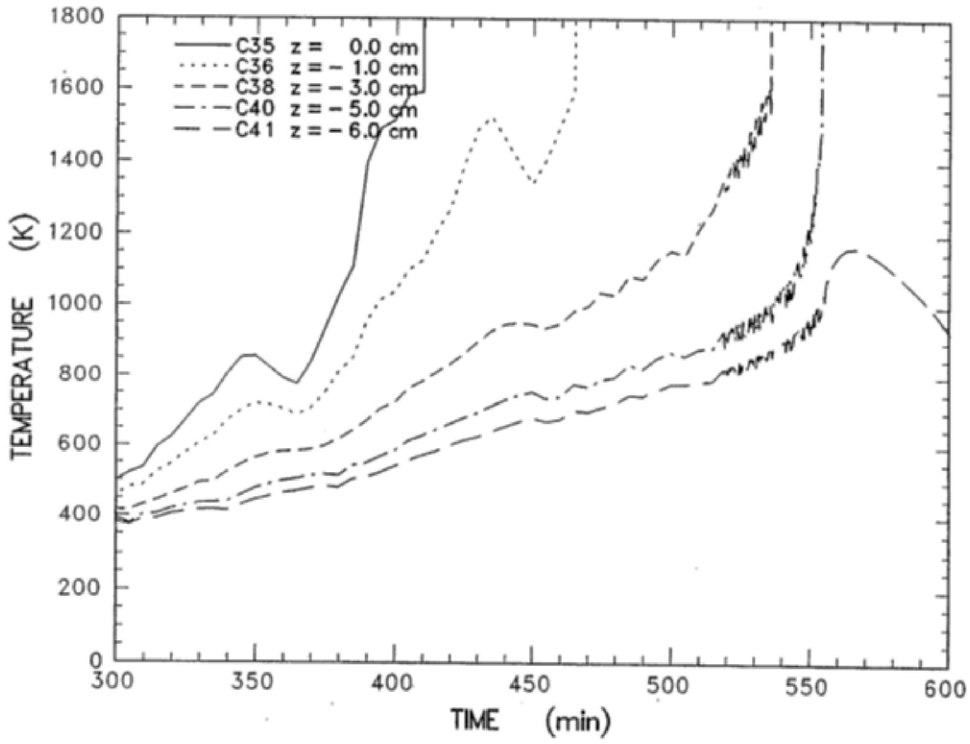


図 3.1-14　WETCOR 実験 コンクリート温度変化（外周部 r=15cm）

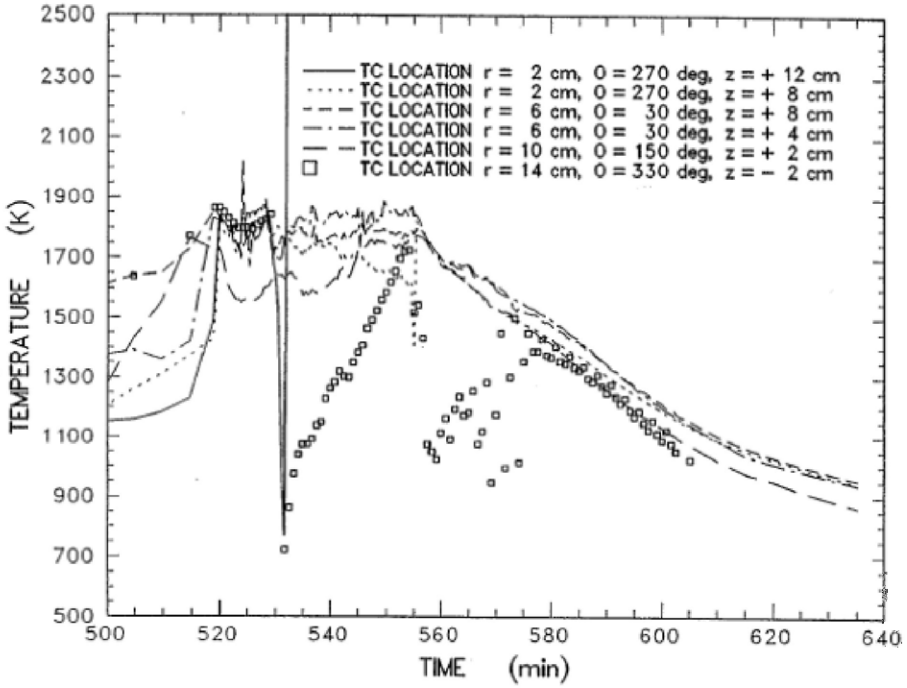


図 3.1-15　WETCOR 実験 メルト温度履歴

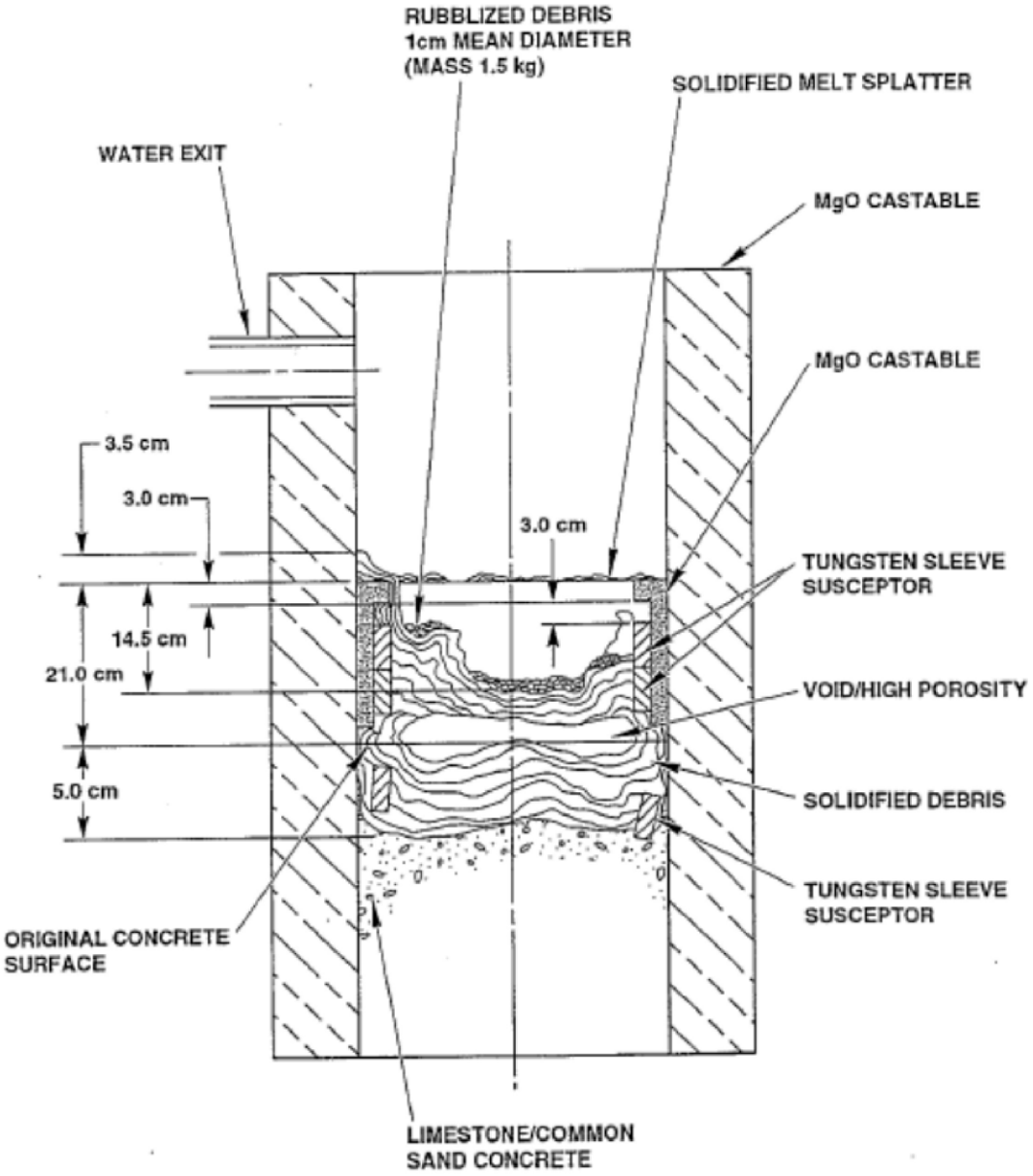


図 3.1-16　WETCOR 実験 試験後テスト部状態

表 3.1-3　MACE 実験条件一覧

		M0	M1b	M3	M4
溶融炉心模擬物重量 (kg)		130	480	1800	480
コンクリート床浸食開始時溶融炉心模擬物組成(%)	UO_2	56	65	57	57
	ZrO_2	11	13	29	29
	Zr	4	3	-	-
	その他（コンクリート成分等）	29	19	14	14
溶融炉心模擬物深さ (m)		0.15	0.25	0.2	0.3
溶融炉心模擬物初期温度 (K)		2000	2350	2250	2280
溶融炉心模擬物初期発熱量 (kW)		100	130	300	130
コンクリートの種類		石灰岩系	石灰岩系	石灰岩系	ケイ酸系
コンクリート床面積 (m^2)		0.3×0.3	0.5×0.5	1.2×1.2	0.5×0.5
コンクリート床の深さ (m)		0.35	0.55	0.55	0.55
水位 (m)		0.5	0.5	0.5	0.5

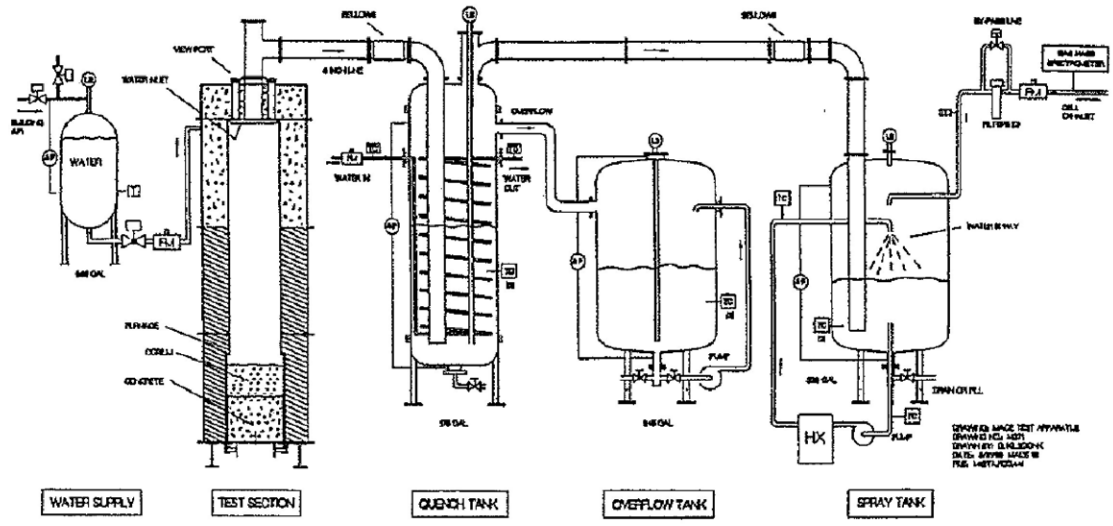


図 3.1-17 MACE 実験装置

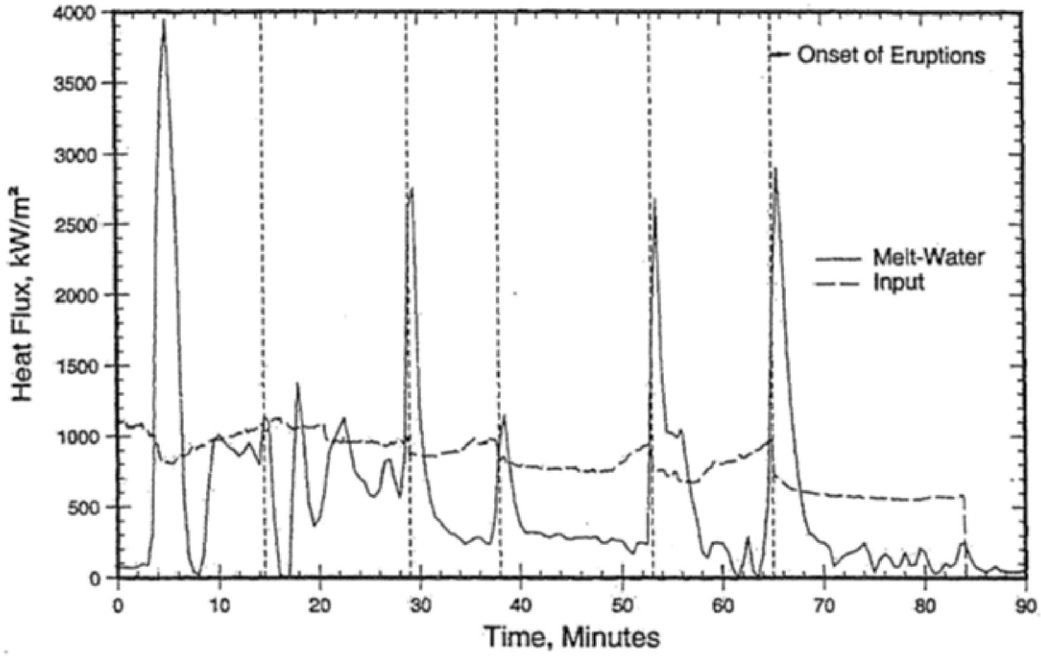


図 3.1-18　MACE-M0 実験での水への熱流束

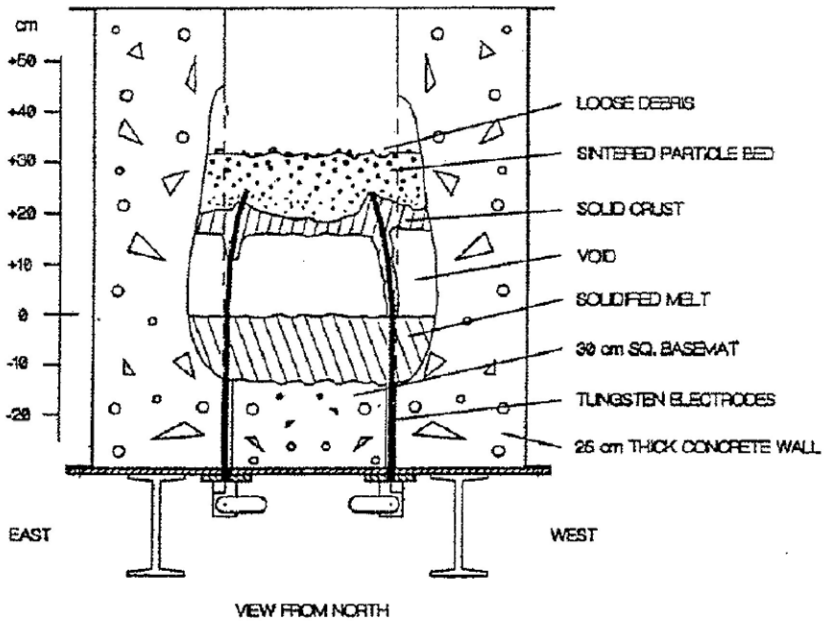


図 3.1- 19 MACE-M0 実験後の溶融炉心模擬物の状況

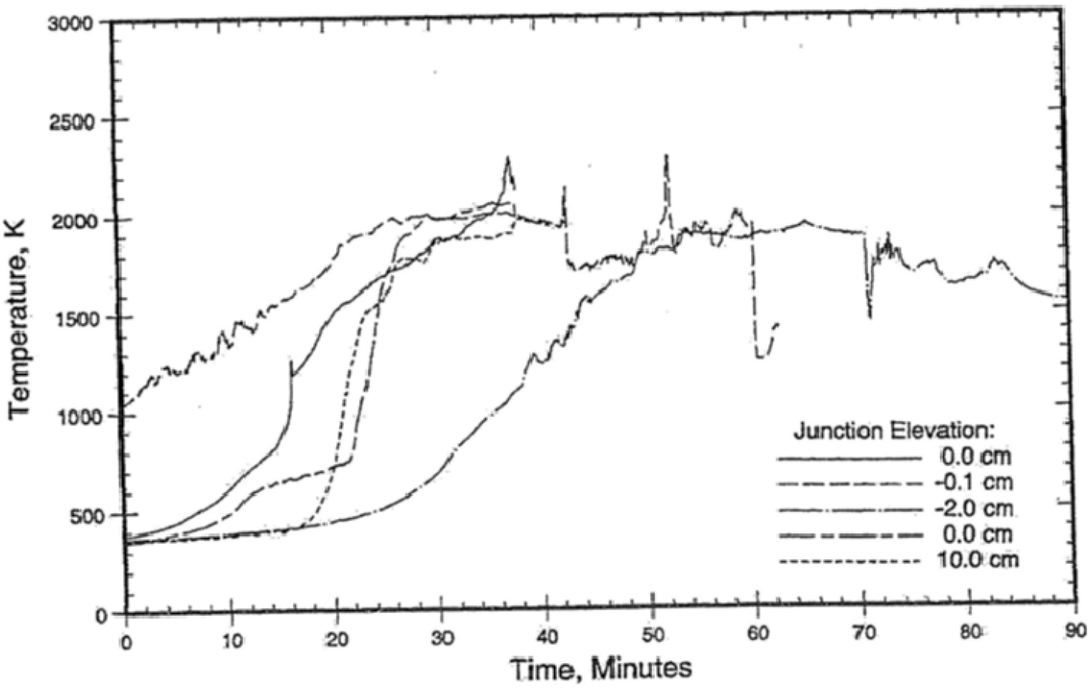


図 3.1-20　MACE-M0 実験での溶融物温度変化

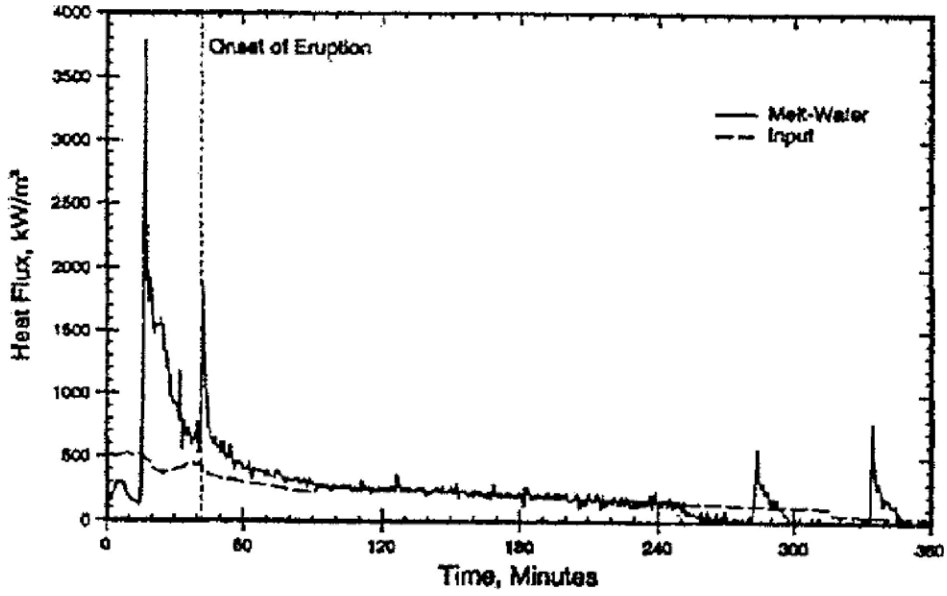


図 3.1-21 MACE-M1b 実験における溶融炉心模擬物から水プールへの熱流束

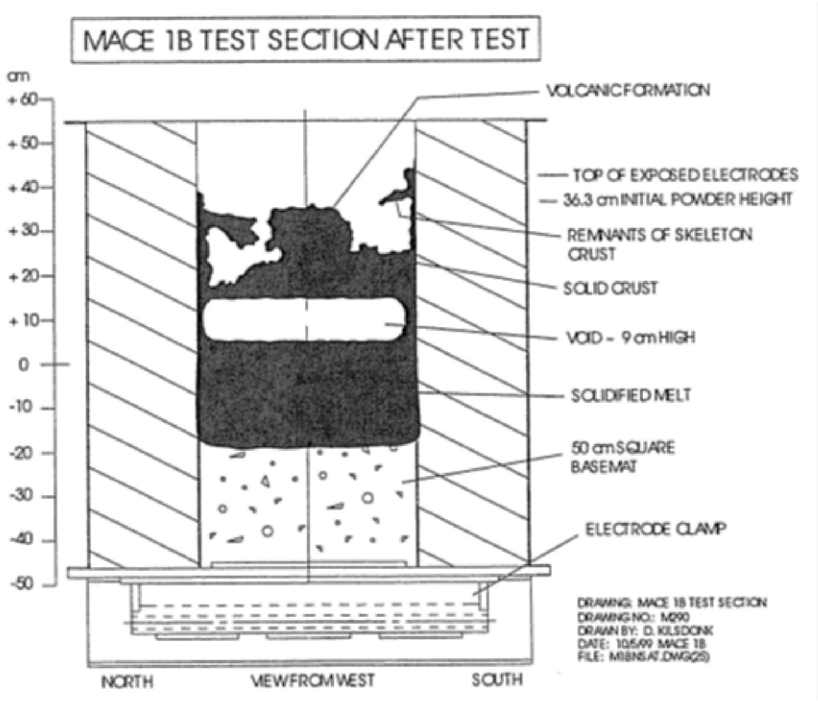


図 3.1-22　MACE-M1b 実験での実験後の溶融炉心の状態

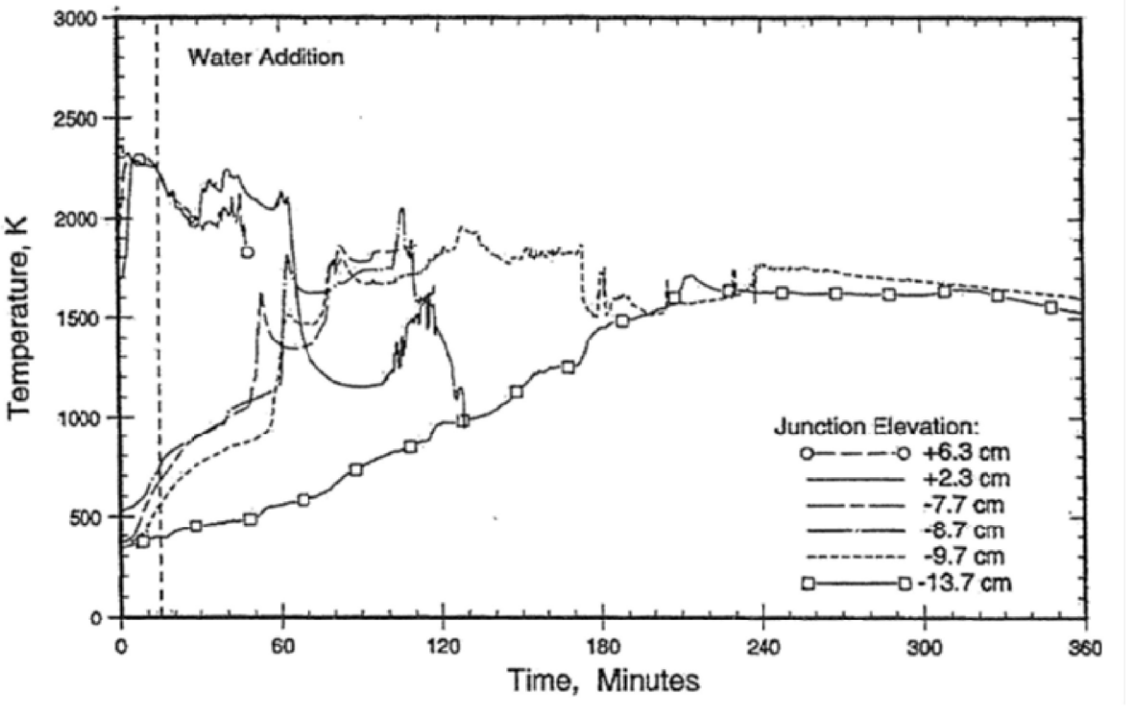


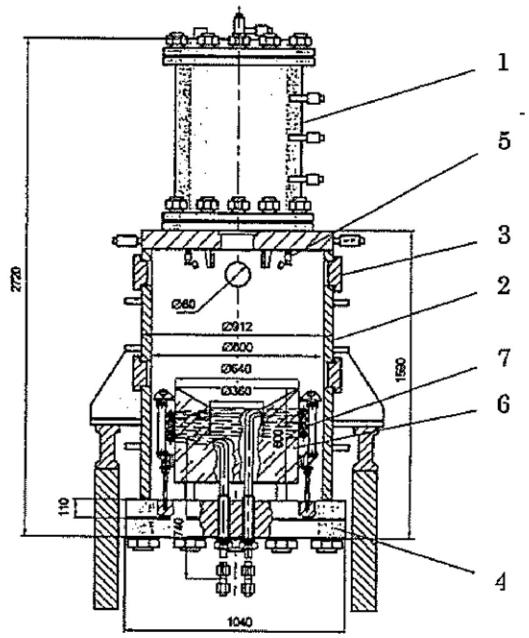
図 3.1-23　MACE-M1b 実験での溶融物温度変化

表 3.1-4 COTELS（B 及び C）実験条件一覧

ケース（B 及び C）		5a	5	4	2	3	10	6	7	8	9
溶融物タイプ			B		A	B					
溶融物重量（kg）		47	56	53	45	46	58	56	52	42	51
溶融物出力（kW）		0	150	170	155	150	150	150	150	110-140	150
コンクリートトラップ径(m)		0.26		0.36							
注水条件	方式	－	Jet	Jet	Jet	Jet	Jet	Jet	Jet	Jet	Spray
	質量流量（kg/s）	－	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04
	開始時刻（min）	－	8	8	8	8	15	9	10	10	6.5
実験後の溶融物状態											
デブリ粒子重量（kg） （粒子化割合）		9 (19%)	21.5 (38%)	19 (34%)	35 (78%)	33 (72%)	48 (83%)	－	－	－	－
粒子径 16mm 以上（kg）		0	0	6	0	0	18	－	－	－	－
粒子径 16mm 以下（kg）		6	21.5	13	32	33	30	－	－	－	－
平均粒子径（mm）		0.6	0.8	2.2	1.5	1.0	0.4	－	－	－	－
溶融炉心重量（kg）		38	34.5	37	10	13	10	53	52	42	51
実験後のコンクリート状態											
侵食量（底面）（mm）		28	25	22	15	20	40	15	15	15	10
侵食量（側面）（mm）		13	10	25	15	15	48	8	10	8	～0
砂礫深さ（mm）		12	15	21	18	15	15	10	12	12	5
変色深さ（mm）		40	55	65	40	34	35	32	35	30	20

