

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

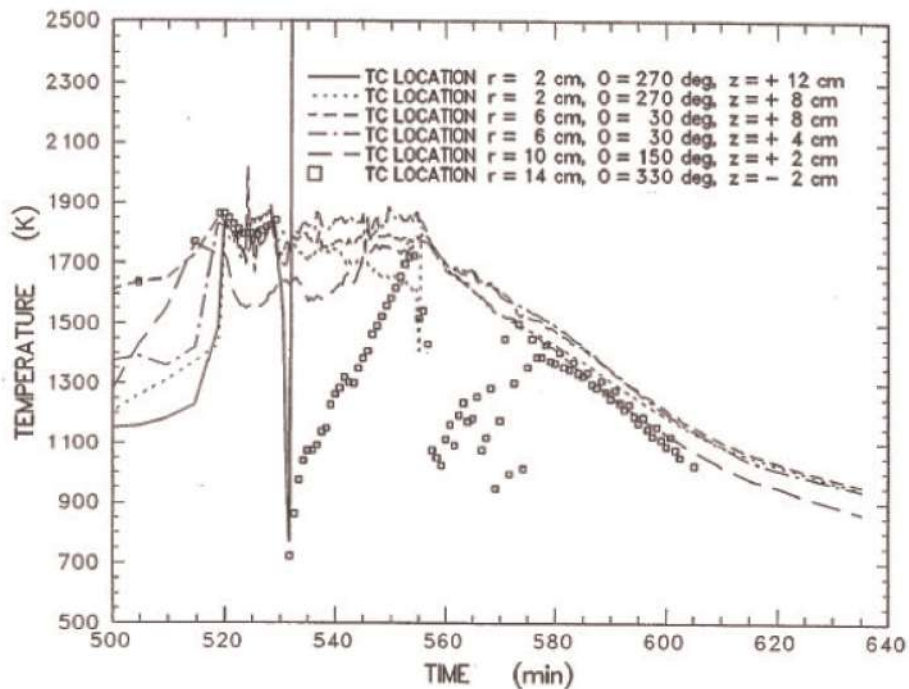


図 3.1-15 WETCOR 実験 メルト温度履歴

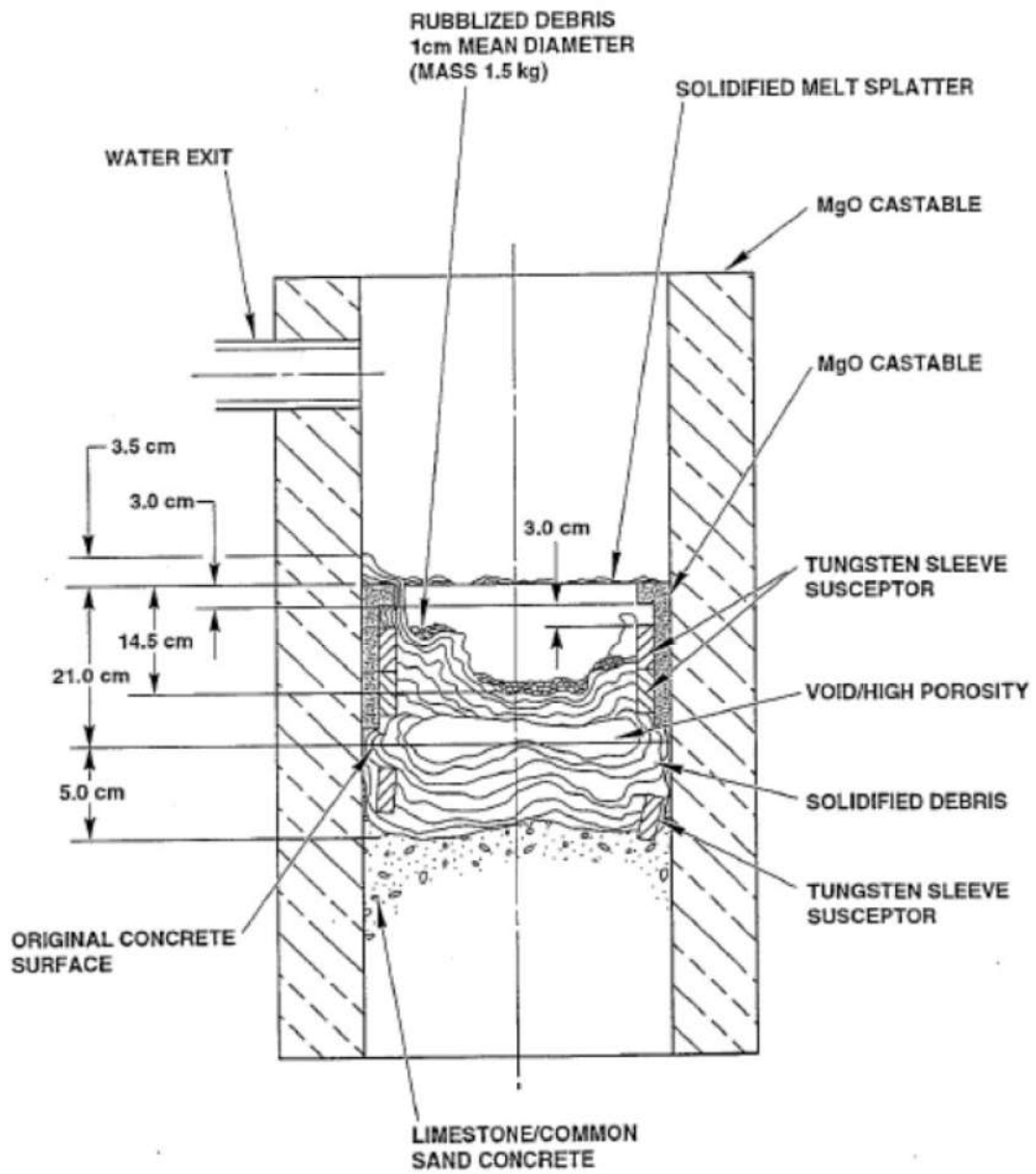


図 3.1-16 WETCOR 実験 試験後テスト部状態

表 3.1-3 MACE 実験条件一覧

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

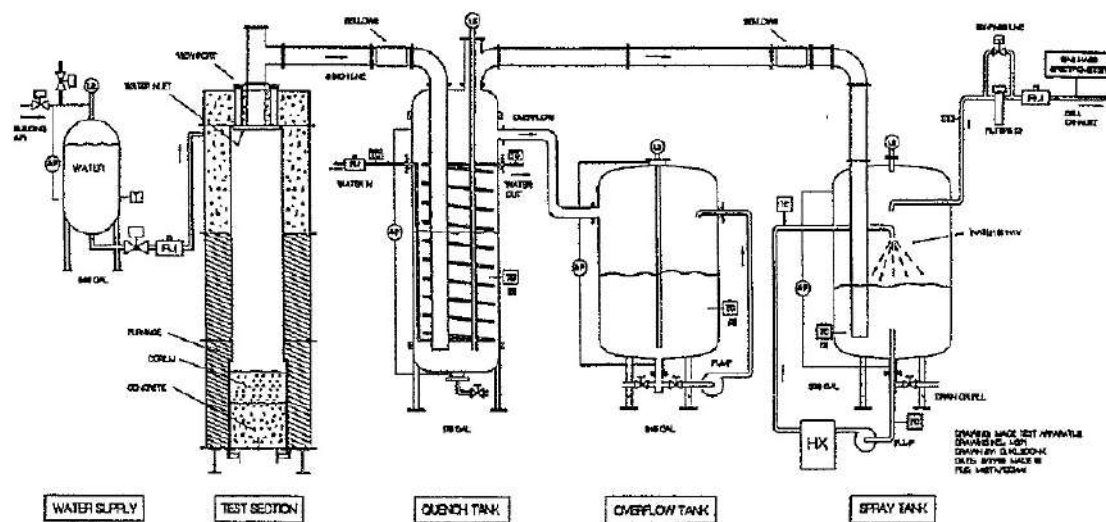


図 3.1-17 MACE 実験装置

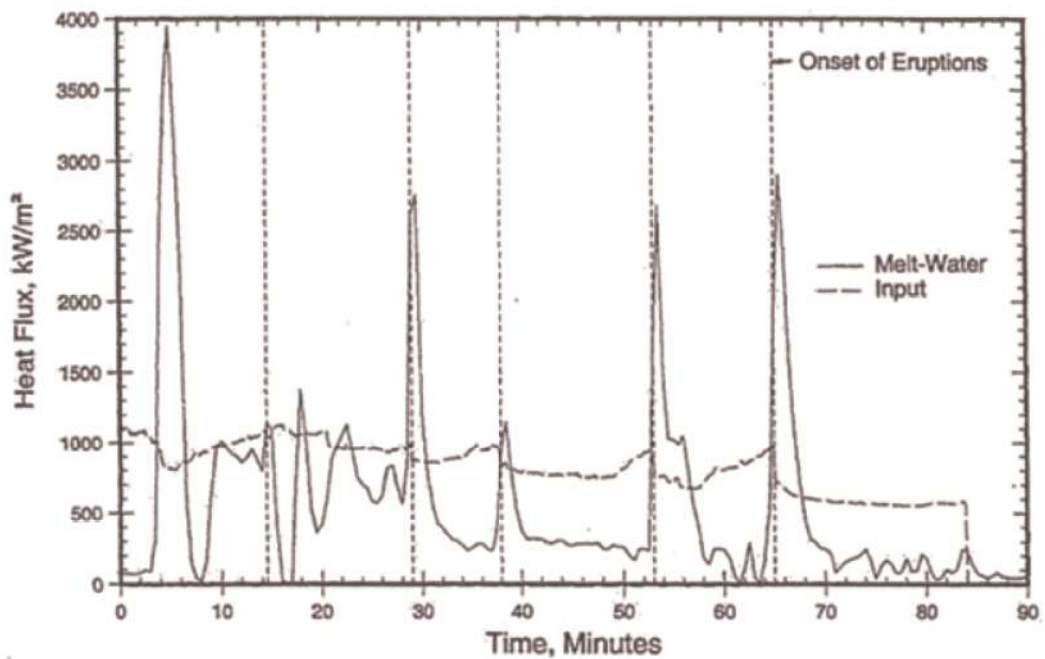


図 3.1-18 MACE-M0 実験での水への熱流束

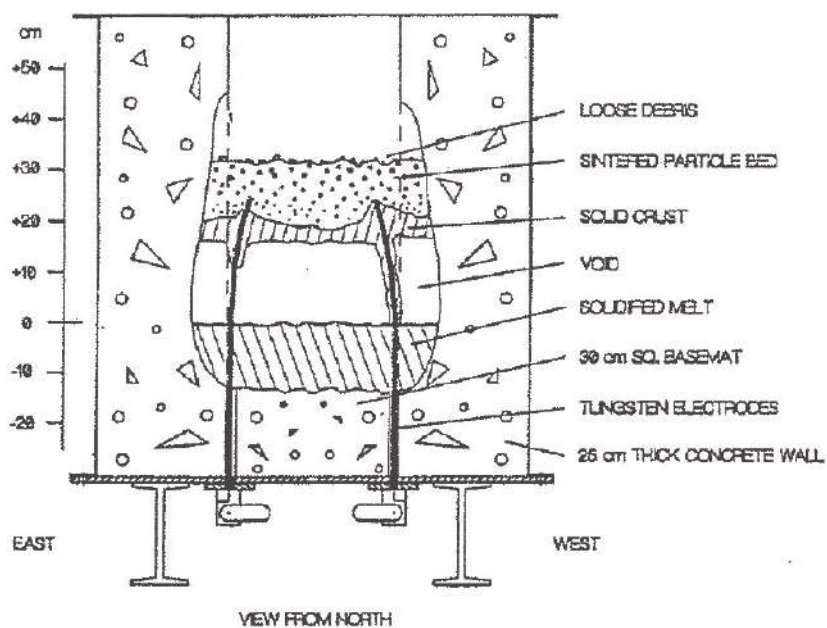


図 3.1- 19 MACE-M0 実験後の熔融炉心模擬物の状況

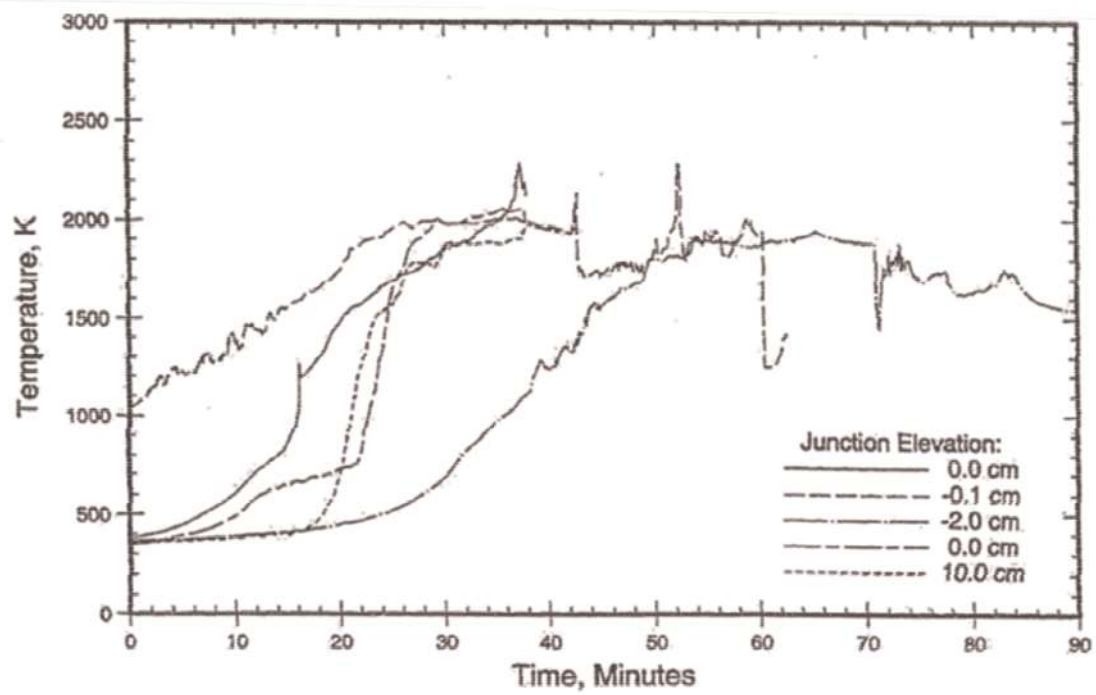


図 3.1-20 MACE-M0 実験での溶融物温度変化

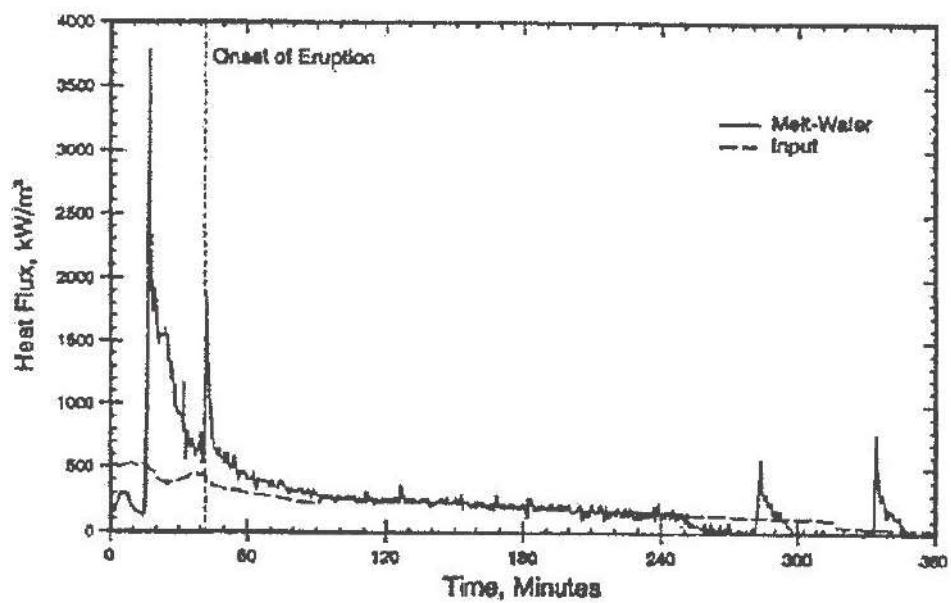


図 3.1-21 MACE-M1b 実験における溶融炉心模擬物から水プールへの熱流束

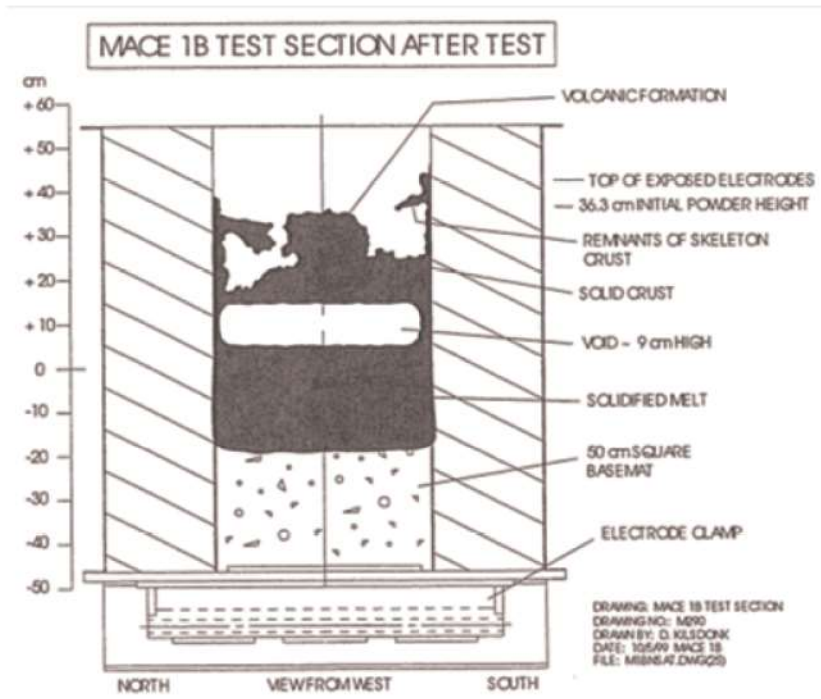


図 3.1-22 MACE-M1b 実験での実験後の溶融炉心の状態

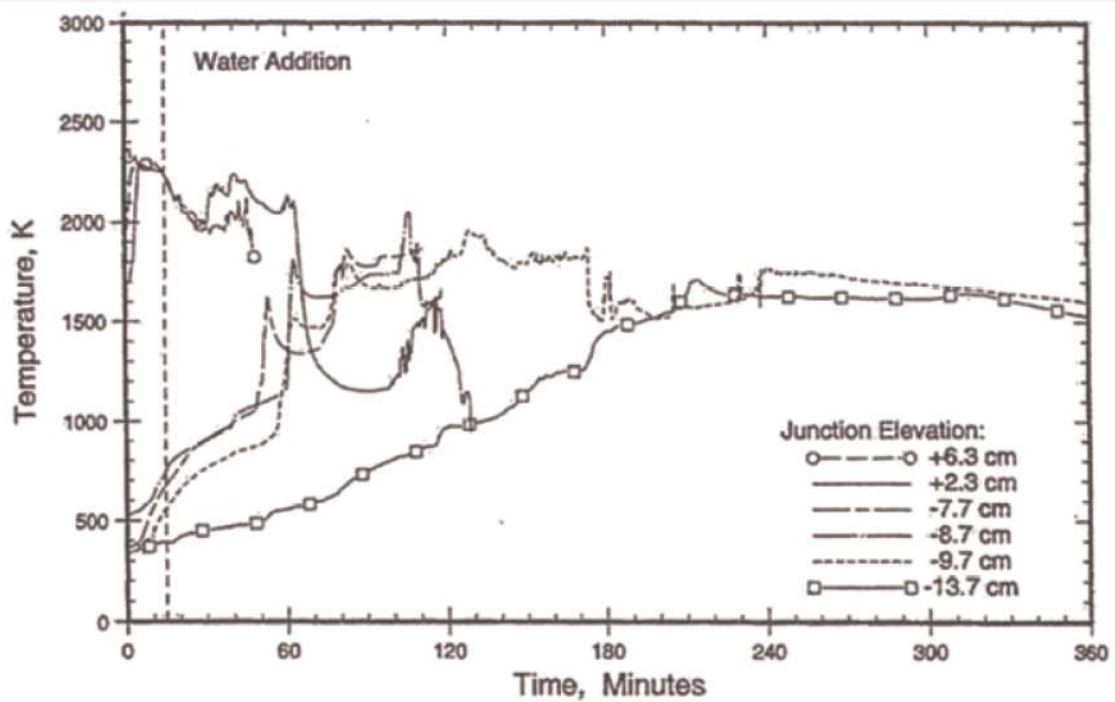


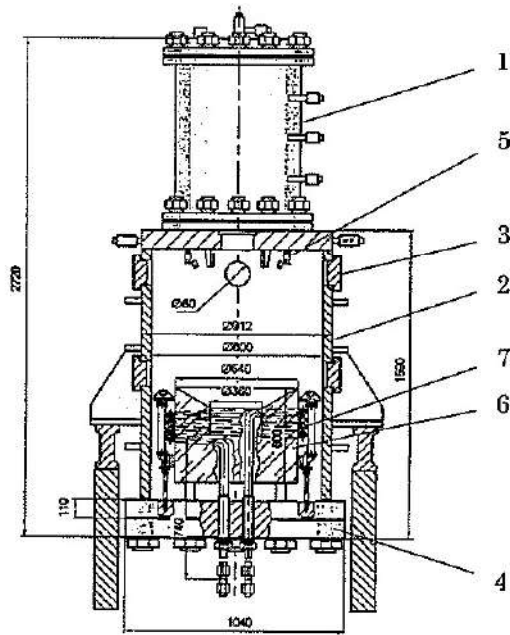
図 3.1-23 MACE-M1b 実験での溶融物温度変化

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	Spray
	質量流量 (kg/s)	—	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
	開始時刻 (min)	—	8	8	8	8	15	9	10	10
実験後の溶融物状態										
デブリ粒子重量 (kg)	9	21.5	19	35	33	48	—	—	—	—
(粒子化割合)	(19%)	(38%)	(34%)	(78%)	(72%)	(83%)				
粒子径 16mm 以上 (kg)	0	0	6	0	0	18	—	—	—	—
粒子径 16mm 以下 (kg)	6	21.5	13	32	33	30	—	—	—	—
平均粒子径 (mm)	0.6	0.8	2.2	1.5	1.0	0.4	—	—	—	—
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: UO₂-78wt%, SUS-5wt%, ZrO₂-17wt%, Zr-0wt%

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



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

図 3.1-24 COTELS (B 及び C) 実験装置

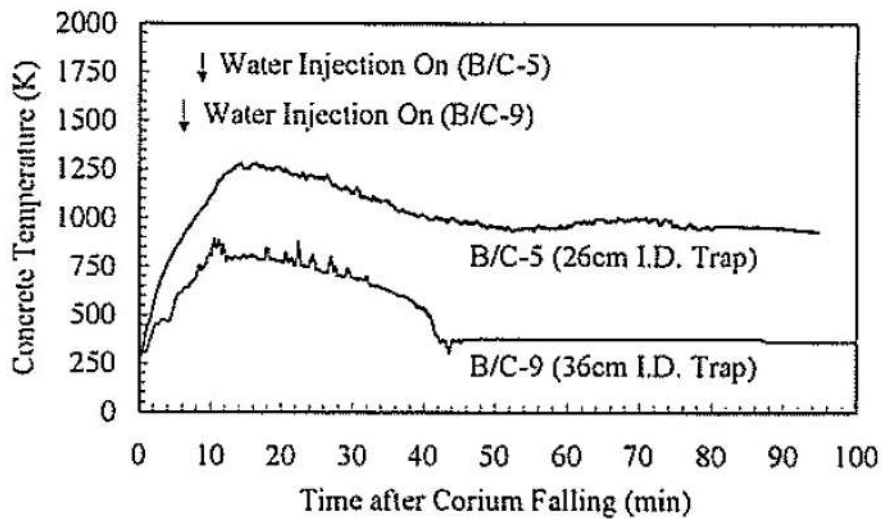


図 3.1-25 COTELS (B 及び C) 実験におけるコンクリート温度挙動

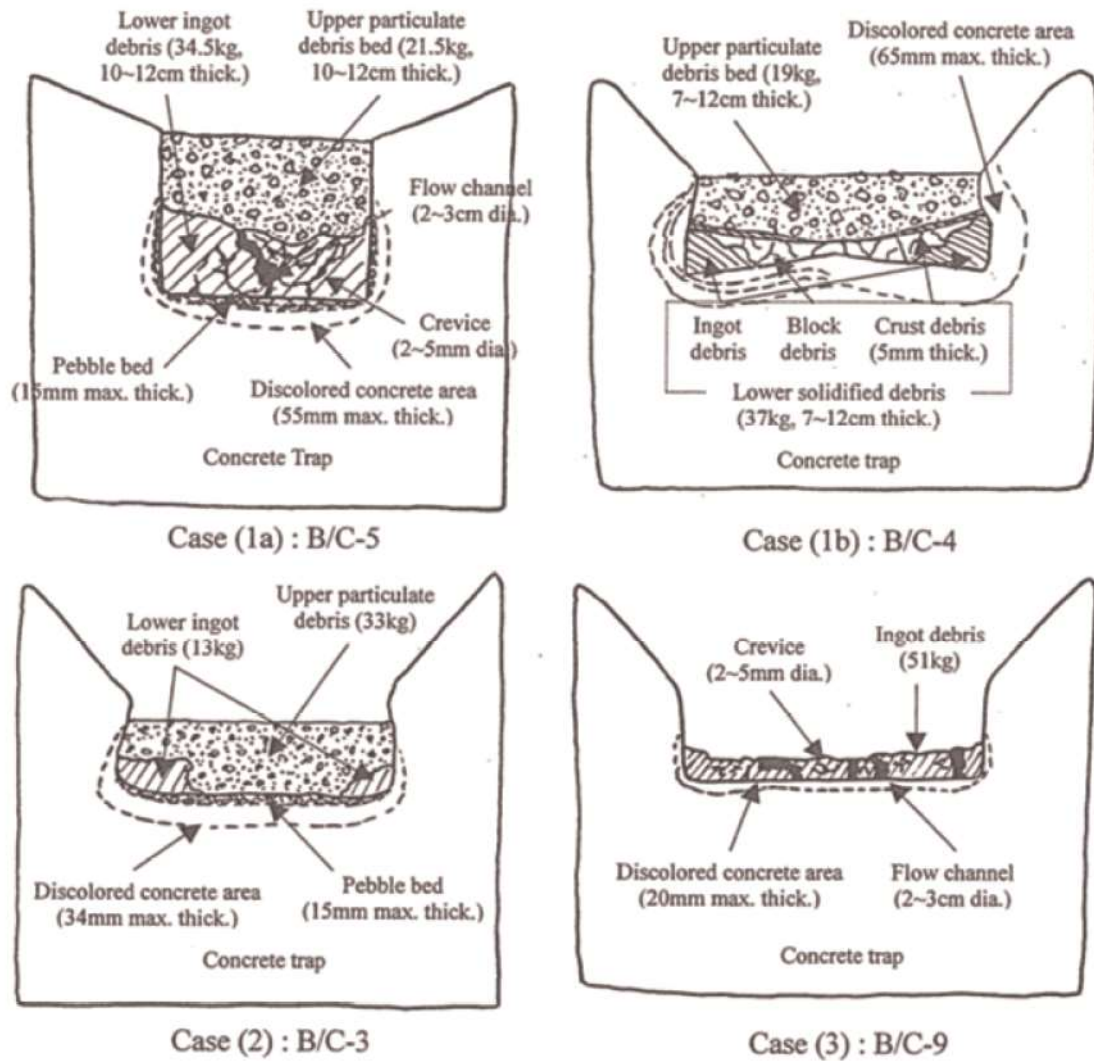


図 3.1-26 COTELS 実験での溶融物固化状態

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

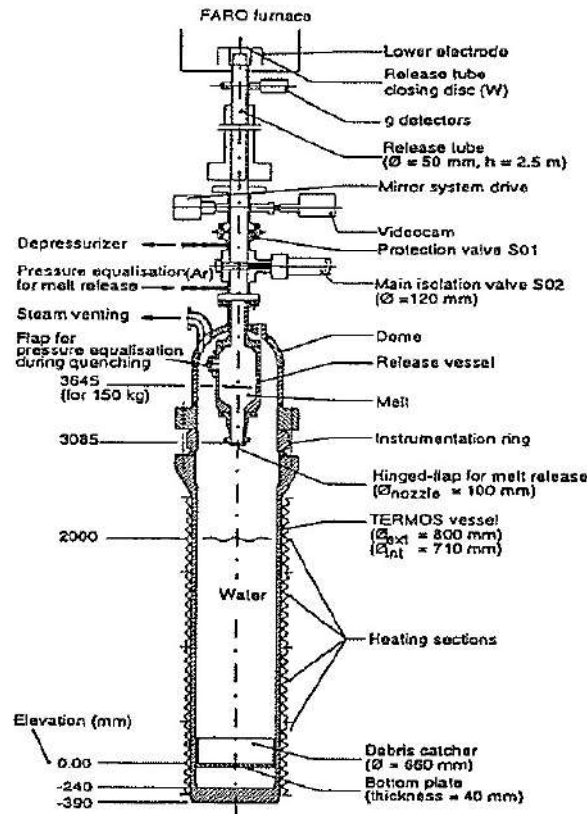
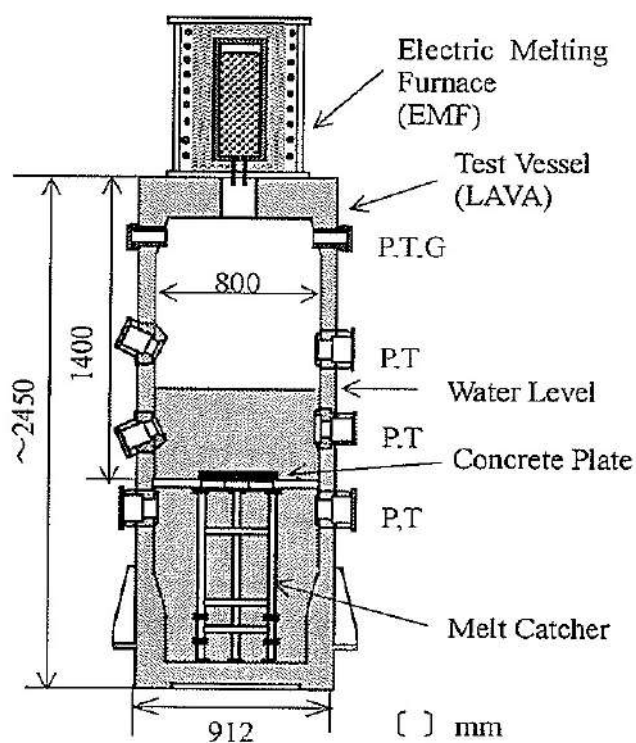


図 3.1-27 FARO 実験装置

表 3.1-6 COTELS (A) 実験条件及び結果一覧

実験 ID	UO ₂ 割合 ※	溶融物質量 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 UO₂ : 55wt%, Zr : 25wt%, ZrO₂ : 5wt%, SS : 15wt% の混合物



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

図 3.1-28 COTELS (A) 実験装置

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·cm ²
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	15.2	210-1000 + μ Cu	15	9.2	6.0	7.6	7.4	...
5	29.2	210-1000 + μ Cu	100	12.1	3.2	7.6	5.7	0.79
6 ^{**}	29.2	50-50 vol.% UO_2 -SS	100	8.9	3.8	6.4	6.2	1.20

〔註〕
 傾斜角の変化(初期)
 (2~3分後)

Run 3 [*]	Run 6 ^{**}
29.7°	19.3°
0.0°	0.8°

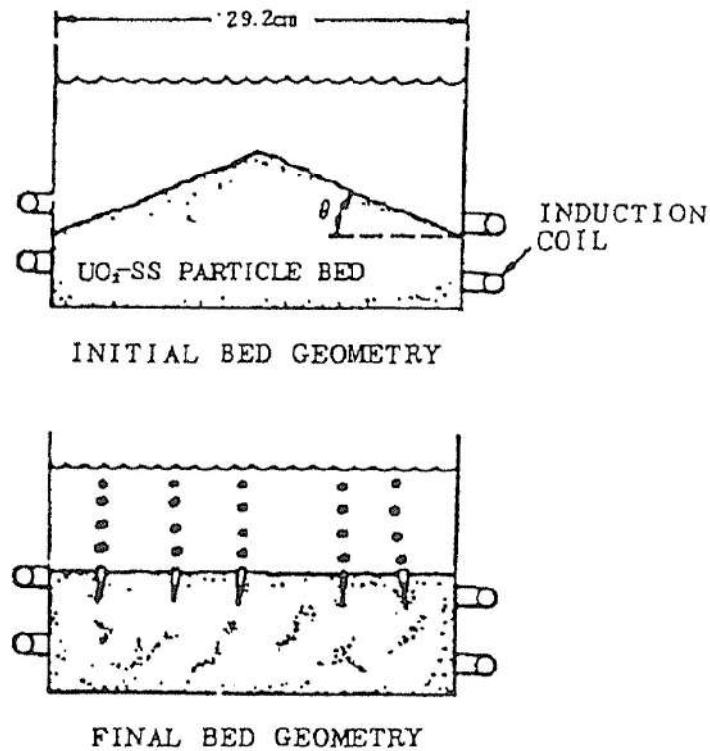


図 3.1-29 セルフレベリング実験における粒子ベッド概念

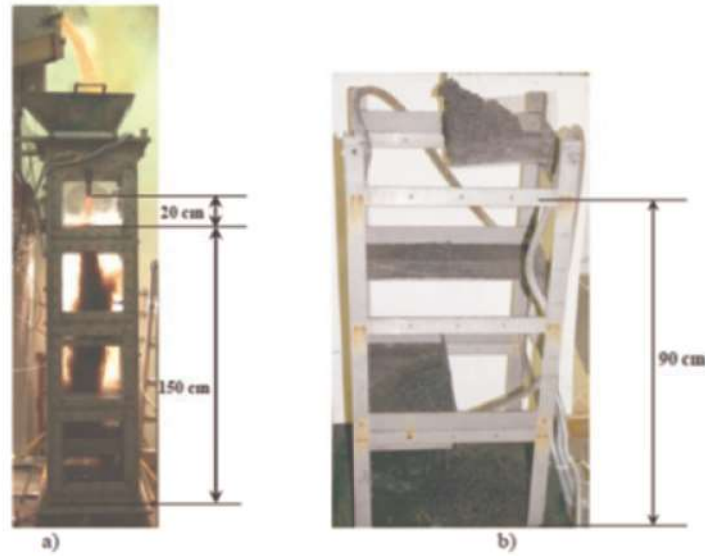


図 3.1-30 DEFOR 試験装置全体及び溶融炉心キャッチャー

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

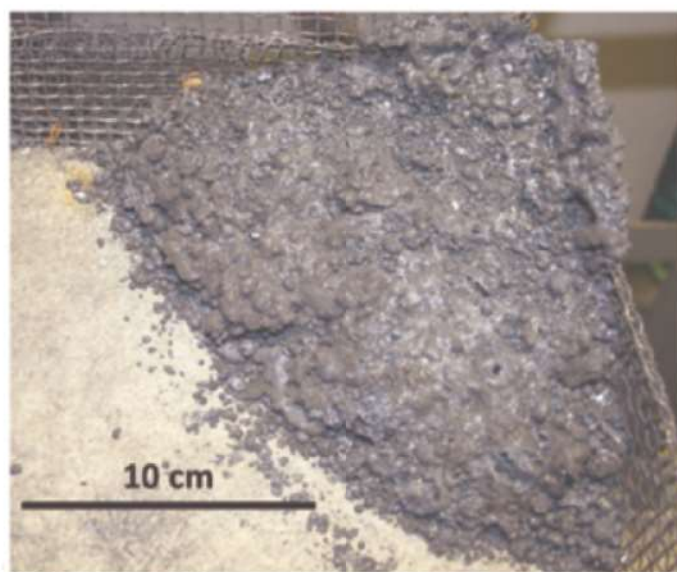


図 3.1-31 DEFOR-A8 キャッチャー 1 のケーキ状熔融炉心

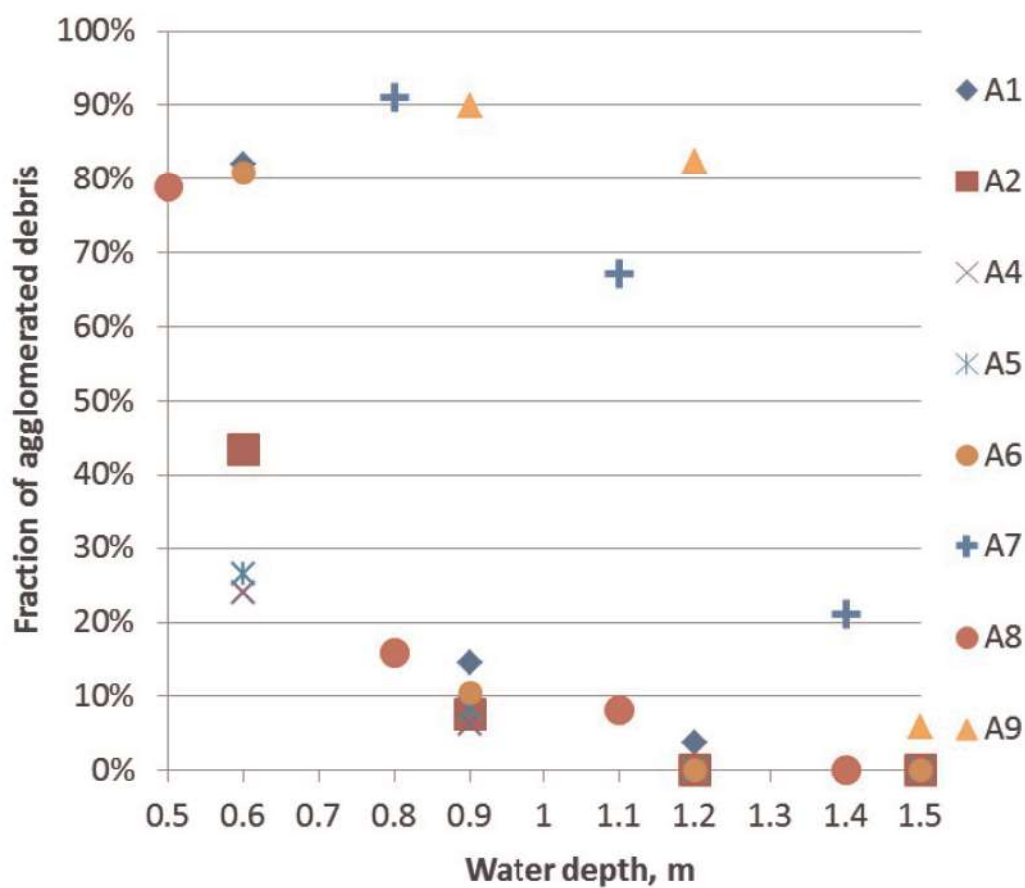


図 3.1-32 DEFOR-A 実験結果

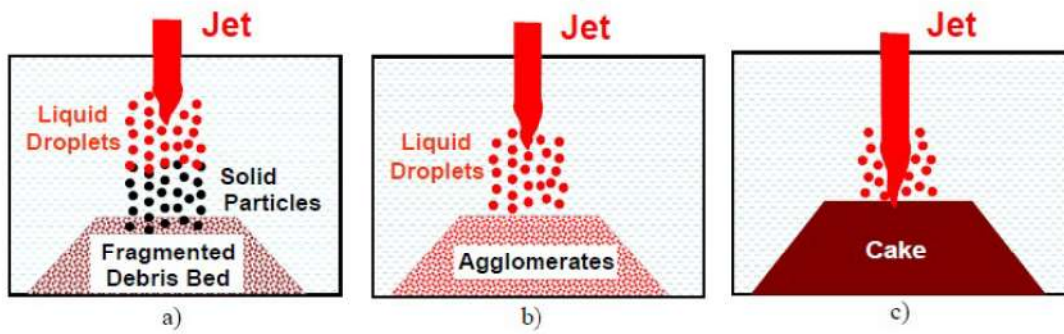


図 3.1-33 DEFOR 実験における溶融物凝集の概念図

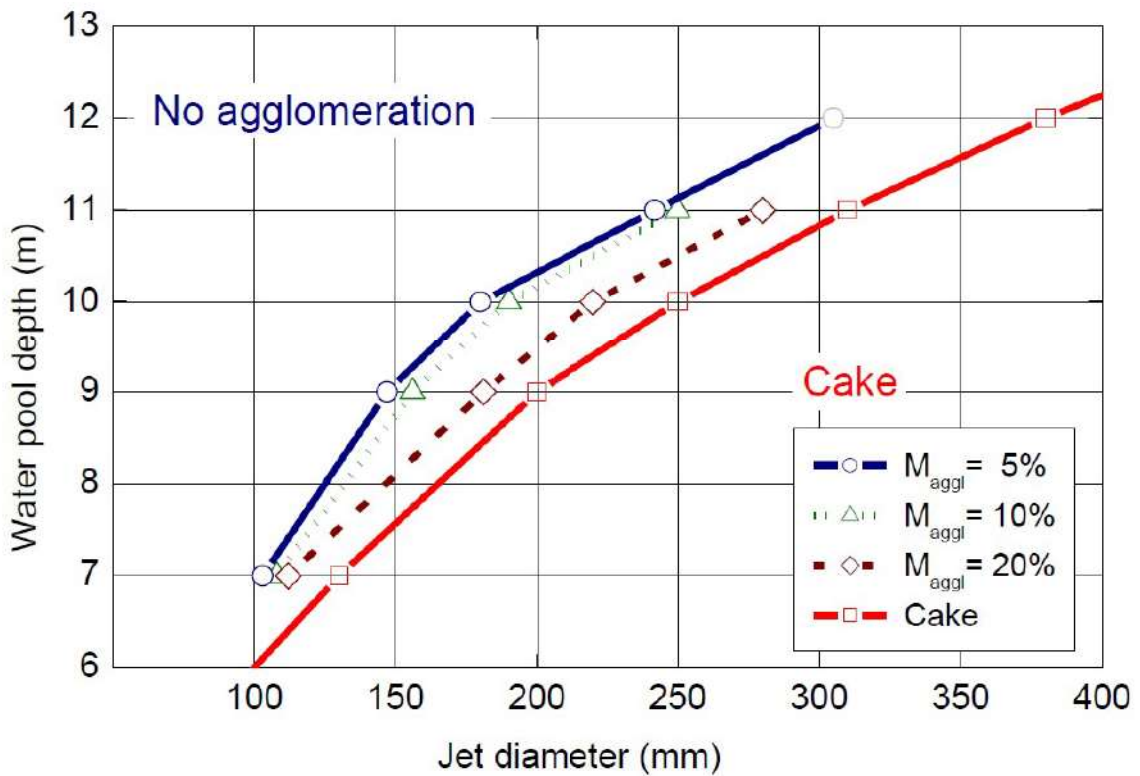


図 3.1-34 スウェーデン王立工科大学 (KTH) による凝集モードマップ

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°C	1,880°C	1,950°C
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°C	同左	同左
注水停止条件	50cm±5cm	同左	同左

表 3.1-10 CCI 実験に使用されたコンクリートの組成

Oxide	CCI-1 Wt%	CCI-2 Wt%	CCI-3 Wt%
Al ₂ O ₃	0.77	2.49	3.53
CaO	8.54	25.88	16.79
Fe ₂ O ₃	0.79	1.39	1.49
MgO	0.60	11.47	0.85
MnO	0.00	0.03	0.04
K ₂ O	0.12	0.55	0.81
SiO ₂	82.48	21.61	59.91
Na ₂ O	0.00	0.31	0.66
SrO	0.00	0.00	0.04
TiO ₂	0.051	0.135	0.155
SO ₃	0.514	0.505	0.434
CO ₂	0.901	29.71	9.80
H ₂ O, Free	1.808	3.255	2.293
H ₂ O, Bound	1.92	1.11	1.40
Total	98.48	98.47	98.19

表 3.1-11 CCI 実験の 15-25 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.

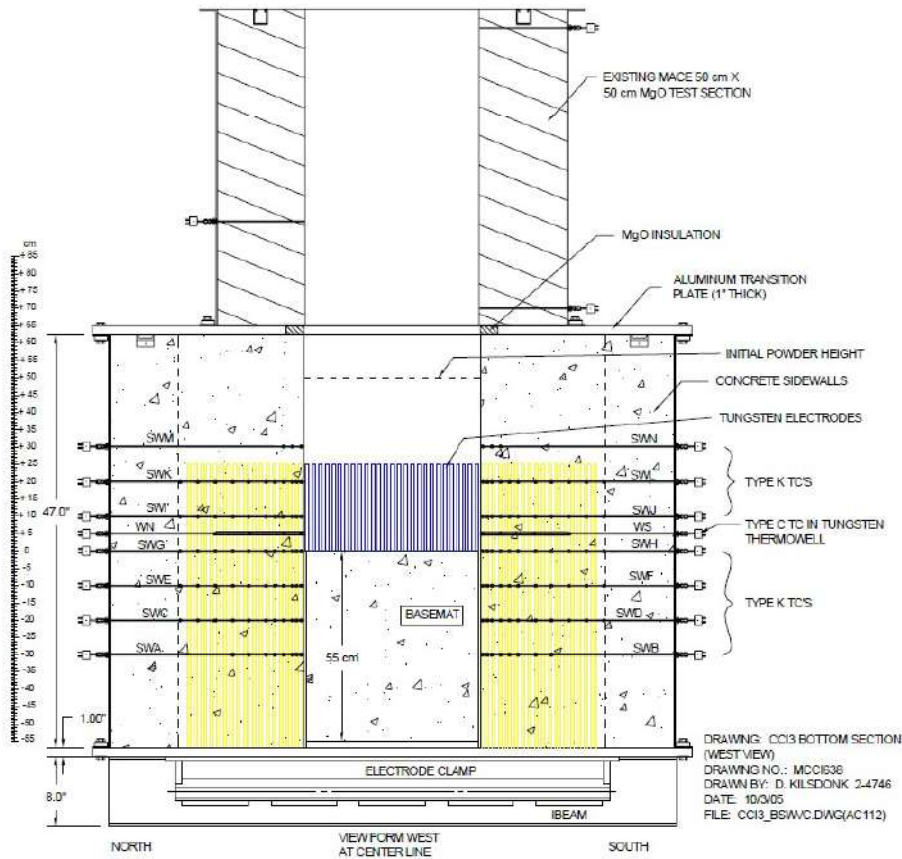


図 3.1-35 CCI 実験装置

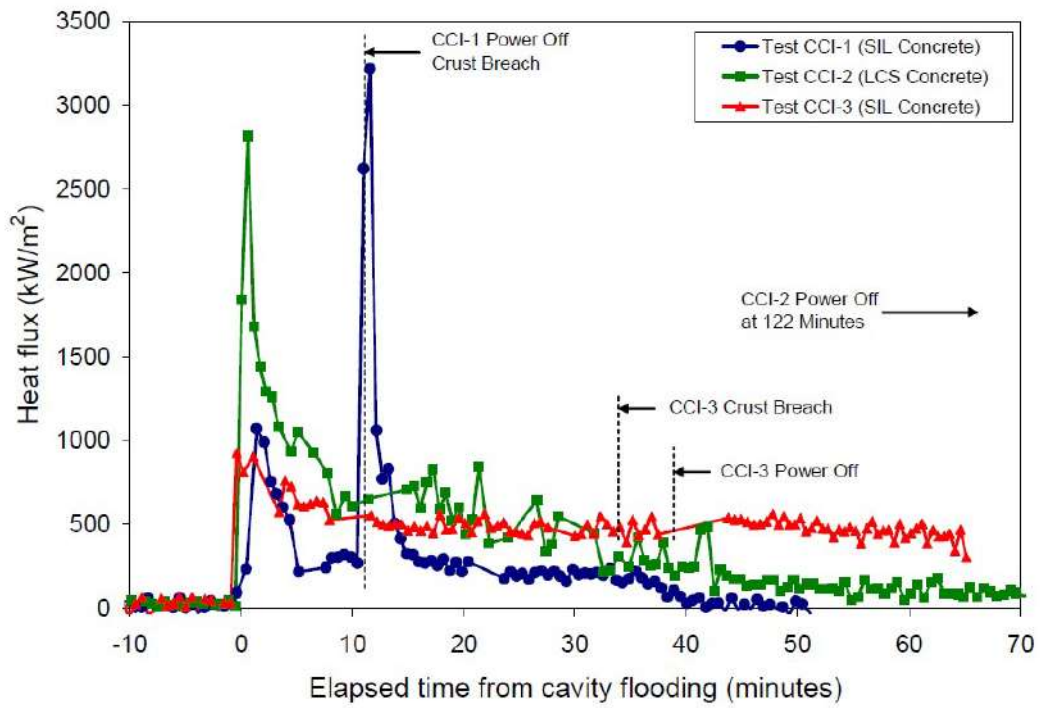


図 3. 1-37 CCI 実験における水-溶融炉心間の熱流束

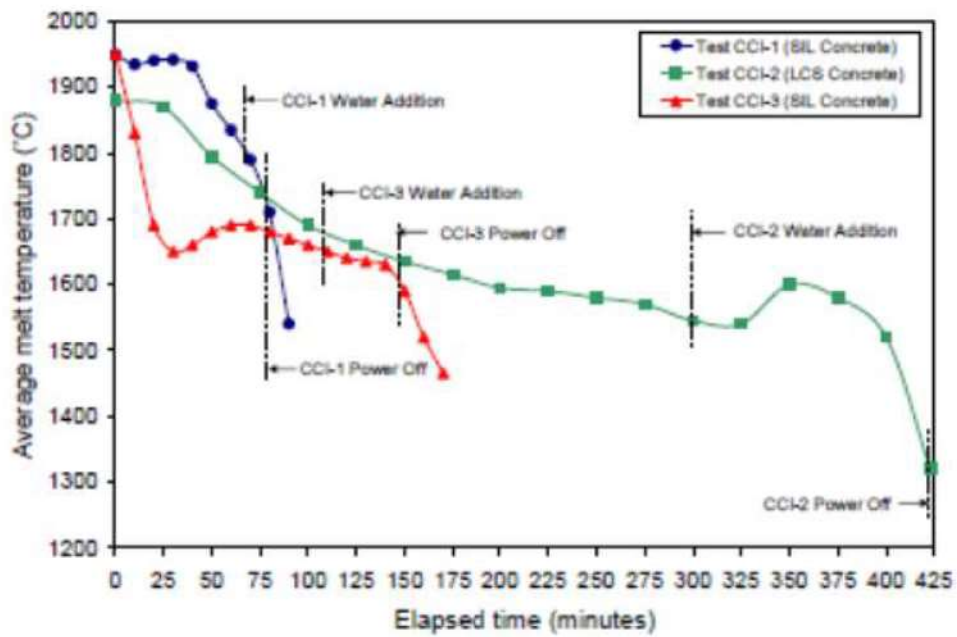
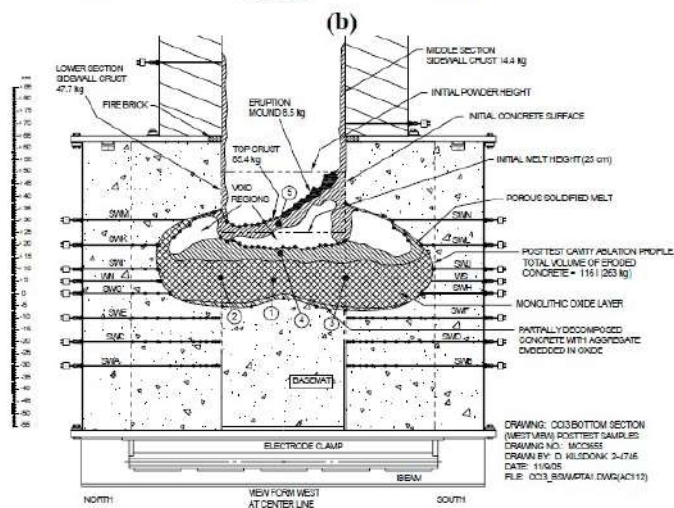
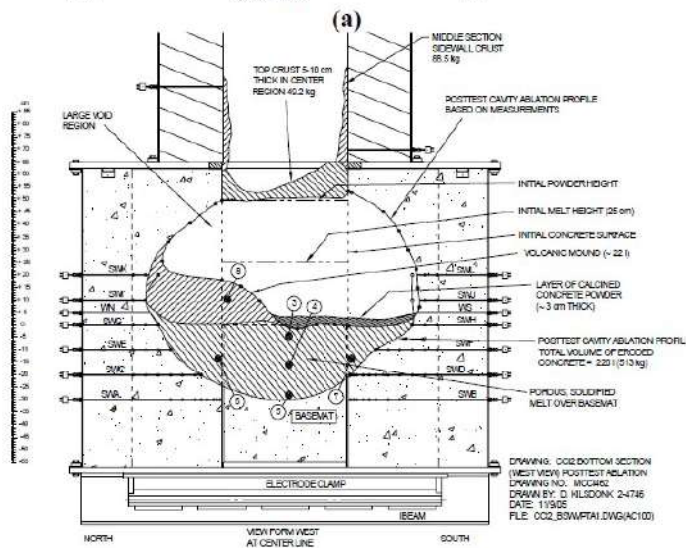
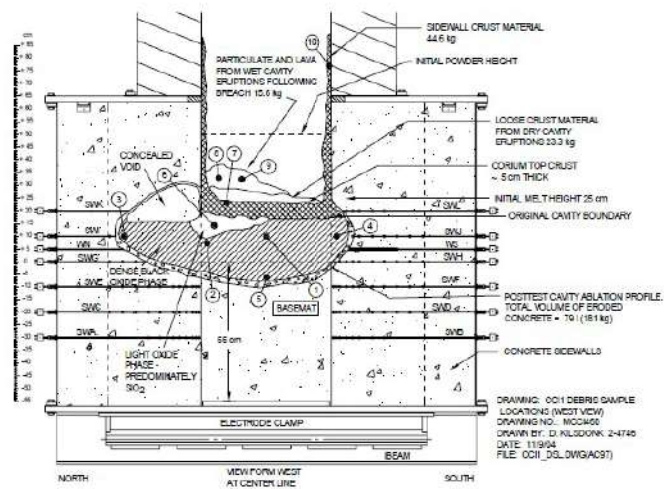


図 3. 1-38 CCI 実験の溶融物平均温度変化



(c)

図 3.1-39 CCI 実験における侵食状態の模式図



図 3.1-40 熔融プールからクラストへの対流熱伝達係数

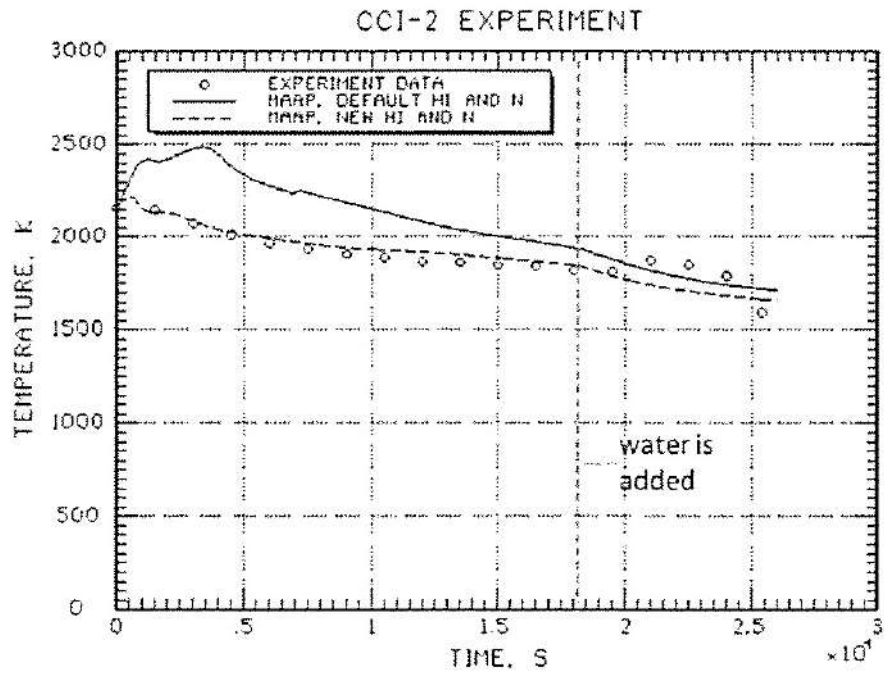


図 3.1-41 CCI-2 実験のコリウム温度の実験データと MAAP 解析結果の比較
 (MAAP New 熱伝達係数 (破線) : 床面方向 $300\text{W/m}^2/\text{K}$, 壁面方向 $300\text{W/m}^2/\text{K}$, $n=0$)

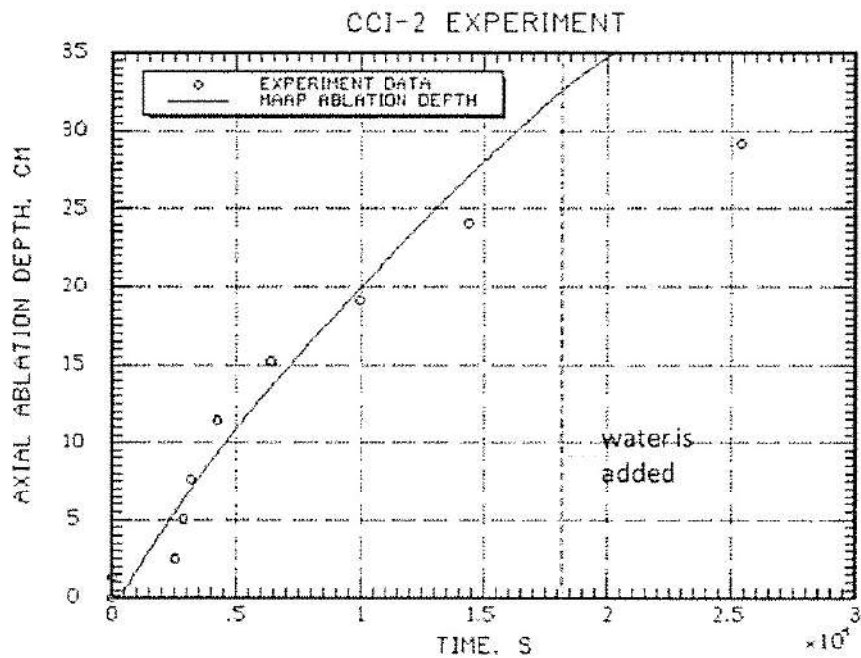


図 3.1-42 CCI-2 実験の床面方向侵食の実験データと MAAP 解析結果の比較

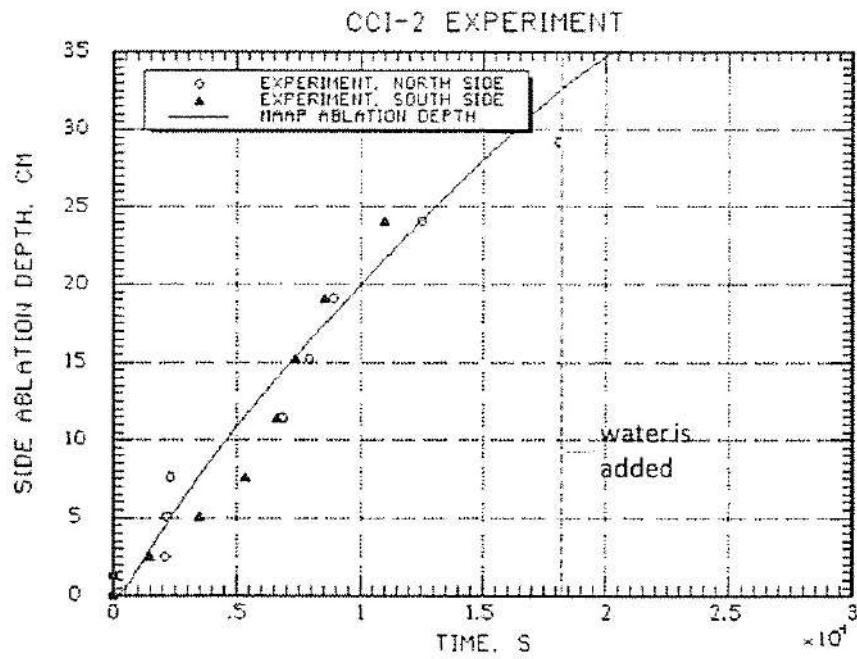


図 3.1-43 CCI-2 実験の壁面方向侵食の実験データと MAAP 解析結果の比較

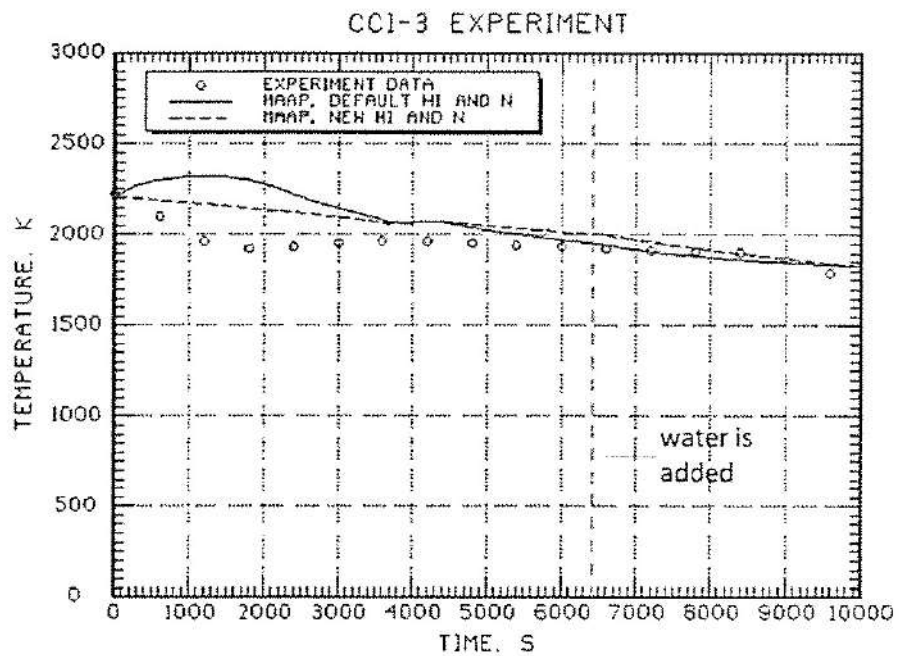


図 3.1-44 CCI-3 実験のコリウム温度の実験データと MAAP 解析結果の比較
(MAAP New 熱伝達係数 (破線) : 床面方向 80W/m²/K, 壁面方向 300W/m²/K, n=0)

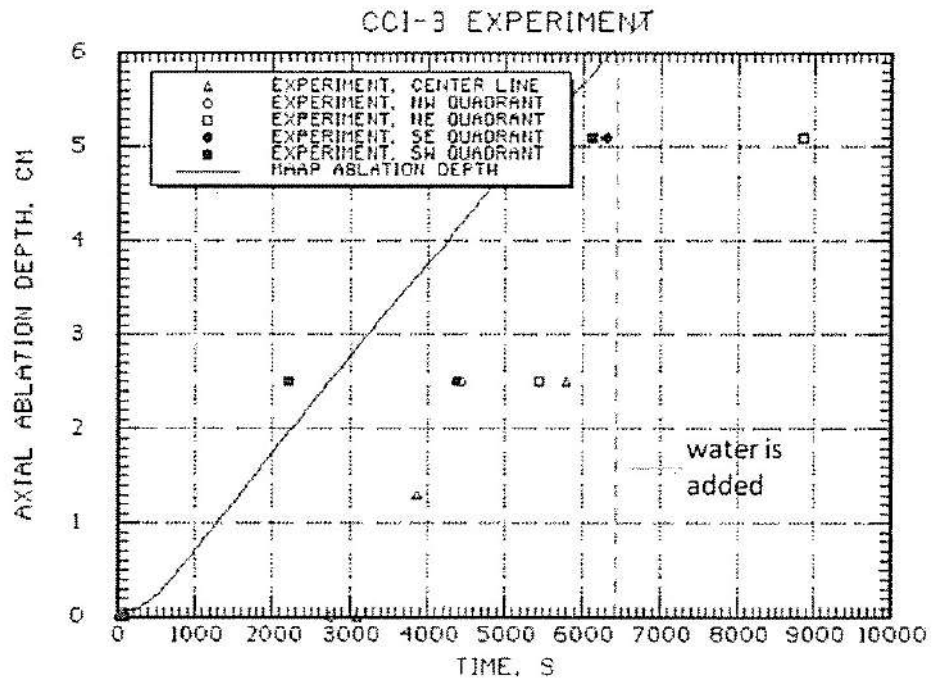


図 3.1-45 CCI-3 実験の床面方向侵食の実験データと MAAP 解析結果の比較

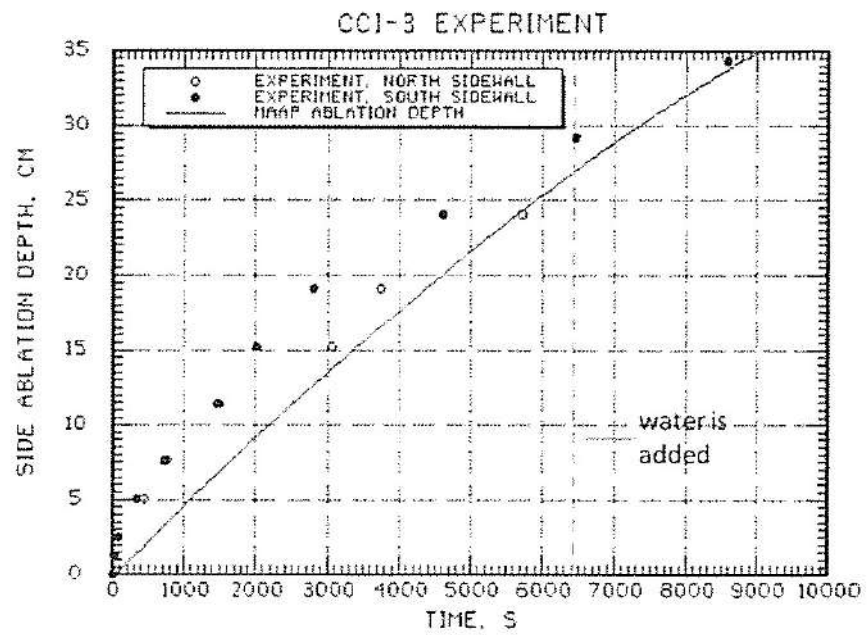


図 3.1-46 CCI-3 実験の壁面方向侵食の実験データと MAAP 解析結果の比較

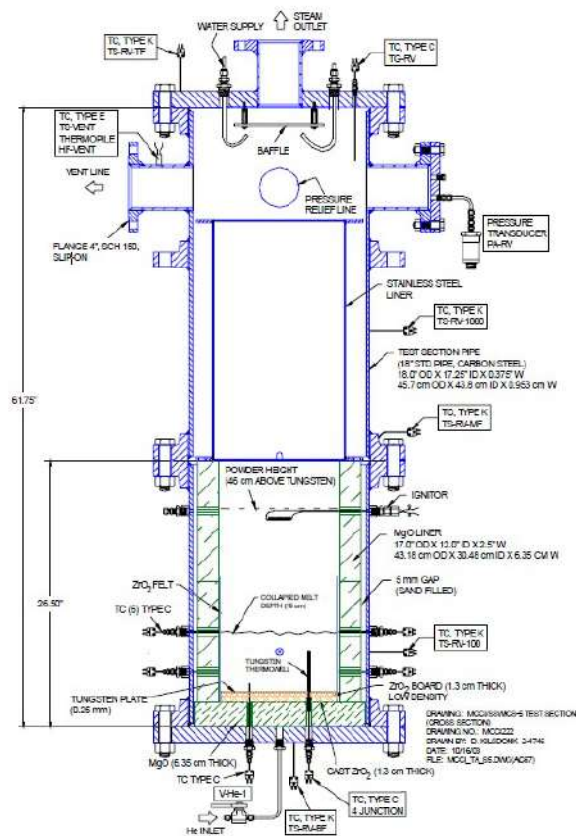


図 3.1-47 SSWICS 試験装置

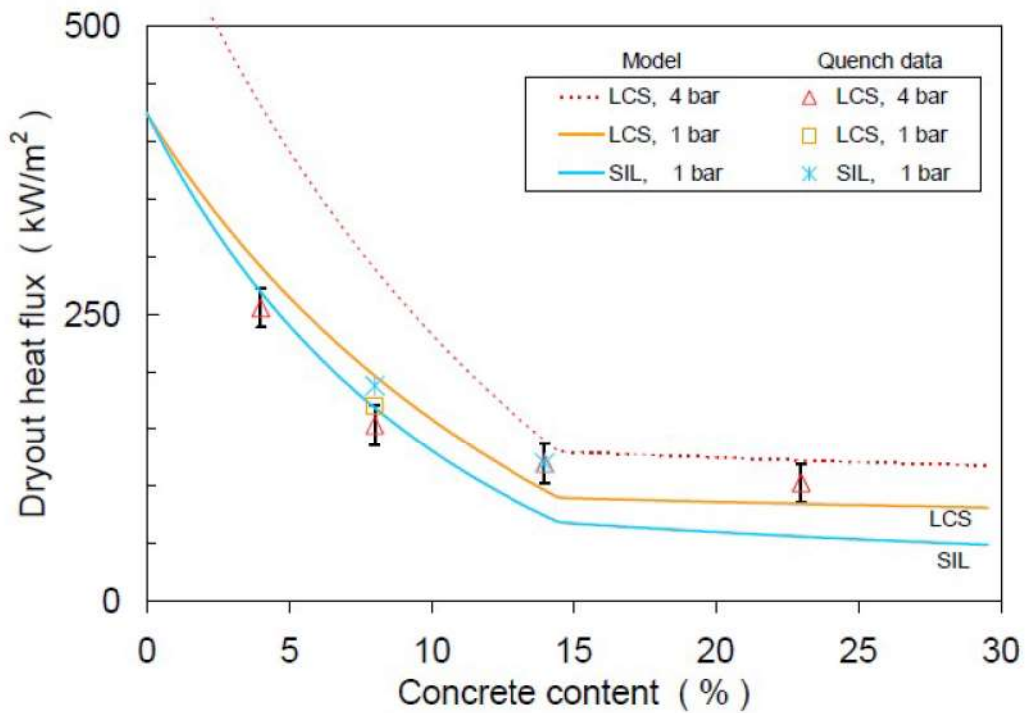


図 3.1-48 SSWICS 試験 ドライアウト熱流束の比較

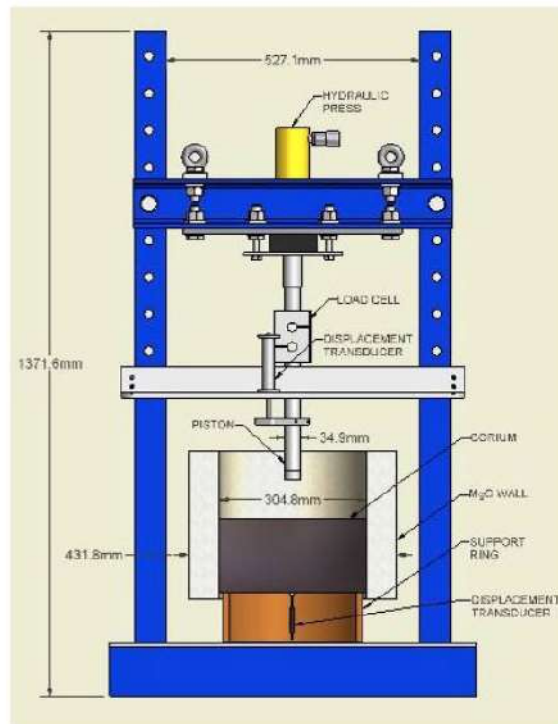


図 3.1-49 SSWICS 試験 強度試験の装置図

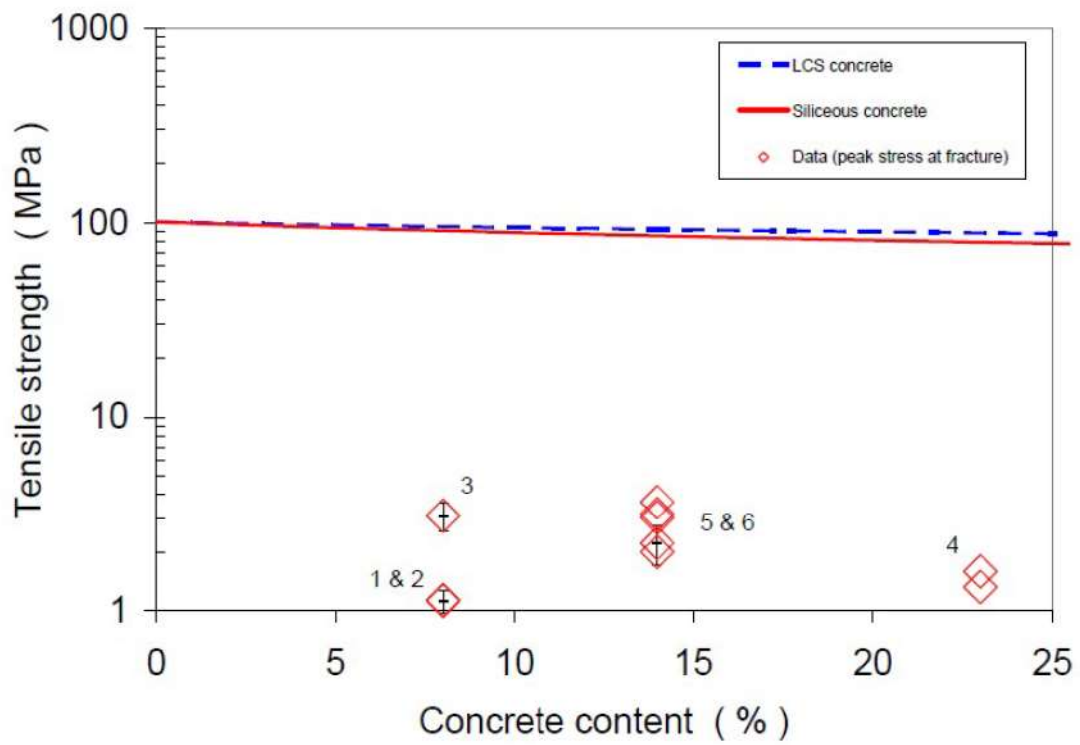


図 3.1-50 SSWICS 試験 強度試験結果

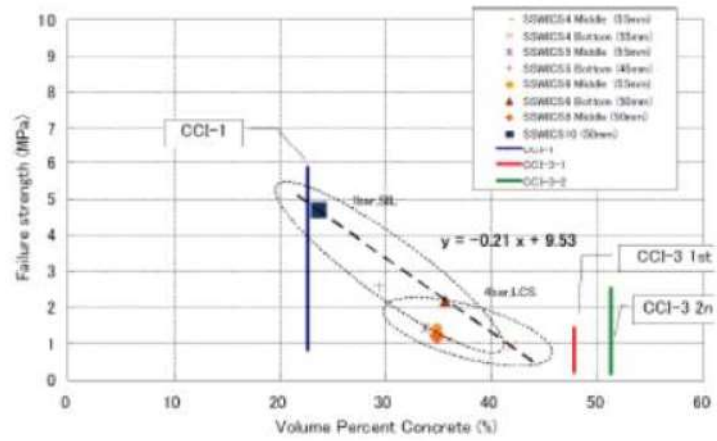


図 3.1-51 破損応力算出結果

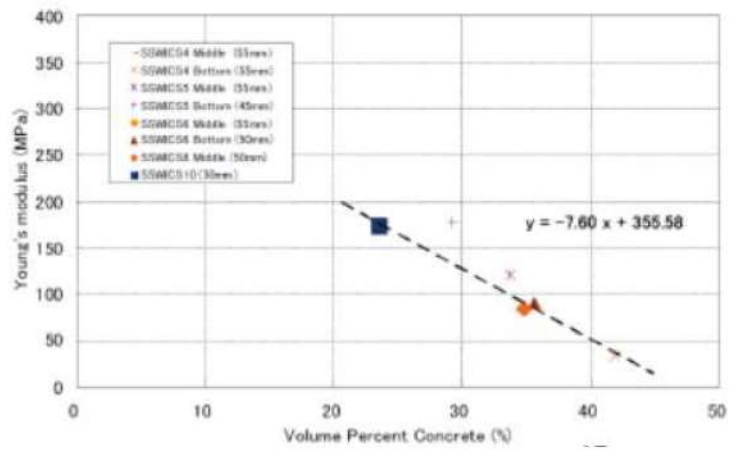


図 3.1-52 ヤング率算出結果

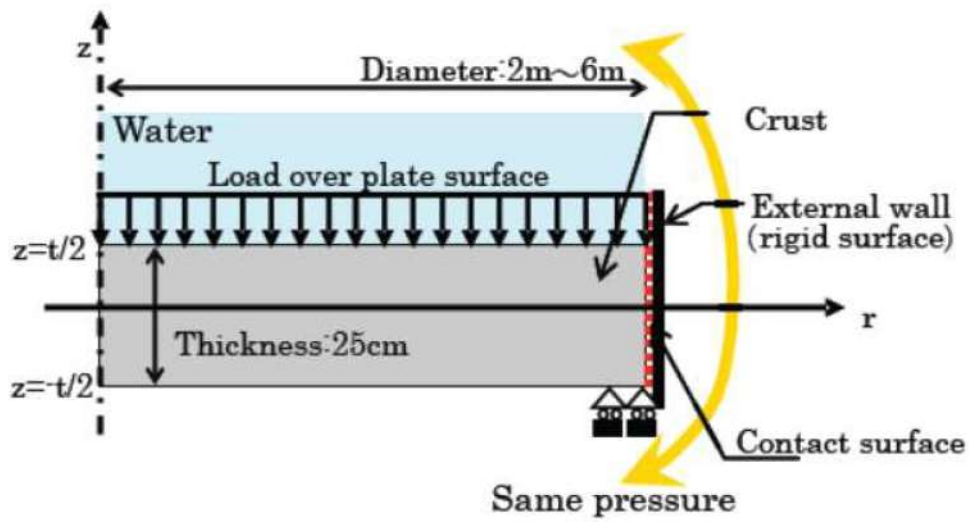


図 3.1-53 実機スケールのクラスト解析モデル

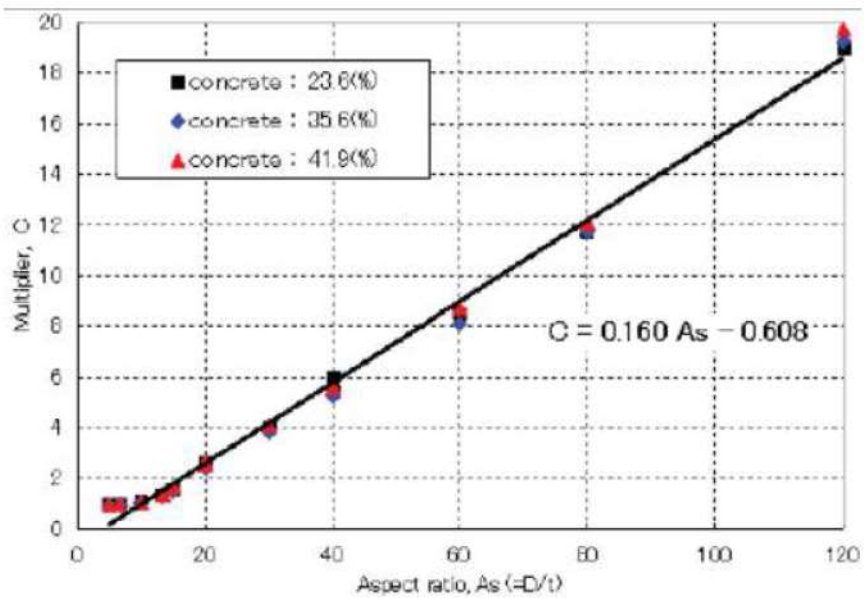
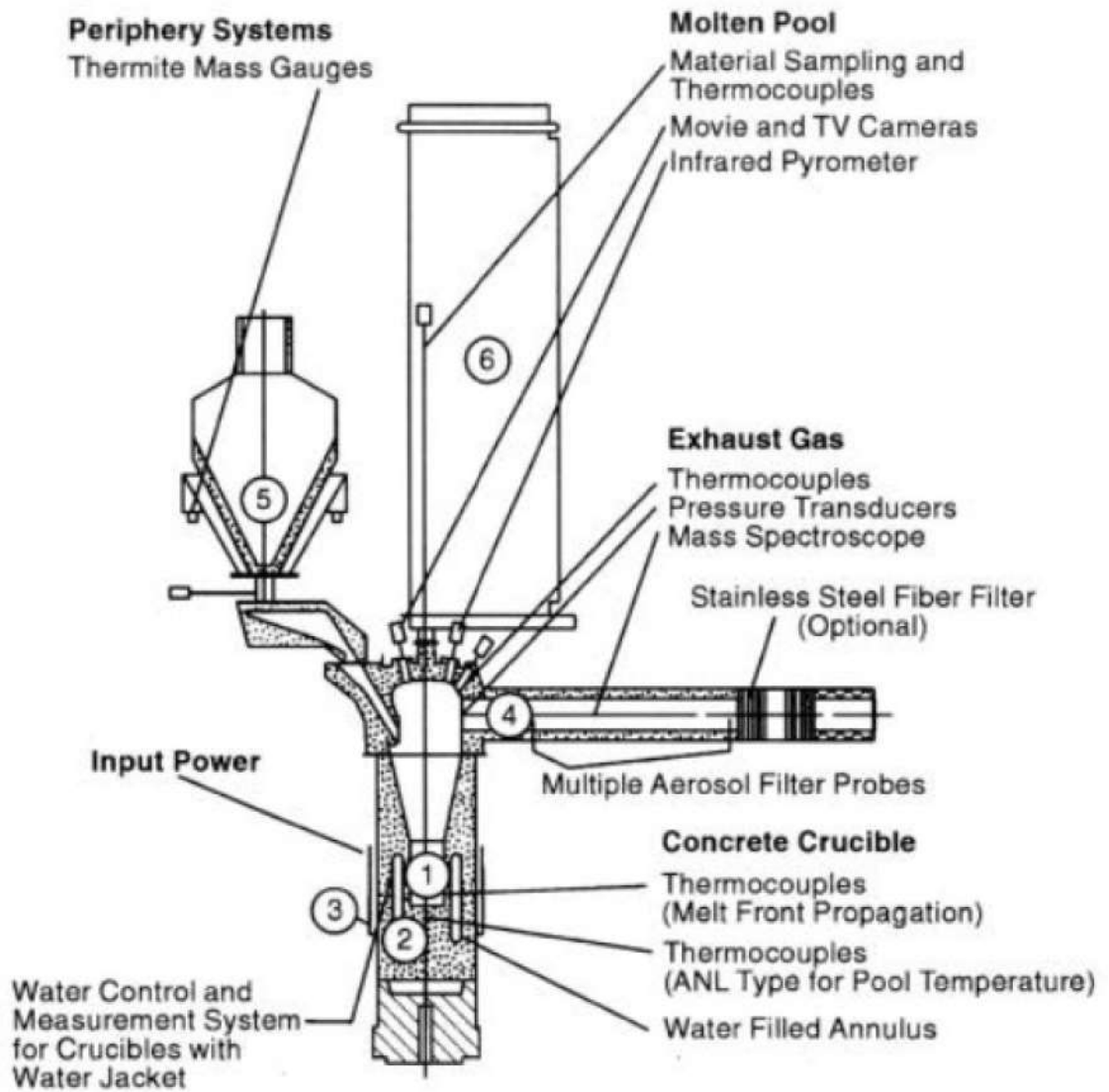


図 3.1-54 クラストの自重による応力分布



図 3.1-55 PULiMS-E4 試験での溶融物拡がり挙動



- | | |
|-----------------------|---------------------------------|
| (1) Melt | (4) Hood and Offgas System |
| (2) Concrete Crucible | (5) Thermite Reaction Tank |
| (3) Induction Coil | (6) Tank for Measurement Probes |

图 3.1-56 BETA 試驗 實驗裝置

表 3.1-12 BETA 試験 実験マトリックス^[6]

BETA Test	Initial Melt, ~ 2200 K	Fission Product Mock-ups and Additives	Planned Heating Power	Main Objectives
V 5.1	300 kg Fe+Cr+Ni 80 kg Zry-4 50 kg Al ₂ O ₃ +SiO ₂ +CaO	none	400 kW	PWR: Zr chemistry, consequences on erosion and aerosol release
V 5.2	as V 5.1	1 kg Mo, 0.5 kg ZrTe ₂ , 1.5 kg CeO ₂ , 1 kg BaO, 0.5 kg La ₂ O ₃ , 0.5 kg SrO, 6 kg B ₄ C in steel containers	200 kW	BWR with B ₄ C absorber, low power: Zr chemistry and related processes
V 5.3	as V 5.1	1 kg Mo, 1 kg CeO ₂ , 1 kg BaO, 0.5 kg La ₂ O ₃ , 0.5 kg SrO, 6 kg B ₄ C in steel containers	800 kW	BWR with B ₄ C absorber, high power: Zr chemistry and related processes

