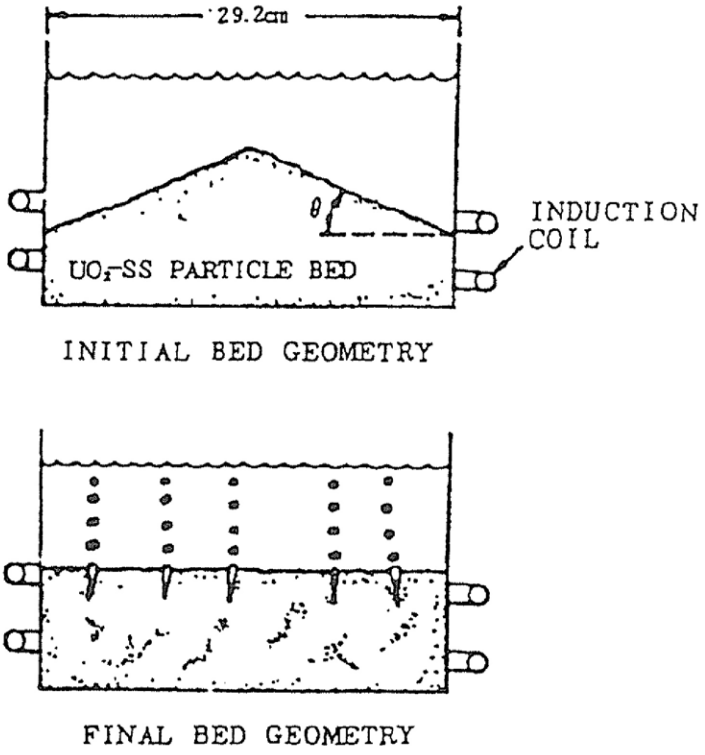


図 3.1-29　セルフレベリング実験における粒子ベッド概念

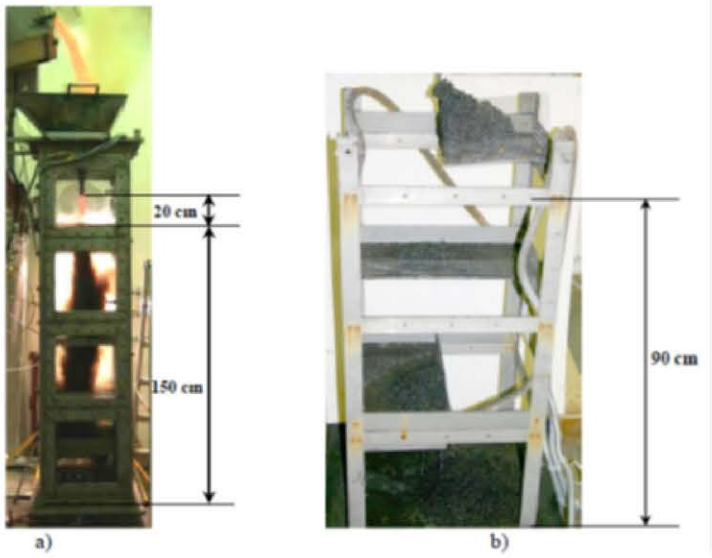


図 3.1-30　DEFOR 試験装置全体及び溶融炉心キャッチャー

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	1,253	1,246	1,221	1,245	1,279	1,349	1,255	1,343
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

