

平成 30 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業
原子力システム研究開発事業

凸型炉心形状による再臨界防止
固有安全高速炉に関する研究開発

成果報告書

平成 31 年 3 月

学校法人五島育英会 東京都市大学

本報告書は、文部科学省の原子力システム研究開発事業による委託業務として、学校法人五島育英会東京都市大学が実施した平成 27-30 年度「凸型炉心形状による再臨界防止固有安全高速炉に関する研究開発」の成果を取りまとめたものです。

目次

概略	ix
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1-1
2.2 平成 30 年度の成果の目標及び業務の実施方法	2.2-1
3. 業務の実施内容及び成果	
3.1 再臨界解析評価及び凸型炉心設計	3.1-1
3.1.1 従来炉心との比較及び総合評価	3.1-1
(1) 概要	3.1-1
(2) 凸型炉心の仕様設定、核特性評価及び熱流力設計(平成 27 年度～平成 29 年度)	3.1-2
(3) 従来炉心との比較及び総合評価(平成 30 年度)	3.1-6
(4) まとめ	3.1-11
3.2 凸型炉心に関わる炉心・安全特性検討(再委託先:東北大学)	3.2-1
3.2.1 軸芯燃料利用の効果の検討	3.2-1
(1) 概要	3.2-1
(2) 凸型炉心の安全性評価及び軸芯燃料利用の効果の検討 (平成 27 年度～平成 29 年度)	3.2-1
(3) 軸芯燃料利用の効果の検討(平成 30 年度)	3.2-3
(4) まとめ	3.2-5
3.3 再臨界防止用軸芯燃料の開発(再委託先:日本原子力研究開発機構)	3.3-1
3.3.1 軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討	3.3-1
(1) 概要	3.3-1
(2) 軸芯燃料構造の検討及び軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討 (平成 27 年～平成 29 年)	3.3-1
(3) 軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討(平成 30 年度)	3.3-2
(4) まとめ	3.3-6
3.4 研究推進	3.4-1
4. 結言	4-1
付録 1 円柱型炉心と凸型炉心の被覆管内原子数密度とコンパクション時原子数密度	付 1-1
付録 2 上下凸型炉心外側炉心下部に固定吸収体を設置した場合の効果	付 2-1
付録 3 外側炉心燃料下部—下部ブランケット間のプレナム部の溶融についての検討	付 3-1
付録 4 炉心のさらなる改善案(径方向ブランケット下部削除型炉心及び 内側炉心下部吸収体導入炉心)について	付 4-1

表一覧

表 3.1-1	大型円柱型炉心の仕様	3.1-13
表 3.1-2	凸型炉心の仕様	3.1-14
表 3.1-3	大型円柱型炉心と大型凸型炉心のコンパクト化反応度	3.1-15
表 3.1-4	再臨界解析用径ブランケット等変更凸型炉心仕様	3.1-16
表 3.1-5	径ブランケット仕様変更での凸型炉心再臨界解析結果	3.1-17
表 3.1-6	炉心形状と炉心溶融時挿入反応度の関係	3.1-18
表 3.1-7	上下凸型基準炉心仕様（制御棒 55 体）	3.1-19
表 3.1-8	上下凸型 4 領域炉心の集合体数配分案及び炉心高さ	3.1-20
表 3.1-9	上下凸型 4 領域炉心におけるコンパクト化反応度と最大線出力	3.1-21
表 3.1-10	上下凸型基準炉心仕様（制御棒 55 体）	3.1-22
表 3.1-11	熱特性評価用データ	3.1-23
表 3.1-12	被覆管ホットスポット係数	3.1-23
表 3.1-13	炉心上端のフィルム内、被覆管内温度上昇量	3.1-24
表 3.1-14	全ホットスポット係数	3.1-25
表 3.1-15	実証炉と凸型炉心の集合体仕様	3.1-26
表 3.1-16	実証炉と凸型炉心内外ピンの健全性評価	3.1-27
表 3.1-17	外側炉心燃料の被覆管制限値を 750°Cとした場合	3.1-27
表 3.1-18	集合体出力分布及び集合体内径方向ピーキング係数	3.1-28
表 3.1-19	外側炉心出口温度向上策の適用の場合の各列の被覆管最高温度 と集合体出口温度	3.1-29
表 3.1-20	炉心圧力損失評価結果	3.1-30
表 3.1-21	ピン径変更型上下凸型炉心の仕様	3.1-31
表 3.1-22	集合体出力分布、集合体内径方向ピーキング係数（ケース 1）	3.1-32
表 3.1-23	各列の被覆管最高温度と集合体出口温度（ケース 1）	3.1-32
表 3.1-24	各領域の燃料仕様と圧力損失（ケース 1）	3.1-33
表 3.1-25	集合体出力分布、集合体内径方向ピーキング係数（ケース 2）	3.1-34
表 3.1-26	各列の被覆管温度と集合体出口温度（ケース 2）	3.1-35
表 3.1-27	各領域の燃料仕様と圧力損失（ケース 2）	3.1-36
表 3.1-28	集合体出力分布、集合体内径方向ピーキング係数（ケース 3）	3.1-37
表 3.1-29	各列の被覆管最高温度と集合体出口温度（ケース 3）	3.1-38
表 3.1-30	各領域の燃料仕様と圧力損失（ケース 3）	3.1-39
表 3.1-31	集合体出力分布、集合体内径方向ピーキング係数（ケース 4）	3.1-40
表 3.1-32	各列の被覆管最高温度と集合体出口温度（ケース 4）	3.1-41
表 3.1-33	各領域の燃料仕様と圧力損失（ケース 4）	3.1-42
表 3.1-34	炉心圧損とコンパクト化反応度のまとめ	3.1-43
表 3.1-35	ケース 4 の評価条件	3.1-44
表 3.1-36	ケース 4 の軸芯炉心のコンパクト化反応度	3.1-45

表 3.1-37	ケース 3-1 炉心集合体出力（辺方向）	3.1-46
表 3.1-38	ケース 3-1 炉心集合体最大線出力（辺方向）	3.1-47
表 3.1-39	ケース 3-2 炉心集合体出力（辺方向）	3.1-48
表 3.1-40	ケース 3-2 炉心集合体最大線出力（辺方向）	3.1-49
表 3.1-41	ケース 3 の軸芯炉心のコンパクト化反応度	3.1-50
表 3.1-42	集合体出力分布と集合体内径方向ピーキング係数（ケース 3-2）	3.1-51
表 3.1-43	ケース 3-2 の流量配分結果	3.1-52
表 3.1-44	ケース 3-2 の圧力損失	3.1-53
表 3.1-45	円柱型炉心の仕様	3.1-54
表 3.1-46	円柱型炉心出力分布	3.1-55
表 3.1-47	燃料仕様	3.1-56
表 3.1-48	円柱型炉心の流量配分結果	3.1-57
表 3.1-49	円柱型炉心の圧損評価	3.1-58
表 3.1-50	円柱型炉心出力分布（外側炉心軸芯吸収体配置）	3.1-59
表 3.1-51	集合体出力と集合体内径方向ピーキング係数（円柱型炉心：軸芯有り）	3.1-60
表 3.1-52	流量配分結果（円柱型炉心：軸芯有り）	3.1-61
表 3.1-53	円柱型炉心（軸芯有り、無し）と上下凸型炉心（軸芯有り、無し）の仕様	3.1-62
表 3.1-54	円柱型炉心（軸芯有り、無し）と上下凸型炉心（軸芯有り、無し）の主要炉心特性の比較	3.1-63
表 3.1-55	制御棒価値計算条件（上下凸型基準炉心）	3.1-64
表 3.1-56	制御棒価値均質計算値（上下凸型基準炉心）	3.1-65
表 3.1-57	制御棒反応度収支（上下凸型基準炉心）	3.1-66
表 3.1-58	制御棒価値均質計算値（上下凸型基準炉心）	3.1-67
表 3.1-59	制御棒反応度収支（上下凸型基準炉心）	3.1-68
表 3.2-1	円柱型炉心と凸型炉心の仕様	3.2-6
表 3.2-2	炉心溶融時挿入反応度評価例（MVP 解析結果）	3.2-7
表 3.2-3	大型凸型炉心仕様（制御棒 55 体）	3.2-8
表 3.2-4	大型凸型炉心（制御棒 55 体）の炉心溶融時挿入反応度	3.2-9
表 3.2-5	凸型炉心（制御棒 55 体）の軸芯モデルによる反応度差	3.2-10
表 3.2-6	軸芯モデルペレット内全中性子束分布	3.2-11
表 3.2-7	軸芯モデルペレット内反応率分布	3.2-12
表 3.2-8	上下凸型炉心の解析体系（軸芯無し）	3.2-13
表 3.2-9	上下凸型炉心の解析体系（軸芯有り）	3.2-14
表 3.2-10	円柱型炉心の仕様（軸芯無し）	3.2-15
表 3.2-11	円柱型炉心の仕様（軸芯有り）	3.2-16
表 3.2-12	円柱型炉心（軸芯有り、軸芯無し）及び上下凸型炉心（軸芯有り、軸芯無し）の炉心特性の比較	3.2-17

表 3. 2-13	膨張反応度係数	3. 2-18
表 3. 2-14	事故時反応度	3. 2-19
表 3. 3-1	加熱溶融試験と高温保持試験の試験条件	3. 3-7
表 3. 3-2	供試体の仕様	3. 3-7
付表 1-1	上下凸型炉心（軸芯無し（ケース 3））	付 1-2
付表 1-2	上下凸型炉心（軸芯有り（ケース 3-2））	付 1-3
付表 1-3	円柱型炉心（軸芯無し）	付 1-4
付表 1-4	円柱型炉心（軸芯有り）	付 1-5
付表 1-5	ケース 1 TRU 富化度 24%	付 1-6
付表 1-6	ケース 2 TRU 富化度 35%	付 1-7
付表 1-7	ケース 4 TRU 富化度 30% 外側炉心のピン径 8 mm のケース	付 1-8
付表 2-1	集合体でのピン本数と吸収体体積比の関係	付 2-2
付表 2-2	ケース 3 炉心各炉心健全時及びコンパクト時原子数密度 及び寸法等データ（固定吸収体 24 体配置時）	付 2-2
付表 3-1	炉心の重量と外側炉心プレナム部の溶解に必要な熱量と外側炉心の ガスプレナムを溶解させた場合の溶融燃料温度低下量（1/2）	付 3-3
付表 3-1	炉心の重量と外側炉心プレナム部の溶解に必要な熱量と外側炉心の ガスプレナムを溶解させた場合の溶融燃料温度低下量（2/2）	付 3-4

図一覧

図 3.1-1	凸型炉心の検討の流れ(平成 27 年度～平成 29 年度)	3.1-69
図 3.1-2	未臨界性解析大型円柱型炉心モデル	3.1-70
図 3.1-3	未臨界性解析大型凸型炉心の燃料溶融前後の解析モデル	3.1-71
図 3.1-4	ブランケット部仕様変更の再臨界解析モデル	3.1-72
図 3.1-5	溶融前後の H/D 比変化と挿入反応度の評価結果	3.1-73
図 3.1-6	上下凸型 4 領域炉心健全状態	3.1-74
図 3.1-7	上下凸型 4 領域炉心溶融状態	3.1-75
図 3.1-8	集合体出力分布及び集合体内径方向ピーキング係数	3.1-76
図 3.1-9	必要流量と設計流量の比較(外側炉心集合体出口温度向上策適用)	3.1-77
図 3.1-10	集合体出口温度分布図(外側炉心集合体出口温度向上策適用)	3.1-78
図 3.1-11	集合体断面仕様(ケース 3)	3.1-79
図 3.1-12	集合体出力分布及び集合体内径方向ピーキング係数 (ケース 1 と Pu 富化度調整型上下凸型炉心の比較)	3.1-80
図 3.1-13	設計流量と必要流量の比較	3.1-81
図 3.1-14	集合体出口温度分布(ケース 1)	3.1-82
図 3.1-15	集合体出力分布及び集合体内径方向ピーキング係数 (ケース 2 とケース 1 との比較)	3.1-83
図 3.1-16	設計流量と必要流量の比較(ケース 2)	3.1-84
図 3.1-17	集合体出口温度分布(ケース 2)	3.1-85
図 3.1-18	集合体出力分布及び集合体内径方向ピーキング係数 (ケース 3 とケース 2 との比較)	3.1-86
図 3.1-19	設計流量と必要流量の比較(ケース 3)	3.1-87
図 3.1-20	集合体出口温度分布(ケース 3)	3.1-88
図 3.1-21	集合体出力分布及び集合体内径方向ピーキング係数 (ケース 4 とケース 2 との比較)	3.1-89
図 3.1-22	設計流量と必要流量の比較(ケース 4)	3.1-90
図 3.1-23	集合体出口温度分布(ケース 4)	3.1-91
図 3.1-24	上下凸型軸芯炉心の線出力分布の比較(基準: ケース 4)	3.1-92
図 3.1-25	上下凸型軸芯炉心の線出力分布の比較(基準: ケース 3)	3.1-93
図 3.1-26	集合体出力分布及び集合体内径方向ピーキング係数 (ケース 3-1 とケース 3-2 との比較)	3.1-94
図 3.1-27	流量配分結果(ケース 3-2)	3.1-95
図 3.1-28	円柱型炉心(炉心高さ 80 cm) の出力分布計算モデル	3.1-96
図 3.1-29	円柱型炉心と上下凸型炉心(ケース 3) の出力分布の比較	3.1-97
図 3.1-30	円柱型炉心(軸芯無し) の流量配分	3.1-98
図 3.1-31	円柱型炉心(軸芯無し) と円柱型炉心(軸芯有り) の 集合体出力分布の 比較	3.1-98
図 3.1-32	円柱型炉心(軸芯無し) と円柱型炉心(軸芯有り) の線出力分布の比較	3.1-99

図 3.1-33	円柱型炉心（軸芯無し）と円柱型炉心（軸芯有り）の設計流量の比較	3.1-99
図 3.1-34	主炉停止系ワンロードスタック位置	3.1-100
図 3.1-35	後備炉停止系ワンロードスタック位置	3.1-101
図 3.2-1	大型凸型炉心の解析モデル	3.2-20
図 3.2-2	円柱型炉心の解析モデル	3.2-21
図 3.2-3	凸型炉心の径方向中性子束分布と外側炉心軸芯吸収体の効果	3.2-22
図 3.2-4	軸芯燃料ペレット中性子束領域分割図	3.2-23
図 3.2-5	軸芯吸収体各ケースでの全中性子束分布	3.2-24
図 3.2-6	ケース 2 の軸芯吸収体 2 mm φ ケースでの全中性子束分布詳細	3.2-25
図 3.2-7	各ケースの反応率分布	3.2-26
図 3.2-8	上下凸型 4 領域炉心体系	3.2-27
図 3.2-9	円柱型炉心（炉心高さ 80 cm）の出力分布計算モデル	3.2-28
図 3.2-10	上下凸型炉心の集合体出力の比較（軸芯有り、軸芯無し）	3.2-29
図 3.2-11	上下凸型炉心の集合体最大線出力分布の比較（軸芯有り、軸芯無し）	3.2-29
図 3.2-12	上下凸型炉心の集合体設計流量の比較（軸芯有り、軸芯無し）	3.2-30
図 3.2-13	円柱型炉心の集合体出力分布（軸芯有り、軸芯無し）	3.2-30
図 3.2-14	円柱型炉心の集合体線出力の比較（軸芯有り、軸芯無し）	3.2-31
図 3.2-15	円柱型炉心の流量配分（軸芯有り、軸芯無し）	3.2-31
図 3.3-1	模擬軸芯燃料ペレットの概要	3.3-8
図 3.3-2	模擬軸芯燃料ペレットの加熱方法	3.3-8
図 3.3-3	Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の加熱溶融後の外観	3.3-8
図 3.3-4	Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の加熱溶融後の断面（縦断面）	3.3-9
図 3.3-5	Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の加熱溶融後の断面（横断面）	3.3-10
図 3.3-6	Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の加熱溶融後の元素分析結果（試料頂部）	3.3-11
図 3.3-7	Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の加熱溶融後の元素分析結果（試料内部 1）	3.3-11
図 3.3-8	Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の加熱溶融後の元素分析結果（試料内部 2）	3.3-12
図 3.3-9	Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の高温保持試験後の外観	3.3-12
図 3.3-10	Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の高温保持試験後の断面	3.3-13
図 3.3-11	Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の高温保持試験後の元素分析結果	3.3-14
図 3.3-12	Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の外観	3.3-14
図 3.3-13	Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の断面（縦断面）	3.3-15
図 3.3-14	Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の断面（横断面）	3.3-16
図 3.3-15	Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の元素分析結果（試料上部）	3.3-16
図 3.3-16	Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の元素分析結果（試料下部）	3.3-17
図 3.3-17	Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の元素分析結果（試料中央部）	3.3-17
図 3.3-18	Cu-Ni 試料の高温保持試験後の外観	3.3-17
図 3.3-19	Cu-Ni 試料の高温保持試験後の断面	3.3-18

図 3.3-20	Cu-Ni 試料の高温保持試験後の元素分析結果（縦断面）	3.3-19
図 3.3-21	Cu-Ni 試料の高温保持試験後の元素分析結果（横断面）	3.3-19
図 3.3-22	Cu-Zn 試料の加熱溶融試験後の外観	3.3-19
図 3.3-23	Cu-Zn 試料の加熱溶融試験後の断面（縦断面）	3.3-20
図 3.3-24	Cu-Zn 試料の加熱溶融試験後の断面（横断面）	3.3-20
図 3.3-25	Cu-Zn 試料の加熱溶融試験後の元素分析結果	3.3-21
図 3.3-26	Cu-Zn 試料の高温保持試験後の断面	3.3-21
図 3.3-27	Cu-Zn 試料の高温保持試験後の元素分析結果	3.3-22
付図 2-1	上下凸型炉心の制御棒の挿入概念と固定吸収体設置案	付 2-3
付図 2-2	溶融プールと固定吸収体の位置関係	付 2-4
付図 2-3	固定吸収体 軸方向設置可能領域	付 2-5
付図 3-1	基準ケースの反応度、出力、炉内質量	付 3-5
付図 3-2	保守側ケース 1 の反応度、出力、炉内質量	付 3-6
付図 3-3	保守側ケース 3 の反応度、出力、炉内質量	付 3-7
付図 3-4	外側燃料の下部プレナムの溶解での温度変化	付 3-8
付図 3-5	全炉心での下部プレナムの溶解での温度変化	付 3-9
付図 4-1	径方向ブランケット削除型炉心概念（溶融前後の炉心）	付 4-2
付図 4-2	内側炉心下部吸収体導入炉心概念（溶融前後の炉心）	付 4-2

略語一覧

BOL	: Bigining of Life(燃焼初期)
CDA	: Core Disruptive Accident (炉心崩壊事故)
CDF	: Cumulative Damage Fraction(クリープ寿命損傷和)
CR	: Control Rod (制御棒)
CRT モデル	: Chiu-Rohsenow-Todreas model (圧力損失の評価モデル)
CS	: centi - Stokes, cSt (センチストークス)
ENDF	: Evaluated Nuclear Data File (米国で整備された評価済み核データファイル)
EOL	: End of Life (燃焼末期)
FBR	: Fast Breeder Reactor (高速増殖炉)
FCCI	: Fuel Cladding Chemical Interaction (燃料被覆管間の化学的相互作用)
FCI	: Fuel Coolant Interaction. (燃料・冷却材相互作用)
HEDL	: Hanford Engineering Development Laboratory (米国国立ハンフォード研究所)
HM インベントリ	: Heavy Metal inventory(重金属量)
IC	: Inner Core (内側炉心)
INES-5	: 5th International Symposium on Innovative Nuclear Energy Systems (第5回革新的原子力システム国際シンポジウム)
JENDL	: Japanese Evaluated Nuclear Data Library (日本で整備された評価済み核データライブラリー)
JSFR	: Japan Sodium-cooled Fast Reactor (日本のループ型ナトリウム冷却高速炉)
MOX	: Mixed-Oxide (混合酸化物燃料)
MVP	: Monte Carlo code for Vector Processors (連続エネルギー法に基づく汎用モンテカルロコード)
OC	: Outer Core (外側炉心)
TRU	: transuranium elements (超ウラン元素)
UAB	: Upper Axial Blanket (上部軸ブランケット)

概略

高速炉炉心部の燃料要素が溶融し、下部軸ブランケット上面に堆積すると想定した場合、従来の円柱炉心形状では、一般に再臨界状態となる。本研究では大型酸化物高速炉を対象に、炉心形状の工夫（断面形状が中央で高い凸型炉心）や、燃料溶融時に中性子自己遮蔽効果が低減して中性子吸収率が增大する軸芯燃料を用いることにより、炉心固有の特性によって再臨界を防止する固有安全高速炉炉心の検討を実施している。

本年度は本研究の最終年度に当たるため、再臨界解析評価及び凸型炉心設計では、従来炉心（円柱型炉心）との比較及び総合評価を、凸型炉心に関わる炉心・安全特性検討では、軸芯燃料利用の効果の検討を、また再臨界防止用軸芯燃料の開発では、軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討を実施する。このうち、東京都市大学ではプロジェクトの総合的推進及び従来炉心との比較及び総合評価を、東北大学では炉心・安全特性検討における軸芯燃料利用の効果の検討を、また日本原子力研究開発機構では軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討を実施する。

平成30年度の成果を以下に示す。

(1) 従来炉心との比較及び総合評価として、凸型炉心と従来炉心の燃料溶融時及び通常運転時の特性を比較し、設計上、炉心性能上の特質を明らかにした。

昨年度に設定した均一 TRU 富化度で炉心内側ほど細径化した燃料を用いた「ピン径調整型上下凸型炉心」と従来炉心（円柱型炉心）の特性を比較するとともに、軸芯燃料の導入効果も含めた総合評価を行った。

軸芯無しの場合、上下凸型炉心はピン径調整型の採用により、円柱型炉心では正となるコンパクション反応度は負となり、かつ圧損は円柱型炉心並みとできた。一方、燃焼反応度は燃料インベントリを低下させたことにより大きくなるため、反応度収支の観点からサイクル長の短縮が必要となる事が明らかになった。また安全性に関わるナトリウムボイド反応度は、上下凸型炉心では円柱型炉心より低下し、ドップラー係数も負側に大きくなり、安全性が高くなることが明らかになった。また軸芯燃料を装荷した場合の円柱型炉心と上下凸型炉心の特性の差は、軸芯無しの場合と基本的には同様の傾向となっていることが明らかになった。

(2) 凸型炉心に関わる炉心・安全特性検討における軸芯燃料利用の効果の検討（再委託先：東北大学）では、従来炉心と凸型炉心に軸芯燃料を利用した場合の燃料溶融反応度、ナトリウムボイド反応度、ドップラー係数を解析し、比較検討してその効果を明らかにするとともに、凸型炉心の総合評価に反映した。

上下凸型炉心と円柱型炉心の外側炉心に軸芯燃料を装荷した結果、コンパクション反応度は上下凸型炉心ではより負となり、円柱型炉心ではコンパクション反応度は正から負とすることができることが分かった。また、ドップラー係数とナトリウムボイド反応度は、軸芯有り無しで、円柱型炉心、上下凸型炉心とも大きな差はなく安全性は両者大きな差がないことが明らかになった。燃焼反応度は、上下凸型炉心は軸芯燃料有りの場合が若干大きく、サイクル期間の縮小等の対策が必要であるが、円柱型炉心では大きな差は生じていなかった。

以上より軸芯燃料は、燃料溶融時のコンパクション反応度を負側にすることができ、高速炉の安全性の向上におおいに寄与できることを示した。

(3)再臨界防止用軸芯燃料の開発（再委託先：日本原子力研究開発機構）においては、平成29年度までの3ヶ年の業務により得られた知見に基づき、模擬軸芯燃料ペレットを試作した。試作した模擬軸芯燃料を加熱溶解させることにより軸芯部に装荷した中性子吸収体の模擬物質の分散挙動を評価し、再臨界防止用軸芯燃料ペレットとしての機能の妥当性を検証した。

模擬軸芯燃料ペレットの試作とそれを用いた中性子吸収体の分散挙動の評価結果から、燃料部と固溶性のない中性子吸収体の場合には密度差が燃料溶解時の中性子吸収体の分散駆動力となることを確認した。一方、燃料部と固溶性のある中性子吸収体の場合には加熱温度に応じた反応相の形成により溶解燃料内への分散が期待できるが、通常運転時において中性子吸収体の燃料部への拡散を防止することが重要であることが明らかとなった。これらのことから中性子吸収体として被覆粒子を想定した軸芯燃料ペレットの仕様は燃料溶解時の再臨界防止機能を有することを確認した。

(4)上記の研究開発と並行して研究推進を実施した。研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、広く意見を聴きながら研究を進めるため研究会を開催した。プロジェクトの円滑な進行を実現するために定期的に会合を開き、進捗状況の確認と問題点の議論を行った。

また本年度は専門家を招き2回の研究会(九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門の守田幸路教授、東京工業大学の関本博名誉教授)を開催し、これまでの検討結果及び今後の検討方針について意見交換を行い、助言を得た。

これまでの成果を含め本研究と関連する新しい概念の炉心について、日本原子力学会「2018年秋の大会」及び「2019年春の年会」並びにICONE2018（International Conference on Nuclear Engineering）及びICANSE2018（International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering）の国際会議で発表し、固有安全高速炉に係る本研究開発を引き続き精力的に進めていることを国内外に示すことができた。今後「2019年秋の大会」には、これまでの研究の成果を、東京都市大学、東北大学、日本原子力研究開発機構でシリーズ発表を行う予定である。

本研究の内、炉心形状の工夫による再臨界回避については、博士後期課程社会人学生のテーマとして研究を行い、「炉心崩壊事故時の再臨界を回避する高速スペクトル炉心概念に関する研究」と題する博士論文としてまとめ、2019年3月に博士（工学）の学位記が授与された。その成果はEnergy Procedia Volume131(2017)に掲載され、またAnnals of Nuclear Energy 127(2019)に投稿した論文は本年5月に発行予定である。

以上、4ヵ年計画の最終年度として本年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

1. はじめに

高速炉炉心部の燃料要素が溶融し、下部軸ブランケット上面に堆積すると想定した場合、従来の円柱炉心形状では、一般に再臨界状態となる。本研究では、大型酸化物高速炉を対象に、炉心形状の工夫や、燃料溶融時に中性子自己遮蔽効果が低減して中性子吸収率が增大する軸芯燃料を用いることにより、炉心固有の特性によって再臨界を防止する固有安全高速炉炉心の検討を目的とする。

本年度は従来炉心との比較及び総合評価として、凸型炉心と従来炉心の燃料溶融時及び通常運転時の特性を比較し、設計上、炉心性能上の特質を明らかにした。

また、従来炉心と凸型炉心に軸芯燃料を利用した場合の燃料溶融反応度、ナトリウムボイド反応度、ドップラー係数を解析し、比較検討してその効果を明らかにするとともに、凸型炉心総合評価に反映した。

さらに、これまでに得られた知見に基づき、模擬軸芯燃料ペレットを試作する。試作した模擬軸芯燃料を加熱溶融させることにより軸芯部に装荷した中性子吸収体の模擬物質の分散挙動を評価し、再臨界防止用軸芯燃料ペレットとしての機能の妥当性を検証した。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の計画図を図 2.1-1 と図 2.1-2 に示す。また、研究実施体制を図 2.1-3 に示す。

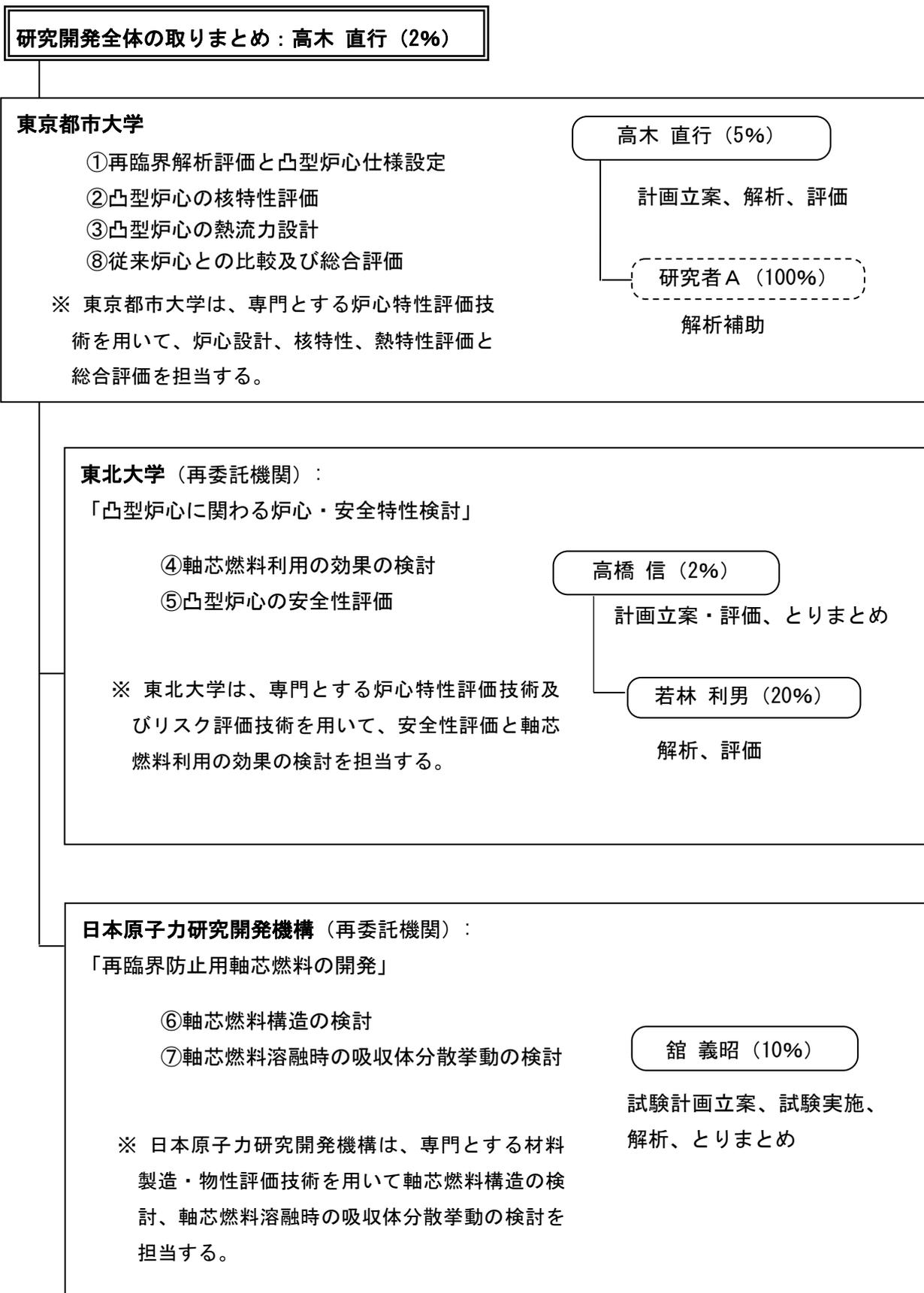
図 2.1-1 全期間を通じた研究実施計画

研究開発項目	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
(1) 再臨界解析評価及び凸型炉心設計（東京都市大学） ・ 再臨界解析評価と凸型炉心仕様設定 ・ 凸型炉心の核特性評価 ・ 凸型炉心の熱流力設計 ・ 従来炉心との比較及び総合評価	↔	↔	↔	↔
(2) 凸型炉心に関わる炉心・安全特性検討（再委託先：東北大学） ・ 軸芯燃料利用の効果の検討 ・ 凸型炉心の安全性評価	↔	↔	↔	↔
(3) 再臨界防止用軸芯燃料の開発（再委託先：日本原子力研究開発機構） ・ 軸芯燃料構造の検討 ・ 軸芯燃料熔融時の吸収体分散挙動の検討	↔	↔	↔	↔
(4) 研究推進	↔	↔	↔	↔

図 2.1-2 平成 30 年度研究実施計画

業務項目	実 施 日 程											
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
(1) 再臨界解析評価及び凸型炉心設計 ・従来炉心との比較及び総合評価												
(2) 凸型炉心に関わる炉心・安全特性検討 (再委託先：東北大学) ・軸芯燃料利用の効果の検討												
(3) 再臨界防止用軸芯燃料の開発（再委託先：日本原子力研究開発機構） ・軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討												
(4) 研究推進												

図 2.1-3 研究実施体制



2.2 平成 30 年度の成果の目標及び業務の実施方法

平成 30 年度の計画の概要は、従来炉心との比較及び総合評価、軸芯燃料利用の効果の検討、及び軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討であり、研究推進とあわせて実施するものである。成果の目標及び業務の実施方法を項目ごとに以下に記す。

(1) 再臨界解析評価及び凸型炉心設計

・ 従来炉心との比較及び総合評価

凸型炉心と従来炉心の燃料溶融時及び通常運転時の特性を比較し、設計上、炉心性能上の得失を明らかにする。

(2) 凸型炉心に関わる炉心・安全特性検討（再委託先：東北大学）

・ 軸芯燃料利用の効果の検討

従来炉心と凸型炉心に軸芯燃料を利用した場合の燃料溶融反応度、ボイド反応度、ドップラー係数を解析し、比較検討してその効果を明らかにするとともに、凸型炉心総合評価に反映する。

(3) 再臨界防止用軸芯燃料の開発（再委託先：日本原子力研究開発機構）

・ 軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討

これまでに得られた知見に基づき、模擬軸芯燃料ペレットを試作する。試作した模擬軸芯燃料を加熱溶融させることにより軸芯部に装荷した中性子吸収体の模擬物質の分散挙動を評価し、再臨界防止用軸芯燃料ペレットとしての機能の妥当性を検証する。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、広く意見を聴きながら研究を進めるため研究会を開催する。

3. 業務の実施内容及び成果

3.1 再臨界解析評価及び凸型炉心設計（平成 27 年度～平成 30 年度）

3.1.1 従来炉心との比較及び総合評価

(1) 概要

燃料溶融時前後の挙動の実効増倍率解析から、凸型炉心が従来の円柱型炉心（炉心長 75 cm）が +8.2 \$ に対し、Pu 富化度均一の凸型炉心では -1.3 \$ となることを確認した。これに基づきコンパクト化反応度が最小になるようにサーベイを行い、コンパクト化反応度は内側炉心高さ(Hin)と内側炉心直径(Din)の比が ($Hin/Din=158.5/230=0.689$) で最小になることを確認した。さらに健全時の炉心から中性子漏えいが低減するように、二つの凸型炉心の底部を結合させ、断面形状が上下凸型となる上下凸型炉心がさらにコンパクト化反応度を低減できることを明らかにし、「上下凸型炉心」を基準炉心とすることとした。この上下凸型炉心で、内外炉心をそれぞれ 2 領域に分けた Pu 富化度調整型凸型炉心を設定し熱流力特性評価を行った。上下凸型炉心の流量配分は、CDA 時に確実に全炉心を溶融させるために外側炉心の沸騰を内側炉心より先行させ、外側炉心から溶融させることが求められている。このため被覆管温度制限を外側炉心で上昇させて外側の温度を内側より高くする等の対策を検討しその対策を反映して流量配分を行った。その結果、外側炉心からの沸騰を先行させた流量配分は可能であるが、内側炉心燃料の炉心長は 1.5m と実証炉(JSFR)の 0.8 m の約 2 倍の長尺であり、集合体流量は JSFR の 3 倍となることから炉心圧力損失が約 3 MPa と高くなることが明らかとなった。その対策として Pu 富化度を全領域一定として、内側炉心では Pu 富化度を低く設定する代わりに細径化することで、Pu 富化度調整と同様の出力平坦化効果を得ることができ、さらに炉心高さが高かつ線出力が高い内側炉心の流路面積を大きくすることで低圧損化を図ったピン径調整型上下凸型炉心を検討した。これによりコンパクト化反応度を低減したピン径調整型上下凸型炉心を基準炉心として設定した。またこの炉心の炉心特性解析を実施した。以上の炉心設定の流れを図 3.1-1 に示す。

平成 30 年度には、平成 29 年度までに設定したピン径調整型上下凸型炉心に対し従来の円柱型炉心と比較するとともに、軸芯燃料の導入効果も含めた総合評価を行った。軸芯燃料装荷において軸芯燃料装荷後の出力平坦化を考慮した場合と考慮しない場合での炉心特性評価を行った結果、軸芯装荷後の炉心の出力平坦化を図るとコンパクト化反応度が正となることが分かった。出力平坦化を考慮せずに上下凸型炉心の外側炉心に軸芯燃料を装荷した場合にコンパクト化反応度は負となり、炉心圧力損失も 0.36 MPa と原型炉以下となる。これより、外側炉心に軸芯燃料を導入することにより、熱的特性に大きな影響を与えずにピン径調整型上下凸型炉心のコンパクト化反応度をさらに低減できることを示した。また従来の円柱型炉心との比較のため、JSFR と同一の炉心長 80 cm の円柱型炉心とその外側炉心に軸芯燃料を装荷した場合のコンパクト化反応度を評価した。その結果、軸芯無し円柱型炉心ではコンパクト化反応度が正となるが、ペレット中心の直径 1 mm の孔に Gd_2O_3 顆粒を充填した軸芯燃料を外側炉心に装荷すると、軸芯燃料の効果でコンパクト化反応度を負とすることができた。またその場合の外側炉心の出力の低下による流量配分への影響は圧損に影響がない程度であることが分かった。

(2)再臨界解析評価と凸型炉心の仕様設定、核特性評価及び熱流力設計

(平成 27 年度～平成 29 年度)

凸型炉心の仕様選定については図 3.1-1 で示す手順で検討し設定した。それについて各炉心型式での主要な結果を示す。

①Pu 富化度均一凸型炉心の検討(平成 27 年度)

凸型炉心についてコンパクション反応度を評価した。評価した大型円柱型炉心の仕様を表 3.1-1、図 3.1-2 に示す。凸型炉心の仕様を表 3.1-2、図 3.1-3 に示す。またコンパクション反応度の計算体系を図 3.1-3 に示す。なお解析手法には、3 次元連続モンテカルロコード MVP を用い、核データライブラリーは JENDL-4.0 を用いた。燃料溶融前は燃料集合体をピン非均質モデルとし、溶融時の体系は、燃料及び構造材を均質化し、炉心部冷却材は溶融プールから排除されるものとした。さらに炉心の溶融した上部に軸ブランケットが直上にあるとして評価を行った。この Pu 富化度均一凸型炉心のコンパクション反応度を表 3.1-3 に示す。この結果から円柱型炉心は+8.2 \$で、凸型炉心は-1.3 \$であり、外側炉心の高さを低くすることで、溶融時の未臨界が達成できることが示された。燃料溶融時に径方向中性子漏えいを増大できるように、径ブランケットの下部をラップ管だけにした場合とさらに径遮蔽体の下部もラップ管のみにした場合の影響を検討した。表 3.1-4 に検討した仕様と計算体系を図 3.1-4 に示す。径ブランケット及び遮蔽体の炉心下部をラップ管のみのキャビティ構造にして燃料溶融時も健全であるとした。解析手法は上記の検討と同一である。計算結果を表 3.1-5 に示す。計算結果はブランケット等の炉心下部をキャビティにすると中性子漏えいが大きくなりコンパクション反応度が低下することが示された。さらに、炉心高さ/炉心直径比とコンパクション反応度のサーベイ結果を整理したものを、表 3.1-6 と図 3.1-5 に示す。

凸型炉心は円柱型炉心と比較して、燃料溶融時のコンパクション反応度が負になりやすいことが示されている。これは円柱型炉心で高さ/直径 (H/D) の比が大きいことから、炉心溶融による炉心高さの低下とそれによる密度増大の影響が大きい、凸型炉心では炉心高さの低下が比較的小さく H/D の変化が小さいので、正の反応度挿入が抑制されコンパクション反応度が負になりやすいことを示している。

②Pu 富化度調整型上下凸型炉心の検討(平成 28 年度)

凸型炉心についての JSFR と同体積の凸型炉心で内側炉心高さ (Hin) と直径 (Din) の比 (Hin/Din) とコンパクション反応度について、中性子拡散計算によるサーベイ計算の結果から、Hin/Din=158.3/230(cm)=0.689 において最小になるとの結果と、健全時の中性子漏えいを減少させるため、二つの凸型炉心の底部で結合させ断面形状が上下凸型となる炉心はコンパクション反応度を低減させることができるという知見[3.1.1-1]に基づき、上下凸型炉心について検討を行った。凸型炉心によるコンパクション反応度の低減方策における基本概念は、健全炉心状態で内側炉心の炉心高さを外側炉心よりも増大させ、炉心溶融時における内側炉心から外側方向への燃料移動と炉心偏平化による中性子漏えい増大による負の反応度を活用することにある。しかし、健全状態では、内側炉心での炉心高さ増大により、外側炉心の出力分担率が従来の円柱型炉心よりも小さ

くなり、出力分布の平坦化が困難となる。その結果、最大線出力が許容線出力以上となり、設計が成立しなくなった。従来の高速炉炉心の最大線出力は、もんじゅ 360W/cm、Super Phenix 480W/cm、DFBR 410W/cm、BN-800 480W/cm 等[3.1.1-2]となっているが、仮に本炉心の定格許容線出力を 450W/cm としても、コンパクト反応度条件を負として上記線出力条件を満足することは非常に困難であった。このため、燃料ピン径を細径化し、集合体当たりのピン本数を従来 (JSFR) の 271 ピン/集合体から 331 ピン/集合体に約 20%増大することとし、線出力制限と内側炉心を高くする条件を同時に満足する Pu 富化度分布の有無をサーベイした。また、出力分布の平坦化のためには Pu 富化度領域が多い方が有利であるが、製造上及び管理上の観点から内側炉心 2 領域、外側炉心 2 領域の計 4 領域とした。さらに出力分布平坦化の観点からは、円柱型 2 領域炉心と同様、凸型炉心においても内側炉心の Pu 富化度を外側炉心よりも下げることが望ましい。この場合、炉心全体の平均 Pu 富化度が同一であっても健全時の実効増倍率が低下し、その結果、コンパクト反応度は正側にシフトすることとなる。従って、各領域の富化度分布としては、コンパクト反応度を負としつつ、最大線出力を上記制限以内とする最適化サーベイを行う必要がある。以上を考慮して、表 3.1-7、表 3.1-8 及び図 3.1-6 に Pu 富化度調整型上下凸型炉心 (4 領域) の仕様と解析体系を示す。解析手法は 3 次元連続モンテカルロコード MVP を用い、核データライブラリーは JENDL-4.0 を用いて、Pu 富化度のサーベイを実施した。またコンパクト反応度は、図 3.1-7 に示す体系、即ち熔融燃料と上部軸ブランケットの間にキャビティがある体系で評価した。表 3.1-9 にその結果を示す。Pu 富化度領域と集合体ピン本数を 331 本に増加することで最大線出力条件を満足しつつコンパクト反応度が負となる炉心を設定することができた。しかし相変わらず出力分布は外側炉心に比べ内側炉心へ大きく歪んでいるため、各領域の Pu 富化度の調整を行ったが、中性子インポートランスの高い中心部の低富化度化は、健全時の臨界性低下やコンパクト反応度の増大 (正值化) を招き、出力平坦化と負のコンパクト反応度を両立する仕様は見出せなかった。

表 3.1-9 の基準炉心の結果に対し、さらに富化度を微調整した炉心仕様を表 3.1-10 に示す。本炉心に対して、熱流設計を実施した。次項に熱流設計を示す。

③熱流設計(平成 29 年度)

上下凸型炉心の流量配分としては、外側炉心の沸騰を内側炉心より先行させ、外側炉心から熔融させることが求められており、被覆管温度制限の見直し等の対策を検討した。熱特性評価用データを表 3.1-11[3.1.1-3]に示す。熱設計で用いるホットスポット係数を表 3.1-12 [3.1.1-3]に示す。また設定した炉心上端部のフィルム内、被覆管内温度上昇量を表 3.1-13 に示す。またホットスポット係수에表 3.1-13 に示す各部温度上昇を入れて求めた全ホットスポット係数を表 3.1-14 に示す。

凸型炉心の燃料集合体について仕様を設定する。これには、実証炉では被覆管制限温度 700°C、クリープ寿命損傷和 (CDF) $CDF < 0.5$ で制限する。この制限値を満たす仕様を設定する。使用するクリープ強度、内外面腐食の式は下記を用いる。

a) クリープ強度

ODS 鋼のクリープ強度[3. 1. 1-4]を以下に示す式に示す。

$$(T+273.15) (35.12+\log t)/1000=56.784-9.133\log \sigma$$

T: 温度 (°C)

t: クリープ破断時間 (h)

σ : 周応力 (MPa)

b) 外面腐食 ODS 鋼の外面腐食式[3. 1. 1-4]は以下である。

$$C = (C_{R1} + C_{R2} \cdot t) \cdot 1.5 \cdot O_x$$

C: Na による外面腐食

C_{R1} : 寿命初期の被覆管外面の初期腐食量 ($\mu\text{m/ppm}$)

$$\text{Log} C_{R1} = 9.078 - 8.251 \times 10^{-3} / (T + 273.15)$$

T: 被覆管外面温度(°C)

C_{R2} : 定常腐食速度 ($\mu\text{m/h/ppm}$)

$$C_{R2} = 4.1667 \cdot 10^4 \cdot \exp(-1.7580 \cdot 10^4 / (T + 273.15))$$

c) 内面腐食

ODS 内面腐食式[3. 1. 1-4] は以下である。

a) $0 \leq B \leq 9000$

$$\text{CFP} = 35$$

b) $9000 < B \leq 57500$

$$\text{CFP} = 1.363 \times 10^{-3} \times (B - 9000)$$

$$-1.363 \times 10^{-3} / K2 \times \{1 - \exp(-K2 \times (B - 9000))\} + 35$$

c) $57500 < B$

$$\text{CFP} = 1.363 \times 10^{-3} \times (57500 - 9000)$$

$$-1.363 \times 10^{-3} / K2 \times \{1 - \exp(-K2 \times (57500 - 9000))\} + 35$$

ここで、CFP: FP による内面腐食量 (μm)

T: 被覆管内面温度(°C)

B: 局部燃焼度 (MWd/t)

$$K2 = 7.676 \times 10^8 \times \exp\{-47000 / (1.987 \times (T + 273.15))\}$$

以上の式を用いて、表 3. 1-15 の実証炉[3. 1. 1-3]の燃料を評価する。

評価条件

燃焼度 150000MWd/Tm

被覆管肉厚中心温度 700°C

被覆管温度漸減幅 10°C

内側炉心燃料の炉心長は 152cm と実証炉の 80cm に対して約 2 倍であるので、約 2 倍の

プレナム長になるように設定した。このため、内側炉心のピン長は実証炉の 2900 mm に対して、4970 mm となる。従って、外側炉心燃料の仕様は内側炉心と集合体軸長を合わせるため表 3.1-15 に示す様に炉心長 52cm に対して大きいガスプレナムが設定することになる。そのために表 3.1-16 に示す様にピン内圧を低く抑えることができる。そのためクリープ損傷が小さくなることを利用して、被覆管制限温度を上昇させ、外側炉心の流量を絞り外側が早く沸騰するようにする。表 3.1-17 に示す様に被覆管温度制限を 750°C に上昇しても外側炉心の CDF は制限値内であることから被覆管温度制限を 750°C とすることとした。これにより外側炉心の沸騰を内側より先行させることが可能となる。さらに外側炉心の流量を絞りこむために、周辺流れ効果を低減するため、外周ピンのワイヤーを内側ピンより細径を用いて、周辺流れ効果を約 1.1 から 1.05 程度に低減させる工夫を行い、さらに流量を低下できるようにした。外側炉心の被覆管制限温度を 750°C（内側は 700°C のまま）で流量配分を行うこととした。

1) Pu 富化度調整型上下凸型炉心の流量配分結果

Pu 富化度調整型上下凸型炉心の集合体出力（相対値）と集合体内径方向ピーキング係数を表 3.1-18 と図 3.1-8 に示す。これにより流量配分を行った結果を表 3.1-19、図 3.1-9 に示す。また集合体出口温度分布を図 3.1-10 に示す。炉心外側での集合体出口温度は高くなっている。この場合の炉心圧力損失を表 3.1-20 に示すが 2.92 MPa であり、実証炉の圧力損失の約 15 倍となった。これは、流量は実証炉の約 3 倍で、バンドル長が約 2 倍であるためである。

これに対する対策として、Pu 富化度は全領域一定とし、Pu 富化度が低くインポートランスの高い炉心内側ほどピン径を細径化した炉心構成である「ピン径調整型上下凸型炉心」を検討した。この炉心は Pu 富化度調整と同様の出力平坦化効果の他、炉心高さが高かつ線出力が高いため流量を多く流す必要がある内側炉心燃料に対して流路断面を大きくすることができるので、低圧損化を図ることができる。さらに重金属燃料インベントリ減少により熔融プールとなった場合の熔融プール高さが低減するためコンパクション反応度をさらに負側とできる効果を有する。

2) ピン径調整型上下凸型炉心の検討

ピン径調整型上下凸型炉心について、炉心の TRU 富化度をサーベイすることで、炉心圧損を検討した。ケース 1 は、前 1) 項で検討した Pu 富化度調整型の外側炉心の外側領域 (OC2) の富化度を約 24 % とし、その他の領域は Pu 富化度比に従い細径化することを想定した。ケース 2 は圧損を低減するために富化度を 35 % に上昇し出力分布を調整したもの、ケース 3 はケース 2 ですべての領域の富化度を 30 % 相当としたケースである。

ケース 4 は、4 領域の富化度を 30% で、さらに外側炉心のピン径を 8 mm として、外側の出力を上昇させたものである。各ケースの評価条件を表 3.1-21 示す。なおケース 3 の場合の各領域の集合体断面を図 3.1-11 に示す。内側炉心は細径化により流路面積が外側炉心に比較して大きくなっていることが示されている。

それぞれについて、出力分布と集合体内ピーキング係数より流量配分評価と圧力損失を各ケースで算出した。ケース 1 の集合体出力、集合体ピーキング係数を表 3.1-22 と図 3.1-12 に示す。流量配分結果を表 3.1-23 と図 3.1-13 に示す。また、領域の圧力損失評価結果を表 3.1-24 に示す。さらに集合体出口温度分布を図 3.1-14 に示す。ケース 2 の集合体出力と集合体ピーキング係数を表 3.1-25 と図 3.1-15 に示す。流量配分結果を表 3.1-26 と図 3.1-16 に示す。また、領域の圧力損失評価結果を表 3.1-27 に示す。さらに集合体出口温度分布を図 3.1-17 に示す。

ケース 3 の集合体出力と集合体ピーキング係数を表 3.1-28 と図 3.1-18 に示す。流量配分結果を表 3.1-29 と図 3.1-19 に示す。また、領域の圧力損失評価結果を表 3.1-30 に示す。さらに集合体出口温度分布を図 3.1-20 に示す。

ケース 4 の集合体出力と集合体ピーキング係数を表 3.1-31 と図 3.1-21 に示す。流量配分結果を表 3.1-32 と図 3.1-22 に示す。また、領域の圧力損失評価結果を表 3.1-33 に示す。さらに集合体出口温度分布を図 3.1-23 に示す。ケース 4 は外側炉心を太径ピンにして出力を上昇させたものだが、外側燃料の圧損が上昇して、0.4 MPa 近くになっている。

3) 各炉心の核熱特性の比較及びまとめ

表 3.1-34 に各炉心の圧力損失特性とコンパクション反応度の比較を示す。Pu 富化度調整型上下凸型基準炉心は、健全に燃焼可能で、外側炉心燃料から沸騰させることが可能であるが、内側炉心燃料集合体の圧力損失が大きいことが課題となった。その対策として、各領域の富化度を一定とすることで、内側炉心のピン径を細径化して圧損の低減を図ることとしピン径調整型上下凸型炉心を評価した。ケース 1 では TRU 富化度 24% で圧損は 0.8 Mpa と大きく、ケース 2 炉心で TRU 富化度 35% とすると（ピン径：IC1/IC2/OC1/OC2= 4.7/5.42/6.2/6.76 mm）集合体圧力損失は約 0.2 MPa と実証炉並にできた。一方でケース 3 炉心（ピン径：IC1/IC2/OC1/OC2= 6.2/6.76/6.63/7.24 mm）の 1 年燃焼後の燃焼反応度は $7\% \Delta k/kk'$ と大きい。（表 3.1-54 参照）。ケース 2 炉心はケース 3 炉心に比べピン径をさらに細径化しており TRU 富化度が 35% と高いため、コンパクション反応度（定常時制御棒全引き抜き時の反応度との差で定義）はケース 3 炉心より負側に大きくなっているものの、燃焼反応度はさらに大きくなると考えられる。以上より、ケース 3 炉心は、負のコンパクション反応度を有しており、圧損も実証炉並みの約 0.2 MPa に納まることから、炉心性能とのバランスを考え、本炉心をピン径調整型上下凸型炉心の基準炉心に選定した。

(3) 従来炉心との比較及び総合評価（平成 30 年度）

従来炉心及び前年度設定した、ピン径調整型上下凸型炉心に対して、軸芯を設置するケースについて検討を行った。

① ピン径調整型上下凸型炉心の検討

軸芯燃料を設置する凸型炉心としては、ピン径調整型上下凸型炉心の基準炉心である

ケース 3 炉心とケース 4 炉心を候補として検討した。

1) ケース 4 炉心の検討

ケース 4 は軸芯設置後の出力分布平坦化を考慮し、レファレンスのケース 3 炉心をベースに外側炉心 (OC2) の燃料ピン径を 8 mm に太径化した炉心である。サーベイ計算では外側炉心に軸芯吸収体 (Gd_2O_3) を配置することとした。パラメータは軸芯吸収体径 (1 mm ϕ 及び 2 mm ϕ) と軸芯吸収体充填密度 (100% 及び 60%) である。ケース 4 及びパラメータサーベイのケース 4-1~ケース 4-3 の軸芯燃料の評価条件を表 3.1-35 に示す。

各ケースの径方向線出力分布を図 3.1-24 に示す。また同図にケース 3 炉心の出力分布も併せて示す。同図よりケース 4 の外側炉心に軸芯燃料を装荷することにより、いずれのケース (ケース 4-1~4-3) も外側炉心で出力が低下し、内側炉心で出力が増加しており、径方向の出力分布が平坦化しているのが分かる。軸芯径 (2 mm ϕ)、充填密度 (60%) のケース 4-3 はケース 3 の分布に近くなっている。

また表 3.1-36 に軸芯径 (2 mm ϕ) で充填密度 (100%) のケース 4-2 と軸芯径 (2 mm ϕ) で充填密度 (60%) のケース 4-3 のコンパクション反応度の評価結果を示す。なお、ケース 4-1 についてはケース 4-2、ケース 4-3 よりコンパクション反応度が大きくなるので、評価対象から外した。同表より、軸芯燃料を装荷することにより、ケース 4-2 及びケース 4-3 のコンパクション反応度はケース 4 より 0.4 % $\Delta \rho$ から 0.5 % $\Delta \rho$ の低減効果があるが、出力分布の平坦化による正の効果と相まって、結果として正の値となった。

2) ケース 3 炉心の検討

ケース 4 炉心での軸芯装荷によるコンパクション反応度の低減効果が小さく正の値となったことからケース 3 の外側炉心に中心径 2 mm で Gd_2O_3 を充填した軸芯燃料を装荷することとした。充填密度を 100% としたケース 3-1 と 60% としたケース 3-2 を示す。

ケース 3-1 の集合体出力分布を表 3.1-37 に炉心集合体最大線出力を表 3.1-38 に示す。ケース 3-2 の集合体出力分布を表 3.1-39 に炉心集合体最大線出力を表 3.1-40 に示す。また最大集合体最大線出力分布を図 3.1-25 に示す。同図より軸芯燃料を外側炉心に装荷したことにより外側炉心で出力が低下し、内側炉心で出力が増加している。

またコンパクション反応度は、表 3.1-41 に示す様に充填密度 60% のケース 3-2 においても、軸芯無しのケース 3 炉心の -0.66 % $\Delta \rho$ から -2.1 % $\Delta \rho$ に約 1.5 % $\Delta \rho$ 低下している。ここで、顆粒の充填密度は約 60% が現実的であるので、軸芯上下凸型炉心はケース 3-2 を採用する。この場合の出力分布と集合体内径方向ピーキング係数、流量配分の結果を表 3.1-42、表 3.1-43 と図 3.1-26、図 3.1-27 に示す。また圧力損失の内訳を、表 3.1-44 に示す。この結果から、圧損は軸芯無し上下凸型炉心の 0.23 MPa から 0.36 MPa に増大するが、原型炉の炉心圧力損失より小さい

範囲に収まっている。

なお流量配分ではケース 3 では表 3.1-30 に示すように内側炉心(2)の最大流量が 55.6 kg/s、外側炉心(2)の流量は 20.3 kg/s としている。また、軸芯燃料を装荷した場合には、表 3.1-44 に示す様に、内側炉心(2)で 71 kg/s で外側炉心(2)では 12 kg/s となっている。両者ともに流量調整には、オリフィス分担率を変えて調整しており、特に外側炉心(2)は流量の差も大きくオリフィスでの圧力損失分担率は大きくなる。

流量減少が生じた場合には、オリフィス圧損は流量の二乗に比例し、バンドル圧損は 1.82 乗に比例することから、流量減少時には、オリフィスの圧損の低下が、バンドル圧損の低下より大きくなるので、流量減少下では流量が外側炉心で相対的に大きくなる流量再配分が生じると考えられる。ケース 3 では、炉心圧損は、内側炉心はほぼバンドル圧損で決まるが、外側炉心(2)では全圧損 0.23 MPa の内、オリフィスの圧損が 0.163 MPa と 70%がオリフィス圧損である。

ここで 1/10 程度に流量が下がる場合を想定する。内側炉心燃料では定格時のレイノルズ数 (Re 数) は 1×10^5 から 1×10^4 まで下がる。バンドル圧損は Re 数が非常に低くなり、例えば層流状態になると流量の 1 乗の比例まで変わるが上記のように $Re=1 \times 10^4$ では 1.82 乗に比例している範囲である。その間、オリフィスは流量の 2 乗で低下するとすると、内側炉心が 10%流量になった時の圧損と同一になるのは 10.5%と 5%程度外側炉心が多く流れる状態となる。実際は内側と外側で流量が配分されてバランスするので 3%~4%程度多くなる程度と推定される。またケース 3-2 では、表 3.1-44 に示す様に圧損 0.36 MPa に対し外側炉心(2)のオリフィス圧損は 0.334 MPa と 93%がオリフィス圧損である。この場合は内側が 10%の流量になると外側炉心(2)では 11.4%程度の流量が流れることとなるので 10%程度内側炉心より定格時に対する流量比率が高くなると推定される。

しかしながら、ケース 3-2 では流量配分は外側炉心を絞っているので内側炉心(2)と外側炉心(2)の平均の定格時温度上昇量の比は 1.21 倍であり、流量減少で流量が 10%程度増加しても外側領域の温度上昇量は内側炉心よりも大きいものとなる。ケース 3 における温度上昇比は内側に比較して 1.02 であるが、これは、外側炉心の炉心内側に近い領域における流量の設定が若干高めに設定していたためであり、ケース 3-2 と同等の温度上昇比に外側炉心を絞り、内側炉心の流量を増加させることは可能である。

以上より流量再配分が生じて外側炉心の温度は内側とほぼ同等もしくは温度が高い状態を確保できるものと推定され、流量低下での流量再配分が生じて外側炉心の温度を内側より高い状態にできる見通しがある。

②円柱型炉心の検討（軸芯無し）

参照用の円柱型炉心として、JSFR に準じた炉心長 80cm の炉心で、特性評価を行った。炉心体系と仕様を図 3.1-28、表 3.1-45 に示す。またこの円柱型炉心に対し、軸芯径 1 mm で Gd_2O_3 顆粒を充填密度 60 %で装荷した円柱型炉心（軸芯有り）の評価を行った。

1) 円柱型炉心（軸芯無し）

円柱型炉心（軸芯無し）の出力分布、集合体最大線出力を表 3.1-46、図 3.1-29 に示す。これに基づき炉心流量配分評価を行った。熱特性評価では、被覆管温度制限は 700℃としている。この理由は、内側と外側で燃料仕様は同一であるため、外側炉心の CDF は内側炉心燃料と同等になるので被覆管制限値を同一に設定した。その他の条件については表 3.1-11、表 3.1-12、表 3.1-13 と同一の数値を用いた。また燃料仕様については表 3.1-47 に示すものを用いた。表 3.1-48、図 3.1-30 に流量配分結果、表 3.1-49 に炉心圧力損失の結果を示す。炉心燃料集合体圧力損失は 0.18 MPa である。

