

原子力規制庁
平成 26 年度原子力施設の臨界管理安全基盤強化委託費
(東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの
臨界評価手法の整備) 事業

報告書

平成 27 年 3 月

(独) 日本原子力研究開発機構

目 次

第Ⅰ編 はじめに.....	1
第1章 背景・目的.....	3
1.1 事業の背景.....	3
1.2 事業の目的.....	3
1.3 事業の基本方針.....	3
参考文献.....	4
第2章 全体計画及び年度計画.....	7
2.1 全体計画.....	7
2.2 平成26年度計画.....	9
参考文献.....	11
第Ⅱ編 臨界マップの整備.....	13
第3章 MCCI生成物の臨界特性解析.....	15
3.1 MCCI生成物性状に関する調査.....	15
3.2 MCCI生成物の無限増倍率解析.....	19
3.3 MCCI生成物の臨界量解析.....	42
参考文献.....	60
第4章 臨界マップデータベースの整備.....	63
4.1 データベースの概念設計.....	63
4.2 燃焼計算コードの改良.....	73
参考文献.....	83
第Ⅲ編 臨界リスク評価手法の整備.....	85
第5章 リスク評価で考慮すべき事象の検討.....	87
5.1 目的と課題.....	87
5.2 燃料デブリ臨界リスク評価の手順.....	89
5.3 主な事象の検討.....	91
5.4 長期維持管理時の安全確保.....	97
5.5 その他の検討が必要な事項.....	98
5.6 リスクの定量化手法.....	99
参考文献.....	101

第 6 章	リスク評価支援ツールの概念設計	103
6.1	リスク評価支援ツールの全体概要	103
6.2	データベース機能について	105
6.3	リスク定量化支援機能について	108
6.4	ユーザーインターフェースについて	116
	参考文献	118
第 IV 編	臨界実験による臨界マップ検証	119
第 7 章	STACY 更新炉原子炉本体の整備	121
7.1	STACY 更新炉の整備工程計画	121
7.2	臨界実験炉心の基本設計	129
7.3	可動装荷物駆動装置の基本設計	166
7.4	炉室フード水密化の検討	196
	参考文献	213
第 8 章	デブリ模擬体調製設備の整備及び燃料の調達計画の策定	215
8.1	デブリ模擬体の調製設備の整備	215
8.2	棒状燃料及び燃料粉末の調達検討	228
第 9 章	モックアップ装置を用いた STACY 更新炉の設計検証	245
9.1	安全板加振試験	245
9.2	水位計測試験装置の検討	373
第 10 章	デブリ模擬体分析設備の整備	401
10.1	分析の構想・計画	401
10.2	分析設備の設計方針	406
10.3	分析設備の設計及び製作（購入）	408
	参考文献	417
第 V 編	専門家の意見聴取	419
第 11 章	福島燃料デブリ臨界評価研究専門部会	421
11.1	第 1 回会合	421
11.2	第 2 回会合	426

第 VI 編	まとめ	431
第 12 章	平成 26 年度の成果	433
12.1	臨界マップの整備	433
12.2	臨界リスク評価手法の整備	433
12.3	臨界実験による臨界マップ検証	434
12.4	専門家の意見聴取	434
12.5	提言	435
第 13 章	今後の計画	437
13.1	全体計画	437
13.2	平成 27 年度計画	438

第I編 はじめに

第1章 背景・目的

1.1 事業の背景

東京電力福島第一原子力発電所（1F）の1～3号機では、炉心が損傷・溶融し、多量の燃料デブリ（核燃料と炉内構造物やコンクリート等の構造材が溶融し再度固化した状態）が発生していることが想定されている。¹⁾ これらの燃料デブリは、局所的に多様な性状を持つと考えられ^{2,4)}、水中における臨界量は大幅に小さくなり得る。^{5,6)} 中性子吸収材を含まない水で冷却されている現行の冠水法を考慮すると、今後の水中での取出し作業、取出し後の収納・輸送・保管に至るまで、性状の不確かさも考慮した燃料デブリの慎重な臨界管理が必要である^{7,8)}。廃止措置に係る安全規制として、これらの局面で事業者が行う管理の適否を判断するための新たな臨界評価基準を整備しなければならない。

1.2 事業の目的

本事業では、燃料デブリの臨界条件等を示す臨界マップを作成し、この上に実際の燃料デブリ性状を位置づけ、燃料デブリの臨界リスク評価を行う基準を整備する。⁷⁾ また、臨界マップの検証のため、臨界実験装置を用いて燃料デブリを模擬した臨界実験を行い、臨界データを取得し、臨界マップの妥当性を検証する。⁹⁾

1.3 事業の基本方針

前節に示した目的を達するため、これまでの臨界安全研究の成果・知見^{5,10-12)}・施設¹³⁻¹⁹⁾を基盤とし、1Fの最新状況を反映しつつ、燃料デブリ性状及び1～3号機の状態の不確かさを考慮した臨界リスク評価^{20,21)}を実現することを基本方針として、次章に述べる研究開発を行う。本事業では、日本原子力研究開発機構（JAEA）の持つ人的な研究ネットワークを通じて国内外の知見を活用し、成果を国際的な水準に照らして優秀なものとする。

参考文献

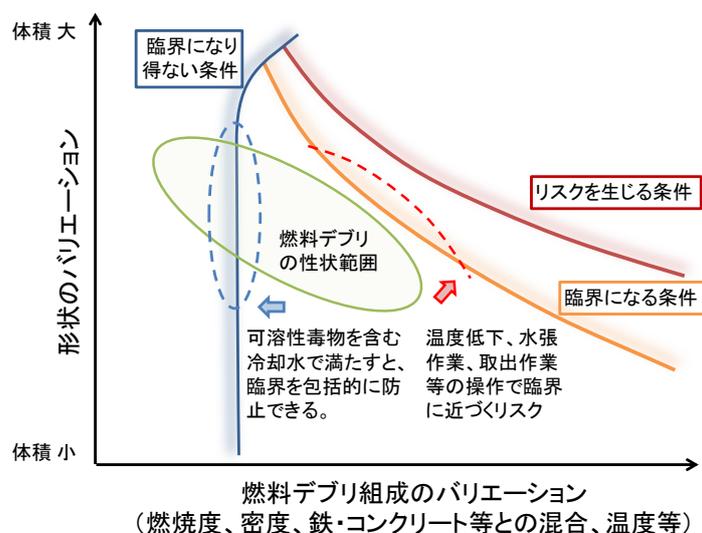
- 1) 東京電力、福島第一原子力発電所の現況、
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/genkyo/index-j.html>
- 2) 西原健司、他、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、JAEA-Data/Code 2012-018、日本原子力研究開発機構 (2012).
- 3) D. W. Akers, et al., *TMI-2 Examination Results from the OECD-CSNI Program*, NEA/CSNI/R(91)9, Committee on the Safety of Nuclear Installations, Organization for Economic Cooperation and Development (1992).
- 4) K. Suyama, et al., *OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmark Phase IIIC, Nuclide Composition and Neutron Multiplication Factor of BWR Spent Fuel Assembly for Burnup Credit and Criticality Control of Damaged Nuclear Fuel*, OECD/NEA/WPNCs/EGBUC (2012)
- 5) 奥野浩、他、臨界安全ハンドブック・データ集第2版 (受託研究)、JAEA-Data/Code 2009-010、日本原子力研究開発機構 (2009).
- 6) K. Izawa, et al., "Infinite Multiplication Factor of Low-Enriched UO₂-Concrete System," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **49**, 1043 (2012).
- 7) K. Tonoike, et al., "Major Safety and Operational Concerns for Fuel Debris Criticality Control," *Proc. GLOBAL2013*, Salt Lake City, USA, Sept.29-Oct.2, 2013 (2013).
- 8) W. Stratton, *Review of the State of Criticality of the Three Mile Island Unit 2 Core and Reactor Vessel*, DOE/NCT-01, Lawrence Livermore National Laboratory (1987).
- 9) 外池幸太郎、他、「STACY 更新炉における燃料デブリ臨界実験の検討 ; (1) 燃料デブリ取扱いの臨界安全に関する臨界実験計画」、2012年春の年会予稿集、E35、日本原子力学会(2012).
- 10) 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課編、臨界安全ハンドブック、にっかん書房 (1988).
- 11) 臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ、臨界安全ハンドブック第2版、JAERI 1340、日本原子力研究所 (1999).
- 12) 燃料サイクル安全研究委員会、燃焼度クレジット導入ガイド原案 (受託研究)、JAERI-Tech 2001-055、日本原子力研究所 (2001).
- 13) NUCEF 実験計画検討グループ、燃料サイクル安全工学研究施設 (NUCEF) における研究計画、JAERI-M 94-066、日本原子力研究所 (1994).
- 14) 竹下功、他、「動き出す燃料サイクル安全工学研究施設 NUCEF 計画の現状と展望」、*原子力工業*、**40**、9 (1994).
- 15) 峯尾英章、他、「原研東海研究所の燃料サイクル安全工学研究施設 (NUCEF) 」、*放射線化学*、**0**、47 (1995).
- 16) 竹下功、他、「NUCEF 計画 燃料サイクル安全工学研究の現状と今後の展開」、*原子力工業*、**43**、1 (1997).
- 17) 村上清信、他、定常臨界実験装置 (STACY) の製作、JAERI-Tech 98-033、日本原子力研究所 (1998).

- 18) 杉川進、他、*燃料サイクル安全工学研究施設 (NUCEF) 核燃料調製設備の概要*、JAERI-Tech 97-007、日本原子力研究所 (1997).
- 19) 宮内正勝、他、*NUCEF 分析設備*、JAERI-Tech 96-007、日本原子力研究所 (1996).
- 20) 保安院受託 *MOX 燃料加工施設安全技術調査等 (臨界事故安全評価等調査) 調査報告書*、日本原子力研究所／日本原子力研究開発機構 (2003～2006).
- 21) (編) 吉田一雄、他、*核燃料施設の確率論的安全評価に関する調査 (1, 2)*、JAEA-Research 2006-085、2007-002 (2006, 2007).

第2章 全体計画及び年度計画

2.1 全体計画

燃料デブリの性状をパラメータとして未臨界か否かを判断するためのデータベース「臨界マップ」(図 2-1)¹⁾を、臨界安全研究で実績のある組成モデル化及び解析手法^{2,3)}を用いて整備する。また、燃料デブリ組成の評価に必要な燃焼計算コード⁴⁾を検証するため燃焼燃料の組成を測定する⁵⁾とともに、実燃料デブリ試料が得られた場合の分析実施に備える。



燃料デブリが臨界になり得ない条件、臨界になる条件、さらに、臨界により作業員被ばく、放射性物質放出等のリスクを生じる条件を「臨界マップ」で明確にする。ここに、燃料デブリの性状範囲を位置づけ、燃料デブリに対する操作の臨界リスクを評価できるようにする。

図 2-1 臨界マップの概念

燃料デブリが臨界を超過した際の、作業員被ばく、放射性物質環境放出等の影響が生じる条件を明らかにし、臨界リスクを評価する基準を整備する。これは、前述の臨界マップ、シビアアクシデント解析コードによる評価又は実地調査に基づく 1～3 号機の状態及び燃料デブリ所在の情報、並びに作業内容等を組み合わせるリスクを評価するツール^{6,7)}となる。

臨界に近い燃料デブリについても未臨界か否かの判断を可能とするため、臨界マップの精度を臨界実験で検証する。JAEA が保有する燃料サイクル安全工学研究施設 NUCEF の定常臨界実験装置 STACY を更新し、様々な中性子スペクトルを実現できる汎用の水減速・燃料棒非均質臨界実験装置とする。^{8,9)} そこで、核燃料と構造材を混合した試料「デブリ模擬体」の反応度値測定、ウラン燃料棒と構造材棒を組み合わせた臨界量測定等の臨界実験を行い、実験結果により臨界マップの整備に用いた解析手法を検証する。デブリ模擬体を調製・分析する設備も NUCEF 内に整備し、効率的かつ柔軟に実験を実施する。以上の実験の概念を図 2-2 に示す。ウラン燃料棒及びデブリ模擬体原料の核燃料調達、並びに実験上重要な設備の性能を確認するモックアップ試験も行う。¹⁰⁻¹⁴⁾

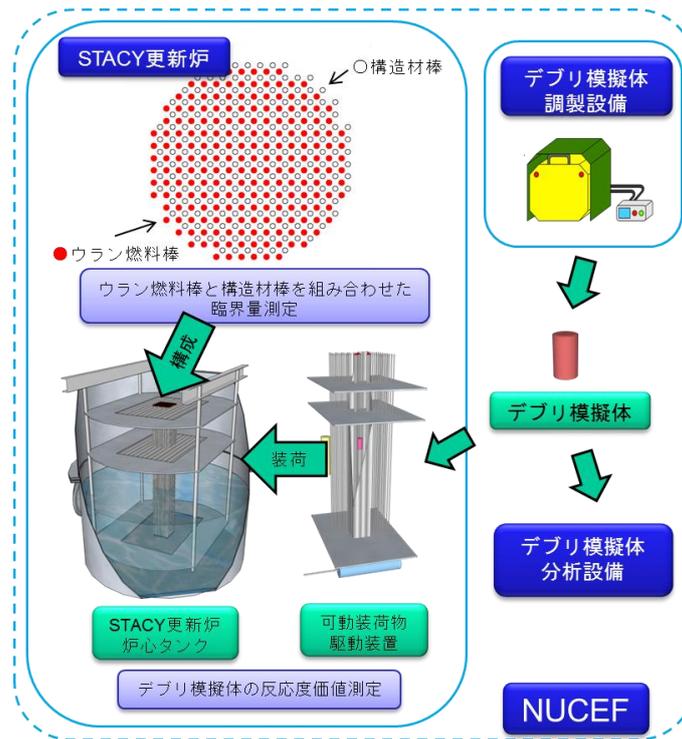


図 2-2 STACY 更新炉燃料デブリ 臨界実験の概念

平成 32 年度に計画されている燃料デブリ本格取出開始までに、検証済みの臨界マップ、臨界リスク評価手法を整備する。燃焼燃料組成測定は平成 27 年度に、STACY 更新炉の実験は平成 30 年度に開始する。燃料デブリ取出作業中も、本事業は、安全規制としての臨界管理の適否判断を継続的に支援する。この全体スケジュールを図 2-3 に示す。

事業内訳	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
(1) 燃料デブリ臨界リスク評価基準整備		臨界量計算・不確かさ解析	★臨界マップ作成	臨界制限量計算(質量・寸法・濃度等)	臨界マップの稠密化(高精度化)			
		臨界リスク評価(解析ベース)		★臨界リスク評価手法(解析ベース)提案		★臨界リスク評価手法(実験検証ベース)提案		
		高燃焼度燃焼燃料の核種組成分析及び燃焼計算コードの検証			臨界リスク評価(実験検証ベース)			
					実デブリ試料分析及び臨界特性評価			
(2) 臨界実験装置を用いた臨界マップの検証実験	○臨界実験装置	設計・製作・据付		性能試験		臨界試験		
		モックアップ試験						
		燃料調達			★初臨界			
○デブリ模擬体調製設備	設計・製作・据付・検査			コールド試験		デブリ模擬体調製		
○デブリ模擬体分析設備	設計・製作・据付・検査			デブリ模擬体分析				

図 2-3 事業全体のスケジュール (計画)

2.2 平成 26 年度計画

前節に示した全体計画の初年度として、平成 26 年度事業として以下の研究開発を、図 2-4 に示すスケジュールに沿って行うことを計画した。

(1) 燃料デブリ臨界リスク評価基準整備

- ① MCCI 模擬実験に係る文献を調査し MCCI の過程に関する知見を収集する。MCCI 模擬実験を実施しているドイツ KIT 等の欧米海外機関を約 1 週間訪問して研究者と議論し、MCCI の過程、MCCI 生成物の性状について調査する。これらの調査に基づき MCCI 生成物の取り得る性状範囲を評価する。
- ② 上記①の評価結果に基づき、密度、ウラン含有率、水分含有率、非均質性等のパラメータを変化させ、計算コード MVP、核データライブラリ JENDL 等を用いて臨界特性を系統的に解析し、MCCI 生成物の臨界マップの作成に着手する。また、臨界マップの実態となるデータベースの概念設計を行う。
- ③ 1～3 号機、並びにその廃炉工法検討及び工程の最新の状況を把握しつつ、燃料デブリの想定される所在場所及び性状、並びに取出しに至る準備作業工法及び取出し作業工法を想定し、冷却促進、余震等の外部事象、及び取出し作業に起因する事象等、再臨界リスクを評価する上で考慮すべき事象を検討する。また、これらの炉の状態及び臨界となるシナリオを系統的に集積するデータベースの概念設計を行う。

(2) STACY 更新炉を用いた臨界マップの検証実験

- ① STACY 更新炉について、燃料デブリの取り得る性状範囲を参考に実施すべき実験の炉心構成を検討し、炉心格子板及び反応度値測定のための可動装荷物駆動装置の基本設計を行う。この設計では、実験目的を達するための性能、並びに装置及び実験の安全の確保を考慮する。

(3) 専門家の意見聴取

本事業の実施にあたっては、燃料デブリや臨界管理等の専門家と意見交換を 2 回行い、妥当性を確認しながら進める。専門家として以下の 4 名の方々を候補とする。

京都大学	中島 健	教授 (炉物理・臨界安全・臨界事故評価)
名古屋大学	遠藤 知弘	助教 (炉物理・臨界安全・未臨界監視)
東京都市大学	村松 健	特任教授 (リスク評価)
大阪大学	黒崎 健	准教授 (核燃料化学)

事業内訳	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
(1) 燃料デブリ臨界リスク 評価基準整備	① MCCI 生成物性状評価 ← 文献調査 →	△ 海外調査 (独KIT等)		
	② MCCI 生成物の臨界マップ作成 ← 臨界計算コード等による解析 / 臨界マップデータベースの概念設計 →			
	③ 再臨界リスク評価で考慮する事象の検討 ← 臨界シナリオの検討 / 臨界シナリオデータベースの概念設計 →			
(2) 臨界実験装置を用いた 臨界マップの検証実験	① 臨界実験装置の整備 ← 臨界実験装置の基本設計 →			
	② 臨界実験の計画・設計・施工管理に係る調査 ← 現地調査・意見交換 (仏IRSN) →			
	③ デブリ模擬体の調製・分析設備の整備 ← デブリ模擬体調製設備設計 →		← デブリ模擬体調製用粉砕機製作 →	
	← デブリ模擬体分析設備の基本設計 →			
		← デブリ模擬体分析設備放射線モニタリング設備の一部機器調達 →		
	④ デブリ模擬体特性把握に係る調査		△ ペレット測定・分析手法の海外調査 (仏AREVA又は英NDA)	
	⑤ 燃料の調達計画の策定			
	⑥ モックアップ装置を用いた加振試験 ← モックアップ装置の設計・製作 →		← 加振試験 →	
(3) 専門家の意見聴取		△ 計画検討		進捗評価 △

図 2-4 平成 26 年度事業のスケジュール (計画)

参考文献

- 1) K. Tonoike, et al., "Major Safety and Operational Concerns for Fuel Debris Criticality Control," *Proc. GLOBAL2013*, Salt Lake City, USA, Sept.29-Oct.2, 2013 (2013).
- 2) 臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ、*臨界安全ハンドブック第2版*、JAERI 1340、日本原子力研究所 (1999).
- 3) 奥野浩、他、*臨界安全ハンドブック・データ集第2版 (受託研究)*、JAEA-Data/Code 2009-010、日本原子力研究開発機構 (2009).
- 4) K. Suyama, et al., "Revised Burnup Code System SWAT: Description and Validation Using Postirradiation Examination Data," *Nucl. Technol.*, **138**, 97 (2002).
- 5) 深谷洋行、他、*使用済燃料に含まれる核分裂生成核種の組成測定試験方法の検討*、JAEA-Research 2013-020、日本原子力研究開発機構 (2013).
- 6) 保安院受託 *MOX 燃料加工施設安全技術調査等 (臨界事故安全評価等調査) 調査報告書*、日本原子力研究所/日本原子力研究開発機構 (2003~2006).
- 7) (編) 吉田一雄、他、*核燃料施設の確率論的安全評価に関する調査 (1, 2)*、JAEA-Research 2006-085、2007-002 (2006, 2007).
- 8) K. Izawa, et al., "Evaluation of Nuclear Characteristics of Light-Water-Moderated Heterogeneous Cores in Modified STACY," *Proc. ICNC2011*, Edinburgh, UK, Sept.19-23, 2011 (2011).
- 9) 井澤一彦、他、「STACY 更新炉における軽水減速非均質体系の炉物理特性」、*2011 年春の年会予稿集*、I37、日本原子力学会 (2011).
- 10) 外池幸太郎、他、「STACY 更新炉における燃料デブリ臨界実験の検討；(1) 燃料デブリ取扱いの臨界安全に関する臨界実験計画」、*2012 年春の年会予稿集*、E35、日本原子力学会(2012).
- 11) 梅田幹、他、「STACY 更新炉における燃料デブリ臨界実験の検討；(2) NUCEF 核燃料使用施設における燃料デブリ模擬体の調製と分析」、*2012 年春の年会予稿集*、E36、日本原子力学会 (2012).
- 12) 井澤一彦、他、「STACY 更新炉における燃料デブリ臨界実験の検討；(3) 燃料デブリ模擬体を含む炉心の核特性解析」、*2012 年春の年会予稿集*、E37、日本原子力学会 (2012).
- 13) 木田孝、他、「燃料デブリ臨界試験に向けた STACY 更新炉の核特性評価と安全設計の検討；(1) 燃料デブリ臨界試験の概要と安全設計方針」、*2013 年春の年会予稿集*、H30、日本原子力学会 (2013).
- 14) 井澤一彦、他、「燃料デブリ臨界試験に向けた STACY 更新炉の核特性評価と安全設計の検討；(2) 炉心核特性と反応度評価」、*2013 年春の年会予稿集*、H31、日本原子力学会 (2013).

第 II 編 臨界マップの整備

第3章 MCCI 生成物の臨界特性解析

3.1 MCCI 生成物性状に関する調査

3.1.1 目的及び概要

(1) 目的

1F 事故では 1～3 号機のいずれの炉心も大規模に損傷・溶融し、その全部又は一部が圧力容器を貫通し格納容器のコンクリート床に落下した可能性が高い。¹⁾ このような場合、溶融炉心コンクリート相互作用 (MCCI) を経て、燃料とコンクリートの混合物 (MCCI 生成物) が生じる可能性がある。²⁾ JAEA は、既に燃料とコンクリートの非均質混合物について臨界特性を予備的に検討し、臨界管理の必要性を指摘した。³⁾

この検討では、水分も含めてコンクリートの組成をそのまま用いたため、コンクリート中の水分が中性子減速に大きな役割を果たした。一方で、MCCI は極めて高温の反応であり、コンクリート中の水分がほとんど蒸発し失われると考えられ、MCCI 生成物の臨界特性は異なったものになる可能性がある。

したがって、MCCI 生成物の性状をより具体的に予想・想定し臨界特性解析に反映することを目的として、調査を行った。

(2) 概要

まず、MCCI 模擬実験において生成物の性状分析を行った例を調査した。さらに、MCCI 模擬実験を行って得られた生成物を実際に見学できるドイツのカールスルーエ研究所 (KIT) を訪問し、研究者との議論及び MOCKA 試験⁴⁾ の生成物の観察により調査を行った。

3.1.2 調査

(1) 文献調査

参考文献 2) が MCCI 研究を総覧している。実験的研究の歴史は 1975 年に米国及びドイツで開始された一連の研究に遡る。初期の大規模実験として米国サンディア国立研究所 (SNL) の LSL、LSB、LSCRBR 及び TURC の実験シリーズが挙げられている。高温金属又は溶融酸化物のコンクリート中での相互作用は、SNL の SURC 実験、ドイツカールスルーエ研究所 (FZK) の BETA 実験、並びに米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) の ACE 実験及び MACE 実験で研究されている。これらの実験では誘導加熱や直接加熱により崩壊熱を模擬し、長時間にわたる相互作用を観察している。最近の実験として、OECD が出資した ANL の CCI 実験、EC が出資した FZK の COMET-L 実験がある。さらに、フランス CEA で VULCANO 実験が行われている。

これらの実験では、MCCI における熱水力、熱輸送、ガスの放出と組成、コリウムとコンクリート分解物の相互作用が、溶融物からのエアロゾルや核分裂生成物の放出とともに調べられている。着目点は主に MCCI に至った時点及びそれ以後の過酷事故の進展である。このため、強度劣化を評価するためコンクリート浸食が重点的に観察されており、また、放射性物質放出による環境影響を評価するために物質移動が測定されている。

一方で、苛酷事故の後、どのような MCCI 生成物が残されるか、特に元素組成を詳細に分析した報告は見いだせなかった。

(2) KIT 訪問

MOCKA 試験では、コンクリート容器の内部に粉末状の金属 (Fe) と酸化物 (Al_2O_3 、 CaO)、ジルコニウム (Zr) を加えて MCCI を模擬し、溶けたコンクリートの量を測定する。シリカ (SiO_2) とライムストーン (CaCO_3) の比率を変えたコンクリートを用いた試験では、ライムストーンが 700°C から 900°C で二酸化炭素をシリカよりも多量に放出するため、シリカが多いコンクリートに比べ、溶融体がより均一に混合されるという結果を得た。シリカが多いコンクリートでは、ガス量が少ないため、溶融体が有効に混合均一化されにくい。酸化反応としては、Zr が酸素を消費して酸化されたあと、シリコンの酸化が進んだ。得られた生成物中には、シリカが多いコンクリートにおいて、大きい気泡が少数存在した (図 3-1)。ライムストーンが多いコンクリートでは、小径の気泡が全体に分散していた (図 3-2)。1F のコンクリート組成は、本試験のシリカが多いコンクリートの組成により近いとの情報がある。この試験の試料の提供を受けることができたので、平均密度等を測定し、燃料デブリの組成推定に役立てたい。



図 3-1 MOCKA 試験生成物 (シリカ/ライムストーン=50/50) の写真

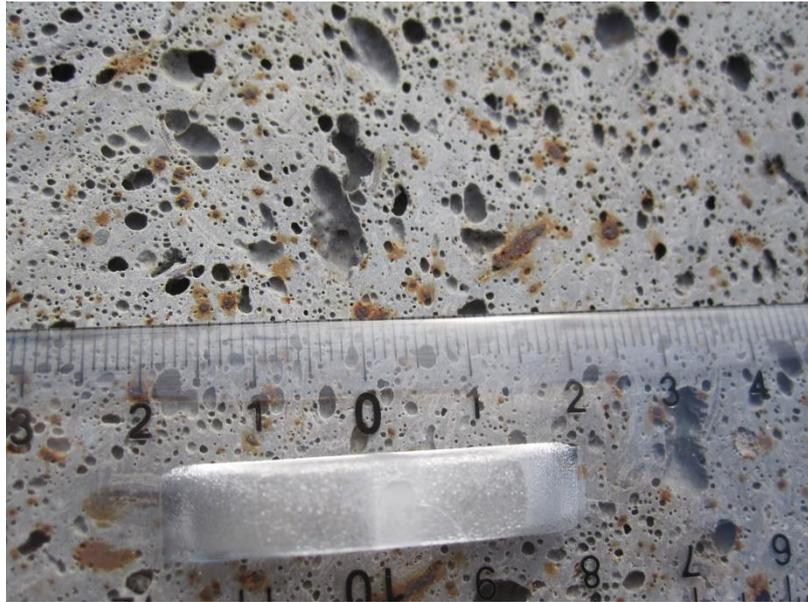


図 3-2 MOCKA 試験生成物（シリカ／ライムストーン=30/70）の写真

1F の MCCI 生成物について、燃料／コンクリート比等を推定する根拠となるような情報を求めたが、同比や気泡の割合が特定の範囲に限定されることを示唆する試験データは得られていないとのことであった。実際の格納容器と MOCKA 試験では酸素雰囲気異なるが、酸素はコンクリートから十分な量が供給されるため、雰囲気の差は結果に影響しないと考えているとのことであった。

12% の鉄筋入りコンクリートを用いた MOCKA 5.1 試験の結果、鉄筋を入れることによりコンクリート（鉄筋を含む全体）のみかけの融点が高くなった。それ以外の効果（例えば浸食が促進されるなど）は見られなかった。鉄筋の存在はメルトの進行やデブリの生成に影響するので、福島のコクリートの情報がわかれば、解析を促進すると考えられる。浸食のスピードは 8 mm/min. だった。軸方向の浸食速度の水平方向浸食速度に対する比 Erosion ratio を測定したが、試験ごとにバラバラな値となり、固定した値ではないようであった。

解析によると、100 °C の水で冷却した場合、MCCI 生成物の厚みが 8 cm 以上あると、崩壊熱による熔融を起こす。上下両面を水で冷やしても 22 cm 以上であれば、崩壊熱を除去しきれない。したがって、このような熔融を阻止することはできないと考えられる。1F の MCCI 生成物についても内部はまだ熔融したままと推測するとのことであった。燃料がコンクリートを浸食し拡散していけば、伝熱面が増えて、熱バランスができる可能性があると考えられる。

MOCKA 試験から得られたデータを基に、熱流動と化学反応を 2 次元円筒形状等で扱う数値計算コード WECHSL を開発している。同コードは過去に KIT で行われた同種の試験のデータにより有効性が確認されている。今回の調査で WECHSL コードに関する詳細な文書を手に入れた。⁵⁻⁷⁾ 計算モデルで考慮しているパラメータ等の情報は、1F の MCCI 生成物の平均組成推定に有益な情報である。

WECHSL コードは以下のエネルギーバランス方程式を、表 3-1 に示すような化学反応の情報を用いて、繰り返し数値計算により解く。⁵⁾

$$H_{bj+1} = H_{bj} + \left[\sum_k m_k h_k + \sum_l Q_l + \Omega_{chem} + \Omega_{decay} \right] \delta_\tau \quad (3-1)$$

ここで、 H_b はバルクエンタルピー、 m_k は第 k 層を出入りする質量流速、 h_k は比エンタルピー、 Q_l は第 l 層の境界を通過する熱流束、 Ω_{chem} は化学反応熱、 Ω_{decay} は放射性物質の崩壊熱をそれぞれ表す。溶融層の質量は以下の式で計算される。

$$m_{bj+1} = m_{bj} + \sum_k m_k \delta_\tau \quad (3-2)$$

バルク温度は以下の式で計算される。

$$T_{bj+1} = \left(\frac{H_{bj+1}}{m_{bj+1}} + \Delta + c_p T_0 \right) / c \quad T_0 = 298 K \quad (3-3)$$

ここで Δ 、 c は T_b の温度により決定される。

表 3-1 WECHSL コードで計算するコンクリートの熱分解反応⁵⁾

分解温度 (K)	分解反応	分解反応熱 (kJ/mol)
1573	$\text{SiO}_{2s} \rightarrow \text{SiO}_{2l}$	-8.53
	$\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3$	+88.5
	$\text{CaSiO}_{3s} \rightarrow \text{CaSiO}_{3l}$	-46.5
1167	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_{2g}$	-165.5
796	$\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}_g$	-99.5
400	$\text{H}_2\text{O}_l \rightarrow \text{H}_2\text{O}_g$	-39.4

3.1.3 まとめ

MCCI に関する文献は、コンクリートの浸食とそれによる強度低下に焦点を当てたものがほとんどであり、MCCI 生成物の性状、特に元素組成の詳細な分析を示したものは見いだせなかった。MCCI 生成物の元素組成の研究は、実際のところ、臨界特性の予備検討³⁾を受けて JAEA で始まったところである。⁸⁾

KIT 訪問により次のような知見を得た。MCCI を模擬した MOCKA 試験では、燃料/コンクリート比を限定するデータはなかった。また、鉄筋の影響によりみかけの融点が上昇するほか、シリカとライム石の混合比によって MCCI 生成物中の混合の程度や気泡の大きさに差が生じた。MCCI 計算コード WECHSL では、MCCI を考慮した浸食の進行を計算できる。同コードは、熱流動と化学反応をモデル化しており、円筒及び平板形状 (2次元) を扱える。本訪問では計算モデルの資料も入手している。

3.2 MCCI 生成物の無限増倍率解析

3.2.1 目的及び概要

(1) 目的

前節で調査結果を述べたとおり、MCCI 生成物性状のうち元素組成を詳しく予想するに足る知見は現時点において得られていない。また、燃料とコンクリートの混合割合を限定する知見もない。このため、コンクリートの燃料の混合割合を幅広く想定しなければならない。

MCCI の有無に関わらず、コンクリートと接している燃料を回収するにあたって、両者を厳密に分別することは難しいと考えられ、臨界管理の観点では燃料と水分を含むコンクリートの混合物が生じることを想定する必要がある。

一方、格納容器底部は1~3号機のいずれも冠水していることが確認されている。前節で示したように MCCI 生成物は多孔質なものと予想されており、亀裂があれば容易に水分が MCCI 生成物中に浸入すると考えられる。MCCI 生成物若しくはコンクリート又は燃料を水中で破碎・切削等の工法により回収する場合には、水中にこれらの混合物の微粉が一時的にせよ浮遊する。このため、水分量も幅広く想定しなければならない。

これらの想定の下で、臨界管理が必要な性状条件範囲を絞り込むため、3.3 節で述べる臨界量解析に先立ち、無限増倍率 (k_{∞}) を解析した。さらに、可溶性中性子毒物を用いた未臨界担保の検討として、 $k_{\infty} < 1$ となる水中ホウ素濃度を探索した。

(2) 概要

燃料、コンクリート及び水の 3 者の混合物について解析した。本節では、化学反応としての MCCI の有無に関わらず、燃料とコンクリートの混合物を MCCI 生成物と称する。このため、MCCI 生成物を特徴づけるパラメータは、燃料組成及び燃料とコンクリートの混合比である。さらに、MCCI 生成物とその周りを流れる水の体積割合が中性子の減速を大きく左右する。

本節では、燃料組成として、まず、 ^{235}U 濃縮度が 5 wt%、4 wt% 及び 3 wt% の 3 種類の二酸化ウラン (UO_2) を取扱う。これらは核分裂生成物 (FP) を含まない。さらに、ウラン酸化物燃料が 14 GWd/t まで燃焼した組成 (燃焼燃料) も用いる。燃料とコンクリートの混合比は MCCI 生成物中のコンクリート体積割合 (%) で示し、水体積 (V_m) と MCCI 生成物体積 (V_f) の比を V_m/V_f と表示する。

3.2.2 無限増倍率解析

(1) 解析条件

コンクリート体積割合及び V_m/V_f をパラメータとし、

- ・ 3.3 節で述べる臨界量解析のため、 $k_{\infty} > 1$ となる条件
- ・ 未臨界担保の目安として $k_{\infty} = 1$ となる水中ホウ素濃度

を評価した。

計算モデルは、MCCI 生成物を燃料とコンクリートの均質混合物とし、

- ・ MCCI 生成物と水から成る 2 領域非均質球体系
- ・ 両者の体積比を保存した 1 領域均質体系

の 2 種類を用いた。図 3-3 に 2 領域非均質球体系のモデルを示す。

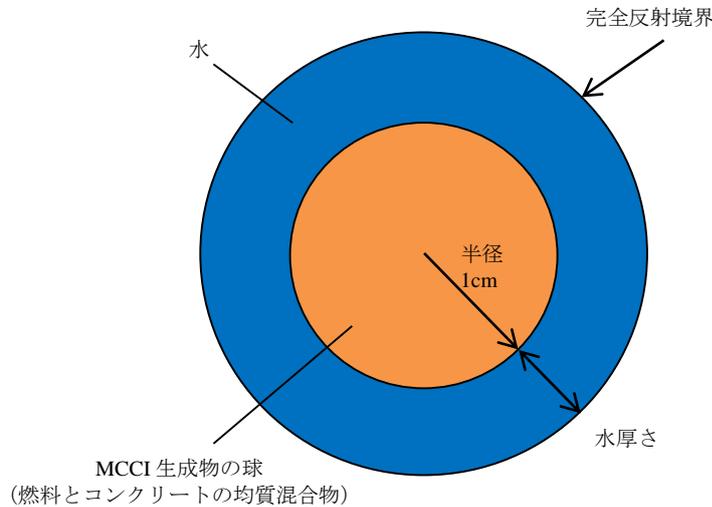


図 3-3 無限増倍率計算モデル (非均質体系)

使用した計算コード及び核データライブラリは、 $k_{\infty} > 1$ となる条件の評価については、連続エネルギーモンテカルロコード MVP⁹⁾ と JENDL-4.0¹⁰⁾ の組合せである。モンテカルロ計算におけるヒストリ数は 500 万 (1 サイクルあたり 10,000 ヒストリ。有効サイクル 500。統計に用いないサイクル 100。) とした。未臨界担保の毒物濃度解析では、汎用核計算コードシステム SRAC 中の衝突確率法計算 PIJ¹¹⁾ と JENDL-4.0 の組み合わせを用いた。

MCCI 生成物中の燃料は 3 ケースの UO_2 (^{235}U 濃縮度 5 wt%、4 wt% 及び 3 wt%) 及び 1 ケースの燃焼燃料 (冷却水ボイド率 70% で燃焼度 14 GWd/t まで燃焼し、その後 2.5 年が経過した STEP 3 集合体¹²⁾ について、平均組成を統合化燃焼計算コードシステム SWAT¹³⁾ で求めたもの。Gd の燃焼による効果も考慮した。) の合計 4 ケースとした。燃焼燃料中の FP について、福島事故の状況を鑑み ^{133}Cs は除外し、考慮する核種は以下の 11 核種とした。

^{95}Mo 、 ^{99}Tc 、 ^{103}Rh 、 ^{143}Nd 、 ^{145}Nd 、 ^{147}Sm 、 ^{149}Sm 、 ^{150}Sm 、 ^{152}Sm 、 ^{153}Eu 及び ^{155}Gd

また、考慮するアクチノイド核種は ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu 、 ^{242}Pu 及び ^{241}Am の 9 核種とした。¹⁴⁾ 計算に供した各燃料の密度は、STEP 3 燃料集合体の仕様に合わせて、 10.63 g/cm^3 (理論密度の 97%) である。

表 3-2 に UO_2 、表 3-3 に燃焼燃料の各核種の原子個数密度を示す。また、水の原子個数密度を表 3-4 に、MCCI 生成物中のコンクリートの組成として普通コンクリートを仮定したものを表 3-5¹⁵⁾ に、水中のホウ素の原子個数密度を表 3-6 に示す。

表 3-2 UO₂ の原子個数密度 (単位: atoms/b cm)

²³⁵ U 濃縮度	5 wt%	4 wt%	3 wt%
²³⁵ U	1.200E-03	9.604E-04	7.203E-04
²³⁸ U	2.252E-02	2.276E-02	2.300E-02
O	4.744E-02	4.744E-02	4.744E-02

表 3-3 燃焼燃料の原子個数密度 (単位: atoms/b cm)

²³⁴ U	6.055E-06	⁹⁵ Mo	2.114E-05
²³⁵ U	6.310E-04	⁹⁹ Tc	2.137E-05
²³⁸ U	2.284E-02	¹⁰³ Rh	1.215E-05
²³⁸ Pu	4.411E-07	¹³³ Cs	2.302E-05
²³⁹ Pu	1.038E-04	¹⁴³ Nd	1.779E-05
²⁴⁰ Pu	1.931E-05	¹⁴⁵ Nd	1.266E-05
²⁴¹ Pu	7.888E-06	¹⁴⁷ Sm	3.575E-06
²⁴² Pu	1.028E-06	¹⁴⁹ Sm	1.198E-07
²⁴¹ Am	1.192E-06	¹⁵⁰ Sm	4.106E-06
		¹⁵² Sm	1.926E-06
		¹⁵³ Eu	1.267E-06
		¹⁵⁵ Gd	5.895E-07
		O	4.805E-02

表 3-4 水 (25°C) の原子個数密度 (単位: atoms/b cm)

H	6.666E-02
O	3.333E-02

表 3-5 コンクリート (2.3g/cm³) の原子個数密度 (単位: atoms/b cm) ¹⁵⁾

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

表 3-6 水中のホウ素の原子個数密度 (単位: atoms/b cm)

ホウ素濃度 (ppm)	¹⁰ B	¹¹ B
1000	1.099E-05	4.460E-05
2000	2.199E-05	8.929E-05
3000	3.302E-05	1.341E-04
4000	4.408E-05	1.789E-04
5000	5.515E-05	2.239E-04
6000	6.625E-05	2.690E-04
7000	7.737E-05	3.141E-04
8000	8.851E-05	3.593E-04
9000	9.967E-05	4.046E-04
10000	1.109E-04	4.501E-04
12000	1.333E-04	5.412E-04
15000	1.671E-04	6.785E-04
20000	2.240E-04	9.093E-04
30000	3.394E-04	1.378E-03
40000	4.573E-04	1.857E-03
50000	5.776E-04	2.345E-03

(2) 解析結果—水中のホウ素無し

3.3 節の臨界量解析のパラメータ範囲設定のため、 V_m/V_f をパラメータとして $k_{\infty} > 1$ となる範囲を探索した。また、臨界量解析の計算モデルは非均質体系と均質体系の 2 種類があるため、 k_{∞} の計算も非均質体系と均質体系で行った。

表 3-7 (1)~(4) に、非均質体系の k_{∞} を、表 3-8 (1)~(4) に均質体系の k_{∞} を示す。表中の赤字で示す欄は、 $k_{\infty} > 1$ であり、臨界量解析の対象となることを示す。また表 3-7 (1)~(4) 中のアンダーラインで示す値は、 k_{∞} が最大（最適減速）となっており、非均質体系の臨界量解析を行う条件である。また、均質体系と非均質体系の k_{∞} の比較を図 3-4 (1)~(4) に示す。

均質体系で k_{∞} が最大となる V_m/V_f は、非均質体系の場合よりも、コンクリート割合が少ないときは大きく、コンクリート割合が多いとき小さくなる傾向がある。 k_{∞} の最大値は非均質体系のものが均質体系のものより大きい。また、 V_m/V_f が小さいうちは非均質体系と均質体系で k_{∞} はほぼ同じであり、そこから V_m/V_f が増加していくと、非均質体系の k_{∞} が大きくなる。最大値を過ぎた後、両者は逆転し均質体系の k_{∞} の方が大きくなる。

表 3-7 (1) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 5 wt% UO_2) ・水非均質体系の無限増倍率

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段 : コンクリート、下段 : UO_2)					
		0%	20%	40%	60%	80%	90%
		100%	80%	60%	40%	20%	10%
0.0032	0.010	0.85628	0.91834	0.97067	1.05626	1.20062	1.28182
0.0066	0.020	0.88053	0.93302	0.98609	1.07331	1.21498	1.29046
0.01	0.03	0.90105	0.94821	1.00248	1.08935	1.22826	1.29866
0.02	0.06	0.94980	0.99194	1.04839	1.13507	1.26521	1.32001
0.03	0.09	0.99245	1.03372	1.09169	1.17755	1.29636	1.33698
0.04	0.12	1.03123	1.07353	1.13229	1.21462	1.32315	1.35006
0.05	0.16	1.06831	1.11123	1.16856	1.24745	1.34583	1.35974
0.06	0.19	1.10287	1.14572	1.20260	1.27786	1.36560	1.36683
0.08	0.26	1.16584	1.20810	1.26098	1.32828	1.39675	1.37597
0.105	0.35	1.23355	1.27326	1.32133	1.37800	1.42438	1.37794
0.15	0.52	1.33085	1.36347	1.40190	1.44112	1.45168	1.36547
0.2	0.73	1.40941	1.43552	1.46239	1.48401	1.45944	1.33625
0.24	0.91	1.45573	1.47647	1.49513	1.50391	1.45488	1.30511
0.3	1.20	1.50722	1.51851	1.52596	1.51722	1.43450	1.25110
0.4	1.74	1.55305	1.55289	1.54302	1.50837	1.37784	1.15103
0.5	2.38	1.56671	1.55519	1.53088	1.47387	1.30432	1.04754
0.6	3.10	1.55684	1.53622	1.49873	1.42258	1.22236	0.94688
0.7	3.91	1.52992	1.50126	1.45254	1.36031	1.13665	0.85183
0.8	4.83	1.49048	1.45428	1.39616	1.29117	1.05060	0.76415
0.9	5.86	1.44137	1.39921	1.33362	1.21826	0.96706	0.68477
1.0	7.00	1.38606	1.33844	1.26603	1.14366	0.88717	0.61336
1.2	9.65	1.26172	1.20725	1.12694	0.99674	0.74279	
1.5	14.63	1.06639	1.00841	0.92501	0.79676	0.56617	
2.0	26.00	0.77573	0.72211	0.64879	0.54137		
2.5	41.88	0.55749	0.51419	0.45453	0.37278		
最大と なる点	減速材厚さ	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.105
	V_m/V_f	2.38	2.38	1.74	1.20	0.73	0.35

表 3-7 (2) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 4 wt% UO_2) ・水非均質体系の無限増倍率

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段 : コンクリート、下段 : UO_2)					
		0%	20%	40%	60%	80%	90%
		100%	80%	60%	40%	20%	10%
0.0032	0.010	0.77519	0.84622	0.91260	1.01285	1.16334	1.23116
0.0066	0.020	0.80133	0.86371	0.93090	1.03103	1.17754	1.23940
0.01	0.03	0.82342	0.88072	0.94862	1.04893	1.19097	1.24697
0.02	0.06	0.87893	0.93184	1.00082	1.09712	1.22644	1.26586
0.03	0.09	0.92773	0.97928	1.04809	1.14115	1.25638	1.28016
0.04	0.12	0.97209	1.02389	1.09109	1.17804	1.28185	1.29077
0.05	0.16	1.01439	1.06557	1.13024	1.21302	1.30375	1.29832
0.06	0.19	1.05270	1.10274	1.16569	1.24267	1.32202	1.30383
0.08	0.26	1.12161	1.16932	1.22647	1.29286	1.35038	1.30859
0.105	0.35	1.19497	1.23765	1.28739	1.34188	1.37444	1.30624
0.15	0.52	1.29599	1.33034	1.36715	1.40110	1.39545	1.28572
0.2	0.73	1.37576	1.40131	1.42548	1.43970	1.39670	1.24928
0.24	0.91	1.42263	1.44079	1.45601	1.45649	1.38631	1.21315
0.3	1.20	1.47121	1.48030	1.48241	1.46412	1.35936	1.15377
0.4	1.74	1.51339	1.50888	1.49274	1.44650	1.29317	1.04803
0.5	2.38	1.52149	1.50568	1.47390	1.40421	1.21270	0.94261
0.6	3.10	1.50717	1.48092	1.43537	1.34672	1.12622	0.84299
0.7	3.91	1.47619	1.44076	1.38407	1.27914	1.03815	0.75127
0.8	4.83	1.43243	1.38987	1.32346	1.20664	0.95198	0.66864
0.9	5.86	1.38026	1.33162	1.25724	1.13147	0.86968	0.59487
1.0	7.00	1.32202	1.26852	1.18834	1.05604	0.79260	0.52914
1.2	9.65	1.19463	1.13477	1.04792	0.91074	0.65541	
1.5	14.63	1.00077	0.93798	0.85038	0.71831	0.49326	
2.0	26.00	0.71911	0.66347	0.58834			
2.5	41.88	0.51368	0.46864				
最大と なる点	減速材厚さ	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.08
	V_m/V_f	2.38	1.74	1.74	1.20	0.73	0.26

表 3-7 (3) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 3 wt% UO_2) ・水非均質体系の無限増倍率

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段：コンクリート、下段： UO_2)					
		0%	20%	40%	60%	80%	90%
		100%	80%	60%	40%	20%	10%
0.0032	0.010	0.68240	0.76167	0.84372	0.95879	1.10889	1.15614
0.0066	0.020	0.70960	0.78174	0.86409	0.97751	1.12244	1.16351
0.01	0.03	0.73358	0.80207	0.88243	0.99164	1.13531	1.16943
0.02	0.06	0.79525	0.85978	0.94161	1.04719	1.16889	1.18479
0.03	0.09	0.85056	0.91446	0.99301	1.09107	1.19670	1.19594
0.04	0.12	0.90123	0.96308	1.03883	1.12911	1.22034	1.20342
0.05	0.16	0.94851	1.00818	1.07953	1.16276	1.23952	1.20805
0.06	0.19	0.99155	1.04839	1.11589	1.19228	1.25586	1.21066
0.08	0.26	1.06642	1.11854	1.17729	1.24070	1.27976	1.20942
0.105	0.35	1.14376	1.18863	1.23834	1.28675	1.29850	1.20095
0.15	0.52	1.24809	1.28174	1.31538	1.34090	1.31032	1.17152
0.2	0.73	1.32717	1.35057	1.36895	1.37254	1.30284	1.12705
0.24	0.91	1.37210	1.38707	1.39526	1.38364	1.28621	1.08626
0.3	1.20	1.41720	1.43003	1.41605	1.38329	1.25083	1.02164
0.4	1.74	1.45173	1.44100	1.41610	1.35451	1.17352	0.91238
0.5	2.38	1.45274	1.43003	1.38791	1.30298	1.08647	0.80815
0.6	3.10	1.43120	1.39783	1.34185	1.23769	0.99619	0.71310
0.7	3.91	1.39415	1.35134	1.28417	1.16502	0.90778	0.62817
0.8	4.83	1.34579	1.29555	1.21893	1.08873	0.82368	0.55332
0.9	5.86	1.28967	1.23363	1.14984	1.01239	0.74542	
1.0	7.00	1.22893	1.16780	1.07894	0.93719		
1.2	9.65	1.09951	1.03330	0.93961	0.79272		
1.5	14.63	0.90875	0.84122	0.75067			
2.0	26.00	0.64329	0.58499				
2.5	41.88	0.45517					
最大と なる点	減速材厚さ	0.5	0.4	0.4	0.3	0.15	0.08
	V_m/V_f	2.38	1.74	1.74	1.20	0.52	0.26

表 3-7 (4) MCCI 生成物（燃焼燃料）・水非均質体系の無限増倍率

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段：コンクリート、下段： UO_2)					
		0%	20%	40%	60%	80%	90%
		100%	80%	60%	40%	20%	10%
0.0032	0.010	0.69702	0.75302	0.79346	0.86439	0.99703	1.07472
0.0066	0.020	0.72054	0.76610	0.80702	0.88007	1.01045	1.08299
0.01	0.03	0.73998	0.77913	0.82129	0.89510	1.02350	1.09058
0.02	0.06	0.78486	0.81729	0.86221	0.93805	1.05858	1.11050
0.03	0.09	0.82264	0.85460	0.90191	0.97762	1.08822	1.12492
0.04	0.12	0.85775	0.89075	0.93885	1.01273	1.11422	1.13684
0.05	0.16	0.89072	0.92447	0.97271	1.04377	1.13610	1.14531
0.06	0.19	0.92281	0.95601	1.00438	1.07205	1.15410	1.15172
0.08	0.26	0.97925	1.01320	1.05951	1.12057	1.18363	1.15761
0.105	0.35	1.04148	1.07373	1.11584	1.16821	1.20934	1.15740
0.15	0.52	1.13148	1.15996	1.19296	1.22859	1.23333	1.14130
0.2	0.73	1.20590	1.22707	1.25089	1.26826	1.23835	1.10920
0.24	0.91	1.25030	1.26654	1.28186	1.28728	1.23157	1.07740
0.3	1.20	1.29872	1.30734	1.31143	1.29877	1.20919	1.02413
0.4	1.74	1.34331	1.34005	1.32710	1.28787	1.15146	0.92880
0.5	2.38	1.35620	1.34231	1.31422	1.25277	1.07946	0.83389
0.6	3.10	1.34745	1.32362	1.28289	1.20305	1.00165	0.74469
0.7	3.91	1.32242	1.29047	1.23871	1.14323	0.92251	0.66246
0.8	4.83	1.28570	1.24616	1.18523	1.07819	0.84509	0.58838
0.9	5.86	1.24015	1.19494	1.12651	1.01083	0.77129	
1.0	7.00	1.18869	1.13868	1.06494	0.94288	0.70200	
1.2	9.65	1.07593	1.01980	0.93915	0.81248		
1.5	14.63	0.90166	0.84301	0.76164	0.64061		
2.0	26.00	0.64843	0.59633	0.52656			
最大と なる点	減速材厚さ	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.08
	V_m/V_f	2.38	1.74	1.74	1.20	0.73	0.26

表 3-8 (1) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 5 wt% UO_2) ・水均質体系の無限増倍率

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段 : コンクリート、下段 : UO_2)					
		0%	20%	40%	60%	80%	90%
		100%	80%	60%	40%	20%	10%
0.0032	0.010	0.85482	0.91716	0.96849	1.05406	1.20028	1.28220
0.0066	0.020	0.87768	0.92973	0.98330	1.06968	1.21314	1.28945
0.01	0.03	0.89462	0.94170	0.99558	1.08457	1.22472	1.29635
0.02	0.06	0.93320	0.97355	1.03178	1.12090	1.25586	1.31460
0.03	0.09	0.96192	1.00429	1.06550	1.15652	1.28056	1.32945
0.04	0.12	0.98840	1.03309	1.09629	1.18576	1.30534	1.33904
0.05	0.16	1.01324	1.05967	1.12419	1.21261	1.32284	1.34522
0.06	0.19	1.03526	1.08497	1.14900	1.23566	1.33915	1.35174
0.08	0.26	1.08134	1.13040	1.19507	1.27688	1.36464	1.35596
0.105	0.35	1.13012	1.18101	1.24336	1.31696	1.38716	1.35567
0.15	0.52	1.20453	1.25167	1.30770	1.36993	1.40790	1.34165
0.2	0.73	1.26955	1.31191	1.36135	1.40697	1.41406	1.31269
0.24	0.91	1.30867	1.34766	1.38874	1.42436	1.40989	1.28205
0.3	1.20	1.35820	1.39018	1.42159	1.44075	1.39331	1.23289
0.4	1.74	1.41304	1.43483	1.45087	1.44440	1.34905	1.14052
0.5	2.38	1.44460	1.45714	1.45725	1.42928	1.28931	1.04569
0.6	3.10	1.46193	1.46387	1.44930	1.39939	1.22283	0.95329
0.7	3.91	1.46558	1.45865	1.43230	1.36096	1.15158	0.86548
0.8	4.83	1.46240	1.44565	1.40507	1.31571	1.07973	0.78347
0.9	5.86	1.45183	1.42477	1.37200	1.26564	1.00734	0.70810
1.0	7.00	1.43376	1.39822	1.33447	1.21163	0.93716	0.63974
1.2	9.65	1.38440	1.33139	1.24769	1.10060	0.80576	0.52212
1.5	14.63	1.28287	1.21081	1.10337	0.93417	0.63635	0.38794
2.0	26.00	1.08410	0.99184	0.86669	0.69146	0.42965	0.24445
最大と なる点	減速材厚さ	0.7	0.6	0.5	0.4	0.2	0.08
	V_m/V_f	3.91	3.10	2.38	1.74	0.73	0.26

表 3-8 (2) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 4 wt% UO_2) ・水均質体系の無限増倍率

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段 : コンクリート、下段 : UO_2)					
		0%	20%	40%	60%	80%	90%
		100%	80%	60%	40%	20%	10%
0.0032	0.010	0.77340	0.84515	0.91154	1.01282	1.16284	1.23170
0.0066	0.020	0.79771	0.85859	0.92663	1.02678	1.17554	1.23812
0.01	0.03	0.81654	0.87291	0.94165	1.04344	1.18752	1.24401
0.02	0.06	0.86018	0.91280	0.98322	1.08475	1.21635	1.26102
0.03	0.09	0.89493	0.94818	1.02047	1.11931	1.24395	1.27230
0.04	0.12	0.92650	0.98066	1.05482	1.14884	1.26458	1.27954
0.05	0.16	0.95663	1.01197	1.08427	1.17894	1.28027	1.28489
0.06	0.19	0.98208	1.04068	1.11357	1.20280	1.29634	1.28884
0.08	0.26	1.03489	1.09075	1.15929	1.24291	1.31917	1.28981
0.105	0.35	1.08881	1.14548	1.20944	1.28358	1.33885	1.28456
0.15	0.52	1.16903	1.22063	1.27454	1.33195	1.35179	1.26195
0.2	0.73	1.23638	1.27991	1.32518	1.36493	1.35392	1.22549
0.24	0.91	1.27744	1.31658	1.35364	1.37969	1.34325	1.19145
0.3	1.20	1.32536	1.35436	1.38165	1.39062	1.32004	1.13498
0.4	1.74	1.37530	1.39500	1.40299	1.38491	1.26388	1.03599
0.5	2.38	1.40349	1.40987	1.40268	1.35970	1.19712	0.93847
0.6	3.10	1.41579	1.41036	1.38817	1.32212	1.12306	0.84576
0.7	3.91	1.41430	1.39856	1.36212	1.27642	1.04730	0.75941
0.8	4.83	1.40524	1.37818	1.32847	1.22497	0.97221	0.68073
0.9	5.86	1.38624	1.35119	1.28912	1.16893	0.89891	0.61011
1.0	7.00	1.36318	1.31955	1.24517	1.11074	0.82939	0.54680
1.2	9.65	1.30193	1.24239	1.14859	0.99310	0.70172	0.44074
1.5	14.63	1.18830	1.10933	0.99668	0.82598	0.54390	0.32293
2.0	26.00	0.97606	0.88284	0.76007	0.59439	0.35909	0.20044
最大と なる点	減速材厚さ	0.6	0.6	0.4	0.3	0.2	0.08
	V_m/V_f	3.10	3.10	1.74	1.20	0.73	0.26

表 3-8 (3) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 3 wt% UO_2) ・水均質体系の無限増倍率

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段：コンクリート、下段： UO_2)					
		0%	20%	40%	60%	80%	90%
		100%	80%	60%	40%	20%	10%
0.0032	0.010	0.68087	0.75989	0.84223	0.95765	1.10833	1.15585
0.0066	0.020	0.70567	0.77621	0.85978	0.97391	1.12032	1.16230
0.01	0.03	0.72637	0.79460	0.87695	0.99230	1.13219	1.16745
0.02	0.06	0.77435	0.83974	0.92525	1.03361	1.16131	1.17993
0.03	0.09	0.81527	0.88109	0.96448	1.06960	1.18361	1.18818
0.04	0.12	0.85400	0.92095	1.00064	1.10161	1.20331	1.19353
0.05	0.16	0.88891	0.95429	1.03474	1.12789	1.21853	1.19545
0.06	0.19	0.91977	0.98631	1.06335	1.15257	1.23202	1.19686
0.08	0.26	0.97879	1.04185	1.11352	1.19213	1.25017	1.19208
0.105	0.35	1.03986	1.09814	1.16259	1.22868	1.26400	1.18106
0.15	0.52	1.12400	1.17297	1.22680	1.27386	1.27074	1.15047
0.2	0.73	1.19095	1.23253	1.27294	1.30074	1.26083	1.10463
0.24	0.91	1.23121	1.26544	1.29604	1.31156	1.24506	1.06572
0.3	1.20	1.27556	1.30015	1.31799	1.31281	1.21244	1.00362
0.4	1.74	1.31958	1.33137	1.32910	1.29522	1.14482	0.90003
0.5	2.38	1.33913	1.33792	1.31918	1.25898	1.06779	0.80126
0.6	3.10	1.34303	1.32867	1.29588	1.21187	0.98842	0.71154
0.7	3.91	1.33374	1.30914	1.25974	1.15639	0.90974	0.63077
0.8	4.83	1.31533	1.27999	1.21765	1.09763	0.83436	0.55890
0.9	5.86	1.29069	1.24578	1.17047	1.03644	0.76229	0.49596
1.0	7.00	1.25899	1.20540	1.12053	0.97493	0.69568	0.44050
1.2	9.65	1.18545	1.11628	1.01494	0.85536	0.57787	0.34992
1.5	14.63	1.05646	0.97291	0.85827	0.69291	0.43804	0.25242
2.0	26.00	0.83792	0.74650	0.63145	0.48199	0.28197	0.15425
最大と なる点	減速材厚さ	0.6	0.5	0.4	0.3	0.15	0.06
	V_m/V_f	3.10	2.38	1.74	1.20	0.52	0.19

表 3-8 (4) MCCI 生成物（燃焼燃料）・水均質体系の無限増倍率

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段：コンクリート、下段： UO_2)					
		0%	20%	40%	60%	80%	90%
		100%	80%	60%	40%	20%	10%
0.0032	0.010	0.69608	0.75232	0.79322	0.86325	0.99757	1.07424
0.0066	0.020	0.71773	0.76282	0.80334	0.87633	1.00963	1.08148
0.01	0.03	0.73399	0.77360	0.81398	0.88757	1.02047	1.08862
0.02	0.06	0.76880	0.80062	0.84641	0.92504	1.05119	1.10436
0.03	0.09	0.79372	0.82648	0.87658	0.95578	1.07354	1.11743
0.04	0.12	0.81551	0.85110	0.90365	0.98427	1.09556	1.12679
0.05	0.16	0.83618	0.87399	0.92984	1.00780	1.11513	1.13318
0.06	0.19	0.85688	0.89630	0.95164	1.03092	1.12820	1.13754
0.08	0.26	0.89542	0.93665	0.99444	1.07001	1.15360	1.14095
0.105	0.35	0.93885	0.98248	1.03930	1.10826	1.17343	1.13735
0.15	0.52	1.00601	1.04903	1.09979	1.15750	1.19225	1.11917
0.2	0.73	1.06269	1.10457	1.14963	1.19377	1.19484	1.08672
0.24	0.91	1.10028	1.13819	1.17718	1.21134	1.18880	1.05711
0.3	1.20	1.14768	1.17825	1.20946	1.22554	1.16984	1.00581
0.4	1.74	1.19949	1.21996	1.23460	1.22492	1.12160	0.91680
0.5	2.38	1.23023	1.24007	1.23848	1.20559	1.06114	0.82843
0.6	3.10	1.24517	1.24549	1.22899	1.17410	0.99453	0.74431
0.7	3.91	1.24992	1.23769	1.20875	1.13306	0.92661	0.66729
0.8	4.83	1.24283	1.22169	1.17999	1.08643	0.85808	0.59682
0.9	5.86	1.22957	1.19970	1.14494	1.03611	0.79196	0.53381
1.0	7.00	1.20915	1.17084	1.10455	0.98374	0.72960	0.47769
1.2	9.65	1.15572	1.10208	1.01800	0.87788	0.61552	0.38385
1.5	14.63	1.05288	0.98216	0.88062	0.72659	0.47499	0.28029
2.0	26.00	0.86209	0.77762	0.66748	0.51961	0.31195	0.17342
最大と なる点	減速材厚さ	0.7	0.6	0.5	0.3	0.2	0.08
	V_m/V_f	3.91	3.10	2.38	1.20	0.73	0.26

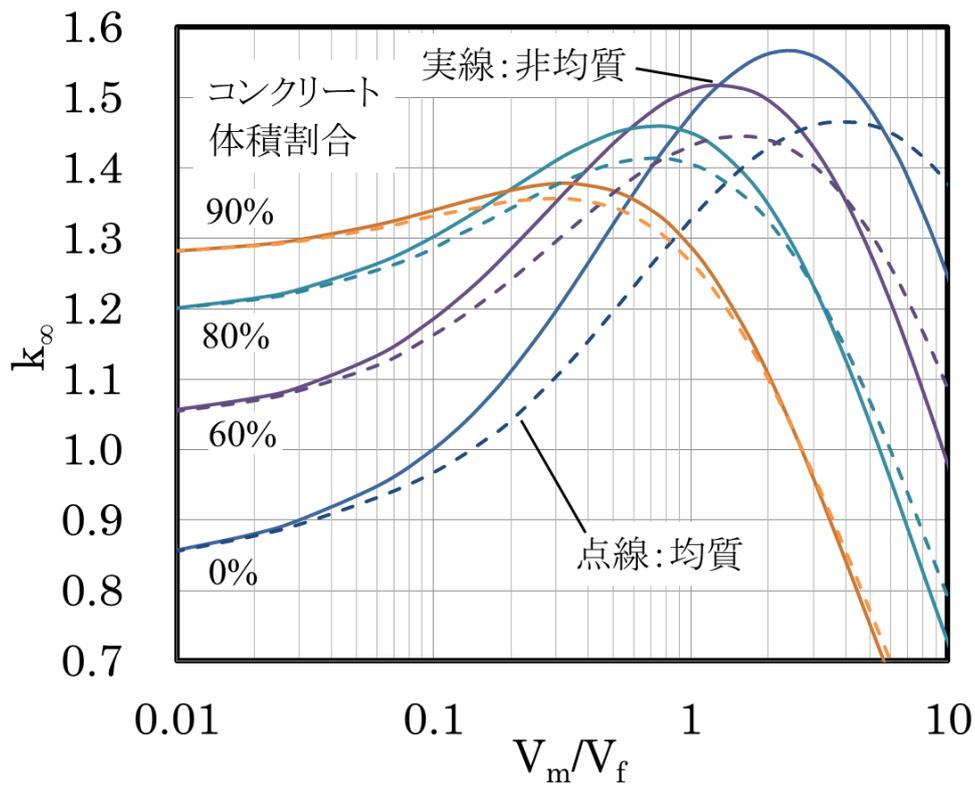


図 3-4 (1) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 5 wt% UO_2) ・水混合物の無限増倍率

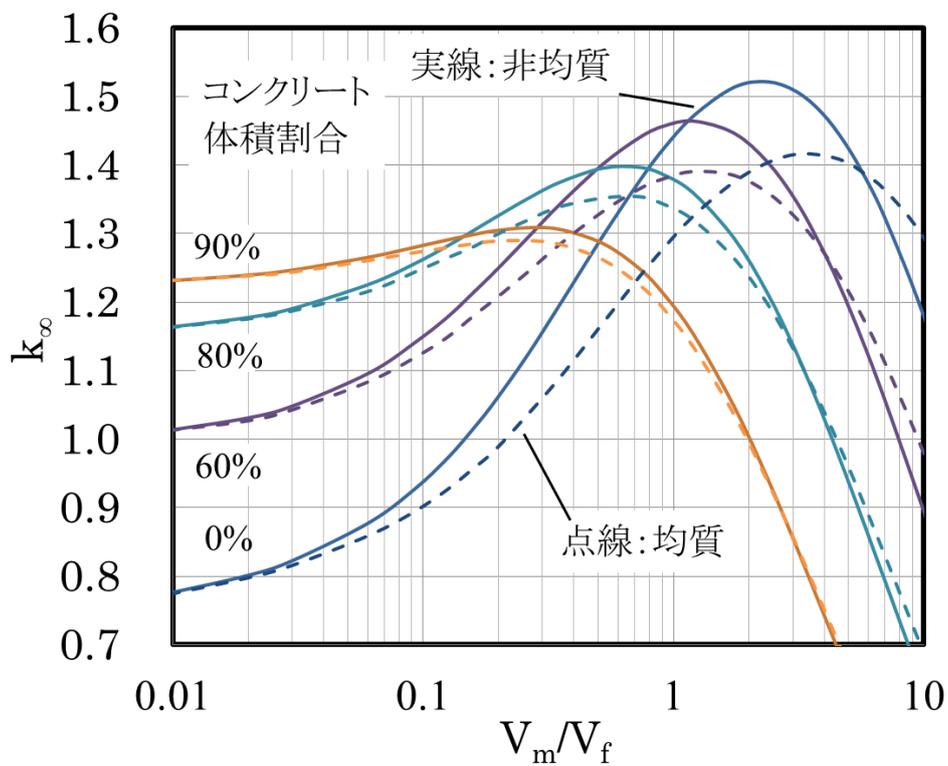


図 3-4 (2) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 4 wt% UO_2) ・水混合物の無限増倍率

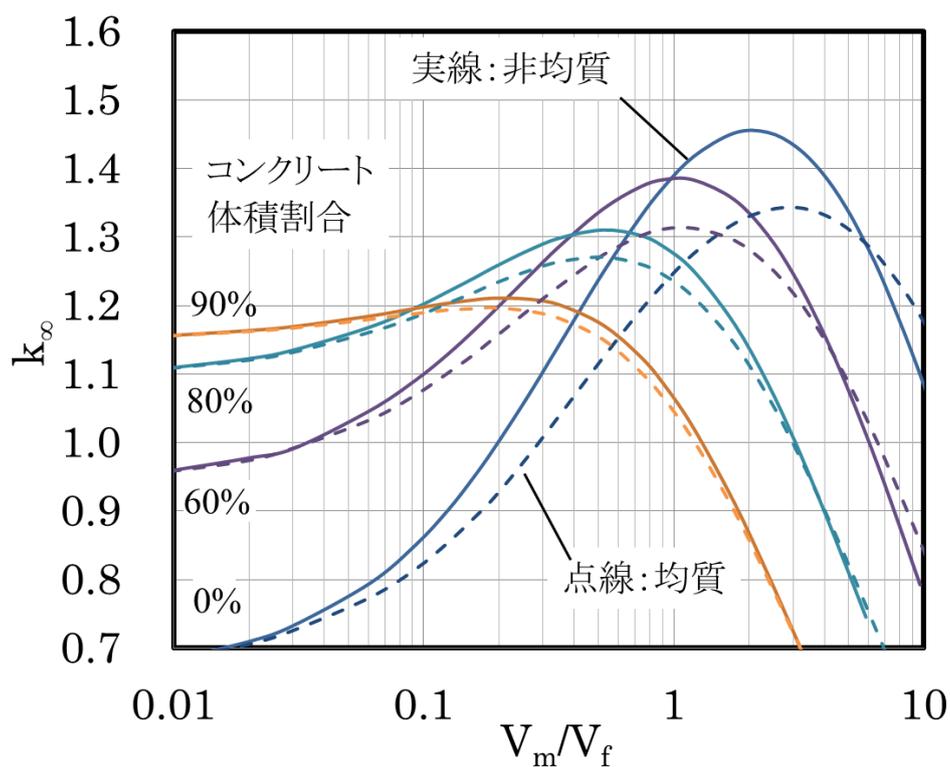


図 3-4 (3) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 3 wt% UO_2) ・水混合物の無限増倍率