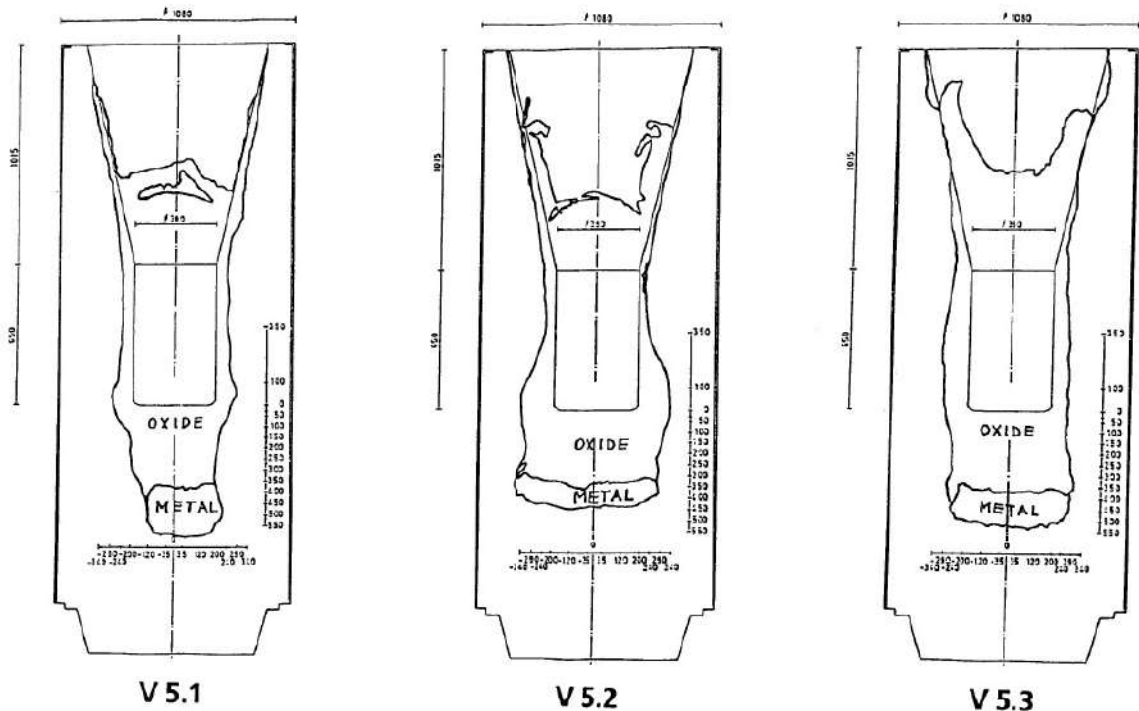


図 3.1-57 BETA 試験 実験後のコンクリート侵食状況を示す模式図

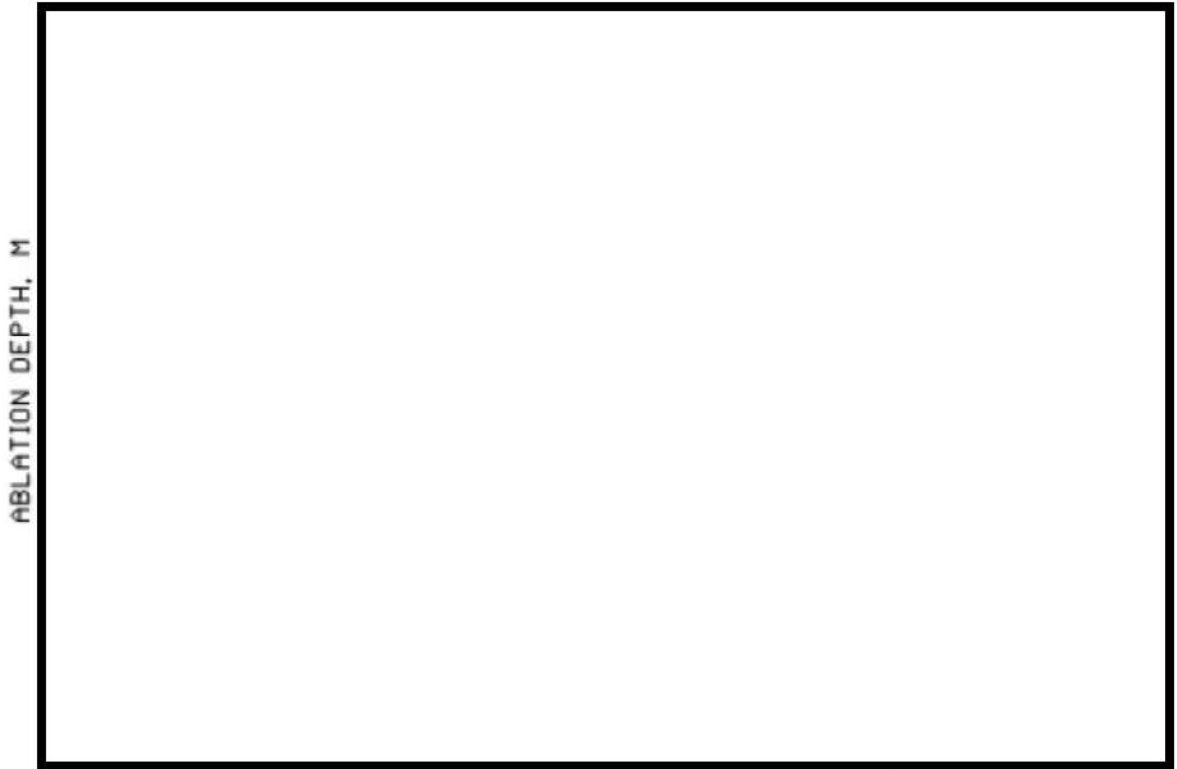


図 3.1-58 BETA 試験 V5.1 試験と MAAP 解析結果の侵食深さの比較



図 3.1-59 BETA 試験 V5.2 試験と MAAP 解析結果の侵食深さの比較

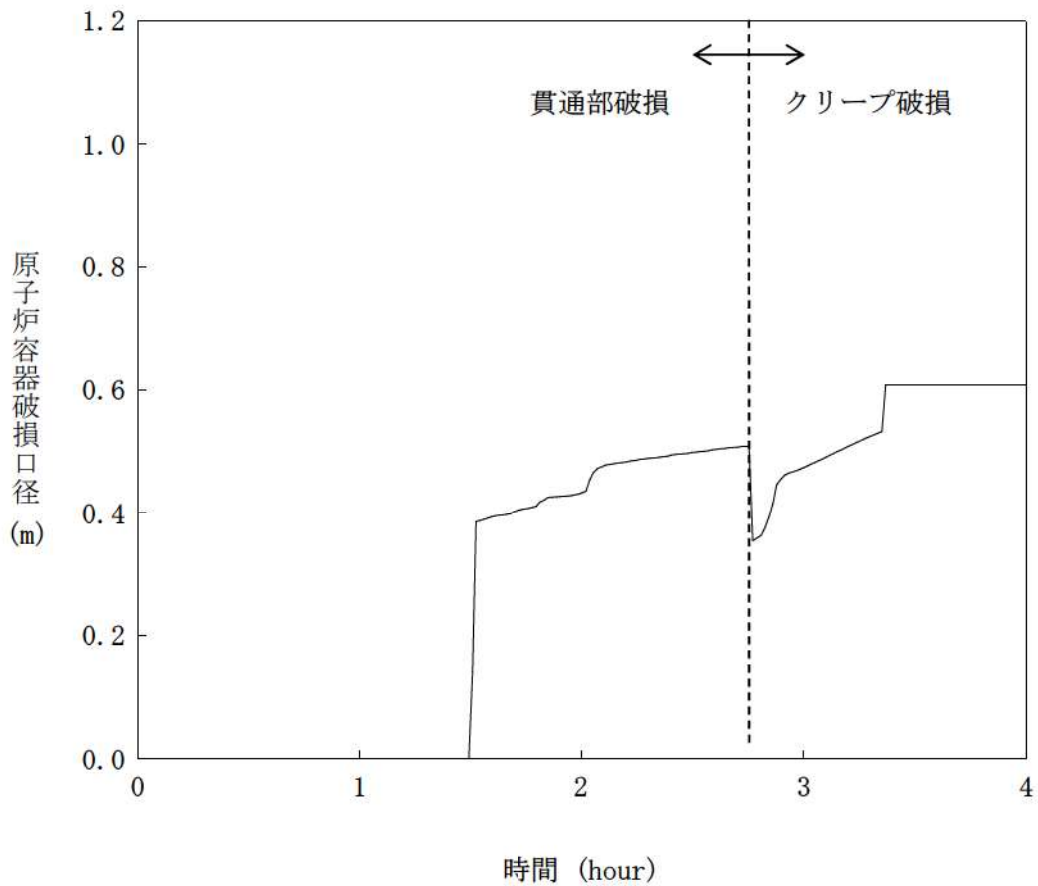
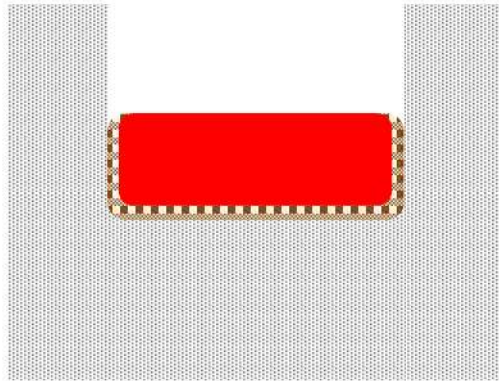


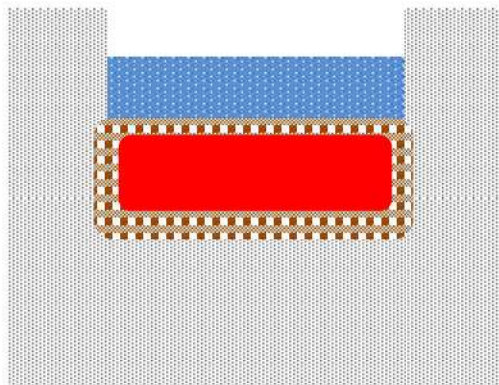
図 3.2-1 原子炉容器破損口径の拡がり (3 ループプラントの例)

注)

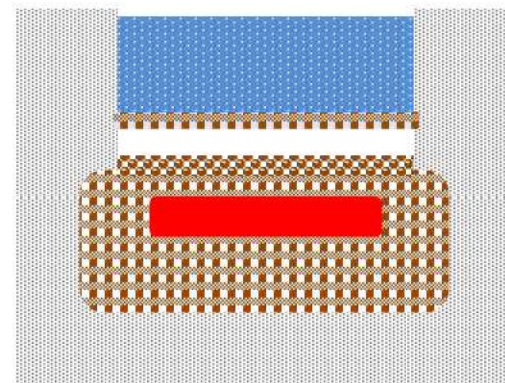
約 1.5 時間の時点で貫通部破損, 約 2.8 時間の時点でクリープ破損が生じており, クリープ破損以前は貫通部破損口径をクリープ破損後はクリープ破損口径をプロットしている。



注水前：
 溶融物とコンクリートの中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。

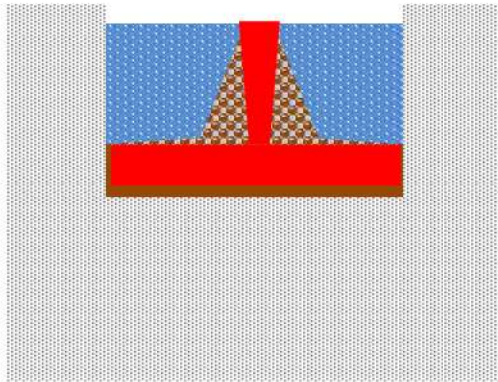


注水後短期：
 溶融物上面から水への激しい伝熱が起き、上面に厚いクラストが形成される。この期間の熱流束は最大約 3MW/m^2 となり、その後急速に低下し約 1MW/m^2 となる。



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

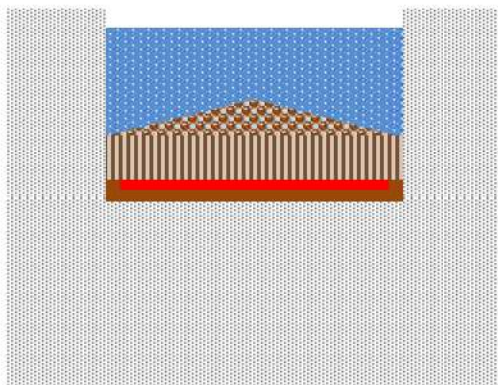


溶融炉心落下時：

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

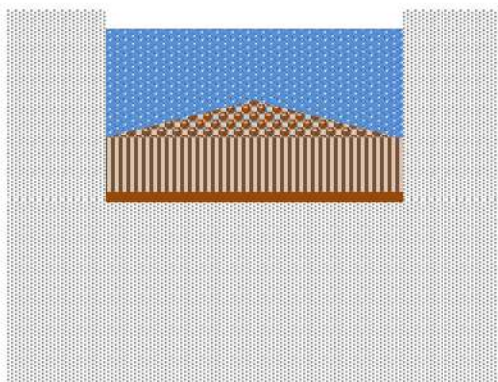


落下後短期：

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碎していく。このため溶融炉心は急激に冷却されていく。

< 4層状態 >

- ・粒子ベッド
- ・破碎クラスト
- ・溶融炉心
- ・ケーキ



長期冷却時：

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

< 3層状態 >

- ・粒子ベッド
- ・破碎クラスト
- ・ケーキ

図 3.3-2 実機で想定される挙動

4. 評価モデルと不確かさに関する整理

本章では、MCCI 評価に使用している解析モデルと想定される不確かさについて整理する。

4.1 MCCI 評価モデル

以下に、MCCI 伝熱モデルの概要を示す。

① 溶融プールモデル

- ・原子炉下部キャビティ床上に落下した溶融炉心（連続体及び粒子状）の質量とエネルギーは溶融プールに加算され瞬時に均質化すると仮定
- ・溶融プールは平板を仮定
- ・上部，下部及び側部クラストを考慮し，下方及び側方への侵食を考慮
- ・内部の溶融プールの温度は1点で模擬
- ・クラスト内の温度分布は崩壊熱を考慮して2次式で近似
- ・侵食したコンクリートと炉心溶融物との混合割合から液化及び固化温度を評価
- ・炉心材及びコンクリートの化学組成の化学平衡計算に基づき非凝縮性ガス（水素，一酸化炭素，二酸化炭素）の発生を評価
- ・溶融炉心内部の発生ガスによる溶融プールの伝熱挙動への影響は模擬しない

② 溶融プール伝熱モデル

- ・上部クラストから上部水プールへは Kutateladze の熱伝達相関式を考慮
- ・水がない場合は上部クラストから対流及び輻射熱伝達を考慮
- ・内部の溶融物から上部，下部及び側部クラストへは対流熱伝達を考慮

③ コンクリート侵食モデル

- ・コンクリートへは熱伝導で伝熱し，コンクリートの分解エネルギーを考慮
- ・コンクリート内部の温度分布を考慮

なお，溶融炉心から床方向及び側面方向のコンクリートへの熱流束を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{床面方向の熱流束} \quad q_d &= h_d(T_f - T_{F,m}) + q_v \cdot X_{cd} \\ h_d &= h_{d0}(1 - f_s)^n \\ \text{壁面方向の熱流束} \quad q_s &= h_s(T_f - T_{F,m}) + q_v \cdot X_{cs} \\ h_s &= h_{s0}(1 - f_s)^n \end{aligned}$$

ここで，

q_d, q_s : 床面方向及び壁面方向の熱流束 [W/m²]

h_d, h_s : 溶融プールからクラストへの対流熱伝達係数 [W/m²/K]

h_{d0}, h_{s0} : 溶融プールが完全な液相の場合の対流熱伝達係数 [W/m²/K]

f_s : 固化割合 [-] n : 固化効果項の指数 [-]

T_f : 溶融プールの温度 [K]

$T_{F,m}$: デブリ融点 [K]

q_v : 体積発熱率 [W/m³]

X_{cd}, X_{cs} : 床面及び壁面のクラスト厚さ [m]

である。

対流熱伝達係数 h_{d0} 及び h_{s0} は、BETA 実験のベンチマーク解析を元に、それぞれ [] と [] が、固化効果項の指数 n は、 [] が推奨されている。

また、クラストの厚さについては、クラストのエネルギーバランス（溶融プールからの伝熱、水プール・コンクリートへの伝熱）により変化率が計算されている。側面方向及び床方向の溶融プールからの対流熱伝達係数が異なるため、下部クラストと側面クラストの厚さも異なる。

4.2 不確かさの整理

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、厳しいといえるが、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・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層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、残りが連続層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 1/3 割小さく設定されているため、不確かさとしては約 1/3 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小さくなく、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、残りは連続層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いえるが、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する。

クラストとコンクリートと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いえるが、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。

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)

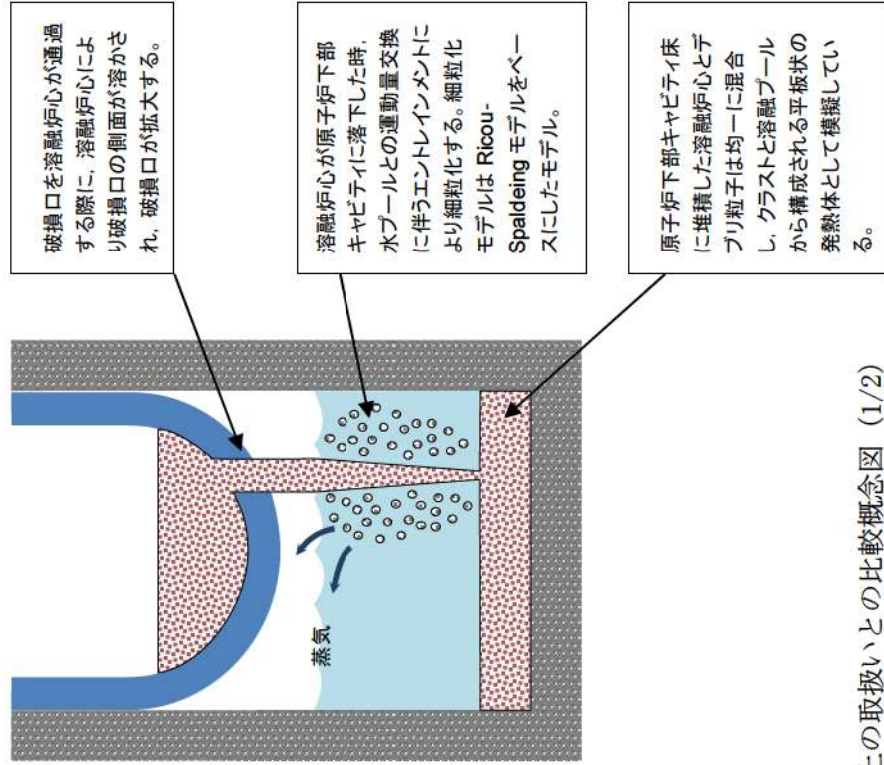
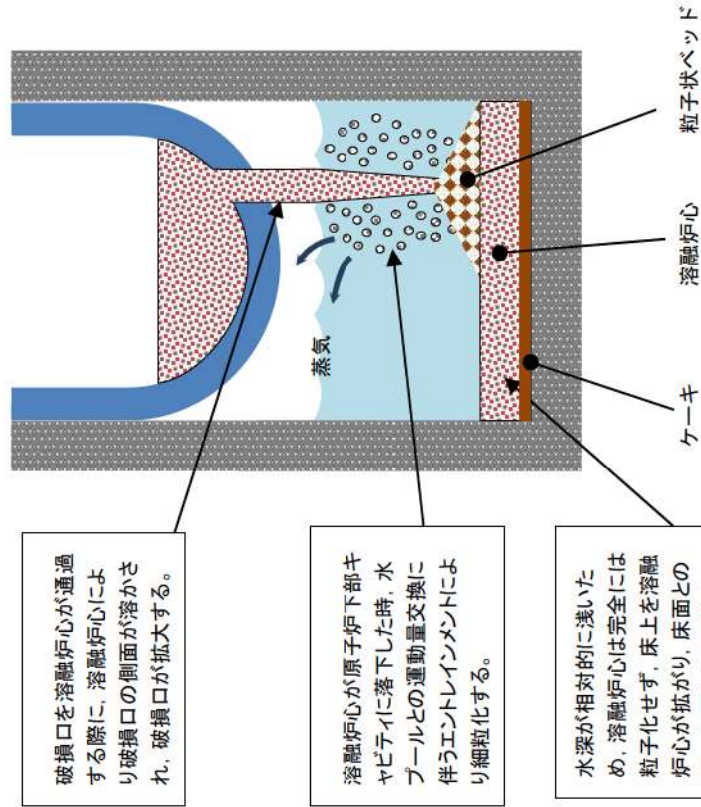
影響因子	実機での実現象	解析上の取扱い	感度解析条件
原子炉下部キャビティへの注入量	ブローダウン水、スプレイ水等が原子炉下部キャビティに回り込み、原子炉下部キャビティ水深が決まる。	ノード-ジャンクションモデルに従い、原子炉下部キャビティに流れ込む水量が評価される。	原子炉下部キャビティ水深 (5. (1)にて感度解析実施)
エントレインメント係数	デブリジェット径が大きいため、水中に落下する溶融炉心の内、エントレインメント部分はジェットの表面近傍に限られると想定される。	逆円錐型のデブリジェットに対して、Ricou-Spalding 相関式によって評価される。	エントレインメント係数 (5. (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。	床面積全面に一樣に拡がるとして、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て非凝縮性ガスが放出されるものとして評価される。	物性値が把握できており、感度解析不要

実機で想定される現象

計算モデルの扱い



破損口を溶融炉心が通過する際に、溶融炉心により破損口の側面が溶かされ、破損口が拡大する。

破損口を溶融炉心が通過する際に、溶融炉心により破損口の側面が溶かされ、破損口が拡大する。

溶融炉心が原子炉下部キャビティに落下した時、水プールとの運動量交換に伴うエントレインメントにより細粒化する。

溶融炉心が原子炉下部キャビティに落下した時、水プールとの運動量交換に伴うエントレインメントにより細粒化する。細粒化モデルは Ricou-Spaldeing モデルをベースにしたモデル。

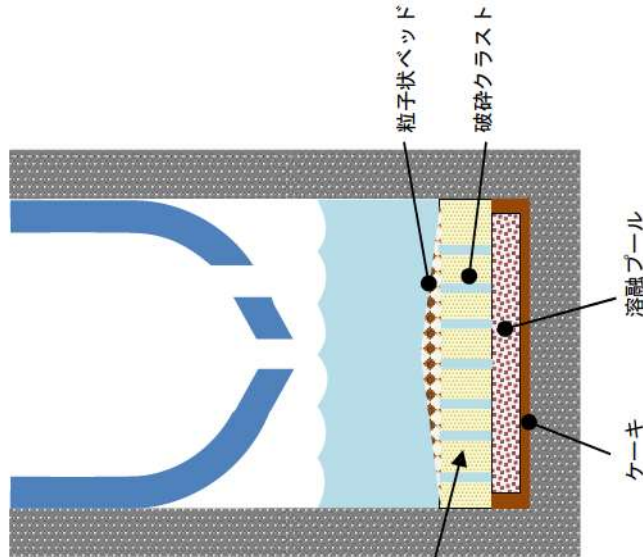
水深が相対的に浅いため、溶融炉心は完全に粒子化せず、床上を溶融炉心が拡がり、床面との間にケークが形成される。ジェットの一部は粒子化して溶融炉心上に降下する。

原子炉下部キャビティ床に堆積した溶融炉心とデブリ粒子は均一に混合し、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いる。

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

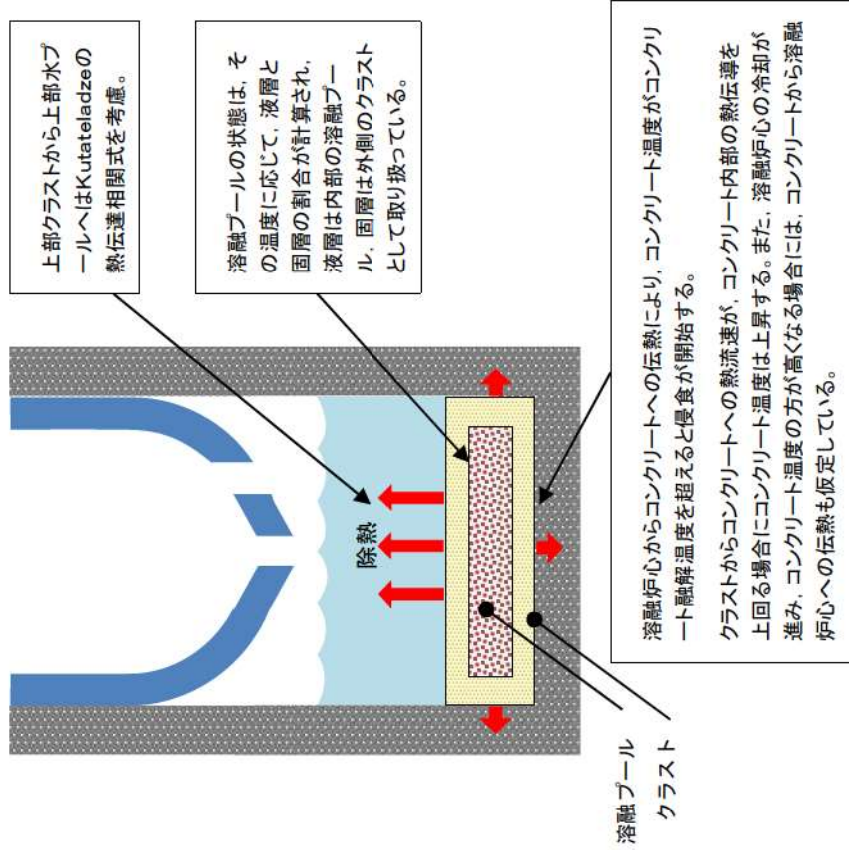
原子炉下部キャビティでの溶融炉心挙動

実機で想定される現象



溶融炉心上面からクラストが形成されるが、自重あるいは熱応力によって破碎していく。このため溶融炉心は急激に冷却されていく。
その後、溶融物は破碎クラストとなって固化し、上に粒子ベッドとケーキが存在する。

計算モデルの扱い



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

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

溶融炉心からコンクリートへの伝熱により、コンクリート温度がコンクリート融解温度を超えると侵食が開始する。
クラストからコンクリートへの熱流速が、コンクリート内部の熱伝導を上回る場合にコンクリート温度は上昇する。また、溶融炉心の冷却が進み、コンクリート温度の方が高くなる場合には、コンクリートから溶融炉心への伝熱も仮定している。

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

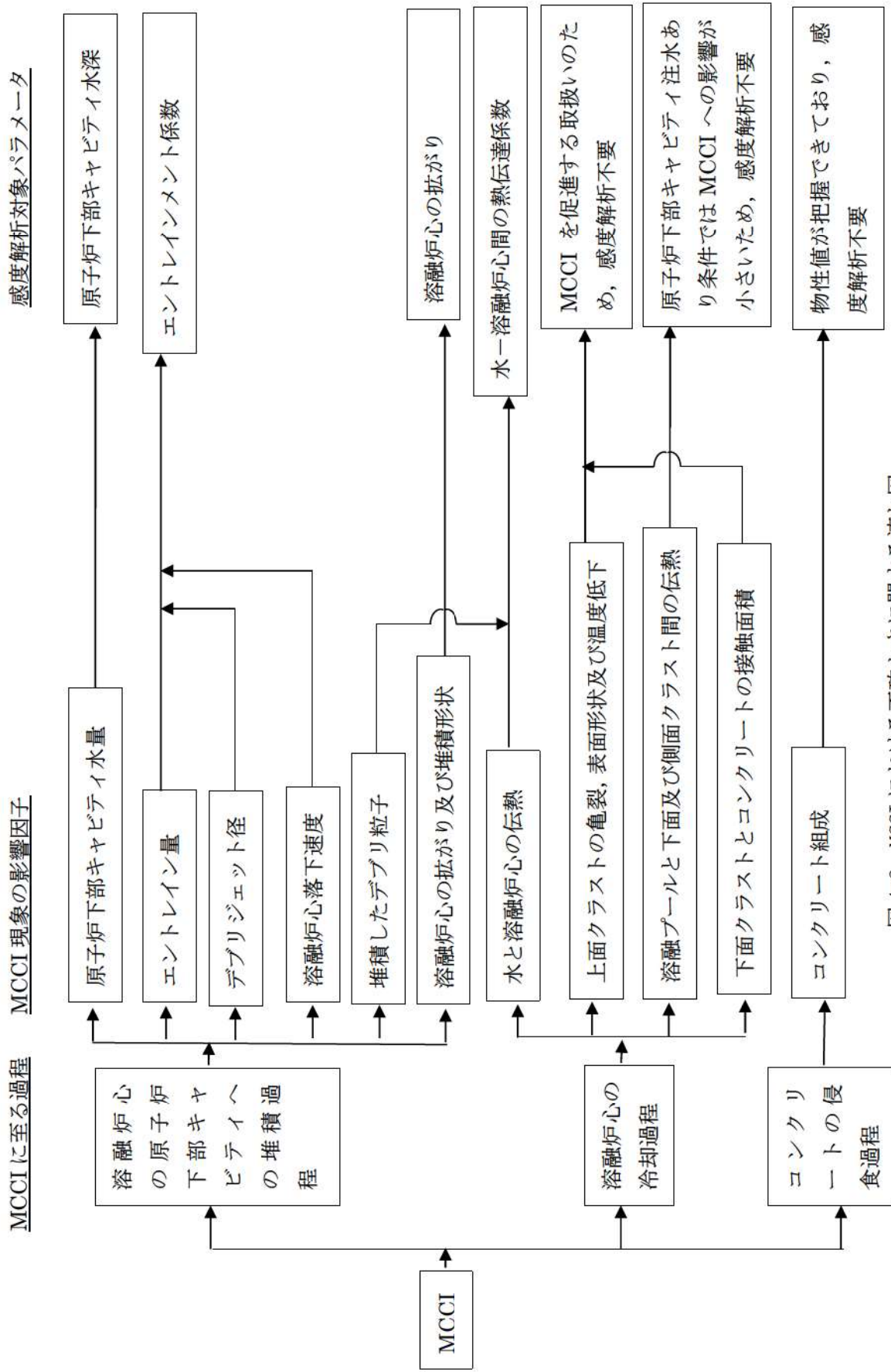
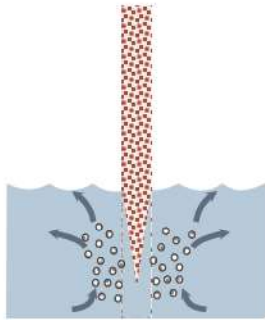
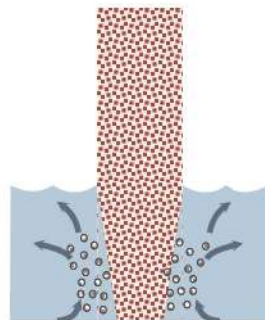


図 4-2 MCCI における不確かさに関する流れ図



(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

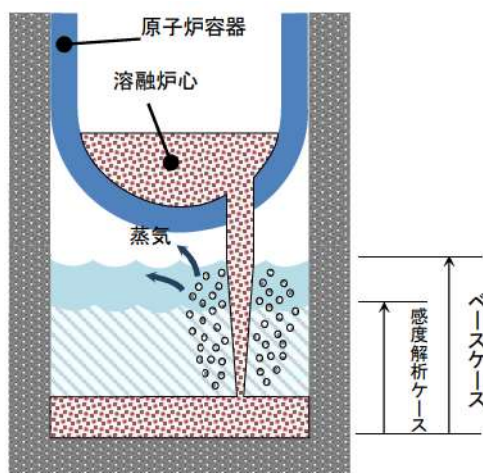
前章において抽出したパラメータに関して感度解析によりその影響程度を把握した。感度解析のベースケースは、3ループプラントの「大破断 LOCA+ECCS 注入失敗+CV スプレイ注入失敗」である。

(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、0.5~2m 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いえる。

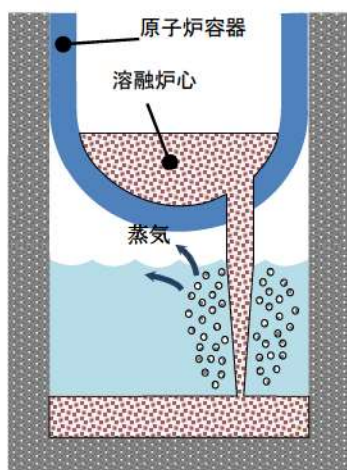
(2) Ricou-Spalding のエントレインメント係数

解析条件

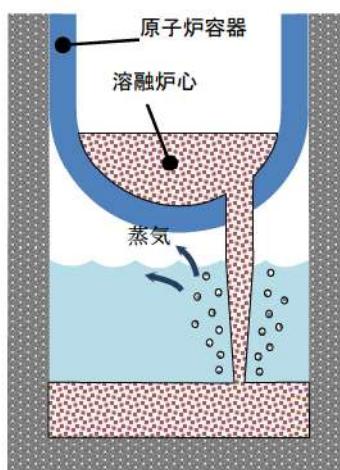
エントレインメント係数はベースケースでは [] を設定しているが、感度解析ケースでは、原子炉下部キャビティ底に直接落下する塊状の溶融炉心を多くして、コンクリートが加熱されやすくなるよう、MAAP コードの当該変数の推奨範囲 ([] ~ []) のうち最も小さい値、すなわち、細粒化割合が小さく評価される値である [] を設定する。なお、推奨範囲とは、FCI の大規模実験に対するベンチマーク解析において検討された範囲のことである。FCI の大規模実験の条件として、水プール水深は 0.87~2.05m、水プールのサブクール度は飽和~124K、雰囲気圧力条件は 2~5.8MPa (高圧条件)、0.2~0.5MPa (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層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、大半は連続層として原子炉下部キャビティ床に堆積し、落下中

に細粒化する溶融炉心は一部であるといえる。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層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 1.3MW/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、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。熔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、約〇割の不確かさ幅で感度を確認した結果、熔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-熔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、熔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、粒子状の熔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-熔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いえる。

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いえる。

(3) 熔融炉心の拡がり面積

解析条件

熔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。熔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、水中での熔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
- ・ 落下時に細粒化等により冷却が進むケース

まず、落下時に冷却されずに高温のまま床に到達するケースでは、評価上、最初の原子炉容器破損による熔融炉心の落下により、原子炉下部キャビティ床面に約 47 m²

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には制限されるため、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、落下時に細粒化等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。

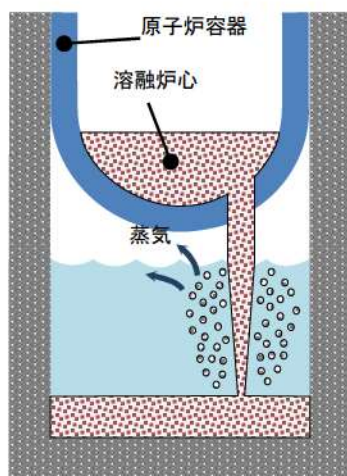
本ケースは以下の点から極端な条件で局所的に溶融炉心が堆積するよう想定しており、実機条件よりも厳しい条件を与えるものである。

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。

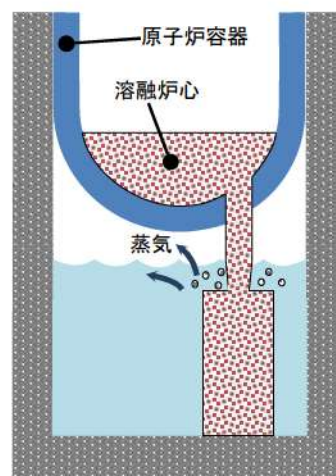
落下時に細粒化等により冷却が進むケースにおいては、落下時に冷却されずに高温のまま床に到達するケースと同様、溶融炉心の質量を約50t (MAAPコードにおける1回目の原子炉容器破損による溶融炉心落下量相当) で、拡がり面積を算出しており、原子炉下部キャビティ床上に落下した溶融炉心は、この拡がり面積で堆積するよう仮定している。しかし、実際は原子炉容器破損以降、溶融炉心は断続的に原子炉下部キャビティへ落下することから、拡がりに寄与する溶融炉心量は更に大きくなり、拡がり面積は大きくなると考えられる。なお、本ケースでは溶融炉心の堆積高さが原子炉下部キャビティ水面より高くなった場合は、原子炉下部キャビティ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-熔融炉心間の伝熱は熔融炉心の上面のみ計算する。しかし、熔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、熔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、熔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	熔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	落下時に細粒化等により冷却が進む



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、熔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。熔融炉心と水の熱流束については、感度解析ケースの方が、 $1\text{MW}/\text{m}^2$ を超える[※]高い値が継続する結果となっている。これは、熔融炉心の拡がり面積を制限したことで、熔融炉心と水の接触面積が小さくなり、その結果熔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、熔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、熔融炉心の冷却が遅くなっていることから、熔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

熔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。熔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熔融炉心が堆積するように設定しており、実機条件よりも厳しい条件を与えるものである。

※水-熔融炉心間の熱流束の上限値として設定している $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ 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-熔融炉心間の熱伝達係数

解析条件

水と熔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熔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 $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ に相当する値を使用している。

なお、熔融炉心が原子炉下部キャビティ水に落下する際は、熔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、それにより熔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熔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、熔融炉心落下直後は熱流束が比較的高い状態が持続され、この間に熔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、熔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、熔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等による破損により、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²¹で示されており、高温の熔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判断できる。

²¹ 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)

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検討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 $3\text{MW}/\text{m}^2$ を適用する。なお、常に高い熱流束が維持されるのではなく、熔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熔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 $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ を選定する。

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

CCI実験では、コンクリート侵食開始後に注水しており、クラストと熔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熔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 $3\text{MW}/\text{m}^2$ まで再上昇しているが、これはクラストと熔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、高温の熔融物と水が直接接触することによって熱流束が大きくなったものである。実機スケールでは、このような空洞は形成されないと考えられるため、感度解析の条件設定の際の検討対象から除外することとした。

感度解析ケース3では、次のように熱流束を設定する。

まず、熔融炉心内部が熔融状態の場合、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、部分的にも熔融炉心から水へ、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、小規模実験で熔融物へ注水を開始した時点と同等と考えられ、MACE実験、CCI実験では $1\text{MW}/\text{m}^2$ 以上の値が観測されている。熔融炉心の落下直後は、高温の熔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、内部に熔融部が存在する間の熱流束として、一律に $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ を適用する。

次に、熔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

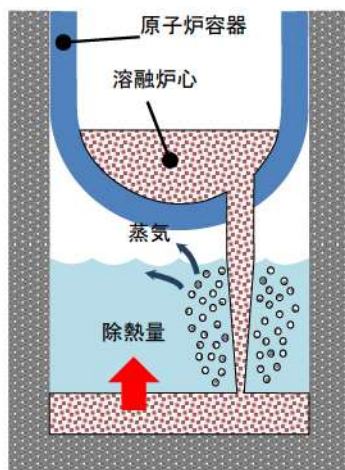
下直後の高い熱流束やクラストの破損による内部の溶融炉心と原子炉下部キャビティ水との直接接触を考慮せず、CCI-2 及び CCI-3 実験において初期のピークを除外した熱流束である $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ を選定する。

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

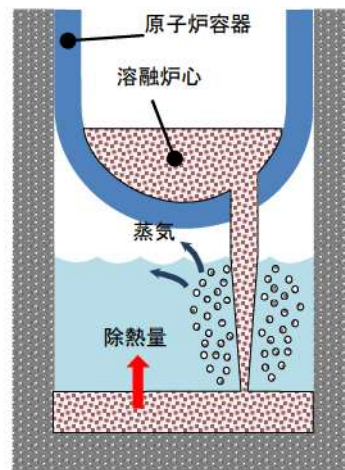
感度解析ケース 4 では、WETCOR, MACE, CCI 実験においてクラスト全体が固化して温度が低下した状態の熱流束である $0.2\text{MW}/\text{m}^2$ を適用する。これについて、溶融炉心は、溶融状態で原子炉下部キャビティ水と直接接触するため、溶融炉心落下直後は高い熱流束が得られると考えられるが、本感度解析は溶融炉心落下直後から、安定化クラスト形成後の熱流束を仮定しているという点で、仮想的なケースであるといえる。

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熔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	熔融物存在時 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))	熔融物存在時はベースケースと同様。全体固化時は感度解析ケース 2 と同様。コンクリート混入時は SSWICS 実験での熱流束値
感度解析ケース 4	0.025 (0.2 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-熔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 $2\text{MW}/\text{m}^2$ 以上となる場合があり、ベースケースの限界熱流束（約 $1.3\text{MW}/\text{m}^2$ ）に比べて高く、限界熱流束の継続時間はベースケースよりも短くなっている。感度解析ケースでは、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 $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ （大気圧で $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ 相当）とベースケースより低く、限界熱流束の持続時間はベースケースより若干長く、約20分となっている。感度解析ケースでは、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 $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ （大気圧で $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ 相当）とベースケースより低く、限界熱流束の持続時間はベースケースより長くなっている。感度解析ケースでは、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 $0.3\text{MW}/\text{m}^2$ で推移しており、ベースケースの限界熱流束（約 $1.3\text{MW}/\text{m}^2$ ）に比べて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、 $0.1\text{MW}/\text{m}^2$ 前後の熱流束が継続している。その結果、コンクリートの侵食深さはベースケースの解析結果である約 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
- ・ 落下時に細粒化等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、「落下時に細粒化等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	落下時に細粒化等により冷却 が進む
	Kutateladze 係数	溶融物存在時 0.1 (0.8 MW/m ² 相当 ^(注)) 全体固化時 0.0625 (0.5 MW/m ² 相当 ^(注)) コンクリート 15%混入時 0.015625 (0.125 MW/m ² 相当 ^(注))	CCI 実験, SSWICS 実験に基づ く熱流束を設定

(注) 大気圧条件

解析結果

図 5-5-1～5-5-9 に、本感度解析の結果を示す。

感度解析ケース 1 は、熔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-熔融炉心間の熱流束は、ベースケースでは、熔融炉心が原子炉下部キャビティに落下するごとに、大気圧条件相当で $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ であるのに対して、感度解析ケース 1 では、最初の落下時に大気圧条件相当で $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ に達するものの、その後は瞬時に全体が固化するため、大気圧条件相当で $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ となる。このため、熔融炉心温度、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 11kg 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、熔融炉心落下時に細粒化等により冷却が進むケースであり、水-熔融炉心間の熱流束について、ベースケースに比べて、熔融炉心の拡がり面積を制限したことで、熔融炉心と水の接触面積が小さくなり、その結果、熔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、熔融炉心温度、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 (原子炉格納容器内水素処理装置 (PAR) 及び格納容器水素イグナイタ (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 23 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%)	23.46kg (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%)	23.46kg (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、熔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。熔融炉心落下時に細粒化等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、熔融炉心の拡がり面積として、極端な条件で局所的に熔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。」

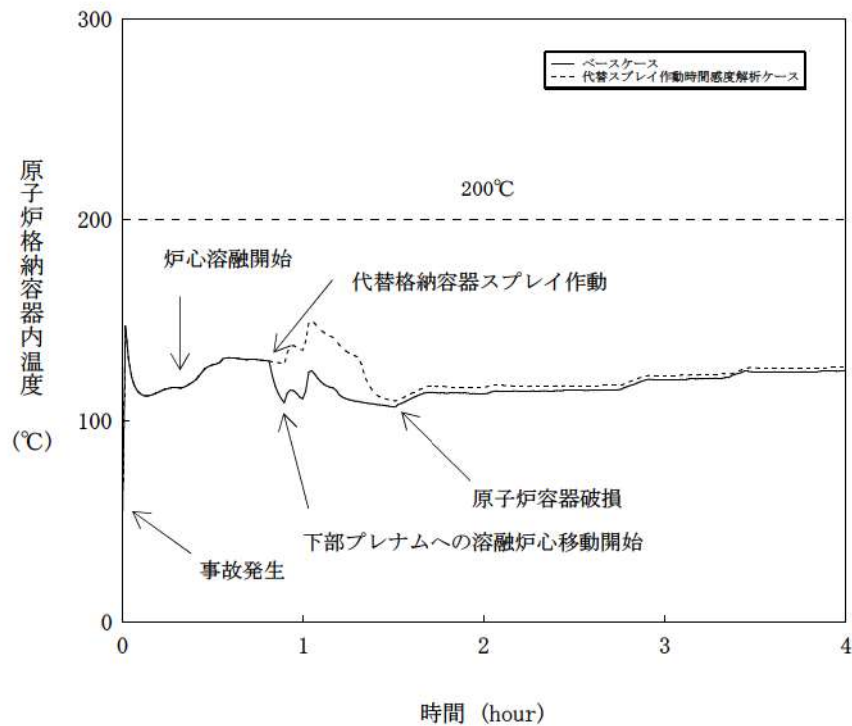


図 5-1-1 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（1）

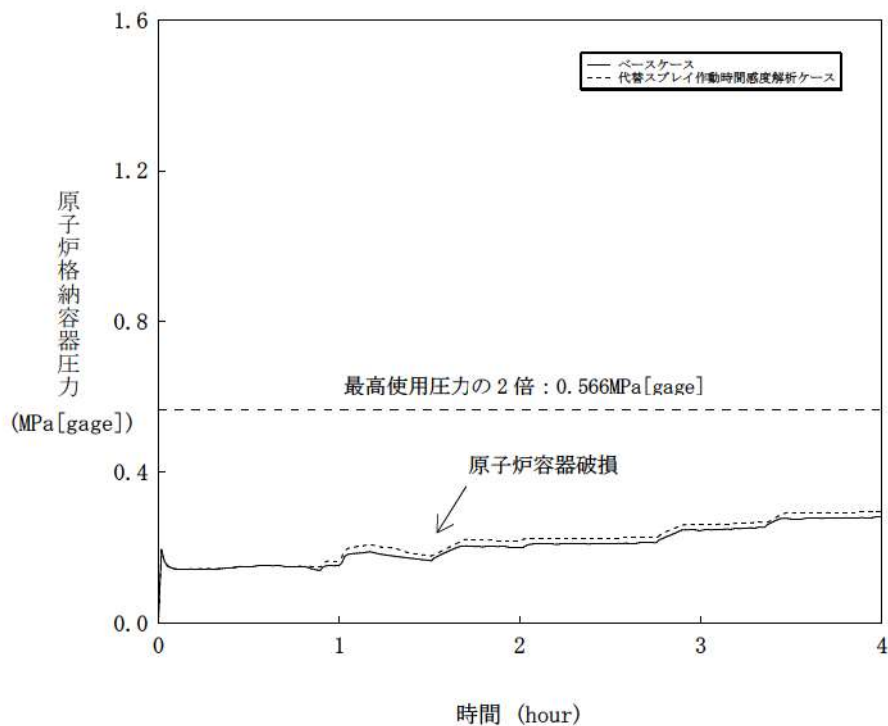


図 5-1-2 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析（2）

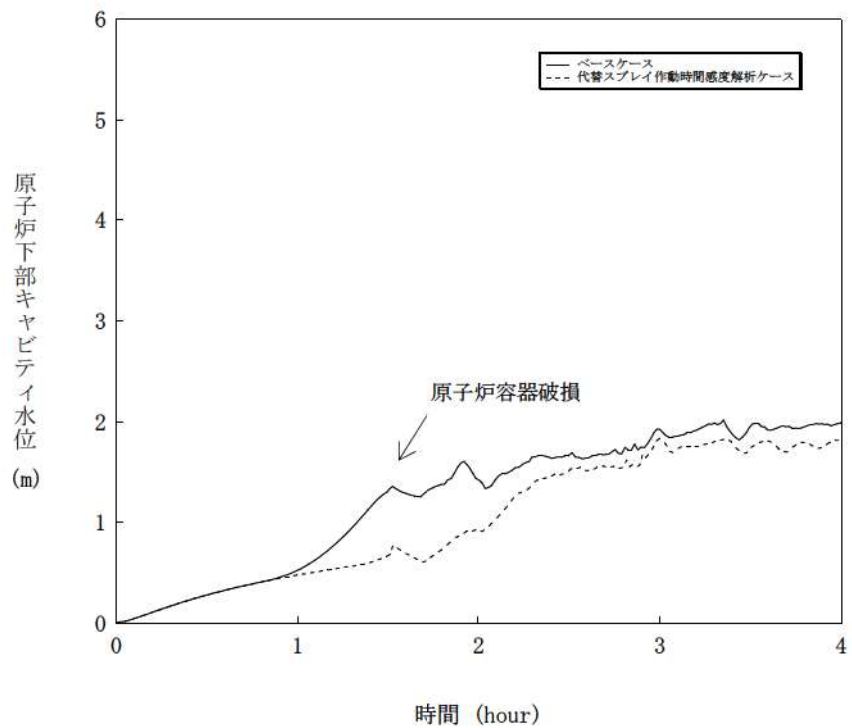


図 5-1-3 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (3)

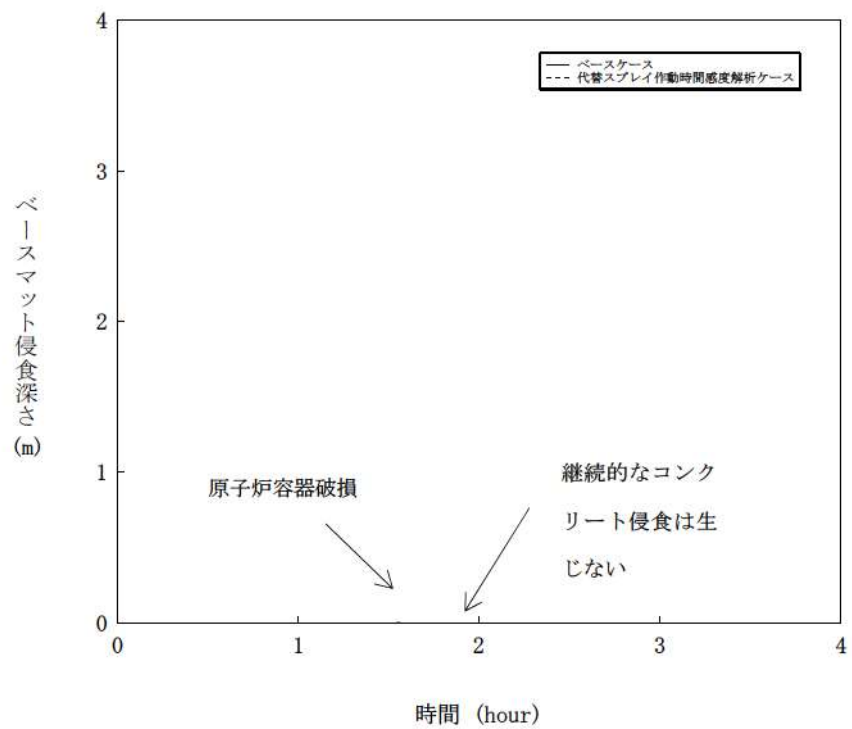


図 5-1-4 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (4)

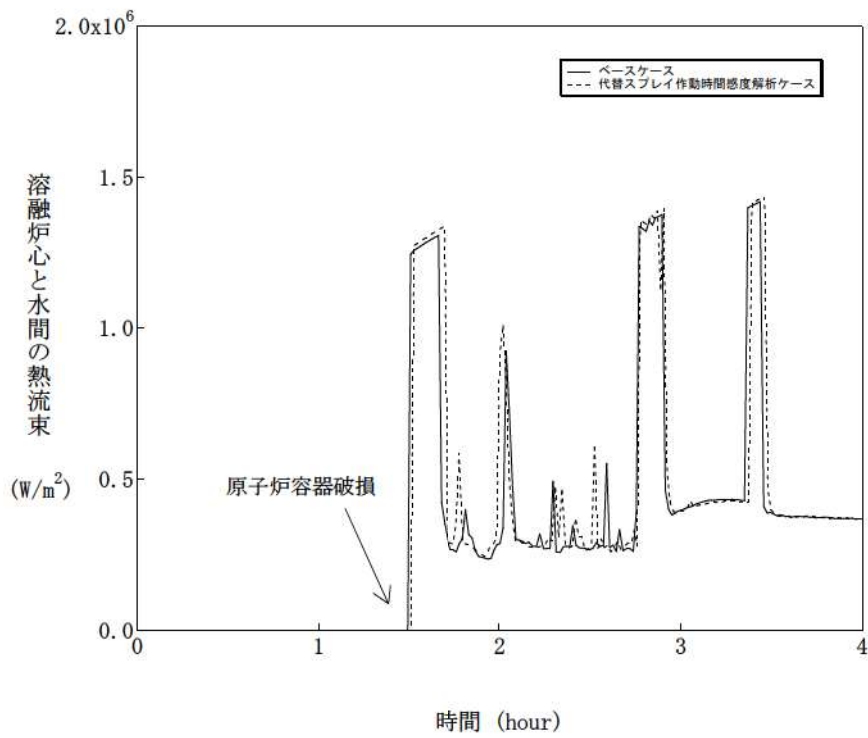


図 5-1-5 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (5)

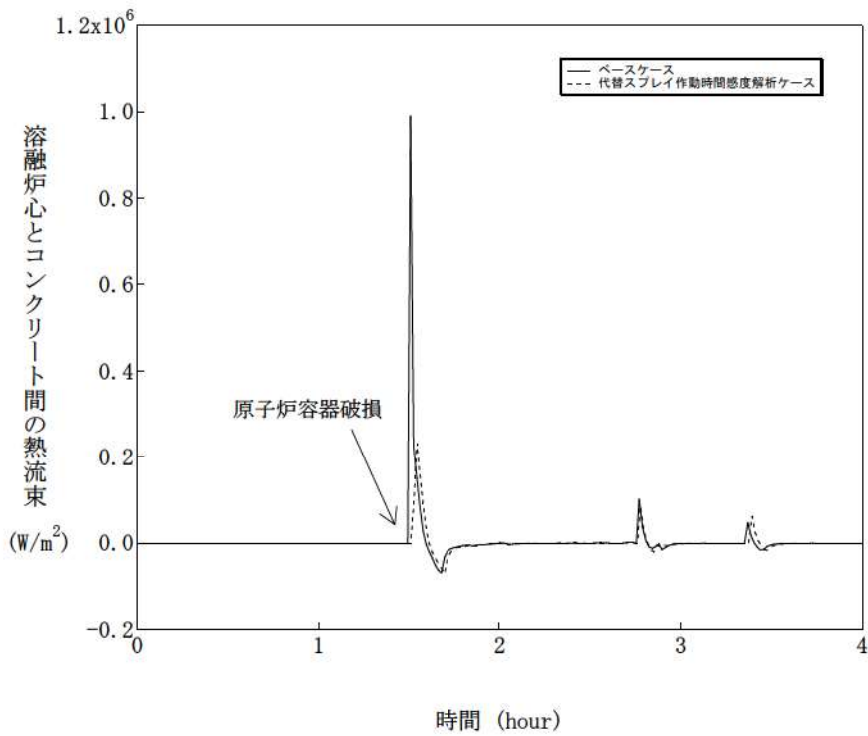


図 5-1-6 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (6)

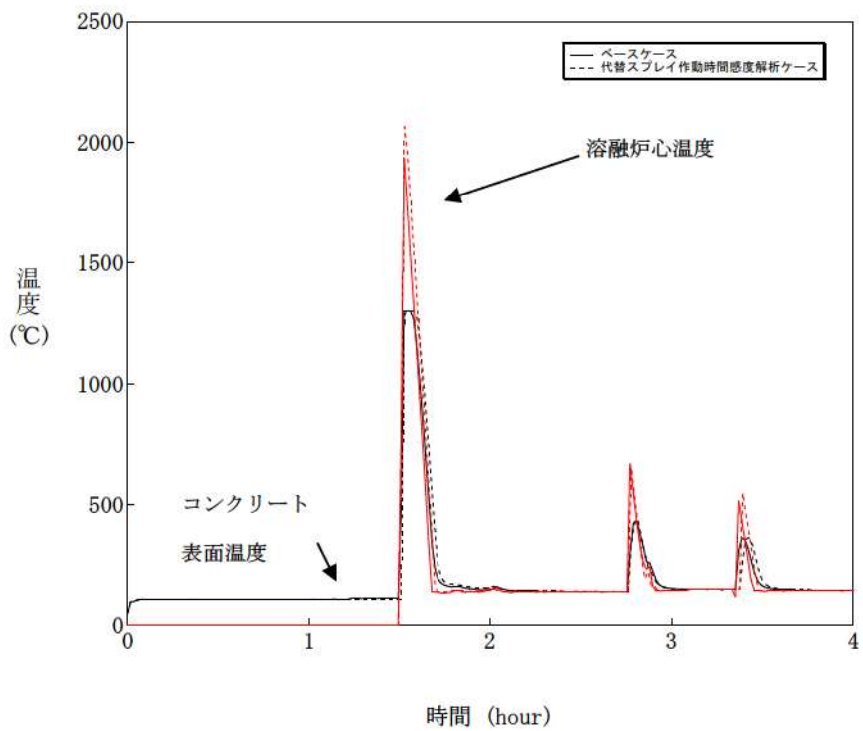


図 5-1-7 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (7)

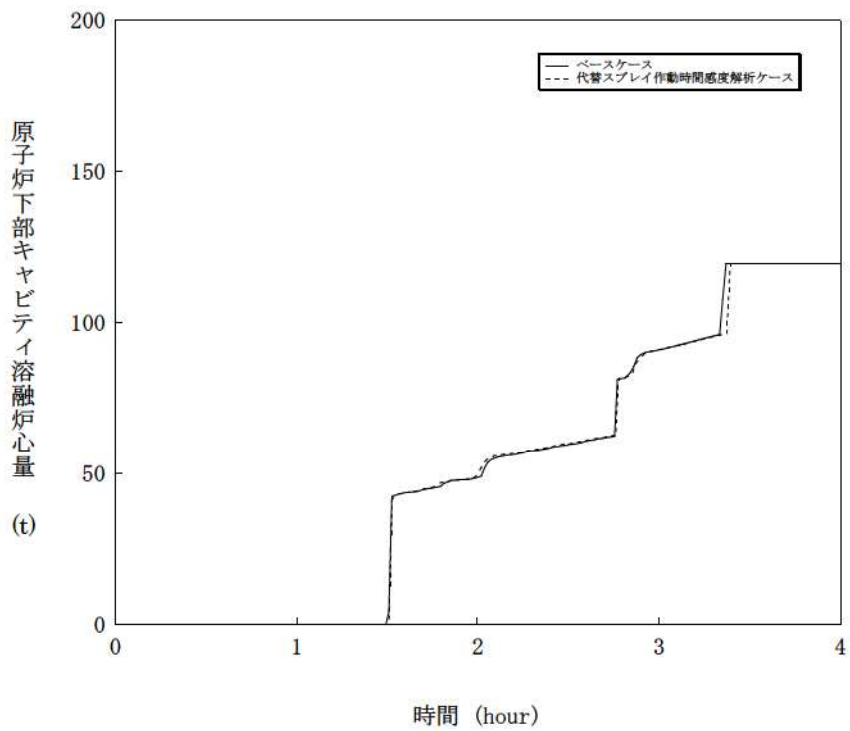


図 5-1-8 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (8)

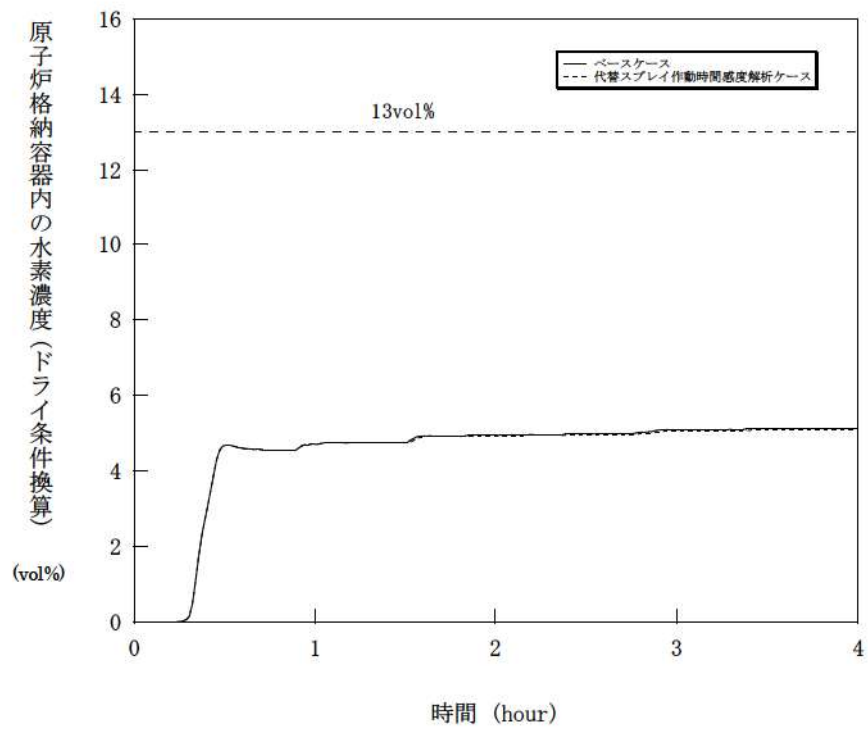


図 5-1-9 代替格納容器スプレイ作動時刻感度解析 (9)

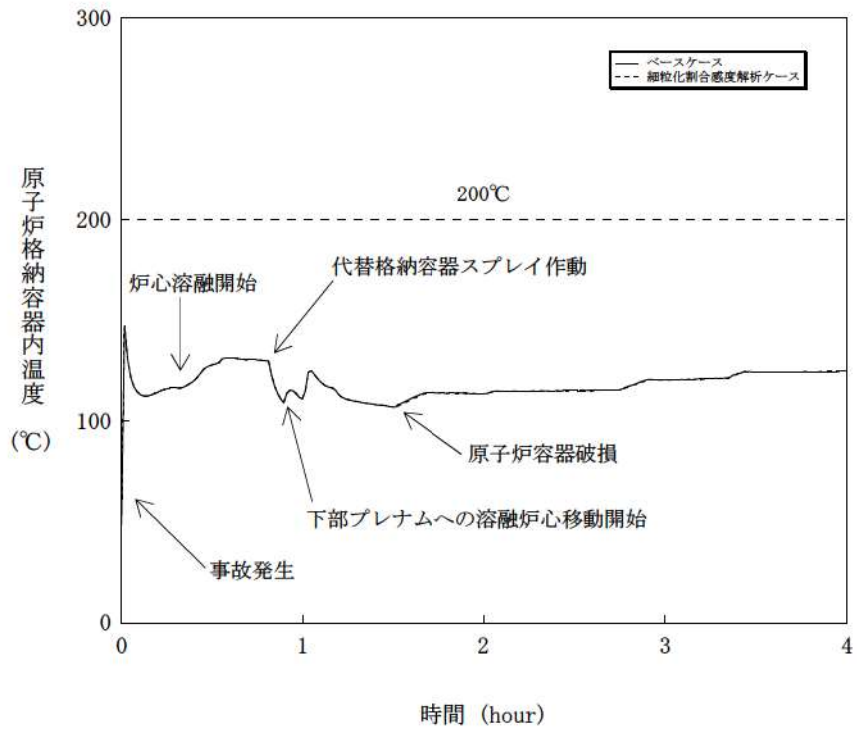


図 5-2-1 溶融炉心の細粒化割合感度解析 (1)

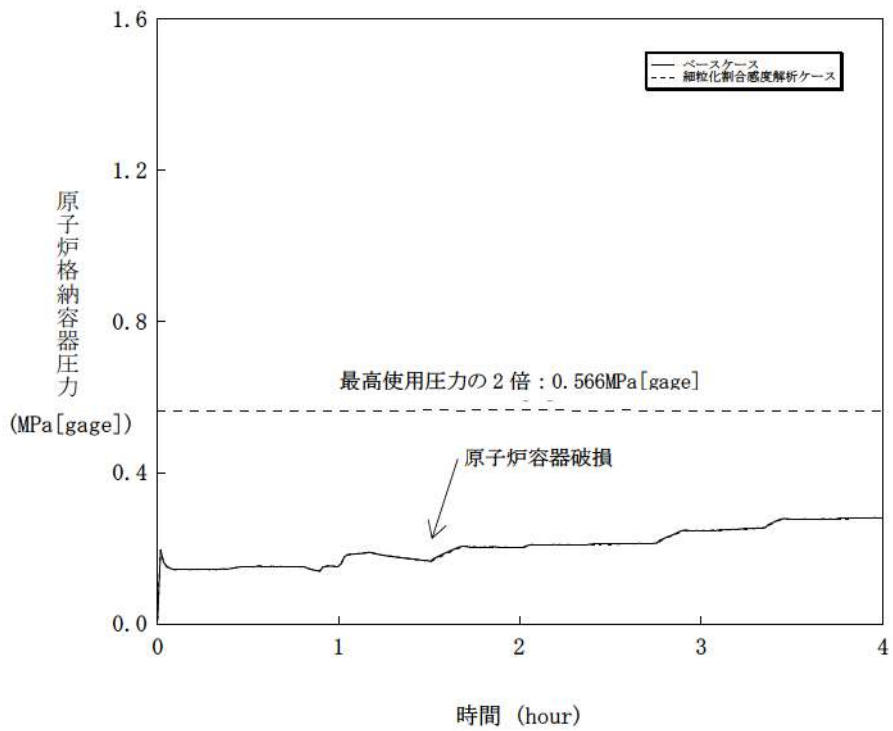


図 5-2-2 溶融炉心の細粒化割合感度解析 (2)

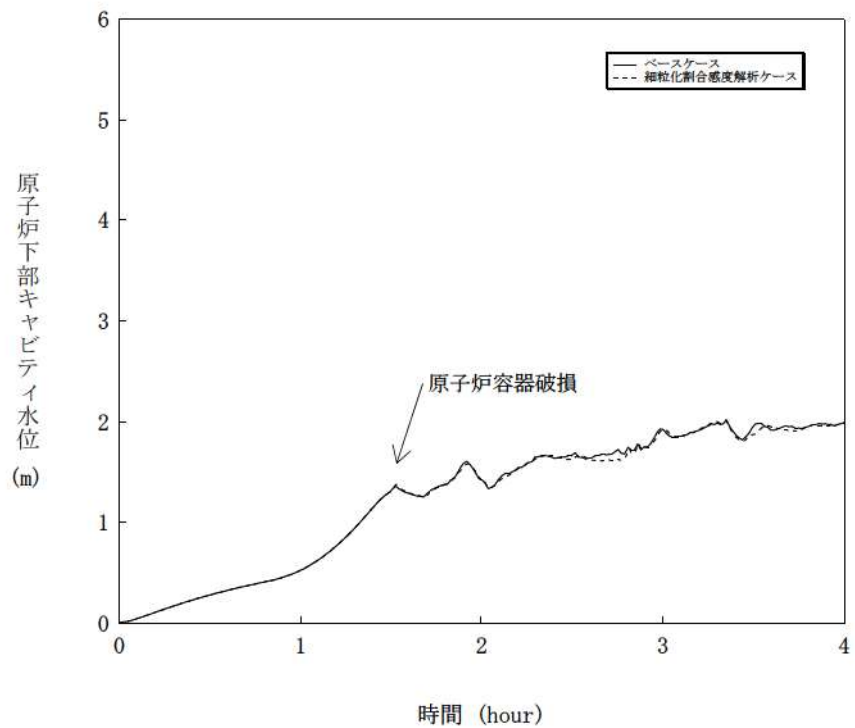


図 5-2-3 熔融炉心の細粒化割合感度解析 (3)

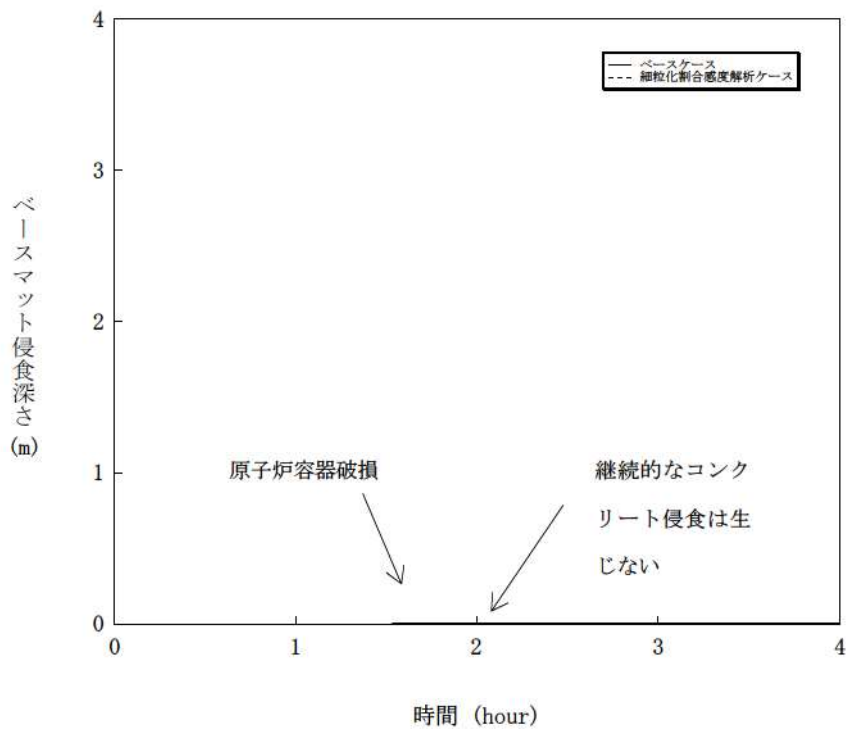


図 5-2-4 熔融炉心の細粒化割合感度解析 (4)

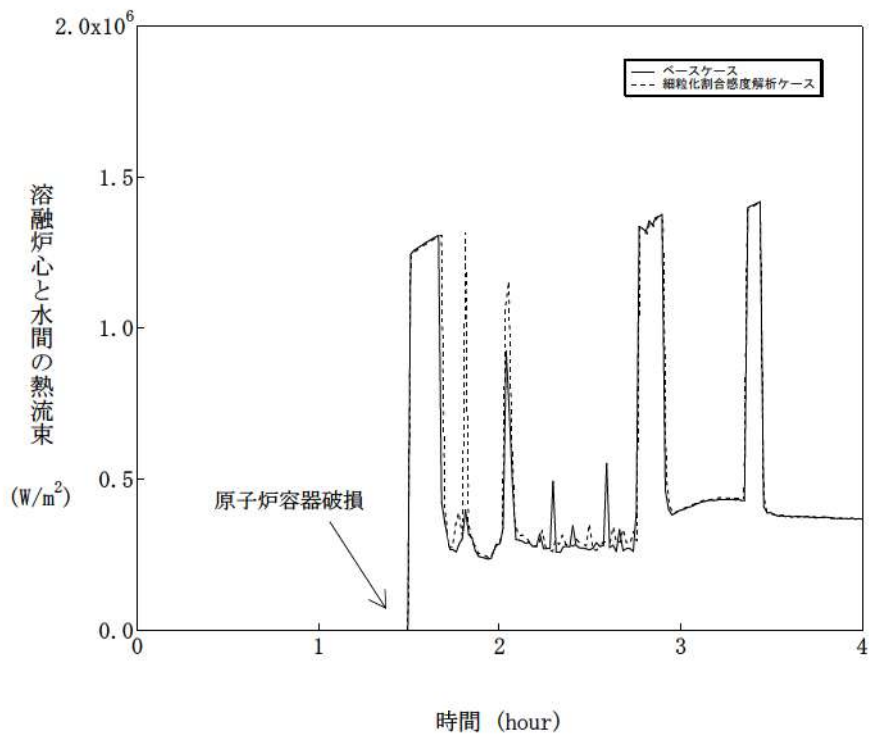


図 5-2-5 溶融炉心の細粒化割合感度解析 (5)

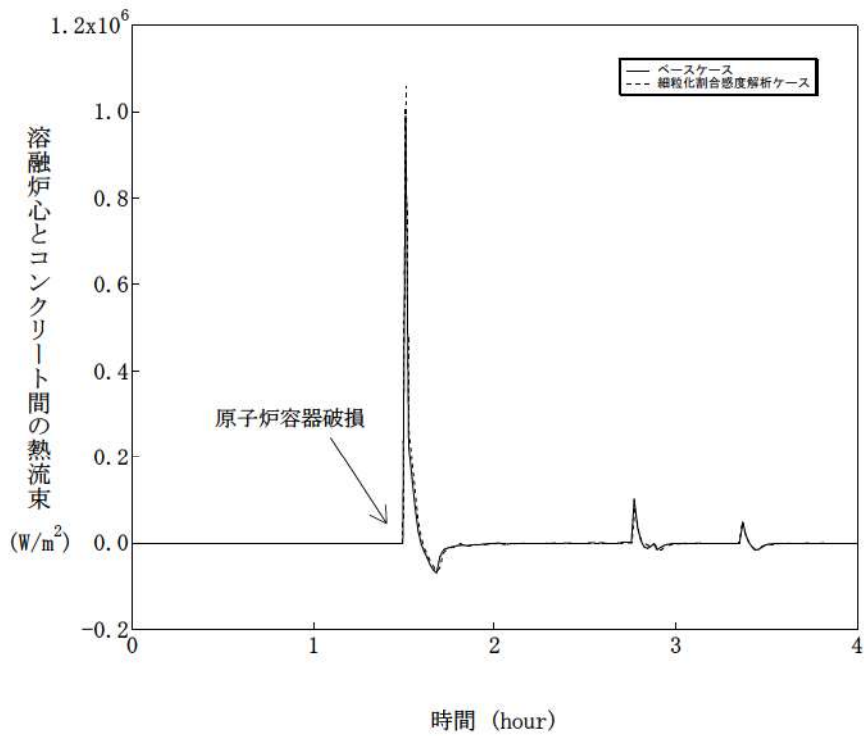


図 5-2-6 溶融炉心の細粒化割合感度解析 (6)

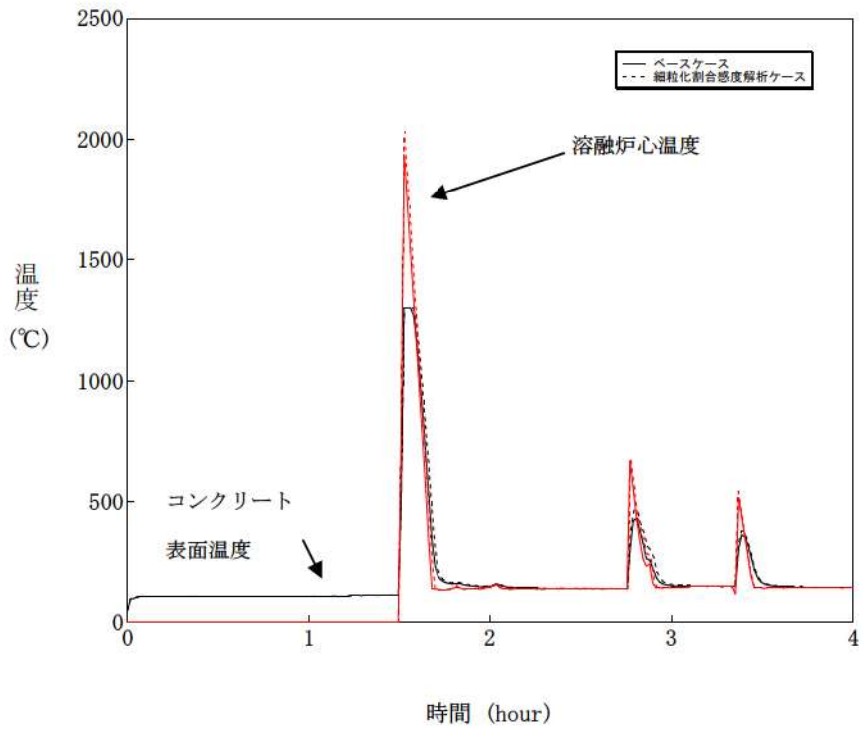


図 5-2-7 熔融炉心の細粒化割合感度解析 (7)

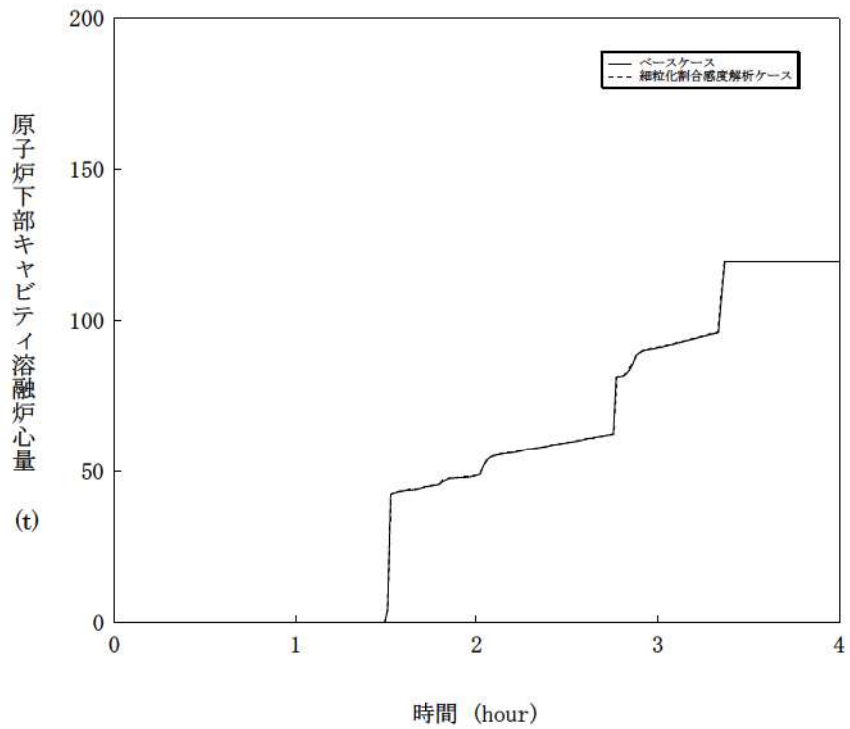


図 5-2-8 熔融炉心の細粒化割合感度解析 (8)

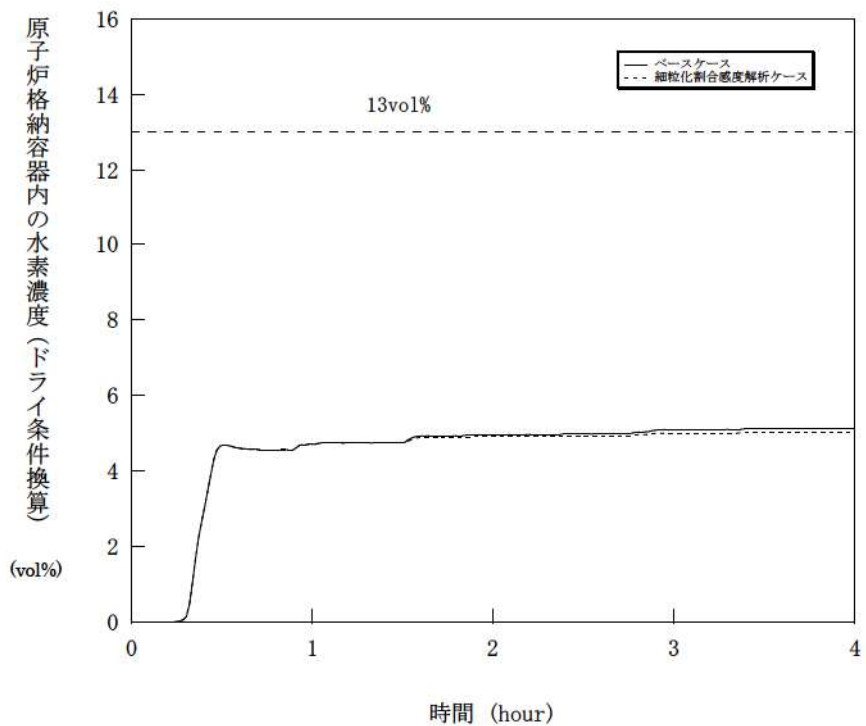


図 5-2-9 溶融炉心の細粒化割合感度解析 (9)

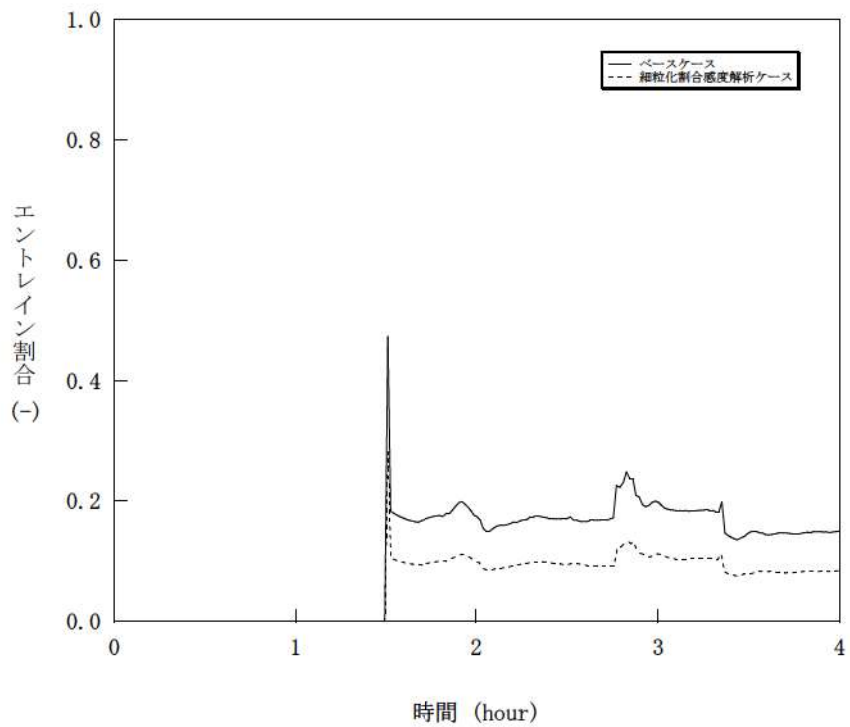


図 5-2-10 溶融炉心の細粒化割合感度解析 (10)

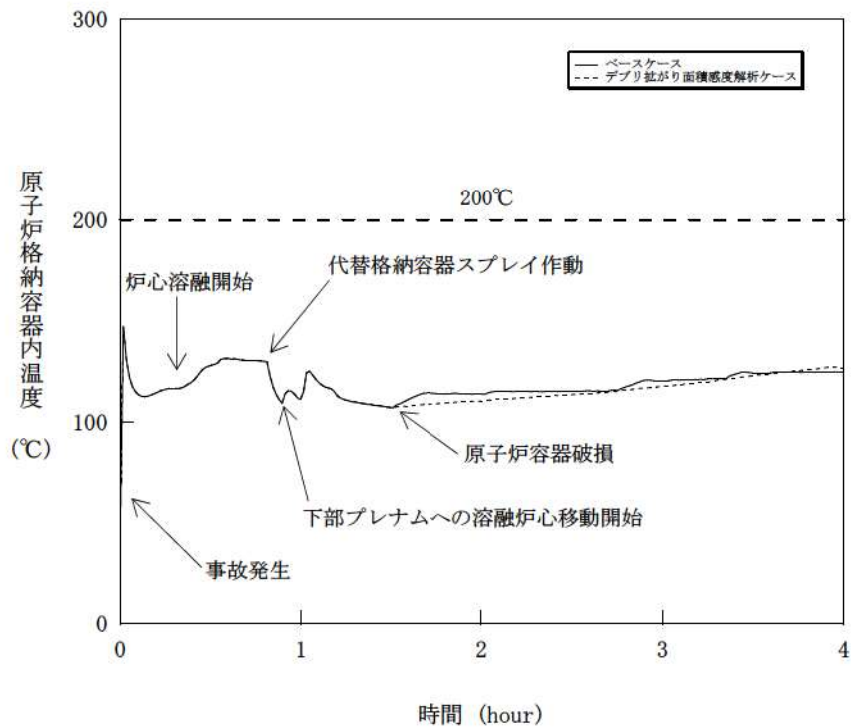


図 5-3-1 溶融炉心の拡がり面積感度解析 (1)

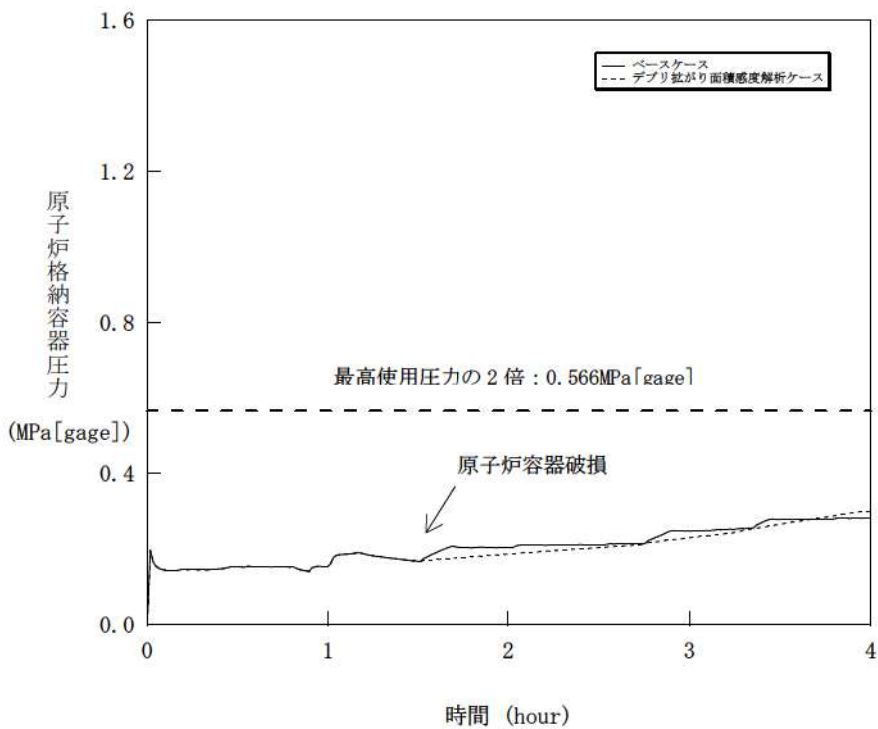


図 5-3-2 溶融炉心の拡がり面積感度解析 (2)

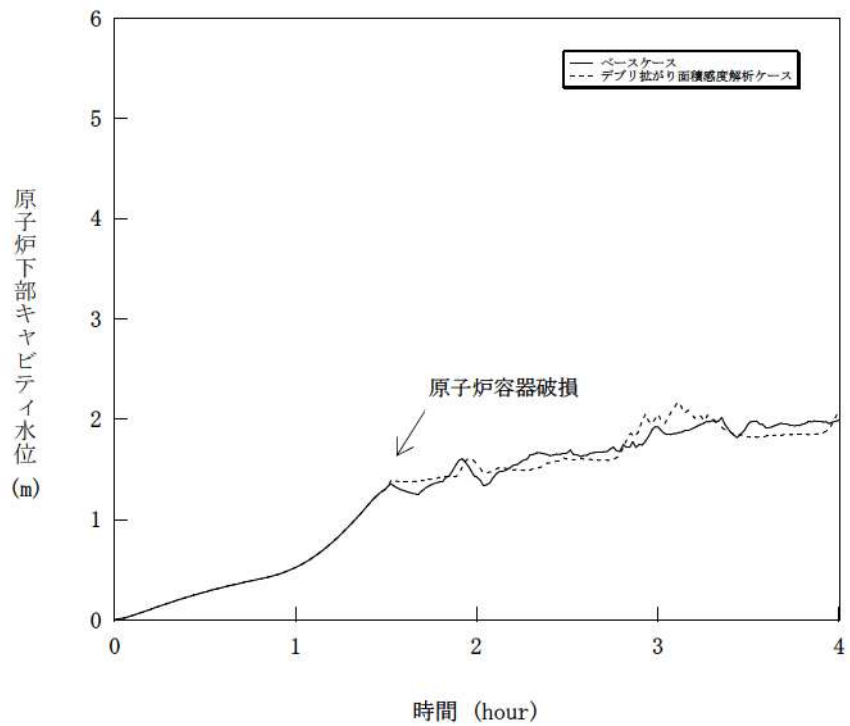


図 5-3-3 溶融炉心の拡がり面積感度解析 (3)

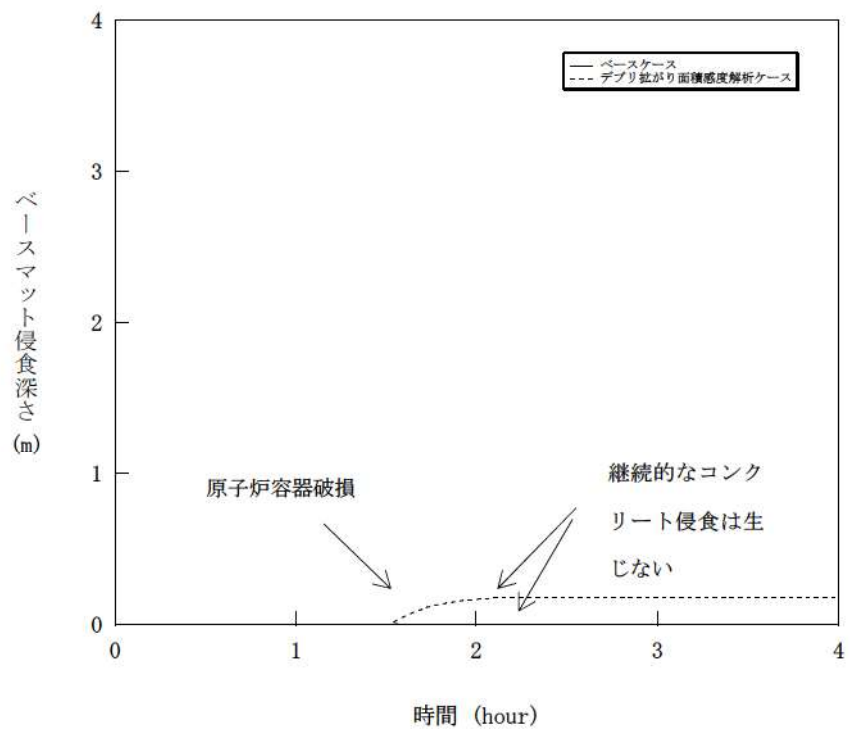


図 5-3-4 溶融炉心の拡がり面積感度解析 (4)

