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

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....................3.3-12
4 不確かさに関する整理....................3.3-34
5 感度解析と評価....................3.3-45
6 まとめ....................3.3-73

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、スウェーデン王立工科大学で実施された 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。水プールに溶融物を落下させて溶融物の冷却性を確認した直接的な実験の実施例は無く、不均質に堆積させたデブリベッドの拡がりを確認した ANL のセルフレベリング実験がある。

以下、各実験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 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 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。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

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

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炉心とコンクリートの相互作用及び溶融炉心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

[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

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/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

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、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。

SWISS 実験と同様に、溶融物の上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により、コンクリートの侵食は継続する結果となっている。図 3.1-10 に実験でのコンクリート侵食の推移を示す。侵食速度は、SWISS実験の 1/3 程度であった。溶融物から水プールへの熱流束は、溶融時には 520kW/m^2 程度、凝固時には 200kW/m^2 程度であったと報告されている。

（５）MACE 実験

MACE 実験（Melt Attack and Coolabikity Experiment）は、米国電力研究所（EPRI）が主催する格納容器内溶融炉心冷却性に関する国際協力計画である。この実験では、溶融炉心が格納容器のコンクリート床に落下した後に、溶融炉心の上に注水する状況を模擬しており、大規模実験が含まれていることと、実機と同等の UO_2 及び ZrO_2 を主成分とする溶融炉心模擬物を用いて、さらに、直接通電加熱により崩壊熱の発生を模擬していることが特徴である。

実験装置の概要を図 3.1-11 に示す。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 3.1-2 に示すとおりである。M0 実験のみコンクリートの側壁で、その他は MgO が用いられている。

M0 実験後の溶融炉心模擬物の固化状況を図 3.1-12 に示す。冷却水の注水後に生成されたクラストが電極あるいは側壁に固定化されており、これによりクラストと

溶融物とが分離した。このため、溶融物の冷却効果が著しく低下し、コンクリート侵食が継続する結果となった。M1b 実験での溶融物から冷却水への熱流束の推移を図 3.1-13 に示す。注水直後の短期間は、高い熱流束となっており膜沸騰及び輻射熱伝達とコンクリート分解により発生した気体による溶融物の撹拌により効果的に冷却されていることが分かる。その後、安定なクラストが形成され、熱流束は低下するが、クラストに生じた亀裂等への浸水やクラスト開口部からの溶融物の噴出により冷却は継続している。

（６）COTELS 実験（テスト B/C）

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 3.1-14 に、試験条件及び結果の一覧を表 3.1-3 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事を想定し、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 0.02～0.4kg/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 3.1-15 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低いため、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 分でコンクリート上昇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。

一連の実験では、いずれもデブリによるコンクリートの侵食が生じているが、先行の SWISS、MACE、WETCOR とは異なり、コンクリート侵食は停止している。これは、アスペクト比が低く水による冷却の効果があったこと、壁面をコンクリートにしたためクラストの固定が発生せずコンクリートと溶融物の間に水が入り込み冷却されたこと、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、溶融物の下層にコンクリートが侵食され分解された際に残った砂礫層が生じたことにより、これが熱抵抗となりコンクリートへの伝熱が抑えられ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 200～700 kW/m^2 であった。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。

（７）FARO 実験

欧州 JRC（Joint Research Center）のイスプラ研究所おける実験であり、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 3.1-16 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 3.1-4 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 3.1-17 に、実験条件及び結果の一覧を表 3.1-4 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。

実験条件を表 3.1-5 に示す。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[4]

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 3.1-6 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。

図 3.1-18 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。

（１０）DEFOR-A 実験[5]

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、デブリベッドの形

[4] 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

[5] P. Kudinov and M. Davydov “PREDICTION OF MASS FRACTION OF AGGLOMERATED DEBRIS IN A LWR SEVERE ACCIDENT”, NURETH14-543

成挙動を調査する事を目的としている。DEFOR-A 実験はその計画の一つである。

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 3.1-7 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。

試験結果を、図 3.1-19 に示す。横軸がプール水深、縦軸が凝集割合である。ここで、デブリの凝集の概念図を図 3.1-20 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、文献[5]では KTH による DEFOR 実験に基づいた凝集のモデル化についても示されており、DEFOR A7、A9 の結果を再現できること、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。図 3.1-21 にモードマップを示すが、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、ＭＡＡＰ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。

（１１）CCI 実験

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 実験装置を図 3.1-22 に示す。実験装置中に、断面 50cm x 50cm、高さ 55cm のるつぼがあり、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 3.1-8 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。

試験結果のうち、時間対熱流束の結果を、図 3.1-23 に示す。珪岩質系コンクリートを使用している CCI-1, 3 では、初期の熱流束が限界熱流束に近い 1MW/m^2 程度の値となっている。これは、注水が開始された時点で上部クラストが形成されていることを示している。一方、CCI-2 では注水開始時点で熱流束は 3MW/m^2 程度まで達しており、これは CCI-2 実験では注水時点で上部クラストが形成されていないためであると考えられるが、5 分程度で 1MW/m^2 程度まで低下する。注水初期を除けば、熱流束は 250～650kW/m^2 程度で推移している。また、CCI-1 では溶融物の噴出が生じた時点で熱流束が 3MW/m^2 程度まで上昇している。

クラストの強度測定も行われており、CCI 実験により形成されたクラストの強度は、クラストが高密度に形成された場合よりも二桁程度低い事が示されている。

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 現象ついては、次の３つの段階、

① 溶融炉心の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、溶融物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、溶融物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、溶融物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 に達すると考えられるため、水深が数 m 確保されていても、細粒化する炉心デブリは一部にとどまり、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可能性がある。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、上記のように溶融物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。

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/m^2 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/m^2 を超える高い熱流束が観測されている。

○COTELS 実験においては、溶融物のアスペクト比（高さと面積の比）に着目した評価も行っており、高いアスペクト比（厚く堆積する場合）では、溶融物から上面の水プールへの熱流束は高くなる傾向があると述べている。

○CCI 実験では、注水初期には 1MW/m^2 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/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 程度の熱流束となっている。

○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、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。

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。

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_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

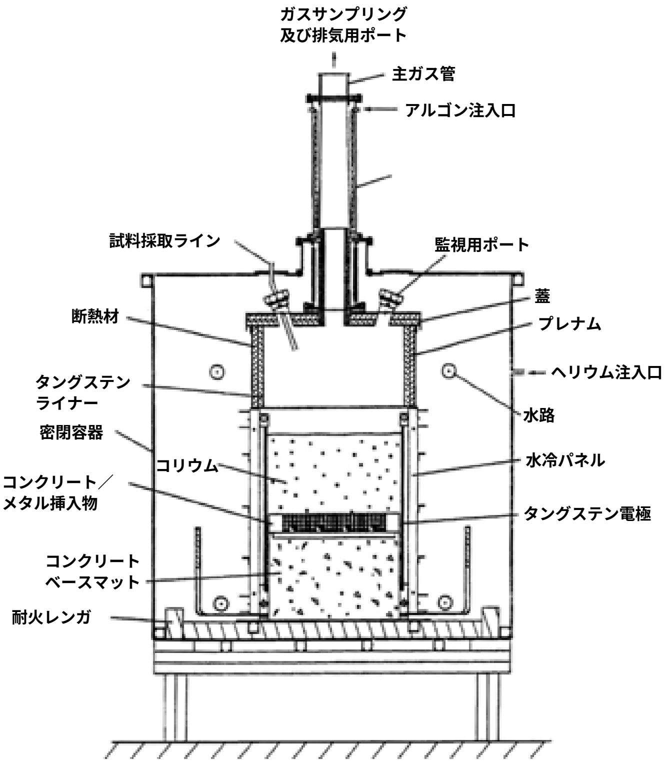
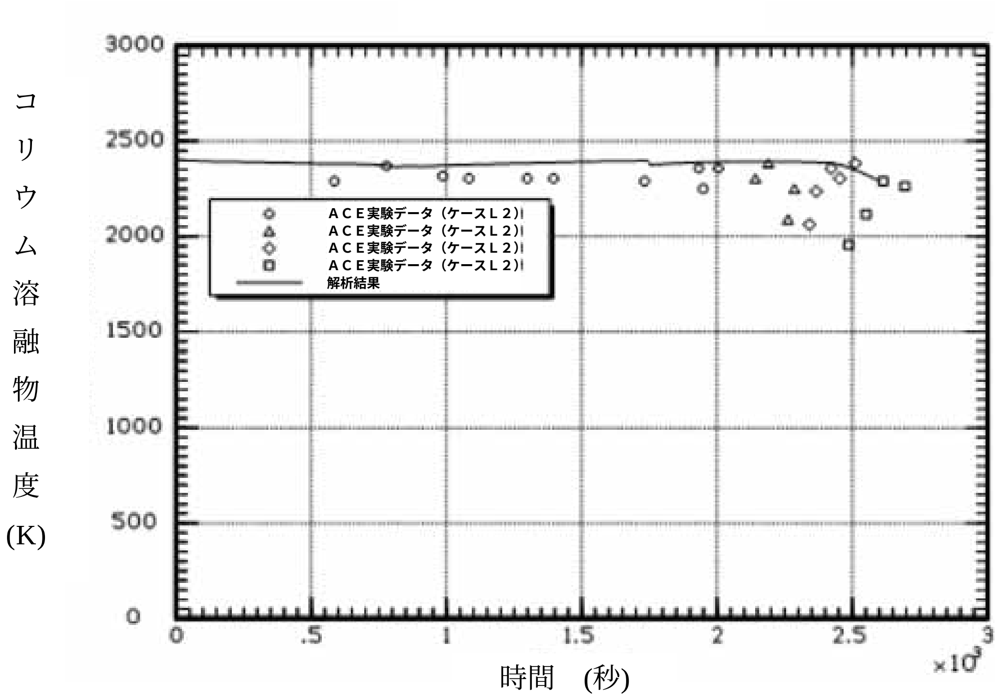
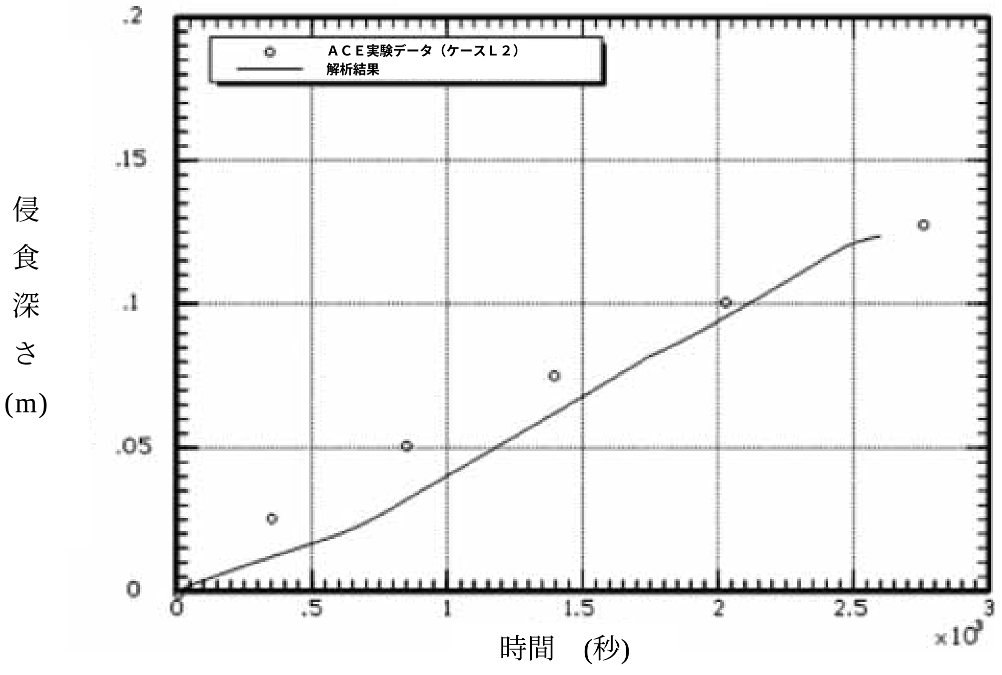


図 3.1-1　ACE 実験装置



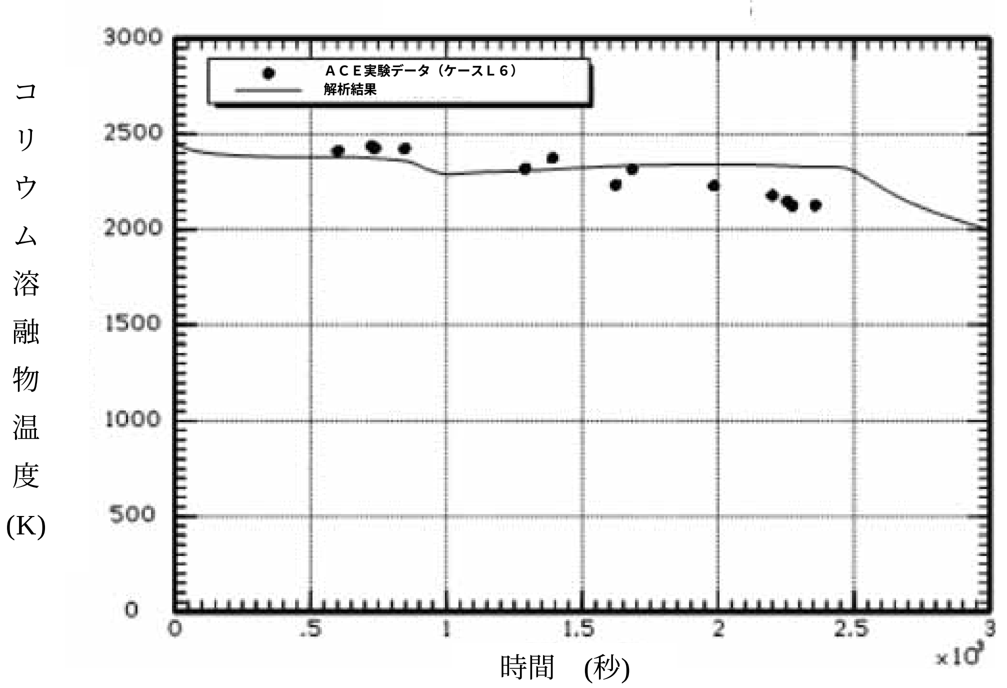


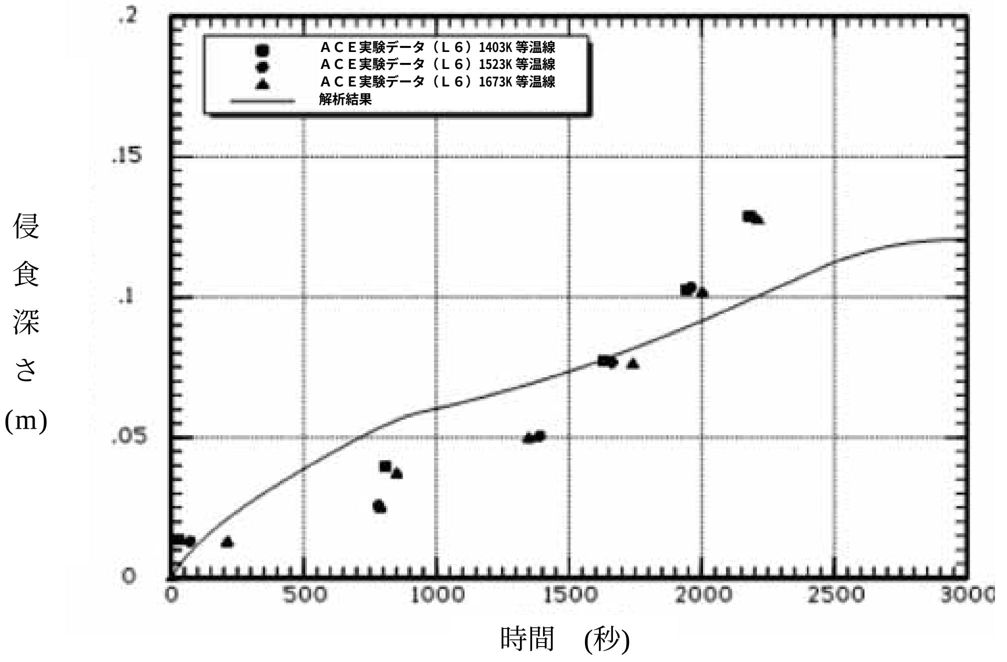
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-2　ACE 実験（ケース L2）