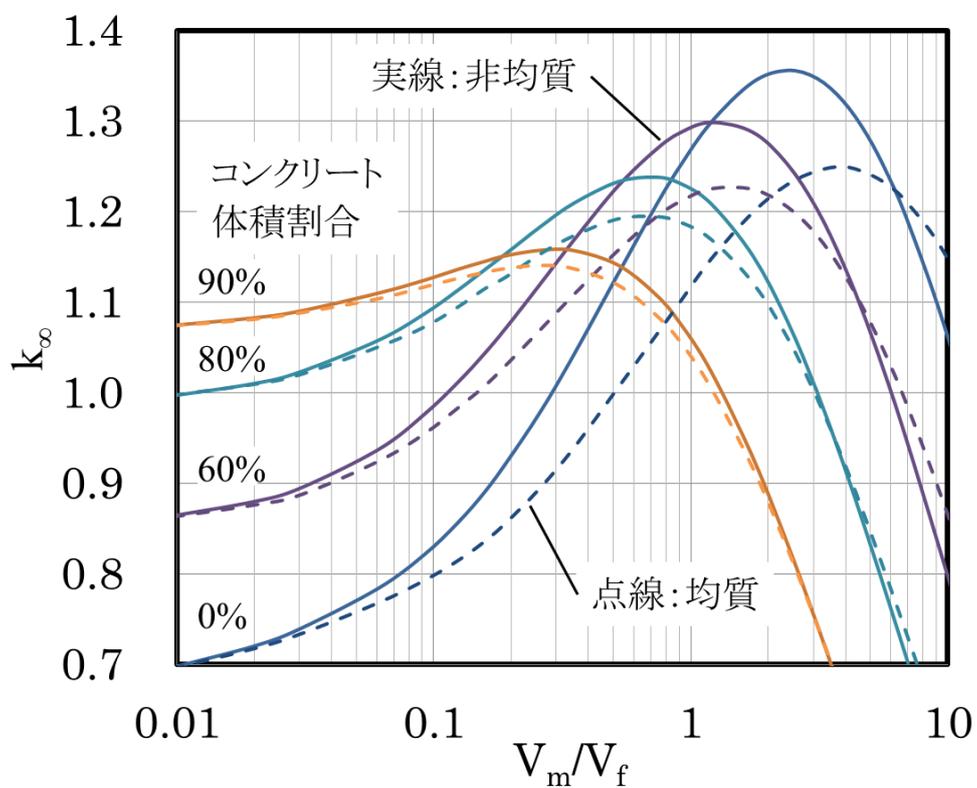


図 3-4 (4) MCCI 生成物 (燃焼燃料) ・水混合物の無限増倍率

(3) 解析結果—水中のホウ素有り

MCCI 生成物の未臨界を担保する手法の 1 つとして水に中性子毒物のホウ素を添加することを想定し、必要濃度の目安として $k_{\infty} = 1$ となる濃度を評価した。計算モデルは図 3-3 に示す非均質体系であり、ホウ素を MCCI 球を取囲む水の部分にのみ含ませた。用いた計算コードは SRAC-PIJ である。解析結果を表 3-9 (1)~(4) 及び図 3-5 (1)~(4) に示す。

UO₂ の場合、表 3-9 (1)~(3) 及び図 3-5 (1)~(3) に見られるように、MCCI 生成物中のコンクリート体積割合が 0%~40% の範囲では、 $k_{\infty} = 1$ となる最小ホウ素濃度はほぼ一定となる。²³⁵U 濃縮度 5 wt% の場合 17,000ppm、同 4 wt% の場合 10,000ppm、同 3 wt% の場合 6,000 ppm となった。しかし、コンクリート体積割合が増大するにつれ、 V_m/V_f が小さい領域、すなわち自由に流れる水が極端に少なく、コンクリート中の水分が主に中性子を減速している条件では、必要なホウ素濃度が増大し非現実的な値となる。

燃焼燃料の場合、表 3-9 (4) 及び図 3-5 (4) に見られるように、コンクリート体積割合が 80% 程度までは、 $k_{\infty} = 1$ となる最小ホウ素濃度は 4,000ppm 程度となる。但しコンクリート体積割合が 90% では 16,000ppm となる。

表 3-9 (1) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 5 wt% UO_2) が $k_{\infty} = 1$ となる水中ホウ素濃度

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段 : コンクリート、下段 : UO_2)							
		0%	20%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
		100%	80%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
0.0032	0.01				15144	71560	97104	97316	67100
0.0066	0.02				20448	43893	54126	51982	34418
0.01	0.03				21315	34238	39269	36384	23416
0.02	0.06			13621	20288	23623	23808	20470	12404
0.03	0.09		5576	16231	18580	19209	18070	14784	8582
0.04	0.12	1691	12004	16407	16990	16538	14885	11786	6610
0.05	0.16	9807	14372	15884	15624	14632	12805	9878	5385
0.06	0.19	13336	15138	15130	14407	13187	11283	8535	4541
0.08	0.26	15416	14921	13538	12467	11033	9173	6735	3441
0.10	0.3	15267	13943	12120	10922	9489	7735	5549	2740
0.11	0.35	15095	13661	11790	10583	9162	7429	5320	2603
0.15	0.52	12988	11291	9334	8206	6941	5494	3797	1741
0.20	0.7	10683	9134	7391	6422	5352	4159	2796	1184
0.24	0.91	9148	8018	6236	5379	4431	3416	2251	892
0.30	1.2	7431	6208	4912	4218	3453	2610	1670	588
0.40	1.7	5257	4401	3449	2925	2360	1740	1053	270
0.50	2.4	3856	3211	2488	2093	1661	1190	669	75
0.60	3.1	2792	2311	1781	1482	1154	796	396	
0.70	3.9	2100	1733	1310	1076	815	531	211	
0.80	4.8	1595	1303	967	776	567	336	76	
0.90	5.9	1217	982	707	550	380	188		
1.00	7.0	930	733	507	377	235	75		
1.20	9.6	482	351	200	125	14			
1.50	14.6	129	48						

単位:ppm

表 3-9 (2) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 4 wt% UO_2) が $k_{\infty} = 1$ となる水中ホウ素濃度

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段 : コンクリート、下段 : UO_2)							
		0%	20%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
		100%	80%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
0.0032	0.01					13344	54180	65729	46491
0.0066	0.02					14241	31362	34995	23680
0.01	0.03					14103	23599	24672	16116
0.02	0.06				6959	12955	15401	14191	8570
0.03	0.09			4993	9414	11797	12182	10427	5952
0.04	0.12			7856	9946	10787	10324	8400	4590
0.05	0.16		4468	8949	9863	9911	9044	7098	3739
0.06	0.19	1904	6955	9290	9536	9158	8075	6169	3149
0.08	0.26	7256	8850	9091	8699	7909	6678	4904	2374
0.10	0.3	8965	9139	8510	7849	6929	5696	4062	1877
0.11	0.35	9144	9104	8344	7654	6714	5488	3892	1780
0.15	0.52	9051	8148	6902	6118	5190	4094	2778	1154
0.20	0.7	7889	6839	5591	4834	4039	3105	2031	753
0.24	0.91	6900	5924	4758	4096	3363	2549	1620	538
0.30	1.2	5722	4792	3783	3221	2609	1937	1180	314
0.40	1.7	4120	3430	2656	2229	1769	1265	708	76
0.50	2.4	3040	2506	1907	1581	1224	836	409	
0.60	3.1	2207	1806	1351	1100	827	529	198	
0.70	3.9	1655	1337	976	775	558	320	55	
0.80	4.8	1248	991	700	536	360	165		
0.90	5.9	941	730	491	355	209	48		
1.00	7.0	702	526	327	214	93			
1.20	9.6	330	214	79					
1.50	14.6	35							

単位:ppm

表 3-9 (3) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 3 wt% UO_2) が $k_\infty = 1$ となる水中ホウ素濃度

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段 : コンクリート、下段 : UO_2)								
		0%	20%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	
		100%	80%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	
0.0032	0.01							15817	34525	25419
0.0066	0.02							11462	18782	12931
0.01	0.03							9868	13552	8839
0.02	0.06					4193		7845	8196	4759
0.03	0.09				2232	5443		6795	6210	3327
0.04	0.12			1368	4143	5702		6056	5106	2570
0.05	0.16			3405	4936	5634		5478	4373	2092
0.06	0.19		979	4432	5246	5444		5004	3837	1756
0.08	0.26	1379	3982	5174	5249	4954		4256	3085	1302
0.10	0.3	4013	5042	5216	4963	4463		3683	2566	1009
0.11	0.35	4384	5164	5181	4879	4349		3562	2459	949
0.15	0.52	5555	5239	4561	4066	3447		2688	1748	568
0.20	0.7	5242	4623	3797	3292	2710		2039	1253	316
0.24	0.91	4723	4077	3265	2791	2258		1660	978	180
0.30	1.2	3981	3347	2611	2192	1742		1239	676	34
0.40	1.7	2931	2411	1824	1502	1150		769	350	
0.50	2.4	2173	1756	1291	1036	761		465	141	
0.60	3.1	1569	1246	887	690	476		246		
0.70	3.9	1159	902	612	453	281		95		
0.80	4.8	855	642	406	277	135				
0.90	5.9	620	445	251	141	23				
1.00	7.0	438	292	128	41					
1.20	9.6	154	54							
1.50	14.6									

単位:ppm

表 3-9 (4) MCCI 生成物 (燃焼燃料) が $k_{\infty} = 1$ となる水中ホウ素濃度

減速材 厚さ (cm)	V_m/V_f	燃料球の UO_2 とコンクリートの体積割合 (上段 : コンクリート、下段 : UO_2)								
		0%	20%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	
		100%	80%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	
0.0032	0.01									15615
0.0066	0.02							1599		8373
0.01	0.03							2747		5988
0.02	0.06							3520		3548
0.03	0.09						1083	3501		2639
0.04	0.12						2277	3331		2129
0.05	0.16					1169	2800	3127		1788
0.06	0.19				373	2111	3017	2923		1537
0.08	0.26			1146	2265	2931	3064	2546		1180
0.10	0.3		844	2539	2997	3144	2913	2224		936
0.11	0.35		1334	2741	3089	3148	2863	2153		885
0.15	0.52	2959	3378	3407	3233	2900	2377	1615		546
0.20	0.7	3880	3667	3218	2880	2445	1893	1198		312
0.24	0.91	3878	3478	2907	2536	2100	1576	949		181
0.30	1.2	3503	3022	2423	2065	1662	1200	666		38
0.40	1.7	2718	2262	1748	1448	1120	758	351		
0.50	2.4	2058	1680	1251	1011	750	462	145		
0.60	3.1	1486	1195	860	673	469	245			
0.70	3.9	1099	863	591	440	275	96			
0.80	4.8	804	612	390	266	132				
0.90	5.9	580	421	236	134	21				
1.00	7.0	403	269	115	29					
1.20	9.6	126	36							

単位:ppm

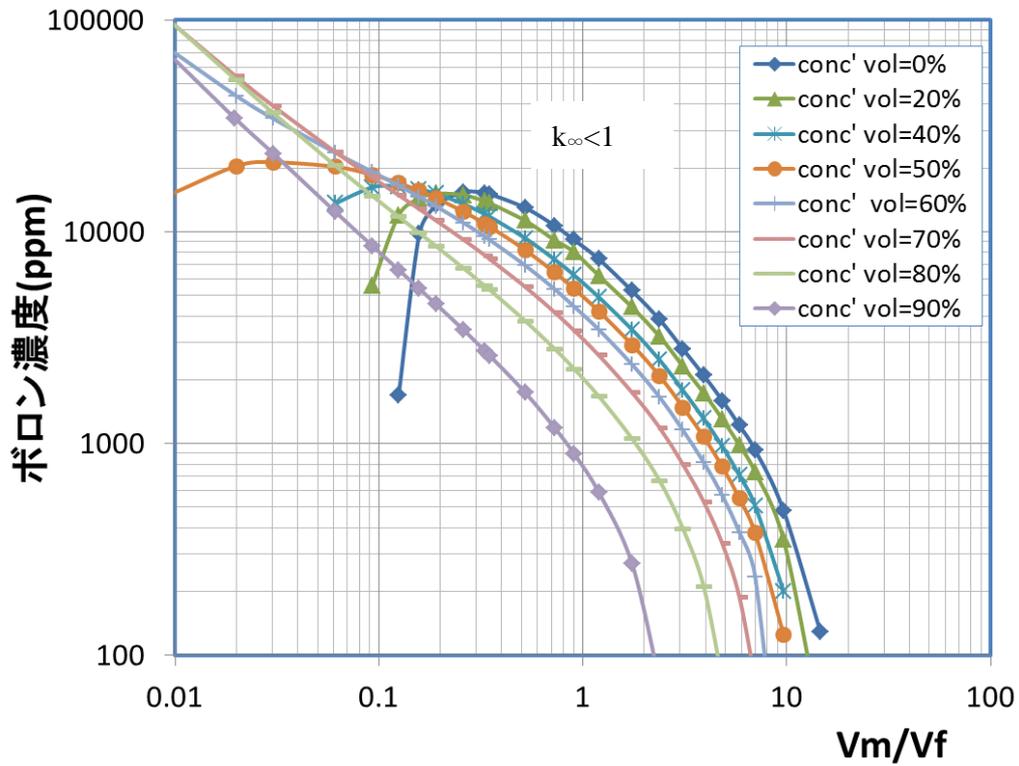


図 3-5 (1) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 5 wt% UO_2) が $k_\infty = 1$ となる水中ホウ素濃度

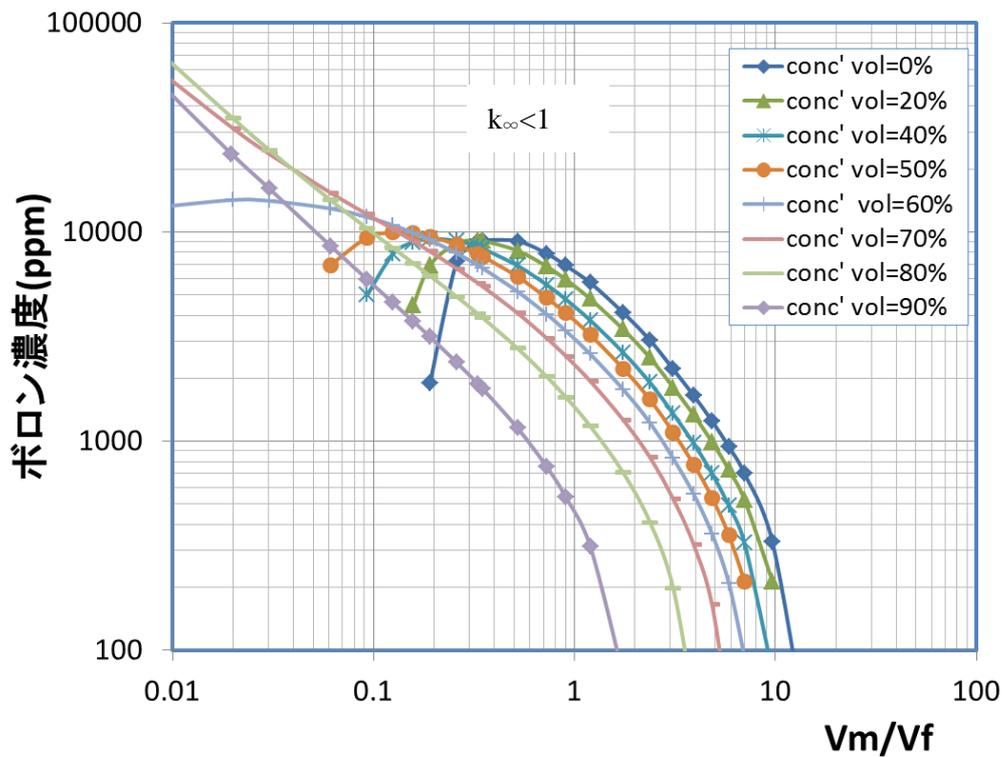


図 3-5 (2) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 4 wt% UO_2) が $k_\infty = 1$ となる水中ホウ素濃度

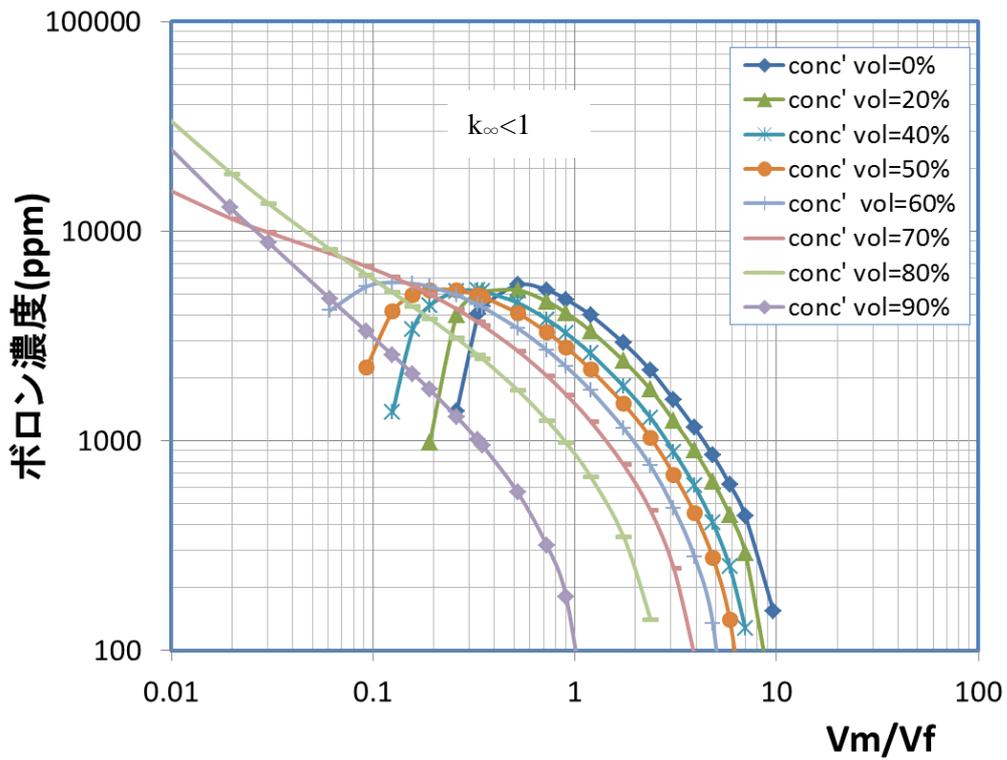


図 3-5 (3) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 3 wt% UO_2) が $k_\infty = 1$ となる水中ホウ素濃度

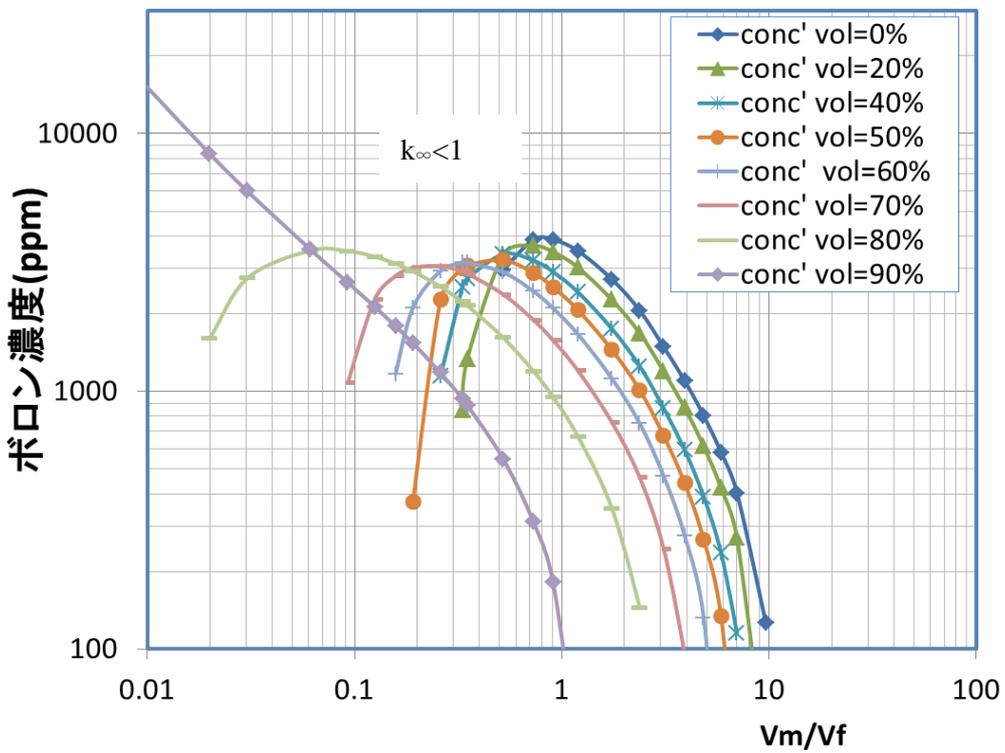


図 3-5 (4) MCCI 生成物 (燃焼燃料) が $k_\infty = 1$ となる水中ホウ素濃度

3.2.3 まとめ

燃料、コンクリート及び水の3元系において k_{∞} を系統的に算出した。燃料として、3ケースの UO_2 (^{235}U 濃縮度 5 wt%、4 wt% 及び 3 wt%) 及び燃焼燃料 (燃焼度 14 GWd/t) 1 ケースを採りあげた。MCCI 生成物を燃料とコンクリートの均質混合物としてモデル化し、さらに、MCCI 生成物と水について均質体系及び非均質体系のモデルを構築した。パラメータとして、MCCI 生成物中のコンクリート体積割合、及び水と MCCI 生成物の体積比を変化させた。この結果、3.3 節で述べる臨界量解析を行う条件範囲 ($k_{\infty} > 1$) を定めた。

さらに水に可溶性中性子毒物としてホウ素を加えることにより未臨界を担保することを想定し、同じ4ケースの燃料に対して $k_{\infty} = 1$ となるホウ素濃度を系統的に算出した。必要となるホウ素濃度の目安が得られたが、その濃度は ^{235}U 濃縮度ないし燃焼度に対して敏感に変化した。さらに、 V_m/V_f が非常に小さい条件では、コンクリート中の水分による減速のみで中性子が十分に増倍する ($k_{\infty} > 1$) ため、水中のホウ素が効かなくなる。したがって、水中に存在する MCCI 生成物の現実的なモデルとして、燃焼度(あるいは残留 ^{235}U 濃縮度)の不均一さ、及び MCCI 生成物中に残存する水分量をどのように想定すべきか、慎重に検討する必要がある。

3.3 MCCI 生成物の臨界量解析

3.3.1 目的及び概要

(1) 目的

MCCI生成物の水中における臨界管理に資するため、3.2節の解析で明らかとなった $k_{\infty} > 1$ となる条件において、燃料とコンクリートの混合物としてのMCCI生成物の水中における臨界量を明らかにした。

(2) 概要

均質体系としてモデル化した水中のMCCI生成物について、3.2節の解析で明らかとなった $k_{\infty} > 1$ となる条件範囲において、系統的に臨界量を求めた。この一連の解析において、水とMCCI生成物を均質化した領域をMCCI生成物領域と称する。

また、水とMCCI生成物を分けて非均質体系としてモデル化したものについて、3.2節の解析で明らかとなった k_{∞} が最大となる条件において、臨界量と求めた。この一連の解析において、水中にMCCI生成物球が配列されている領域をMCCI生成物領域と称する。

これらの均質体系及び非均質体系の解析では、いずれも、MCCI生成物領域の周囲に水反射体を設けた。MCCI生成物のうち燃料については、3.2節と同様に、 ^{235}U 濃縮度が5 wt%、4 wt%及び3 wt%の3種類の UO_2 及び14 GWd/tまで燃焼した燃焼燃料を解析対象とした。

MCCI生成物領域の臨界特性を特徴づけるパラメータとして、3.2節と同じ定義で、MCCI生成物中のコンクリート体積割合及び V_m/V_f を用いる。使用した計算コード及び核データはMVPとJENDL-4.0である。

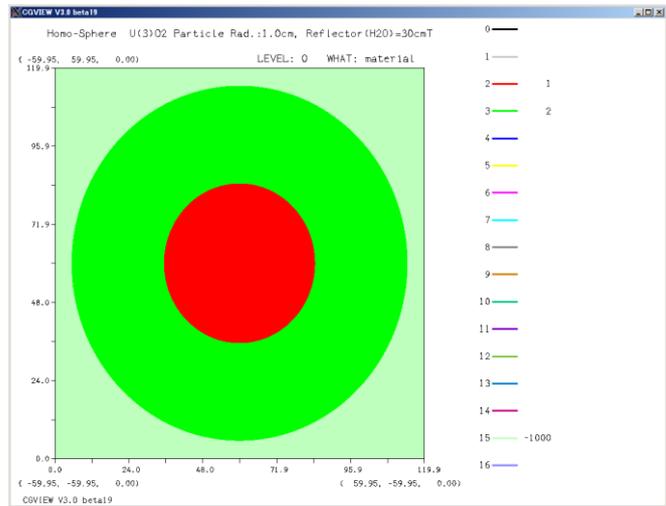
3.3.2 MCCI 生成物領域を均質体系でモデル化した解析

(1) 解析条件

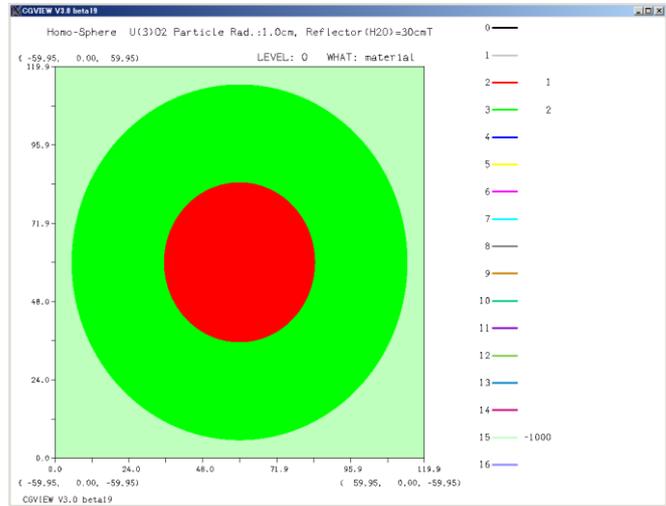
図 3-6 に示す球の計算モデルを用いて V_m/V_f を変化させながら臨界量の解析を系統的に行った。さらに、3.2 節の解析で k_{∞} が最大となった最適減速条件の V_m/V_f (表 3-8 (1)~(4) に下線を付した k_{∞} の V_m/V_f) において、図 3-7 に示す無限円柱及び図 3-8 に示す無限平板の計算モデルを用いて、MCCI 生成物領域の臨界寸法を求めた。

これらの球、無限円柱及び無限平板のいずれの体系も、MCCI 生成物領域は厚さ 30 cm の水反射体を有する。MCCI 生成物領域の原子個数密度は 3.2 節で取扱った均質体系と同じ方法で求めた。

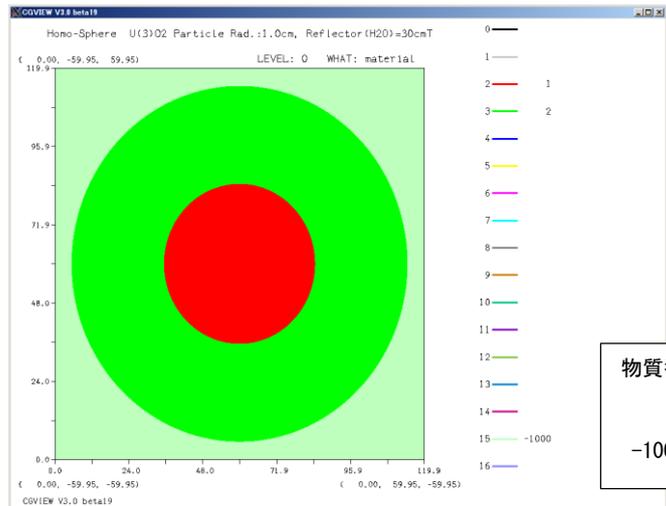
解析は、ある特定の燃料、MCCI 生成物中のコンクリート体積割合、及び V_m/V_f を組合わせた条件において、MCCI 生成物領域の寸法を変化させて中性子実効増倍率 (k_{eff}) が 1 となる値を求めた。ここで言う寸法とは、球体系の場合は半径、無限円柱体系の場合は円柱の直径、無限平板体系の場合は平板厚さである。解析で得られた寸法の変化と k_{eff} の変化の関係に 3 次関数であてはめ、内挿することにより $k_{\text{eff}} = 1$ となる寸法を求めた。



(a) X-Y 断面図 (Z=0.0)



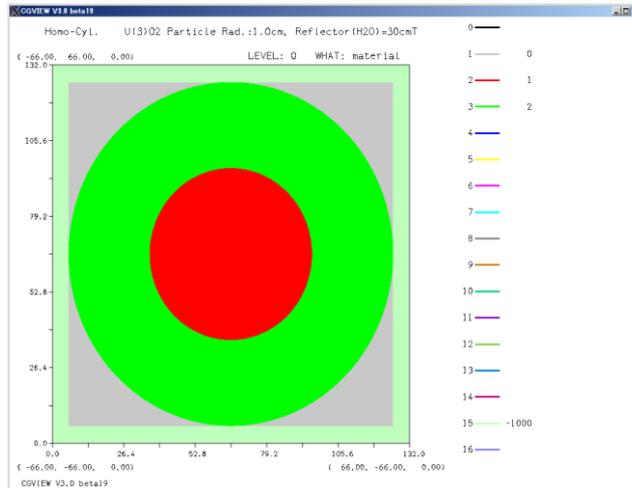
(b) X-Z 断面図 (Y=0.0)



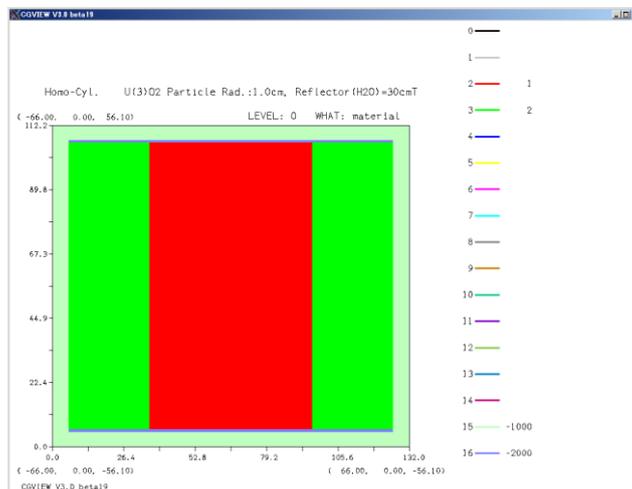
(c) Y-Z 断面図 (X=0.0)

物質番号	
1	燃料+コンクリート
2	反射体 (水)
-1000	外部ボイド

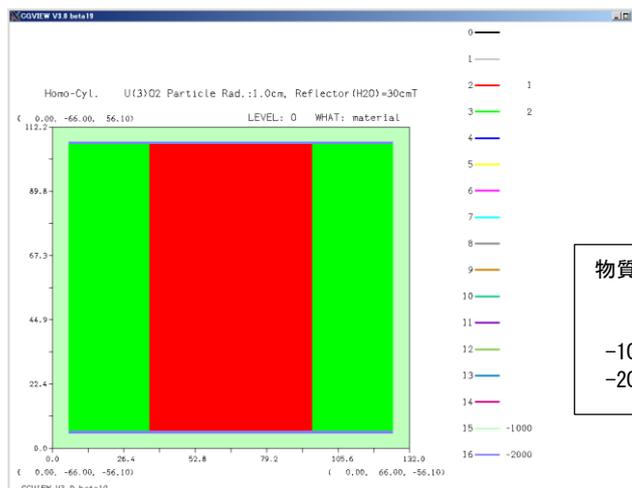
図 3-6 均質-球体系の計算モデル



(a) X-Y 断面図 (Z=0.0)



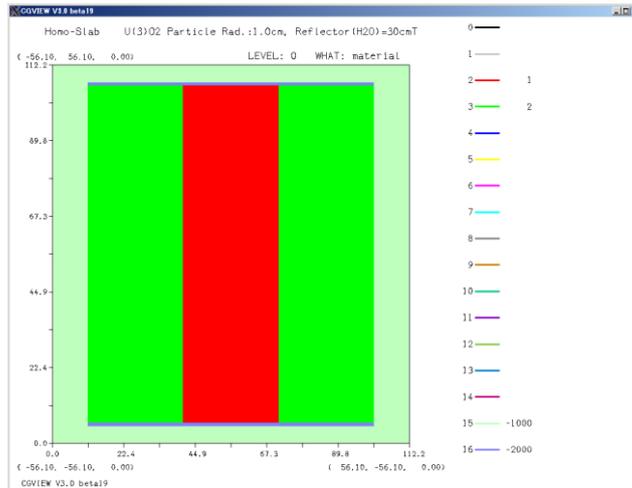
(b) X-Z 断面図 (Y=0.0)



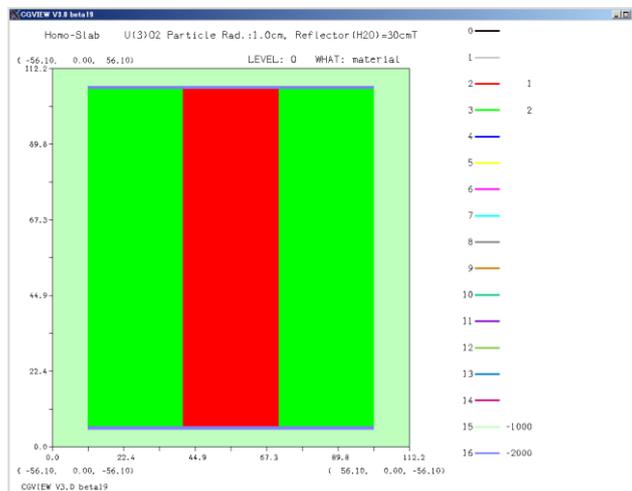
物質番号	
1	燃料+コンクリート
2	反射体 (水)
-1000	外部ボイド
-2000	完全反射物質

(c) Y-Z 断面図 (X=0.0)

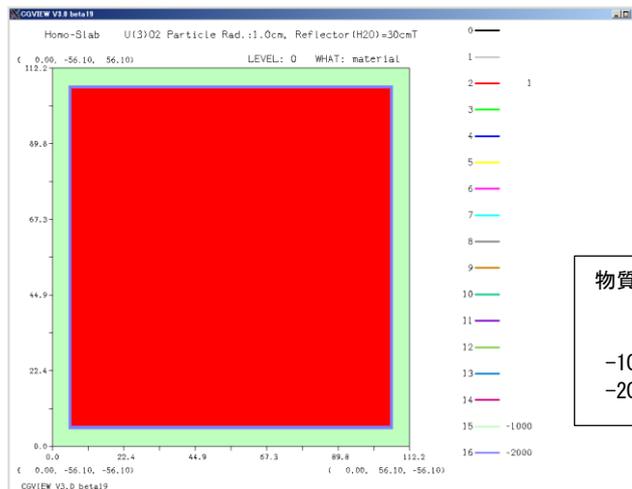
図 3-7 均質-無限円柱体系の計算モデル



(a) X-Y 断面図 (Z=0.0)



(b) X-Z 断面図 (Y=0.0)



(c) Y-Z 断面図 (X=0.0)

物質番号	
1	燃料+コンクリート
2	反射体(水)
-1000	外部ボイド
-2000	完全反射物質

図 3-8 均質-無限平板体系の計算モデル

(2) 解析結果

球体系の臨界量解析結果を、 UO_2 (^{235}U 濃縮度 5 wt%、4 wt% 及び 3 wt%) と燃焼燃料について、表 3-10 (1)~(4) にそれぞれ示す。表の中で「球体積」は「球半径」の解析結果から導出されたものである。この体積に解析に用いた原子個数密度及び原子量を乗じて、表 3-10 (1)~(3) における「 UO_2 質量」及び表 3-10 (4) における「燃料質量」が求められている。図 3-9 (1)~(4) には臨界半径を、図 3-10 (1)~(4) には臨界質量をそれぞれ示す。

表 3-10 (1) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 5 wt% UO_2) ・水均質球体系の臨界量

濃縮度 (wt%)	コンクリート割合 (vol%)	V_m/V_f (-)	k_{eff}		UO_2 質量 (kg)
			球半径 (cm)	球体積 (L)	
				1.0	
5	0	0.191	103.4	4633.1	41356.2
5	0	0.521	34.8	177.1	1238.1
5	0	0.907	25.8	72.0	401.5
5	0	2.375	19.6	31.6	99.6
5	0	3.096	19.0	28.9	74.9
5	0	4.832	19.0	28.6	52.2
5	0	9.648	21.6	42.3	42.2
5	0	11.167	22.8	49.8	43.5
5	20	0.191	67.4	1282.1	9155.6
5	20	0.521	32.0	137.0	766.3
5	20	0.907	24.8	64.3	286.7
5	20	2.375	19.8	32.4	81.8
5	20	3.096	19.5	31.0	64.3
5	20	9.648	24.0	57.6	46.0
5	20	11.167	25.9	72.5	50.7
5	40	0.093	88.0	2858.9	16688.5
5	40	0.191	51.0	557.1	2983.4
5	40	0.521	29.7	109.6	459.8
5	40	0.907	24.2	59.1	197.7
5	40	1.744	20.9	38.3	89.1
5	40	3.096	20.3	35.2	54.9
5	40	9.648	29.0	102.3	61.3
5	60	0.093	56.9	772.1	3004.6
5	60	0.191	41.7	303.6	1084.0
5	60	0.521	28.2	93.5	261.4
5	60	0.907	24.1	58.3	130.0
5	60	1.744	22.0	44.5	69.0
5	60	3.096	22.7	48.9	50.8
5	60	9.648	32.5	144.3	57.6
5	80	0.030	54.0	658.2	1358.3
5	80	0.093	44.5	368.6	717.2
5	80	0.191	37.0	211.6	377.8
5	80	0.521	28.6	98.4	137.6
5	80	0.728	27.0	82.8	101.9
5	80	0.907	26.4	77.2	86.1
5	80	3.096	33.8	161.2	83.7
5	80	3.913	41.6	301.5	130.5
5	90	0.030	49.8	516.0	532.5
5	90	0.093	43.8	352.7	343.2
5	90	0.191	38.9	246.4	219.9
5	90	0.349	35.3	183.6	144.7
5	90	0.521	33.9	163.6	114.4
5	90	0.907	34.8	176.9	98.6
5	90	1.744	47.8	458.4	177.6
5	90	2.375	85.9	2655.3	836.4

表 3-10 (2) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 4 wt% UO_2) ・水均質球体系の臨界量

					k_{eff}
					1.0
濃縮度 (wt%)	コンクリート割合 (vol%)	V_m/V_f (-)	球半径 (cm)	球体積 (L)	UO_2 質量 (kg)
4	0	0.260	104.6	4795.8	40474.0
4	0	0.521	39.4	255.6	1786.6
4	0	0.907	27.9	91.0	507.2
4	0	2.375	21.1	39.2	123.5
4	0	3.096	20.6	36.6	94.9
4	0	9.648	25.2	66.8	66.7
4	0	11.167	27.3	84.8	74.1
4	20	0.191	102.1	4463.0	31869.8
4	20	0.521	35.1	181.7	1016.1
4	20	0.907	26.8	80.2	357.9
4	20	1.744	22.2	46.0	142.6
4	20	3.096	21.2	40.0	83.0
4	20	9.648	29.2	104.6	83.5
4	40	0.093	166.2	19232.6	112268.8
4	40	0.191	60.8	941.5	5042.4
4	40	0.521	32.2	139.2	583.9
4	40	0.907	26.0	73.7	246.6
4	40	1.744	22.7	48.8	113.6
4	40	3.096	22.6	48.1	74.8
4	40	9.648	39.3	255.1	152.8
4	60	0.093	67.1	1265.2	4923.5
4	60	0.191	46.3	415.9	1484.9
4	60	0.907	26.1	74.7	166.6
4	60	1.197	24.9	64.8	125.3
4	60	3.096	26.1	74.5	77.3
4	60	9.648	51.9	584.7	233.5
4	80	0.030	61.0	949.1	1958.7
4	80	0.093	49.1	495.4	964.0
4	80	0.191	40.5	278.4	497.1
4	80	0.521	31.7	133.2	186.3
4	80	0.728	30.2	114.8	141.3
4	80	0.907	29.7	109.8	122.4
4	80	3.096	47.8	456.4	236.9
4	90	0.030	56.3	748.7	772.5
4	90	0.061	52.4	603.9	605.0
4	90	0.093	49.4	506.2	492.5
4	90	0.191	44.2	360.6	321.8
4	90	0.260	42.1	311.7	263.1
4	90	0.521	40.0	268.2	187.5
4	90	0.907	43.9	354.6	197.7

表 3-10 (3) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 3 wt% UO_2) ・水均質球体系の臨界量

濃縮度 (wt%)	コンクリート割合 (vol%)	V_m/V_f (-)	k_{eff}		UO_2 質量 (kg)
			球半径 (cm)	球体積 (L)	
				1.0	
3	0	0.521	48.0	464.5	3247.3
3	0	0.907	31.7	132.8	740.6
3	0	2.375	23.7	56.1	176.6
3	0	3.096	23.4	53.9	139.9
3	0	3.913	23.8	56.3	121.8
3	0	5.859	25.9	72.7	112.6
3	0	9.648	34.0	164.9	164.6
3	20	0.260	100.5	4248.3	28682.4
3	20	0.521	41.0	289.5	1619.0
3	20	0.907	30.1	114.1	508.9
3	20	1.744	25.1	66.4	205.9
3	20	3.096	24.6	62.3	129.3
3	20	9.648	44.6	372.1	297.2
3	40	0.191	85.3	2601.5	13932.9
3	40	0.521	36.7	207.4	869.7
3	40	0.907	29.2	104.8	350.7
3	40	1.744	26.0	73.6	171.2
3	40	3.096	27.0	82.3	128.1
3	40	7.000	44.8	377.7	301.1
3	60	0.093	91.8	3238.6	12603.5
3	60	0.191	55.4	710.9	2538.2
3	60	0.521	34.7	174.5	487.9
3	60	0.907	29.9	111.8	249.3
3	60	1.744	28.9	100.7	156.1
3	60	3.096	33.8	162.2	168.4
3	60	4.832	51.9	584.7	426.3
3	80	0.030	75.5	1804.4	3723.8
3	80	0.093	58.5	837.1	1628.9
3	80	0.191	47.5	449.4	802.4
3	80	0.521	37.7	224.0	313.2
3	80	0.728	36.5	204.0	251.1
3	80	0.907	36.7	207.1	230.9
3	80	2.375	68.0	1315.0	828.5
3	90	0.030	70.9	1494.0	1541.5
3	90	0.061	65.7	1187.1	1189.3
3	90	0.093	62.1	1003.4	976.2
3	90	0.191	55.7	723.0	645.4
3	90	0.331	53.4	636.5	508.4
3	90	0.521	55.6	721.5	504.4
3	90	0.907	80.5	2185.5	1218.6

表 3-10 (4) MCCI 生成物 (燃焼燃料) ・水均質球体系の臨界量

燃焼度 (GWd/t)	コンクリート割合 (vol%)	Vm/Vf (-)	球半径 (cm)	k _{eff}	球体積 (L)	燃料質量 (kg)
				1.0		
14	0	0.907	50.2		531.1	2960.0
14	0	2.375	29.5		107.8	339.6
14	0	3.096	28.2		94.0	243.8
14	0	4.832	28.4		95.6	174.2
14	0	7.000	31.1		125.9	167.2
14	0	9.648	37.2		214.8	214.4
14	0	11.167	42.6		324.3	283.2
14	20	0.521	83.8		2468.6	13798.0
14	20	0.907	43.4		342.2	1525.6
14	20	2.375	29.5		107.4	270.5
14	20	3.096	28.9		101.5	210.6
14	20	4.832	30.4		118.1	172.1
14	20	7.000	35.7		190.2	202.1
14	20	9.648	48.0		462.7	369.4
14	40	0.331	118.9		7040.0	33721.9
14	40	0.521	57.6		801.5	3360.1
14	40	0.907	39.0		249.3	833.8
14	40	1.744	31.3		128.8	299.3
14	40	3.096	30.9		123.9	192.8
14	40	4.832	35.4		185.9	203.2
14	40	7.000	48.0		464.2	370.0
14	60	0.191	131.2		9469.4	33793.5
14	60	0.521	46.9		431.8	1206.8
14	60	0.907	37.0		212.2	473.1
14	60	1.197	34.6		173.5	335.6
14	60	1.744	33.4		156.5	242.4
14	60	3.096	37.6		222.6	231.0
14	60	5.859	88.7		2924.7	1812.4
14	80	0.191	65.1		1156.7	2064.0
14	80	0.521	45.1		384.0	536.5
14	80	0.728	42.6		322.8	397.0
14	80	0.907	42.1		312.9	348.8
14	80	2.375	71.5		1532.3	964.9
14	90	0.030	99.2		4088.6	4216.7
14	90	0.061	87.0		2762.6	2766.2
14	90	0.191	67.2		1272.5	1135.3
14	90	0.260	63.5		1074.0	906.0
14	90	0.331	61.8		989.5	790.0
14	90	0.521	62.4		1018.6	711.7
14	90	0.907	86.4		2705.5	1507.8

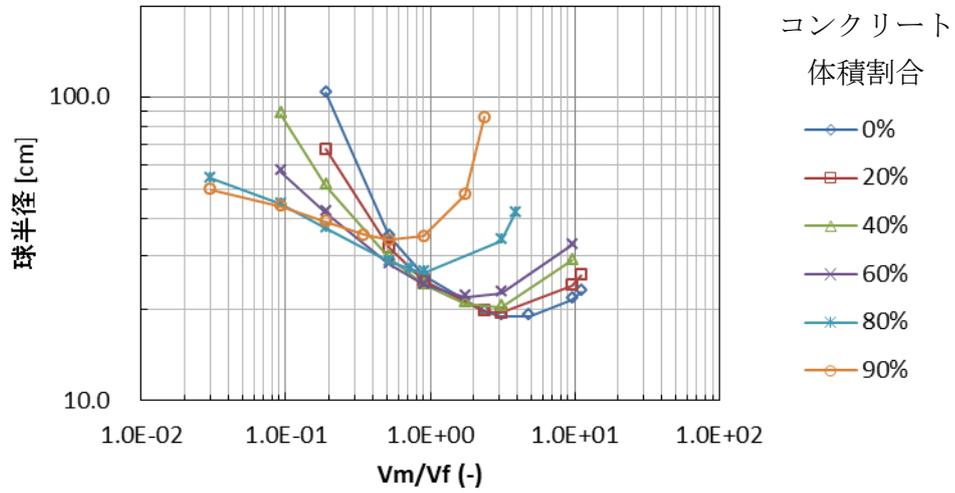


図 3-9 (1) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 5 wt% UO_2) ・水均質球体系の臨界半径

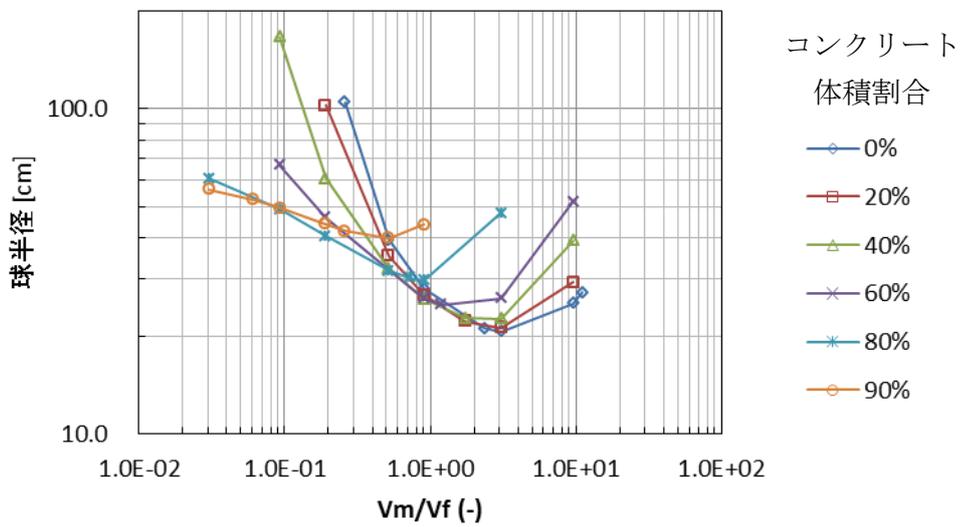


図 3-9 (2) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 4 wt% UO_2) ・水均質球体系の臨界半径

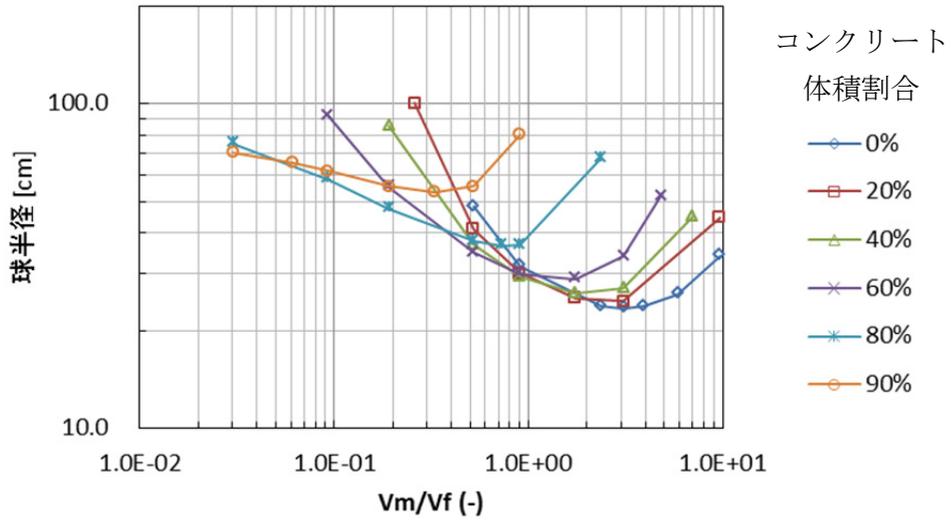


図 3-9 (3) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 3 wt% UO_2) ・水均質球体系の臨界半径

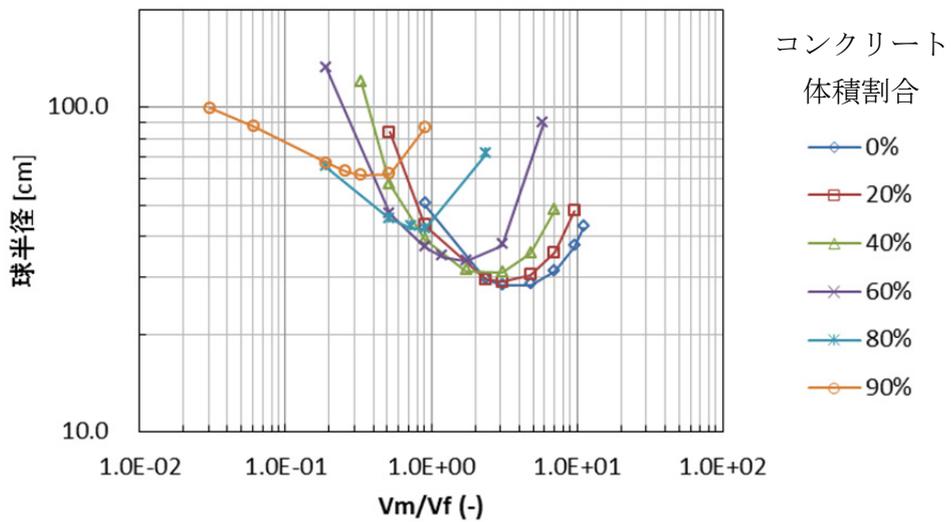


図 3-9 (4) MCCI 生成物 (燃烧燃料) ・水均質球体系の臨界半径

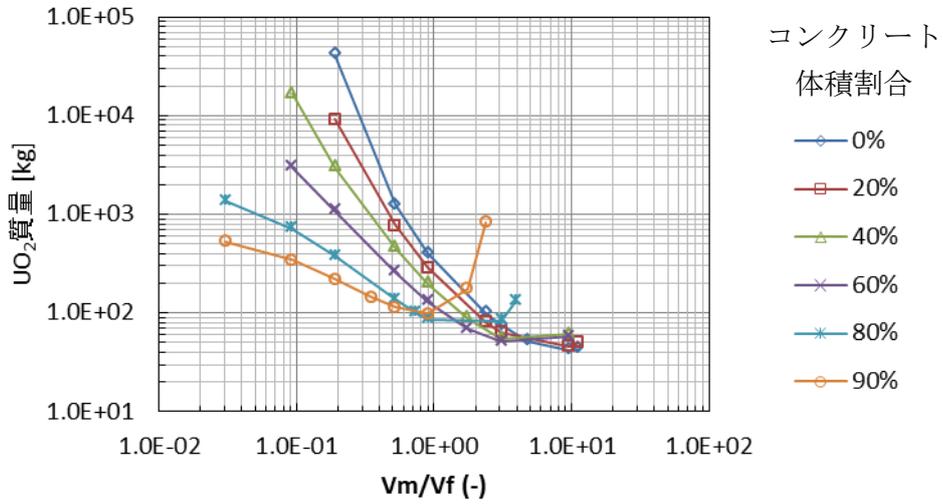


図 3-10 (1) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 5 wt% UO_2) ・水均質球体系の臨界質量

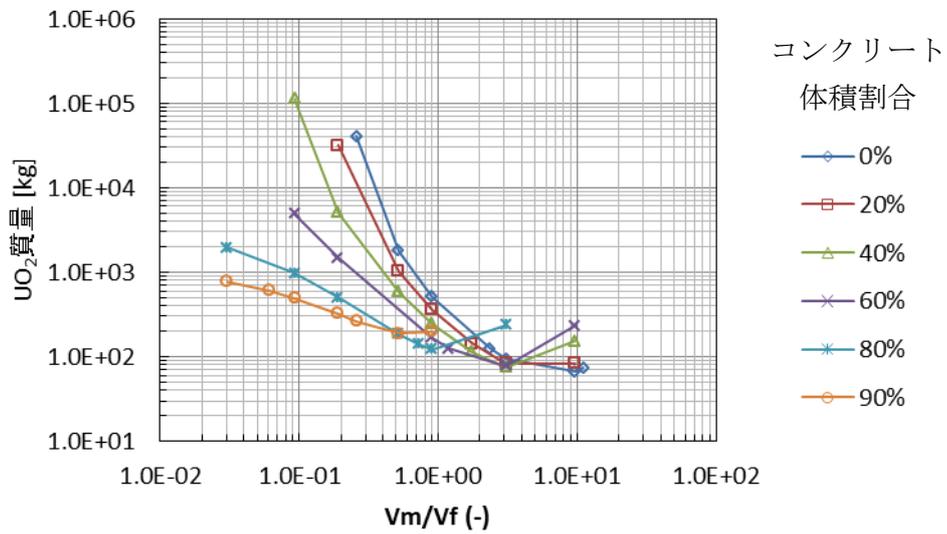


図 3-10 (2) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 4 wt% UO_2) ・水均質球体系の臨界質量

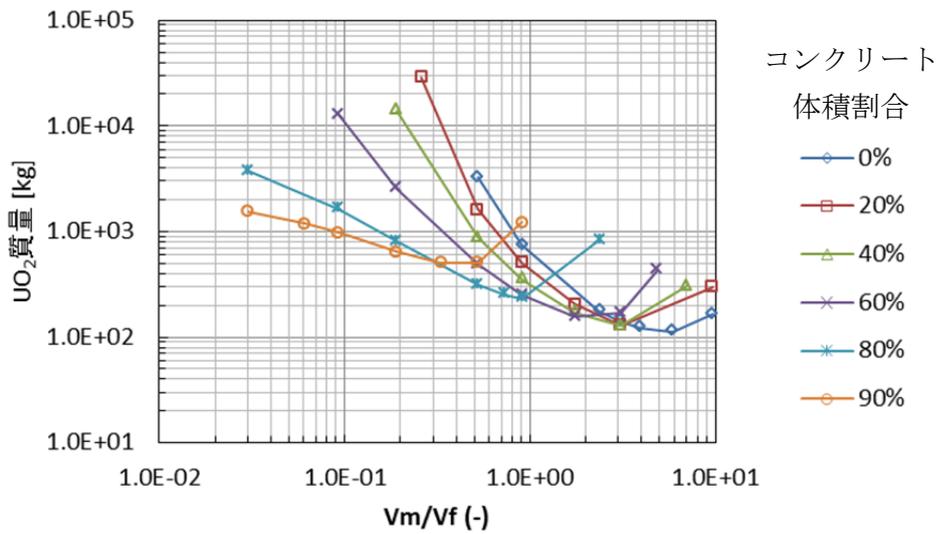


図 3-10 (3) MCCI 生成物 (^{235}U 濃縮度 3 wt% UO_2) ・水均質球体系の臨界質量

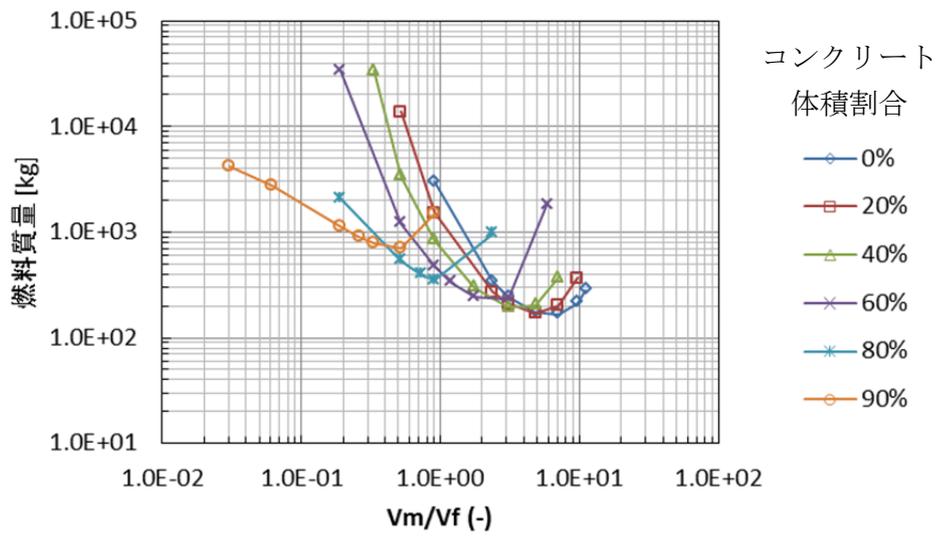


図 3-10 (4) MCCI 生成物 (燃焼燃料) ・水均質球体系の臨界質量

無限円柱体系の臨界直径の解析結果を表3-11及び図3-11に示す。 V_m/V_f は最適減速条件、すなわち、3.2節の解析で k_{∞} が最大となった V_m/V_f (表3-8(1)~(4)に下線を付した k_{∞} の V_m/V_f)である。

表 3-11 MCCI 生成物・水均質無限円柱体系の臨界寸法

			k_{eff}
濃縮度 (wt%)	コンクリート割合 (vol%)	V_m/V_f (-)	1.0
3	0	2.375	33.1
3	20	1.744	35.0
3	40	1.744	36.4
3	60	0.907	42.3
3	80	0.728	52.3
3	90	0.191	81.0
4	0	2.375	28.9
4	20	1.744	30.6
4	40	1.744	31.3
4	60	1.197	34.6
4	80	0.728	42.5
4	90	0.260	60.2
5	0	2.375	26.7
5	20	2.375	27.0
5	40	1.744	28.6
5	60	1.197	31.4
5	80	0.728	37.8
5	90	0.349	50.0
燃焼度14	0	2.375	41.7
14	20	2.375	41.7
14	40	1.744	44.5
14	60	1.197	49.3
14	80	0.728	61.4
14	90	0.331	90.5

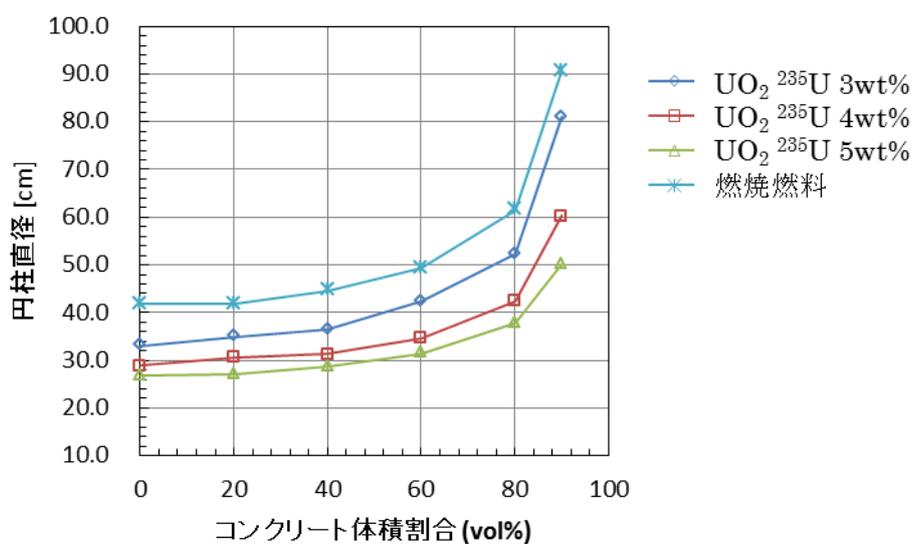


図 3-11 MCCI 生成物・水均質無限円柱体系の臨界寸法

無限平板体系の臨界厚さの解析結果を表3-12及び図3-12に示す。 V_m/V_f は最適減速条件、すなわち、3.2節の解析で k_{∞} が最大となった V_m/V_f (表3-8(1)~(4)に下線を付した k_{∞} の V_m/V_f)である。

表 3-12 MCCI 生成物・水均質無限平板体系の臨界寸法

keff			1.0
濃縮度 (wt%)	コンクリート割合 (vol%)	V_m/V_f (-)	平板厚さ (cm)
3	0	2.375	16.7
3	20	1.744	17.9
3	40	1.744	18.9
3	60	0.907	22.3
3	80	0.728	28.9
3	90	0.191	46.8
4	0	2.375	14.0
4	20	1.744	15.0
4	40	1.744	15.6
4	60	1.197	17.5
4	80	0.728	22.5
4	90	0.260	33.5
5	0	2.375	12.5
5	20	2.375	12.8
5	40	1.744	13.8
5	60	1.197	15.4
5	80	0.728	19.4
5	90	0.349	27.0
燃焼度14	0	2.375	22.2
14	20	2.375	22.3
14	40	1.744	24.0
14	60	1.197	27.0
14	80	0.728	34.7
14	90	0.331	53.3

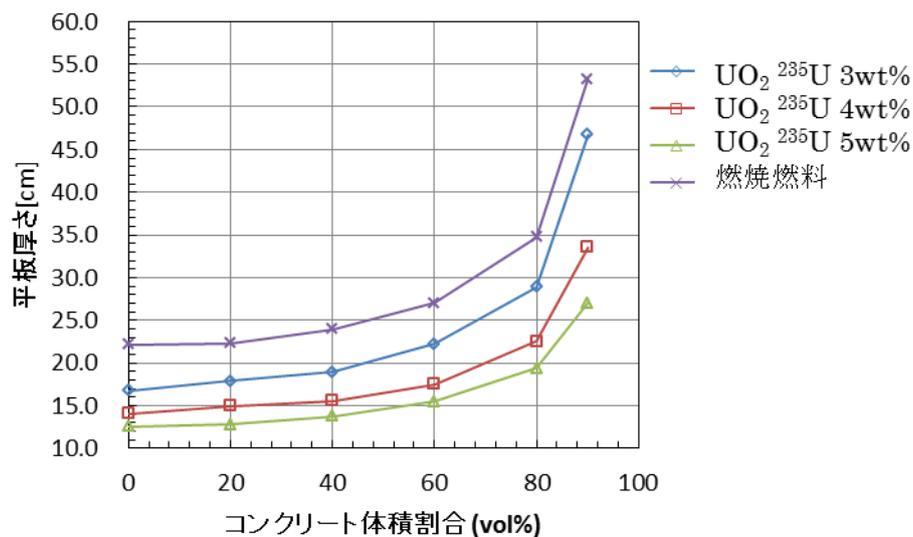


図 3-12 MCCI 生成物・水均質無限平板体系の臨界寸法

3.3.3 MCCI 生成物領域を非均質体系でモデル化した解析

(1) 解析条件

MCCI 生成物領域のうち MCCI 生成物球について、モデル化の方法は 3.2 節で取扱った非均質体系の MCCI 生成物球と同じである。

MCCI 生成物領域において、MCCI 生成物球を水中に配列する格子構造は図 3-13 に示す面心立法格子（FCC : Face Centered Cubic lattice）とした。P は FCC 単位セル（立方体）の一辺の長さであり、この単位セルの中に MCCI 生成物球が体積にして 4 個分存在する。

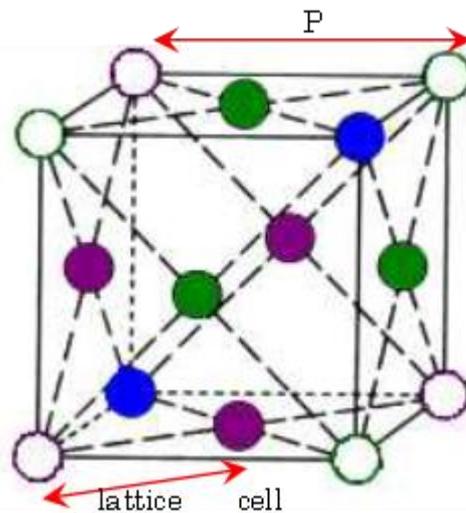
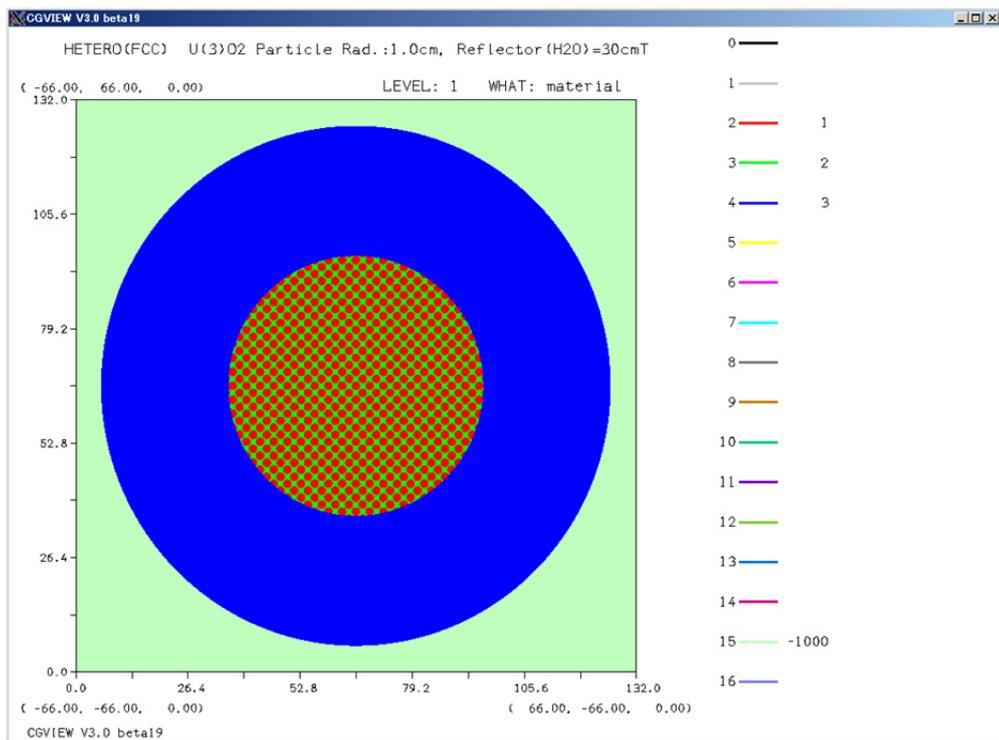
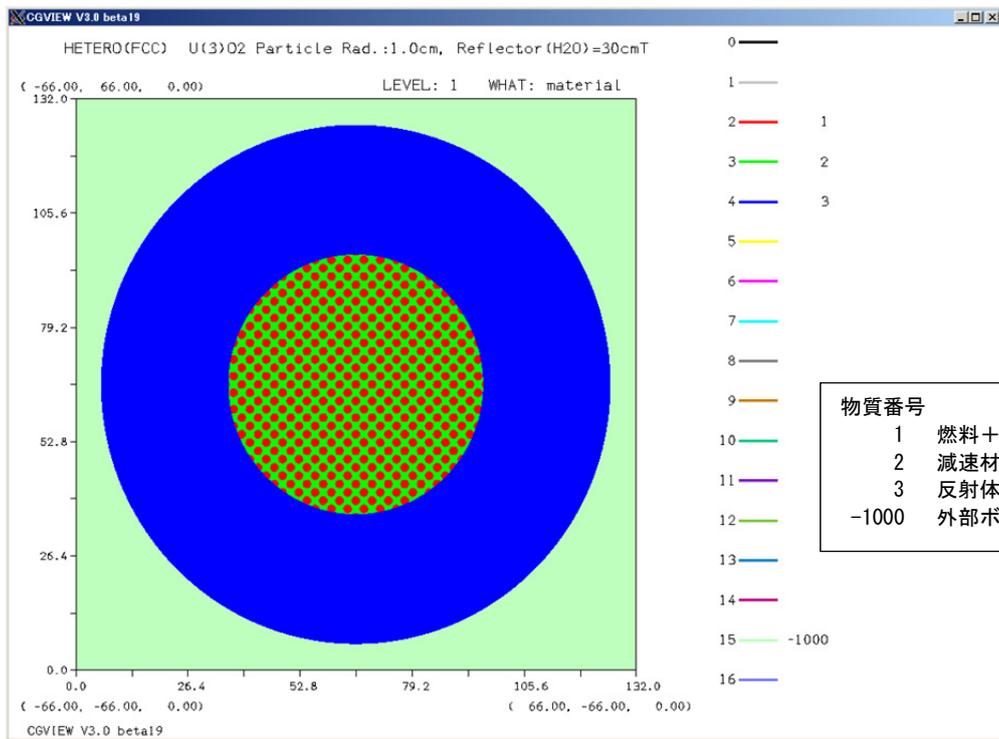


図 3-13 MCCI 生成物領域の非均質体系モデル（面心立法格子）

このような非均質な構造を持つ MCCI 生成物領域を図 3-14 に示すように球形状で区切り、その周りに厚さ 30 cm の水反射体を設け、臨界量解析を行うモデルとした。3.2 節の解析で k_{∞} が最大となった最適減速条件の V_m/V_f （表 3-7 (1)~(4) に下線を付した k_{∞} の V_m/V_f ）において、MCCI 生成物領域の球半径を変化させて $k_{\text{eff}} = 1$ となる値を求めた。



(a) $V_m/V_f = 1.0$



(b) $V_m/V_f = 2.375$

図 3-14 非均質-球体系の計算モデル

(2) 解析結果

解析結果を、表 3-13 と図 3-15 に示す。

表 3-13 MCCI 生成物・水非均質球体系の臨界量

					k_{eff} : 1.0
濃縮度 (wt%)	コンクリート割合 (vol%)	V_m/V_f (-)	球半径 (cm)	球体積 (L)	UO_2 又は 燃料質量 (kg)
3	0	2.375	21.2	40.0	126.1
3	20	1.744	22.4	46.8	145.0
3	40	1.744	23.8	56.4	131.2
3	60	0.907	27.6	87.7	195.6
3	80	0.728	34.6	173.2	213.1
3	90	0.191	53.7	650.1	580.3
4	0	2.375	19.2	29.5	92.9
4	20	1.744	20.1	34.3	106.2
4	40	1.744	21.1	39.3	91.3
4	60	1.197	23.3	53.2	102.9
4	80	0.728	28.9	101.4	124.8
4	90	0.260	41.1	291.1	245.7
5	0	2.375	18.0	24.5	77.0
5	20	2.375	18.5	26.7	67.2
5	40	1.744	19.6	31.3	72.8
5	60	1.197	21.6	42.1	81.5
5	80	0.728	26.1	74.6	91.8
5	90	0.349	34.6	173.7	136.8
燃焼度 14	0	2.375	24.5	62.0	195.1
14	20	2.375	25.6	70.2	176.8
14	40	1.744	27.3	85.6	198.9
14	60	1.197	30.8	122.7	237.4
14	80	0.728	39.4	256.1	315.0
14	90	0.331	58.7	849.1	677.9

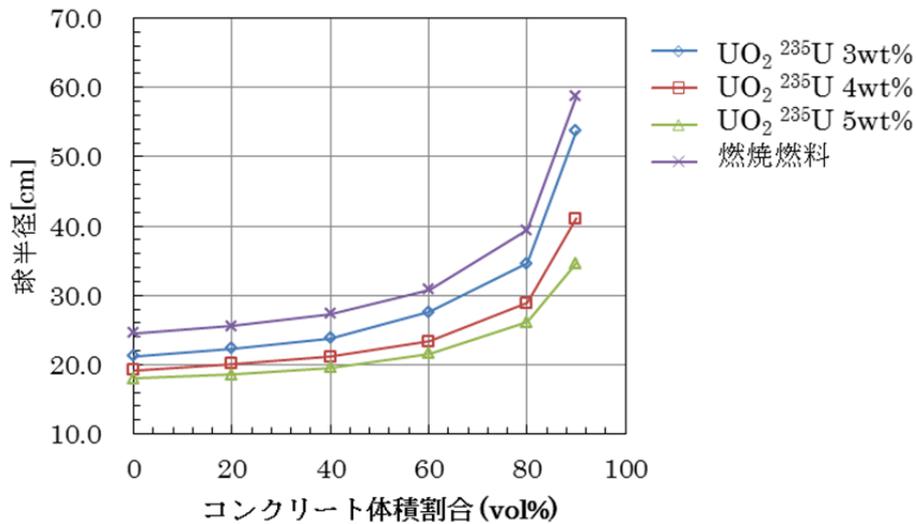


図 3-15 MCCI 生成物・水非均質球体系の臨界半径

3.3.4 まとめ

燃料とコンクリートの混合物としての MCCI 生成物について、水中における臨界量を解析で求めた。燃料の種類は、3 ケースの UO₂ (²³⁵U 濃縮度 5 wt%、4 wt% 及び 3 wt%) 及び 燃焼燃料（燃焼度 14 GWd/t）1 ケースである。MCCI 生成物と水からなる MCCI 生成物領域を球形状の均質な混合物としてモデル化し、 V_m/V_f を変化させて系統的に臨界となる球半径及び燃料質量を求めた。同様の均質なモデルで無限円筒形状と無限平板形状について最適減速条件の臨界寸法を求め、コンクリート体積割合の関数として整理した。

MCCI 生成物球が水中に配列している非均質な MCCI 生成物領域についても最適減速条件において球形状の臨界半径を求め、コンクリート体積割合の関数として整理した。

参考文献

- 1) 東京電力、福島第一原子力発電所の現況、
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/genkyo/index-j.html>
- 2) J. J. Foit, "Overview and history of core concrete interaction issues (international review)," *MCCI Project Seminar*, Cadarache, France (2007).
- 3) K. Izawa, et al., "Infinite Multiplication Factor of Low-Enriched UO₂-Concrete System," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **49**, 1043 (2012).
- 4) J. J. Foit, et al., "MOCKA Experiments on Concrete Erosion by a Metal and Oxide Melt," *Proc. 5th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2012)*, Cologne, Germany, March 21-23, 2012 (2012).
- 5) J. J. Foit, et al., "The WECHSL-Mod3 Code: A Computer Program for the Interaction of a core Melt with Concrete Including the Long Term Behavior," *Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt Wissenschaftliche Berichte*, FZKA 5522 (1995).
- 6) J. J. Foit, et al., "Modeling of Viscosity and Heat Transfer of Complex Oxidic Melts in WECHSL," *Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt Wissenschaftliche Berichte*, FZKA 5507 (1995).
- 7) J. J. Foit, et al., "Assessment of Uncertainties in the Analysis of Molten Core-Concrete Interaction Using the WECHSL Code," *Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt Wissenschaftliche Berichte*, FZKA 5710 (1997).
- 8) 高野公秀、「2-3 燃料デブリとはどのようなものかを理解する (3) —B4C 制御棒及びコンクリートとの反応生成物性状—」、2014 年版 東京電力 (株) 福島第一原子力発電所事故に係る廃止措置及び環境回復への原子力機構の取り組み、p.30、日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 (2014)
- 9) Y. Nagaya, et al., *MVP/GMVP II : General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods*, JAERI 1348, Japan Atomic Energy Research Institute (2005).
- 10) K. Shibata, et al, "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, 1 (2011).
- 11) 奥村啓介、他、*SRAC95 ; 汎用核計算コードシステム*、JAERI-Data/Code 96-015、日本原子力研究所 (1996).
- 12) K. Suyama, *OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmark Phase IIIC, Nuclide Composition and Neutron Multiplication Factor of BWR Spent fuel Assembly for Burnup Credit and Criticality Control of Damaged Nuclear Fuel*, OECD/NEA/WPNCs/EGbuc (2012).
- 13) 須山賢也、他、*連続エネルギーモンテカルロコード MVP 及び MCNP を使用する統合化燃焼計算コードシステム—SWAT3.1*、JAERI-Data/Code 2009-002、日本原子力研究開発機構(2009).
- 14) 燃料サイクル安全研究委員会、*燃焼度クレジット導入ガイド原案 (受託研究)*、JAERI-Tech 2001-055、日本原子力研究所 (2001).