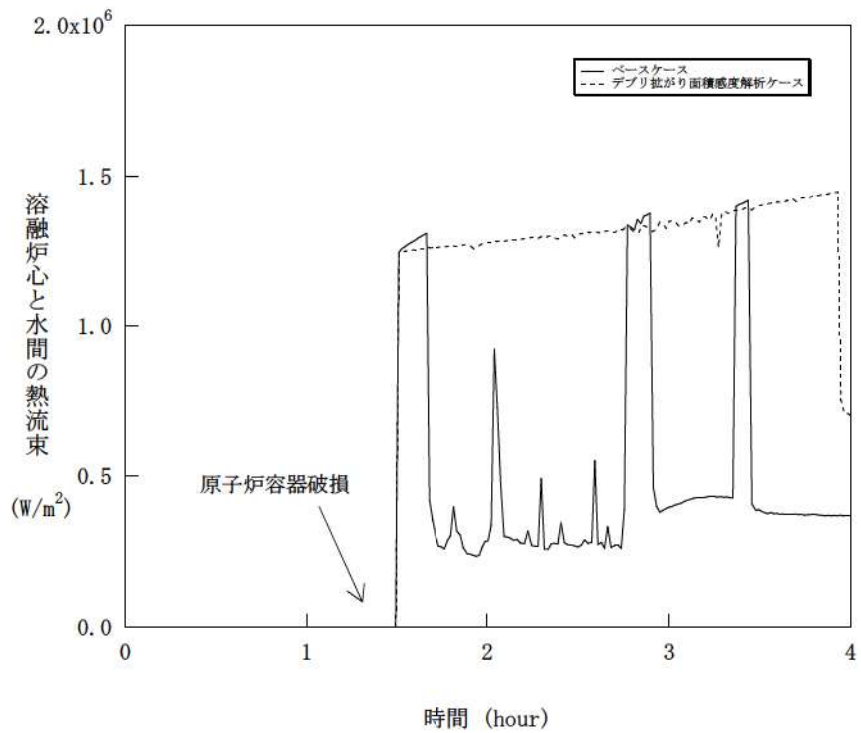


図 5-3-5 溶融炉心の拡がり面積感度解析 (5)

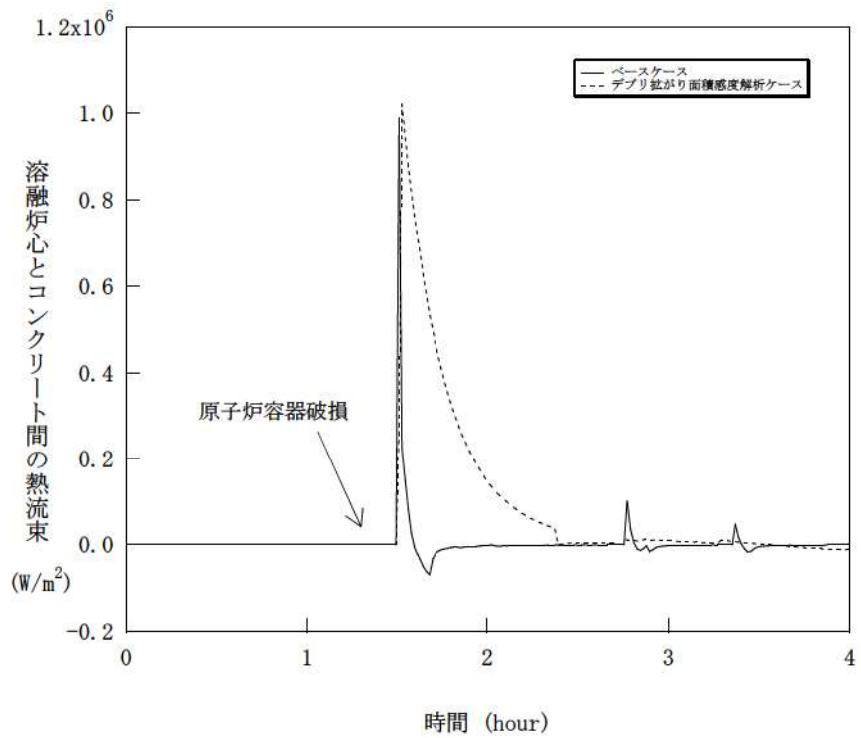


図 5-3-6 溶融炉心の拡がり面積感度解析 (6)

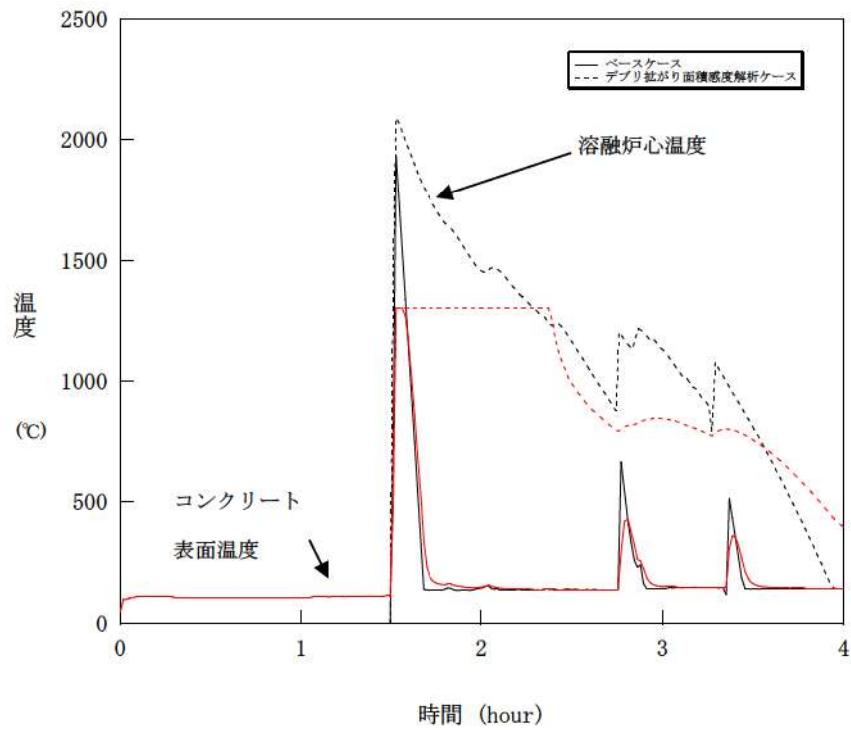


図 5-3-7 融融炉心の拡がり面積感度解析 (7)

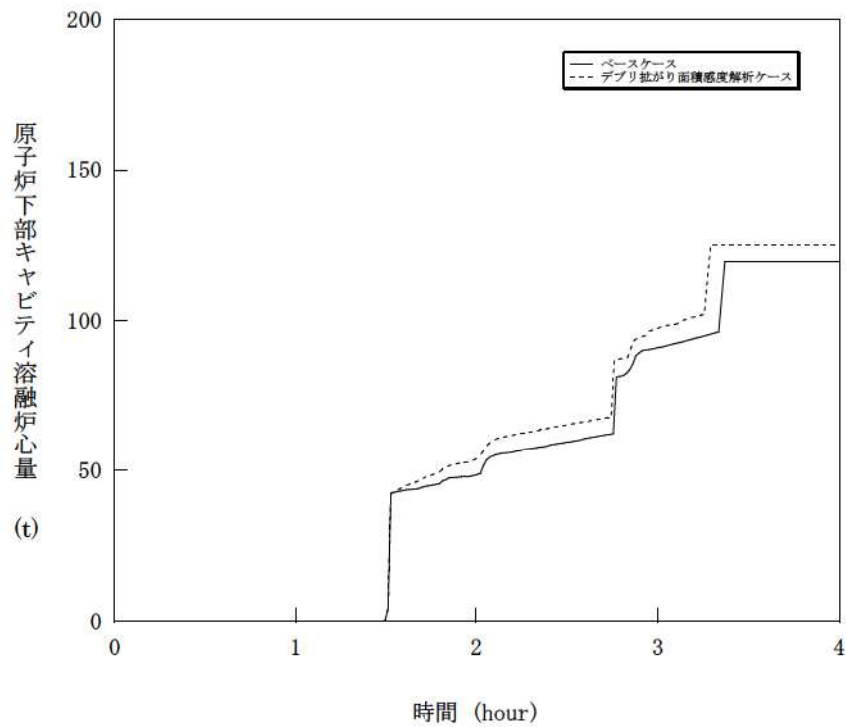


図 5-3-8 融融炉心の拡がり面積感度解析 (8)

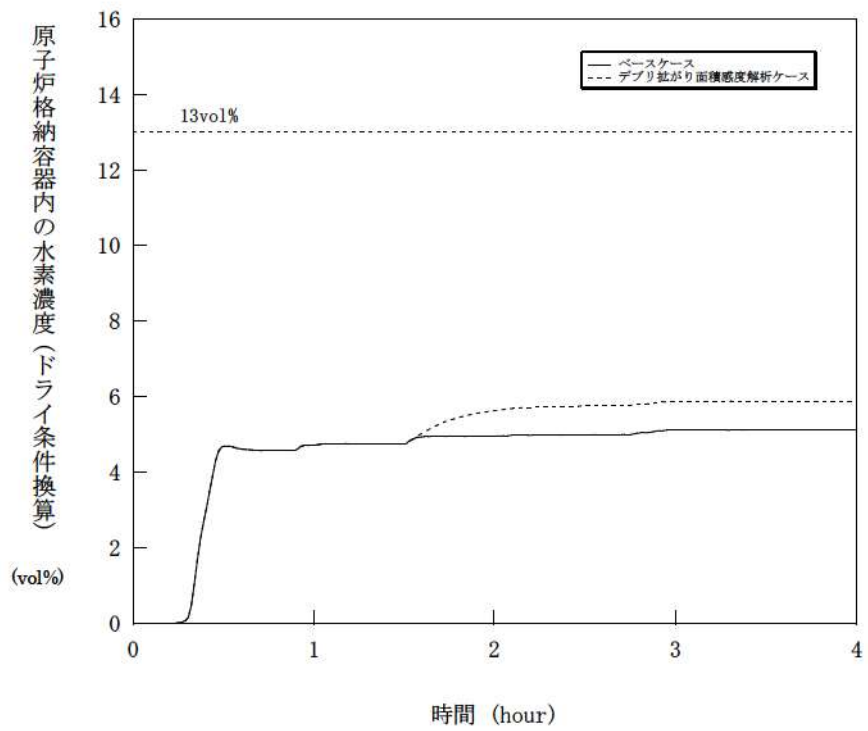


図 5-3-9 溶融炉心の拡がり面積感度解析 (9)

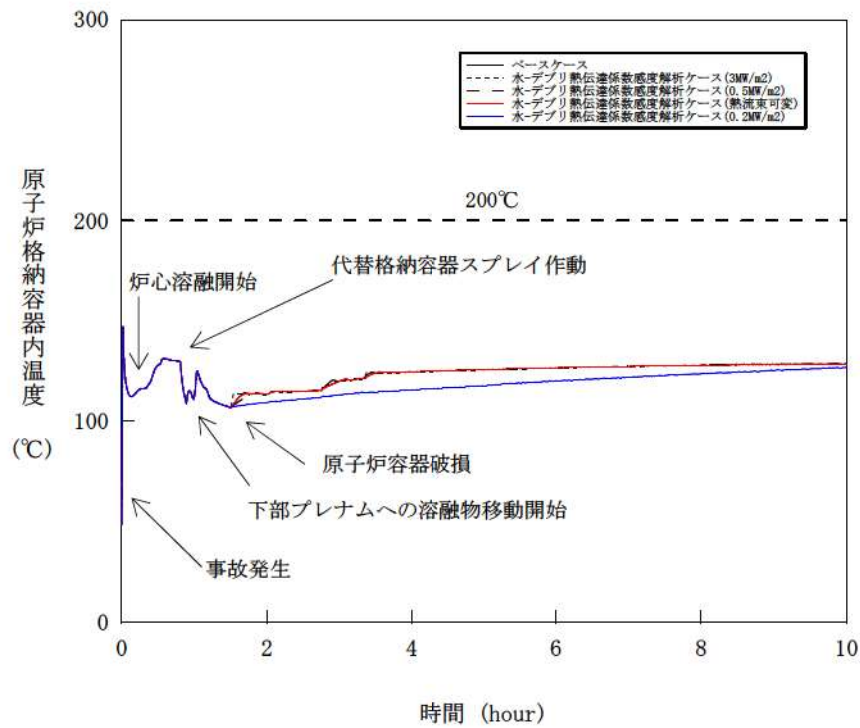


図 5-4-1 水-溶融炉心間の熱伝達係数感度解析 (1)

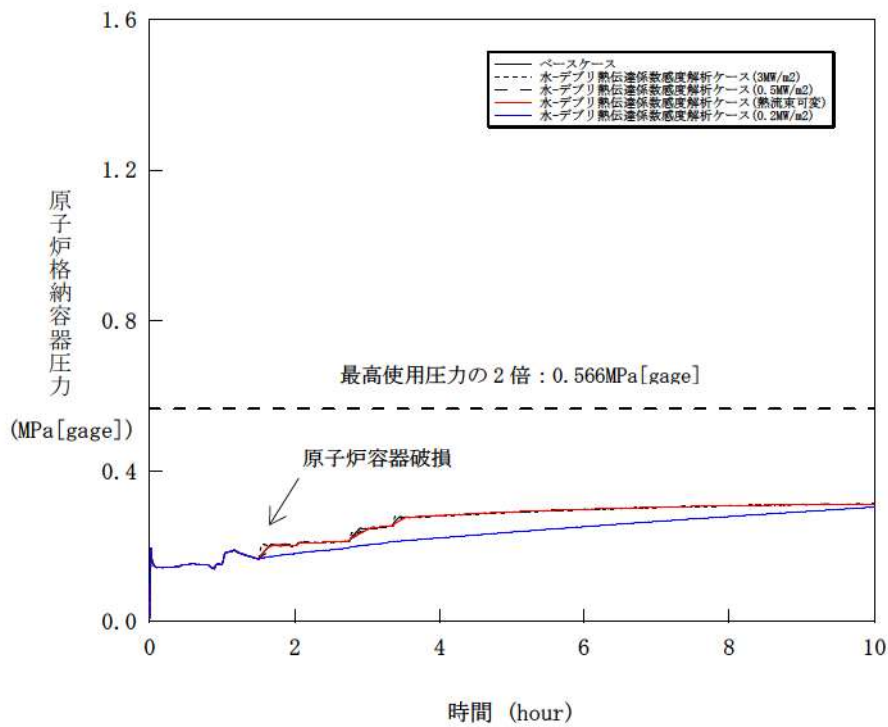


図 5-4-2 水-溶融炉心間の熱伝達係数感度解析 (2)

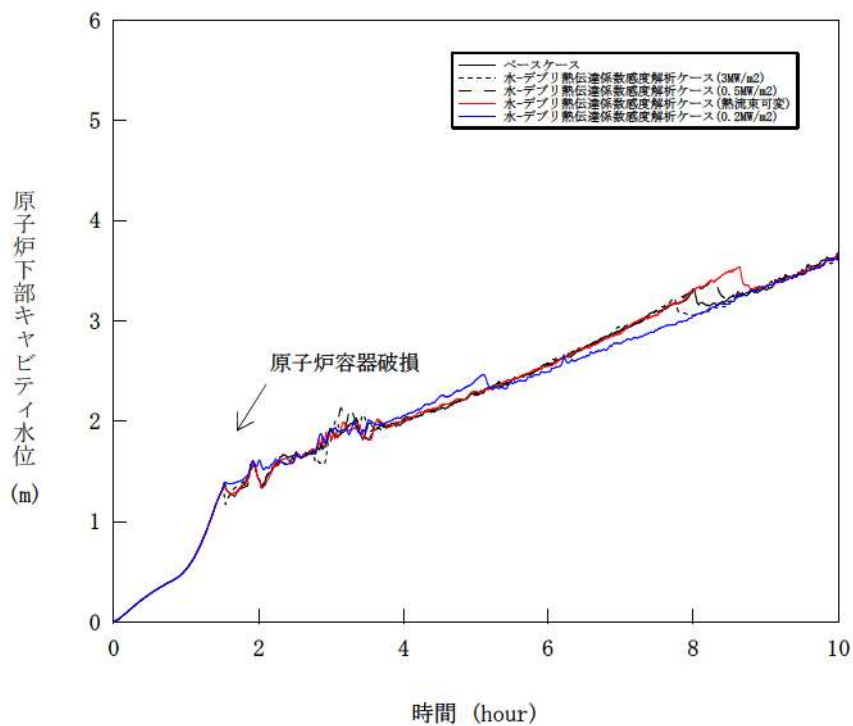


図 5-4-3 水-溶融炉心間の熱伝達係数感度解析 (3)

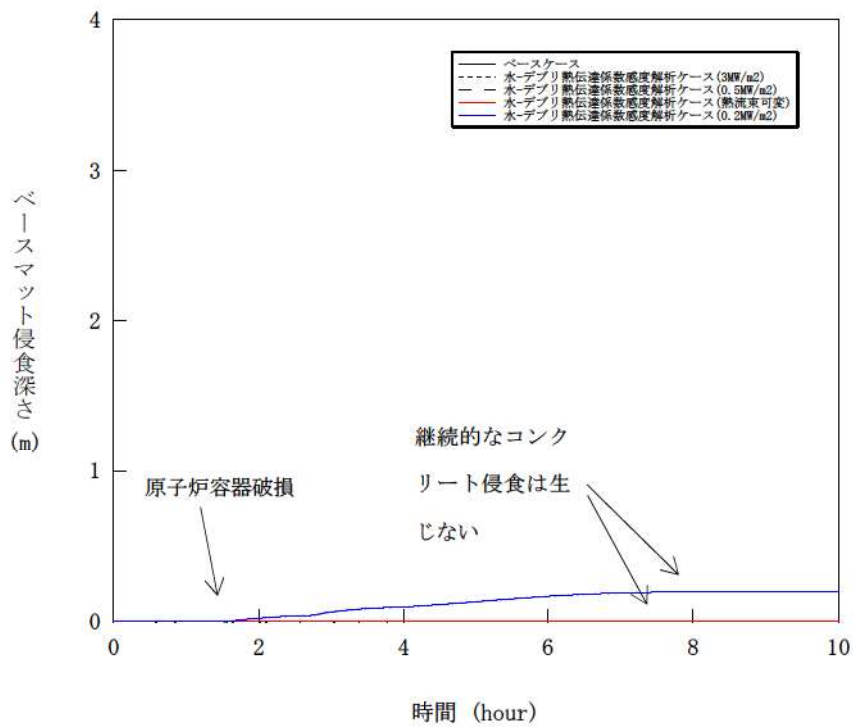


図 5-4-4 水-溶融炉心間の熱伝達係数感度解析 (4)

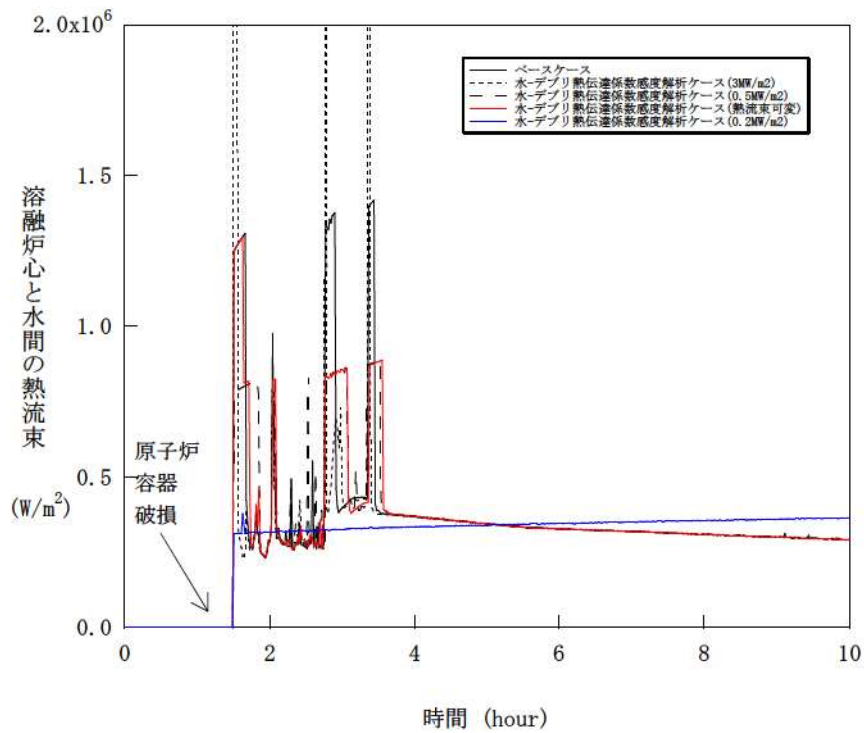


図 5-4-5 水-溶融炉心間の熱伝達係数感度解析 (5)

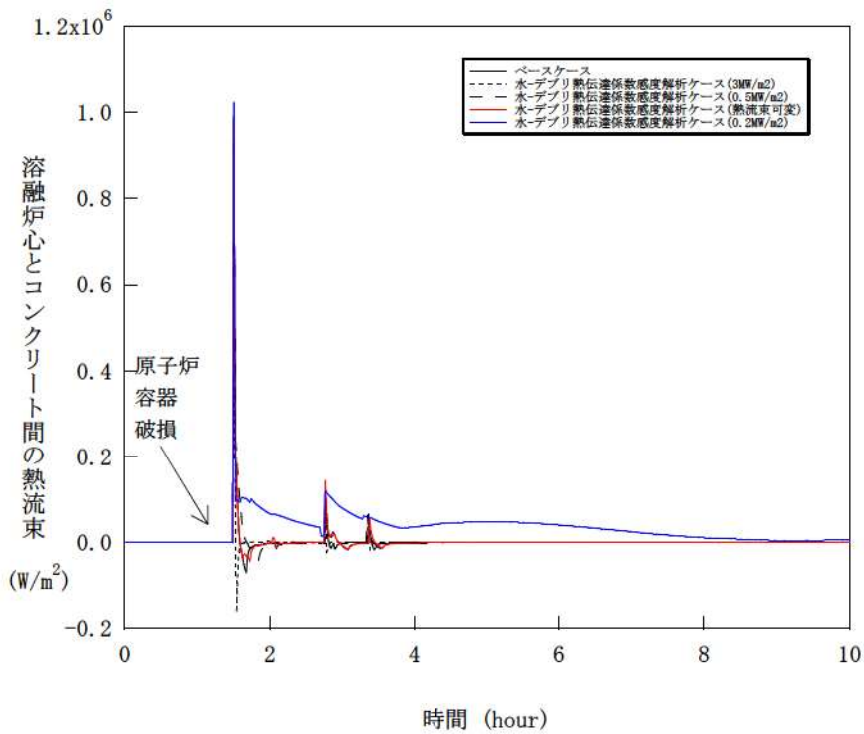


図 5-4-6 水-溶融炉心間の熱伝達係数感度解析 (6)

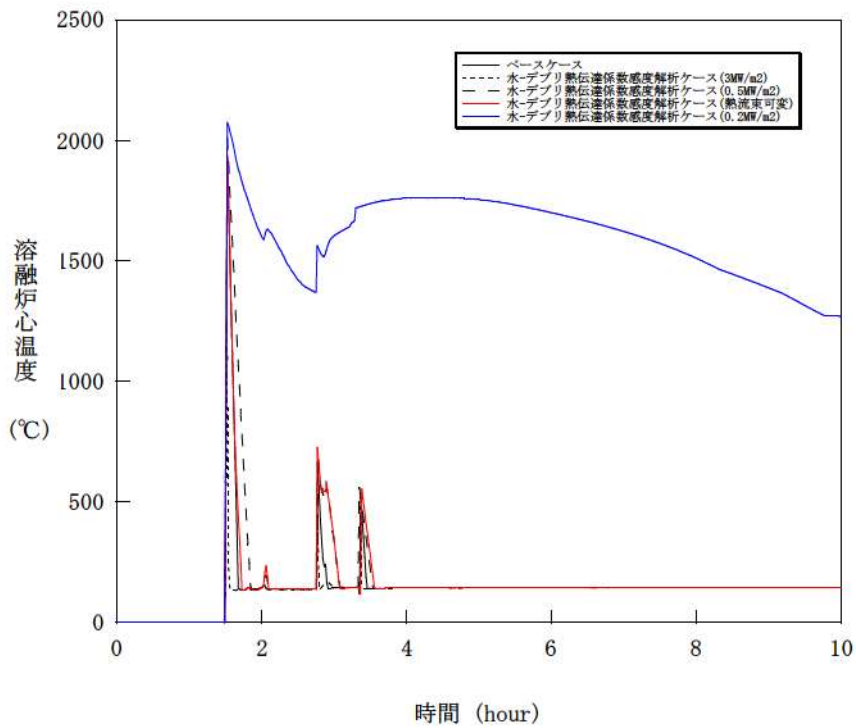


図 5-4-7 水-溶融炉心間の熱伝達係数感度解析 (7)

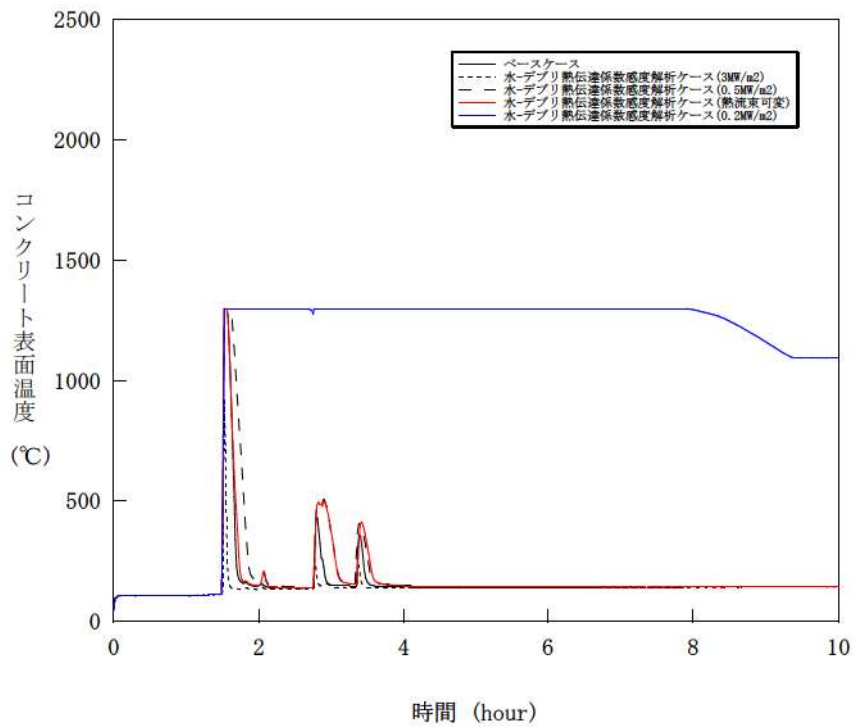


図 5-4-8 水-溶融炉心間の熱伝達係数感度解析 (8)

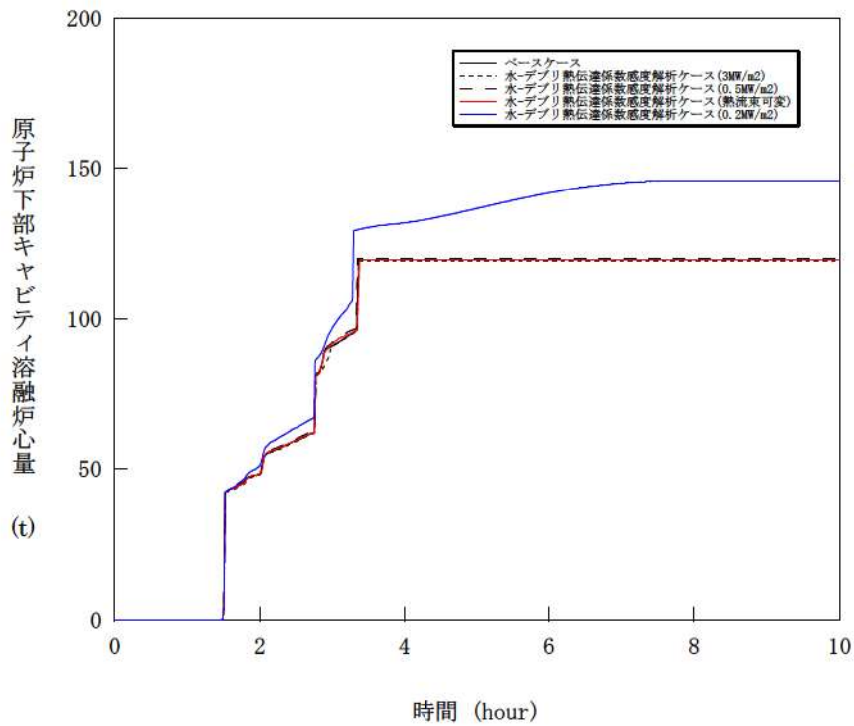


図 5-4-9 水-溶融炉心間の熱伝達係数感度解析 (9)

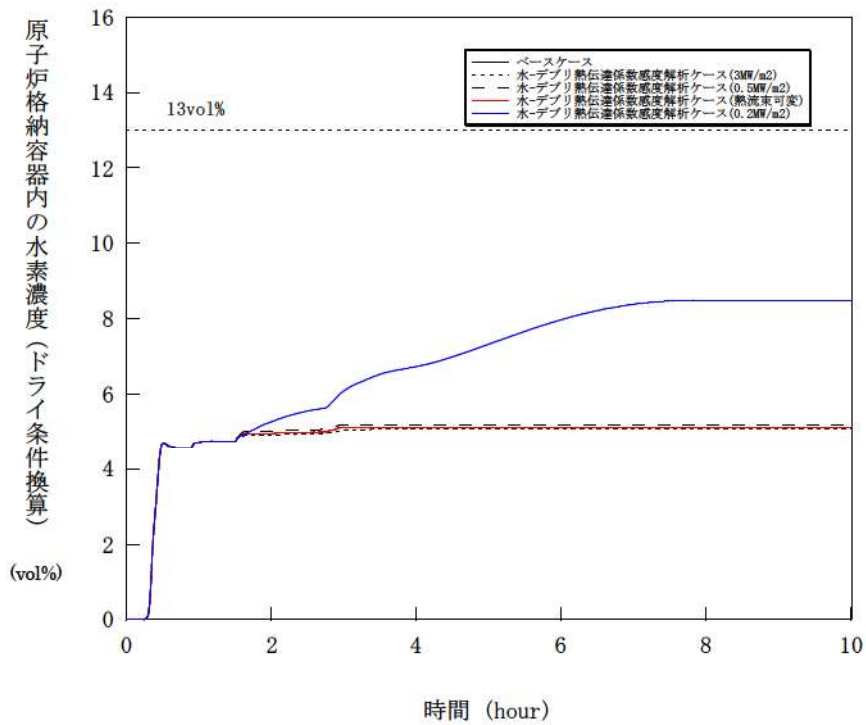


図 5-4-10 水-溶融炉心間の熱伝達係数感度解析 (1 0)

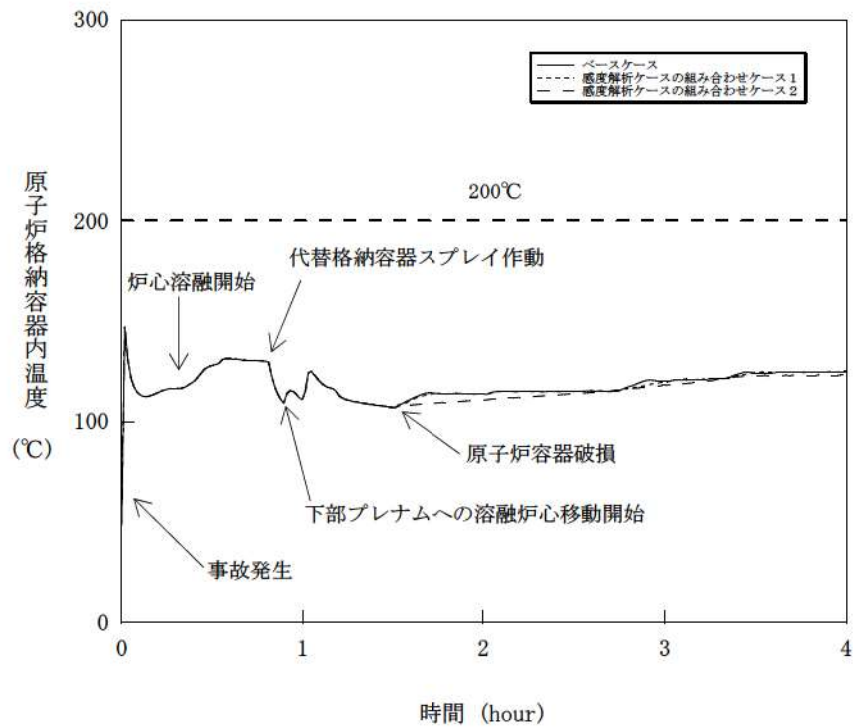


図 5-5-1 感度解析ケースの組合せ (1)

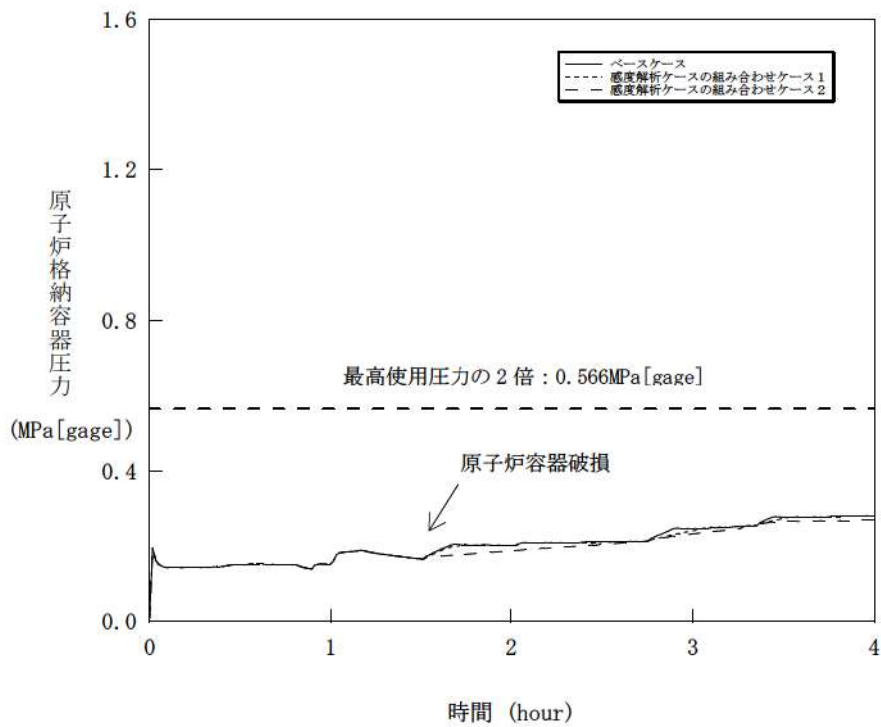


図 5-5-2 感度解析ケースの組合せ (2)

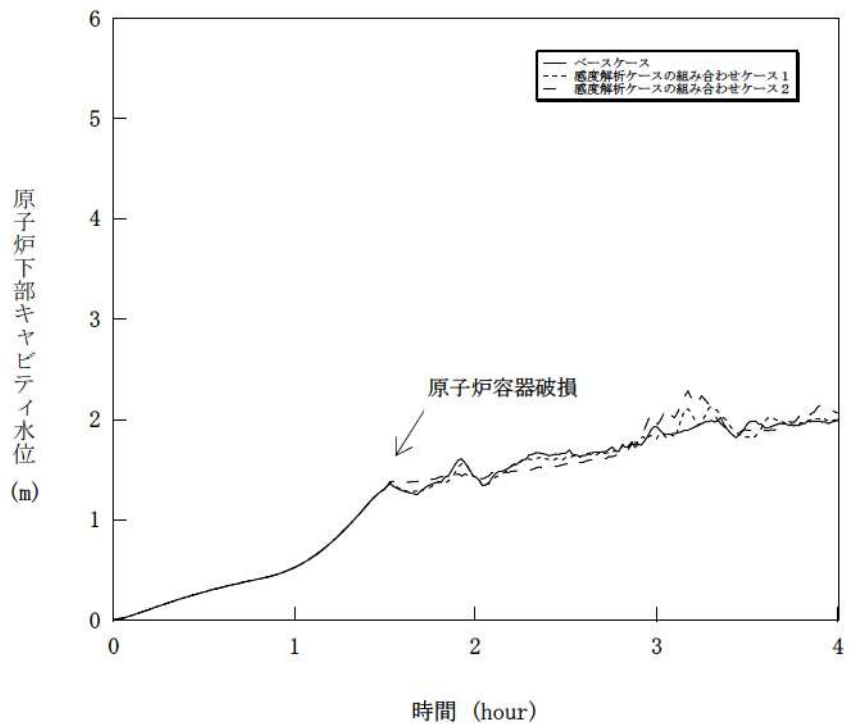


図 5-5-3 感度解析ケースの組合せ (3)

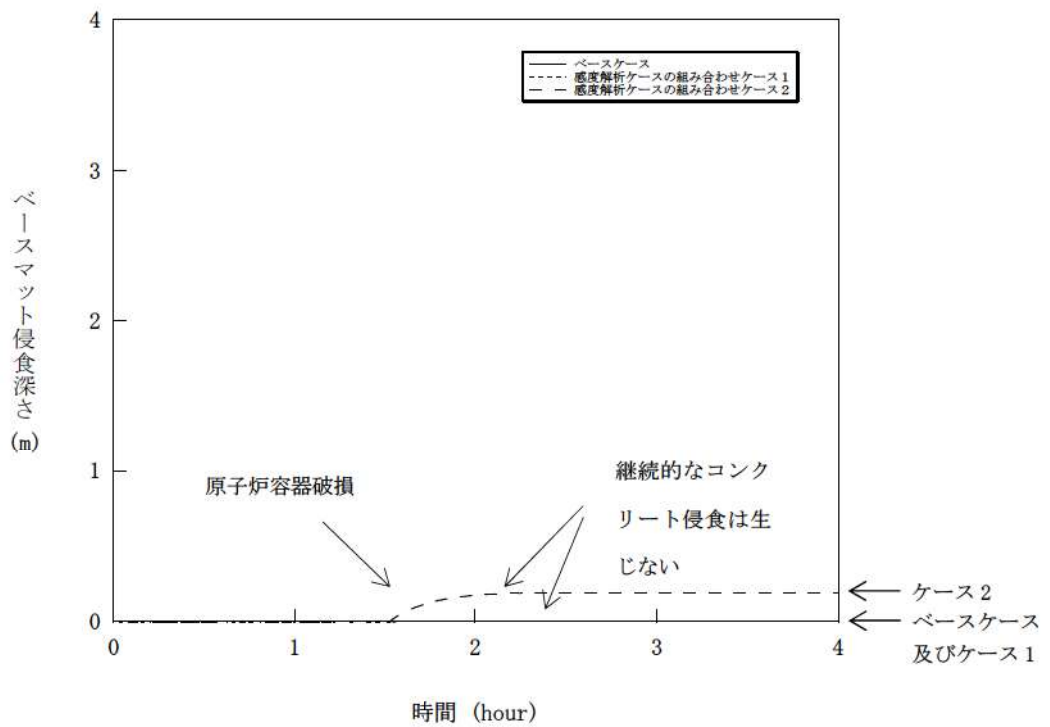


図 5-5-4 感度解析ケースの組合せ (4)

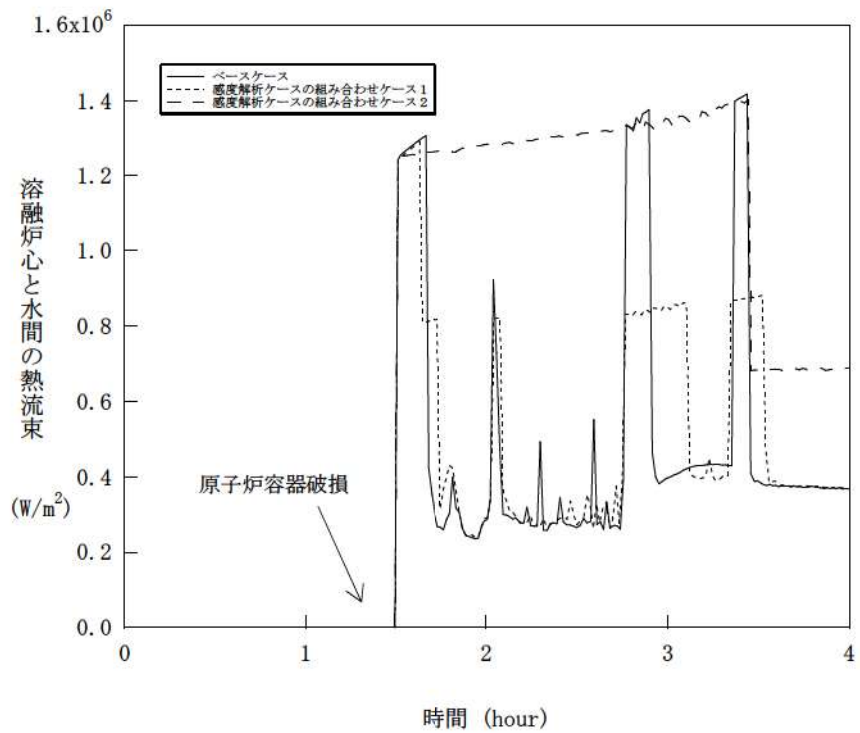


図 5-5-5 感度解析ケースの組合せ (5)

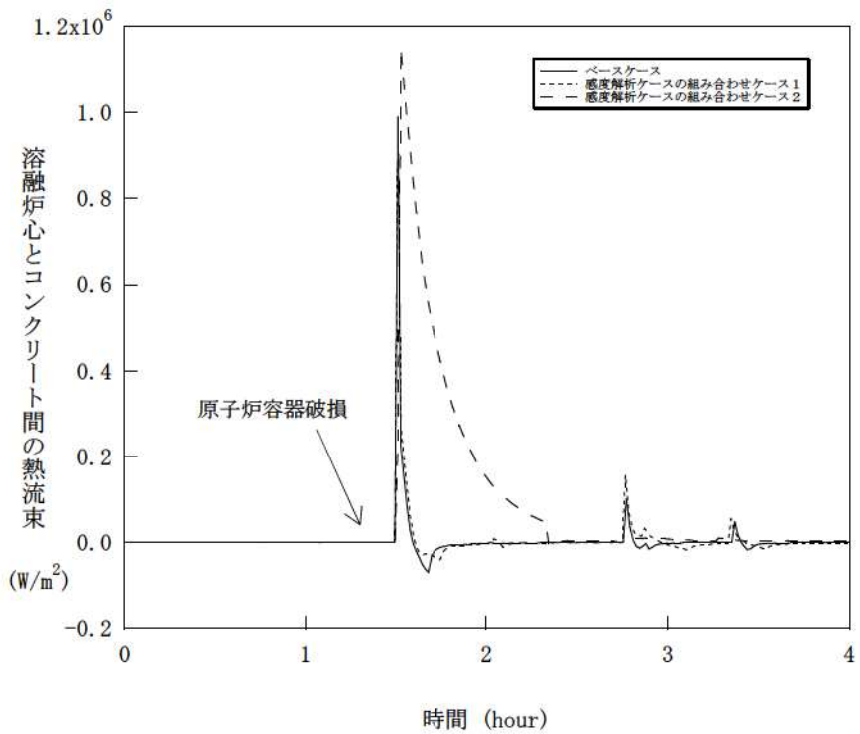


図 5-5-6 感度解析ケースの組合せ (6)

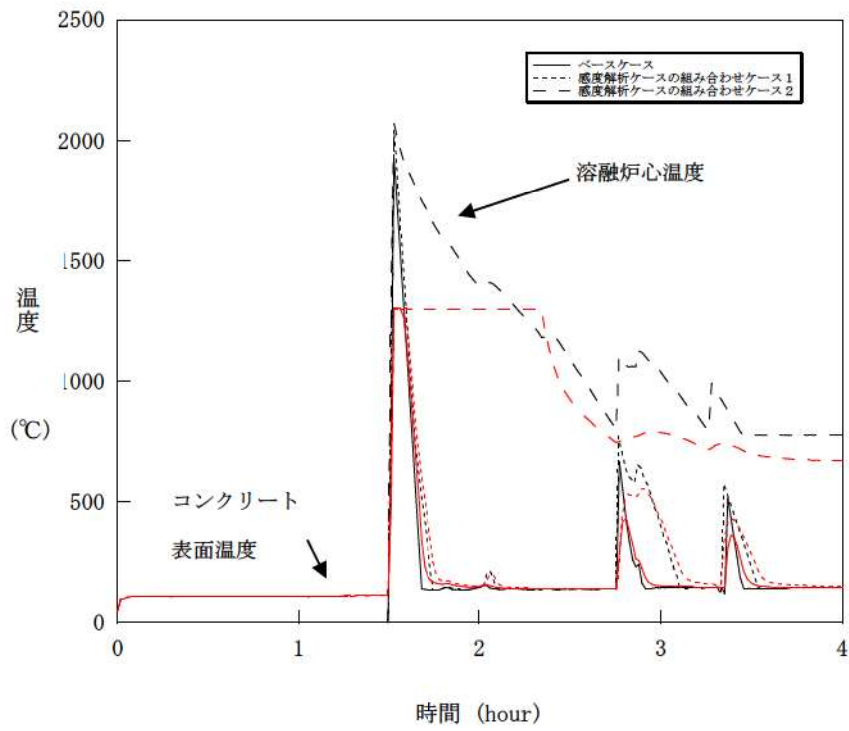


図 5-5-7 感度解析ケースの組合せ (7)

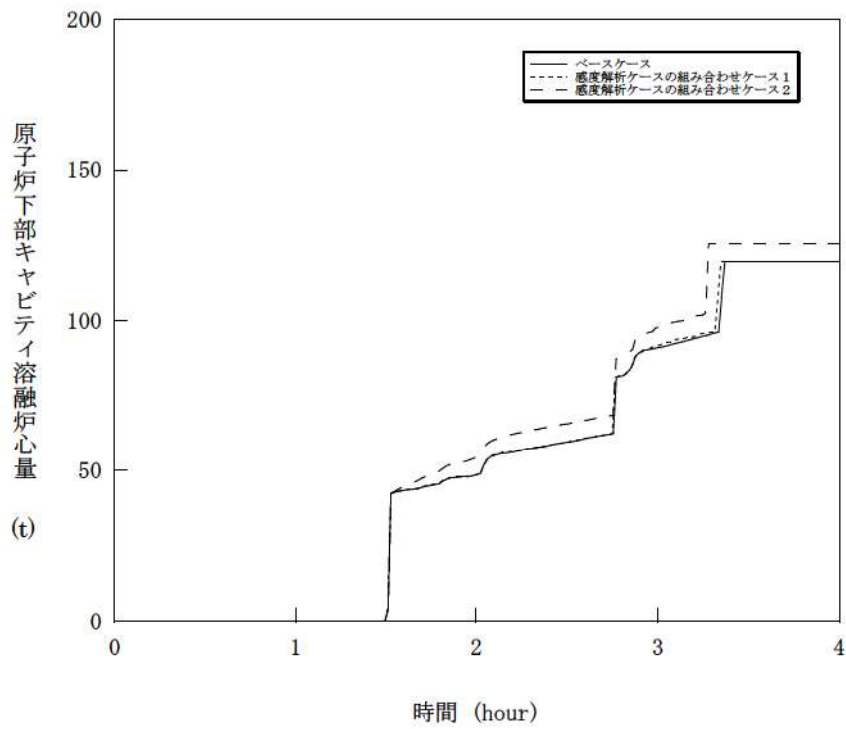


図 5-5-8 感度解析ケースの組合せ (8)

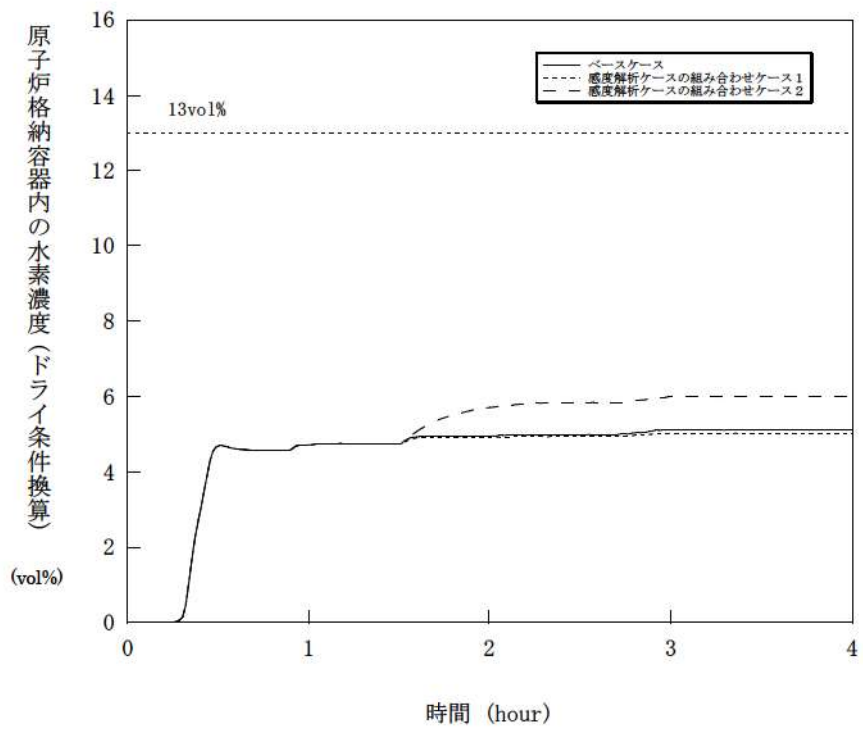


図 5-5-9 感度解析ケースの組合せ (9)

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、不確かさに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
- ・熔融炉心の拡がり
- ・水-熔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-熔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。

熔融炉心の拡がりについては、熔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、熔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、熔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熔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 熔融炉心の水中での拡がり評価について

1. はじめに

熔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、落下過程において熔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、水中での熔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、水中での熔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、浅い水プールへ熔融した $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-W}_2\text{O}_6$ 合金を流入させ、その拡がり挙動を観察した。水中へ流入した熔融物は、水との熱伝達により徐々に固化し、ある程度床上に拡がる結果となった。固化した熔融炉心層は 3 層を形成し、熔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、熔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。熔融物の流れにより、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、熔融物の過熱度と水深が、熔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。熔融物の拡がりは、水への熱伝達による熔融物の温度の挙動と、熔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% になった場合に熔融物の拡がり停止しており、熔融物の拡がりには落下質量流量と熔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、熔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。

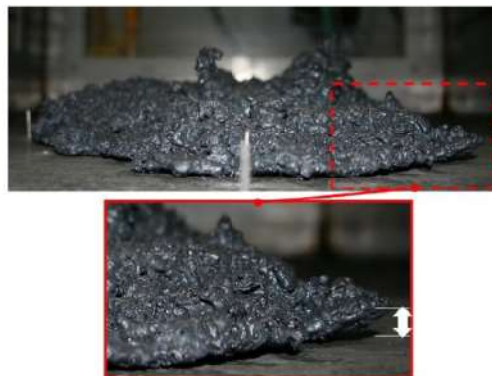


Figure 40: The melt spread in PULiMS-E1 experiment (side view). The volatile particle detris have been removed while solidified core of the melt remained intact.

図 2.1 PULiMS 試験において水中に落下させた熔融物

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熔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熔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熔融炉心の拡がり挙動は、熔融炉心の過熱状態及び熔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熔融炉心落下後、熔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、熔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、熔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熔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熔融炉心については、原子炉下部キャビティ水に落下する過程において、細粒化した熔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碎すること等により、多孔質層のクラストを形成する。熔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。熔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、側方から熔融物の下面へ水が浸入することによる冷却の可能性はある。

表 2.1 実験条件の整理

	PULIMS 実験 (Sweden)	S3E 実験 (Sweden)	BNL 実験 (USA)	SPREAD 実験 (Japan)	CORINE 実験 (France)	KATS 実験 (Germany)
実験装置の特徴	2D	1D, 2D	1D, 2D	1D, 2D	2D (19° 円分)	1D, 2D
溶融物材	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°C	80~120°C 280~364°C	不明 (鉛の融点: 327.46°C)	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*	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。

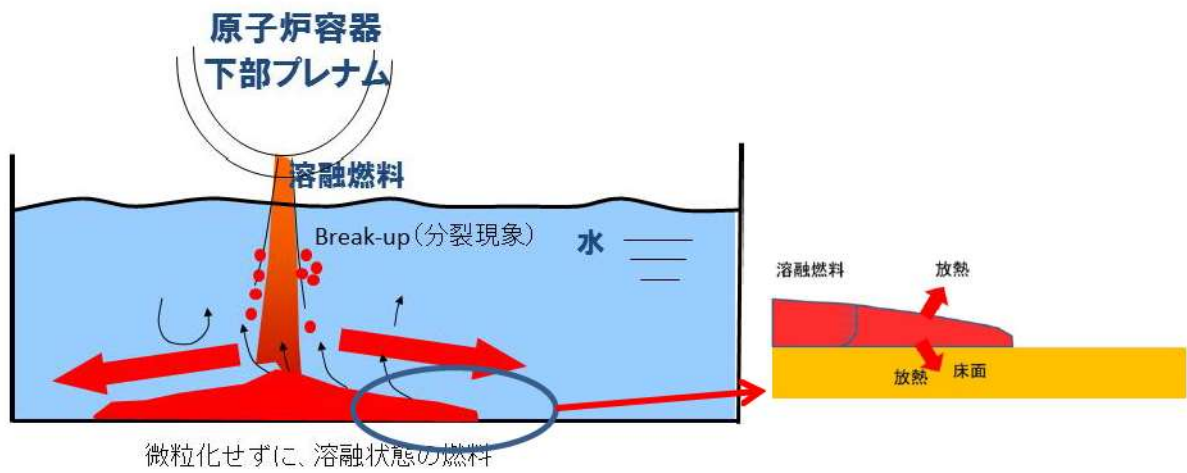


図 3.1 熔融炉心の落下から拡がりに至る挙動

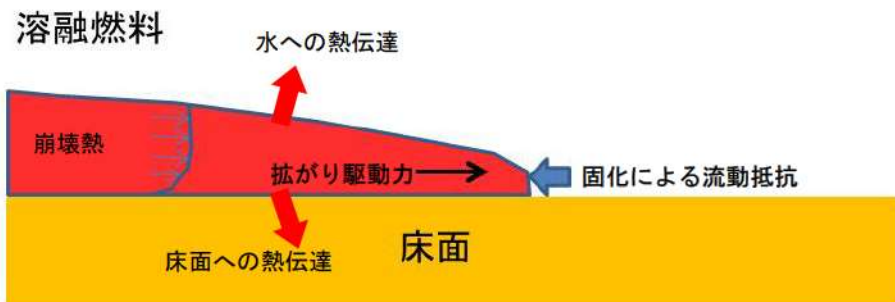


図 3.2 熔融炉心の拡がりに係る熱伝達及び流体力学的挙動

(2) 水中での溶融炉心拡がり長さとの時間の相関式^{[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。

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

δ_{sp} : 溶融炉心の最終厚さ

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

C : 比例定数

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

N : 重力-慣性力支配流れの時 1, 重力-粘性力支配流れの場合 $= \left(\frac{V_{core}}{\pi\delta_{cap}}\right)^{1/2} \frac{\beta_i^{4/3}}{\beta_v^2}$

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) $= \delta_{cap} \rho_m \frac{C_{p,m} \Delta T_{sup} + \eta H_f}{q_{up} + q_{dn} - q_v \delta_{cap}}$

(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。

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

$\beta_{i,v}$: デブリ広がり係数 $\beta_v = \left(\frac{gG^2}{v}\right)^{0.125} \beta_i = 0.84(gG)^{0.25}$

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/m²)

q_{dn} : 溶融炉心下面の熱流束 (対流熱伝達) (W/m²)

q_v : 単位体積当たりの崩壊熱 (W/m³)

H_f : 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/m³)

ρ_w : 水の密度 (kg/m³)

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

g : 重力加速度 (m/s²)

ν : 溶融炉心の動粘性係数 (m²/s)

V_{tot} : 溶融炉心体積 (m³) $= \frac{m(1-f_m)}{\rho_m}$

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 (m³/s) $= \frac{V_{tot}}{t_{rei}}$

t_{rei} : 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 (-)

ρ'_m : 有効溶融炉心密度 (kg/m³) $= \rho_m(1 - \varepsilon_m)$

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。

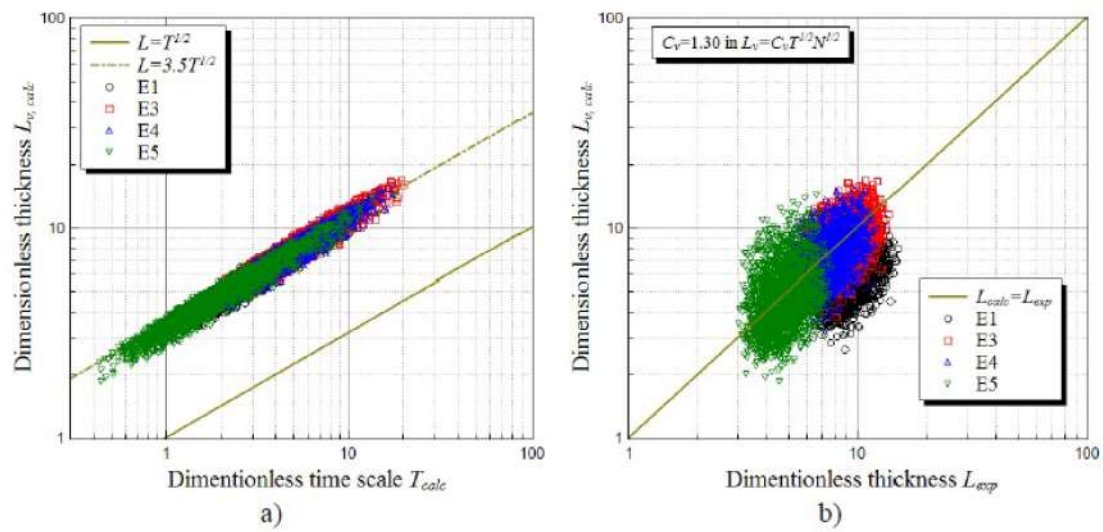


図 3.3 拡がりモデルと PULiMS 試験結果との比較

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、熔融炉心の拡がりが大きくなり、反対に、熔融炉心が落下時に細粒化等により冷却が進む場合には、熔融炉心の拡がり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熔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。

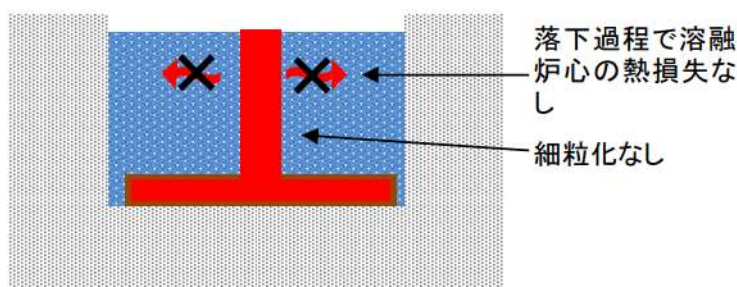


図 4.1 落下時に冷却されず高温のまま床に到達するケース
(熔融炉心からの除熱が進まず、固化割合が小さいため拡がりが大きくなる。)

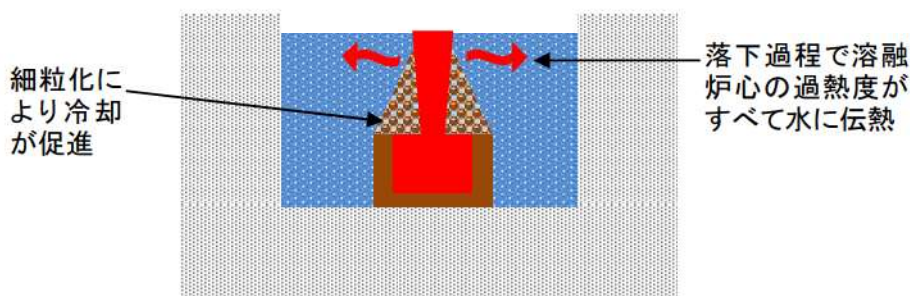


図 4.2 落下時に細粒化等により冷却が進むケース
(熔融炉心からの除熱が進み、固化割合が大きくなるため拡がり抑制される。)

表 4.1 に 1 回目の原子炉容器破損時の熔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等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、熔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、落下過程における熔融炉心-原子炉下部キャビティ水間の熱伝達による熔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^[10]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	落下時に細粒化等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	落下時に細粒化等により冷却が進むケース
拡がり直径 [m]	約 7.7	約 1.5
拡がり面積 [m ²]	約 47	約 1.8

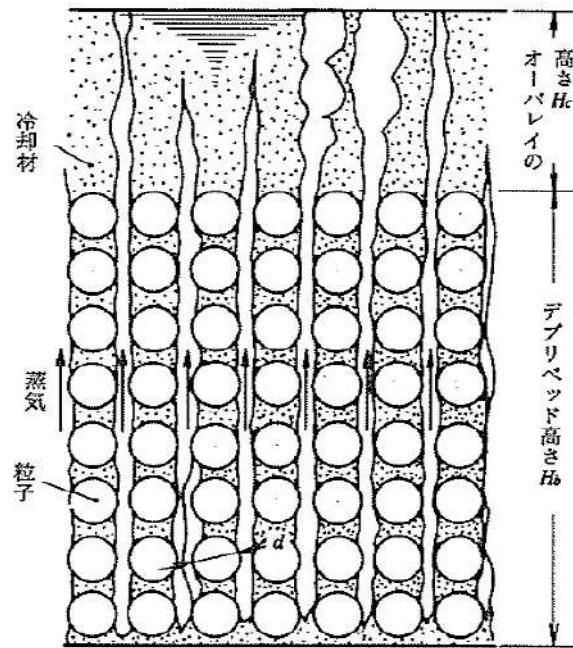
5. 参考文献

- [1] Pavel Kudinov, et al., " Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-Coolant Interaction," The 9th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-9), Kaohsiung, Taiwan, September 9-13, 2012.
- [2] Sehgal, B.R., Dinh, T.N., Green, J.A., Konovalikhin, M.J., Paladino, D., Leung, W.H., Gubaidulin, A.A., " Experimental Investigation of Melt Spreading in One-Dimensional Channel" , RIT/NPS Research Report for European Union EU-CSC-1D1-97, 86p., 1997.
- [3] Greene, G.A., Finrock, C., Klages, J., and Schwarz, C.E., " Experimental Studies on Melt Spreading, Bubbling Heat Transfer and Coolant Layer Boiling," Proceedings of 16th Water Reactor Safety Meeting, NUREG/CP-0096, pp.341-358, (1988).
- [4] Suzuki, H., et al., " Fundamental Experiment and Analysis for Melt Spreading on Concrete Floor," Proceedings of 2nd ASME/JSME Nuclear Engineering Conference, Vol. 1, pp. 403-407, (1993).
- [5] Fieg, G., et al., " Simulation Experiments on the Spreading Behavior of Molten Core Debris" , Proceedings of the 1996 National Heat Transfer Conference, in the session " Fundamental Phenomena in Severe Accidents" , Houston, Texas, August 3-6, 1996, HTC-Vol.9, pp.121-129.
- [6] Alsmeyer H., et al., " Overview on the Results of the RCA Project on Molten Core - Concrete Interactions" , FISA-95 Proceedings, Luxemburg, EUR 16896 EN, pp.231-255 (1996).
- [7] Konovalenko A. and Kudinov P., "Development of Scaling Approach for Prediction of Terminal Spread Thickness of Melt Poured into a Pool of Water," Proceedings of The 9th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-9), Kaohsiung, Taiwan, September 9-13, N9P0302, 2012.
- [8] Dinh, T.N. Konovalikhin, M. J., Sehgal, B. R., " Core melt spreading on a reactor containment floor" , Progress in Nuclear Energy, 36(4), pp. 405-468, (2000).
- [9] Maxim J.K., Investigations on Melt Spreading and Coolability in a LWR Severe Accident, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology Stockholm, 2001.
- [10] M.Saito, K.Sato, S.Imahori, "Experimental Study on Penetration Behavior of Water Jet into Freon-11 and Liquid Nitrogen," ANS Proc. of National Heat Transfer Conference, Houston, Texas, USA, (1988).

添付 3-2 粒子状ベッドの冷却性実験と解析モデル

粒子状ベッドの冷却性については、高速増殖炉の炉心損傷事故の評価において重要な評価となることから、従来から多くの実験的及び解析的研究が行われてきている。また、TMI-2 事故以降は、軽水炉を対象とした研究も進められている。

デブリベッド冷却に関する研究の主要な焦点の 1 つは、デブリベッドの冷却限界が、崩壊熱を上回るかどうかであり、判断基準のパラメータはデブリベッドのドライアウト熱流束と考えられている。発熱する粒子状ベッドの内を流下する冷却水と上昇する蒸気の対向二相流がデブリベッド内で形成される。粒子状デブリベッドの流動状態の模式図を付図 2-1 に示す。崩壊熱が高いと、局所的にデブリベッド内でドライアウトが生じ、デブリベッドの温度が急激に高くなる。この時の熱流束がドライアウト熱流束となる。粒子状デブリベッドのドライアウト熱流束は、種々の実験が行われ、種々の相関式が提案されている。その中でも Lipinski 0-D モデル（付表 2-1 参照）は、小さい粒径から大きい粒径まで適用可能とされており、広く使われている。MAAP コード内でも乱流域に対する Lipinski 0-D モデルが粒子状ベッドの冷却の評価に使用されている。Lipinski 0-D モデルでは、ドライアウト熱流束は、主に粒子径、ポロシティ、堆積高さ、圧力に依存する。



付図 2-1 粒子状ベッド冷却の流動モデル

出展：日本機械学会編「沸騰熱伝達と冷却」日本工業出版（平成元年）

付表 2-1 Lipinski 0-D モデルについて

出展：日本機械学会編「沸騰熱伝達と冷却」日本工業出版（平成元年）

モデル	実験との比較
<p>c. Lipinskiの0-Dモデル</p> <p>Lipinskiは多孔質の対向二相流の気液各相で、層流及び乱流に適用できる運動量の式を、連続の式、エネルギーの式と共に連立して解いた。</p> <p>連続の式</p> $\rho_v U_v = \rho_l U_l \quad \dots(8.14)$ <p>運動量の式（気相）</p> $\rho_v U_v^2 / \eta \eta_v + \mu_v U_v / \kappa \kappa_v + \rho_v g = \Delta P_v / H_b \quad \dots(8.15)$ <p>運動量の式（液相）</p> $-\rho_l U_l^2 / \eta \eta_l - \mu_l U_l / \kappa \kappa_l + \rho_l g = \Delta P_l / H_b \quad \dots(8.16)$ <p>エネルギー式</p> $\rho_v U_v \Delta h_v = \dot{Q} H_b \quad \dots(8.17)$ <p>圧力の釣合^(8.10)</p> $\Delta P_v - \Delta P_l = \sigma(\epsilon/5\kappa)^{1/2} \quad \dots(8.18)$ <p>ここで、 U：見掛け流速 κ：層流での浸透率 η：乱流での浸透率 $\kappa_v, \kappa_l, \eta_v, \eta_l$：各々層流及び乱流での気液の比浸透率（無次元）</p> <p>でデブリベッド内の平均液体存在割合 s の関数で、以下のように表わしている^(8.9)。</p> $\kappa = (d^2/180)\epsilon^3/(1-\epsilon)^2$ $\eta = (d/1.75)\epsilon^3/(1-\epsilon)$ $\kappa_v = 1 - 1.11s, \quad \kappa_l = s^3$ $\eta_v = (1-s)^3, \quad \eta_l = s^3$ <p>上述の関係を用いると、式(8.14)～式(8.18)からデブリベッド上面での熱流束 q ($=\dot{Q}H_b$) は下式で与えられる。</p> $q = \rho_v \Delta h_v u_1 \left\{ 1 + (u_2/u_1)^2 \right\}^{1/2} - 1 \quad \dots(8.19)$ $u_1 = \frac{90(1-\epsilon)}{1.75d} \left\{ \frac{\mu_v}{\rho_v(1-1.11s)} + \frac{\mu_l}{\rho_l s^3} \right\} / \left\{ \frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right\}$ $u_2 = \left[\frac{d\epsilon^3(\rho_l - \rho_g)g}{1.75(1-\epsilon)} \left\{ 1 + \frac{6\sigma(1-\epsilon)}{\epsilon d(\rho_l - \rho_g)gH_b} \right\} \right] / \left[\frac{1}{\rho_v(1-s)^3} + \frac{1}{\rho_l s^3} \right]^{1/2}$ <p>ドライアウト熱流束は、式(8.19)が s ($0 \leq s \leq 1$) に関して極大値をとる条件として求まる。</p>	<p>ドライアウト熱流束 (W/m²)</p> <p>粒子径 d (mm)</p> <p>冷却材：水</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ : Gabor-Cassulo⁽¹⁸⁾ □ : Somerton-Catton⁽³¹⁾ ▽ : Barleon-Werle^{(30) (33)} ○ : Dhir-Catton⁽¹⁷⁾ ▽ : Dhir-Barleon⁽⁷⁾ □ : Shirds-Stevens⁽²⁾ ◇ : Abe-Sudo⁽¹⁰⁾ ● : Trenberth-Shires⁽³⁹⁾ △ : Squarer, et al.^{(9) (138)} ■ : Sowa, et al.⁽⁴⁰⁾ <p>Hardee-Nilson⁽¹¹⁾ Ostensen⁽⁵⁾ Lipinski O-D⁽¹¹⁾ ($H_b=20\text{cm}$)</p>

(第4部 GOTHIC コード)

目次

－ 第4部 － GOTHIC コード －

1. はじめに	4-3
2. 重要現象の特定	4-4
2.1 事故シーケンスと評価指標	4-4
2.2 ランクの定義	4-4
2.3 物理現象に対するランク付け	4-5
3. 解析モデルについて	4-9
3.1 コード概要	4-9
3.2 重要現象に対する解析モデル	4-11
3.3 解析モデル	4-12
3.4 ノード分割	4-27
3.5 入出力	4-35
4. 検証, 妥当性確認	4-36
4.1 重要現象に対する検証, 妥当性確認方法	4-36
4.2 NUPEC試験解析	4-40
4.3 構造材凝縮熱伝達モデルの感度検討	4-71
4.4 熱伝達試験との比較	4-74
4.5 熱伝導解析解との比較	4-76
4.6 PAR特性検証	4-77
4.7 イグナイタによる水素燃焼モデルの検証	4-99
4.8 実機解析への適用性	4-100
5. 有効性評価への適用性	4-120
5.1 不確かさの取扱いについて (評価指標の観点)	4-120
5.2 不確かさの取扱いについて (運転員等操作の観点)	4-121
6. 参考文献	4-123
添付1 解析コードにおける解析条件	4-125
添付2 PANDA試験	4-126
添付3 代替格納容器スプレイポンプの攪拌効果について	4-133

1. はじめに

本資料は、格納容器損傷防止に関する重大事故対策の有効性評価（以下「有効性評価」という。）のうち、水素燃焼解析において適用している GOTHIC (Generation of Thermal-Hydraulic Information for Containments) Ver. 7*（以下、「GOTHIC コード」と称す。）について、

- ・有効性評価において重要となる現象の特定
- ・GOTHIC コードの解析モデル及び入出力に関する説明
- ・妥当性評価
- ・有効性評価への適用性

に関してまとめたものである。

* GOTHIC Code, Version 7.2a-p5 Windows 2000/XP (with associated GOTHIC Documentation), EPRI Palo Alto, CA, EPRI Product 1013072, 9-Feb-2006

2. 重要現象の特定

2.1 事故シーケンスと評価指標

GOTHIC コードが適用される、格納容器破損防止対策における格納容器破損モードについて、具体的な評価事故シーケンス及びその事象の推移と評価指標について記述する。

(1) 水素燃焼

格納容器損傷防止に係る格納容器破損モードである「水素燃焼」では、事故時の原子炉格納容器内の熱流動並びに原子炉及び原子炉格納容器内で発生する水素の拡散・混合挙動を評価する。

「水素燃焼」において想定する評価事故シーケンスとして、「大破断 LOCA+ECCS 注入失敗（格納容器スプレイ成功）」を想定する。事象初期においては1次冷却系からの破断流による原子炉格納容器内への質量エネルギー放出が顕著であり、原子炉格納容器内の圧力・温度上昇が見られる。また、破断流の一部は、スプレイ及びそれに伴う凝縮、構造材表面における蒸気凝縮に伴い、液相が形成されサンプへの流入に至る。

炉心は、ECCS の炉心注入失敗により、冷却能力が長期的に不足するため、燃料が高温状態に至り、溶融する。燃料の過熱過程において水素が発生し、破断口から原子炉格納容器内に放出される。溶融した燃料は原子炉容器を貫通し原子炉下部キャビティに落下し、原子炉格納容器内には原子炉内のジルコニウム-水反応により生成された水素が大量に放出される。また、原子炉格納容器内における水の放射線分解、金属腐食、溶融炉心・コンクリート相互作用等によっても水素が発生する。

発生した水素は、原子炉格納容器内に設置された水素処理設備により処理され、原子炉格納容器内の水素濃度の増加が抑制される。この過程において、原子炉格納容器内部の圧力及び温度は、原子炉格納容器気相部における質量エネルギーにより変動する。

評価指標は原子炉格納容器内の水素濃度であり、審査ガイド（参考文献1）に示されるとおり、原子炉格納容器内の水素濃度がドライ条件に換算して 13vol%以下又は酸素濃度が 5vol%以下であれば爆轟は防止できると判断される。

2.2 ランクの定義

本資料の本文「2. 有効性評価における物理現象の抽出」で抽出された物理現象のうち GOTHIC コードで評価する事象において、考慮すべき物理現象を対象に、表 2-1の定義に従って「H」、「M」、「L」及び「I」のランクに分類し、「H」及び「M」に分類された物理現象を重要現象として抽出する。

表 2-1 ランクの定義

ランク	ランクの定義	本資料での取扱い
H	評価指標に対する影響が大きいと考えられる現象	物理現象に対する不確かさを実験との比較や感度解析等により求め、実機評価における評価指標及び運転員等操作への影響を評価する
M	評価指標に対する影響が中程度と考えられる現象	事象推移を模擬する上で一定の役割を担うが、影響が「H」に比べて顕著でない物理現象であるため、必ずしも不確かさによる実機評価における評価指標及び運転員等操作への影響を評価する必要はないが、本資料では実機評価への影響を感度解析等により評価するか、「H」と同様に評価することとする
L	評価指標に対する影響が小さいと考えられる現象	事象推移を模擬するためにモデル化は必要であるが、評価指標及び運転員等操作への影響が明らかに小さい物理現象であるため、検証、妥当性評価は記載しない
I	評価指標に対し影響を与えないか、又は重要でない現象	評価指標及び運転員等操作へ影響を与えないか、又は重要でない物理現象であるため、検証、妥当性評価は記載しない

2.3 物理現象に対するランク付け

水素濃度を評価指標とした物理現象とランクの関係を表 2-2に示し、以下に説明する。表 2-1の定義に従い、物理現象に対してランク付けを行い、「H」及び「M」に分類された物理現象を重要現象として抽出した。

2.3.1 区画間・区画内の流動

区画間・区画内の流動について、主として、対流（自由及び強制）及び乱流は原子炉格納容器内の大局的な挙動に、また、構造物と流体の相互作用、気相及び液相の相間の相互作用は局所的な挙動に影響し、原子炉格納容器内の水素濃度の分布が定まることになる。また、破断流や蒸気生成に伴う流体の駆動、密度差による成層化の影響も水素濃度分布を支配する主要因と成りえる。これら流動に鑑み、区画間・区画内の流動に係るモデルが原子炉格納容器内の水素濃度評価に与える影響を以下に説明する。

1次冷却系破断箇所から冷却材とともに流出する水素は、蒸気発生器室煙突部を經由して原子炉格納容器ドーム部に流入する。この時、蒸気発生器室及びその煙突部内の密度は水素及び随伴する蒸気の影響により周囲に比べ低下する。これにより、蒸気発生器室及びその煙突部周囲では下降流が形成され、原子炉格納容器全体での大きな循環流が形成される。なお、自然循環冷却開始以降は自然循環冷却により原子炉格納容器外周部にて下降流が形成され、原子炉格納容器全体での大きな循環流はより促進される。

[REDACTED]

原子炉格納容器ドーム部に流出した水素を含む上昇流はスプレー冷却による蒸気凝縮、水素処理に伴う発熱による対流及び原子炉格納容器全体での大きな循環流の影響により周囲流体と混合する。なお、混合が弱い場合には、水素は密度差により成層化することとなる。したがって、この原子炉格納容器内の区画間・区画内の流動が各区画での水素濃度に及ぼす影響は大きい(H)。

2.3.2 気液界面の熱伝達

気液界面の熱伝達及び蒸発・凝縮による相変化については、スプレー水によるものとサンプル等の原子炉格納容器床面に溜まる水面によるものとに大別できる。スプレー水による効果は後述するとし、ここでは原子炉格納容器床の水面での気液界面熱伝達について整理する。

[REDACTED]

[REDACTED]したがって、気液界面熱伝達が、原子炉格納容器全体の流動並びに水素挙動に与える影響は小さい(L)。

2.3.3 構造材との熱伝達及び内部熱伝導

原子炉格納容器内の流体から構造材への熱伝達は、[REDACTED]

[REDACTED]また、構造材への伝熱に伴う凝縮、自然対流冷却開始以降に発生する気相部温度の低下に伴う構造材からの再蒸発は、気体成分の密度変化及び温度変化に伴う流れに対し影響がある。実機プラントの重大事故等対策の有効性評価では、後述するように大破断 LOCA を起因事象とし、格納容器スプレーを想定することから水素は原子炉格納容器内に均一に分布する傾向となる。また、水素濃度をドライ条件に換算して評価項目に照らすことから、構造材への熱伝達及びそれに伴う凝縮及び再蒸発が評価結果に大きく影響しない。

また、構造材内部の熱伝導についても、熱伝達係数と同様に、ヒートシンクへの伝熱に影響するものの、水素濃度に対して直接的に大きな影響は与えない。

以上、直接水素濃度に影響しないものの、構造材との熱伝達及び内部熱伝導は、[REDACTED]
[REDACTED]評価指標となる水素濃度への影響は大きい(H)。

2.3.4 スプレー冷却

スプレーによる気液界面の熱伝達及びそれによる気相部冷却は、原子炉格納容器内の全体的な圧力に大きく影響する。原子炉格納容器ドーム部においては、このスプレー冷却により、蒸気凝縮、気相部温度分布及び気体成分の変化等を通じて水素混合に影響を与える。したがって、原子炉格納

容器内流動並びに水素混合の観点から、スプレー効果の影響は大きい(H)。

2.3.5 水素発生

実機プラントの重大事故等対策の有効性評価では、水素濃度をドライ条件で換算して評価項目に照らすことから、原子炉1次冷却系から原子炉格納容器に流入する水素、水の放射線分解等により原子炉格納容器で発生する水素は原子炉格納容器内の水素濃度に直接影響する。しかし、GOTHICコードを用いた評価では、MAAPコードによる評価結果に基づいて発生水素量を時刻歴に評価し、これを境界条件としてGOTHICコードの計算に入力することから、GOTHICコード内で水素発生を直接モデル化するわけではない。

このように水素濃度評価における水素発生の影響は大きいものの、GOTHICコード内で直接モデル化しない(I)。

2.3.6 水素処理

評価指標である水素濃度に影響する現象としては、燃料被覆管の酸化反応による水素発生と、冷却材の水の放射線分解等による水素発生が挙げられる。酸化反応による水素発生は、燃料被覆管の高温状態が継続し、酸化割合が大きくなると水素濃度の他に原子炉格納容器圧力にも有意な影響を与える。水素発生に対しては、原子炉格納容器内に設置した水素処理装置が動作し、水素を再結合若しくは燃焼させることでその濃度増加を抑制し、低減する。このように原子炉格納容器内の水素濃度に直接影響することから、水素処理の影響は大きい(H)。

なお、水素処理に係る設備の内、原子炉格納容器内水素処理装置(PAR)は、水素の処理に伴い発熱する。この発熱は「区画間・区画内の流動」にて述べられるように原子炉格納容器内の流動に影響することから適切に考慮される必要がある。

水素処理に係る設備の内、格納容器水素イグナイタ(イグナイタ)により周囲の水素が燃焼することで、さらにその周囲の水素も火炎伝ばによって燃焼し、瞬時に原子炉格納容器内の水素濃度を低下させる効果が期待できる。これは、原子炉格納容器内の水素分布に影響することから適切に考慮される必要がある。

表 2-2 格納容器破損防止対策の有効性評価（水素燃焼）のランク

		水素燃焼
分類	物理現象	評価指標
		水素濃度
原子炉格納容器	(1) 区画間・区画内の流動	H
	(2) 気液界面熱伝達	L
	(3) 構造材との熱伝達及び内部熱伝導	H
	(4) スpray冷却	H
	(5) 水素発生	H (GOTHIC コードでは計算しないため「I」)
	(6) 水素処理	H

3. 解析モデルについて

3.1 コード概要

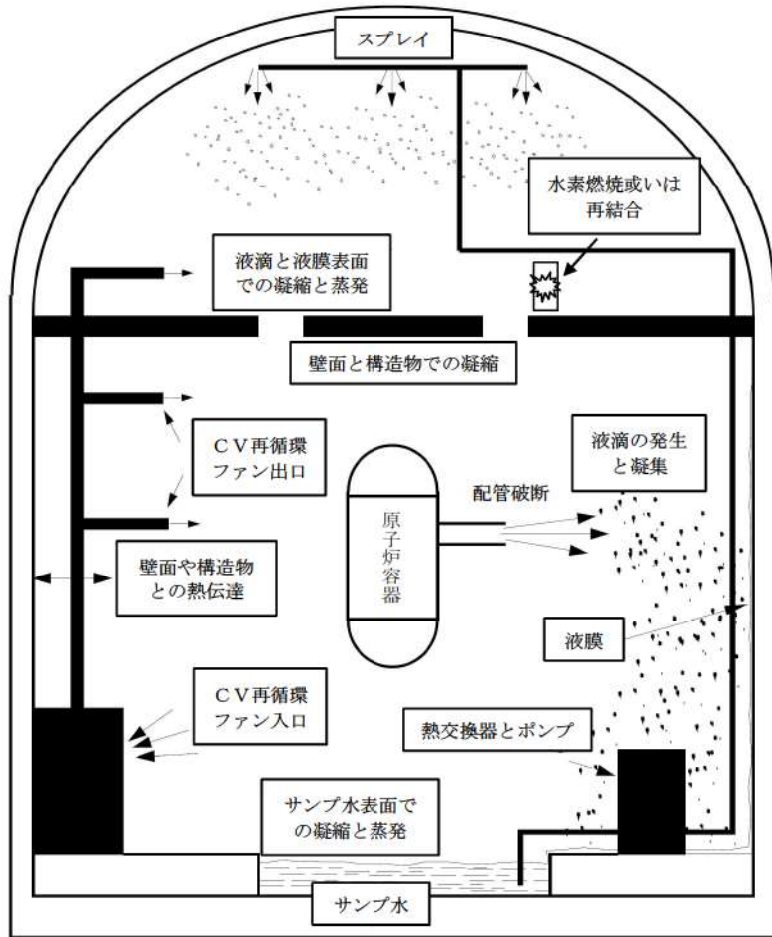
GOTHIC コードは、原子力発電プラントの格納システムの事故解析を主目的に、米国 NAI (Numerical Applications Inc.) により開発された汎用熱流動解析コードである (参考文献 2)。

コードは質量、エネルギー及び運動量の 3 保存則を気相・液相・液滴相の各流体場に適用し、状態方程式、熱伝導方程式、各種構成式及び相関式等を解くことにより流体、構造材の相互作用、機器の作動を考慮した過渡解析が可能である。流体場においては各種ガス組成の考慮が可能である。空間はノードとして模擬され、それらはパスにより接続される。ノードは集中定数系、あるいは有限差分法で分割する分布定数系による模擬が適用可能である。

また、ポンプ、バルブ、スプレイ、ファン、空調機器、熱交換器、イグナイタ、PAR 等の機器設備の作動及び制御に対しても組み込みのコンポーネントモデルにより模擬可能である。

これらにより、想定した事故シーケンスに従って原子炉格納容器 (CV) 内の水素を含む流体の過渡状態が計算される。

GOTHIC コードによる解析モデルを図 3-1 に示す。また、以下にコードの構成要素の概要を示す。



出典：EPRI Product 1013072, GOthic Technical Manual, Figure 2-1

図 3-1 GOthic コードモデル概念図及びサンプルモデル

3.2 重要現象に対する解析モデル

2章で示した現象のうち、評価目的に対し影響が大きいと判断した重要現象（表 2-2において「H」に分類された物理現象）について、その物理現象を評価するために必要となる解析モデルを表 3-1に示す。

表 3-1 重要現象に対する解析モデル

重要現象	必要な解析モデル
区画間・区画内の流動	保存式モデル 流動を模擬する構成式及び相関式 非凝縮性ガスの輸送モデル ノーディングスキーム（空間離散化）
構造材との熱伝達及び内部熱伝導	多相流モデル 熱伝達モデル（自然及び強制対流，輻射，凝縮） 熱伝導モデル
スプレー冷却	多相流モデル 界面積モデル 界面熱伝達モデル（凝縮では相変化アナログを考慮）
水素処理	PAR 特性モデル イグナイタによる水素燃焼モデル

3.3 解析モデル

GOTHIC コードの主要な解析モデルを以降に示し、その概要を表 3-2に纏める。

表 3-2 GOTHIC コードのモデル一覧

項目	モデル
基本式	<ul style="list-style-type: none"> ・気相，液相，液滴からなる 3 相の流体場 ・質量保存則，エネルギー保存則，運動量保存則 ・各種構成式・相関式及び状態方程式 ・沸騰・凝縮等多相状態の変化（二相流況，相間摩擦，物質輸送，熱伝達等） ・気相には蒸気及びガス組成を考慮
数値解法	<ul style="list-style-type: none"> ・陰解法，半陰解法，陽解法から選択（実機・検証解析では半陰解法を使用）
区画間・区画内の流動	<ul style="list-style-type: none"> ・離散化モデル（パス及びジャンクションでノード間を接続） ・集中定数系では気液分離と気相部における液滴の存在を模擬する流況モデルを適用 ・分布定数系では二相流況をすべてモデル化
構造材との熱伝達及び内部熱伝導	<ul style="list-style-type: none"> ・自由対流（McAdams），強制対流熱伝達（Dittus-Boelter）及び混合領域をモデル化 ・輻射モデル ・凝縮モデル（実験相関式あるいは熱・物質伝達のアナロジ） ・熱伝導モデル
スプレイ	<ul style="list-style-type: none"> ・液滴径・流量，温度 ・流動様式モデル ・自由対流（McAdams），強制対流熱伝達（Dittus-Boelter）及び混合領域モデル ・相変化（物質伝達）は界面を定義しアナロジにより計算
水素処理	<ul style="list-style-type: none"> ・PAR 特性を組込関数として模擬 ・イグナイトによる水素燃焼モデル

3.3.1 区画間・区画内の流動

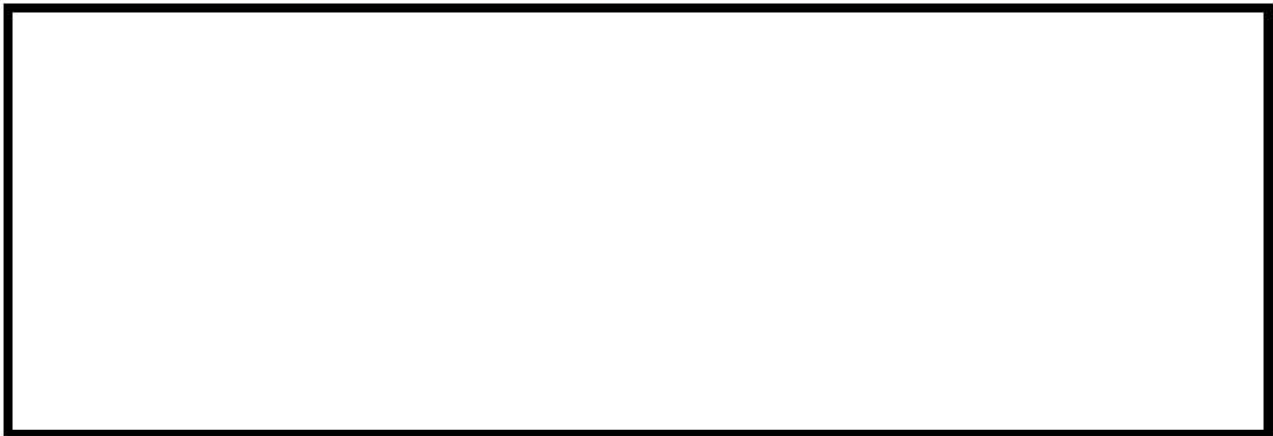
原子炉格納容器内の区画・区画内の流動を適切に模擬するため，原子炉格納容器を適切にノード分割する。流動計算で取り扱われる流体は各種ガス組成及び蒸気を含む気相，液相及び液滴相となり，これら各相に対して質量，エネルギー，運動量の保存式を各種の構成式及び相関式と合わせて数値的に解き，原子炉格納容器内の流動を模擬する。流体の各相に対しては非平衡状態の模擬が可能であり，多相の流況及び界面状態，相間の相互作用が考慮される。また，これら流体に合わせ，アイス及びミストも考慮することが可能である。