2) 円柱型炉心（軸芯有り）

円柱型炉心（軸芯有り）の出力分布と集合体最大線出力を表 3.1-50 に示す。集合体出力分布の円柱型炉心（軸芯無し）との比較を図 3.1-31 に示す。出力分布と、集合体内ピーキング係数を表 3.1-51 に示す。また線出力分布の円柱型炉心（軸芯無し）との比較を図 3.1-32 に示す。これにより集合体出力と線出力は外側炉心で低下し、内側炉心で最大約 50W/cm 上昇し、外側炉心で最大約 30 W/cm 低下している。円柱型炉心（軸芯有り）の流量配分結果を表 3.1-52 に示す。図 3.1-33 に、円柱型炉心（軸芯無し）と円柱型炉心（軸芯有り）の設計流量の比較を示す。炉心の最大流量は軸芯有りと軸芯無し炉心で同一となっており、両者の炉心圧力損失は同一の 0.18 MPa となる。

3) まとめ

円柱型炉心（軸芯有り、無し）と上下凸型炉心（軸芯有り、無し）の仕様を、表 3.1-53 に、3.2 章での特性評価結果をまとめた炉心特性評価のまとめを表 3.1-54 に示す。

③ピン径調整型上下凸型炉心の制御棒反応度収支

Pu 富化度調整型上下凸型炉心の制御棒反応度収支評価において、炉心は(2)②項の表 3.1-9 に示すケース 3.1-2 の基準炉心を対象炉心として評価を行った。評価条件は表 3.1-55 に示す。また制御棒配置とワンロッドスタック評価の制御棒位置を図 3.1-34、図 3.1-35 に示す。評価結果を表 3.1-56 と表 3.1-57 に示す。この場合 JSFR と同一仕様（¹⁰B 90%、吸収体断面体積比 30%）の制御棒で制御反応度収支を満たすことができる。

そこで、ピン径調整型上下凸型炉心の制御棒反応度収支について、Pu 富化度調整型上下凸型炉心での制御棒反応度収支の検討結果に基づき評価を行った。

ピン径調整型は、内側炉心の燃料体積比を Pu 富化度調整型のピン仕様に比較して約 1/3 程度に下げている。このため、内側炉心領域に属する主炉停止系制御棒値は低下すると考えられる。制御棒の構成は、図 3.1-34、図 3.1-35 に示す様に主炉停止棒 40 本、後備炉停止棒 15 本である。主炉停止棒の内、ワンロッドスタックでは主炉停止棒 39 本となる。このうち内側炉心で 11 本の主炉停止棒の値が保守側に体積比に比例し

て低下すると仮定すると従来の制御棒価値に比較して

$$(11 \times 1/3 + 28) / 39 = 0.8 \text{ 倍}$$

となる。しかしながら、制御棒仕様として吸収体体積比は 30%で、¹⁰B 濃縮度は 90%であるため、例えば、制御棒の体積比を増加して全体の ¹⁰B 濃度を 1.2 倍程度とすることは可能と考える。実証炉の B₄C 体積比 30%を 1.2 倍程度に増加することを想定すると、制御棒価値は Pu 富化度調整型の場合と同等にでき、表 3.1-58 の制御棒価値を確保できると考えられる。その場合、ピン径調整型上下凸型炉心では、表 3.1-54 に示す様に、燃焼反応度が大きい。このため、サイクル長を短縮することにより燃焼反応度を減少させることを措定する。例えば、運転サイクル長を 12 ケ月から 7 ケ月にすると、燃焼反応度は 4% Δk/kk' となる。出力補償等は、表 3.1-57 と同程度とすると、表 3.1-59 に示す様に上下凸型炉心でも制御棒反応度収支は成立すると考えられる。

④従来炉心（円柱型炉心）との比較及び総合評価

円柱型炉心（軸芯有り、無し）と凸型炉心（軸芯有り、無し）について、表 3.1-53 の炉心仕様のまとめと、表 3.1-54 の炉心特性のまとめから以下となる。

1) 上下凸型炉心と円柱型炉心の比較（軸芯無しの場合）

上下凸型炉心はピン径調整型の採用により内側炉心燃料の燃料スミア密度を円柱型炉心より約 1/3 に低下させることにより、円柱型炉心では正となるコンパクション反応度は負となり、かつ圧損は従来の円柱型炉心並みとできる。

但し、燃料インベントリーを低下させたため、燃焼反応度は 7.1 % Δρ/年と大きくなるため反応度収支の観点からサイクル長の短縮が必要となる。従来の円柱型炉心の 18 ケ月から 7 ケ月に短縮する必要がある。

円柱型炉心と比較すると、上下凸型炉心は外側炉心の炉心部上下のガスプレナム部への中性子リークが大きいことから、ナトリウムボイド反応度は円柱型炉心より小さくなる。またドップラー係数も上下凸型炉心は内側炉心の出力分担が大きくなるため、円柱型炉心より負側になる。具体的にはドップラー係数は $-8.9E-3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$ から $-9.5 E-3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$ に、またナトリウムボイド反応度は 1.6 % Δρ から 0.81 % Δρ となり、両者とも小さくなることから、上下凸型炉心の安全性は高いと考えられる。

増殖比については、上下凸型炉心は 1.09 と、円柱型炉心の 1.17 に比較して小さい。これは、上下凸型炉心は外側炉心の上下軸ブランケットとの間にガスプレナムが存在し、その影響により軸方向ブランケットの増殖比が低下したと考えられる。さらに径方向ブランケットでも炉心長 52 cm の外側炉心に接しているため、ここでも増殖比が低下する方向となったと考えられる。

2) 上下凸型炉心と円柱型炉心の比較（軸芯有りの場合）

軸芯装荷による炉心特性、熱特性への効果は、3.2 章にて詳細を示す。以下にその概略を示す。

上下凸型炉心（軸芯有り）と円柱型炉心（軸芯有り）ではコンパクション反応度は円柱型炉心の $-1.7\% \Delta \rho$ に対し上下凸型炉心では $-2.1\% \Delta \rho$ と上下凸型炉心の方がより負側になっている。これは、軸芯無しと同様であり、軸芯燃料装荷によりコンパクション反応度が両者とも低下していることを示している。

ドップラー反応度についても軸芯無しと同様の傾向で円柱型炉心では $-8.1E-3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$ から、上下凸型炉心で $-8.9 E-3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$ と負側に大きくなっている。これも軸芯無しの場合と同様に内側炉心の出力分担の差によるものと考えられる。

ナトリウムボイド反応度についても円柱型炉心で $1.7\% \Delta \rho$ 、上下凸型炉心で $0.61\% \Delta \rho$ と上下凸型炉心が小さいが、これも外側炉心の上下ガスプレナムでの中性子リークの影響と考えられる。

燃焼反応度は円柱型炉心で $2.33\% \Delta \rho / \text{年}$ 、上下凸型炉心で $8.3\% \Delta \rho / \text{年}$ と大きく、軸芯無しに比較してさらに差が大きくなっているが、これは上下凸型炉心の燃料のスマ密度が内側炉心で小さく、さらに内側炉心への出力増大の効果で燃焼反応度が大きくなったためと考えられる。増殖比については、円柱型炉心では 1.21 と上下凸型炉心で 1.10 と軸芯無しでの差（ 1.17 と 1.09 ）とほぼ同様の結果となっている。

以上から軸芯燃料の装荷により円柱型炉心と上下凸型炉心での特性の差は軸芯無しの場合と基本的には同様の傾向となっている。

(4)まとめ

上下凸型炉心はピン径調整型の採用により内側炉心燃料の燃料インベントリを円柱型炉心より低下させることができ、円柱型炉心では正となるコンパクション反応度は負となり、かつ圧損は従来の円柱型炉心並みの約 0.2 MPa とすることができる。

一方、安全性に関わるナトリウムボイド反応度は上下凸型炉心の外側炉心燃料の上下ガスプレナムからの中性子リークにより、円柱型炉心より $0.8\% \Delta \rho$ も低下する。またドップラー係数も負側に大きくなり安全性が高くなることが明らかになった。

但し、燃料インベントリを低下したため、燃焼反応度は約 $7\% \Delta \rho / \text{年}$ と大きくなるため、反応度収支の観点からサイクル長の短縮が必要である。

軸芯燃料装荷の効果について上下凸型炉心と円柱型炉心に対して検討した結果以下のことが分かった。

上下凸型炉心に軸芯径 2 mm で Gd_2O_3 を装荷した軸芯燃料を外側炉心に設置するとコンパクション反応度はさらに低下する。内側炉心の出力が上昇することから、内側炉心の流量が増加し、圧損が原型炉より若干低い 0.36 MPa となる。また、上下凸型炉心への軸芯燃料の導入によりドップラー反応度は低下し、ナトリウムボイド反応度も低下するが、それらの数値の差は小さい。

円柱型炉心に軸芯吸収体を導入した場合には、軸芯吸収体を外側炉心に装荷することでコンパクション反応度を負とすることができる。その場合の出力分布は若干変動するが、軸芯無し炉心と炉心圧損は同等であることが分かった。

その他の安全特性に係る、ドップラー係数、ナトリウムボイド反応度の変化は小さいことが分かった。

尚、付録1に、3.1章の主要な解析ケースの、各炉心領域（IC1～OC2）被覆管内原子数密度及びコンパクション時原子数密度及び寸法等データを示した。

参考文献

- [3.1.1-1] Suetomi, E., Nakano, S., Takezawa, H., Takaki, N., “Core Geometry for Recriticality Prevention against CDA in Sodium-Cooled Fast Reactor” Proc. 5th Int. Symp. on Innovative Nuclear Energy Systems (INES-5), October 31–November 2, Tokyo (2016)
- [3.1.1-2] 高木 直行 監訳, Alan E. Waltar, Donald R. Todd, Pavel V. Tsvetkov 編著
「高速スペクトル炉」 ECR 出版 (2016 年) p. 559
- [3.1.1-3] ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 (MOX 燃料炉心) JNC TN9400 2004-039
2004 年 6 月
- [3.1.1-4] JNC TN9400 2000-048 ODS フェライト鋼被覆管の設計評価関係式の検討
2000 年 4 月

表 3.1-1 大型円柱型炉心の仕様

項目	単位	仕様	備考
原子炉熱出力	MW t	3600	
炉心高さ	cm	75	炉心溶融時 50.3
炉心等価直径	cm	490	
燃料集合体数(内側/外側)		316/278	
制御棒本数		55	
燃料要素数/集合体		271	
燃料要素外径	mm	8.8	
燃料要素内径	mm	7.76	
燃料体積比	%	44.1	
構造材体積比	%	23.0	
上部軸ブランケット厚さ	cm	30	
下部軸ブランケット厚さ	cm	40	
Pu 富化度	%	22.6	

表 3.1-2 凸型炉心の仕様

項目	単位	仕様	備考
原子炉熱出力	MW t	3600	
炉心高さ (内側/外側)	cm	100/50	炉心溶融時 51.4
炉心等価直径	cm	490	
燃料集合体数(内側/外側)		316/278	
制御棒本数		55	
燃料要素数/集合体		271	
燃料要素外径	mm	8.8	
燃料要素内径	mm	7.76	
燃料体積比	%	44.1	
構造材体積比	%	23.0	
上部軸ブランケット厚さ	cm	30	
下部軸ブランケット厚さ	cm	40	
Pu 富化度	%	22.6	

表 3.1-3 大型円柱型炉心と大型凸型炉心のコンパクション反応度

ケース	炉心	内側炉心 高さ (m)	外側炉心 高さ (m)	炉心溶融後 上部軸ブラン ケットモデル	未臨界度 (% $\Delta \rho$)	未臨界度 ($\$*$)
1	円柱型炉心	0.75	0.75	有り	3.27	8.18
2	凸型炉心	1.0	0.5	有り	-0.53	-1.32
3	凸型炉心	0.8	0.4	有り	-0.94	-2.4

(*) $1\$=0.4\% \Delta \rho$

表 3.1-4 再臨界解析用径ブランケット等変更凸型炉心仕様

項目	単位	ケース 1 (基準)	ケース 2	ケース 3
原子炉熱出力	MW t	3600	同左	同左
炉心高さ (内側/外側)	cm	100/50	同左	同左
炉心等価直径	cm	490	同左	同左
燃料集合体数 (内側/外側)		316/278	同左	同左
制御棒本数		55	同左	同左
燃料要素数/集合体		271	同左	同左
燃料要素外径	mm	8.8	同左	同左
燃料要素内径	mm	7.76	同左	同左
燃料体積比	%	44.1	同左	同左
構造材体積比	%	23.0	同左	同左
上部軸ブランケット厚さ	cm	30	同左	同左
下部軸ブランケット厚さ	cm	40	同左	同左
Pu 富化度	%	22.6	同左	同左
径ブランケット燃料 集合体数	-	198	同左	同左
径ブランケット燃料 構成	-	劣化ウラン 燃料含有	炉心下半分ラッ パ管のみ	同左
径方向遮蔽体構造	-	中実 (SUS 体積比 80%)	同左	炉心下半分ラッパ 管のみ

表 3.1-5 径ブランケット仕様変更での凸型炉心再臨界解析結果

ケース	炉心	内側炉心高さ (m)	外側炉心高さ (m)	径ブランケット	径遮蔽体	未臨界度 (% $\Delta \rho$)	未臨界度 (\$*)
1	凸型炉心	1.0	0.5	有り	有り	-0.53	-1.3
2	凸型炉心	1.0	0.5	炉心下部ラップ管のみ	有り	-0.74	-2.2
3	凸型炉心	1.0	0.5	炉心下部ラップ管のみ	炉心下部ラップ管のみ	-0.81	-2.4

(*) 1\$=0.4% $\Delta \rho$

表 3.1-6 炉心形状と炉心溶融時挿入反応度の関係

ケース	炉心	炉心直径 (D, m)	内側炉心高さ (m)	外側炉心高さ (m)	平均炉心高さ (H, m)	溶融後高さ (H', m)	溶融前炉心 H/D 比 (A)	溶融後 H/D 比 (B)	H/D 変化比 (A-B)/A	溶融時挿入反応度 (\$)
1	円柱型炉心	5.5	0.75	0.75	0.75	0.503	0.136	0.091	0.329	8.18
2	円柱型炉心	1.8	0.93	0.93	0.93	0.545	0.517	0.303	0.414	24.63
3	凸型炉心	5.5	1	0.5	0.75	0.514	0.136	0.093	0.315	-1.32
4	凸型炉心	5.5	0.8	0.4	0.6	0.411	0.109	0.075	0.315	-2.4
5	凸型炉心	1.8	0.93	0.465	0.719	0.433	0.399	0.241	0.398	18.11

ケース 1 の仕様 表 3.1-1

ケース 3 の仕様 表 3.1-2

ケース 4 の仕様 表 3.1-2 で炉心高さを 1/0.5m→0.8/0.4m とした。

ケース 2 とケース 5 は下記仕様の中型炉の円柱型及び凸型炉心仕様

項目		ケース 2 (円柱型)	ケース 5 (凸型)
原子炉熱出力	MWt	710	710
炉心高さ (内側/外側)	cm	93/93	93/46.5
燃料集合体本数 (内側/外側)		108/90	108/90
制御棒本数		19	19
燃料要素/集合体		169	169
燃料要素外径	mm	6.5	6.5
燃料要素内径	mm	5.56	5.56
燃料体積比	%	33.5	33.5
構造材体積比	%	25.1	25.1
軸ブランケット厚さ(上/下)	cm	30/35	30/35
Pu 富化度 (内側/外側)	%	21.1/28.7	24.3/28.7

表 3.1-7 上下凸型基準炉心仕様 (制御棒 55 体)

項目	単位	仕様	備考
原子炉熱出力	MW t	3600	
炉心高さ 内側炉心 1 / 内側炉心 2 外側炉心 1 / 外側炉心 2	cm	158.5 52.0	炉心溶融時 52.6
炉心等価直径	cm	490	
燃料集合体数 内側炉心 1 / 内側炉心 2 外側炉心 1 / 外側炉心 2		32/114 170/278	
制御棒本数		55	
集合体配列ピッチ	mm	183.2	
ラッパ管外対面間距離	mm	179.2	
ラッパ管内対面間距離	mm	169.2	
燃料要素数/集合体		331	
燃料要素外径	mm	8.0	
燃料要素内径	mm	7.07	
燃料体積比	%	44.5	
構造材体積比	%	23.1	
上部軸ブランケット厚さ	cm	30	
下部軸ブランケット厚さ	cm	40	

表 3.1-8 上下凸型 4 領域炉心の集合体数配分案及び炉心高さ

列	領域	合計	内側 領域1 (IC1)	内側 領域2 (IC2)	外側 領域1 (OC1)	外側 領域2 (OC2)	CR	RB
R1	CR	1	0	0	0	0	1	0
R2	IC1	6	6	0	0	0	0	0
R3	IC1	12	12	0	0	0	0	0
R4	IC1	18	14	0	0	0	4	0
R5	IC2	24	0	24	0	0	0	0
R6	IC2	30	0	26	0	0	4	0
R7	IC2	36	0	32	0	0	4	0
R8	IC2/OC1	42	0	32	6	0	4	0
R9	OC1	48	0	0	44	0	4	0
R10	OC1	54	0	0	50	0	4	0
R11	OC1/OC2	60	0	0	44	6	10	0
R12	OC1/OC2	66	0	0	24	38	4	0
R13	OC1/OC2	72	0	0	2	58	12	0
R14	OC2	78	0	0	0	74	4	0
R15	OC2/RB	84	0	0	0	66	0	18
R16	OC2/RB	90	0	0	0	36	0	54
	合計	721	32	114	170	278	55	72
	炉心燃 料		内側合 計	146	外側合 計	448	55	72
炉心高さ								
領域	上記表領域		集合体数		炉心高さ (c m)		領域体積 (CC)	
内側炉心	内側領域 1, 2		146		158.5		6.7261E+06	
外側炉心	外側領域 1, 2		448		52.0		6.7712E+06	
合計			594				1.3497E+07	

表 3.1-9 上下凸型 4 領域炉心におけるコンパクト反応度と最大線出力（炉心体積維持型）

ケース	領域*1	集合体 本数	炉心高 さ (cm)	Pu 富化 度*2	健全時 Keff*5	熔融時 Keff*3, *3'	コンパ クショ ン 反応度 (% Δ ρ)	コンパ クショ ン 反応度 (%) *4	最大 線出力 (W/cm) *6
3.1-3	内側炉心 1	32	158.5	15.6	1.0240	1.0416	1.65	4.20	273.6
	内側炉心 2	114	158.5	17.5					312.1
	外側炉心 1	170	52	21.8					334.4
	外側炉心 2	278	52	24.9					269.2
3.1-2 (基準 炉心)	内側炉心 1	32	158.5	16.2	1.0237	1.0179	-0.56	-1.42	429.4
	内側炉心 2	114	158.5	18.3					429.7
	外側炉心 1	170	52	18.7					273.2
	外側炉心 2	278	52	22.8					163.1
3.1-2' (中心 7 体 Na 配置)	内側炉心 1	26	158.5	16.2	1.0146	1.0134	-0.12	-0.31	405.0
	内側炉心 2	114	158.5	18.3					437.1
	外側炉心 1	170	52	18.7					287.5
	外側炉心 2	278	52	22.8					185.6
3.1-3	内側炉心 1	32	158.5	15.6	1.0416	1.05653	1.36	3.45	251.9
	内側炉心 2	114	158.5	18.3					302.0
	外側炉心 1	170	52	22.8					342.6
	外側炉心 2	278	52	24.9					249.4

*1) 炉心配置は図 3.1-1 参照。

*2) ベースとした均質炉心の内側炉心富化度は Pu 富化度 21.6%、TRU22.6%)

*3) 3.1-2 スランピング後高さ 52.8654 cm、UAB は元位置、熔融燃料上部はキャビティ。

*3') 3.1-2' スランピング後高さ 51.69572 cm、UAB は元位置、熔融燃料上部はキャビティ。

*4) $\beta_{eff}=0.004$ (健全時) とした。

*5) Keff 誤差約 0.1%

*6) MVP でのブランケット出力分担率評価により炉心出力分担率 96% とした。

表 3.1-10 上下凸型基準炉心仕様（制御棒 55 体）

項目	単位	仕様	備考
原子炉熱出力	MW t	3600	
炉心高さ 内側炉心 1 / 内側炉心 2 外側炉心 1 / 外側炉心 2	cm	158.5 52.0	炉心溶融時 52.6
炉心等価直径	cm	490	
燃料集合体数 内側炉心 1 / 内側炉心 2 外側炉心 1 / 外側炉心 2		32/114 170/278	
制御棒本数		55	
集合体配列ピッチ	mm	183.2	
ラッパ管外対面間距離	mm	179.2	
ラッパ管内対面間距離	mm	169.2	
燃料要素数/集合体		331	
燃料要素外径	mm	8.0	
燃料要素内径	mm	7.07	
燃料体積比	%	44.5	
構造材体積比	%	23.1	
上部軸ブランケット厚さ	cm	30	
下部軸ブランケット厚さ	cm	40	
Pu 富化度 内側炉心 1 / 内側炉心 2 外側炉心 1 / 外側炉心 2	%	16.2/18.3 21.8/24.9	

表 3.1-11 熱特性評価用データ(*)

項目	数値*	備考
原子炉出力 (MWt)	3600	
入口温度 (°C)	395	
出口温度	550	
出入口温度差 (°C)	155	
原子炉流量 (kg/s)	18200	実証炉 約 3600MWth の入口／出口 =395/550°Cでの一次系流量
被覆管制限温度 (°C)	700	
炉心流量分担率	0.86	実証炉での炉心全流量 96%に対し、ブランケット流量を原型炉並みの 10%と想定した。
炉心部出力分担率	0.96	0.95 程度より設定した。

(*)JNC TN9400 2004-039 「ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討」 [3.1.1-3]に基づき設定。

表 3.1-12 被覆管ホットスポット係数(*)

	項目	ΔT_{NA}	ΔT_{film}	ΔT_{clad}
乗 算 項	出力分布誤差	1.05	1.05	1.05
	炉心出力較正誤差		1.02	1.02
	流路変形効果	1.03		
	集合体間流量配分誤差	1.05		
	原子炉出入口温度誤差	1.02		
	ワイヤーコンタクト効果		2	
	項目			
統 計 項	炉内流量配分	1.03		
	物性値誤差	1.02	1.3	1.03
	各部製造公差	1.03	1.04	1.05
	ペレット偏心効果		1.16	1.2

(*)係数値は JNC TN9400 2004-039 「ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討」 [3.1.1-3]より設定。

表 3. 1-13 炉心上端のフィルム内、被覆管内温度上昇量

項目	数値	備考
サブチャンネル流路等価直径 (cm)	0. 35	被覆管 0. 8cm ピンピッチ 0. 912cm D=0. 346cm
冷却材熱伝導度 (W/cmK)	0. 62	
Nu 数	8	$Nu=7+0025 (0. 5*200)^{0. 8}$
Film 熱伝達率 (W/cm ² sK)	14. 2	
局所線出力 (W/cm)	250	内側炉心局所線出力 (H28 年度上下 凸型基準炉心) $429W/cm \times 0. 642/1. 205=228W/cm$ →250W/cm
フィルム内温度上昇 (°C)	7	$250/14. 2/0. 8/\Pi=7. 0$
被覆管熱伝導度 (W/cmK)	0. 33	
被覆管外半径/内半径 (cm)	0. 4/0. 3535	
被覆管内温度上昇 (°C)	7. 5	$250/4/\Pi/\lambda \ln(0. 4/0. 3535)=7. 37$

表 3.1-14 全ホットスポット係数

	項目	ΔT_{NA}	ΔT_{film}	ΔT_{clad}
乗算項	出力分布誤差	1.05	1.05	1.05
	炉心出力較正誤差		1.02	1.02
	流路変形効果	1.03		
	集合体間流量配分誤差	1.05		
	原子炉出入口温度誤差	1.02		
	ワイヤーコンタクト効果		2	
	ノミナル温度上昇	225.00	7.00	7.50
			a	239.50
乗算済み温度 ΔT_{jouzan}		260.61	14.99	8.03
			b	283.641
	項目			
統計項	炉内流量配分	1.03		
	物性値誤差	1.02	1.3	1.03
	各部製造公差	1.03	1.04	1.05
	ペレット偏心効果		1.16	1.2
	各項目の係数処理	7.82		
	(F-1)* ΔT_{jouzan}	5.21	4.50	0.24
		6.75	0.28	0.38
			2.40	1.61
係数処理の和		391.28	51.51	4.94
統計項の和				447.73
平方根			c	21.16
乗算済み温度+統計処理項の和			b+c	304.80
全ホットスポット係数			(b+c)/a	1.273

↓

全ホットスポット係数 1.275

表 3.1-15 実証炉と凸型炉心の集合体仕様

	実証炉 仕様(*)	凸型 内側炉心	凸型 外側炉心	備考
燃料ピン外径 (mm)	8.8	8	8	
燃料ピン内径 (mm)	7.76	7.07	7.07	
被覆管肉厚 (mm)	0.52	0.465	0.465	
燃料スミア密度	82	82	82	
ワイヤー径 (mm)	1.27	1.17	1.17	
被覆管材料	ODS	ODS	ODS	
炉心長 (mm)	800	1585	520	
上下軸ブラケット長さ (mm)	300/400	300/400	300/400	
ガスプレナム長さ (mm) 下/ 上	1020/285	2200*1/285	2200/285	*1) CDF を 0.5 以下とする。
ボンド材	He ボンド	He ボンド	He ボンド	*2) 内側炉心：炉心長と下部 プレナム長の変更による。 1965mm 伸ばす。
燃料要素全長 (mm)	2905	4970*2	<4970	
集合体全長 (mm)	4370	6335	6335	内側と合わせる
集合体当たりピン本数	234(271)	331	331	
ラップ管対面間距離 (mm)	169.2	169.2	169.2	
ラップ管肉厚 (mm)	5	5	5	
集合体配列ピッチ (mm)	183.2	183.2	183.2	

(*) JNC TN9400 2004-039 「ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討」 [3.1.1-3] より

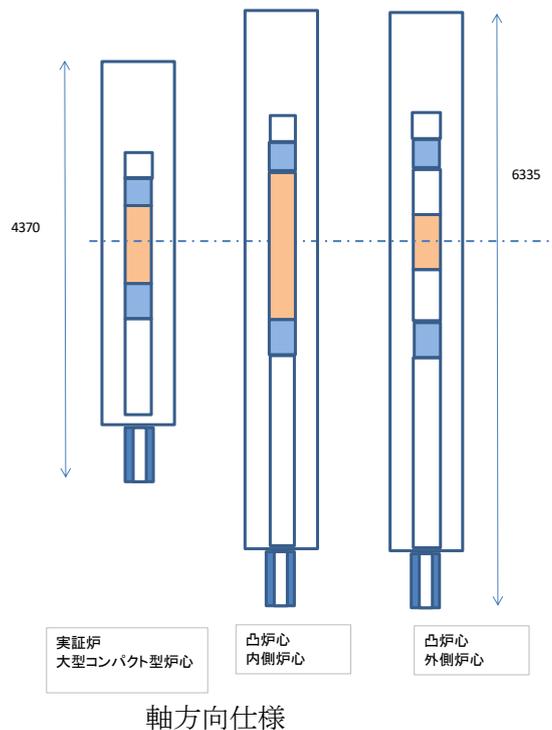


表 3.1-16 実証炉と凸型炉心内外ピンの健全性評価

	実証炉	凸型 内側燃料	凸型 外側燃料
燃焼度 (MWd/TM)	150000	150000	150000
被覆管温度 (BOL/EOL) (°C)	700/690	700/690	700/690
被覆管肉厚 (製造時) mm	0.52	0.465	0.465
(EOL) mm	0.314	0.259	0.259
外面腐食 (μm)	101	101	101
内面腐食 (μm)	78	78	78
プレナムガス圧 (kg/cm^2)	57	60.5	23.5
被覆管応力 (kg/mm^2)	7.6	8.86	3.2
CDF	0.1	0.41	3.00E-05

表 3.1-17 外側炉心燃料の被覆管制限值を 750°Cとした場合

	実証炉	凸型 内側燃料	凸型 外側燃料	凸型 外側燃料 温度上昇
燃焼度 (MWd/TM)	150000	150000	150000	150000
被覆管温度 (BOL/EOL) (°C)	700/690	700/690	700/690	750/740
被覆管肉厚 (製造時) mm	0.52	0.465	0.465	0.465
(EOL) mm	0.314	0.259	0.259	0.149
外面腐食 (μm)	101	101	101	101
内面腐食 (μm)	78	78	78	188
プレナムガス圧 (kg/cm^2)	57	60.5	23.5	23.5
被覆管応力 (kg/mm^2)	7.6	8.86	3.2	5.65
CDF	0.1	0.41	3.00E-05	0.43

表 3.1-18 集合体出力分布及び集合体内径方向ピーキング係数

列番号	集合体出力 (相対値)	集合体内径方向ピーキング係数
1	3.1354	1.0160
2	3.0486	1.0164
3	3.0299	1.0036
4	3.215	1.0451
5	2.9638	1.0836
6	2.5348	1.1087
7	2.0577	1.1339
8	0.7046	1.1140
9	0.5655	1.1420
10	0.512	1.0603
11	0.4585	1.1142
12	0.3678	1.1424
13	0.0672	1.0988
14	0.0557	1.1462
15	0.0416	1.1999
16	0.0272	1.3057

*炉心平均1で規格化

表 3.1-19 外側炉心出口温度向上策の適用の場合の各列の被覆管最高温度と集合体出口温度

		必要流量	設計流量	体数		集合体 出口温度	被覆管 温度	流量領域
		(kg/s)	(kg/s)			(°C)	(°C)	
内側 1	1	87.5	90.0	6		570.7	692.0	1
	2	85.1	90.0	12	小計	565.8	684.4	
	3	83.5	90.0	14	32	564.8	679.3	
内側 2	4	92.3	93.0	24		569.3	697.8	2
	5	88.2	93.0	26		555.7	685.2	
	6	77.2	80.0	32	小計	554.8	689.9	3
	7	64.1	69.0	32	114	545.4	679.5	4
外側 1	8	18.7	20.0	50		569.3	711.2	5
	9	15.4	17.0	50		559.6	701.6	6
	10	12.9	16.0	44	小計	553.4	670.8	7
	11	12.2	14.5	26	170	551.5	680.7	8
外側 2	12	10.0	11.0	40		560.5	703.2	9
	13	1.8	1.8	62		579.7	724.6	10
	14	1.5	1.6	74		567.3	716.1	11
	15	1.2	1.2	66	小計	566.5	729.0	12
	16	0.8	0.8	36	278	562.8	749.4	13

表 3.1-20 炉心圧力損失評価結果

項目	単位	実証炉	レファレンス
ピン肉厚	mm	0.52	0.465
ピン内径		7.76	7.07
ピン径	mm	8.8	8
ピン本数		271	331
集合体内対面距離	mm	169.2	169.2
ラッパ管肉厚	mm	5	5
バンドルピッチ	mm	4	4
ワイヤー径	mm	1.27	1.15
集合体配列ピッチ	mm	183.2	183.2
燃料体積比		0.4410	0.4471
構造材体積比		0.2417	0.2410
冷却材体積比 (ラッパ管内)		0.2741	0.2688
冷却材体積比 (ラッパ管外)		0.0432	0.0432
計		1	1
ラッパ管内流路相対比			
ワイヤー巻ピッチ	mm	200	200
ピン長	mm	2905	4970
バンドル圧損 (reference)			
流量	kg/s	32.1	93
圧損	MPa	0.192	2.92
流速	m/s	4.79	14.15
バンドル部以外圧損	MPa	0.008	0.0671
集合体圧損	MPa	0.2	2.99
オリフィス圧損			
全圧損		-	-

表 3.1-21 ピン径調整型上下凸型炉心の仕様

項目	円柱型炉心	上下凸型炉心				
		平成 28 年 度炉心	均一 TRU 富化度 細径ピン採用			
			ケース 1	ケース 2	ケース 3 (レファレンス)	ケース 4
内側炉心高さ／直径 (Hin/Din)	0.162	0.7	同左	同左	同左	同左
炉心高さ (cm)	80	158.5/52	同左	同左	同左	同左
TRU 富化度 (%)	18.3/ 22.9	16.2/18.3/ 18.7/22.8	24	35	30	30
ピン径(mm) (IC1/IC2/ OC1/OC2)	8.8	8	6.41/6.93 /7.31/8.0	4.7/5.42/ 6.2/6.76	5.0/5.79/ 6.63/7.24	5.0/5.79/ 6.63/8.0
ピン本数	271	331	同左	同左	同左	同左

表 3.1-22 集合体出力分布、集合体内径方向ピーキング係数（ケース 1）

列番号	集合体出力(相対値)	集合体内径方向ピーキング係数
1	2.9724	1.0181
2	2.8794	1.0186
3	2.798	1.0166
4	3.1485	1.0568
5	2.8388	1.0799
6	2.4458	1.0975
7	2.0328	1.1173
8	0.7813	1.1173
9	0.6226	1.1472
10	0.5108	1.1264
11	0.4009	1.1583
12	0.4632	1.1094
13	0.3754	1.1084
14	0.3049	1.1496
15	0.2259	1.2285
16	0.1365	1.3781

表 3.1-23 各列の被覆管最高温度と集合体出口温度（ケース 1）

		必要流量	設計流量	体数		集合体出口	被覆管温度	流量領域
		(kg/s)	(kg/s)			温度(°C)	(°C)	
内側 1	1	72.2	81.0	6		565.4	668.9	1
	2	70.0	81.0	12	小計	560.0	661.0	
	3	67.9	81.0	14	32	555.4	653.5	
内側 2	4	79.4	81.0	24		575.5	694.3	2
	5	73.1	81.0	26		557.7	672.2	
	6	64.0	69.0	32	小計	559.6	679.4	3
	7	54.2	56.0	32	114	563.5	690.7	4
外側 1	8	16.8	21.0	50		567.7	682.3	5
	9	13.7	17.0	50		565.0	685.4	6
	10	11.1	13.5	44	小計	570.7	689.1	7
	11	8.9	10.5	26	170	572.3	9.0	8
外側 2	12	9.9	12.0	40		574.2	690.4	9
	13	8.0	9.9	62		571.0	685.3	10
	14	6.7	7.9	74		574.2	700.4	11
	15	5.3	5.9	66	小計	572.8	717.6	12
	16	3.6	3.62	36	278	570.1	749.5	13

表 3. 1-24 各領域の燃料仕様と圧力損失 (ケース 1)

項目	単位	実証炉	レファ レンス	内側 1	内側 2	外側 1	外側 2
ピン肉厚	mm	0.52	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465
ピン内径	mm	7.76	7.07	5.48	6	6.382	7.07
ピン径	mm	8.8	8	6.41	6.93	7.312	8
ピン本数		271	331	331	331	331	331
集合体内対面距離	mm	169.2	169.2	169.2	169.2	169.2	169.2
ラップ管肉厚	mm	5	5	5	5	5	5
バンドルピッチ	mm	4	4	4	4	4	4
ワイヤー径	mm	1.27	1.15	2.5	2	1.8	1.15
集合体配列ピッチ	mm	183.2	183.2	183.2	183.2	183.2	183.2
燃料体積比		0.4410	0.4471	0.2686	0.3220	0.3643	0.4471
構造材体積比		0.2417	0.2410	0.2586	0.2471	0.2467	0.2410
冷却材体積比 (ラップ管内)		0.2741	0.2688	0.4296	0.3877	0.3458	0.2688
冷却材体積比 (ラップ管外)		0.0432	0.0432	0.0432	0.0432	0.0432	0.0432
計		1	1	1	1	1	1
ラップ管内流路相対 比				1.599	1.443	1.287	1
ワイヤー巻ピッチ	mm	200	200	200	200	200	200
ピン長	mm	2905	4970	4970	4970	4970	4970
バンドル圧損 (reference)							
流量	kg/s	32.1	93	81	81	21	12
圧損	MPa	0.192	2.92	0.655	0.77	0.09	0.001
流速	m/s	4.79	14.15	7.72	8.55	2.48	1.83
バンドル部以外圧損	MPa	0.008	0.0671	0.0509	0.0509	0.0034	0.0011
集合体圧損	MPa	0.2	2.99	0.71	0.82	0.09	0.002
オリフィス圧損				0.11	0	0.73	0.82
全圧損				0.82	0.82	0.82	0.82

CRT モデル*を用いた。ピン径が 6.4mm 以下では、グリッドを採用となる。

圧損は 2.5mm のワイヤー径として固定して計算。

*) 高速スペクトル原子炉 ERC 出版

表 3.1-25 集合体出力分布、集合体内径方向ピーキング係数 (ケース 2)

列番号	集合体出力(相対値)	集合体内径方向ピーキング係数
1	1.6906	1.0146
2	1.6479	1.0150
3	1.6504	1.0009
4	2.2506	1.0329
5	2.1225	1.0404
6	1.9741	1.0434
7	1.8420	1.0414
8	0.9079	1.0552
9	0.8211	1.0646
10	0.7292	1.0768
11	0.6322	1.0886
12	0.7456	1.0837
13	0.6375	1.0780
14	0.5514	1.1351
15	0.4224	1.2011
16	0.2753	1.3085

表 3.1-26 各列の被覆管温度と集合体出口温度 (ケース 2)

		必要流量 (kg/s)	設計流量 (kg/s)	体数		集合体 出口温度 (°C)	被覆管 温度 (°C)	流量領域
内側 1	1	41.2	53.0	6		544.2	638.5	1
	2	40.2	53.0	12	小計	540.4	633.1	
	3	39.7	53.0	14	32	540.6	630.4	
内側 2	4	55.9	56.1	24		582.6	699.8	2
	5	53.1	56.1	26		572.0	685.7	
	6	49.5	56.1	32	小計	559.6	666.3	3
	7	46.1	52.5	32	114	559.1	665.1	
外側 1	8	18.5	25.0	50		564.8	663.1	4
	9	16.9	22.4	50		566.4	667.7	5
	10	15.2	20.0	44	小計	565.5	669.2	6
	11	13.3	17.0	26	170	568.9	677.2	7
外側 2	12	15.6	20.3	40		566.8	672.8	8
	13	13.3	17.5	62		565.4	669.3	9
	14	12.1	15.1	74		565.8	683.5	10
	15	9.8	10.7	66	小計	579.6	722.4	11
	16	7.0	7.0	36	278	578.9	748.7	12

表 3.1-27 各領域の燃料仕様と圧力損失 (ケース 2)

項目	単位	実証炉	レファ レンス	内側 1	内側 2	外側 1	外側 2
ピン肉厚	mm	0.52	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465
ピン内径		7.76	7.07	3.77	4.49	5.27	5.83
ピン径	mm	8.8	8	4.7	5.42	6.2	6.76
ピン本数		271	331	331	331	331	331
集合体内対面距離	mm	169.2	169.2	169.2	169.2	169.2	169.2
ラップ管肉厚	mm	5	5	5	5	5	5
バンドルピッチ	mm	4	4	4	4	4	4
ワイヤー径	mm	1.27	1.15	2.5	2.5	2.5	2.3
集合体配列ピッチ	mm	183.2	183.2	183.2	183.2	183.2	183.2
燃料体積比		0.4410	0.4471	0.1271	0.1803	0.2484	0.3040
構造材体積比		0.2417	0.2410	0.2302	0.2421	0.2551	0.2558
冷却材体積比 (ラップ管内)		0.2741	0.2688	0.5995	0.5344	0.4533	0.3970
冷却材体積比 (ラップ管外)		0.0432	0.0432	0.0432	0.0432	0.0432	0.0432
計		1	1	1	1	1	1
ラップ管内流路相対比				2.231	1.988	1.687	1.477
ワイヤー巻ピッチ	mm	200	200	200	200	200	200
ピン長	mm	2905	4970	4970	4970	4970	4970
バンドル圧損 (reference)							
流量	kg/s	32.1	93	53	56.1	25	20.3
圧損	MPa	0.192	2.92	0.1	0.17	0.065	0.063
流速	m/s	4.79	14.15	3.61	4.29	2.26	2.09
バンドル部以外圧損	MPa	0.008	0.0671	0.0218	0.0244	0.0049	0.0032
集合体圧損	MPa	0.2	2.99	0.12	0.20	0.07	0.066
オリフィス圧損				0.08	0	0.13	0.134
全圧損				0.2	0.2	0.2	0.2

表 3.1-28 集合体出力分布、集合体内径方向ピーキング係数（ケース 3）

列番号	集合体出力(相対値)	集合体内径方向ピーキング係数
1	1.6631	1.0107
2	1.6324	1.0109
3	1.6379	1.0019
4	2.2350	1.0305
5	2.1169	1.0441
6	1.9553	1.0477
7	1.8266	1.0407
8	0.9260	1.0614
9	0.8276	1.0687
10	0.7291	1.0724
11	0.6377	1.0828
12	0.7556	1.0890
13	0.6391	1.0818
14	0.5486	1.1231
15	0.4316	1.2076
16	0.2764	1.3242

表 3.1-29 各列の被覆管最高温度と集合体出口温度（ケース 3）

		必要流量 (Kg/s)	設計流量 (kg/s)	体数		集合体 出口温度 (°C)	被覆管温度 (°C)	流量 領域
内側 1	1	40.4	45.0	6		567.8	670.6	1
	2	39.6	45.0	12	小計	564.6	665.9	
	3	39.4	45.0	14	32	565.2	664.5	
内側 2	4	55.3	55.6	24		582.9	698.7	2
	5	53.1	55.6	26		573.0	687.1	
	6	49.2	55.6	32	小計	559.4	667.1	3
	7	45.7	52.4	32	114	558.0	663.2	
外側 1	8	19.0	25.0	50		568.2	669.5	4
	9	17.1	22.4	50		567.7	670.6	5
	10	15.1	20.0	44	小計	565.4	668.1	6
	11	13.4	17.1	26	170	569.4	676.4	7
外側 2	12	15.9	20.3	40		569.0	677.5	8
	13	13.4	17.5	62		565.7	670.7	9
	14	11.9	15.0	74		566.0	681.0	10
	15	10.1	10.9	66	小計	579.8	724.3	11
	16	7.1	7.1	36	278	577.0	749.2	12

表 3.1-30 各領域の燃料仕様と圧力損失 (ケース 3)

項目	単位	実証炉	レファレンス	内側 1	内側 2	外側 1	外側 2
ピン肉厚	mm	0.52	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465
ピン内径	mm	7.76	7.07	4.07	4.86	5.7	6.31
ピン径	mm	8.8	8	5	5.79	6.63	7.24
ピン本数		271	331	331	331	331	331
集合体内対面距離	mm	169.2	169.2	169.2	169.2	169.2	169.2
ラップ管肉厚	mm	5	5	5	5	5	5
バンドルピッチ	mm	4	4	4	4	4	4
ワイヤー径	mm	1.27	1.15	2.5	2.5	1.91	1.32
集合体配列ピッチ	mm	183.2	183.2	183.2	183.2	183.2	183.2
燃料体積比		0.441	0.4471	0.1482	0.2113	0.2906	0.3561
構造材体積比		0.241	0.2410	0.2352	0.2483	0.2390	0.2321
冷却材体積比 (ラップ管内)		0.274	0.2688	0.5735	0.4973	0.4272	0.3686
冷却材体積比 (ラップ管外)		0.043	0.0432	0.0432	0.0432	0.0432	0.0432
計		1	1	1	1	1	1
ラップ管内流路相対比				2.134	1.850	1.590	1.371
ワイヤー巻ピッチ	mm	200	200	200	200	200	200
ピン長	mm	2905	4970	4970	4970	4970	4970
バンドル圧損 (reference)							
流量	kg/s	32.1	93	54	55.6	25	20.3
圧損	MPa	0.192	2.92	0.12	0.21	0.063	0.064
流速	m/s	4.79	14.15	3.85	4.57	2.39	2.25
バンドル部以外圧損	MPa	0.008	0.0671	0.0226	0.0240	0.0049	0.0032
集合体圧損	MPa	0.2	2.99	0.14	0.23	0.068	0.067
オリフィス圧損				0.09	0	0.162	0.163
全圧損		-	-	0.23	0.23	0.23	0.23

表 3.1-31 集合体出力分布、集合体内径方向ピーキング係数（ケース 4）

列番号	集合体出力(相対値)	集合体内径方向ピーキング係数
1	1.1017	1.0005
2	1.1007	1.0005
3	1.1048	1.0021
4	1.5599	1.0175
5	1.5125	1.0268
6	1.4423	1.0281
7	1.4503	0.9968
8	0.7505	1.0115
9	0.7356	1.0230
10	0.7063	1.0289
11	0.7417	1.0276
12	1.1655	1.0164
13	1.1323	1.0674
14	1.0001	1.1226
15	0.7878	1.2051
16	0.5080	1.3180

表 3.1-32 各列の被覆管最高温度と集合体出口温度（ケース 4）

		必要流量	設計流量	体数		集合体 出口温度	被覆管 温度	流量領域
		(kg/s)	(kg/s)			(°C)	(°C)	
内側 1	1	25.5	32.1	6		549.3	640.8	1
	2	25.4	32.1	12	小計	549.2	640.6	
	3	25.6	32.1	14	32	549.7	641.8	
内側 2	4	36.7	42.6	24		559.6	660.2	2
	5	35.9	42.6	26		554.6	654.8	
	6	34.3	42.6	32	小計	547.2	643.9	
	7	33.4	41.0	32	114	554.0	646.9	3
外側 1	8	14.1	19.2	50		570.7	661.1	4
	9	14.0	18.8	50		570.9	664.2	5
	10	13.5	18.1	44	小計	570.4	664.9	6
	11	14.2	19.0	26	170	570.5	664.7	7
外側 2	12	22.0	29.9	40		570.3	661.6	8
	13	22.5	29.0	62		570.5	674.5	9
	14	20.9	25.0	74		574.9	694.7	10
	15	17.7	20.0	66	小計	572.1	710.7	11
	16	12.5	12.8	36	278	573.4	741.1	12

表 3.1-33 各領域の燃料仕様と圧力損失 (ケース 4)

項目	単位	実証炉	レファレンス	内側 1	内側 2	外側 1	外側 2
ピン肉厚	mm	0.52	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465
ピン内径		7.76	7.07	4.07	4.86	5.7	7.07
ピン径	mm	8.8	8	5	5.79	6.63	8
ピン本数		271	331	331	331	331	331
集合体内対面距離	mm	169.2	169.2	169.2	169.2	169.2	169.2
ラップ管肉厚	mm	5	5	5	5	5	5
バンドルピッチ	mm	4	4	4	4	4	4
ワイヤー径	mm	1.27	1.15	2.5	2.5	1.91	1.15
集合体配列ピッチ	mm	183.2	183.2	183.2	183.2	183.2	183.2
燃料体積比		0.4410	0.4471	0.1482	0.2113	0.2906	0.4471
構造材体積比		0.2417	0.2410	0.2352	0.2483	0.2390	0.2410
冷却材体積比 (ラップ管内)		0.2741	0.2688	0.5735	0.4973	0.4272	0.2688
冷却材体積比 (ラップ管外)		0.0432	0.0432	0.0432	0.0432	0.0432	0.0432
計		1	1	1	1	1	1
ラップ管内流路相対比				2.134	1.850	1.590	1.000
ワイヤー巻ピッチ	mm	200	200	200	200	200	200
ピン長	mm	2905	4970	4970	4970	4970	4970
バンドル圧損 (reference)							
流量	kg/s	32.1	93	32.1	42.6	19.2	29.9
圧損	MPa	0.192	2.92	0.047	0.12	0.054	0.371
流速	m/s	4.79	14.15	2.29	3.5	1.92	4.55
バンドル部以外圧損	MPa	0.008	0.0671	0.0080	0.0141	0.0029	0.0069
集合体圧損	MPa	0.2	2.99	0.06	0.13	0.06	0.378
オリフィス圧損				0.318	0.248	0.318	0
全圧損		-	-	0.378	0.378	0.378	0.378

表 3.1-34 炉心圧損とコンパクション反応度のまとめ

項目	円柱型 炉心	上下凸型炉心				
		Pu 富化度 調整型 上下凸型 基準炉心	ピン径調整型上下凸型炉心			
			ケース 1	ケース 2	ケース 3 (レファレンス)	ケース 4
TRU 富化度 (%)	18.3/ 22.9	16.2/18.3/ 18.7/22.8	24	35	30	30
ピン径(mm) (IC1/IC2/ OC1/OC2)	8.8	8	6.41/6.93 /7.31/8.0	4.7/5.42/ 6.2/6.76	5.0/5.79/ 6.63/7.24	5.0/5.79/ 6.63/8.0
炉心圧損 (MPa)	0.18	2.99	0.82	0.20	0.23	0.38
コンパクシ ョン反応度 (% $\Delta \rho$) *1)	3.93 (11.5\$)	-0.56 (-1.6\$)	-2.3 (-6.8\$)	-1.2 (-3.5\$)	-0.66 (-1.9\$)	1.10 (3.2\$)

*1) 1\$=0.341% $\Delta \rho$

表 3.1-35 ケース 4 の軸芯炉心の評価条件

炉心	TRU富化度	軸芯吸収体 (スミア密度)	軸芯吸収体 配置	吸収体径
ケース4	30%	無し	-	-
ケース4-1	30%	Gd ₂ O ₃ (100%)	OC1/OC2	1mm
ケース4-2	30%	Gd ₂ O ₃ (100%)	OC1/OC2	2mm
ケース4-3	30%	Gd ₂ O ₃ (60%)	OC1/OC2	2mm

表 3.1-36 ケース 4 の軸芯炉心のコンパクション反応度

炉心	TRU富化度	軸芯吸収体 (スミア密度)	軸芯吸収 体配置	吸収体径	初期 健全時 Keff	コンパク ション時 Keff	コンパクシ ョン反応度 (% $\Delta \rho$)
ケース4	30%	無し	-	-	1.0671	1.0798	1.10
ケース4-2	30%	Gd ₂ O ₃ (100%)	OC1/OC2	2mm	1.0210	1.0273	0.60
ケース4-3	30%	Gd ₂ O ₃ (60%)	OC1/OC2	2mm	1.0305	1.0379	0.69

表 3.1-37 ケース 3-1 炉心集合体出力 (辺方向)

集合体位置略号 領域及び F ; 集合体列番号	集合体出力 (相対値)
IC1F1	2.3900
IC1F2	2.2927
IC1F3	2.2793
IC2F4	3.0991
IC2F5	2.8558
IC2F6	2.5292
IC2F7	2.1679
OC1F8	0.9213
OC1F9	0.7153
OC1F10	0.5498
OC1F11	0.4478
OC2F11	0.5036
OC2F12	0.3899
OC2F13	0.3139
OC2F14	0.2432
OC2F15	0.1568

表 3. 1-38 ケース 3-1 炉心集合体最大線出力（辺方向）

集合体位置略号 領域及び F ; 集合体列番号	最大線出力 (W/cm)
IC1F1	306.9
IC1F2	294.4
IC1F3	292.7
IC2F4	405.8
IC2F5	374.0
IC2F6	331.2
IC2F7	283.9
OC1F8	314.5
OC1F9	244.2
OC1F10	187.7
OC1F11	159.3
OC2F11	179.1
OC2F12	138.7
OC2F13	111.7
OC2F14	86.5
OC2F15	55.8

表 3. 1-39 ケース 3-2 炉心集合体出力 (辺方向)

集合体位置略号 領域及び F ; 集合体列番号	集合体出力 (相対値)
IC1F1	2. 1226
IC1F2	2. 0913
IC1F3	2. 0765
IC2F4	2. 8087
IC2F5	2. 5930
IC2F6	2. 3353
IC2F7	2. 0413
OC1F8	0. 8574
OC1F9	0. 7154
OC1F10	0. 5958
OC1F11	0. 4695
OC2F11	0. 5566
OC2F12	0. 4649
OC2F13	0. 3765
OC2F14	0. 2862
OC2F15	0. 1723

表 3.1-40 ケース 3-2 炉心集合体最大線出力（辺方向）

集合体位置略号 領域及び F ; 集合体列番号	最大線出力 (W/cm)
IC1F1	267.4
IC1F2	263.5
IC1F3	261.6
IC2F4	353.8
IC2F5	326.6
IC2F6	294.2
IC2F7	257.1
OC1F8	299.0
OC1F9	249.5
OC1F10	207.8
OC1F11	165.0
OC2F11	195.6
OC2F12	163.4
OC2F13	132.3
OC2F14	100.6
OC2F15	60.6

表 3.1-41 ケース 3 の軸芯炉心のコンパクション反応度

炉心	TRU富化度	軸芯吸収体 (スミア密度)	軸芯吸収 体配置	吸収体径	初期健全 時 Keff	コンパク ション時 Keff	コンパクシ ョン反応度 (% $\Delta \rho$)
ケース3	30%	無し	-	-	1.0411	1.0349	-0.66
ケース3-1	30%	Gd ₂ O ₃ (100%)	OC1/OC2	2mm	1.0120	0.9816	-3.1
ケース3-2	30%	Gd ₂ O ₃ (60%)	OC1/OC2	2mm	1.0168	0.9951	-2.1

表 3.1-42 集合体出力分布と集合体内径方向ピーキング係数 (ケース 3-2)

列番号	集合体出力(相対値)	集合体内径方向ピーキング係数
1	2.1226	1.0085
2	2.0913	1.0086
3	2.0765	1.0041
4	2.8087	1.0443
5	2.5930	1.0574
6	2.3353	1.0637
7	2.0413	1.0832
8	0.8574	1.0956
9	0.7154	1.0965
10	0.5958	1.1224
11	0.4695	1.1553
12	0.5566	1.0951
13	0.4649	1.1098
14	0.3765	1.1356
15	0.3862	1.3198
16	0.1723	1.7167

表 3.1-43 ケース 3-2 の流量配分結果

		必要流量	設計流量	体数		集合体 出口温度	被覆管 温度	流量領域
		(kg/s)	(kg/s)			(°C)	(°C)	
内側 1	1	51.3	59.0	6	小計	562.6	662.4	1
	2	50.5	59.0	12		560.1	658.8	
	3	49.9	59.0	14		559.0	655.9	
内側 2	4	70.2	71.0	24	小計	579.3	696.9	2
	5	65.7	71.0	26		565.2	678.4	
	6	59.5	71.0	32		548.2	653.5	3
	7	52.9	70.0	32		530.9	630.2	
外側 1	8	18.1	23.0	50	小計	568.7	678.5	4
	9	15.1	18.0	50		580.2	696.3	5
	10	12.9	15.0	44		580.1	702.8	6
	11	10.5	12.0	26		577.3	706.8	7
外側 2	12	11.8	12.0	40	小計	611.1	743.1	8
	13	9.9	10.0	62		611.6	748.3	9
	14	8.2	9.0	74		589.9	721.8	10
	15	9.8	10.0	66		574.9	744.3	11
	16	5.7	5.8	36		533.4	744.4	12

表 3.1-44 ケース 3-2 の圧力損失

項 目	単位	実証炉	レファレンス	内側 1	内側 2	外側 1	外側 2
ピン肉厚	mm	0.52	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465
ピン内径	mm	7.76	7.07	4.07	4.86	5.7	6.31
ピン径	mm	8.8	8	5	5.79	6.63	7.24
ピン本数		271	331	331	331	331	331
集合体内対面距離	mm	169.2	169.2	169.2	169.2	169.2	169.2
ラップ管肉厚	mm	5	5	5	5	5	5
バンドルピッチ	mm	4	4	4	4	4	4
ワイヤー径	mm	1.27	1.15	2.5	2.5	1.91	1.32
集合体配列ピッチ	mm	183.2	183.2	183.2	183.2	183.2	183.2
燃料体積比		0.4410	0.4471	0.1482	0.2113	0.2906	0.3561
構造材体積比		0.2417	0.2410	0.2352	0.2483	0.2390	0.2321
冷却材体積比 (ラップ管内)		0.2741	0.2688	0.5735	0.4973	0.4272	0.3686
冷却材体積比 (ラップ管外)		0.0432	0.0432	0.0432	0.0432	0.0432	0.0432
計		1	1	1	1	1	1
ラップ管内流路相対比				2.134	1.850	1.590	1.371
ワイヤー巻ピッチ	mm	200	200	200	200	200	200
ピン長	mm	2905	4970	4970	4970	4970	4970
バンドル圧損 (reference)							
流量	kg/s	32.1	93	59	71	23	12
圧損	MPa	0.192	2.92	0.14	0.32	0.054	0.025
流速	m/s	4.79	14.15	4.2	5.84	2.2	1.33
バンドル部以外圧損	MPa	0.008	0.0671	0.0270	0.0391	0.0041	0.0011
集合体圧損	MPa	0.2	2.99	0.17	0.36	0.06	0.026
オリフィス圧損				0.19	0	0.3	0.334
全圧損		-	-	0.36	0.36	0.36	0.36

表 3.1-45 円柱型炉心の仕様

項目	単位	円柱型炉心
原子炉熱出力	MW t	3600
炉心高さ (内側/外側)	cm	80/80
炉心等価直径	cm	490
燃料集合体数 (内側/外側)		316/278
制御棒本数		55
燃料要素数/集合体		271
燃料要素外径	mm	8.8
燃料要素内径	mm	7.76
集合体配列ピッチ	mm	183.2
燃料体積比	%	44.1
構造材体積比	%	23.0
上部軸ブランケット厚さ	cm	30
下部軸ブランケット厚さ	cm	40
TRU 富化度	%	18.3/22.9

表 3.1-46 円柱型炉心出力分布

集合体位置	集合体径方向 ピーキング 係数	最大線出力	備考
内側炉心第 1 列	1.0932	347.8	
内側炉心第 2 列	1.0167	323.5	
内側炉心第 3 列	1.0257	326.4	
内側炉心第 4 列	1.0072	320.5	
内側炉心第 5 列	1.0226	325.4	
内側炉心第 6 列	0.9842	313.3	
内側炉心第 7 列	1.0067	320.3	
内側炉心第 8 列	1.0097	323.1	
内側炉心第 9 列	1.0092	322.9	
内側炉心第 10 列	0.9811	313.9	
内側炉心第 11 列	0.9792	307	
外側炉心第 1 列	1.2053	377.9	最大位置*
外側炉心第 2 列	1.1694	366.6	
外側炉心第 3 列	1.0768	337.7	
外側炉心第 4 列	0.8663	271.6	
外側炉心第 5 列	0.5303	166.3	

*軸方向ピーキング係数 1.178

表 3. 1-47 燃料仕様

項目	単位	値
燃料ピン径 (外径/内径)	mm	8.8/7.76
燃料ピン本数/集合体	本	271
炉心長	mm	800
軸方向ブランケット長(上/下)	mm	300/400
燃料要素長	mm	2905
ガスペナム長	mm	285/1020
燃料集合体全長	mm	4370

表 3. 1-48 円柱型炉心の流量配分結果

		必要流量 (kg/s)	設計流量 (kg/s)	体数	集合体出口 温度 (°C)	被覆管 温度 (°C)	流量領域	
内側	1	26.1	28.5	6	566.5	676.2	1	
	2	24.4	28.5	12	554.5	658.5		
	3	23.7	28.5	14	555.9	651.6		
	4	23.3	26.0	24	568.2	670.7	2	
	5	24.0	26.0	26	570.8	678.0		
	6	23.1	26.0	32	564.2	668.2		
	7	23.4	26.0	32	568.1	671.6		
	8	23.2	26.0	50	568.6	669.2	3	
	9	23.6	25.0	50	575.4	683.4	4	
	10	22.9	25.0	44	小計	570.4	676.1	
	11	22.5	25.0	26	316	570.1	671.6	
外側	12	28.2	30.0	40	574.6	682.5	5	
	13	28.1	30.0	62	569.2	681.8		
	14	27.5	29.0	74	561.0	685.5	6	
	15	24.4	25.0	66	小計	549.9	692.6	7
	16	16.6	17.0	36	278	534.4	693.9	8

表 3.1-49 円柱型炉心の圧損評価

項目	単位	実証炉	円柱型 炉心
ピン肉厚	mm	0.52	0.52
ピン内径	mm	7.76	7.76
ピン径	mm	8.8	8.8
ピン本数	本	271	271
集合体内対面距離	mm	169.2	169.2
ラップ管肉厚	mm	5	5
バンドルピッチ	mm	4	4
ワイヤー径	mm	1.27	1.27
集合体配列ピッチ	mm	183.2	183.2
燃料体積比		0.4410	0.4410
構造材体積比		0.2417	0.2417
冷却材体積比 (ラップ管内)		0.2741	0.2741
冷却材体積比 (ラップ管外)		0.0432	0.0432
計		1	1
ラップ管内流路相対比			
ワイヤー巻ピッチ	mm	200	200
ピン長	mm	2905	2905
バンドル圧損 (reference)			
流量	kg/s	32.1	30
圧損	MPa	0.192	0.17
流速	m/s	4.79	4.48
バンドル部以外圧損	MPa	0.008	0.0070
集合体圧損	MPa	0.2	0.18
オリフィス圧損			
全圧損		-	-