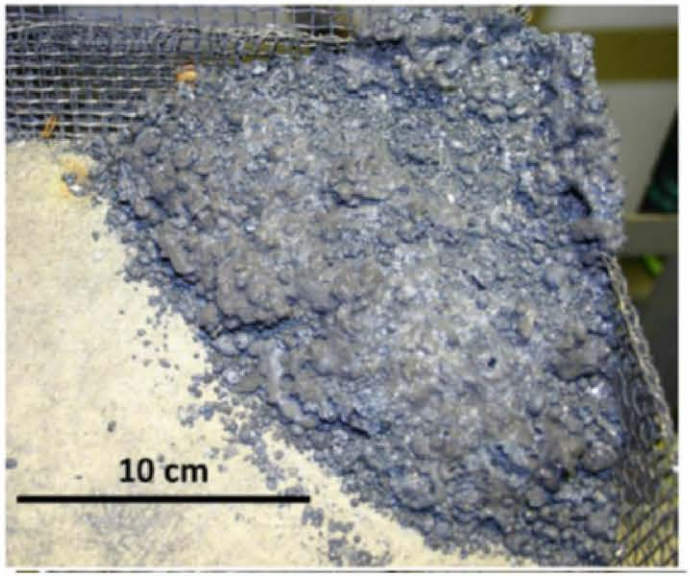


図 3.1-31　DEFOR-A8 キャッチャー１のケーキ状溶融炉心

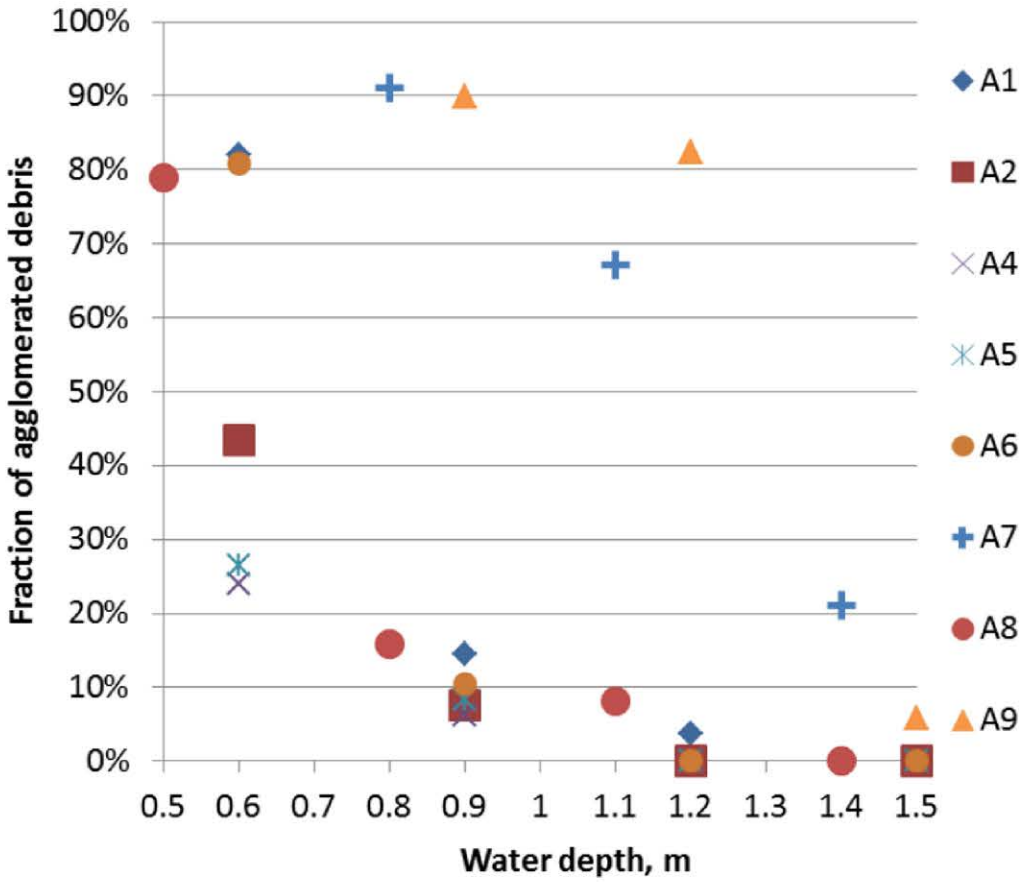


図 3.1-32　　DEFOR-A 実験結果

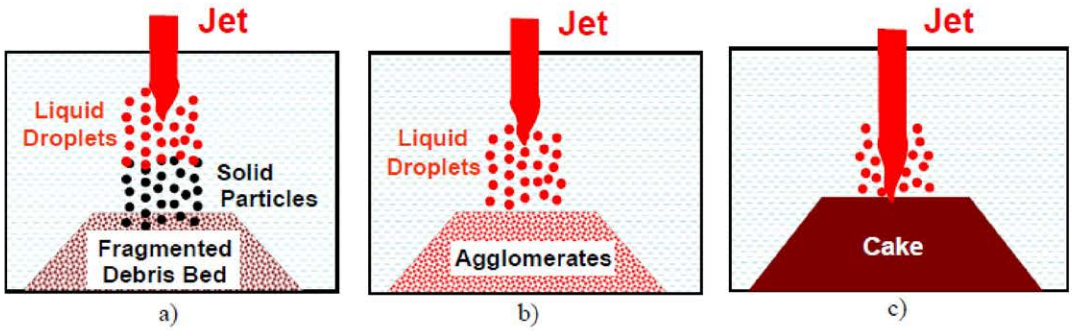


図 3.1-33　DEFOR 実験における溶融物凝集の概念図

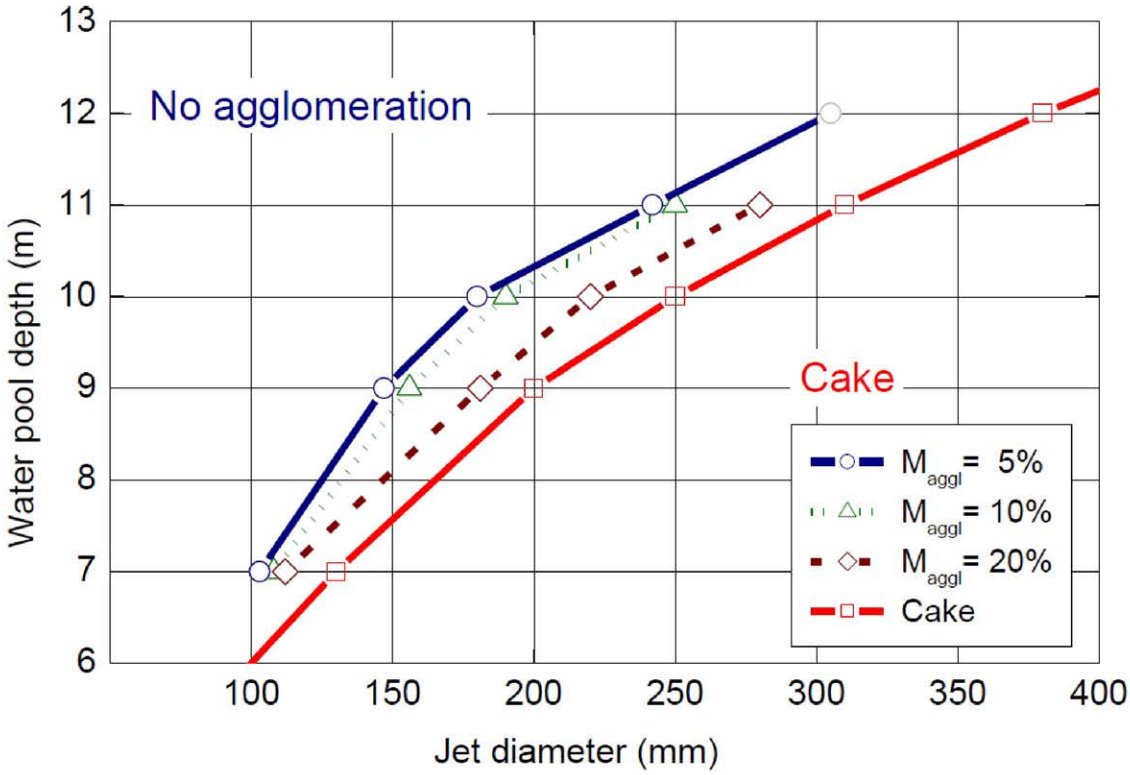


図 3.1-34　スウェーデン王立工科大学（KTH）による凝集モードマップ

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	1,950℃	1,880℃	1,950℃
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	2 liters/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.

