

第7章 デブリ模擬臨界実験用燃料の調達

本章では、STACY 更新炉において使用するドライバー燃料の調達について、平成 29 年度事業の結果を報告する。以下、燃料輸送に使用する容器に係る検討の詳細を「7.1 デブリ模擬臨界実験用燃料輸送容器の詳細検討」に示す。また、ドライバー燃料の製作状況について「7.2 棒状燃料及びデブリ模擬体用燃料粉末の製作」に示す。

7.1 デブリ模擬臨界実験用燃料輸送容器の詳細検討

7.1.1 目的及び概要

(1) 目的

平成 28 年度事業において、STACY 更新炉の臨界実験に用いる棒状燃料を海外から輸送する際の輸送容器として RAJ-III 型輸送容器を選定し、さらに、棒状燃料を収納するため RAJ-III 型輸送容器の設計を変更すると共に安全設計上の成立性を確認し、詳細な安全解析を実施した。平成 29 年度事業では上記の検討を踏まえ、STACY 更新炉用の棒状燃料を収納するための輸送容器である RAJ-III S 型輸送容器の安全解析書を作成した。また、当該安全解析書を基に RAJ-III S 型輸送容器の設計承認申請を行った。設計承認に係る安全審査においては、傾斜落下に関する説明に資するため追加の解析を行い、結果として RAJ-III S 型輸送容器の設計承認を取得した。また、設計承認申請の認可に続き、英文証明申請及び容器承認申請を行った。

(2) 概要

RAJ-III S 型輸送容器は、RAJ-III 型輸送容器の設計を基に、STACY 更新炉で使用する棒状燃料を収納するため収納方法や緩衝体を変更して設計したものである。RAJ-III S 型輸送容器の設計が、車両運搬確認申請書、容器承認申請書及び核燃料輸送物設計承認申請書に添付する説明書の記載要領について（平成 23・03・07 原院第 8 号）（以下、「原院記載要領」という。）に示す、第 2 項 輸送容器の設計及び核燃料物質等を当該輸送容器に収納した場合の核燃料輸送物の安全性を満足することを示すため、原院記載要領に基づき RAJ-III S 型輸送容器の安全解析書を作成した。

当該安全解析書を基に平成 30 年 9 月に RAJ-III S 型輸送容器の設計承認申請を行った。設計承認に係る安全審査においては、傾斜落下時の衝撃加速度に関する説明するため、傾斜落下時の構造解析を行い、傾斜落下時にも輸送容器の安全性が維持されることを確認した。この結果、平成 31 年 3 月に RAJ-III S 型輸送容器の設計承認認可を取得し、同月に英文証明申請及び容器承認申請を行った。

7.1.2 成果報告

RAJ-III S 型輸送容器安全解析書について、原院記載要領に記載のある項目ごとに、RAJ-III 型輸送容器の設計から変更となる点を中心に概説する。

(1) (イ)章 核燃料輸送物の説明

(イ) - A 目的及び条件

RAJ-III S 型輸送容器の収納物として STACY 更新炉用の棒状燃料を収納することを記載した。

(イ) - B 輸送物の種類

棒状燃料の仕様に基づき、輸送物の種類を A 型核分裂性輸送物 (AF 型) とした。

(イ) - C 輸送容器の構造

輸送容器の構造は、RAJ-III 型輸送容器と同等。RAJ-III S 型輸送容器の外観を図 7.1-1 に示す。棒状燃料の収納方法は RAJ-III 型輸送容器と異なるため、収納本数や収納位置に関する記載を見直した。

(イ) - D 輸送容器の収納物

棒状燃料の収納方法に基づき記載を見直した。収納物の概略図を図 7.1-2 に示す。

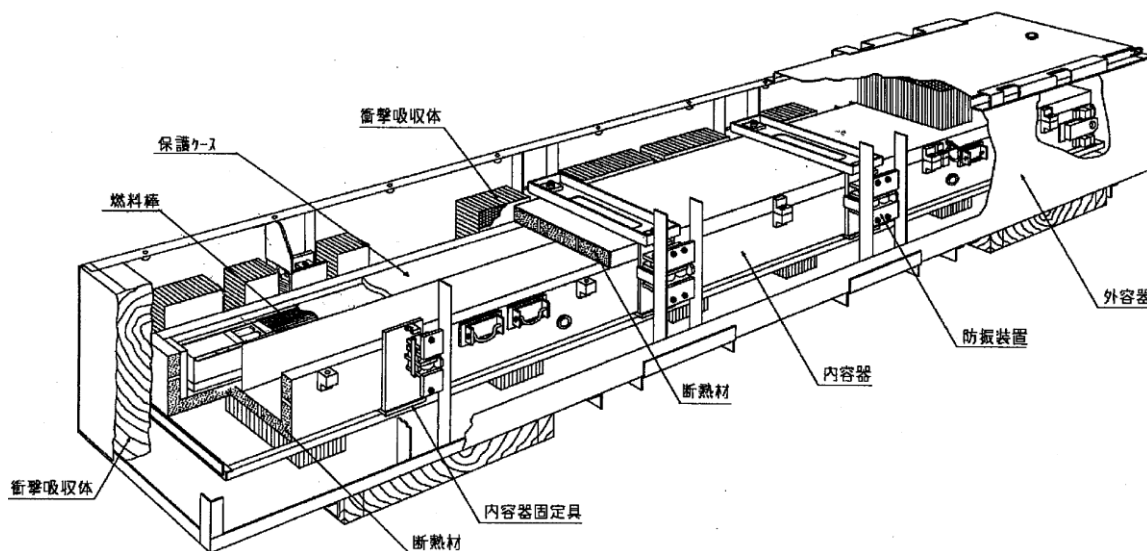


図 7.1-1 RAJ-III S 型輸送容器の外観

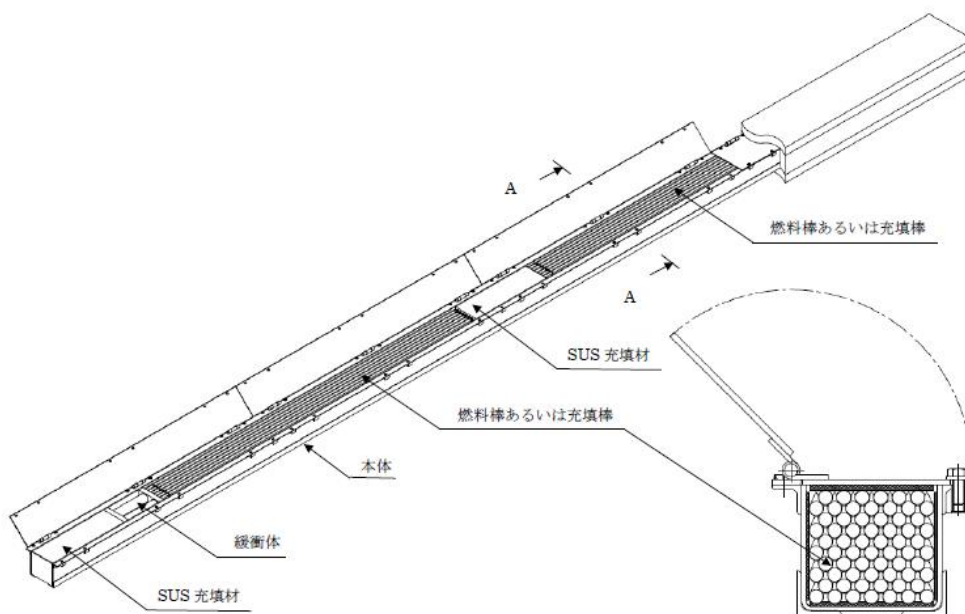


図 7.1-2 収納物の概略図 (保護ケース)

(2) (ロ)章 核燃料輸送物の安全解析の作成

(ロ) - A 構造解析

収納物を STACY 更新炉用の棒状燃料とした場合の構造解析の結果について、下記のとおり記載した。また、追加で解析した傾斜落下時の輸送容器の安全性については (6) に後述する。

- A.1～A.3 : 収納方法及び棒状燃料の仕様に基づき、重心位置や機械的性質の記載を変更。
- A.4 : 棒状燃料の仕様に基づき、棒状燃料に生じる最大内外圧力差を求め、被覆管に生じる圧力を評価。評価の結果、棒状燃料の健全性が損なわれないことを記載。
- A.5 : 棒状燃料の仕様に基づき、一般の試験条件下における落下解析を実施し、棒状燃料の健全性が損なわれないことを記載。
- A.6 : 棒状燃料の仕様に基づき、特別の試験条件下における落下解析を実施し、棒状燃料の健全性が損なわれないことを記載。
- A.7 : RAJ-III 型輸送容器は A 型核分裂性輸送物であり、強化浸漬 (200m 浸漬) の対象とならないことを記載。
- A.8 : RAJ-III 型輸送容器の設計と同等。
- A.9 : RAJ-III 型輸送容器の設計と同等。

(ロ) - B 熱解析

収納物を STACY 更新炉用の棒状燃料とした場合の熱解析の結果について、下記のとおり記載した。

- B.1～B.3 : 収納方法及び棒状燃料の仕様に基づき、重心位置や機械的性質の記載を変更。
- B.4 : 棒状燃料の仕様に基づき、一般の試験条件下における熱解析を実施し、棒状燃料の健全性が損なわれないことを記載。
- B.5 : 棒状燃料の仕様に基づき、特別の試験条件下における熱解析を実施し、棒状燃料の健全性が損なわれないことを記載。

(ロ) - C 密封解析

収納物を STACY 更新炉用の棒状燃料とした場合の密封解析の結果について、下記のとおり記載した。

- C.1 : 棒状燃料の仕様に基づき、密封解析の概要を記載。
- C.2 : 棒状燃料の仕様に基づき、密封装置の概要を記載。
- C.3 : 棒状燃料の仕様に基づき、一般の試験条件下における密封解析を実施し、棒状燃料の健全性が損なわれないことを記載。
- C.4 : 棒状燃料の仕様に基づき、特別の試験条件下における密封解析を実施し、棒状燃料の健全性が損なわれないことを記載。

(ロ) - D 遮蔽解析

収納物を STACY 更新炉用の棒状燃料とした場合の遮蔽解析の結果について、下記のとおり記載した。

D.1～D.2 : 棒状燃料の仕様及び収納方法に基づき、遮蔽解析の概要を記載。また、棒状燃料の仕様に基づく線源強度を記載。

D.3～D.5 : 棒状燃料の収納方法に基づき、一般の試験条件下及び特別の試験条件下における遮蔽解析を実施し、基準を満足していることを記載。

(ロ) - E 臨界解析

収納物を STACY 更新炉用の棒状燃料とした場合の臨界解析の結果について、下記のとおり記載した。

E.1～E.2 : 棒状燃料の仕様及び収納方法に基づき、臨界解析の概要を記載。

E.3～E.6 : 臨界解析の解析モデルを記載すると共に臨界解析を実施し、規則及び告示で定められた条件において未臨界性が確保されることを記載。また、本輸送物の臨界計算に用いた KENO V.a 及び ENDF/B-VI 238 群断面積セットに関するベンチマーク試験について記載。

(ロ) - F 規則及び告示に対する適合性の評価

棒状燃料の仕様及び収納方法並びに(ロ)章 A～E の解析結果に基づき、規則及び告示に対する適合性を記載。

(3) (ハ)章 品質マネジメントの基本方針

RAJ-III S 型輸送容器を管理する国内加工メーカの品質マネジメントに基づき記載。なお、棒状燃料の仕様及び収納方法に伴う記載の変更はない。

(4) (ニ)章 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法

棒状燃料の仕様及び収納方法に基づき、保守及び核燃料輸送物の取扱い方法を記載。既存の RAJ-III 型輸送容器と収納方法が異なるため、取扱い方法を検討し記載。

(5) (ホ)章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項

棒状燃料の仕様及び収納方法に伴う記載の変更はない。

(6) 傾斜落下時の輸送容器の安全性

RAJ-III S 型輸送容器の基本構造は、既に設計承認を取得している RAJ-III 型輸送容器と同様であり、傾斜落下の評価として、平成 28 年度事業における輸送容器の整備事業における構造解析において、下記の評価を行っていた。

- ・傾斜落下時の落下姿勢として、コーナー落下と垂直落下の間の場合とコーナー落下と水平落下の間の場合がある。前者の場合には、落下エネルギーの吸収が垂直落下とコーナー落下の間になり、燃料棒に加わる衝撃力はこれらより厳しくなることはない。また、後者の場合には落下エネルギーの一部が回転モーメントとして働き、

本輸送物を水平方向に回転させ、最終的に水平落下の場合と同様の状態でエネルギー吸収が行われるので、燃料棒に加わる衝撃力は水平落下より厳しくなることはない。

しかしながら設計承認に係る安全審査において、IAEA 規則放射性物質安全規則助言文書(No.SSG-26)に基づく傾斜落下時の詳細な説明を求められ、RAJ-III S 型輸送容器の傾斜落下解析を行った。

1) 解析条件

燃料被覆管に想定される最大の変形を仮定した解析を行い、被覆管に生じるひずみによりその健全性を評価する。解析モデルを図 7.1-3 に示す。

解析モデルに示すように、負荷前の被覆管とペレットの上部及び被覆管同士の接触点の隙間は、それぞれ 0.2mm 及び 0.16mm と設定され、中心軸と 50.1° となる方向から接触している被覆管同士により、被覆管内面がペレット外表面に接触するまでが被覆管に想定される最大の変形となるので、この変形量を強制変位として負荷させる。

2) 解析結果

被覆管内面とペレット外表面が接触する時点で被覆管に生じるひずみは 5%未満であり、被覆管材料の伸び限界値 28%を超えず、被覆管が破断することはない。また、被覆管が変形してペレットに接した後は、ペレットが荷重を負担することから、被覆管内面とペレット外表面の接触以降に被覆管が破断することはない。

この結果、RAJ-III S 型輸送容器の傾斜落下時において、被覆管が破断することはない、被覆管の健全性が維持される。

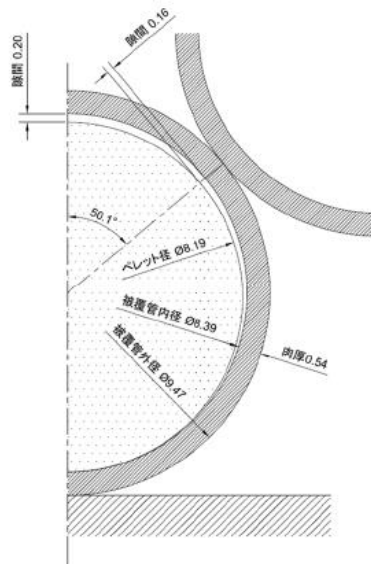


図 7.1-3 解析モデル

7.1.3 まとめ

STACY 更新炉用の棒状燃料を収納するための輸送容器である RAJ-III S 型輸送容器に関し、原院記載要領に基づく構造解析、熱解析、密封解析、遮蔽解析、臨界解析の結果をとりまとめ、安全解析書を作成した。

次年度以降の事業では、輸送経路として想定される海外の規制当局へ、RAJ-III S 型輸送容器のバリデーション申請を行うとともに、RAJ-III S 型輸送容器の空容器を海外へ輸送し、棒状燃料を収納する予定である。

7.2 棒状燃料及びデブリ模擬体用燃料粉末の製作

7.2.1 目的及び概要

(1) 目的

STACY 更新炉の臨界実験に用いる棒状燃料及びデブリ模擬体用粉末燃料の製造契約に基づき、平成 28 年度事業で実施した燃料設計及び取得した粉末燃料を用いて、棒状燃料用の燃料ペレットの製造を実施する。また、棒状燃料用の金属部材を調達し、棒状燃料の製作に向けて準備を整える。

(2) 概要

平成 28 年度事業で実施した棒状燃料の詳細設計や製造要領に基づき、棒状燃料用の燃料ペレットを製造した。燃料ペレット製造後、海外（ロシア）燃料加工工場に職員を派遣し、製造された燃料ペレットについて寸法検査、密度検査等を実施した（第 7.2.2(1)項）。また、棒状燃料用の金属部材として、被覆管、上部端栓、下部端栓及びスプリングを調達した。金属部材調達後、海外（ロシア）燃料加工工場に職員を派遣し、製造された燃料ペレットについて材料検査、寸法検査等を実施した（第 7.2.2(2)項）。

7.2.2 成果報告

(1) 燃料ペレット製造

1) 製造概要

平成 28 年度事業において海外加工メーカーと合意した燃料ペレットの詳細設計及び製造要領に基づき、燃料ペレットを製造した。燃料ペレットの詳細図面を図 7.2-1 に示す。

STACY 更新炉の臨界実験に用いる棒状燃料として 901 本製造する予定であり、棒状燃料 1 本には約 120 個程度の燃料ペレットを挿入する。このため、約 10 万個超の燃料ペレットを製造した。臨界実験に対する精度向上を目的として、 UO_2 ペレットを製作する際の濃縮度や寸法等のばらつきを極力抑えるため、同一ロットの粉末ウラン燃料を使用し、同一ラインで圧縮成型及び焼結を行っている。

2) 検査結果

製造した燃料ペレットについて、機構職員立会いの下、密度検査及び寸法検査等を行い、燃料ペレットの詳細設計及び設工認申請書に示す仕様を満足していることを確認した。密度検査については、製造した約 10 万個超の燃料ペレットを収納している全ての収納容器（全 28 個）から数個ずつサンプリングした合計 100 個の燃料ペレットを用いて、浸漬法により密度を測定した。密度検査の結果を表 7.2-1 に示す。また、寸法検査については、焼結工程のうち焼結初期、焼結中期及び焼結後期の燃料ペレットを無作為に 5 個ずつサンプリングし、1 つの燃料ペレットに対し 4 箇所直径を測定した。寸法検査の結果を表 7.2-2 に示す。

さらに、製造メーカーにより燃料ペレットの同位体組成、化学特性、不純物について測定し、燃料ペレットの詳細設計に示す仕様を満足していることを確認した。燃料ペレットの同位体組成を表 7.2-3 に、化学特性を表 7.2-4 に、不純物を表 7.2-5 にそれぞれ示す。

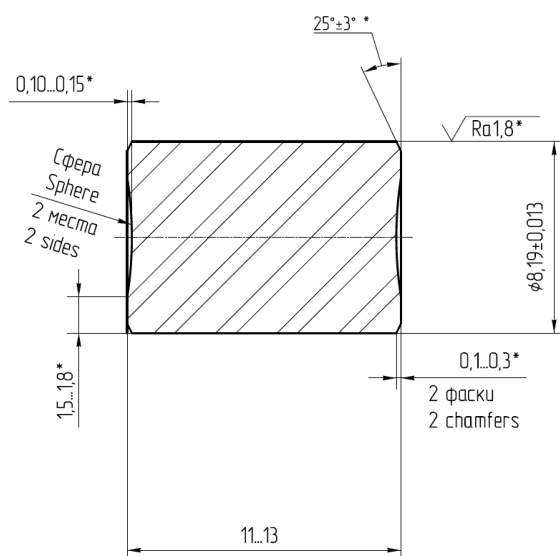


図 7.2-1 UO₂ペレット詳細図面

表 7.2-1 密度検査

ペレット No.	収納容器 No.	仕様 (%)	測定結果 (%)	ペレット No.	収納容器 No.	仕様 (%)	測定結果 (%)
1	398	96±1	96.64	51	413	96±1	96.50
2	398	96±1	96.72	52	413	96±1	96.51
3	399	96±1	96.57	53	414	96±1	96.60
4	399	96±1	96.46	54	414	96±1	96.72
5	400	96±1	96.46	55	414	96±1	96.72
6	400	96±1	96.62	56	414	96±1	96.62
7	401	96±1	96.55	57	415	96±1	96.56
8	401	96±1	96.63	58	415	96±1	96.48
9	402	96±1	96.54	59	415	96±1	96.55
10	402	96±1	96.51	60	415	96±1	96.57
11	403	96±1	96.67	61	416	96±1	96.67
12	403	96±1	96.54	62	416	96±1	96.70
13	404	96±1	96.46	63	416	96±1	96.45
14	404	96±1	96.33	64	416	96±1	96.50
15	404	96±1	96.48	65	417	96±1	96.25
16	404	96±1	96.49	66	417	96±1	96.61
17	405	96±1	96.21	67	417	96±1	96.51
18	405	96±1	96.54	68	417	96±1	96.55
19	405	96±1	96.28	69	418	96±1	96.55
20	405	96±1	96.72	70	418	96±1	96.08

ペレット No.	収納容器 No.	仕様 (%)	測定結果 (%)
21	406	96±1	96.68
22	406	96±1	96.71
23	406	96±1	96.65
24	406	96±1	96.33
25	407	96±1	96.42
26	407	96±1	96.27
27	407	96±1	96.35
28	407	96±1	96.32
29	408	96±1	96.36
30	408	96±1	96.47
31	408	96±1	96.39
32	408	96±1	96.30
33	409	96±1	96.43
34	409	96±1	96.38
35	409	96±1	96.38
36	409	96±1	96.41
37	410	96±1	96.44
38	410	96±1	96.66
39	410	96±1	96.64
40	410	96±1	96.20
41	411	96±1	96.67
42	411	96±1	96.59
43	411	96±1	96.63
44	411	96±1	96.72
45	412	96±1	96.56
46	412	96±1	96.45
47	412	96±1	96.20
48	412	96±1	96.63
49	413	96±1	96.63
50	413	96±1	96.61

ペレット No.	収納容器 No.	仕様 (%)	測定結果 (%)
71	418	96±1	96.62
72	418	96±1	96.66
73	419	96±1	96.53
74	419	96±1	96.66
75	419	96±1	96.61
76	419	96±1	96.51
77	420	96±1	96.52
78	420	96±1	96.28
79	420	96±1	96.49
80	420	96±1	96.49
81	421	96±1	96.46
82	421	96±1	96.47
83	421	96±1	96.64
84	421	96±1	96.58
85	422	96±1	96.36
86	422	96±1	96.55
87	422	96±1	96.58
88	422	96±1	96.59
89	423	96±1	96.57
90	423	96±1	96.55
91	423	96±1	96.60
92	423	96±1	96.51
93	424	96±1	96.49
94	424	96±1	96.61
95	424	96±1	96.59
96	424	96±1	96.57
97	425	96±1	96.51
98	425	96±1	96.59
99	425	96±1	96.68
100	425	96±1	96.52

表 7.2-2 寸法検査 (燃料ペレット直径)

ペレット No.	収納容器	仕様 (mm)	測定結果 (mm)
1	焼結工程中、 初期に焼結し た容器	8.19 +0.014 -0.013 (8.177 以上、 8.204 以下)	8.193
			8.194
			8.190
			8.190
2			8.188
			8.188
			8.186
			8.190
3			8.187
			8.187
			8.188
			8.191
4	8.187		
	8.188		
	8.188		
	8.189		
5	8.182		
	8.182		
	8.181		
	8.186		
6	焼結工程中、 中期に焼結し た容器	8.19 +0.014 -0.013 (8.177 以上、 8.204 以下)	8.187
			8.189
			8.186
			8.182
7			8.187
			8.188
			8.181
			8.188
8			8.182
			8.186
			8.181
			8.182
9	8.183		
	8.182		
	8.185		

ペレット No.	収納容器	仕様 (mm)	測定結果 (mm)
10			8.185
			8.181
			8.187
			8.182
			8.183
11	焼結工程中、 後期に焼結し た容器	8.19 +0.014 -0.013 (8.177 以上、 8.204 以下)	8.183
			8.190
			8.183
12			8.190
			8.182
			8.186
13			8.185
			8.185
			8.181
			8.180
			8.182
14			8.181
			8.183
			8.192
			8.182
15	8.192		
	8.192		
	8.189		
	8.190		
			8.186

表 7.2-3 同位体組成

同位体	仕様	測定結果
U232	≤ 0.0001 ppm/U total	0.000014 ppm
U234	≤ 500 ppm/U total	421 ppm
U235	4.95 +0.02/-0.05 %	4.941 %
U236	≤ 250 ppm/U total	<15 ppm

表 7.2-4 化学特性

項目	仕様	測定結果
ウラン含有量	> 87.7 %	88.04 %
O/U 比	2.000 +0.010/-0.000	2.0025

表 7.2-5 不純物

元素	仕様 ppm/U total	測定結果 ppm/U total
B*	< 1.0	0.103
Cd	< 1.0	< 0.1
C	< 500	< 30
Si	< 300	48
Al	< 100	45
Ca	< 100	< 30
Li*	< 2.0	1.3
Ni	—	< 10
Mg	—	< 1
Co	—	< 0.25
Fe	—	33
Cu	—	< 1
Mo	—	< 10
V	—	< 3
Cr	—	5.7
Pb	—	< 3
Ag	—	< 0.1
N	—	< 20
Mn	—	< 1
不純物合計	< 1000	243 (最大)

(2) 金属部材調達

1) 調達概要

平成 28 年度事業において海外加工メーカと合意した金属部材（被覆管、上部端栓、下部端栓及びスプリング）の詳細設計及び製造要領に基づき、金属部材を調達した。被覆管、上部端栓、下部端栓及びスプリングの詳細図面を図 7.2-2～図 7.2-5 に示す。

臨界実験に対する精度向上を目的として、金属部材組成のばらつきを極力抑えるため、金属部材のうち被覆管、上部端栓及び下部端栓は同一のジルコニウムインゴットを使用している。

2) 検査結果

調達した金属部材について、機構職員立会いの下、材料検査及び寸法検査等を行い、金属部材の詳細設計及び設工認申請書に示す仕様を満足していることを確認した。

材料検査については、金属部材の材料組成及び機械的性質がそれぞれの規格に定められた値であることを材料証明書で確認した。

被覆管の寸法検査については、被覆管規格（Technical specification TC 001.410-2009 (Zirconium alloy ingot grade E110)）に基づき金属部材製造メーカーが実施した被覆管の外径、内径及び肉厚の測定結果が、詳細設計及び設工認申請書に示す仕様を満足していることを確認した。また、無作為に抜き取りした被覆管の外径を測定し、仕様を満足していることを確認した。

下部端栓の寸法検査については、臨界実験の精度に影響する長さ寸法について、抜き取りで寸法測定を実施し、詳細設計及び設工認申請書に示す仕様を満足していることを確認した。

なお、上部端栓及びスプリングの寸法については、安全評価に直接関係する寸法がないため、抜き取りによる寸法検査は実施していないが、詳細設計図に示す寸法のとおり製作されていることを外観確認にて確認した。

それぞれの金属部材（①被覆管、②上部端栓、③下部端栓及び④スプリング）に関する検査の結果を表 7.2-6～表 7.2-21 に示す。

① 被覆管

①-1 被覆管図面

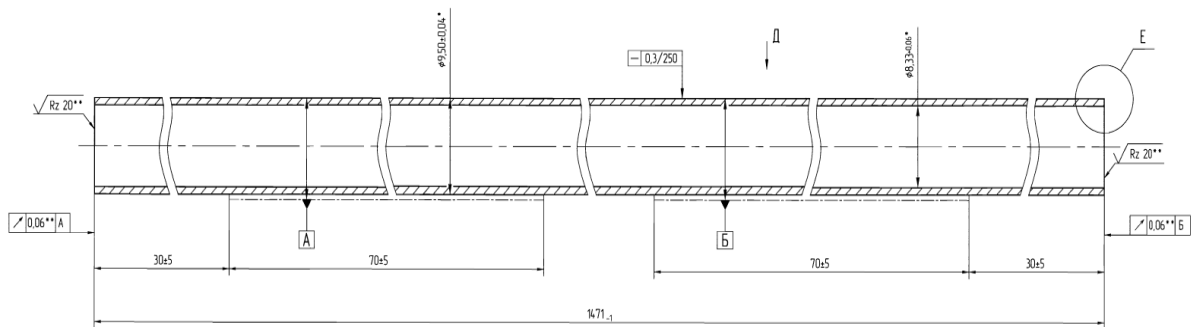


図 7.2-2(1) 被覆管詳細図面(全体)

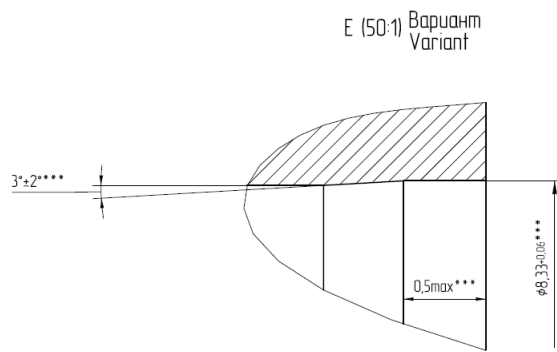


図 7.2-2(2) 被覆管 E 部詳細

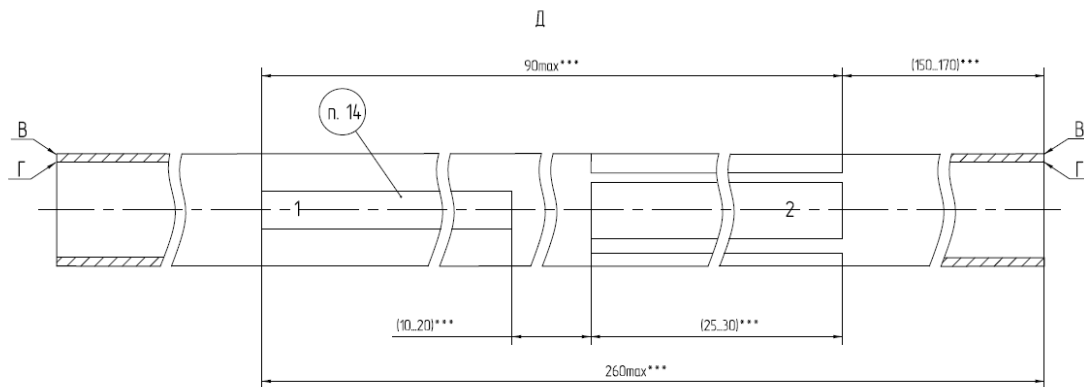


図 7.2-2(3) 被覆管 Д 部詳細

①-2 被覆管 材料検査結果

表 7.2-6 被覆管の化学的特性

同位体	仕様 (%)	測定結果 (%)
Fe	0.04 以上 0.07 以下	0.05
Nb	0.90 を超え 1.10 未満	1.00
O	0.070 を超え 0.099 未満	0.096
N	0.006 以下	< 0.003
H	0.0015 以下	0.0006
C	0.010 以下	0.007
Cu	0.005 以下	< 0.001
F	0.0001 以下	< 0.0001

表 7.2-7(1) 被覆管の機械的特性（試験温度 20℃における断面方向）

No.	引張強度 (kgf / mm ²)		降伏オフセット強度 (kgf / mm ²)		相対伸び率 (%)	
	仕様	結果	仕様	結果	仕様	結果
1	28 以上	43	21 以上	36	28 以上	35
2		43		36		35
3		44		37		36
4		44		37		36
5		44		36		36
6		43		37		37

表 7.2-7(2) 被覆管の機械的特性（試験温度 380℃における断面方向）

No.	引張強度 (kgf / mm ²)		降伏オフセット強度 (kgf / mm ²)		相対伸び率 (%)	
	仕様	結果	仕様	結果	仕様	結果
1	15 以上	19	13 以上	17	33 以上	45
2		19		17		45
3		19		17		45
4		19		16		46
5		19		17		44
6		19		16		44

表 7.2-7(3) 被覆管の機械的特性（試験温度 380℃における長さ方向）

No.	引張強度 (kgf / mm ²)		降伏オフセット強度 (kgf / mm ²)		相対伸び率 (%)	
	仕様	結果	仕様	結果	仕様	結果
1	10 以上	21	8 以上	11	33 以上	61
2		21		11		62
3		21		12		62
4		21		11		61
5		21		11		61
6		21		11		61

表 7.2-8 被覆管の水素化物方向係数

No.	内層		中心層		外層	
	仕様	結果	仕様	結果	仕様	結果
1	0.4 以下	< 0.1	0.4 以下	< 0.1	0.4 以下	0.1
2		< 0.1		< 0.1		0.2
3		< 0.1		< 0.1		0.1
4		0.1		< 0.1		0.2
5		< 0.1		0.1		0.1
6		< 0.1		< 0.1		0.1

表 7.2-9 被覆管の腐食試験結果

No.	サンプルの重量増加量 (mg / dm ²)	
	仕様	測定結果
1	22 以下	14
2	22 以下	14
3	22 以下	13
4	22 以下	12
5	22 以下	14
6	22 以下	14

(環境：400±3℃蒸気、圧力：200±7kg、試験時間：72⁺¹時間)

表 7.2-10 被覆管の表面粗さ

No.	外表面 Ra max		内表面 Ra max	
	μ m		μ m	
	仕様	結果	仕様	結果
1	0.4 以下	0.32	0.8 以下	0.20
2		0.35		0.23
3		0.30		0.40
4		0.34		0.32
5		0.27		0.33
6		0.31		0.33

①-3 被覆管 寸法検査結果

表 7.2-11 被覆管の寸法

外径 (mm)		内径 (mm)		肉厚 (mm)	
仕様	ロット内平均 (標準偏差)	仕様	ロット内平均 (標準偏差)	仕様	ロット内平均 (標準偏差)
9.50±0.04	9.511 (0.0081)	8.33+0.06	8.355 (0.0076)	0.54 以上	0.578 (0.0088)

表 7.2-12 被覆管の外径 (抜き取り)

被覆管番号	被覆管外径 (mm)			
	仕様	測定結果		
		上端部	中央部	下端部
004632413	9.50±0.04	9.50	9.49	9.49
		9.49	9.49	9.49
004632401		9.50	9.50	9.50
		9.50	9.50	9.50
004632013		9.50	9.50	9.50
		9.50	9.50	9.50
004632511		9.49	9.50	9.49
		9.49	9.50	9.49
004632119		9.50	9.49	9.50
		9.49	9.49	9.50
004632229		9.49	9.50	9.49
		9.49	9.50	9.49
004632470	9.50	9.49	9.50	
	9.50	9.49	9.50	
004632815	9.50	9.50	9.49	
	9.50	9.50	9.49	
004632297	9.50	9.50	9.49	
	9.49	9.50	9.49	
004632544	9.49	9.50	9.50	
	9.50	9.50	9.50	

②上部端栓

②-1 上部端栓図面

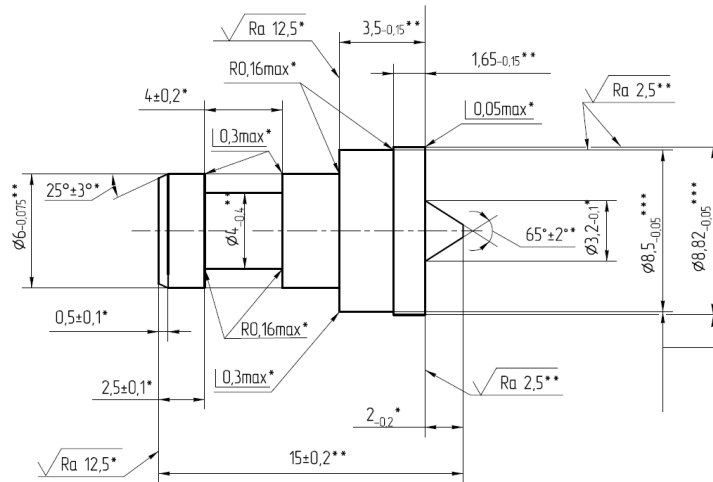


図 7.2-3 上部端栓詳細図面

②-2 上部端栓 材料検査結果

表 7.2-13 上部端栓の化学的特性

同位体	仕様 (%)	測定結果 (%)
Nb	0.90 を超え 1.10 未満	1.03
Fe	0.04 以上 0.07 以下	0.05
O	0.070 を超え 0.099 未満	0.090
C	0.010 以下	0.009

表 7.2-14 上部端栓の機械的特性 (試験温度 20°Cにおける長さ方向)

No.	引張強度 (kgf/mm ²)		降伏オフセット強度 (kgf/mm ²)		相対伸び率 (%)	
	仕様	結果	仕様	結果	仕様	結果
1	35 以上	48	25 以上	31	20 以上	28
2		48		31		28

表 7.2-15 上部端栓の腐食試験結果

No.	サンプルの重量増加量 (mg/dm ²)	
	仕様	測定結果
1	22 以下	14
2	22 以下	12

(環境 : 400±3°C蒸気、圧力 : 200±7kg、試験時間 : 72⁺¹時間)

③下部端栓

③-1 下部端栓図面

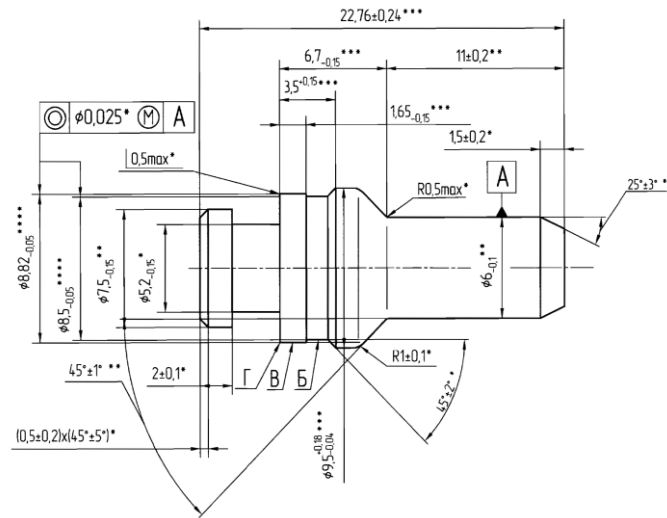


図 7.2-4 下部端栓詳細図面

③-2 下部端栓 材料検査結果

表 7.2-16 下部端栓の化学的特性

同位体	仕様 (%)	測定結果 (%)
Nb	0.90 を超え 1.10 未満	1.03
Fe	0.04 以上 0.07 以下	0.05
O	0.070 を超え 0.099 未満	0.090
C	0.010 以下	0.009

表 7.2-17 下部端栓の機械的特性 (試験温度 20°Cにおける長さ方向)

No.	引張強度 (kgf / mm ²)		降伏オフセット強度 (kgf / mm ²)		相対伸び率 (%)	
	仕様	結果	仕様	結果	仕様	結果
1	35 以上	48	25 以上	31	20 以上	28
2		48		31		28

表 7.2-18 下部端栓の腐食試験結果

No.	サンプルの重量増加量 (mg / dm ²)	
	仕様	測定結果
1	22 以下	14
2	22 以下	12

(環境 : 400±3°C蒸気、圧力 : 200±7kg、試験時間 : 72⁺¹時間)

③-3 下部端栓 寸法検査結果

表 7.2-19 下部端栓の長さ (抜き取り)

No.	仕様 (mm)	結果 (mm)	No.	仕様 (mm)	結果 (mm)
1	22.76 ±0.24	22.77	19	22.76 ±0.24	22.82
2		22.77	20		22.77
3		22.79	21		22.74
4		22.80	22		22.74
5		22.82	23		22.75
6		22.77	24		22.74
7		22.76	25		22.74
8		22.80	26		22.78
9		22.75	27		22.79
10		22.82	28		22.74
11		22.79	29		22.76
12		22.75	30		22.74
13		22.75	31		22.77
14		22.75	32		22.79
15		22.78	33		22.75
16		22.75	34		22.74
17		22.77	35		22.74
18		22.77			

④スプリング

④-1 スプリング図面

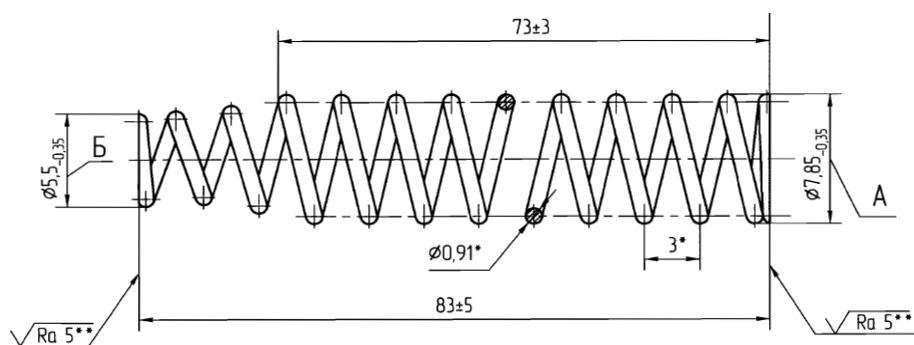


図 7.2-5 スプリング詳細図面

④-2 スプリング 材料検査結果

表 7.2-20 スプリングの化学的特性

同位体	仕様 (%)	測定結果 (%)
C	0.09 を超え 0.12 未満	0.10
Mn	1.50 を超え 2.00 未満	1.73
Cr	17.00 を超え 18.00 未満	17.33
Ni	10.00 を超え 11.00 未満	10.47
Ti	$5(C^* - 0.02)$ を超え 0.7 未満	0.50
Si	0.80 以下	0.37
S	0.020 以下	0.010
P	0.035 以下	0.027

C*は炭素含有量。

表 7.2-21 スプリングの機械的特性 (試験温度 20°Cにおける長さ方向)

No.	引張強度 (MPa)		捻回試験 (回)	
	仕様	結果	仕様	結果
1	175 以上 205 以下	183.0	3 以上	7
2		177.0		8
3		185.0		10
4		184.0		9

7.2.3 まとめ

平成 28 年度事業で実施した燃料設計及び取得した粉末燃料を用いて、棒状燃料用の燃料ペレットの製造を実施するとともに、棒状燃料用の金属部材として被覆管、上部端栓、下部端栓及びスプリングを調達した。燃料ペレットについて寸法検査、密度検査等を実施し、燃料ペレットの詳細設計及び設工認申請書に示す仕様を満足していることを確認した。また、金属部材について材料検査及び寸法検査等を行い、金属部材の詳細設計及び設工認申請書に示す仕様を満足していることを確認した。これらの材料を用いて平成 30 年度事業にてウラン棒状燃料の組み立てを実施する予定である。

第 8 章 デブリ模擬体調製設備の整備及びデブリ模擬体分析設備の整備

STACY 更新炉では、燃料デブリを模擬したサンプルを使用する燃料デブリ模擬体臨界実験が計画されている。本章では、当該実験のために整備するデブリ模擬体調製設備及びデブリ模擬体分析設備について、平成 29 年度事業の結果を報告する。以下、デブリ模擬体調製設備の整備について「8.1 デブリ模擬体調製設備の整備」に、「8.2 デブリ模擬体分析設備の整備」に示す。

8.1 デブリ模擬体調製設備の整備

STACY 更新炉の臨界実験で用いるデブリ模擬体を調製するためには、デブリ模擬体調製設備及びデブリ模擬体の調製材料となるウラン粉末が必要となる。設備整備の一環として、デブリ模擬体調製設備の据え付け後に行うホット試験で用いる少量のウラン粉末の調達可能性について第 8.1.1 項で検討する。また、STACY 更新炉の臨界実験で用いるデブリ模擬体を調製するためのデブリ模擬体調製設備のうち、圧縮成型機の性能試験について第 8.1.2 項で検討する。

8.1.1 少量のウラン粉末の調達検討

8.1.1.1 目的及び概要

(1) 目的

STACY 更新炉の臨界実験で用いるデブリ模擬体を調製するためには、デブリ模擬体調製設備及びデブリ模擬体の調製材料となるウラン粉末が必要となる。設備整備の一環として、デブリ模擬体調製設備の据え付け後に行うホット試験で用いる少量のウラン粉末の調達可能性について検討する。

(2) 概要

デブリ模擬体調製設備は、NUCEF の BECKY 施設の分析室に設置された 2 台の既存グローブボックスに据え付ける予定である。当該設備の据え付け後、デブリ模擬体を調製する前にはコールド試験及びホット試験を行い、デブリ模擬体の調製作業全体や調製されるデブリ模擬体の寸法等を確認する必要がある。当該ホット試験を行うためにはデブリ模擬体の調製材料となるウラン粉末が必要となる。STACY 更新炉の臨界実験で用いるデブリ模擬体の調製材料となるウラン粉末は、ロシアで製造され、日本への輸送(平成 31 年輸送予定)を待つ状況にあるが、ホット試験までには入手できない可能性があるため、ホット試験用の少量のウラン粉末を調達する必要がある。ホット試験に用いるウラン粉末の仕様を検討(第 8.1.1.2 項 (1))するとともに、国内外からの調達可能性を検討(第 8.1.1.2 項 (2) 及び (3))し、ホット試験で用いる少量のウラン粉末の調達の見通しを得た(第 8.1.1.2 項 (4))。

8.1.1.2 成果報告

(1) ホット試験で用いる少量のウラン粉末仕様

燃料デブリに係る臨界解析コードを用いた臨界評価精度を実験的に高精度で検証するための STACY 更新炉の臨界実験では、燃料デブリの臨界特性を良好に模擬したデブリ模擬体が必要となる。ホット試験では、デブリ模擬体の調製手順の検討や調製されたデブリ模擬体の外観、寸法、密度等を確認する。このためホット試験に用いるウラン粉末は、表 8.1.1-1 に示す仕様を満たす必要がある。

表 8.1.1-1 ウラン粉末仕様

項目		備考
1. 量	100gU 以上	ホット試験で用いるウラン粉末の量
2. 性状	酸化物粉末	UO ₂ 又は U ₃ O ₈
3. 濃縮度	天然～5%未満	GB で取り扱える濃縮度が 5%未満であるため。
4. 同位体組成	回収ウランでないもの	回収ウランに比較的多く含まれる 234 及び 236 による外部被ばくを抑えるため。
5. 不純物	できるだけ不純物がないこと。又はこれまでの使用履歴等から不純物の量・組成を特定できるもの。	—
6. その他	粒径、O/U、含水率、タップ密度、嵩密度等の物性	—

(2) 国外からの調達可能性

ホット試験用の少量のウラン粉末として、(1) に示す仕様を満たすウラン粉末を国外から調達する場合の条件・懸案事項等を検討した。また、調達するウラン粉末の量は数百グラムと少量であり、輸送費用や調達期間を最適化するため、航空輸送を前提とした手続・許認可、輸送方法及び輸送容器の選定なども併せて検討した。

1) ウラン粉末供給者の選定

ホット試験に用いるため、ウラン粉末には高い品質や品質管理等が求められ、国外調達先の候補として、研究炉用燃料の品質管理の実績を持つフランスの Company for the Study of Atomic Fuel Creation (以下、「CERCA 社」という。) 及びアメリカ合衆国の Framatome Richland (旧 Areva NP Richland Facility Fuel Production、以下、「Richland 社」という。) を選定した。CERCA 社は研究炉用燃料のシェア No.1 の供給者であり、JAEA の JRR-3 や JMTR 用の燃料を供給した実績並びに工業用、医療用及び研究用の放射性同位元素線源を供給した

実績を有する。Richland 社は商用原子力発電所向けの UO_2 ペレット製造用の二酸化ウラン粉末を日本の NFI に供給した実績を有する。

しかしながら、CERCA 社から数百グラムオーダーの研究炉用燃料製造について受託できないとの回答があったため、本調査では Richland 社を対象とした。

2) 調査結果

Richland 社が供給可能であるウラン粉末の仕様と、表 8.1.1-1 ウラン粉末仕様とを比較した結果、1.~5.の仕様をすべて満たすウラン粉末を供給可能であることを確認した。

輸送について、濃縮度 4.95% の二酸化ウラン粉末 1kg の輸送を前提に最適化を行った結果を以下に示す。

- 1kg の二酸化ウラン粉末を輸送する際、核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示で定める L 型輸送物で輸送することが最も安価でかつ効率的。
- 航空機による放射性物質等の輸送基準を定める告示第 2 条第 6 号ハに定める核分裂性物質の許容量は 3.5g 以下であり、1kg の二酸化ウラン粉末を 13 個の輸送容器に分けることで、L 型輸送物として航空輸送が可能。
- 上記の輸送及び輸送容器は米国法令及び IAEA 輸送規則を満足する。
- L 型輸送容器として、従来から標準試料の輸送等で使用している実績がある TNB169 型が使用可能。(図 8.1.1-1 参照)
- 航空輸送を担う航空会社として、Japan Air Line 社及び Polar Air Cargo 社が選定可能。両社とも IATA の定める航空危険物規則書 (Dangerous Goods Regulation) の基準を満足しているとともに、核燃料物質の輸送の実績があり、米国から日本へのダイレクトフライトで輸送が可能。

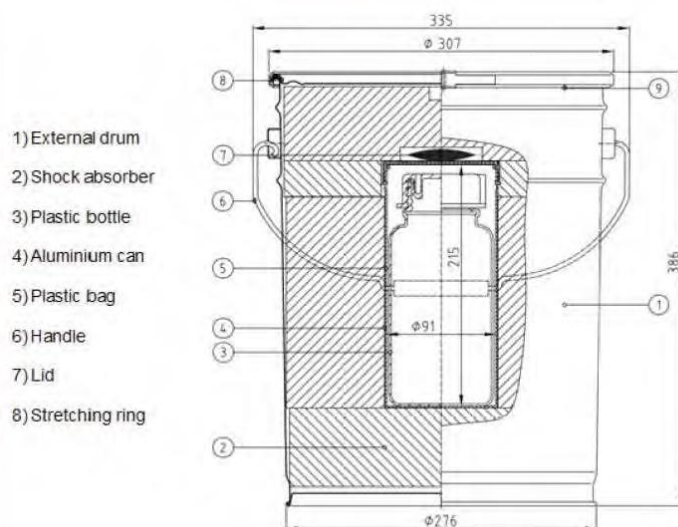


図 8.1.1-1 TNB169 型輸送容器概略

また、懸案事項として下記を抽出した。

- Richland 社が製造するウラン粉末は 1 バッチあたり 1 トンを超える。今回の少量のウラン粉末を製造する際にも 1 バッチあたりの製造費が必要であり、製造費、米国内輸

送、航空輸送、日本国内輸送等を含めた全体費用は約 30 百万円前後と高額となる可能性がある。

- ・ウラン粉末の製造に 1 年間程度、その他手続き（米国輸出許可、日本輸入許可、輸送容器整備）等を合わせると、調達までに最短でも 1 年半程度かかる見込みであり、次年度以降に開始されるホット試験に間に合わない可能性がある。

(3) 国内からの調達可能性

1) ウラン粉末供給者の選定

国内には電力会社、大学、その他事業者等、ウラン粉末を一定量所有する事業者が存在するが、これらのウラン粉末を JAEA に移管する際の許認可手続きや国内輸送の期間・費用を考慮すると JAEA 外からの調達実現性は低い。一方、JAEA 内には様々な試験に使用するウラン粉末があるため、国内調達先の候補として、JAEA の原子力科学研究所を選定した。

2) 調査結果

JAEA が所有するウラン粉末の仕様と、表 8.1.1-1 ウラン粉末仕様とを比較した結果、3.濃縮度を除く仕様を満たすウラン粉末を調達可能であることを確認した。3.濃縮度について、調達可能なウラン粉末は天然ウランのみである。しかしながら、ホット試験の目的は、デブリ模擬体の調製手順の検討や調製されたデブリ模擬体の外観、寸法、密度等を確認することであり、天然ウランを用いてもホット試験の目的を達成可能である。

輸送について、天然ウランの粉末 1kg 程度を輸送する場合、JAEA 原子力科学研究所には事業所内運搬用の輸送容器が整備されており、期間（梱包・輸送等で約 1 か月程度）及び費用（所内輸送に係る費用程度）共に大きな問題はない。

(4) まとめ

STACY 更新炉の臨界実験で用いるデブリ模擬体を調製するデブリ模擬体調製設備の設備整備の一環として、デブリ模擬体調製設備の据え付け後に行うホット試験で用いる少量のウラン粉末の調達可能性について検討した。検討においては、ホット試験に用いるウラン粉末の仕様を定め、国内外からの調達可能性を調査した。

この結果、国外の調達先として Richland 社が挙げられ、ウラン粉末の仕様、輸送手続き等に問題はないことを確認した。しかしながら、調達までの期間が 1 年以上必要であることや費用が大幅にかかることが調査の結果判明した。並行して国内の調達先を検討し、JAEA 原子力科学研究所内にあるウラン粉末が調達可能であること、仕様・輸送手続き・調達期間・費用に問題がないことを確認した。

以上のことから、デブリ模擬体調製設備の据え付け後に行うホット試験までに、ウラン粉末が入手できない場合でも、JAEA 内のウラン粉末を用いてホット試験が実施可能であること確認した。

8.1.2 デブリ模擬体調製設備の性能試験

8.1.2.1 目的及び概要

(1) 目的

STACY 更新炉の臨界実験で用いるデブリ模擬体を調製するためのデブリ模擬体調製設備のうち、圧縮成型機の性能試験を行う。

(2) 概要

デブリ模擬体調製設備は、NUCEF の BECKY 施設の分析室に設置された 2 台の既存のグローブボックス（以下 GB と示す。）に整備する予定である。GB 内に設置するにあたり事前に製作工場において当該設備の主要機器である圧縮成型機の性能試験を実施し、所要の性能を有することを確認するとともに、ペレット製作時のデータを取得する。

8.1.2.2 成果報告

(1) 実施内容

① 圧縮成型機

1) 圧縮成型試験

圧縮成型試験で使用する原料はアルミナ、ジルコニア又は相当品とし、 $\phi 8.5\text{mm}$ の金型を用いてペレット試料を試作する。またプレス圧及びフローティング圧についても機器性能に準じて調整する。以上のパラメータを網羅し、かつ同一条件の試料を製作する。試験条件については、試験結果に基づき調整する。試験前後において以下の項目を検査する。

- ・ 充填量
- ・ 圧縮成型後のペレット外観（割れ、欠け、キャッピング等の有無）
- ・ 圧縮成型後のペレット寸法（径、高さ）
- ・ 圧縮成型後のペレット密度（寸法重量法又は浸水法による）
- ・ フローティング力による試料への影響評価（密度の変化、金型からの抜けやすさ等）
- ・ 圧縮成型機用金型の外観（金型摩耗、割れ欠け等の状況）

2) 成型手順確認

成型手順については、平成 28 年度事業にて報告した手順と同様であり、この手順書に沿って圧縮成型を行い、手順書の適切性を確認する。

(2) 実施結果

① 圧縮成型機

FSY 酸化ジルコニウム、3mol% イットリア添加ジルコニウム、8mol% イットリア添加ジルコニウム、 $150\mu\text{m}$ 酸化アルミニウム (III)、 $10\sim 20\mu\text{m}$ 酸化アルミニウム (III) $0.3\mu\text{m}$ アルファアルミナの粉末を使用した。試料の詳細を表 8.1.2-1 に、圧縮条件を表 8.1.2-2 に示す。

1) 試験方法

- i) 比較試験（H28 年度事業での結果との比較）

- ・ 試料 1、試料 2 を加え圧縮成型
- ・ 試料 1、試料 3 を加え圧縮成型
- ii) 新たな試料を用いた試験
 - ・ 試料 1、試料 7 を加え圧縮成型
 - ・ 試料 1、試料 4、試料 5、試料 6、試料 7 のそれぞれ単体での圧縮成型
- iii) 比較試験条件出し
 - ・ 試料 1、試料 2 を加え圧縮成型
 - ・ 試料 1、試料 3 を加え圧縮成型
- iv) 新たな試料を用いた試験条件出し
 - ・ 試料 1、試料 4、試料 5、試料 6、試料 7 のそれぞれ単体での圧縮成型

2) 試験結果

i) 比較試験結果

- ・ 試料 1、試料 2 を加え圧縮した場合

試料 1、試料 2 を加えて圧縮した場合（圧縮条件 No.1~4）の成型結果を表 8.1.2-3~6 に示す。それぞれ 10 試料を製作したが、外力で崩壊することなく、多少の割れが発生したが、どの圧縮条件でも成型に成功した。また、手順書に沿って適切に圧縮成型ができることを確認した。

- ・ 試料 1、試料 3 を加え圧縮した場合

試料 1、試料 3 を加えて圧縮した場合（圧縮条件 No.5~8）の成型結果を表 8.1.2-7~10 に示す。製作した 10 試料について、外力で崩壊することなく、多少の割れが発生したが、どの圧縮条件でも成型に成功した。

ii) 新たな試料を用いた試験結果

- ・ 試料 1、試料 7 を加え圧縮した場合

試料 1 に試料 7 を加えて圧縮した場合（圧縮条件 No.9~12）の成型結果を表 8.1.2-11~14 に示す。製作した 5 試料について、どの圧縮条件でも成型はしたが、外力にて崩壊するものがあった。

- ・ 試料 1、試料 4、試料 5、試料 6、試料 7 の各単体での圧縮成型

試料 1、試料 4、試料 5、試料 6、試料 7 の各単体をそれぞれ一試料ずつ加えて圧縮した場合（圧縮条件 No.13~33）の成型結果を表 8.1.2-15~35 に示す。どの圧縮条件でも成型したが、試料 1、試料 4、試料 5、試料 6 は外力にて崩壊した。

iii) 比較試験条件出し結果

- ・ 試料 1、試料 2 を加え圧縮成型

試料 1、試料 2 を加えて圧縮した場合（圧縮条件 No.34~37）の成型結果を表 8.1.2-36~39 に示す。それぞれ 2 試料を製作し、試験条件出しを行った。

- ・ 試料 1、試料 3 を加え圧縮成型

試料 1、試料 3 を加えて圧縮した場合（圧縮条件 No.38~41）の成型結果を表 8.1.2-40~43 に示す。それぞれ 2 試料を製作し、試験条件出しを行った。

iv) 新たな試料を用いた試験条件出し結果

・ 試料 1、試料 4、試料 5、試料 6、試料 7 の各単体での圧縮成型

試料 1、試料 4、試料 5、試料 6、試料 7 の各単体をそれぞれ一試料ずつ加えて圧縮した場合（圧縮条件 No.42~46）の成型結果を表 8.1.2-44~48 に示す。どの圧縮条件でも成型したが、試料 4、試料 5 は外力にて崩壊。試料 1 は金型分離により成型可否について確認できなかった。

8.1.2.3 まとめ

デブリ模擬体調製設備について、据付後のペレット製造に先立ち、圧縮成型機を用いた性能試験を H28 年度事業に引き続き行った。

圧縮成型試験は、二酸化ウランを模擬したアルミナ、ジルコニアを原料とし、試料を作製した。また、本年度は金型接原料部を超硬にしたことにより、バインダを使用せずに圧縮成型可能とした。これによりペレット作製時の作業能力向上が図れる。試験の結果、適切に圧縮成型できる条件と、成型できず外力で崩壊する条件を確認し、今後のデブリ模擬体ペレット調製に必要なデータを取得した。

これらの結果は、次年度以降の事業において計画されている据付後のデブリ模擬体調製設備試運転に活用される。

表 8.1.2-1 使用原料

	品名	形状	純度(%)	粒度(μm)	メーカー
試料1	FSY酸化ジルコニウム (FSY-8H)	粉末	99	254	第一稀元素化学工業
試料2	3mol%イットリア添加ジルコニウム	粉末	-	0.3~0.4	住友大阪セメント(株)
試料3	8mol%イットリア添加ジルコニウム	粉末	-	0.3~0.4	住友大阪セメント(株)
試料4	酸化アルミニウム (Ⅲ)	粉末	-	150	(株)高純度化学研究所
試料5	酸化アルミニウム (Ⅲ)	粉末	-	53	(株)高純度化学研究所
試料6	酸化アルミニウム (Ⅲ)	粉末	-	10~20	(株)高純度化学研究所
試料7	アルファアルミナ	粉末	-	0.3	(株)高純度化学研究所

表 8.1.2-2 圧縮条件

No.	試料1/比率			試料2/比率			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
1	90%	2.2	g	10%	0.24	g	○	15	1095	2.4	8.5	10
2	90%	2.2	g	10%	0.24	g	○	21	1533	2.4	8.5	10
3	90%	2.2	g	10%	0.24	g	○	28	2044	2.4	8.5	10
4	90%	2.2	g	10%	0.24	g	○	35	2555	2.4	8.5	10
No.	試料1/比率			試料3/比率			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
5	90%	2.2	g	10%	0.24	g	○	15	1095	2.4	8.5	10
6	90%	2.2	g	10%	0.24	g	○	21	1533	2.4	8.5	10
7	90%	2.2	g	10%	0.24	g	○	28	2044	2.4	8.5	10
8	90%	2.2	g	10%	0.24	g	○	35	2555	2.4	8.5	10
No.	試料1/比率			試料7/比率			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
9	90%	2.1	g	10%	0.23	g	○	15	1095	2.3	8.5	10
10	90%	2.1	g	10%	0.23	g	○	21	1533	2.3	8.5	10
11	90%	2.1	g	10%	0.23	g	○	28	2044	2.3	8.5	10
12	90%	2.1	g	10%	0.23	g	○	35	2555	2.3	8.5	10
No.	試料1/比率			-			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
13	100%	2.4	g	-	-	-	×	15	1095	2.4	8.5	5
14	100%	2.4	g	-	-	-	×	21	1533	2.4	8.5	5
15	100%	2.4	g	-	-	-	×	28	2044	2.4	8.5	5
16	100%	2.4	g	-	-	-	×	35	2555	2.4	8.5	5
No.	試料4/比率			-			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
17	100%	1.54	g	-	-	-	×	15	1095	1.54	8.5	5
18	100%	1.54	g	-	-	-	×	21	1533	1.54	8.5	5
19	100%	1.54	g	-	-	-	×	28	2044	1.54	8.5	5
20	100%	1.54	g	-	-	-	×	35	2555	1.54	8.5	5
No.	試料5/比率			-			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
21	100%	1.54	g	-	-	-	×	35	2555	1.54	8.5	5
22	100%	1.54	g	-	-	-	×	28	2044	1.54	8.5	5
No.	試料6/比率			-			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
23	100%	1.54	g	-	-	-	×	15	1095	1.54	8.5	5
24	100%	1.54	g	-	-	-	×	21	1533	1.54	8.5	5
25	100%	1.54	g	-	-	-	×	28	2044	1.54	8.5	5
26	100%	1.54	g	-	-	-	×	35	2555	1.54	8.5	5
No.	試料7/比率			-			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
27	100%	1.54	g	-	-	-	×	8	584	1.54	8.5	1
28	100%	1.54	g	-	-	-	×	4	292	1.54	8.5	5
29	100%	1.54	g	-	-	-	×	5	365	1.54	8.5	5
30	100%	1.54	g	-	-	-	×	6	438	1.54	8.5	3
31	100%	1.54	g	-	-	-	×	7	511	1.54	8.5	1
32	100%	1.54	g	-	-	-	×	8	584	1.54	8.5	1
33	100%	1.54	g	-	-	-	×	10	730	1.54	8.5	1

No.	試料1/比率			試料2/比率			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
34	90%	2.2g		10%	0.24g		○	15	1095	2.4g	8.5	2
35	90%	2.2g		10%	0.24g		○	21	1533	2.4g	8.5	2
36	90%	2.2g		10%	0.24g		○	28	2044	2.4g	8.5	2
37	90%	2.2g		10%	0.24g		○	35	2555	2.4g	8.5	2
No.	試料1/比率			試料3/比率			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
38	90%	2.2g		10%	0.24g		○	15	1095	2.4g	8.5	2
39	90%	2.2g		10%	0.24g		○	21	1533	2.4g	8.5	2
40	90%	2.2g		10%	0.24g		○	28	2044	2.4g	8.5	2
41	90%	2.2g		10%	0.24g		○	28	2044	2.4g	8.5	2
No.	試料7/比率			-			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
42	100%	-g		-			×	35	2555	-g	8.5	1
No.	試料6/比率			-			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
43	100%	-g		-			×	35	2555	-g	8.5	1
No.	試料5/比率			-			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
44	100%	-g		-			×	35	2555	-g	8.5	1
No.	試料4/比率			-			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
45	100%	-g		-			×	35	2555	-g	8.5	1
No.	試料1/比率			-			乳鉢使用	圧力(Mpa)	荷重(kg)	質量(g)/個	金型径(mm)	製作数
46	100%	-g		-			○	35	2555	-g	8.5	1

表 8.1.2-3 圧縮成型試験・検査記録 1

圧縮条件： No. 1

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
外観	割れ	無	有	無	有	無	有	無	無	無	無
	欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	キャッピング	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	高さ(mm)	12.8	10.5	12.5	12.8	12.7	-	12.9	13.2	13.0	13.3
質量(g)		2.391	2.399	2.388	2.392	2.394	2.392	2.341	2.391	2.378	2.390
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	3.3	4.0	3.4	3.3	3.3	-	3.2	3.2	3.2	3.2
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	割れ欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無

写真 1

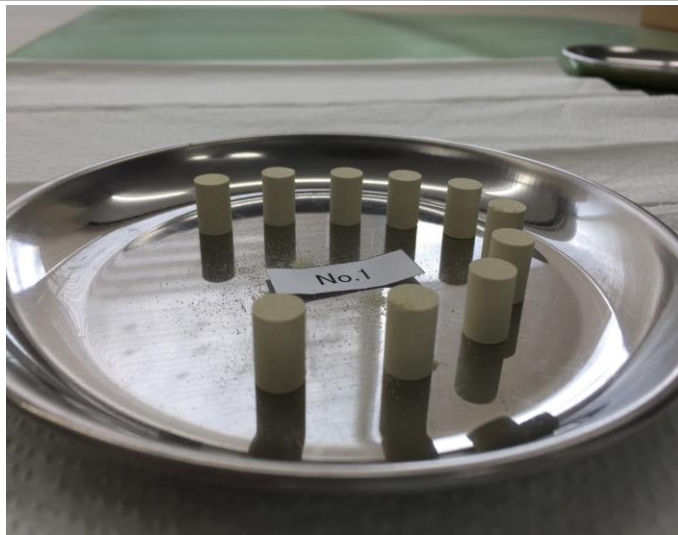


写真 2



表 8.1.2-4 圧縮成型試験・検査記録 2

圧縮条件： No. 2

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
外観	割れ	無	無	無	無	無	無	無	有	無	無
	欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	キャッピング	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	高さ(mm)	12.8	12.8	12.8	12.6	13.0	12.9	12.9	13.1	13.0	13.1
質量(g)		2.390	2.392	2.398	2.386	2.387	2.382	2.399	2.390	2.387	2.392
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	割れ欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無

写真 1



写真 2

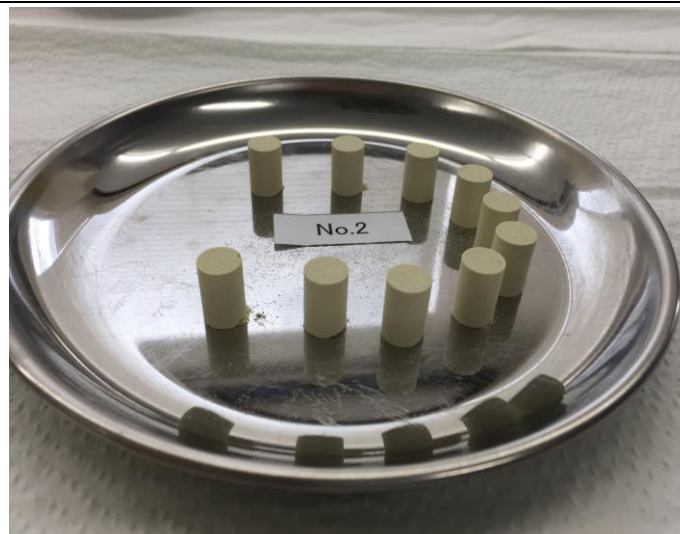


表 8.1.2-5 圧縮成型試験・検査記録 3

圧縮条件： No. 3

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
外観	割れ	無	無	無	無	有	無	無	有	無	無
	欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	キャッピング	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	高さ(mm)	12.9	12.9	12.8	12.8	-	12.6	12.7	-	12.7	12.9
質量(g)		2.391	2.399	2.388	2.392	-	2.396	2.399	-	2.397	2.399
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	3.3	3.3	3.3	3.3	-	3.4	3.3	-	3.3	3.3
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	割れ欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無

写真1

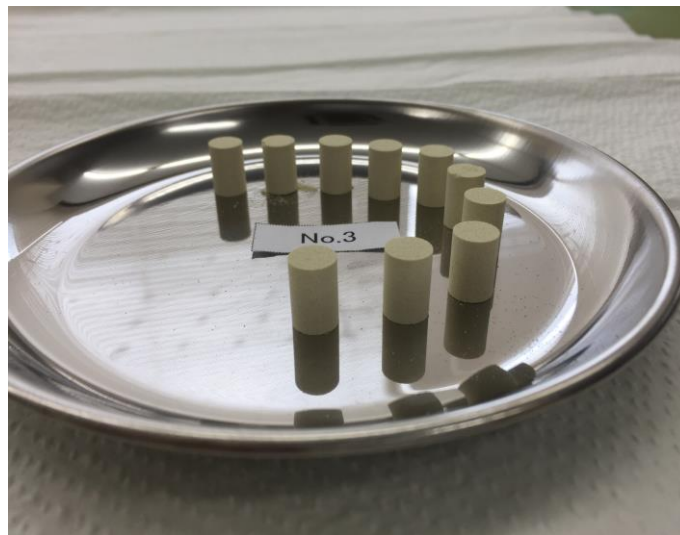


写真2

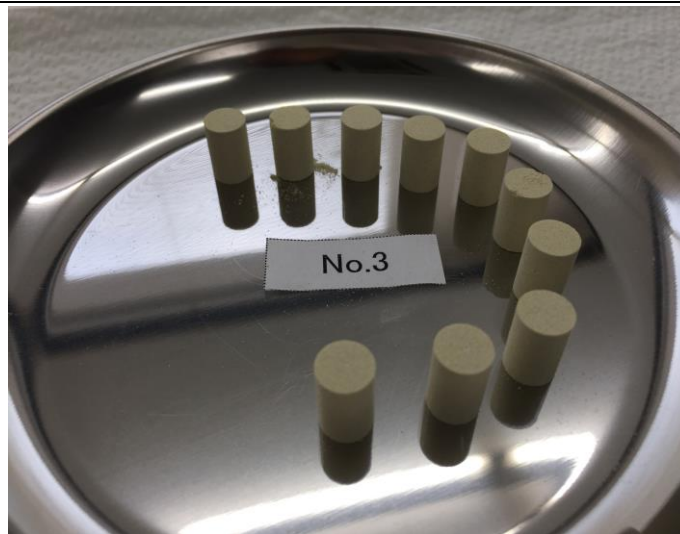


表 8.1.2-6 圧縮成型試験・検査記録 4

圧縮条件： No. 4

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
外観	割れ	無	無	無	無	無	無	無	有	無	無
	欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	キャッピング	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	高さ(mm)	12.8	13.0	12.8	12.8	13.0	12.8	12.6	-	13.0	13.0
質量(g)		2.382	2.396	2.389	2.396	2.392	2.371	2.378	-	2.397	2.384
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	3.3	3.2	3.3	3.3	3.2	3.3	3.3	-	3.2	3.2
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	割れ欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無

写真 1

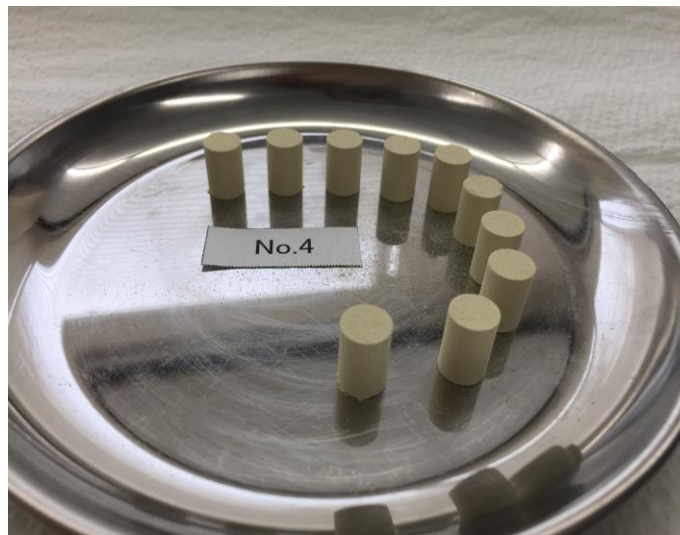


写真 2



表 8.1.2-7 圧縮成型試験・検査記録 5

圧縮条件： No. 5

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
外観	割れ	無	無	無	有	無	有	有	無	無	無
	欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	キャッピング	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	高さ(mm)	12.7	12.7	12.7	-	12.7	-	12.7	13.0	13.0	13.0
質量(g)		2.394	2.387	2.389	-	2.394	-	2.392	2.399	2.396	2.390
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	3.3	3.3	3.3	-	3.3	-	3.3	3.3	3.2	3.2
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	割れ欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無