表 3.1-50 円柱型炉心出力分布（外側炉心軸芯吸収体配置）

集合体位置*	集合体径方向 ピーキング 係数	最大線出力	備考
内側炉心第1列	1.0914	344.8	
内側炉心第2列	1.1221	354.5	
内側炉心第3列	1.1757	371.4	最大位置**
内側炉心第4列	1.1486	354.1	
内側炉心第5列	1.1529	355.4	
内側炉心第6列	1.0855	334.6	
内側炉心第7列	1.0826	333.6	
内側炉心第8列	1.0377	338.2	
内側炉心第9列	1.0266	334.6	
内側炉心第10列	1.0308	336	
内側炉心第11列	0.9688	306	
外側炉心第1列	1.1756	371.3	
外側炉心第2列	1.0742	339.2	
外側炉心第3列	0.9748	307.8	
外側炉心第4列	0.7987	252.2	
外側炉心第5列	0.4982	157.4	

*上下凸型炉心と同じ

**軸方向ピーキング係数 1.187

表 3.1-51 集合体出力と集合体内径方向ピーキング係数 (円柱型炉心：軸芯有り)

列番号	集合体出力 (相対値)	集合体内 径方向ピーキング係数
1	1.0914	1.0163
2	1.1222	1.0158
3	1.1758	1.0269
4	1.1487	1.0021
5	1.1529	1.0338
6	1.0855	1.0359
7	1.0826	1.0015
8	1.0378	1.0062
9	1.0266	1.0024
10	1.0309	1.0024
11	0.9689	1.0370
12	1.1757	1.0498
13	1.0743	1.0534
14	0.9749	1.1043
15	0.7987	1.2172
16	0.4983	1.3481

表 3.1-52 流量配分結果 (円柱型炉心：軸芯有り)

		必要 流量 (kg/s)	設計 流量 (kg/s)	体数	集合体出口 温度 (°C)	被覆管 温度 (°C)	流量 領域	
内側	1	25.5	27.0	6	575.7	683.9	1	
	2	26.2	27.0	12	580.8	691.4		
	3	27.7	27.0	14	589.6	707.8		
	4	26.4	28.5	24	575.1	679.3	2	
	5	27.4	28.5	26	575.8	688.7		
	6	25.8	28.5	32	565.2	673.1		
	7	24.9	28.5	32	564.8	663.9		
	8	24.0	26.0	50	573.4	677.8	3	
	9	23.6	25.0	50	578.6	684.4	4	
	10	23.7	25.0	44	小計	579.3	685.5	
	11	23.1	25.0	26	316	568.2	678.0	
外側	12	28.4	30.0	40	570.2	684.3	5	
	13	26.0	30.0	62	555.1	661.7		
	14	24.7	27.0	74	556.4	675.9	6	
	15	22.3	24.0	66	小計	543.8	680.1	7
	16	15.4	16.0	36	278	534.2	689.8	8

表 3.1-53 円柱型炉心（軸芯有り、無し）と上下凸型炉心（軸芯有り、無し）の仕様

	円柱型炉心 (軸芯無し)	円柱型炉心 (軸芯有り)	上下凸型炉心 (軸芯無し) (Case3)	上下凸型炉心 (軸芯有り)
集合体本数				
内側 1/内側 2	316	316	32/114	32/114
外側 1/外側 2	278	278	170/278	170/278
内側炉心高さ／直 径(Hin/Din)	0.162	0.162	0.7	0.7
炉心高さ (cm)	80	80	158.5/52.	158.5/52.
TRU 富化度 (%)	18.3/22.9	18.3/22.9	30	30
ピン径 (IC1/IC2/ OC1/OC2) (mm)	8.8	8.8	5.0/5.79/6.63 /7.24	5.0/5.79/6.63 /7.24
ピン本数	271	271	331	331
軸芯燃料装荷位置	無し	外側炉心に装荷	無し	外側 OC1 と OC2 に装荷
軸芯仕様	—	φ1 Gd ₂ O ₃ 60%充填	—	Φ2 Gd ₂ O ₃ 60%充填

表 3.1-54 円柱型炉心（軸芯有り、無し）と上下凸型炉心（軸芯有り、無し）の
主要炉心特性の比較

	円柱型炉心 (軸芯無し)	円柱型炉心 (軸芯有り)	上下凸型炉心 (軸芯無し) (Case3)	上下凸型炉心 (軸芯有り)
コンパクトン反応度 (% $\Delta \rho$) (\$)*	3.9 (11.5)	-1.7 (-5.0)	-0.66 (-1.9)	-2.1 (-6.2)
炉心圧損 (MPa)	0.18	0.18	0.23	0.36
ドップラー係数 ($E-3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$)	-8.9	-8.1	-9.5	-8.9
ナトリウムボイド反応度 (% $\Delta \rho$)	1.6	1.7	0.81	0.61
増殖比	1.17	1.21	1.09	1.10
燃焼反応度 (% $\Delta \rho$ /年)	2.26	2.33	7.1	8.3
燃焼度 (GWd/TM/年)	29	29	32	33
出力分担率 (内側/外側/ ブランケット)	0.58/0.32 0.1	0.6/0.30 0.1	0.50/0.45 0.05	0.54/0.37 0.09

*) 1\$=0.341% $\Delta \rho$

表 3.1-55 制御棒価値計算条件（上下凸型基準炉心）

制御棒	条件	備考
主炉停止系本数	40	
主炉停止系 ワンロッドスタック位置	第4列	図 3.1-34
後備炉停止系本数	15	
後備炉停止系 ワンロッドスタック位置	中心	図 3.1-35
吸収体	^{10}B 90%濃縮 B_4C	
吸収体体積比	30%	ラッパ管内
構造材体積比	20%	ラッパ管内
吸収体長	炉心高さ部	

注) JNC TN9400 2004-039 大型コンパクト型炉心仕様を参考に設定。

表 3. 1-56 制御棒価値均質計算値（上下凸型基準炉心）

制御棒	引抜時 Keff	挿入時 Keff	制御棒価値 均質計算値 (% $\Delta k/kk'$)
主炉停止系全挿入	1. 0237	0. 9052	12. 79
主炉停止系 ワンロッドスタック	1. 0237	0. 9188	11. 15
後備炉停止系全挿入	1. 0237	0. 9835	3. 99
後備炉停止系 ワンロッドスタック	1. 0237	0. 9985	2. 47

表 3.1-57 制御棒反応度収支（上下凸型基準炉心）

単位：%Δk/kk'

項目		主炉停止系 (ワット・スタック)	後備炉停止系	
			ワット・スタック	全数挿入
I.	計画余剰反応度	5.4	0.8	1.1
(1)	出力補償	1.1	0.8	1.1
(2)	燃焼補償	4.1 ^{*1}		
(3)	運転余裕	0.2		
II.	余剰反応度不確かさ(2σ)	0.6	0.2	0.3
(1)	臨界予測誤差	0.0		
(2)	出力補償予測誤差	-	0.2	0.3
(3)	燃料製作予測誤差	0.4		
(4)	燃料交換余裕	0.2		
III.	事故時投入反応度	-	0.8	0.8
IV.	必要制御反応度 (I + II + III)	6.4 ^{*2}	1.8	2.2
V.	制御棒価値 ^{*3}	8.3	1.9	3.0
VI.	反応度停止余裕 (V-IV)	1.9	0.1	0.8

*1:ノミナル計算値に燃料組成変動分を考慮した値

*2:炉停止余裕 1\$ (0.4%Δk/kk')を考慮した値

*3:ノミナル計算値に対し、各種補正（ランピング効果等）、設計予測誤差計 25%を考慮した値

表 3.1-58 制御棒価値均質計算値（上下凸型基準炉心）

制御棒	制御棒価値均質計算値 (% $\Delta k/kk'$)
主炉停止系 ワンロッドスタック	11
後備炉停止系全挿入	4.0
後備炉停止系 ワンロッドスタック	2.5

表 3.1-59 制御棒反応度収支（上下凸型基準炉心）

単位：%△k/kk'

項目		主炉停止系 (ワット・スタック)	後備炉停止系	
			ワット・スタック	全数挿入
I.	計画余剰反応度	5.4	0.8	1.1
(1)	出力補償	1.1	0.8	1.1
(2)	燃焼補償	4* ¹		
(3)	運転余裕	0.2		
II.	余剰反応度不確かさ(2σ)	0.6	0.2	0.3
(1)	臨界予測誤差	0.0		
(2)	出力補償予測誤差	-	0.2	0.3
(3)	燃料製作予測誤差	0.4		
(4)	燃料交換余裕	0.2		
III.	事故時投入反応度	-	0.8	0.8
IV.	必要制御反応度 (I + II + III)	6.0* ²	1.8	2.2
V.	制御棒価値* ³	8.2	1.9	3.0
VI.	反応度停止余裕 (V-IV)	1.8	0.1	0.8

*1: 運転長を縮小（7ヶ月）で余裕を考慮した値

*2: 炉停止余裕 1\$（0.4%△k/kk'）を考慮した値

*3: ノミナル計算値に対し、各種補正（ランピング効果等）、設計予測誤差計 25%を考慮した値

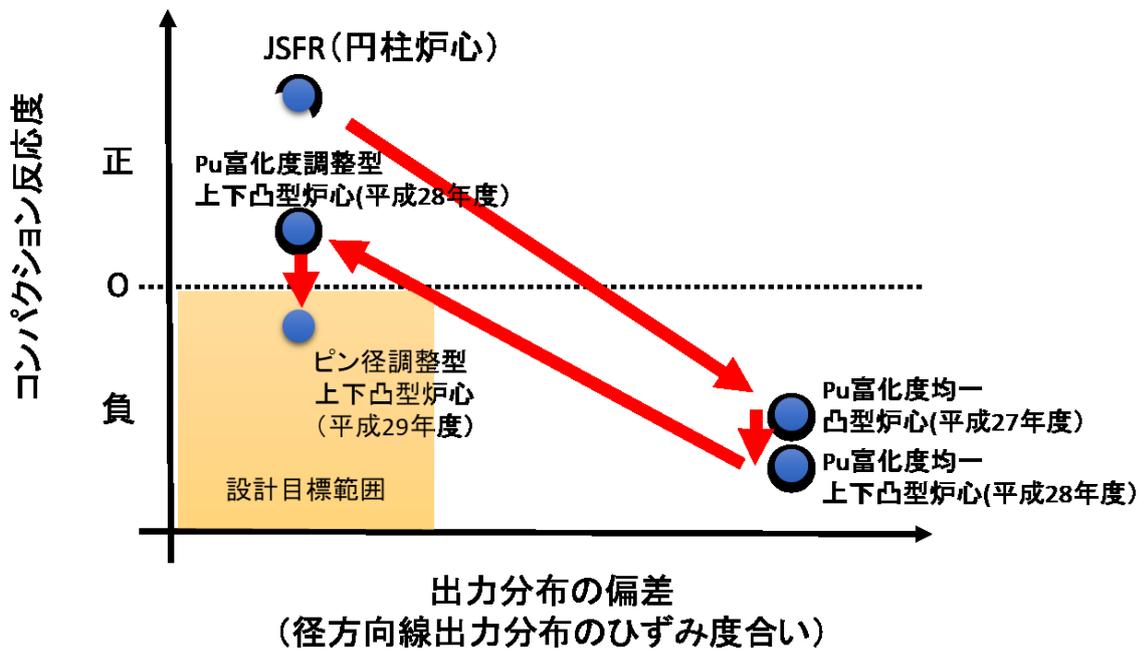


図 3.1-1 凸型炉心の検討の流れ(平成 27 年度～平成 29 年度)

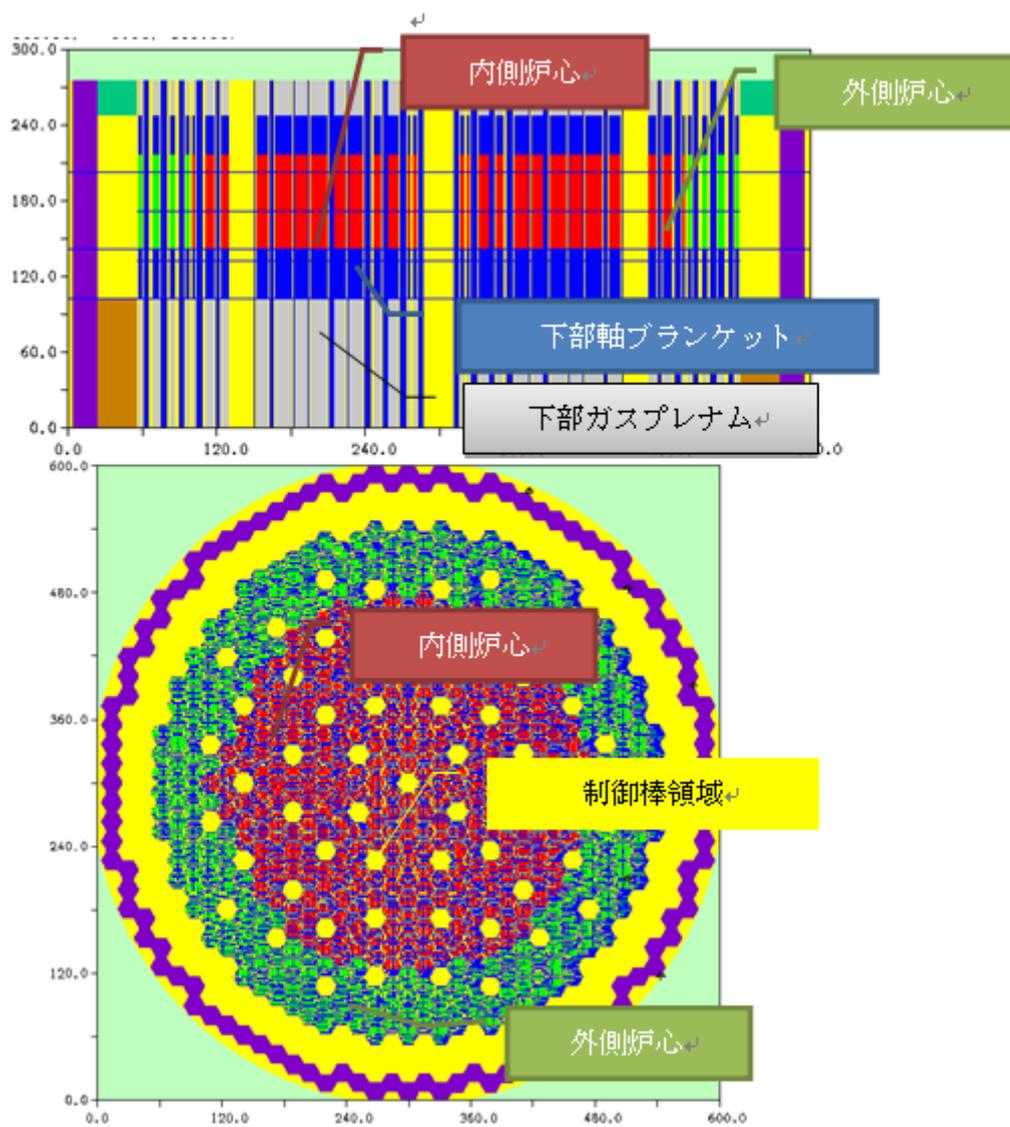


図 3.1-2 未臨界性解析大型円柱型炉心モデル

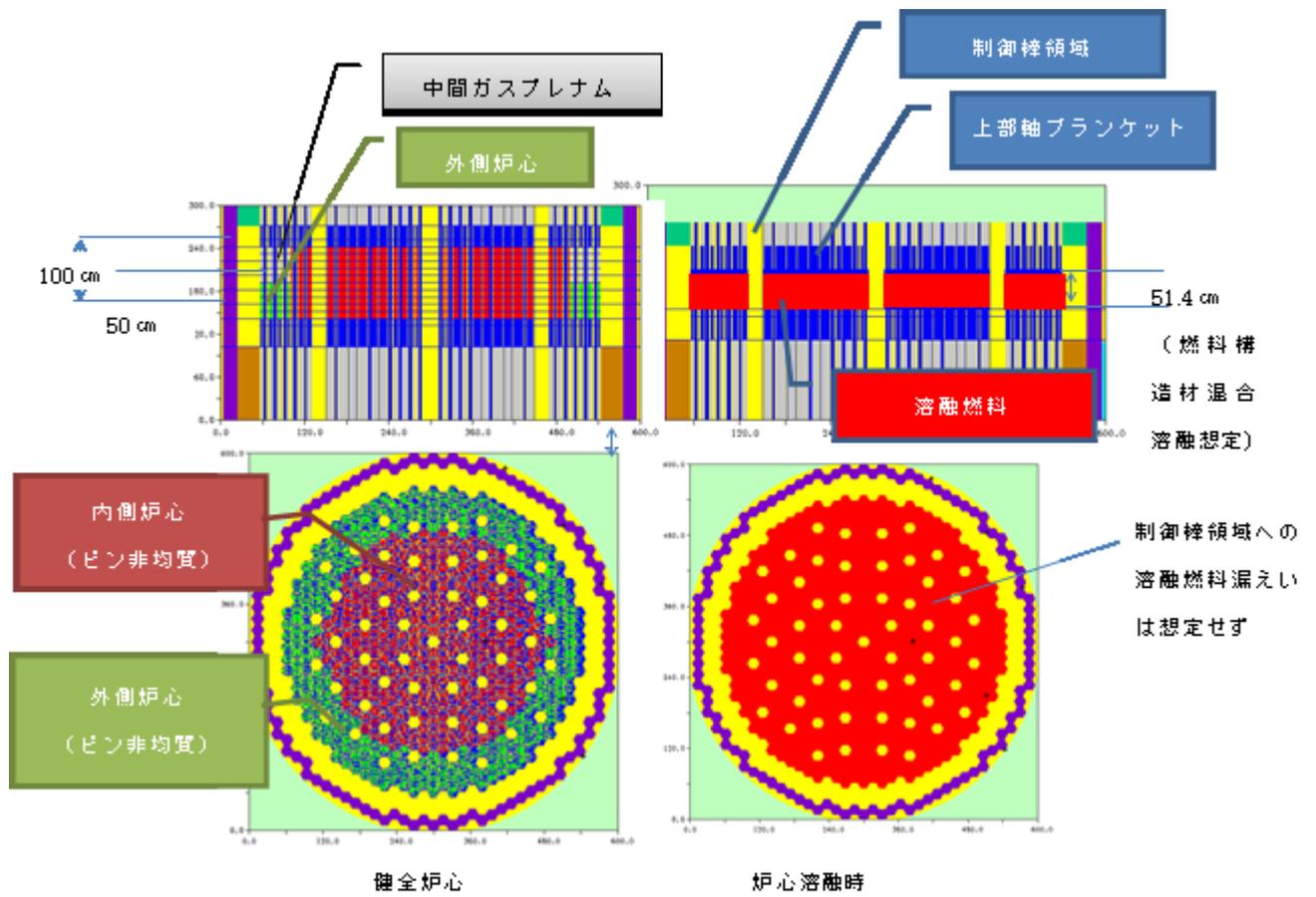


図 3.1-3 未臨界性解析大型凸型炉心の燃料溶融前後の解析モデル

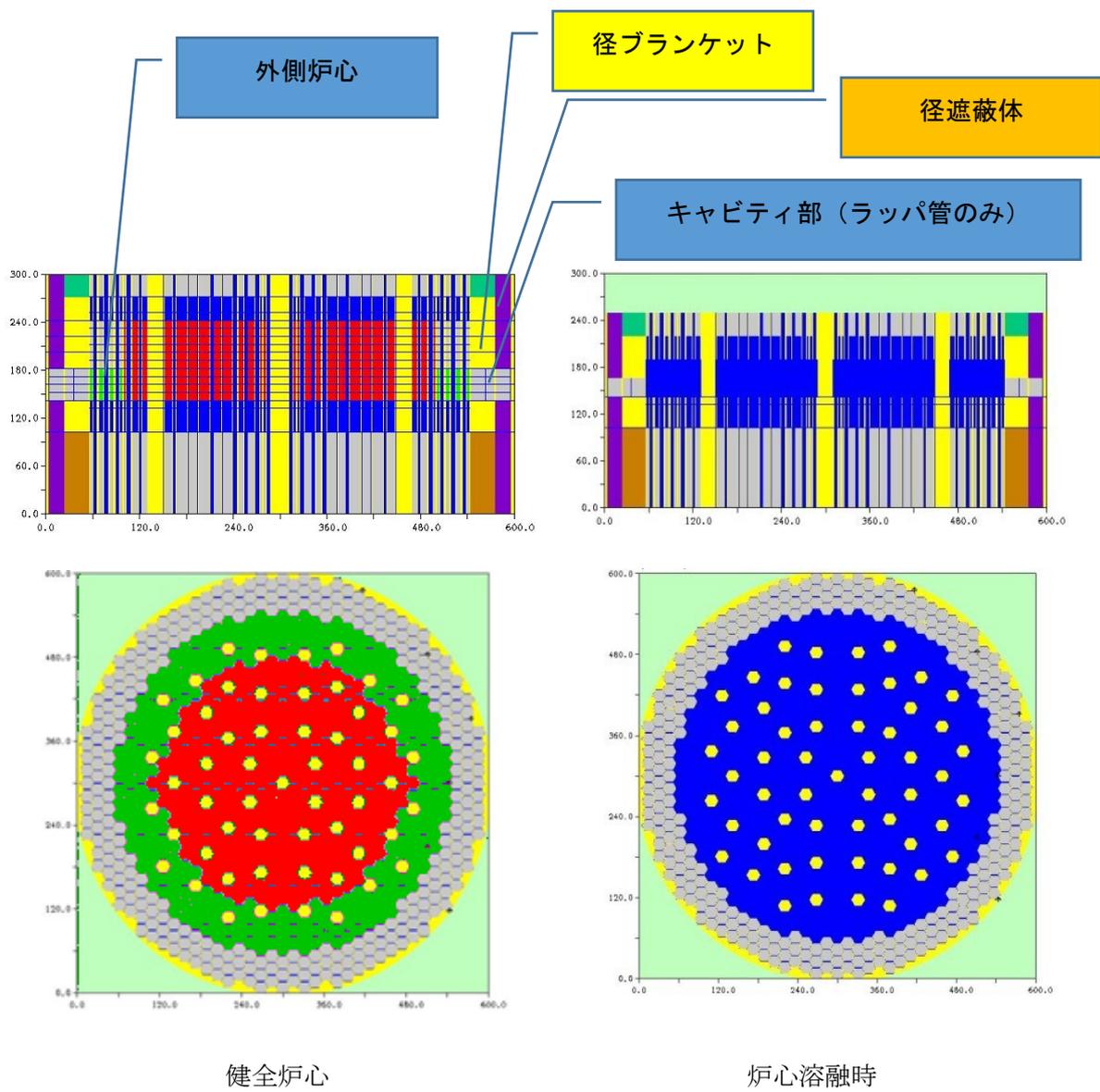


図 3.1-4 ブランケット部仕様変更の再臨界解析モデル

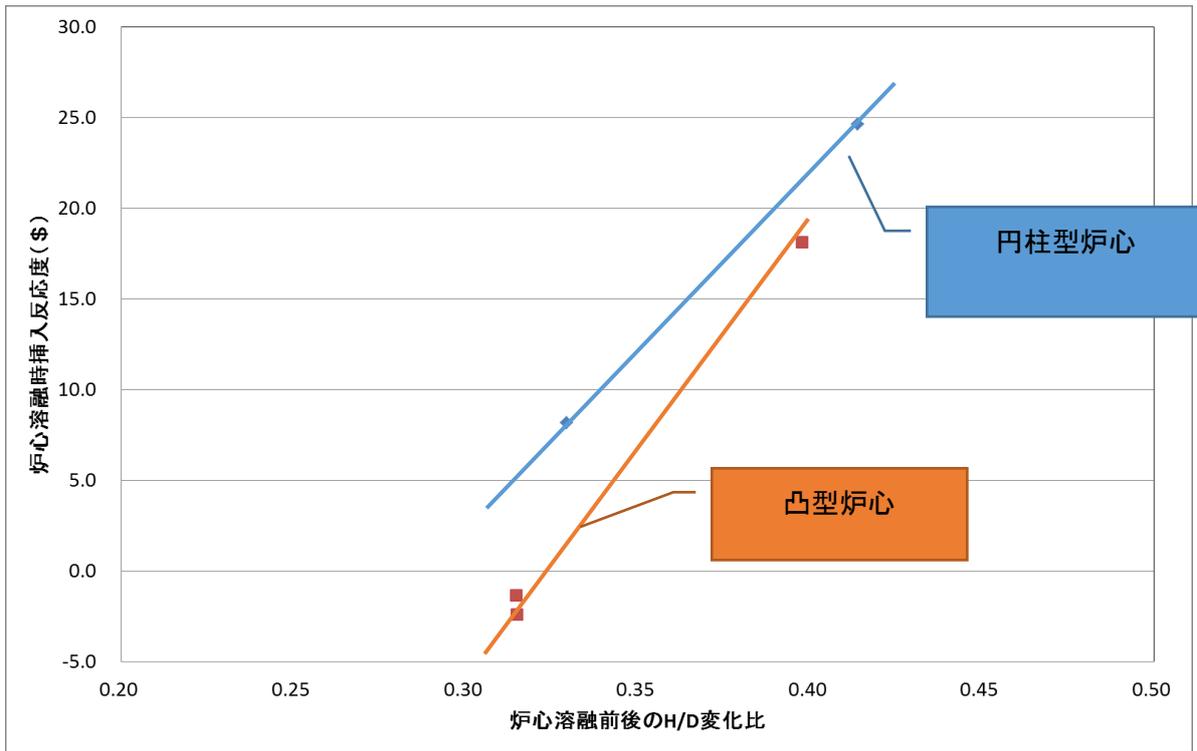


図 3.1-5 溶融前後の H/D 比変化と挿入反応度の評価結果

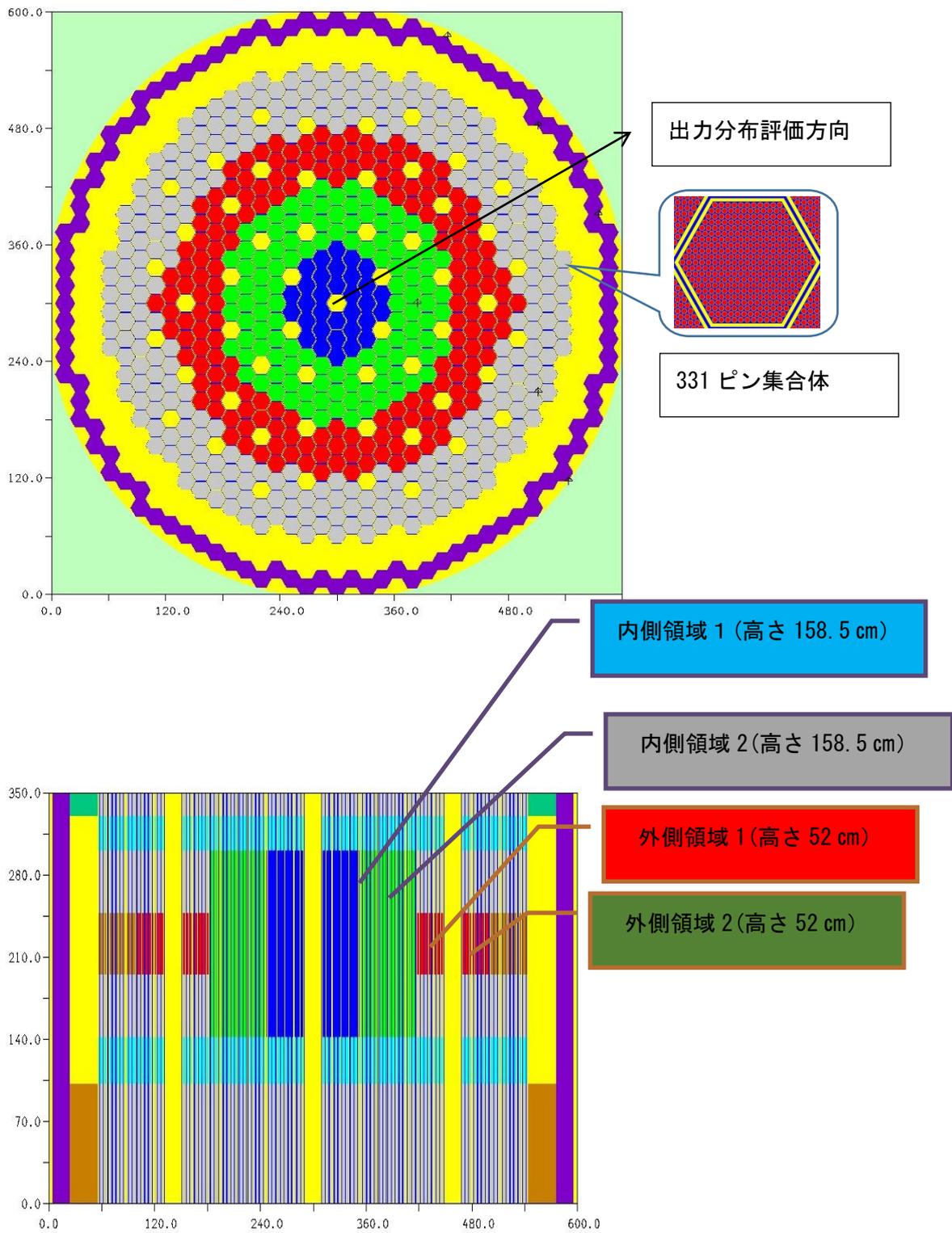


図 3.1-6 上下凸型 4 領域炉心健全状態

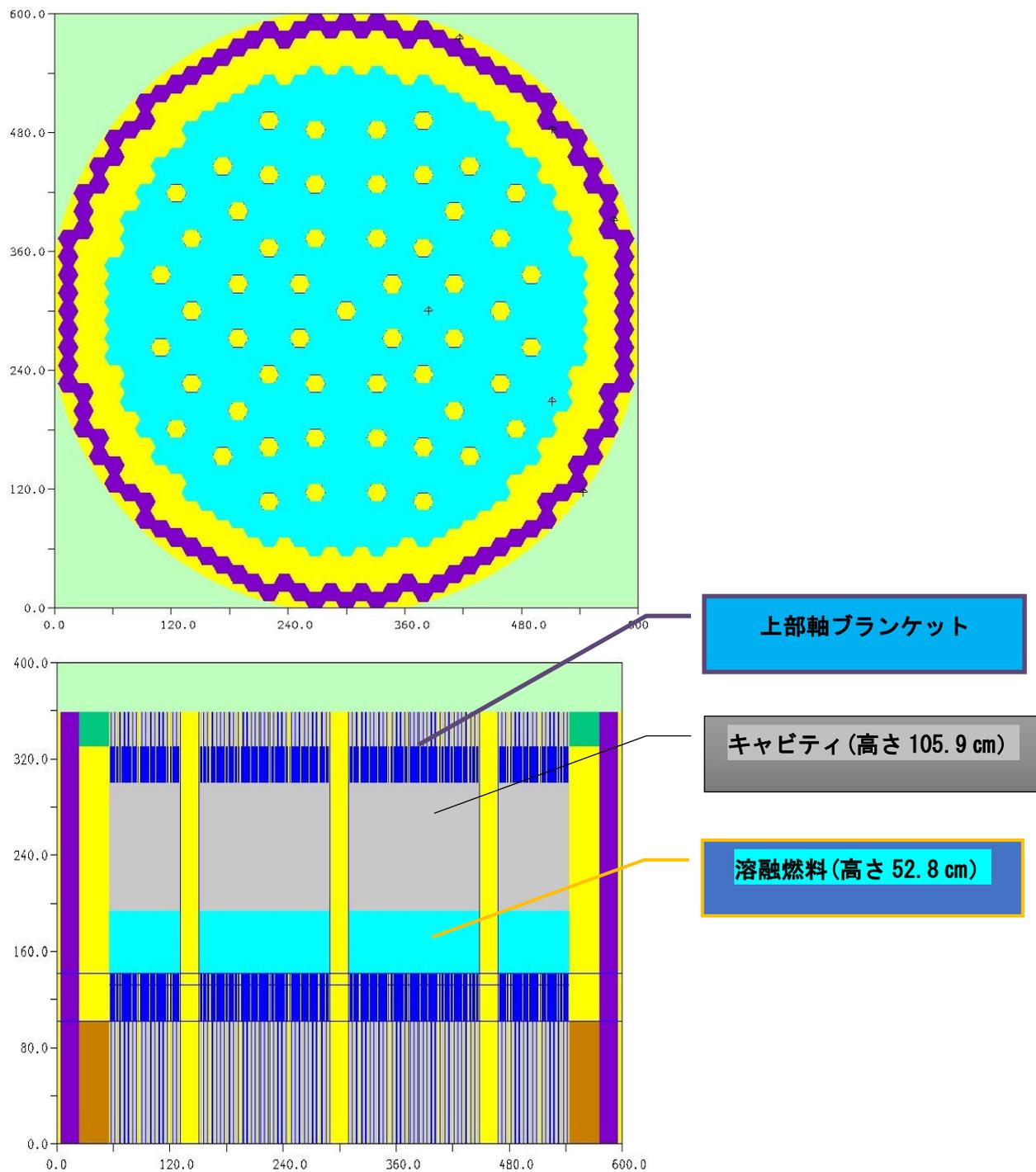
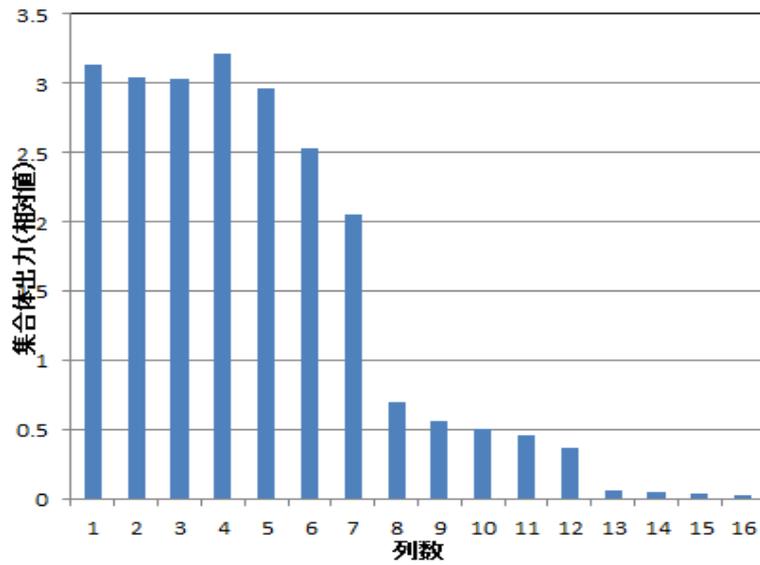
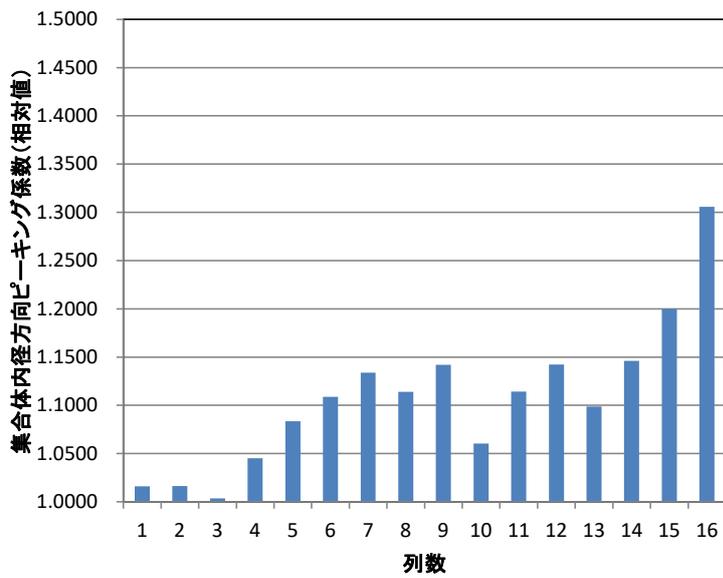
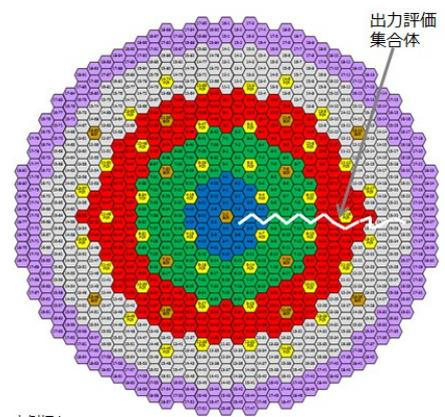


図 3.1-7 上下凸型 4 領域炉心熔融状態



集集体出力相対値



集集体内径方向ピーキング係数

図 3.1-8 集集体出力分布及び集集体内径方向ピーキング係数

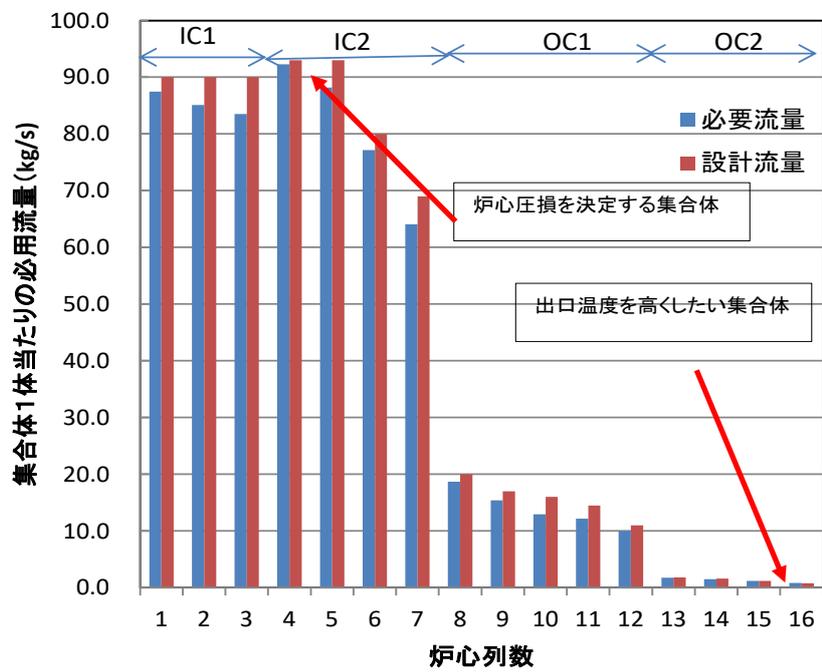
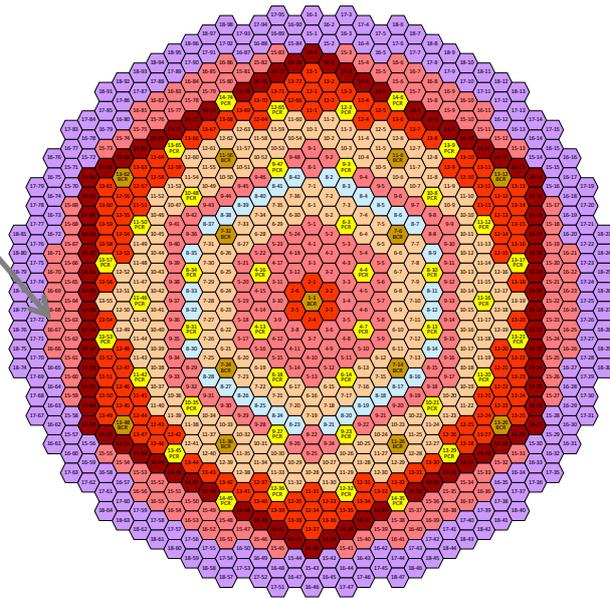


図 3.1-9 必要流量と設計流量の比較 (外側炉心集合体出口温度向上策適用)

外側炉心外周の

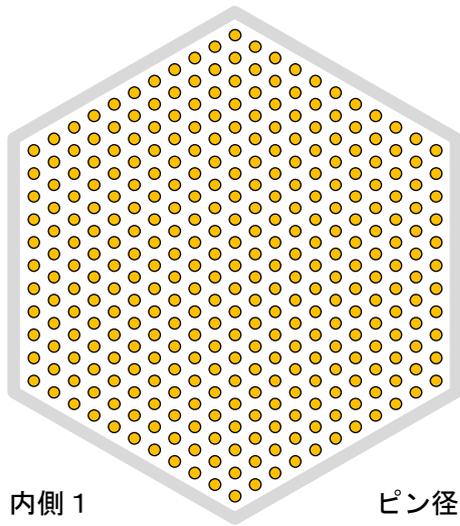
温度を高温化



	流量(Kg/s)	被覆温度(°C)
内側	90	692
	93	698
	80	690
	69	680
外側	20	712
	17	702
	16	671
	14.5	681
	11	703
	1.8	725
	1.6	716
	1.2	729
0.8	750	
PCR	-	-
BCR	-	-
BR	-	-

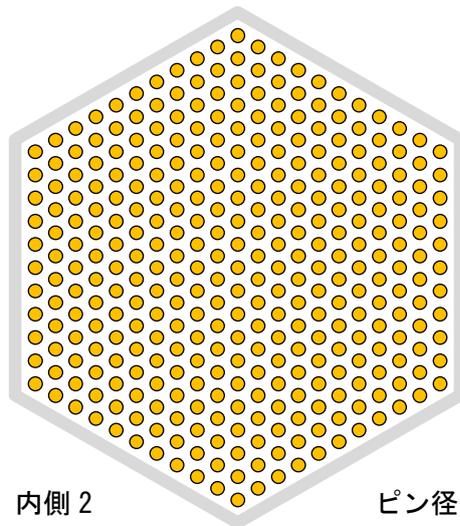
	出口温度(°C)
Dark Red	580以上
Red	580-570
Light Red	570-560
Orange	560-550
Light Orange	550-540
Yellow	540-530
Blue	530以下

図 3.1-10 集合体出口温度分布図（外側炉心集合体出口温度向上策適用）



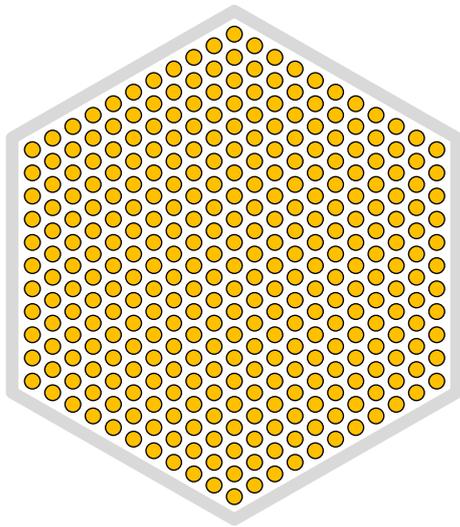
内側 1

ピン径 5.0mm



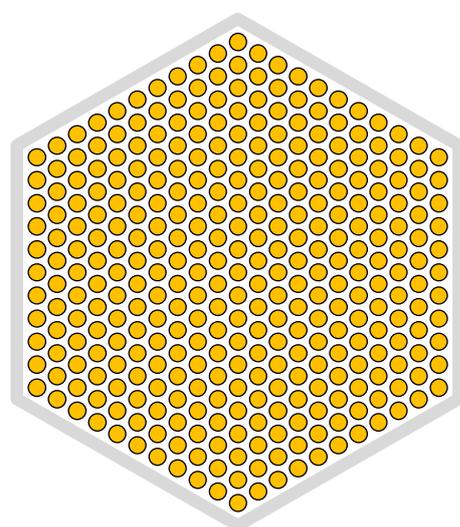
内側 2

ピン径 5.79mm



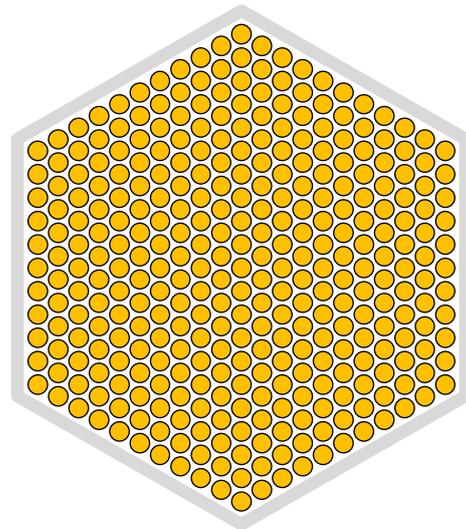
外側 1

ピン径 6.63mm



外側 2

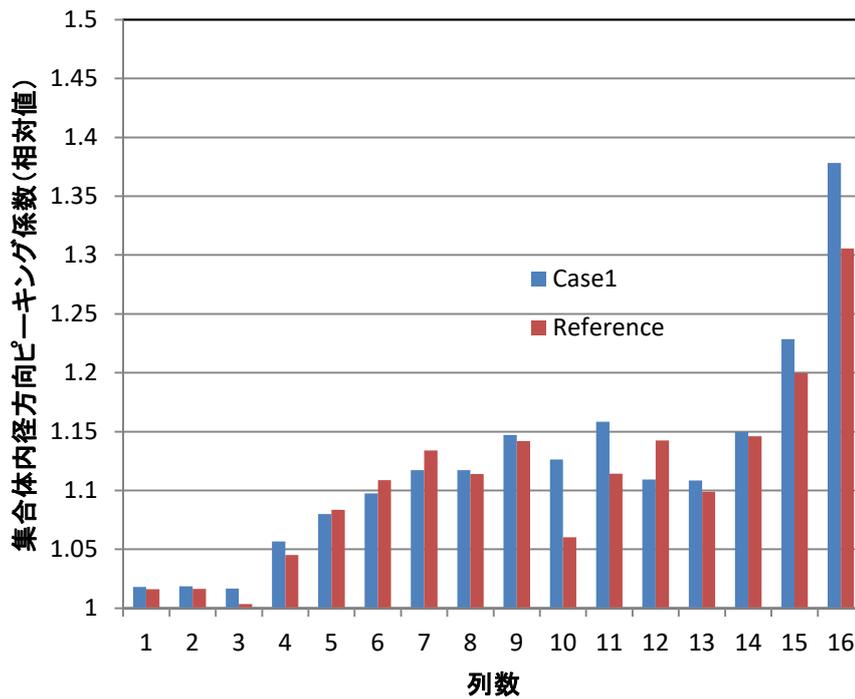
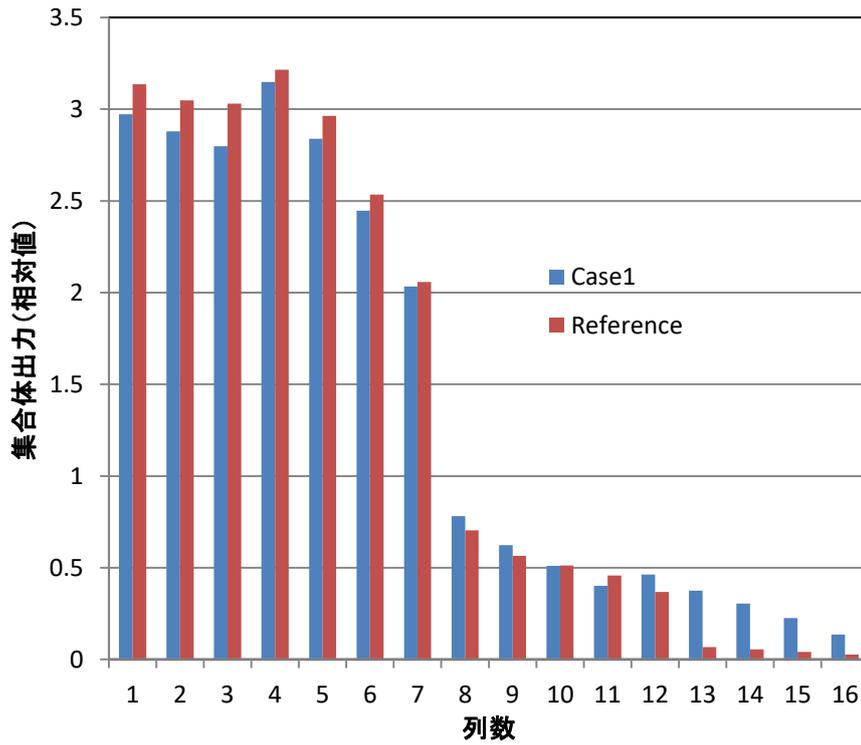
ピン径 7.24mm



レファレンス

ピン径 8mm

図 3.1-11 集合体断面仕様 (ケース 3)



列位置は図 3.1-8 を参照

図 3.1-12 集集体出力分布及び集集体内径方向ピーキング係数
(ケース 1 と Pu 富化度調整型上下凸型炉心の比較)

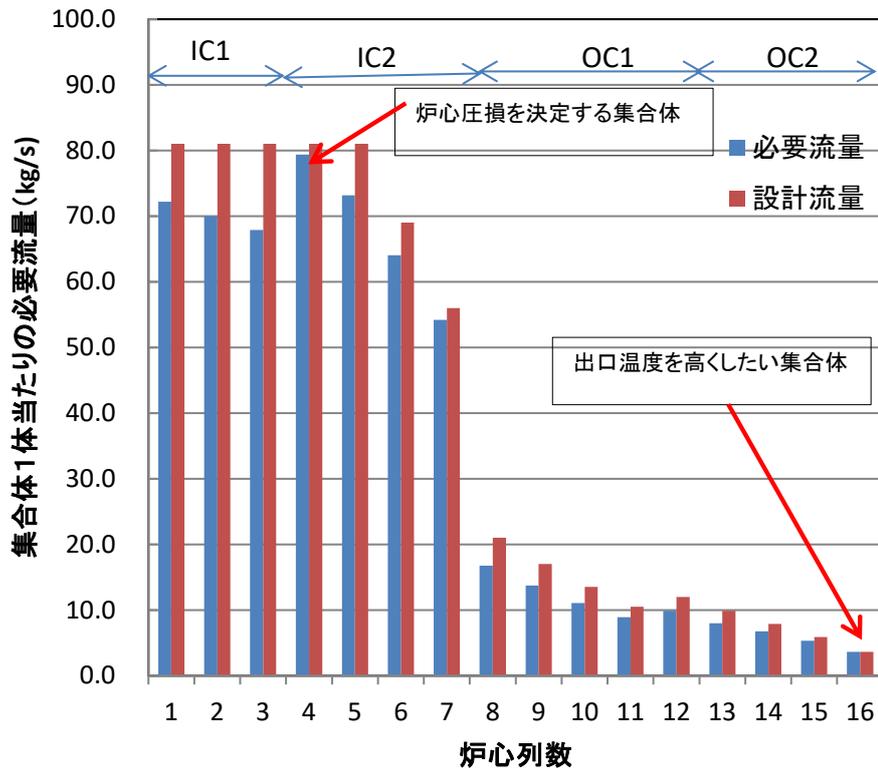


図 3.1-13 設計流量と必要流量の比較

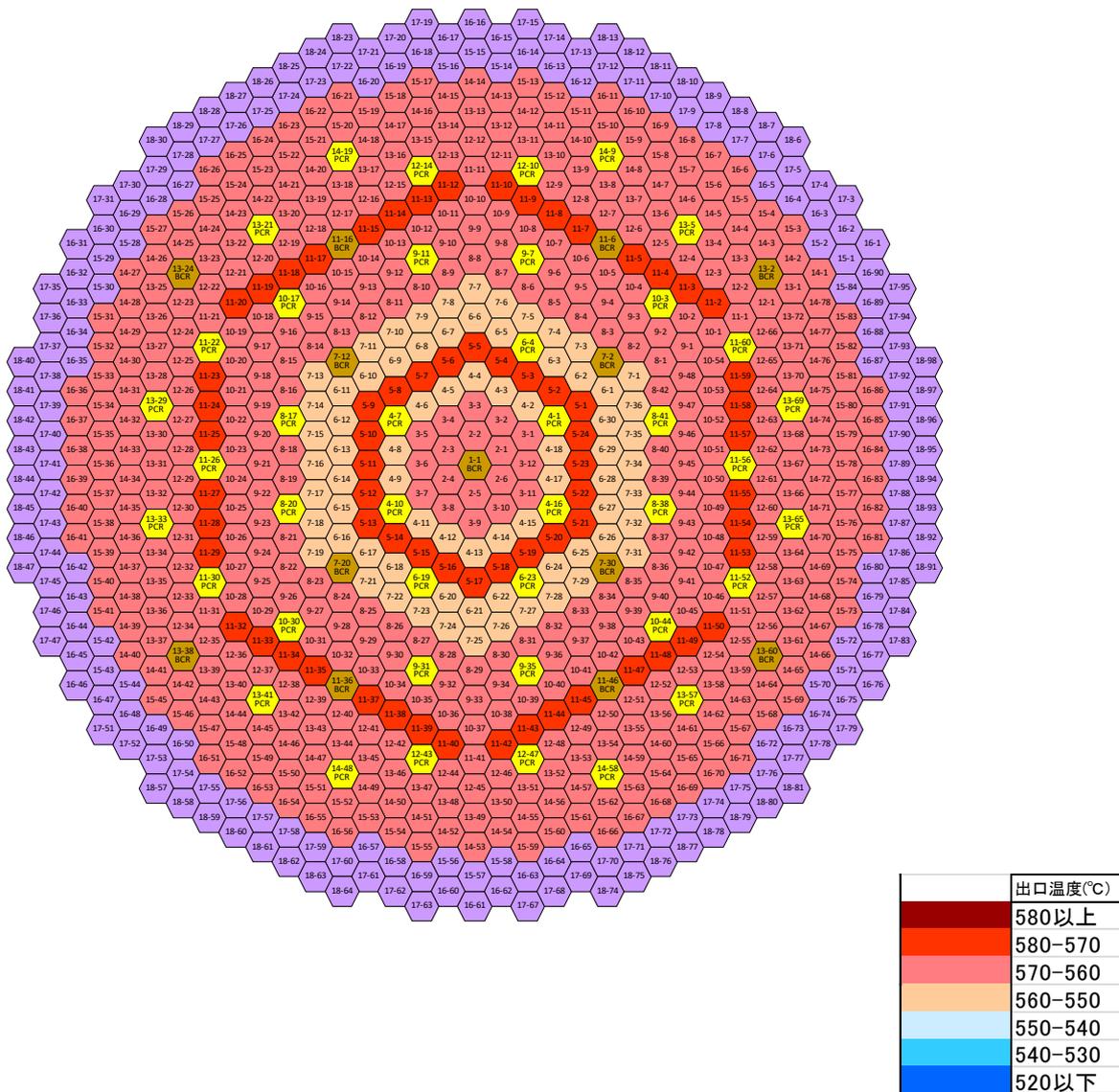


図 3.1-14 集合体出口温度分布 (ケース 1)

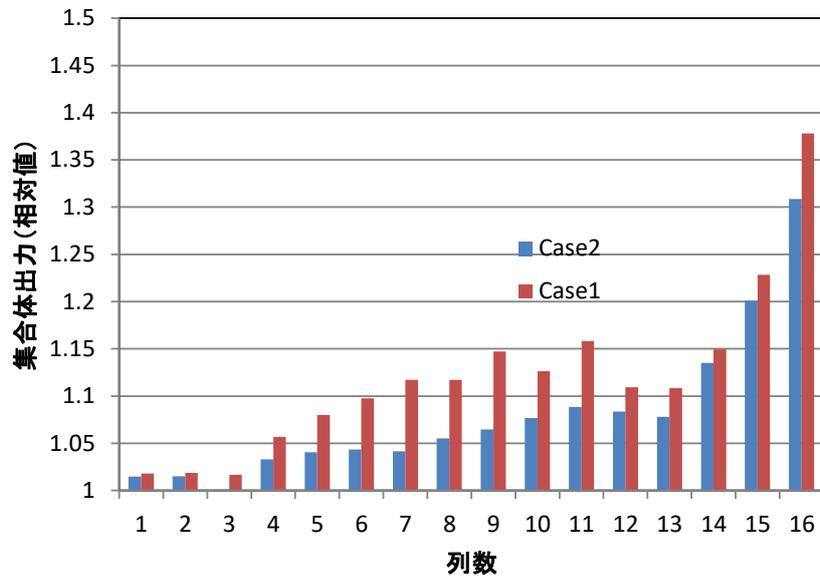
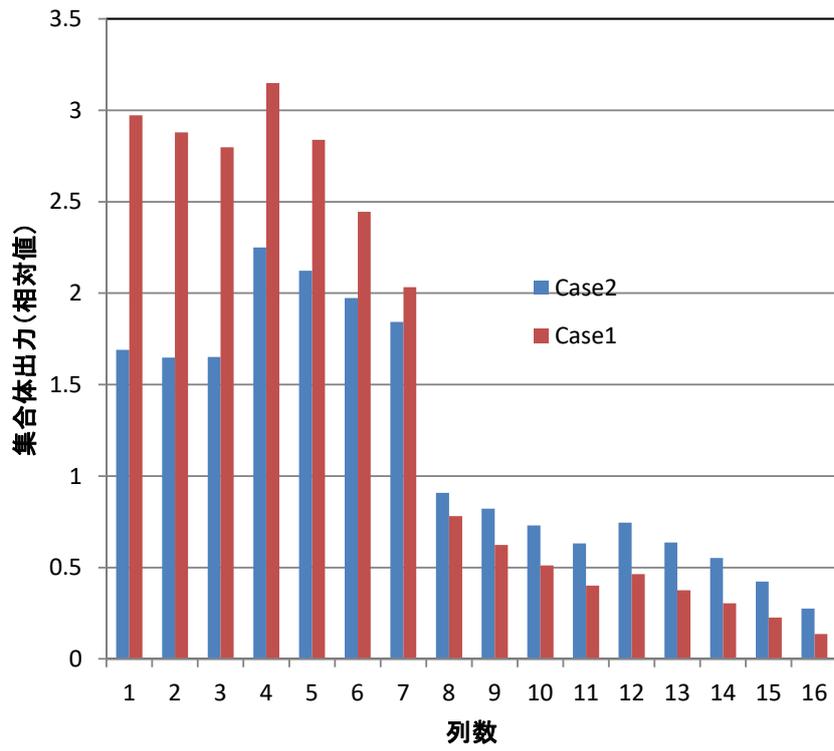


図 3.1-15 集合体出力分布及び集合体内径方向ピーキング係数
(ケース 2 とケース 1 との比較)

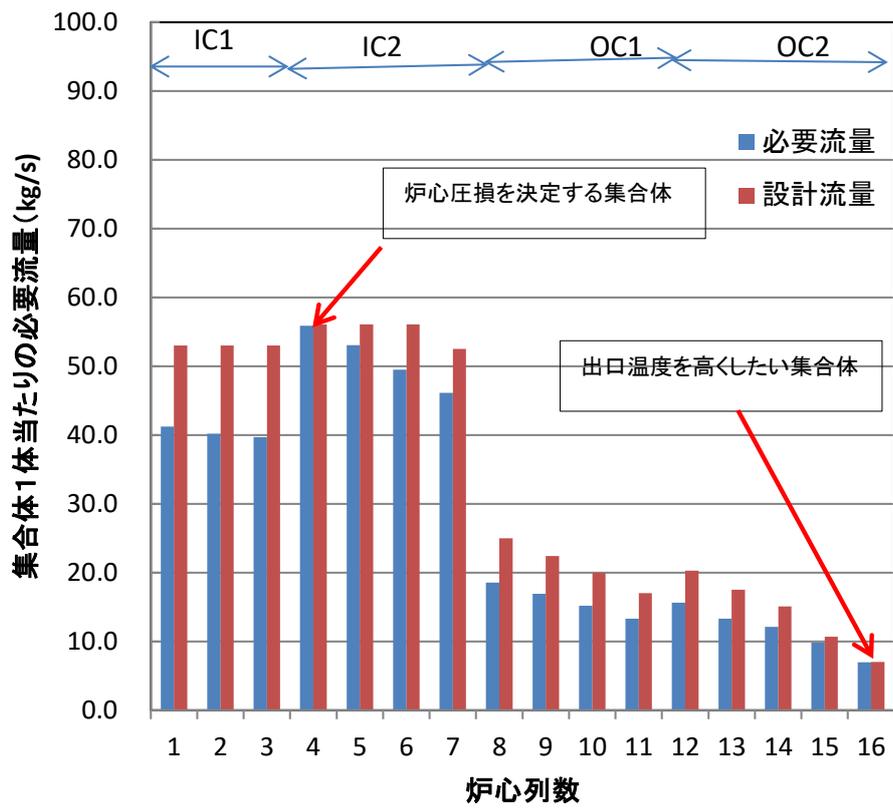


図 3.1-16 設計流量と必要流量の比較 (ケース 2)