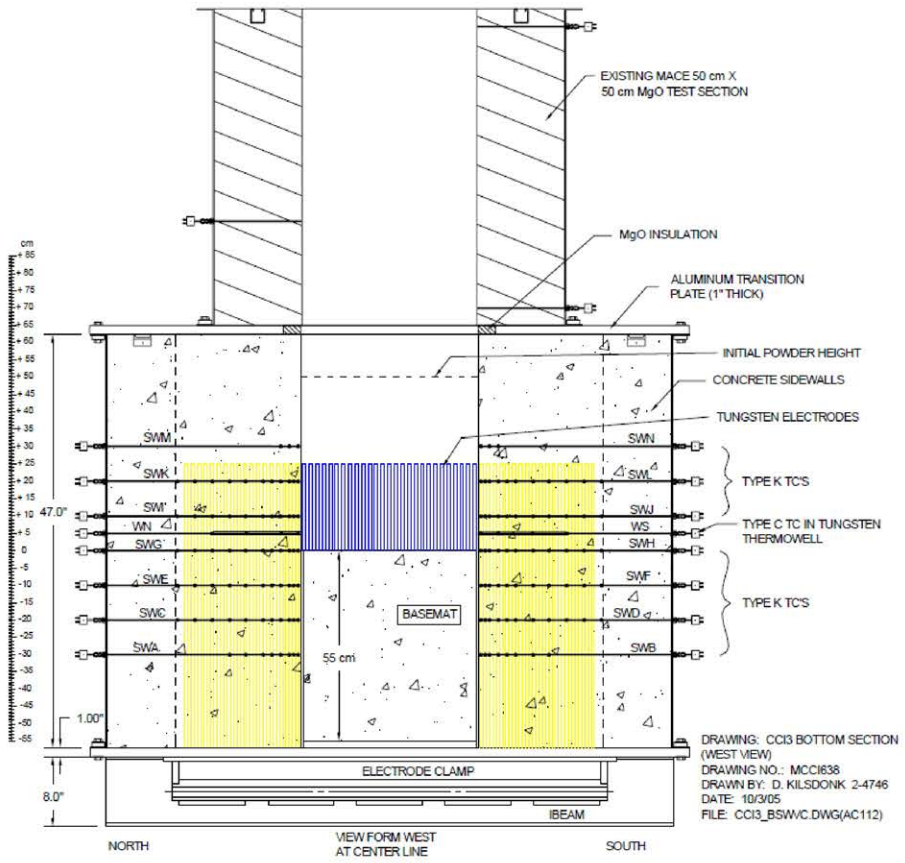


図 3.1-35　CCI 実験装置

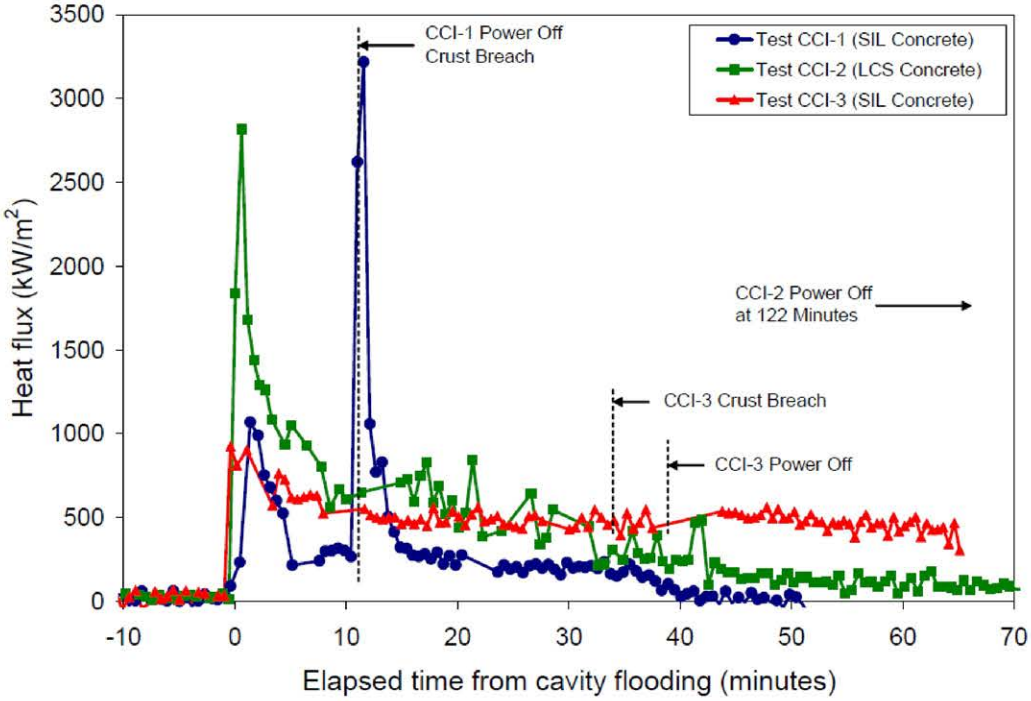


図 3.1-36　CCI 実験における水－溶融炉心間の熱流束

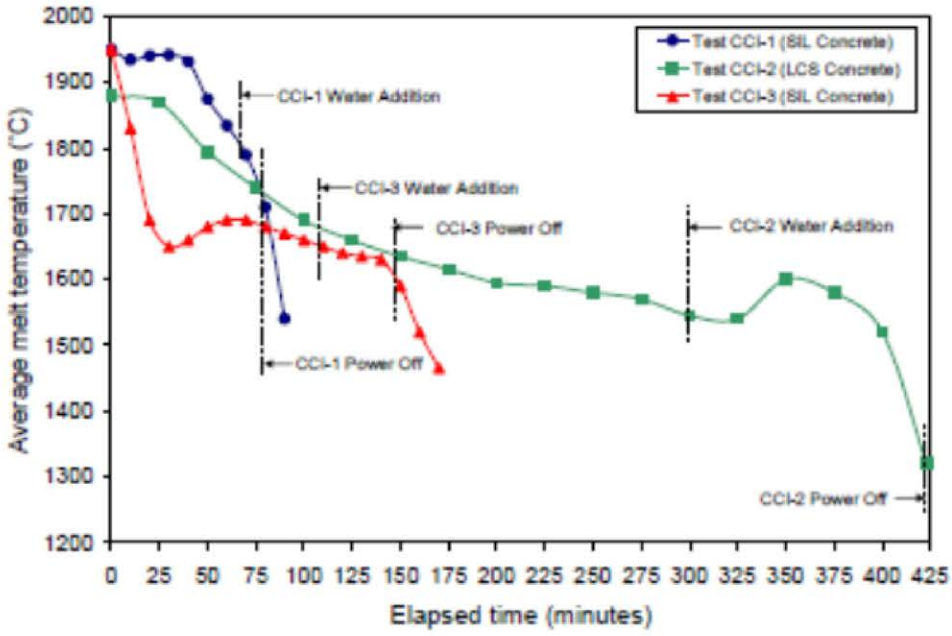


図 3.1-37　　CCI 実験の溶融物平均温度変化

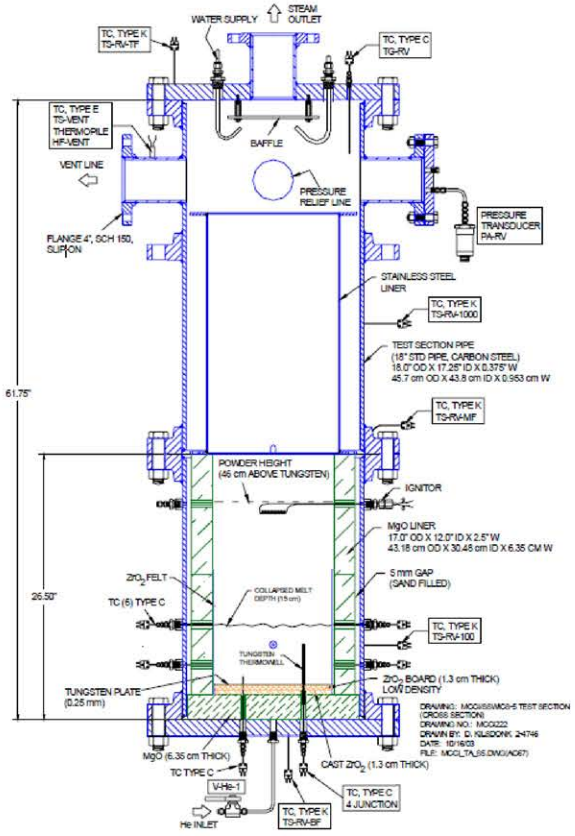


図 3.1-38　SSWICS 試験装置

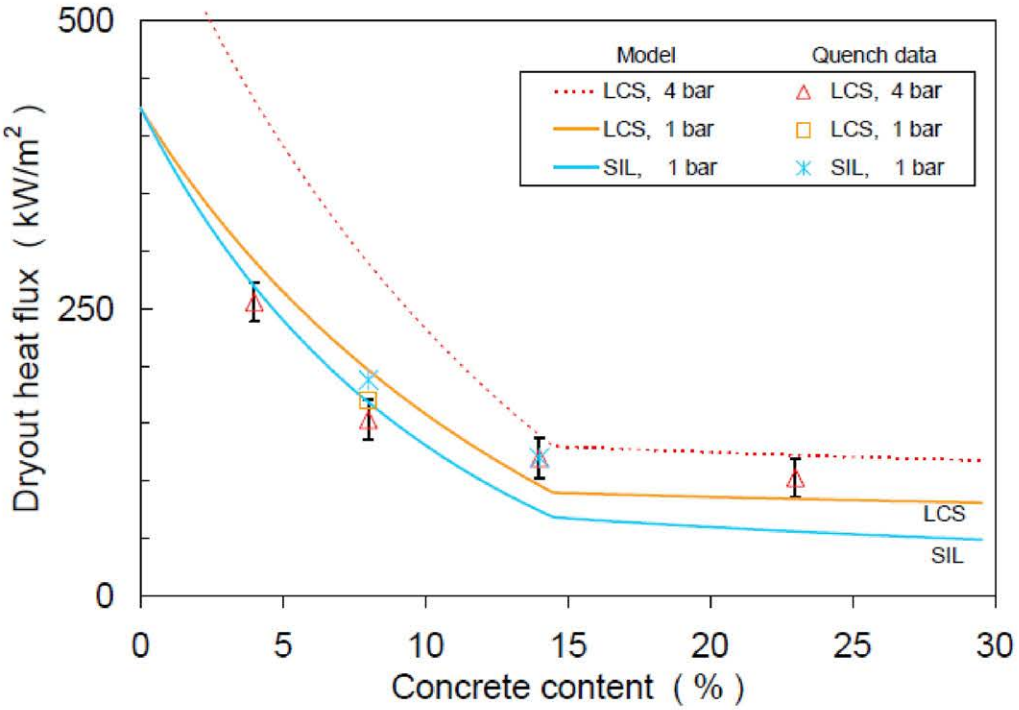


図 3.1-39　SSWICS 試験　ドライアウト熱流束の比較

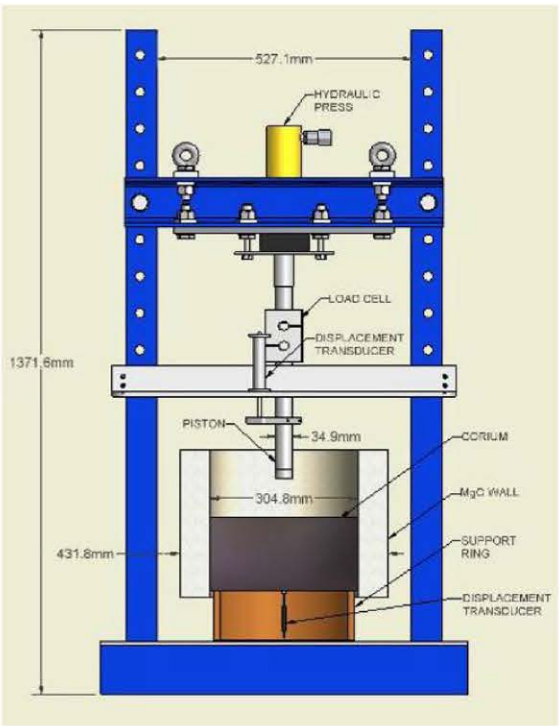


図 3.1-40　SSWICS 試験　強度試験の装置図

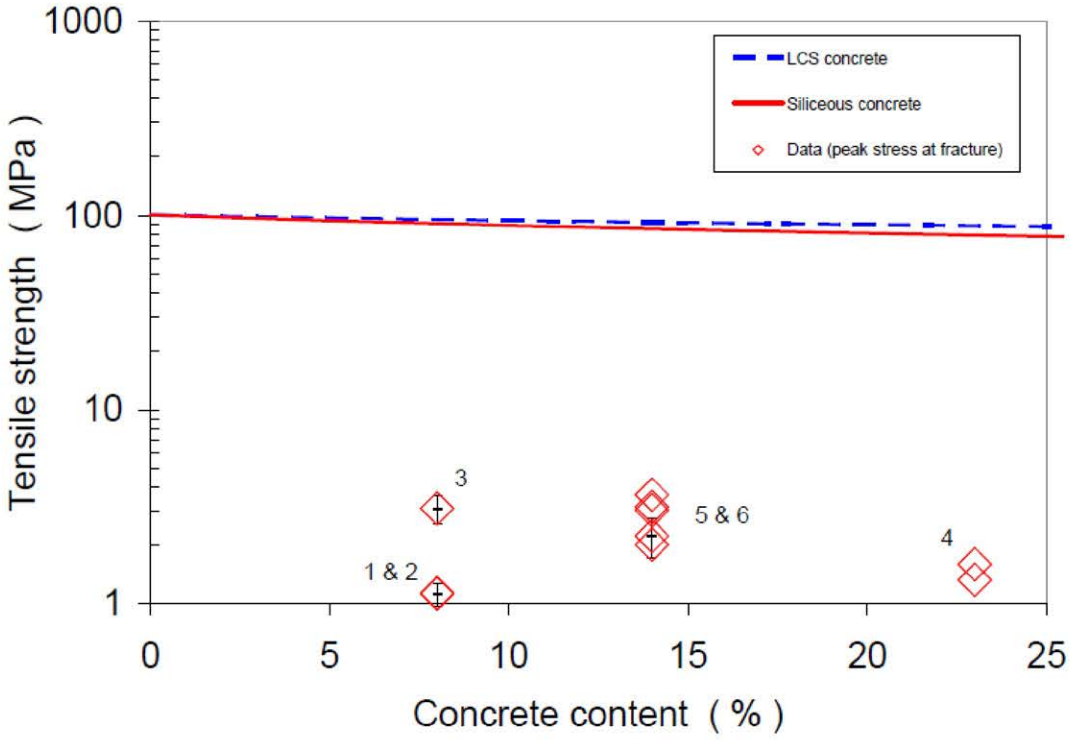


図 3.1-41　SSWICS 試験 強度試験結果

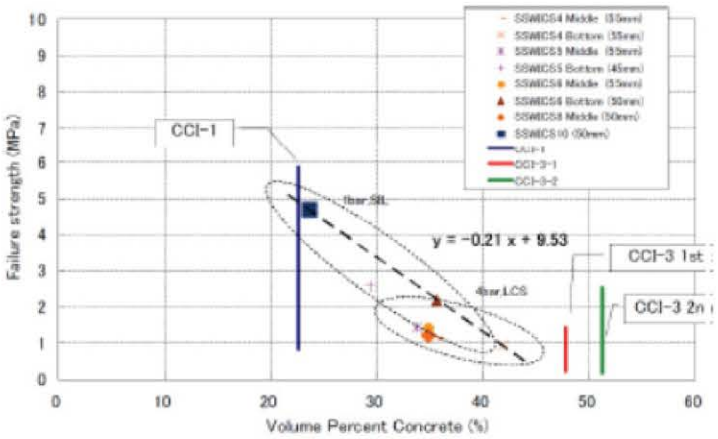


図 3.1-42　破損応力算出結果