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



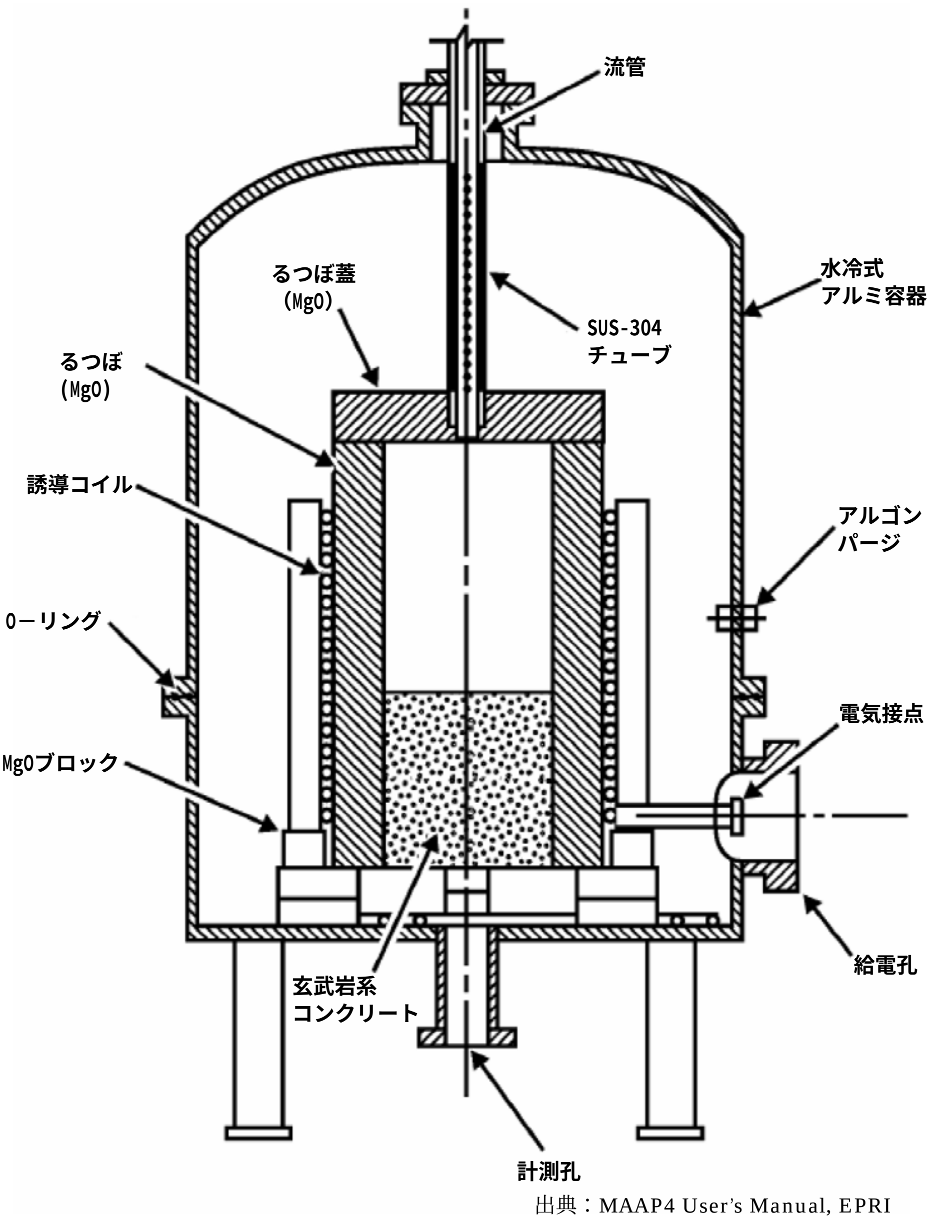


出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-3　ACE 実験（ケース L6）

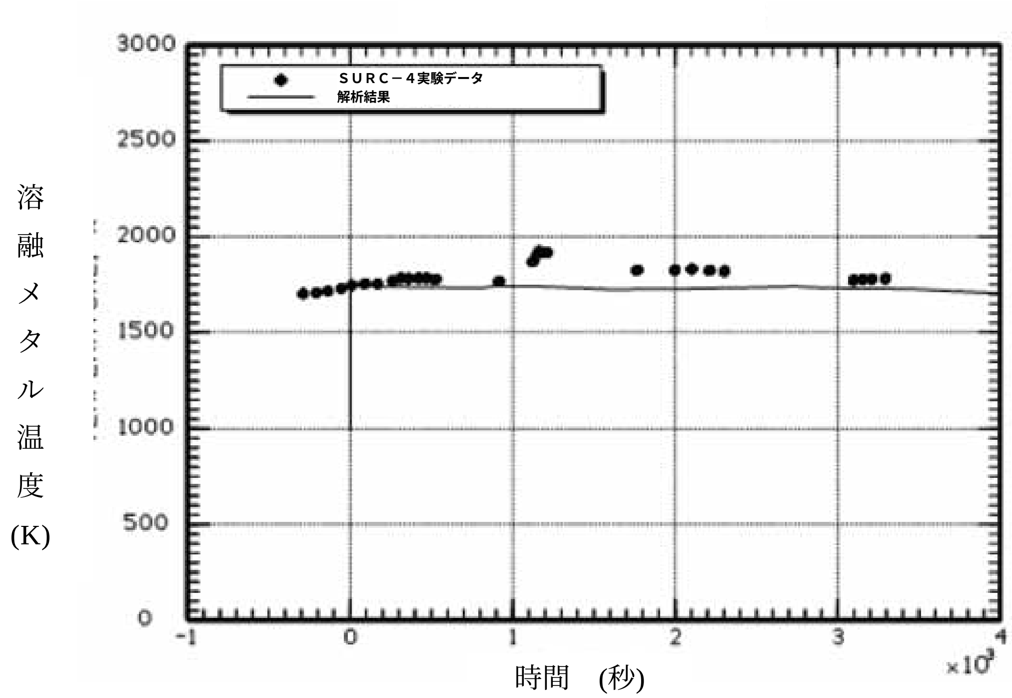
コリウム　　：PWR コリウム溶融物（部分酸化、制御棒材質を含む）

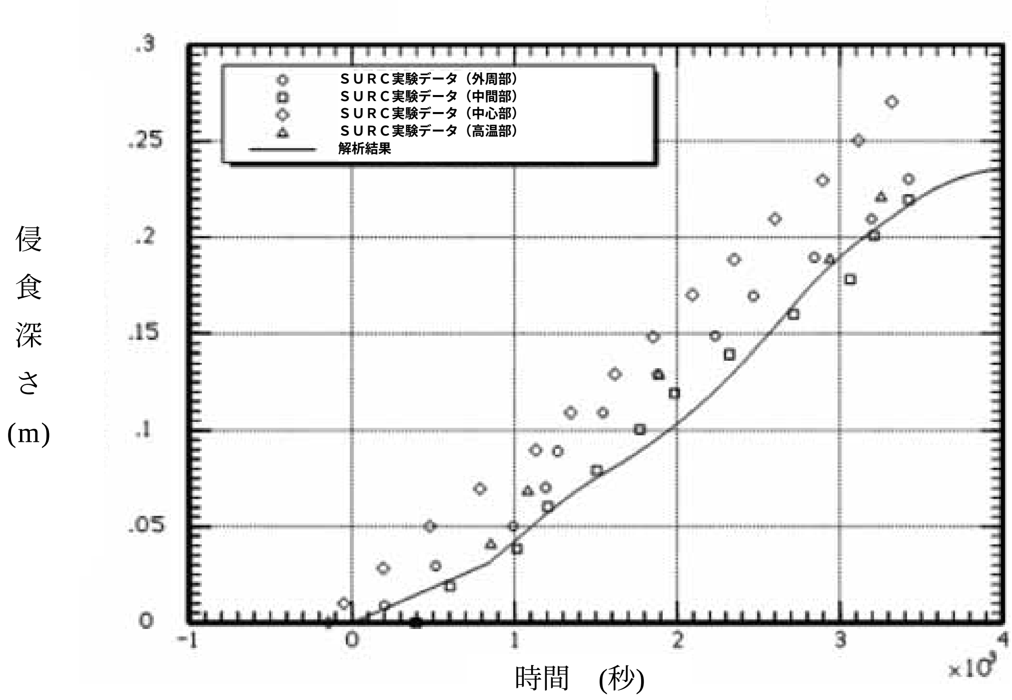
コンクリート：ケイ土系コンクリート



出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-4　SURC－4 実験：実験装置





出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

図 3.1-5　SURC－4 実験

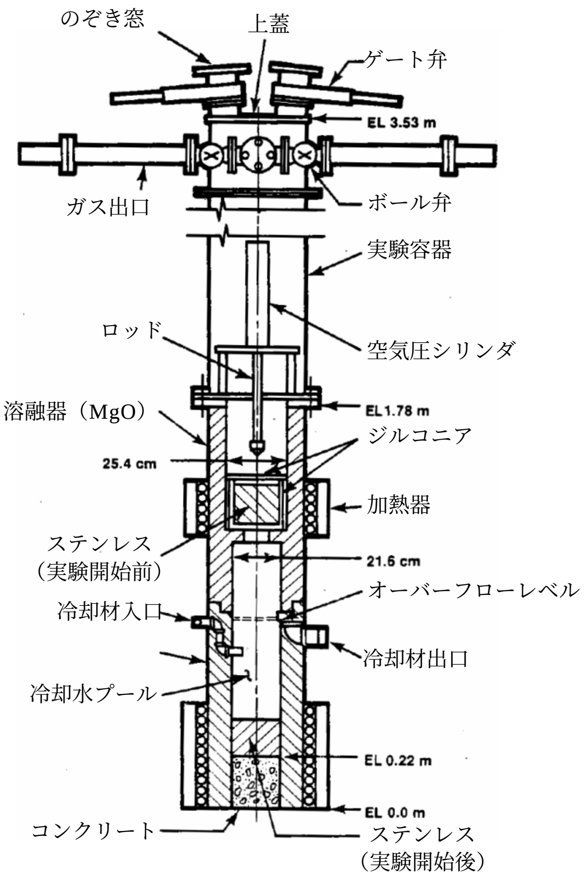
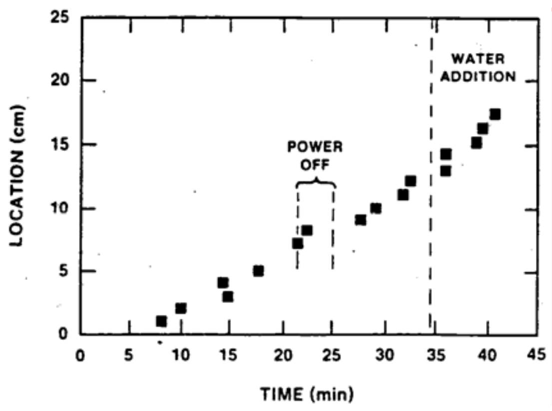


図 3.1-6　SWISS 実験装置概要



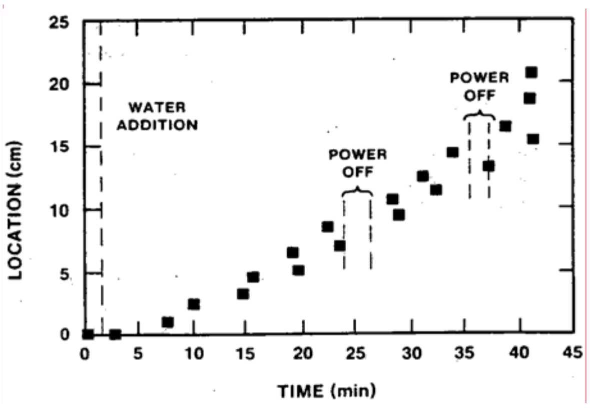


図 3.1-7 SWISS-1 及び SWISS-2 実験結果
（コンクリート温度が 1600K に到達した位置）

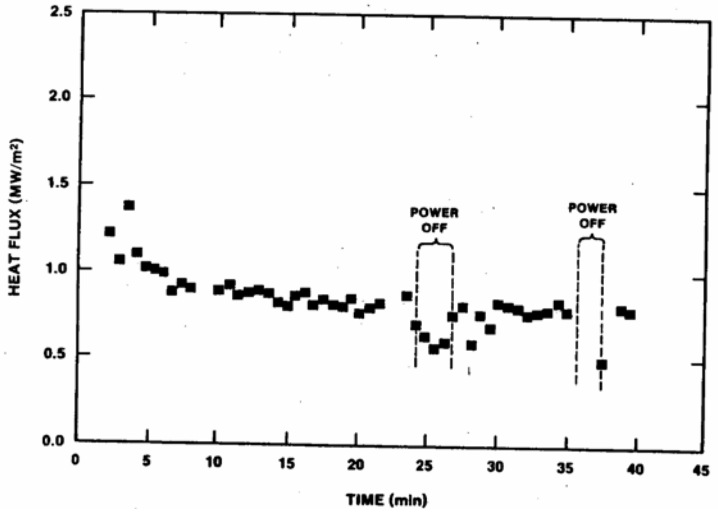


図 3.1-8 SWISS-2 実験結果（溶融物から水プールへの熱流束）

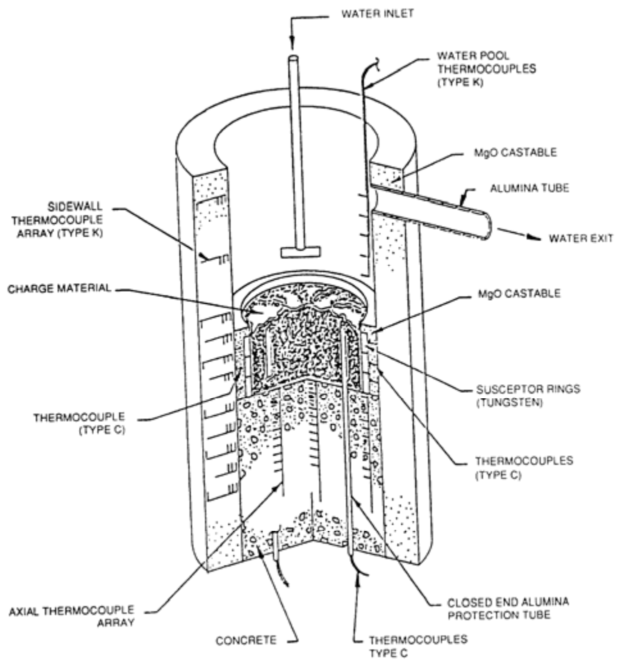


図 3.1-9 WETCOR 実験装置

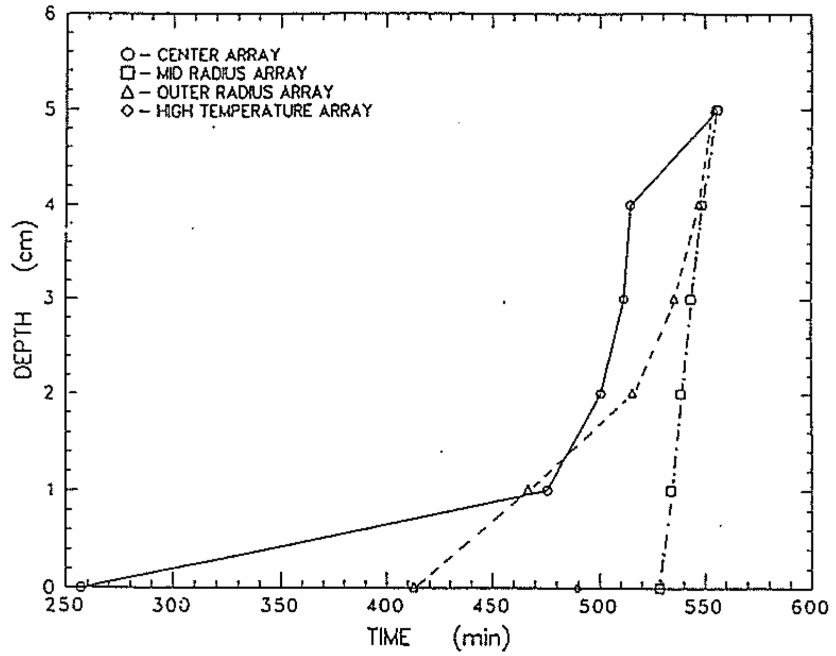


図 3.1-10 WETCOR 実験結果（コンクリート侵食推移）

表 3.1-2　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

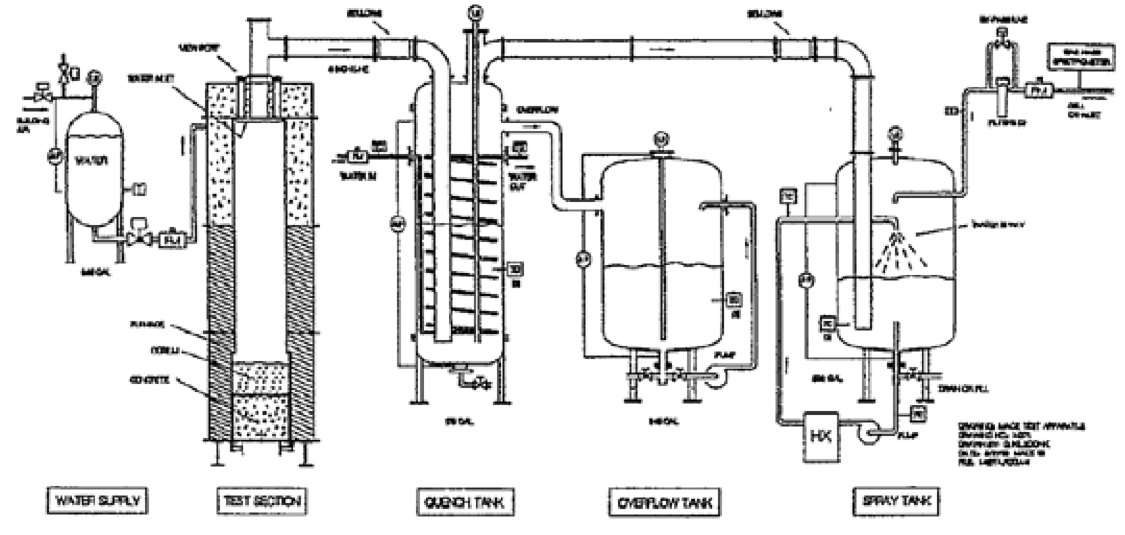


図 3.1-11 MACE 実験装置

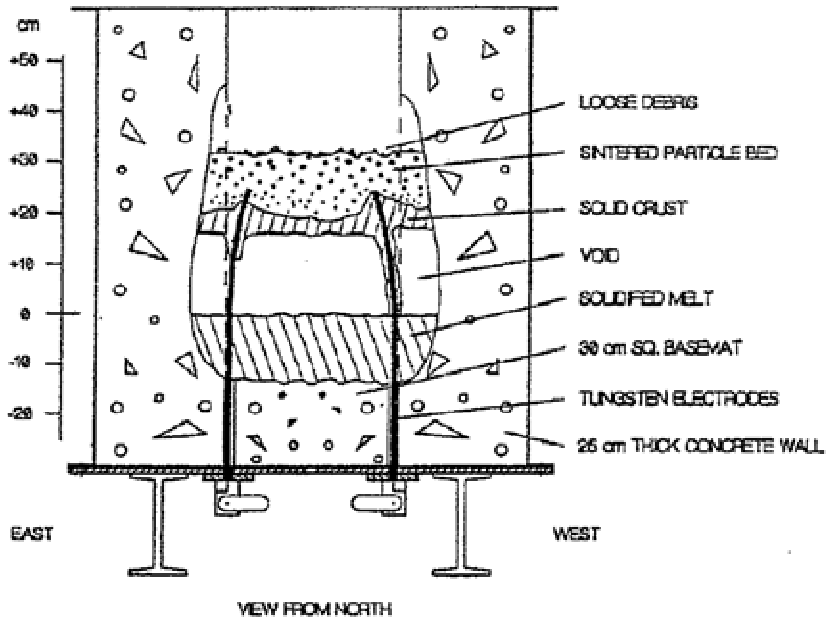


図 3.1-12 MACE-M0 実験後の溶融炉心模擬物の状況

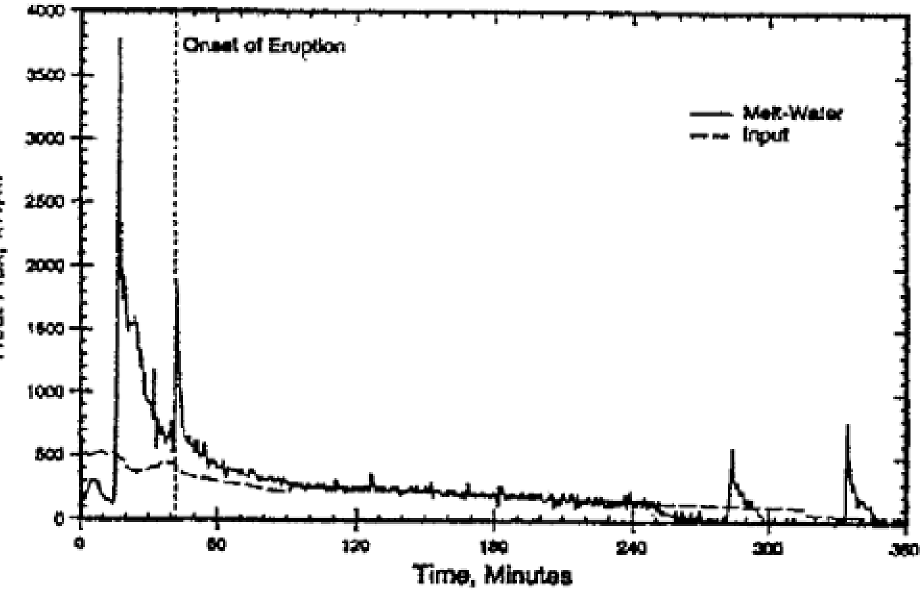
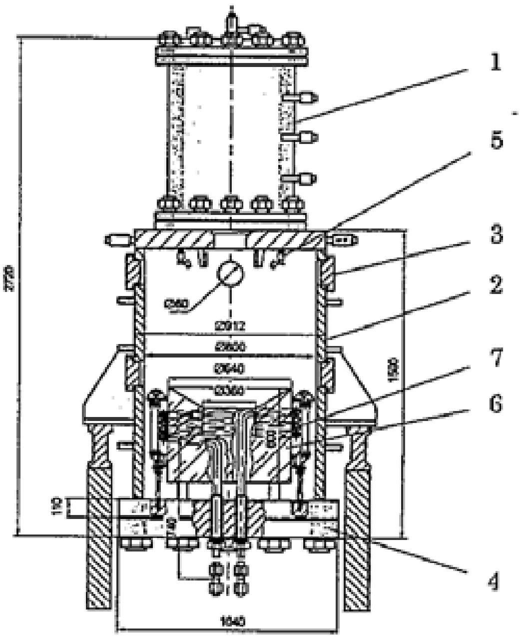