写真1



写真2

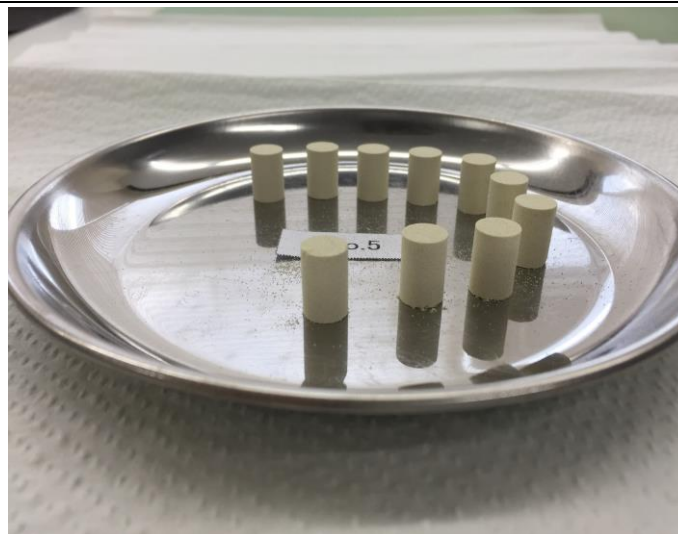


表 8.1.2-8 圧縮成型試験・検査記録 6

圧縮条件： No. 6

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
外観	割れ	無	無	有	有	無	無	無	無	無	無
	欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	キャッピング	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	高さ(mm)	12.8	12.9	12.7	12.8	12.8	13.0	13.0	12.9	13.0	13.0
質量(g)		2.396	2.396	2.396	2.379	2.396	2.398	2.384	2.324	2.396	2.391
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	割れ欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無

写真 1

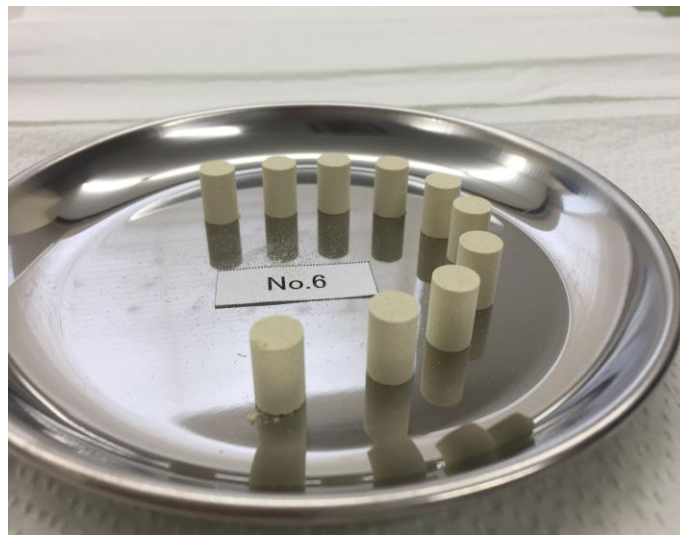


写真 2

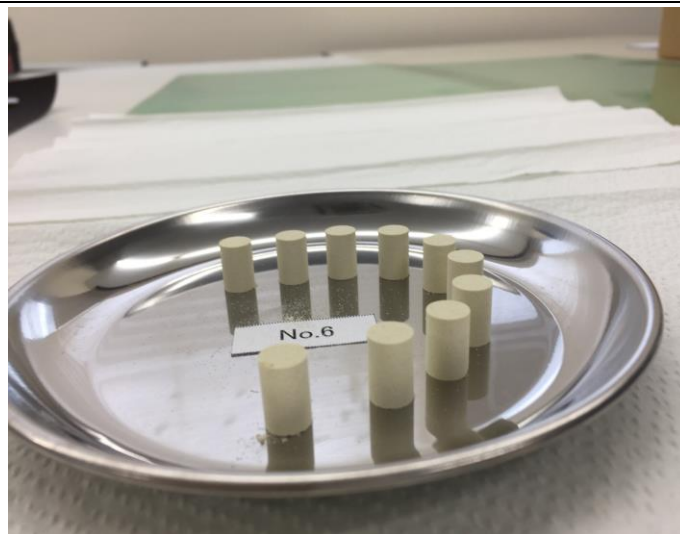


表 8.1.2-9 圧縮成型試験・検査記録 7

圧縮条件： No. 7

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
外観	割れ	有	無	有	有	無	有	無	無	無	無
	欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	キャッピング	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	高さ(mm)	12.9	13.0	-	-	12.9	-	12.9	13.0	12.9	13.0
質量(g)		2.398	2.398	-	-	2.398	2.390	2.351	2.398	2.388	2.398
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	3.3	3.3	-	-	3.3	-	3.2	3.3	3.3	3.3
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	割れ欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無

写真 1



写真 2



表 8.1.2-10 圧縮成型試験・検査記録 8

圧縮条件： No. 8

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
外観	割れ	有	無	有	無	無	有	無	無	無	有
	欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	キャッピング	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	高さ(mm)	13.0	12.9	12.8	12.9	12.8	-	13.0	13.0	13.0	-
質量(g)		2.394	2.390	2.382	2.376	2.388	-	2.385	2.389	2.389	-
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	3.2	3.3	3.3	3.2	3.3	-	3.2	3.2	3.2	-
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	割れ欠け	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無

写真 1

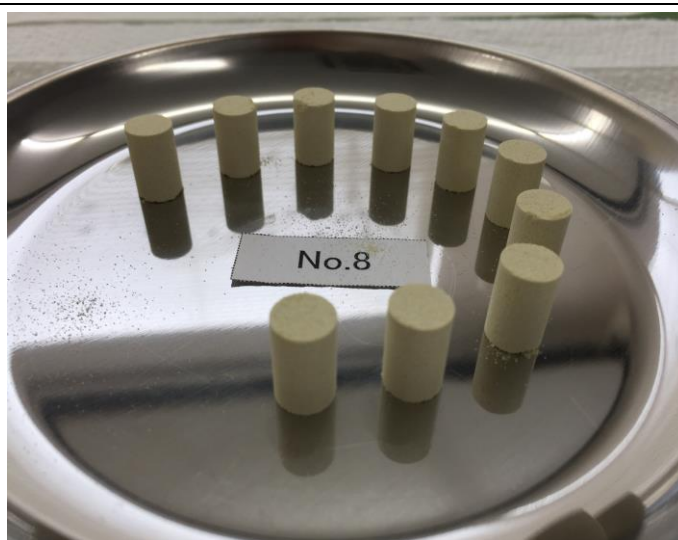


写真 2

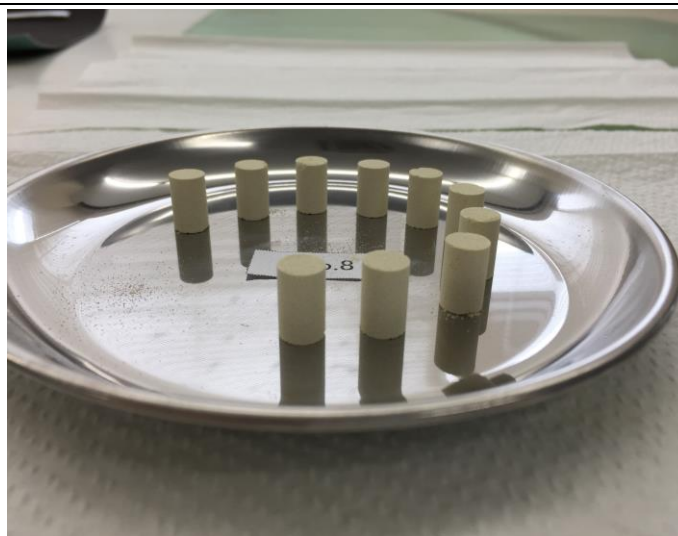


表 8.1.2-11 圧縮成型試験・検査記録 9

圧縮条件： No. 9

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.3	2.3	2.3	2.3	2.3					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3



写真 4

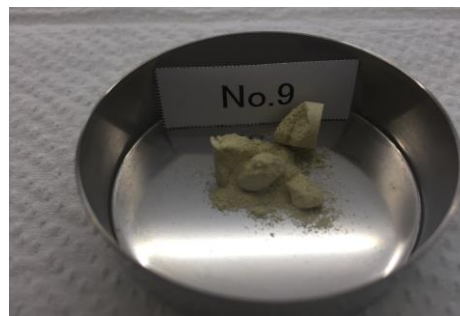


写真 2

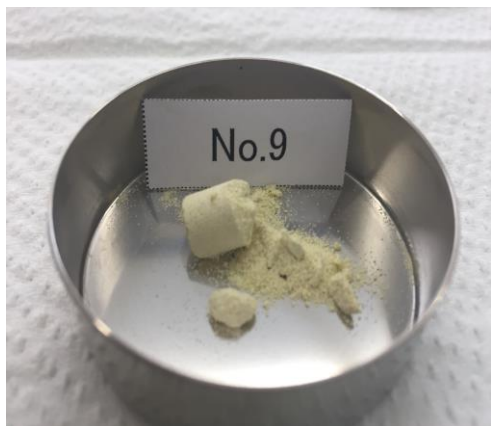


写真 5

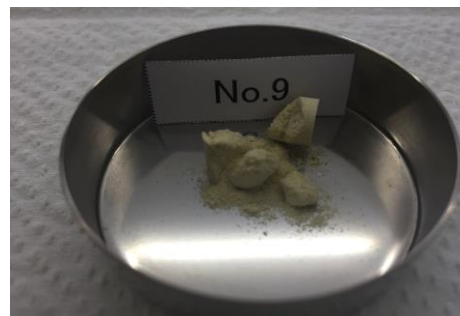


表 8.1.2-12 圧縮成型試験・検査記録 10

圧縮条件： No. 10

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.3	2.3	2.3	2.3	2.3					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	無	無	無	有					
	欠け	無	無	無	無	無					
	キャッピング	無	無	無	無	無					
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5					
	高さ(mm)	-	13.0	13.0	13.0	-					
質量(g)		-	2.285	2.286	2.284	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	3.1	3.1	3.1	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真1

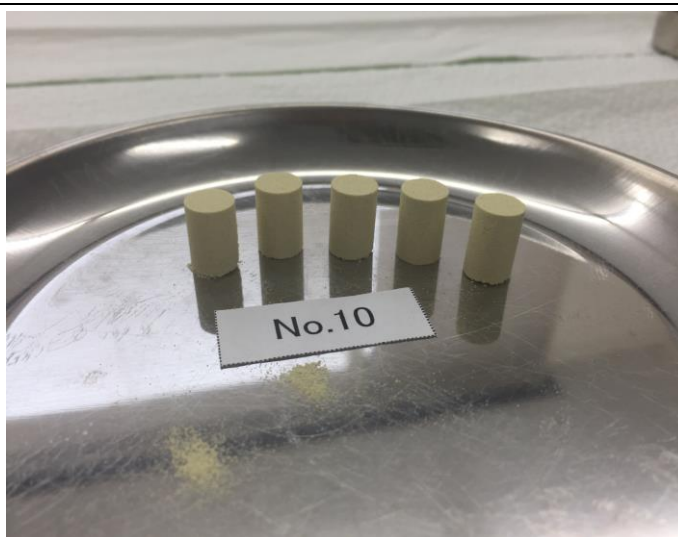


写真2

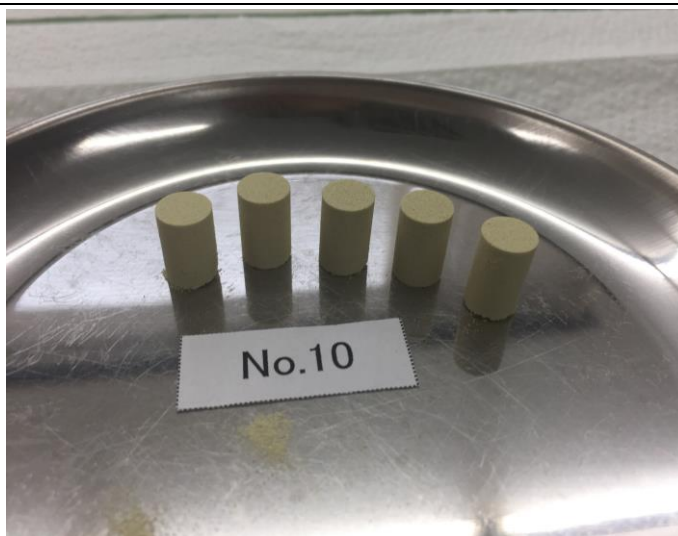


表 8.1.2-13 圧縮成型試験・検査記録 11

圧縮条件： No. 11

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3					
ペレット成績時間(min)	2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	無	無	有				
	欠け	-	無	無	無	-				
	キャッピング	-	無	無	無	-				
寸法	径(mm)	-	8.5	8.5	8.5	-				
	高さ(mm)	-	-	12.8	13.0	-				
質量(g)	-	-	2.291	2.281	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	3.2	3.1	-				
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良				
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無				
	割れ欠け	無	無	無	無	無				

写真1



写真2

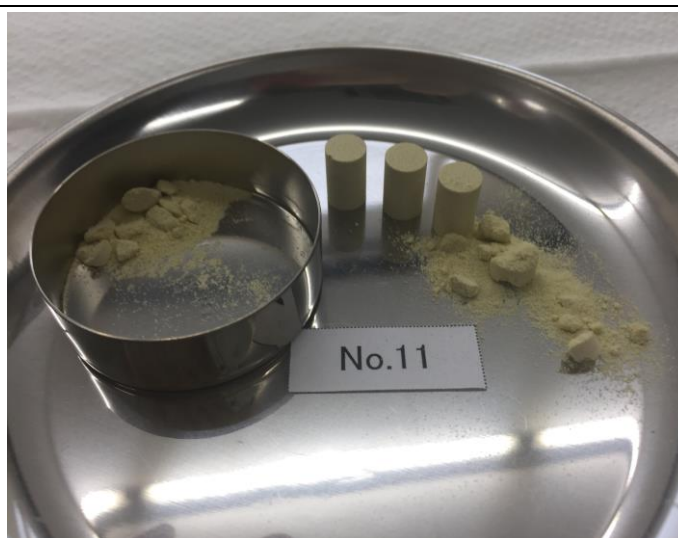


表 8.1.2-14 圧縮成型試験・検査記録 12

圧縮条件： No. 12

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.3	2.3	2.3	2.3	2.3					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	無	無	有	有	無					
	欠け	無	無	無	無	無					
	キャッピング	無	無	無	無	無					
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5					
	高さ(mm)	12.5	12.7	-	-	12.9					
質量(g)		2.239	2.292	-	-	2.274					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	3.2	3.2	-	-	3.1					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真1



写真2

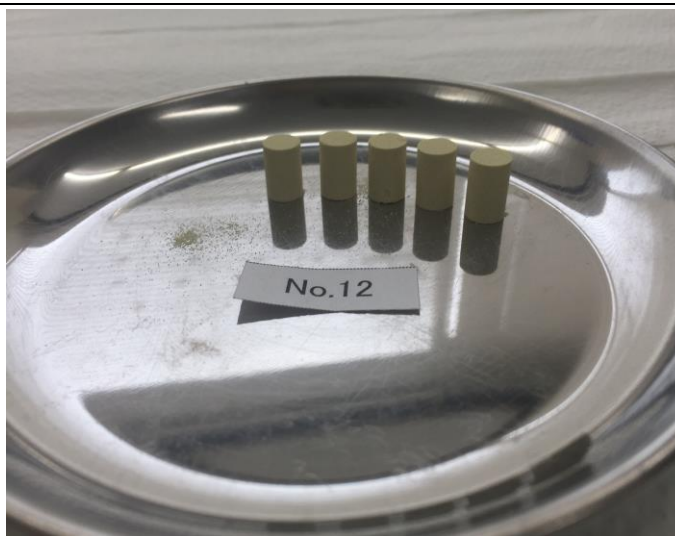


表 8.1.2-15 圧縮成型試験・検査記録 13

圧縮条件： No. 13

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm3)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3



写真 4



写真 2



写真 5



表 8.1.2-16 圧縮成型試験・検査記録 14

圧縮条件： No. 14

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 2



写真 3



写真 4



写真 5



表 8.1.2-17 圧縮成型試験・検査記録 15

圧縮条件： No. 15

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3



写真 4



写真 2



写真 5



表 8.1.2-18 圧縮成型試験・検査記録 16

圧縮条件： No. 16

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4	2.4	2.4	2.4					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3



写真 4



写真 2



写真 5



表 8.1.2-19 圧縮成型試験・検査記録 17

圧縮条件： No. 17

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3



写真 4



写真 2



写真 5



表 8.1.2-20 圧縮成型試験・検査記録 18

圧縮条件： No. 18

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3



写真 4



写真 2



写真 5



表 8.1.2-21 圧縮成型試験・検査記録 19

圧縮条件： No. 19

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm3)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3

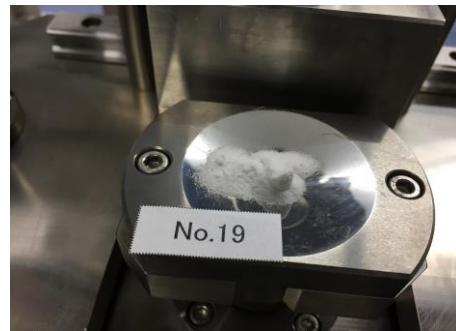


写真 4



写真 2

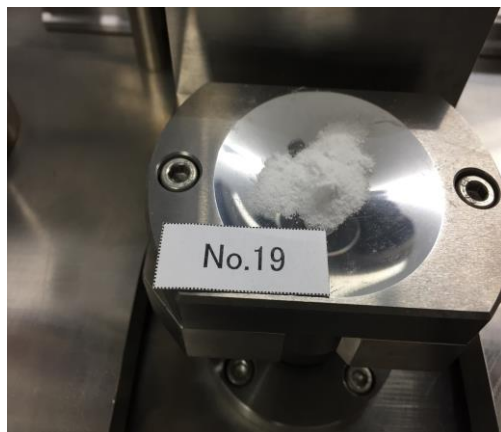


写真 5



表 8.1.2-22 圧縮成型試験・検査記録 20

圧縮条件： No. 20

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1

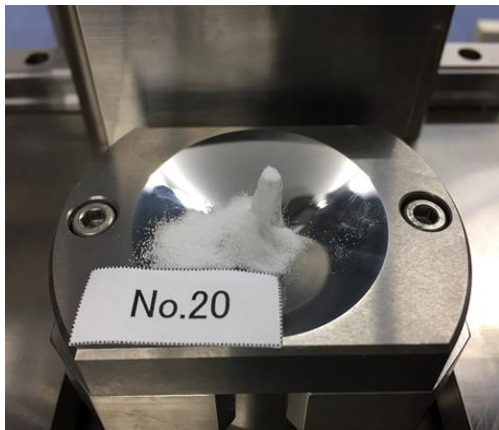


写真 2



写真 3



写真 4



写真 5

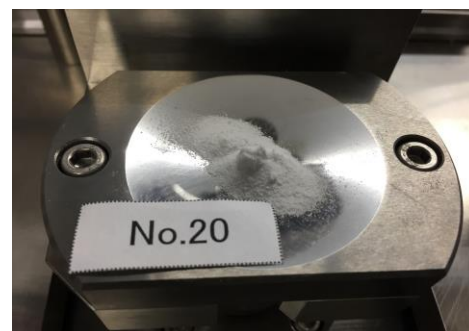


表 8.1.2-23 圧縮成型試験・検査記録 21

圧縮条件： No. 21

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3



写真 4

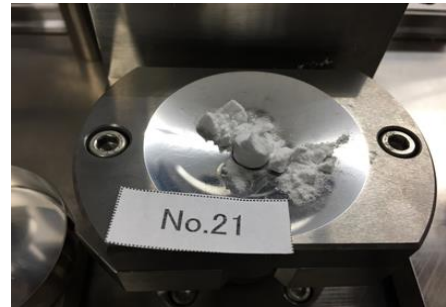


写真 2

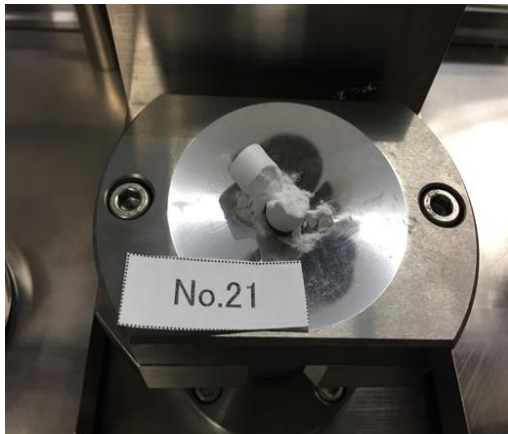


写真 5



表 8.1.2-24 圧縮成型試験・検査記録 22

圧縮条件： No. 22

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3



写真 4



写真 2



写真 5



表 8.1.2-25 圧縮成型試験・検査記録 23

圧縮条件： No. 23

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3

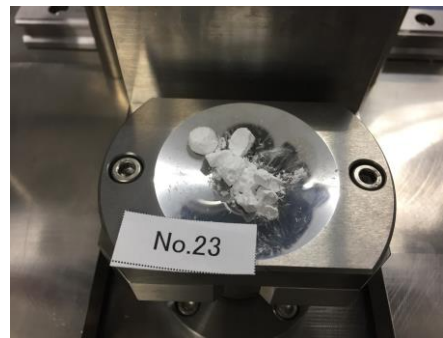


写真 4



写真 2



写真 5

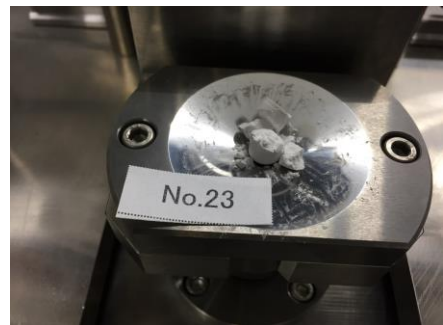


表 8.1.2-26 圧縮成型試験・検査記録 24

圧縮条件： No. 24

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm3)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3



写真 4



写真 2



写真 5



表 8.1.2-27 圧縮成型試験・検査記録 25

圧縮条件： No. 25

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm3)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1



写真 3



写真 4



写真 2



写真 5



表 8.1.2-28 圧縮成型試験・検査記録 26

圧縮条件： No. 26

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54					
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2					
外観	割れ	有	有	有	有	有					
	欠け	-	-	-	-	-					
	キャッピング	-	-	-	-	-					
寸法	径(mm)	-	-	-	-	-					
	高さ(mm)	-	-	-	-	-					
質量(g)		-	-	-	-	-					
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-	-	-	-					
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良					
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無					
	割れ欠け	無	無	無	無	無					

写真 1

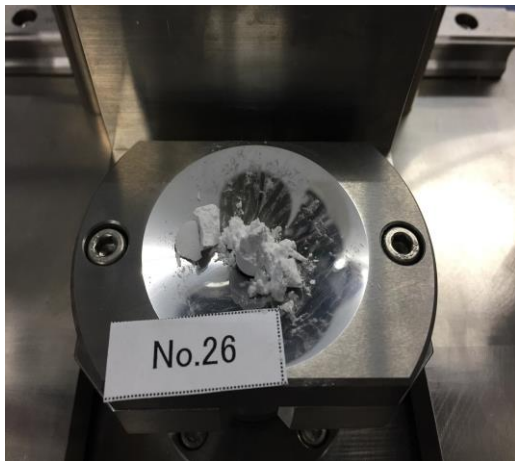


写真 2



写真 3



写真 4



写真 5



表 8.1.2-29 圧縮成型試験・検査記録 27

圧縮条件： No. 27

※成形は可、下型ろう付部で破損

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54									
ペレット成績時間(min)		2									
外観	割れ	有									
	欠け	-									
	キャッピング	-									
寸法	径(mm)	-									
	高さ(mm)	-									
質量(g)		-									
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-									
	金型からの抜けやすさ	良									
金型外観	金型摩耗	難									
	割れ欠け	有									

写真 1



写真 3



写真 2

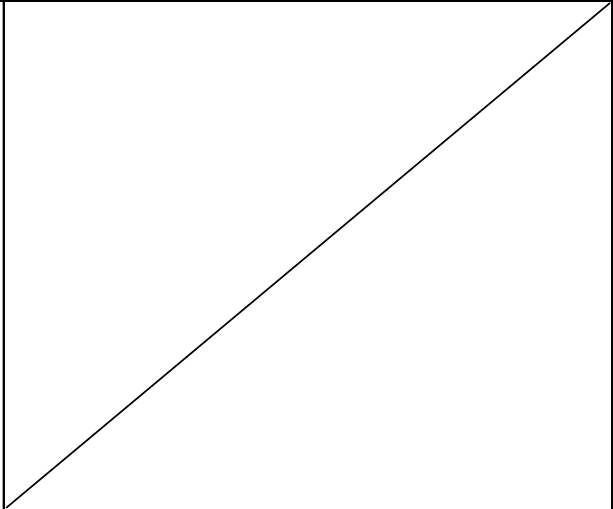
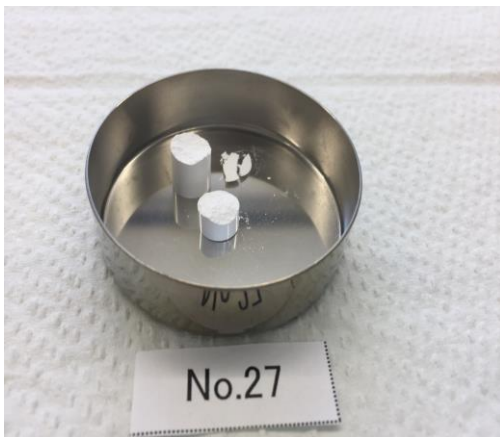


表 8.1.2-30 圧縮成型試験・検査記録 28

圧縮条件： No. 28

※下型SCM440部と超硬部分離にて使用

ペレット数		1	2	3	4	5						
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54						
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2						
外観	割れ	無	無	無	無	無						
	欠け	無	無	無	無	無						
	キャッピング	無	無	無	無	無						
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5						
	高さ(mm)	14.0	15.5	15.5	15.3	15.3						
質量(g)		1.514	1.529	1.520	1.526	1.538						
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	1.9	1.7	1.7	1.8	1.8						
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良						
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無						
	割れ欠け	無	無	無	無	無						

写真 1



写真 3

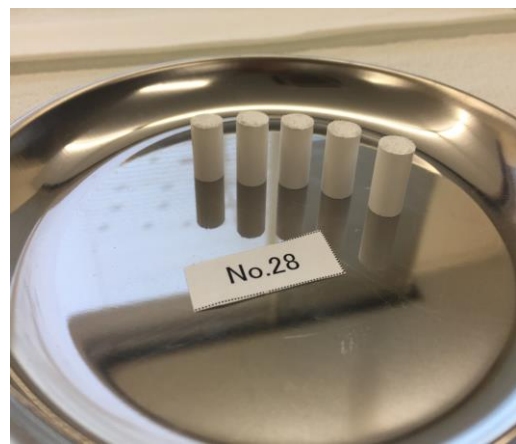


写真 2

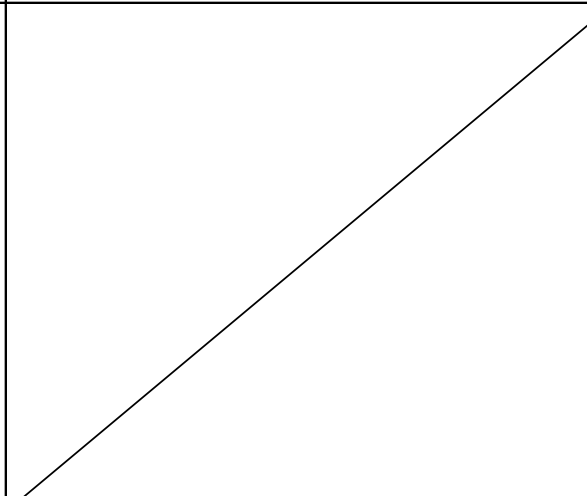


表 8.1.2-31 圧縮成型試験・検査記録 29

圧縮条件： No. 29

※下型SCM440部と超硬部分離にて使用

ペレット数		1	2	3	4	5						
充填量(g)		1.54	1.54	1.54	1.54	1.54						
ペレット成績時間(min)		2	2	2	2	2						
外観	割れ	無	無	無	無	無						
	欠け	無	無	無	無	無						
	キャッピング	無	無	無	無	無						
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5						
	高さ(mm)	15.4	15.7	15.6	15.7	15.9						
質量(g)		1.518	1.537	1.527	1.529	1.537						
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7						
	金型からの抜けやすさ	良	良	良	良	良						
金型外観	金型摩耗	無	無	無	無	無						
	割れ欠け	無	無	無	無	無						

写真 1



写真 3

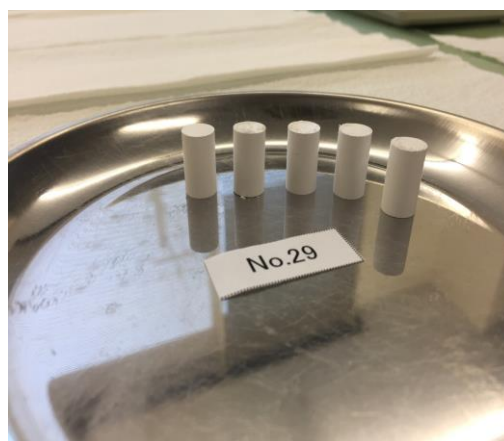


写真 2

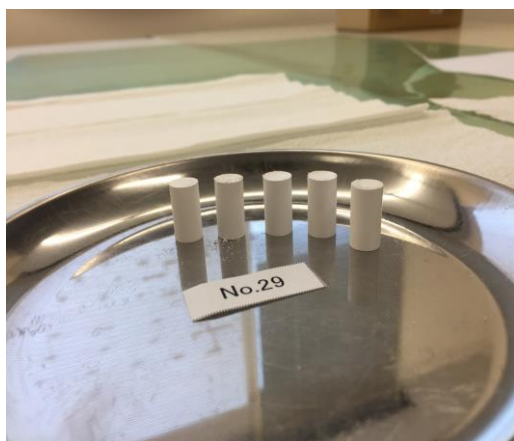


表 8.1.2-32 圧縮成型試験・検査記録 30

圧縮条件： No. 30

※下型SCM440部と超硬部分離にて使用

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54	1.54	1.54							
ペレット成績時間(min)		2	2	2							
外観	割れ	無	無	無							
	欠け	無	無	無							
	キャッピング	無	無	無							
寸法	径(mm)	8.5	8.5	8.5							
	高さ(mm)	15.4	15.5	15.6							
質量(g)		1.535	1.538	1.530							
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	1.8	1.7	1.7							
	金型からの抜けやすさ	良	良	良							
金型外観	金型摩耗	無	無	無							
	割れ欠け	無	無	無							

写真 1



写真 3

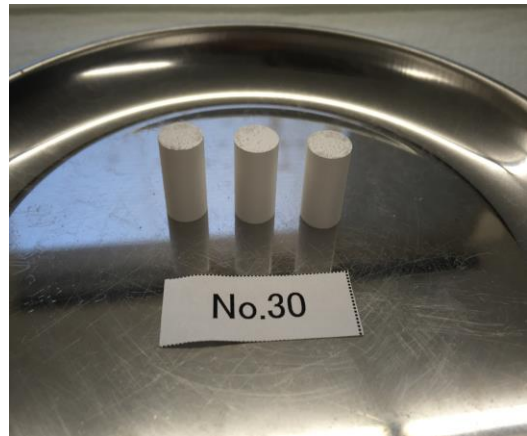


写真 2

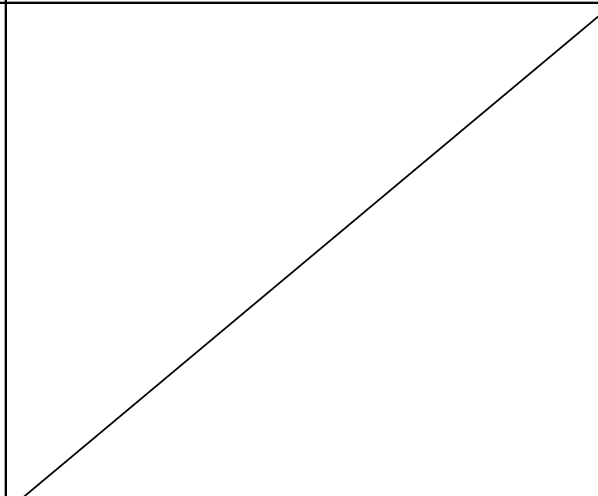


表 8.1.2-33 圧縮成型試験・検査記録 31

圧縮条件： No. 31

※下型SCM440部と超硬部分離にて使用

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54									
ペレット成績時間(min)		2									
外観	割れ	無									
	欠け	無									
	キャッピング	無									
寸法	径(mm)	8.5									
	高さ(mm)	15.5									
質量(g)		1.539									
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	1.7									
	金型からの抜けやすさ	良									
金型外観	金型摩耗	無									
	割れ欠け	無									

写真 1



写真 3

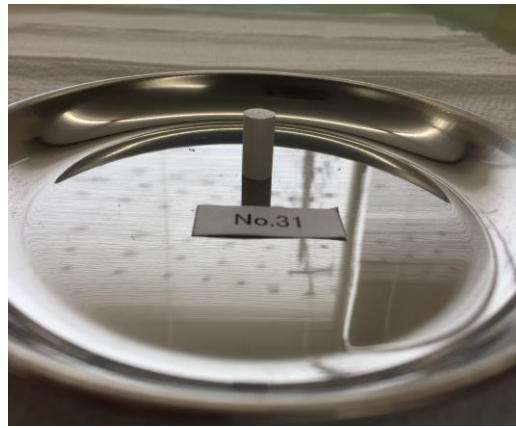


写真 2

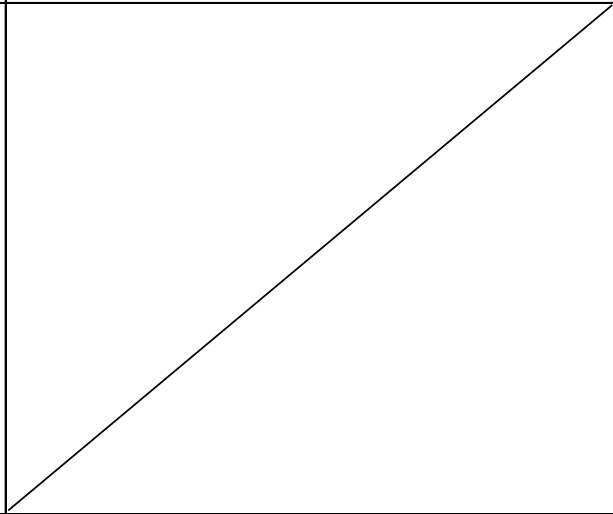


表 8.1.2-34 圧縮成型試験・検査記録 32

圧縮条件： No. 32

※下型SCM440部と超硬部分離にて使用

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54									
ペレット成績時間(min)		2									
外観	割れ	無									
	欠け	無									
	キャッピング	無									
寸法	径(mm)	8.5									
	高さ(mm)	15.3									
質量(g)		1.539									
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	1.8									
	金型からの抜けやすさ	良									
金型外観	金型摩耗	無									
	割れ欠け	無									

写真 1

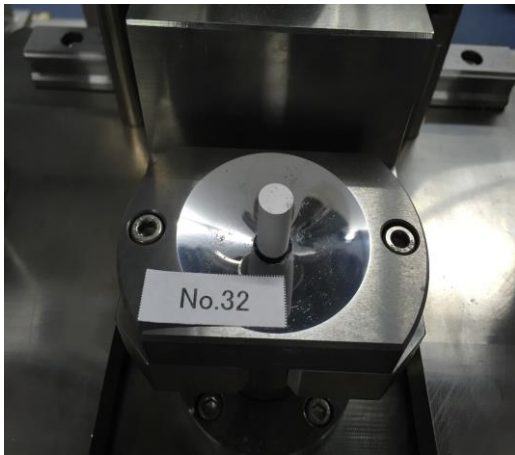


写真 3

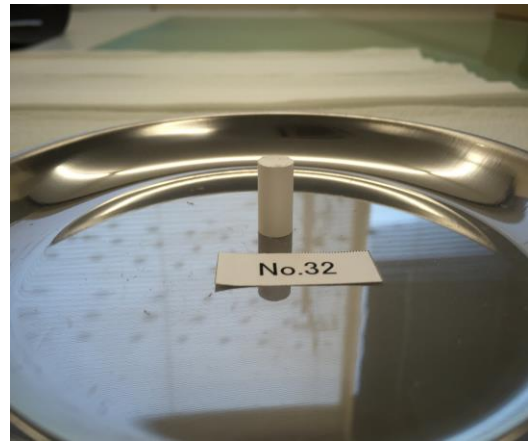


写真 2

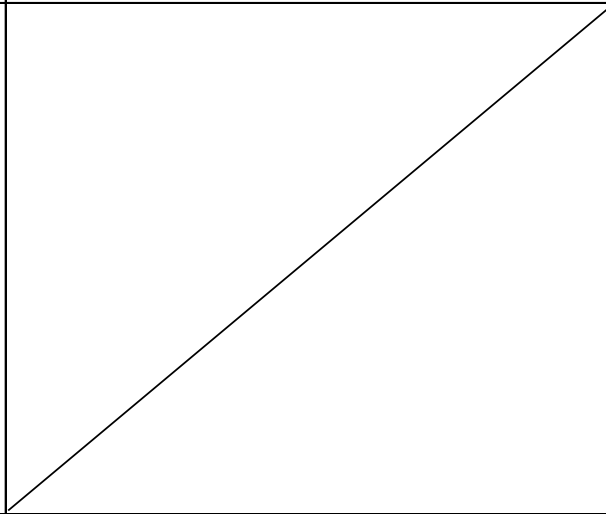


表 8.1.2-35 圧縮成型試験・検査記録 33

圧縮条件： No. 33

※下型SCM440部と超硬部分離にて使用

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		1.54									
ペレット成績時間(min)		2									
外観	割れ	無									
	欠け	無									
	キャッピング	無									
寸法	径(mm)	8.5									
	高さ(mm)	15.7									
質量(g)		1.554									
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	1.7									
	金型からの抜けやすさ	良									
金型外観	金型摩耗	無									
	割れ欠け	無									

写真 1

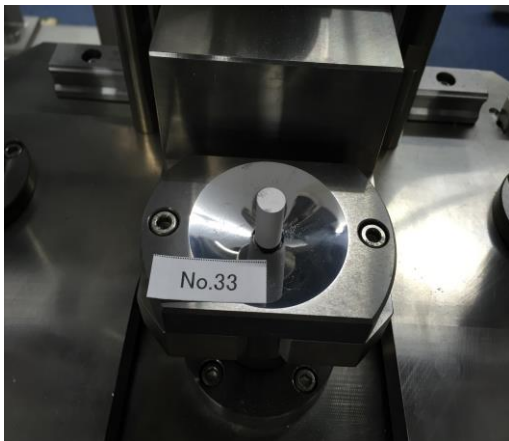


写真 3



写真 2

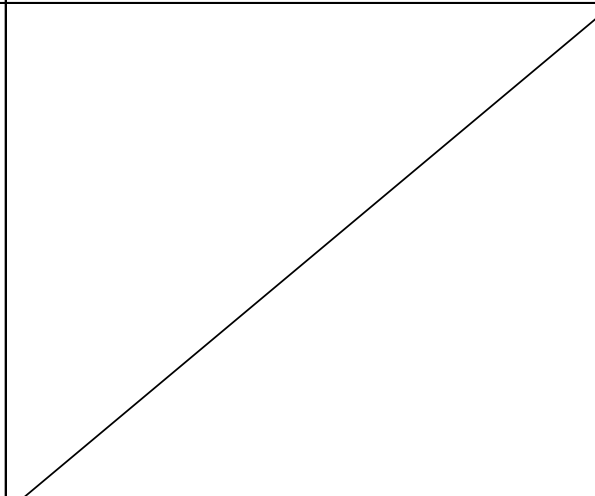


表 8.1.2-36 圧縮成型試験・検査記録 34

圧縮条件： No. 34

ペレット数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)	2.4	2.4								
ペレット成績時間(min)	2	2								
外観	割れ	無	無							
	欠け	無	無							
	キャッピング	無	無							
寸法	径(mm)	8.5	8.5							
	高さ(mm)	-	-							
質量(g)	-	-								
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-							
	金型からの抜けやすさ	良	良							
金型外観	金型摩耗	無	無							
	割れ欠け	無	無							

写真 1



写真 2



表 8.1.2-37 圧縮成型試験・検査記録 35

圧縮条件： No. 35

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4								
ペレット成績時間(min)		2	2								
外観	割れ	無	無								
	欠け	無	無								
	キャッピング	無	無								
寸法	径(mm)	8.5	8.5								
	高さ(mm)	-	-								
質量(g)		-	-								
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-								
	金型からの抜けやすさ	良	良								
金型外観	金型摩耗	無	無								
	割れ欠け	無	無								

写真 1



写真 2



表 8.1.2-38 圧縮成型試験・検査記録 36

圧縮条件： No. 36

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4								
ペレット成績時間(min)		2	2								
外観	割れ	無	無								
	欠け	無	無								
	キャッピング	無	無								
寸法	径(mm)	8.5	8.5								
	高さ(mm)	-	-								
質量(g)		-	-								
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-								
	金型からの抜けやすさ	良	良								
金型外観	金型摩耗	無	無								
	割れ欠け	無	無								

写真 1



写真 2



表 8.1.2-39 圧縮成型試験・検査記録 37

圧縮条件： No. 37

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4								
ペレット成績時間(min)		2	2								
外観	割れ	無	無								
	欠け	無	無								
	キャッピング	無	無								
寸法	径(mm)	8.5	8.5								
	高さ(mm)	-	-								
質量(g)		-	-								
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-								
	金型からの抜けやすさ	良	良								
金型外観	金型摩耗	無	無								
	割れ欠け	無	無								

写真 1



写真 2



表 8.1.2-40 圧縮成型試験・検査記録 38

圧縮条件： No. 38

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		2.4	2.4								
ペレット成績時間(min)		2	2								
外観	割れ	無	無								
	欠け	無	無								
	キャッピング	無	無								
寸法	径(mm)	8.5	8.5								
	高さ(mm)	-	-								
質量(g)		-	-								
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-								
	金型からの抜けやすさ	良	良								
金型外観	金型摩耗	無	無								
	割れ欠け	無	無								

写真 1



写真 2



表 8.1.2-41 圧縮成型試験・検査記録 39

圧縮条件： No. 39

ペレット数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)	2.4	2.4								
ペレット成績時間(min)	2	2								
外観	割れ	無	無							
	欠け	無	無							
	キャッピング	無	無							
寸法	径(mm)	8.5	8.5							
	高さ(mm)	-	-							
質量(g)	-	-								
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-							
	金型からの抜けやすさ	良	良							
金型外観	金型摩耗	無	無							
	割れ欠け	無	無							

写真 1



写真 2



表 8.1.2-42 圧縮成型試験・検査記録 40

圧縮条件： No. 40

ペレット数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)	2.4	2.4								
ペレット成績時間(min)	2	2								
外観	割れ	無	無							
	欠け	無	無							
	キャッピング	無	無							
寸法	径(mm)	8.5	8.5							
	高さ(mm)	-	-							
質量(g)	-	-								
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-							
	金型からの抜けやすさ	良	良							
金型外観	金型摩耗	無	無							
	割れ欠け	無	無							

写真 1



写真 2



表 8.1.2-43 圧縮成型試験・検査記録 41

圧縮条件： No. 41

ペレット数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)	2.4	2.4								
ペレット成績時間(min)	2	2								
外観	割れ	無	無							
	欠け	無	無							
	キャッピング	無	無							
寸法	径(mm)	8.5	8.5							
	高さ(mm)	-	-							
質量(g)	-	-								
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-	-							
	金型からの抜けやすさ	良	良							
金型外観	金型摩耗	無	無							
	割れ欠け	無	無							

写真 1



写真 2



表 8.1.2-44 圧縮成型試験・検査記録 42

圧縮条件： No. 42

※成形は可、下型ろう付部で破損

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		-									
ペレット成績時間(min)		2									
外観	割れ	無									
	欠け	無									
	キャッピング	無									
寸法	径(mm)	8.5									
	高さ(mm)	-									
質量(g)		-									
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-									
	金型からの抜けやすさ	良									
金型外観	金型摩耗	難									
	割れ欠け	有									

写真 1



写真 2

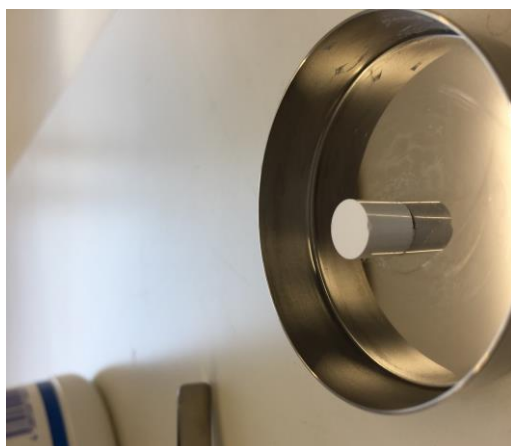


写真 3



表 8.1.2-45 圧縮成型試験・検査記録 43

圧縮条件： No. 43

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		-									
ペレット成績時間(min)		2									
外観	割れ	無									
	欠け	無									
	キャッピング	無									
寸法	径(mm)	8.5									
	高さ(mm)	-									
質量(g)		-									
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-									
	金型からの抜けやすさ	良									
金型外観	金型摩耗	無									
	割れ欠け	無									

写真 1

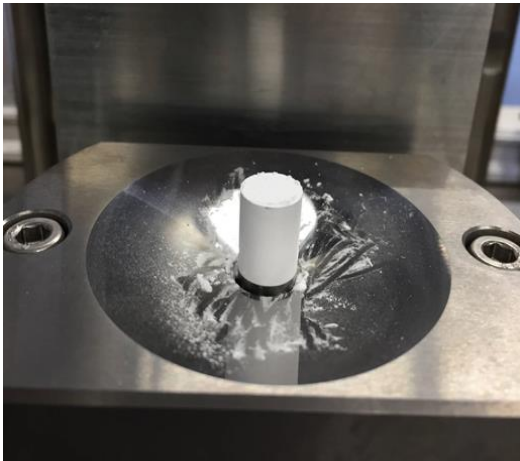


写真 3



写真 2



表 8.1.2-46 圧縮成型試験・検査記録 44

圧縮条件： No. 44

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		-									
ペレット成績時間(min)		2									
外観	割れ	有									
	欠け	-									
	キャッピング	-									
寸法	径(mm)	-									
	高さ(mm)	-									
質量(g)		-									
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-									
	金型からの抜けやすさ	良									
金型外観	金型摩耗	無									
	割れ欠け	無									

写真 1

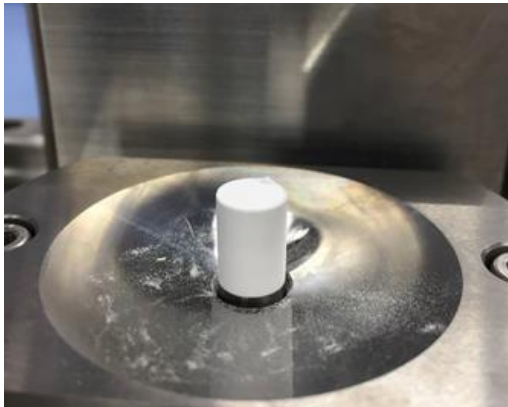


写真 3



写真 2



表 8.1.2-47 圧縮成型試験・検査記録 45

圧縮条件： No. 45

※成形は可、ピンセットにて崩壊

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		-									
ペレット成績時間(min)		2									
外観	割れ	有									
	欠け	-									
	キャッピング	-									
寸法	径(mm)	-									
	高さ(mm)	-									
質量(g)		-									
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-									
	金型からの抜けやすさ	良									
金型外観	金型摩耗	無									
	割れ欠け	無									

写真 1



写真 3

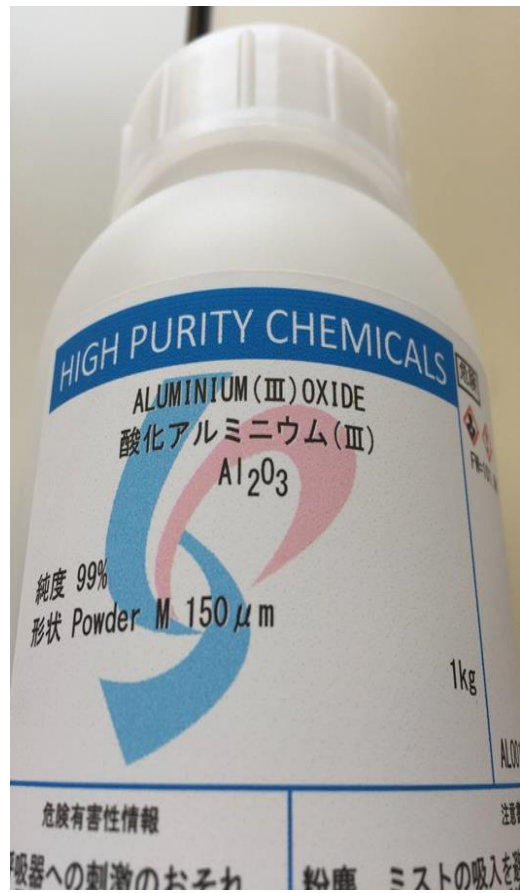


写真 2



表 8.1.2-48 圧縮成型試験・検査記録 46

圧縮条件： No. 46

※成形は不明、下型ろう付部で破損

ペレット数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
充填量(g)		-									
ペレット成績時間(min)		2									
外観	割れ	-									
	欠け	-									
	キャッピング	-									
寸法	径(mm)	-									
	高さ(mm)	-									
質量(g)		-									
フローティング力の影響評価	密度(g/cm ³)	-									
	金型からの抜けやすさ	難									
金型外観	金型摩耗	無									
	割れ欠け	有									

写真 1

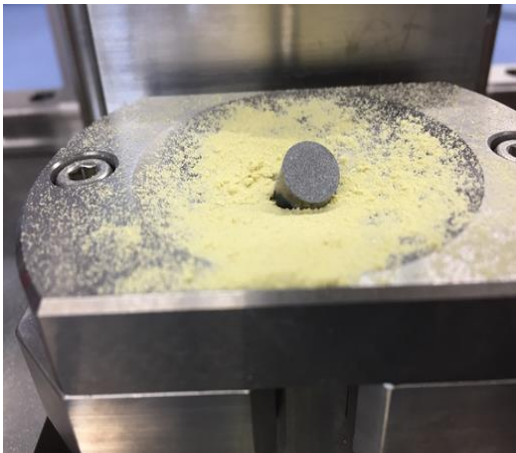


写真 3

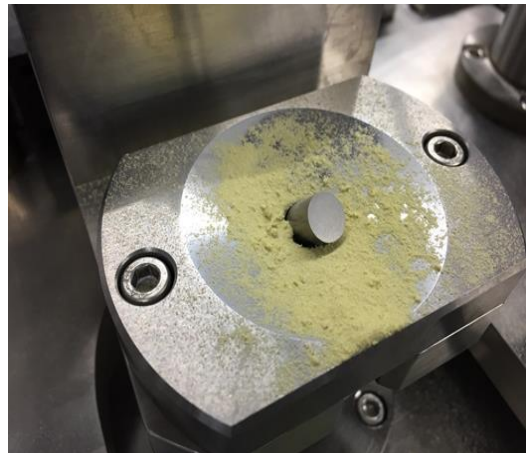
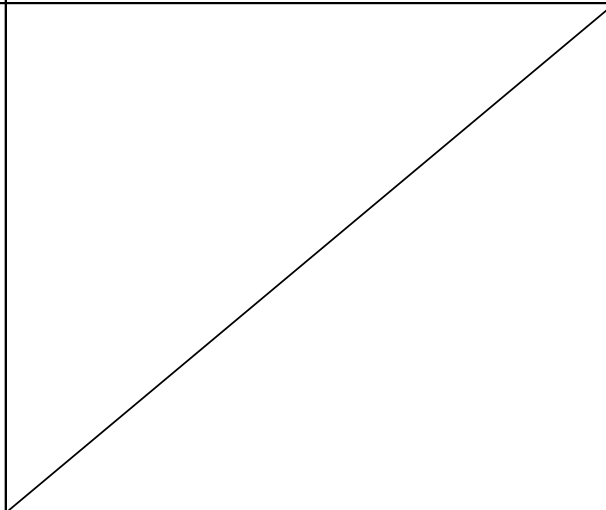


写真 2



8.2 デブリ模擬体分析設備の整備

STACY 更新炉における臨界実験で用いるデブリ模擬体の品質を保証することを目的とした分析を実施するため、デブリ模擬体分析設備を整備する。このとき、燃料サイクル安全工学研究施設（NUCEF）の既存の分析設備を最大限に有効活用する。

8.2.1 デブリ模擬体分析用器材の整備と試分析

8.2.1.1 目的及び概要

(1) 目的

デブリ模擬体の品質を保証することを目的とした分析に先立ち、デブリ模擬体分析用器材を整備し、試分析を実施する。

(2) 概要

デブリ模擬体の分析に向け、分析前処理等に使用する器材を整備した。また、平成 27 年度に購入したデブリ模擬体分析用器材等のうち、マイクロウェーブ分解装置、試料溶解用器材、化学分析用セメント標準試料等及び本年度整備した器材を用いて試分析を実施した。

8.2.1.2 成果報告

(1) マイクロウェーブ分解装置等を用いた試分析

デブリ模擬体試料は、コンクリートや原子炉構造材成分の酸化物粉末をウラン酸化物粉末に混合して調製されることから、試分析用試料として化学分析用セメント標準試料を使用した。マイクロウェーブ分解装置は、マイクロ波を利用して容器内を高温高圧にすることにより分解反応を促進し、短時間での試料溶解を可能にする装置である。容器内圧力は、使用する試薬や供試料量、マイクロ波出力等により増減するため、効率良く溶解する条件の設定が必要となる。本年度は、マイクロ波出力をパラメータとして、硝酸のみによる溶解（条件①）と、硝酸と塩酸の混酸による溶解（条件②）を実施することとし、1 回あたりの供試料量を 100 mg とし、2 試料～3 試料ずつ分取し、秤量瓶にて恒量としてから使用した。

① 試験方法

本装置による溶解条件を確認するため、化学分析用セメント標準試料の溶解試験を実施した。この溶解液中の各元素の分析値と、化学分析用セメント標準試料の標準値を比較することによって分析条件の妥当性を確認することとした。なお、分析対象元素は、化学分析用セメント標準試料中に含まれる主要元素のうち Mg、Al、Ca、Fe、Si の 5 元素とした。

1) 化学分析用セメント標準試料の溶解

使用した化学分析用セメント標準試料の仕様及び標準値は、表 8.2-1 のとおりである。本年度の試分析では、表 8.2-2 に示す溶解条件にて溶解した。溶解前後の状態を図 8.2-1～図 8.2-7 に示す。

表 8.2-1 化学分析用セメント標準試料の仕様及び標準値

メーカー	一般社団法人セメント協会	
性状	211S (化学分析用標準試料) 普通ポルトランドセメント	
標準値	強熱減量	2.19%
	不溶残分	0.23%
	SiO ₂	20.57%
	Al ₂ O ₃	5.60%
	Fe ₂ O ₃	2.51%
	CaO	64.25%
	MgO	1.26%
	SO ₃	2.10%
	Na ₂ O	0.27%
	K ₂ O	0.40%
	TiO ₂	0.30%
	P ₂ O ₅	0.14%
	MnO	0.05%
	Cl	0.022%

表 8.2-2 化学分析用セメント標準試料の溶解条件

	条件①	条件②
供試料量	100 mg	100 mg
試薬	硝酸 8 mL	硝酸 2 mL + 塩酸 6 mL
マイクロ波出力	140°C 3分 160°C 10分 200°C 20分	150°C 10分 180°C 15分

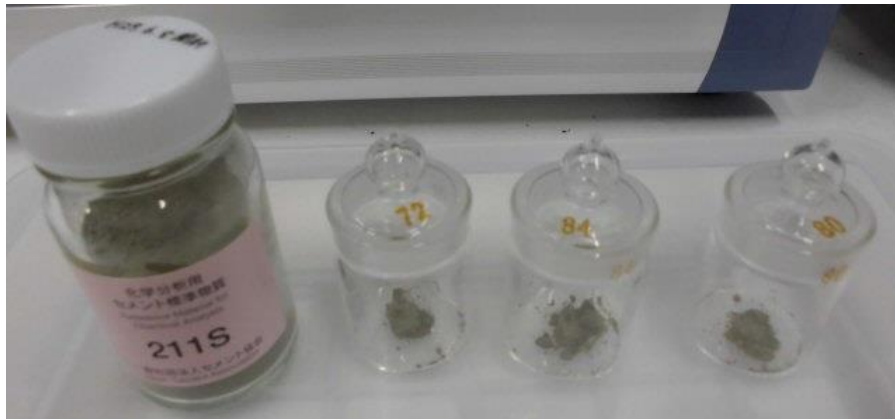


図 8.2-1 化学分析用セメント標準試料外観



図 8.2-2 試薬添加後の状態 (条件①)



図 8.2-3 試薬添加後の状態 (条件②)



図 8.2-4 溶解後の状態 (条件①)



図 8.2-5 溶解後の状態 (条件②)



図 8.2-6 ろ過後の沈殿物（条件①）



図 8.2-7 ろ過後の沈殿物（条件②）

2) 測定方法

溶解後の試料をろ過して得た溶液を蒸発乾固し、 1 mol/dm^3 の硝酸で定容又は希釈して測定試料とした。これらの測定試料は、JAEA に既存の誘導結合プラズマ発光分光分析装置（島津製作所製 ICPS-7510）にて測定した。

② 試験結果

試験結果を表 8.2-3 及び表 8.2-4 に示す。

Si 以外の元素において、標準値に対する分析値平均の比は 0.91～1.03 であり、各元素の分析結果の変動係数は 5% 未満であった。また、条件①及び条件②による溶解において、残渣の外観や量には大きな変化は見られなかった。これらのことから、セメント標準試料中の主要元素は、硝酸のみによるマイクロ波分解で十分に分析可能であることが確認できた。

なお、Si については測定試料中からほとんど検出されていないことから、マイクロ波分解後の残渣は SiO_2 であると予想される。今後は乾燥後重量測定等の適用を検討する。

表 8.2-3 化学分析用セメント標準試料の溶解試験結果（条件①）

	Mg	Al	Ca	Fe	Si
No.1 (wt%)	0.74	3.0	43	1.8	0.02
No.2 (wt%)	0.74	3.1	43	1.8	0.01
No.3 (wt%)	0.72	3.1	43	1.8	0.01
分析値平均 (wt%)	0.73	3.1	43	1.8	0.02
分析平均値/標準値 (-)	0.96	1.03	0.93	1.03	< 0.01

表 8.2-4 化学分析用セメント標準試料の溶解試験結果 (条件②)

	Mg	Al	Ca	Fe	Si
No.1 (wt%)	0.67	2.7	42	1.7	< 0.01
No.2 (wt%)	0.71	2.9	45	1.8	< 0.01
分析値平均 (wt%)	0.69	2.8	44	1.7	< 0.01
分析平均値/標準値 (-)	0.91	0.95	0.95	0.99	—

(2) 分析用器材の整備

分析前処理等に使用する分析用器材を整備した。整備した分析用器材一覧を表 8.2-5 に、主な器材の外観図を図 8.2-8～図 8.2-10 に示す。

表 8.2-5 分析用器材一覧

器材名称	型式、主要仕様	備考
DAP-60K 圧力容器一式	(株)アクタック製 DAP-60K, DAQ-10	図 8.2-8 参照
マイクロウェーブ分解装置消耗品一式	(株)アクタック製 DAP-60K, DAQ-10	
ねじ口洗浄瓶 フィルタ付き	アズワン製, 6-758-01, 500mL	
ねじ口洗浄瓶 ムエンケ式	アズワン製, 6-759-01, 500mL	
ドライ真空ポンプ	アズワン製, DA-30S 排気速度: 24ℓ/30min 到達圧力: 26.6 kPa 吸気口径: 9mm×5mm	図 8.2-9 参照
ベルジャー	理工科学製 IS-26H	
ポータブル天秤	ザルトリウス製 ENTRIS224-1S 読取限度: 0.1mg 量: 210g	図 8.2-10 参照
分析装置用排気ポンプ一式	Thermo Fisher Scientific 製 OME25S, NW20/25KF, NW25 VIT	
標準分銅セット	ザルトリウス製 YCS01-513-00 OIML: F1, 1mg~100g JCSS 校正済及び校正証明書付	



図 8.2-8 DAP-60K 圧力容器一式



図 8.2-9 ドライ真空ポンプ



図 8.2-10 ポータブル天秤

8.2.1.3 まとめ

デブリ模擬体試料の分析に先立ち、前処理等に使用する分析用器材を整備し、マイクロウェーブ分解装置等を用いた試分析を実施した。試分析の結果から、デブリ模擬体試料の分析において必要となる試料溶解手法及び主要元素の含有量の測定について見通しを得ることができた。今後は、試料溶解での残渣として予想される SiO_2 の測定手法及びデブリ模擬体試料への混合物として想定されているジルコニウム等の溶解手法について検討する予定である。

8.2.2 既存設備・装置の一部解体撤去及び原子炉施設との系統遮断

8.2.2.1 目的及び概要

(1) 目的

デブリ模擬体分析設備の整備の一環として、NUCEF 分析設備のうち分析室 (I) を原子炉施設から核燃料物質使用施設への許可区分変更を行い、デブリ模擬体の分析を実施するための設備・装置を整備する。許可区分変更に当たり、分析室 (I) を原子炉施設から隔離するため、既存設備・装置の一部解体撤去及び原子炉施設との系統遮断を実施する。

(2) 概要

本事業の平成 27 年度報告に記載した「許可区分変更のための分析設備の詳細設計」に基づき、既存設備・装置の一部解体撤去及び原子炉施設との系統遮断を実施した。解体撤去の対象は、分析室 (I) 内の設備・装置のうち、①STACY 及び TRACY の溶液燃料を受け払いする装置（分析試料受入装置、後処理装置等）、②今後使用しないことが明らかであり、新規に導入する分析装置等の設置を想定している場所に現存している設備・装置である。また、系統遮断の対象は、STACY 及び TRACY の溶液燃料を受け払いする装置（分析試料受入装置、後処理装置等）と配管によって接続されている系統である。

8.2.2.2 成果報告

(1) 既存設備・装置の一部解体撤去及び原子炉施設との系統遮断

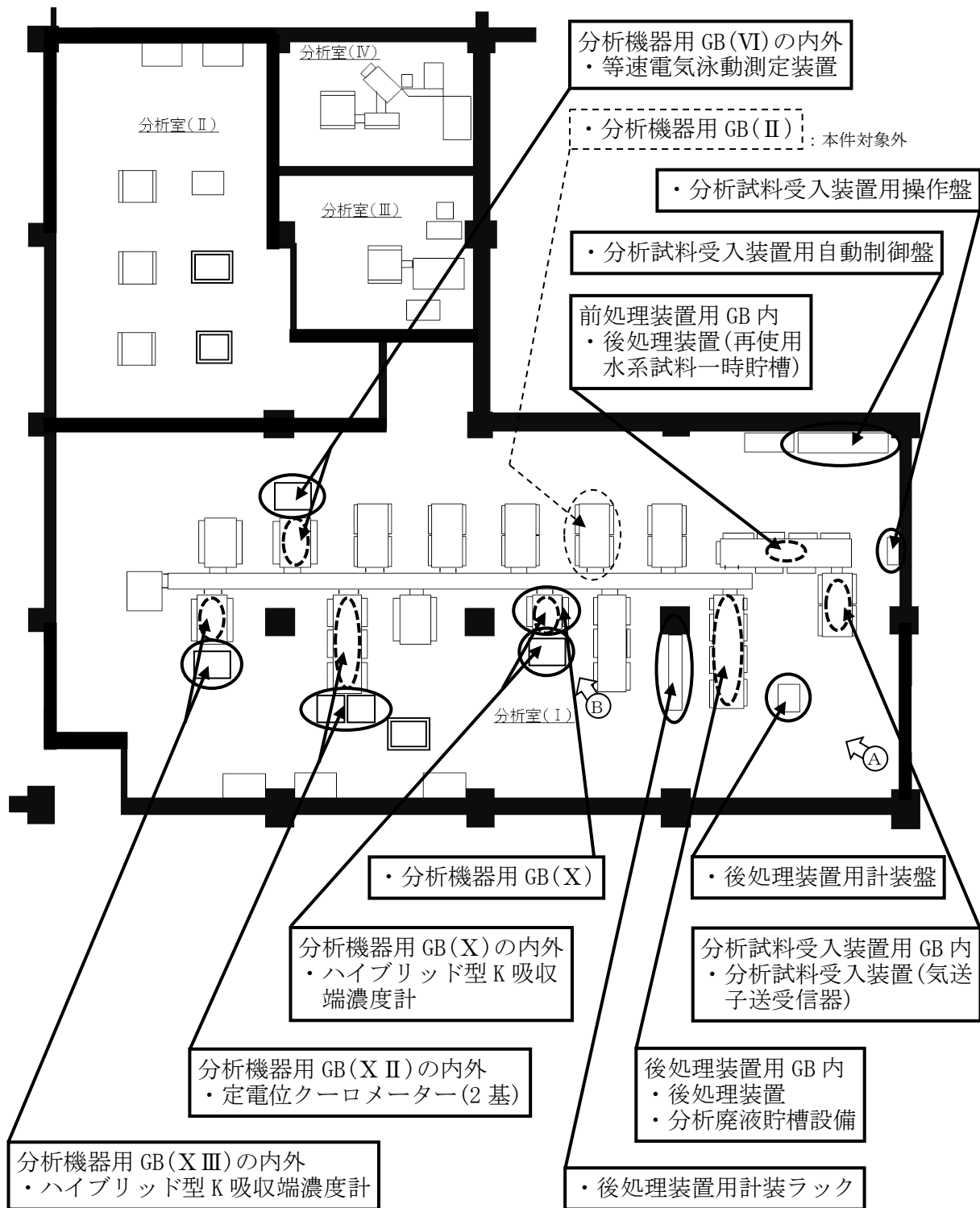
解体撤去及び系統遮断にあたっては、平成 27 年度に行った詳細設計に最新の知見を反映して実施した。解体撤去及び系統遮断は、事故や大きなトラブルもなく、計画どおりに終了した。

① 解体撤去した設備・機器

解体撤去の対象は以下のとおりである。これらの配置を図 8.2-11 に、解体撤去の前と後の状況の代表例を図 8.2-12 に示す。

- a) 分析試料受入装置のうち、分析室 (I) 内設置部
 - ・気送子送受信器一式
 - ・気送管及び気送用空気配管一式
 - ・合流転換器一式
 - ・自動制御盤及び操作盤
 - ・その他、分析試料受入装置に附属する機器、配管等
- b) 後処理装置のうち、分析室 (I) 内設置部
 - ・貯槽 (8 基) 及びポンプ (7 基)
 - ・液移送用、計装用配管一式
 - ・計装ラック及び計装盤一式
 - ・その他、後処理装置に附属する機器、配管等
- c) 分析廃液貯槽設備のうち、分析室 (I) 内設置部
 - ・貯槽及びポンプ各 1 基
 - ・液移送用、計装用配管一式

- ・その他、分析廃液貯槽設備に附属する機器、配管等
- d) グローブボックス
 - ・分析機器用グローブボックス (X)
 - ・上記グローブボックスの給排気系統、電線管等
 - ・その他、上記グローブボックスに附属する機器、配管等
- e) グローブボックス対応分析装置 (グローブボックスの内外設置部)
 - ・ハイブリッド型 K 吸収端濃度計 (2 基) 一式
 - ・定電位クーロメーター (2 基) 一式
 - ・等速電気泳動測定装置一式



GB : グローブボックス

図 8.2-11 解体撤去した設備・装置の配置



撤去前



撤去後

後処理装置用グローブボックスの周辺 (図 8.2-11 の ㉔より)



撤去前



撤去後

分析機器用グローブボックス(X)の周辺 (図 8.2-11 の ㉕より)

図 8.2-12 解体撤去の状況

② 解体撤去作業の内容

解体撤去作業のフローを図 8.2-13 に示す。

作業においては、解体撤去で発生した撤去物の仮置きや移動を考慮して順次必要な空間や動線を確保できるよう、順序に留意した。また、分析室 (I) の中心に位置する分析機器用グローブボックス (X) の撤去で空いたエリアには、撤去物を細断するための専用のグリーンハウスを設置することで、汚染対策や火気対策の集約による効率化と、作業性の向上による放射性廃棄物の減容化を目指した。

なお、解体撤去に伴ってグローブボックスの気密性に影響を与える箇所には、溶接止め、フランジ止め等によって適切に閉止措置している。

これらを踏まえて実施した解体撤去作業について以下に記す。

1) グローブボックスの解体撤去

分析機器用グローブボックス（X）の解体撤去では、本体部を原子力科学研究所の廃棄施設である放射性廃棄物処理場の解体分別保管棟に運搬した。これによって、分析室（I）での汚染対策や火気対策の削減及び解体に係る作業を効率化した。

分析室（I）では、グローブボックス外側の計器類や給排気配管等を取り除いて撤去したのち、分析機器用グローブボックス（X）と試料搬送装置用グローブボックスとの接続を切り離した。切り離しにあたっては、汚染対策としてPVC（ポリ塩化ビニル）製の手付きバッグで覆う手法を用いた。切り離し手順の一部を図 8.2-14 に、作業の様子を図 8.2-15 に示す。

解体分別保管棟に運搬する本体部は、事前にグローブを気密栓タイプに交換し、給排気配管等の撤去によって生じた開口部には用意した閉止フランジ等を取り付けた。管理区域外を運搬する前には本体部の表面に汚染がないことを確認したのち、酢酸ビニルシートで梱包してから引き渡した。