溶融物タイプ：　A：UO_2-78wt%, SUS-5wt%, ZrO_2-17wt%, Zr-0wt%

B：UO_2-55wt%, SUS-15wt%, ZrO_2-5wt%, Zr-25wt%



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

図 3.1-24 COTELS（B 及び C）実験装置

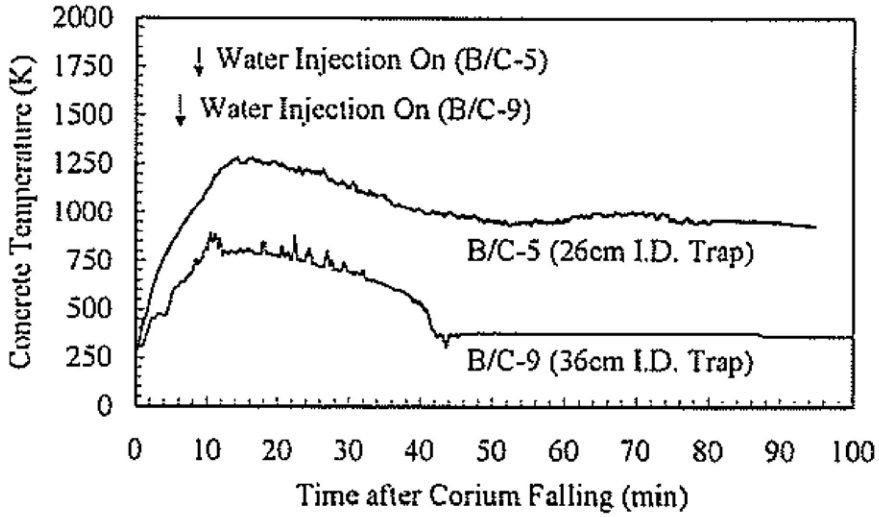


図 3.1-25　COTELS（B 及び C）実験におけるコンクリート温度挙動

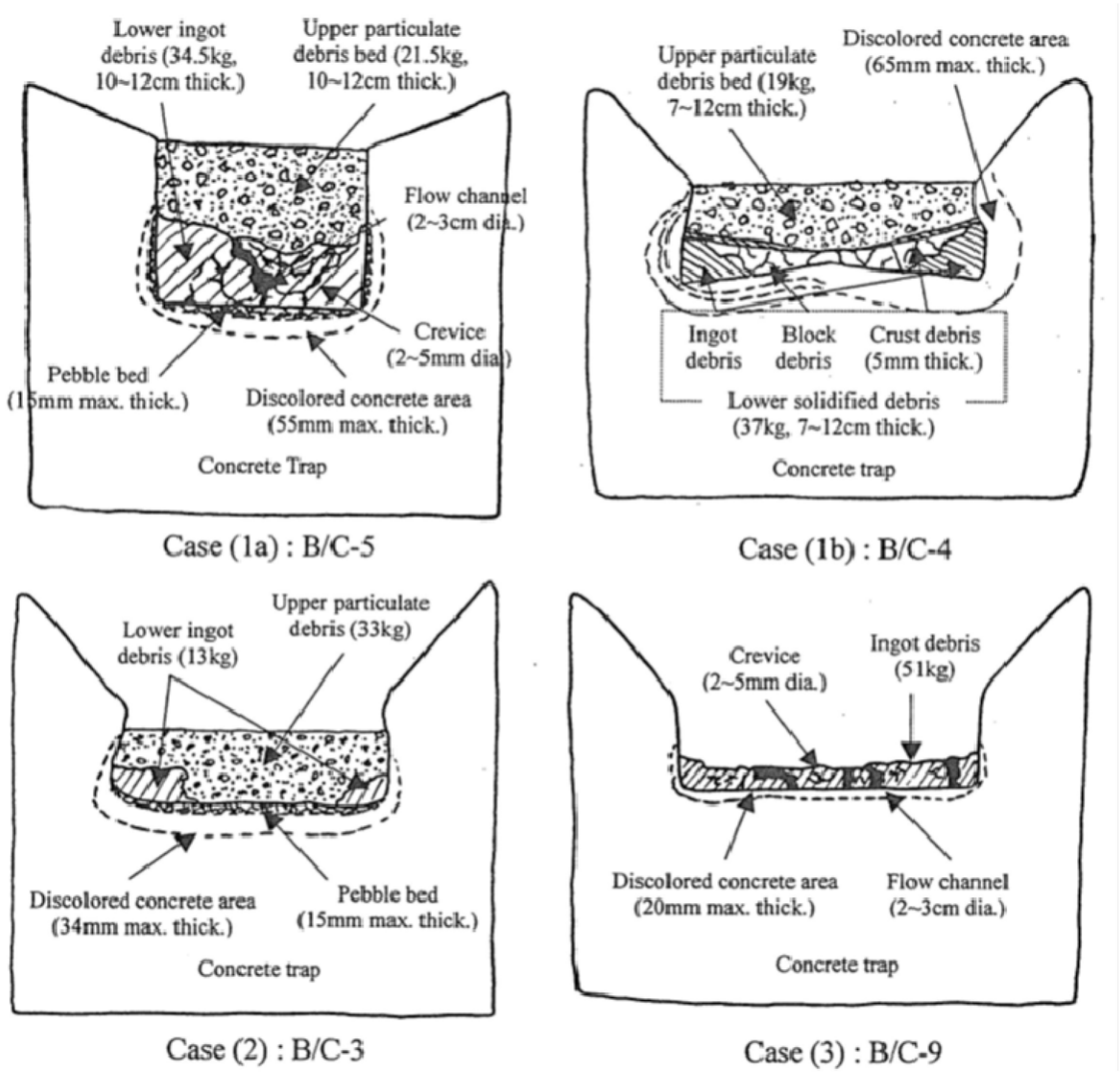


図 3.1-26　COTELS 実験での溶融物固化状態

表 3.1-5　FARO 実験条件及び結果一覧

実験 ID	UO_2 質量割合※	溶融物質量 kg	溶融物温度 K	溶融物落下径 mm	雰囲気圧力 MPa	水深 m	サブクール度 K	水蒸気爆発
L-06	0.8	18	2,923	100	5	0.87	0	なし
L-08	0.8	44	3,023	100	5.8	1.00	12	なし
L-11	0.77	151	2,823	100	5	2.00	2	なし
L-14	0.8	125	3,123	100	5	2.05	0	なし
L-19	0.8	157	3,073	100	5	1.10	1	なし
L-20	0.8	96	3,173	100	2	1.97	0	なし
L-24	0.8	176	3,023	100	0.5	2.02	0	なし
L-27	0.8	129	3,023	100	0.5	1.47	1	なし
L-28	0.8	175	3,052	50	0.5	1.44	1	なし
L-29	0.8	39	3,070	50	0.2	1.48	97	なし
L-31	0.8	92	2,990	50	0.2	1.45	104	なし
L-33	0.8	100	3,070	50	0.2	1.60	124	なし

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

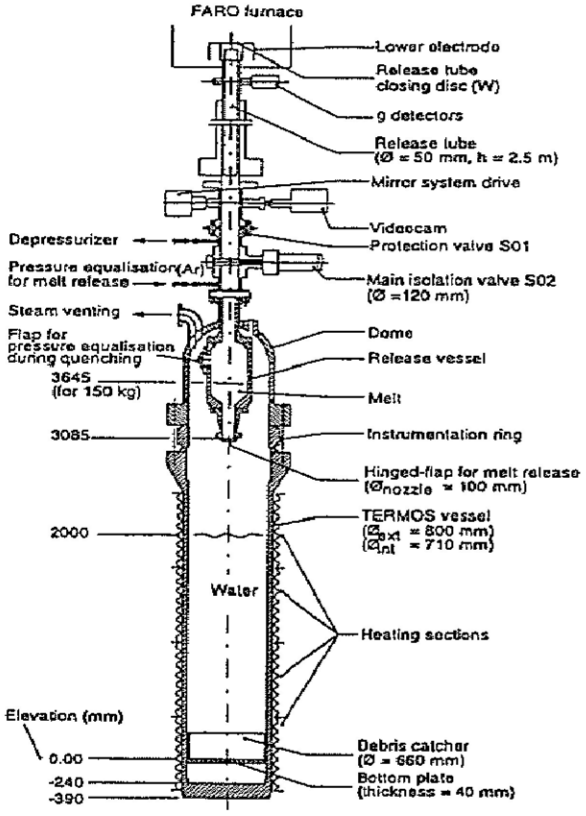


図 3.1-27　FARO 実験装置

表 3.1-6　COTELS（A）実験条件及び結果一覧

実験 ID	UO_2割合 ※	溶融物質量 kg	溶融物温度 K	雰囲気圧力 MPa	水深 m	サブクール度 K	水蒸気爆発
A-1	0.55	56.30	3,050	0.20	0.4	0	－
A-4	0.55	27.00	3,050	0.30	0.4	8	－
A-5	0.55	55.40	3,050	0.25	0.4	12	－
A-6	0.55	53.10	3,050	0.21	0.4	21	－
A-8	0.55	47.70	3,050	0.45	0.4	24	－
A-9	0.55	57.10	3,050	0.21	0.9	0	－
A-10	0.55	55.00	3,050	0.47	0.4	21	－
A-11	0.55	53.00	3,050	0.27	0.8	86	－

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

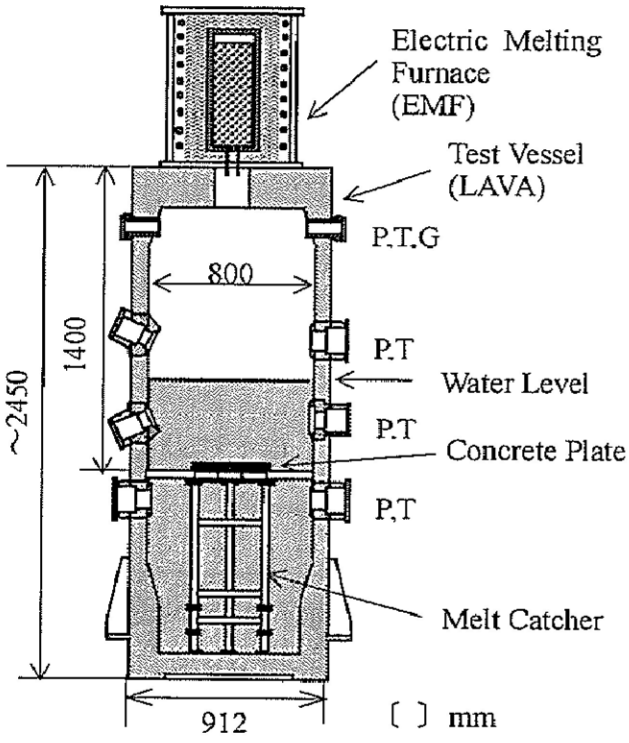


図 3.1-28　COTELS（A）実験装置

表 3.1-7　セルフレベリング実験条件一覧

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

〔註〕

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

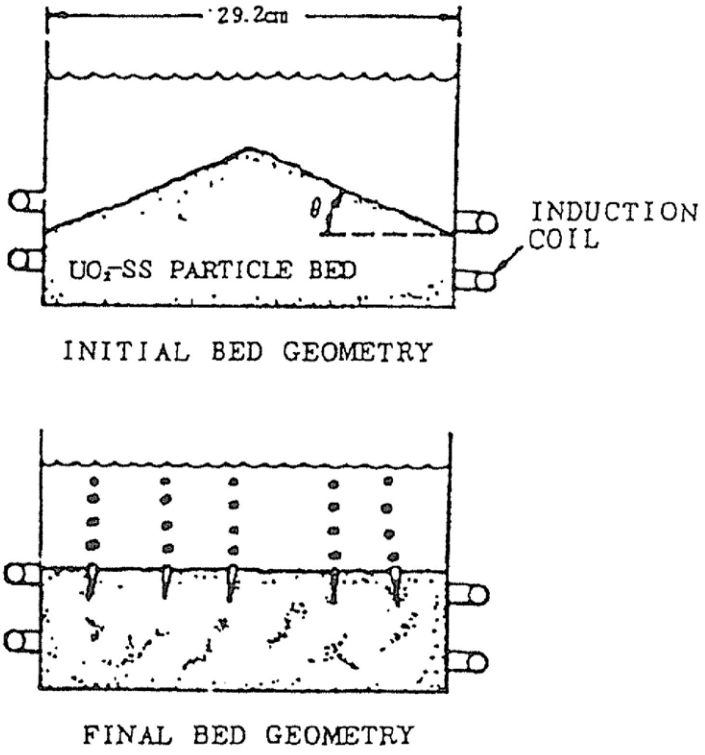


図 3.1-29　セルフレベリング実験における粒子ベッド概念

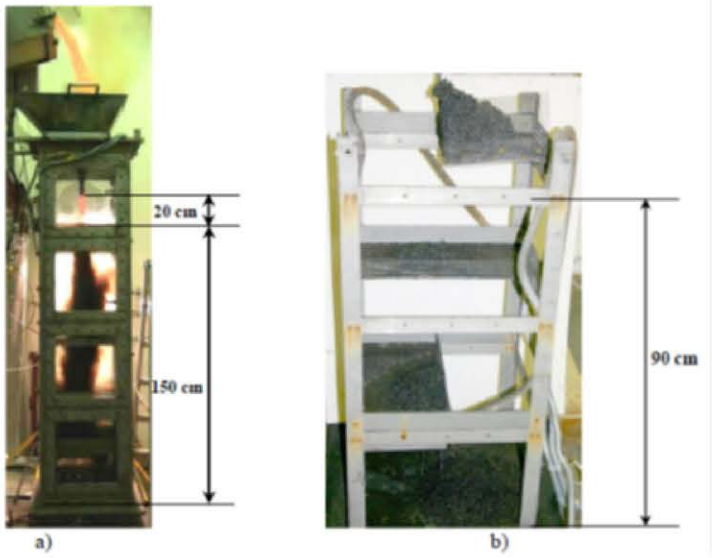


図 3.1-30　DEFOR 試験装置全体及び溶融炉心キャッチャー

表 3.1-8　　DEFOR-A 実験の実験条件

	単位	A1	A2	A4	A5	A6	A7	A8	A9
溶融物温度	K	1,253	1,246	1,221	1,245	1,279	1,349	1,255	1,343
溶融物過熱度	K	110	103	78	102	136	206	112	200
ジェット初期径	mm	10	20	20	10	12	25	25	20
溶融物の注入時間	s	38	11	11	38	20	10	10	11
溶融物注入高さ	m	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.62	1.62	1.7
水面までの距離	m	0.18	0.18	0.2	0.18	0.18	0.2	0.2	0.18
水プール深さ	m	1.52	1.52	1.5	1.52	1.52	1.42	1.42	1.52
水プール初期温度	K	346	367	346	364	346	356	355	355
水プールサブクール度	K	27	7	27	9	27	17	18	18

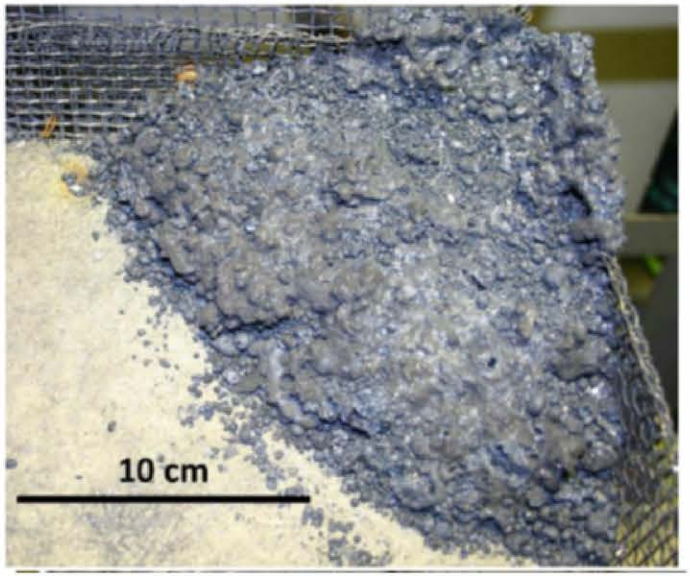


図 3.1-31　DEFOR-A8 キャッチャー１のケーキ状溶融炉心

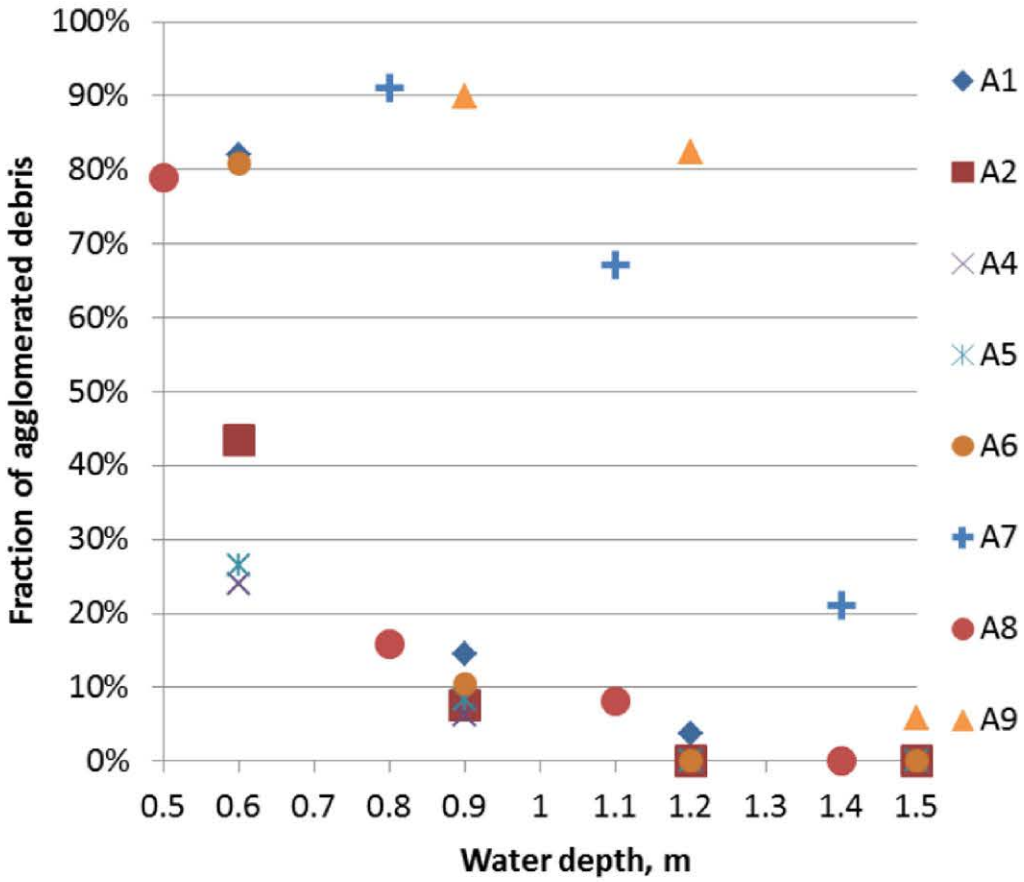


図 3.1-32　　DEFOR-A 実験結果

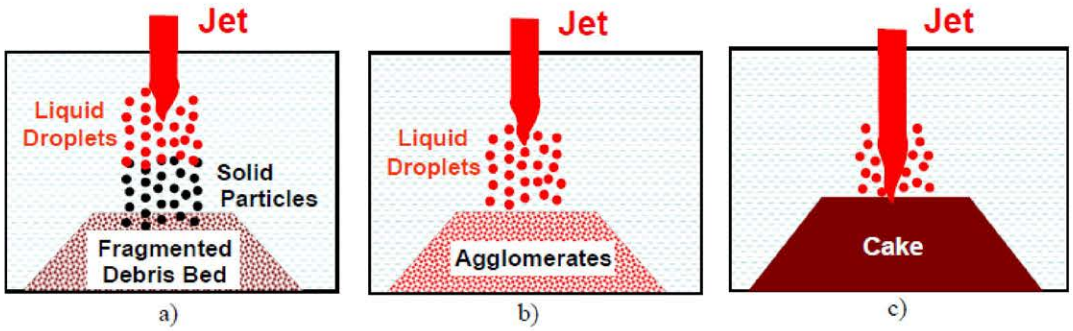


図 3.1-33　DEFOR 実験における溶融物凝集の概念図

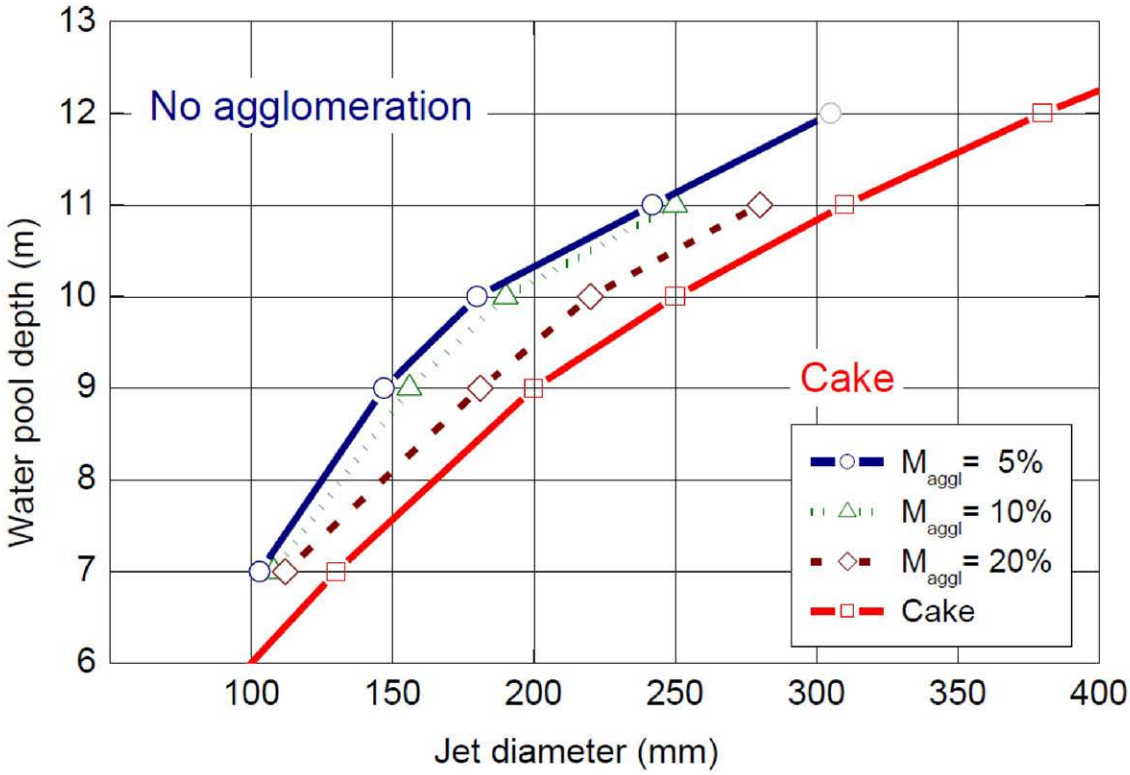


図 3.1-34　スウェーデン王立工科大学（KTH）による凝集モードマップ

表 3.1-9　CCI 実験の主要実験条件

	CCI-1	CCI-2	CCI-3
溶融物	PWR+8% concrete	同左	PWR+15% concrete
コンクリートタイプ	珪岩質系	石灰岩系	珪岩質系
溶融物重量	400kg	同左	375kg
圧力	大気圧	同左	同左
初期溶融物温度	1,950℃	1,880℃	1,950℃
直接電気加熱量	150kW	120kW	120kW
注水条件	加熱後 5.5 時間あるいは 30cm 侵食	同左	同左
注水量、温度	2 liters/秒、20℃	同左	同左
注水停止条件	50cm±5cm	同左	同左