図 3.1-13 MACE-M1b 実験における溶融炉心模擬物から水プールへの熱流束

表 3.1-3 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	Jet	Spray
	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											
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：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 3.1-14 COTELS（B/C）実験装置

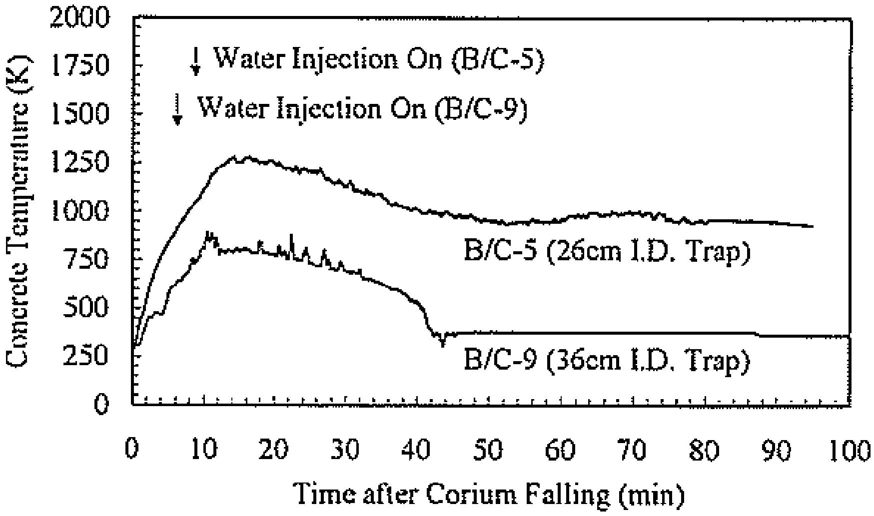


図 3.1-15　COTELS（B/C）実験におけるコンクリート温度挙動

表 3.1-4　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%UO_2＋20%ZrO_2、0.77 の場合の組成は 77%UO_2＋19%ZrO_2＋4%Zr。

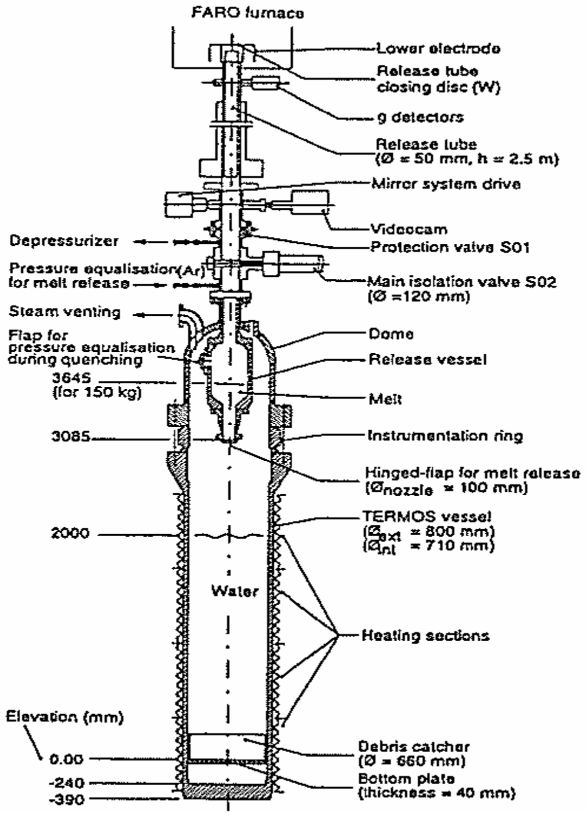


図 3.1-16　FARO 実験装置

表 3.1-5　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	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 UO_2：55wt%、Zr：25wt%、ZrO_2：5wt%、SS：15wt%の混合物

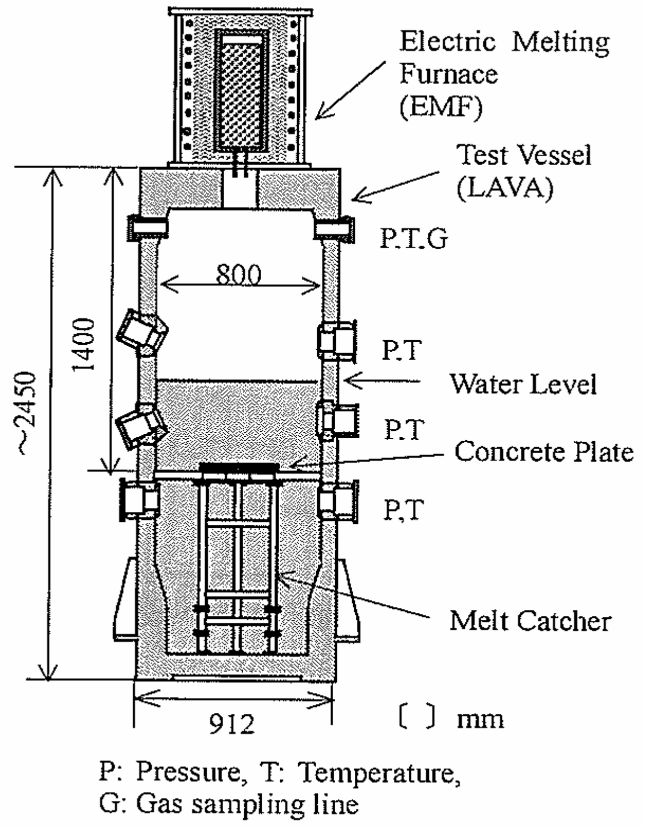


図 3.1-17　COTELS（A）実験装置

表 3.1-6　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 +μ Cu	15	9.2	6.0	7.6	7.4	···
5	29.2	210-1000 +μ Cu	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°

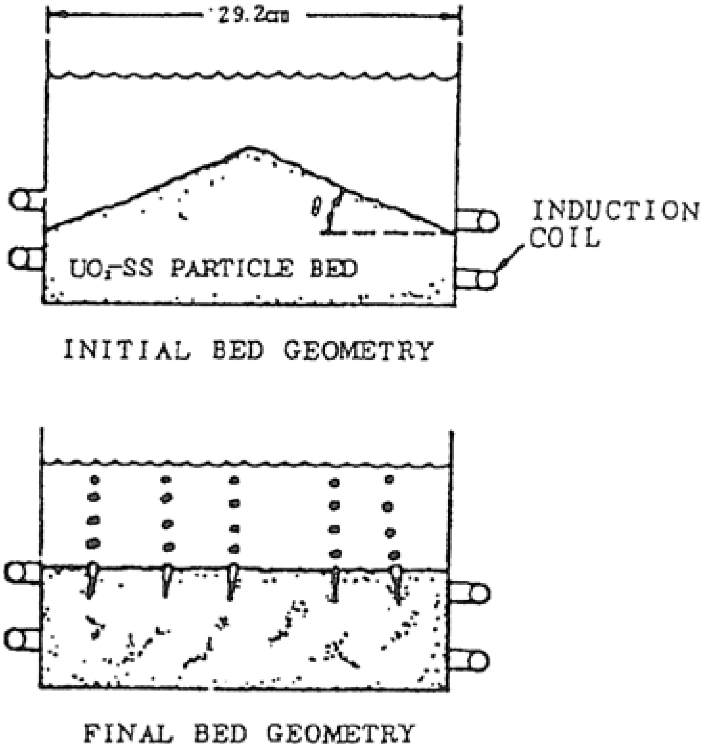


図 3.1-18　セルフレベリング実験におけるデブリベッド概念

表 3.1-7　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

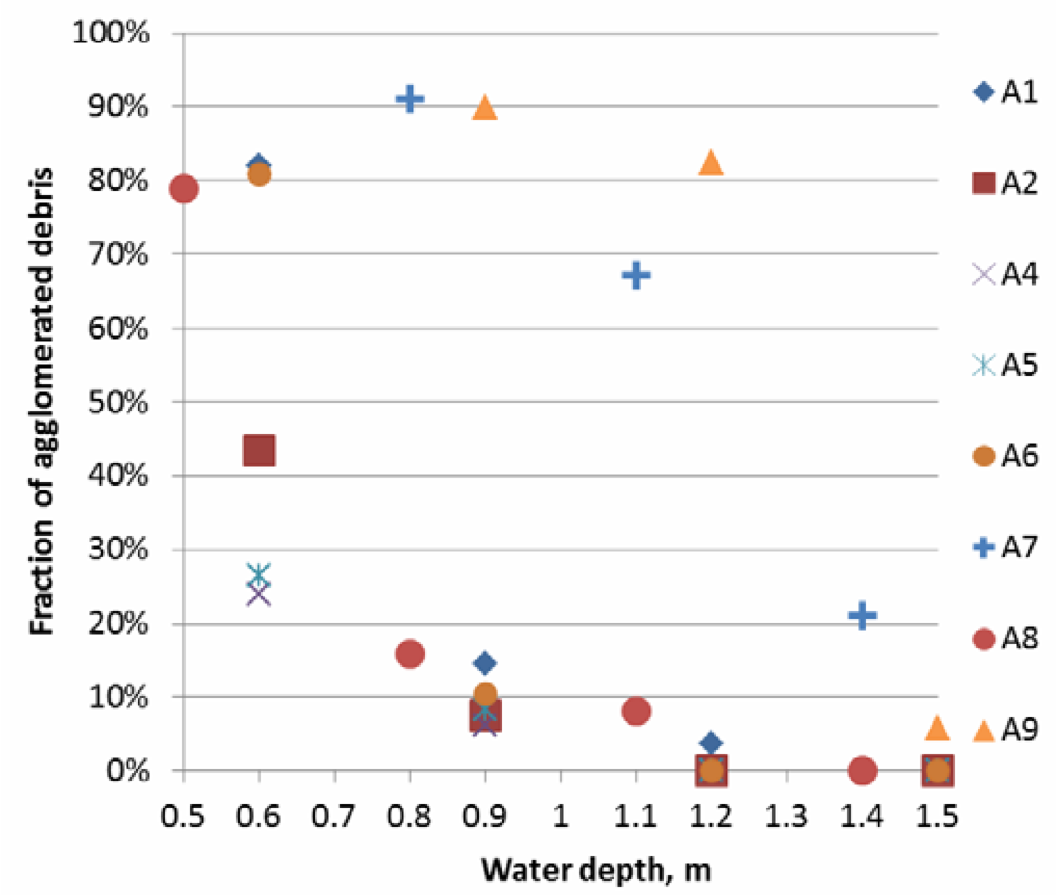


図 3.1-19　DEFOR-A 実験結果

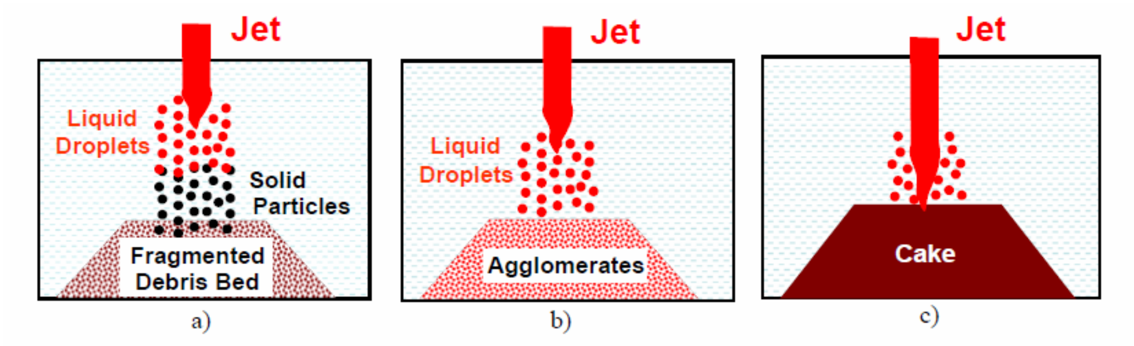


図 3.1-20　 DEFOR 実験における溶融物凝集の概念図

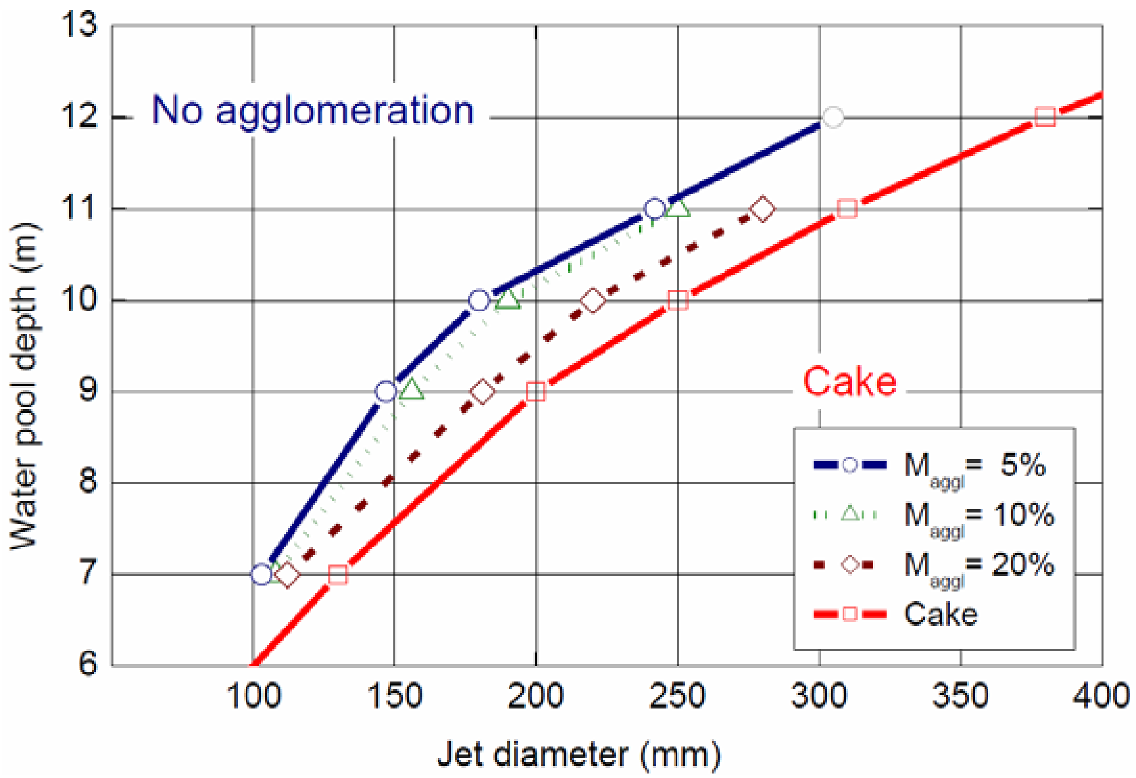


図 3.1-21　 KTH による凝集モードマップ

表 3.1-8　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

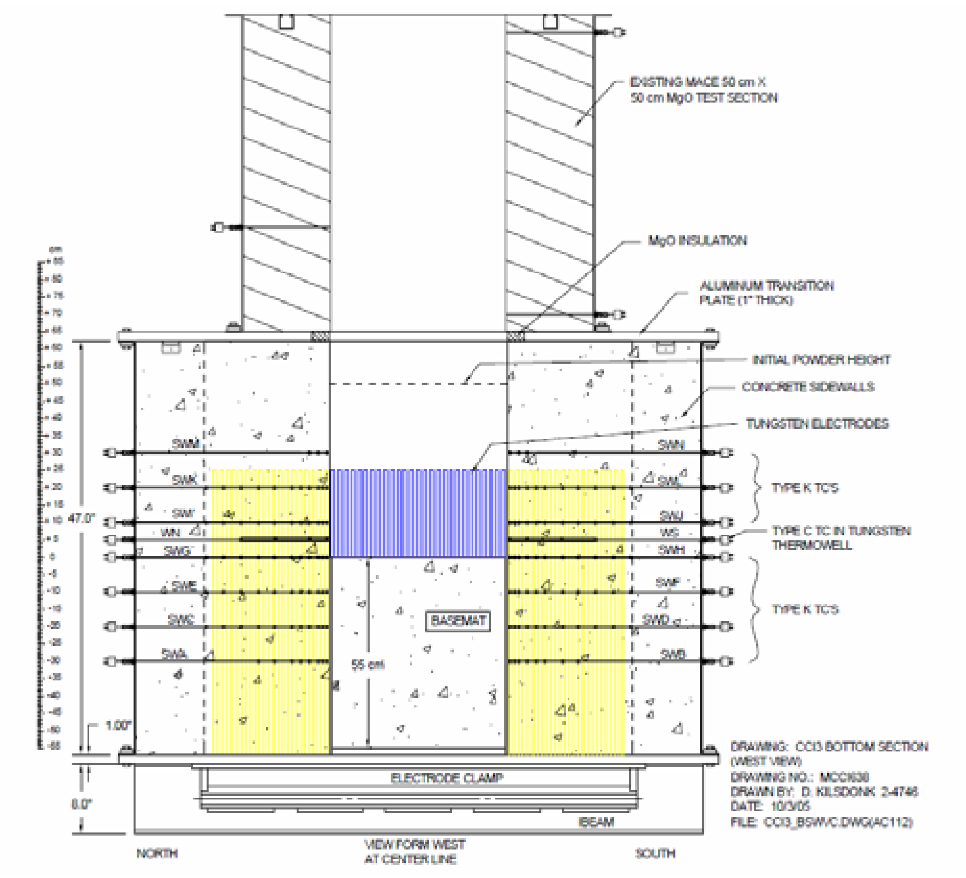


図 3.1-22　CCI 実験装置

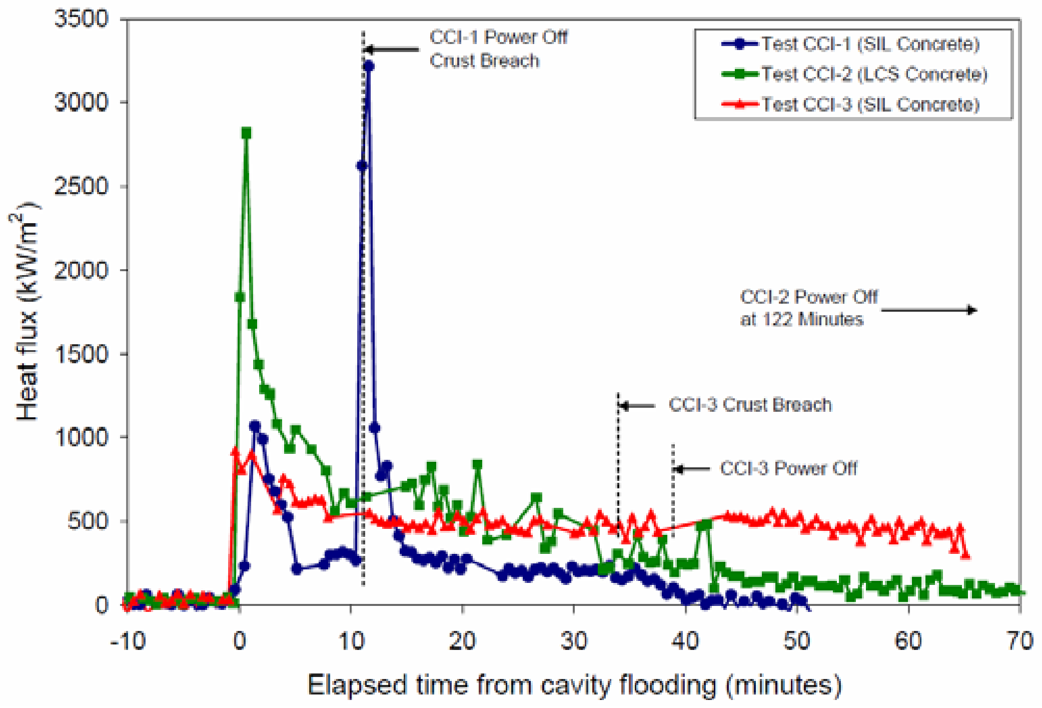


図 3.1-23　CCI 実験における水-デブリ間の熱流束

4 不確かさに関する整理

前述のとおり 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。コンクリート侵食に至る過程は、

① 溶融炉心の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 4-1 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。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。