2) グローブボックス内装機器の解体撤去

i) 分析装置の解体撤去

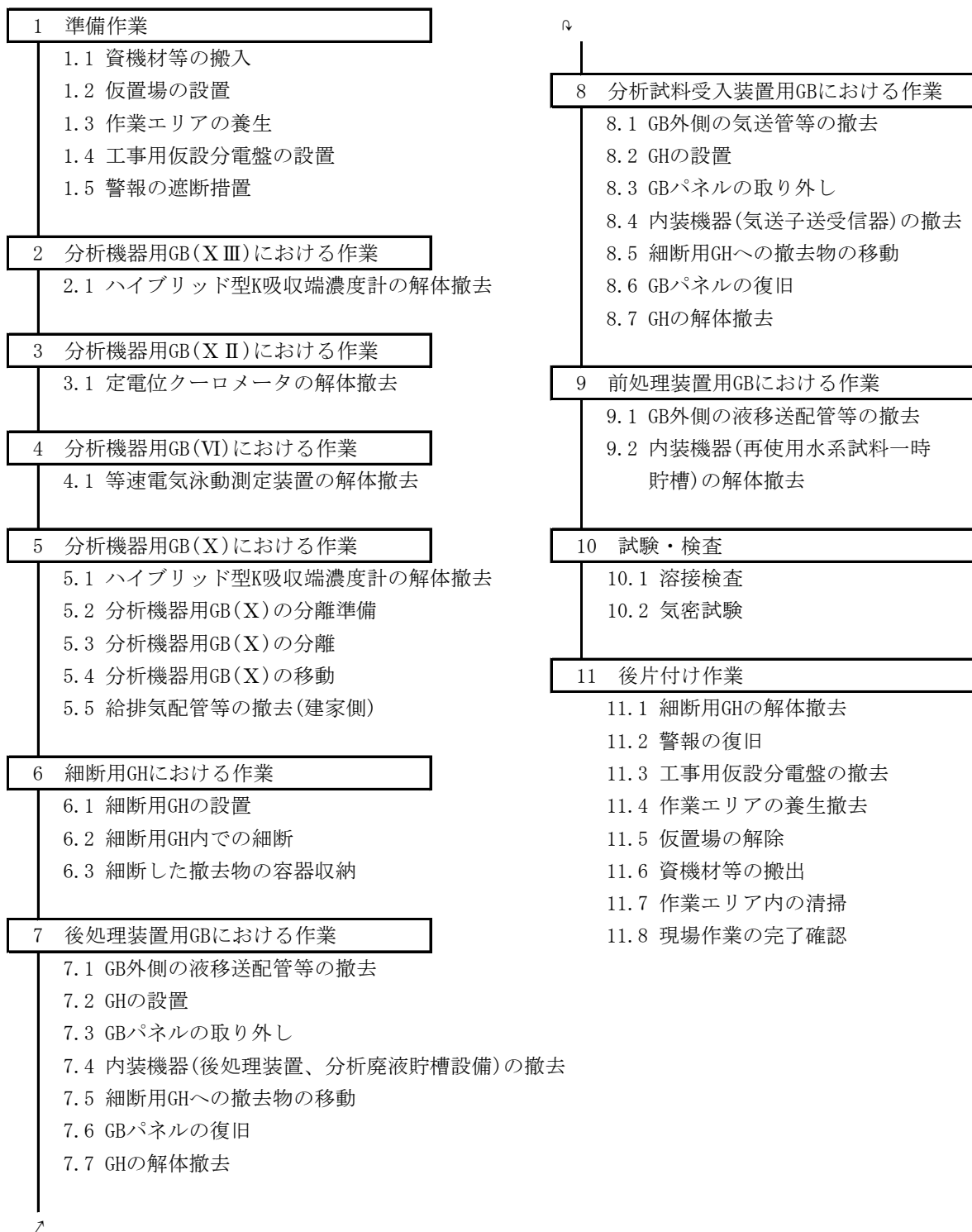
グローブボックス内に設置されている分析装置は、スパナ等の手工具にて分解したのち、性状ごとに分別してバッグアウトによりグローブボックスから取り出した。取り出した撤去物は、所定の容器（200L ドラム缶）に収納したのち、放射性廃棄物処理場に引き渡した。

ii) 分析試料受入装置及び後処理装置

分析試料受入装置用グローブボックス及び後処理装置用グローブボックスでは、内装機器を撤去するためにグローブボックスのパネルを取り外している。

はじめに、グローブボックス内部から取り出した物を細断するための専用のグリーンハウスを、分析機器用グローブボックス（X）を撤去して空いたエリアに設置した。

パネルの取り外しにあたっては、グローブボックスを囲むようにグリーンハウスを設置した。グリーンハウス内の空気の排気は、グローブボックスの排気を利用した。なお、着手前に内部全体の汚染検査と除染を行っており、スポット汚染についてはパネル取り外し後に除染した。内装機器の撤去は、主にスパナ等の手工具による分解で行い、発生した撤去物は速やかに細断用グリーンハウスに搬出した。切断工具は最低限の使用に留めた。重量のある貯槽をグローブボックス内部から取り出すときは、複数のチェーンブロックによる合い吊りにて慎重に行った。貯槽の取り出し手順の一部を図 8.2-16 に、作業の様子を図 8.2-17 に示す。



GB : グローブボックス

GH : グリーンハウス

図 8.2-13 解体撤去作業のフロー

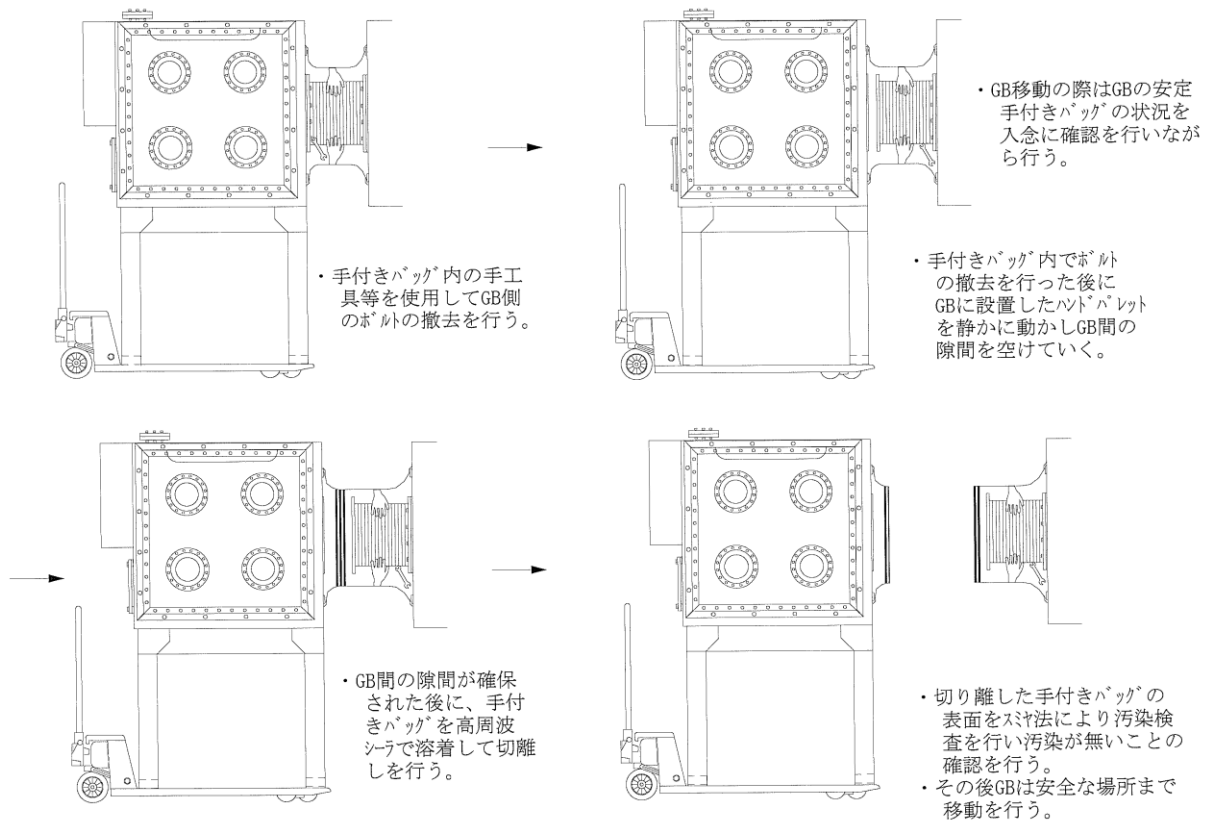


図 8.2-14 手付きバックを用いたグローブボックス接続部の切り離し手順（抜粋）



図 8.2-15 切り離し作業の様子

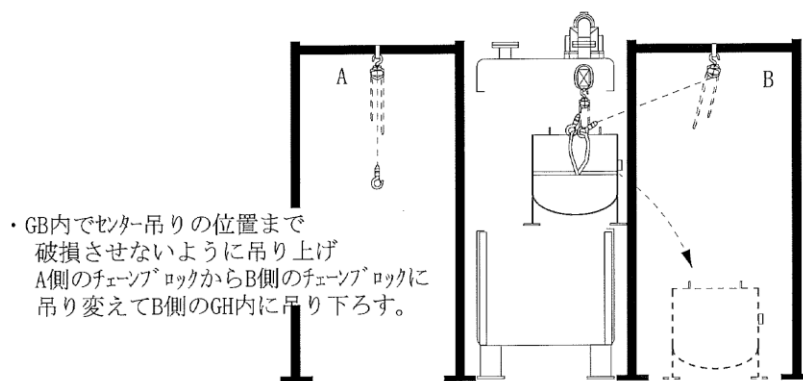
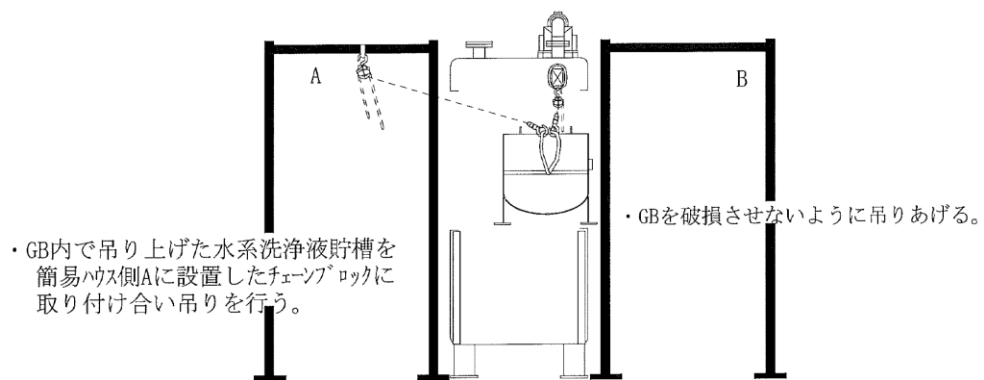


図 8.2-16 複数のチェーンブロックによる貯槽の取り出し手順（抜粋）



図 8.2-17 貯槽の取り出し作業の様子

③ 原子炉施設との系統遮断

系統遮断の対象は STACY 及び TRACY の溶液燃料を受け払いする装置であり、以下のとおりである。

- ・分析試料受入装置のうち、気送管及び気送用空気管
- ・後処理装置のうち、他設備との接続配管
- ・分析廃液貯槽設備のうち、極低レベル廃液貯槽への配管及び他設備との接続配管

これらの系統の配管は、解体撤去で生じた開口部に閉止キャップを溶接することで原子炉施設との接続を遮断した。また、既存設備・装置の一部解体撤去に伴って残存する設備・装置に生じた開口部も、閉止キャップの溶接や閉止フランジの取り付けなどを行って閉止した。

閉止した箇所の仕様を表 8.2-6 に示す。配管の遮断の前と後の状況について、代表例を図 8.2-18 に示す。

閉止キャップの溶接では、既存の配管と同径同材質を用い、浸透探傷検査等の溶接検査を行って健全であることを確認した。また、閉止措置を行ったグローブボックスは、気密試験と外観検査を行って異常のないことを確認した。

表 8.2-6 閉止した箇所の仕様

系統名・部位名	場所	形状	サイズ	材質	個数
【分析試料受入装置の解体撤去に伴う箇所】					
気送管ライン	分析試料受入装置用 GB の上部	閉止キャップ	40A	SUS304	1
気送管ライン	分析室 (I) の壁面	閉止キャップ	40A	SUS304	1
気送管ライン	分析室 (I) の床面	閉止キャップ	40A	SUS304	1
気送用空気管ライン	分析室 (I) の壁面	閉止キャップ	80A	SUS304	1
気送用空気管ライン	分析室 (I) の床面	閉止キャップ	80A	SUS304	1
気送時給気用配管ライン	分析試料受入装置用 GB の上部	閉止キャップ	40A	SUS304	1
計装配管	分析試料受入装置用 GB の上部	閉止プラグ	8A	SUS304	10
【後処理装置の解体撤去に伴う箇所】					
槽バント設備 B ライン	分析室 (I) の床面	閉止キャップ	25A	SUS304L	1
調整設備ライン	分析室 (I) の床面	閉止キャップ	10A	SUS304L	1
燃取補助設備ライン	分析室 (I) の床面	閉止キャップ	10A	SUS304L	1
精製附属設備ライン	分析室 (I) の床面	閉止キャップ	10A	SUS304L	1
槽バント設備 B ライン	後処理装置用 GB の上部	閉止キャップ	25A	SUS304L	1
調整設備ライン	後処理装置用 GB の上部	閉止キャップ	10A	SUS304L	1
燃取補助設備ライン	後処理装置用 GB の上部	閉止キャップ	10A	SUS304L	1
精製附属設備ライン	後処理装置用 GB の上部	閉止キャップ	10A	SUS304L	1
再使用水系試料の移送ライン	後処理装置用 GB の上部	閉止キャップ	10A	SUS304L	1
再使用水系試料の移送ライン	前処理装置用 GB の上部	閉止キャップ	10A	SUS304L	1
圧縮空気配管	後処理装置計装盤の上部	閉止キャップ	10A	SUS304	1
圧縮空気配管	分析室 (I) の柱側面	閉止フランジ	10A	SUS304	1
計装配管	後処理装置用 GB の上部	閉止プラグ	φ 6	SUS316	8
計装配管	後処理装置用 GB の上部	閉止プラグ	φ 9.53	SUS316	11
計装配管	前処理装置用 GB の上部	閉止プラグ	φ 9.53	SUS316	2
計装配管	後処理装置用 GB の上部	閉止プラグ	8A	SUS316	6
計装配管	前処理装置用 GB の上部	閉止プラグ	8A	SUS316	1
【分析廃液貯槽設備の解体撤去に伴う箇所】					
槽バント設備 D ライン	分析室 (I) の床面	閉止キャップ	25A	SUS304	1
α 廃液系設備ライン	分析室 (I) の床面	閉止キャップ	20A	SUS304L	1
極低レベル廃液系ライン	分析室 (I) の床面	閉止キャップ	20A	SUS304L	1
槽バント設備 D ライン	後処理装置用 GB の上部	閉止キャップ	25A	SUS304	1
α 廃液系設備ライン	後処理装置用 GB の上部	閉止キャップ	20A	SUS304L	1
極低レベル廃液系ライン	後処理装置用 GB の上部	閉止キャップ	20A	SUS304L	1
計装配管	後処理装置用 GB の上部	閉止プラグ	φ 6	SUS316	1
計装配管	後処理装置用 GB の上部	閉止プラグ	φ 9.53	SUS316	1
計装配管	後処理装置用 GB の上部	閉止プラグ	8A	SUS316	1
【分析機器用 GB(X)の解体撤去に伴う箇所】					
給気ヘッダ部	分析室 (I) の天井側	閉止フランジ	100A	SUS304	1
排気ヘッダ部	分析室 (I) の天井側	閉止フランジ	100A	SUS304	1
連結ポート部	試料搬送装置用 GB の側面	閉止フランジ	φ 560	SUS304	1
【ハイブリッド型K吸収端濃度計の解体撤去に伴う箇所】					
装置接続部	分析機器用 GB(XⅢ)の側面	閉止フランジ	φ 358	SUS304	1
【定電位ターロメーターの解体撤去に伴う箇所】					
チューブ貫通部	分析機器用 GB(XⅡ)の側面	コネクタ閉止板	φ 12	SUS304	6
【等速電気泳動装置の解体撤去に伴う箇所】					
チューブ貫通部	分析機器用 GB(VI)の側面	閉止キャップ	φ 70	樹脂	2
チューブ貫通部	分析機器用 GB(VI)の側面	コネクタ閉止板	φ 26	SUS304	1

GB: グローブボックス



遮断前



遮断後

分析試料受入装置の気送用空気管（上）と気送管（下）



遮断前



遮断後

後処理装置の液移送配管（一部）

図 8.2-18 系統遮断の状況

(2) 発生した放射性固体廃棄物

既存設備・装置の一部解体撤去及び原子炉施設との系統遮断に伴って発生した放射性固体廃棄物について表 8.2-7 に示す。

金属などの不燃性の廃棄物の発生量は 2,924kg であった。これは平成 27 年度に行った詳細設計にて計画した放射性廃棄物の発生量 3,076kg とよく整合した。

可燃性の廃棄物は、解体撤去作業で用いた使い捨て保護具（綿手袋、ゴム手袋、タイベックスーツ等）や養生材（酢酸ビニルシート、ガムテープ等）であり、解体撤去した設備・装置からは発生していない。

表 8.2-7 発生した放射性固体廃棄物

性状		体積	重さ	主な物品	
不燃性	フィルタ類	0.07 m ³	19 kg	HEPA フィルタ、プレフィルタ	
	難燃物	0.40 m ³	137 kg	PVC、ゴム、プラスチック	
	非金属	0.06 m ³	38 kg	ガラス	
	金属	鉄鋼	2.14 m ³	1926 kg	配管、貯槽、装置躯体
		非鉄	0.20 m ³	157 kg	計装配管、バルブ
	複合物	0.20 m ³	164 kg	計器類、ケーブル	
	大型廃棄物	1.70 m ³	483 kg	分析機器用グローブボックス (X)	
小計		4.77 m ³	2924 kg		
可燃性		1.40 m ³	307 kg	使い捨て保護具、養生材	
合計		6.17 m ³	3231 kg		

(3) 作業の期間及び人工数

解体撤去及び系統遮断に要した期間は 50 日であり、人工数は 582 であった。これは平成 27 年度に行った詳細設計にて計画した期間 (約 60 日) と人工数 (約 600) とよく整合した。

8.2.2.3 まとめ

デブリ模擬体分析設備の整備のうち、許可区分変更に当たり、原子炉施設と隔離するため、平成 27 年度に行った詳細設計に基づいて既存設備・装置の一部解体撤去及び原子炉施設との系統遮断を行った。作業は、計画どおりに遂行することができた。今後は、許可区分変更のうち、核燃料物質使用施設への対応として、グローブボックス排気配管へのサポート増設、フード基礎ボルトの増設等を実施するとともに、本事業において整備した分析装置をグローブボックス内に設置する対応を行う計画である。

第IV編 臨界挙動評価手法の整備

第9章 臨界挙動評価精度に関する解析

本章では、H28 年度事業で実施した臨界挙動評価の精度に関する課題への対応として、球形状、平板形状の計算をできるように改良した評価コードによる実験データ解析結果を報告する。

9.1 目的と概要

(1) 目的

本受託事業で整備してきた燃料デブリ再臨界時の出力挙動評価のための計算コード AGNES-P について、円筒形状だけでなく、球形状や平板形状にも対応できるようにすることで、伝熱による燃料デブリからの放熱の計算精度を向上させ、出力挙動の評価精度を向上させることを目的とする。

(2) 概要

RESTORE システム上で動作する AGNES-P コードが多様な形状を取り扱えるようにすることを目的として、球形状、平板形状に対する臨界事故解析が可能となるように AGNES-P コードを改良した。AGNES-P は、燃料粉末、添加剤と水からなる形状における臨界事象解析コードである。AGNES-P では、炉心中の燃料粉末、添加剤及び水が核的及び熱的に均質な混合物とし、これらの組成の物性値を入力する。そのため、燃料粉末として酸化物ウランだけでなく MOX 粉末が適用でき、減速材として水だけではなく潤滑剤（例えば、ステアリン酸亜鉛の有機物）等の解析ができる。更に、炉心中の減速材が 2 回まで相転移できるように設計されている。

従来の AGNES-P は、図 9.1-2 に示されるような円筒形状について、出力 (W)、エネルギー (J)、温度 (°C)、核分裂率を算出していた。本事業において、球形状、平板形状についても、出力 (W)、エネルギー (J)、温度 (°C)、核分裂率を算出できるように改良した。今回の改良後の AGNES-P では、各幾何形状において均質な混合物（以降バルクという）からなる熱伝導モデルを採用した。また、容器の外側では放熱モデルを採用している。減速材の相転移を模擬する際、開放系で大気圧とし、気体に相転移した減速材は計算体系外に放出されると仮定している。今回の改良で AGNES-P で利用できるようになった計算体系のモデル図を図 9.1-1～図 9.1-7 に示す。

改良作業の主な作業項目は以下の通りである。

- ① AGNES-P コードへの球形状計算モデルの組み込み
- ② AGNES-P コードへの平板形状計算モデルの組み込み
- ③ RESTORE システム上での計算機能の確認
- ④ AGNES-P コードの試計算

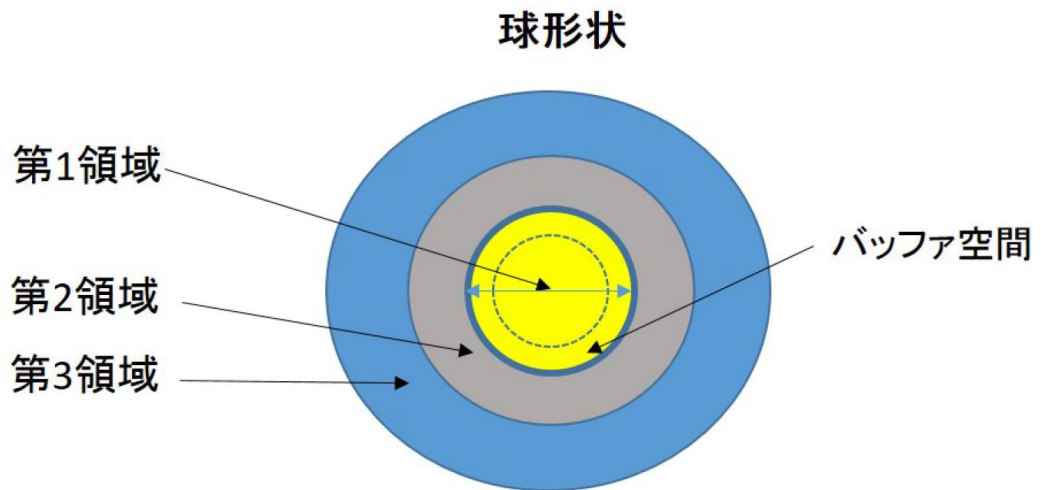


図 9.1-1 1次元球形状

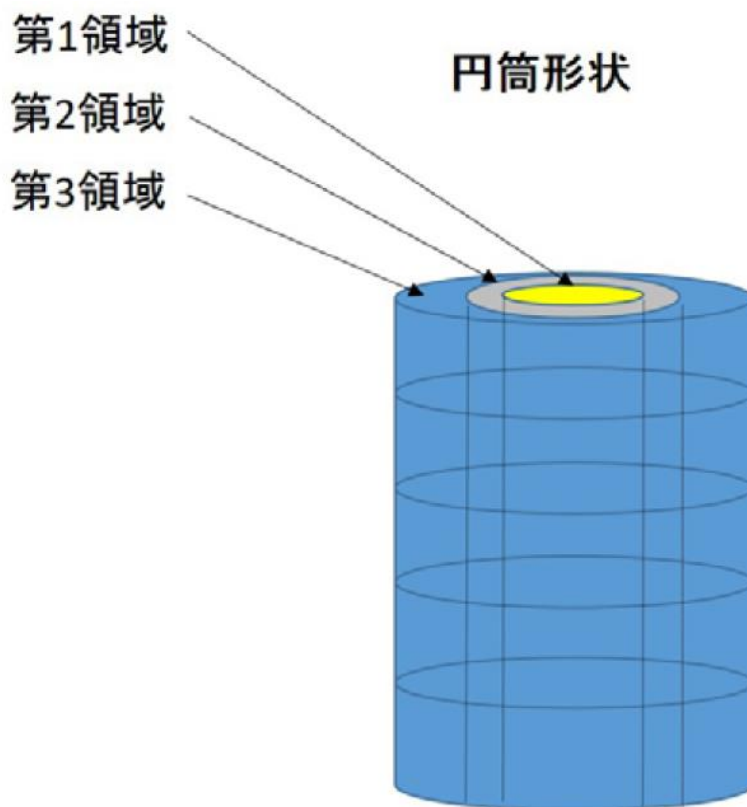


図 9.1-2 2次元円筒形状

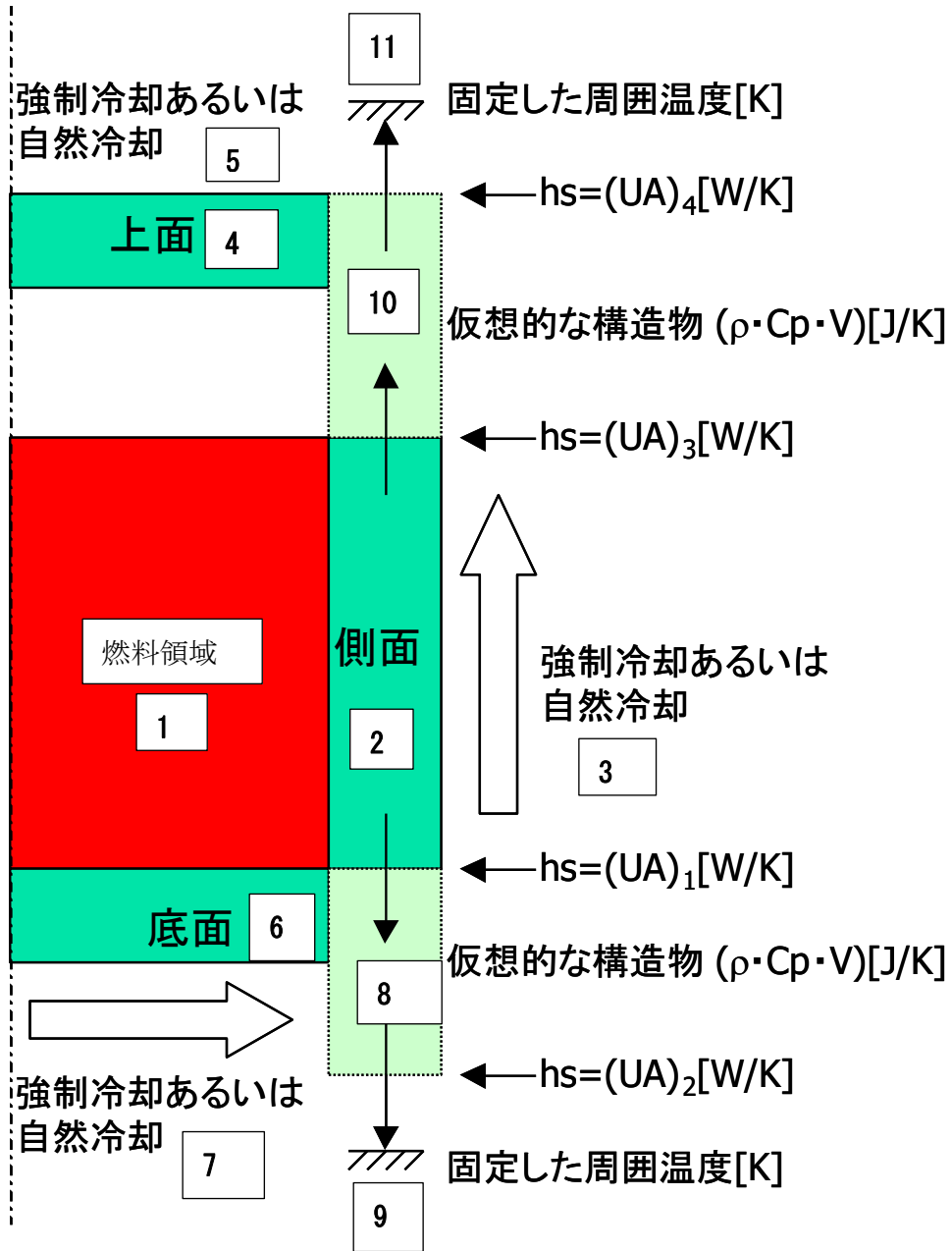


図 9.1-3 円筒形状の熱計算モデル RZ 平面での断面図

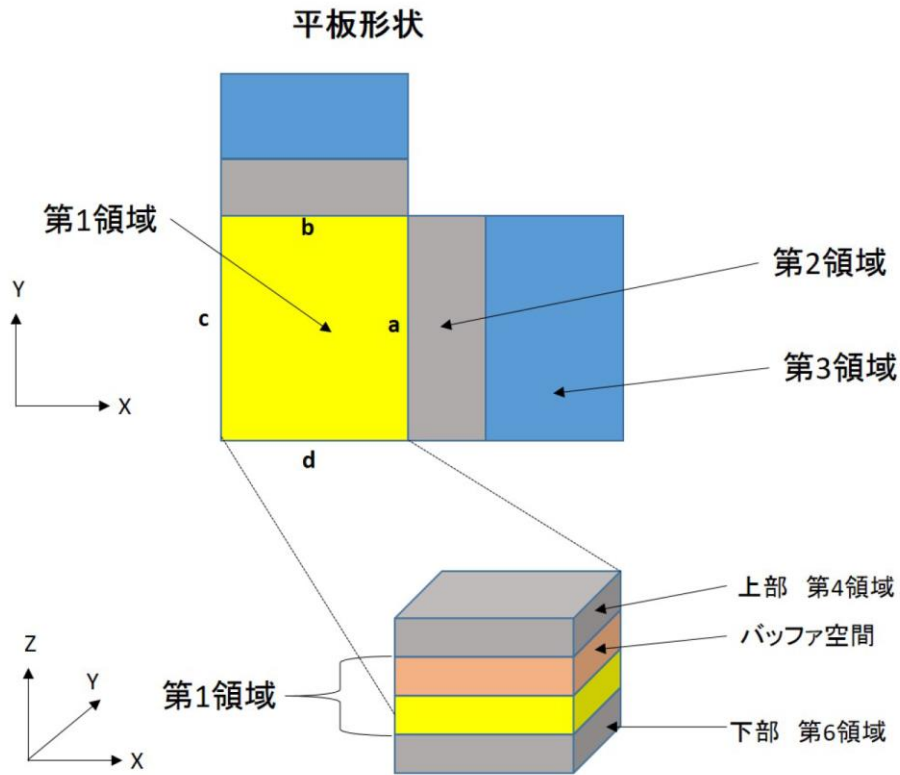


図 9.1-4 3次元平板形状

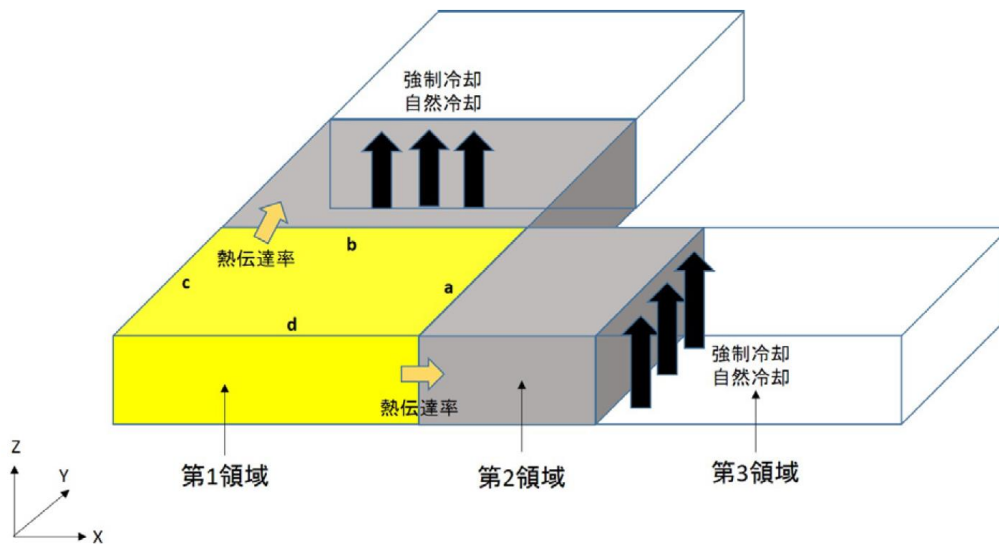


図 9.1-5 平板形状の熱計算モデル

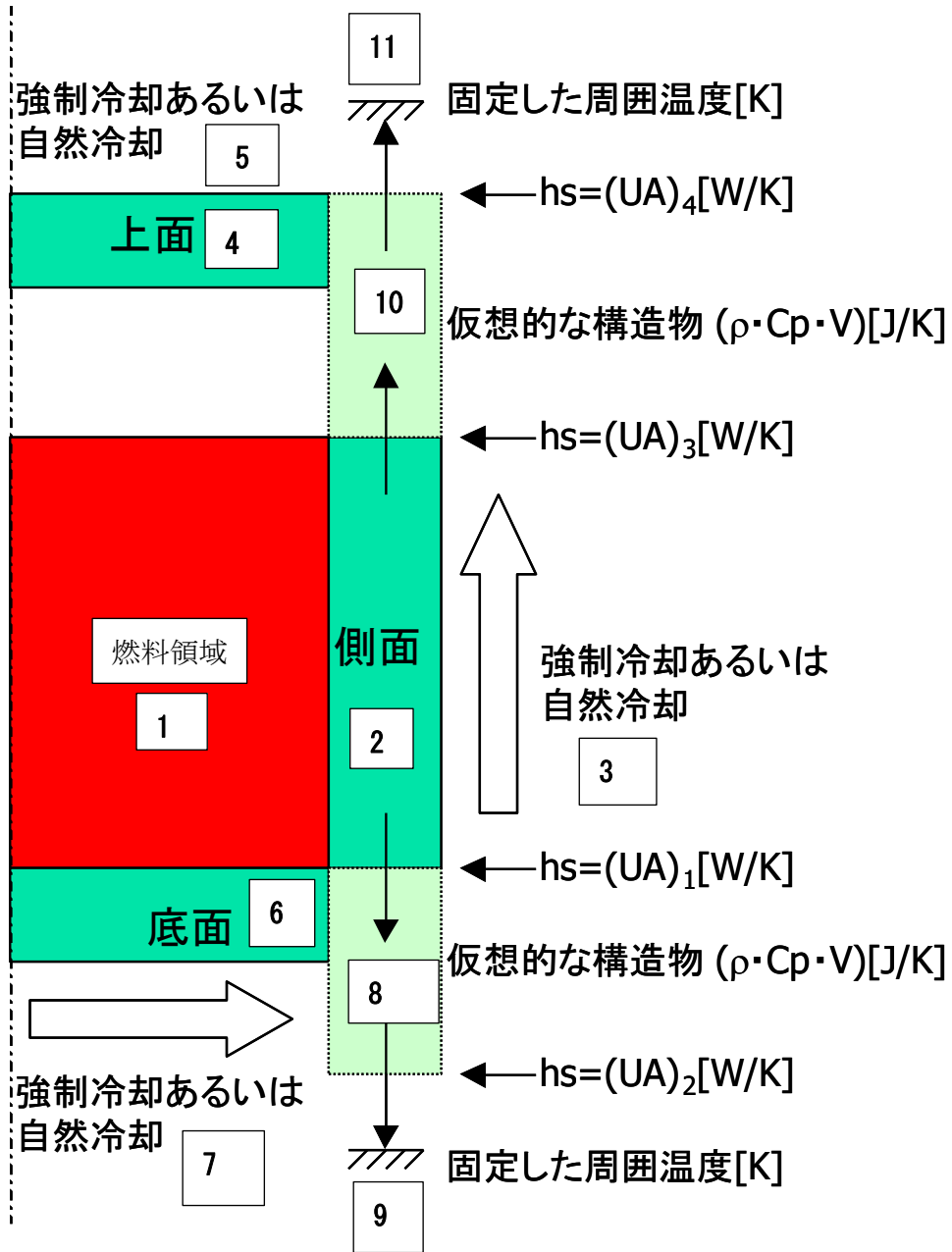


図 9.1-6 平板形状の熱計算モデル XZ 平面での断面図

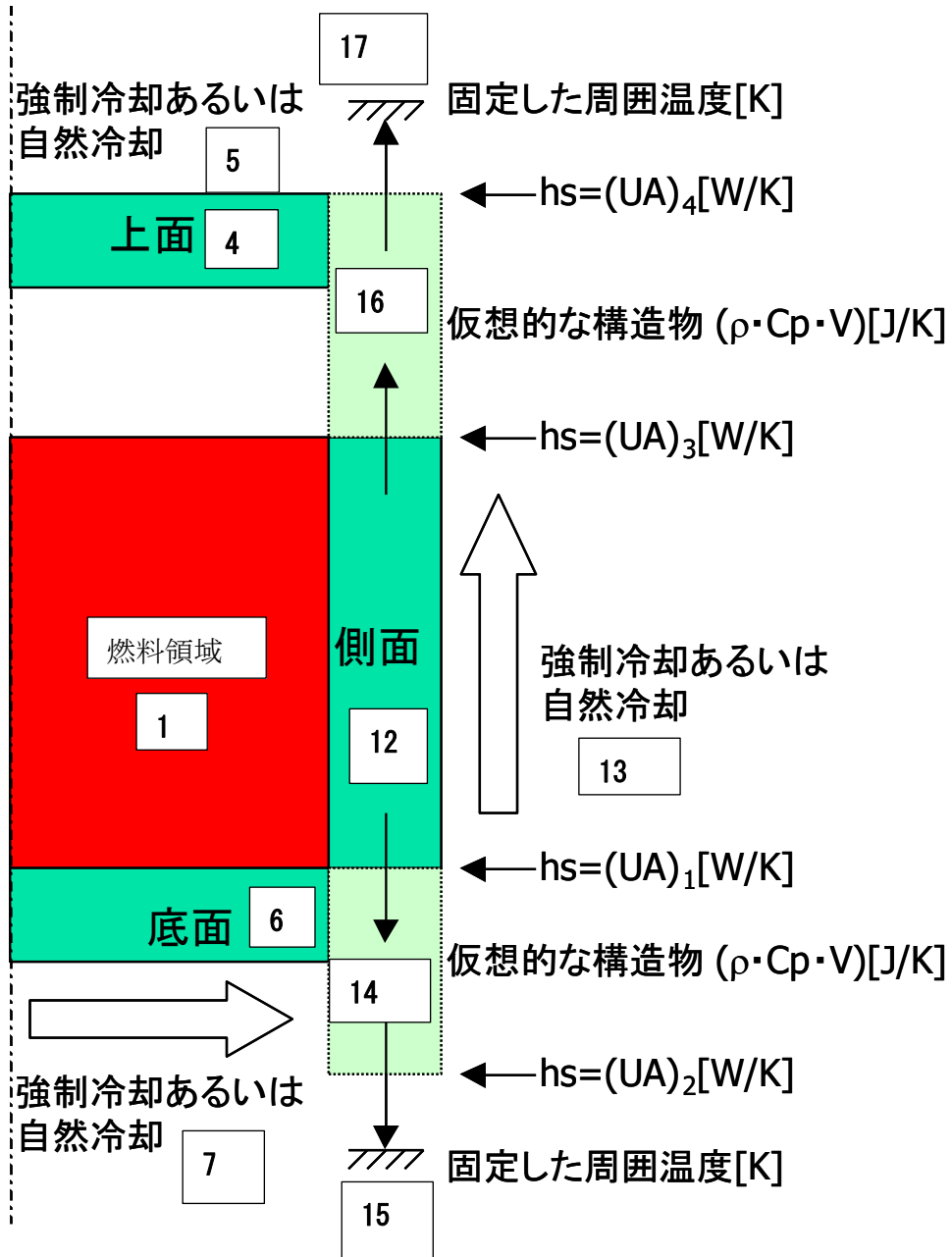


図 9.1-7 平板形状の熱計算モデル YZ 平面での断面図

9.2 AGNES-P コードの改良手順

AGNES-P コードの改良は次の方針に従って実施した。

(1) 基本方針

従来の AGNES-P で取り扱えるのは図 9.1-2 に示されるような 2 次元円筒形状のみであった。今回の改良において 2 次元配列で記述されているところを 3 次元配列にするとともに次元に関する二重ループを三重ループとし、1 次元球形状、2 次元円筒形状、3 次元平板形状に対応できるようにする。サブルーチンはできるだけ増やさず、既存の計算処理部分をできるだけ利用する。

計算モデルに Y 方向の側面構造体領域およびその外側の冷却水領域、Y 方向側面の上部構造体領域およびその上部の冷却水領域と Y 方向側面の下部構造体領域およびその下部の冷却水領域を追加する。これらの領域を第 12 領域、第 13 領域、・・・第 17 領域等とする。図 9.1-6、図 9.1-7 を参照のこと。

(2) 入力データ読み込み部分の改良

- ・ 幾何形状指定変数 IG を追加し、1 次元球形状、2 次元円筒形状、3 次元平板形状の選択ができるようにする。
- ・ Y 方向メッシュ数を指定する変数 K1、K2 を追加する。K1 が燃料領域、K2 は Y 方向側面構造体部分のメッシュ数である。
- ・ Y 方向側面の上部構造体および下部構造体の熱容量および熱伝達係数等を入力できるようにする。

(3) 配列宣言部分の改良

2 次元 RZ 形状に対応する 2 次元配列を 3 次元配列にする。3 次元目が Y 方向に対応する。

(4) 計算部分の改良

- ・ 既存の計算処理部分のアルゴリズムをできる限り利用する。
- ・ RZ の二重ループになっている処理を XYZ の三重ループに変更する。
- ・ 以上の段階で 3 次元目の変数に 1 または適当な数値を代入して 2 次元円筒形状の計算を行い、従来の計算結果と一致することを確認する。
- ・ 1 次元球形状、3 次元平板形状の計算処理を追加する。

(5) 出力部分の改良

1 次元球形状、3 次元平板形状の出力処理を追加する。

9.3 AGNES-P コードへの球形状計算モデルの組み込み

今回の改良では、燃料デブリを計算対象として取り扱うことを念頭にしている。燃料デブリの計算では、組成として燃料 (UO_2)、炭素鋼、コンクリート、水等が指定されることが想定される。図 9.1-1 に示されるような 1 次元球形状モデルにおいて、燃料デブリが第 1 領域に位置し、第 2 領域に水、炭素鋼、コンクリート等、第 3 領域に空間 (空気、水) を指定することを想定した。以下では、改良を行うモデル形状とバッファ空間について説明する。

1 次元球形状について、同心球の内側から第 1 領域、その外側の同心球を第 2 領域 (第 1 領域は含まない)、さらに外側の同心球を第 3 領域 (第 1、2 領域は含まない) とする。

計算メッシュに関しては、核計算 (一点炉動特性方程式) の場合、第 1 領域に関して、径方向メッシュ分割数を指定する。熱計算の場合は、核計算で指定した第 1 領域メッシュに加え、第 2 領域の径方向メッシュ分割数も指定する。バッファ空間については、初期の燃料デブリの半径を R_f 、第 1 領域の半径を R_1 とする。 $R_f < R_1$ の場合、燃料デブリと第 2 領域の間に空間ができ、それをバッファ空間とする。 $R_f = R_1$ の場合はバッファ空間がない。バッファ空間は、液体相から気体相に変化した物質が、このバッファ空間へ移動するものとする。このバッファ空間については、完全に密閉された閉鎖系と密閉されていない解放系の 2 つが入力ファイルより指定できる。

(1) 入力ファイル

入力ファイルには、幾何データに幾何形状を指定するデータ **IG** を加えた。1:1 次元球形状、2:2 次元円筒形状、3:3 次元平板形状とした。それ以外の数値が入力された場合は、一般出力ファイル (AGNESPC.PRT) に、エラーを書き出し終了する。

(2) 出力ファイル

AGNESPC.PRT

燃料デブリ形状フラグに、1~3 以外の値が入力された場合、該当部分を示しエラーを書き出す。

PHASE.GRF (各組成および各相の存在量の出力ファイル)

修正無し。

AGNESPC.GRF (核熱計算結果の可視化用の出力ファイル)

1 次元球形状の場合、第 1 領域の高さは、第 1 領域の半径を出力。

THERM2D.GRF (詳細な熱計算結果の可視化用の出力ファイル)

1 次元球形状の場合、使用しない第 4 領域以降の値については、0 を出力。

(3) 相転移効果

今回の改良において、相転移効果は燃料デブリに含まれる水を対象としたものである。燃料デブリ内の水が沸点に達すると、水が沸騰する。熱は第 2 領域に移動する分を除き気化の潜熱になる。気体相に変化し、バッファ空間へ移動する。バッファ空間がない場合は、相転移はないものとして計算する。

バッファ空間がある場合は、以下の処理を行う。

① 第 1 領域の温度が相転移温度以上かチェックする。

相転移温度を超える場合、計算された潜熱の量から相転移する質量を計算する。相転移による組成変化で各物性値を再計算する。

② 相転移による各メッシュの体積変化を計算する

体積が変化することにより、第 1 領域の燃料デブリの球半径が時間と共に変化する。

1) 閉鎖系の場合

入力された初期値からバッファ体積を計算し、その体積の初期圧力に大気圧を設定する。第 1 領域からバッファ体積に放出された気体相の密度のデータからバッファ体積とその圧力を計算する。

2) 開放系の場合

指定された大気圧で、気体相の密度のデータからバッファ体積を計算する。

(4) 構造材の熱効果

燃料デブリを取り囲む第 2 領域の構造材の熱効果を考量する。ここでは、第 1 領域は熱容量を持ち、入力された熱伝達率で第 2 領域と熱の交換を行うものとする。

球形状の場合、第 1 領域、第 2 領域内部の熱効果については、球の半径方向の一次元熱伝導の方程式を利用して計算を行う。また、第 1 領域と第 2 領域の接する面については、熱伝達率 × 伝達面積を使用して計算する

(5) 自然冷却効果

円筒形状では、第 2 領域と第 3 領域との間の熱交換を、垂直壁近傍の自然対流のモデルで計算しているが、球形状の場合、垂直壁近傍の自然対流のモデルが球形状に合わないため、第 2 領域と第 3 領域の接する面については、熱伝達率 × 伝達面積を使用して計算する。

9.4 AGNES-P コードへの平板形状計算モデルの組み込み

今回の改良で計算対象としている燃料デブリは、組成として燃料 (UO_2)、炭素鋼、コンクリート、水等が指定されることを想定している。図 9.1-4 に示されるような 3 次元平板形状モデルにおいて、燃料デブリが第 1 領域に位置し、第 2 領域に水、炭素鋼、コンクリート等、第 3 領域に空間 (空気、水) を指定することを想定する。以下では、改良を行うモデル形状とバッファ空間について説明する。

3 次元平板形状において、第 1 領域は直方体である。第 1 領域と接する直方体を第 2 領域とする。第 2 領域のその外側の直方体が第 3 領域とする。3 次元図では、第 1 領域の上部に第 4 領域、下部に第 6 領域がある。熱伝達モデルでは、水平方向の対称性を利用し燃料デブリの 4 分の 1 カットモデルを用いるため、対称面の境界条件を完全反射条件とする。メッシュに関しては、円筒形状と同様に軸 (z) 方向にメッシュ分割し、それに加え、縦 (x) 方向、横 (y) 方向にもメッシュ分割をする。核計算 (一点炉動特性方程式) の場合、第 1 領域にメッシュ分割数を指定する。熱計算の場合は、核計算で指定した第 1 領域メッシュに加え、第 2 領域にメッシュ分割数も指定する。

バッファ空間については、初期の燃料デブリの高さを Z_f 、第 1 領域の高さを Z_1 とする。 $Z_f < Z_1$ の場合、下に燃料デブリと上に空間でき、その空間をバッファ空間とする $Z_f = Z_1$ の場合、バッファ空間はない。バッファ空間は、液体相から気体相に変化した物質が、このバッファ空間へ移動するものとする。このバッファ空間については、完全に密閉された閉鎖系と密閉されていない解放系の 2 つが入力ファイルより指定できる。

(1) 入力ファイル

入力ファイルには、幾何データに幾何形状を指定するデータ **IG** を加えた。さらに **Y** 軸方向のメッシュ数、幅を第 1 領域と第 2 領域に設定できるよう新たな入力データを加えた。**IG** については 1 : 1 次元球形状、2 : 2 次元円筒形状、3 : 3 次元平板形状とした。それ以外の数値が入力された場合は、一般出力ファイル (AGNESPC.PRT) に、エラーを書き出し終了する。

(2) 出力ファイル

AGNESPC.PRT

燃料デブリ形状フラグに、1 ~ 3 以外の値が入力された場合、該当部分を示しエラーを書き出す。

PHASE.GRF (各組成および各相の存在量の出力ファイル)

修正無し。

AGNESPC.GRF (核熱計算結果の可視化用の出力ファイル)

修正無し。

THERM2D.GRF（詳細な熱計算結果の可視化用の出力ファイル）

修正無し。

(3) 相転移効果

今回の改造の相転移効果は、燃料デブリに含まれる水を対象としたものである。燃料デブリ内の水が沸点に達すると、水が沸騰する。熱は第2領域に移動する分を除き気化の潜熱になる。気体相に変化し、バッファ空間へ移動する。バッファ空間がない場合は、相転移はないとして計算する。

バッファ空間がある場合は、以下の処理を行う。

① 第1領域の温度が相転移温度以上かチェックする。

相転移温度を超える場合、計算された潜熱の量から相転移する質量を計算する。相転移による組成変化で各物性値を再計算する。

② 相転移による各メッシュの体積変化を計算する

体積が変化することにより、第1領域の燃料デブリの高さが時間と共に変化する。

1) 閉鎖系の場合

入力された初期値からバッファ体積を計算し、その体積の初期圧力に大気圧を設定する。第1領域からバッファ体積に放出された気体相の密度のデータからバッファ体積とその圧力を計算する。

2) 開放系の場合

指定された大気圧で、気体相の密度のデータからバッファ体積を計算する。

(4) 構造材の熱効果

燃料デブリを取り囲む第2領域の構造材の熱効果を考量する。ここでは、第1領域は熱容量を持ち、入力された熱伝達率で第2領域と熱の交換を行うものとする。

3次元平板形状の場合、第1領域と第2領域内部については、熱伝導一次元の方程式を利用して計算する。第1領域の燃料デブリと接する第2領域の側面について、入力された熱伝達率 × 伝達面積を使用して計算する。座標中心では完全反射条件とする。すなわち、計算体系は1/4対称モデルである。

(5) 自然冷却効果

2次元円筒形状では、第2領域と第3領域との間の熱交換を、垂直壁近傍の自然対流のモデルで計算している。3次元平板形状では、第2領域と第3領域の隣接面で、2次元円筒形状と同様に取り扱う。

9.5 AGNES-P コードの試計算

Windows8.1 Pro64 bit 上 Cygwin64 環境の gfortran を用いて改造した AGNES-P コードの実行ファイルを作成し、RESTORE システム上で正常に動作することを確認した。

今回の改良において追加した 1 次元球形状計算モデルは、²³⁵U 高濃縮球体系の臨界事故例である Godiva 体系により試計算を行い、良好な結果を得た。3 次元平板形状計算モデルについても、MOX 粉体とステアリン酸亜鉛の混合の粉末体系のデータを元に試計算を行い、良好な結果を得た。以下ではそれぞれの試計算について記す。

(1) 1 次元球形状計算モデルの試計算

今回改良を行って追加した 1 次元球形状モデルが正しく計算できることを確認するため、従来の 2 次元円筒モデルと比較するための試計算を行った。

1) 評価モデル：Godiva 1957 年臨界事故の概略

評価に用いた球形状モデルは、1957 年 Los Alamos、Godiva 臨界事故のものである。解析条件の設定は、文献資料、LA-1614(1953)、LA-2029(1956)、Paxton(1957)、LA-UR-96-3886(1996)、LA-13638(2000)、より当該臨界事故の情報に従って行った。Godiva 臨界事故に関する情報を図 9.5-1、表 9.5-1、表 9.5-2 に示す。

事故概要

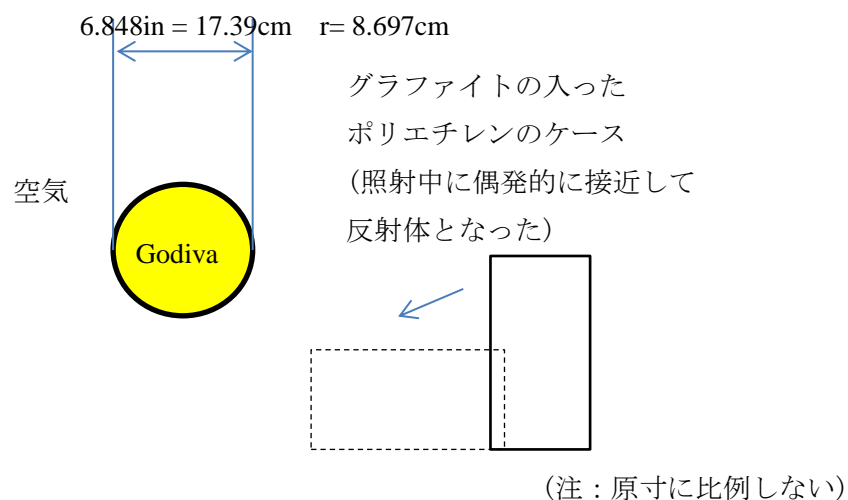


図 9.5-1 1957 年 Los Alamos 臨界事故の概要

表 9.5-1 Godiva に関する情報

項目	内容	出所
濃縮度	U-235 93.69～93.74 % 平均 93.71 % U-234 約 1 % U-238 残り【平均値からの残りなら 5.3 %】	LA-1614 (1953) p.9
	U-235 約 90 %	LA-2029(1956) p.11
	U-235 約 93 %	LA-UR-96-3886(1996) p.2
	U-235 93.7 %	LA-13638(2000) p.80
平均密度	18.71 g/cm ³	LA-1614 (1953) p.9
臨界質量	52.65 ± 0.02 kg	LA-1614 (1953) p.17
	約 54 kg	LA-2029(1956) p.11
	約 55 kg	LA-UR-96-3886(1996) p.2
	約 54 kg	LA-13638(2000) p.80
半径	8.697 cm (直径 6.848 インチ) 【ただし下記構造に示すように質量調整にシムを挟む等するので、真球ではない】	LA-1614 (1953) p.9 8 行
	8.573 cm (直径 6-3/4 インチ)	LA-2029(1956) p.11
	【LA-1614 の平均密度 18.71 g/cm ³ と LA-13638 の臨界質量約 54 kg を用いると体積 2886.1571 cm ³ 、真球ではないが球体と仮定すると r = 8.832 cm となる。】	LA-1614 と LA-13638
構造	Godiva は上中下水平に六分割された部品と、質量調整用の間に挟むシムと 14 カ所の凹部にはめるプラグ、ウラン制御棒などから構成され、それら部品、及びそれらを固定するネジも濃縮ウランでできている。	LA-1614 (1953) p.8-11
	上下部品は、独立してシリンダで分離することができるので、上下独立した 2 つの緊急停止機構となる。	LA-13638(2000) p.80
その他	【不純物等の情報は無い。】	

(注)内容欄の【 】無しが、文献の記述、【 】は追記した説明または、記述されたデータからの推定値。

表 9.5-2 Godiva 臨界事故(1957)に関する情報

項目	内容	出所
事故概要	事故は、ある実験の準備の段階で Godiva が高速中性子のパルスを供給しようとしていたときに発生した。照射されていた大きな質量のグラファイトとポリエチレン Godiva に近づく方向に動いた(もしくは、その材料が Godiva の方に倒れた)ため、それが反射体となり過剰な反応度が発生した。【緊急停止についての記載無し】	LA-13638(2000) p.80
	Godiva はウランが添加されたグラファイトが突然の中性子の波長に曝された後の当該材料の挙動を見出すため、その照射に使用されていた。ケースの位置が Godiva に近づく方向にずれポリエチレンが中性子を Godiva に反射した。【緊急停止についての記載無し】	Paxton(1957) p.104
反射体	グラファイトとポリエチレン 【形状、寸法、重量、Godiva との位置関係等の情報は無し】	LA-13638(2000) p.80
	グラファイトの入ったポリエチレンのケース。 【形状、寸法、重量、距離の情報は無し】	Paxton(1957) p.104
推定バースト	1.2×10^{17} fissions	LA-13638(2000) p.80
添加反応度	80 セント	LA-13638(2000) p.80
継続時間	4.7 μ s	LA-13638(2000) p.80
出力	3.2×10^5 W 【グラフ読取】	LA-UR-96-3886 (1996) p.13 Fig 7.0
温度	中央のロッド部はウランの融点【1405 K】の 100 K 以内に達しない【1305~1405 K】。	LA-13638(2000) p.80
	1500 K 【グラフ読取】	LA-UR-96-3886 (1996) p.14 Fig 8.0

2) AGNES-P での解析計算に使用するデータ

AGNES-P コードによる解析例として、従来の 2 次元円筒形状モデルで計算したものと今回改良して追加した 1 次元球形状モデルで計算したものを示す。円筒形状モデルで使用するデータを以下に示す。球形状モデルでは燃料の半径が 8.832 cm の真球となるところが異なってくる。AGNES-P に設定するパラメータは、表 9.5-7 に示す。従来の 2 次元円筒形状モデルでの計算では、Godiva の球形状を再現するための補正を行っている (H27 年度事業報告書に詳述)。

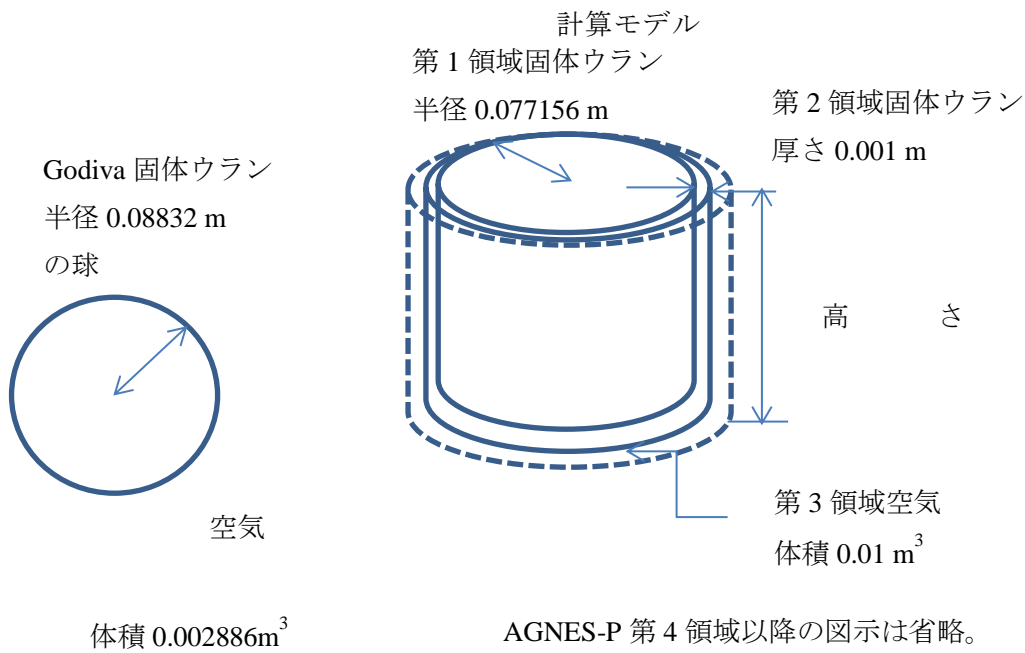
このようにして得られた計算結果のうち出力、放出エネルギー、燃料温度の時間変化をそれぞれ図 9.5-3、図 9.5-4、図 9.5-5 に示す。

表 9.5-3 Godiva 球体内容

解析対象	形状	内容
Godiva 基本形	球体	半径 8.832 cm の固体ウランの球体が空気に囲まれており、反射体となるポリエチレンケースがどこかに置かれている (位置、形状は文献に記述無し)

表 9.5-4 Godiva 2 次元円筒モデル設定

コード	形状	設定理由
AGNES-P	円筒	<ul style="list-style-type: none"> ・球体は選択できないので、Godiva と同じ体積の円柱形 (直径と高さを同じ長さとする) を想定した。半径 8.832 cm の球体に対して、半径 7.7156 cm、高さ 15.4312 cm の円筒。(注: この半径を中央値として、変動した値が与えられる)。 ・第 1 領域 (燃料)、第 2 領域 (容器)、第 3 領域 (冷却材) の設定が必要であり、第 1 領域を Godiva 自体の固体ウラン、第 2 領域は、固体ウラン、第 3 領域は空気とした。第 2 領域の厚さは、適当に 0.001 m、第 3 領域の体積は 0.01 m³ とした。領域(1 → 2)、領域(2 → 3)の熱伝達率を十分小さい値に設定しているため、値の大小の影響はない。それ以外の領域も同じ。(図 9.5-2)



(注:原寸に比例しない)

図 9.5-2 AGNES-P で設定する Godiva 円筒モデル形状

初期出力密度は以下の計算により 1×10^{-7} (W/m³)とする。

U-238	α崩壊半減期	4.4680E+09 (年)	SF 分岐比	5.450E-07
	自発核分裂半減期	8.1982E+15 (年)		
	崩壊定数	2.6810E-24 (1/s)		
	自発核分裂エネルギー	2.0000E+02 (MeV/SF)		
		3.2044E-11 (J/SF)		
	質量	2.8620E+00 (kg)		
	原子量	2.3805E+02 (g/mol)		
	原子数	7.2402E+24 (atoms)	2.5087E-03	
	自発核分裂率	1.9411E+01 (SF/s)		
	出力	6.2201E-10 (J/s)		
	体積	2.8860E-03 (m ³)		
	初期出力密度	2.1553E-07 (W/m ³)		

表 9.5-5 燃料半径と濃縮度

パラメータ	出所\ケース	Godiva
燃料球半径 [cm]	LHS 計算による	8.832
U-235 濃縮度 [wt%]	LHS 計算による	93.715
燃料円筒とその下の反射体の距離 [cm]	MVP 計算による	16
燃料円筒半径 [m]	(注 1)	0.0772
燃料円筒高さ [m]	(注 1)	0.1543

(注 1) 球体体積を維持した円筒形半径、高さ (半径の 2 倍)。入力値として球半径の代わりに設定した。

表 9.5-6 温度別の k_{eff}

	LHS ケース	Godiva
	濃縮度 [wt%]	93.715
	球半径 [cm]	8.832
温 度 [°C]	25.6	0.9806
	400	0.9722
	700	0.9656
	1000	0.9591
	1300	0.9527

(注)球-円筒モデル間の k_{eff} 増減を補正する前の値。

表 9.5-7 AGNES-P 計算に用いるパラメータ値

AGNES-P 入力パラメータ\ケース	Godiva
中性子寿命 [sec]	4.25E-08
球形状モデル反応度 [cent]	8.00E+01
円筒形状モデル反応度 [cent](補正後) ^(注1)	6.00E+01
領域 1 の密度 [kg/m ³]	1.87E+04 ^(注2)
領域 1 の比熱 [J/kg/K]	1.20E+02 ^(注3)
領域 1 の反応度温度 1 次係数 [cent/K]	-3.67E-01
領域 1 の反応度温度 2 次係数 [cent/K ²]	1.61E-06
第 1 群遅発中性子割合	2.12E-04
第 2 群遅発中性子割合	1.39E-03
第 3 群遅発中性子割合	1.25E-03
第 4 群遅発中性子割合	2.51E-03
第 5 群遅発中性子割合	7.55E-04
第 6 群遅発中性子割合	2.75E-04
第 1 群先行核崩壊定数	1.25E-02
第 2 群先行核崩壊定数	3.06E-02
第 3 群先行核崩壊定数	1.12E-01
第 4 群先行核崩壊定数	3.03E-01
第 5 群先行核崩壊定数	1.14E+00
第 6 群先行核崩壊定数	3.04E+00

(注 1) Godiva 球体を円筒形状モデルで扱うためのモンテカルロ計算によりバイアスを導出している。

(注 2) 密度: LA-1614 (1953) p.9 18.71 (g/cm³) を使用する。

(注 3) 比熱: 理科年表(1983) 丸善 0.12 (J/g/K)

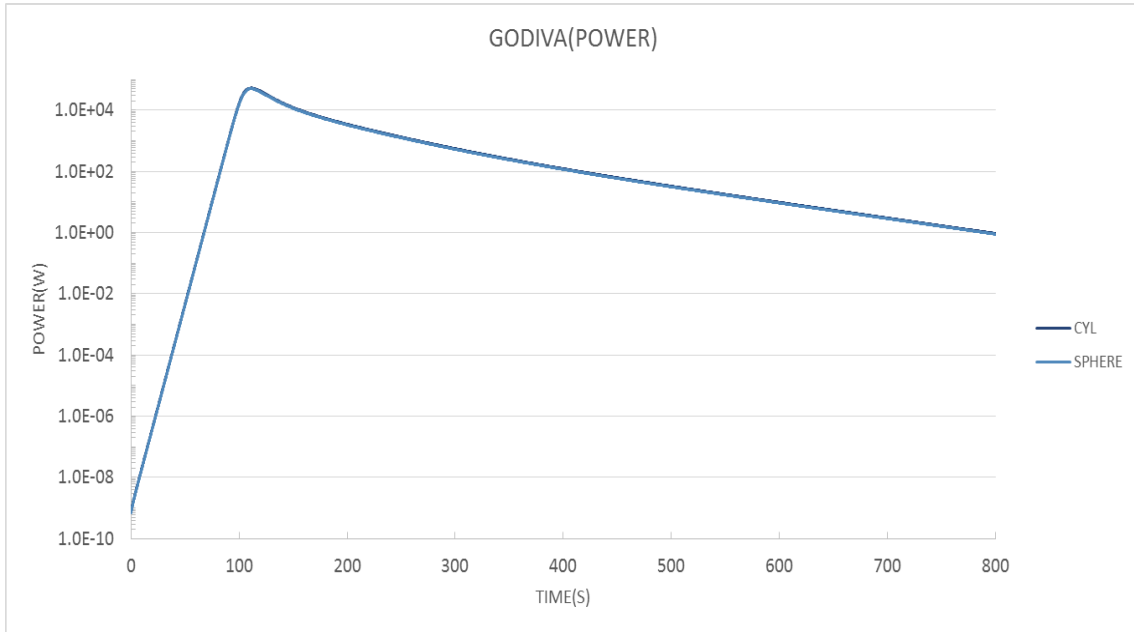


図 9.5-3 AGNES-P による GODIVA 臨界事故解析 出力時間変化
(CYL : 2次元円筒形状モデル、SPHERE : 1次元球形状モデル)

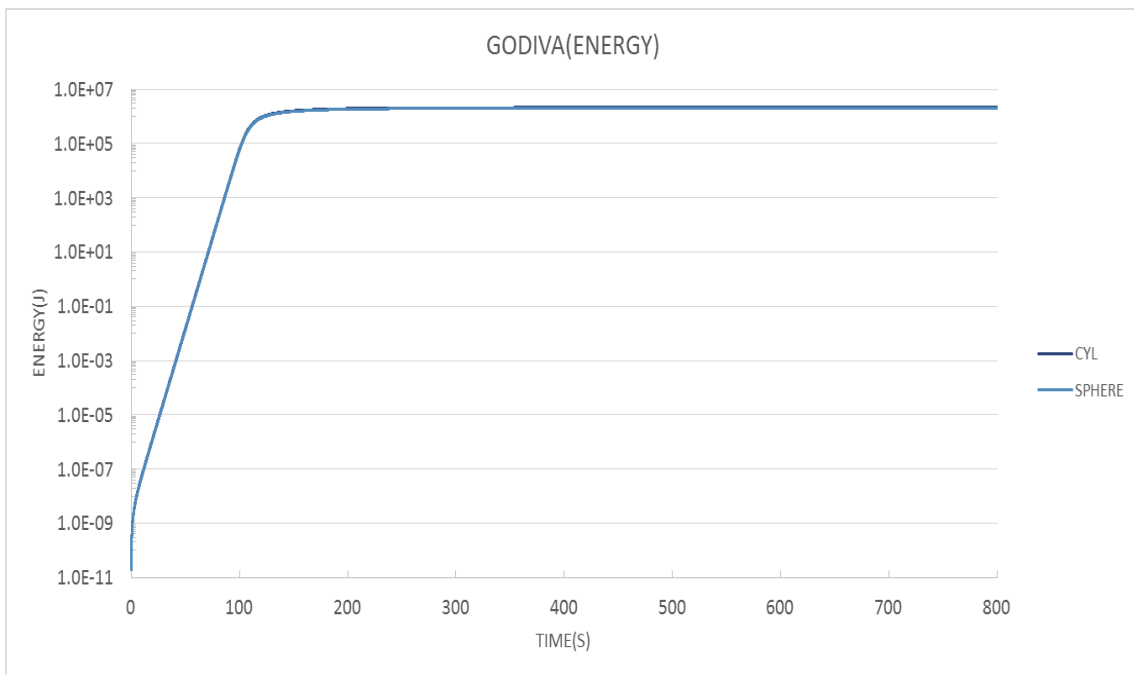


図 9.5-4 AGNES-P による GODIVA 臨界事故解析 放出エネルギー時間変化
(CYL : 2次元円筒形状モデル、SPHERE : 1次元球形状モデル)

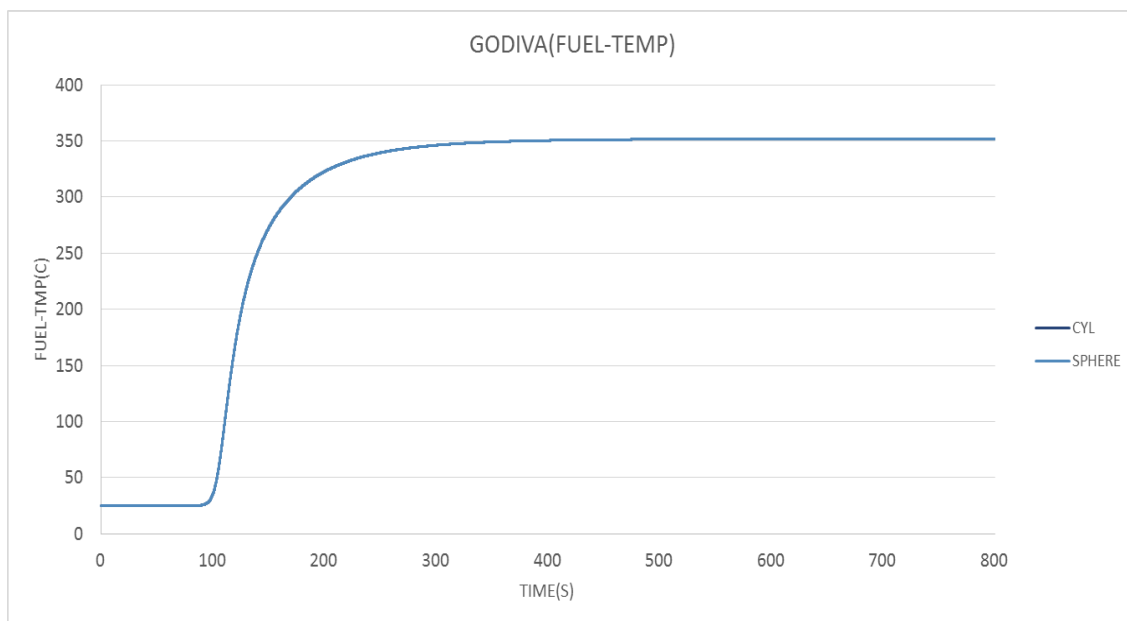


図 9.5-5 AGNES-P による GODIVA 臨界事故解析 燃料温度時間変化
(CYL : 2次元円筒形状モデル、SPHERE : 1次元球形状モデル)

(2) 3次元平板形状計算モデルの試計算

今回改良を行って追加した3次元平板形状モデルが正しく計算できることを確認するため、従来の2次元円筒モデルと比較するための試計算を行った。

1) 評価モデル：MOX とステアリン酸亜鉛の混合粉末体系

評価に用いた case-01 は、円筒容器に収納した MOX 粉体とステアリン酸亜鉛の混合の粉末体系における臨界事象を取り扱ったもので、MOX 粉末 490 kg、ステアリン酸亜鉛 68 kg、形状は円筒形で半径 0.22 m、高さ 1.71 m である。第 2 領域（空気）の厚さ 0.01 m である。case-01 のデータを元に燃料領域体積を保存するように、3次元平板形状モデルを作成して評価を行った。3次元平板形状の計算体系は縦 0.19 m、横 0.19 m、高さ 1.71 m である。第 2 領域の厚さ 0.01 m とした。

2) AGNES-P での解析計算に使用するデータ

AGNES-P コードによる試計算として 2次元円筒形状モデルと 3次元平板形状モデルで計算したものを比較した。試計算で AGNES-P に設定する case-01 のパラメータは表 9.5-8 に示す。得られた計算結果のうち出力、放出エネルギー、燃料温度の時間変化を図 9.5-6、図 9.5-7、図 9.5-8 に示す。

表 9.5-8 AGNES-P 計算に用いるパラメータ値

AGNES-P 入力パラメータ\ケース	MOX 粉末
中性子寿命 [sec]	1.22E+00
円筒形状モデル反応度 [cent]	1.00E+01
平板形状モデル反応度 [cent]	1.00E+01
領域 1 の密度 [kg/m ³]	1.86E+03
領域 1 の比熱 [J/kg/K]	3.00E+02
領域 1 の反応度温度 1 次係数 [cent/K]	-1.43E+00
領域 1 の反応度温度 2 次係数 [cent/K ²]	1.68E-03
第 1 群遅発中性子割合	9.71E-05
第 2 群遅発中性子割合	8.96E-04
第 3 群遅発中性子割合	6.87E-04
第 4 群遅発中性子割合	1.30E-03
第 5 群遅発中性子割合	5.68E-04
第 6 群遅発中性子割合	2.15E-04
第 1 群先行核崩壊定数	1.28E-02
第 2 群先行核崩壊定数	3.02E-02
第 3 群先行核崩壊定数	1.25E-01
第 4 群先行核崩壊定数	3.39E-01
第 5 群先行核崩壊定数	1.36E+00
第 6 群先行核崩壊定数	3.24E+00