(1) 空間に対するモデル

ノードモデルには集中定数系モデル，ノードを有限差分法で分割する分布定数系モデルがある。

集中定数系ノードでは、熱水力学的諸量がノード平均として扱われ、流体各相のノード間の質量、エネルギー及び運動量の伝ばは、ノード間接続の流路面積、慣性長及び流動抵抗を考慮したパスにより模擬される。ノード内の流体が二相となる場合、ノード内の床面側に液相が、天井側に気相が存在する Pool/Drop 流動様式となる（図 3-2参照）。また、ノード内に構造材等のヒートシンク、破断口等の境界条件を設定することができる。

分布定数系ノードでは、ノードを複数のサブノードに分割することで流体の熱水力学的諸量の空間変化が詳細に模擬される。ノード内の質量、エネルギー及び運動量の空間変化は、サブノードに分割されたメッシュ構造体系で、有限差分法により求められる。また、乱流を考慮した多次元のモデル化が可能である。分布定数系ノードでは、図 3-2に示される流動様式が考慮され、流動様式に応じた界面熱伝達等を表す構成式、構造材表面の熱伝達等を表す相関式により二相流れが模擬される。分布定数系ノードはパスにより集中定数系ノードと接続することができる。



(2) 気液界面の熱伝達

PWR の重大事故等発生時において、原子炉格納容器内で水素が発生するような状態で考慮されるべきである流体間の熱・物質伝達に関する相互作用を図 3-3に示す。流体は液相（水）・気相（蒸気）・液滴の三相による流体場を想定している。流体間では、液相・気相間、液滴・気相間において凝縮・蒸発・沸騰・フラッシング等が、液滴相・液相間では、デポジット・ディエントレイン・凝集等が考えられる。構造材表面では流体との熱・物質伝達の相互作用が計算され、構造材表面を介して流体の相や保有エネルギーに変化が及ぶ。これらの相互作用のうち、流体間の界面における熱・物質伝達に関し、GOTHIC コードにおけるモデルと取扱いを示す。

流体の相間における相互作用は、空間における流況を判断した上で界面積・状態量等から判断される。流況（Flow Regime）を識別することにより、相間（液相・気相間、液滴・気相間）の熱伝達及び抗力が作用する界面積が定義される。集中定数系ボリュームでは Pool/Drop 流動様式が、分布定数系においては図 3-2に示される流動様式が考慮される。液相・気相間、液滴・気相間の熱・物質伝達モデル概念図を図 3-4に示す。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

流体が相変化を伴う場合、それによる輸送量は界面に対し作用する。この界面に対し、相間の物質伝達、熱伝達、運動量等の輸送量は、界面の両面における質量エネルギーバランスから算出される。

蒸気の凝縮に対しては、熱及び物質伝達間のアナログを考慮する機構論的なモデルにより伝達量が計算される。伝熱量は以下のとおりとなる。

$$Q_{vl} = H_{vl}A_{vl}(T_{ll} - T_v) + \Gamma_l h_{vs}$$

$$Q_{ll} = H_{ll}A_{vl}(T_{ll} - T_l) + \Gamma_l h_l$$

H_{vl}, H_{ll} : 熱伝達係数

Γ_l : 相変化質量

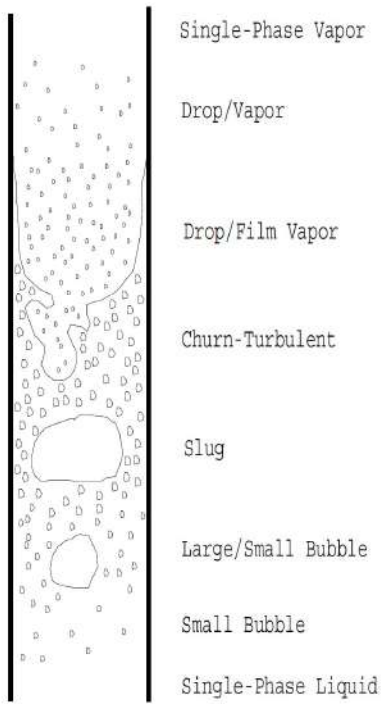
h_{vs}, h_l : エンタルピー

A_{vl} : 界面積

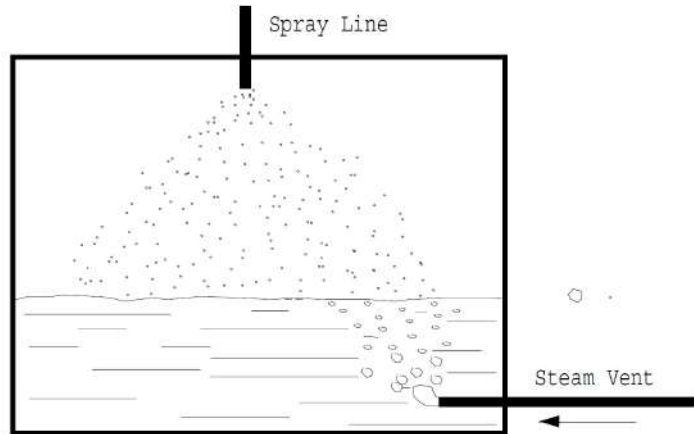
T_v, T_l, T_{ll} : 温度

(3) まとめ

このように原子炉格納容器内の空間を適切にノード分割した上で、気液界面の熱伝達や後述する構造物との熱伝達を表記する構成式・相関式と合わせて流体の保存式を解くことで、区画間・区画内の流動が模擬される。



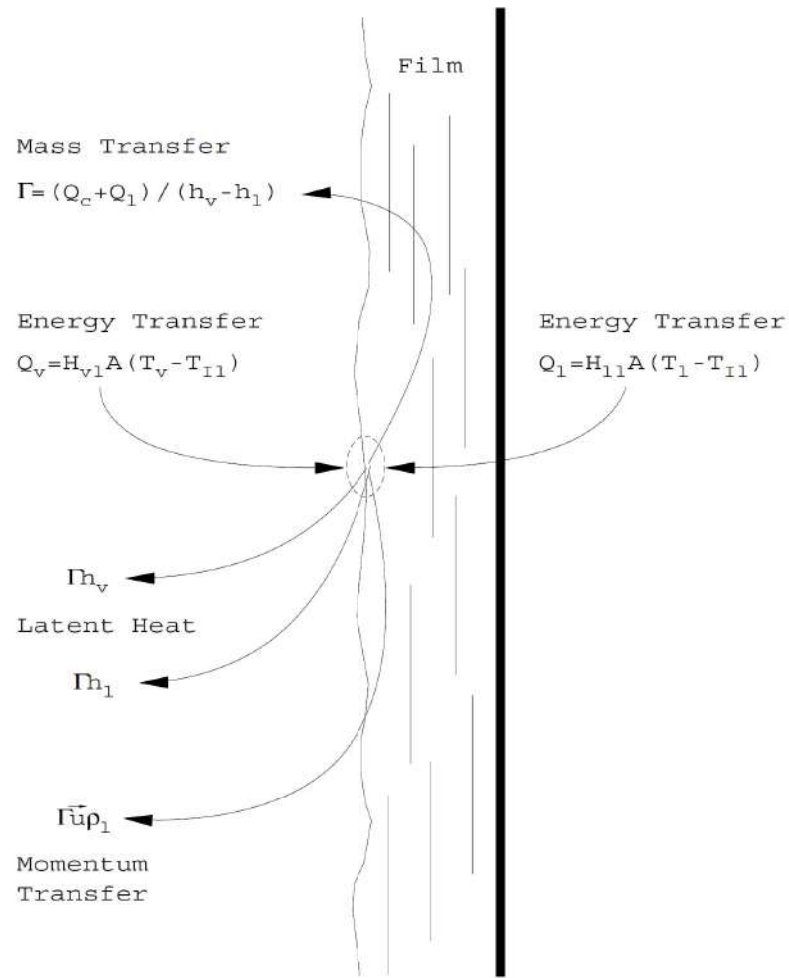
分布定数系における Flow Regime



集中定数系における Flow Regime

出典 : EPRI Product 1013072, GOHIC Technical Manual, Figure 8-1 and 8-3

図 3-2 二相流モデル



出典：EPRI Product 1013072, GOETHIC Technical Manual, Figure 8-6

図 3-3 界面伝達モデル

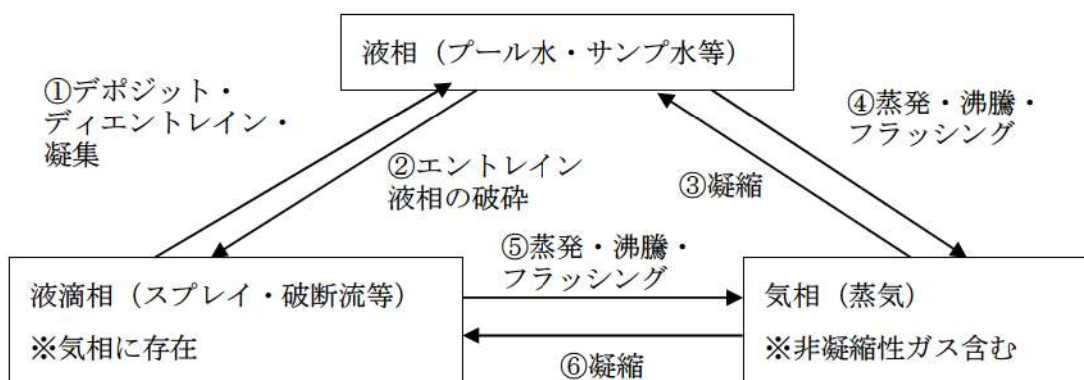


図 3-4 流体間の相互作用 (界面における熱・物質伝達)

3.3.2 構造材との熱伝達及び内部熱伝導

流体と構造物表面との間の、単相、輻射、凝縮熱伝達が考慮される(図 3-5参照)。以下に、GOTHIC コードに具備される代表的な熱伝達モデルを示す。

- ・単相熱伝達 (McAdams (参考文献3) : 自由対流, Dittus-Boelter (参考文献4) : 強制対流)
- ・輻射熱伝達 (壁面-気相, 壁面-壁面, Stefan-Boltzman (参考文献3) 式に基づく)
- ・凝縮熱伝達 (内田 (参考文献5)・田上 (参考文献6), Gido-Koestel (参考文献7), Diffusion Layer Model (参考文献8))

熱伝達モデルにより、凝縮伝熱量は以下のとおりとなる。

$$Q_{cond} = \lambda_t \lambda_{wv} H_{cond} A_{cn} \Delta T_{cond}$$

H_{cond} : 凝縮熱伝達係数

λ_t : 強制関数

λ_{wv} : 接触表面割合

A_{cn} : 伝熱面積

ΔT_{cond} : 温度差

なお、構造物表面での伝熱量は以下のとおりとなる。

$$Q_w = Q_{cond} + Q_{conv_v} + Q_{conv_l} + Q_{rad}$$

熱構造材表面の凝縮は、気体の流動強度と境界部分の密度差、非凝縮性ガスの存在等気体組成・状態量、表面の液膜の状況に影響を受ける。コードでは、実験相関式あるいは構造材表面の液膜濡れの影響を考慮する機構論的モデルを用いてこれら影響が考慮される。

事故時に1次冷却系から冷却材が放出されると原子炉格納容器内に蒸気が広がるが、構造材がヒートシンクとなり表面で蒸気凝縮が作用し、原子炉格納容器圧力及び温度上昇の抑制に寄与する。一方、格納容器スプレイによる冷却、再循環ユニットによる気相部の自然対流冷却が開始されると、構造材表面にある液相が再蒸発を始める。これら冷却材-構造材熱伝達は、これらに対応するための上記の凝縮及び対流熱伝達モデルにより模擬される。以下に構造材表面の凝縮熱伝達モデルの概要を示す。

(1) 田上ブローダウン式 (参考文献6)

日本で実施した Safe Project (参考文献9) において、1区画の閉空間に対する大破断 LOCA ブローダウン (二相放出) を想定し得られた実験相関式である。対象となる区画の自由体積、放出エネルギー積分値、放出期間の関数により、ブローダウン時のピーク凝縮熱伝達係数を定義する。な

お本式をベースにした修正田上相関式が、日本国内の原子炉設置（変更）許可申請書添付書類十における原子炉格納容器健全性評価及び長期内圧評価に使用されている。

(2) 直接凝縮モデル

構造材表面における直接凝縮モデルを示す。なお、ここで示す凝縮モデルは、濡れ面における凝縮膜が継続的に落下することで、気相と構造材との接触性が確保される状態を仮定している。

① 内田相関式（参考文献 5）

熱構造材との熱流束が過度に大きい、あるいは過度に少ない場合を除いて適用可能である。対象となる領域の蒸気・非凝縮性ガスの比のべき乗により凝縮熱伝達係数を定義する。過熱状態に対しては適用しないものとする。本式をベースにした修正内田相関式が整備されており、LOCA を想定した設計基準事故（DBA）の解析で、修正田上相関式と組み合わせて使用されている実績がある。

② Gido-Koestel 相関式（参考文献 7）

熱・物質伝達のアナログにより、熱構造材表面における凝縮に伴う物質伝達を算出、これにより等価的な熱伝達係数を定義する。気相が過熱・飽和いずれの状態においても適用可能である。表面の凝縮膜による伝熱促進を組み込んでおり、液膜厚さ・流速が考慮される。

(3) Diffusion Layer Model（参考文献 8）

Diffusion Layer Model（DLM）は、熱・物質伝達のアナログを用いて凝縮率と顕熱伝達率を計算する。このモデルは開発元（NAI）の検証により、最適な熱伝達予測であることが確認されている。このうち、DLM-FM は構造材近傍の気相におけるミストの発生及び構造材表面の液膜擾乱効果を考慮することで、最確評価が可能である。

GOTHIC コードの実験検証においては、例えば NUPEC 試験解析等で DLM-FM を使用している。他のモデル検証解析を以下に示す。

- ・内田試験
- ・Wisconsin 大学 大気圧試験（参考文献 10）
- ・Wisconsin 大学 加圧試験（参考文献 10）
- ・Wisconsin 大学 Flat Plate Tests（参考文献 11）
- ・Debhi 試験（参考文献 12）
- ・CVTR 試験（参考文献 13）
- ・BFMC 試験（参考文献 14, 15, 16）
- ・HDR 試験（参考文献 16, 17）
- ・ヌッセルト理論（参考文献 18）

(4) 膜状凝縮モデル (Film)

原子炉格納容器内の壁面のような熱構造物とは異なり、液相で浸されている濡れ面(配管内部等)に対しては、膜状凝縮モデルを適用する。このモデルでは膜状凝縮のみならず、周辺の流体との单相熱伝達及び沸騰も模擬可能である。凝縮のモデルは内田と Gido-Koestel の組合せ、あるいはそれらの最大値が適用される。

その他、GOTHIC コードによるモデル化で考慮される事項は以下のとおりである。

- ・ 溶融炉心による輻射は、ソースタームとして境界条件で考慮する。
- ・ 原子炉格納容器外面での大気との熱伝達の影響は模擬しない。
- ・ ヒートシンクモデルは、表面における流体及び空間からの伝熱を内部の熱伝導モデルに渡す。

原子炉格納容器本体及び構造物内部の伝熱は平板体系(場合によっては円柱あるいは円筒)により模擬される。すなわち、構造物の厚さ方向に離散化された体系において1次元熱伝達方程式が数値的に解かれ、構造物内の温度分布が求められる。熱伝導の計算においては、厚さ方向に分割した層ごとの密度、熱伝導率及び比熱が入力データとして与えられる。厚さの分割は、計算における温度拡散の強度に従い設定する。

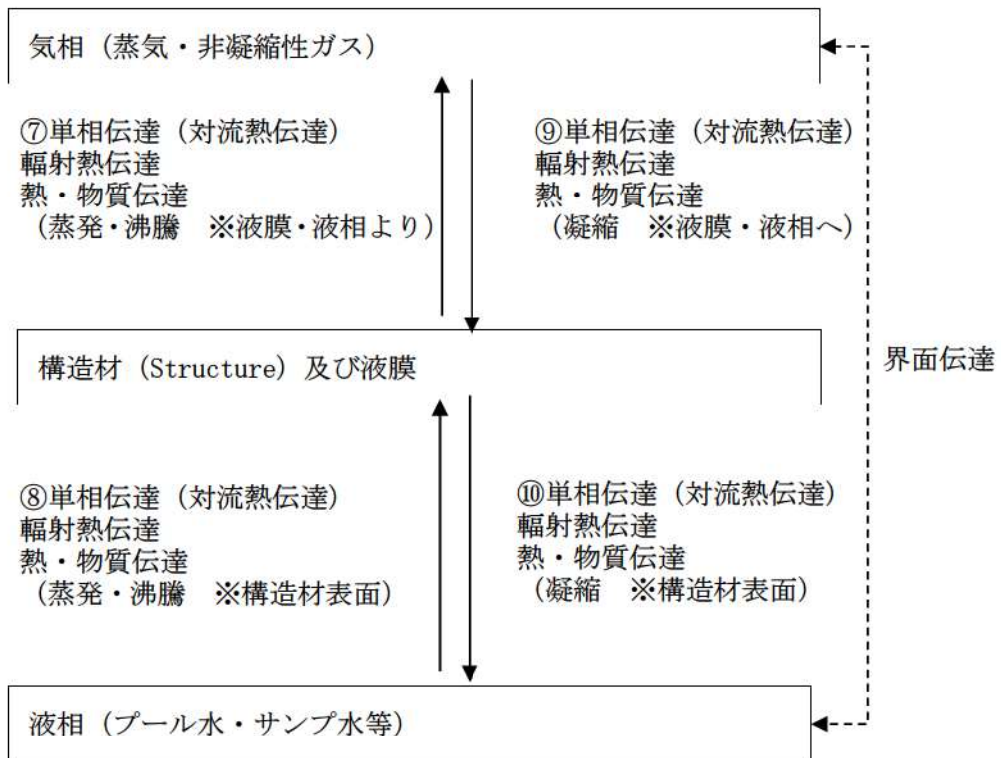


図 3-5 流体と構造物の相互作用 (構造材表面における熱及び物質伝達)

3.3.3 スpray冷却

3.3.1章(2)における気液界面の熱伝達のうち原子炉格納容器内の全体的な圧力に大きく影響するスpray冷却は、分散液滴を考慮する3流体モデルを採用することから、スpray液滴を独自の流体場として、質量、エネルギー及び運動量の保存則において考慮する。スprayの模擬に当たっては、ノミナルパラメータ(液滴径及び流量、温度)が入力により与えられる。スprayモデルが設定されるノードでは、設定されたスpray液滴がノード内に分散すると仮定され、通常、重力に従って落下する動きとなる。また、パスを用いてスpray液滴の流れ方向を定義することもできる。スprayによる流体の冷却及び凝縮は、気液界面の熱伝達、流体の相変化は、相間の運動量交換とともに、界面積、界面熱伝達、界面抗力からなる構成式により模擬される。構成式について、集中定数系ボリュームではPool/Drop流動様式が、分布定数系においては以下に示される流動様式が考慮される。

- Pool
- Small Bubble
- Large/Small Bubble
- Churn-Turbulent
- Film/Drop
- Single Phase Vapor

流動様式はノードのボイド率等に判定され、また、同様にパスに対しても適用される。相間の自由対流熱伝達、強制対流熱伝達及び混合領域に対しては以下のモデルが適用される。

- Dittus-Boelter
- McAdams
- それらの混合効果

蒸気の凝縮においては、熱及び物質伝達間のアナログを考慮する機構論的なモデルが具備されている。また、コードは3流体を考慮することから、対向流及び気相中の分散液滴を陽にモデル化することができる。

3.3.4 原子炉格納容器内の水素発生

実機プラントの解析では、水素の発生源として以下を考慮する。

- 炉内でのジルコニウム-水反応による水素発生
- 原子炉格納容器内での熔融炉心による水素発生
- 原子炉格納容器内での水の放射線分解による水素発生
- 原子炉格納容器内での金属腐食による水素発生
- 原子炉格納容器内でのヒドラジンの放射線分解による水素発生

いずれについても、MAAPコードによる解析結果に基づいて時刻歴の水素発生量が評価され、境

界条件として GOTHIC コードに与える。発生する水素は、3 ループプラントの場合、「大破断 LOCA +ECCS 注入失敗（格納容器スプレイ成功）」において、以下の区画に放出されるものとしている。MAAP コードと GOTHIC コードで水素放出先のノード分割が異なる場合は、ノードの体積による重みで放出量を分割している。

<炉内及び溶融炉心による水素発生>

- ・破断口が存在する区画（蒸気発生器室）
- ・加圧器逃がしタンクのラプチャディスクが存在する区画（蒸気発生器室）
- ・RV 破損口存在区画（原子炉下部キャビティ）

<水の放射線分解，金属腐食，ヒドラジンの放射線分解による水素発生>

- ・オペレーションフロア以下の各区画

なお、境界条件は時系列による水素の放出質量流量、圧力及び温度である。流量に対しては後述するように補正を行っている。適用する圧力及び温度は、炉心から発生する水素に対しては MAAP コードの計算結果によるもの、それ以外については発生量算出の時点で参照した MAAP コードによる計算結果を使用している。

3.3.5 水素処理

実機プラントの解析では、水素処理設備の特性を模擬し水素の再結合若しくは燃焼を化学的に解いた上で熱及び流動の観点から周辺領域への影響を考慮した計算体系とする。具体的には、水素処理設備が広域な原子炉格納容器ドーム部に設置される場合には、3 次元的なノード分割を考慮した上で、水素処理設備の設置位置を定義する。また、下部区画等の 1 次元的あるいは限定された範囲で等方的な流動が予想される位置に設置される場合は、単一の評価ボリューム内で水素処理設備による効果を考慮し、それが周囲に与える影響についてはボリューム間を接続するパスにより模擬される。

以降に、水素処理設備である PAR、水素燃焼設備となるイグナイタについて説明する。

(1) PAR による水素処理

PAR の性能評価式は製造元より提示されており、実証試験において試験結果との相関関係の確認が行われている。水素処理速度は再結合率の性能評価式に基づき、PAR 設置場所における水素及び酸素の体積比、圧力の関数となる。触媒の反応度は温度に依存するが、触媒温度は水素濃度に、ガス温度は圧力に依存するため、評価式はこれらを含む形となる。また、PAR の入口流量は、触媒温度（水素濃度に依存）と圧力によるため、入口流量を直接的なパラメータとする必要がないが、水素処理速度は圧力条件に制約される。水素の再結合率に係る性能評価式を以下に示す。

$$\gamma = \eta \cdot \min(X_{H_2}, 2 \cdot X_{O_2}, 8.0) \cdot (A \cdot P + B) \cdot \tanh(X_{H_2} - 0.5)$$

ここで、

γ : 再結合率 (g/s)

η : 1.0 ($X_{O_2} > X_{H_2}$)

X_{H_2} : 水素体積比 (vol%)

X_{O_2} : 酸素体積比 (vol%)

P : 圧力 (MPa)

A, B : 係数

A 及び B は試験結果に基づき設定される係数となる。

また、PAR では水素の再結合により、以下のように量論的に化学反応熱が発生するが、この発生熱は GOTHIC コードにおいて考慮される。



GOTHIC コードでは、PAR が設置されるノードの水素及び酸素の体積比、圧力が性能評価式の入力として与えられ、性能評価式に基づいて再結合率、すなわち、ノード内の水素処理速度が計算される。計算された水素処理速度に基づき発生する化学反応熱量が計算され、当該ノードの雰囲気への熱源として考慮される。

(2) イグナイタによる水素燃焼

GOTHIC コードに組み込まれるイグナイタモデルについて説明する。イグナイタへ通電されると、その表面部が 900℃まで上昇することで、周囲空気温度を水素の自己発火温度である約 560℃まで上昇させ、イグナイタ周囲の水素を自己燃焼させる。イグナイタ周囲の水素が燃焼することで、さ

らにその周囲の水素も火炎伝ばによって燃焼し、瞬時に原子炉格納容器内の水素濃度を低下させる効果が期待できる。

GOTHIC コード内において水素燃焼を模擬する場合、対象となるボリュームの種別に応じ適用される燃焼モデルが異なる。集中定数系においては HECTR コードと同様なモデルを使用する。これは、ガスの状態がクライテリアに適合した場合に、対象区画における一定割合の水素が燃焼するとし、パスを経由して隣接区画に燃焼が伝ばするものとする Discrete Burn Model と、外からの水素供給に基づき燃焼が継続する Continuous Burn Model による。Discrete Burn Model はイグナイタによる着火で区画燃焼が生じるとする。Continuous Burn Model では、イグナイタによる燃焼判定によらず自然着火のみの模擬に対し使用するが、パスを経由した隣接区画への燃焼伝ばは評価されない。分布定数系においては、機構論的な燃焼モデルが適用される。これは、対象セルの気相成分（水素及び酸素濃度）及び乱流要素により層状あるいは乱流燃焼のうち最大のものが生じるとするものである。

図 3-7に水素濃度に応じたイグナイタによる一般的な火炎伝ば挙動を示す。水素濃度が 4vol% から可燃限界に入り、約 4vol%から約 6vol%では火炎は上方伝ばのみ、約 6vol%から約 8vol%では上方と水平に伝ば、約 8vol%以上で下方伝ばも起きる。このため、水素濃度が約 8vol%未満ではイグナイタより高い領域が燃焼し、約 8vol%以上では区画全体に火炎が広がる。水素濃度が低い場合には、火炎は上方にしか伝ばしないが、水素濃度が高まるにつれて水平方向への火炎伝ばが生じ、ついには下方への火炎伝ばが生じることを示している。

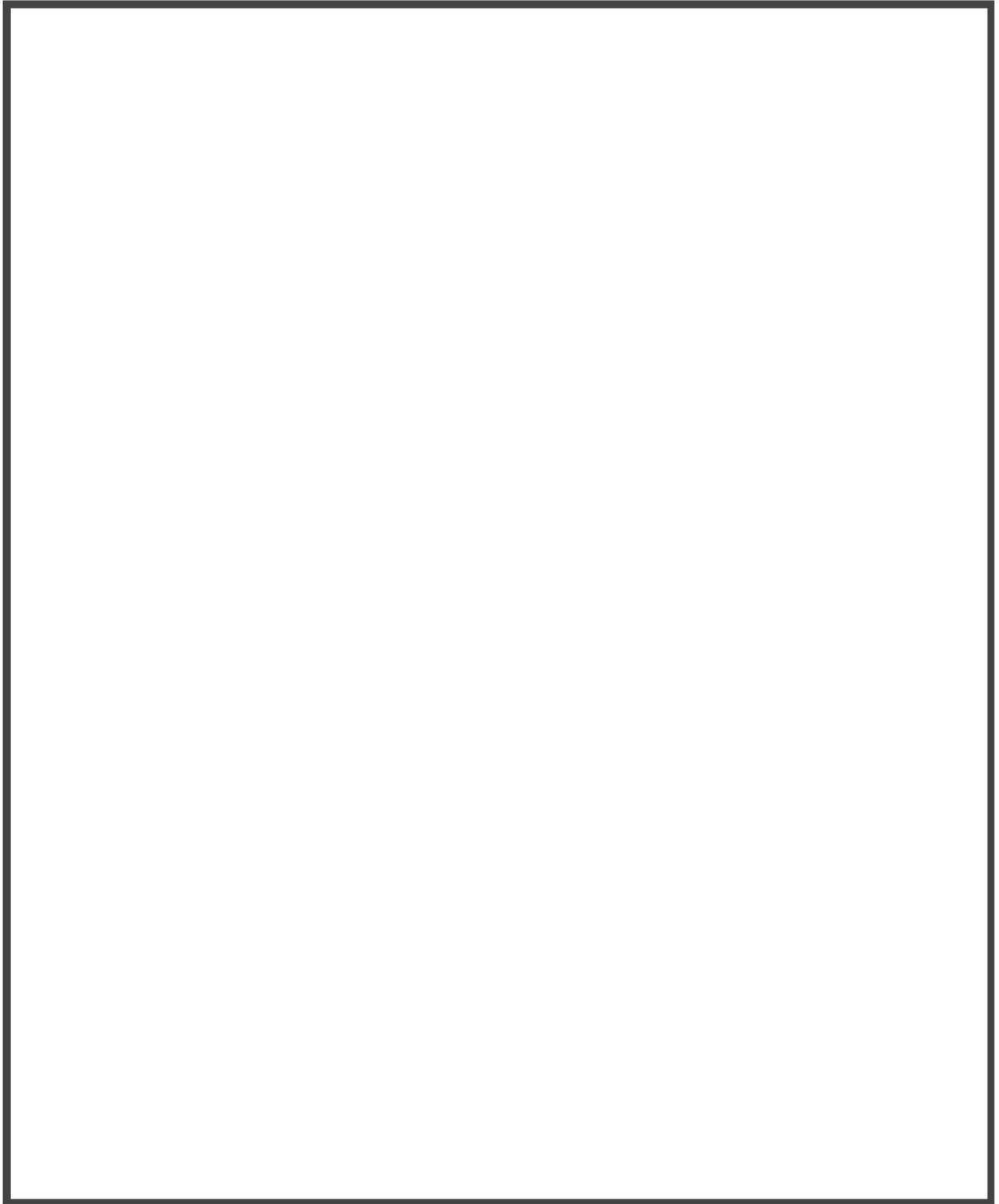
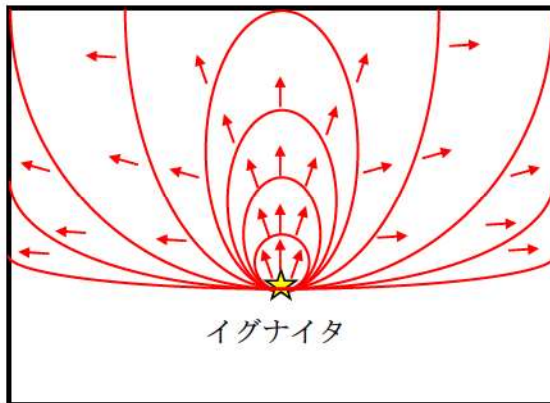


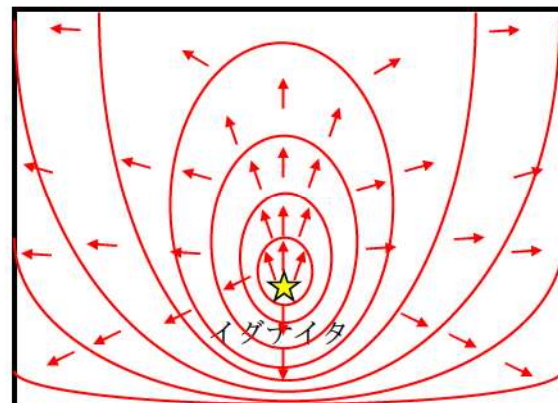
図 3-6 PAR 組み込みロジック

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

(6vol% ≤ 水素濃度 < 8vol%)



(8vol% ≤ 水素濃度)



[補足] 火炎伝ばの方向

- 4vol% ≤ 水素濃度 < 6vol% : 上方のみ
- 6vol% ≤ 水素濃度 < 8vol% : 上方・水平
- 8vol% ≤ 水素濃度 : 上方・水平・下方

図 3-7 イグナイタによる水素燃焼挙動

3.4 ノード分割

有効性評価における実機プラントのノーディングスキームは、形状、模擬する物理現象の強度、数値計算上の必要条件により基本的な分割を定める。



GOTHIC コードによる空間の模擬に対し適用する解法には集中定数系及び分布定数系があり、それらの比較を表 3-3に示す。集中定数系で考慮できるものは、基本的に分布定数系によっても模擬可能である。

プラントノーディングを図 3-8から図 3-11に示す。なお、ノード分割は想定される物理現象及びその模擬の要否、数値計算上の扱い等によって検討すべきものであり、解析により得られる結果がこの分割方針により大きく変わることがないようにする必要がある（表 3-4参照）。

また、想定する事故シーケンスによって支配的な現象が異なる場合等は、その模擬の必要性に応じて分割手法を見直す必要が生じることがある。

解析では、原子炉からの冷却材と水素の放出源としてループ室の破断口に境界条件が設定される。また、原子炉容器の破損による放出についても同様に、境界条件として原子炉下部キャビティに設定される。これ以外で、水の放射線分解及びヒドラジンの放射線分解、原子炉格納容器内の金属腐食に伴う水素発生に関しても、それぞれの箇所において境界条件により模擬している。同様に「水素燃焼」の評価事故シーケンスとして想定される事象では格納容器スプレイに期待することから、スプレイモデルを設定し、原子炉格納容器ドーム部の各ノードに境界条件として設定される。実機解析全体の評価の流れ及びインプット及びアウトプットの関係を図 3-12に示す。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 3-3 集中定数系と分布定数系の比較

項目	集中定数系ノード	分布定数系ノード
特徴	ノード内の物理諸量を平均値として表す。他ノードとの流体の伝ばはパスにて模擬され、移流慣性はパスで考慮されるが、ノード内では瞬時に一様に拡散及び混合する。	ノード内をサブノードに詳細分割し、ノード内の物理諸量の空間及び時間変化を模擬。集中定数系ノードとパスで接続することができる。流体の対流及び乱流を模擬することができる。
適用例	原子炉格納容器下部区画	原子炉格納容器ドーム部
保存式	質量保存則 エネルギー保存則 運動量保存則 (いずれも流体場である気相、液相及び液滴相に対し考慮)	質量保存則 エネルギー保存則 運動量保存則 (いずれも流体場である気相、液相及び液滴相に対し考慮)
流動様式	Pool/Drop	Pool, Small Bubble, Large/Small Bubble, Churn-Turbulent, Film/Drop, Single Phase Vapor
構造材と流体の熱伝達	流体と構造物表面との間の、単相、輻射、凝縮熱伝達が考慮される。	流体と構造物表面との間の、単相、輻射、凝縮熱伝達が考慮される。
乱流モデル	使用しない	k-εモデル等
数値解法	ノードーパス	有限体積における差分法 (スタaggerド格子)

表 3-4 ノード分割の考え方

対象区画	ノード分割の考え方
全体的な考え方	
原子炉格納容器 ドーム	
下部	
水素処理設備	

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

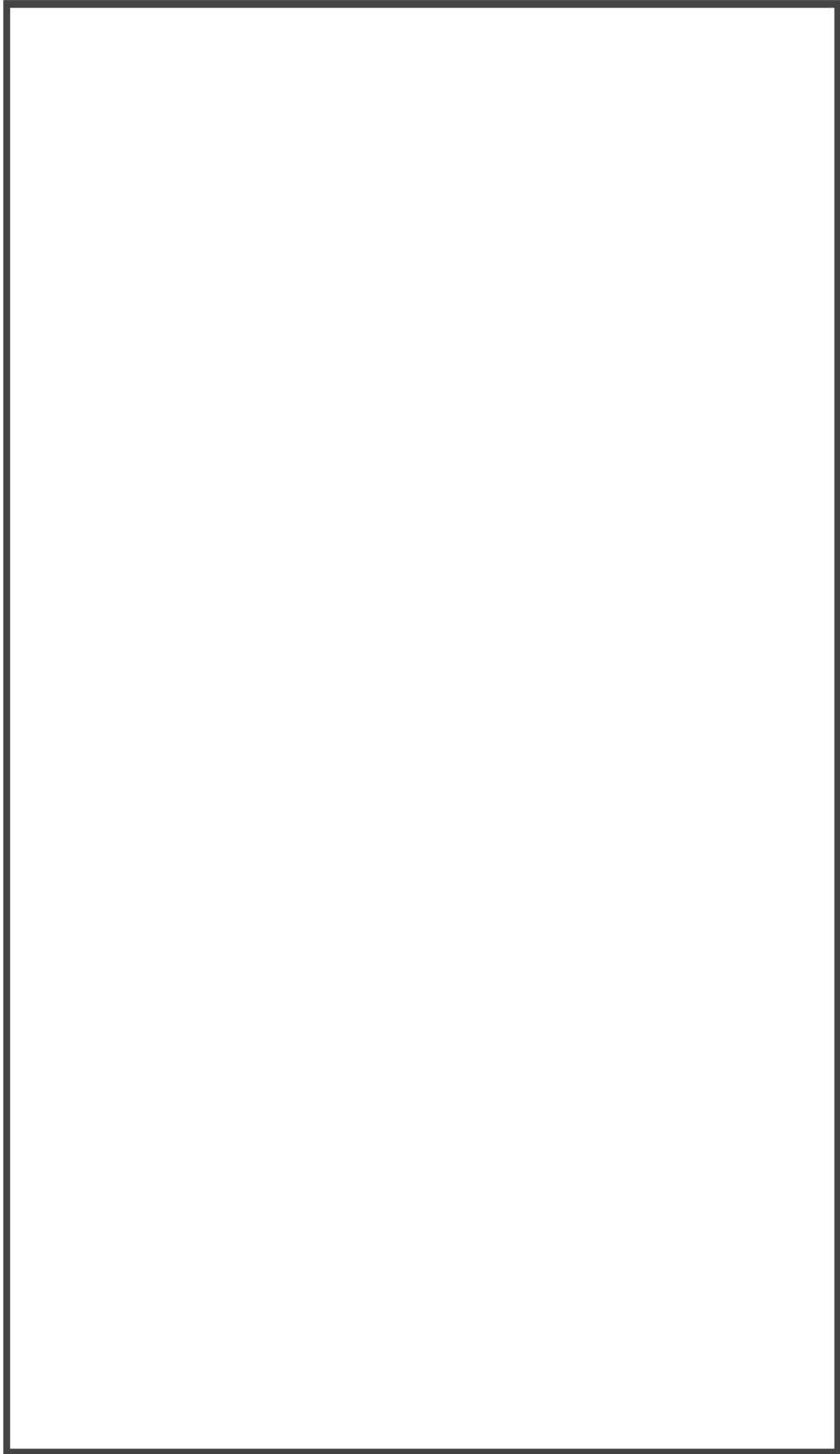


図 3-8 GOTHIC コードによる水素濃度評価解析ノード図と実機プラントの対応 (3ルーブプラントの例)

枠囲いの内容は、商業機密に属します
ので公開できません。

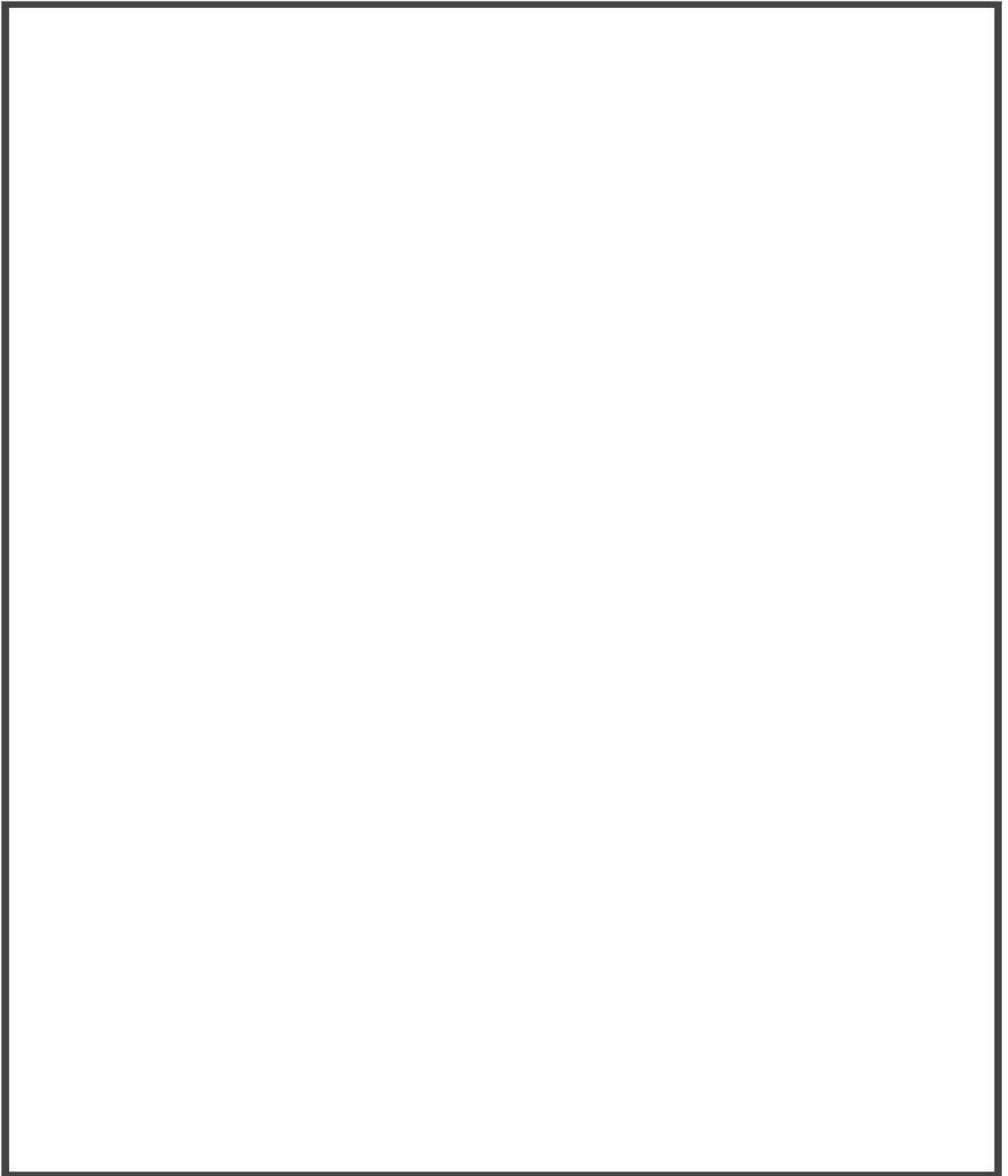


図 3-9 GOTHIC コードによる水素濃度評価解析ノード図 (代表 3 ループプラント)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

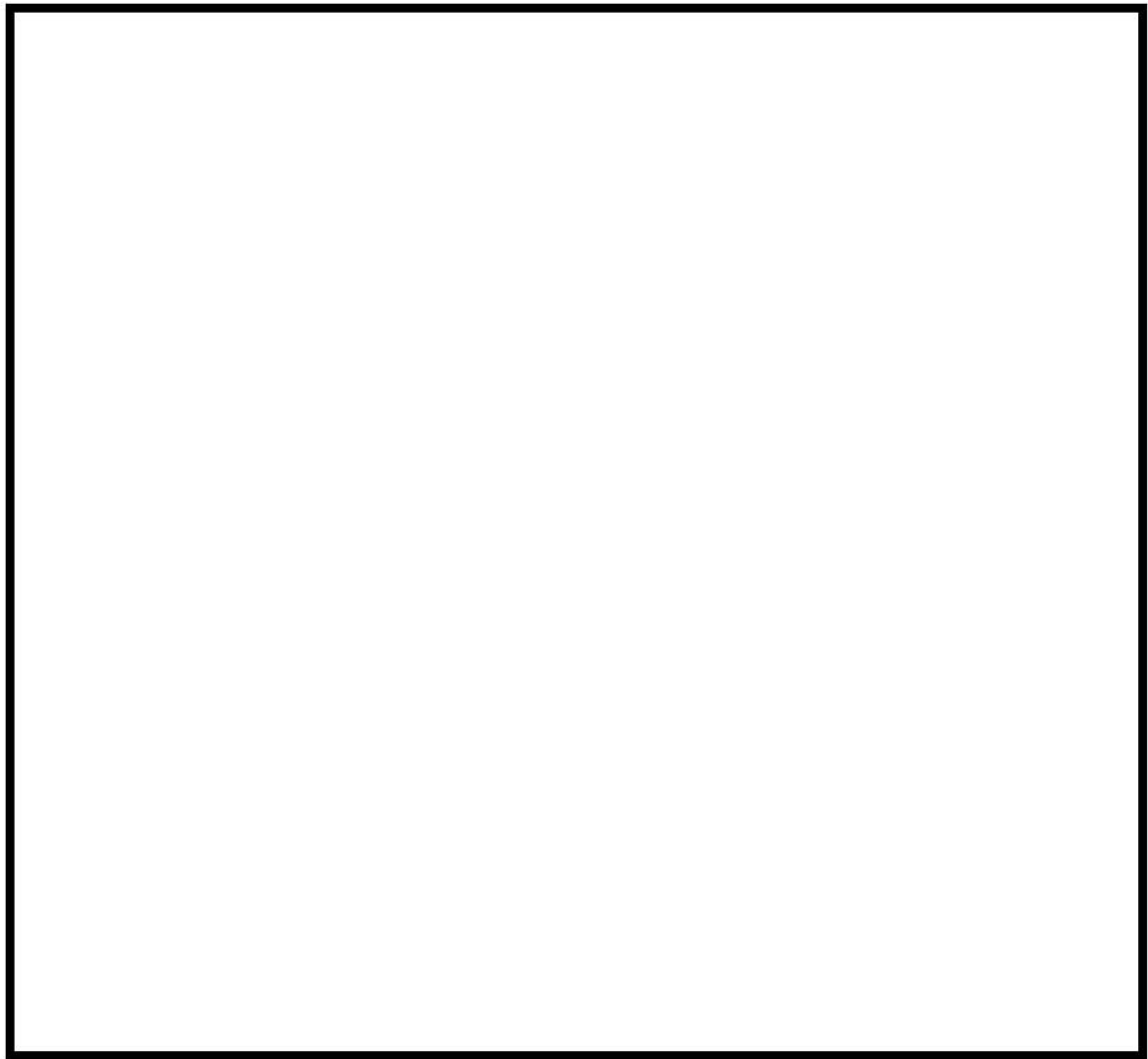


図 3-10 GOTHIC コードによる原子炉格納容器ドーム部ノーディング例
(代表 3 ループプラント)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

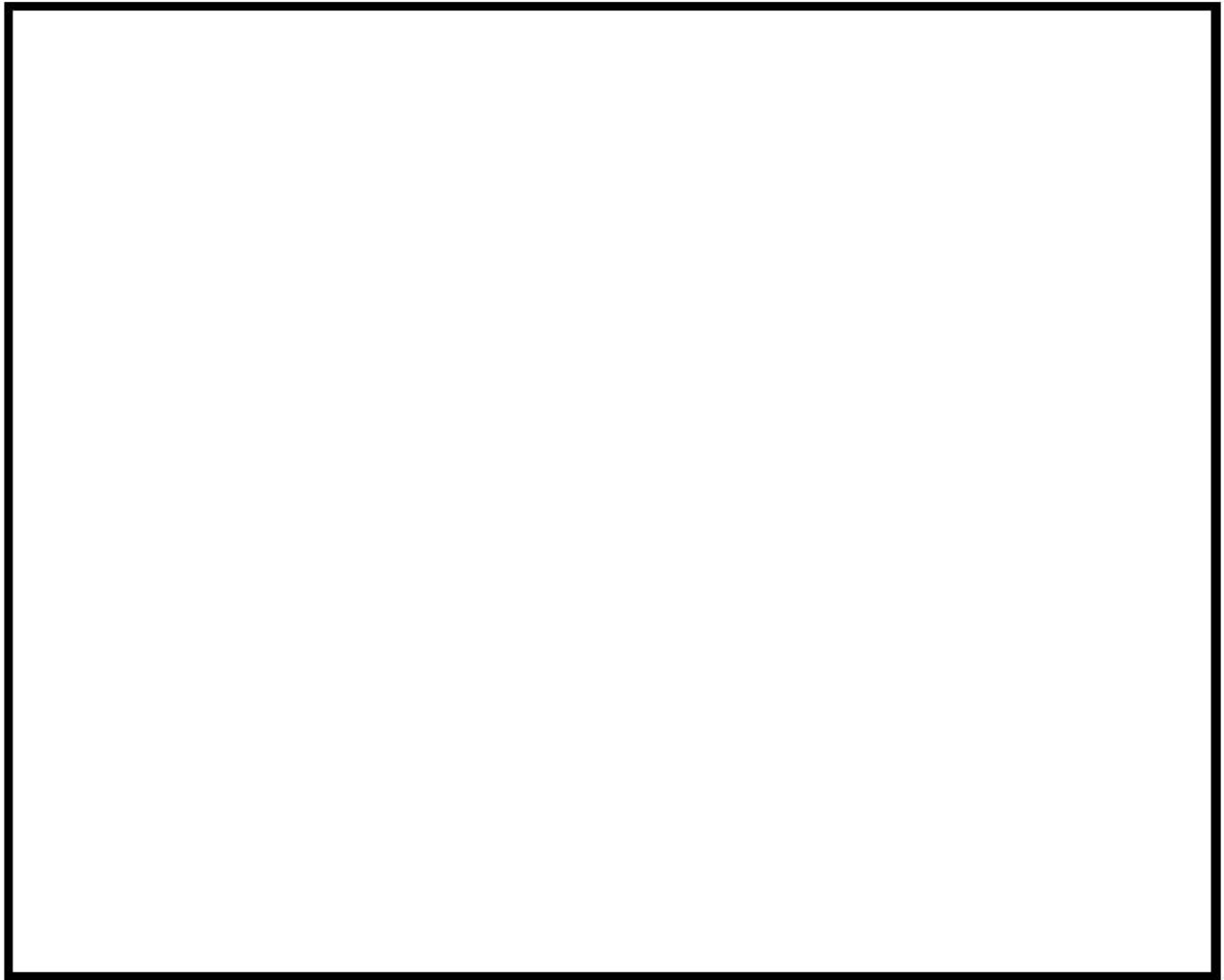


図 3-11 GOTHIC コードによる原子炉格納容器ドーム部ノーディング例
(代表 3 ループプラント) 付番詳細

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

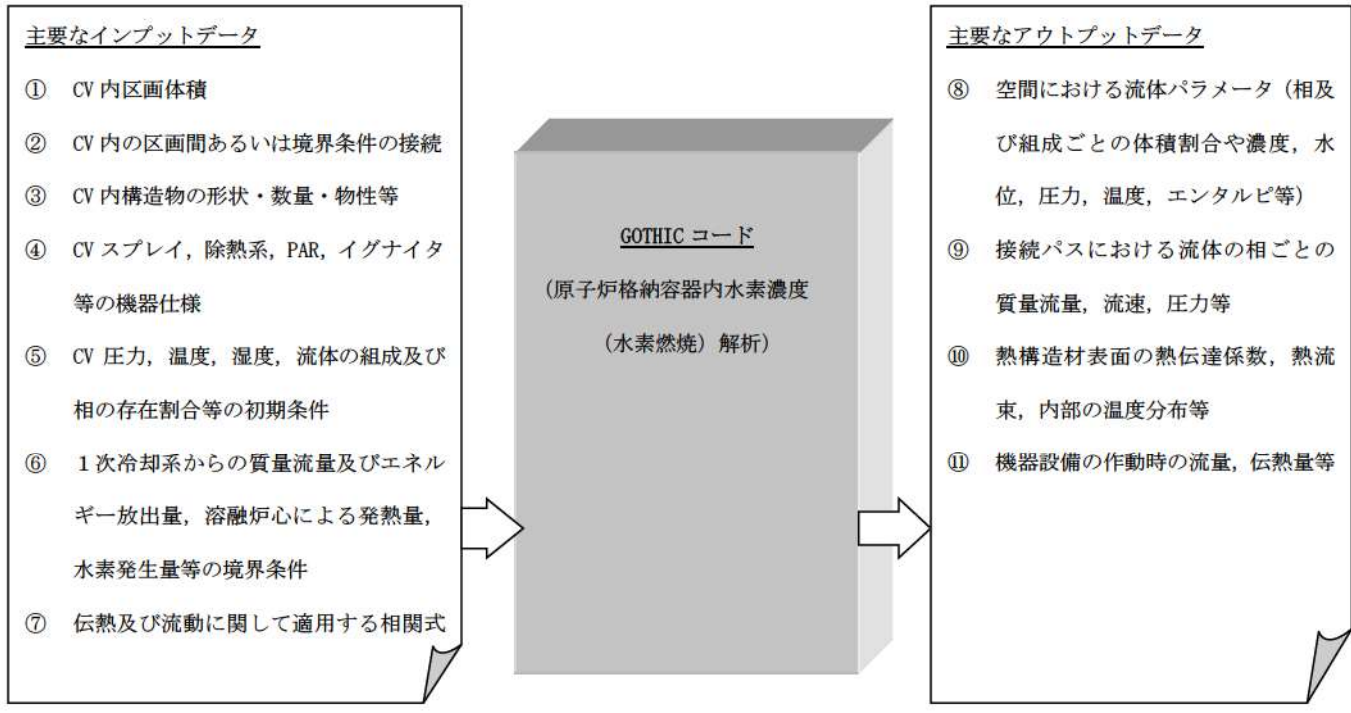
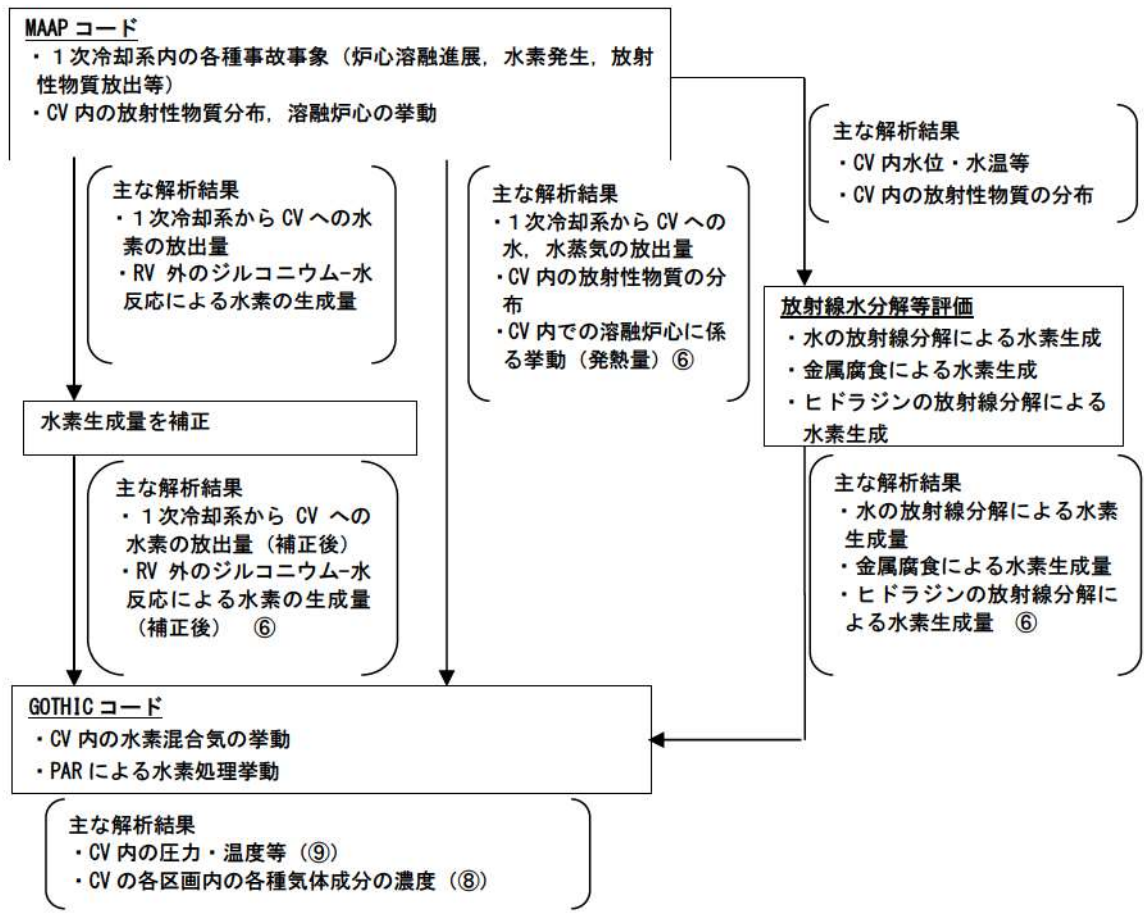


図 3-12 実機プラントにおける原子炉格納容器内水素濃度評価の概要

3.5 入出力

GOTHIC コードによる水素濃度評価の入出力を図 3-12に示す。また、主要なインプットデータは以下のとおり構成される。インプットデータの元となる「原子炉格納容器関連データ」, 「事象収束に重要な機器及び操作」等を整理した解析条件を添付 1 に示す。

- ① CV 内の区画体積及びそれに係る諸元（高さ，水力等価径等）
- ② CV 内の区画間あるいは境界条件の接続に係る諸元（断面積，水力等価径等）
- ③ CV 内構造物の形状，数量及び物性等
- ④ CV スプレイ，除熱系，PAR，イグナイタ等の機器仕様
- ⑤ CV 内圧力，温度，湿度，流体の相及び組成の存在割合等の初期条件
- ⑥ 1 次冷却系からの質量流量及びエネルギー放出量，熔融炉心による発熱量，水素発生量等の境界条件
- ⑦ 伝熱及び流動に関して適用する相関式及び流体場に対し有効とする項目の指定（熱伝達相関式，流動様式等）

上記をインプットデータとして過渡解析を実施し，以下のアウトプットデータを得る。

- ⑧ 空間における流体パラメータ（相及び組成ごとの体積割合や濃度，水位，圧力，温度，エンタルピ等）
- ⑨ 接続パスにおけるパラメータ（流体の相ごとの質量流量，流速，圧力等）
- ⑩ 熱構造材の熱的パラメータ（表面の熱伝達係数，熱流束，内部の温度分布等）
- ⑪ 機器設備の作動パラメータ（流量，伝熱量等機器の諸量に係るものと作動状況等）

4. 検証, 妥当性確認

GOTHIC コードの水素分布解析に対する適用性を以降に示す。

4.1 重要現象に対する検証, 妥当性確認方法

GOTHIC コードの評価マトリックスを表 4-1に示す。表 4-1では, 評価対象となる現象のうち「H」ランクとなるものを列挙している。各実験解析及び実機解析の内容について要約を 4.1.1 章から 4.1.5章に示す。なお, 水素生成については, MAAP コードによる解析結果に基づいて, 時系列の境界条件として GOTHIC コードに与えられることから, GOTHIC コードの妥当性確認の対象外とする。

表 4-1 評価マトリックス

											関連モデル			
区画間・区画内の流動	NUPEC 試験解析 M-7-1 図 4-8 ～ 図 4-12	NUPEC 試験解析 M-4-3 図 4-13 ～ 図 4-16	熱伝導率と熱伝導率との比較※	—	—	熱伝導率と熱伝導率との比較	—	熱伝導率と熱伝導率との比較	—	図 4-29 ～ 図 4-30	図 4-31	PAR 特性検証 図 4-32 図 4-33 図 4-44 図 4-48	図 4-7 表 4-7	保存式モデル 流動を模擬する構成式及び相関式 非凝縮性ガスの輸送モデル ノーディングスキーム (空間離散化モデル) 多相流モデル 熱伝達モデル (自然及び強制対流, 輻射, 凝縮) 熱伝導モデル
			構造材との熱伝達及び内部熱伝導	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	多相流モデル 界面積モデル 界面熱伝達モデル (凝縮では相変化アナロジを考慮)
スプレー冷却	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	多相流モデル 界面積モデル 界面熱伝達モデル (凝縮では相変化アナロジを考慮)
水素処理	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	PAR 特性モデル イグナイタによる水素燃焼モデル

※ 複数の試験による凝縮熱伝達モデルの実験検証。

4.1.1 NUPEC 試験解析

NUPEC 試験は、実機プラントの重大事故等時に発生する水素の代替としてヘリウムガスを用いた非凝縮性ガスの拡散及び混合挙動に関する総合効果試験である。ここでは、水素燃焼評価に対する評価事故シーケンスとなる「大破断 LOCA+ECCS 注入失敗（格納容器スプレイ成功）」を想定し、評価で重要となる区画間・区画内の流動、構造材との熱伝達及び内部熱伝導、スプレイに係るモデルを中心としたコードの水素濃度予測に係る性能について検証を行い、GOTHIC コードが実機プラントの解析に適用できることを確認する（Test M-7-1）。また、NUPEC 試験ではスプレイなし条件（Test M-4-3）でも実験がなされており、これらに対するコードの適用性についても確認し、スプレイ及び蒸気放出が評価結果に与える影響を検討する。

4.1.2 熱伝達試験との比較

構造材との熱伝達及び内部熱伝導に係るモデルのうち、実機プラント解析に用いられる構造材表面の熱伝達モデルについて、解析予測と各種試験データとの比較を行った。実機プラントの解析では Gido-Koestel モデルと内田モデルの最大値に保守性を考慮することで、ウェット条件に換算した水素濃度を保守的に見積もるアプローチを採用する。ここでは、広範囲にわたり適用される内田モデルの試験データに対するバラつきを確認する。

また、前述の NUPEC 試験解析では、コードの流動に係る模擬性を適切に評価することから、より最適予測性の高い Diffusion Layer Model FM (DLM-FM) を適用している。各種試験に対する同モデルの予測性能についても確認する。

4.1.3 熱伝導解析解との比較

構造材との熱伝達及び内部熱伝導に係るモデルのうち、内部熱伝導に係るモデルについて検証した。具体的には、コードによる数値計算が解析解を適切に再現することを確認し、同モデルがコード内に適切に組み込まれていることを検証する。

4.1.4 PAR 特性検証

水素処理設備のうち、重大事故等対策として設置される PAR について、設備製造元が供給する水素処理性能評価式が、コードに適切に組み込まれていることを検証する。

PAR の特性が適切にコードに組み込まれている点に対しては、理論値とコードの予測値を比較する。

また、実機プラント解析に際し、空間の分割手法等の点から PAR の性能曲線の適用可否に対しては、THAI 試験においてノード分割を変更した実験解析により検証を行う。

4.1.5 イグナイタによる水素燃焼モデルの検証

水素処理設備のうち、イグナイタによる水素燃焼モデルについて、コード内モデルの妥当性検証を示す。

4.2 NUPEC 試験解析

NUPEC で実施された原子炉格納容器挙動試験（参考文献 19, 20）では，原子炉格納容器内で形成される非凝縮性ガスと空気の密度差による自然循環試験，放水水蒸気及び格納容器スプレイによる可燃性ガス濃度分布及び混合挙動試験等の 35 試験が実施された。実機で想定される非凝縮性ガスは水素となるが，本試験では代替ガスとしてヘリウムを用いている。NUPEC 試験と他機関で実施された試験との比較を図 4-1（参考文献 20）に示す。

ここでは，評価事故シーケンスとなる LOCA 時の ECCS 注入失敗（格納容器スプレイ成功）を想定した Test M-7-1 を選択する。Test M-7-1 は OECD/NEA の ISP35 に採用されており，海外 10 か国，15 機関にて確認解析が実施されている。また，スプレイを仮定しないシーケンスとなる Test M-4-3 についても解析を実施し，スプレイ有無がコード予測性に与える影響について確認する。

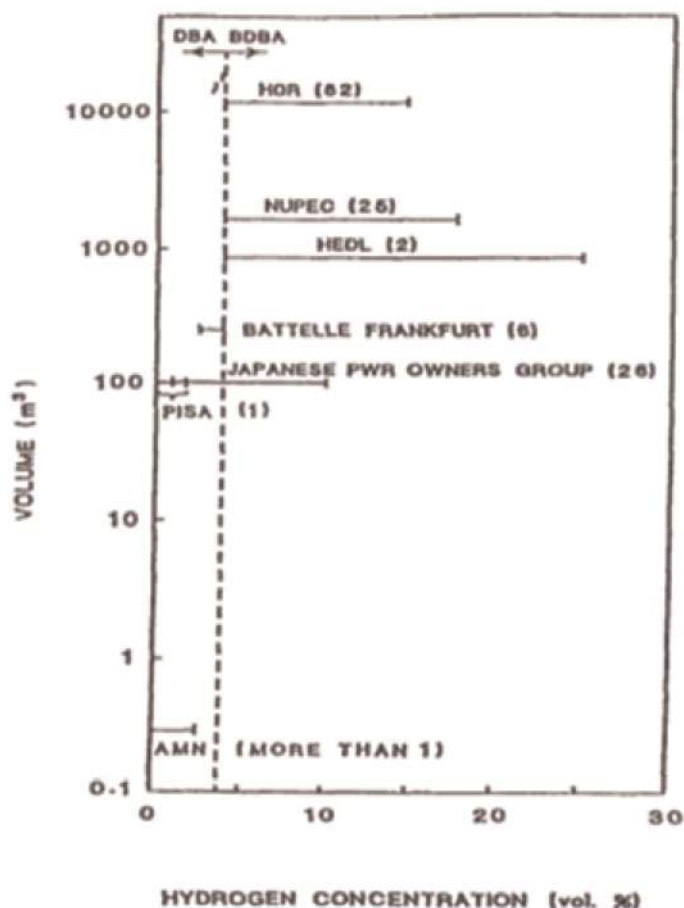


図 4-1 濃度分布及び混合挙動試験の規模と水素濃度範囲

4.2.1 NUPEC 試験設備

NUPEC 試験設備の概要図を図 4-2及び図 4-3に示す。また、原子炉格納容器スケール設備、ガス放出設備等の主要な試験設備を以下に示す。

(1) 原子炉格納容器

原子炉格納容器はドライ型 4 ループ PWR の 1/4 規模であり、4 ループ相当の区画が模擬されている。自由体積は 1,300m³である。

(2) ガス放出設備

試験は安全性の観点から水素ガスの代わりにヘリウムガスが使用されている。

(3) 格納容器スプレイ

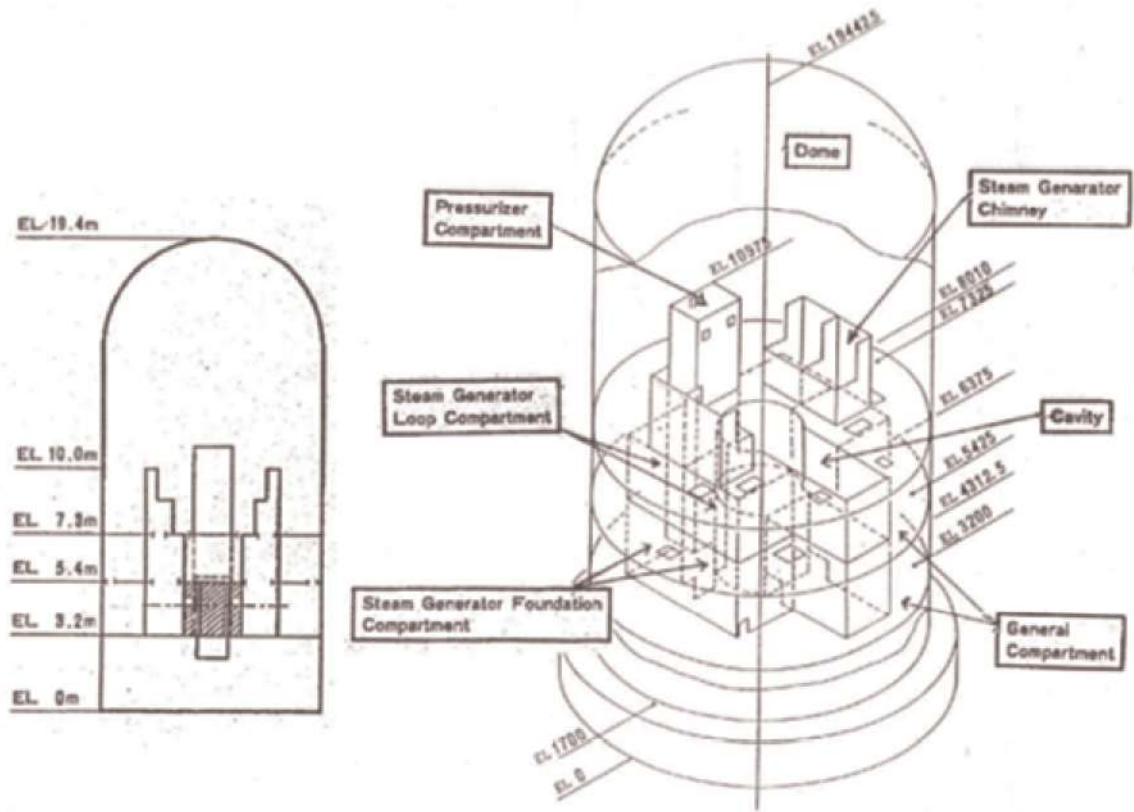
原子炉格納容器全体をカバーするため合計 21 個のスプレイノズルが設置されている。スプレイ液滴径は約 0.75mm である。

(4) 蒸気供給設備

配管破断時の放出蒸気を模擬するため蒸気供給設備を設けている。

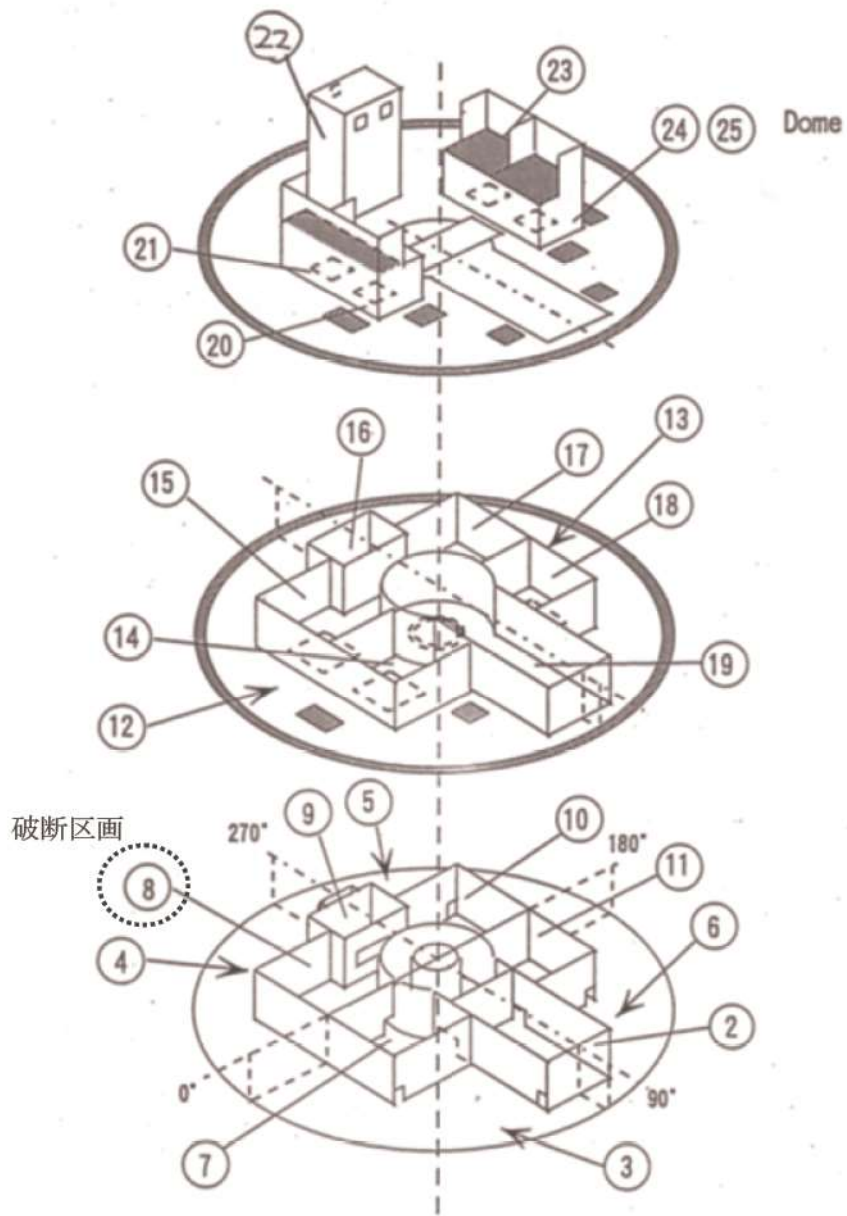
(5) 計測設備

ヘリウム濃度、雰囲気温度、圧力、原子炉格納容器壁面温度、区画壁面温度が計測されている。ヘリウム濃度は、図 4-4 (参考文献 19) に示すとおり、原子炉格納容器内の 5 箇所 (原子炉格納容器ドーム頂部 (赤線, EL. 19.4m) 及び原子炉格納容器ドーム上部 4 箇所 (青線, EL. 16.7m)) に設置されたサンプリングチューブにより計測される。圧力は区画間圧力損失が微少であることから原子炉格納容器ドーム部の圧力を代表して測定している。区画壁面温度及び空間温度は熱電対により計測している。



出典：EPRI Product 1013072, GOthic Qualification Report, Figure 16-1

図 4-2 NUPEC 試験設備の概要図



出典：EPRI Product 1013072, GOTHIC Qualification Report, Figure 16-2

図 4-3 NUPEC 試験設備内部区画の概要図

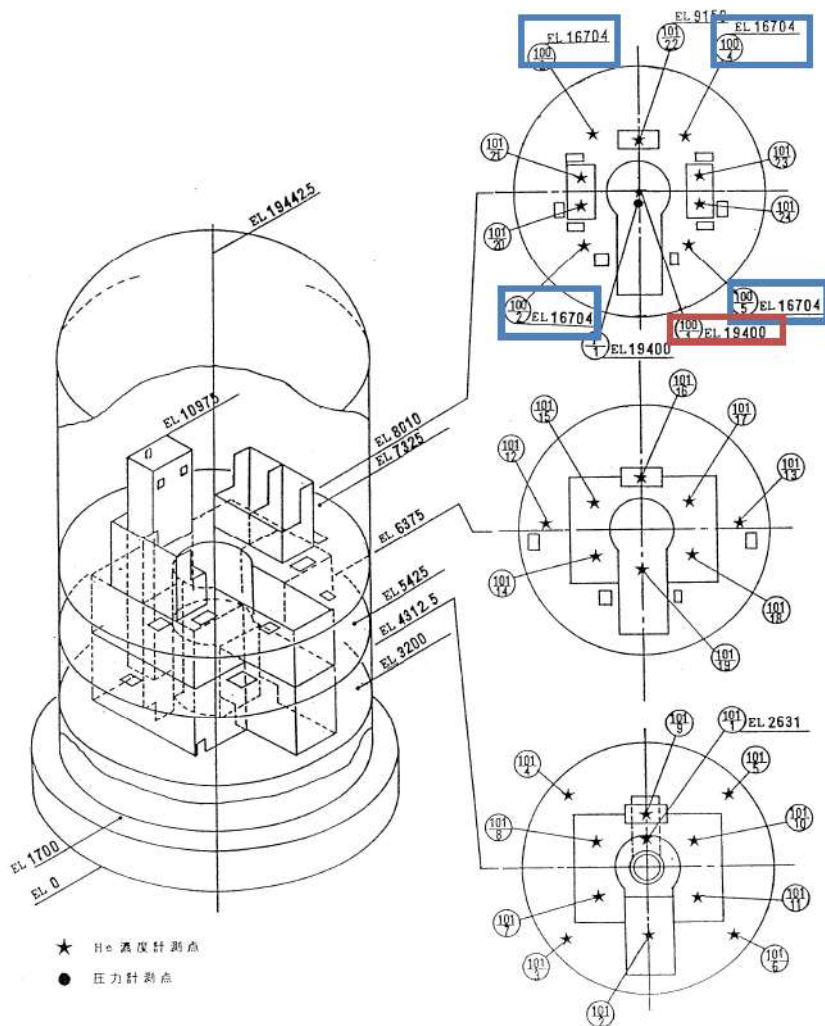


図 4-4 ヘリウム計測位置

4.2.2 解析モデル



GOTHIC コードによる NUPEC 試験施設のノード分割モデルを図 4-5に, 原子炉格納容器ドーム部の分割を図 4-6に示す。

枠囲いの内容は, 商業機密に属しますので公開できません。

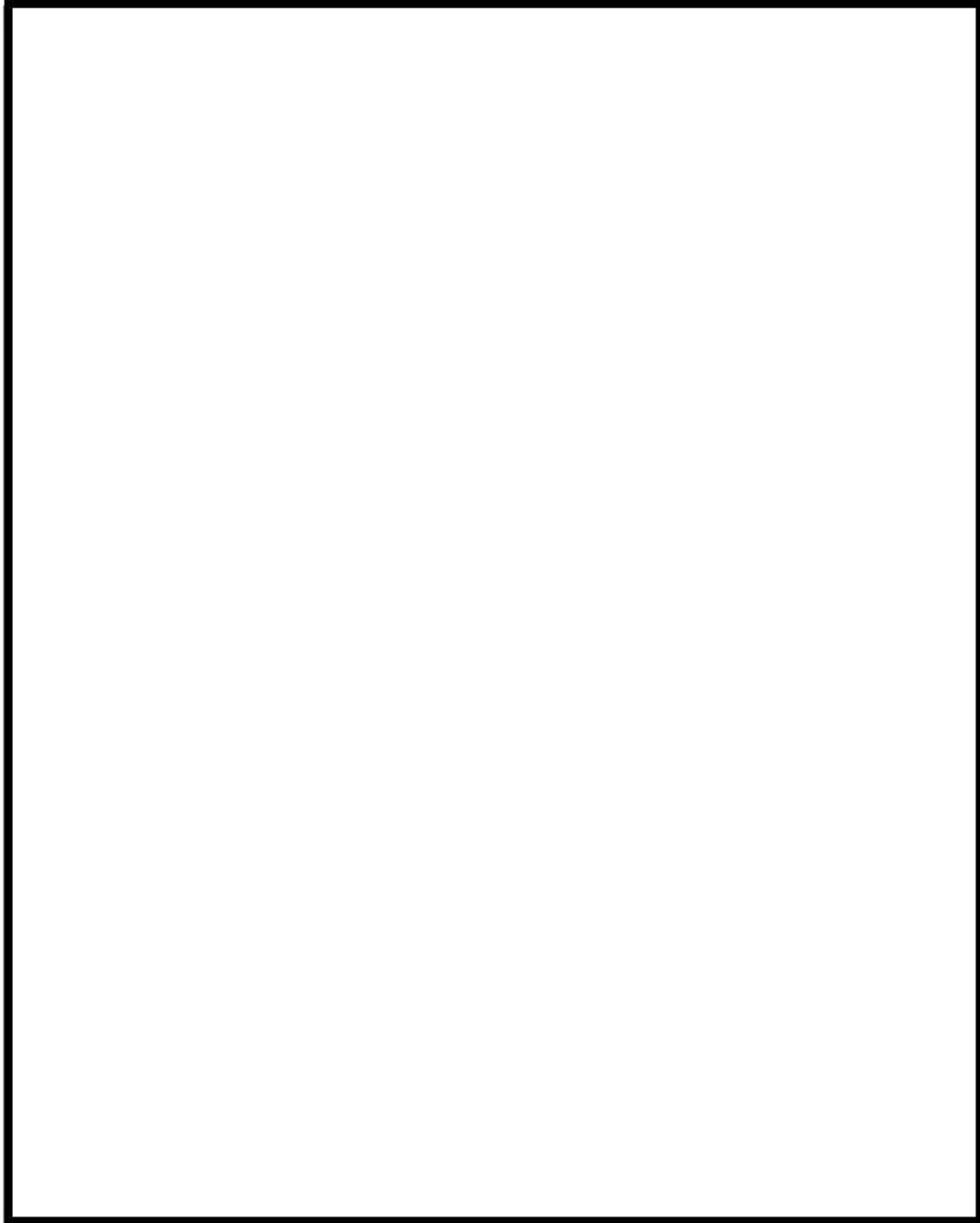


図 4-5 NUPEC 試験 (Test M-7-1) の GOTHIC コードによるノード分割モデル

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

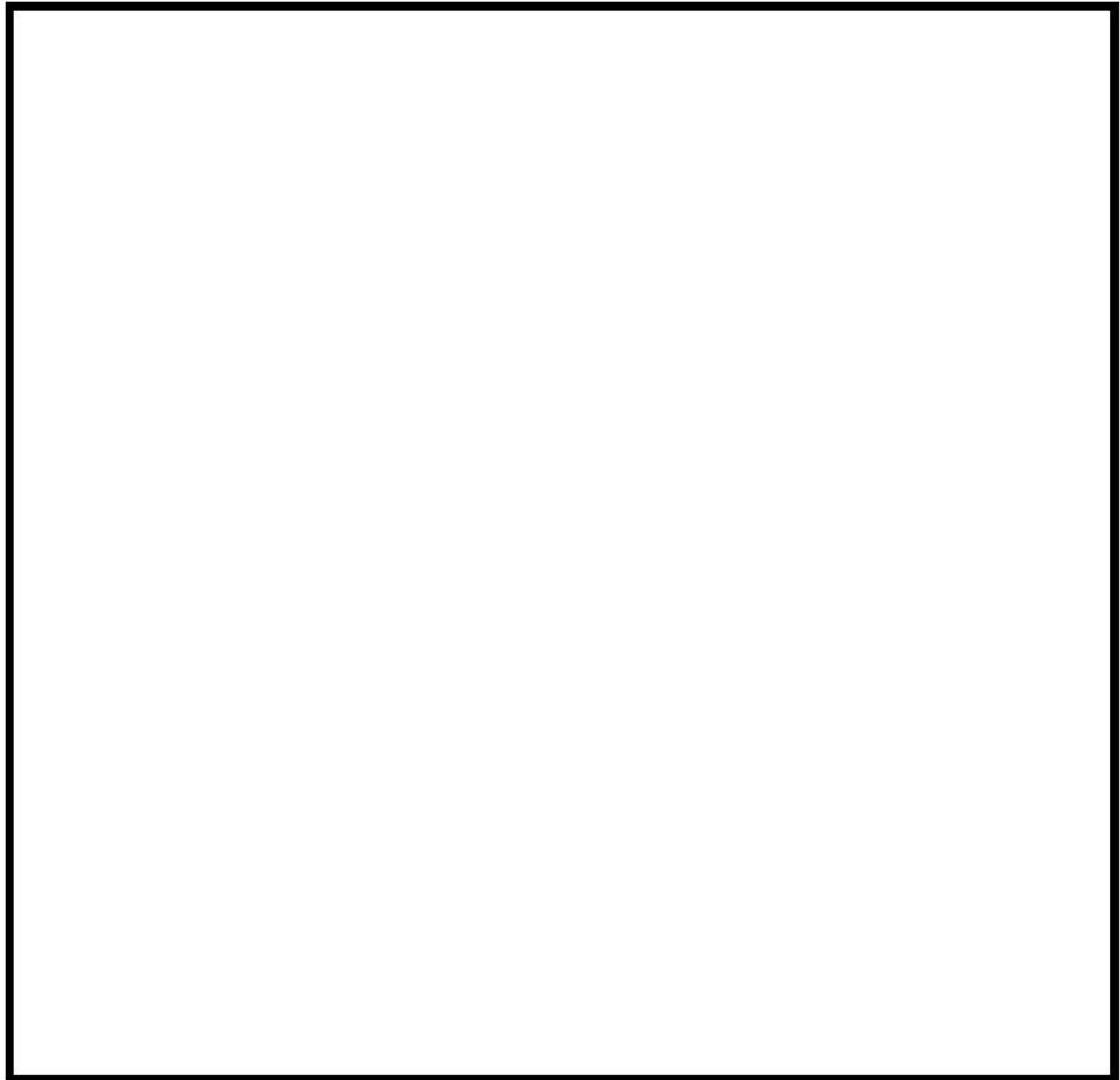


図 4-6 原子炉格納容器ドーム部のヘリウム濃度測定位置と実験解析におけるノード分割

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

4.2.3 解析結果

NUPEC 試験の実験解析結果を示す。

4.2.3.1 Test M-7-1 (スプレイ及び蒸気放出あり)

(a) 試験条件

Test M-7-1 の試験条件を表 4-2に示す。試験は蒸気発生器下部での配管破断を想定し、原子炉格納容器下部から水蒸気及びヘリウムを放出すると同時に、格納容器スプレイを作動させる。初期温度設定のため蒸気放出による事前加熱を行った後、ヘリウム及び蒸気の放出、格納容器スプレイの作動を同時に行っている。ヘリウム及び蒸気の放出、格納容器スプレイの運転は30分間行われ、ヘリウムの放出は試験開始から15分間で0.03kg/sまで放出量を増加させたのち、以降の15分間で0.0kg/sまで放出量を減少させている。蒸気の放出は試験開始から30分間で0.08kg/sから0.03kg/sまで放出量を減少させている。格納容器スプレイは30分間19.4kg/s一定の放出である(図4-7参照)。

(b) 解析結果

(1) 原子炉格納容器圧力

GOTHIC コードによる原子炉格納容器圧力の評価結果を図4-8に試験データと比較する。原子炉格納容器圧力は試験開始から10分後に約125kPaまで低下したのち、緩やかに上昇する。これは、格納容器スプレイの蒸気凝縮による圧力低下と、ヘリウム放出により非凝縮性流体が増加して熱伝達率が低下することによる圧力低下抑制効果の複合的な結果並びにヘリウム及び蒸気放出による圧力上昇効果によるものであると考えられる。解析結果もこれら複合的な挙動をよく予測しており、試験と良好に一致している。

(2) 原子炉格納容器内温度

原子炉格納容器ドーム部の雰囲気温度比較を図4-9に示す。試験結果としては、原子炉格納容器ドーム部頂部(EL. 19.4m)と原子炉格納容器ドーム上部4箇所(EL. 16.7m)で最も温度の低い結果を示しており、その温度差は最大で5℃程度に留まる。解析結果として、原子炉格納容器ドーム部頂部付近のノードと原子炉格納容器ドーム上部近傍ノードでの雰囲気温度を同図に比較するが、試験データ程の温度差は現れない。すなわち、解析結果は試験データに対して5℃程度の不確かさが残る。しかし、解析結果は原子炉格納容器ドーム部の雰囲気温度の時間変化を良好に予測しており、コードは事象進展を適切に模擬していることが確認できる。

(3) 原子炉格納容器内のヘリウム混合（水素混合挙動）

配管からの放出位置上部（図 4-3におけるノード 21）及び原子炉格納容器ドーム部（図 4-3におけるノード 25）におけるヘリウム濃度の時間変化の比較を各々、図 4-10及び図 4-11に示す。また、各蒸気発生器室及び外周部下部のヘリウム濃度に対して図 4-12に示す。

ヘリウムは破断流と同じく、放出位置（ノード 8）から上方に放出され、その上部領域（ノード 21）を抜けて原子炉格納容器ドーム部（ノード 25）に到達する。この過程において、想定破断区画の上部から別ループの蒸気発生器室（ノード 17）に横流れが生じ、そこから上方の蒸気発生器煙突部（ノード 23）に至り原子炉格納容器ドーム部に放出される。

原子炉格納容器ドーム部においてはヒートシンク及びスプレイによる冷却により、他の 2つの蒸気発生器室上部及び外周部を經由し下降流が生じる。蒸気発生器室上部（ノード 20 及び 24）からループ室（ノード 11 及び 7）に達した流れは、蒸気及びヘリウムによる上昇流に巻き込まれる形で想定破断区画（ノード 8）に再び集約される。原子炉格納容器ドームから外周部上部に向かう下降流はその下部区画（ノード 3～6）に達したのち、ループ室（ノード 7, 8, 10, 11）に流れ込み、再び放出流量とともにノード 8 から上昇する。このように、破断口からの蒸気放出とスプレイによる循環流が形成され、原子炉格納容器ドーム部での水素濃度の成層化、また、原子炉格納容器の上部と下部の有意な水素濃度差は発生していない。

解析では、図 4-10に見られるように、放出位置上部（ノード 21）のヘリウム濃度が試験に比べ、900 秒以降一時的に低めに推移している。900 秒時点においては、放出されるヘリウム流量が減少に転じており、ヘリウム濃度の変曲点として現れる主因と考えられる。この時、試験ではノード 21 の濃度の変曲は顕著ではなく、解析結果は測定値と比較してヘリウム濃度を過小評価する傾向にある。解析においては、破断区画から上部区画へ向かう上昇流におけるヘリウムのプルームが崩れたような挙動が得られているものと考えられる。このため破断ループの蒸気発生器区画内でヘリウムが拡散し、破断区画及びその上部に位置する区画（いずれも区画 21 の下部に位置）において、隣接する A ループ蒸気発生器等の隣接区画へのヘリウムの分散が多めに評価され、すなわち、解析が破断区画から上方のみならず周辺へのヘリウムの移流を試験より大きく評価していることを示唆している。