<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、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。

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、水面下では、デブリジェットの細粒化が進み、逆円錐の形状となる。ここで、落下速度など、デブリジェット径以外の条件が同じであれば、ジェット径によらず円錐の傾きは同じであるため、初期のジェット径が大きい場合、デブリジェットは細粒化されずにキャビティ床面に達する割合が大きくなる（図 4-3（a））。反対に、初期デブリジェット径が小さい場合、細粒化されずにキャビティ床面に到達する割合が小さくなる。（図 4-3（b））。

以上より、デブリジェット径の不確かさは、細粒化量の不確かさとして整理することができる。

デブリ落下速度については、速度が速い場合に細粒化も促進されると考えられるため、デブリ落下速度と細粒化量の間には相関がある。そのため、デブリ落下速度の不確かさは、細粒化量の不確かさとして整理できる。

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。MAAP では、エントレインメント係数E_0は、数値として取り扱うことができる。有効性評価の解析で

は、エントレインメント係数は FCI の大規模実験に基づく値を使用しており妥当であると考えられるが、係数の不確かさの影響を把握する目的から、その感度を確認する。

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。また、山状に堆積する可能性については、「溶融炉心のキャビティ床面での拡がり」の中で整理する。

（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、π/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）で実施された溶融炉心とコンクリートの相互作用及び溶融炉心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

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。

溶融プールと炉心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

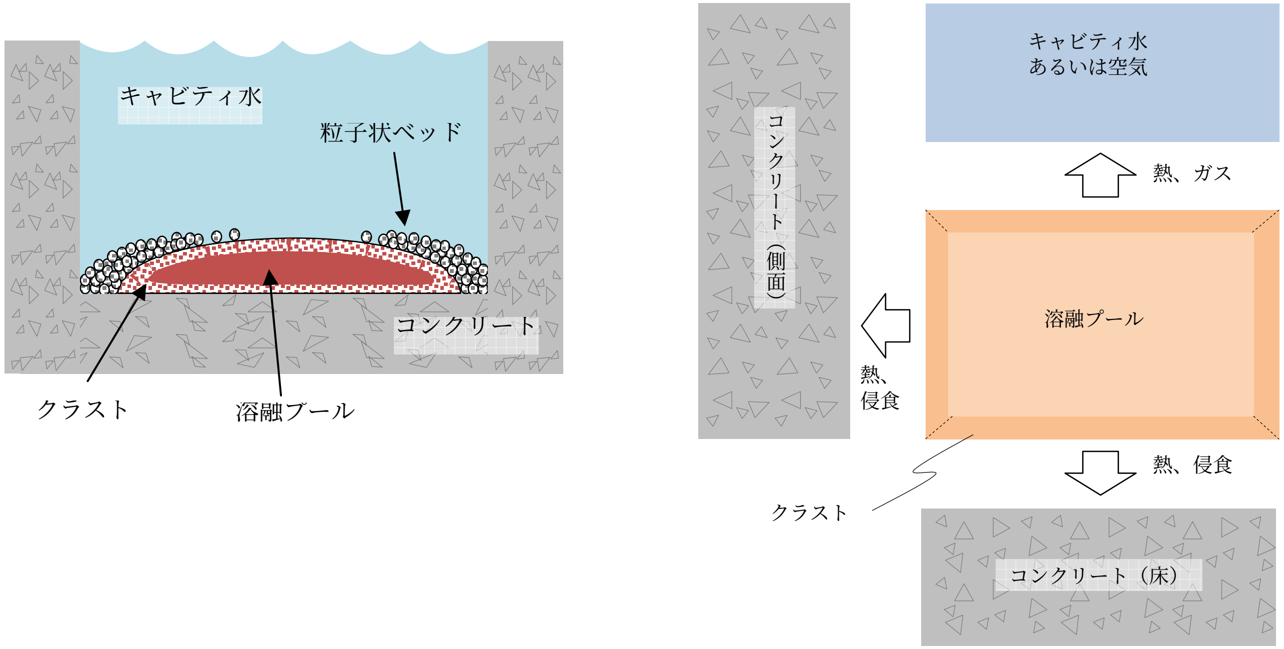
コンクリートには主に玄武岩系のコンクリートと石灰岩系のコンクリートがある。コンクリート組成が異なると、コンクリート侵食挙動にも違いが生じる。玄武岩系のコンクリートの特徴は Si の含有量が多い。一方、石灰岩系のコンクリートの特徴は Ca、CO2 が比較的多く含まれていることである。しかしながら、コンクリート組成については、物性値が把握できており、不確かさに対する感度解析は不要である。

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ため、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。	水ー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	落下点を中心に水中を山状に堆積すると想定される。粒子状炉心デブリはキャビティ床をセルフレベリングすると想定される。	床面積全面に一様に拡がるとして、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
水と溶融炉心の伝熱	実機スケールでは、溶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、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－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、溶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
溶融プールと下面・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。	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



想定される現象　　　　解析上の取り扱い

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

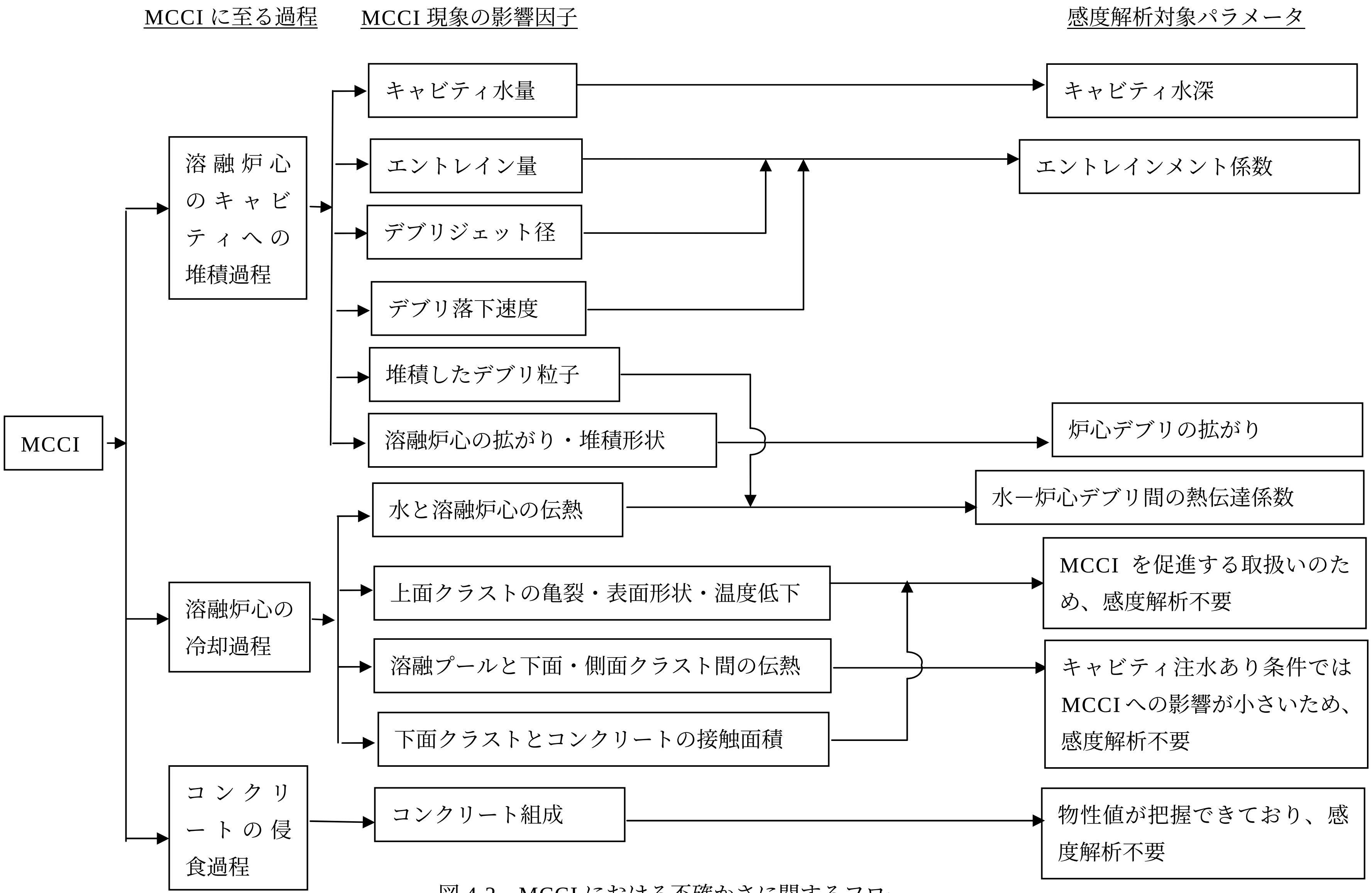
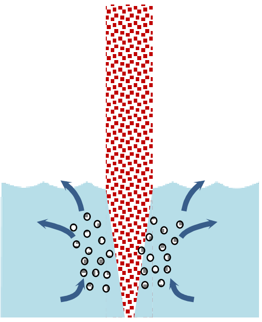
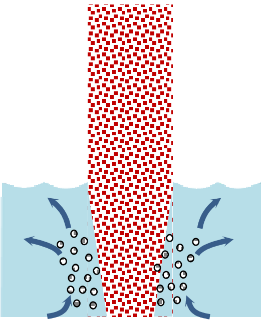


図 4-2　MCCI における不確かさに関するフロー

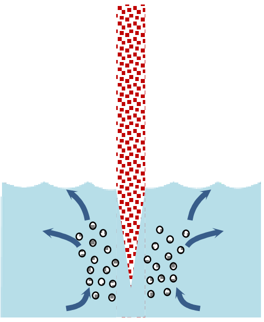


ベースケース



(a)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。



(b)デブリジェット径が
小さい場合

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

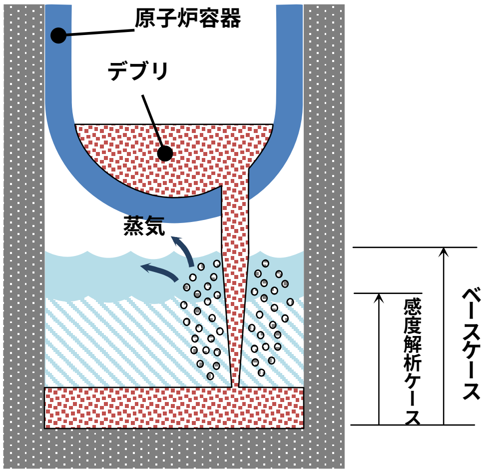
前章において抽出したパラメータに関して感度解析によりその影響程度を把握した。感度解析のベースケースは、3ループプラントの「大破断 LOCA＋ECCS 注入失敗＋CV スプレイ注入失敗」である。

（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い。

評価

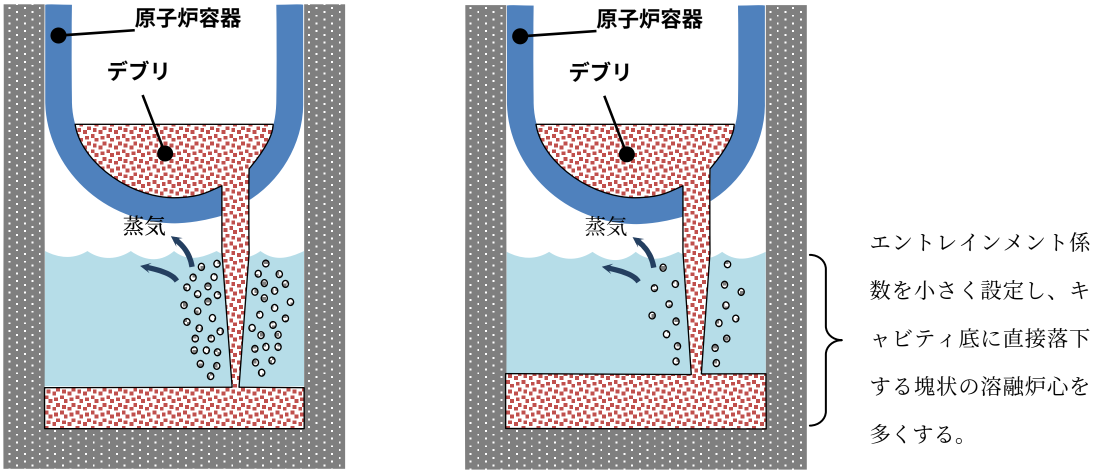
キャビティ水深のコンクリート侵食に対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

（2）Ricou-Spalding のエントレインメント係数

<u>解析条件</u>

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、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、溶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溶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	□	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 5-2-1～5-2-9 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。

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。

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（1.3 MW/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が、長時間継続することはないため、コンクリートの侵食量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。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、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。炉心デブリ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。

評価

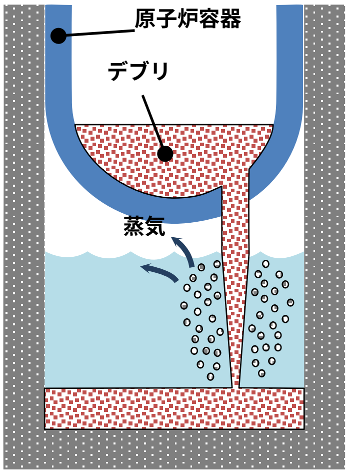
エントレインメント割合のコンクリート侵食に対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価の結果に与える影響は小さいと言える。

（３）炉心デブリの拡がり面積

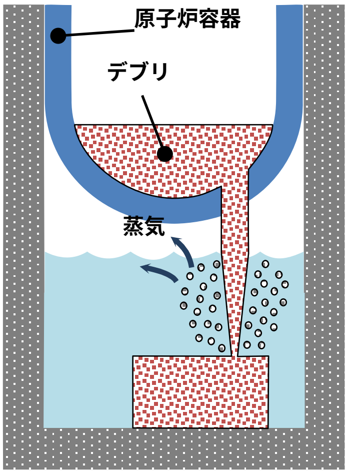
解析条件

炉心デブリの拡がり面積には不確実さがあり、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り、コンクリート侵食が生じる可能性がある。拡がり面積は、ベースケースではキャビティ区画床全面に拡がるとして床面積設計値を設定しているが、感度解析として床面積を 0.5 倍とする。

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 1/2	拡がり面積が小さい場合には熱流束が大きくなることからキャビティ区画の 1/2 に拡がると設定



ベースケース



感度解析ケース

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。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。

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、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 1/2 としたことで、炉心デブリと水の接触が小さくなり、熱流束のピーク値は限界熱流束に制限されることから、炉心デブリの除熱量が小さくなり、炉心デブリの冷却に時間を要しているためである。

また、炉心デブリとコンクリートの熱流束についても、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、コンクリートへの熱流束も低下が遅くなっているものの、その時間は短く、早期に低下することから、コンクリート侵食は僅かに深くなる程度である。

評価

炉心デブリ拡がり面積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。

（４）水-炉心デブリ間の熱伝達係数

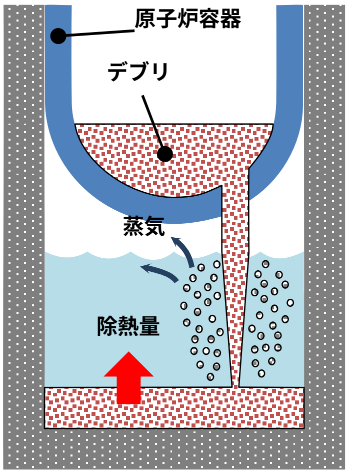
解析条件

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。WETCOR 実験、CCI 実験では、炉心デブリが高温の場合には、水と炉心デブリ間で高い熱流束が観測され、また、CCI 実験では溶融物の噴出が生じて熱流束が 3MW/m^2 程度まで上昇することが観測された。また、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[6]で示されており、高温の炉心デブリと上面水プールが直接接触して、高い熱流束が生じると判断できる。したがって、ベースケースの想定は実現象をよく模擬しているといえる。感度解析ケースでは、水と炉心デブリの熱伝達が促進されずコンクリート侵食に対して厳しくなるよう、0.2MW/m^2 に相当する値を設定している。ここで、0.2MW/m^2 は、COTELS 実験においてクラストが形成された後の熱流束値であり、限界熱流束よりも低い領域での熱伝達となっている。したがって、感度解析の想定は炉心デブリが高温の状態のときの水と炉心デブリの熱伝達を非常に小さく評価したものとなっている。

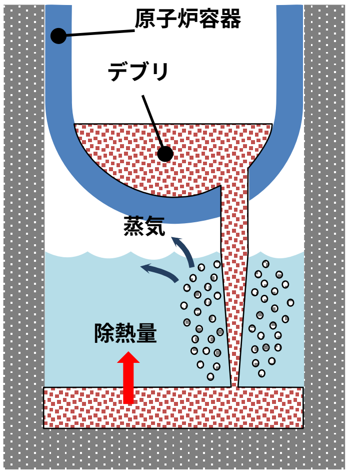
項　目	Kutateladze 係数	設定根拠
ベースケース	0.1（0.8 MW/m^2 相当 ^(注)^）	水による冷却を伴ったデブリとコンクリートの相互作用に関する実験に基づく値
感度解析ケース	0.025（0.2 MW/m^2 相当 ^(注)^）	COTELS 実験でクラスト形成後の熱流束値

（注）　大気圧条件

[6] 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)



ベースケース



感度解析ケース

解析結果

図 5-4-1～5-4-9 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。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。

炉心デブリと水の熱流束について、感度解析ケースでは 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限界熱流束での熱伝達が維持され、概ね一定の熱流束が継続している。一方、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いる。また、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量はベースケースに比べて増加したものの、約 20cm 程度である。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。