図 9.5-6 AGNES-P による case-01 臨界事故解析 出力時間変化 (CYL : 2次元円筒形状モデル、XYZ : 3次元平板形状モデル)

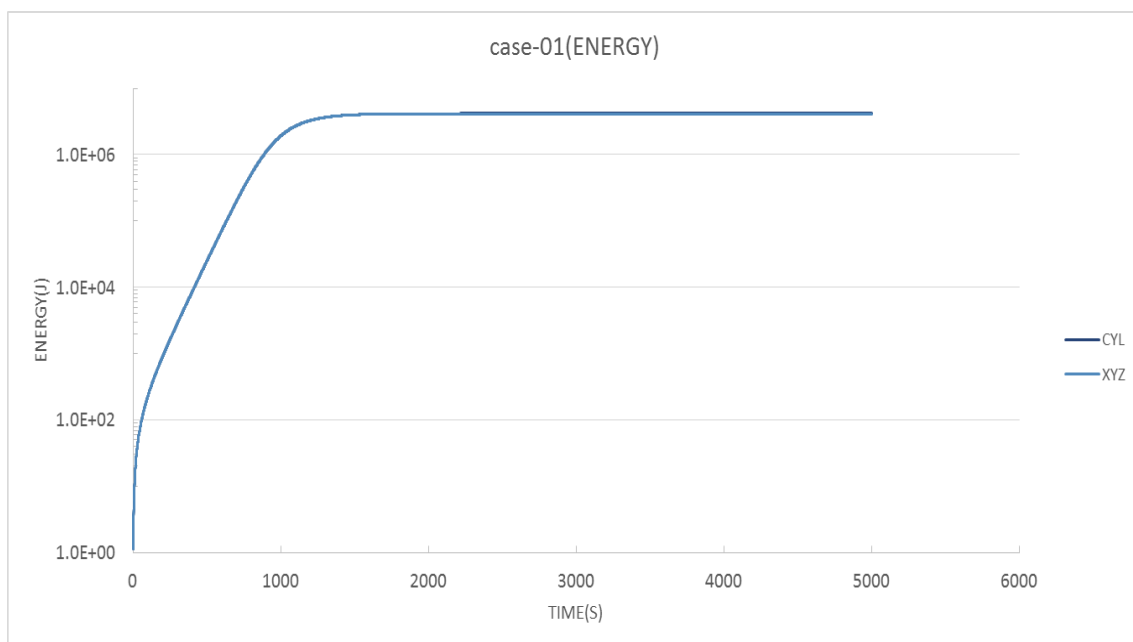


図 9.5-7 AGNES-P による case-01 臨界事故解析 放出エネルギー時間変化
(CYL : 2次元円筒形状モデル、XYZ : 3次元平板形状モデル)

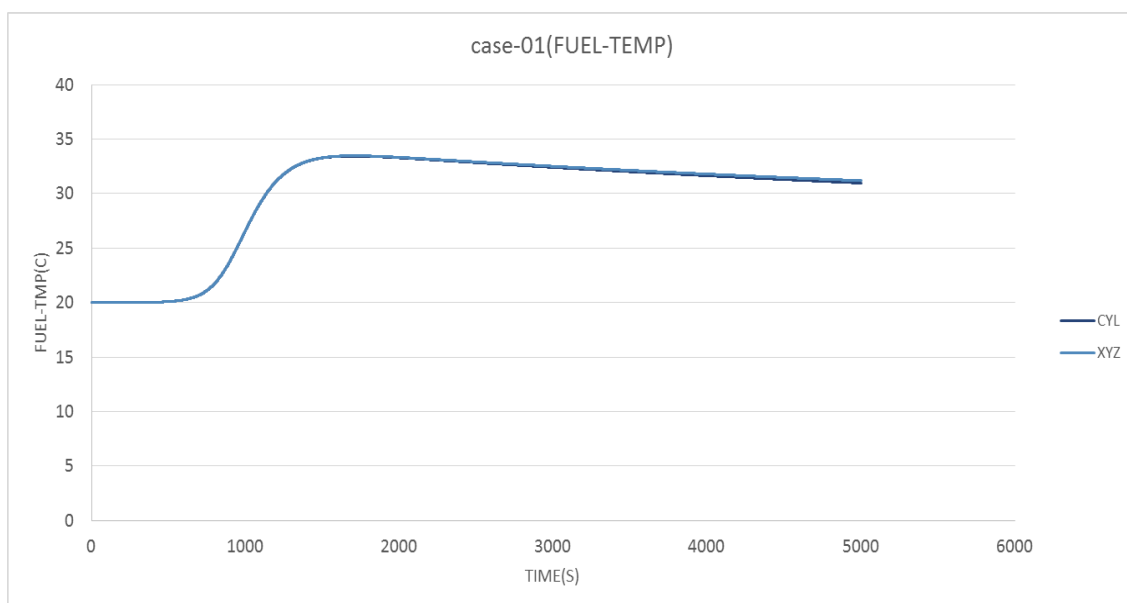


図 9.5-8 AGNES-P による case-01 臨界事故解析 燃料温度時間変化
(CYL : 2次元円筒形状モデル、XYZ : 3次元平板形状モデル)

(3) 試計算の比較と考察

(1)について、円筒形状モデルによる計算と球形状モデルによる計算とでは、図上で判断できる違いはなく、良く一致していると言える。評価に用いたような燃料の冷却効果が小さい計算に関しては、形状の違いによる出力挙動の差異は認められなかった。

(2)について、円筒形状モデルによる計算と平板形状モデルによる計算とでは、図上で判断できる違いはなく、概ね良く一致していると言える。但し、評価に用いたような燃料の冷却効果が大きい計算に関しては、同じ熱伝達率を用いていることから、表面積の大きい平板形状の方が円筒形状よりも、より大きな温度フィードバック反応度が生じることにより、図 9.5-6 に示されるように長時間経過後の出力がやや小さくなる結果を得た。

9.6 まとめ

AGNES-P の改良により、2次元円筒形状に加え、1次元球形状及び3次元平板形状についても、出力 (W)、エネルギー (J)、温度 (°C)、核分裂率等の時間変化の挙動を計算できるようになった。試計算による結果について、球形状及び平板形状では従来の円筒形状と良く一致する結果が得られた。

今後の課題としては、固体の燃料デブリを冷却用水が取り囲む場合、もしくはデブリ内の亀裂等に水が浸入している場合に、初期バースト以降の出力挙動を正確に評価するためには、デブリに接触する水の沸騰を適切にモデル化して、その反応度的効果および熱的效果を計算する必要がある。AGNES-Pには沸騰（相転移）モデルが実装されているが、その実験的検証が必要である。

第 10 章 燃料デブリ形状の反応度効果に係る解析

本章では、形状の凹凸が臨界性に与える効果についての解析的検討を行った。

東京電力福島第一原子力発電所（1F）の燃料デブリを対象として、その形状と組成をパラメータとして臨界計算を行い、中性子実効増倍率 k_{eff} を計算する。計算結果を整理し、形状効果の評価を行う。この計算により、 k_{eff} と形状の関係を明らかにすることで、形状が不明である燃料デブリの臨界安全管理に役立てることを目的とする。

H27・28 年度は同じ凹凸が無限に連なる条件での解析を実施し、凹凸の周期によっては、デブリ取出しを安全に実施できる条件が存在する可能性を示すことができた。今回は単独の凹凸形状を対象として解析を実施した。

10.1 目的及び概要

(1) 目的

1F 事故の復旧作業を支援する技術開発として、燃料デブリの臨界管理に係る技術開発を行っている。本作業では、1F の燃料デブリを対象として、今後実施される燃料デブリの取り出しを考慮して、デブリを除去した場合に生じる形状変化による中性子実効増倍率 k_{eff} への影響を明らかにすることを目的とする。

(2) 概要

それぞれ単独の凸型、凹型、半円凸型、半円凹型の形状を対象とし、異なる燃料条件で凹凸のサイズ（波長）と振幅を変えて k_{eff} を計算した。

10.2 解析方法及び解析条件

始めに本作業の概略を述べる。本作業内容は以下の3つに分けられる。

(1) 平坦型モデルによる $k_{\text{eff}} = 1$ となるデブリ厚さ探索 (10.3.1)

2次元 Sn 法輸送解析コード TWODANT を用いて平坦型モデル(図 10.2-1)における $k_{\text{eff}} = 1$ となるデブリ厚さ $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を求める。燃料条件 3 パターン、デブリ凹凸 1/2 波長 8 パターンの全 24 ケースについて探索を行う。

(2) TWODANT による感度解析 (10.3.2)

TWODANT を用いて k_{eff} の感度解析を行う。計算モデル(凸型、凹型、半円凸型、半円凹型) 4 パターン、燃料条件 3 パターン、デブリ凹凸 1/2 波長 8 パターン、デブリ凹凸振幅 5 パターンの全 480 ケースについて解析を行う。なお、TWODANT では、半円凸型、半円凹型において半円をモデル化できないため、階段状に定義する。

(3) MCNP による感度解析 (10.4.2)

(2)の結果の妥当性を確認するため、連続エネルギーモンテカルロ計算コード MCNP を用いて k_{eff} の感度解析を行う。ここでは燃料条件 1 パターンに絞り、計算モデル 5、デブリ凹凸 1/2 波長 8 パターン、デブリ凹凸振幅 5 パターンの全 160 ケースについて解析を行う。なお、MCNP では、半円凸型、半円凹型において半円をモデル化できるため、そのまま半円で定義する。

上記で述べたモデル、燃料条件、計算モデル、デブリ凹凸 1/2 波長、およびデブリ凹凸振幅などの解析条件や解析方法の詳細については 10.2.1 以降で述べる。

10.2.1 計算コード及び核データライブラリ

燃料デブリで想定される組成及び形状を組み合わせて臨界計算を行った。計算は、TWODANT コードを用いた。TWODANT コードを用いる場合、計算用の断面積作成のため SRAC コードを用いた。また、計算の一部については、MCNP コードを用いた。

核データライブラリ、および断面積ファイルは以下を用いた。

- ・核データライブラリ : JENDL-4.0

断面積ファイル

- ・SRAC : SRACLIB-JDL40
- ・MCNP : FSXLIB-J40

10.2.2 体系を構成する材料と組成および原子個数密度

計算体系の構成材料 (UO₂、燃焼燃料、水、コンクリート) の組成および原子個数密度を表 10.2-1～表 10.2-4 に示す。

表 10.2-1 UO₂ の原子個数密度 (単位 atoms/b cm)

²³⁵ U 濃縮度	4 wt%
²³⁵ U	9.604E-04
²³⁸ U	2.276E-02
O	4.744E-02

表 10.2-2 燃焼燃料の原子個数密度 (単位 atoms/b cm)

²³⁴ U	6.055E-06	⁹⁵ Mo	2.114E-05
²³⁴ U	6.310E-04	⁹⁹ Tc	2.137E-05
²³⁴ U	2.284E-02	¹⁰³ Rh	1.215E-05
²³⁸ Pu	4.411E-07	¹³³ Cs	2.302E-05
²³⁸ Pu	1.038E-04	¹⁴³ Nd	1.779E-05
²³⁸ Pu	1.931E-05	¹⁴⁵ Nd	1.266E-05
²³⁸ Pu	7.888E-06	¹⁴⁷ Sm	3.575E-06
²³⁸ Pu	1.028E-06	¹⁴⁹ Sm	1.198E-07
²⁴¹ Am	1.192E-06	¹⁵⁰ Sm	4.106E-06
		¹⁵² Sm	1.926E-06
		¹⁵³ Eu	1.267E-06
		¹⁵⁵ Gd	5.895E-07
		O	4.805E-02

表 10.2-3 水の原子個数密度 (単位 atoms/b cm)

H	6.666E-02
O	3.333E-02

表 10.2-4 コンクリートの原子個数密度 (単位 atoms/b cm)

H	1.374E-02	³⁹ K	4.295E-04
O	4.592E-02	⁴⁰ K	5.388E-08
C	1.153E-04	⁴¹ K	3.100E-05
Na	9.640E-04	⁴⁰ Ca	1.457E-03
²⁴ Mg	9.786E-05	⁴² Ca	9.722E-06
²⁵ Mg	1.239E-05	⁴³ Ca	2.029E-06
²⁶ Mg	1.364E-05	⁴⁴ Ca	3.134E-05
Al	1.741E-03	⁴⁶ Ca	6.010E-08
²⁸ Si	1.533E-02	⁴⁸ Ca	2.810E-06
²⁹ Si	7.761E-04	⁵⁴ Fe	2.001E-05
³⁰ Si	5.152E-04	⁵⁶ Fe	3.165E-04
		⁵⁷ Fe	7.592E-06
		⁵⁸ Fe	9.662E-07

10.2.3 同位体割合を考慮した原子個数密度

10.2.2のうち、同位体割合の表記のない元素 H,O,Al については臨界安全ハンドブック初版データ集の存在比を使用し設定した。入力ファイルへ設定した原子個数密度を表 10.2-5～表 10.2-8 に示す。TWODANT および MCNP どちらのコードにおいても、Na は ^{23}Na 100%、O は ^{16}O 100%とした。ただし、TWODANT の核データライブラリでは、 ^2H が存在しないため、入力カードには ^1H 100%として ^2H の原子個数密度を合算した。また、天然同位体核種組成のデータも存在しないため、C を ^{12}C 100%とした。一方 MCNP では、 ^1H と ^2H を個別に入力し、核データライブラリに C の天然同位体核種組成のデータが存在するため、そのデータを使用した。

表 10.2-5 UO_2 の原子個数密度 (単位 atoms/b cm)

^{235}U 濃縮度	4 wt%
^{235}U	9.604E-04
^{238}U	2.276E-02
^{16}O	4.733E-02

表 10.2-6 燃焼燃料の原子個数密度 (単位 atoms/b cm)

^{234}U	6.055E-06	^{95}Mo	2.114E-05
^{234}U	6.310E-04	^{99}Tc	2.137E-05
^{234}U	2.284E-02	^{103}Rh	1.215E-05
^{238}Pu	4.411E-07	^{133}Cs	2.302E-05
^{238}Pu	1.038E-04	^{143}Nd	1.779E-05
^{238}Pu	1.931E-05	^{145}Nd	1.266E-05
^{238}Pu	7.888E-06	^{147}Sm	3.575E-06
^{238}Pu	1.028E-06	^{149}Sm	1.198E-07
^{241}Am	1.192E-06	^{150}Sm	4.106E-06
		^{152}Sm	1.926E-06
		^{153}Eu	1.267E-06
		^{155}Gd	5.895E-07
		^{16}O	4.793E-02

表 10.2-7 水の原子個数密度 (単位 atoms/b cm)

$^1\text{H}^*$	6.6650E-02
$^2\text{H}^*$	9.8657E-06
^{16}O	3.3250E-02

※TWODANT では ^2H を ^1H に合算。

表 10.2-8 コンクリートの原子個数密度 (単位 atoms/b cm)

^1H	1.374E-02	^{39}K	4.295E-04
^2H	2.034E-06	^{40}K	5.388E-08
^{16}O	4.581E-02	^{41}K	3.100E-05
C^*	1.153E-04	^{40}Ca	1.457E-03
^{23}Na	9.640E-04	^{42}Ca	9.722E-06
^{24}Mg	9.786E-05	^{43}Ca	2.029E-06
^{25}Mg	1.239E-05	^{44}Ca	3.134E-05
^{26}Mg	1.364E-05	^{46}Ca	6.010E-08
^{27}Al	1.741E-03	^{48}Ca	2.810E-06
^{28}Si	1.533E-02	^{54}Fe	2.001E-05
^{29}Si	7.761E-04	^{56}Fe	3.165E-04
^{30}Si	5.152E-04	^{57}Fe	7.592E-06
		^{58}Fe	9.662E-07

※TWODANT では ^{12}C として入力。MCNP では核データライブラリ中の天然同位体核種組成を使用。

10.2.4 燃料条件

燃料デブリの組成は、10.2.3 で示した UO_2 とコンクリートが均質に混合したものとし、コンクリート体積割合と、残りの UO_2 の体積割合を変化させた。本作業では、表 10.2-9 に示すコンクリート体積割合が異なる 3 ケースの燃料条件について評価を行った。なお、デブリ表面凹凸の凹部の水を減速体すなわち V_m とし、その外側の水は反射体として区別することもできるが、本作業では区別せず一体として取り扱った。また、 UO_2 と減速材（水）を均質に混入させることはせず、燃料デブリ領域中の減速材対燃料体積比 (V_m/V_f) はゼロで評価を行った。

表 10.2-9 燃料条件

燃料条件	燃料	コンクリート体積割合
D1 (基本ケース)	^{235}U 濃縮度 4 wt%	90 %
D2	^{235}U 濃縮度 4 wt%	0 %
D3	^{235}U 濃縮度 4 wt%	60 %

10.2.5 計算モデル

探索モデルの平坦型に加えて計算モデルは、凸型、凹型、半円凸型、半円凹型の4パターンとした。なお、平坦型は $k_{\text{eff}} = 1$ となる y 軸方向のデブリ厚さ「 $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ 」を決定する予備解析にのみ使用する。2次元 (X-Y) 計算モデルのうち境界条件は、モデル底面を完全反射境界、上面を外部ボイド境界とした。なお、モデルが左右対称であることから、モデルの半分のみを模擬し、対称軸を完全反射境界、その反対側を外部ボイド境界とした。各パターンのパラメータや境界条件を以下に示す。

(1) 平坦型

図 10.2-1 に平坦型モデルを示す。モデルの大きさは、x 軸方向の長さをデブリ凹凸 1/2 波長、y 軸方向の反射体厚さを 50 cm とした。y 軸方向のデブリ厚さを変化させ、 $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を求める。デブリ表面の凹凸は無く、境界条件は、右側面を対称軸として完全反射境界、左側面を外部ボイド境界とした。

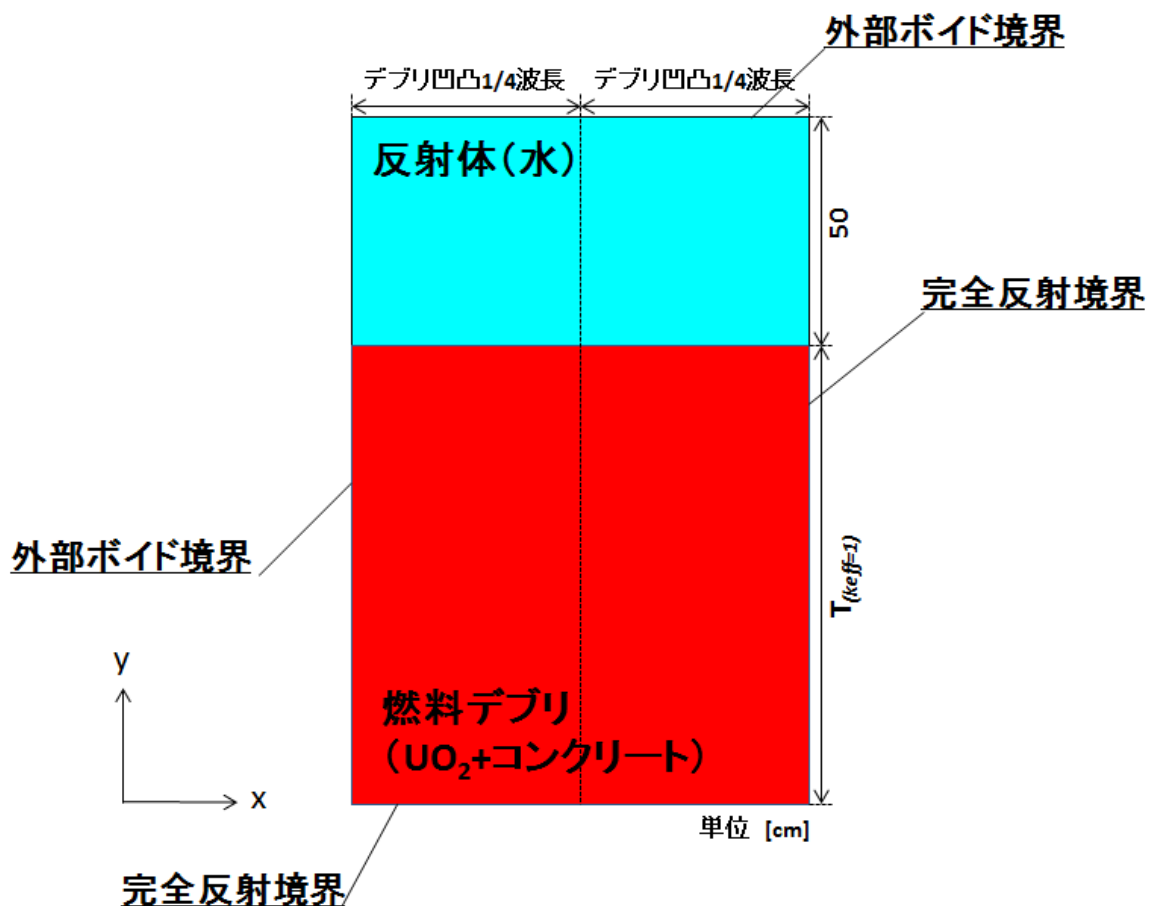


図 10.2-1 平坦型モデル

(注) 実寸に比例しない

(2) 凸型

図 10.2-2 に凸型のモデルを示す。寸法は凸型とほぼ同じであるが、反射体厚さを 100 または 200 cm に変更することで、凸部にも反射効果を担保できる厚さ 30 cm を満たすようにした。境界条件は凸型とは逆に、左側面（凸側）を完全反射境界、右側面（凹側）を外部ポイド境界とした。

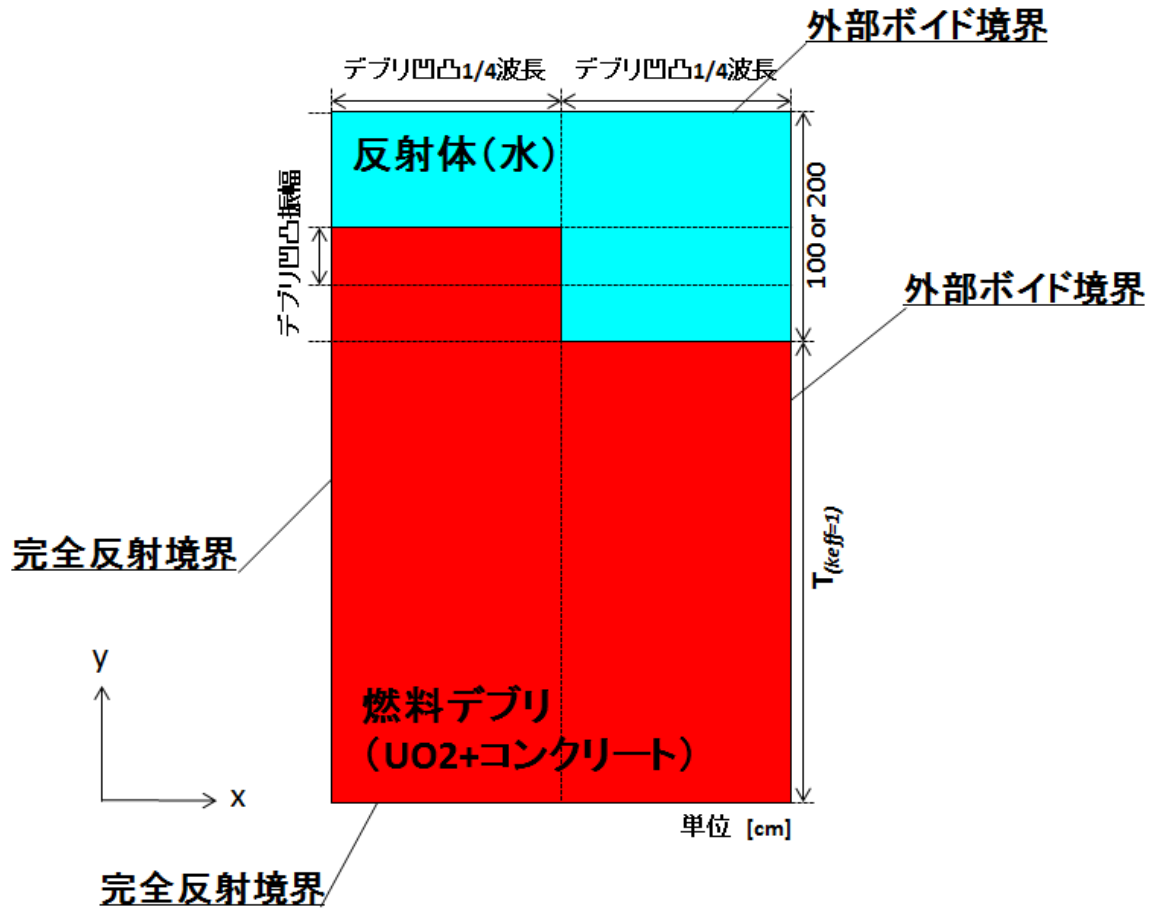


図 10.2-2 凸型モデル

(3) 凹型

図 10.2-3 に凹型のモデルを示す。このモデルでは、凹凸波長および凹凸振幅の 2 つのパラメータを変化させて k_{eff} の変化を調べる。モデルの大きさは、x 軸方向の長さをデブリ凹凸波長の 1/2 とし、y 軸方向は、(1) で求めた $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を基準に y 軸方向のモデル中心で凹凸振幅の段差をつけた。反射体厚さは 50 cm に固定した。境界条件は、右側面（凹側）を完全反射境界、左側面（凸側）を外部ポイド境界とした。

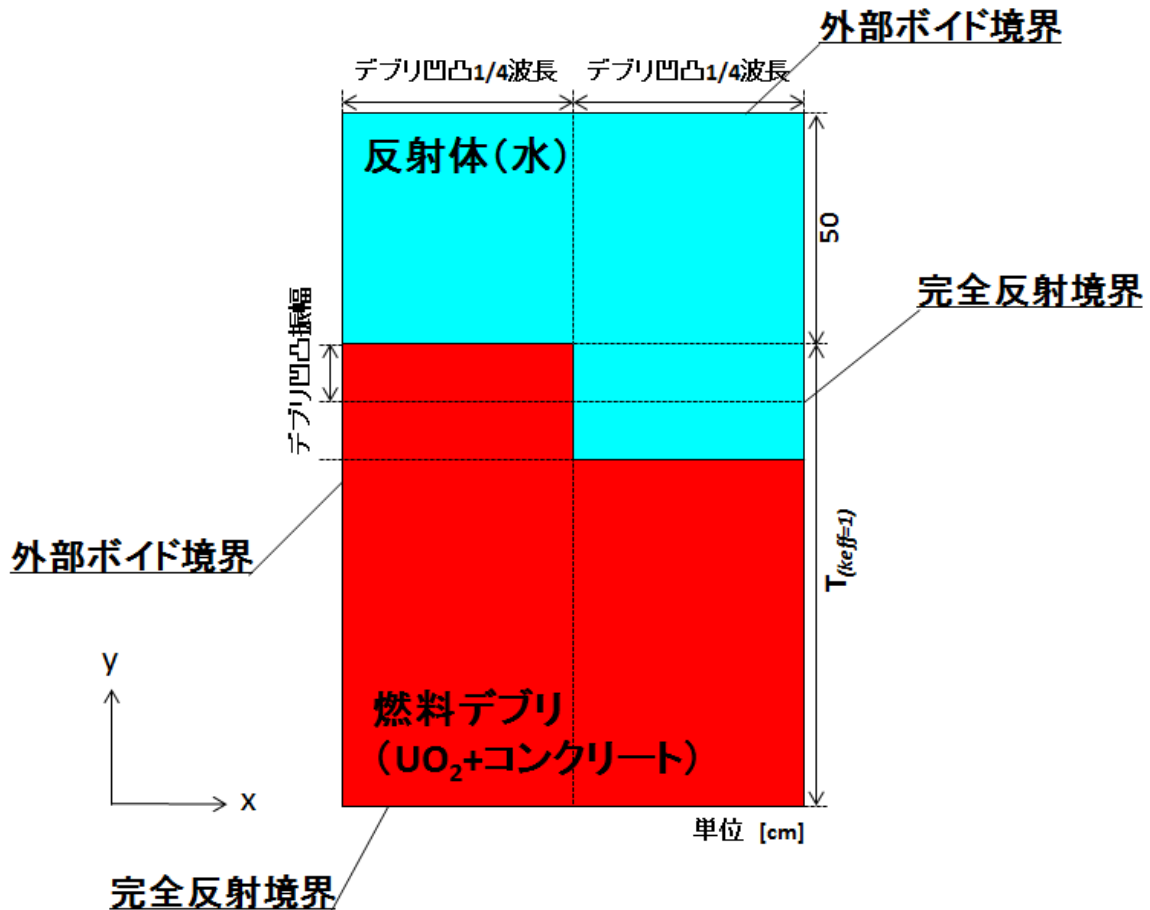


図 10.2-3 凹型モデル

(4) 半円凸型

図 10.2-4 に半円凸型のモデルを示す。このモデルも(2)の凸型とほとんど同じであるが、凸部分の形状が半円型になっており、凸型と同様の考えに基づいて反射体厚さを 100 または 200 cm とした。半円部分については、半円凹型と同様に、凸部を x 軸に対して半分に分けて、階段形状とした。2 段目の高さを半円凸の高さに一致させ、1 段目の高さを半楕円の面積に一致するように調整した。

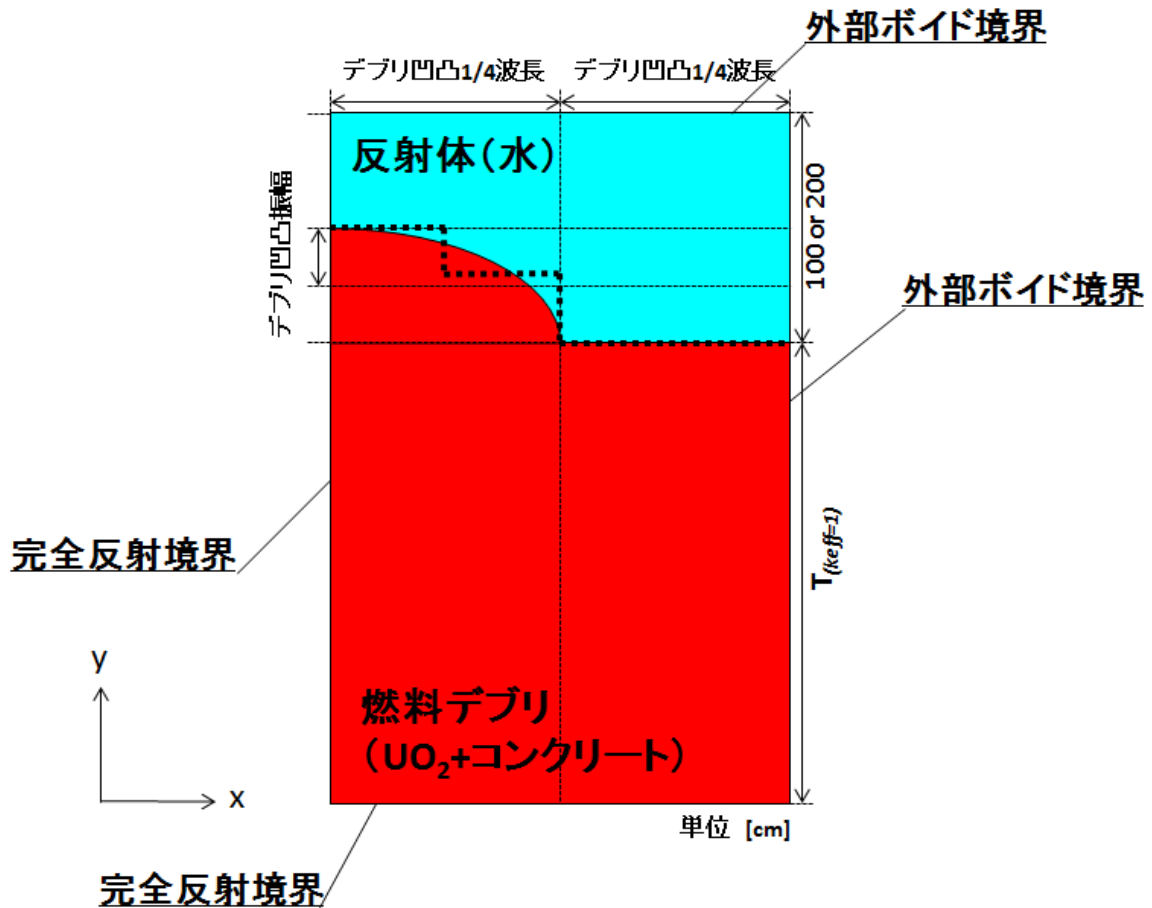


図 10.2-4 半円凸型モデル
太点線は TWODANT における半円の入力モデル

(5) 半円凹型

図 10.2-5 に半円凹型のモデルを示す。このモデルは、(3)の凹型とほとんど同じであるが、凹部分の形状が半円型になっている。なお、TWODANT では円を定義することができないため、点線のように、すり鉢部分を x 軸に対して半分に分割して、階段形状とした。階段部分の高さは、すり鉢部分の面積に一致するように調整した。

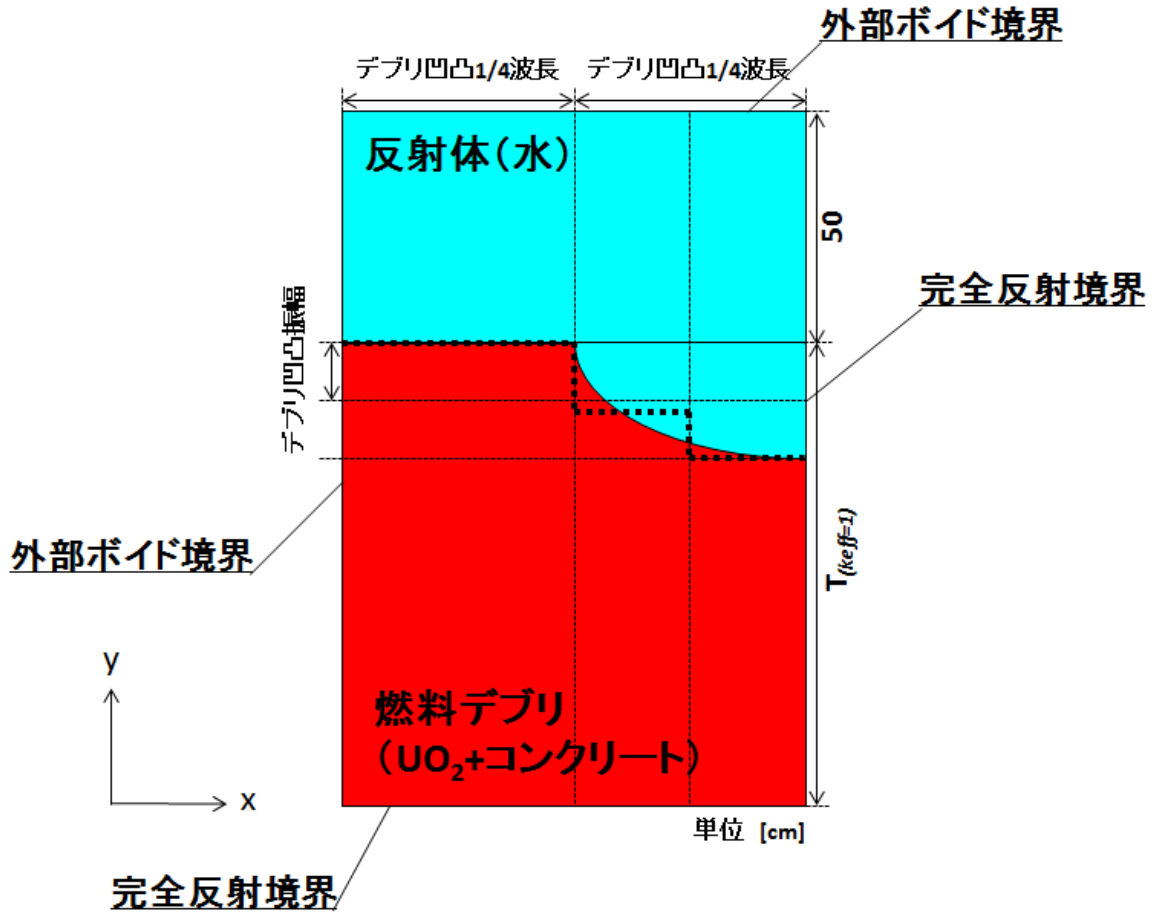


図 10.2-5 半円凹型モデル

太点線は TWODANT における半円の入力モデル

10.2.6 形状パラメータ

表 10.2-10 にデブリ凹凸 1/2 波長、およびデブリ凹凸振幅のパラメータを示す。デブリ凹凸 1/2 波長は 0.1～100 cm の 8 パターン、デブリ凹凸振幅は 0.5～8 cm、および $k_{\text{eff}} = 1$ となるデブリ厚さ($T_{(k_{\text{eff}}=1)}$)の半分の 5 パターンである。

表 10.2-10 形状寸法パラメータ

パラメータ	寸法 [cm]
デブリ凹凸 1/2 波長	0.1, 1, 2, 4, 10, 20, 40, 100
デブリ凹凸振幅	0.5, 1, 4, 8, $T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$

10.3 TWODANT を用いた解析

10.3.1 予備解析

始めに図 10.2-1 で示す平坦型モデルを対象として、 $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を求める予備解析を、TWODANT を用いて行った。デブリ厚さを変化させる計算を繰り返し行い、表 10.2-10 のデブリ凹凸 1/2 波長 8 パターンについて、それぞれの場合の $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を求めた。

(1) 計算および解析方法

計算および解析方法の手順を以下に示す。

- ① 初期条件として、デブリの厚さ 6 点（表 10.3-1）の設定に対する TWODANT の臨界計算により k_{eff} を求める。
- ② 前①で求めたデブリ厚さと k_{eff} の散布図に対して多項式フィッティングし、 $k_{\text{eff}} = 1$ 相当のデブリ厚さを決定する。
- ③ フィッティングで求めた $k_{\text{eff}} = 1$ 相当のデブリ厚さを中心に 1.00 cm 刻みで 4 点振って、再度 k_{eff} を求める。
- ④ 前②と同様に $k_{\text{eff}} = 1$ 相当のデブリ厚さを多項式フィッティングし、更新する。
- ⑤ 前③と同様にフィッティングで求めたデブリ厚さを中心に 0.01 cm 刻みで 4 点振って k_{eff} を求める。

以上の手順を $1.00000 \leq k_{\text{eff}}$ を満足するまで繰り返し、 $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を決定した。

表 10.3-1 予備解析 形状寸法パラメータ例

設定するデブリ厚さ [cm]	6.00, 10.00, 15.00, 20.00, 30.00, 50.00
-------------------	---

なお、本作業ではモデル左右壁がボイド境界条件のため、デブリ厚さを十分とったとしても、 k_{eff} 値が 1 にならずに収束安定する場合は考えられる。その場合は、 k_{eff} 値の増分が微小となって安定した傾向を示したデブリ厚さから 1 点を採用して $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ とした。

(2) 平坦型モデルによる予備解析

1) 燃料条件 D1

i) デブリ凹凸 1/2 波長 : 100 cm

① 1 回目

1 回目の臨界計算の結果を表 10.3-2、および図 10.3-1 に示す。フィッティングには、10.00、15.00、20.00、30.00 cm の 4 点のデータを採用し、近似曲線には対数関数 ($y = a \times \log_e(x) + b$) を使用した。

解析の結果、 $k_{\text{eff}} = 1$ 相当のデブリ厚さは約 28 cm となったことから、2 回目の臨界計算では、デブリ厚さを 27.00~30.00 cm の範囲において 1.00 cm 刻みで設定した。

表 10.3-2 デブリ厚さに対する k_{eff} の変化(1 回目)

デブリ厚さ [cm]	k_{eff}
6.00	0.58294
10.00	0.70907
15.00	0.82776
20.00	0.91242
30.00	1.01662
50.00	1.10717

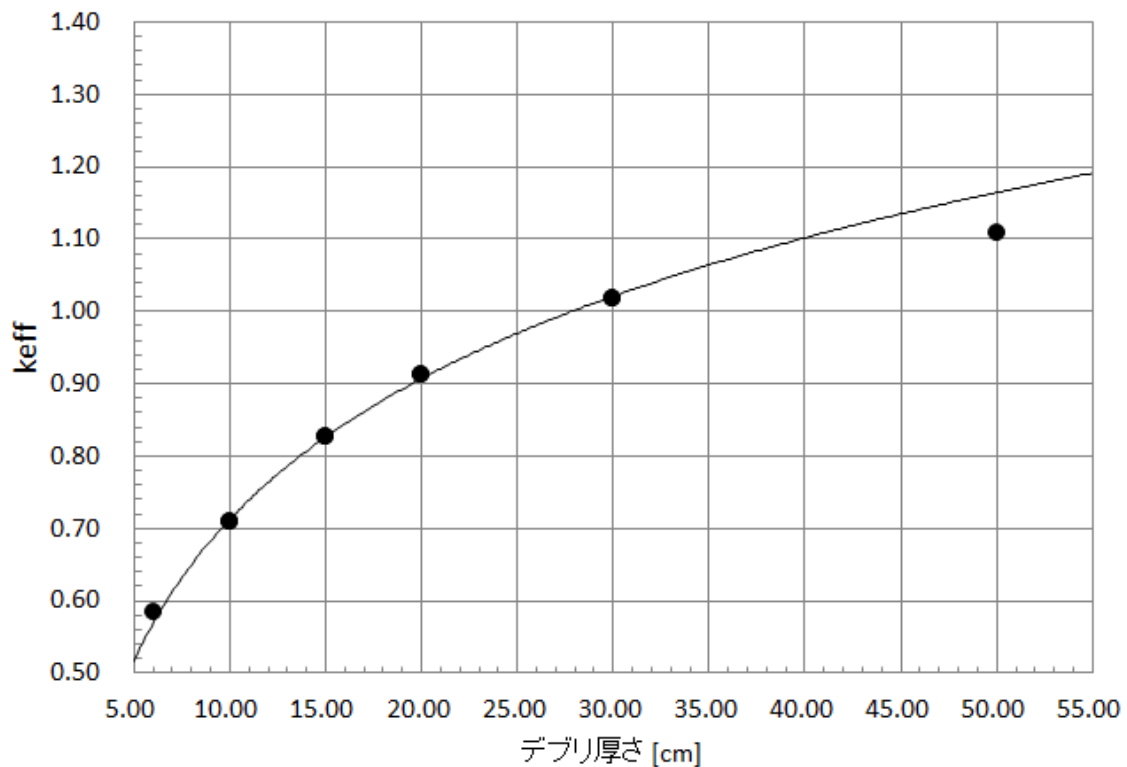


図 10.3-1 臨界計算結果およびフィッティング (1 回目)

② 2回目

2回目臨界計算の結果を表 10.3-3、および図 10.3-2 に示す。近似曲線には1次関数を使用した。

解析の結果、 $k_{\text{eff}} = 1$ 相当のデブリ厚さは約 27.94 cm となったことから、3回目の計算では、デブリ厚さを 27.92 ~ 27.96 cm の範囲において 0.01 cm 刻みで設定した。

表 10.3-3 デブリ厚さに対する k_{eff} の変化(2回目)

デブリ厚さ [cm]	k_{eff}
27.00	0.99197
28.00	1.00069
29.00	1.00890
30.00	1.01662

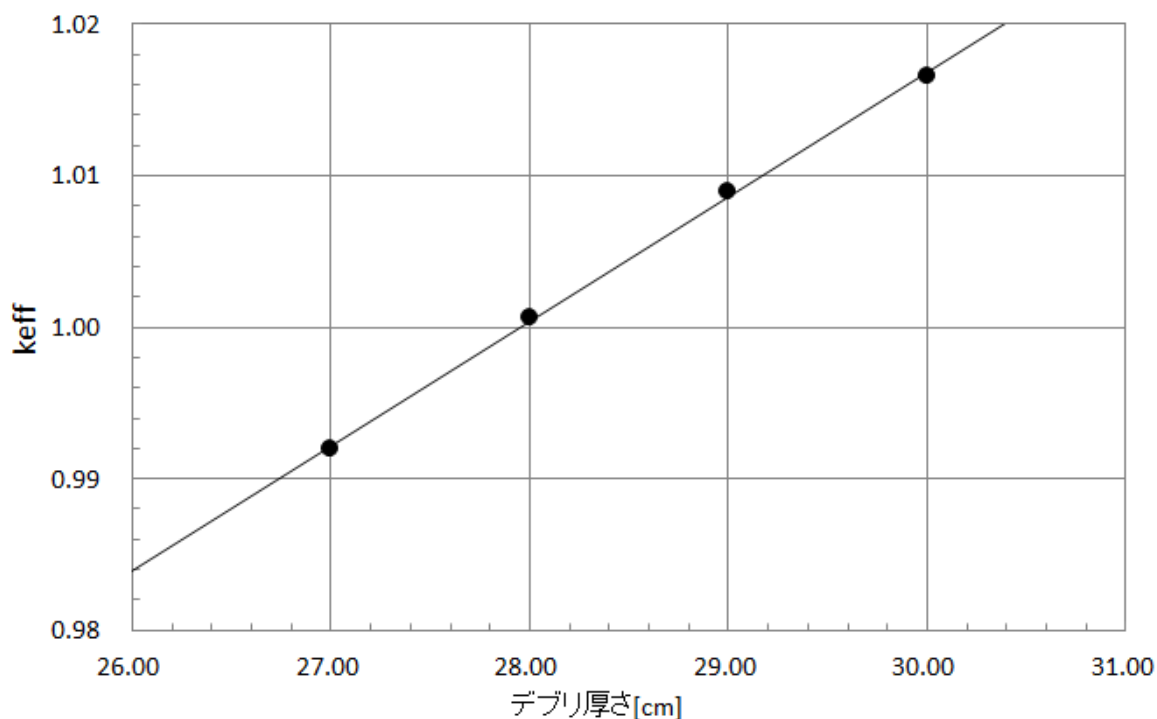


図 10.3-2 臨界計算結果およびフィッティング (2回目)

③ 3回目

3回目臨界計算の結果を表 10.3-4 に示す。この結果、 $k_{\text{eff}} = 1.00009$ を得たデブリ厚さ 27.93 cm を $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ として決定した。

表 10.3-4 デブリ厚さに対する k_{eff} の変化(3回目)

デブリ厚さ [cm]	k_{eff}
27.92	0.99999
27.93	1.00009
27.94	1.00019
27.95	1.00026
27.96	1.00034

ii) デブリ凹凸 1/2 波長 : 40 cm

デブリ凹凸 1/2 波長が 100 cm の場合と同様に調査し、 $k_{\text{eff}} = 1.00001$ を得たデブリ厚さ 58.54 cm を $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ として決定した。

iii) デブリ凹凸 1/2 波長 : 20 cm

デブリ厚さを 60 および 70 cm に設定して k_{eff} を計算したところ、 $k_{\text{eff}} \doteq 0.72 \sim 0.73$ に収まっていたため、デブリ厚さを 0.5 ~ 10000 cm の範囲で変化させて k_{eff} の変化を調べた。この結果を表 10.3-5 に示す。デブリ厚さが 50 cm 以上になると k_{eff} の増分は小さくなり、ほぼ安定していることが分かった。以上の結果から、 $k_{\text{eff}} = 1$ を満たすデブリ厚さを決定することは現実的でないと判断し、デブリ凹凸 1/2 波長 20 cm では、 $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ は $k_{\text{eff}} = 1$ 相当のデブリ厚さではなく、 k_{eff} が収束安定したデブリ厚さ 60 cm をパラメータ値として決定した。

表 10.3-5 デブリ凹凸 1/2 波長 : 20 cm における
 デブリ厚さに対する k_{eff} の変化

デブリ厚さ [cm]	k_{eff}
0.5	0.17744
1	0.25326
3	0.37039
5	0.42406
10	0.51099
20	0.61119
30	0.66126
40	0.68868
50	0.70511
60	0.71559
70	0.72267
100	0.73411
1000	0.74806
10000	0.75072

iv) デブリ凹凸 1/2 波長 : 0.1,1,2,4,10 cm

上記(c)の結果から、デブリ凹凸 1/2 波長が 0.1 ~ 10 cm の範囲の 5 ケースにおいても、 $k_{\text{eff}} = 1$ を満たすデブリ厚さを決定することは現実的でないと推定できる。よって、これらの 5 ケースの波長においても、 $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を 60 cm に設定することとした。なお、参考として、表 10.3-6 にデブリ厚さ 60 cm における各波長での k_{eff} を示す。

表 10.3-6 デブリ厚さ 60 cm における k_{eff}

デブリ厚さ [cm]	デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]				
	0.1	1	2	4	10
60	0.00067	0.00620	0.01220	0.04022	0.29816

以上、i)~iv)をまとめた結果を図 10.3-3 に示す。

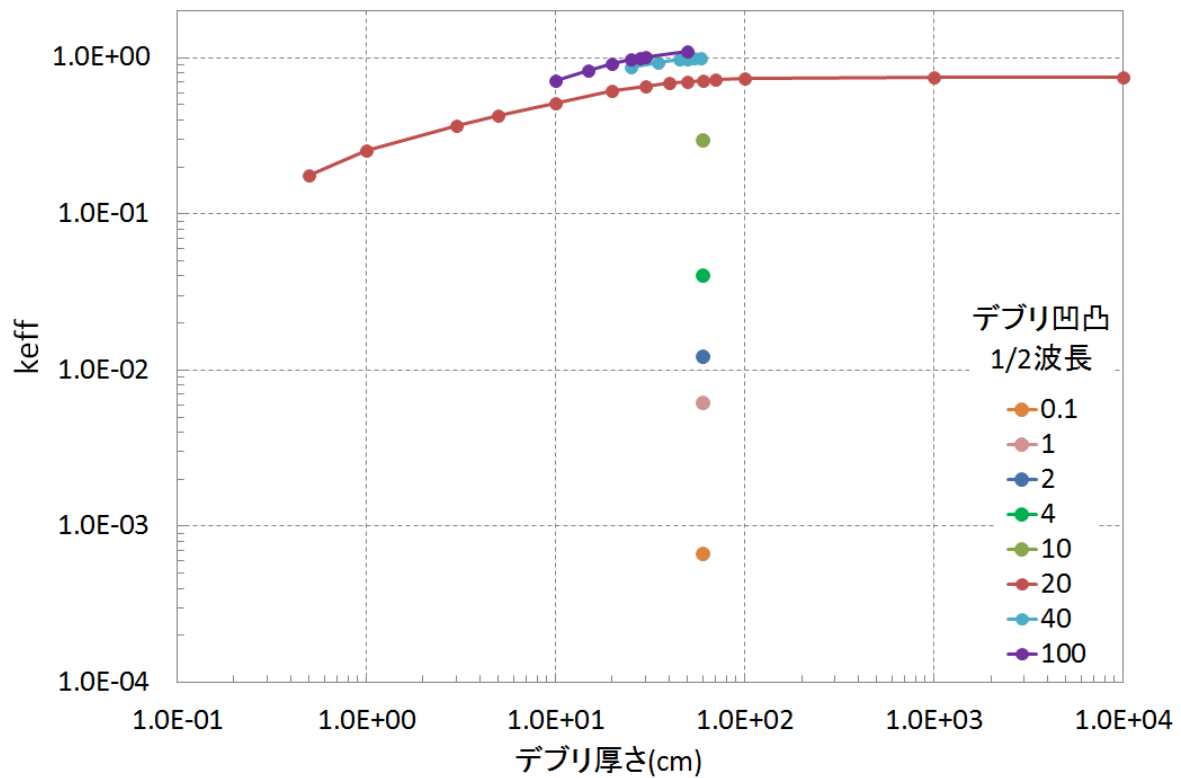


図 10.3-3 燃料条件 D1 の各デブリ凹凸 1/2 波長におけるデブリ厚さと k_{eff} 値の相関

2) 燃料条件 D2

燃料条件 D2 において、1/2 波長を 100 cm に設定して k_{eff} を調査したところ、デブリ厚さ 10000 cm でも k_{eff} は 1 に達しなかった。そこで、デブリ厚さを 0.5 ~ 10000 cm の間で変化させ、 k_{eff} が収束するデブリ厚さを調査した。この結果を表 10.3-7 に示す。これらの結果から、デブリ厚さ 60 cm で k_{eff} が収束安定していると判断し、燃料条件 D2 では、全ての波長パターンで $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を 60 cm とした。1/2 波長 0.1 ~ 40 cm において、デブリ厚さ 60 cm における k_{eff} を表 10.3-8 に示す。これらの結果をまとめたものを図 10.3-4 に示す。

表 10.3-7 デブリ凹凸 1/2 波長 : 100 cm における
デブリ厚さに対する k_{eff} の変化

デブリ厚さ [cm]	k_{eff}
0.5	0.48193
1	0.54212
3	0.63119
6	0.68732
10	0.71372
15	0.72224
20	0.72537
30	0.72874
50	0.73216
60	0.73311
80	0.73445
500	0.73799
10000	0.73940

表 10.3-8 デブリ厚さ 60 cm における k_{eff}

デブリ厚さ [cm]	デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]						
	0.1	1	2	4	10	20	40
60	0.00633	0.05484	0.09697	0.16796	0.37626	0.56327	0.68190

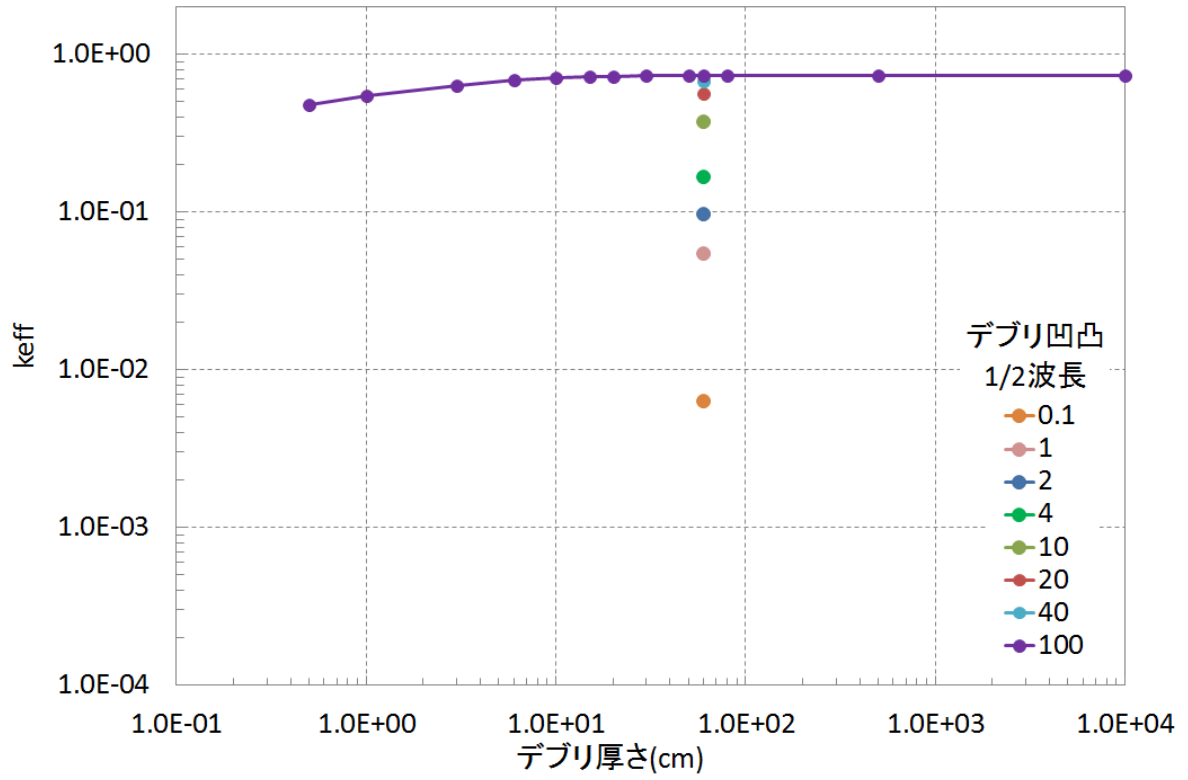


図 10.3-4 燃料条件 D2 の各デブリ凹凸 1/2 波長におけるデブリ厚さと k_{eff} 値の相関

3) 燃料条件 D3

燃料条件 D3 において、1/2 波長を 100 cm に設定して k_{eff} を調査したところ、デブリ厚さ 10000 cm でも k_{eff} は 1 に達しなかった。そこで、デブリ厚さを 0.5 ～ 10000 cm の間で変化させ、 k_{eff} が収束するデブリ厚さを調査した。この結果を表 10.3-9 に示す。これらの結果から、デブリ厚さ 150 cm で k_{eff} が収束安定していると判断し、燃料条件 D3 では、全ての波長パターンで $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を 150 cm とした。1/2 波長 0.1 ～ 40 cm において、デブリ厚さ 150 cm における k_{eff} を表 10.3-10 に示す。これらの結果をまとめたものを図 10.3-5 に示す。

表 10.3-9 デブリ凹凸 1/2 波長：100 cm における
デブリ厚さに対する k_{eff} の変化

デブリ厚さ [cm]	k_{eff}
0.5	0.38850
1	0.46865
3	0.58203
6	0.66215
10	0.73049
15	0.78948
20	0.83102
30	0.88309
50	0.93054
80	0.95590
100	0.96325
120	0.96764
150	0.97151
200	0.97481
500	0.97869
10000	0.97972

表 10.3-10 デブリ厚さ 150 cm における k_{eff}

デブリ厚さ [cm]	デブリ凹凸 1/2 波長[cm]						
	0.1	1	2	4	10	20	40
150	0.00263	0.02372	0.04412	0.09444	0.34650	0.67450	0.88348

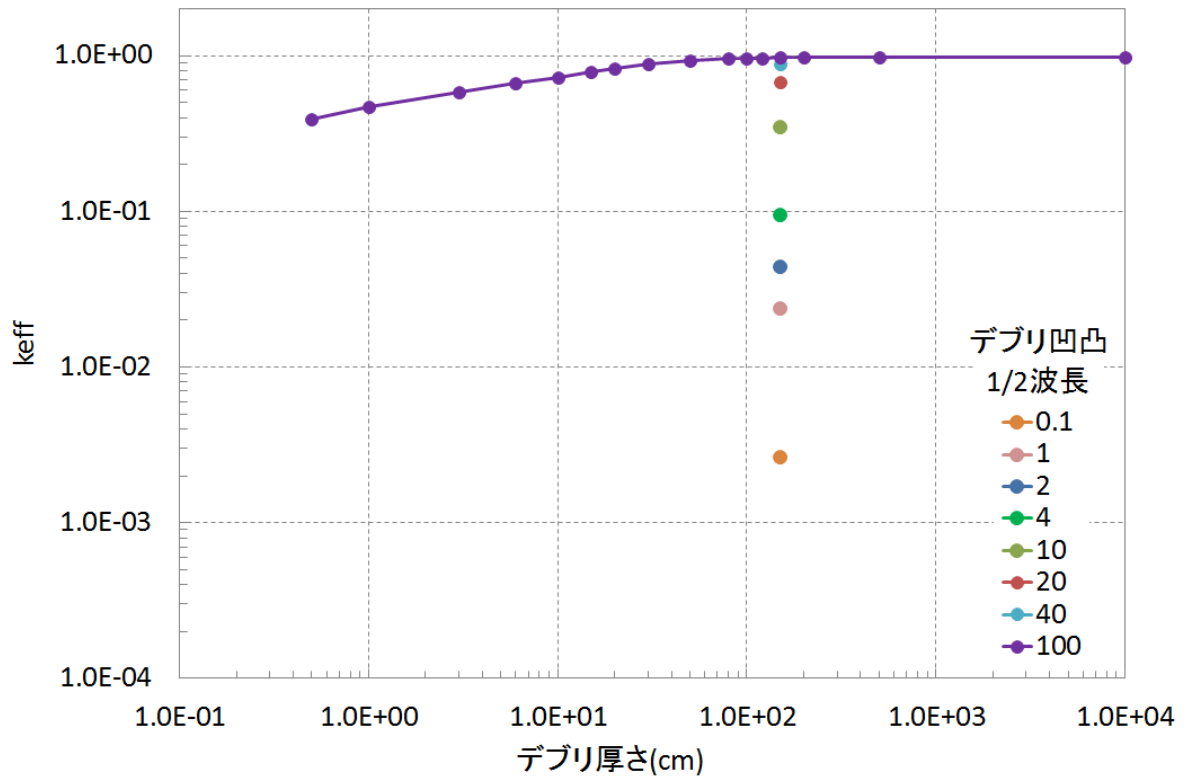


図 10.3-5 燃料条件 D3 の各デブリ凹凸 1/2 波長におけるデブリ厚さと k_{eff} 値の相関

(3) 予備解析のまとめ

燃料条件 D1、D2、D3 について、各デブリ凹凸 1/2 波長の場合の $T_{(k_{eff}=1)}$ の決定値とその時の k_{eff} の一覧を表 10.3-11 に示す。

表 10.3-11 各デブリ凹凸 1/2 波長における $T_{k_{eff}=1}$ と k_{eff} の一覧

デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	燃料条件 D1		燃料条件 D2		燃料条件 D3	
	$T_{(k_{eff}=1)}$ [cm]	k_{eff}	$T_{(k_{eff}=1)}$ [cm]	k_{eff}	$T_{(k_{eff}=1)}$ [cm]	k_{eff}
0.1	60	0.00067	60	0.00633	150	0.00263
1	60	0.00620	60	0.05484	150	0.02372
2	60	0.01220	60	0.09697	150	0.04412
4	60	0.04022	60	0.16796	150	0.09444
10	60	0.29816	60	0.37626	150	0.34650
20	60	0.71559	60	0.56327	150	0.67450
40	58.54	1.00001	60	0.68190	150	0.88348
100	27.93	1.00009	60	0.73311	150	0.97151

10.3.2 本解析

(1) 計算方法

本解析では、表 10.2-9 に示す燃料条件 3 パターン、図 10.2-3～図 10.2-4 に示す 4 モデル、表 10.2-10 に示すデブリ凹凸 1/2 波長 8 パターン、およびデブリ凹凸振幅 5 パターンを全て組み合わせて計算し、全 480 ケースでの k_{eff} の変化を調べた。また、形状変化にともなう k_{eff} の変化も調べた。形状変化は以下の 6 パターンとし、各モデルで計算した k_{eff} の差分を調べた。なお、平坦型は予備解析の結果（表 10.3-11）を用いた。

- ①凸型→平坦型
- ②平坦型→凹型
- ③凸型→凹型
- ④半円凸型→平坦型
- ⑤平坦型→半円凹型
- ⑥半円凸型→半円凹型

(2) 解析結果

1) 燃料条件 D1

燃料条件 D1 において、デブリ凹凸 1/2 波長、およびデブリ凹凸振幅を変化させた時の、凹凸型と半円凹凸型の k_{eff} を表 10.3-12～表 10.3-15 に示す。また、1/2 波長と k_{eff} の相関を図 10.3-6～図 10.3-9、および振幅と k_{eff} の相関を図 10.3-10～図 10.3-13 に示す。さらに、形状変化による k_{eff} の差を表 10.3-16～表 10.3-21 および図 10.3-14～図 10.3-19 に示す。

表 10.3-12 燃料条件 D1、凸型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	6.70E-04	6.70E-04	6.70E-04	6.70E-04	6.70E-04
	1	6.20E-03	6.20E-03	6.20E-03	6.20E-03	6.20E-03
	2	1.22E-02	1.22E-02	1.30E-02	1.46E-02	1.66E-02
	4	4.18E-02	4.44E-02	6.36E-02	7.99E-02	1.01E-01
	10	2.99E-01	3.00E-01	3.14E-01	3.49E-01	4.33E-01
	20	7.16E-01	7.17E-01	7.22E-01	7.27E-01	7.36E-01
	40	1.00E+00	1.00E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.02E+00
	100	1.01E+00	1.01E+00	1.04E+00	1.07E+00	1.10E+00

表 10.3-13 燃料条件 D1、凹型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	6.70E-04	6.70E-04	6.70E-04	6.70E-04	3.28E-04
	1	6.20E-03	6.20E-03	6.20E-03	6.19E-03	3.17E-03
	2	1.22E-02	1.22E-02	1.22E-02	1.23E-02	1.24E-02
	4	3.99E-02	4.06E-02	5.10E-02	5.98E-02	7.23E-02
	10	2.98E-01	2.98E-01	3.00E-01	3.01E-01	2.28E-01
	20	7.15E-01	7.14E-01	7.09E-01	7.00E-01	3.22E-01
	40	9.99E-01	9.97E-01	9.88E-01	9.70E-01	5.39E-01
	100	9.93E-01	9.86E-01	9.35E-01	8.63E-01	8.12E-01

表 10.3-14 燃料条件 D1、半円凸型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	6.70E-04	6.70E-04	6.70E-04	6.70E-04	6.70E-04
	1	6.21E-03	6.21E-03	6.21E-03	6.21E-03	6.21E-03
	2	1.22E-02	1.22E-02	1.31E-02	1.51E-02	1.80E-02 [※]
	4	4.15E-02	4.37E-02	6.37E-02	8.36E-02	1.11E-01 [※]
	10	2.99E-01	2.99E-01	3.10E-01	3.41E-01	4.22E-01
	20	7.16E-01	7.17E-01	7.21E-01	7.25E-01	7.34E-01
	40	1.00E+00	1.00E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.02E+00
	100	1.01E+00	1.01E+00	1.04E+00	1.06E+00	1.09E+00

※通常の計算に用いる入力カードでは k_{eff} が NaN になったため、x 軸方向のメッシュ数を増やして再計算した。

表 10.3-15 燃料条件 D1、半円凹型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	6.70E-04	6.70E-04	6.70E-04	6.70E-04	6.05E-04
	1	6.21E-03	6.21E-03	6.21E-03	6.20E-03	4.62E-03
	2	1.22E-02	1.22E-02	1.22E-02	1.23E-02	1.30E-02
	4	3.99E-02	4.04E-02	5.01E-02	6.09E-02	7.85E-02
	10	2.98E-01	2.98E-01	3.01E-01	3.11E-01	3.88E-01
	20	7.15E-01	7.14E-01	7.11E-01	7.05E-01	5.34E-01
	40	9.99E-01	9.98E-01	9.91E-01	9.77E-01	6.84E-01
	100	9.94E-01	9.89E-01	9.50E-01	8.99E-01	8.56E-01

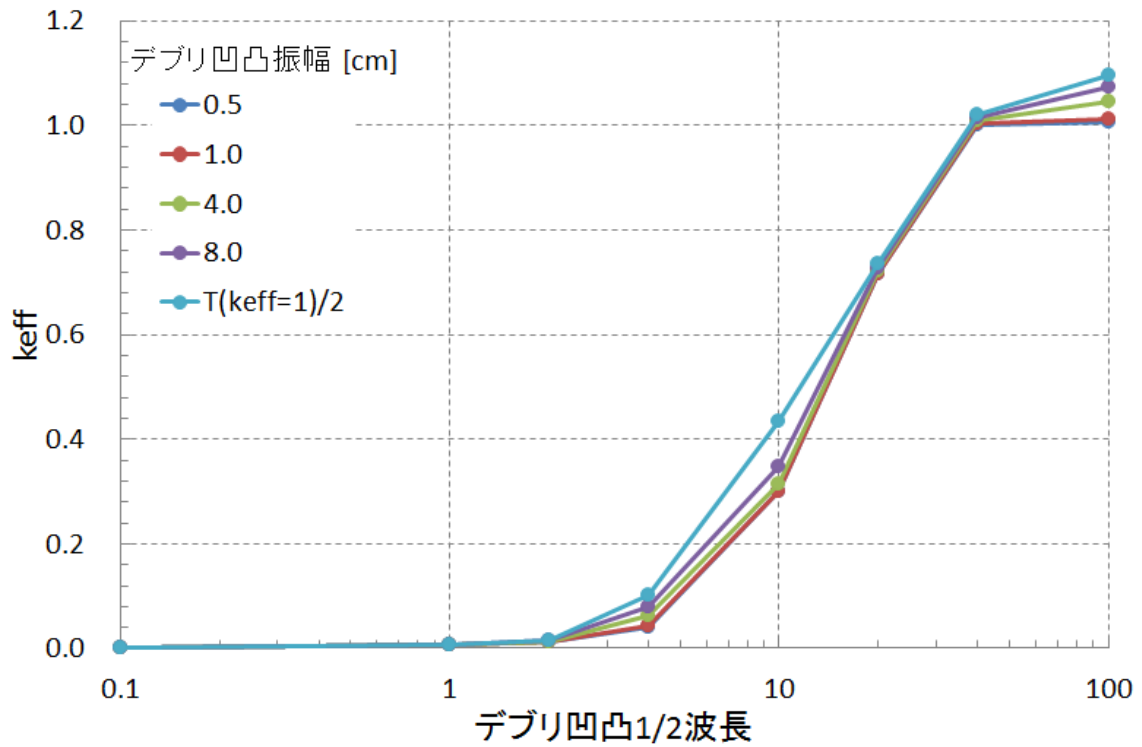


図 10.3-6 燃料条件 D1、凸型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関
(表 10.3-12)

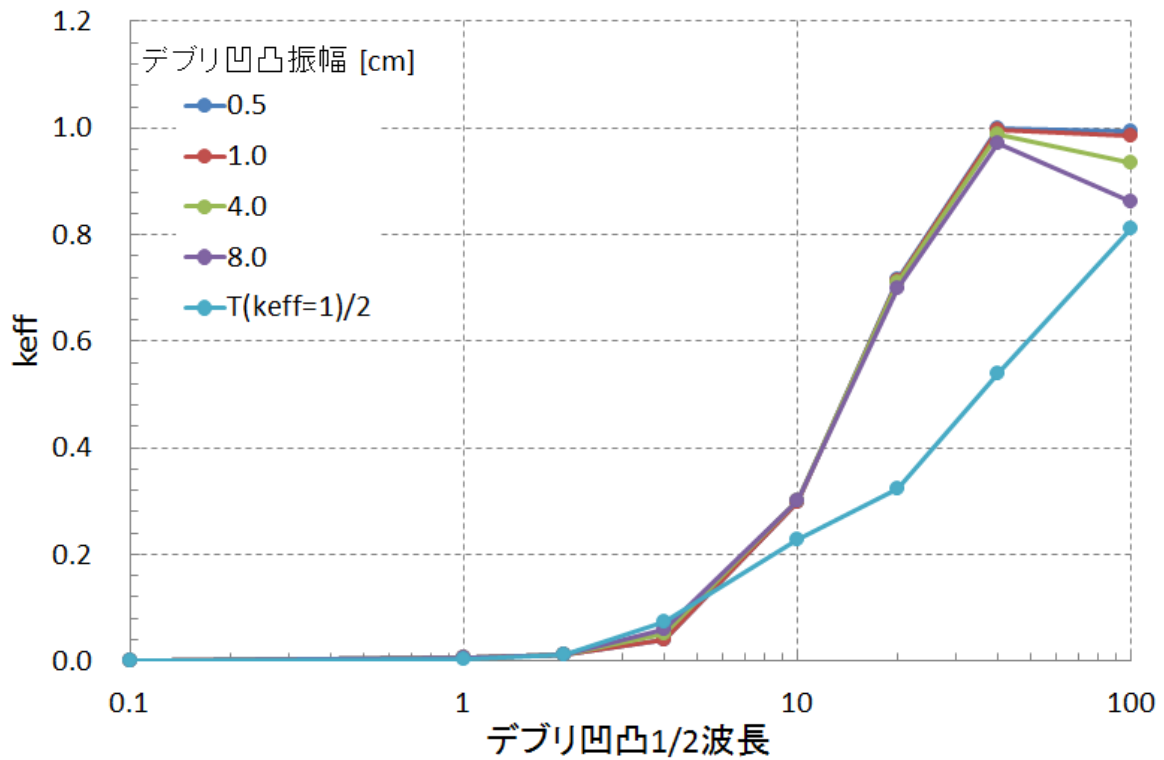


図 10.3-7 燃料条件 D1、凹型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関
(表 10.3-13)