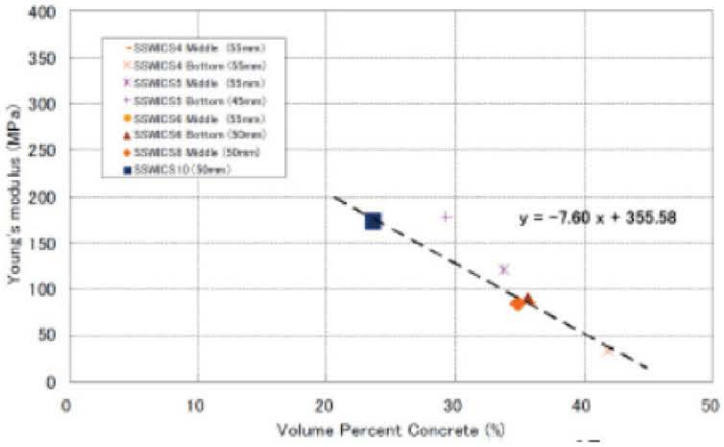


図 3.1-43　ヤング率算出結果

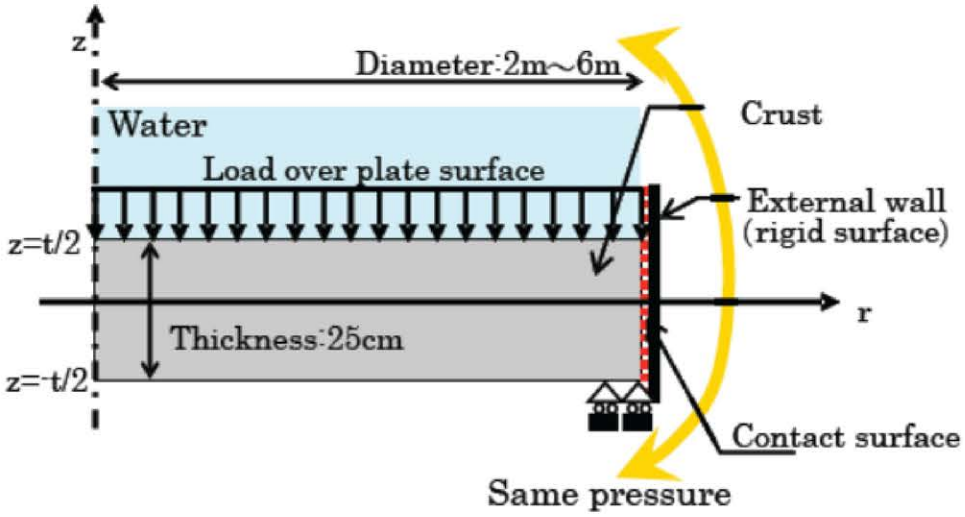


図 3.1-44　実機スケールのクラスト解析モデル

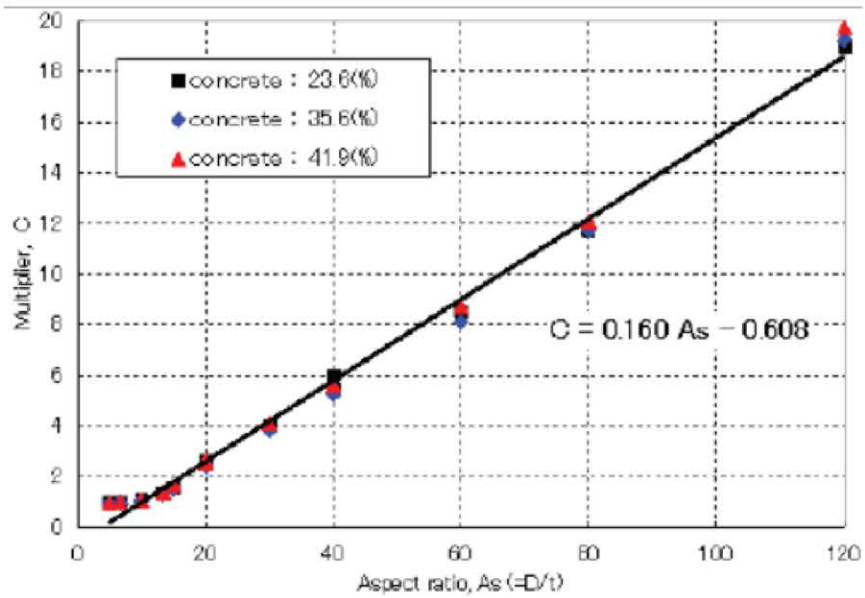


図 3.1-45　クラストの自重による応力分布



図 3.1-46　PULiMS-E4 試験での溶融物拡がり挙動

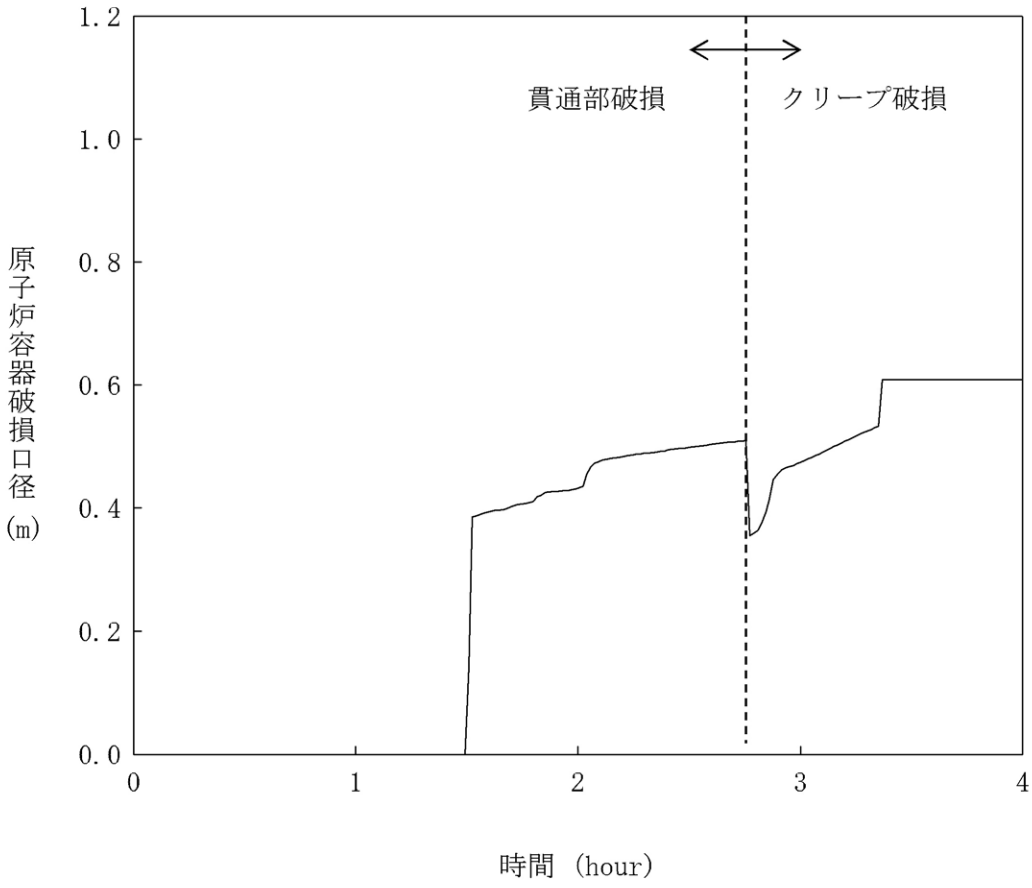
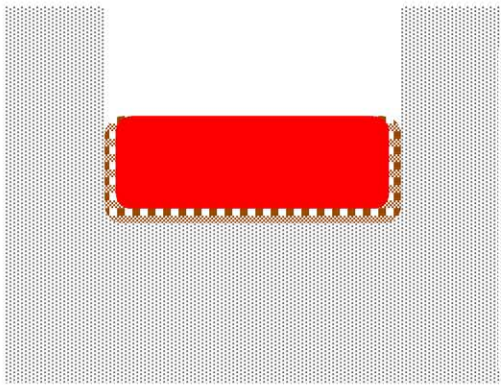
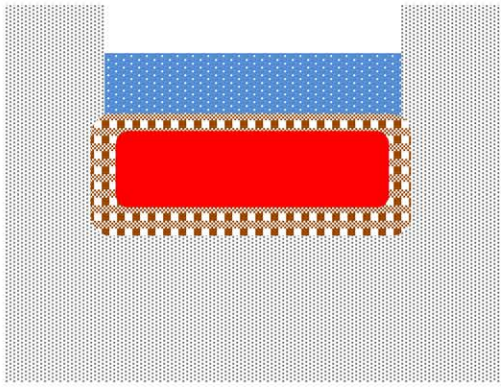


図 3.2-1 原子炉容器破損口径の拡がり（3 ループプラントの例）

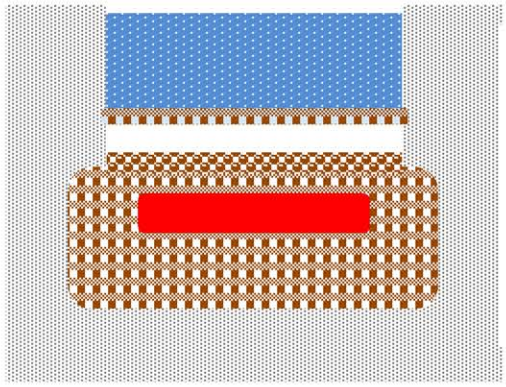
注）
約 1.5 時間の時点で貫通部破損、約 2.8 時間の時点でクリープ破損が生じており、クリープ破損以前は貫通部破損口径を、クリープ破損後はクリープ破損口径をプロットしている。



注水前：
溶融物とコンクリートの間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。