図 4-11に原子炉格納容器ドーム部の 5 箇所に設置されたヘリウム濃度の計測結果（図 4-4, 参考文献 20 参照）と、当該位置での GOTHIC コードによる評価結果を示す。格納容器スプレイによる拡散効果があり、原子炉格納容器ドーム部ではヘリウム混合が促進され、試験終了時にはほぼ完全な混合状態となる。図 4-12のヘリウムの濃度の応答から分かる

ように、破断区画に放出されたヘリウムは、蒸気発生器室を經由して原子炉格納容器ドーム部に流入し、ここでスプレイ及びヒートシンクによる凝縮により、流体は破断区画と分離された蒸気発生器室及び外周区画を下降する。このように、破断口からの蒸気放出と原子炉格納容器ドーム部での蒸気凝縮が駆動力となり、原子炉格納容器内を循環する流れが形成され、ヘリウムは原子炉格納容器内で均一に混合される。

GOTHIC コードは原子炉格納容器内の各区画全体にわたり、過渡から平衡に至るまでのヘリウム濃度の時間変化を良好に予測しており、原子炉格納容器内の流動並びにヘリウム拡散を良好に再現していることが分かる。なお、破断区画であるノード8におけるヘリウム濃度は、解析結果と測定結果において差異が生じている。この原因として破断区画で放出される蒸気が検出器へ与える影響が考えられる。

表 4-2 NUPEC 試験条件 (Test M-7-1)

試験ケース	Test M-7-1
初期条件	
原子炉格納容器ドーム部圧力	139.7 kPa
原子炉格納容器ドーム部温度	66.4 °C
原子炉格納容器ドーム部湿度	100 %
外気温度	11 °C
気相 (ヘリウム及び蒸気) 放出	
ヘリウム放出流量	0.0-0.03-0.0 kg/s
蒸気放出流量	0.08-0.03 kg/s
放出ヘリウム温度	14 °C
放出蒸気温度	165 °C
放出期間	30 min
放出位置	D ループ 蒸気発生器基礎区画
スプレイ	
スプレイ流量	19.4 kg/s (70 m ³ /h)
スプレイ水温	40 °C
放出期間	30 min
スプレイ液滴径 (平均液滴径)	0.75 mm
スプレイノズル個	21 個
放出位置	原子炉格納容器ドーム部

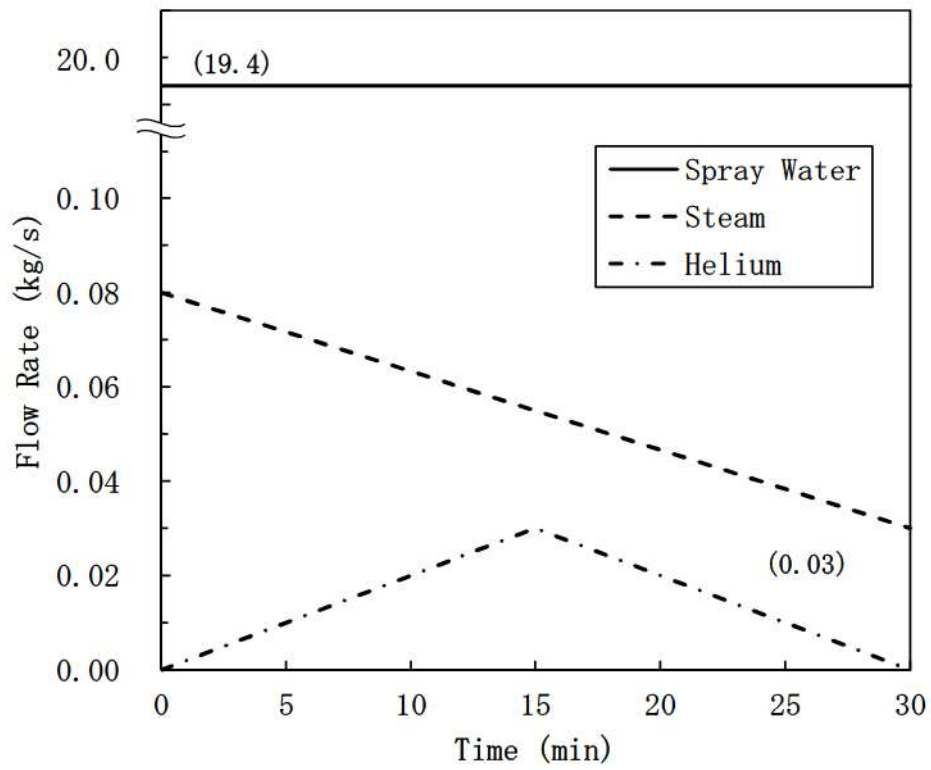


図 4-7 供給流体の流量条件 (Test M-7-1)

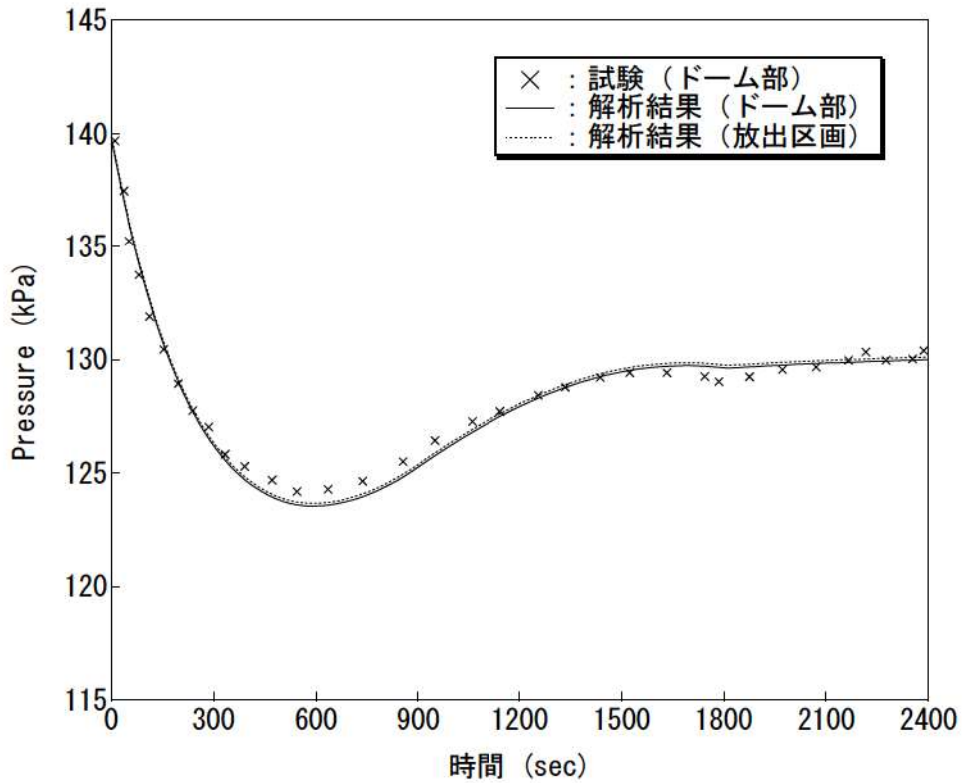


図 4-8 原子炉格納容器圧力 (Test M-7-1) (ノード 25)

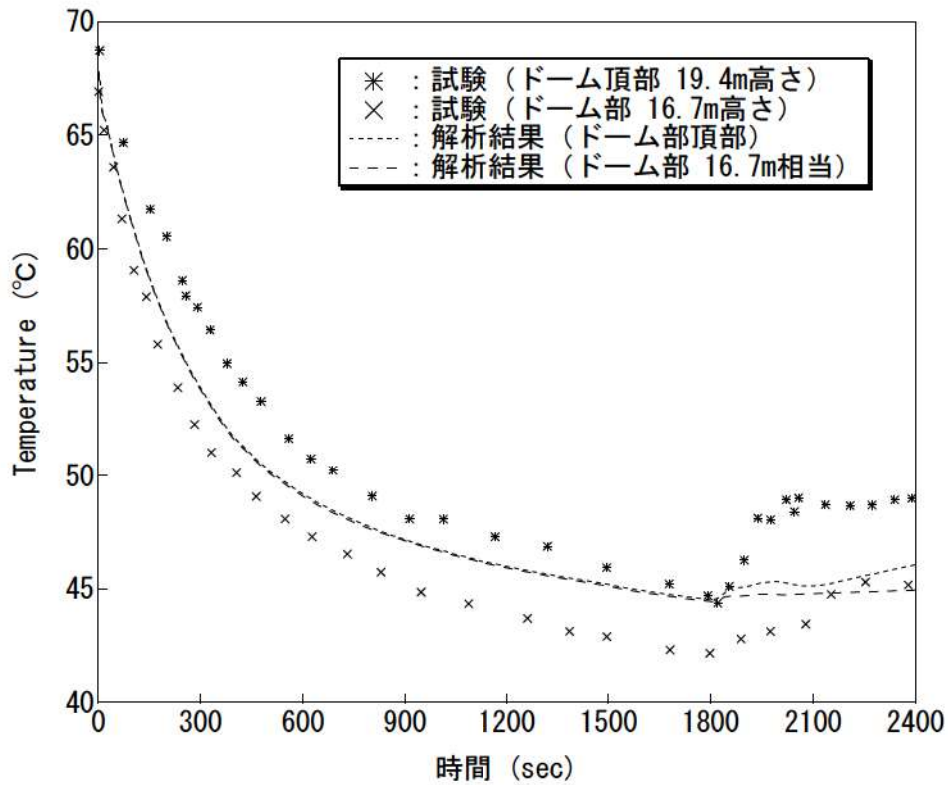


図 4-9 原子炉格納容器ドーム部雰囲気温度 (Test M-7-1) (ノード 25)

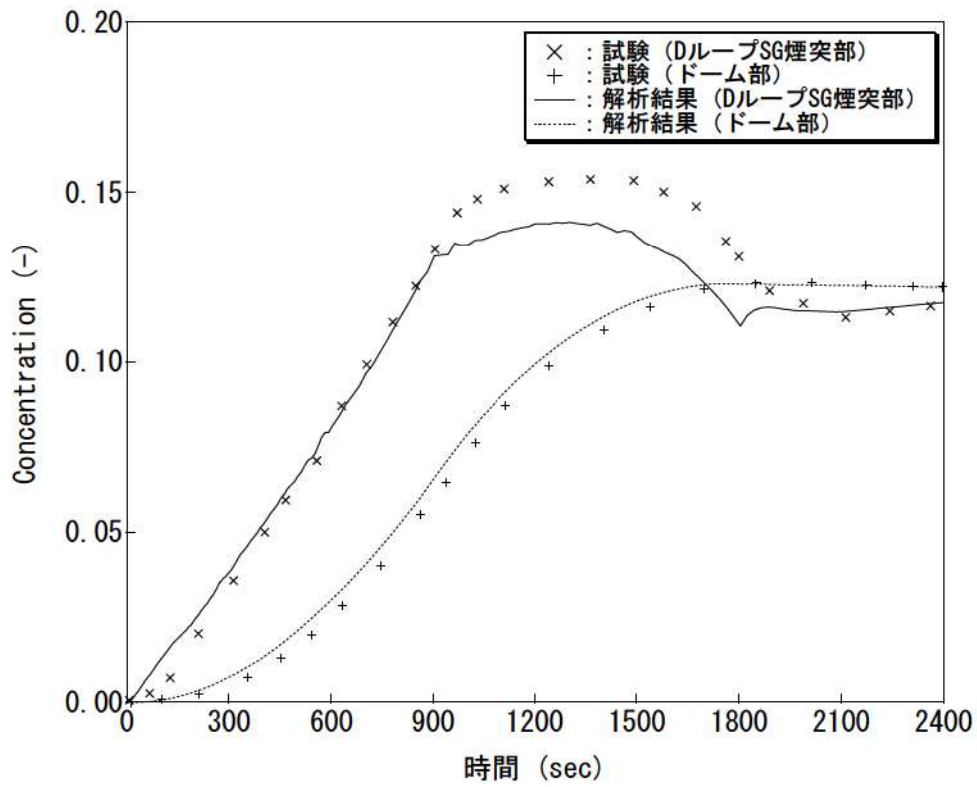
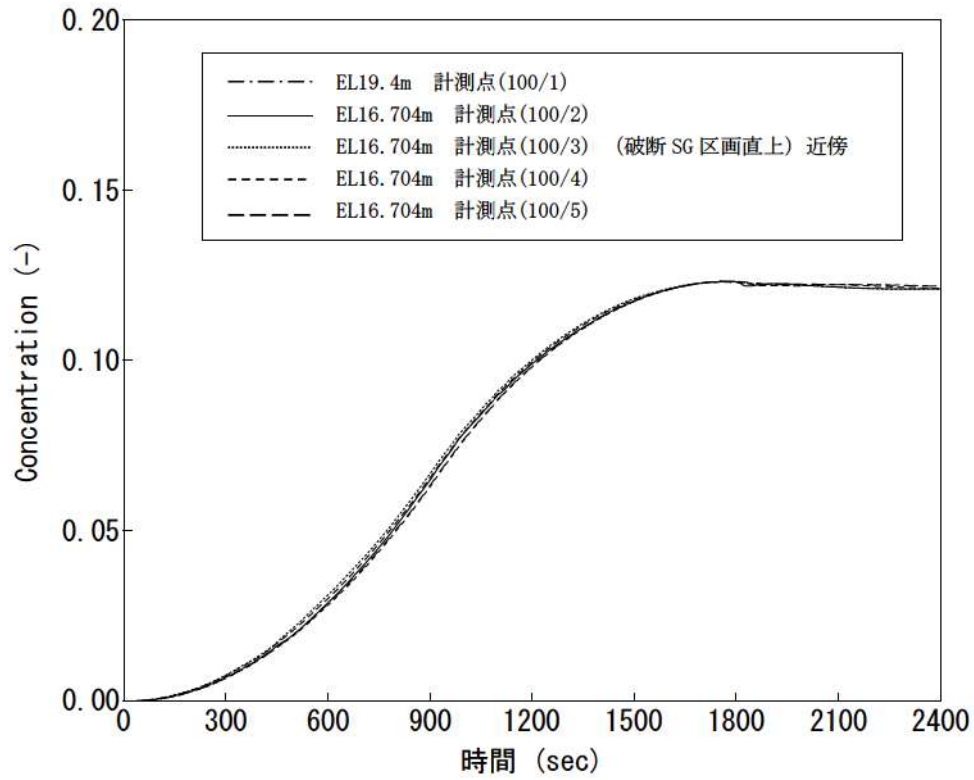
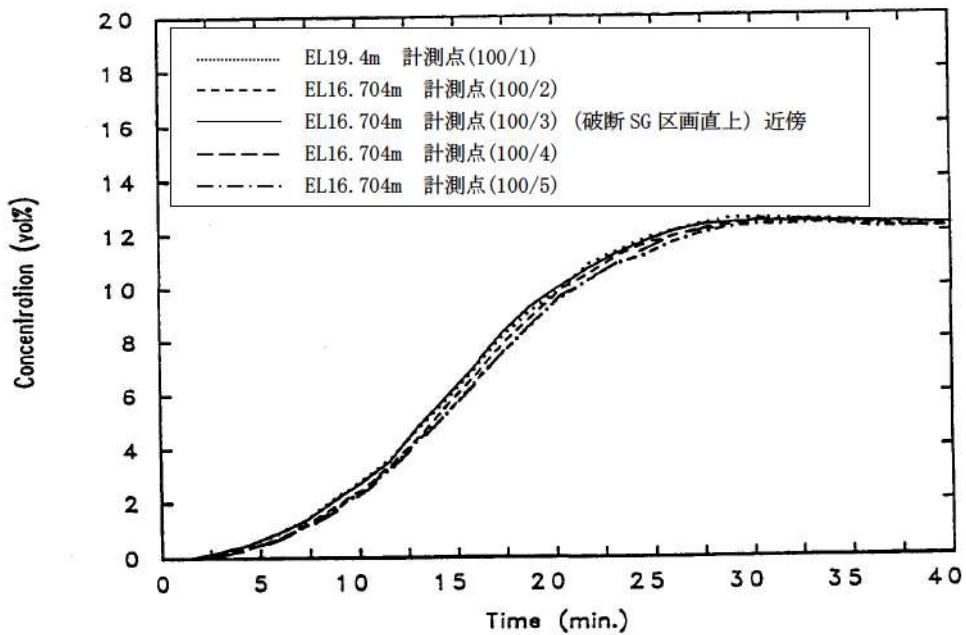


図 4-10 ノード 21, ノード 25 ヘリウム濃度 (Test M-7-1)



(a) 解析結果



(b) 試験データ

図 4-11 原子炉格納容器ドーム部へリウム濃度 (Test M-7-1) (ノード 25)

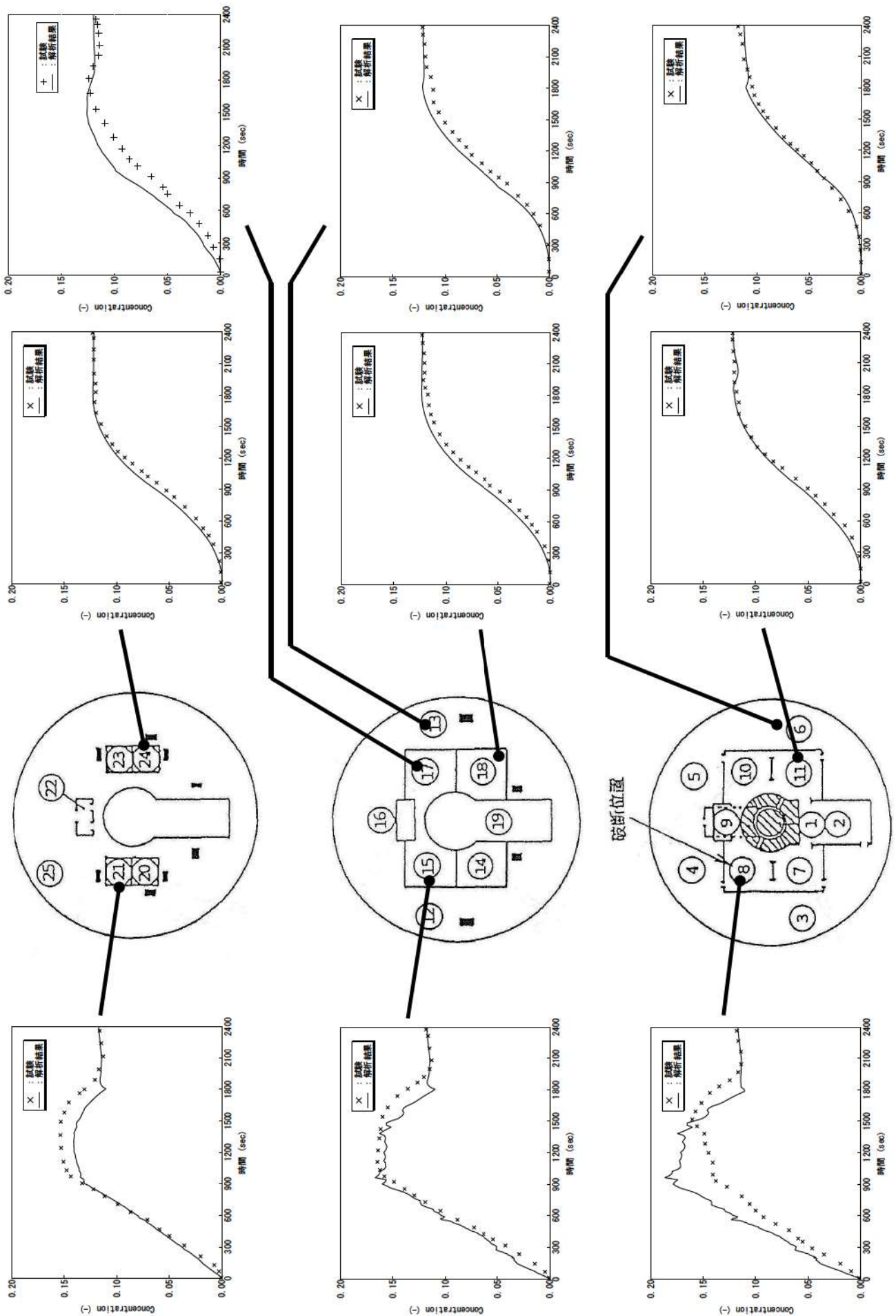
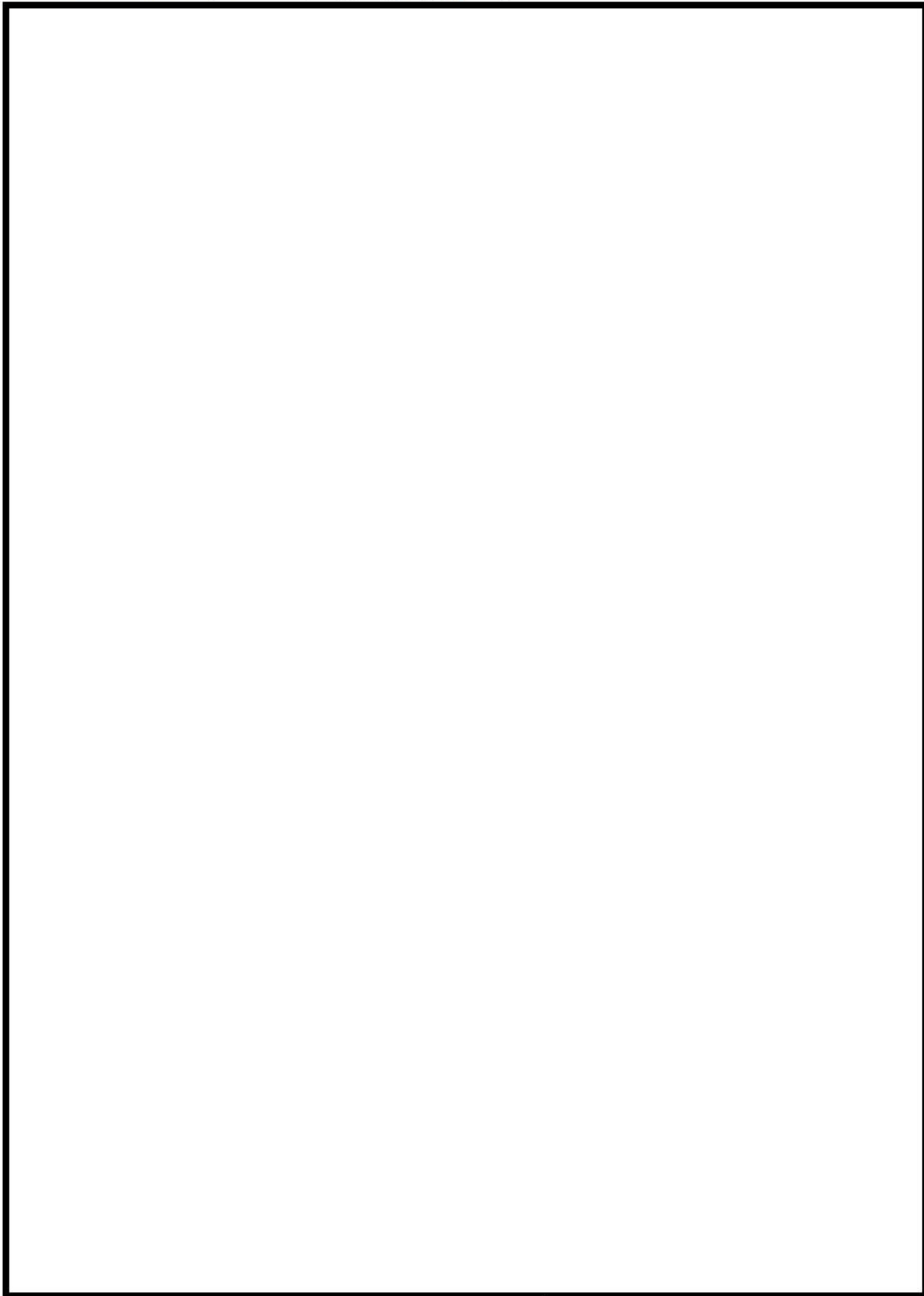


図 4-12 原子炉格納容器内各部のヘリウム濃度 (Test M-7-1)

4.2.3.2 Test M-4-3 (スプレーなし及び蒸気放出あり)





枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 4-3 NUPEC 試験条件 (Test M-4-3)

試験ケース	Test M-4-3
初期条件	
原子炉格納容器ドーム部圧力	101kPa (大気圧)
原子炉格納容器ドーム部温度	28℃
原子炉格納容器ドーム部湿度	—
外気温度	—
気相 (ヘリウム及び蒸気) 放出	
ヘリウム放出流量	0.027 kg/s
蒸気放出流量	0.33 kg/s
放出ヘリウム, 蒸気温度	115 ℃
放出期間	30 min
放出位置	D ループ 蒸気発生器基礎区画
スプレー	
スプレー流量	—
スプレー水温	—
放出期間	—
スプレー液滴径 (平均液滴径)	—
スプレーノズル個	—
放出位置	—

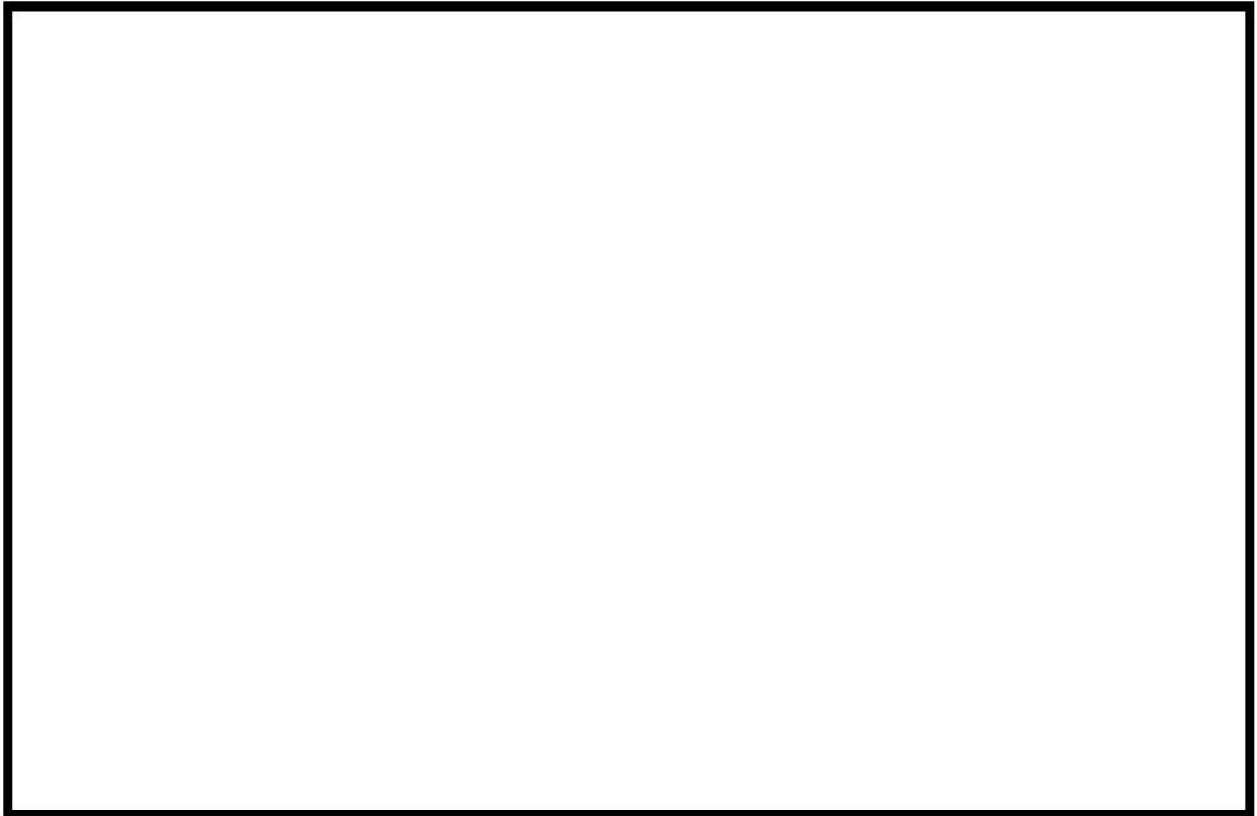


図 4-13 原子炉格納容器圧力 (Test M-4-3) (ノード 25)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので
公開できません。

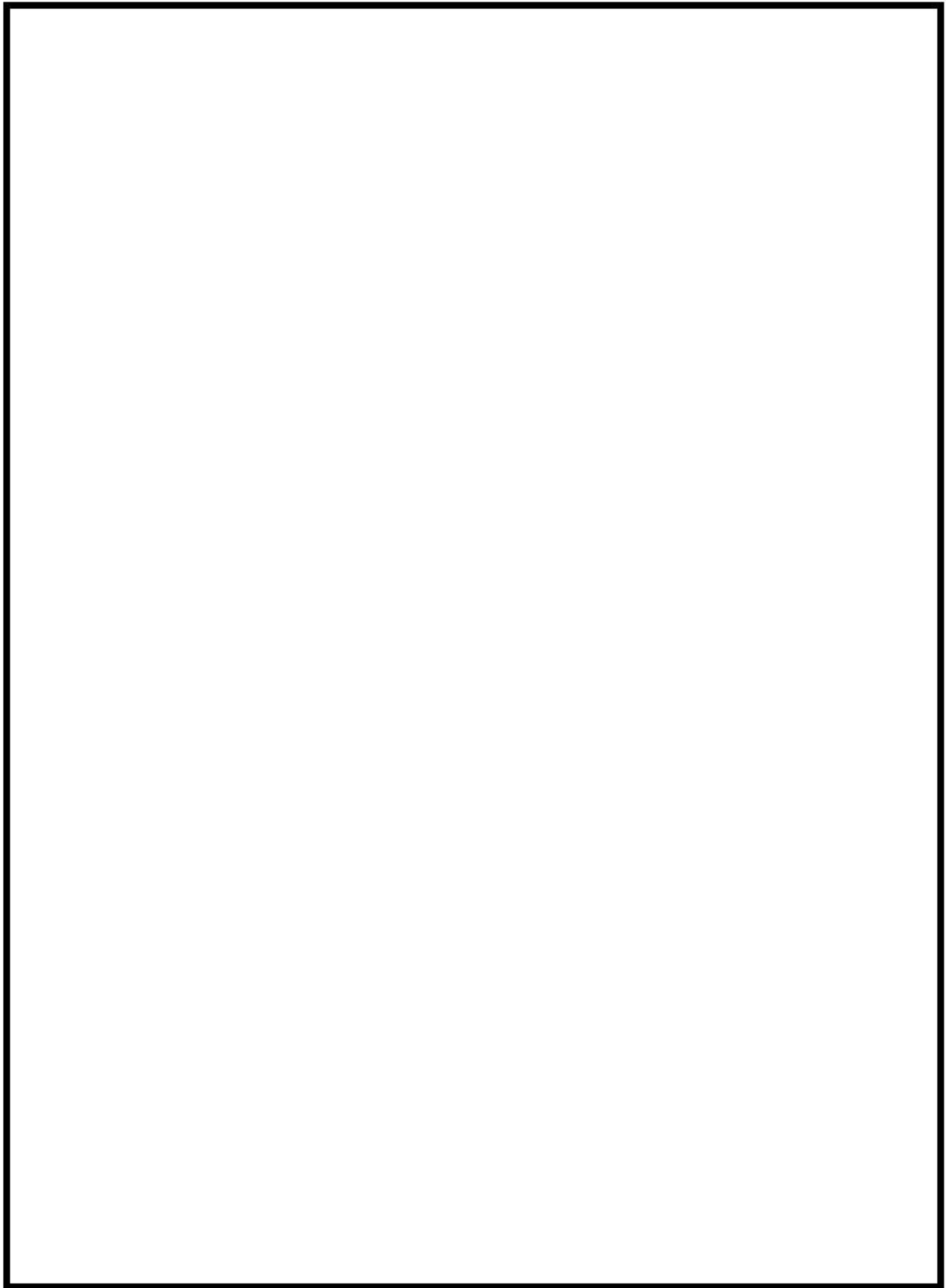


図 4-14 原子炉格納容器ドーム部雰囲気気温度 (Test M-4-3)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので
公開できません。

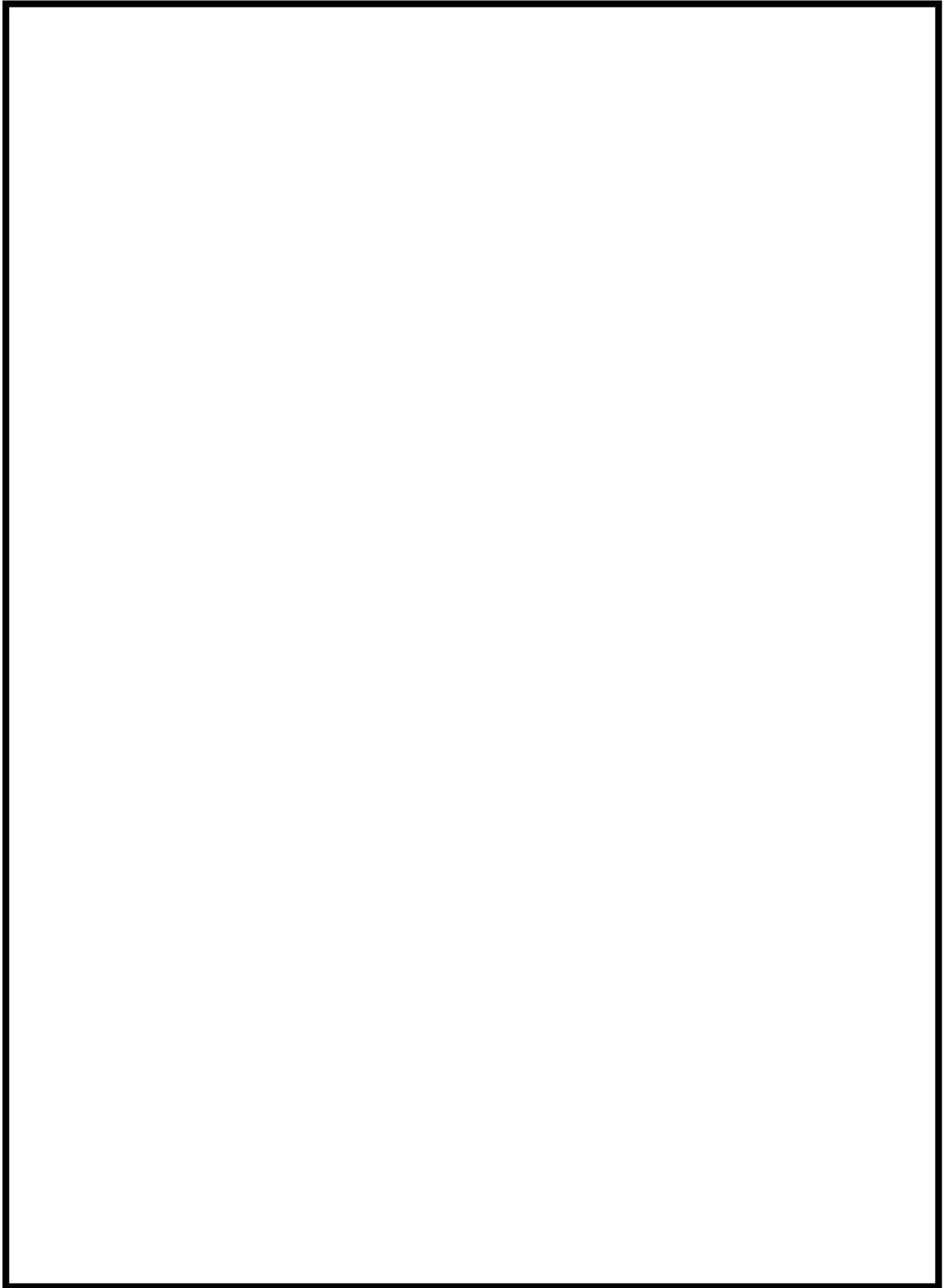


図 4-15 原子炉格納容器ドーム部ヘリウム濃度 (Test M-4-3)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので
公開できません。

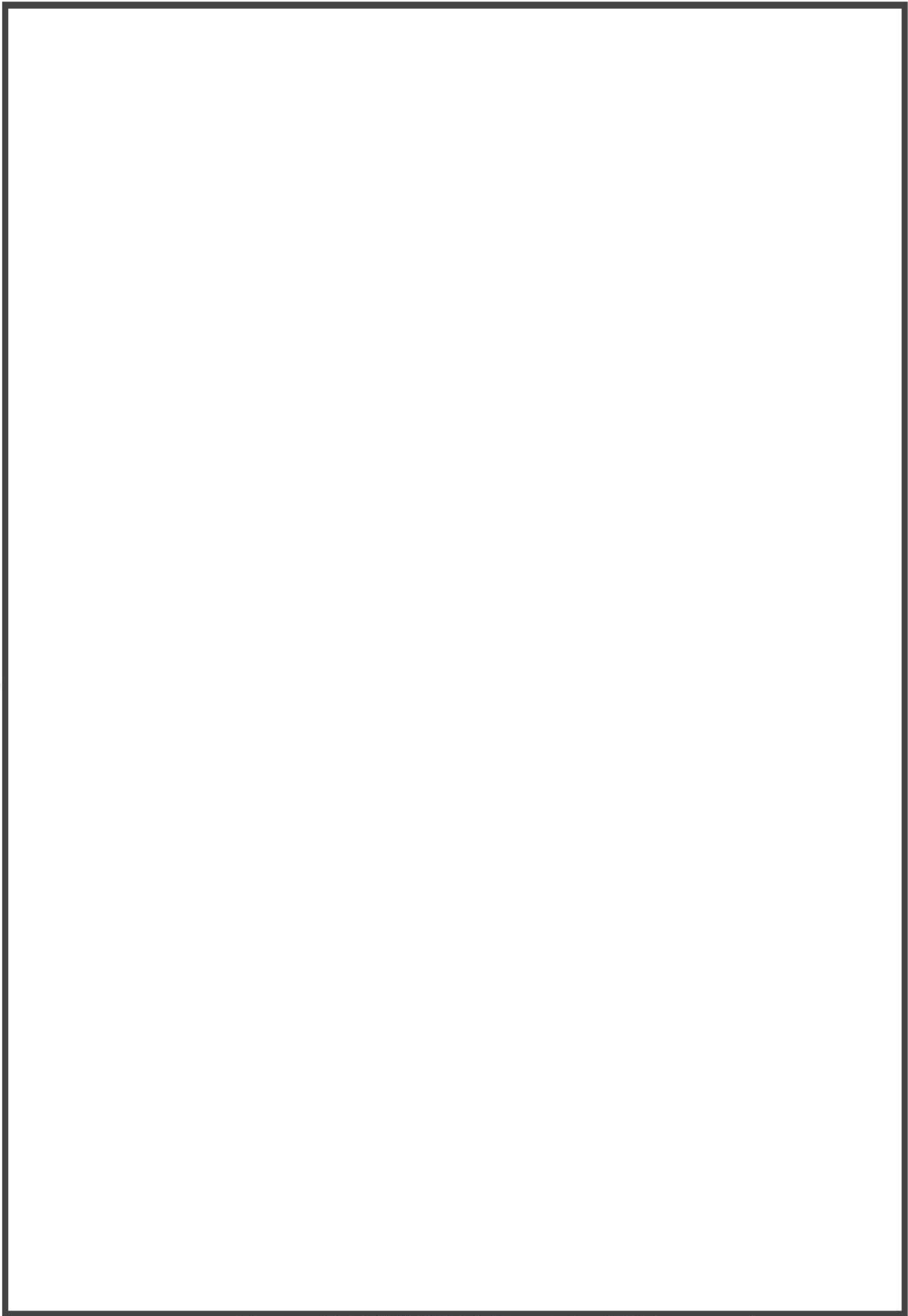


図 4-16 原子炉格納容器内各部のヘリウム濃度 (Test M-4-3)

4.2.4 NUPEC 試験におけるヘリウム濃度の検討

NUPEC 試験におけるヘリウム濃度の測定は、熱伝導度検出器を使用したガスクロマトグラフィーにより測定されている。サンプリングは、区画の中央部でスプレイ水等の影響を受けにくい測定方法が取られている。計測誤差については表 4-4（参考文献 20）のとおりであり、ヘリウム濃度計測値に大きな誤差はない。

ただし、蒸気及びヘリウムを下部区画から放出するという点において同様に実施された Test M-4-3 (Test M-9-2) と Test M-7-1 の破断区画及び破断区画上部の区画におけるヘリウム濃度の比較において、ヘリウム濃度の挙動に有意な差が見られた。したがって、計測誤差以外にもヘリウム濃度の測定に影響を及ぼす要因があると考えられる。

表 4-4 ヘリウム濃度計測誤差について

Quantity	location	σ value	Unit
Temperature	Each compartment and walls	0.2	°C
Pressure	Dome top	1079 (0.011)	Pa (kg/cm ²)
	Helium, steam primary circuit	2648 (0.027)	Pa (kg/cm ²)
	Differential pressure of He,steam	132 (13.5)	Pa (mmH ₂ O)
He concentration	Each compartment	0.01x[Vol%]+0.002	Vol%

4.2.4.1 Test M-7-1 における区画 8 のヘリウム濃度の差異について

NUPEC 試験 Test M-7-1 において破断区画及び破断区画上部のヘリウム濃度の挙動のうち、破断区画（区画 8）のヘリウム濃度と破断区画上部（区画 15 等）のヘリウム濃度を比較すると、破断区画の方が破断区画上部に比べて高い濃度、若しくは同程度の濃度となっている。しかしながら、Test M-7-1 では図 4-17（参考文献 20）に示す試験結果のとおり、試験開始後 10 分（600 秒）以降から破断区画（区画 8）のヘリウム濃度よりも破断区画上部（区画 15）のヘリウム濃度が高くなっている。Test M-7-1 では 600 秒以降においても破断区画でヘリウム及び蒸気を放出しており（図 4-18（参考文献 20））、破断区画よりも破断区画上部のヘリウム濃度が高くなるというのは考えにくい。Test M-7-1 における破断区画の測定値が異なる挙動を示す理由として以下が推察される。

- a) 破断区画（区画 8）のヘリウム計測位置は、ヘリウム及び蒸気放出位置に近い。Test M-7-1 では蒸気放出を含む試験となるため、破断区画においてはサンプリングの際に蒸気凝縮による液相を採取してしまい、成分分離が不完全又は、熱伝導度を計測する際の測定に影響が出ている可能性がある。

上記のとおり、Test M-7-1 の破断区画のヘリウム濃度については、破断区画のヘリウム計測の不確かさに起因して測定値に差異が生じている可能性がある。ここで、図 4-19 に破断区画（区画 8）の試験結果と解析結果の比較図に破断区画上部（区画 15）の試験結果を追加した図を示す。解析結果は破断区画上部（区画 15）に比べてもヘリウム濃度を高めに予測しているが、試験結果においても試験開始後 5 分までは破断点のヘリウム濃度の方が高い。この傾向から、破断区画（区画 8）が破断区画上部（区画 15）よりヘリウム濃度が高い、あるいは同程度であると仮定すると、解析結果とほぼ同程度のヘリウム濃度になると考えられる。

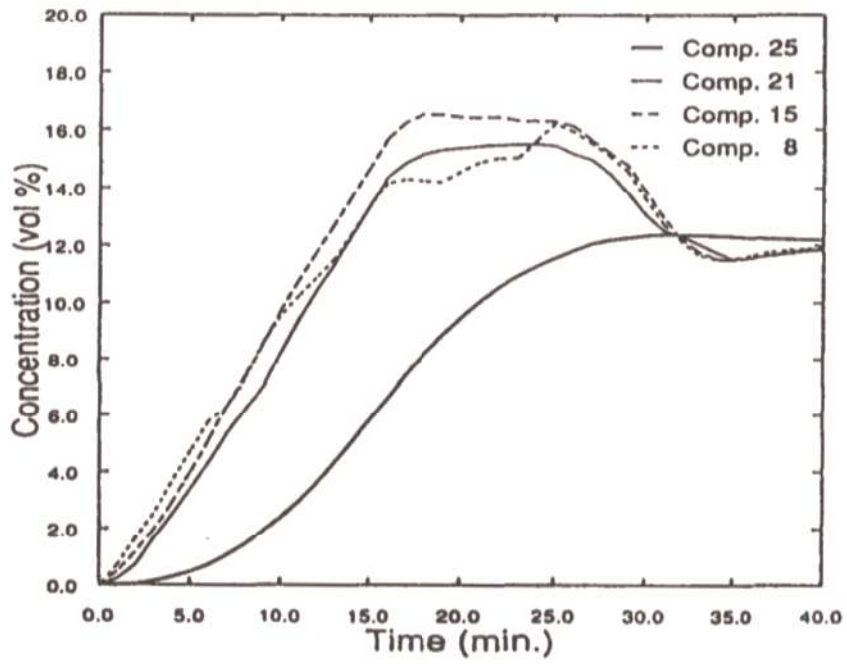


図 4-17 ヘリウム濃度 (Test M-7-1)

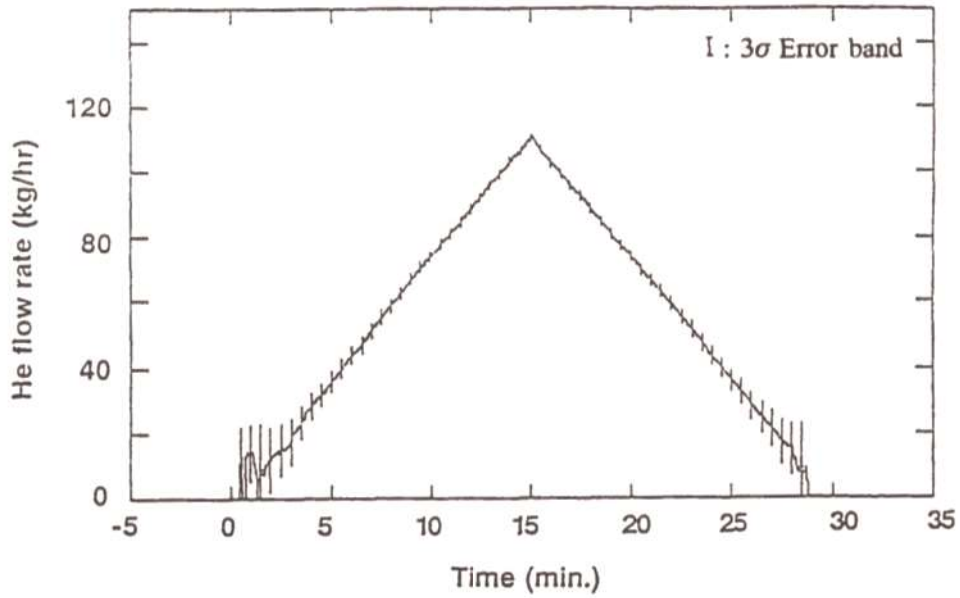


図 4-18 ヘリウム放出量 (Test M-7-1)

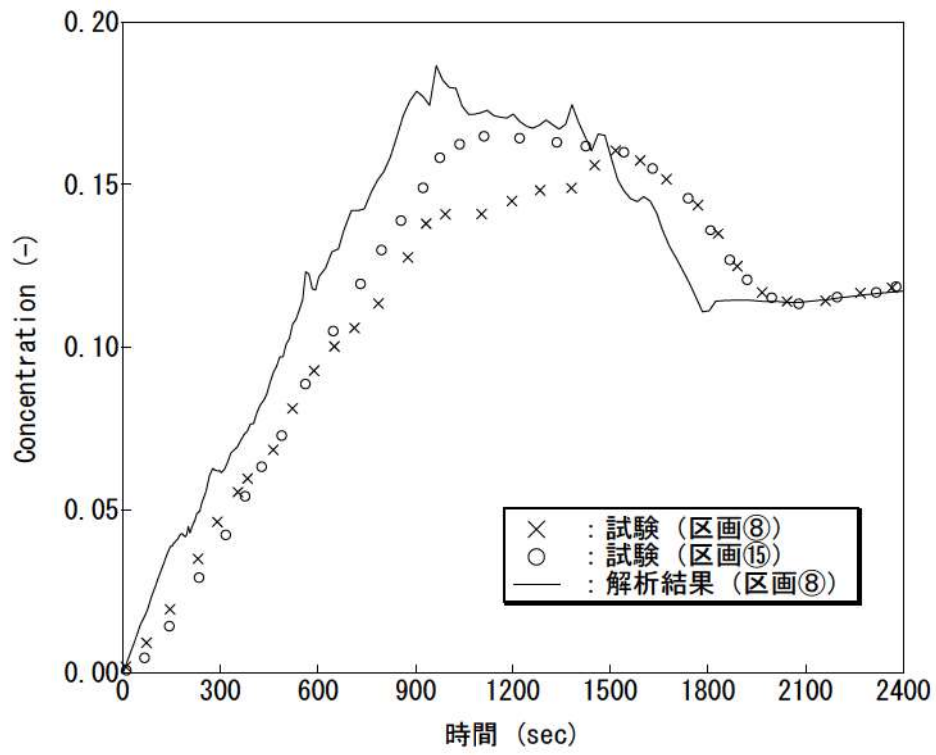


図 4-19 ヘリウム濃度比較 (Test M-7-1)

4.2.4.2 Test M-4-3 の下部区画のヘリウム濃度について

NUPEC 試験 Test M-4-3 においては解析結果のヘリウム濃度に比べ、試験結果のヘリウム濃度が全体的に高い傾向である。図 4-20 に計測グラフからの読み取り流量 (約 0.32kg/s) と試験レポートの蒸気放出量記載値 (0.33kg/s) を示す。解析では試験レポートの蒸気放出量記載値 (0.33kg/s) を使用している。このために、破断流における蒸気量を相対的に多く仮定している GOTHIC コードでは、ヘリウム濃度を試験より低く評価していると思われる。

Test M-4-3 に対する計測点の代表性確認試験として、ヘリウム放出、蒸気放出量及び放出区画が同条件となる試験 Test M-9-2 が行われている。図 4-21 に、全体的な挙動に対し支配的である原子炉格納容器ドーム部のヘリウム濃度を比較すると、Test M-4-3 のヘリウム濃度が全体的に高くなっている。Test M-9-2 で実測の蒸気放出量は 0.33kg/s であり、Test M-4-3 に対し実施した GOTHIC コードの解析と同じ破断蒸気流量である。また、Test M-9-2 は Test M-4-3 と初期温度が異なるが、初期温度はヘリウム濃度に対し有意な影響がないことから、破断蒸気流量の整合性の観点を重視し、Test M-4-3 として実施した GOTHIC コードの解析と Test M-9-2 の試験結果を以降に比較する。

破断区画 (区画 8)、破断区画上部 (区画 15) 及び原子炉格納容器ドーム部における解析結果と試験結果 (Test M-4-3, Test M-9-2) との比較を図 4-22～図 4-24 に示す。解析結果はヘリウム濃度を全体的に低めに予測しているが、Test M-9-2 と一致する傾向となり、また、過渡から平衡に至るまでのヘリウム濃度の時間変化を良好に予測している。次に、下部区画のヘリウム濃度に対し Test M-9-2 との比較を図 4-25 に示す。破断区画及び破断蒸気発生器区画において GOTHIC コードによる予測がやや過小評価となっているが、隣接する外周部では良好な一致あるいはわずかに過大傾向である。したがって、GOTHIC コードは再現試験となる Test M-9-2 に対し原子炉格納容器内のヘリウム分布を適切に予測しているものと判断できる。

以上により、Test M-4-3 の解析では、試験計測値に不確かさが残るものの、解析結果が Test M-9-2 と一致する傾向であり、過渡から平衡に至るまでのヘリウム濃度の時間変化を良好に予測していることから、GOTHIC コードは区画間の熱的挙動及びヘリウム拡散挙動を適切に評価できているといえる。



図 4-20 NUPEC Test M-4-3 の放出蒸気流量



図 4-21 ヘリウム濃度比較 (Test M-4-3, Test M-9-2)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

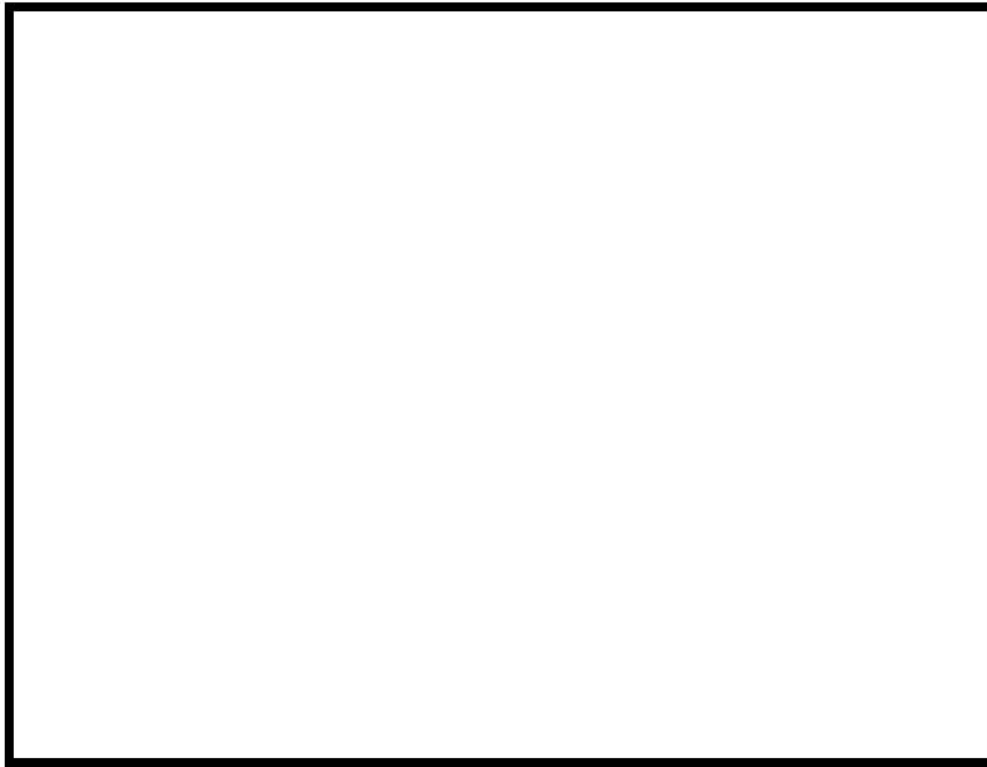


図 4-22 破断区画（区画⑧）ヘリウム濃度



図 4-23 破断区画上部（区画⑮）ヘリウム濃度

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。



図 4-24 原子炉格納容器ドーム部ヘリウム濃度

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

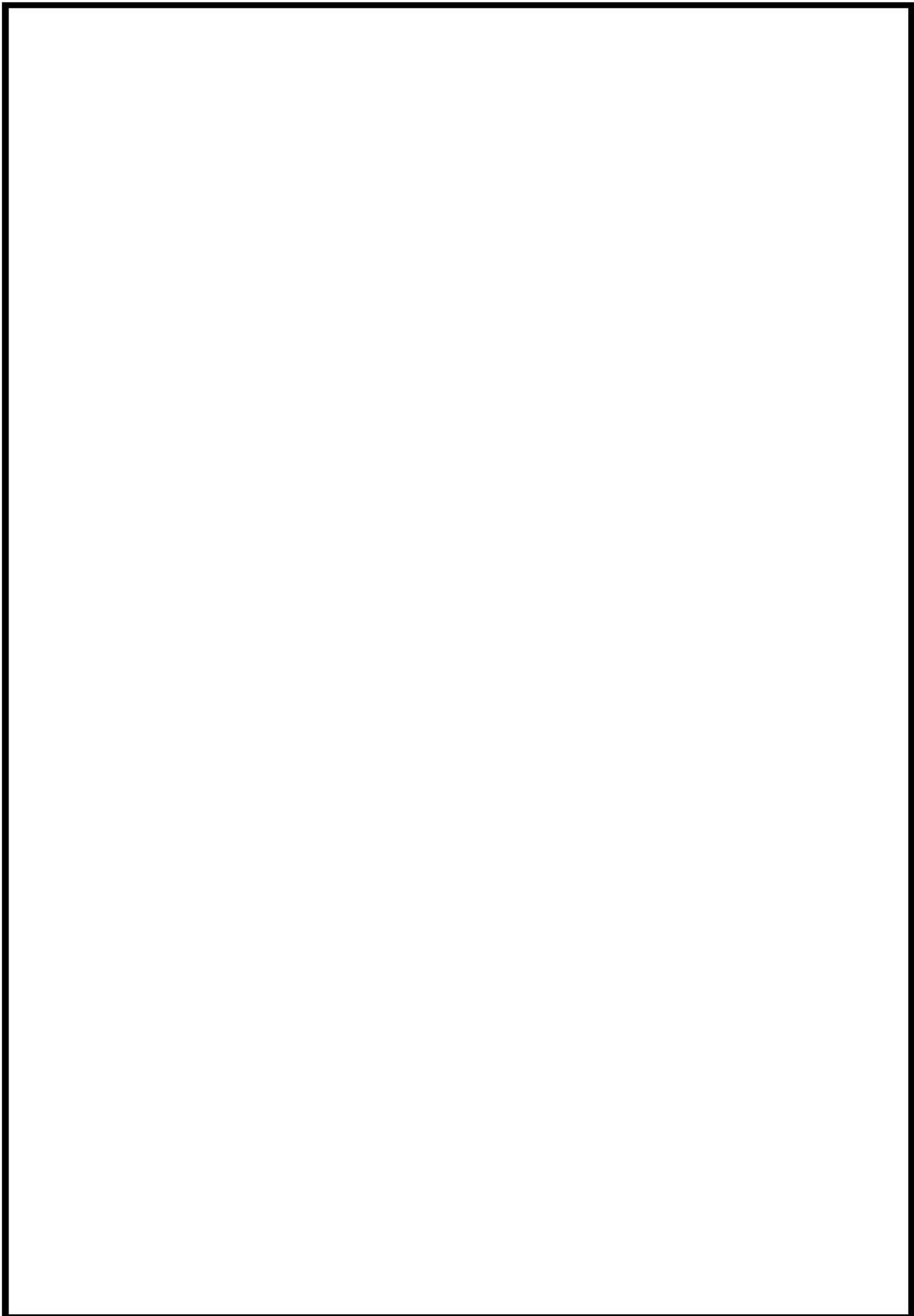


図 4-25 原子炉格納容器内各部のヘリウム濃度 (解析：M-4-3, 試験結果：M-9-2)

4.3 構造材凝縮熱伝達モデルの感度検討

4.3.1 NUPEC 試験解析における構造材凝縮熱伝達モデルの感度解析について

NUPEC 試験解析では主として原子炉格納容器内の流動，非凝縮性ガスの拡散及び混合挙動のコード予測性を検討するため，構造材への熱伝達についてはより最適評価性の高い DLM-FM モデルを適用する。一方，実機プラントの解析では，原子炉格納容器内での構造材ヒートシンク効果による蒸気凝縮を大きめに見積り，ウェット換算水素濃度を高めに予測するためにより保守的な構造材熱伝達モデル（Gido-Koestel モデルと内田モデルの最大値に保守ファクタとして を乗じる）を適用する。ここでは，NUPEC 試験のうち代表ケースとなる Test M-7-1 を対象に，適用する構造材熱伝達を実機プラントモデルとした場合の感度影響について確認する。なお，これら凝縮熱伝達モデルについては 3.3.2 章にて説明する。

原子炉格納容器ドーム部の圧力，雰囲気温度及びヘリウム濃度について，ベースケース（DLM-FM モデル）と感度ケース（Gido-Koestel モデルと内田モデルの最大値に保守ファクタとして を乗じる）を図 4-26 ～ 図 4-28 に比較する。感度ケースでは構造材への凝縮熱伝達が大きくなることから圧力が低下する傾向になるが，その低下量はわずかである。これは，原子炉格納容器雰囲気の除熱にはスプレイ冷却と構造材ヒートシンクが寄与するが，前者がより支配的となることから構造材の凝縮熱伝達モデルの影響が相対的に軽微となるためである。同様に，原子炉格納容器ドーム部の雰囲気温度及びヘリウム濃度についてもモデル間の差異は小さい。

以上より，NUPEC 試験解析では，実機プラント解析で用いる構造材の凝縮熱伝達モデルについて，より最適評価性の高い DLM-FM モデルを用いているが，「水素燃焼」の評価事故シーケンスとして選択される「大破断 LOCA+ECCS 注入失敗（格納容器スプレイ成功）」に対してはその影響が軽微であるものと判断される。

枠囲いの内容は，商業機密に属しますので公開できません。

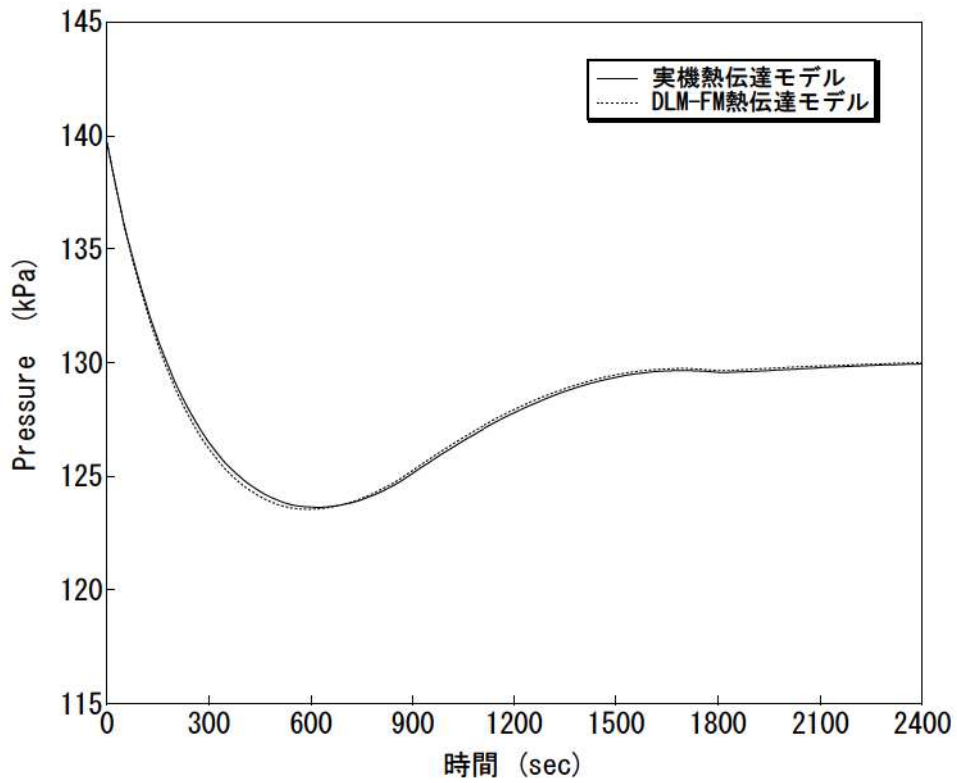


図 4-26 原子炉格納容器圧力 (Test M-7-1, 構造材熱伝達モデル感度ケース)

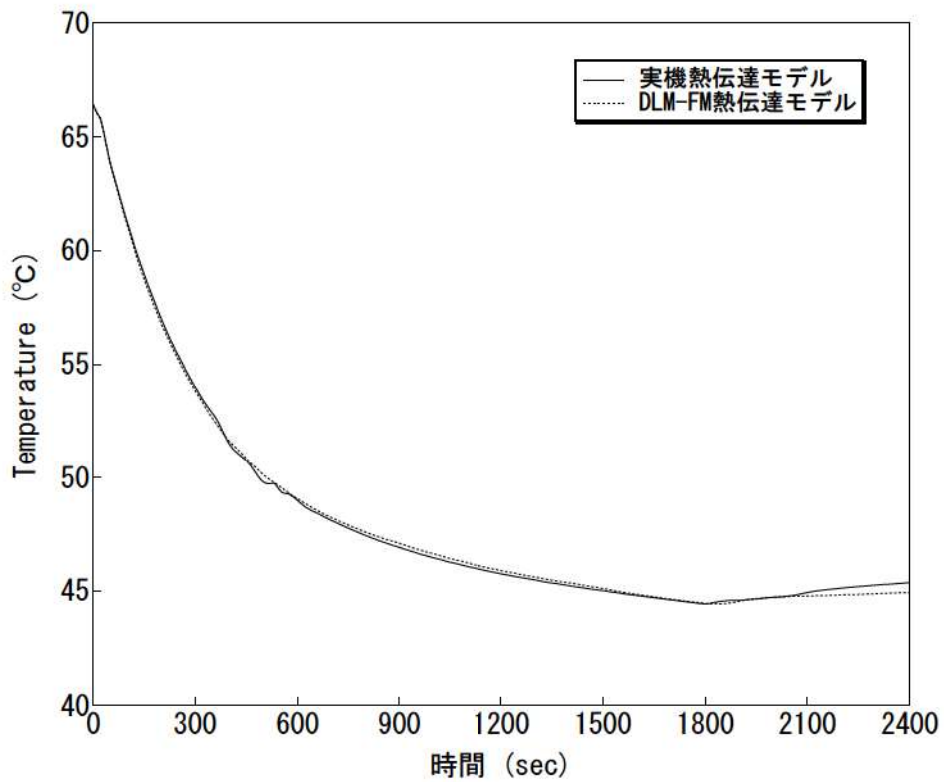


図 4-27 原子炉格納容器ドーム部雰囲気温度 (Test M-7-1, 構造材熱伝達モデル感度ケース)

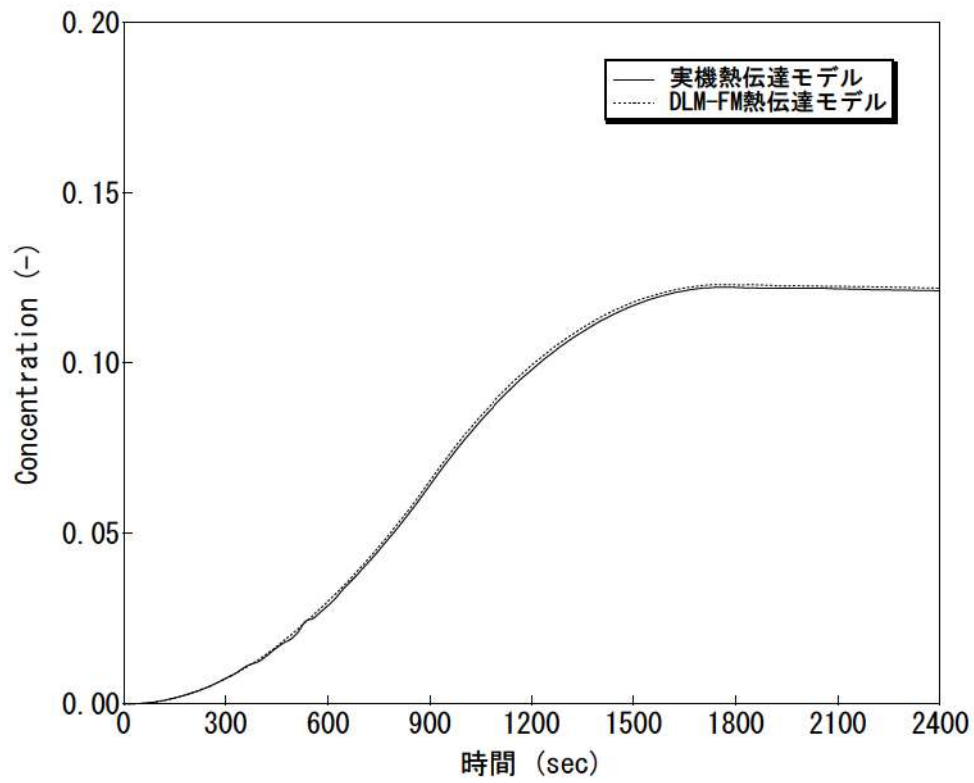


図 4-28 原子炉格納容器ドーム部ヘリウム濃度 (Test M-7-1, 構造材熱伝達モデル感度ケース)

4.4 熱伝達試験との比較

実機プラントにおける重大事故等対策の有効性評価ではGido-Koestel（参考文献7）と内田（参考文献5）の最大値に保守性を考慮した凝縮熱伝達係数を適用している。これは、当該モデルの安全解析等への使用実績が多く、また保守的に凝縮係数を大きくすることで蒸気凝縮を促進させ、ウェット水素濃度を保守的に評価するためである。

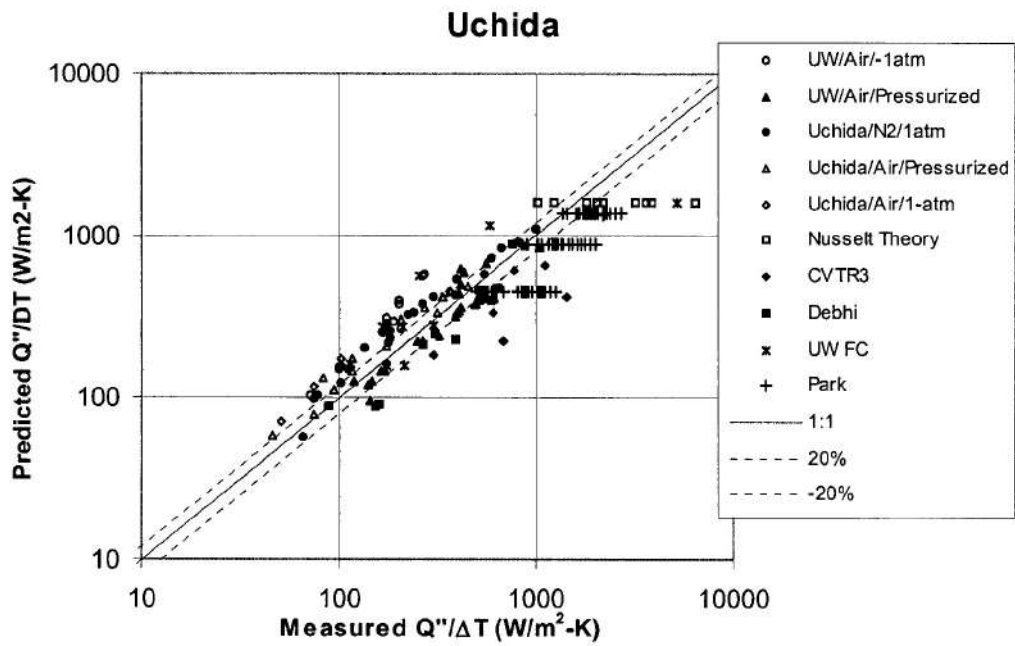
Gido-Koestel モデルは、対流による熱及び物質伝達のアナログに基づく凝縮に加え、構造材表面液膜の流れによる伝熱促進効果を考慮している。このため、非凝縮性ガスの存在下、かつ飽和あるいは過熱環境においても適用可能である。スプレー起動により原子炉格納容器内の雰囲気は飽和に近づき、当該条件下で使用実績の高い内田による凝縮熱伝達が適用される。実機プラントの解析では、特に空間体積の大きな原子炉格納容器ドーム部でスプレーが継続することから、内田による飽和凝縮モードが支配的となる。内田モデルによる予測と実験データとの比較を図 4-29に示す。このうち、実機解析において見られるオーダは $10^1 \sim 10^3$ (W/m²-K) のオーダであり、過熱状態等により極端な逸脱を含む試験を除けば、誤差はおおむね±40%程度に収まる。

実機プラントの解析では、上記モデルによる凝縮熱伝達係数に を乗じることで凝縮を過大に仮定し、ウェット水素濃度を高めに評価することを指向している。これは原子炉格納容器内の雰囲気と構造材に温度差が生じる期間に有効となる。ただし、有効性評価のシナリオではスプレーが継続してこれによる凝縮が支配的となること、また、長時間の評価となり、特に原子炉格納容器ドーム部については雰囲気と構造材が熱平衡に漸近することからその影響は限定的である。

一方、凝縮熱伝達モデルとして最適評価性の高い Diffusion Layer Model FM (DLM-FM) が GOTHIC コード内に内蔵されている（参考文献8）。同モデルは、構造材表面の液膜の擾乱及び構造材表面近傍の気相部におけるミストの存在を考慮することで予測精度を向上させている。図 4-30に、各種の実験におけるヒートシンク表面の凝縮レートの測定値対 DLM-FM の予測値を示す。凝縮レートの予測は、測定値に対し高い精度で合致しており、95%以上が±20%の予想精度に含まれていることから、その最適評価性は十分に高い。

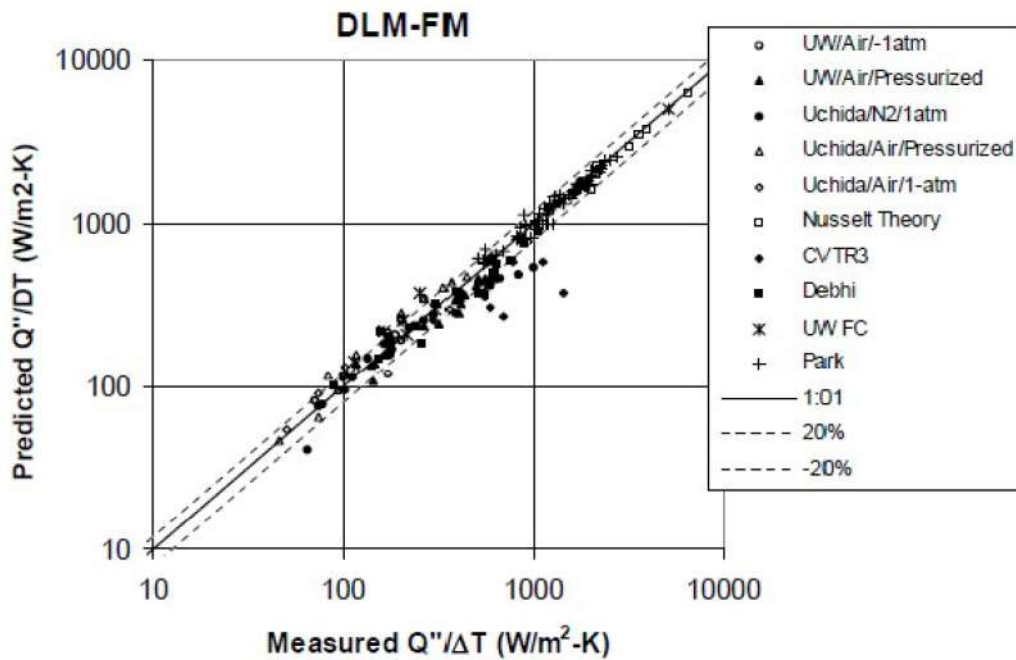
なお、NUPEC 試験検証においては、構造材表面の凝縮熱伝達係数として DLM-FM モデルを適用している。これは、同試験ではスプレー冷却が支配的となるが、ヒートシンクとなる構造材との熱授受が気相の対流挙動に与える影響は無視できるものではないため、最適評価性の高い DLM-FM モデルを適用してヒートシンク伝熱に係る不確かさを小さくすることで、流動に係るコードモデルの適用性を評価するためである。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。



出典：EPRI Product 1013072, GOthic Qualification Report, Figure 5-42

図 4-29 内田凝縮相関式の実験予測特性



出典：EPRI Product 1013072, GOthic Qualification Report, Figure 5-40

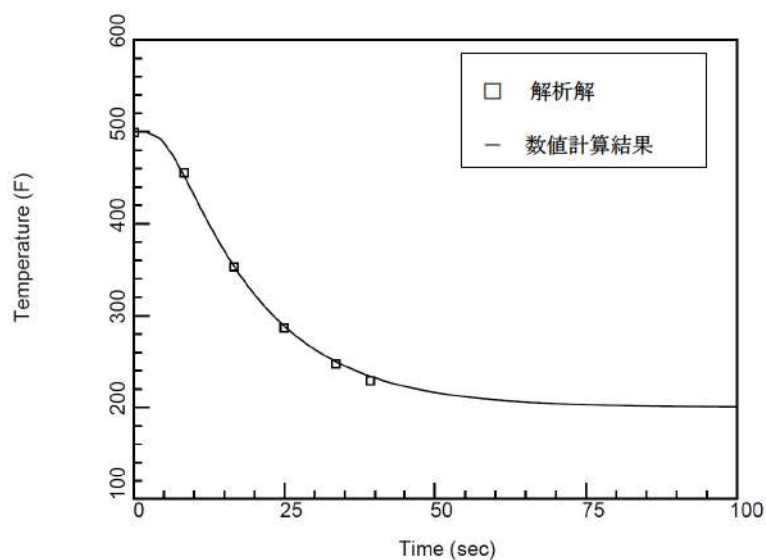
図 4-30 DLM-FM の実験予測特性

4.5 熱伝導解析解との比較

コード開発元により、1次元熱伝導に対する解析解と GOTHIC コードによる複数の形状（平板、円柱、円筒）による熱構造材の温度変化の予測に対し比較が行われている（参考文献 21）。これは、熱構造材の片面に一定の熱流束を与え、もう片面を温度一定とするものである。この仮定により、熱構造材の温度履歴及びプロファイルが解析解として得られる。図 4-31に、評価条件及び解析解と数値計算結果の比較を示す。数値計算結果は良好に解析解と一致している。

これより、GOTHIC コードに組み込まれる伝熱モデルが適切に構造材内部の熱伝導を解くことが検証された。

- ・ 熱伝導率 = $k = 12$. Btu/hr-ft-R
- ・ 比熱 = $c_p = 0.1$ Btu/lbm-R
- ・ 密度 = $\rho = 400$. lbm/ft³
- ・ 円柱直径 = 2. in ※円柱の場合。
- ・ 初期温度 = 500. F
- ・ 流体温度 = 200. F



出典：EPRI Product 1013072, GOTHIC Qualification Report, Figure 4-8

図 4-31 1次元熱伝導モデルと解析解の比較

4.6 PAR 特性検証

4.6.1 PAR による水素処理性能評価式の組み込み

水素処理設備となる PAR について、製造元が供給する水素処理に係る性能評価式が GOTHIC コードに適切に組み込まれていることを以下に検証する。

PAR の水素処理に関する性能評価式は3.3.5節にて説明したとおりである。同性能評価式を GOTHIC コードに組み込み、コードが計算する水素の再結合率（ここでは水素処理速度と同義とする）を想定される事故時環境の範囲で理論値と比較し、その誤差が十分に小さいことを検証している。解析では一定の区画を定義し、その雰囲気における酸素及び水素の体積比と圧力を定義する。同区画の水素濃度（体積比）を連続的に増加させ、コードで計算される水素処理速度と性能評価式で得られる値とを比較する。圧力条件 1.5bar 及び 4.0bar において、GOTHIC コードによる組み込み計算結果と性能曲線による値の比較を図 4-32及び図 4-33に示す。結果を統計処理した理論値対予測を比較した結果、GOTHIC コードに組み込まれる性能評価式は理論値に対し、誤差 0.3%以内という結果により良好に再現していることが確認でき、PAR の水素処理に関する特性式は GOTHIC コードに適切に組み込まれていることが検証された。

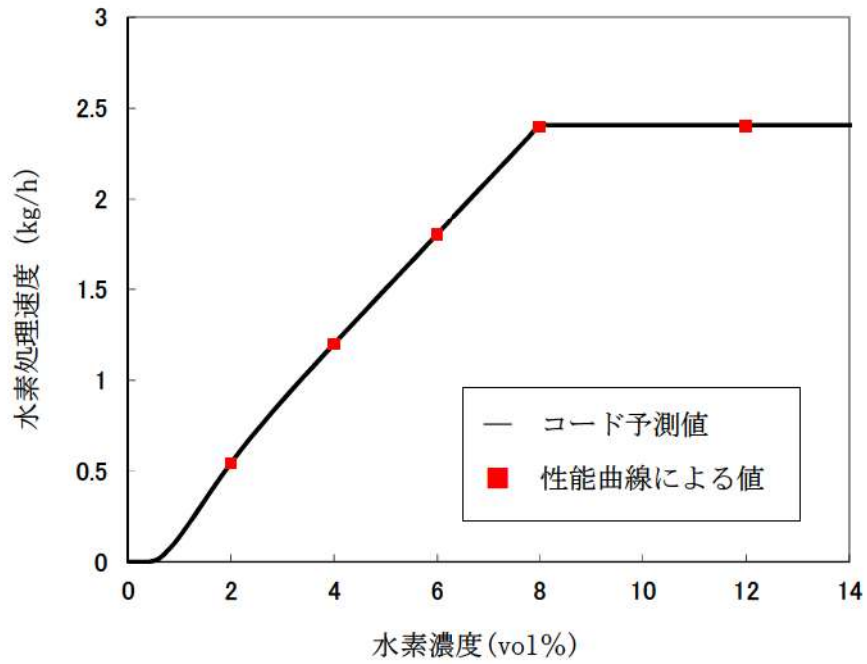


図 4-32 1.5bar における PAR 性能曲線組み込み結果

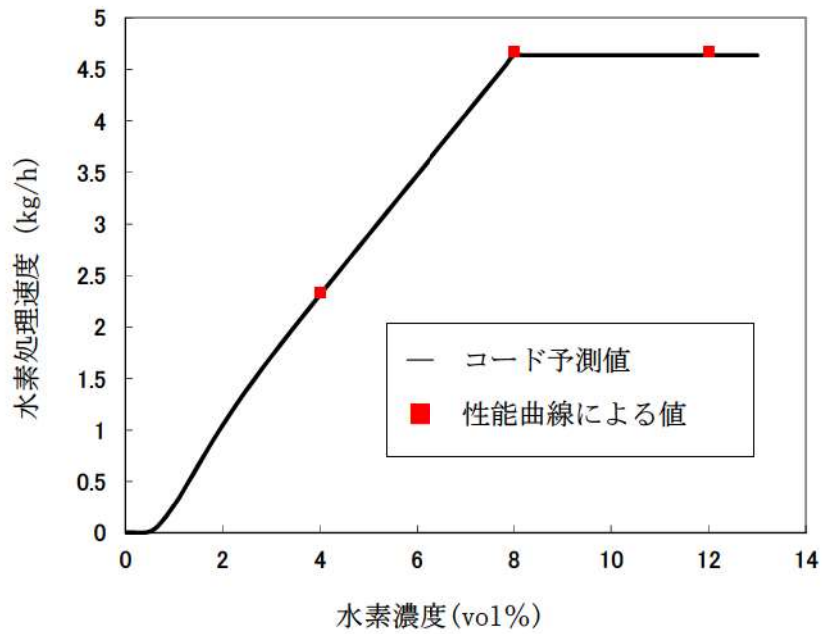


図 4-33 4.0bar における PAR 性能曲線組み込み結果

4.6.2 THAI 試験

有効性評価に使用する PAR の性能評価式は THAI 試験 (参考文献 2) において検証されている。THAI 試験のうち、HR 試験はドイツ連邦経済技術省の後援により、ドイツエッシュボルンの Becker Technologies GmbH (ドイツの委託研究工学及びプラント製造会社) により THAI 格納容器試験設備で行われた。うち、容器内に PAR のみを設置し、水素を流入させることで PAR による水素処理性能及び容器内の流体状況を計測した HR-3 試験に対し、GOTHIC コードにより実験解析を行う。これにより、有効性評価における PAR 模擬及び空間分割手法の妥当性を示す。

4.6.2.1 THAI 試験条件及び設備

THAI 試験のうち、HR-3 試験の試験条件を表 4-5 に示す。試験は、水素放出時における PAR による水素処理能力及び水素放出を停止し自然循環による処理能力を確認している。試験で使用した圧力容器、水素処理設備及び各種計測設備、水素放出条件を以下に示す。また、THAI 試験と実機プラントとの条件比較を表 4-6 に示す。

(1) 圧力容器

HR 試験シリーズで使用した圧力容器を図 4-34 及び図 4-35 に示す。これは総体積 60m^3 、高さ 9.2m、直径 3.2m のステンレス鋼製容器である。最高許容圧力は 180°C において 14bar である。

(2) 水素処理設備及び計測設備

HR-3 試験では、圧力容器内部に AREVA 社の商用 PAR が取り付けられている。また、水素濃度及び温度の計測位置を図 4-36 に示す。

(3) 水素放出

表 4-5 に示すように、HR-3 試験では 4 つの時間帯により水素の放出状況が異なる。PAR が作動開始するまでは試験容器に低流量の水素を放出する。PAR 作動後は水素注入量を試験条件に切り替え、水素濃度及び水素再結合割合が増加する様子を測定する (Phase 1)。PAR 入口の水素濃度がおよそ 5.8vol% に到達したことを確認すると水素注入を一度中断して、PAR の処理による水素濃度の減少を測定する (Phase 2)。水素処理により、PAR 入口の水素濃度がおよそ 0.75vol% に到達後、再び水素注入を開始し、自然発火に至るまで水素濃度を上昇させたのち (Phase 3)、水素放出を停止する (Phase 4)。水素注入流量の変化を図 4-37 に示す。

4.6.2.2 実験結果と PAR 性能評価式との比較

試験容器内部に温度計及び水素体積比計を配置し、試験容器内の温度や水素体積比の分布を確認している。PAR の入口及び出口に設置した水素体積比計、PAR 入口部の流速計等の測定パラメータ

より試験時の PAR 単体の水素除去割合 (g/s) を求め、試験時の試験容器内の計測圧力を入れた PAR 性能評価式による水素除去割合 (g/s, kg/h) との比較を行った結果、図 4-38のとおりよく一致する結果が得られた。

4.6.2.3 GOTHIC コードによる解析結果と試験との比較

(1) 解析モデル

THAI 試験の実験解析を実機における水素燃焼解析において適用している GOTHIC コードにより実施した。

GOTHIC コードによる THAI 試験設備のモデル化は、試験容器を 1 区画の集中定数系ノードにより模擬する 1 区画評価と (図 4-39)、多区画分割による多区画評価を実施した (図 4-40)。

なお、いずれの評価においても構造材への熱伝達については、最適評価性の高い DLM-FM モデルを適用する。PAR モデルは、試験装置の再現として適切な高さに配置し、水素の再結合率は AREVA 社より提供された相関式を入力条件として与える。境界条件は容器下部の水素放出位置に設定し、試験条件に設定されたデータを与える。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

(2) 解析結果

A. 1 区画模擬による解析結果

① 圧力

容器圧力の解析結果と試験データとの比較を図 4-41に示す。解析結果は試験の挙動を概ね良好に予測していると考ええる。しかし、試験では開始 92 分後に水素の燃焼による急激な圧力上昇が、また、92 分後以降においては試験データと比較して解析結果の圧力が高めに推移する傾向となっている。この原因として、試験においては Phase 3 で PAR の自然発火が生じているのに対し、解析においては水素の燃焼を模擬しないことから、解析では急激な圧力上昇は見られないこと、また容器内に存在する非凝縮性気体が多く残ることから圧力が下がらないものと考えられる。

② 温度

容器内の各高さ位置における雰囲気温度の解析結果と試験データとの比較を図 4-42に示す。解

析では PAR の排気が PAR 設置区画内に一様に拡散するよう模擬し、影響は軽微であるが区画における水素濃度を過小評価することで、水素処理量及び処理に伴う発熱を過小評価する傾向にある。また、燃焼を模擬しないことから容器内の発生熱量は少なく評価されるものの、結果は試験の挙動を概ね良好に予測していると考ええる。

試験においては開始 92 分後 (Phase 3) に水素の燃焼により、容器上部で急激な温度上昇が見られるが、解析では水素の燃焼を模擬していないことからこの挙動は見られない。

解析は容器を 1 区画で模擬していることから、解析結果はおおよそ試験結果の平均温度を再現することとなるが、試験では容器下部は水素処理による発熱の影響を受けにくいことから解析結果に比べて低い傾向を示している。

③ 水素濃度

容器内の各高さ位置における水素濃度の解析結果と試験データの比較を図 4-43 に示す。解析結果は試験の挙動を概ね良好に予測していると考ええる。

試験においては開始 92 分後 (Phase 3) に水素の燃焼により水素濃度が減少するのに対し、解析では水素の燃焼を模擬していないことから、開始 92 分以降においては水素濃度が解析結果の方が試験データに比べて高く推移することとなる。また、その傾向については図 4-44 から確認でき、解析結果は試験結果と比較して、PAR による水素処理量の積分値が少なく、一方容器内に残留している水素量を多く予測する。