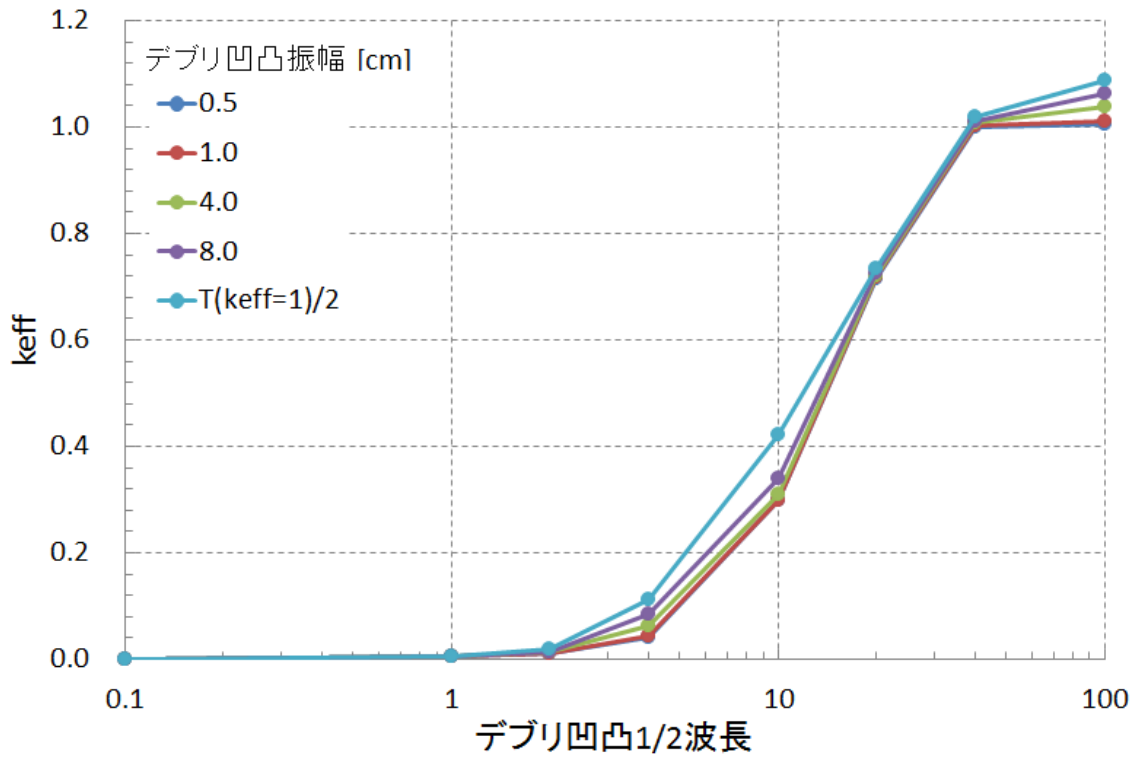


図 10.3-8 燃料条件 D1、半円凸型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関 (表 10.3-14)

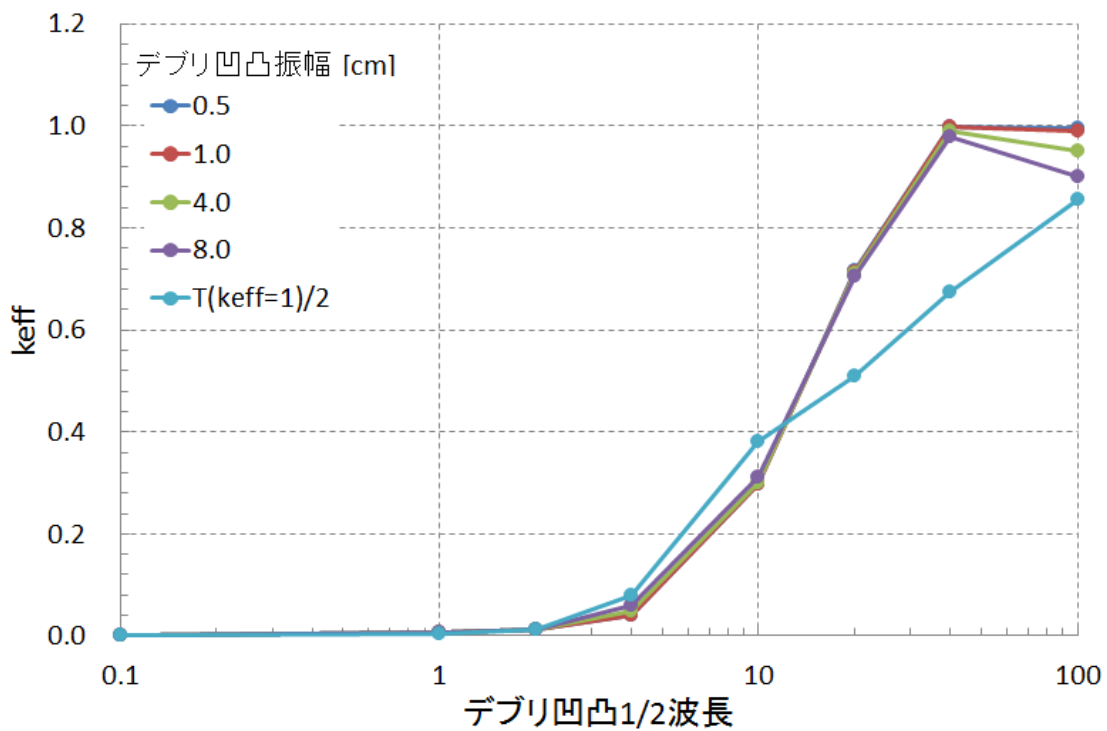


図 10.3-9 燃料条件 D1、半円凹型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関 (表 10.3-15)

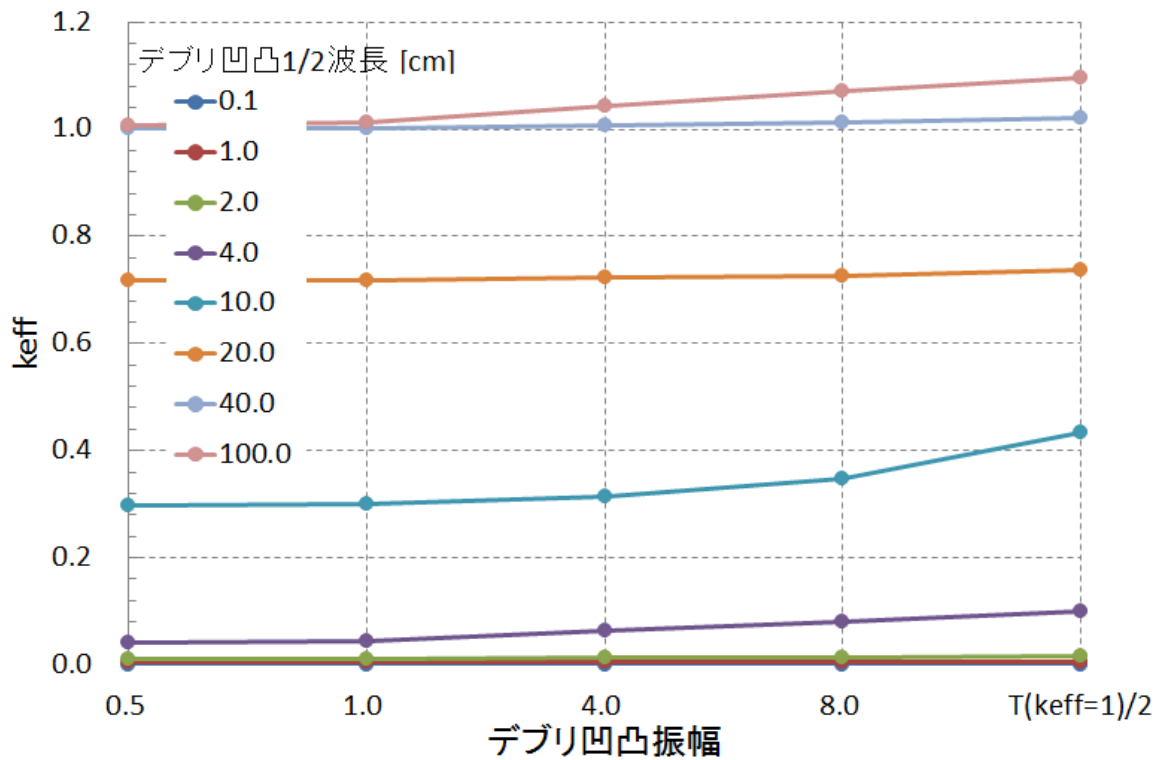


図 10.3-10 燃料条件 D1、凸型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関
(表 10.3-12)

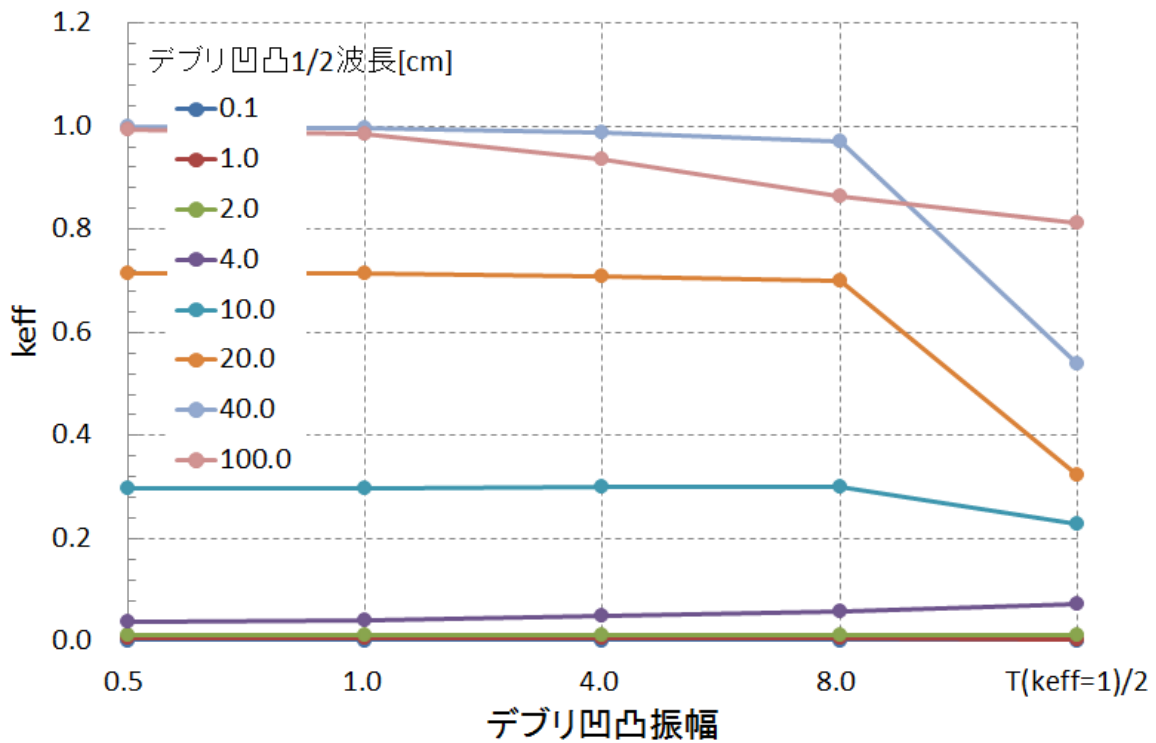


図 10.3-11 燃料条件 D1、凹型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関
(表 10.3-13)

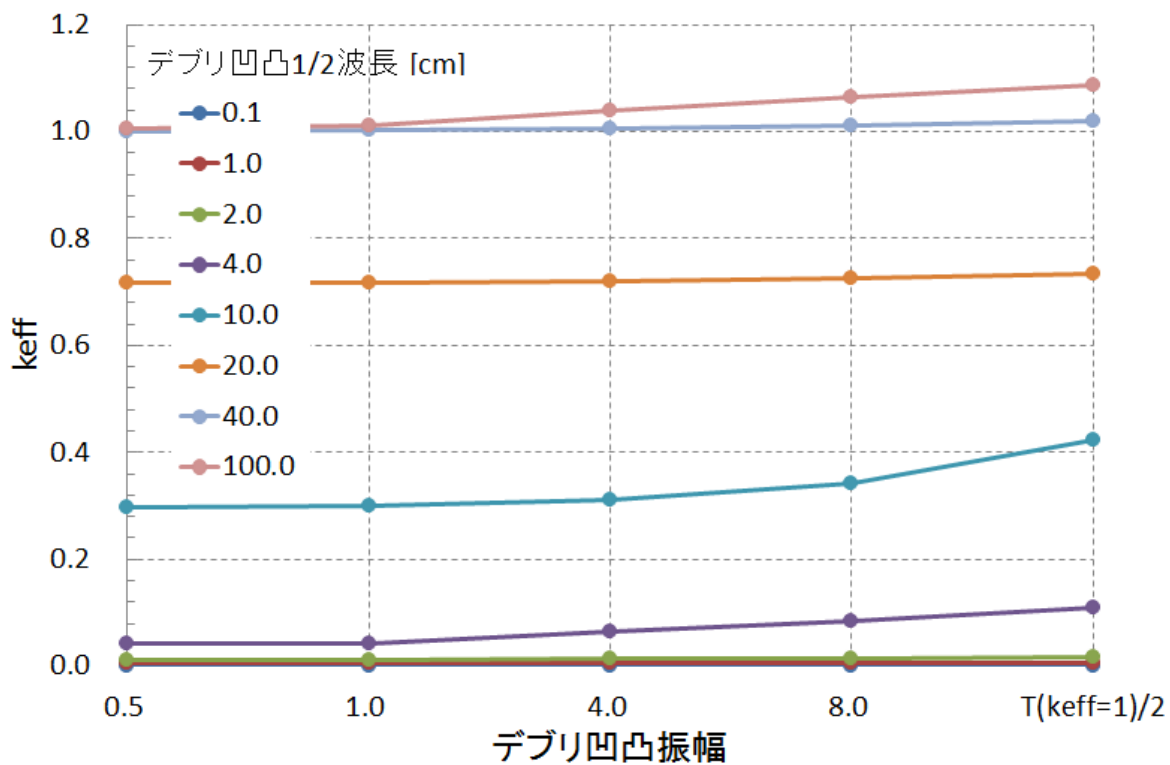


図 10.3-12 燃料条件 D1、半円凸型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関 (表 10.3-14)

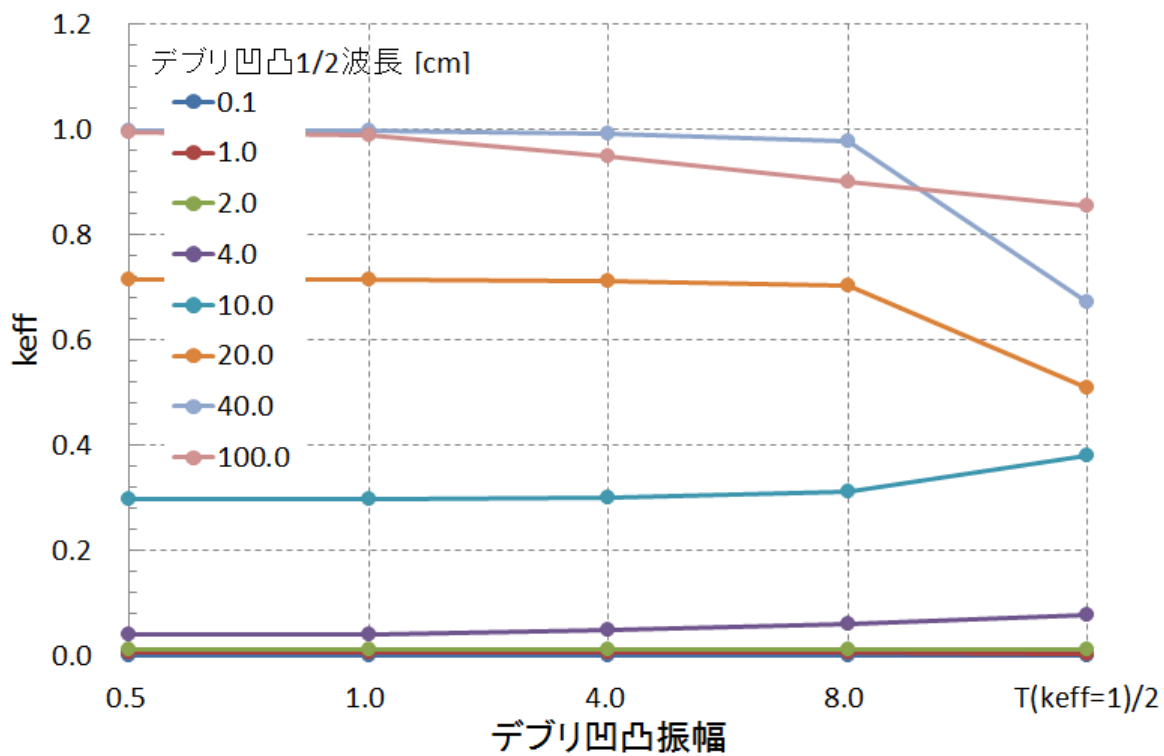


図 10.3-13 燃料条件 D1、半円凹型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関 (表 10.3-15)

表 10.3-16 燃料条件 D1、凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-12)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	1.64E-09	1.64E-09	3.38E-08	9.80E-10	1.64E-09
1/2 波長	1	2.97E-07	2.45E-07	2.04E-07	2.03E-07	-2.54E-07
[cm]	2	-5.61E-06	-1.48E-05	-8.10E-04	-2.39E-03	-4.41E-03
	4	-1.61E-03	-4.22E-03	-2.34E-02	-3.97E-02	-6.11E-02
	10	-5.91E-04	-1.55E-03	-1.59E-02	-5.07E-02	-1.35E-01
	20	-7.45E-04	-1.59E-03	-6.54E-03	-1.14E-02	-2.05E-02
	40	-1.13E-03	-2.31E-03	-8.30E-03	-1.34E-02	-2.02E-02
	100	-6.66E-03	-1.30E-02	-4.43E-02	-7.20E-02	-9.67E-02

表 10.3-17 燃料条件 D1、平坦型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-13)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	-1.34E-09	-2.91E-09	-1.41E-08	-3.04E-08	-3.42E-04
1/2 波長	1	-2.17E-07	-5.26E-07	-3.39E-06	-8.11E-06	-3.03E-03
[cm]	2	-3.24E-06	-4.10E-06	1.77E-05	8.09E-05	2.24E-04
	4	-2.98E-04	4.07E-04	1.08E-02	1.96E-02	3.21E-02
	10	-2.70E-04	-2.49E-04	1.66E-03	3.14E-03	-7.03E-02
	20	-7.84E-04	-1.46E-03	-6.12E-03	-1.58E-02	-3.93E-01
	40	-1.32E-03	-2.59E-03	-1.18E-02	-3.00E-02	-4.61E-01
	100	-6.94E-03	-1.42E-02	-6.55E-02	-1.37E-01	-1.88E-01

表 10.3-18 燃料条件 D1、凸型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-12、表 10.3-13)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	3.00E-10	-1.27E-09	1.97E-08	-2.94E-08	-3.42E-04
	1	8.01E-08	-2.82E-07	-3.19E-06	-7.91E-06	-3.03E-03
	2	-8.85E-06	-1.89E-05	-7.93E-04	-2.31E-03	-4.18E-03
	4	-1.91E-03	-3.81E-03	-1.27E-02	-2.00E-02	-2.90E-02
	10	-8.60E-04	-1.80E-03	-1.43E-02	-4.76E-02	-2.06E-01
	20	-1.53E-03	-3.05E-03	-1.27E-02	-2.72E-02	-4.14E-01
	40	-2.44E-03	-4.91E-03	-2.01E-02	-4.34E-02	-4.81E-01
	100	-1.36E-02	-2.72E-02	-1.10E-01	-2.10E-01	-2.84E-01

表 10.3-19 燃料条件 D1、半円凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-14)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	-1.96E-07	-1.95E-07	-1.96E-07	-1.96E-07	-1.96E-07
	1	-9.85E-06	-9.93E-06	-9.97E-06	-9.97E-06	-1.04E-05
	2	-3.79E-05	-4.62E-05	-8.98E-04	-2.93E-03	-5.77E-03
	4	-1.31E-03	-3.51E-03	-2.35E-02	-4.34E-02	-7.08E-02
	10	-4.58E-04	-1.17E-03	-1.20E-02	-4.29E-02	-1.24E-01
	20	-5.89E-04	-1.26E-03	-5.35E-03	-9.77E-03	-1.87E-02
	40	-9.00E-04	-1.87E-03	-6.98E-03	-1.17E-02	-1.92E-02
	100	-5.48E-03	-1.08E-02	-3.80E-02	-6.38E-02	-8.77E-02

表 10.3-20 燃料条件 D1、平坦型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-15)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	1.96E-07	1.94E-07	1.84E-07	1.67E-07	-1.73E-04
1/2 波長 [cm]	1	1.00E-05	9.76E-06	7.48E-06	2.68E-06	-1.67E-03
	2	3.02E-05	2.89E-05	4.07E-05	1.10E-04	7.74E-04
	4	-3.16E-04	1.39E-04	9.88E-03	2.07E-02	3.87E-02
	10	-2.59E-04	-2.88E-04	2.76E-03	1.29E-02	8.31E-02
	20	-6.66E-04	-1.24E-03	-4.66E-03	-1.08E-02	-2.06E-01
	40	-1.09E-03	-2.13E-03	-9.33E-03	-2.30E-02	-3.27E-01
	100	-5.65E-03	-1.15E-02	-5.00E-02	-1.01E-01	-1.46E-01

表 10.3-21 燃料条件 D1、半円凸型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-14、表 10.3-15)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	5.00E-11	-1.30E-09	-1.17E-08	-2.87E-08	-1.73E-04
1/2 波長 [cm]	1	1.68E-07	-1.69E-07	-2.50E-06	-7.30E-06	-1.68E-03
	2	-7.69E-06	-1.74E-05	-8.57E-04	-2.82E-03	-4.99E-03
	4	-1.62E-03	-3.38E-03	-1.36E-02	-2.27E-02	-3.21E-02
	10	-7.17E-04	-1.46E-03	-9.23E-03	-3.01E-02	-4.08E-02
	20	-1.25E-03	-2.50E-03	-1.00E-02	-2.06E-02	-2.25E-01
	40	-1.99E-03	-4.00E-03	-1.63E-02	-3.47E-02	-3.46E-01
	100	-1.11E-02	-2.22E-02	-8.80E-02	-1.65E-01	-2.34E-01

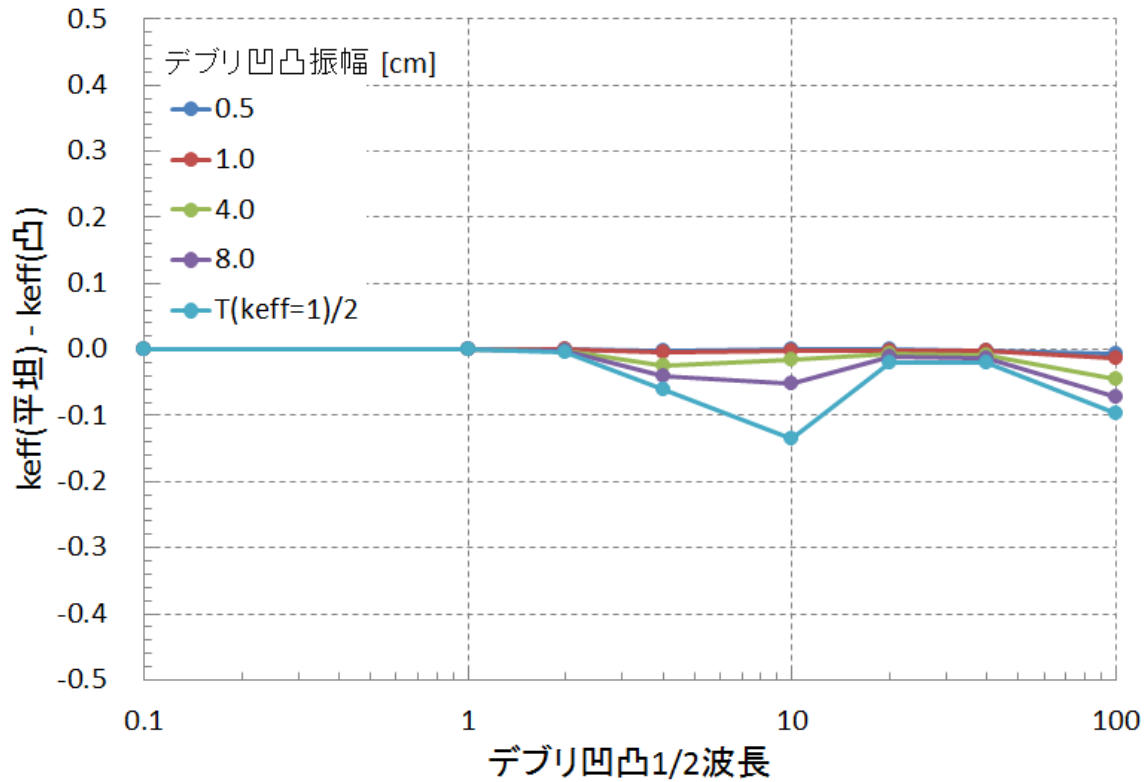


図 10.3-14 燃料条件 D1、凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-16)

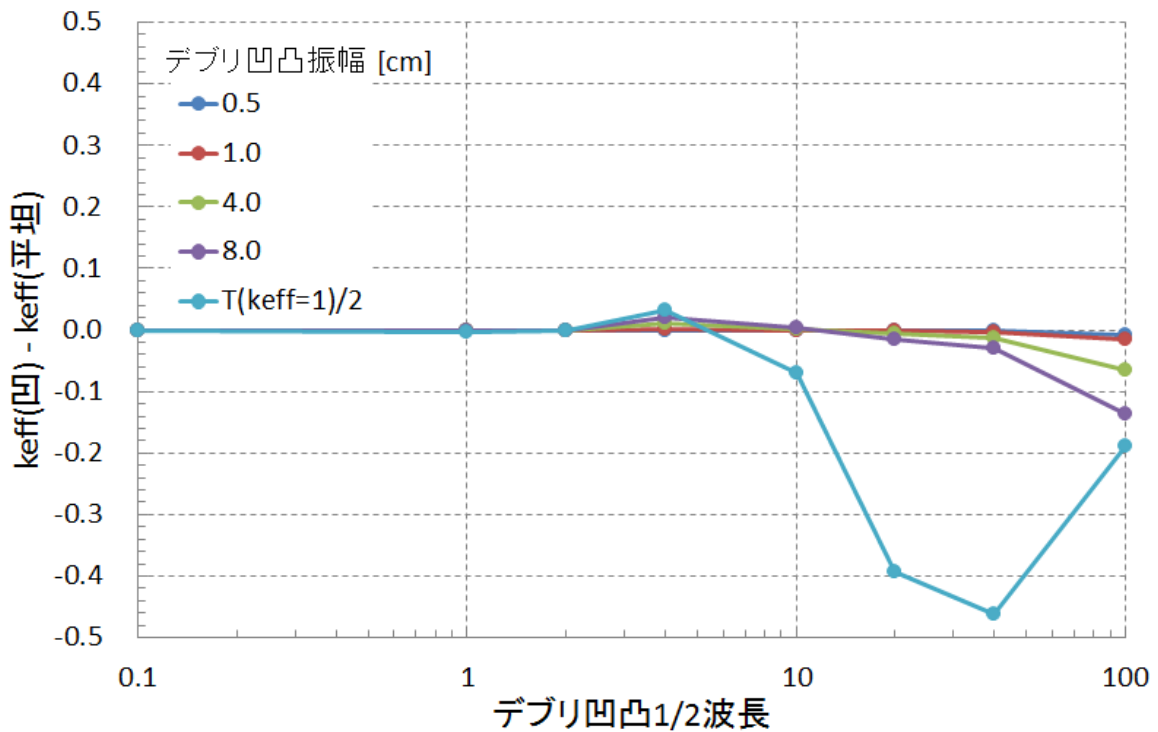


図 10.3-15 燃料条件 D1、平坦型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-17)

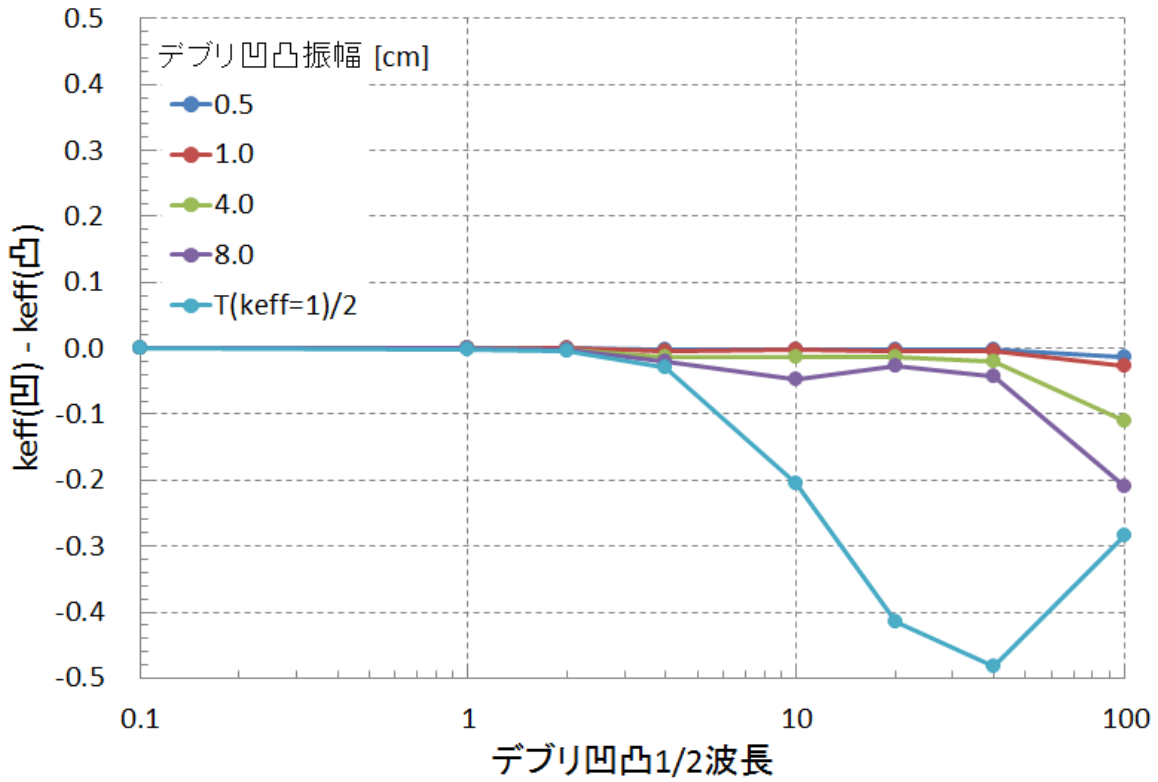


図 10.3-16 燃料条件 D1、凸型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-18)

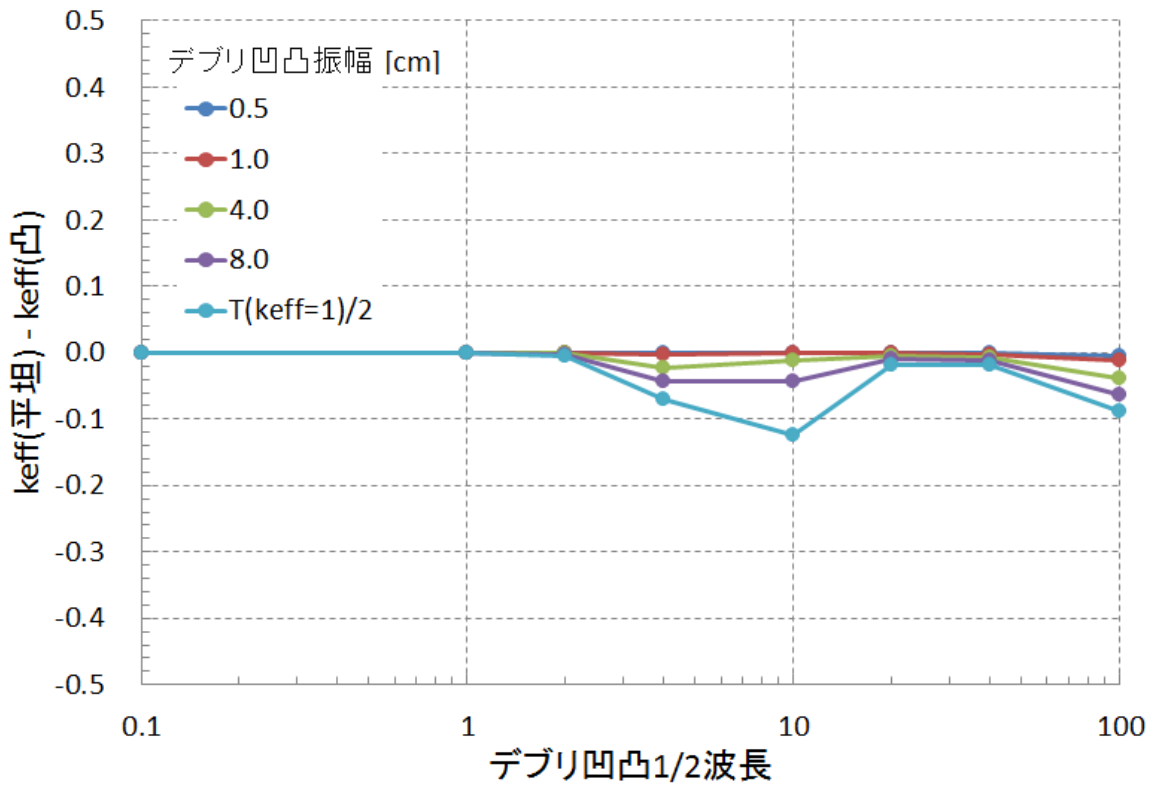


図 10.3-17 燃料条件 D1、半円凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-19)

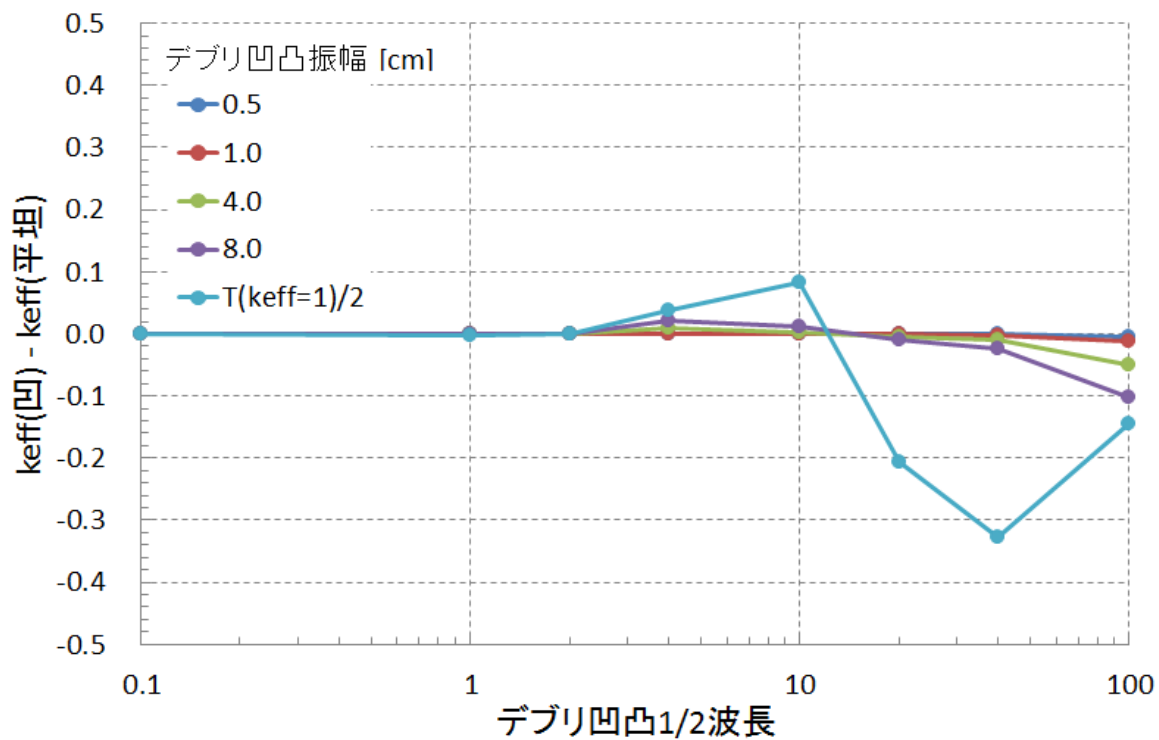


図 10.3-18 燃料条件 D1、平坦型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-20)

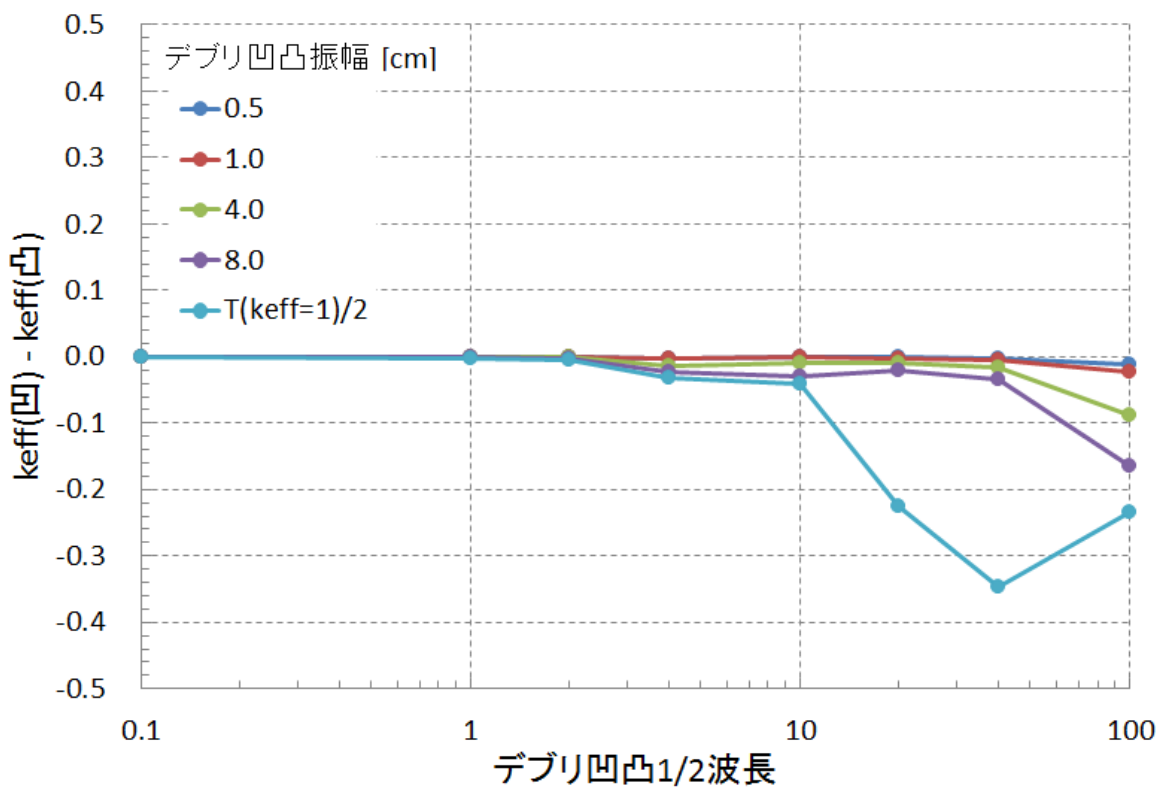


図 10.3-19 燃料条件 D1、半円凸型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-21)

2) 燃料条件 D2

燃料条件 D2 において、デブリ凹凸 1/2 波長、およびデブリ凹凸振幅を変化させた時の、凹凸型と半円凹凸型の k_{eff} の変化を表 10.3-22～表 10.3-25 に示す。また、1/2 波長と k_{eff} の相関を図 10.3-20～図 10.3-23、および振幅と k_{eff} の相関を図 10.3-24～図 10.3-27 に示す。さらに、形状変化による k_{eff} の差を表 10.3-26～表 10.3-31 および図 10.3-28～図 10.3-33 に示す。

表 10.3-22 燃料条件 D2、凸型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹 凸 1/2 波長 [cm]	0.1	6.33E-03	6.33E-03	6.33E-03	6.33E-03	6.33E-03
	1	5.48E-02	5.48E-02	5.48E-02	5.48E-02	5.48E-02
	2	9.70E-02	9.70E-02	9.70E-02	9.70E-02	9.69E-02
	4	1.68E-01	1.68E-01	1.75E-01	1.87E-01	2.06E-01
	10	3.78E-01	3.82E-01	4.27E-01	4.73E-01	5.46E-01
	20	5.64E-01	5.67E-01	5.94E-01	6.26E-01	6.84E-01
	40	6.82E-01	6.83E-01	6.92E-01	7.02E-01	7.21E-01
	100	7.33E-01	7.34E-01	7.37E-01	7.40E-01	7.45E-01

表 10.3-23 燃料条件 D2、凹型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹 凸 1/2 波長 [cm]	0.1	6.33E-03	6.33E-03	6.33E-03	6.33E-03	3.10E-03
	1	5.48E-02	5.48E-02	5.48E-02	5.48E-02	2.76E-02
	2	9.70E-02	9.70E-02	9.69E-02	9.68E-02	7.96E-02
	4	1.68E-01	1.69E-01	2.01E-01	2.33E-01	2.77E-01
	10	3.79E-01	3.85E-01	4.38E-01	4.72E-01	4.96E-01
	20	5.64E-01	5.67E-01	5.88E-01	6.01E-01	5.07E-01
	40	6.82E-01	6.83E-01	6.90E-01	6.96E-01	5.99E-01
	100	7.33E-01	7.33E-01	7.36E-01	7.37E-01	6.92E-01

表 10.3-24 燃料条件 D2、半円凸型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹 凸 1/2 波長 [cm]	0.1	6.33E-03	6.33E-03	6.33E-03	6.33E-03	6.33E-03
	1	5.49E-02	5.49E-02	5.49E-02	5.49E-02	5.49E-02
	2	9.72E-02	9.72E-02	9.72E-02	9.71E-02	9.72E-02
	4	1.68E-01	1.68E-01	1.78E-01	1.98E-01	2.36E-01
	10	3.77E-01	3.81E-01	4.24E-01	4.78E-01	5.61E-01
	20	5.64E-01	5.65E-01	5.89E-01	6.26E-01	6.88E-01
	40	6.82E-01	6.83E-01 [※]	6.91E-01	7.05E-01	7.30E-01
	100	7.33E-01	7.34E-01	7.37E-01	7.42E-01	7.49E-01 [※]

※通常の計算に用いる入力カードでは k_{eff} が NaN または 1 より大きくなったため、x 軸方向または y 軸方向のメッシュ数を増やして再計算した。

表 10.3-25 燃料条件 D2、半円凹型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹 凸 1/2 波長 [cm]	0.1	6.33E-03	6.33E-03	6.33E-03	6.33E-03	4.70E-03
	1	5.49E-02	5.49E-02	5.49E-02	5.49E-02	3.98E-02
	2	9.72E-02	9.72E-02	9.71E-02	9.70E-02	8.37E-02
	4	1.68E-01	1.69E-01	1.93E-01	2.26E-01	2.68E-01
	10	3.78E-01	3.83E-01	4.41E-01	5.09E-01	6.77E-01
	20	5.64E-01	5.66E-01	5.90E-01	6.25E-01	6.91E-01
	40	6.82E-01	6.83E-01	6.91E-01	7.04E-01	6.62E-01
	100	7.33E-01	7.33E-01	7.36E-01	7.40E-01	7.24E-01

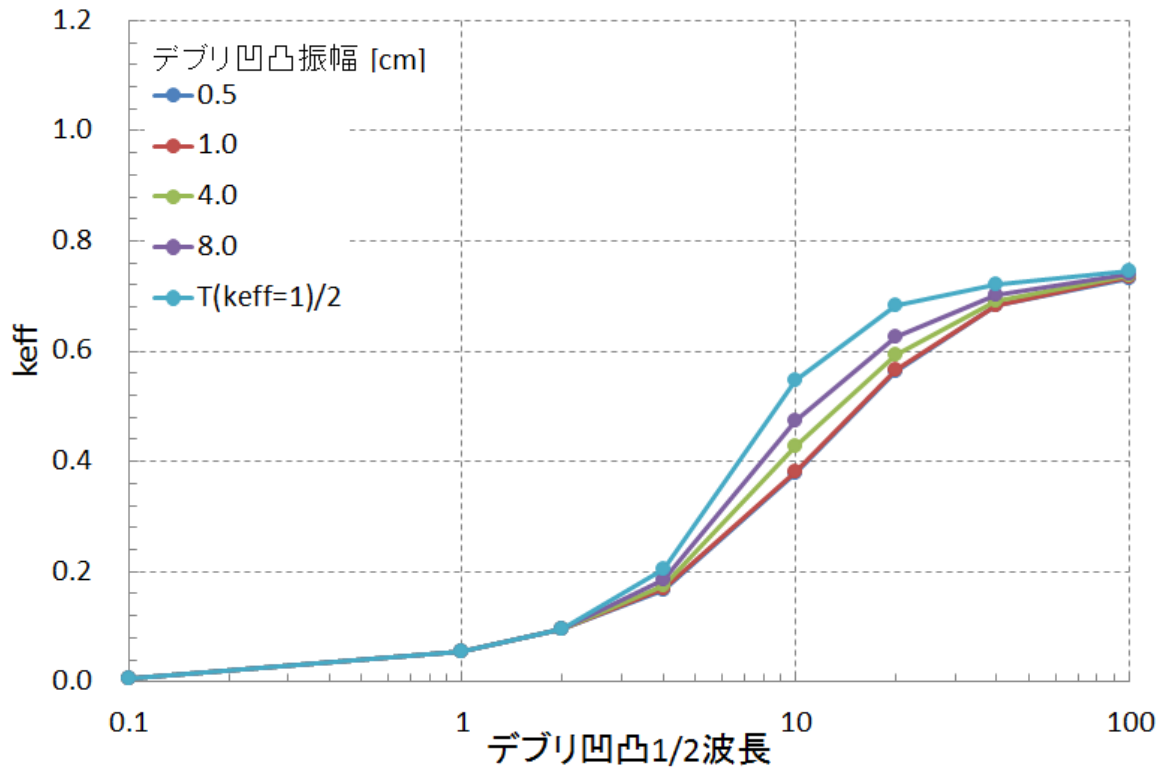


図 10.3-20 燃料条件 D2、凸型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関
(表 10.3-22)

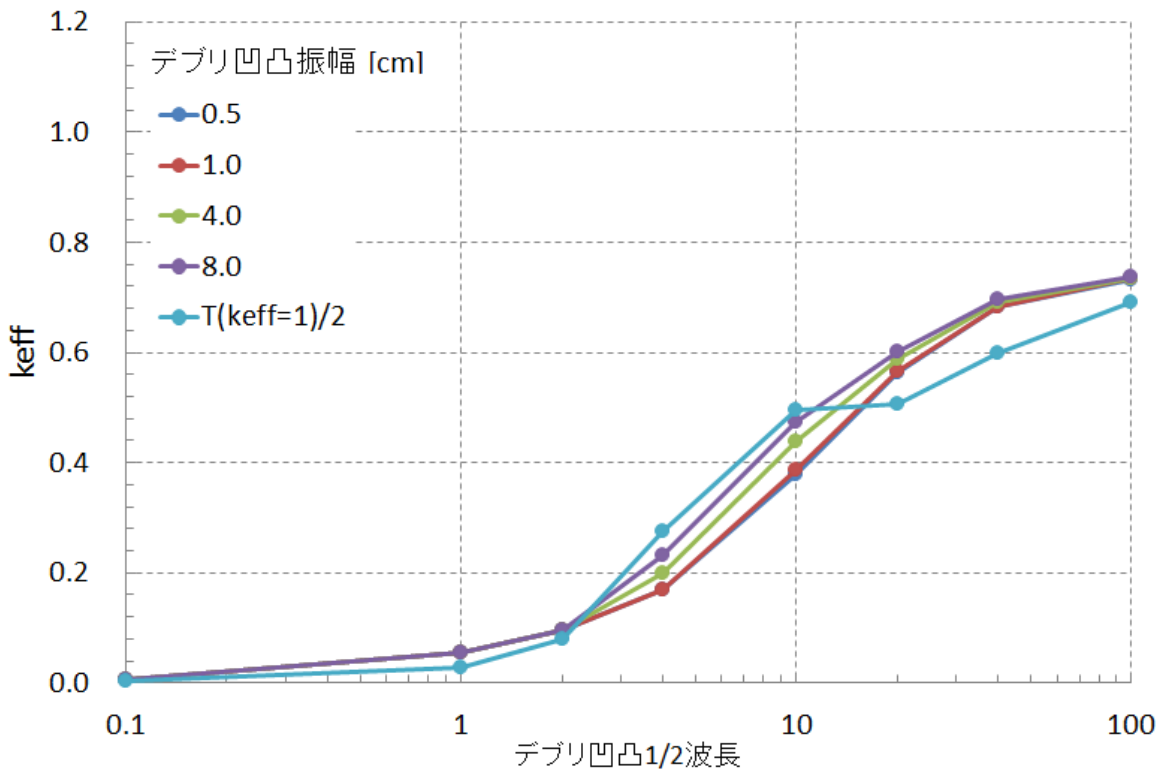


図 10.3-21 燃料条件 D2、凹型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関
(表 10.3-23)

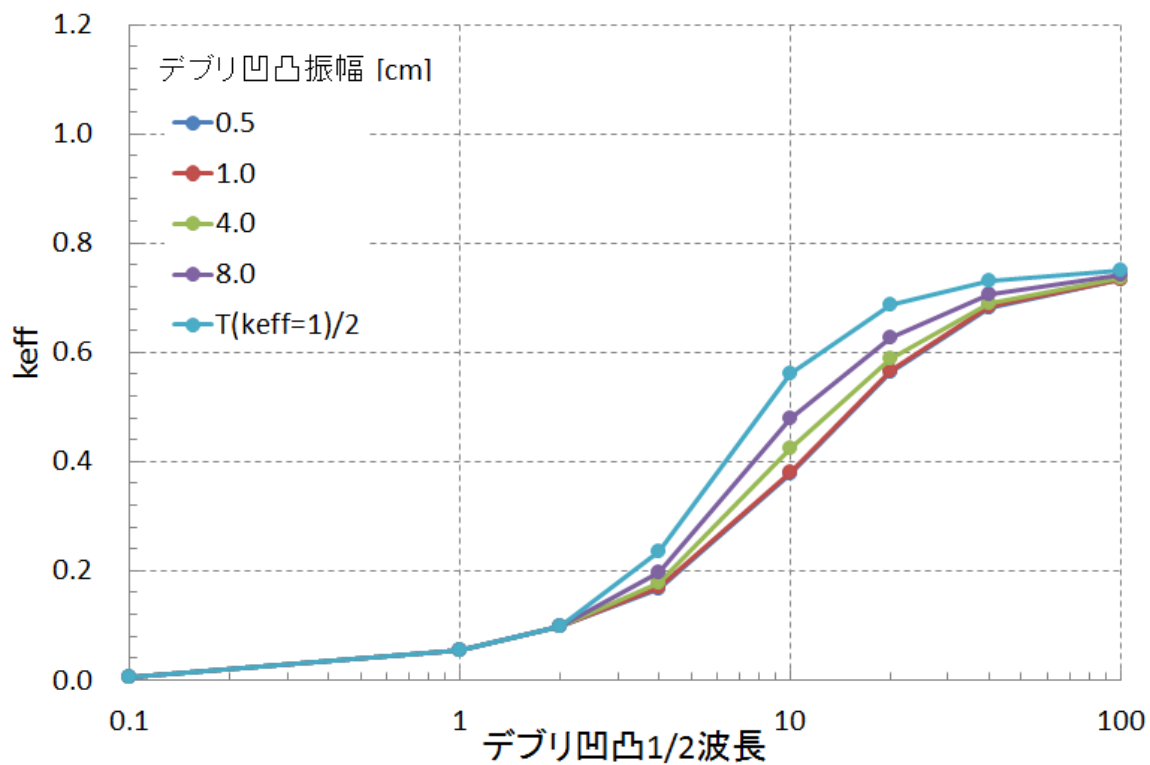


図 10.3-22 燃料条件 D2、半円凸型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関 (表 10.3-24)

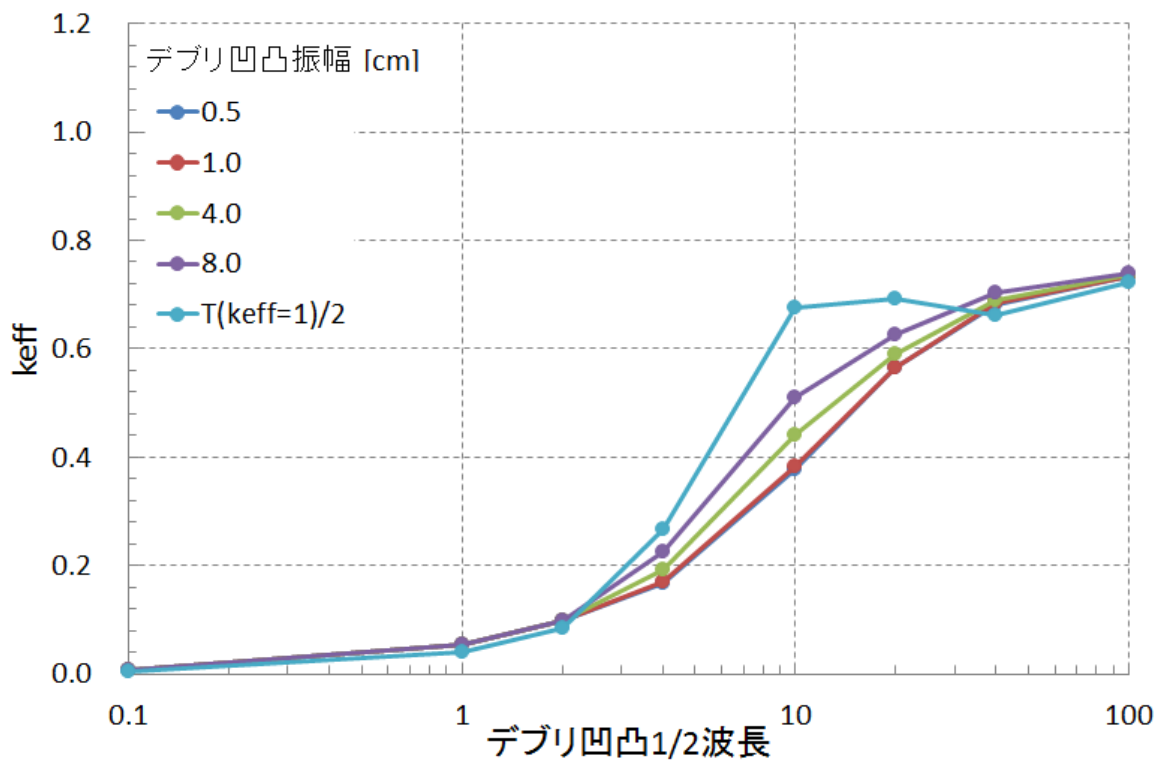


図 10.3-23 燃料条件 D2、半円凹型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関 (表 10.3-25)

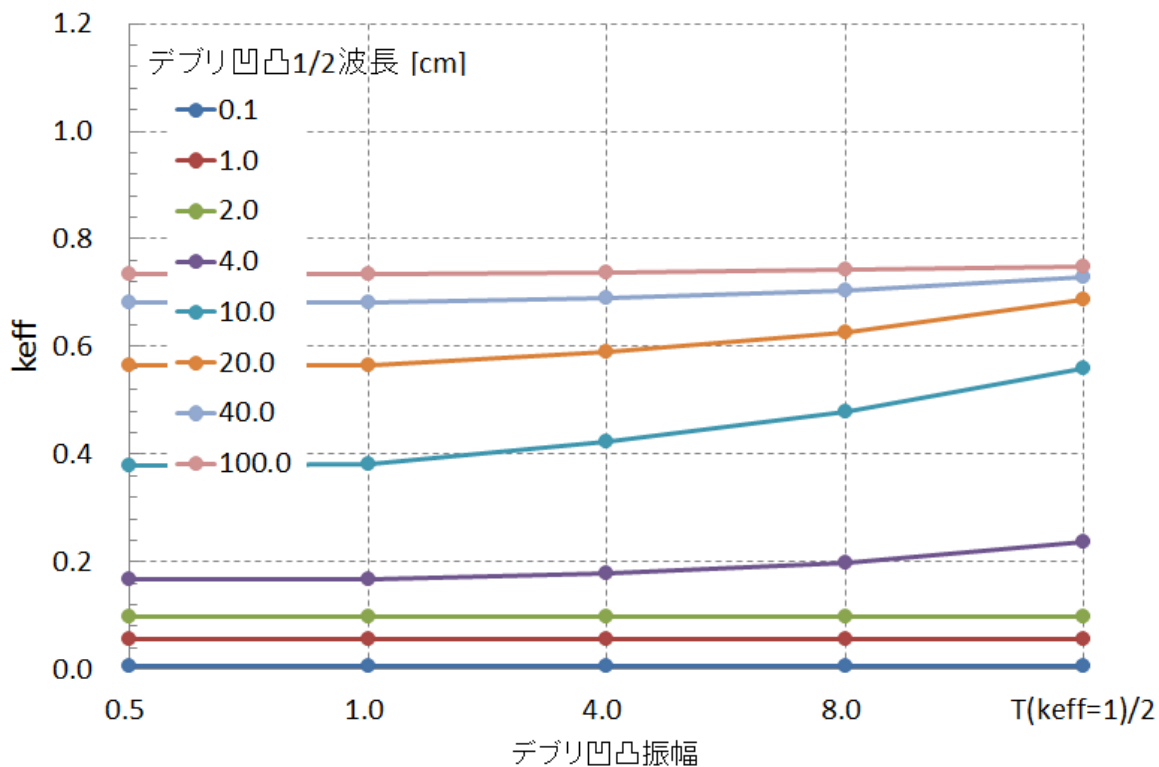


図 10.3-24 燃料条件 D2、凸型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関 (表 10.3-22)

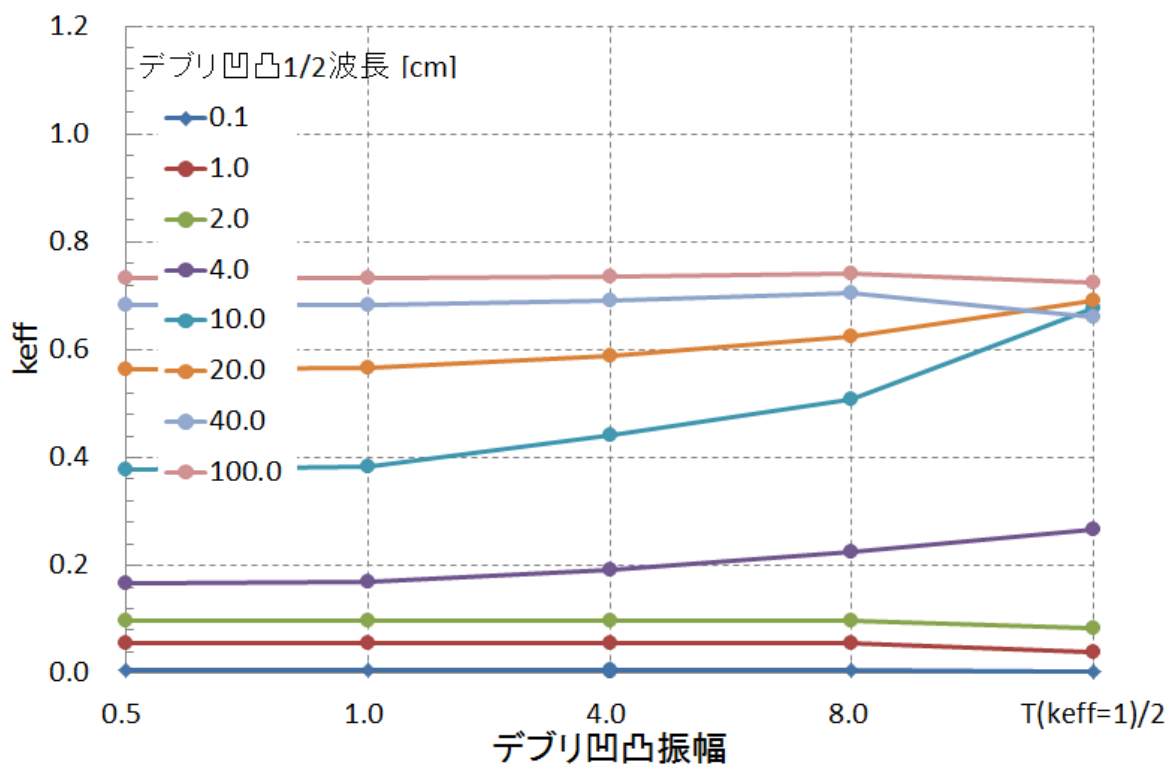


図 10.3-25 燃料条件 D2、凹型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関 (表 10.3-23)

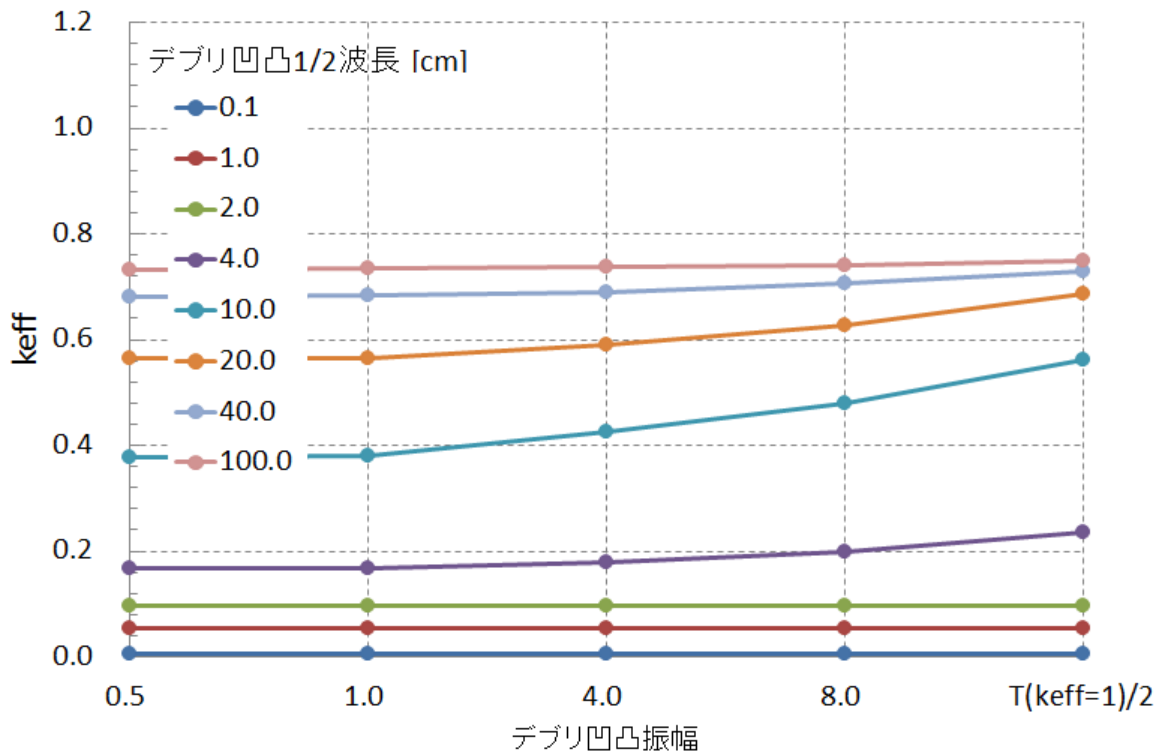


図 10.3-26 燃料条件 D2、半円凸型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関 (表 10.3-24)

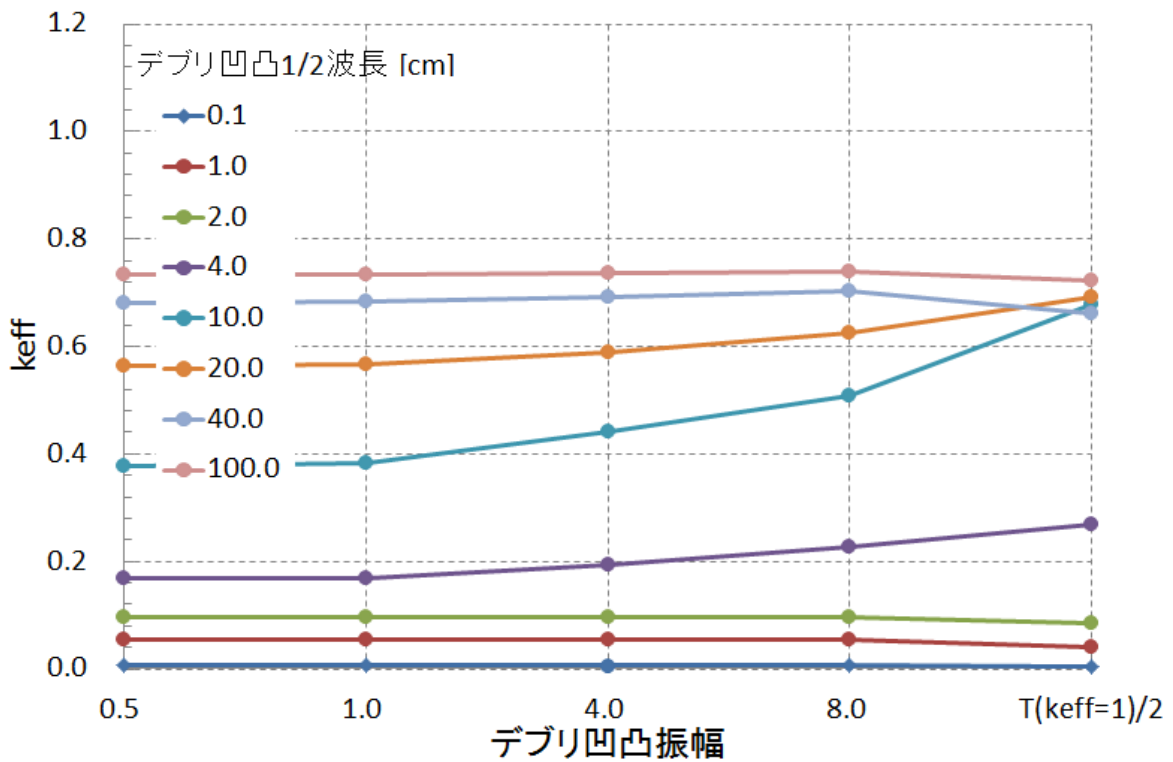


図 10.3-27 燃料条件 D2、半円凹型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関 (表 10.3-25)

表 10.3-26 燃料条件 D2、凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-22)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	9.57E-08	9.57E-08	9.57E-08	9.57E-08	9.57E-08
1/2 波長	1	-2.71E-06	-3.06E-06	-3.23E-06	-3.47E-06	-3.61E-06
[cm]	2	-8.53E-06	-1.10E-05	-1.50E-05	-1.56E-05	8.05E-05
	4	-5.52E-05	-2.21E-04	-6.76E-03	-1.90E-02	-3.78E-02
	10	-1.60E-03	-5.96E-03	-5.11E-02	-9.68E-02	-1.70E-01
	20	-9.13E-04	-3.24E-03	-3.07E-02	-6.24E-02	-1.21E-01
	40	-3.85E-04	-1.22E-03	-1.02E-02	-2.05E-02	-3.91E-02
	100	-2.74E-04	-6.28E-04	-3.80E-03	-6.92E-03	-1.14E-02

表 10.3-27 燃料条件 D2、平坦型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-23)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	-1.08E-07	-1.23E-07	-2.27E-07	-3.88E-07	-3.23E-03
1/2 波長	1	2.86E-07	-1.98E-06	-1.68E-05	-5.75E-05	-2.72E-02
[cm]	2	-6.44E-07	-8.54E-06	-6.67E-05	-1.97E-04	-1.74E-02
	4	2.56E-04	1.18E-03	3.26E-02	6.50E-02	1.09E-01
	10	2.88E-03	9.21E-03	6.14E-02	9.62E-02	1.19E-01
	20	1.12E-03	3.68E-03	2.51E-02	3.78E-02	-5.67E-02
	40	3.48E-04	1.15E-03	8.45E-03	1.39E-02	-8.27E-02
	100	9.44E-05	2.79E-04	2.46E-03	4.28E-03	-4.09E-02

表 10.3-28 燃料条件 D2、凸型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-22、表 10.3-23)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	-1.23E-08	-2.71E-08	-1.31E-07	-2.92E-07	-3.23E-03
	1	-2.43E-06	-5.03E-06	-2.00E-05	-6.10E-05	-2.72E-02
	2	-9.17E-06	-1.95E-05	-8.17E-05	-2.13E-04	-1.73E-02
	4	2.00E-04	9.54E-04	2.58E-02	4.60E-02	7.09E-02
	10	1.28E-03	3.25E-03	1.03E-02	-5.29E-04	-5.08E-02
	20	2.12E-04	4.47E-04	-5.69E-03	-2.46E-02	-1.77E-01
	40	-3.70E-05	-6.51E-05	-1.76E-03	-6.56E-03	-1.22E-01
	100	-1.79E-04	-3.49E-04	-1.34E-03	-2.64E-03	-5.23E-02

表 10.3-29 燃料条件 D2、半円凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-24)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	-2.38E-06	-2.38E-06	-2.38E-06	-2.38E-06	-2.38E-06
	1	-9.71E-05	-9.75E-05	-9.78E-05	-9.78E-05	-1.03E-04
	2	-2.06E-04	-2.07E-04	-2.11E-04	-1.29E-04	-2.16E-04
	4	-4.65E-05	-2.15E-04	-9.68E-03	-2.98E-02	-6.83E-02
	10	-1.16E-03	-4.50E-03	-4.82E-02	-1.02E-01	-1.84E-01
	20	-6.05E-04	-2.18E-03	-2.59E-02	-6.29E-02	-1.25E-01
	40	-2.69E-04	-8.50E-04	-9.02E-03	-2.34E-02	-4.84E-02
	100	-2.20E-04	-4.87E-04	-3.48E-03	-8.81E-03	-1.60E-02

表 10.3-30 燃料条件 D2、平坦型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-25)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	2.37E-06	2.35E-06	2.26E-06	2.09E-06	-1.63E-03
1/2 波長 [cm]	1	9.96E-05	9.76E-05	8.02E-05	4.37E-05	-1.51E-02
	2	1.99E-04	1.92E-04	1.35E-04	7.20E-06	-1.32E-02
	4	1.92E-04	7.57E-04	2.53E-02	5.78E-02	9.96E-02
	10	2.08E-03	6.84E-03	6.46E-02	1.33E-01	3.01E-01
	20	7.44E-04	2.52E-03	2.66E-02	6.20E-02	1.28E-01
	40	2.36E-04	8.02E-04	8.95E-03	2.23E-02	-1.98E-02
	100	7.41E-05	2.04E-04	2.68E-03	7.35E-03	-9.60E-03

表 10.3-31 燃料条件 D2、半円凸型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-24、表 10.3-25)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	-1.46E-08	-2.75E-08	-1.25E-07	-2.92E-07	-1.63E-03
1/2 波長 [cm]	1	2.51E-06	1.01E-07	-1.77E-05	-5.41E-05	-1.52E-02
	2	-7.03E-06	-1.54E-05	-7.61E-05	-1.22E-04	-1.35E-02
	4	1.46E-04	5.42E-04	1.56E-02	2.80E-02	3.12E-02
	10	9.26E-04	2.34E-03	1.63E-02	3.05E-02	1.16E-01
	20	1.39E-04	3.36E-04	7.33E-04	-9.51E-04	2.92E-03
	40	-3.24E-05	-4.84E-05	-7.18E-05	-1.09E-03	-6.82E-02
	100	-1.46E-04	-2.82E-04	-8.03E-04	-1.46E-03	-2.56E-02