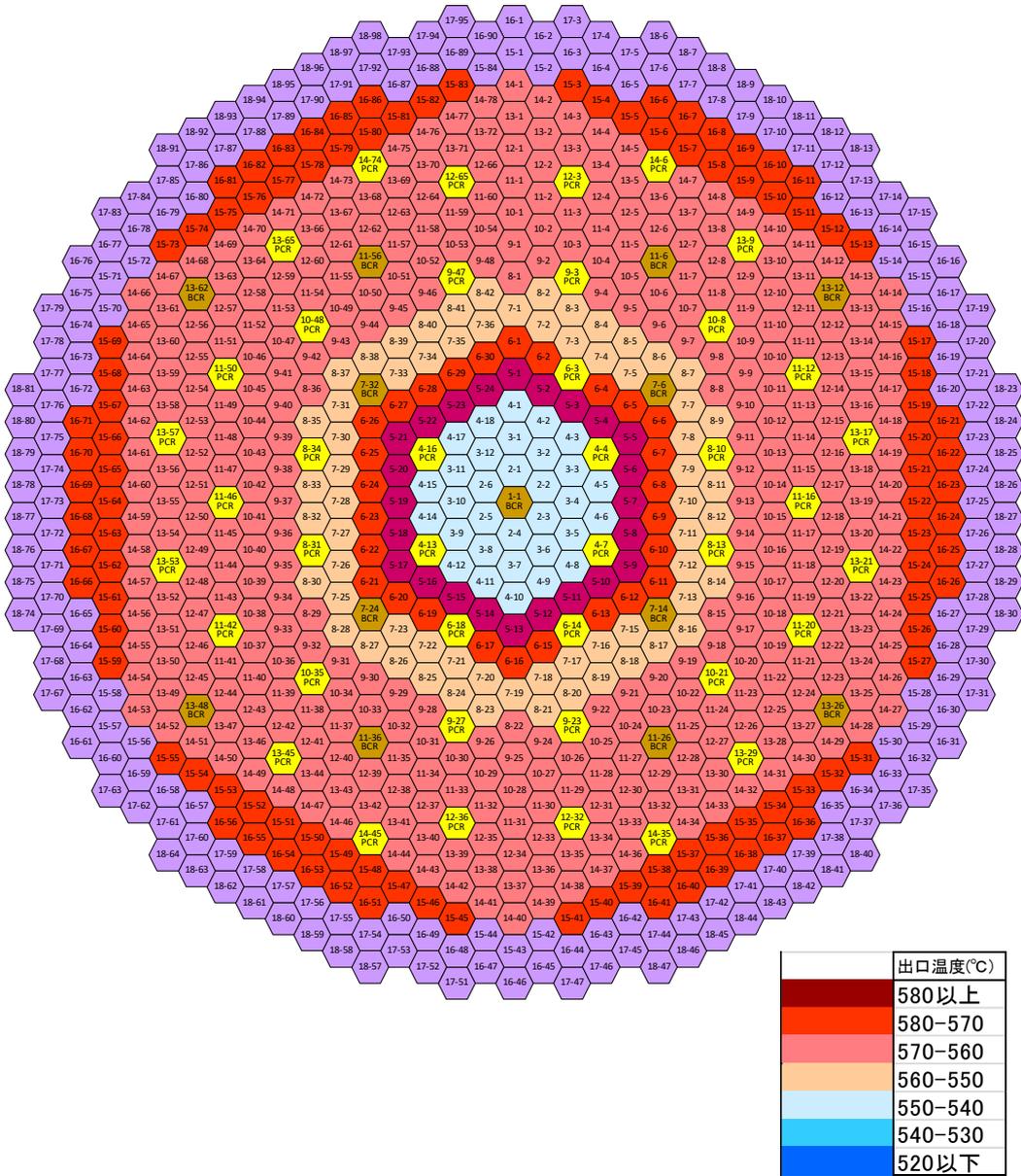


図 3.1-17 集合体出口温度分布 (ケース 2)

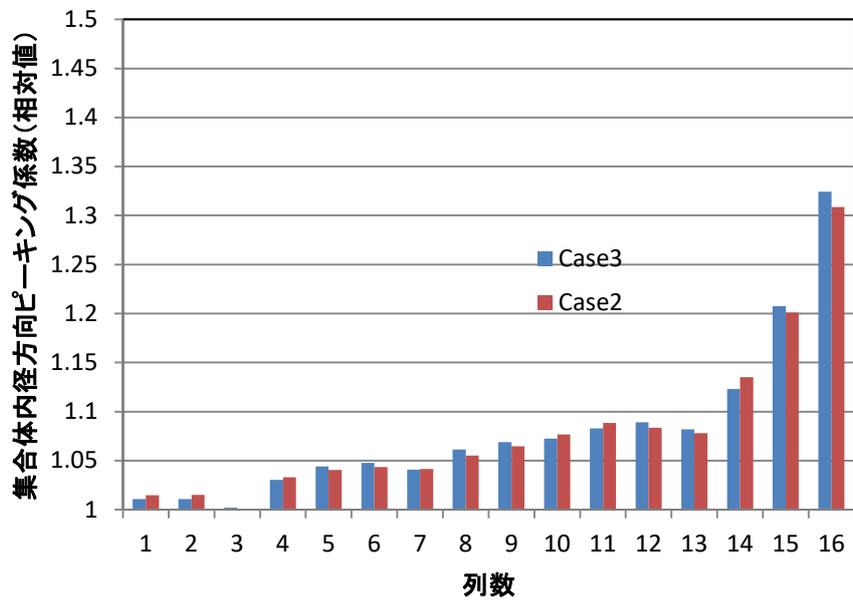
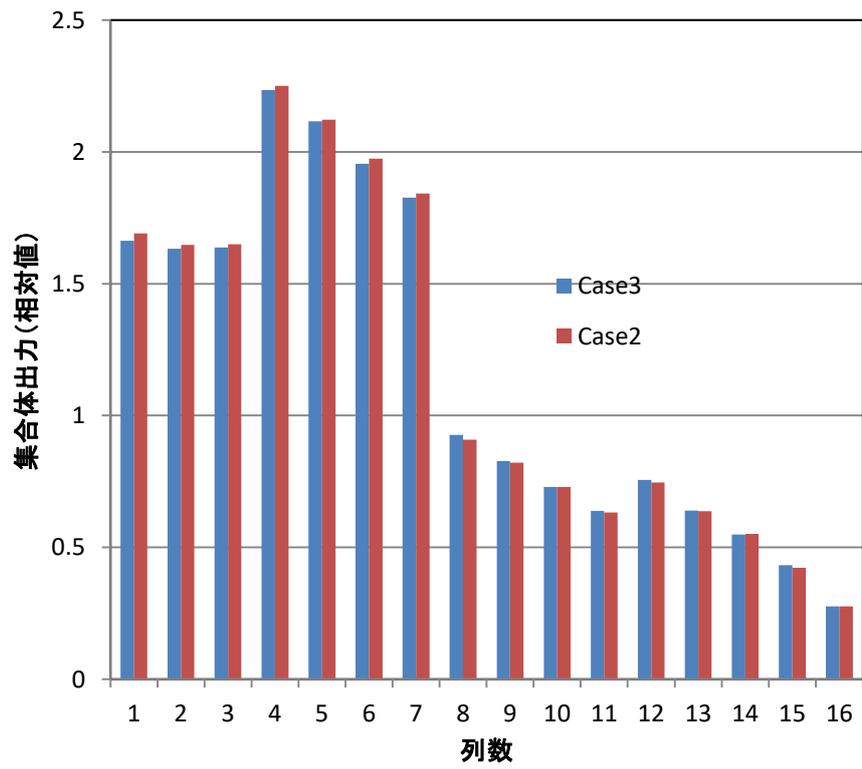


図 3.1-18 集合体出力分布及び集合体内径方向ピーキング係数
(ケース 3 とケース 2 との比較)

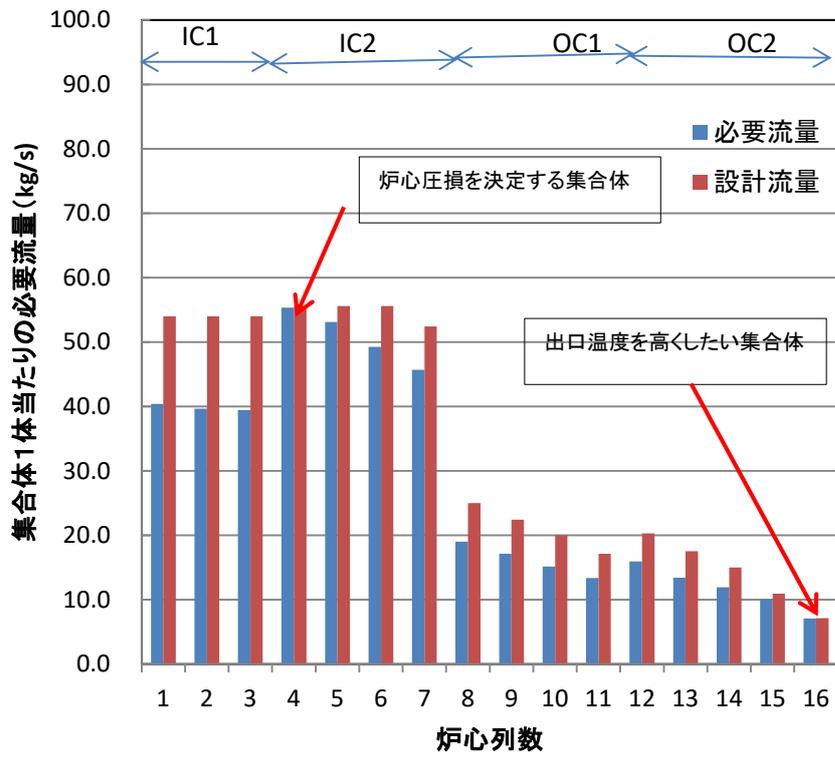


図 3.1-19 設計流量と必要流量の比較 (ケース 3)

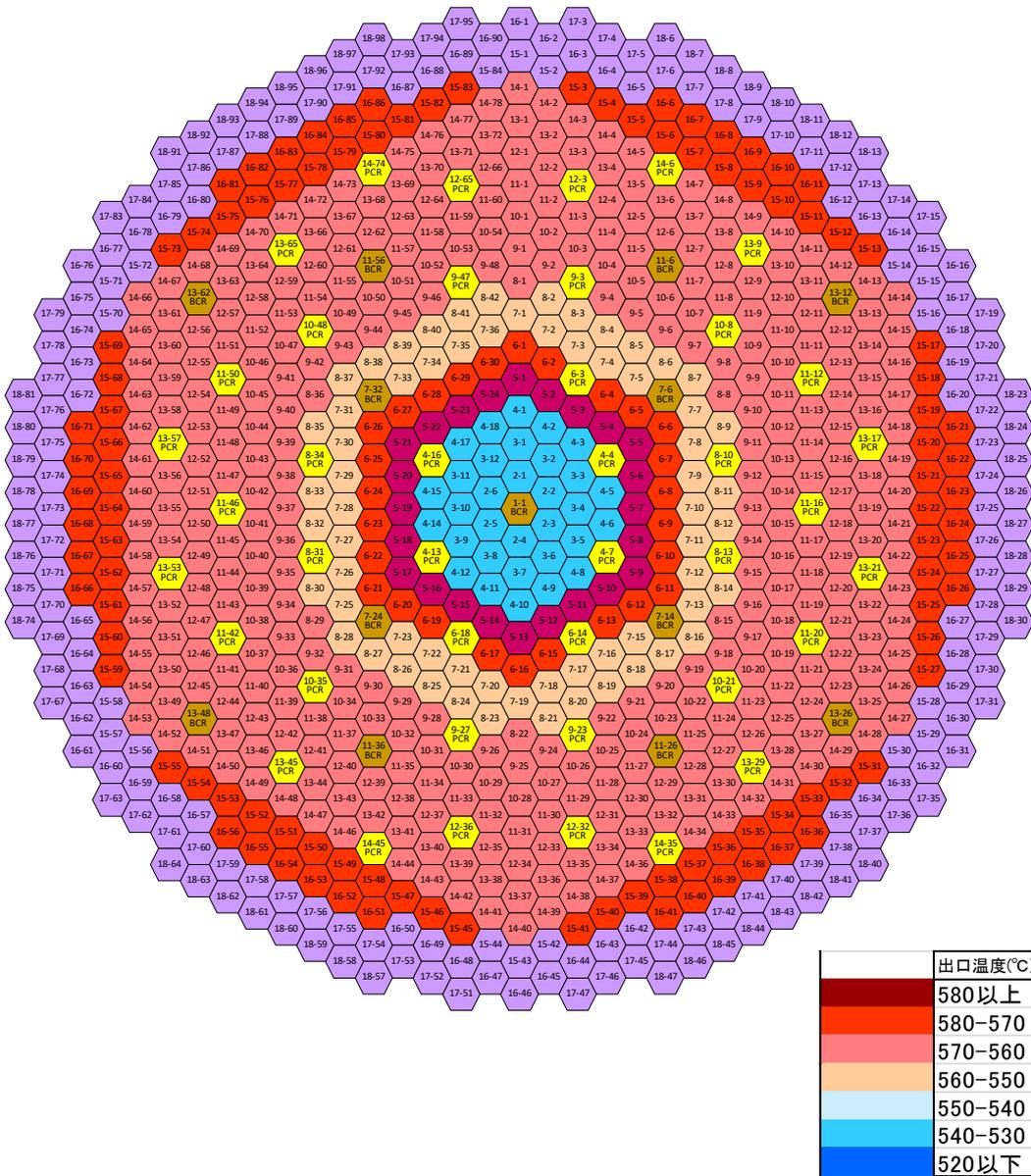


図 3.1-20 集合体出口温度分布 (ケース 3)

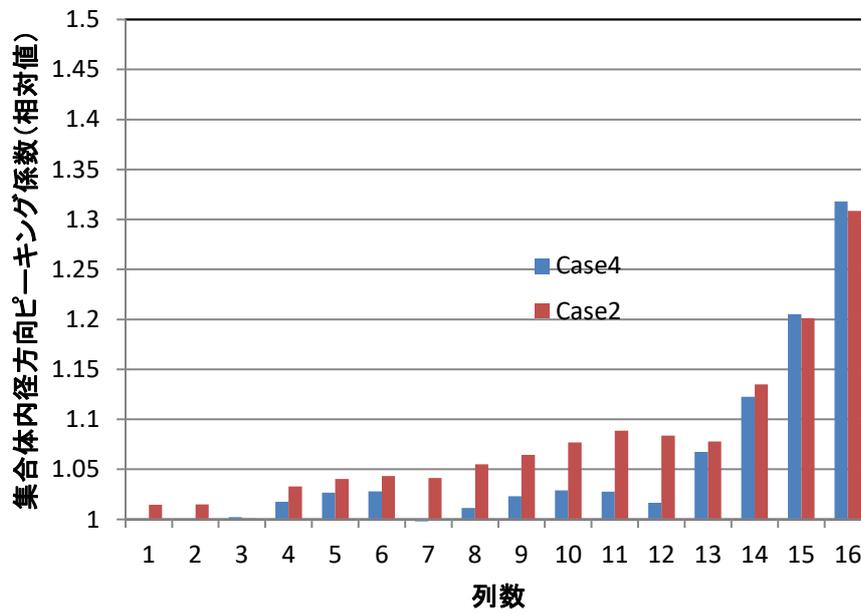
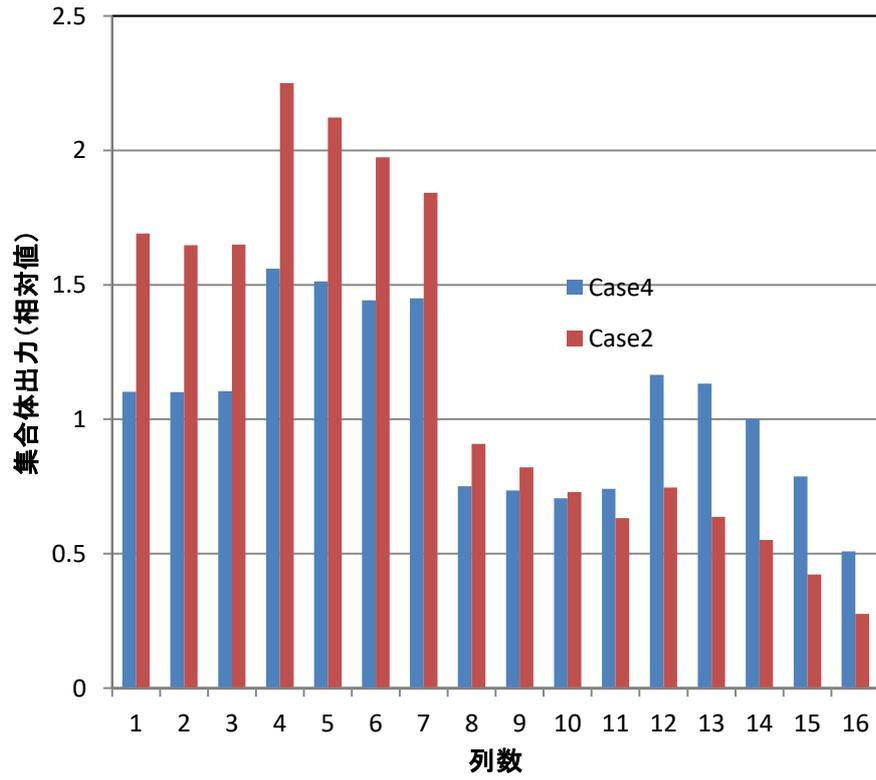


図 3.1-21 集集体出力分布及び集集体内径方向ピーキング係数
(ケース 4 とケース 2 との比較)

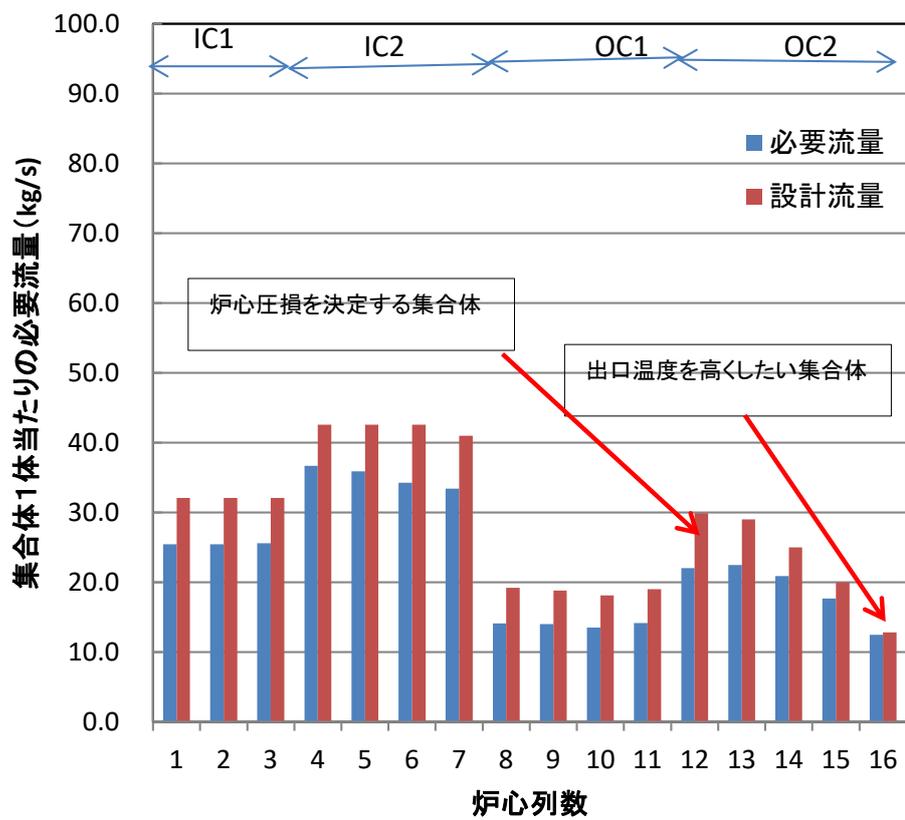
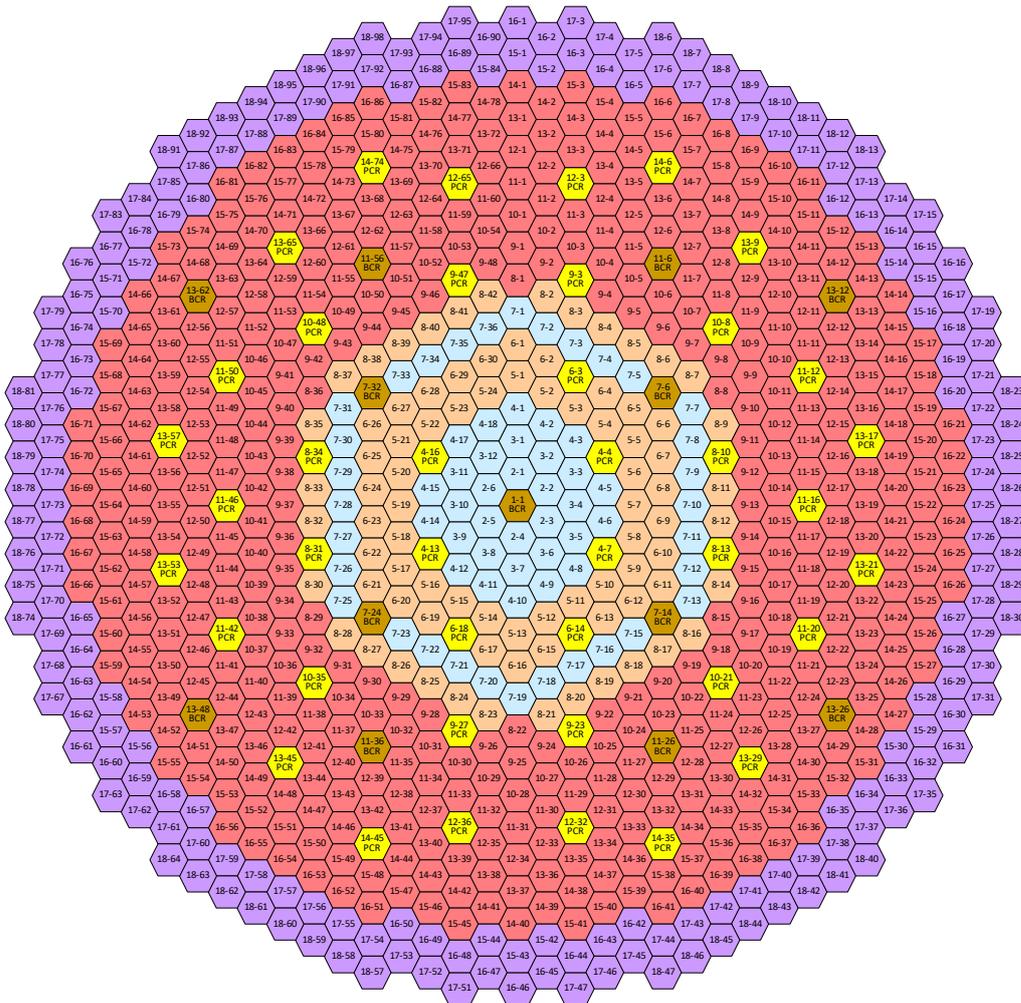
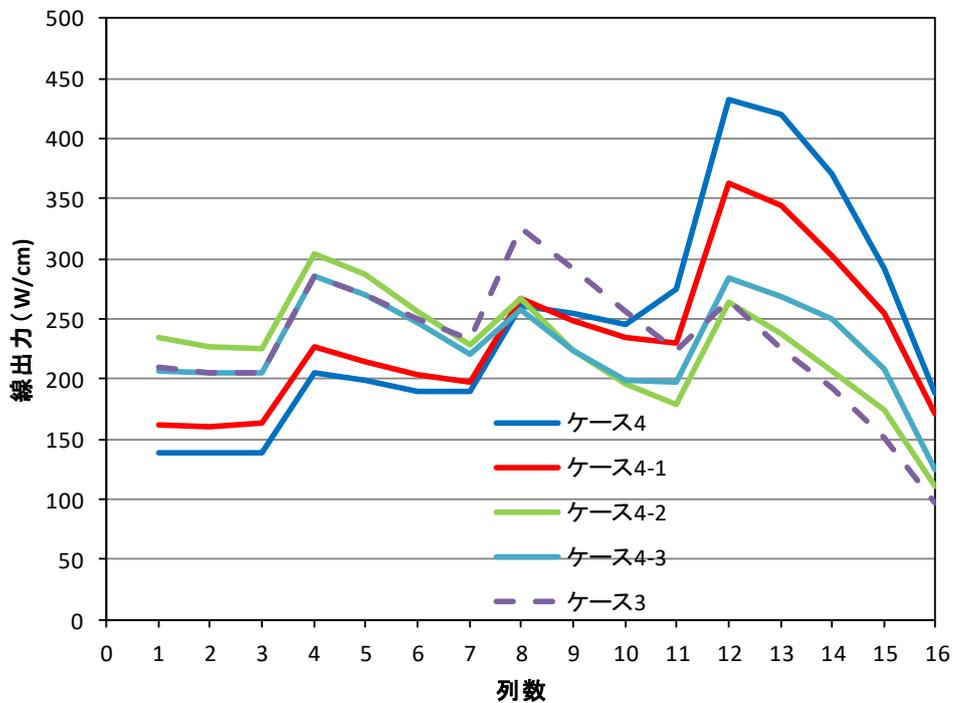


図 3.1-22 設計流量と必要流量の比較 (ケース 4)



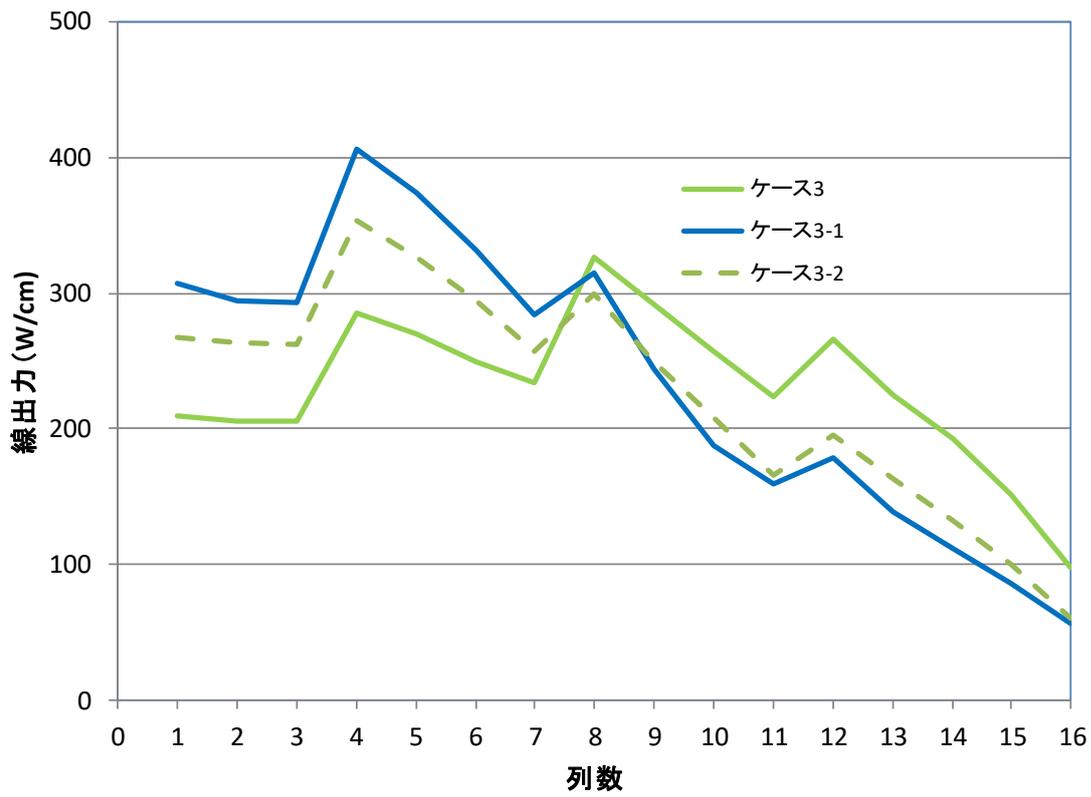
出口温度(°C)	
	580以上
	580-570
	570-560
	560-550
	550-540
	540-530
	520以下

図 3.1-23 集合体出口温度分布 (ケース 4)



ケース	軸芯吸収体	軸芯スミア密度 (%)	吸収体径 (mm)	OC2 ピン径 (mm)
4	無し	—	—	8
4-1	Gd203	100	1	8
4-2	Gd203	100	2	8
4-3	Gd203	60	2	8
3(参考)	無し	—	—	7.24

図 3.1-24 上下凸型軸芯炉心の線出力分布の比較 (基準：ケース 4)



ケース	軸芯吸収体	軸芯スミア密度 (%)	吸収体径 (mm)
3	無し	—	—
3-1	Gd203	100	2
3-2	Gd203	60	2

図 3. 1-25 上下凸型軸芯炉心の線出力分布の比較 (基準 : ケース 3)

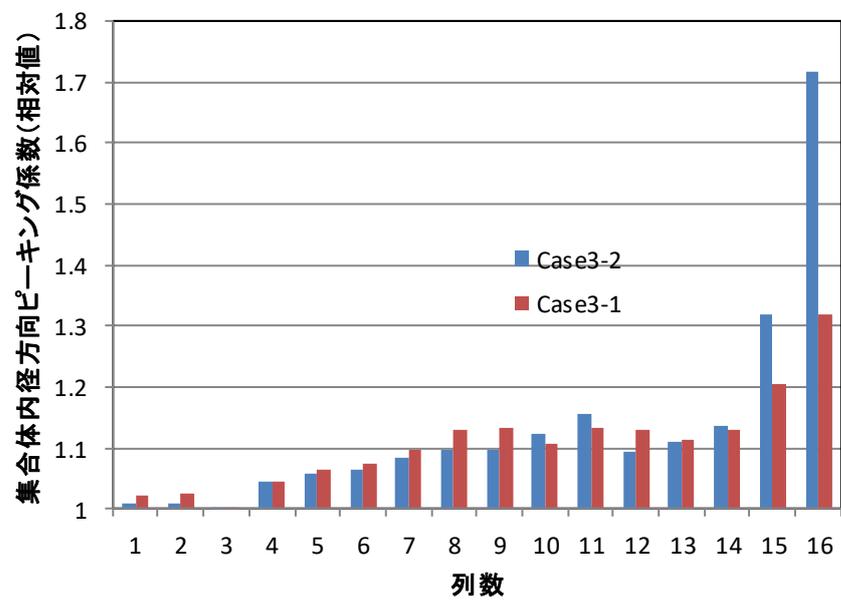
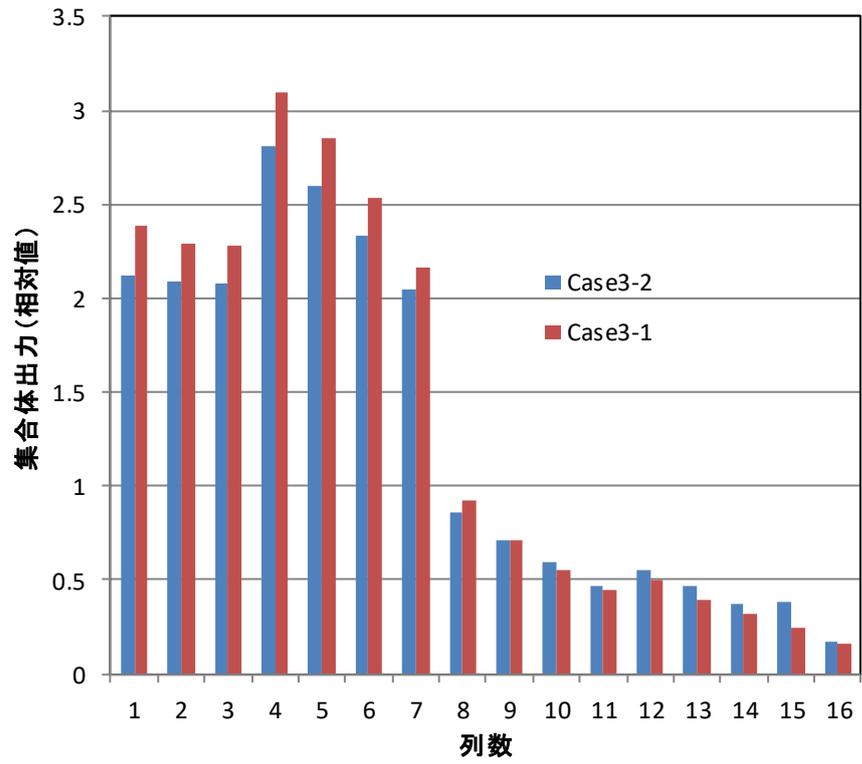


図 3.1-26 集合体出力分布及び集合体内径方向ピーキング係数
(ケース 3-1 とケース 3-2 との比較)

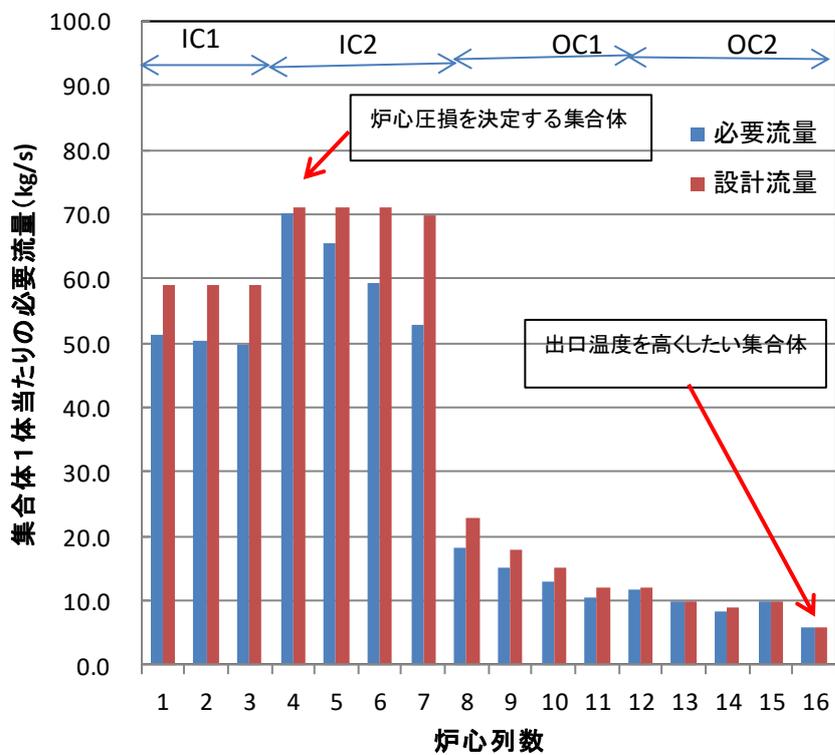


図 3.1-27 流量配分結果 (ケース 3-2)

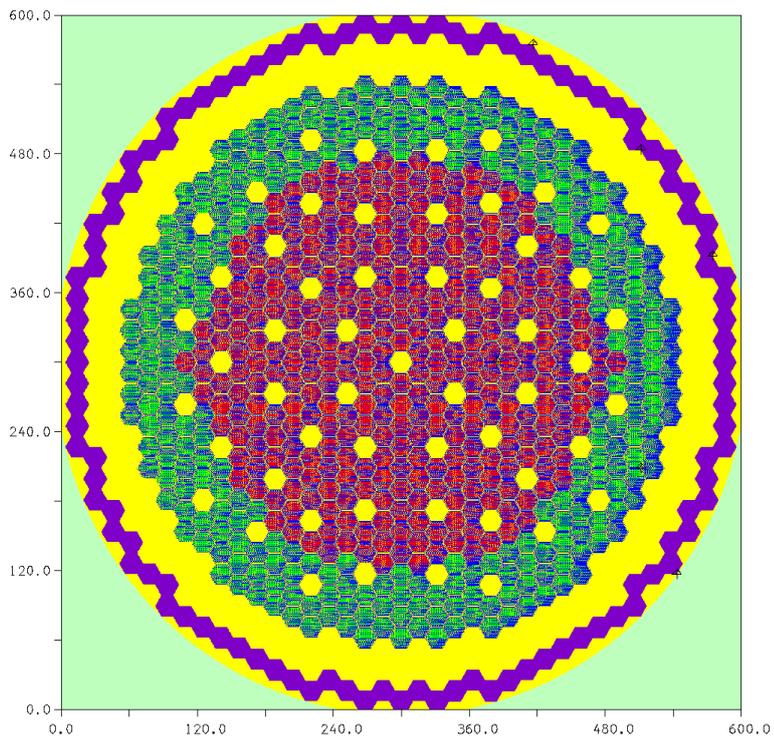
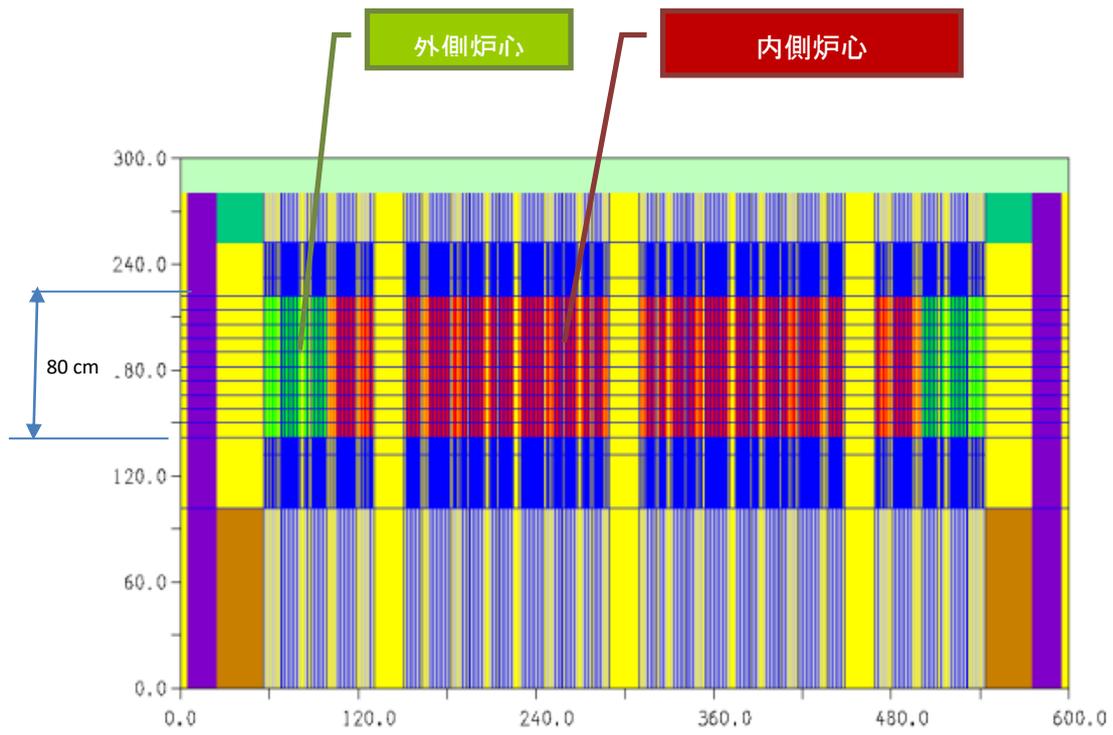


図 3.1-28 円柱型炉心（炉心高さ 80 cm）の出力分布計算モデル

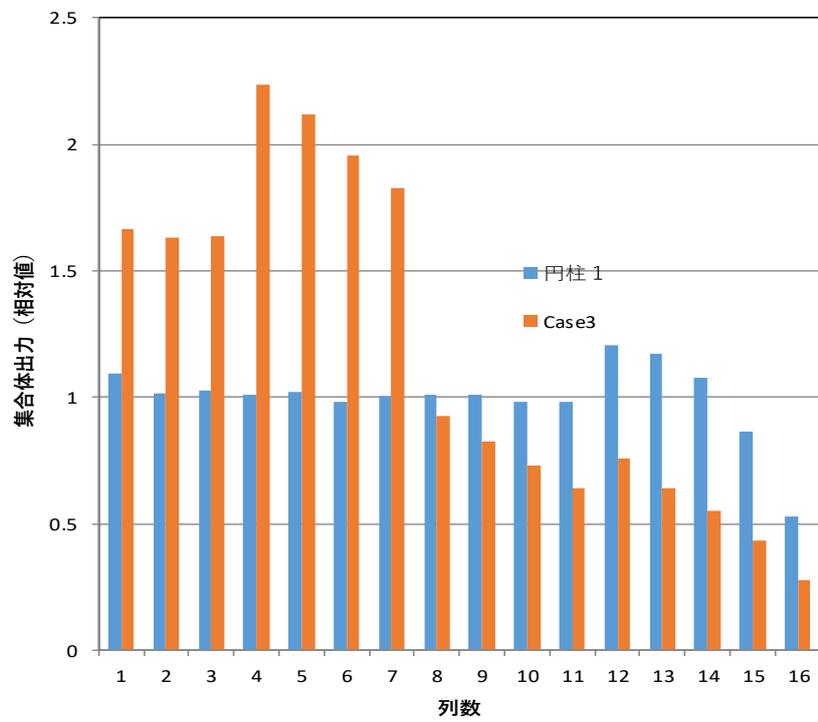


図 3.1-29 円柱型炉心と上下凸型炉心（ケース 3）の出力分布の比較

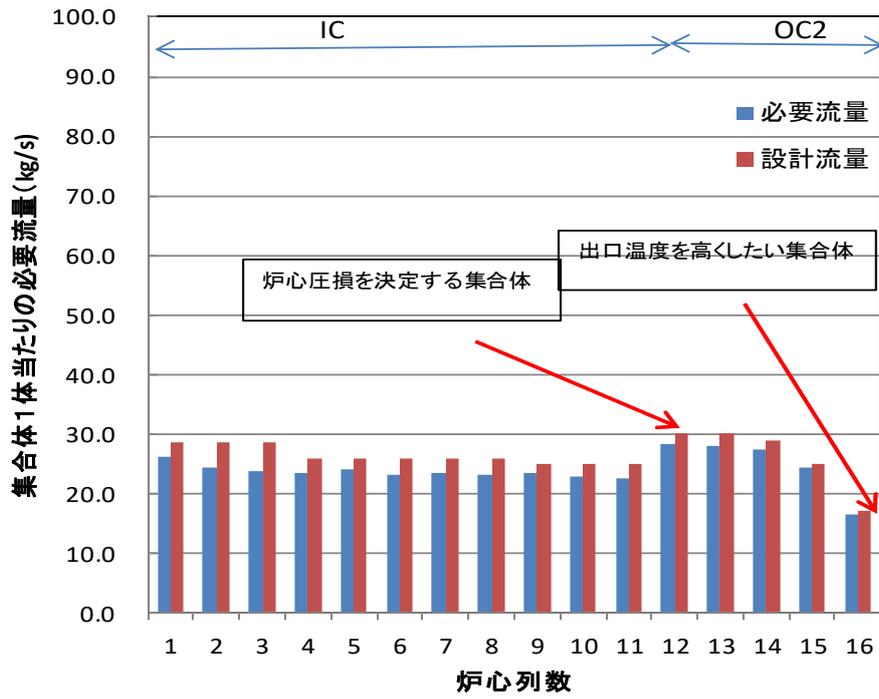


図 3.1-30 円柱型炉心（軸芯無し）の流量配分

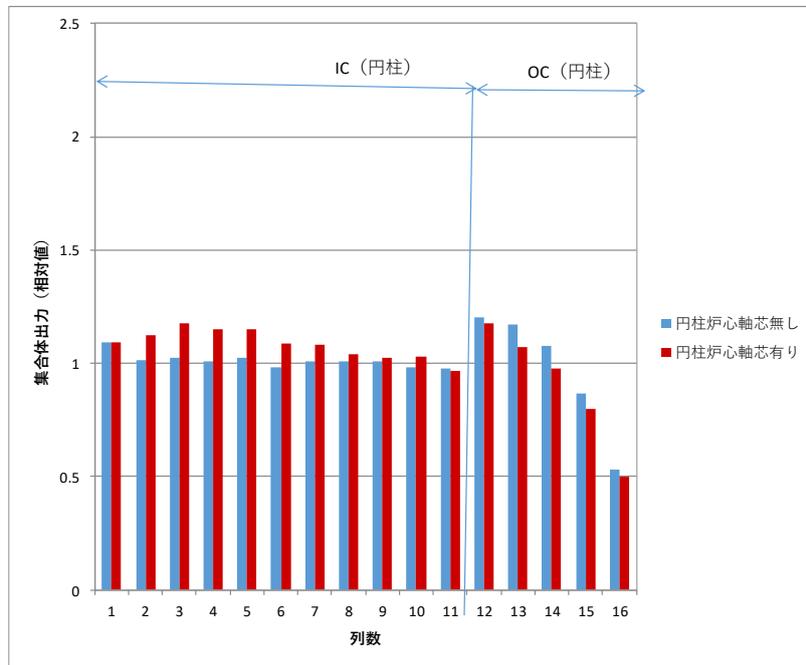


図 3.1-31 円柱型炉心（軸芯無し）と円柱型炉心（軸芯有り）の集合体出力分布の比較

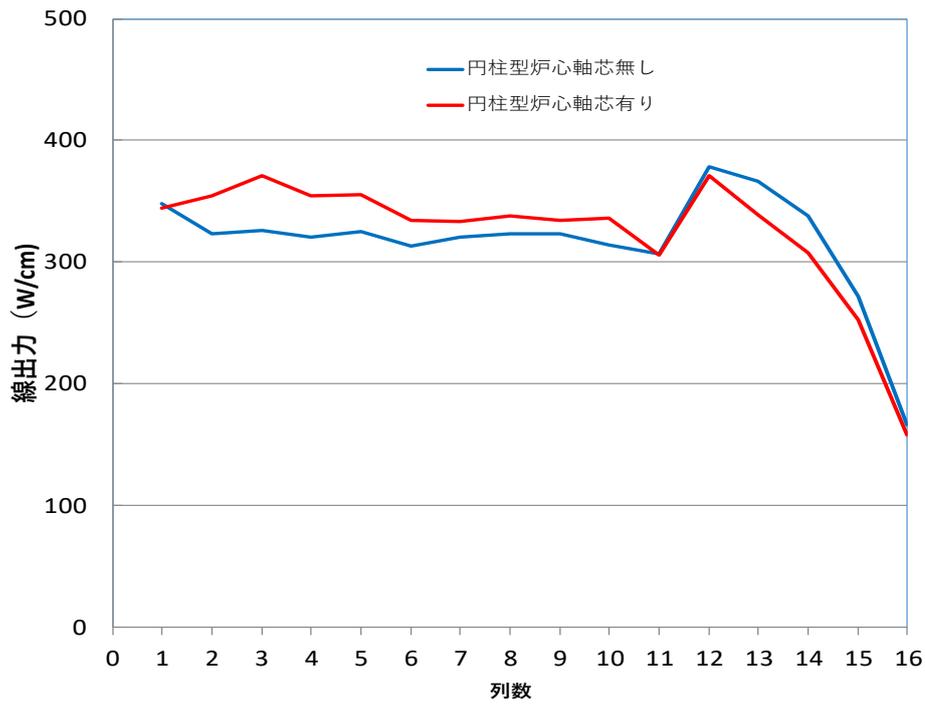


図 3.1-32 円柱型炉心（軸芯無し）と円柱型炉心（軸芯有り）の線出力分布の比較

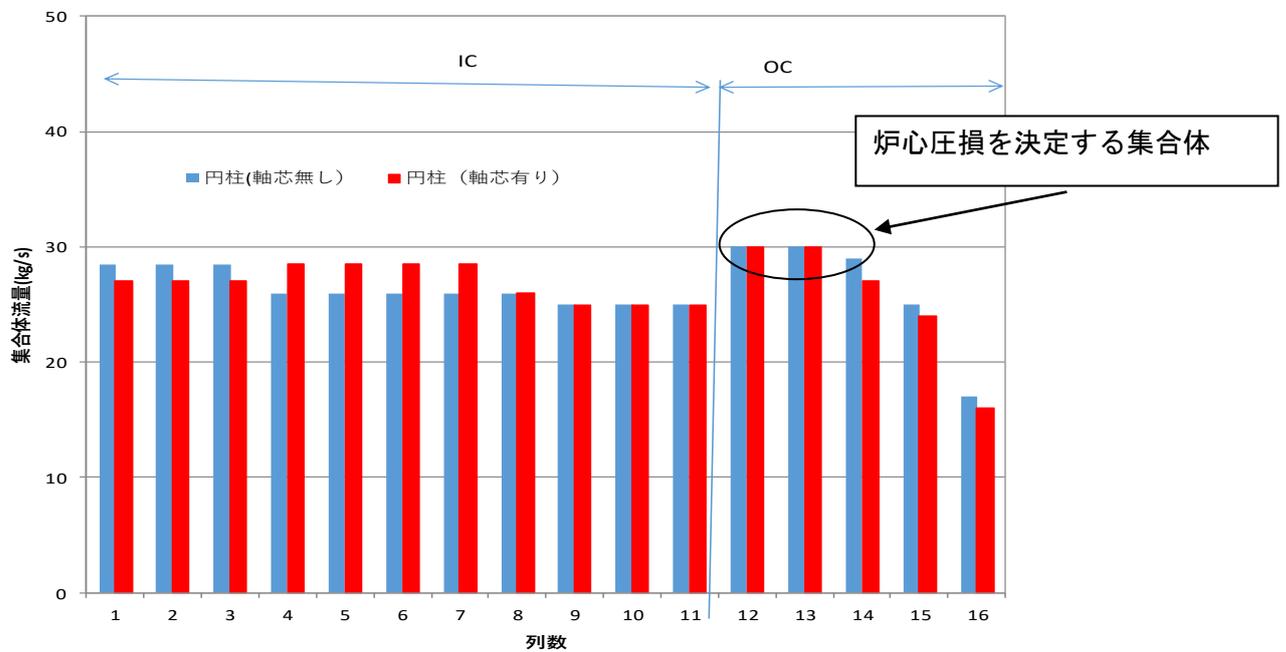


図 3.1-33 円柱型炉心（軸芯無し）と円柱型炉心（軸芯有り）の設計流量の比較

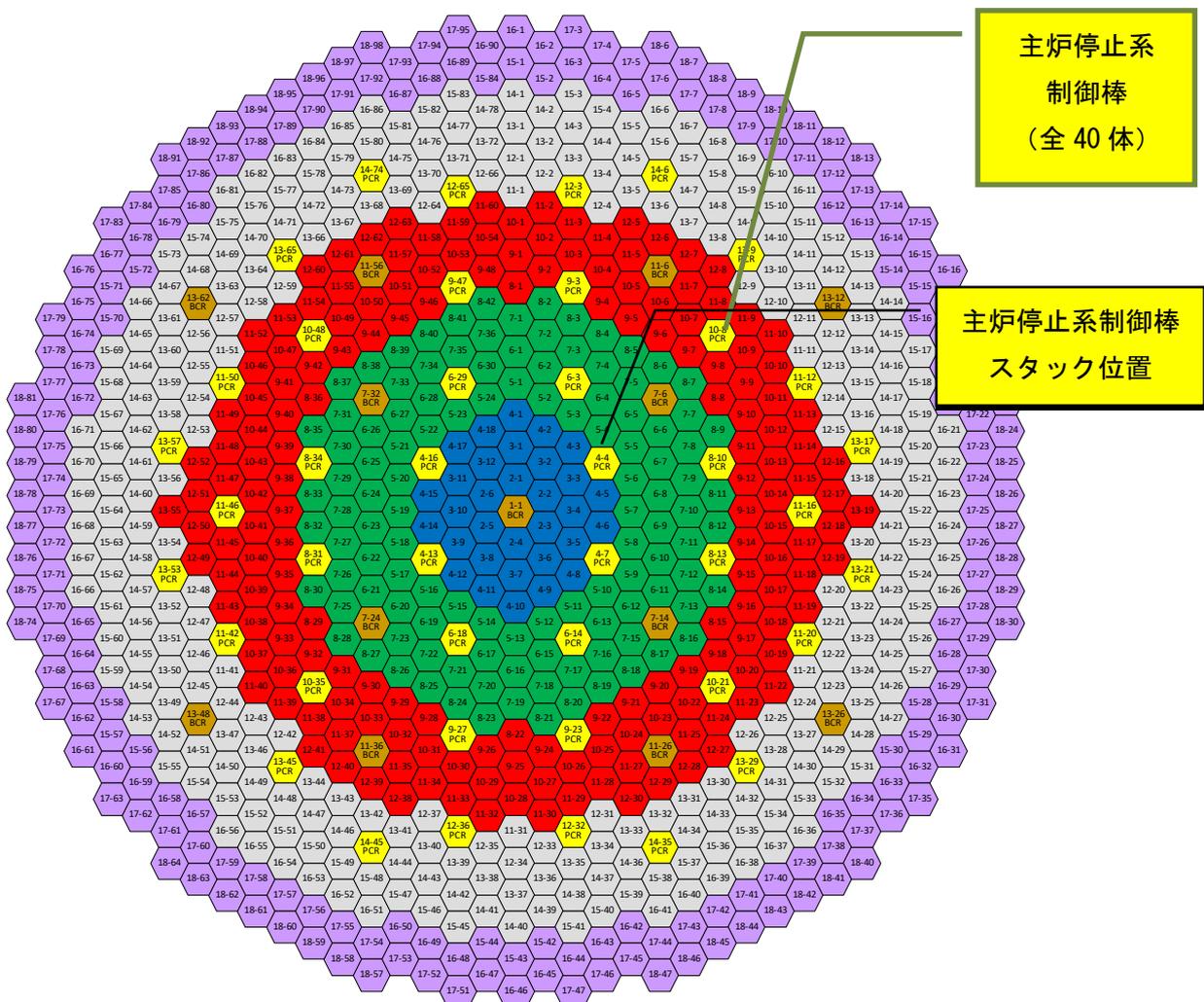


図 3.1-34 主炉停止系ワンロッドスタック位置

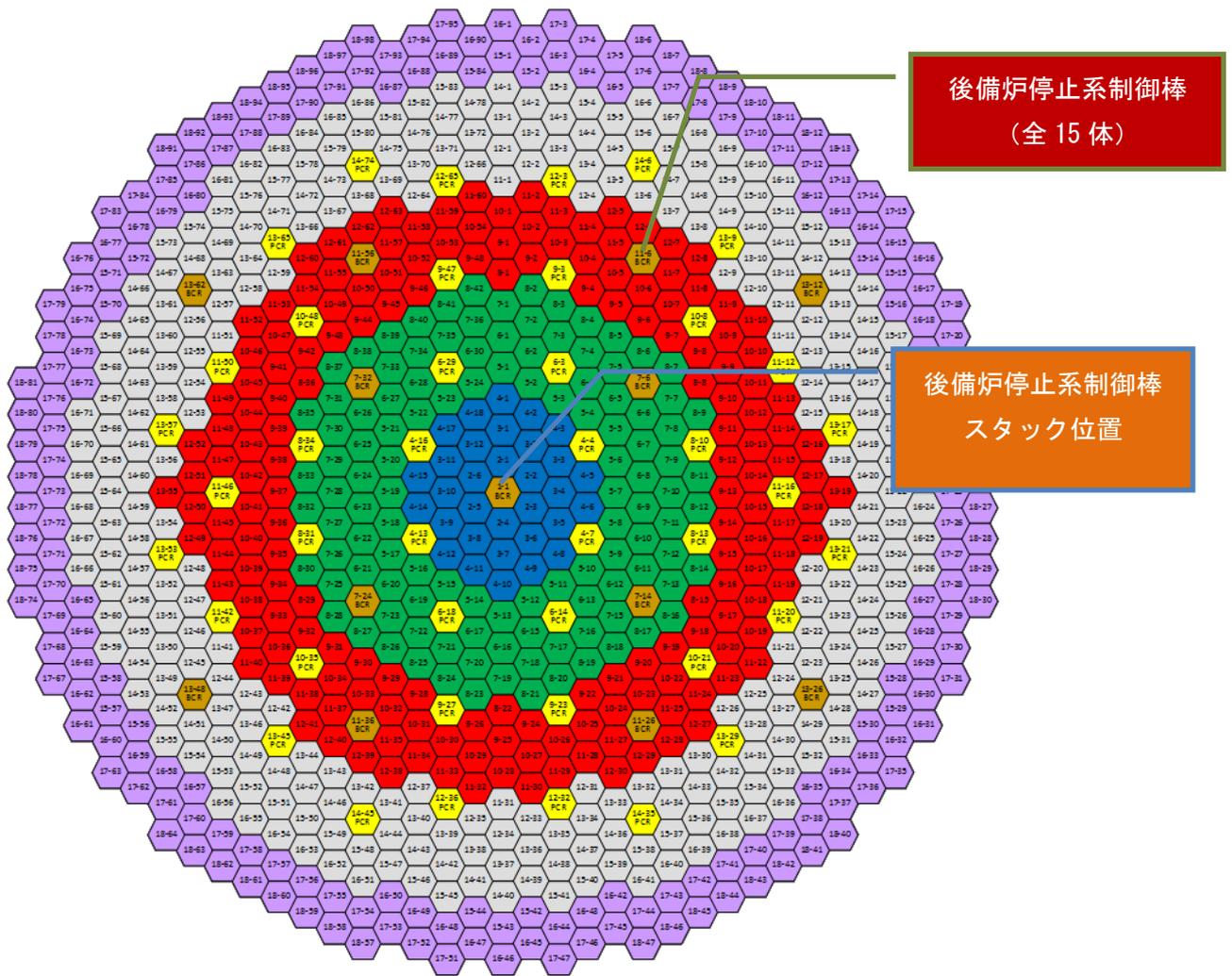


図 3.1-35 後備炉停止系ワンロッドスタック位置

3.2 凸型炉心に関わる炉心・安全特性検討（再委託先：東北大学）

3.2.1 軸芯燃料利用の効果の検討

(1) 概要

大型 MOX 高速炉炉心を対象に円柱型炉心と凸型炉心に軸芯燃料を設置する方法を検討し、コンパクション反応度は負になることが明らかになった。さらに、凸型炉心の外側炉心に軸芯燃料を装荷することで燃料溶融時の反応度は軸芯無し炉心に比較して低減もしくは負の反応度となることが明らかになった。さらに燃料溶融時の負の反応度の吸収物質による効果を凸型炉心の外側炉心に軸芯燃料を設置した場合で検討し、炭化ボロン、イリジウム、ハフニウム、酸化ガドリニウムの順に負の効果が大きくなることが示された。

外側炉心に軸芯燃料を設置した場合の健全時の燃料内中性子分布と実効増倍率を、軸芯燃料と均質混合で比較した。その結果自己遮蔽の効果により健全時の実効増倍率に対する影響は均質混合に比較して小さくなることを確認した。

平成 30 年度は、軸芯吸収体の健全時及び炉心溶融時の挙動より酸化物顆粒 (Gd_2O_3) を充填する方式を選定すると「軸芯燃料の開発」の結果を受けて、 Gd_2O_3 の顆粒を MOX 燃料ペレットの中心孔に充填した軸心燃料を外側炉心に設置した上下凸型炉心と円柱型炉心の炉心特性、安全特性を評価した。軸芯燃料装荷によるコンパクション反応度は、上下凸型炉心では、コンパクション反応度をより大きな負にし、円柱型炉心では、軸芯燃料の効果によりコンパクション反応度は正から負とすることが明らかになり、軸芯の導入で、燃料溶融時の安全性が高くなることが明らかになった。

定常運転では、上下凸型炉心は吸収体の効果により燃焼反応度が若干増加するため、軸芯無しの場合と同様にサイクル長の短縮等の対策が必要である。また外側炉心の出力低下による内側集合体の流量増大により炉心圧損が増加するが、その影響は小さく、いずれも設計対応可能であることが分かった。

また、ドップラー係数とナトリウムボイド反応度は、軸芯有りとなしでは、円柱型炉心、上下凸型炉心とも大きな差はなく安全性は両者に大きな差がないことが明らかになった。

(2) 凸型炉心の安全性評価及び軸芯燃料利用の効果の検討（平成 27 年度～平成 29 年度）

① 軸芯配置と軸芯燃料材料の検討（平成 27 年度、平成 28 年度）

大型炉高速炉円柱型炉心と凸型炉心を対象に軸芯燃料を装荷した場合の検討を行った。炉心仕様を表 3.2-1 に示す。円柱型炉心は炉心長 75 cm であり、凸型炉心の炉心長は内側炉心で 150 cm、外側炉心は 50 cm である。

