添付 1-1　Surry 型原子炉下部キャビティの 1/ 42 スケール実験

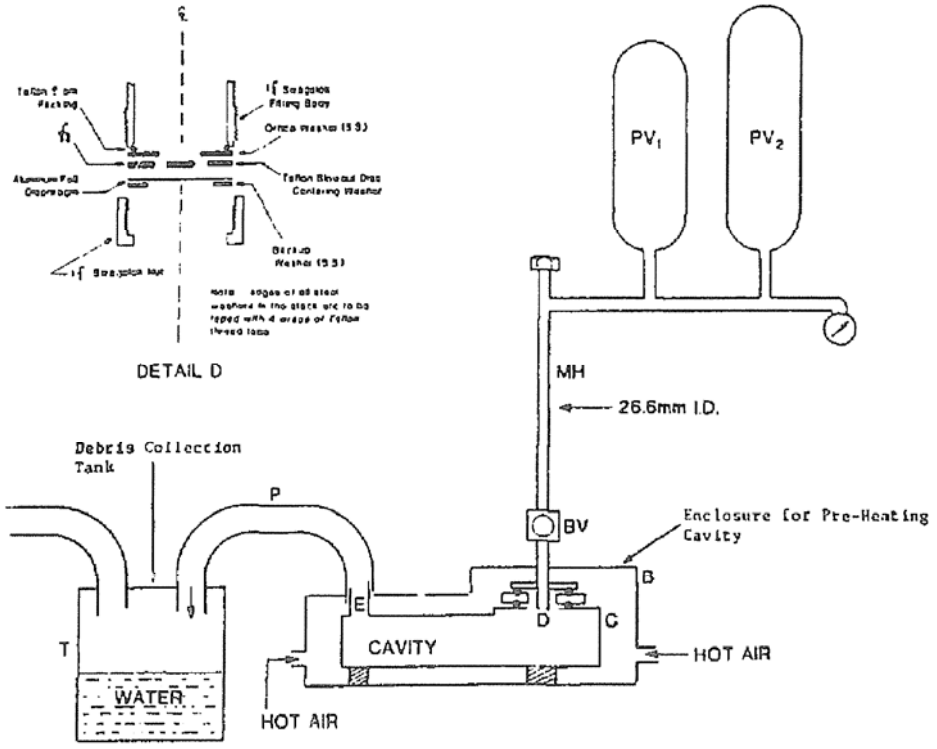
BNL では、Surry 型原子炉下部キャビティの 1/42 スケールモデルを用いた模擬物質の分散放出実験[1]を実施し、原子炉下部キャビティ内に残存する物質の測定結果を整理して、実機において分散放出が生じない圧力を評価している。

実験装置の概要を付図 1-1 に示す。模擬物質は弁の上のメタルホルダに保持され、弁を開放すると、模擬気体の圧力によって、模擬物質が原子炉下部キャビティに噴出する。その後、模擬気体のブローダウンによって模擬物質の一部が配管やタンクにエントレインされ、原子炉下部キャビティに残った模擬物質を測定する。

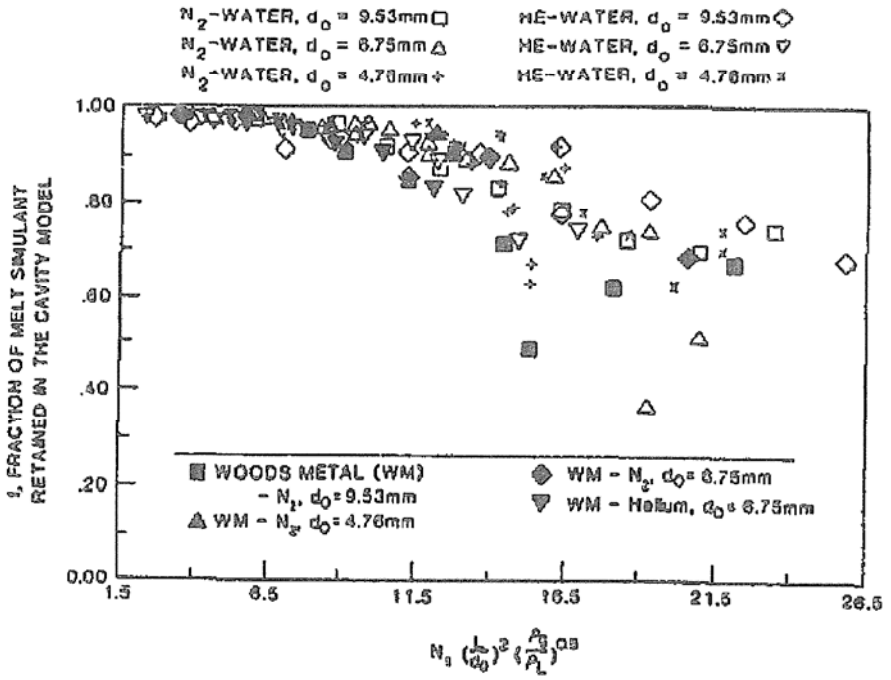
模擬物質を用いた分散放出実験では、様々な初期圧力、様々な開口径に対して、原子炉下部キャビティ内に残存する模擬物質の割合を測定している。模擬物質としては水とウッド合金を使用し、模擬気体としては窒素とヘリウムを使用している。付図 1-2 に測定結果を示す。原子炉下部キャビティ内に残存する模擬物質の割合の測定結果(f)は Kutateladze 数に関係する無次元数（G）の関数として整理されており、f～$1/(1+0.001G^2)$でよく近似できる。

この関係式を用いて、分散放出が無視できる 1 次系圧力を評価することができる。具体的には、Kutateladze 数に関係する無次元数が 7 以下の場合に溶融炉心の分散放出が無視できるとしている。このとき、原子炉下部キャビティに残存する模擬物質の割合は、すべてのデータについて 0.9 以上、平均値では約 0.95 である。実機条件（水蒸気温度 500K、原子炉容器破損口径 0.4m）に対しては、溶融炉心の分散放出が無視できる 1 次系圧力は 2.38MPa と評価される。

[1] N. K. Tutu, et al.,“Low Pressure Cutoff for Melt Dispersal from Reactor Cavities”, Fourth Proceedings of Nuclear Thermal Hydraulics, ANS Meeting, October 30 . November 4, 1988.



付図 1-1　Surry 型原子炉下部キャビティの 1/42 スケール実験装置



付図 1-2　Kutateladze 数に関係する無次元数と原子炉下部キャビティに残存する模擬物質との関係

添付 1-2　1 次系圧力が 2.0MPa[gage]近傍にて停滞する現象について

1 次系強制減圧操作を実施すると、付図 2-1 に示すとおり、1 次系圧力は速やかに低下するが、蓄圧注入開始後、一旦 2.0MPa[gage]近傍で維持される。この現象について説明する。

(1)現象の考察

蓄圧タンク圧力は蓄圧注入の進行とともに低下し、蓄圧タンク圧力と 1 次系圧力が均衡した後は、1 次系圧力の低下分だけ蓄圧注入が入る。それにより蓄圧タンク圧力は低下するのに加え、蓄圧注入水により炉心水位が上昇し、炉心部で蒸気生成が起こり、1 次系圧力が上昇すると、蓄圧注入は停止する。この時の炉心部の概念図を付図 2-2 に示す。

つまり、加圧器逃がし弁からの蒸気放出質量流量と蓄圧注入水の蒸発質量流量がバランスした状態が形成されるため、1 次系圧力が 2.0MPa[gage]近傍で停滞することになる。この現象を数式で表すと以下のようになる。

加圧器逃がし弁の臨界流量W_{PORV}は冠水炉心の崩壊熱により次式のように近似できる。

$$W_{PORV} \approx \frac{Q_{decay}(L_{ctrl})}{h_{lg}}$$

ただし、

W_{PORV}：加圧器逃がし弁の臨界流量

$Q_{decay}(L_{ctrl})$：冠水炉心の崩壊熱

L_{ctrl}：冠水炉心の崩壊熱がW_{PORV}相当になる炉心水位

h_{lg}：水の蒸発潜熱

この時、炉心水位LとL_{ctrl}の関係により、次のようなメカニズムで、蓄圧注入量W_{ACUM}が加圧器逃がし弁の臨界流と同等になるように制御される。

if $L > L_{ctrl}$　　蒸発量がW_{PORV}より大きくなり加圧　→蓄圧注入が停止

if $L < L_{ctrl}$　　蒸発量がW_{PORV}より小さくなり減圧　→蓄圧注入作動

その結果、$L \approx L_{ctrl}$　また　$W_{PORV} \approx \overline{W_{ACUM}}$　となり、1 次系圧力が蓄圧タンク圧力とバランスして維持される、というメカニズムで制御される。

(2)確認計算

この現象を簡単な計算により確認する。加圧器逃がし弁からの蒸気放出質量流量を与え、蓄圧注入流量は加圧器逃がし弁の質量流量と等しいとして、蓄圧タンク圧力について以下の確認計算を実施した。その結果を付図 2-3 に示す。確認計算結果はＭＡＡＰコードの解析結果より若干低めになっているが、これは確認計算では加圧器逃がし弁質量流量を一定

にしたためであり、ＭＡＡＰコードの計算では１次系圧力に応じて質量流量も低下しており、結果として１次系圧力の低下が確認計算より緩やかになっている。この違いを考慮すれば両者は同様の挙動を示すものとなり、上述の考察が適切であることを確認できた。

計算の条件

・加圧器逃がし弁の放出流量　4kg/s（定数）を仮定（2.0MPa[gage]での臨界流量）
・蓄圧タンク気相は等温膨張
・蓄圧タンクは４基
・計算開始 3.7 時間

計算方法

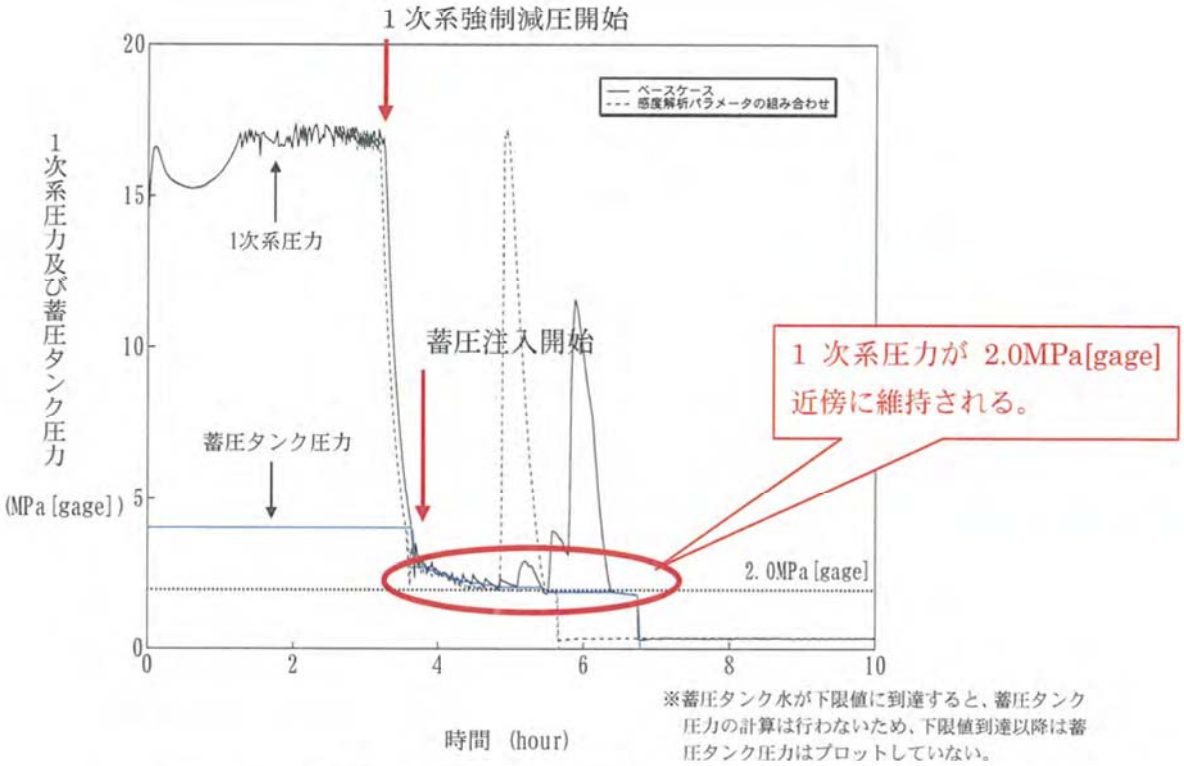
蓄圧タンク気相を等温膨張として、加圧器逃がし弁の質量流量から蓄圧タンク圧力（１次系圧力）の時間変化を概略的に計算する。

$$P(V_T - V_w) = P_0(V_T - V_{w0}) = P_1(V_T - V_{w1})$$

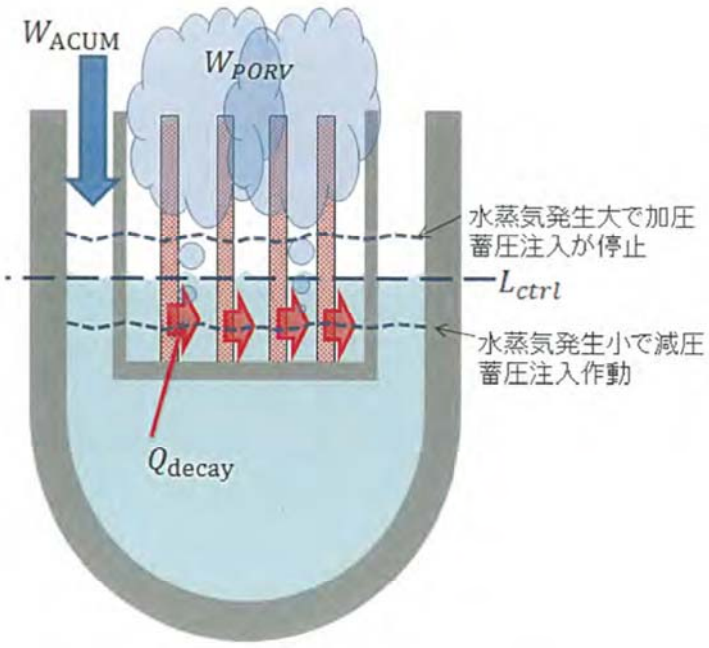
$$P = P_0 \frac{(V_T - V_{w0})}{(V_T - V_w)} = P_1 \frac{(V_T - V_{w1})}{(V_T - V_w)}$$

$$V_w = V_{w1} - \frac{W}{\rho N}(t - t_1)$$

P：蓄圧タンク圧力
V_w：蓄圧タンク内の水体積
P_0：蓄圧タンク初期圧力
V_T：蓄圧タンクの容積
V_{w0}：蓄圧タンク初期水量の体積
t_1：蓄圧タンク注入直後の安定した時刻
V_{w1}：t_1時の蓄圧タンク水量の体積
P_1：t_1時の蓄圧タンク圧力
W：加圧器逃がし弁の質量流量（ＭＡＡＰコード解析結果）
N：蓄圧タンクの数
ρ：水の密度

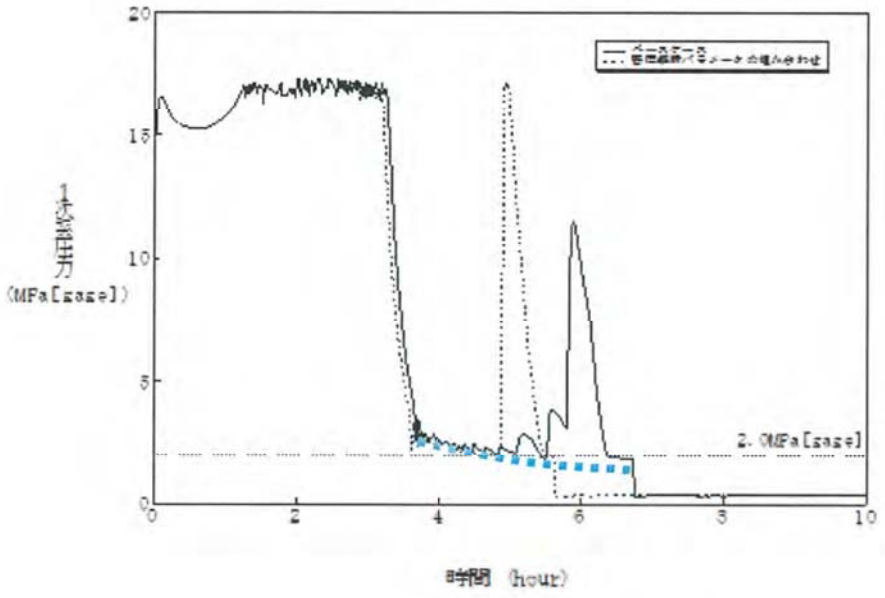


付図 2-1　1 次系強制減圧時の 1 次系圧力挙動



炉心部の水位が上がれば、蒸気生成量が増加し 1 次系が加圧され、蓄圧注入が停止する。炉心部の水位が下がれば、蒸気生成量が減少し 1 次系が減圧され、蓄圧注入が再開する。

付図 2-2　蓄圧注入水の蒸発による 1 次系圧力バランス維持メカニズム



付図 2-3　蓄圧タンクの平衡圧力の確認計算結果

（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

目次

1. まえがき 3.2-3
2. 現象の概要 3.2-3
3. これまでの知見の整理 3.2-3
3.1 FCI 実験の概要 3.2-4
3.2 FCI 実験の知見の整理 3.2-9
3.3 これまでの知見のまとめ 3.2-11
4. 不確かさに関する整理 3.2-19
5. 感度解析と評価 3.2-26
6. まとめ 3.2-45

1. まえがき

溶融炉心と冷却水の相互作用（FCI：Fuel-Coolant Interaction、以下「FCI」という。）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

溶融炉心と冷却水が接触することによる急激な水蒸気の生成において、溶融炉心の熱エネルギが機械的エネルギに変換されて原子炉格納容器破損に至る可能性がある。このような現象、すなわち、溶融炉心と冷却水との接触及びそれに伴って引き起こされる現象のことを”FCI”と呼ぶ。また、FCIのうち衝撃波を伴うものを”水蒸気爆発”と呼び、水蒸気爆発に至らない圧力変化を”圧力スパイク”と呼ぶ。さらに、溶融炉心と冷却水の接触は、原子炉容器の下部プレナムと原子炉下部キャビティで発生する可能性があり、雰囲気圧力や冷却水の状態が異なることから両者を区別して取り扱い、前者を原子炉容器内FCI、後者を原子炉容器外FCIとする。

炉心あるいは下部プレナムから落下する溶融炉心（デブリジェット）が、水プールに接触する際の液－液混合に伴って、溶融炉心が細粒化して水中に分散する（エントレイン）。細粒化した溶融炉心（以下「デブリ粒子」という。）は、膜沸騰及び輻射熱伝達により水と伝熱しており、デブリ粒子は蒸気膜に覆われた状態である。ここで、蒸気膜へ何らかの外乱（トリガリング）が加わり蒸気膜が崩壊すると、デブリ粒子が冷却水と直接接触することで急激な水蒸気発生が起こり、これが近傍のデブリ粒子に対する新たなトリガリングとなり蒸気膜を崩壊させ、この現象が瞬時に伝ぱ及び拡大することで、衝撃波を伴った水蒸気爆発に至ると考えられている。また、水蒸気爆発に至らない場合でも、発生した水蒸気により急激な圧力上昇（圧力スパイク）が発生する。

3. これまでの知見の整理

FCIについては、1975年の米国原子力規制委員会NRCの原子炉安全研究WASH-1400（NUREG75-014）において、原子炉容器内水蒸気爆発による原子炉格納容器破損が公衆へのリスクの大きな一因となることが指摘されたことを機に、現象の解明や評価に関する多くの活動が行われてきた。水蒸気爆発に関しては、水蒸気爆発専門家グループ（SERG: Steam Explosion Review Group）によるレビュー評価として纏められ、「圧力容器内水蒸気爆発はリスクの観点から無視できる」と結論付けられている。この結論は1997年のFCIに関する専門家会議においても、SERGの結論の変更は不要であることが

確認されている。また、米国原子力規制委員会 NRC は、原子炉容器内 FCI から水蒸気爆発に至り原子炉格納容器が破損する事象（いわゆるαモード破損）については、これまでの専門家による検討結果では、発生する可能性は非常に低く、問題は解決済みと結論付けられている[1]。また、原子炉容器内 FCI から圧力スパイクに至る事象については、1次系圧力を上昇させることはあるが、原子炉格納容器への直接的な脅威にはならない。

一方、緩和策により注水された原子炉下部キャビティに溶融炉心が落下する場合の FCI（原子炉容器外 FCI）は、原子炉容器内 FCI が高圧かつ高温（低サブクール度）の条件下であることに対し、低圧かつ低温（高サブクール度）であり、定性的には水蒸気爆発が発生し易いと言われている。また、圧力スパイクの観点でも、水プールの容量が原子炉容器内よりも大きく、水蒸気の発生量自体も多くなる可能性がある。

ここでは、原子炉容器外 FCI に主眼をおいて、国内外で実施された実験等により得られた知見について整理する。

3.1 FCI 実験の概要

FCI 実験は、主として溶融物を水プールに落下させ、水プールとの混合の際に発生する諸現象について解明することを目的としたものであり、国内外の研究機関において、種々の実験研究が行われている。その中で、比較的大規模な実験として、欧州 JRC（Joint Research Center）のイスプラ研究所の FARO 実験、同じくイスプラ研究所の KROTOS 実験、旧原子力研究所 JAERI の ALPHA 実験、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 COTELS 実験が行われており、これらの実験について、その概要とそこで得られた知見について整理する。

（1）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 3.1-1 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 3.1-1 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。

---

[1] NRC, "A Reassessment of the Potential for an Alpha-Mode Containment Failure and Review of the Current Understanding of Broader Fuel-Coolant Interaction Issue", NUREG-1524

いずれの FARO 実験においても、高圧条件、低圧条件ともに、水蒸気爆発の発生は観測されなかったが、圧力スパイクは観測されている。典型的な圧力変化の例として、ケース L-14 の結果を図 3.1-2 に示す。溶融物の落下に伴う圧力上昇は、短期間（約 3 秒）で発生していることがわかる。

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)、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。

なお、FARO 実験に対してＭＡＡＰコードにおいて実験解析が行われており、圧力スパイク等の実験結果と解析結果が比較されている。

（2）KROTOS 実験

欧州 JRC（Joint Research Center）のイスプラ研究所における FARO 計画の一環として行われた実験であり、FARO 実験が高圧条件を主目的に行われたのに対して、KROTOS 実験では、低圧及びサブクール水を主として実施されている。

実験装置の概要を図 3.1-3 に示す。実験手順は、FARO 実験とほぼ同様であり、電気炉内で模擬物質を溶融させ、水プールに落下させる。実験条件は、表 3.1-2 に示すとおりであり、模擬物質は酸化アルミニウム（Al_2O_3）と UO_2 混合物（約 80wt%UO_2 +約 20wt%ZrO_2）が用いられており、アルミナ 1.0～1.8kg、UO_2 混合物は 2.62～5.15kg、水プールの水深は約 1.1m、水プールのサブクール度は 4～123K の範囲で変動させ複数のケースが行われている。また、水プール底部からのガス注入による外部トリガを与えることで水蒸気爆発を誘発させたケースも行われている。

アルミナを用いた実験では、サブクール水の場合は外部トリガなしで水蒸気爆発が発生し、低サブクールの場合（ケース 27、28、41、44、50、51）は、外部トリガがある場合（ケース 28 及び 44）に水蒸気爆発が発生する結果であった。一方、UO_2 混合物を用いた実験では、サブクール度は 4～123K の範囲で、外部トリガなしでは水蒸気爆発は発生せず、外部トリガありの場合でも、溶融物の重量が多い、あるいは、水プールのサブクール度が大きい場合（ケース 46、52、53）に水蒸気爆発が観測されているが、エネルギ変換効率はアルミナのケースよりも 1 桁以上低い結果であった。なお、ケース 47 は水蒸気爆発には至らなかったと判断されたが、圧力スパイクから計算された機械的エネルギへの変換効率は 0.01%である。図 3.1-4 に、アルミナ（ケース 42、水蒸気爆発あり）と UO_2 混合物（ケース 37、水蒸気爆発なし）

の圧力変化を示す。アルミナの場合、初期の圧力上昇は、比熱の小ささから、UO_2混合物に比べて緩やかであるが、約1,750ms時点では、瞬時に圧力上昇が観測されている。

このように、アルミナとUO_2混合物のケースで、水蒸気爆発の発生の有無や規模が異なる結果となっており、その考察が行われている。粒子径はアルミナの8～17mmに対しUO_2混合物は1～1.7mmであり、UO_2混合物の方が小さく、粒子化直後の表面積が大きいことから粗混合時に水プールが高ボイドとなり、トリガの伝搬を阻害した可能性がある。また、アルミナは、比重が小さいことから水面近傍でブレークアップし、径方向に拡がったためにトリガの伝搬がしやすくなったと考えられている。また、UO_2混合物では、粒子表面と水が接触した直後に表面が固化し、かつ、金属－水反応によって発生した水素が蒸気膜に混入していることにより、これらが要因となって水蒸気爆発の発生を阻害していると考えられている。

（3）ALPHA実験

旧原子力研究所JAERIで行われた実験であり、シビアアクシデント時の原子炉格納容器内の諸現象を明らかにするとともに、緩和策の有効性を評価することを目的とした事故時原子炉格納容器挙動試験（ALPHA：Assessment of Loads and Performance of Containment in Hypothetical Accident）の一環で実施された。

実験装置の概要を図3.1-5に示す。実験では、溶融ステンレス鋼（高周波誘導加熱）あるいは酸化アルミニウムと鉄から成る溶融物（テルミット反応により加熱）を、ALPHA装置の模擬原子炉格納容器内の水プールに落下させるものであり、模擬原子炉格納容器は内径4m、高さ5m及び容積50m^3である。

実験条件及び結果の一覧を表3.1-3に示す。図3.1-6には、水蒸気爆発が生じた代表的なケースとしてケース016の圧力応答を示しているが、図から分かるように圧力上昇は約0.13MPaと低いものであった。

溶融ステンレス鋼の場合（ケース102～104）では、水プールのサブクール度が大きい場合でも水蒸気爆発の発生は観測されなかった。

酸化アルミニウムと鉄の溶融物の実験では、多くのケースが実施されており、溶融物重量、雰囲気圧力、プール水サブクール度を変化させて行われ、さらに、溶融物を分散させ複数のジェットを形成させたケースも行われている。ケース002、003、005、009、016、017及び018は、溶融物20kg、雰囲気圧力0.1MPaで、サブクール度73～90Kで行われたものであり、いずれも水蒸気爆発が観測されている。溶融物重量を半減させたケース001、010及び013では、ケース010のみ水蒸気爆発が観測された。この3ケースの条件は有意な差がないことから、この実験体系において水蒸気爆発の発生の有無の境界近傍であり、この結果から、溶融物の落下量が多い場合に水蒸気爆発の発生しやすいことが示されている。水プールを飽和水とした

ケース 014 では、水蒸気爆発が観測されなかった。一方、ケース 008、012、015 及び 025 では、0.5～1.6MPa の範囲で雰囲気圧力を変化させているが、最も低い 0.5MPa のケースのみ水蒸気爆発が観測された。これらより、高雰囲気圧力あるいは低サブクール度の場合に水蒸気爆発が抑制される傾向にあることが示されている。

ケース 006、011、019、020 及び 021 は、溶融物を分散させ複数のジェットを形成させたケースであり、3 ケースで水蒸気爆発が観測されたが、水蒸気爆発の規模は抑制される場合と増大される場合があり、溶融物と冷却水の粗混合状態が FCI の進展に大きな影響を及ぼすことを示唆していると結論付けられている。

（4）COTELS 実験

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 3.1-7 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、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。

表 3.1-4 に示す 8 ケースの実験では、サブクール度が大きいケースも含め、すべての実験で水蒸気爆発は発生していない。典型的な圧力の応答として、ケース A-1 における計測結果を図 3.1-8 に示す。溶融ジェットと水プールが接触した直後（Region 1）では、急激な圧力上昇が見られ、その後は溶融物のエネルギが水プールの沸騰に変換されるにつれて、緩やかに圧力が上昇している。溶融物が水プールに落下した直後の圧力上昇は、溶融物の落下速度に最も大きな影響を受け、圧力上昇速度、上昇幅ともに、落下速度に比例する。また、水蒸気爆発が生じていないため、プール水のサブクール度が大きくなると初期の圧力上昇幅は小さくなる傾向にあったと報告されている。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。

3.2 FCI 実験の知見の整理

ここでは、「3.1 FCI 実験の概要」に示した知見に関する整理を行う。

（1）FCI 現象への影響因子

国内外の FCI 実験で得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- 水プールの水深が深い場合、細粒化割合が大きい。FARO 実験のうち、原子炉容器外 FCI を想定したケースでは、水深が 1～2m の場合に対して、溶融物のほとんどが細粒化した。一方、COTELS 実験では、水深が 0.4m の場合に対して、溶融物の 90%以上が細粒化した。
- 水プールのサブクール度が大きい場合、水蒸気爆発に至る可能性は高いが、圧力スパイクの観点からは、サブクール度が小さい方が厳しい。KROTOS 実験（ケース 46、52、53）において、UO_2混合物に対して、水プールのサブクール度が大きく外部トリガを与えた場合に、水蒸気爆発が発生した。一方、圧力スパイクについては、サブクール度が 77K の場合には約 0.06MPa の圧力上昇（KROTOS 実験（ケース 37））、サブクール度が 0K の場合には約 3MPa の圧力上昇（FARO 実験（ケース L-14））となった。
- 溶融炉心の落下量が多い場合は、圧力上昇が大きい。COTELS 実験（ケース A-1）では、サブクール度 0K で落下量が 56.3kg であり、圧力上昇は 8 秒で約 3MPa、FARO 実験（ケース L-14）では、サブクール度 0K で落下量が 125kg であり、圧力上昇は 3 秒で約 3MPa であった。
- デブリ粒子の径は、UO_2混合物の場合、実験によりばらつきはあるが、1～6mm であった。観測されたデブリ粒子径は、FARO 実験では 3.2～4.8mm、KROTOS 実験では 1～1.7mm、COTELS 実験では約 6mm であった。
- デブリ粒子の径は、デブリジェットの落下速度に反比例する傾向があることが、COTELS 実験で確認された。
- デブリ粒子の径が小さい方が、初期の圧力上昇幅が大きくなる傾向があることが COTELS 実験で確認された。

これらの知見について、PWR プラントの体系に置き換えると以下の 3 つの観点に分類できる。

- 原子炉下部キャビティ水の状態（水温及び水量）
- 溶融炉心の落下量（落下速度）と細粒化量
- 原子炉下部キャビティ水とデブリ粒子の伝熱（デブリ粒子の径）

（2）原子炉容器外 FCI における水蒸気爆発の発生可能性

水蒸気爆発は、溶融炉心と冷却水の相互作用（FCI）のうち、溶融炉心と水の伝熱

により水蒸気が生成される過程で衝撃波を伴う現象であり、溶融炉心はエントレインされ粒子状となり水中に混合する、“初期粗混合”の状態において、デブリ粒子を覆う蒸気膜が局所的に崩壊（トリガリング）し、デブリ粒子と水が直接接触して急激な伝熱が行われ、これらエントレインされた周囲のデブリ粒子に瞬時に拡大及び伝ぱして、系全体で水蒸気が爆発的に発生し、衝撃波を生じ、原子炉格納容器への機械的荷重が生じると考えられている。

ここでは、FCI実験のうち、UO_2を用いたFARO実験、KROTOS実験及びCOTELS実験の結果から、水蒸気爆発に至る可能性について考察する。

３つの実験のうち、水蒸気爆発が観測されたのはKROTOS実験のみで、水プール底から圧縮ガスを供給し膜沸騰を強制的に不安定化（外部トリガリング）を行った場合に水蒸気爆発が観測されているが、外部トリガリングを行ったケースでも、水蒸気爆発が観測されないケースもあった。これらを比較する。ケース46及び47は、ケース36及び37と同程度のサブクール度であるが、落下させる溶融物が約1.6倍であり、同じサブクール度であれば溶融物の落下量が多い場合に水蒸気爆発の可能性が高まることを示している。また、ケース52及び53は、ケース36及び37と比べて落下させる溶融物がわずかに少ない2.6 kgであるが、サブクール度が大きく、ケース52及び53で水蒸気爆発の発生が観察されている。このことから、サブクール度が大きい場合に水蒸気爆発の可能性が高くなると言える。

この結果を踏まえれば、FARO実験のケースL-33は、KROTOS実験ケース53と同程度のサブクール度であるが、溶融物は約40倍の量であり、水蒸気爆発が起こりやすい条件と言えるが、水蒸気爆発は観察されていない。一方、COTELS実験では、UO_2割合は低めであるが、溶融物の量は、FARO実験とKROTOS実験の中間的な量である。いずれのケースも、水蒸気爆発の発生は観察されなかった。

以上、UO_2を用いたFARO実験、KROTOS実験及びCOTELS実験について分析した結果、KROTOS実験で外部トリガリングによりデブリ粒子を覆う蒸気膜の崩壊を促進させたケースで、溶融物が多い、又は、サブクール度が大きい場合に水蒸気爆発に至っている。また、KROTOS実験で水蒸気爆発が確認されたケースよりも溶融物が多いFARO実験やCOTELS実験では、水蒸気爆発は観察されていない。このことから、デブリ粒子を覆う蒸気膜は安定性があり、外部トリガリングなどの外的な要因がなければ、蒸気膜の崩壊は起こりにくいことを示している。

したがって、実機においては、原子炉下部キャビティ水は準静的であり、KROTOS実験のような外部トリガリングとなり得る要素は考えにくく、実機において大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて低いと考えられる。

また、炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率について、ＪＡＳＭＩＮＥコード

を用いて水蒸気爆発が発生したという条件における格納容器破損確率が評価[2]されている。

これについて、初めに、炉外水蒸気爆発の起こりやすさの観点で整理する。本解析では水蒸気爆発を起こしやすくするため、爆発の規模が最も大きくなり得る時刻、すなわち粗混合融体質量が最初のピークをとる時刻に恣意的にトリガリングを与えている。これは、爆発に関与し得る融体の質量が最大に近く、ボイド発生とそれによる圧力の減衰が低い条件であることから、爆発の強度が大きくなりやすい条件となっているが、実機では、前述のとおり原子炉下部キャビティ水は準静的であり、トリガリングとなり得る要素は考えにくい。

次に水蒸気爆発が起こったときの影響の観点で整理する。本論文の中で、原子炉格納容器のフラジリティ分布については、大半が200MJ以上の範囲に含まれている。また、ＪＡＳＭＩＮＥコードにおけるランダムサンプリング解析結果によれば、融体ジェット直径の分布として0.1m～1mの一様分布を仮定しており、0.9mを超える場合に、流体の運動エネルギが200MJを超える結果となっている。これに対して実機解析では、融体ジェット口径は約 0.5m であることから、流体の運動エネルギは200MJ以下と考えられ、この結果フラジリティカーブと重ならず、格納容器破損確率は十分低くなる。

フラジリティの設定についても原子炉容器の上昇運動エネルギが遮へい壁構造物の破損エネルギで吸収できない場合に即、原子炉格納容器破損に至るという簡易的な取扱いとしている。これに対して実機では、原子炉容器の上昇運動エネルギが遮へい壁構造物の破損エネルギで吸収できない場合でも、遮へい壁構造物以外の原子炉格納容器内構造物でエネルギが吸収できるため、即時に原子炉格納容器破損に至らないと考えられる。

以上のとおり、トリガリングの付与、流体の運動エネルギの大きめな評価、及びフラジリティの簡易的な取扱いをした場合の、条件付確率として、PWRに対する評価結果として 6.8E-2（平均値）が算出されている。実機では、トリガリングとなりうる要素は考えにくいこと、融体ジェット口径が約0.5mであること、遮へい壁構造物以外の構造物で吸収できるエネルギがあることから、格納容器破損確率は本評価結果より十分低い値になると考えられる。

3.3 これまでの知見のまとめ

これまでの知見をまとめると、以下のとおりである。

- 原子炉容器内FCIから水蒸気爆発に至り原子炉格納容器が破損する事象（いわゆるαモード破損）については、発生する可能性は非常に低い。

---

[2] JAEA-Research 2007-072「軽水炉シビアアクシデント時の炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率の評価」2007年8月

- 原子炉容器外 FCI については、UO_2 を用いた各種実験において、外部トリガリング等の外的な要因がなければ水蒸気爆発の発生は観察されていない。
- 恣意的なトリガリングの付与など、水蒸気爆発が起こりやすくなるような条件下における格納容器破損確率評価では、実機より保守的な条件で評価されており、実機での確率は十分低くなると考えられる。

以上から、FCI は原子炉格納容器への直接的な脅威にはならないと考えられる。

表 3.1-1　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 80wt%UO_2＋20wt%ZrO_2、0.77 の場合の組成は 77wt%UO_2＋19wt%ZrO_2＋4wt%Zr。

表 3.1-2　KROTOS 実験条件及び結果一覧

実験 ID	溶融物タイプ	UO_2 割合	溶融物質量 kg	溶融物温度 K	圧力 MPa	水深 m	サブクール度 K	外部トリガ	水蒸気爆発	機械的エネルギへの変換効率
26	Al_2O_3	0	1.00	2,573	0.1	1.08	40	●	●	0.53 %
27	Al_2O_3	0	1.43	2,573	0.1	1.08	10	−	−	−
28	Al_2O_3	0	1.43	2,573	0.1	1.08	13	●	●	0.85 %
29	Al_2O_3	0	1.45	2,573	0.1	1.08	80	−	●	0.72 %
30	Al_2O_3	0	1.52	2,573	0.1	1.08	80	−	●	1.1 %
38	Al_2O_3	0	1.53	2,665	0.10	1.11	79	−	◍	1.45 %
40	Al_2O_3	0	1.47	3,073	0.10	1.11	83	−	●	0.9 %
41	Al_2O_3	0	1.43	3,073	0.10	1.11	5	−	−	−
42	Al_2O_3	0	1.54	2,465	0.10	1.11	80	−	●	1.9 %
43	Al_2O_3	0	1.50	2,625	0.21	1.11	100	−	●	1.3 %
44	Al_2O_3	0	1.50	2,673	0.10	1.11	10	◍	●	2.6 %
49	Al_2O_3	0	1.74	2,415	0.37	1.11	120	−	●	2.2 %
50	Al_2O_3	0	1.57	2,200	0.10	1.11	13	−	−	−
51	Al_2O_3	0	1.80	2,475	0.10	1.11	5	−	−	−
32	81wt%UO_2+19wt%ZrO_2	0.81	3.03	3,063	0.10	1.08	22	−	−	−
33	81wt%UO_2+19wt%ZrO_2	0.81	3.20	3,063	0.10	1.08	75	−	−	−
35	79wt%UO_2+21wt%ZrO_2	0.79	3.10	3,023	0.10	1.08	10	◍	−	−
36	79wt%UO_2+21wt%ZrO_2	0.79	3.03	3,025	0.10	1.08	79	●	−	−
37	79wt%UO_2+21wt%ZrO_2	0.79	3.22	3,018	0.10	1.1	77	◍	−	−
45	80wt%UO_2+20wt%ZrO_2	0.8	3.09	3,105	0.10	1.14	4	◍	−	−
46	79wt%UO_2+21wt%ZrO_2	0.79	5.05	3,088	0.10	1.1	83	◍	●	0.04 %
47	80wt%UO_2+20wt%ZrO_2	0.8	5.15	3,023	0.10	1.1	82	◍	−	0.01 %
52	80wt%UO_2+20wt%ZrO_2	0.8	2.62	3,023	0.20	1.1	102	◍	◍	0.02 %
53	80wt%UO_2+20wt%ZrO_2	0.8	2.62	3,023	0.36	1.1	123	◍	●	0.05 %

・"◍" あり、"−" なし

・エネルギ変換効率の "−"は報告書において評価値の記載されていないものである。

表 3.1-3　ALPHA 実験条件及び結果一覧

実験 ID	溶融物タイプ	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	備考
002	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	1	84	●	
003	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	1	81	●	
005	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	1	73	●	
009	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	1	84	●	
016	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	1	78	●	
017	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	0.9	87	●	
018	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	0.9	90	●	
001	$Fe+Al_2O_3$	0	10.0	2,723.15	0.1	1	80	−	溶融物半減
010	$Fe+Al_2O_3$	0	10.0	2,723.15	0.1	1	76	●	溶融物半減
013	$Fe+Al_2O_3$	0	10.0	2,723.15	0.1	1	89	−	溶融物半減
014	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	1	1	−	飽和水
008	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	1.6	1	186	−	高圧
012	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	1.6	1	184	−	高圧
015	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	1.0	1	171	−	高圧
025	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.5	0.9	145	●	高圧
006	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	1	75	−	溶融物分離器
011	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	1	83	●	溶融物分離器
019	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	0.9	92	●	溶融物分離器
020	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	1	92	−	溶融物分離器
021	$Fe+Al_2O_3$	0	20.0	2,723.15	0.1	0.9	92	●	溶融物分離器
102	SUS	0	20.0	2,070	0.1	0.8	91	−	
103	SUS	0	20.0	1,950	0.1	0.8	0	−	
104	SUS	0	20.0	2,070	0.1	0.8	40	−	