表 3.1-10　CCI 実験の 15-20 分における水への熱流束

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

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

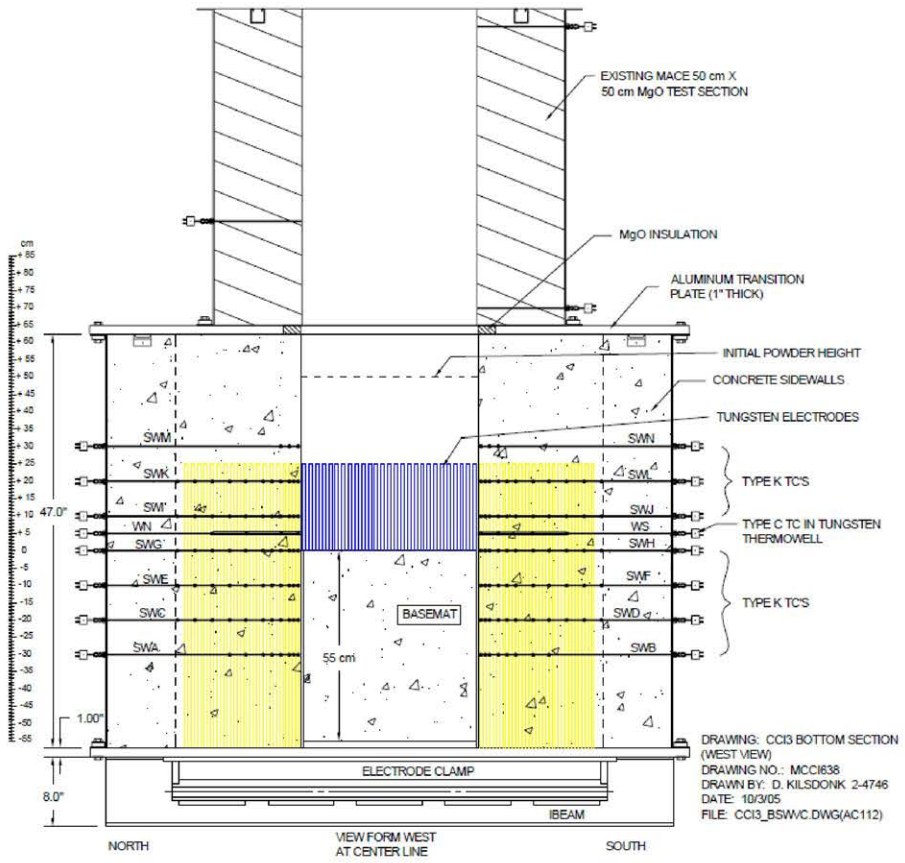


図 3.1-35　CCI 実験装置

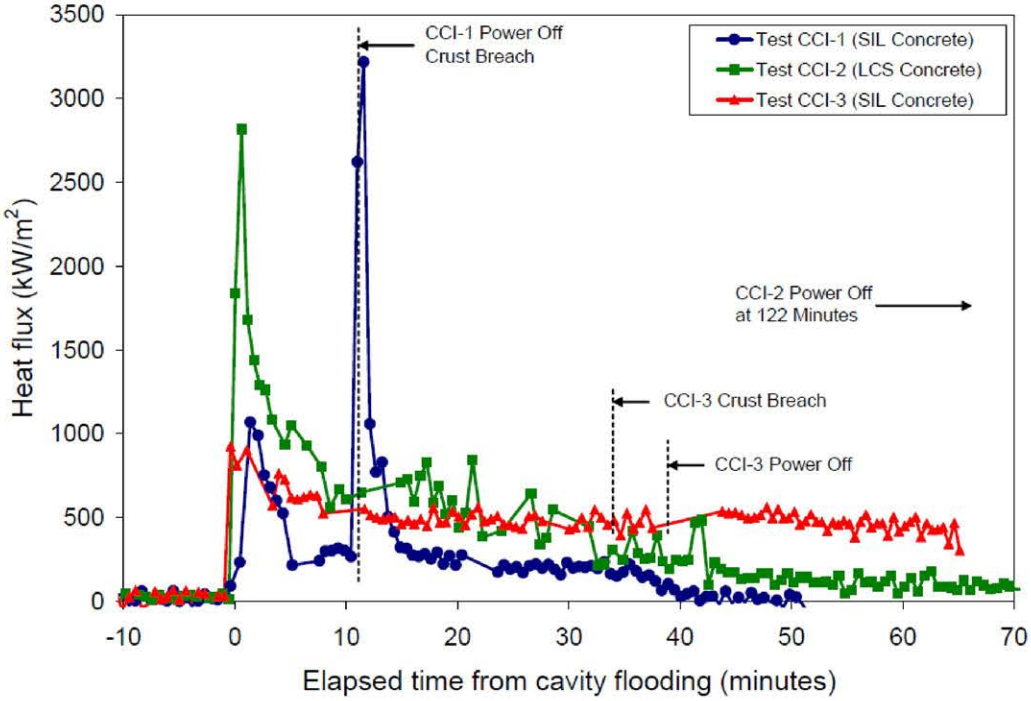


図 3.1-36　CCI 実験における水－溶融炉心間の熱流束

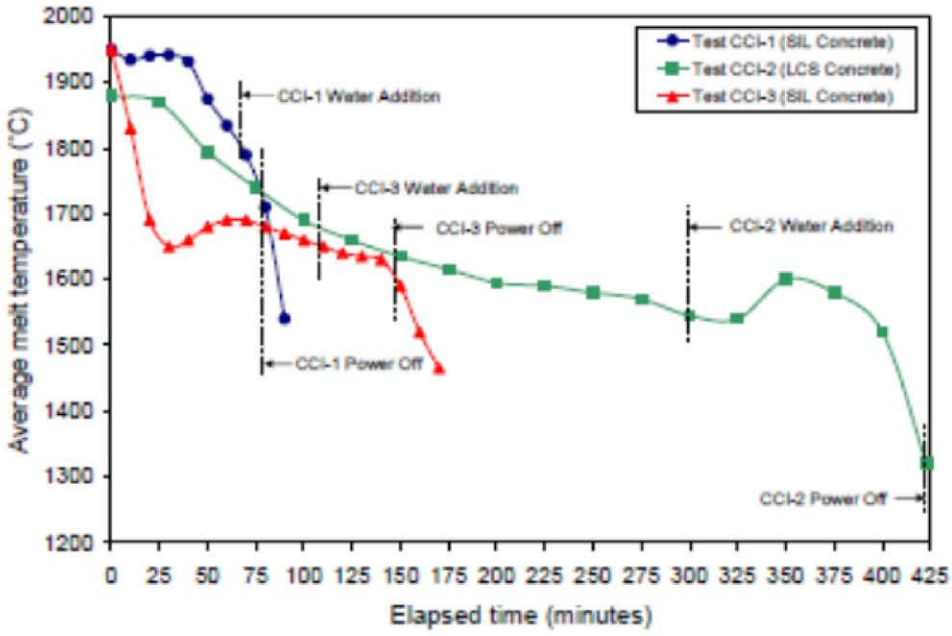


図 3.1-37　　CCI 実験の溶融物平均温度変化

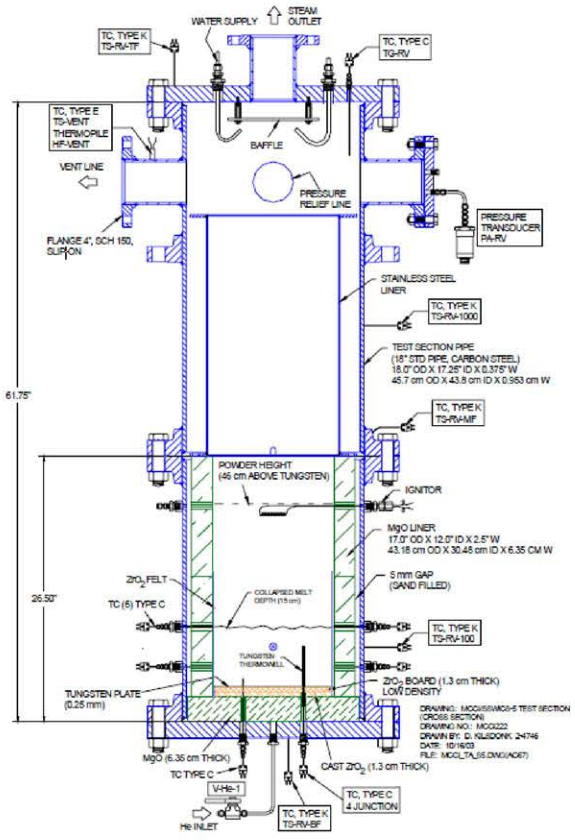


図 3.1-38　SSWICS 試験装置

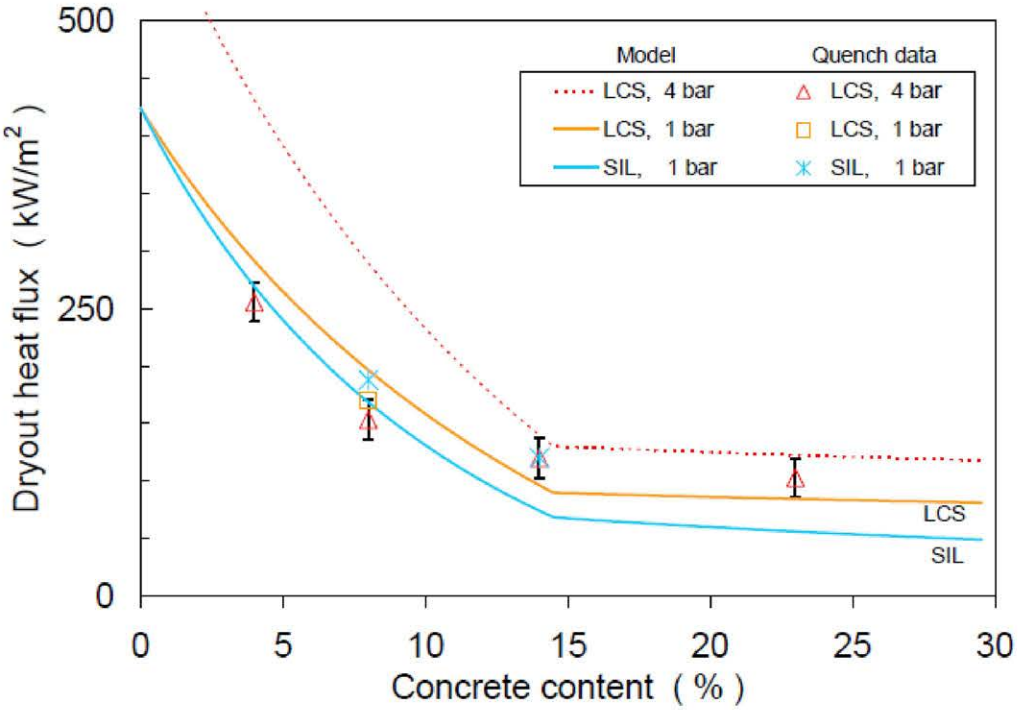


図 3.1-39　SSWICS 試験　ドライアウト熱流束の比較

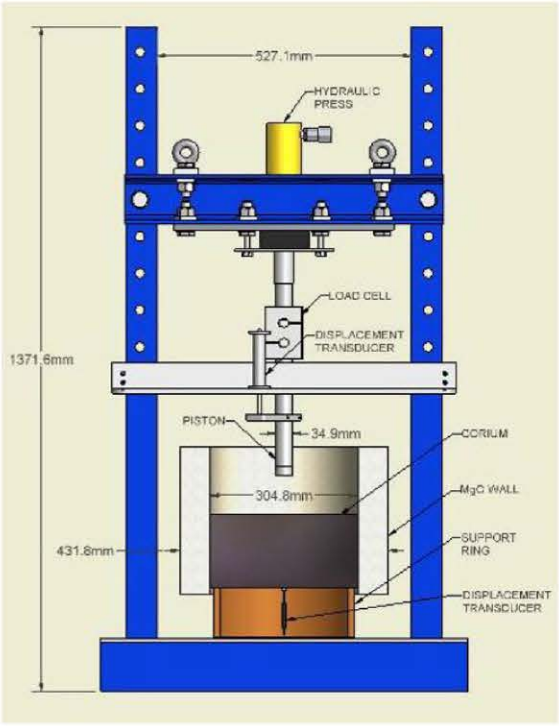


図 3.1-40　SSWICS 試験　強度試験の装置図

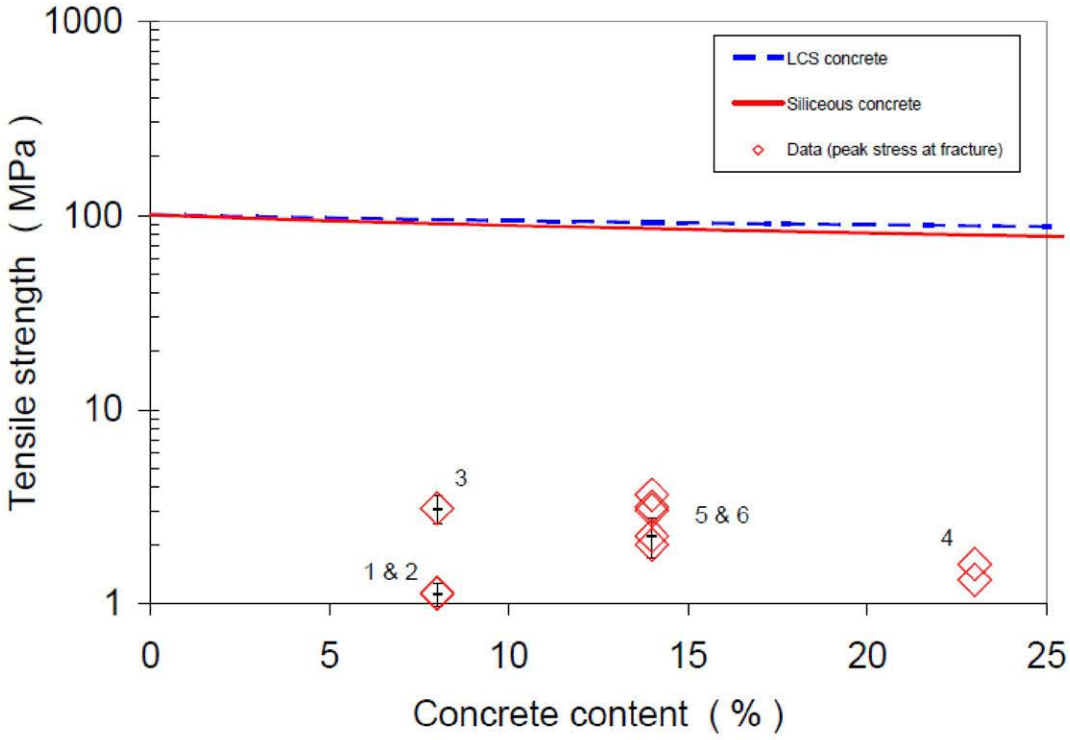


図 3.1-41　SSWICS 試験 強度試験結果

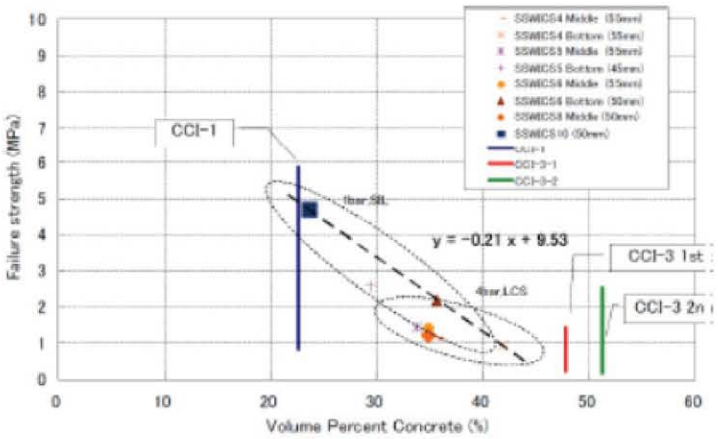


図 3.1-42　破損応力算出結果

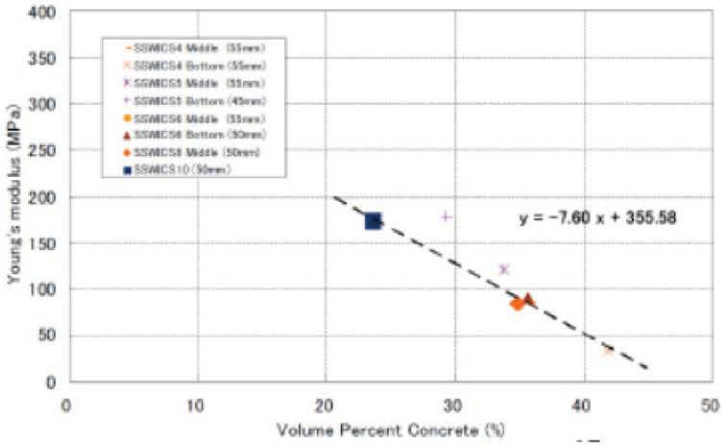


図 3.1-43　ヤング率算出結果

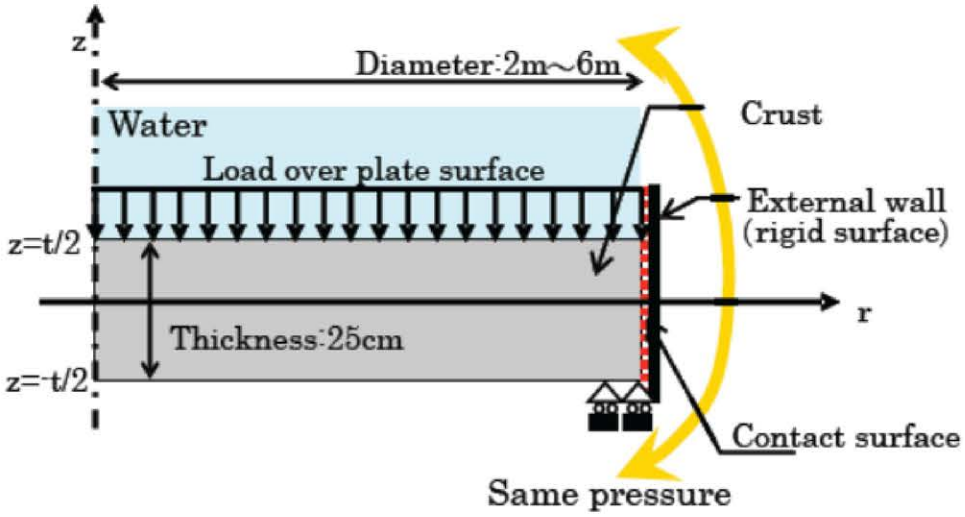


図 3.1-44　実機スケールのクラスト解析モデル

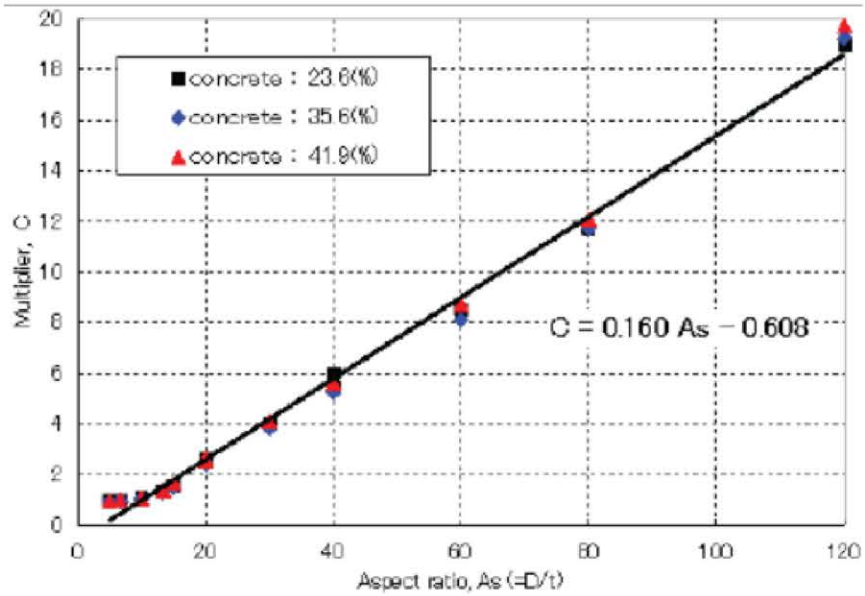


図 3.1-45　クラストの自重による応力分布



図 3.1-46　PULiMS-E4 試験での溶融物拡がり挙動

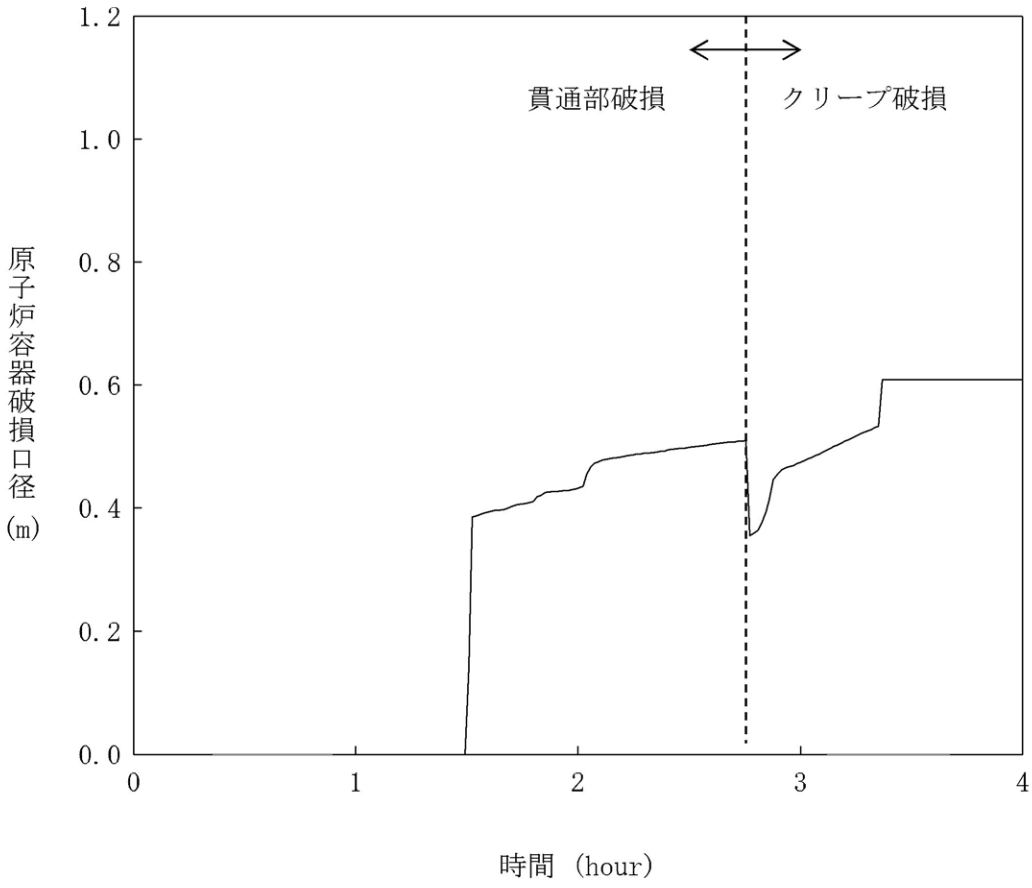
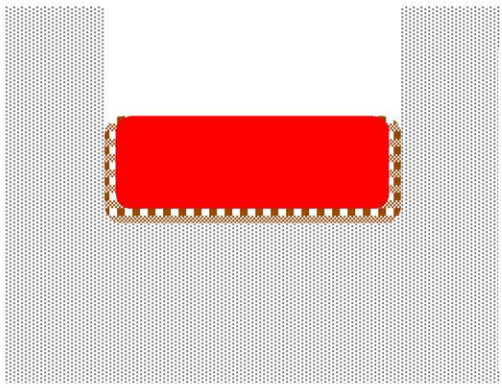
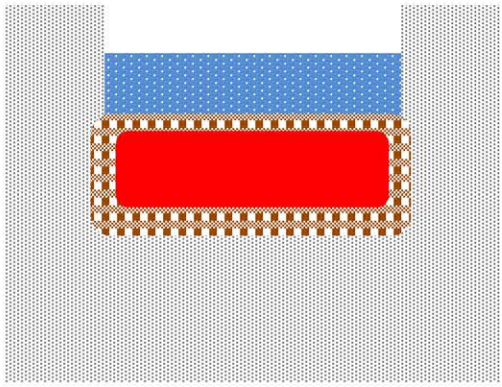


図 3.2-1 原子炉容器破損口径の拡がり（3 ループプラントの例）

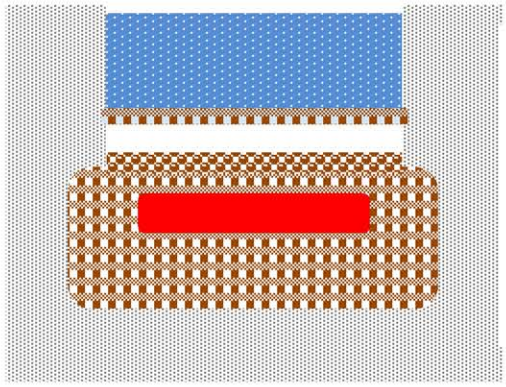
注）
約 1.5 時間の時点で貫通部破損、約 2.8 時間の時点でクリープ破損が生じており、クリープ破損以前は貫通部破損口径を、クリープ破損後はクリープ破損口径をプロットしている。



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

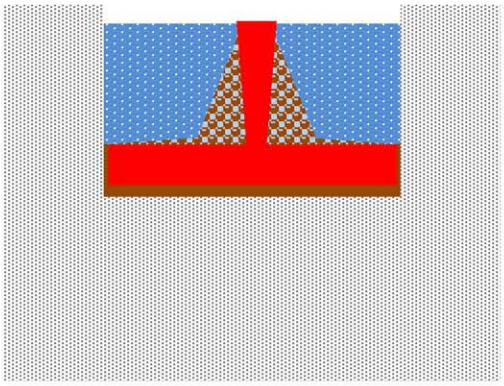


注水後短期：
溶融物上面から水への激しい伝熱が起き、上面に厚いクラストが形成される。この期間の熱流束は最大約 3MW/m² となり、その後急速に低下し約 1MW/m² となる。

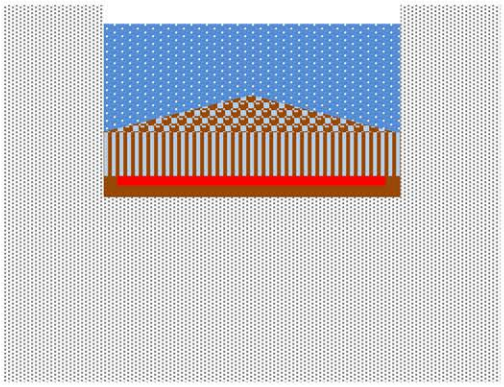


注水後長期：
溶融物上面のクラストが側壁に固着し、溶融物との間に空間が生じる。水への熱流束は約 0.2MW/m² まで徐々に低下していく。
クラストにはコンクリート分解ガスが通過することで空隙が出来、水やガスがある程度透過する。

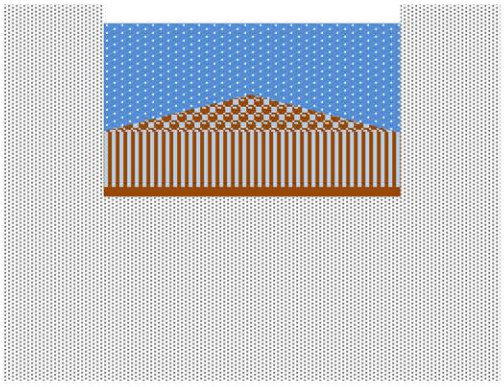
図 3.3-1　MCCI 実験での挙動



溶融炉心落下時：
溶融炉心は完全には粒子化せず、床上を溶融炉心が拡がり、床面との間にケーキが形成される。ジェットの一部は粒子化して溶融炉心上に降下する。クラストが形成されるまでは比較的高い熱流束が維持される。
＜３層状態＞
・粒子ベッド
・溶融炉心
・ケーキ



落下後短期：
溶融炉心上面からクラストが形成されるが、自重あるいは熱応力によって破砕していく。このため溶融炉心は急激に冷却されていく。
＜４層状態＞
・粒子ベッド
・破砕クラスト
・溶融炉心
・ケーキ



長期冷却時：
溶融物は破砕クラストとなって固化し、上下に粒子ベッドとケーキが存在する。破砕クラストは浸水性があることから、長期的にも冷却を維持できる。
＜３層状態＞
・粒子ベッド
・破砕クラスト
・ケーキ

図 3.3-2　実機で想定される挙動

4 不確かさに関する整理

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

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

コンクリート侵食に至る過程は、

① 溶融炉心の原子炉下部キャビティへの堆積過程
② 溶融炉心の冷却過程
③ コンクリートの侵食過程

のように段階的に進展する。

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

（1）溶融炉心の原子炉下部キャビティへの堆積過程

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

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

がある。これらの過程に関して不確かさを整理する。

<u>エントレイン量（溶融炉心の細粒化量）</u>

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

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

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

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

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

エントレインメント係数E_0について、ＭＡＡＰコードでは FCI の大規模実験に対す

るベンチマーク解析によって、その範囲を設定しており、有効性評価の解析ではその中間的な値（最確値）を設定している。ここで、エントレインメント係数の最小値は最確値よりも約□割小さく設定されているため、不確かさとしては約□割を見込む。

一方、溶融炉心落下速度は、原子炉容器内外圧力差と溶融炉心の水頭から計算される。大破断 LOCA シーケンスでは、原子炉容器内外圧力差は大きくなく、不確かさも小さいと考えられるが、溶融炉心水頭については、原子炉容器の破損位置により不確かさがある。原子炉容器の破損位置は、原子炉容器下部プレナムのノード代表点で表されるため、溶融炉心上面から破損口までの高さとして 0.8m～1.2m、即ち約 3 割の不確かさ幅がある。溶融炉心落下速度は溶融炉心水頭の平方根に比例することから、落下速度の不確かさ幅は約 2 割となる。

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

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

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

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

ては「5 感度解析と評価（２）Ricou-Spalding のエントレインメント係数」にて考察する。

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

溶融炉心の原子炉下部キャビティ床面への拡がり

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

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

（２）溶融炉心の冷却過程

原子炉下部キャビティ底に堆積した溶融炉心は、高温かつ崩壊熱による発熱状態であるが、周囲のコンクリート及び原子炉下部キャビティ水との伝熱により冷却される。

前述のとおり、溶融炉心は一部が細粒化し、残りは連続相として原子炉下部キャビティ床に堆積するが、ＭＡＡＰコードでは、原子炉下部キャビティに堆積した溶融炉心は、クラストと溶融プールから構成される平板状の発熱体として模擬される。

溶融炉心と原子炉下部キャビティ水の伝熱

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

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

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

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

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

くなることも考えられる。解析モデルでは、このプロセスは模擬されず、熱伝達が悪化することから、不確かさが存在する。これらの不確かさとは、溶融炉心の冷却の悪化（熱伝達係数の低下）であるから、熱伝達係数の感度を確認する。

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

溶融炉心とコンクリートの伝熱

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

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

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

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

（3）コンクリートの侵食過程

前項で述べたとおり、溶融炉心の冷却過程において、溶融炉心からクラストへの伝熱があり、クラスト内部の1次元の熱伝導方程式を解き、コンクリート表面温度を計算している。コンクリートへの熱流束が十分大きく、コンクリート温度が融解温度を上回る場合に侵食が発生する。コンクリートが融解すると、ガス（水蒸気及び二酸化炭素）が発生し、溶融プールに侵入して金属との化学反応が発生し、反応熱が発生するとともに、生成された非凝縮性ガスが原子炉格納容器内に放出され、原子炉格納容器内を加圧する要因となる。また、コンクリートのスラグも溶融プールに侵入し、ウラン及びジルコニウム等との混合物となる。スラグが混入することにより、溶融炉心の融点が低下する傾向となる。