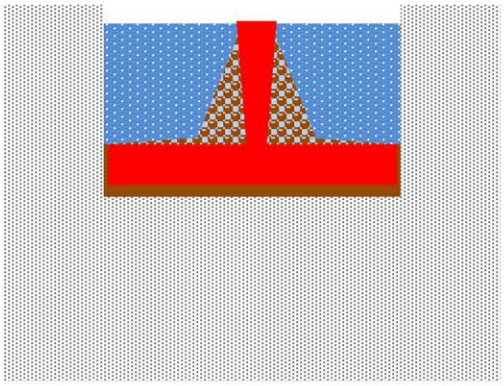


注水後短期：
溶融物上面から水への激しい伝熱が起き、上面に厚いクラストが形成される。この期間の熱流束は最大約 3MW/m² となり、その後急速に低下し約 1MW/m² となる。

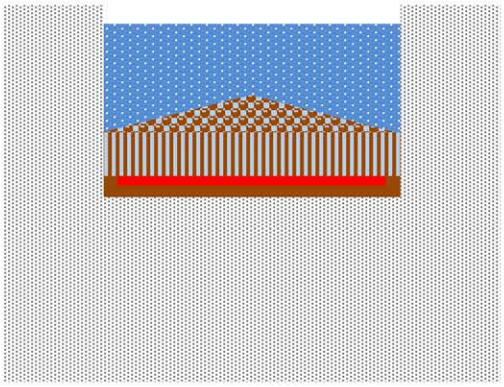


注水後長期：
溶融物上面のクラストが側壁に固着し、溶融物との間に空間が生じる。水への熱流束は約 0.2MW/m² まで徐々に低下していく。
クラストにはコンクリート分解ガスが通過することで空隙が出来、水やガスがある程度透過する。

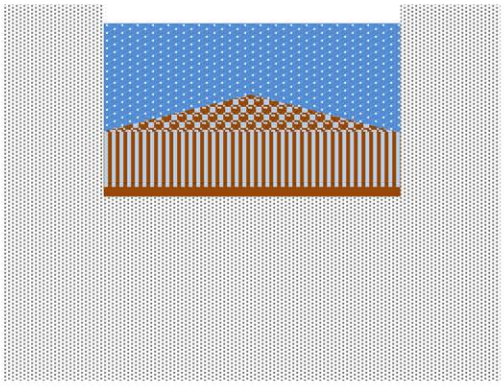
図 3.3-1　MCCI 実験での挙動



溶融炉心落下時：
溶融炉心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＞
・粒子ベッド
・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砕していく。このため溶融炉心は急激に冷却されていく。
＜４層状態＞
・粒子ベッド
・破砕クラスト
・溶融炉心
・ケーキ