・"●" あり、"−" なし

表 3.1-4　COTELS 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

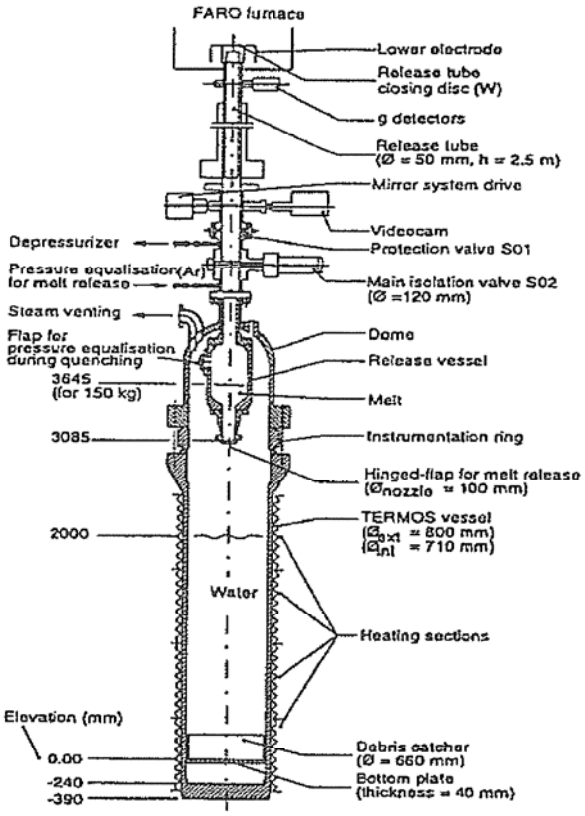


図 3.1-1　FARO 実験装置

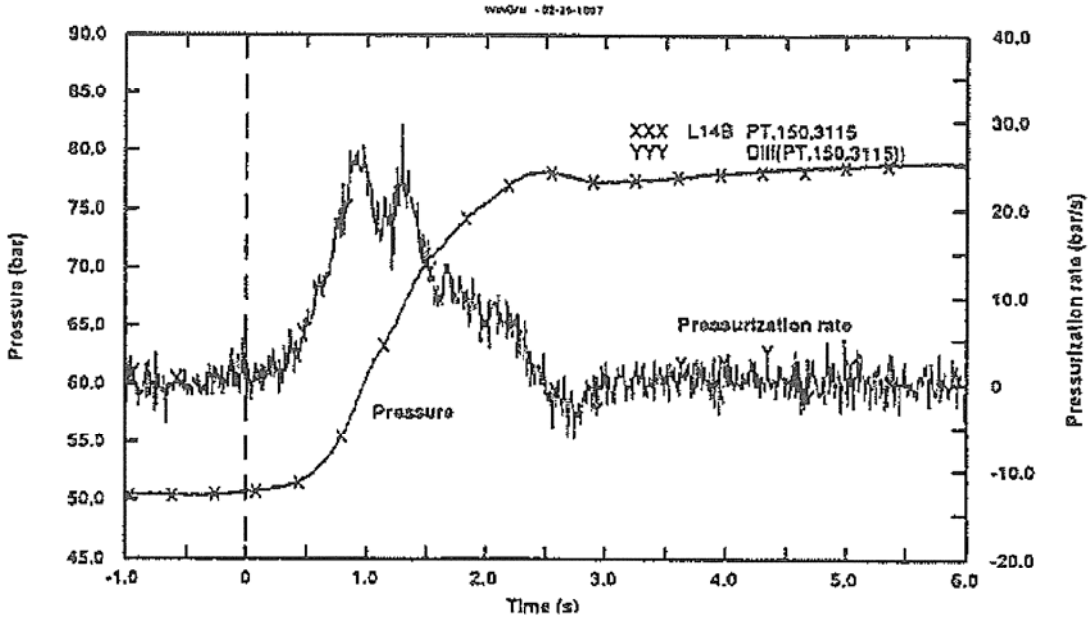


図 3.1-2　FARO 実験代表的圧力変化（L-14）

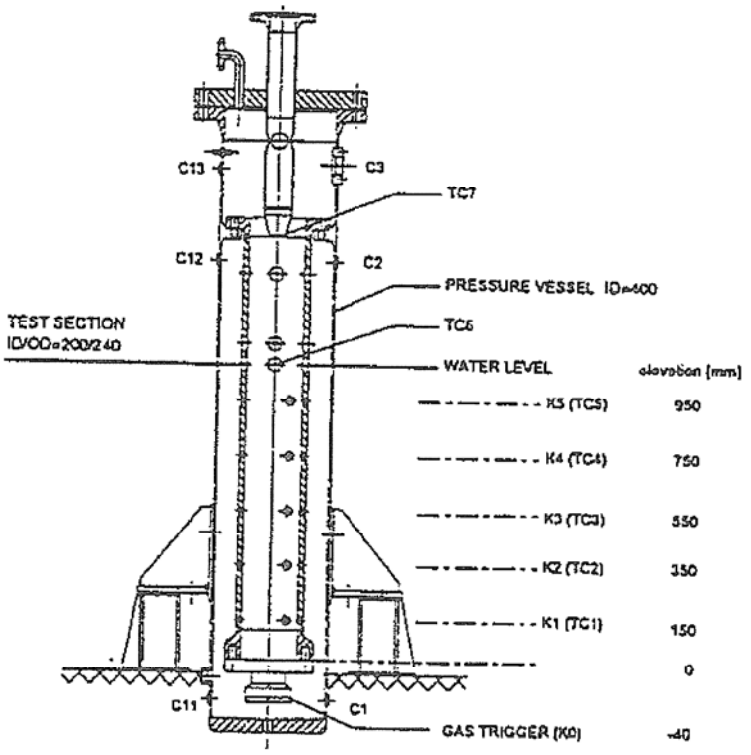


図 3.1-3　KROTOS 実験装置

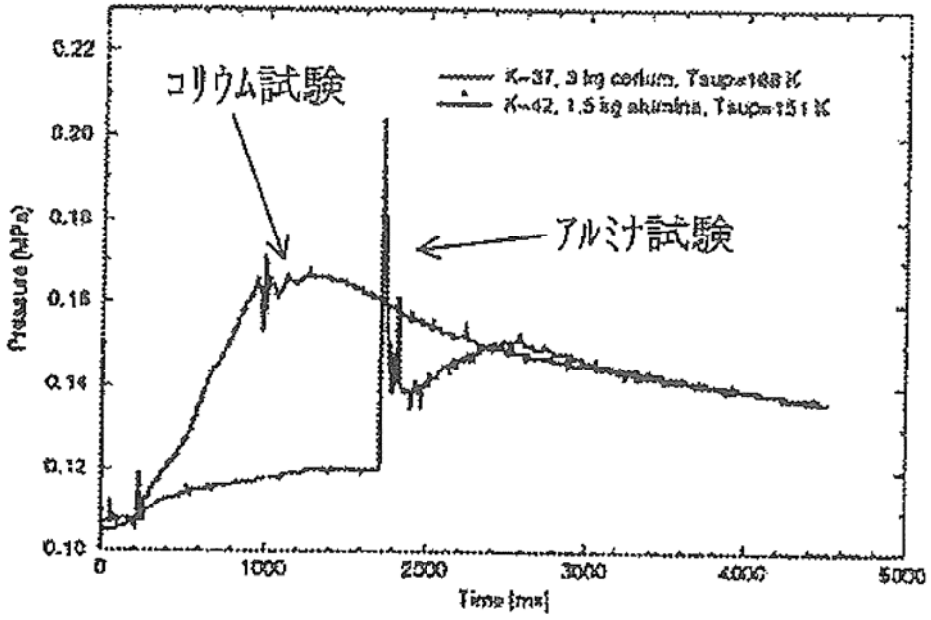


図 3.1-4　KROTOS 実験代表的圧力変化（ケース 37 及び 42）

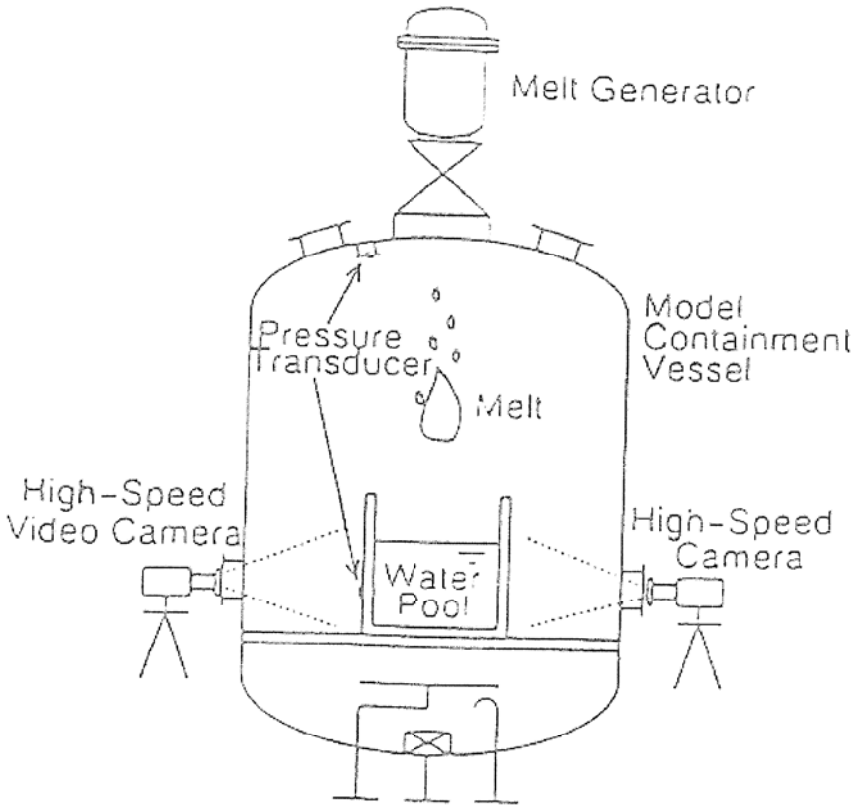


図 3.1-5　ALPHA 実験装置

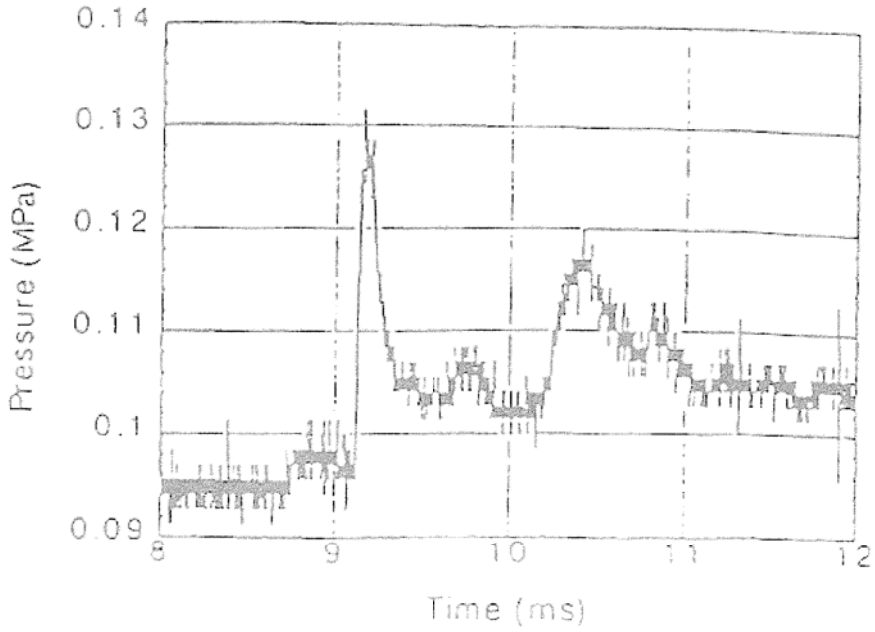
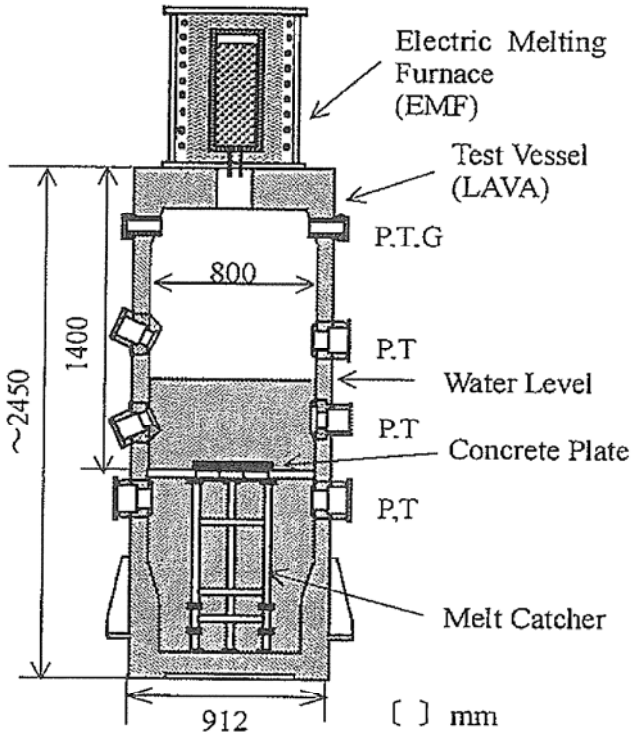


図 3.1-6　ALPHA 実験代表的圧力変化（016）



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

図 3.1-7　COTELS 実験装置

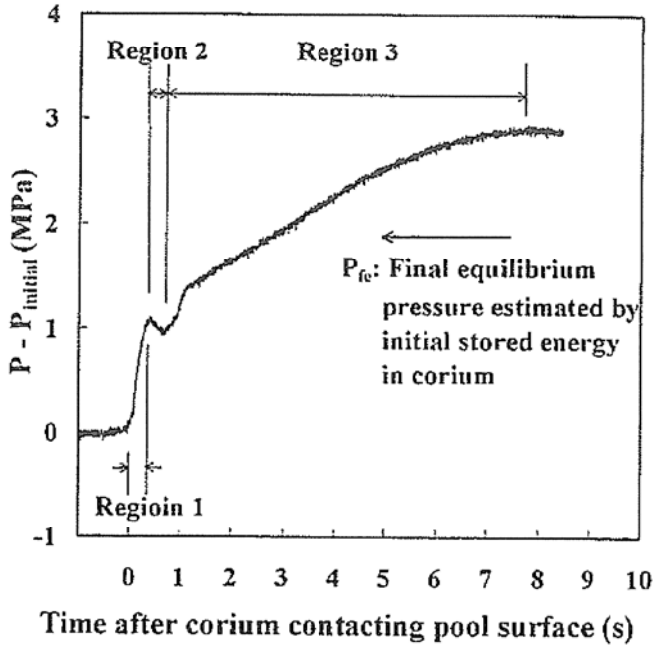


図 3.1-8　COTELS 実験代表的圧力変化(A-1)

4. 不確かさに関する整理

原子炉容器外 FCI について、実現象と解析モデルの差に着目しつつ、不確かさの整理を行う。なお、「3.3 これまでの知見のまとめ」で述べたように、原子炉容器外 FCI における水蒸気爆発の発生可能性は低いことから、ここでは、圧力スパイクの観点で整理を行う。

前述のとおり FCI は、細粒化した溶融炉心（デブリ粒子）により原子炉下部キャビティ水が加熱される際に水蒸気が発生し、圧力上昇（圧力スパイク）を引き起こす現象である。したがって、水の状態、溶融炉心の状態及びこれらの相互作用として分けて考えることができることから、原子炉容器外 FCI 現象の影響因子としては、

・原子炉下部キャビティ水温及び水量
・溶融炉心の落下量（落下速度）と細粒化量
・原子炉下部キャビティ水とデブリ粒子の伝熱

として分類できる。また、水蒸気発生後の圧力上昇に関しては、原子炉下部キャビティ区画の圧力変化が原子炉格納容器上部区画に伝ぱされる挙動であることから、

・原子炉格納容器内での水蒸気の流動

についても不確かさの要因として考えられる。

以下、それぞれに関して、ＭＡＡＰコードの解析モデル上の取扱いを踏まえ、考え方を整理する。また、表 4-1 に原子炉容器外 FCI の不確かさに関する整理結果を示す。図 4-1 に以下について整理した流れ図を示す。

（1）原子炉下部キャビティ水温及び水量

原子炉下部キャビティ水温が高い場合（＝サブクール度が小さい場合）には、水蒸気発生が促進され、圧力スパイクの観点では厳しい方向となる。原子炉下部キャビティ水は、１次系から放出された冷却水とスプレイ水が混合したものであり、これらの質量及びエネルギバランスより、原子炉下部キャビティ水温が決定される。１次系から放出された冷却水の初期状態は、プラント設計に基づき設定されるものである。一方、スプレイ水は、再循環前は RWST を水源とし、再循環後はサンプ水から熱交換器を通って得られた水温が使用される。ここで、有効性評価の解析では RWST の水温を、現実的な範囲内で高めの値である夏季温度を設定している。したがって、不確かさが存在する場合でも、原子炉下部キャビティ水温は、解析で仮定した条件よりも低くなる方向であり、水蒸気の大量発生の観点から、不確かさは問題とならない。また、事象による違いとして、有効性評価では原子炉格納容器破損シーケンスとして大破断 LOCA＋ECCS 注入失敗＋CV スプレイ注入失敗及び全交流動力電源喪失＋補助給水失敗を選定している。3 ループプラントを対象とした、これらのシーケンスに対する原子炉下部キャビティ水温の比較図を図 4-2 に示す。上記のように、大破断 LOCA では高温の 1 次系からの破断流が初期より原子炉下部キャビティに放出されるため原子炉下

部キャビティ水温はより早期に上昇する。全交流動力電源喪失では主に代替格納容器スプレイから注水されるため初期の温度は低いが、原子炉容器破損までの時間が長いことから、次第に飽和温度に近づいていく。結果として、原子炉容器破損時点での原子炉下部キャビティ水温はほぼ同程度であるが、全交流動力電源喪失では原子炉容器破損が遅いことから、原子炉容器破損時点での原子炉格納容器圧力も高めとなっており、サブクール度は大破断 LOCA の方が小さい。以上より、圧力スパイクの観点で大破断 LOCA の方が厳しいと言える。なお、ＭＡＡＰコードでは、デブリ粒子の熱エネルギは水蒸気生成に費やされる熱量と水に伝熱する熱量に分けられ、水蒸気生成に費やされる熱量は系の圧力とサブクール度から計算される。また、気泡の上昇速度が臨界速度よりも大きい場合には、周囲の水が気泡の流れによって巻き込まれ、巻き込まれた水に気泡の水蒸気が凝縮することもモデル化されている。

一方、原子炉下部キャビティ水位に関しては、水深が深い方が、溶融炉心の細粒化量が多くなる傾向がある。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。すなわち、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。したがって、原子炉下部キャビティ水深の感度を確認する。

（２）溶融炉心の落下量（落下速度）と細粒化量

溶融炉心の落下量及び落下速度は、原子炉容器の破損口径と破損時の１次系圧力及び下部プレナム内の溶融炉心水頭に依存する。

原子炉容器の破損口径に関しては、原子炉容器下部ヘッドに貫通部が存在し、主たる破損モードは、貫通部（計装案内管）の溶接部が破損し、貫通部程度の開口が生じるものと仮定している。したがって、破損の際、貫通部と同等の破損口が形成されるのか貫通部の周辺も溶融破損するのかについては不確かさがあることから、破損口径の感度を確認する必要がある。なお、原子炉容器破損形態に関しても、不確かさが存在するが、破損口径として整理できる。

１次系圧力に関して、圧力が高ければ原子炉容器下部ヘッド破損口からの溶融炉心の落下（噴出）を加速させる傾向がある。炉心溶融時に１次系圧力が高い状態の重要事故シーケンスにおいては、炉心損傷検知後の運転員等操作による加圧器逃がし弁の開放に伴い、溶融炉心の落下前に、１次系は十分に減圧された状態となる。

細粒化量に関して、ＭＡＡＰコードでは、Ricou-Spalding の式から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、

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

で表される。ここで、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（溶融炉心の落下速度）、ρ_wは静止側の流体密度（原子炉下部キャビティ水の密度）、ρ_{jet}は噴出側の流体密度（溶融炉心の密度）である。上記エントレインメント則に示すように流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大値は最確値よりも約□割大き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、すなわち約 5 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。

以上より、落下速度の不確かさ幅はエントレインメント係数の不確かさ幅に包絡されることから、溶融炉心落下速度の不確かさの影響は、細粒化量の不確かさとして整理することとし、溶融炉心落下速度の不確かさの影響も含めて、エントレインメント係数E_0に関して感度を確認する。

（３）原子炉下部キャビティ水とデブリ粒子の伝熱

水中にエントレインされたデブリ粒子は、高温かつ崩壊熱による発熱状態にあり、周囲の水が膜沸騰となることから、デブリ粒子自体は蒸気膜に覆われた状態である。

ＭＡＡＰコードでは、水中にエントレインされたデブリ粒子と水との伝熱は蒸気膜に覆われた粒子の熱伝達（膜沸騰熱伝達と輻射熱伝達）に関する相関式で表される。ここで、デブリ粒子から水への伝熱はデブリ粒子の径に依存する。また、原子炉下部キャビティ床に堆積したデブリ粒子は、細粒化されない他の溶融炉心とともに、均質

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

の平板として模擬される。

前述のとおり、溶融炉心のエントレインメント量は、Ricou-Spalding の式により計算され、デブリ粒子の数はデブリ粒子の径により計算されるため、デブリ粒子の径がキーパラメータである。有効性評価の解析では、デブリ粒子の径を、UO_2 及び ZrO_2 を用いた FCI の大規模実験に基づき設定していることから妥当であると考えるが、解析において設定したデブリ粒子の径は、FCI の大規模実験での平均的な値であり、実験ケースによってばらつきが存在している。したがって、この観点で不確かさが存在することから、デブリ粒子の径の感度を確認する。

なお、ＭＡＡＰコードでは、デブリ粒子径はデブリジェットの表面張力に依存するモデルとなっており、デブリジェット径には依存しない。

（４）原子炉格納容器内での水蒸気の流動

FCI による圧力スパイクの評価の観点では、原子炉下部キャビティ区画から他区画への気体の流れのモデルも不確かさの要因として考えられる。ＭＡＡＰコードでは、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であり、原子炉下部キャビティ区画から他区画への流れは、ノードの圧力、ジャンクションの圧力損失により、差圧流や臨界流として取り扱われる。

ジャンクションの圧力損失に関しては、一般的な流動モデルを扱っていることから、不確かさは小さいと判断する。

表 4-1　FCI の不確かさに関する整理結果

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水温	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温が決まる。	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の温度が評価される。	FCI を促進する取扱いのため、感度解析不要
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）
溶融炉心落下量	破損口径と同等の大きさで溶融炉心が流出すると想定される。	破損口径と同じ径で溶融炉心が流出する。破損口の侵食も考慮される。	破損口径 （5.（2）にて感度解析実施）
溶融炉心落下速度	原子炉容器内外圧力差、自重、破損口径によって落下速度が決まる。	原子炉容器内外圧力差、自重、破損口径によって落下速度が評価される。	エントレインメント係数 （5.（3）にて感度解析実施）
細粒化量	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.（3）にて感度解析実施）
原子炉下部キャビティ水とデブリ粒子の伝熱	デブリ粒子から水へ膜沸騰伝熱及び輻射熱伝達から伝熱量が決まる。	デブリ粒子から水へ膜沸騰伝熱及び輻射熱伝達による熱流束によって評価される。	デブリ粒子の径 （5.（4）にて感度解析実施）
原子炉格納容器内での水蒸気の流動	原子炉下部キャビティで発生した水蒸気が圧力差と流動抵抗によって他区画へ移行すると想定される。	ノードージャンクションモデルに従い、原子炉格納容器内を流れる水蒸気質量流量が評価される。	一般的な流動モデルで取扱っており、不確かさが小さく、感度解析不要

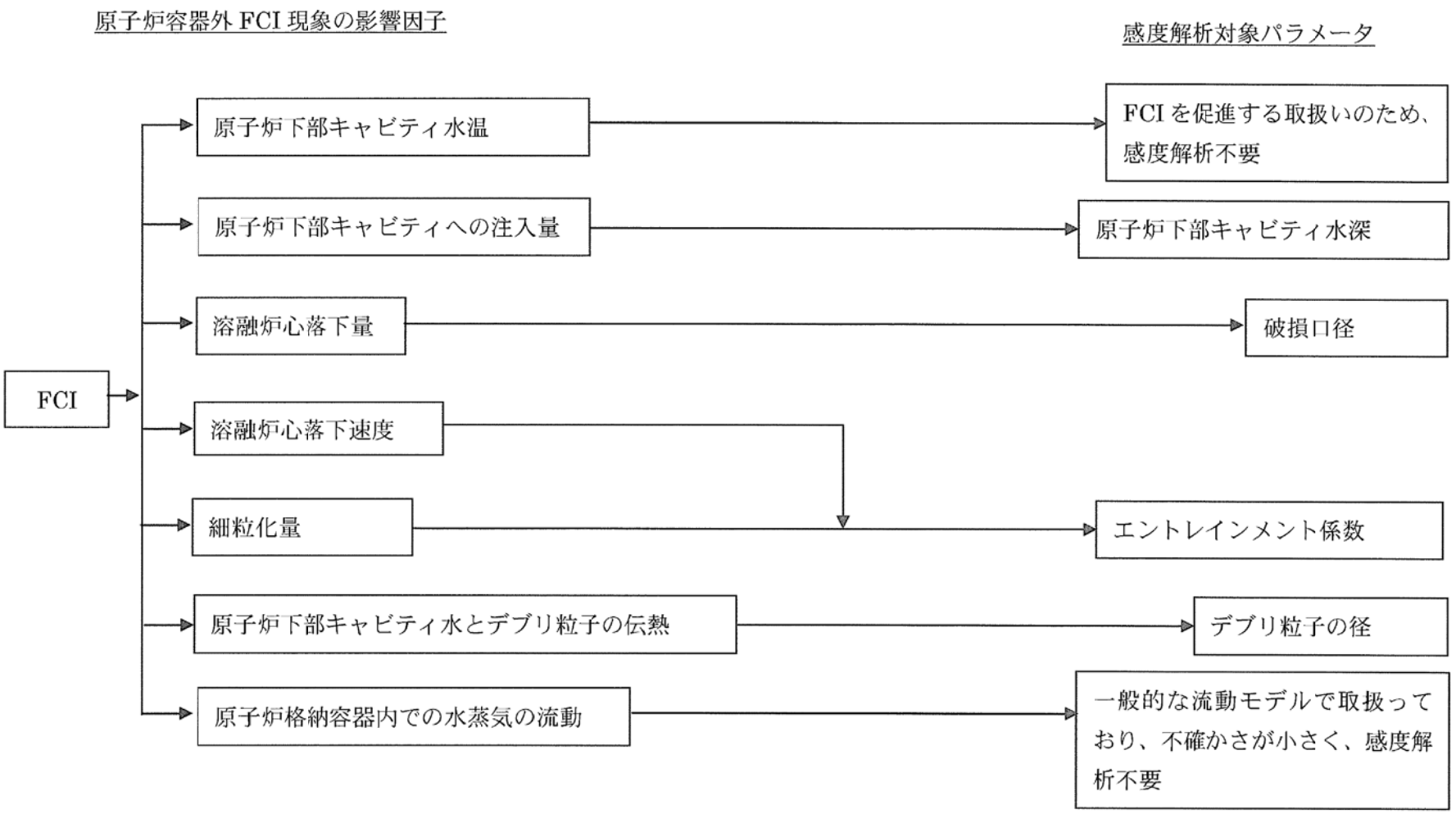


図 4-1　FCI における不確かさに関する流れ図

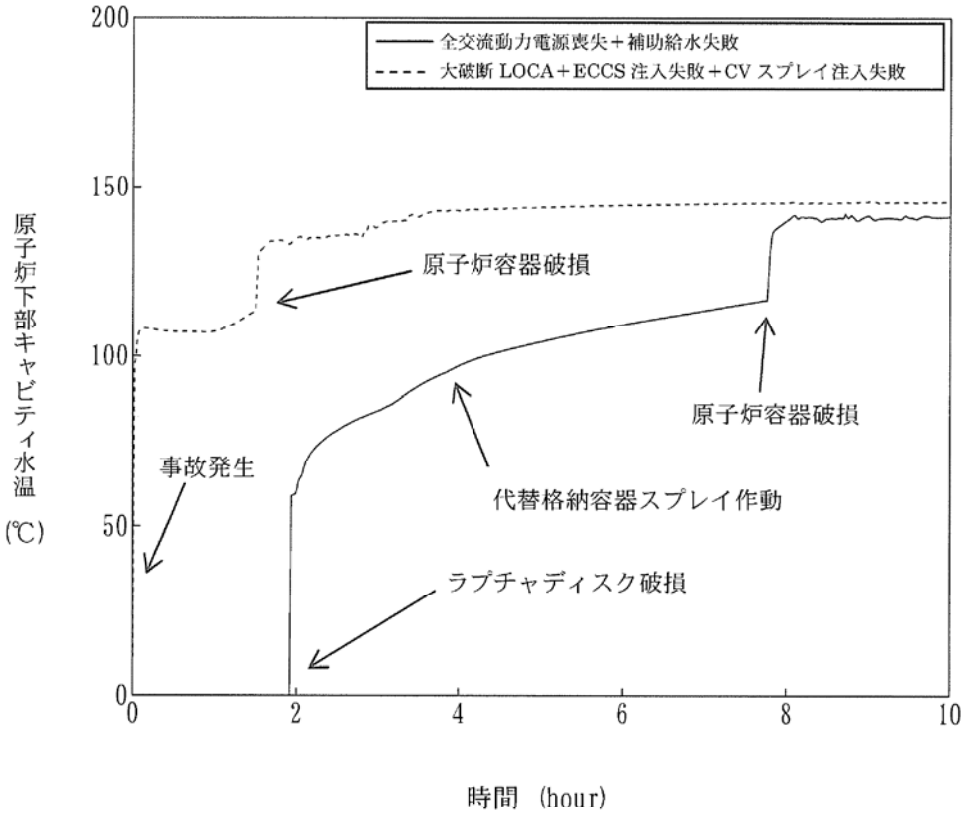


図 4-2　シーケンス間の原子炉下部キャビティ水温の比較（3 ループプラントの例）

5. 感度解析と評価

「4.不確かさに関する整理」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。

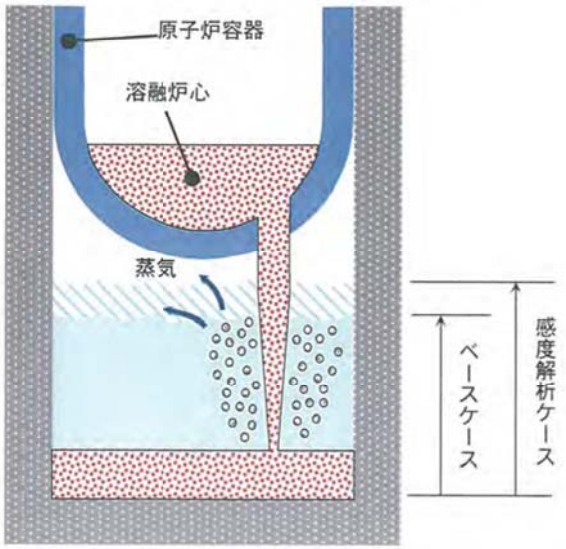
（1）原子炉下部キャビティ水深

解析条件

ベースケースでは、炉心溶融開始後 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、原子炉容器破損時点での原子炉下部キャビティ水深がより深くなる想定として、代替格納容器スプレイ作動のタイミングを変更する。

ベースケースでは炉心溶融後 30 分としているが、感度解析ケースでは 10 分早めて炉心溶融後 20 分での代替格納容器スプレイ作動を仮定した感度解析を実施する。

項　目	代替格納容器 スプレイ作動	設定根拠
ベースケース	炉心溶融開始後 30 分	運転員等操作余裕時間として設定
感度解析ケース	炉心溶融開始後 20 分	原子炉下部キャビティへの注入量を増加するため、ベースケースより 10 分早く、代替格納容器スプレイ作動を仮定



解析結果

図 5-1-1～5-1-5 に、代替格納容器スプレイ作動時刻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開始後 20 分以降に現れる。炉心溶融開始後 20 分までの挙動は同等である。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 10 分早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位がベースケースに比べて増加している。また、約 1.5 時間時点で原子炉容器破損が発生し圧力スパイクが起こるが、ベースケースと感度解析ケースで大きな違いはない。これは、PWR では格納容器体積が大きいことにより、過渡的な圧力上昇が緩和されたことから、感度解析に差が生じなかったと考えられる。

評価

原子炉下部キャビティ水深の圧力スパイク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。

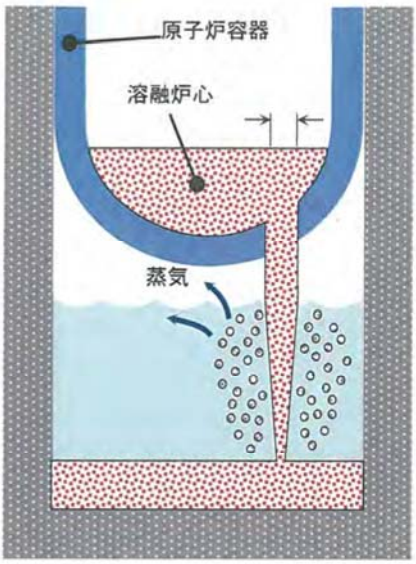
（2）原子炉容器の破損口径

解析条件

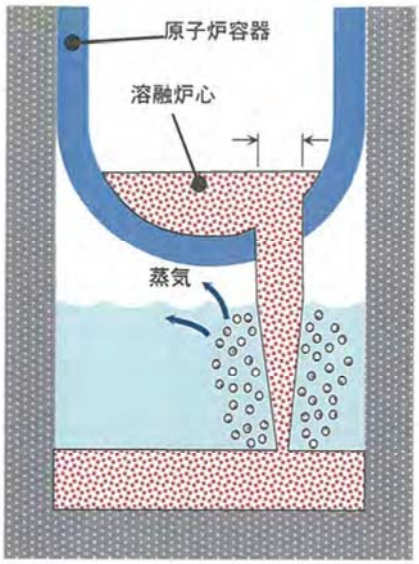
原子炉容器破損口の大きさには不確かさがあり、破損口の大きさが大きい場合に圧力スパイクが大きくなると考えられる。破損口初期径として、ベースケースでは原子炉容器貫通部 1 つ分の径である□m を与えているが、感度解析としてその約 3 倍の□m を設定する。貫通部の径に対して約 3 倍の初期径を想定したのは、貫通部の口径に対して隣接する計装案内管間の距離は数倍あり、隣接する貫通部が同時に破損すると、その間の領域の原子炉容器本体も同時に溶融破損する可能性も考慮したためである。

項　目	破損口の初期径	設定根拠
ベースケース	□ m	原子炉容器貫通部 1 つ分の径
感度解析ケース	□ m	隣接する貫通部の同時破損を想定

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



ベースケース



感度解析ケース

解析結果

図 5-2-1～5-2-5 に、原子炉容器の破損口径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。約 1.5 時間の時点で原子炉容器の破損が発生しており、感度解析ケースでは破損口径が大きくなることでデブリジェットの質量流量が増加し、原子炉下部キャビティの水位の低下がやや大きくなるが、ベースケースとの差はわずかである。これは、溶融炉心が破損口を通過する際に、溶融炉心からの対流熱伝達により破損口が溶融拡大され、結果的に破損口の初期径の差の影響が現れなかったこと、PWR では原子炉格納容器体積が大きいことにより、過渡的な圧力上昇が緩和されたことから、感度解析に差が生じなかったと考えられる。

評価

原子炉容器破損口径の圧力スパイク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）Ricou-Spalding のエントレインメント係数

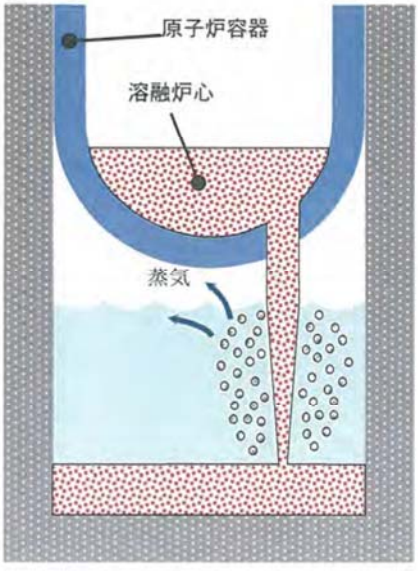
解析条件

細粒化割合には不確かさがあり、細粒化割合が大きい場合に圧力スパイクが大きくなると考えられる。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、ＭＡＡＰコードの当該変数の推奨範囲（□～□）のうち最も大きい値、すなわち、細粒化割合が大きく評価される値である□

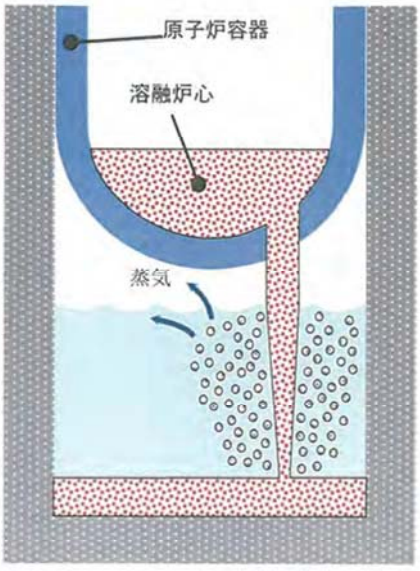
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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。実機条件に対して当該変数推奨値の最大値を与えて感度解析を実施することは、実現象よりも FCI の影響を過大に評価することになる。

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大値



ベースケース



感度解析ケース

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

解析結果

図 5-3-1～5-3-5 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。約 1.5 時間の時点で原子炉容器の破損が発生しており、そのとき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大きい結果となっている。また、原子炉下部キャビティの水温については、原子炉容器の破損に伴う溶融炉心の落下時点での温度上昇は感度解析ケースの方がわずかに大きい結果となっている。これは、エントレインメント係数を大きくすることで細粒化が進み、水との接触面積が大きくなり、水蒸気を短期間に発生させる効果があるためである。

ベースケース、感度解析ともに、発生水蒸気は水面に到達する間に周囲の水と熱交換し、水蒸気のエネルギは水温上昇に費やされるため、一部が凝縮し、圧力スパイクには寄与しなくなる。また、発生した水蒸気による原子炉格納容器の圧力上昇は、PWR では原子炉格納容器体積が大きいことにより緩和されたため、ベースケースとの圧力の差は小さくなり、エントレインメントに伴う圧力スパイクに対する感度は小さくなる。溶融炉心全体の熱量は、ベースケースと感度解析ケースで等価であるため、溶融炉心落下後の原子炉格納容器内温度、圧力、原子炉下部キャビティ水位等は一致した結果になり、エントレインメント係数を変更させたことの影響は過渡的なものとして現れる。

評価

エントレインメント割合の圧力スパイク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）デブリ粒子の径

解析条件

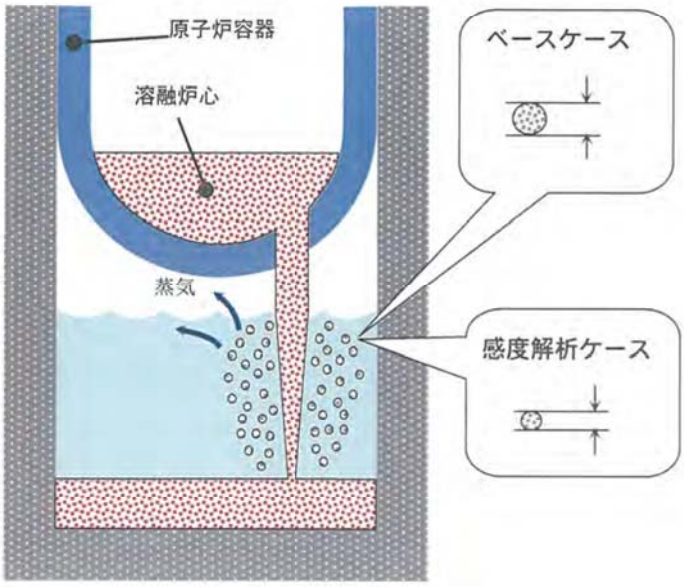
粒子の径には不確かさがあり、粒子の径が小さい場合に圧力スパイクが大きくなると考えられる。粒子の径に係る係数は、ベースケースでは FCI の大規模実験に基づく[　]を設定しているが、感度解析ケースでは、ＭＡＡＰコードの当該変数の推奨範囲（[　]～[　]）のうち最も小さい値、すなわち、デブリ粒子の径が小さく評価される値である[　]を設定する。なお、推奨範囲とは、FCI の大規模実験に対するベンチマーク解析において検討された範囲のことである。FCI の大規模実験の条件として、水プールの水深は 0.87～2.05m、水プールのサブクール度は飽和～124K、雰囲気圧力条件は 2～5.8MPa（高圧条件）、0.2～0.5MPa（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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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。しかし、細粒化したデブリ粒子の径については、溶融炉心の表面張力とジェット速度によって決まるものであり、ジェット径には依存しない。

また、デブリ粒子の径に関する入力値は、原子炉下部キャビティだけでなく、原子炉容器内での溶融炉心の細粒化に対しても適用されている（前述のエントレインメント係数については、原子炉下部キャビティと原子炉容器内で、個別に設定可能である）。

項　目	粒子径ファクタ	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



解析結果

図 5-4-1～5-4-5 に、デブリ粒子の径の感度解析結果を示す。デブリ粒子の径に関する入力値が原子炉容器下部プレナム部の細粒化にも適用されていることから、本解析では、原子炉容器下部プレナム部の応答も含めて考察する。

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溶融炉心の下部プレナムへの落下以降に現れる。溶融炉心が、原子炉容器下部プレナムに落下する時点（約 1 時間）での原子炉格納容器圧力の上昇は、ベースケースと感度解析ケースとで、差

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

はわずかである。その後、原子炉容器の破損時刻は、感度解析ケースの方が早い結果となっている。これは、デブリ粒子の径が小さくなることで下部プレナムに残留している冷却水の蒸発が早くなることと、径が小さいデブリ粒子が下部プレナム底に成層化することによるものである。そのため、下部プレナムに堆積した塊状の溶融炉心が冷却されにくくなり、結果として原子炉容器の破損が早まっている。

その後、約 1.5 時間で原子炉容器の破損に至り、溶融炉心が原子炉下部キャビティに落下し、水蒸気発生に伴う圧力上昇となり、感度解析ケースの方が、原子炉格納容器圧力が早く上昇する結果となっている。これは、前述のとおり、感度解析ケースの方が原子炉容器の破損が早くなるためであり、この時の圧力上昇幅を比較すると、ベースケースと感度解析ケースとで大きな差はない。また、原子炉下部キャビティ水温について、原子炉容器の破損後の温度上昇幅は、感度解析ケースの方がわずかに大きいが、過渡的な変化であり、溶融炉心全体の熱量がベースケースと感度解析ケースとで等価であるため、最終的にはベースケースと一致した温度となっている。

以上、デブリ粒子の径に関しては、約３割小さくした場合でも、原子炉格納容器圧力の上昇にはほとんど影響しない結果となった。これは、原子炉下部キャビティが水張りされていることで、デブリ粒子の冷却自体が促進されており、相対的に粒子径の差が、大きな影響を与えていないこと、及び PWR では原子炉格納容器体積が大きいことにより過渡的な圧力上昇が緩和された結果、感度解析に差が生じなかったと考えられる。

評価

デブリ粒子径の圧力スパイクに対する感度は小さく、その不確かさが有効性評価へ与える影響は小さいと言える。

（５）感度解析パラメータの組合せ

原子炉下部キャビティ水深、破損口径、エントレインメント係数、デブリ粒子の径のそれぞれに対して、圧力スパイクに対する感度を確認した。いずれの場合においても、PWR では原子炉格納容器体積が大きいことにより圧力上昇が緩和されたため、感度解析に大きな差は生じなかった。これらの不確かさ要因を組み合わせた場合、定性的には圧力スパイクに対する感度は、単独の不確かさを考慮した場合よりも大きくなると考えられるが、PWR の原子炉格納容器体積は十分大きいため、不確かさを組み合わせた場合でも圧力上昇は緩和され、その不確かさが有効性評価へ与える影響は小さいと言える。