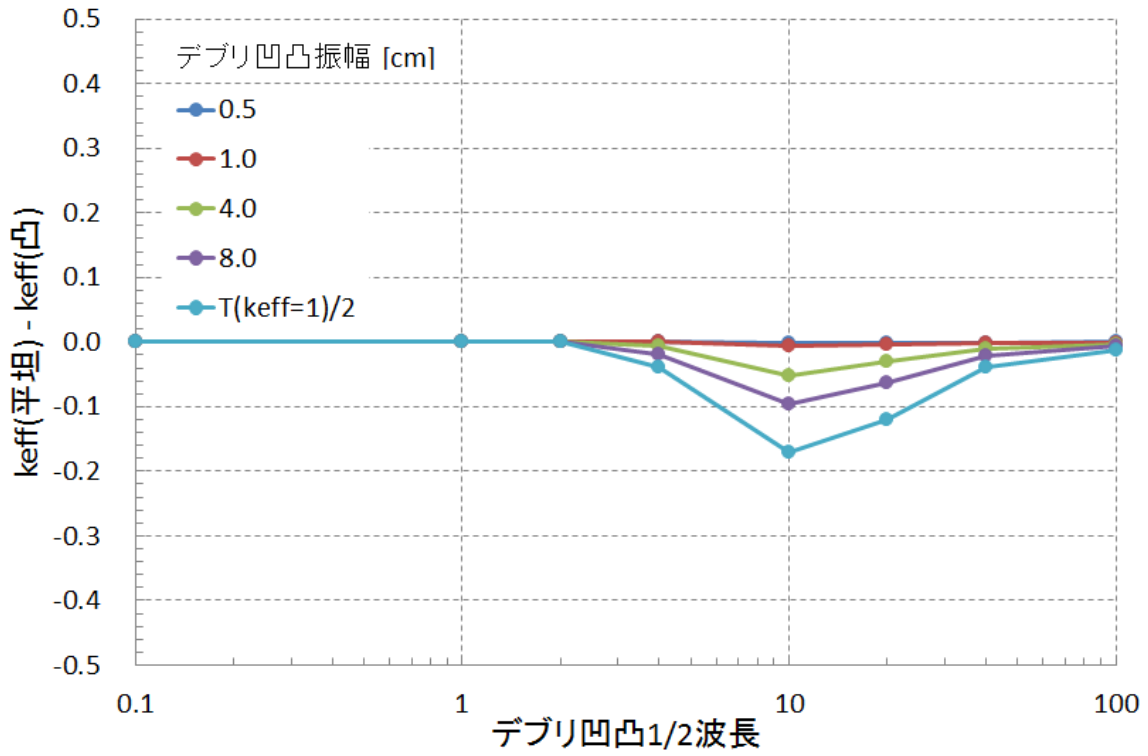


図 10.3-28 燃料条件 D2、凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-26)

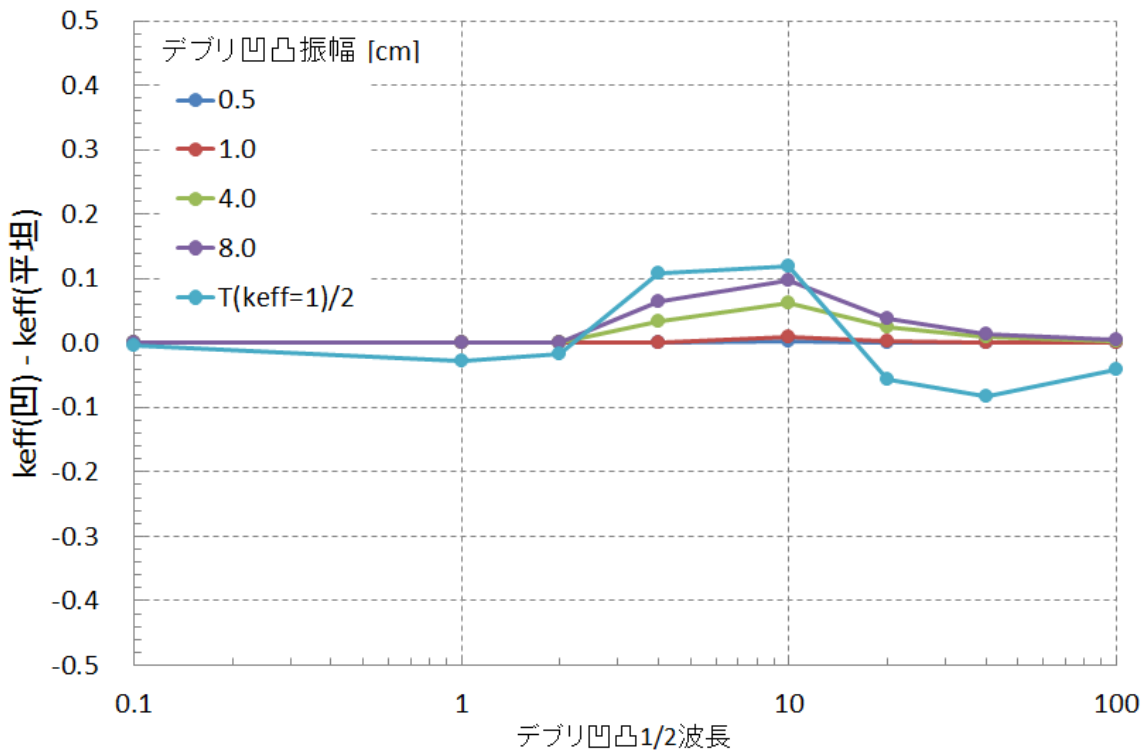


図 10.3-29 燃料条件 D2、平坦型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-27)

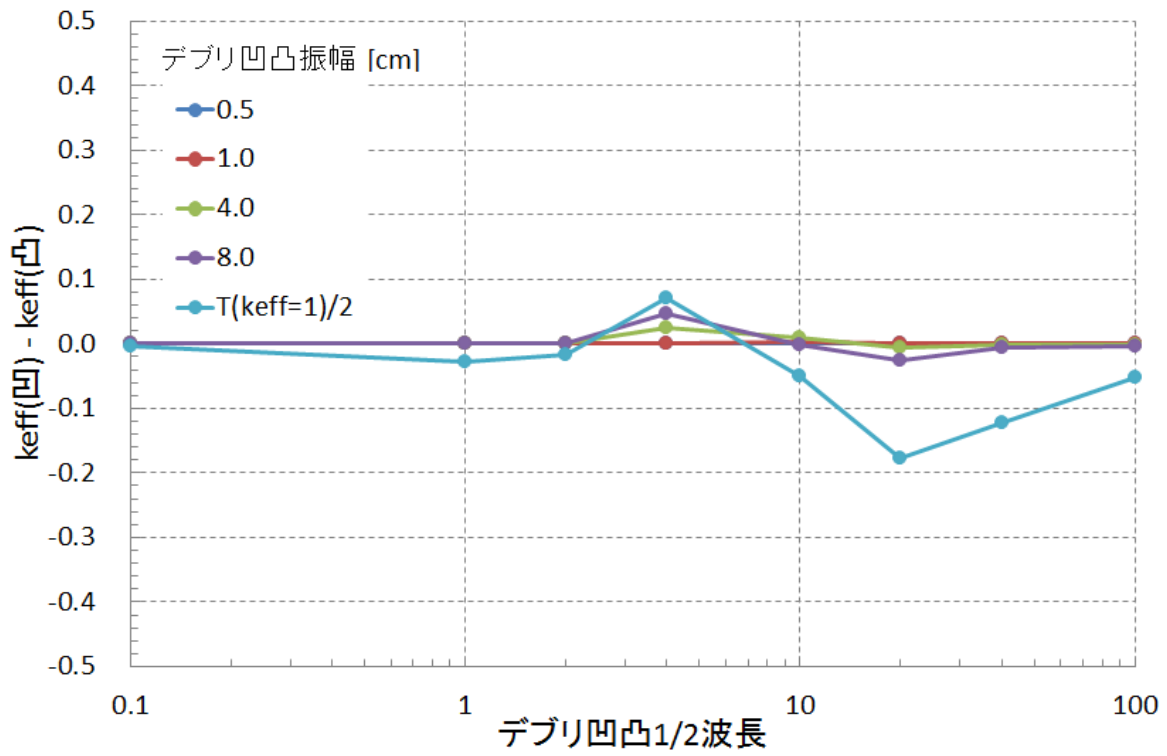


図 10.3-30 燃料条件 D2、凸型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-28)

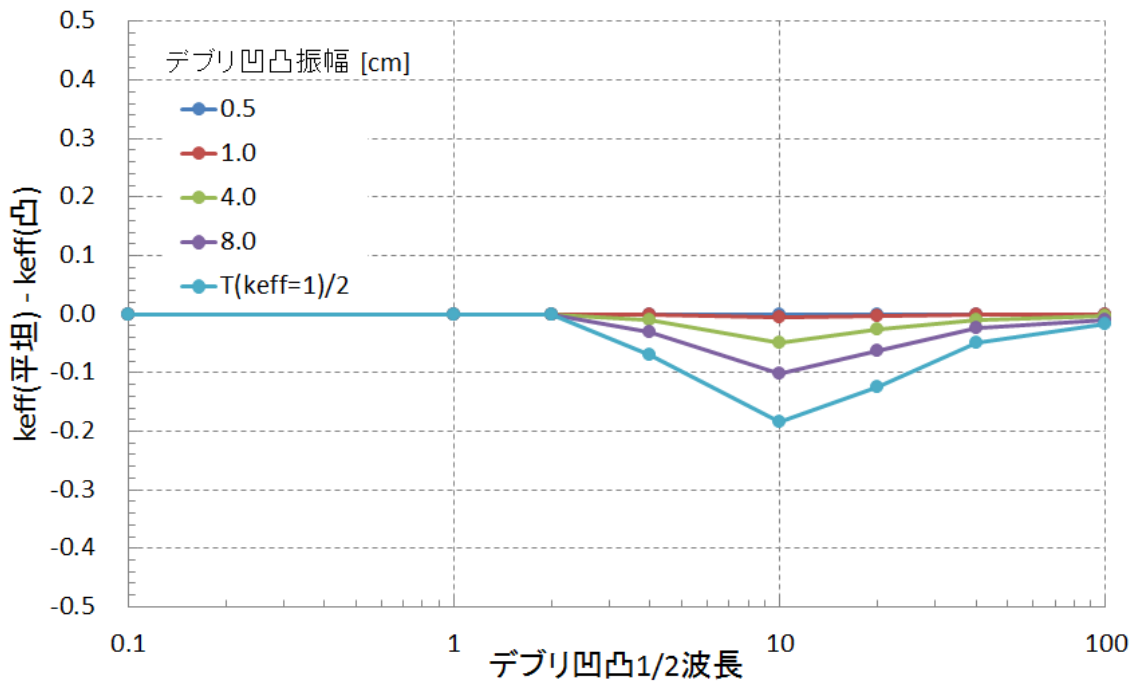


図 10.3-31 燃料条件 D2、半円凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-29)

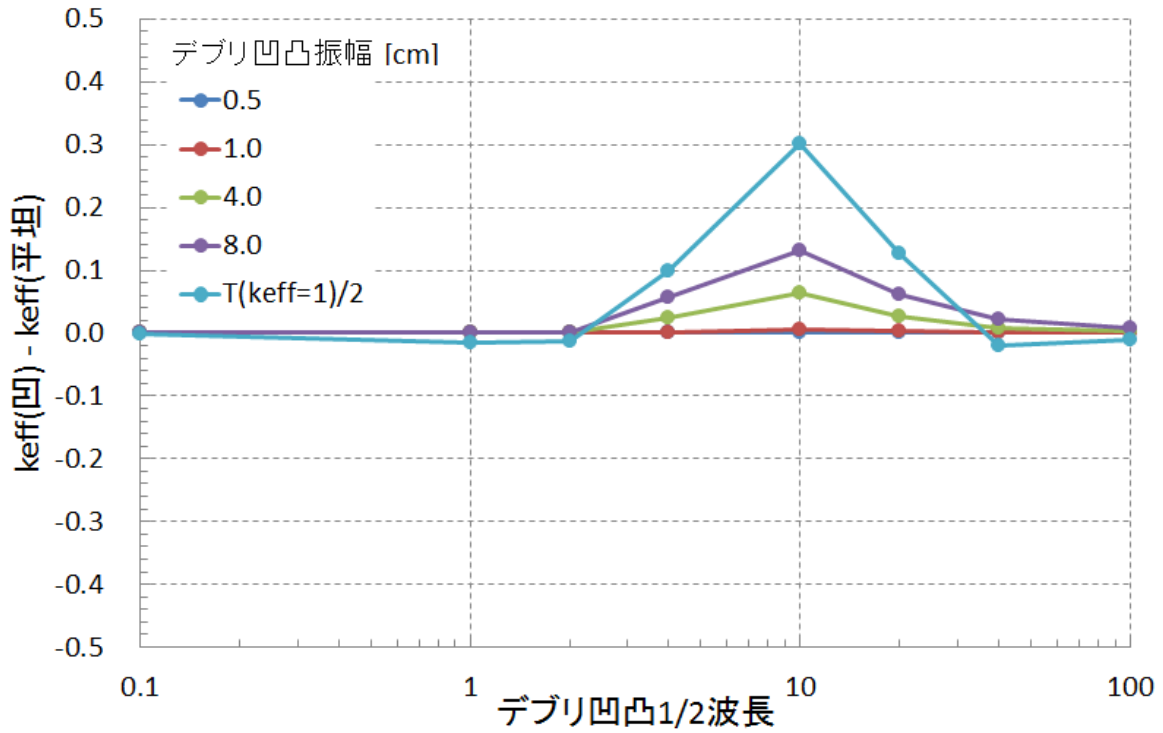


図 10.3-32 燃料条件 D2、平坦型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-30)

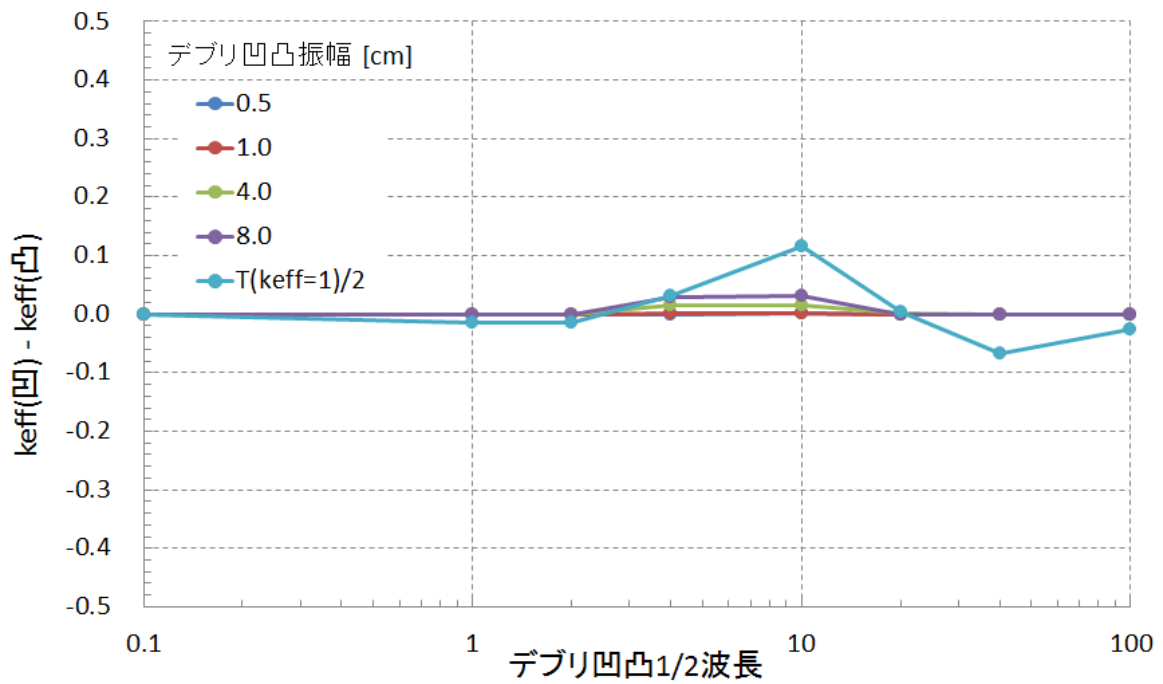


図 10.3-33 燃料条件 D2、半円凸型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-31)

3) 燃料条件 D3

燃料条件 D3 において、デブリ凹凸 1/2 波長、およびデブリ凹凸振幅を変化させた時の、凹凸型と半円凹凸型の k_{eff} の変化を表 10.3-32～表 10.3-35 に示す。また、1/2 波長と k_{eff} の相関を図 10.3-34～図 10.3-37、および振幅と k_{eff} の相関を図 10.3-38～図 10.3-41 に示す。さらに、形状変化による k_{eff} の差を表 10.3-36～表 10.3-41 および図 10.3-42～図 10.3-47 に示す。

表 10.3-32 燃料条件 D3、凸型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹 凸 1/2 波長 [cm]	0.1	2.63E-03	2.63E-03	2.63E-03	2.63E-03	2.63E-03
	1	2.37E-02	2.37E-02	2.37E-02	2.37E-02	2.37E-02
	2	4.41E-02	4.41E-02	4.41E-02	4.41E-02	4.41E-02
	4	9.57E-02	9.81E-02	1.19E-01	1.38E-01	1.36E-01
	10	3.47E-01	3.49E-01	3.84E-01	4.31E-01	4.88E-01
	20	6.75E-01	6.75E-01	6.76E-01	6.79E-01	7.29E-01
	40	8.84E-01	8.84E-01	8.84E-01	8.85E-01	8.86E-01
	100	9.72E-01	9.72E-01	9.72E-01	9.73E-01	9.74E-01

表 10.3-33 燃料条件 D3、凹型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹 凸 1/2 波長 [cm]	0.1	2.63E-03	2.63E-03	2.63E-03	2.63E-03	1.29E-03
	1	2.37E-02	2.37E-02	2.37E-02	2.37E-02	1.20E-02
	2	4.41E-02	4.41E-02	4.41E-02	4.41E-02	4.04E-02
	4	9.48E-02	9.68E-02	1.23E-01	1.16E-01	1.77E-01
	10	3.47E-01	3.48E-01	3.68E-01	3.87E-01	3.92E-01
	20	6.75E-01	6.75E-01	6.75E-01	6.75E-01	4.45E-01
	40	8.83E-01	8.83E-01	8.83E-01	8.82E-01	6.03E-01
	100	9.71E-01	9.71E-01	9.71E-01	9.70E-01	8.31E-01

表 10.3-34 燃料条件 D3、半円凸型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹 凸 1/2 波長 [cm]	0.1	2.63E-03	2.63E-03	2.63E-03	2.63E-03	2.63E-03
	1	2.38E-02	2.38E-02	2.38E-02	2.38E-02	2.38E-02
	2	4.42E-02	4.42E-02	4.42E-02	4.42E-02	4.64E-02
	4	9.56E-02	9.78E-02	1.22E-01	1.48E-01	2.02E-01
	10	3.47E-01	3.48E-01	3.63E-01	4.31E-01	4.65E-01
	20	6.75E-01	6.73E-01	6.76E-01	6.79E-01	7.23E-01
	40	8.84E-01	8.84E-01	8.84E-01	8.85E-01	8.86E-01
	100	9.72E-01	9.72E-01	9.72E-01	9.72E-01	9.74E-01

表 10.3-35 燃料条件 D3、半円凹型の TWODANT による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹 凸 1/2 波長 [cm]	0.1	2.63E-03	2.63E-03	2.63E-03	2.63E-03	1.95E-03
	1	2.38E-02	2.38E-02	2.38E-02	2.38E-02	1.73E-02
	2	4.42E-02	4.42E-02	4.42E-02	4.42E-02	4.20E-02
	4	9.47E-02	9.61E-02	1.19E-01	1.42E-01	1.76E-01
	10	3.47E-01	3.47E-01	3.72E-01	4.18E-01	5.87E-01
	20	6.75E-01	6.75E-01	6.75E-01	6.76E-01	6.63E-01
	40	8.83E-01	8.83E-01	8.83E-01	8.83E-01	7.14E-01
	100	9.71E-01	9.71E-01	9.71E-01	9.70E-01	8.87E-01

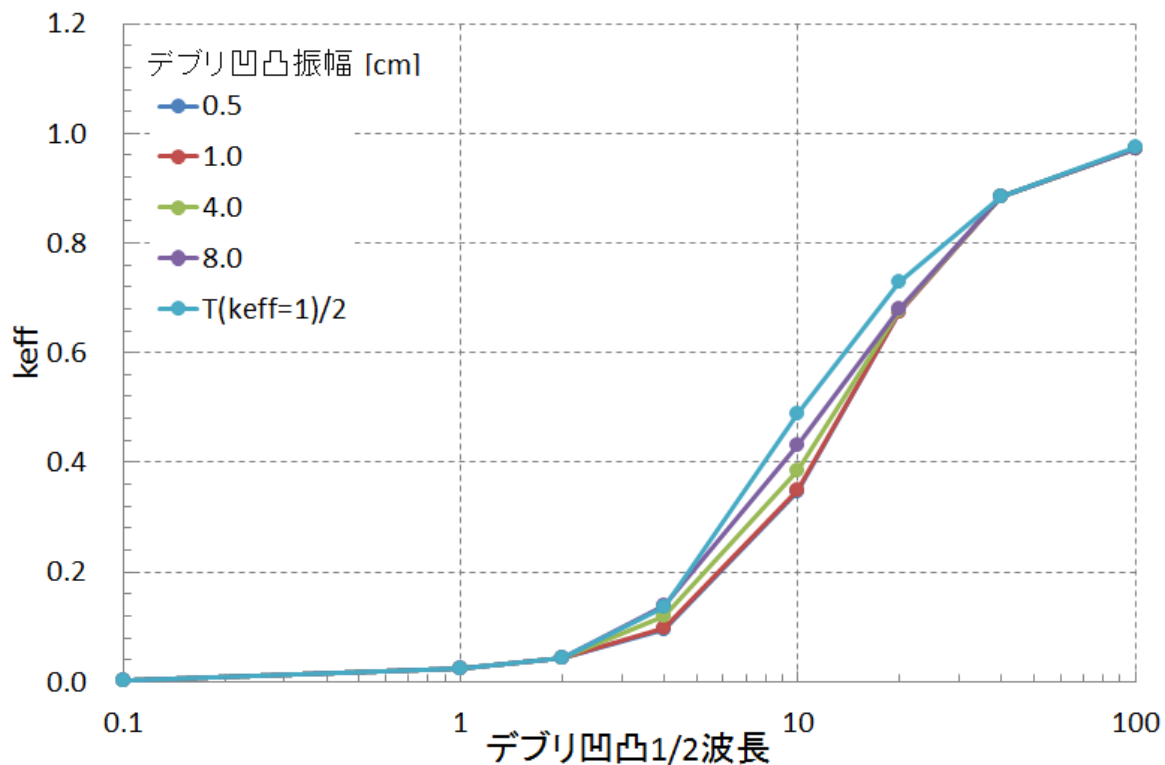


図 10.3-34 燃料条件 D3、凸型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関
(表 10.3-32)

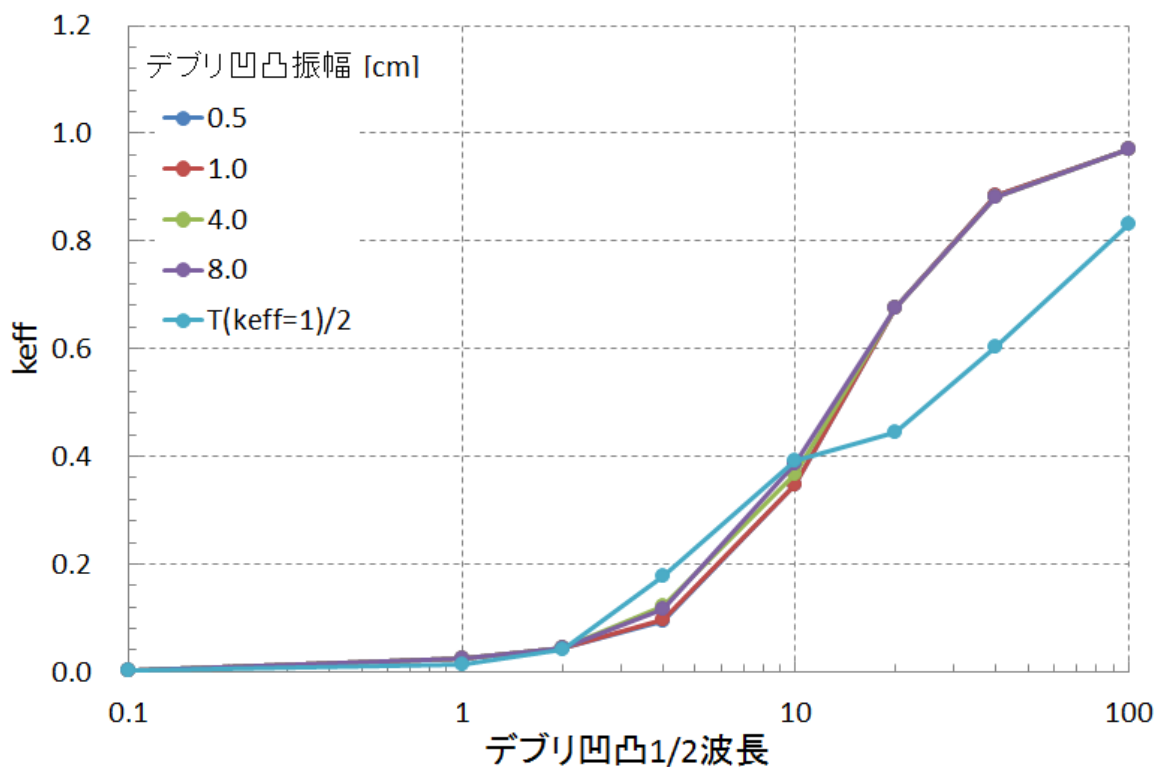


図 10.3-35 燃料条件 D3、凹型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関
(表 10.3-33)

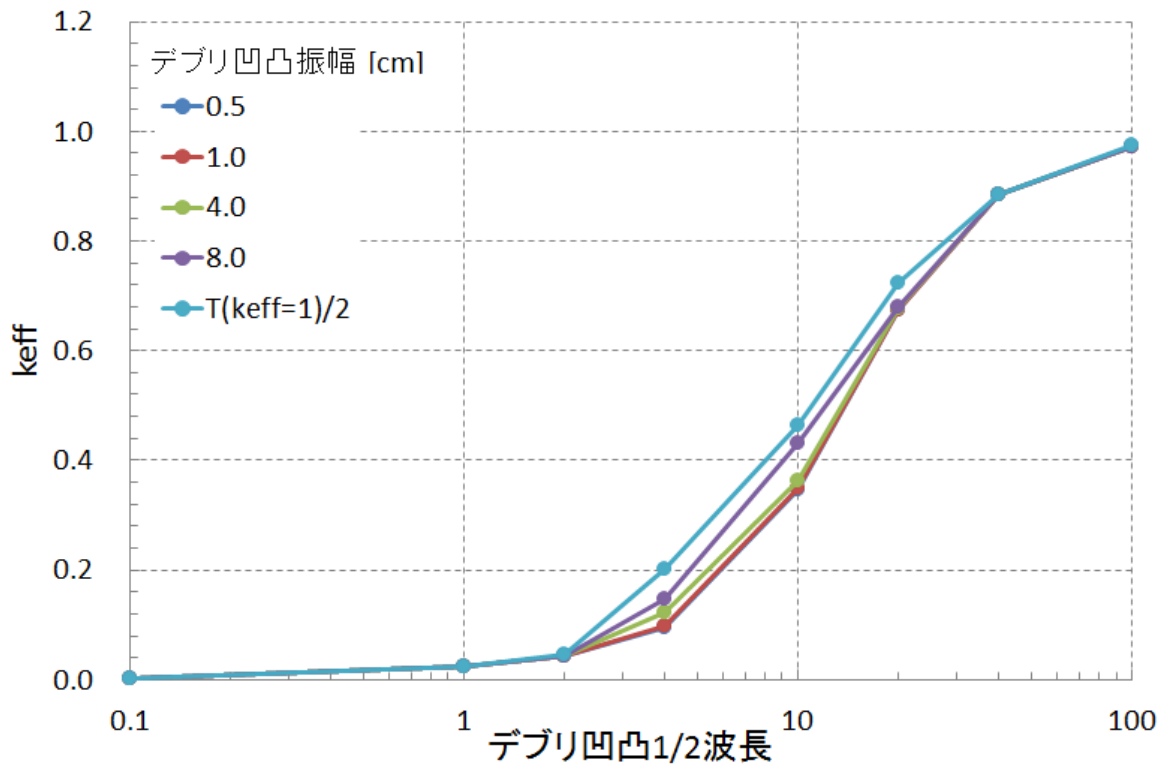


図 10.3-36 燃料条件 D3、半円凸型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関 (表 10.3-34)

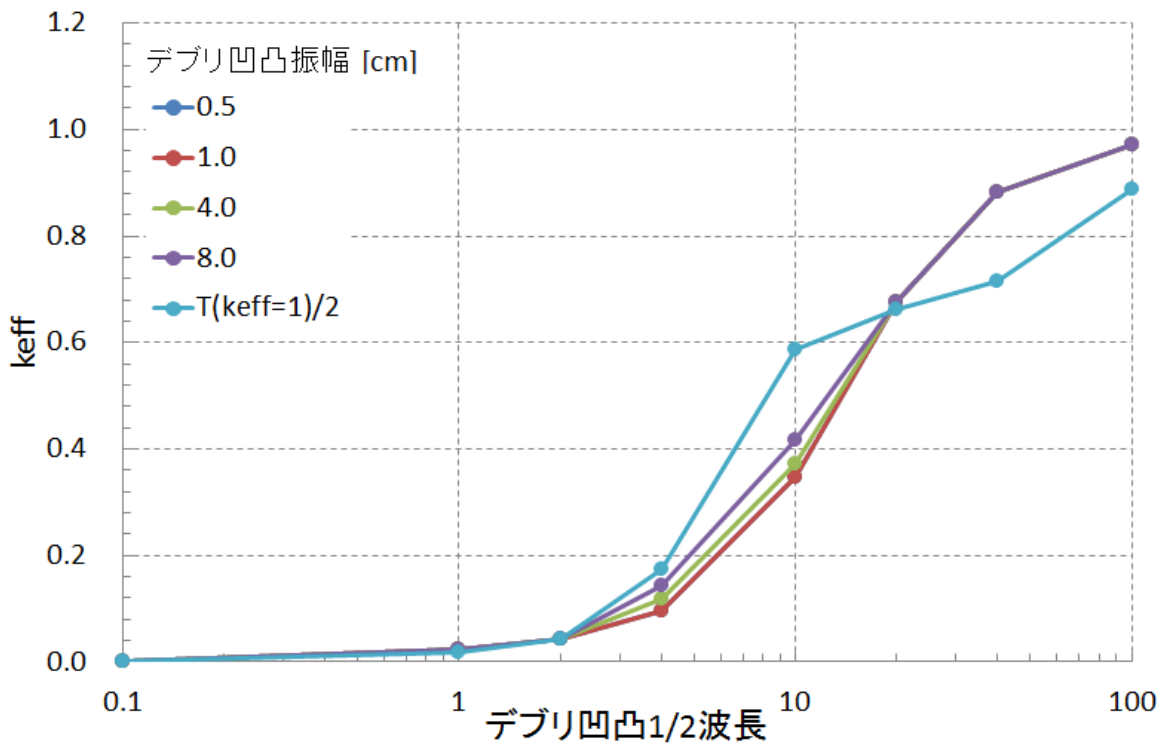


図 10.3-37 燃料条件 D3、半円凹型の TWODANT によるデブリ凹凸 1/2 波長と k_{eff} の相関 (表 10.3-35)

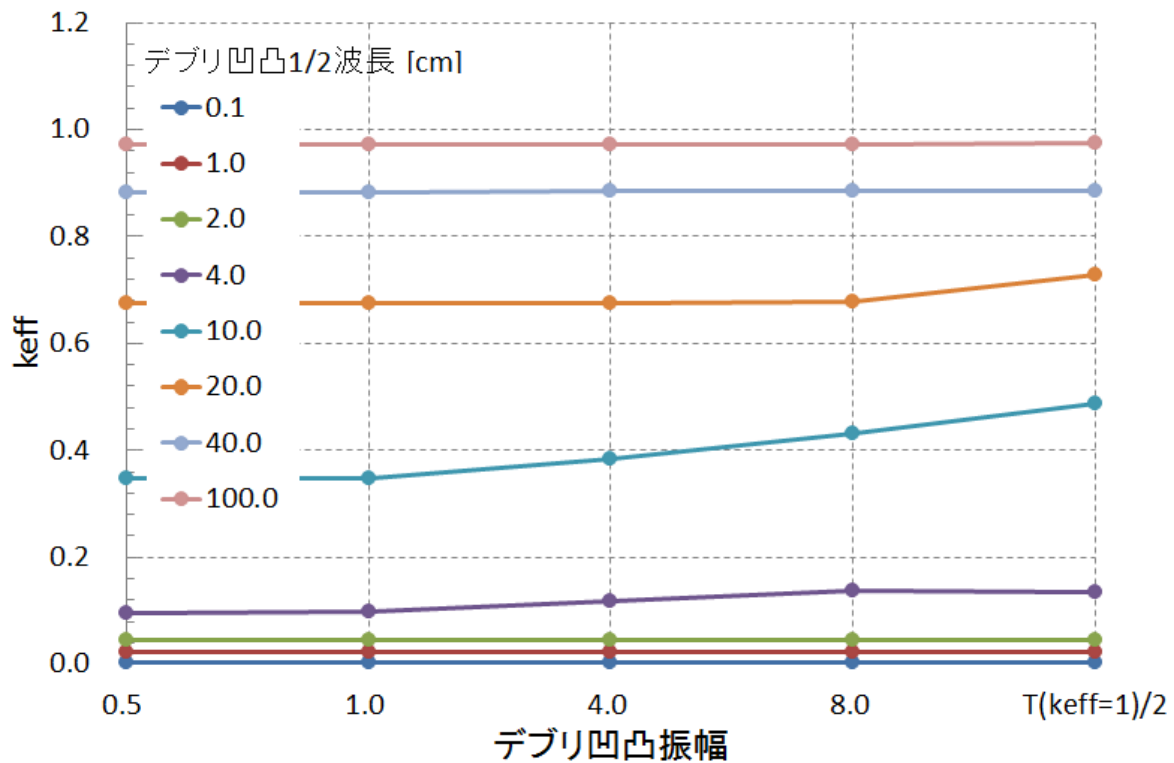


図 10.3-38 燃料条件 D3、凸型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関 (表 10.3-32)

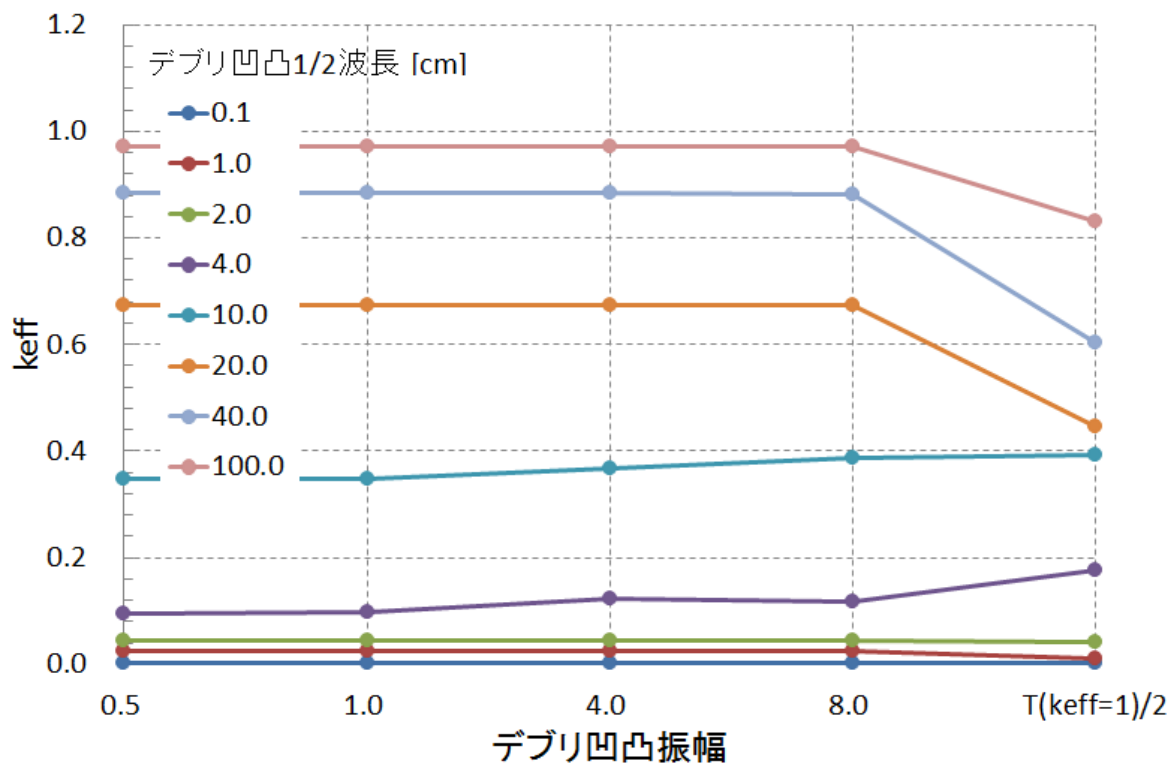


図 10.3-39 燃料条件 D3、凹型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関 (表 10.3-33)

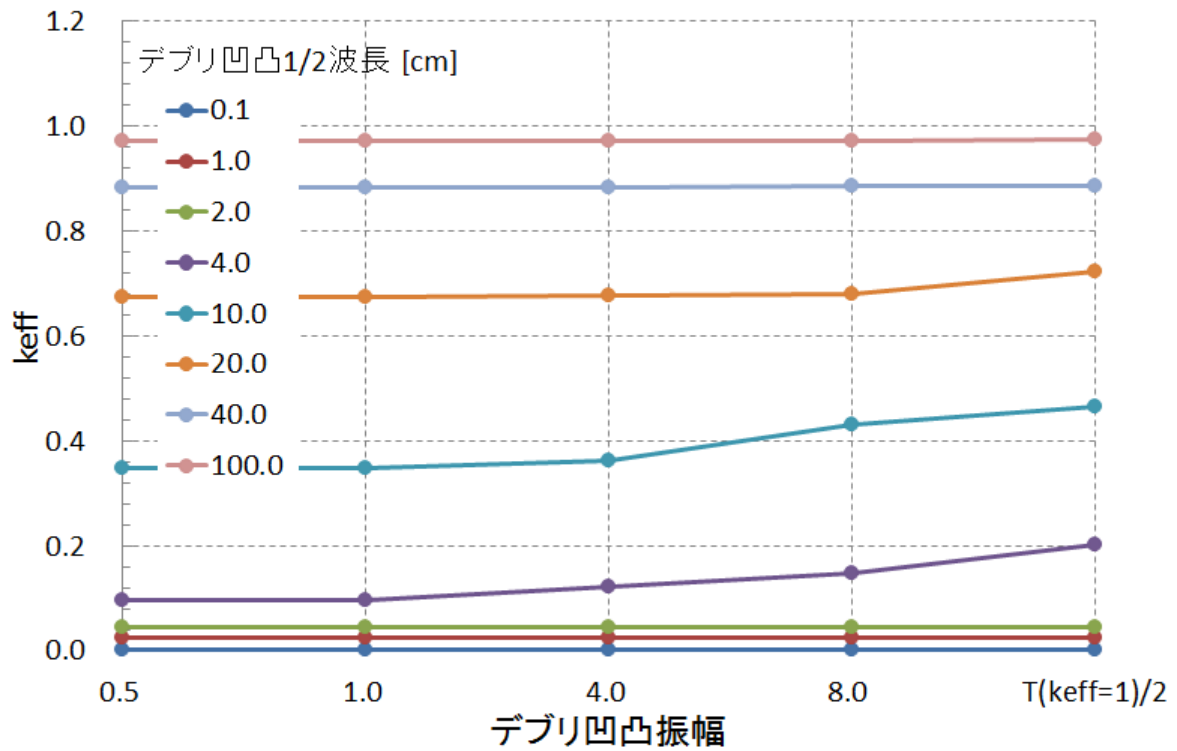


図 10.3-40 燃料条件 D3、半円凸型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関
(表 10.3-34)

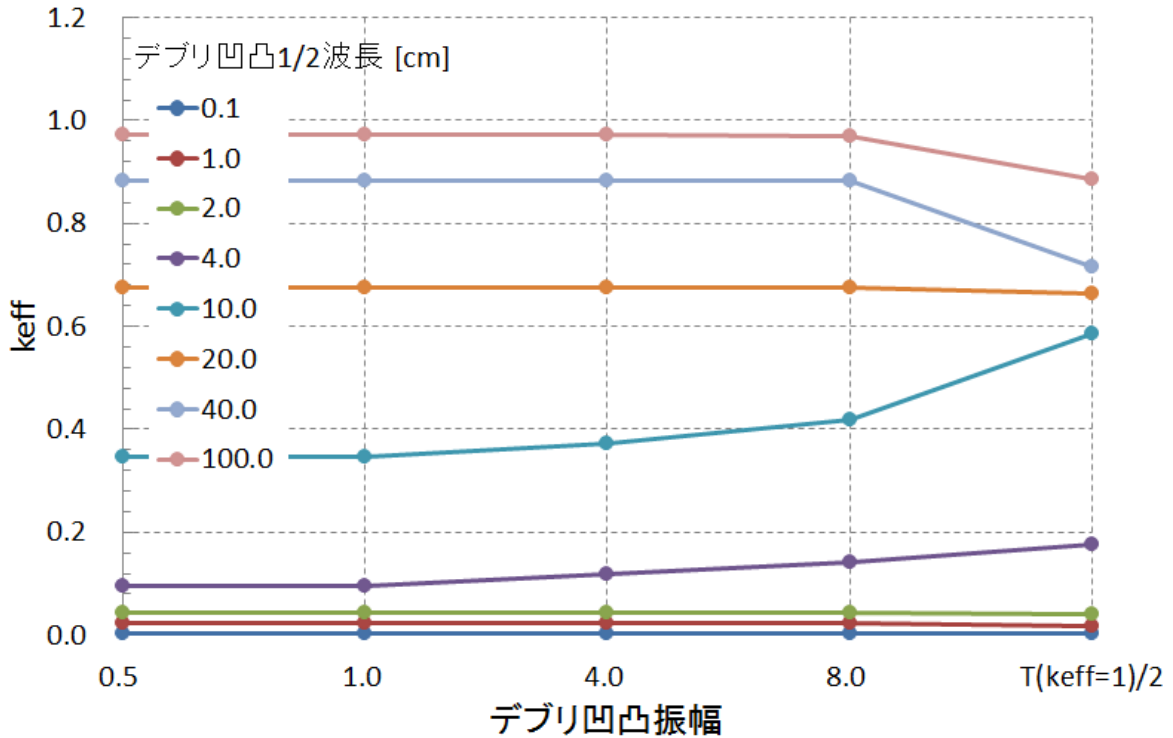


図 10.3-41 燃料条件 D3、半円凹型の TWODANT によるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関
(表 10.3-35)

表 10.3-36 燃料条件 D3、凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-32)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	2.25E-08	2.24E-08	-8.41E-07	2.24E-08	2.24E-08
	1	-5.30E-08	-7.70E-08	-9.10E-08	-8.80E-08	-2.37E-07
	2	2.59E-05	2.02E-05	3.04E-06	-2.21E-06	-5.59E-06
	4	-1.25E-03	-3.65E-03	-2.48E-02	-4.31E-02	-4.17E-02
	10	-5.51E-04	-2.18E-03	-3.80E-02	-8.48E-02	-1.42E-01
	20	-6.59E-05	-1.63E-04	-1.18E-03	-3.93E-03	-5.36E-02
	40	-4.32E-05	-1.20E-04	-6.18E-04	-1.14E-03	-2.31E-03
	100	-3.97E-05	-1.11E-04	-5.48E-04	-1.01E-03	-2.41E-03

表 10.3-37 燃料条件 D3、平坦型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-33)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	-2.50E-08	-2.68E-08	-3.38E-08	-4.59E-08	-1.34E-03
	1	1.50E-07	7.10E-08	-2.59E-07	-2.10E-06	-1.17E-02
	2	1.20E-07	-1.45E-07	-1.14E-06	-3.78E-06	-3.77E-03
	4	3.96E-04	2.38E-03	2.81E-02	2.20E-02	8.26E-02
	10	1.89E-04	1.09E-03	2.17E-02	4.07E-02	4.52E-02
	20	-2.92E-05	-3.31E-05	4.35E-05	-1.50E-04	-2.30E-01
	40	-8.00E-05	-1.33E-04	-4.74E-04	-1.14E-03	-2.81E-01
	100	-1.08E-04	-1.81E-04	-6.57E-04	-1.46E-03	-1.41E-01

表 10.3-38 燃料条件 D3、凸型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-32、表 10.3-33)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	-2.50E-09	-4.40E-09	-8.74E-07	-2.35E-08	-1.34E-03
	1	9.70E-08	-6.00E-09	-3.50E-07	-2.18E-06	-1.17E-02
	2	2.60E-05	2.00E-05	1.91E-06	-5.99E-06	-3.77E-03
	4	-8.51E-04	-1.27E-03	3.34E-03	-2.11E-02	4.08E-02
	10	-3.62E-04	-1.09E-03	-1.63E-02	-4.42E-02	-9.67E-02
	20	-9.51E-05	-1.96E-04	-1.14E-03	-4.09E-03	-2.84E-01
	40	-1.23E-04	-2.53E-04	-1.09E-03	-2.27E-03	-2.83E-01
	100	-1.48E-04	-2.92E-04	-1.20E-03	-2.47E-03	-1.43E-01

表 10.3-39 燃料条件 D3、半円凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-34)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	-1.06E-06	-1.12E-06	-1.06E-06	-1.06E-06	-1.06E-06
	1	-4.96E-05	-4.96E-05	-4.96E-05	-4.89E-05	-4.91E-05
	2	-1.18E-04	-1.18E-04	-1.21E-04	-7.29E-05	-2.27E-03
	4	-1.18E-03	-3.31E-03	-2.77E-02	-5.37E-02	-1.08E-01
	10	-5.20E-04	-1.61E-03	-1.68E-02	-8.43E-02	-1.19E-01
	20	-6.57E-05	1.77E-03	-9.12E-04	-4.02E-03	-4.76E-02
	40	-3.27E-05	-9.64E-05	-4.25E-04	-1.04E-03	-2.29E-03
	100	-2.56E-05	-8.17E-05	-4.57E-04	-8.91E-04	-2.35E-03

表 10.3-40 燃料条件 D3、平坦型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-11、表 10.3-35)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	8.40E-07	8.38E-07	8.31E-07	8.20E-07	-6.77E-04
	1	4.29E-05	4.47E-05	4.37E-05	3.85E-05	-6.38E-03
	2	9.35E-05	9.52E-05	7.60E-05	6.51E-05	-2.15E-03
	4	2.49E-04	1.63E-03	2.42E-02	4.80E-02	8.11E-02
	10	9.79E-05	6.76E-04	2.51E-02	7.11E-02	2.41E-01
	20	-3.00E-05	-4.00E-05	1.74E-04	9.33E-04	-1.20E-02
	40	-7.46E-05	-1.20E-04	-3.49E-04	-7.26E-04	-1.69E-01
	100	-1.00E-04	-1.60E-04	-5.25E-04	-1.10E-03	-8.43E-02

表 10.3-41 燃料条件 D3、半円凸型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-34、表 10.3-35)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	0.1	-2.18E-07	-2.80E-07	-2.26E-07	-2.37E-07	-6.78E-04
	1	-6.73E-06	-4.90E-06	-5.87E-06	-1.04E-05	-6.43E-03
	2	-2.42E-05	-2.27E-05	-4.54E-05	-7.79E-06	-4.42E-03
	4	-9.29E-04	-1.68E-03	-3.49E-03	-5.72E-03	-2.69E-02
	10	-4.22E-04	-9.37E-04	8.34E-03	-1.33E-02	1.22E-01
	20	-9.57E-05	1.73E-03	-7.38E-04	-3.08E-03	-5.96E-02
	40	-1.07E-04	-2.16E-04	-7.74E-04	-1.77E-03	-1.71E-01
	100	-1.26E-04	-2.42E-04	-9.82E-04	-2.00E-03	-8.66E-02

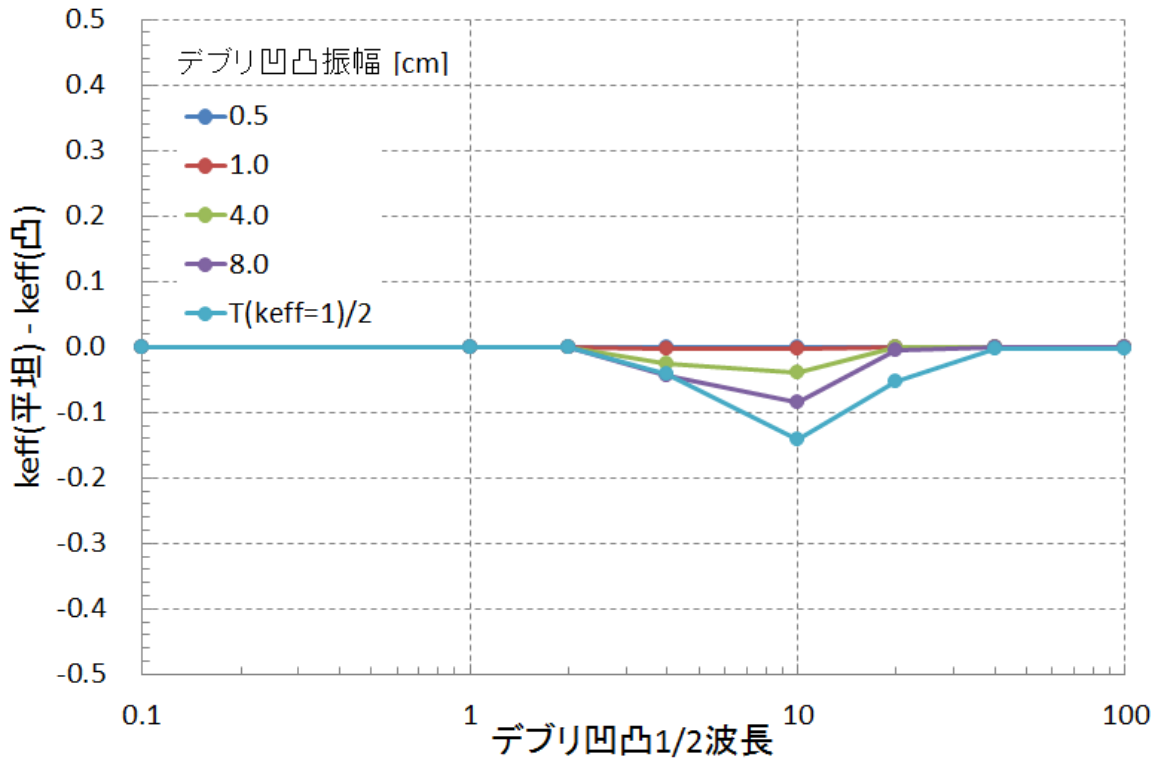


図 10.3-42 燃料条件 D3、凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-36)

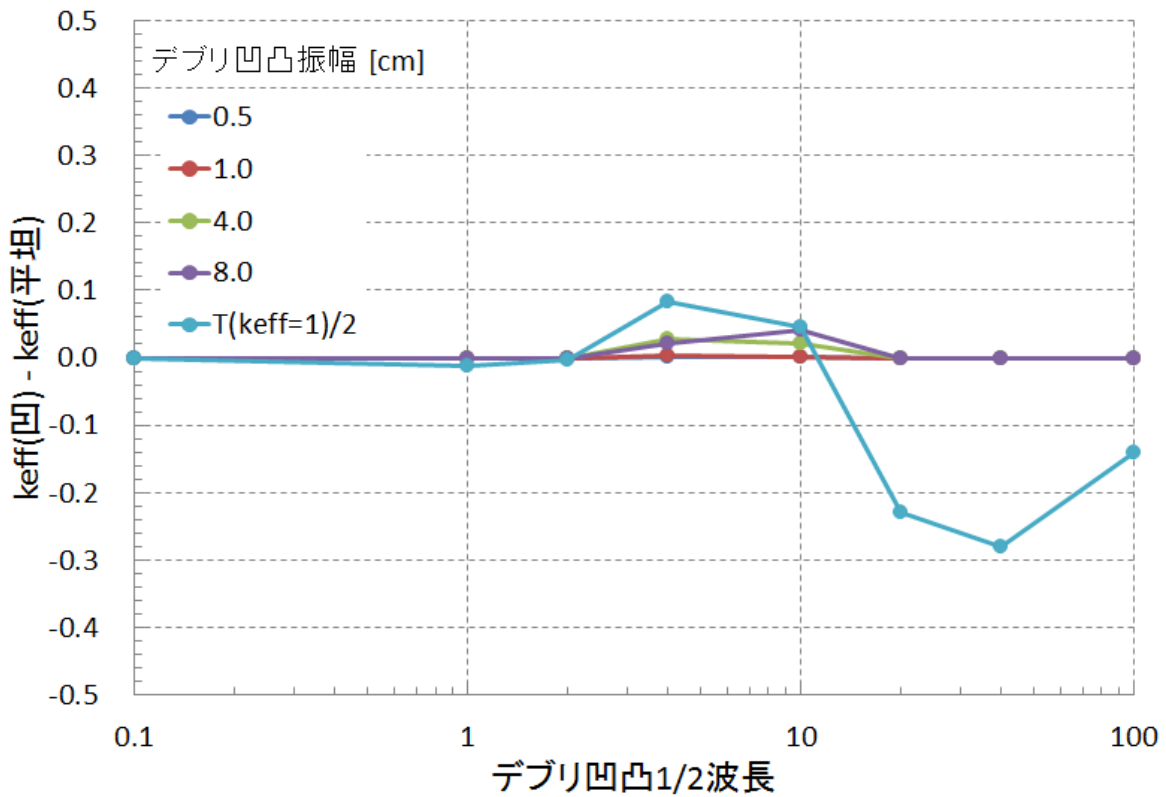


図 10.3-43 燃料条件 D3、平坦型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-37)

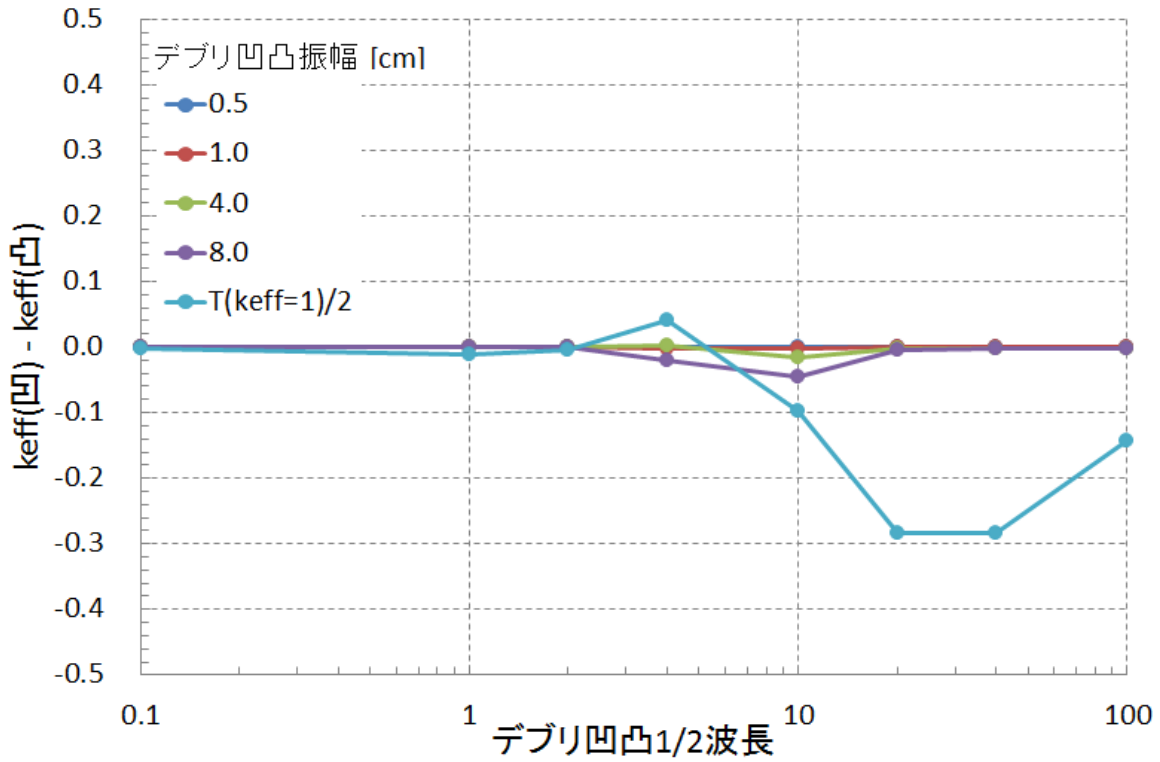


図 10.3-44 燃料条件 D3、凸型→凹型における k_{eff} の差(表 10.3-38)

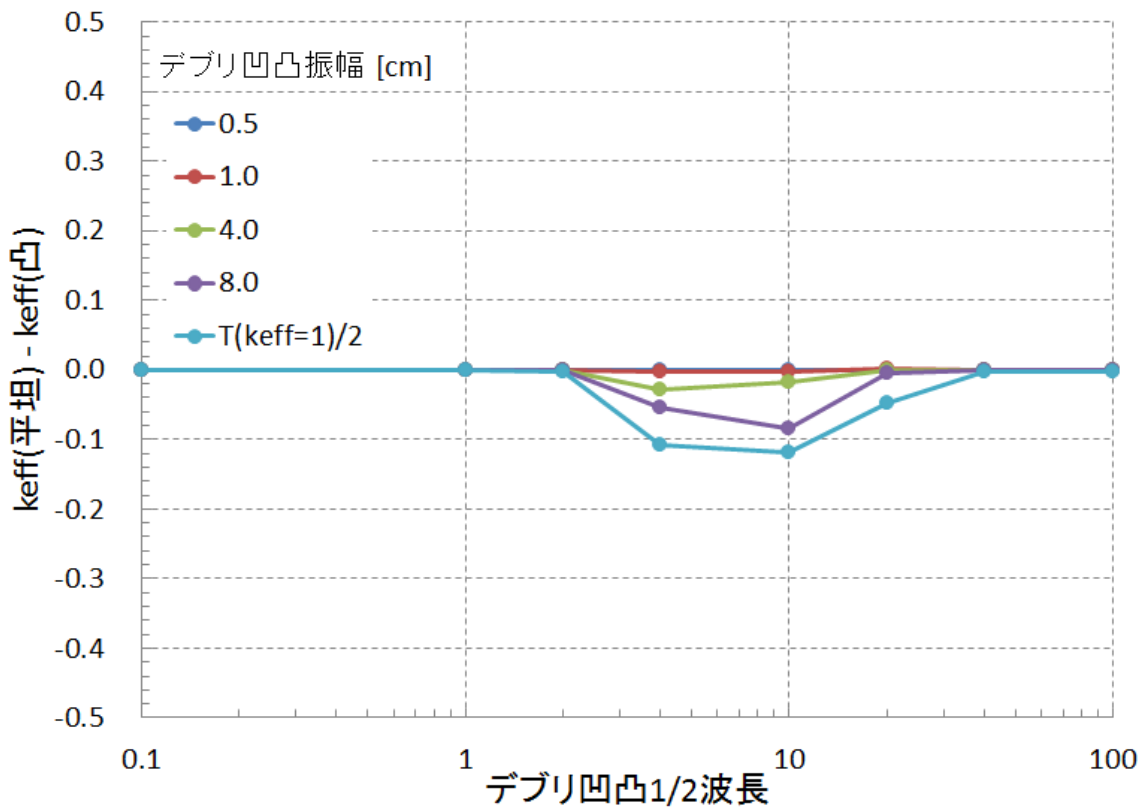


図 10.3-45 燃料条件 D3、半円凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.3-39)

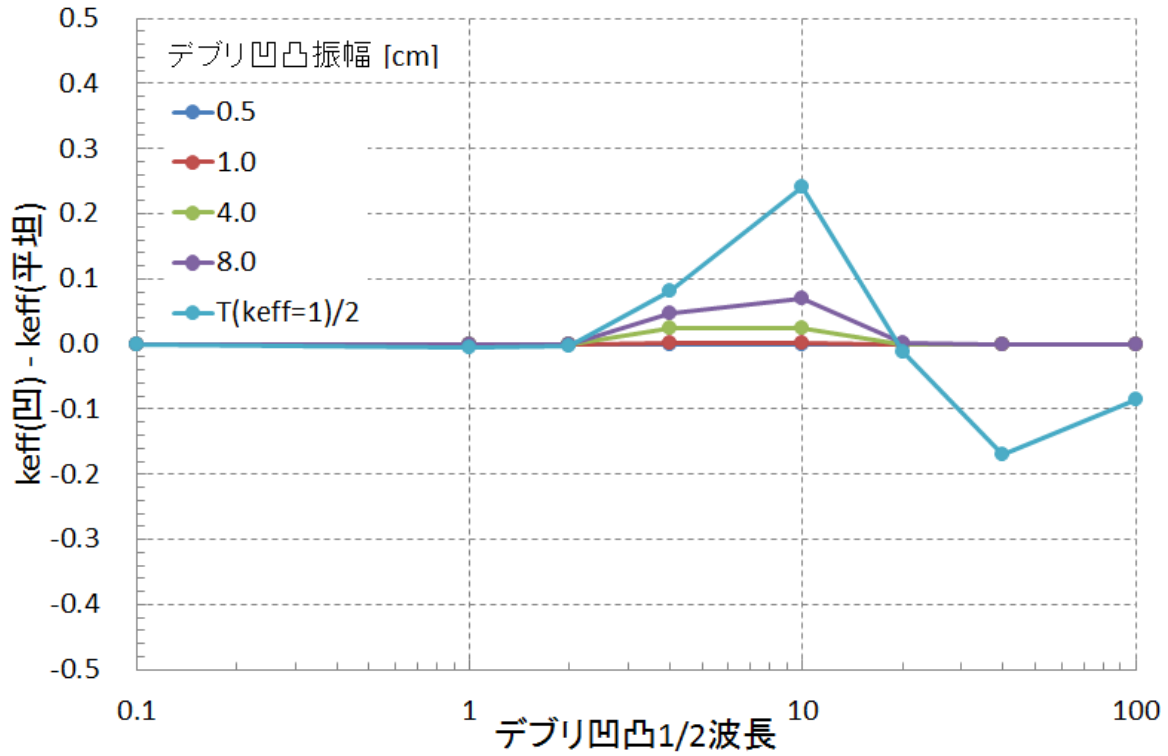


図 10.3-46 燃料条件 D3、平坦型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-40)

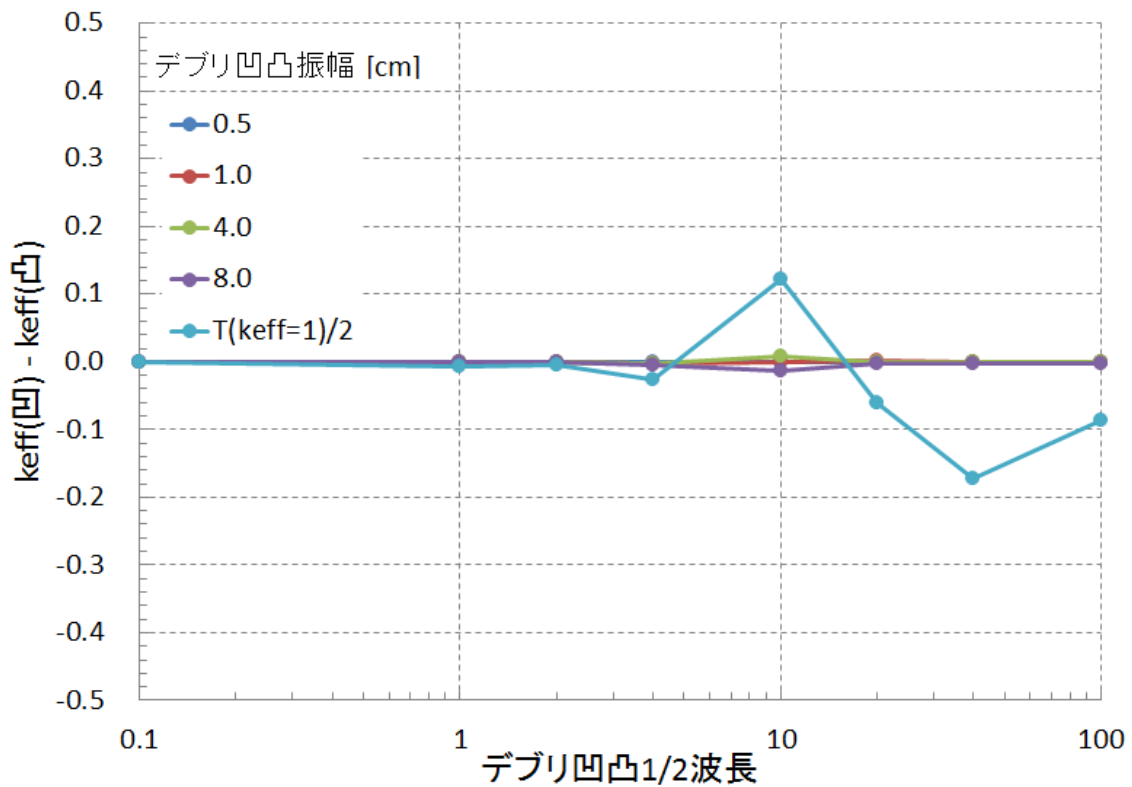


図 10.3-47 燃料条件 D3、半円凸型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.3-41)

(3) 検討

1) 燃料条件 D1

燃料条件 D1 では、凸型および半円凸型において、デブリ凹凸 1/2 波長が 40 cm または 100 cm の場合に k_{eff} が 1 以上になった。一方、平坦型による予備解析の段階で $k_{\text{eff}} = 1$ を満たさなかった 1/2 波長が 0.1 ~ 20 cm の場合や、燃料デブリの体積が減少する凹型および半円凹型では、1/2 波長の値によらず全ての組み合わせで k_{eff} が 1 未満であった。

各パラメータにおける k_{eff} の変化を比較すると、図 10.3-11 および図 10.3-13 から、1/2 波長が 100 cm の場合では、振幅が小さい時から k_{eff} が徐々に小さくなるが、20 cm または 40 cm の場合では、振幅が 0.5 ~ 8.0 cm では k_{eff} はほとんど変化せず、振幅が $T_{(k_{\text{eff}}=1)/2}$ となった時に k_{eff} が小さくなった。この現象を詳しく調査するため、1/2 波長が 40 cm と 100 cm の凹型において、振幅が 8.0 cm ~ $T_{(k_{\text{eff}}=1)/2}$ 間の k_{eff} の変化を調べ、得られた結果を表 10.3-42 および図 10.3-48 に示す。1/2 波長が 40 cm では、振幅が大きくなるほど k_{eff} が急激に小さくなっているが、1/2 波長が 100 cm では、ほぼ一定の割合で k_{eff} が小さくなっている。この結果から、1/2 波長 40 cm と 100 cm では、デブリ中の核分裂反応の分布が異なっていると考えられる。表 10.3-11 に示したように、1/2 波長が 40 cm の時は $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ が 58.54 cm ある一方、1/2 波長が 100 cm では厚さが 27.93 cm と縦横比が約 4 : 1 と平らな形状である。よって、1/2 波長が 40 cm では中心の核分裂数が比較的多く、一方 1/2 波長が 100 cm では比較的均一であると考えられる。この結果、凹型によって中性子増倍に寄与する中心部が除去された 1/2 波長 40 cm の k_{eff} は急激に小さくなったと考えられる。

形状変化による k_{eff} の変化は、平坦型→凹型と平坦型→半円凹型、または凸型→凹型と半円凸型→半円凹型では、1/2 波長が 100 cm、または振幅が $T_{(k_{\text{eff}}=1)/2}$ の場合のみ k_{eff} の変化が大きくなり、他の波長・振幅では差はほとんど無かった。凸型→平坦型および半円では、1/2 波長が 4、10 cm、 $T_{(k_{\text{eff}}=1)/2}$ の場合は変化が大きくなるが、20、40 cm の場合は前者よりも小さくなった。

表 10.3-42 凹型デブリ凹凸 1/2 波長 40cm および 100cm におけるデブリ凹凸振幅と k_{eff}

デブリ凹凸振幅[cm]	デブリ凹凸 1/2 波長[cm]	
	40	100
0.5	9.99E-01	9.93E-01
1.0	9.97E-01	9.86E-01
4.0	9.88E-01	9.35E-01
8.0	9.70E-01	8.63E-01
10.0	9.58E-01	8.40E-01
12.0	—	8.26E-01
13.975	—	8.12E-01
15.0	9.12E-01	—
20.0	8.31E-01	—
25.0	6.83E-01	—
28.0	5.77E-01	—
29.270	5.39E-01	—

※「—」は計算を省略

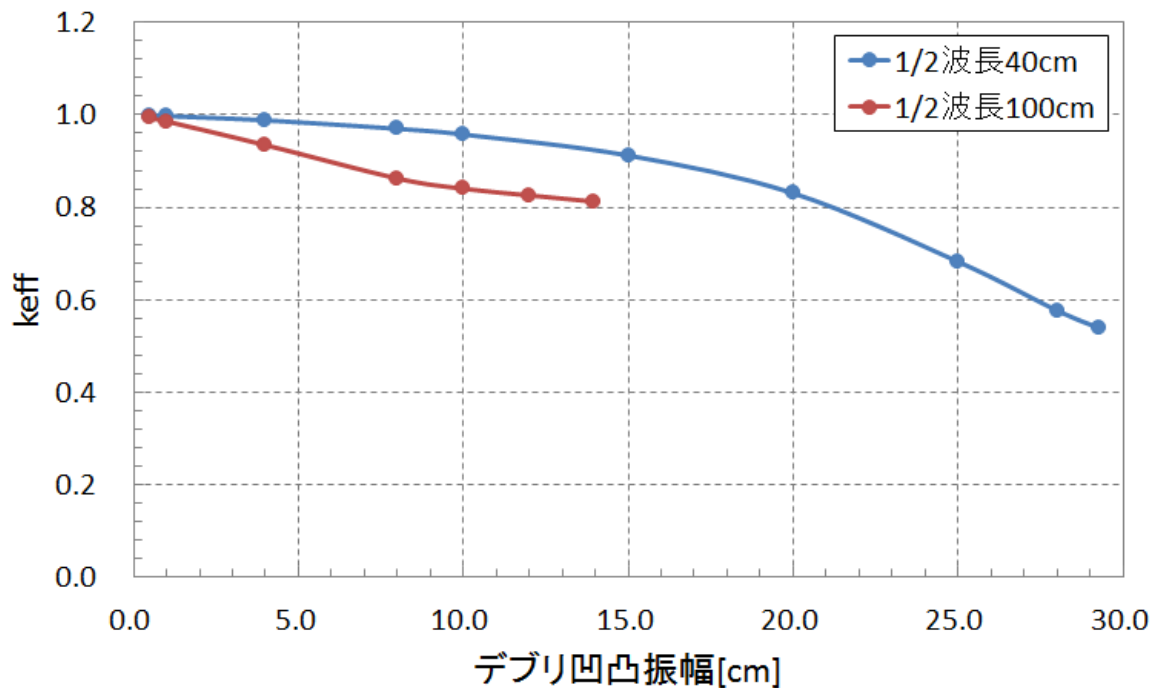


図 10.3-48 凹型デブリ凹凸 1/2 波長 40cm および 100cm におけるデブリ凹凸振幅と k_{eff} の相関

表 10.3-43 前回業務と本業務の解析条件の比較

条件	前回	今回
次元	3次元	2次元
両壁の境界条件	ボイド境界	完全反射/ボイド境界
デブリ厚さ	1/2 波長ごとに決定 (1/2 波長 8 パターンそれぞれで $k_{\text{eff}} = 1$ を満たすデブリ厚さを決定)	1/2 波長によらず一定 (1/2 波長 2.0cm において $k_{\text{eff}} = 1$ を満たすデブリ厚さを決定)
予備解析での k_{eff}	$10^{-4} \sim 1.0$	≈ 1.0