- 15) 臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ、*臨界安全ハンドブック第2版*、JAERI 1340、日本原子力研究所 (1999).

第4章 臨界マップデータベースの整備

4.1 データベースの概念設計

4.1.1 目的及び概要

(1) 目的

第3章3.2節及び3.3節で示したように、燃料デブリの性状を幅広く想定し、臨界計算コードと核データライブラリを用いて燃料デブリの無限増倍率や臨界量を系統的に解析する作業を進めている。今年度事業では MCCI 生成物の解析を行ったが、次年度以降も鉄含有デブリ等の解析を継続し、膨大な解析結果が得られる予定である。

将来、1F で実際に燃料デブリが見出され、その多様な性状が明らかとなるごとに、この解析結果と照合し、臨界になる可能性の有無、質量制限値、寸法制限値等の臨界管理に必要な情報を迅速に得なければならない。また、解析を行っていない性状条件の燃料デブリが見出された場合、迅速に解析を行い新たな結果を得る必要がある。

このような臨界管理に必要な情報の迅速な取得、及び解析の省力化に資するデータベースシステムの概念設計を行った。

(2) 概要

図 4-1 に示すように、互いに連動する以下の機能を持つデータベースシステムの概念設計を行った。これらの機能を分散した物理的位置（1F オンサイトを含み得る）に置かれた計算機に実装し、1F 廃止措置期間を通じて安全規制支援のために運用することを考慮した。

臨界計算管理

燃料デブリ性状の想定に基づく中性子増倍率解析の実行を管理し、解析結果をデータベース化する。

臨界マップ管理

中性子増倍率の解析結果に基づき臨界管理に必要な情報をデータベース化する。

臨界管理情報呼び出し

燃料デブリの実際の性状を入力し、臨界管理に必要な情報を呼び出す。実際の性状が想定から外れている（上記データベースに情報が存在しない）場合には、実際の性状に基づき「臨界計算管理」の中性子増倍率解析実行機能呼び出し、「臨界計算管理」の解析結果データベース及び「臨界マップ管理」の臨界管理情報データベースを更新する。

現在行っている解析作業（例えば 3.2 節と 3.3 節に示したもの）の流れ・手順を詳細にレビュー・整理した上で、以下の作業を行った。

- 1) 機能要件の定義
- 2) システム機能・構成設計
- 3) システム運用手順設計

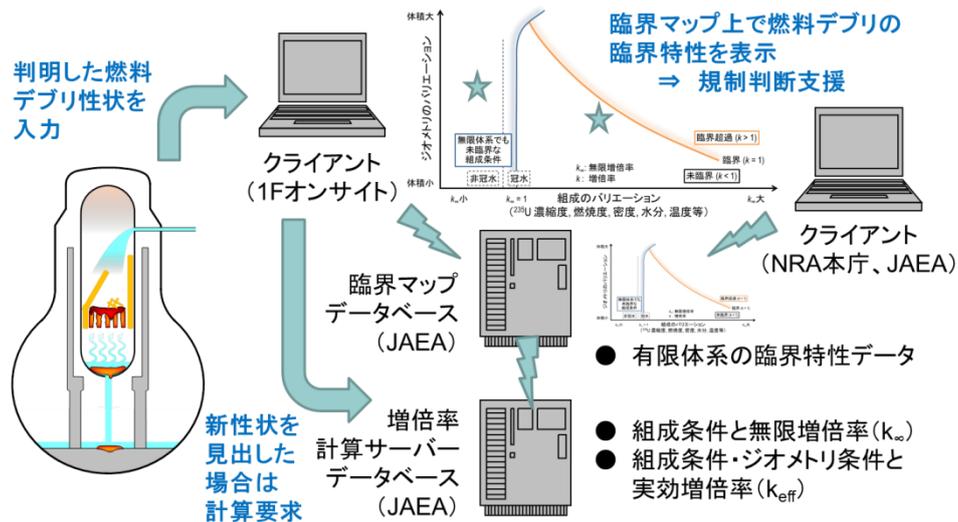


図 4-1 臨界マップデータベースの構想

4.1.2 概念設計

(1) 機能要件の定義

本データベースシステムが備えるべき機能は以下のものである。

- ・ 燃料デブリの組成、質量、ジオメトリ情報から臨界計算コードの入力データを作成する。
- ・ 作成した入力データを用いて中性子増倍率解析を実行する。
- ・ 本システム外で解析した結果および入力データをデータベースに登録できるようにする。
- ・ 解析で使用した燃料デブリの組成、質量、ジオメトリ情報をデータベースに登録できるようにする。
- ・ 中性子増倍率解析結果（中性子増倍率および解析パラメータ）をデータベースに登録できるようにする。
- ・ 燃料デブリの組成データ（化学的表現）をパラメータとした臨界・未臨界を担保できる質量及びジオメトリ情報をデータベースに登録できるようにする。
- ・ データベースから組成データ（化学的表現）を指定し中性子増倍率を抽出する。
- ・ データベースから組成データ（範囲を指定）を指定し中性子増倍率の変化を図化する。
- ・ データベースから組成データ（化学的表現）を指定し臨界・未臨界条件を抽出する。
- ・ データベースから組成データ（範囲を指定）を指定し臨界・未臨界条件の変化を図化する。
- ・ データベースの検索条件で検索結果が無い場合などに臨界計算コードの入力データの作成ができるようにする。
- ・ システムの利用は登録されたユーザのみが可能とし、機能ごとに利用権限を設定できるようにする。
- ・ データベースへの情報の登録等は管理者（データ管理者）のみができるものとする。
- ・ 中性子増倍率解析のリクエスト等が利用者から管理者へ行えるようにする。

これらの機能を、臨界計算管理システム（管理者用機能）、臨界マップ管理システム（管理者用機能）、臨界マップ表示システム（利用者機能）、及びユーザ管理システム（管理者機能）の4つのサブシステムに、以下のとおり配置する。システム構成の概要を図4-2に示す。

臨界計算管理システム（管理者用機能）

燃料デブリの組成、質量、ジオメトリ情報から臨界計算コードの入力データを作成し、解析を実行する。

燃料デブリの組成、質量、ジオメトリ情報等からパラメータ解析用の入力データのテンプレートとなるデータ（以下「ベース入力データ」と呼ぶ）を登録する。登録したベース入力データの解析パラメータの値を変更して入力データを作成し、解析を実行する。作成した入力データ（組成、質量、ジオメトリなどの解析パラメータ）および解析結果はデータベース（以下「臨界計算データベース」と呼ぶ）に登録し管理する。また本システム外で解析したものについてもデータベースへの登録を可能とする。なお、解析を実行するには、計算サーバ上で動作しているジョブ管理ツール（LSFやTORQUEなど）と連動できる必要がある。

臨界計算管理システムの機能構成を以下に示す。

1) 分類管理機能

入力データおよび解析結果を燃料デブリの組成、質量、ジオメトリ等の情報で分類をしている大分類と新燃料、燃焼燃料や無限、有限形状等の情報で分類をしている中分類を管理する機能がある。

2) ベース入力データ管理機能

燃料デブリの組成、質量、ジオメトリ情報等からパラメータ解析用入力データをベース入力データとして登録管理するベース入力データ管理機能がある。

3) 入力データ作成機能

登録されたベース入力データを元に燃料デブリの組成、質量、ジオメトリ情報等のパラメータ変数に値を設定して臨界計算コードの入力データを作成し臨界計算データベースに登録管理する入力データ作成機能がある。

4) 臨界解析管理機能

作成した入力データを使用して中性子増倍率解析の実行（計算サーバ上のジョブ管理ツールに対してジョブの投入）を行う。解析の実行状況は、ジョブ管理ツールからのステータスを表示することで確認をすることができる。また計算終了後に中性子増倍率解析の解析結果は臨界計算データベースに登録管理される。登録された解析結果の表示及び削除機能がある。

5) データ管理機能

システムで使用される臨界計算コード名称や解析パラメータ名称等各種情報（固有値、名称など）を登録管理するデータ管理機能がある。

6) システム外解析結果登録機能

本システム外で実施した中性子増倍率解析の入力データ及び解析結果を臨界計算データベースに登録をする。登録は複数解析結果をまとめて登録を行う一括登録も可能とする。

臨界マップ管理システム（管理者用機能）

臨界計算データベースに登録された中性子増倍率解析の入出力情報から解析パラメータおよび中性子増倍率を抽出してデータベース（以下「臨界マップデータベース」と呼ぶ）に登録し管理する。

臨界マップ管理システムの機能構成を以下に示す。

1) 臨界マップデータベース登録機能

中性子増倍率解析の解析結果を確認（結果の表示および組成データ等解析パラメータと中性子増倍率や推定臨界値による描画）し、解析条件（燃料デブリの組成、質量、ジオメトリ情報等解析パラメータ）および解析結果（中性子増倍率）を臨界マップデータベースへ登録し管理する機能がある。また解析条件などによる解析結果の検索において検索されなかった場合や解析結果の確認で追加解析が必要な場合に臨界計算管理システムの入力データ作成機能へ連動して入力データを作成できる。

臨界マップ表示システム（利用者機能）

臨界マップデータベースに登録管理した解析条件（燃料デブリの組成、質量、ジオメトリ情報等解析パラメータ）と解析結果（中性子増倍率）などから推定臨界値や臨界・未臨界条件を図化する。

また、臨界マップ表示システムは、臨界マップ管理システムに複数のシステムがネットワークを介して接続することができる。

臨界マップ表示システムの構成を以下に示す。

1) 臨界マップ表示機能

臨界マップ管理システムで登録された中性子増倍率解析結果の表示及び解析結果から解析パラメータに対して増倍率を図化（推定臨界値図の作成）または臨界・未臨界条件を図化（臨界未臨界判定図の作成）して表示する機能がある。

2) 臨界解析リクエスト機能

既存のパラメータ解析の条件の追加など管理者に対しての解析の追加要求（中性子増倍率解析のリクエスト）がおこなえる機能がある。

ユーザ管理システム（管理者機能）

臨界マップデータベースシステムの利用者の登録管理および各機能の利用権限を管理する。

(2) システム機能・構成設計

機能要件の定義を受けて、システム設計、データベース設計、データフロー設計、及び
 インターフェース定義を行うとともに、システム構成及びハードウェア構成を検討した。

システム設計の一例として、画面構成の計画を図 4-3 に示す。

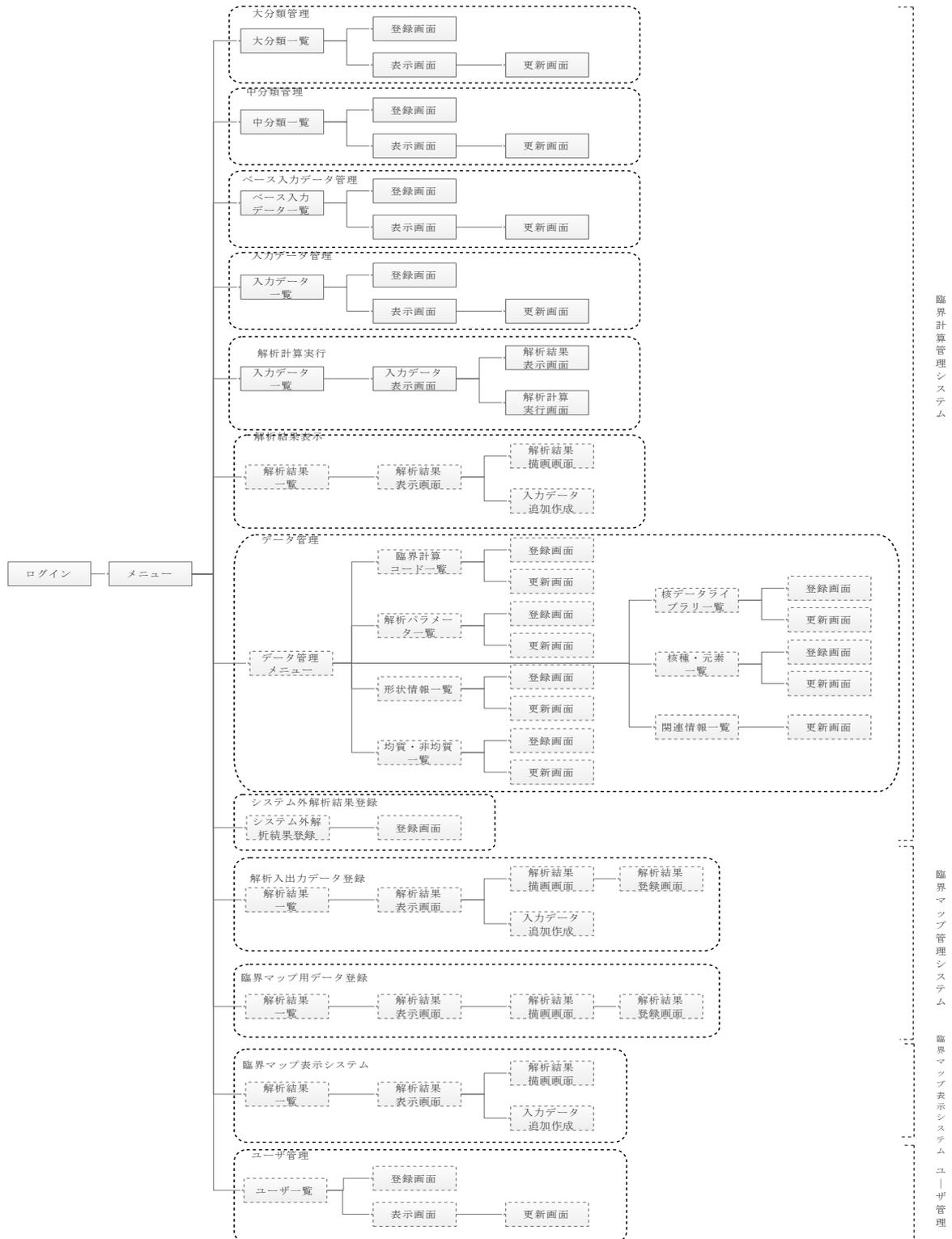


図 4-3 画面構成の計画

データベース設計の一例として、保持するテーブル群とそれらのリレーションの計画を図 4-4 に示す。

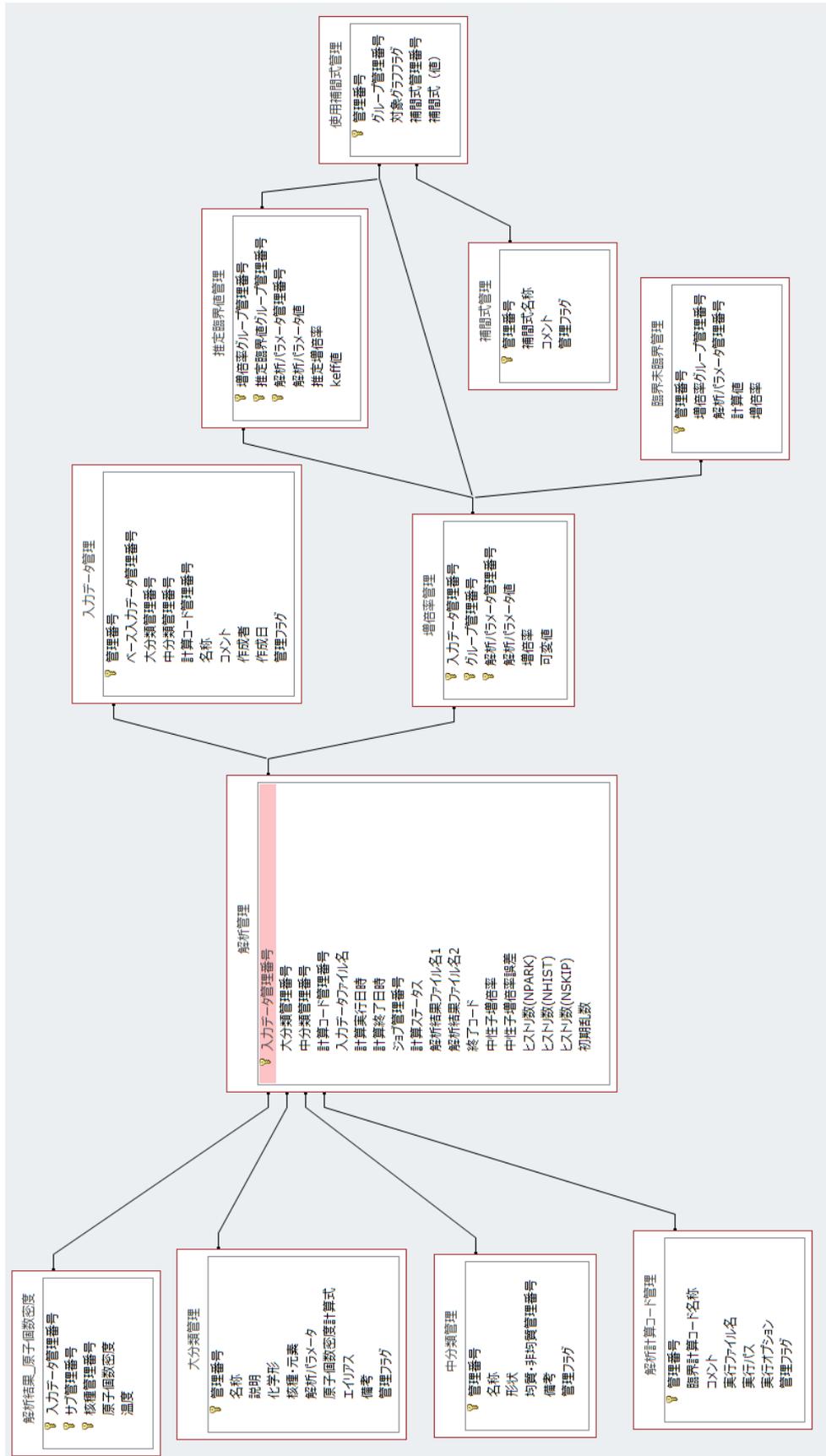


図 4-4 解析結果管理テーブルを中心としたテーブル関係図

データフロー設計の一例として、臨界マップを表示する際のデータの流れの計画を図 4-5 に示す。

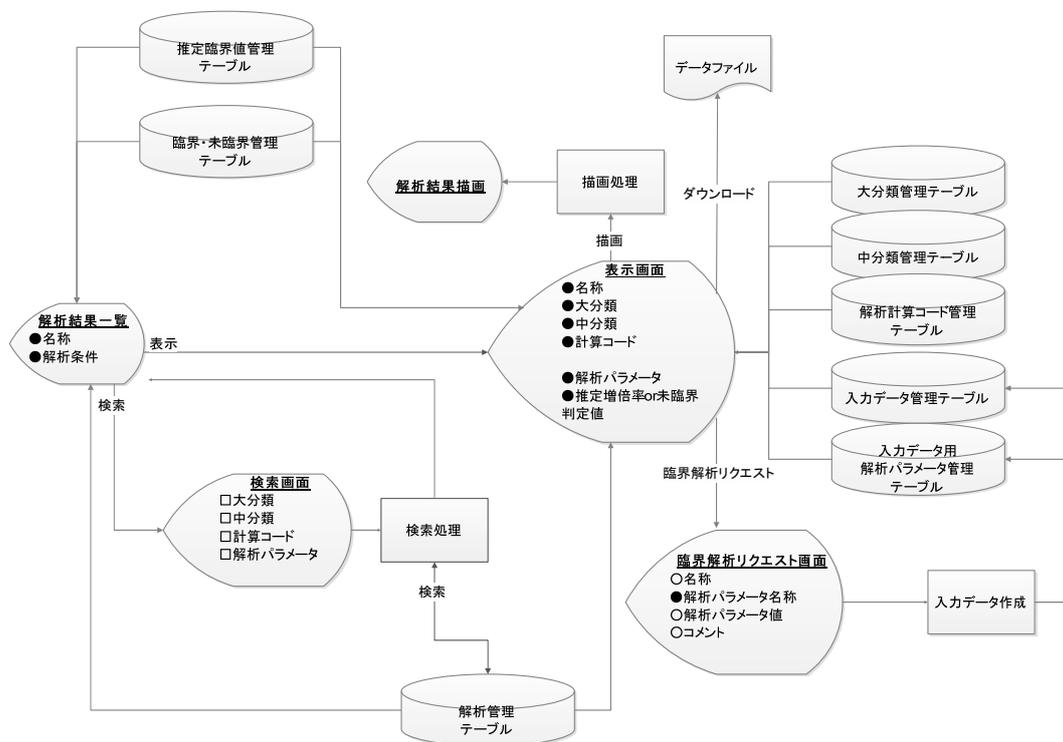


図 4-5 臨界マップ表示の際のデータの流れ

インターフェース定義の一例として、連続エネルギーモンテカルロコード MVP¹⁾ の出力ファイルから情報を抽出するインターフェースを表 4-1 に示す。

表 4-1 MVP の出力ファイルを読取るインターフェース

抽出情報	抽出方法	備考
タイトル	入力データ打ち返し後の"==="で挟まれた2行をタイトルとして抽出する。	1行あたり最大72文字
原子個数密度および温度	"MATERIAL NO"の次行以下に記載されている核種IDと原子個数密度および温度を抽出する。	核種IDは核データライブラリを用いて核種名称を変換する。MATERIAL ID毎に抽出をする。
ヒストリ数	"NPART"の次の数値を抽出する。	
バッチあたりのヒストリ数	"NHIST"の次の数値を抽出する。	
初期乱数	"IRAND"の次の数値を抽出する。	
スキップ数	"NSKIP"の次の数値を抽出する。	
増倍率	"ALL --> KEFF="の次の数値を抽出する。	
相対誤差	上記次の()内の数値を抽出する。	

システム構成の検討結果を図 4-6 に示す。ここで「所内ローカルネットワーク」や「DMZ (公開セグメント)」と記されているものは、例えば JAEA のネットワークである。図 4-1 に示した臨界マップを表示する遠隔地の端末は通常のパーソナルコンピュータで良く、本図には示されていない。遠隔地端末は「インターネット等外部ネットワーク」から接続する。

ハードウェア構成は、例えば、図 4-7 に示すようなものとなる。

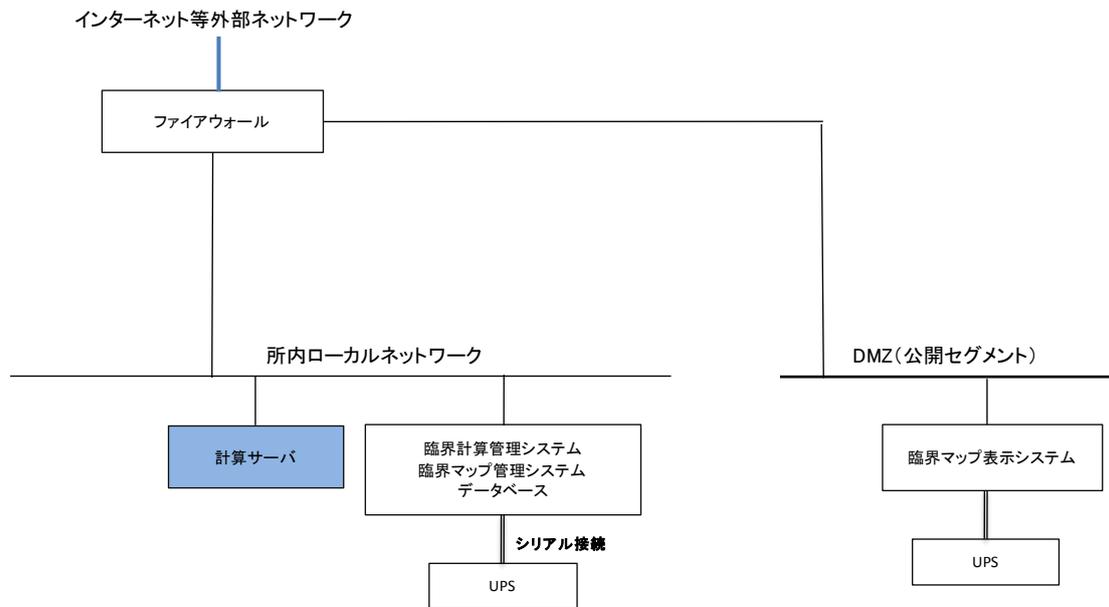


図 4-6 ネットワーク上で運用する際のシステム構成案

(3) システム運用手順設計

以下の項目について、運用に係る要件を定め、これに従ってシステム運用手順を設計した。

- ・ 可用性要件 (利用時間、計画停止、障害時の影響)
- ・ 信頼性要件 (障害が発生した場合のシステム内に保持するデータの整合性確保)
- ・ セキュリティー性要件 (認証・認可、暗号化、監査、セキュリティー対策)
- ・ 運用要件 (保守、復旧)

4.1.3 まとめ

1Fにおける燃料デブリ臨界管理に必要な情報の迅速な取得、及び臨界解析の省力化に資する臨界マップデータベースシステムの概念設計を行った。設計の結果は、機能要件定義書、データベース設計書、データフロー図、インターフェース定義書、システム設計書、システム構成図、ハードウェア構成図、及びシステム運用手順書の設計図書としてまとめられた。

この概念設計に基づき、次年度には、臨界マップデータベースシステムの実装を行い、JAEA ネットワーク内で仮運用する予定である。

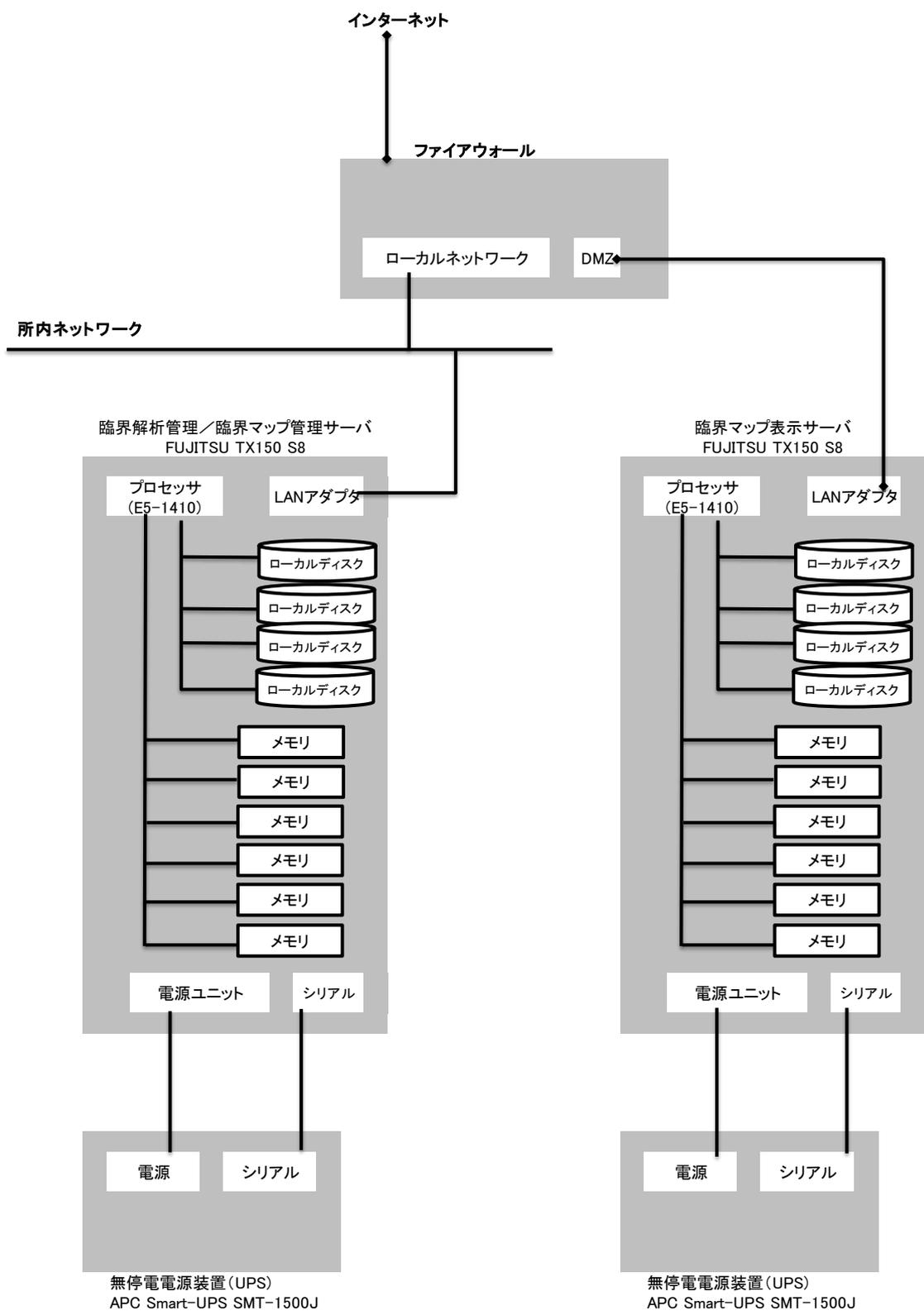


図 4-7 ネットワーク上で運用する際のハードウェア構成案

4.2 燃焼計算コードの改良

4.2.1 目的及び概要

(1) 目的

燃料デブリ臨界リスクを評価する基準を整備するにあたって、それに必要な燃焼燃料の臨界評価に用いる燃焼感度計算コードとして、北海道大学原子炉工学研究室にて開発された汎用炉物理解析コードシステム CBZ が選定されている。本項では、バンドル体系に燃焼感度計算を適用できるように本コードの機能を改良することを目的とする。

(2) 概要

汎用炉物理解析コードシステム CBZ について、バンドル体系で燃焼感度計算を適用できるようにコードの機能を改良した。さらに、軽水炉照射燃料を対象に改良前後の機能を用いた燃焼感度計算を実施し、今回新たに組み込んだ機能の検証を行うとともに、異なる組成の燃料棒で構成されるバンドル体系に対して燃焼感度を計算し、隣接燃料棒が異なることによって感度係数がどの程度影響を受けるか評価を行った。

4.2.2 燃焼計算感度計算機能の改良

Gandini の燃焼核特性に対する一般化摂動論²⁾ を Williams が空間依存の問題に拡張した理論³⁾ に基づき、CBZ に燃焼感度計算機能を実装した。

4.2.3 燃焼計算感度計算機能の比較

(1) マルチセル体系における燃焼感度計算機能の実装

コードシステム CBZ は全てのプログラムが C++ で記述されており、計算機能に応じて複数のクラスが実装されている。例えば単ピンセルの燃焼計算、燃焼感度計算を行なうクラスとして Burner が実装されている。ユーザは、計算目的に応じてクラス（ソルバー）を呼び出し、それに必要な入力データを与えて計算を走らせ、その後、必要なデータ（計算結果）を取り出す。これらは全て C++ で記述されるプログラム上で行なわれることから、CBZ の入力は一貫して「C++ のプログラム」と言い換えることが出来る。

今回の研究では、マルチセル体系における燃焼感度計算機能を実装したが、これらは特定のクラスとして整備するのではなく、「C++ のプログラム」として作成した。すなわち、入力、計算部分、出力が一体となったプログラムである。

このプログラムでは、「部品」として、既の実装されている CBZ のモジュール（クラス）を利用している。以下にその一例を示す。

- IrregularGeometryInformation : マルチセルの幾何形状データを定義するクラス
- Burnup : 燃焼方程式を数値的に解くクラス
- SelfShieldingCalculator : 実効断面積を計算する（共鳴処理を行なう）クラス
- PJISystem : 衝突確率法に基づき中性子輸送方程式を解くクラス

(2) 単ピンセル体系に対する妥当性の検証

単ピンセル体系における燃焼後数密度に対する感度係数について、既に十分な検証が行なわれている CBZ/Burner モジュールの結果を参照解として、今回開発したプログラムの妥当性を確認した。解析対象は参考文献4)に記載されている PWR を模擬したピンセルとし、 UO_2 燃料は ^{235}U 濃縮度を 4.1 wt% のもの、MOX 燃料は核分裂性 Pu 含有率が 10% のものを用いた。

感度計算対象は 45 GWd/t まで燃焼させたときの ^{239}Pu 、 ^{242}Cm 、 ^{245}Cm 、 ^{156}Gd の数密度とし、各々の数密度について、 $^{235}\text{U}(n,f)$ 、 $^{239}\text{Pu}(n,f)$ 、 $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ 断面積に対する感度を計算した。 ^{242}Cm 、 ^{245}Cm 、 ^{156}Gd 数密度については、それらの生成に大きく影響する親核種の (n,γ) 断面積に対する感度も計算した。

図 4-8 から図 4-11 に UO_2 セルに対する結果を示す。Burner では、燃焼サブステップ中の随伴数密度の変動を精度良く評価するため、「サブサブステップ」を導入しているが、本研究で作成したモジュールではその導入は行なっていない。したがって、2 つの感度係数は厳密には一致することはないが、両者は良く一致しており、本研究で作成したマルチセル体系での燃焼感度計算機能の妥当性を確認した。

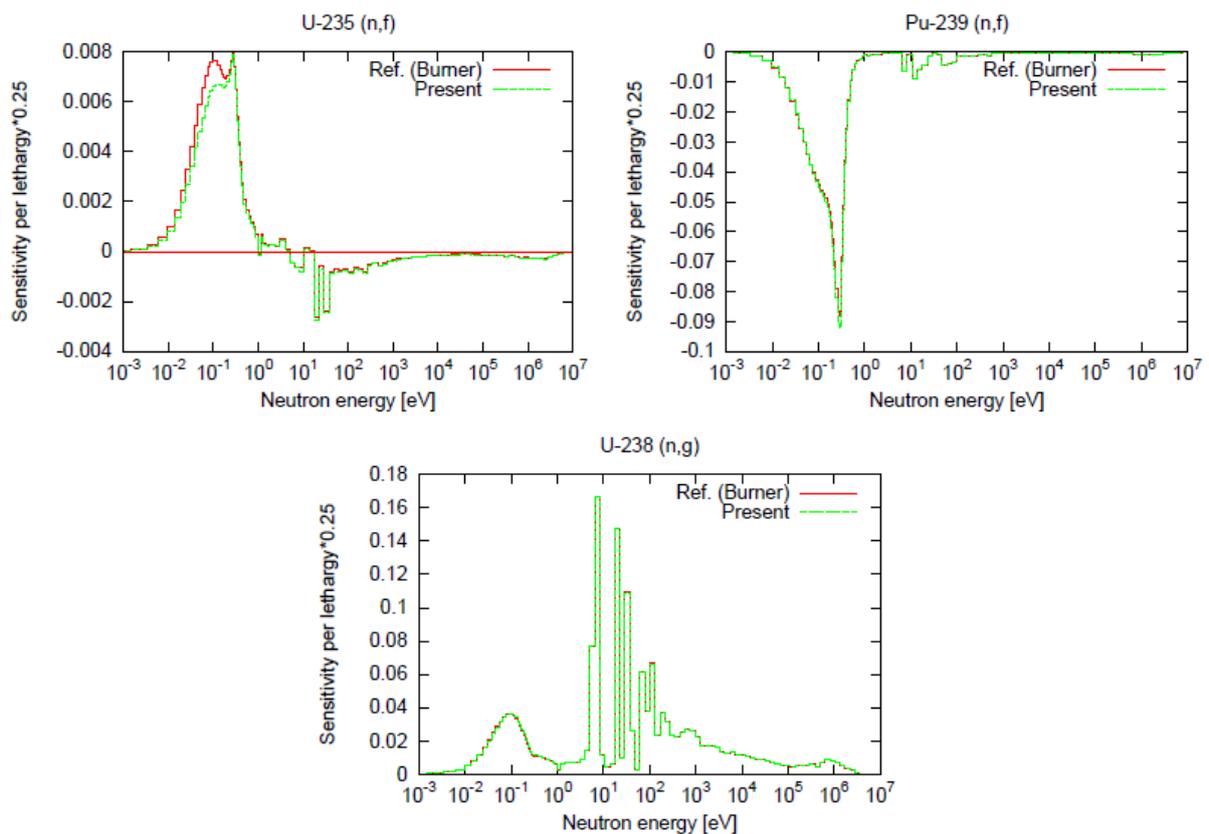


図 4-8 燃焼度 45 GWd/t の UO_2 における ^{239}Pu 数密度の感度

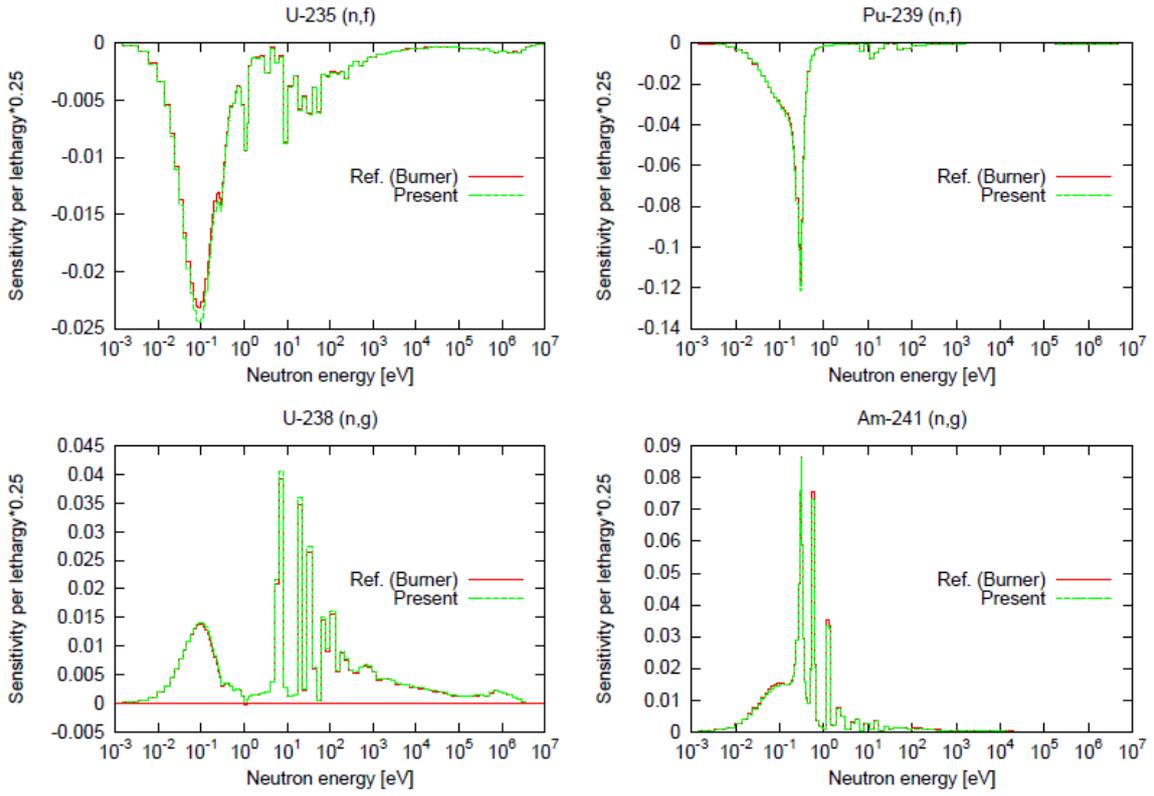


図 4-9 燃焼度 45 GWd/t の UO_2 における ^{242}Cm 数密度の感度

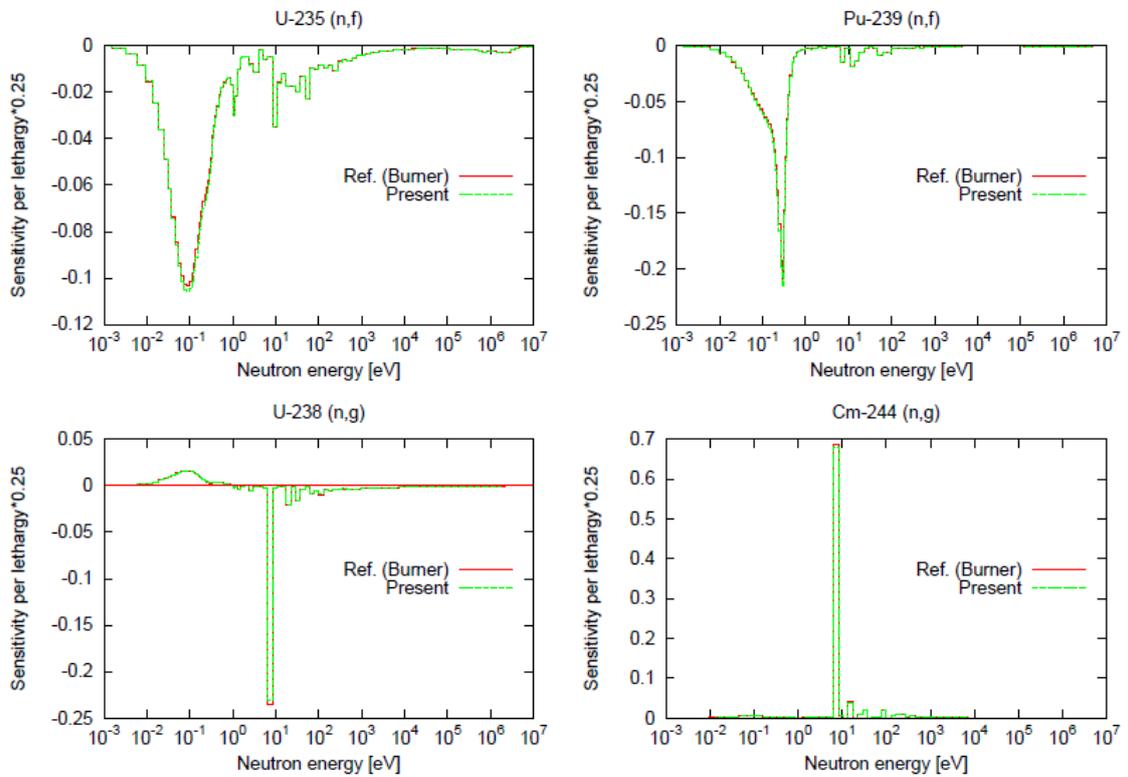


図 4-10 燃焼度 45 GWd/t の UO_2 における ^{245}Cm 数密度の感度

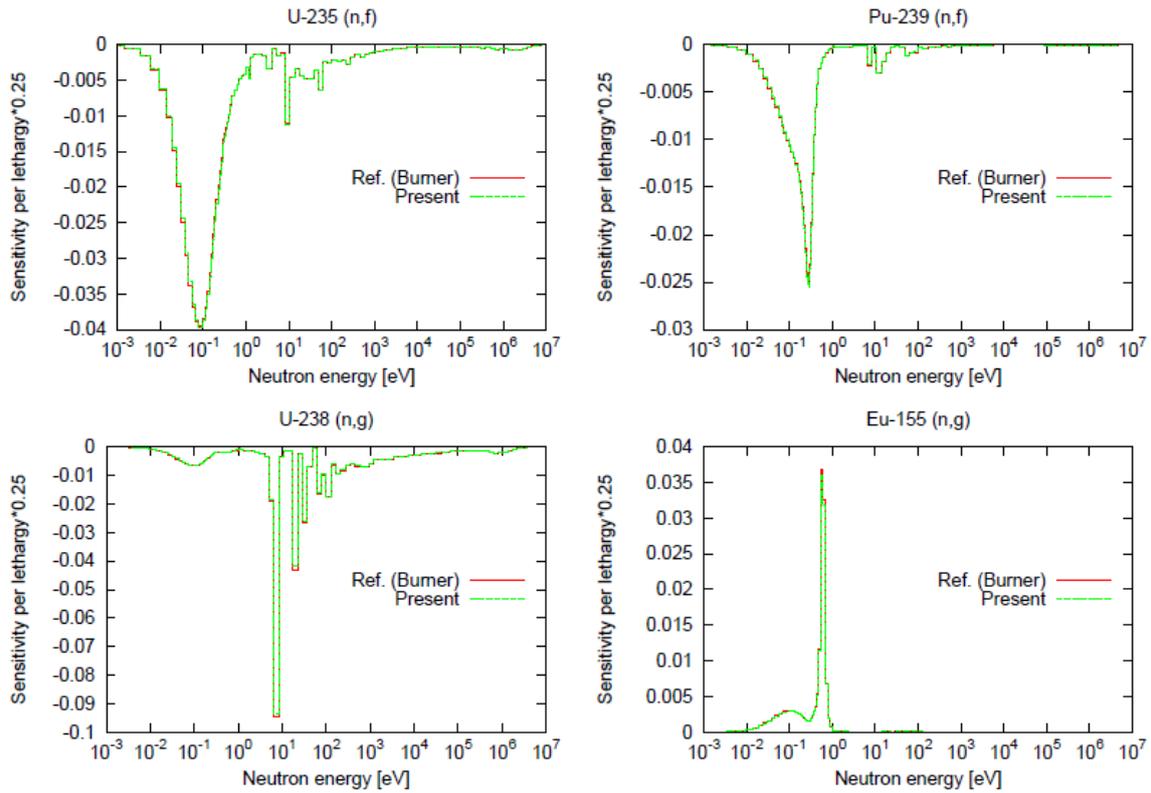


図 4-11 燃焼度 45 GWd/t の UO_2 における ^{156}Gd 数密度の感度

(3) マルチセル体系における燃焼感度の比較

次に、異なる燃料ピンからなるマルチセル体系の燃焼感度を計算し、着目ピンセルの周囲の環境の違いによって感度がどの程度変動するかを評価した。 UO_2 セル、 MOX セルそれぞれについて、図 4-12 のような 3×3 のマルチセル体系を構築した。着目するのは中心の燃料ピンとし、4 ケースのマルチセルを考えた。参照ケースは同一の燃料ピンからなる体系、ケース 1 はマルチセルの端部に異なる燃料ピンが存在する体系、ケース 2 は隣接する位置に異なる燃料ピンが存在する体系、ケース 3 は着目燃料ピン以外は全て異なる燃料ピンとした体系である。

中央を UO_2 セルとしたマルチセル体系での感度係数を図 4-13 から図 4-16 に、中央を MOX セルとしたマルチセル体系での感度係数を図 4-17 から図 4-20 に、それぞれ示す。

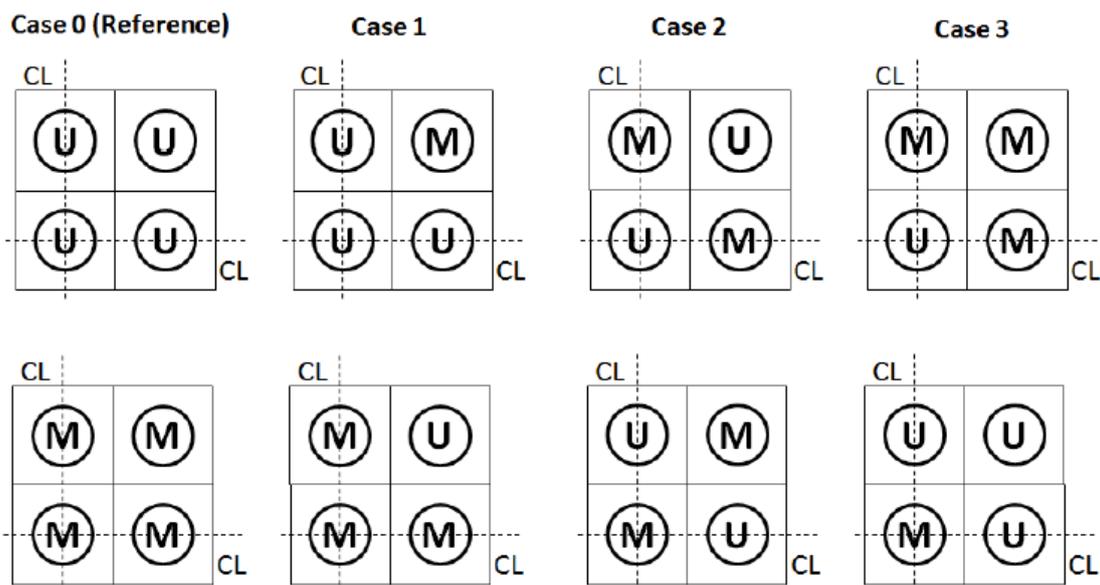


図 4-12 解析に用いたマルチセル体系

着目セルの周辺環境の違いにより、感度係数のエネルギー依存性に大きな差異が観察される。着目セルの周囲に MOX セルが多く隣接する場合は、中性子束のエネルギースペクトルが硬化するため、感度係数のエネルギープロファイルも高エネルギー側にシフトしている。また、 ^{235}U 、 ^{239}Pu の核分裂断面積の感度が燃料配置で大きく変わるもう 1 つの原因としては、いわゆる出力規格化項の影響である。マルチセル体系における燃料配列によって ^{235}U 、 ^{239}Pu の出力への寄与が異なるが、今回はマルチセル全体の出力で中性子束を規格化しているため、この項の影響が現れることになる。

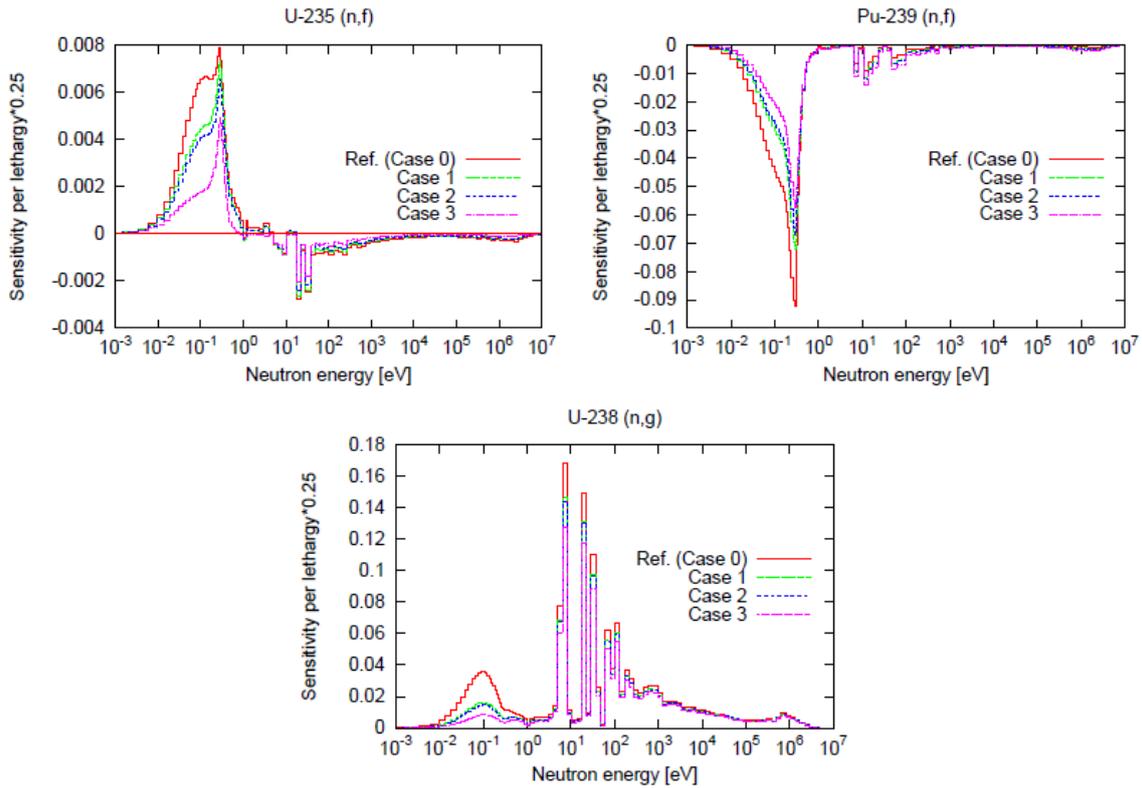


図 4-13 燃焼度 45 GWd/t の UO_2 における ^{239}Pu 数密度の感度 (マルチセル体系)

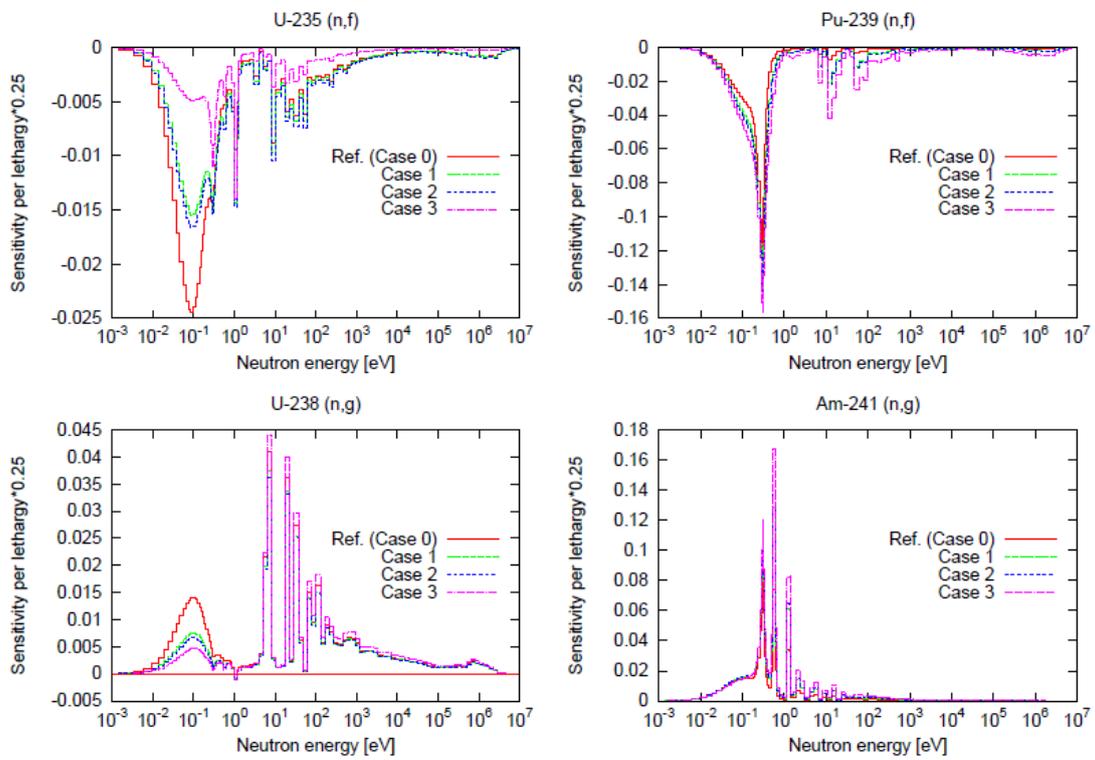


図 4-14 燃焼度 45 GWd/t の UO_2 における ^{242}Cm 数密度の感度 (マルチセル体系)

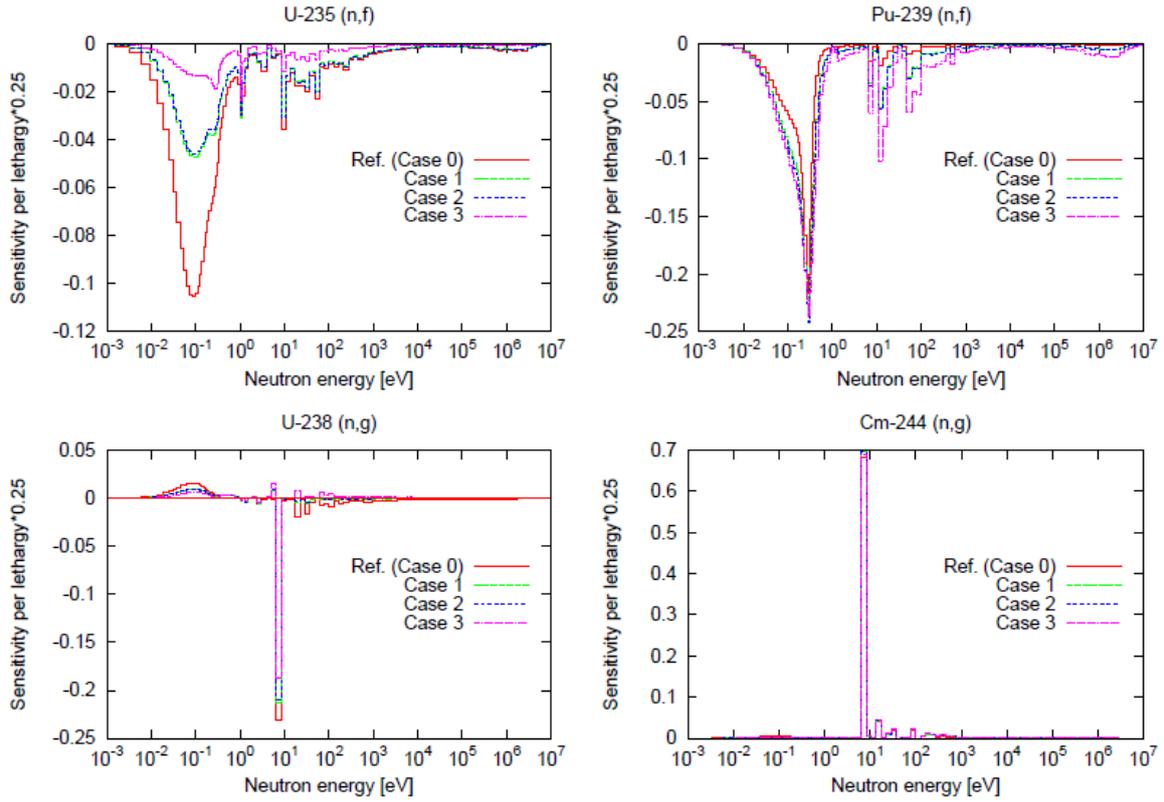


図 4-15 燃焼度 45 GWd/t の UO_2 における ^{245}Cm 数密度の感度 (マルチセル体系)

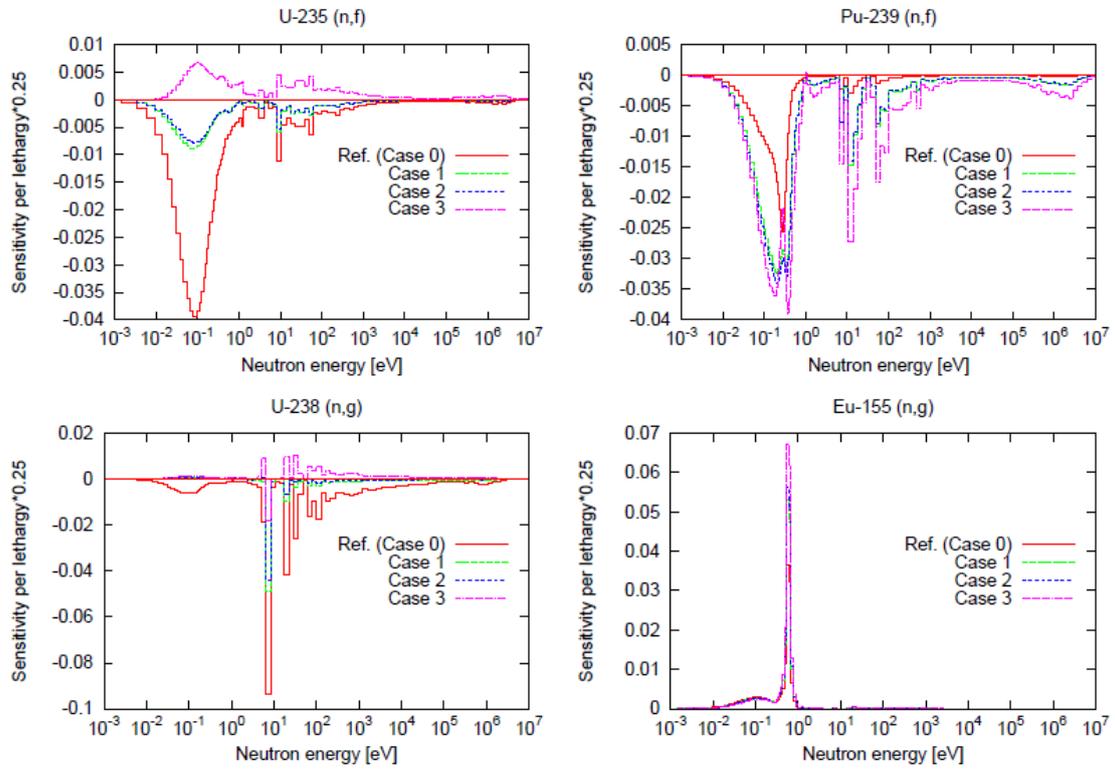


図 4-16 燃焼度 45 GWd/t の UO_2 における ^{156}Gd 数密度の感度 (マルチセル体系)

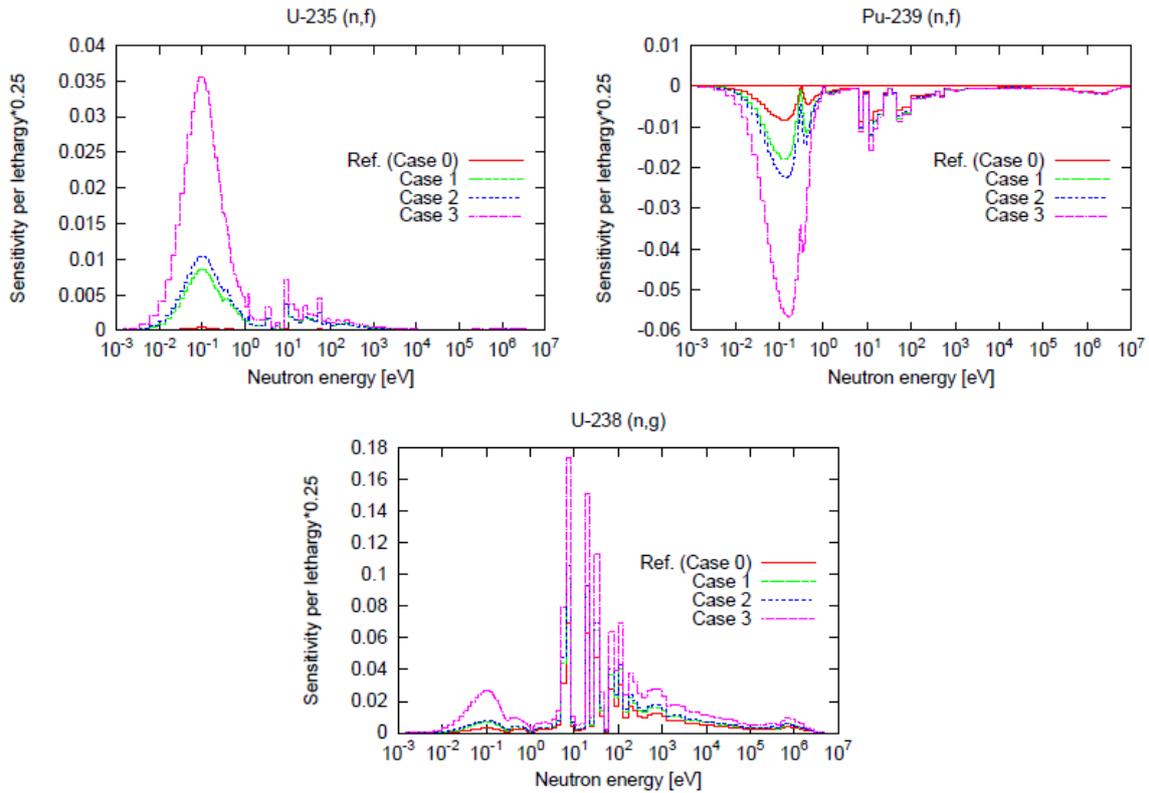


図 4-17 燃焼度 45 GWd/t の MOX における ^{239}Pu 数密度の感度 (マルチセル体系)

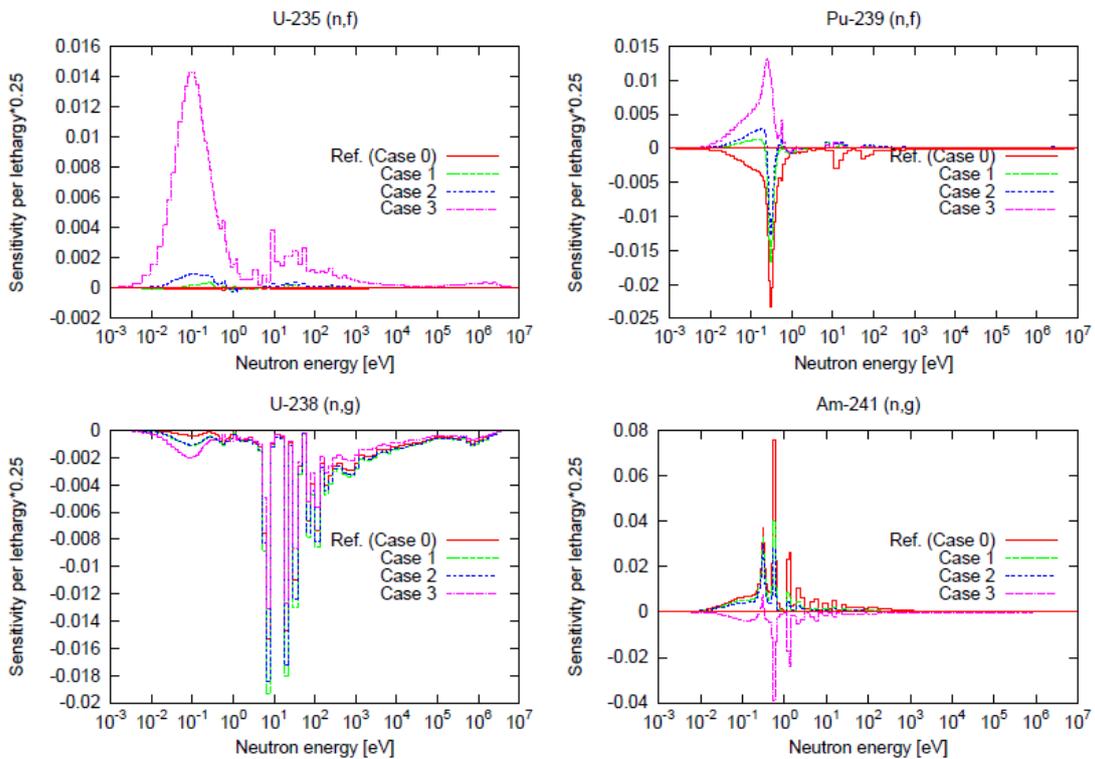


図 4-18 燃焼度 45 GWd/t の MOX における ^{242}Cm 数密度の感度 (マルチセル体系)

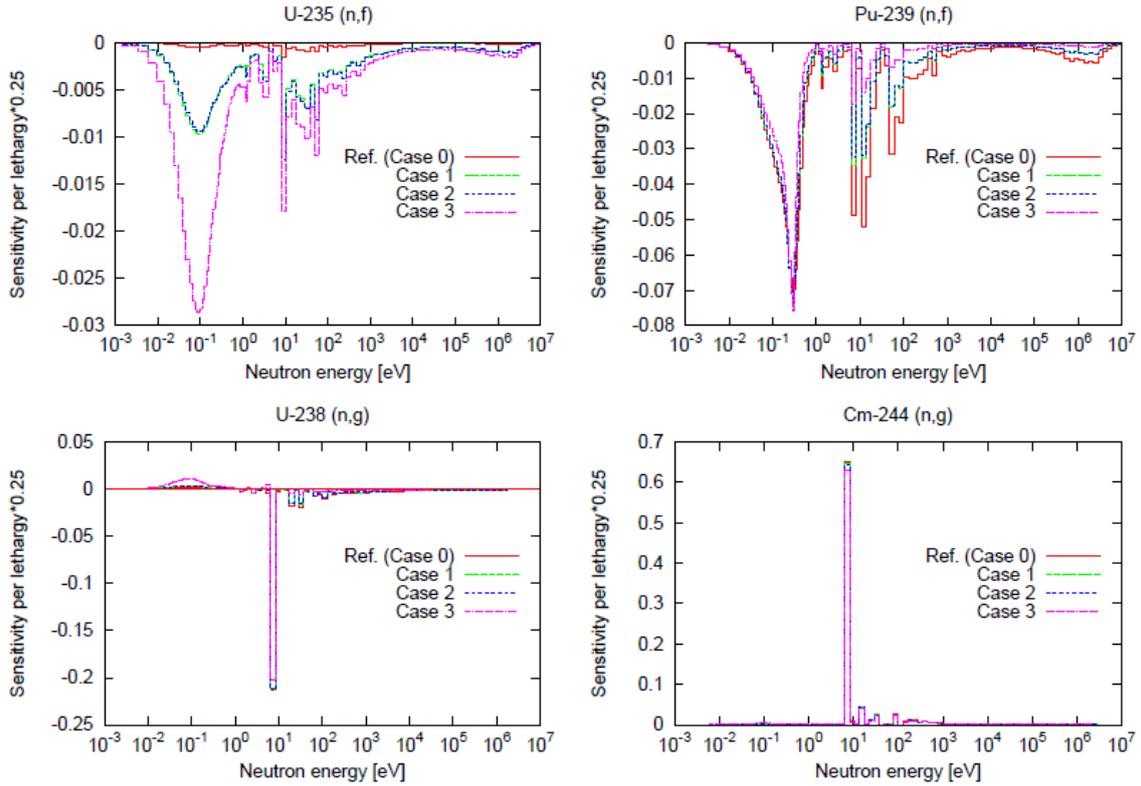


図 4-19 燃焼度 45 GWd/t の MOX における ^{245}Cm 数密度の感度 (マルチセル体系)

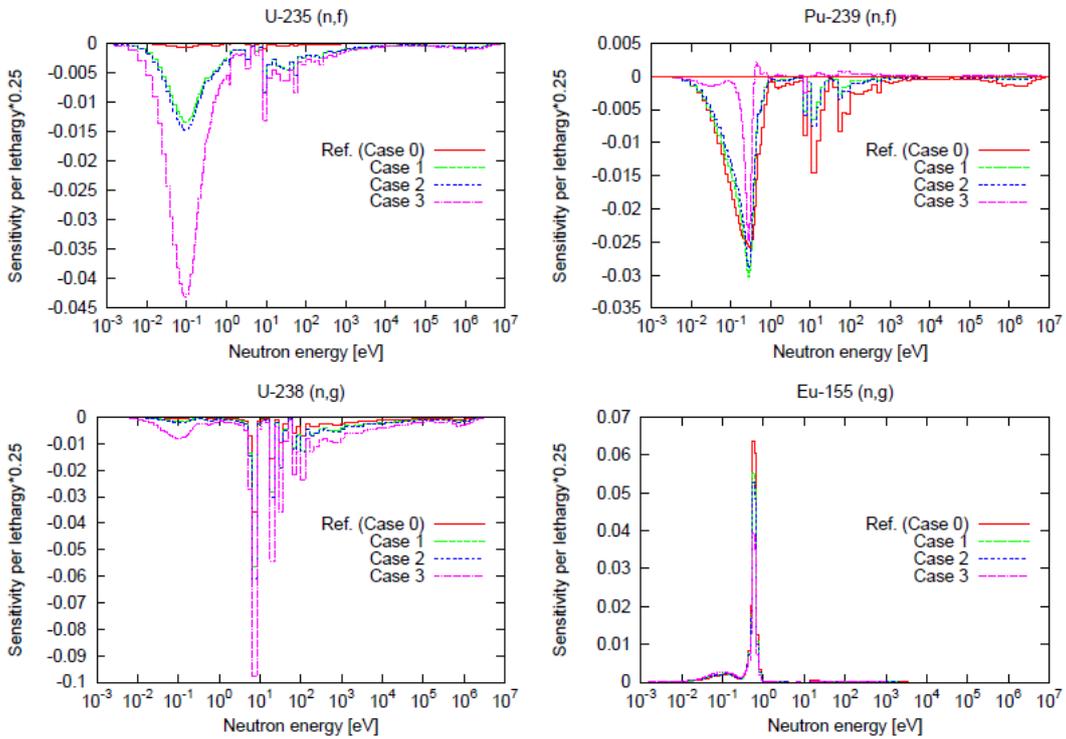


図 4-20 燃焼度 45 GWd/t の MOX における ^{156}Gd 数密度の感度 (マルチセル体系)

4.2.4 まとめ

汎用炉物理解析コードシステム CBZ について、バンドル体系で燃焼感度計算を適用できるようにコードの機能を改良した。さらに、軽水炉照射燃料を対象に改良前後の機能を用いた燃焼感度計算を実施し、今回新たに組み込んだ機能の検証を行うとともに、異なる組成の燃料棒で構成されるバンドル体系に対して燃焼感度を計算し、隣接燃料棒が異なることによって感度係数がどの程度影響を受けるか評価を行った。

参考文献

- 1) Y. Nagaya, et al., *MVP/GMVP II : General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods*, JAERI 1348, Japan Atomic Energy Research Institute (2005).
- 2) A. Gandini, *Time-dependent generalized perturbation methods for burn-up analysis*, CNEN RT/F1(75)4, Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare, Rome (1975).
- 3) M. L. Williams, "Development of depletion perturbation theory for coupled neutron/nuclide fields," *Nucl. Sci. Eng.*, **70**, 20 (1979).
- 4) 片倉純一、他、*JENDL-3.3 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット : ORLIBJ33*、JAERI-Data/Code 2004-015、日本原子力研究所 (2004).