「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。」

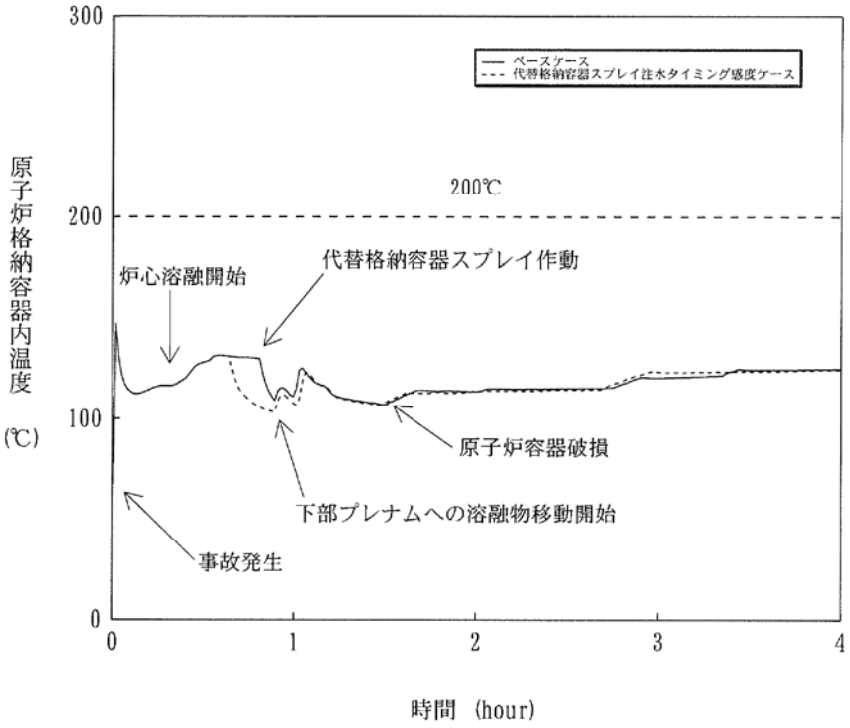


図 5-1-1 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（１）

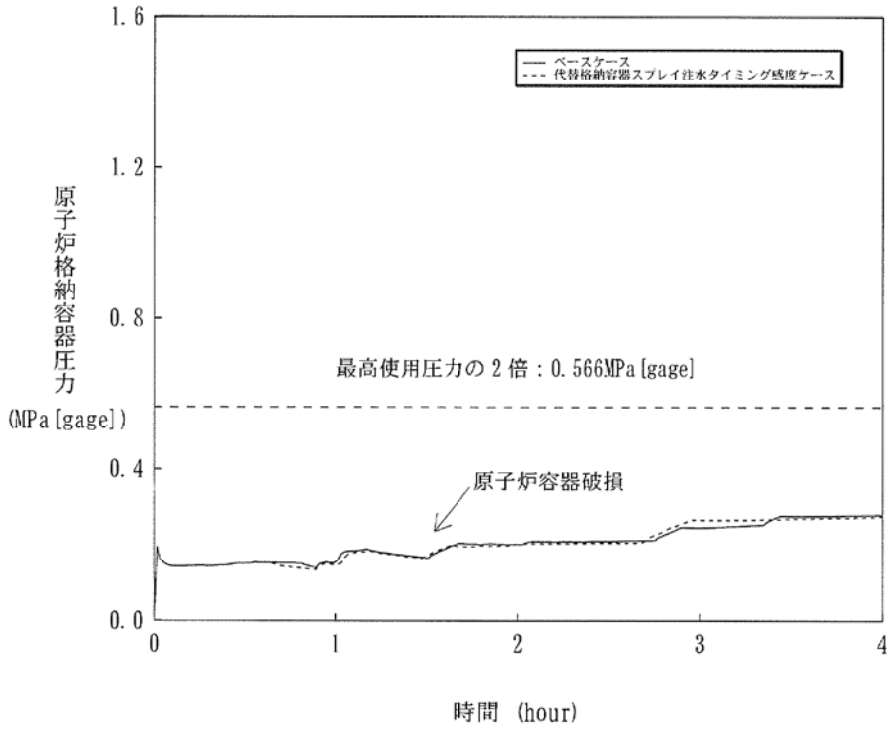


図 5-1-2 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（２）

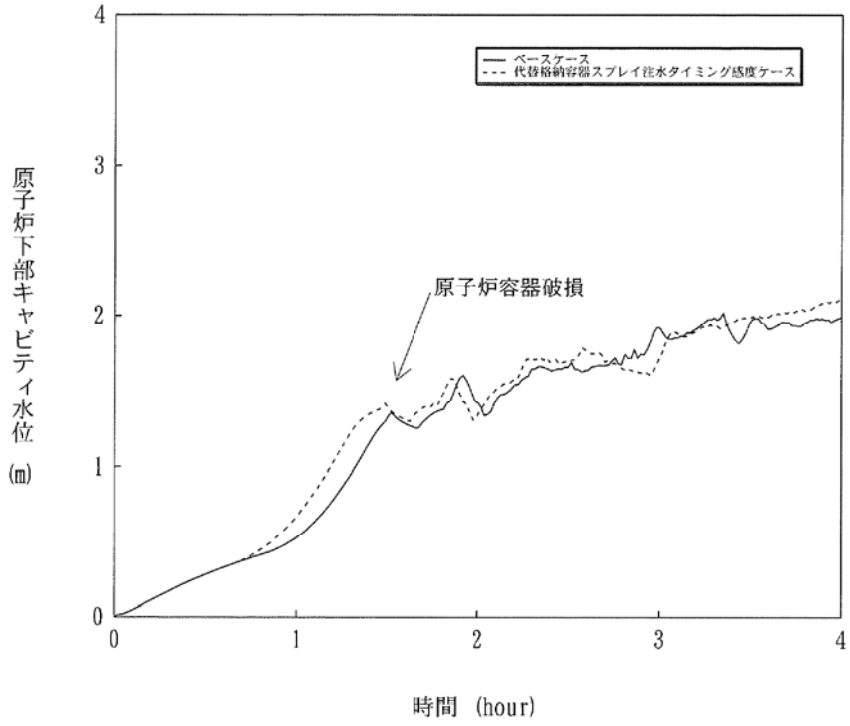


図 5-1-3 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（３）

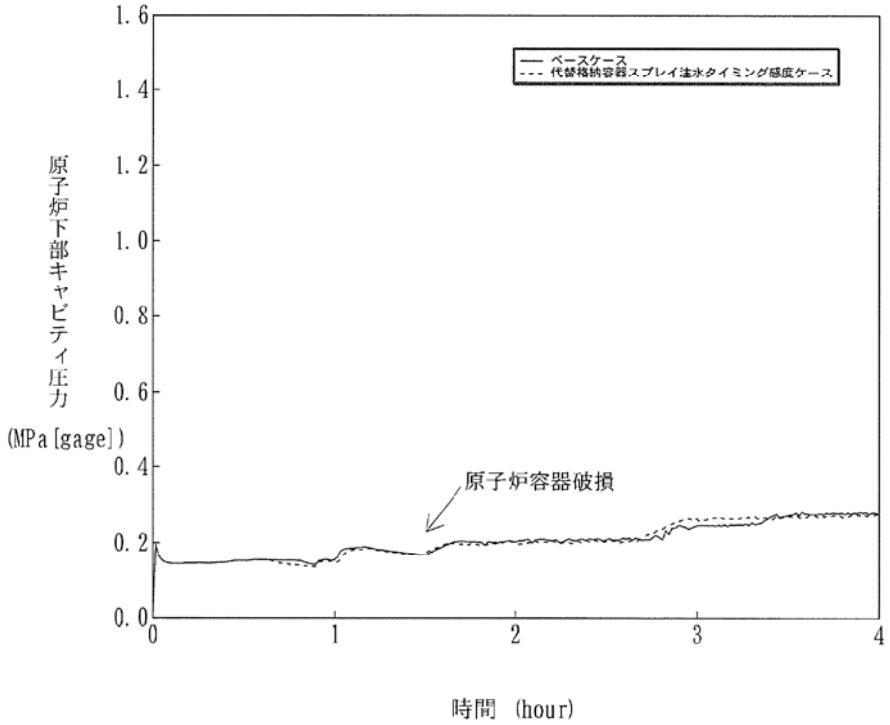


図 5-1-4 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（４）

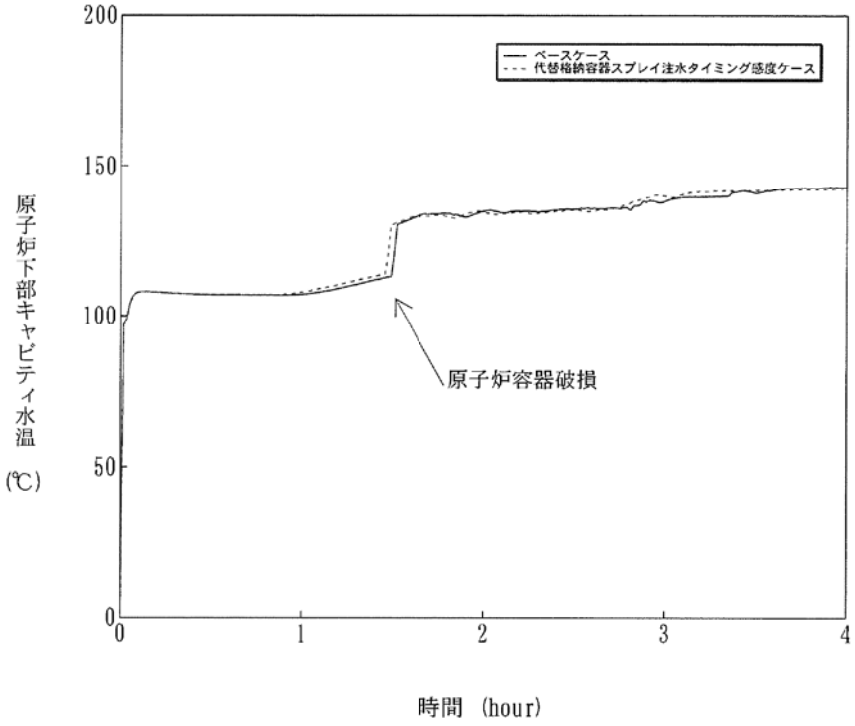


図 5-1-5 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（５）

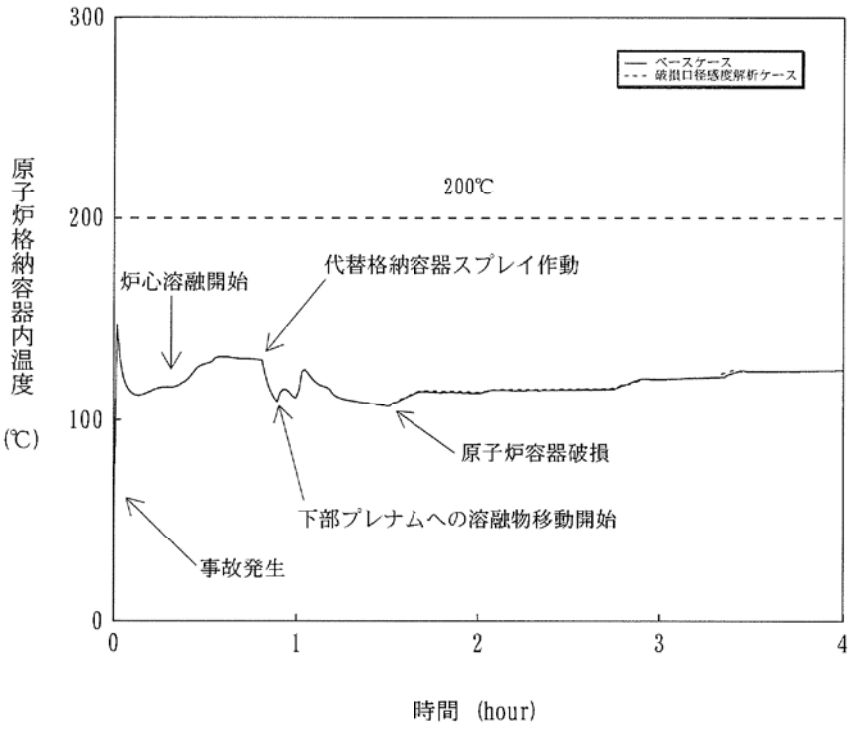


図 5-2-1 原子炉容器の破損口径感度解析（１）

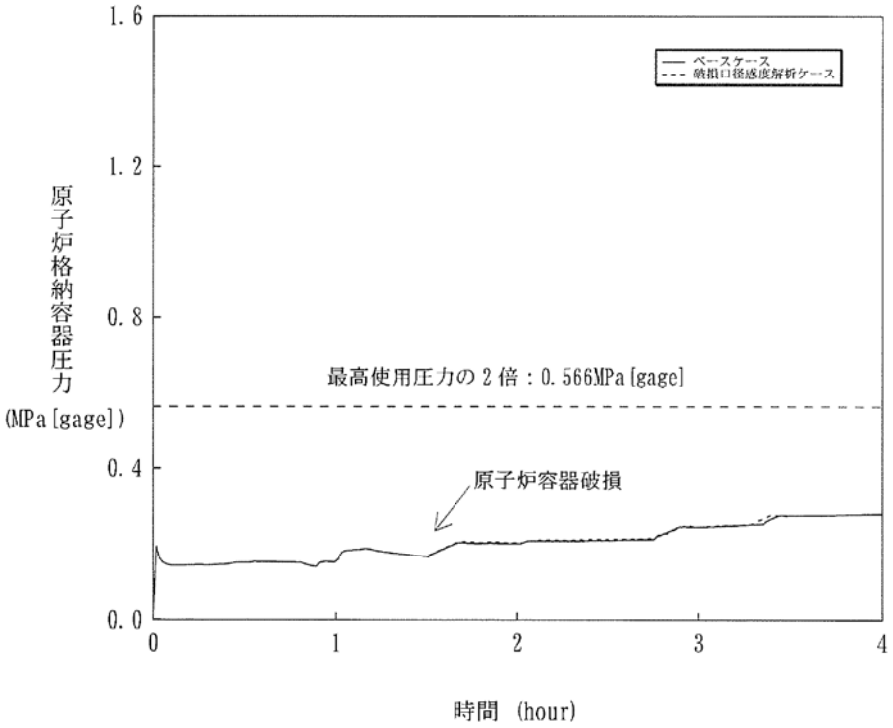


図 5-2-2 原子炉容器の破損口径感度解析（２）

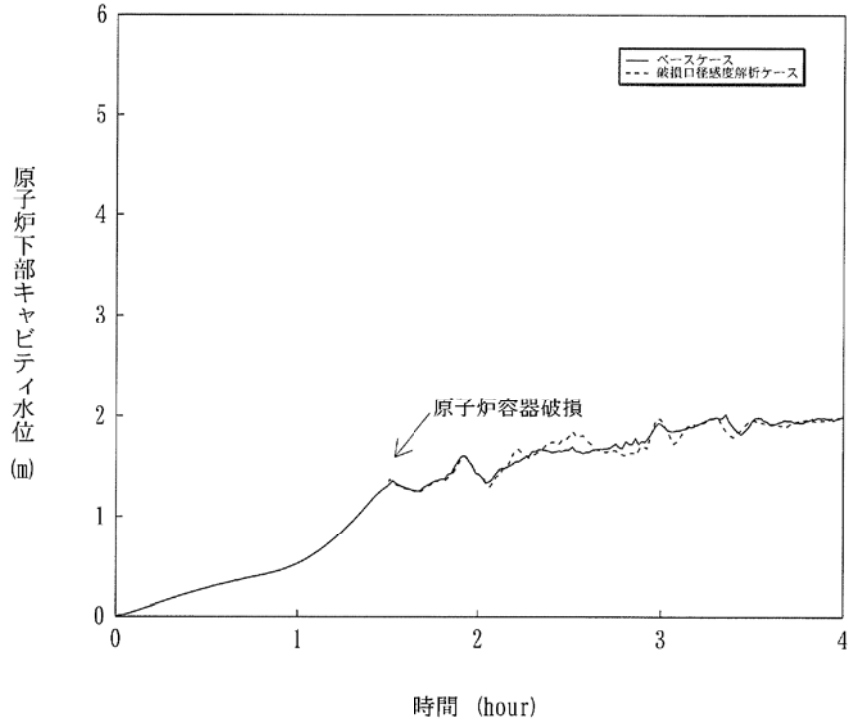


図 5-2-3 原子炉容器の破損口径感度解析（３）

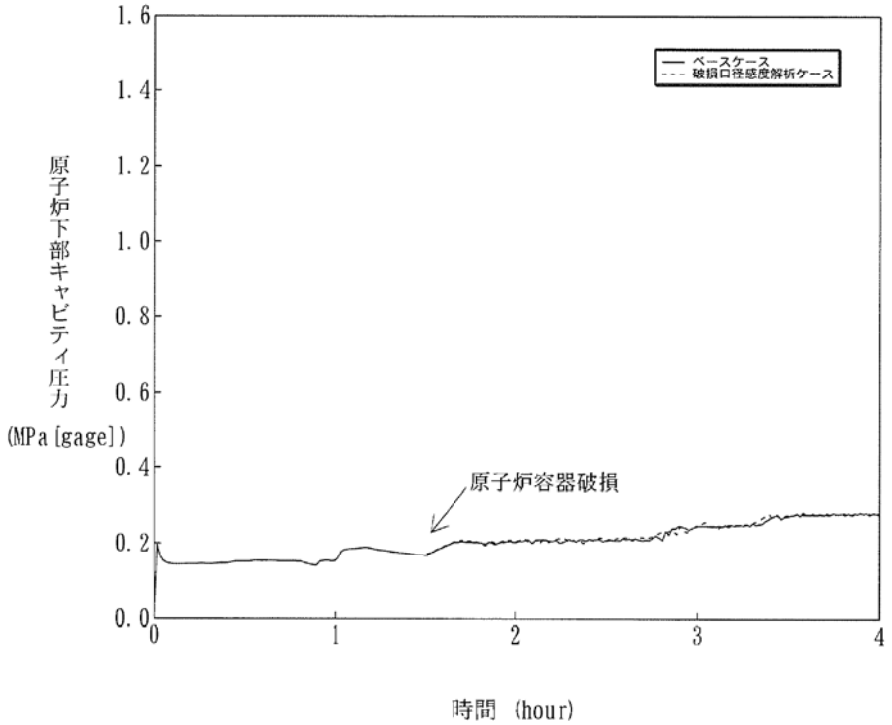


図 5-2-4 原子炉容器の破損口径感度解析（４）

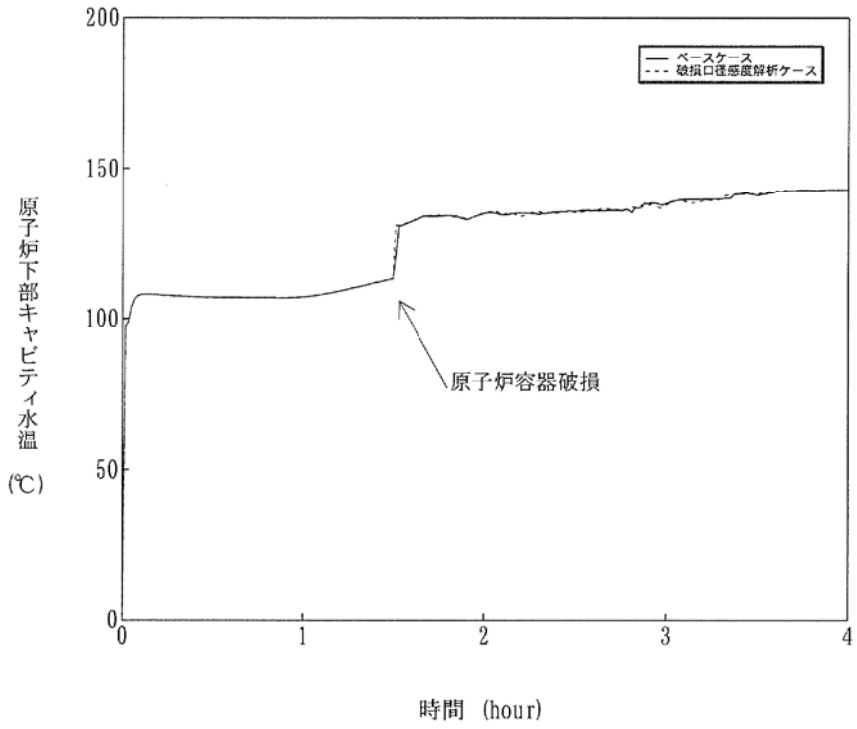


図 5-2-5 原子炉容器の破損口径感度解析（５）

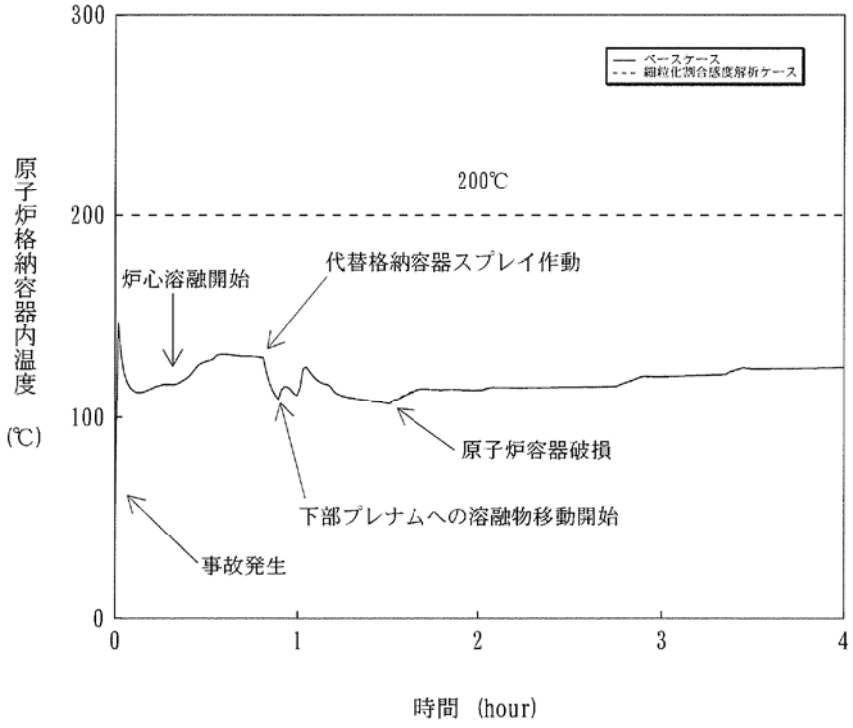


図 5-3-1 エントレインメント係数感度解析（１）

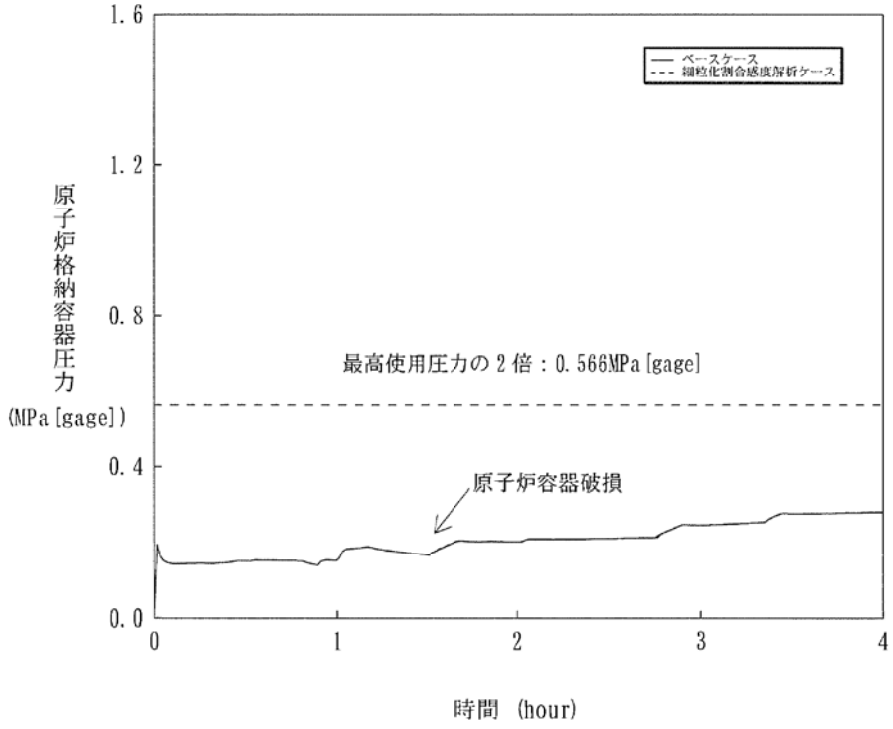


図 5-3-2 エントレインメント係数感度解析（２）

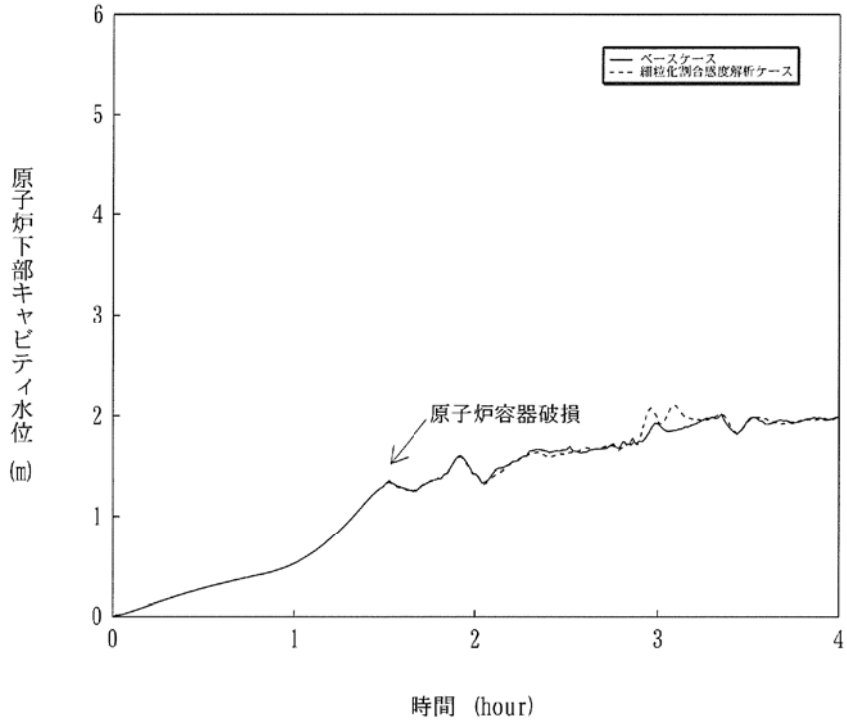


図 5-3-3 エントレインメント係数感度解析（３）

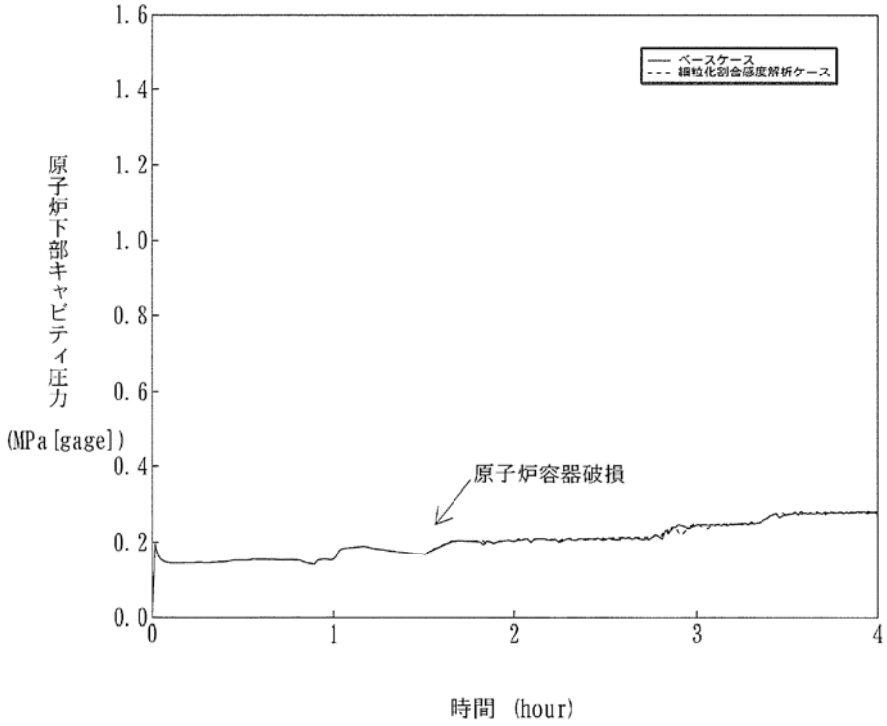


図 5-3-4 エントレインメント係数感度解析（４）

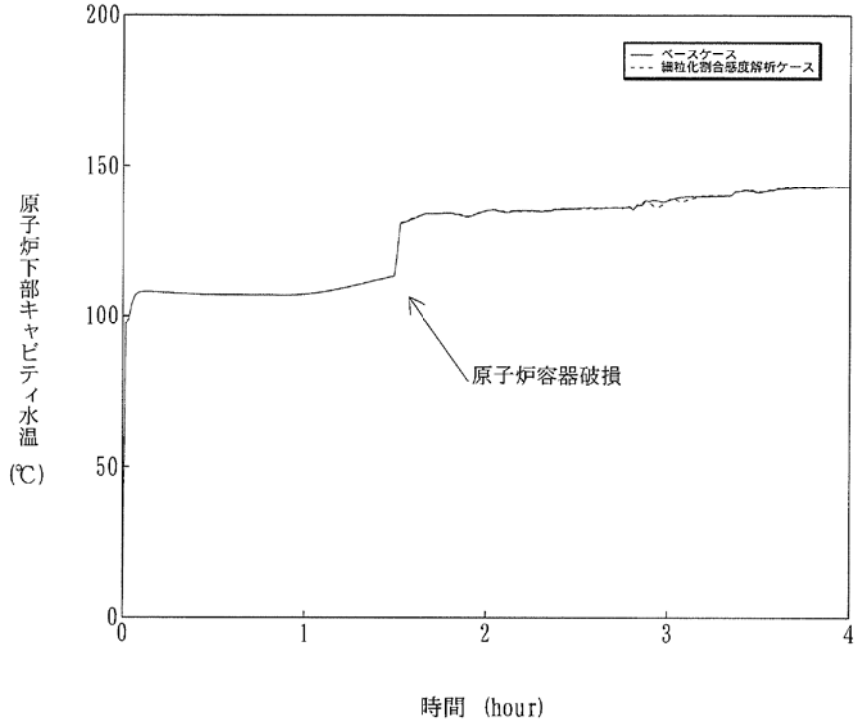


図 5-3-5 エントレインメント係数感度解析（５）

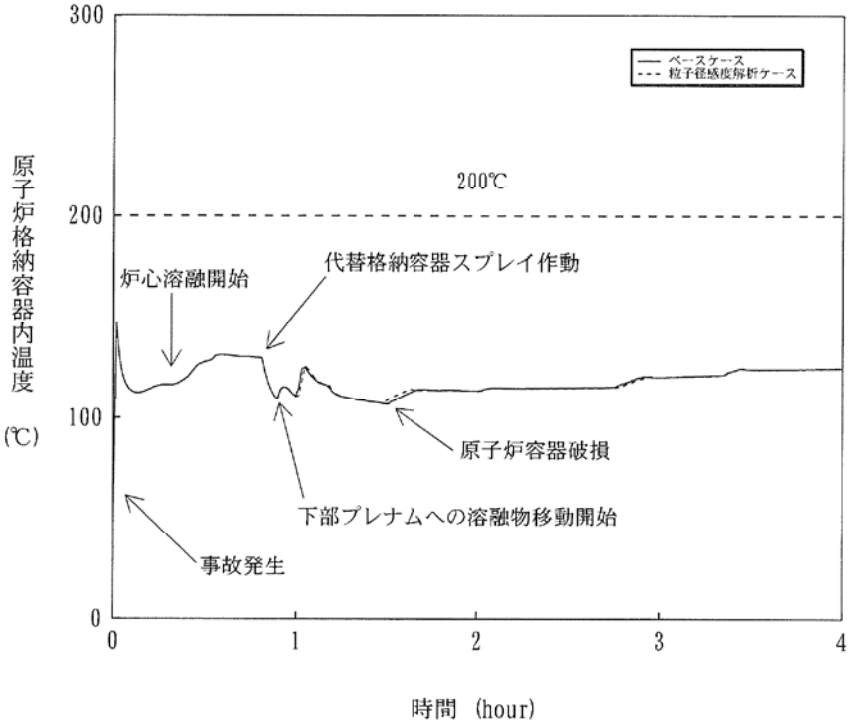


図 5-4-1 デブリ粒子の径感度解析（１）

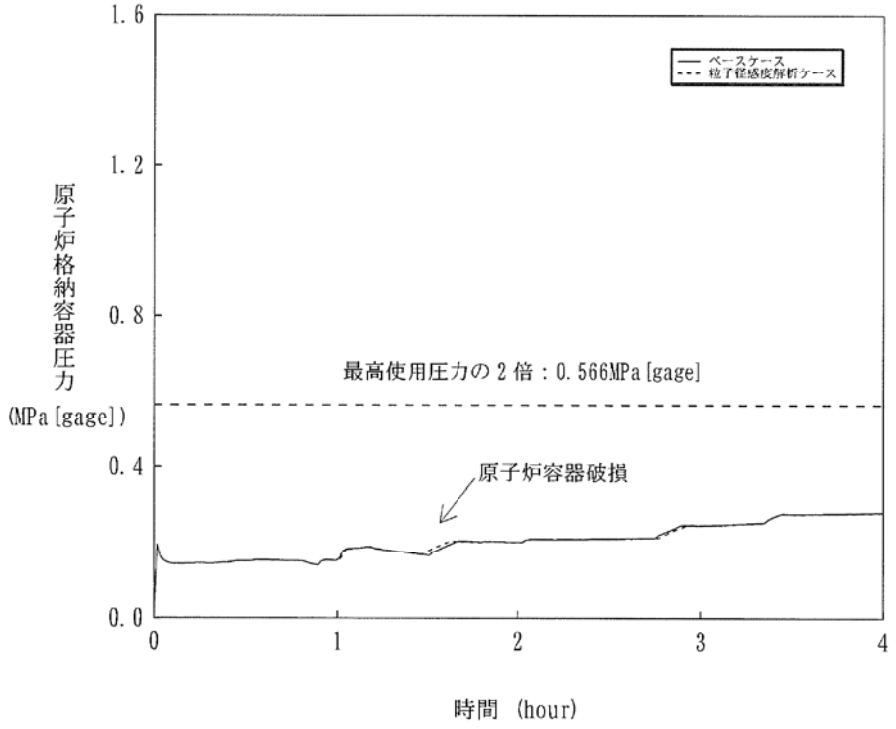


図 5-4-2 デブリ粒子の径感度解析（２）

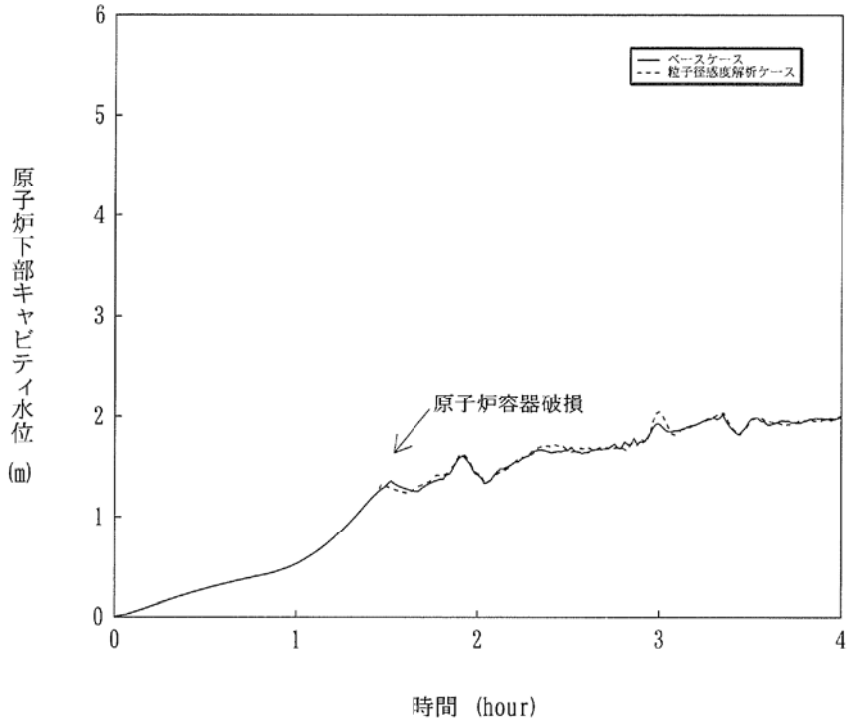


図 5-4-3 デブリ粒子の径感度解析（３）

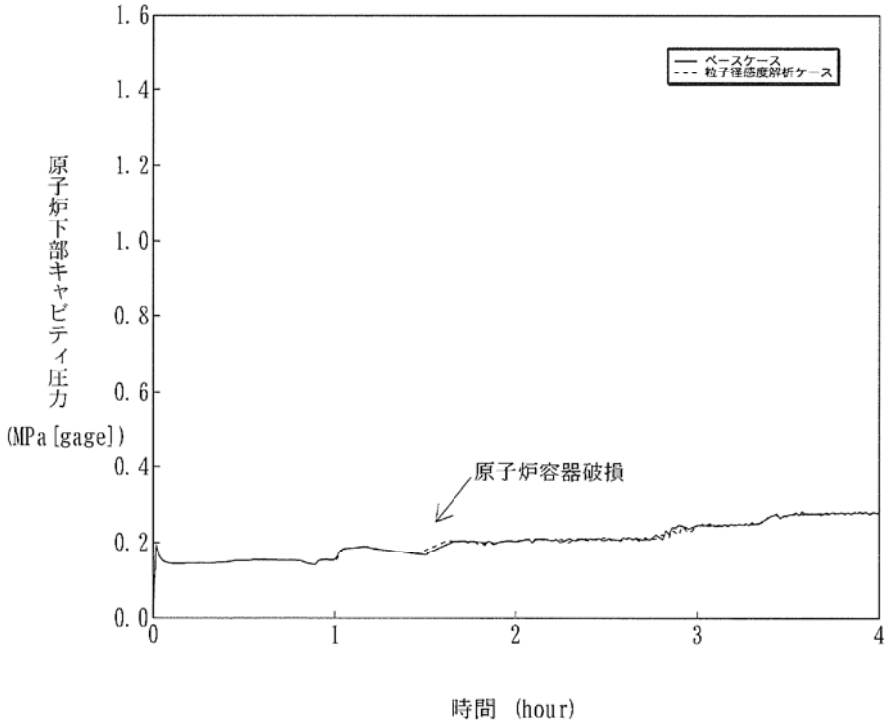


図 5-4-4 デブリ粒子の径感度解析（４）

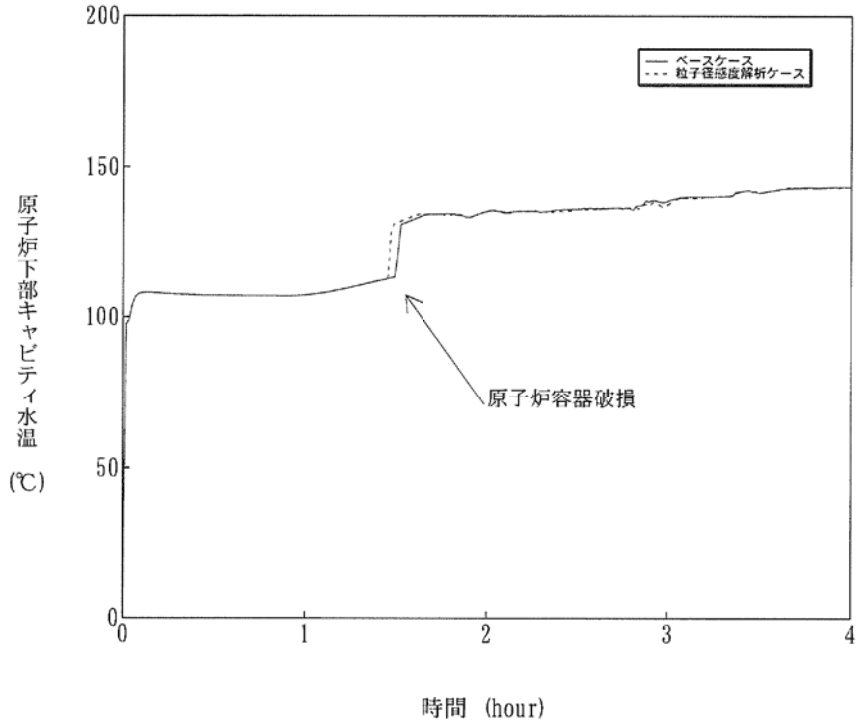


図 5-4-5 デブリ粒子の径感度解析（５）

6. まとめ

原子炉容器内 FCI から水蒸気爆発に至り原子炉格納容器が破損する事象については、これまでの専門家による検討結果では、発生する可能性は非常に低く、問題は解決済みと結論付けられている。また、原子炉容器内 FCI から圧力スパイクに至る事象については、１次系圧力を上昇させることはあるが、原子炉格納容器への直接的な脅威にはならない。

原子炉容器外 FCI についても、実験より、デブリ粒子を覆う蒸気膜は安定性があり、外部トリガリングなどの外的な要因がなければ、蒸気膜の崩壊は起こりにくいと言え、実機においては、原子炉下部キャビティ水は準静的であることから、外部トリガリングとなり得る要素は考えにくいため、大規模な水蒸気爆発に至る可能性は極めて低いと考えられる。

原子炉容器外 FCI のうち、圧力スパイクの不確かさの要因について、実現象と解析モデルの差に着目し、以下のとおり抽出した。

- 原子炉下部キャビティ水深
- 破損口径
- Ricou-Spalding のエントレインメント係数
- デブリ粒子の径

これらの項目について感度解析を行い、圧力スパイクへの感度を確認した結果、PWR では原子炉格納容器体積が大きいことにより、過渡的な圧力上昇が緩和されたことから、いずれについても圧力スパイクに対する感度は小さく、重大事故対策の有効性評価の結果に影響は与えない。

（第３部　ＭＡＡＰコード）

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 3.3-15
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」という。）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原子力安全基盤機構(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、溶融炉心を加熱する。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L6の溶融炉心組

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

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。

WETCOR-1 実験結果では、溶融状態の部分が存在する期間にクラストを通して水へ伝熱した熱流束は 0.52±0.13MW/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 1,800K 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 1,500K 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 1,500K 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）により実施された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、実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 3,200K まで誘電加熱された。溶融物のタイプ A は TMI 事故の溶融物を模擬した組成、タイプ B は下部プレナムにより多くの金属が含まれることを想定し、金属の割合を増やした組成である。コンクリートトラップの内径は 0.36m あるいは 0.26m である。ここで、0.26m は他の実験（WETCOR、MACE-M0 及び MACE-M1b）との比較のためアスペクト比（高さと直径の比）を 0.5 としたものである。コンクリートは国内プラントのセメント成分を模擬した玄武岩系コンクリートである。コンクリート内部には温度計測用の熱電対が配置されている。落下後の溶融物は、崩壊熱を模擬して誘電加熱され、75kW は崩壊熱の 11 倍に相当する。注水は、室温水を Jet もしくは Spray で 0.02～0.2kg/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実験条件が設定され、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 実験は水深に応じた粒子化割合を調べることを目的にしたものである。試験装置を図 3.1-30 に示す。DEFOR-A 実験では、るつぼ型誘導炉により加熱された模擬溶融物を、ファンネル及びノズルを通じて大気圧条件の水タンクに注入する。ここでノズル径、すなわちデブリジェット径は可変となっている（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、実験条件の一覧を表 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。その他主要な実験条件として、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 実験である。

次に、実験結果について述べる。A8 実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。実験結果からは、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－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/m^2、CCI-2 では 3MW/m^2 近い値になっている。この違いとして、CCI-1,3 では注水時点でクラストが形成されており、CCI-2 では注水時点でクラストが形成されておらず、溶融物と水が直接接触（バルク冷却）したためと推測されている。CCI-2 も、バルク冷却期間（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/m^2、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/m^2 及び 0.5MW/m^2 となっている。この違いから、クラスト形成段階でコンクリート分解ガスが多いほど、クラストのひび、割れ目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/m^2 を超える熱流束が発生している。

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

（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 2,000K 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、すなわち、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、1,000kW/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 解析研究より、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な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な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－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 1,500K 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 実験、MACE 実験より)。

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

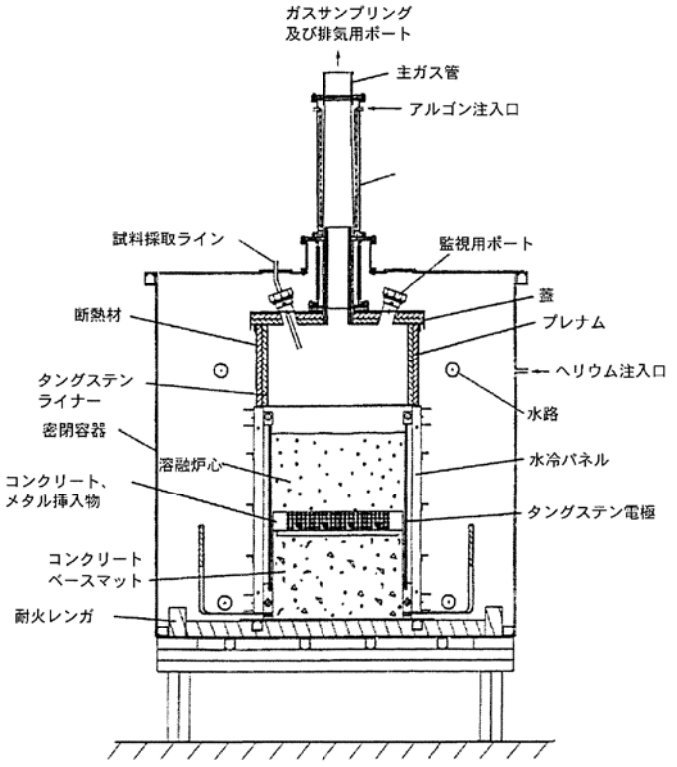
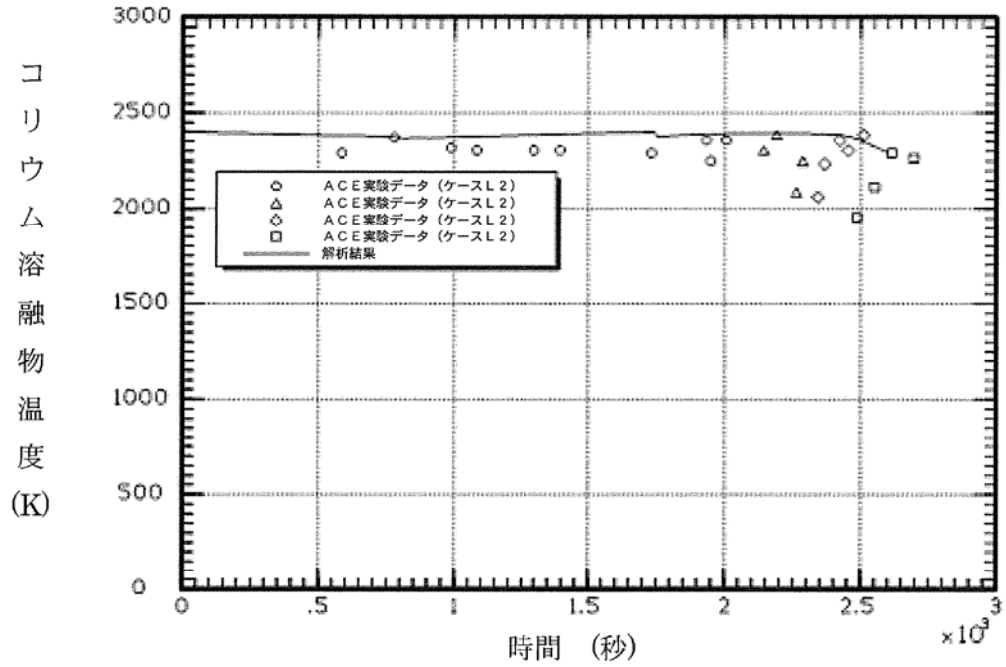
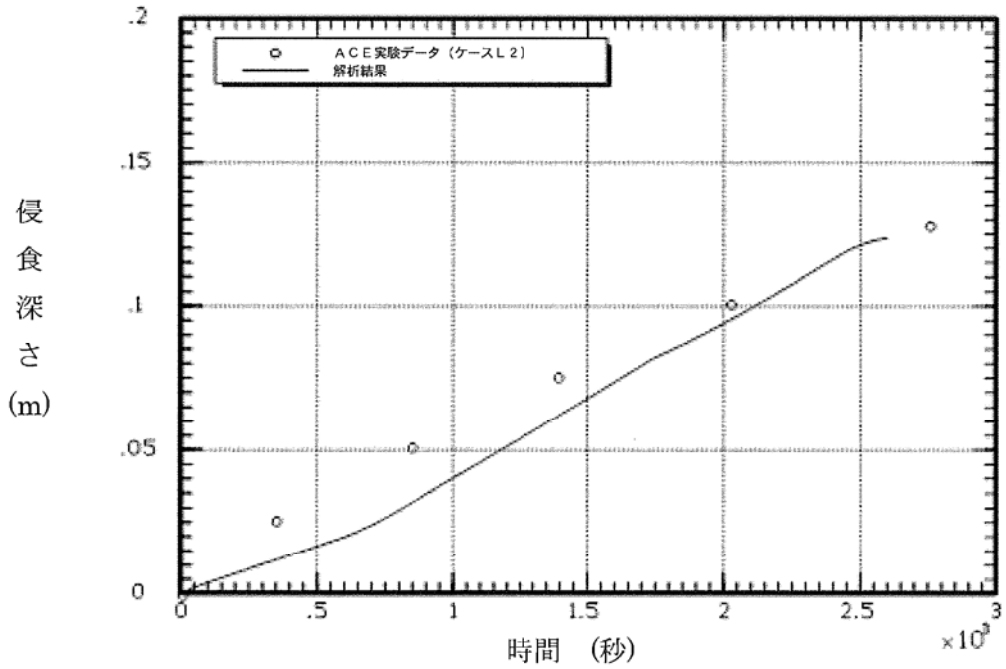