コンクリートの組成

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

表 4-1　MCCI の不確かさに関する整理結果（1/2）

影響因子	実機での実現象	解析上の取扱い	感度解析条件
原子炉下部キャビティへの注入量	ブローダウン水、スプレイ水等が原子炉下部キャビティに回り込み、原子炉下部キャビティ水深が決まる。	ノードージャンクションモデルに従い、原子炉下部キャビティに流れ込む水量が評価される。	原子炉下部キャビティ水深 （５．（１）にて感度解析実施）
エントレイン量	デブリジェット径が大きいため、水中に落下する溶融炉心の内、エントレインされる部分はジェットの表面近傍に限られると想定される。	逆円錐型のデブリジェットに対して、Ricou-Spalding 相関式によって評価される。	エントレインメント係数 （５．（２）にて感度解析実施）
デブリジェット径	破損口を侵食しながらデブリジェットが流出すると想定される。	ジェット径は初期破損口径から破損口の侵食を考慮して評価される。	エントレインメント係数 （５．（２）にて感度解析実施）
溶融炉心落下速度	破損口径、原子炉容器内外圧力差、重力から決まると想定される。	落下速度は、破損口径、原子炉容器内外圧力差、重力から評価される。	エントレインメント係数 （５．（２）にて感度解析実施）
堆積したデブリ粒子	連続層として原子炉下部キャビティ床面に堆積した溶融炉心の上に粒子状ベッドが堆積すると想定される。あるいは、連続層の溶融炉心の中に巻き込まれると想定される。	連続層の溶融炉心と区別なく、平板状の発熱体として評価される。	水ー溶融炉心間の熱伝達係数 （５．（４）にて感度解析実施）
溶融炉心の拡がり及び堆積形状	溶融炉心が過熱度を持ち断続的に原子炉下部キャビティ床に落下すること等から、原子炉下部キャビティ床面積相当に拡がると想定される。	床面積全面に一様に拡がるとして、原子炉下部キャビティ床面積設計値を入力する。	溶融炉心の拡がり面積 （５．（３）にて感度解析実施）

表 4-1　MCCI の不確かさに関する整理結果（2/2）

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

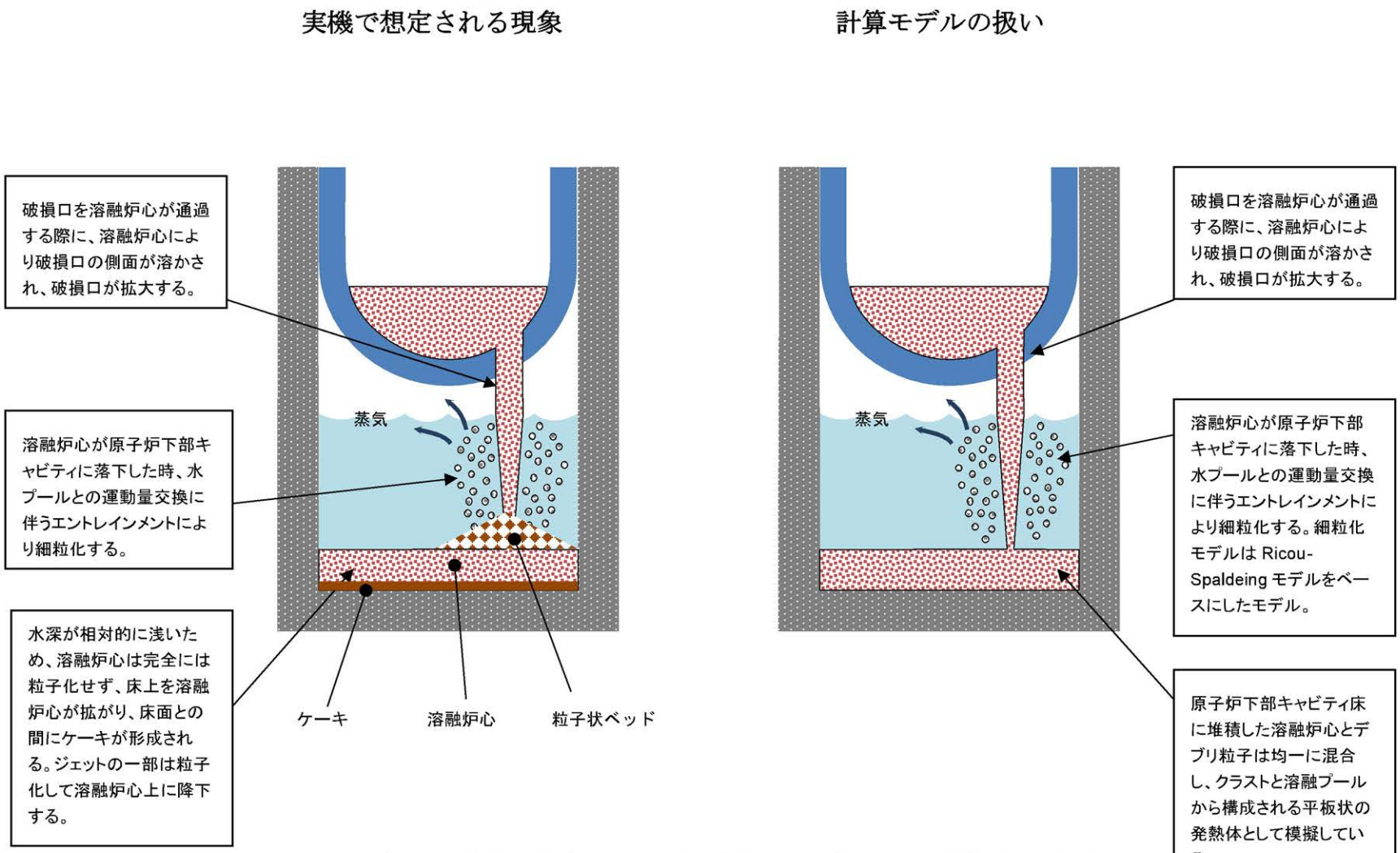


図 4-1　溶融炉心伝熱の想定される現象と解析上の取扱いとの比較概念図（1/2）
原子炉下部キャビティでの溶融炉心挙動

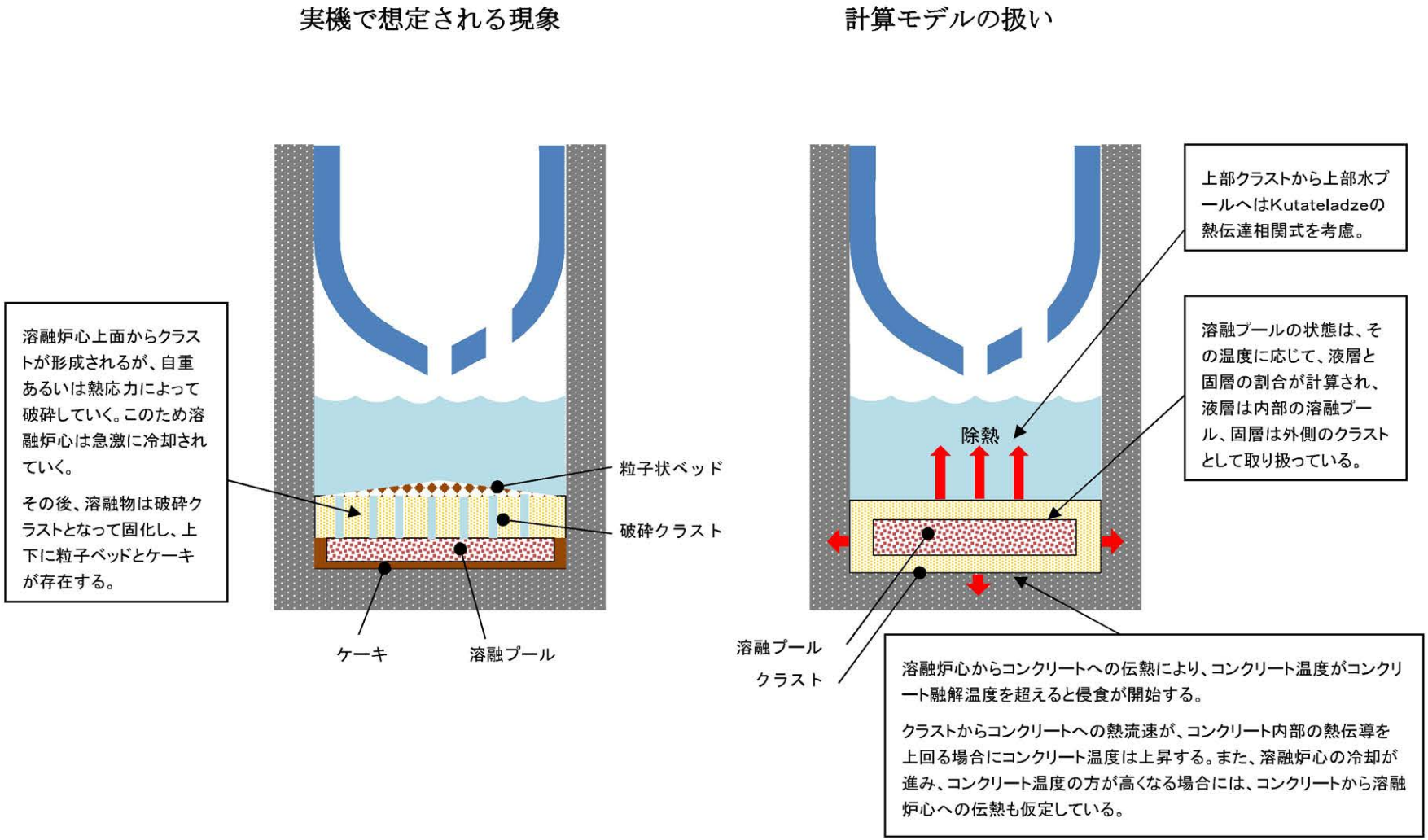


図 4-1　溶融炉心伝熱の想定される現象と解析上の取扱いとの比較概念図（2/2）
溶融炉心と冷却水及びコンクリートとの相互作用

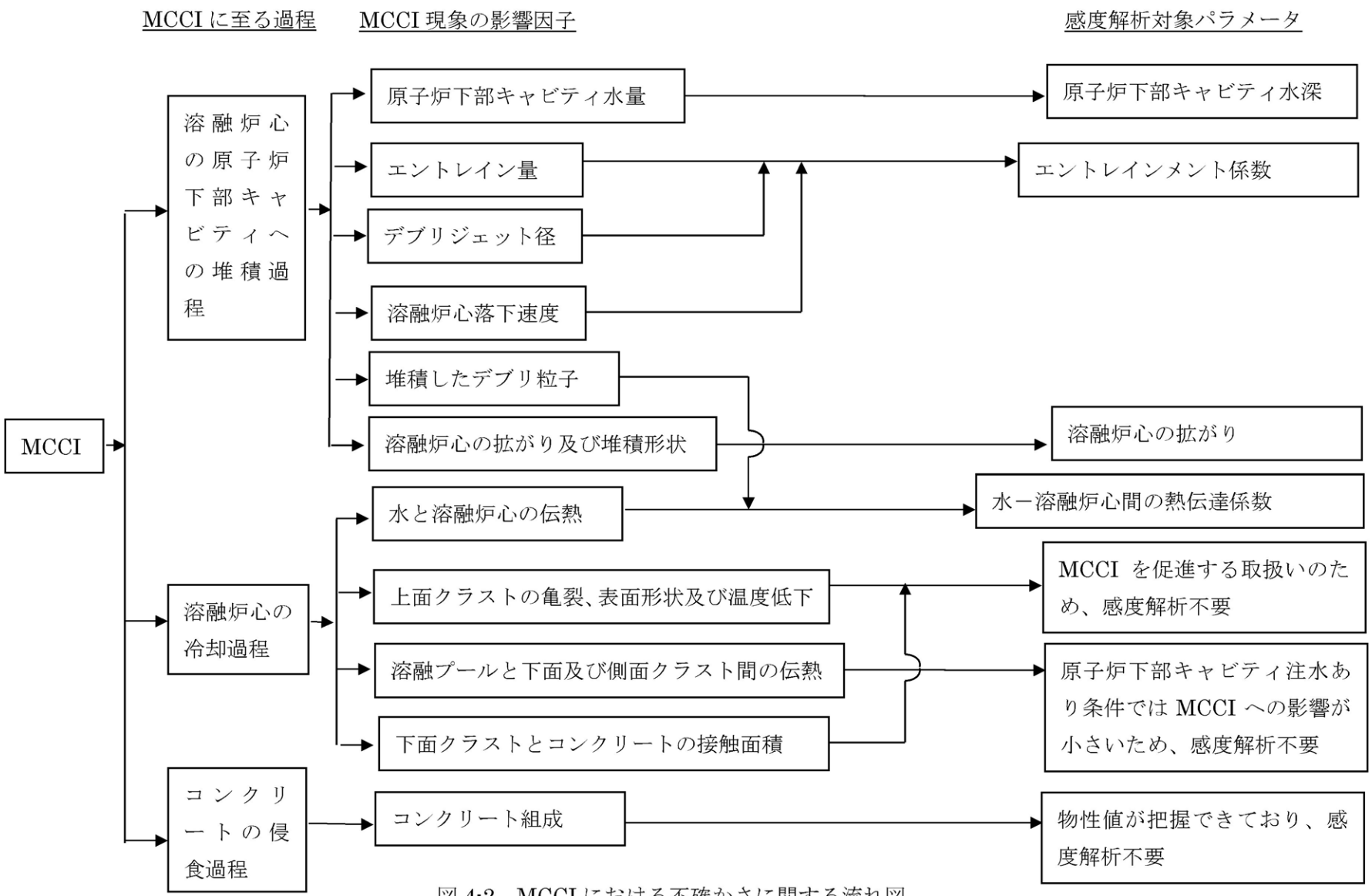
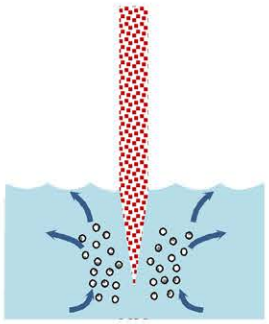
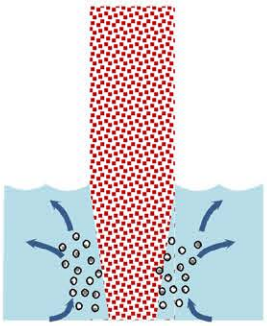


図 4-2　MCCI における不確かさに関する流れ図



(a)デブリジェット径が
小さい場合



(b)デブリジェット径が
大きい場合

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

図 4-3　デブリジェット径と細粒化量の関係

5 感度解析と評価

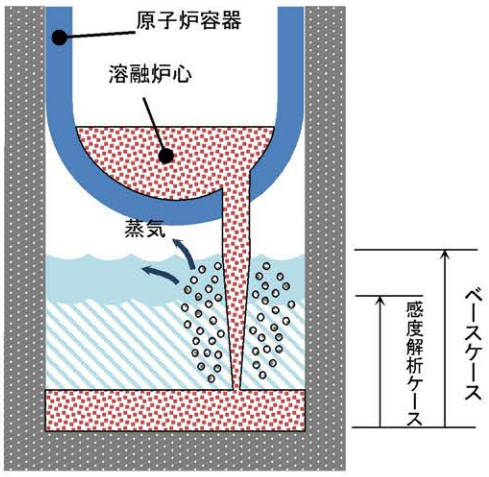
前章において抽出したパラメータに関して感度解析によりその影響程度を把握した。感度解析のベースケースは、3ループプラントの「大破断 LOCA＋ECCS 注入失敗＋CV スプレイ注入失敗」である。

（1）原子炉下部キャビティ水深

解析条件

ベースケースでは、炉心損傷検知後 30 分で代替格納容器スプレイを実施することとしている。感度解析ケースでは、代替格納容器スプレイ作動のタイミングがベースケースよりも 30 分遅くなることを想定する。この場合、原子炉下部キャビティへの注水も遅れ、原子炉下部キャビティ内での溶融炉心冷却に影響を与える可能性がある。

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



解析結果

図 5-1-1～5-1-9 に、原子炉下部キャビティ水深の感度解析結果を示す。

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

なった。

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

評価

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

（２）Ricou-Spalding のエントレインメント係数

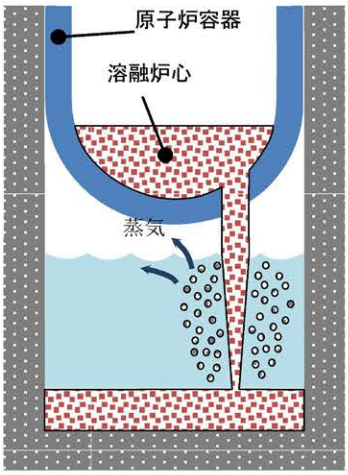
解析条件

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

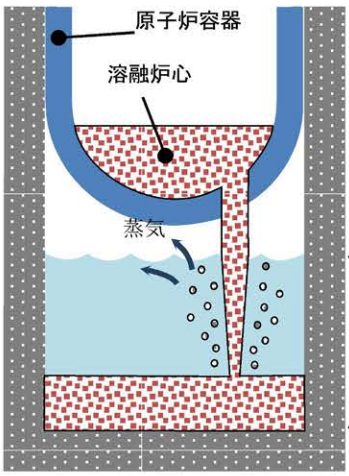
枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

が浅い場合には、エントレインメント係数はより小さく評価されると考えられるが、デブリジェット径が大きいこととエントレインメント係数が小さいことは等価といえるため、デブリジェット径の不確かさはエントレインメント係数の不確かさとして評価する。また、溶融炉心の過熱度が大きい場合には、冷却されずに原子炉下部キャビティ床に堆積し、凝集状態になるが、このような状況についてもエントレインメント係数が小さい場合に相当し、溶融炉心の過熱度の不確かさもエントレインメント係数の不確かさとして評価することができる。

項　目	エントレインメント係数	設定根拠
ベースケース	□	当該変数推奨範囲の最確値
感度解析ケース	□	当該変数推奨範囲の最小値



ベースケース



感度解析ケース

エントレインメント係数を小さく設定し、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する。

解析結果

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

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

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

に細粒化する溶融炉心は一部であると言える。また、図 5-2-10 に表示しているエントレインメント割合は溶融炉心の落下中の値であり、床面に堆積する粒子状ベッドの割合は、DEFOR 試験の結果から、更に小さくなると考えられる。なお、ＭＡＡＰコードでは、細粒化された溶融炉心は連続相の溶融炉心と混合された状態で原子炉下部キャビティ床に堆積し、溶融炉心とクラストからなる平板上の発熱体として模擬している。

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

一方、溶融炉心とコンクリートの熱流束についても、水との熱伝達の場合と同様であり、溶融炉心の冷却に時間を要することから、コンクリートへの熱流束がわずかに大きいが、長時間継続することはないため、コンクリートの侵食深さへの影響はわずかであり、継続的なコンクリート侵食が発生する状況ではない。コンクリート侵食深さはベースケースが約 3mm、感度解析ケースが約 4mm となった。なお、溶融炉心とコンクリートとの間の熱伝達については、基本的には溶融炉心側からコンクリート側に熱が流れるが、熱が逆向きに流れることもある。これは、コンクリート表面温度は溶融炉心が落下した後に急激に上昇し、その後、溶融炉心が上面の水に冷却されるためコンクリート表面温度も低下するが、その際一時的にコンクリート表面温度と溶融炉心の温度が逆転する場合があり、そのときに溶融炉心とコンクリートとの熱流束が負の値となるためである。ＭＡＡＰコードの解析モデルでは、溶融プールとクラス

トの界面は対流熱伝達を仮定する。クラスト内部は２次関数の温度勾配を持つと仮定し、クラストとコンクリートの界面がコンクリート表面温度となる。コンクリート内では、深さ方向に１次元の熱伝導方程式により温度分布を持つ仮定としている。溶融炉心とコンクリートの間の熱伝達には不確かさが存在するが、接触面積が小さくなる場合には、コンクリートへの伝熱量が小さくなり、コンクリート侵食は抑制される方向となるため、不確かさの観点では問題とならない。

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

評価

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

（３）溶融炉心の拡がり面積

解析条件

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

したがって、拡がりの形態として、以下の２ケースを考える。

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

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

まず、落下時に冷却されずに高温のまま床に到達するケースでは、評価上、最初の

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

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、側面クラストへは厚さ方向に２次関数の温度勾配を持つものとし、側面クラスト外面にてコンクリートへ熱伝導により伝熱する。コンクリート内部でも側面深さ方向に１次元の熱伝導方程式による温度分布を持つ。そして、コンクリート表面温度がコンクリートの融点を超えると侵食が開始する。

一方、落下時に細粒化などにより冷却が進むケースでは、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。

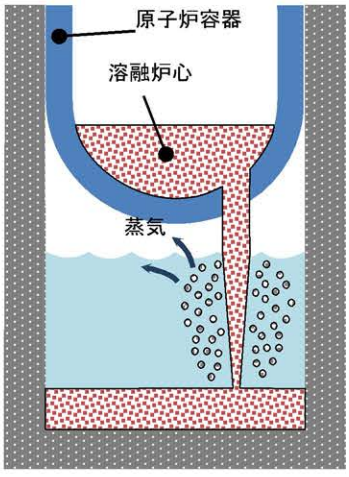
デブリジェットが原子炉下部キャビティ床に到達するまでの落下過程において、溶融炉心と原子炉下部キャビティ水との接触により、溶融炉心から原子炉下部キャビティ水への伝熱が発生する。本ケースにおいては、溶融炉心の過熱度分がすべて伝熱されると仮定し、溶融炉心の融点まで冷却するよう条件を与えているが、実際は、溶融ジェット径が約 0.5m と大きいため、落下過程で冷却されずに過熱度を保ったまま原子炉下部キャビティ床に到達する溶融ジェットの割合が大きいと考えられる。

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

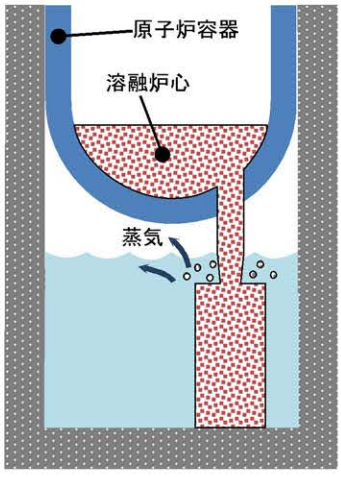
融炉心の拡がり面積の初期値として、原子炉下部キャビティ床面積の約 1/10 を与えた。

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。即ち、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/m^2 を適用する。なお、常に高い熱流束が維持されるのではなく、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/m^2 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/m^2 を適用する。

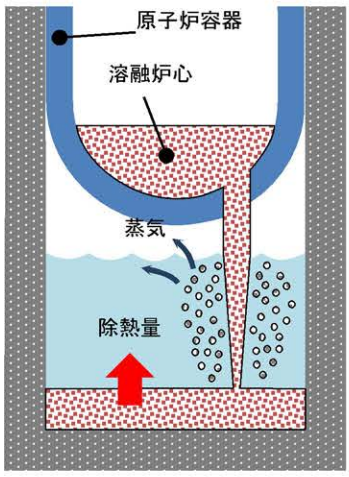
次に、溶融炉心全体が固化した後の挙動においては、原子炉下部キャビティへの落下直後の高い熱流束や、クラストの破損による内部の溶融炉心と原子炉下部キャビティ水との直接接触を考慮せず、CCI-2 及び CCI-3 実験において初期のピークを除外した熱流束である 0.5MW/m²を選定する。

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。

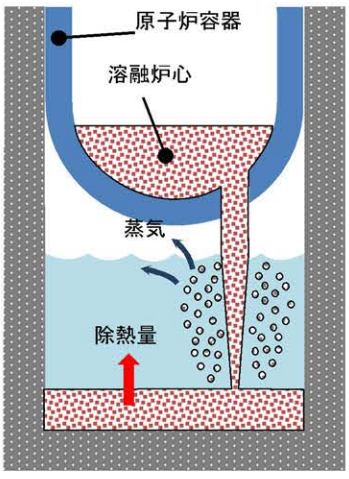
感度解析ケース 4 では、WETCOR、MACE、CCI 実験においてクラスト全体が固化して温度が低下した状態の熱流束である 0.2MW/m² を適用する。これについて、溶融炉心は、溶融状態で原子炉下部キャビティ水と直接接触するため、溶融炉心落下直後は高い熱流束が得られると考えられるが、本感度解析は溶融炉心落下直後から、安定化クラスト形成後の熱流束を仮定しているという点で、仮想的なケースであると言える。

項　目	Kutateladze 係数	設定根拠
ベースケース	0.1（0.8 MW/m²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/m²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/m²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/m²相当 (注)） 全体固化時 0.0625（0.5 MW/m²相当 (注)） コンクリート 15%混入時 0.015625（0.125 MW/m²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/m²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、水ー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）水ー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

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

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）及び電気式水素燃焼装置（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 ㎏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 ㎏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。」