ペレットに直径 1mm、100%密度で酸化ガドリニウムを入れた軸芯燃料を全炉心に設置した。健全炉心と炉心溶融時の計算体系を凸型炉心の場合を図 3.2-1 に、円柱型炉心の場合を図 3.2-2 に示す。計算には、連続エネルギーモンテカルロコード MVP-II、核データライブラリーは JENDL-4.0 を用いた。

解析結果を表 3.2-2 に示す。円柱型炉心と凸型炉心ともに、コンパクション反応度は負になることが示された。

また、軸芯吸収体の材料を変えて、軸芯効果の検討を行った。計算に用いた凸型炉心仕様（制御棒 55 体）を表 3. 2-3 に、図 3. 2-1 に燃料溶融前後の解析体系モデルを示す。解析ケースは下記の通りとした。

ケース	軸芯吸収体	配置
2-1	軸芯吸収体 無し	
2-2	全炉心燃料軸芯吸収体	酸化ガドリニウム (Gd_2O_3 、2 mm ϕ)
2-3	外側炉心燃料軸芯吸収体	酸化ガドリニウム (Gd_2O_3 、2 mm ϕ)
2-4	外側炉心燃料軸芯吸収体	酸化ガドリニウム (Gd_2O_3 、1 mm ϕ)
2-5	外側炉心燃料軸芯吸収体	ハフニウム (Hf、2 mm ϕ)
2-6	外側炉心燃料軸芯吸収体	^{10}B 90%濃縮 B_4C (90% B_4C 、2 mm ϕ)
2-7	外側炉心燃料軸芯吸収体	イリジウム (Ir、2 mm ϕ)

ここで、イリジウムは希少金属ではあるが、中性子捕獲断面積の大きい核種の例として評価した。

表 3. 2-4 に上記ケースの燃料溶融時挿入反応度を示す。

内側炉心高さが 1m、外側炉心高さが 0.5mの基準条件での、燃料溶融プール生成前後の挿入反応度は、軸芯吸収体無しの場合、約-1.6 \$である。

一方、軸芯燃料を全炉心に配置した場合、今回の炉心条件では約 0.8 \$となった。これは、内側炉心の反応度が高い領域から溶融プールにより外側の反応度が小さい領域に負の反応度を有する Gd_2O_3 吸収体が広がるため、相対的に負の反応度が小さくなったためと考えられる。

逆に、軸芯吸収体を外側炉心だけに配置し、内側炉心は通常の中実燃料とすることで、大きな負の反応度が期待される。ケース 2-3~2-6 に示すように、軸芯吸収体が 2 mm ϕ の場合、 Gd_2O_3 吸収体で約-13 \$、Hf 吸収体で約-14 \$、 ^{10}B 90%濃縮 B_4C 吸収体で約-60 \$、Ir 吸収体で約-30 \$といずれも非常に大きい負の反応度が得られ、一方、健全時実効増倍率の軸芯吸収体による影響は比較的小さいことが分かった。

軸芯吸収体を外側炉心に配置し、内側炉心には通常のもう一つの燃料を配置した場合、燃料溶融時の反応度が大幅に負になることが分かった。負の大きさとしては、90%濃縮 ^{10}B を用いた炭化ボロン、イリジウム、ハフニウム、酸化ガドリニウムの順に大きいことが明らかになった。

②凸型炉心の軸芯ペレット内中性子、反応率分布 (平成 29 年度)

酸化ガドリニウム吸収材の軸芯燃料における吸収体効果を検討するため、ペレット内の中性子束分布、実効増倍率の関係について検討した。

外側炉心だけに軸芯燃料を装荷した凸型炉心では、燃料溶融プール生成時のコンパクト反応度が全炉心に軸芯燃料を配置するより大きく負になることが示された。これは図 3. 2-3 に示す様に外側炉心にのみ軸芯燃料を配置すると燃料溶融時に、負の反応度効果を有する吸収体が、中性子レベルの低い位置から高い内側炉心に広がり、内側炉心

燃料の外側炉心領域への流出と重畳することで大きな負の反応度効果が生じるためである。

凸型炉心には表 3.2-1 の凸型炉心を用いた。また解析モデルは図 3.2-1 を用いた。また軸心燃料ペレット中性子束領域分割について図 3.2-4 に示す。計算には、連続エネルギーモンテカルロコード MVP-II、核データライブラリーは JENDL-4.0 を用いた。

解析ケースは下記の通りとした。

ケース	軸芯吸収体	配置
1	軸芯吸収体無し炉心	
2	外側炉心燃料軸芯吸収体	酸化ガドリニウム (SD80%、2 mm φ)
配置 MOX ペレット炉心		
3	外側炉心燃料吸収体均質混合 (ケース 1 原子数保存)	MOX ペレット炉心
4	ケース 2 でのコンパクション炉心	(反応度評価用)

実効増倍率の解析結果を表 3.2-5 に示す。また 軸芯モデルペレット内全中性子束分布を表 3.2-6 と図 3.2-5、図 3.2-6 に示す。また軸芯ペレット内反応率分布を表 3.2-7 と図 3.2-7 に示す。

表 3.2-5 に示す様に、軸芯無しと軸芯有り (ケース 2)、軸心無しと均一混合 (ケース 3) との実効増倍率の差は、 $-0.14 \% \Delta \rho$ と $-0.45 \% \Delta \rho$ である。この場合、外側炉心均一混合に比較して軸芯燃料では、自己遮蔽による吸収効果低下と吸収体の装荷による外側炉心の中性子束分布の低下効果が重畳した状態である。その差は、 $0.31 \% \Delta \rho$ (約 0.8 \$) である。一方燃料熔融時の反応度は $-5.73 \% \Delta \rho$ である。従って、自己遮蔽効果とそれに伴う中性子束の分布の変動により、均質混合に比較して、健全時の反応度の低下が抑えられていることが示されている。また燃料反応度は、自己遮蔽による吸収の低下及び、外側炉心領域の吸収効果が低くなることにより中性子束が外側炉心で上昇したことで、均質混合の場合より燃料反応度が上昇したと考えられる。

(3) 軸芯燃料利用の効果の検討 (平成 30 年度)

健全時及び炉心熔融時での吸収体の挙動に基づき酸化物顆粒 (Gd_2O_3) を充填する方式が「軸芯燃料の開発」にて選定された。この結果を反映して、軸芯炉心として上下凸型炉心及び円柱型炉心の外側炉心に Gd_2O_3 の顆粒を MOX 燃料ペレットの中心孔に充填した軸芯燃料を設置した炉心とした。

この炉心において、炉心特性と安全特性を評価した。

評価した上下凸型炉心 (軸芯無し) 及び上下凸型炉心 (軸芯有り) の仕様を表 3.2-8、表 3.2-9、また解析体系を図 3.2-8 に示す。また円柱型炉心 (軸芯無し) と円柱型炉心 (軸芯有り) の仕様を表 3.2-10、表 3.2-11、図 3.2-9 に示す。計算には、連続エネルギーモンテカルロコード MVP-II、核データライブラリーは JENDL-4.0 を用いた。

表 3.2-12 に円柱型炉心 (軸芯有り、軸芯無し)、上下凸型炉心 (軸芯有り、軸芯無

し) についての炉心特性の比較を示す。

①上下凸型炉心への軸芯燃料の導入効果

上下凸型炉心に軸芯径 2 mm で Gd_2O_3 を装荷した軸芯燃料を外側炉心に設置するとコンパクト化反応度はさらに低下する。

内側炉心の出力が図 3.2-10 と図 3.2-11 に示す様に上昇することから、設計流量は図 3.2-12 に示す様に内側炉心の流量が増加し、圧損が原型炉より若干高い 0.36 MPa となるが、これは原型炉クラスの炉心圧損より低いもので設計対応の範囲である。また、上下凸型への軸芯燃料の導入によりドップラー反応度は $-9.5 E-3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$ から $-8.9 E-3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$ に低下し、ナトリウムボイド反応度も $0.81 \% \Delta \rho$ から $0.61 \% \Delta \rho$ に低下するが、それらの数値の差は小さい。

なお、ナトリウムボイド反応度に対する軸芯による影響は、内側炉心の出力上昇によるナトリウムボイド反応度の上昇効果、逆に内側炉心と接する外側炉心プレナム部への中性子リークによるナトリウムボイド反応度の減少効果のバランスで決まるが、中性子リークの効果が上回りナトリウムボイド反応度が減少したものと考えられる。

ドップラー反応度は、ドップラーが大きい内側炉心領域の出力上昇によりドップラーの絶対値が大きくなる効果と、軸芯吸収体 (Gd_2O_3) の低エネルギーの中性子吸収によるスペクトルの硬化でドップラー反応度が低下する効果のバランスできまるが、後者が大きくドップラーの絶対値が低下したものと考えられる。その変化量は $-9.5E-3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$ から $-8.9E-3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$ と小さい。

燃焼反応度については、軸芯燃料を外側に装荷したことで軸芯無しに比べ $1.2 \% \Delta \rho$ 増加し、 $8.3 \% \Delta \rho / \text{年}$ となった。これは出力分担の大きい内側炉心の出力が上昇して燃焼量が増大したためと考えられる。

増殖比(BOC)は上下凸型炉心では内側炉心の上下軸ブランケットは外側炉心の様にプレナムを挟まず、直接接しており中性子を効率よく受けており増殖比への寄与は内側炉心の方が外側炉心より高くなっていると考えられる。軸芯燃料の装荷で内側炉心の出力が増加したため、増殖比が大きくなったと考えられるがその大きさは、1.09 から 1.10 となる程度である。

事故時の反応度挿入量について、表 3.2-13 に各炉心の膨張反応度を示す。事故時の温度上昇を考慮して膨張による反応度とドップラー効果を加算した非ボイド時事故時反応度概算値と、ボイド反応度を加算したボイド時事故時反応度概算値を表 3.2-14 に示す。ナトリウムボイド反応度との加算では、凸型炉心は負となっており事故時反応度の点で上下凸型炉心は安全性が高いと考えられる。

②円柱型炉心への軸芯燃料の導入効果

円柱型炉心の外側炉心に軸芯径 1 mm で Gd_2O_3 を軸芯燃料として導入すると、コンパクト化反応度は正から負にできる。また、その場合、図 3.2-13、図 3.2-14 に示す様に出力分布の外側炉心の低下は小さく上下凸型炉心では圧損が 0.36 Mpa に増加したが円柱型炉心では流量配分は図 3.2-15 に示す様に大きくは変わらず圧損はほぼ軸芯無しの

場合と同等で 0.18 MPa である。

円柱型炉心での軸芯吸収体の導入によりドップラー反応度の絶対値は $-8.9 \text{ E-}3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$ から $-8.1 \text{ E-}3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$ と低下し、ナトリウムボイド反応度は上昇する。

ナトリウムボイド反応度に対する軸芯による影響については、 $1.6 \% \Delta \rho$ から $1.7 \% \Delta \rho$ に上昇している。これは内側炉心の出力上昇で、ナトリウムボイド反応度が大きくなる効果があり、一方で上下凸型炉心のように外側炉心のプレナムへの中性子リークはないため、結果としてナトリウムボイド反応度は上昇したと考えられる。またドップラー反応度の絶対値は、軸芯燃料の中性子吸収によるスペクトルの硬化による低下効果が大きく、ドップラー反応度の絶対値は低下したものと考えられる。しかしながらそれらの数値の差異は小さい。

燃焼反応度は、軸芯無し炉心と軸芯有りでは $2.2 \% \Delta \rho$ と $2.3 \% \Delta \rho$ と殆ど差がない。軸芯燃料装荷によりインベントリの若干の低下があり、燃焼反応度は若干大きくなったものと考えられる。

増殖比についても軸芯燃料装荷により若干上昇しているが、これも内側炉心の方が増殖比の寄与が大きいと考えられ、軸芯燃料装荷による内側炉心の出力分担の増加により増加したと考えられる。しかしながら差は小さいものである。

事故時の反応度挿入量については、表 3.2-14 に示す様にボイド時の反応度は軸芯装荷の有無にかかわらず正になるが、これはナトリウムボイド反応度が凸型炉心より大きいためである。

以上より、軸芯燃料の装荷により、コンパクション反応度は円柱型炉心では負になり、上下凸型炉心ではさらに負となり安全性が向上すると考えられる。

(4)まとめ

上下凸型炉心と円柱型炉心の外側炉心に軸芯燃料を装荷した。その結果、コンパクション反応度は上下凸型炉心ではより負となり、円柱型炉心ではコンパクション反応度は正から負とすることができる。

また、ドップラー反応度とナトリウムボイド反応度は、軸芯有りと軸芯無しでは、円柱型炉心、上下凸型炉心とも大きな差はなく安全性は両者大きな差がないことが明らかになった。

燃焼反応度は、上下凸型炉心は軸芯燃料が若干大きくサイクル期間の縮小等の対策が必要であるが、円柱型炉心では大きな差は生じていなかった。

以上より軸芯燃料は、コンパクション反応度を低下させることから安全性の向上に寄与できることを示した。

表 3.2-1 円柱型炉心と凸型炉心の仕様

項目	単位	円柱型炉心	凸型炉心	備考
原子炉熱出力	MW t	3600	3600	
炉心高さ (内側/外側)	cm	75/75	100/50	炉心溶融時 円柱型 50.3/凸型 51.4
炉心等価直径	cm	495	495	
燃料集合体数(内側/外側)		316/278	316/278	
制御棒本数		68	68	
燃料要素数/集合体		271	271	
燃料要素外径	mm	8.8	8.8	
燃料要素内径	mm	7.76	7.76	
燃料体積比	%	44.1	44.1	
構造材体積比	%	23.0	23.0	
上部軸ブランケット厚さ	cm	30	30	
下部軸ブランケット厚さ	cm	40	40	
Pu 富化度	%	22.6*	22.6*	MOX

表 3.2-2 炉心溶融時挿入反応度評価例 (MVP 解析結果 *1)

ケース	炉心	軸芯 ガドリニウム 吸収体	内側炉 心高さ (m)	外側炉 心高さ (m)	炉心溶融 後の上部 軸ブラン ケットモ デル	燃料溶融時 挿入反応度 (% $\Delta \rho$)	燃料溶融時 挿入反応度 ($\$$) *2	備考 軸芯吸収 体装荷に よる反応 度減少 (% $\Delta \rho$)
1	従来炉心 (円柱型 炉心)	無し	0.75	0.75	有り	+2.7	+6.8	—
2	凸型炉心	無し	1.0	0.5	有り	-1.0	-2.5	—
3	凸型炉心 軸芯燃料	有り (直径 1 mm 酸化ガドリ ニウム)	1.0	0.5	有り	-1.4	-3.5	-3.1
4	凸型炉心 軸芯燃料	有り (直径 1 mm 窒化ガドリ ニウム)	1.0	0.5	有り	-1.5	-3.8	-4.6
5	円柱型炉心 軸芯燃料	有り (直径 1 mm 酸化ガドリ ニウム)	0.75	0.75	無し (燃料溶 融時)	+0.6	+1.5	-2.8

*1 : 計算条件 : 連続エネルギーモンテカルロ計算 MVP - II、核データ JENDL-4.0

溶融時、燃料は炉心部から漏えいすることなく、下部軸ブランケット上面に蓄積されると想定。

*2 : $1\$ = 0.4\% \Delta \rho$

表 3.2-3 大型凸型炉心仕様（制御棒 55 体）

項目	単位	仕様	備考
原子炉熱出力	MW t	3600	
炉心高さ（内側/外側）	cm	100/50	炉心熔融時 51.4
炉心等価直径	cm	490	
燃料集合体数(内側/外側)		316/278	
制御棒本数		55	
燃料要素数/集合体		271	
燃料要素外径	mm	8.8	
燃料要素内径	mm	7.76	
燃料体積比	%	44.1	
構造材体積比	%	23.0	
上部軸ブランケット厚さ	cm	30	
下部軸ブランケット厚さ	cm	40	
Pu 富化度	%	22.6	

表 3.2-4 大型凸型炉心（制御棒 55 体）の炉心溶融時挿入反応度（MVP 解析結果 * 1）

ケース	炉心	軸芯吸収体構成	内側炉心高さ (m)	外側炉心高さ (m)	炉心溶融後の上部軸ブランケットモデル	燃料溶融時挿入反応度 (% $\Delta \rho$)	燃料溶融時挿入反応度 (\$) * 2	備考健全時実効増倍率
2-1	凸型炉心	無し	1.0	0.5	有り	-0.55	-1.6	-
2-2	凸型炉心	全炉心軸芯 (Gd ₂ O ₃ 、2 mm ϕ)	1.0	0.5	有り	0.32	0.80	0.9118
2-3	凸型炉心	外側炉心軸芯 (Gd ₂ O ₃ 、2 mm ϕ)	1.0	0.5	有り	-5.2	-12.99	1.0105
2-4	凸型炉心	外側炉心軸芯 (Gd ₂ O ₃ 、1 mm ϕ)	1.0	0.5	有り	-1.2	-3.0	1.0135
2-5	凸型炉心	外側炉心軸芯 (Hf、2 mm ϕ)	1.0	0.5	有り	-5.8	-14.4	1.0132
2-6	凸型炉心	外側炉心軸芯 (90%濃縮 B ₄ C、2 mm ϕ)	1.0	0.5	有り	-23.8	-59.6	1.0070
2-7	凸型炉心	外側炉心軸芯 (Ir、2 mm ϕ)	1.0	0.5	有り	-11.8	-29.5	1.0084

*1： 計算条件：連続エネルギーモンテカルロ計算 MVP - II、核データ JENDL-4.0

溶融時、燃料は炉心部から漏えいすることなく、下部軸ブランケット上面に蓄積されると想定。

表 3.2-5 凸型炉心（制御棒 55 体）の軸芯モデルによる反応度差

ケース	炉心	軸芯吸収体構成	内側炉心高さ (m)	外側炉心高さ (m)	Keff	ケース 1 との反応度差 (% $\Delta \rho$)	ケース 1 との反応度差 (\$) *
1	凸型炉心	軸芯吸収体無し	1.0	0.5	1.01235	-	-
2	凸型炉心	外側炉心軸芯 (Gd ₂ O ₃ 、2 mm ϕ)	1.0	0.5	1.01090	-0.14	-0.35
3	凸型炉心	外側炉心吸収体ペレット内均質化	1.0	0.5	1.00776	-0.45	-1.12
4	凸型炉心 (溶融)	吸収体溶融炉心内均質化	0.514	0.514	0.95711	-5.73	-14.3

解析条件：連続エネルギーモンテカルロ計算 MVP、1000 万ヒストリ、核データ JENDL-4.0。

溶融時、燃料は炉心部から漏えいすることなく、下部軸ブランケット上面に蓄積されると想定。

* 1\$=0.4% $\Delta \rho$

表 3. 2-6 軸芯モデルペレット内全中性子束分布

中心からの 距離 (c m)	ケース 1	ケース 2	ケース 3
吸収体モデル	軸芯吸収体無し	外側炉心軸芯 (Gd ₂ O ₃ 、2 mm φ)	外側炉心 吸収体ペレット内 均質化
単位	(/cm ² /s/発生中性子)	(/cm ² /s/発生中性子)	(/cm ² /s/発生中性子)
0. 369	2. 9526E-06	2. 2676E-06	8. 6150E-07
0. 330	2. 9530E-06	2. 2675E-06	8. 6120E-07
0. 291	2. 9532E-06	2. 2674E-06	8. 6064E-07
0. 252	2. 9537E-06	2. 2671E-06	8. 5992E-07
0. 213	2. 9533E-06	2. 2671E-06	8. 5961E-07
0. 175	2. 9538E-06	2. 2666E-06	8. 5934E-07
0. 136	2. 9534E-06	2. 2658E-06	8. 5913E-07
0. 108	2. 9530E-06	2. 2638E-06	8. 5942E-07
0. 083	2. 9528E-06	2. 2616E-06	8. 5893E-07
0. 050	2. 9521E-06	2. 2602E-06	8. 5918E-07
0. 017	2. 9531E-06	2. 2590E-06	8. 5961E-07

表 3.2-7 軸芯モデルペレット内反応率分布

中心からの距離 (cm)	ケース 1 軸芯吸収体無し		ケース 2 外側炉心軸芯 (Gd ₂ O ₃ 、2 mm φ)		ケース 3 外側炉心 吸収体ペレット内均質化	
	核分裂反応 率*1	捕獲反応率 *2	核分裂反応 率*3	捕獲反応率 *4	核分裂反応 率*5	捕獲反応率 *6
単位	(/cm ³ /発生 中性子)	(/cm ³ /発生 中性子)	(/cm ³ /発生 中性子)	(/cm ³ /発生 中性子)	(/cm ³ /発生 中性子)	(/cm ³ /発生 中性子)
0.369	1.481E-08	1.911E-08	1.110E-08	1.446E-08	3.551E-09	1.724E-08
0.330	1.480E-08	1.882E-08	1.109E-08	1.426E-08	3.546E-09	1.705E-08
0.291	1.480E-08	1.870E-08	1.109E-08	1.418E-08	3.541E-09	1.695E-08
0.252	1.480E-08	1.862E-08	1.108E-08	1.412E-08	3.537E-09	1.688E-08
0.213	1.479E-08	1.856E-08	1.108E-08	1.409E-08	3.534E-09	1.683E-08
0.175	1.479E-08	1.852E-08	1.107E-08	1.406E-08	3.532E-09	1.679E-08
0.136	1.479E-08	1.850E-08	1.106E-08	1.405E-08	3.530E-09	1.676E-08
0.108	1.479E-08	1.847E-08	1.104E-08	1.407E-08	3.531E-09	1.675E-08
0.083	1.479E-08	1.847E-08	0.000E+00	5.598E-08	3.528E-09	1.674E-08
0.050	1.479E-08	1.847E-08	0.000E+00	5.512E-08	3.530E-09	1.673E-08
0.017	1.478E-08	1.845E-08	0.000E+00	5.478E-08	3.533E-09	1.672E-08

*1) ペレット体積積分値 : 0.0263

*2) ペレット体積積分値 : 0.0334

*3) ペレット体積積分値 : 0.0184

*4) ペレット体積積分値 : 0.0302

*5) ペレット体積積分値 : 0.0063

*6) ペレット体積積分値 : 0.0302

表 3.2-8 上下凸型炉心の解析体系（軸芯無し）

項目	値
原子炉熱出力 (MWt)	3600
炉心高さ 内側／外側 (cm)	158.5/52
燃料集合体数 内側 1／内側 2 外側 1／外側 2	32/114 170/278
配列ピッチ (mm)	183.2
燃料ピン径 (mm) 内側 1／内側 2 外側 1／外側 2	5.0/5.79 6.63/7.24
TRU 富化度 (wt%)	30
燃料ピン本数／集合体	331
ラップ管肉厚 (mm)	5

表 3.2-9 上下凸型炉心の解析体系(軸芯有り)

項目	値
原子炉熱出力(MWt)	3600
炉心高さ 内側/外側 (cm)	158.5/52
燃料集合体数 内側 1/内側 2 外側 1/外側 2	32/114 170/278
配列ピッチ (mm)	183.2
燃料ピン径 (mm) 内側 1/内側 2 外側 1/外側 2	5.0/5.79 6.63/7.24
TRU 富化度 (wt%)	30
燃料ピン本数/集合体	331
ラップ管肉厚 (mm)	5
軸芯材料	Gd ₂ O ₃
軸芯穴径 (mm)	2
軸芯装荷集合体	外側 1、外側 2
軸芯材料充填率 (%)	60

表 3.2-10 円柱型炉心の仕様（軸芯無し）

項 目	値
原子炉熱出力 (MWt)	3600
炉心高さ (cm)	80
燃料集合体数 内側／外側	316/278
配列ピッチ (mm)	183.2
燃料ピン径 (mm)	8.8
Pu 富化度 (wt%) 内側／外側	18.3/22.9
燃料ピン本数／集合体	271
ラップ管肉厚 (mm)	5

表 3.2-11 円柱型炉心の仕様（軸芯有り）

項目	値
原子炉熱出力 (MWt)	3600
炉心高さ (cm)	80
燃料集合体数 内側／外側	316/278
配列ピッチ (mm)	183.2
燃料ピン径 (mm)	8.8
Pu 富化度 (wt%) 内側／外側	18.3/22.9
燃料ピン本数／集合体	271
ラップ管肉厚 (mm)	5
軸芯材料	Gd ₂ O ₃
軸芯穴径 (mm)	1
軸芯装荷集合体	外側炉心
軸芯材料充填率 (%)	60

表 3.2-12 円柱型炉心（軸芯有り、軸芯無し）及び上下凸型炉心（軸芯有り、軸芯無し）の炉心特性の比較

項目	円柱型炉心		上下凸型炉心	
	軸芯無し	軸芯有り	軸芯無し	軸芯有り
コンパクション反応度 ($\% \Delta \rho$)	3.9	-1.7	-0.66	-2.1
ドップラー反応度 ($E-3 \Delta \rho / (\Delta T/T)$)	-8.9	-8.1	-9.5	-8.9
ナトリウムボイド反応度 ($\% \Delta \rho$)	1.6	1.7	0.81	0.61
増殖比	1.17	1.21	1.09	1.10
燃焼反応度 ($\% \Delta k/kk' / \text{year}$)	2.26	2.33	7.1	8.3

表 3.2-13 膨張反応度係数

ケース	炉心	内側炉心高さ (m)	外側炉心高さ (m)	膨張方向	膨張反応度係数 (% $\Delta \rho$ / %膨張)
1	円柱型炉心	0.8	0.8	径方向	-0.523
1'	円柱型炉心	0.8	0.8	軸方向	-0.046
2	円柱型炉心 (外側炉心軸芯 吸収体配置)	0.8	0.8	径方向	-0.55
2'	円柱型炉心 (外側炉心軸芯 吸収体配置)	0.8	0.8	軸方向	-0.050
3	上下凸型炉心	1.585	0.52	径方向	-0.477
3'	上下凸型炉心	1.585	0.52	軸方向	-0.142
4	上下凸型炉心 (外側炉心軸芯 吸収体配置)	1.585	0.52	径方向	-0.49
4'	上下凸型炉心 (外側炉心軸芯 吸収体配置)	1.585	0.52	軸方向	-0.15

表 3.2-14 事故時反応度

ケース	膨張想定温度	反応度 (% $\Delta \rho$)	非ボイド時 反応度 (% $\Delta \rho$)	ボイド時 ネット反応度 (% $\Delta \rho$)
円柱型炉心	径方向膨張*1 支持板400° C→830°C	-0.47	-1.3	0.3
	軸方向膨張*2 炉心燃料1100° C→2800°C	-0.16		
	ドップラー反応度 炉心燃料1100° C→2800°C	-0.72		
円柱型炉心 (外側炉心軸芯 吸収体配置)	径方向膨張*1 支持板400° C→830°C	-0.49	-1.3	0.4
	軸方向膨張*2 炉心燃料1100° C→2800°C	-0.18		
	ドップラー反応度 炉心燃料1100° C→2800°C	-0.65		
上下凸型炉心	径方向膨張*1 支持板400° C→830°C	-0.43	-1.6	-0.9
	軸方向膨張*2 炉心燃料1100° C→2800°C	-0.49		
	ドップラー反応度 炉心燃料1100° C→2800°C	-0.77		
上下凸型炉心 (外側炉心軸芯 吸収体配置)	径方向膨張*1 支持板400° C→830°C	-0.47	-1.7	-1.1
	軸方向膨張*2 炉心燃料1100° C→2800°C	-0.53		
	ドップラー反応度 炉心燃料1100° C→2800°C	-0.72		

*1) 支持板膨張係数：SUS304 想定 2.09E-5/°C (650°C)

*2) 燃料膨張係数：MOX(30%富化度、2000°C) 2.01E-5/°C

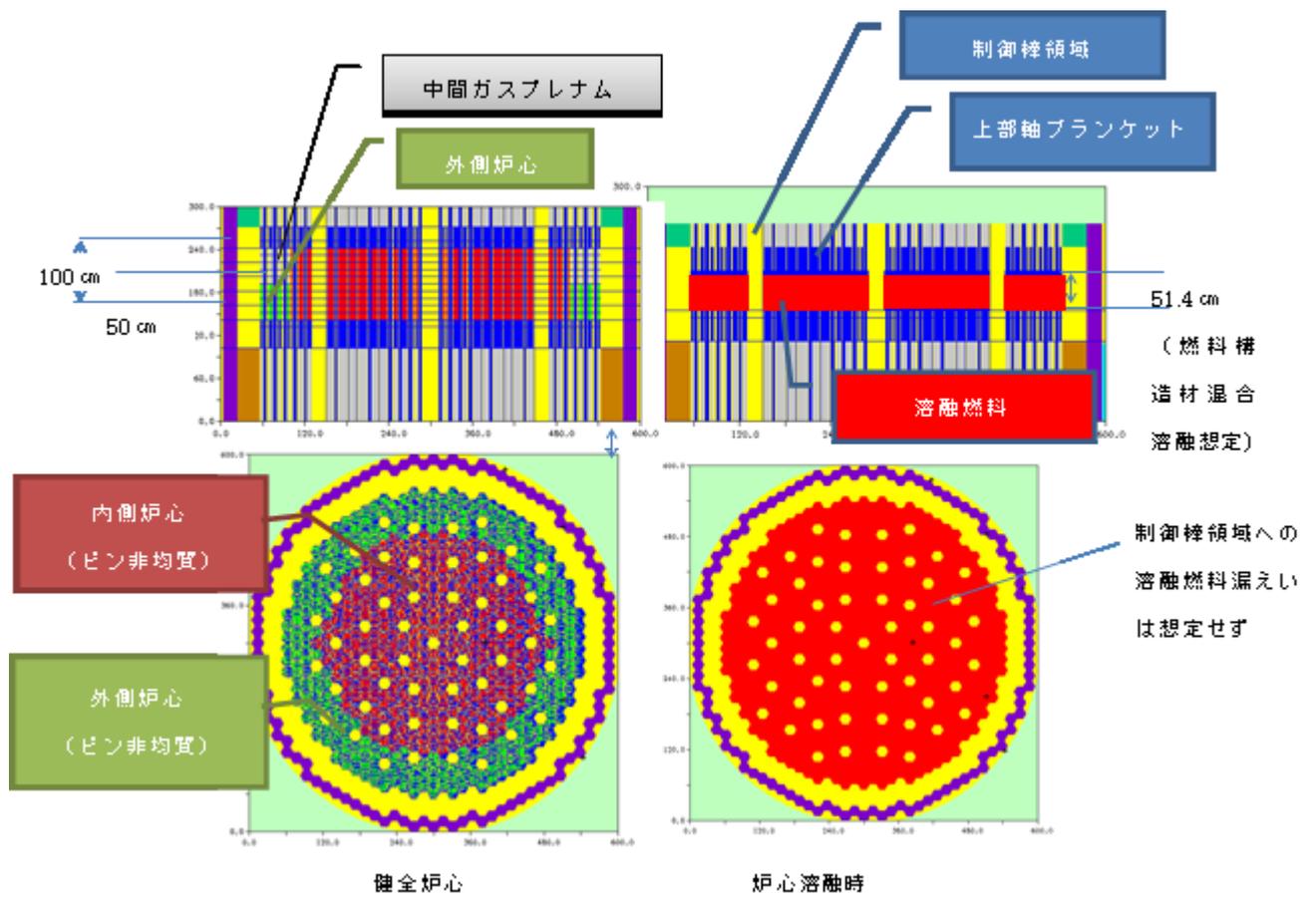


図 3.2-1 大型凸型炉心の解析モデル

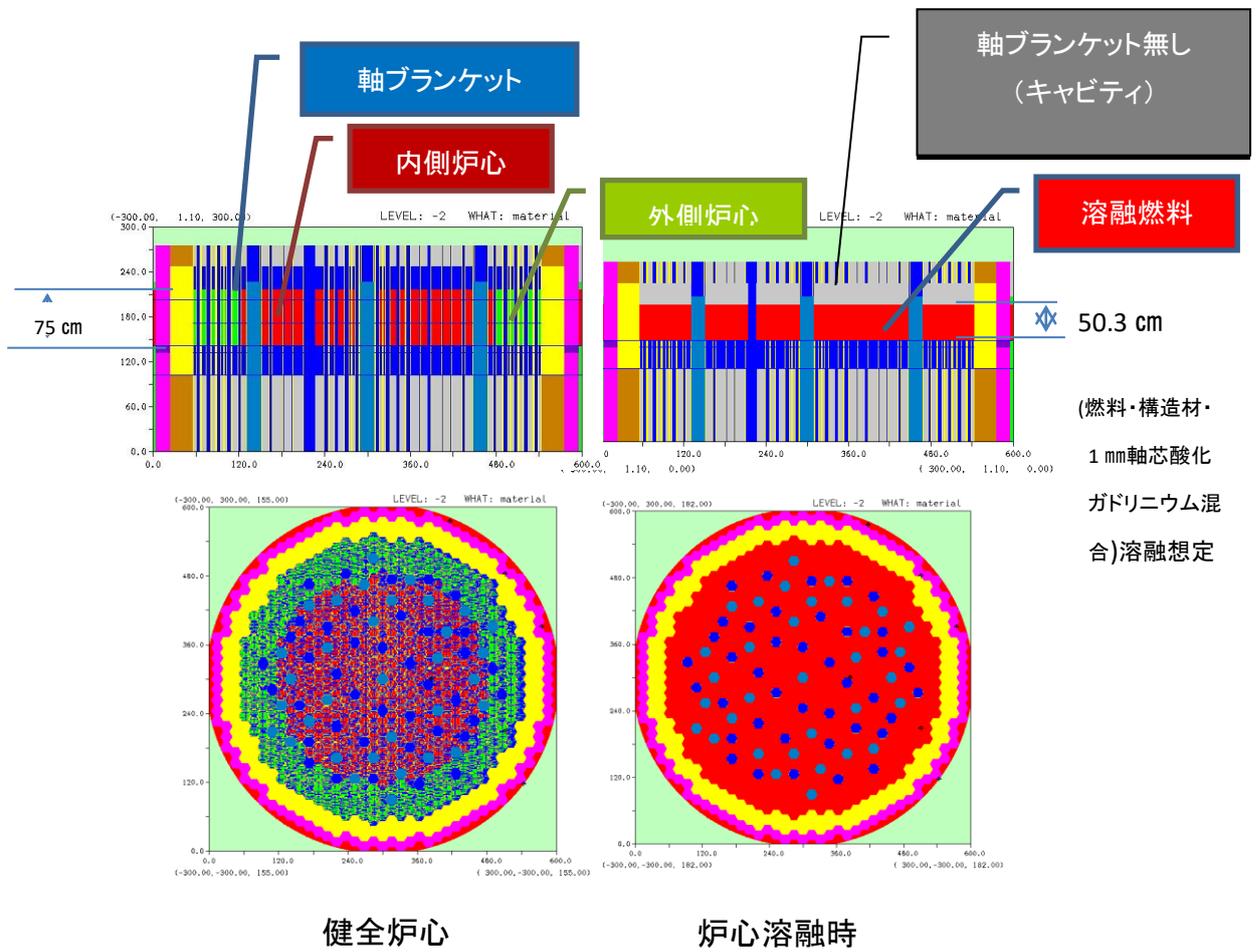


図 3.2-2 円柱型炉心の解析モデル

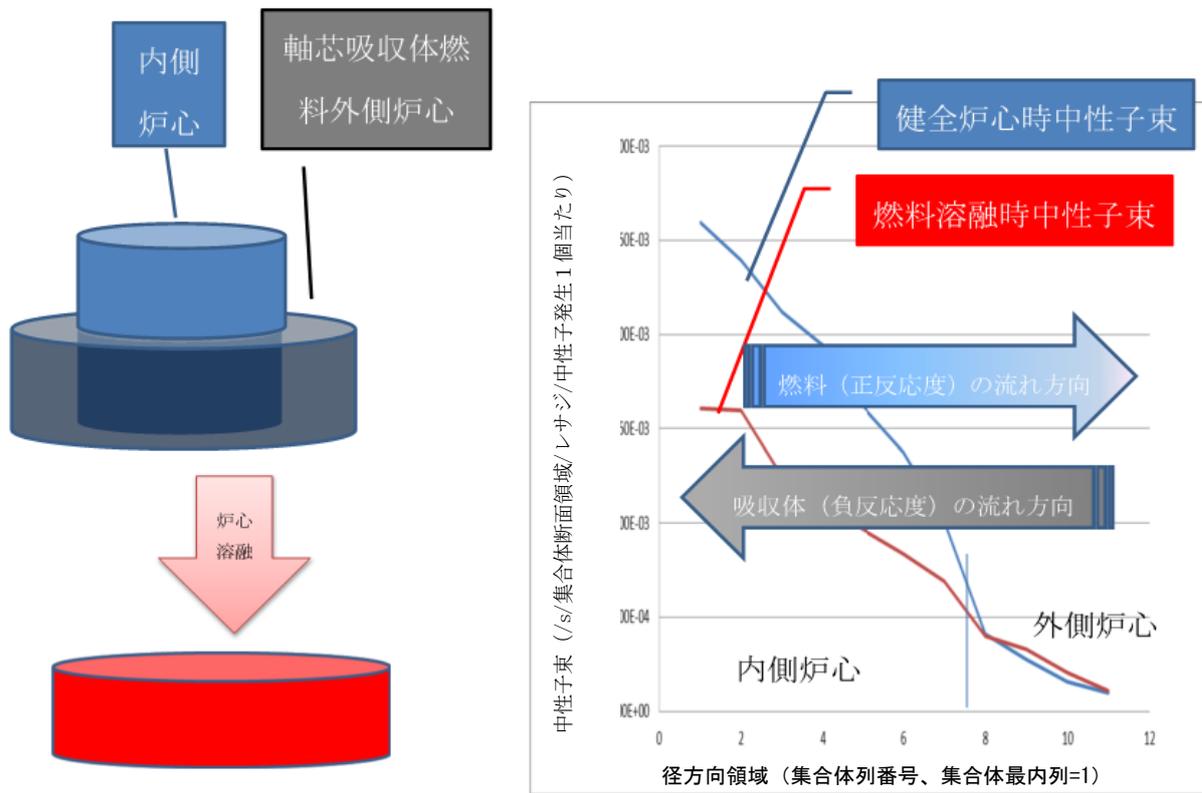


図 3. 2-3 凸型炉心の径方向中性子束分布と外側炉心軸芯吸収体の効果

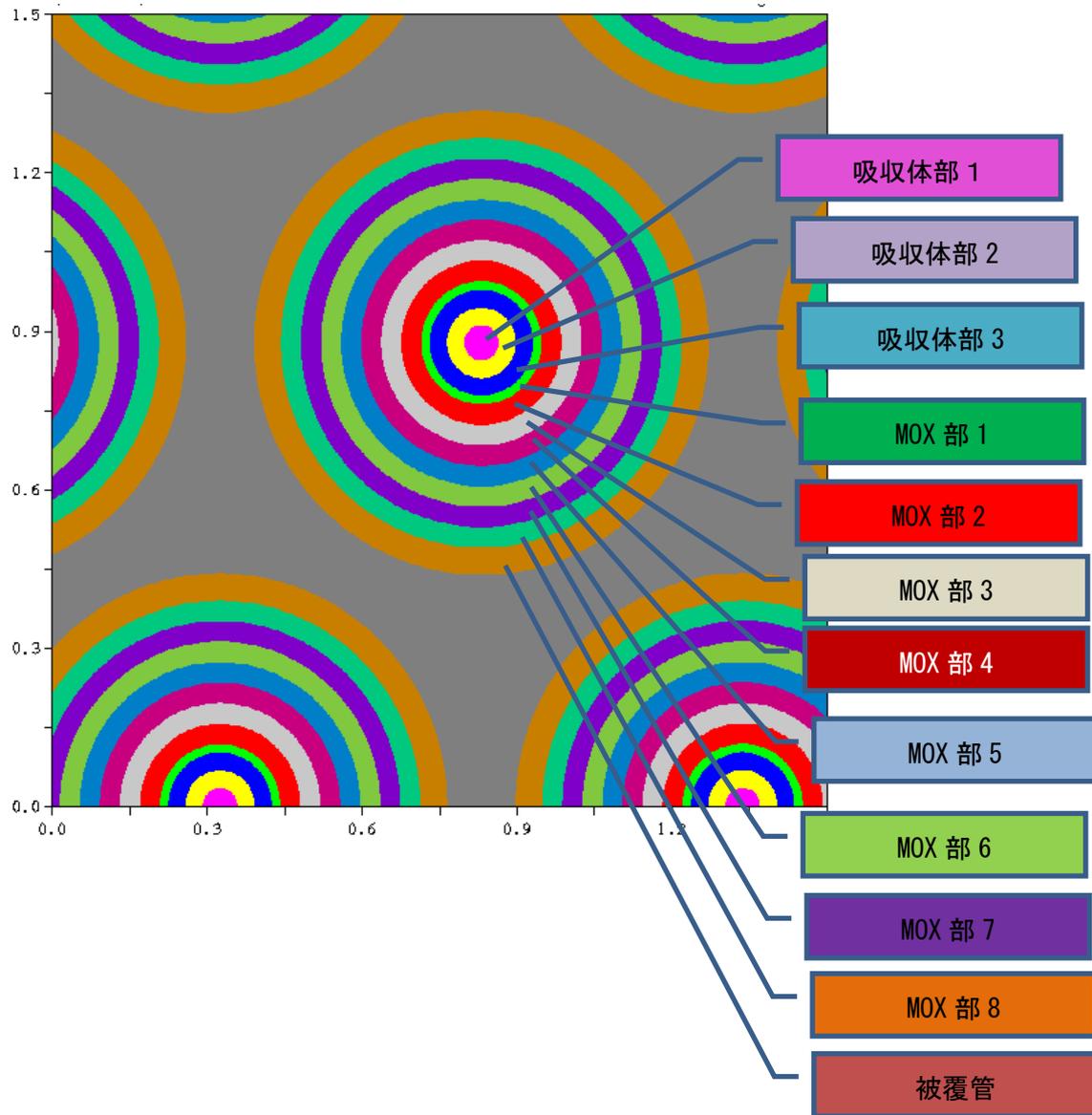


図 3.2-4 軸心燃料ペレット中性子束領域分割図

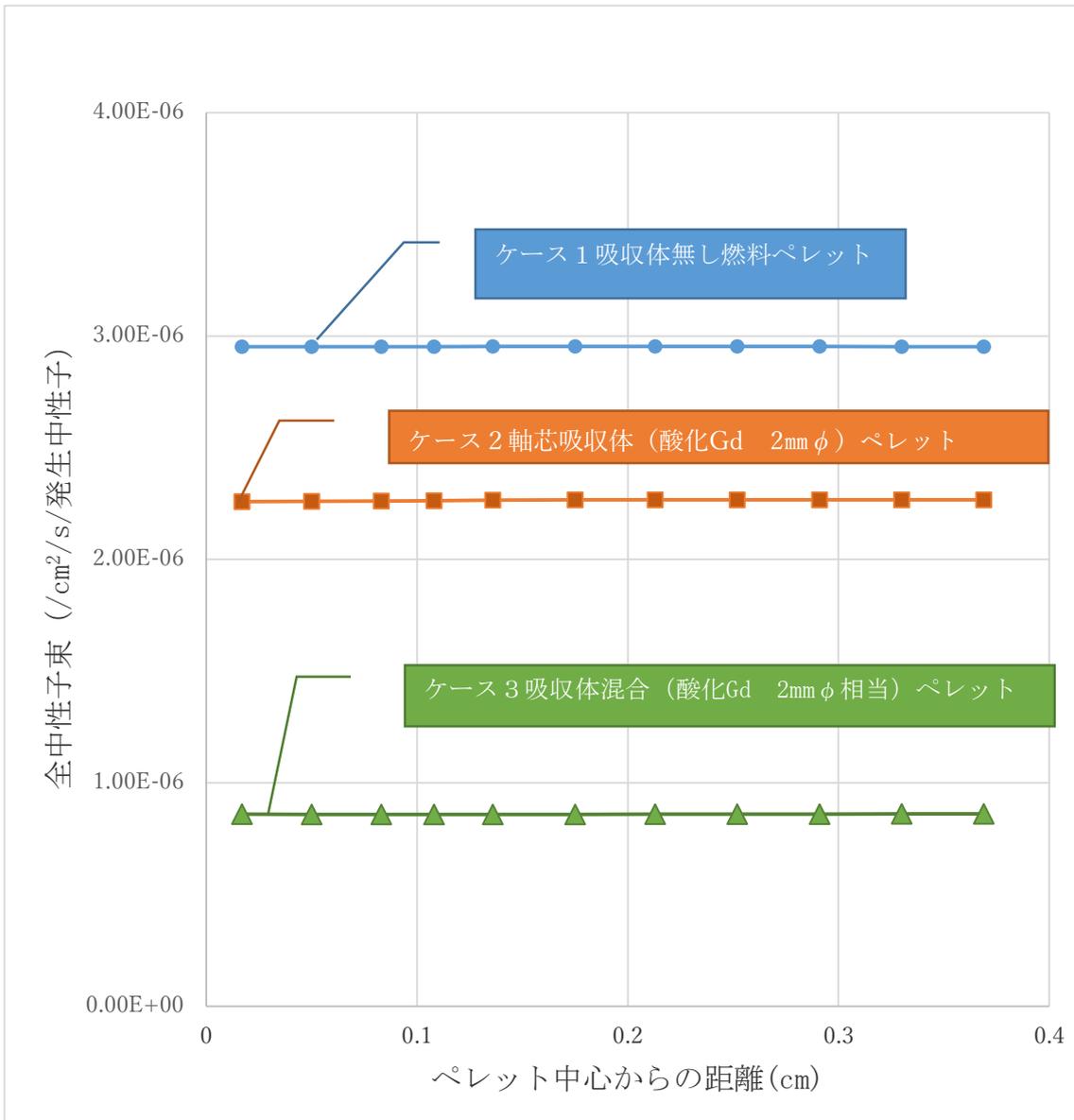


図 3.2-5 軸芯吸収体各ケースでの全中性子束分布

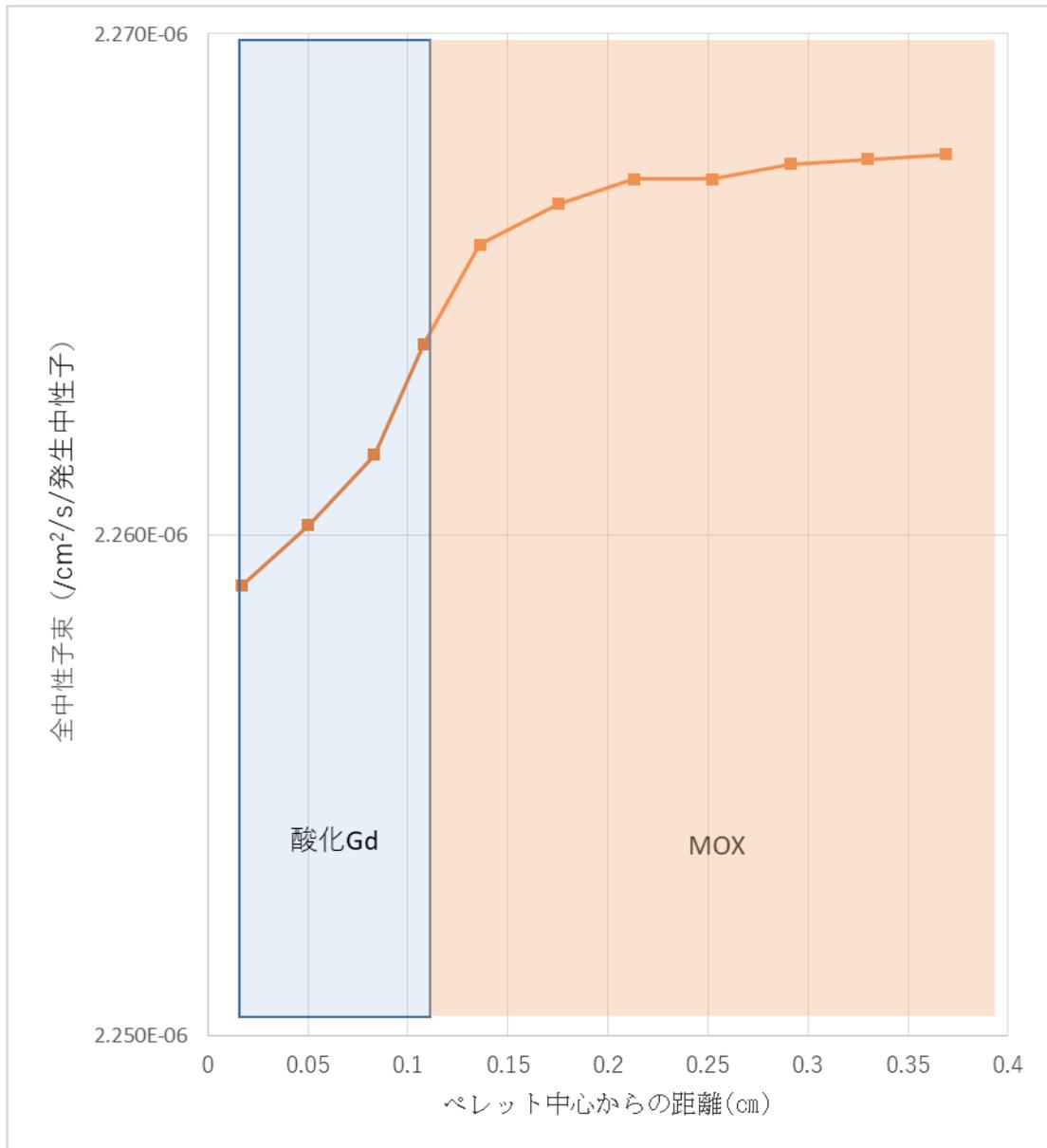


図 3.2-6 ケース 2 軸芯吸収体 2 mm φ ケースでの全中性子束分布詳細

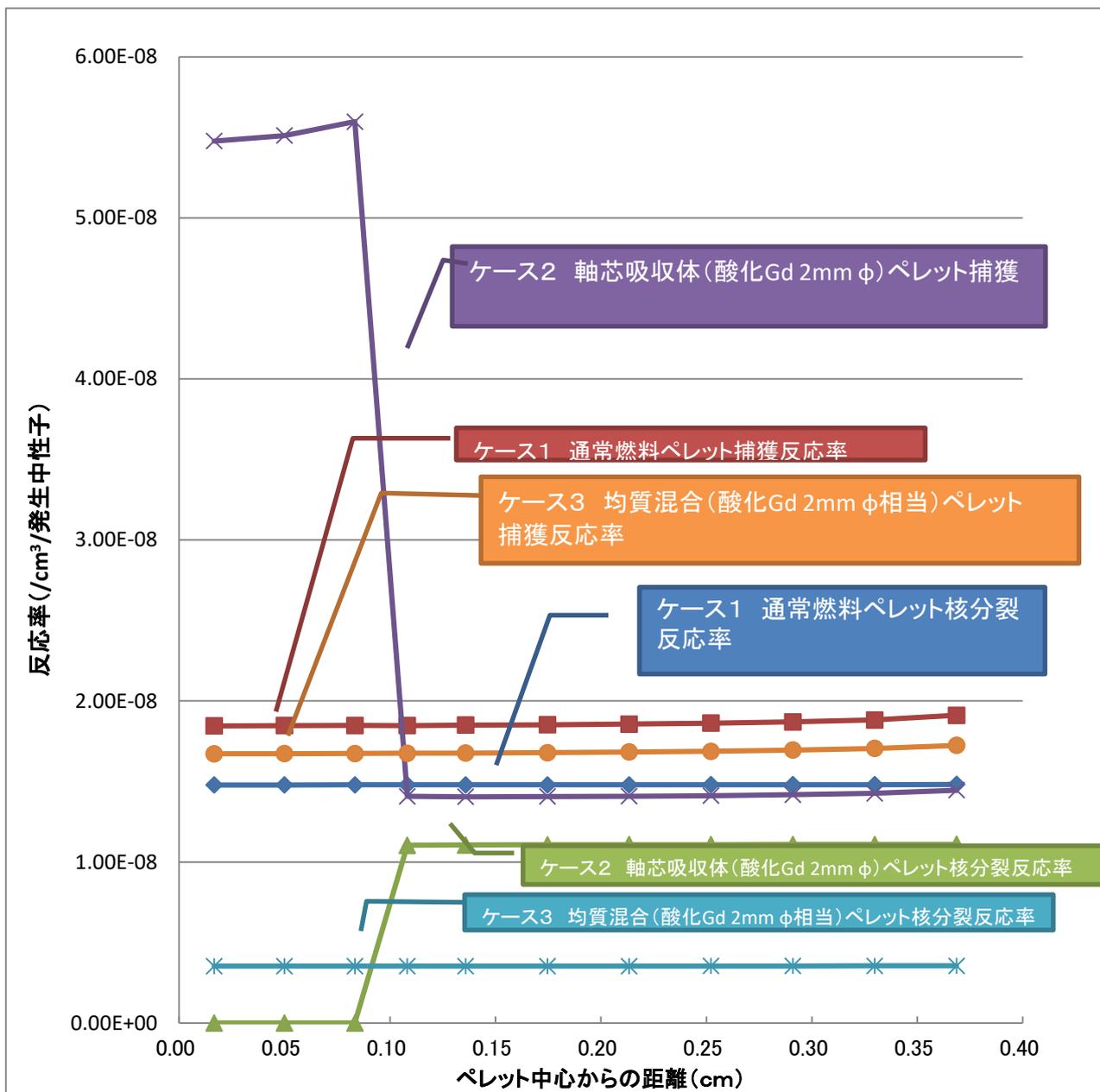


図 3.2-7 各ケースの反応率分布

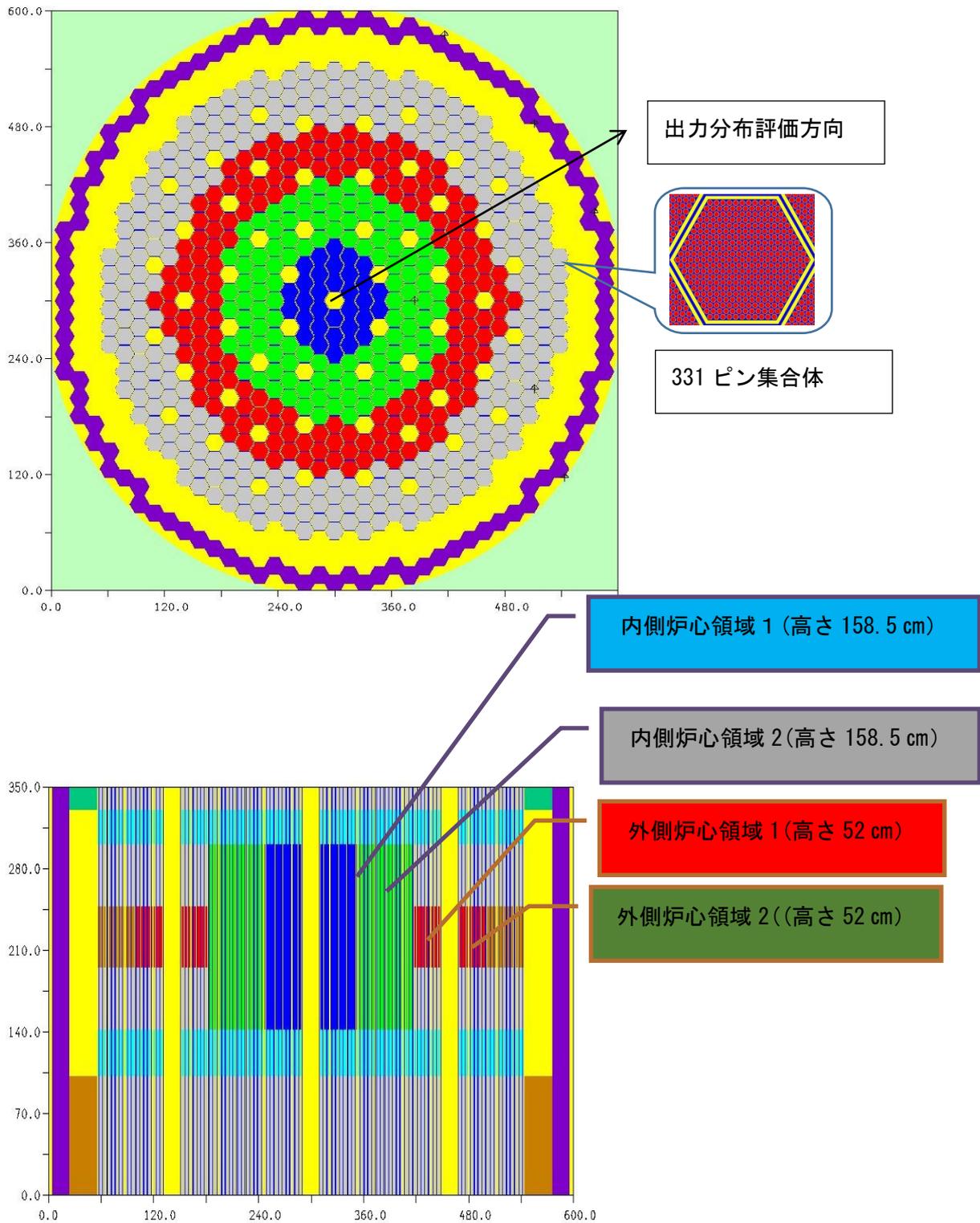


図 3.2-8 上下凸型 4 領域炉心体系

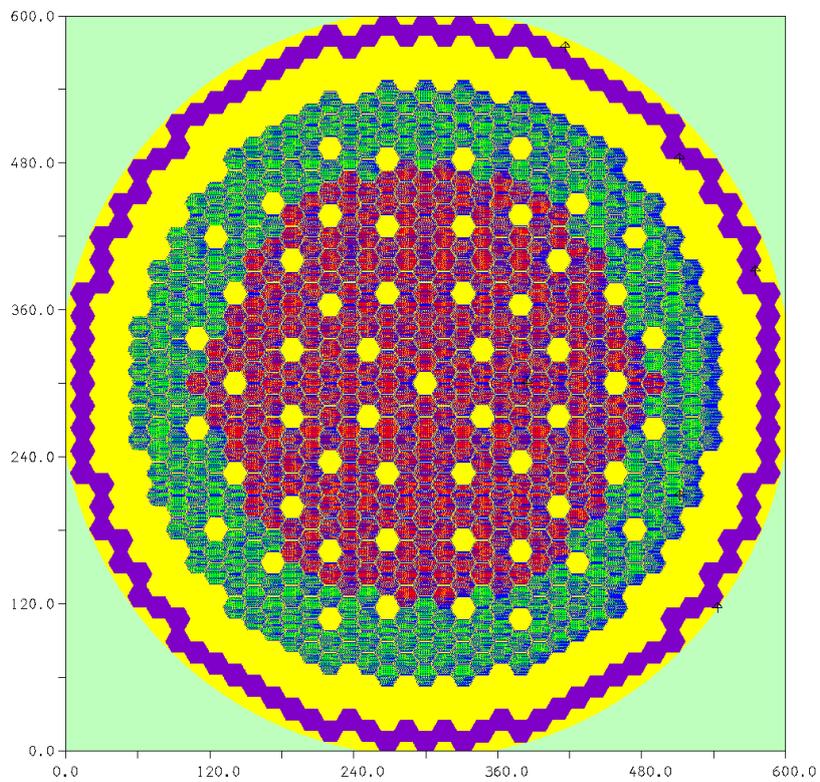
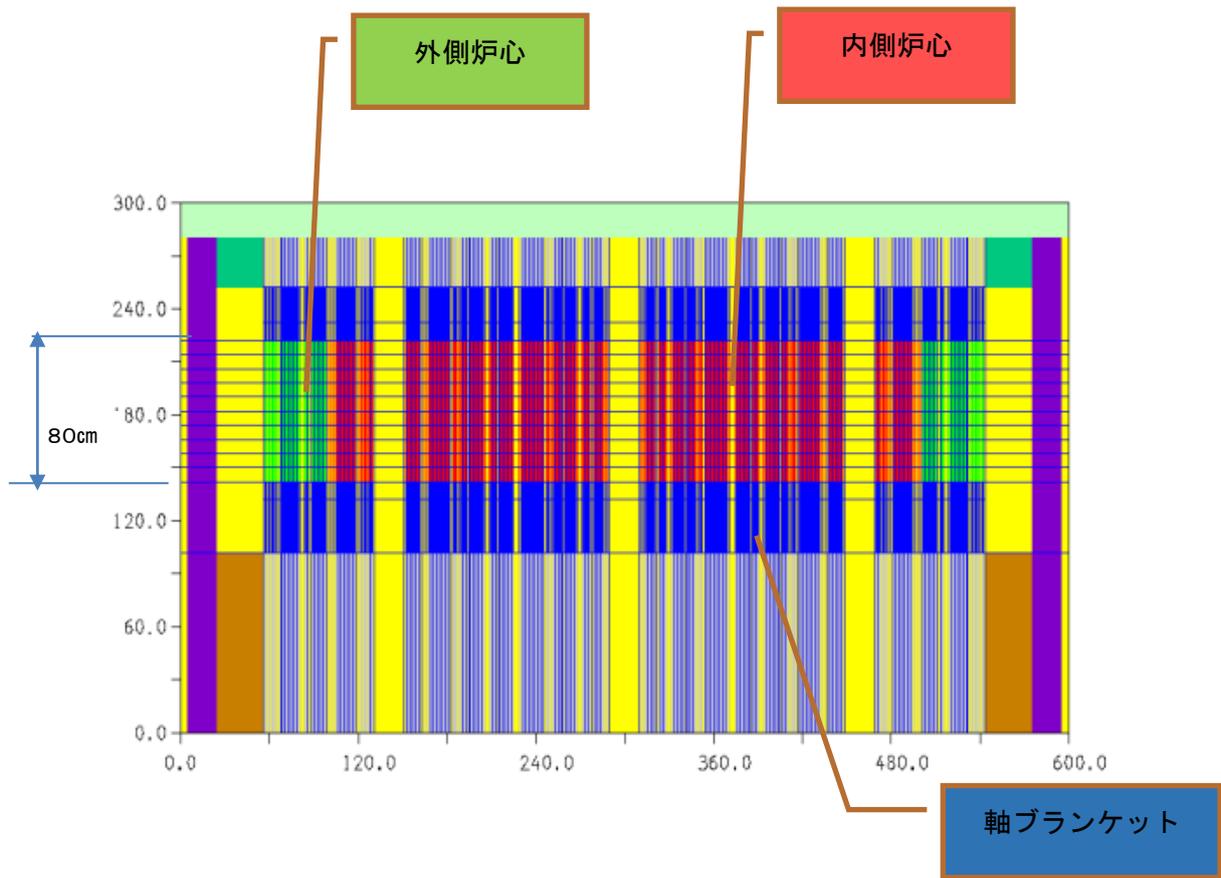