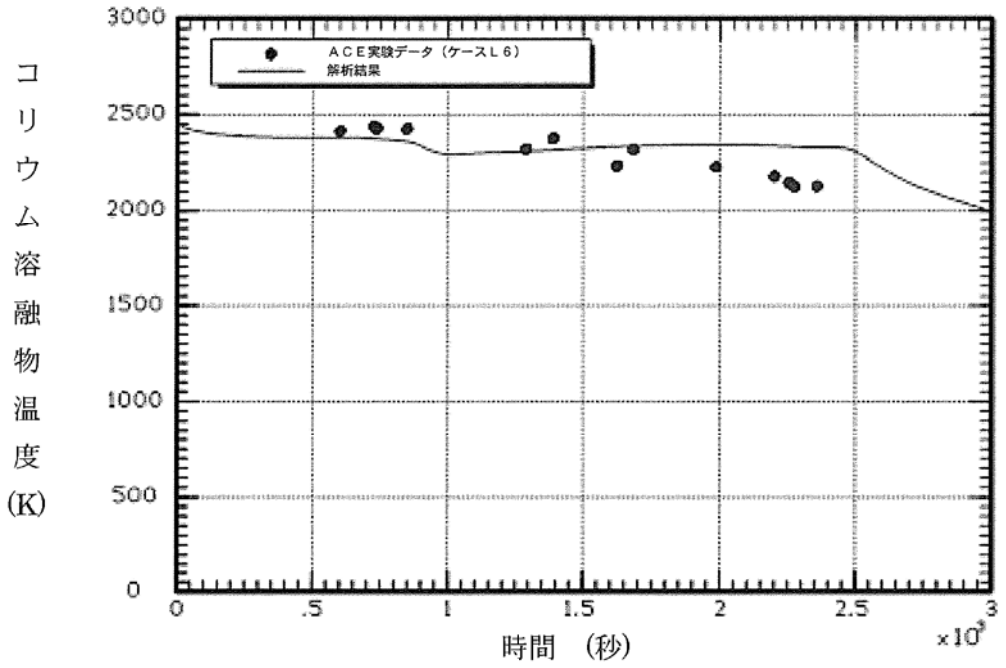
図 3.1-1　ACE 実験装置

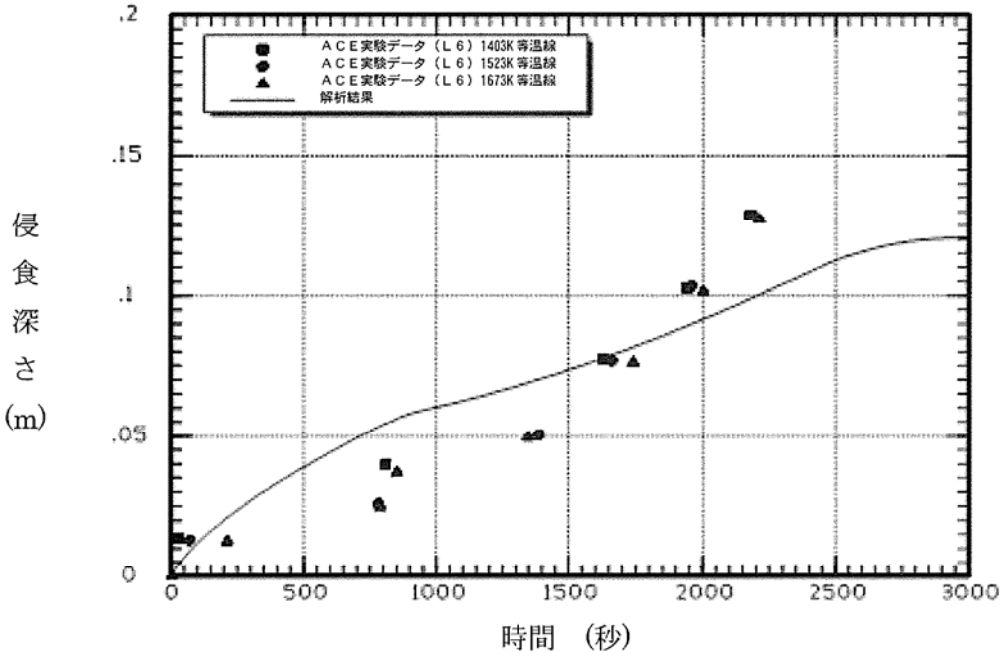




出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

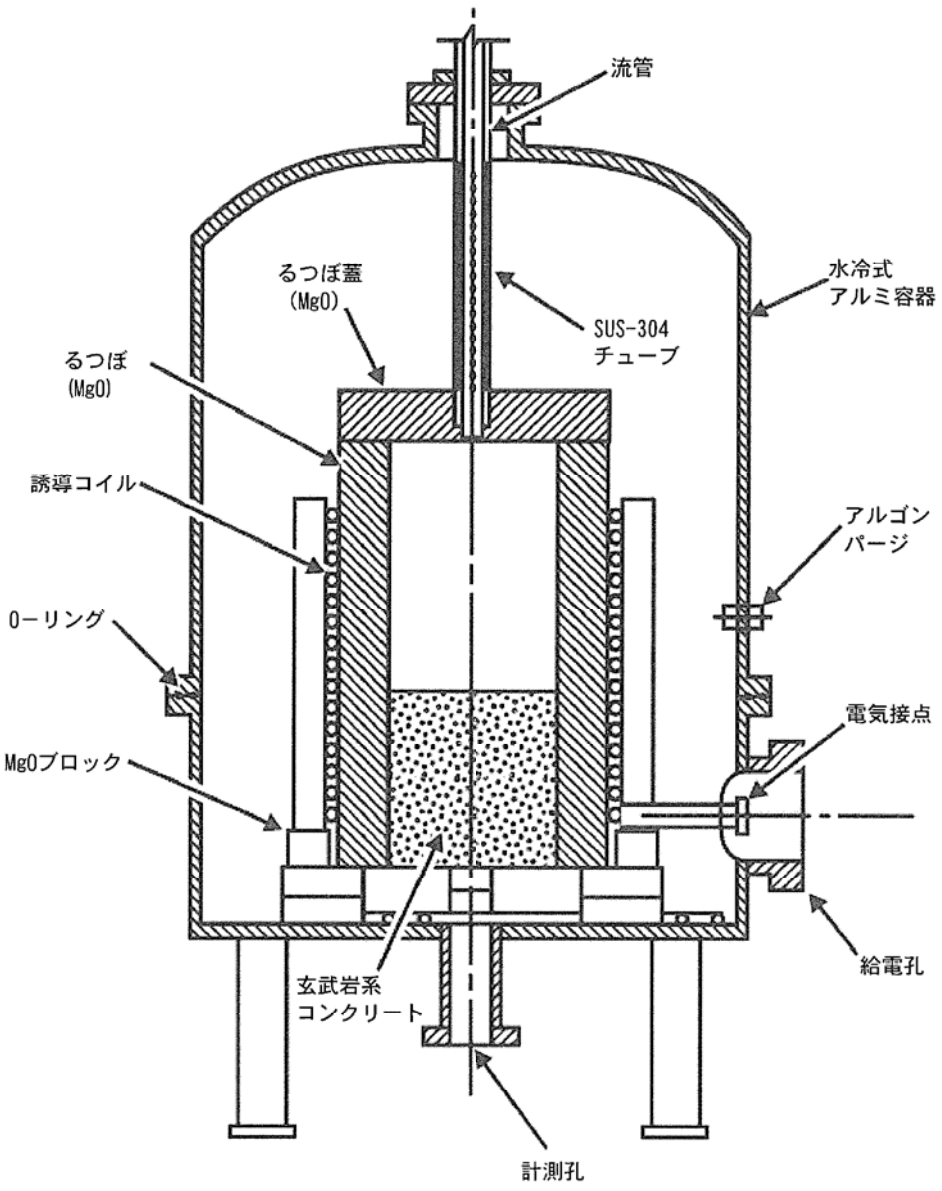
図 3.1-2　ACE 実験（ケース L2）
溶融炉心：PWR 溶融物（部分酸化）
コンクリート：ケイ土系コンクリート





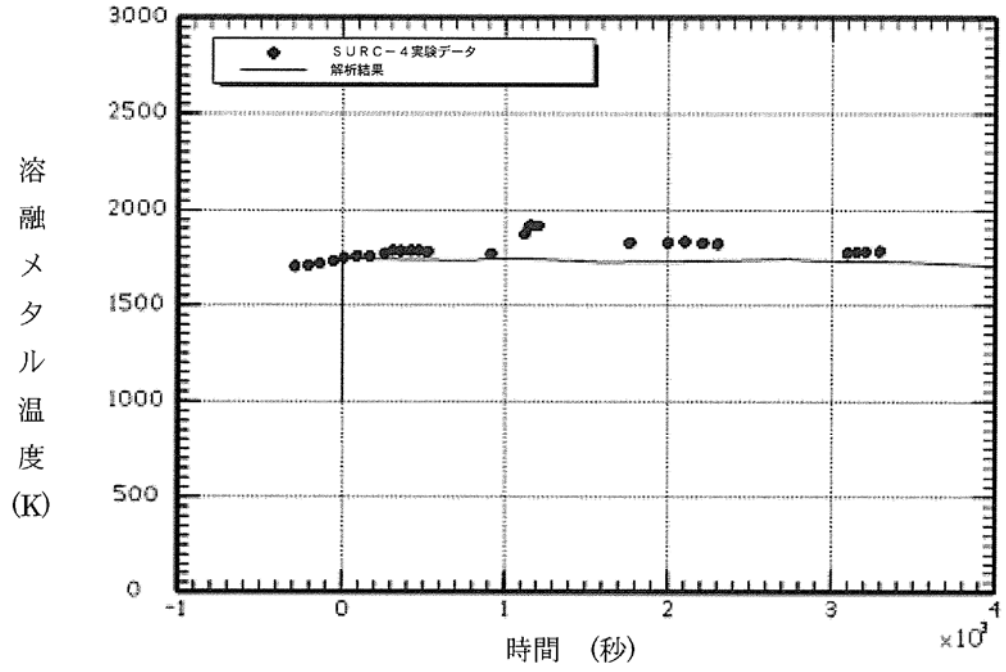
出典：MAAP4 User's Manual, EPRI

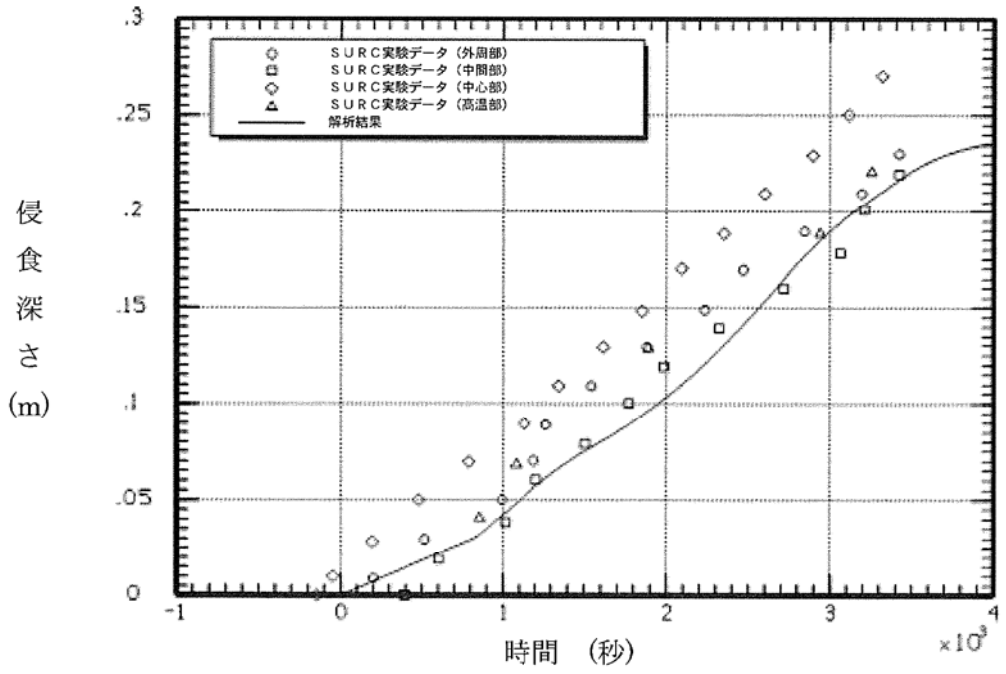
図 3.1-3　ACE 実験（ケース L6）
溶融炉心：PWR 溶融物（部分酸化、制御棒材質を含む）
コンクリート：ケイ土系コンクリート