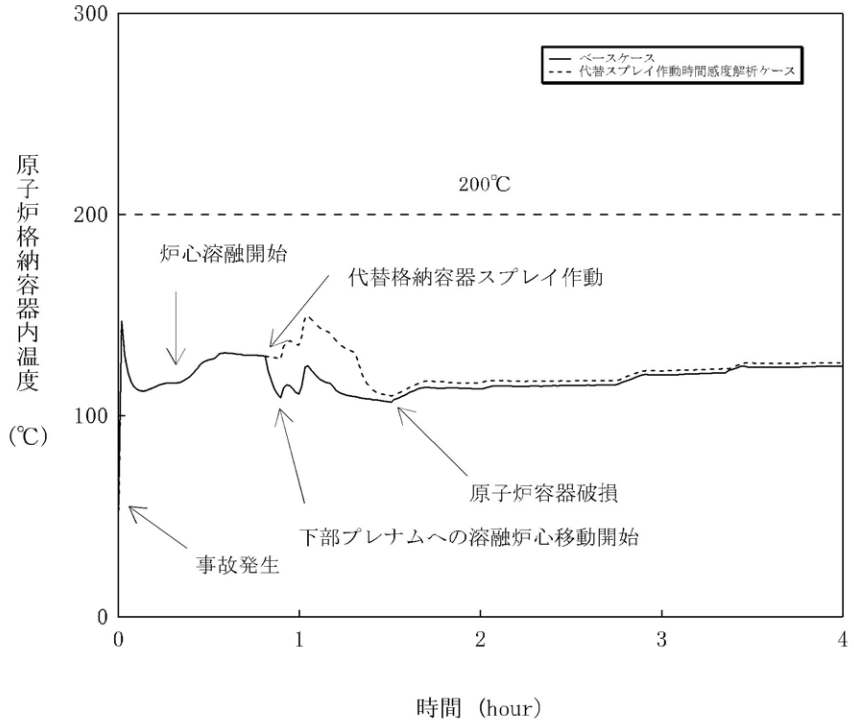


図 5-1-1 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（１）

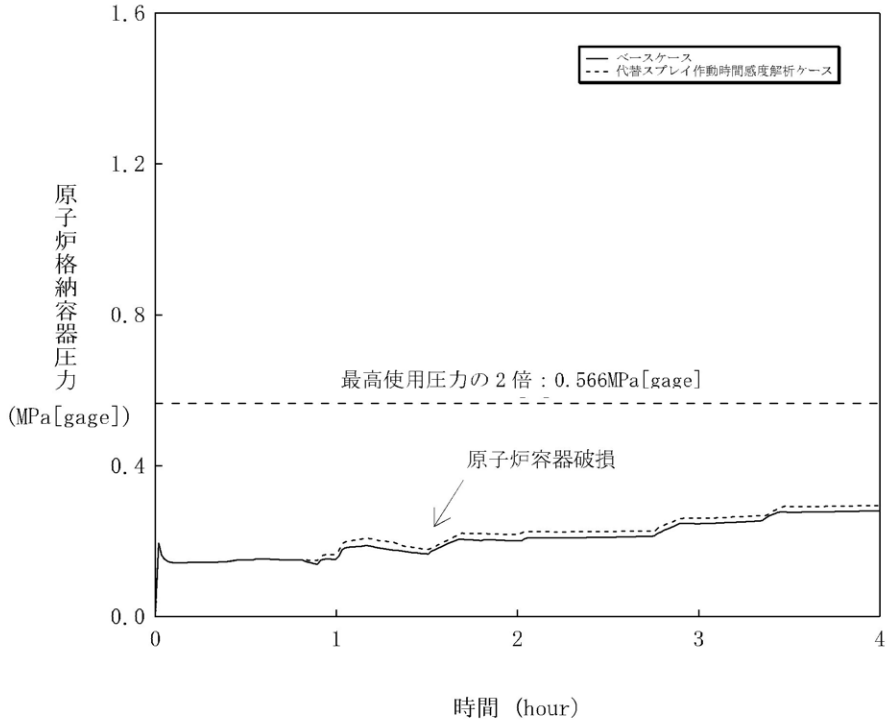


図 5-1-2 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（２）

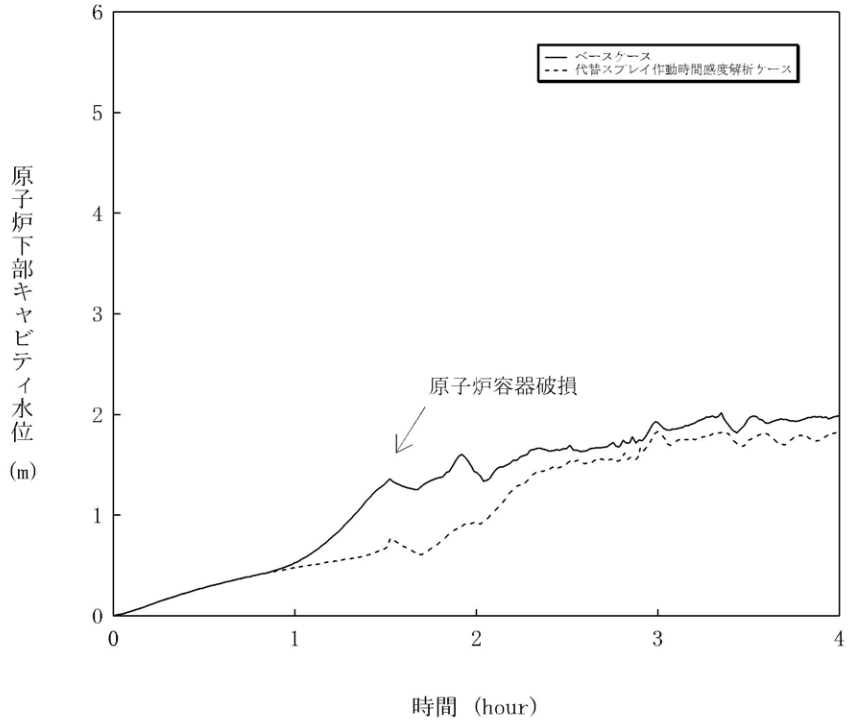


図 5-1-3 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（３）

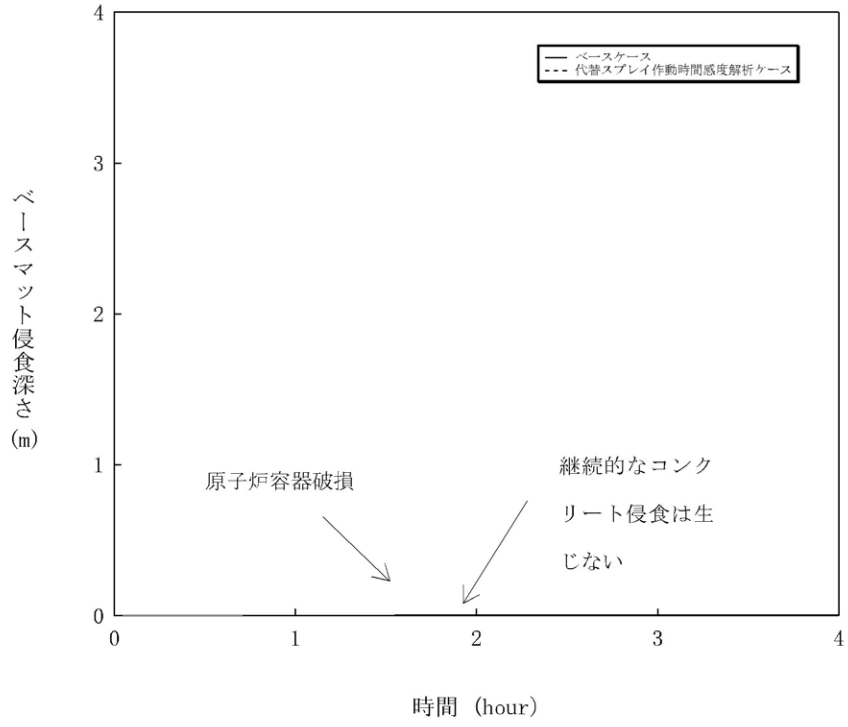


図 5-1-4 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（４）

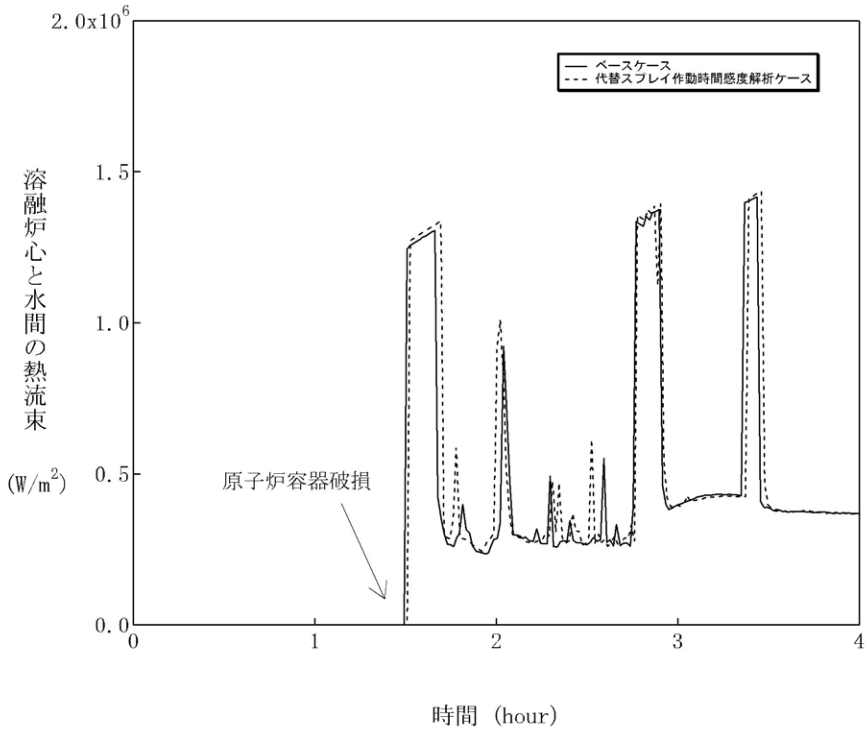


図 5-1-5 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（５）

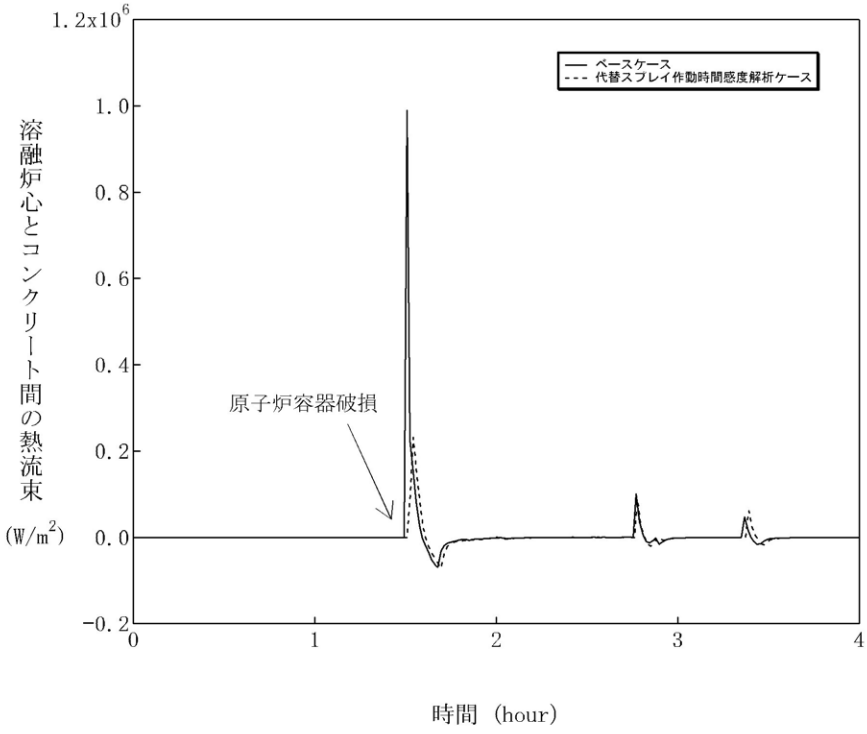


図 5-1-6 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（６）

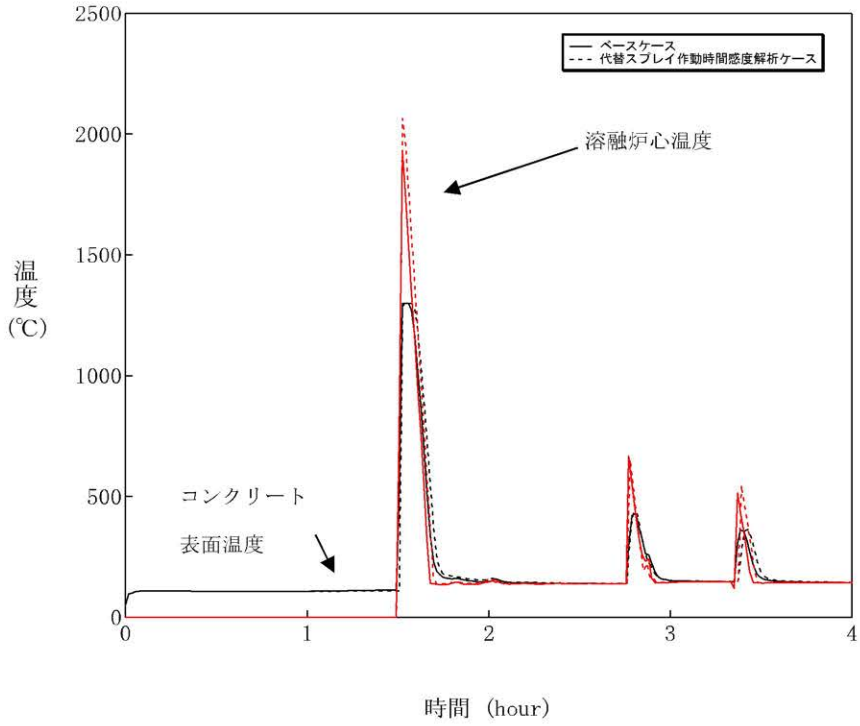


図 5-1-7 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（7）

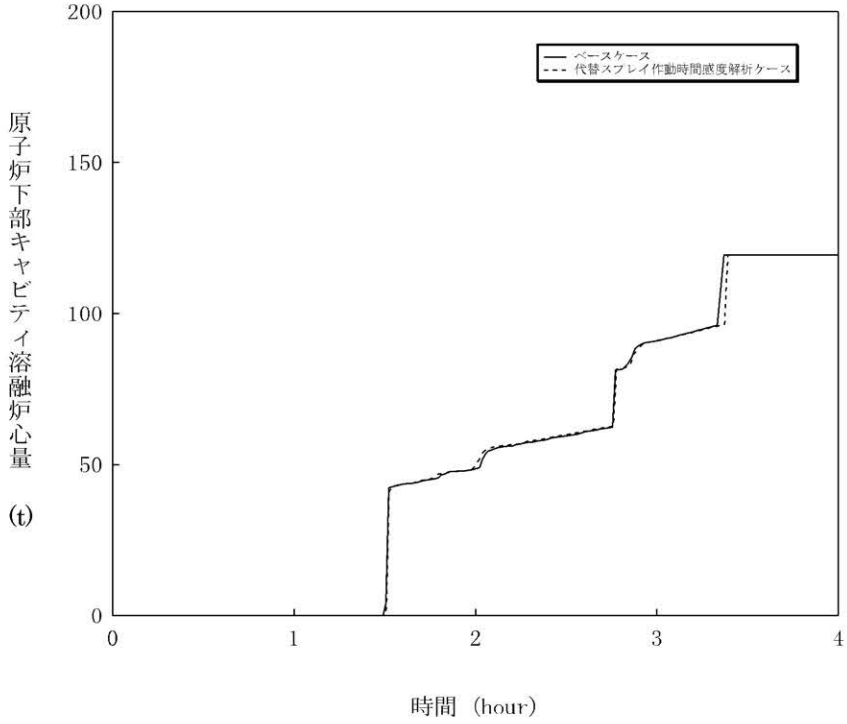


図 5-1-8 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（8）

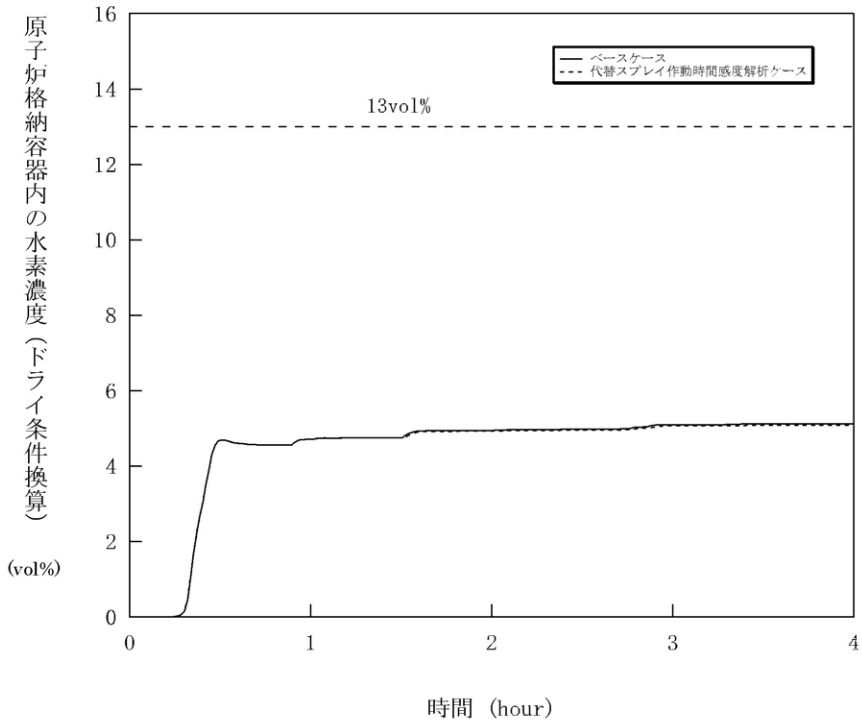


図 5-1-9 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（９）

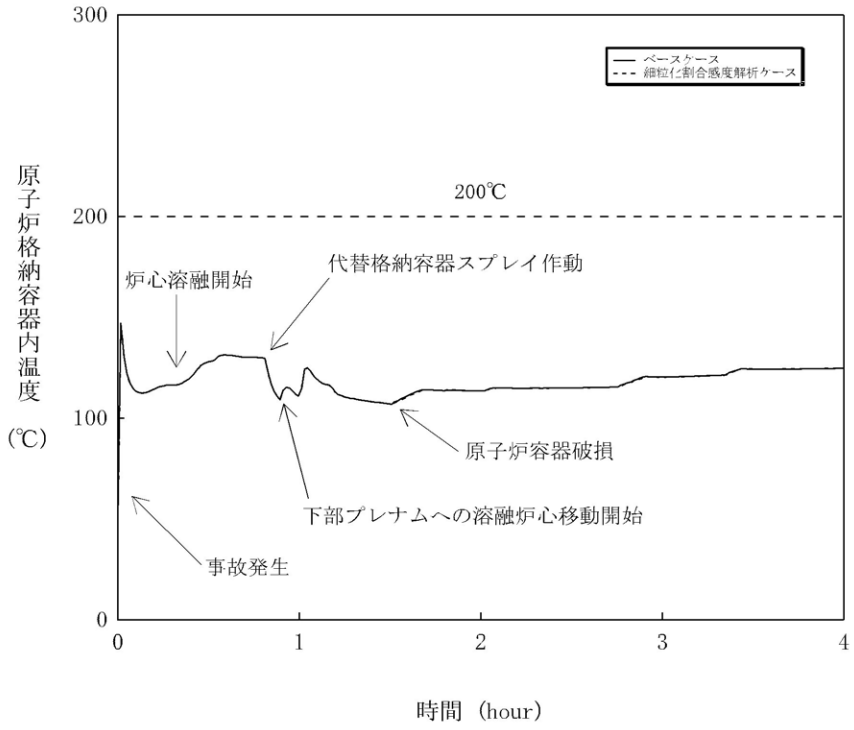


図 5-2-1 溶融炉心の細粒化割合感度解析（１）

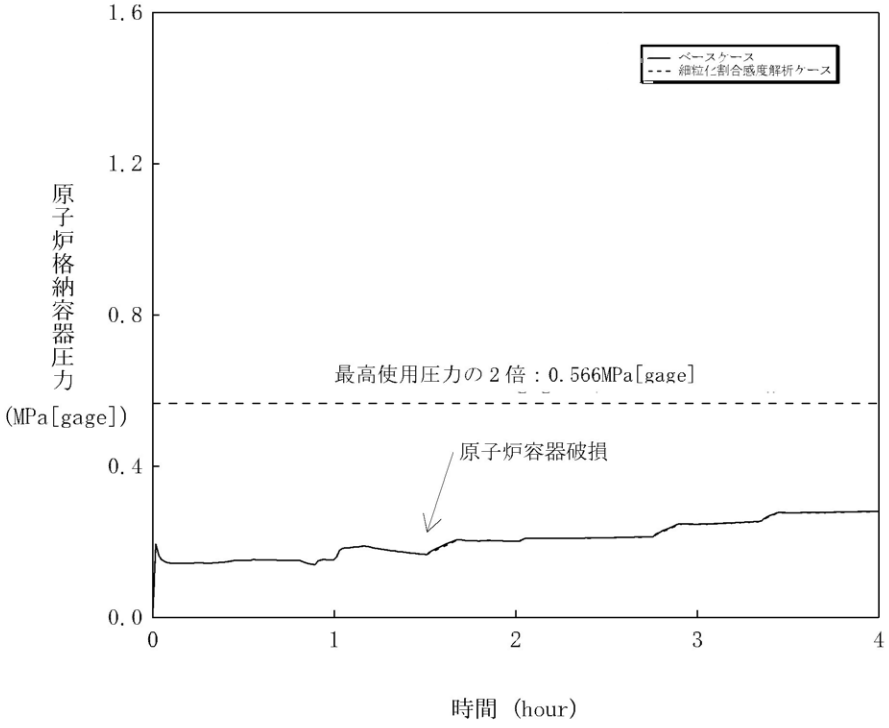


図 5-2-2 溶融炉心の細粒化割合感度解析（２）

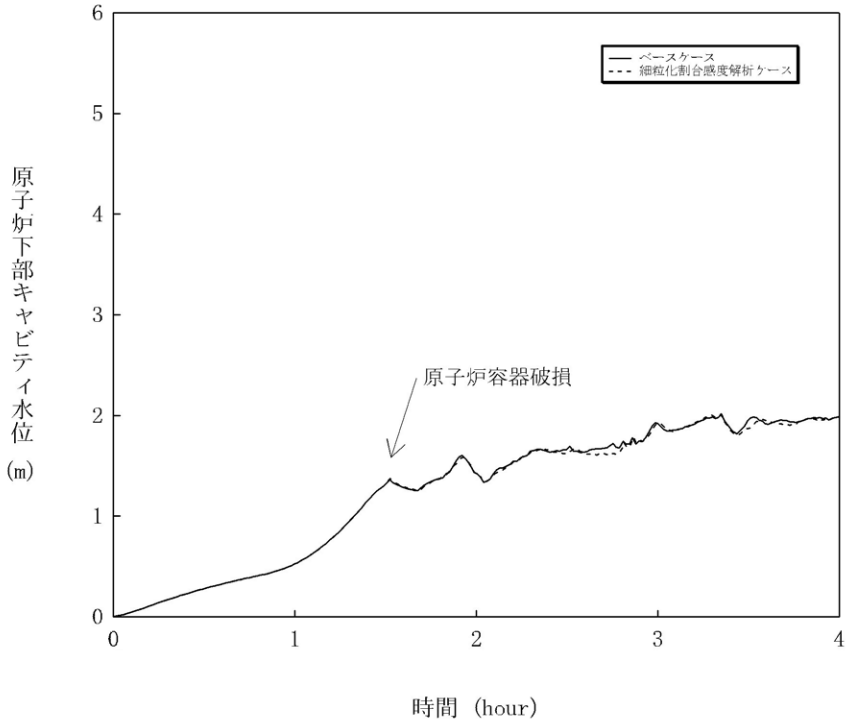


図 5-2-3 溶融炉心の細粒化割合感度解析（３）

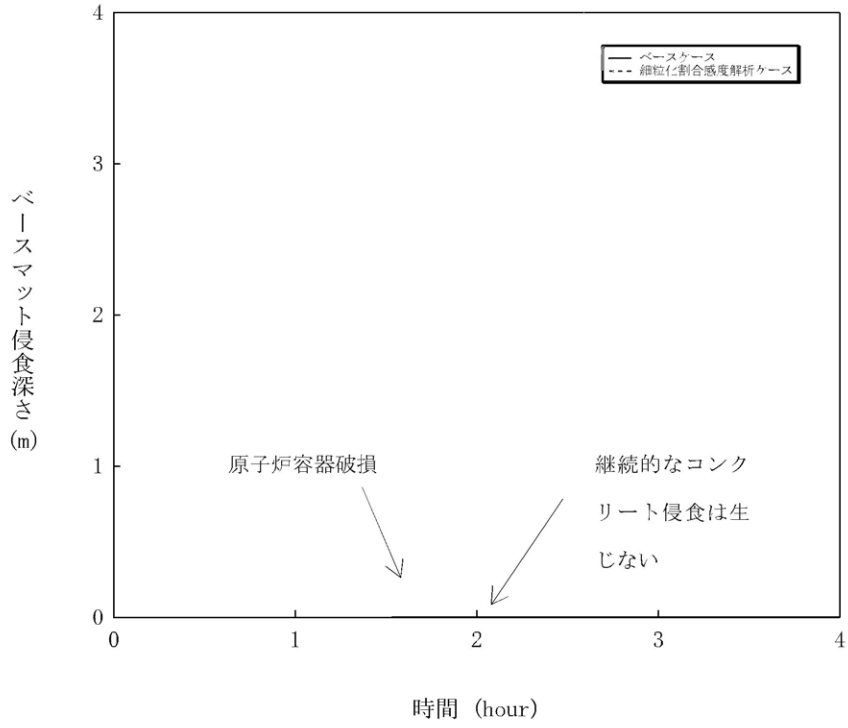


図 5-2-4 溶融炉心の細粒化割合感度解析（４）

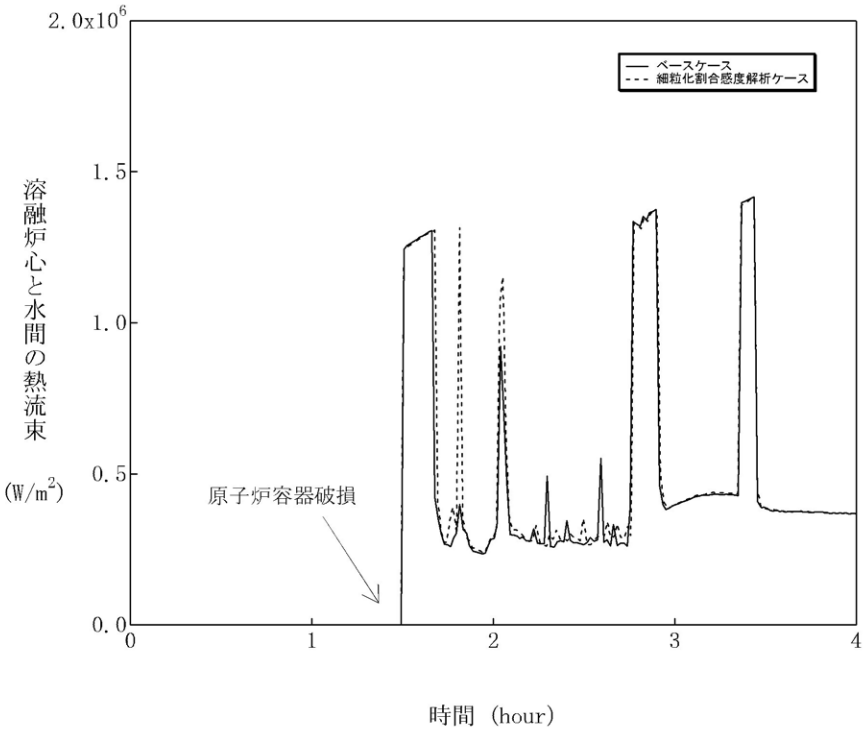


図 5-2-5 溶融炉心の細粒化割合感度解析（５）

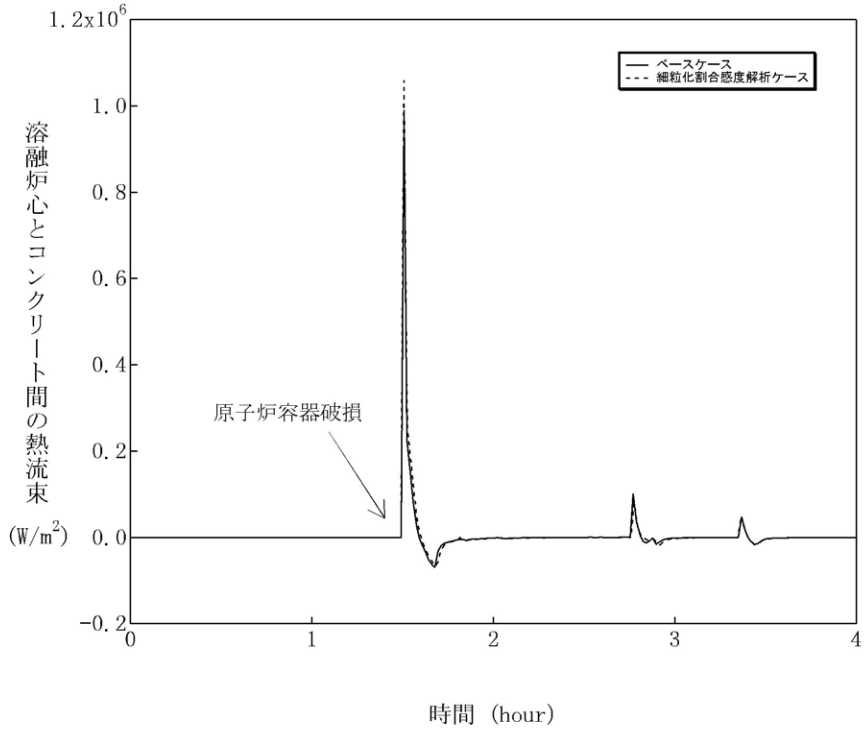


図 5-2-6 溶融炉心の細粒化割合感度解析（６）

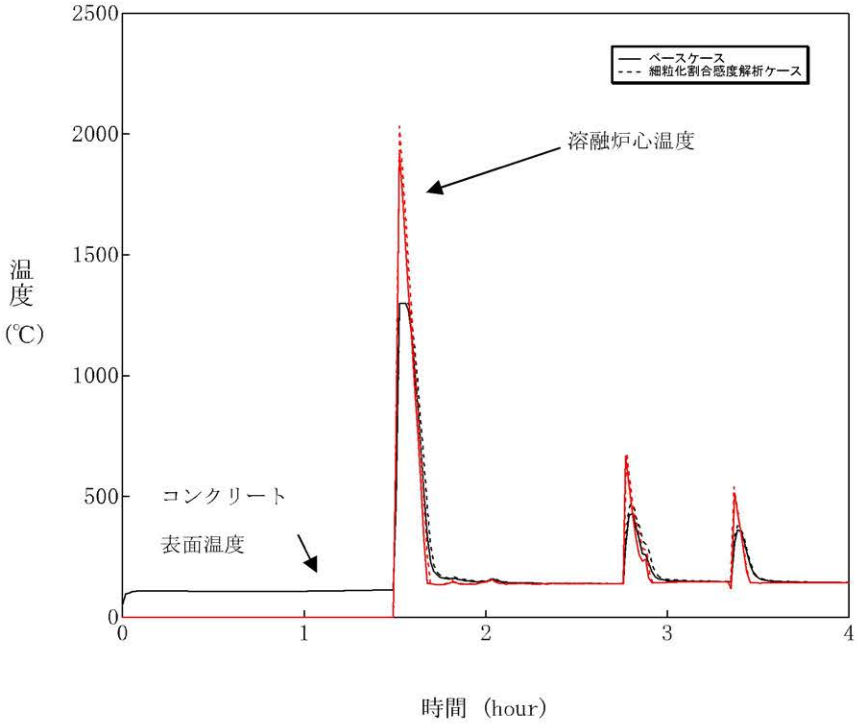


図 5-2-7 溶融炉心の細粒化割合感度解析（７）

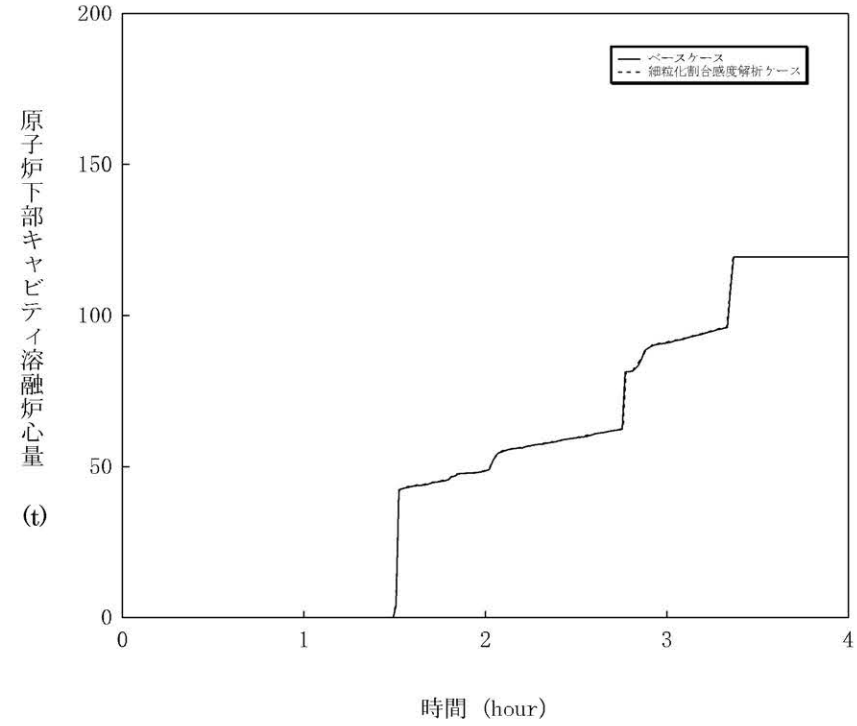


図 5-2-8 溶融炉心の細粒化割合感度解析（８）

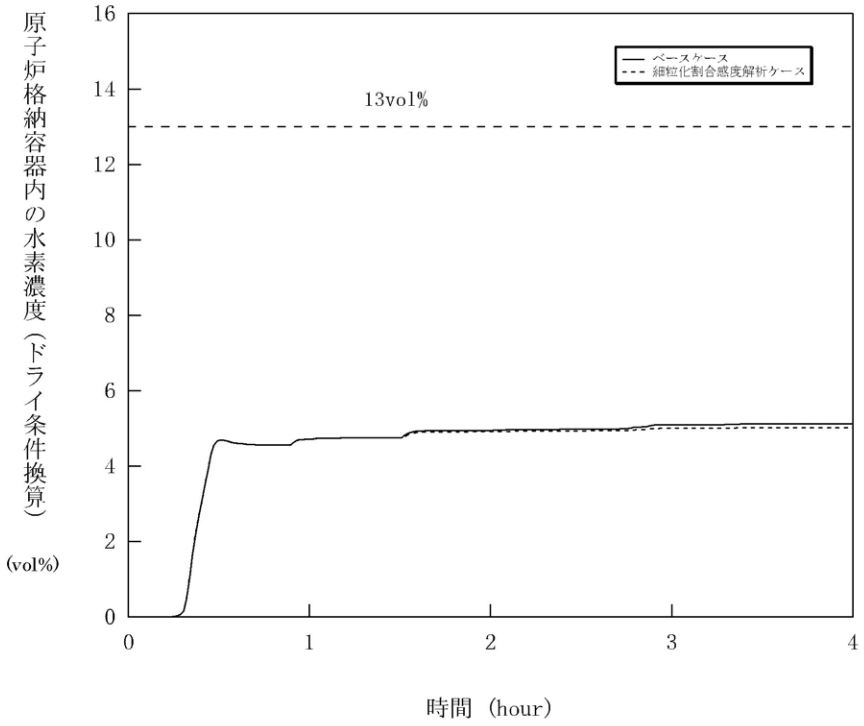


図 5-2-9 溶融炉心の細粒化割合感度解析（９）

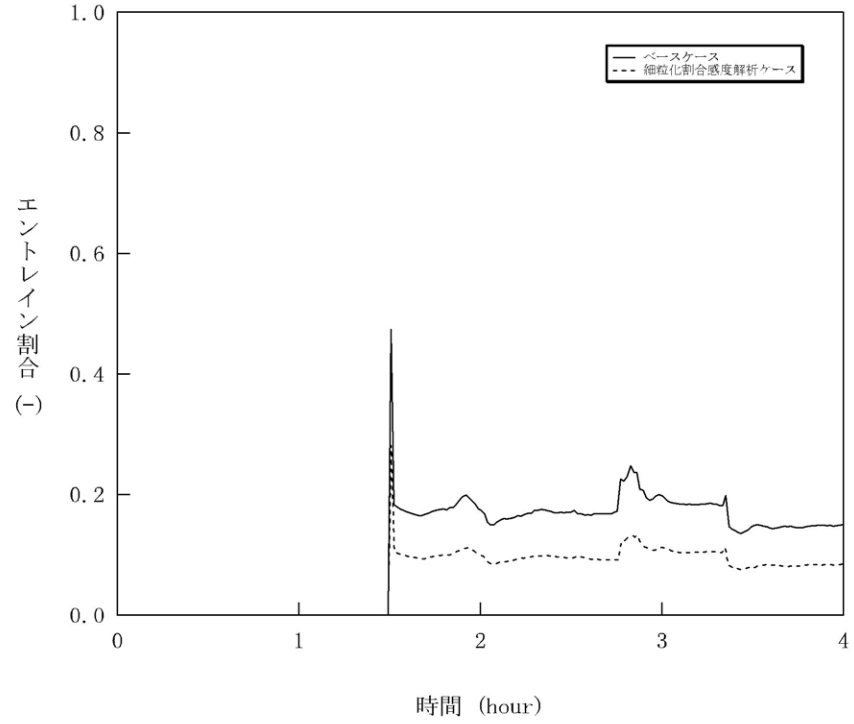


図 5-2-10 溶融炉心の細粒化割合感度解析（１０）

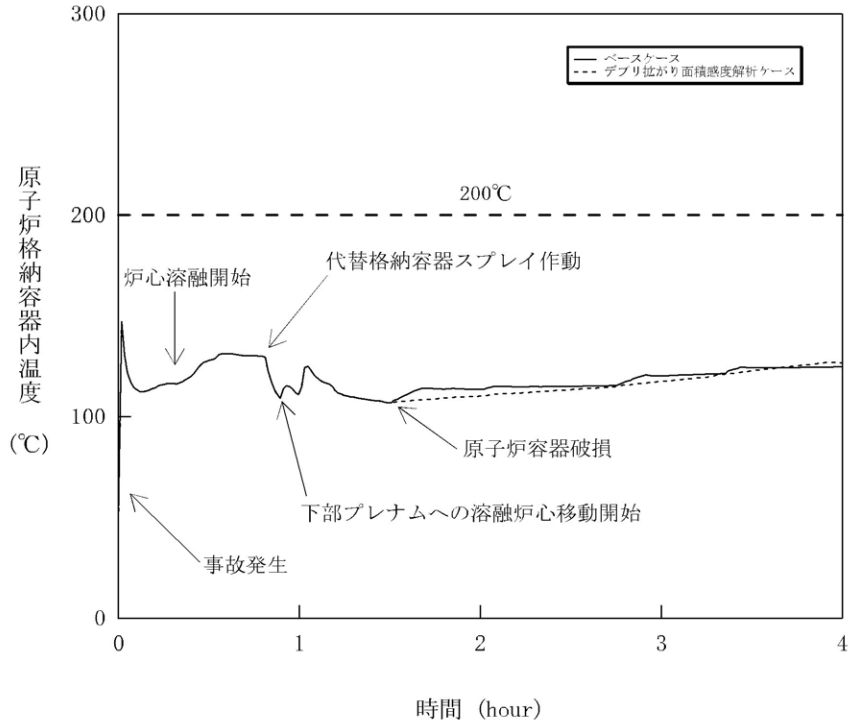


図 5-3-1 溶融炉心の拡がり面積感度解析（１）

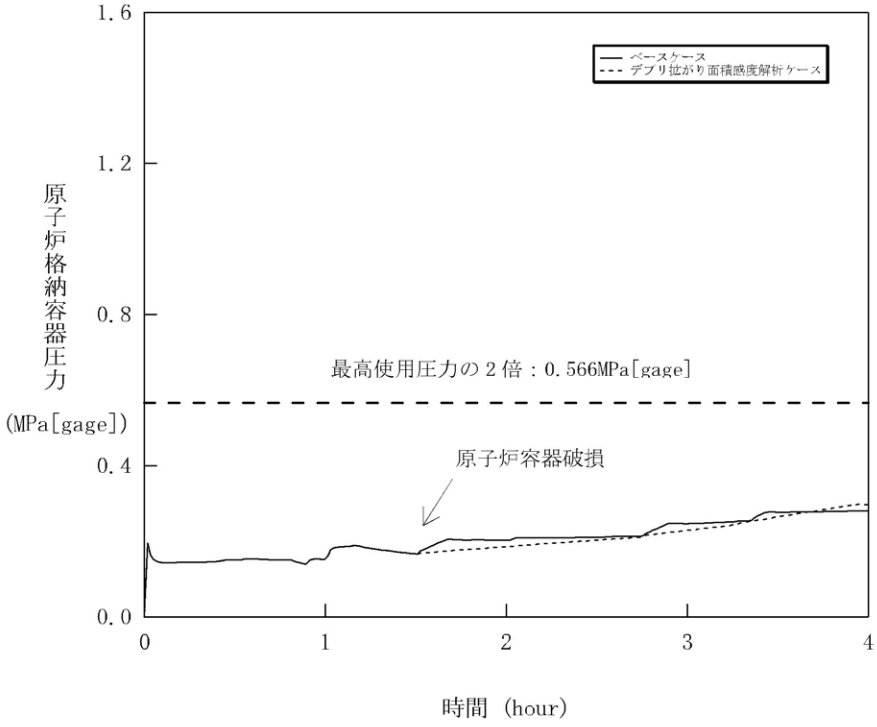


図 5-3-2 溶融炉心の拡がり面積感度解析（２）

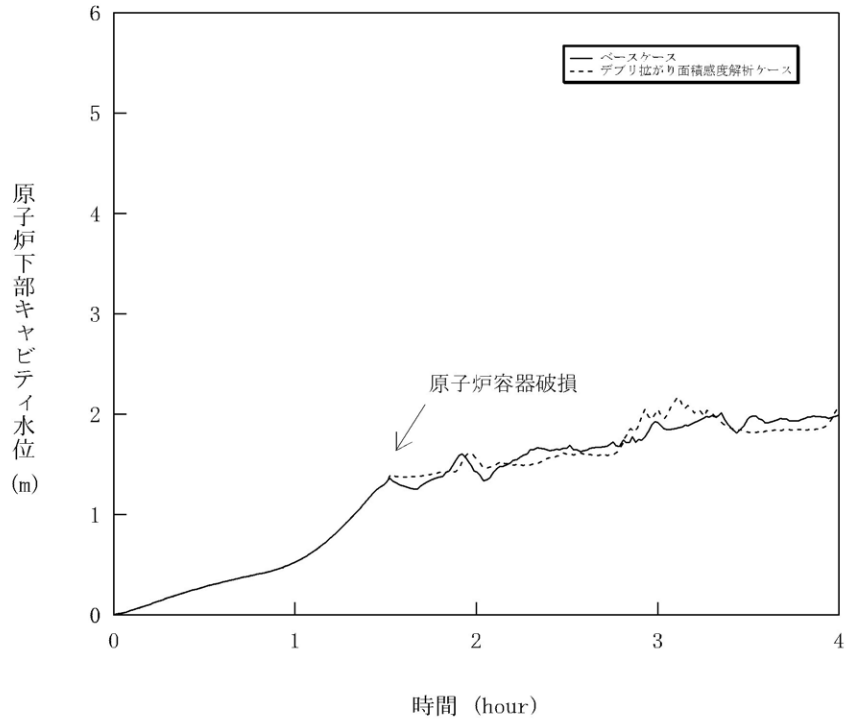


図 5-3-3 溶融炉心の拡がり面積感度解析（３）

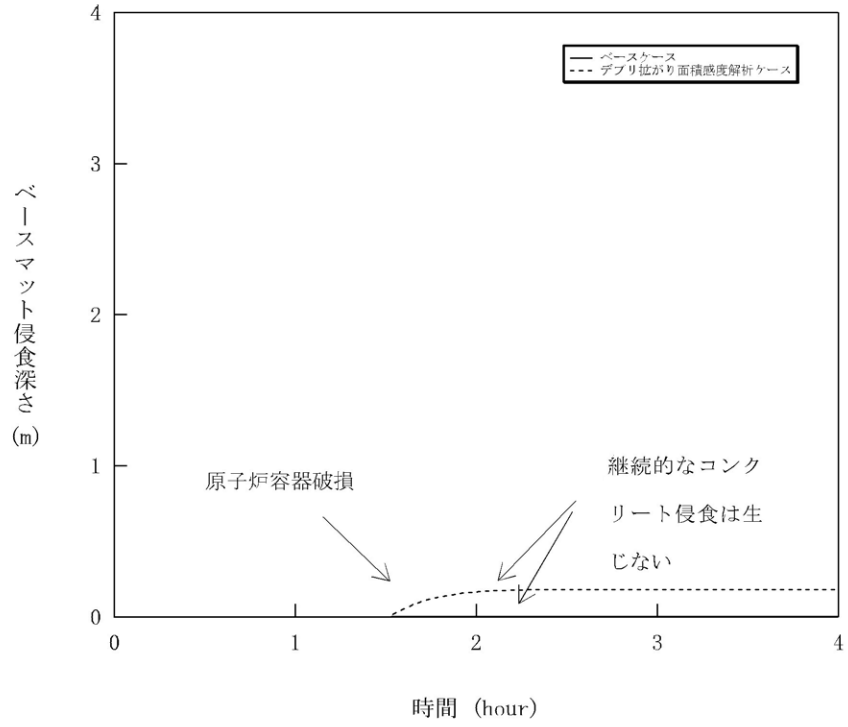


図 5-3-4 溶融炉心の拡がり面積感度解析（４）

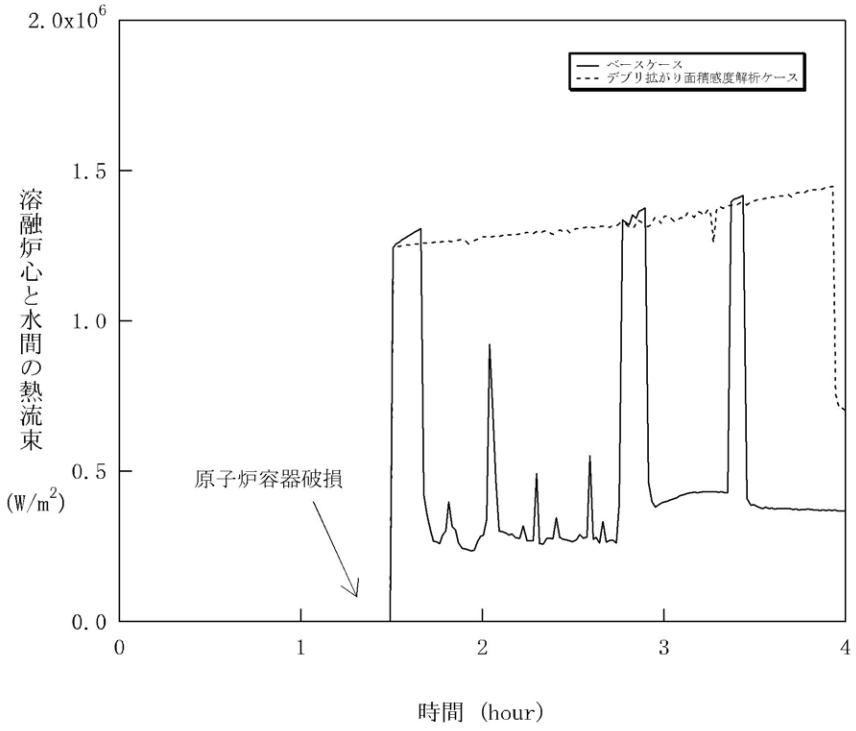


図 5-3-5 溶融炉心の拡がり面積感度解析（５）

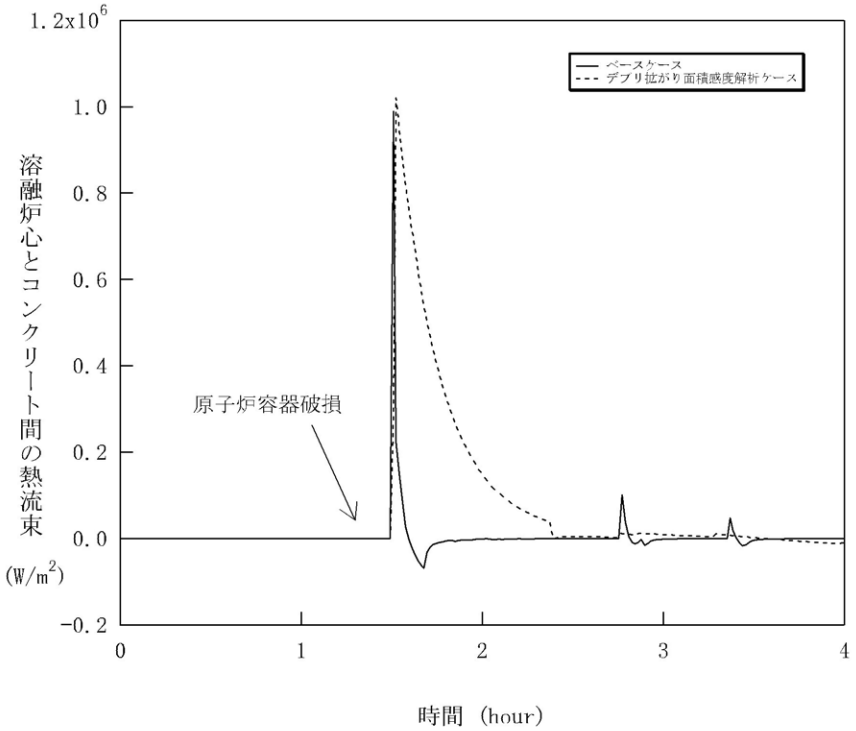


図 5-3-6 溶融炉心の拡がり面積感度解析（６）

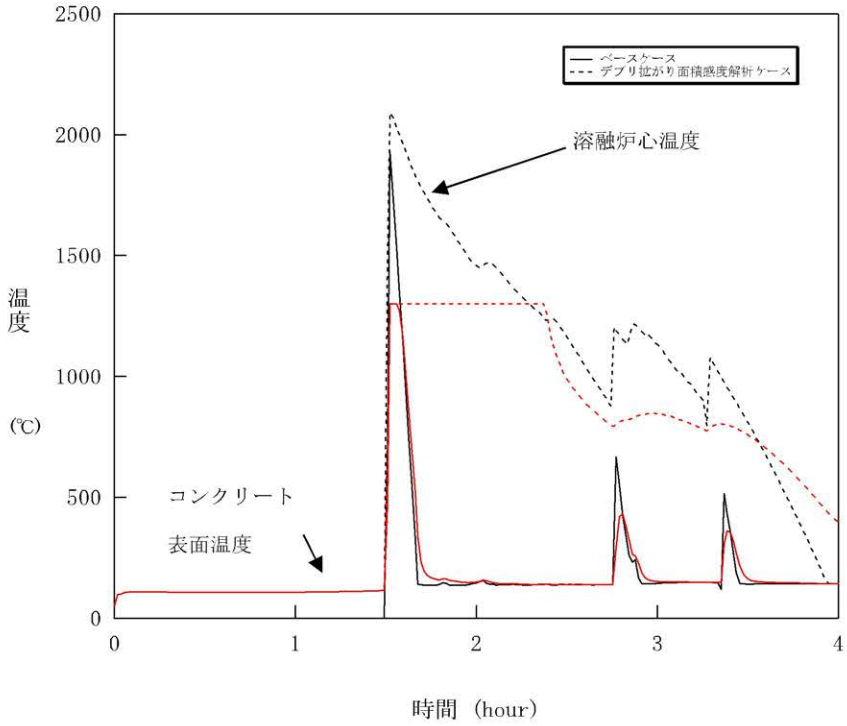


図 5-3-7 溶融炉心の拡がり面積感度解析（7）

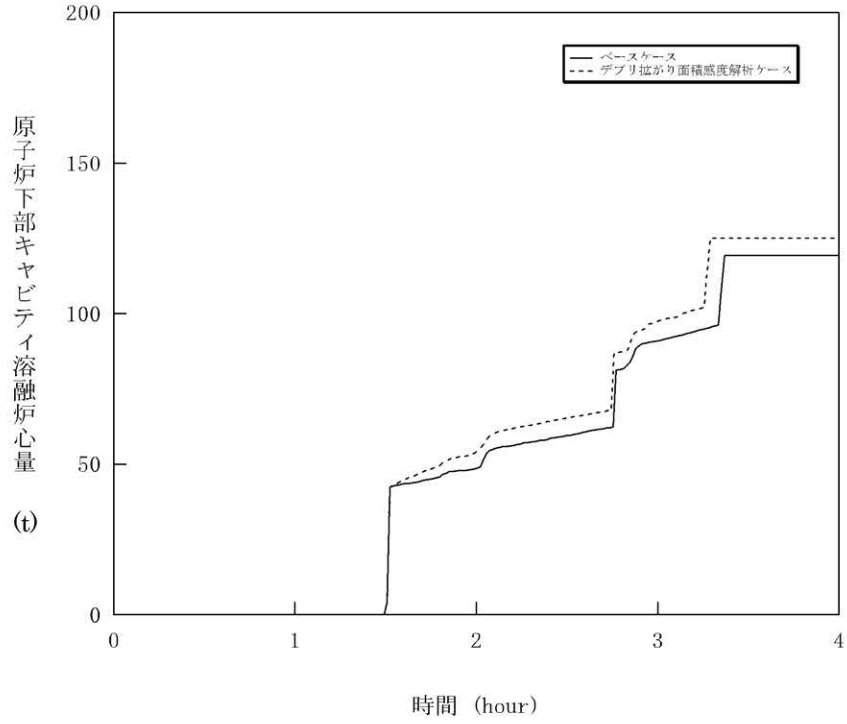


図 5-3-8 溶融炉心の拡がり面積感度解析（8）

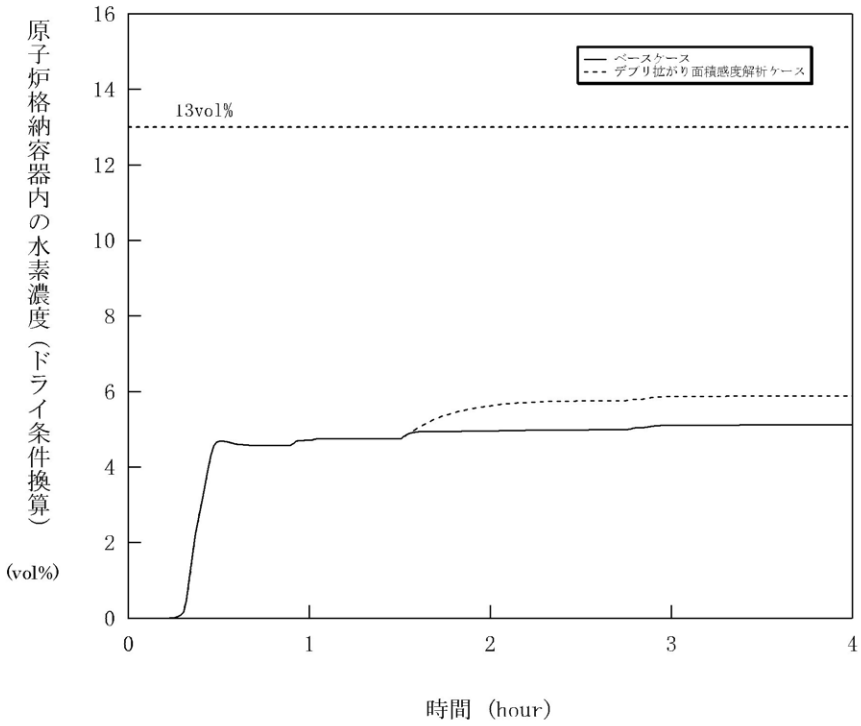


図 5-3-9 溶融炉心の拡がり面積感度解析（９）

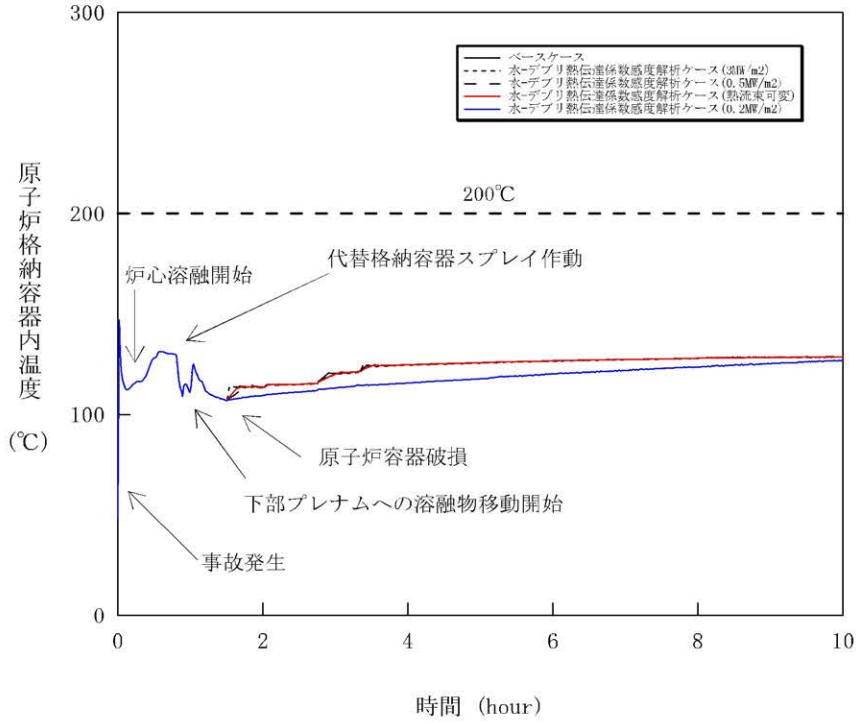


図 5-4-1 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（１）

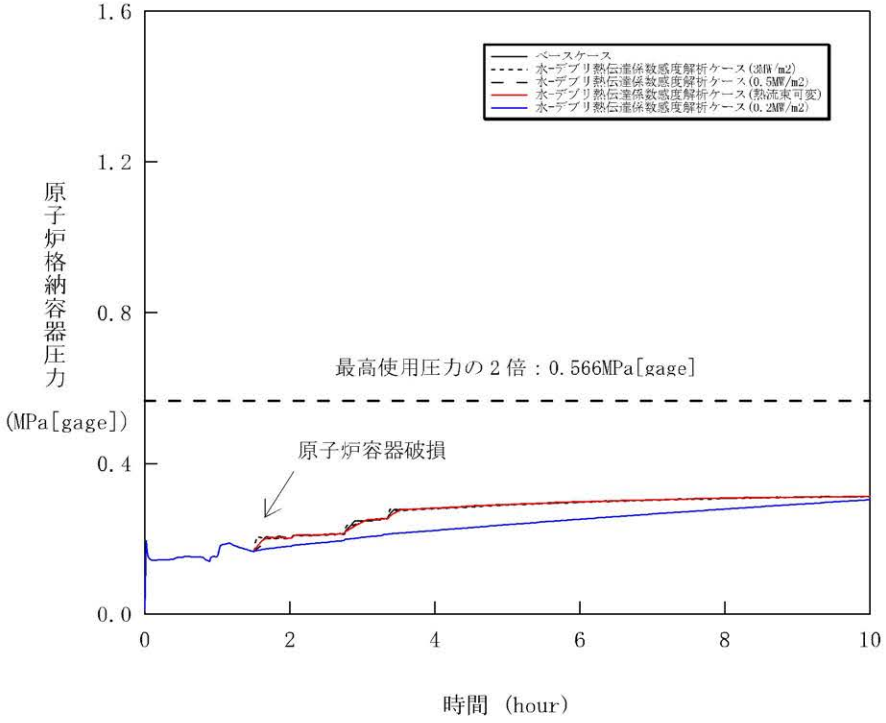


図 5-4-2 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（２）