B. 多区画模擬による評価

① 圧力

容器圧力の解析結果と試験データとの比較を図 4-45 に示す。解析結果は試験の挙動を概ね良好に予測しており、解析結果と試験データの差異の原因については 1 区画模擬での議論と同様である。

② 温度

容器内の各高さ位置における雰囲気温度の解析結果と試験データとの比較を図 4-46 に示す。下部サンプル区画と水素放出区画を除いて解析結果は試験データに比べ全体的に低い温度傾向となっている。その原因としては、解析では PAR の排気が PAR 設置区画に一様に拡散するよう模擬し、影響は軽微であるが区画における水素濃度を過小評価することで、PAR による水素処理量及び処理に伴う発熱を過小評価する傾向にある。また、Phase 3 以降で見られる水素の燃焼を模擬していないことから発生熱量を少なく予測する。さらに、区画分割を実施したことにより、各所の対流熱伝達に基づくヒートシンクによる除熱が過大に評価されることによるものと考えられる。これは 1 区画模擬による結果と比較することでも推測が可能である。なお、1 区画模擬での議論と同様、試験では開始 92 分後 (Phase 3) に水素の燃焼により、容器上部で急激な温度上昇が見られるが、解析で

は水素の燃焼を模擬していないことからこの挙動は見られない。

③ 水素濃度

容器内の各高さ位置における水素濃度の解析結果と試験データの比較を図 4-47に示す。解析結果は試験の挙動を概ね良好に予測していると考ええる。

試験では水素注入を停止する期間（Phase 2 及び Phase 4）において、水素供給領域及び内部シリンダに水素が滞留している。これは、下部水素供給領域からの水素供給及び PAR により発生する上昇流れと、上部領域の下降流れとが拮抗することで、下部の水素供給領域を介さずに中間領域の外周部のみで循環流れが発生してしまうためであると考えられる。



水素濃度の過渡変化としては 1 区画模擬での議論と同様、試験においては開始 92 分後（Phase 3）に水素の燃焼により水素濃度が減少するのに対し、解析では水素の燃焼を模擬していないことから、開始 92 分以降の水素濃度は、解析結果の方が試験データに比べて高く推移することとなる。その傾向は図 4-48からも確認でき、解析結果は試験結果と比較して、PAR による水素処理量の積分値が少なく、一方容器内に残留している水素量を多く予測する。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 4-5 HR-3 の試験条件

--

表 4-6 THAI 試験条件と実機プラント条件の比較

体系	THAI 試験条件 (HR-3)	3 ループプラント	コメント
PAR		実機向け PAR	
PAR 設置位置		蒸気発生器煙突部(原子炉格納容器ドーム部), 外周部	
PAR 台数		5 台	
再結合率		約 1.2kg/h/台	
容器(体積)		約 67,400m ³ (原子炉格納容器体積)	
圧力		0.4MPa[gage]未満	
温度		50~約 140℃	
水素濃度		平均 13vol%未満	
蒸気濃度		0~100%	
スプレー		10.6g/s/m ³ (NaOH 含む)	
水素放出量		770kg	

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

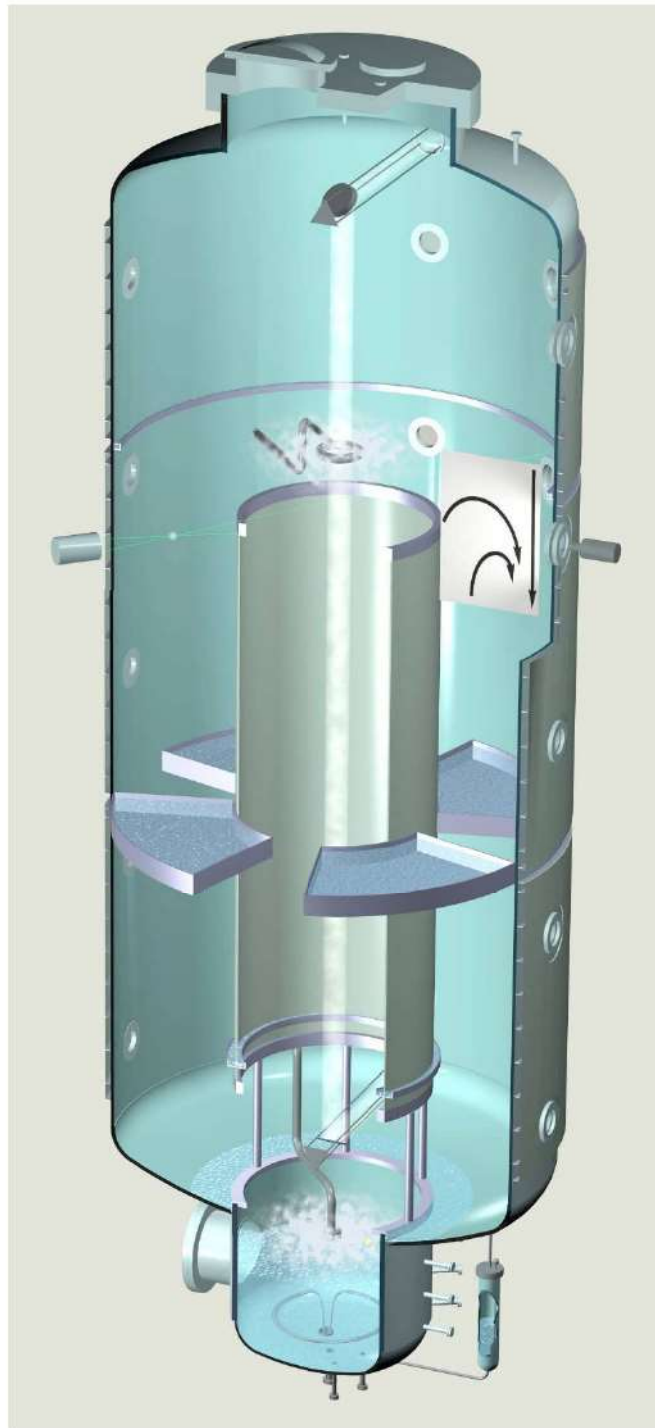


図 4-34 HR 試験設備概要

注：内部の円筒の上半分及び付随する水平板は，HR-3 試験では取り外されている。

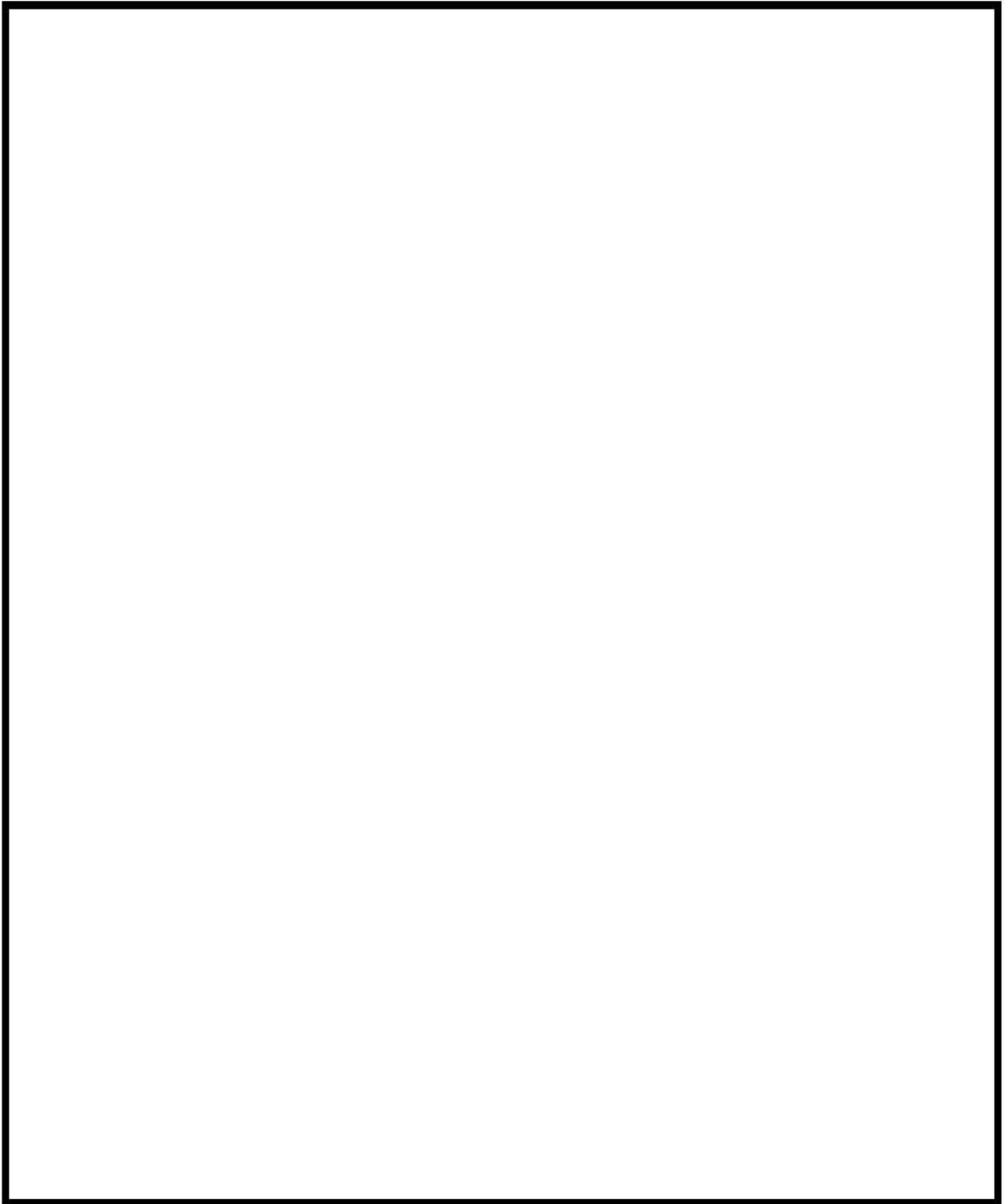


図 4-35 HR 試験設備寸法

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

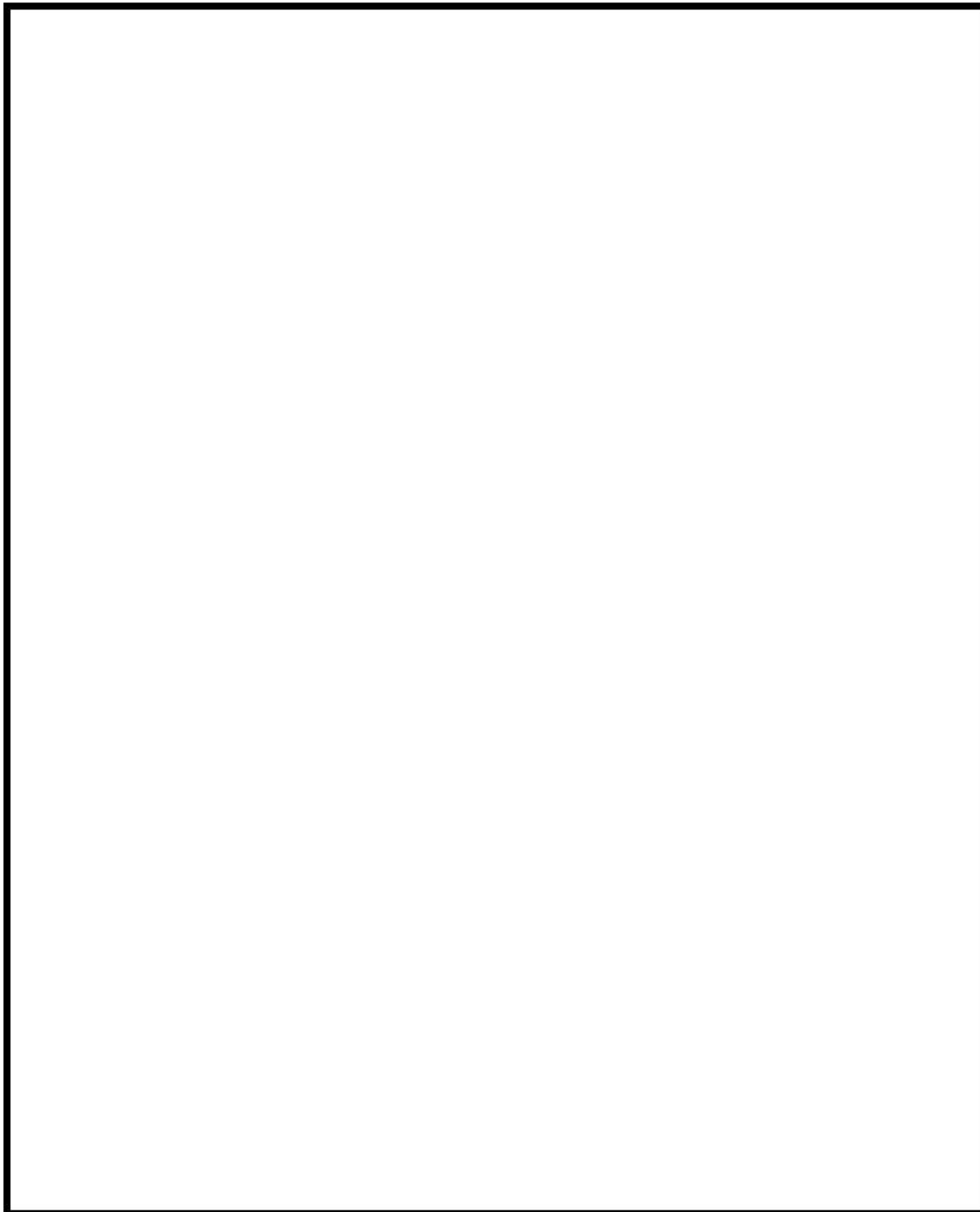


図 4-36 THAI 試験装置及び水素濃度計及び温度計の設置場所

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

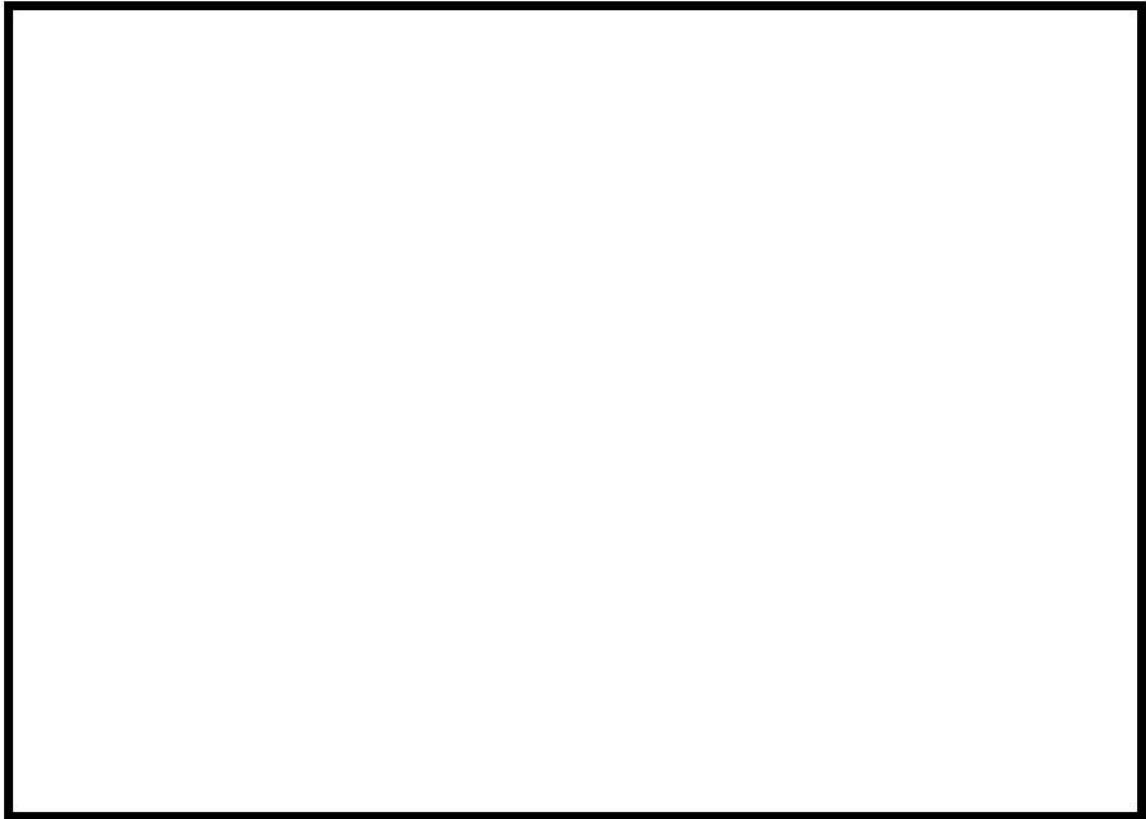


図 4-37 HR-3 試験水素注入流量

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

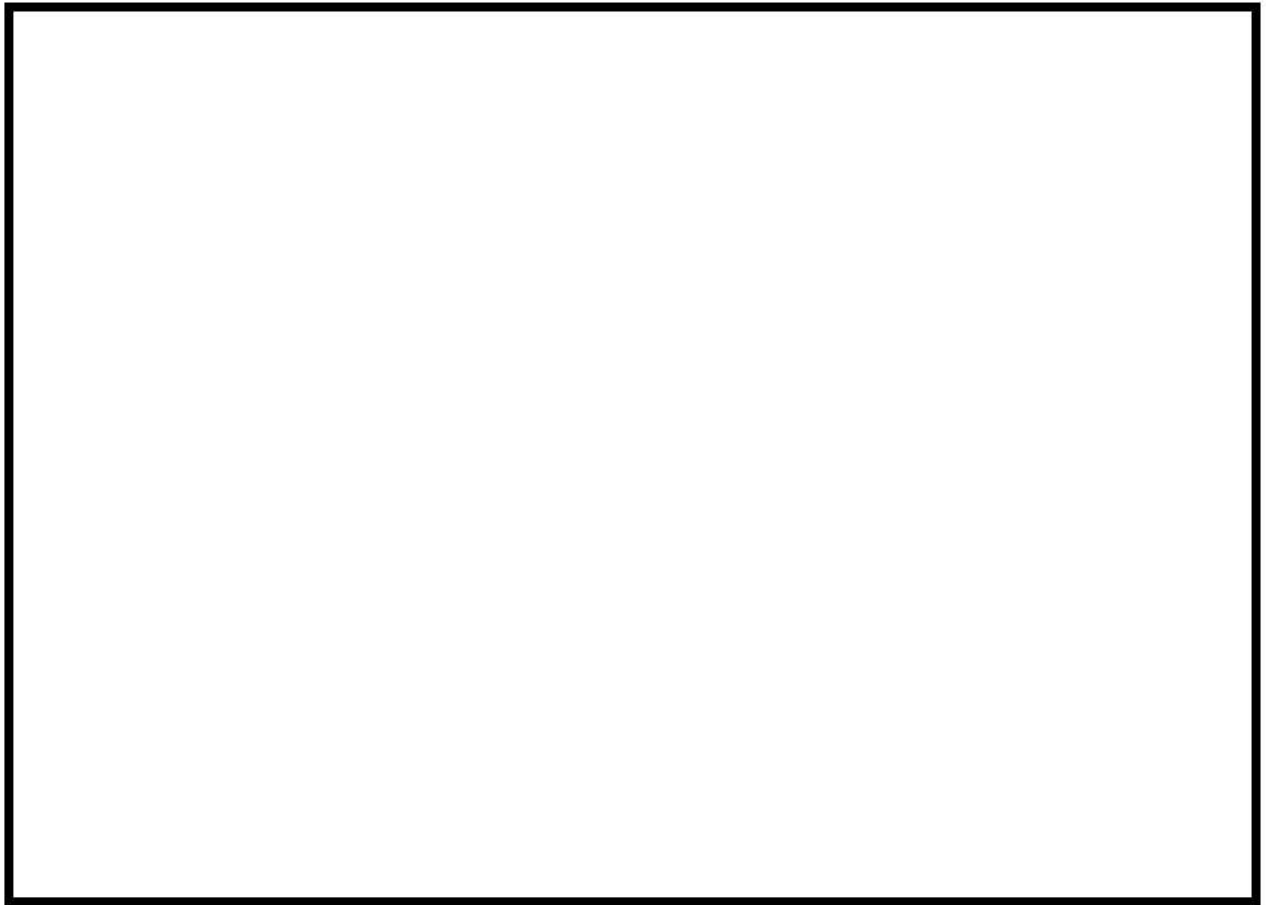


図 4-38 水素除去率の評価式と試験の比較

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

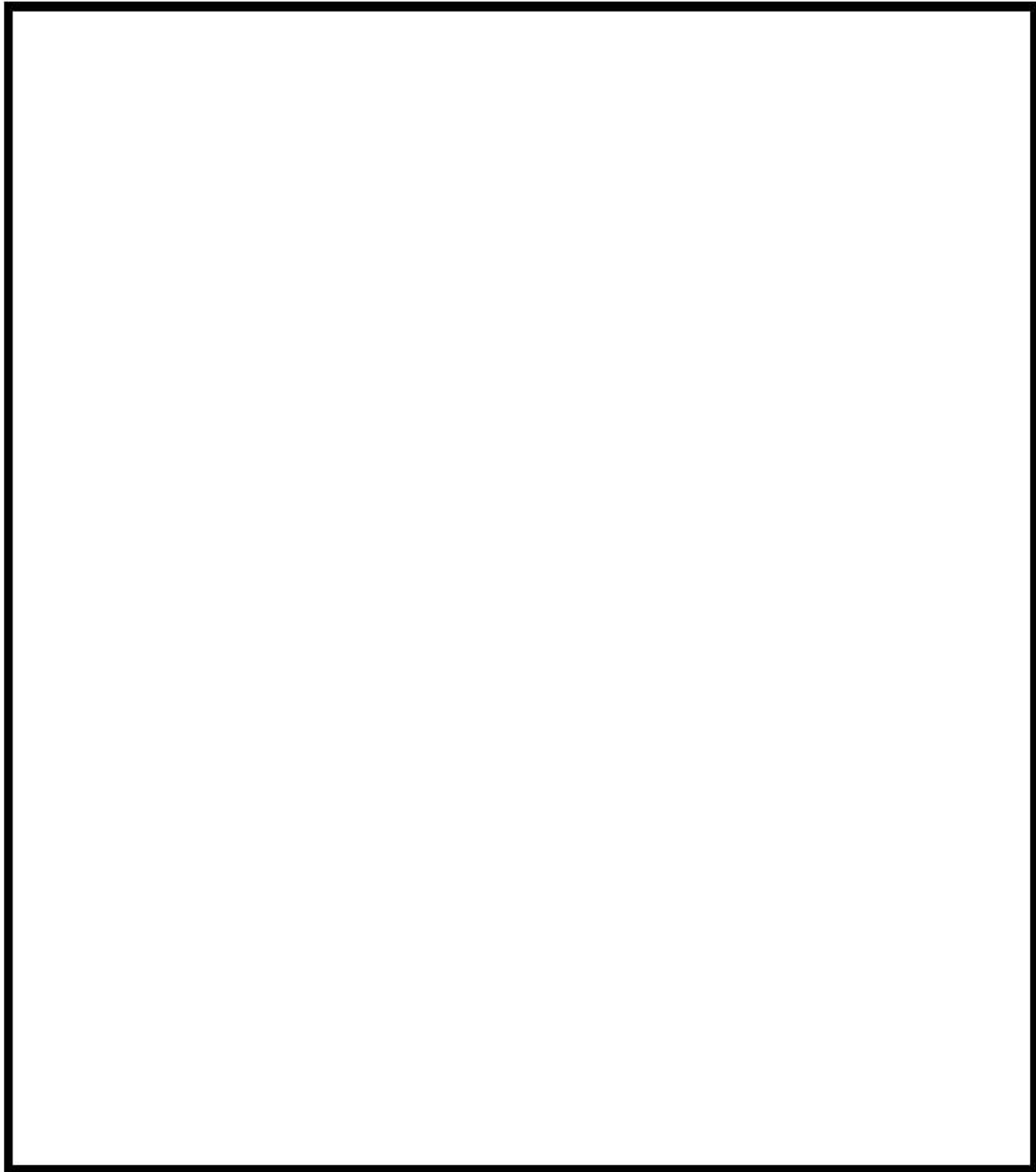


図 4-39 THAI 試験 (HR-3) の GOTHIC コードによるノーディング (1 区画模擬)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

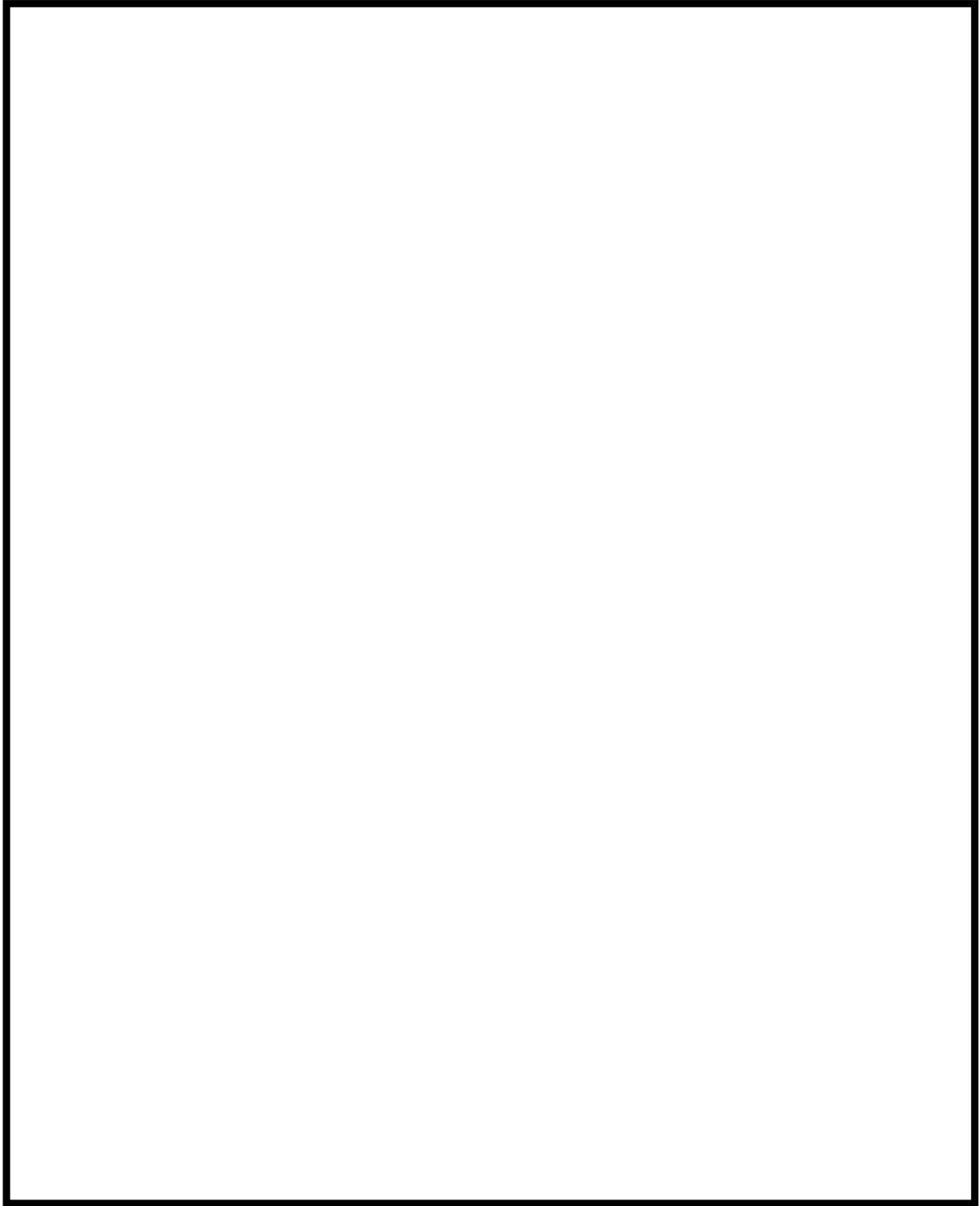


図 4-40 THAI 試験 (HR-3) の GOTHIC コードによるノーディング (多区画模擬)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

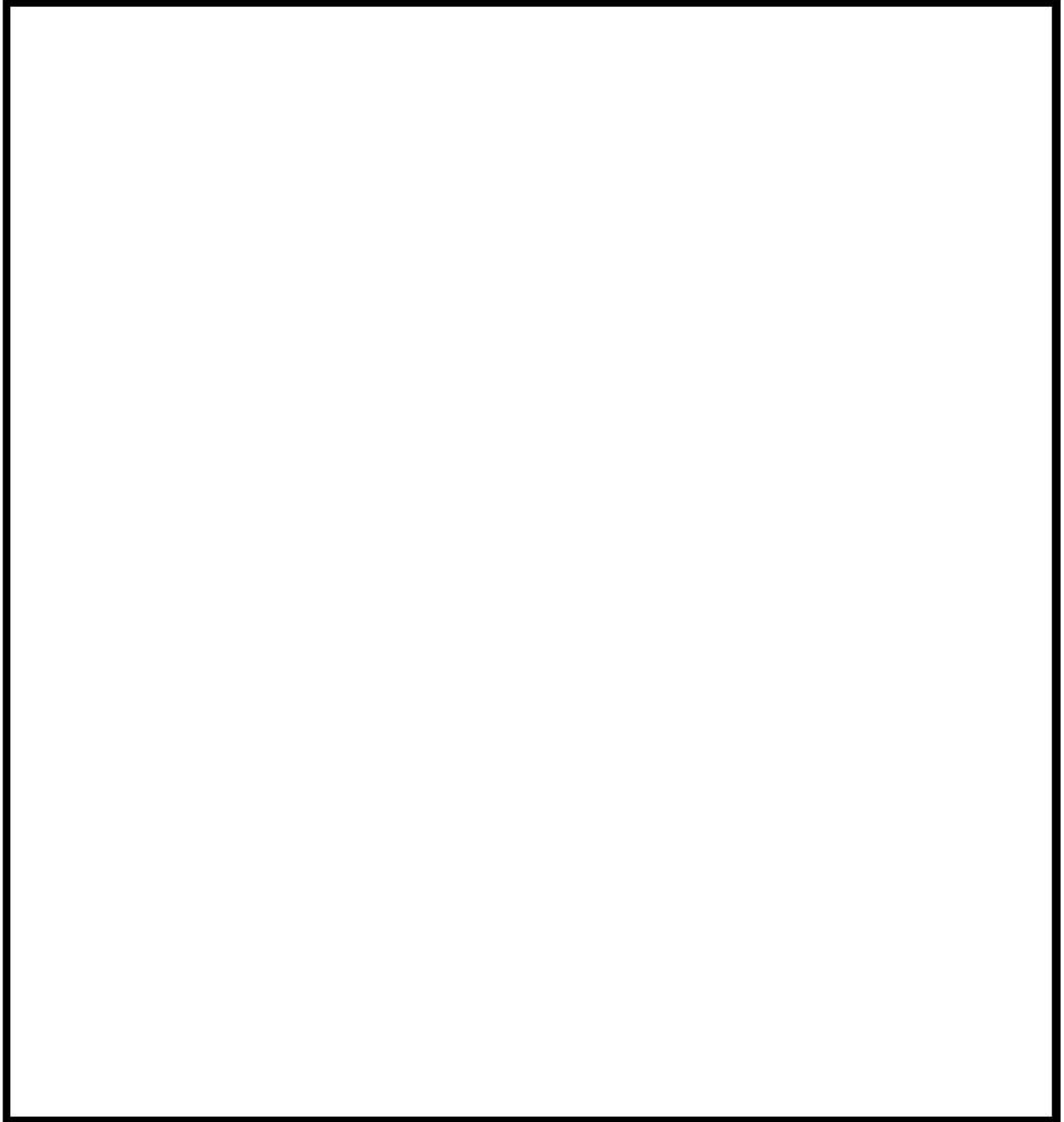


図 4-41 容器内圧力比較（1区画模擬）

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

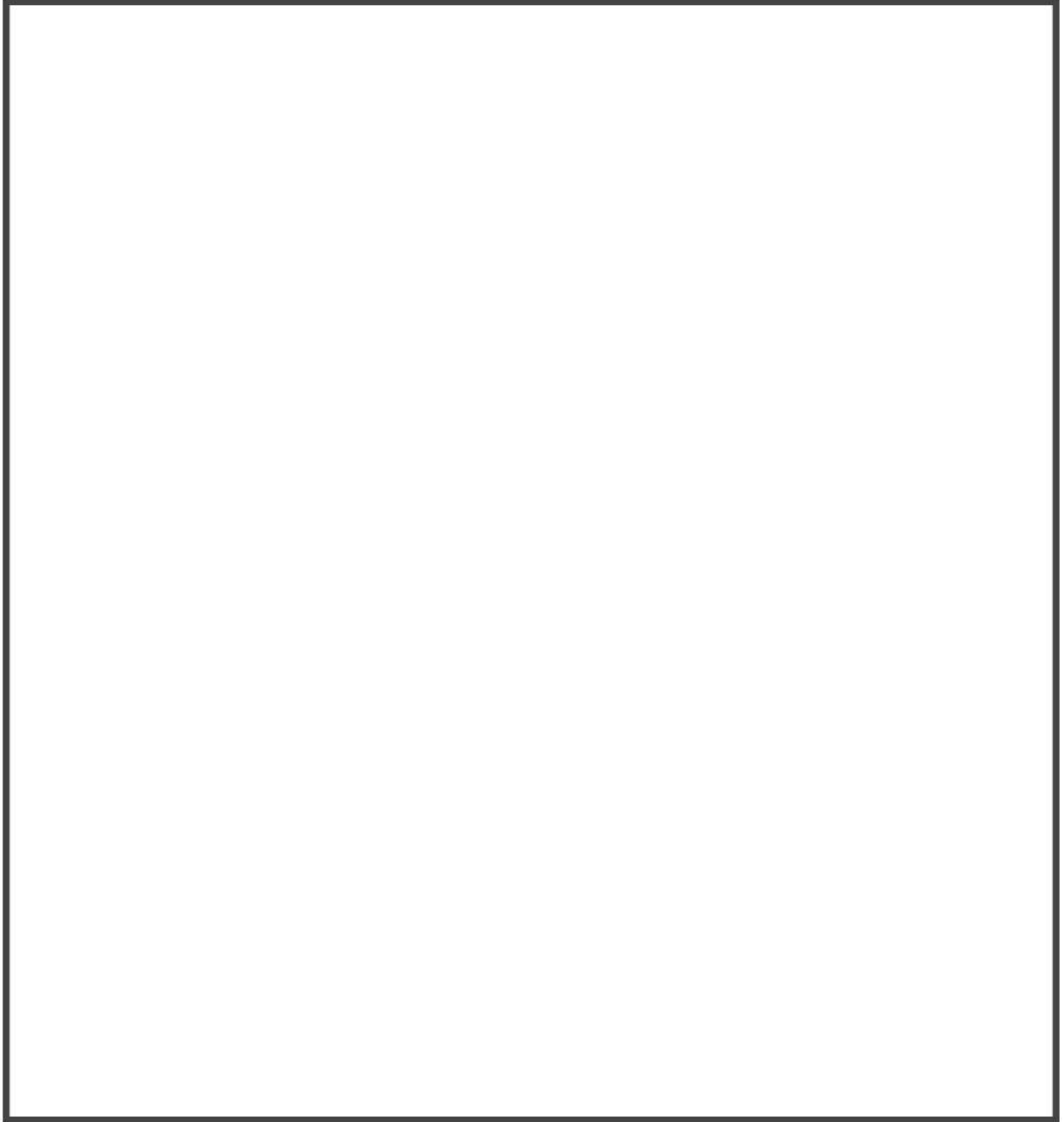


図 4-42 容器内温度分布比較（1区画模擬）

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

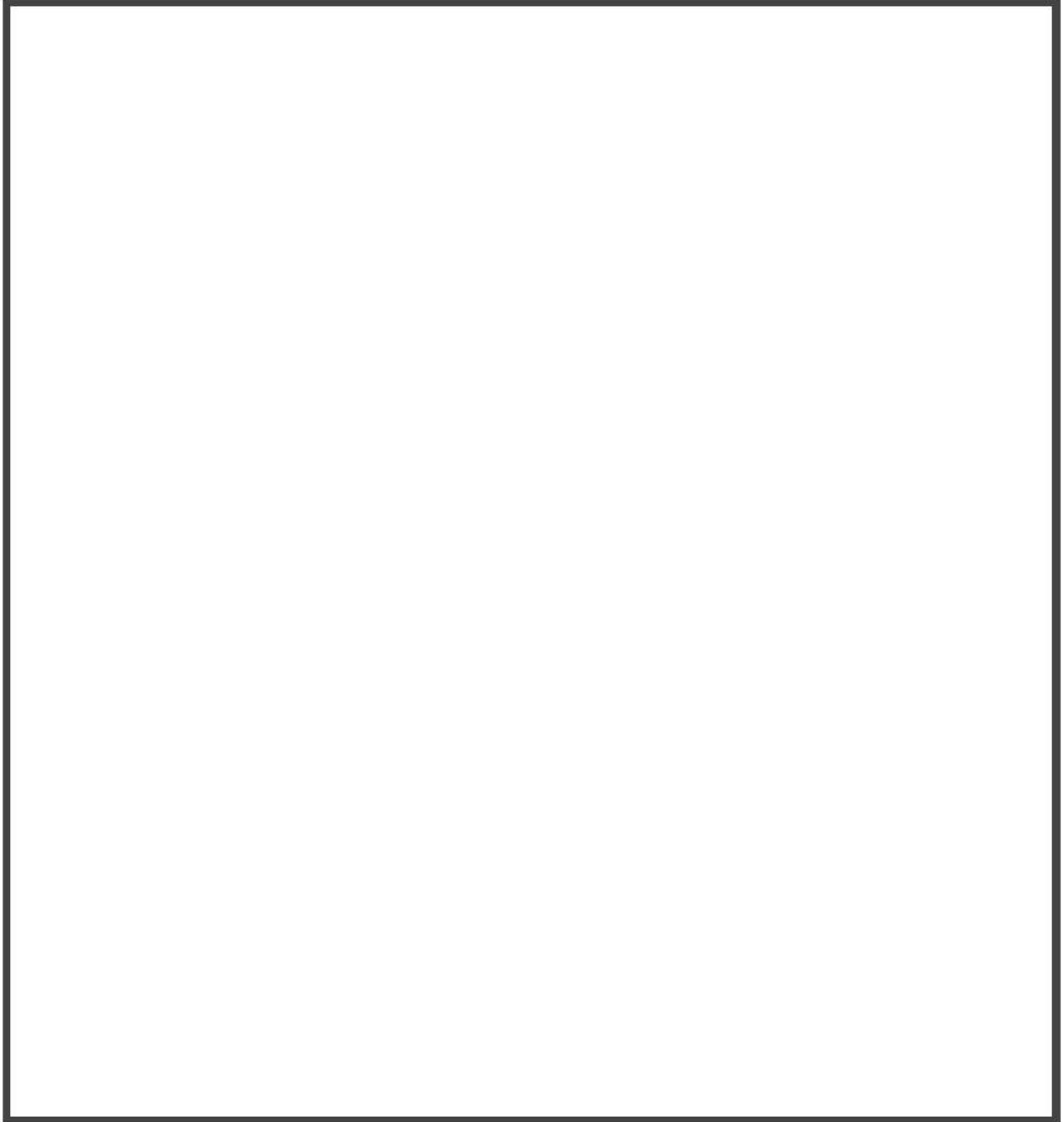


図 4-43 容器内水素濃度分布比較（1区画模擬）

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

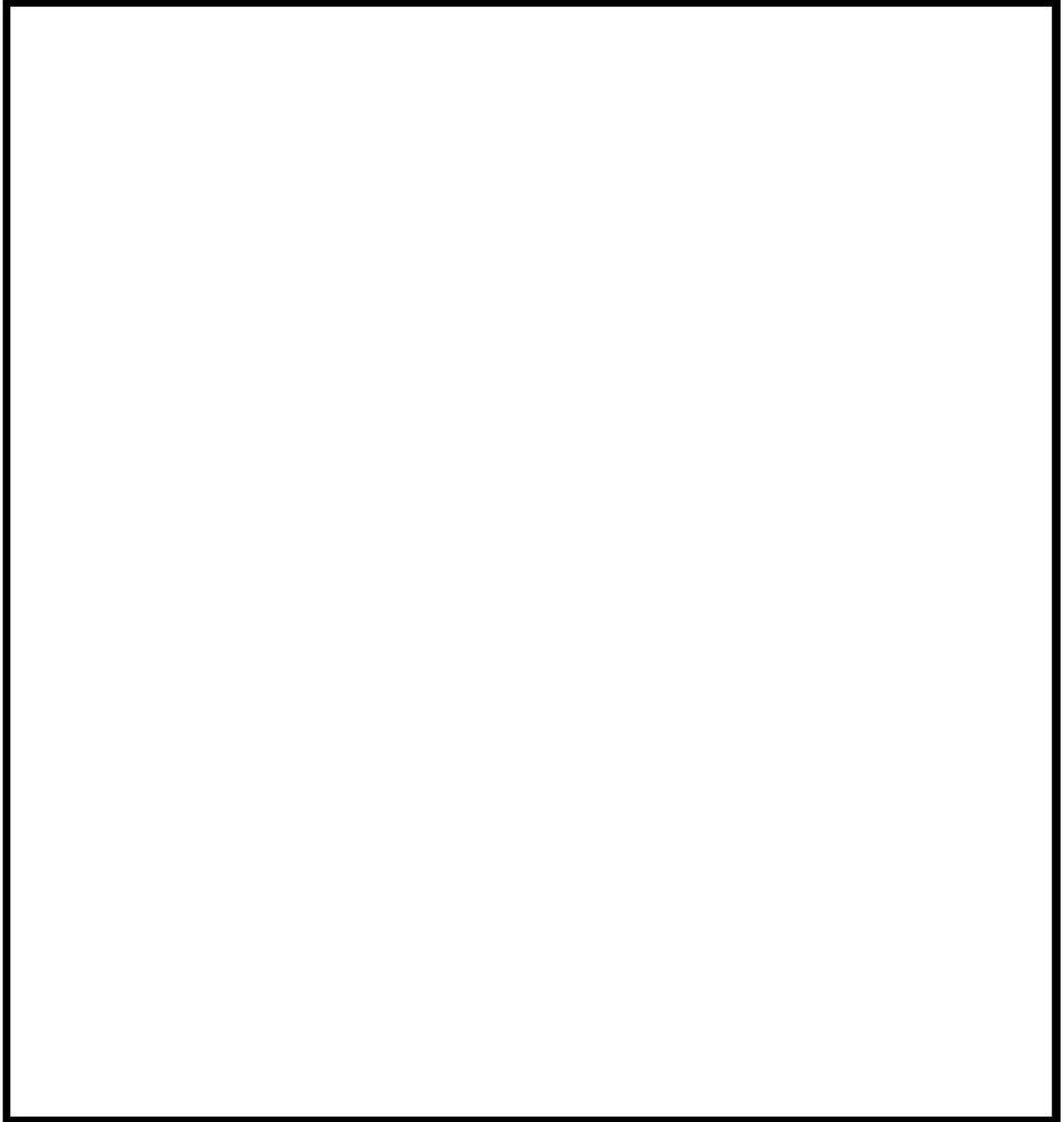


図 4-44 水素処理量の比較（1区画模擬）

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

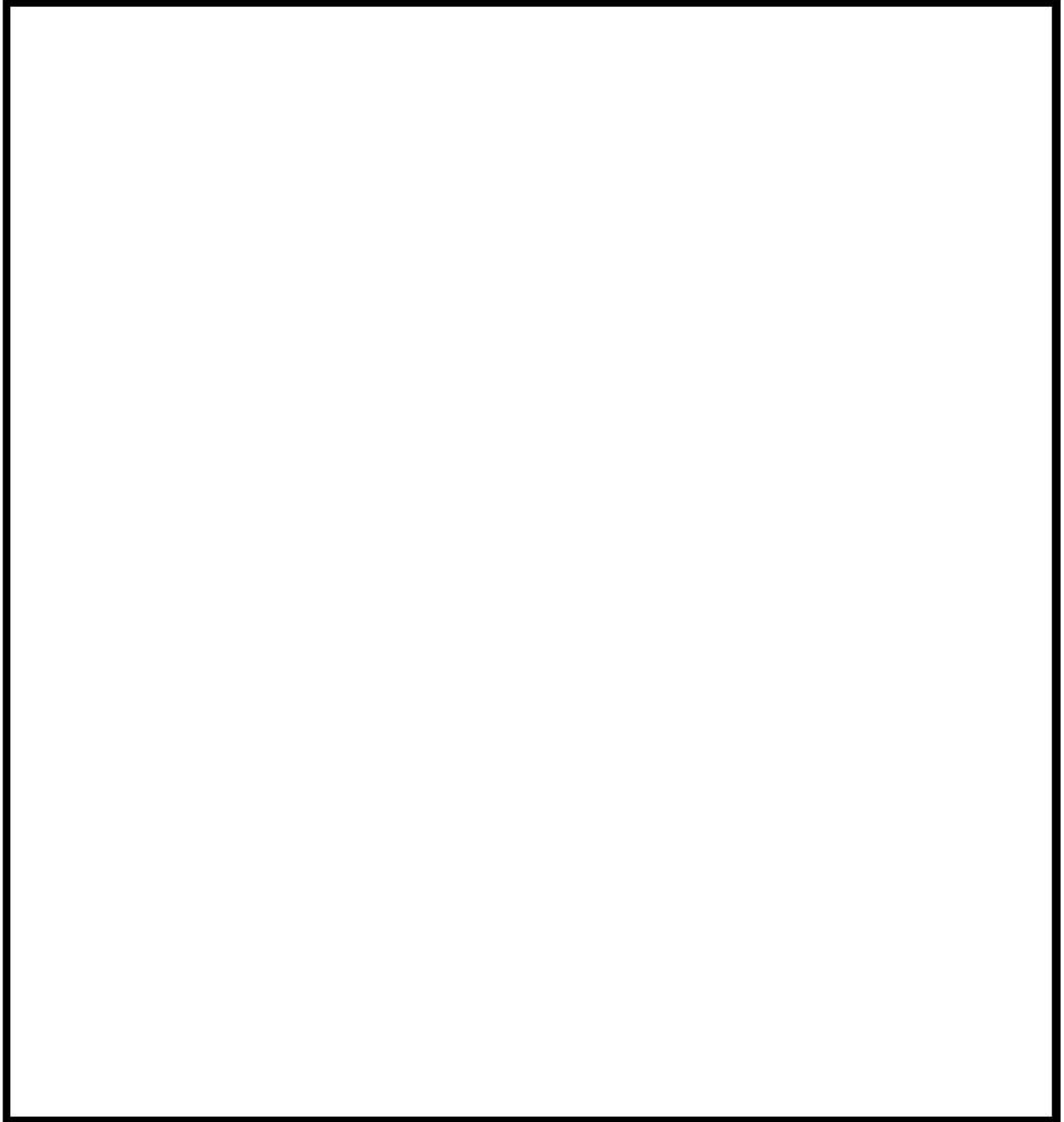


図 4-45 容器内圧力比較（多区画模擬）

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

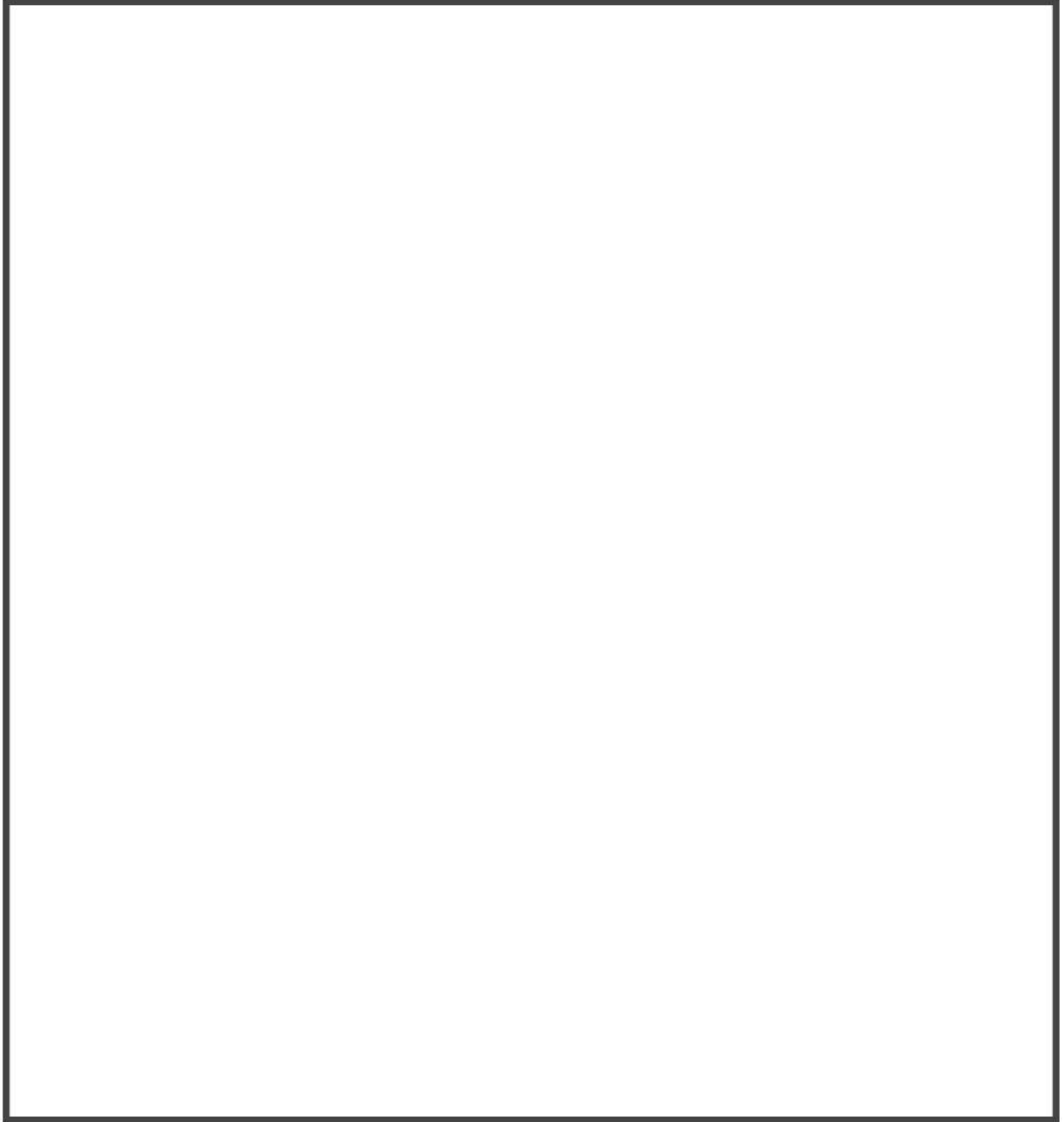


図 4-46 容器内温度分布比較 (多区画模擬)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

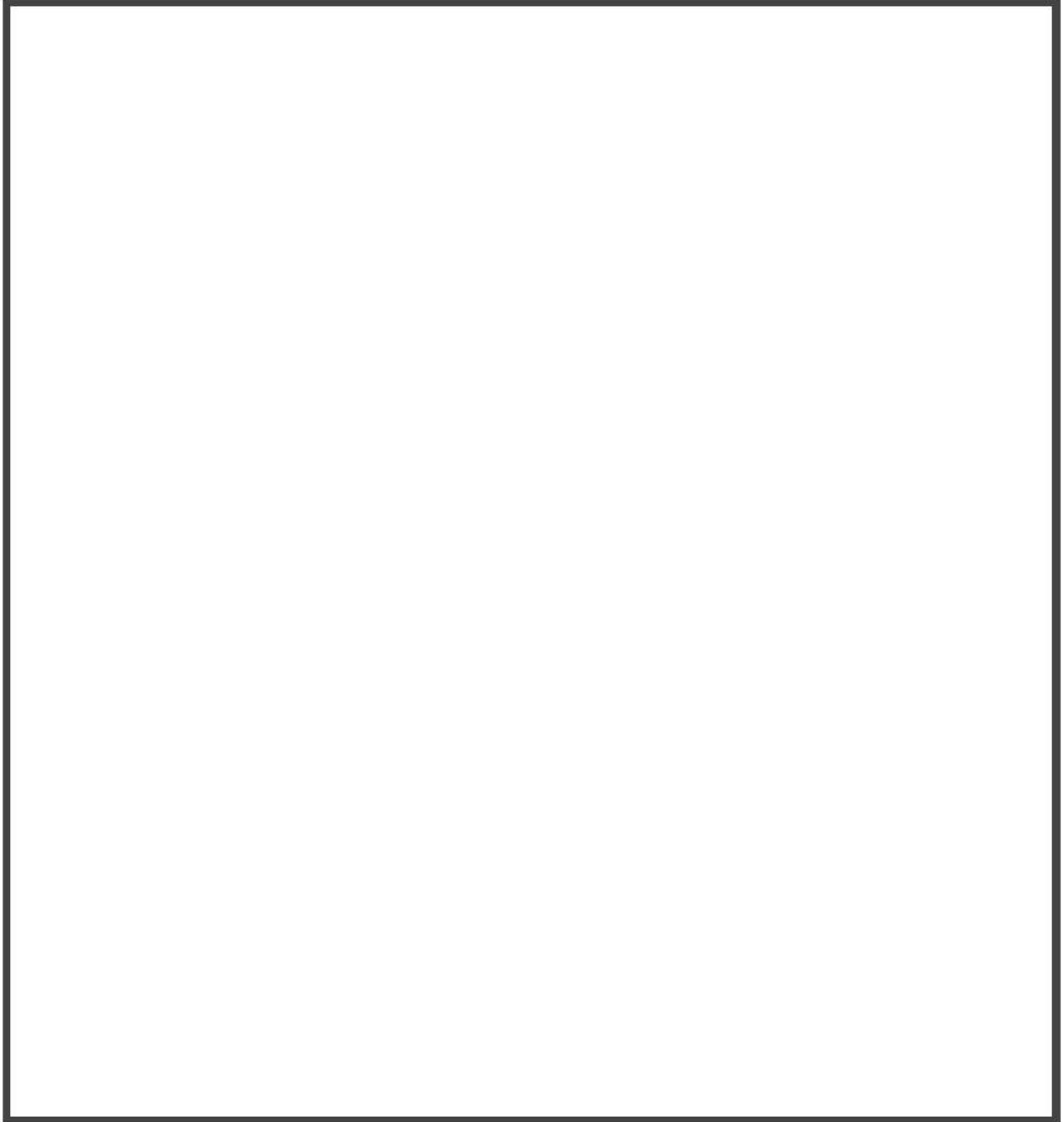


図 4-47 容器内水素濃度分布比較（多区画模擬）

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

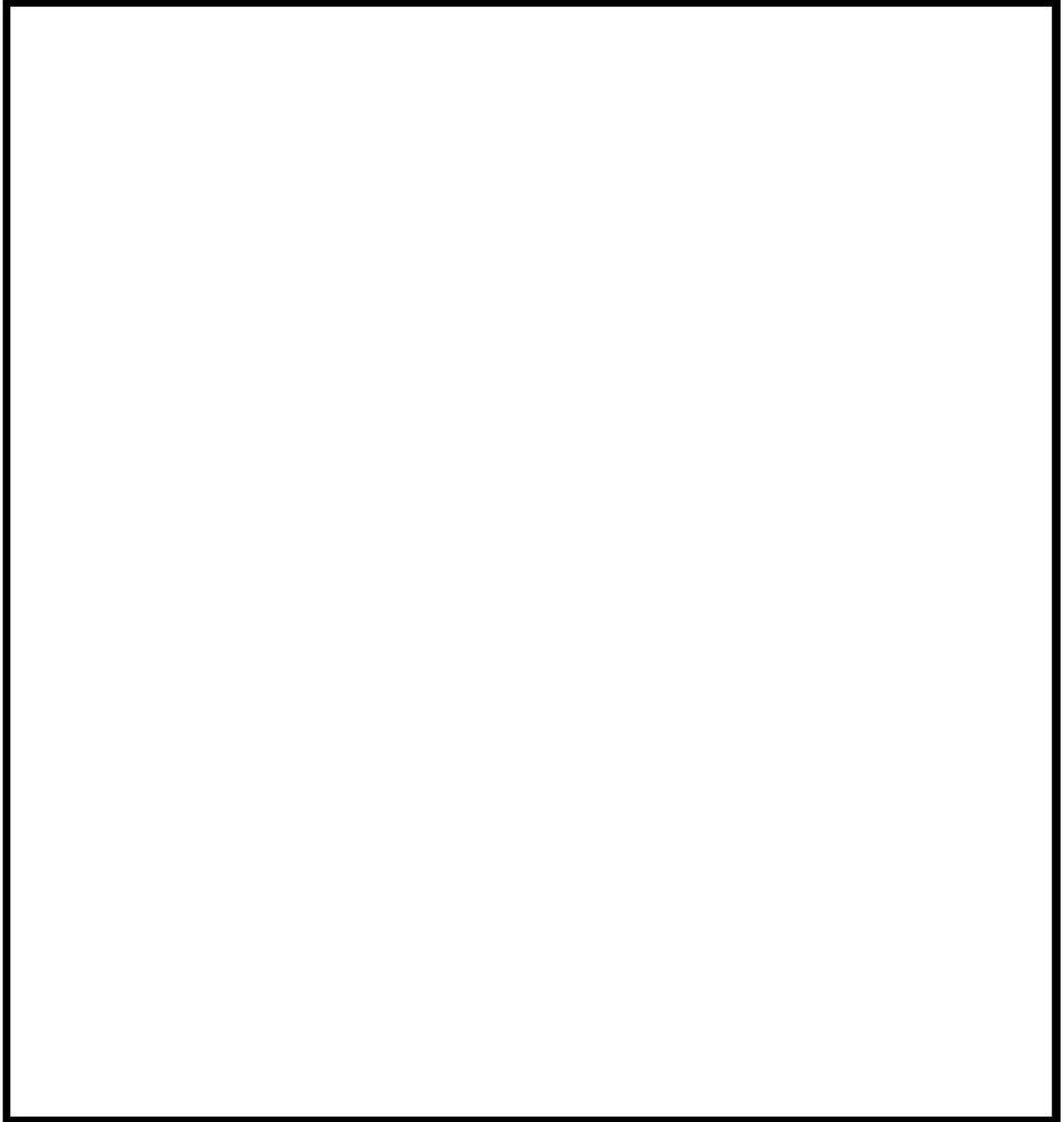


図 4-48 水素処理量の比較（多区画模擬）

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

4.7 イグナイタによる水素燃焼モデルの検証

水素処理設備となるイグナイタについて、コード開発元が供給する水素処理に係る燃焼モデルが適切に組み込まれていることを以下に検証する。

GOTHIC コードに具備されている燃焼モデルは、コード開発元となる NAI により水素燃焼に関して熱バランスを考慮することで得られる解析解と比較することで検証されている。表 4-7に解析解とコードの予測の結果を比較して示す。GOTHIC コードに組み込まれている3つの燃焼モデルは、解析解と比べ温度に対し最大約1%、圧力に対し最大約0.5%の差であり適切にモデル化されていることが分かる。

表 4-7 解析解と GOTHIC コード予測の結果比較



枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

4.8 実機解析への適用性

妥当性確認の結果より、実機解析にてモデル化が必要となる現象に対する GOTHIC コードの適用性を検討する。

4.8.1 区画間・区画内の流動

(1) 実験解析による実機適用性検討

原子炉格納容器内の、破断区画に放出される 1 次冷却材及び水素の流動と、各区間及び原子炉格納容器ドーム部内での水素の拡散及び混合挙動は、流体挙動を模擬するための質量、エネルギー及び運動量の保存式に加え、各種の構成式及び相関式、非凝縮性ガスの輸送モデルが支配要素となる。これら関連するモデルの総合的な実機プラント解析への適用性について、NUPEC 試験 Test M-7-1 データを用いて検証した。同試験の試験条件は、評価事故シーケンスとして選択される LOCA 時の ECCS 注入失敗（格納容器スプレイ成功）に相当し、GOTHIC コードは原子炉格納容器圧力の時間変化、雰囲気温度及びヘリウム（水素）濃度の時間及び空間変化を良好に再現している。これにより、GOTHIC コードは水素を含む流体の原子炉格納容器内の混合挙動を適切に模擬できるものと判断できる。

また、スプレイ有無の影響についても Test M-4-3 試験を用いたコード適用性の検討を実施した。スプレイがないことにより原子炉格納容器ドーム部での蒸気凝縮、蒸気及びヘリウムの均一拡散及び混合の影響が弱まる。しかし、Test M-7-1 と同様に、試験では原子炉格納容器ドーム部内での水素濃度の成層化、また、上下区画間の有意な水素濃度差は生じず、原子炉格納容器全体にわたりヘリウムは均一に混合していることが確認された。また、GOTHIC コードは、スプレイの有無にかかわらず、原子炉格納容器圧力、原子炉格納容器ドーム部の雰囲気温度及びヘリウム濃度、また、原子炉格納容器内の各区画の水素濃度を良好に予測する。すなわち、スプレイの有無にかかわらず、GOTHIC コードは原子炉格納容器内の流動を適切に模擬できるものと判断できる。

なお、NUPEC 試験 Test M-7-1 では、破断口の直上に存在する蒸気発生器室出口部のヘリウム濃度に対し、GOTHIC コードが過小評価する傾向が確認された。これは、試験では区画内で蒸気及びヘリウムを上方に放出していることから解析でも同様の境界条件を設定しているが、区画内での流体の異方性に対する模擬が、隣接する区画に対し多めの流量を与えることでやや損なわれているものと考えられる。

しかし、「水素燃焼」の評価事故シーケンスとして選定される事象では、配管の両端破断を想定しており、破断口からの蒸気及び水素が区画内に満たされるように放出を仮定するのが適切であると考えられる。これは、破断口となるループ室に隣接する比較的狭い原子炉下部キャビティや外周区画への水素の流入を増やす傾向となり、過渡的にこれら局所の水素濃度を高めることとなる。また、同試験解析では実機プラント解析で重要となる原子炉格納容器ドーム部の雰囲気温度及びヘリウ

ム濃度を良好に模擬している。これは、破断区画からの流れの異方性について実験と解析では差異が見られるものの、原子炉格納容器内の構造上、結果として複数の経路を経て原子炉格納容器ドーム部に流入する全体の流れをコードが適切に模擬している。したがって、NUPEC 試験 Test M-7-1 に見られた蒸気発生器室解析予測の誤差が実機プラント解析に与える影響はないものと判断できる。

また、ループ数が異なるプラントにおいても、破断口から流出する冷却材や水素は原子炉格納容器内の各区画を通過し、液相は床面に、蒸気及び水素は上部区画に流入する基本的な流動は共通である。ループ数が異なることにより、冷却材や水素の移流の駆動力、凝縮等の熱的变化の度合いが異なるが、GOTHIC コードは NUPEC 試験の Test M-7-1 及び Test M-4-3 という異なる事象進展に対して適切な予測を与えている。これは、コードの能力と模擬手法が適切であることを示しており、ループ数が異なることによる原子炉格納容器内の流動の差は、コードにより十分に模擬されるものと判断できる。

(2) 原子炉格納容器ドーム部のノード分割の妥当性

実機プラントの解析への適用に係る不確かさの1つとして、解析におけるノーディングが挙げられる。PWR プラントと NUPEC 試験装置規模及びノーディングの比較を表 4-8及び表 4-9に示す。

NUPEC 試験解析では原子炉格納容器を [] により1つのボリュームを [] 分割している。NUPEC 試験 Test M-7-1 について、ノーディングの分割数による解析結果への影響評価を実施するため、原子炉格納容器ドーム部を1区画とした集中定数系による解析を実施した。

NUPEC 試験 Test M-7-1 における原子炉格納容器ドーム部の温度分布の試験測定値及び、Test M-7-1 を対象とし、原子炉格納容器ドーム部を [] による [] 分割した GOTHIC コードによる実験解析結果を図 4-9に示す。試験結果と試験測定値を比較すると、GOTHIC コードの予測は試験に対し最大5℃程度の誤差が見られるものの、原子炉格納容器内の温度挙動を適切に再現している。また、ヘリウム濃度に対する試験測定値と GOTHIC コードの予測結果の比較を図 4-11に示す。原子炉格納容器内のヘリウム濃度の挙動についても、良好に一致している。

次に、Test M-7-1 の実験解析について、原子炉格納容器ドーム部の分割を1区画とした集中定数系による解析を実施した。原子炉格納容器ドーム部の温度の比較を図 4-49に、原子炉格納容器ドーム部のヘリウム濃度の比較を図 4-50に示すが、試験測定値及び上記の [] 分割した解析結果と比較しても大きな差異が見られていない。この理由としては、原子炉格納容器ドーム部において比較的溫度分布が小さく、局所温度による熱構造材の除熱効果の影響が小さいためであると考えられる。

Test M-7-1 のように原子炉格納容器ドーム部の温度分布が比較的小さい場合においては、上記の原子炉格納容器ドーム部の温度及びヘリウム濃度等の結果から、原子炉格納容器ドーム部の空間の分割により定義される各セルのバルク温度の変化による解析結果への影響は小さいと考えられる。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

実機プラントの有効性評価で想定する評価事故シーケンスは、「大破断 LOCA+ECCS 注入失敗（格納容器スプレイ成功）」であり、NUPEC 試験 Test M-7-1 の結果を踏まえても、破断流による流れの形成及び格納容器スプレイ、水素処理設備の作動等によって、原子炉格納容器ドーム部における混合が良好であることが予想される。

したがって、上記の NUPEC 試験 Test M-7-1 の原子炉格納容器ドーム部分割を変えた場合の評価結果を踏まえれば、原子炉格納容器ドームの分割を による 分割とした場合において、構造材との凝縮計算に使用する原子炉格納容器ドーム部各セルのバルク温度を使用しても、有効性評価の結果に与える影響は小さいと考える。

なお、壁面との熱伝達を有限体積における数値計算モデルで評価する際は、その壁面が存在する有限体積の代表温度を定め、壁面の表面温度との温度差により伝熱量を定義する。したがって、セルのサイズを詳細にすると局所的な温度分布が再現され、場所ごとの伝熱量が異なる場合がある。しかし、評価対象とする空間全体の温度分布を適切に模擬できる程度のセルサイズが選択されていれば、壁面近傍において温度勾配が生じた場合も、伝熱量の増加により温度差が縮小すること、境界層に対して主流からの流れ込みが発生することにより補償的な作用が生じる。このため、結果的に局所的な温度分布があっても壁面に対する総量としての伝熱量は保存され、評価結果に与える影響は小さくなる。なお、GOTHIC コードにおいて使用可能な熱伝達モデルは、一般的に壁面近傍において見られる温度勾配の影響外にある主流の温度計測結果から導かれており、極端に詳細なセルサイズを要求するものではない。

また、NUPEC 試験においては表 4-10に示すように破断箇所、流量及び破断流組成及びスプレイの有無を変えた様々な条件により、水素の代替気体であるヘリウムの分布挙動が測定されている。

表 4-10に示すように、蒸気発生器基礎部及び加圧器逃がしタンクといった原子炉格納容器下部区画からの放出時においては流量及び破断流組成、スプレイの有無にかかわらず濃度成層化現象は確認されず、原子炉格納容器内は概ね一様に混合している。また、加圧器気相部破断のように破断位置が原子炉格納容器内の上部に位置し、さらに格納容器スプレイ等の循環流がないケースで試験が行われた Test M-8-1 では、破断位置より上方に熱成層化が生じ、これにより原子炉格納容器ドーム部の高さ方向及び下部区画との間で濃度差が生じるという濃度成層化現象が確認されたものの、Test M-8-1 と破断箇所及び流量及び破断流組成について概ね同様の条件であり、スプレイがある場合の試験として Test M-8-2 では、原子炉格納容器ドーム部においては Test M-8-1 と異なり濃度成層化現象は確認されなかった。

上記の破断箇所、流量及び破断流組成、スプレイの有無を変えた様々な条件で実施している NUPEC 試験の知見から、以下のとおり推測される。

- ・原子炉格納容器下部区画からの放出においては、放出量及びスプレイの有無にかかわらず原子炉格納容器ドーム部において濃度成層化現象は観察されない。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

・原子炉格納容器上部区画からの放出においては、

が観察されたが、スプレーがある場合においてはスプレーによる原子炉格納容器内の攪拌効果により濃度成層化現象は観察されなかった。これはスプレーに伴う水素の拡散及び混合が促進されるためと考えられる。実機プラントにおいては、本設の格納容器スプレーポンプよりも流量の少ない代替ポンプによる格納容器スプレーを実施することがあるが、代替ポンプによる格納容器スプレーが、事故時の原子炉格納容器冷却に必要となる液滴径は確保されており、また原子炉格納容器内の水素攪拌に必要な流量についても確保できていると評価される(添付3参照)。したがって、原子炉格納容器内における水素拡散及び混合の観点からも、代替ポンプによる格納容器スプレーが、本設スプレーと同様に原子炉格納容器全体における動的な攪拌効果及び蒸気凝縮による原子炉格納容器内の攪拌効果が期待できるといえる。

したがって、上記の NUPEC 試験の結果を踏まえると、実機解析においても多くのケースにおいて原子炉格納容器ドーム部の温度分布については概ね一様となると考えられることから、実機においても原子炉格納容器ドーム部のノーディングの差により解析結果において大きな差異が生じないと予測されるため、実機解析において原子炉格納容器ドーム部を [] により 1 つのボリュームを [] 分割としていることは妥当であると考ええる。

(3) 濃度成層化が生じる場合における原子炉格納容器ドーム部のノード分割について

(2) においては原子炉格納容器内の混合が十分になされている場合の原子炉格納容器ドーム部のノード分割について考察を行なったが、原子炉格納容器ドーム部において濃度成層化が発生する場合について考察を実施する。

原子炉格納容器ドーム部において濃度成層化が確認された NUPEC 試験のケースとして、NUPEC Test M-8-1 が挙げられる。Test M-8-1 は加圧器気相部破断を想定した試験であり、本試験において加圧器室内で発生したヘリウム及び水蒸気は加圧器室上端の開口部を經由して原子炉格納容器ドーム部へ直接放出されることから、原子炉格納容器ドーム部のヘリウム濃度が顕著に高くなることが同試験の特徴である。この挙動を GOTHIC コードで模擬するためには、加圧器室開口部から原子炉格納容器ドーム部への流れを適切に模擬する必要があり、原子炉格納容器ドーム部の分割を [] による [] 分割とし、検証解析を行った。なお、原子炉格納容器ドーム部の分割の概要を図 4-51 に示す。

上記のとおり原子炉格納容器ドーム部について分割をした際の原子炉格納容器のヘリウム濃度及び温度の GOTHIC コードによる解析結果と試験結果の比較を図 4-52 及び図 4-53 に示す。

原子炉格納容器のヘリウム濃度については図 4-52 に示すように、原子炉格納容器上下部の濃度差については、試験結果で確認される顕著な濃度差の予測には至らないものの、下部区画と比較して原子炉格納容器ドーム部でよりヘリウム濃度が高くなる傾向は再現することができた。また、破

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

断位置より上部においてヘリウムは高い濃度で均一になる傾向、すなわち原子炉格納容器ドーム部における成層化の傾向についても再現することができた。

原子炉格納容器の温度については図 4-53に示すように、原子炉格納容器のドーム部における温度測定点、蒸気発生器煙突部及び下部区画の温度を再現することができ、また原子炉格納容器ドーム部がその他の区画に比べ温度が高くなる傾向についても再現することができた。

以上の結果から、水素成層化するようなケースについても原子炉格納容器ドーム部のノード分割を細かくすることで、GOTHIC コードにより十分に再現可能である。

したがって、実機解析のノーディングについては基本的には格納容器ドーム部を [] [] により 1つのボリュームを [] 分割とすることで、水素濃度挙動等については十分に確認することができると考えられる。一方で水素成層化が懸念される場合については、流体の流れを再現するために、より細かいノーディングにより原子炉格納容器ドーム部を分割すれば良いと考えられる。

なお、濃度成層化が確認された試験として PANDA 試験もあるが、PANDA 試験は 2つの圧力容器が配管で接続された特殊な試験体系（ESBWR を想定）であり、接続配管で接続された別の DW に放出区画からヘリウムが移動して成層化が発生している（添付 2 参照）。しかし、PWR の原子炉格納容器においては PANDA 試験装置のような構造の箇所は存在しないため、このようなメカニズムによる成層化は考えられない。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 4-8 PWR と NUPEC 実験装置の比較

項目 \ プラント	2 ループ	3 ループ	4 ループ	NUPEC
プラント熱出力	1, 650 MWt	2, 652 MWt	3, 411 MWt	—
スプレイ系 (全能力)	2 トレイン	2 トレイン	2 トレイン	1 トレイン
原子炉格納容器内自由体積	42, 400 m ³	67, 900 m ³	73, 700 m ³	1, 300m ³

表 4-9 NUPEC 実験解析 (Test M-7-1) 及び 3 ループプラント解析の空間分割

	NUPEC実験解析	3 ループプラント
原子炉格納容器ドーム部		
下部		

() 内は原子炉格納容器内空間のセル数を示す。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 4-10 NUPEC 試験条件比較

試験条件	Test NO.	試験条件												成層化	
		CV 初期温度 (°C)		ヘリウム放出			水蒸気放出			スプレイ水			ヘリウム、水蒸気放出位置		
		流量 (kg/s)	時間 (min)	流量 (kg/s)	時間 (min)	ヘリウム、水蒸気温度 (°C)	温度 (°C)	流量 (kg/s)	時間 (min)						
CV 内ヘリウム濃度分布・混合試験 放出水蒸気による濃度分布・混合試験	M-2-2	RT	0.027	30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	蒸気発生器基礎部	なし
	M-2-3	RT	0.027	30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	加圧器逃がしタンク	なし
	M-4-1	RT	0.027	30	0.04	30	68	—	—	—	—	—	—	蒸気発生器基礎部	なし
	M-4-3	RT	0.027	30	0.33	30	115	—	—	—	—	—	—	蒸気発生器基礎部	なし
スプレイによるヘリウム濃度分布・混合試験	M-5-1	RT	0.027	30	—	—	—	—	—	—	RT	5 (18m ³ /h)	30	加圧器逃がしタンク	なし
	M-7-1	(初期) ~70	0.0 ↓ 0.03 ↓ 0.0	0 ↓ 15 ↓ 30	0.08 ↓ 0.03 ↓ 0.0	0 ↓ 15 ↓ 30	~110	(初期) 40	19.4 ↓ 19.4 (70m ³ /h)	0 ↓ 30	蒸気発生器基礎部	なし			
上部破断による混合試験	M-8-1	RT	0.027	30	0.33	30	115	—	—	—	—	—	—	加圧器逃がし弁 (加圧器室)	有り
	M-8-2	(初期) ~70	0 ↓ 0.033 ↓ 0	0 ↓ 15 ↓ 30	0.08 ↓ 0.03 ↓ 0	0 ↓ 15 ↓ 30	90	40	19.4 ↓ 19.4 (70m ³ /h)	0 ↓ 30	加圧器逃がし弁 (加圧器室)	なし			

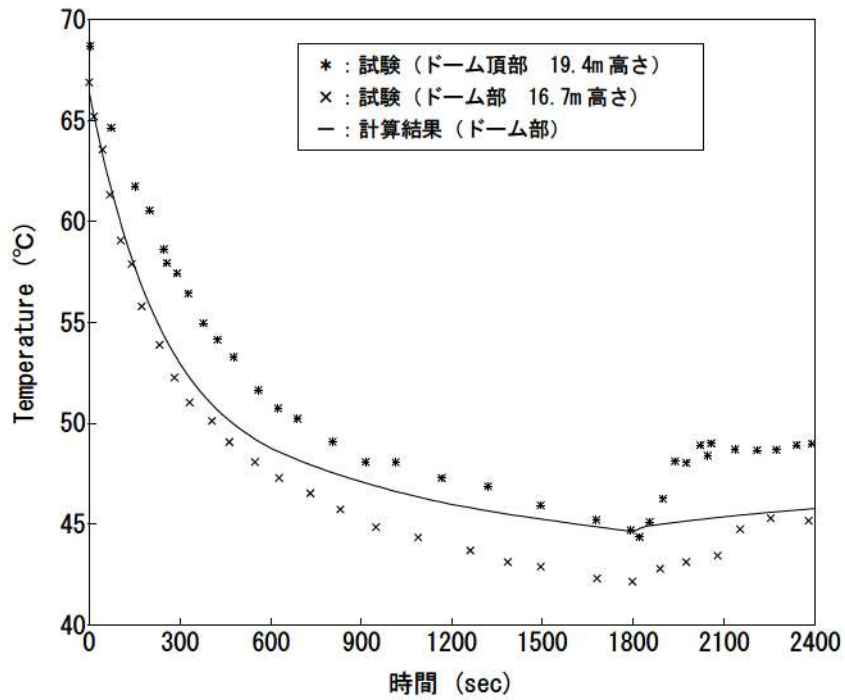


図 4-49 解析結果（原子炉格納容器ドーム部1区画模擬） 原子炉格納容器ドーム部温度分布 (Test M-7-1)

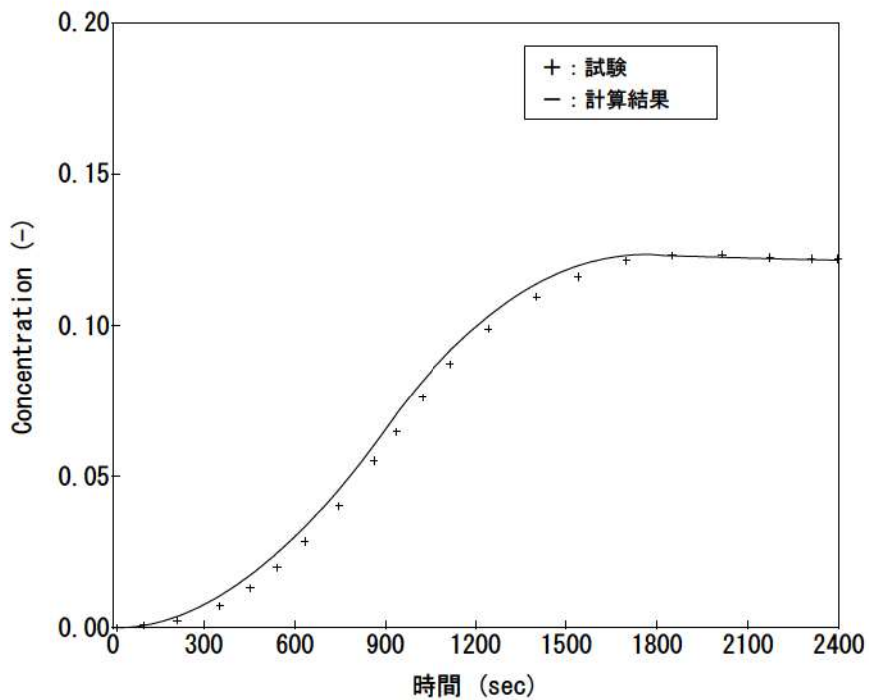


図 4-50 解析結果（原子炉格納容器ドーム部1区画模擬） 原子炉格納容器ドームヘリウム濃度 (Test M-7-1)

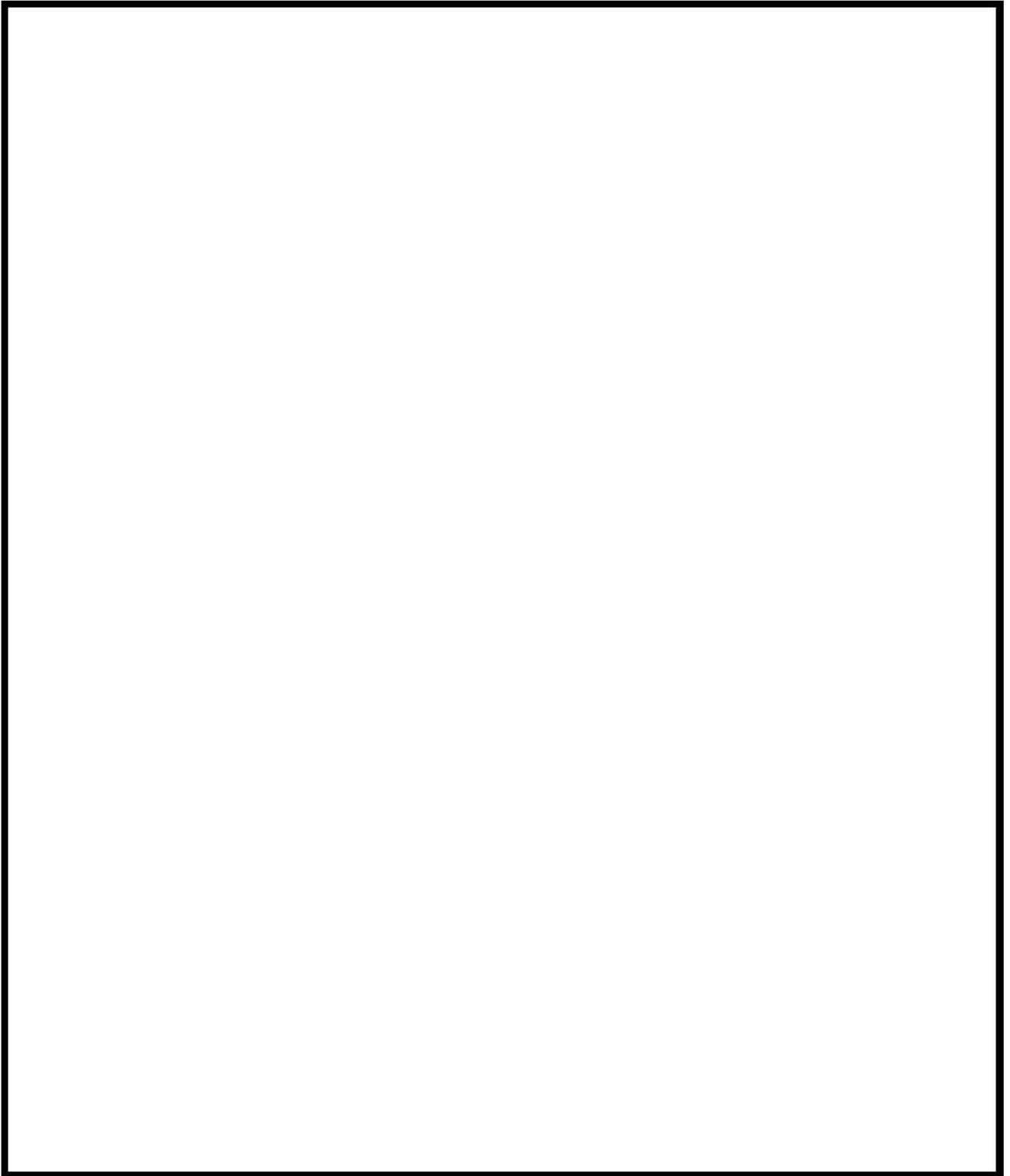
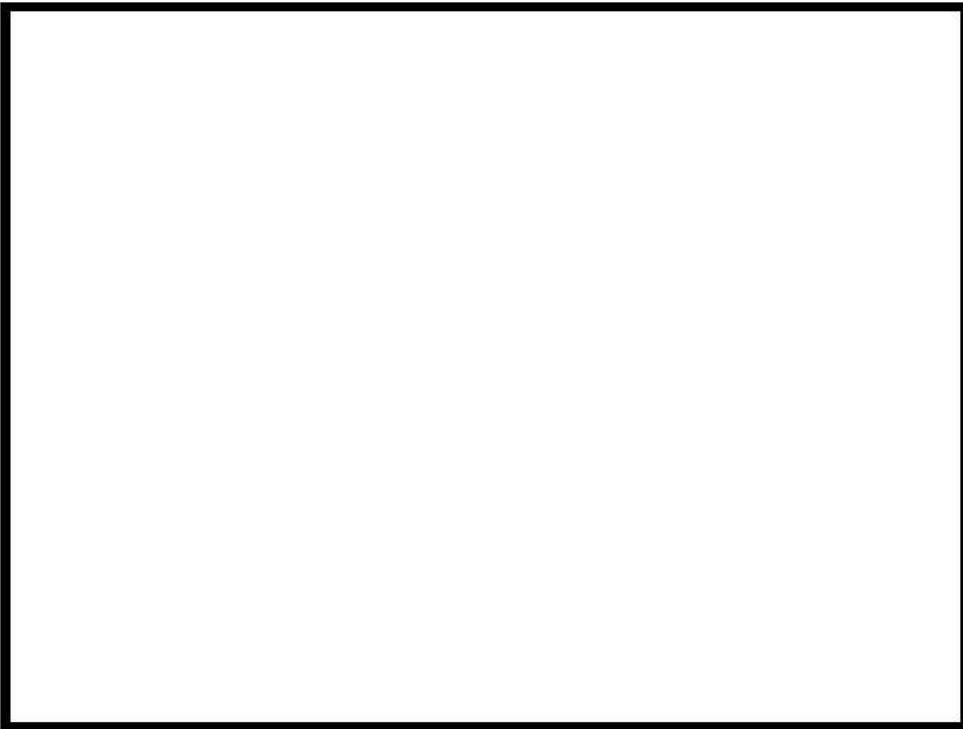


図 4-51 Test M-8-1 原子炉格納容器ドーム部ノーディング図

枠囲いの内容は、機密に属します
ますので公開できません。



(a) 試験結果



(b) 解析結果

図 4-52 原子炉格納容器ドームヘリウム濃度 (Test M-8-1)

枠囲いの内容は、機密に属しますので公開できません。



(a) 試験結果



(b) 解析結果

図 4-53 原子炉格納容器内温度分布 (Test M-8-1)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

4.8.2 構造材との熱伝達及び内部熱伝導

(1) 熱構造材との熱伝達

実機解析に用いられる熱構造材表面、界面に対する熱及び物質伝達の挙動は、上記の NUPEC 試験検証解析結果により、適切に原子炉格納容器圧力及び温度を予測し、さらに、流動モデルと相まって、水素の拡散及び混合挙動を適切に模擬されることが確認された。また、実機プラント解析に適用される熱伝達モデルの中でも、水素濃度に影響する凝縮熱伝達において主要となる内田モデルについて、各種の試験データとの比較からモデルの予測特性を確認した。同モデルのバラつきを包絡する大きい凝縮熱伝達を実機プラント解析に適用することで蒸気凝縮を促進し、ウェット条件での水素濃度を大きく評価することを指向している。構造材の凝縮熱伝達を大きくすることの影響は、雰囲気と構造材に温度差が生じる期間に有効となるが、有効性評価のシナリオではスプレーが継続してこれによる凝縮が支配的となること、また、原子炉格納容器ドーム部については雰囲気と構造材が熱平衡に漸近する期間が長いことからその影響は限定的である。

NUPEC 試験について、実機プラント解析に用いる構造材凝縮熱伝達モデルを適用した感度を 4.3.1 章で確認したが、その影響は小さい。また、NUPEC 試験解析で用いた DLM-FM モデルを実機プラント解析に適用した場合の感度評価を示すが、原子炉格納容器圧力、温度及び水素濃度に与える影響は小さいことを以下のとおり確認している。

(2) 実機プラント解析における構造材凝縮熱伝達モデルの感度解析について

実機プラントにおける「水素燃焼」における評価事故シーケンスとして選定される「大破断 LOCA + ECCS 注入失敗（格納容器スプレー成功）」に対し、構造材の凝縮熱伝達係数としてより最適評価性の高い DLM-FM モデルを適用した場合の感度影響について以下に確認する。対象は 3 ループ PWR プラントであり、ベースケースの構造材凝縮熱伝達モデルでは Gido-Koestel と内田の最大値に を乗じている。

図 4-54 及び図 4-55 に原子炉格納容器ドーム部の圧力及び雰囲気温度について、ベースケースと感度ケースの比較を示す。同様に図 4-56 及び図 4-57 に原子炉格納容器平均のドライ換算及びウェット換算の水素濃度を示す。