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

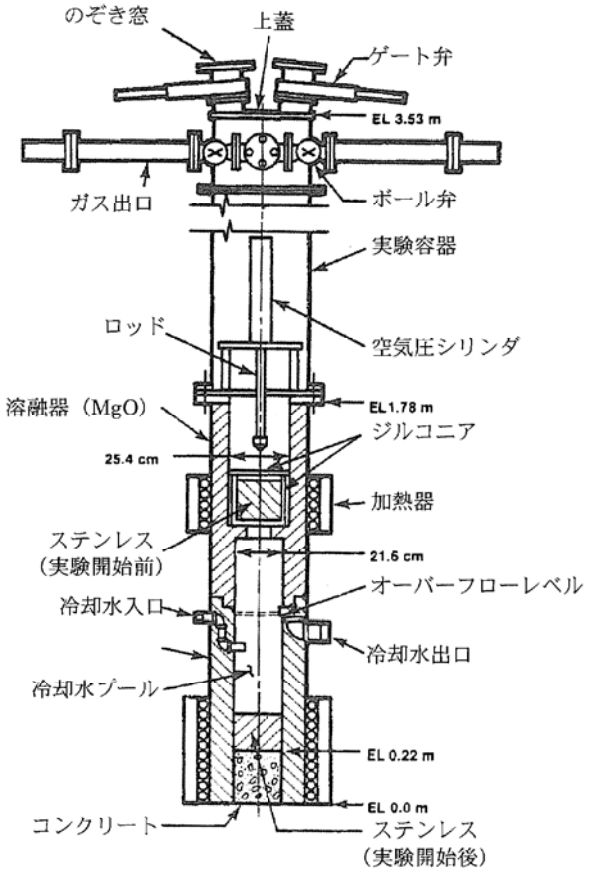


図 3.1-6　SWISS 実験装置概要

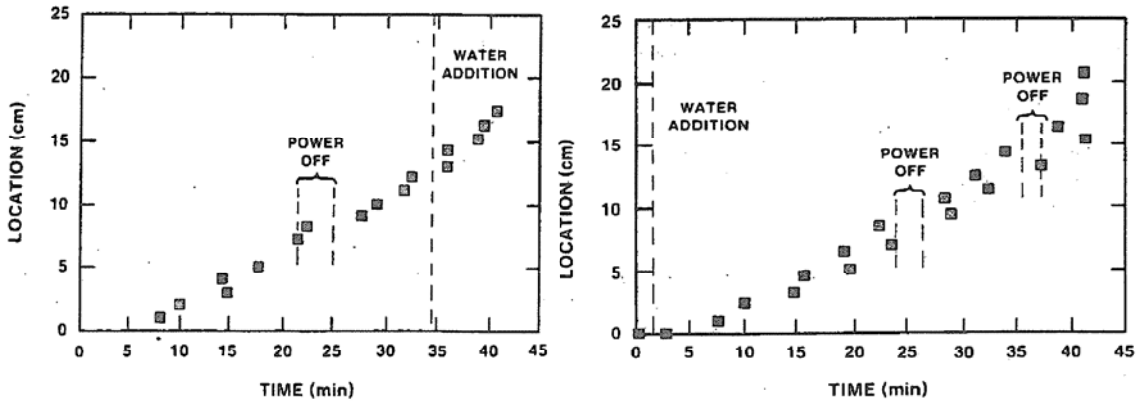


図 3.1-7 SWISS-1 及び SWISS-2 実験結果
（コンクリート温度が 1,600K に到達した位置）

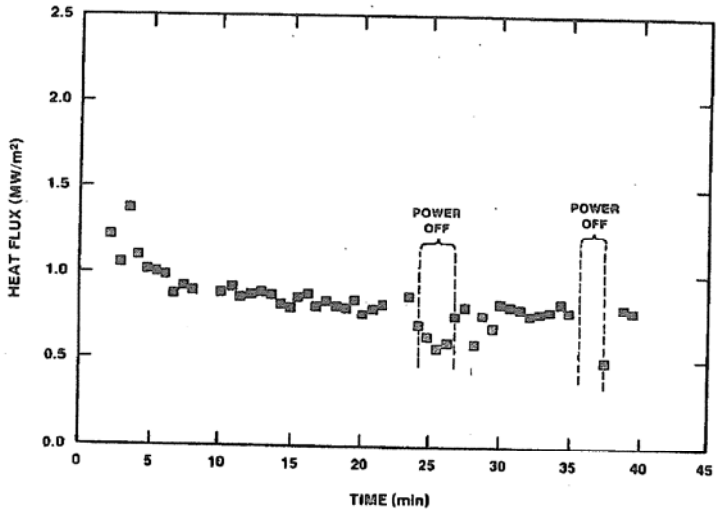


図 3.1-8 SWISS-2 実験結果（溶融物から水プールへの熱流束）

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

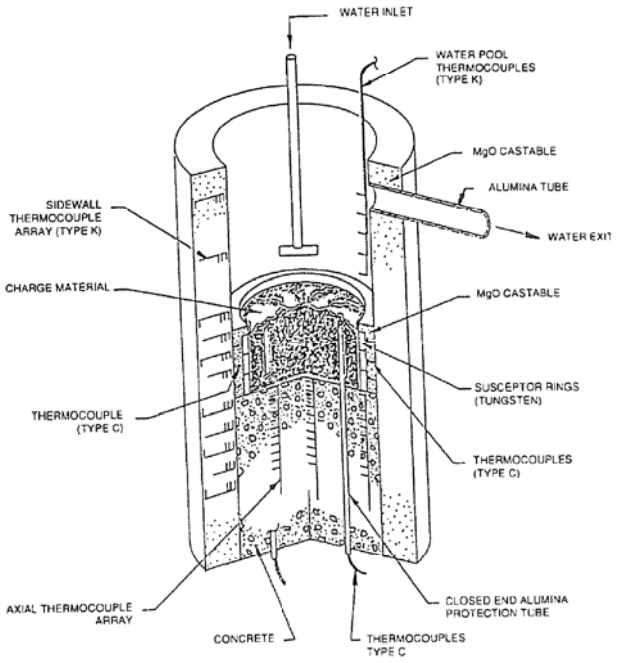


図 3.1-9 WETCOR 実験装置

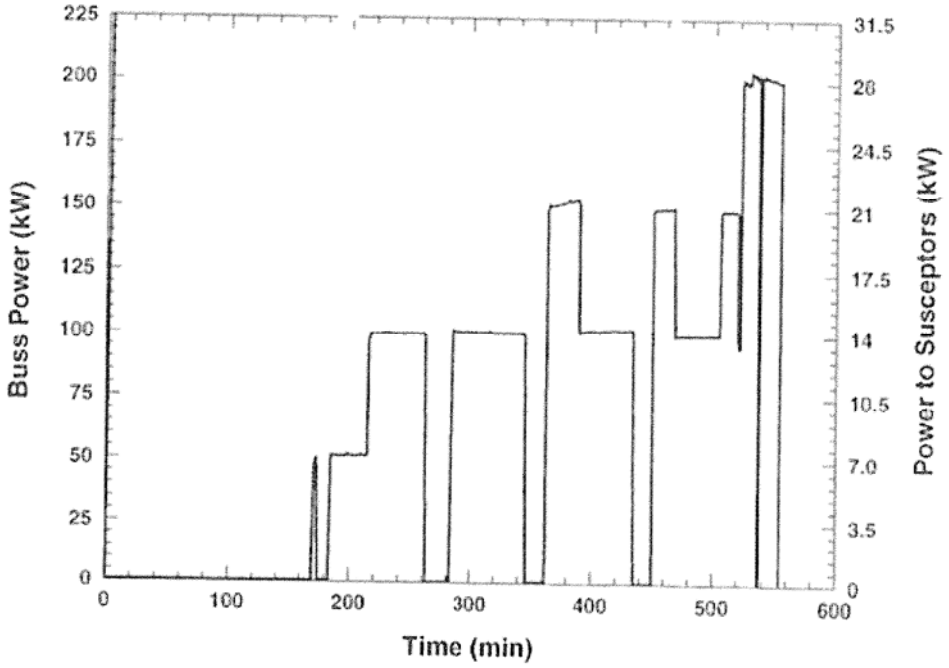


図 3.1-10　WETCOR 実験 メルト加熱履歴

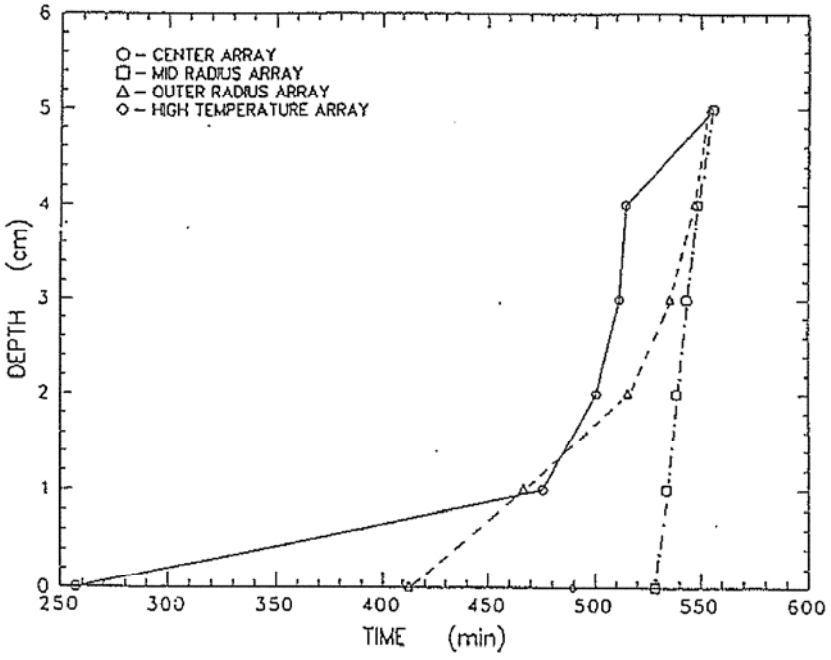


図 3.1-11 WETCOR 実験結果（コンクリート侵食推移）

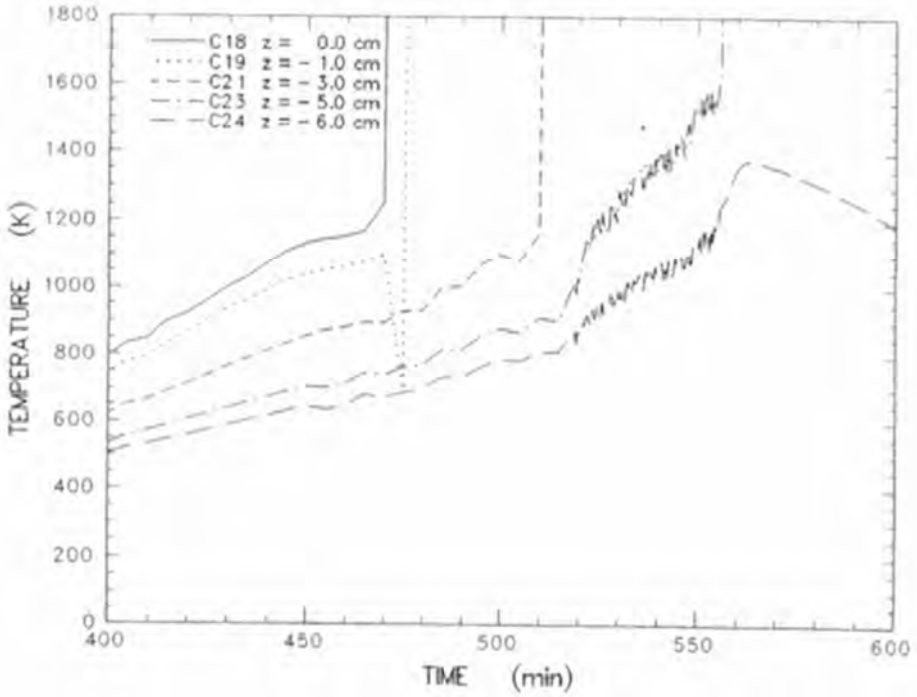


図 3.1-12　WETCOR 実験 コンクリート温度変化（半径方向中心 r=0cm）

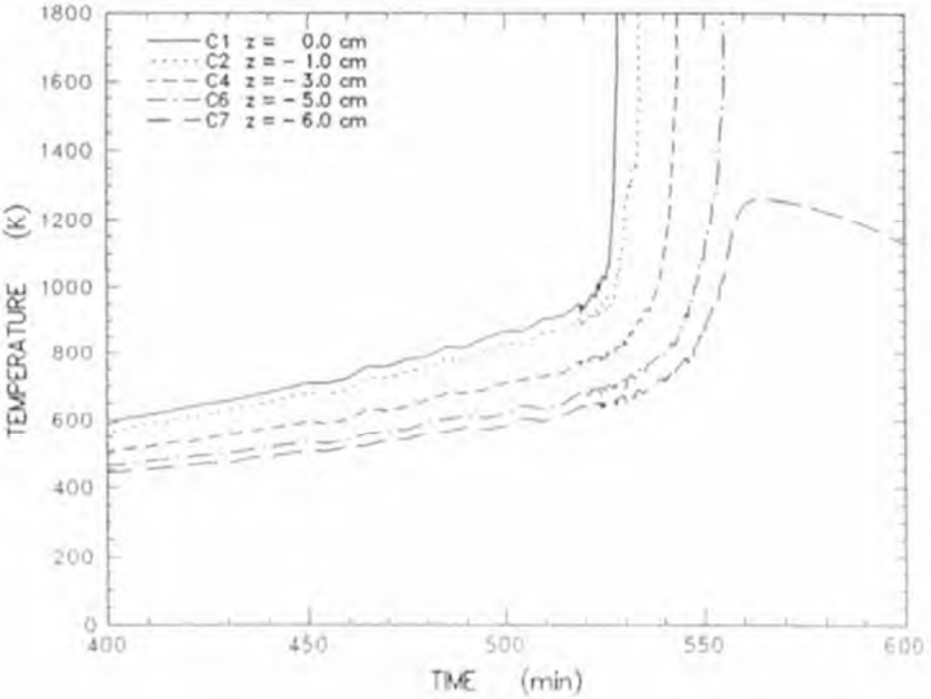


図 3.1-13　WETCOR 実験 コンクリート温度変化（半径方向中間部 r=10cm）

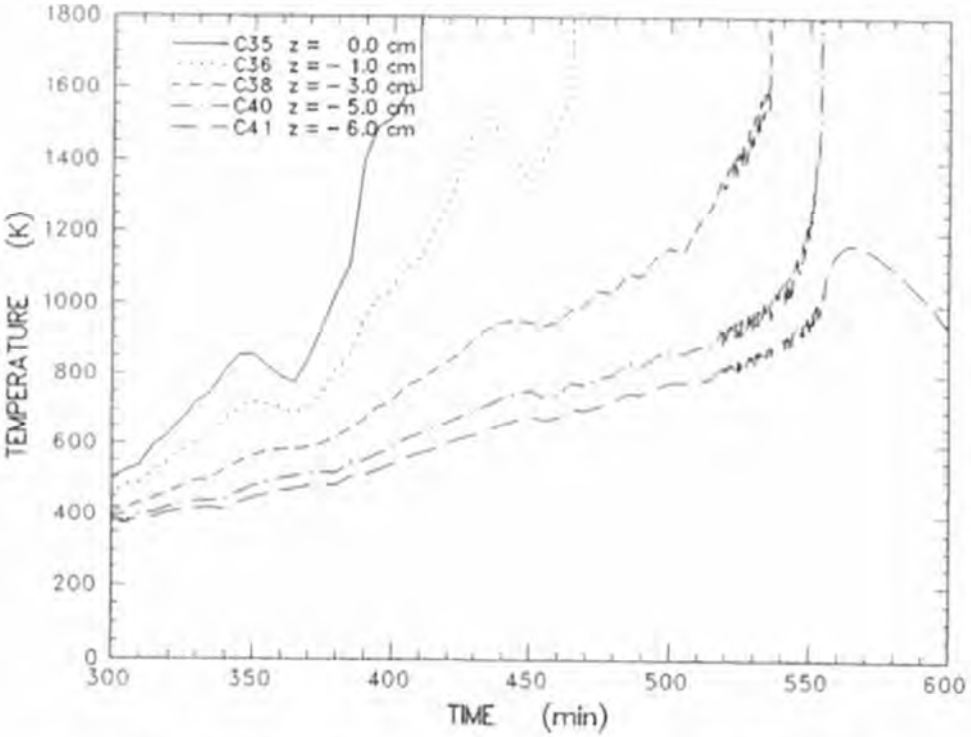


図 3.1-14　WETCOR 実験 コンクリート温度変化（外周部 r=15cm）

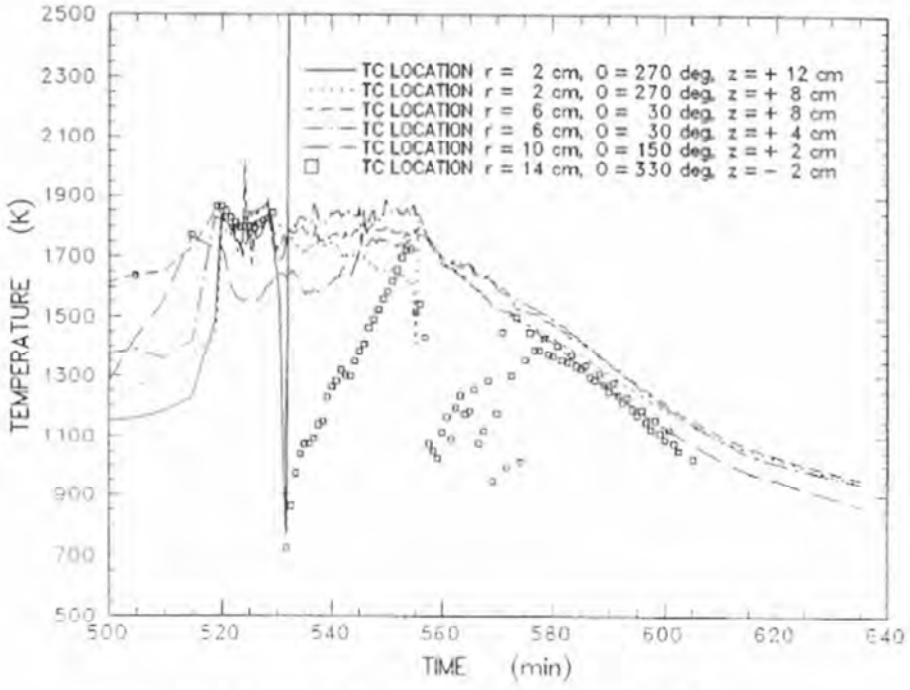


図 3.1-15　WETCOR 実験 メルト温度履歴

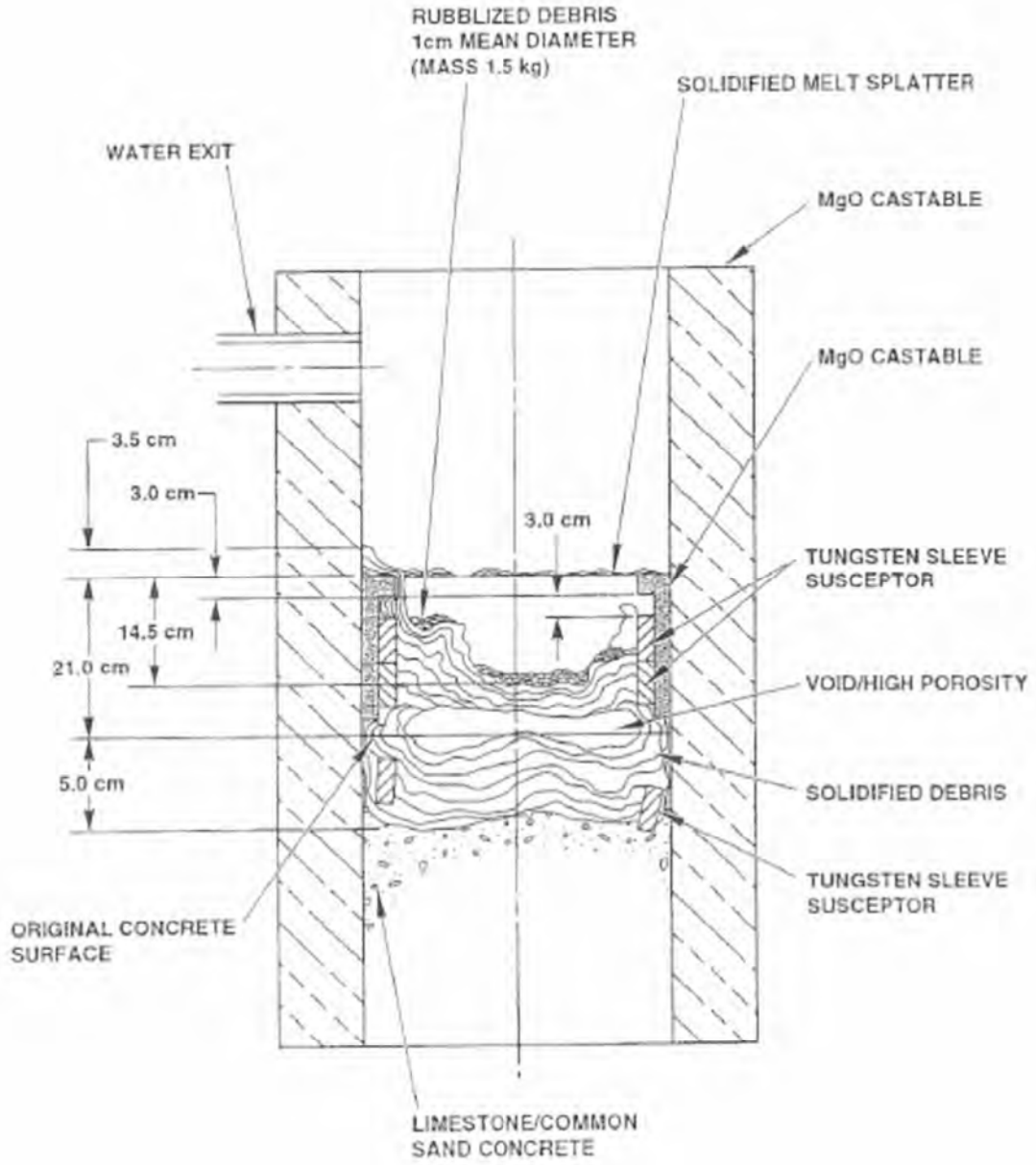


図 3.1-16　WETCOR 実験 試験後テスト部状態

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

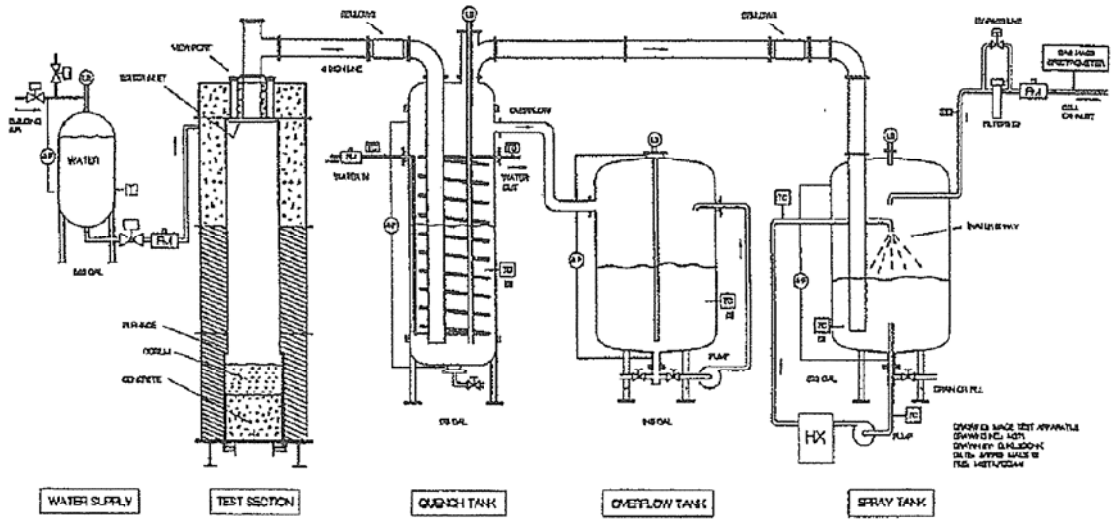


図 3.1-17 MACE 実験装置

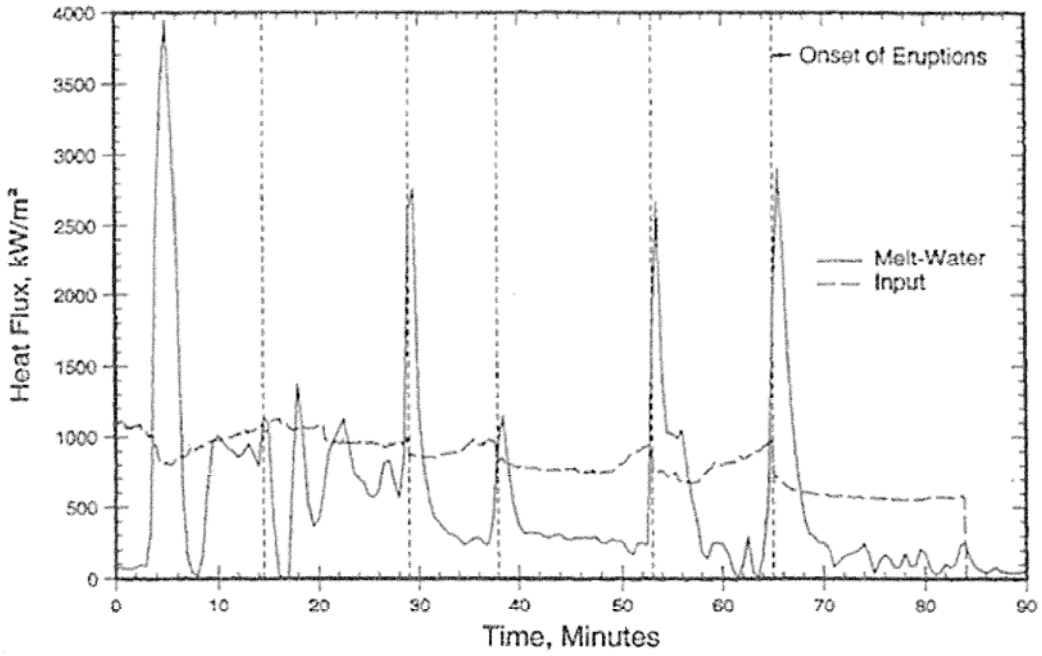


図 3.1-18　MACE-M0 実験での水への熱流束

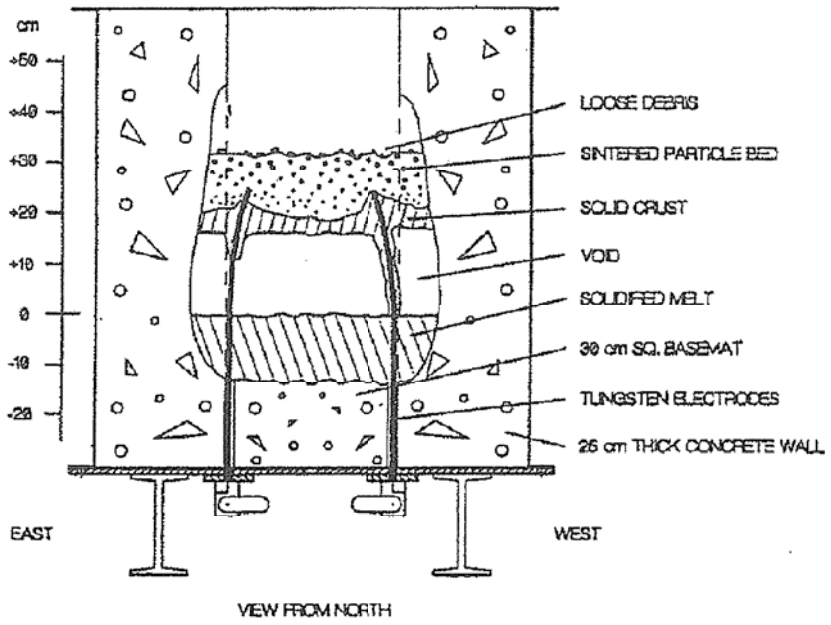


図 3.1-19 MACE-M0 実験後の溶融炉心模擬物の状況

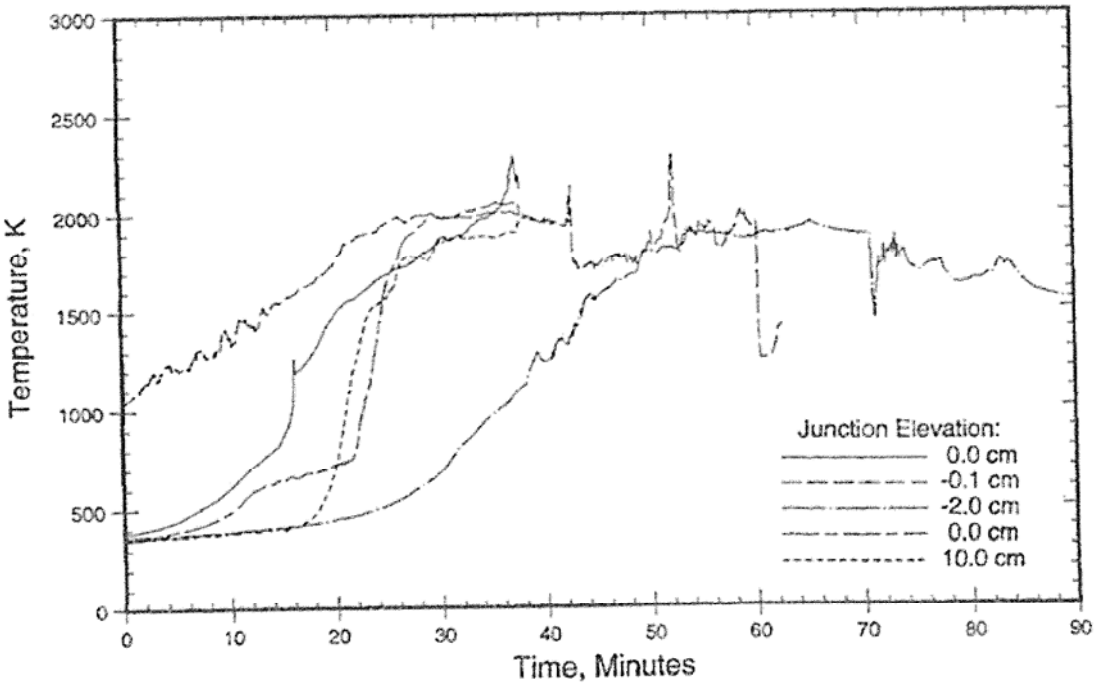


図 3.1-20　MACE-M0 実験での溶融物温度変化

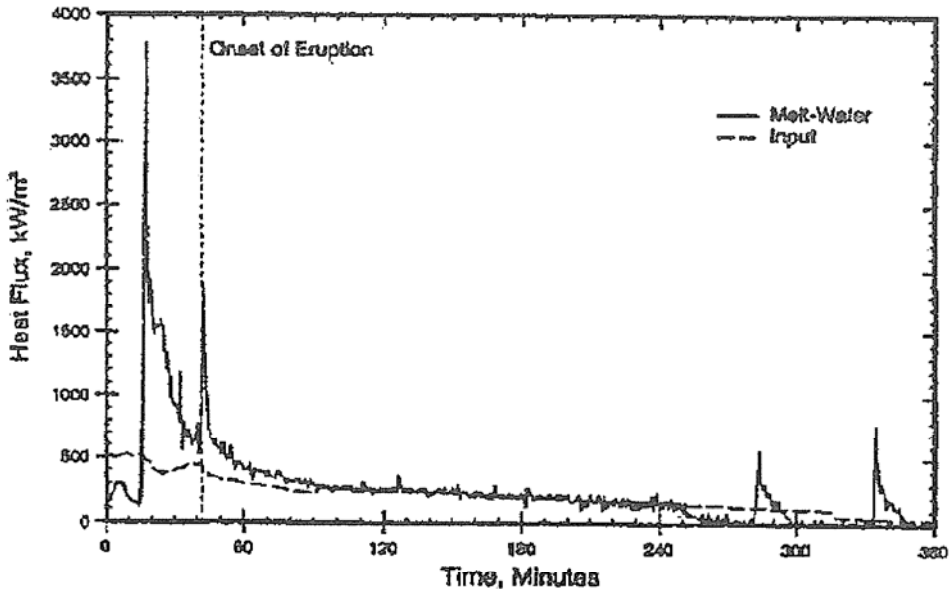


図 3.1-21 MACE-M1b 実験における溶融炉心模擬物から水プールへの熱流束

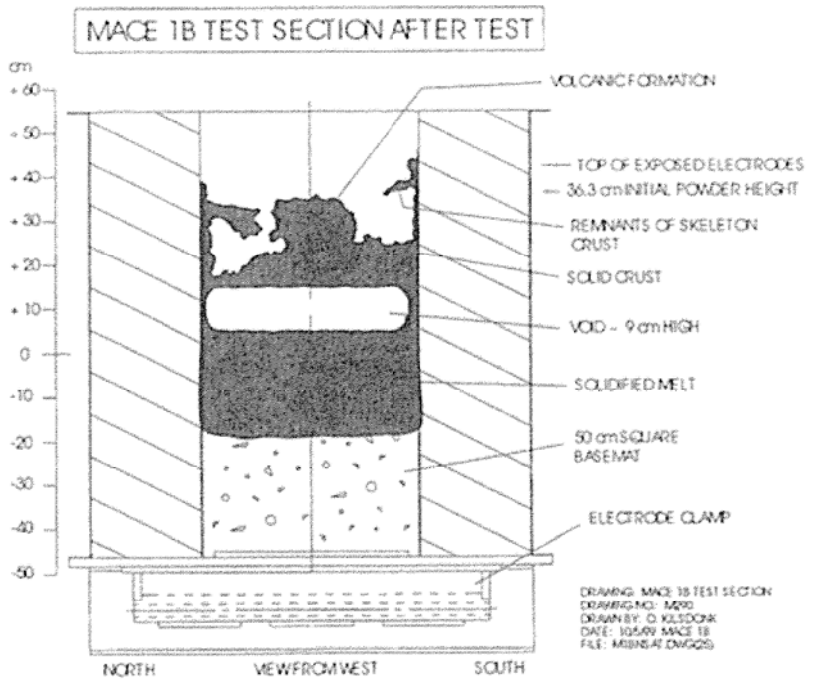


図 3.1-22　MACE-M1b 実験での実験後の溶融炉心の状態

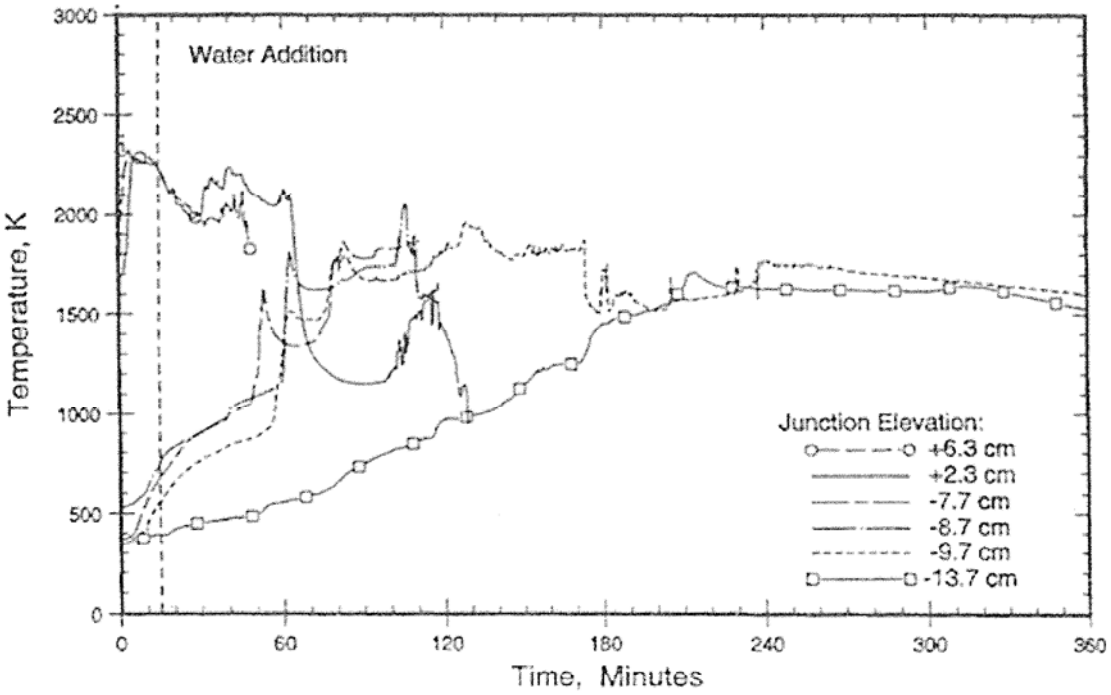


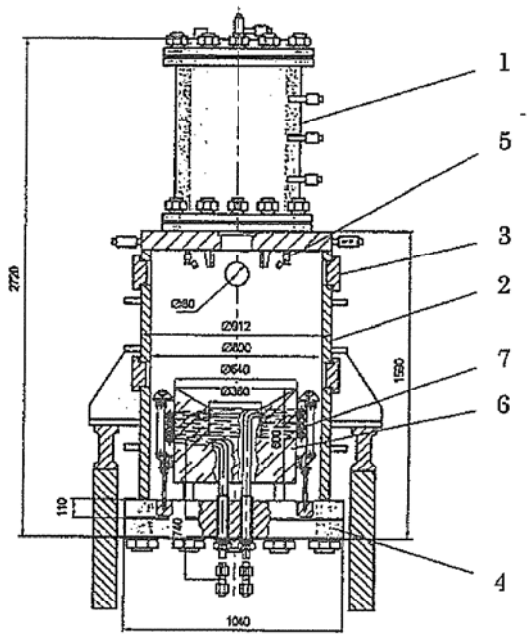
図 3.1-23　MACE-M1b 実験での溶融物温度変化

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

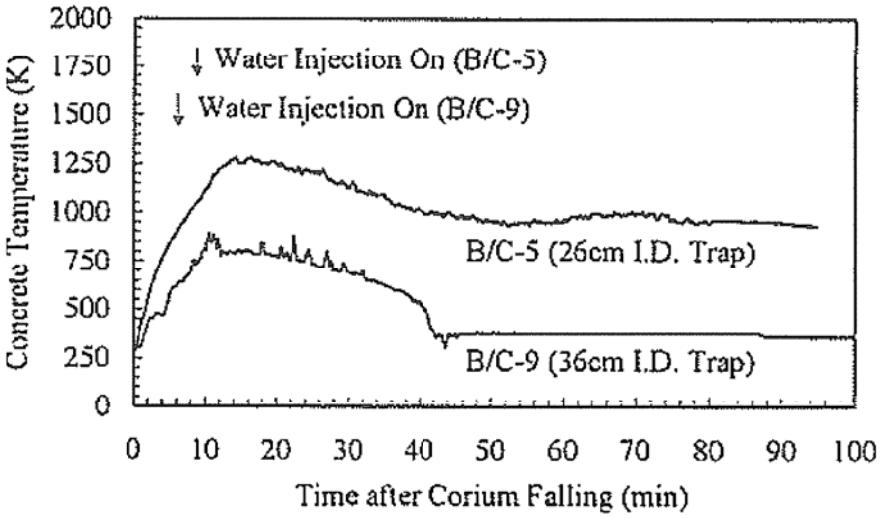


図 3.1-25　COTELS（B 及び C）実験におけるコンクリート温度挙動

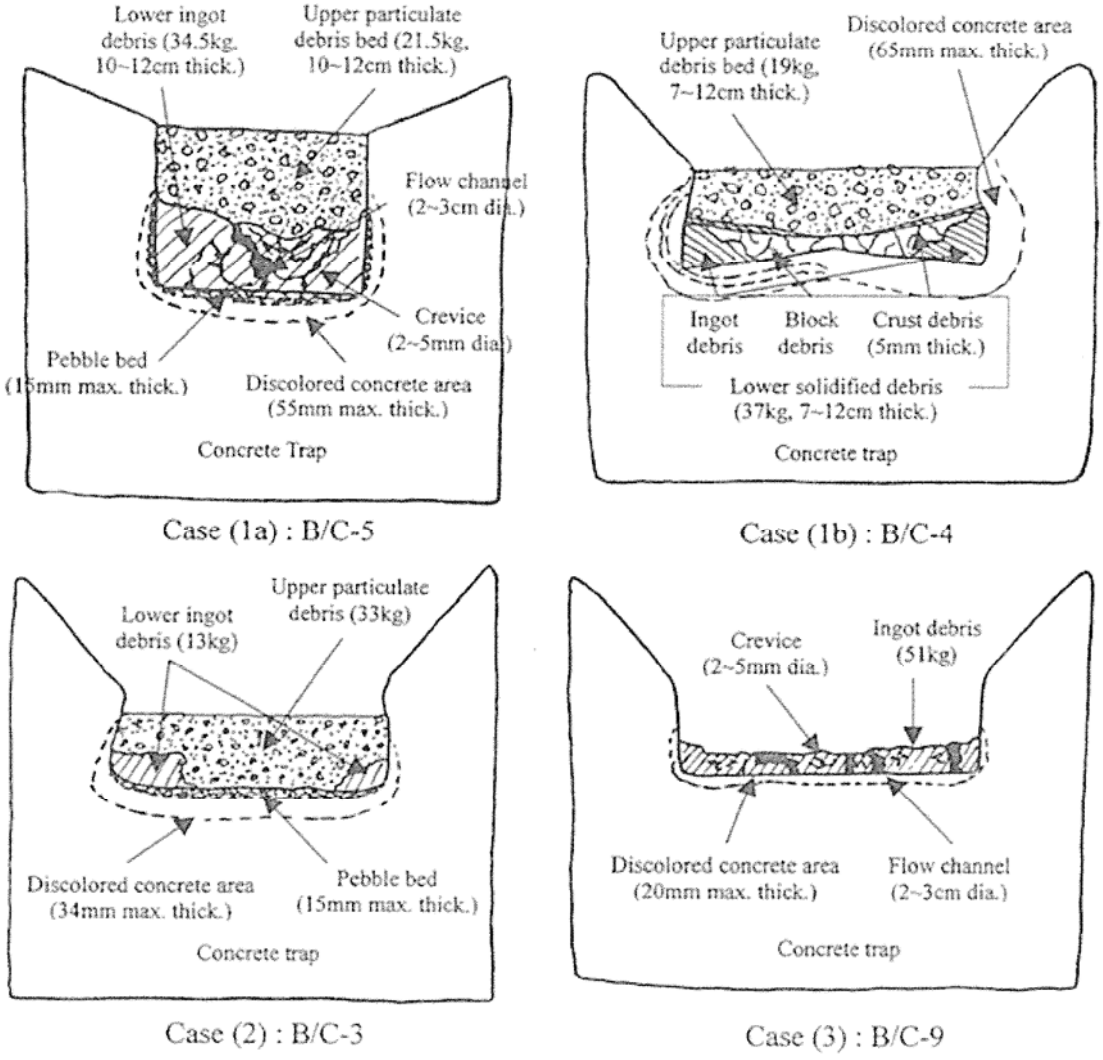


図 3.1-26　COTELS 実験での溶融物固化状態

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

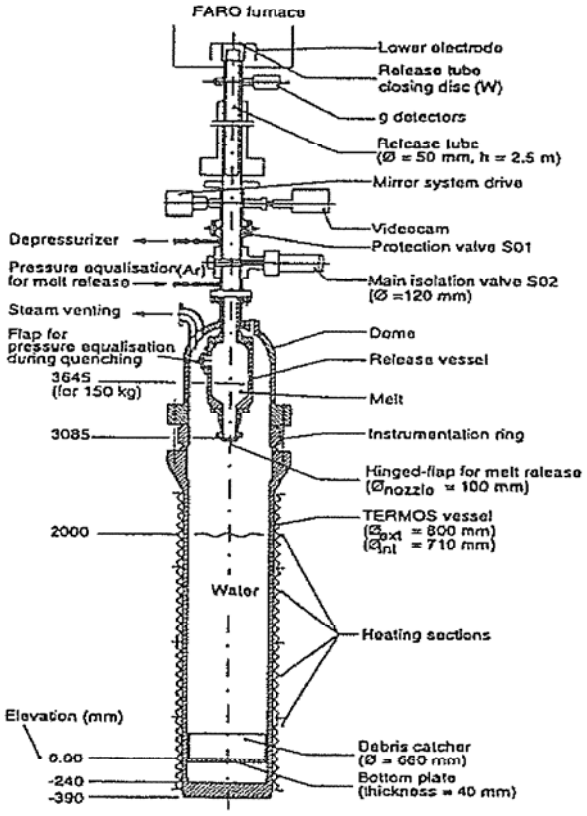
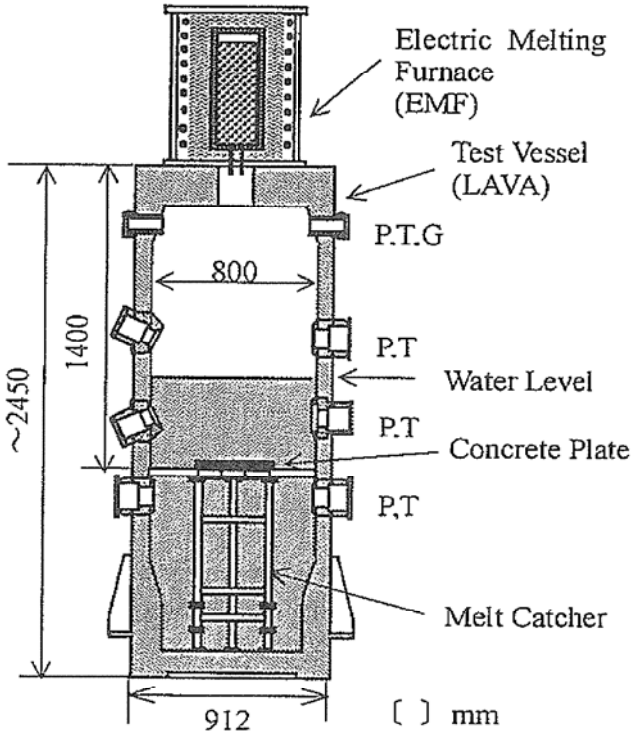


図 3.1-27　FARO 実験装置

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



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

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）	28.7°	19.3°
（2～3分後）	0.0°	0.8°

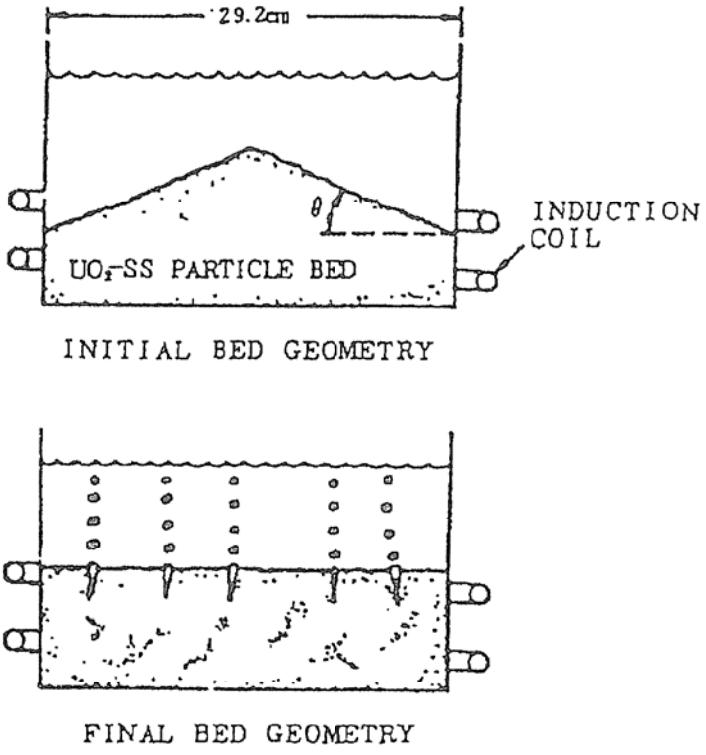


図 3.1-29　セルフレベリング実験における粒子ベッド概念

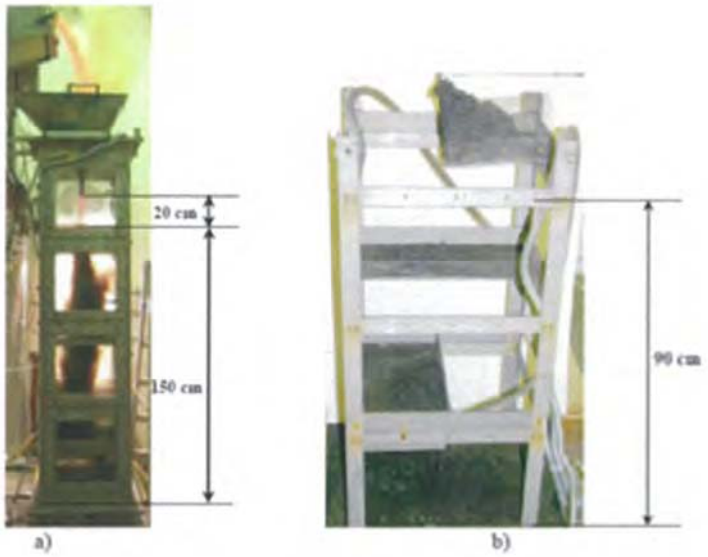


図 3.1-30　DEFOR 試験装置全体及び溶融炉心キャッチャー

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

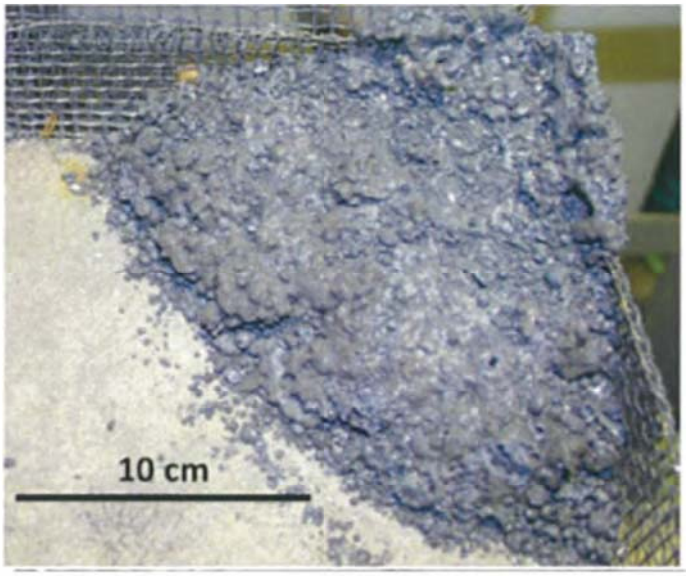


図 3.1-31　DEFOR-A8 キャッチャー 1 のケーキ状溶融炉心

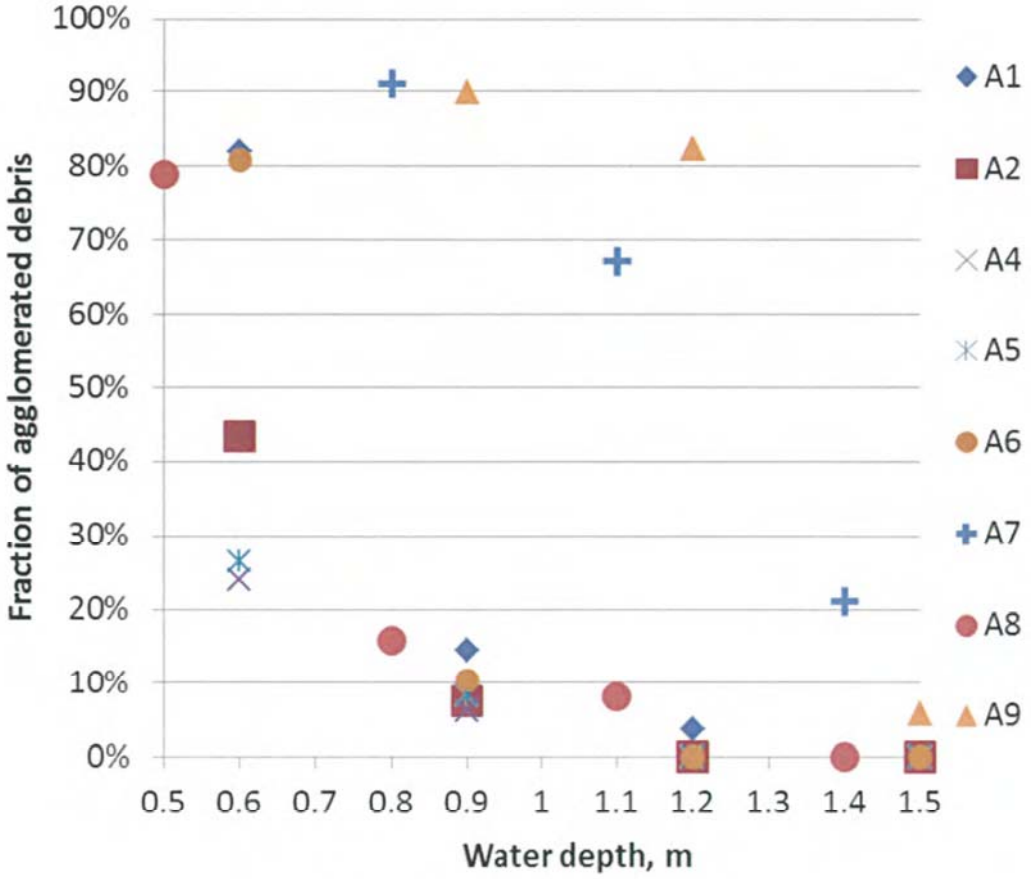


図 3.1-32　DEFOR-A 実験結果

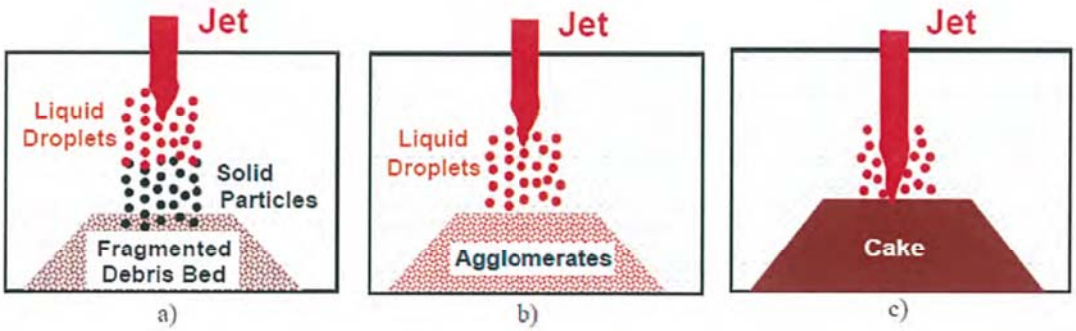


図 3.1-33　DEFOR 実験における溶融物凝集の概念図

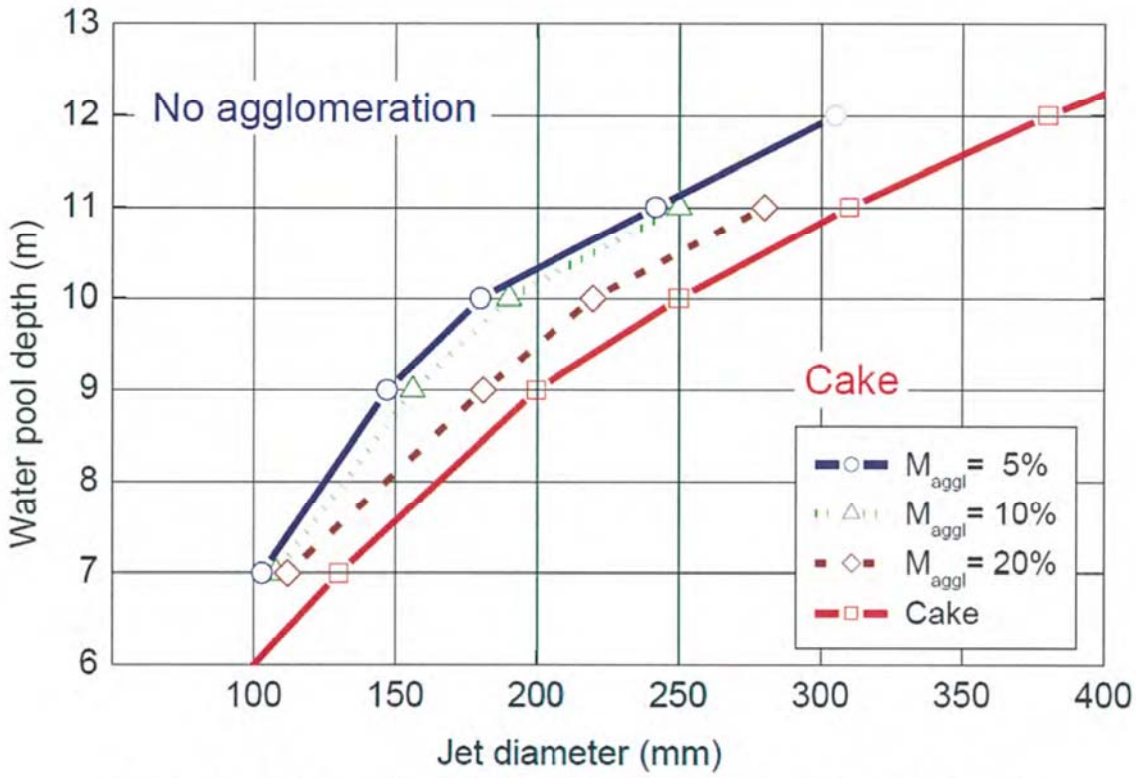


図 3.1-34　スウェーデン王立工科大学（KTH）による凝集モードマップ

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.

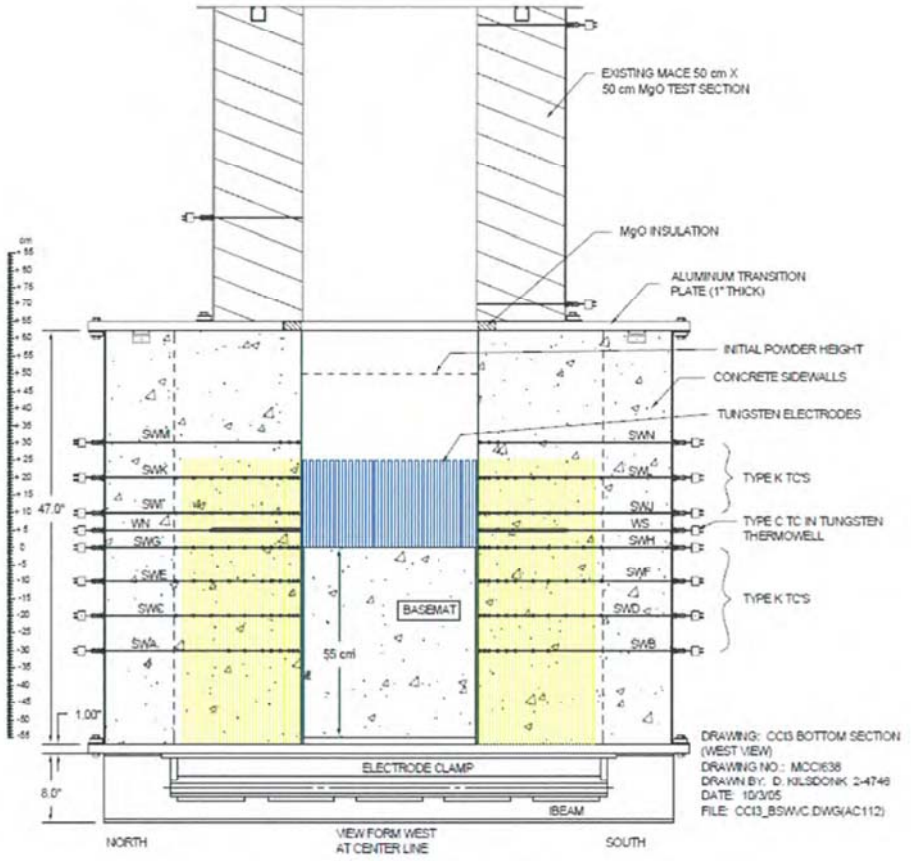


図 3.1-35　CCI 実験装置

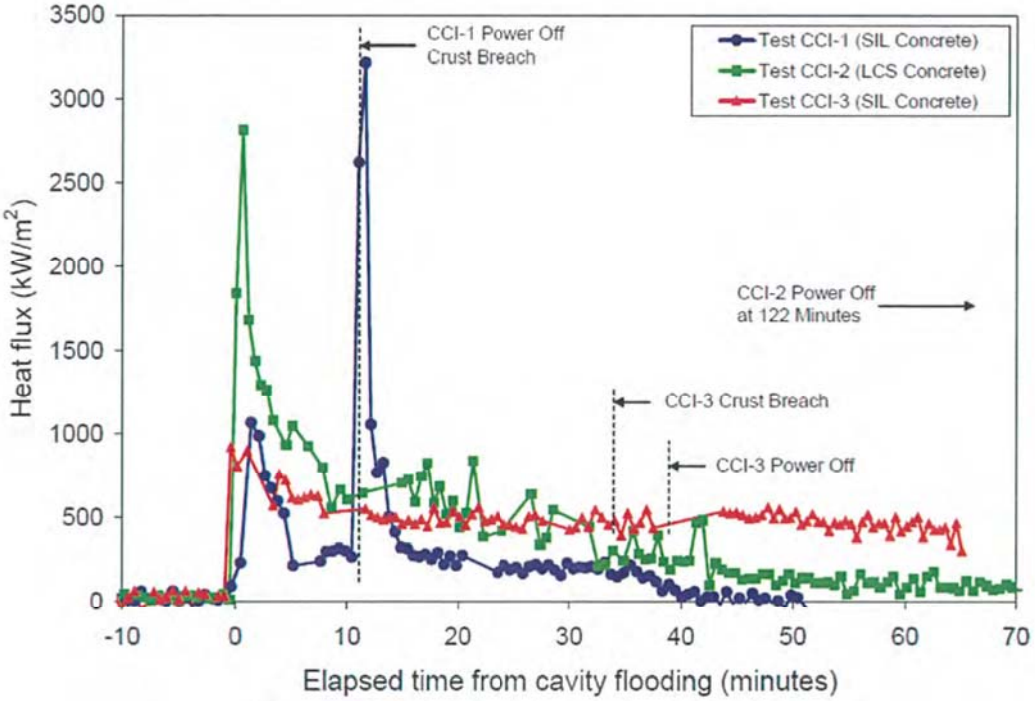


図 3.1-36　CCI 実験における水－溶融炉心間の熱流束

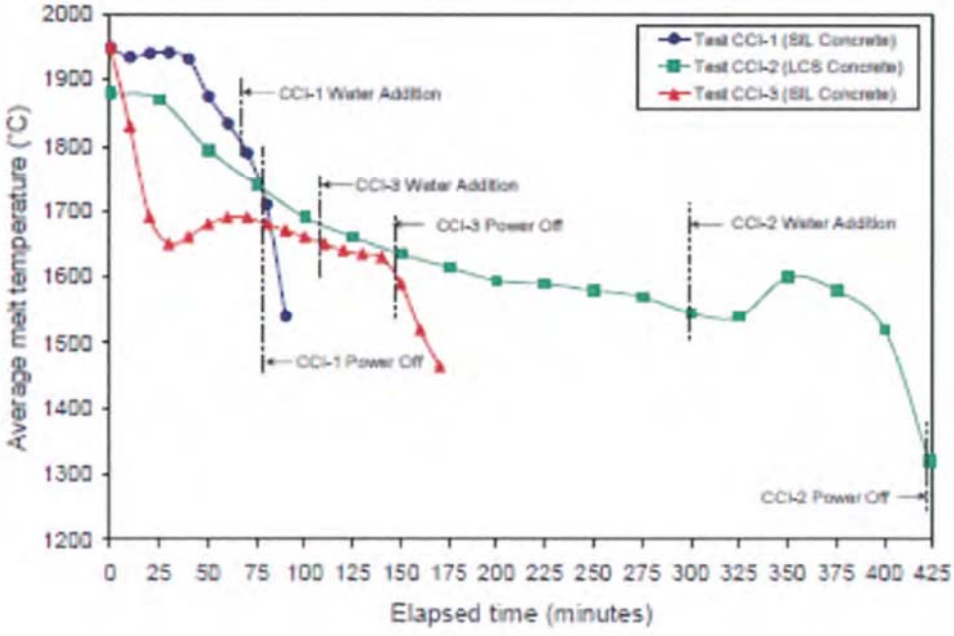


図 3.1-37　CCI 実験の溶融物平均温度変化

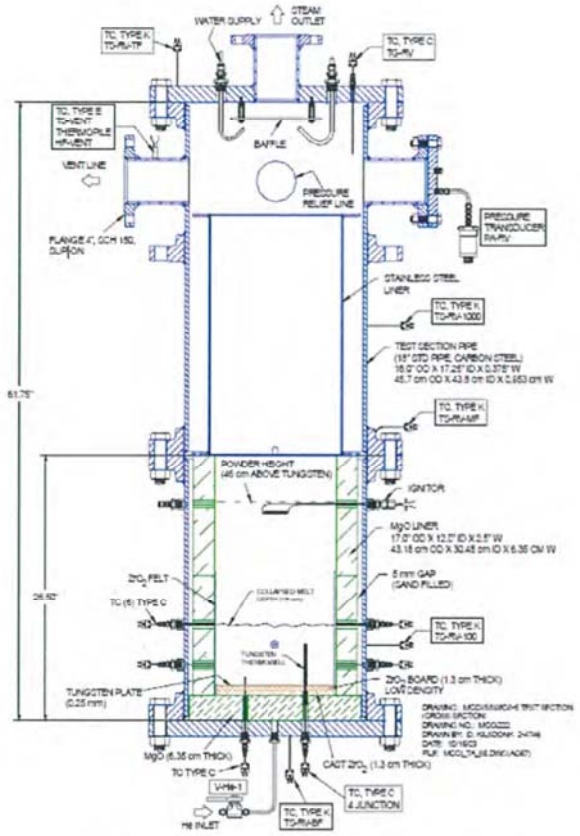


図 3.1-38　SSWICS 試験装置

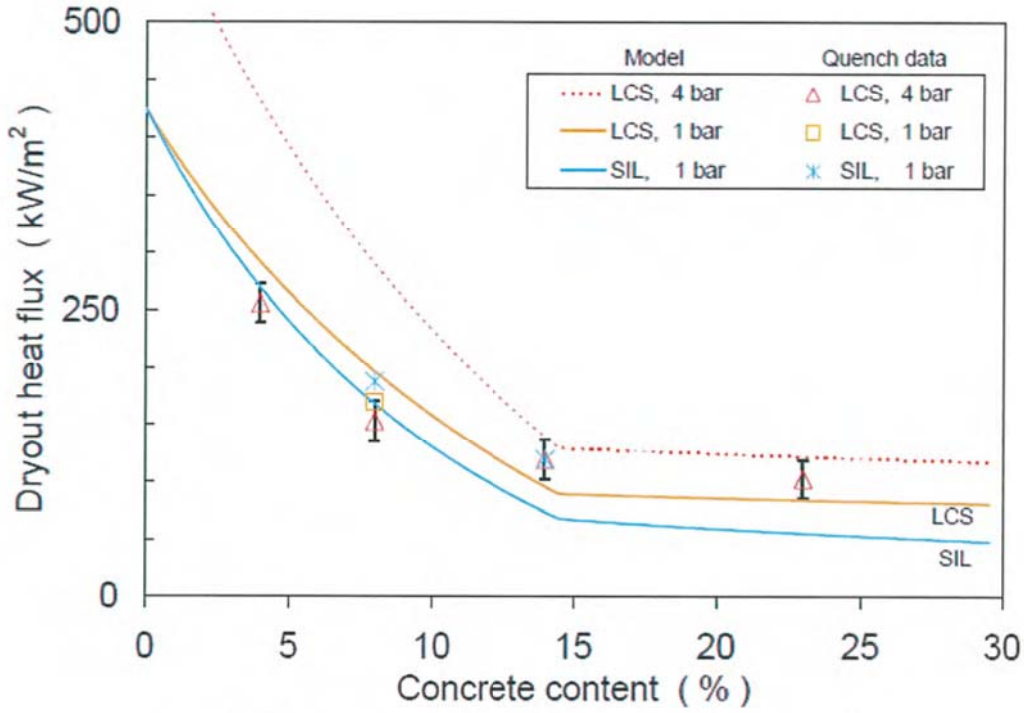


図 3.1-39　SSWICS 試験　ドライアウト熱流束の比較

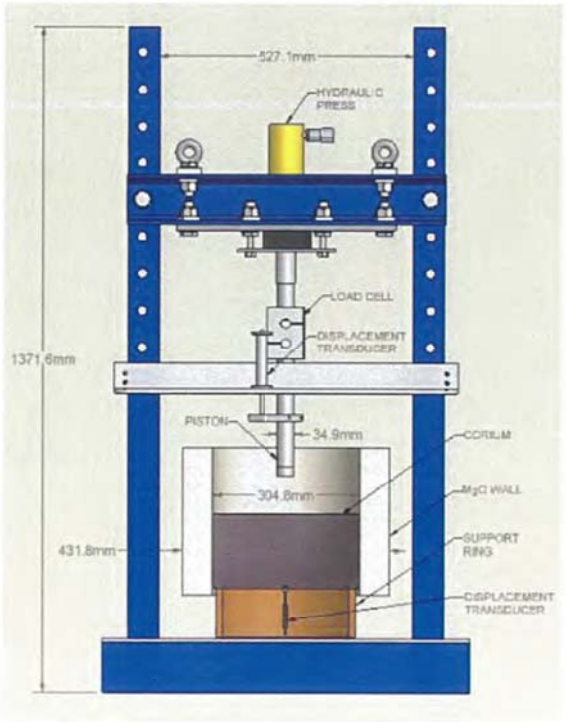


図 3.1-40　SSWICS 試験　強度試験の装置図

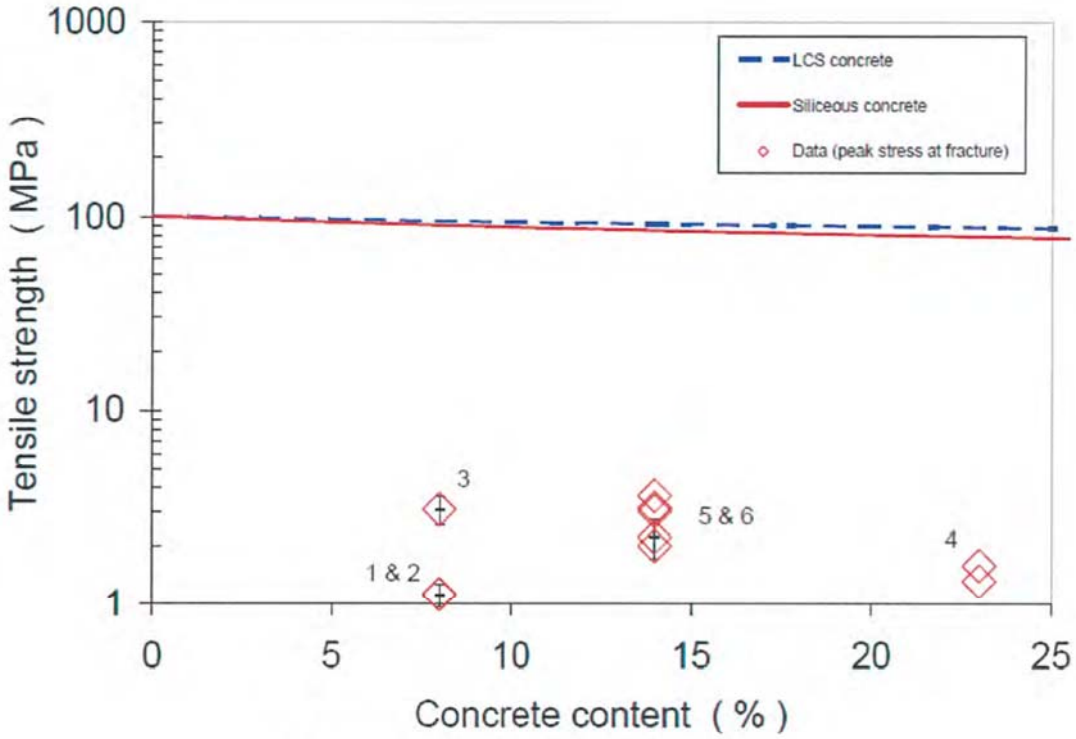


図 3.1-41　SSWICS 試験 強度試験結果

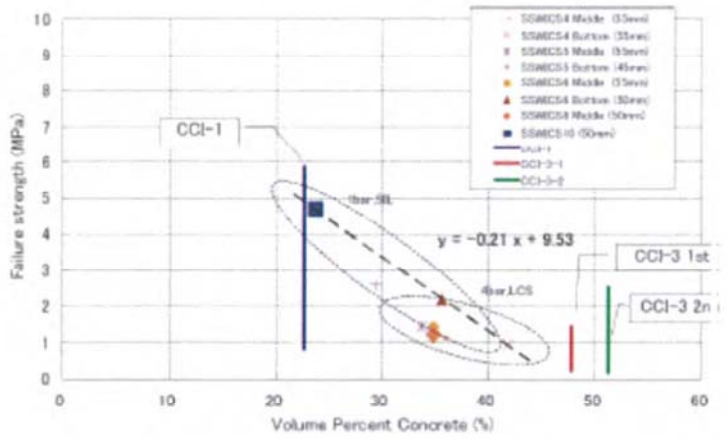


図 3.1-42　破損応力算出結果

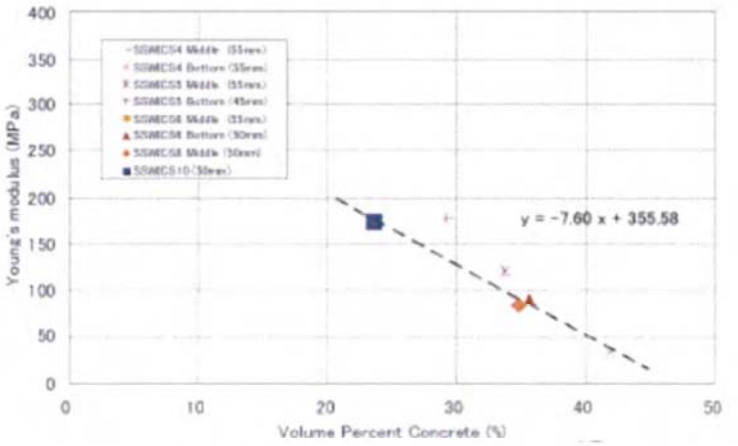


図 3.1-43　ヤング率算出結果

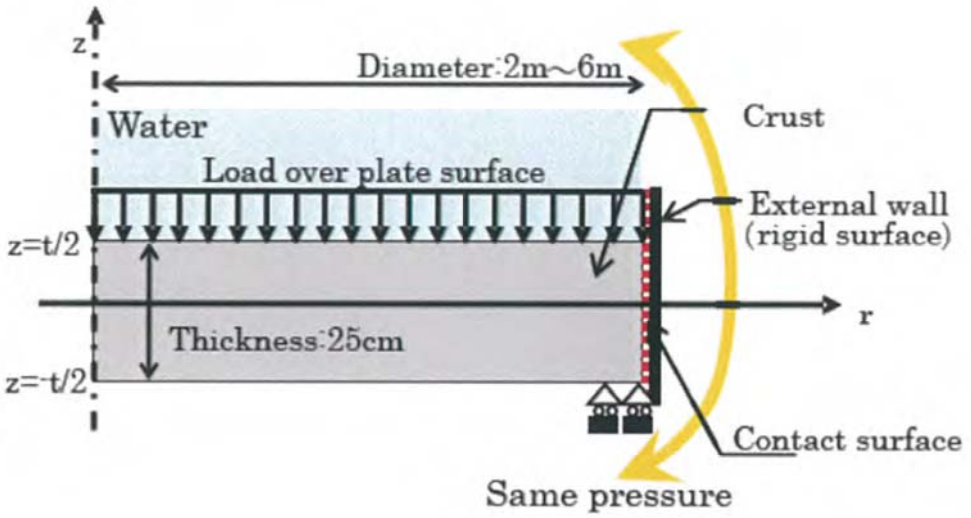


図 3.1-44　実機スケールのクラスト解析モデル

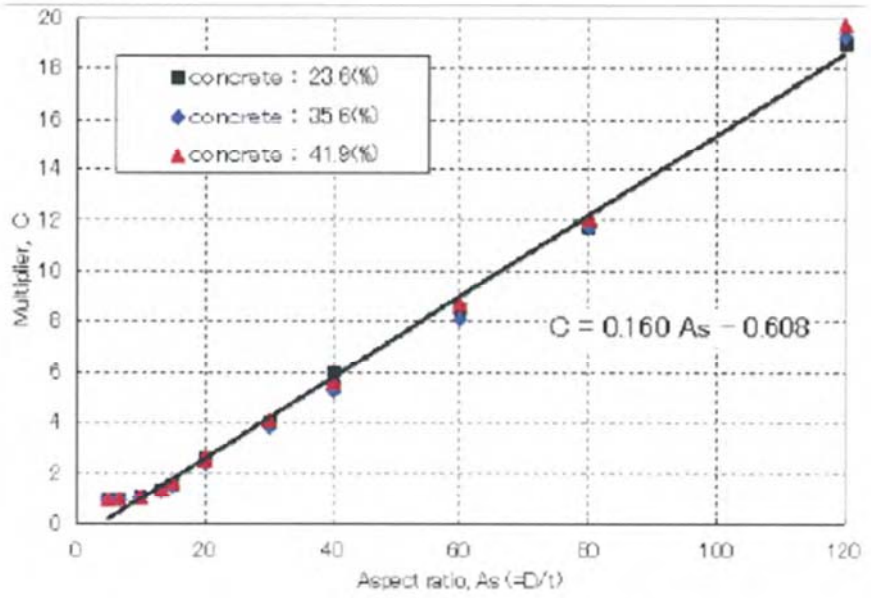


図 3.1-45　クラストの自重による応力分布



図 3.1-46　PULiMS-E4 試験での溶融物拡がり挙動

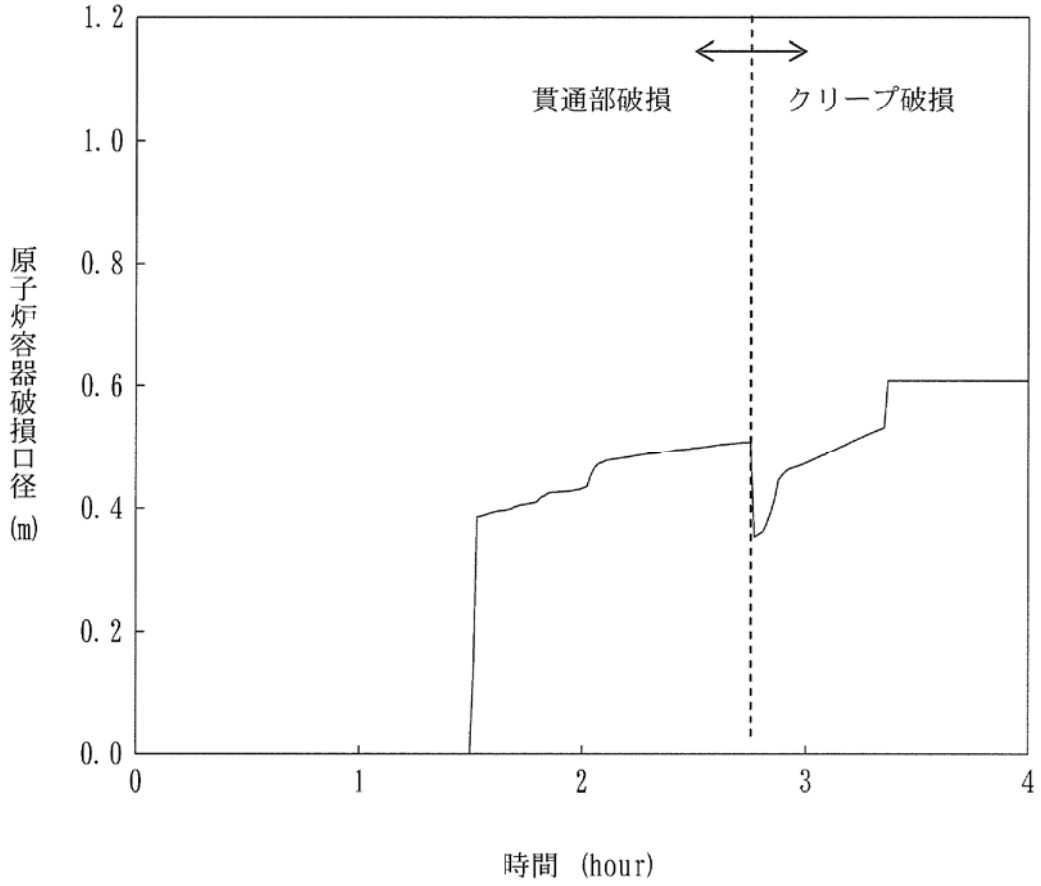
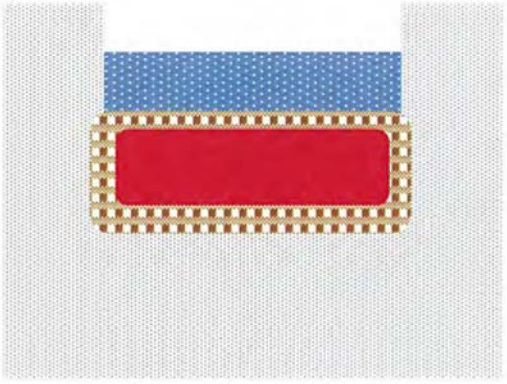