コンクリート侵食による水素濃度の増加については、格納容器内のドライ換算水素濃度は 3%程度増加し、約 8%となるが、再循環ユニットの除熱量への影響は別途評価している不確かさの範囲に含まれる。また、コンクリートの溶融量については、25ton 程度であり、コンクリート以外の炉心デブリの数分の 1 程度である。コンクリート侵食時に発生する水蒸気や二酸化炭素は溶融炉心デブリの中で化学反応を起こ

し、水素や一酸化炭素を生成する。
以上から、Kutateladze 係数を変化させることで、炉心デブリの冷却性は低下し、係数をベースケースの１／４に低下させた場合、コンクリート侵食深さは約 20cm 程度となる。

評価

ＭＡＡＰでは、溶融プール上面への粒子デブリの形成や溶融プール上面のクラスト亀裂への浸水などの詳細な模擬は行っていないため、水・炉心デブリ間の限界熱流束を有効性評価の 1/4 程度まで下げることで、MCCI 実験で観測された熱流束を模擬した場合の感度解析を行い、侵食量が約 20cm となる結果であった。ただし、この解析では限界熱流束を一様に下げるように作用し、初期に高温の炉心デブリが水と接触する場合においても限界熱流束を小さく評価するものである。今回調査した実験においても、初期には高い熱流束（500～1,000kW/m^2）が観測されていることからも、非常に厳しい条件である。したがって、実際には上記のような侵食には至ることはないものと考えられる。
なお、コンクリート侵食による水素濃度の増加については、20cm の侵食量に対して、水素濃度（ドライ換算）の増加は 3%程度であったことから、有意なコンクリート侵食を伴う場合には、原子炉容器内で水素発生との重ね合わせた評価が必要である。