長期冷却時：
溶融物は破砕クラストとなって固化し、上下に粒子ベッドとケーキが存在する。破砕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＞
・粒子ベッド
・破砕クラスト
・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溶融炉心を冷却できない状態が継続すると、原子炉容器壁は溶融炉心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溶融炉心からの伝熱によって、原子炉容器底部がクリープ破損に至る。破損口から溶融炉心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、原子炉下部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原子炉下部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原子炉下部キャビティに水を張り、高温の溶融炉心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 に溶融炉心伝熱の想定される現象と解析上の取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、

① 溶融炉心の原子炉下部キャビティへの堆積過程

② 溶融炉心の冷却過程

③ 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流れ図を示す。

（1）溶融炉心の原子炉下部キャビティへの堆積過程

原子炉容器が破損し、溶融炉心が原子炉下部キャビティへ落下し、原子炉下部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原子炉下部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。

<u>エントレイン量（溶融炉心の細粒化量）</u>

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、原子炉下部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コードの解析モデルでは、原子炉格納容器内の流動は、ノードージャンクションモデルによって、ブローダウン水、スプレイ水等の原子炉下部キャビティへの流入量を計算し、原子炉下部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。即ち、原子炉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。原子炉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原子炉下部キャビティへの注水が継続した状態であることから、原子炉下部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、原子炉下部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。原子炉下部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、原子炉下部キャビティ床に堆積する溶融炉心のうち、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、粒子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、溶融炉心は冷却されにくくなるといえる。また、溶融炉心が段階的に原子炉下部キャビティに落下する場合、溶融炉心が落下するたびに、一部が細粒化し、残りが連続相として原子炉下部キャビティ床に堆積し、原子炉下部キャビティ内の水が蒸発して原子炉下部キャビティ水深が浅くなることを繰り返す。溶融炉心が段階的に原子炉下部キャビティに落下することによる原子炉下部キャビティ水深の減少は、溶融炉心冷却の観点で厳しくなる。このように、原子炉下部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コードでは、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コードでは 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は最確値よりも約□割小さく設定されているため、不確かさとしては約□割を見込む。

一方、溶融炉心落下速度は、原子炉容器内外圧力差と溶融炉心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大きくなく、不確かさも小さいと考えられるが、溶融炉心水頭については、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、溶融炉心上面から破損口までの高さとして 0.8m～1.2m、即ち約 3 割の不確かさ幅がある。溶融炉心落下速度は溶融炉心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約 2 割となる。

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、後述のとお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、すべての溶融炉心が細粒化される（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、すべ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炉心の量に依存する。

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　ＭＡＡＰコード）　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　ＭＡＡＰコード)」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

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。

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コードの解析モデルでは、原子炉下部キャビティ底の溶融炉心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、溶融プールから原子炉下部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「溶融炉心と原子炉下部キャビティ水の伝熱」にて整理する）。

溶融炉心の原子炉下部キャビティ床面への拡がり

溶融炉心の原子炉下部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、炉心損傷検知後に、原子炉下部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コードの解析モデルでは、原子炉下部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、原子炉下部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、原子炉下部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原子炉下部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原子炉下部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、原子炉下部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

原子炉下部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原子炉下部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原子炉下部キャビティ床に堆積するが、ＭＡＡＰコードでは、原子炉下部キャビティに堆積した溶融炉心は、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。

溶融炉心と原子炉下部キャビティ水の伝熱

溶融炉心から原子炉下部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、原子炉下部キャビティ水によって亀裂が入り、その中に原子炉下部キャビティ水が浸入することによって行われる。

ＭＡＡＰコードの解析モデルでは、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、$\pi/24$（=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、米国サンディア国立研究所（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 の式を原子炉下部キャビティ床に堆積した溶融炉心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コード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阻害され、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

原子炉下部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、即ち、原子炉下部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考える。

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ＭＡＡＰコード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ＭＡＡＰコードでは、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原子炉格納容器内に放出され、原子炉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、ウラン及び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
原子炉下部キャビティへの注入量	ブローダウン水、スプレイ水等が原子炉下部キャビティに回り込み、原子炉下部キャビティ水深が決まる。	ノードージャンクションモデルに従い、原子炉下部キャビティに流れ込む水量が評価される。	原子炉下部キャビティ水深 （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ため、水中に落下する溶融炉心の内、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）
溶融炉心落下速度	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	連続層として原子炉下部キャビティ床面に堆積した溶融炉心の上に粒子状ベッドが堆積すると想定される。あるいは、連続層の溶融炉心の中に巻き込まれると想定される。	連続層の溶融炉心と区別なく、平板状の発熱体として評価される。	水ー溶融炉心間の熱伝達係数 （５．（４）にて感度解析実施）
溶融炉心の拡がり及び堆積形状	溶融炉心が過熱度を持ち断続的に原子炉下部キャビティ床に落下すること等から、原子炉下部キャビティ床面積相当に拡がると想定される。	床面積全面に一様に拡がるとして、原子炉下部キャビティ床面積設計値を入力する。	溶融炉心の拡がり面積 （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
水と溶融炉心の伝熱	実機スケールでは、溶融炉心の上面に形成されるクラストには亀裂が生じ、溶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。	水ー溶融炉心間の熱伝達係数（５.（４）にて感度解析実施）
上面クラストの亀裂、表面形状及び温度低下	実機スケールでは、溶融炉心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
溶融プールと下面及び側面クラスト間の伝熱	溶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。	原子炉下部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