図 3.2-1 原子炉容器破損口径の拡がり（3 ループプラントの例）

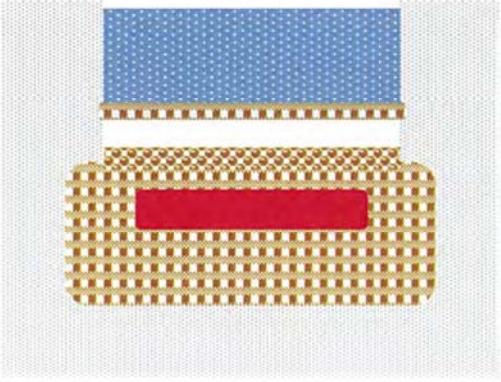
注）
約 1.5 時間の時点で貫通部破損、約 2.8 時間の時点でクリープ破損が生じており、クリープ破損以前は貫通部破損口径を、クリープ破損後はクリープ破損口径をプロットしている。



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。

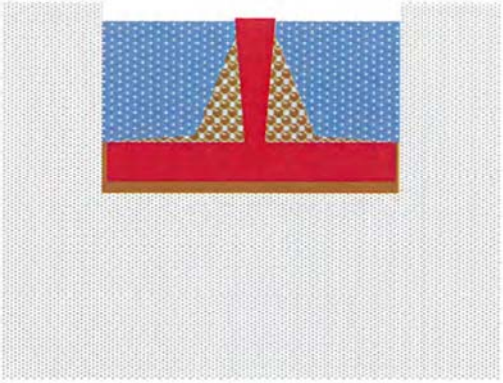


注水後短期：
溶融物上面から水への激しい伝熱が起き、上面に厚いクラストが形成される。この期間の熱流束は最大約 3MW/m^2 となり、その後急速に低下し約 1MW/m^2 となる。

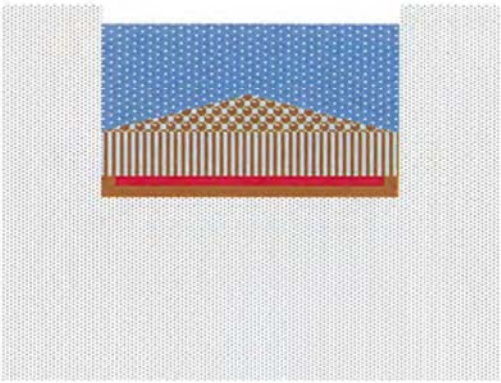


注水後長期：
溶融物上面のクラストが側壁に固着し、溶融物との間に空間が生じる。
水への熱流束は約 0.2MW/m^2 まで徐々に低下していく。
クラストにはコンクリート分解ガスが通過することで空隙が出来、水やガスがある程度透過する。

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。

エントレイン量（溶融炉心の細粒化量）

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

一方、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。すなわち、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、すなわち約 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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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、

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

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/m²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、溶融プール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、溶融プール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。

<u>コンクリートの組成</u>

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、CO_2 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－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－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た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

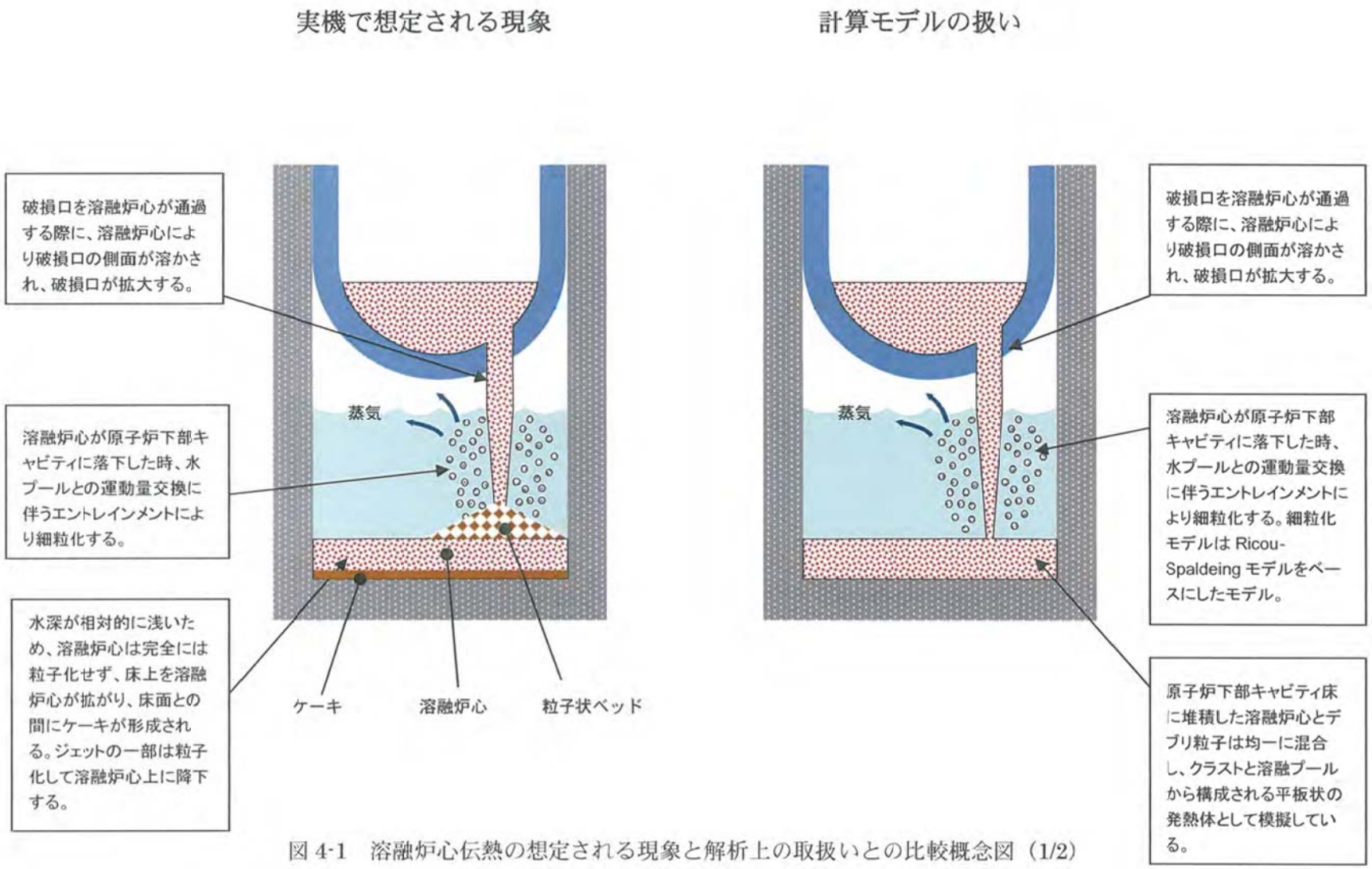


図 4-1　溶融炉心伝熱の想定される現象と解析上の取扱いとの比較概念図（1/2）
原子炉下部キャビティでの溶融炉心挙動

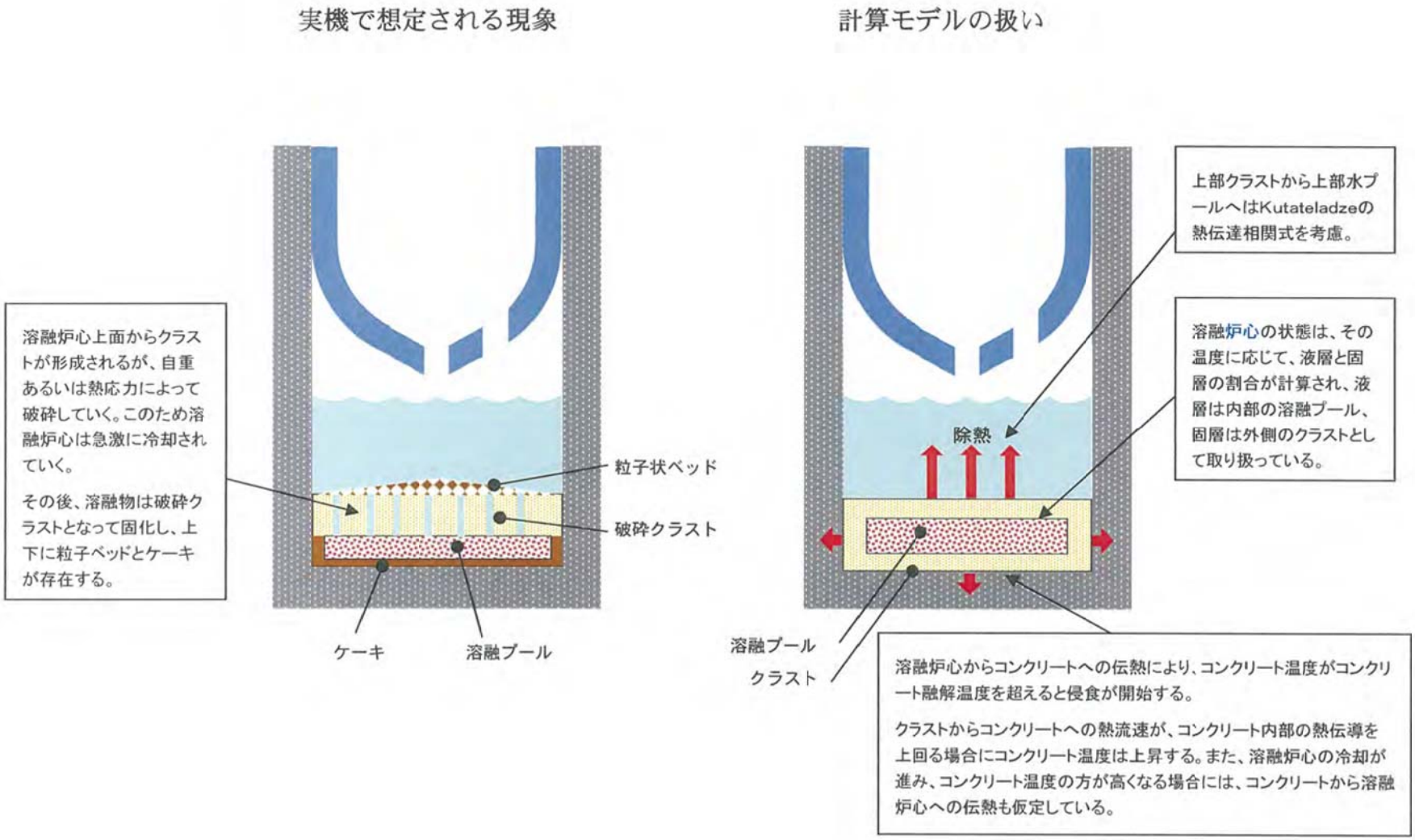


図 4-1　溶融炉心伝熱の想定される現象と解析上の取扱いとの比較概念図（2/2）
溶融炉心と冷却水及びコンクリートとの相互作用

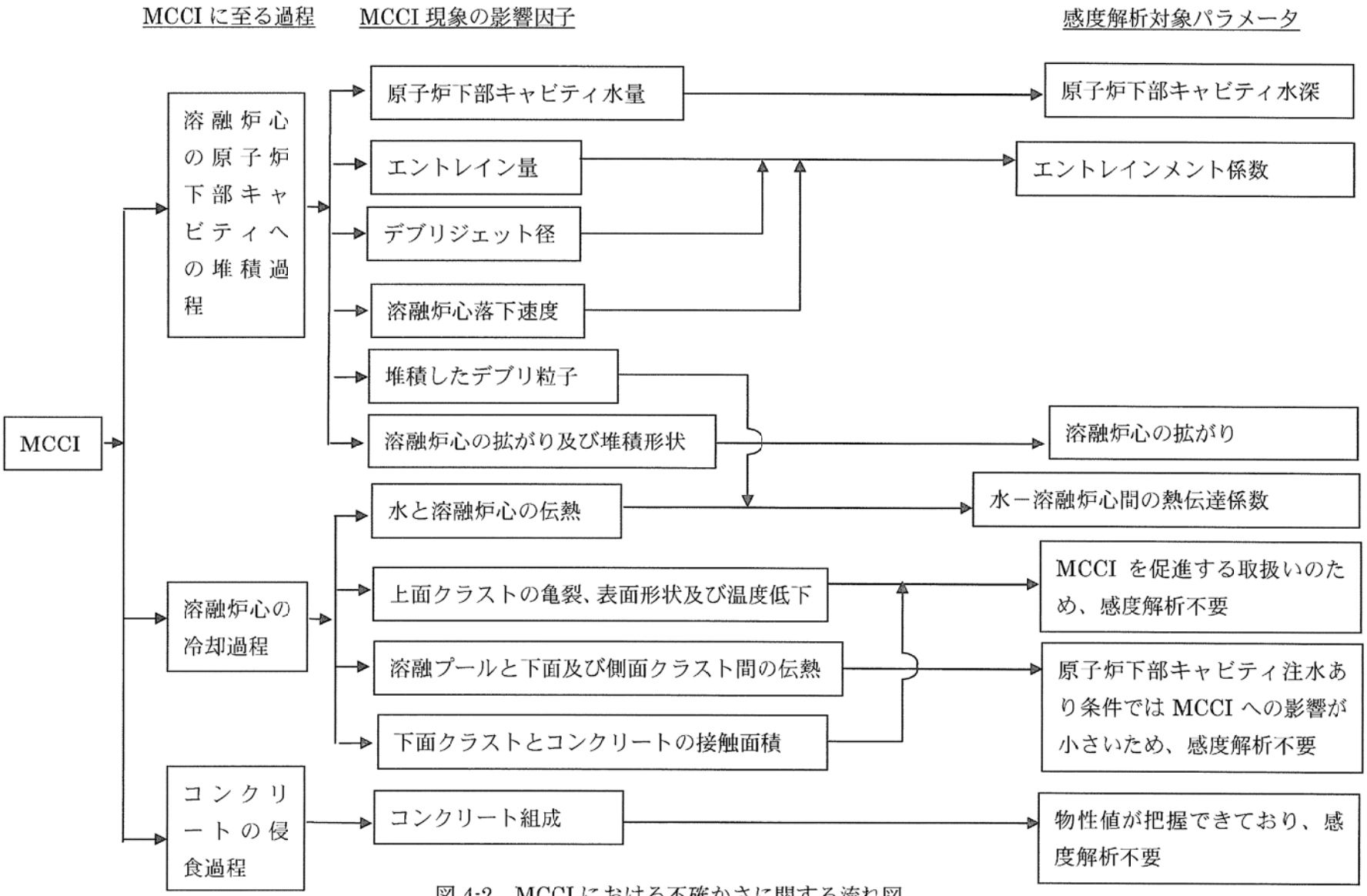
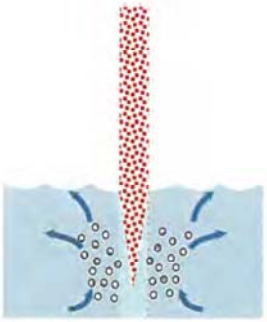
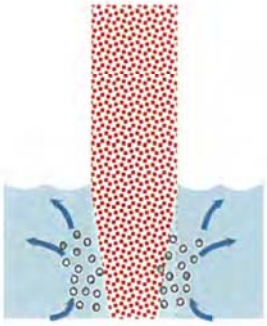


図 4-2　MCCI における不確かさに関する流れ図



(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

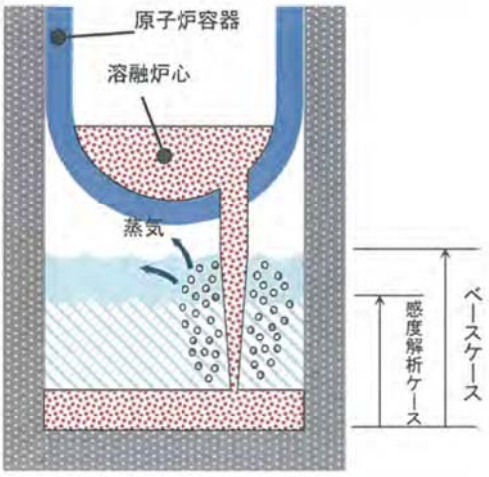
前章において抽出したパラメータに関して感度解析によりその影響程度を把握した。感度解析のベースケースは、3ループプラントの「大破断 LOCA＋ECCS 注入失敗＋CV スプレイ注入失敗」である。

（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、炉心溶融開始後 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	炉心溶融開始後 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

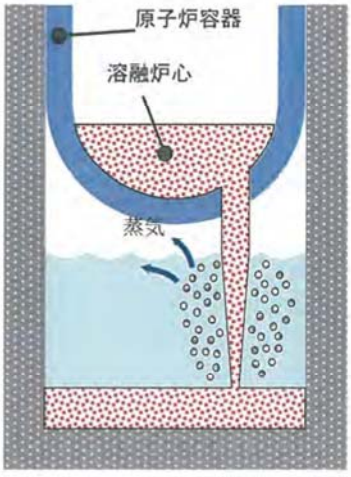
解析条件

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、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

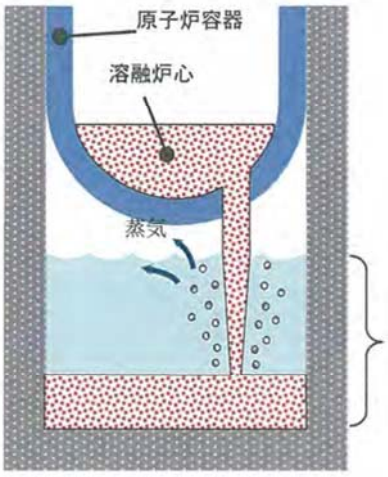
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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、溶融炉心の冷却に時間を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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

原子炉容器破損による溶融炉心の落下により、原子炉下部キャビティ床面に約 47 ㎡の広さで拡がり、原子炉下部キャビティ床面積とほぼ同等となる。その後、断続的に溶融炉心が落下するため、溶融炉心は床全面を超えて拡がると考えられるが、実際は原子炉下部キャビティ壁により拡がりは制限されるため、溶融炉心の拡がり面積としては原子炉下部キャビティ床一面を設定する。これは、ベースケースの設定と同等である。溶融炉心が床全面に拡がる場合、溶融炉心は原子炉下部キャビティ側面と接触する。溶融炉心は外周部にクラストを形成し、内部に溶融プールが存在する形態として扱う。溶融プールから側面クラスト内面へは対流熱伝達により伝熱し、側面クラスト内部では厚さ方向に２次関数の温度勾配を持つものとし、側面クラスト外面にてコンクリートへ熱伝導により伝熱する。コンクリート内部でも側面深さ方向に１次元の熱伝導方程式による温度分布を持つ。そして、コンクリート表面温度がコンクリートの融点を超えると侵食が開始する。

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

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

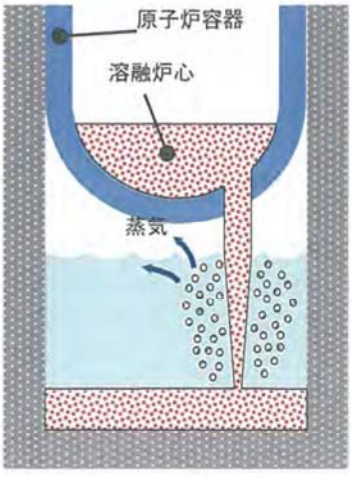
デブリジェットが原子炉下部キャビティ床に到達するまでの落下過程において、溶融炉心と原子炉下部キャビティ水との接触により、溶融炉心から原子炉下部キャビティ水への伝熱が発生する。本ケースにおいては、溶融炉心の過熱度分がすべて伝熱されると仮定し、溶融炉心の融点まで冷却するよう条件を与えているが、実際は、溶融ジェット径が約 0.5m と大きいため、落下過程で冷却されずに過熱度を保ったまま原子炉下部キャビティ床に到達する溶融ジェットの割合が大きいと考えられる。

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

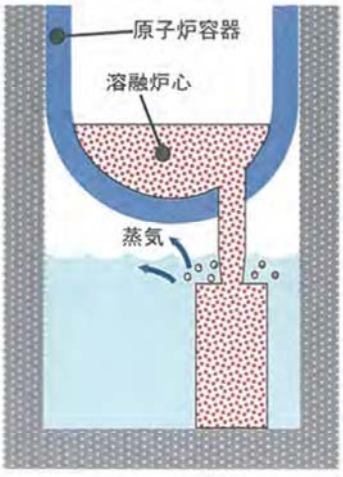
融炉心の拡がり面積の初期値として、原子炉下部キャビティ床面積の約 1/10 を与えた。

ＭＡＡＰコードでは、水－溶融炉心間の伝熱は溶融炉心の上面のみ計算する。しかし、溶融炉心が局所的に堆積する場合には、その側面も水と接触するため、側面からの除熱にも期待できる。そこで、上面に加えて側面からの除熱効果を考慮するため、溶融炉心形状として円柱を想定し、側面を伝熱面積に加える。計算上の取扱いとしては、局所的に堆積した床面積を水への伝熱計算に使われる上面の面積とし、溶融炉心の落下量に応じて側面分の伝熱面積が増える分を上面の伝熱量の増分として考慮する。すなわち、上面に側面を加算した面積に相当する比率を、上面から水への伝熱量の比率として設定する。

項　目	溶融炉心の拡がり面積	設定根拠
ベースケース	原子炉下部キャビティ 床面積の 1/1	原子炉下部キャビティ区画床全面とする
感度解析ケース	原子炉下部キャビティ 床面積の約 1/10 から 落下量に応じて拡大	落下時に細粒化などにより冷却が進む



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、溶融炉心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。溶融炉心と水の熱流束については、感度解析ケースの方が、1MW/m² を超える※高い値が継続する結果となっている。これは、溶融炉心の拡がり面積を制限した

ことで、溶融炉心と水の接触面積が小さくなり、その結果溶融炉心の単位時間当たりの除熱量が小さくなったことで、溶融炉心の冷却に時間を要しているためである。

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

評価

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

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

（4）水－溶融炉心間の熱伝達係数

解析条件

水と溶融炉心の熱伝達には、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溶融炉心とコンクリートの相互作用に関する実験に基づき大気圧条件で 0.8MW/m^2 に相当する値を使用している。

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

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

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

判断できる。

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

感度解析ケース１では、CCI 実験において観測されている初期のバルク冷却期間中の熱流束である 3MW/m² を適用する。なお、常に高い熱流束が維持されるのではなく、溶融炉心の温度が低下した場合には、熱流束は崩壊熱を除去できる熱流束に制限される。

感度解析ケース２では、上記の原子炉下部キャビティへの落下直後の高い熱流束や、クラストの破損による内部の溶融炉心と原子炉下部キャビティ水との直接接触を考慮せず、CCI-2 及び CCI-3 実験において初期のピークを除外した熱流束である 0.5MW/㎡を選定する。

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

CCI 実験では、コンクリート侵食開始後に注水しており、クラストと溶融物の間に空洞が形成されている。これは、実験のような小スケールでは壁と壁の間でクラストが強固につながり、クラストブリッジが形成され、その下でコンクリート侵食により溶融物の液位が低下するためである。一方、実機スケールではクラストの自重及び水の水頭によりクラストが破損し、本実験のような空洞は生じないと考えられる。CCI-1 実験はクラストの形成後、約 10 分の時点でクラスト破損が生じ、熱流束が約 3MW/㎡まで再上昇しているが、これはクラストと溶融物の間に形成された空洞の影響が大きく現れたケースであり、クラストが破損するまでは空洞の形成により熱流束が小さく、クラストが破損した後に破損箇所から水が流入し、高温の溶融物と水が直接接触することよって熱流束が大きくなったものである。実機スケールでは、このような空洞は形成されないと考えられるため、感度解析の条件設定の際の検討対象から除外することとした。

感度解析ケース３では、次のように熱流束を設定する。

まず、溶融炉心内部が溶融状態の場合、クラストは破損、浸水を繰り返し、安定したクラストは形成されないと考えられる。したがって、部分的にも溶融炉心から水へ、高い熱流束での伝熱となると考えられる。この時の現象は、小規模実験で溶融物へ注水を開始した時点と同等と考えられ、MACE 実験、CCI 実験では 1MW/m² 以上の値が観測されている。溶融炉心の落下直後は、高温の溶融炉心と原子炉下部キャビティ水の直接接触により、更に高い熱流束が得られると考えられるが、本感度解析では、内部に溶融部が存在する間の熱流束として、一律に 0.8MW/m² を適用する。

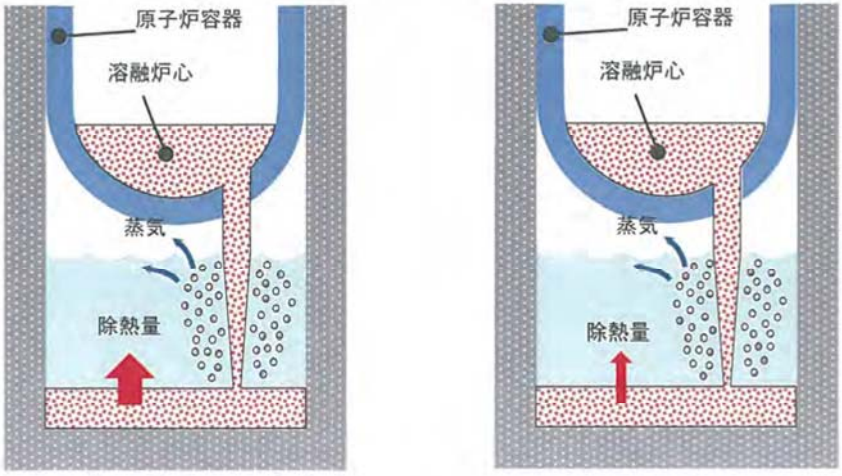
次に、溶融炉心全体が固化した後の挙動においては、原子炉下部キャビティへの落下直後の高い熱流束や、クラストの破損による内部の溶融炉心と原子炉下部キャビティ水との直接接触を考慮せず、CCI-2 及び CCI-3 実験において初期のピークを除外した熱流束である 0.5MW/㎡を選定する。

次に、コンクリート混入がある場合のドライアウト熱流束については、SSWICS 実験において確認されており、コンクリートの混入割合が約 15%に達した場合にドライアウト熱流束は約 0.125MW/m² となっている。15％までの間は、ドライアウト熱流束はほぼ直線的に低下しており、コンクリート混入割合が約 15%以上の場合には、ドライアウト熱流束はほぼ一定となっている。本感度解析では、コンクリート侵食量に応じて、上記の SSWICS 実験において確認された熱流束を使用する。

感度解析ケース４では、WETCOR、MACE、CCI 実験においてクラスト全体が固化して温度が低下した状態の熱流束である 0.2MW/m² を適用する。これについて、溶融炉心は、溶融状態で原子炉下部キャビティ水と直接接触するため、溶融炉心落下直後は高い熱流束が得られると考えられるが、本感度解析は溶融炉心落下直後から、安定化クラスト形成後の熱流束を仮定しているという点で、仮想的なケースであると言える。

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

（注）　大気圧条件



ベースケース　　感度解析ケース

解析結果

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

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

まず感度解析ケース１について考察する。感度解析ケース１では、溶融炉心と水の熱流束について、瞬間的に 2MW/m² 以上となる場合があり、ベースケースの限界熱流束（約 1.3MW/m²）に比べて高く、限界熱流束の継続時間はベースケースよりも短くなっている。感度解析ケースでは、溶融炉心落下時の高い熱流束を考慮しているため、溶融炉心温度の低下が顕著であり、コンクリートの侵食深さは 0mm となった。

感度解析ケース２では、溶融炉心と水の熱流束について、感度解析ケースでは限界熱流束の値は約 0.8MW/m²（大気圧で 0.5MW/m² 相当）とベースケースより低く、限界熱流束の持続時間はベースケースより若干長く、約 20 分となっている。感度解析ケースでは、溶融炉心落下直後の高い熱流束を考慮していないことから、溶融炉心温度の低下が緩やかになっており、コンクリートと溶融炉心間の熱伝達もより長時間継続したため、コンクリートの侵食深さはベースケースに比べて増加したものの有意ではなく、約 7mm となった。

感度解析ケース３では、溶融炉心と水の熱流束について、初期はベースケースと同様であるが、全体固化後は約 0.8MW/m²（大気圧で 0.5MW/m² 相当）とベースケースより低く、限界熱流束の持続時間はベースケースより長くなっている。感度解析ケースでは、溶融炉心落下直後の高い熱流束を考慮していないことから、溶融炉心温度の低下が緩やかになっており、コンクリートと溶融炉心間の熱伝達もより長時間継続したため、コンクリートの侵食深さはベースケースに比べて若干増加したものの有意ではなく、約 3mm となった。

感度解析ケース４では、溶融炉心と水の熱流束について、約 0.3MW/m² で推移しており、ベースケースの限界熱流束（約 1.3MW/m²）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、溶融炉心から水への熱流束が小さく評価された結果であり、感度解析ケースでは概ね一定の熱流束が継続している。溶融炉心とコンクリートの熱流束については、最初のピーク値が最も高く、この時点で最もコンクリートが熱せられており、感度解析ケースでは、0.1MW/m² 前後の熱流束が継続している。その結果、コンクリートの侵食深さはベースケースの解析結果である約 3mm に比べて増加し、約 20cm となった。崩壊熱は時間の経過に伴い減衰し、水による除熱量は前述のとおり概ね一定の値が維持されるため、その結果、約 8 時間の時点でコンクリート表面温度は融点を下回りコンクリート侵食は停止する。

評価

水－溶融炉心間の熱流束に対する感度解析を実施し、コンクリート侵食に対する感度を確認した。感度解析ケース 1、2、3 においては、有意なコンクリート侵食には至らず、その不確かさが有効性評価の結果へ与える影響は小さい。一方、溶融炉心落

下直後から、安定化クラスト形成後の熱流束を仮定した条件のケース４では、コンクリート侵食が有意に進む結果となった。ただし、本ケースは、前述のとおり、溶融炉心落下直後の高い熱流束の状態を無視した仮想的なケースであり、現実的に起こり得るものではないと考える。

（５）感度解析パラメータの組合せ

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さまざまなパターンの不確かさが考えられること、また直接的な実験例が少なく知見が不十分であることから「4. 不確かさに関する整理」にて抽出したパラメータの組合せを考慮し、感度解析を実施する。

解析条件

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

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

感度解析の組合せとして、「落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース」では、細粒化が進みにくくなるよう設定するため、エントレインメント係数を推奨範囲の最小値とし、溶融炉心の拡がり面積としては、原子炉下部キャビティ床面積を設定した。

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

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

以上から、パラメータの組合せとして次表の２ケースを考える。

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

（注）　大気圧条件

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

解析結果

図 5-5-1～5-5-9 に、本感度解析の結果を示す。

感度解析ケース１は、溶融炉心落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケースであり、水－溶融炉心間の熱流束は、ベースケースでは、溶融炉心が原子炉下部キャビティに落下する毎に、大気圧条件相当で 0.8MW/m² であるのに対して、感度解析ケース１では、最初の落下時に大気圧条件相当で 0.8MW/m² に達するものの、その後は瞬時に全体が固化するため、大気圧条件相当で 0.5MW/m² となる。このため、溶融炉心温度、コンクリート表面温度はベースケースよりも高温の期間が若干長く維持される。その結果、コンクリート侵食深さはわずかに増加する程度であり、ベースケースが約 3mm、感度解析ケース１が約 4mm となった。なお、感度解析ケース１では、原子炉下部キャビティでの水素生成量がベースケースに比べてわずかながら減少した。具体的には、ベースケースでは MCCI による水素発生量が約 3kg、細粒化によるジルコニウム－水反応による水素発生量が約 18kg であるのに対して、感度解析ケース１では、MCCI による水素発生量が約 4kg、細粒化によるジルコニウム－水反応量による水素発生量が約 10kg となった。これは、感度解析ケース１においてエントレインメント係数を小さくしたことから、細粒化によるジルコニウム－水反応量が少なくなったためである。

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

の約 37.9%が水と反応する結果となっている。これについて、MCCI により発生する水素は、すべてジルコニウムに起因するものであることを確認した。また、追加発生となる水素については、水素処理装置（PAR 及びイグナイタ）を使用することで処理が可能である。