「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。」

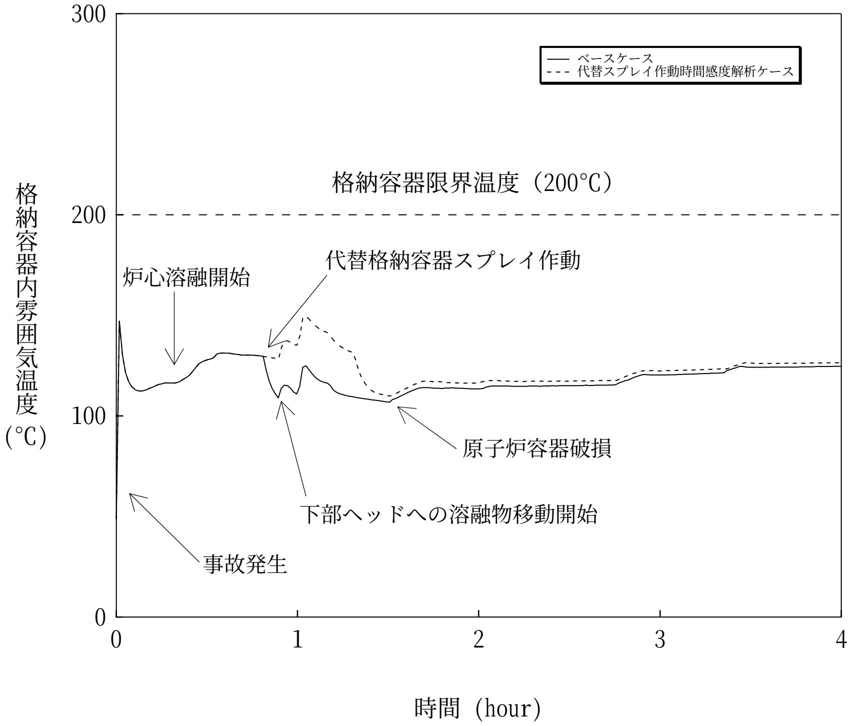


図 5-1-1 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（１）

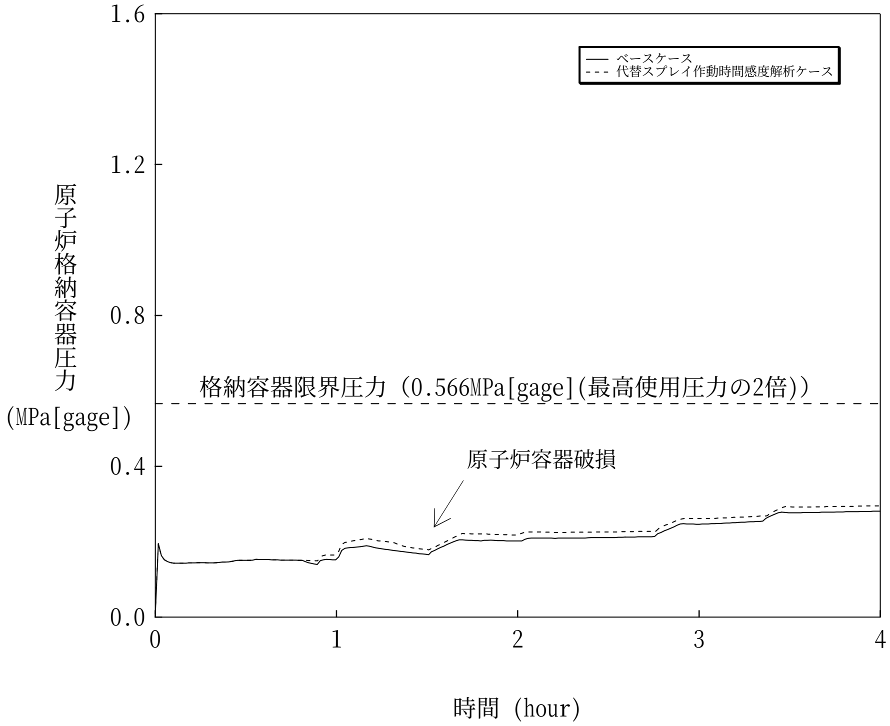


図 5-1-2 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（２）

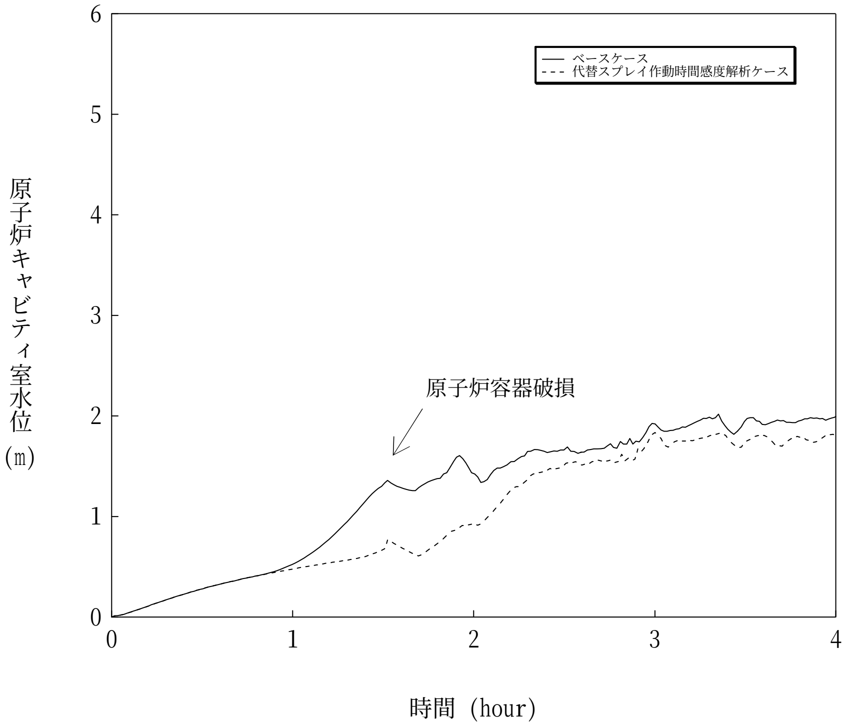


図 5-1-3 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（３）

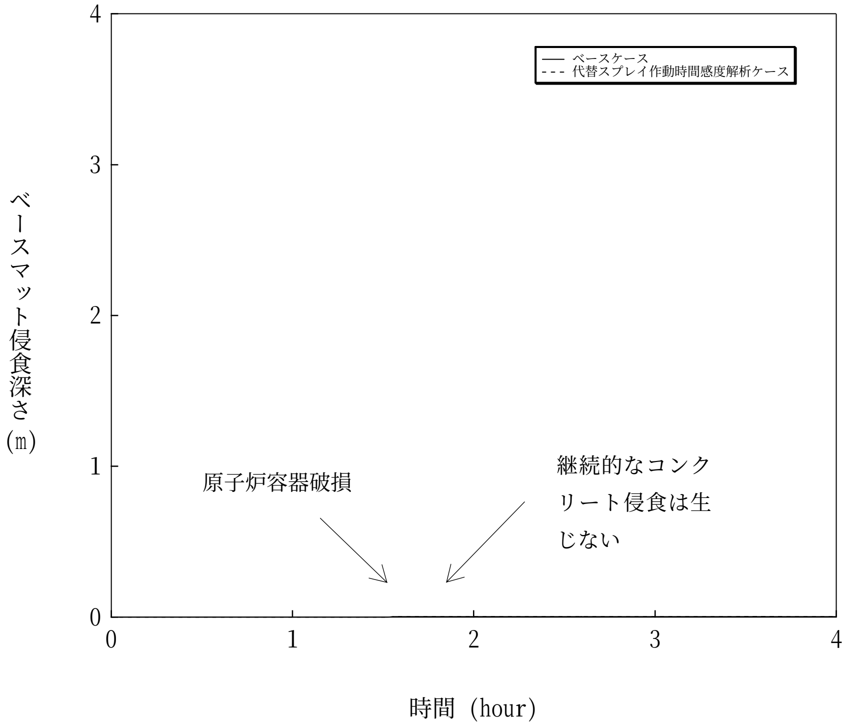


図 5-1-4 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（４）

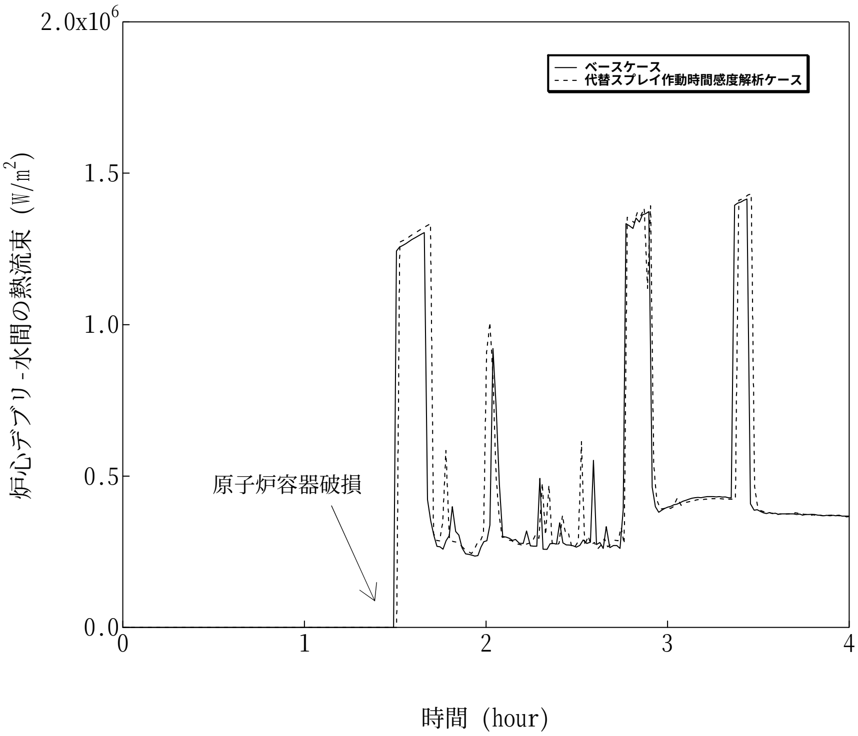


図 5-1-5 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（５）

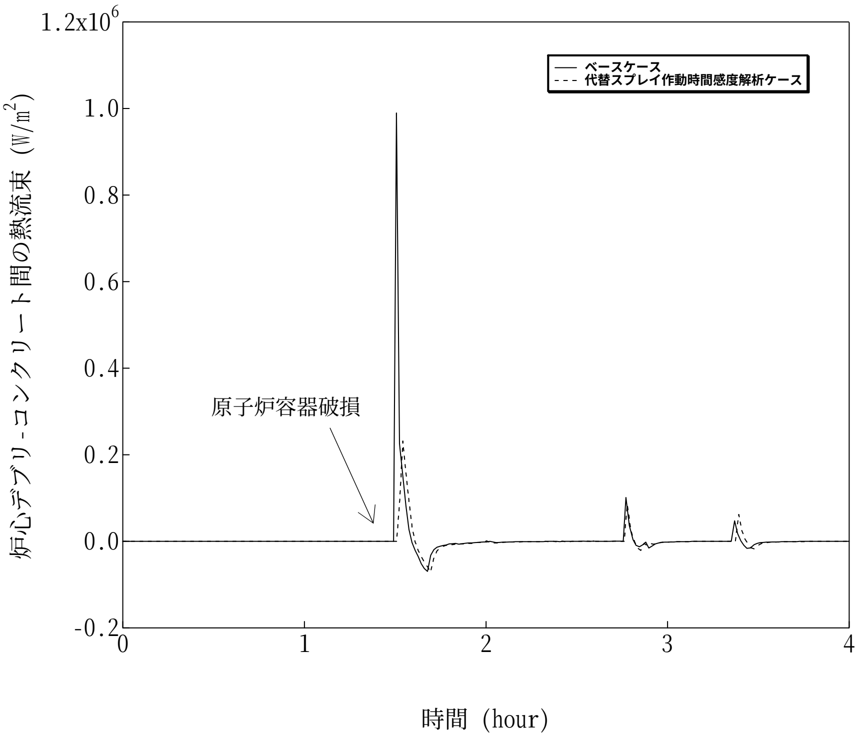


図 5-1-6 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（６）

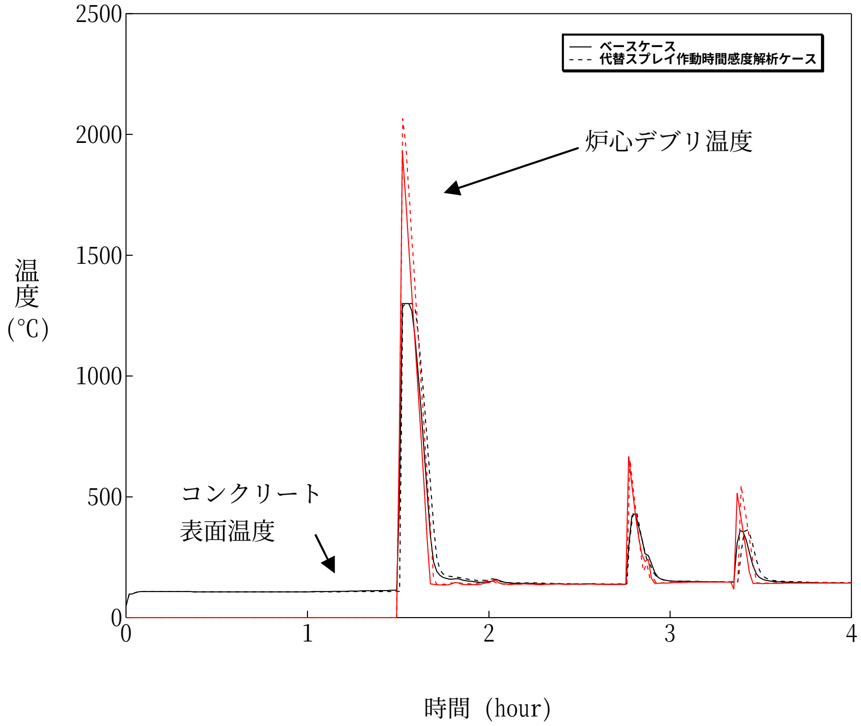


図 5-1-7 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（7）

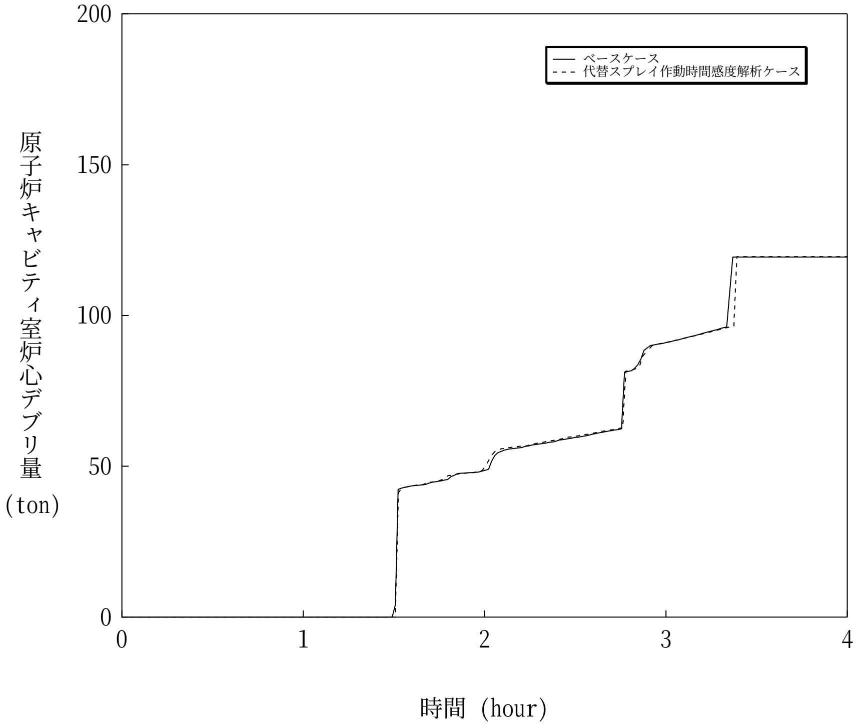


図 5-1-8 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（8）

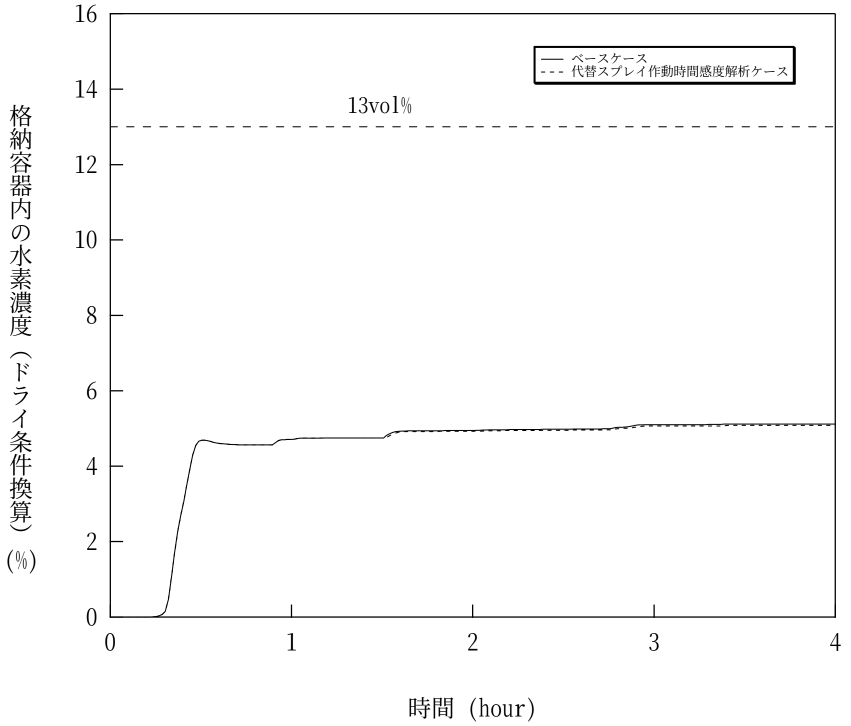


図 5-1-9 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（9）

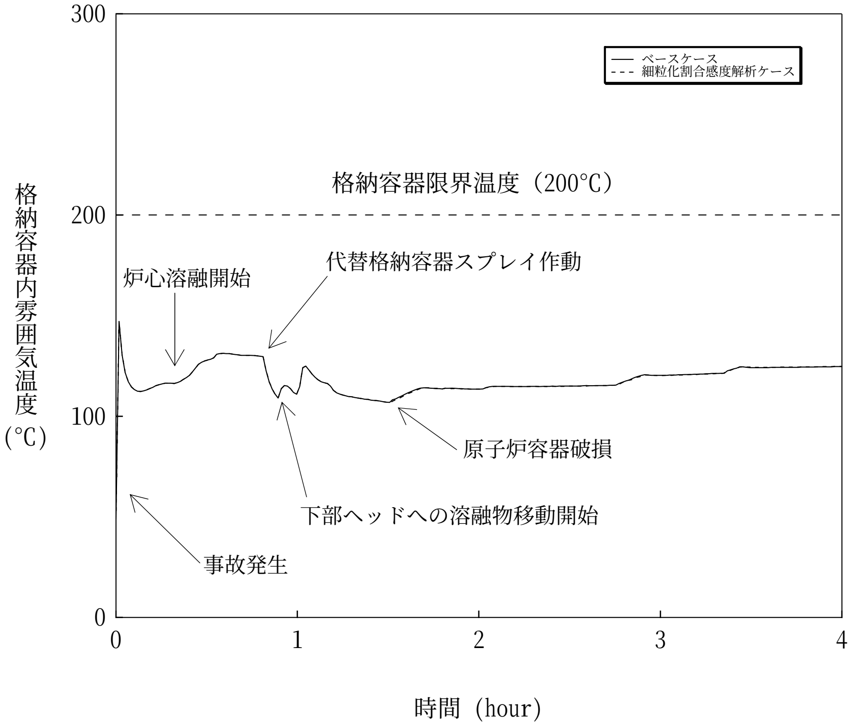


図 5-2-1 溶融デブリの細粒化割合感度解析（１）

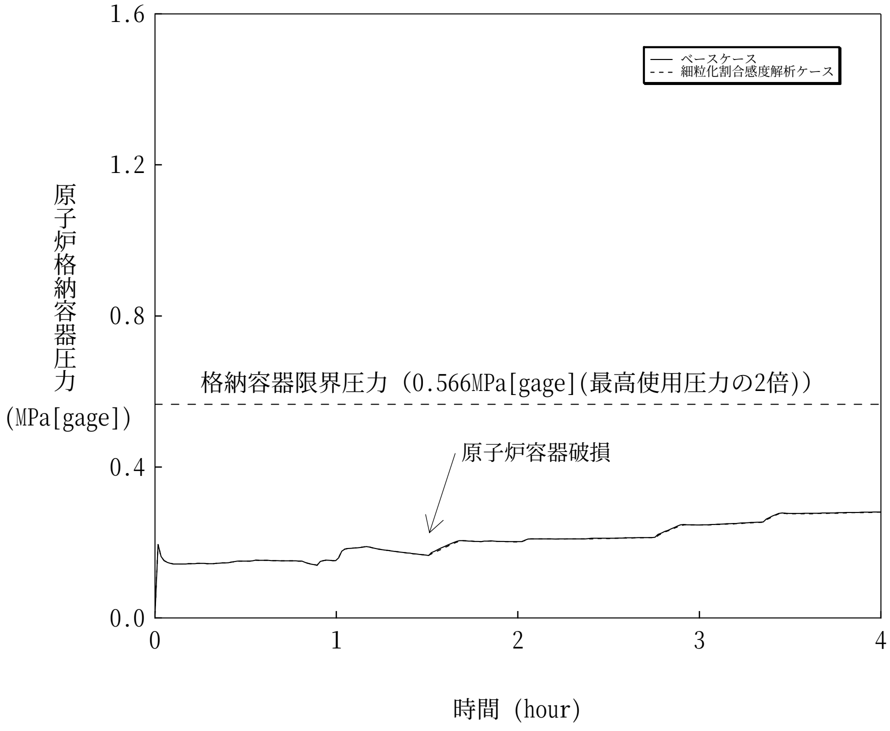


図 5-2-2 溶融デブリの細粒化割合感度解析（２）

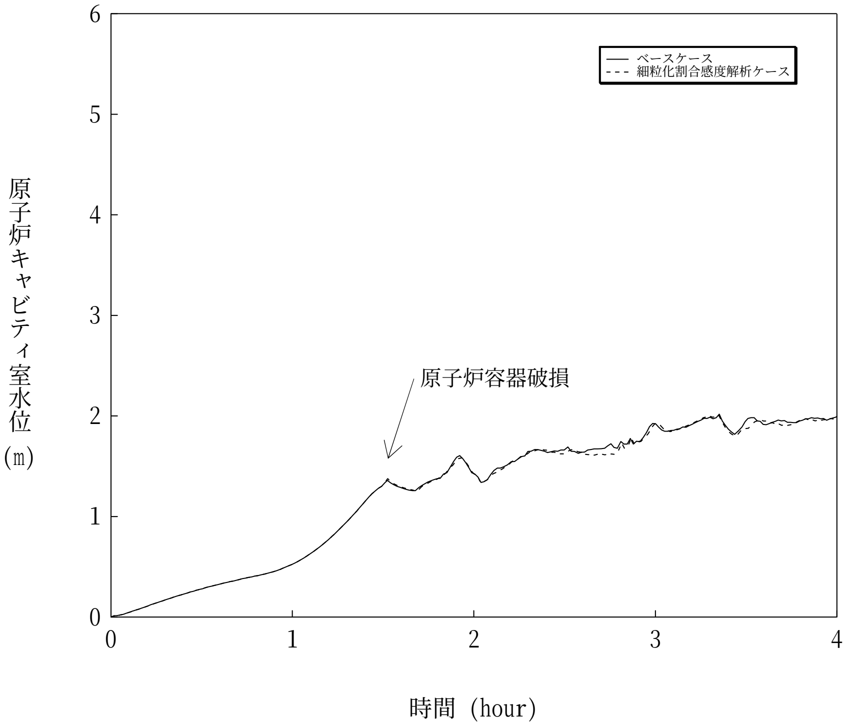


図 5-2-3 溶融デブリの細粒化割合感度解析（３）

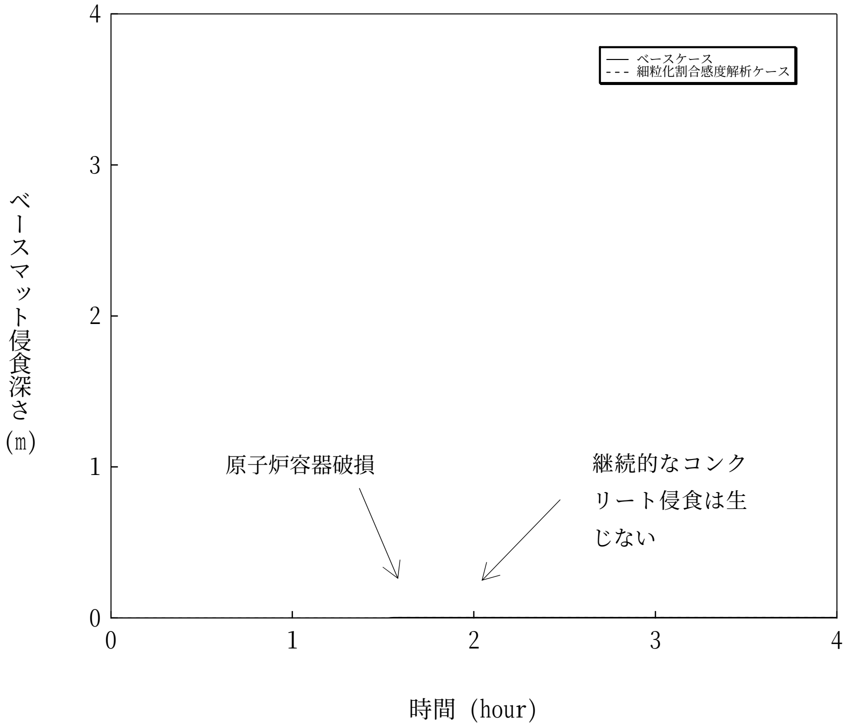


図 5-2-4 溶融デブリの細粒化割合感度解析（４）

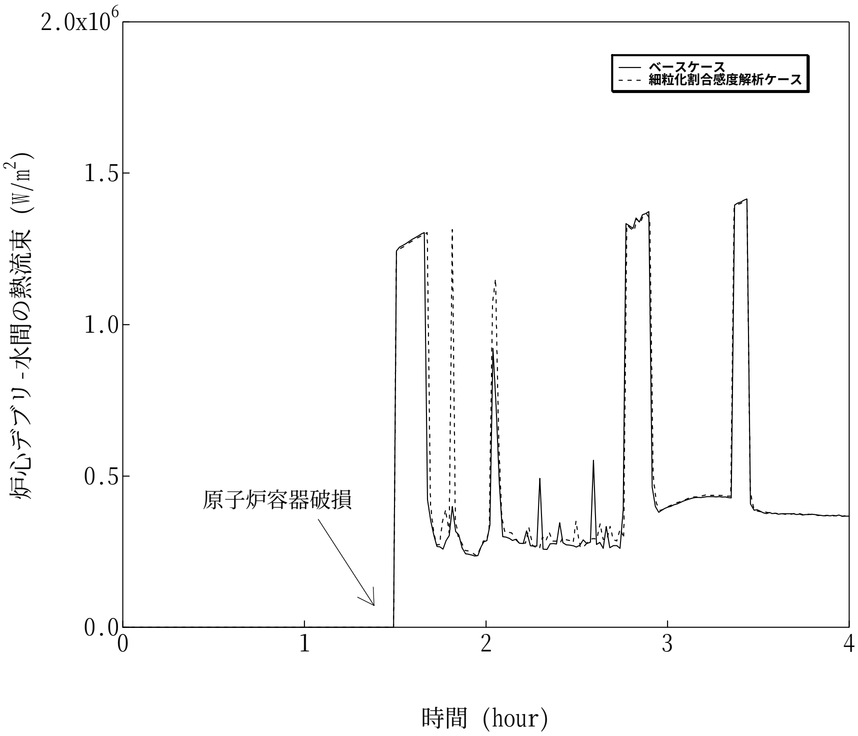


図 5-2-5 溶融デブリの細粒化割合感度解析（５）