図 3.2-9 円柱型炉心（炉心高さ 80 cm）の出力分布計算モデル

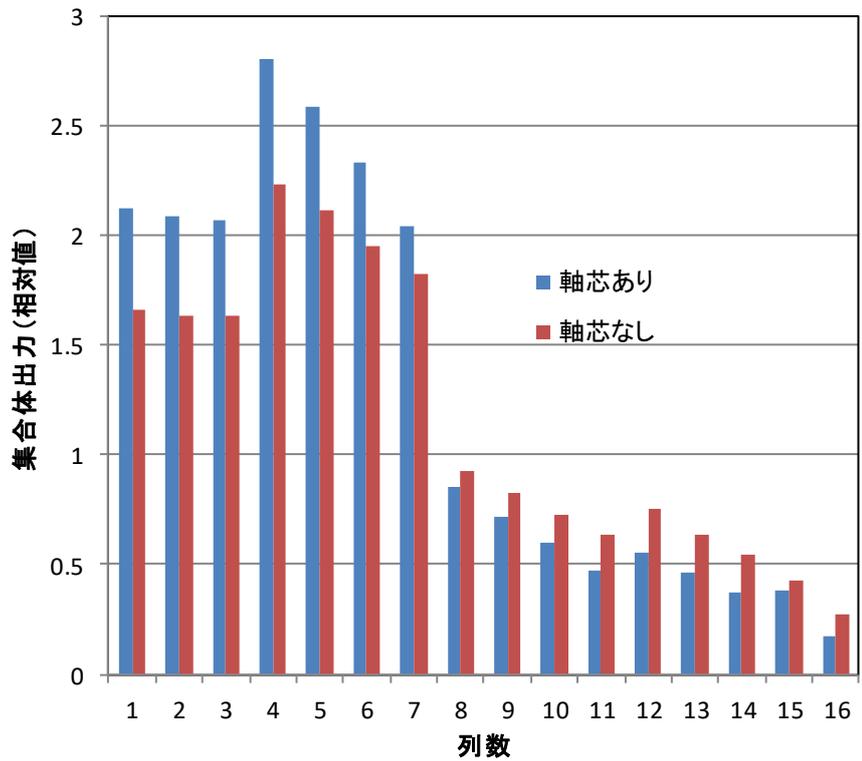


図 3.2-10 上下凸型炉心の集合体出力の比較(軸芯有り、軸芯無し)

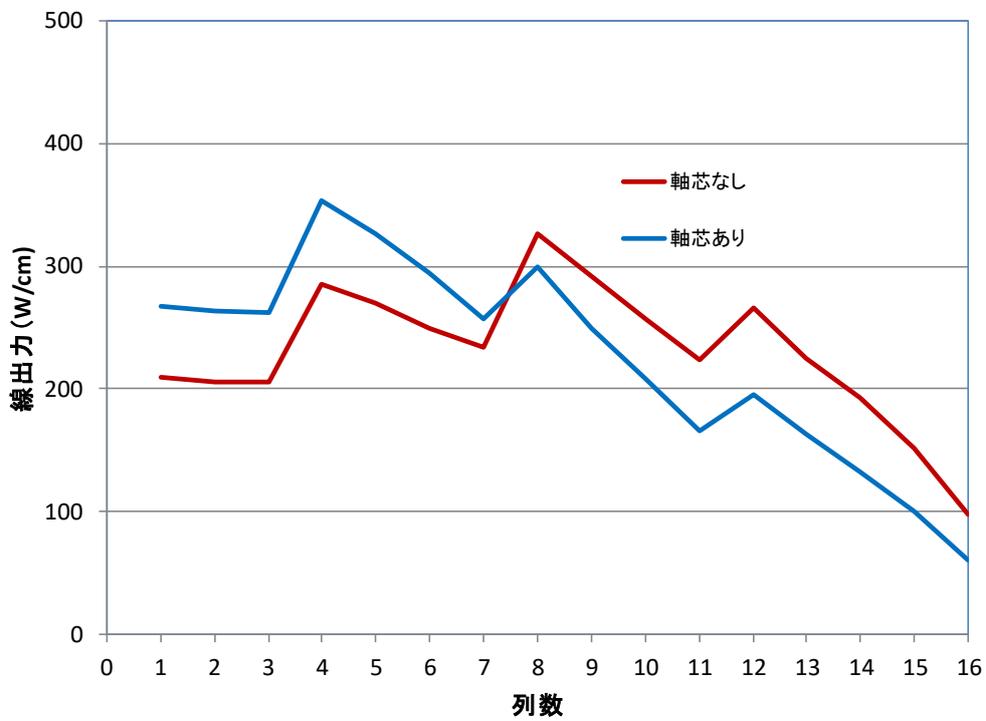


図 3.2-11 上下凸型炉心の集合体最大線出力分布の比較 (軸芯有り、軸芯無し)

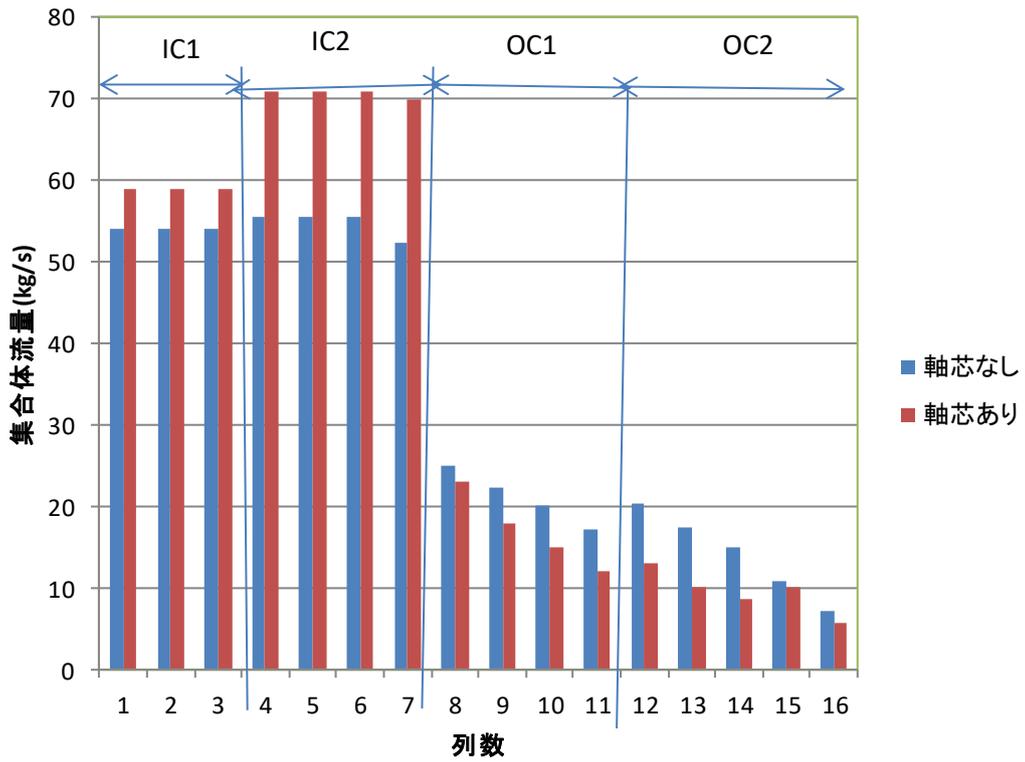


図 3.2-12 上下凸型炉心の集合体設計流量の比較（軸芯有り、軸芯無し）

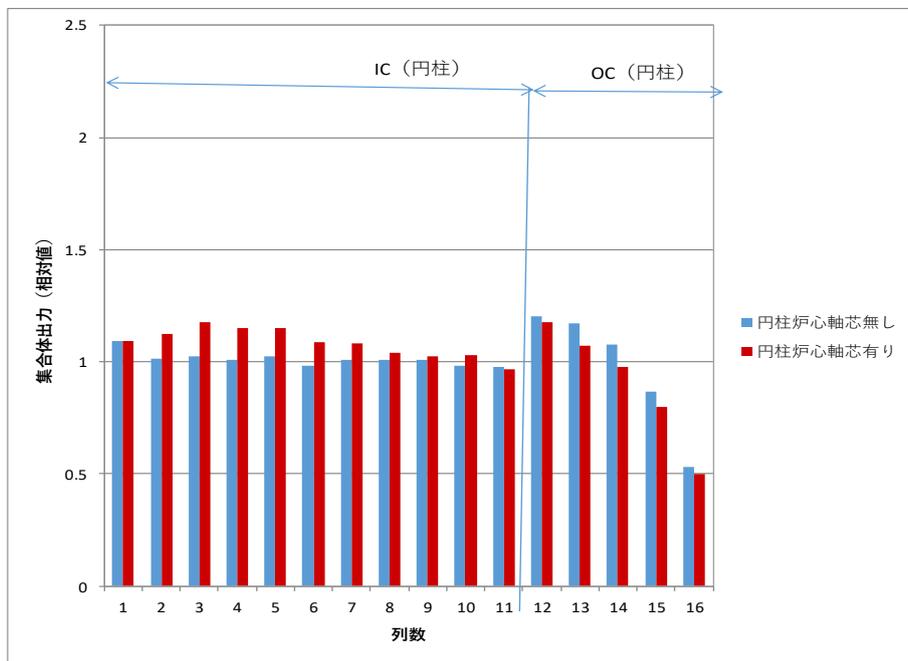


図 3.2-13 円柱型炉心の集合体出力分布（軸芯有り、軸芯無し）

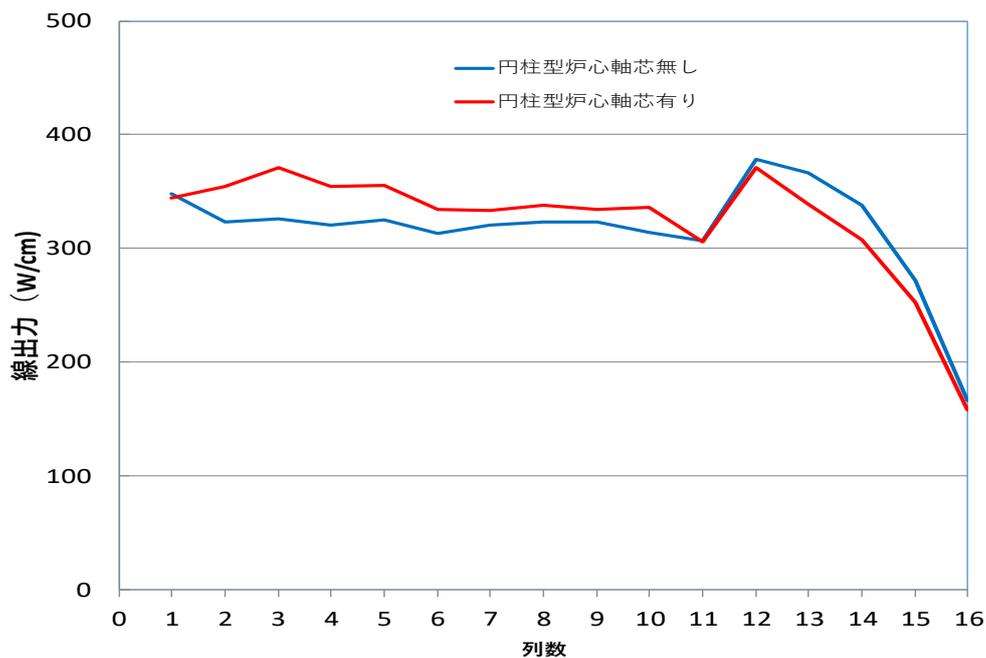


図 3.2-14 円柱型炉心の集合体線出力の比較（軸芯有り、軸芯無し）

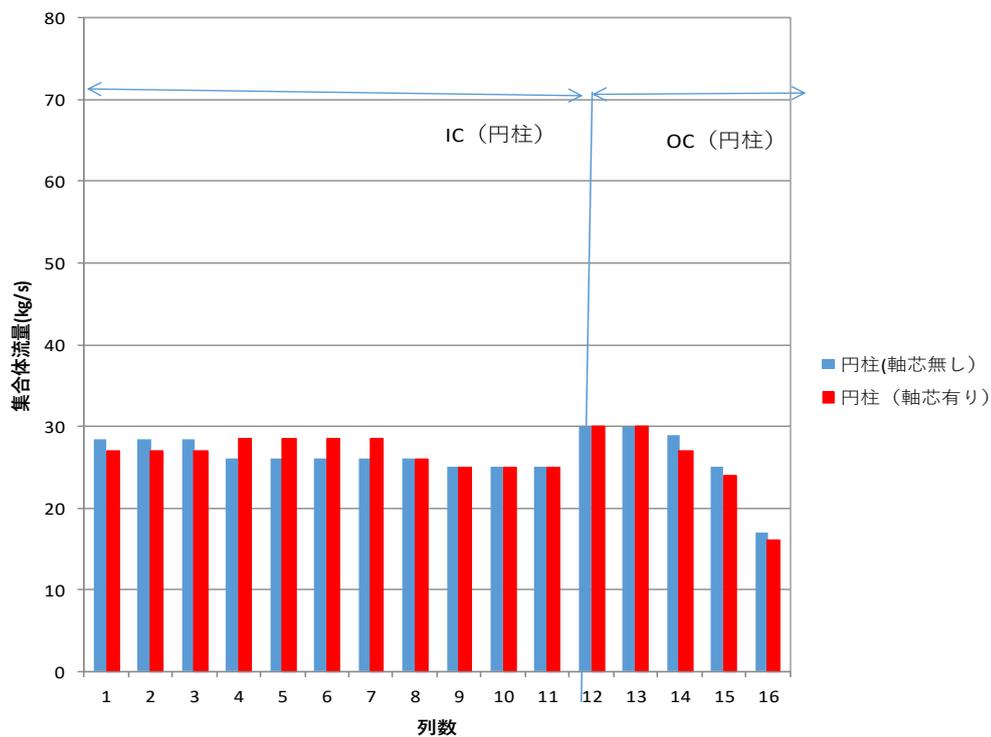


図 3.2-15 円柱型炉心の流量配分（軸芯有り、軸芯無し）

3.3 再臨界防止用軸芯燃料開発（再委託先：日本原子力研究開発機構）

3.3.1 軸芯燃料熔融時の吸収体分散挙動の検討

(1) 概要

高速炉の炉心熔融時に熔融燃料による即発再臨界を防止するため、MOX 燃料ペレットの軸芯部分に中性子吸収体を装填した軸芯燃料の開発を進めている。軸芯燃料は、通常運転時には軸芯部の中性子吸収体はその自己遮蔽効果により MOX 燃料の燃焼を阻害しない一方、燃料熔融時には熔融燃料中に均質に分散して即発再臨界を防止するものである。このような軸芯燃料を開発するためには、中性子吸収体として適切な物質を選択し、適切な状態で MOX 燃料の軸芯部に装荷する必要がある。平成 27 年度以降様々な基礎的知見を得て、平成 29 年度末までに優れた再臨界防止効果を発揮する軸芯燃料ペレット仕様を設定した。この軸芯燃料仕様の有効性を検証するため、平成 30 年度は MOX 燃料部及び中性子吸収体部のそれぞれに模擬物質を用いた模擬軸芯燃料ペレットを試作し、高温で熔融させた際の模擬中性子吸収体の分散性を評価した。この結果に基づき、再臨界防止用軸芯燃料仕様の妥当性を検証した。

(2) 軸芯燃料構造の検討及び軸芯燃料熔融時の吸収体分散挙動の検討（平成 27 年度～平成 29 年度）

高速炉の炉心熔融時に発生すると考えられている再臨界を防止するための軸芯燃料の構造や軸芯部に装荷する中性子吸収体の分散挙動を検討するための平成 27 年度から平成 29 年度までに実施した業務とそれにより明らかになった知見等について以下に記す。

平成 27 年度には軸芯燃料ペレットの構造の検討として、軸芯部の装荷に適する中性子吸収体の選定のため、中性子吸収性能の高い元素として知られているホウ素 (B)、サマリウム (Sm)、ユーロビウム (Eu)、ガドリニウム (Gd) 及びジスプロシウム (Dy) を対象に、単体や酸化物などの化合物の融点や沸点の物性と高温での安定性、微細粉末への加工性を調査した。その結果、MOX 燃料の融点を約 2800℃と想定すると、いずれの元素の単体及び酸化物などもこれよりも融点が低いことが判明した。また、沸点については、データのない元素が多いことも明らかとなった。一方、高温安定性については熱分析によって調査し、酸化ユーロビウム (Eu_2O_3)、酸化ガドリニウム (Gd_2O_3) 及び酸化ジスプロシウム (Dy_2O_3) が 1200℃までの高温安定性に優れていることが明らかとなった。微細化への加工については、いずれの元素においても粉碎により可能な見通しを得た。これらの結果から、軸芯燃料ペレット中性子吸収体としては、 Eu_2O_3 、 Gd_2O_3 及び Dy_2O_3 が候補となるという結論を得た[3.3.1-1]。

平成 28 年度には、 Eu_2O_3 、 Gd_2O_3 及び Dy_2O_3 が中性子吸収体の候補となることを踏まえ、熔融した MOX 燃料中での分散混合性を検討するため、Eu、Gd 及び Dy と U または Pu との状態図に類似する状態図を有する元素を用いた加熱試験を実施した。状態図の類似性は金属間化合物の形成の有無に着目し、Eu、Gd 及び Dy と U または Pu との混合時の模擬となるような元素を選択して加熱熔融し、冷却後の組織状態からこれらの液相時の混合性を予測した。その結果、相互に固溶性のない元素同士の組織は密度差に応じて分離するとともにそれぞれの元素は混合せず一定の大きさをもつ単体組織として存在していた。これより

相互に固溶性のない物質同士は液相として混合し難い特性があると考えられ、Eu と U または Pu、Gd と U または Pu、Dy と U または Pu はいずれも相互の固溶性がないため、液相同士では混合し難いと予想された。また、Eu、Gd、Dy はいずれも融点が MOX 燃料の融点よりも低い、Eu 及び Dy は沸点も MOX 燃料の融点よりも低く、燃料溶融時には蒸発することが予測される。以上のことから、軸芯燃料ペレットの中性子吸収体としては、燃料溶融時の固液混合を想定して W のような高融点で、比較的中性子吸収能が高い元素からなる高融点金属粒子か、または、高融点金属で被覆された Gd 粒子とすることが有望であるとの結論を得た[3.3.1-2]。

平成 29 年度は、溶融燃料中での中性子吸収体の分散性を検討するため、異なる粘性の液相や液相と固相を用いた試験を実施した。この結果に基づき、溶融時に軸芯部の中性子吸収体が均質に分散する軸芯燃料仕様を検討した。液相としては粘性の異なるシリコンオイルや精製水を使用し、固相としては粒径の異なるアルミナ粒子を使用した。試験の結果、相互に溶解性のない液相同士（シリコンオイルと精製水）では混合が困難であること、相互に溶解性の有る液相同士（粘性の異なるシリコンオイル同士）においても混合には液相全体に伝わる攪拌力を必要とし、混合が困難な場合があることが明らかとなった。固相粒子と液相の混合では高粘性が粒子分散を抑制してしまう一方、分散した粒子は攪拌力が停止したのちも分散が維持されやすいことが明らかとなった。これらの結果から、燃料溶融時に均質に中性子吸収体を分散する軸芯燃料ペレットとしては、高融点金属で被覆した中性子吸収体を軸芯部に装荷することとし、中性子吸収体としては Gd_2O_3 、被覆金属としては W（タングステン）が有望であるとした。また、W 被覆の表面は通常運転時の長時間の高温保持環境下の粒子同士の固着を防止するため、溶融燃料温度と同等の融点を持つ炭化タングステン（WC）化することを想定した[3.3.1-3]。具体的な仕様の一例として、MOX 燃料の中心空孔径を 2 mm、W 被覆 Gd_2O_3 粒子は Gd_2O_3 粒径を 80 μm 、W 被覆を 10 μm 厚としそのうち 1 μm 相当を WC 化することで、直径 100 μm で MOX 燃料よりも約 17% 密度の大きい中性子吸収体をもった軸芯燃料ペレットが設定できる。

(3) 軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討（平成 30 年度）

平成 29 年度末までに設定した再臨界防止用軸芯燃料仕様の妥当性を検証するため、模擬物質を活用した模擬軸芯燃料ペレットを試作し、これを加熱溶融することにより中性子吸収体の模擬物質の分散挙動を評価した。

現時点の仕様検討の段階において MOX 燃料を用いた軸芯燃料ペレットを試作し、加熱溶融することは試験実施上困難を伴うため、MOX 燃料部及び中性子吸収体部にそれぞれ模擬物質を用いて模擬軸芯燃料ペレットを試作した。MOX 燃料部には、加熱溶融のしやすさを考慮して 1000°C 程度の融点をもつ材料を模擬物質として選択し、中性子吸収体部は MOX 燃料部の溶融時の状態により二つの選択基準を設けた。一つ目の基準は、MOX 燃料部が溶融した際に固相を維持し、かつ MOX 燃料部の模擬物質と相互の固溶性がない物質であること、二つ目の基準は、MOX 燃料部の溶融温度までに相互に固溶する物質とすることである。前者は MOX 燃料部と中性子吸収体部の固液混合を想定し、後者は液相同士の混合を想定したものである。また、固液混合を想定した中性子吸収体部の模擬物質には、MOX 燃料部の

模擬物質と密度の違いにも着目し、密度の大きい物質と小さい物質を選定することとした。

これらのことを踏まえ、平成 29 年度に設定した仕様に基づく軸芯燃料ペレットの模擬物質として、MOX 燃料部には Cu を、中性子吸収体部には Ru、Nb、Fe、Zn、Ni を選択した。熔融時に固液混合を想定する模擬軸芯燃料ペレットとしては、円柱状の Cu 材の中心部に直径 2mm の細孔を設け、そこに下部から Fe、Nb、Ru の粉末をそれぞれ充填した。Fe、Nb、Ru はそれぞれ Cu よりも融点が高く相互溶解性もないため、Cu を熔融しても固相であると想定した。また、Cu の密度に対して Fe は小さく、Nb はほぼ同等で、Ru は大きいという関係があり、Cu を熔融させた際にそれぞれに密度に応じた移動が生じることを期待した。一方、熔融時に液相同士の混合を想定する場合、MOX 燃料部と相互固溶性を持つ中性子吸収体を選択することによって相互固溶した液相による中性子吸収体の分散を期待できる。この挙動を明らかにするため、Cu と全率固溶となる Ni と金属間化合物を形成する Zn をそれぞれ個別に軸芯部に装填したものを模擬軸芯燃料ペレットとした。それぞれ模擬軸芯燃料ペレットの概要を図 3.3-1 に示す。

上述の模擬軸芯燃料ペレットに対して、MOX 燃料熔融時の軸芯部の中性子吸収体の分散挙動を把握するため、図 3.3-2 に示すような長尺のアルミナ製のタンマン管に Cu のダミー材とともに挿入し、電気炉内で所定の温度まで加熱し、一定時間保持する加熱試験を実施した。長尺のタンマン管と Cu のダミー材を用いた理由は、Cu の熔融時に一定の液相深さを維持し、密度の異なる模擬中性子吸収物質の縦方向の移動性や相互固溶する Ni、Zn の分散性を調査するためである。軸芯燃料ペレットには燃料熔融時の中性子吸収体の分散とともに、炉心の通常運転時に中性子吸収体が MOX 燃料部に固相拡散しない安定性が重要となる。そのため、模擬軸芯燃料ペレットの加熱試験では、Cu を熔融させる試験（加熱熔融試験）と Cu を熔融させず高温に保持する試験（高温保持試験）を実施することとし、試験条件をそれぞれ表 3.3-1 に示すように設定した。加熱熔融後の模擬軸芯燃料ペレットは室温まで冷却し、外観状態の観察、縦断面及び横断面の組織観察と元素分析を実施した。なお、Cu、Ru、Nb、Fe、Ni、Zn にはいずれも高純度市販品を用い、Ru、Nb、Fe、Ni、Zn は粉末状の試料を使用した。供試体の仕様を表 3.3-2 に示す。

Cu 母材に Ru、Nb、Fe を軸芯部に装荷した模擬軸芯燃料ペレット (Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料) の加熱熔融後の外観は、図 3.3-3 に示すように全体が Cu 色となっているものの、上部が黒色に変色しており、底部には窪みの形成が認められた。断面状態を図 3.3-4 及び図 3.3-5 に示す。縦断面図から当初設けた軸芯部の空孔は消滅し、そこへ装荷した模擬中性子吸収体も識別できなくなっている。図 3.3-4 に示す頂部の組織観察からは試料の頂部付近に Cu とは異なる組織の点在が認められた。これは内部の組織状態とも異なっており、頂部付近に特有な状態であった。横断面方向では、図 3.3-5 に示すようにいずれの高さにおいても同じような組織状態の連続であった。元素分析の結果、図 3.3-6～図 3.3-8 に示すように、頂部には Fe と Nb、Ru が検出され、O（酸素）の存在も示唆されたが、試料内部の位置では Cu 以外の元素は検出されなかった。

これらの結果、Nb 及び Fe はそれぞれ Cu の密度に比べて小さため、Cu 熔融時に密度差によって浮揚したものと考えられる。一方、頂部以外の部位からは Nb、Fe は検出されていないため熔融前に Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の中央部または下部に装荷した Nb と Fe はほぼ

全量が頂部まで浮揚したものと考えられる。Ru については、試験前の予測では Cu よりも密度が大きいため溶融後には底部に蓄積するものと想定していたが、Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の下部の元素分析結果からは Ru は認められなかった。Ru は Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の上部で検出されたがその量は Nb や Fe に比べて非常に少ない量であった。これは、Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料頂部において酸素の存在が示唆されていることから、外観の黒色変化にも関連して Ru が高温加熱中に雰囲気内の酸素により酸化したことによるものと推測される。Ru は酸化物 (RuO_3 , RuO_4) となることにより融点及び沸点が大きく低下し、Cu の溶融時には大部分が揮発することが想定される [3.3.1-4, 3.3.1-5]。また、密度も単体密度の 1/4 程度にまで低下する。一方、外観上に認められた Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料底部の窪みは軸芯部に残留していた空隙により形成されたものと思われ、空隙部に含まれる雰囲気元素が Cu の溶融時に外部に放出されず、底部に留まったものと考えられる。

以上のように Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の加熱溶融試験からは Nb 及び Fe は Cu 内を浮揚したことが確認されたが Ru の沈降は確認できなかった。これは Ru の酸化による密度低下が原因と推測されるが、液相中の粒子の浮揚と沈降は液相と粒子に対する重力に基づく同等の移動挙動であるため、液相よりも密度の小さい元素が液相中を浮揚すれば密度の大きい元素は沈降することとなり、密度の違い（密度差）が液相内の移動の駆動力になることが確認できた。また、液相よりも密度が小さい物質は比較的短時間の移動により液面近傍に集中し、液相内はとどまらない可能性が高いことも明らかとなった。さらに、溶融時は高温となるため雰囲気中の主成分はもとより不純物成分との反応の可能性もあり、これにより酸化物形成などが生じると融点、沸点、密度などの物性が変化し、液相内での挙動が大きく変わる可能性のあることも明らかとなった。

Cu 部分を溶融させない Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の高温保持試験の結果について、外観状態を図 3.3-9 に示す。外観上は加熱前と同様な状態であり、大きな変化は認められなかった。断面状態を図 3.3-10 に示す。縦断面からは中心空孔部にも大きな変化はなく、加熱前の状態と同様であったが、Ru と Nb が観察用試料への加工時に喪失しているのに対し、Fe は残留していた。これは Fe 粒子が固着していることを示唆しており、Ru 及び Nb よりも融点が低いためと考えられる。横断面についても同様に試料状態に大きな変化はなかった。横断面に模擬中性子吸収体が残留しているのは切削加工をせずに観察しているためである。元素分析の結果、図 3.3-11 に示すように縦断面においても横断面においても母材部には Cu 以外は検出されなかった。これらのことから、Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料について高温保持の結果、状態図調査の予測通りに高融点で母材と相互の固溶性のない物質は母材との反応はなく、安定な状態で維持できる可能性が高いことが明らかとなった。

Cu 母材の軸芯部に Ni を装荷した模擬軸芯燃料ペレット (Cu-Ni 試料) の加熱溶融試験後の外観を図 3.3-12 に示す。Cu-Ni 試料の外観は単体 Cu の色に比べて少し変色しており、全体の 1/4 程度に相当する下部とそれ以外の部位では若干色の違いも認められた。また、底部には窪みがあった。断面状態は、図 3.3-13 に示すように試料上部の縦断面中心部に中心空孔の残骸と思わる多数の微細な空隙が認められた。横断面についても図 3.3-14 に示すようにいくつかの空隙があるものの組織としては同一であった。元素分析の結果、図

3.3-15～図 3.3-17 に示すように縦断面においても横断面においても Ni は Cu 内に均質に分散していた。これらのことから Cu と金属間化合物を形成する Ni は高温加熱とともに Cu と混合し、Cu が溶融した時点で試料全体にわたって均質に分布していたと考えられる。Cu-Ni 試料全体の内部は Cu と Ni のほぼ同一の組織状態であったため、外観観察時に認められた色の違いは表面的な事象であると考えられる。一方、Cu-Ni 試料の高温保持試験後の外観は図 3.3-18 に示すように Cu が溶融していないため、外観上に大きな変化は認められなかった。断面状態は、図 3.3-19 に示すように縦断面、横断面ともに大きな変化はなかった。元素分析結果からも図 3.3-20 及び図 3.3-21 に示すように Cu の中への Ni の固溶は認められなかった。これらのことから Cu-Ni 試料では、状態図が示す通り Cu と全率固溶の Ni であっても今回の試験温度のように保持温度が低い場合には、化合物の形成も固相拡散も生じないことが明らかとなった。

Cu 母材の軸芯部に Zn を装荷した模擬軸芯燃料ペレット (Cu-Zn 試料) の加熱溶融試験後の外観を図 3.3-22 に示す。Cu-Zn 試料では、模擬中性子吸収体として Zn を選択した時点において Zn の沸点が Cu の融点よりも低いため、加熱溶融温度を 700°C に設定した。このため、Cu-Zn 試料の加熱溶融試験では Cu は溶融していないため、外観上は大きな変化はなかった。断面状態を図 3.3-23 及び図 3.3-24 に示す。これらの図より明らかのように、縦断面及び横断面のいずれにおいても中心空孔の周縁部が 1mm 程度の幅で変色し、変質していることが認められた。これは図 3.3-25 に示す元素分析の結果から Cu と Zn の化合物 (合金) であることが判明した。これらのことから、Cu-Zn 試料では Cu と Zn が金属間化合物を形成するため、高温加熱中に液相となった Zn が固相の Cu 内に拡散し、Cu-Zn 合金を形成したものと考えられる。一方、高温保持試験では、図 3.3-26 及び図 3.3-27 の断面観察及び元素分析結果に示すように、縦断面及び横断面のいずれにおいても変色や変性は認められなかった。これらのことから、保持温度に応じて金属間化合物を形成する物質間では反応が進むことが明らかとなった。

Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料、Cu-Ni 試料及び Cu-Zn 試料の加熱溶融試験、高温保持試験を通じて、溶融時の固液混合を想定した場合、液相と固溶性のない固相を選択することにより液相内では密度差に応じた移動の駆動力が働く。また、相互固溶性のない物質は液相の融点以下の高温保持においては安定な状態を維持する。一方、溶融時に液相同士の間となる場合には、溶融時にはほぼ均質な混合を期待できるが、融点以下の高温保持時には軸芯部に装荷した物質の融点や母材部との反応性に留意し、母材部への拡散を抑制することが重要となる。特に、共晶を形成する物質同士ではその共晶点温度が重要であり、MOX 燃料と Gd_2O_3 の場合、 $UO_2-Gd_2O_3$ の状態図に基づく Gd_2O_3 の融点よりも低い 2200°C 程度に共晶点があるため Gd_2O_3 と直接接触した UO_2 はこの温度で溶解すると考えられる [3.3.1-6, 3.3.1-7]。これは MOX 燃料単体の融点よりも非常に低く、燃料溶融が促進されてしまい好ましくない状態である。そのため、 Gd_2O_3 は MOX 燃料との接触を避けた被覆粒子とすることが好ましいと言える。

平成 29 年度に再臨界防止用の軸芯燃料ペレット仕様は、中性子吸収体としてタンダス

テン被覆 Gd_2O_3 粒子を選定し、中空 MOX 燃料の軸芯部に装荷することとした。また、タングステン被覆粒子は、タングステン被膜の厚さの制御で密度調整が可能であり、固着防止のために表層を炭化タングステン化することとした。これらの仕様は、今年度の業務結果からも液相の溶融燃料内に分散する固相粒子として密度調整による移動駆動力を有し、高温時の固着防止も考慮されており、燃料溶融時の中性子吸収体が良好に分散する機能を有しており、軸芯燃料ペレット仕様として妥当であると考えられる。

(4) まとめ

平成 27 年度から平成 29 年度までの業務遂行により、再臨界防止用軸芯燃料ペレットとして、中空形状の MOX 燃料ペレットの軸芯部に表面を WC 化した W 被覆の Gd_2O_3 を中性子吸収体として装填することとした。この仕様は、平成 30 年度の業務結果から固液混合時の固相が液相との密度差によって浮揚・沈降が期待できることが明らかになり、W 被覆 Gd_2O_3 粒子は被覆厚さの制御により密度調整が可能なることから、軸芯燃料ペレットとして良好な分散性を発現できる仕様である。炉心部で燃料溶融が生じた場合、液相の対流や炉心上部部材の崩壊落下などが液相の攪拌力になると想定されるが、これまでの模擬物質による固液混合では液相に対して密度の小さい物質は容易に浮揚しやすく、一旦浮揚した物質はほとんど液相内には分散しない傾向であることから、中性子吸収体の最終仕様としては液相よりも密度を大きく設定する必要がある。

以上のように、高速炉の炉心溶融時の再臨界を効果的に防止する軸芯燃料ペレットとしては、MOX 燃料の軸芯部に W 被覆 Gd_2O_3 粒子を中性子吸収体として装荷したペレットとする仕様が有効かつ妥当であることを確認した。また、今後の課題として、本仕様に基づき実際の核燃料物質を使用した軸芯燃料ペレットを試作し、溶融させるなどの試験を通して中性子吸収体の分散・混合挙動を確認していく必要がある。

参考文献

- [3.3.1-1]凸型炉心形状による再臨界防止固有安全高速炉に関する研究開発 平成 27 年度報告書
- [3.3.1-2]凸型炉心形状による再臨界防止固有安全高速炉に関する研究開発 平成 28 年度報告書
- [3.3.1-3]凸型炉心形状による再臨界防止固有安全高速炉に関する研究開発 平成 29 年度報告書
- [3.3.1-4]S. Miwa, S. Yamashita, et al., “Research Program for the Evaluation of Fission Product and Actinide Release Behaviour, Focusing on Their Chemical Forms” Energy Procedia, 2015; 71, 168-181
- [3.3.1-5]A. Auvinen, G. Brilliant, et al., “Progress on ruthenium release and transport under air ingress conditions” Nucl. Eng. Des., 2015; 71, 168-181
- [3.3.1-6]R. Beals, J. Handwerk, and B. Wrona, “Behavior of urania-rare-earth oxides at high temperatures,” J. Amer. Ceram. Soc., 52, No. 11, 578-581 (1969).
- [3.3.1-7]S. G. Popov, V. N. Proselkov, and V. A. Lysenko, ” THERMODYNAMIC ANALYSIS OF URANIUM-GADINIUM FUEL STABILITY AT HIGH TEMPERATURES” , Atomic Energy, Vol. 110, No. 4, 221-229 (2011)

表 3.3-1 加熱溶融試験と高温保持試験の試験条件

	ペレット組成	加熱温度 (°C)	保持時間 (min)	試験数 (回)
加熱溶融試験	Cu-(Ru, Nb, Fe)	1200	10	2
	Cu-Ni	1200		
	Cu-Zn	700		
高温保持試験	Cu-(Ru, Nb, Fe)	800	10	2
	Cu-Ni	800		
	Cu-Zn	350		

表 3.3-2 供試体の仕様

試料	形状	純度 (%)
Fe	粉末 (<150 μ m)	99.9
Nb	粉末 (75~150 μ m)	99.9
Ru	粉末	99.9
Ni	粉末 (<150 μ m)	99
Zn	粉末 (<150 μ m)	99.9
Cu	丸棒 (ϕ 10mm)	99.9

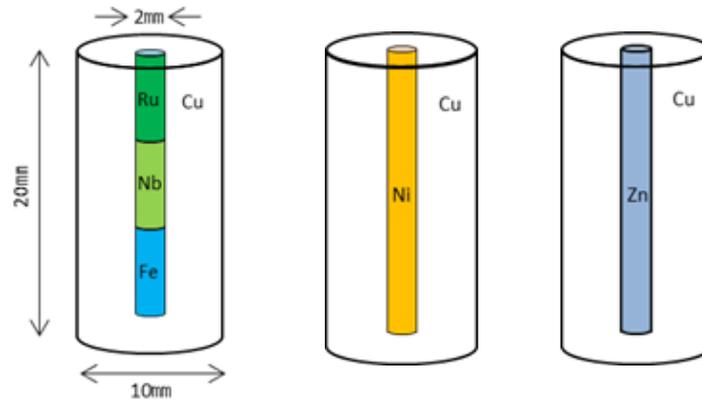


図 3.3-1 模擬軸芯燃料ペレットの概要

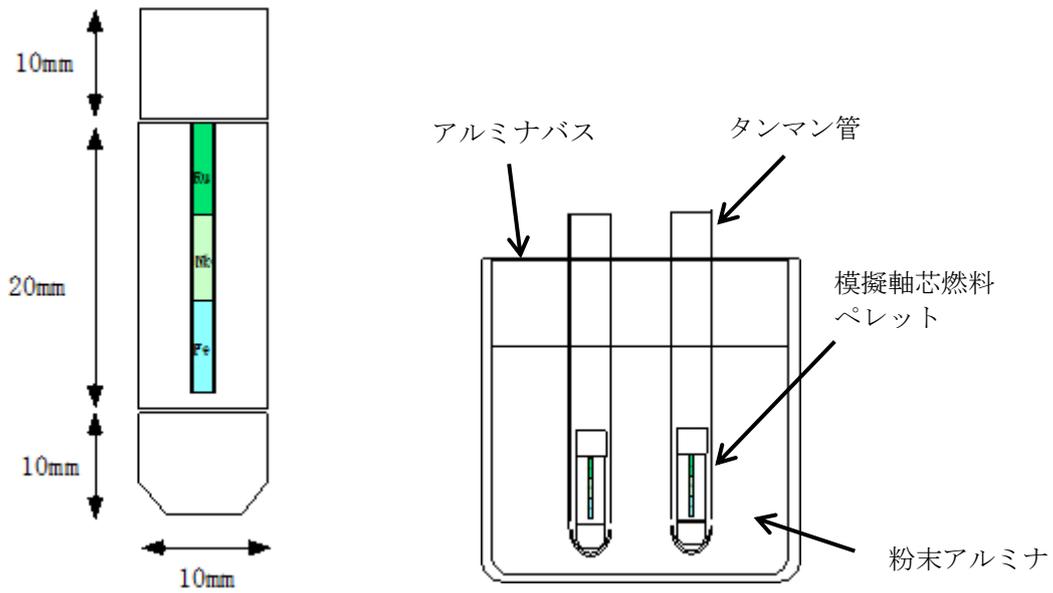
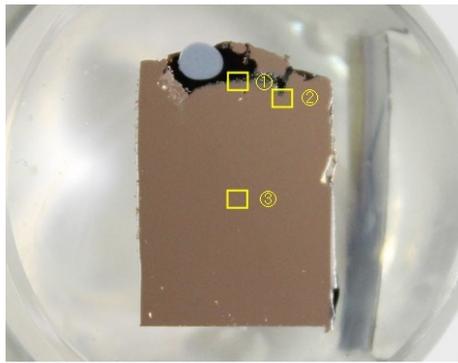


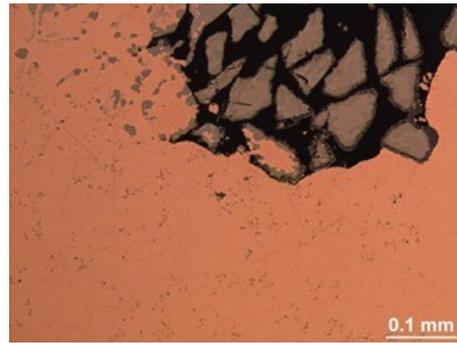
図 3.3-2 模擬軸芯燃料ペレットの加熱方法



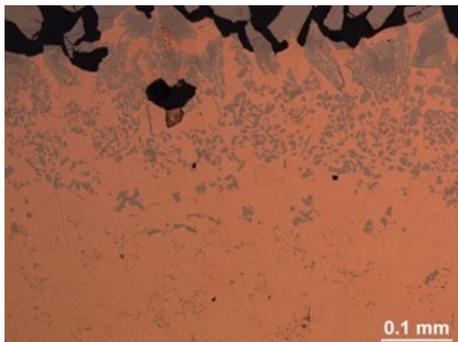
図 3.3-3 Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の加熱溶融後の外観



縦断面（試料上部）



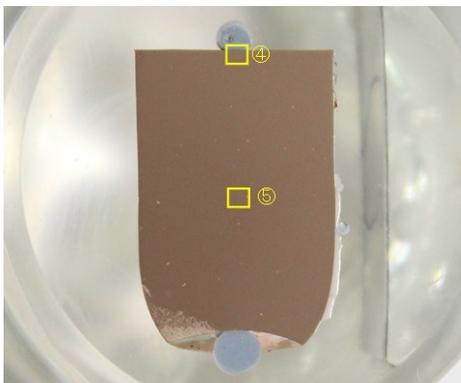
①部分の拡大図



②部分の拡大図



③部分の拡大図



縦断面（試料下部）

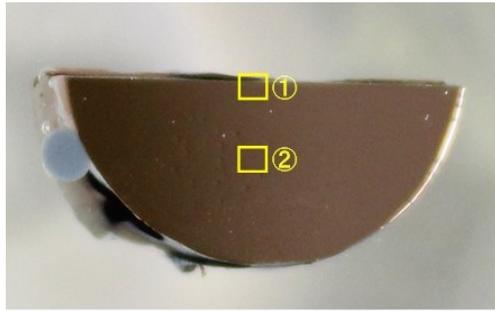


④部分の拡大図



⑤部分の拡大図

図 3. 3-4 Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の加熱溶融後の断面（縦断面）



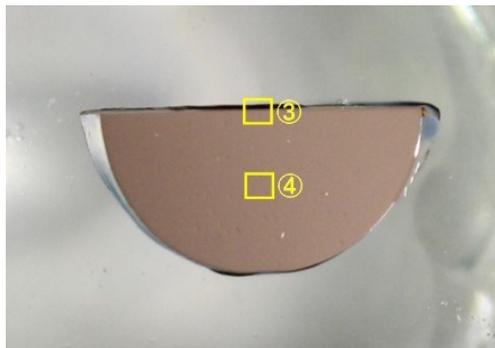
横断面（試料上部）



①部分の拡大図



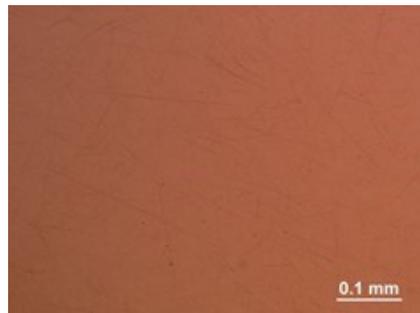
②部分の拡大図



横断面（高さ中心部）



③部分の拡大図



④部分の拡大図

図 3.3-5 Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の加熱溶融後の断面（横断面）

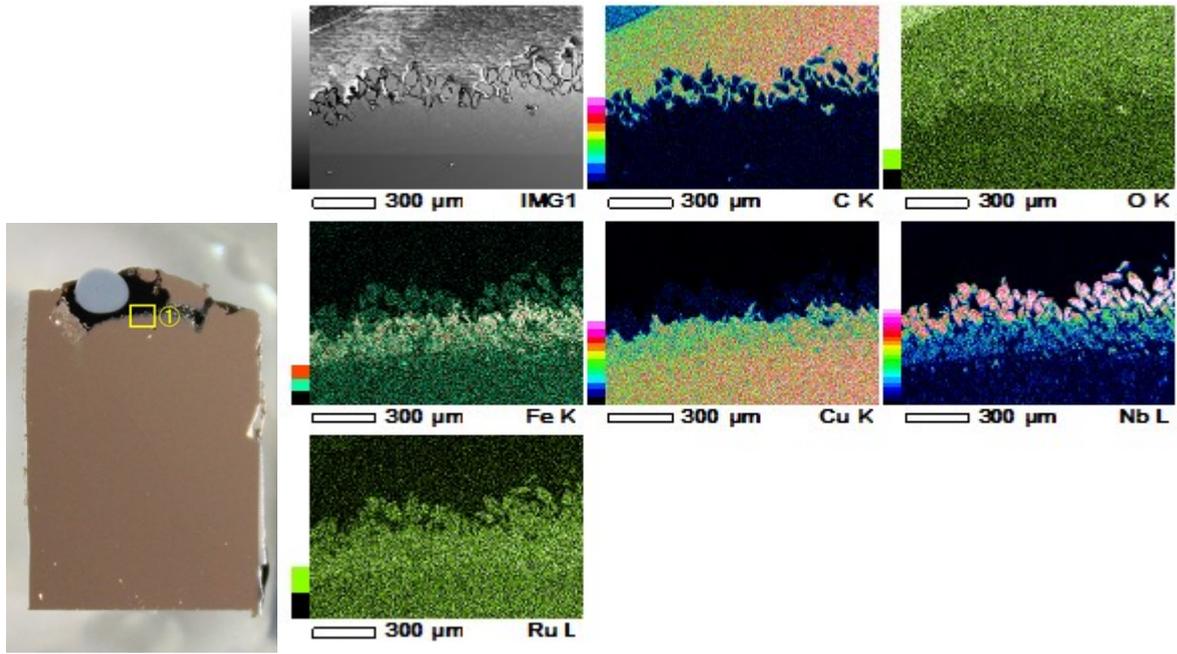


図 3.3-6 Cu-(Ru, Nb, Fe)試料の加熱溶融後の元素分析結果 (試料頂部)

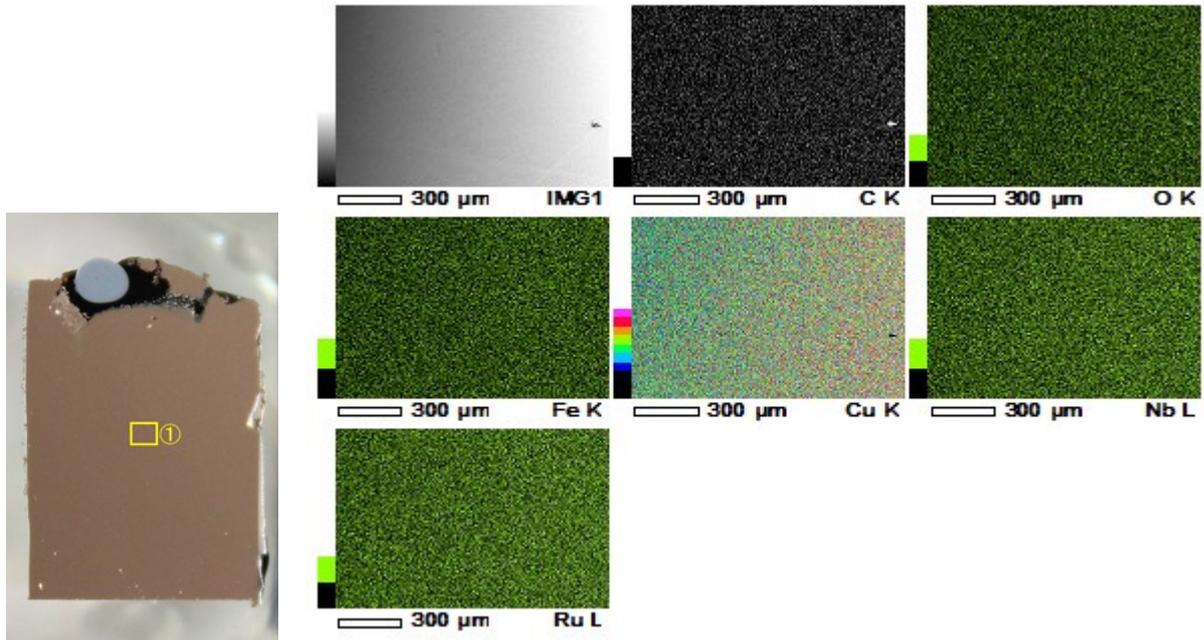
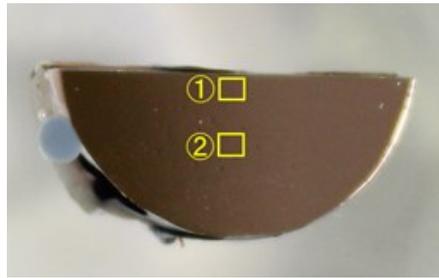
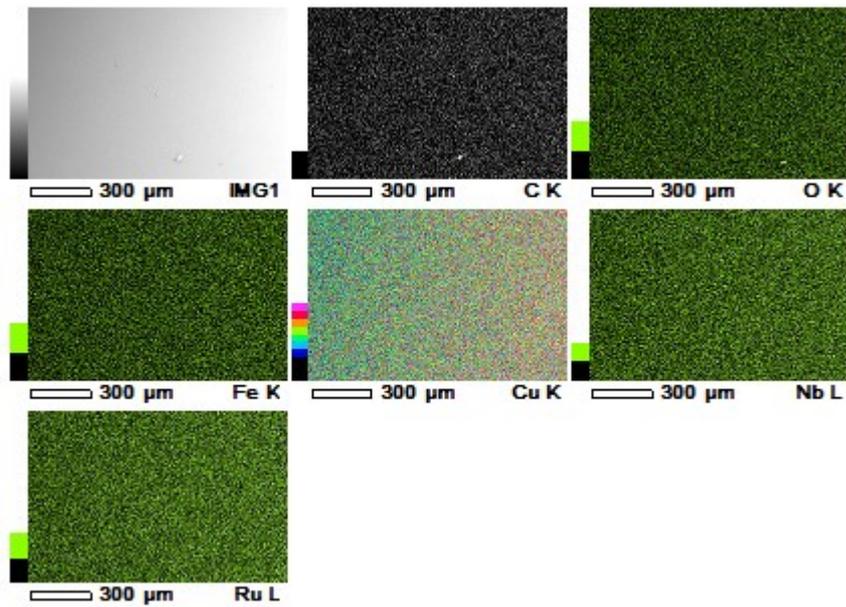


図 3.3-7 Cu-(Ru, Nb, Fe)試料の加熱溶融後の元素分析結果 (試料内部1)



上部横断面



①部分の元素分析結果

図 3. 3-8 Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の加熱溶解後の元素分析結果 (試料内部 2)

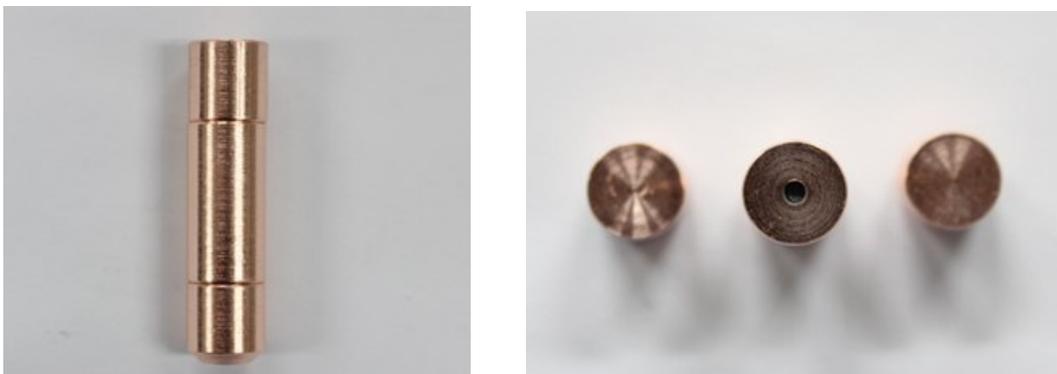
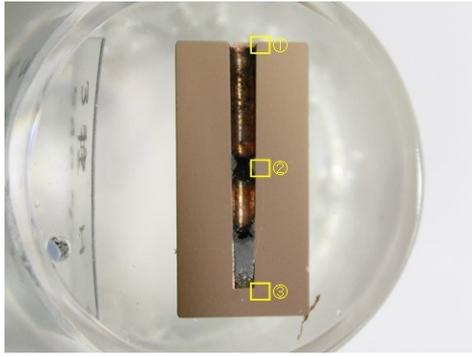
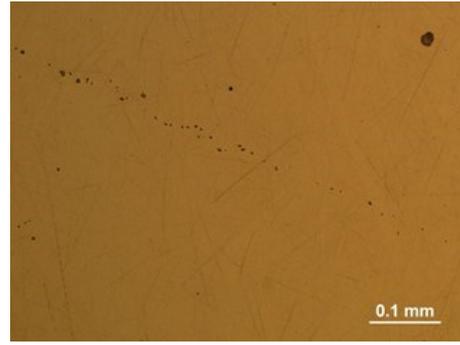


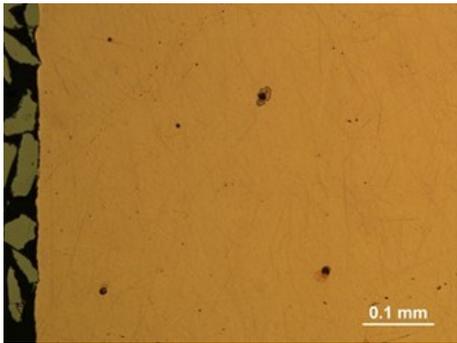
図 3. 3-9 Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の高温保持試験後の外観



縦断面



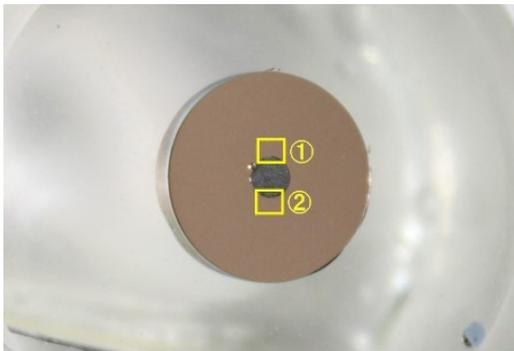
①部分の拡大



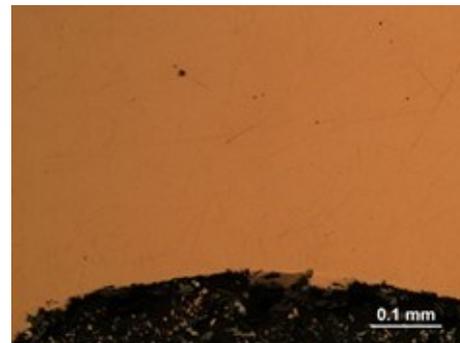
②部分の拡大



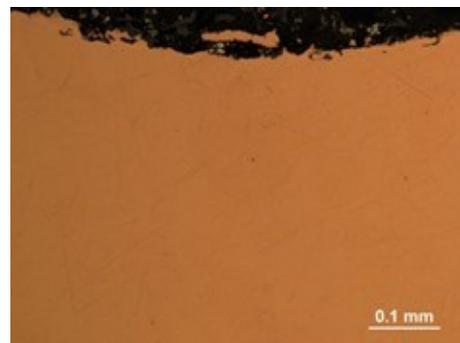
③部分の拡大



横断面

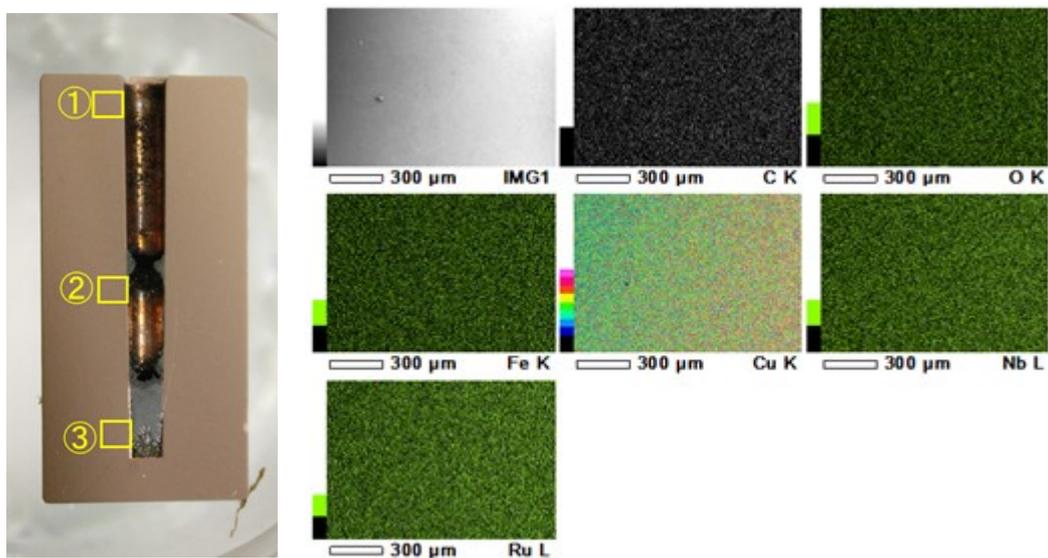


①部分の拡大



②部分の拡大

図 3.3-10 Cu-(Ru, Nb, Fe) 試料の高温保持試験後の断面

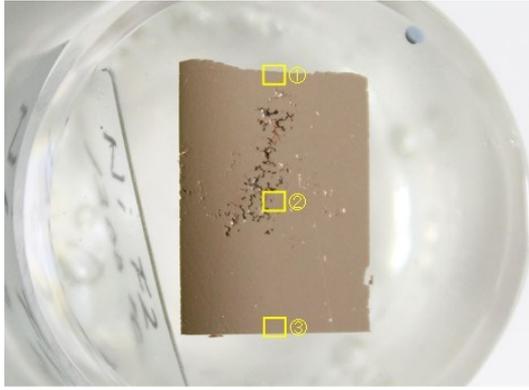


②部分の元素分析結果

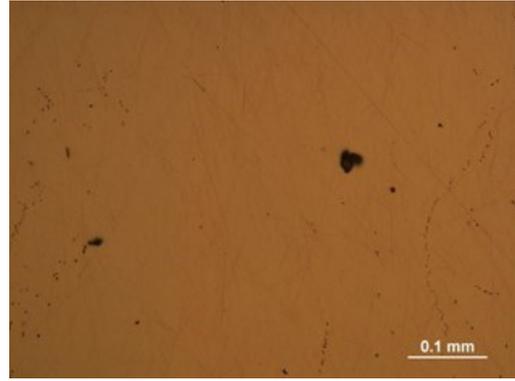
図 3.3-11 Cu-(Ru, Nb, Fe)試料の高温保持試験後の元素分析結果