表5　水素発生量の内訳

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

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

評価

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

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

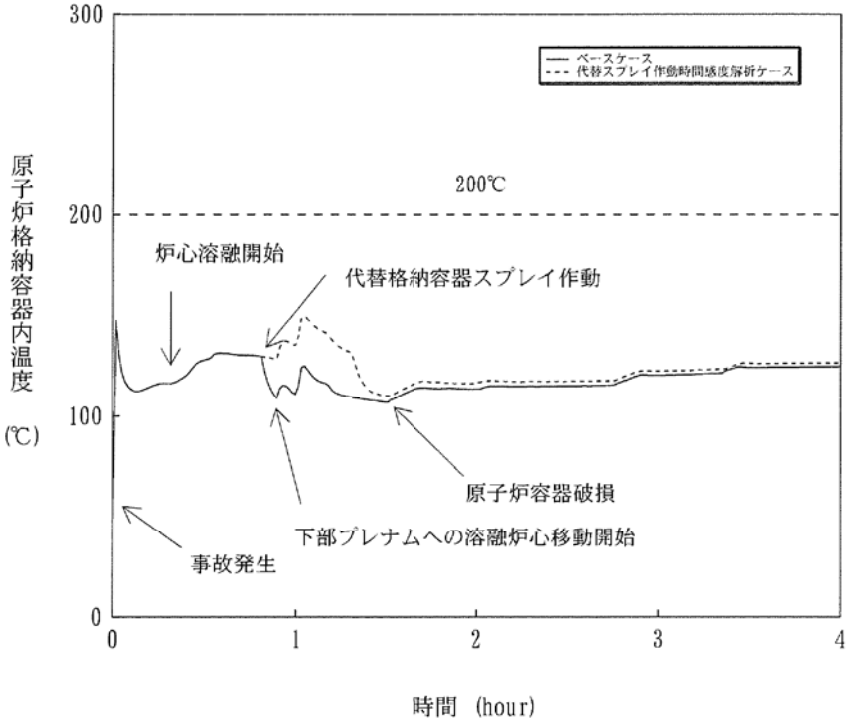


図 5-1-1 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（１）

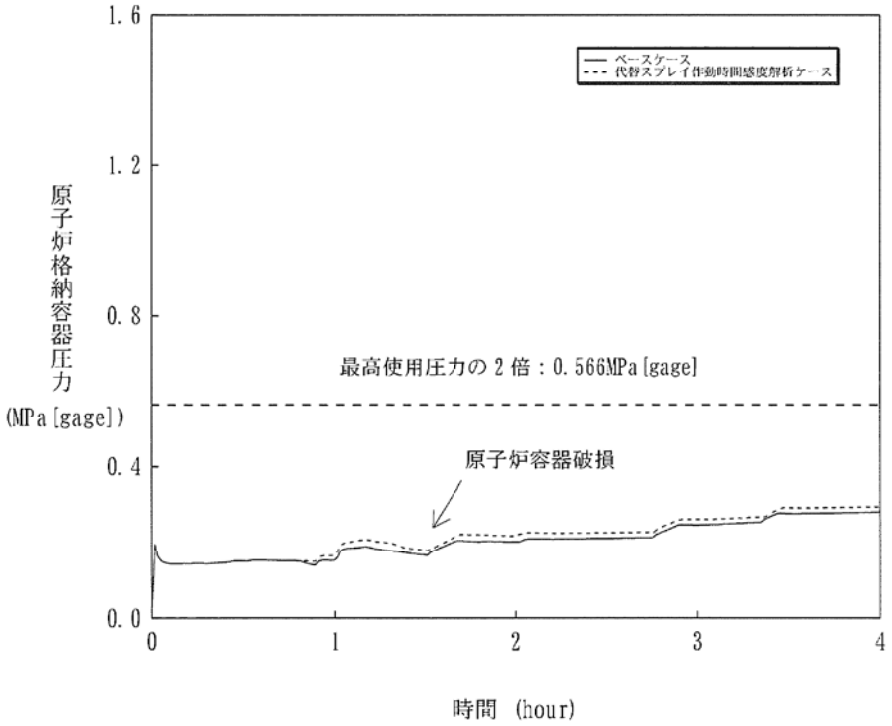


図 5-1-2 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（２）

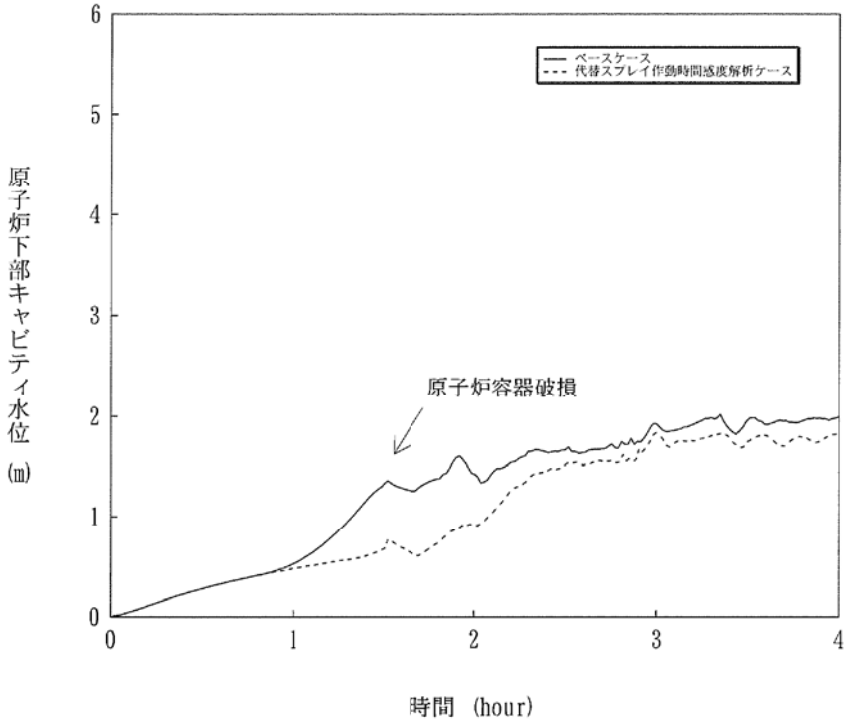


図 5-1-3 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（３）

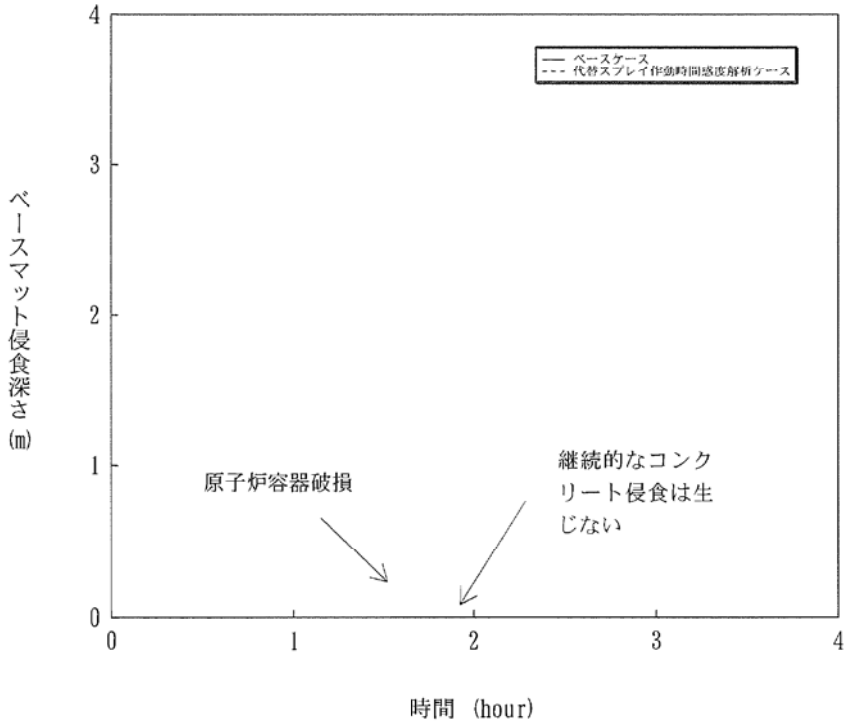


図 5-1-4 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（４）

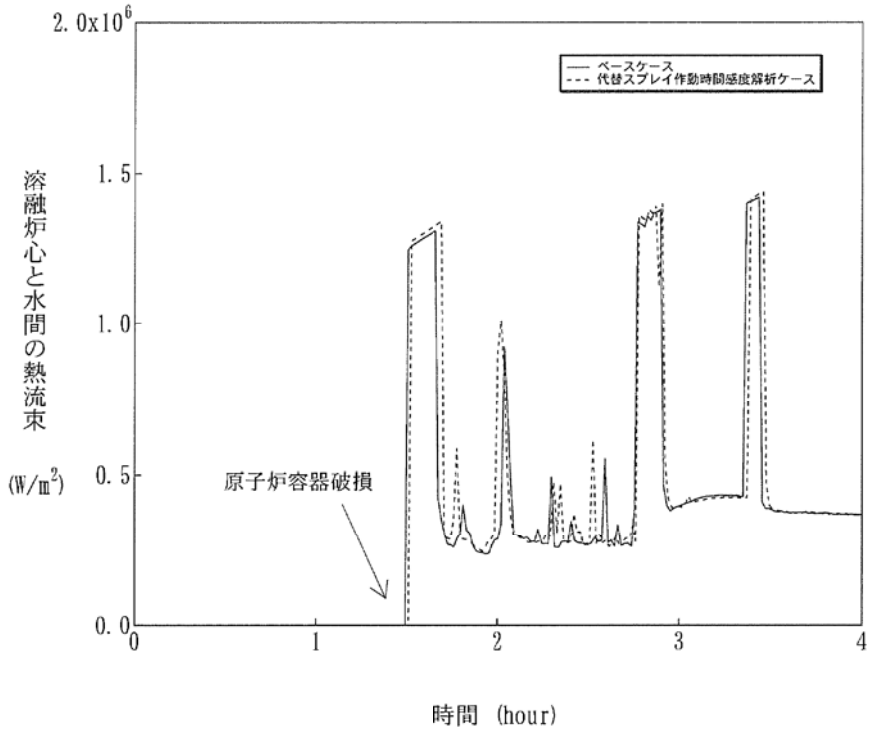


図 5-1-5 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（５）

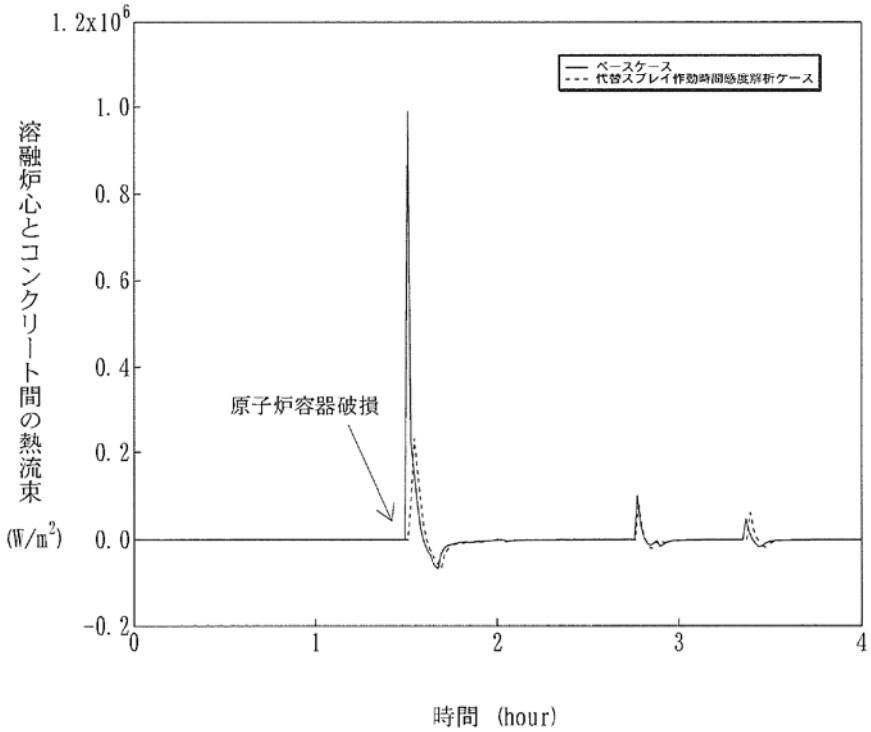


図 5-1-6 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（６）

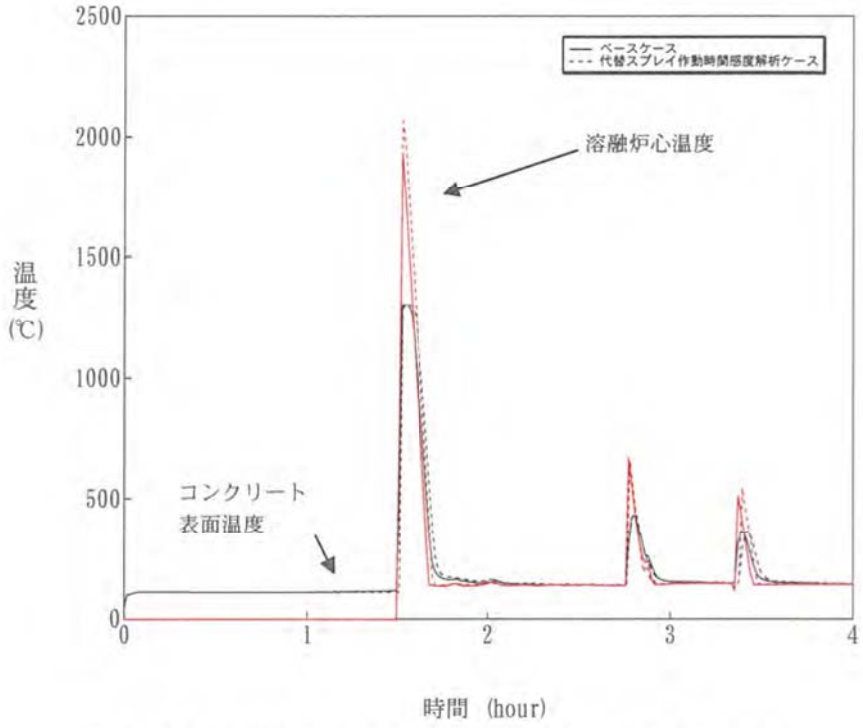


図 5-1-7 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（7）

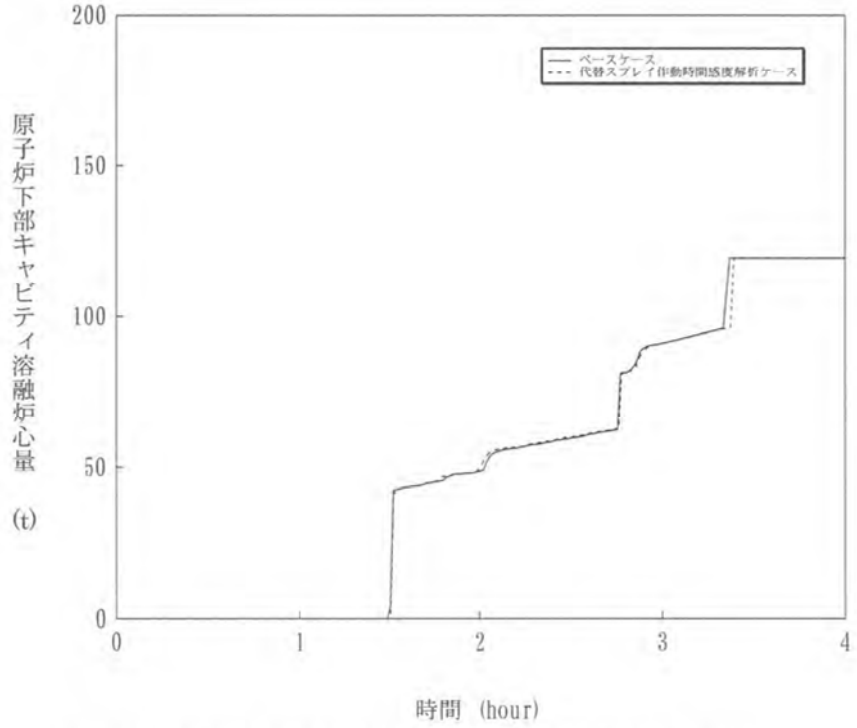


図 5-1-8 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（8）

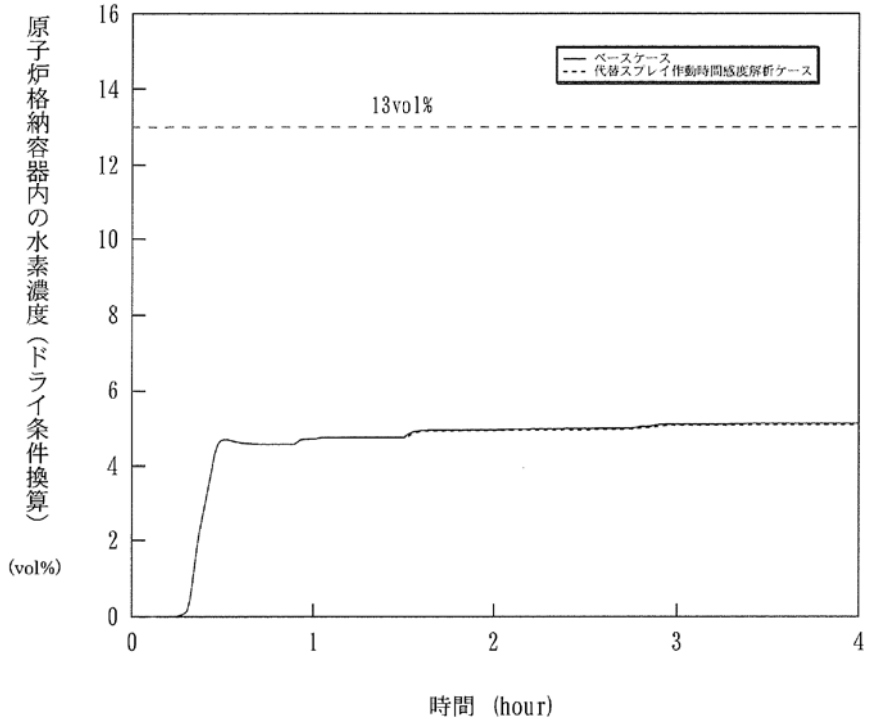


図 5-1-9 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（９）

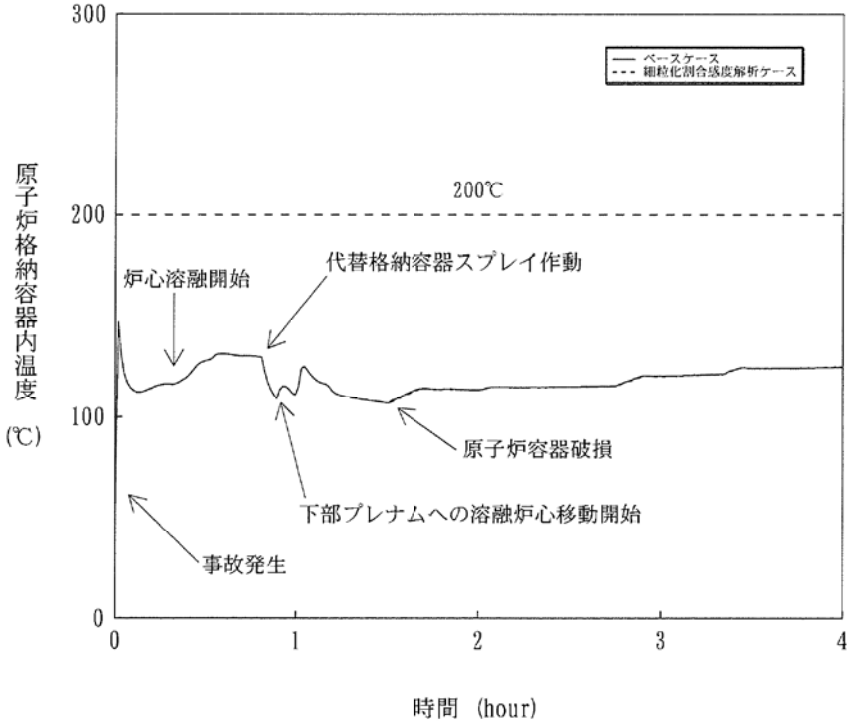


図 5-2-1 溶融炉心の細粒化割合感度解析（１）

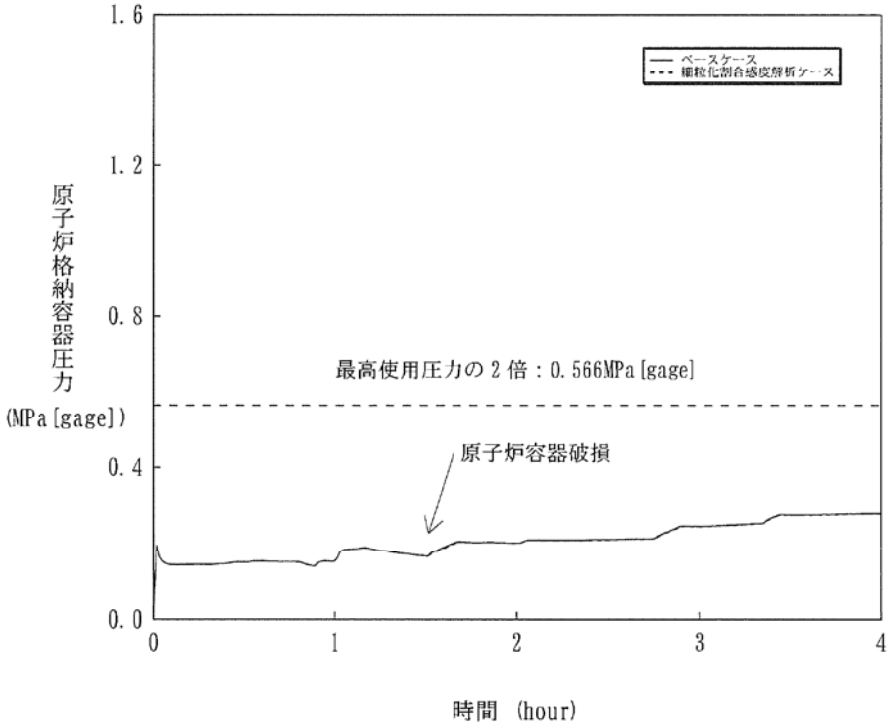


図 5-2-2 溶融炉心の細粒化割合感度解析（２）

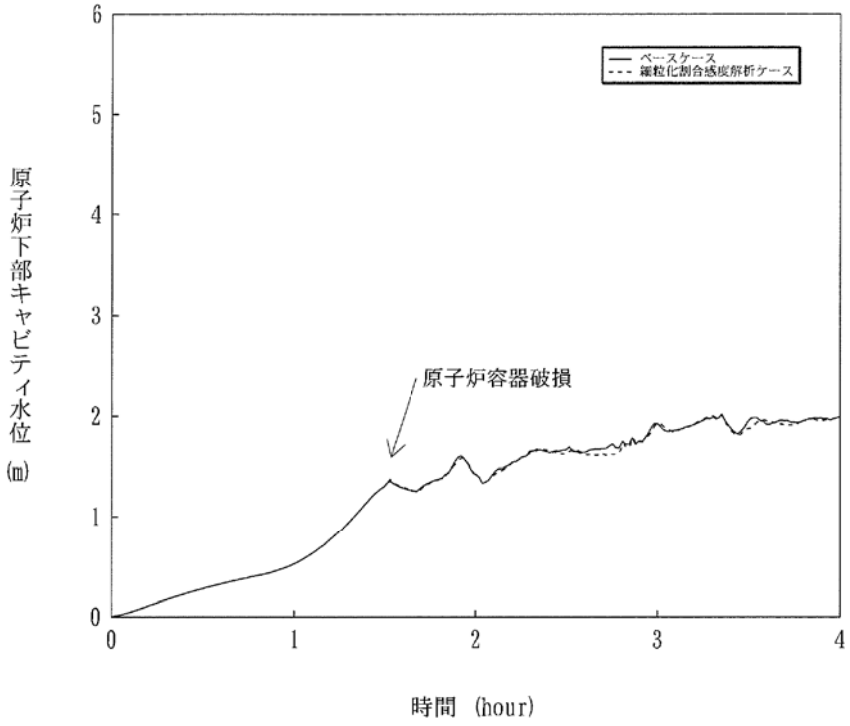


図 5-2-3 溶融炉心の細粒化割合感度解析（３）

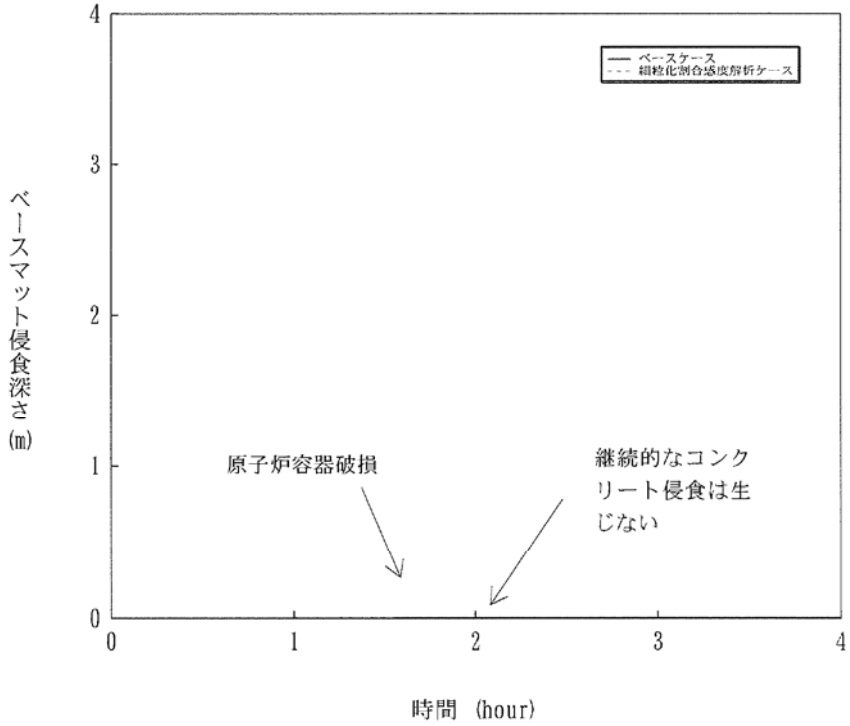


図 5-2-4 溶融炉心の細粒化割合感度解析（４）

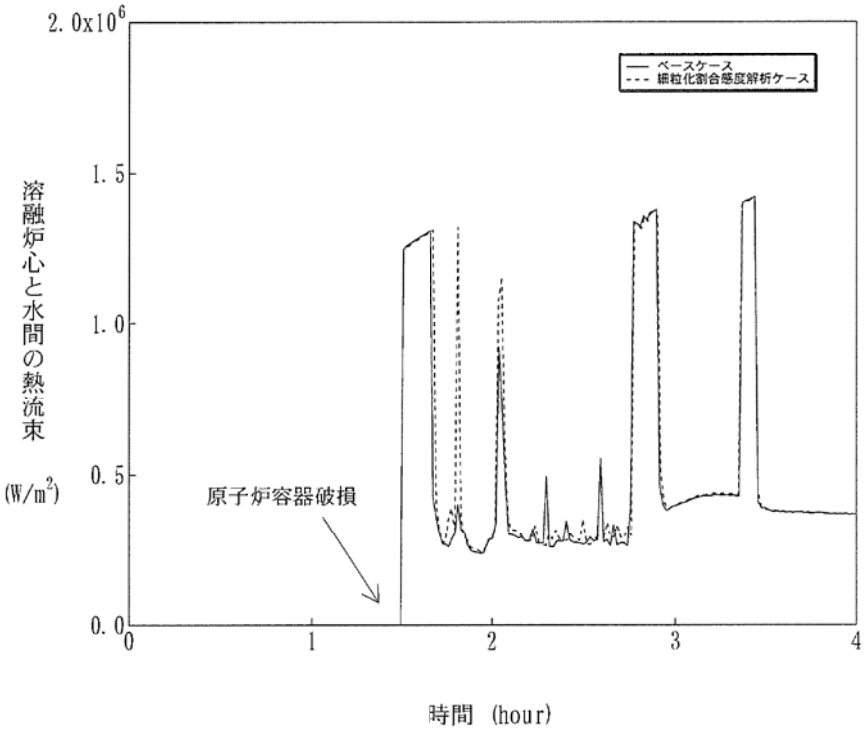


図 5-2-5 溶融炉心の細粒化割合感度解析（５）

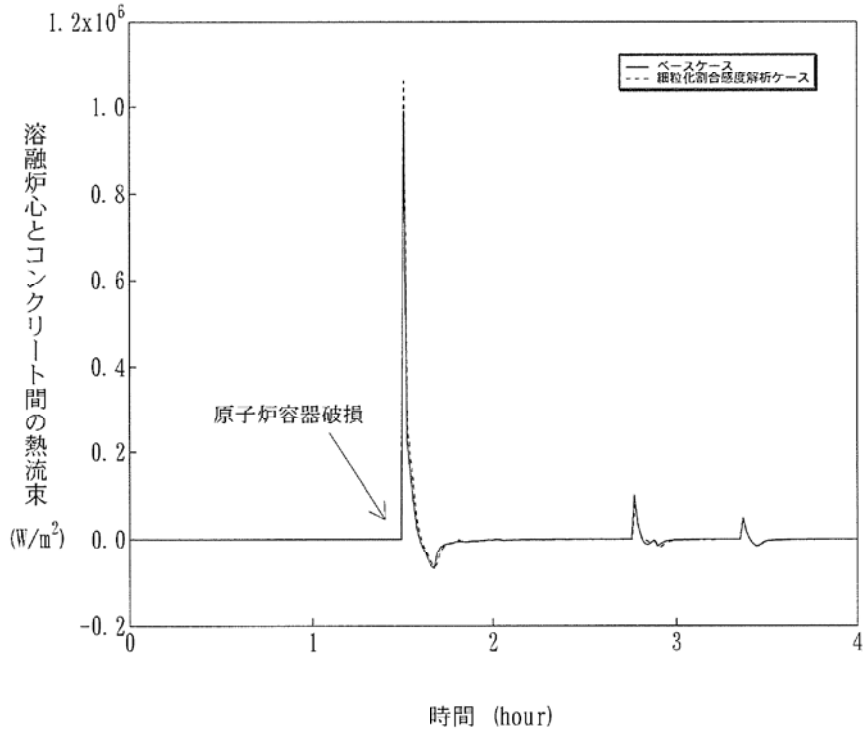


図 5-2-6 溶融炉心の細粒化割合感度解析（６）

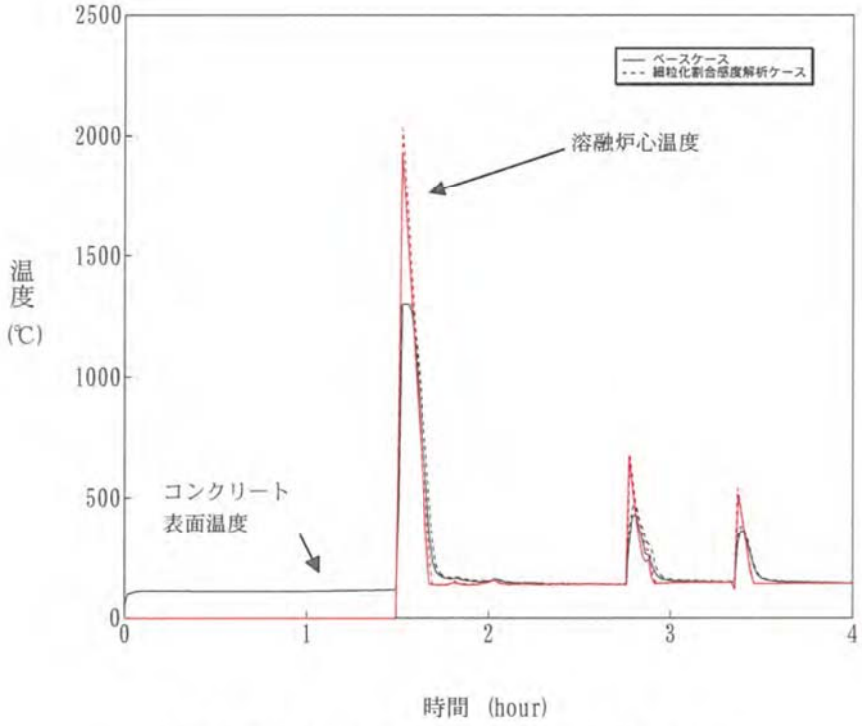


図 5-2-7 溶融炉心の細粒化割合感度解析（7）

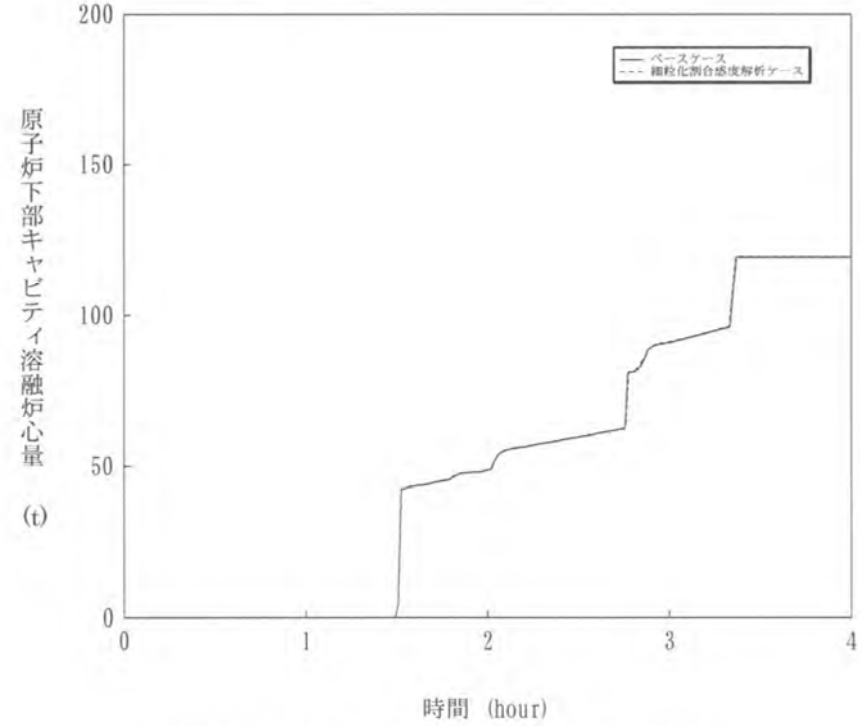


図 5-2-8 溶融炉心の細粒化割合感度解析（8）

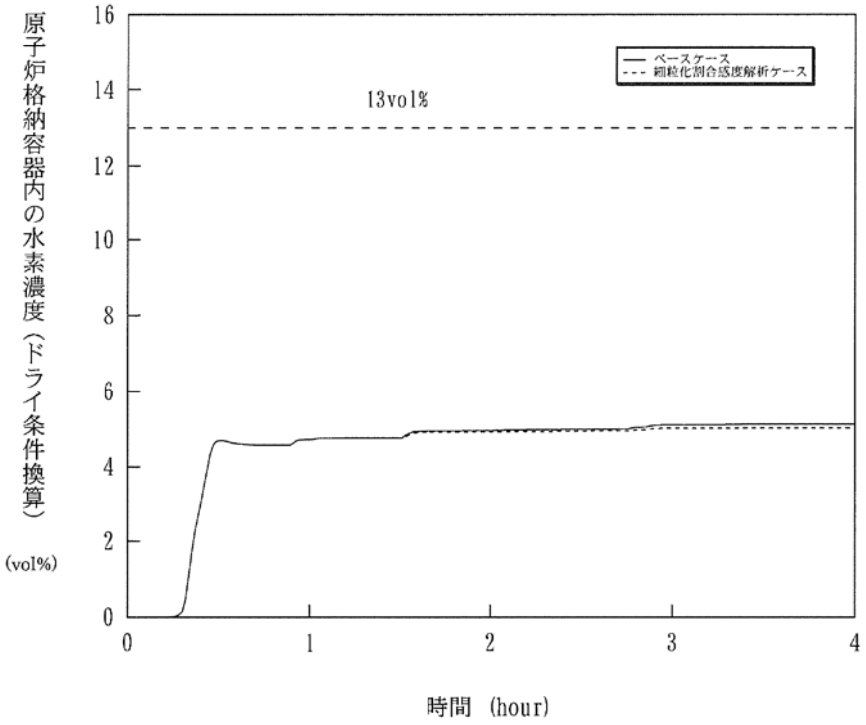


図 5-2-9 溶融炉心の細粒化割合感度解析（９）

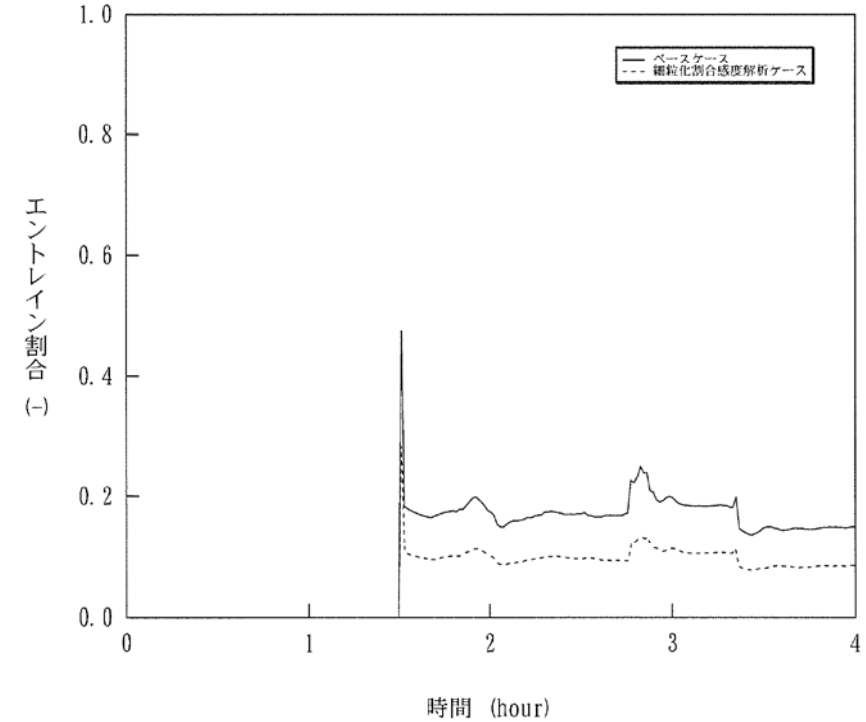


図 5-2-10 溶融炉心の細粒化割合感度解析（１０）

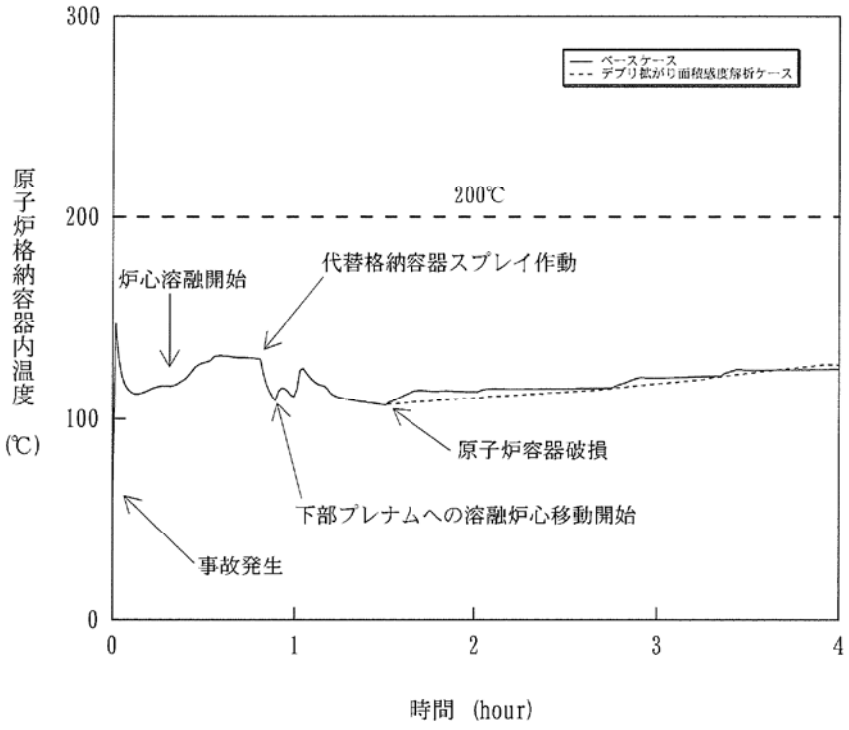


図 5-3-1 溶融炉心の拡がり面積感度解析（１）

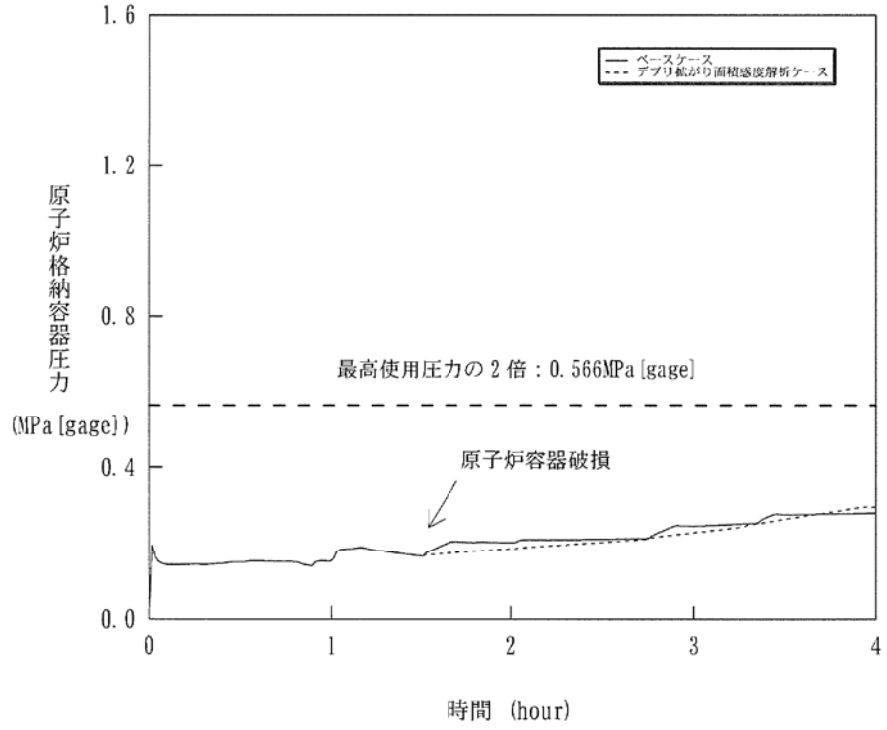


図 5-3-2 溶融炉心の拡がり面積感度解析（２）

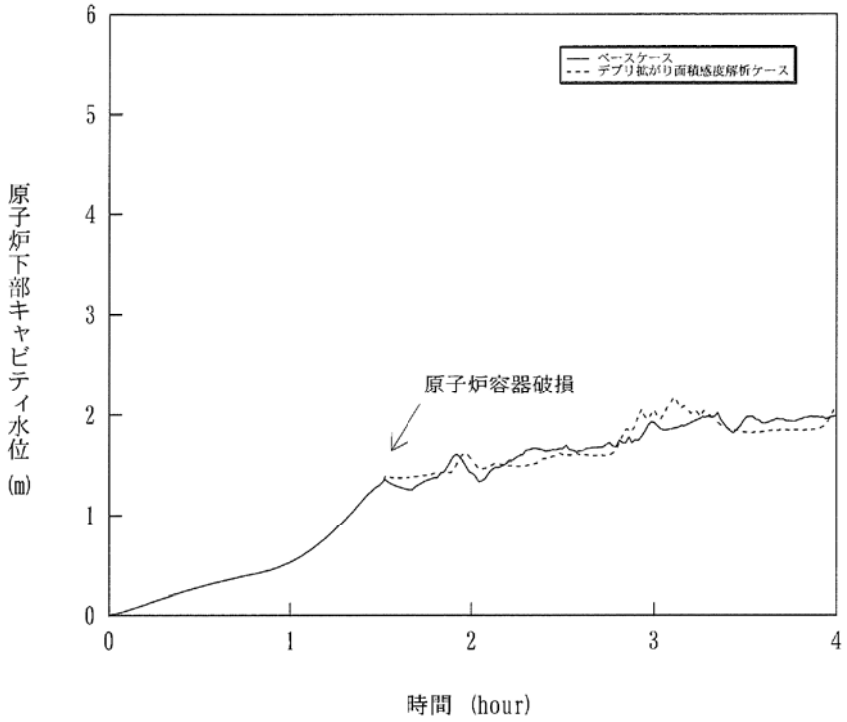


図 5-3-3 溶融炉心の拡がり面積感度解析（３）