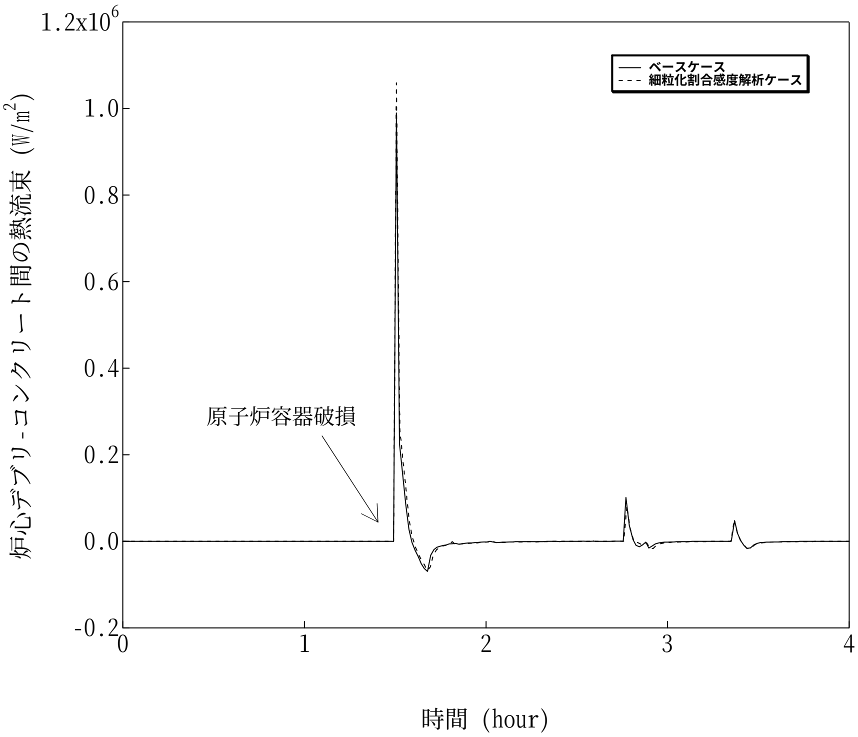


図 5-2-6 溶融デブリの細粒化割合感度解析（６）

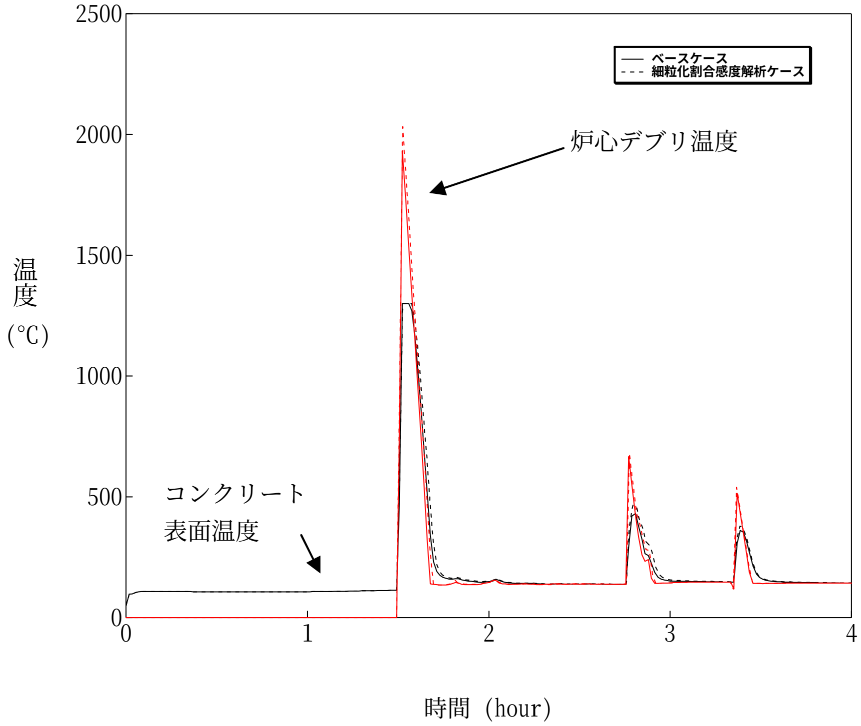


図 5-2-7 溶融デブリの細粒化割合感度解析（７）

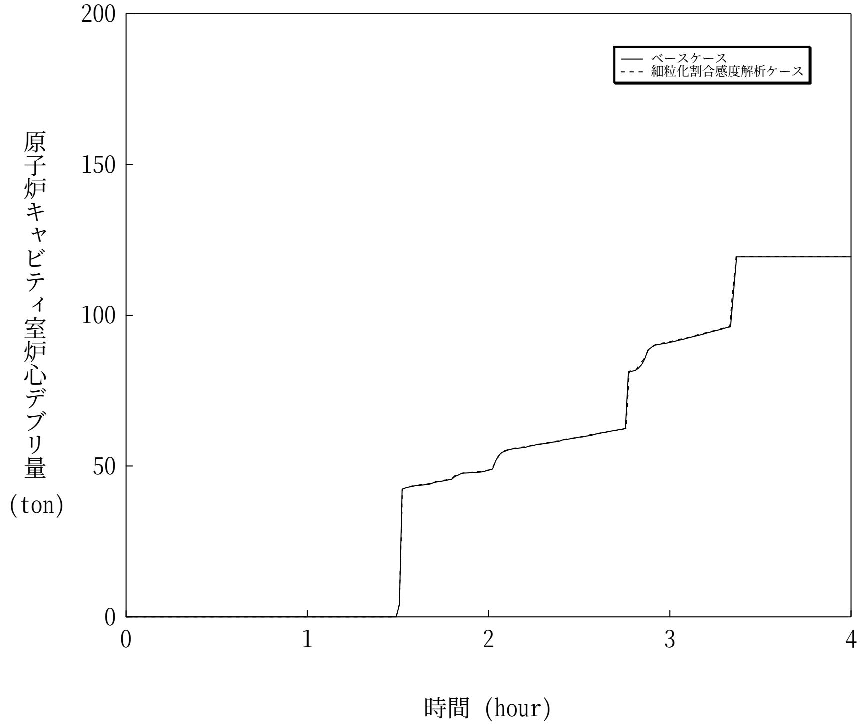


図 5-2-8 溶融デブリの細粒化割合感度解析（８）

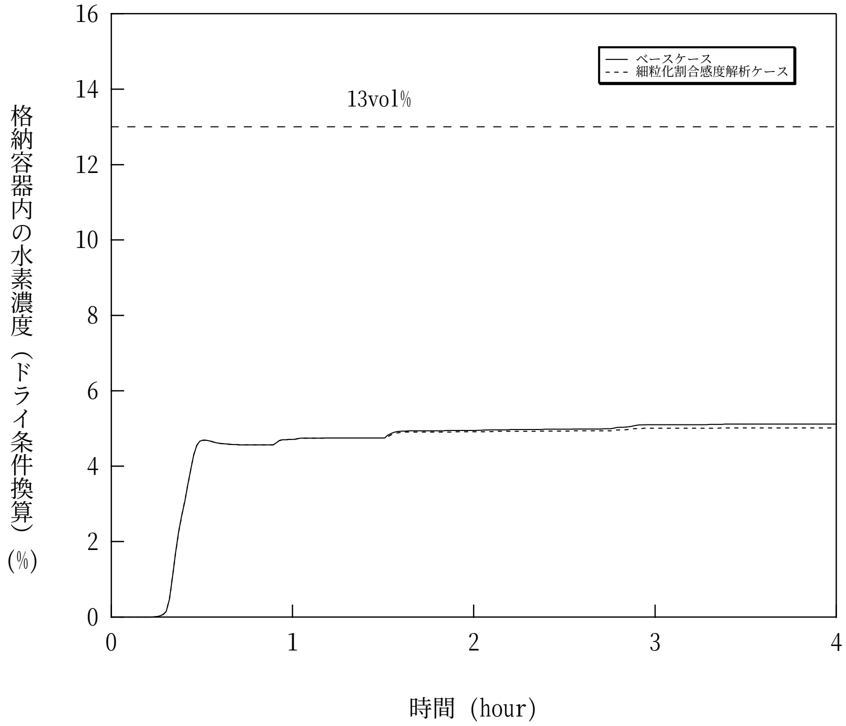


図 5-2-9 溶融デブリの細粒化割合感度解析（９）

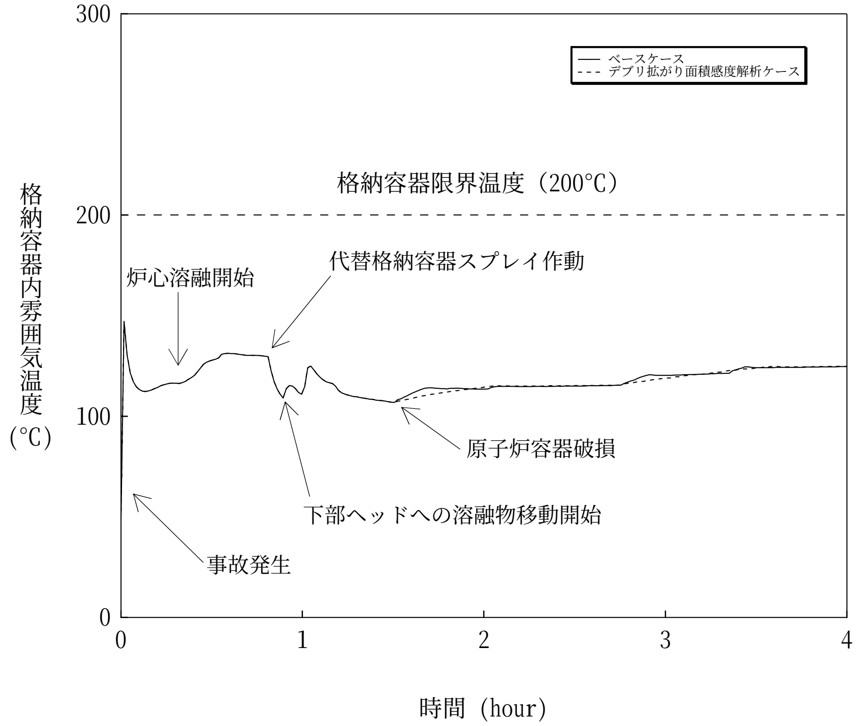


図 5-3-1 炉心デブリの拡がり面積感度解析（１）

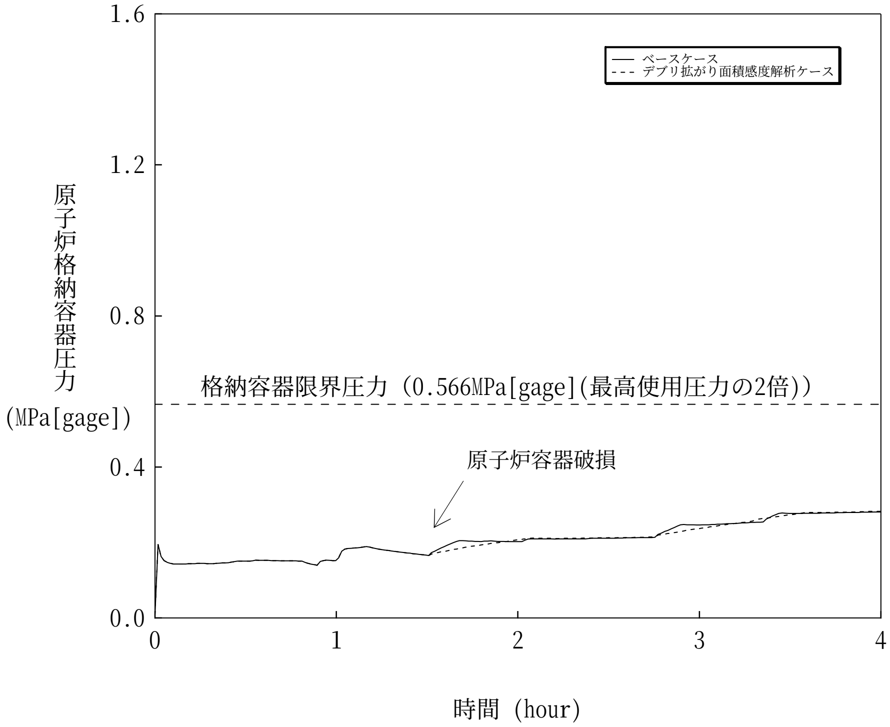


図 5-3-2 炉心デブリの拡がり面積感度解析（２）

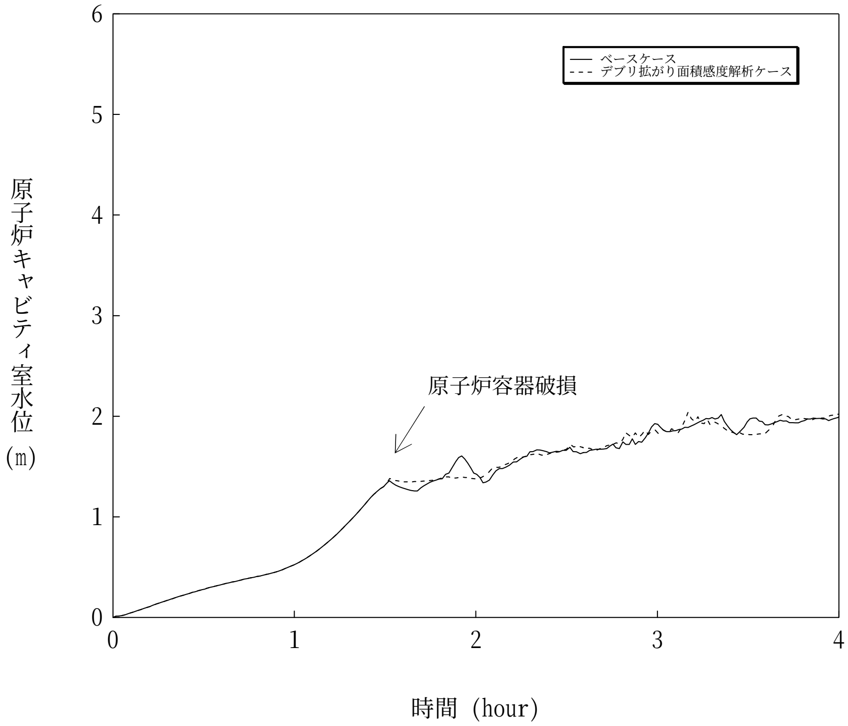


図 5-3-3 炉心デブリの拡がり面積感度解析（３）

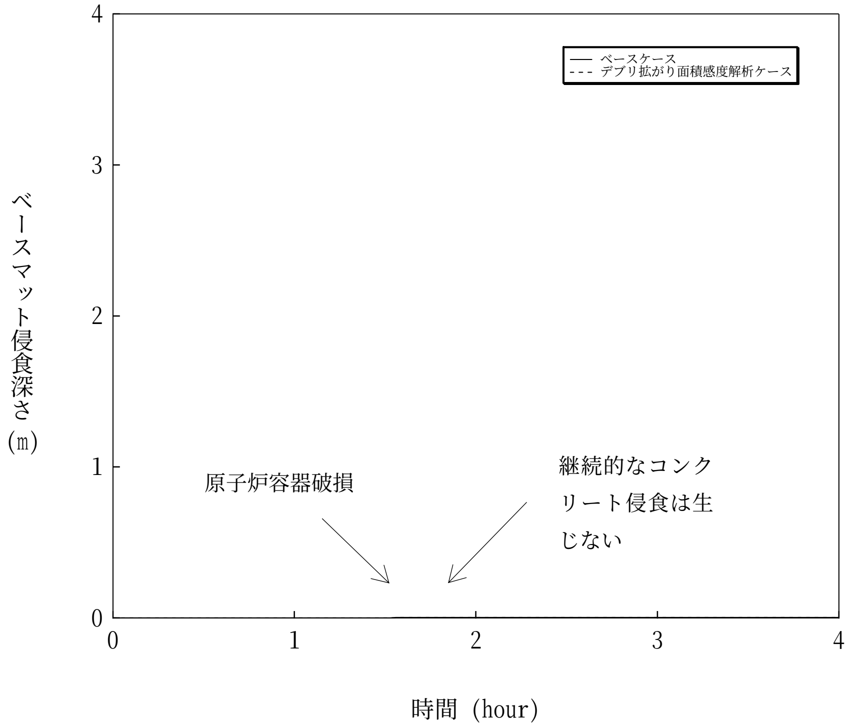


図 5-3-4 炉心デブリの拡がり面積感度解析（４）

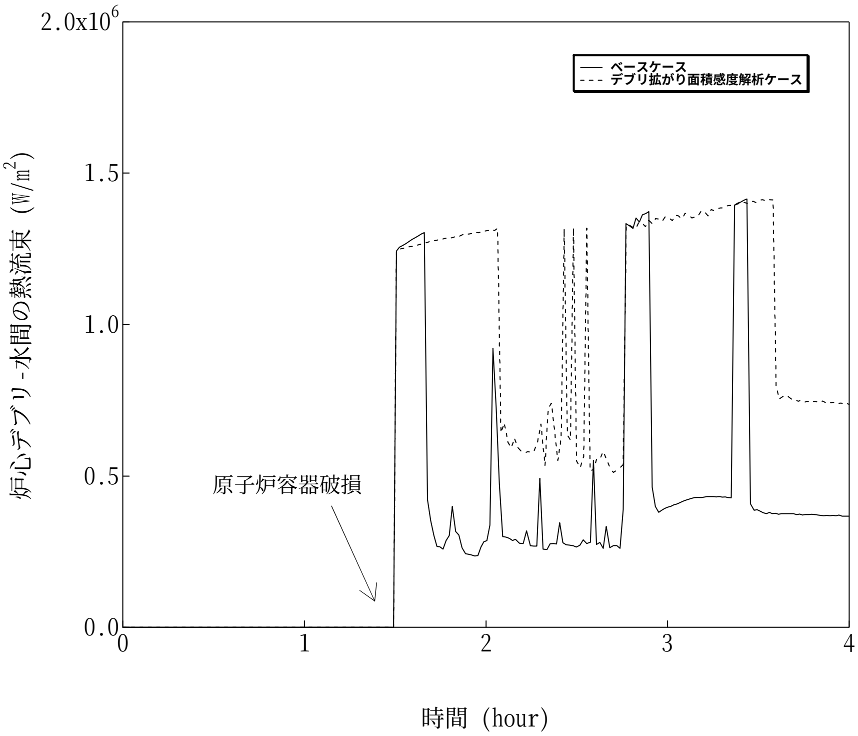


図 5-3-5 炉心デブリの拡がり面積感度解析（５）

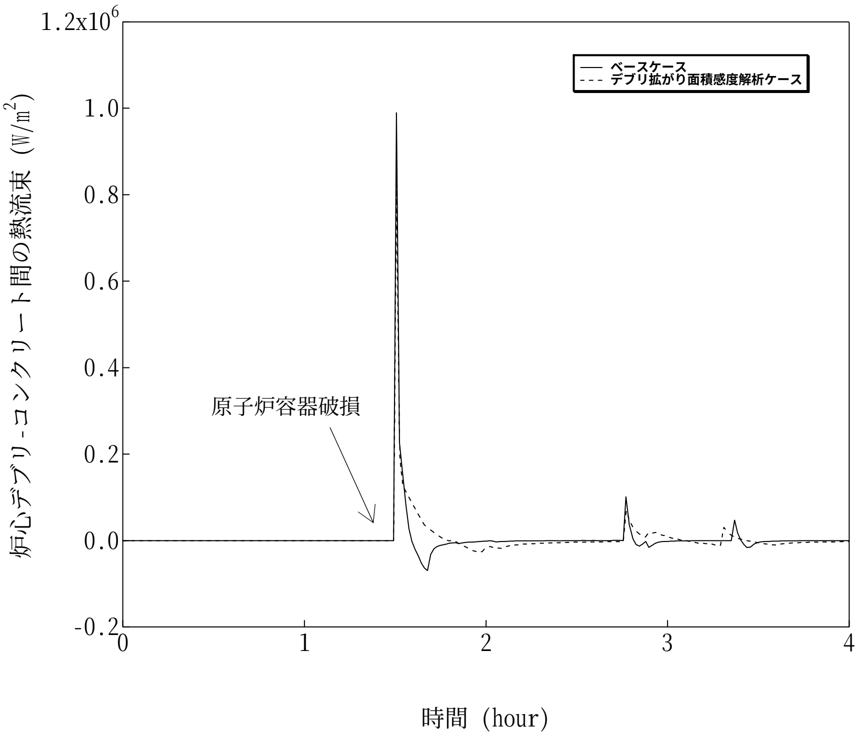


図 5-3-6 炉心デブリの拡がり面積感度解析（６）

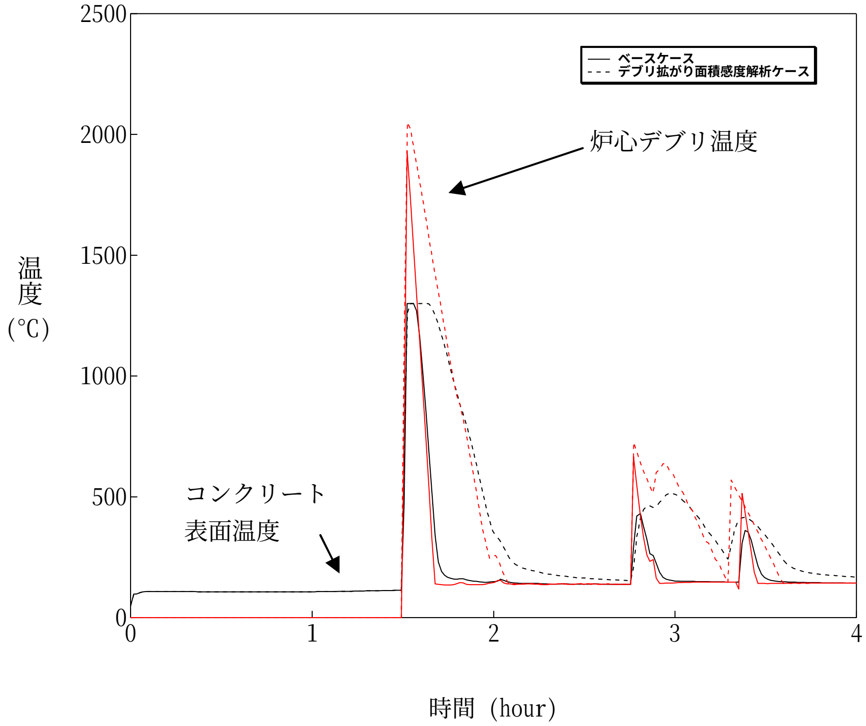


図 5-3-7 炉心デブリの拡がり面積感度解析（７）

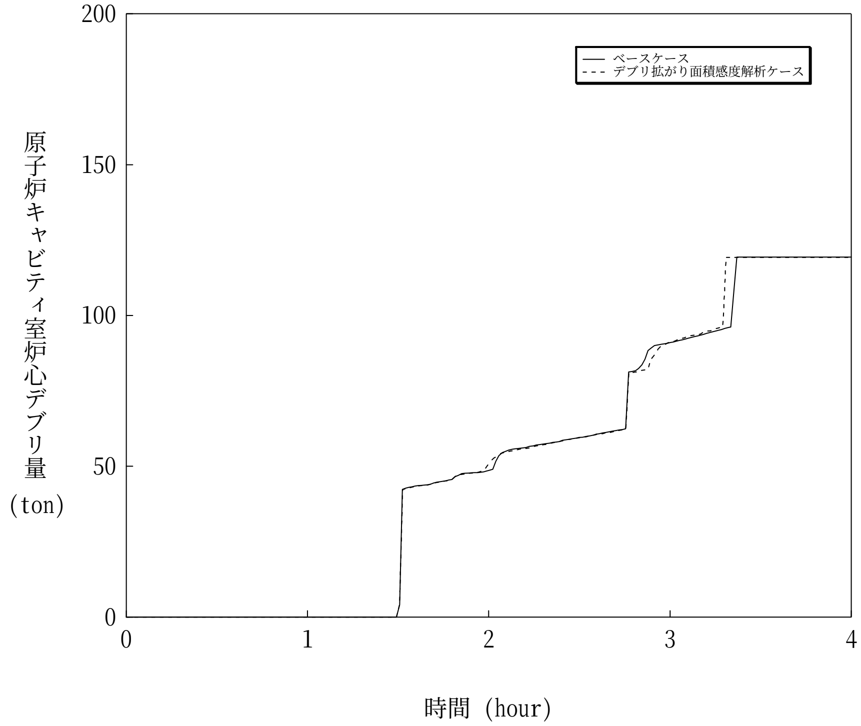


図 5-3-8 炉心デブリの拡がり面積感度解析（８）

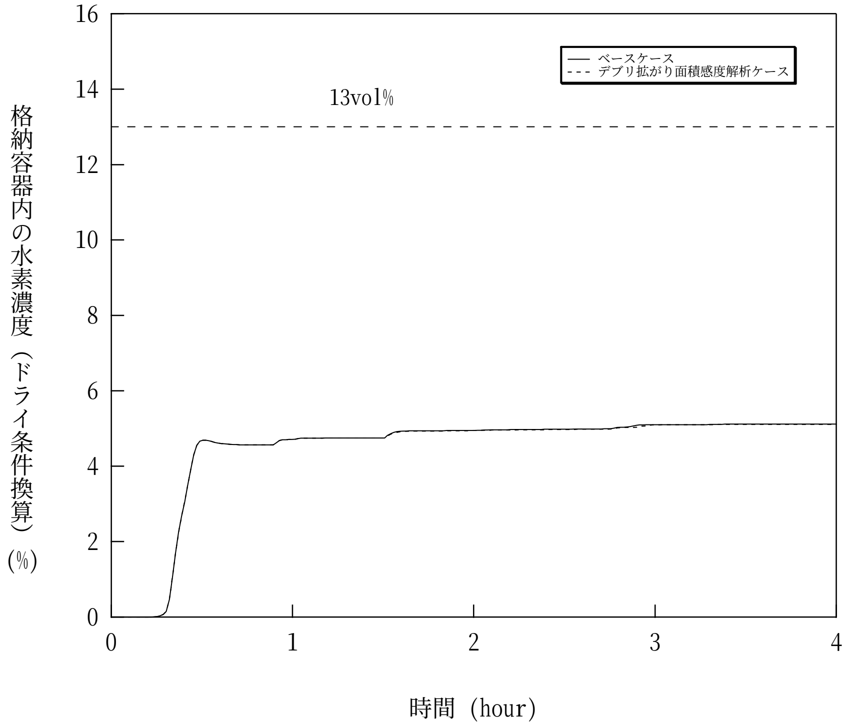


図 5-3-9 炉心デブリの拡がり面積感度解析（９）

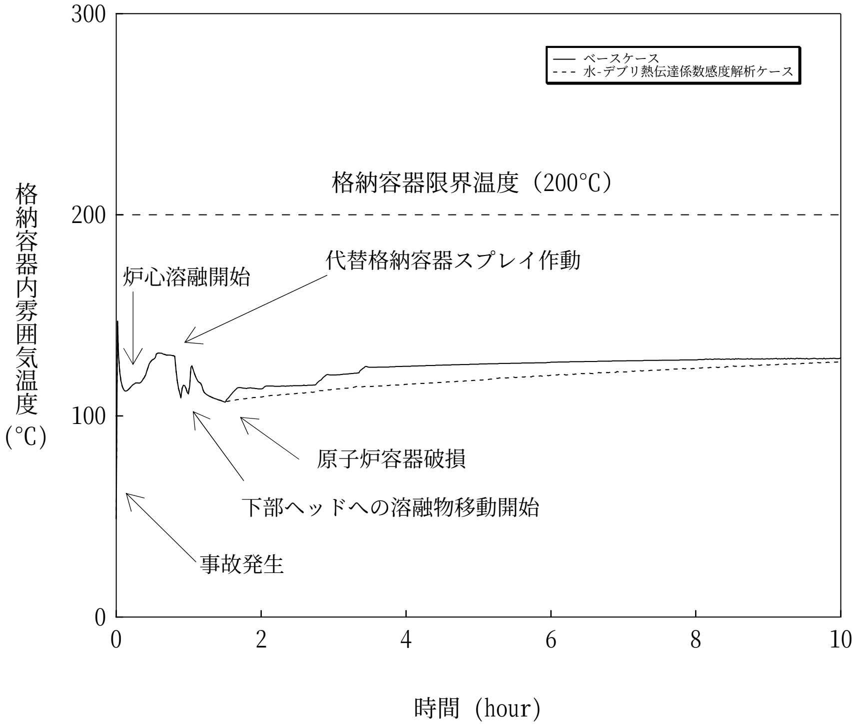


図 5-4-1 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析（１）

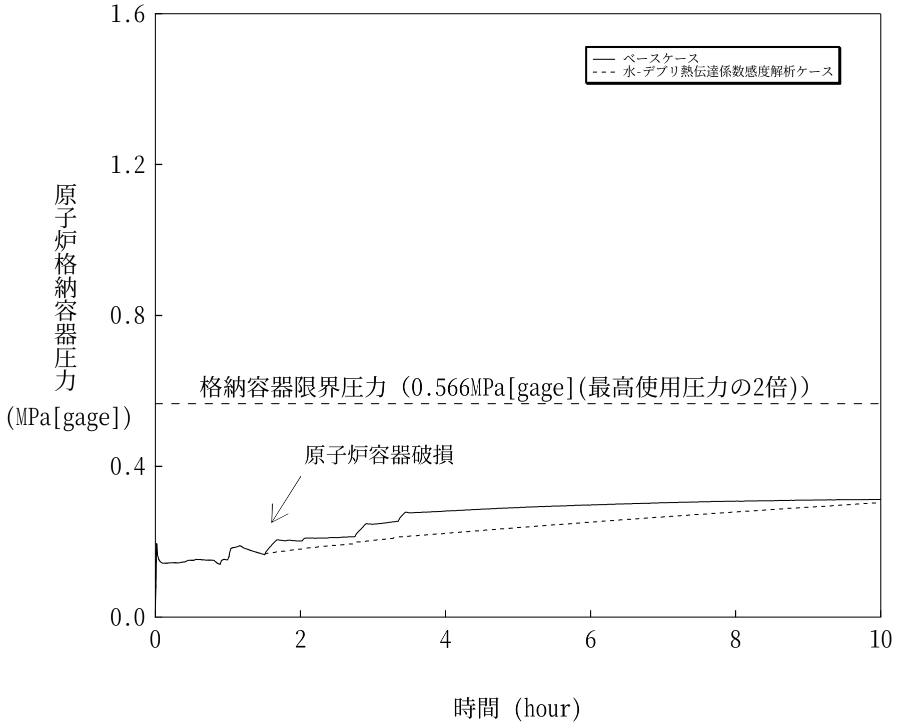


図 5-4-2 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析（２）

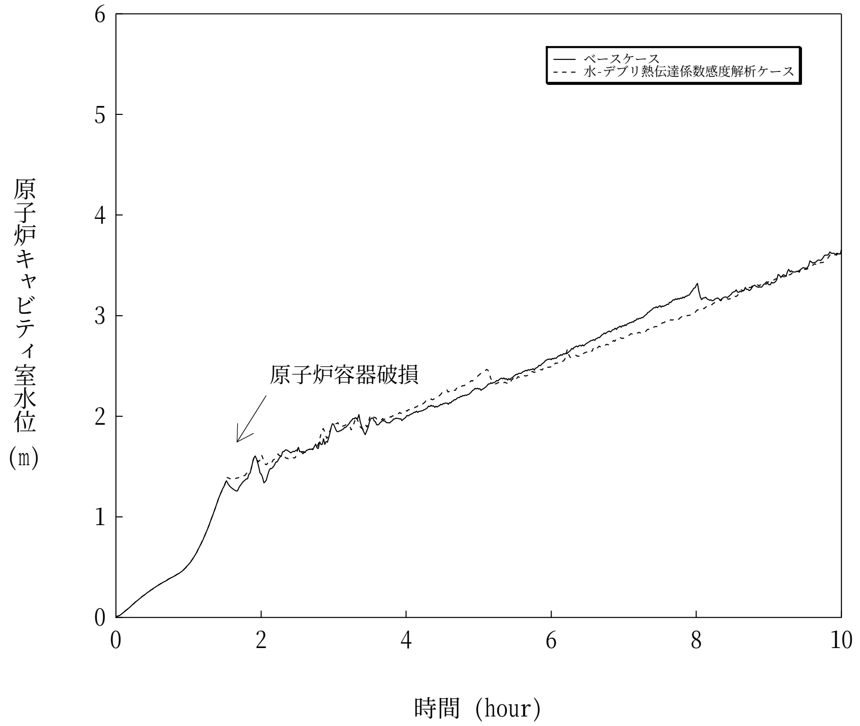


図 5-4-3 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析（３）

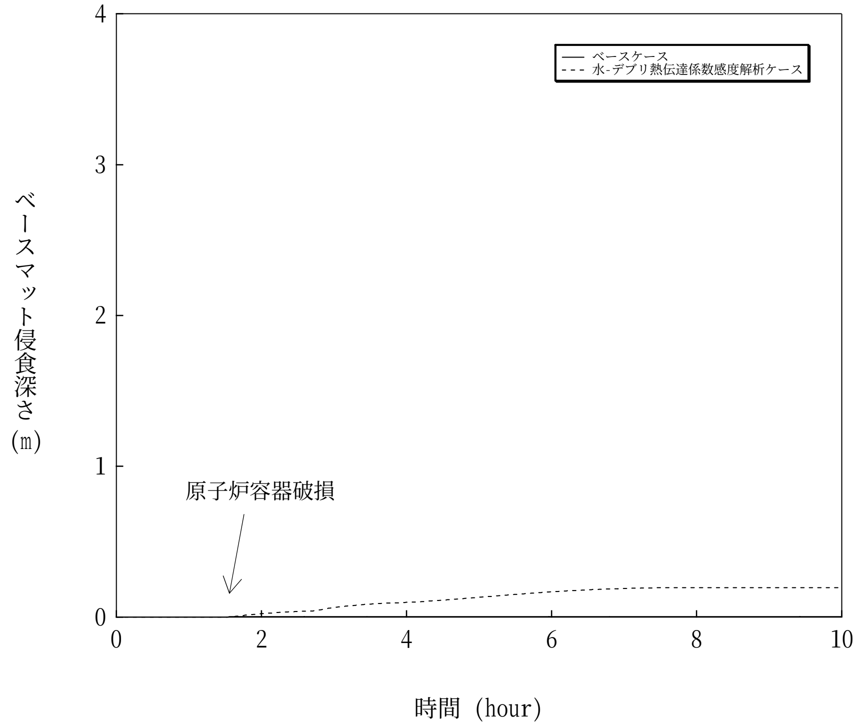


図 5-4-4 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析（４）

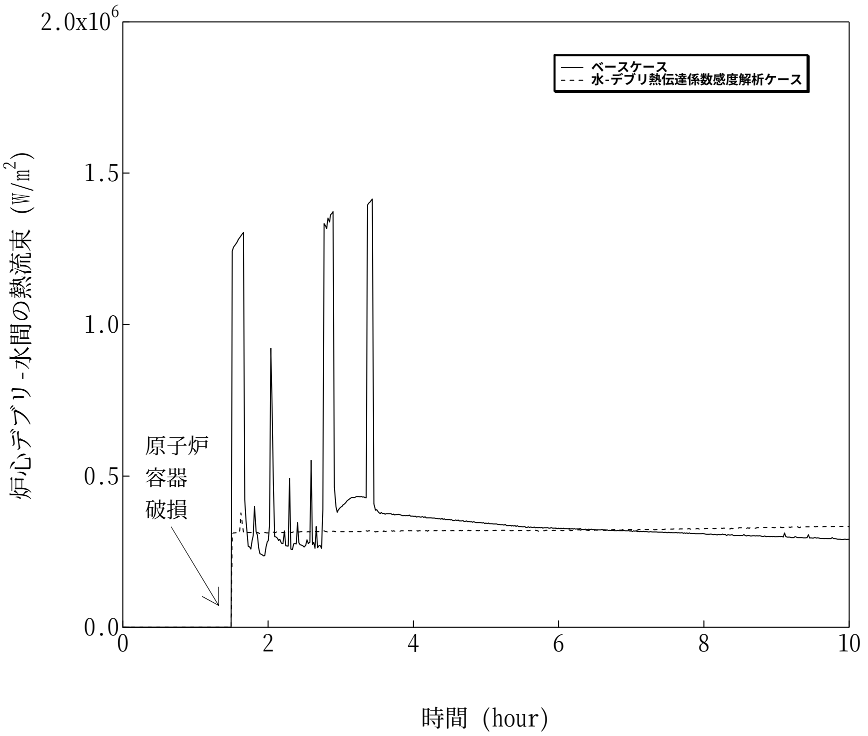