図 4-54 及び図 4-55 より、構造材凝縮熱伝達モデルが原子炉格納容器圧力及び温度に与える影響が小さいことが示される。これは、当該事故シーケンスではスプレー冷却が有効に作用するため、原子炉格納容器からの除熱に占める構造材ヒートシンクの影響が小さいためである。また、ドライ及びウェット換算の原子炉格納容器平均の水素濃度にもケース間の差異は見られない。このように、構造材の凝縮熱伝達に保守的なモデルを用いても評価事故シーケンスに対する重大事故等対策有効性評価の結果に大きく影響しないことが分かる。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

上記のように長時間にわたる事故シーケンスの評価では、原子炉格納容器の構造材と雰囲気温度が熱平衡状態に漸近し、温度差がつきにくくなることから、熱伝達モデルの差異が現れにくい。しかし、原子炉1次冷却系からの蒸気放出が著しく増加する、また、スプレイ停止が生じた場合の直後等、構造材と雰囲気が熱的に非平衡な状態に遷移する一時的な期間、熱伝達モデルの差異が現れてくる。特に、実機プラント解析に適用する凝縮熱伝達を大きく評価するモデルでは、蒸気凝縮が進み、ウェット換算の水素濃度が大きく評価される傾向になる。

したがって、有効性評価に対する感度解析ではその効果が表れにくいものの、実機プラントの解析では凝縮熱伝達を大きく評価するモデルを採用している。

以上より、構造材との熱伝達は、原子炉格納容器内の雰囲気と構造材の温度差が著しくなる期間にのみ影響が現れ、事故後の緩やかな過渡条件下ではモデル差の影響は小さい。したがって、個別効果的に検証されたモデルに対して、そのバラつきを包絡する大きい凝縮熱伝達を適用すれば、有効性評価結果に大きな歪を与えることなくウェット換算の水素濃度を保守側に予測できる。

(3) 構造材の内部熱伝導

解析解との比較により、GOTHIC コードは構造物内の熱伝導を精度よく解くことが確認できた。また、NUPEC 試験解析では原子炉格納容器の構造材を実機と同様にモデル化しているが、前述のとおり、コードは原子炉格納容器圧力、温度及びヘリウム（水素）の挙動を良好に予測している。このことから、構造材内部の熱伝導モデルは十分に実機に適用できるものである。

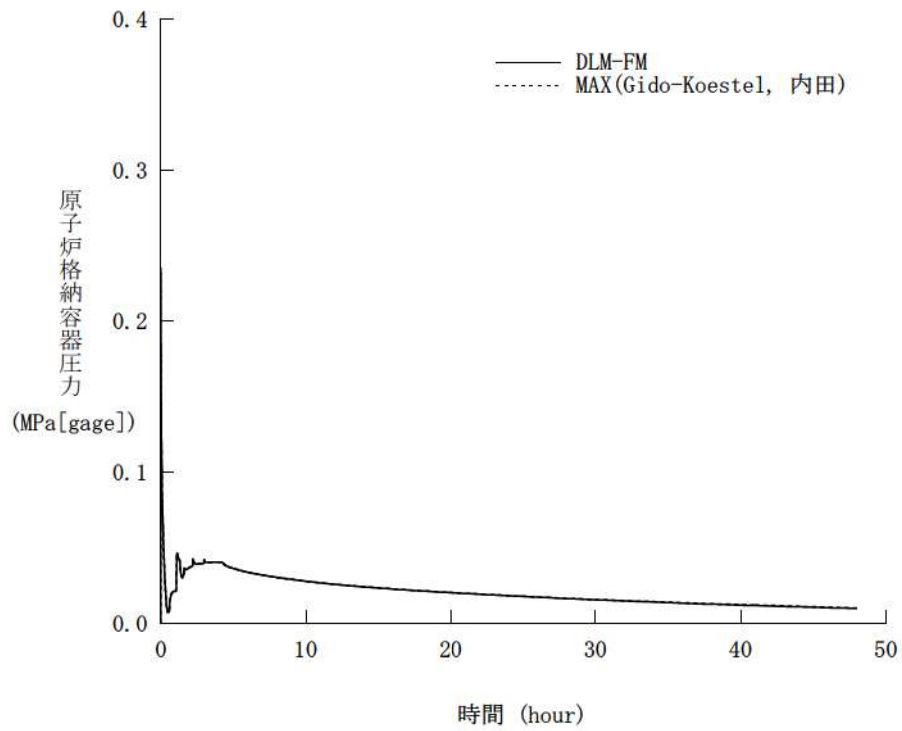


図 4-54 構造材凝縮熱伝達モデル感度 (原子炉格納容器圧力)

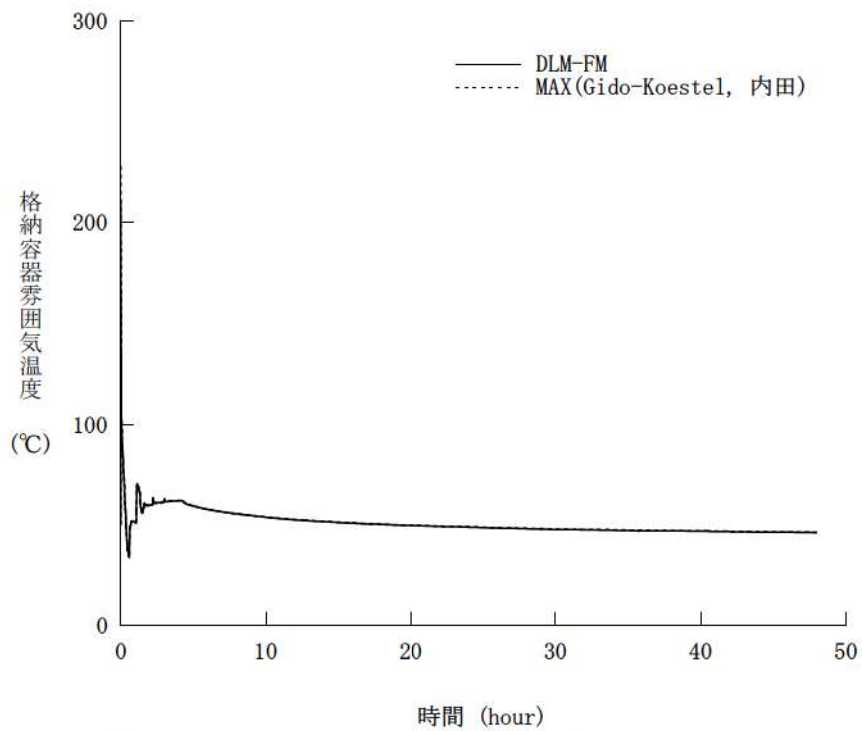


図 4-55 構造材凝縮熱伝達モデル感度 (原子炉格納容器雰囲気温度)

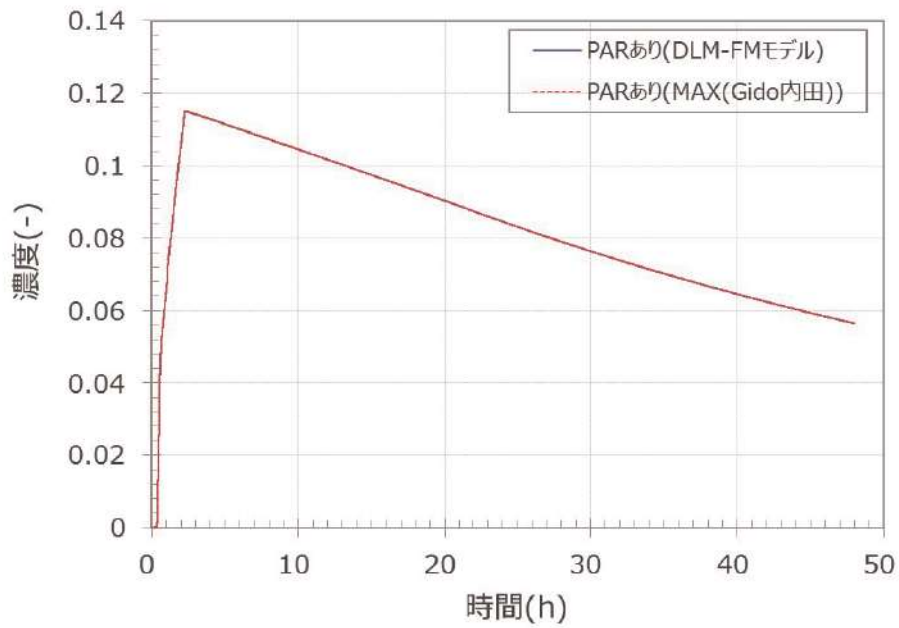


図 4-56 構造材凝縮熱伝達モデル感度 (原子炉格納容器平均水素濃度, ドライ換算)

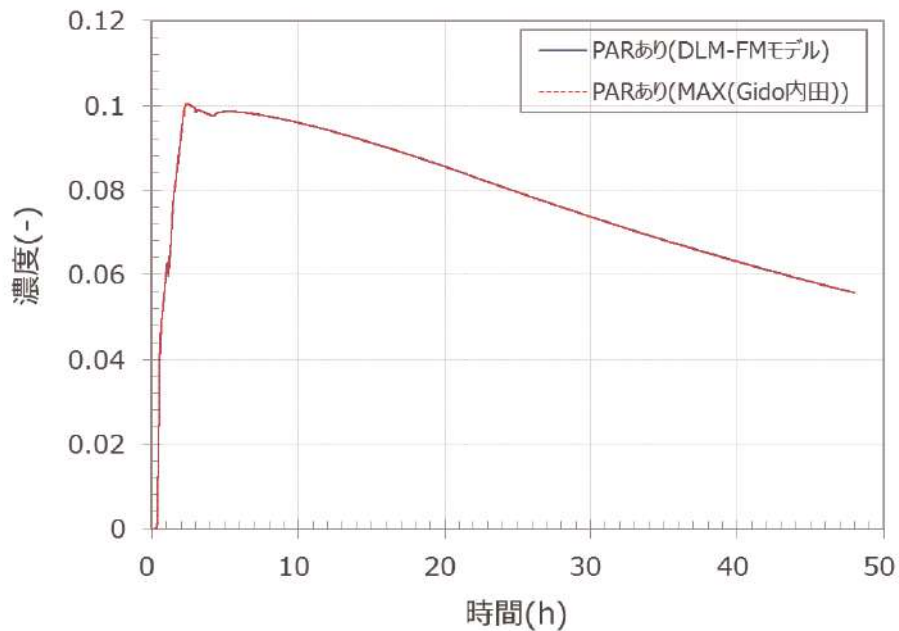


図 4-57 構造材凝縮熱伝達モデル感度 (原子炉格納容器平均水素濃度, ウェット換算)

4.8.3 スpray冷却

スプレイによる原子炉格納容器圧力及び温度挙動に与える影響、また、原子炉格納容器ドーム部における蒸気凝縮と水素の拡散及び混合挙動の予測が重要となるが、NUPEC 実験解析において、スプレイ冷却の有無を含めて、GOTHIC コードはこれを適切に模擬できることが確認された。コードは、スプレイ水と流体との質量、エネルギー及び運動量交換を直接的に模擬できる3流体モデルを採用しており、スプレイ特性として液滴径、流量及び温度が設定されれば、これらスプレイによる効果は適切に模擬される。したがって、スプレイに係る流体モデルは実機プラント解析にも十分に適用できる。

4.8.4 水素処理

4.8.4.1 PARによる水素処理モデルの実機適用性検討

水素処理設備であるPARについては、GOTHIC コードにその特性モデルを組み込む。これは製造元により整備された性能評価式が含まれ、水素処理（再結合）に関する理論評価値との比較により検証した。また、THAI 試験 HR-3 による検証解析を実施し、実機への適用性を以下のとおり検討した。

(1) 実機条件と試験条件の比較

実機条件と試験条件について表 4-5及び表 4-6に記載する。表 4-6のとおり、圧力、温度及び水素放出量については実機条件と試験条件は同等である。

(2) PAR 単体によるスケーリング効果

PAR は同一規格の触媒プレート（幅 290mm、高さ 140mm の両側に触媒が付いている薄板）を複数枚同じ間隔（10mm）で並べ、下方から水素を含むガスが通り抜ける時の触媒反応で水素を処理するものである。ここで、THAI 試験の PAR と各プラントにおいて設置した PAR の触媒プレートは実機で使用しているものと同じ規格であり、設置する間隔も同じである。したがって、触媒プレート間で形成される流路断面形状が同じとなるため、水素濃度が同じであれば触媒の発熱によって触媒プレート間に生じる上昇流の流速も同じとなる。このため、PAR の触媒反応を律する拡散現象も同等と考えられ、いずれの PAR も触媒との相互作用は同じとなる。

(3) PARによる水素処理に伴う水素濃度の局所的な濃度分布の影響

A. THAI 試験において見られた水素滞留現象の実機プラントにおける発生可能性

THAI 試験における水素の濃度分布（主に容器内シリンダ下部における滞留）は、水素放出及

び PAR による上昇流と下降流が拮抗してしまうことにより発生すると考えられる。THAI 試験装置のように系のサイズが小さく空間分割が少ない空間においては、各部の断面積及び水力等価径が小さいことから気相部の流動に対する自由度が低い。そのような系であるシリンダに対しては、上部の圧力が高いことから垂直方向上向き的一次元的な流れが阻害されていると推測される。

しかし、実機プラントにおいては、事故時において下部区画に放出された水素は各ループ室間あるいは外周部の周回流等の平面方向における区画間の流れに加え、蒸気発生器区画と原子炉格納容器ドーム部、外周部と原子炉格納容器ドーム部の上昇及び下降流により原子炉格納容器内の巨視的な流れにより拡散していくことから気相部の流動に対する自由度が高いといえる。また、PWR の原子炉格納容器は区画間の循環を生じさせる思想に基づいた配置設計がなされており、特に原子炉格納容器ドームと下部区画の垂直方向の接続には多様性が存在するため、水素の滞留が生じるような流況は見られにくい。したがって、実機プラントは THAI 試験と比較すると、上記のように空間的な特性が異なることから、試験と同様な水素の滞留が発生することは考えにくい。

B. PAR 排気による PAR 入口における水素濃度への影響

濃度分布の観点では、試験体系が小さい場合は PAR 出口からの排気により PAR 入口近傍における局所的な濃度分布が生じることで、PAR 入口における水素濃度の測定値と、実際に PAR に流入する水素濃度との間に差異が生じることが考えられる。しかしながら、THAI 試験は 60m^3 の試験容器を用いており、試験に用いた PAR の発熱によるガス流量は約 $0.07\text{m}^3/\text{s}$ （試験における実測値と設備形状に基づく）であり、1 秒間あたりのガス処理量は試験容器全体の約 $1/1,000$ （体積比）であるため、PAR 出口からの排気が PAR 入口近傍における局所的な濃度分布に影響を与えることは考えにくい。

以上より、THAI 試験体系においても実機体系においても、PAR 排気に伴う水素濃度の局所的な濃度分布による影響は小さいといえる。

(4) PAR 内を上昇する流量の影響

PAR 内を上昇する流量が大きい方が水素処理は増加する。一方で、PAR 内の流量が大きいと、触媒表面の除熱が促進され、触媒温度の低下に伴う処理効率低下が考えられる。THAI 試験における PAR 触媒表面温度は、水素濃度 $4\text{vol}\%$ 時において約 600°C （試験実測値）まで上昇しているが、この場合に PAR 出口で生じる上昇流は高々 $1\text{m}/\text{s}$ 程度（試験実測値）である。一方、触媒温度を有意に低下させるような PAR 内を通過する強制対流は、单相を仮定すると計算上では数十 m/s 程度である。実機プラントに設置する PAR は、処理蒸気が上部側面から放出される設計であり、原子炉格納容器内の対流により PAR 内が強制対流となるような状況は起こりえず、触媒温度の低下に伴い水素処理効率が低下することはない。

また、水素燃焼により PAR 及び周辺の流体状況に変化が及んだ場合も、水素処理性能に不可逆

的な変化が生じていることは図 4-38からは特段認められない。

(5) 水素濃度分布に伴う GOTHIC コードによる評価への影響

GOTHIC コードで用いられている PAR の性能評価式は PAR 入口における水素体積比ではなく、PAR を配置している区画の水素体積比を処理量計算の入力としているため、PAR 入口近傍において水素濃度分布が生じるような体系であれば、実際の水素処理量と評価値の間に差異が生じる (PAR 排気を再び吸い込むため、定性的には水素濃度がやや過小に評価される)。

しかしながら、(3) で示したとおり、実機においても THAI 試験体系においても PAR 入口近傍の局所における水素濃度分布の影響は小さいと考えられ、GOTHIC コードにおいて区画における水素体積比を入力と用いても、影響は軽微であると考えられる。

また、(4) において示したように、原子炉格納容器内部の対流が PAR の水素処理能力を低下させる状況は考えにくく、GOTHIC コードにより PAR の作動を模擬する際、設置区画における流れの状態が影響を及ぼすことはないといえる。

なお、解析においては燃焼を模擬していないため、PAR において燃焼が生じるような場合においては、水素処理量を小さく見積もるため、解析結果は保守的な水素濃度を与えることとなる。

(6) GOTHIC コードによる PAR の空間設置模擬手法による影響

GOTHIC コードによる実機プラントの評価では、PAR を比較的大きな体積の分布定数系セルあるいは集中定数系ボリュームに設置している。これにより、PAR 出入口における局所的な濃度分布は PAR が存在する有限体積内で一様となり、その結果 PAR 排気によって体積内の水素濃度が低く計算されるため、影響は軽微であるものの計算上は水素処理量が定性的に低下する傾向となる。ただし、THAI 試験における解析体系を 1 区画及び多区画により模擬した際において、水素処理量に大きな差が見られなかった。このことから、実機解析の結果に対しても PAR が設置される有限体積ボリュームの大きさにより有意な感度がないと判断できる。

以上の考察から、THAI 試験より得られた検証結果を実機に適用すること及び実機体系における PAR 設置空間模擬手法は妥当であると考えられる。

4.8.4.2 イグナイタによる水素燃焼の実機適用性

同じく、イグナイタにより発生する水素燃焼の評価に対しては、燃焼が想定される空間に対してコードの内部モデルを適用する。このモデルは、コード開発元により解析解との比較を行うことで妥当性が検証されている。

個別効果的なモデル組込みの検証に限られるものの、水素処理設備は、周辺の水素再結合を評価するものであることから、①設備の特性が適切に模擬され、また、②その効果を考える区画若しくはノードに対し実プラントでの設備配置を適切に考慮することにより、実機プラントの水素濃度評

価は適切に行える。

4.8.5 まとめ

以上より、本章に記載している妥当性確認結果より得られた不確かさについても、実機 PWR の有効性評価解析に適用できるといえる。重要現象に対する GOTHIC コードの不確かさを表 4-11に示し、実機解析における不確かさの取扱いを 5 章にて述べる。

表 4-11 重要現象に対する不確かさ

分類	重要現象	解析モデル	検証, 妥当性確認	不確かさ
原子炉格納容器	区画間・区画内の流動	保存式, 流動を模擬する構成式及び相関式	NUPEC 試験 Test M-7-1 NUPEC 試験 Test M-4-3	ヘリウム濃度のコード予測性から, モデル不確かさが各区画の水素濃度予測に与える影響は約 2.4%と推定
		非凝縮性ガスの輸送モデル		
		ノーディングスキーム		
	構造材との熱伝達及び内部熱伝導	多相流モデル	NUPEC 試験 Test M-7-1 NUPEC 試験 Test M-4-3	区画間・区画内の流動と同じ
		熱伝達モデル	熱伝達試験との比較	流動に影響する凝縮熱伝達モデルについて±40%程度
		熱伝導モデル	熱伝導解析解との比較	不確かさはない
	スプレイ	多相流モデル	NUPEC 試験 Test M-7-1	区画間・区画内の流動と同じ
		界面積モデル		
		界面伝達モデル		
	水素処理	PAR 特性モデル	PAR 特性検証 THAI 試験 HR-3	実規模試験に基づき, 製造元が供給する水素処理に係る性能評価式を使用(組込誤差約 0.3%) THAI 試験再現性より, 水素処理量を少なく予測する傾向となる。
イグナイトによる水素燃焼モデル		イグナイトによる水素燃焼モデルの検証	コード開発元による解析解との比較により, 圧力で 0.5%, 温度で 1%	

5. 有効性評価への適用性

4章に記載した試験解析をふまえ、重要現象についての不確かさ、及びその不確かさが評価指標の視点と運転員等操作の視点から有効性評価解析へ与える影響について表 5-1に纏めた。以下にその不確かさについて記述する。

5.1 不確かさの取扱いについて（評価指標の観点）

5.1.1 区画間・区画内の流動

原子炉格納容器の水素濃度に影響する重要モデルの1つとなる区画間・区画内の流動及びスプレイ冷却について、NUPEC 試験解析を行うことで、コードが現象を適切に予測できることが確認された。実機プラントの重大事故等対策の有効性評価で想定するシナリオは、大破断 LOCA を起因事象としたスプレイ継続を仮定する事故シーケンスとなることから、原子炉格納容器内の流体の攪拌が大きく、水素濃度は均一化する傾向にある。NUPEC 試験は同様の事故シーケンスを模擬したものであり、その傾向が実験的にも確認され、かつコードもこの傾向を適切に予測している。NUPEC 試験検証解析では、原子炉格納容器内の各区画で測定されたヘリウム濃度のピーク値に対し、解析予測のバラつきは約 2.4%（測定誤差の大きい破断区画及びループ室を除く。含めた場合約 4.4%）となる。

5.1.2 構造材との熱伝達及び内部熱伝導

また、構造材との熱伝達及び内部熱伝導のうち、水素濃度評価に影響する凝縮熱伝達モデルについては、コードに組み込まれるモデルと試験データとのバラつきを評価し、その不確かさを同定した。実機プラント解析への適用においては、その不確かさを包絡するよう凝縮熱伝達モデルを設定し、ウェット条件換算の水素濃度を保守的に予測するアプローチとしている。原子炉格納容器内流動並びに水素濃度に影響する凝縮熱伝達モデルについて、実機プラント解析で用いるモデルは約 40%の不確かさを有する。これを包絡する実機プラント解析用のモデルと、不確かさが約 20%となり最適評価性の高い DLM-FM モデルを NUPEC 検証解析及び実機プラント解析に適用し、両者を比較したとしてもヘリウム濃度及び水素濃度に与える影響は無視できる程度であることを確認している。

5.1.3 水素処理

水素処理設備となる PAR については、製造元が供給する水素処理特性モデルが GOTHIC コードに組み込まれることを検証した。実機プラント解析では、PAR 設置位置を考慮した原子炉格納容器ローディングとし、設備周辺の水素濃度等の環境が適切に考慮されるようモデル化している。THAI 試験を対象とした実験解析より、水素処理量は定性的に小さく見積もることとなり、特に PAR にお

いて燃焼が生じる場合においてその傾向は顕著に現れる。実機プラント解析においては水素処理量を小さく見積もるため、水素濃度の解析結果については保守的な値となる。また、イグナイタによる水素燃焼モデルに対しては、コード開発元により解析解との比較が行われており、その誤差はごく軽微であり水素濃度の評価値に与える影響が無視できる程度であるといえる。

なお、NUPEC 検証解析において、GOTHIC コードは、破断区画からの経路の一部で局所的かつ過渡的な水素濃度の変化を過小評価する可能性があることが確認された。これは試験装置では蒸気及び非凝縮性ガスが上方放出となり流れの異方性が大きく、ヘリウム流量が減少に転じた際、側面に隣接する区画への流れをコードが過大に予測するためである。これは、実機プラント解析においては、原子炉 1 次冷却系からの水素の流出が減少する際に、広大な原子炉格納容器ドーム部への経路において水素濃度を過小評価する傾向となるが、側面に隣接する相対的に狭い原子炉下部キャビティや外周区画への水素の流入を一時的に過大に予測する傾向となることを示している。また、このように放出口から原子炉格納容器ドーム部に至るまでの水素の流れに差異が見られたとしても、スプレイの有無にかかわらず、原子炉格納容器ドーム部の水素濃度は適切に予測できることが NUPEC 試験解析にて確認されている。以上より、NUPEC 試験解析で見られた一時的かつ局所的なヘリウム濃度の予測の不確かさは、実機プラントの重大事故等対策の有効性評価に影響を与えるものではないと判断できる。

以上、解析コードの凝縮熱伝達モデル、流動並びにスプレイ冷却に係るモデルが有する不確かさが、原子炉格納容器内の各区画の水素濃度に与える影響は限定的であり、また、実機プラントの評価上、最も重要となる原子炉格納容器ドーム部の水素濃度をコードは良好に予測することができるものと判断される。

5.2 不確かさの取扱いについて（運転員等操作の観点）

GOTHIC コードによる水素燃焼解析は、MAAP コードによって検討された事象進展を反映することにより実施する。したがって、運転員等操作の設定は MAAP コードのものを受け継ぐ。

水素分布評価の観点から運転員等操作に反映される項目はない。

表 5-1 重要現象に対する不確かさの取扱い

分類	重要現象	解析モデル	不確かさ	有効性評価解析への影響
原子炉格納容器	区画間・区画内の流動	保存式, 流動を模擬する構成式及び相関式	NUPEC 検証解析より水素濃度に与える影響を推定	ヘリウム濃度のコード予測性から, モデル不確かさが各区画の水素濃度予測に与える影響は約 2.4%と推定
		非凝縮性ガスの輸送モデル		
		ノーディングスキーム		
	構造材との熱伝達及び内部熱伝導	多相流モデル	NUPEC 検証解析より水素濃度に与える影響を推定	区画間・区画内の流動と同じ
		熱伝達モデル	流動に影響する凝縮熱伝達モデルについて±40%程度	モデル感度解析により水素濃度への影響は無視できることを確認
		熱伝導モデル	解析解と一致	なし
	スプレイ	多相流モデル	NUPEC 検証解析より水素濃度に与える影響を推定	区画間・区画内の流動と同じ
		界面積モデル		
		界面伝達モデル		
	水素処理	PAR 特性モデル	実規模試験に基づき, 製造元が供給する水素処理に係る性能評価式を使用 (組込誤差約 0.3%) THAI 試験再現性より, 水素処理量を常に少なく予測する傾向となる。	燃焼が生じる水素濃度範囲においては, 水素処理量を少なく予測する傾向となる。
イグナイタによる水素燃焼モデル		イグナイタの水素燃焼モデルの検証により推定	コード開発元による解析解との比較により, 圧力で 0.5%, 温度で 1%	

6. 参考文献

- [1] 原子力規制委員会「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」原規技発第 13061915 号, 平成 25 年 6 月 19 日制定
- [2] 三菱 PWR 格納容器損傷に係る重要事故シーケンスへの GOTHIC コードの適用性について, MHI-NES-1057 改 0, 三菱重工業, 平成 25 年
- [3] McAdams, W. H., Heat Transmission, Third Edition, McGraw-Hill, New York, 1954.
- [4] Dittus, F. W., and L. M. K. Boelter, University of California, Publ. Eng., 2, 443, 1930.
- [5] Uchida, H., A. Oyama and Y. Togo, Evaluation of Post-Incident Cooling Systems of Light Water Power Reactors, U. of Tokyo, International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, New York, 1965.
- [6] Tagami, T., Interim Report on Safety Assessments and Facilities Establishment Project in Japan for Period Ending June 1965 (No. 1), unpublished work, 1965.
- [7] Gido, R. G., and A. Koestel, Containment Condensing Heat Transfer, Second International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Santa Barbara, CA, January, 1983.
- [8] Electric Power Research Institute, “GOTHIC Containment Analysis Package Technical Manual version 7.2a(QA)”, EPRI Product 1013072, NAI 8907-06 Rev.16, January 2006
- [9] 凝縮熱伝達相関式に関わる SAFE プロジェクト報告書
- [10] MH Anderson, “Steam Condensation on Cold Walls of Advanced PWR Containments”, PhD Dissertation, University of Wisconsin, Madison, 1998
- [11] I Huhtiniemi, A Pernsteiner and ML Corradini, “Condensation in the Presence of a Noncondensable Gas: experimental Investigation”, Dept. of Nuclear Engineering and Engineering Physics, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, April 1991.
- [12] AA Debhi, “The Effects of Noncondensable Gases on Steam Condensation Under Turbulent Natural Convection Conditions”, Ph. D. Thesis, Department of Nuclear Engineering, MIT, 1991.
- [13] RC Shmitt, GE Bingham and JA Norberg, “Simulated Design Basis Accident Tests of the Carolinas Virginia Tube Reactor Containment – Final Report”, Idaho Nuclear Corporation, Idaho Falls, Idaho, prepared for the US Atomic Energy Commission, UC-80, December 1970.

- [14] Investigation of the Phenomena Occurring within a Multi-Compartment Containment after Rupture of the Primary Cooling Circuit in Water-Cooled Reactors, Technischer Bericht BF RS 50-32-C13-1, Battelle-Institute e. V., 6000 Frankfurt am Main 90, Am Romerhof 35, Postfach 900160, July, 1976, (German).
- [15] Investigation of the Phenomena Occurring within a Multi-Compartment Containment after Rupture of the Primary Cooling Circuit in Water-Cooled Reactors, Technischer Bericht BF RS 50-32-C15-1, Battelle-Institute e. V., 6000 Frankfurt am Main 90, Am Romerhof 35, Postfach 900160, July, 1976, (German).
- [16] Die Containment-Versuchsanlage (C-und D-Versuche), Detailbericht BF-RS 50-21-1, Battelle-Institute e. V., 6000 Frankfurt am Main 90, Am Romerhof 35, Postfach 900160, March, 1978, (German with English Summary). Design Report for the HDR Containment Experiments V21.1 to V21.3 and V42 to V44 with Specification for the Pre-Test Computations, Report No. 3.280/82, January, 1982.
- [17] PHDR 38-83, Test V44, May, 1983.
- [18] W. Nusselt, Z. VDI, 60, P. 541-569, 1916
- [19] 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 「溶接部等熱影響部信頼性実証試験 (原子炉格納容器) に関する報告書 (平成 4 年度)」, 平成 5 年 3 月
- [20] NUPEC, “Final Comparison Report on ISP-35: NUPEC Hydrogen Mixing and Distribution Test (Test M-7-1) ”, CSNI Report NEA/CSNI/R(94)29, December, 1994.
- [21] Electric Power Research Institute, “GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE QUALIFICATION REPORT Version 7.2a(QA)”, EPRI Product 1013072, NAI8907-09 Rev9, January 2006.
- [22] Reactor Safety Research Project 150 1326 OECD-NEA THAI Project(contract 18 July 2007) Quick Look Report Hydrogen Recombiner Tests HR-1 to HR-5, HR-27 and HR-28 (Tests without steam, using an Areva PAR)

添付1 解析コードにおける解析条件

表 解析コードにおける解析条件

分類	解析条件	
原子炉格納容器関連データ	区画データ	自由体積
		底部高さ
		区画高さ
		初期圧力
		初期温度
	区画間データ	底部高さ
		開口高さ
		断面積
		水力等価径
		圧力損失
	ヒートシンク（伝熱面， 表面積，厚さ，材質の物 性，初期温度）	原子炉格納容器ドーム部及びリングガータ
		原子炉格納容器シリンダ部
		原子炉格納容器コンクリート
		スチールラインドコンクリート
		雑鋼材（炭素鋼）
雑鋼材（ステンレススチール）		
雑鋼材（銅フィン及びチューブ）		
配管（ステンレススチール（内部に水有））		
配管（ステンレススチール（内部に水無））		
配管（炭素鋼（内部に水有））		
配管（炭素鋼（内部に水無））		
検出器等（アルミニウム）		
境界条件データ	破断流	圧力
		温度（あるいはエンタルピ）
		流量
	水素	圧力
		温度（あるいはエンタルピ）
		流量
溶融炉心及び核分裂生成物による発熱	発熱量	
事象収束に重要な機器及び操作関連	PAR	<input type="text"/> 及び <input type="text"/>
	スプレイ	<input type="text"/> 流量 温度

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

添付2 PANDA 試験

濃度成層化発生については OECD/CSNI で実施された PANDA 試験において、成層化事象が発生していると報告されている。以下では PANDA 試験の概要及びその実験解析結果について示す。

(1) PANDA 試験装置 (参考文献1)

PANDA 試験装置は、ESBWR(Economic Simplified Boiling Water Reactor)の格納容器と安全系を実機の1/40にスケールダウンしたものである。付図2-1に示すように、PANDA 試験装置は6つの大型圧力容器から構成されている。

1つは蒸気生成を目的とした原子炉容器(RPV)である。RPVは出力系として2本の主蒸気ラインにてドライウェル(DW)と接続されている。RPVへの入力ラインは受動的格納容器冷却(PCC)ドレンラインと重力駆動冷却系(GDCS)ドレンラインである。

2つのDWは高さ8mの円筒型容器であり、各々が大口径の接続配管で接続されている。DWの出力はDWの頂部とPCC熱交換器の上部ドラムと接続するPCCフィードラインである。

2つのWWは高さ10.11mの円筒型容器であり、約4mの水位で水が満たされ、各々が2本の大口径の配管で気相部と液相部で接続されている。WWはPCCベントライン経由でPCC熱交換低ドラムと、2本の圧力均衡ライン経由でGDCS気相部と各々接続されている。

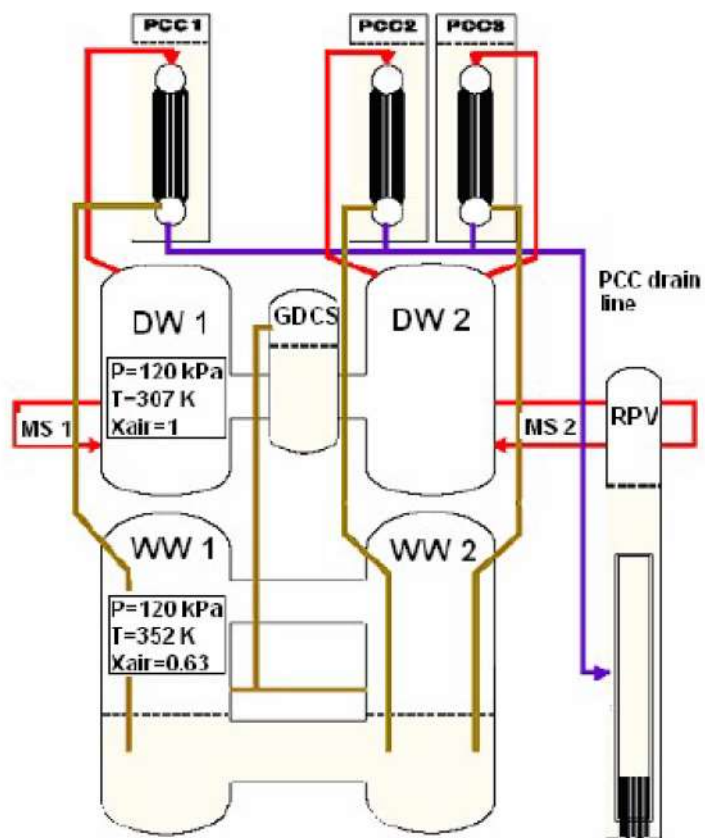
(2) PANDA 試験概要 (参考文献2)

PANDA 試験は、PANDA 試験装置のうち、内径0.9mの連結管で接続された直径4m、高さ8m、容積90m³の円筒型圧力容器2体からなるドライウェルを対象として、放出ジェット流や自然対流、水素成層化等の事故時の格納容器内の諸現象を対象とした、自由区間における混合気体の3次元挙動及び多区画形状容器内における移行、混合、濃度分布の3次元挙動の詳細を把握し、緩和系の効果や解析コードの検証のためのデータの提供を目的としている。

LOCA等を想定した1次冷却系からの高速ジェット吹き出し流及び緩やかな吹き出し流(プルーム)の2種類のパターンを中心に以下の5つのシリーズからなる計25ケースの試験が実施された。

- ・水平ジェット流試験(水蒸気及び空気系) Test-1~4
- ・水平ジェット流試験(水蒸気及びヘリウム系) Test-5~8
- ・器壁近傍のプルーム挙動試験 Test-9~17
- ・自由空間中のプルーム挙動試験 Test-18~24
- ・総合試験(水蒸気、ヘリウム及び空気系) Test-25

上記の試験のうちヘリウム濃度の成層化が確認された総合試験であるTest25については、実験解析と共に以降で説明する。



付図 2-1 PANDA 試験装置

(3) PANDA 試験解析

NAI(Numerical Applications Inc.)社と PSI(Paul Scherrer Institut)により執筆された文献(参考文献3)において、PANDA 試験の Test 25 に対し GOTHIC コードによる再現解析が実施されている。本解析は、PANDA 試験 Test 25 における配管で接続されたタンク(付図 2-2)間の蒸気及びヘリウムの移流に起因する蒸気の熱成層並びにヘリウムの成層化に対して、詳細なセル分割を採用することで GOTHIC コードが再現性能を有することを確認するものである。対象となる試験設備と条件を付表 2-1 及び付表 2-2 に示す。

対象となる試験では空気が満たされたタンク(DW)の片側に、内部の上向きノズルを経てヘリウム及び水蒸気が放出され、配管で接続された別のタンクへの移流等を含む挙動が観測されている。注入される気体は、2時間までは過熱蒸気とヘリウムの混合気体、以降は過熱蒸気のみである。

タンク形状を模擬し、詳細メッシュにより実施した再現解析は過渡挙動を比較的良好に再現している。片側のタンク(注入ノズルあり)においては、時間経過に伴いヘリウムがタンク上部に滞留することにより、上向きのブルームがタンク上端に至らず下方向に向けて流れ方向を変える様子が見られる。これに伴い隣接するタンクへの気体の流れ込みが増加し、隣接するタンクにおいてもヘリウムの存在割合が増加する。隣接タンクにおいては、蒸気及びヘリウム混合気体の流入に対し、壁面での凝縮が見られる。このため、タンク上部にヘリウムが滞留し、中～下部エレベーション近傍では混合気体の割合が高くなる(付図 2-3)。

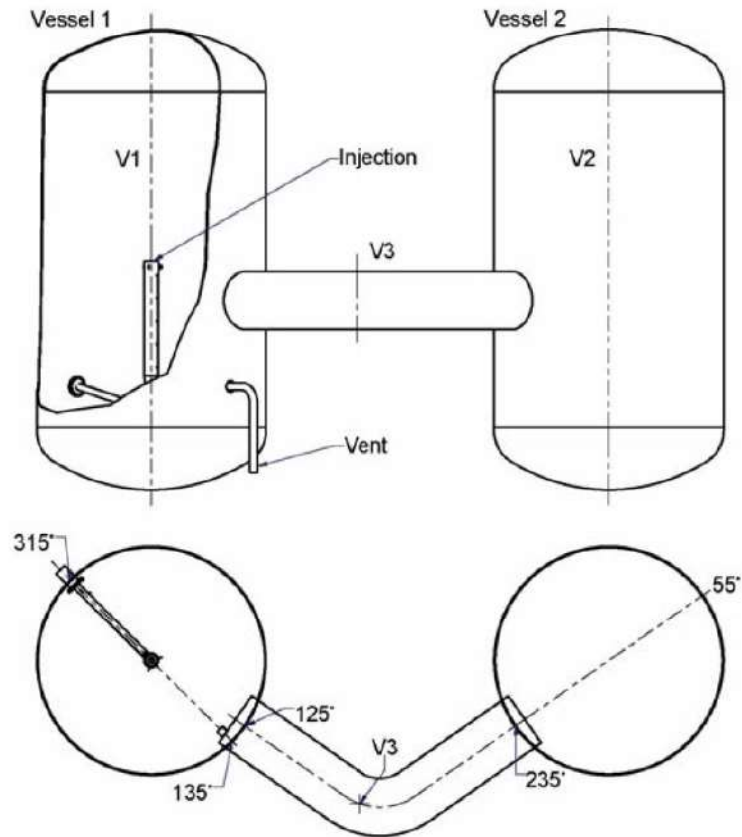
タンク上部では凝縮により蒸気成分が少なくなっており、ヘリウムも同時に冷却されて密度に変化が起き、下降流が発生する。しかしながらこの効果は過渡的であり、拡散による分布強度と相まって、タンク内のヘリウムは均質な拡散に向かう。時間経過に伴い、蒸気成分の減少、成分間の温度の平衡が進む。破断流が継続しているため、タンク 1 及び 2 共にヘリウムは上部に滞留したままとなる。結果的に、タンク 1 の上部に微量のヘリウムが、タンク 2 の上半分においては顕著に成層化したヘリウムが見られる(付図 2-4)。

付表 2-1 Test 25 試験条件

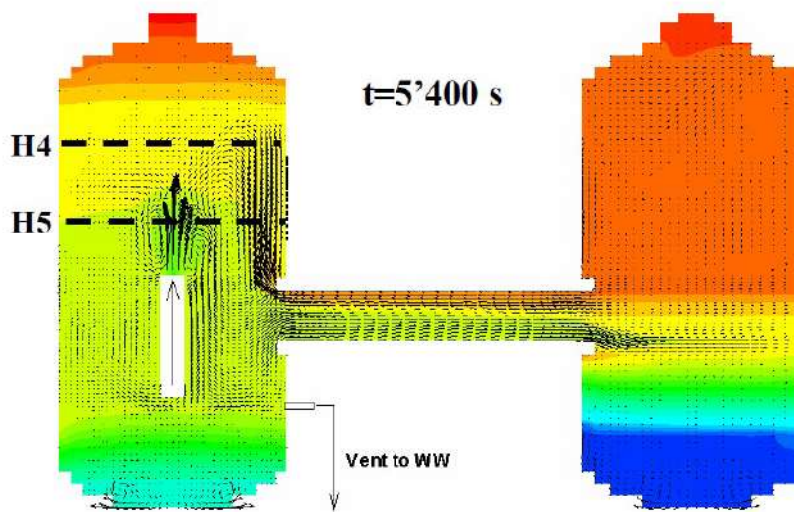
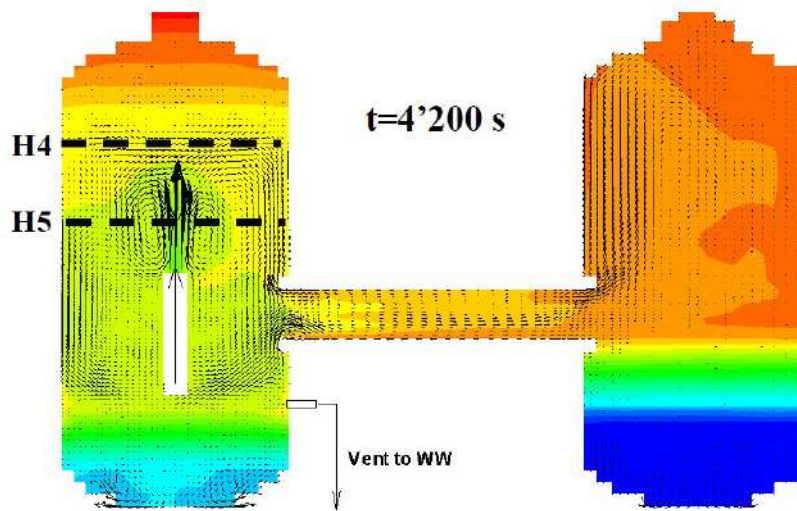
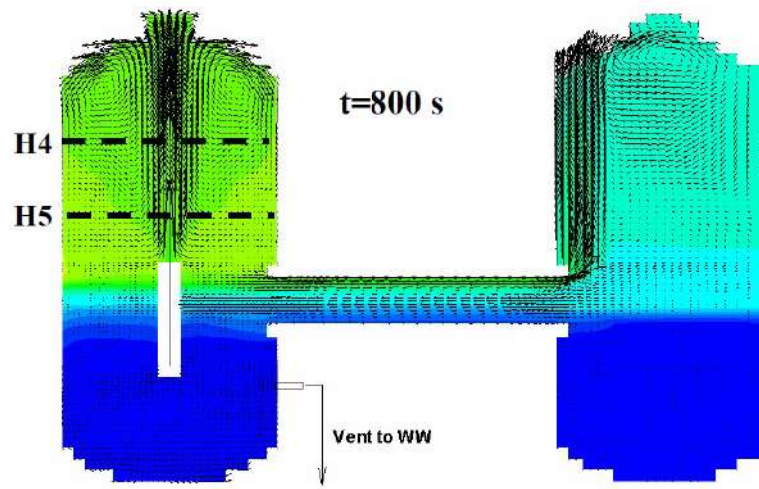
Test	Flow	Pipe diameter (m)	Fluid injected
Phase1 ~2 hours	垂直上方ジェット	0.2	過熱蒸気及びヘリウム混合
Phase2 2 hours~	噴水状, のち垂直上方ジェット	0.2	過熱蒸気

付表 2-2 Test 25 解析条件

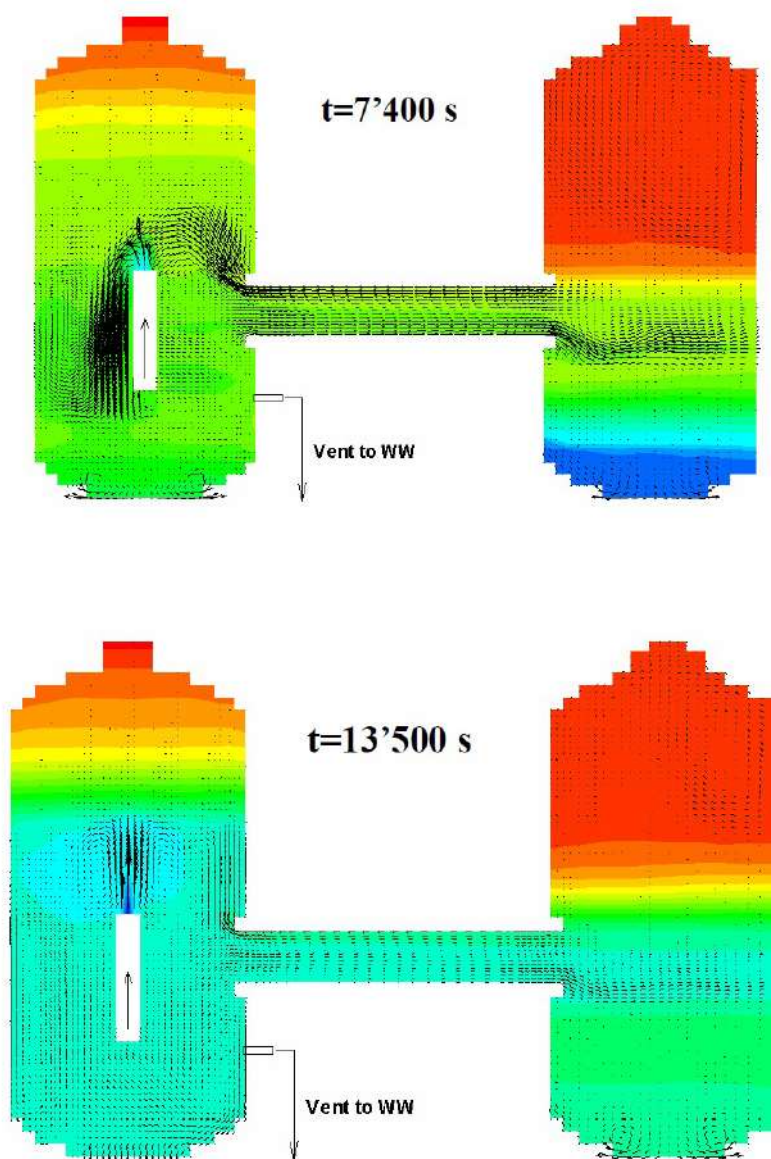
メッシュ	形状	タンク 1	接続配管	タンク 2	壁面熱伝達
詳細	シリンダー 半球 (ドーム)	21 19 50	15 5 10	13 15 48	・自然及び強制対流 ・Direct (DLM-FM)



付図 2-2 3種ガス混合試験 (Test25) 装置体系



付図 2-3 ヘリウムモル分率と流速(Phase1)



付図 2-4 ヘリウムモル分率と流速(Phase2)

(参考文献)

- [1] Analysis of OECD/CSNI ISP-42 Phase A PANDA Experiment Using RELAP5/mod3.3 and GOthic 7.2a Codes (International Conference Nuclear Energy for New Europe 2009)
- [2] アクシデントマネジメント 知識ベース整備に関する報告書=格納容器内多次元流動解析手法の検証と自然対流冷却 AM 策への適用 (JNES/SAE06-057 H18 年 8 月)
- [3] SIMULATIONS OF BASIC GAS MIXING TESTS WITH CONDENSATION IN THE PANDA FACILITY USING THE GOthic CODE (Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering ICONE16)

添付3 代替格納容器スプレイポンプの攪拌効果について

(財)原子力発電技術機構による平成11年度「格納容器内水素挙動解析評価に関する報告書」(参考文献1)では、重大事故等発生による水素成層化時における代替格納容器スプレイでの攪拌効果について検討がなされている。概要を以下にまとめる。

(1) 解析モデル概要

同検討では、INSPAT/CVコード(α -FLOWコードの非圧縮性流体解析モジュールに液滴、液膜モデル及びコンパートメントモデルを追加したコード)を用いて、原子炉格納容器上部での水素成層化状態におけるスプレイの攪拌挙動が解析されている。

解析は付図3-1に示されるとおり、原子炉格納容器の上部コンパートメントを対象に、約22,000メッシュに空間分割したモデルにより解析が実施される。解析の初期条件としては以下のとおり。

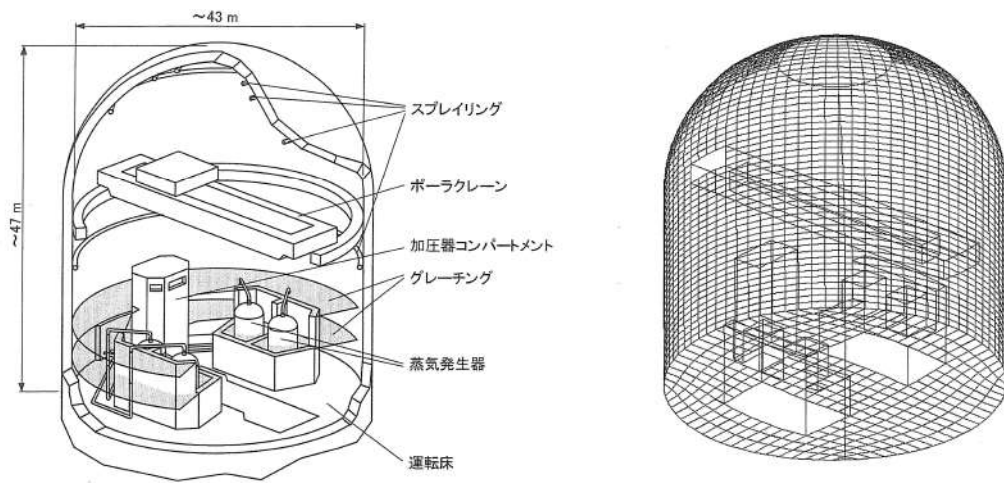
- ・水素は上部に滞留(上部にモル分率1.0, 下部は大気条件(平均モル分率約0.21))
- ・初期圧力: 0.3MPa(定格使用圧力の約1/2)
- ・初期温度: 400K(飽和温度相当)
- ・代替格納容器スプレイポンプ流量: 120m³/h/台(本設スプレイ定格流量の約1/10)

(2) 解析結果

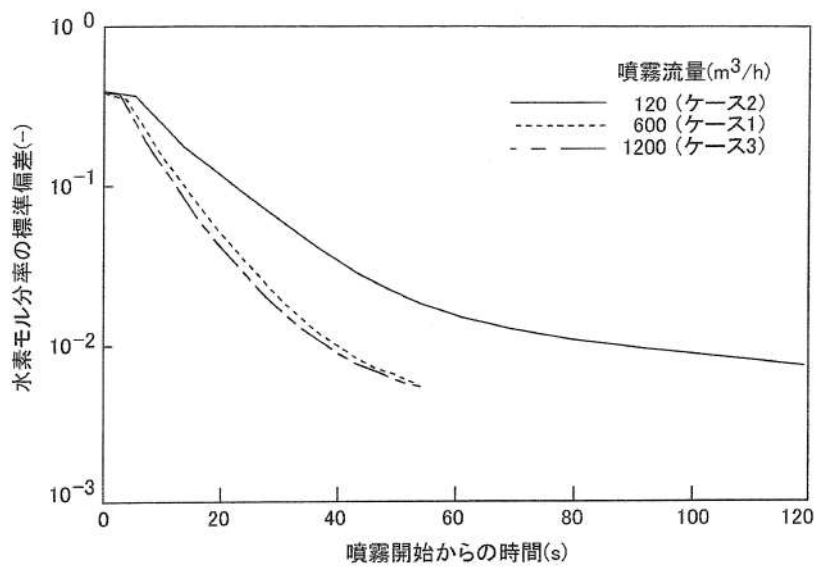
混合挙動に関するスプレイ流量の依存性を付図3-2に示すが、スプレイ流量が本設スプレイ流量の1/10となった場合においても、混合までの時間は長くなる傾向とはなるが、スプレイ開始から120秒後には原子炉格納容器内の水素モル分率の分布の標準偏差が 10^{-2} にまで低下し、水素は原子炉格納容器内で混合することが確認される。

(3) 結論

原子炉格納容器のドーム部で水素が滞留(成層化)した場合のスプレイによる水素濃度分布の攪拌について、INSPAT/CVコードを用いた解析により評価した。スプレイ流量が低下すると攪拌効果も遅れる傾向となるが、代替格納容器スプレイポンプとして想定される流量(本設スプレイ流量の約1/10)とした場合においても、スプレイ開始後の120秒程度で水素濃度が均一化することが確認された。



付図 3-1 原子炉格納容器概略構造と解析メッシュ



付図 3-2 水素モル分率の時間変化のスプレー流量依存性

(参考文献)

- [1] (財)原子力発電技術機構, 平成 11 年度「格納容器内水素挙動解析評価に関する報告書」(平成 12 年 3 月)

(第5部 COCO コード)

目次

－ 第5部 COCOコード －

1. はじめに	5-3
2. 重要現象の特定	5-4
2.1 事故シーケンスと評価指標	5-4
2.2 ランクの定義	5-5
2.3 物理現象に対するランク付け	5-6
3. 解析モデルについて	5-8
3.1 コード概要	5-8
3.2 解析モデル	5-8
3.3 入出力	5-11
4. 妥当性確認	5-14
4.1 重要現象に対する妥当性確認方法	5-14
4.2 CVTR試験	5-15
4.3 実機解析への適用性	5-20
5. 有効性評価への適用性	5-22
5.1 不確かさの取扱いについて（評価指標の視点）	5-22
5.2 不確かさの取扱いについて（運転員等操作の観点）	5-22
6. 参考文献	5-23
添付1 解析コードにおける解析条件	5-24
添付2 CVTR Test-3 測定温度について	5-25
添付3 NUPEC試験（M-3シリーズ）について	5-27

1. はじめに

本資料は、炉心損傷防止に関する重大事故対策の有効性評価（以下、「有効性評価」という。）に適用するコードのうち、COCO Ver.1（以下、「COCO コード」と称す。）について、

- ・有効性評価において重要となる現象の特定
- ・解析モデル及び入出力に関する説明
- ・妥当性確認
- ・有効性評価への適用性

に関してまとめたものである。

2. 重要現象の特定

2.1 事故シーケンスと評価指標

COCO コードが適用される，炉心損傷防止対策における事故シーケンスグループについて，具体的な重要事故シーケンス及びその事象の推移と評価指標について記述する。

2.1.1 炉心損傷防止対策のシーケンスグループ

(1) 全交流動力電源喪失（RCP シール LOCA が発生する場合）

全交流動力電源喪失は，原子炉の出力運転中に，送電系統又は所内主発電設備の故障等により外部電源が喪失するとともに，非常用所内電源系統も機能喪失し，重要度が特に高い安全機能を有する構築物，系統及び機器の交流電源が喪失する事象を想定する（全交流動力電源喪失発生）。

その後，全交流動力電源喪失による原子炉補機冷却水系の機能喪失に伴い，RCP シール部へのシール水注入機能及びサーマルバリアの冷却機能が喪失し，RCP シール部からの冷却材喪失に至り，ECCS 等による冷却材の補給が行われない場合には炉心損傷に至る。また，原子炉格納容器内に 1 次冷却材が放出されることから，原子炉格納容器内の圧力及び温度が上昇し格納容器スプレイ等の除熱手段が作動しない場合には格納容器破損に至る。

この事象に対する炉心損傷防止対策としては，タービン動補助給水及び主蒸気逃がし弁を用いた 2 次冷却系強制冷却があり，1 次冷却系を冷却及び減圧し，蓄圧注入を促進させることで事故初期の炉心冷却を確保することができる。また，代替交流電源の確立後は，燃料取替用水タンクを水源とした代替炉心注入手段により，炉心損傷を防止することができる。また，格納容器破損防止策としては，再循環ユニットに通水を実施して格納容器内自然対流冷却を実施することで，原子炉格納容器内の圧力及び温度の上昇を抑制する事ができる。

COCO コードによる評価は，原子炉格納容器の健全性に問題がない事を確認することが目的であることから，評価指標は「原子炉格納容器圧力，原子炉格納容器内温度」である。

（炉心冷却能力については M-RELAP5 コードによる解析で確認する）

(2) 原子炉補機冷却機能喪失

(1) 全交流動力電源喪失と同様である。

2.2 ランクの定義

本資料の本文「2. 有効性評価における物理現象の抽出」で抽出された物理現象のうちCOCOコードで評価する事象において、考慮すべき物理現象を対象に、表2-1の定義に従って「H」、「M」、「L」及び「I」のランクに分類し、「H」及び「M」に分類された物理現象を重要現象として抽出する。

表2-1 ランクの定義

ランク	ランクの定義	本資料での取扱い
H	評価指標に対する影響度が大きいと考えられる現象	物理現象に対する不確かさを実験との比較や感度解析等により求め、実機評価における評価指標及び運転員等操作への影響を評価する
M	評価指標に対する影響が中程度と考えられる現象	事象推移を模擬する上で一定の役割を担うが、影響が「H」に比べて顕著でない物理現象であるため、必ずしも不確かさによる実機評価における評価指標及び運転員等操作への影響を評価する必要はないが、本資料では実機評価への影響を感度解析等により評価するか、「H」と同様に評価することとする
L	評価指標に対する影響が小さいと考えられる現象	事象推移を模擬するためにモデル化は必要であるが、評価指標及び運転員等操作への影響が明らかに小さい物理現象であるため、検証及び妥当性評価は記載しない
I	評価指標に対し影響を与えないか、又は重要でない現象	評価指標及び運転員等操作へ影響を与えないか、又は重要でない物理現象であるため、検証及び妥当性評価は記載しない

2.3 物理現象に対するランク付け

原子炉格納容器圧力及び原子炉格納容器内温度を評価指標とし、表 2-1 の定義に従い評価指標に対する影響度合いに応じて、事故シーケンスグループに対して抽出された物理現象について、表 2-2 のとおりランク付けを行い、「H」及び「M」に分類された物理現象を重要事象として抽出した。

なお、COCO コードを適用する事故シーケンスとしては「全交流動力電源喪失」時及び「原子炉補機冷却機能喪失」時の格納容器健全性評価である。両シーケンスに対する炉心冷却性確認のための解析は M-RELAP5 コードで実施しているが、解析としては共通である。したがって、本資料中では「全交流動力電源喪失」を代表として記載するものとする。

2.3.1 原子炉格納容器関連

(1) 放出質量流量、放出エネルギー流量（1次冷却系からの冷却材放出）

冷却材の放出質量流量及び放出エネルギー流量に応じた原子炉格納容器圧力及び原子炉格納容器内温度の変化が原子炉格納容器の健全性を判定する目的から影響が大きい (H)。しかしながら、放出質量流量及び放出エネルギー流量の算出は M-RELAP5 コードで実施するため、COCO コードにおける重要度は「I」である。

(2) 気液界面の熱伝達

1次冷却材は

「気液界面の熱伝達」の影響は小さい (L)。

(3) 構造材との熱伝達及び内部熱伝導

原子炉格納容器内に放出された蒸気が構造材表面で凝縮することによる原子炉格納容器の減圧効果が大きい。また、構造材内部の熱伝導も構造材表面の温度変化に影響するため、原子炉格納容器の減圧効果に大きく影響する (H)。

(4) 格納容器再循環ユニットによる格納容器内自然対流冷却

長期的な原子炉格納容器冷却手段として、原子炉格納容器内蒸気を凝縮させる「格納容器再循環ユニットによる格納容器内自然対流冷却」は重要である (H)。しかしながら、COCO コードによる解析は「格納容器再循環ユニットによる格納容器内自然対流冷却」を開始する前までであるため、重要度は「I」である。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 2-2 各物理現象に対して重要度の分類

分類	物理現象	評価指標
		全交流動力電源喪失 (原子炉補機冷却機能喪失)
		原子炉格納容器圧力 原子炉格納容器内温度
原子 炉 格 納 容 器	放出質量流量・放出エネルギー流量	H (COCO コードでは計算しないため「I」)
	気液界面熱伝達	L
	構造材との熱伝達及び内部熱伝導	H
	格納容器再循環ユニットによる格納容器内自然対流冷却	H (COCO コードでは計算しないため「I」)

3. 解析モデルについて

3.1 コード概要

COCO コード(Ref. [1])は, LOCA 時の原子炉格納容器内の圧力, 温度変化の評価を主目的に, 米国 Westinghouse 社により開発された原子炉格納容器内圧解析コードであり, 原子炉格納容器内を気相系と液相系に大別し, 各系内では状態は一樣とし, 各々の系について質量及びエネルギー保存則を解く。

気相部の蒸気については過熱及び飽和状態, 液相部の水については飽和及び未飽和状態を模擬することができ, どの状態にあるかは圧力, 流体温度を内蔵された蒸気表に照らして蒸気及び水の状態を判別して, 対応した状態方程式を用いる。また, 原子炉格納容器スプレイ設備等の減圧系のみならず, 原子炉格納容器内構造物との間の熱の授受もモデルとして組み込まれている。

3.2 解析モデル

COCO コードの評価モデル図を図 3-1 及び図 3-2 に示す。

3.2.1 ノード

対象とする流体としては空気, 蒸気を取り扱い, 空気は理想気体として取り扱う。ノードは単一であり, ノードの中は空気-蒸気混合相と液相の 2 相に分離し, 各相内の温度, 圧力は均一であるとして取扱う。ノード内の状態量は次の 4 区分に分けて模擬する。

- (i) 過熱蒸気とサブクール水
- (ii) 飽和蒸気とサブクール水
- (iii) 過熱蒸気と飽和水
- (iv) 飽和蒸気と飽和水

3.2.2 保存則

原子炉格納容器内の空気-蒸気混合相, 液相の温度, 圧力は質量保存式, エネルギーの保存式, 体積方程式, 状態方程式等を数値解法により解き求めている。

<質量保存則>

$$\frac{dM_a}{dt} = \sum (m_a)_v$$

$$\frac{d[M_{s1} + M_{w1}]}{dt} = \sum (m_s)_i + \sum [(m_s)_v - m_C + m_B] \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{d(M_{w2})}{dt} = \sum (m_w)_i - m_R + m_{SP} + m_C - m_B$$

ここで,

- M_a : 空気質量
- $(m_a)_v$: 空気ベント流量
- M_{s1} : 蒸気質量 (蒸気相)
- M_{w1} : 水質量 (蒸気相)
- $(m_s)_i$: 放出質量流量 (蒸気相)
- $(m_s)_v$: 蒸気ベント流量
- m_c : 凝縮質量流量
- m_B : 沸騰質量流量
- M_{w2} : 水質量 (液相)
- $(m_w)_i$: 放出質量流量 (液相)
- m_R : 格納容器再循環サンプル取水流量
- m_{SP} : 格納容器スプレー流量

サンプル水がサブクール水の場合には沸騰質量流量 $m_B=0$ となり、蒸気が過熱状態の場合には凝縮質量流量 $m_c=0$ となる。

質量保存則は原子炉格納容器内の空気、蒸気、水に対し各々考慮している。①式の右辺は各相への質量の収支を表すが、破断流の他、蒸気相に対しては凝縮による減少、格納容器再循環サンプル水の沸騰による増加も考慮している。また、水 (液相) に対しては、さらに格納容器再循環サンプルからの再循環時の取水による減少、格納容器スプレー水による増加も考慮している。

<エネルギー保存則>

$$\frac{d(M_i h_i)}{dt} - V \frac{dP}{dt} = \sum(m_i h_i) + \sum Q \dots \textcircled{2}$$

ただし、 M_i : 原子炉格納容器内の各相質量 (i = 空気 - 蒸気, 液相)

h_i : エンタルピー (i = 空気 - 蒸気, 液相)

t : 時間

V : 原子炉格納容器有効体積

P : 圧力

m : 原子炉格納容器内の質量流量

Q : 熱量

エネルギー保存則は原子炉格納容器内の空気 - 蒸気相、水 (液相) に対し各々考慮している。②式の右辺の第1項は、原子炉格納容器内各相への放出エネルギー流量である。右辺の第2項は原子炉格納容器減圧装置 (スプレー系, 空調系), ヒートシンク, 再循環運転に起因して流出入する熱量である。

<体積方程式>

$$V = V_{as} + V_{\ell} \cdots \textcircled{3}$$

ただし、 V ：原子炉格納容器有効体積

V_{as} ：空気－蒸気相体積

V_{ℓ} ：液相体積

原子炉格納容器体積は一定であるので、原子炉格納容器内の空気－蒸気相体積と液相体積の合計が保存される。

3.2.3 ヒートシンク

原子炉格納容器本体及び内部構造物は平板として模擬され、表面熱伝達係数は修正田上－内田の式が内蔵されている。全交流動力電源喪失時の格納容器健全性評価においては内田の式を適用している。

ヒートシンクとしての原子炉格納容器本体及び構造物内部の温度は厚み方向の分布を考慮し、縦、横方向の分布は一定であるとする。ヒートシンクの温度分布は、一般的な1次元熱伝導方程式（④式）を厚さ方向に分割して解く事により求める。ただし、内表面及び外表面については雰囲気との熱伝達も考慮する。

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dX} \left[k \frac{dT}{dX} \right] \cdots \textcircled{4}$$

ただし、 ρ ：密度

C_p ：定圧比熱

T ：温度

t ：時間

k ：熱伝導率

X ：厚さ方向位置

3.2.4 その他

工学的に必要とされる以下の項目を選択模擬して評価することができる。

- ① 格納容器スプレイによる除熱量計算
- ② 格納容器空調装置による除熱量の計算
- ③ 格納容器再循環サンプル水温度、格納容器スプレイ冷却器、余熱除去冷却器、原子炉

補機冷却水冷却器間の熱平衡量の計算とこれらによる空気-蒸気混合相、液相からの除熱量の計算

- ④ ノードへの空気の添加，除去の影響
- ⑤ 外気との熱伝達（太陽熱，輻射，対流）の影響

3.3 入出力

COCO コードによる評価の入出力を図 3-1 に示す。また，主要なインプットデータは以下のとおり構成される。インプットデータの元となる「原子炉格納容器関連データ」，「境界条件データ」を整理した解析条件を添付 1 に示す。

- ① 原子炉格納容器の自由体積
- ② 原子炉格納容器内構造物の形状，数量，物性，初期温度等
- ③ 格納容器スプレイ，減圧系の特性及び作動パラメータ
- ④ 原子炉格納容器圧力，温度，湿度等の初期条件
- ⑤ 破断流（放出質量流量及び放出エネルギー流量）（全交流動力電源喪失時の評価で M-RELAP5 コードの計算結果を入力）

上記をインプットデータとして，原子炉格納容器内圧解析を実施し，以下のアウトプットデータを得る。

- ① 原子炉格納容器圧力変化
- ② 原子炉格納容器内温度変化
- ③ 格納容器再循環サンプル水の温度変化
- ④ 熱構造体（ヒートシンク）温度

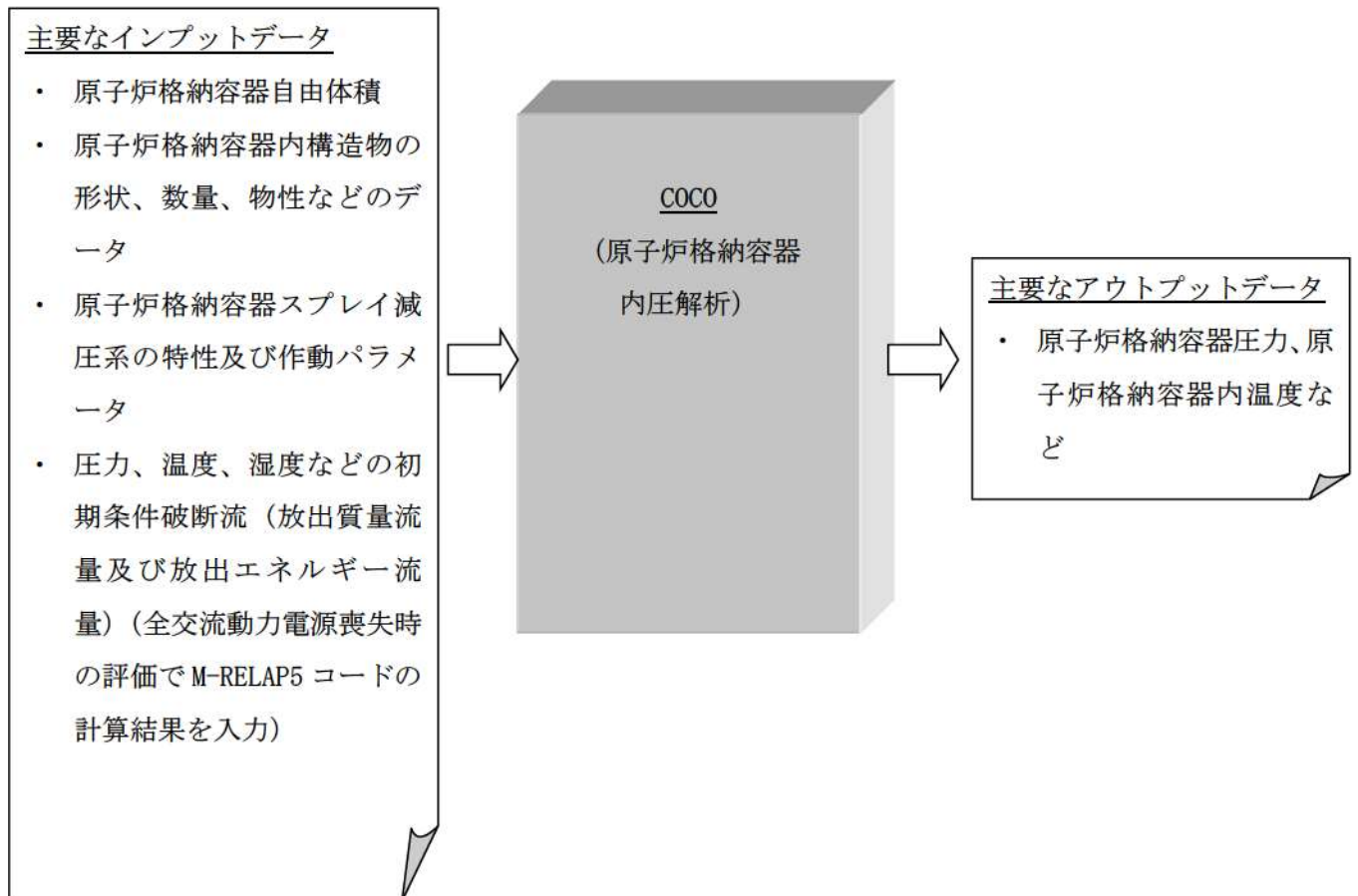


図 3-1 COCO コードモデル

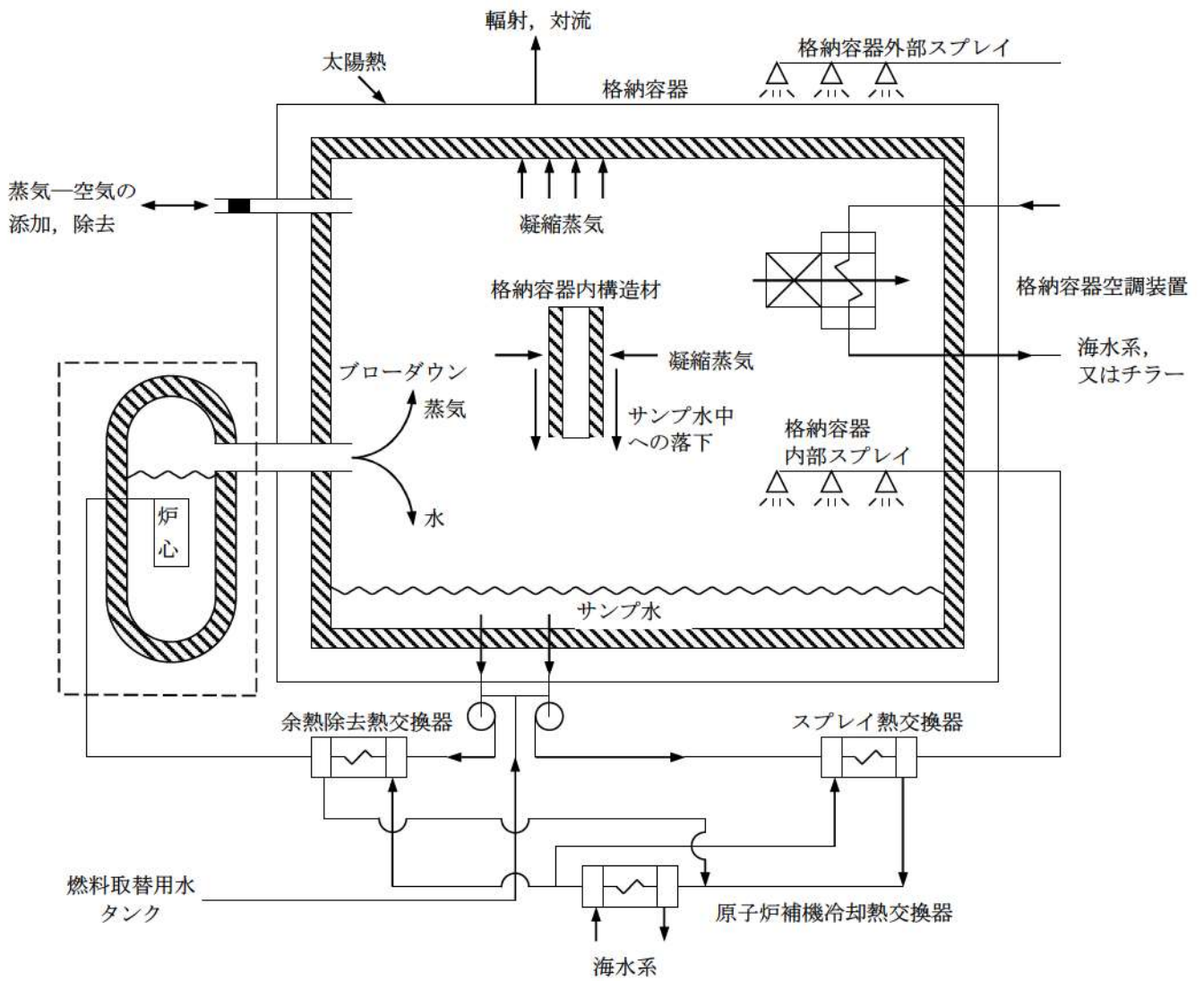


図 3-2 COCO コードモデル概念図

4. 妥当性確認

4.1 重要現象に対する妥当性確認方法

COCO コードの原子炉格納容器健全性評価への適用性検証のため、CVTR (Carolina Virginia Tube Reactor) 実験解析を実施した。CVTR 実験は設計基準事故 (DBA) を模擬した総合試験であるが、前述の通り、重要となる原子炉格納容器への放出質量流量及び放出エネルギー流量に対する原子炉格納容器の除熱性能を確認するための試験データとして採用する。対象とした実験ケースは Test-3 であり、一定時間の蒸気放出後、格納容器スプレイを作動させずに蒸気の凝縮及び自然対流による減圧挙動を観測したケースである。

また、表 4-1 に「H」ランクとして抽出された重要現象とその妥当性確認方法を示す。

表 4-1 重要現象に対する妥当性確認方法

分類	物理現象	CVTR Test-3 実験解析	関連モデル
原子炉格 納容器	構造材との熱伝達 及び内部熱伝導	図 4-3 図 4-4	ヒートシンク熱伝達モデル ヒートシンク内熱伝導モデル

4.2 CVTR 試験

実験は 1969 年に U. S. Atomic Energy Commission's Water Reactor Safety Program の一部として実施された。このプロジェクトの目的は、CVTR 格納容器を用いて発電用原子炉の安全評価に直接適用可能な情報を得ることにあつた。(Ref. [2])

4.2.1 試験装置の概要

(a) 格納容器

格納容器は鉄筋コンクリート製で、平らな底板のあるシリンダ構造物に半円球ドームをかぶせた構造になっている。自由体積は約 6,400m³である。

(b) 蒸気注入設備

試験で用いる蒸気は、格納容器近隣にある石炭火力発電所より供給される。

(c) 格納容器スプレイ

格納容器の減圧用散水スプレイシステムが DBA 模擬実験のために設置された。スプレイノズルは格納容器をカバーできるように配置されている。

(d) 計測設備

CVTR 試験では格納容器内圧力、格納容器内空気温度、格納容器壁面温度等が計測されている。

4.2.2 試験条件 (Test-3)

初期格納容器圧力：大気圧

初期格納容器温度：約 27 (°C)

注入質量流量：45 (kg/sec)

エネルギー注入流量：3×10⁴ (kcal/sec)

蒸気注入終了時刻：166.4 (sec)

格納容器スプレイ：作動無し

4.2.3 試験結果 (Test-3)

最高圧力：1.27 (kg/cm²G)

最高圧力発生時刻：163 (sec)

最高温度：113 (°C)

最高温度発生時刻：163 (sec)

4.2.4 解析結果

図 4-1 に COCO コードの解析モデル概念図を、図 4-2 に CVTR 格納容器構造の概略図を

示す。COCO コードでは、原子炉格納容器内部の熱的状态を単一ノードで模擬し、その内部で空気-飽和蒸気混合相と液相の2相に分離し各相内の圧力、温度は均一であるとして扱われる。

ヒートシンク表面の熱伝達モデルとしては修正内田の式を使用している。なお、本モデルは全交流動力電源喪失時の原子炉格納容器健全性評価で使用しているモデルと同様であり、解析においては外部との熱伝達を考慮せず、断熱扱いとしている。また、自由体積やヒートシンクデータについては特に保守性を考慮せずに As Built データを使用している。

COCO コードを用いた検証解析の結果を図 4-3、図 4-4 に示す。図 4-3 に示すように、原子炉格納容器圧力については解析結果が実験結果（原子炉格納容器最高圧力）を上回って推移していることが確認できる。また、原子炉格納容器内温度については、解析結果が測定位置を勘案して算出した CVTR 実験装置の平均温度を上回って推移していることが確認できる。これは修正内田の式がヒートシンク表面の熱伝達を過小評価していることを示しており、これにより試験結果に対してピーク圧力は約 1.6 倍、ピーク温度は約 40° F（約 20°C）それぞれ高めの解析値を得ている。

したがって、放出された蒸気がヒートシンク表面で凝縮するような事象に対して、熱伝達モデルとして修正内田の式を使用した COCO コードによる解析は原子炉格納容器圧力及び原子炉格納容器内温度を高めめに評価しているといえる。

表 4-2 CVTR と実機 PWR の比較

	CVTR	PWR プラント(注 1)
格納容器自由体積(m ³)	6,400	約 42,000～約 73,000
放出質量流量 (kg/sec)	45	約 85～5 (注 2)
放出エネルギー流量 (kcal/sec)	30,000	約 27,000～1,000 (注 2)

(注 1) 代表 2, 3, 4 ループプラント

(注 2) 全交流動力電源喪失事象における 24 時間までの解析結果

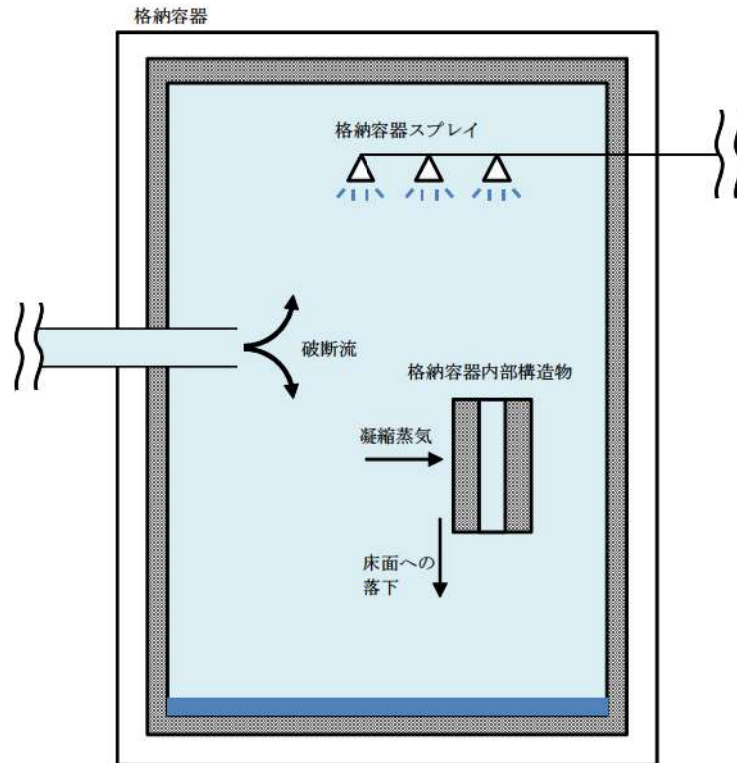


図 4-1 COCO コード解析モデル概念図

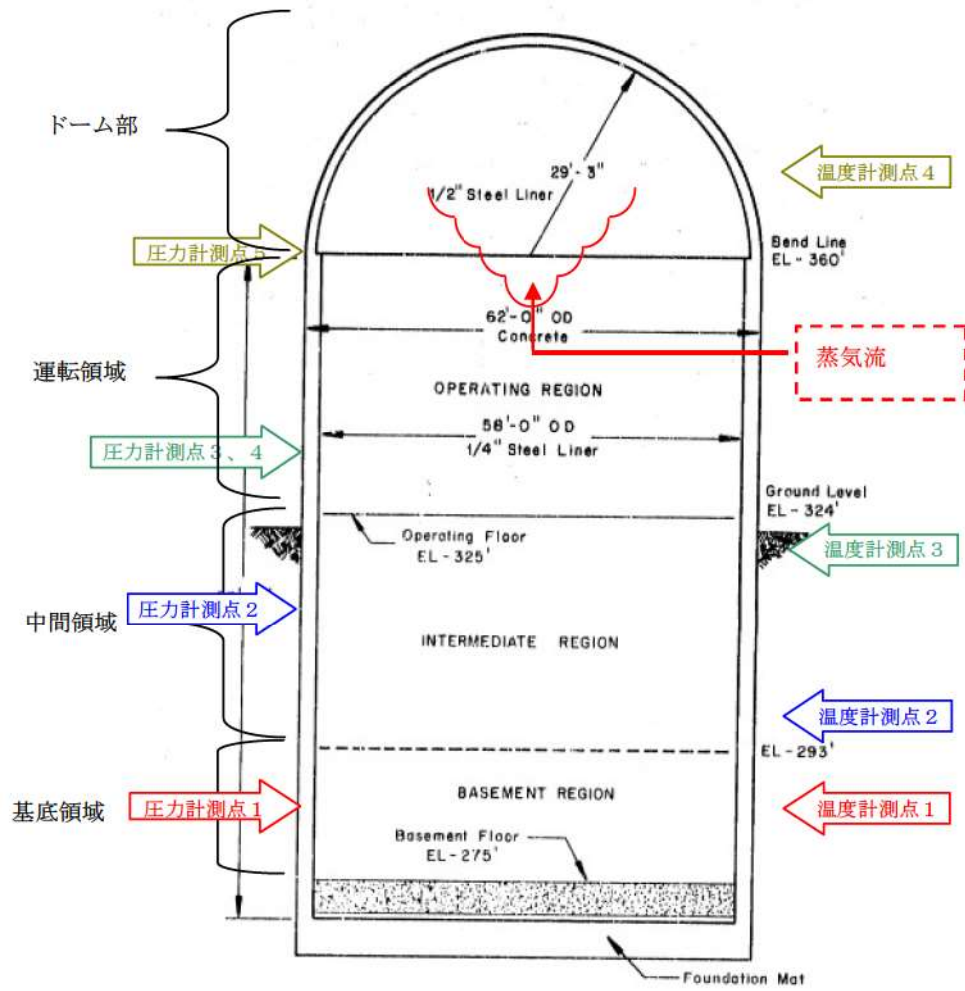


図 4-2 CVTR 格納容器構造概略図



図 4-3 CVTR 実験 (Test-3) 圧力変化



図 4-4 CVTR 実験 (Test-3) 温度変化

枠囲いの内容は、商業機密に属
しますので公開できません。

4.3 実機解析への適用性

COCO コードを使用した実機解析で対象とする事故シーケンスグループは全交流動力電源喪失であり、RCP シール部の破損により 1 次冷却材が原子炉格納容器内に放出され、原子炉格納容器圧力及び温度が上昇する状況を COCO コードにより解析評価を実施している。内圧及び温度の上昇を抑制する効果としては原子炉格納容器内の構造物によるヒートシンク効果しか期待できないため、検証解析としては CVTR 試験 Test-3 を選定している。この試験は 4.2 で述べたとおり、格納容器内に蒸気を一定時間放出させて、その後ヒートシンク効果により減圧及び冷却させており、内圧及び温度の抑制効果として、ヒートシンクにのみ期待している点が全交流動力電源喪失事象と類似している。CVTR 試験装置と実機 PWR の比較を表 4-2 に示す。自由体積は実機 PWR に対して 1/10 程度であるが、放出質量流量及び放出エネルギー流量については、実機 PWR における「全交流動力電源喪失時」のそれらとほぼ同等である。この点が、実験検証と実機 PWR における「全交流動力電源喪失時」の条件の大きな違いであるものの、添付 3 に示す漏えい量の小さい NUPEC 試験の知見(Ref. [3][4])から、COCO コードを実機 PWR における「全交流動力電源喪失時」の原子炉格納容器圧力及び原子炉格納容器内温度を評価する場合に用いることは妥当であるといえる。

また、ヒートシンク表面における熱伝達の不確かさについては、熱伝達モデルとして修正内田の式を適用することで、格納容器圧力についてはピーク圧力を約 1.6 倍高く、原子炉格納容器雰囲気温度については約 40° F (約 20°C) 高めに評価することを確認している。したがって、CVTR 試験 Test-3 で妥当性が確認された COCO コードを実機 PWR の「全交流動力電源喪失」時の原子炉格納容器健全性解析に使用することは妥当である。

CVTR 検証解析では、格納容器自由体積やヒートシンク物量として最適値を使用しているが、格納容器圧力及び温度を高めに予測している。この過大評価の傾向はヒートシンク表面の凝縮熱伝達を小さく見積もることによるが、特にドーム部についてフルスケール規模に外挿すると、自由体積、すなわち熱源となる蒸気量に対してヒートシンクとなる壁面の割合が相対的に小さくなることから、過大評価傾向は緩和される傾向になるものと考察される。しかし、熱伝達による凝縮を小さく予測するモデルであること、さらには実機 PWR の解析では不確かさを考慮して自由体積やヒートシンク物量がそれぞれ小さく設定されることから、実機 PWR の原子炉格納容器圧力、原子炉格納容器内温度を高めに評価されると判断できる。

実機の「全交流動力電源喪失」事象に対する有効性評価解析では事故後 24 時間までの解析を実施しており、CVTR 実験や NUPEC 試験よりも長期間となるが、放出された蒸気が原子炉格納容器内の構造物(ヒートシンク)との熱伝達により凝縮することで原子炉格納容器圧力、原子炉格納容器内温度の上昇を抑制するという現象は事象発生直後から長期に至るまで継続する。したがって、CVTR 実験に対する検証解析や NUPEC 試験の結果から得られる COCO コードの実機解析への適用性は、長期にわたる有効性評価解析に対しても当てはまると判断

できる。

また、COCO コードによる解析は原子炉格納容器を単一ノードとした原子炉格納容器圧力、原子炉格納容器内温度等の解析であることから、ループ数が異なるプラントにおいても適用が可能である。