図 3.3-12 Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の外観



縦断面（試料上部）



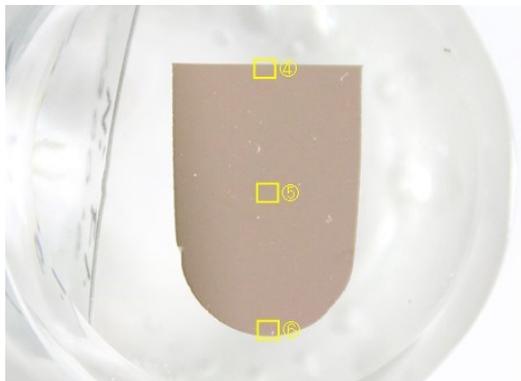
①部分の拡大



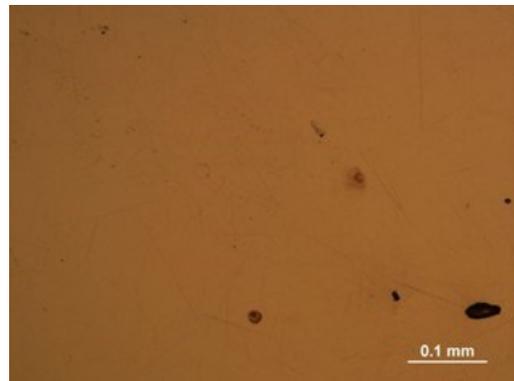
②部分の拡大



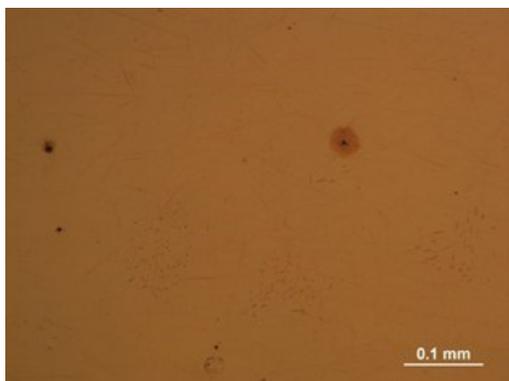
③部分の拡大



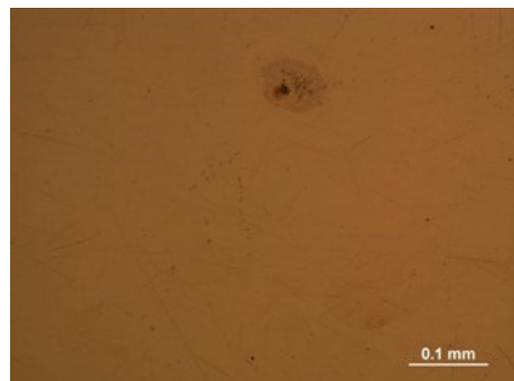
縦断面（試料下部）



①部分の拡大

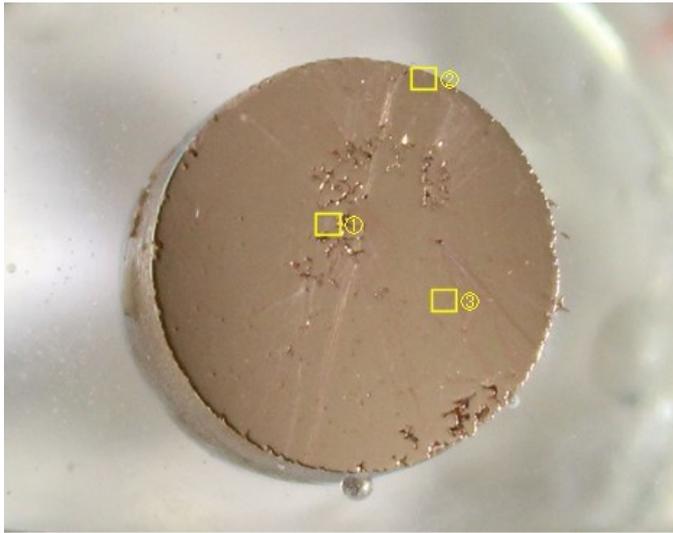


②部分の拡大



③部分の拡大

図 3. 3-13 Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の断面（縦断面）



横断面



①部分の拡大

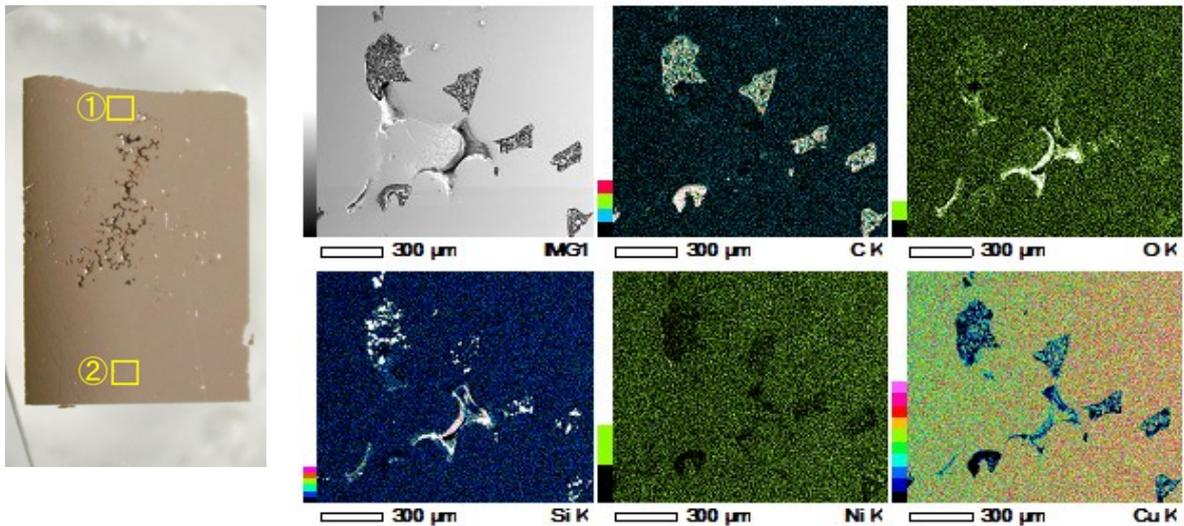


②部分の拡大



③部分の拡大

図 3.3-14 Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の断面（横断面）



①部分の元素分析結果

図 3.3-15 Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の元素分析結果（試料上部）

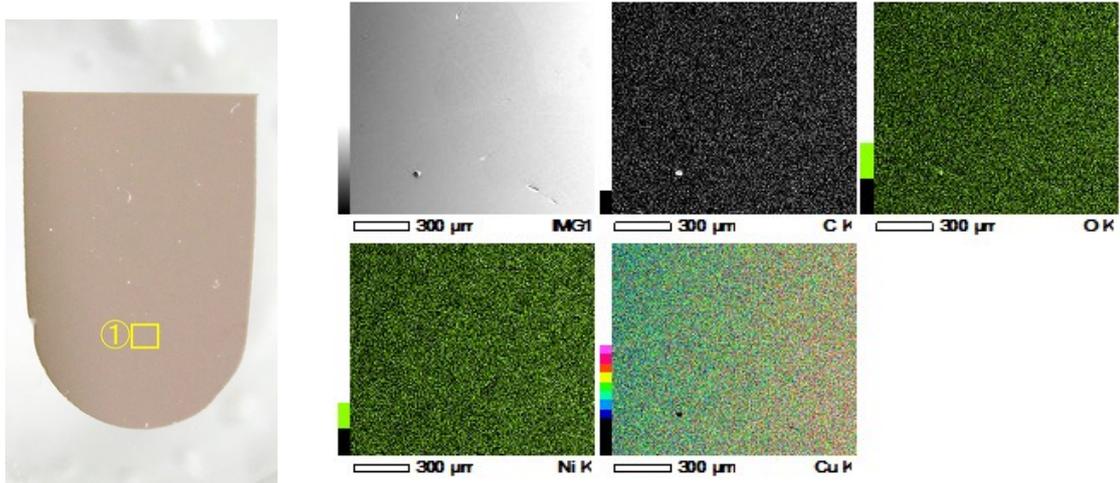
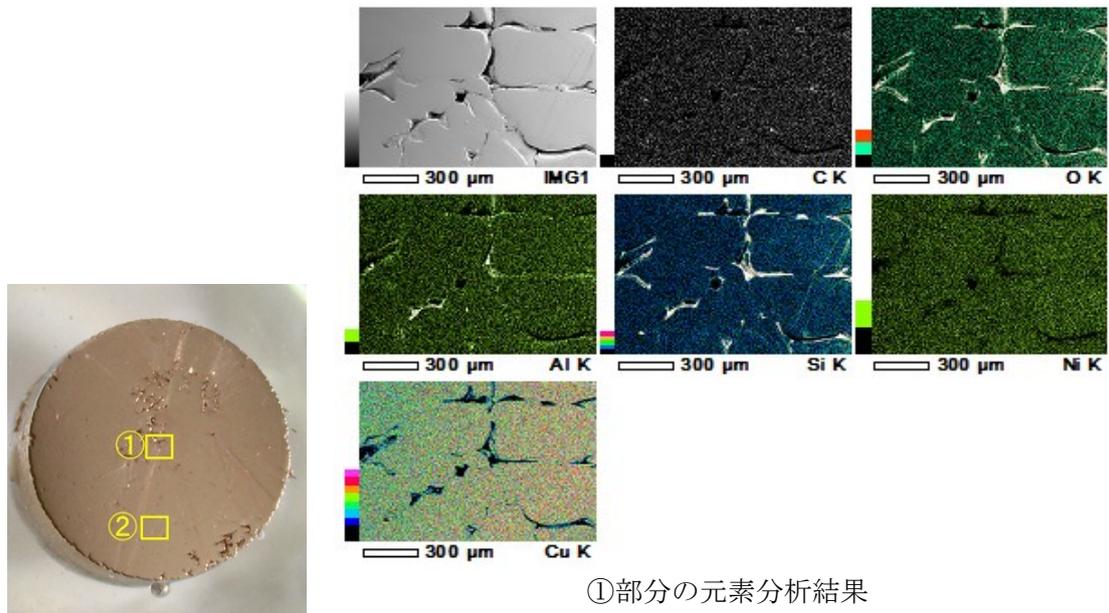


図 3.3-16 Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の元素分析結果（試料下部）



①部分の元素分析結果

図 3.3-17 Cu-Ni 試料の加熱溶融試験後の元素分析結果（試料中央部）

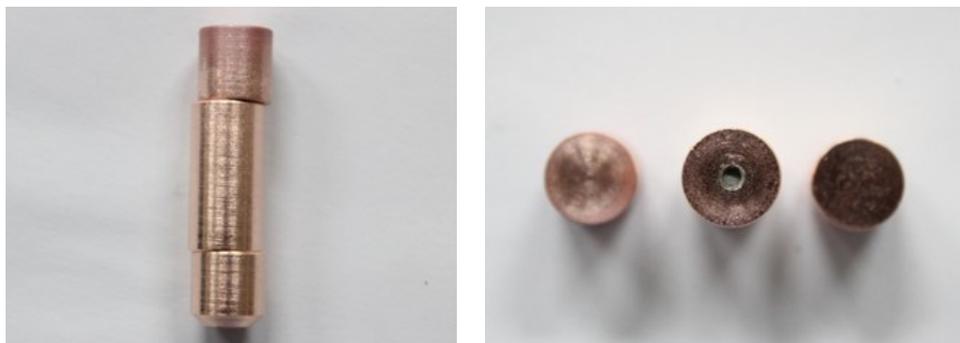
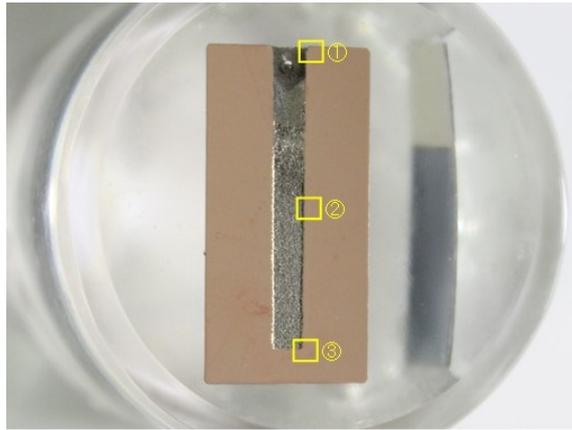
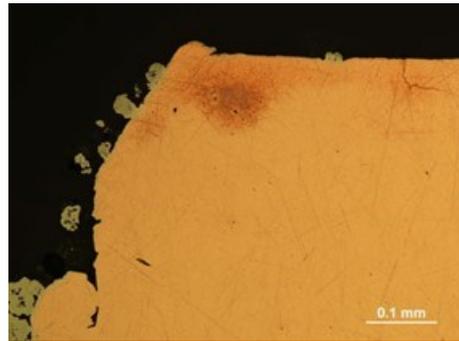


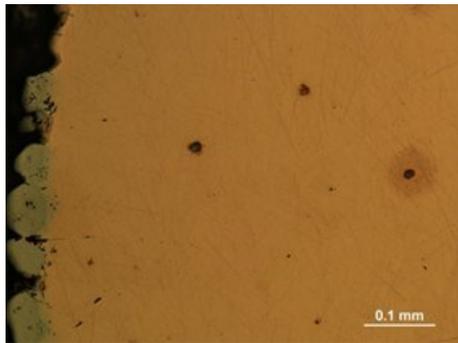
図 3.3-18 Cu-Ni 試料の高温保持試験後の外観



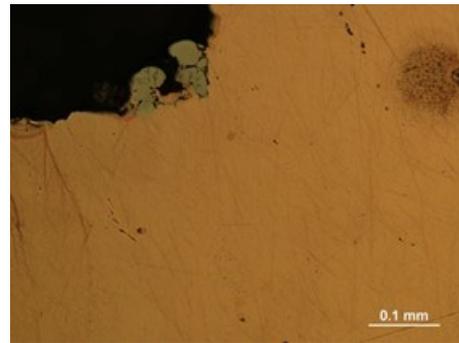
縦断面



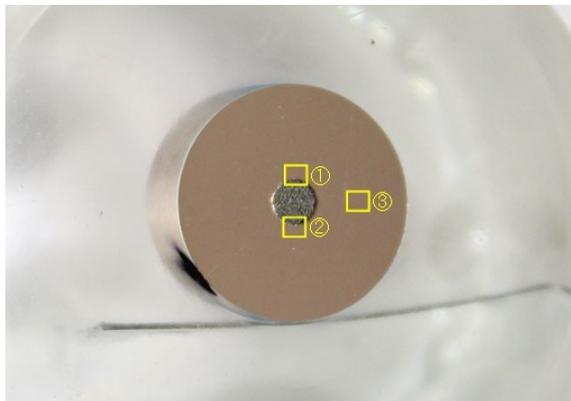
①部分の拡大



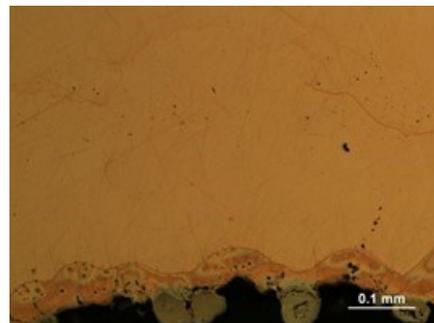
②部分の拡大



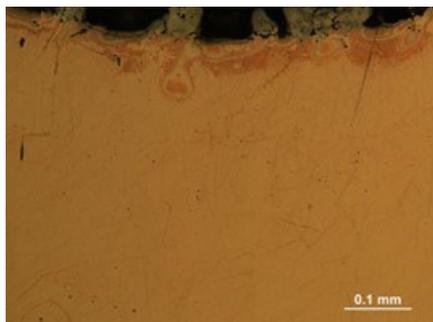
③部分の拡大



横断面



①部分の拡大

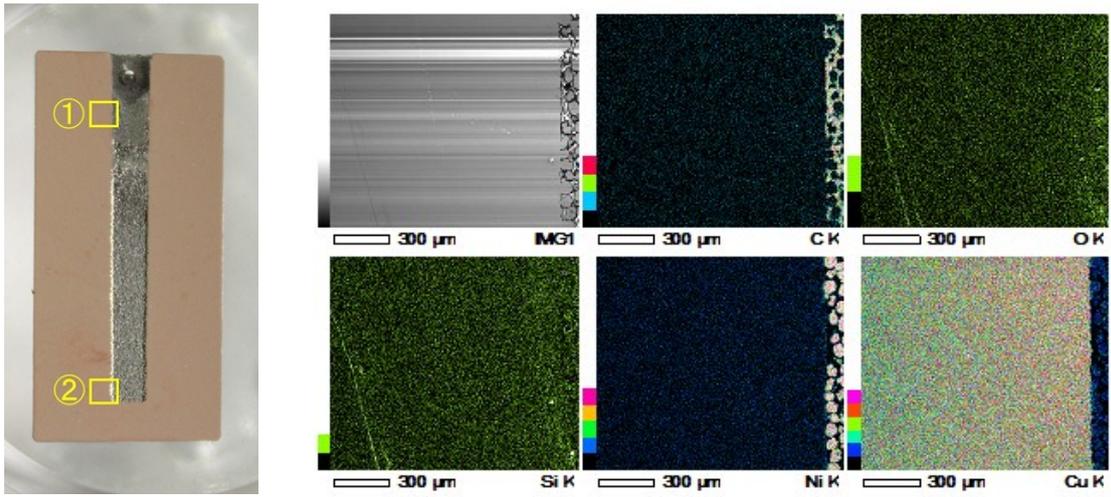


②部分の拡大



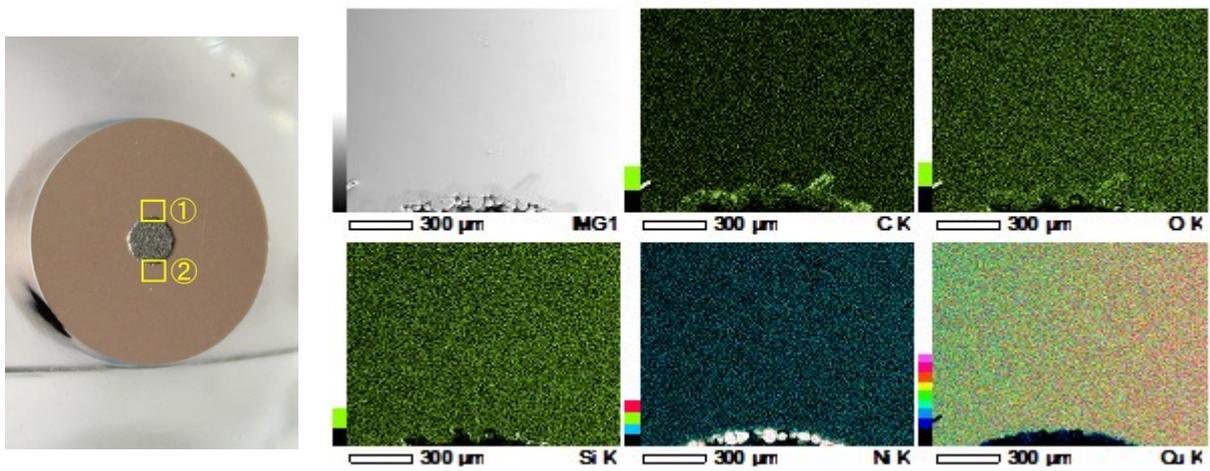
③部分の拡大

図 3. 3-19 Cu-Ni 試料の高温保持試験後の断面



①部分の元素分析結果

図 3.3-20 Cu-Ni 試料の高温保持試験後の元素分析結果（縦断面）

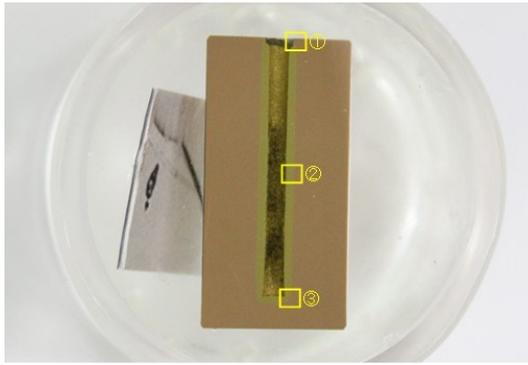


①部分の元素分析結果

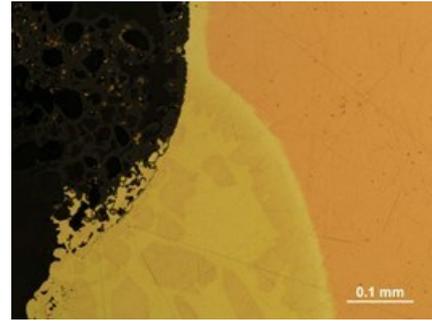
図 3.3-21 Cu-Ni 試料の高温保持試験後の元素分析結果（横断面）



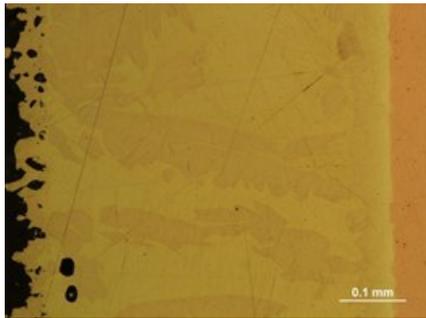
図 3.3-22 Cu-Zn 試料の加熱溶融試験後の外観



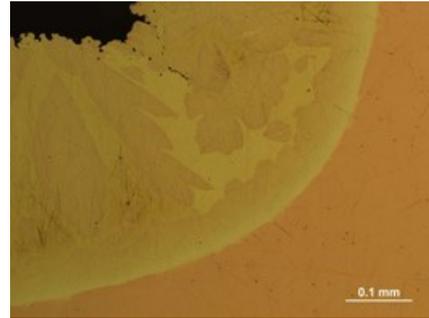
縦断面



①部分の拡大

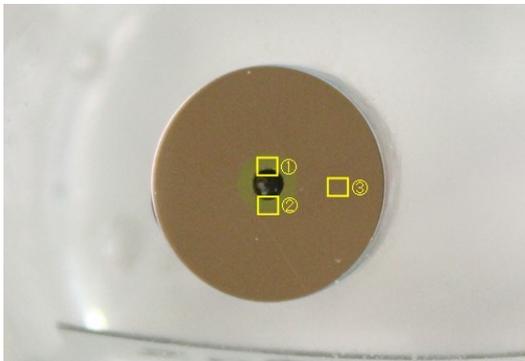


②部分の拡大

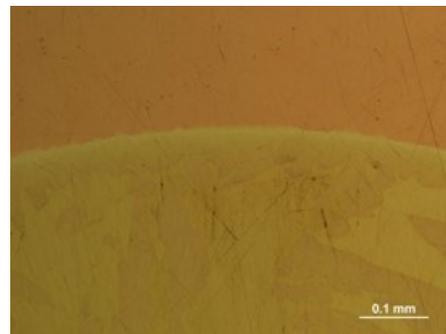


③部分の拡大

図 3.3-23 Cu-Zn 試料の加熱溶融試験後の断面（縦断面）



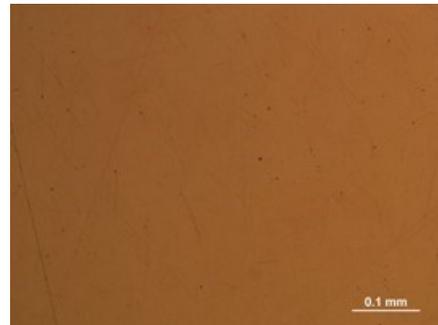
横断面



①部分の拡大



②部分の拡大



③部分の拡大

図 3.3-24 Cu-Zn 試料の加熱溶融試験後の断面（横断面）

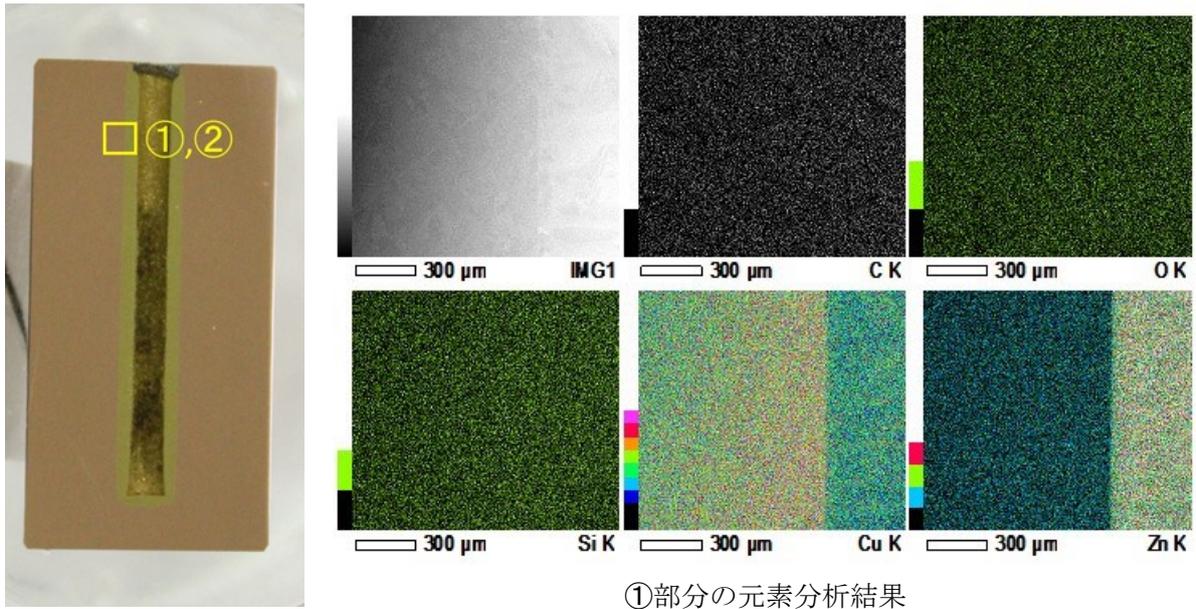


図 3. 3-25 Cu-Zn 試料の加熱溶融試験後の元素分析結果

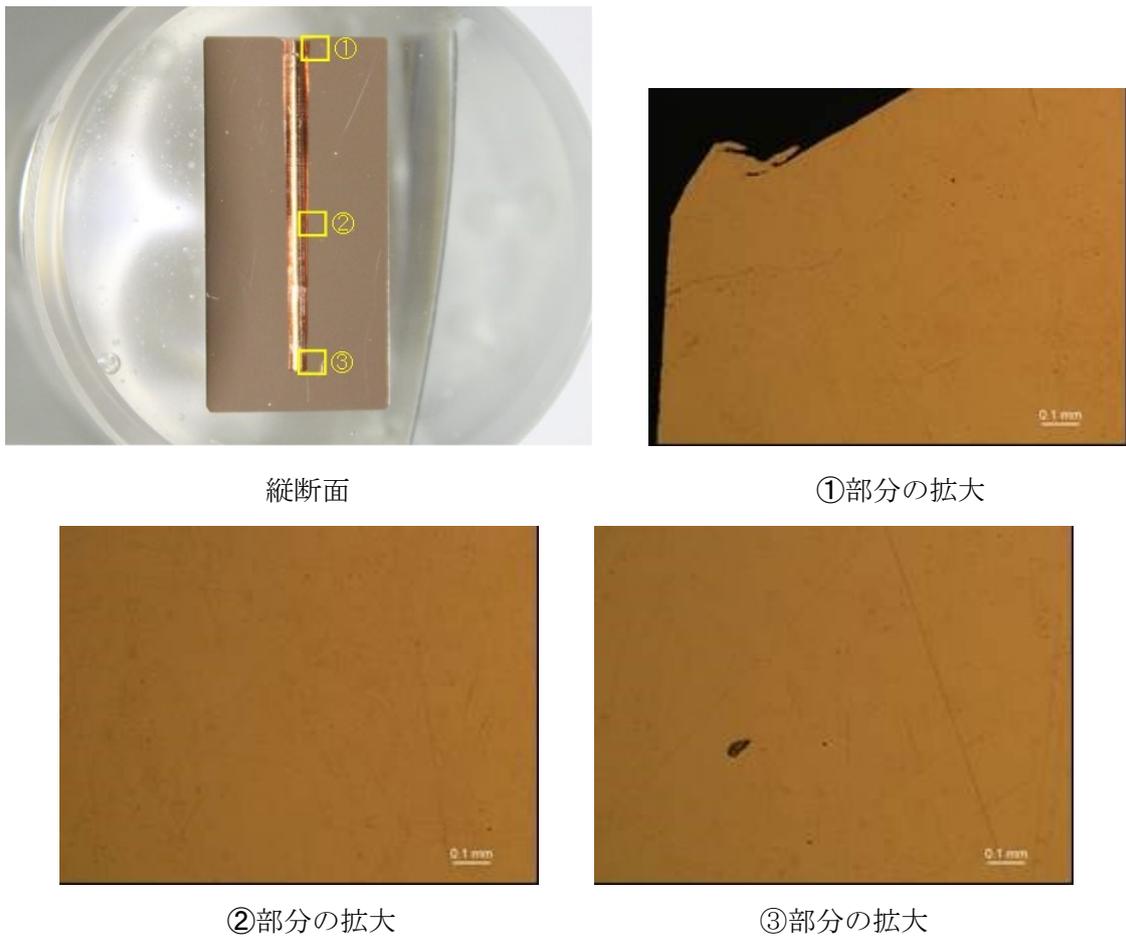
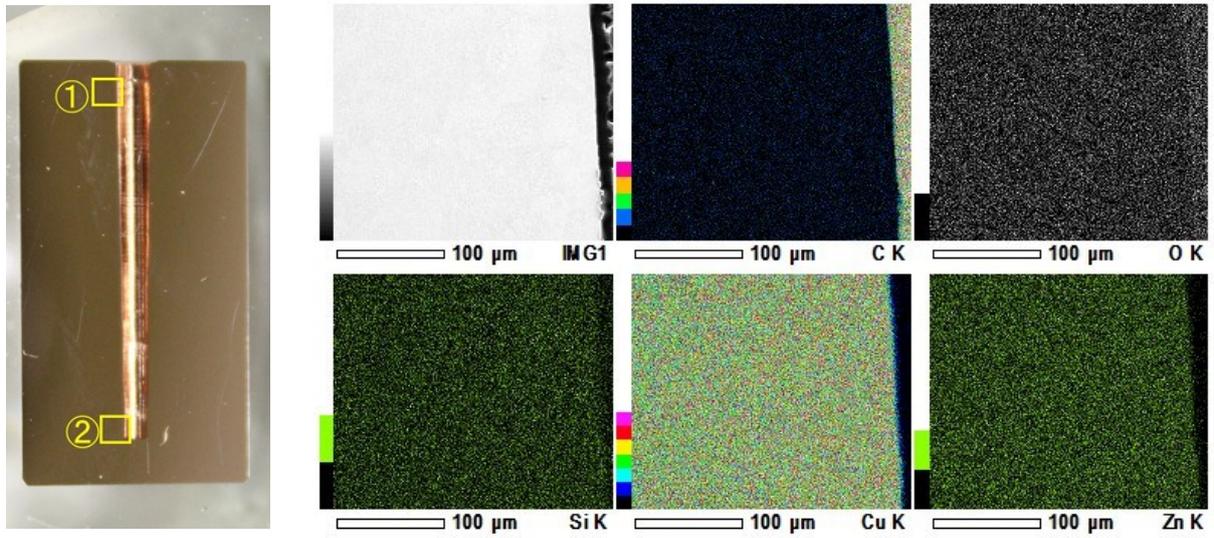


図 3. 3-26 Cu-Zn 試料の高温保持試験後の断面



①部分の元素分析結果

図 3. 3-27 Cu-Zn 試料の高温保持試験後の元素分析結果

3.4 研究推進

本業務を円滑かつ適切に遂行することを目的に再委託先である東北大学並びに日本原子力研究開発機構等と8回の全体会合(5月10日、6月11日、7月30日、9月26日、10月25日、12月4日、1月17日、3月12日)を開催した。この会合を通して相互の進捗状況と課題を共有化し、事業の進捗管理を実施した。各会合の議事を(1)に示すとともに議題を示した。

一方で、会合だけでは把握しきれない課題解決のため、炉心関連の個別打合せや、必要に応じて電子メールを使用したコミュニケーションにより課題解決を図った。

最後に本年度は本課題の最終年度にあたるため、再委託先と東京都市大間で議論を行い、本研究期間を通しての成果を取りまとめた成果報告書(最終年度版)としてまとめた。

また平成30年度に2回開催した研究会(8月28日、9月21日)では、専門家(九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門の守田幸路教授、東京工業大学の関本博名誉教授)を招き、これまでの検討結果及び今後の検討方針について意見交換を行い、助言を得た。コンパクト化反応度のさらなる低減のための炉心形状の新しいアイデアについても紹介し、助言を得た。(2)に各研究会の議事を示すとともに議題を示した。

これまでの成果を含め本研究と関連する新しい概念の炉心について、日本原子力学会「2018年秋の大会」及び「2019年春の年会」並びにICONE2018(International Conference on Nuclear Engineering)及びICANSE2018(International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering)の国際会議で発表し、固有安全高速炉に係る本研究開発を引き続き精力的に進めていることを国内外に示すことができた。発表のタイトル等を(3)(4)に示す。今後「2019年秋の大会」には、これまでの研究の成果を、東京都市大学、東北大学、日本原子力研究開発機構でシリーズ発表を行う予定である。

本研究の内、炉心形状の工夫による再臨界回避については、博士後期課程社会人学生のテーマとして研究を行い、「炉心崩壊事故時の再臨界を回避する高速スペクトル炉心概念に関する研究」と題する博士論文としてまとめ、2019年3月に博士(工学)の学位記が授与された。またその成果はEnergy Procedia Volume131(2017)に掲載され、またAnnals of Nuclear Energy 127(2019)に投稿した論文は本年5月に発行予定である。(5)に投稿論文のタイトル等を示す。

(1) 各会合の議事

第1回会合

日時：2018年5月10日

場所：東京都市大学世田谷キャンパス 10号館 3階 多用室

出席者：東北大 若林、JAEA 舘、東芝エネルギーシステムズ(株) 横山、坪井、原
都市大 高木、矢野

議題：平成30年度実施内容について

第2回会合

日時：2018年6月11日

場所：東京都市大学世田谷キャンパス 10号館 3階 多用室

出席者：東北大 若林、JAEA 館、東芝エネルギーシステムズ（株）横山、坪井、原
都市大 高木、矢野

議題：

- ① 軸芯炉心仕様の設定に関するサーベイ計算について
- ② 円柱型炉心（JSFR）の基本仕様について

第3回会合

日時：2018年7月30日

場所：東京都市大学世田谷キャンパス 10号館 3階 多用室

出席者：東北大 若林、JAEA 館、東芝エネルギーシステムズ（株）横山、坪井、原
都市大 高木、矢野

議題：

- ① 上下凸型基準炉心へ固定吸収体を設置した場合のコンパクション反応度について
- ② 軸芯炉心仕様の設定に関するサーベイ計算について
- ③ JAEAにて実施予定の試験の詳細（試験方法、試験条件）について
- ④ 原子力学会 2018 秋の大会の発表予稿（径ブランケット下部削除型炉心）及び ICONE26 の発表について

第4回会合

日時：2018年9月26日

場所：東京都市大学世田谷キャンパス 10号館 3階 多用室

出席者：東北大 若林、JAEA 館、東芝エネルギーシステムズ（株）横山、坪井
都市大 高木、矢野

議題：

- ① 軸芯炉心仕様の設定に関するサーベイ計算について
- ② 外側炉心燃料落下一下部ブランケット間のプレナム部の溶融についての検討結果
- ③ 現軸芯燃料仕様における課題及び模擬軸芯燃料溶融評価試験（中性子吸収体分散挙動評価試験）について

第5回会合

日時：2018年10月25日

場所：東京都市大学世田谷キャンパス 10号館 3階 多用室

出席者：東北大 若林、JAEA 館、東芝エネルギーシステムズ（株）横山、坪井
都市大 高木、千歳、矢野

議題：

- ① 円柱型炉心（FS ベース 80 cm高さ、2領域炉心、軸芯無し）の結果について
- ② 上下凸型炉心（軸芯無し/有）の炉心特性の比較について
- ③ 内側炉心下部吸収体設置型円筒炉心について

第6回会合

日時：2018年12月4日

場所：東京都市大学世田谷キャンパス 10号館 3階 多用室

出席者：東北大 若林、JAEA 舘、東芝エネルギーシステムズ(株) 横山、坪井
都市大 高木、千歳、矢野

議題：

- ① 円柱型炉心の出力分布及び流量配分検討結果について
- ② 上下凸型炉心(軸芯有) ケース3-2の炉心特性評価結果について
- ③ 円柱型炉心及び上下凸型炉心の炉心特性比較について

第7回会合

日時：2019年1月17日

場所：東京都市大学世田谷キャンパス 10号館 3階 多用室

出席者：東北大 若林、東芝エネルギーシステムズ(株) 坪井、横山
都市大 高木、千歳、矢野

議題：

- ① 円柱型炉心(軸芯あり)の主要特性評価結果について
- ② 円柱型炉心(軸芯あり)の出力分布及び流量配分検討結果について
- ③ 軸芯燃料ペレットの吸収体(Gd_2O_3)径の違いによる自己遮蔽効果について

第8回会合

日時：2019年3月12日

場所：日本原子力研究開発機構 大洗研究所 交流棟

出席者：東北大 若林、JAEA 舘、東芝エネルギーシステムズ(株) 坪井
都市大 高木、矢野

議題：

- ① 軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討結果について
- ② 報告書ドラフト版について

(2) 研究会の議事

第1回研究会

講師：九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門 守田幸路教授

日時：2018年8月28日 14:00~17:00

場所：東京都市大学世田谷キャンパス 10号館 3階 多用室

出席者：鈴木徹、高木直行、千歳敬子、矢野真理(都市大)

若林利男(東北大)、坪井靖、横山次男(東芝エネルギーシステムズ(株))

議題：

- ① これまでの研究成果についての紹介
- ② ICONE2018での発表内容についての紹介

発表タイトル：

Geometry Survey on the Convex Shaped Core for Re-criticality Prevention against CDA in Sodium-cooled Fast Reactor

③ 今後の研究方針について

コンパクト化反応度のさらなる低減のため、下記の炉心形状のアイデアについて紹介し議論した。

- 1) 上下凸型炉心の外側炉心下部に固定吸収体を設置することにより、コンパクト化時の大きな負の反応度挿入を狙った炉心。
付録2に示す。
- 2) JSFR 円筒炉心の径ブランケット下部を削除し短尺化することでコンパクト化時の燃料プールの広がり、また扁平化される事で、大きな負の反応度挿入を狙った炉心。
- 3) 内側炉心 (IC) の下部を削除し、IC の下部に固定吸収体を設置する炉心。

議論：

研究全般についてのコメントや助言等を下記に示す。

- ・凸型は分かりやすい議論である。
- ・径ブランケット削除炉心はラップ管、被覆管の熱容量に比べて、プールの熱量が大きいので十分これを溶かすことができる、という部分は手計算であたっておくと良い。プール温度低下がこの程度、ということを示せば良い。
⇒ 本議論を受け、外側炉心燃料下部と下部ブランケット間のプレナム部の熔融について検討し、燃料の固化が生じないことを確認した。
付録3に示す。
- ・内側炉心の下部を削除し、吸収体の下で待っているというアイデアは新しい概念である。IVR シナリオをサポートできる、あるいは FAIDUS が機能しなかった場合の最後の砦になる等、既存の技術/設計に親和性のあるものであれば、違和感なく受け入れられると思う。

第2回研究会

講師：東京工業大学 関本博名誉教授

日時：2018年9月21日 9:00-12:00

場所：東京都市大学世田谷キャンパス 10号館 高木研究室

出席者：高木直行、千歳敬子、矢野真理（都市大）

議題：

- ① 平成29年度までの研究成果
- ② 平成30年度進捗状況
- ③ ICONE2018での発表内容についての紹介及び、投稿準備中論文の内容

発表タイトル：

Geometry Survey on the Convex Shaped Core for Re-criticality Prevention against CDA in Sodium-cooled Fast Reactor

④ 今後の研究方針について

コンパクト化反応度のさらなる低減のための炉心形状のアイデアについて紹介し議論を行った。

付録4に示す。

議論：

研究全般についてのコメント、助言を下記に示す。

- ・研究の方向性はユニークで、今回報告した結果の背景に多くの解析が積み重ねられたことが伝わり、検討内容もよく理解できた。
- ・UAB 上にプールの形成を想定している部分で、少し違和感を覚える。他の人もそのような疑問を持つと想定されるので、今回の検討の対象外であるが、これまでに実施された SIMMER 等の解析を踏まえていることを説明すると良いと思う。
- ・固定吸収体を下部に配置するアイデアは良い。設計も難しくないと思う。

(3) 日本原子力学会発表 2 件

①2018 年秋の大会（場所：岡山大学）

III. 核分裂工学 》 301-2 炉設計と炉型戦略, 核変換技術

[3L10-13]高速炉設計

2018 年 9 月 7 日 14:45 ~ 15:50 D 会場

座長：大泉昭人 (JAEA)

[3L11]再臨界防止固有安全高速炉の炉心形状に関する研究

持丸 貴則¹、高木 直行¹、千歳 敬子¹ (1. 東京都市大学)

②2019 年春の年会（場所：茨城大学）

III. 核分裂工学 》 301-2 炉設計と炉型戦略, 核変換技術

[3K04-07]高速炉

2019 年 3 月 20 日 10:50 ~ 12:00 K 会場

座長：相沢 直人 (東北大)

[3L11]再臨界防止固有安全高速炉の炉心形状に関する研究 (その 2)

千歳 敬子¹、持丸 貴則¹、高木 直行¹ (1. 東京都市大学)

(4) 国際会議発表 2 件

① K.Chitose, Y.Tachi, T.Wakabayashi and N.Takaki : “Geometry Survey on the Convex Shaped Core for Recriticality Prevention against CDA in Sodium-cooled Fast Reactor”, Int. Conf.on Nuclear Engineering (ICONE2018), 22-26 Jul. 2018, London, England (2018)

② T.Mochimaru, K.Chitose and N.Takaki : “Study on the core shape of intrinsic safe fast reactor preventing re-criticality”, Int. Conf.on Advances in Nuclear Science and Engineering (ICANSE2018), 29-30 Nov.2018, Bandung, Indonesia

(5) 投稿論文 2 件

- ① K.Chitose,H.Mochizuki and N.Takaki: “Thermal-hydraulic Feasibility Study of a Convex shaped Fast Reactor Core “, Energy Procedia, Vol.131, pp. 86-93(2017)
- ② K.Chitose and N.Takaki: “Convex shaped FBR core with graded size pins to prevent re-criticality during Core Disruptive Accident “
雑誌名 : Annals of Nuclear Energy 127 (2019) 発行予定 : 2019年5月

4. 結言

4 ヶ年計画の最終年度として、平成 30 年度は、従来炉心との比較及び総合評価、軸芯燃料利用効果の検討、軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討を実施した。

以下に平成 30 年度の主要な成果をまとめた。

(1) 従来炉心との比較及び総合評価

従来炉心（円柱型炉心）との比較においては、上下凸型炉心はピン径調整型の採用により内側炉心燃料の燃料インベントリを円柱型炉心より低下させることができ、円柱型炉心では正（約 11.5 \$）となるコンパクション反応度は負（-1.9 \$）となり、かつ圧損は円柱型炉心並みの約 0.2 Mpa とすることができることが明らかになった。一方、安全性に関わるナトリウムボイド反応度は上下凸型炉心の外側炉心燃料上下のガスプレナムからの中性子リークにより円柱型炉心より 0.8 % $\Delta \rho$ も低下する。またドップラー係数も負側に大きくなり安全性が高くなることが明らかになった。但し、燃料インベントリが低下するため、燃焼反応度は約 7 % $\Delta \rho$ /年と大きくなり、反応度収支の観点からサイクル長の短縮が必要である。

軸芯燃料装荷の効果については、上下凸型炉心と円柱型炉心に対して比較検討した結果、以下のことが分かった。

上下凸型炉心に軸芯径 2 mm で Gd_2O_3 を装荷した軸芯燃料を外側炉心に設置するとコンパクション反応度は -6.2 \$ となり軸芯無しに比べさらに低下する。内側炉心の出力が上昇することから、内側炉心の流量が増加し、圧損が原型炉より若干低い 0.36 MPa となる。また、ドップラー係数は、上下凸型への軸芯燃料の導入により低下し、ナトリウムボイド反応度も低下するが、それらの数値の差は小さい。

円柱型炉心に軸芯吸収体（軸芯径 1 mm, Gd_2O_3 ）を導入した場合には、軸芯吸収体を外側炉心に装荷することでコンパクション反応度を負（-5 \$）とすることができた。この場合の出力分布は若干変動するが、軸芯無し炉心と炉心圧損は同等であることが分かった。その他の安全特性に係るドップラー係数、ナトリウムボイド反応度の変化は小さいことが分かった。

(2) 軸芯燃料利用効果の検討（再委託先：東北大学）

凸型炉心の安全性評価では、従来炉心と凸型炉心に軸芯燃料を利用した場合の燃料溶融反応度、ナトリウムボイド反応度、ドップラー係数を解析し、比較検討してその効果を明らかにするとともに、前記(1)の凸型炉心の総合評価に反映した。解析には、連続エネルギーモンテカルロコード MVP-II を、核データライブラリーは JENDL-4.0 を用いた。

軸芯燃料は、上下凸型炉心と円柱型炉心の外側炉心に装荷し解析評価した結果、前記の通りコンパクション反応度は上下凸型炉心ではより負となり、円柱型炉心ではコンパクション反応度は正から負とすることができることが分かった。

ドップラー反応度とボイド反応度も、前記の通り軸芯有りと無しで円柱型炉心、上下凸型炉心とも大きな差はなく安全性は両者大きな差がないことが明らかになった。

燃焼反応度は、上下凸型炉心は軸芯燃料がある場合が若干大きく、サイクル期間の縮小等の対策が必要であるが、円柱型炉心では大きな差は生じていなかった。

以上より軸芯燃料は、燃料溶融時のコンパクション反応度を負側にすることができ、高速炉の安全性の向上におおいに寄与できることを示した。

(3) 軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討（再委託先：日本原子力研究開発機構）

再臨界防止用軸芯燃料の開発における軸芯燃料溶融時の吸収体分散挙動の検討では、平成29年度までの3ヶ年の業務により得られた知見に基づき、模擬軸芯燃料ペレットを試作した。試作した模擬軸芯燃料を加熱溶融させることにより軸芯部に装荷した中性子吸収体の模擬物質の分散挙動を評価し、再臨界防止用軸芯燃料ペレットとしての機能の妥当性を検証した。模擬軸芯燃料ペレットの試作とそれを用いた中性子吸収体の分散挙動の評価結果から、燃料部と固溶性のない中性子吸収体の場合には密度差が燃料溶融時の中性子吸収体の分散駆動力となることを確認した。一方、燃料部と固溶性のある中性子吸収体の場合には加熱温度に応じた反応相の形成により溶融燃料内への分散が期待できるが、通常運転時において中性子吸収体の燃料部への拡散を防止することが重要であることが明らかとなった。これらのことから中性子吸収体として被覆粒子を想定した軸芯燃料ペレットの仕様は燃料溶融時の再臨界防止機能を有することを確認した。

(4) 主要成果のまとめ((1)～(3))

従来炉心（円柱型炉心）との比較においては、軸芯無しの場合、上下凸型炉心はピン径調整型の採用により内側炉心燃料の燃料インベントリを円柱型炉心より低下させることができ、円柱型炉心では正となるコンパクション反応度は負となり、かつ圧損は円柱型炉心並みとすることができることが明らかになった。但し、燃料インベントリが低下するため、燃焼反応度は大きくなり、反応度収支の観点からサイクル長の短縮が必要である。

また凸型及び円柱型炉心の軸芯に配置する中性子吸収体については、軸芯燃料として最適なものを開発するため、文献調査による材料選定や模擬物質による混合・分散性の試験評価を行い、それらの結果から、MOX燃料溶融時に固相を維持できるW被覆Gd₂O₃粒子が最適であることを明らかにした。その粒径は凝集を防ぐために100μm程度、最表面をWC化し、W被覆の厚みを10μm程度に調整することでMOX燃料よりも密度を大きく設計することで、通常時は軸芯部で健全性を維持し、燃料溶融時には溶融MOX燃料内に分散して再臨界を防止する機能を発揮できることを明らかにした。

この知見に基づき、上下凸型炉心及び円柱型炉心の外側炉心にGd₂O₃粒子をMOX燃料ペレットの中心孔に充填した仕様としたこれらの軸芯燃料炉心は、燃料溶融時にコンパクション反応度を負側にすることができ、高速炉の安全性の向上に寄与できることを示すとともに、これらの炉心及び安全特性評価結果を総合評価に反映した。

本研究により、凸型という炉心形状のみの工夫により、燃料溶融時のコンパクション反応度を負にできる事が明らかになった。また軸芯燃料の導入により、円柱型炉心及び上下凸型炉心とも、燃料溶融時のコンパクション反応度は更に大幅に低下し負となる。燃焼反応度については円柱型炉心では軸芯有りとし、ほぼ同等となった。上下凸型炉心では、軸芯導入により、燃焼反応度は更に大きくなるため、軸芯無しの場合と同様にサイクル長の短縮等の対策が必要である。その他の安全特性に係るドップラー係数及びナトリウムボイド反応度は、軸芯有りとし、大きな差はないことが明らかになった。

(5) 研究推進

上記の研究開発と並行して研究推進を実施した。研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、広く意見を聴きながら研究を進めるため研究会を開催した。プロジェクトの円滑な進行を実現するために定期的に会合を開き、進捗状況の確認と問題点の議論を行った。

また2回開催した研究会では、専門家(九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門の守田幸路教授、東京工業大学の関本博名誉教授)を招き、これまでの検討結果及び今後の検討方針について意見交換を行い、またコンパクション反応度のさらなる低減のための炉心形状の新しいアイデアについても紹介し、助言を得た。

これまでの成果を含め本研究と関連する新しい概念の炉心について、日本原子力学会「2018年秋の大会」及び「2019年春の年会」並びに ICONE2018

(International Conference on Nuclear Engineering) 及び ICANSE2018

(International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering) の国際会議で発表し、固有安全高速炉に係る本研究開発を引き続き精力的に進めていることを国内外に示すことができた。今後「2019年秋の大会」には、これまでの研究成果を、東京都市大学、東北大学、日本原子力研究開発機構でシリーズ発表を行う予定である。

本研究の内、炉心形状の工夫による再臨界回避については、博士後期課程社会人学生のテーマとして研究を行い、「炉心崩壊事故時の再臨界を回避する高速スペクトル炉心概念に関する研究」と題する博士論文としてまとめ、2019年3月に博士(工学)の学位記が授与された。その成果はEnergy Procedia Volume131(2017)に掲載され、またAnnals of Nuclear Energy 127(2019)に投稿した論文は本年5月に発行予定である。

以上、4ヵ年計画の最終年度として平成30年度の業務項目を実施し、全ての項目について計画目標を達成した。

付録 1 円柱型炉心と凸型炉心の被覆管内原子数密度とコンパクション時原子数密度

炉心各領域の被覆管内原子数密度とコンパクション時の原子数密度について以下に示す。

①比較検討での選定炉心

付表 1-1 上下凸型炉心（軸芯無し（ケース 3））

付表 1-2 上下凸型炉心（軸芯有り（ケース 3-2））

付表 1-3 円柱型炉心（軸芯無し）

付表 1-4 円柱型炉心（軸芯有り）

②その他サーベイ炉心

付表 1-5 ケース 1 TRU 富化度 24%

付表 1-6 ケース 2 TRU 富化度 35%

付表 1-7 ケース 4 TRU 富化度 30% 外側炉心のピン径 8mm のケース

付表 1-1 上下凸型炉心（軸芯無し（ケース 3））

核種	健全時 IC1	健全時 IC2	健全時 OIC1	健全時 OC2	コンパクト ション時 アクチニ ド	コンパクト ション時 構造材核 種	コンパクト ション時 原子数密 度
	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm		/barn・cm
U0235	8.71E-06	1.24E-05	1.71E-05	2.09E-05	1.40E-05	CR050	3.15E-04
U0236	1.01E-06	1.43E-06	1.98E-06	2.42E-06	1.62E-06	CR052	6.08E-03
U0238	4.20E-03	5.97E-03	8.25E-03	1.01E-02	6.75E-03	CR053	6.90E-04
PU238	2.22E-05	3.16E-05	4.36E-05	5.33E-05	3.57E-05	CR054	1.72E-04
PU239	9.41E-04	1.34E-03	1.85E-03	2.26E-03	1.51E-03	FE054	1.56E-03
PU240	5.98E-04	8.48E-04	1.17E-03	1.43E-03	9.59E-04	FE056	2.44E-02
PU241	8.85E-05	1.26E-04	1.74E-04	2.12E-04	1.42E-04	FE057	5.65E-04
PU242	7.30E-05	1.04E-04	1.43E-04	1.75E-04	1.17E-04	FE058	7.51E-05
NP237	7.76E-06	1.10E-05	1.52E-05	1.86E-05	1.25E-05	NI058	3.48E-03
AM241	3.25E-05	4.61E-05	6.38E-05	7.80E-05	5.22E-05	NI060	1.34E-03
AM242	1.17E-06	1.66E-06	2.30E-06	2.81E-06	1.88E-06	NI061	5.82E-05
AM243	1.94E-05	2.75E-05	3.80E-05	4.65E-05	3.11E-05	NI062	1.86E-04
CM242	1.64E-06	2.33E-06	3.22E-06	3.94E-06	2.63E-06	NI064	4.73E-05
CM243	1.33E-07	1.89E-07	2.62E-07	3.20E-07	2.14E-07	M0092	8.59E-05
CM244	1.91E-05	2.71E-05	3.75E-05	4.58E-05	3.06E-05	M0094	5.35E-05
CM245	1.85E-06	2.63E-06	3.64E-06	4.44E-06	2.97E-06	M0095	9.21E-05
00016	1.19E-02	1.69E-02	2.34E-02	2.86E-02	1.91E-02	M0096	9.65E-05
-	-	-	-	-	-	M0096	5.53E-05
-	-	-	-	-	-	M0097	1.40E-04
-	-	-	-	-	-	M0098	5.57E-05
-	-	-	-	-	-	M0100	4.04E-10
高さ (cm)	158.5	158.5	52	52	38.65		38.65
想定燃料体積比	0.1477	0.2097	0.2901	0.3545	-	-	-
H28 基準被覆管 内径比	0.5760	0.6863	0.8073	0.8925	-	-	-
Keff	1.0411				1.0340（上部キャビティ）		
反応度 (%Δρ)	-0.66						

付表 1-2 上下凸型炉心（軸芯有り（ケース 3-2））

核種	健全時 IC1	健全時 IC2	健全時 OIC1	健全時 OC2	コンパクトシ ョン時アク チニド	コンパクト ション時 構造材核 種	コンパクト ション時 原子数密 度
	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm		/barn・cm
U0235	8.71E-06	1.24E-05	1.50E-05	1.88E-05	1.34E-05	CR050	3.15E-04
U0236	1.01E-06	1.43E-06	1.74E-06	2.18E-06	1.55E-06	CR052	6.08E-03
U0238	4.20E-03	5.97E-03	7.23E-03	9.09E-03	6.47E-03	CR053	6.90E-04
PU238	2.22E-05	3.16E-05	3.82E-05	4.79E-05	3.42E-05	CR054	1.72E-04
PU239	9.41E-04	1.34E-03	1.62E-03	2.03E-03	1.45E-03	FE054	1.56E-03
PU240	5.98E-04	8.48E-04	1.03E-03	1.29E-03	9.20E-04	FE056	2.44E-02
PU241	8.85E-05	1.26E-04	1.53E-04	1.91E-04	1.36E-04	FE057	5.65E-04
PU242	7.30E-05	1.04E-04	1.25E-04	1.57E-04	1.12E-04	FE058	7.51E-05
NP237	7.76E-06	1.10E-05	1.33E-05	1.67E-05	1.20E-05	NI058	3.48E-03
AM241	3.25E-05	4.61E-05	5.59E-05	7.02E-05	5.01E-05	NI060	1.34E-03
AM242	1.17E-06	1.66E-06	2.02E-06	2.53E-06	1.80E-06	NI061	5.82E-05
AM243	1.94E-05	2.75E-05	3.33E-05	4.18E-05	2.98E-05	NI062	1.86E-04
CM242	1.64E-06	2.33E-06	2.82E-06	3.54E-06	2.52E-06	NI064	4.73E-05
CM243	1.33E-07	1.89E-07	2.30E-07	2.88E-07	2.05E-07	M0092	8.59E-05
CM244	1.91E-05	2.71E-05	3.29E-05	4.12E-05	2.93E-05	M0094	5.35E-05
CM245	1.85E-06	2.63E-06	3.19E-06	3.99E-06	2.85E-06	M0095	9.21E-05
00016	1.19E-02	1.69E-02	2.05E-02	2.57E-02	1.83E-02	M0096	9.65E-05
-	-	-	-	-	-	M0096	5.53E-05
-	-	-	-	-	-	M0097	1.40E-04
-	-	-	-	-	-	M0098	5.57E-05
-	-	-	-	-	-	M0100	4.04E-10
高さ(cm)	158.5	158.5	52	52			38.65
想定燃料体 積比	0.1477	0.2097	0.2901	0.3545	-	-	-
H28 基準被覆 管内径比	0.5760	0.6863	0.8073	0.8925	-	-	-
Keff	1.0168				0.9951（上部キャビティ）		
反応度（%Δρ）	-2.1						

軸芯燃料 直径 2mm の空孔に吸収材充填 ペレット径 OC1 5.7mm、OC2 6.31mm を想定

付表 1-3 円柱型炉心（軸芯無し）

核種	健全時 IC	健全時 OIC	コンパクション時アクチニド	コンパクション時構造材核種	コンパクション時原子数密度
	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm		/barn・cm
U0235	3.05E-5	3.33E-5	4.84E-05	CR050	2.28E-04
U0236	3.58E-6	2.45E-6	4.65E-06	CR052	4.41E-03
U0238	1.47E-2	1.42E-2	2.21E-02	CR053	5.00E-04
PU238	4.34E-5	5.46E-5	7.40E-05	CR054	1.25E-04
PU239	1.83E-3	2.31E-3	3.13E-03	FE054	1.13E-03
PU240	1.17E-3	1.47E-3	1.99E-03	FE056	1.77E-02
PU241	1.73E-4	2.06E-4	2.86E-04	FE057	4.10E-04
PU242	1.32E-4	1.79E-4	2.35E-04	FE058	5.44E-05
NP237	1.51E-5	2.03E-5	2.67E-05	NI058	2.52E-03
AM241	6.34E-5	8.97E-5	1.15E-04	NI060	9.72E-04
AM242	2.28E-6	2.40E-6	3.56E-06	NI061	4.22E-05
AM243	3.78E-5	4.70E-5	6.40E-05	NI062	1.35E-04
CM242	3.20E-6	2.98E-6	4.71E-06	NI064	3.43E-05
CM243	2.60E-7	1.65E-7	3.28E-07	M0092	6.23E-05
CM244	3.72E-5	4.51E-5	6.22E-05	M0094	3.88E-05
CM245	3.61E-6	3.19E-6	5.20E-06	M0095	6.68E-05
00016	3.95E-2	3.960E-2	6.02E-02	M0096	7.00E-05
-	-	-	-	M0096	4.01E-05
-	-	-	-	M0097	1.02E-04
-	-	-	-	M0098	4.04E-05
-	-	-	-	M0100	2.93E-10
高さ (cm)	80	80			53.7
想定燃料体積比	0.1477	0.2901	-	-	-
Keff	1.0358		1.0797（上部キャビティ）		
反応度（%Δρ）	+3.9				