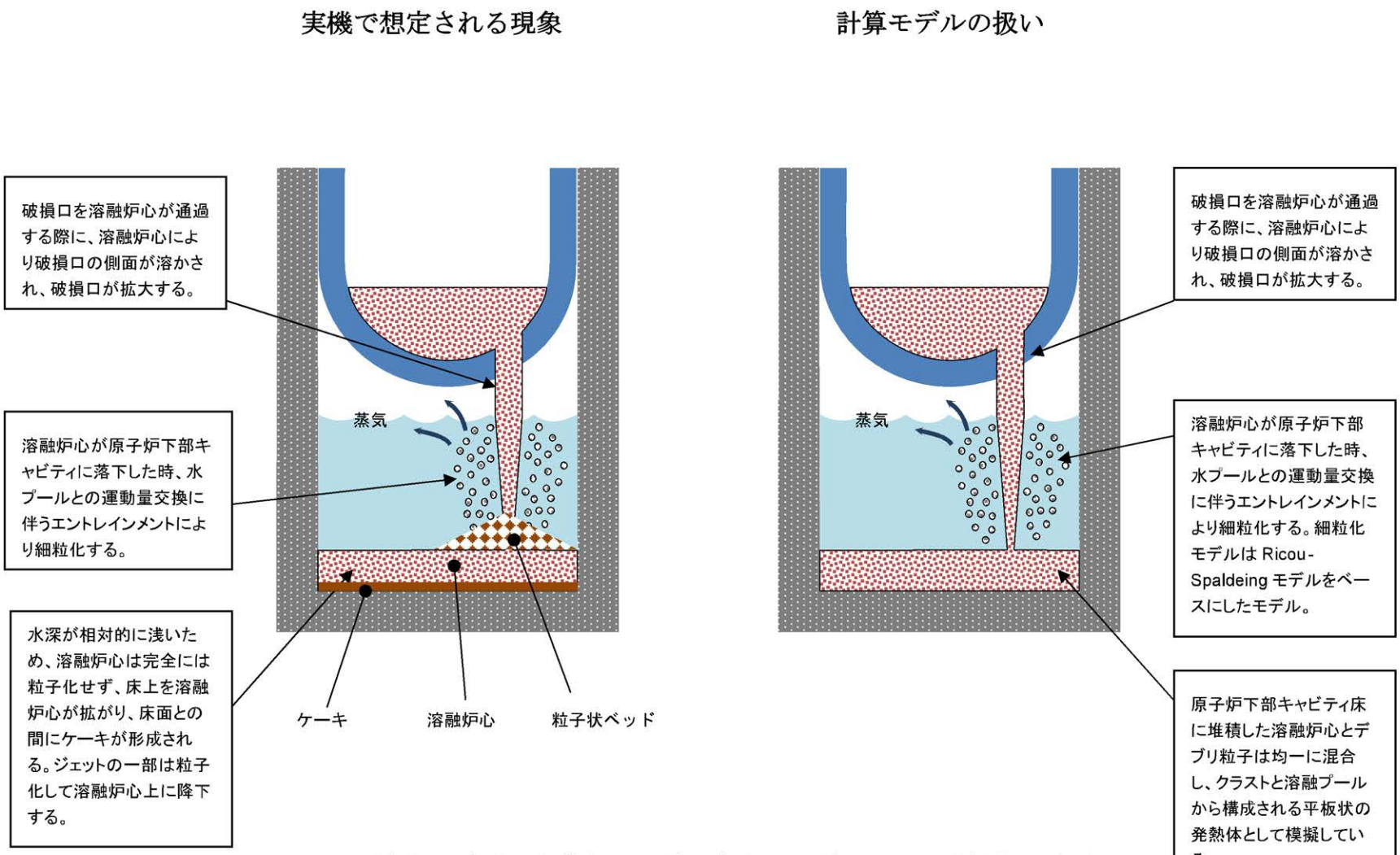


図 4-1　溶融炉心伝熱の想定される現象と解析上の取扱いとの比較概念図（1/2）
原子炉下部キャビティでの溶融炉心挙動

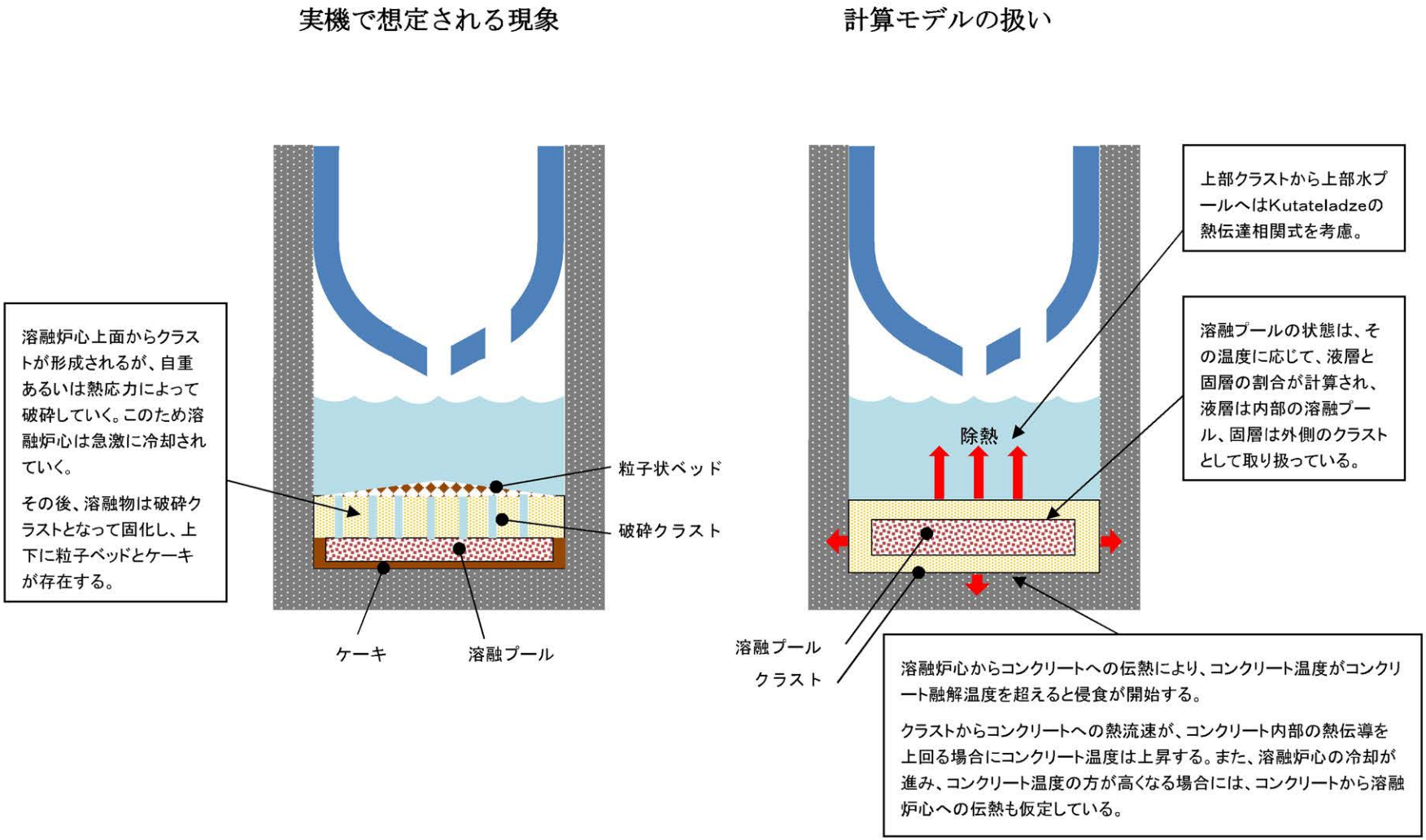


図 4-1　溶融炉心伝熱の想定される現象と解析上の取扱いとの比較概念図（2/2）
溶融炉心と冷却水及びコンクリートとの相互作用

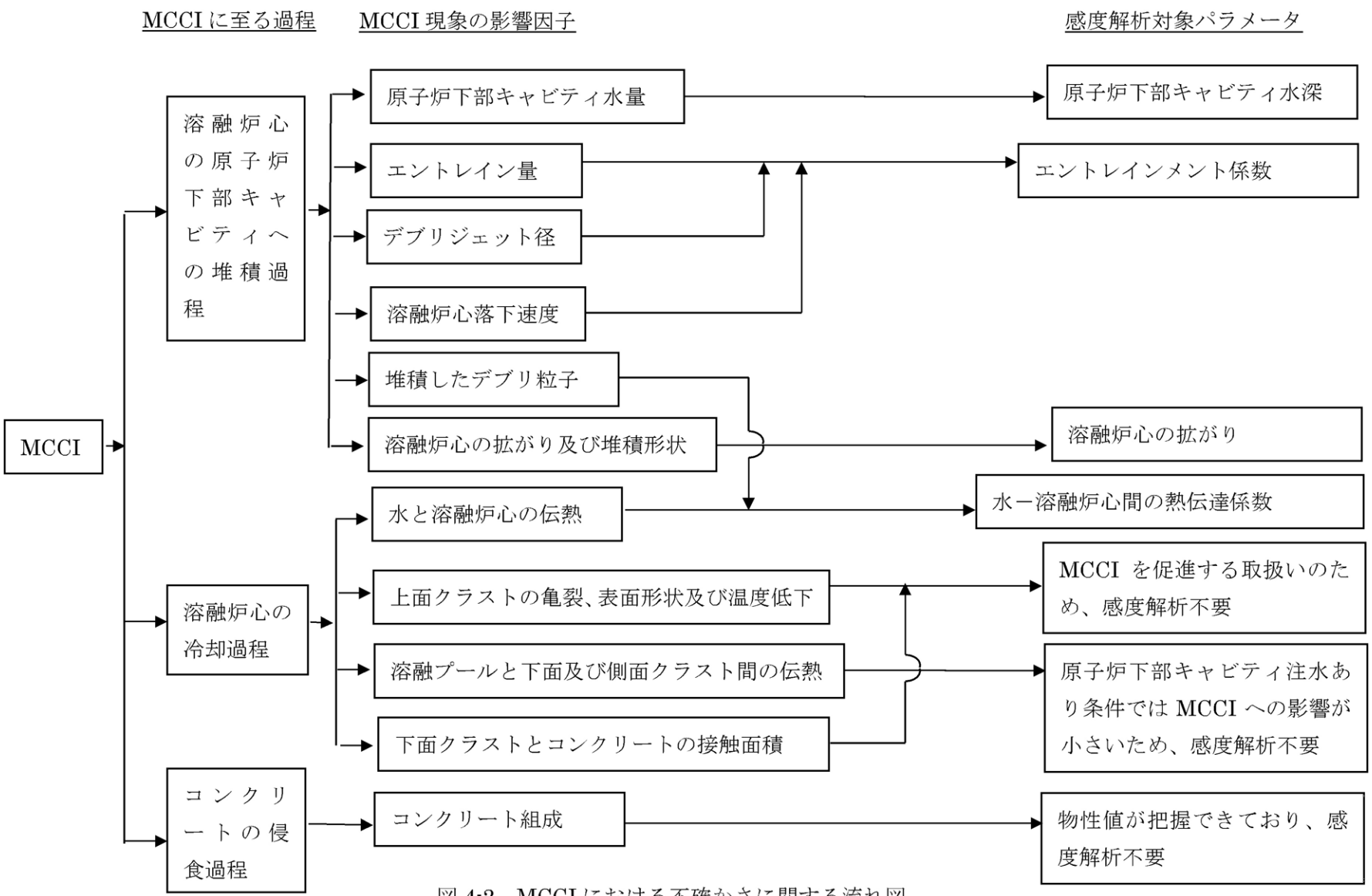
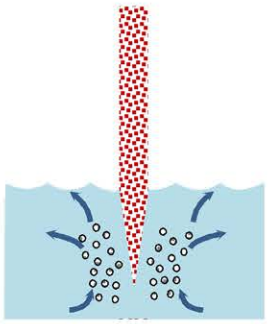
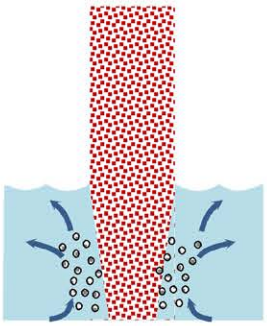