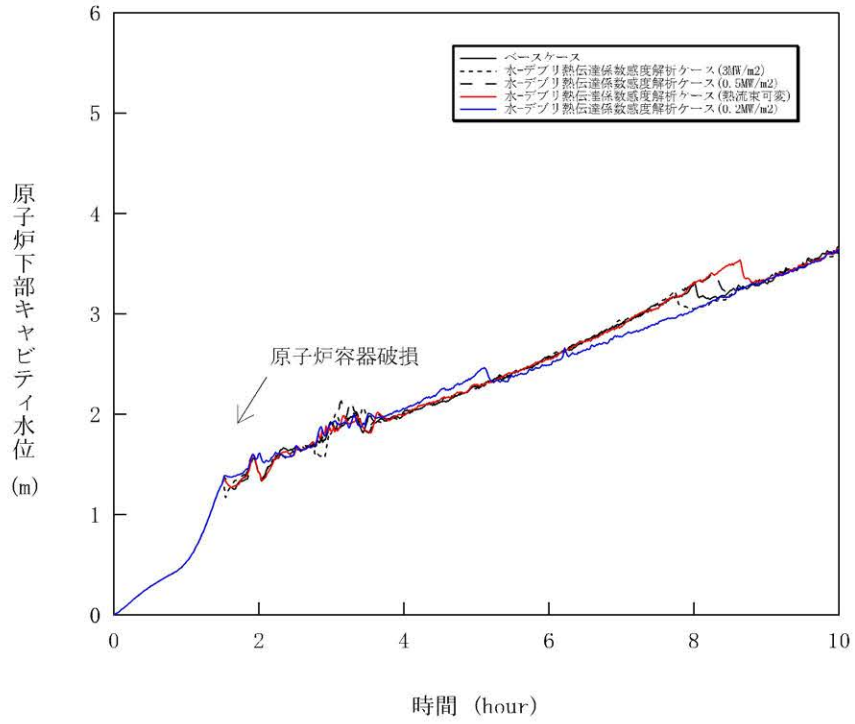


図 5-4-3 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（３）

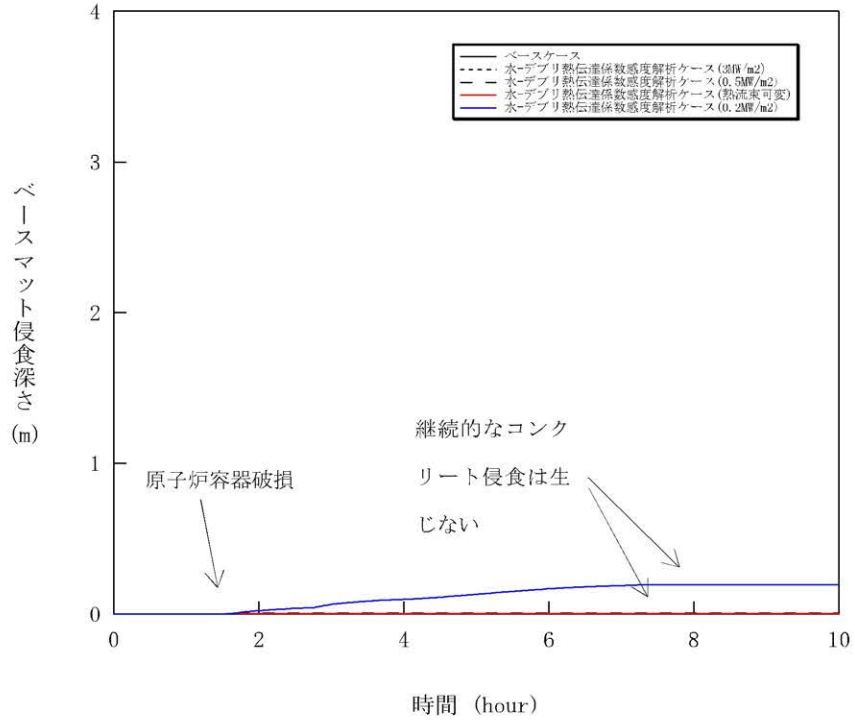


図 5-4-4 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（４）

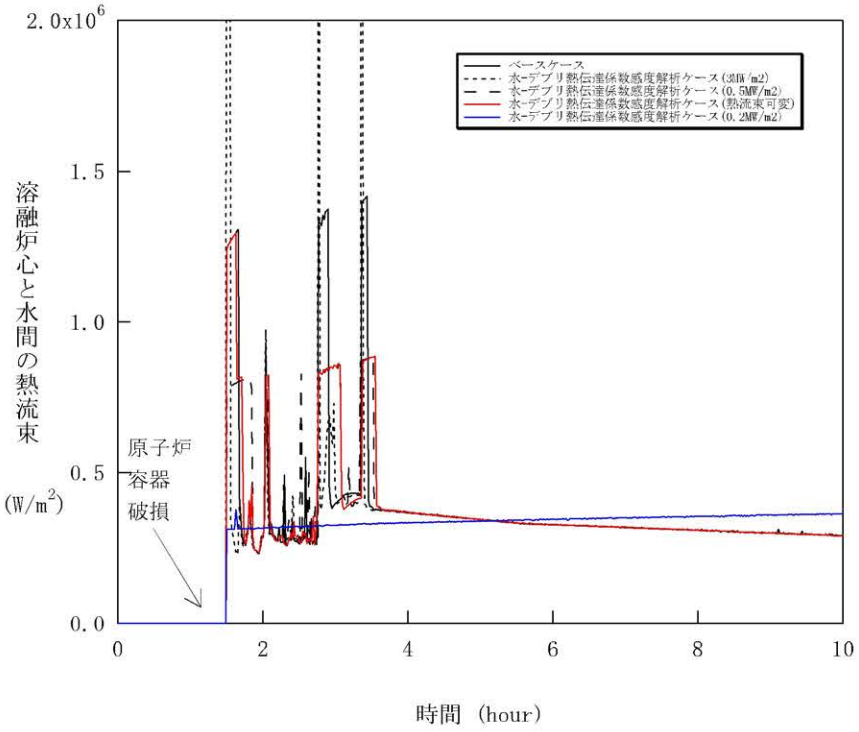


図 5-4-5 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（５）

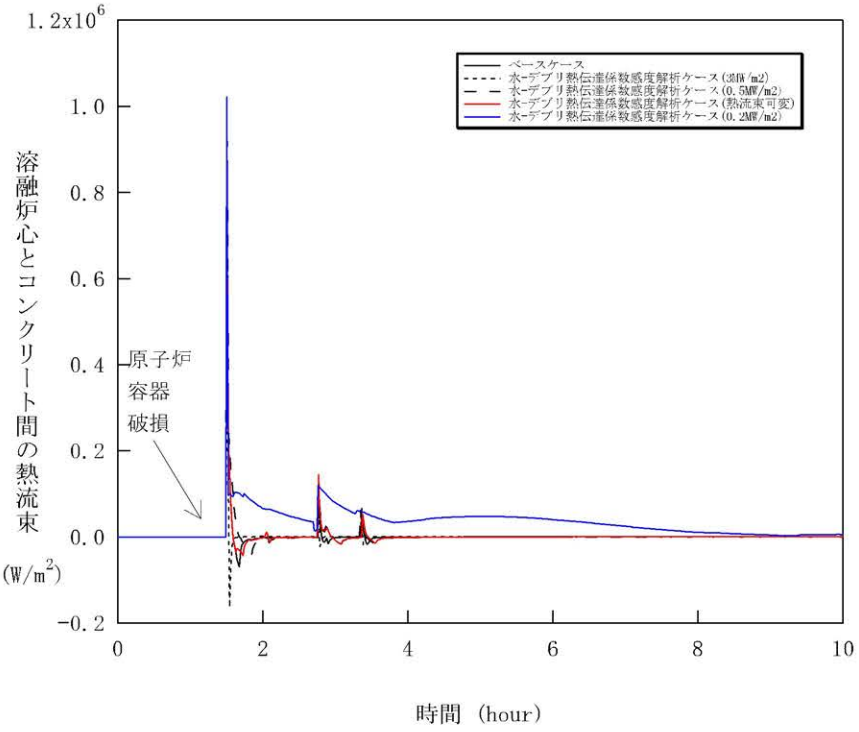


図 5-4-6 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（６）

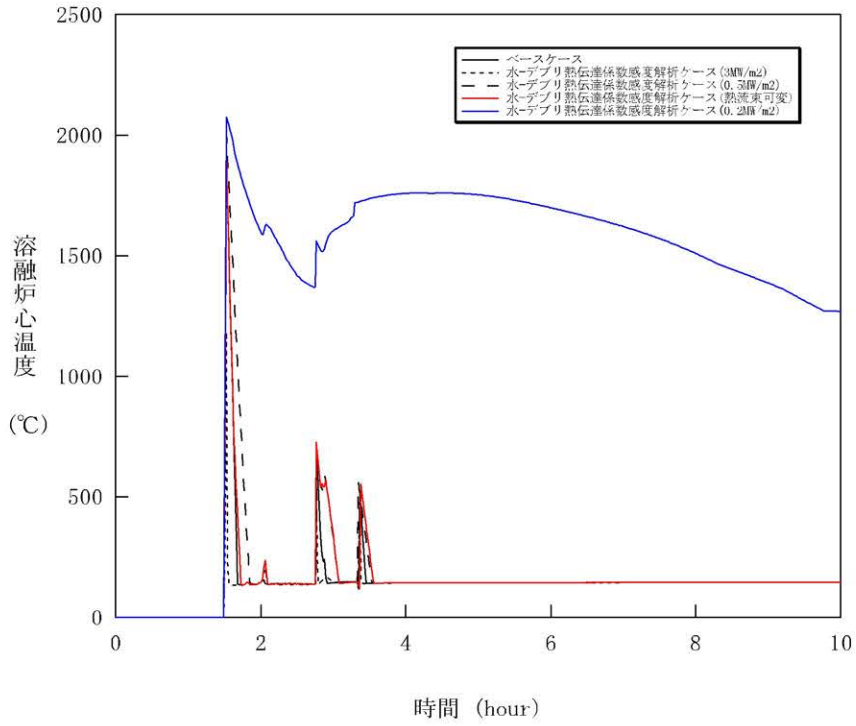


図 5-4-7 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（７）

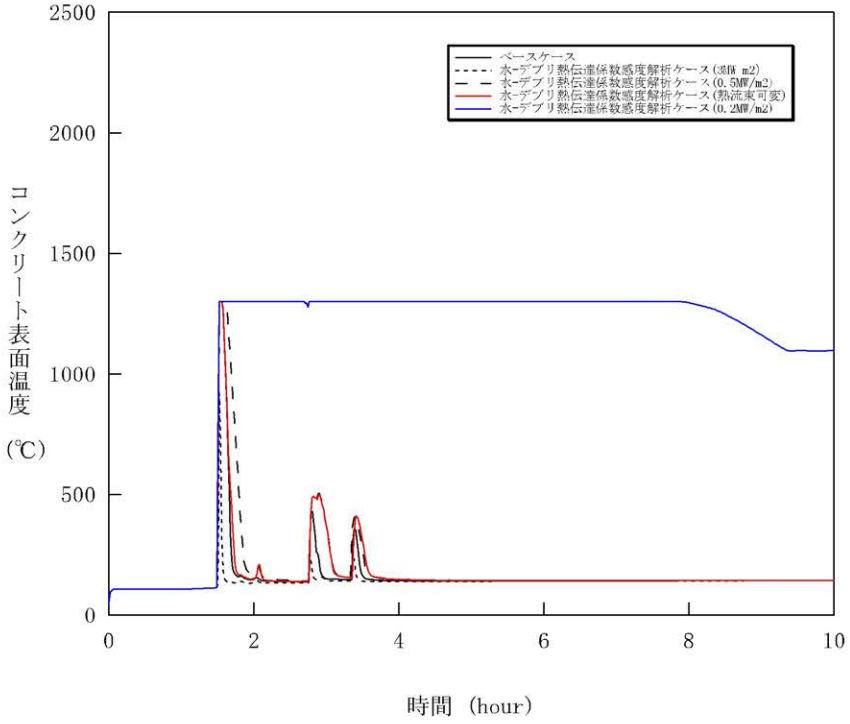


図 5-4-8 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（８）

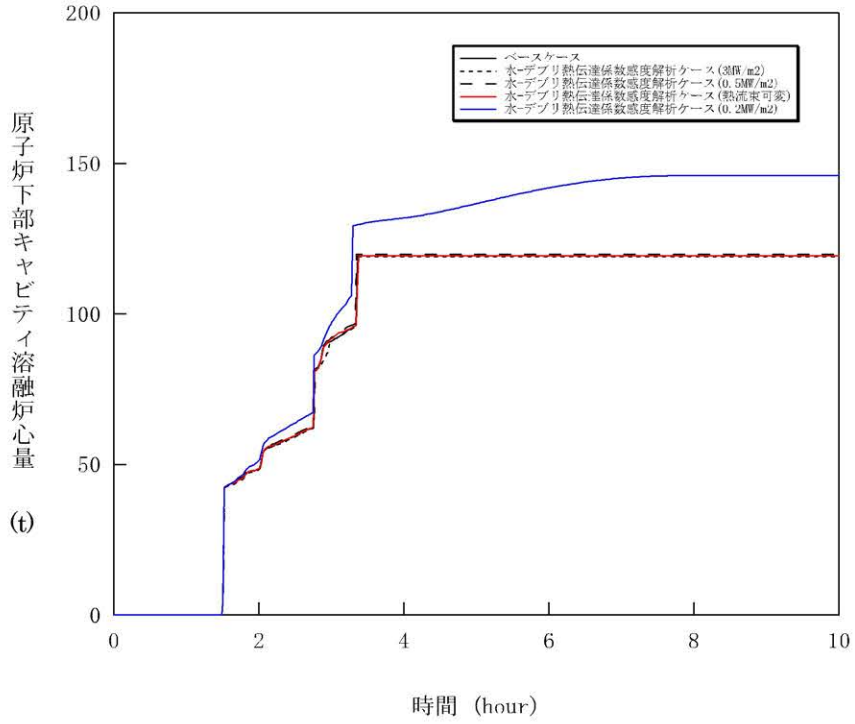


図 5-4-9 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（９）

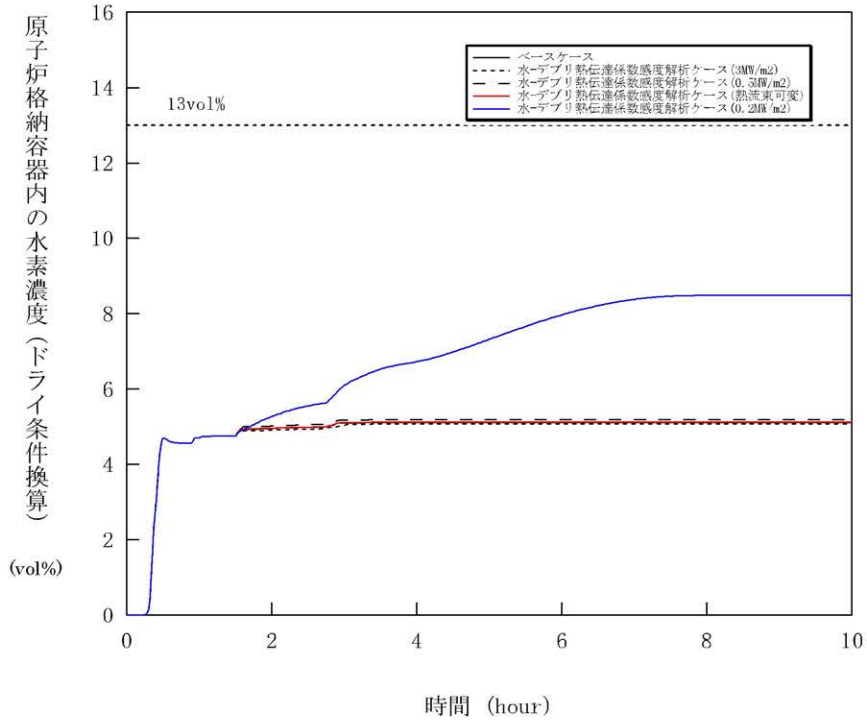


図 5-4-10 水－溶融炉心間の熱伝達係数感度解析（１０）

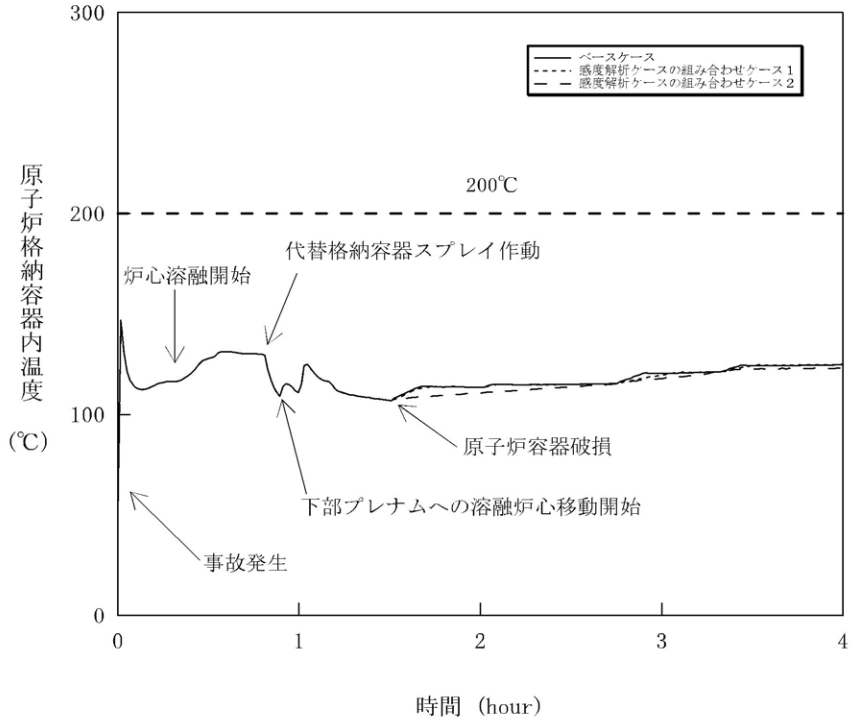


図 5-5-1 感度解析ケースの組合せ（１）

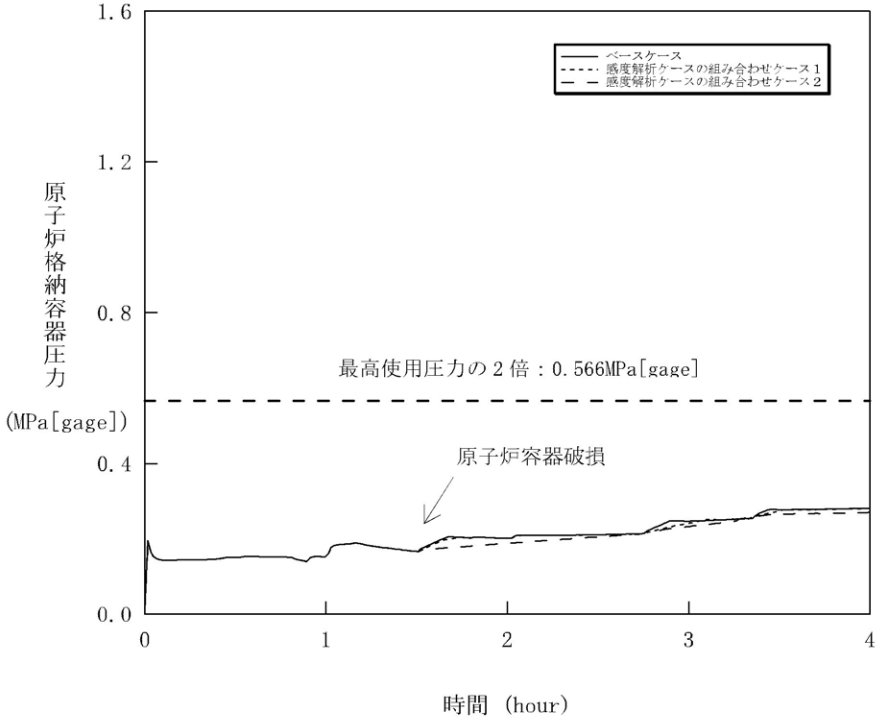


図 5-5-2 感度解析ケースの組合せ（２）

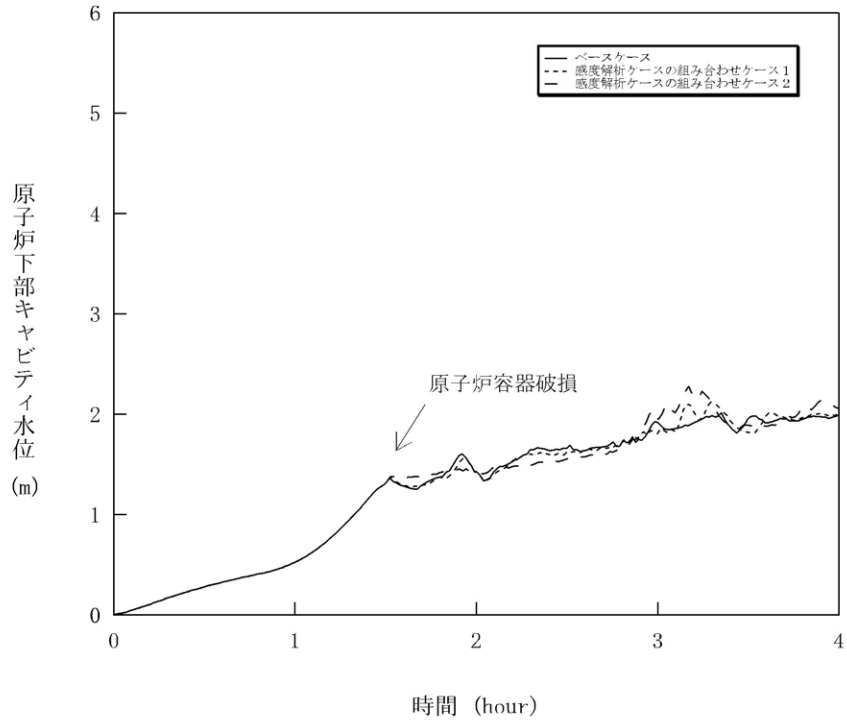


図 5-5-3 感度解析ケースの組合せ（3）

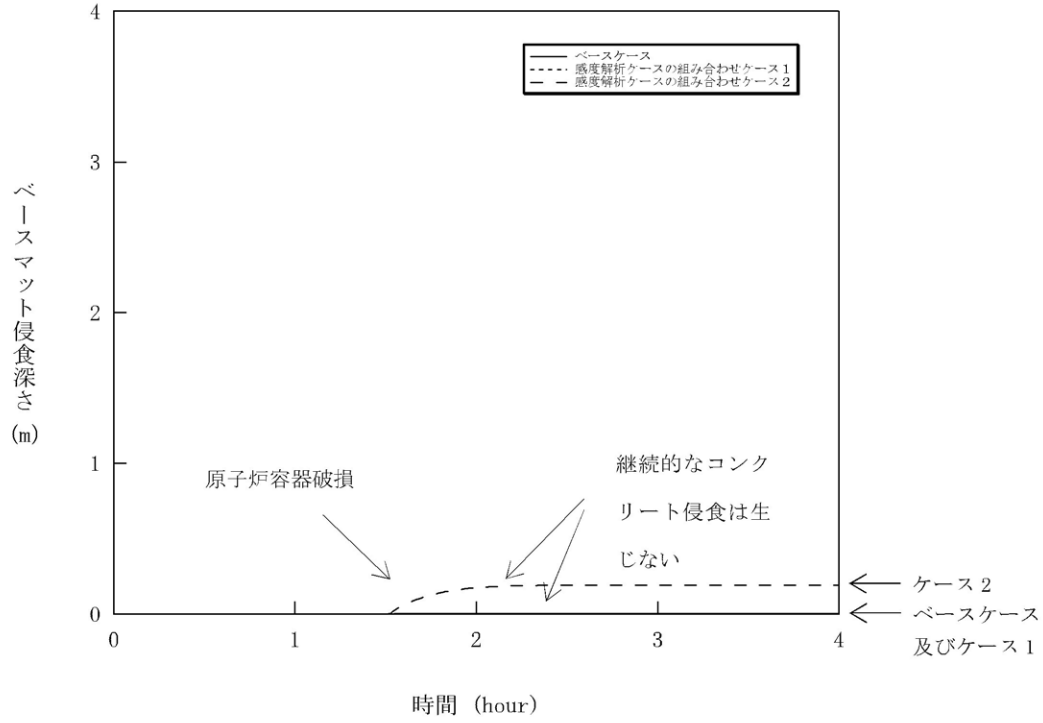


図 5-5-4 感度解析ケースの組合せ（4）

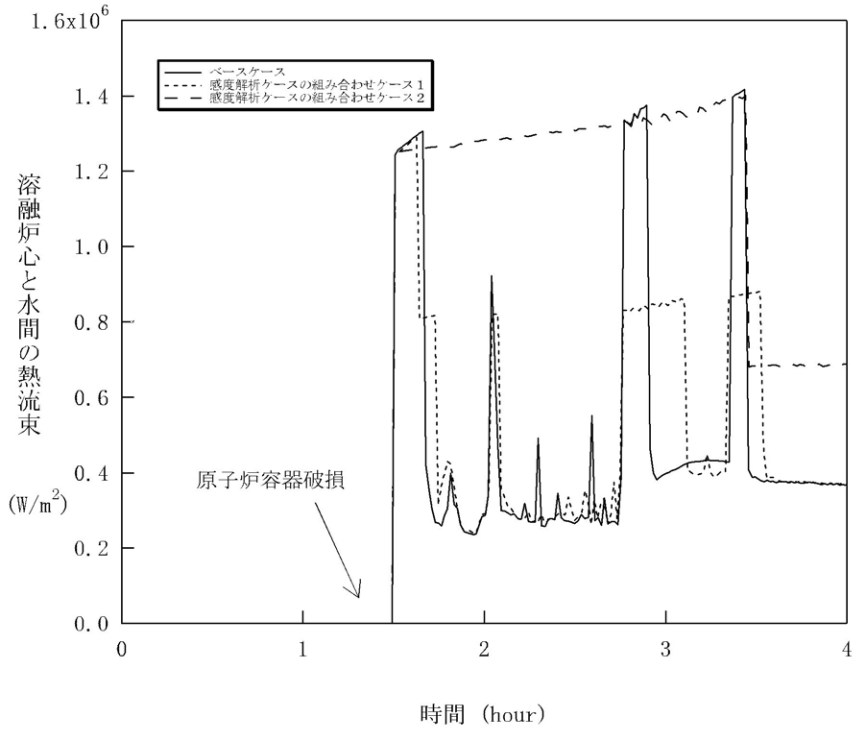


図 5-5-5 感度解析ケースの組合せ（5）

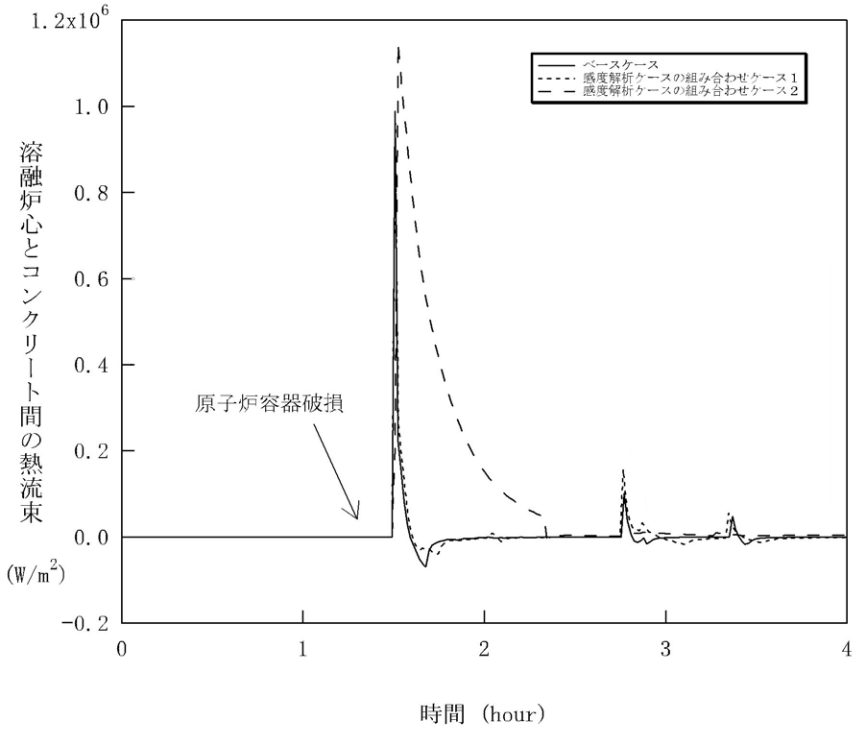


図 5-5-6 感度解析ケースの組合せ（6）

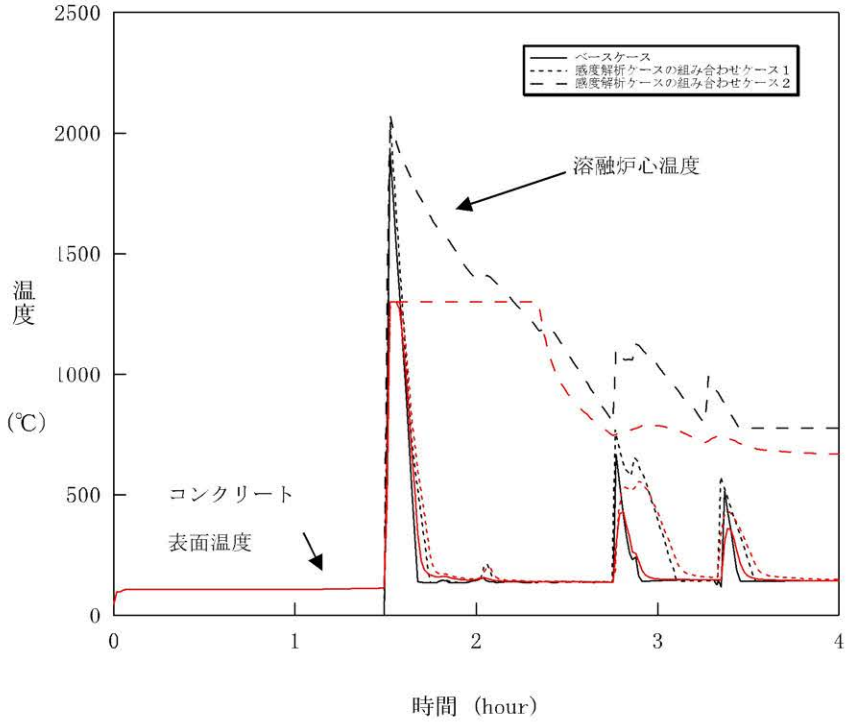


図 5-5-7 感度解析ケースの組合せ（7）

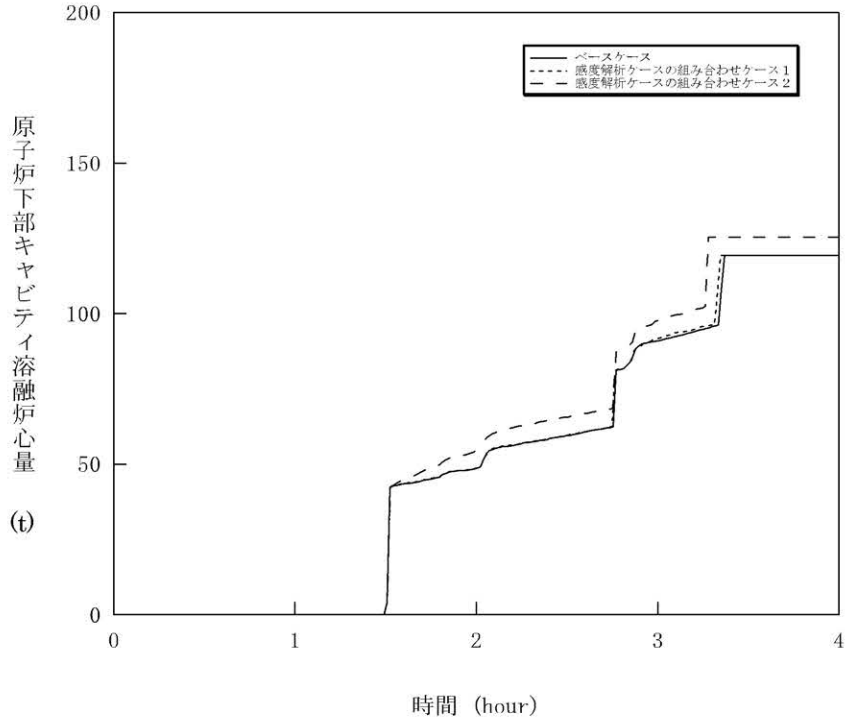


図 5-5-8 感度解析ケースの組合せ（8）

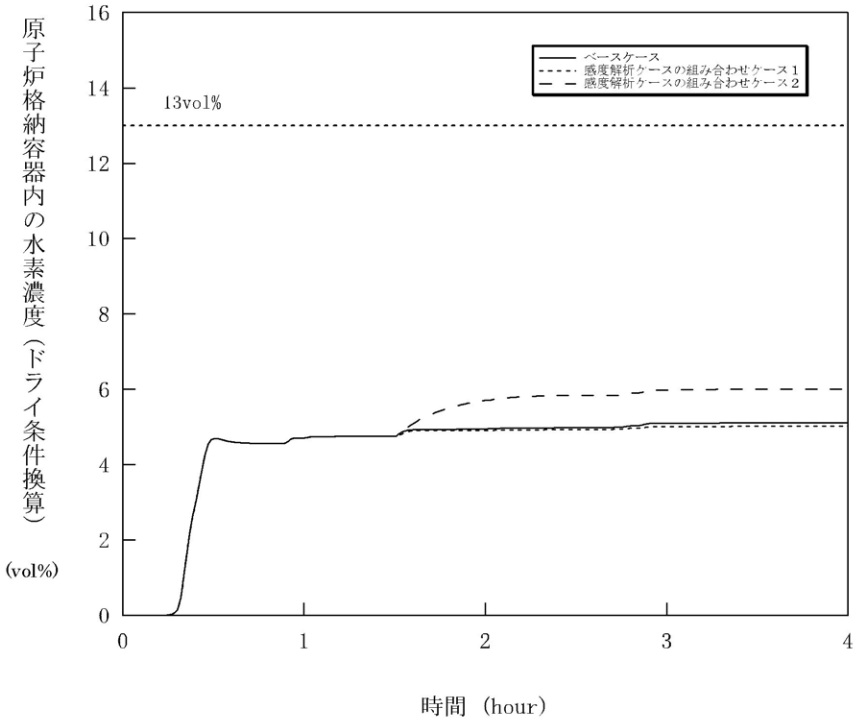


図 5-5-9 感度解析ケースの組合せ（９）

6 まとめ

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

- 原子炉下部キャビティ水深
- Ricou-Spaldingのエントレインメント係数
- 溶融炉心の拡がり
- 水ー溶融炉心間の熱伝達係数

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

溶融炉心の拡がりについては、溶融炉心が過熱度を持ち連続的に原子炉下部キャビティ床へ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考えられるが、溶融炉心が原子炉下部キャビティ水中に落下した際に冷却が進み局所的に堆積するよう仮定して解析を行った場合でも、コンクリート侵食は約18cmにとどまる結果となった。

感度解析パラメータを組み合わせた場合の感度解析でもコンクリート侵食は約19cmとなったが、原子炉下部キャビティ底面のコンクリート厚さは数メートルであり、侵食深さは十分小さいことが確認できた。この規模のコンクリート侵食が発生する場合でも、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（PAR及びイグナイタ）による処理が可能なレベルに収まっている結果となっている。また、MCCIにより発生する水素は、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。

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

添付 3-1　溶融炉心の水中での拡がり評価について

1.はじめに

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

2.水中での拡がり挙動に関する実験的知見と考察

スウェーデン王立工科大学（KTH）では、水中での溶融物拡がり挙動を調べる PULiMS 試験[1]を実施している。この実験では、浅い水プールへ溶融した Bi_2O_3-WO_3 合金を流入させ、その拡がり挙動を観察した。水中へ流入した溶融物は、水との熱伝達により徐々に固化し、ある程度床上を拡がる結果となった。固化した溶融炉心層は３層を形成し、溶融炉心層下面とコンクリートは密着せずギャップが存在しており（図 2.1)、水又は蒸気が存在していた可能性がある。３層の最下層は薄い 1.5～2mm のケーキ（クラスト）層で空隙無し、中間層は割れ目や細長い孔を含む。最上部は不規則な構造で高多孔性である。