以上より、COCO コードは実機の「全交流動力電源喪失」への適用性を有するとともに、本章の検証及び妥当性確認によりヒートシンク熱伝達モデル及びヒートシンク内部熱伝導モデルの不確かさについても、実機の「全交流動力電源喪失」に適用できるといえる。

5. 有効性評価への適用性

4章にて議論した実験解析を踏まえ、COCOコードでHランクとした物理現象の不確かさについては、下記の通りである。

構造材との熱伝達については修正内田の式を用いることで、熱伝達率を小さく見積もることができ、評価指標である原子炉格納容器圧力及び原子炉格納容器内温度を高め評価できることが確認された。

以下においては、COCOコードを用いて評価を実施する重要事故シーケンスにおいて評価指標の視点及び運転員等操作の視点から、上記の不確かさがどのような影響を与えるか考察を行った。

5.1 不確かさの取扱いについて（評価指標の視点）

COCOコードが適用される重要事故シーケンスは炉心損傷防止対策における「全交流動力電源喪失（RCPシールLOCA）」である。本事象では、RCPシールからの1次冷却材漏えいが発生し、漏えいに伴い質量及びエネルギーの放出が生じるが、原子炉格納容器内のヒートシンクによる除熱により、圧力及び温度の上昇が抑制される。したがって、1次冷却系からの放出質量流量及び放出エネルギー流量と原子炉格納容器内ヒートシンクによる吸熱が重要な物理現象となり、COCOコードではプラント過渡解析コードであるM-RELAP5コードで計算される放出質量流量及び放出エネルギー流量を境界条件として与え、原子炉格納容器内のヒートシンク量やヒートシンク表面の熱伝達係数を小さく設定（修正内田の式を適用）することで、原子炉格納容器圧力及び原子炉格納容器内温度を高め評価することができる。

5.2 不確かさの取扱いについて（運転員等操作の観点）

本事象における運転員等操作としては、原子炉格納容器圧力が最高使用圧力まで上昇した時に、格納容器再循環ユニットに通水を実施して格納容器内自然対流冷却により原子炉格納容器圧力及び原子炉格納容器内温度の上昇を抑制することであるが、最高使用圧力に到達するまでには十分な時間余裕があるため、不確かさが運転員等操作に影響を与えることはない。

6. 参考文献

- [1] 三菱PWR原子炉格納容器内圧評価解析手法, MHI-NES-1016, 改0 三菱重工業, 平成12年
- [2] R. C. Schmitt, et al., “Simulated Design Basic Accident Tests of The Carolinas Virginia Tube Reactor Containment”, TID-4500, Dec. 1970
- [3] 財団法人 原子力発電技術機構, 原子炉格納容器信頼性実証試験 可燃性ガス濃度分布・混合挙動試験 (最終試験報告書), 平成5年3月 (非公開資料)
- [4] 独立行政法人 原子力安全基盤機構 (財団法人 原子力発電技術機構), 「溶接部等熱影響部信頼性実証試験 (原子炉格納容器) に関する報告書 (平成4年度)」, 平成5年3月

添付1 解析コードにおける解析条件

表 解析コードにおける解析条件

分 類	解析条件	
原子炉格納容器関連 データ	原子炉格納容器内自由体積	
	初期温度	
	初期圧力	
	ヒートシンク（伝熱面，表 面積，厚さ，材質の物性， 初期温度）	原子炉格納容器ドーム部及びリングガータ
		原子炉格納容器シリンダ部
		原子炉格納容器コンクリート
		スチールラインドコンクリート
		雑鋼材（炭素鋼）
		雑鋼材（ステンレス・スチール）
		雑鋼材（銅フィン・チューブ）
		配管（ステンレス・スチール（内部に水有））
		配管（ステンレス・スチール（内部に水無））
		配管（炭素鋼（内部に水有））
配管（炭素鋼（内部に水無））		
検出器等（アルミニウム）		
境界条件データ	破断流	
	放出質量流量	放出エネルギー流量

添付2 CVTR Test-3 測定温度について

CVTR 試験では、4箇所の異なる高さ位置に温度計を設置して温度測定を実施している。
(Ref. [2])

付図 2-1 に 4 箇所での測定値と COCO コードでの解析値を示す。Test-3 試験では格納容器の上部に直接蒸気を放出しているため、上部の温度が高くなりやすい傾向にある。放出蒸気によって暖められた空気-蒸気の混合気体が拡散することで下部の温度も上昇しているが均一に混ざるには至っていない。

一方、COCO コードでは解析体系を 1 ノードで扱うため、算出された温度は系全体の平均温度となる。COCO コードによる解析結果と試験結果を比較するために、試験結果の平均値を算出した。平均温度の算出方法は次頁に示す。

この平均温度と比較して COCO コードの解析結果は全解析期間にわたって高めの温度を予測していることから、全交流動力電源喪失時の原子炉格納容器健全性評価で使用している熱伝達モデル(修正内田の式)を使えば試験結果を高めに予測できるといえる。

なお、本試験では高温蒸気を格納容器の上部に放出しているため、密度差による対流が起こりにくい状況であると考えられるが、PWR プラントにおける SBO 時 RCP シール LOCA の事象では格納容器の下部に高温の 2 相流体が放出され、蒸気が密度差によって原子炉格納容器上部に拡散すると考えられるため、Test-3 のような広い空間における顕著な温度分布は生じないと考えられる。



付図 2-1 CVTR Test-3 測定温度と COCO コードの解析結果の比較

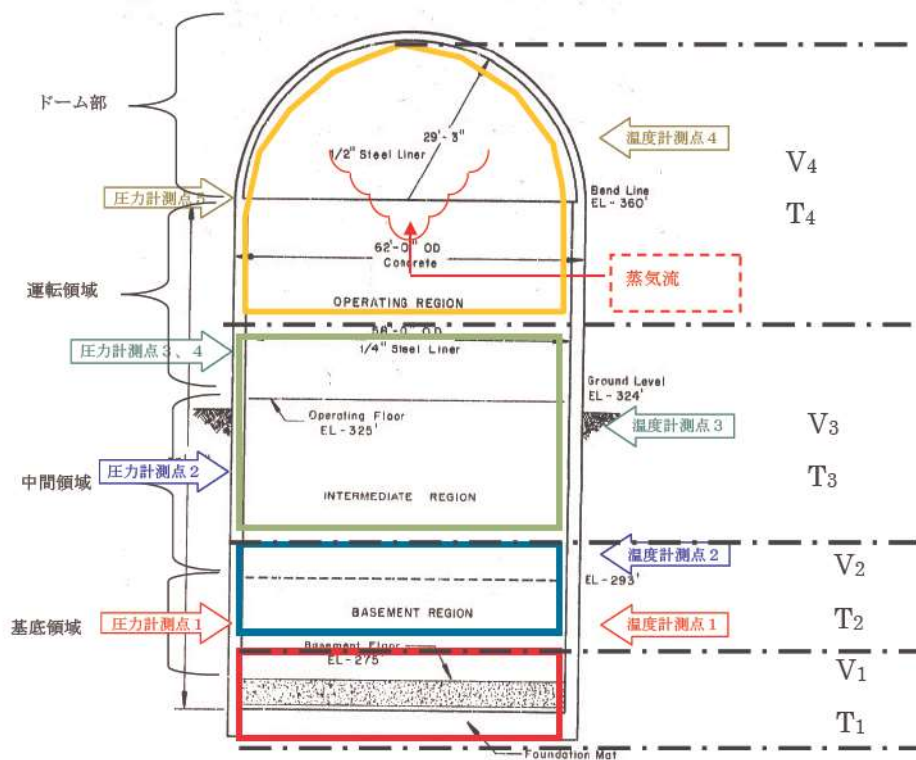
<平均温度の算出方法>

各測定点（高さ）の担当範囲の境界を測定点の中間高さとして、担当範囲の体積を求めて、各測定点の担当体積に応じた重みを掛けて平均温度を算出した。

$$T_{avg} = \frac{T_1 \times V_1 + T_2 \times V_2 + T_3 \times V_3 + T_4 \times V_4}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}$$

V_i : 測定点 i の担当する体積

T_i : 測定点 i における測定温度



付図 2-2 平均温度算出のための体積区分

添付3 NUPEC 試験 (M-3 シリーズ) について

(財)原子力発電技術機構 (NUPEC) において昭和 62 年～平成 4 年に実施された可燃性ガス濃度分布・混合挙動試験であり、炉心損傷事故時における格納容器内水素の濃度分布と混合挙動及び格納容器内水素の燃焼挙動を把握するとともに、放出蒸気等による水素燃焼抑制効果も併せて確認し、また格納容器内の放射性物質の捕集特性の把握並びに格納容器の耐圧機能限界の把握を行い、格納容器の健全性について総合的評価を実施したものである。

一連の試験の中で、格納容器内に水蒸気のみを放出した試験が実施されており (M-3 シリーズ)、ここではこの試験結果を参照して COCO コードの実機解析への適用の妥当性について確認する。

<試験の概要>

(1) 格納容器

格納容器はドライ型 4 ループ PWR の 1/4 規模であり、4 ループ相当の区画が模擬されており、自由体積は 1,300m³である。付図 3-1 に試験設備の概要図を示す (Ref. [4])。

(2) 蒸気供給設備

配管破断時の放出蒸気を模擬するため蒸気供給設備を設けている。

(3) 計測設備

雰囲気温度、圧力、格納容器壁面温度、区画壁面温度が計測されている。圧力は区画間圧力損失が微小であることからドーム部の圧力を代表して測定している。区画壁面温度及び空間温度は熱電対により計測している。

<試験条件 (M-3 シリーズ) >

放出水蒸気による格納容器内循環確認試験として、格納容器内に水蒸気のみを流入させて、各区画内温度分布、圧力計測を実施している。

M-3-1～4 の各試験条件を付表 3-1 に示す (Ref. [4])。

<試験結果 (M-3 シリーズ) >

試験結果を付図 3-2～5 に示す (Ref. [3])。ドーム部及び一般部について複数の高さ位置について温度が計測されているが、いずれの試験においてもドーム部については各測定位置で顕著な温度差は認められない。これは放出水蒸気により格納容器内循環が発生しており、ドーム部において温度成層化していないことを示している。

<COCO コードの実機解析への適用性>

本試験は水蒸気の放出量として実機の「全交流動力電源喪失」時相当若しくはそれよりも少

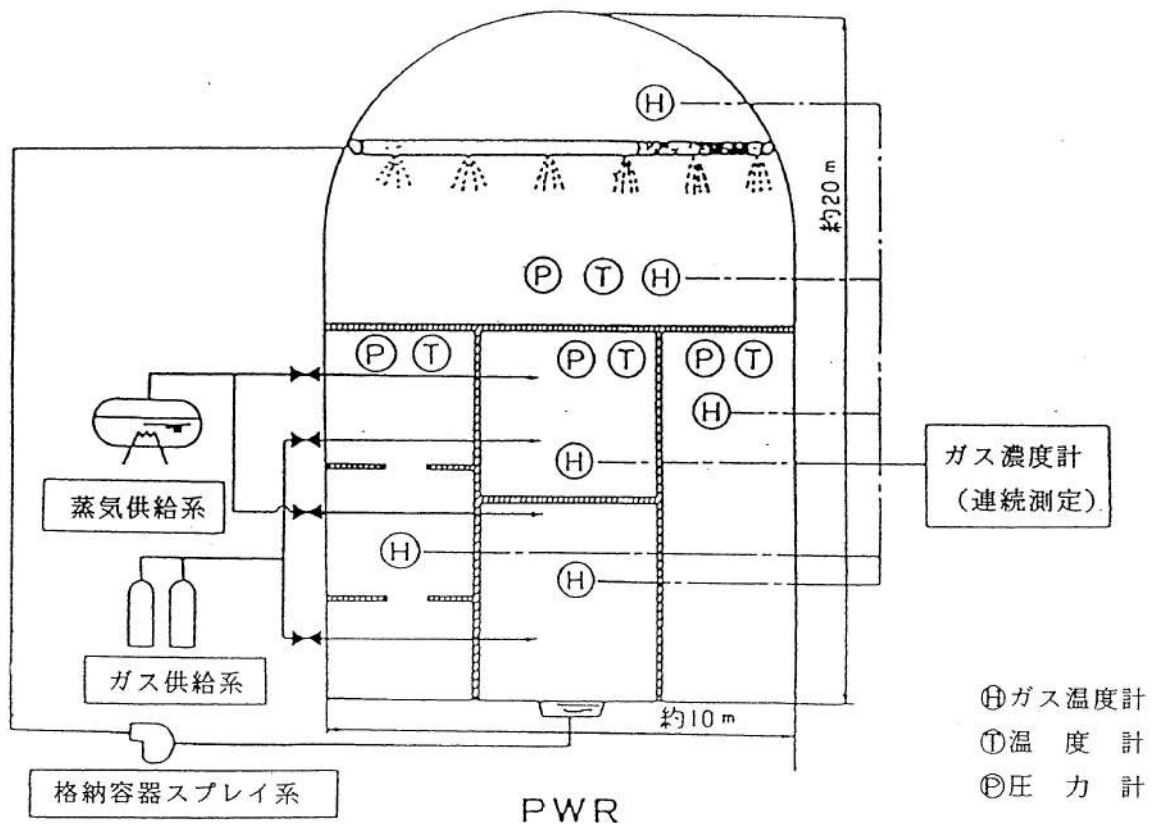
ない条件において試験を実施している。本試験結果からもドーム部においては有意な温度成層化は認められていない。したがって、本試験のように小さい漏えい量においても原子炉格納容器圧力及び原子炉格納容器内温度を評価する場合に原子炉格納容器内を1ノードで模擬するCOCOコードを用いることは妥当であるといえる。

付表 3-1 NUPEC 試験の試験条件 (M-3 シリーズ)

Run No.	格納容器初期温度 (°C)	水蒸気放出			放出位置	格納容器自由体積 (m ³)
		流量 (kg/sec)	時間 (min)	気体温度 (°C)		
M-3-1	室温	0.08	30	105	SG ループ室 下部基礎部	1,300
M-3-2	室温	0.33	30	128	SG ループ室 下部基礎部	
M-3-3	82	0.33	30	130	SG ループ室 下部基礎部	
M-3-4	室温	0.33	30	128	加圧器逃がしタンク	
(参考) 実機 PWR (注 1)	約 50°C	約 85~5 (二相放出) (注 2)	—	約 300 (1次冷却系初期温度)	SG ループ室 下部	約 42,000~ 約 73,000

(注 1) 代表 2, 3, 4 ループの「全交流動力電源喪失事象」における解析条件及び解析結果

(注 2) NUPEC 試験における水蒸気放出量を実機の規模に換算した場合、約 19~3kg/sec



付図 3-1 NUPEC 試験設備概念図



付図 3-2 NUPEC 試験 (M-3-1) 試験結果



付図 3-3 NUPEC 試験 (M-3-2) 試験結果

枠囲いの内容は、非公開資料(Ref. [3])の内容ですので公開
できません。



付図 3-4 NUPEC 試験 (M-3-3) 試験結果



付図 3-5 NUPEC 試験 (M-3-4) 試験結果

枠囲いの内容は、非公開資料(Ref. [3])の内容ですので公開
できません。

JASMINE コード

目次

1. はじめに	参考 1- 3
2. 使用実績及び解析モデルについて	参考 1- 3
2.1 使用実績	参考 1- 3
2.2 解析モデル	参考 1- 6
2.2.1 背景	参考 1- 6
2.2.2 解析モデルの構成	参考 1- 6
2.2.3 解析モデルの説明	参考 1- 9
2.3 入出力	参考 1-21
2.3.1 入力例	参考 1-22
2.3.2 出力例	参考 1-28
3. 解析結果の例示	参考 1-28
4. 水蒸気爆発実験への適用例	参考 1-30
4.1 粗混合実験解析	参考 1-30
4.1.1 解析条件	参考 1-30
4.1.2 解析結果	参考 1-34
4.2 爆発実験解析	参考 1-36
4.2.1 解析条件	参考 1-36
4.2.2 解析結果	参考 1-41
5. 参考文献	参考 1-48
添付 1 水蒸気爆発実験と実プラントの水蒸気爆発評価における エネルギー変換効率の比較について	参考 1-49

1. はじめに

格納容器破損モード「原子炉压力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」では、発電用原子炉の運転中に LOCA が発生するとともに、ECCS 注水機能、格納容器スプレイ再循環機能等の安全機能の喪失が重畳する。このため、緩和措置がとられない場合には、溶融炉心と原子炉容器外の水が接触し、このときに発生するエネルギーが大きい場合に構造物が破壊され原子炉格納容器破損に至る可能性がある。

この原子炉压力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用による水蒸気爆発事象発生の可能性は、これまでの知見からも極めて低いと考えられる。しかしながら、水蒸気爆発が発生した場合についても考慮し、ペDESTAL 等の原子炉格納容器の構造部材の支持機能に対する影響を確認しておくことは、格納容器下部への水張り等の格納容器破損防止対策の適切性を確認する上でも有益な参考情報になると考える。

本資料では、水蒸気爆発の現象を評価する解析コードである JASMINE コードについて、以下の内容をまとめる。

- ・使用実績及び解析モデル
- ・実験結果とのベンチマーク

2. 使用実績及び解析モデルについて

2.1 使用実績

水蒸気爆発解析コード JASMINE (JAEA Simulator for Multiphase INteractions and Explosions) ^[1] は、日本原子力研究開発機構 (以下「JAEA」という。) にて開発された水蒸気爆発の現象を評価する解析コードであり、水蒸気爆発の粗混合過程及び伝播膨張過程 (爆発過程) における伝熱流動現象のシミュレーションを行うことができる。

表 2-1 に JASMINE コードの主な適用実績を示す。JASMINE コードは、FARO 及び KROTOS における各種実験結果とのベンチマークにより水蒸気爆発時の挙動を適切に模擬できることが確認されている他、SERENA 実験解析への適用^[2]、炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率評価への適用実績^[3]がある。

(1) 格納容器破損確率評価への適用

BWR 及び PWR モデルプラントにおける炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率を水蒸気爆発の解析コードである JASMINE コードと確率論的手法を組み合わせ、評価した事例が文献^[3]にて示されている。

PWR モデルプラントを対象とした原子炉下部キャビティ内水蒸気爆発解析の概要は以下のとおりである。

既存の確率論的安全評価より、頻度の高いプラント損傷状態で原子炉下部キャビティ冠水の可能性があるものとして「小破断 LOCA, 早期炉心損傷, 格納容器スプレイ作動」, 「小破断 LOCA, 後期炉心損傷, 格納容器スプレイ作動」, 「小破

断 LOCA, 早期炉心損傷, 格納容器スプレイ不作動」, 「小破断 LOCA, 後期炉心損傷, 格納容器スプレイ不作動」が選定され, 事故解析コードによる解析等に基づき原子炉容器破損時の原子炉格納容器内熱水力条件及び熔融炉心条件が設定されている。

解析体系は二次元円筒座標系であり, 径方向 18×軸方向 36 セルの解析格子で原子炉下部キャビティ周辺が模擬されている。爆発解析では, 体系の中心軸上で底から 2 番目のセルに爆発源を置き, トリガリングを与えている。

JASMINE コードは炉外水蒸気爆発による負荷の確率分布を評価するために用いられている。評価の入力条件である水蒸気爆発の初期・境界条件, 及び解析モデルに含まれるパラメータは, それぞれの不確かさを表す確率分布関数で与えられ, JASMINE 解析により, その不確かさを伝播させ, 水蒸気爆発による負荷の確率分布が評価される。負荷を示す指標としては, プール水に与えられる運動エネルギーのピーク値, 壁面の力積の飽和値がそれぞれ評価され, 水蒸気爆発による負荷の累積確率分布が評価されている。

(2) SERENA 実験解析への適用

国際協力プロジェクトとして実施されている最新の OECD-NEA/SERENA 実験データを用いて, JASMINE コードを用い, SERENA 実験 TROI 装置体系を対象にメッシュモデルを作成し, 試験体系内での粗混合過程及び微細化過程における熱流動解析が実施^[2]されている。

SERENA 実験 FARO 装置は炉容器と圧力容器の 2 つに大別され, 試験時には, 炉容器内で融解した熔融デブリが開放弁及びノズルを通じて圧力容器内に設置された試験容器に流入する。試験容器は, 直径 600mm, 高さ 1.5m の円筒容器であり, 水面高さが 1m となるように水が溜められている。解析体系は, 圧力容器, 圧力容器内の試験容器, メルト流入位置としてノズルが考慮されており, 試験容器形状が軸対称形状であることから, 二次元軸対称としてモデル化されている。

表 2-1 JASMINE コードの主な適用実績

1	研究名称	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
	解析実施者	JAEA
	実施時期	2007年11月
	研究概要	BWR及びPWRモデルプラントにおける炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率を評価した。水蒸気爆発による負荷の確率分布を評価するために、ラテン超方格サンプリング(LHS)による確率論的手法を用い、その中で水蒸気爆発コードJASMINEコードを物理モデルとして使用した。評価対象はBWR Mark-II型のペDESTAL及び圧力抑制プール、PWRのキャビティにおける水蒸気爆発である。
2	研究名称	改良型軽水炉のシビアアクシデント対策に係る検討
	解析実施者	独立行政法人 原子力安全基盤機構
	実施時期	平成21年度
	研究概要	FCI解析コードJASMINE Ver.3を用いて、SERENA実験体系を対象にメッシュモデルを作成し、容器内熱流動解析を実施することによりその適用性について検討を実施。また作成したモデルを適用して感度解析を実施し、模擬溶融デブリ及びプール水の温度、プールの形状、模擬溶融デブリの組成について水蒸気爆発に対する影響を確認した。

2.2 解析モデル

2.2.1 背景

図 2-1 で示すとおり，水蒸気爆発は，熱的デトネーションモデル^[4]において，4つの段階があると考えられている。それぞれの過程に関する現象を以下に示す。

- ・粗混合 低温冷却材内で高温の融体が粗い粒子として分散（細粒化）し，混合しながら蒸気膜によって断熱されている状態。（タイムスケール：0.1秒～数秒）
- ・トリガリング 蒸気膜の不安定化による急速な冷却材の蒸発及び溶融した液滴の微細化の開始
- ・伝播 衝撃波の伝播に伴う溶融液滴の微細化及び急速な熱伝達が生じる状態。（タイムスケール：数ミリ秒単位）
- ・膨張（爆発） 冷却材の蒸発と，周囲に負荷を生じさせる可能性のある混合物の膨張（爆発）

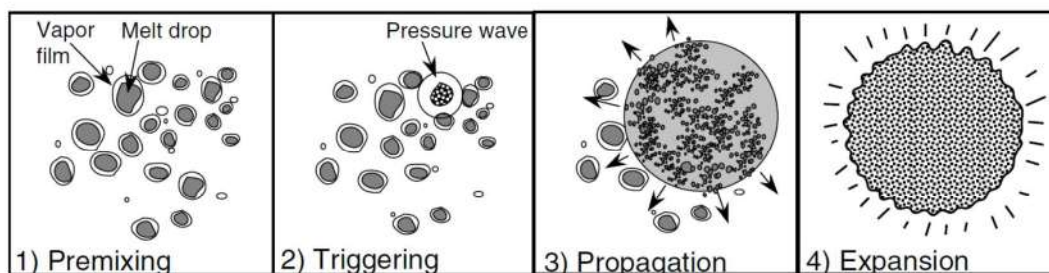


図2-1 水蒸気爆発の現象論的な4つの段階^[1]

上で示した現象論的な4つの段階の仮定に基づくと，水蒸気爆発による発生エネルギーの評価は，通常次の2ステップを通して行われる。

- ・冷却材と粗混合状態にあり，続く爆発過程に関与し得る高温液体がもつ内部エネルギーの評価
- ・伝播と膨張（爆発）の過程を介する力学的エネルギーの評価

2.2.2 解析モデルの構成

原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用（以下「FCI」という。）で想定される現象と JASMINE コードの概念と構成を図 2-2 に示す。JASMINE コードは溶融炉心挙動モデルと冷却材の多相流動モデルの2つで構成される。溶融炉心モデルは融体ジェット，融体プール，融体粒子の3つのサブモデルを含む。冷却材の熱水力挙動を扱う多相流動モデルは，日本原子力研究所（JAERI）で開発された ACE-3D コード^[5]の修正版である。

JASMINE コードは，粗混合過程と爆発過程の2段階に分けて水蒸気爆発の全過程

を解析する。初めに、流動体系や流入する溶解物に関する初期・境界条件を与えることで粗混合過程が解析され、次に、解析時刻における粗混合計算の出力データに、爆発モデルオプションの指定を与えることで、爆発過程、すなわち伝播と膨張過程が解析される。

粗混合過程と爆発過程の物理特性を表 2-2 にまとめる。

表 2-2 粗混合過程及び爆発過程の物理特性

	粗混合	爆発（伝播，膨張）
物理特性		
支配的な物理過程	重力（浮力）による対流	衝撃波の伝播
時間スケール	0.1-10 s	0.1-10ms
融体サイズスケール	1-10mm	1-100 μ m

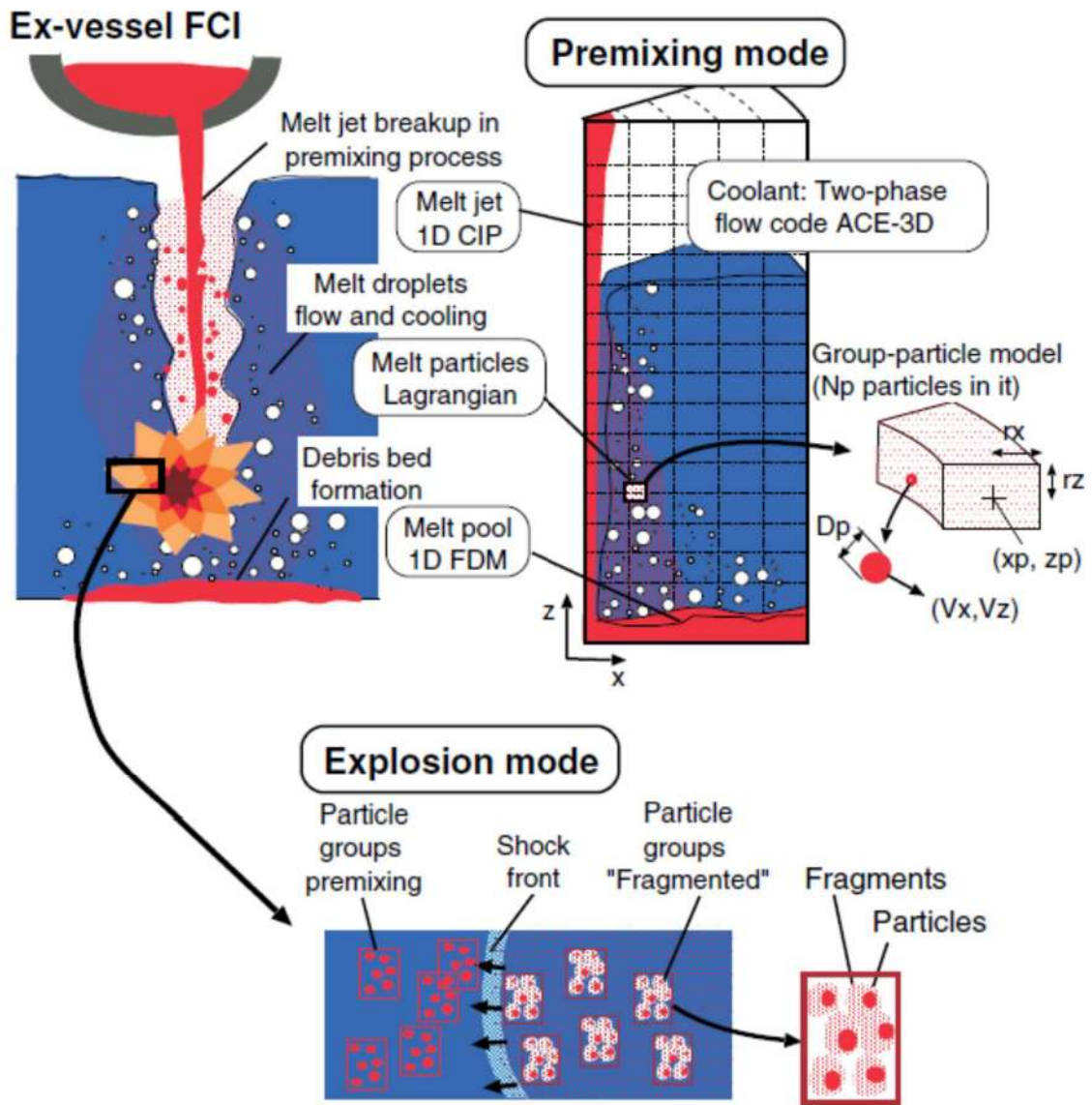


図 2-2 JASMINE コードの概念と構成 [1]

2.2.3 解析モデルの説明

(1) 融体ジェットモデル

融体ジェットに対しては、Z方向一次元の質量、内部エネルギー及び運動量保存則が解かれる。融体ジェット表面からの液滴の発生（融体ジェットからの質量エントレインメント）は、ジェット分裂長に対する実験相関式と融体ジェットの質量保存則に基づき求められる。図2-3は、融体ジェットがプール水で侵食され、下方に進むに従ってジェット直径が減少する様を表している。ジェットが完全に消失する水深をジェット分裂長 L_{brk} と呼ぶ。

ジェット分裂長は、Bond 数 $Bo_J > 50$ の条件では Taylor 型相関式^[6]が用いられ、それ以外の場合は Saito らの相関式^[7]によって次のとおり算出される。

$$\frac{L_{brk}}{D_{ji}} = \begin{cases} 10 \left(\frac{\rho_j}{\rho_l} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_j g D_{ji}^2}{\sigma_j} \geq 50 \\ 2.1 \left(\frac{\rho_j}{\rho_l} \right)^{1/2} \left(\frac{V_{ji}^2}{g D_{ji}} \right)^{1/2} & Bo_J = \frac{\rho_j g D_{ji}^2}{\sigma_j} < 50 \end{cases} \quad (2.2-1)$$

ここで、 ρ_j と ρ_l はそれぞれジェットと水の密度、 σ_j はジェットの表面張力、 D_{ji} は水面でのジェットの直径、 V_{ji} は水面でのジェット流速、 g は重力加速度である。

融体液滴発生量、すなわち質量エントレインメントに対応する体積エントレインメント流量 (V_e) は、ジェット直径が水深とともに線形的に減少するという仮定で計算される。

$$V_e = \frac{V_j}{2} \left(\frac{D_{ji}}{L_{brk}} \right) \sqrt{\frac{H_{pl}}{\max(L_{brk}, H_{pl})}} \quad (2.2-2)$$

ここで、 H_{pl} はプール深さ、 V_j はジェットの流速である。

質量エントレインメント流量 \dot{m}_e は、次のように求められる。

$$\dot{m}_e = C_{ent} \rho_j V_e \quad (2.2-3)$$

ここで、 C_{ent} は定数である。定数 C_{ent} を 1 として設定した場合、ジェットは実験に基づく相関式によって決定されたジェット分裂長で崩壊する。 C_{ent} を大きくするにつれ、ジェット分裂長は短くなる。

本融体ジェットモデルでは、ジェットからの伝熱は、表面積と冷却水内の移動時間のどちらにおいても、融体粒子や融体プールの場合と比較して小さいので、現在のところ考慮されていない。したがって、ジェットから冷却水への熱流束は 0 と設定される。

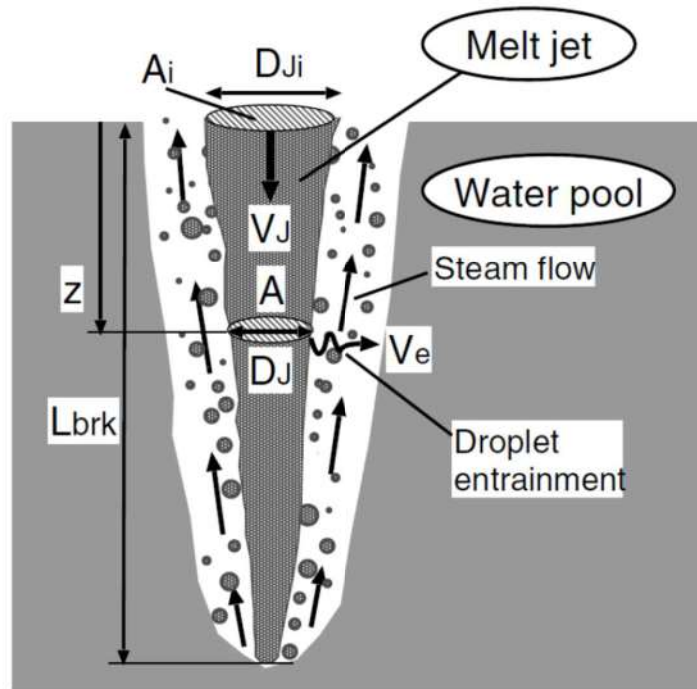


図 2-3 ジェット分裂モデルの概要 [1]

(2) 融体プールモデル

ジェット又は粒子群が底面に到達する際には、連続した融体を形成する可能性がある。図 2-4 に、融体プールモデルの模式図を示す。融体プールモデルの概要を以下に示す。

- X方向一次元の質量，エネルギー及び運動量保存則を解く。
- ジェットや粒子群から加わった融体質量を考慮する。
- 融体プール表面における二相流及び床との摩擦影響は無視する。
- 融体プール端の凝固を取り扱う。
- 二相流と融体プール間の伝熱を考慮する。(図 2-5)
- 流動様式が気泡流以外，すなわち核沸騰，膜沸騰状態となって気相体積が増加することによる熱流束緩和効果（ボイド効果）は，ベース熱流束にボイド率の関数としての係数を乗じることで考慮する。

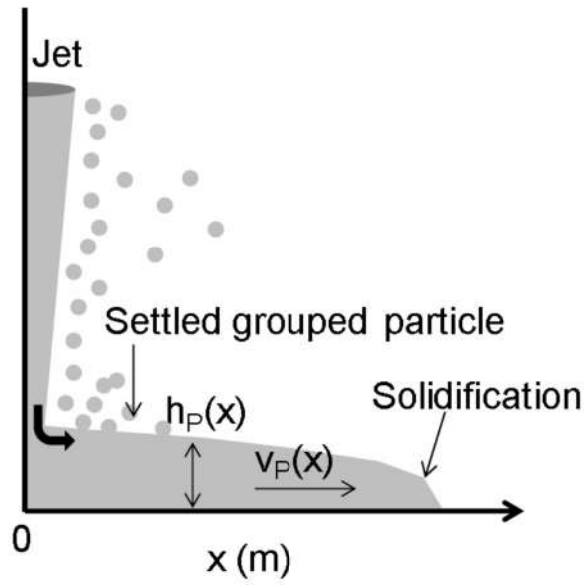


図 2-4 融体プールモデル模式図^[1]

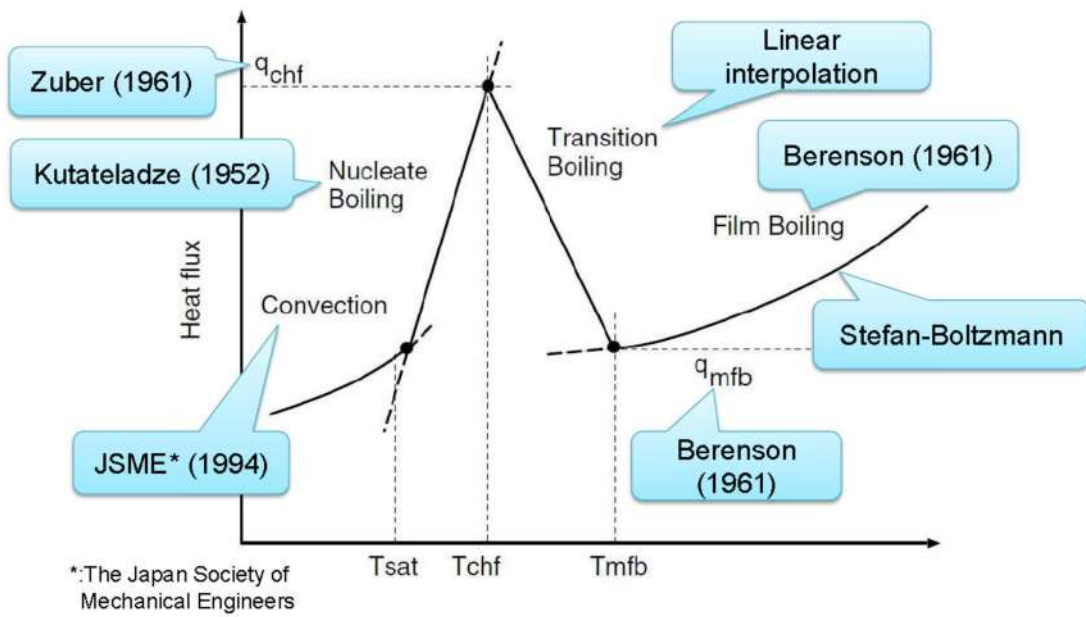


図 2-5 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (融体プール)

(3) 融体粒子モデル

実機体系のような大規模シミュレーションを可能とするために、グループ化された粒子（粒子群）の概念が導入された。図 2-6 に融体粒子モデルの概要図を示す。融体粒子モデルの概要を以下に示す。

- “粒子群”とは、同じ特性を持ち、X-Z 平面上の有限な空間を占める粒子のグループである。
- 粒子群の実際の形状、回転、拡散特性のような属性は無視される。
- それぞれの粒子群の代表粒子の動きやヒートバランスは、ラグランジュ方程式によって計算される。
- ジェット表面から粒子群が離れる前に、一定量以上の粒子を蓄える“前粒子群”概念が導入されている。前粒子群の融体ジェット表面からの放出基準を以下に示す。
- 粒子群質量 > 0 ，かつ下記に示す少なくとも1つの状況に該当すること。
 - 粒子数が N_{per} の値を超える。
 - 前粒子群の X 方向のサイズが、格子の X 方向サイズの 4 分の 1 より大きい。
 - 前粒子群の X 方向の外側のエッジ位置が最初のセル境界を超える。
 - 存続時間が時間制限値 n_{lim} を超える。

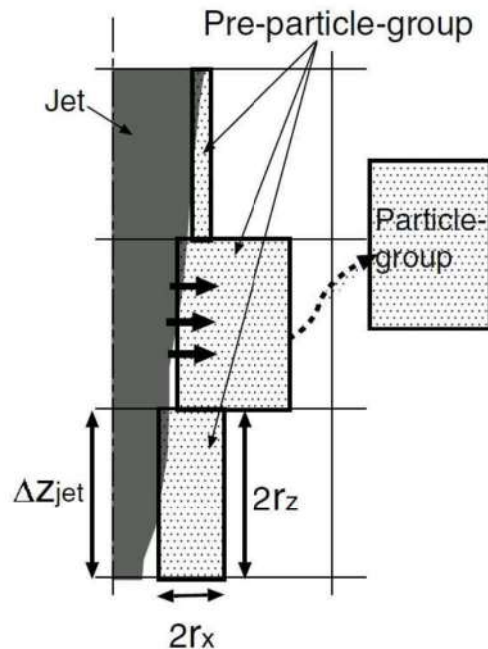


図 2-6 融体粒子モデル概要図 [1]

次に、粒子群の取扱い手法について説明する。

図 2-7 に、物理的に非現実的な状況の発生を回避するために設けられた粒子群間のインターフェースにおける 3 つのモデルを示す。これらのモデルの特徴を以下に示す。

1. 接触する 2 つの粒子群の粒子の体積割合の総和が融合制限 $\alpha_{\text{pack}} (=0.6)$ 以上となる場合は、2 つの粒子群は減衰係数 0.5 の条件で反発する。
2. 上記の条件を満たさず、かつ 2 つの接する粒子群が同じような特性を持つ場合、すなわち温度、粒子径、速度が 20% 以内の差で一致する場合は、それらは融合して 1 つの粒子群となる。
3. 上記 2 つの条件を満たさない場合、2 つの粒子群は干渉を起こさずにすり抜ける。

図 2-8 に、解析体系の境界において粒子群に適用する取扱い条件を示す。

1. 粒子群が中心境界に到達した場合、境界内側へ弾性衝突する。
2. 粒子群が頂部又は側部の境界に達した際は、減衰係数 0.1 の条件で境界内側へと反発する。
3. 粒子群が底へ到達した際、デブリプールと粒子群のどちらかが溶融している場合には粒子群はデブリプールと融合する。そうでない場合には、粒子群は冷え固まったデブリプール上に堆積し、デブリベッドを形成する。

図 2-9 に粒子に対する抗力係数の評価条件を示す。抗力係数は球体に対する一般的な評価式を用いる。

融体粒子に対する伝熱モデルの概要を以下に示す。

- ・粒子表面における熱伝達率は、図 2-10 に示す相関式により評価される。粒子が固化するかどうかは、その粒子の表面温度により判断される。
- ・粒子群周囲のボイド及び床への粒子群堆積に伴う伝熱効果の劣化の影響が考慮される。

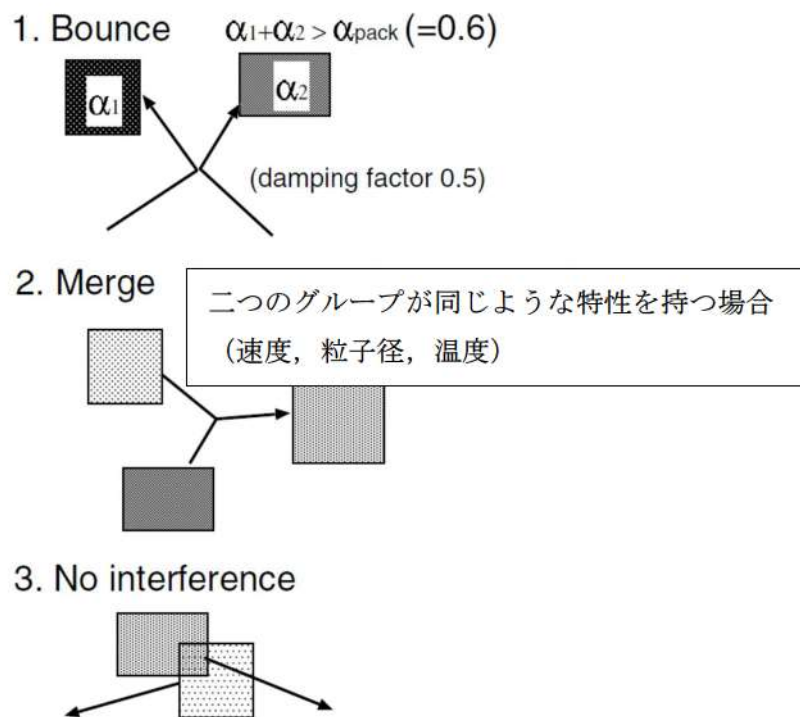


図 2-7 粒子群間のインターフェースモデル [1]

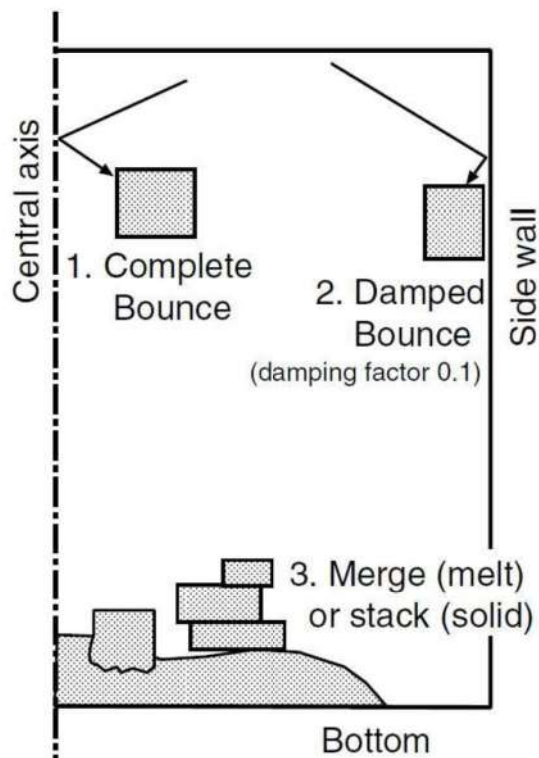


図 2-8 粒子群の境界での取扱い [1]

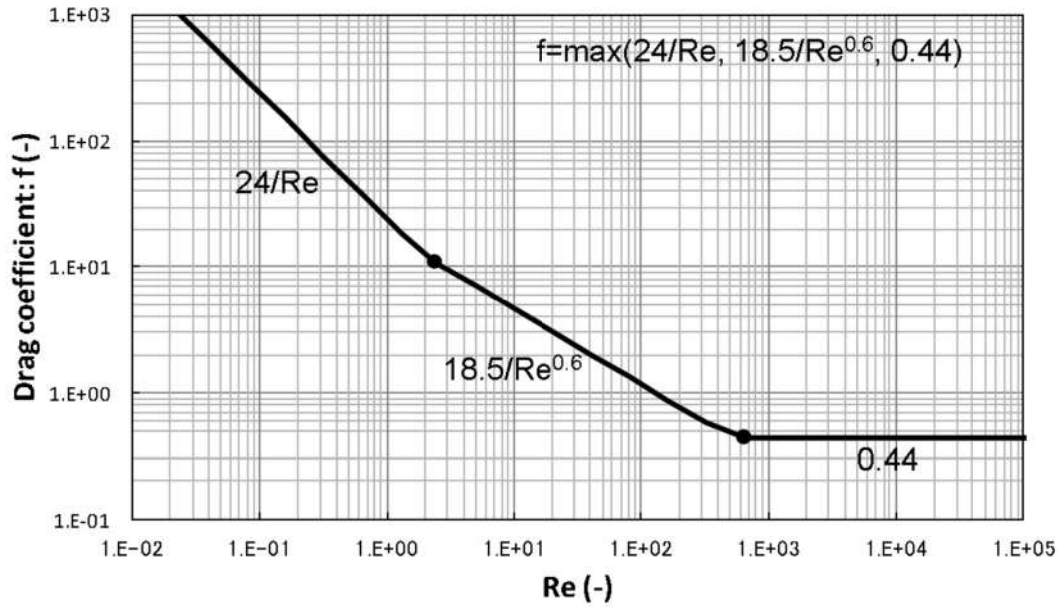


図 2-9 融体粒子の流体抗力係数

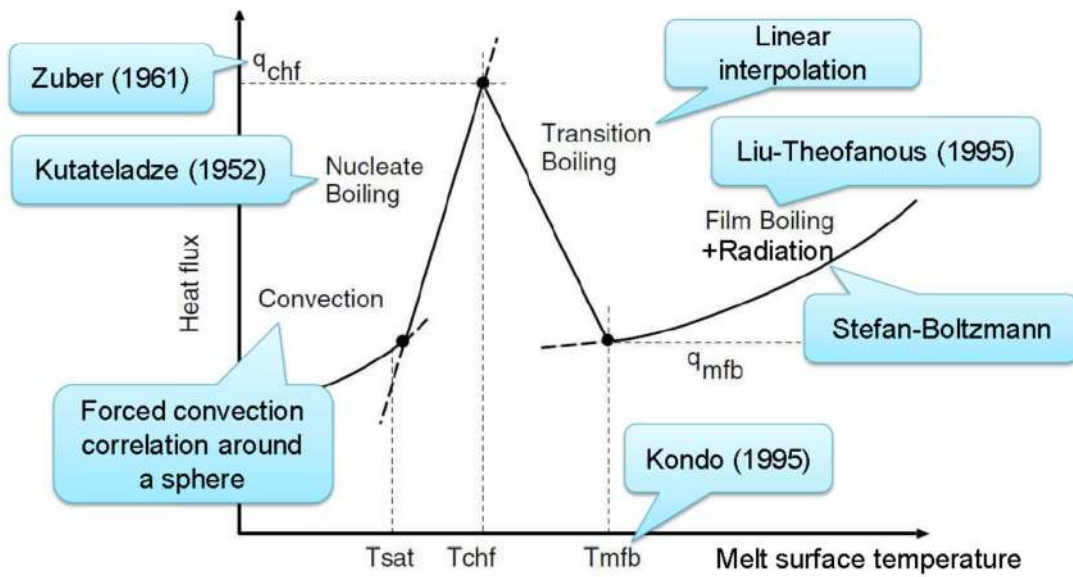


図 2-10 各沸騰状態において用いられる伝熱モデル (粒子群)

(4) トリガリングモデル

JASMINE コードを用いた解析では、粗混合計算結果を爆発計算に引き継ぐ際に、トリガリングと呼ばれる爆発のきっかけをユーザーが任意のタイミングで与えることにより、爆発解析を実施する。トリガリングモデルの特徴を以下に示す。

- ・局所的な圧力上昇と瞬時のガス膨張によりトリガリングを与える。
- ・圧力伝播は微細化を誘発する。

(5) 微細化モデル

爆発過程は以下の概念を基本としてモデル化されている。

- ・粗混合で発生した粒子が衝撃波、すなわち周囲冷却材の極端に大きな相対速度に晒されると、流体力により粒子表面の融体が微細化する。
- ・微細化粒子は μm オーダーで熱放出が非常に早く、瞬時に水を蒸発させることで、衝撃波を増幅させる。熱放出は微細化粒子の発生率に依存する。

上記過程を評価するために、図 2-11 に示す粒子群モデルにおいて、融体モデル構成要素として”微細粒群”が追加された。

微細粒群は粒子群から発生した微細化粒子の集合体である。微細粒群は以下のように扱われる。

- ・微細化粒子の発生：

微細化粒子質量は母粒子群から水力的な相互作用により分離される。質量保存則は次のように表せる。

$$\frac{dm_p}{dt} = -\dot{m}_f \quad (2.2-4)$$

$$\frac{dM_f}{dt} = n_p \dot{m}_f \quad (2.2-5)$$

ここで、 m_p は粒子群中の一粒子の質量、 m_f は一粒子から生成する微細粒群の質量、 M_f は粒子群全体から生成する微細粒群の質量、 n_p は粒子群の粒子数である。一粒子からの微細化率 \dot{m}_f は構成式(2.2-7)により与えられる。

- ・伝熱とエネルギー保存：

微細化粒子表面の熱伝達率は非常に大きいと考えられることから、微細化粒子内の熱伝導が、この過程における伝熱量の律速となる。微細化粒子の外部の熱伝達率は非常に大きいと考えられ、定常状態でのいかなる伝熱式もこの特異に過度的な状況には適用できない。微細化粒子の単位質量当たりの熱放出量 \dot{q}_f を用いて、微細化粒子のエネルギー保存は以下のように表せる。

$$\frac{de_f}{dt} = e_p \frac{n_p \dot{m}_f}{M_f} - \dot{q}_f \quad (2.2-6)$$

ここで、 e_f と e_p は微細化粒子と粒子群の粒子の比内部エネルギーである。母粒子（粒子群の粒子）の比内部エネルギーは爆発過程では一定であると仮定する。

微細化粒子の主要な作用は急速熱放出で、運動論的な観点は重要ではないことから、微細化粒子に対する運動方程式は解かず、微細化粒子は母粒子群に付随すると仮定する。

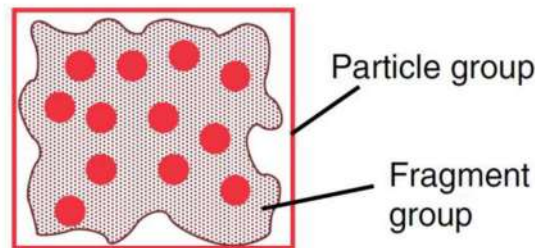


図 2-11 粒子群と微細粒群 [1]

一融体粒子からの微細化率 \dot{m}_f は以下のように求める。

$$\dot{m}_f = C_{frg} \frac{1}{t_b^*} \frac{\pi}{6} D_p^2 v_r (\rho_c \rho_p)^{1/2} \quad (2.2-7)$$

$$t_b^* = \begin{cases} 1 & : \text{Carachario s et al. model} \\ 18.7/B_0^{1/4} & : \text{Yuen et al. model} \end{cases} \quad (2.2-8)$$

$$B_0 = \frac{3}{16} \frac{C_D \rho_c D_p v_r^2}{\sigma_p} \quad (2.2-9)$$

$$t_b = t_b^* \sqrt{\frac{\rho_p D_p}{\rho_c v_r}} \quad (2.2-10)$$

ここで、 t_b は分裂時間、 t_b^* は分裂の無次元時間、 D_p は粒子径、 v_r は粒子と冷却材間の相対速度、 ρ_c と ρ_p は冷却材と融体粒子の密度、 σ_p は融体粒子の表面張力である。抗力係数 C_D はニュートン域の値 0.44 を使用する。 C_{frg} は実験定数である。

(6) 二相流モデル

JASMINE コードにおける二相流モデルは、二相流コード ACE-3D [6] を基に開発された。二相流モデルの特徴を以下に示す。

- ACE-3D は円筒座標系の三次元保存方程式を解くことができるが、JASMINE コ

ードでは二次元座標系での計算機能が適用されている。

- 水、蒸気、非凝縮性ガスの質量及び内部エネルギー方程式が解かれる。対して、運動量方程式においては、蒸気と非凝縮性ガスは平衡状態であると仮定して、水、混合性ガスの質量及び内部エネルギー方程式を解く。
- 融体プールと融体粒子、微細化粒子からの伝熱を扱うことができる。
- 水-ガス間の熱伝達係数（図 2-12 参照）は、TRAC-PF1 コードの気泡流と液滴流のモデルを採用。
- 二相間の相対速度が終端速度に等しいと仮定（図 2-13 参照）。
- 水滴/気泡径は臨界 We 数を用いて評価。臨界 We 数は、水滴は 4.0、気泡は 7.5（図 2-13 参照）。
- 抗力係数は融体粒子の場合とほぼ同じ（図 2-14 参照）。
- 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構を図 2-15(a)に示す。図 2-15(a)において f_{htint} , $f_{hilkill}$, $f_{higkill}$ は粗混合解析にて冷却材の蒸発を制御するパラメータである。 f_{htint} は、融体からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合を示す。 $f_{hilkill}$, $f_{higkill}$ は、それぞれサブクール水と気液界面の熱伝達係数、過熱蒸気と気液界面の熱伝達係数の乗数である。
- 微細化粒子から二相流への伝熱量分配機構を図 2-15(b)に示す。 K_{ev} は爆発解析にて微細化粒子からの放熱量のうち、冷却材の蒸発に直接寄与する熱量の割合を表す。

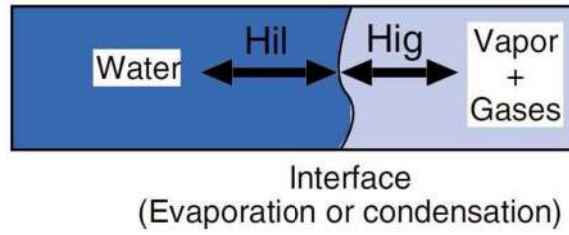


図 2-12 水とガスの界面における熱伝達 [1]

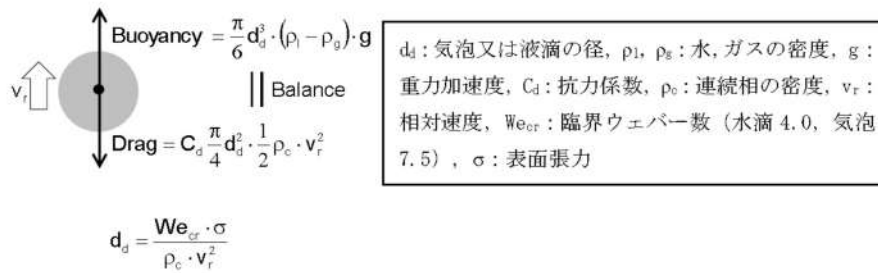


図 2-13 水滴及び気泡における力のつり合い

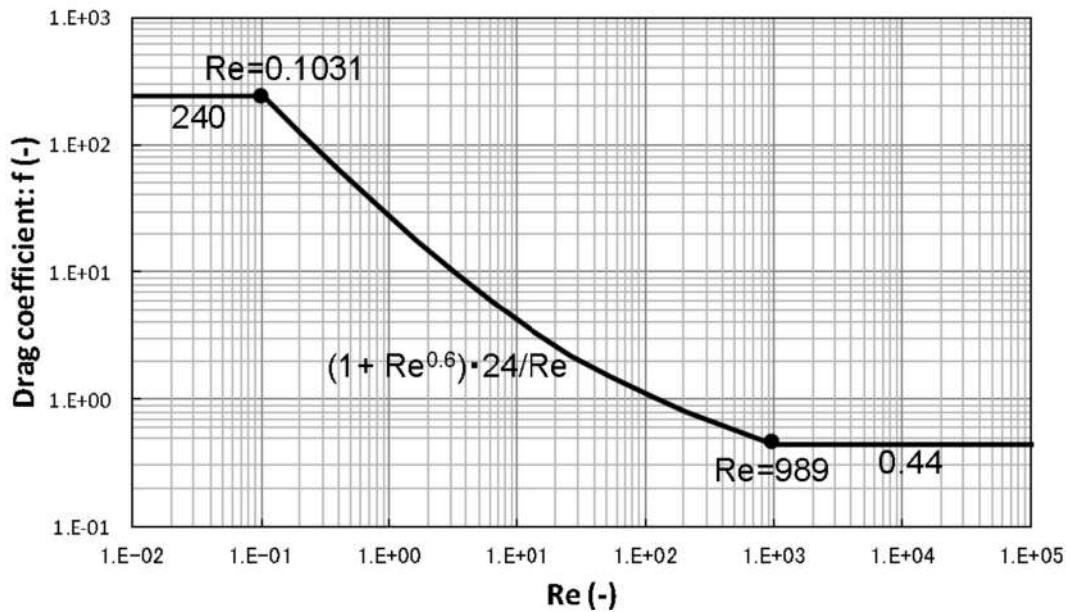
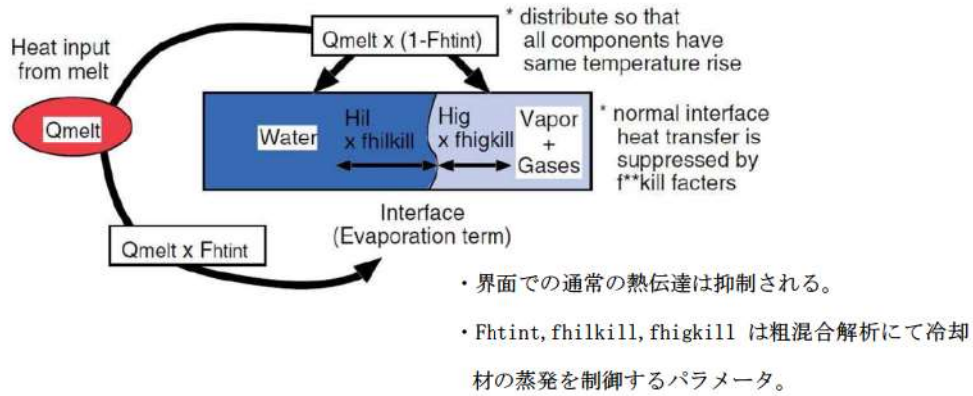
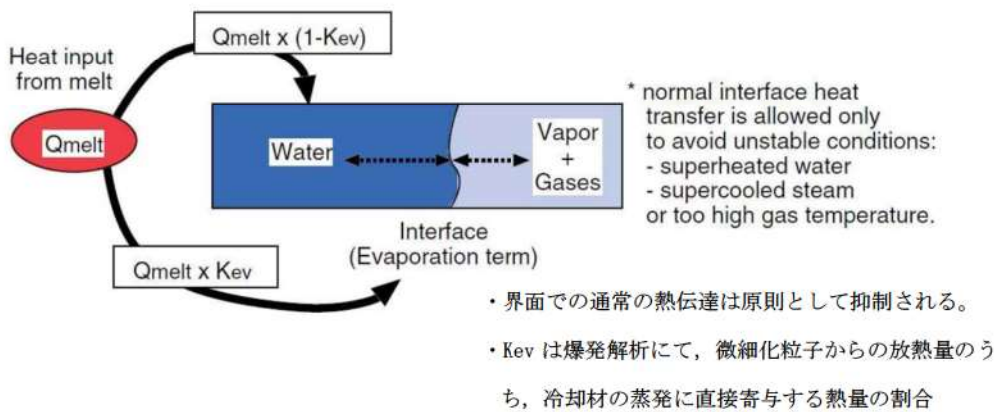


図 2-14 水滴及び気泡の流体抗力係数



(a) 融体粒子から二相流への伝熱量分配機構 [1]



(b) 微細化粒子から二相流への伝熱量分配機構

図 2-15 二相流への伝熱量分配機構 [1]

2.3 入出力

本章では、JASMINE コードによる水蒸気爆発解析時の入出力例を示す。

図 2-16 に水蒸気爆発解析のフロー図を示す。幾何形状等のプラント固有条件や事象進展解析 (MAAP) に基づく溶融燃料条件等に基づき JASMINE コードの入力条件の設定を行う。

JASMINE 解析の評価結果は、水蒸気爆発時の原子炉格納容器の健全性評価を実施するための構造応答評価コードの負荷条件として用いられる。水蒸気爆発負荷を直接受け渡す場合には、動圧を含めた壁面での圧力履歴が構造応答評価コードに引き渡される。

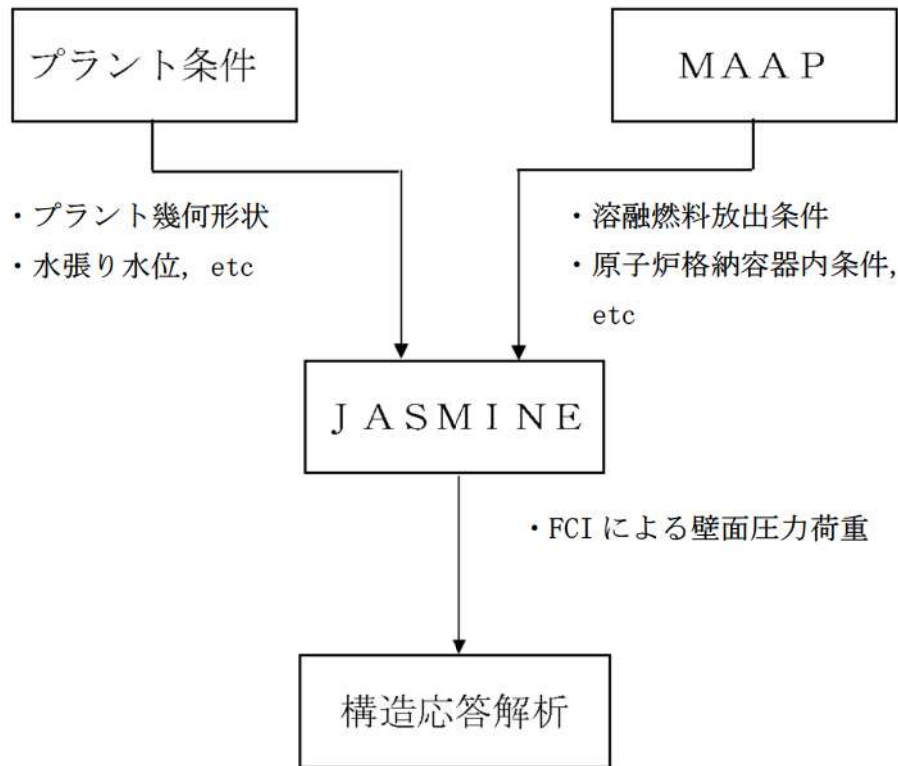


図 2-16 水蒸気爆発解析の流れ

2.3.1 入力例

(1) 計算体系の幾何形状

計算領域は、図 2-17 に示すとおり、円筒座標系における角度 θ のセクターとして定義され、体積は X-Z 平面のグリッドとして離散化される。

原子炉容器破損時における原子炉下部キャビティ領域での水蒸気爆発解析を実施する場合、計算体系を原子炉容器、原子炉下部キャビティ壁面、床面で形成される原形状の中からモデル化することができる。

X-Z 平面でのメッシュ分割は、JASMINE コードの制限値【X方向(=30)、Z方向(=40)】以内で任意に設定することができ、原子炉下部キャビティ領域について、ベッセル、原子炉下部キャビティ空間（液相、気相）、原子炉下部キャビティ壁面等を定義することが可能である。図 2-18 にメッシュ分割の例を示す。

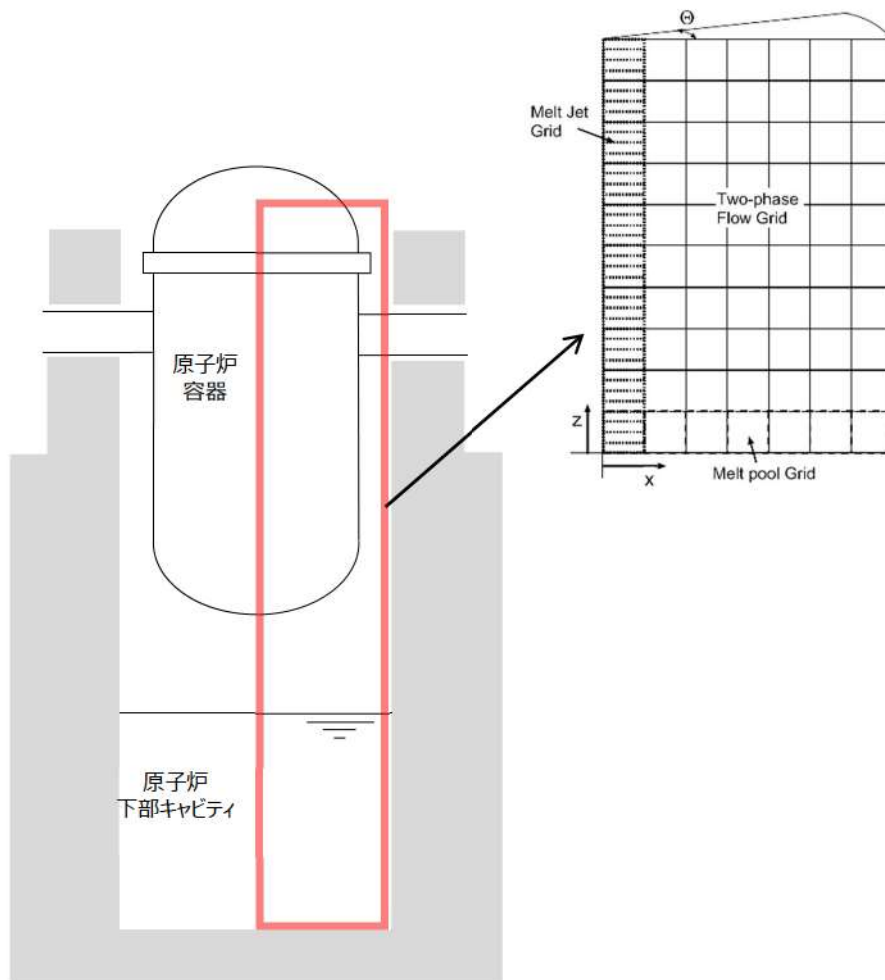


図 2-17 計算体系の幾何形状の例

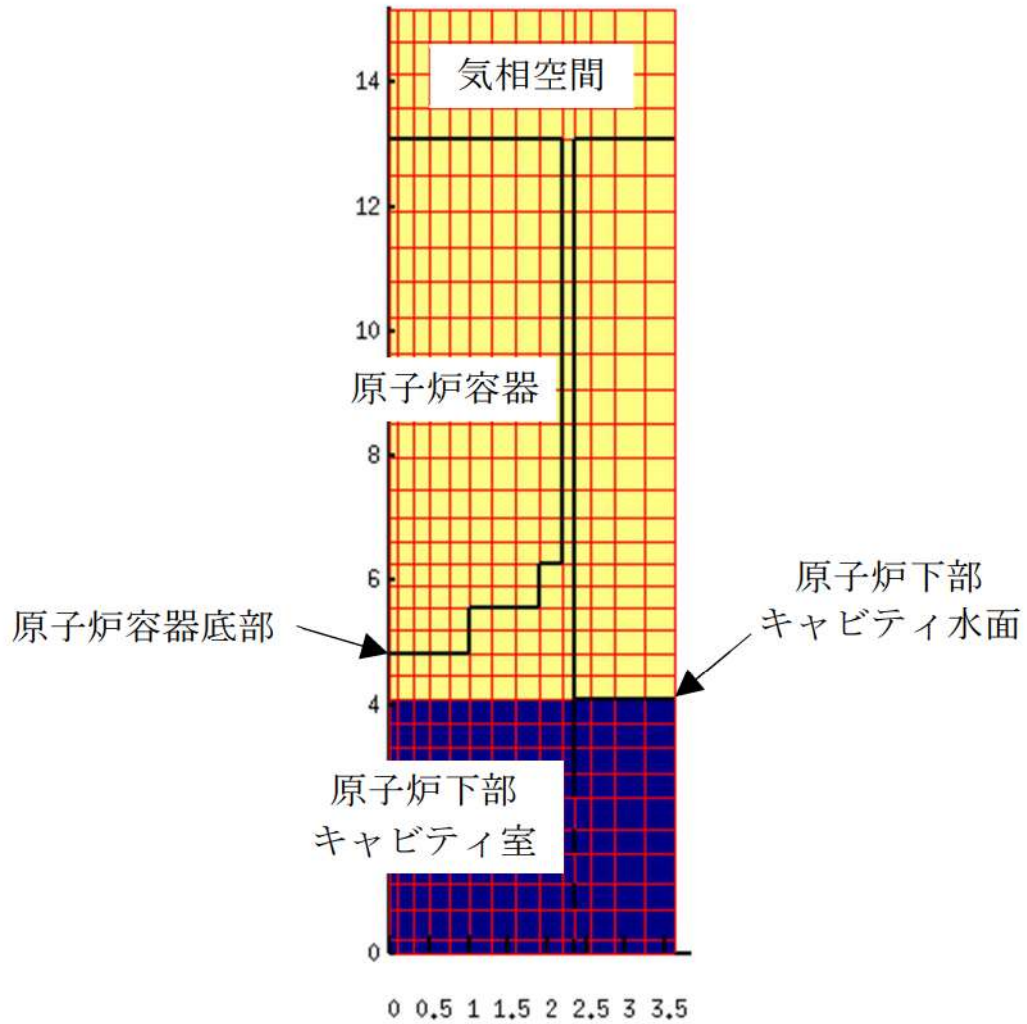


図 2-18 JASMINE 解析のメッシュ分割の例

(2) 溶融炉心物性値

溶融炉心物性値については、溶融コリウムの物性値ライブラリ (jasmine.corium, jasmine.corium2, jasmine.corium3) が、JASMINE コードに付属されており、ユーザーは目的に応じてこれらを活用することができる。各物性値ライブラリの主要な特性は以下のとおりである。表 2-3 に jasmine.corium2 の物性値を例示する。

jasmine.corium : FARO/KROTOS 実験条件 ($UO_2/ZrO_2=80/20wt\%$)

jasmine.corium2 : FARO/KROTOS 実験条件 ($UO_2/ZrO_2=80/20wt\%$), 融点, リキダス, ソリダスを実機相当条件に設定

jasmine.corium3 : TROI 実験条件 ($UO_2/ZrO_2=70/30wt\%$)

(3) 主要入力値

表 2-4 に(1), (2)以外の主要な入力例を示す。

(4) 入力条件の設定の考え方

入力条件は、表 2-4 に示された入力条件の例で示すように、代表的な水蒸気爆発実験を最適に再現するために設定した入力値をベースとし、水蒸気爆発事象に伴う不確かさを踏まえて、以下の保守性を考慮して設定している。なお、評価結果に対して各々が相互に影響し得る条件については、総合的に保守性が担保できることを考慮した設定としている。

- ・メルト放出速度：メルト放出速度は、破損口にかかるデブリ堆積圧等の圧力から計算される。メルト放出速度としては、原子炉容器（以下「RV」という。）の低圧破損時に溶融デブリが下部プレナムに堆積した場合を想定した値を設定。
- ・メルト放出口径：粗混合融体質量を保守的に評価するために、RV 底部の計装案内管口径 0.038m の値を保守的に丸めて として設定。
- ・粗混合時液滴径：既存の FCI 実験 (KROTOS, FARO, TROI, CCM) のザウター平均粒径は 0～3 mm 程度^[8]とされている。一般に粗混合時液滴径が大きい程、粒子から冷却材への伝熱が低下して粒子が固化しにくくなり、冷却材ボイド率も低下することで、粗混合融体質量が大きい傾向があると考えられ、このような傾向は、トリガリング位置を底部、トリガリングタイミングを粗混合融体質量がピークとなる条件において、感度解析により確認されている。上述のトリガ条件を前提として、爆発の強度が大きくなりやすい条件として、上述のザウター平均粒径を包絡する を設定。

: 枠囲みの内容は機密情報に属
しますので公開できません。

- ・トリガリング位置：爆発に関与し得る融体の質量が最大に近く，爆発の強度が大きくなりやすい条件として，中心軸上の底部から軸方向7セル目を選定。
- ・トリガリングタイミング：水蒸気爆発により発生する運動エネルギーが最も大きくなると考えられる条件として設定。

表 2-3 JASMINE 解析における物性値

No.	項目	物性値	備考
1	溶融点	[K]	組み込みライブラリ (jasmine.corium2) に基づく値
2	固相線温度	[K]	
3	液相線温度	[K]	
4	固相密度	[kg/m ³]	
5	液相密度	[kg/m ³]	
6	液相比熱	[J/(kg・K)]	
7	固相比熱	[J/(kg・K)]	
8	溶融潜熱	[J/kg]	
9	熱伝導率	[W/(m・K)]	
10	粘性係数	[Pa・s]	
11	表面張力	[N/m]	
12	輻射率	[—]	

□：枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

表 2-4 JASMINE 解析における主な入力条件の例 (1/2)

No.	入力	値(定義)	単位	備考
1	初期圧力		[Pa]	MAAP 解析結果に基づき設定。
2	プール水温		[K]	MAAP 解析結果に基づき設定。
3	落下メルト総重量		[kg]	コードへは「5メルト放出速度」として入力。
4	メルトジェット温度		[K]	MAAP 解析によると下部プレナム内の溶融デブリの酸化物層の過熱度は約 <input type="text"/> であることから、溶融デブリの融点は jasmine 付属のメルトの物性値パッケージ jasmine.corium2 のリキダス <input type="text"/> に、過熱度 <input type="text"/> に対して保守的に 10K を考慮した値を設定。
5	メルト放出速度		[m/s]	MAAP 解析に基づく RV 破損時の落下メルト総重量約 <input type="text"/> までのデブリ流入速度の最大値を設定。
6	メルト放出口径		[m]	RV 底部の貫通部（計装案内管）口径 0.038m を保守的に丸めて <input type="text"/> を設定。
7	プール水深		[m]	MAAP 解析結果に基づき設定。原子炉容器底部から原子炉下部キャビティ床面までの水深は約 5m。
8	粗混合時液滴径		[m]	大規模 FCI 実験結果 (FARO, COTELS 等) の粒径分布から代表粒子径として設定。
9	爆発後粒子径	0.00005	[m]	文献 ^[1] 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。
10	ブレイクアップ係数	1.0	[-]	文献 ^[1] 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。
11	液滴速度ファクタ	5	[-]	文献 ^[1] 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。
12	トリガリング位置	原子炉下部キャビティ円筒部の中心、底からから 2.7m	[m]	トリガ位置には中心軸上の底部から軸方向 7セル目を選定。これは爆発により発生する運動エネルギーが最も大きくなると考えられる条件を選定したものである。
13	トリガリングタイミング	粗混合融体質量の最初のピークとなる時刻	[sec]	水蒸気爆発により発生する運動エネルギーが最も大きくなると考えられる条件として設定。
14	トリガ閾値	5×10^5	[Pa]	マニュアルによるトリガ圧力の設定範囲 500kPa-10MPa より、500kPa を設定。

: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

表 2-4 JASMINE 解析における主な入力条件の例 (2/2)

No.	入力	値 (定義)	単位	備考
15	フラグメンテーションモデル	Caracharios (1983)モデル	[-]	-
16	フラグメンテーション条件	粒子温度の平均温度が融点以上	[-]	-
17	フラグメンテーション係数	0.35	[-]	文献 ^[1] 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。
18	フラグメンテーション時間	10^{-3}	[sec]	
19	蒸発に用いられるエネルギー割合	融体の寄与 : 0.02 フラグメント放熱の寄与 : 0.7	[-]	
20	フラグメンテーションにおけるボイド緩和係数	ボイド率 0.3~0.75 でカットオフ	[-]	文献 ^[1] 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。
21	トリガ点圧力	2×10^6	[Pa]	ピーク圧力よりも低くかつトリガ閾値圧力 500kPa よりも十分大きい圧力として設定。
22	トリガ点ガス割合	粗混合解析結果の引き継ぎ	[-]	トリガ気相割合は, 粗混合解析結果に基づきトリガ発生時点でのトリガセルでの気相割合を設定。
23	トリガ点ガス温度	1000	[K]	文献 ^[1] 記載の JAEA が実施した検証解析に用いられる条件を採用。

2.3.2 出力例

JASMINE 解析は、「粗混合過程」と「爆発過程」の2段階に分かれている。それぞれの解析における主要な出力を以下に示す。

(1) 粗混合過程

- ・放出されたメルト及び粗混合領域におけるメルト粒子の全質量

粗混合解析は、爆発解析の初期条件を評価するために実施する。重要な物理量は、粗混合過程において熔融状態で水中に分散した融体の質量であり、この物理量に基づきトリガリングタイミングを設定する。

JASMINE コードではこの物理量を定量化する指標として、粗混合融体質量（ボイド率 0.75 以下の領域に存在し、温度が融点以上の融体質量）の時間変化を出力することができる。爆発の強度が大きくなるように粗混合融体質量が最初にピークとなったタイミングでトリガリングタイミングを設定する。

(2) 爆発過程

- ・流体の運動エネルギーの時間変化

流体の運動エネルギーを用いて構造健全性評価を実施する場合には、水蒸気爆発発生時にトリガセルから周囲へ圧力波が伝播し、その発生エネルギーの大部分が流体の運動エネルギーに変換されると想定し、全領域の流体の運動エネルギーの時間変化からその最大値を設定することが考えられる。

3. 解析結果の例示

本項では、泊発電所3号炉における JASMINE 解析結果例を示す。

評価条件はそれぞれ以下の通りである。

- ・評価体系：図 2-18
- ・主な評価条件：表 2-3, 表 2-4

(1) 粗混合過程

放出されたメルト及び粗混合領域におけるメルト粒子の全質量を図 3-1 に示す。図 3-1 により、粗混合融体質量が最初にピークとなる約 0.6 秒後にてトリガリングタイミングを設定している。

(2) 爆発過程

流体の運動エネルギーの時間変化を図 3-2 に示す。図 3-2 より、流体の運動エネルギーのピーク値約 2 MJ が水蒸気爆発時に発生するエネルギーと設定することができる。

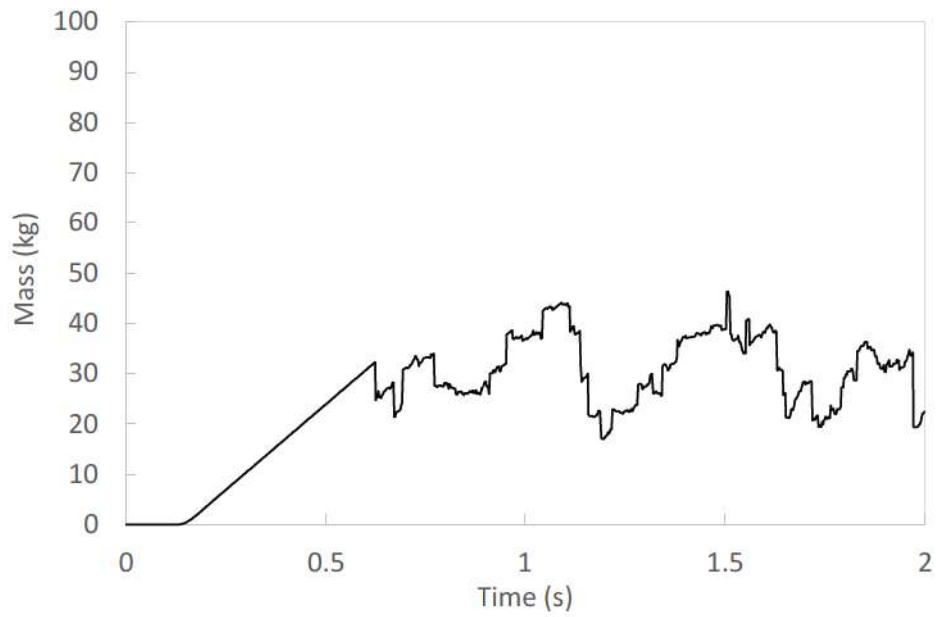


図 3-1 粗混合融体質量（温度が融点以上かつボイド率 0.75 以下の領域に存在する融体質量）の時間的推移

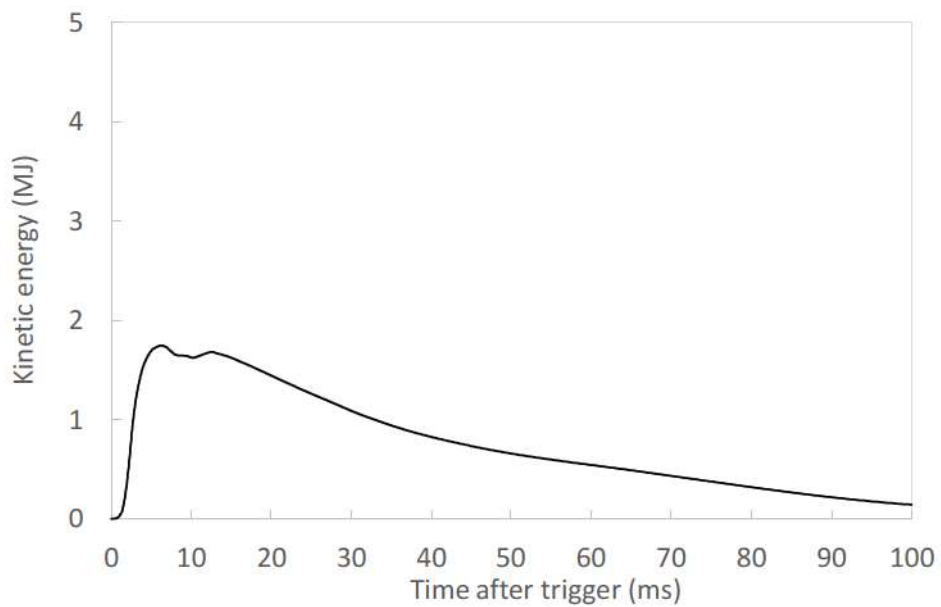


図 3-2 流体運動エネルギーの時間的推移

4. 水蒸気爆発実験への適用例

4.1 粗混合実験解析

粗混合に関するモデルの機能を確認するため、及び実験を最適に再現することを目的としたパラメータ調整のため、JRC-Ispra 研究所で実施された FARO 実験に関するシミュレーションを JAEA が実施している^[1]。FARO 実験では、溶融燃料としてコリウム(UO_2 と ZrO_2 の混合物)を使用し、これらを水プールに落下させたときの、融体ジェット分裂やクエンチ時の加圧及び水蒸気発生によるプール水位上昇等のデータが得られている。FARO 実験における実験装置の概要を図 4-1 に示す。JASMINE コードにおけるベンチマークでは、サブクール度、圧力、ジェット径等のパラメータの異なる 3 種類の実験ケースを選択している。これらの実験では水蒸気爆発が発生せず、かつ粗混合状態が確認できたため、粗混合に関するベンチマーク実験として選定された。以下に各ケースの特徴を簡単に述べる。

L14 ケース : デブリの温度は 3073K, 水位は 2.05m, サブクール度は 1K と小さく、圧力は高圧 (5MPa) であり、ジェット径は 92mm と大きい。雰囲気ガスは蒸気である。

L28 ケース : デブリの温度は 3053K, 水位は 1.44m, サブクール度は 1K と小さく、圧力は低圧 (0.51MPa) であり、ジェット径は 44mm と小さい。雰囲気ガスは蒸気である。

L31 ケース : デブリの温度は 2990K, 水位は 1.45m, サブクール度は 104K と大きく、圧力は最も低圧 (0.22MPa) であり、ジェット径は 48mm と小さい。雰囲気ガスはアルゴンである。

4.1.1 解析条件

ベンチマーク対象の実験ケース (L14, L28, L31) の実験条件及びそれぞれのベンチマーク解析条件を表 4-1 に示す。また、実験装置を模擬した解析モデルを図 4-2 に示す。

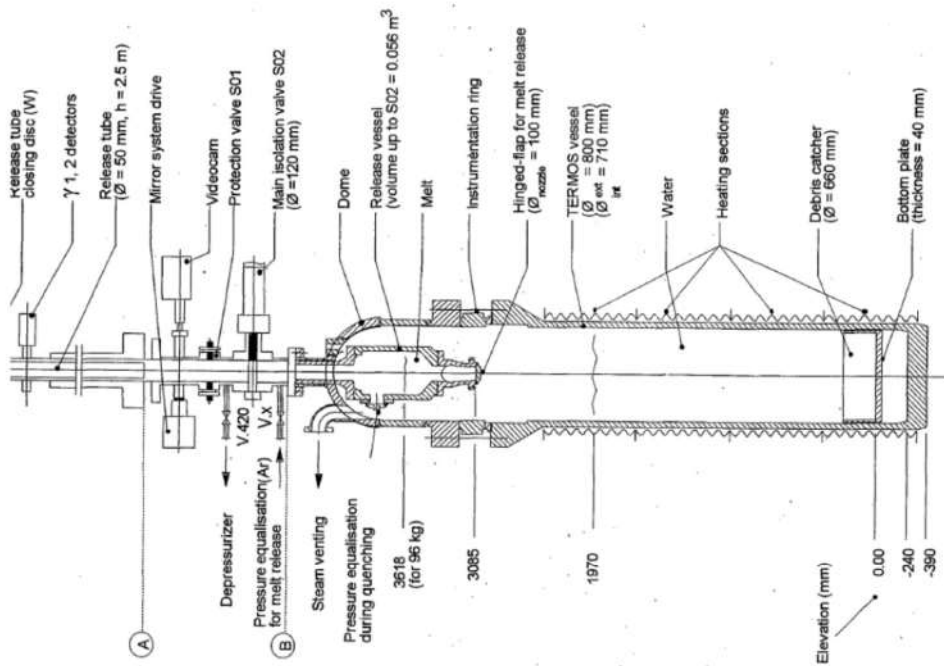
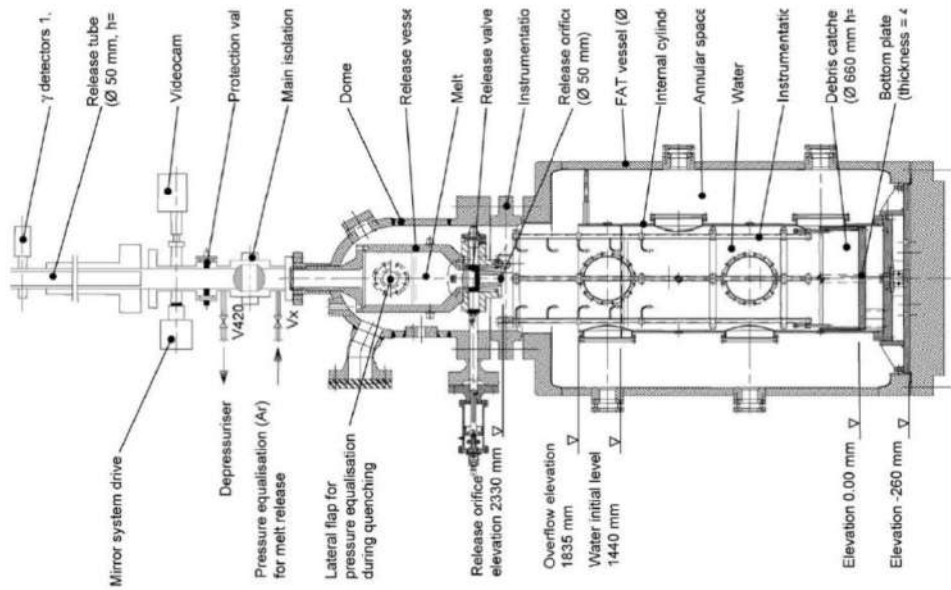


图 4-1 FARO 实验装置 [9], [10]