第 III 編 臨界リスク評価手法の整備

第5章 リスク評価で考慮すべき事象の検討

本章では、5.1 節で背景と目的、5.2 節で主な事象の検討、5.3 節で検討結果から導かれる今後対応すべき事柄について報告する。

5.1 目的と課題

1F 廃炉の安全を担保するために必要な検討を行うための考え方について整理することが本節の目的である。初めに現状を示し、以降に検討すべき課題について述べる。

1F では、平成 23 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の際に、複数の原子炉で炉心燃料が溶融し格納容器底部へ落下したと推定されている。¹⁾ 燃料被覆管の水ジルカロイ反応により発生した水素ガスの爆発により原子炉建屋の損壊に至っている。溶融した炉心燃料冷却のため、炉心上部から注水し、冷却後の汚染水を浄化し一部を冷却水として再利用している。廃炉のための燃料デブリ取出しは平成 32 年以降に計画²⁾されており、平成 37 年度以降になるとも伝えられている。

廃炉の作業は安全でなければならない。燃料の溶融を起こした 1F の原子炉は地震の直前まで通常の運転をしており、原子炉内に装荷されていた核燃料は最低臨界量より多い。燃料デブリの取出し作業等で再び臨界に達して、公衆や作業者に甚大な被害を与えることがないようにしなければならない。

現状では、なんらかの条件の変化により燃料デブリが臨界になる可能性を想定することが必要である。溶融した燃料は燃料被覆管などとともに炉心下部に溶け落ちたとみられており、その所在や所在ごとの核燃料物質の存在量、燃料その他の物質の濃度（組成）などは不明である。冷却のために注入されている水は中性子を減速、反射することで臨界になりやすくする効果を持つ。想定される燃料デブリの組成に基づいた臨界計算により、中性子無限増倍率が 1 を超える場合があることが報告されている。³⁾ これは、臨界になる条件の一つを満たしている可能性があることを意味する。中性子無限増倍率が 1 を超え、かつ燃料デブリの塊などからの中性子の漏れが十分小さければ、臨界になるからである。

臨界への対策の有効性を確認する必要がある。1F では現在 Xe ガスのモニタリングにより臨界を監視している。実施計画では、臨界発生時にはホウ素を投入することにより臨界を停止することになっている。⁴⁾ これらの対策は、臨界時に生じる核分裂連鎖反応によって Xe が大量に発生するのでそれを検知できる、ホウ素を投じれば中性子が吸収されて核分裂連鎖反応が維持できないという考え方に基づいている。しかし、Xe が途中で漏れることなく検出器に達するのか、ホウ素が確実に燃料デブリまで達して必要な濃度を維持し続けるのかといった重要な点については明らかになっていない。また、これらの対策で十分であることを判断できるだけの情報がない。これは、どのような条件の変化により臨界に達するのかという点が明らかにされていないためである。臨界の「起因事象」を想定しないで対策の有効性を議論することは困難である。

対策の検討では、公衆及び作業者の安全を考慮する必要がある。臨界による直接的な被害は、放射線による被ばくである。公衆の場合、臨界時の核分裂で生じた核分裂生成物（FP）が環境に放出され、それらの FP から生じる放射線による外部被ばくや、FP を摂取したこと

による内部被ばくを考慮する必要がある。作業者の場合、臨界に達した直後に生じる最大出力（出力は単位時間当たりの核分裂エネルギー）において、核分裂で放出される中性子線による外部被ばくを考慮する必要がある。公衆の被ばくについては敷地境界で 1 mSv/year、作業者の被ばくについては 20 mSv/year⁵⁾ といった基準が設けられているので、これを超えないこと、超えなくとも可能な限り被ばく線量を小さくすることが必要である。

公衆や作業者の臨界による被ばくのリスクを評価するためには、原因となる核分裂数や臨界到達直後の最大出力の値の評価（以下影響評価）が重要である。核分裂生成物の量から公衆の被ばく量を推定するには放射性物質の飛散などの計算が必要である。最大出力から作業者の被ばく量を推定するには構造物等による放射線の遮蔽効果等を計算する必要がある。⁶⁾ これらの計算方法については多くの研究がなされているが、燃料デブリの臨界による影響評価については確立された方法がない。燃料デブリの臨界リスク評価のためには、臨界影響評価手法について検討する必要がある。

臨界リスク評価のためには、燃料デブリの臨界の発生確率を評価する手法についても検討する必要がある。リスクの定量化に必要な事象の発生確率については、リスク評価の代表的な手法として HAZOP⁷⁾、FMEA⁸⁾ などのボトムアップ的手法や FTA (Fault Tree Analysis) などのトップダウン的手法などが挙げられる。⁹⁾ これらの手法は機器の故障などの事象を網羅的に検討して、正常に管理されている状態を逸脱する確率を求める手法であるが、燃料デブリはすでに正常な管理を逸脱した状態であるため、このような手法を適用することが困難である。このため、適用可能な手法について検討する必要がある。

以上のことを踏まえ、次節では臨界リスク評価の手順について述べる。

5.2 燃料デブリ臨界リスク評価の手順

燃料デブリの臨界リスク評価において前節で示された課題は、以下の3つである。

- ① 臨界に対する対策の有効性の確認
- ② 正常な状態ではない状態からの臨界発生確率の評価
- ③ 燃料デブリの臨界影響評価

①は検討方法について、③は定量的評価方法についての課題であるが、②はその両方を含んでいる。すなわち、臨界発生を伴う条件の変化（シナリオ）の検討方法の課題とシナリオに基づく発生確率の評価という2つの課題を含んでいる。

①、②の検討方法の課題を解決するための、燃料デブリ臨界リスク評価の考え方の重要な点は以下の2点である。

- ・ 起回事象を明確にすること
- ・ 網羅的な検討を行うこと

臨界の起回事象を明確に想定することは、シナリオを想定することであり、これにより対策の有効性を検討することが可能となる。例えば、中性子の減速・反射材である水が燃料デブリを包むことにより臨界に達したのであれば、最も直接的な対策としては水を取除くことが考えられる。さらに、起回事象が明確であれば、その起回事象の発生確率が臨界発生の確率と等しいと考えられるため、臨界の発生確率を起回事象の発生確率に置き換えて検討することが可能となる。

起回事象について網羅的に検討を行うことで、提案されている対策がどのような範囲の事象に起因する（どのようなシナリオに基づく）臨界への対策になっているかが明らかとなり、対策の有効性を確認することが可能となる。そして、事象ごとに発生確率と影響を評価し、その積でリスクを求めれば、網羅した事象のリスクを総合的に検討して臨界リスクの定量化が可能となる。

網羅的な検討を実践するためには、新たな工夫が必要である。燃料デブリを含む十分広い空間を設定し、その空間を必要に応じて区切って、一つ一つの区切られた空間において起回事象の検討を行う。燃料デブリ取出し作業まで数年以上の長期間に及ぶことが想定されることから、時間的にも区切ることをとする。例えば、取出し準備作業直前まで、準備作業時、取出し作業時などと区切ってそれぞれの時間、空間の区切りで起回事象を想定する。

起回事象の想定には、臨界管理因子を利用する。質量、濃度（組成）、形状、減速・反射条件、多体効果などの観点から臨界の起因となる事象を想定する。このようなシステムマッチな検討により網羅的な評価を行うことができる。

②、③の定量的評価方法についての課題を解決するための最も単純な方法は、起回事象ごとに変化する条件（質量、組成、形状等の臨界パラメータ）を想定して臨界計算を行い、中性子実効増倍率を求めて過渡臨界計算等により影響評価（核分裂数、最大出力の評価）を実施することである。しかし、燃料デブリについては臨界パラメータの多くが不明であること、網羅的な検討を行うために実施する計算ケース数が膨大となるため、現実的な時間で結果を出すことが困難と予想されることなどの問題がある。このため、さまざま工夫により効率よくリスクを定量化する方法を検討する必要がある。

検討すべきリスク定量化方法には、不明なパラメータを推定する方法、中性子実効増倍率が 1 を超えないことを確認するなどにより計算ケース数を減らす方法、少ない計算で精度良く中性子実効増倍率の分布を評価する方法、中性子実効増倍率の分布に基づいて臨界影響の分布を精度良く評価する方法などが挙げられる。

以上のことを踏まえ、燃料デブリの臨界リスク評価を以下の手順で検討することとする。

燃料デブリ臨界リスク評価の手順

ステップ 1：時間・空間的に検討対象を区切る

ステップ 2：各区切りの中で、臨界管理因子ごとに関連する起因事象を想定する

ステップ 3：中性子無限増倍率、実効増倍率を評価する

ステップ 4：発生確率および影響を評価しリスクの定量化を行う

「臨界リスク事象の検討」として、ステップ 1 と 2 において「網羅的な検討」と「起因事象の明確化」を実施する。ステップ 3 と 4 では「定量的なリスクの評価」を実施する。

次節でステップ 1 と 2 を試行し、燃料デブリの臨界リスク評価で考慮すべき事象について検討する。

5.3 主な事象の検討

5.3.1 臨界リスク評価マトリックスの作成

臨界リスク事象の検討として、前節で示した手順に従って燃料デブリ臨界リスク評価の前半（ステップ1と2）を試行する。検討を精度よく効率的に実施するため、多次元のマトリックス（臨界リスク評価マトリックス）を作成する。

マトリックス作成にあたって注意すべきことがある。事象の検討を十分に行うためには、現場についての技術情報や臨界安全管理、臨界事故評価、規制に関する情報等の専門的知見が必要である。また臨界リスクを精度良く定量化するためには、完成度の高いマトリックスが必要である。このため、臨界リスク評価マトリックスの作成は事業者や規制当局、有識者等が単独で実施するのではなく、マトリックスを互いに共有して相互に検討を行い、完成度を高めていく必要がある。

臨界リスク評価の第1のマトリックスは表5-1に示すような、考慮すべき範囲を時間と空間で区切ったものである。時間軸では、デブリの取出し作業開始までが長期間となることを想定し、現在、10年後、取出し準備の時期、取出し時に区分した。空間軸の区分は、本来、事業所境界などの線量評価の基準となる境界を外縁とする領域を設定して、その内部を核燃料物質等の所在に応じて区分すべきだが、ここでは試行として参考文献11)で想定されている燃料デブリの所在場所を中心に区分した。参考文献11)に示されていない区分として「冷却水中」を想定した。

網羅的な検討のためには、事業所境界内でこの区分に入っていない部分を「その他の区分」とし、そこに核燃料が存在していないこと、そこへの核燃料の移行がないことを確認する必要がある。以下では「その他の区分」についての検討は行わない。

表 5-1 臨界リスク評価の第1マトリックスの例

状態マトリックス	時間軸（日時）				
		現在	10年後	準備	取出し
空間軸（場所）	RPV 下部	①	②	③	④
	RPV 中央	⑤	⑥	⑦	⑧
	PCV 下部	⑨	⑩	⑪	⑫
	冷却水中	⑬	⑭	⑮	⑯
	その他	—	—	—	—

表 5-1 で示される第 1 マトリックス中の各カラム (①から⑯) に対して、以下の第 2 マトリックス (表 5-2) を作成する。ここでは、臨界管理因子として提示される各項目に対して、ブレインストーミング的に想定できる起回事象とシナリオを列挙する。その後、一つ一つの起回事象とシナリオについて、リスク検討を進める必要があるかどうかを検討する。一つの臨界管理因子に対して、できる限り多くの起回事象とシナリオを想定することが大切である。個々のシナリオには、臨界の終息条件 (終息方法) も含まれていなければならない。また、それらのシナリオに対して、リスク検討の要否を判定する際には、起因から終息までを総合的に考慮して、合理的な理由を明示することが重要である。

表 5-2 臨界リスク評価の第 2 マトリックスの例

状態	① 2015年2月25日15:00 RPV 下部			
	起回事象	シナリオ	リスク検討要否	
臨界管理因子			要否	理由
質量	融解落下	RPV 中央部からの落下	要	地震等による落下を想定
組成	化学反応	冷却水との反応	否	短時間のため想定できる化学反応がない
形状	水流	...	否	
減速・反射条件	
多体効果	

5.3.2 事象の検討

臨界の影響や対策を検討しなければならない事象について、前節までに述べた考え方及び手続に従って検討した結果を示す。第 2 マトリックスは共通する部分も多いので、以下では第 2 マトリックスの一つ一つを示すことはせず、検討結果をまとめて示す。この検討は、公開情報など限られた情報に基づいて実施しているという意味で、試行的である。以下、(1) デブリ取出しまでの維持管理時、(2) デブリ取出し準備及び取出し時、のそれぞれについて示す。

(1) デブリ取出しまでの維持管理時

1) で、第 1 マトリックスの②、⑥、⑩、⑭のそれぞれについて主な条件を整理し、2) で検討すべき事象、3) で検討課題について示す。

1) 主な条件

② RPV 下部

核燃料物質：融解後固化した燃料デブリ
状態：固体
組成：出来方依存[制御棒等の溶け方]、均一性
形状：塊、粒状、クラック有無

⑥ RPV 中央部

核燃料物質：溶け残った燃料
状態：燃料棒、固体
組成：ほぼ製作時の燃料
形状：ほぼ製作時の燃料

②⑥で考慮すべき条件：

注水されている冷却水との間で生じる化学的及び物理的作用

⑩ PCV 下部・長期保管

核燃料物質：融解後固化した燃料デブリ
状態：固体
組成：出来方依存[制御棒等の溶け方]、MCCI、均一性
形状：塊、複数の塊、粒状、クラック有無

⑩ で考慮すべき条件：

水没状態で生じる化学的及び物理的作用と MCCI 生成物の核的性質及び断熱性

⑭ 冷却水中・長期保管

核燃料物質：水中に浮遊もしくは堆積したデブリ
状態：固体、イオン
組成：粒子内は均一扱いしてよい、粒子ごと
形状：微細粒子、イオン

⑭ で考慮すべき条件：

水没状態で生じる化学的及び物理的作用、粒子状デブリの SC や ALPS 等での堆積及び経路での漏えい

以上の条件を考慮すると、長期的な現状維持管理において臨界リスクを検討すべき事象は以下ようになる。

2) 長期維持管理時に検討すべき事象

組成変化：化学反応、デブリ中の気泡・水泡量の変化

形状変化：水流、化学反応、堆積、外的事象

位置変化：水流によって塊状のデブリが移動する効果

減速・反射条件変化：水位上昇（漏れ穴がふさがることによる意図しない水位上昇）

3) 検討課題

- ・ 冷却水の pH 記録（上下流それぞれ）：組成変化等の検討に利用
- ・ デブリのサンプリング：熱伝導率、水との反応性確認
- ・ デブリの位置の測定・推定：臨界が生じる場所の特定
- ・ 水流中デブリ（塊、微粒子）の組成、形状、位置の変化の可能性検討：安定性確認
- ・ 地震時の点検項目の確認：デブリの形状変化（Xe）、冷却水の新たな漏えいの有無（水量）を確認
- ・ 水温の季節（日）変動と Xe の変動の相関を検討：水温の反応度効果（未臨界の確認や取出し作業時の反応度余裕の評価）
- ・ 臨界終息方法の検討（冷却水による冷却に応じた核分裂が継続）

(2) デブリ取出し準備及び取出し時

デブリ取出し準備時には、冷却水の水位を上昇させることが予定されている。これは、水中でデブリ取出し作業を行うことで放射性物質の飛散を防止するためである。ここではこの水位上昇に伴う臨界の起因事象を検討した。デブリ取出し時には、デブリを掘削する作業等が検討されているので、このような作業に伴う臨界起因事象を検討した。以下では、1) でデブリ取出し準備時、2) でデブリ取出し時の主な条件をそれぞれ整理し、3) と 4) で検討すべき事象と検討課題をまとめて示す。

1) デブリ取出し準備時の主な条件

RPV 内部冠水のための水位上昇操作によって生じることが想定される臨界起因事象

③ RPV 下部

減速・反射条件の変化による臨界

⑦ RPV 下部

減速・反射条件の変化による臨界

⑪ PCV 下部

SC での水圧上昇

デブリ内部気泡の潰れによる水分侵入

クラックの拡大による水分侵入

水流の変化によるデブリ配置の変化

⑮ 冷却水中

新たな水漏れの発生

2) デブリ取出し時の主な条件

④⑧⑫に関して

検討されている工法の例

水中

ボーリング

プラズマアーク溶融切断

気中（代替工法）

レーザー切断

液体窒素切断

考慮すべき反応度効果

水中（特にボーリング）の掘削・切断時にデブリの水による置換

掘削・切断時にデブリ粉末の拡散

掘削・切断時の振動によってクラックが生じる等のデブリの破損

切り取り時の切片脱落による下部デブリへの近接

気中で遮蔽効果のある部分を取去ることによる反応度添加

⑯（冷却水中）に関して

検討されている工法によりデブリ粉末が拡散した場合の対応方法の検討が必要

水中

モニタリング方法（現行の α 監視で十分か？）

フィルタリングによる回収

気中（代替工法）

モニタリング方法？

回収方法？

考慮すべき反応度効果

掘削・切断時にデブリ粉末の拡散

気中で遮蔽効果のある部分を取去ることによる反応度添加

3) デブリ取出し時に検討すべき事象

取出し準備及び取出し時のポイント

想定される反応度添加の起因

組成変化：水圧による気泡・水泡量の変化

形状変化：切断、掘削、水流、堆積、外的事象

位置変化：取出し操作、水流（多体）、水圧上昇（新たな漏水）

減速・反射条件変化：取出し操作、水位上昇（冠水操作）

4) 検討課題

- ・ デブリの置換、拡散、破損、近接等の反応度効果：未臨界の確認及びリスク評価に活用
- ・ デブリ粒子の監視および回収方法：水中及び気中について検討が必要
- ・ 組成分布の評価：強い攪拌などの条件がなければ均一を前提とできない→反応度効果の検討が必要
- ・ 臨界終息方法の検討（冷却水による冷却に応じた核分裂が継続）

5.4 長期維持管理時の安全確保

前節での、長期維持管理時に想定され得るシナリオの検討により示される、安全確保のための課題を述べる。

長期維持管理時の臨界起因事象としては、以下の項目が想定され得る（概ね反応度添加の早い順）。

- ・ 地震（クラック発生と浸水、形状変化、配置変化）
- ・ 水流による形状・位置変化
- ・ 水位上昇（気泡の潰れと浸水）
- ・ 化学反応による組成変化
- ・ 粒状デブリの堆積

これらの起因事象によって臨界に達した後、水冷却が続けられていれば、冷却に応じた出力を維持するように核分裂連鎖反応が継続する。臨界の終息条件が自明ではないため、注水等の条件が維持され続ける間、核分裂が継続し、公衆被ばくへの影響が大きくなることが想定される。このため、これらの起因事象に対して対策（臨界終息方法）を検討し、有効性を評価する必要がある。もしくは、10年程度の長期に渡っても、これらの起因事象が生じ得ないことを示す必要がある。

終息方法の案としては、冷却水停止が考えられるが燃料溶融の懸念がある。ホウ素の投入も考えられるが、クラック内まで入らない懸念や十分な反応度効果を生じる程度には行き渡らない、濃度が維持できないなどの懸念がある。

5.3.1 節でも述べたが、シナリオ（起因事象や終息条件）の検討から対策と有効性の検討は、第一義的に、現場の情報を有する事業者が実施すべきである。その結果について規制当局や有識者等の見解を交えつつ、産官学が共通の理解を持てるシナリオや対策とすべきである。

上記で挙げた起因事象のうち、「化学反応による燃料デブリの組成変化」が想定され得るか否かを検討するためには、化学反応に影響すると考えられる冷却水の pH 等について記録を取っておくことが有益と考えられる。

臨界が生じた場合には、それをできるだけ早く検知して終息のための対応を行う必要がある。上記の起因事象のうち、「地震」については発生したことが明確な事象なので、地震後に Xe の変動を監視するなどの手順を定めることは、臨界の早期検知に有効と考えられる。

想定外の臨界リスクを低減するためには、未臨界と想定されている現在の状態を安定的に保つことが理想的である。燃料デブリについてはその所在を特定することが重要である。冷却水が漏えいすると、粉末状の燃料デブリが同じように漏えいして集積し、臨界になることが想定し得るので、「地震」時に、配管等にあらたな亀裂が生じて冷却水の漏えいが起こるような事象を想定し、冷却水の異常な漏えいがいないこと（水位の変動）を点検することなども、想定外のリスク低減に役立つと考えられる。

5.5 その他の検討が必要な事項

公衆の安全を確実に担保するために、今後必要と考えられる検討事項を以下に示す。

起回事象不明の場合の臨界への対応

- 臨界が検知されたときに起回事象が明確である保証はない。また、十分な検討がなされたとしても、想定外の起回事象による臨界がないとは言えない。このことから、起回事象が不明でも臨界が生じた場合にどのように対応するのかを検討し、定めておく必要がある。

デブリの場所の特定

- 燃料デブリの所在を限定することは、臨界の生じ得る場所を特定することと同義であり、想定外の臨界リスクを減少させる効果が期待できる

未臨界が保障できない場合の許容リスクの検討

- デブリ取出し完了までのプロセスの一部において、万一、臨界になる可能性をゼロもしくは十分低くすることができない状況や操作を経る必要がある場合には、許容できるリスクを検討して定めておく必要がある。敷地境界での線量を担保するためには、閉込め効果が期待できる PCV 内部での臨界よりも外部での臨界の方がより許容されるリスク（核分裂数等）が小さくなると考えられる。

臨界リスクの低減方法の検討

- 許容リスクを定め、予測したリスクがそれよりも小さいとしても、可能な限りリスクを低減する方法を検討することで、公衆の被ばくリスクを低減することができる。例えば長期維持時のデブリの組成や形状の変化が臨界のリスクを上昇させることが示された場合、冷却水量や水質の調整を行うことでこれを緩和するなどの対策の検討が必要である。
- 公衆だけでなく、例えばデブリの掘削時に反応度効果の小さいところから着手することで、作業員の被ばくリスクの低減が期待できる。

5.6 リスクの定量化手法

臨界リスクの定量化のためには、臨界の発生確率と影響（核分裂数、最大出力）を評価する必要がある。発生確率の評価については、5.1 節の終わりで述べたように、従来の方法が適用できないことから、新しい方法を検討する必要がある。

5.3 節のリスク評価手順に対応した、リスクの定量化のプロセスについて以下で説明する。例として、一つの操作（デブリの掘削など）を実施するとし、その結果として臨界管理因子（形状など）の変化のパターンが 10 通りあるとする。各々のケースは互いに背反で、どのケースの生じる確率も等しいとする。形状の変化により中性子実効増倍率が変化し、10 通りのうち、5 通りで中性子実効増倍率が 1 を超えると評価された場合、操作の結果として臨界を超える確率は $5/10 = 1/2$ である（実務上は計算誤差を考慮して臨界の基準を 1 にとらないが、ここでは簡単のため 1 とする）。各ケースの中性子実効増倍率の値を k_i ($i = 1, 2, \dots, 10$) で表し、 $k_1 \sim k_5 > 1$ とする。臨界となるケースでの核分裂数をそれぞれ $f_1 \sim f_5$ で表すと、この操作による核分裂数の期待値は

$$\sum_{i=1}^{10} \frac{f_i}{10} \quad (5-1)$$

で表される。ただし、6 番目から 10 番目のケースでは、臨界にならないため、 $f_6 \sim f_{10} = 0$ である。一般的には、発生確率を p_i 、変化のパターン数を N としたとき、一つの操作に対応する核分裂数の期待値は

$$\sum_{i=1}^N p_i f_i \quad (5-2)$$

で表される。最大出力についても同様である。臨界管理因子の変化の原因は、操作だけでなく、機器の故障や長期的な化学反応なども考えられる。

形状などの臨界管理因子が変化した後の中性子実効増倍率を求めるには通常モンテカルロ計算コードや決定論的手法を用いた計算コードを用いる。

核分裂数や最大出力の値を求める方法には動特性解析や準定常法、簡易評価手法などさまざまな手法が提案されている。ここでは、最新の知見として、リスク評価に便利な評価手法を示す。

原子力機構の最近の研究により、初期添加反応度 ρ_0 が瞬時に添加された場合の第 1 ピークで生じるエネルギー E_p と第 1 ピーク出力 n_p の値に対して、以下の式が提案されている。エネルギーは核分裂数に換算することができる。臨界事故時の核分裂数については、第 1 ピークで生じる核分裂数が最も重要である。

第 1 ピークで生じるエネルギーの式

$$E_p = \frac{1}{K} \left[\sqrt{3 \left(\frac{\rho_0 - \beta}{\alpha_2} \right) + \frac{9}{4} A^2} - \frac{3}{2} A \right] \quad (5-3)$$

第 1 ピークの最大出力の式

$$n_p = \frac{2}{3\sqrt{\alpha_2 K \ell}} (\rho_0 - \beta + \alpha_2 A^2)^{3/2} \left[1 - \frac{3}{2} \left(\frac{\alpha_2 A^2}{\rho_0 - \beta + \alpha_2 A^2} \right)^{1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_2 A^2}{\rho_0 - \beta + \alpha_2 A^2} \right)^{3/2} \right] \quad (5-4)$$

ここで、

$$A = \frac{\alpha_1}{2\alpha_2} \quad (5-5)$$

α_1 、 α_2 はそれぞれ反応度温度フィードバック係数の 1 次係数と 2 次係数である。これらは、反応度添加率が不明である場合に対して、上限の値を与えることから、影響の上限評価に有効である（第 1 ピークのエネルギーだけでは必ずしも上限ではないので、適用には注意が必要である）。第 1 ピーク以外の部分のエネルギーも含めた評価方法は、第 6 章 6.3.5 節に示す。

参考文献

- 1) 東京電力株式会社、「福島第一原子力発電所の現状」、原子力学会 原子力安全部会 第2回「原子力安全夏期セミナー」資料(2014).
- 2) 鈴木俊一、「東京電力福島第一原子力発電所の現状と建屋内除染の進捗状況について」、日本原子力学会シンポジウム コラッセふくしま多目的ホール、(2014).
- 3) K. Tonoike et al., Major Safety and Operational Concerns for Fuel Debris Criticality Control, Proc. International Nuclear Fuel Cycle Conference GLOBAL 2013(2013).
- 4) 東京電力株式会社「福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画」
- 5) ICRP Publication 60 ” Recommendation of International Commission on Radiological Protection” , Pergamon Press (邦訳：日本アイソトープ協会) 1990.
- 6) 放射線遮蔽ハンドブック —基礎編— (「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会編)、ISBN 978-4-89047-161-4.
- 7) Institution of Chemical Engineers, “HAZOP: Guide to Best Practice,” ISBN 0-85295-427-1, (2000)
- 8) Center for Chemical Process Safety of the AIChE, “Guidelines for Hazard Evaluation Procedures 3rd Edition,” ISBN 978-0-471-97815-2, (2008)
- 9) 日本原子力学会再処理・リサイクル部会 核燃料サイクル施設シビアアクシデント研究ワーキンググループ報告書、「核燃料サイクル施設における対応を検討すべきシビアアクシデントの選定方法と課題」(2015)
- 10) 東京電力株式会社、「原子炉内燃料デブリ検知技術の開発設置作業の進捗報告」(2015)

第6章 リスク評価支援ツールの概念設計

本章では、前章で述べたリスク評価手法の効率的な実施を支援するためのツールの製作を目的として、必要な要素技術の検討を行った結果について説明する。6.1節で支援ツール全体の概要を示し、6.2節でデータベース機能について、6.3節でリスクの定量化支援機能について、6.4節でユーザーインターフェースについて報告する。

6.1 リスク評価支援ツールの全体概要

リスク評価支援ツールの目的は、利用者が自然に第5章5.3節で述べた臨界リスク評価手順に従った評価を実施することができるようにすることである。このために必要な機能的要請から、本ツールは図6-1に示すような3つのモジュールで構成される。状態管理データベースモジュールは、臨界リスク評価マトリックスやリスク評価に必要な核燃料等の組成、形状等に関するデータを保持し、提供するモジュールである。リスク評価モジュールは、中性子実効増倍率等の計算、核分裂数等の計算、物質の移行計算等を行うモジュールである。ユーザーインターフェースモジュールは、上記2つのモジュールへの入出力を支援するとともに、各モジュールのデータを可視化する。

基本的なデータ入力から検討結果の確認までのデータの流れを図6-2に示す。第5章5.3節の表5-1で示した第1マトリックスの中の区分(①から⑯)を、データベース上では「セル」と呼んでいる。本ツールが取り扱う情報には、リスク評価に必要な物理・化学的データとセル管理のための情報の2種類がある。リスク評価で用いる物質組成のデータや形状のデータ等をすべてデータベース上のキーとして登録すると、扱うデータ量が膨大となることにより、処理速度の低下等の問題を生じるので、一部の重要なデータをキーとし、それ以外はデータファイルの形式で保存、管理する。データベースモジュールはこのファイルを管理する。

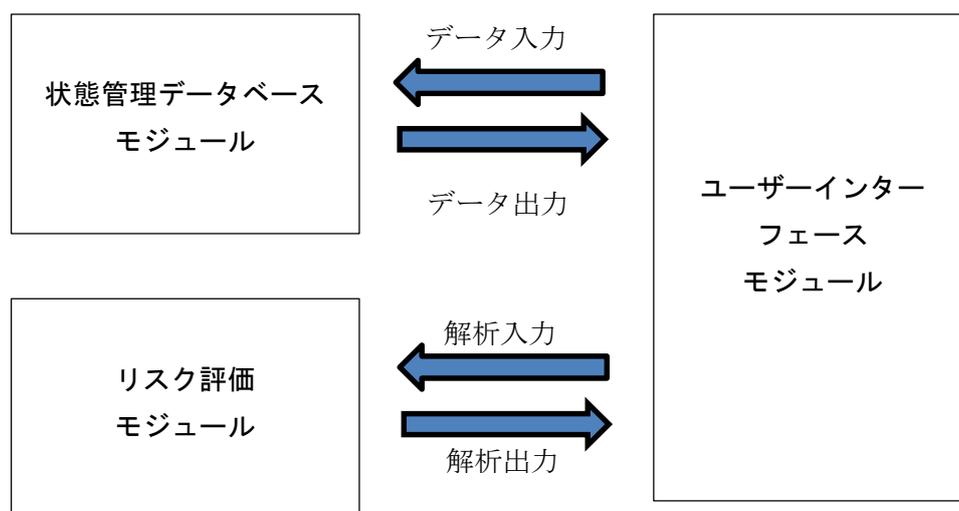


図 6-1 リスク評価支援ツールの概要

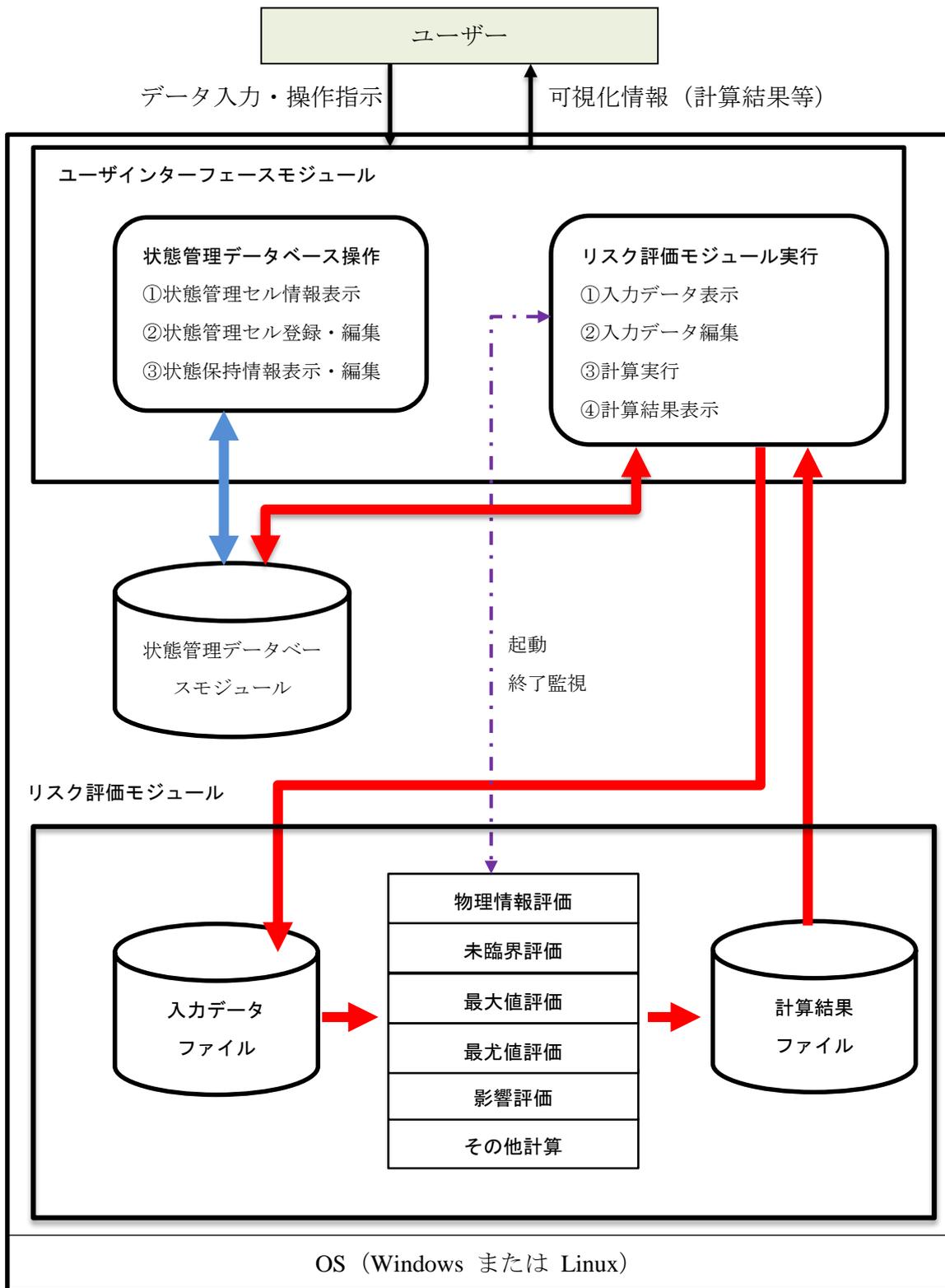


図 6-2 システム処理フロー（青線：セル管理情報、赤線：数値計算用データ）

6.2 データベース機能について

データベースモジュールの目的はマトリックスを用いたリスク評価の実施を支援することである。このため、以下の機能を有する。

セル情報管理機能

- セル（マトリックスの区分に対応）は、その内部を空間的に区分して複数のセルとすることができる。
- このセルの構造により、核燃料物質の多い特定の空間に集中したリスク評価が実施できるとともに、それ以外の空間の検討を促し、網羅的な検討を自然に実施することができる。

臨界リスク評価用データの管理と提供

- 実測値と推定値およびそれらの誤差を管理することで、定量されたリスクの精度も合わせて評価できる。

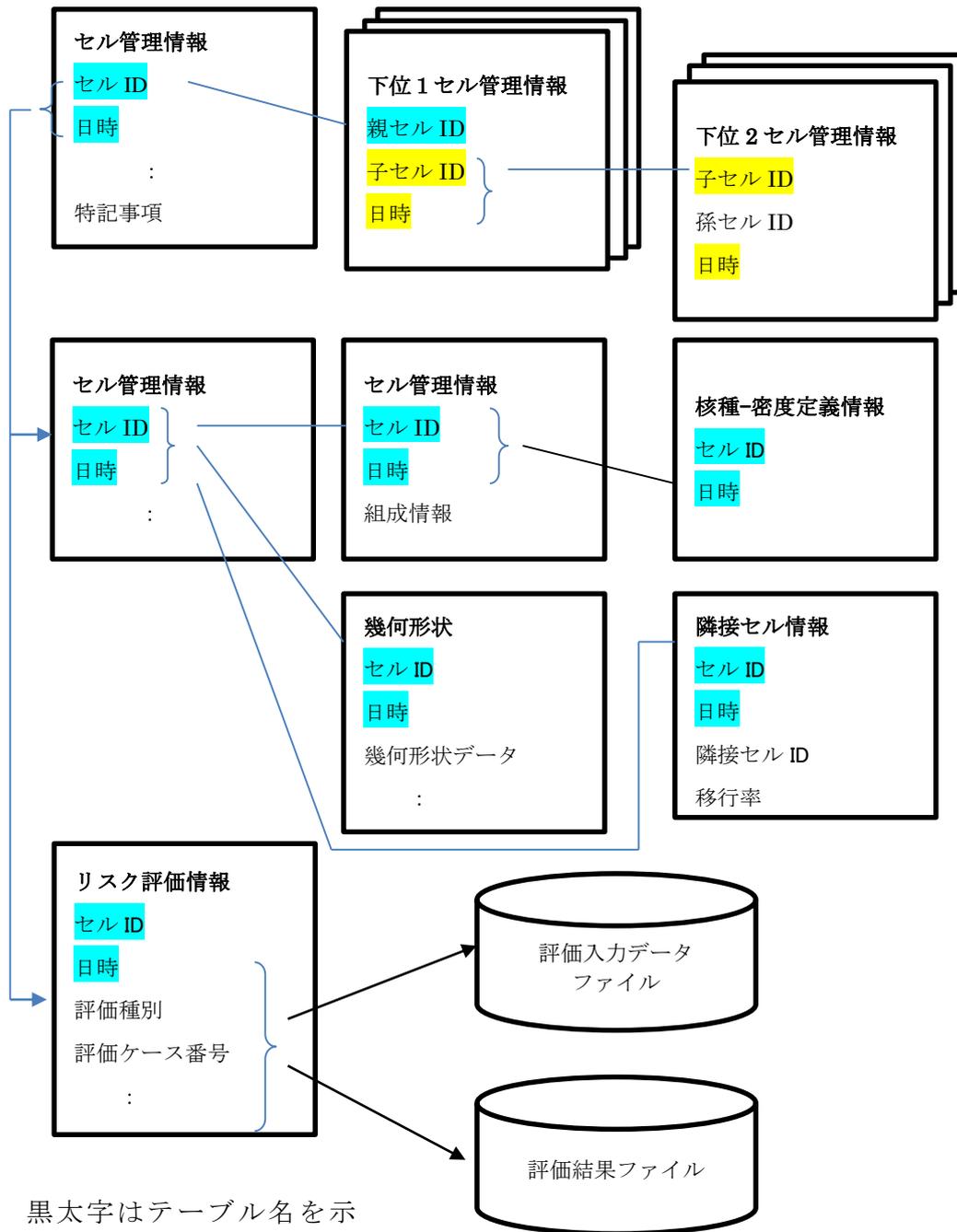
データ間の整合性確認

- 上位セルが保持する物質の量は下位セルの物質量の総和と等しいなど、当然満たされるべき条件を満たしていることを確認することで、入力ミスなどを防ぐ。

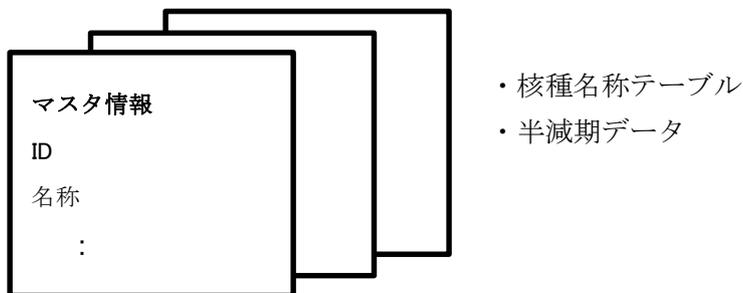
評価結果管理機能

- リスク評価必要性の有無と理由、リスク評価結果、許容レベルとの比較結果等、利用者の判断と理由を情報として管理することで、十分な検討がなされていることを保証する。

図 6-3 にデータベースが管理する情報の種類と階層構造を示す。図 6-4 に情報の管理単位であるテーブルごとに、それが管理する情報とテーブル間の関係を示す。



黒太字はテーブル名を示す。



(注) 網掛け項目は、キー項目であることを示す。

図 6-3 情報の種類と階層

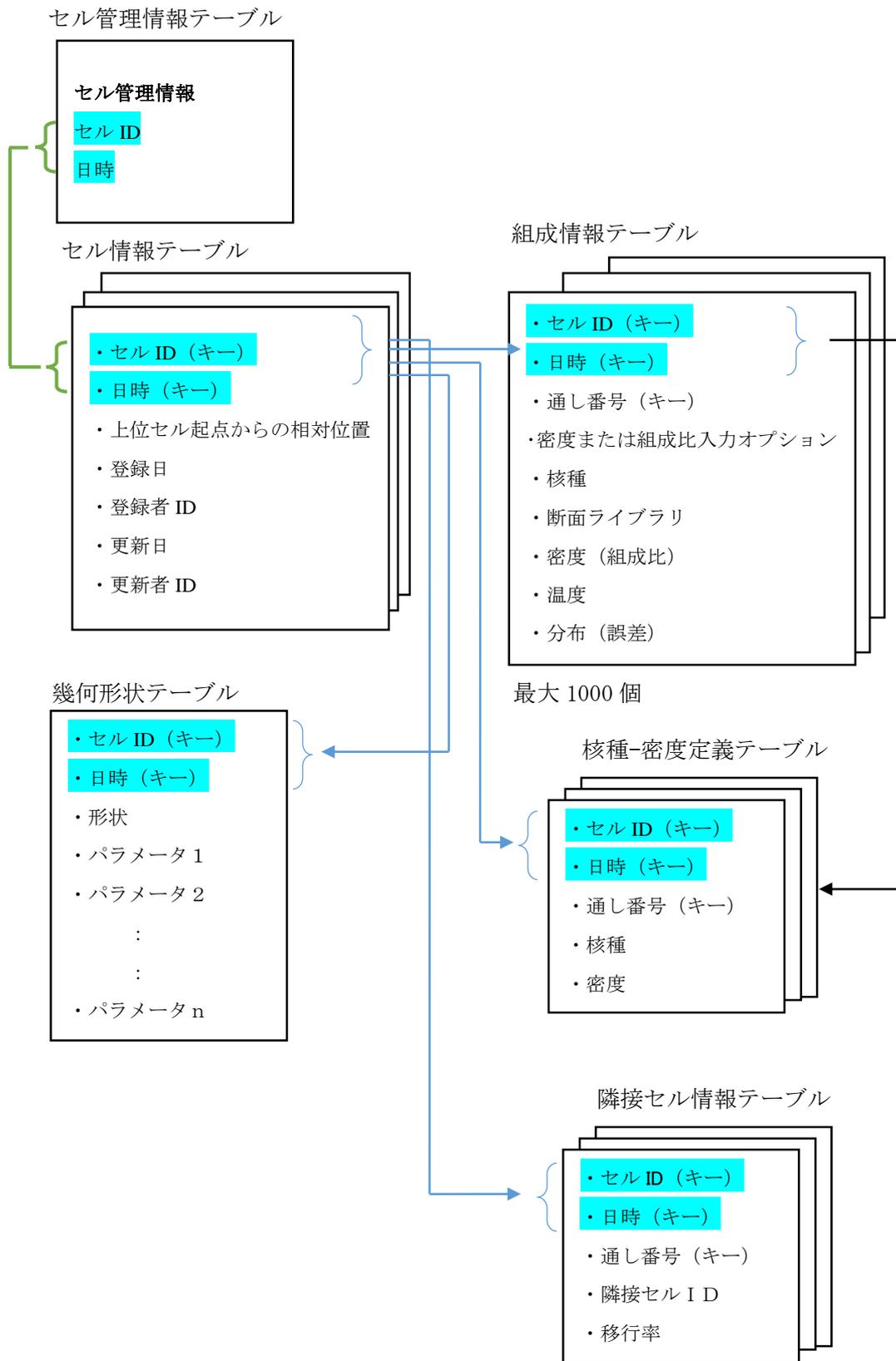


図 6-4 組成データテーブルおよび隣接セル情報テーブルの関連

6.3 リスク定量化支援機能について

臨界リスクの定量化の手順は第 5 章 5.6 節に示したとおりだが、想定されるすべてのケースごとに、さまざまなパラメータ（燃料組成や形状など）の変化を全て考慮するのは、計算量が膨大となり、困難である。核燃料の濃度もしくは組成が一定の条件を満たせば、形状によらず未臨界となることは良く知られており、組成だけで未臨界と判断できれば、余計な計算をせず、他の必要な検討により多くの時間を割くことが可能となる。単純なリスク評価に加えて、このような工夫を行うことで、効率的にリスク評価を実施することができる。

この支援ツールが提供するリスク定量化の支援機能は以下の通りである。手順としては、1 から 6 までを順に実施し、最終的にリスクを定量化した時点か、いずれかのステップで未臨界と判断できた時点で手順を終了する。この手順を臨界リスク評価マトリックスで列挙したセルのうち、リスク評価が必要と判断されたセルの一つ一つについて実施する。

1. 基礎データ評価機能：評価対象のセルについて、基準となる日時のリスク評価情報に基づいて、評価したい日時のリスク評価情報を推定する。放射性元素の減衰、数年に渡る長期間の化学反応、セル間の移行等の計算を行う。
2. 未臨界評価機能：中性子無限増倍率の計算結果により未臨界判定に必要な情報を得る。燃料デブリの組成情報を与えて、臨界マップデータベースに問い合わせることで、結果を得る。この結果から、組成情報だけで臨界を検討すべきかどうかの情報を得ることができる。臨界の可能性がある場合には最大値評価を実施する。
3. 最大値評価機能：セル内の物質について、中性子実効増倍率が最大となる分布を計算し、対応する中性子実効増倍率の最大値を計算する。これが基準値を超えた場合には臨界となる可能性を考慮する必要があるため、最尤値評価を実施する。
4. 最尤値評価機能：臨界因子となるパラメータのある範囲に対するセル内の中性子実効増倍率を計算する。計算に用いるデータの誤差（もしくは分布）に基づいて、中性子実効増倍率の値の誤差（もしくは分布）を計算する。この計算結果から、中性子実効増倍率が予め定めた値を超える確率を計算する。この確率がゼロでなければ、影響評価を実施する。
5. 影響評価機能：核分裂数、最大出力とその誤差（もしくは分布）を計算する。
6. リスク定量化機能：影響評価結果と確率評価結果からリスクを定量化する。

以下では、リスク評価モジュールを構成する各機能について概説する。実装の具体的例として各機能に対応する計算コードの例を示す。

6.3.1 基礎データ評価機能

放射性元素の減衰計算とセル間の物質移行計算について説明する。

放射性元素の減衰計算

あるセルにおいて放射性元素の減衰を次のように計算する。

$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda_i N_i + \sum_j \alpha_{j \rightarrow i} \lambda_j N_j \quad (6-1)$$

ここで、 N_i ; 核種 i の数密度 (#/cm³)
 λ_i ; 核種 i の崩壊定数 (1/s)
 $\alpha_{j \rightarrow i}$; 核種 j が崩壊して核種 i になる確率 (-)
 $\gamma_{j \rightarrow i}$; 核種 j の核分裂による核種 i の収率 (-)
 t ; 時間 (s)

セル間の移行計算

セル i からセル j への物質 (核種) の移行量 $M_{i \rightarrow j}^m$ (kg) は、物質 (核種) ごとに移行率 $T_{i \rightarrow j}^m$ (kg/s) が与えられているものとして、移行時間 Δt (s) との積で表し計算する。即ち、

$$M_{i \rightarrow j}^m = T_{i \rightarrow j}^m \times \Delta t \quad (6-2)$$

セル間の移行計算モデルを新規開発し、下記のように実装する。

- 1) 状態管理データベースから下記の項目を参照して計算を実施する。
 - (ア) 組成の密度 (g/cm³) あるいは核種数密度 (#/cm³) (オプションによる)、体積 (cm³) (重量の計算)
 - (イ) 移行率データ (-)
 - (ウ) セルの日時
 - (エ) 評価日時 (Δt (s) の計算)
- 2) 計算結果を状態管理データベースに下記の項目について登録する。
 - (ア) 更新した移行元及び移行先の密度 (g/cm³) あるいは核種数密度 (#/cm³) (オプションによる)
 - (イ) 更新した移行元及び移行先のセル日時

6.3.2 未臨界評価機能

第4章4.1節で述べた臨界マップデータベースの機能を用いて、未臨界評価を実施する。

6.3.3 中性子実効増倍率の最大値評価機能

セル内の物質について、中性子実効増倍率が最大となるような分布を求め、対応する中性子実効増倍率の最大値を計算する。形状の対称性が良い場合には、1次元もしくは2次

元計算で十分な結果を得られるが、そうでない場合には 3 次元計算が必要となる。幾何形状に応じ、1 次元、2 次元及び 3 次元の体系に対して、それぞれ SMORES コード¹⁾、OPT-TWO コード²⁾ 及び OPT-DANT コード³⁾ を用いて計算することができる。

SMORES は、米国 Oak Ridge 国立研究所による SCALE-6 コード・システムの一つの計算コードで、SCALE Material Optimization and Replacement Sequence の略語である。最大値評価コードでは、1 次元体系（板状、円筒状及び球状のジオメトリ）における最大固有値及びその最適な組成分布（体積割合）を計算することができる。SMORES の特長は、以下の通りである。

- ・ SCALE-6 コードシステムの一つであるので、SCALE-6 に含まれる全ての組成ライブラリ及び核定数を容易に利用できる。
- ・ SMORES を実行するための SCALE-6 ドライバーを使用することによって後述の各段階の計算及び問題依存の確定数の作成と受渡しを自動的に行えるので、ユーザのミスが極限に避けられる。
- ・ SMORES の臨界計算に採用されるのが 1 次元多群中性子輸送 XSDRN コードであるので計算時間が短い。
- ・ 最大値及び最適な組成分布のサーチ機能が豊か。
- ・ 反復計算用の最適なパラメータ（既存値）が多くてユーザが入力するデータが少ない。

SMORES の計算は下記の順番で行う。

- (1) 中性子輸送計算及び最適化計算に必要な確定数を準備する
- (2) 角度中性子束（標準及び随伴）を求めるための輸送計算を実施する
- (3) 目標関数を評価して、あるパラメータに対して体系の最適化を行う

OPT-TWO は、MOX（ウラン・プルトニウム混合酸化物）燃料の 2 次元体系において、臨界安全上で最も厳しい評価を与える濃度分布（最適濃度分布）を計算することを目的に JAEA で開発されたコードである。OPT-TWO における最適濃度分布の算出は、燃料インポートランス量が一定になるときに燃料体系の反応度が最も大きくなることを示す原理である。燃料インポートランス平坦化原理に基づき、OPT-TWO では、① 2 次元 SN 法中性子輸送計算コード TWOTRAN を用いた中性子束、随伴中性子束及び中性子増倍率の算出、② 燃料インポートランスの算出、③ 燃料移行量の算出、の繰返し計算を実施し、燃料インポートランスの分布を徐々に平坦化していき、最終的に燃料体系の最適濃度分布を算出する。

OPT-DANT は、OPT-TWO を改良して 3 次元の計算ができるようにしたもので、基本的な原理は OPT-TWO と同じである。

6.3.4 中性子実効増倍率の最尤値評価機能

中性子実効増倍率を計算するための計算コードは 6.3.2 節で示した MVP 等のコードであるが、燃料デブリについてはその組成、形状に不明な点が多く、サンプリングによる実測

などが行われるまでは、それらの臨界に影響するパラメータに推定値を用いる必要がある。例えば、ウランの濃度をパラメータとしたとき、想定し得る最小の値から最大の値までの範囲で計算を実施し、対応する中性子実効増倍率を求めることで、最も確からしい値（最尤値）やその周りの分布を求めることができる。しかし、このような計算を精度よく実施するためにはパラメータを変えた計算を多数行う必要がある上に、パラメータの数が多いとその積の数だけ計算する必要があり、計算量が膨大となる。このような場合に、予め指定した数のサンプルで、統計的に偏りのない分布計算を行えるようにする方法として、LHS (Latin Hypercube Sampling) 法が提案されている。

このサンプリング法を実装した LHS コード⁴⁾が公開されている。このコードは LHS 法及び完全なランダム法により、多変数のサンプルを生成する。LHS 法では、束縛されたサンプリング方式を採用されるが、ランダム法は、単純にモンテカルロ法によるサンプリング方式に相当する。ユーザが、各変数（パラメータ）に対して解析的な分布を与える（選ぶ）ことができ、その情報に基づいて LHS がサンプルを生成する。本コードは米国 Sandia 国立研究所で Iman 氏、Davenport 氏と Zeigler 氏（1980 年）により開発され、Fortran-77 言語で書かれた。LHS によるサンプリング法の特長は下記の通りである。

- ・ 効率的に変数の数が多いサンプルの問題を取り扱える（最尤値評価に少ないサンプル数で良い）。
- ・ 全ての変数に対して統計学的に満遍なくサンプリングできる。
- ・ コード内部で提供する分布の種類が多い。
- ・ コード内部にない分布の場合には、ユーザ定義の分布が入力可能である。

6.3.5 影響評価機能

核分裂数と最大出力を計算する手法としては、従来提案されている簡易評価手法、準定常法、一点炉動特性解析コード (AGNES (液体燃料体系)⁵⁾ 及び DOCTRINE コード (粉体燃料体系)⁶⁾ といった 3 種類の手法のほか、最近提案された厳密解に基づく手法がある。計算結果や計算内容に特徴があるので、使い分ける必要がある。

厳密解法

一点炉動特性解析で用いられる連立方程式を、条件を限定することで解析的に解いた厳密解を用いる。添加反応度と反応度温度係数、動特性パラメータなどを変数とする数式であり、計算結果は動特性解析コードと一致する。溶液状の核燃料においては沸騰や放射線分解ガスボイドが生じない条件で、核分裂数と最大出力についてのみ計算したい場合は、最も効率よく高精度で計算できる。燃料デブリなど固体状の核燃料の場合には、そのまま適用できると考えられる。

Yamane の評価式による核分裂エネルギー⁷⁾及び最大出力⁸⁾の評価式を表 6-1 及び表 6-2 に示す。核分裂数はエネルギーに換算係数を乗じて求める。

表 6-1 核分裂エネルギー評価式 (Yamane) ⁹⁾

適用範囲	評価式
第 1 ピーク内	$E_p = \frac{1}{K} \left[\sqrt{3 \left(\frac{\rho_0 - \beta}{\alpha_2} \right) + \frac{9}{4} A^2} - \frac{3}{2} A \right]$
単調的減少領域	$E_d = \frac{n_{pe}}{\lambda_1} \quad n_{pe} \cong \frac{\lambda \beta}{\alpha K}$
プラトー領域	$E_C = \text{冷却出力} \times \text{経過時間}$
合計	$E_{\text{total}} = E_p + E_d + E_C$

表 6-2 第 1 ピークの最大出力の評価式 (Yamane)

適用範囲	評価式
第 1 ピークの最大出力	$n_p = \frac{2}{3\sqrt{\alpha_2 K \ell}} (\rho_0 - \beta + \alpha_2 A^2)^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{3}{2} \left(\frac{\alpha_2 A^2}{\rho_0 - \beta + \alpha_2 A^2} \right)^{1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_2 A^2}{\rho_0 - \beta + \alpha_2 A^2} \right)^{3/2} \right)$

ここで、 $A = \frac{\alpha_1}{2\alpha_2}$ である。

上式で用いられている記号を表 6-3 にまとめる。

表 6-3 Yamane の評価式の記号の説明

ρ	トータル反応度 (\$)
ρ_0	初期余剰反応度 (\$)、添加反応度と同等
β	実効遅発中性子割合 (-)
ℓ	中性子再生時間 (s)
λ	先行核の崩壊定数 (1/s)
n	核分裂による出力 (W)
n_p	第 1 ピーク出力 (W)
α	平均温度反応度係数 (1/°C)
α_1	1 次温度反応度係数 (1/°C)
α_2	2 次温度反応度係数 (1/°C ²)
ΔT	核燃料液体の温度上昇 (°C)
K	熱容量の逆数 (°C/J)

簡易法

核分裂数を核燃料の体積などの関数として表す式。動特性パラメータなどを予め求める必要がなく簡易に計算できるが、精度が低い。表 6-4 に種々の簡易法を列挙する。

表 6-4 簡易評価手法の一覧

提案者	評価式
Tuck ¹⁰⁾	$F_T = V \times 10^{17}$
Olsen ¹¹⁾	$F_B = 2.95 \times 10^{15} \cdot V_B^{0.85}$ $F_P = 3.2 \times 10^{18} \cdot (1 - t^{-0.15})$ $F_T = F_B + F_P$
Barbry ¹²⁾	$F_T = \frac{V \cdot t}{3.55 \times 10^{-15} + 6.38 \times 10^{-17} \cdot t} \quad (t \leq 600s)$
Nomura ¹³⁾	$F_T = 2.6 \times 10^{16} \cdot V \quad \text{Non-boiling}$ $F_T = 6 \times 10^{16} \cdot V \quad \text{boiling}$
Knemp-Duluc ¹⁴⁾	$F_T = 1.3 \times 10^{16} \cdot V \cdot d_{sol} \cdot \left(1 + \frac{k \cdot h \cdot t}{4.184 \times 10^5 \cdot d_{sol} \cdot (V)^{1/3}}\right) \quad \text{or}$ $F_T = 1.3 \times 10^{16} \cdot m_{sol} \cdot \left(1 + \frac{k \cdot h \cdot t}{4.184 \times 10^5 \cdot (d_{sol})^{2/3} \cdot (m_{sol})^{1/3}}\right) \quad \text{Non-boiling}$ $F_T = 1.3 \times 10^{16} \cdot V \cdot d_{sol} + 8 \times 10^{16} \cdot [V - V_c(\phi)] \cdot d_{H2O} \quad \text{or}$ $F_T = 1.3 \times 10^{16} \cdot m_{sol} + 8 \times 10^{16} \cdot [m_{sol} - m_c(\phi)] \quad \text{boiling}$
F_T : 総核分裂数 V : 体積 (liter) D : 直径 (cm) H : 高さ (cm) t : 経過時間 (s)	

準定常法¹⁵⁾

「準定常法」コードでは、臨界事故時の総核分裂数、あるいはこれに相当する核分裂積算出力を体系の反応度釣合いの反復計算で求める。沸騰や放射線分解ガスボイドが生じる場合に有用であるが、第1ピークの間など、短時間の評価には利用できない。

<計算の流れ>

まず、準定常法コードでは、全ての時刻において下記の反応度バランス式（単位：\$）が成り立っている。

$$\rho_{IN} + \rho_{Temp} + \rho_{Void} = 0 \quad (6-3)$$

ステップ (a)

添加反応度 ρ_{IN} (\$) を入力データから与える。

ステップ (b)

水素分解ガスに伴ったボイド率 V (o/v) を温度上昇 T (°C) = 0、即ち $\rho_{Temp} = 0$ で計算する。

$$\rho_{Void} = \rho_{IN} = \alpha_{V1}V + \alpha_{V2}V^2 \quad (6-4)$$

ステップ (c)

ステップ (b) で求めたボイド率を用いて下記の式で核分裂出力 P (W) を算出する。

$$V(1 - V) = C_1 \times P \quad (6-5)$$

$$V = C_2 \times P\rho_{Void} = \rho_{IN} = \alpha_{V1}V + \alpha_{V2}V^2 \quad (6-6)$$

ステップ (d)

得られた核分裂出力から温度上昇 (°C) を計算する。これを用いて温度上昇による温度反応度フィードバック ρ_{Temp} (\$) を計算する。

$$\rho_{Temp} = \alpha_{T1}T + \alpha_{T2}T^2 \quad (6-7)$$

ステップ (e)

時間ステップを進めて解析完了時間までステップ (a)～ステップ (d) を繰り返す。

<入力データ>

本コードの入力データは下記の通りである。

- ・ 1 次温度反応度係数 (\$ / °C)
- ・ 2 次温度反応度係数 (\$ / °C²)
- ・ 1 次ボイド反応度係数 (\$ / %vol)
- ・ 2 次ボイド反応度係数 (\$ / (%vol)²)
- ・ 添加反応度 (\$)

1次、2次温度反応度係数、1次、2次ボイド反応度係数は、「動特性パラメータ」コードで計算され状態管理データベースに登録したデータを参照する。また、添加反応度については、下記の2つの可能性を対応できるとする。

- ・ ユーザが入力した添加反応度 (\$)
- ・ 「未臨界評価」コードの結果 (状態管理データベースに登録した k_{∞} もしくは k_{eff})
この場合には下記の式で反応度 (\$) を計算する。

$$\rho_{\text{IN}} = k - 1 / k \cdot \beta_{\text{eff}} \quad (6-8)$$

動特性解析コード

AGNES コードは、JAEA により開発された液体燃料体系の臨界事故解析コードである。本コードでは、一点炉動特性モデルに放射線分解ガスボイドの生成及び消滅モデルを取り入れたことによって、ボイドの生成・消滅による出力振動を計算できる。JAEA の TRACY 実験装置で行った低濃縮ウラン溶液の超臨界実験結果により本コードが検証された。検証結果では、出力振動の初期における出力の時間変化は実験をほぼ再現した。また、総核分裂数 (エネルギー) の時間変化については、実験範囲全般にわたり良い一致をみた。但し、本コードが扱える幾何形状は2次元円筒形状のみである。

6.3.6 リスクの定量化機能

中性子実効増倍率 k_{eff} の分布から確率を計算し、影響評価結果と合わせて定量化する。

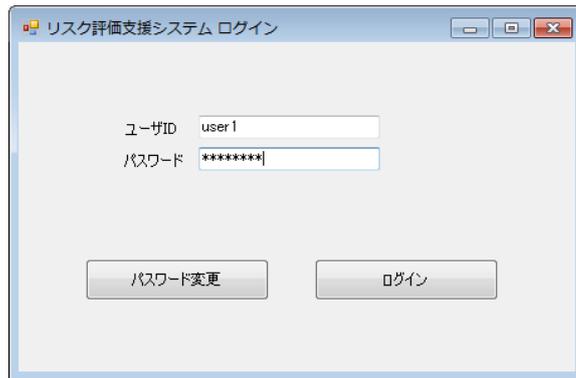
6.4 ユーザーインターフェースについて

ユーザーインターフェースの主な機能は、データの入出力とデータベース及びリスク評価計算の管理を支援することである。ガイドに従って操作することにより、自然に臨界リスク評価が実施できることを目的としており、図 6-5 に示すように臨界リスク評価マトリックスを表示して、入出力を容易にすることや、図 6-6 に示すようにデータの可視化によりデータの管理等を容易にするなどの機能を有する。

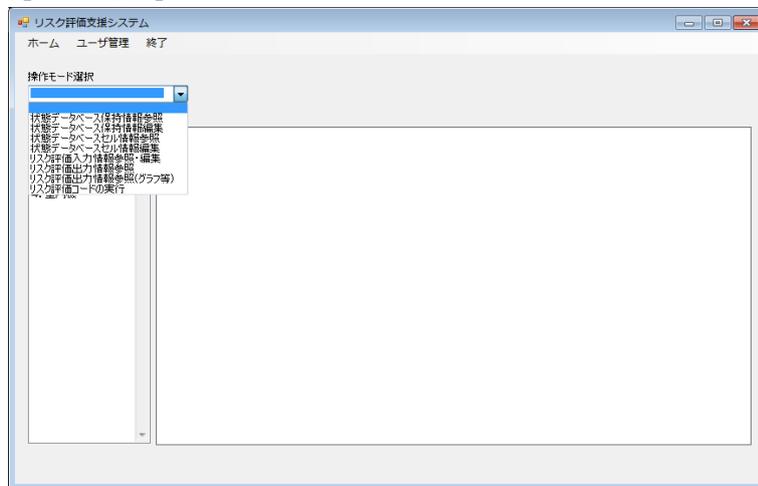


図 6-5 臨界リスク評価マトリックスの表示例

【ユーザ認証画面】



【ホーム画面】



【状態データベース参照（セル情報）】

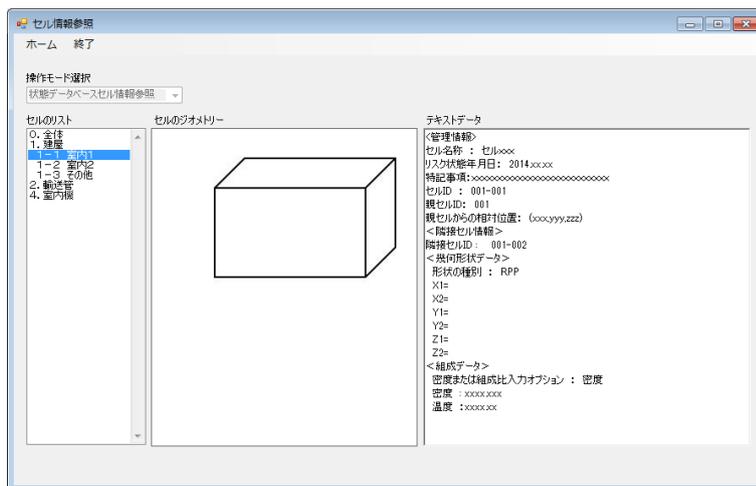


図 6-6 形状データの可視化例

参考文献

- 1) S.S. Goluoglu et al., "SMORES: A One-Dimensional Material Optimization Module," ORNL/TM-2005/39 Version 6, Vol. I. Sect. C7 (2009).
- 2) Shohei Sato et al., "OPT-TWO: Calculation Code for Two-Dimensional MOX Fuel Models in the Optimum Concentration Distribution," JAEA-Data/Code 2007-017 (2007).
- 3) OPT-DANT コードマニュアル(2014).
- 4) Ronald L. Iman and Michael J. Shortencarier, "A FORTRAN 77 Program and User's Guide for the Generation of Latin Hypercube and Random Samples for Use with Computer Models," NUREG/CR-3624, SAND83-2365 (1984).
- 5) Ken Nakajima et al., "A Kinetics Code for Criticality Accident Analysis of Fissile Solution Systems: AGNES2," JAERI-Data/Code 2002/004 (2002).
- 6) Yuichi Yamane et al., "Criticality Accident Evaluation for MOX Powder System," Proceedings of the ICNC2007 (2007).
- 7) Yuichi Yamane, "Improvement in estimation of maximum first peak power based on non-linear temperature feedback reactivity in criticality accident with instantaneous reactivity insertion," J. Nucl. Sci. Technol., <http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2015.1005718> (2015).
- 8) 日本原子力学会 2015 春の年会予稿集 J25 (CD) (2015).
- 9) Yuichi Yamane, *Advances in Nuclear Fuel -Chp.8 Introduction to Criticality Accident Evaluation-*, ISBN 978-953-51-0042-3, pp159-174 (2012).
- 10) TUCK, G. Simplified Methods of Estimating the Results of Accidental Solution Excursions. Nuclear Technology, 23, p. 177, 1974.
- 11) OLSEN, A. R. et al. Empirical Model to Estimate Energy Release from Accidental Criticality. Trans. Am. Nucl. Soc., 19, p. 189, 1974.
- 12) BARBRY, F. et al. Criticality Accident Studies in France: Experimental Programs and Modelisation. Proc. Int. Seminar on Nuclear Criticality Safety, ISCS'87, p. 423, Tokyo, Japan, 1987.
- 13) NOMURA, Y. and OKUNO, H. Simplified Evaluation Models for Total Fission Number in a Criticality Accident. Nuclear Technology, 109, pp. 142-152, 1995.
- 14) DULUC, M. New improvement in simplified methods of estimating the number of fissions during a criticality accident in solution. Proc. Topl. Mtg. Nuclear Criticality Safety Division (NCSD 2009), Richland, Washington, USA, September 13-17, (2009).
- 15) K. Nakajima, T. Yamamoto and Y. Miyoshi, "Modified Quasi-Steady-State Method to Evaluate the Mean Power Profiles of Nuclear Excursions in Fissile Solution," J. Nucle. Sci. Technol., 39[11], 1162 (2002).