2) 燃料条件 D2

燃料条件 D2 では、どのパターンにおいても k_{eff} が 1 以上にはならなかった。一方、図 10.3-25 と図 10.3-27 の結果から、凹型や半円型の 1/2 波長が 4 cm または 10 cm において、振幅が大きくなる、つまり凹がどんどん深くなるにつれて k_{eff} が大きくなっていることが分かった。これは図 10.3-49 に示すように、燃料デブリであった部分が水に置換され、水が減速材の役割を果たすため、デブリ内の核分裂により発生した高速中性子が減速して熱中性子となり、核分裂反応が起こりやすくなったと考えられる。一方、1/2 波長が 40 cm や 100 cm の場合では、減速材の厚さも大きくなるため、熱中性子がデブリまで届きにくいため、 k_{eff} がほぼ変化しないと考えられる。一方、凸型や半円凸型における k_{eff} の変化は、どの 1/2 波長および振幅においても、燃料条件 D1 と同じような傾向であった。

k_{eff} の変化は、1/2 波長が 4、10、40 cm の時に振幅が大きくなるにつれて k_{eff} の差も大きくなるが、それ以外の波長ではあまり変化しなかった。また、 k_{eff} の差も最大で 0.3 程度であり、D1 よりも変化は小さかった。

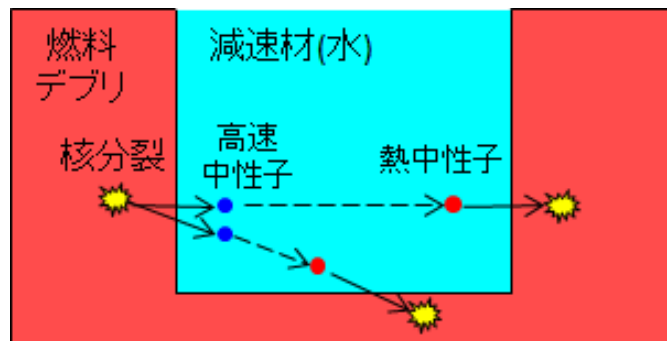


図 10.3-49 凹型における核分裂の連鎖反応の概略図

3) 燃料条件 D3

燃料条件 D3 でも、どのパターンにおいても k_{eff} が 1 以上にはならなかった。図 10.3-39 や図 10.3-41 で示すように、凹型や半円凹型で振幅が大きくなるにつれて k_{eff} が大きくなった。ただし、燃料条件 D2 の時よりも変化が小さく、デブリに含まれるコンクリート成分によりデブリ内で一定程度減速していると推測される。一方、凸型や半円凸型における k_{eff} の変化は、燃料条件 D1 および D2 と同じような傾向であった。

k_{eff} の変化は、D2 と同様であるが、反応度の変化の割合は D2 よりもやや大きいことが分かった。すなわち、燃料デブリに含まれるコンクリート体積割合が大きくなるほど、形状変化による反応度の変化が大きくなるということが分かった。

10.4 MCNP を用いた解析

10.4.1 予備解析

(1) 計算および解析方法

MCNP の予備解析では、10.3.1 で求めた TWODANT の計算における $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を MCNP に適用し、 k_{eff} の値が一致するかを確認した。

デブリ凹凸 1/2 波長が 0.1、1、2、4、10、および 20 cm では、 $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を 60 cm に設定した。また、1/2 波長が 40 cm では $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を 58.54 cm に設定し、1/2 波長が 100 cm では $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ を 27.93 cm に設定した。燃料条件は表 10.2-9 の D1 のみとし、計算ヒストリー数を 14,000,000 とした。

(2) 予備解析結果

表 10.4-1 に各デブリ凹凸 1/2 波長、およびその時の $T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ で計算した MCNP と TWODANT の k_{eff} を示す。さらに、TWODANT の k_{eff} に対する MCNP の k_{eff} のずれ (diff) を計算した。なお、1/2 波長が 0.1cm の場合、MCNP では k_{eff} が算出されなかった。これは、 k_{eff} の値が小さすぎたためと考えられる。各波長で MCNP と TWODANT の k_{eff} を比較すると、ほぼ一致していることから、それぞれのコードにおける計算が妥当であることを確認した。

表 10.4-1 $T(k_{\text{eff}}=1)$ に対する k_{eff} の変化

デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}$ [cm]	MCNP [k_{eff}]	TWODANT [k_{eff}]	diff [%]
0.1	60	—	0.00067	—
1	60	0.00667	0.006199	7.60
2	60	0.01224	0.012195	0.37
4	60	0.03894	0.040220	-3.18
10	60	0.29436	0.298163	-1.28
20	60	0.71437	0.715594	-0.17
40	58.54	0.99901	1.0000118	-0.10
100	27.93	1.00520	1.0000886	0.51

10.4.2 本解析

(1) 計算方法

MCNP の本解析は、10.3.2 と同様に凸型、凹型、半円凸型、半円凹型の 4 モデルにおいて、デブリ凹凸 1/2 波長、およびデブリ凹凸振幅を表 10.2-10 に示した値で計算し、各パラメータでの k_{eff} の変化を調べた。また、10.3.2 (1)と同様に、形状変化にともなう k_{eff} の変化も調べた。燃料条件は表 10.2-9 の D1 のみとし、計算モデルは 4 モデル、1/2 波長が 8 パターン、振幅が 5 パターンの組み合わせ全 160 ケースで計算を行った。なお、計算ヒストリー数は 14,000,000 とした。

(2) 解析結果

以下の条件による MCNP の本解析結果を表 10.4-2～表 10.4-5、および図 10.4-1～図 10.4-4 に示す。なお、1/2 波長が 0.1 cm の場合では、全ての計算パターンにおいて k_{eff} が算出されなかった。形状変化による k_{eff} の差を表 10.4-6～表 10.4-11 および図 10.4-5～図 10.4-10 に示す。

また、TWODANT と MCNP の結果を比較するため、MCNP における形状変化による k_{eff} の差に対する TWODANT の k_{eff} の差の残差を調べた。その結果を表 10.4-12～表 10.4-17 および図 10.4-11～図 10.4-16 に示す。なお、形状変化が大きい 1/2 波長が 4 cm 以上、振幅が 1 cm 以上の結果のみを示す。

残差の計算式を以下に示す。例として、形状変化は凸→凹とした。

$$\frac{\left\{ \left(k_{\text{eff}_{\text{TWODANT},\text{凹}}} - k_{\text{eff}_{\text{TWODANT},\text{凸}}} \right) - \left(k_{\text{eff}_{\text{MCNP},\text{凹}}} - k_{\text{eff}_{\text{MCNP},\text{凸}}} \right) \right\}}{\left(k_{\text{eff}_{\text{MCNP},\text{凹}}} - k_{\text{eff}_{\text{MCNP},\text{凸}}} \right)}$$

表 10.4-2 燃料条件 D1、凸型の MCNP による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	—	—	—	—	—
1/2 波長 [cm]	1	6.67E-03	6.67E-03	6.67E-03	6.67E-03	6.67E-03
	2	1.23E-02	1.23E-02	1.23E-02	1.31E-02	1.45E-02
	4	3.99E-02	4.17E-02	5.62E-02	6.94E-02	8.71E-02
	10	2.95E-01	2.96E-01	3.10E-01	3.43E-01	4.24E-01
	20	7.15E-01	7.16E-01	7.21E-01	7.26E-01	7.38E-01
	40	1.00E+00	1.00E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.02E+00
	100	1.01E+00	1.02E+00	1.05E+00	1.08E+00	1.10E+00

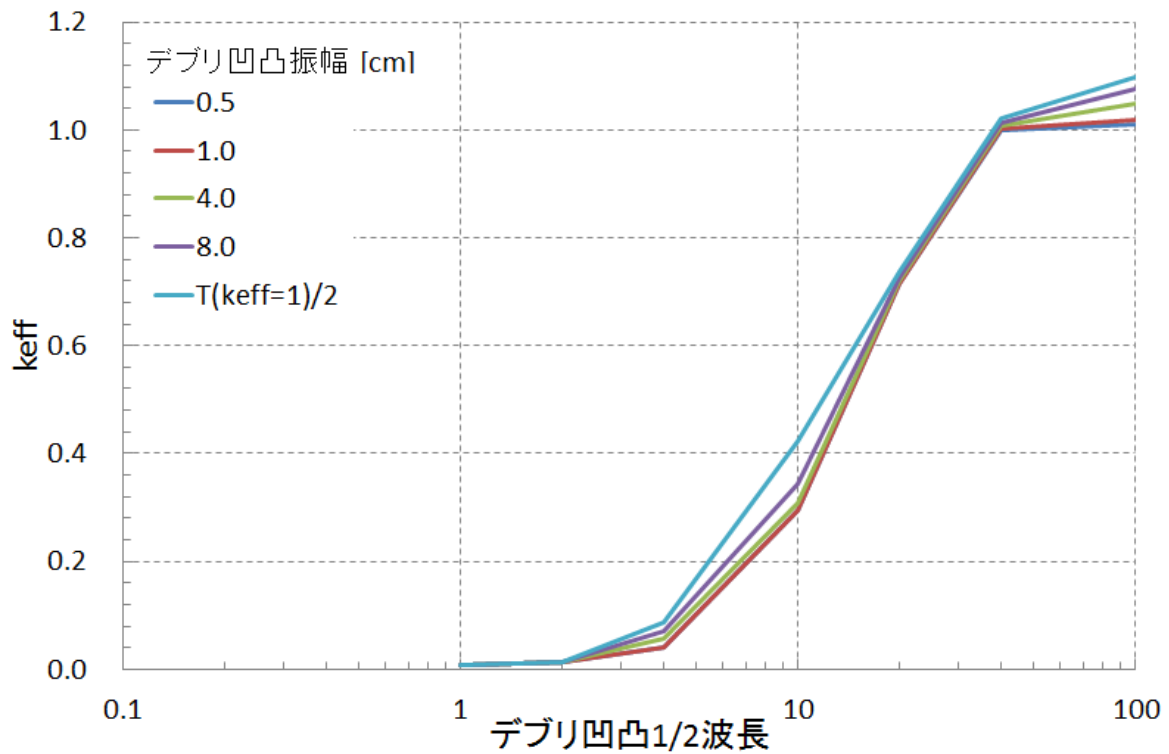


図 10.4-1 燃料条件 D1、凸型の MCNP による k_{eff} (表 10.4-2)

表 10.4-3 燃料条件 D1、凹型の MCNP による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	—	—	—	—	—
1/2 波長 [cm]	1	6.67E-03	6.67E-03	6.66E-03	6.64E-03	3.61E-03
	2	1.23E-02	1.23E-02	1.23E-02	1.25E-02	1.32E-02
	4	3.90E-02	4.00E-02	5.24E-02	6.33E-02	7.87E-02
	10	2.94E-01	2.94E-01	2.99E-01	3.05E-01	2.67E-01
	20	7.13E-01	7.13E-01	7.09E-01	7.00E-01	3.54E-01
	40	9.98E-01	9.97E-01	9.88E-01	9.70E-01	5.55E-01
	100	9.98E-01	9.91E-01	9.43E-01	8.73E-01	8.19E-01

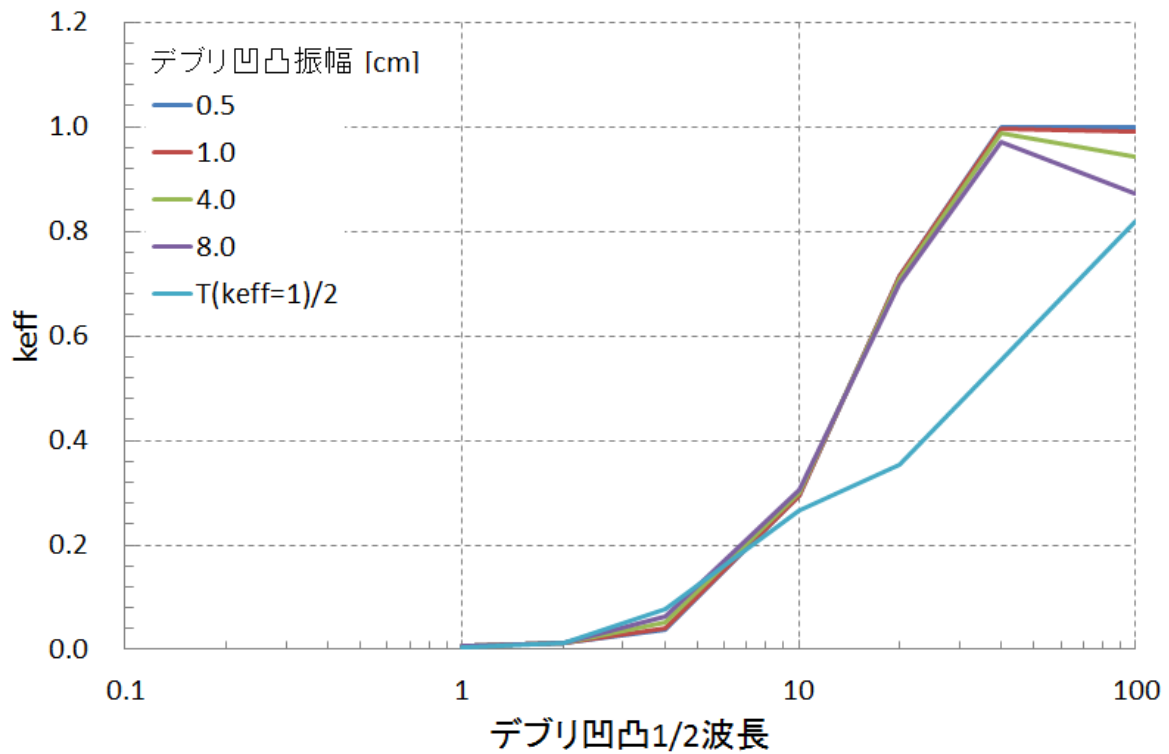


図 10.4-2 燃料条件 D1、凹型の MCNP による k_{eff} (表 10.4-3)

表 10.4-4 燃料条件 D1、半円凸型の MCNP による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)/2}$
デブリ凹凸	0.1	—	—	—	—	—
1/2 波長 [cm]	1	6.67E-03	6.67E-03	6.67E-03	6.67E-03	6.67E-03
	2	1.23E-02	1.23E-02	1.23E-02	1.32E-02	1.52E-02
	4	3.97E-02	4.13E-02	5.56E-02	7.15E-02	9.48E-02
	10	2.95E-01	2.95E-01	3.05E-01	3.34E-01	4.17E-01
	20	7.15E-01	7.15E-01	7.19E-01	7.24E-01	7.34E-01
	40	1.00E+00	1.00E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.02E+00
	100	1.01E+00	1.02E+00	1.04E+00	1.07E+00	1.09E+00

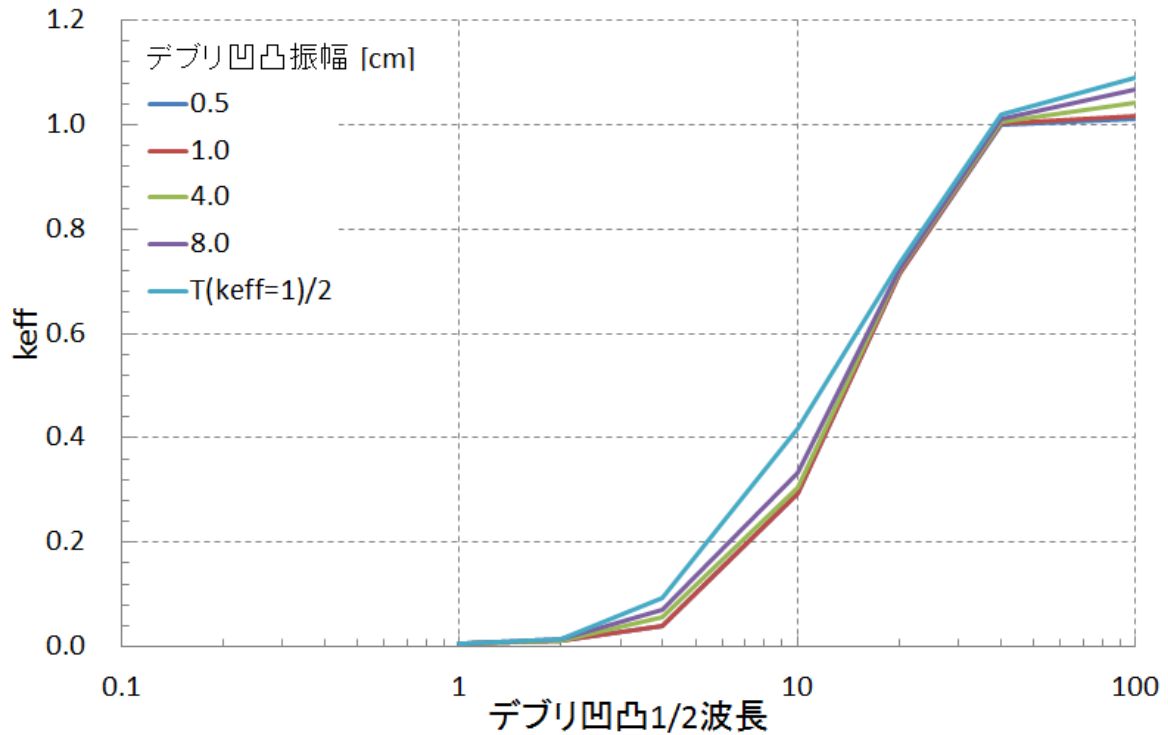


図 10.4-3 燃料条件 D1、半円凸型の MCNP による k_{eff} (表 10.4-4)

表 10.4-5 燃料条件 D1、半円凹型の MCNP による k_{eff}

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)/2}$
デブリ凹凸	0.1	—	—	—	—	—
1/2 波長 [cm]	1	6.67E-03	6.66E-03	6.66E-03	6.65E-03	5.74E-03
	2	1.23E-02	1.22E-02	1.23E-02	1.24E-02	1.34E-02
	4	3.89E-02	3.96E-02	5.07E-02	6.33E-02	8.12E-02
	10	2.95E-01	2.94E-01	2.98E-01	3.09E-01	3.86E-01
	20	7.14E-01	7.13E-01	7.09E-01	7.03E-01	5.92E-01
	40	9.99E-01	9.97E-01	9.90E-01	9.76E-01	7.05E-01
	100	9.99E-01	9.94E-01	9.55E-01	9.04E-01	8.64E-01

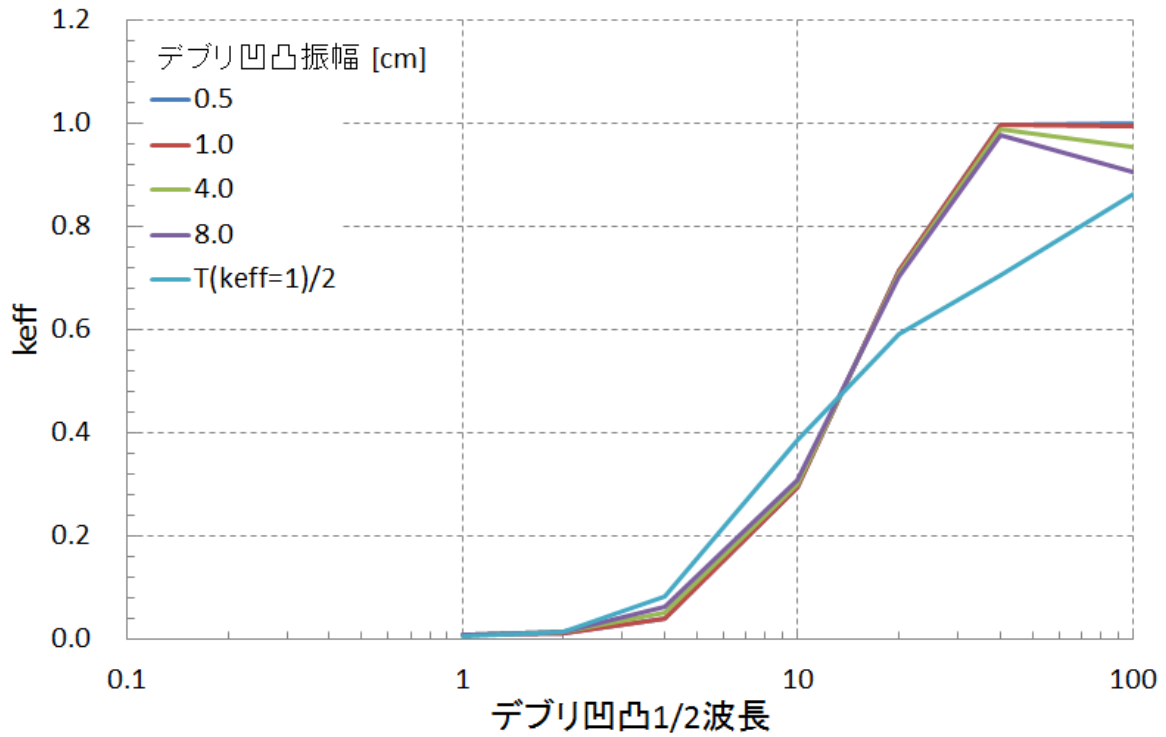


図 10.4-4 燃料条件 D1、半円凹型の MCNP による k_{eff} (表 10.4-5)

表 10.4-6 燃料条件 D1、凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.4-1、表 10.4-2)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	—	—	—	—	—
1/2 波長 [cm]	1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	2	-2.00E-05	-1.00E-05	-1.00E-04	-8.50E-04	-2.28E-03
	4	-9.60E-04	-2.73E-03	-1.72E-02	-3.04E-02	-4.82E-02
	10	-5.00E-04	-1.32E-03	-1.52E-02	-4.86E-02	-1.29E-01
	20	-1.05E-03	-1.62E-03	-6.41E-03	-1.18E-02	-2.36E-02
	40	-1.60E-03	-2.41E-03	-8.61E-03	-1.40E-02	-2.17E-02
	100	-6.21E-03	-1.23E-02	-4.27E-02	-6.98E-02	-9.39E-02

表 10.4-7 燃料条件 D1、平坦型→凹型における k_{eff} の差(表 10.4-1、表 10.4-3)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	—	—	—	—	—
1/2 波長 [cm]	1	0.00E+00	0.00E+00	-1.00E-05	-3.00E-05	-3.06E-03
	2	1.00E-05	1.00E-05	4.00E-05	2.10E-04	9.60E-04
	4	6.00E-05	1.04E-03	1.35E-02	2.43E-02	3.97E-02
	10	-1.70E-04	6.00E-05	4.31E-03	1.02E-02	-2.78E-02
	20	-9.60E-04	-1.22E-03	-5.44E-03	-1.41E-02	-3.61E-01
	40	-6.80E-04	-2.23E-03	-1.06E-02	-2.85E-02	-4.44E-01
	100	-7.01E-03	-1.38E-02	-6.26E-02	-1.32E-01	-1.86E-01

表 10.4-8 燃料条件 D1、凸型→凹型における k_{eff} の差(表 10.4-2、表 10.4-3)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	—	—	—	—	—
1/2 波長 [cm]	1	0.00E+00	0.00E+00	-1.00E-05	-3.00E-05	-3.06E-03
	2	-1.00E-05	0.00E+00	-6.00E-05	-6.40E-04	-1.32E-03
	4	-9.00E-04	-1.69E-03	-3.74E-03	-6.10E-03	-8.48E-03
	10	-6.70E-04	-1.26E-03	-1.09E-02	-3.84E-02	-1.57E-01
	20	-2.01E-03	-2.84E-03	-1.19E-02	-2.60E-02	-3.84E-01
	40	-2.28E-03	-4.64E-03	-1.92E-02	-4.26E-02	-4.66E-01
	100	-1.32E-02	-2.61E-02	-1.05E-01	-2.02E-01	-2.80E-01

表 10.4-9 燃料条件 D1、半円凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.4-1、表 10.4-4)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{eff}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	—	—	—	—	—
1/2 波長 [cm]	1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	2	-2.00E-05	-2.00E-05	-1.00E-04	-9.30E-04	-2.96E-03
	4	-7.30E-04	-2.32E-03	-1.67E-02	-3.26E-02	-5.58E-02
	10	-5.50E-04	-8.70E-04	-1.03E-02	-3.96E-02	-1.23E-01
	20	-4.10E-04	-1.02E-03	-4.61E-03	-9.34E-03	-1.98E-02
	40	-1.06E-03	-2.61E-03	-6.88E-03	-1.17E-02	-1.96E-02
	100	-4.76E-03	-1.02E-02	-3.61E-02	-6.15E-02	-8.52E-02

表 10.4-10 燃料条件 D1、平坦型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.4-1、表 10.4-5)

		デブリ凹凸振幅 [cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	—	—	—	—	—
1/2 波長 [cm]	1	0.00E+00	-1.00E-05	-1.00E-05	-2.00E-05	-9.30E-04
	2	1.00E-05	0.00E+00	4.00E-05	1.60E-04	1.15E-03
	4	-2.00E-05	6.80E-04	1.18E-02	2.43E-02	4.23E-02
	10	1.60E-04	-2.10E-04	3.84E-03	1.47E-02	9.15E-02
	20	-6.40E-04	-1.51E-03	-5.14E-03	-1.13E-02	-1.22E-01
	40	-4.20E-04	-2.17E-03	-9.13E-03	-2.30E-02	-2.94E-01
	100	-6.14E-03	-1.17E-02	-5.00E-02	-1.01E-01	-1.41E-01

表 10.4-11 燃料条件 D1、半円凸型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.4-4、表 10.4-5)

		デブリ凹凸振幅[cm]				
		0.5	1	4	8	$T_{(k_{\text{eff}}=1)}/2$
デブリ凹凸	0.1	—	—	—	—	—
1/2 波長 [cm]	1	0.00E+00	-1.00E-05	-1.00E-05	-2.00E-05	-9.30E-04
	2	-1.00E-05	-2.00E-05	-6.00E-05	-7.70E-04	-1.81E-03
	4	-7.50E-04	-1.64E-03	-4.89E-03	-8.22E-03	-1.36E-02
	10	-3.90E-04	-1.08E-03	-6.47E-03	-2.49E-02	-3.11E-02
	20	-1.05E-03	-2.53E-03	-9.75E-03	-2.06E-02	-1.42E-01
	40	-1.48E-03	-4.78E-03	-1.60E-02	-3.47E-02	-3.14E-01
	100	-1.09E-02	-2.19E-02	-8.60E-02	-1.62E-01	-2.26E-01

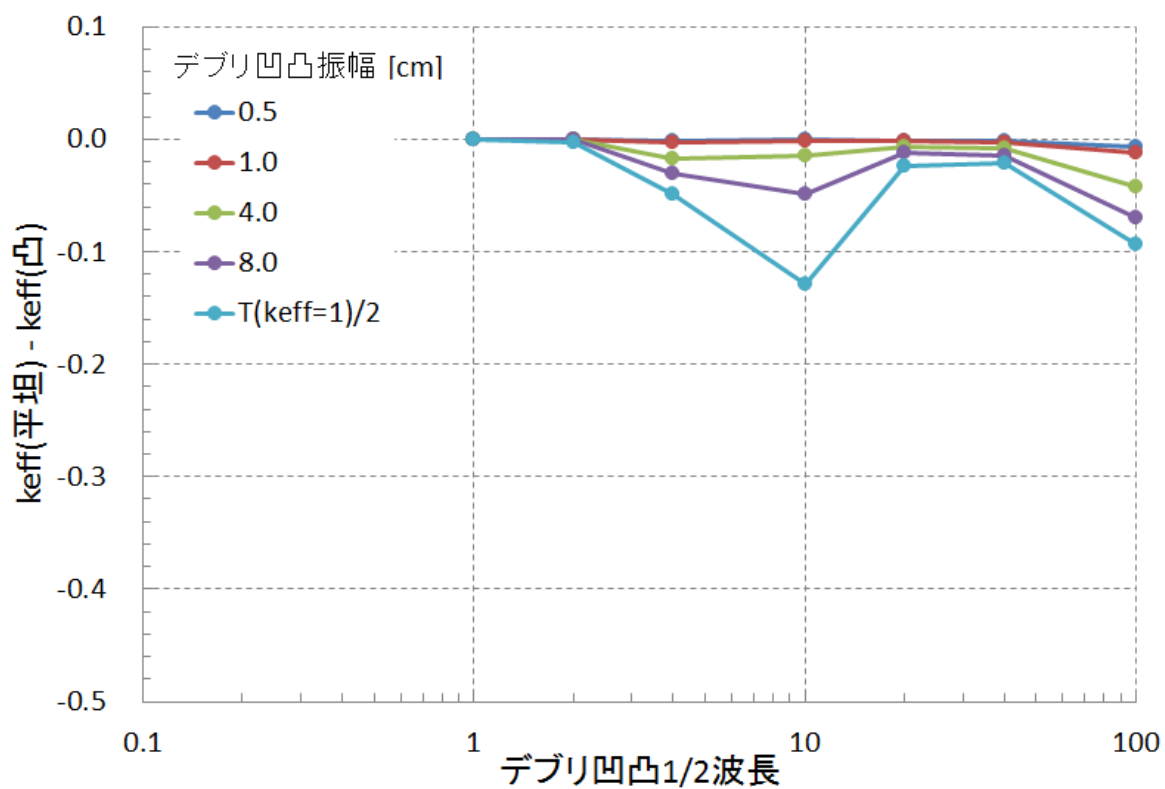


図 10.4-5 燃料条件 D1、凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.4-6)

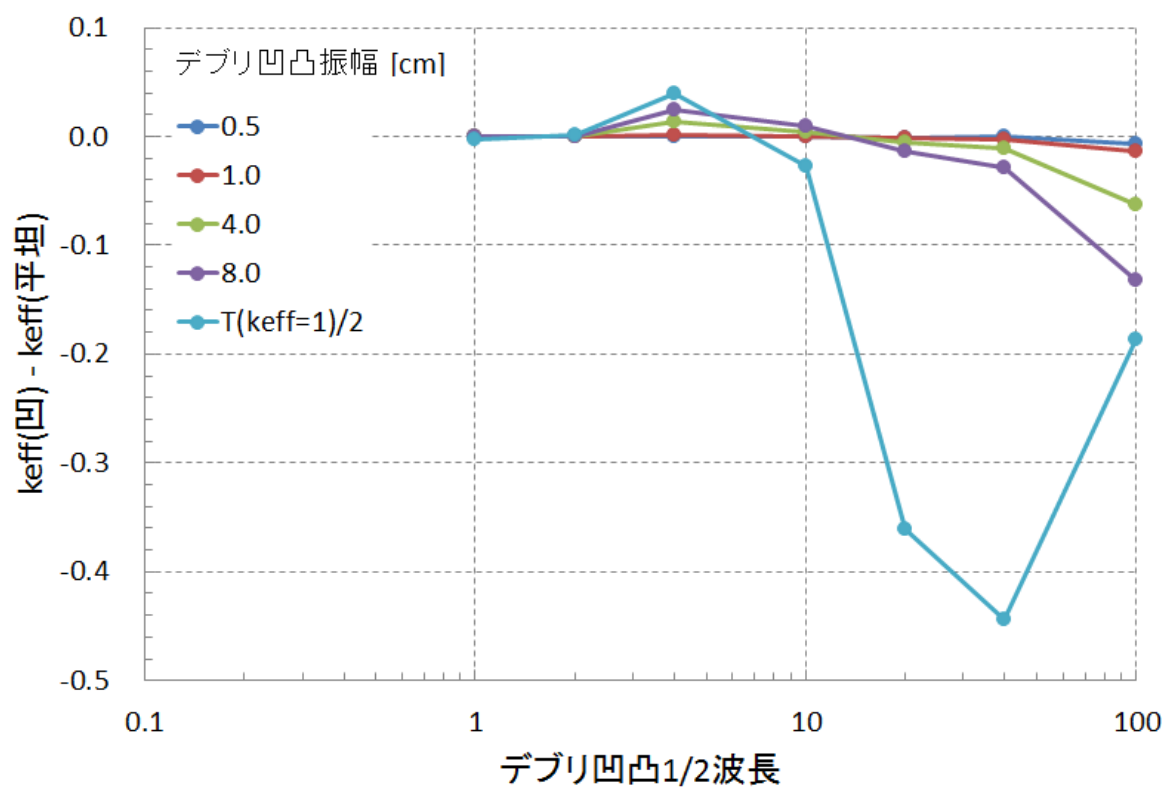


図 10.4-6 燃料条件 D1、平坦型→凹型における k_{eff} の差(表 10.4-7)

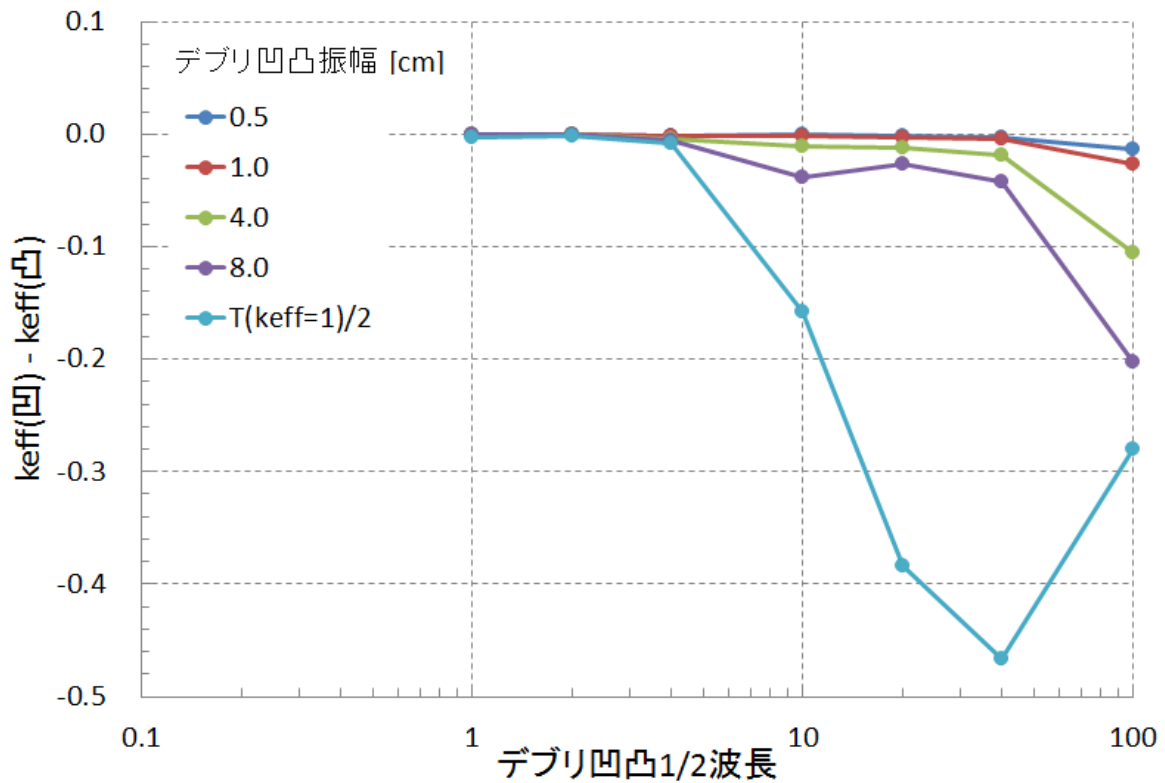


図 10.4-7 燃料条件 D1、凸型→凹型における k_{eff} の差(表 10.4-8)

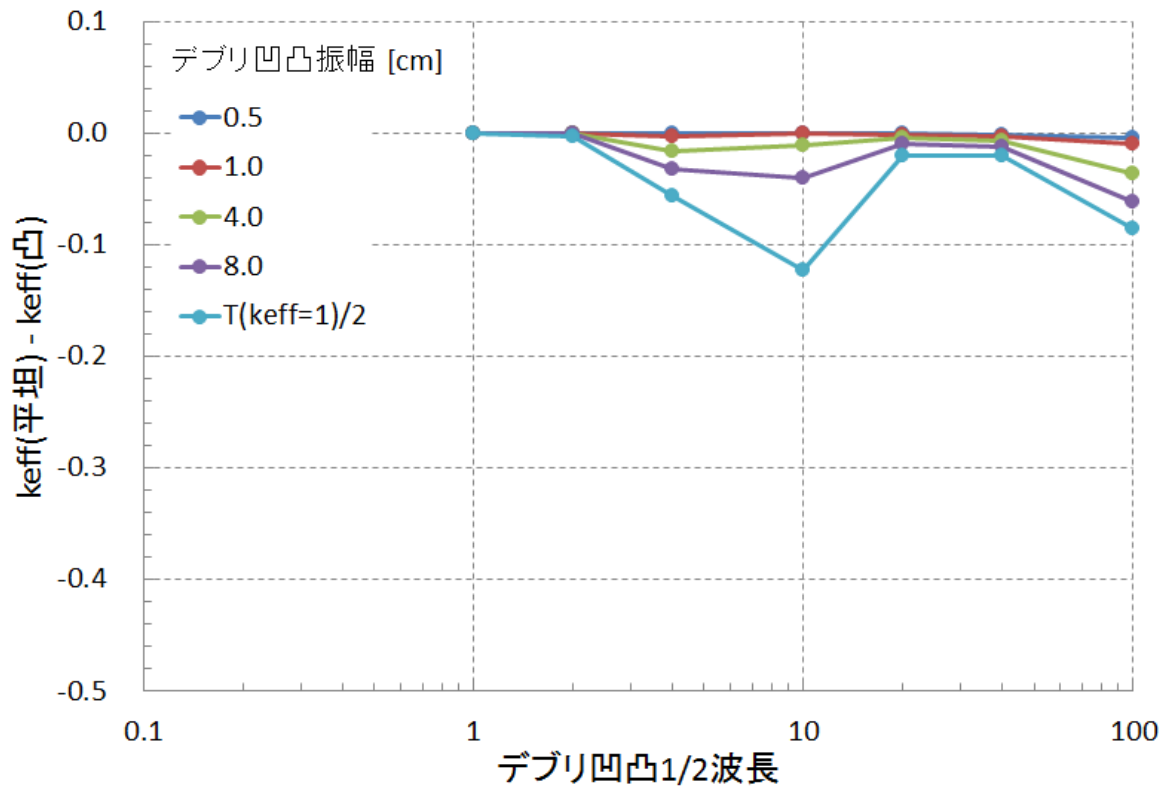


図 10.4-8 燃料条件 D1、半円凸型→平坦型における k_{eff} の差(表 10.4-9)

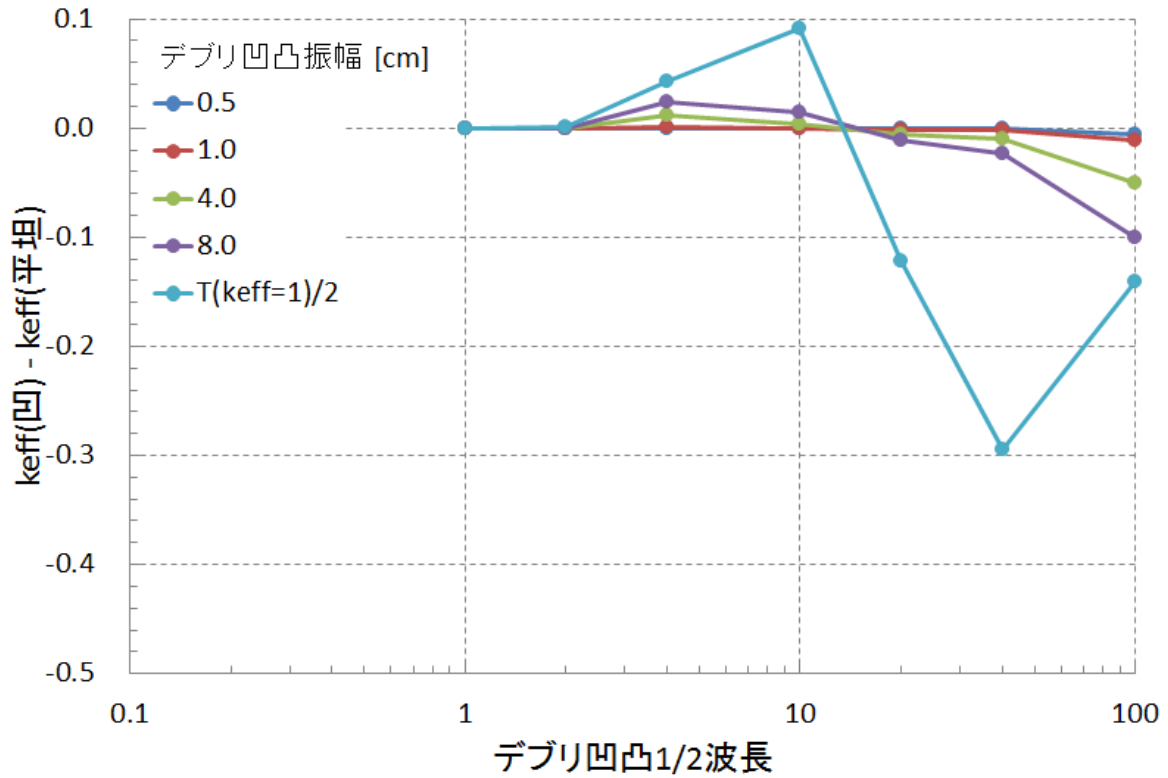


図 10.4-9 燃料条件 D1、平坦型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.4-10)

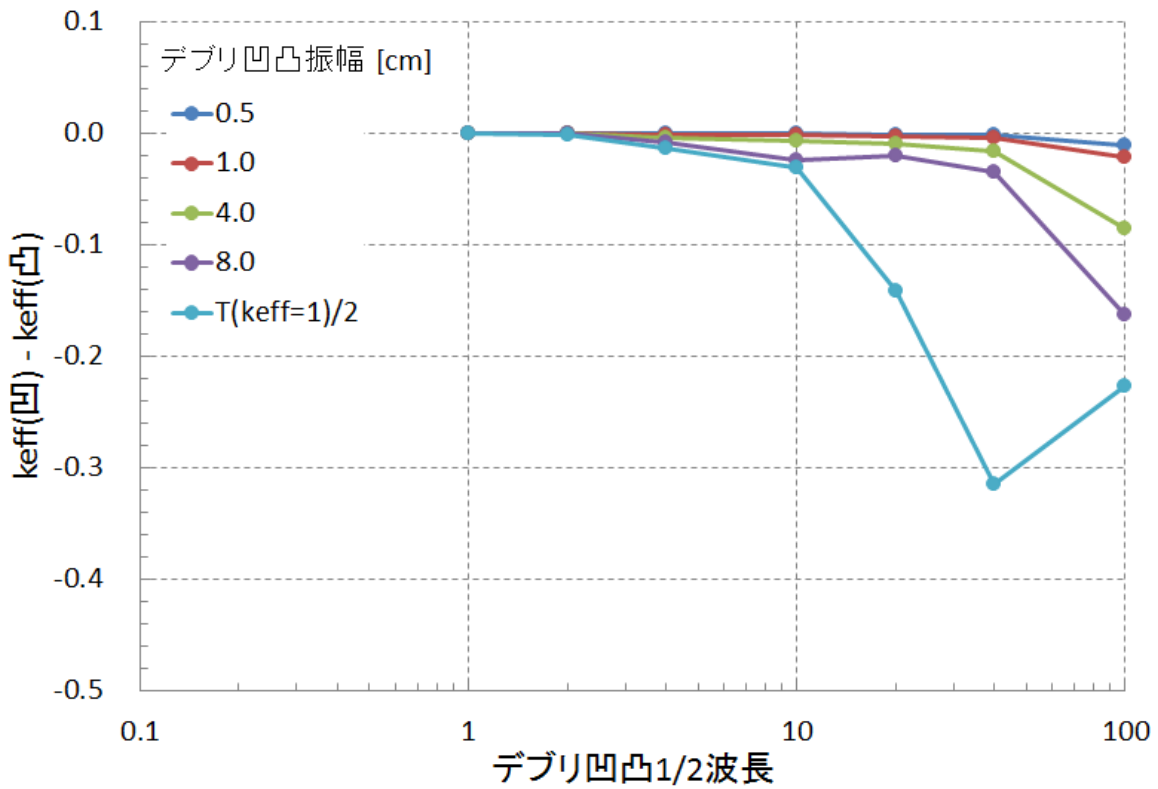


図 10.4-10 燃料条件 D1、半円凸型→半円凹型における k_{eff} の差(表 10.4-11)

表 10.4-12 凸型→平坦型における MCNP に対する TWODANT の残差 [%]

(表 10.3-16、表 10.4-6)

		デブリ凹凸振幅 [cm]			
		1	4	8	$T_{(keff=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	4	54.42	35.95	30.27	26.77
	10	17.12	4.86	4.47	4.51
	20	-1.71	2.05	-3.60	-13.20
	40	-4.00	-3.60	-4.89	-6.67
	100	5.27	3.61	3.14	2.96

表 10.4-13 平坦型→凹型における MCNP に対する TWODANT の残差 [%]

(表 10.3-17、表 10.4-7)

		デブリ凹凸振幅 [cm]			
		1	4	8	$T_{(keff=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	4	-60.87	-20.25	-19.41	-19.28
	10	-515.08	-61.39	-69.14	153.08
	20	19.70	12.44	11.96	9.00
	40	16.23	11.45	5.28	3.78
	100	2.89	4.55	3.79	0.84

表 10.4-14 凸型→凹型における MCNP に対する TWODANT の残差 [%]

(表 10.3-18、表 10.4-8)

		デブリ凹凸振幅[cm]			
		1	4	8	$T_{(keff=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	4	125.38	238.68	228.47	242.49
	10	42.46	31.13	23.99	30.76
	20	7.49	6.82	4.87	7.64
	40	5.73	4.71	1.92	3.29
	100	4.02	4.17	3.57	1.55

表 10.4-15 半円凸型→平坦型における MCNP に対する TWODANT の残差 [%]

(表 10.3-19、表 10.4-9)

		デブリ凹凸振幅[cm]			
		1	4	8	$T_{(keff=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	4	51.50	41.28	33.37	26.88
	10	34.95	16.32	8.48	1.13
	20	23.46	16.12	4.57	-5.75
	40	-28.42	1.49	0.47	-1.95
	100	5.44	5.41	3.87	3.02

表 10.4-16 平坦型→半円凹型における MCNP に対する TWODANT の残差 [%]
(表 10.3-20、表 10.4-10)

		デブリ凹凸振幅[cm]			
		1	4	8	$T_{(keff=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	4	-79.62	-16.02	-14.94	-8.36
	10	37.22	-28.15	-12.33	-9.12
	20	-17.86	-9.33	-4.43	69.06
	40	-1.65	2.16	0.03	11.10
	100	-1.85	0.05	0.09	3.30

表 10.4-17 半円凸型→半円凹型における MCNP に対する TWODANT の残差 [%]
(表 10.3-21、表 10.4-11)

		デブリ凹凸振幅[cm]			
		1	4	8	$T_{(keff=1)}/2$
デブリ凹凸 1/2 波長 [cm]	4	105.86	179.07	176.43	136.53
	10	35.39	42.71	20.75	31.32
	20	-1.20	2.71	-0.36	58.61
	40	-16.26	1.87	0.18	10.28
	100	1.55	2.29	1.52	3.20

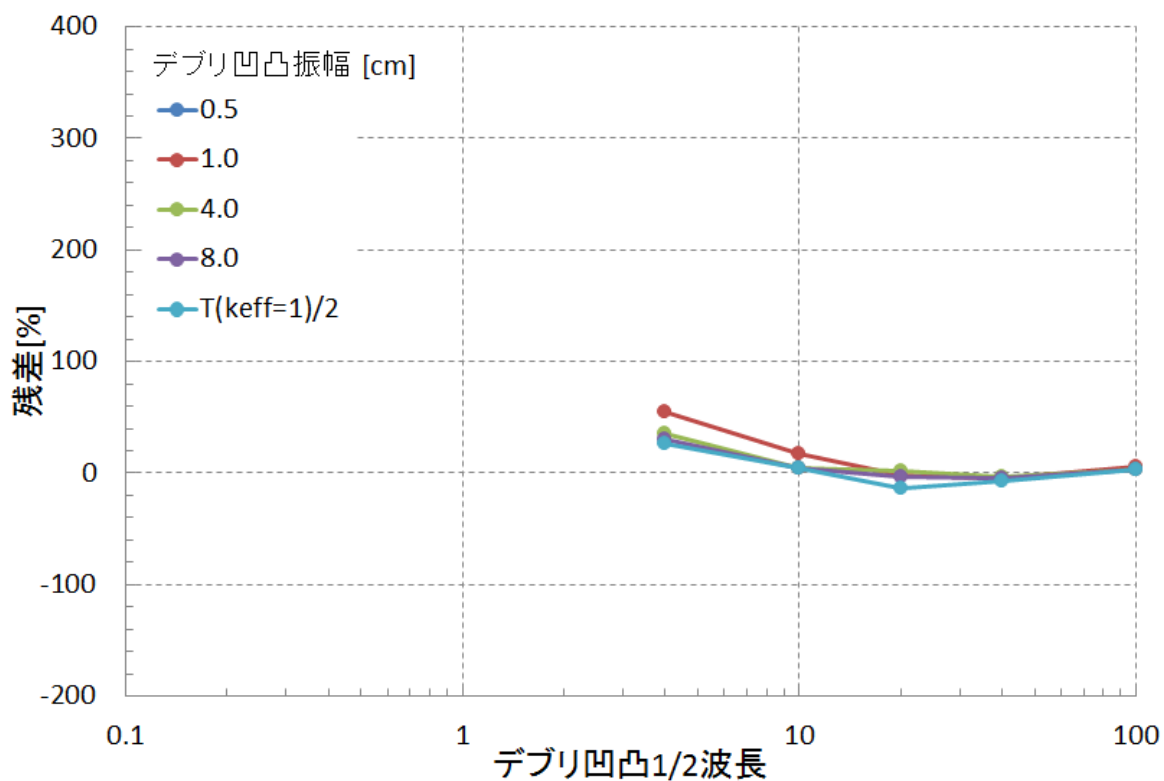


図 10.4-11 凸型→平坦型における MCNP に対する TWODANT の残差(表 10.4-12)

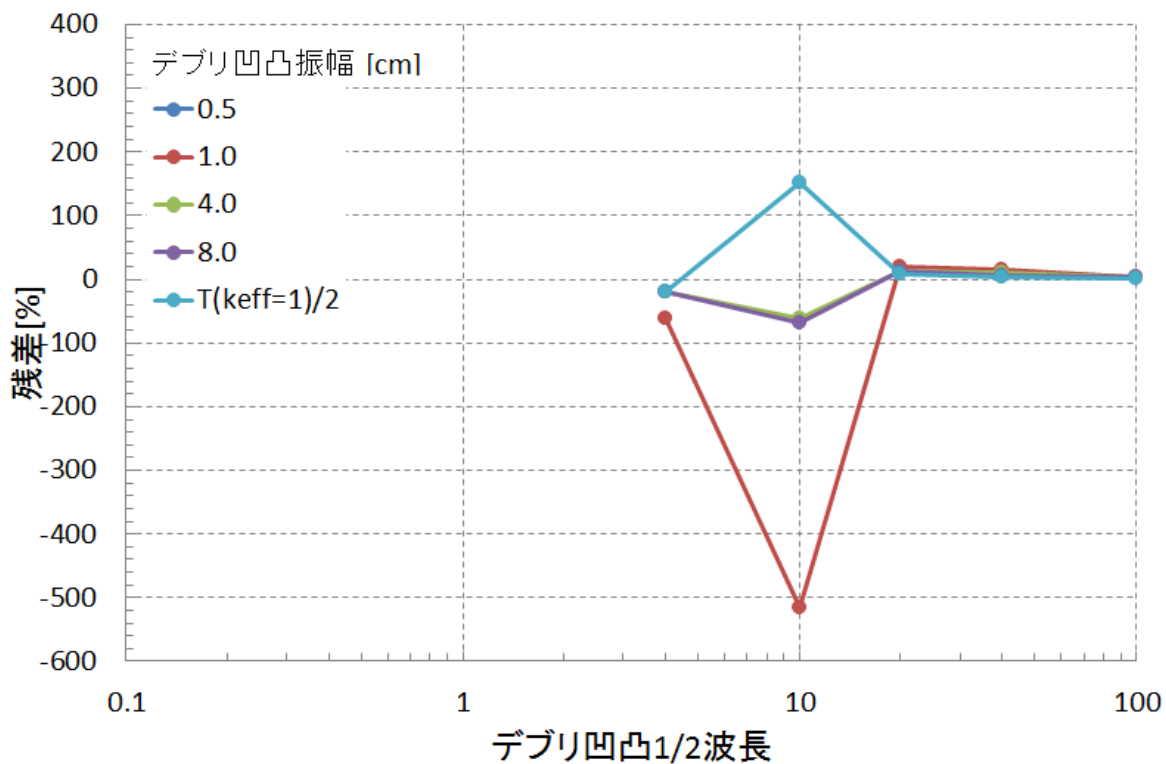


図 10.4-12 平坦型→凹型における MCNP に対する TWODANT の残差(表 10.4-13)

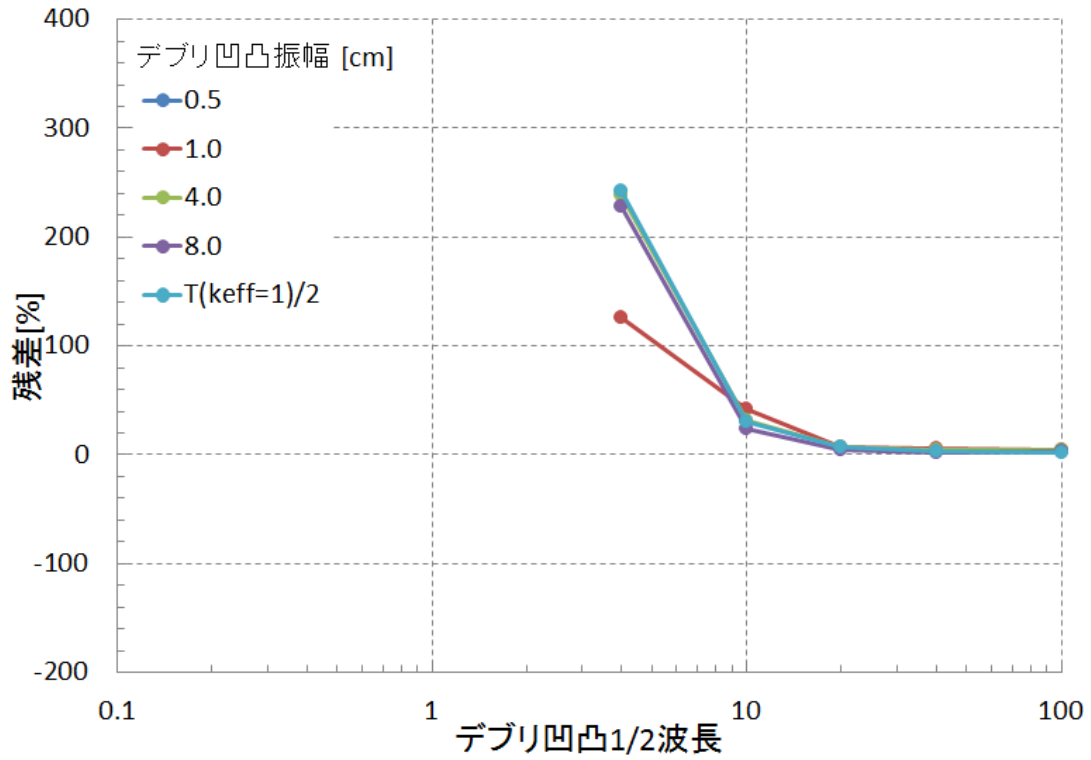


図 10.4-13 凸型→凹型における MCNP に対する TWODANT の残差(表 10.4-14)

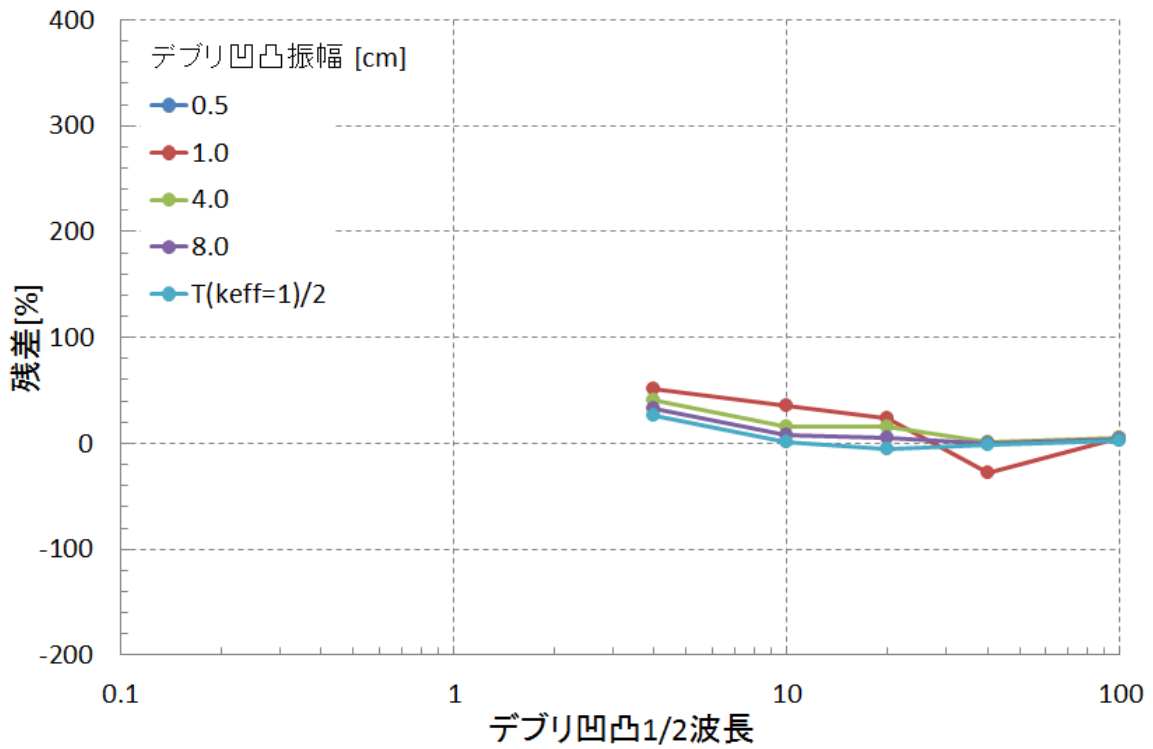


図 10.4-14 半円凸型→半円凹型における MCNP に対する TWODANT の残差(表 10.4-15)

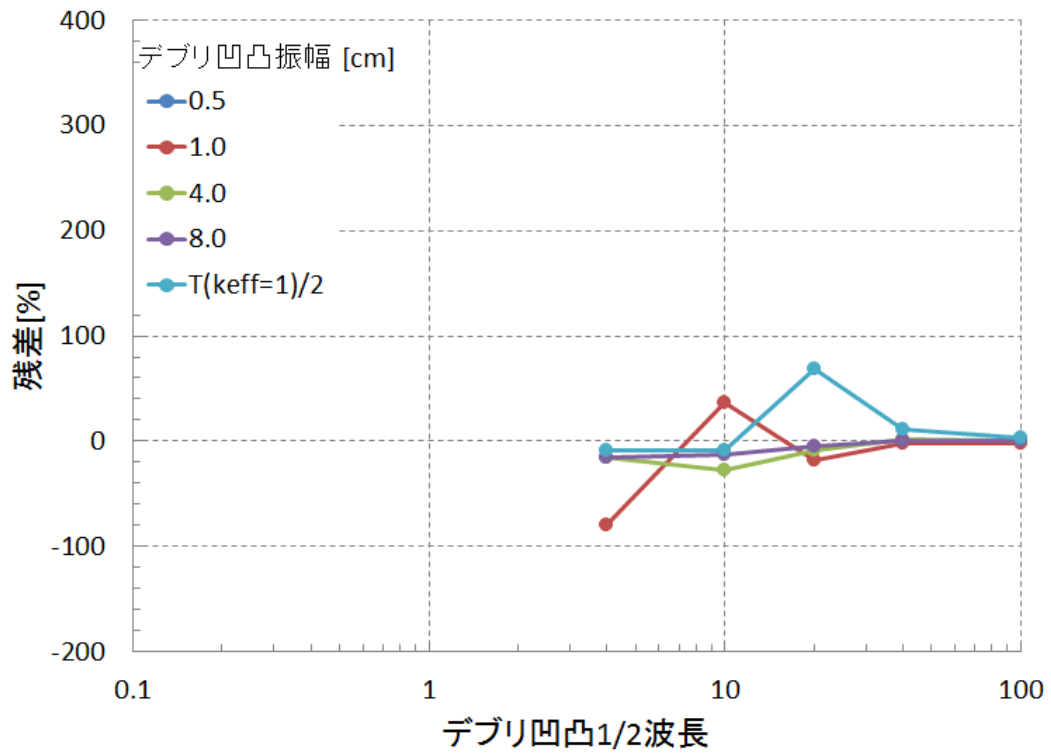


図 10.4-15 平坦型→半円凹型における MCNP に対する TWODANT の残差(表 10.4-16)

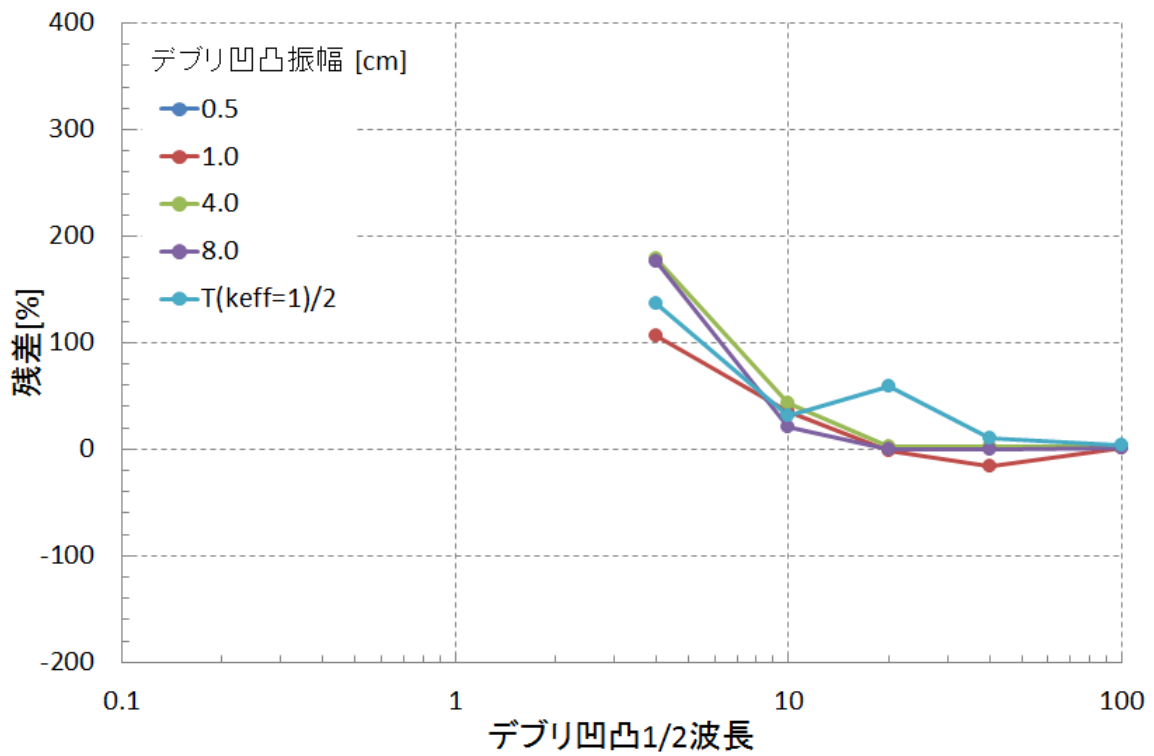


図 10.4-16 半円凸型→半円凹型における MCNP に対する TWODANT の残差(表 10.4-17)

(3) 検討

MCNP コードにより得られた燃料条件 D1 の解析結果と TWODANT コードによる燃料条件 D1 の解析結果を比較したところ、どのケースでもほぼ同じ k_{eff} 値であった。

MCNP と TWODANT で形状変化による k_{eff} の差を比較したところ、残差が数百%と大きくなった。これは、 k_{eff} の値がもともと小さく、その差分をとったうえで、さらに残差を計算しているためである。1/2 波長が 4 cm の時は、残差が 200 %程度と大きい、10 cm では 30 %程度、20 cm 以上では約 10 %となり、1/2 波長が大きくなるにつれて、残差が小さくなっていくことが分かった。

10.5 まとめ

本作業では、1Fの燃料デブリを対象として、デブリを除去した場合に生じる形状変化による中性子実効増倍率 k_{eff} への影響を明らかにした。

- いずれの計算においても、デブリ凹凸 1/2 波長が 1 cm 程度以下であれば、凸を取り除く場合でも、平坦を凹にする場合でも反応度的な効果はほとんどなかった。従って、実際のデブリのサンプルを取得する場合でも、非常に小さな塊を扱う場合には、再臨界に至らずに取得する方法が存在する可能性があることが推察される。
- より大きい波長の場合、コンクリート体積割合に応じて反応度効果が異なる。コンクリート体積割合が大きい場合 (D1 のケース)、図 10.3-14～図 10.3-16 に示されるように、デブリ除去により凸を凹にするような操作では、負の反応度効果が生じる。
- コンクリート体積割合が小さい場合 (D2, D3 のケース)、図 10.3-32 に示されるように、デブリ凹凸 1/2 波長が数 cm 程度では、デブリ除去により正の反応度効果が生じる可能性がある。
- 上記の結果及び昨年度までに行った計算結果から、一般的には以下の手順が妥当な手順であることが推定される。
 - 非常に小さなサンプルを除去する (反応度効果はほぼゼロ)
 - そのサンプルの組成 (コンクリート体積割合等) を検討して、以後取り扱うデブリの大きさを決定する。
- 本章の計算は、デブリの塊を瞬時に十分遠方まで取り去った場合に相当する。実際には、動かしている途中で、時々刻々の反応度効果が生じうる。これまでの検討で正の反応度効果が生じないことが示された条件に対して、デブリを徐々に動かす場合の反応度効果の時間的推移について検討することは、実際の操作の安全性確保のために有益である。

第 11 章 取出し時を想定した臨界事故挙動評価の試行

本章では、燃料デブリ取出し作業を想定し、仮想的な臨界事故シナリオに対して、支援ツールを用いて臨界事故挙動評価を試行する。さらに支援ツールに実装したソースターム移行評価モデルにより、影響評価としての空間線量評価も試行する。これにより得られた結果と、影響評価を行う上での注意点等について報告する。

11.1 目的及び概要

(1) 目的

東京電力福島第一原子力発電所（1F）1号機の燃料デブリ取り出しにおいて、再臨界を想定した仮想的なシナリオに従って、空間線量率の評価を試行し、臨界事故挙動評価および影響評価の手法の検証に資することを目的とする。

(2) 概要

本案件の作業内容を以下に示す。それぞれの作業の詳細は 11.2 と 11.3 に記載する。

1) 空間線量率に係る予備調査（11.2 に詳細を記載）

1F 事故当時の 1 号機の放射性物質放出量の推定値から敷地境界を含む数点の空間線量率評価ができるように当時の風向、風速、空間線量率等の調査を行う。また、調査で得られたデータに基づいて求めた計算結果を実際の値と比較検討する。

2) 取り出し時の影響評価（11.3 に詳細を記載）

仮想的な燃料デブリ取り出しシナリオに従って、臨界になった場合の被ばく影響の評価を試行する。

(3) 計算環境

本作業の計算で使用するコードを以下に示す。

1) LHS¹⁾

- ・ 目的：変動パラメータデータセットの生成
- ・ 開発元：Sandia 研(米)
- ・ 配布元：一般財団法人高度情報科学技術研究機構(RIST)原子力コードセンター

2) AGNES-P

- ・ 目的：臨界事象解析
- ・ 開発元：JAEA

3) RASCAL

- ・ 目的：線量評価解析
- ・ 開発元：U.S. Nuclear Regulatory Commission（アメリカ合衆国原子力規制委員会）
- ・ 配布元：一般財団法人高度情報科学技術研究機構(RIST)原子力コードセンター

(4) 線量評価解析計算コード RASCAL の概要

線量評価解析にあたっては U.S. NRC の開発した被ばく線量評価を行うための影響分析用放射線学的評価システム RASCAL (Radiological Assessment System for Consequence AnaLysis、以下、RASCAL と記す。)を使用した。作業時点での RASCAL の最新バージョンは 4.3 であり、本作業では同バージョンを対象とした。

RASCAL を管理する U.S. NRC RAMP (Radiation Protection Computer Code Analysis and Maintenance Program) では、RASCAL の概要について、以下のように説明している。

“RASCAL は、放射線事故や放射線緊急事態において、米国原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission : 以下、NRC と記す。) の緊急時対応センター (Emergency Operations Center) 防護対策チーム (Protective Measures Team) が単独で線量予測と影響範囲の推定を行うために作られたシステムである。RASCAL は、NRC の許認可施設におけるインシデントやアクシデント時の迅速評価と、公衆の避難や屋内退避の指示に係る意思決定の補助のためのツールとして、NRC により 25 年以上前に開発された。RASCAL では、原子力発電所、使用済核燃料の貯蔵プールとキャスク、核燃料サイクル施設および放射性物質取扱施設を対象に、放射性物質の大気放出を評価することができる。その結果は事故時において地元自治体の判断基準となる重要なデータとして用いられる”²⁾。

RASCAL には 4 つの基本ツールと、3 つの追加ツールが整備されており、いずれも GUI 経由で実行することができる。まず Source Term to Dose (STDose)は、プラント状況や事故状況の情報から、プルームに由来する推定被ばく線量を推定するツールである³⁾。施設から放出された放射性核種の放出率は時間の関数であることから、STDose で生成されるソースタームは時間変化を考慮している。計算されたソースタームは大気中での放射性物質の移流拡散モデルの入力値として用いられる。移流拡散モデルでは、風下での放射性核種の濃度と被ばく線量率の推定を行う。このときの被ばく経路は、放射性プルームからのクラウドシャイン、呼吸による摂取、沈着した放射性物質からのグラウンドシャイン (グラウンドシャインによる被ばくは 4 日間継続すると仮定) である。次に Field Measurement to Dose (FMDose)は、事故後放射性プルームの放出が生じた段階あるいは事故中期において、環境中の放射性物質の濃度の実測値に基づき線量計算を行うツールである。なお、事故中期での線量の計算には放射性核種の地表面濃度を用いる。Radionuclide Data Viewer は RASCAL の有する放射性核種のデータベースに収録された各核種の半減期や崩壊定数、インベントリといった情報を閲覧できるツールである。Decay Calculator は放射性物質の混合物に対する特定期間での壊変量の評価に用いられる。また追加ツールのうち、The Create Reactor Inventory Base File は、炉心及び原子炉冷却系 (RCS) および使用済燃料のインベントリとして、デフォルトインベントリの代わりに対象とする原子炉の運転状況の詳細情報を含むファイルを作成し、そのファイルに基づいた影響解析を行うためのものである³⁾。Source Term Merge/Export は FDNPS 事故を踏まえて開発されたツールで、同一発電所の複数炉で発災したケースを評価するため、サイト内の複数の施設のソースタームを結合することができる。Download Meteorology from the Internet (MetFetch)は STDose で使用する気象データ

をインターネット経由で自動収集するツールである⁴⁾。本作業では RASCAL の各ツールのうち、STDose を用いた。

RASCAL では、開発元が定めた仕様により英語版 OS 上でのみ動作が確認されており、それ以外の OS での動作が保証されていない。実際に動作確認した所、日本語版 OS 上に RASCAL をインストールして使用した場合、不具合の発生により、計算を行うことができなかった。この理由から、別途英語版の OS 上で RASCAL の計算を行った。

11.2 空間線量率に係る予備調査

1F事故当時1号機の放射性物質放出量の推定値から敷地境界を含む数点の空間線量率評価ができるように調査を行った。

調査内容を以下に示す。

1) 入力パラメータの調査

1F1号機について、公開データに基づき放射性物質放出量を推定する。また、これに必要なソースターム、気象情報等を合わせて調査する。

2) 被ばく影響の計算

1)で求めた放射性物質放出量から被ばく影響を求める。計算には、線量評価解析コードRASCALを用いる。

3) 被ばく影響の妥当性の評価

2)で求めた計算結果と実測値との比較を行い、計算結果が妥当であるかどうか評価する。

11.2.1 入力パラメータの調査（放射性物質放出量の推定）

1Fを対象に RASCAL のツールの 1 つである STDose への入力パラメータを調査した。その後、調査した入力パラメータを用いて放射性物質の放出量を推定した。