図 4-2　MCCI における不確かさに関する流れ図



(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

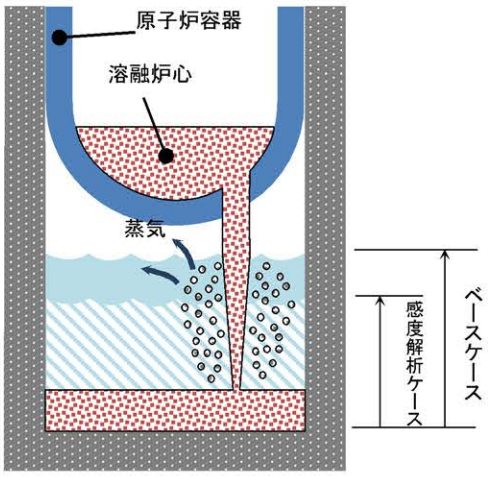
前章において抽出したパラメータに関して感度解析によりその影響程度を把握した。感度解析のベースケースは、3ループプラントの「大破断 LOCA＋ECCS 注入失敗＋CV スプレイ注入失敗」である。

（1）原子炉下部キャビティ水深

解析条件

ベースケースでは、炉心損傷検知後 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、原子炉下部キャビティへの注水も遅れ、原子炉下部キャビティ内での溶融炉心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	運転員等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、原子炉下部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原子炉下部キャビティ水深がベースケースに比べて約半分に減少する。しかしながら、原子炉容器が破損し、溶融炉心が原子炉下部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。

デブリジェットの径は原子炉容器破損口径に相当し、原子炉容器破損後に溶融炉心が原子炉下部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、その破損口から溶融炉心が原子炉下部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、溶融炉心による侵食により 40～60cm まで早期に拡大する。また、原子炉下部キャビティ水位は、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。原子炉下部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

原子炉下部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

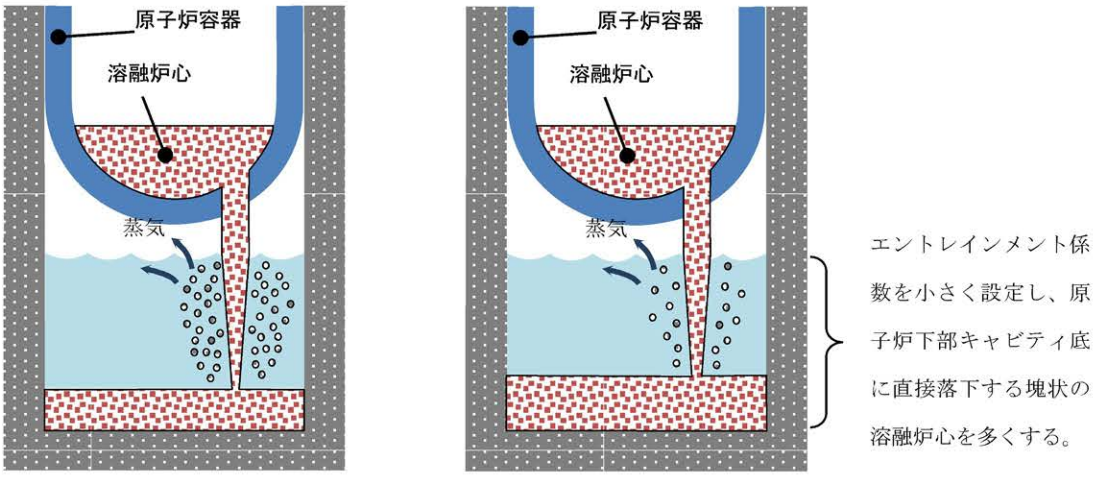
解析条件

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、原子炉下部キャビティ底に直接落下する塊状の溶融炉心を多くして、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、即ち、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、溶融炉心が原子炉下部キャビティへ落下する時点の特徴的な条件では、原子炉下部キャビティの水位は 1～2m、原子炉下部キャビティ内の冷却水のサブクール度は数十℃、雰囲気圧力は 0.2～0.3MPa（abs）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溶融炉心は一部であり、残りの大部分は連続相のまま原子炉下部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、ほとんどすべての溶融炉心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

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。

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、溶融炉心の過熱度が大きい場合には、冷却されずに原子炉下部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、溶融炉心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	□	当該変数推奨範囲の最確値
感度解析ケース	□	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

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。溶融炉心が原子炉下部キャビティに落下する時点（1.5 時間）での原子炉格納容器圧力の上昇は、感度解析ケースの方がわずかに小さいことから、溶融炉心の細粒化量が少なく、塊状のまま原子炉下部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。溶融炉心のエントレインメント割合を比較すると、ベースケースでは約 0.2 であるのに対して、感度解析ケースでは、約 0.1 となっている。したがって、溶融炉心のうち、大半は連続相として原子炉下部キャビティ床に堆積し、落下中

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。

に細粒化する溶融炉心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溶融炉心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、更に小さくなると考えられる。なお、ＭＡＡＰコードでは、細粒化された溶融炉心は連続相の溶融炉心と混合された状態で原子炉下部キャビティ床に堆積し、溶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。

溶融炉心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わずかに長く、溶融炉心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原子炉下部キャビティ床に到達した溶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、水と溶融炉心間の熱流束が約 1.3MW/m^2 の時間帯と約 0.5MW/m^2 の時間帯に分かれているのは、時間帯によって原子炉下部キャビティに落下した溶融炉心の保有熱が異なるためである。熱流束が大きい（約 1.3 MW/m^2）時間帯は、溶融炉心が多量に落下した後であり、その時間帯では、溶融炉心の保有熱は大きく、限界熱流束相当の熱流束が発生する。その後、溶融炉心が冷却、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、熱流束は約 0.5MW/m^2 まで小さくなる。ＭＡＡＰコードの解析モデルでは、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。溶融炉心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溶融炉心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－溶融炉心間の熱伝達係数」において考察する。

一方、溶融炉心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、溶融炉心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わずかに大きいが、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わずかであり、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、溶融炉心とコンクリートとの間の熱伝達については、基本的には溶融炉心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溶融炉心が落下した後に急激に上昇し、その後、溶融炉心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溶融炉心の温度が逆転する場合があり、そのときに溶融炉心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コードの解析モデルでは、溶融プールとクラス

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。溶融炉心とコンクリート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、ジェットの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、溶融炉心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－溶融炉心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、本事故シーケンスでは、溶融炉心に対するエントレイン割合が比較的小さいことにより、粒子状の溶融炉心からの除熱量が小さくなるためである。したがって、水－溶融炉心間の限界熱流束の感度としてはわず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）溶融炉心の拡がり面積

解析条件

溶融炉心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。溶融炉心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

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。