第 IV 編 臨界実験による臨界マップ検証

第7章 STACY 更新炉原子炉本体の整備

本章では、「STACY 更新炉原子炉本体の整備」として、7.1 節「STACY 更新炉の整備工程計画」、7.2 節「臨界実験炉心の基本設計」、7.3 節「可動装荷物駆動装置の基本設計」、7.4 節「炉室フード水密化の検討」について報告する。

7.1 STACY 更新炉の整備工程計画

7.1.1 目的及び概要

(1) 目的

臨界実験による臨界マップ検証に向けた STACY 更新炉の整備は、現行 STACY の原子炉本体及び計測制御系統施設等の原子炉施設の主要部分を解体・撤去した後、STACY 更新炉の原子炉本体等の主要部分を製作・据付ける大規模なものである。平成 30 年度に臨界を達成し臨界実験を開始する計画で、平成 27 年度から約 4 ヶ年で整備を進める。

本検討では、大規模かつ複数年にわたる整備事業を円滑に進めるために必要な、予算及び発注計画の立案、並びに工場製作、現地工事、運転調整のスケジュールリング及び進捗管理に資することを目的として、STACY 更新炉の整備工程計画を立案する。

(2) 概要

STACY 更新炉の整備に必要な製作・工事案件は、「既設設備の解体撤去」「既設設備の改造」「STACY 更新炉の製作据付」に大別できる。これまでの更新計画検討により、各案件について主要作業がリストアップされ、その作業内容と費用、所要期間が見積もられている。

本検討では、各主要作業の作業内容と作業エリア等の条件から生じる前後関係、相互依存関係を考慮して合理的な実施順序を定め、クリティカルパスを明確にした整備工程計画を立案する。これにより、実施段階で計画のズレが生じても、それによってスケジュールにどのような影響があるかを見極めることができ、計画の修正や必要に応じたスケジュール変更及び資源配分の変更調整等の対策を素早く行うことが可能となる。

7.1.2 成果報告

(1) 検討仕様

STACY 更新炉の原子炉本体等の主要部分は、現行 STACY と同様に炉室(S)内に設置されるため、更新整備に必要な製作・工事案件では「既設設備の解体撤去」を先行して実施する。「既設設備の改造」と「STACY 更新炉の製作・据付」については、その後並行して実施できるが、主要作業単位では、新設機器の工場出荷時期とその据付までに必要な改造工事の完了時期を整合させる等、相互の前後関係、依存関係を考慮した実施順序を定める

必要がある。その検討条件となる、各主要作業の作業内容及び所要期間の見積もりを整理する。

① 整備に必要な製作・工事の概要

STACY 更新炉の整備に必要な「既設設備の解体撤去」「既設設備の改造」「STACY 更新炉の製作据付」の概要を示す。

1) 既設設備の解体撤去

現行 STACY 施設のうち更新後に使用しないものを解体撤去する。主要な解体範囲は、STACY 更新炉の原子炉本体等を設置する炉室(S)内の現行設備及び更新後は不要となる炉下室(S)内の溶液燃料給排液系統の現行設備の一部である。なお、炉下室(S)内の解体範囲は溶液燃料給排液系統設備の隔離を目的とした取合い配管の切断・撤去及び閉止措置のみとし、グローブボックス（内装機器を含む）は解体撤去せず残存設備として管理する。

2) 既設設備の改造

現行 STACY 施設のうち更新後も使用するものを STACY 更新炉に適合するように改造する。主要な改造設備は、STACY 更新炉の原子炉本体等を設置する炉室(S)内の炉室フード、実験装置架台である。また、現場制御盤、制御室内の監視操作盤等についても、新規設備に適合するよう改造して更新後の設備監視・制御に使用する。

3) STACY 更新炉の製作据付

STACY 更新炉の主要部分として新規に製作するのは、原子炉本体として炉心タンク、格子板等、計測制御系統施設として減速材の給排水系設備、安全板装置、水位計測装置等、及び燃料貯蔵設備として棒状燃料収納容器Ⅱである。これらの新規製作機器は、現行 STACY と同様に、主に炉室(S)、炉下室(S)に据付ける。

② 各案件の主要作業内容と所要期間

前項で概要を示した各案件を主要作業に展開し、その作業内容及び所要期間の見積もりを整理する。

1) 既設設備の解体撤去の主要作業

①炉室(S)非汚染機器の解体撤去	
作業内容：溶液燃料による汚染履歴がない機器を放射化物として養生してそのまま保管するか、細断して廃棄物容器等で保管する。	
主要対象機器	作業所要期間
<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉心水槽及び水反射体供給系配管弁類 ・ 炉心タンクサポート用架台 ・ 実験装置架台の一部 ・ 非汚染系配管、現場制御盤（更新後は不要な範囲） 	約3ヵ月

②炉室(S)汚染機器の解体撤去、炉心タンク等の移動保管	
作業内容：溶液燃料による汚染履歴がある機器を、内部汚染物として閉止措置を施し、そのまま移動保管するか、細断して廃棄物容器等で保管する。	
主要対象機器	作業所要期間
<ul style="list-style-type: none"> ・安全板駆動装置（移動保管） ・触針式液位計駆動装置（移動保管） ・炉心タンク（移動保管） ・安全棒弁ボックス本体及び内外配管等 ・溶液燃料給排液系配管等の汚染系配管 	約4ヵ月

③炉下室(S)非汚染機器の解体撤去	
作業内容：溶液燃料による汚染履歴もなく、放射化もないため汚染検査し、一般産業廃棄物として処理する。	
主要対象機器	作業所要期間
<ul style="list-style-type: none"> ・水反射体供給系配管 ・給液ポンプモータ部及びオイル配管 ・現場制御盤（更新後は不要な範囲） 	約1ヵ月

④炉下室(S)汚染機器、燃料調整系機器の解体撤去	
作業内容：溶液燃料による汚染履歴がある機器を細断して廃棄物容器等で保管する。	
主要対象機器	作業所要期間
<ul style="list-style-type: none"> ・溶液燃料給排液系配管 ・真空系ベント系配管等 	約4ヵ月

⑤機材室等に保管されている炉心タンク等の移動保管	
作業内容：使用履歴がある炉心タンク等を、閉止措置を施し、そのまま移動保管する。	
主要対象機器	作業所要期間
<ul style="list-style-type: none"> ・使用履歴のある炉心タンク ・使用履歴のある安全板及び安全棒駆動装置 ・使用履歴のある触針式液位計駆動装置 ・使用履歴のある実験用装荷物駆動装置 	約3ヵ月

2) 既設設備の改造の主要作業

①炉室(S)炉室フード改造	
作業内容：津波対策（浸水抑制）の自主保安として、既存の炉室フード床面及び側壁を補強し、開口部の水密化を図る。	
主要対象機器	作業所要期間
<ul style="list-style-type: none"> ・炉室フード 	約6ヵ月

②炉室(S)試験装置架台改造	
作業内容：STACY 更新炉の炉心タンク、安全板駆動装置架台等の据付及び耐震補強（剛構造設計）のため、既存の試験装置架台を改造する。また、更新後も使用する起動用中性子源を試験装置架台改造に合わせて移設する。	
主要対象機器	作業所要期間
<ul style="list-style-type: none"> ・試験装置架台 ・起動用中性子源移設 	約4ヵ月

③制御室盤／現場盤改造	
作業内容：SYTACY 更新炉の監視・制御に使用するため、制御室、現場（炉室(S)、炉下室(S)）制御盤を新規設備に適合するよう改造する。	
主要対象機器	作業所要期間
<ul style="list-style-type: none"> ・炉室(S)現場制御盤 （水位計測装置、安全板起動装置、ヒータ等） ・炉下室(S)現場制御盤 （給水ポンプ、配管ヒータ・弁関係盤等） ・制御室盤 （監視操作盤、インターロック盤、モニター盤） 	約6ヵ月

3) STACY 更新炉の製作・据付の主要作業

①主要機器材料手配／工場製作	
作業内容：STACY 更新炉の原子炉本体、計測制御系施設（制御設備、主要計装）、核燃料物質貯蔵設備に属する主要機器を工場製作する。	
主要対象機器	作業所要期間
・炉心タンク、格子板（原子炉本体）	約10ヵ月
・安全板装置、ダンプ槽（制御設備）	約10ヵ月
・水位計装装置（主要計装）	約7ヵ月
・燃料棒収納容器（燃料貯蔵設備）	約8ヵ月

②主要購入品手配	
作業内容：STACY 更新炉の計測制御系施設（制御設備）等の構成機器を購入する。	
主要対象機器	作業所要期間
・給水ポンプ、排水弁等（制御設備）	約4ヵ月
・電気ヒータ、保温材、温度制御盤	約3ヵ月

③新設機器据付工事（炉室(S)）	
作業内容：STACY 更新炉用の棒状燃料収納容器を設置するため、炉室(S)と炉室フードにまたがる範囲で設置用架台を新規に据付ける。炉心タンク、安全板装置等の新規製作した主要機器を炉室(S)に据付ける。	
主要対象機器	作業所要期間
・燃料棒収納容器架台据付（炉室(S)）	約6ヵ月
・炉心タンク、安全板装置等据付（炉室(S)）	約5ヵ月

④新設機器据付工事（給排水系機器・配管据付工事）	
作業内容：ダンプ槽、給水ポンプ等の制御設備給排水系機器及び給排水系配管を炉下室(S)を中心に据付ける。	
主要対象機器	作業所要期間
・給排水系機器・配管据付（炉下室(S)）	約8ヵ月

⑤新設機器据付工事（電気・計装工事）	
作業内容：据付が完了した新設機器から順次、電源ケーブル、計装品ケーブル敷設等の電気・計装工事を行う。	
主要対象機器	作業所要期間
・電気・計装工事	約7ヵ月

⑥ 運転・調整	
作業内容：新設機器の据付工事完了後に STACY 更新炉の単体作動試験、系統試験、性能試験を行う。	
主要対象機器	作業所要期間
・STACY 更新炉	約5ヵ月

(2) 検討結果

① 主要作業の実施順序

クリティカルパスを明確にした整備工程計画を立案するため、前項で整理した各主要作業の作業内容を考慮して実施順序を定める。なお、各主要作業の作業エリアは炉室(S)に集中しており、クリティカルパスは炉室(S)に係る作業工程となる。よって、炉室(S)に係る主要作業に着目して実施順序を決定する。

1) 既設設備の解体撤去の実施順序

先行して実施する解体撤去の中でも、炉室(S)非汚染機器、汚染機器の解体撤去作業を先に実施する。その他の炉下室(S)、機材室等に関しては、炉室(S)と関係なく工事が可能であるため、並行して実施することが可能である。

各作業の着手には、解体撤去に係る「設計及び工事の方法の認可」（以下「設工認」という。）の認可取得が前提条件となる。

2) 既設設備改造の実施順序

炉室(S)の解体撤去の完了後、新設機器据付工事までに実施する必要がある改造作業は、炉室フード改造及び実験装置架台改造である。実験装置架台改造では、耐震性の向上を図るため炉室(S)のコンクリート壁からの支持を増設する計画である。そのため、炉室フードに新たな貫通孔を設ける作業が必要であり、炉室フード改造に含めてその作業を実施し、その後に実験装置架台改造を行う順序が合理的である。

制御室盤、現場盤の改造に関しては、炉室(S)と関係なく工事が可能であり、関連機器の据付及び電気・計装工事と時期を合わせて効率的に実施することが可能である。

各作業の着手には改造に係る設工認取得が前提条件となる。

3) STACY 更新炉の製作・据付の実施順序

炉室(S)での新設機器据付作業のうち棒状燃料収納容器架台据付は、実験装置架台改造と同様の鋼構造物組立作業であり、かつ両作業間に大きな前後関係、依存関係はないので、両作業を炉室フード改造後に並行して実施する。

これら炉室(S)内の架台整備の完了により、新設機器据付工事(炉室(S))の作業が実施可能になる。主要機器の材料手配/工場製作及び購入品手配は、設工認取得を前提条件として作業着手し、架台整備完了時に現地搬入できるように、所要期間を考慮して実施時期を設定する。主に炉下室(S)の作業となる給排水系機器のダンプ槽、給水ポンプ及び給排水系配管の据付は、炉室(S)の据付工事と並行して実施可能である。

据付が完了した新設機器から順次、電源ケーブル、計装品ケーブル敷設等の電気・計装工事を行い、全ての新設機器据付工事完了後に STACY 更新炉の単体作動試験、系統試験、性能試験を行う。

② STACY 更新炉の整備工程計画

主要作業の所要期間と前項で定めた実施順序に基づいて作成した STACY 更新炉の整備工程表を表 7.1-1 に示す。

解体撤去に係る設工認取得を前提に、平成 27 年度の第 4 四半期より炉室(S)の解体撤去に着手し、順次、炉室フード改造、炉室(S)内架台整備、炉室(S)内新設機器据付、配管工事・電気計装工事、運転・調整と続く作業がクリティカルパス(工程表に破線矢印で表示)となり、平成 30 年度の下期に臨界を達成する整備計画である。

許認可の工程は現時点での想定であるが、設工認の取得は改造工事、工場製作等の主要作業に着手するためのホールドポイント(工程表に点線矢印で表示)となる。また、所要期間の長い炉心タンク、安全板装置等の工場製作については、作業終了(現地出荷)も次工程のホールドポイントとなる。これらはクリティカルパス上にはないが、実施段階でこれらに遅延が生じた場合は新たなクリティカルパスとなる可能性があることに注意が必要である。

7.1.3 まとめ

本検討では、STACY 更新炉の整備に必要な主要作業の内容と所要期間を整理し、各作業内容と作業エリア等の条件から生じる前後関係、相互依存関係を考慮して合理的な実施順序を定め、主要作業エリアの炉室(S)に関連する作業がクリティカルパスとなることを明確にした整備工程表を作成した。

平成 27 年度より実施段階に移行するが、クリティカルパス上の作業に計画とのズレが生じた場合に、その後のスケジュールにどのような影響があるかを、本整備工程表から見極めることができる。それによって、対策として必要な計画の修正、スケジュール変更及び資源配分の変更調整を的確かつ素早く決定・実行できる等、本整備工程表の活用により整備事業のプロジェクト管理を効率的に実施することが効能となる。

なお、本検討で作成した整備工程計画は、現状の作業内容及び所要期間の見積もりに基づいた計画（Plan）であり、整備事業を円滑に遂行するためには、今後の実施段階（Do）において進捗管理（Check）を確実にを行い、必要に応じて計画の是正（Act、re-plan）をするというプロジェクト管理サイクル（PDCA）を常に回すことが重要である。

表 7.1-1 STACY 更新炉の整備工程表

	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度
I. 許認可 *1					
(1) 設置変更許可		■■■■■■■■■■			
(2) 設工認					
① 解体撤去		■■■■■■■■■■			
② 既設改造(フード、試験装置架台)		■■■■■■■■■■	■■■■■■■■■■		
③ 原子炉本体等/計装制御系統設備			■■■■■■■■■■		
④ 燃料貯蔵設備			■■■■■■■■■■		
II. 既存設備の解体撤去(更新後に使用しない設備)					
(1) 工事計画/資材調達		契約 ■■■■■■■■■■			
(2) 既設備解体・撤去工事					
① 炉室(S)非汚染機器		■■■■■■■■■■	■■■■■■■■■■		
② 炉室(S)汚染機器/炉心タンク等移動			■■■■■■■■■■		
③ 炉下室(S)非汚染機器		■■■■■■■■■■			
④ 炉下室(S)汚染機器/燃調機器			■■■■■■■■■■		
⑤ 機材室等保管機器移動			■■■■■■■■■■		
III. 既存設備の改造(更新後も仕様する設備)					
(1) 工事計画・資材調達		■■■■■■■■■■			
(2) 既設備改造工事					
① 炉室(S) 炉室フード改造		■■■■■■■■■■	■■■■■■■■■■	■■■■■■■■■■	
② 炉室(S) 試験装置架台改造		契約 ■■■■■■■■■■		■■■■■■■■■■	
③ 制御室盤/現場盤改造				■■■■■■■■■■	
IV. STACY更新炉の製作・据付					
(1) 製作設計		■■■■■■■■■■			
(2) 主要機器材料手配/工場製作					
① 炉心タンク、格子板(原子炉本体)			■■■■■■■■■■	■■■■■■■■■■	
② 安全板装置、ダンプ槽(制御設備)			■■■■■■■■■■	■■■■■■■■■■	
③ 水位計測装置(主要計装)				■■■■■■■■■■	
④ 燃料棒収納容器(燃料貯蔵設備)				■■■■■■■■■■	
(3) 主要購入品手配					
① ポンプ、弁等(給排水系設備)				■■■■■■■■■■	
② 電気ヒータ/保温/制御盤				■■■■■■■■■■	
(4) 新設機器据付工事					
① 燃料棒収納容器架台据付(炉室(S))				■■■■■■■■■■	
② 炉心タンク、安全板等据付(炉室(S))				■■■■■■■■■■	
③ 給排水系機器・配管据付(主に炉下室(S))				■■■■■■■■■■	
④ 電気・計装工事				■■■■■■■■■■	
(5) 運転・調整					■■■■■■■■■■ 初臨界

* 1: 許認可工程の「設置変更許可時期」「設工認申請・認可時期及び分割申請」については想定である。

7.2 臨界実験炉心の基本設計

7.2.1 目的及び概要

(1) 目的

STACY 更新炉でデブリ模擬臨界実験を行うに先立ち、当該実験が国際的にみて優秀な精度を確保できるよう、デブリ模擬材料を含まない基本的な炉心（以下「基本炉心」と言う。）の実験精度を検討し、炉心を構成する機器の製作精度に由来する実験結果の不確かさを十分に把握しておかなければならない。

本事業では、臨界解析によって STACY 更新炉の典型的な基本炉心を検討し、それらの不確かさを解析により評価する。また、STACY 更新炉の各機器の製作精度をパラメータとしてそれらが実験結果に及ぼす影響を定量的に評価し、影響の大きいパラメータについて、設計上の要求精度に反映する。

(2) 概要

前節に示した目的を達成するため、まず、現行の STACY の各機器の製作精度を調査する。得られた情報をもとに STACY 更新炉の製作精度を仮定し、当該情報をもとに STACY 更新炉の基本炉心を臨界解析により決定する。決定に当たっては、STACY 更新炉の許認可上の炉心構成範囲の制限を満足しつつ、高い臨界量測定精度と運転の自由度が得られるよう考慮する。

次に、実験結果に影響を及ぼすことが想定される設計パラメータについて、その影響を感度解析（Sensitivity analysis）によって評価する。評価に当たっては、特にデブリ模擬臨界実験を計画している格子間隔が狭小な炉心について、そのような実験に豊富な経験を持つ仏国放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）を訪問し、解析手法、解析対象パラメータについて協議し、その知見を反映する。

7.2.2 成果報告

(1) 調査仕様

① 現行 STACY の製作精度調査

STACY 更新炉の設計精度を決定するにあたり、まず現行の STACY の製作精度を調査し、更新炉は現行 STACY と同程度の製作精度が達成できるものと仮定する。調査対象とする精度は以下の 10 項目とする。調査に当たっては可能な限り測定行為の不確かさに由来する「偶然誤差」と、測定機器の器差に由来する「系統誤差」を区別して取り扱うものとする。

- 1)燃料ペレットの直径
- 2)燃料被覆直径の直径
- 3)棒状燃料位置
- 4)燃料ペレットの密度
- 5)燃料被覆の密度
- 6)燃料ペレットの不純物
- 7)燃料被覆の不純物

- 8)²³⁵U 濃縮度
- 9)体系水位
- 10)体系温度

② 基本炉心の臨界解析

前項で調査した現行 STACY の寸法(実測値)をもとに STACY 更新炉の寸法を決定し、基本炉心の臨界解析を行う。基本炉心の臨界解析のための解析条件を表 7.2-1 に示す。解析には連続エネルギーモンテカルロコード MCNP5 ^{1,2)}及び評価済み核データ JENDL-4.0 ³⁾を使用する。

評価する炉心は棒状燃料及び軽水減速材のみモデル化するものとし、棒状燃料を支持する定盤、格子板は無視する。棒状燃料の解析モデルを図 7.2-1 に、炉心の全体のモデルについて図 7.2-2 に示す。また、体系温度は 25 °C とする。

解析する炉心の棒状燃料配列について図 7.2-3 に示す。図のように、棒状燃料は炉心の水平断面積が正方形になるように配列するものとする。正方形の 1 辺の棒状燃料の数は常に偶数になるよう配列することとし、臨界調整のために燃料棒を追加する時には、正方形の各辺の中央部分から対称性を維持しつつ配列するものとする。

表 7.2-1 基本炉心の解析条件

項目	条件
燃料ペレット直径	調査結果から決定
燃料被覆外径	調査結果から決定
燃料被覆厚み	調査結果から決定
燃料有効長	142.0 cm
棒状燃料長さ	149.5 cm
上下端栓長さ	1.468 cm
燃料ペレット密度	調査結果から決定
燃料被覆密度	調査結果から決定
体系温度	25 °C

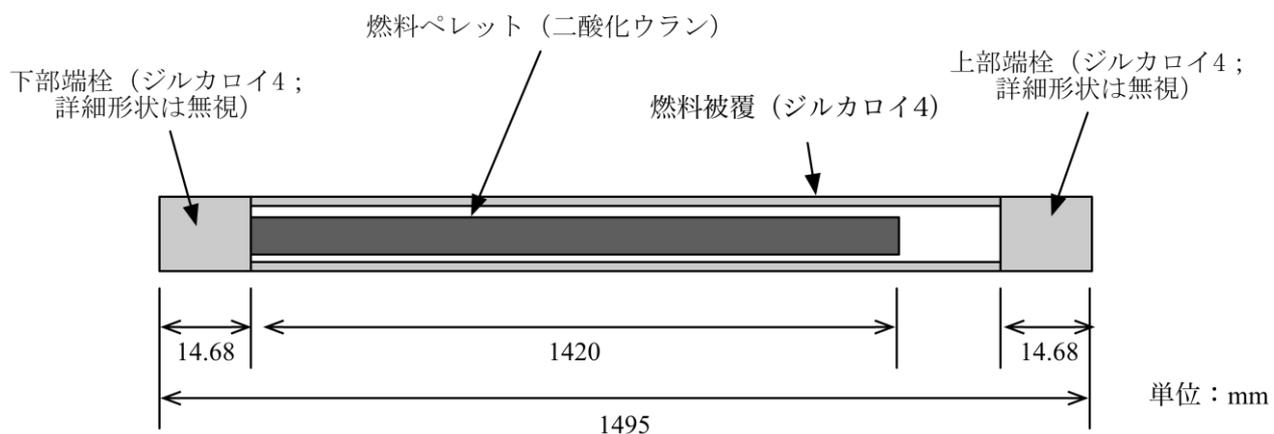


図 7.2-1 棒状燃料の計算モデル (径方向寸法は実測値から決定する)

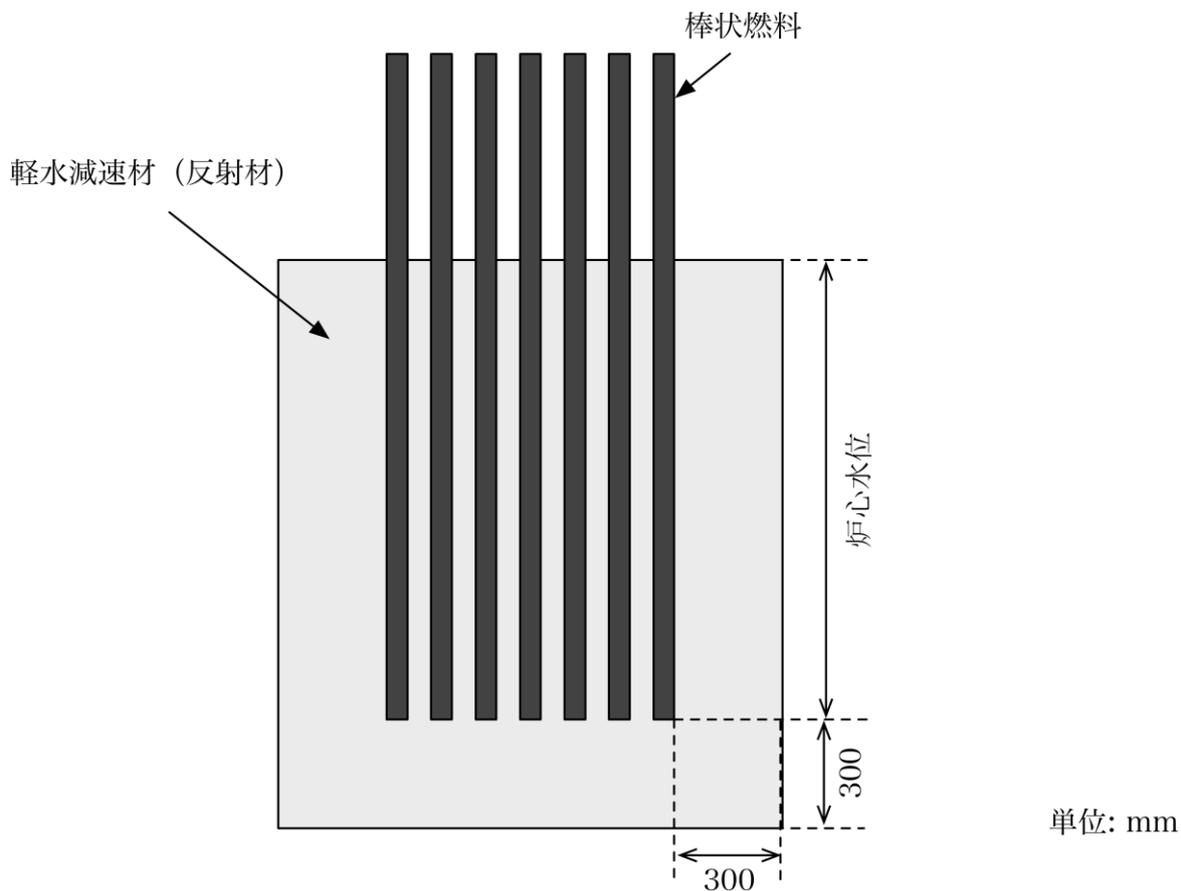


図 7.2-2 炉心の計算モデル

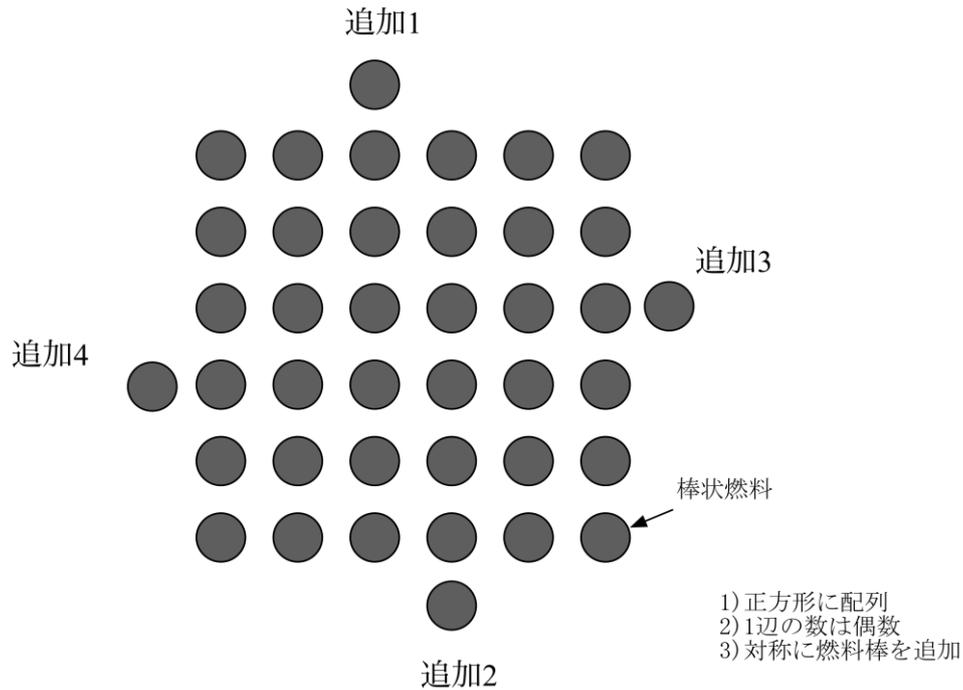


図 7.2-3 炉心の燃料配列

③ 設計パラメータの感度解析

前項の作業「② 基本炉心の臨界解析」で決定した基本炉心 3 種類に対して、設計パラメータ（製作精度）が実験精度に及ぼす影響を感度解析により評価する。評価するパラメータは「① 現行 STACY の製作精度調査」で評価した以下の 10 種類とする：

- 1) 燃料ペレットの直径
- 2) 燃料被覆直径の直径
- 3) 棒状燃料位置
- 4) 燃料ペレットの密度
- 5) 燃料被覆の密度
- 6) 燃料ペレットの不純物
- 7) 燃料被覆の不純物
- 8) ^{235}U 濃縮度
- 9) 体系水位
- 10) 体系温度

評価には連続エネルギーモンテカルロコード MCNP5 の摂動計算機能を用い、核データには評価済み核データ JENDL-4.0 を用いる。

(2) 調査結果

① 現行 STACY の製作精度調査

1) 燃料ペレットの直径

現行 STACY は、燃料製作時にペレットを抜き出して寸法測定を実施している。抜き出し個数は 125 個である。測定結果を図 7.2-4 に示す。測定の結果、燃料ペレットの直径

8.203 mm、偶然誤差 ± 0.002 mm を得た。測定に使用した機器の測定誤差に関する情報は記録に残されていなかったため、系統誤差として読み取り誤差の 5 倍の 0.005 mm を仮定することとする¹。

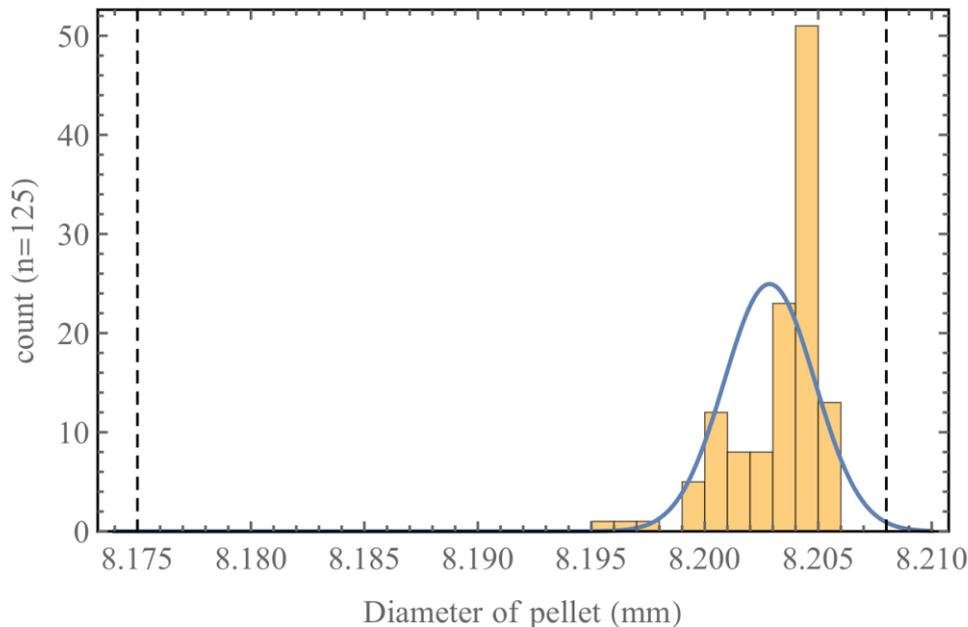


図 7.2-4 燃料ペレット直径の測定結果（破線は製作公差を示す）

2) 燃料被覆の直径

燃料被覆の直径について現行 STACY の燃料製作時の寸法測定結果を調査した結果、被覆管 50 本に対し 1 本につき 3 箇所ずつ測定した結果を得た (n=150)。直径の測定結果を図 7.2-5 に示す。測定の結果、燃料被覆の直径として 9.492 mm、偶然誤差 ± 0.005 mm を得た。測定に使用した機器の測定誤差に関する情報は記録されていなかったため、燃料ペレットと同様、読み取り誤差の 5 倍の 0.005 mm を系統誤差とする。また、燃料被覆の厚みについては、同様に燃料被覆 50 本に対して 1 点ずつ測定した結果、厚みの平均として 0.571 mm、偶然誤差 ± 0.003 mm を得ている。

¹ デジタルノギス（例えば格子板孔測定に使用したミットヨ製 200 mm digital vernier micrometer）の測定誤差は読み取り誤差 0.01 mm の 3 倍の 0.03 mm である。

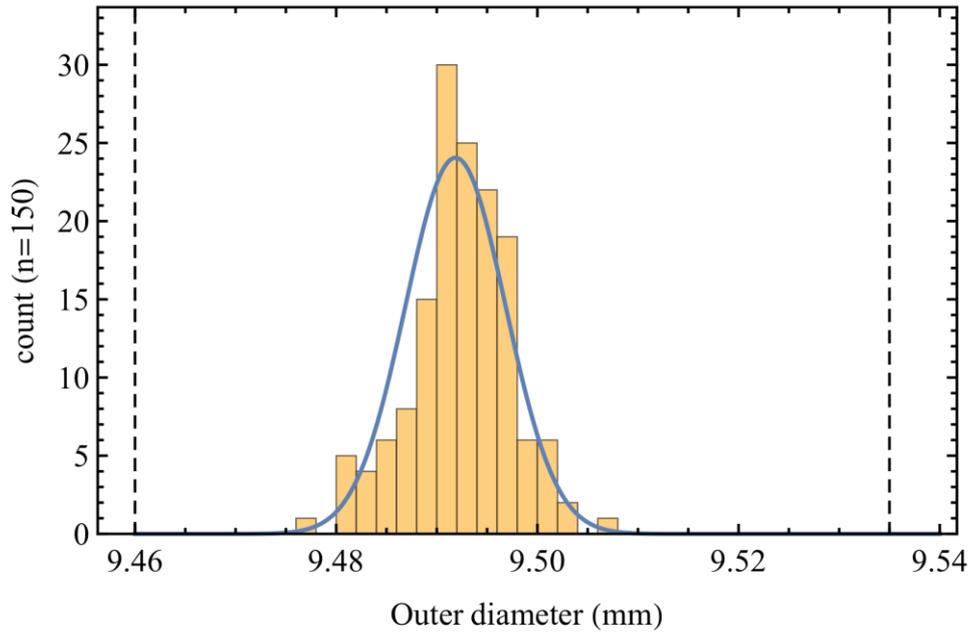


図 7.2-5 燃料被覆直径の測定結果（破線は製作公差を示す）

3) 棒状燃料位置

棒状燃料の位置の不確かさの評価について、図 7.2-6 に考え方を示す。同図に示すように、棒状燃料は格子板の孔の中で棒状燃料と孔の間の空隙を自由に動くことができる。本解析ではこの自由度に由来する位置の不確かさは当該範囲に一様分布するものとして評価した。これに加えて以下の変数に付随する不確かさを評価に加える必要がある。

- 棒状燃料の外径 ϕ_{rod}
- 格子板孔の直径 ϕ_{hole}
- 格子板孔の位置 p （格子板中央からの距離を測定）
- 格子板孔の間隔 P

ここで、 ϕ_{rod} は 2) で測定した燃料被覆の直径と同じである。また、現行 STACY の製作時に ϕ_{hole} と p 及び P はそれぞれ全数測定されている。現行の STACY のタイプ 1 格子板（格子間隔 25 mm）について、 ϕ_{hole} の測定結果を図 7.2-7 に、 p の測定結果を図 7.2-8 に、 P の測定結果を図 7.2-9 にそれぞれ示す。測定の結果 ϕ_{hole} の測定値として 9.914 mm、偶然誤差として 0.002 mm を得た。また、格子孔の間隔 P は格子板中央からの孔の距離 p の全数測定値から計算されており、計算結果として 24.996 mm、偶然誤差 0.030 mm を得ている。ここで、 p の分布形状は正規分布ではないにもかかわらず、 P はほぼ理想的な正規分布の形状で分布していることがわかる。これは、 P が 2 つの p の差から計算されるため、 p の測定値に含まれる系統誤差が打ち消されるからであると考えられる。本解析では、モデルの簡単化のため、 p は正規分布するとして評価した。その場合 p の偶然誤差は正規分布の加法性より P のそれを $\sqrt{2}$ で除した大きさとなる。

また、測定に当たって、 ϕ_{hole} の測定には測定誤差 0.005 mm のデジタルキャリブレータを使用している。したがって、 ϕ_{hole} の系統誤差は 0.005 mm とする。一方、格子孔の間隔 P の測定には最大測定長さ 200 mm のデジタルノギス（測定誤差 0.03 mm）または最

大測定長さ 300 mm のデジタルノギス（測定誤差 0.08 mm）使用している。どの孔をどちらのノギスを使用して測定したかの記録は残されていないが、現行 STACY の非均質炉心タンクの直径が 600 mm であり、孔の位置は最大でも中心から 225 mm であることを考慮すると、ほとんどの測定には最大長さ 200 mm のデジタルノギスを使用したものと考えられる。よって、ここでは p の測定に付随する系統誤差を 0.03 mm とする。

以上の測定値より、本解析では棒状燃料位置の不確かさについて、系統誤差を ϕ_{rod} 、 ϕ_{hole} 及び p の系統誤差の二乗平方和として以下のように評価した。

$$(\text{系統誤差}) = \sqrt{0.005^2 + 0.005^2 + 0.03^2} = 0.0308 \text{ mm}$$

また、偶然誤差については、格子板孔と棒状燃料の空隙、格子板孔の半径の偶然誤差、棒状燃料半径の偶然誤差及び格子板孔位置の偶然誤差の二乗平方和として、次の式で評価した。

$$(\text{偶然誤差}) = \sqrt{\left\{ \frac{(9.914 - 9.492)}{2\sqrt{3}} \right\}^2 + \left(\frac{0.002}{2} \right)^2 + \left(\frac{0.005}{2} \right)^2 + \left(\frac{0.03}{\sqrt{2}} \right)^2} = 0.1239 \text{ mm}$$

格子板中央

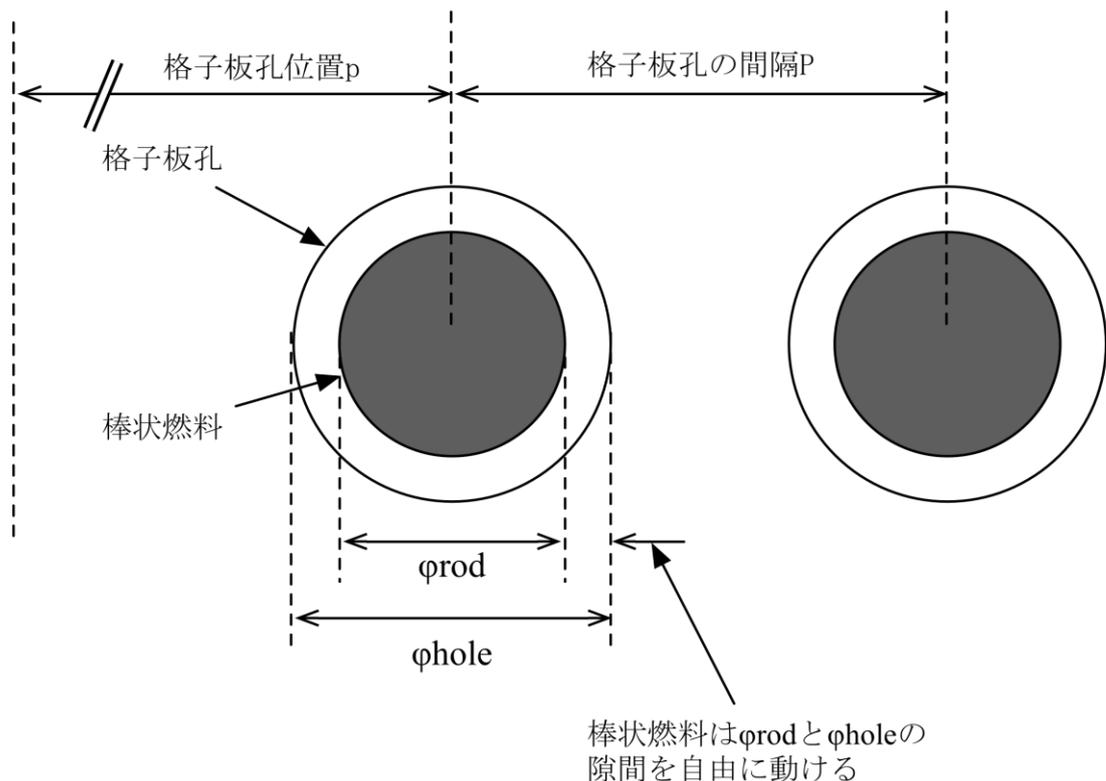


図 7.2-6 棒状燃料位置の不確かさ

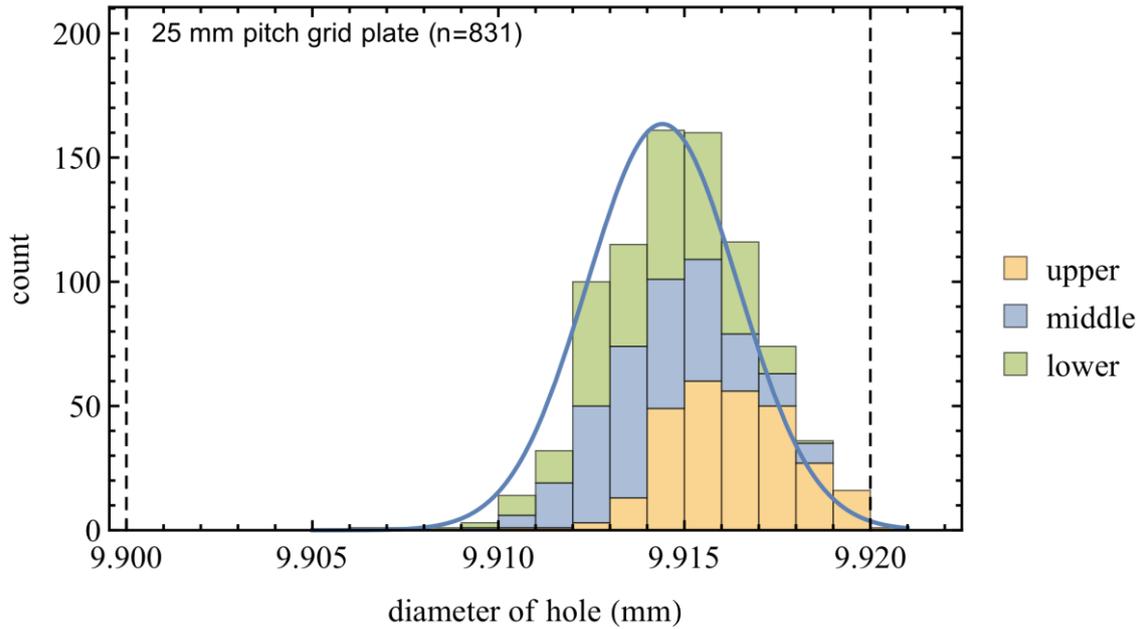


図 7.2-7 格子板孔の測定結果
(現行 STACY タイプ 1 格子板;格子間隔 25 mm。破線は製作公差を示す。)

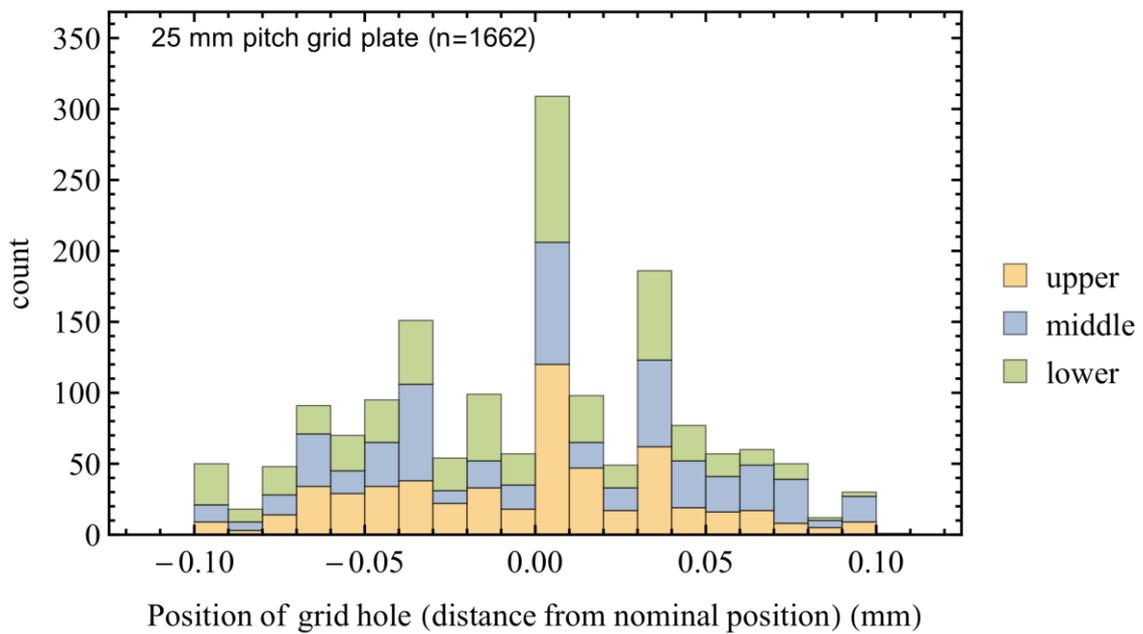


図 7.2-8 格子板孔位置 p の測定結果 (設計値からのずれ)
(現行 STACY タイプ 1 格子板;格子間隔 25 mm)

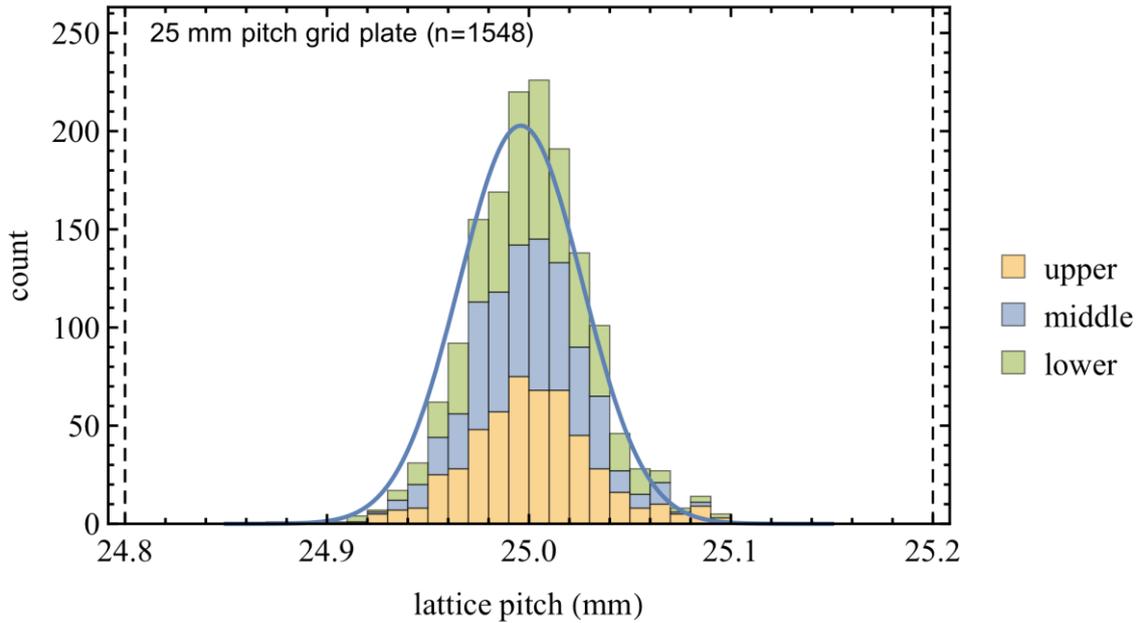


図 7.2-9 格子板孔間隔 P の測定結果
(現行 STACY タイプ 1 格子板;格子間隔 25 mm。破線は設計公差を示す)

4) 燃料ペレットの密度

燃料ペレットの密度については、現行の STACY において、燃料製作時にペレットを抜き取りで評価している。抜き取り個数は 125 個であり、燃料ペレットの重量、高さ、直径をそれぞれ測定し、計算により密度を算出している。また、ペレットのディンプル（皿型くぼみ）及びチャンファ（面取り）の体積も考慮されている。燃料ペレットの密度の測定結果を図 7.2-10 に示す。測定の結果、燃料ペレットの密度として 10.447 g/cm^3 、偶然誤差として 0.0122 g/cm^3 を得た。

燃料ペレットの測定に使用した機器の誤差についての情報は残されていないため、それぞれの読み取り誤差の 5 倍を仮定して、誤差伝播の式を用いて系統誤差を評価した。

$$(\text{系統誤差}) = \sqrt{\left(\frac{\pi d h w \sigma_d}{2V^2}\right)^2 + \left(\frac{\pi d^2 w \sigma_h}{4V^2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_w}{V}\right)^2 + \left(\frac{w \sigma_{ch}}{V^2}\right)^2 + \left(\frac{w \sigma_{dim}}{V^2}\right)^2} = 0.0152 \text{ g/cm}^3$$

ただし、

- w : ペレット平均重量 7.488 g/cm^3
- σ_w : ペレット重量測定の系統誤差 0.005 g/cm^3
- h : ペレット平均高さ 1.3771 cm
- ρ_h : ペレット高さ測定の系統誤差 0.0005 cm
- d : ペレット平均直径 0.8203 cm
- ρ_d : ペレット直径測定の系統誤差 0.0005 cm
- V : ペレット体積の平均値 $V = \pi/4 d^2 h - V_{ch} - V_{dim}$
- V_{ch} : ペレットチャンファの体積 $2.706 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$

- ρ_{ch} : ペレットチャンファ体積の系統誤差 $0.005 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$
 V_{dim} : ペレットディンプルの体積 $8.307 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$
 ρ_{dim} : ペレットディンプル体積の系統誤差 $0.005 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$

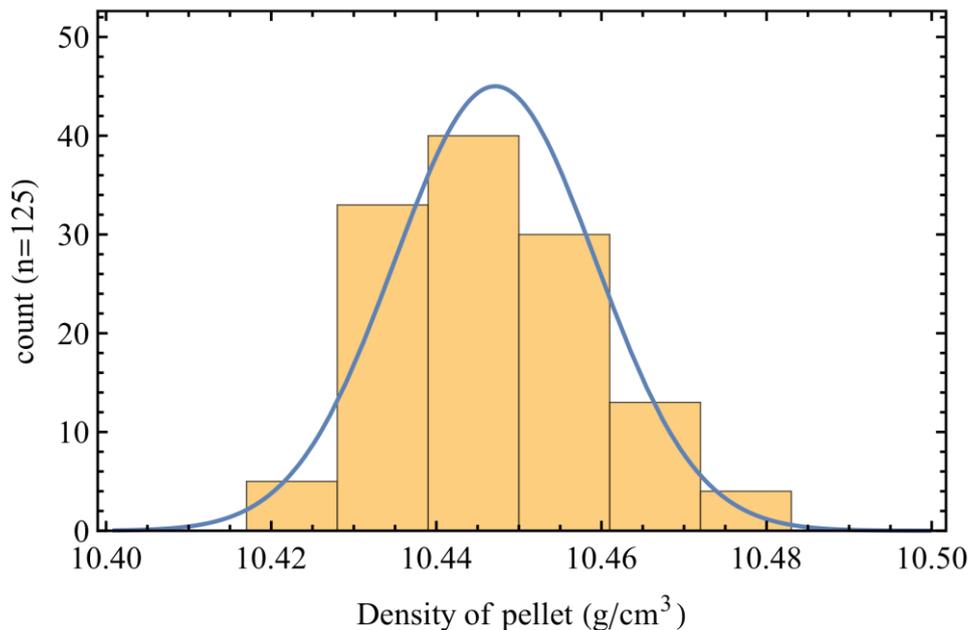


図 7.2-10 燃料ペレット密度の調査結果

5) 燃料被覆の密度

燃料被覆であるジルコニウム合金（ジルカロイ 4）は中性子に対してほとんど反応しないため、その密度の不確かさは実験精度に大きな影響を与えないと考えられる。しかし、現行の STACY の検査記録にその密度の不確かさが与えられていないため、本解析では燃料被覆の密度をジルカロイ 4 の標準的な密度である 6.56 g/cm^3 とし、その系統誤差を保守的に評価するため 0.1 g/cm^3 を仮定した。また、燃料被覆はすべて同一ロットのジルカロイ合金から製作されているため、偶然誤差は無視できるものとした。

6) 燃料ペレットの不純物

燃料ペレットの原料の二酸化ウラン粉末には、納入前に不純物検査を実施している。不純物検査結果を調査し、検出された不純物については、検出値の 10% を系統誤差として評価した。また、検出限界を下回った不純物については、特に中性子吸収に影響がある元素（ホウ素、カドミウム、モリブデン、窒素、塩素）について、検出限界値の $100/2\sqrt{3}\%$ を系統誤差として評価した。評価した結果は、Appendix 7.2.A1 の表 7.2-A1 に示す。なお、燃料ペレットはすべて同一ロットの二酸化ウラン粉末から製作されているため、不純物濃度の偶然誤差は無視できるものとした。

7) 燃料被覆の不純物

燃料被覆の原料のジルカロイ 4 には、納入前に不純物検査を実施している。本解析では不純物検査結果を調査し、検出された不純物については検出値の 10% を系統誤差として評価した。また、検出限界を下回った不純物については、特に中性子吸収に影響がある元素（ホウ素、カドミウム、モリブデン、ウラン）について、検出限界値の $100/2\sqrt{3}\%$ を系統誤差として評価した。評価した結果は、Appendix 7.2.A1 の表 7.2-A2 に示す。なお、燃料被覆はすべて同一ロットのジルカロイ 4 から製作されているため、不純物濃度の偶然誤差は無視できるものとした。

8) ^{235}U 濃縮度

燃料ペレットの原料である二酸化ウラン粉末には、納入前に同位体組成比の測定を実施している。本解析では、解析結果を調査し、 ^{235}U 濃縮度として 4.9781 wt% を得た。測定方法に付随する系統誤差が検査結果に与えられていないため、最終桁の 5 倍の 0.0005 wt% を系統誤差として仮定した。また、燃料ペレットはすべて同一ロットの二酸化ウラン粉末から製作されているため、不純物濃度の偶然誤差は無視できるものとした。

9) 炉心水位

STACY 更新炉は水位を変化させることによって炉心の反応度を調整するため、水位測定の不確かさは実験精度に大きな影響を及ぼす。STACY 更新炉の水位測定装置は現行 STACY の液位測定に使用している触針式液位計とは違う方式となるが、同等の精度を実現するために水位測定誤差 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 以下の高精度水位計を設計中である。本解析では、炉心の水位測定の偶然誤差を設計目標値である $\pm 0.2 \text{ mm}$ とした。一方、系統誤差は較正によって解消するため、無視できるものとした。

10) 体系温度

体系温度の変化が実験精度におよぼす影響は、原子核の平均運動エネルギーが増大することによる影響と、減速材密度が変化することによる影響に大別される。STACY 更新炉は軽水減速の原子炉であるため、後者の影響が大きい。STACY 更新炉の炉心を設置する NUCEF 実験棟は、24 時間空調管理下にある鉄筋コンクリート造であり、室温は安定して $25 \text{ }^\circ\text{C}$ に維持されている。本解析では、更新炉の温度の不確かさを偶然誤差として $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ として温度変化の影響を見積った。

以上の調査で得た STACY 更新炉の製作精度を表 7.2-2 にまとめる。

表 7.2-2 STACY 更新炉の製作精度（現行 STACY の調査による）

項目	平均値	偶然誤差	系統誤差
燃料ペレット直径 (mm)	8.203	±0.002	±0.005
燃料被覆直径 (mm)	9.492	±0.005	±0.005
燃料被覆厚み (mm)	0.571	±0.003	±0.005
棒状燃料位置 (mm)	0	±0.1239	±0.0308
燃料ペレット密度 (g/cm ³)	10.447	±0.0122	±0.0152
燃料被覆密度 (g/cm ³)	6.56	-	±0.1
燃料ペレット不純物 (検出) (%)	分析値	-	±10
燃料ペレット不純物 (未検出) (%)	検出限界値	-	±100
²³⁵ U 濃縮度 (wt%)	4.9781	-	±0.0005
炉心水位 (mm)	測定値	±0.2	-
体系温度 (°C)	25 (室温)	±1	-

② 基本炉心の臨界解析

前項の調査によって得た現行 STACY の製作精度をもとに、棒状燃料の装荷本数をパラメータとして STACY 更新炉の臨界計算を行った。計算コード及び核データは調査仕様に示すとおり、それぞれ MCNP5 及び JENDL-4.0 である。また、計算のヒストリー数 1 バッチあたり 1 万粒子とし、400 バッチのうち 100 バッチを統計処理から除外して合計 300 万粒子とした。炉心の格子間隔は STACY 更新炉の制限値の下限 (1.09 cm)、上限 (2.55 cm) 及び最適減速となる格子間隔 (1.5 cm) とした。臨界とみなす中性子実効増倍率は 1.0 とした。結果を図 7.2-11 及び表 7.2-3 に示す。図には、本事業の計算結果を図中にシンボルマークで示した。また、参考として原子力機構が STACY 更新のための予備解析で実施した計算の結果を点線として合せて示す。解析の結果、臨界水位が 110 cm の場合、STACY 更新炉の格子間隔の下限である 1.09 cm の炉心では臨界量が許可上の装荷量の制限値である 900 本を超えることが確認された。臨界量が 900 本となる炉心の格子間隔は 1.103 cm である。このような格子間隔が狭小な炉心では格子間隔の感度 (臨界燃料棒本数に対する影響) が大きく、わずかな違いで大きく臨界燃料棒本数が増えるため、基本炉心の格子間隔は制限値に対して余裕を持って設定する必要がある。

上述の評価結果を受け、制限値への余裕を棒状燃料の本数にして約 200 本確保することとし、臨界となる棒状燃料が約 700 本となる基本炉心の格子間隔を検討した。なお、臨界量にして 200 本の違いは格子間隔の違いにして約 0.5 mm に相当し、格子板の製作精度に対して十分な余裕であると考えられる。評価した基本炉心の臨界量を表 7.2-3 に、棒状燃料の配列を図 7.2-12 に示す。また、各炉心の中性子エネルギースペクトルを図 7.2-13 に示す。

表 7.2-3 STACY 更新炉の基本炉心の臨界解析結果

形状	格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	棒状燃料燃 料本数 (本)	中性子実効 増倍率	標準偏差
正方	1.09	110	971	0.99952	0.00042
正方	1.103	110	900	0.99999	0.00050
<u>正方</u>	<u>1.15</u>	<u>110</u>	<u>683</u>	<u>0.99999</u>	<u>0.00045</u>
<u>正方</u>	<u>1.5</u>	<u>110</u>	<u>258</u>	<u>1.00044</u>	<u>0.00050</u>
<u>正方</u>	<u>2.55</u>	<u>110</u>	<u>217</u>	<u>1.00059</u>	<u>0.00040</u>

下線は、基本炉心として選定した炉心をあらわす。

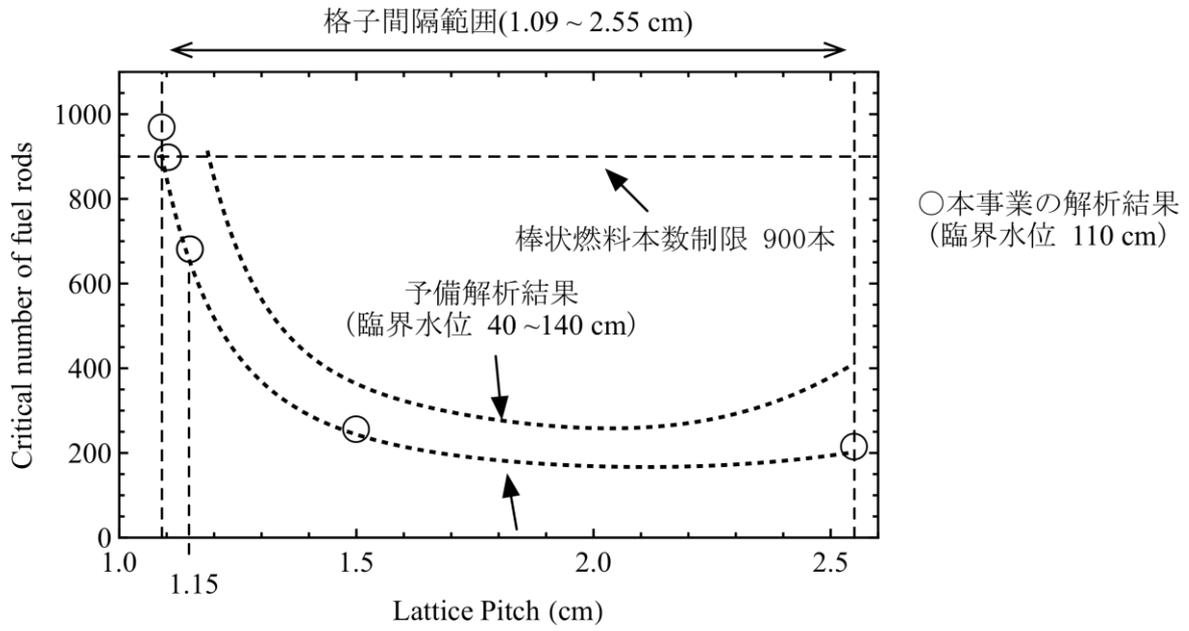


図 7.2-11 基本炉心の臨界解析結果

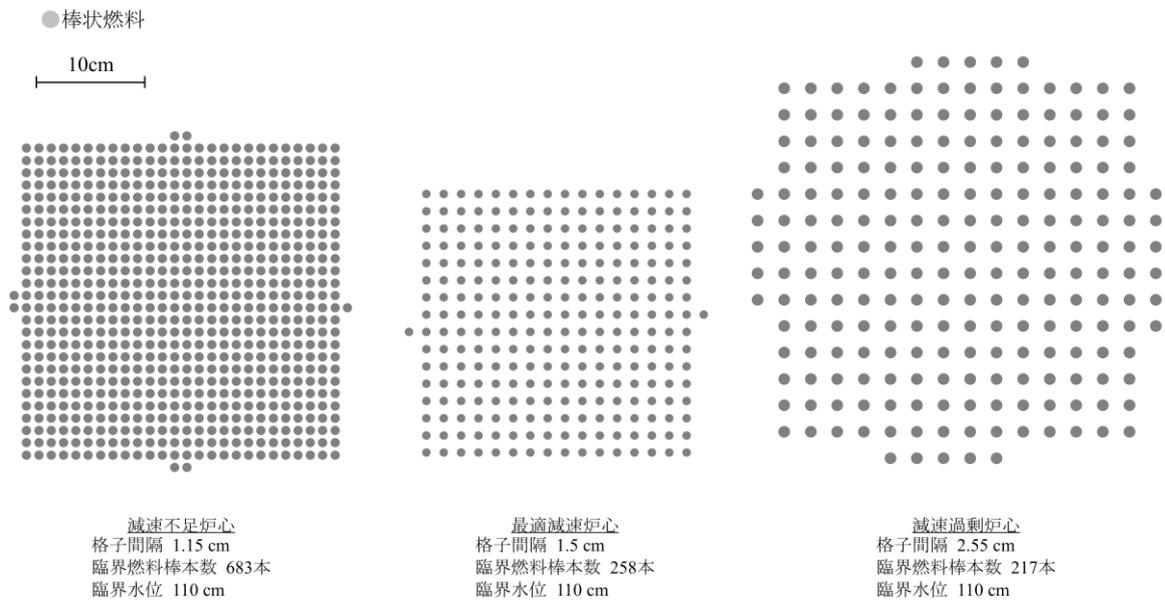


図 7.2-12 基本炉心の棒状燃料配列

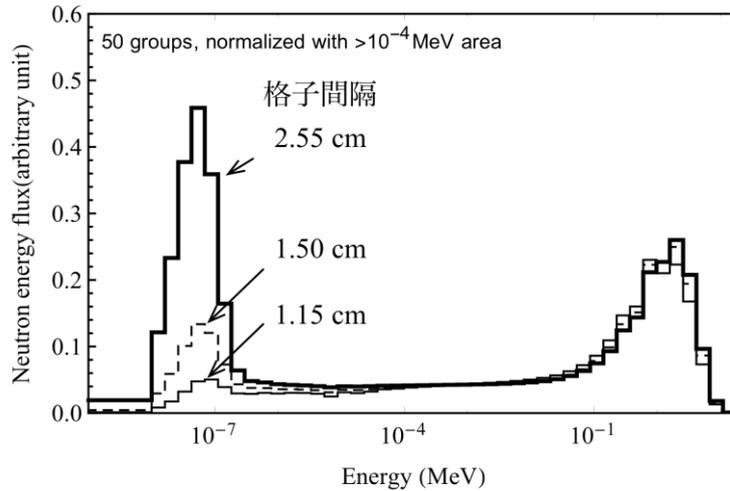


図 7.2-13 基本炉心の中性子エネルギースペクトル
(タリー50群、エネルギー 10^{-4} MeV以上の面積で正規化)