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

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

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

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

CEA/DRN/DTP で行われた CORINE 実験[6]では、低融点合金を模擬物質として使用して、

底部でのクラスト形成を防止するために底部を熱くした試験が実施された。その結果、先端が著しく速く進展したことが示され、底部クラストによる減速効果が示された。

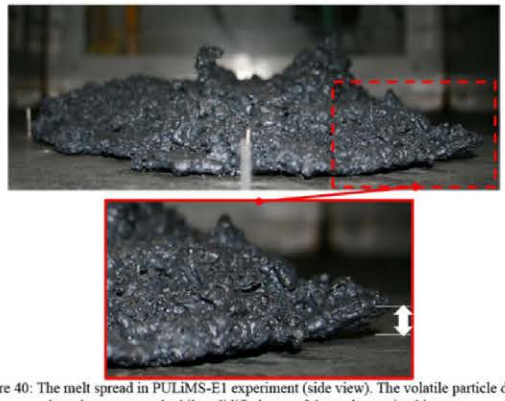


Figure 40: The melt spread in PULiMS-E1 experiment (side view). The volatile particle debris have been removed while solidified core of the melt remained intact.

図 2.1　PULiMS 試験において水中に落下させた溶融物

上記の水中での拡がり実験に対する実験条件を表 2.1 に整理する。

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

① 原子炉下部キャビティでの溶融炉心の拡がり挙動について

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

② 原子炉下部キャビティでの溶融炉心の形状について

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

表 2.1　実験条件の整理

	PULiMS 実験 (Sweden)	S3E 実験 (Sweden)	BNL 実験 (USA)	SPREAD 実験 (Japan)	CORINE 実験 (France)	KATS 実験 (Germany)
実験装置の特徴	2D	1D、2D	1D、2D	1D、2D	2D（19° 円分）	1D、2D
溶融物材	Bi2O3-WO3、水 B2O3-CaO、水	ウッドメタル、水 NaNO3-KNO3、 オイル	鉛、水	Steel、水	低融点合金、水	Iron、水 Oxide、水
溶融物体積、質量	2.7～3 m^3	3～19 liters	～1 liters	1～15 liters	～50 liters	140～160kg
溶融物融点	870～1027℃	80～120℃ 280～364℃	不明（鉛の融点： 327.46℃）	1,584～1,625K	不明	2,450K
溶融物の流入方法	ジェット 直径 20mm	底部流入口*	底部流入口*	底部流入口* 入口幅 0.05m	底部流入口*	底部流入口*
水深	0.2m	4.5～7.5cm	不明	不明	不明	1cm

*）非ジェット形状の底部からの流入

3.水中での拡がり挙動の概要及び相関式

(1) 水中での溶融炉心拡がり挙動の概要

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

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

・拡がり駆動力

溶融炉心と水との密度差により、溶融炉心には水中を拡がる駆動力が生じる。

・拡がり抑制力

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

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

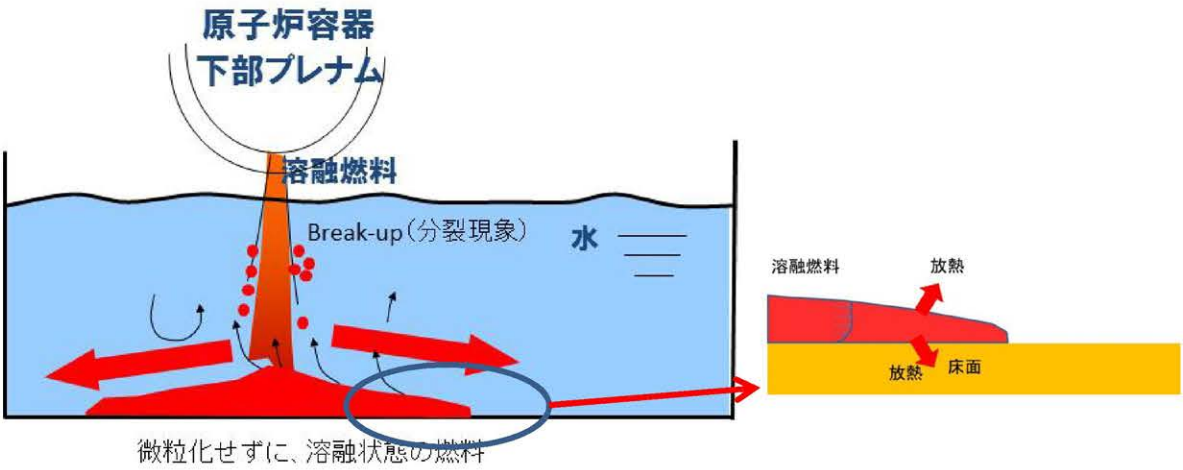


図 3.1　溶融炉心の落下から拡がりに至る挙動

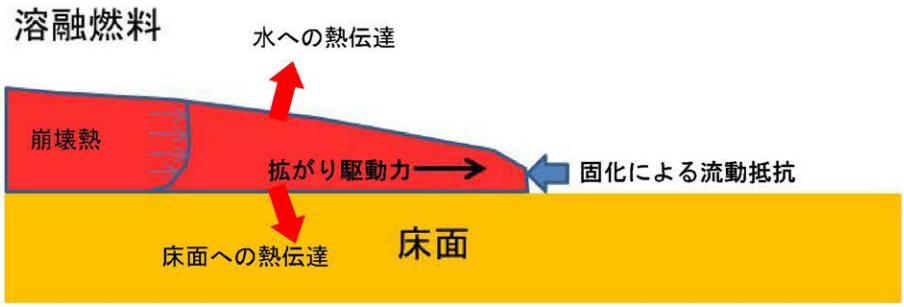


図 3.2　溶融炉心の拡がりに係る熱伝達及び流体力学的挙動

(2)水中での溶融炉心拡がり長さと時間の相関式[7][8][9]

文献[7]では、溶融炉心の水中での拡がり挙動を以下のとおり定式化している。

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

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

δ_{sp}：溶融炉心の最終厚さ

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

C：比例定数

T：溶融炉心拡がり無次元時間$\left(=\tau_{conv}/\tau_{solid}\right)$

N：重力ー慣性力支配流れの時１、重力ー粘性力支配流れの場合$=\left(\frac{\nu_{mac}}{m\vartheta_{cap}}\right)^{2/3}\frac{\rho_l^{4/3}}{\rho_l^2}$

τ_{conv}：溶融炉心拡がり特性時間(s)$=\left(\frac{r_{sp}}{\beta_v}\right)$

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

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

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