図 5-4-5 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析（５）

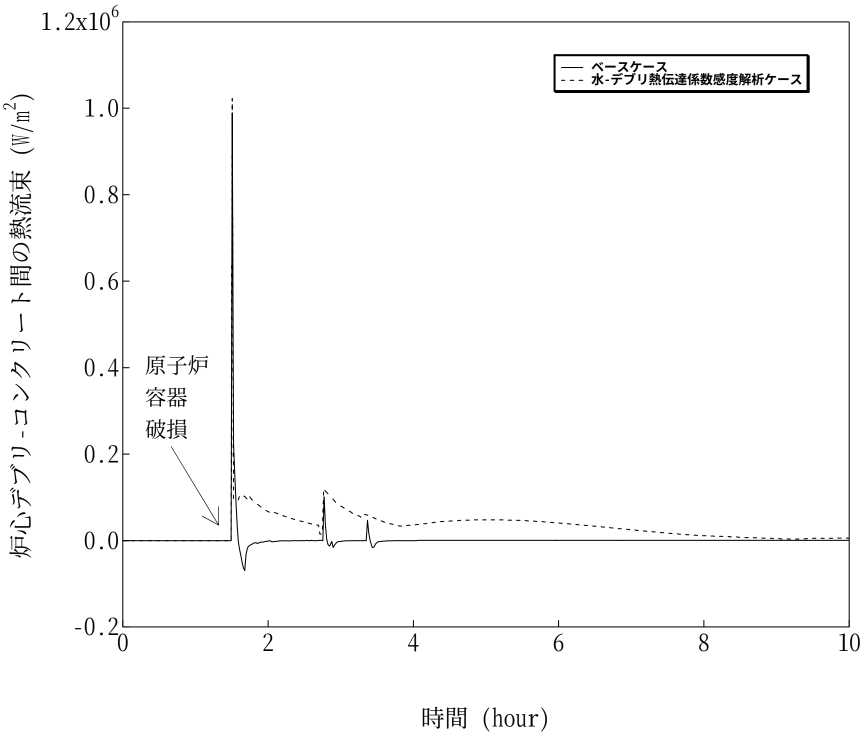


図 5-4-6 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析（６）

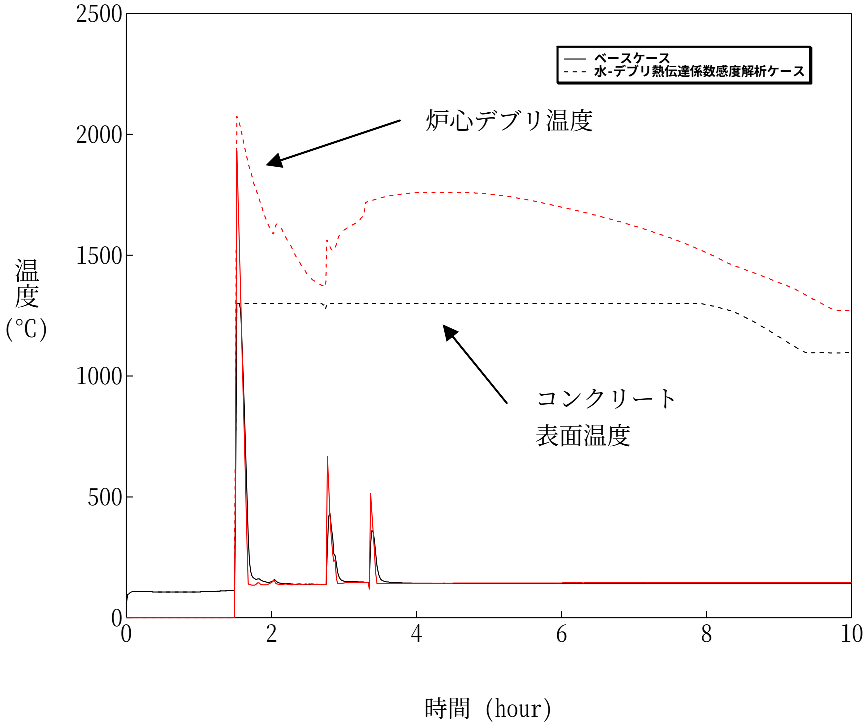


図 5-4-7 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析（7）

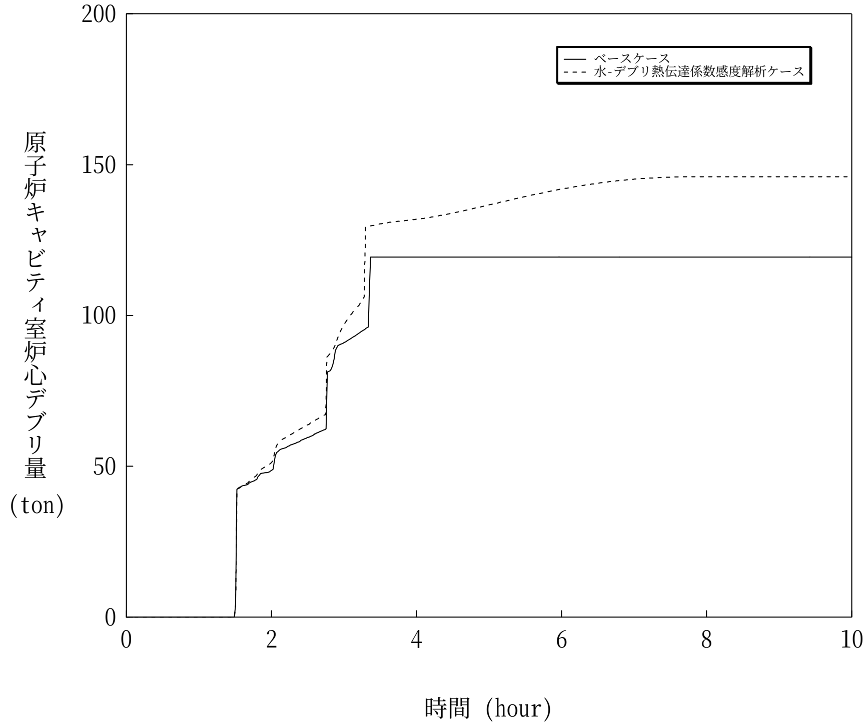


図 5-4-8 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析（8）

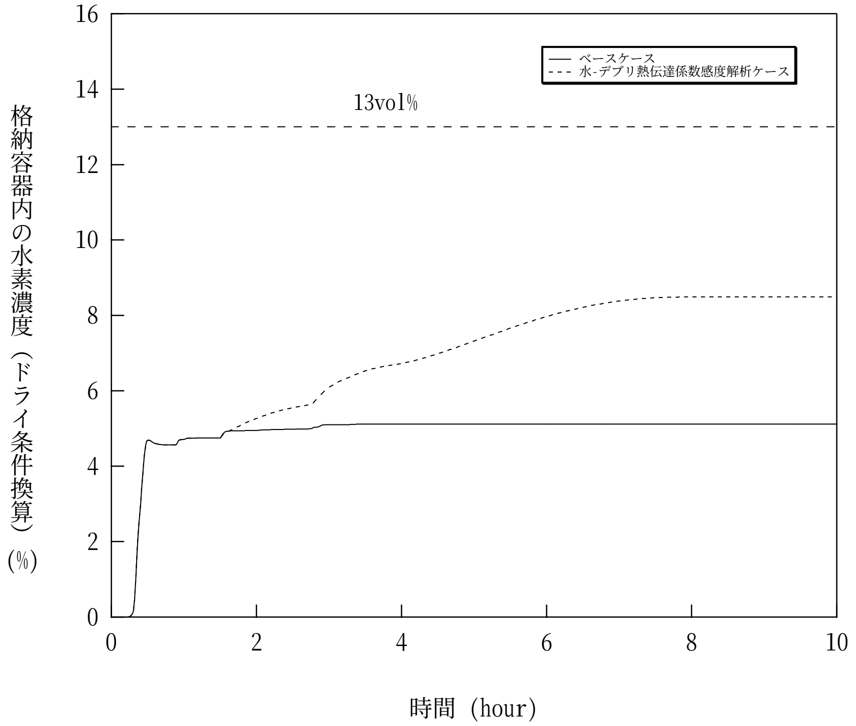


図 5-4-9 水-炉心デブリ間の熱伝達係数感度解析（９）

6 まとめ

溶融炉心とコンクリートの相互作用（MCCI）に関しては、水プールに溶融物を落下させて溶融物の冷却性を確認した直接的な実験例は DEFOR 実験のみでありサンプルが少ない。また、COTELS 実験の知見より注水することでコンクリート侵食が停止したことが確認されている。

これまでの実験により得られた知見に基づき分析した結果、MCCI に関する溶融炉心のキャビティへの堆積過程及び溶融炉心の冷却過程における不確かさの要因として抽出した、

・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
・水ー炉心デブリ間の熱伝達係数

について、感度解析を行い、コンクリート侵食への影響を確認した。

その結果、水-炉心デブリ間の熱伝達係数を除いてはコンクリート侵食量への感度は小さく、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。水-炉心デブリ間の熱伝達係数については、侵食量が約 20cm となる程度の感度があったが、原子炉格納容器の構造部材の支持機能が喪失には至ることはない。この感度解析条件は、水-炉心デブリ間の熱伝達係数を低温の炉心デブリから水への熱流束に基づき設定したものであり、高温の炉心デブリが水と接触する場合においても水への熱流束が小さく評価されるものとなっている。想定される現象としては、炉心デブリが水中に落下し、高温の炉心デブリが水と接触している間は、水への熱流束が大きくなり、その間に炉心デブリが冷却されることから有意なコンクリート侵食に至ることはないと考えられる。

感度解析の結果から、炉心損傷検知後、キャビティに水を張ることにより炉心デブリの細粒化及び固化を促進させる方策が有効であることを確認したが、今後、原子炉容器破損時における炉心デブリの放出状況に応じ影響因子間の相関を考慮し、コンクリート侵食への影響を把握する。

また、溶融炉心とコンクリート相互作用（MCCI）については、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、今後も継続してコンクリート侵食に対する検討を進め、知見の拡充に努める。