③ 設計パラメータの感度解析

前節の評価によって得た基本炉心について、調査仕様のとおり感度解析を行い、各設計パラメータが実験精度に及ぼす影響を評価した。

1) 燃料ペレットの直径

燃料ペレットの直径の変化について、MCNP5を使用して感度解析を実施した。解析モデルを図 7.2-14 に示す。同図に示すとおり、燃料ペレットの幾何形状の境界を二重に設定し、MCNP5の物質置換摂動計算機能を使用して二酸化ウランを真空に置換し、反応度効果を計算した。計算のヒストリー数は15百万粒子とした。

計算の結果を図 7.2-15 に示す。燃料ペレットの直径変化とその反応度効果は解析した範囲で比例関係にある。また、過減速領域（格子間隔 2.55 cm）で効果が大きく、減速不足な狭小格子（格子間隔 1.15 cm）ではほとんど効果が見られない。これは、臨界解析で確認されたとおり、狭小な格子間隔では臨界量に対する格子間隔の感度が大きい、すなわち燃料の量の変化の感度が鈍いことによる。解析結果を最小二乗法でフィッティングして得た単位変化あたりの反応度係数に対し、調査①で得た設計精度を乗ずることで反応度に及ぼす影響を評価した。燃料ペレット直径の感度解析の結果を表 7.2-4 に示す。設計精度は偶然誤差と系統誤差に分けて評価した。本解析では棒状燃料すべての直径を変更しているため、偶然誤差を評価するに当たっては値を棒状燃料の本数の平方根で除している。

表 7.2-4 燃料ペレット直径の感度解析結果

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (mm)	系統誤差 (mm)	反応度 (偶然) *	反応度 (系統) ** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	0.002/ $\sqrt{683}$	0.005	0.1	4.2	4.2
1.5	0.002/ $\sqrt{258}$	0.005	0.3	12.0	12.0
2.55	0.002/ $\sqrt{217}$	0.005	0.9	13.0	32.0

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm=10⁻⁵Δk

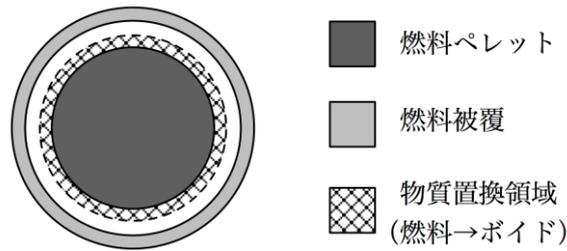


図 7.2-14 燃料ペレット直径の感度解析モデル (単位セル)

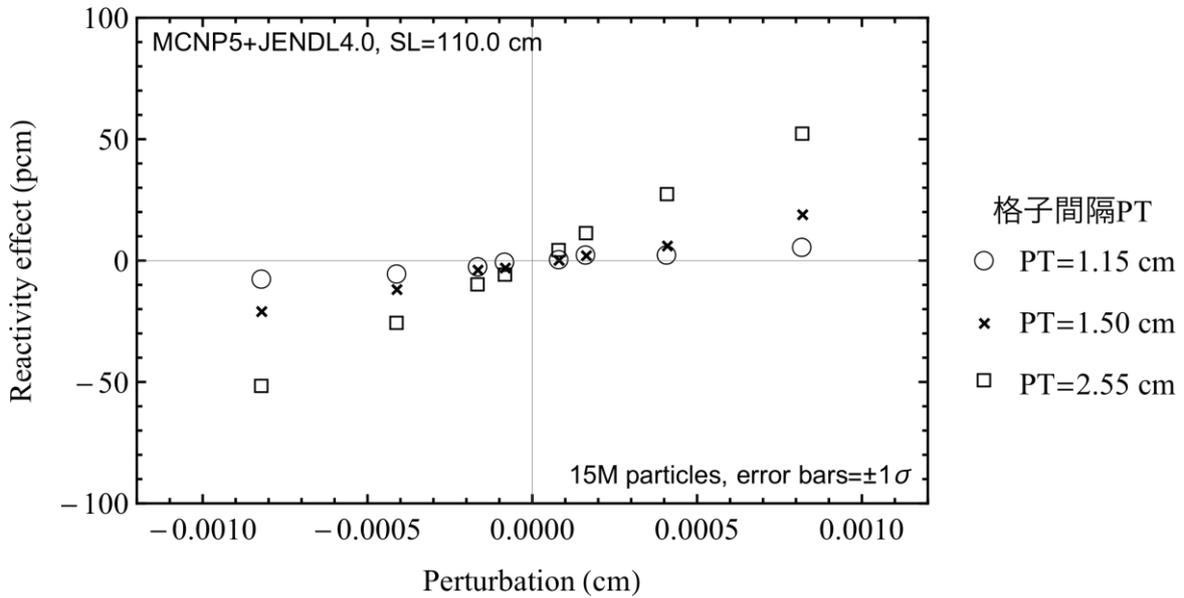


図 7.2-15 燃料ペレット直径の感度解析結果

2) 燃料被覆の直径

燃料被覆の直径の変化の解析モデルを図 7.2-16 に示す。図のとおり、燃料被覆の外壁を二重に設定し、物質置換摂動によって燃料被覆の直径の変化に対する反応度変化を計算した。計算のヒストリー数は 3 百万粒子である。なお、図に示すとおり同時に燃料被

覆の厚みも変化しているが、ジルコニウムの中性子に対する反応断面積の小ささから、この影響は無視できるものとしている。

燃料被覆の直径変化の感度解析結果を図 7.2-17 に示す。被覆の直径が増大すると単位セル内の減速材が減少するため、減速不足の体系（格子間隔 1.15 cm）及び最適減速の体系（格子間隔 1.5 cm）では被覆直径の増大は減速能の低下による負の反応度効果をもたらす。減速過剰の体系（格子間隔 2.55 cm）では軽水の吸収効果の減少効果が減速能の低下の影響を上回るため、正の反応度効果が見られる。ただし、その効果はわずかである。この解析結果を最小二乗法でフィッティングして得た単位変化あたりの反応度係数に対し、調査①で得た設計精度を乗ずることで反応度に及ぼす影響を評価した。得られた結果を表 7.2-5 に示す。1)の燃料ペレット直径の効果と同様、設計精度は偶然誤差と系統誤差に分けて評価し、偶然誤差を評価するに当たっては値を棒状燃料の本数の平方根で除している。

表 7.2-5 燃料被覆直径の感度解析結果

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (mm)	系統誤差 (mm)	反応度 (偶然) * (pcm***)	反応度 (系統) ** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	0.005/√683	0.005	-1.3	-33.0	33.0
1.5	0.005/√258	0.005	0.8	-12.0	12.0
2.55	0.005/√217	0.005	0.2	2.8	2.8

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm=10⁻⁵Δk

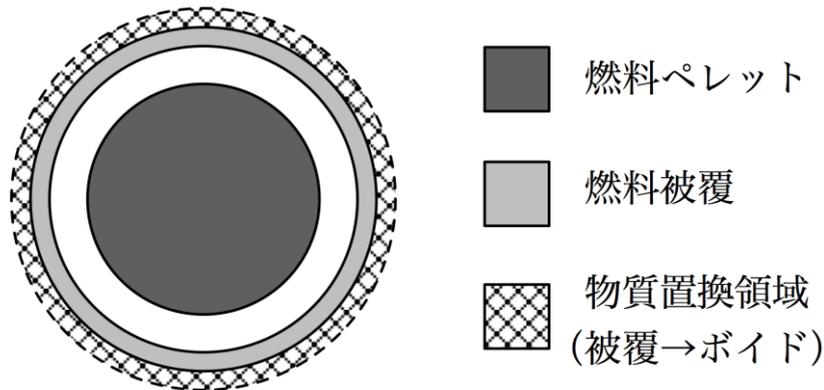


図 7.2-16 燃料被覆直径の感度解析モデル（単位セル）

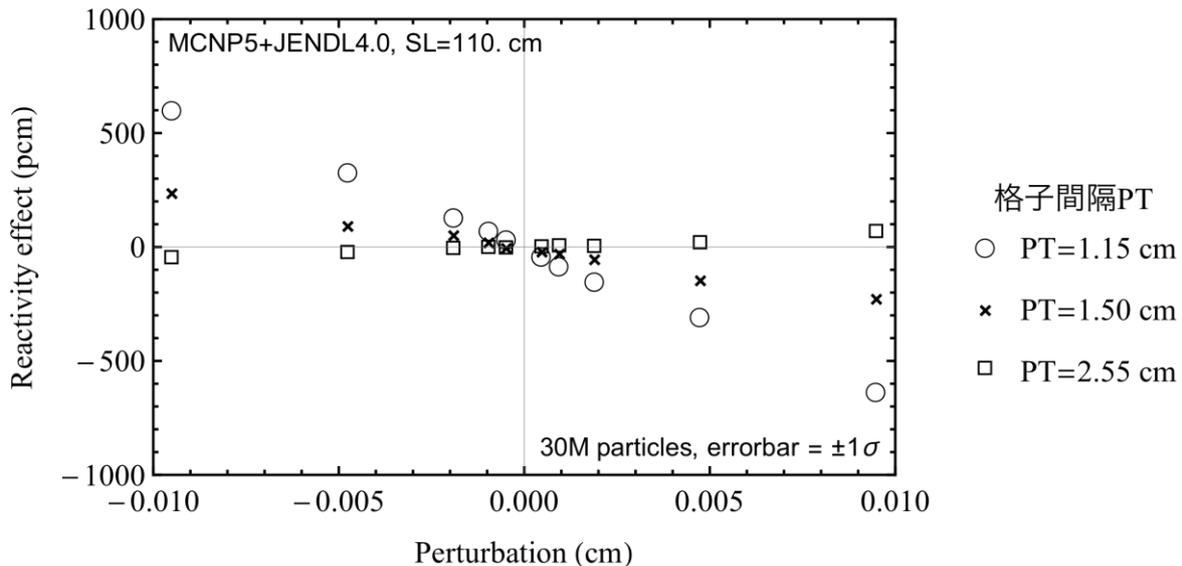


図 7.2-17 燃料被覆直径の感度解析結果

3) 棒状燃料位置

棒状燃料の位置の不確かさは、STACY 更新炉のような軽水減速非均質型の臨界実験装置において重要なパラメータであり、可能な限り低減し、またその影響をできる限り正確に評価する必要がある。この影響を評価するに当たっては、従来国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト (ICSBEP) では、体系の格子間隔を一様に変化させる方式 (以下「ICSBEP 方式」という。) が用いられてきた^{4,5)}。ICSBEP 方式の解析モデルを図 7.2-18 に示す。調査②の基本炉心の臨界解析で確認されたように、狭小な格子では格子間隔の感度が大きく、わずかな違いで臨界量が大きく変動する。このため、ICSBEP 方式で棒状燃料の位置の不確かさの影響を評価すると、狭小な格子の炉心で反応度効果の評価結果が大幅に増大する⁴⁾。ただし、実際の格子板では格子間隔が一様に変化することはなく、1 本の棒状燃料の位置が変動し、隣接する燃料との間隔が狭まった場合では、反対側の燃料との間隔は増大する。両者の効果は互いに打ち消し合うため、ICSBEP 方式では棒状燃料位置の不確かさを過大評価する可能性が高い。

このため、本解析では、ICSBEP 方式の解析の他、MCNP5 に実装されている確率論的幾何形状モデルを用いた解析を実施した。確率論的幾何形状モデルとは、高温ガス炉で用いられる被覆粒子燃料のようにランダム性を持つ形状をモデル化するための機能を指す。MCNP5 で実装されている確率論的幾何形状モデル化機能の概要を図 7.2-19 に示す。同図に示すように、同機能を使用することにより、燃料格子の座標にランダムな変動を与えることができ、格子板の孔の中で棒状燃料の位置がランダムに変化する効果を評価することができると考えられる。本解析では、確率論的幾何形状による評価方式 (以下「確率論的方式」という) の適用性を確認した上で、棒状燃料の位置の不確かさが実験精度に及ぼす影響を評価し、ICSBEP 方式と比較した。確率論的方式の適用性の確認については、Appendix 7.2.A2 に示す。

以上の両方式で評価した棒状燃料の位置の不確かさの評価結果を、ICSBEP 方式について図 7.2-20 に、確率論的方式の評価結果を図 7.2-21 に示す。ICSBEP 方式は確率論的方式より反応度効果を大幅に過大評価することがわかる。これは、前述のとおり、実際の燃料格子において棒状燃料の位置の変動が格子間隔に及ぼす影響が、移動する棒状燃料の左右（または前後）で互いに打ち消し合うからであると考えられる。

以上の解析結果を最小二乗法でフィッティングして得た単位変化あたりの反応度係数に対し、調査①で得た設計精度を乗ずることで反応度に及ぼす影響を評価した。棒状燃料位置の不確かさの感度解析の結果を表 7.2-6 及び表 7.2-7 に示す。設計精度は偶然誤差と系統誤差に分けて評価した。なお、ICSBEP 方式では炉心のすべての格子間隔を棒状燃料 1 本あたり 2 箇所（X 方向と Y 方向）変更しているため、誤差を評価するに当たっては不確かさの値を棒状燃料の本数の 2 倍の平方根で除している。

表 7.2-6 棒状燃料位置の不確かさの感度解析結果（ICSBEP 方式）

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (mm)	系統誤差 (mm)	反応度（偶然）* (pcm***)	反応度（系統）** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	0.1239/ $\sqrt{2} \times 683$	0.0308/ $\sqrt{2} \times 683$	67.0	17.0	69.0
1.5	0.1239/ $\sqrt{2} \times 258$	0.0308/ $\sqrt{2} \times 258$	40.0	9.9	41.0
2.55	0.1239/ $\sqrt{2} \times 217$	0.0308/ $\sqrt{2} \times 217$	-18.0	4.5	19.0

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm= $10^{-5} \Delta k$

表 7.2-7 棒状燃料位置の不確かさの感度解析結果（確率論的方式）

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (mm)	系統誤差 (mm)	反応度（偶然）* (pcm***)	反応度（系統）** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	0.1239	0.0308	3.0	0.7	3.1
1.5	0.1239	0.0308	5.3	1.3	5.5
2.55	0.1239	0.0308	-1.6	-0.4	1.7

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm= $10^{-5} \Delta k$

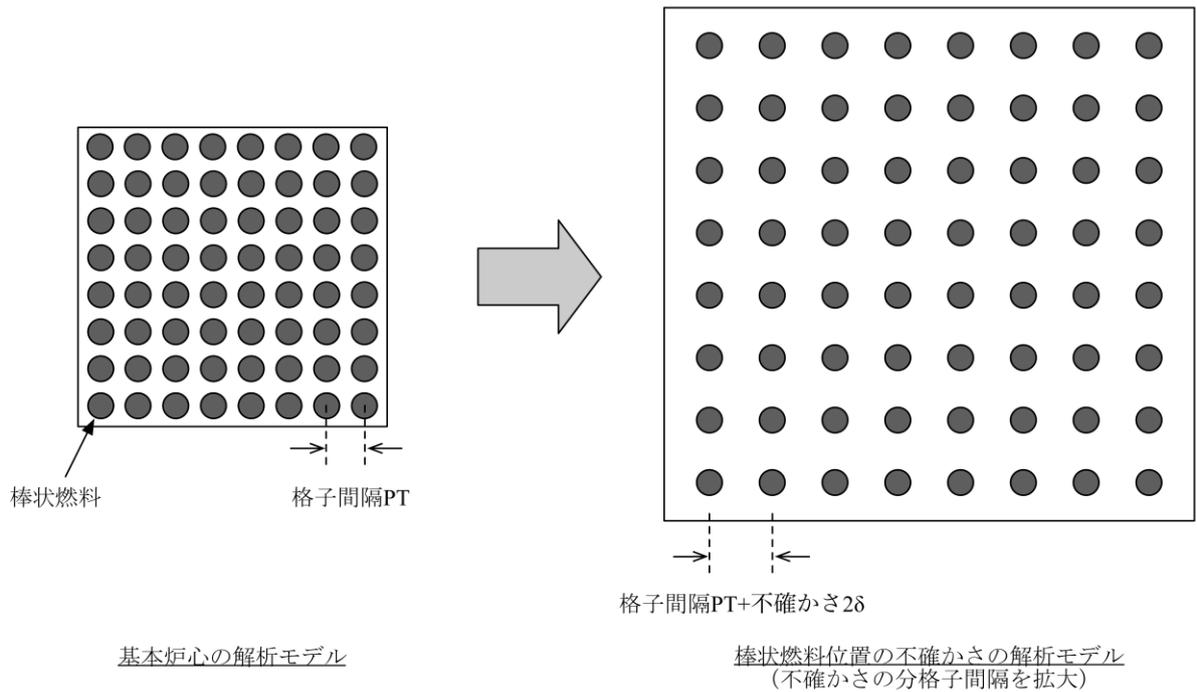


図 7.2-18 ICSBEP の方式による棒状燃料位置の不確かさの解析

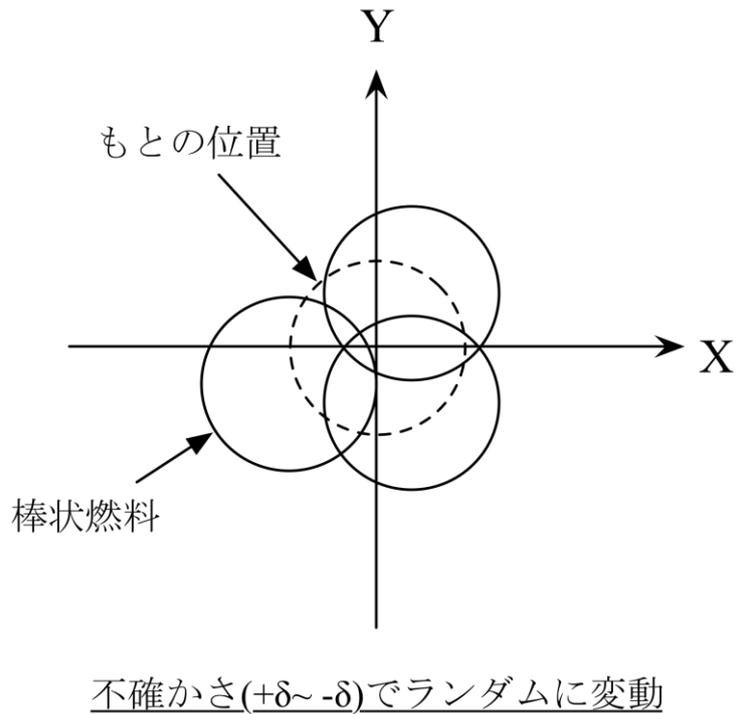


図 7.2-19 確率論的手法による棒状燃料位置の不確かさの解析 (単位セル)

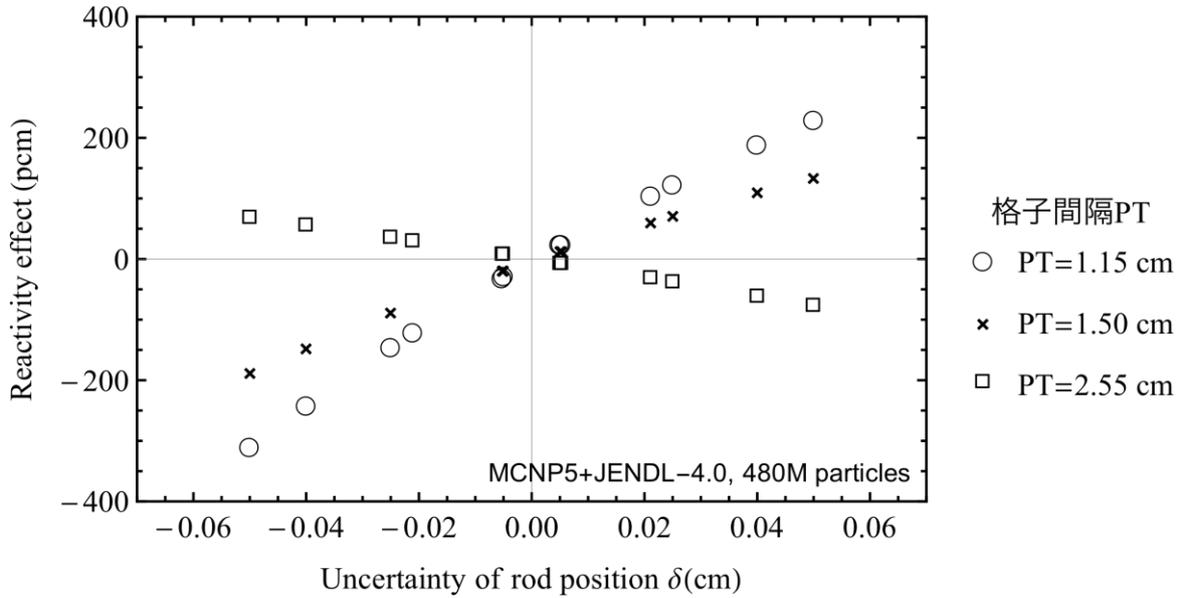


図 7.2-20 ICSBEP の方式による棒状燃料位置の不確かさの解析結果

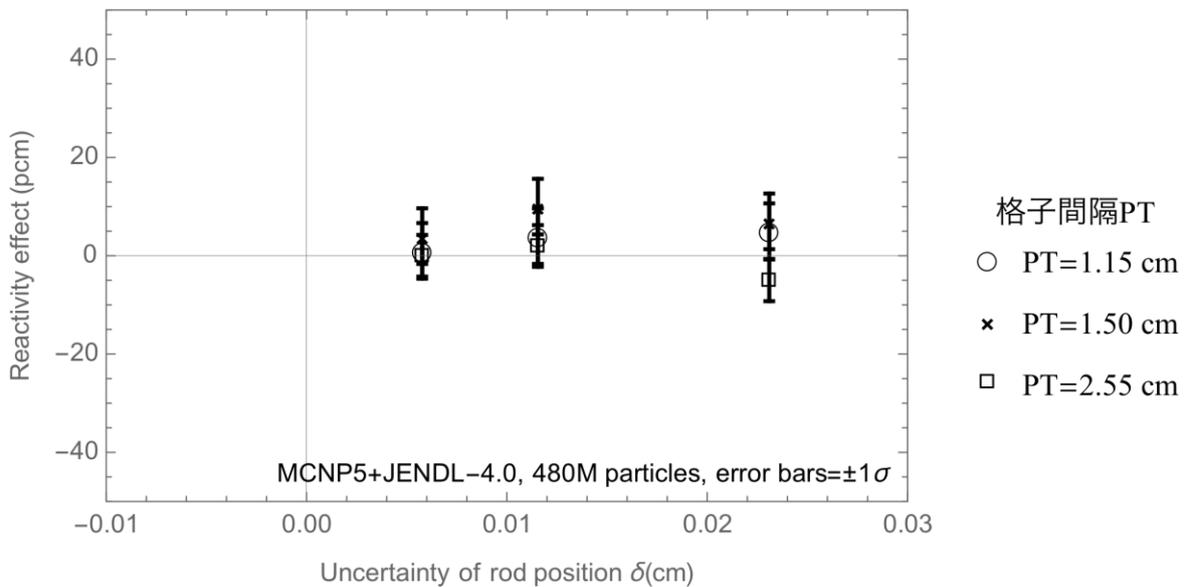


図 7.2-21 確率論的手法による棒状燃料位置の不確かさの解析結果

4) 燃料ペレットの密度

燃料ペレットの密度は、MCNP5 の摂動計算機能（密度変化）を使用して解析した。解析結果を図 7.2-22 に示す。反応度効果は密度変化に比例して変化する。また、燃料ペレット直径の変化と同様に、燃料の量の変化の感度が大きい減速過剰な格子間隔 2.55 cm の炉心で反応度効果が大きく、反対に減速不足な格子間隔 1.15 cm の炉心では小さくなる。燃料ペレット密度の感度解析の結果を表 7.2-8 に示す。本解析ではすべての棒状燃料の燃

料ペレット密度を一様に変化させているため、偶然誤差の評価に当たっては、不確かさの値を棒状燃料の本数の平方根で除している。

表 7.2-8 燃料ペレット密度の感度解析結果

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (g/cm ³)	系統誤差 (g/cm ³)	反応度 (偶然) * (pcm ^{***})	反応度 (系統) ** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	0.01219/√683	0.01519	0.2	7.3	7.3
1.5	0.01219/√258	0.01519	0.8	16.0	16.0
2.55	0.01219/√217	0.01519	1.8	33.0	33.0

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm=10⁻⁵Δk

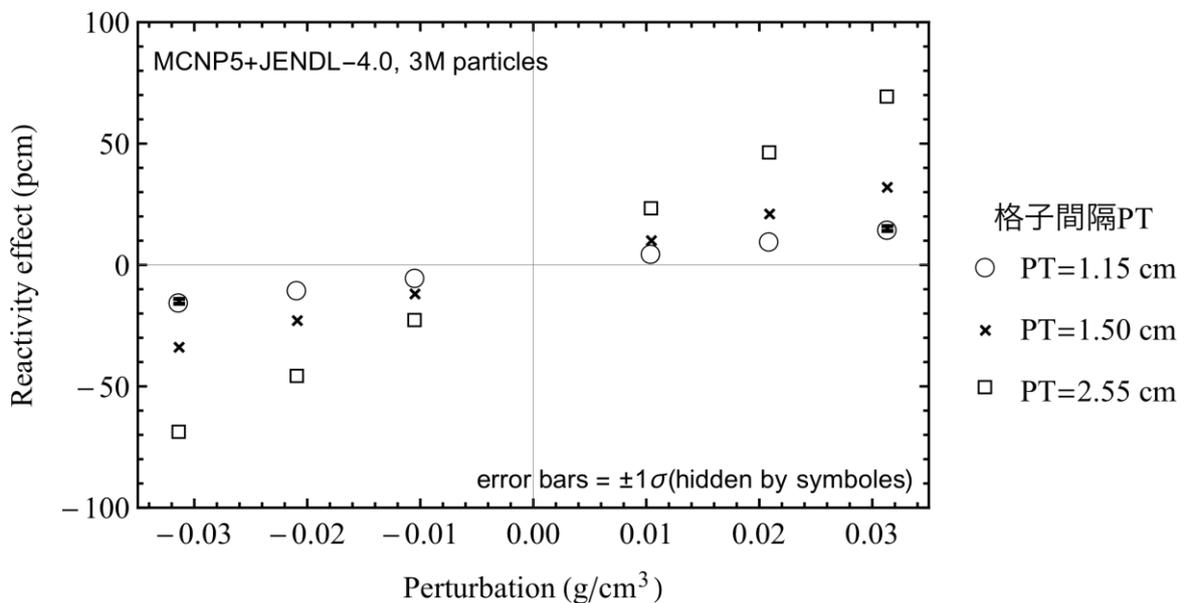


図 7.2-22 燃料ペレット密度の感度解析結果

5) 燃料被覆の密度

前項と同様、燃料被覆の密度変化を MCNP5 の摂動計算機能（密度変化）を使用して解析した。解析結果を図 7.2-23 に示す。反応度変化は密度変化にほぼ比例していることがわかる。また、燃料被覆であるジルカロイ 4 の密度の増大は、減速不足な狭小格子（格子間隔 1.15 cm）の炉心及び最適減速な炉心（格子間隔 1.5 cm）において正の効果を持つ。これは、燃料被覆との衝突により中性子がエネルギーを奪われるため、減速能がわずかに増大することによる効果であると考えられる。一方、減速過剰な炉心（格子間隔 2.55 cm）では被覆が減速能に与える効果は無視できる大きさであり、被覆に含まれる不純物による中性子吸収効果による小さな負の効果を持つ。

燃料被覆の密度の感度解析結果を表 7.2-9 に示す。燃料被覆はすべて同一ロットのジルカロイ 4 から作られているため、燃料被覆の密度の偶然誤差は無視できるものとしている。

表 7.2-9 燃料被覆密度の感度解析結果

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (g/cm ³)	系統誤差 (g/cm ³)	反応度 (偶然) * (pcm ^{***})	反応度 (系統) ** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	-	0.1	-	6.7	6.7
1.5	-	0.1	-	5.7	5.7
2.55	-	0.1	-	-2.8	2.8

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm=10⁻⁵Δk

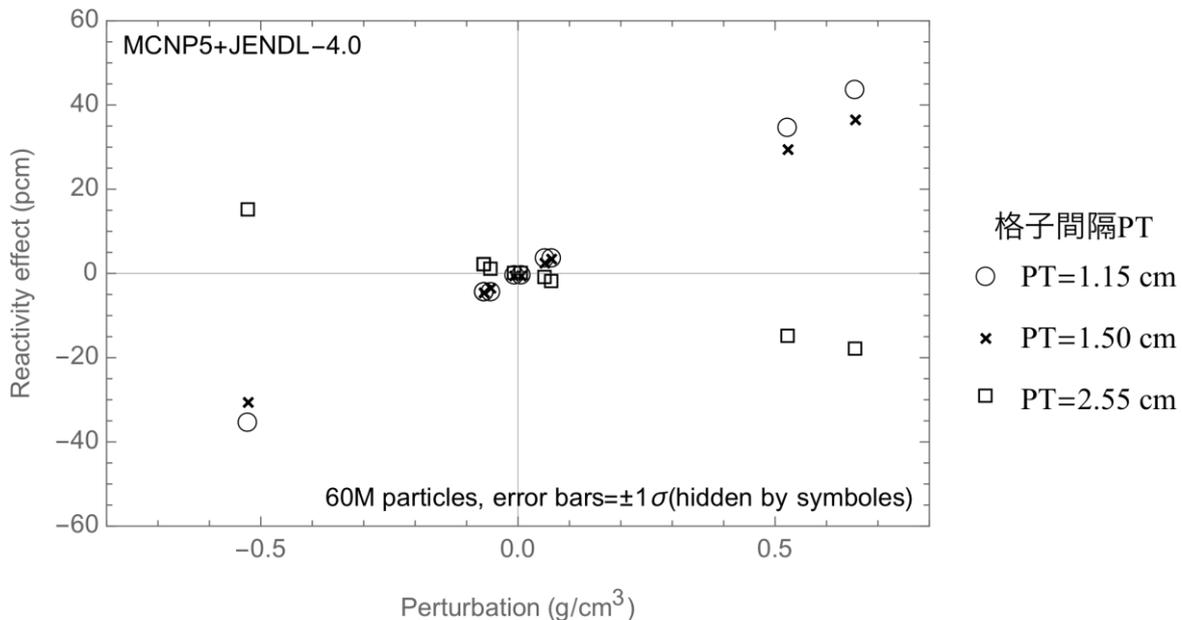


図 7.2-23 燃料被覆密度の感度解析結果

6) 燃料ペレットの不純物

i) 検出された不純物

燃料ペレットに含まれている不純物について、化学分析で検出された核種（クロム、鉄、ニッケル）のうちクロム及びニッケルについて感度解析によりその反応度効果の評価した。なお、ペレットに含まれる鉄は燃料被覆材であるジルコニウム 4 に含まれている量の 1%未満であるため、無視した。解析には MCNP6⁶⁾の感度解析機能を使用し、核種毎の全断面積の感度を計算した。不純物の不確かさとしては、一般的な化学分析の誤差として系統誤差 10%を仮定し、すべてのペレットが同一ロットのウラン粉末からできていることから、偶然誤差は無視できるものとした。

検出された燃料ペレットの不純物の反応度効果を表 7.2-10 に示す。

ii) 検出限界以下の不純物

燃料ペレットに含まれている不純物について、化学分析で検出されなかった核種のうち中性子吸収効果が大きいホウ素、カドミウム、モリブデン、窒素、塩素について感度解析を実施した。これらについては検出限界値の 100%/2√3 の系統誤差があると仮定し、

検出限界値の上限まで不純物を含む物質と不純物を含まない物質の置換効果を計算した。計算には、MCNP5 の物質置換摂動計算機能を使用した。前項と同様に、偶然誤差は無視できるものとした。

検出限界を下回った燃料ペレットの不純物の反応度効果を表 7.2-11 に示す。

表 7.2-10 燃料ペレット不純物（検出されたもの）の感度解析結果

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (%)	系統誤差 (%)	反応度（偶然）* (pcm***)	反応度（系統）** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	-	10	-	-0.6	0.6
1.5	-	10	-	-0.8	0.8
2.55	-	10	-	-0.7	0.7

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm=10⁻⁵Δk

表 7.2-11 燃料ペレット不純物（検出されなかったもの）の感度解析結果

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (%)	系統誤差 (%)	反応度（偶然）* (pcm***)	反応度（系統）** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	-	100/2√3	-	-2.6	2.6
1.5	-	100/2√3	-	-3.2	3.2
2.55	-	100/2√3	-	-2.6	2.6

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm=10⁻⁵Δk

7) 燃料被覆の不純物

i) 検出された不純物

燃料被覆に含まれている不純物について、化学分析で検出された核種（アルミニウム、水素、ハフニウム、窒素）のうちアルミニウム、ハフニウム及び窒素について感度解析によりその反応度効果を評価した。ここで、水素は減速材である軽水に含まれている量に比べて無視できるものとした。解析には MCNP6 の感度解析機能を使用し、核種毎の全断面積の感度を計算した。不純物の不確かさとしては、一般的な化学分析の誤差として系統誤差 10%を仮定し、すべての棒状燃料の被覆材が同一ロットのジルコニウム 4 からできていることから、偶然誤差は無視できるものとした。

検出された燃料被覆の不純物の反応度効果を表 7.2-12 に示す。

ii) 検出限界以下の不純物

燃料被覆に含まれている不純物について、化学分析で検出されなかった核種のうちホウ素、カドミウム、モリブデン、ウランについて感度解析を実施した。これらについては検出限界値の 100%/2√3 の系統誤差があると仮定し、検出限界値の上限まで不純物を含む物質と不純物を含まない物質の置換効果を計算した。計算には、MCNP5 の物質置換摂動計算機能を使用した。前項と同様に、偶然誤差は無視できるものとした。

検出限界を下回った燃料被覆の不純物の反応度効果を表 7.2-13 に示す。

表 7.2-12 燃料被覆不純物（検出されたもの）の感度解析結果

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (%)	系統誤差 (%)	反応度（偶然）* (pcm***)	反応度（系統）** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	-	10	-	-3.0	3.0
1.5	-	10	-	-2.0	2.0
2.55	-	10	-	-0.8	0.8

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm=10⁻⁵Δk

表 7.2-13 燃料被覆不純物（検出されなかったもの）の感度解析結果

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (%)	系統誤差 (%)	反応度（偶然）* (pcm***)	反応度（系統）** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	-	100/2√3	-	-2.3	2.3
1.5	-	100/2√3	-	-2.0	2.0
2.55	-	100/2√3	-	-1.7	1.7

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm=10⁻⁵Δk

8) ²³⁵U 濃縮度

²³⁵U 濃縮度の感度解析には MCNP5 の物質置換摂動計算機能を使用し、²³⁵U 濃縮度を変化させた物質を燃料ペレットの物質と置換、その反応度効果を計算した。²³⁵U を増大または減少する際は ²³⁸U の個数を同数変化させ、全体のウランの原子個数を保存した。

²³⁵U 濃縮度の感度解析の結果を図 7.2-24 に示す。図より、²³⁵U 濃縮度が増大する効果はいずれの炉心でも正であり、またその反応度効果は変化に比例することがわかる。反応度効果は減速過剰な炉心（格子間隔 2.55 cm）でもっとも大きくなるが、これは ²³⁵U が熱中性子に対して大きな反応断面積をもつため、熱中性子の多い減速過剰な炉心でその感度が大きくなるためである。

以上の解析結果を最小二乗法でフィッティングして得た単位変化あたりの反応度係数に対し、調査①で想定した ²³⁵U 濃縮度の精度を乗ずることで反応度に及ぼす影響を評価した。評価の結果を表 7.2-14 に示す。

表 7.2-14 ²³⁵U 濃縮度の感度解析結果

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (wt%)	系統誤差 (wt%)	反応度（偶然）* (pcm***)	反応度（系統）** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	-	0.0005	-	1.3	1.3
1.5	-	0.0005	-	1.7	1.7
2.55	-	0.0005	-	2.8	2.8

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm=10⁻⁵Δk

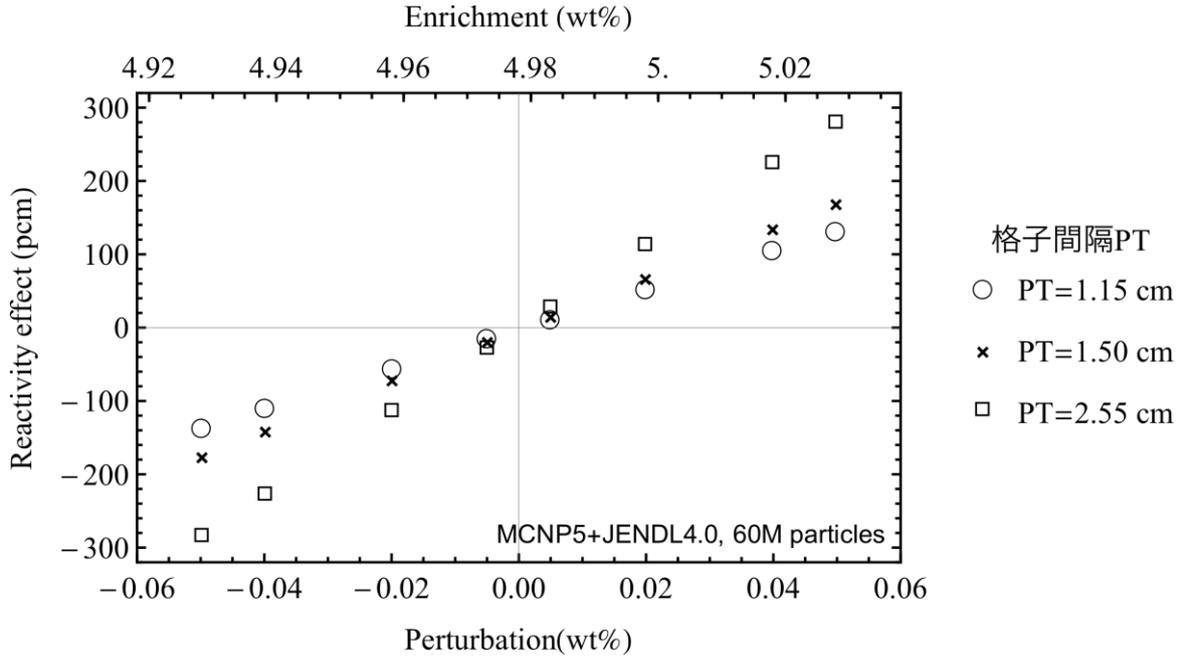


図 7.2-24 ²³⁵U 濃縮度の感度解析結果

9) 炉心水位

炉心の水位の解析モデルを図 7.2-25 に示す。図に示すように、水面上に置換用の物質を設定し、MCNP5 の物質置換摂動計算機能によって水とボイドを置換することによって微少な水位変化の反応度効果を解析した。解析結果を図 7.2-26 に示す。図に示すように、反応度変化は水位の微少な変化に対してほぼ比例している。また、炉心毎の違いは見られない。この結果は修正一群理論⁷⁾から予想される結果（水位変化あたりの反応度効果は炉心高さの 3 乗に反比例する）と整合している。

以上の解析結果を最小二乗法でフィッティングして得た単位変化あたりの反応度係数に対し、調査①で想定した水位測定精度を乗ずることで反応度に及ぼす影響を評価した。評価の結果を表 7.2-15 に示す。

表 7.2-15 炉心水位の感度解析結果

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (mm)	系統誤差 (mm)	反応度 (偶然) * (pcm ^{***})	反応度 (系統) ** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	0.2	-	3.0	-	3.0
1.5	0.2	-	2.9	-	2.9
2.55	0.2	-	3.2	-	3.2

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm=10⁻⁵Δk

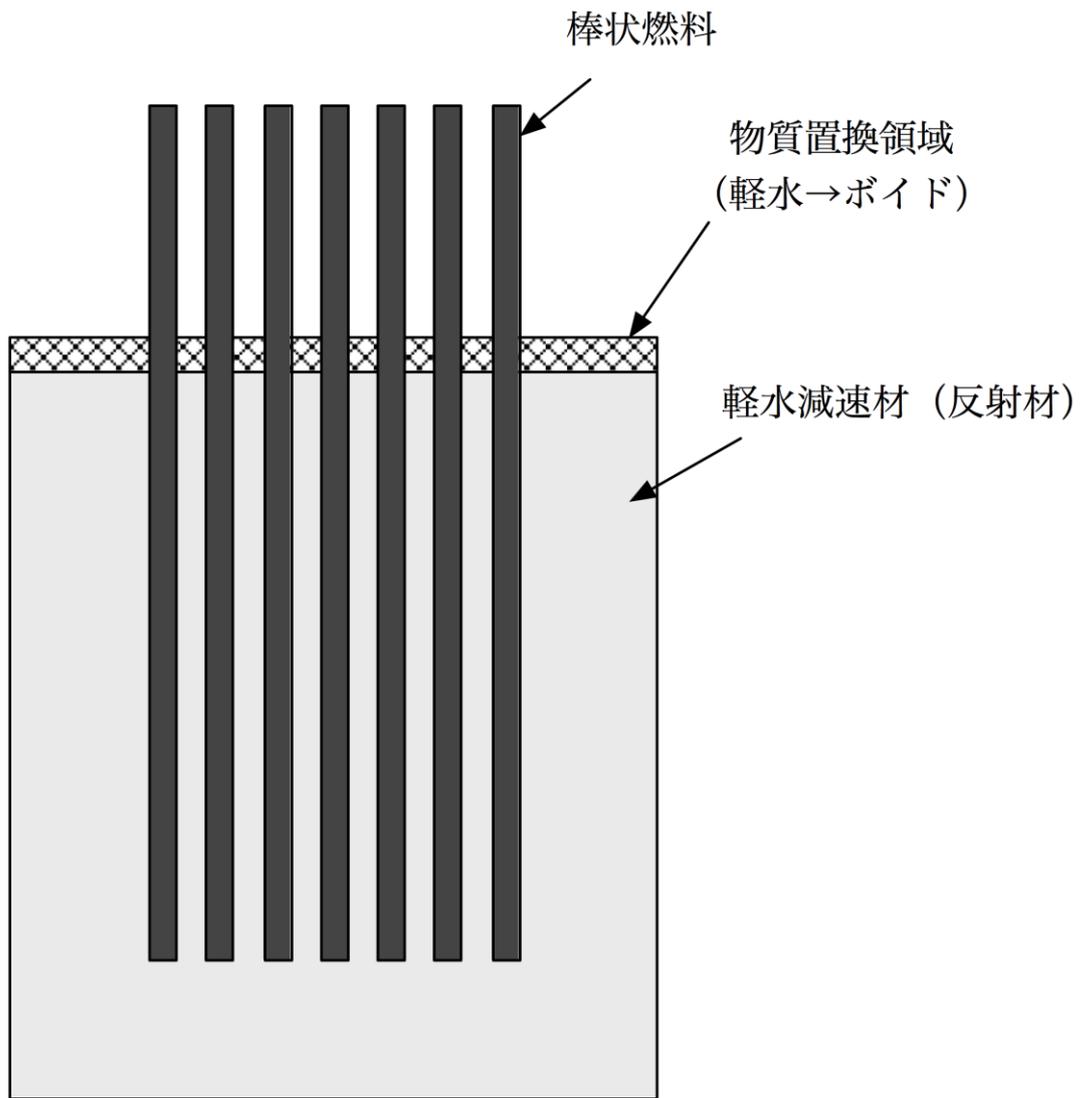


図 7.2-25 体系水位の感度解析モデル

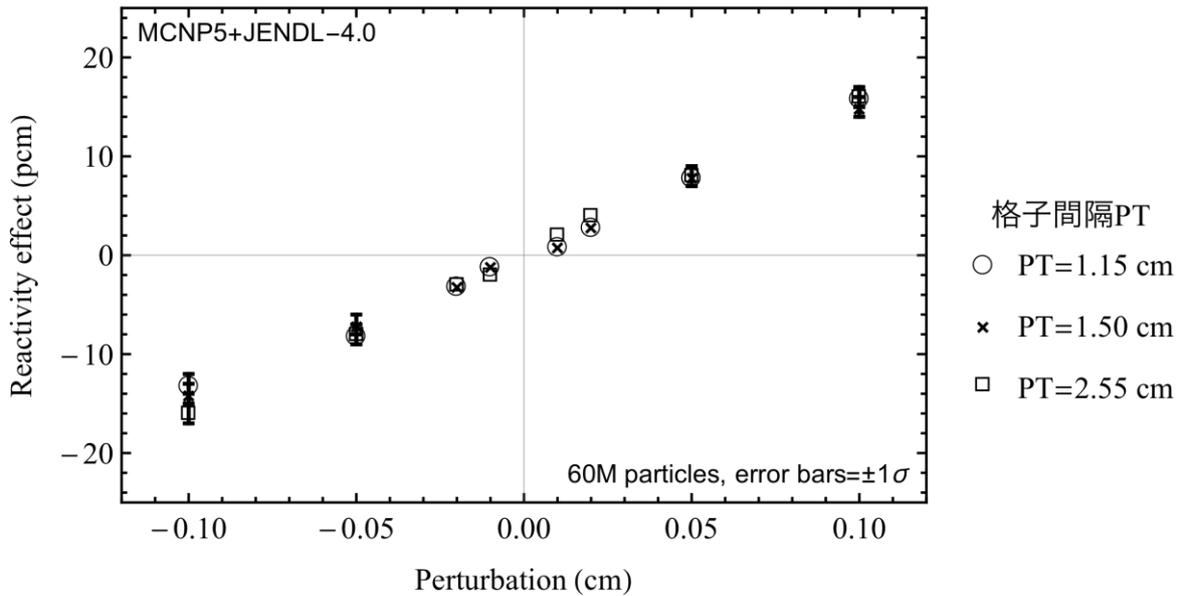


図 7.2-26 体系水位の感度解析結果

10) 体系温度

体系温度の評価として、本解析では温度による水の密度の変化を評価した。温度変化に対する水の密度の変化を図 7.2-27 に示す。図に示すように、温度上昇に対して水の密度は減少する。MCNP5 の物質置換摂動計算機能を使用し、温度変化の反応度効果を解析した。解析の結果を図 7.2-28 に示す。格子間隔 1.15 cm 及び 1.5 cm の炉心において温度上昇（密度減少）の効果は負であり、減速能の減少が支配的であることがわかる。また、減速過剰な炉心である格子間隔 2.55 cm の炉心では温度上昇の効果は正であり、熱中性子の吸収が支配的であることがわかる。

解析結果を最小二乗法でフィッティングして得た単位変化あたりの反応度係数に対し、調査①で想定した温度の不確かさを乗ずることで反応度に及ぼす影響を評価した。評価の結果を表 7.2-16 に示す。

表 7.2-16 体系温度の感度解析結果

格子間隔 (cm)	偶然誤差 (°C)	系統誤差 (°C)	反応度 (偶然) * (pcm***)	反応度 (系統) ** (pcm)	合計 (pcm)
1.15	1	-	-7.9	-	7.9
1.5	1	-	-7.6	-	7.6
2.55	1	-	2.0	-	2.0

*偶然誤差に由来する効果、**系統誤差に由来する効果、*** pcm=10⁻⁵Δk

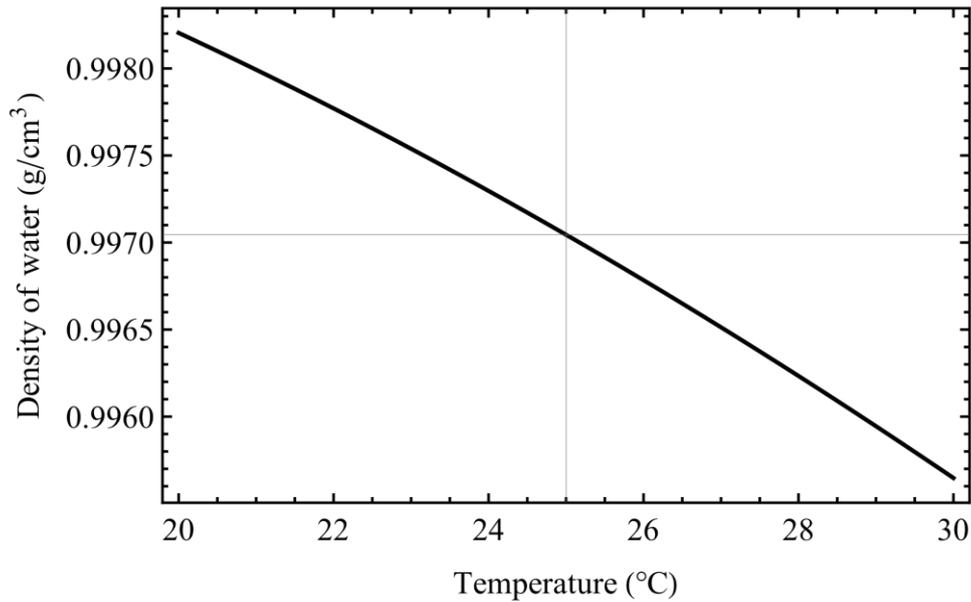


図 7.2-27 温度変化に対する水の密度の変化⁸⁾

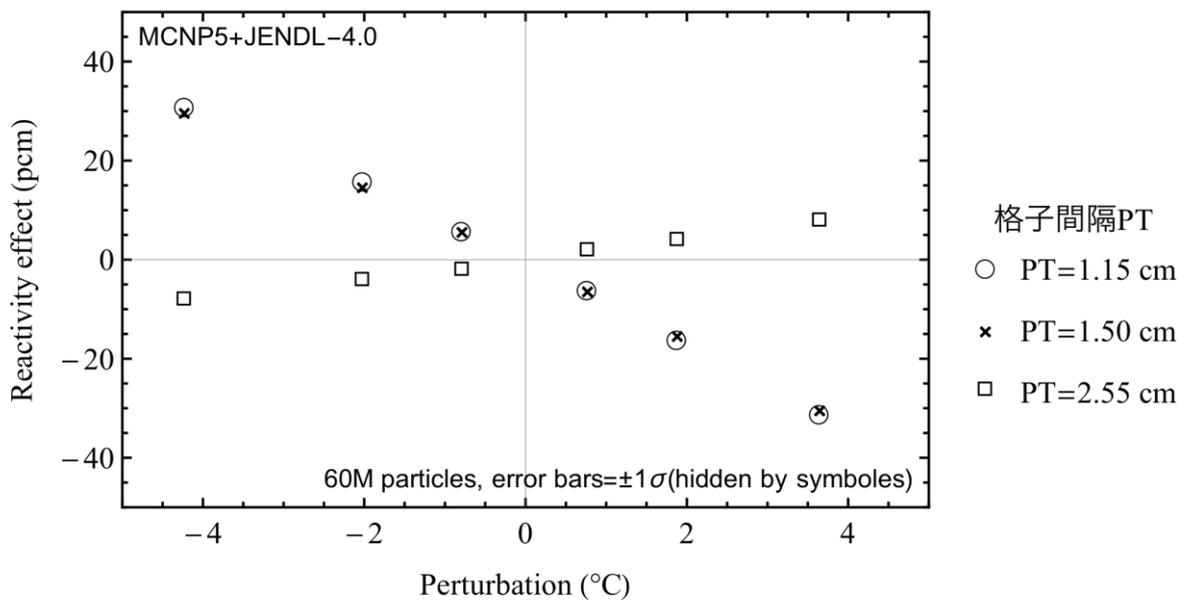


図 7.2-28 体系温度の感度解析結果（水密度の影響）

7.2.3 まとめ

STACY 更新炉でデブリ模擬臨界実験を行うに先立ち、当該実験が国際的にみて優秀な精度を確保できるよう、デブリ模擬材料を含まない基本的な炉心（以下「基本炉心」と言う。）の実験精度を検討し、炉心を構成する機器の製作精度に由来する実験結果の不確かさを十分に把握しておかなければならない。

本事業では、臨界解析によって STACY 更新炉の典型的な炉心を検討し、デブリ模擬臨界実験を行う基本炉心を 3 種類選定した。また、それらの炉心の実験精度を評価するため、

現行の STACY の製作データを調査し、STACY 更新炉の機器の製作精度の不確かさを推定した。さらに、それらの結果を用いて、STACY 更新炉の実験精度を解析により評価した。

評価した STACY 更新炉の基本炉心の感度解析の結果を表 7.2-17 ~ 7.2-19 にまとめる。これらの結果より、次のことが言える。

- ・評価した STACY 更新炉の実験精度は格子間隔 1.15 cm の狭小格子の炉心で $40 \times 10^{-5} \Delta k$ 程度（棒状燃料の位置の不確かさの計算に ICSBEP 方式を用いた場合は $80 \times 10^{-5} \Delta k$ 程度）であり、従来国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト（ICSBEP）に提出されている狭小炉心実験（格子間隔 1.26 cm）のデータ $144 \times 10^{-5} \Delta k$ ⁴⁾を上回る精度が得られる見通しが得られた。
- ・棒状燃料位置の不確かさを評価する手法としてモンテカルロコード MCNP5 の確率論的幾何形状モデルを適用し、当該評価手法を使用することで不確かさを大幅に低減できる見通しが得られた。

表 7.2-17 基本炉心の感度解析結果のまとめ (1/3) (格子間隔 1.15 cm)

項目	偶然誤差	系統誤差	反応度 (偶然) (pcm)	反応度 (系 統) (pcm)	合計 (pcm)
燃料ペレット 直径 (mm)	0.002/ $\sqrt{683}$	0.005	negligible*	4	4
燃料被覆直径 (mm)	0.005/ $\sqrt{683}$	0.005	-1	-33	33
棒状燃料位置 の不確かさ (mm)	0.1239**	0.0308**	3 / 67***	1 / 17***	3 / 69***
燃料ペレット 密度 (g/cm ³)	0.01219/ $\sqrt{683}$	0.01519	negligible*	7	7
燃料被覆密度 (g/cm ³)	-	0.1	-	7	7
検出された燃 料ペレット不 純物 (%)	-	10	-	1	1
検出されなか った燃料ペレ ット不純物 (%)	-	100/2 $\sqrt{3}$	-	-3	3
検出された燃 料被覆不純物 (%)	-	10	-	-3	3
検出されなか った燃料被覆 不純物 (%)	-	100/2 $\sqrt{3}$	-	-2	2
²³⁵ U 濃縮度 (wt%)	-	0.0005	-	1	1
炉心水位 (mm)	0.2	-	3	-	3
体系温度 (°C)	1	-	-8	-	8
合計**			9 / 68	35 / 39	36 / 78

*反応度が 1 pcm= $1.0 \times 10^{-5} \Delta k$ を下回った場合、無視できる (negligible) ものとした

** ICSBEP 方式の計算に使用する場合は臨界棒状燃料本数の 2 倍の平方根($\sqrt{2 \times 683}$)で除する

***棒状燃料位置の不確かさの解析に確率論的方式を用いた場合 / ICSBEP 方式を用いた場合

表 7.2-18 基本炉心の感度解析結果のまとめ (2/3) (格子間隔 1.5 cm)

項目	偶然誤差	系統誤差	反応度 (偶然) (pcm)	反応度 (系 統) (pcm)	合計 (pcm)
燃料ペレット 直径 (mm)	0.002/ $\sqrt{258}$	0.005	negligible*	12	12
燃料被覆直径 (mm)	0.005/ $\sqrt{258}$	0.005	-1	-12	12
棒状燃料位置 の不確かさ (mm)	0.1239**	0.0308**	5 / 40***	1 / 10***	5 / 41***
燃料ペレット 密度 (g/cm ³)	0.01219/ $\sqrt{258}$	0.01519	1	16	16
燃料被覆密度 (g/cm ³)	-	0.1	-	6	6
検出された燃 料ペレット不 純物 (%)	-	10	-	-1	1
検出されなか った燃料ペレ ット不純物 (%)	-	100/2 $\sqrt{3}$	-	-3	3
検出された燃 料被覆不純物 (%)	-	10	-	-2	2
検出されなか った燃料被覆 不純物 (%)	-	100/2 $\sqrt{3}$	-	-2	2
²³⁵ U 濃縮度 (wt%)	-	0.0005	-	2	2
炉心水位 (mm)	0.2	-	3	-	3
体系温度 (°C)	1	-	-8	-	8
合計			10 / 41**	25 / 26**	27 / 49**

*反応度が 1 pcm= $1.0 \times 10^{-5} \Delta k$ を下回った場合、無視できる (negligible) ものとした

** ICSBEP 方式の計算に使用する場合は臨界棒状燃料本数の 2 倍の平方根($\sqrt{2 \times 258}$)で除する

***棒状燃料位置の不確かさの解析に確率論的方式を用いた場合 / ICSBEP 方式を用いた場合

表 7.2-19 基本炉心の感度解析結果のまとめ (3/3) (格子間隔 2.55 cm)

項目	偶然誤差	系統誤差	反応度(偶然) (pcm)	反応度(系 統) (pcm)	合計 (pcm)
燃料ペレット 直径 (mm)	0.002/ $\sqrt{217}$	0.005	1	32	32
燃料被覆直径 (mm)	0.005/ $\sqrt{217}$	0.005	negligible*	3	3
棒状燃料位置 の不確かさ (mm)	0.1239**	0.0308**	-2 / -18****	negligible* / -5****	2 / 19****
燃料ペレット 密度 (g/cm ³)	0.01219/ $\sqrt{217}$	0.01519	2	33	33
燃料被覆密度 (g/cm ³)	-	0.1	-	-3	3
検出された燃 料ペレット不 純物 (%)	-	10	-	-1	1
検出されなか った燃料ペレ ット不純物 (%)	-	100/2 $\sqrt{3}$	-	-3	3
検出された燃 料被覆不純物 (%)	-	10	-	-1	1
検出されなか った燃料被覆 不純物 (%)	-	100/2 $\sqrt{3}$	-	-2	2
²³⁵ U 濃縮度 (wt%)	-	0.0005	-	3	3
炉心水位 (mm)	0.2	-	3	-	3
体系温度 (°C)	1	-	2	-	2
合計			5 / 18**	46 / 47**	47 / 50**

*反応度が 1 pcm=1.0×10⁻⁵ Δk を下回った場合、無視できる (negligible) ものとした

** ICSBEP 方式の計算に使用する場合は臨界棒状燃料本数の 2 倍の平方根($\sqrt{2 \times 217}$)で除する

***棒状燃料位置の不確かさの解析に確率論的方式を用いた場合 / ICSBEP 方式を用いた場合

7.2.4 今後の課題

本解析を通じて、デブリ模擬臨界実験のための基本炉心を選定し、STACY 更新炉の機器及び燃料の製作精度が、それらの炉心の実験精度に及ぼす影響を定量的に把握することができた。今後は臨界マップの整備を進め、想定される燃料デブリの条件のうちで特に臨界条件に近く臨界マップの精度を実験的に検証する必要がある条件を特定し、デブリ模擬炉心を設計する計画である。

また、本解析では STACY 更新炉の機器の製作精度として現行 STACY のそれを仮定している。したがって、本解析の評価と同等の実験精度を得るためには、STACY 更新炉の機器が現行 STACY と同等以上の製作精度を得られるよう、確実に品質管理を行う必要がある。

特に、STACY 更新炉で使用する棒状燃料は、現行 STACY の棒状燃料 400 本と新規製作の棒状燃料 500 本とを併用するため、入手可能な UO_2 粉末の ^{235}U 濃縮度やジルカロイ被覆管の径等、同等の燃料を揃えることができない可能性もある。この場合、製作本数を変更して同一ロットの棒状燃料を 900 本製作する等、実験精度を確保するための検討が必要である。

Appendix 7.2.A1 解析に使用した原子個数密度

臨界実験炉心の基本設計に使用した物質の原子個数密度を、燃料ペレットについて表 7.2-A1 に、燃料被覆について表 7.2-A2 に、軽水減速材について表 7.2-A3 に示す。

表 7.2-A1 燃料ペレット（二酸化ウラン）の原子個数密度

核種*	個数密度 ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)
U-234	1.07932×10^{-5}
U-235	1.17326×10^{-3}
U-236	8.70677×10^{-6}
U-238	2.20930×10^{-2}
O-16	4.66414×10^{-2}
Cr	1.32975×10^{-6}
Fe	3.60176×10^{-6}
Ni	6.42556×10^{-7}

*質量数のない核種は天然存在比であることを示す。

表 7.2-A2 燃料被覆（ジルカロイ 4）の原子個数密度

核種	個数密度 ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)
C	4.28254×10^{-5}
Cr	8.50946×10^{-5}
Fe	1.49971×10^{-4}
O-16	3.18523×10^{-4}
Si	1.38413×10^{-5}
Sn	4.35287×10^{-4}
Zr	4.25332×10^{-2}
Al	3.60183×10^{-6}
H-1	1.64609×10^{-5}
Hf	1.19961×10^{-6}
N	7.22028×10^{-6}

*質量数のない核種は天然存在比であることを示す。

表 7.2-A3 軽水減速材の原子個数密度

核種	個数密度 ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)
H-1	6.66758×10^{-2}
O-16	3.33379×10^{-2}

Appendix 7.2.A2 確率論的手法による棒状燃料位置の不確かさの感度解析手法の検討

(1) 確率論的手法と実際の炉心の違い

本解析で棒状燃料の位置の不確かさの感度解析に使用したモンテカルロコード MCNP5 の確率論的幾何形状モデルは、本来は高温ガス炉燃料等のランダム性を持つ燃料をモデル化するための機能であり、本解析に適用するに当たっては妥当性の検証が必要である。

確率論的幾何形状モデルと実際の STACY 更新炉の棒状燃料格子との主要な違いは、確率論的幾何形状モデルでは当該モデルに中性子が進入するたびに座標がランダムに変更されるためいわば格子が振動しているかのようにモデル化されるのに対し、実際の STACY 更新炉では棒状燃料の配置はランダムになるものの棒状燃料は運転中に振動しているわけではないという点にある。いわば、両者の違いは「動的なモデル」と「静的なモデル」の違いであると言える。ただし、確率論的幾何形状モデルの本来の目的である高温ガス炉の被覆燃料等においても同様の問題は存在する。

(2) 解析による適用性の確認

動的な確率論的手法を使用して静的な棒状燃料格子を評価できることを確認するため、実際の炉心を想定し、棒状燃料の位置をランダムに変更した計算モデルを 100 ケース作成した。確率論的手法に対し、当該 100 ケースは実際に棒状燃料の位置を変更した炉心を直接モデル化しているため、以下決定論的な手法という。決定論的なモデルを作成するに当たっては、一様分布の疑似乱数を用いて格子の中の棒状燃料の位置を X、Y 方向の自由度それぞれ 9 点、合計 81 点からランダムに決定した。解析対象の炉心は格子間隔 1.15 cm の基本炉心とし、棒状燃料の位置の不確かさは ± 1 mm とした。

(3) 適用性確認の結果

適用性確認の結果を図 7.2-A1 に示す。また、決定論的手法による解析結果をヒストグラムにしたものを図 7.2-A2 に示す。決定論的手法の計算結果は平均 1.00057 を中心に標準偏差 0.00033 で正規分布し、その平均値は確率論的手法の解析結果 $k_{\text{eff}}=1.00060 \pm 0.00010$ とよく一致した。

このように、棒状燃料の位置を確率論的に評価する解析手法と決定論的に評価する手法を比較した結果、両者の結果はよく一致し、確率論的手法の棒状燃料の位置の不確かさの感度解析への適用性を確認することができた。

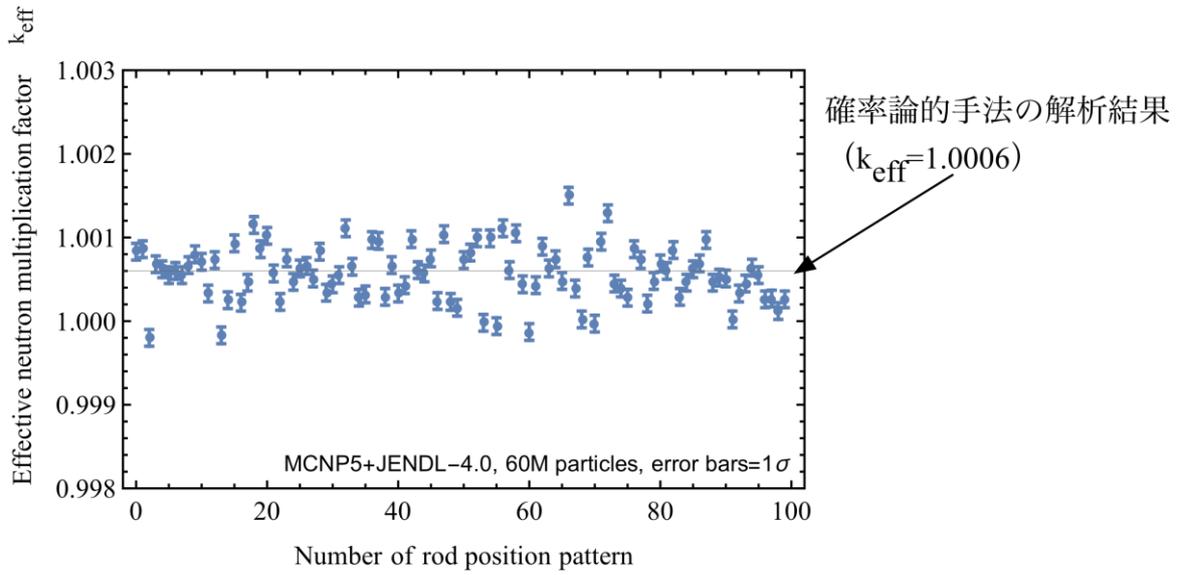


図 7.2-A1 確率論的手法の適用性確認結果(1)

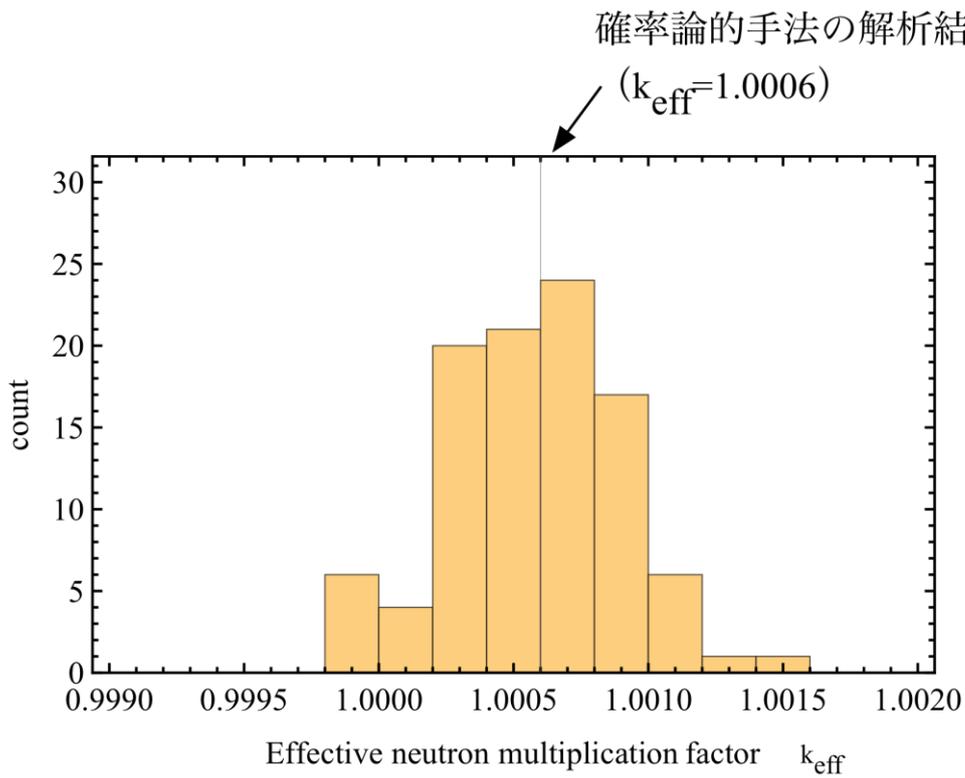


図 7.2-A2 確率論的手法の適用性確認結果(2)