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

$\beta_{i,v}$：デブリ広がり係数 $\beta_v=\left(\frac{\rho g\Sigma}{\nu}\right)^{0.125}\beta_i=0.84(\beta G)^{0.25}$

r_{sp}：幾何的に可能な最大拡がり径(m)

ΔT_{sup}：溶融炉心過熱度(K)

$C_{p,m}$：溶融炉心比熱(J/kg/K)

q_{up}：溶融炉心上面の熱流束（放射及び対流熱伝達）(W/m^2)

q_{dn}：溶融炉心下面の熱流束(対流熱伝達) (W/m^2)

q_v：単位体積当たりの崩壊熱(W/m^3)

H_f：溶融炉心の溶融潜熱(J/kg)

η：有効潜熱割合(-)

σ：溶融炉心表面張力(N/m)

ρ_m：溶融炉心密度(kg/m^3)

ρ_w：水の密度(kg/m^3)

$\acute{g}$：水中における重力加速度の補正$(=g(\rho_m-\rho_w)/\rho_m)$ (m/s^2)

g：重力加速度(m/s^2)

ν：溶融炉心の動粘性係数（m^2/s)

V_{tot}：溶融炉心体積(m^3)$=\frac{m(1-f_m)}{\acute{\rho}_m}$

m：溶融炉心質量(kg)

G：エントレインされなかった連続体溶融炉心の体積流量(m^3/s) $=\frac{V_{tot}}{t_{rel}}$

t_{rel}：**原子炉容器からのデブリ放出時間**(s)

f_m：溶融炉心落下時のエントレイン割合(-)

$\acute{\rho}_m$：有効溶融炉心密度(kg/m^3) $=\rho_m(1-\varepsilon_m)$

ε_m：溶融炉心ボイド率(-)

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

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

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

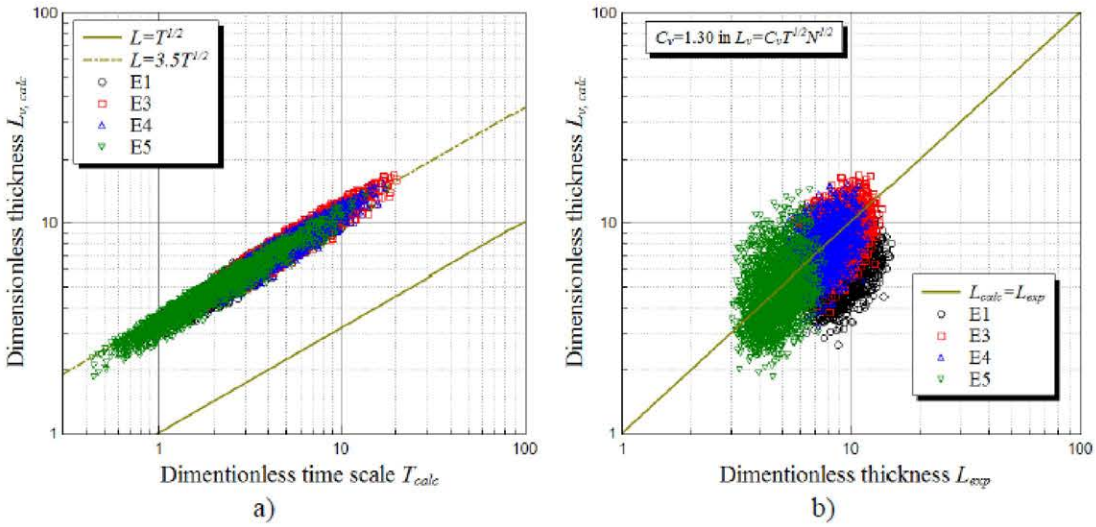


図 3.3　拡がりモデルと PULiMS 試験結果との比較

4.実機評価

これまでの実験の知見から、デブリジェットが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冷却されず高温のまま床に到達する場合には、溶融炉心の拡がりは大きくなり、反対に、溶融炉心が落下時に細粒化などにより冷却が進む場合には、溶融炉心の拡がりは小さくなると考えられる。図 4.1 及び図 4.2 にそれぞれの場合の模式図を示す。感度解析では、これらのケースに対する溶融炉心の拡がり面積を算出し、ＭＡＡＰコードの解析の入力条件とする。

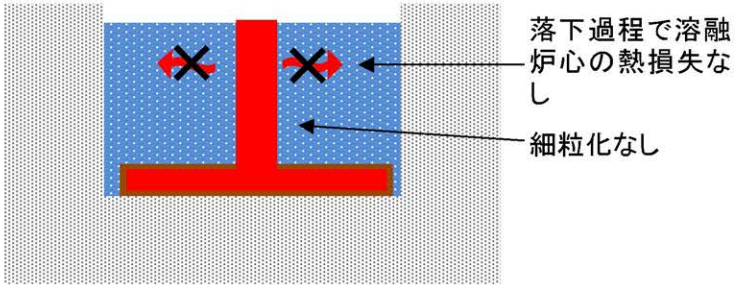


図 4.1　落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース
（溶融炉心からの除熱が進まず、固化割合が小さいため拡がりが大きくなる。）

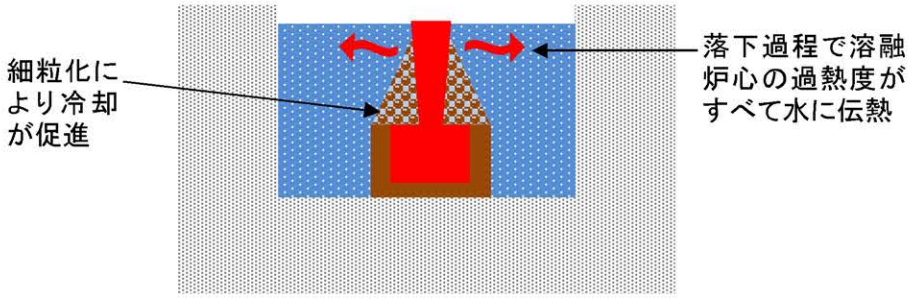


図 4.2　落下時に細粒化などにより冷却が進むケース
（溶融炉心からの除熱が進み、固化割合が大きくなるため拡がりが抑制される。）

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

前者のケースでは、デブリジェットが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、溶融炉心の冷却が進まないような条件として、細粒化無しとし、また、落下過程における溶融炉心ー原子炉下部キャビティ水間の熱伝達による溶融炉心の熱損失も無しとしている。

一方、後者のケースでは、デブリジェットが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、溶融炉心の冷却が進むような条件として、細粒化割合はSaitoの相関式を用い、また、溶融炉心の熱損失については、溶融炉心の過熱度分がすべて水と熱交換するとしている。

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

表4.1　溶融炉心放出時のパラメータ

項目	値
メルト質量 [kg]	48,600
放出時間 [s]	100
メルト温度 [K]	2,554.05
冷却水温度 [K]	408.05
メルト密度 [kg/m^3]	8,463.1
冷却水密度 [kg/m^3]	931
ジェット径 [m]	0.4
ジェット粘性係数 [Pa*s]	10.5
ジェット表面張力 [N/m]	1
メルト比熱 [J/kg/K]	484.6
冷却水比熱 [J/kg/K]	4,280
単位質量当たりの崩壊熱 [W/kg]	264.2
固化温度 (Tsol) [K]	2,308.25
液化温度 (Tliq) [K]	2,308.25
メルト融解熱 [J/kg]	326,415

表4.2　各ケースに対する主な入力パラメータ

	落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース	落下時に細粒化などにより冷却が進むケース
メルト細粒化割合［-］	0.0	0.66
ジェット冷却による過熱度の熱損失 [K]	0	245.8

表4.3　溶融炉心の拡がり評価結果

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