コンパクション時構造材原子数密度：ケース 3 の構造材数密度にケース 3 と円柱型炉心の溶融構造材体積の比と溶融時高さの比を乗じて設定。

付表 1-4 円柱型炉心（軸芯有り）

核種	健全時 IC	健全時 OIC	コンパクト ヨ ン時アク チニド	コンパク ション時 構造材核 種	コンパク ション時原子 数密度
	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm		/barn・cm
U0235	3.05E-5	3.27E-05	4.80E-05	CR050	2.28E-04
U0236	3.58E-6	2.41E-06	4.62E-06	CR052	4.41E-03
U0238	1.47E-2	1.40E-02	2.19E-02	CR053	5.00E-04
PU238	4.34E-5	5.37E-05	7.34E-05	CR054	1.25E-04
PU239	1.83E-3	2.27E-03	3.10E-03	FE054	1.13E-03
PU240	1.17E-3	1.45E-03	1.97E-03	FE056	1.77E-02
PU241	1.73E-4	2.02E-04	2.84E-04	FE057	4.10E-04
PU242	1.32E-4	1.76E-04	2.32E-04	FE058	5.44E-05
NP237	1.51E-5	2.00E-05	2.65E-05	NI058	2.52E-03
AM241	6.34E-5	8.82E-05	1.14E-04	NI060	9.72E-04
AM242	2.28E-6	2.36E-06	3.53E-06	NI061	4.22E-05
AM243	3.78E-5	4.62E-05	6.35E-05	NI062	1.35E-04
CM242	3.20E-6	2.93E-06	4.68E-06	NI064	3.43E-05
CM243	2.60E-7	1.62E-07	3.26E-07	M0092	6.23E-05
CM244	3.72E-5	4.43E-05	6.17E-05	M0094	3.88E-05
CM245	3.61E-6	3.14E-06	5.16E-06	M0095	6.68E-05
00016	3.95E-2	3.89E-02	5.97E-02	M0096	7.00E-05
-	-	-	-	M0096	4.01E-05
-	-	-	-	M0097	1.02E-04
-	-	-	-	M0098	4.04E-05
-	-	-	-	M0100	2.93E-10
高さ (cm)	80	80			53.7
想定燃料体積比	0.1477	0.2901	-	-	-
Keff	1.0357		1.0264（上部キャビティ）		
反応度（%Δρ）	-1.7				

外側炉心 中空径 1mm ペレット径 7.76mm

付表 1-5 ケース 1 炉心 TRU 富化度 24%

核種	健全時 IC1	健全時 IC2	健全時 OIC1	健全時 OC2	コンパクト ション時 アクチニ ド	コンパクト ション時 構造材核 種	コンパクト ション時 原子数密 度
	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm		/barn・cm
U0235	1.72E-05	2.06E-05	2.33E-05	2.85E-05	1.74E-05	CR050	2.63E-04
U0236	1.99E-06	2.39E-06	2.70E-06	3.30E-06	2.02E-06	CR052	5.07E-03
U0238	8.29E-03	9.95E-03	1.13E-02	1.38E-02	8.41E-03	CR053	5.75E-04
PU238	3.21E-05	3.86E-05	4.36E-05	5.33E-05	3.26E-05	CR054	1.43E-04
PU239	1.36E-03	1.63E-03	1.85E-03	2.26E-03	1.38E-03	FE054	1.30E-03
PU240	8.64E-04	1.04E-03	1.17E-03	1.43E-03	8.76E-04	FE056	2.04E-02
PU241	1.28E-04	1.53E-04	1.74E-04	2.12E-04	1.30E-04	FE057	4.70E-04
PU242	1.06E-04	1.27E-04	1.43E-04	1.75E-04	1.07E-04	FE058	6.26E-05
NP237	1.12E-05	1.35E-05	1.52E-05	1.86E-05	1.14E-05	NI058	2.90E-03
AM241	4.70E-05	5.64E-05	6.38E-05	7.80E-05	4.76E-05	NI060	1.12E-03
AM242	1.69E-06	2.03E-06	2.30E-06	2.81E-06	1.72E-06	NI061	4.85E-05
AM243	2.80E-05	3.36E-05	3.80E-05	4.65E-05	2.84E-05	NI062	1.55E-04
CM242	2.37E-06	2.85E-06	3.22E-06	3.94E-06	2.40E-06	NI064	3.94E-05
CM243	1.93E-07	2.31E-07	2.62E-07	3.20E-07	1.95E-07	MO092	7.15E-05
CM244	2.76E-05	3.31E-05	3.75E-05	4.58E-05	2.80E-05	MO094	4.46E-05
CM245	2.68E-06	3.21E-06	3.64E-06	4.44E-06	2.71E-06	MO095	7.68E-05
00016	2.16E-02	2.60E-02	2.94E-02	3.59E-02	2.19E-02	MO096	8.04E-05
-	-	-	-	-	-	MO096	4.60E-05
-	-	-	-	-	-	MO097	1.16E-04
-	-	-	-	-	-	MO098	4.64E-05
-	-	-	-	-	-	MO100	3.37E-10
高さ (cm)	158.5	158.5	52	52	46.4		46.4
想定燃料体積比	0.2681	0.3218	0.3641	0.4451	-	-	-
H28 基準被覆管内 径比	0.7761	0.8502	0.9045	1.0	-	-	-
Keff	1.0591				1.0340		
反応度 (%Δρ)	-2.3						

付表 1-6 ケース 2 炉心 TRU 富化度 35%

核種	健全時 IC1	健全時 IC2	健全時 OIC1	健全時 OC2	コンパクシ ョン時アク チニド	コンパクシ ョン時構造 材核種	コンパクシ ョン時原子 数密度
	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm		/barn・cm
U0235	6.93E-06	9.84E-06	1.36E-05	1.66E-05	1.15E-05	CR050	3.25E-04
U0236	8.02E-07	1.14E-06	1.57E-06	1.92E-06	1.33E-06	CR052	6.27E-03
U0238	3.35E-03	4.75E-03	6.57E-03	8.03E-03	5.54E-03	CR053	7.11E-04
PU238	2.22E-05	3.16E-05	4.36E-05	5.33E-05	3.68E-05	CR054	1.77E-04
PU239	9.41E-04	1.34E-03	1.85E-03	2.26E-03	1.56E-03	FE054	1.61E-03
PU240	5.98E-04	8.48E-04	1.17E-03	1.43E-03	9.89E-04	FE056	2.52E-02
PU241	8.85E-05	1.26E-04	1.74E-04	2.12E-04	1.46E-04	FE057	5.82E-04
PU242	7.30E-05	1.04E-04	1.43E-04	1.75E-04	1.21E-04	FE058	7.75E-05
NP237	7.76E-06	1.10E-05	1.52E-05	1.86E-05	1.28E-05	NI058	3.59E-03
AM241	3.25E-05	4.61E-05	6.38E-05	7.80E-05	5.38E-05	NI060	1.38E-03
AM242	1.17E-06	1.66E-06	2.30E-06	2.81E-06	1.94E-06	NI061	6.00E-05
AM243	1.94E-05	2.75E-05	3.80E-05	4.65E-05	3.20E-05	NI062	1.91E-04
CM242	1.64E-06	2.33E-06	3.22E-06	3.94E-06	2.71E-06	NI064	4.88E-05
CM243	1.33E-07	1.89E-07	2.62E-07	3.20E-07	2.21E-07	MO092	8.85E-05
CM244	1.91E-05	2.71E-05	3.75E-05	4.58E-05	3.16E-05	MO094	5.52E-05
CM245	1.85E-06	2.63E-06	3.64E-06	4.44E-06	3.06E-06	MO095	9.50E-05
00016	1.02E-02	1.45E-02	2.01E-02	2.45E-02	1.69E-02	MO096	9.95E-05
-	-	-	-	-	-	MO096	5.70E-05
-	-	-	-	-	-	MO097	1.44E-04
-	-	-	-	-	-	MO098	5.75E-05
-	-	-	-	-	-	MO100	4.17E-10
高さ (cm)	158.5	158.5	52	52	35.7		35.7
想定燃料体積比	0.1266	0.1797	0.2486	0.3039	-	-	-
H28 基準被覆管内 径比	0.5333	0.6354	0.7474	0.8263	-	-	-
Keff	1.0678				1.0545 (上部キャビティ)		
反応度 (%Δρ)	-1.2						
Keff	1.0678				1.1350 (上部 Na)		
反応度 (%Δρ)	+5.5 (参考)						

付表 1-7 ケース 4 炉心 TRU 富化度 30% 外側炉心のピン径 8mm のケース

核種	健全時 IC1	健全時 IC2	健全時 OIC1	健全時 OC2	コンパクト ヨシ時アク チニド	コンパクト ヨシ時構造 材核種	コンパクト ヨシ時原子 数密度
	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm	/barn・cm		/barn・cm
U0235	8.71E-06	1.24E-05	1.71E-05	2.62E-05	1.46E-05	CR050	2.98E-04
U0236	1.01E-06	1.43E-06	1.98E-06	3.04E-06	1.69E-06	CR052	5.76E-03
U0238	4.20E-03	5.97E-03	8.25E-03	1.27E-02	7.07E-03	CR053	6.53E-04
PU238	2.22E-05	3.16E-05	4.36E-05	6.70E-05	3.74E-05	CR054	1.62E-04
PU239	9.41E-04	1.34E-03	1.85E-03	2.83E-03	1.58E-03	FE054	1.47E-03
PU240	5.98E-04	8.48E-04	1.17E-03	1.80E-03	1.00E-03	FE056	2.31E-02
PU241	8.85E-05	1.26E-04	1.74E-04	2.67E-04	1.49E-04	FE057	5.34E-04
PU242	7.30E-05	1.04E-04	1.43E-04	2.20E-04	1.23E-04	FE058	7.11E-05
NP237	7.76E-06	1.10E-05	1.52E-05	2.34E-05	1.30E-05	NI058	3.29E-03
AM241	3.25E-05	4.61E-05	6.38E-05	9.80E-05	5.46E-05	NI060	1.27E-03
AM242	1.17E-06	1.66E-06	2.30E-06	3.53E-06	1.97E-06	NI061	5.51E-05
AM243	1.94E-05	2.75E-05	3.80E-05	5.84E-05	3.26E-05	NI062	1.76E-04
CM242	1.64E-06	2.33E-06	3.22E-06	4.94E-06	2.76E-06	NI064	4.47E-05
CM243	1.33E-07	1.89E-07	2.62E-07	4.02E-07	2.24E-07	M0092	8.13E-05
CM244	1.91E-05	2.71E-05	3.75E-05	5.75E-05	3.21E-05	M0094	5.06E-05
CM245	1.85E-06	2.63E-06	3.64E-06	5.58E-06	3.11E-06	M0095	8.72E-05
00016	1.19E-02	1.69E-02	2.34E-02	3.59E-02	2.00E-02	M0096	9.13E-05
-	-	-	-	-	-	M0096	5.23E-05
-	-	-	-	-	-	M0097	1.32E-04
-	-	-	-	-	-	M0098	5.27E-05
-	-	-	-	-	-	M0100	3.82E-10
高さ (cm)	158.5	158.5	52	52	40.86		40.86
想定燃料体積比	0.1477	0.2097	0.2901	0.4451	-	-	-
H28 基準被覆管内 径比	0.5760	0.6863	0.8073	1.0	-	-	-
Keff	1.0671				1.0798 (上部キャビティ)		
反応度 (%Δρ)	+1.10						

付録 2 上下凸型炉心外側炉心下部に固定吸収体を設置した場合の効果

上下凸型炉心は外側炉心下部と下部軸ブランケットの間にガスプレナムがあり、溶融プールは、そのガスプレナム部に形成される。

通常運転時には、制御棒は炉心部分に挿入できれば良いので、上記ガスプレナム部には制御棒が挿入されない領域がある。制御棒の上下の位置と固定吸収体の位置関係を付図 2-1 に示す。固定吸収体を外側炉心下部のプレナム部に別途設置可能である。

プール形成時には、制御棒チャンネルは健全であることからそこに固定吸収体を置くことでプールの反応度を抑制できると考えられる。付図 2-2 に溶融プールが形成された時の固定吸収体との位置関係を示す。

これについて上下凸型炉心(ケース 3)を対象としてその効果を検討する。

吸収体の設置可能量については付表 2-1 に示す様に、約 50%程度の体積比で装荷可能である。

また制御棒が挿入された時の制御棒の先端部構造を考慮すると付図 2-3 に示す様に、固定吸収体は 30 cm 程度装荷できると考えられる。

付表 2-2 に設置時の溶融時コンパクション反応度の計算結果を示す。コンパクション反応度は $-1.3\% \Delta \rho$ 低下する。

付表 2-1 集合体でのピン本数と吸収体体積比の関係

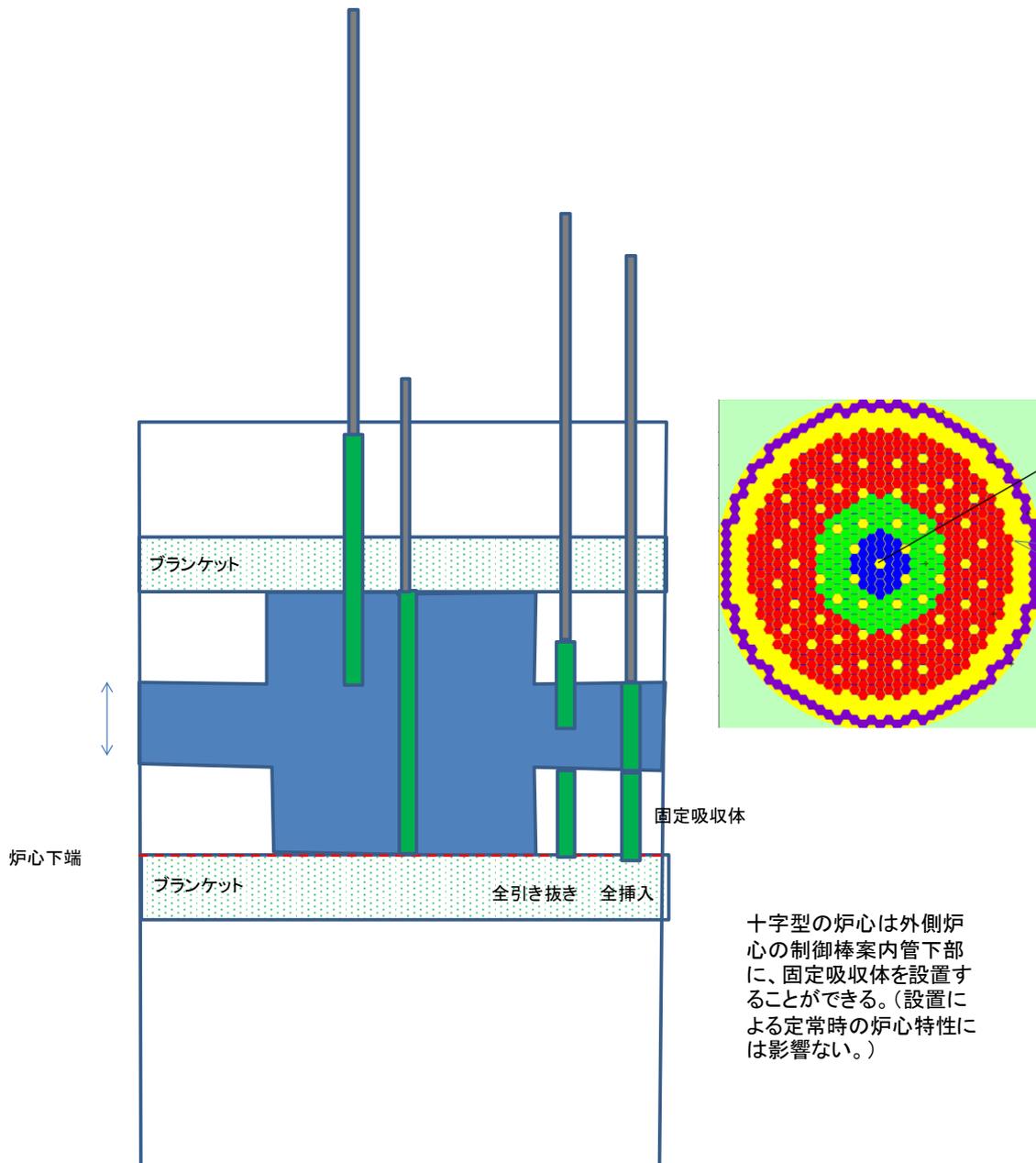
		実証炉	Ref	331本	271本	217本	169本	127本	91本	61本	37本	19本	1本	1本
ピン肉厚	mm	0.51	0.33	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.7	1	2.5
ピン内径	mm	7.58	4.84	10.6	4.25	4.8	5.55	6.35	7.5	8.8	14.6	20.6	34	95
ピン径	mm	8.6	5.5	11.6	4.85	5.4	6.15	6.95	8.1	9.4	15.6	22	36	100
ピンピッチ	mm	10	6.6	13	5.65	6.23	6.95	7.85	9.05	10.5	16.65	23.15	37.6	9.17
ピン本数		271	631	61	331	271	217	169	127	91	6	37	19	7
ベレット径	mm			10.4	4.05	4.6	5.35	6.15	7.3	8.6	10.3	14.4	20.4	33.8
集合体内対面距離	mm	167.9	167.9	104.6	104.6	104.6	104.6	104.6	104.6	104.6	104.6	104.6	104.6	104.6
ラッパ管肉厚	mm	5	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5
バンドルピッチ	mm	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
ワイヤー径	mm	1.39	1.39	1.2	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.2	1	1.87	1.8
集合体配列ピッチ	mm	181.9	181.9	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6
		9	14	4	10	9	8	7	6	5	3	2	1	10
燃料体積比		0.427	0.405	0.465	0.406	0.424	0.454	0.462	0.485	0.478	0.50	0.535	0.547	0.549
構造材体積比		0.241	0.256	0.194	0.234	0.221	0.209	0.197	0.184	0.169	0.153	0.175	0.178	0.165
冷却材体積比(ラッパ管内)		0.288	0.295	0.256	0.276	0.271	0.252	0.255	0.246	0.268	0.256	0.205	0.190	0.202
冷却材体積比(ラッパ管外)		0.043	0.043	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.068
計		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

吸収体体積比

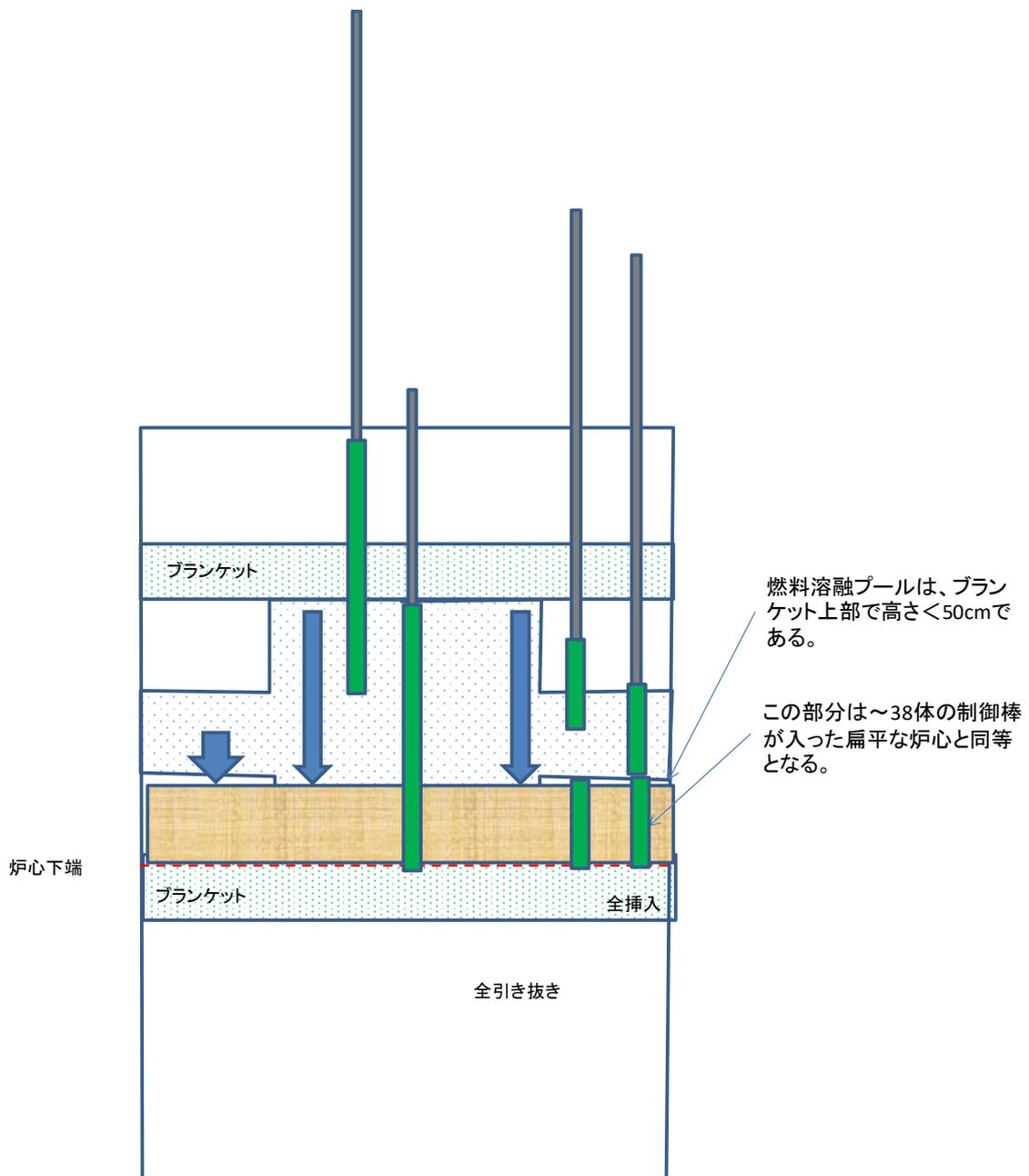
付表 2-2 ケース 3 炉心各炉心健全時及びコンパクション時原子数密度及び寸法等データ (固定吸収体 24 体配置時)

ケース	固定吸収体配置	固定吸収体本数	B ₄ C 体積比 (%)*	Keff (健全時)	Keff (コンパクション時) (上部キャビティ)	反応度 (%) ...
A	なし	-	-	1.0411	1.0340	-0.66
B	外側炉心下部	24	30	1.0374	1.0188	-1.76
C	外側炉心下部	24	50	1.0375	1.0171	-1.93

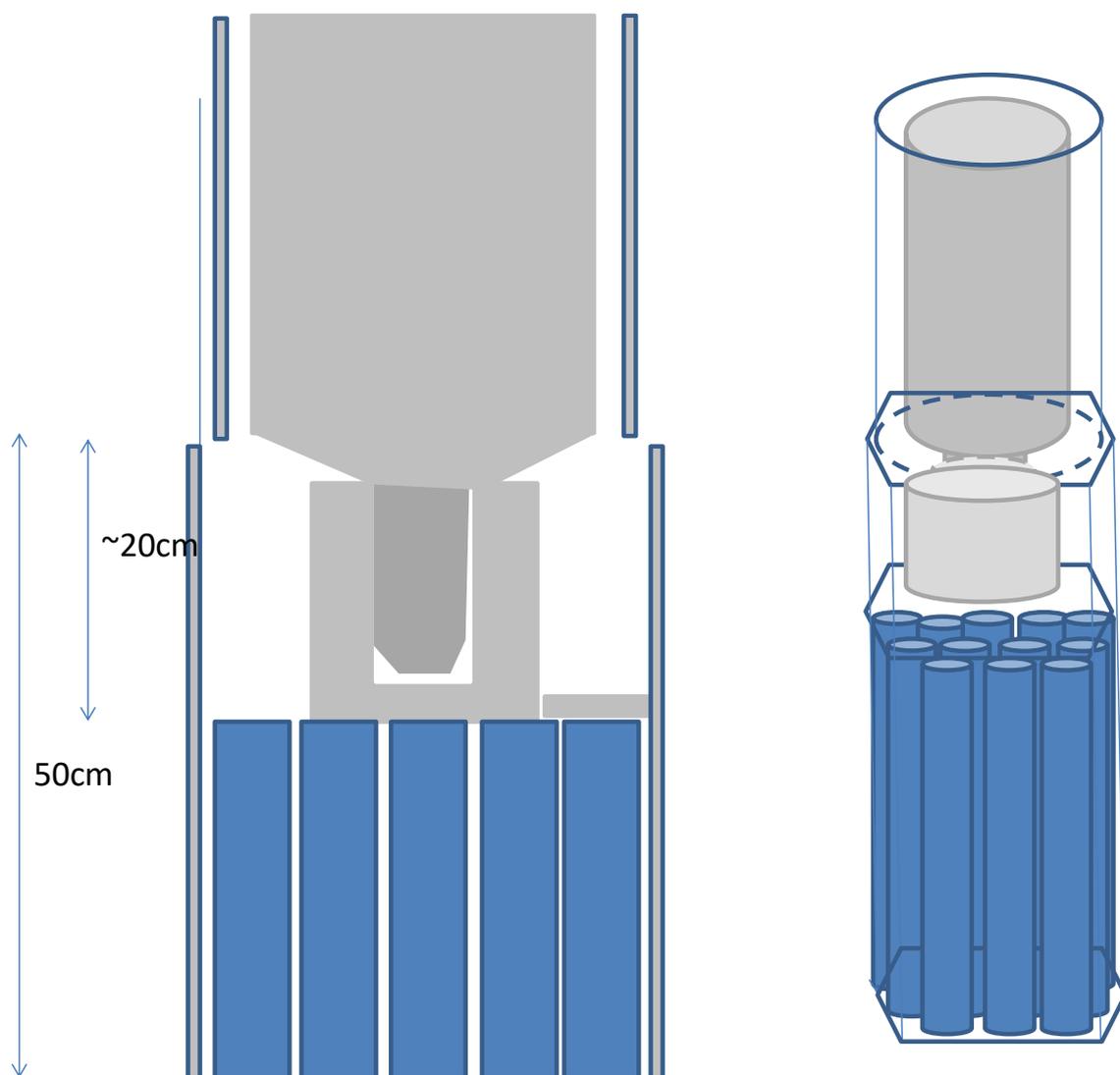
*) 固定吸収体は均質モデルとし、構造材 20%、冷却材は残りとした。また、固定吸収体高さは制御棒吸収体下部ダッシュラム (もんじゅで約 30 cm) 配置等を想定し、外側炉心下部長さの 1/2 (26.625 cm) とした。



付図 2-1 上下凸型炉心の制御棒の挿入概念と固定吸収体設置案



付図 2-2 溶融プールと固定吸収体の位置関係



付図 2-3 固定吸収体 軸方向設置可能領域

付録3 外側炉心燃料下部と下部ブランケット間のプレナム部の溶融についての検討

1. 目的

8/28 の打ち合わせにて、凸型炉心燃料の外側炉心のプレナム（ブランケット燃料と炉心燃料の間の被覆管のみの部分）が溶融プール形成時に溶解することの確認を行う必要があることを指摘された。

本指摘事項についてプレナム部の被覆管を溶解するのに必要な熱量による溶融燃料の温度低下量を評価し、既往研究で初期遷移過程（溶融燃料プール形成）の評価での平均溶融燃料温度と比較し燃料の固化が生じないことを確認する。

2. 既往研究（PNC TN9410 97-079 高速原型炉 ULOF 事象の評価研究 1997年9月）における遷移過程の評価

本報告書の高速原型炉の解析では、いくつかの条件で遷移過程のサーベイ計算が行われている。

(1) 基準ケース

燃料凝集が緩慢に進行して燃料溶融が進むが、出力急上昇したのちに 0.5s で制御棒案内管の開口が生じ、それに加えて FP ガスによる燃料分散で終息に向かう。

燃料の落下は順次行われ、それと燃料の分散が生じている。

（炉心溶融プール形成での平均温度の記載なし）

付図 3-1 に基準ケースの出力、反応度、炉内燃料質量を示す。

(2) 保守ケース 1

燃料凝集による再臨界の上限値を評価ケース。

燃料落下が 0.35s で全部落下する。これにより全炉心プールが形成される。

炉心平均温度 4000K

付図 3-2 に保守ケース 1 の出力、反応度、炉内燃料質量を示す。

(3) 保守ケース 2

制御棒案内管破損時に FCI 圧力発生による燃料の径方向揺動による反応度挿入。

径方向揺動では再臨界は生じない。（図は省略する。）

(4) 保守ケース 3

炉心プールの温度・圧力が上昇する過程におけるピン東部への燃料流出挙動を保守的に評価するとともに、溶融プールの拡大過程における制御棒案内管開口部を通しての燃料流出挙動が生じないとするケースである。

評価結果

- ① 1.3s で第1の燃料凝集が発生する。この時点では完全なプールではなくまだラッパ管が残っている状態である。

○炉心平均温度 3150K

- ② 第1回の燃料分散後、2.1s で燃料凝集が生じ第2回目の出力上昇で完全な燃料プールが生じる。

○炉心平均温度 3770K

- ③ 第2回の炉心バーストにより燃料の攪拌、分散状態で再臨界となり第3回の出力上昇が2.8s で生じる。

○炉心平均温度 3560K

第3回での反応度挿入速度は18\$/s である。

付図 3-3 に保守ケース 3 の出力、反応度、炉内燃料質量を示す。

3. 凸型炉心の検討条件に類似する評価ケース

凸型炉心のコンパクション反応度の評価は、(4)保守ケース 3 に類似している。

即ち、燃料の流出が無い状態でのプール形成の挙動である。

燃料が完全に溶融するのは、保守ケース 3 の②の状態に相当すると考える。

その場合の溶融燃料平均温度は 3770K である。

4. 外側炉心の下部プレナムが溶融について

保守的ケース 3 の完全にプールになる 2.1 s でのプール燃料平均温度は 3770K である。

この溶融した燃料プールで外側炉心の下部プレナムを溶解したのち溶融燃料が固化しないかを検討した結果を付表 3-1、付図 3-4、付図 3-5 に示す。

被覆管は開始時に 873K として 1700K で溶解するとしてプレナム被覆管の物量からこれが溶解に必要な熱量を計算した。付表 3-1 にその結果を示す。

2つのケースを計算した。

(1) 付図 3-4 に示す、外側炉心の溶融燃料だけが下部におちて溶解させるとした場合に、外側炉心溶融燃料プールの燃料の平均温度は約 400°C 低下する。

(2) 付図 3-5 に示す、全炉心での溶融燃料が炉心の下部プレナム部に侵入し溶解するとしたら約 230°C の温度低下となる。

なお MOX 燃料の融点は約 3070K であるので 400°C 低下しても燃料は固化しない見通しである。

以上

付表 3-1 炉心の重量と外側炉心プレナム部の溶解に必要な熱量と外側炉心の
ガスペナムを溶解させた場合の熔融燃料温度低下量 (1/2)

	数値	単位	内側 1	内側 2	外側 1	外側 2	
燃料仕様	ピン肉厚	mm	0.465	0.465	0.465	0.465	
	ピン内径		4.07	4.86	5.7	6.31	
	ピン径	mm	5	5.79	6.63	7.24	
	ピンピッチ	mm	9.05	9.05	9.1	9.1	
	ピン本数		331	331	331	331	
	集合体内対面距離	mm	169.2	169.2	169.2	169.2	
	ラッパ管肉厚	mm	5	5	5	5	
	バンドルピッチ	mm	4	4	4	4	
	ワイヤー径	mm	2.5	2.5	1.91	1.32	
	集合体配列ピッチ	mm	183.2	183.2	183.2	183.2	
				10	10	10	10
	Di		169.8506	169.0606	169.1866	168.5766	
	集合体本数		19	19	19	19	
	燃料体積比		0.1482	0.2113	0.2906	0.3561	
	構造材体積比		0.2352	0.2483	0.2390	0.2321	
	冷却材体積比 (ラッパ管内)		0.5735	0.4973	0.4272	0.3686	
	冷却材体積比 (ラッパ管外)		0.0432	0.0432	0.0432	0.0432	
	計		1	1	1	1	
	ワイヤー巻ピッチ	mm	200	200	200	200	
	ピン長	mm	4970	4970	4970	4970	
プレナム部	集合体断面積	cm ²	290.6574	290.6574	290.6574	290.6574	
	構造材軸長さ	cm	50	50	50	50	
	構造材体積	cm ³	3417.435	3608.432	3473.315	3373.084	
	集合体本数	本	32	114	170	278	
	構造材重量 (7.8g/cm ³)	kg	852.9917	3208.618	4605.615	7314.196	
	定圧比熱	KJ/kg°C	0.6	0.6	0.6	0.6	
	融解熱 (構造材)	KJ /kg	267	267	267	267	
	融点までの温度上昇 (1700-873K)		822	822	822	822	
	構造材の融点までの熱量 (KJ)	KJ	420695.5	1582490	2271489	3607362	
	必要溶解熱	KJ	227748.8	856701	1229699	1952890	
	プレナム部溶解に必要な全熱量	KJ	648444.3	2439191	3501189	5560252	

付表 3-1 炉心の重量と外側炉心プレナム部の溶解に必要な熱量と外側炉心の
ガスプレナムを溶解させた場合の熔融燃料温度低下量 (2/2)

炉心部重量	燃料スミア密度 82%TD		0.82	0.82	0.82	0.82
評価	燃料理論密度	g/cm ³	10.8	10.8	10.8	10.8
	炉心部軸長	cm	150	150	52	52
	燃料体積	cm ³	6459.486	9210.467	4392.087	5382.449
	燃料重量	kg	2232.398	11339.93	8064.692	16161.09
	構造材重量 炉心部軸長部分	kg	2558.975	9625.854	4789.84	7606.764
比熱	燃料定圧比熱 ²⁾	KJ/kg°C	0.64	0.64	0.64	0.64
	構造材定圧比熱 ¹⁾	KJ/kg°C	0.6	0.6	0.6	0.6
融解熱	融解熱 (構造材) ¹⁾	KJ/kg	267	267	267	267
	融解熱 (燃料) ²⁾	KJ/kg	277	277	277	277
炉心部保有	炉心部燃料重量×比熱	KJ	1428.735	7257.554	5161.403	10343.09
熱と	炉心部構造材重量×比熱	KJ	1535.385	5775.512	2873.904	4564.058
プール温度	炉心部の熱量/°C	KJ	2964.12	13033.07	8035.307	14907.15
	下部プレナム構造材溶解で熔融燃料の温度低下(外側1と外側2でべつべつに溶解)	°C			435.7256	372.9922
	外側炉心熔融燃料で外側炉心プレナムを溶解させた場合の温度低下	°C				395
	全炉心熔融燃料で外側炉心プレナムを溶解させた場合の温度低下	°C				233

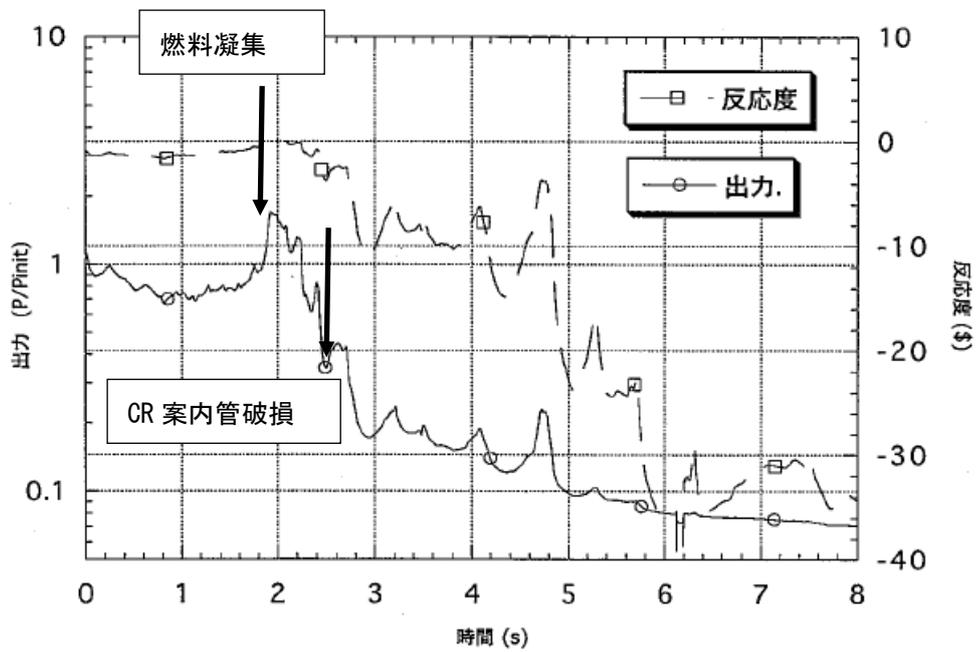


図3.5-1 もんじゅ解析 基準解析ケース 反応度・出力

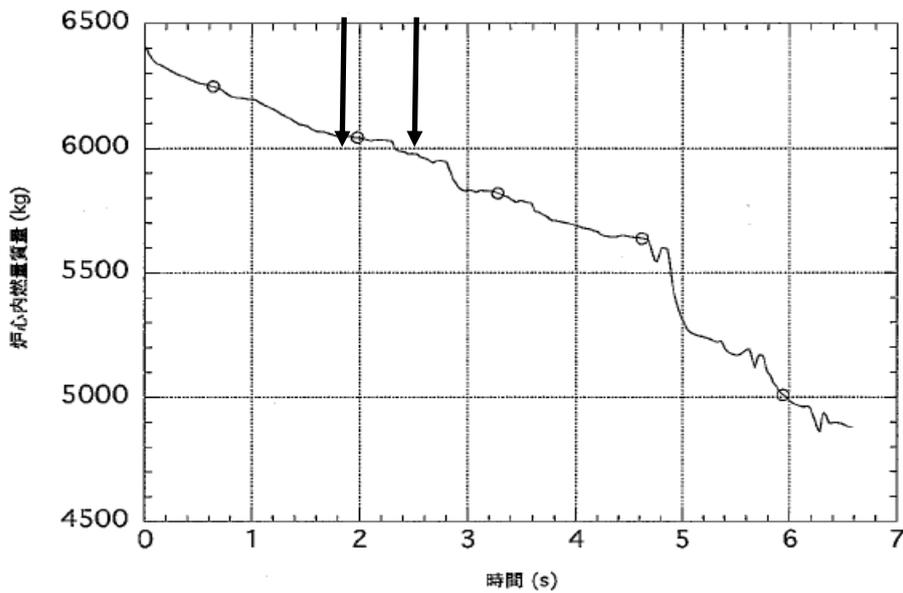


図3.5-2. もんじゅ解析 基準解析ケース 炉心内燃料質量

付図 3-1 基準ケースの反応度、出力、炉内質量

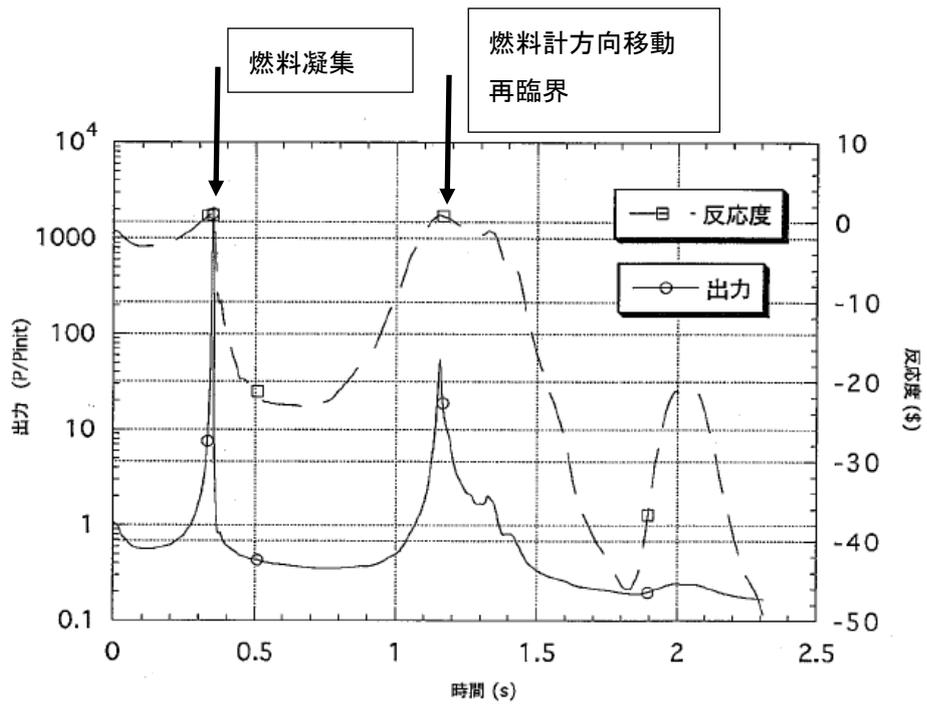


図3.5-4. もんじゅ解析 保守的解析ケース1 反応度・出力

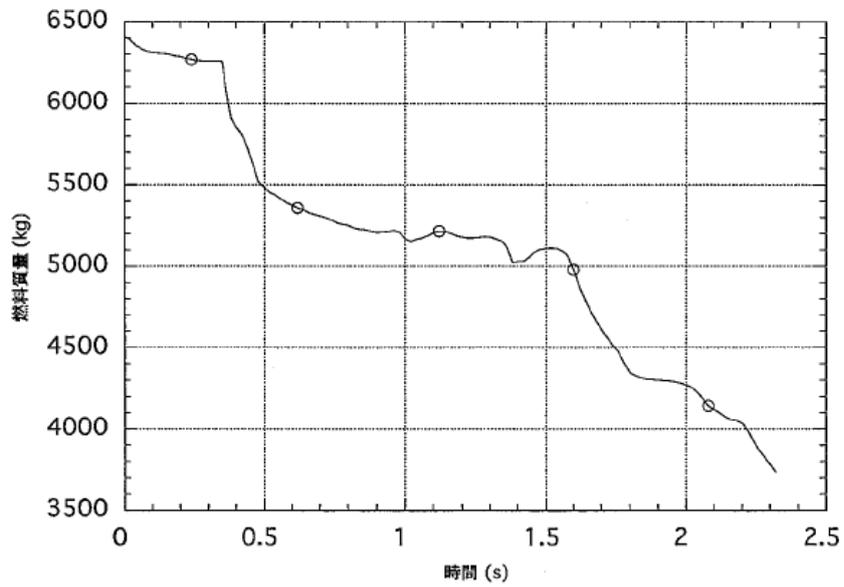


図3.5-5. もんじゅ解析 保守的解析ケース1 炉心内燃料質量

付図 3-2 保守側ケース1の反応度、出力、炉内質量

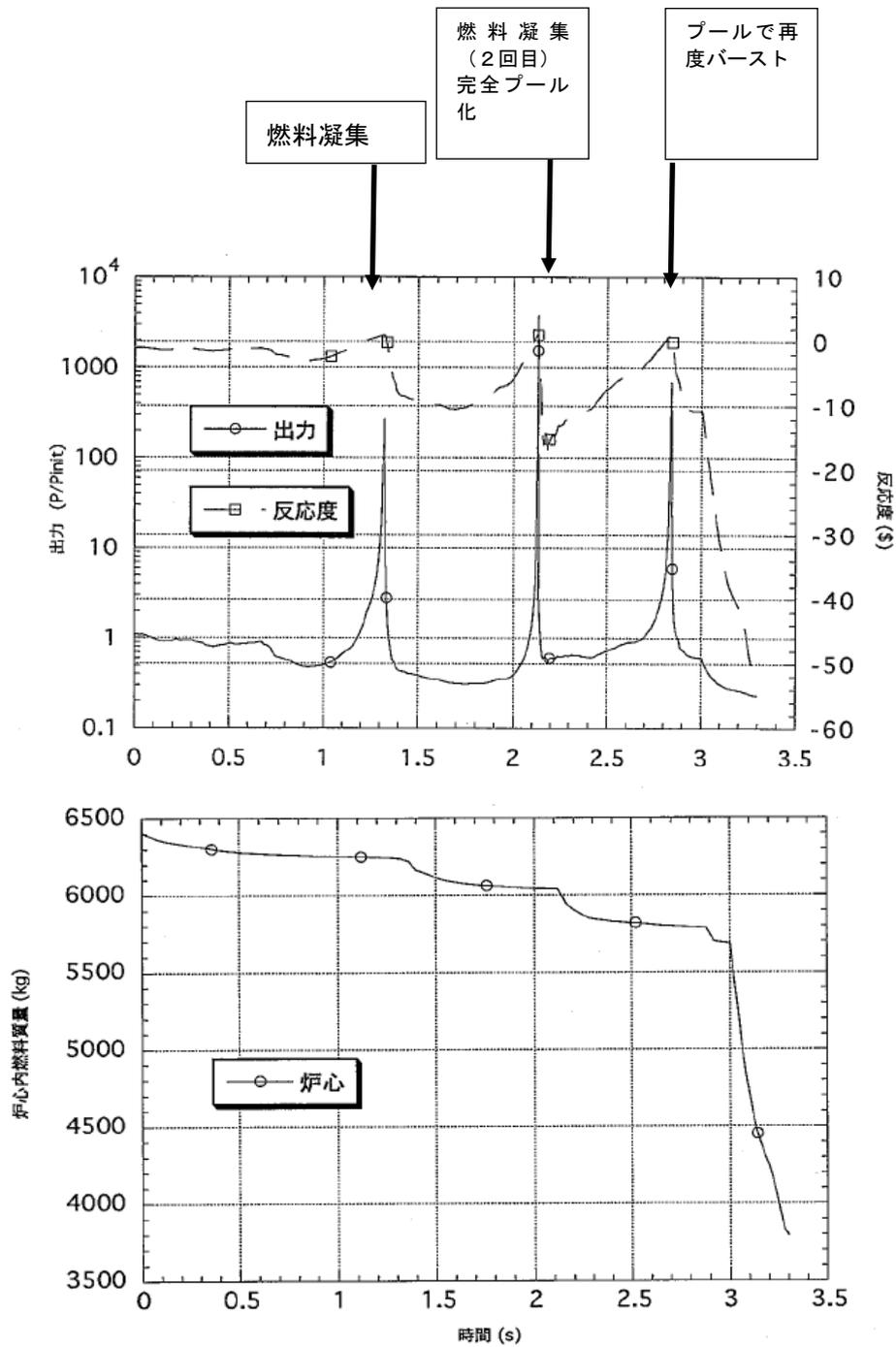
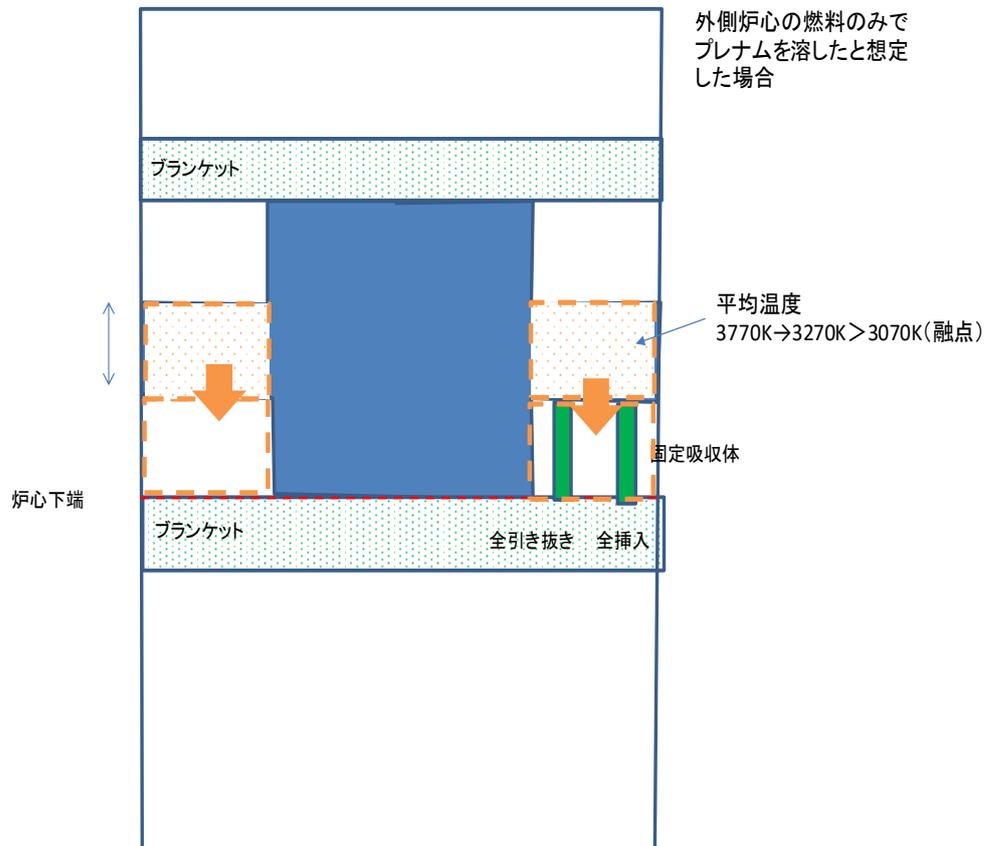
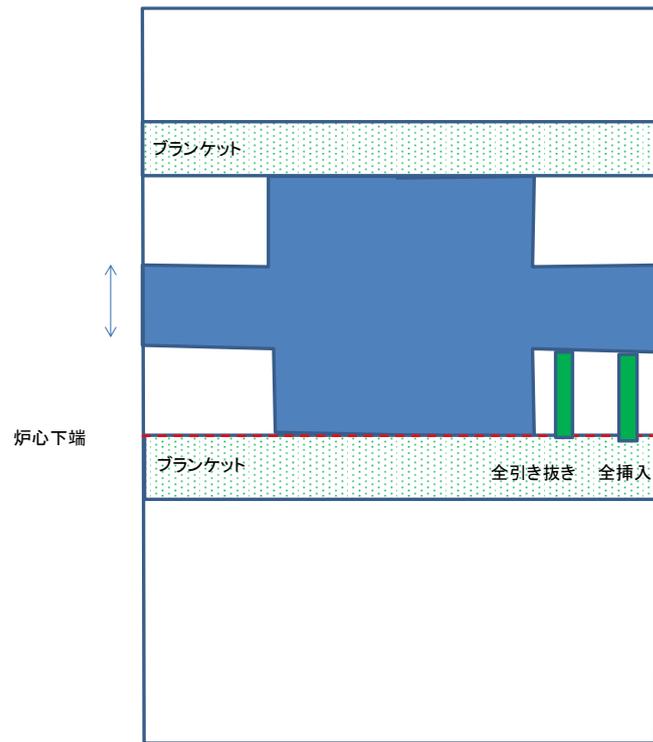
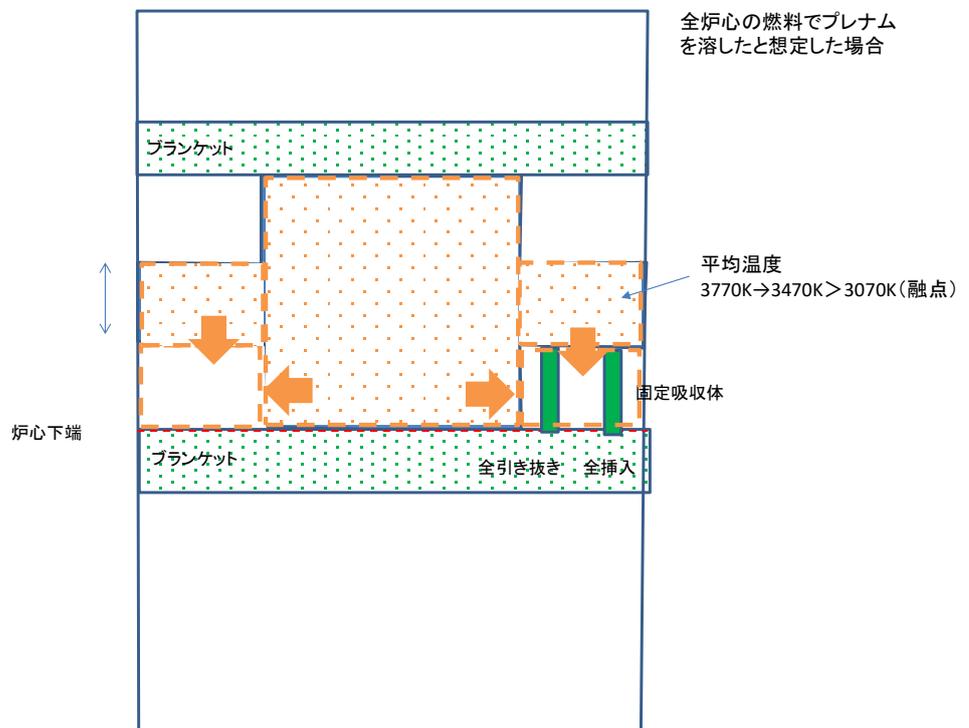
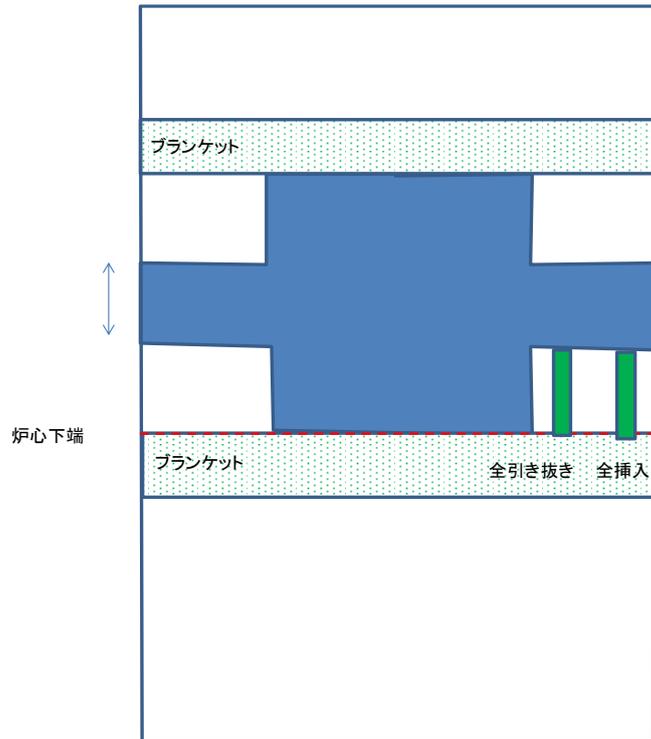


図3.5-9. もんじゅ解析 保守的解析ケース3 炉心内燃料質量

付図 3-3 保守側ケース 3 の反応度、出力、炉内質量



付図 3-4 外側燃料の下部プレナムの溶解での温度変化



付図 3-5 全炉心燃料の下部プレナムの溶解での温度変化

付録4 炉心のさらなる改善案（径方向ブランケット下部削除型炉心及び内側炉心下部吸収体導入炉心）について

1. 概要

JSFRと同型の円柱型炉心で、コンパクション後のプールの形状を工夫し、負のコンパクション反応度を達成する方法を検討した。

径方向ブランケット下部削除型炉心の検討では、径方向ブランケット集合体の下部を削除し、熔融燃料が下部で広がる表面積を大きくする方策を検討し、その効果が確認できた。

さらに、内側炉心領域の集合体下部の軸方向ブランケット部に反射体と吸収体を配置し、健全時には反射効果で炉心の臨界性を保ちつつ、熔融時には中性子吸収が期待できるように工夫し、その際の反応度効果を解析し、コンパクション反応度が負となることを確認した。

2. 径方向ブランケット削除型炉心

付図4-1に径方向ブランケット下部削除型炉心における健全時及び熔融時の炉心概念を示した。本炉心においては、定格運転時の流量調整により、外側炉心から熔融が開始し、適切なタイミングで内側炉心が熔融するように、最外周への熔融燃料の分散を促進させることを想定している。

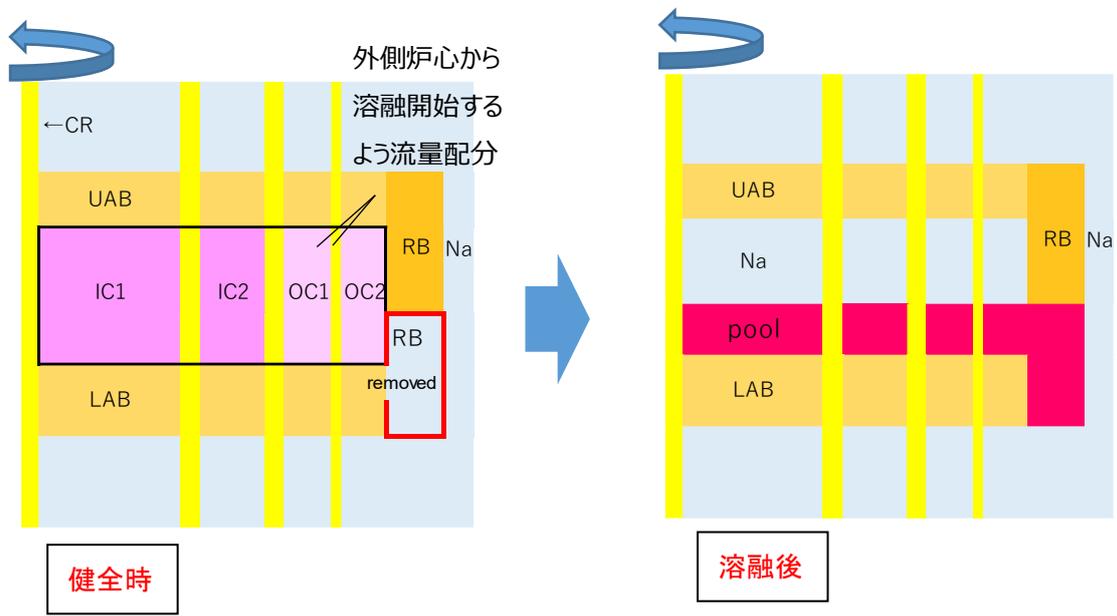
炉心熔融時のプール堆積面積を拡大し、プール高さを低減する事によりコンパクション反応度は約 -20% 程度となり、系全体も未臨界となる結果を得た。

3. 内側炉心下部吸収体導入炉心

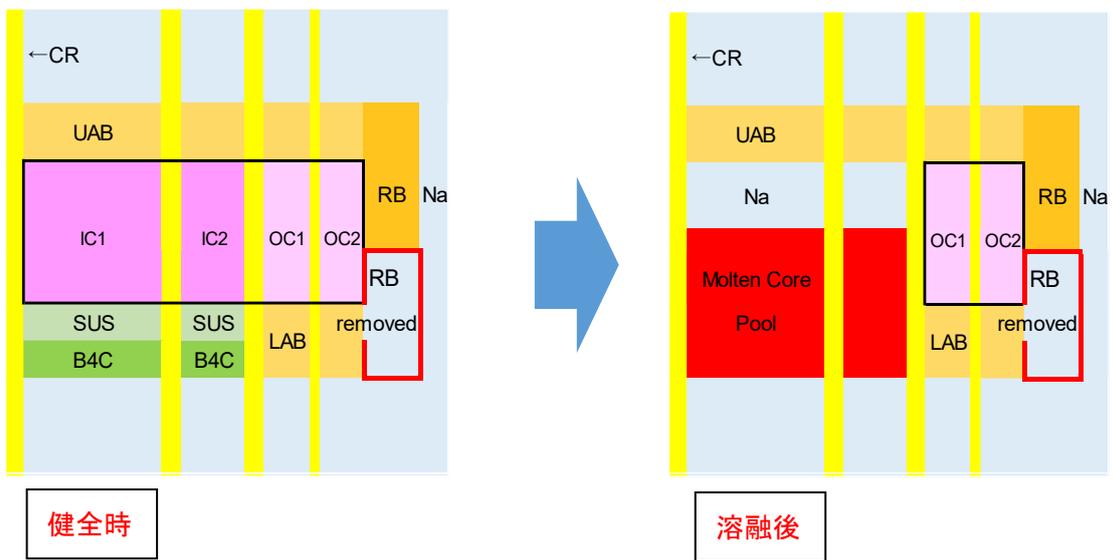
付図4-2に内側炉心下部吸収体導入炉心のものを示した。本炉心概念では、 B_4C 吸収体を内側炉心の炉心下部に設置し、健全時にはSUSによる中性子反射効果で臨界性への影響を最小化し、熔融時に吸収体が均質混合することで中性子吸収効果を発揮する構造とした。

通常は下部軸ブランケットが配置される領域(高さ40 cm)の上部をSUS製ペレット、下部を B_4C 製ペレットとし、健全炉心及び熔融炉心プールの解析を実施した。

B_4C 吸収体の熔融炉心プールへの均質混合を仮定すると、コンパクション反応度は約 -25% 程度となり、系全体も未臨界となる結果を得た。



付図 4-1 径方向ブランケット削除型炉心概念 (熔融前後の炉心)



付図 4-2 内側炉心下部吸収体導入炉心概念 (熔融前後の炉心)