7.3 可動装荷物駆動装置の基本設計

7.3.1 目的及び概要

(1) 目的

STACY 更新炉には、燃料デブリ模擬体を使用した臨界実験を実施するため、運転中の炉心に実験サンプルを挿入するための装置（以下、「可動装荷物駆動装置」という。）を備える計画である。本検討では、可動装荷物駆動装置について、実験目的を達成するための性能、並びに装置及び実験の安全の確保を考慮した基本設計を行う。

(2) 概要

可動装荷物駆動装置は、STACY 更新炉の運転中に、運転員の操作に従い、炉心タンクの下部から実験サンプルを挿入し、任意の位置に実験サンプルを保持する機能を有するもので、駆動装置、制御装置、サンプル棒、サンプル棒案内管で構成される。概念図を図 7.3.1-1 に示す。

本装置の基本設計として、実験上求められる性能及び安全性を確保するための要求事項をまとめた基本設計仕様に基づき、構成機器の構造の具体化、機器仕様の詳細化を行う。なお、設計に当たっては、取合い機器である炉心タンク及び格子板フレーム構造との整合性、炉室フードの水密化検討結果（7.4 節を参照）との整合性の確保に配慮する。

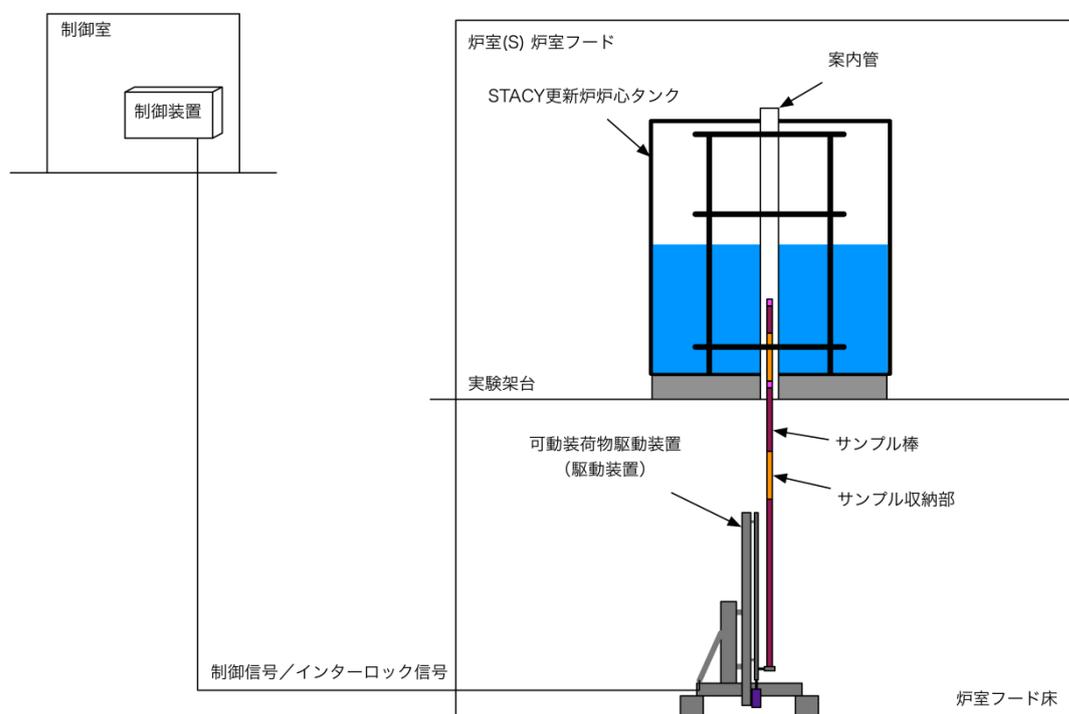


図 7.3.1-1 可動装荷物駆動装置の概念図

7.3.2 成果報告

(1) 基本設計仕様

可動装荷物駆動装置の基本設計仕様として、基本的な要求仕様、構造等の設計条件、構成機器の要求条件を以下に示す。

① 要求仕様

1) 機能条件

可動装荷物駆動装置は、炉心タンクの下部からサンプル棒を挿入し、炉心タンク内の任意の位置（高さ方向）にサンプルを保持する機能を有する。制御室の監視操作盤のスイッチ操作による遠隔手動操作とし、位置表示、状態表示、警報表示による監視ができるものとする。なお、位置表示は、燃料有効長設定器から「燃料有効長下端位置」レベル情報を受取り、そのレベルに対してサンプル棒基準位置の相対位置を表示する。

2) 核的条件

核的条件は、以下のとおりである。

- ・反応度添加量： 0.3 ドル以下
- ・反応度添加率： 3 セント/s 以下

サンプルの反応度値を 0.3 ドル以下に制限し、サンプルの移動による反応度添加率を 3 セント/s 以下に制限する。そのためサンプルの駆動速度は以下のとおりとする。

- ・実験サンプルの駆動速度： 10mm/s 以下

3) 安全性に関する条件

安全性に関する条件は、以下のとおりである。

- ・核的条件を担保するため、サンプルの駆動速度を一定かつ制限速度（10mm/s）以下で制御する機能を有するものとする。
- ・モータ過負荷または速度超過の恐れがある場合は、警報を表示して停止する。
- ・給水による反応度添加とサンプルの移動による反応度添加を同時に行えないよう、インターロック機能を有するものとする。

② 設計条件

1) 適用法規

- ・核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律
- ・核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令
- ・試験研究の用に供する原子炉の設置、運転等に関する規則
- ・試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則
- ・試験研究の用に供する原子炉等の設計及び工事の方法の技術基準に関する規則
- ・試験研究の用に供する原子炉の溶接の技術基準に関する規則
- ・試験研究の用に供する原子炉等の性能に係る技術基準に関する規則
- ・労働安全衛生法

2) 準拠法規又は規格

- ・ 日本工業規格 (JIS)
- ・ 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601 (日本電気協会)
- ・ 圧力容器構造規格
- ・ 発電用原子炉設備に関する技術基準を定める省令
- ・ 水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計審査指針
- ・ 発電用原子炉設備の安全評価に関する審査指針
- ・ 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針
- ・ その他国内規格、他

電気学会電気規格調査基準規格 (J E C)

日本電機工業会規格 (J E M)

3) 構造条件

i) 使用環境

- ・ 設置部屋：炉室フード (炉室(S)内)
- ・ 使用温度：(炉内挿入部) 80 °C 以下、(炉外) 50 °C 以下
- ・ 使用圧力：(サンプル棒案内管) 静水頭 (最大 2 m)
(駆動装置本体及びサンプル棒) 大気圧
- ・ 炉内流体：軽水 (実験目的に応じて最大 5000 ppm 程度のホウ酸または酸化ガドリニウムを添加する。)

ii) 材質

- ・ 原則として、JIS 規格に準ずる部材を使用する。
- ・ サンプル棒はアルミニウム材とする。
- ・ サンプル棒案内管はアルミニウム材とする。(ジルコニウム材も考慮)

iii) その他の設計条件

- ・ サンプル棒の停止位置再現性は、±0.1 mm 以下とする。
- ・ 可動装荷物駆動装置には、サンプル棒駆動装置の他、将来的に微調整棒駆動装置等を追加できるよう、支持架台は複数基が設置できるようにする。
- ・ サンプル収納部は、以下の 2 種類を考慮する。なお、サンプル収納部の高さはいずれも約 40cm とする。
サンプル収納部の水平断面積がサンプル 1 個分 (内径約 1 cm)
サンプル収納部の水平断面積がサンプル 3×3 が挿入可能なもの
- ・ 可動装荷物駆動装置は剛構造 (固有振動数 20 Hz 以上) とする。
- ・ サンプル棒及びサンプル棒案内管の脱着は運転停止中に手作業で行う。

4) 機器区分

発電用原子力設備規格 設計・建設規格における機器区分については、機器区分外相当とする。

5) 耐震クラス

耐震クラスはBクラスとする。

③ 構成機器機能条件

1) 駆動装置

駆動装置の要求条件は、以下のとおり。

- ・駆動速度は、1 mm/s～10 mm/s の範囲で任意に設定（可変）可能とする。
- ・炉心領域高さが最大 1400 mm のため、その全域を駆動できるようにする。
- ・駆動装置は、単軸垂直駆動とし、水平方向の駆動は不要とする。
- ・駆動装置の位置分解能は、サンプル停止位置再現性±0.1 mm を確保する。
- ・昇降位置決めを駆動機構の位置検出にて行う場合、他の機構によるサンプル棒の位置確認、速度異常等の検出を行える機能を持たせる。
- ・過負荷に対して検出機能及び機械的な保護機能を持たせる。

2) サンプル棒

サンプル棒の要求条件は、以下のとおり。

- ・サンプル棒には、2 つのサンプル収納部を設ける。ただし、収納部が同時に炉心領域に設置されないよう最大炉心領域高さに合わせ、中心間隔を 1400 mm 以上に設定する。
- ・一方のサンプル収納部を丸棒に置き換えることが可能な構造とする。
- ・サンプル棒は下部駆動方式であるため、炉心タンク下部のスペースを考慮して、炉心タンクに組立設置可能な構造とする。

3) サンプル棒案内管

サンプル棒案内管の要求条件は、以下のとおり。

- ・サンプル棒案内管は、炉心タンク底部ノズルフランジを取合部として着脱可能とし、減速材（軽水）のバウンダリとなるフランジ部にはシールを設ける。
- ・サンプル棒案内管は、剛性を考慮し上部支持を設ける。上部支持は、炉心タンク最上部の格子板フレームに支持用のはり等を追加して固定する。
- ・炉心タンク上部の安全板駆動装置支持架台の移動に配慮し、上記の支持はり部での分割を設け架台移動の障害にならない構造計画とする。
- ・炉タンク上部の支持はり部は、安全板配置の制約を極力少なくなるよう計画する。

4) 制御装置

i) 給水系との同時運転の防止インターロック

- ・STACY 更新炉のインターロック回路から「反応度添加停止」の信号を受取り、可動装荷物駆動装置の「挿入」、「引抜」操作を受付けない。
- ・運転中は「可動装荷物駆動装置運転中」の信号を STACY 更新炉のインターロック回路に出力する。

ii) 誤操作、誤装荷の防止インターロック

- ・サンプル棒が取付レベル（下限）にある場合、「引抜」押ボタン操作を受付けない。
- ・サンプル棒が最大挿入位置（上限）にある場合、「挿入」押ボタン操作を受付けない。

- ・速度設定は、最大速度設定値を超える入力を受付けない。また、最大速度設定値の変更はキースイッチにて管理し、許可状態でない場合は入力（設定変更）を受付けない。
- ・異常（「過負荷」、「速度超過」）が発生し異常ランプ点灯中は、「挿入」、「引抜」押ボタン操作を受付けない。

iv) 取合条件

- ・インターロック盤と「反応度添加停止」信号を取合うものとする。（入力）
- ・インターロック盤と「可動装荷物駆動装置運転中」信号を取合うものとする。（出力）
- ・燃料有効長設定器と「燃料有効長下端位置」情報を取合うものとする。（入力）

(2) 基本設計結果

基本設計仕様に基づいて、構成機器の構造の具体化及び機器仕様の詳細化を行った。可動装荷物駆動装置の全体概要図を図 7.3.2-1 に示す。

① 駆動装置

1) 構造説明

駆動装置の駆動原理を図 7.3.2-2 に、全体構造図を図 7.3.2-3 に、駆動部詳細図を図 7.3.2-4 に示す。装置の構成はボールネジ、モータ、マグネスケール類を設置する駆動部と、駆動部をリニアモーションガイド（以下「LM ガイド」という。）で支持する架台及び 4 本の柱で架台を支持する基礎で構成し、搬入・据付のため、それぞれがボルトにて接合し分割できる構造である。装置は炉室フード床に設置され、サンプル棒を取付け遠隔操作によりサンプル棒を昇降し、炉心タンク内の任意の位置（高さ方向）に位置決め固定する機能を有する。

構造の設定の根拠を以下に示す。

- ・駆動装置は昇降機構のみであるため、サーボモータとボールネジの組合せにより駆動する方式とした。サーボモータの分解能は停止位置の再現性 ± 0.1 mm が確保できるものを選定した。（ $2600 \text{ pulse/round} \div 0.0019 \text{ mm/pulse}$ ）
- ・昇降速度の制限については、下記の組合せにより最大駆動速度が 10 mm/s となるように設定した。

サーボモータの回転数： 定格 3000 rpm (50 rps)

サーボモータの減速比： $1/25$ ($\times 50 \text{ rps} = 2 \text{ rps}$)

ボールネジのリード： 5 mm ($\times 2 \text{ rps} = 10 \text{ mm/s}$)

- ・運転時の昇降位置決めはサーボモータ（附属エンコーダ）の位置検出にて行うが、過負荷によりトルクキーパーが働いた場合等に、実際のサンプル棒の位置を確認できるよう独立したマグネスケールを設けるものとした。また、マグネスケールは、サンプル棒の位置確認を行うとともに、速度異常の検出にも使用する。
- ・逸走防止のため上下に限界検出スイッチを設け、更に、メカニカルストップを設けた。
- ・無励磁電磁ブレーキの多重化、バランスの設置により電源喪失時等の異常時の自由落下による速度超過対策を取り入れた設計とした。

- ・本検討では、1台の駆動装置を想定しているが、将来的に別の駆動装置を設置できるように、2基同時設置が可能な架台寸法を設定した。そのため、駆動装置の入替えができるように、横行用のリニアガイドを設け、スライドできるようにした。
- ・2つの駆動装置の入替えについては、実験開始前に実施するので、手動でのスライドとしている。駆動装置の横行位置は運転開始前に固定され、運転中に移動することはない。
- ・過負荷検出については、サンプル棒の質量が小さく、大きなトルクは発生しないため、サーボモータの過負荷検出機能を用いるものとする。ただし、機械的な保護のため、モータ最大トルク程度のトルクキーパーを設けておくこととした。なお、下部スペースの制約から、トルクメータは設置しない。
- ・基礎構造は、可動装荷物駆動装置用に炉室(S)床スラブより独立した基礎を設置することとした。基礎構造図を図 7.3.2-5 に示す。なお、炉室フード水密化は、底板に水圧が加わらないようフードと床面間を塞ぎ、フード底板補強を不要としたので、既設強度部材との干渉がない位置で、かつ、後施工アンカー打設作業スペースとしてライナ切欠き寸法を 650 mm×650 mm 程度を確保できる位置で基礎配置を計画した。
- ・昇降ストロークは、炉心領域最大高さ 1400mm と炉心タンク下部の設置スペースを考慮し 1400 mm とした。可動装荷物駆動装置の取合レベルを図 7.3.2-6 に示す。図には、ストローク上下限での可動装荷物駆動装置の状態を示しており、ストローク 1400 mm で各サンプル収納部の中心を最大炉心領域中心に配置できる位置関係にした。
- ・装置の据付基準は炉心タンクの据付け位置を基準にする。具体的には炉心タンク据付後にタンクの定盤上面 EL+2809 mm を基準にサンプル棒取付レベル EL+804 mm を設定し、その位置から 1400 mm 上昇可能できる位置とする。
- ・可動装荷物駆動装置の強度部材は、軽量で剛性の高い炭素鋼製の形鋼等を組合せた構造とし、固有振動数 20 Hz 以上を満足するように設計した。固有振動数の解析結果として、図 7.3.2-7 に解析モデル、図 7.3.2-8 に固有値解析結果を示す。

2) 機器仕様

型 式	下方挿入方式、サーボモータ+ボールネジ駆動式
台 数	1 基
使用温度	50°C 以下 (炉外)
耐震クラス	B
機器区分	機器区分外
取扱対象物	サンプル棒
駆 動 速 度	1 mm/s～10 mm/s の範囲で任意に設定 (可変)
昇降ストローク	1400 mm (最大可動領域 1420 mm)
主 要 寸 法	L1450 mm×W1125 mm×H2341 mm
主 要 材 料	炭素鋼
モータ仕様	容量 0.05 kW、最大回転数 3000 rpm、減速比 1/25
ボールネジ仕様	軸径φ32 mm、リード 5 mm
マグネスケール仕様	有効長さ 1600 mm、分解能 0.013 mm

② サンプル棒

1) 構造説明

サンプル棒の構造を、図 7.3.2-9、10 に示す。

サンプル棒は中空のサンプル収納部を有するアルミニウム製の棒であり、収納部に核燃料物質を封入することができる。サンプル棒は長尺となるため分割可能とし、実験目的に応じて複数のサンプル収納部を設けることができる。サンプル棒の駆動装置への脱着は運転停止中に手動で行う。

構造の設定の根拠を以下に示す。

- ・サンプル棒は炉心タンク下部のスペース (高さ方向約 2000 mm) から挿入するため、最大 1700mm 程度を目安に分割する必要がある。また、サンプルの取替え又は丸棒への置き換えが可能なよう、サンプル収納部 (上部及び下部) も分割する必要がある。そのため、サンプル棒を 8 分割とした。なお、図 7.3.2-9、10 中のサンプル棒 A、B、C については、サンプルの種類によらず共通に使用できるように同一寸法形状とした。
- ・サンプル収納部 (上部及び下部) の間隔については、炉心タンク下部のスペース上、駆動装置ストロークが 1400 mm となることから、中心間隔で 1400 mm に設定した。
- ・サンプル棒は中実のアルミニウム棒としており、接続部のシール等も考慮不要であることから、分割部の接続方式はネジ締めとした。ネジ寸法は M12 としており、この寸法からサンプル棒の直径はφ20mm とした。
- ・サンプル棒の直径及び長さでは、自重のみでたわみが生じると考えられるため、駆動装置との取合い部の他、サンプル棒上部及び中間部にガイドを設ける構造とした。

2) 機器仕様

構造	8分割構造、ネジ組立式 (サンプル収納部2個、ガイド2個、サンプル棒4個)
基数	各1式(サンプル1個用、サンプル3×3個用)
使用温度	80°C以下(炉内挿入部)
耐震クラス	B
機器区分	機器区分外
材質	アルミニウム
主要寸法	
サンプル棒組立全長	3170 mm
サンプル収納部	サンプル1個：OD20 mm×t 5 mm×L400 mm
	サンプル3×3個：OD48.6 mm×t 5.1 mm×L400 mm
ガイド	サンプル1個：OD21 mm×L50 mm
	サンプル3×3個：OD49 mm×L50 mm
サンプル棒	OD20×200 mm、457 mm、475 mm、1120 mm

③ サンプル棒案内管

1) 構造説明

サンプル棒案内管の構造を、図 7.3.2-11、12 に示す。

サンプル棒案内管は炉心内部に取付けサンプル棒をガイドする。実験目的に応じて炉心タンクの底部中央に備えられた管台フランジを介し脱着や交換が可能である。

構造の設定の根拠を以下に示す。

- ・サンプル棒案内管は、サンプル収納部の種類に応じ、2種類の設計とした。案内管はアルミニウムの配管材を用いることとし、サンプル棒の外径を考慮して、以下のサイズとした。

1個タイプの場合：OD 27.2 mm/ID 22.2 mm (20A Sch20S)

3×3個タイプの場合：OD 60 mm/ID 50 mm

- ・炉心タンクとの取合い部については、軽水のバウンダリとなるため、タンク下部ノズル部でOリングを介したフランジ取付け構造とすることでシール構造を設けた。
- ・サンプル棒に設けたガイドとサンプル棒案内管内面とのすき間は、昇降駆動時の動作を考慮して以下にて設定した。なお、必要に応じてガイド部の直径を調整することにより、変更可能である。

1個タイプの場合　：　すき間(片側)　0.6 mm (= (22.2-21) / 2 mm)

3×3個タイプの場合：　すき間(片側)　0.5 mm (= (50-49) / 2 mm)

- ・サンプル棒案内管の耐震性を確保するための上部支持はりについては、炉心タンク格子板フレームとの取合い、剛性確保、炉心構成及び安全板配置への制約を少なくする

ことを考慮し、小さい外形寸法でも剛性が高い構造部材であるステンレス角パイプを用いることとした。□50 mm×t2 mm、□60×t2 mm を候補として剛性評価を行った結果を図 7.3.2-13 に示す。剛性を満足し、かつ、炉心構成及び安全板配置への制約が少ない前者を上部支持はり部材に選定した。

- 前記の上部支持はりにより上端支持されるサンプル棒案内管の剛性評価を行い、固有振動数が 20 Hz 以上となることを確認した。評価結果を図 7.3.2-14 に示す。
- サンプル棒案内管は外径φ60 mm とφ27.2 mm の 2 種類があるが、図 7.3.2-11 に示すようにφ27.2 mm を取付ける際はアダプタを装着することで、同じ上部支持はりで対応できるようにした。
- 安全板駆動装置架台の移動に配慮し、サンプル棒案内管は上記の支持部で分割できる構造とし、架台移動後に追加設置できるようにした。

2) 機器仕様

構 造	2分割構造（炉心タンク内部、炉心タンク上部）
使用温度	80°C以下（炉内挿入部）
使用圧力	静水頭（最大2m水柱相当）
機器区分	機器区分外
雰囲気	軽水（炉心タンク接液部）、空気（その他）
材質	アルミニウム（ジルコニウムも考慮）
主要寸法	
炉心タンク内部	サンプル1個：OD27.2 mm×ID22.2 mm×L2081 mm （JIS10K 100A フランジ付）
	サンプル3×3個：OD60 mm×ID50 mm×L2081 mm （JIS10K 100A フランジ付）
炉心タンク上部	サンプル1個：OD27.2 mm×ID22.2 mm×L890 mm
	サンプル3×3個：OD60 mm×ID50 mm×L890 mm

③ 制御装置

1) 機能説明

制御装置は、基本操作を行う監視操作盤（既設盤の改造）、制御及び各種設定等を行う制御盤、電源及びサーボアンプを内蔵する中継盤で構成する。制御装置のシステム構成図を図7.3.2-15に示す。

i) 操作機能

可動装荷物駆動装置の下記の操作を監視操作盤の盤面の押ボタンスイッチから行う。スイッチ配置案を図7.3.2-16に示す。

- ・「挿入」 サンプル棒を上昇させる
- ・「引抜」 サンプル棒を下降させる
- ・「停止」 サンプル棒の動作を停止させる
- ・「異常リセット」 点灯中の異常のリセットを行う

通常用意する以下のスイッチについては、盤面上の制約から省略する。（製作設計の段階で、必要性を再確認する。）

- ・非常停止、復帰（「停止」と機能的に差がないため省略）
- ・ブザー停止、アラームチェック（異常時にブザー吹鳴は行わない予定）
- ・ランプチェック（LEDでランプ切れの心配は殆ど無い）

ii) 監視機能

可動装荷物駆動装置の主要状態を監視操作盤に表示する。表示器配置案を図7.3.2-17に示す。

- ・位置指示：燃料有効長下端位置とサンプル棒基準位置の相対位置を0.01 mm単位でデジタル表示する。
- ・異常表示：異常状態として「過負荷」、「速度超過」をランプ表示する。

ii) 制御機能

可動装荷物駆動装置の制御は制御盤内の PLC (プログラマブルロジックコントローラ) のソフト処理により行う。制御盤には POD (タッチパネル) を設け、異常判断等のためのパラメータ設定及び異常表示 (監視制御盤に表示するもの以外) を行う。可動装荷物の位置情報に係る計装線図を図 7.3.2-18 に、駆動モータ制御に係るインターロック線図を図 7.3.2-19 に示す。

iii) 異常時の対応

可動装荷物駆動装置の運転中に制御装置に係る異常発生時の対応処理は、以下を基本方針とする。

・外部電源喪失

電源喪失直前の作動状態で運転を停止する。駆動装置モータのブレーキは無励磁でブレーキがかかっている状態となる。

復旧操作は、電源復帰後に、運転員が個々に各制御装置の電源を復旧させていくものとする。(場合により原点位置調整が必要となる。)

・PLC 異常

構成部品の故障時は、自己診断機能によりアラームを出し、機能を停止する。

復旧操作は、故障原因の復旧処置 (故障したカードの交換等) を行うものとする。(場合により原点位置調整が必要となる。)

・速度・停止位置の異常

サンプル棒の昇降はサーボモータ付のエンコーダとマグネスケールにて監視制御しており、双方の検出値が設定した偏差以上になることで速度異常や停止位置異常を検知し、駆動モータ電源遮断及びブレーキを制動させる。また、異常信号を出力する。

・オーバラン

上上限、下下限にオーバラン検出用のリミットスイッチを設け、信号を検出すると駆動モータ電源遮断及びブレーキを制動させる。また、オーバランの異常信号を出力する。

・速度超過

サーボモータ付のエンコーダとマグネスケール双方で設定速度の超過を検出し、駆動モータ電源遮断及びブレーキを制動させる。また、マグネスケールの速度超過は監視操作盤に表示する。

・過負荷の検出

サーボドライバの出力に制限をかけ、過負荷時にはモータが停止させるとともに、監視操作盤に表示する。

2) 機器仕様

i) 監視操作盤

既設の監視操作盤の空きスペースに押ボタンスイッチ、ランプ、デジタル表示器、端子台を追加する。外線は流用する。

ii) 制御盤

制御盤は新規に設置する。盤寸法は既設と同等とし、外線は極力流用する。

数 量	1 面
型 式	キャスタ付き移動盤
概 略 寸 法	W1000 mm×H1000 mm×D1200 mm
塗 装 色	新 JEM 電気色
設 置 場 所	制御室(S)
設置雰囲気条件	常温、常圧、大気中
メンテスペース	背面 1000 mm
ケーブル引込口	下
主要収納品	POD、キースイッチ、押釦スイッチ、PLC、PLC I/O、制御リレー、 直流電源装置、コンセント
入 力 電 源	1φ100 V

iii) 中継盤

中継盤は、新規に設置する。外線は流用する。

数 量	1 面
型 式	壁掛け盤
概 略 寸 法	W500 mm×H1000 mm×D300 mm
塗 装 色	新 JEM 電気色
設 置 場 所	炉室(S)
設置雰囲気条件	常温、常圧、大気中
メンテスペース	前面 1000 mm
ケーブル引込口	上
主要収納品	サーボアンプ、マグネスケール表示ユニット、電磁ブレーキ電 源
入 力 電 源	1φ100 V

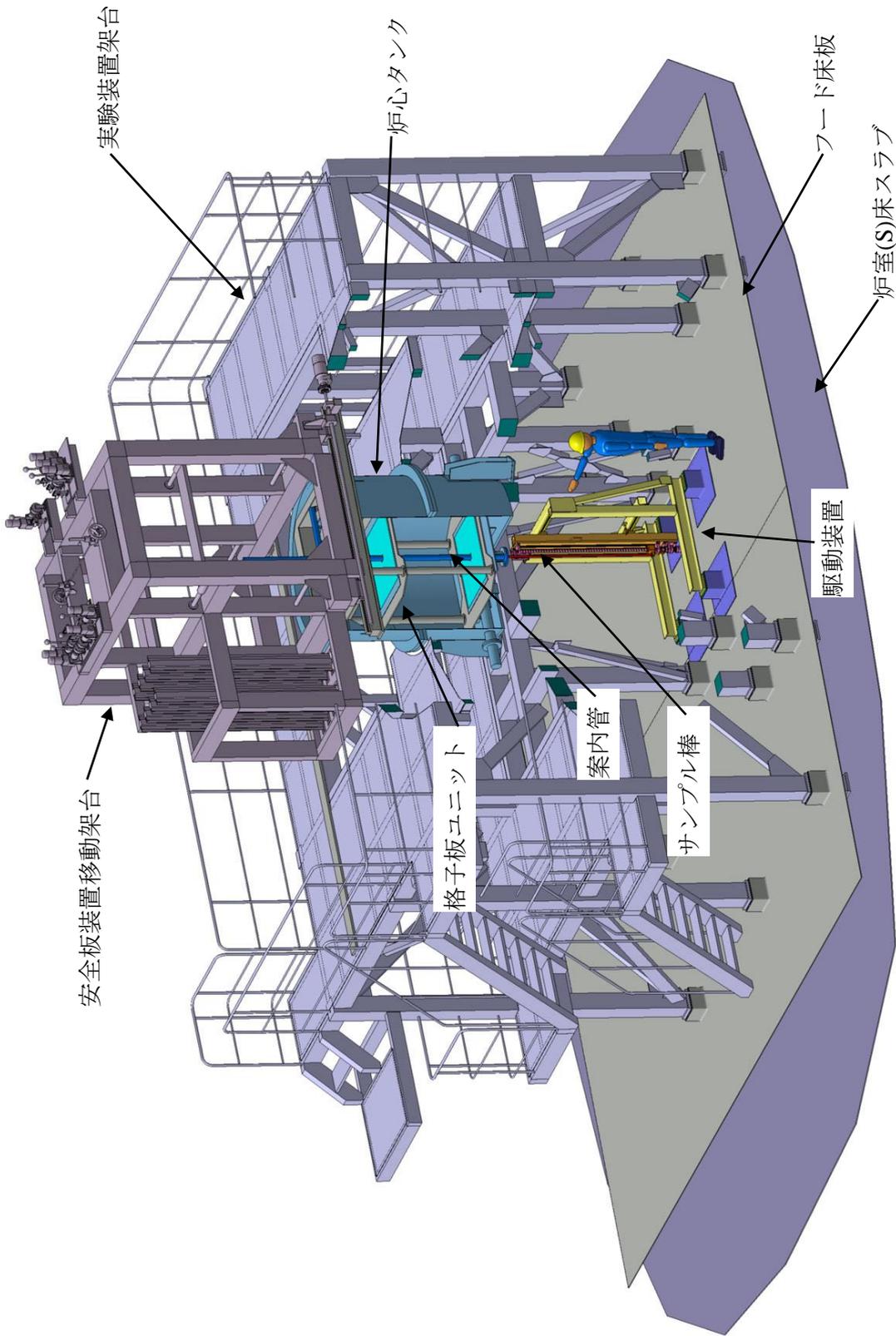


図 7.3.2-1 可動装置荷物駆動装置 全体概要図

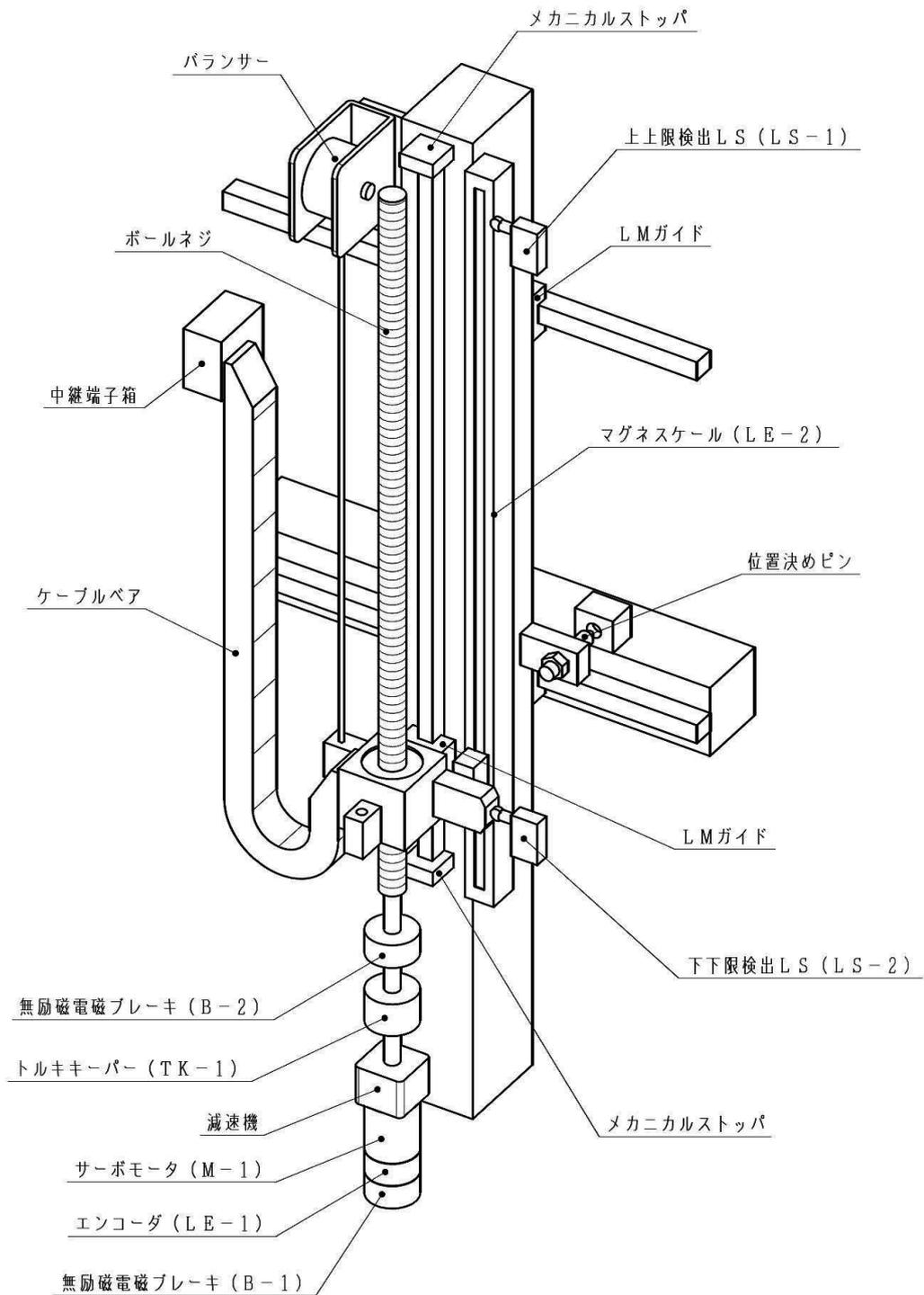


図 7.3.2-2 駆動原理図

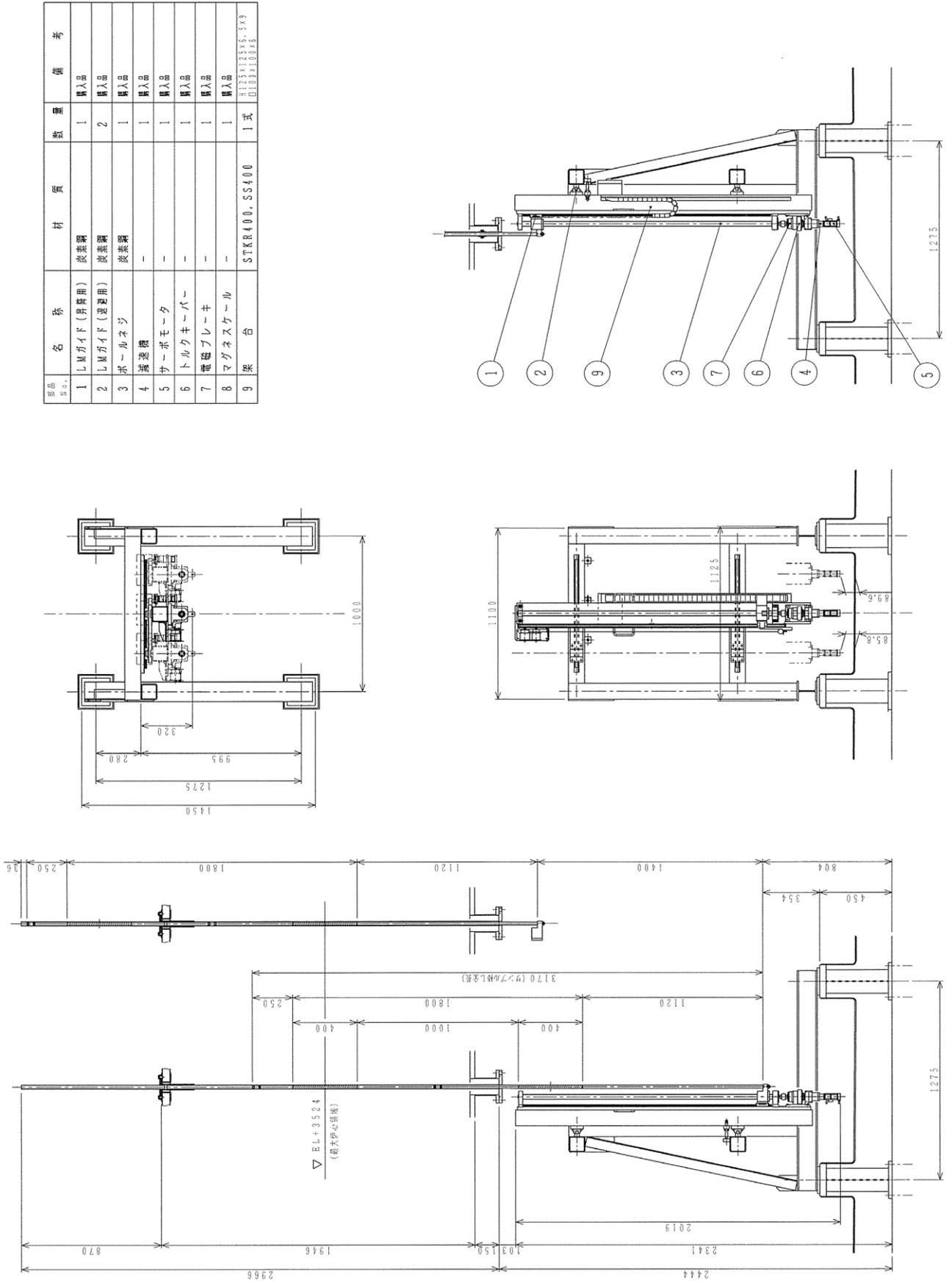


図 7.3.2-3 可動装荷物駆動装置機器構造図

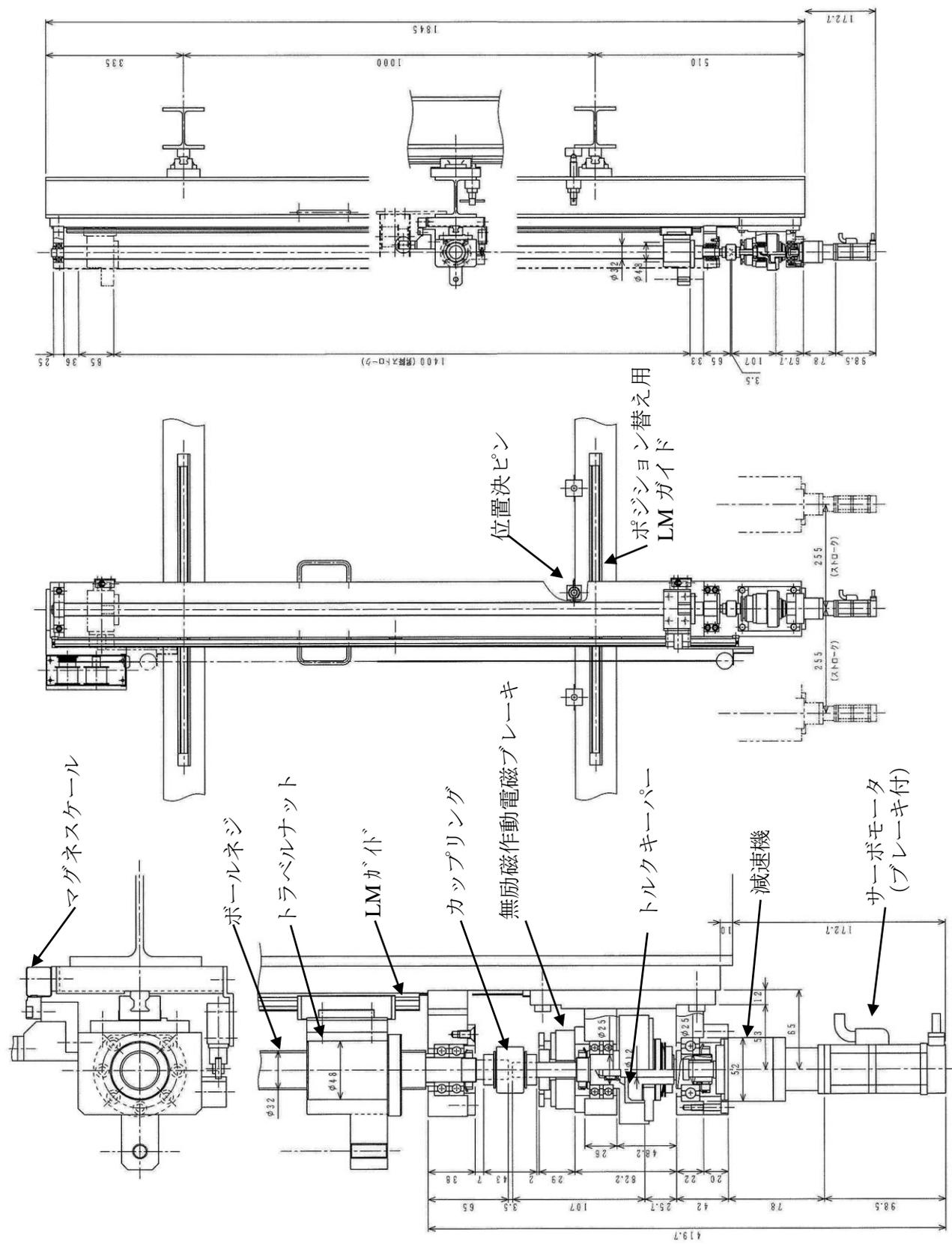


図 7.3.2-4 可動装置駆動装置機器構造図 (駆動部)

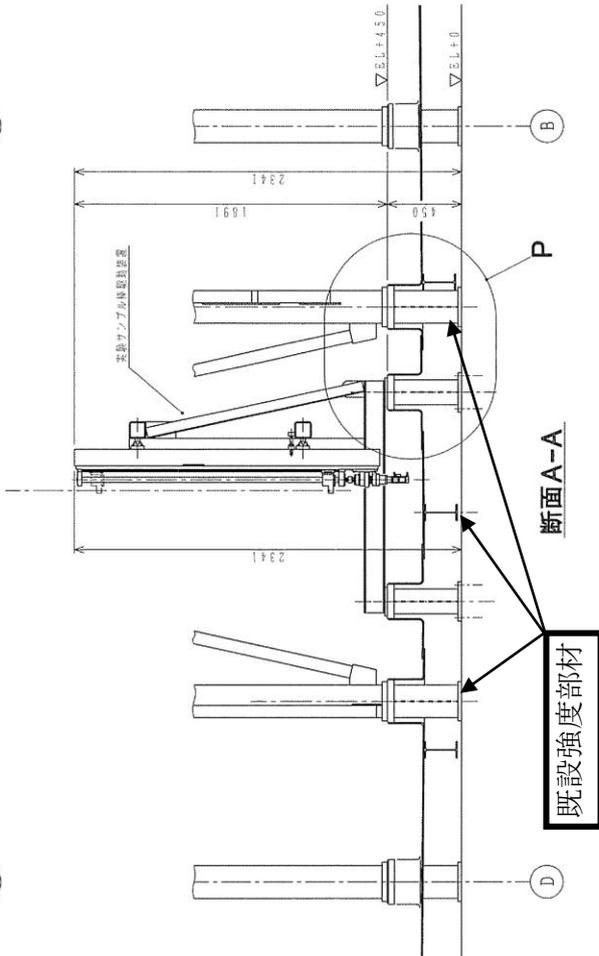
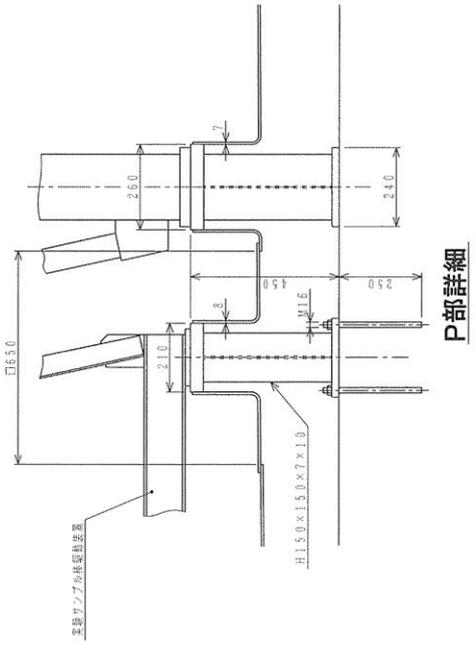
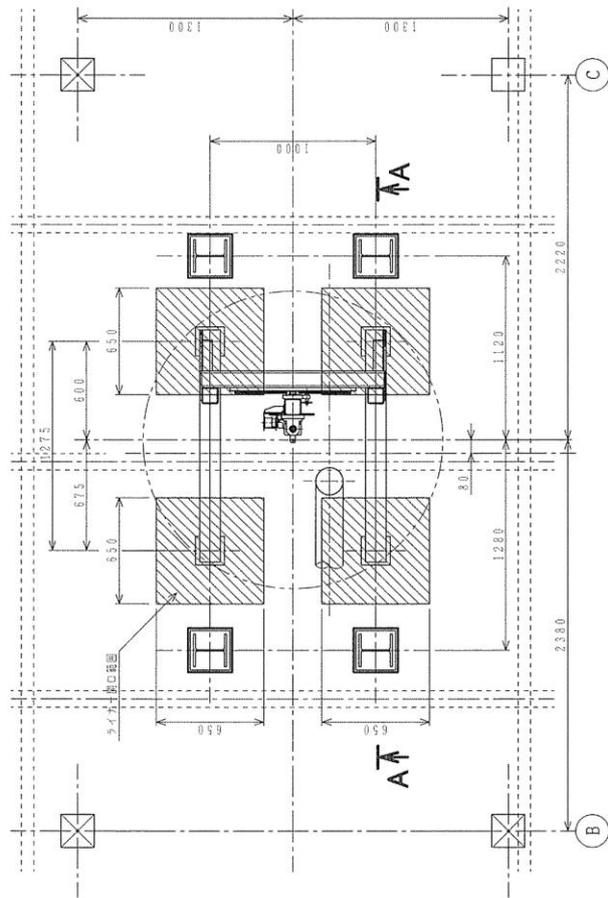
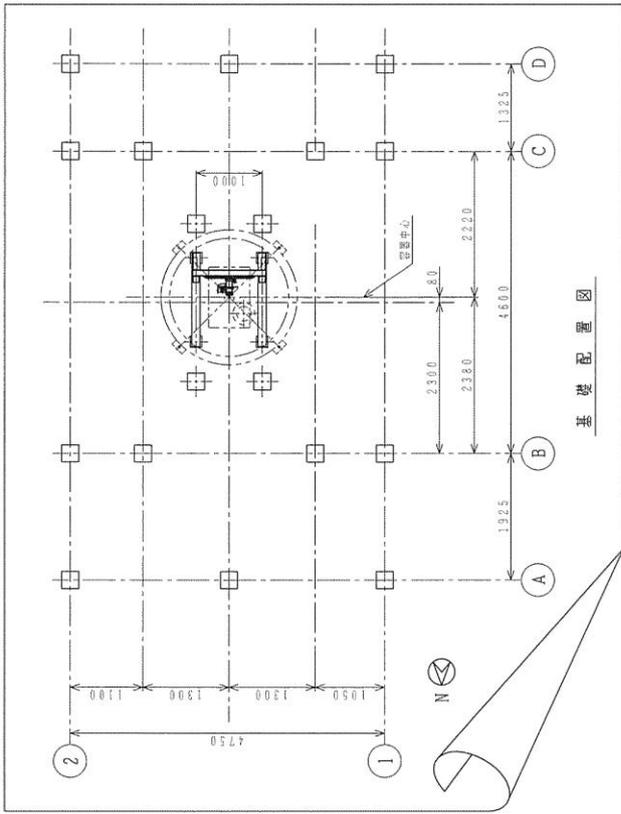


図 7.3.2-5 可動装荷物駆動装置機器基礎図

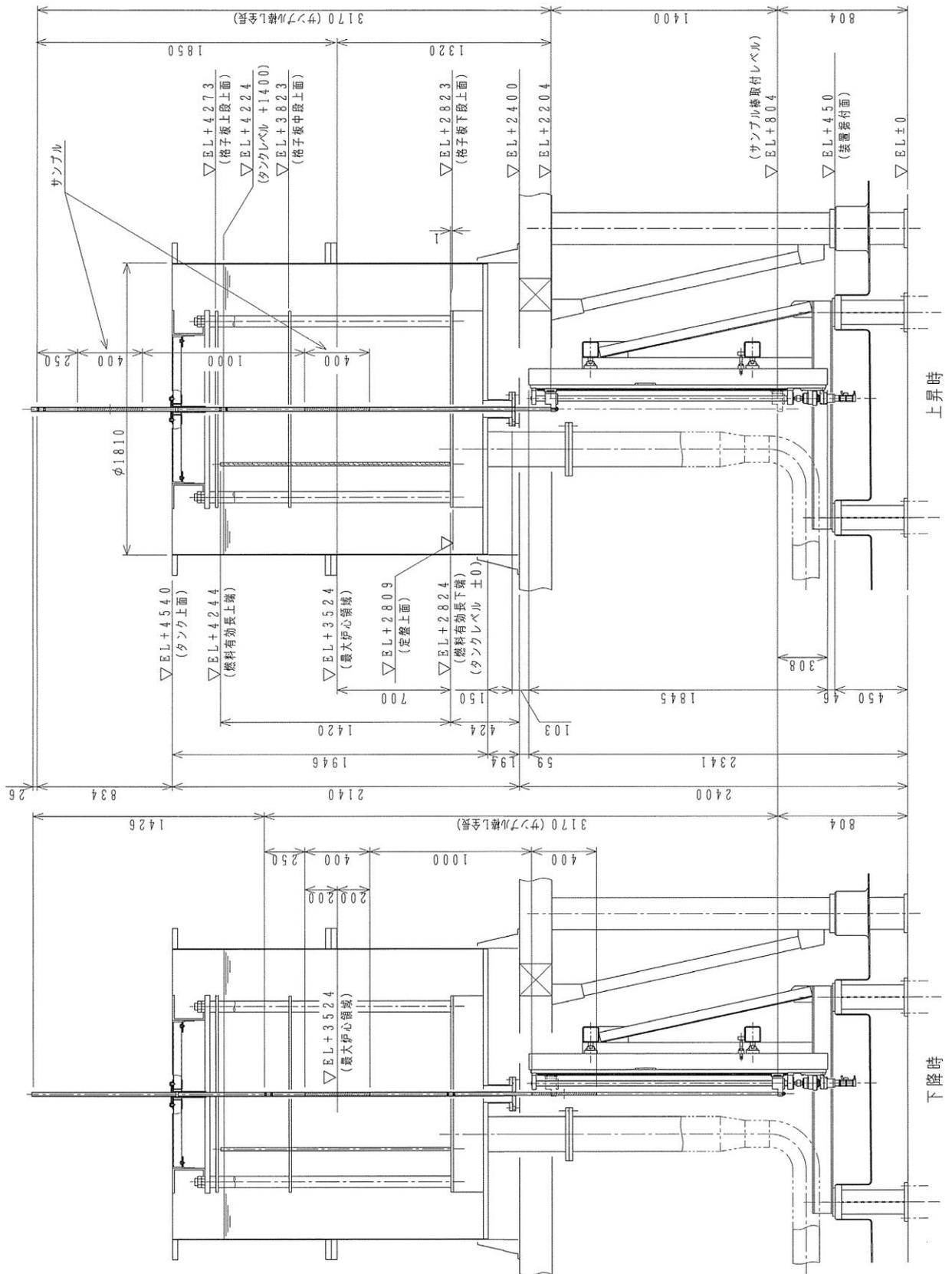
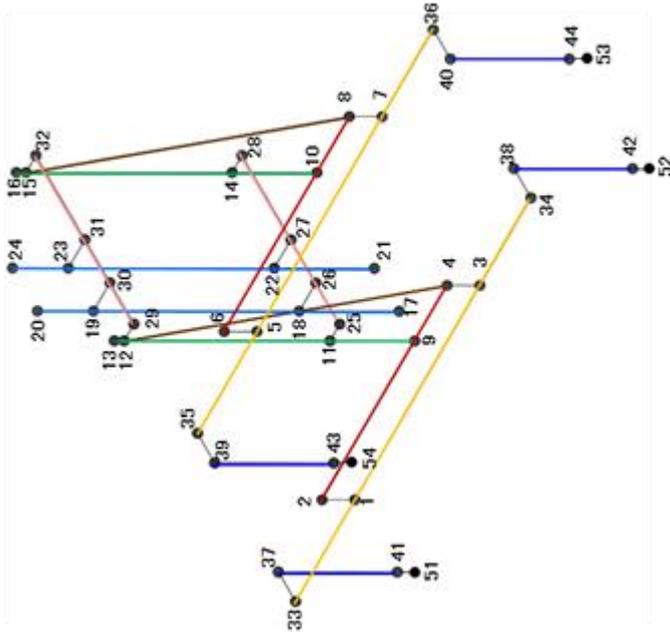


図 7.3.2-6 可動装荷物駆動装置取合レベル図

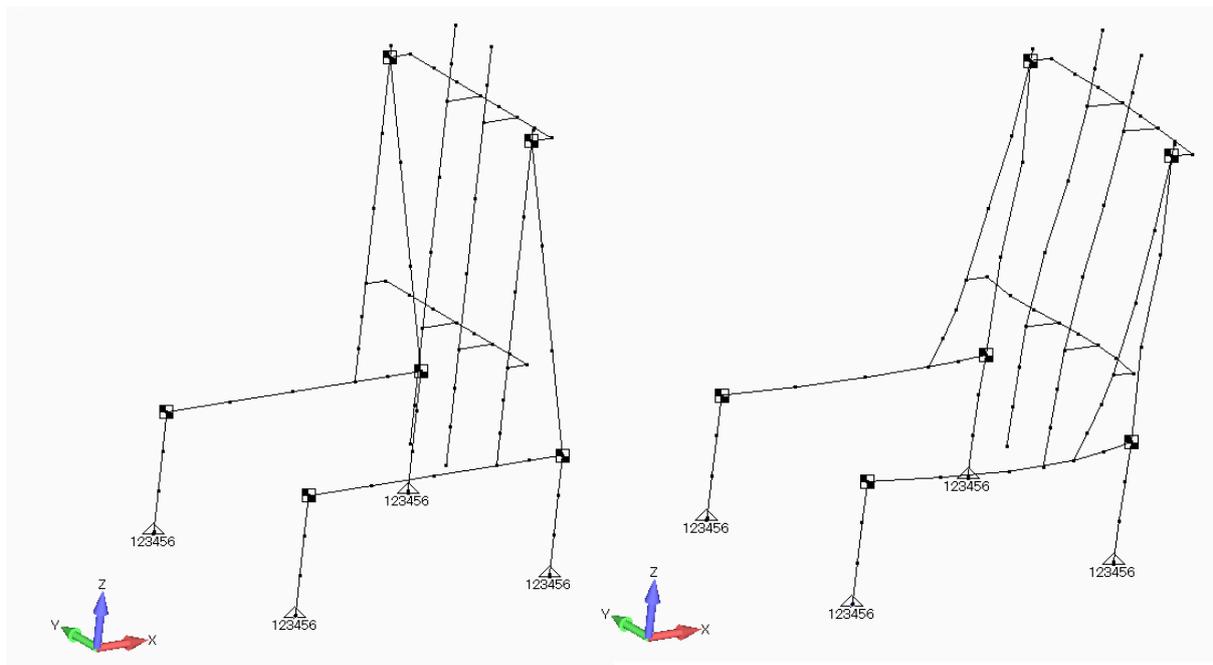
PID	部材	部位	断面方向	図中の表示	材質	断面積A (mm ²)	断面2次モーメント			ねじり定数J (mm ⁴)	中立軸から縁までの距離C1 (mm)	中立軸から縁までの距離C2 (mm)	付加質量 (kg)
							z軸廻り (mm ⁴)	y軸廻り (mm ⁴)	I2 (mm ⁴)				
1	□150×150×9	渡しはり			STKR400	4867.0	1.580E+07	1.580E+07	2.613E+07	75	75	4.30E-05	
2	H125×125×6.5×9	ベース			SS400	3000.0	8.390E+06	2.930E+06	8.089E+04	62.5	62.5	4.20E-05	
3	□100×100×6	柱			STKR400	2163.0	3.110E+06	3.110E+06	5.162E+06	50	50	1.90E-05	
4	□100×100×6	横はり			STKR400	2163.0	3.110E+06	3.110E+06	5.162E+06	50	50	1.90E-05	
5	L65×65×6	斜材(ブレス)			SS400	792.7	2.940E+05	2.940E+05	9.92E+03	46.9	46.9	7.00E-06	
6	□100×100×6	マスト			STKR400	2163.0	3.110E+06	3.110E+06	5.162E+06	50	50	8.50E-05	
7	H200×200×8×12	架台			SS400	6353.0	1.600E+07	4.720E+07	3.02E+05	100	100	5.50E-05	
101	剛体	基礎ポルト	●	—	(SS400)	1.000E+06	1.000E+10	1.000E+10	1.000E+10	1	1	0	
102	剛体	部材接続部	●	—	(SS400)	1.000E+06	1.000E+10	1.000E+10	1.000E+10	1	1	0	



<解析モデルの概要>

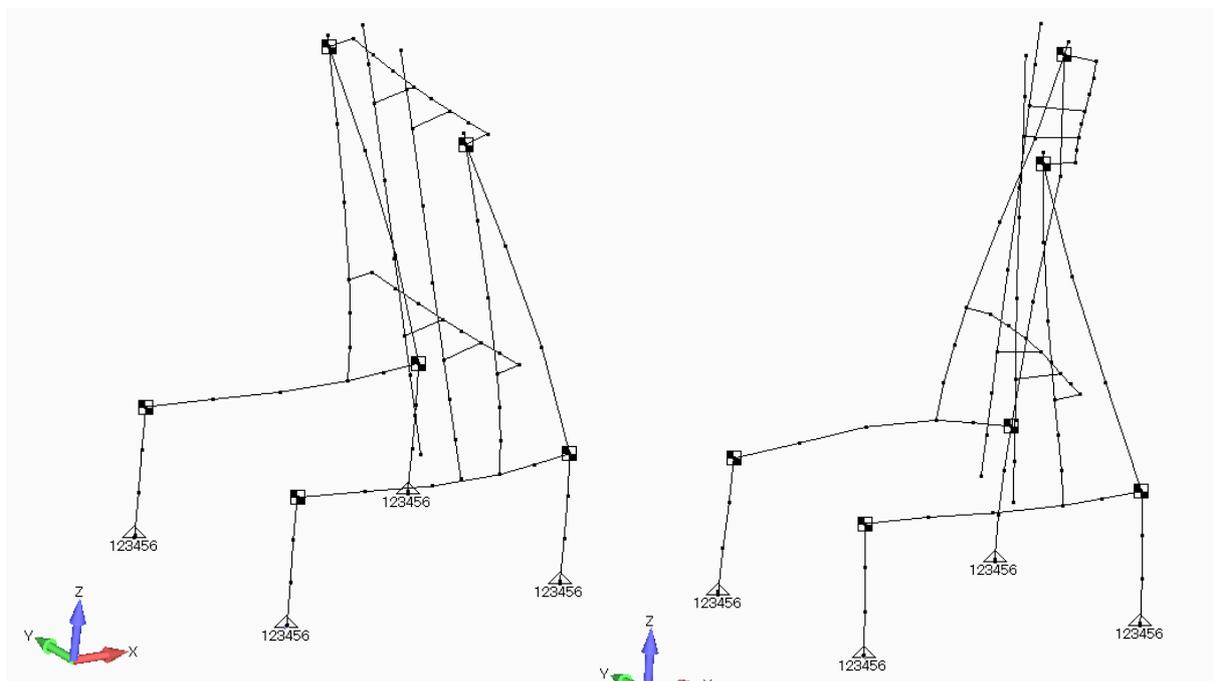
- ① 可動装荷物駆動装置を構成する各はりは、はり要素でモデル化し、部材の質量は自重を含めて付加質量として入力した。
- ② 床との固定部は、埋込金物に溶接等で取り付けられることから、完全拘束(6軸拘束)とした。
- ③ ボールネジ、LM ガイド、座板、フード等の質量は、余裕を見込んで設置されるはりに分布荷重や集中荷重等に適宜選択した。

図 7.3.2-7 固有値解析モデル図



<解析モデル図>

2次モード:24.0Hz
(Y方向倒れ)



1次モード:23.5Hz
(X方向倒れ)

3次モード:55.1Hz
(ねじれ)

図 7.3.2-8 固有値解析結果

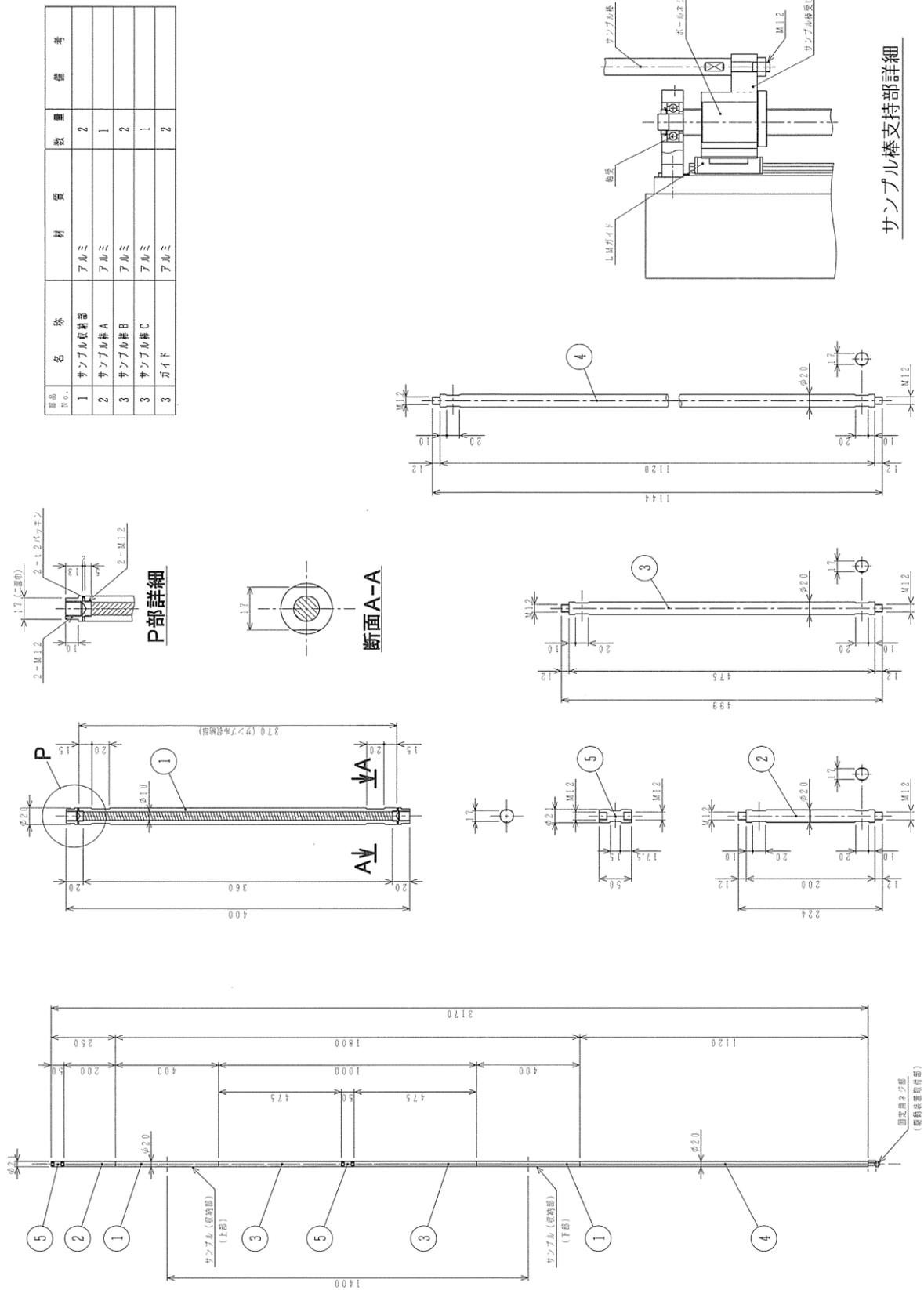


図 7.3.2-9 サンプル棒構造図 (サンプル 1 個用)

部品 No.	名称	材質	数量	備考
1	案内管 (1)	アルミ	1	20A Sch20S
2	案内管 (2)	アルミ	1	20A Sch20S
3	フランジ	アルミ	1	
4	アダプタ	SUS304	1	

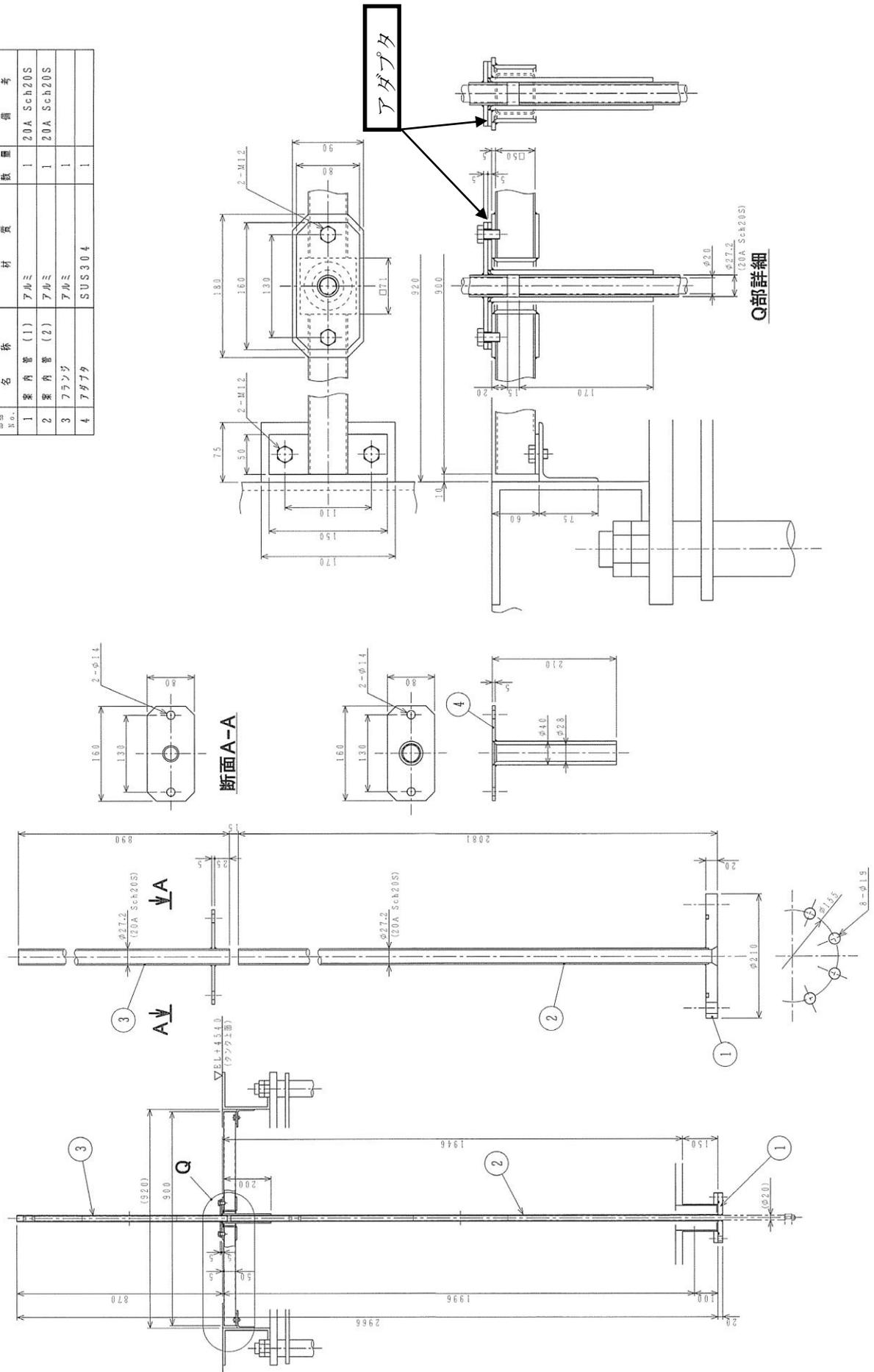


図 7.3.2-11 サンプル棒案内管構造図 (サンプル 1 個用)