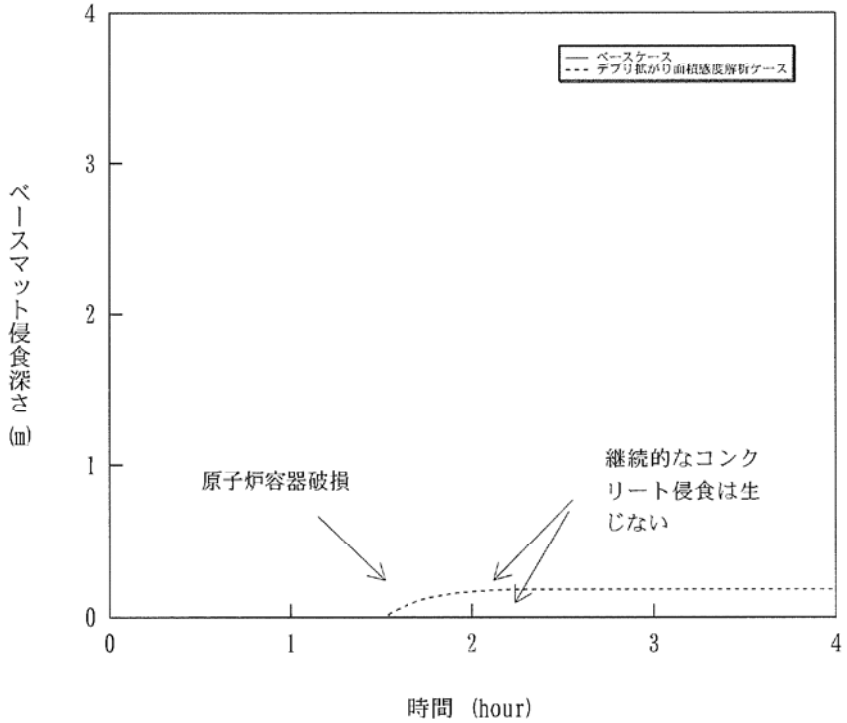


図 5-3-4 溶融炉心の拡がり面積感度解析（４）

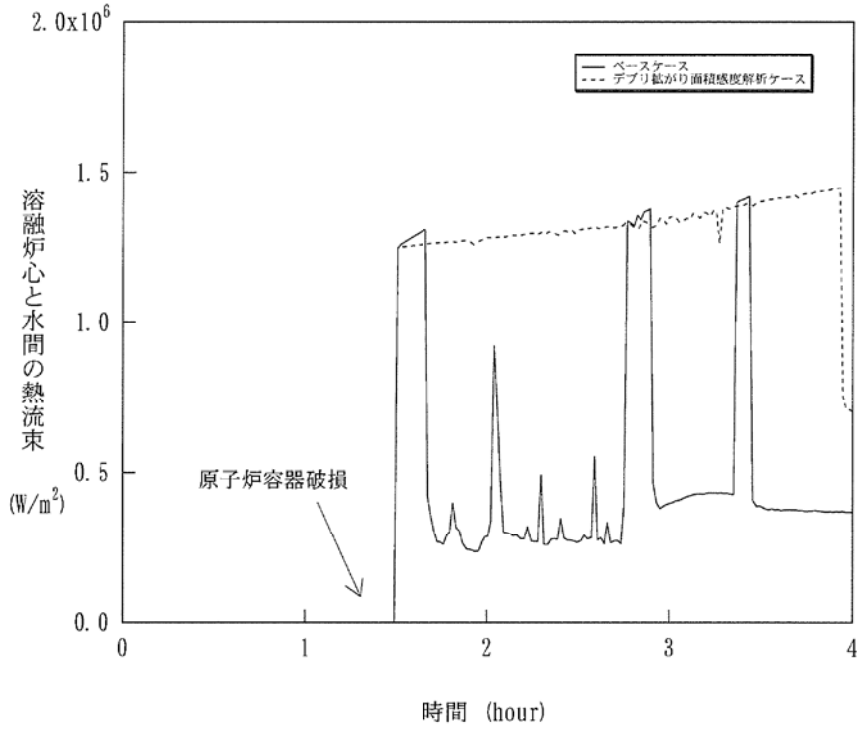


図 5-3-5 溶融炉心の拡がり面積感度解析（５）

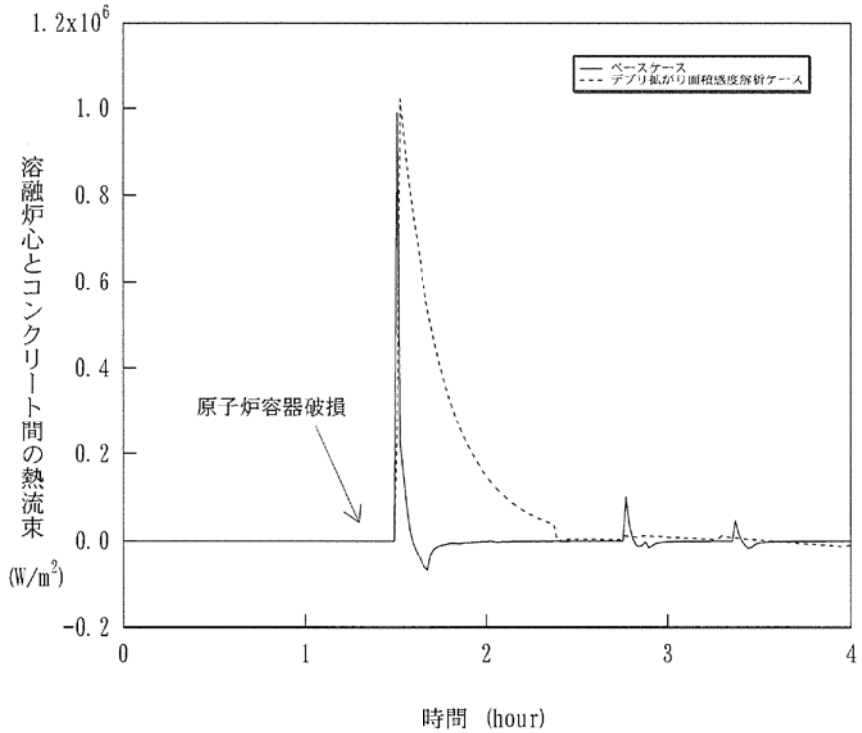


図 5-3-6 溶融炉心の拡がり面積感度解析（６）

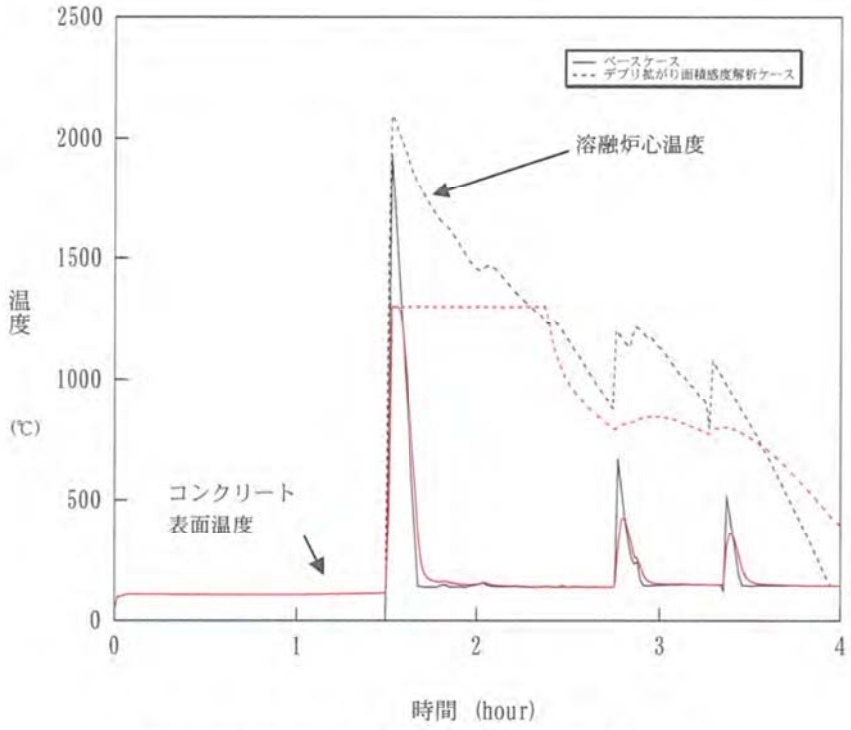


図 5-3-7 溶融炉心の拡がり面積感度解析（7）

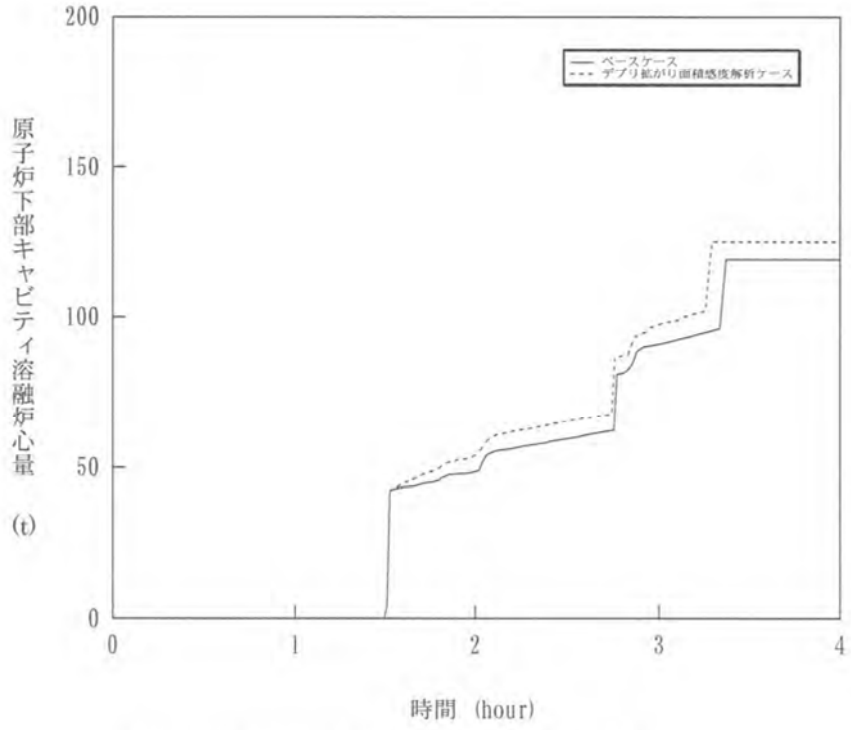


図 5-3-8 溶融炉心の拡がり面積感度解析（8）

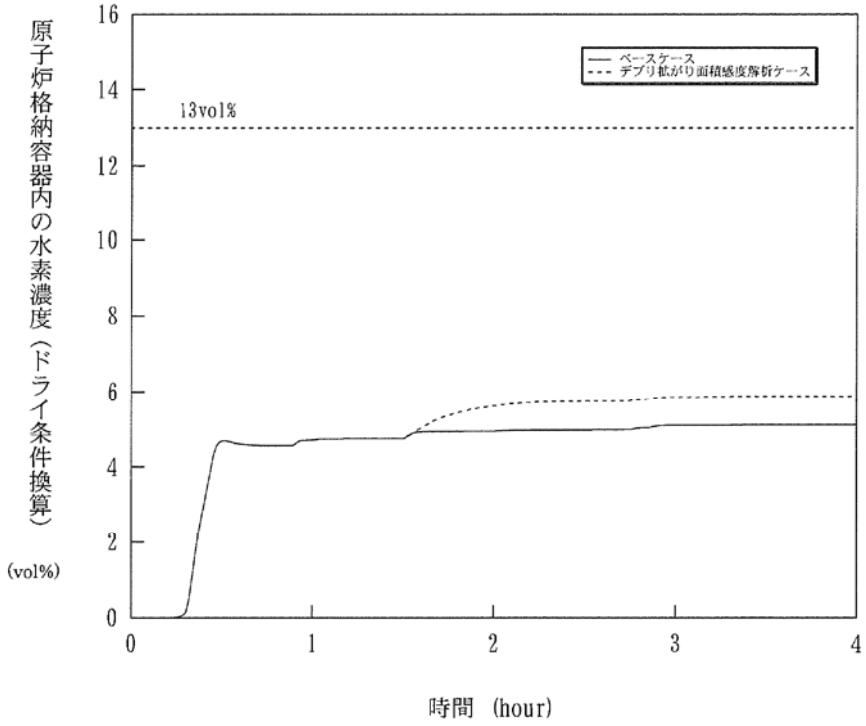


図 5-3-9 溶融炉心の拡がり面積感度解析（９）

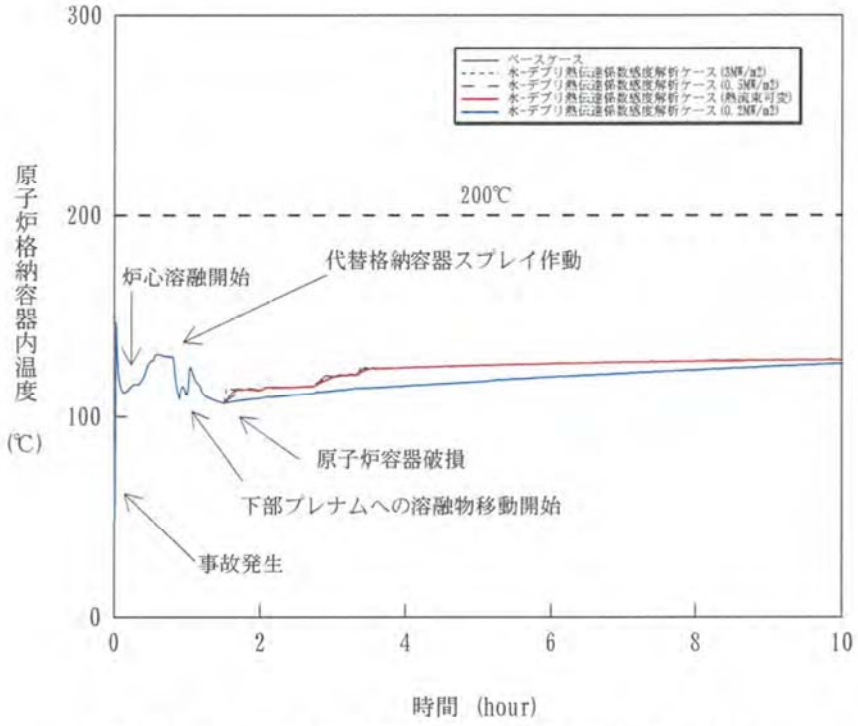


図 5-4-1 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（１）

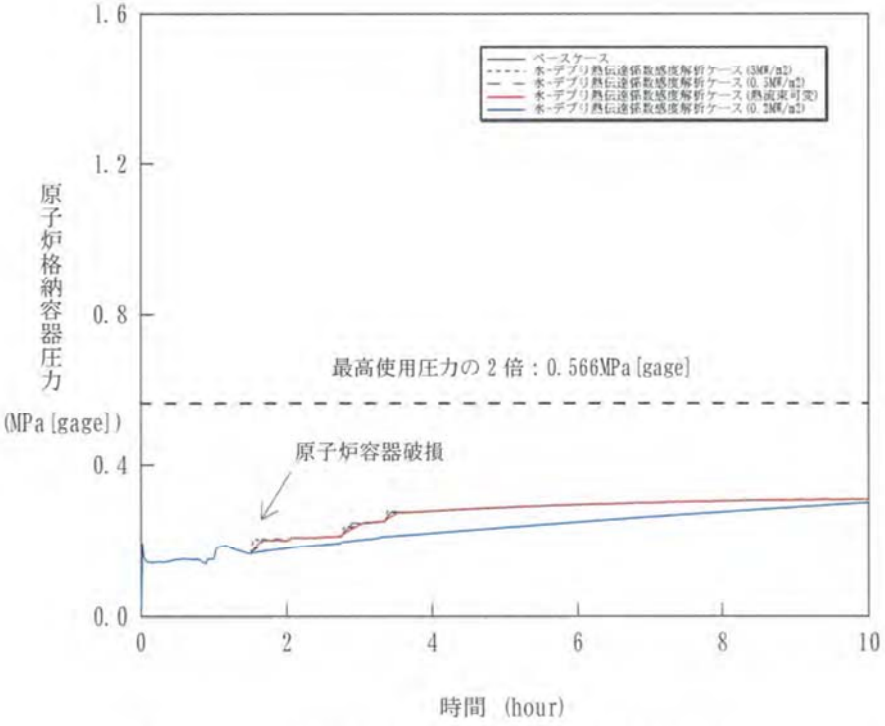


図 5-4-2 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（２）

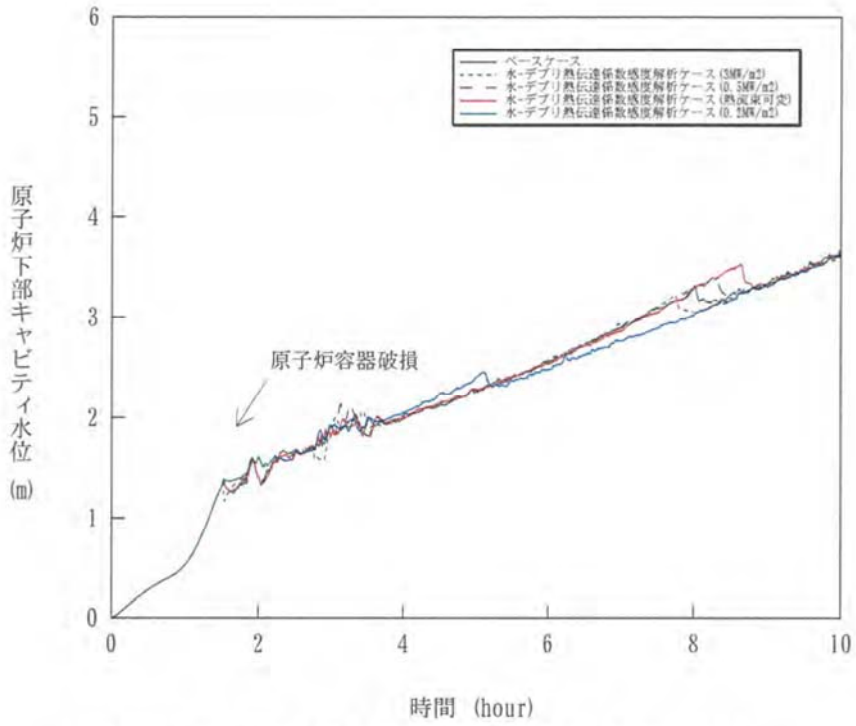


図 5-4-3 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（３）

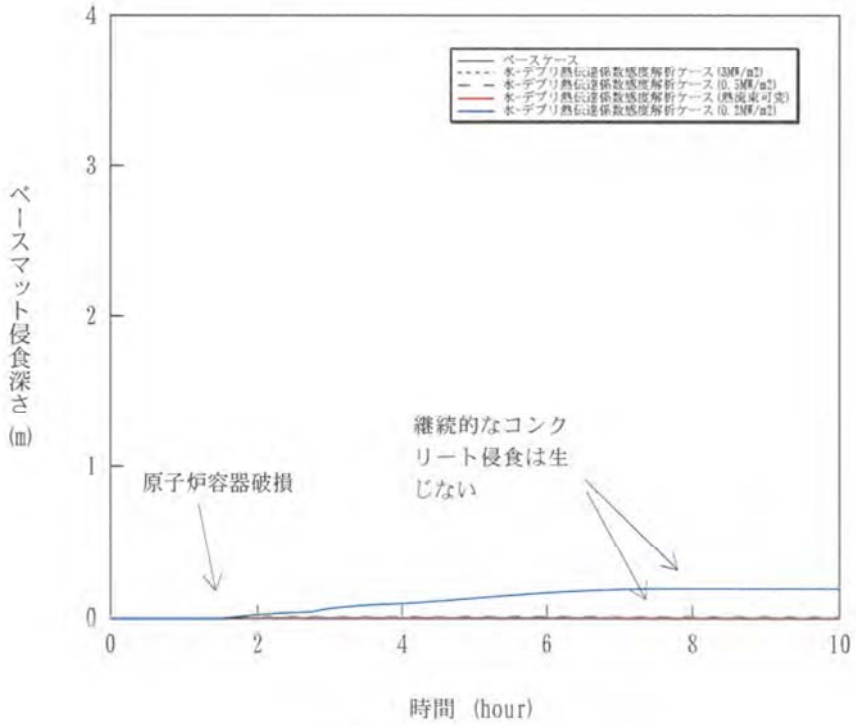


図 5-4-4 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（４）

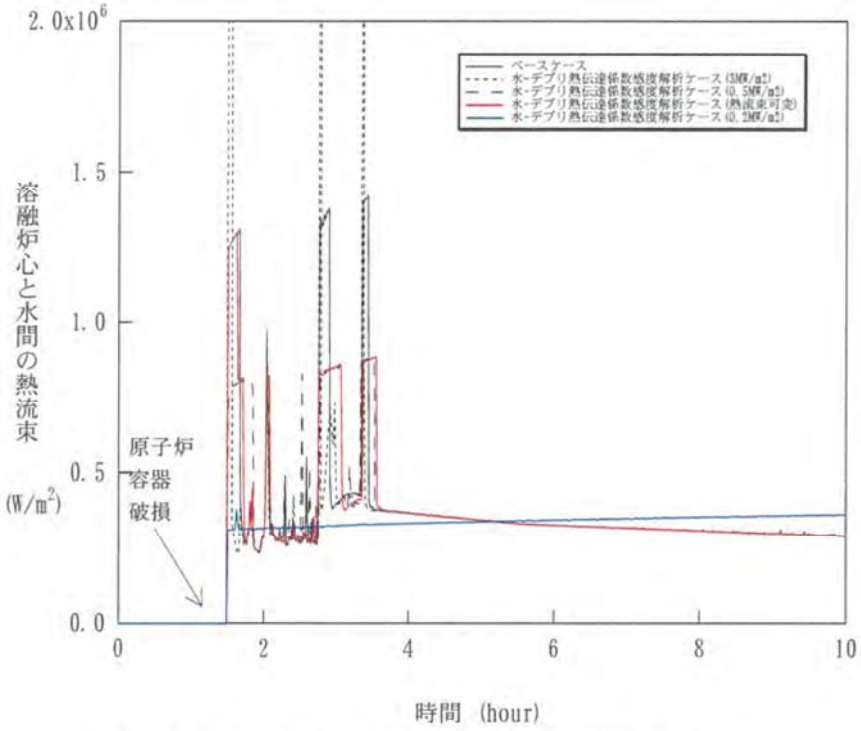


図 5-4-5 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（５）

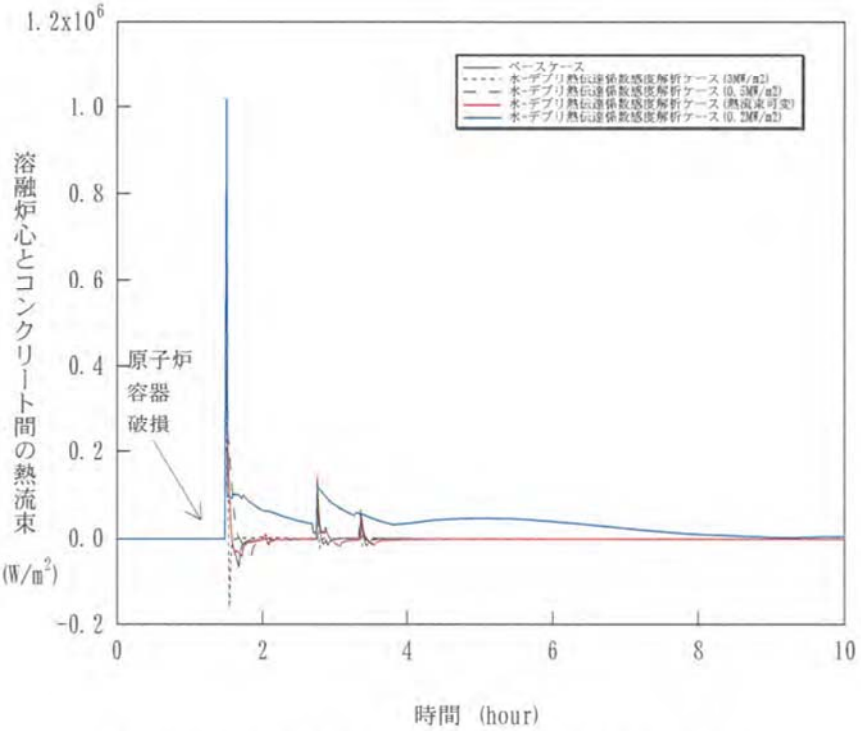


図 5-4-6 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（６）

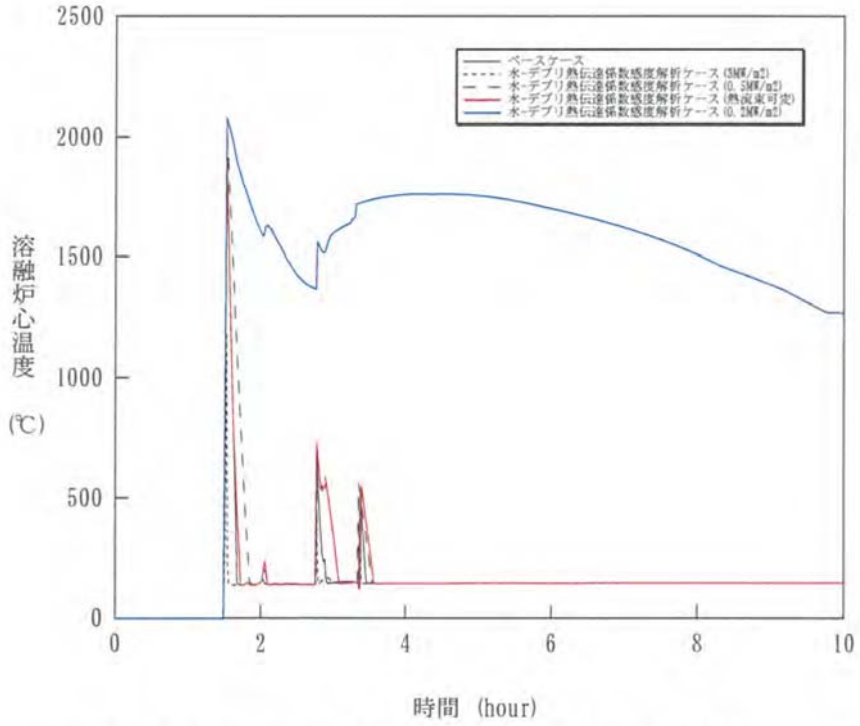


図 5-4-7 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（７）

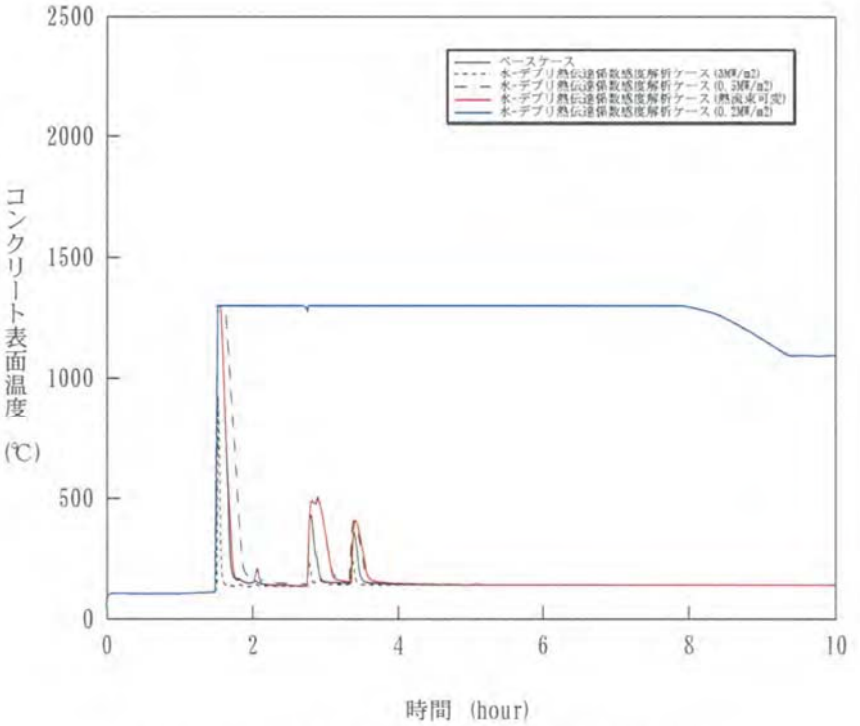


図 5-4-8 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（８）

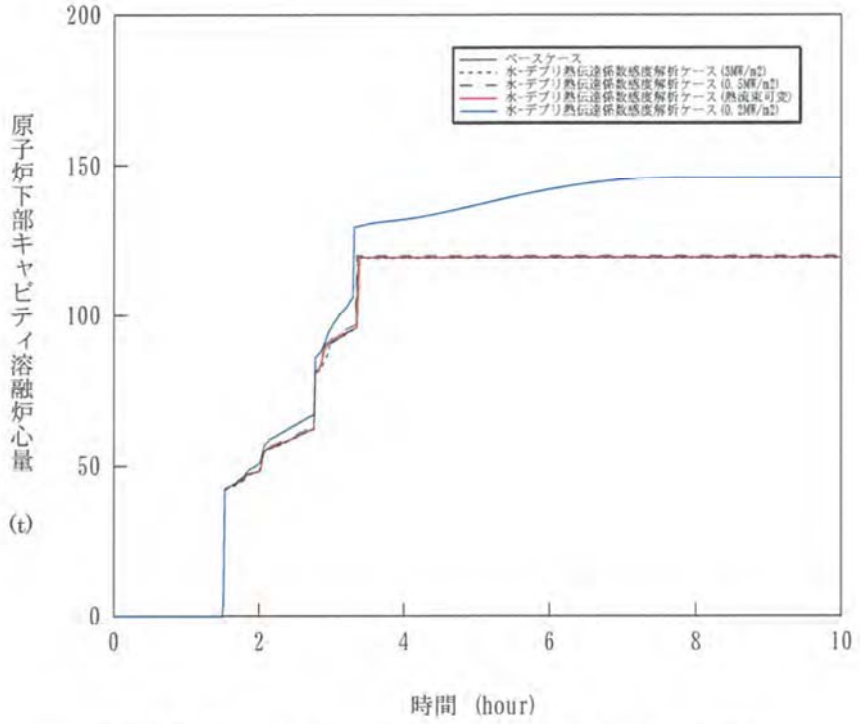


図 5-4-9 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（９）

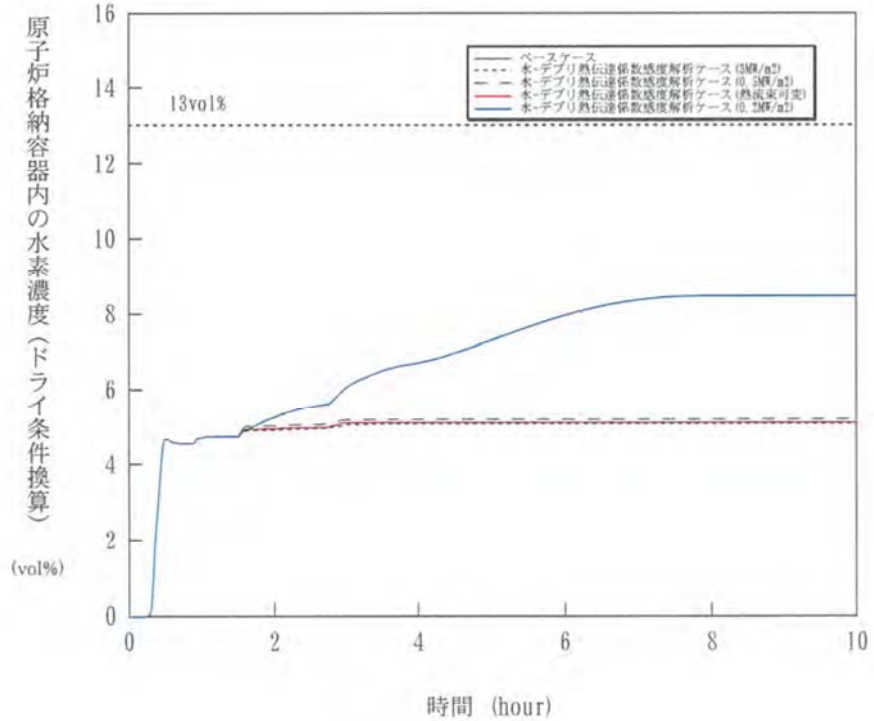


図 5-4-10 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（１０）

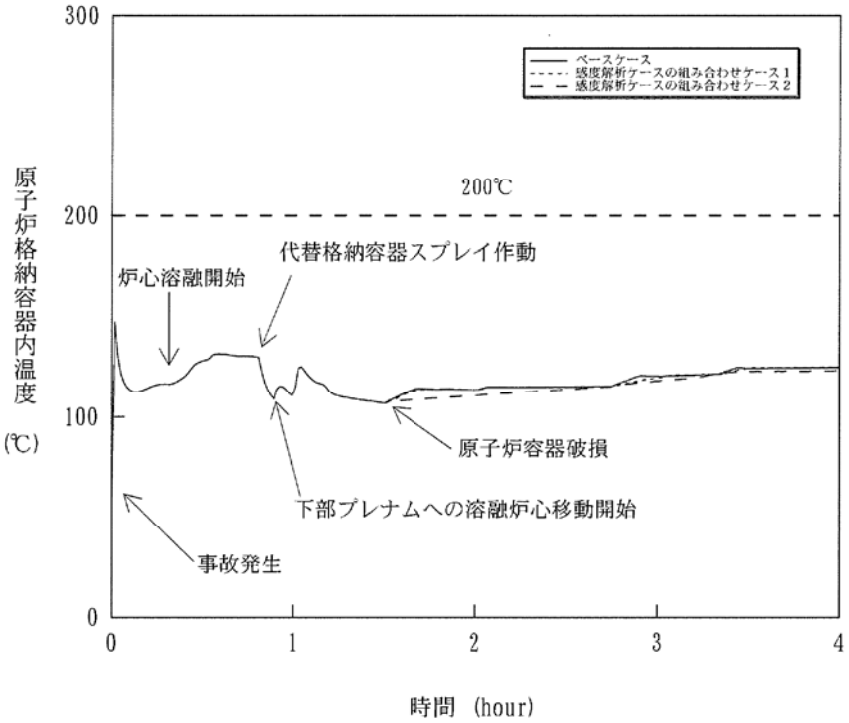


図 5-5-1 感度解析ケースの組合せ（１）

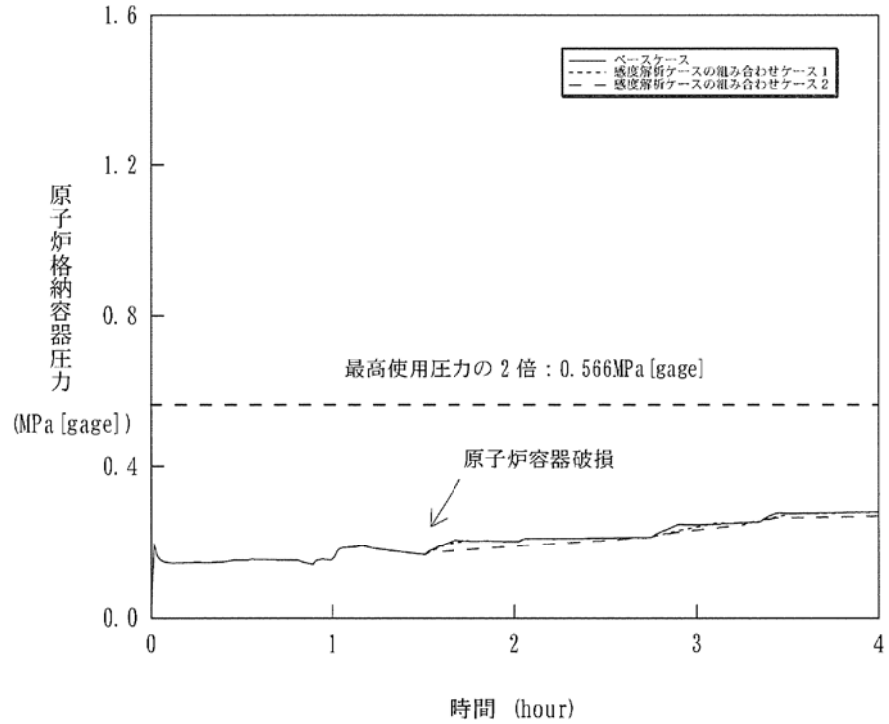


図 5-5-2 感度解析ケースの組合せ（２）

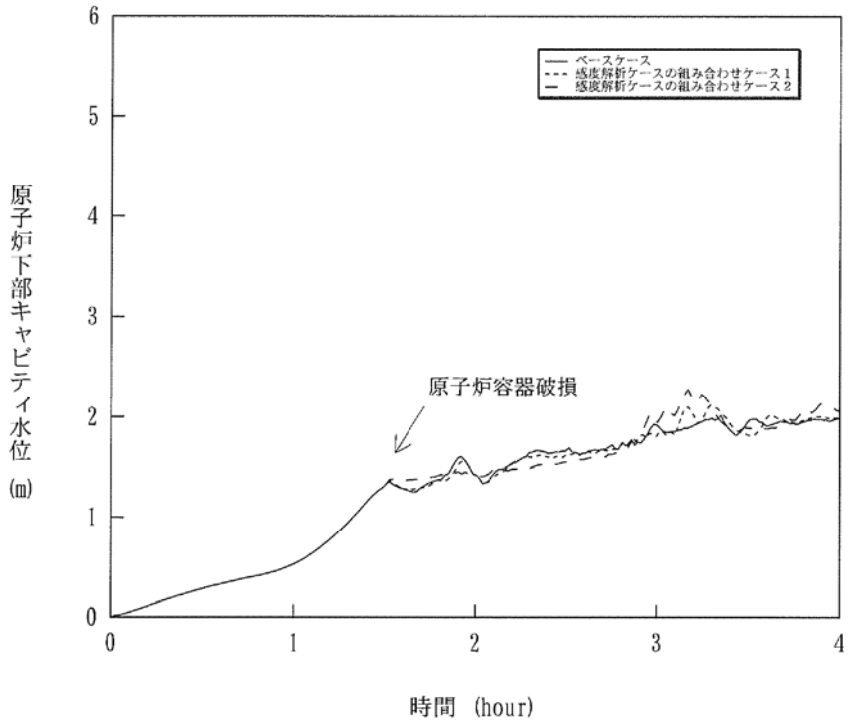


図 5-5-3 感度解析ケースの組合せ（３）

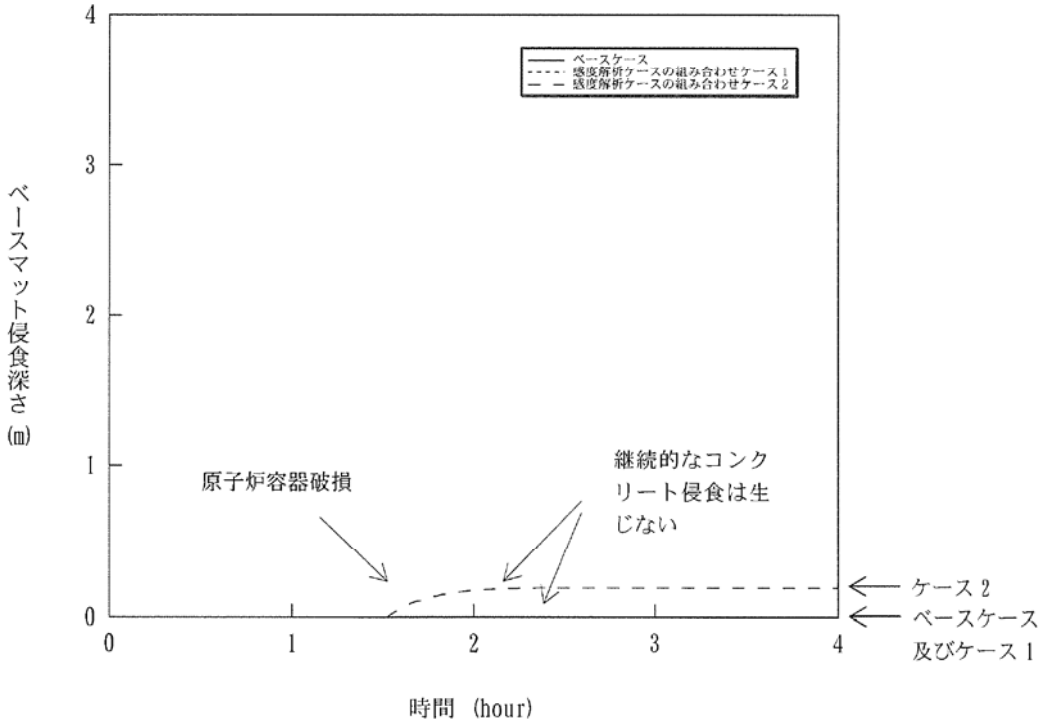


図 5-5-4 感度解析ケースの組合せ（４）

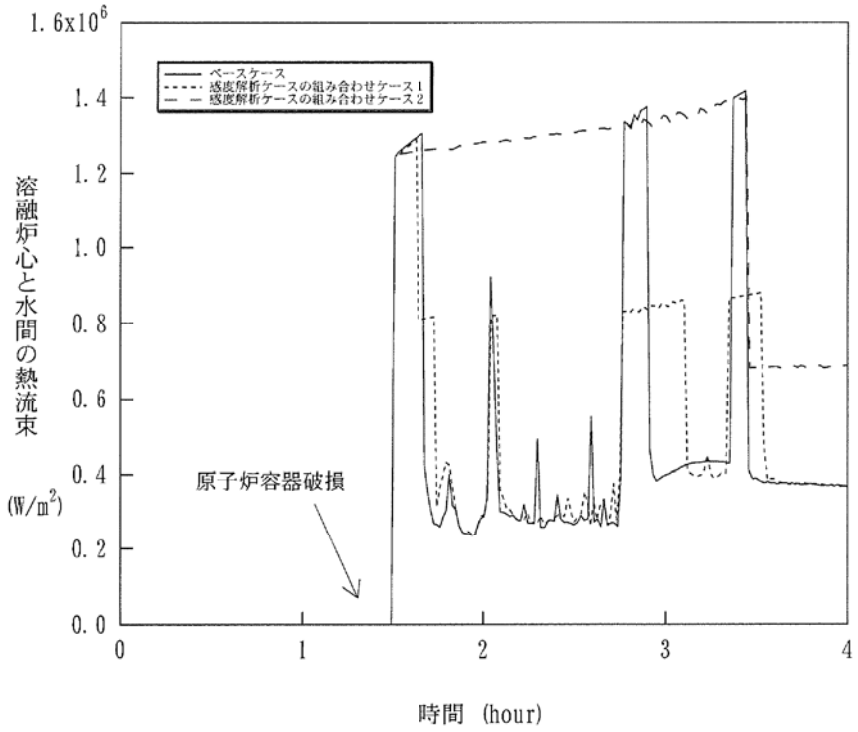


図 5-5-5 感度解析ケースの組合せ（5）

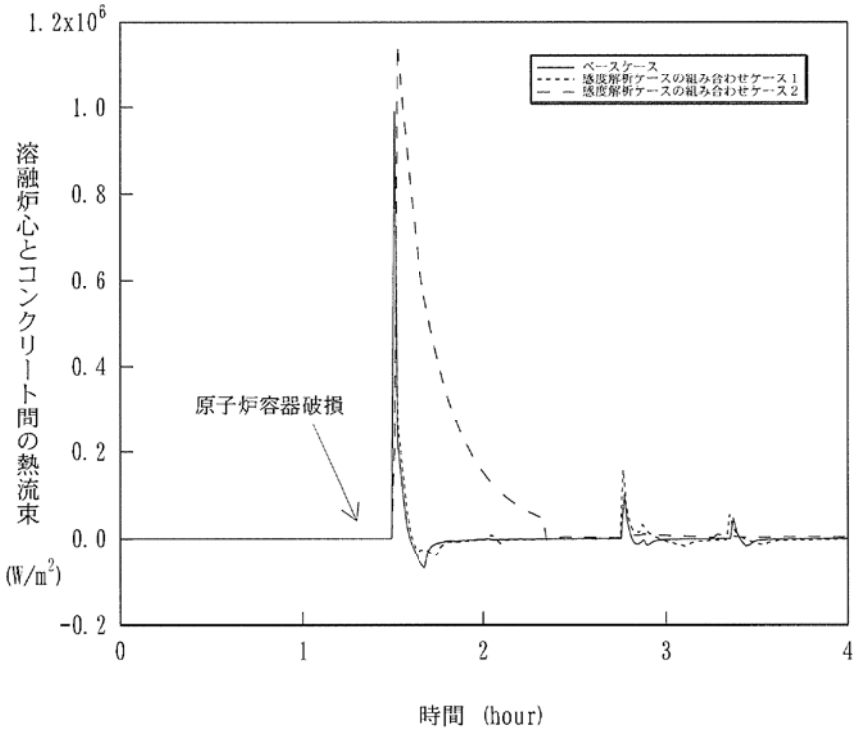


図 5-5-6 感度解析ケースの組合せ（6）

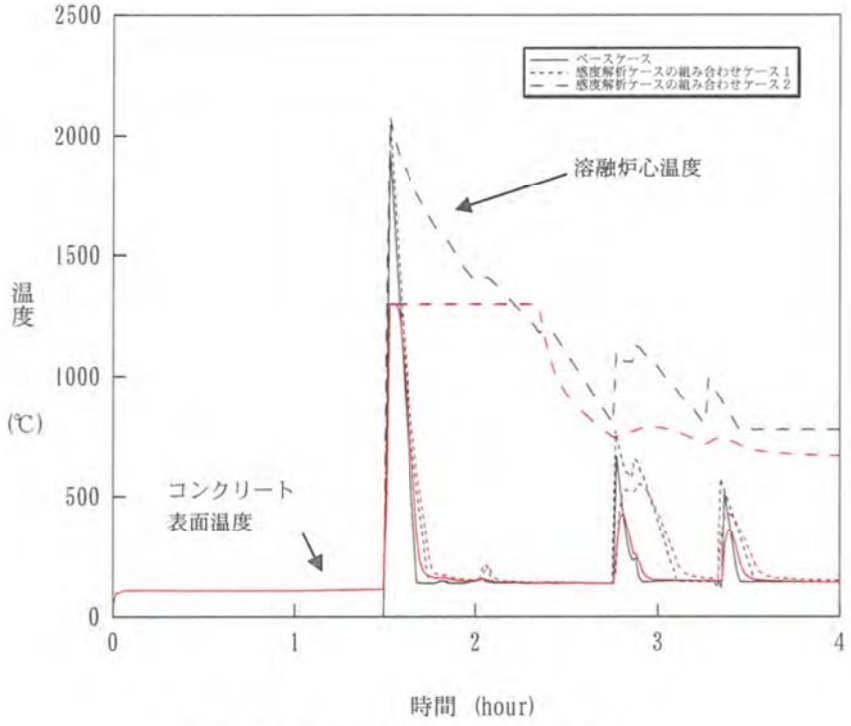


図 5-5-7 感度解析ケースの組合せ（7）

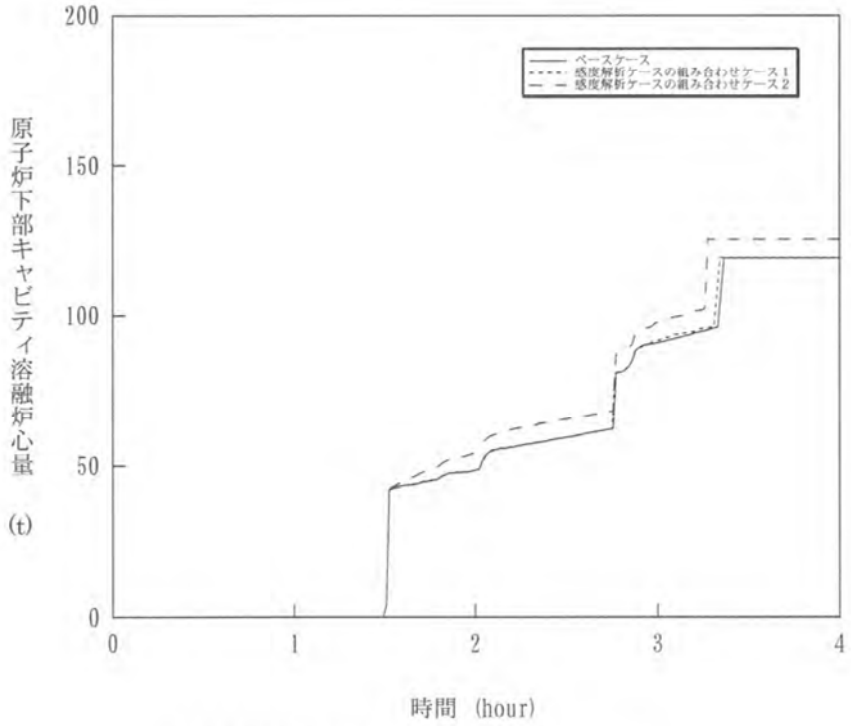


図 5-5-8 感度解析ケースの組合せ（8）

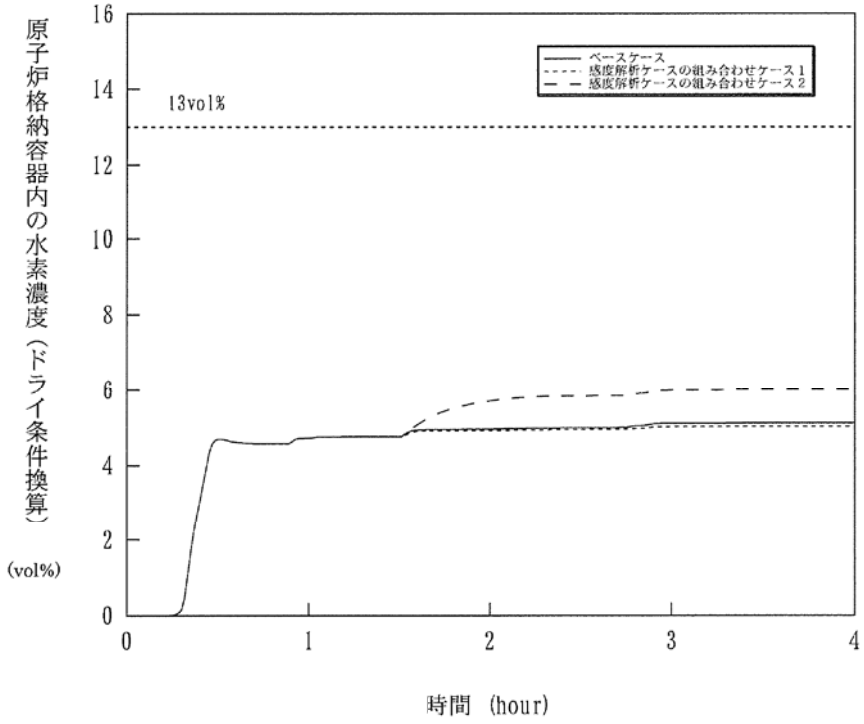


図 5-5-9 感度解析ケースの組合せ（９）