本作業で行った入力パラメータの準備内容を以下に示す。

- 1) STDose では、対象施設の種類および事象ごとに設定すべきパラメータが異なるため、対象とする事故条件を設定した。
- 2) RASCAL 文献（RASCAL4: Description of Models and Methods. NUREG-1940, Supplement 1)には、RASCAL の 1F 事故への適用結果が示されている。このことから本案件でも、RASCAL (Ver.4.3) の 1F 事故への適用事例における RASCAL 文献に記載された事故条件を基本的に採用した。
- 3) 放射性物質の大気中での移流拡散モデルに必要な施設周辺の気象条件について 1F に係る公開資料に基づいて調査した。
- 4) ソースタームの推定値と、RASCAL 文献³⁾におけるソースタームの推定値および他の文献に示されたソースタームの推定値とを比較して、入力パラメータの妥当性を評価した。

STDose では、入力パラメータとして以下に示す 6 つのカテゴリーに対して事故条件を設定する必要がある。

- ① 事象の種類
- ② 対象施設の位置や諸元
- ③ 事故のタイプと事故進展
- ④ 放射性物質の放出経路と放出量の時系列
- ⑤ 気象条件
- ⑥ 線量計算

これら①～⑥は、上記 1)～4)に示した入力パラメータの準備作業の結果に基づき設定を行った。設定内容を一覧にして表 11.2-1 に示す。またこれらの詳細な設定内容は(1)以降に記載する。

表 11.2-1 RASCAL に用いた設定値

No.	項目	設定値	備考	出典
1	事象の種類 (Event Type)	Nuclear Power Plant		-
2	対象施設の場所や諸元 (Event Location)	Define a "Generic" Nuclear Power Plant Site		参考文献 ⁴⁾ p.10
3	原子炉タイプ (Type)	Generic BWR Mark I		参考文献 ³⁾ p.2-4
4	名称 (Name)	FDNPS		-
5	住所 (City, County, State, Country)	福島県双葉郡大熊町大字夫沢		参考文献 ⁵⁾
6	タイムゾーン (Time Zone)	Offset GMT/UTC+9h		-
7	緯度 (Latitude)	37.422917	度表記	参考文献 ⁵⁾
8	経度 (Longitude)	141.033125	度表記	参考文献 ⁵⁾
9	標高 (Elevation)	8.535417		参考文献 ⁵⁾
10	燃料集合体数 (Number of assemblies of core)	400		参考文献 ⁶⁾
11	格納容器の体積 (Containment volume)	148707	default は 250000 図 11.2-1 に詳細を記載	円筒部直径：約 10m 球部直径：約 18m 全高：約 32m 参考文献 ⁶⁾
12	冷却材量 (Coolant mass)	125000		Default (情報無し)
13	平均出力 (炉内燃料) (Reactor power)	1380		参考文献 ³⁾ p.1-39 Table1-16
14	平均燃焼度(燃料) (Average burnup - in reactor)	23700		参考文献 ³⁾ p.1-39 Table1-16

15	平均燃焼度(使用済燃料) (Discharge burnup - in spent fuel storage)	MWd/MTU	50000	Default
16	事故のタイプと事故進展 (Source Term)	-	Long Term Station Black Out (全電源喪失)	参考文献 ⁷⁾
17	事故時の原子炉状態から設定する場合の対象事象 (Source term based on reactor conditions)	-	2011/3/11 15:37	参考文献 ⁸⁾ p.1-5
18	シャットダウン時刻 (Reactor shutdown)	-	あり	参考文献 ⁹⁾ p.22
19	RCIC による冷却 (RCIC and/or HPCL available and operating:)	-	2011/3/12 3:07	参考文献 ⁷⁾ p.13
20	放出開始時刻 予想される冷却時間 (Expected duration of cooling)	h	5.5	TEPCO による仮定時刻 (SD+6h+冷却時間) 放出開始時刻に合わせて設定
21	水位低下による燃料棒露出時刻	-	2011/3/11 18:10	参考文献 ⁹⁾ 別冊 p.1-7
22	炉の状態	-	Vessel through	参考文献 ⁶⁾ p.1-6
23	放射性物質の放出経路と放出量の時系列 (Release Path)	-	Through the dry well wall	参考文献 ⁵⁾ p.1-38
24	放射線物質の放出経路 (Pathway to atmosphere)	-	Direct from reactor building or other rapid, unfiltered release	放出量の多いイベントや水素爆発といったイベントでの放出はいずれも直接放出である理由から

25		放出高さ (Release height)	m	20	スタックからの放出ではなく、 建屋 (のちに爆発) からの放出 であり、公開情報の 1 号機の寸 法、設置状況から類推してこの 高さを仮定	参考文献 ¹³⁾ p.1041
26		リーク率の時系列 (Leak rate to atmosphere described)	%	ベント時以外のリーク率：1% ベント：3/12 14:30-14:50 DW 圧力低下 (大弁) ベント時のリーク率：25%/h 水素爆発：3/12 15:36-16:00 水素爆発時のリーク率：50%/h	水素爆発の放出終了時間は根拠 無し	参考文献 ⁵⁾ p.1-39
27	気象条件 (Meteorology)	観測データ	-	表 11.2-3 参照のこと	11.2.2 に詳細を記載	
28	線量計算 (Calculate Doses)	吸入線量係数 (Inhalation Dose factors)	-	ICRP60/72	RASCAL (Ver.4.3) で主に使用	参考文献 ⁴⁾ p.76

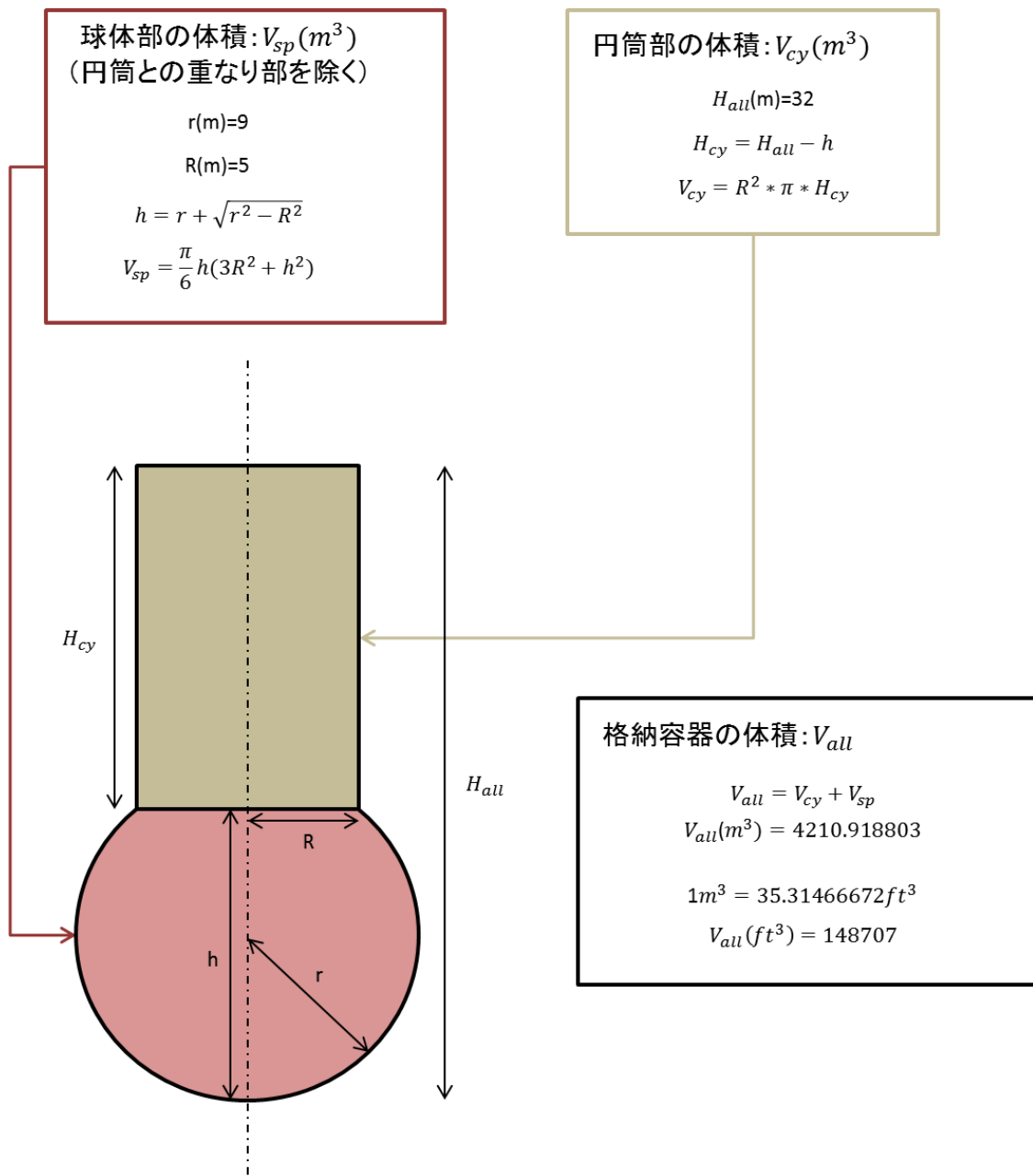


図 11.2-1 格納容器の体積の求め方

(備考)

- 格納容器の体積は、参考文献⁶⁾に記載された格納容器形式に基づき算出した。但し、今回は予備的な検討であるため、体積は概算である。

(1) 事象の種類 (Event Type)

設定可能な事象の種類を以下に示す。本作業では、1F1号機を対象とすることから、原子力発電所 (Nuclear Power Plant) を選択した (図 11.2-2)。

- 1) Nuclear Power Plant (原子力発電所)
- 2) Spent Fuel (使用済み燃料)
- 3) Fuel Cycle/UF6/Criticality(燃料サイクル施設からの排出タイプ)
- 4) Other Radiological Material Release (その他の放射線材料放出)

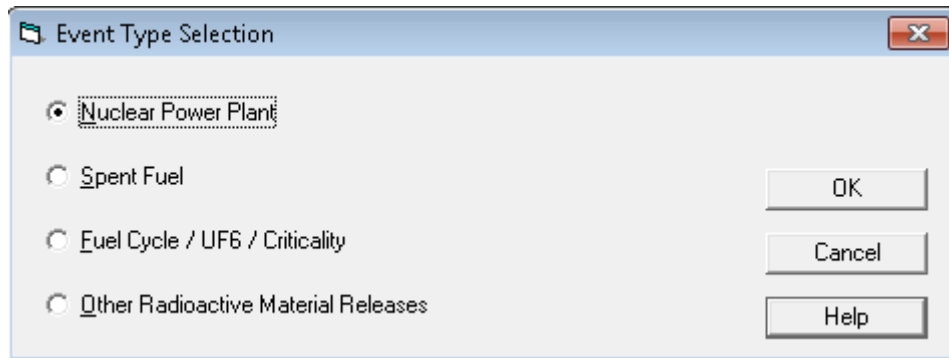


図 11.2-2 事象の種類 (Event Type) の設定ダイアログ

(2) 対象施設の場所や諸元 (Event Location)

公開文献に基づき、RASCAL に設定した対象施設の場所や諸元を以下に示す (図 11.2-3 の①～⑬に対応)

- ① 原子炉タイプ (Type)
Generic BWR Mark I
- ② 名称 (Name)
FDNPS (福島第一原子力発電所 1 号機 : Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 1)
- ③ 住所 (City、County、State、Country)
福島県双葉郡大熊町大字夫沢⁵⁾
- ④ タイムゾーン (Time Zone)
Offset GMT/UTC+9h
- ⑤ 緯度 (Latitude)
37.422917 (degree)⁵⁾
- ⑥ 経度 (Longitude)
141.033125 (degree)⁵⁾
- ⑦ 標高 (Elevation)
8.535417 (m)⁵⁾
- ⑧ 燃料集合体数 (Number of assemblies of core)
400 (体)⁶⁾

- ⑨ 格納容器の容量 (Containment volume)
148707 (ft³)
- ⑩ 冷却材量 (Coolant mass)
125000 (kg)
- ⑪ 平均出力 (炉内燃焼) (Reactor power)
1380 (MWt)
- ⑫ 平均燃焼度 (燃料) (Average burnup - in reactor)
23700 (MWd/MTU)
- ⑬ 平均燃焼度 (使用済燃料) (Discharge burnup - in spent fuel storage)
50000 (MWd/MTU)

図 11.2-3 対象施設の場所や諸元の設定ダイアログ

(3) 事故のタイプと事故進展 (Source Term)

RASCAL ではソースタームの設定方法として、事故時の原子炉状態からの推定と常時モニタリングデータの核種組成からの推定の 2 種類が存在する。それぞれの設定方法に応じた選択肢を以下に示す (図 11.2-4 の①~②に対応)。

- 1) 事故時の原子炉状態から設定する場合の対象事象 (Source term based on reactor conditions)
 - Long term Station Blackout (全電源喪失)
 - LOCA(冷却材喪失)

- ・ Coolant Release Accidents (冷却材漏洩事故)
 - ・ Containment Radiation Monitor (格納容器閉じ込め放射線モニタ)
- 2) 核種データから設定を行う場合の対象サンプルまたは放出率 (Source term based on nuclide specific date)
- ・ Coolant Sample (冷却材サンプル)
 - ・ Containment Air Sample (格納容器内空気サンプル)
 - ・ Effluent Releases-by Mixtures (混合物による排水放出)
 - ・ Effluent Release Rates-by Nuclide (排出割合 - 核種別)
 - ・ Effluent Release Concentrations-by Nuclide (流出物の放出濃度 - 核種別)

RASCAL を用いて行った、Source Term の設定内容を以下に示す。

- 1) 1F 事故を受け、RASCAL (Ver.4.3) には新たに、電源および冷却機能の喪失後、燃料棒が溶融し放射性物質の外部放出発生に至るまで長時間経過する事故を想定したソースタームモデル「Long Term Station Blackout (SOARCA)」が追加された⁷⁾。そこで本予測でも事故のタイプを「Long Term Station Blackout(SOARCA)」とした (図 11.2-4 の赤枠)。
- 2) 全交流電源喪失時刻である 2011 年 3 月 11 日 15:37⁸⁾をシャットダウンの時刻とする (図 11.2-5 の赤枠①)。
- 3) D/W 圧力の測定値にあわせて地震発生約 12 時間後の格納容器の気相部からの漏えいを仮定していることから、本予測の放出開始時刻は 2)に示したシャットダウンした時刻から約 12 時間後の翌 3:07 とした (図 11.2-5 の赤枠②⁹⁾)。
- 4) 原子炉圧力容器の状態を示すパラメータは、1 号機は津波到達後比較的早い段階で燃料ペレットが溶融したため、溶融燃料が原子炉圧力容器を通過して原子炉格納容器底部に落下していたことから、「Vessel through」を選択した (図 11.2-5 の赤枠③)。

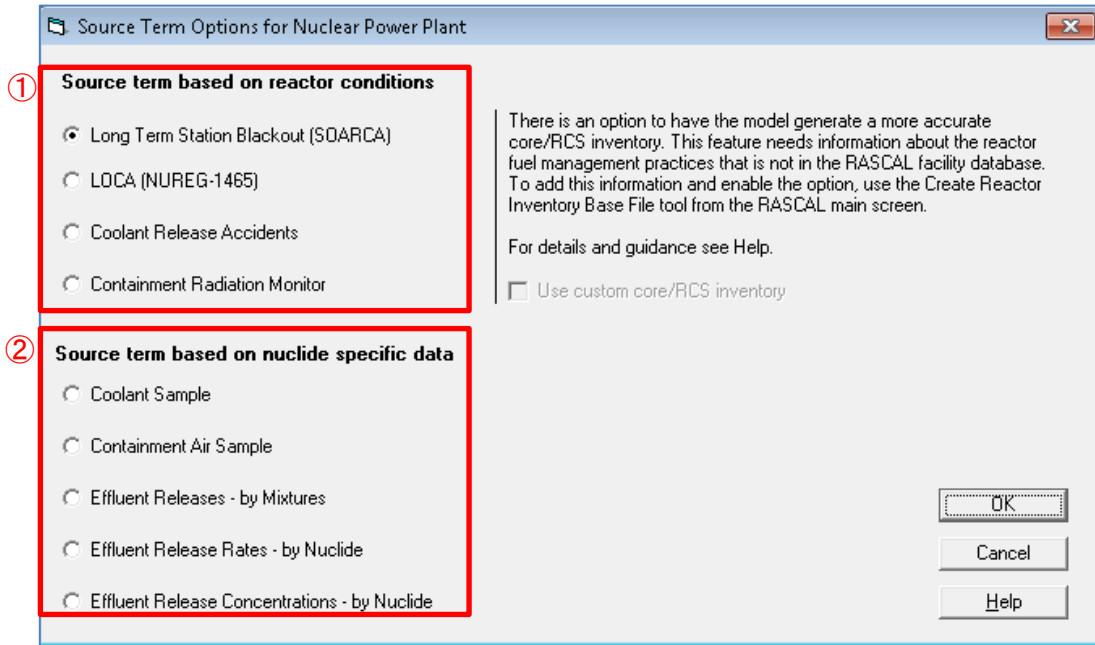


図 11.2-4 Source Term Options 設定画面

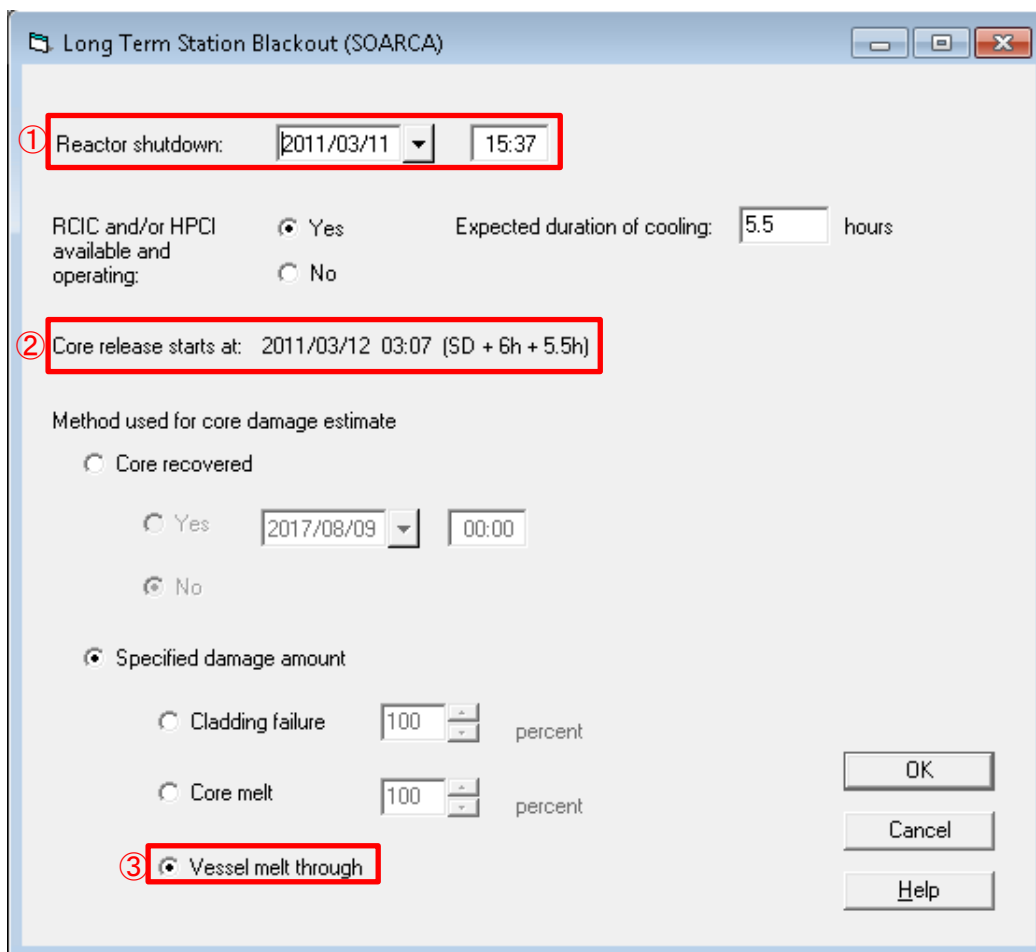


図 11.2-5 Long Term Station Blackout(SOARCA)設定画面

また、RASCAL (Ver.4.3) では炉心内蔵量データ (表 11.2-2) をデフォルトで備えている。そのため、計算対象の炉型を選択し、事故発生時点の燃焼度を RASCAL システムの"EVENT LOCATION"セクションで入力することで、表 11.2-2 に示した事故時放出量に關与する炉心内蔵量が決定されて、RASCAL の解析に使用される構成となっている。

表 11.2-2 炉心内蔵量データ

Radionuclide	Half-life (d)	Decay Constant (1/d)	RASCAL (VER.4.3) Model Production	
			BWR (Bq/MWt)/d	PWR(Bq/MWt)/d
H-3	4.51E+03	1.54E-04	5.77E+08	5.81E+08
Co-58	7.08E+01	9.79E-03	1.50E+11	1.40E+11
Co-60	1.92E+03	3.61E-04	9.72E+09	1.05E+10
Kr-85m	1.87E-01	3.71E+00	8.93E+14	8.29E+14
Kr-85	3.91E+03	1.77E-04	1.15E+10	1.11E+10
Kr-87	5.30E-02	1.31E+01	6.30E+15	5.85E+15
Kr-88	1.18E-01	5.87E+00	3.91E+15	3.62E+15
Rb-86	1.87E+01	3.71E-02	8.93E+10	9.82E+10
Sr-89	5.05E+01	1.37E-02	1.26E+13	1.17E+13
Sr-90	1.06E+04	6.54E-05	9.40E+10	9.05E+10
Sr-91	3.96E-01	1.75E+00	2.05E+15	1.91E+15
Sr-92	1.13E-01	6.13E+00	7.67E+15	7.23E+15
Y-90	2.67E+00	2.60E-01	4.80E+13	4.22E+13
Y-91	5.85E+01	1.18E-02	1.42E+13	1.34E+13
Y-92	1.48E-01	4.68E+00	5.90E+15	7.11E+11
Y-93	4.21E-01	1.65E+00	1.59E+15	1.51E+15
Zr-95	6.40E+01	1.08E-02	1.84E+13	1.79E+13
Zr-97	7.04E-01	9.85E-01	1.64E+15	1.61E+15
Nb-95	3.52E+01	1.97E-02	3.36E+13	3.28E+13
Mo-99	2.75E+00	2.52E-01	4.66E+14	4.60E+14
Tc-99m	2.51E-01	2.76E+00	4.52E+15	4.50E+15
Ru-103	3.93E+01	1.76E-02	2.77E+13	2.87E+13
Ru-105	1.85E-01	3.75E+00	4.05E+15	4.34E+15
Ru-106	3.68E+02	1.88E-03	1.33E+12	1.45E+12
Rh-105	1.47E+00	4.72E-01	4.86E+14	5.13E+14
Sb-125	1.01E+03	6.86E-04	1.32E+10	1.41E+09
Sb-127	3.85E+00	1.80E-01	1.53E+13	1.60E+13
Te-127m	1.09E+02	6.36E-03	9.17E+10	9.56E+10
Te-127	3.90E-01	1.78E+00	1.49E+14	1.56E+14

Radionuclide	Half-life (d)	Decay Constant (1/d)	RASCAL (VER.4.3) Model Production	
			BWR (Bq/MWt)/d	PWR(Bq/MWt)/d
Te-129m	3.36E+01	2.06E-02	1.25E+12	1.28E+12
Te-129	4.83E-02	1.44E+01	4.30E+15	4.37E+15
Te-131m	1.25E+00	5.55E-01	1.08E+14	1.10E+14
Te-132	3.26E+00	2.13E-01	3.00E+14	2.98E+14
I-131	8.04E+00	8.62E-02	8.46E+13	8.48E+13
I-132	9.58E-02	7.24E+00	1.04E+16	1.04E+16
I-133	8.67E-01	7.99E-01	1.62E+15	1.60E+15
I-134	3.65E-02	1.90E+01	4.24E+16	4.18E+16
I-135	2.75E-01	2.52E+00	4.87E+15	4.83E+15
Xe-133	5.25E+00	1.32E-01	2.64E+14	2.66E+14
Xe-135	3.79E-01	1.83E+00	1.49E+15	1.23E+15
Cs-134	7.53E+02	9.21E-04	3.25E+11	3.59E+11
Cs-136	1.31E+01	5.29E-02	4.93E+12	4.91E+12
Cs-137	1.10E+04	6.30E-05	1.25E+11	1.25E+11
Ba-139	5.74E-02	1.21E+01	2.15E+16	2.11E+16
Ba-140	1.27E+01	5.46E-02	9.73E+13	9.60E+13
La-140	1.68E+00	4.13E-01	7.73E+14	7.55E+14
La-141	1.64E-01	4.23E+00	6.87E+15	6.71E+15
La-142	6.42E-02	1.08E+01	1.71E+16	1.67E+16
Ce-141	3.25E+01	2.13E-02	3.49E+13	3.44E+13
Ce-143	1.38E+00	5.02E-01	7.61E+14	7.38E+14
Ce-144	2.84E+02	2.44E-03	3.46E+12	3.41E+12
Pr-143	1.36E+01	5.10E-02	7.54E+13	7.37E+13
Nd-147	1.10E+01	6.30E-02	4.17E+13	4.13E+13
Np-239	2.36E+00	2.94E-01	5.60E+15	6.03E+15
Pu-238	3.20E+04	2.17E-05	4.02E+09	4.52E+09
Pu-239	8.78E+06	7.89E-08	2.99E+08	2.82E+08
Pu-240	2.39E+06	2.90E-07	4.67E+08	4.37E+08
Pu-241	5.26E+03	1.32E-04	1.44E+11	1.42E+11
Am-241	1.58E+05	4.39E-06	2.34E+08	1.95E+08
Am-242	6.68E-01	1.04E+00	1.60E+14	1.58E+14
Cm-242	1.63E+02	4.25E-03	4.34E+11	4.32E+11
Cm-244	6.61E+03	1.05E-04	3.69E+09	6.10E+09

(4) 放射性物質の放出経路と放出量の時系列 (Release Path)

RASCAL を用いて行った、Release Path の設定内容を以下に示す。

- 1) RASCAL 文献に基づき、ドライウェルからの放出 (Through the dry well wall) を選択した (図 11.2-6 の赤枠①)。
- 2) 放出経路として、フィルターを通過したスタック放出または直接放出を選択できる。本作業では、計画放出に当たるベントやその後の水素爆発といったイベントでの放出はいずれも直接放出に相当するので、直接放出 (Direct from reactor building or other rapid, unfiltered release) を選択した (図 11.2-6 の赤枠②)。
- 3) リーク率の設定はデフォルトで 0.5 %/h に設定されている。本作業では、RASCAL 文献の記載に基づき見直した。すなわち、今回の計算では放出開始直後から 3 日間の極めて初期段階を対象とするので、RASCAL 文献で示される事故初期に含まれるとして、ベント時以外のリーク率をデフォルトの 0.5 %/h から 1 %/h に変更した。
- 4) ベント時は 25 %/h、水素爆発時は 50%/h とした。
- 5) ベント継続期間を 20 分とした。水素爆発については資料が得られなかったため、放出継続時間を 24 分と仮定した。リーク率の経時変化を図 11.2-7 の赤枠に示す。

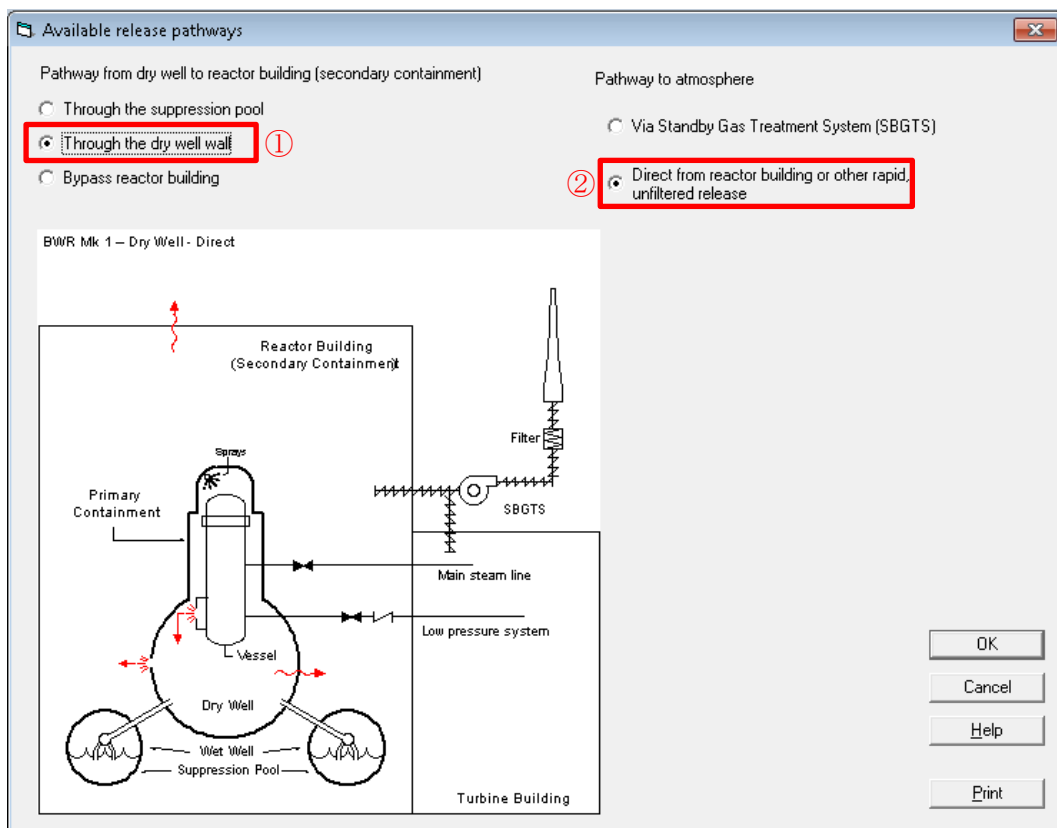


図 11.2-6 Available release pathways 設定画面

BWR - Release Through Dry Well - Direct, unfiltered

Pathway description: (optional; 60 character max)

Release height: (Stack height: 60 ft)

Release timings: Core release starts: 2011/03/12 03:07

Leak rate to atmosphere described by: Percent volume / time
 Containment pressure / hole size

Date	Time	Event	Event setting
2011/03/12	03:07	Leak rate (% vol)	1. %/h
2011/03/12	14:30	Leak rate (% vol)	25. %/h
2011/03/12	14:50	Leak rate (% vol)	1. %/h
2011/03/12	15:36	Leak rate (% vol)	50. %/h
2011/03/12	16:00	Leak rate (% vol)	1. %/h
2011/03/15	16:00	Leak rate (% vol)	1. %/h

Add Row
Remove Row
Sort Rows
Clear All

OK
Cancel
Help

図 11.2-7 Release Through Dry Well 設定画面

11.2.2 気象条件

大気中での放射性物質の拡散計算に使用する気象条件について調査や設定を行った。設定する対象の気象範囲は、Release Through Dry Well 設定画面（図 11.2-7）に示したリーク期間（2011/3/12 3:00～16:00）とする。設定内容を項目別に表 11.2-3 に示し、それぞれの詳細を(1)、(2)で解説する。

表 11.2-3 気象データの設定項目一覧

項目	参照元	備考	出典
風速	公開情報資料		参考文献 ¹²⁾ p.1-4
風向	公開情報資料		参考文献 ¹²⁾ p.1-4
日射量	気象データ (福島)	1F に最も近い取得可能位置が福島市の為	国土交通省気象庁「過去の気象データ・ダウンロード (福島 2011 年 3 月 12 日 日照時間 (時間)、雲量 (10 分比))」, < http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/ >
雲量	気象データ (福島)	1F に最も近い取得可能データ位置が福島市の為	国土交通省気象庁「過去の気象データ・ダウンロード (福島 2011 年 3 月 12 日 日照時間 (時間)、雲量 (10 分比))」, < http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/ >
気温	気象データ (小名浜)	1F に最も近い取得可能データ位置が小名浜の為	国土交通省気象庁「過去の気象データ・ダウンロード (小名浜 2011 年 3 月 12 日 気温 (°C))」, < http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/ >
大気安定度	パスケル大気安定度階級分布表		参考文献 ¹⁰⁾ p.2-20 (表 11.2-1)

(1) 気象データの設定

RASCAL は事故時の迅速予測の目的で開発されているため、インターネット経由でのリアルタイムの気象データ取得ツール (MetFetch) が用意されている。ただし、過去データについては外部ファイルから読み込むことを想定していない。この理由から、各地点での気象データは計算コードの GUI 動作環境の元で入力する必要がある。RASCAL に設定した気象データの項目を以下に示す。

- 1) Wind Direct from [deg] (風向※)
- 2) Speed [m/s] (風速)
- 3) Stability Class (大気安定度)
- 4) Air Temp [deg C] (気温)
- 5) Precipitation (降水量)

※ 風向は、風が吹いてくる方向、すなわち風上風向を指す。北を 0° とし時計回りに測定した。

1)~5)の他に、気圧と露点温度が設定可能なのだが、求めた被ばく影響での寄与が少ない理由から設定項目から除くこととする。

(2) 大気安定度の設定

RASCAL に設定した大気安定度についての詳細を以下に示す。

- 1) 大気安定度は、パスキル安定度階級分類表¹⁰⁾を用いて求めた(表 11.2-4)。
- 2) 表 11.2-4 では、日射量がないときを夜間とし、夜間の最初と最後の各 1 時間は雲の状態にかかわらず中立状態 D とした。
- 3) 表 11.2-4 の中間安定度 A-B、B-C および C-D については、A-B は B に、B-C は C に、また夜間の 2 m/s 未満の欄の「G」は F に置き換えて求めた¹¹⁾。
- 4) 表 11.2-4 では、雲量が 8~10 の場合は、地表に近い位置に雲があると仮定して本曇の値を使用した。
- 5) 大気安定度の設定には、表 11.2-4 に示した通り日射量と雲量が必要となる。事故発生時期におけるサイト近傍の観測で日射量と雲量の利用可能なデータは「福島県福島市」のデータだったので、これを使用した。
- 6) 風速と風向は、東京電力が公開している 1F 構内での計測データ(以下、公開情報資料と記す。)¹²⁾に記載された情報を使用する。なお、この公開資料で示される風速、風向は、正門等にモニタリングカーを置き、線量率測定時に風速・風向を合わせて測定したものであり、地震・津波の影響で機能停止していたサイト内の気象観測設備で測定したものではない。周辺の気象官署も地震・津波の影響で配信不能となっていたため、今回は、利用可能な上述の気象データで代表させた気象場を生成して計算に利用する。

なお、本作業の主目的の対象とする将来の燃料デブリ取出し時の評価の際には、当該サイトと周辺気象官署の気象データを取り組んだ計算実行が期待できる。

表 11.2-4 パスキル安定度階級分類表

風速(U) m/s	昼間 日射量 (T) kw/m ²				夜間 雲量		
	T ≥ 0.60	0.60 > T ≥ 0.30	0.30 > T ≥ 0.15	0.15 > T	本曇 (8 ~ 10)	上層雲(5 ~ 10) 中・下層雲(5 ~ 7)	雲量 (0 ~ 4)
U < 2	A	A-B	B	D	D	G	G
2 ≤ U < 3	A-B	B	C	D	D	E	F
3 ≤ U < 4	B	B-C	C	D	D	D	E
4 ≤ U < 6	C	C-D	D	D	D	D	D
6 ≤ U	C	D	D	D	D	D	D

(3) 地形データ

RASCAL では、米国の対象施設の地形データを内蔵するデータベースに持っている。しかし、1F 周辺の地形データは用意されていないため、今回の計算では、地形の起伏を考慮しない平面地形での計算とした。なお、RASCAL に地形データをユーザが独自入力する手段は準備されていない。

11.2.3 被ばく影響の計算

前項までに示した条件を RASCAL に設定して、「Calculate dose」設定画面の「OK」ボタンをクリックすることで計算が実施される（図 11.2-8 の赤枠）。この計算により、放射性物質の放出量、外部被ばく線量率および核種の沈着率分布を得た。

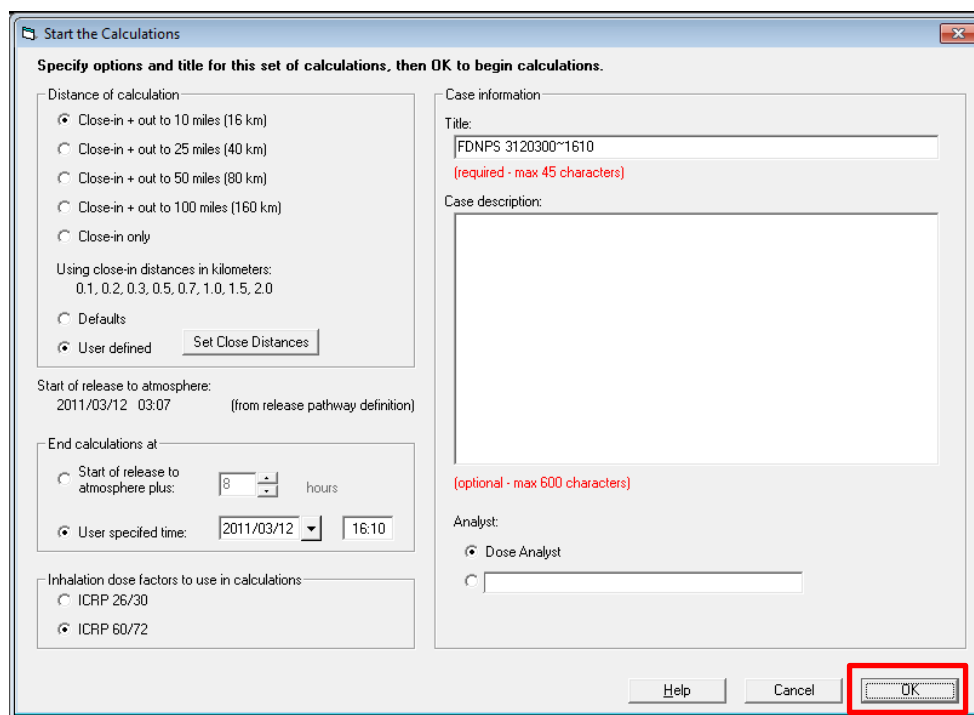


図 11.2-8 「Calculate dose」設定画面

(1) 放射性物質の放出量の推定値

11.2.1～11.2.2 の条件で RASCAL を用いて算出した Cs-137 の放出量推定値を図 11.2-9 の赤枠に示す。求めた放出量推定値を、二種類の文献記載値と比較を行い、妥当性の評価を行った（表 11.2-5）。比較対象の文献は RASCAL 文献および JAEA による放出量推定結果のうち最新の論文（Katata et al.(2015)）¹³⁾を用いた。

なお、RASCAL 文献を用いて計算が行われた当時は RASCAL に「Long Term Station Blackout (SOARCA)」が実装されておらず別な方法で計算を実行したとの記載がある。各モデルによる Cs-137 放出量と比較すると、いずれも同じ桁で一致しており、調査して求めた入力パラメータでの計算結果は妥当であるといえる。（表 11.2-5）。

Containment	2.7E+18 Bq				
RCS	0.0E+00 Bq				
Environment	1.2E+18 Bq				
List of all radionuclides released with total activity					
Nuclide	Bq	Nuclide	Bq	Nuclide	Bq
Ba-139	3.2E+11	La-140	2.8E+14	Te-127	5.8E+15
Ba-140	2.9E+15	Mo-99	1.6E+16	Te-127m	9.9E+14
Cs-134	7.6E+15	Rb-86	8.3E+13	Te-129	2.7E+15
Cs-136	2.3E+15	Rb-88	1.9E+15	Te-129m	4.2E+15
Cs-137*	5.2E+15	Rh-103m	1.9E+15	Te-131	1.9E+15
Cs-138	1.5E+08	Rh-105	9.7E+14	Te-131m	8.5E+15
I-131	6.2E+16	Ru-103	2.0E+15	Te-132	8.0E+16
I-132	8.3E+16	Ru-105	6.1E+13	Xe-131m	5.9E+15
I-133	6.9E+16	Ru-106*	7.1E+14	Xe-133	8.2E+17
I-134	5.9E+11	Sb-127	3.0E+15	Xe-133m	2.2E+16
I-135	1.7E+16	Sb-129	5.6E+14	Xe-135	1.9E+17
Kr-83m	4.0E+13	Sr-89	1.5E+15	Xe-135m	3.5E+15
Kr-85	4.7E+15	Sr-90	1.5E+14	Y-90	9.6E+12
Kr-85m	4.2E+15	Sr-91	4.1E+14	Y-91	2.1E+12
Kr-87	1.3E+13	Sr-92	1.3E+13	Y-91m	2.2E+14
Kr-88	2.1E+15	Tc-99m	1.5E+16	Y-92	1.0E+13
Notes:					
Display units					
<input type="radio"/> English					
<input checked="" type="radio"/> Metric					
View Balance		View Importance		Release vs. Time	
Print					
Case Summary		Source Term		Maximum Dose Values	

図 11.2-9 本作業で算出した放出量推定値

表 11.2-5 各モデルによる Cs-137 放出量推定値の比較

source term	Cs-137 放出量	積算期間
本作業で算出した放出量の推定値 (図 11.2-9 の赤枠)	[Bq] 5.2×10 ¹⁵	3/11-3/15
RASCAL4_MaterialsAndMethods ³⁾	[Bq] 4.1×10 ¹⁵	期間不明
Katata et al (2015) ¹³⁾	[Bq] 9.8×10 ¹⁵	3/12-5/1

(2) 被ばく影響

RASCAL では、入力された放射性物質放出量に基づき大気拡散計算を実行して、周辺環境の事故時影響を下記 1)～14)に示す項目別に、方位別や時間別で確認することができる。この機能を利用して、11.2.1～11.2.3 で求めた放射性物質放出量を入力条件として大気拡散計算を実行して周辺環境の事故時影響を確認した。

今回使用した RASCAL (Ver.4.3) における結果出力項目を以下に示す。

- 1) 全実効線量当量 (CEDE)
 - A) 吸入による預託実効線量当量 (Inhalation CEDE)
 - B) クラウドシャイン線量 (Cloudshine Dose)
 - C) 4日間グランドシャイン線量 (4-Day Groundshine Dose)
- 2) 甲状腺の預託実効線量等量 (Thyroid CDE)
- 3) 小児甲状腺の預託実効線量等量 (Child Thyroid CDE)
- 4) 1年間の中間段階における全実効線量当量 (1st year Intermediate Phase TEDE)
- 5) 2年間の中間段階における全実効線量当量 (2st year Intermediate Phase TEDE)
- 6) 50年間の中間段階における全実効線量当量 (50st year Intermediate Phase TEDE)
- 7) γ 線による外部被ばく線量率 (External Gamma Exposure Rate)
- 8) 期間指定グランドシャイン線量 (GroundShine Dose Over Defined Time Period)
- 9) 任意核種の地表面土壌濃度 (Ground Concentration of [Nuclide])
- 10) I-131 大気中濃度 (I-131 Air Exposure or Concentration)
- 11) 骨の急性被ばく線量の合計 (Acute Bone Dose Total)
- 12) 呼吸による骨の急性被ばく線量 (Acute Bone Dose from Inhalation Only)
- 13) 肺の急性被ばく線量 (Acute Lung Dose)
- 14) 小腸内壁の急性被ばく線量 (Acute Colon Dose)

また予測期間は、対象期間、予測全期間、指定期間、ある特定の時刻から選択することができる。1)～14)の結果出力項目から、外部被ばく線量率と、核種「Cs-137」の沈着量を求めた結果を、以下に記述した。

① 外部被ばく線量率

RASCAL で求めた外部被ばく線量率を図 11.2-10 に示す。

測定距離は 1F から 2 km 圏内とする。観測時刻は、Release Through Dry Well 設定画面 (図 11.2-7) の設定内容を参考に、水素爆発時刻である 2012/3/12 15:36 付近とする。

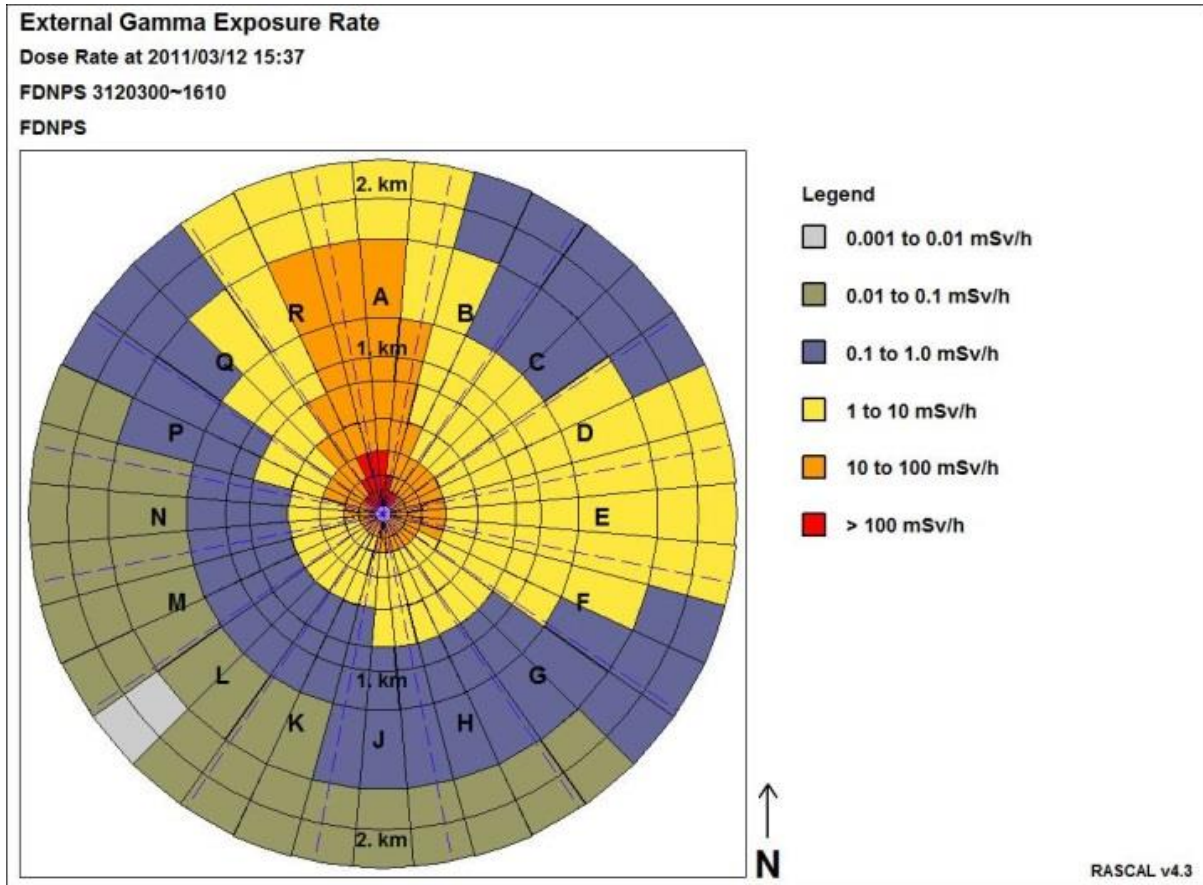


図 11.2-10 計算出力結果（1F から 2km 圏内の外部被ばく線量率）

② 核種「Cs-137」の沈着量

RASCAL で求めた Cs-137 沈着量を図 11.2-11 に示す。

測定距離は 1F から 2 km 圏内とする。観測時刻は、Release Through Dry Well 設定画面（図 11.2-7）の設定内容から、リーク期間である 2012/3/12 3:00～2012/3/12 16:00 付近とする。

Surface Concentration of Cs-137*

Deposited between 2011/03/12 03:07 and 2011/03/12 16:07

FDNPS 3120300~1610

FDNPS

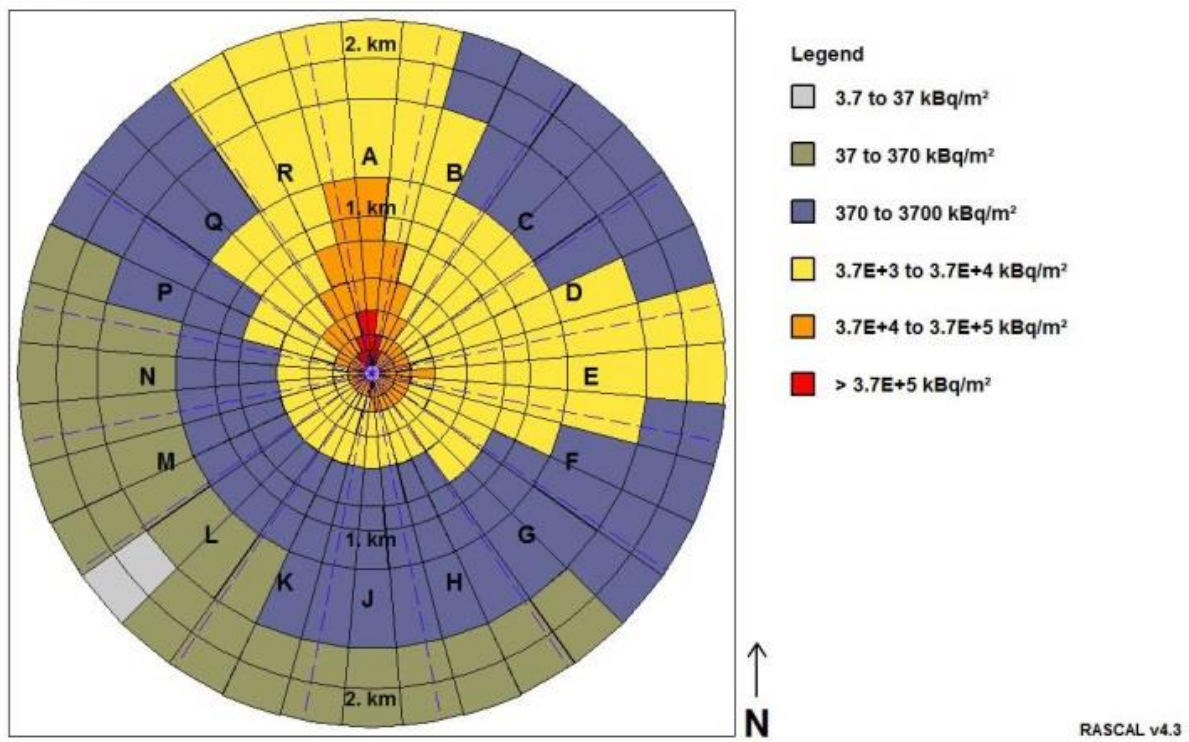


図 11.2-11 計算出力結果 (1F から 2 km 圏内の Cs-137 沈着量)

11.2.4 被ばく影響の妥当性の評価

11.2.3 に記載した被ばく影響の計算結果と実測値の比較を行い、計算結果が妥当であるかどうか評価した。

Release Through Dry Well 設定画面（図 11.2-7）の設定に基づき、リーク時である 2011 年 3 月 12 日 3:00～16:00 までの範囲の外部被ばく線量率を求めて、公開情報資料の傾向（表 11.2-6）と比較することで、信頼できる値かどうか調査した。

表 11.2-6 測定地点の風配状況（公開情報）

日付	時刻	風速 [m/s]	風向 [方位]	風向 [deg]
2011/3/12	3:10:00	0.9	西	270
2011/3/12	3:30:00	0.6	西	270
2011/3/12	3:50:00	0.4	北北西	337.5
2011/3/12	4:10:00	0.6	西	270
2011/3/12	5:00:00	0.5	西	270
2011/3/12	5:20:00	0.5	南西	225
2011/3/12	5:40:00	0.9	西	270
2011/3/12	6:00:00	0.5	西	270
2011/3/12	6:30:00	0.2	西南西	247.5
2011/3/12	7:00:00	0.4	西	270
2011/3/12	7:20:00	0.4	南西	225
2011/3/12	7:50:00	1.1	南	180
2011/3/12	8:10:00	0.9	南西	225
2011/3/12	8:40:00	2	南	180
2011/3/12	9:00:00	2	南東	135
2011/3/12	9:30:00	2.5	南東	135
2011/3/12	9:50:00	2.8	南南東	157.5
2011/3/12	10:10:00	2.2	南東	135
2011/3/12	10:30:00	1.8	北	0
2011/3/12	10:50:00	1.7	北	0
2011/3/12	11:10:00	2.7	南西	225
2011/3/12	11:30:00	1.6	東	90
2011/3/12	11:50:00	2.7	北西	315
2011/3/12	12:10:00	1.9	西	270
2011/3/12	12:30:00	1.8	南東	135
2011/3/12	12:50:00	1.7	南東	135
2011/3/12	13:10:00	2.6	南	180
2011/3/12	13:40:00	2.3	南東	135

日付	時刻	風速 [m/s]	風向 [方位]	風向 [deg]
2011/3/12	14:00:00	3.5	南南東	157.5
2011/3/12	14:20:00	3.3	南南東	157.5
2011/3/12	14:40:00	2.7	南	180
2011/3/12	15:00:00	2.7	南南東	157.5
2011/3/12	15:20:00	3.2	南南東	157.5
2011/3/12	15:40:00	3	南	180
2011/3/12	16:07:00	0.6	南南東	157.5

(1) 調査方法

調査方法の詳細を以下に示す。

- 1) 東京電力が公開している計測地点¹⁴⁾を、放出地点を中心として角度（北が0°、時計回り）と距離に整理して表 11.2-7 に示した
- 2) 1)を参考に、正門付近の外部被ばく線量率を時刻ごとにプロットした（図 11.2-12）。
- 3) 1)を参考に、方位別の外部被ばく線量率をプロットした（図 11.2-13）。
- 4) 2)、3)で作成した図 11.2-12 と図 11.2-13 の散布図を参照して、本作業で RASCAL を使用して求めた外部被ばく線量率の妥当性を検討した。

表 11.2-7 測定地点の角度と距離

モニタリングポスト	角度	距離
MP-1	350°	1200 m
MP-2	330°	1000 m
MP-3	310°	900 m
MP-4	300°	800 m
MP-5	280°	800 m
西門	270°	800 m
MP-6	230°	900 m
正門	220°	700 m
MP-7	210°	700 m
MP-8	180°	800 m

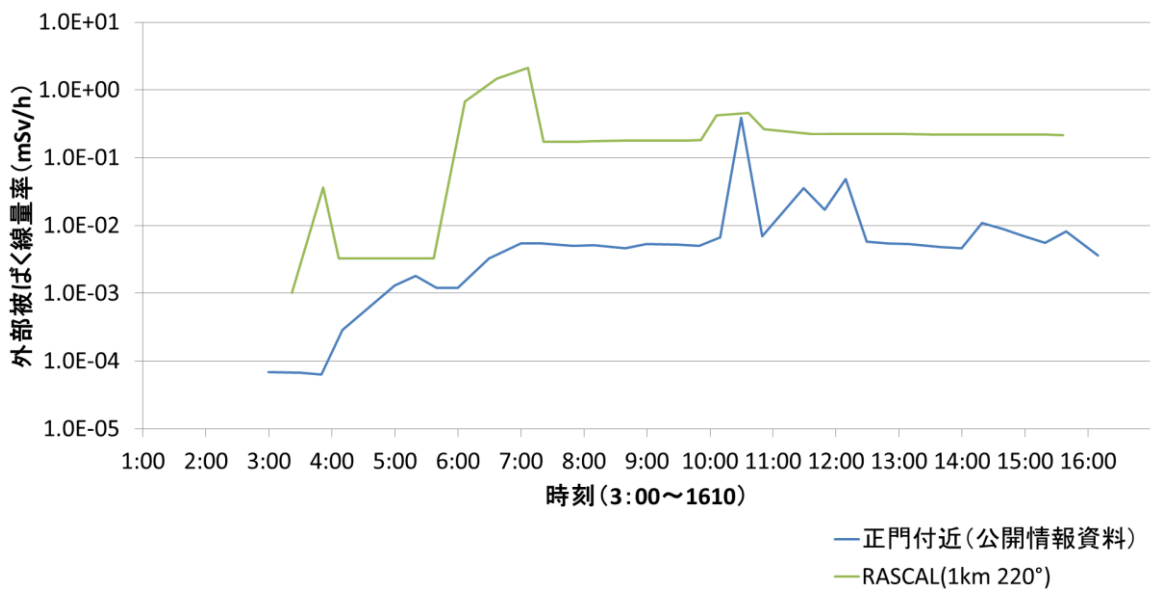


図 11.2-12 外部被ばく線量率の時間変化

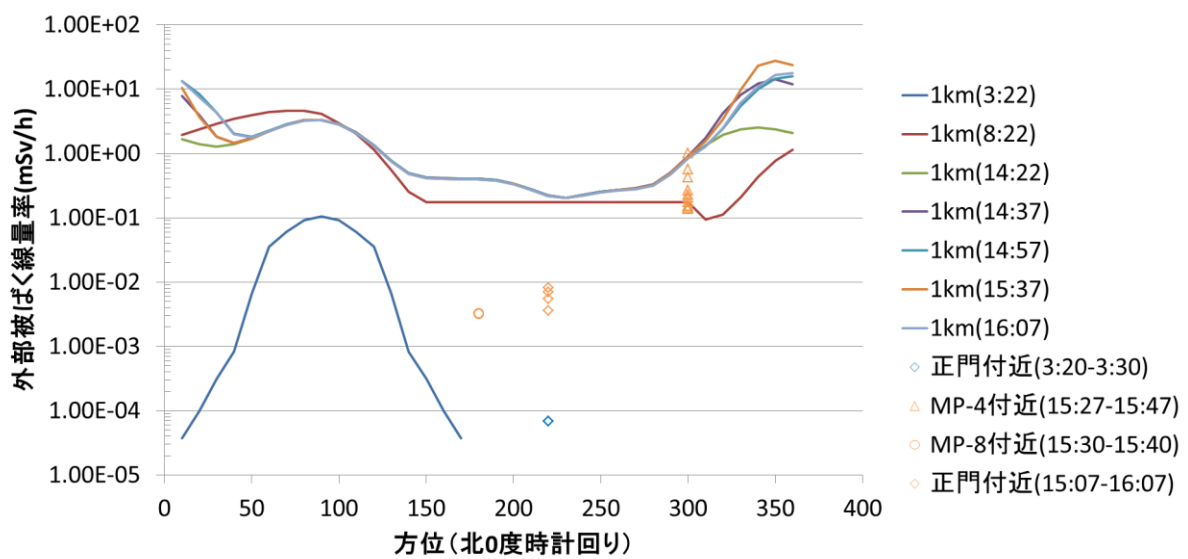


図 11.2-13 方位別の外部被ばく線量率

(2) 調査結果

図 11.2-12 と図 11.2-13 を元に求めた外部被ばく線量率の調査結果を以下に示す。

外部被ばく線量率の時間変化調査結果

外部被ばく線量率の時間変化について調査結果を以下に示す。

- 1) 外部被ばく線量率の時間変化 (図 11.2-12) を見ると、線量率は午前 7 時まで上昇傾向を示す。その後、午前 10~11 時付近を除いて、線量率はほぼ一定となる。公開情報資料¹²⁾のデータを元に作成した 2011 年 3 月 12 日 3:00~16:00 の風向分布 (図

11.2-14) から明らかなように、8 時頃から南東 (135°) へ向かう風配が多く見られる。各測定場所の角度と距離 (表 11.2-7) によると、正門は 1F1 号機から南西 (220°) に位置しているため、この時間帯には放射性プルームの飛来する風配はなく、10 時頃を除けば放射性プルームの外部被ばく線量率への寄与は少ないため、それ以前に地表沈着した放射性物質による外部被ばく線量率がほぼ一定の水準で観測されていると考えられる。

- 2) 測定値 (正門) は 3 月 12 日 4:00 に北東 (45°)、5:10 に東北東 (67.5°) の風が吹いたので、その時刻周辺で正門が風下になり線量率が増加したと考えられる。
- 3) 風向分布 (図 11.2-14) を見ると 10:00~11:30 の間に南東、北、東の風があり、正門付近が風下になるため放射性雲が飛来したため、これらの時間に線量率の増加が見られたと推測される。

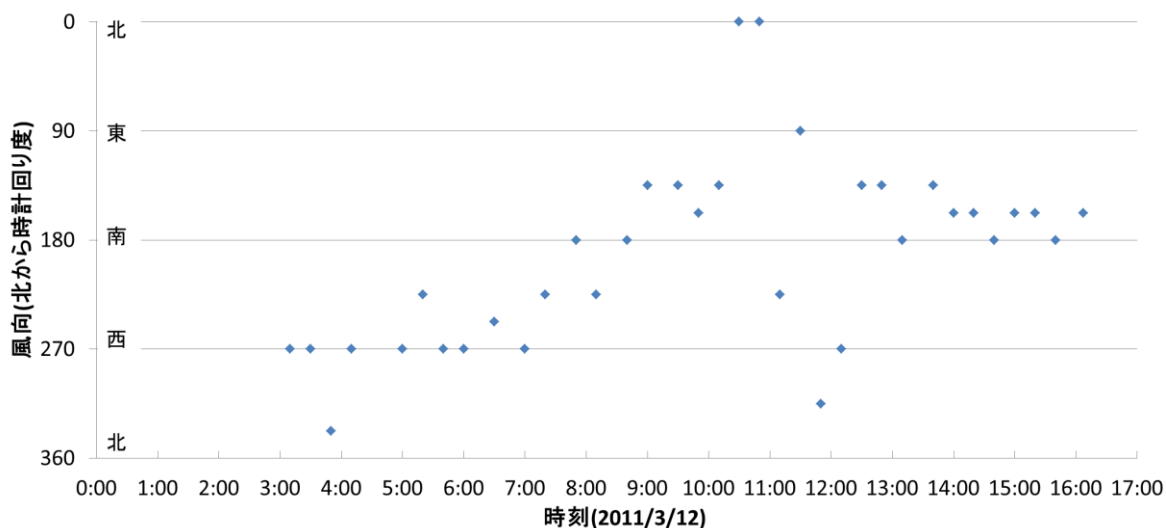


図 11.2-14 風向の時間分布

方位別の外部被ばく線量率の調査結果

方位別の外部被ばく線量率の調査結果を以下に示す。

- 1) 風向の時間分布 (図 11.2-14) に基づき、線量率が上昇している 2011 年 3 月 12 日 3:00 ~ 3:30 付近の風向を調査した所、西から東に風が吹いていることがわかった。このことから、東 (90°) 向きに放射性物質が流れて方位 90° の線量率が上昇していると推測する (図 11.2-13 の 1 km(3:22)線)。
- 2) 公開情報資料では、2011 年 3 月 12 日 15:37 付近の風向は南南東であり、北北西 (337.5°) 周辺に放射線雲が流れて外部被ばく線量率が上昇する。このことを踏まえた場合、15:37 の方位別の線量率 (図 11.2-13 の 1 km(15:37)線) を見ると 300 ~ 350° の方位で線量率が上昇していることがわかる。
- 3) 図 11.2-13 の「方位別の外部被ばく線量率」には、リーク時周辺の公開情報資料に記載された MP-4 付近、正門付近、MP-8 付近の線量率がプロットされている。このプロットを見ると測定値の大小関係は MP-8 と正門付近がほぼ同等で、1 号炉から北北西の方

- 向に近い MP-4 付近は、MP-8 と正門の値より高い測定値を示している。これは、2)に記載した 300 ~ 350° の方位で線量率が上昇している傾向と同様であると考えられる。
- 4) 風向の時間分布 (図 11.2-14) では、西風は 7 時頃まで続き 8 時以降は南東の風に変化している。このことから、方位別の外部被ばく線量率 (図 11.2-13) で方位 90° (東) の 1 km(3:22)線から 1 km(8:22)線までの線量率の上昇理由は、西風により運ばれた放射性物質が沈着して、その積算値の結果であると考えられる。また 8:22 以降上昇が無い理由は、風が 8:22 以降当該方向 (東向き) に吹かなかったため、さらなる放射性物質が蓄積されなかったからと考えられる。

計算値と測定値で差が発生してしまう原因の調査結果

外部被ばく線量率の時間変化 (図 11.2-12) の結果では、RASCAL (VER.4.3) で求めた計算値と公開情報資料に記載された測定値に大きな差が生じた。この原因についての調査内容や、原因が記載された RASCAL 文献の内容について以下に示す。

地形の考慮

計算値と測定値で差が発生してしまう原因として、RASCAL (VER.4.3) では地形データを用意していない理由からすべて同じ平面上にあるとして計算していることが指摘できる。種々の情報から 1F 周辺の地形について調査した内容を以下に示す。

- 1) 原子炉を格納する原子炉建屋は標高 10 m (岩盤に近づけるため元々標高 35 m 丘陵部を削って標高 10 m にした。) である。
- 2) 正門や MP-4 などがある丘陵部は標高 35 m である。

格納容器の高さは約 32 m であるが、標高 10 m の地表より低い位置に設置されているので、格納容器最上部は標高 30 m に達していない。

これら 1)~3)の内容を踏まえて、正門や MP-4 は格納容器の高さより高い崖の上の先にあるといえると推測する。

RASCAL 文献に記載された計算値と測定値で差が発生してしまう原因

計算値と測定値で差が発生してしまう原因について、RASCAL 文献にはいくつか理由が記載されていた。記載内容を抜粋して以下に示す。

- 1) ドライウェルからのリーク率の設定は、現実の情報を基にしていない。
- 2) RASCAL は二次格納容器 (建屋) をモデル化しておらず、一次格納容器から放出された放射性物質は、環境に直接移行する。1F1 号機の実際の格納容器は、建屋に囲まれている。
- 3) 直線ガウスプルームモデルは、風速が小さいと濃度、線量率を過大評価する傾向がある。この挙動の理由は、直線ガウスプルームモデルが、風速を有意な正の値 (例えば、 $v > 5 \text{ m/s}$) である場合を想定しているからである。

以上の予備調査から、RASCAL で計算を行う際は、建屋や地形の影響を考慮する環境が汎用的に準備されていないため、計算結果と測定値に差が生じる可能性がある。しかし、サイトを代表する気象条件を準備することで、RASCAL の計算結果は、風配の推移を反映した結果を与えることが確認できた。ソースタームの推定が合理的に達成できれば、RASCAL の計算結果を事故時影響の測定に役立てることは可能であると考えられる。

11.3 燃料デブリ取り出し時の影響評価

仮想的な燃料デブリ取り出しシナリオに従って、臨界になった場合の被ばく影響の評価を試行した。

解析の流れを以下に示す。また、これらの流れをフロー形式で図 11.3-1 に示す。

1) LHS を用いた計算ケースの作成

中性子実効増倍率及び確率密度分布に基づき、LHS を用いて 10 ケース程度の計算ケースを作成する。この作業に必要な実効増倍率（以下、 k_{eff} と記す。）は、第 10 章で求めた値を使用する。

2) 動特性パラメータの算出

昨年度の作業では、デブリ半径・濃縮度等を LHS で変動させた値を SRAC-TWODANT 計算の入力値として、 k_{eff} や中性子寿命等の動特性パラメータを算出していた。しかし今回の作業では、デブリの取り出し後の半円凹型の形状から動特性パラメータを求めることが困難である。この理由から、昨年度の作業で求めた 1F1 号機の RPV 底部の SRAC-TWODANT 計算 (k_{eff} 、中性子寿命、遅発中性子割合等) (表 11.3-1 に基づき k_{eff} に対する中性子寿命、遅発中性子割合等の近似式を作成して、本作業で用いる k_{eff} に対する中性子寿命、遅発中性子割合等の動特性パラメータを決定する。

3) 動特性解析結果

2) で求めた動特性パラメータから、ケースごとに動特性解析を行う。なお、動特性解析には臨界事象解析コードである AGNES-P を使用する。

4) 核分裂数や期待値の算出

3) で求めた動特性解析結果から、ケースごとの核分裂数を求める。また、3) の結果や核分裂数の期待値を求める。

5) 核分裂生成物 (FP) 生成量の算出

4) で求めた核分裂数から、核分裂生成物 (FP) 生成量を求める。

6) 被ばく影響の算出

5) で求めた FP 生成量の結果を使用して、被ばく影響を求める。

7) 被ばく影響の期待値の評価

6) で求めた被ばく影響から期待値を求める。

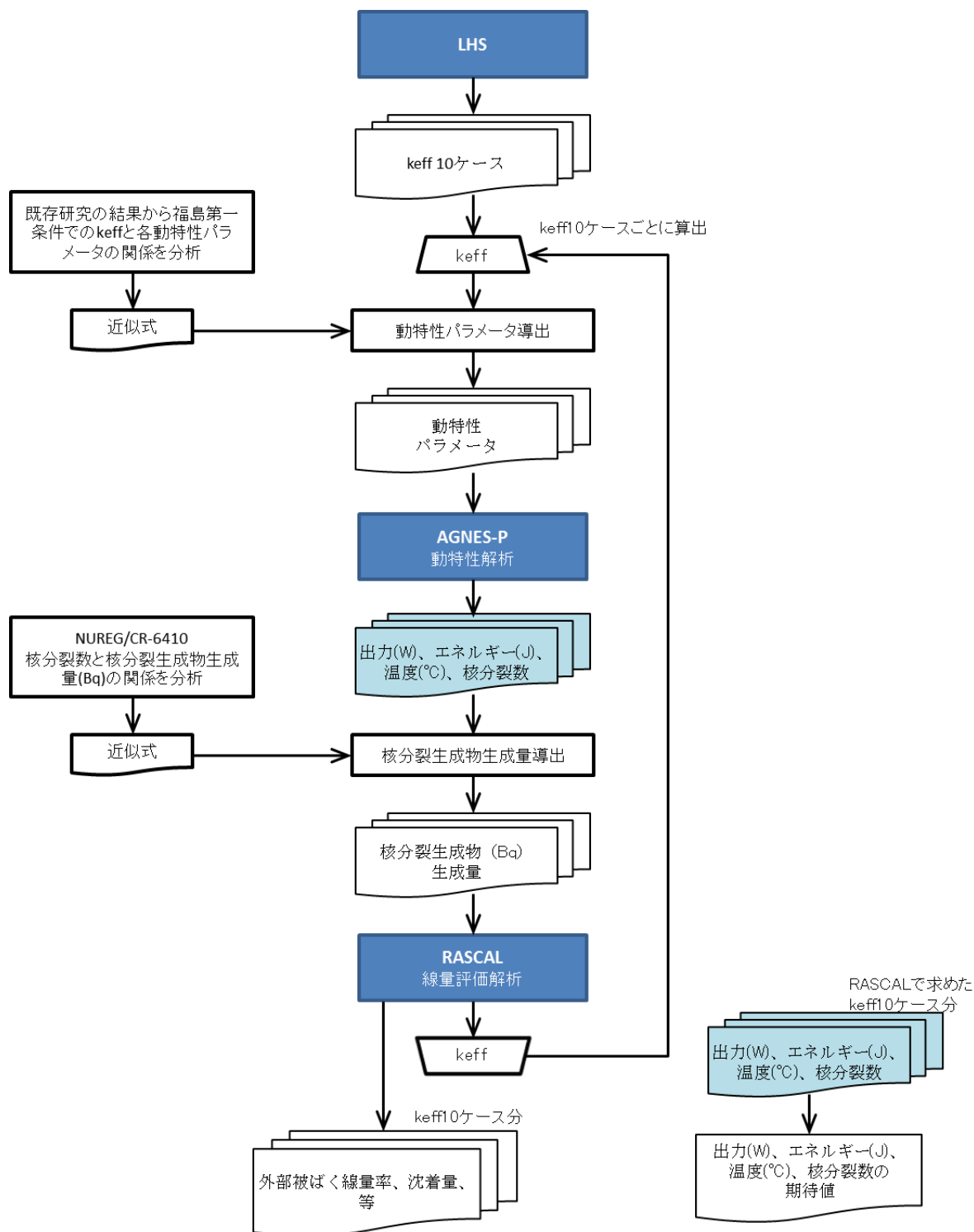


図 11.3-1 解析の流れ