部品 No.	名称	材質	数量	備考
1	案内管 (1)	アルミ	1	20A Scb20S
2	案内管 (2)	アルミ	2	20A Scb20S

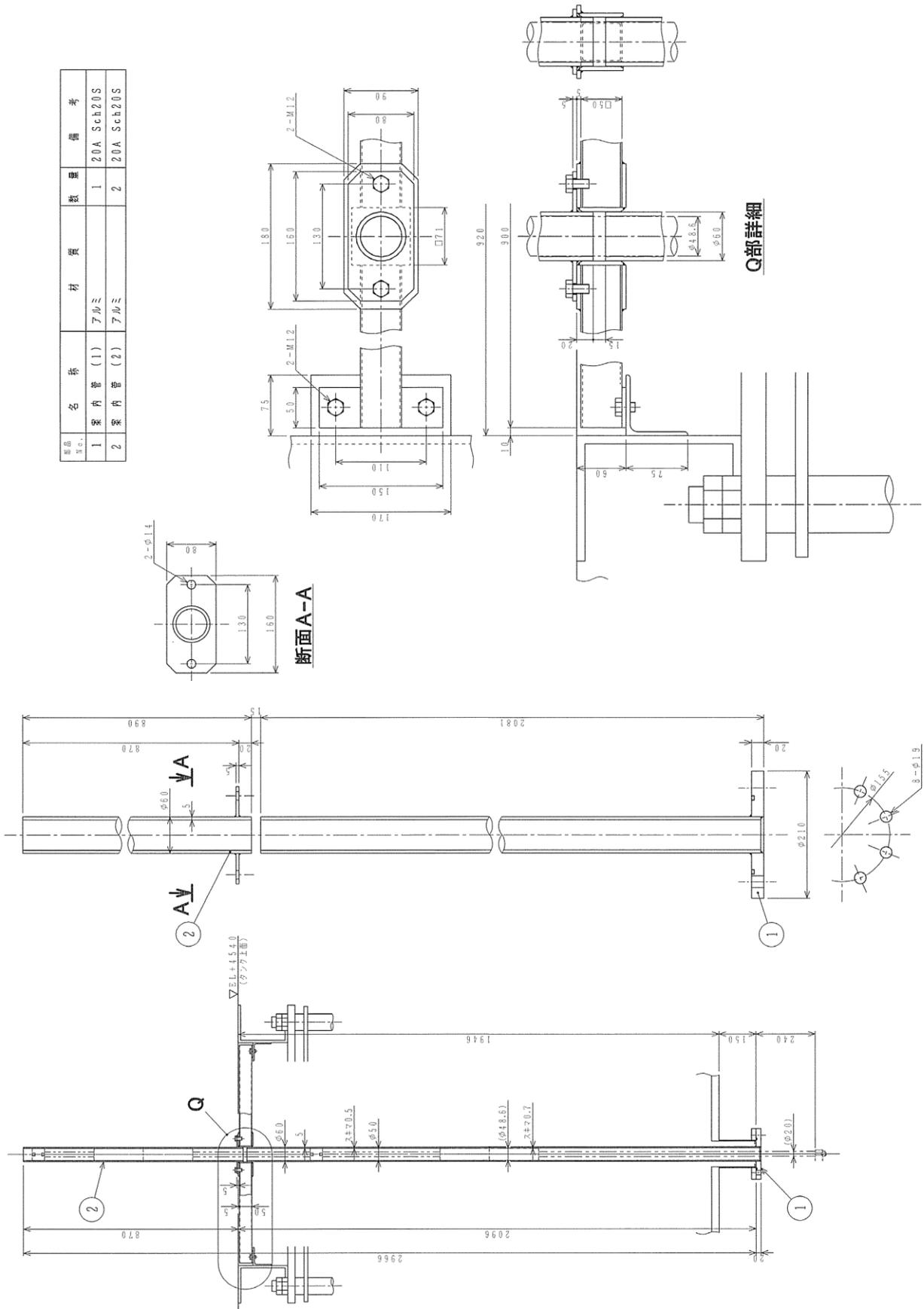
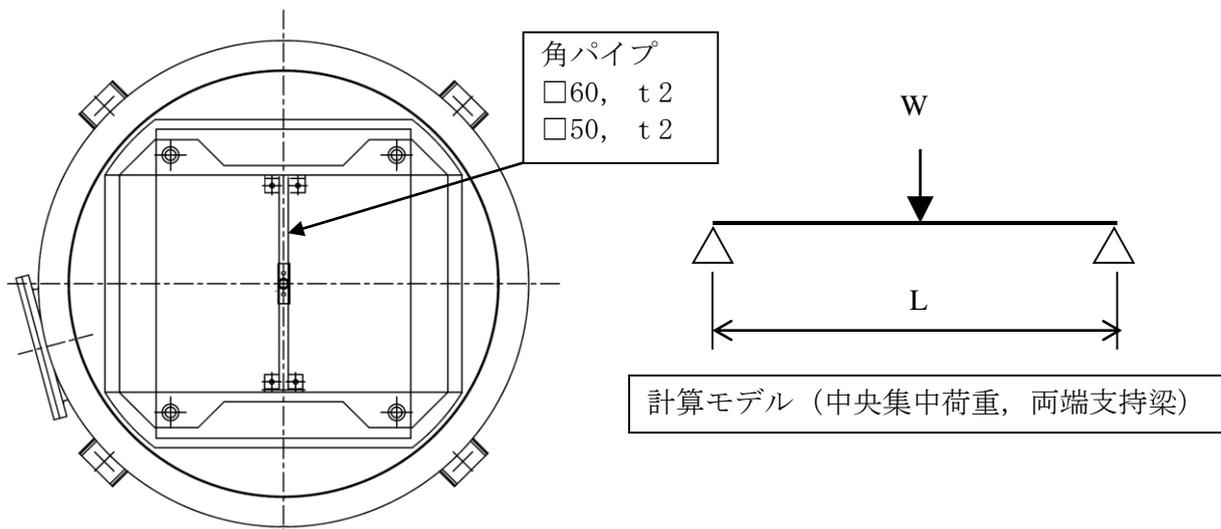
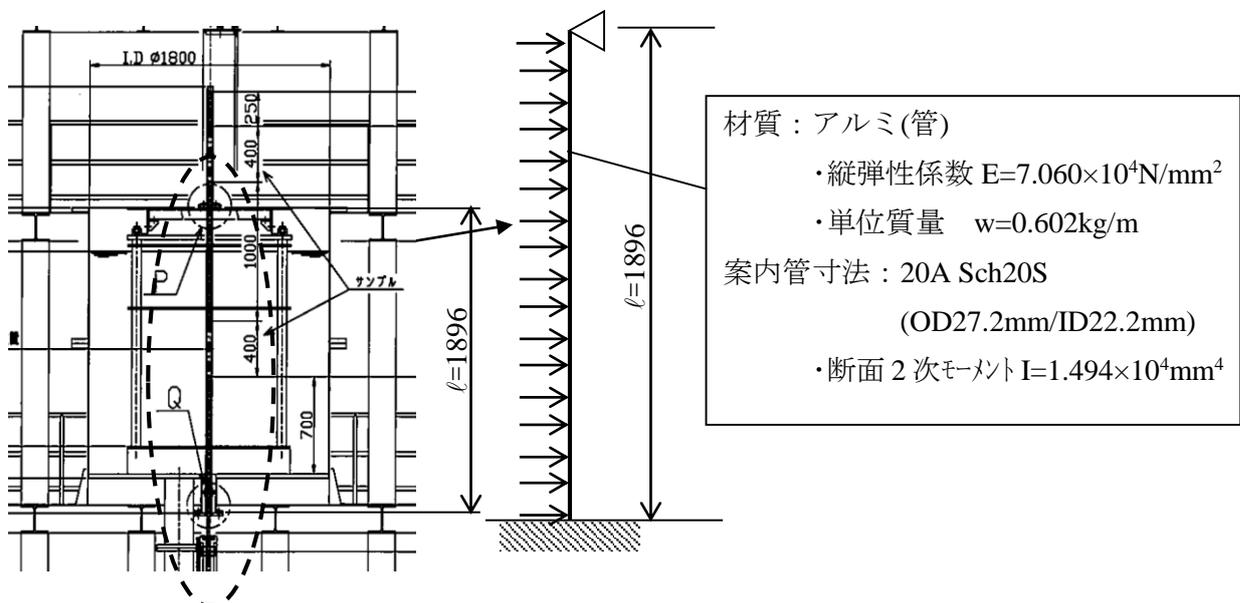


図 7.3.2-12 サンプル棒案内管構造図 (サンプル 3×3 個用)



記号	項目	単位	□60*2	□50*2
I	断面2次モーメント	mm ⁴	2.51E+05	1.41E+05
L	支持点間距離	mm	900	900
W	サポートに加わる集中質量	N	162	156
E	サポートの縦弾性係数	N/mm ²	192000	192000
K	バネ定数	N/mm	3.17E+03	1.78E+03
g	重力加速度	mm/s ²	9.80E+03	9.80E+03
f	固有周波数	Hz	70	53

図 7.3.2-13 上部支持はりの剛性評価結果



$$\textcircled{1} \text{バネ定数} = \frac{184.6EI}{\ell^3} = \frac{184.6 \times 7.060 \times 10^{10} \times 1.494 \times 10^{-8}}{1.896^3} = 2.860 \times 10^4 \text{ N/m}$$

$$\textcircled{2} \text{固有周波数} f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{w \times \ell}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2.860 \times 10^4}{0.602 \times 1.896}} = 25.1 \text{ Hz}$$

図 7.3.2-14 サンプル棒案内管の剛性評価結果

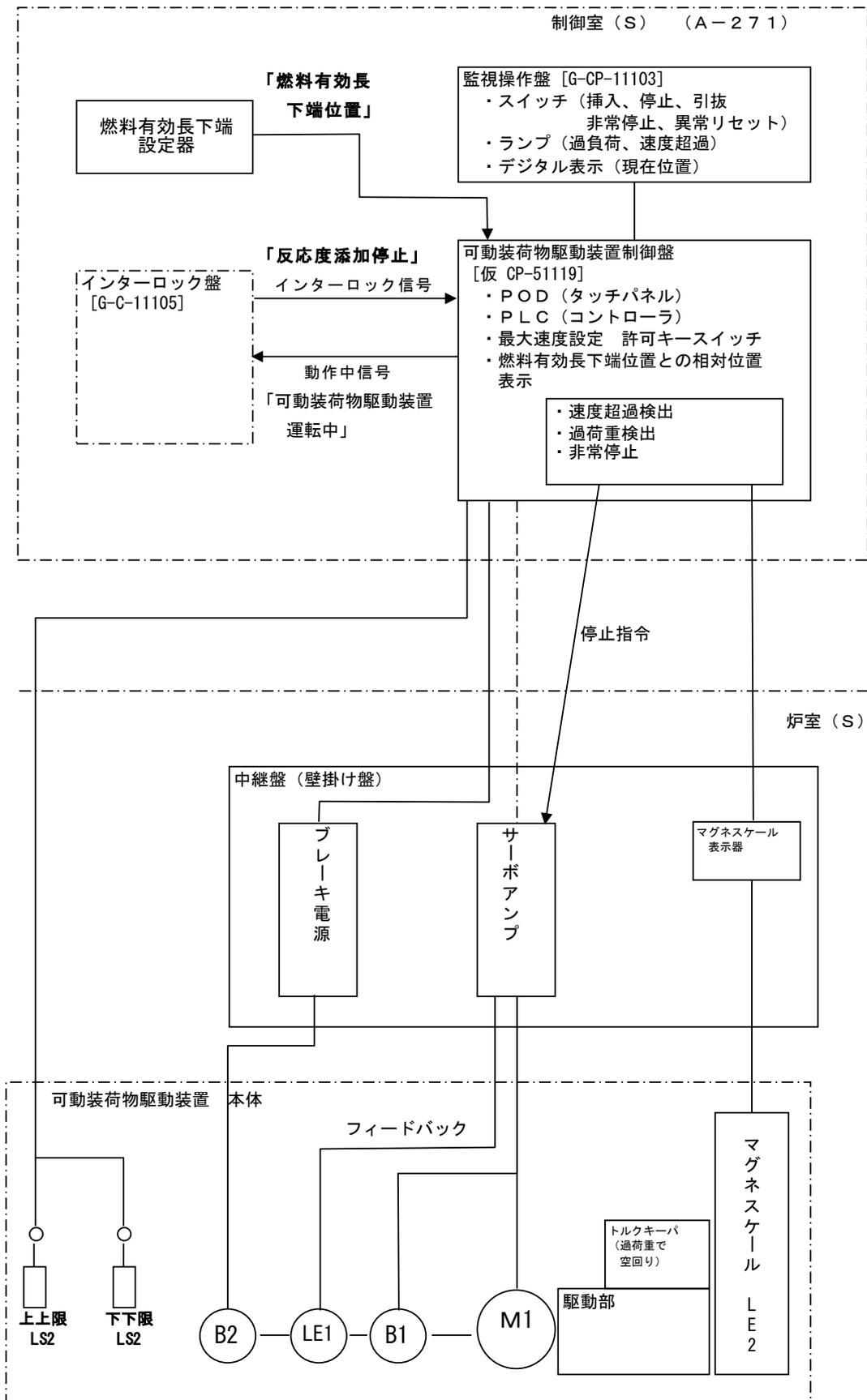


図 7.3.2-15 システム構成図

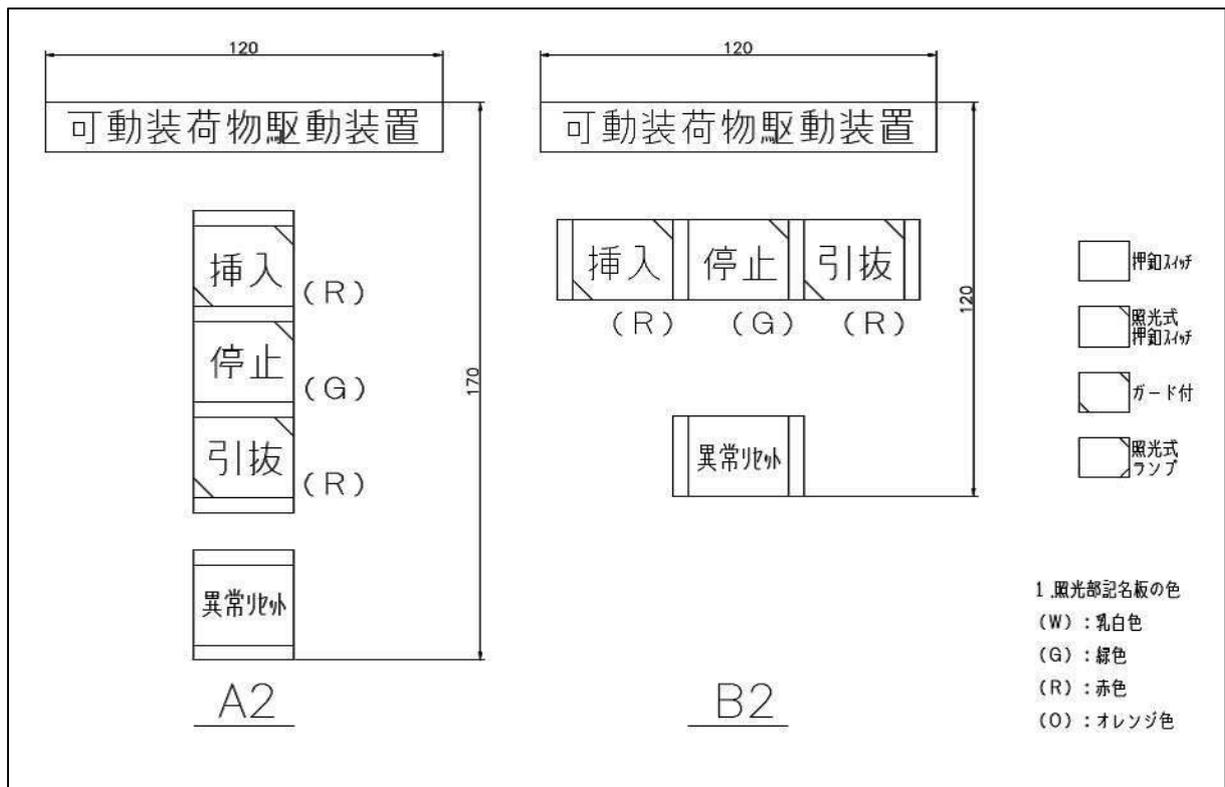


図 7.3.2-16 監視操作盤スイッチ配置案

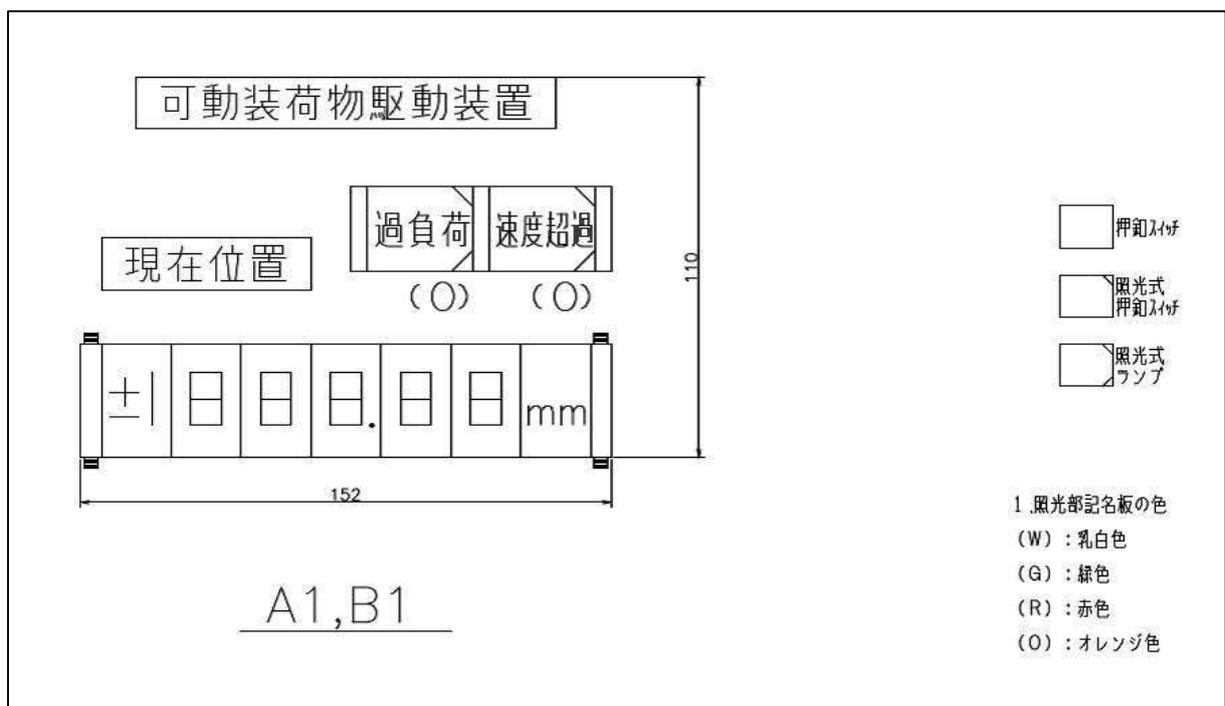


図 7.3.2-17 監視操作盤表示器配置案

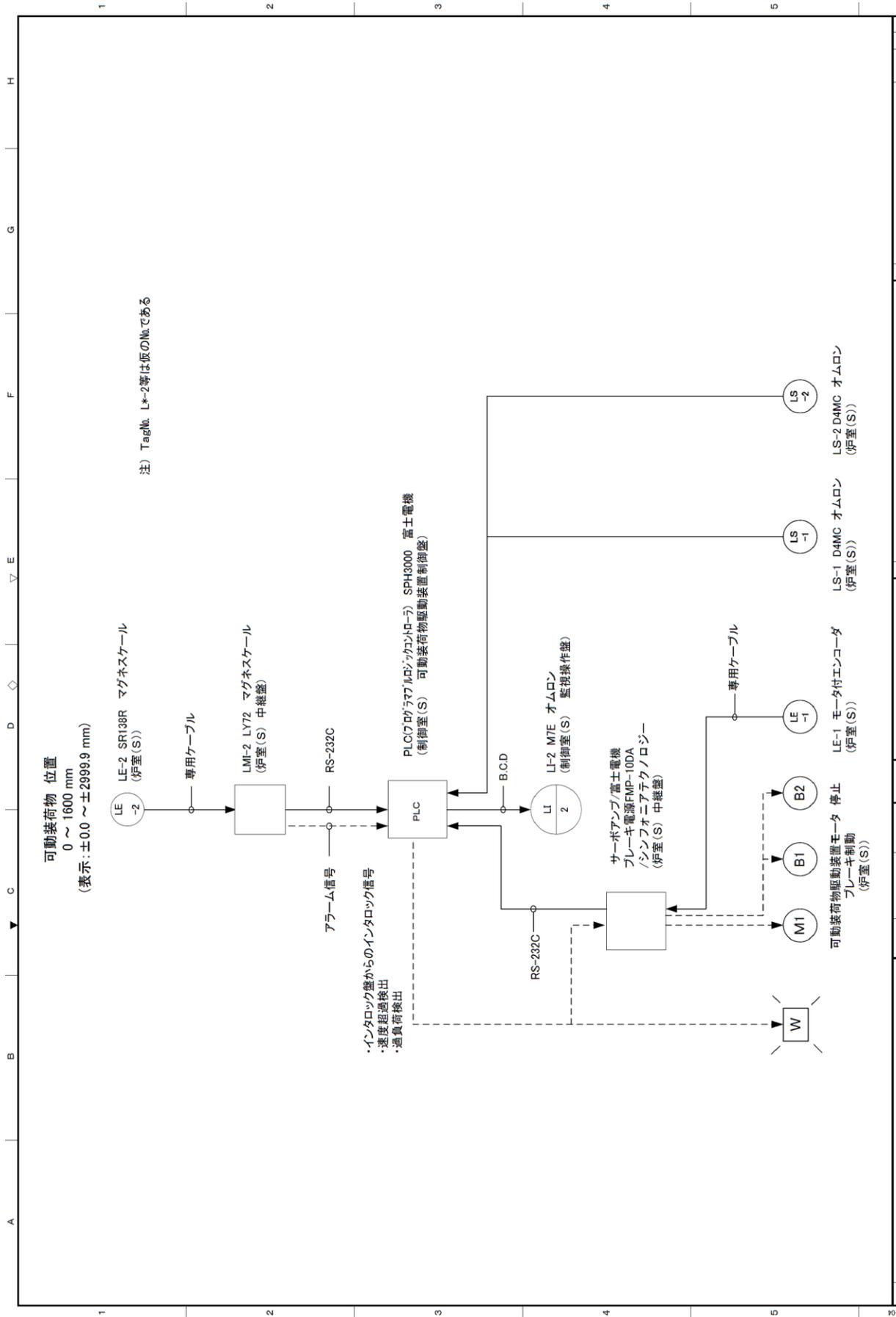


図 7.3.2-18 計装線図 可動装荷物位置

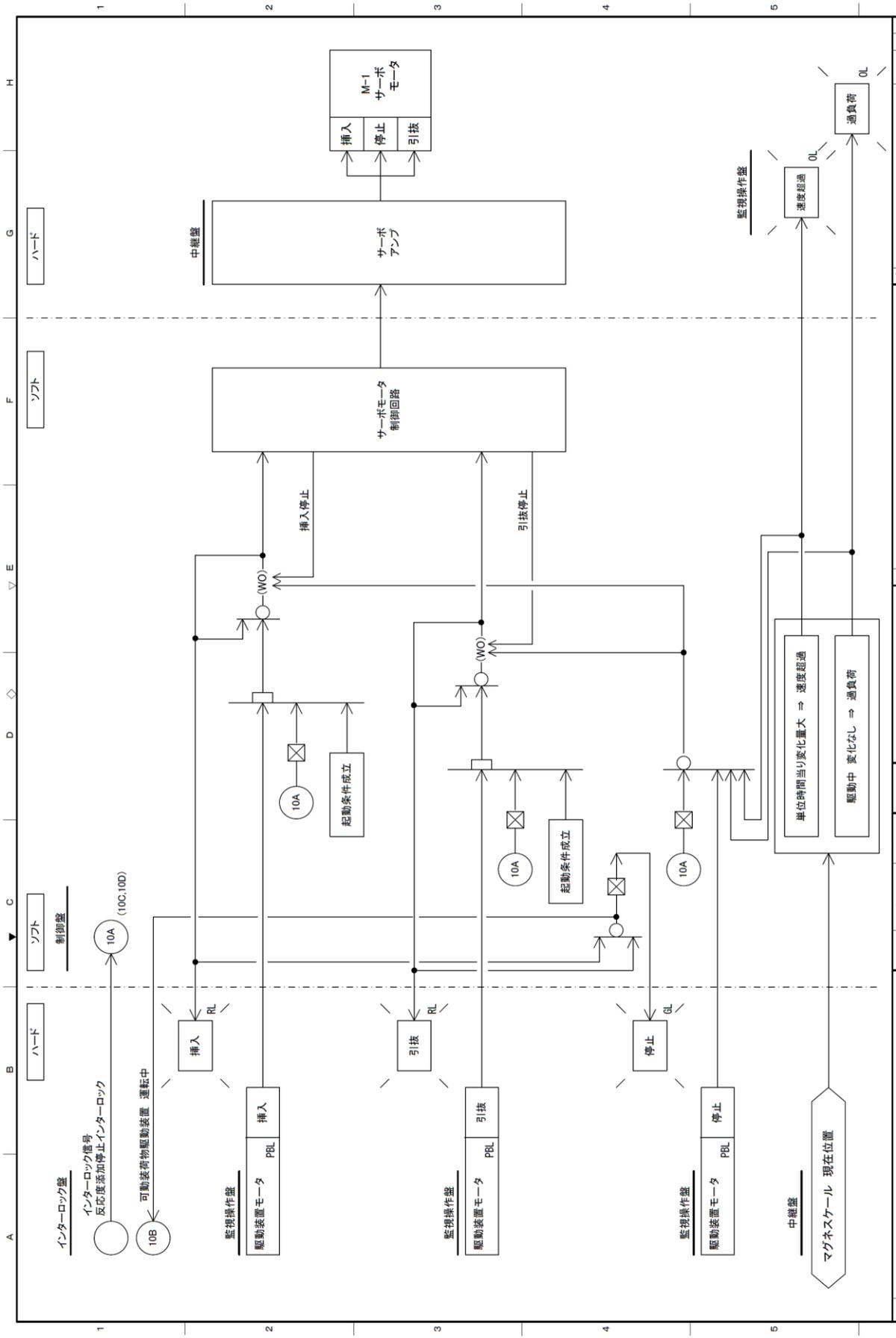


図 7.3.2-19 インターロック線図 駆動装置モータ

7.3.3 まとめ

可動装荷物駆動装置の基本設計を実施し、求められる性能及び安全性を確保するための要求事項を満足するよう、構成機器の構造を具体化するとともに、機器仕様を詳細化した。

主な設計成果は以下のとおりである。

(1) 構成機器の構造設計

可動装荷物駆動装置の設置スペース、並びに炉心タンク、格子板ユニット、安全板装置架台及び炉室フード等の取合機器の計画と整合を図りつつ、要求事項を満足する構造の具体化を行った。

- ・駆動装置について、取合機器とのレベル関係を検討し、必要なストロークを確保しつつ炉心タンク下部スペースに収まる構造とした。
- ・サンプル棒について、サンプル収納部の取替えが容易で、かつ、炉心タンク下部スペースで組立・取付が可能となる分割構造とした。
- ・サンプル棒案内管について、安全板装置移動架台の走行を考慮して、タンク上部部分を取外し可能な構造とした。
- ・サンプル棒案内管のタンク上部支持はりについて、剛性を確保しつつ、炉心構成及び安全板配置の自由度を制限しないコンパクトな構造とした。
- ・駆動装置の基礎構造について、炉室フードの水密化設計との整合性、基礎工事の施工性を確保しつつ、耐震性に優れる炉室(S)スラブから直接支持する構造とした。

(2) 耐震設計

駆動装置及びサンプル棒案内管について、上記の本体構造と支持構造（基礎構造及びタンク上部支持はり構造）を前提として剛性評価を行い、要求仕様である剛構造（固有値 20Hz 以上）となることを確認した。

(3) 駆動機構・制御設計

位置決め精度等の機能要求及び速度制限等の安全性に関する要求事項を満足する駆動原理（駆動機器構成、検出器構成等）及び制御システム構成の検討と具体的な機器仕様の詳細化を行った。

- ・サーボモータとボールネジによる駆動制御で位置精度 0.1 mm 以下を確保した。
- ・モータ、減速機、ボールネジリードの設定で速度制限 10 mm/s をハード的に確保した。
- ・駆動制御系の異常検出及びインターロックのため、独立した位置計測を行うマグネシケールを設け位置異常、速度異常を検出可能とした。
- ・異常時の確実な停止、速度制限の確実な確保のため、電磁ブレーキの 2 重化とバランサー（自由落下速度制限）を採用した。

7.4 炉室フード水密化の検討

7.4.1 目的及び概要

(1) 目的

STACY 更新炉は、炉心に棒状燃料を格子状に配列し、炉心の水位を調整することで臨界制御を行う実験装置である。このため、津波により炉心が冠水すると臨界事故の懸念があることから、津波対策として建家が浸水しても炉心が冠水しないよう対策を講じる。

STACY 更新炉は既存の炉室フード内に設置されるため、津波で炉室フードの周りが水没しても水圧に耐えられる構造とする補強設計を検討する。

(2) 概要

全水没時の耐圧強度及び補強を検討し、耐震評価の観点から剛構造として取扱える設計であること及び耐震評価を行った。また、今回の補強設計が、施工などの点からも実現可能な範囲であるかを検討した。

7.4.2 成果報告

(1) 実施内容

STACY 更新炉の津波対策として、炉室フードの補強設計に関する詳細検討を実施する。

① 補強設計

炉室フードの全水没を想定した場合について、天井、壁、床面等の炉室フードの補強設計を検討する。補強設計に関しては以下を考慮する。

- i) 炉室フードの全水没に対して必要な構造強度を有すること。
- ii) 耐震評価の観点から炉室フードは剛構造（固有振動数 20 Hz 以上）であること及び耐震 S クラス相当の耐震性であること。（更新後の炉室フードは、許認可資料では耐震 C クラスの取扱いとなるが、補強設計の検討においては耐震性への余裕を踏まえ耐震 S クラス相当の耐震性であることとする。）
- iii) 炉室フードの補強（フード重量の増加など）による影響が、その他設備（炉室床強度など）の許容範囲であることを確認すること。

② 耐震評価

上記で検討した補強設計に対して設工認の耐震強度計算書に必要な予備的な計算を実施する。

③ 補強工事に関する検討

炉室フードの改良工事に必要な期間及び費用などの工事計画を策定し、補強施工が現実的に可能であるかを検討する。また、補強設計に関する設計図などを整備する。

(2) 検討結果

① 補強設計の検討

1) 水圧条件と補強設計への影響

i) 炉室フードの構造

炉室フードは、縦約 9 m、横約 10 m、高さ 10 m で炉室(S)内に設置され、内部に炉心タンク等を収納するものである。炉室(S)と炉室フードの関係を図 7.4-1 に示す。現在の炉室フードは核燃料物質の拡散防止のための設備であり、水没を想定した水圧に耐えられる構造とはなっていない。

ii) 補強設計において想定する水位

炉室(S)の高さは床面から 12.1 m である。また、炉室フードの天井には床面から 11.1 m の高さに給気口が設置されている。炉室の全水没を想定して給気口を水密化した場合には 12.1 m、しなかった場合には 11.1 m の水圧に耐えられる補強が必要となる。

表 7.4-1 に上記 2 通りの水没条件において炉室フードの各部（天井、側面上部、側面中央部、側面下部）が受ける水圧を示す。これらの条件において必要となる補強を検討した。表 7.4-2 に、それぞれの水圧条件で必要となる補強を、使用する部材重量で示す。水位の想定をフード給気口位置（高さ 11.1 m）から炉室天井（高さ 12.1 m）にすると、天井及び側面などの補強部材重量が増加し、約 1.4 倍になることがわかる。本検討では、部材及び施工費用増加、工事期間の長期化などを考慮し、より現実的な条件とするため、炉室フード給気口までの水位条件で補強設計を実施した。

なお、現在の最新情報として原子力科学研究所の JRR-3 の基準津波の検討結果を踏まえると、最大想定津波浸水深さは NUCEF 敷地で約 5 m 程度とされている。炉室の床面高さは NUCEF 敷地高さとはほぼ同じであるため、上記の津波では炉室の浸水は床面から 5 m 程度となる。このように、炉室フード給気口位置までの水位条件（床面から 11.1 m）は想定される津波に対して十分な余裕がある。

2) 床面補強設計の検討

床面補強については、炉室フード内に設置される実験用の可動装荷物駆動装置及び棒状燃料収納容器の設置架台と床面補強部材との取合いを考慮して、炉室フードにかかる水圧及び浮力に対する補強設計を検討する必要がある。また、炉室フード下面と炉室床上面の間には高さ約 100 mm の空間があり、床面に密着して固定された構造ではないことから、水没時はその空間に水が浸入する。このため、水没時は底面の圧力に対応できる補強設計が必要となる。これらを踏まえ底面の補強設計として、底面に水が浸入しないようにシール施工する補強設計（以下「底面シール方法」という。）を検討した。

表 7.4-3 に底面を側面同様にリブ補強した場合と底面シール方法とした場合の利点などをまとめる。また、図 7.4-2 に底面シール方法とリブ補強方法の床部の補強内容を示す。両者の比較からわかるように炉室フード内に設置される機器との取合い、補強工事の容易さなどの観点から底面シール方法の採用に利点がある。

3) 床面強度確認

炉室フードの水没（11.1 m まで）を想定した補強設計については、上述の通り、底面シール方法を採用することで部材重量増加を最小化する方向で検討してきた。しかし、この水圧に耐えるための補強設計で、炉室フードの重量は約 50 トン増加する。また、STACY 更新炉では、旧設備の取り外し及び新たな設備の設置が行われ、炉室内の重量が変わるため、炉室床面強度への影響を確認した。表 7.4-4 に更新後の設備を含めた総重量をまとめる。また、炉室(S)床面の許容荷重を以下に示す。

- ・炉室(S)床面耐荷重：1300 kg/m²
(NUCEF 建設時の炉室(S)設計機器荷重とした。)
- ・床面積：約 165m² (=13.1 m×12.6 m)
- ・積載可能荷重：約 215 トン (1300 kg/m²×165 m²)

補強設計後の炉室(S)機器荷重は約 176 トンで、許容荷重の 215 トン以下となり、補強設計による床面強度は問題ないことが確認できた。

4) 補強設計

上記に示したとおり、床面はシール方法を採用し、炉室フード天井の給気口位置（高さ 11.1 m）までの水没に耐えられる補強設計について、鳥瞰図及び概略設計図を図 7.4-3~8 にまとめる。

② 耐震評価

補強設計後のモデルを作成し、NASTRAN コードによる固有値解析結果を表 7.4-5 及び図 7.4-9 に示す。固有振動数は 20 Hz 以上あり、補強後の炉室フードは剛構造として取り扱えることが確認できた。また、炉室フードは重要度分類で C クラスの設備であり、耐震 C クラスの条件に対して、フード本体、支持部、ボルト部について応力評価を行い、許容応力を満足することを確認した。なお、耐震性への余裕確認として耐震 S クラス相当の条件においても問題ないことを確認した。

③ 工事計画の検討

炉室フード上面の給気口がある 11.1 m までの水没に耐えられる補強設計について工事期間及び見積りの検討を実施した。表 7.4-6 に示す通り工事期間は約 6 ヶ月が必要との見込みとなった。

表 7.4-1 補強設計時の高さ位置と水位条件

炉室床面からの高さ(m)	炉室天井までの水位 (mmH ₂ O)	給気ダクトまでの水位 (mmH ₂ O)	備考
12.1	0	0	
11.1	1000	0	
10.15	1950	950	天井圧力に考慮
6.75	5350	4350	側面上部圧力に考慮
3.36	8740	7740	側面中央部圧力に考慮
0.45	11650	10650	側面下部圧力に考慮
0	12100	11100	

表 7.4-2 水圧条件による補強部材重量比較

		補強部材重量 (kg)		備考
		天井 (12.1m) までの水位	給気口 (11.1m) までの水位	
(1)天井		8,206	2,669	
(2)側面	南側壁面	14,285	10,971	
	北側壁面	14,285	10,971	
	西側壁面	16,257	12,051	
	東側壁面	15,227	10,243	
(3)床面等		2,726	2,722	床面等は後述のシール方式の場合は、補強部材重量はほぼ同等
総重量		70,986	49,627	

表 7.4-3 底面補強方法比較

	底面リブ補強方式	底面シール方式
新設する装置や 架台との干渉	実験用可動装荷物駆動装置及び棒状燃料収納容器（Ⅱ）の設置架台と補強リブや新設床との取合いが生じる。	内装設備との干渉を考慮する必要がない。
底面にかかる 圧力	浮力が発生して脚やサポートとで保持する。	底面にかかる圧力が発生しない
補強部材重量	20 トン (炉室床面許容荷重への影響大)	2 トン (炉室床面許容荷重への影響を抑えられる)
施工性	既設床面の大部分を一度撤去して脚や主梁を布設後、既設床面上面に補強リブと新設床面を施工ことになり工事期間が長くなる。	外周下部にある入口床やケーブルダクト等を一時的に撤去後布設。シール構造施工後上記復旧必要。
工事期間 (全補強工事の 期間)	約 9 ヶ月	約 6 ヶ月

表 7.4-4 炉室フード補強後の重量

番号	項目	現 状			更 新 後			
		数量	単位質量 (k g)	小計質量 (k g)	数量	単位質量 (k g)	小計質量 (k g)	
1	炉室フード	1台	63,700	63,700	1台	63,700	63,700	
2	津波対策補強部材	-			1式	49,627	49,627	
3	炉心水槽	1基	8,150	8,150	-	-		
4	水	-	19,200	19,200	-	-		
5	炉心タンク (φ800) 本体	1台	448	448	-	-		
6	液	-	1,702	1,702	-	-		
7	安全棒駆動装置	6本	135	810	-	-		
8	触針式液位計	1基	180	180	-	-		
9	中性子源駆動装置	1基	500	500	1基	500	500	
10	安全棒弁ボックス	1台	1,000	1,000	-	-		
11	実験用装荷物駆動装置	1基	180	180	1基	180	180	
12	実験装置架台	1台	17,922	17,922	1台	17,922	17,922	
13	改造補強部材	-			1式	3,600	3,600	
14	炉室フードクレーン (自重)	1基	1,150	1,150	1基	1,150	1,150	
15	棒状燃料+収納容器	3台	500	1,500	3台	500	1,500	
16	上記架台	1台	1,000	1,000	1台	1,000	1,000	
17	入口床台	1台	1,000	1,000	1台	1,000	1,000	
18	炉心タンク (IDφ1800)	-			1基	3,150	3,150	
19	脱塩水 (PW)	-			-	4,000	4,000	
20	格子板ユニット	-			1式	760	760	
21	安全板駆動装置	-			1基	4,650	4,650	
22	安全板ガイドフレーム	-			8基	39.7	318	
23	棒状燃料収納容器Ⅱ	-			3基	1,350	4,050	
24	棒状燃料収納容器Ⅱ架台	-			1台	16,000	16,000	
25	棒状燃料	-			600本 3基	1.0kg/本	1,800	
26	最大給水制限スイッチ	-			1基	150	150	
27	給水停止&排水開始スイッチ	-			1基	150	150	
28	サーボ式水位計	-			1基	270	270	
				合計質量	118,442		合計質量	175,477

表 7.4-5 炉室フード補強後の固有振動数評価

次数	固有周期(s)	固有振動数 (Hz)
1	0.030	33.21
2	0.027	36.82
3	0.026	38.54

表 7.4-6 工程表

項目 \ 期間	1 ヵ月	2 ヵ月	3 ヵ月	4 ヵ月	5 ヵ月	6 ヵ月
(1)資材搬入/ 準備作業	■					
(2)補強材取付 溶接		■				
(3)入口改造/ 塗装					■	
(4)資材搬出/ 片付け作業						■

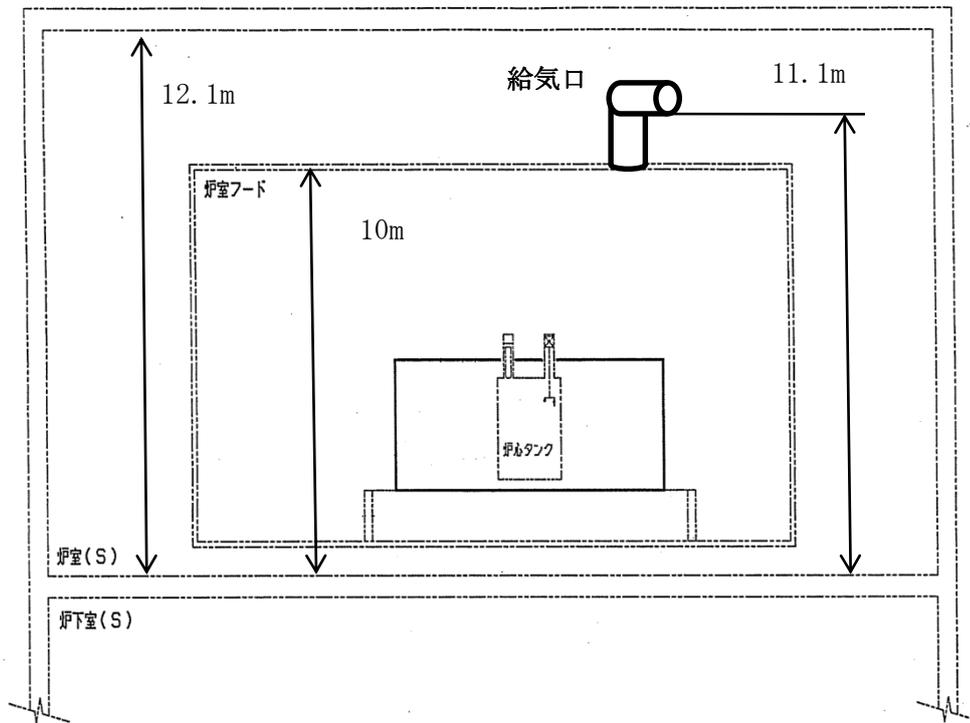


図 7.4-1 炉室フード概要

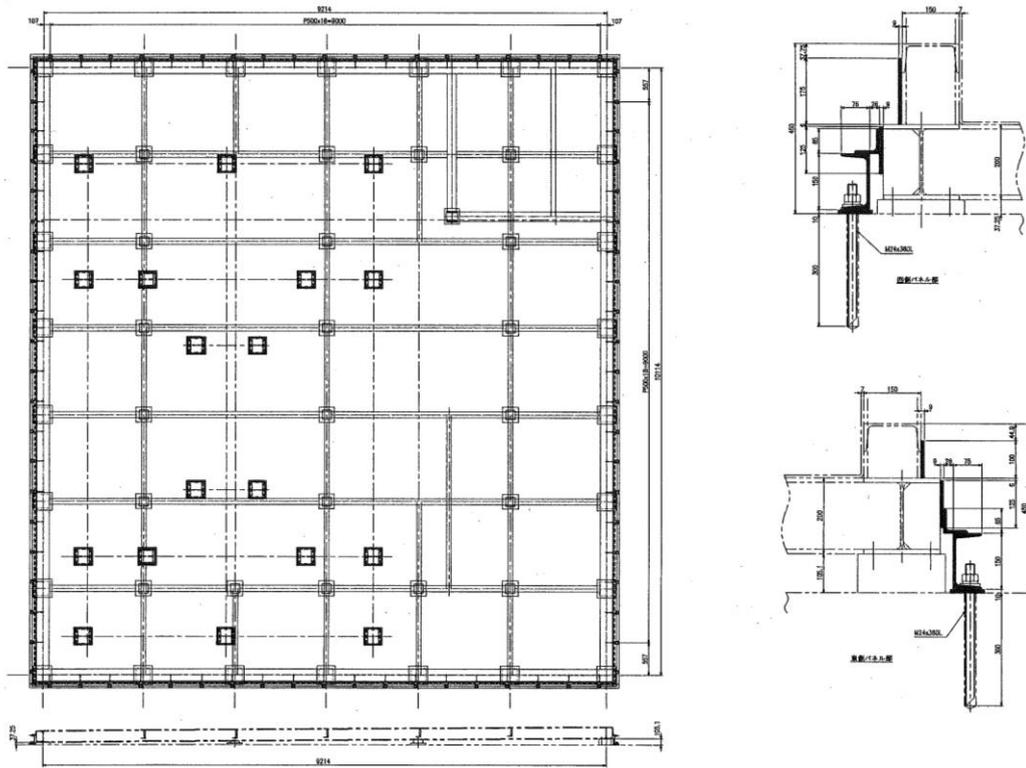


図 7.4-2(1) 底面シール方式の補強

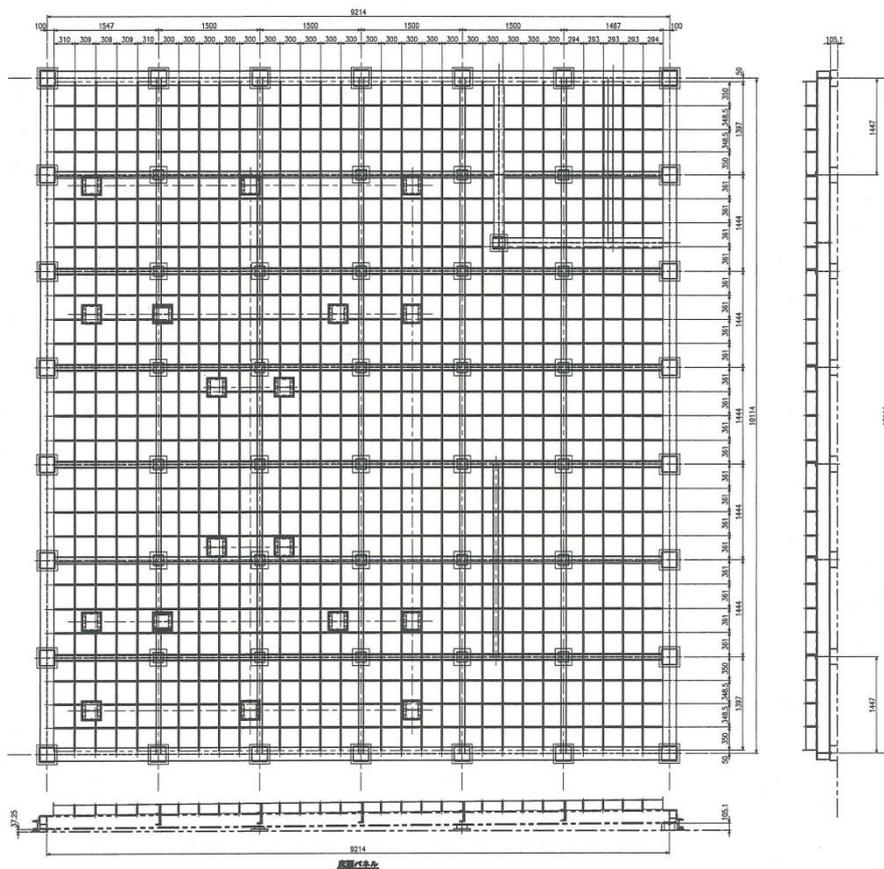


図 7.4-2(2) 底面リブ補強方式の補強

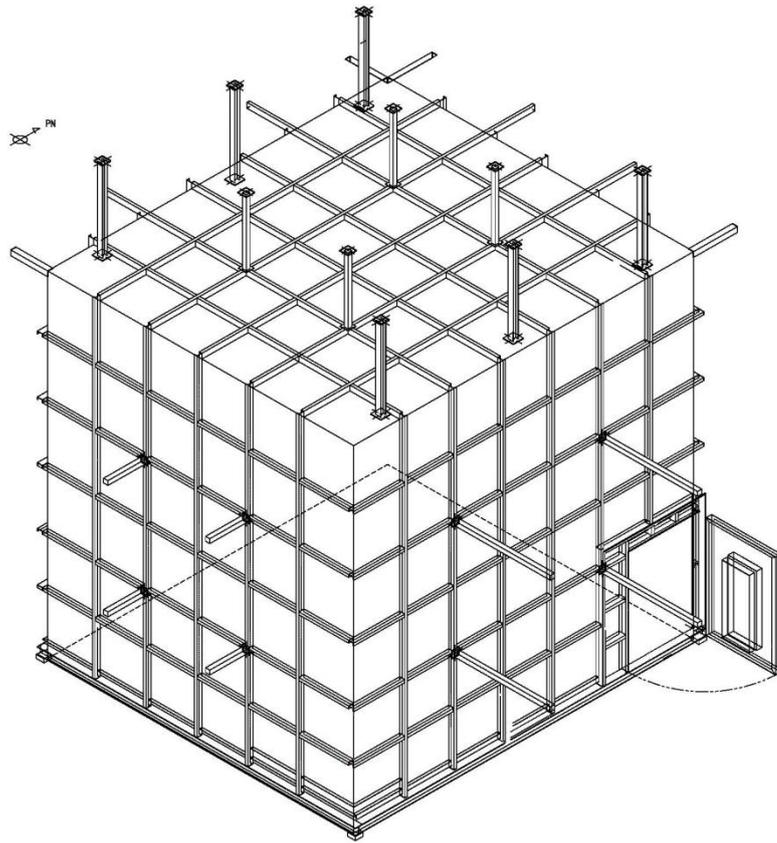


図 7.4-3(1) 炉室フード鳥瞰図（補強前）

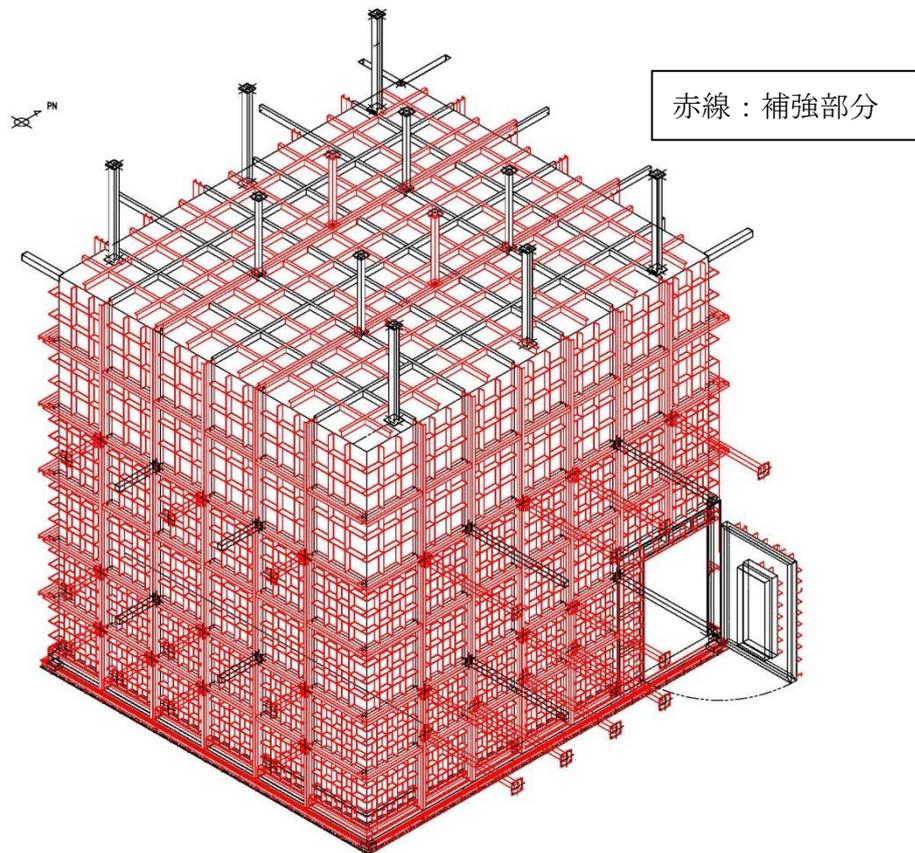


図 7.4-3(2) 炉室フード鳥瞰図（補強後）

赤線：補強部分

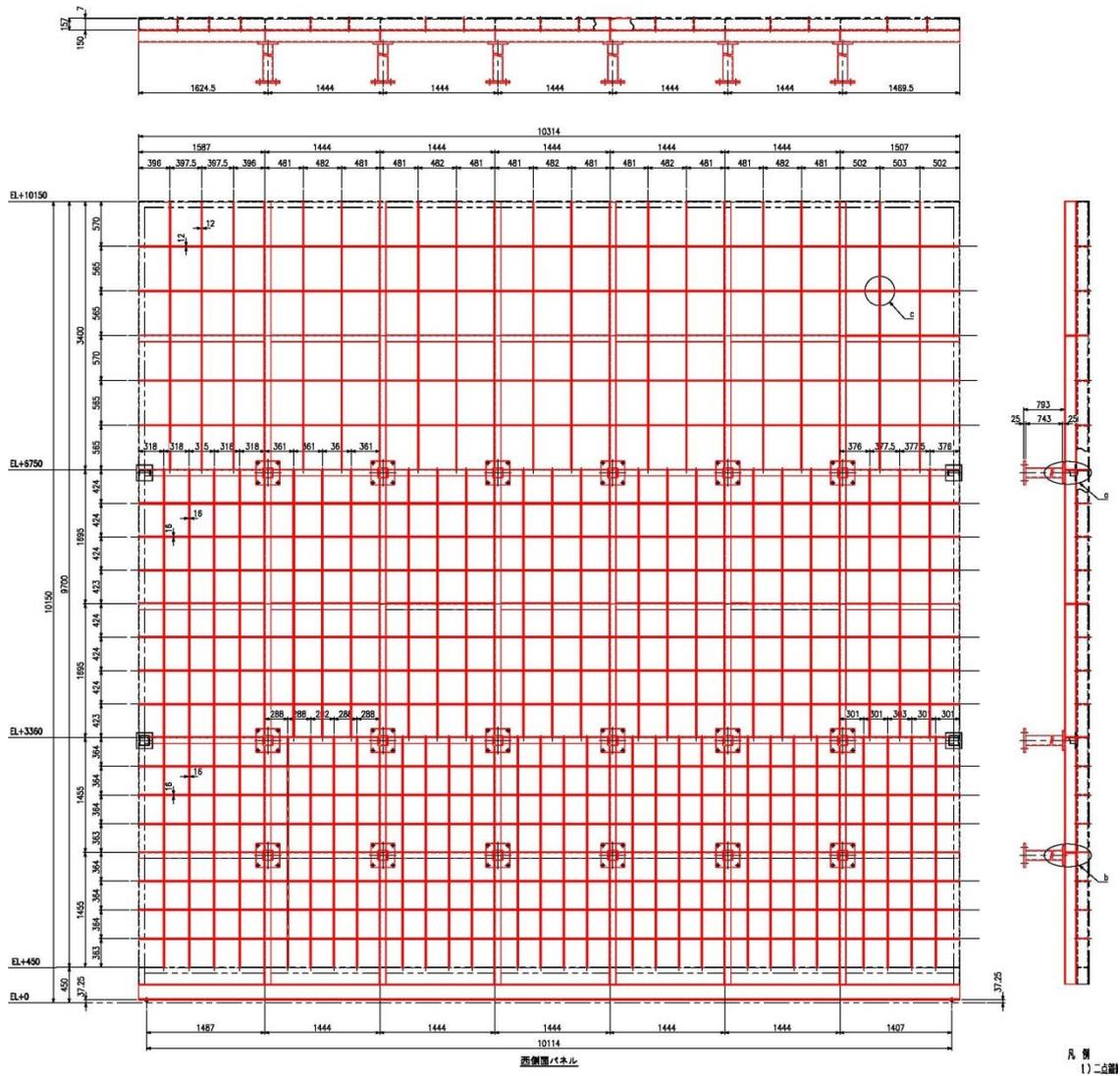


図 7.4-6 炉室フード補強設計図（西側面）

赤線：補強部分

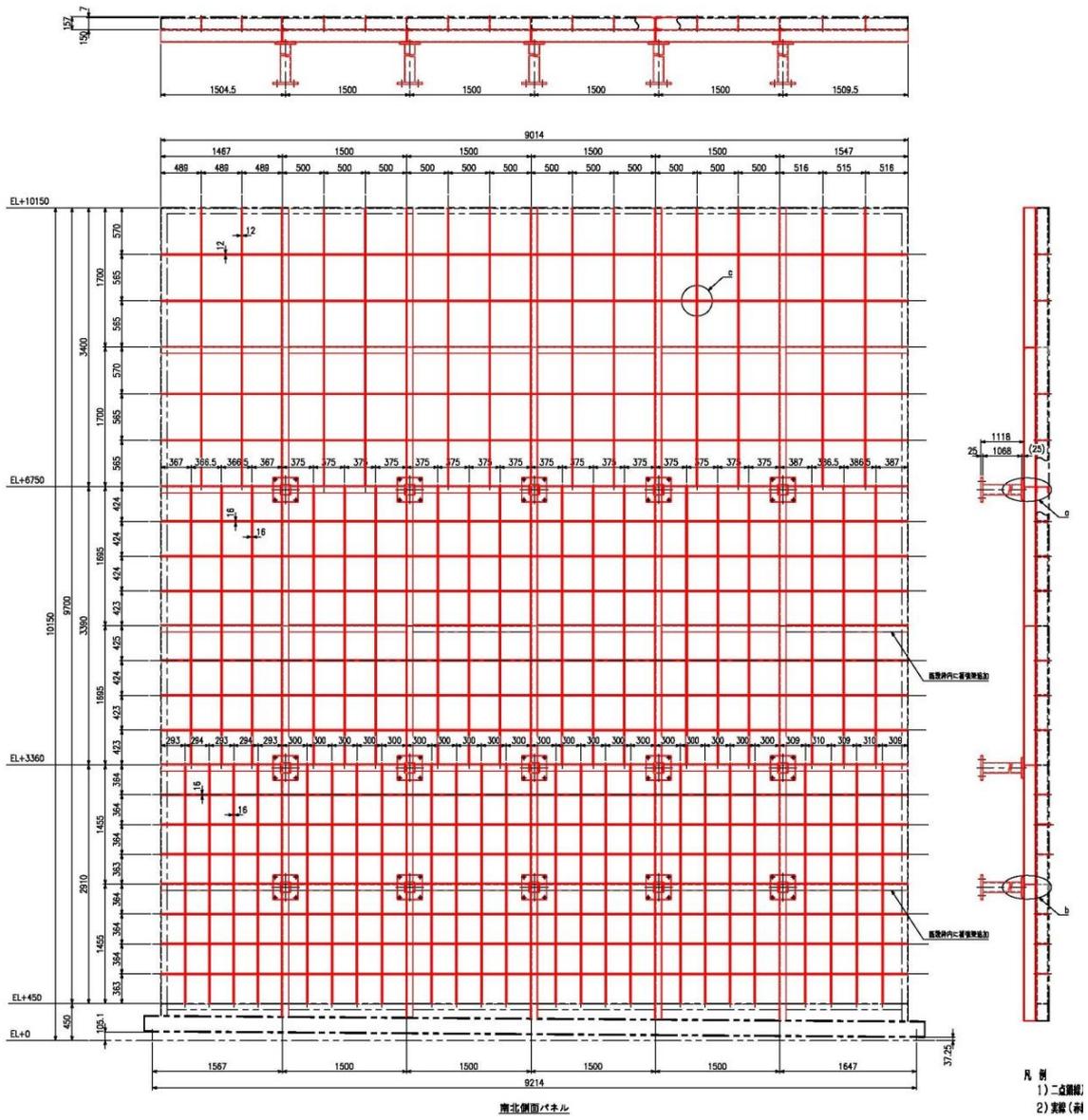


図 7.4-7 炉室フード補強設計図 (北及び南側面)

赤線：補強部分

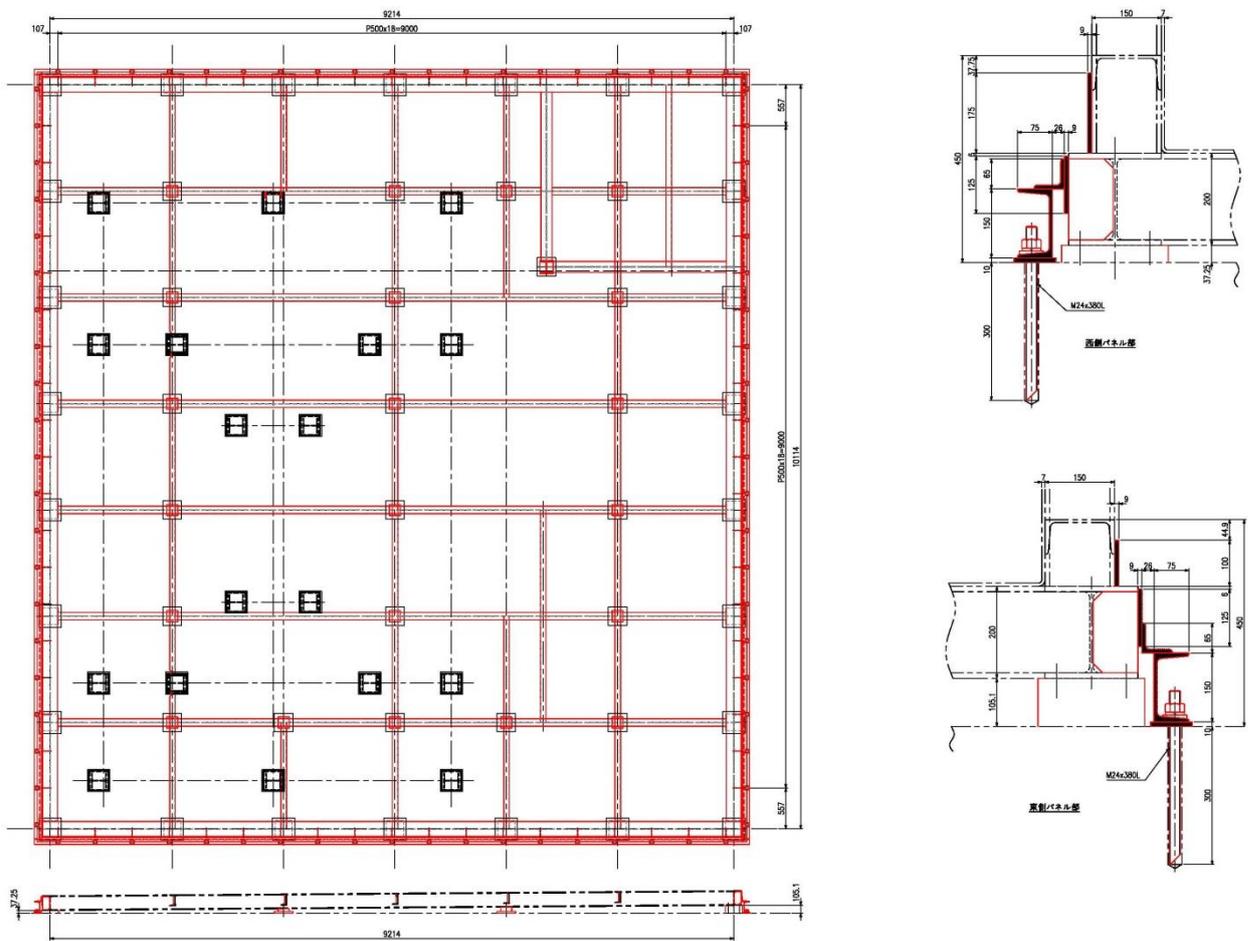


図 7.4-8 炉室フード補強設計図（床面）

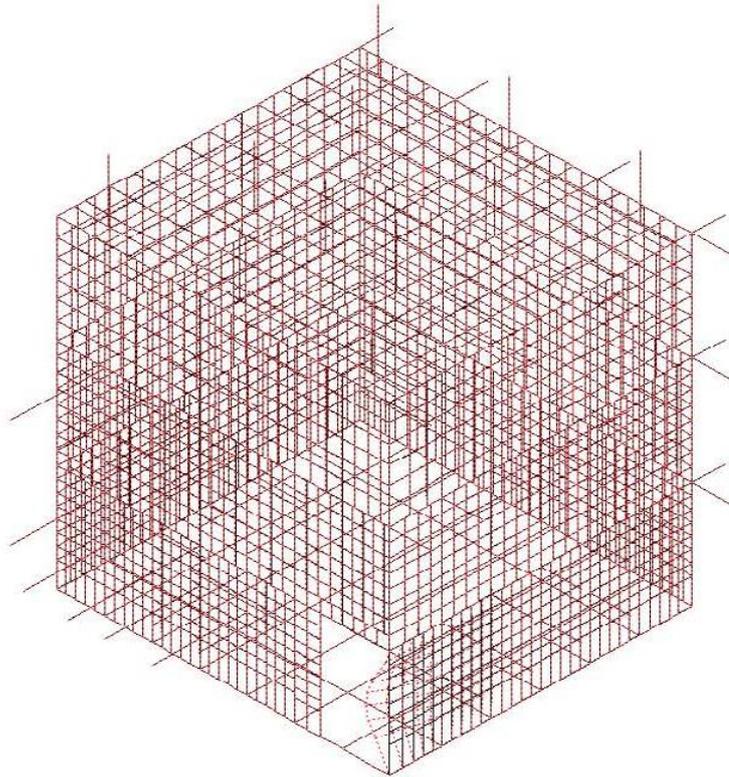


図 7.4-9(1) 補強後フード固有振動数解析 (1次モード)

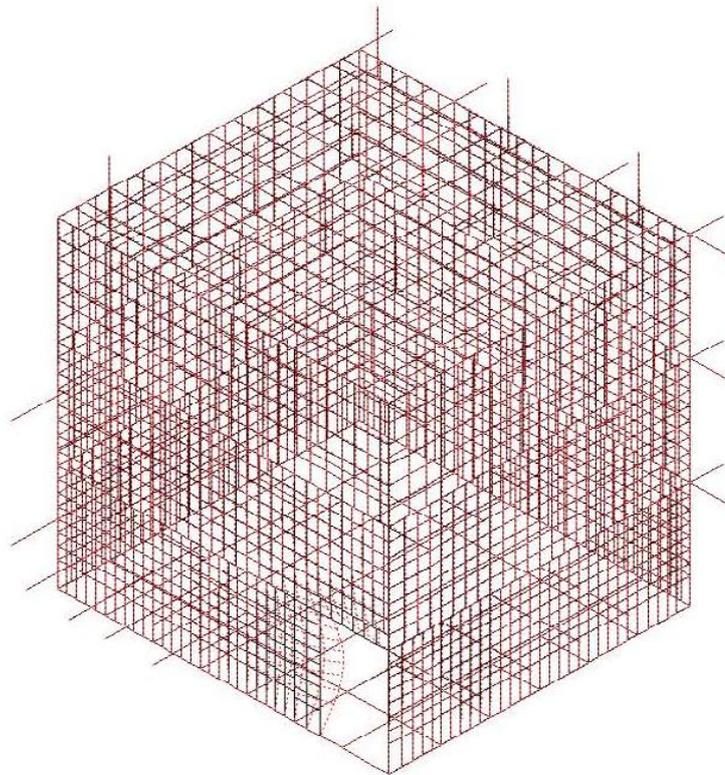


図 7.4-9(2) 補強後フード固有振動数解析 (2次モード)

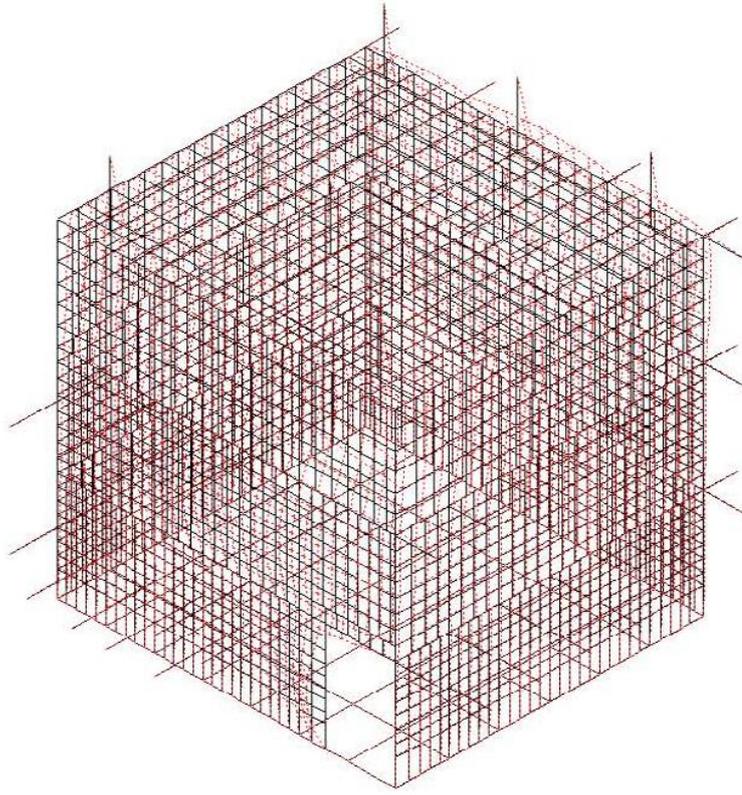


図 7.4-9(3) 補強後フード固有振動数解析 (3次モード)

7.4.3 まとめ

STACY 更新炉が津波による水没に耐えられる構造とするため、炉心タンク等を設置する炉室フードの給気口位置（床面からの高さ 11.1 m）までの水没を想定した条件で補強設計及び耐震評価を行った。

設計検討の結果、炉室床面への補強部材重量の影響及び施工性などから床面シール方式の施工が適切であることがわかった。これにより、上記水没条件でも耐えられる炉室フードの水密化が可能であることが確認できた。

参考文献

- 1) X-5 Monte Carlo Team, *MCNP - A general monte carlo n-particle transport code, version 5, volume I: Overview and theory*, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987 (2003)
- 2) X-5 Monte Carlo Team, *MCNP - A general monte carlo n-particle transport code, version 5, volume II: User's guide*, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-03-0245 (2003).
- 3) Shibata K, IWAMOTO O, NAKAGAWA T, *et al.*, *JENDL-4.0: A new library for nuclear science and engineering*, Journal of Nuclear Science and Technology, **48**(1), pp.1–30 (2012)
- 4) Poullot G, Hanlon D, *WATER-REFLECTED 4.738-WT.-%-ENRICHED URANIUM DIOXIDE FUEL-ROD ARRAYS*, International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, LEU-COMP-THERM-007 (2012)
- 5) Tonoike K, *STACY: A 60-CM-DIAMETER TANK CONTAINING 5%-ENRICHED UO₂ FUEL RODS (1.5-CM SQUARE LATTICE PITCH) IN 6%-ENRICHED URANYL NITRATE SOLUTIONS*, International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, LEU-MISC-THERM-003 (2008)
- 6) Denise B. P., *et al.*, *MCNP6 User's Manual Version 1.0*, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634 (2003)
- 7) ラマーシュ著、武田充司、仁科浩二郎共訳、「原子炉の初等理論」、吉岡書店 (1974)
- 8) Kell, G. S., *Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0.Deg. To 150.Deg.. Correlations and tables for atmospheric pressure and saturation reviewed and expressed on 1968 temperature scale*, J Chem Eng Data, **20**(1), pp.97-105 (1975)